

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIAS

**BÚSQUEDA SISTEMÁTICA DE GRBS PECULIARES, TIPO GRB
200826A, EN EL TERCER CATÁLOGO DE SWIFT/BAT**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
FÍSICA**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

JENNIFER ALEXANDRA CHACÓN CHÁVEZ
jennifer.chacon@epn.edu.ec

Director: NICOLÁS ALEJANDRO VÁSQUEZ PAZMIÑO
nicolas.vasquez@epn.edu.ec

QUITO, SEPTIEMBRE 2022

DECLARACIÓN

Yo JENNIFER ALEXANDRA CHACÓN CHÁVEZ, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Jennifer Alexandra Chacón Chávez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por JENNIFER ALEXANDRA CHACÓN CHÁVEZ, bajo mi supervisión.

Nicolás Alejandro Vásquez Pazmiño
Director del Proyecto

AGRADECIMIENTOS

Concluir con esta etapa de mi vida tiene su mérito en aquellas personas que ya no están pero que dejaron en mi enseñanzas permanentes: mis abuelitos Carlos, Teresa, Ligia y Francisco, quienes siempre me reconfortaron con sus palabras y creyeron que estaba hecha para cosas grandes, incluso cuando yo misma no lo creía.

A mis padres y hermanos, que con sorpresa y cariño siguieron mi proceso para convertirme en Física. Su trabajo duro y perseverancia me inspiraron a continuar en esta travesía a la que también arrastré a Jorge, mi hermano.

Sin duda el convivir con mis compañeros de la universidad también influyó en este trayecto. A Carlos, Juan y Ricardo, mi más sincera gratitud, el camino no hubiera sido tan ameno y llevadero sin su ayuda.

A mis amigas del colegio, Alba y Emily, quienes estuvieron presentes cuando la ayuda que necesitaba iba más allá de lo académico. Me alegra que nuestra amistad perdure en el tiempo y que podamos seguir creciendo juntas.

Bajo la constelación de Orión descubrí mi afición por la ciencia y a alguien con quien compartirla. Agradezco infinitamente a Christopher, *mi espacio dual*, en quien encuentro el ejemplo y tesón para sobrellevar cada amargura y disfrutar cada dicha.

Finalmente, me gustaría destacar el apoyo y recomendaciones de Nicolás y Jonathan, quienes me contagiaron su pasión por la astronomía y colmaron a este trabajo de ambición y profundidad. Personas como ustedes me hacen creer que se puede lograr cambios significativos en el país, solo hace falta iniciativa y creatividad.

DEDICATORIA

“Armados de telescopios, balanzas, termómetros, relojes, los físicos escrutaron el Universo en todas las direcciones, fijaron sus límites, midieron las constantes que son sus piedras angulares; la observación de nebulosas reveló la expansión del Universo, o la paralización del tiempo; se calculó el radio total y la masa encerrada en esta burbuja cósmica; se calculó el número total de partículas.

Y cuando se hubo hecho todo esto, Eddington afirmó que esas búsquedas habían sido superfluas; el hombre que con un reflector escrutaba remotas galaxias hacía, en realidad, un examen de su propio espíritu.”

Uno y el Universo, Ernesto Sábato

Índice general

Resumen	XI
Abstract	XII
1. Introducción	1
2. Marco Teórico	3
2.1. Generalidades y breve historia	3
2.2. Propiedades Observacionales	5
2.2.1. Temporales	5
2.2.2. Espectrales	6
2.2.3. Emisión temprana	8
2.2.4. Postluminiscencia	10
2.3. Procesos de Radiación	10
2.3.1. Relatividad: aspectos generales	10
2.3.2. Radiación sincrotrón	11
2.3.3. Dispersión Compton Inversa	13
2.4. Observatorio Espacial Swift	14
2.4.1. BAT	15
2.4.2. Tercer Catálogo de Swift BAT	16
2.5. GRBs peculiares	18
2.5.1. GRB 200826A	19
3. Metodología	22

3.1. Preprocesamiento de datos	23
3.1.1. Paquetes de Python	23
3.1.2. Propagación de errores	24
3.1.3. Selección de la muestra	25
3.2. Cálculo energías	25
3.2.1. Energía de pico	26
3.2.2. Energía isotrópica	27
3.2.3. Regresión de distancia ortogonal ODR	28
3.3. Análisis de las curvas de luz	30
3.3.1. Obtención de las curvas de luz	30
3.3.2. Cálculo de la CCF	31
3.3.3. Cálculo del retraso espectral	31
4. Resultados	33
4.1. Clasificación según T_{90} y H	34
4.2. Corrección a la energía de pico	35
4.3. Relación de Amati	36
4.4. Retraso espectral	38
4.4.1. GRBs peculiares	41
5. Conclusiones y Discusión	42
Bibliografía	59

Índice de figuras

2.1.	Distribución isotrópica de GRBs detectados por BATSE	4
2.2.	<i>Izquierda:</i> Histograma de la dureza. <i>Derecha</i> Diagrama duración y dureza [30].	6
2.3.	Espectro típico de un GRB modelado con la Función de Band. Se observa la pendiente de baja y alta energía con parámetros $\alpha = -0,6$ y $\beta = -3,1$ respectivamente, la energía de pico está en 720 keV [32]. . .	7
2.4.	Modelo de bola de fuego donde se observan los choques internos y externos. Además, se muestra los dos posibles escenarios de progenitores y la postluminiscencia. Fuente: NASA's HEASARC.	9
2.5.	Espectro de emisión sincrotrón. A la derecha se muestra un espectro de enfriamiento lento y a la izquierda uno de enfriamiento rápido. Las frecuencias ν_a y ν_m corresponden a la frecuencia sincrotrón de auto absorción y a la frecuencia de inyección $\nu_m \equiv \nu_{\text{sin}}(\gamma_{e,\text{min}})$, respectivamente [31].	12
2.6.	Espectro producido por la dispersión Compton inversa de fotones con frecuencia ν por electrones [20].	13
2.7.	Instrumentos de Swift.	15
2.8.	Área efectiva del detector BAT a bordo del telescopio espacial <i>Swift</i> . .	15
2.9.	Distribución isotrópica de 1391 GRBs identificados en el tercer catálogo de <i>Swift</i> -BAT.	17
2.10.	<i>a)</i> Diagrama de correlación $E_{p,z} - E_{\gamma,\text{iso}}$ para GRB cortos y largos. Las líneas punteadas muestran las regiones 3σ para cada correlación. <i>b)</i> Distribuciones de una y dos dimensiones de muestras GRB en el espacio $\epsilon - T_{90}$ [63].	20
3.1.	Distribución normal e intervalos de confianza.	24

4.1.	Histogramas del T_{90} , E_{iso} , E_{peak} y redshift z de la muestra analizada. .	33
4.2.	Diagrama duración y dureza. Los puntos naranjas y verdes representan los <i>GRB</i> cortos y largos, respectivamente; la línea discontinua separa los <i>GRB</i> largos y cortos a los 2 s. Todas las barras de error representan incertidumbres de 1σ	34
4.3.	Corrección de E_{peak} a partir de la relación de Sakamoto [53] condensada en la ecuación 3.3, en contraste con $E_{peak,CPL}$	35
4.4.	<i>Derecha</i> : Histograma de la corrección calculada para E_{peak} (negro), comparada con $E_{peak,CPL}$ (rojo) y $E_{peak,Fermi}$ (azul). <i>Izquierda</i> : Histograma acumulativo.	36
4.5.	Diagrama de correlación $E_{p,z} - E_{iso}$ para los <i>GRB</i> cortos y largos de la muestra. Los límites discontinuos muestran la región 1σ para cada correlación mientras que la línea continua representa la línea de tendencia de la regresión.	37
4.6.	Ajustes gaussianos de la función de correlación cruzada CCF para los 8 <i>GRBs</i> cuasipeculiares.	39
5.1.	Histogramas de parámetros de los <i>GRBs</i> del tercer catálogo de Swift/BAT.	47
5.2.	Curvas de luz <i>GRB</i> 160821B, $T_{90} = 0,48$ s.	48
5.3.	Curvas de luz <i>GRB</i> 070809, $T_{90} = 1,28$ s.	48
5.4.	Curvas de luz <i>GRB</i> 070724A, $T_{90} = 0,43$ s.	49
5.5.	Curvas de luz <i>GRB</i> 070429B, $T_{90} = 0,48$ s.	49
5.6.	Curvas de luz <i>GRB</i> 100724A, $T_{90} = 1,39$ s.	50
5.7.	Curvas de luz <i>GRB</i> 050813, $T_{90} = 0,39$ s.	50
5.8.	Curvas de luz <i>GRB</i> 090426, $T_{90} = 1,24$ s.	51
5.9.	Curvas de luz <i>GRB</i> 120804A, $T_{90} = 0,81$ s.	51

Índice de cuadros

2.1. Descripción técnica de <i>BAT</i>	16
2.2. Número de GRBs de los tres catálogos de Swift <i>BAT</i>	17
3.1. Ubicación de las tablas de datos del tercer catálogo de <i>Swift/BAT</i> . .	22
3.2. Criterios para obtener la muestra de GRBs.	25
4.1. Parámetros óptimos de ajuste lineal en la Relación de Amati calculados por el método <i>ODR</i>	38
4.2. Valores de retraso espectral con su respectivo error y criterio para saber si el valor es consistente con cero.	40
4.3. Información general de los <i>GRBs</i> peculiares.	41
4.4. Información adicional de los <i>GRBs</i> peculiares encontrados.	41
5.1. Cuadro resumen de los parámetros más importantes de la muestra de 285 <i>GRBs</i> analizados	58

Resumen

La clasificación canónica de las ráfagas de rayos gamma establece eventos cortos (SGRBs, $T_{90} < 2s$) y largos (LGRBs, $T_{90} > 2s$) según sus propiedades temporales y espectrales. Combinando la emisión temprana y postluminiscencia de los GRBs, junto con la información de las galaxias anfitrionas, la clasificación canónica parece no ser suficiente para identificar su naturaleza real. Este es el caso de GRB 200826A, que fue descubierto por el telescopio espacial *Fermi* en 2020 y posee una duración de ≈ 1 segundo. Tras analizar sus propiedades espectrales, emisión isotrópica, desplazamiento de la galaxia anfitriona, propiedades de la postluminiscencia y una posible asociación con una emisión de supernova, el GRB 200826A es más consistente con los LGRB a pesar de su corta duración. Así, podría existir una población de aparentemente SGRBs cuya verdadera naturaleza podría estar asociada a los LGRBs.

Para identificar GRBs peculiares adicionales que no siguen la clasificación temporal-espectral canónica, analizamos el tercer catálogo de Gamma-Ray Burst de *Swift*/BAT, que contiene información de 1391 eventos (452 GRB con corrimientos al rojo conocidos), desde diciembre 2004 a mayo de 2021. Consideramos parámetros como el T_{90} (el tiempo de emisión del 90% de los conteos), la energía isotrópica y de pico E_{peak} (condensadas en la Relación Amati), y el retraso espectral (obtenido mediante la función de correlación cruzada) entre diferentes bandas de energía. Al establecer la relación de Amati para la muestra (con corrimientos al rojo conocido), encontramos 8 GRB que no caen en el plano esperado de energía isotrópica- E_{peak} de acuerdo con la clasificación canónica. Este grupo de GRBs representa una muestra novedosa de eventos que no siguen la clasificación tradicional y motiva a establecer una nueva forma de identificar a los progenitores de GRBs.

Abstract

The canonical classification of Gamma-Ray Bursts establishes short (SGRBs, $< 2s$) and long GRBs (LGRBs, $> 2s$) according to temporal and spectral properties. Combining the prompt and afterglow emissions of GRBs and host galaxies information, the canonical classification seems to be not sufficient enough to identify their real nature. This is the case of GRB 200826A, which was discovered by the *Fermi* space telescope in 2020 and has a duration of ≈ 1 second. After analyzing its spectral properties, isotropic emission, host galaxy offset, afterglow properties, and a likely association with a supernova emission, GRB 200826A is more consistent with LGRBs despite the fact that its short duration. Thus, there could exist a population of apparently SGRBs whose real nature might be associated with LGRBs.

In order to identify additional peculiar GRBs that do not follow the canonical timing-spectral classification, we analyzed the third *Swift*/BAT Gamma-Ray Burst catalog, which contains information of 1391 events (452 GRBs with known redshifts) from December 2004 to May 2021. We considered parameters as the T_{90} (the emission time of the 90% of the counts), the isotropic and peak energy E_{peak} (condensed in the Amati Relation), and the spectral lag (from the cross-correlation function) between different energy bands. By establishing the Amati relation for the sample (with known redshifts), we found 8 GRBs which do not fall in the expected Isotropic Energy- E_{peak} plane according to the canonical classification. This group of GRBs represents a novel sample of events that do not follow the traditional classification and motivates to settle a new way to identify GRBs' progenitors.

Capítulo 1

Introducción

Las ráfagas o explosiones de rayos gamma (GRBs por sus siglas en inglés) son, luego del Big Bang, los objetos más energéticos del universo [64, 15]. En sus orígenes los GRBs fueron estudiados con observaciones en múltiples longitudes de onda [65, 48], logrando identificar propiedades que permitieron discernir sus posibles progenitores. De momento se sigue empleando un esquema de clasificación física que es consistente con la clasificación fenomenológica basada en las duraciones de los rayos gamma [6]. Así, los GRBs de tipo II, es decir con su progenitor una estrella masiva, suelen poseer una duración $T_{90} > 2$ s. (LGRBs), mientras que los GRBs de tipo I, cuyo progenitor sería la fusión de objetos compactos como dos estrellas de neutrones o sistemas binarios de una estrella de neutrones y un agujero negro, suelen tener un $T_{90} < 2$ (SGRBs).

Las investigaciones realizadas en la última década mediante ondas gravitacionales, rayos cósmicos y neutrinos, sirvió para proponer indicadores más confiables de la naturaleza física de los GRBs [32]. La identificación de ráfagas como el GRB 200826A [1, 63] visibilizan la existencia de eventos cuya naturaleza física es difusa en cuanto a su clasificación canónica, esto es la clasificación según la duración en SGRBs y LGRBs. En el caso del GRB 200826A, a pesar de ser un SGRB por su duración de ~ 1 s, se encontró que su valor de energía isotrópica corresponde a un valor típico de los LGRBs $E_{iso} \simeq 7,09 \pm 0,28 \times 10^{51}$ erg [1]. Al analizar la relación de Amati, que considera a la energía isotrópica y la energía de pico¹, se encontró que el GRB 200826A era consistente con la región esperada para los LGRBs. Adicionalmente, otra característica relevante que profundiza la naturaleza poco concluyente del GRB 200826A es el valor de su retraso espectral. Este marcador temporal sirve para diferenciar los SGRBs y LGRBs [57], ya que los LGRBs producen valores de retrasos espectrales no consistentes con cero de manera significativa, mientras que

¹La energía de pico se define como la energía en el punto máximo del espectro en rayos-gamma.

los SGRBs presentan valores pequeños o nulos [44]. A partir de la función de correlación cruzada (CCF), se obtuvo un valor retraso espectral no consistente con cero, lo que a su vez es consistente con LGRBs [1].

Analizar eventos como el GRB 200826A ha motivado estudios que permitan explicar la naturaleza de los GRBs y, en definitiva, proponer alternativas en cuanto a su clasificación. Una de ellas fue propuesta en 2010 donde se define un nuevo parámetro $\epsilon = E_{\gamma,iso,52} / E_{p,z,2}^{5/3}$ el cual muestra una distribución bimodal con una separación en $\epsilon \sim 0,03$ [37]. Según esta propuesta, los GRBs agrupados en la región de bajo ϵ tendría origen de tipo I. En 2019 se sugirió otro nuevo método de clasificación basado en la correlación $E_{p,i} - E_{iso}$ e introduciendo dos parámetros, EH y EHD que relacionan la energía-dureza y la energía-dureza-duración, respectivamente [40]. De esta forma, se logra clasificar a los GRBs en eventos de tipo I - tipo II sin considerar su corrimiento al rojo.

Este trabajo está centrado en la búsqueda de GRBs similares al GRB 200826A analizando parámetros temporales y espectrales a partir de eventos identificados en el tercer catálogo de *Swift*-BAT. Tomando como hipótesis que la clasificación canónica de los GRBs no es aplicable a todos los eventos detectados, desarrollamos un método sistemático para buscar eventos peculiares tipo GRB 200826A.

En el Capítulo 2 se detalla una corta revisión histórica sobre los GRBs, sus características temporales y espectrales, los procesos de radiación detrás de las dos fases fundamentales: la emisión temprana y postluminiscencia, las características del observatorio espacial *Swift* y del tercer catálogo de GRBs detectados por *Swift*-BAT (usado en este trabajo), y finalmente una revisión del GRB 200826A. El Capítulo 3 está dedicado al desarrollo de la metodología empleada para la búsqueda de GRBs similares al evento GRB 200826A. Especialmente, hacemos énfasis en la construcción de la relación de Amati y el valor del retraso espectral calculado a partir de la CCF. En el Capítulo 4 presentamos los resultados de nuestra búsqueda sistemática y su respectiva interpretación física. Finalmente, las conclusiones finales a partir de nuestros resultados las presentamos en el Capítulo 5.

Capítulo 2

Marco Teórico

A finales de la década de 1960 y de manera fortuita, se descubrieron los GRBs. En sus primeros segundos de actividad los GRBs liberan una cantidad enorme de energía ($\sim 10^{50}$ erg) que es mayor a la energía que el Sol liberará durante toda su vida ($\sim 10^{30}$ erg) [15].

El estudio de los GRBs es de gran interés ya que guarda una fuerte relación con diferentes áreas de la astronomía como: mapeo la acumulación de metales y masa estelar a lo largo de la historia cósmica; proveer restricciones en los procesos de aceleración de partículas y la producción de rayos cósmicos y neutrinos de ultra alta energía; las condiciones del universo primitivo, entre otras [32]. Es por ello que actualmente este campo de la astrofísica suma más interesados en observar, modelar o en emplear los resultados de los GRBs.

2.1 Generalidades y breve historia

El término *ráfagas de rayos gamma* describe las propiedades temporales y espectrales de este fenómeno. Por un lado, *ráfaga* hace referencia a una emisión repentina que dura desde milisegundos hasta miles de segundos, mientras que *rayos gamma* representa el rango de energía de los eventos que va desde decenas de *keV* hasta algunos *MeV* [64].

Ya que los GRBs no se generan en regiones preferenciales del universo, son considerados fenómenos isotrópicos (ver Figura 2.1). De hecho, la distribución isotrópica de los GRBs y su origen extragaláctico fueron dos grandes resultados del experimento *BATSE* (Burst And Transient Source Experiment) a cargo del Observatorio de Rayos Gamma Compton (CGRO Compton Gamma-Ray Observatory), lanzado en 1990 [39]. Antes de *BATSE* la información respecto a estos eventos era limitada, existiendo incluso más de 100 modelos diferentes sobre su posible origen y mecanismos

físicos [58].

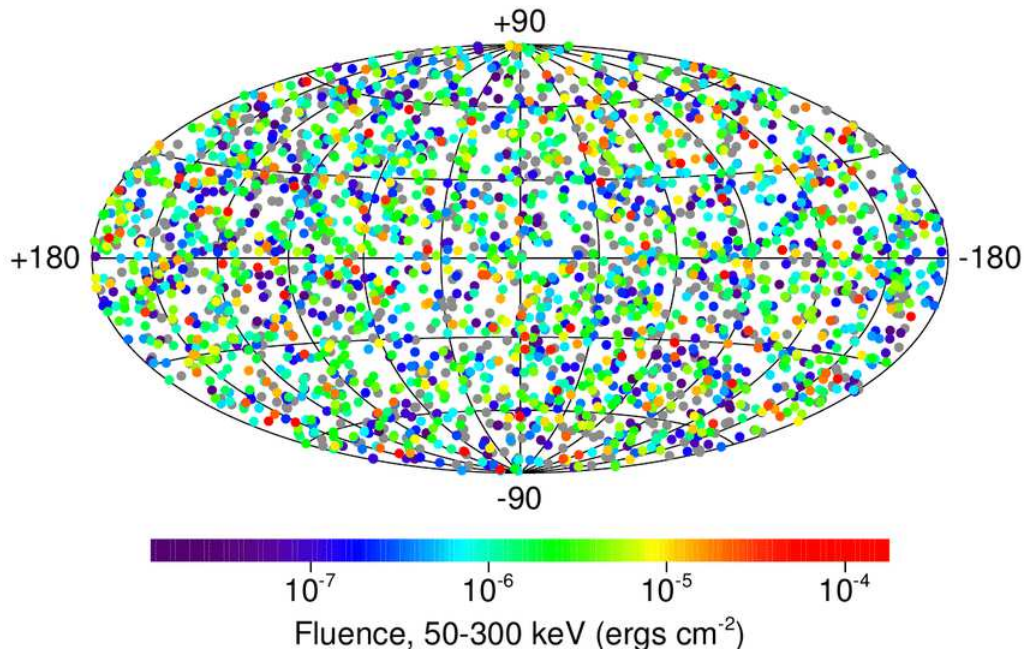


Figura 2.1: Distribución isotrópica de GRBs detectados por BATSE

Seis años después, con el lanzamiento del satélite *BeppoSAX* dedicado al estudio e identificación de la contraparte en rayos-X de las ráfagas, se detectó la primera postluminiscencia de un GRB [18]. Esta fase se presenta después de la emisión temprana y se caracteriza por la emisión de radiación de menor energía. La identificación de la postluminiscencia y de las galaxias anfitrionas fueron clave para la determinación del origen cosmológico de los GRB [32, 64].

Una gran mejora en la detección y localización de los GRBs se logró con el telescopio espacial de la NASA *HETE-2* (High Energy Transient Explorer) lanzado en 2002. Este satélite, diseñado para calcular la ubicación de los GRBs, transmitía inmediatamente las coordenadas para el estudio más detallado del evento desde los observatorios en tierra [19]. Además, con datos adquiridos por *BeppoSAX* y *HETE-2* se confirmó que los LGRBs se originan en el colapso del núcleo de estrellas masivas [21].

No obstante, no se podía asegurar que los SGRBs tuviesen los mismos progenitores. Con la llegada de la misión espacial *Swift* en 2004 [23], se detectó por primera vez la postluminiscencia de un evento corto [24]. Esto dio paso a la identificación de más galaxias anfitrionas de SGRBs, asociando su origen al colapso de objetos compactos [9]. A su vez, se logró mejoras en el rastreo de los GRBs gracias a la capacidad de giro autónomo de la instrumentación de *Swift*.

Posterior a *Swift*, una nueva misión espacial de la NASA fue lanzada en 2008, el *Fermi* Gamma-Ray Space Telescope [3]. Uno de sus objetivos más importantes es el estudio de la emisión de alta energía de los GRBs y los mecanismos físicos responsables de dicha emisión [64]. Los resultados obtenidos por *Fermi* han permitido desarrollar modelos avanzados para interpretar la emisión temprana de los GRBs [49].

2.2 Propiedades Observacionales

A continuación se definen algunos de los parámetros temporales y espectrales más relevantes para el estudio de los GRBs.

2.2.1 Temporales

DEFINICIÓN 2.1 (T_{90}). *Es la duración de un evento. Generalmente se toma como el tiempo en el que emite entre el 5 y el 95 % de la energía total por encima del nivel de fondo. Esta duración, en unidades de segundos, se denomina T_{90} ya que mide el rango en el que se detecta el 90 % de la fluencia. [15]*

La medición de la duración depende de la sensibilidad del detector. Los detectores más sensibles pueden rastrear la emisión durante más tiempo y adicional a esto, los GRBs también tienen diferentes duraciones en diferentes bandas de energía.

DEFINICIÓN 2.2 (Dureza H). *También llamada dureza espectral, es la tasa de fotones de una banda energética respecto a otra banda[36].*

Una forma de obtener H es dividiendo las fluencias de bandas de mayor energía (numerador) respecto a las fluencias en bandas menos energéticas (denominador).

Clasificación Canónica

En 1993, Kouveliotou y su equipo propusieron una clasificación considerando el tiempo de emisión de los GRBs y la dureza de su espectro (ver Figura 2.2) [30]. Con base en la distribución de la duración de eventos detectados por *BATSE*, se estableció la primera clasificación de los GRBs, identificando dos poblaciones: los LGRBs ($(T_{90} > 2s)$ y espectros suaves) y los SGRBs ($(T_{90} < 2s)$ y espectros duros).

Más adelante se asoció a los progenitores de los LGRBs con eventos llamados colapsares, los cuales se originan en una clase de estrellas muy masivas ($20-100 M_{\text{Sol}}$)

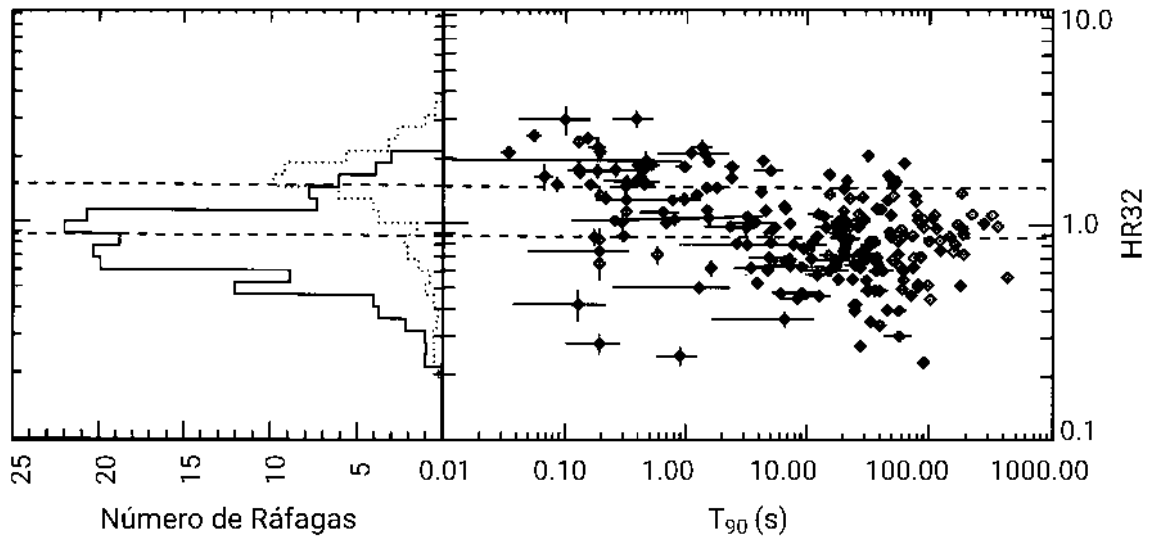


Figura 2.2: *Izquierda:* Histograma de la dureza. *Derecha* Diagrama duración y dureza [30].

identificadas con las estrellas Wolf-Rayet de rotación rápida y baja metalicidad [45].

A pesar del problema relacionado con la sensibilidad del detector en el momento de realizar la medición de la duración del evento, la clasificación según el tiempo de emisión sigue como referente para identificar a los progenitores de los GRBs.

DEFINICIÓN 2.3 (Retraso espectral). *Es la diferencia del tiempo de llegada de los pulsos de alta energía frente a los pulsos de baja energía [57].*

La intensidad de la luz de un objeto en función del tiempo se conoce como *curva de luz*. En el caso de los GRBs, estas pueden ser muy variadas, mostrando patrones con un pulso definido o múltiples pulsos, con anchos distintos e irregulares. Al considerar dos curvas de luz en distintas bandas de energía, es posible calcular el retraso espectral desplazando una curva respecto a la otra.

En los LGRBs, la emisión de mayor energía llega antes que la emisión de menor energía. De esta forma, el retraso espectral es generalmente positivo para LGRBs y normalmente es cero para SGRBs [32, 44, 13, 57]. Ya que este parámetro entre bandas de energía combina información temporal y espectral del evento, puede considerarse como un criterio para la clasificación de los GRBs.

2.2.2 Espectrales

DEFINICIÓN 2.4 (Función de Band). *Esta función representa la forma típica del espectro de un GRB, el cual se ajusta a una ley de potencia rota como [8]:*

$$N(E) = \begin{cases} A \left(\frac{E}{100 \text{ keV}}\right)^\alpha \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right) & E < (\alpha - \beta)E_0 \\ A \left[\frac{(\alpha - \beta)E_0}{100 \text{ keV}}\right]^{\alpha - \beta} \exp(\beta - \alpha) \left(\frac{E}{100 \text{ keV}}\right)^\beta & E \geq (\alpha - \beta)E_0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Donde A es el factor normalización del espectro, E_0 es la energía de quiebre del espectro, α y β son el índice de decaimiento temporal y el índice espectral de densidad de flujo del resplandor residual, respectivamente [64]. A estos últimos dos parámetros también se los conoce como índices fotónicos para baja y alta energía, respectivamente.

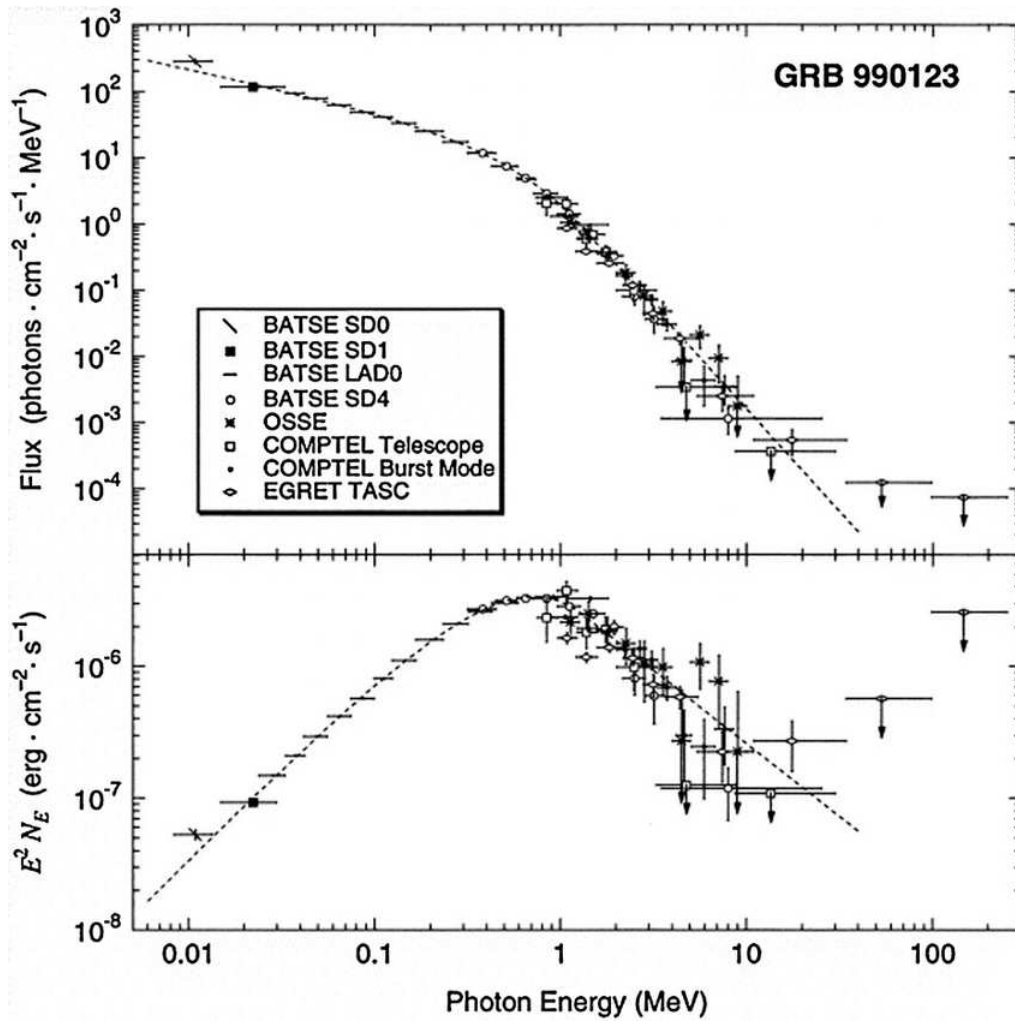


Figura 2.3: Espectro típico de un GRB modelado con la Función de Band. Se observa la pendiente de baja y alta energía con parámetros $\alpha = -0,6$ y $\beta = -3,1$ respectivamente, la energía de pico está en 720 keV [32].

En astronomía de rayos-X y rayos- γ , los fotones se cuentan individualmente. El espectro se define a partir del número de fotones $N(E)$ cuyas unidades son [*fotones* $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{keV}^{-1}$]. Así, $N(E)dE$ es el número de fotones en el intervalo de energía $[E, E + dE]$.

DEFINICIÓN 2.5 (Energía de pico, E_{peak}). *Energía máxima en el espectro $E^2N(E)$ correspondiente al cambio de tendencia del mismo. Esta energía cubre al menos 3 órdenes de magnitud.*

La energía de pico E_{peak} se relaciona con la energía de quiebre E_0 como:

$$E_p = (2 + \alpha)E_0. \quad (2.2)$$

Existe una clasificación de las ráfagas de rayos-gamma según su energía de pico: ráfagas de rayos gamma (GRB, $E_{peak} > 50 keV$), GRB ricos en rayos-X (XRGRB, $30keV < E_{peak} < 50 keV$) y destellos de rayos-X (XRFs, $E_{peak} < 30 keV$) [52].

Por otro lado, se ha observado que los espectros de los GRBs son de origen no térmico, esto ya que el flujo de fotones se extiende hacia energías mucho más altas que las típicas de un espectro térmico (aquí el flujo decrece en altas energías), siguiendo además una distribución de ley de potencia [64]. Para que esto suceda, los electrones deben acelerarse en un entorno de no equilibrio tal como choques o sitios de reconexión magnética [64].

DEFINICIÓN 2.6 (Energía isotrópica, E_{iso}). *Energía que tendría la ráfaga si la energía observada se emitiera en todas las direcciones. [32].*

Se puede calcular a partir de la fluencia S . En los corrimientos al rojo típicos de los GRB, las energías isotrópicas de las ráfagas largas tienen valores entre $10^{52} < E_{iso} < 10^{54} erg$ mientras que para las cortas el valor es $10^{49} < E_{iso} < 10^{51} erg$ [48, 41].

DEFINICIÓN 2.7 (Relación de Amati). *Se trata de una correlación empírica entre E_{iso} y $E_{p,z} = E_p(1 + z)$, descubierta por Amati y su equipo en 2002 [5]. Se expresa de la forma:*

$$\frac{E_{p,z}}{100 keV} = C \left(\frac{E_{iso}}{10^{52} erg} \right)^m, \quad (2.3)$$

donde $C \sim 0,8 - 1$ y $m \sim 0,4 - 0,6$ [4]. Esta correlación establece el hecho de que los GRB más energéticos tienden a ser más duros.

2.2.3 Emisión temprana

Esta emisión hace referencia al periodo de tiempo en el que el detector de rayos-gamma capta una señal por encima del ruido [47]. Se origina en el momento de la creación del GRB debido a la disipación de energía cinética de un flujo de partículas relativistas, esto se explica mediante el modelo de la Bola de Fuego o *Fireball model*.

Modelo de la Bola de Fuego

Las escalas de tiempo para la variabilidad observada en los GRBs requieren la deposición de gran cantidad de energía en un volumen pequeño [58]. De esta forma, el modelo de la bola de fuego propone la deposición del calor de algún evento catastrófico dentro de este pequeño volumen. Al liberarse, la inmensa presión térmica crea una expansión de la bola de fuego que perfora cualquier material que rodee la región, emitiéndose así un chorro de partículas relativistas con un factor de Lorentz de 100 o mayor.

La energía cinética de la bola de fuego, en el sistema de referencia del observador, es:

$$E_0 = \Gamma M_0 \left(\frac{kT'}{m_p} + c^2 \right) \quad (2.4)$$

donde Γ es el factor de Lorentz, M_0 la masa de la componente bariónica de la bola de fuego, T' la temperatura en el sistema en reposo y m_p la masa del protón.

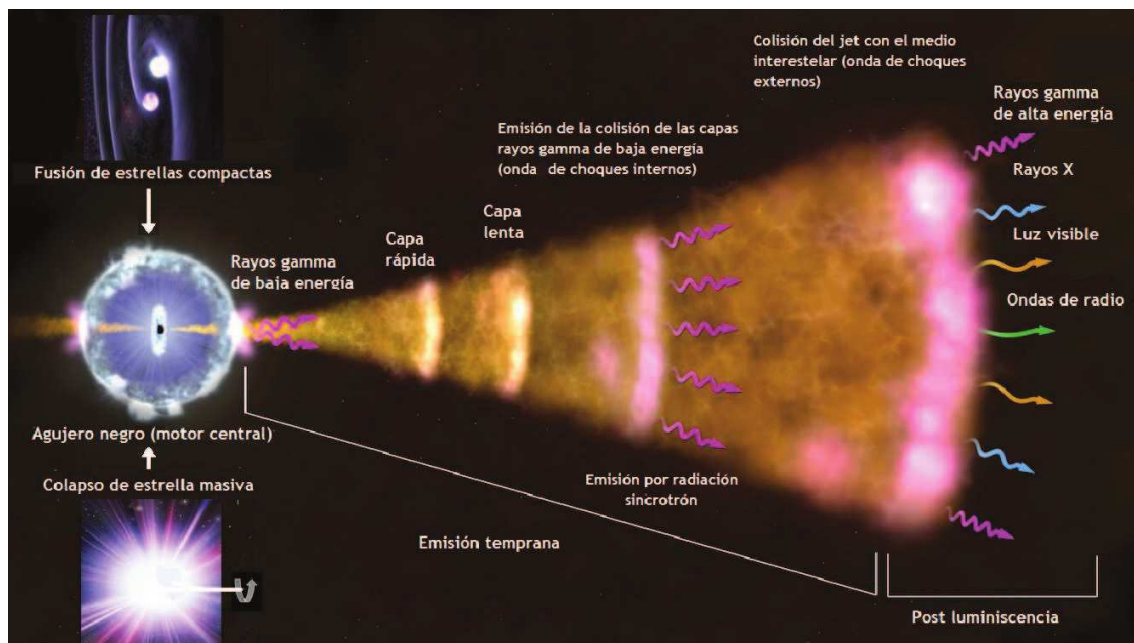


Figura 2.4: Modelo de bola de fuego donde se observan los choques internos y externos. Además, se muestra los dos posibles escenarios de progenitores y la postluminiscencia. Fuente: NASA's HEASARC.

Choques internos

Son producidos por el choque de las capas internas del progenitor. Estos choques entre capas transforman la energía cinética de la bola de fuego en energía cinética de las partículas [47]. A su vez, esto explicaría la variabilidad de las curvas de luz.

Choques externos

La interacción de los choques internos con el medio que rodea al progenitor produce una desaceleración del flujo de partículas, generando así los choques externos. La postluminiscencia se produce inmediatamente después de que la energía se transfiere desde las capas del progenitor a los electrones del medio [32].

2.2.4 Postluminiscencia

Gran parte de lo que se conoce de los GRBs proviene de su postluminiscencia. Posterior al estallido de rayos-gamma, se observa una emisión a lo largo del espectro electromagnético (principalmente en el rango óptico, radio y rayos-X). Esta es conocida como postluminiscencia y se origina por el choque entre el plasma relativista saliente y el medio circunestelar que rodea al progenitor [32].

Su duración desde segundos hasta semanas permite localizar con precisión a los GRBs en el cielo (con un rango de precisión del orden de arcos). Además, se puede identificar el corrimiento de las líneas de emisión del hidrógeno, elemento principal que compone el medio interestelar, para así obtener el corrimiento al rojo del GRB, lo cual permite determinar las galaxias anfitrionas.

En la Figura 2.4 se observa un esquema con la emisión temprana y postluminiscencia de los GRBs y sus diferentes componentes.

2.3 Procesos de Radiación

La radiación observada de los GRBs se debe a la interacción de la materia relativista expulsada por el progenitor con el medio que lo rodea. Como se mencionó anteriormente, el espectro de emisión es de origen no térmico, por lo que los principales procesos de radiación involucrados podrían ser sincrotrón y compton inverso.

Antes de describirlos, es necesario revisar algunos conceptos de relatividad.

2.3.1 Relatividad: aspectos generales

Consideremos una fuente la cual se mueve con velocidad v , factor de Lorentz Γ y en un ángulo θ respecto a un observador. Si dos fotones son emitidos con una diferencia de tiempo $\delta t'$ en el sistema que se mueve con la fuente (comóvil), en el sistema de laboratorio este intervalo de tiempo será $\delta t = \Gamma \delta t'$. La diferencia de tiempo

en la llegada de estos dos fotones a un observador está dada por:

$$\delta t_{obs} = \delta t' \Gamma (1 - \beta \cos \theta) = \delta t' D \quad (2.5)$$

donde $\beta = v/c$ y $D = [\Gamma(1 - \beta \cos \theta)]^{-1}$ es conocido como factor de Doppler [31].

Asímismo, se puede expresar la frecuencia del fotón ν en el sistema del observador en términos de la frecuencia comóvil ν' :

$$\nu = \frac{\nu'}{\Gamma(1 - \beta \cos \theta)} = \nu' D \quad (2.6)$$

En cuanto al impulso, la componente transversal no cambia bajo la transformación de Lorentz, es decir, los valores en los sistemas comóvil y de laboratorio son iguales:

$$\nu \sin \theta = \nu' \sin \theta' \quad (2.7)$$

Para un valor grande de Γ , se puede aproximar $\theta \approx \theta' / \Gamma$. Esto se traduce en que, el tamaño angular del haz de fotones en el marco de laboratorio es más pequeño que en el marco comóvil por un factor $\sim \Gamma$. Por otro lado, el ángulo sólido para un haz cónico de fotones en el marco de laboratorio es menor que en el marco comóvil por un factor $\sim \Gamma^2$ [31]. La transformación de Lorentz del ángulo sólido Ω es:

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi = \frac{\sin \theta' d\theta' d\phi'}{D^2} = \frac{d\Omega'}{D^2} \quad (2.8)$$

2.3.2 Radiación sincrotrón

Las partículas relativistas cargadas, las cuales son aceleradas debido a la presencia de un campo magnético, son las responsables de esta radiación. La emisión de la postluminiscencia es consecuencia de la radiación sincrotrón de electrones en los choques externos a medida que la eyección es desacelerada por el medio [63, 31].

Para un electrón en un campo magnético \vec{B} , con carga q , masa m_e y que se mueve a una velocidad \vec{v} , la fuerza de Lorentz es:

$$\vec{F} = m_e \gamma_e \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{c} \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.9)$$

donde γ_e es el factor de Lorentz del electrón, en este caso se ha despreciado el campo eléctrico externo. Al resolver esta ecuación se puede encontrar la velocidad angular $\omega_B = qB / \gamma_e m_e c$.

Como resultado del avance del haz de fotones en la dirección del sistema de laboratorio, la radiación del electrón es recibida por un observador distante solo en un pequeño segmento de la órbita [22]. La duración del pulso de radiación recibido por el observador en cada órbita es $\delta t_{obs} \sim m_e c / qB\gamma_e^2$. La frecuencia característica de la radiación sincrotrón se define como el inverso de este tiempo:

$$\omega_{sin} \sim \frac{qB\gamma_e^2}{m_e c} \quad y \quad \nu_{sin} = \frac{\omega_{sin}}{2\pi} \sim \frac{qB\gamma_e^2}{2\pi m_e c} \quad (2.10)$$

con ν_{sin} la frecuencia cíclica [31]. El espectro tiene un pico en $\sim \nu_{sin}$ y su comportamiento va de acuerdo a una ley de potencia con $F_\nu \propto \nu^{1/3}$ con $\nu \leq \nu_{sin}(\gamma_e)$. A frecuencias superiores, este espectro sufre un decaimiento de la forma: $F_\nu \propto \nu^{-p/2}$.

Otra característica de la radiación sincrotrón es el enfriamiento de los electrones. Se puede definir un factor de Lorentz γ_c relacionado con el enfriamiento:

$$\gamma_c \sim \frac{6\pi m_e c}{\sigma_T B^2 t_0} \quad (2.11)$$

donde σ_T es la sección eficaz de Thompson y t_0 el tiempo en el que se enfrían los electrones. Si $\gamma_e < \gamma_c$ ocurre un enfriamiento rápido, de lo contrario si $\gamma_e > \gamma_c$ el enfriamiento será lento [22].

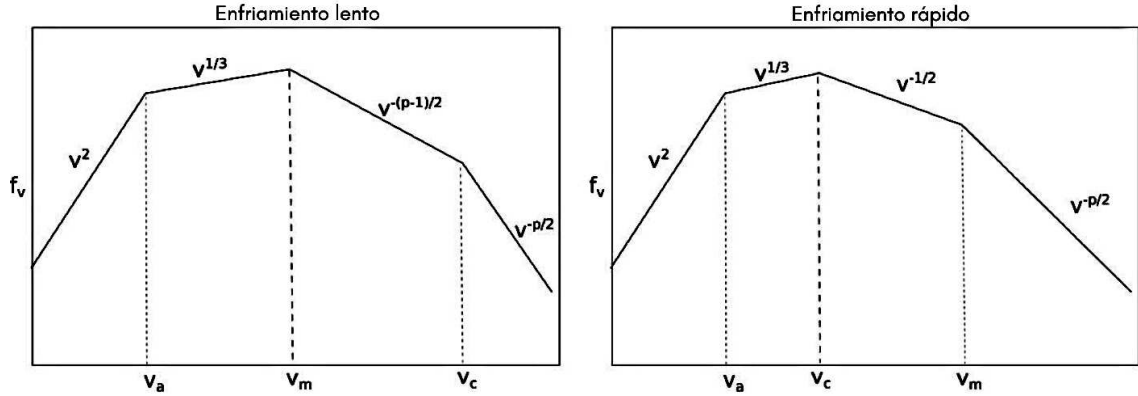


Figura 2.5: Espectro de emisión sincrotrón. A la derecha se muestra un espectro de enfriamiento lento y a la izquierda uno de enfriamiento rápido. Las frecuencias ν_a y ν_m corresponden a la frecuencia sincrotrón de auto absorción y a la frecuencia de inyección $\nu_m \equiv \nu_{sin}(\gamma_{e,min})$, respectivamente [31].

Sin embargo, se ha observado en muchos GRBs que en el régimen de enfriamiento rápido el espectro de baja energía se comporta de la forma $F\nu \propto \nu^0$, lo cual es incompatible con lo que predice la radiación sincrotrón en bajas energías con $F\nu \propto \nu^{-1/2}$ [25]. Lo anterior indica que existen otros procesos radiativos involucrados.

2.3.3 Dispersión Compton Inversa

Se produce cuando un fotón de frecuencia ν es dispersado por un electrón de mayor energía $\gamma m_e c^2 \gg E_\gamma$, ganando así energía dicho fotón [22]. Esta dispersión añade una componente de alta energía la cual es observada durante la postluminiscencia temprana [47]. La componente es γ_e^2 veces mayor al espectro del GRB y se encuentra en el orden de $GeV - TeV$.

El efecto producido en la dispersión Compton Inversa *CI* depende del parámetro de comptomización $Y = \gamma^2 \tau_e$, donde τ_e es la profundidad óptica del electrón. Sean U_e y U_B las densidades energéticas del electrón y del campo magnético respectivamente, el parámetro de comptomización cumple con: $Y = \epsilon_e / U_B$ si $U_e \ll U_B$ y $Y = \sqrt{U_e / U_B}$ si $U_e \gg U_B$, donde ϵ_e es la tasa de radiación de los electrones respecto a la energía total [47].

Cuando $Y < 1$ la dispersión *CI* se puede despreciar, mientras que si $Y > 1$, una fracción considerable de la radiación sincrotrón en bajas frecuencias, es dispersada mediante *CI*, lo que produce una emisión grande de radiación. El espectro típico de la dispersión *CI* se puede observar en la Figura 2.6.

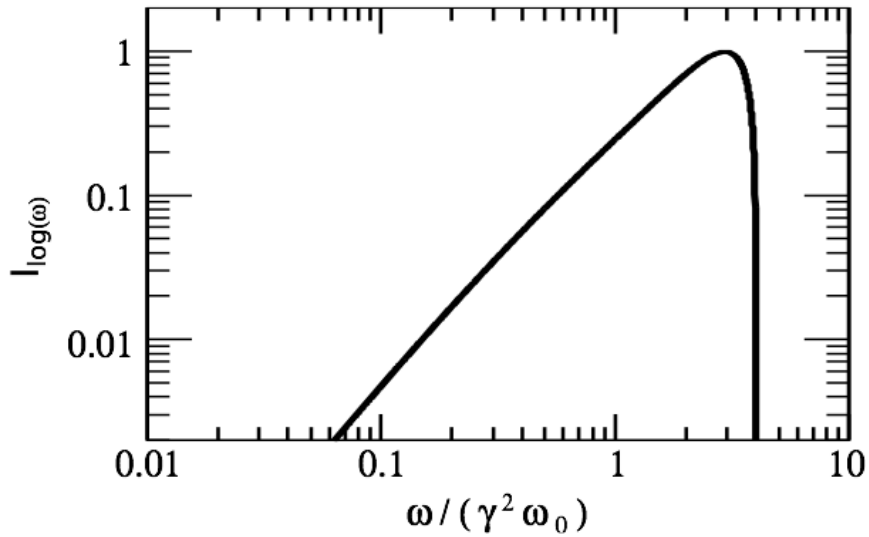


Figura 2.6: Espectro producido por la dispersión Compton inversa de fotones con frecuencia ν por electrones [20].

Esta dispersión además sería responsable, junto a la radiación sincrotrón, del enfriamiento de los electrones en un factor de Y . Existen otros procesos de radiación más complejos pero en este trabajo no abordará dichos procesos.

2.4 Observatorio Espacial Swift

El observatorio espacial Neil Gehrels *Swift*, lanzado en noviembre de 2004, es un observatorio en múltiples longitudes de onda dedicado al estudio de los GRBs [23]. Entre sus principales objetivos destacan:

- Determinar el origen de los GRBs.
- Clasificar los GRBs y buscar nuevos tipos.
- Determinar cómo evoluciona la explosión y la interacción con el medio interestelar.
- Utilizar los GRBs para estudiar el universo primitivo.
- Realizar el primer estudio sensible a los Rayos-X "duros"(0.3–10.0 keV) del cielo.

La llegada de *Swift* redujo drásticamente la escala de tiempo para las observaciones de GRBs en escalas de tiempo de 60 – 100 s, pues en misiones anteriores seguimientos de ~ 10 horas se consideraban una respuesta “rápida”. La combinación de mayor sensibilidad, mayor rango de tiempo y mejor cobertura de longitud de onda ha permitido que *Swift* realice una gran cantidad de descubrimientos [32]. Entre ellos la postluminiscencia, fase posterior a la emisión temprana que comienza segundos después del disparo de la ráfaga y continúa en algunos casos durante varios años. Además, la precisión para localizar la galaxia anfitriona de donde proviene el evento ha sido un gran avance en el campo de los GRBs.

Swift cuenta con 3 instrumentos importantes (ver Figura 2.7) para la detección de los GRBs. El telescopio XRT en rayos-X mide los flujos, espectros, curvas de luz y postluminiscencias de los GRBs en un amplio rango dinámico [23]. XRT localiza un GRB en aproximadamente 3 – 5 segundos de arco y realiza imágenes y espectroscopia en la banda de 0,2 a 10keV [56]. Por otro lado está UVOT, un telescopio en ultravioleta y óptico con un espejo de 30 cm de apertura que opera en longitudes de onda entre 1600Å y 6000Å [23]. UVOT proporciona posiciones de ráfaga a 0,5 segundos de arco, discrimina espectros de baja resolución de GRB brillantes y realiza imágenes de banda ancha de las postluminiscencias.

Sobre el tercer instrumento llamado BAT (Burst Alert Telescope) se explora más a continuación.

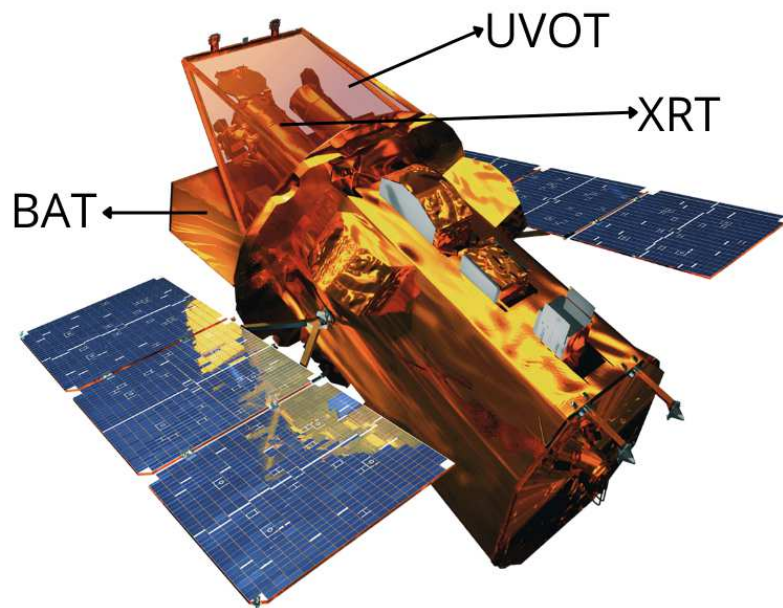


Figura 2.7: Instrumentos de Swift.

2.4.1 BAT

El Telescopio de Alerta de Ráfaga (BAT por sus siglas en inglés), es un instrumento de alta sensibilidad en el rango de energía efectivo de $15 - 150 \text{ keV}$, esto es, el rango de energía sobre el cual el área efectiva es más del 50% del valor pico (ver Figura 2.8). Fue diseñado y construido en el Goddard Space Flight Center.

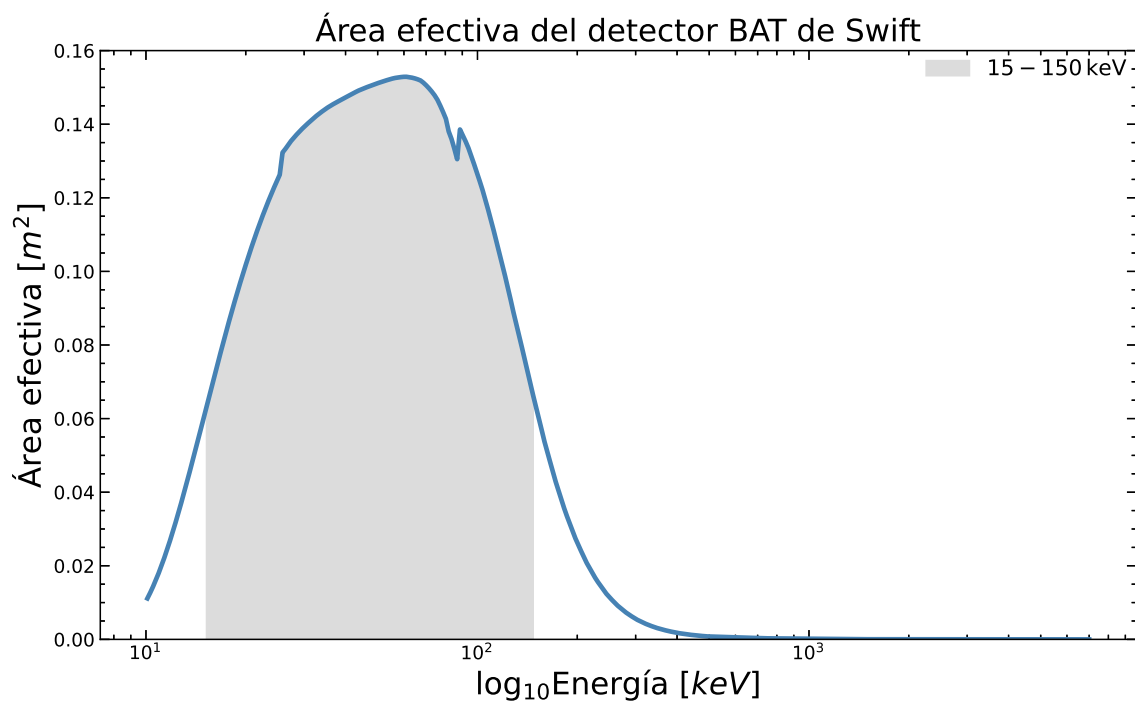


Figura 2.8: Área efectiva del detector BAT a bordo del telescopio espacial *Swift*.

BAT se compone de un plano detector con 32768 detectores de estado sólido hechos de $CdZnTe$ (CZT), y una máscara de apertura codificada de ~ 52000 mosaicos de plomo [56]. La técnica de máscara codificada es útil en astronomía de rayos X y rayos gamma para obtener un gran campo de visión mientras se mantiene la capacidad de generación de imágenes [35]. Para formular una imagen, los mosaicos de plomo se ubican a 1 metro por encima del plano del detector de CZT [38], estos mosaicos bloquean la radiación en un patrón conocido proyectando una sombra codificada sobre el plano. A partir de esta sombra se pueden reconstruir matemáticamente las propiedades de la fuente de radiación original, generando finalmente la imagen.

El arreglo de sensores de estado sólido de BAT permite detectar ráfagas débiles y de forma general, es capaz de detectar alrededor de ~ 100 GRBs por año e identificar sus posiciones con una precisión de 1 arcmin [10].

Propiedad	Descripción
Abertura	Máscara codificada
Área de detección	5200 cm^2
Detector	$CdZnTe$
Operación del detector	Conteo de fotones
Campo de visión	$1,4 \text{ sr}$ (parcialmente codificado)
Elementos de detección	256 módulos de 128 elementos
Tamaño del detector	$4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$
Telescopio PSF	17 arcmin
Rango de energía	$15 - 150 \text{ keV}$

Cuadro 2.1: Descripción técnica de BAT.

Una calibración en órbita de BAT es programada cada año mediante observaciones de la Nebulosa del Cangrejo para realizar mediciones de energía y posición [35]. Durante las observaciones de calibración, BAT observa esta nebulosa en diferentes ángulos de incidencia para comprobar que las medidas muestran resultados consistentes.

2.4.2 Tercer Catálogo de Swift BAT

Se trata de un catálogo en línea donde la información temporal y espectral de cada GRB fue obtenida a partir de los fotones dentro de un rango de 250 s antes y 950 s después del tiempo de activación de BAT.

En la actualidad, este catálogo contiene información de 1391 eventos los cuales fueron monitoreados por el observatorio espacial *Swift* desde diciembre de 2004 hasta mayo de 2020. Respecto al catálogo BAT2, se actualizaron los resultados para incluir los GRB detectados por BAT después de 2009 [35]. Las distribuciones temporales y espectrales generales de los GRBs son similares a las presentadas en el catálogo de *BAT2*. La Figura 2.9 muestra la posición en coordenadas Galácticas de los GRBs identificados por el tercer catálogo de *Swift*-BAT.

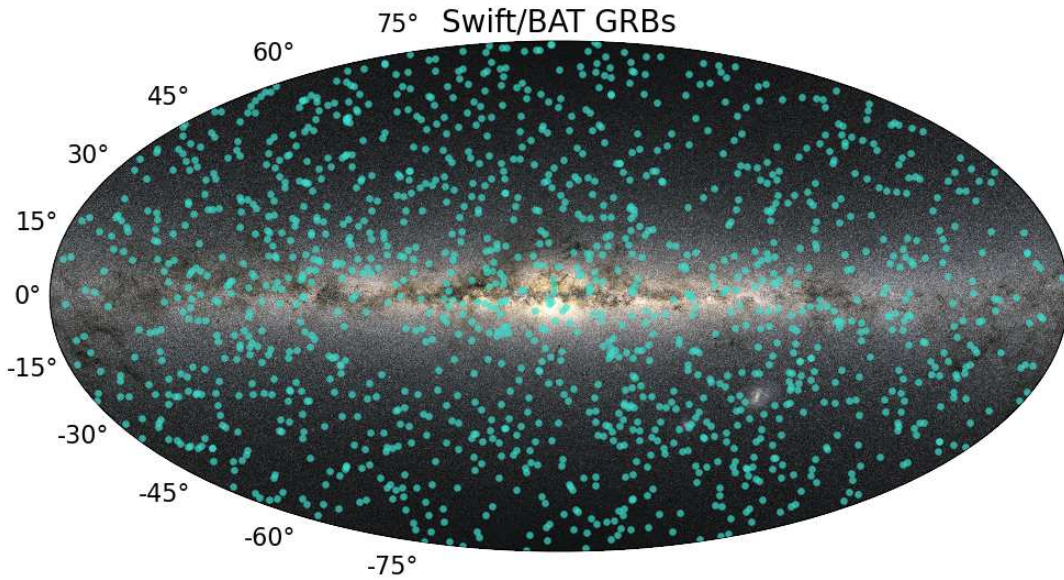


Figura 2.9: Distribución isotrópica de 1391 GRBs identificados en el tercer catálogo de *Swift*-BAT.

Aproximadamente el 9 % de los GRB de BAT son cortos ($T_{90} < 2 s$), que es menor que la fracción de SGRBs correspondientes a la muestra de Fermi ($\sim 17\%$) y la muestra de BATSE ($\sim 26\%$) [35]. Los espectros producidos por BAT utilizando las técnicas *mask-weighting*, tienen estadísticas gaussianas [38].

Catálogo	Número de GRBs	Fecha
BAT1	237	19/12/2004 - 16/06/2007
BAT2	476	19/12/2004 - 21/12/2009
BAT3	1391	19/12/2004 - 05/05/2021

Cuadro 2.2: Número de GRBs de los tres catálogos de Swift BAT.

Es importante señalar que todos los datos de eventos reportados en el catálogo han sido previamente procesados y analizados utilizando principalmente las herramientas HEASARC y XSPEC, este último para el análisis espectral.

Los espectros detectados por *BAT* son ajustados por el modelo *Cutoff Power-Law* (*CPL*):

$$N(E) = K^{CPL} \left(\frac{E}{50keV} \right)^{\alpha^{CPL}} \exp \left[\frac{-E(2 + \alpha^{CPL})}{E_{peak}} \right] \quad (2.12)$$

donde α^{CPL} es el índice fotónico, E_{peak} es la energía de pico en el espectro νF_ν y K^{CPL} es el factor de normalización en $50 keV$ con unidades de $[cm^{-2}s^{-1}keV^{-1}]$.

Si bien los espectros de los GRBs se comportan siguiendo la Función de Band, los GRBs detectados por *BAT* han sido bien representados por el modelo *CPL* [52]. De hecho, el modelo *CPL* es el que mejor representa los datos espectrales de *BAT*.

2.5 GRBs peculiares

Se trata de ráfagas en las cuales se observa inconsistencias respecto a su clasificación canónica, tras estudiar sus propiedades temporales y espectrales. Dos de las ráfagas peculiares más sobresalientes son el GRB 040924 y el GRB 090426.

En el caso del GRB 040924, clasificado como corto por su duración de $\sim 1 s$, se detectó una supernova asociada gracias al Telescopio Espacial Hubble [60, 54]. Es así como en 2006 se identificó que esta ráfaga (con corrimiento al rojo $z = 0,86$), encuentra su origen en el colapso de una estrella masiva. La galaxia anfitriona asociada forma estrellas activamente y tiene una metalicidad significativamente subsolar, características observadas en galaxias asociadas a los LGRBs [51]. A pesar de que la postluminiscencia es débil con respecto a otros LGRB anteriores a Swift, la combinación con la emisión temprana y propiedades de la galaxia anfitriona dejan en claro que el progenitor era un colapsar.

Otro caso peculiar es el GRB 090426, con corrimiento al rojo $z = 2,61$ (uno de los más altos encontrados para un GRB de esta clase) y una duración menor a $2 s$. Esta ráfaga muestra un espectro de alta energía y postluminiscencia típica de los LGRBs [7, 55, 42, 43]. El ángulo de semiapertura del jet, así como la luminosidad de la postluminiscencia, proporcionan evidencia adicional de que GRB 090426 probablemente esté relacionado con la muerte de una estrella masiva y no con la fusión de dos objetos compactos [43], como se propuso en un inicio.

Existen también artículos sobre GRBs largos cuyos progenitores podrían ser objetos compactos [29, 62]. Sin embargo, en este trabajo nos referiremos como “peculiares” únicamente a los SGRBs con características de LGRBs.

2.5.1 GRB 200826A

Descubierto por el telescopio espacial *Fermi* en 2020, el GRB 200826A posee una duración de $T_{90}=96_{-0,07}^{+0,06}$ segundos. Tras analizar su retraso espectral, energía total y desplazamiento respecto al centro de galaxia anfitriona (desplazamiento espacial), en mayo de 2021 se reportó que estas propiedades eran consistentes con aquellas presentes en los LGRBs [63].

El análisis espectral arrojó un valor del índice fotónico $\alpha = -0,68 \pm 0,05$, y del pico de energía $E_p \simeq 120,29_{-3,67}^{+3,93} \text{ keV}$. Estos valores no son diferentes de otros SGRBs y, sin la información de corrimiento al rojo y de la galaxia anfitriona, este estallido se clasificaría dentro de los SGRBs. Observaciones de la contraparte óptica permitieron identificar la galaxia anfitriona y su corrimiento al rojo de $z = 0,7481$ [2, 63]. Con esta información fue posible calcular la energía isotrópica a partir de la fluencia, obteniendo un valor relativamente grande para los SGRBs, $E_{\gamma,iso} \simeq 7,09 \pm 0,28 \times 10^{51} \text{ erg}$.

Esta discrepancia en la energía isotrópica se aprecia mejor en la *Relación de Amati*, como se observa en la Figura 2.10. Ya que tanto los LGRBs como los SGRBs siguen la misma tendencia pero forman trayectorias distintas [65], se esperó encontrar al GRB 200816A en la región de los SGRBs, sin embargo se sitúa en la tendencia de los LGRBs (ver Figura 2.10).

Adicionalmente, al calcular el valor del retraso espectral entre las bandas energéticas de $(10 - 20) \text{ keV}$ y $(250 - 300) \text{ keV}$, se encontró que era igual a $0,157 \pm 0,051 \text{ s}$ [63]. Este valor no es consistente con cero como se espera para el caso de los SGRBs, pero es un valor típico para los LGRBs.

Un artículo posterior donde se estudia la postluminiscencia del GRB 200826A, confirma la asociación con una supernova [1]. Con el satélite *Fermi* se descubrió un transiente óptico de desvanecimiento rápido. Analizando los rayos-X y las emisiones de radio se confirmó que se trataba de la postluminiscencia. Mediante imágenes de seguimiento en un periodo de 17 días, se encontró un exceso de emisión por encima de la postluminiscencia. Este exceso sería consistente con la supernova.

Por lo tanto, existirían GRBs aparentemente cortos cuyo origen es el colapso de un núcleo estelar, similar al GRB 200826A [1]. De hecho, las muestras que contienen ráfagas con duración cercana a la división clásica de 2 segundos son relevantes ya que, probablemente incluyen ráfagas de diferentes progenitores y permiten una fácil comparación con las muestras de ráfagas largas y cortas [51].

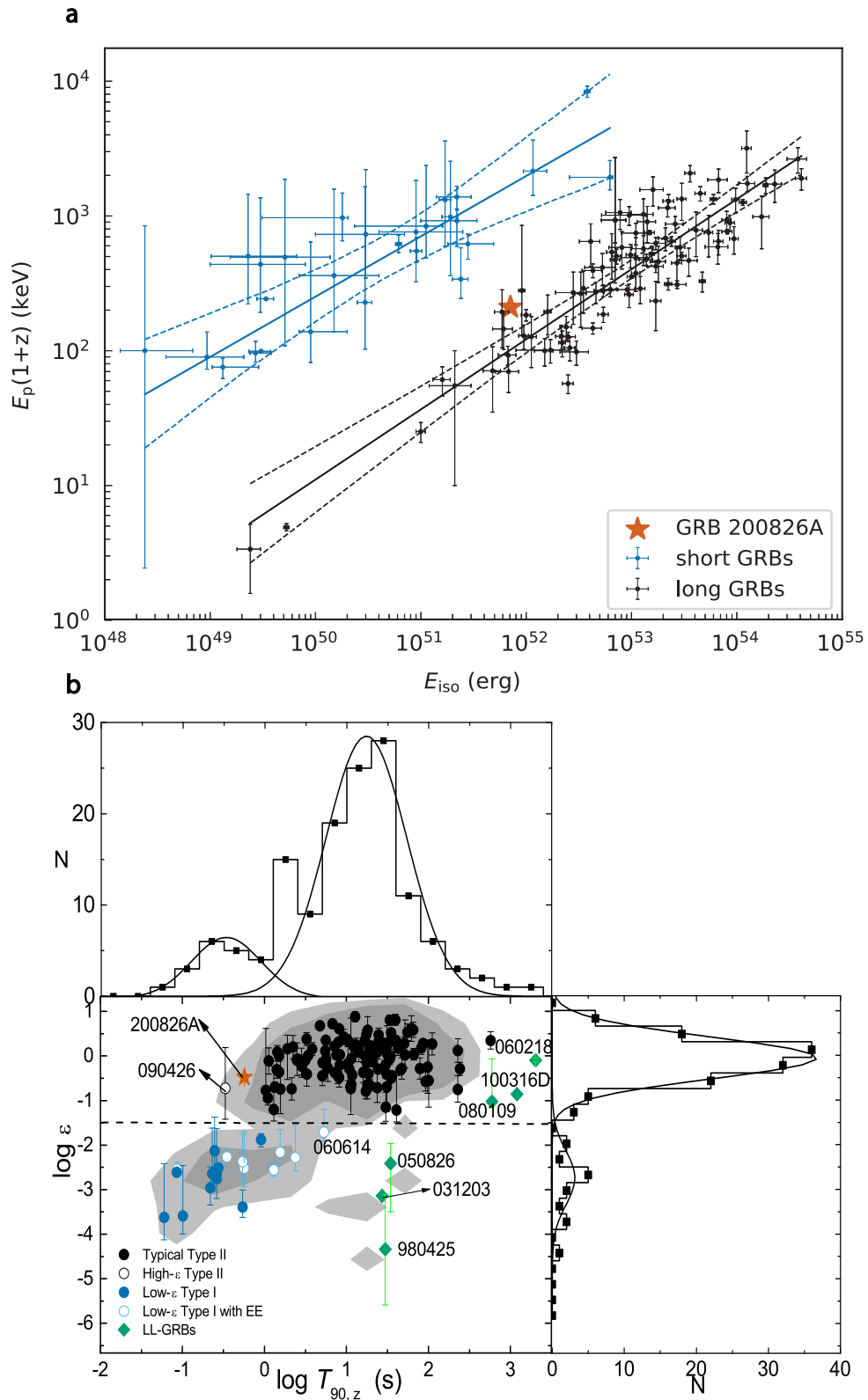


Figura 2.10: *a)* Diagrama de correlación $E_{p,z} - E_{\gamma,iso}$ para GRB cortos y largos. Las líneas punteadas muestran las regiones 3σ para cada correlación. *b)* Distribuciones de una y dos dimensiones de muestras GRB en el espacio $\epsilon - T_{90}$ [63].

El descubrimiento del GRB 200826A abrió nuevamente la discusión sobre nuevas alternativas para la clasificación de los GRBs distintas a la canónica. Una de ellas tuvo lugar en 2020 y usando el método Naive Bayes junto con las distribuciones de la emisión rápida y las propiedades de las galaxias anfitrionas, se logró clasificarlos en dos categorías físicamente distintas [34].

En los últimos años y al contar con mayor información de las características temporales, espectrales e información de las galaxias de donde provienen los GRBs, se ha evidenciado que el paradigma de su clasificación según la duración no es suficiente para identificar a sus progenitores [6].

Capítulo 3

Metodología

Con el fin de identificar SGRBs en duración pero con características de LGRBs según la *Relación de Amati* y su valor de retraso espectral, analizamos 285 GRBs del tercer catálogo de Swift-BAT¹.

En el apartado *Summary Tables* de este catálogo, información general de los GRBs se encuentra tabulada y clasificada. Las tablas utilizadas para el análisis se detallan a continuación:

Ubicación		Información relevante	
Tables of general GRB information	General Summary	Nombre GRB, Trigger ID, T_{90} , T_{90err}	
	GRB Redshift	Redshift z y método de detección	
T_{100}	Model parameters	Simple-power-law	Γ_{SPL} , $norm_{SPL}$, $norm_{err}$
		Cutoff-power-law	E_{peak} , $E_{peakerr}$
	Energy Fluence	Cutoff-power-law	Fluencias: 25 – 50 keV, 50 – 100 keV, 15 – 150 keV y sus respectivos errores

Cuadro 3.1: Ubicación de las tablas de datos del tercer catálogo de *Swift*/BAT

El Cuadro 3.1 resume de forma general la información que empleamos de los GRBs detectados por BAT y sirve como referencia de dónde se encuentra dicha información en la página web del tercer catálogo. El parámetro T_{100} representa el tiempo en el que se registra el 100 % de la energía emitida. Dependiendo del modelo que se considere (*CPL* o *SPL*), los parámetros de ajuste correspondientes son presentados con sus respectivos errores dentro de una región de confianza del 90 %.

Adicionalmente, en el apartado *Analysis results for each Swift/BAT GRB* del catálogo es posible encontrar gráficos y otros resultados interesantes para cada ráfaga.

¹El cual está disponible ingresando a la página web:
<https://Swift.gsfc.nasa.gov/results/batgrbcats/>

Logramos el análisis temporal y espectral de los GRBs empleando el lenguaje de programación Python y la herramienta Google Colaboratory, que permite escribir y ejecutar código de Python y almacenarlo en la nube².

3.1 Preprocesamiento de datos

De las Tablas de datos mencionadas anteriormente extrajimos la información más relevante, la cual fue almacenada en un dataframe. Esto fue posible comparando la columna con el de los GRBs de cada tabla y asignando el nuevo dato a una nueva columna. Antes de guardar la información en un archivo .txt, verificamos el tipo de datos de cada columna. Si existían columnas con valores vacíos y si se duplicaron filas al momento de crear el dataframe general, las eliminamos.

Adicional a esto, calculamos la dureza espectral H a partir de las fluencias energéticas S_1 y S_2 en las bandas $50 - 100 keV$ y $25 - 50 keV$ respectivamente [35],

$$H = \frac{S_2(50 - 100keV)}{S_1(25 - 50keV)}. \quad (3.1)$$

Para visualizar los datos de los parámetros más relevantes elaboramos histogramas de E_{peak} , z , T_{90} , α , S y H .

3.1.1 Paquetes de Python

Los siguientes paquetes de Python fueron útiles en la elaboración de los códigos que permitieron nuestro análisis de los GRBs.

- **PANDAS:** paquete versátil para manejar series temporales y grandes conjuntos de datos [46]. En particular, el entorno *dataframe*, una estructura de datos tabular bidimensional facilita la limpieza, exploración y procesamiento de datos.
- **SCIPY:** este paquete científico proporciona un amplio espectro de funciones matemáticas y rutinas numéricas para Python [46], entre ellas el diferenciar e integrar funciones numéricamente, así como realizar ajustes lineales.
- **ASTROPY:** paquete básico para la astronomía. En este caso, es útil para acceder a información de archivos *.fits* y para cálculos de magnitudes cosmológicas.
- **MATPLOTLIB:** es uno de los paquetes estándar más utilizados de Python, pues permite generar gráficos de alta calidad.

²Los códigos desarrollados para este trabajo están disponibles en <https://github.com/Jenn73/Tesis>

Otros paquetes utilizados: **Numpy** para cálculos puntuales, **SymPy** para el cálculo de derivadas y **Os** para acceder a archivos desde el sistema operativo.

3.1.2 Propagación de errores

El software empleado por BAT utiliza una técnica de deconvolución la cual produce errores que son gaussianos [38]. Los errores de todos los parámetros en las tablas de datos del tercer catálogo se encuentran dentro de un intervalo de confianza del 90%, lo que corresponde a un valor de $1,645\sigma$ donde σ es la desviación estándar de la distribución.

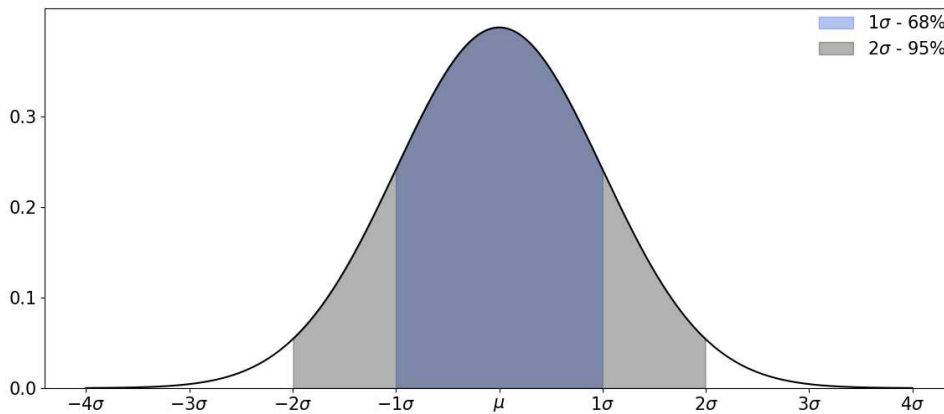


Figura 3.1: Distribución normal e intervalos de confianza.

El límite de una desviación estándar (1σ) se interpreta de la siguiente manera: en una serie de experimentos repetidos, existe aproximadamente un 68% de probabilidad de que los valores medidos se encuentren dentro de $\pm\sigma$ de la media μ . Para trabajar con errores dentro de un intervalo de confianza correspondiente a 1σ , se dividió el error tabulado para 1,645.

Una vez establecido el intervalo de confianza de los errores, utilizamos el método estándar para determinar su propagación: sea $f(x_i)$ una función con parámetros x_i , $i = 1 \dots N$, el error estimado en una medición de f está dado por [14],

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 (\sigma_{x_i})^2} \quad (3.2)$$

donde σ_{x_i} es el error asociado al parámetro x_i , el cual se encuentra tabulado y, como se explicó en el párrafo anterior, lo extrapolamos para un intervalo de confianza del 68%. Las derivadas fueron calculadas con *SymPy*.

3.1.3 Selección de la muestra

Realizamos la selección descartando en primer lugar aquellos GRBs con valores negativos de T_{90} (es decir, aquellos que tienen pocas cuentas en su detección). Simultáneamente, prescindimos de aquellos eventos con un valor de $E_{peak} > 1000$, esto ya que se encontró valores atípicos ($E_{peak} > 9000 \text{ keV}$) que se alejaban órdenes de magnitud del rango de energía óptimo del detector, por lo que no serían datos confiables.

Luego, procedimos a tomar solamente aquellos eventos que tenían asociado un valor de corrimiento al rojo z (ya sea por métodos espectroscópicos o fotométricos). Conjuntamente consideramos los eventos con valores diferentes de cero de los parámetros de ajuste del modelo SPL y de fluencia $S_{15-150 \text{ keV}}$. Esto ya que los datos anteriormente mencionados intervienen directamente en el cálculo de la energía isotrópica. En el Cuadro 3.2 resumimos los criterios con los que filtramos los datos para obtener la muestra final.

	Consideraciones	Total GRBs
Filtro 1	Eliminación de GRBs repetidos $T_{90} > 0$ $E_{peak} < 1000 \text{ keV}$	1110
Filtro 2	GRBs con redshift Valores no nulos de los parámetros $\alpha, E_{peak}, norm$ y S	316
Filtro 3	Se descarta los GRBs con valores atípicos de E_{iso} Tolerancia para los errores de E_{iso} : $err \leq 2$	285

Cuadro 3.2: Criterios para obtener la muestra de GRBs.

De los 285 GRBs obtenidos en la muestra, según la duración 15 corresponden a SGRBs y 270 a LGRBs. Con esto obtuvimos el diagrama duración-dureza ($T_{90} - H$), el cual se presenta en el Capítulo 4.

3.2 Cálculo energías

La *Relación de Amati* establece una correlación entre la energía de pico E_{peak} y la energía isotrópica E_{iso} . Para obtener esta relación, primero calculamos dichas energías.

3.2.1 Energía de pico

La región de detección de BAT es relativamente estrecha pues está entre 15 – 150 keV, lo cual representa una dificultad para determinar la energía de pico E_{peak} . Por ello es necesario constreñir esta energía de los GRBs del tercer catálogo y así estimar E_{peak} dentro del rango de detección de BAT.

En 2012, una corrección fue propuesta por Virgili y su equipo [59], donde el espectro del GRB se puede ajustar con una ley de potencia simple *SPL*. Para los GRBs de *Swift*, se encontró que existe una correlación entre la energía de pico medida y el índice gamma de fotones en la banda de BAT [53]

$$\log gE_{peak} = (3,05 \pm 0,359) - (3,79 \pm 0,554) \log \Gamma_{BAT}. \quad (3.3)$$

Es así como, con el índice gamma Γ_{BAT} del modelo *SPL*, realizamos una corrección a la energía de pico tabulada en el modelo *CPL* a partir de la ecuación anterior. Los errores correspondientes a esta energía también fueron calculados mediante la propagación de errores.

Kolmogorov-Smirnof test

Esta prueba estadística permite comparar dos conjuntos de datos (por medio del p-valor de la prueba) y analizar si ambos provienen de la misma distribución estadística. La distribución estadística esperada se evalúa asumiendo que la hipótesis nula es verdadera, esto es, una afirmación sobre los parámetros esperados de los datos estudiados. La hipótesis nula se rechaza con algún umbral de probabilidad del p-valor, normalmente es $p < 0,05$ [28].

Una forma de comprobar si dos conjuntos de datos provienen de la misma distribución estadística es empleando el Kolmogorov-Smirnof (*K-S*) test. Se trata de una prueba no paramétrica y sin distribución, es decir, no hace suposiciones sobre como los datos de las muestras fueron generados [28]. En el caso de comparar dos muestras independientes es posible probar la concordancia entre sus distribuciones acumulativas.

Para ello, se mide la distancia máxima D entre las funciones de distribución acumuladas $F_1(x)$ y $F_2(x)$ de ambas muestras:

$$D = \max |F_1(x) - F_2(x)| \quad (3.4)$$

La probabilidad (o p-valor) de obtener por casualidad un valor de D mayor que

el valor medido j fue mostrada por Kolmogorov en 1933 y calculada por Smirnov en 1984 [27].

$$p = \exp \left[-2j^2 - \frac{2j}{3} \frac{(m+2n)}{\sqrt{mn(m+n)}} \right] \quad (3.5)$$

El módulo *Stats* de la librería SciPy cuenta con la función *ks_2samp*, la cual permite realizar el test (*K-S*) de dos distribuciones. El resultado de esta función es el valor de D y la probabilidad p que permite rechazar o no la hipótesis nula.

A partir del Kolmogorov-Smirnov test, comparamos dos distribuciones de datos: los E_p obtenidos a partir del telescopio espacial *Fermi*, el cual cubre el rango esperado para del E_p , y los E_p de nuestra muestra de *Swift-BAT*.

En nuestro caso, la hipótesis nula H_0 indica que ambos conjuntos de datos provienen de la misma distribución. Con esto en mente, lo que evaluamos es el rechazo o no de H_0 .

3.2.2 Energía isotrópica

Partiendo de la fluencia relacionada con el T_{100} de cada GRB, ya que sus unidades son energía por unidad de área, podemos obtener la energía multiplicando este valor por el área. Asumiendo que la explosión del GRB es isotrópica, es decir que toda la energía la emite sin una dirección preferencial, esto se puede interpretar como una simetría esférica. Así, multiplicando el valor de la fluencia por el área de una esfera de radio D_L , que es la distancia entre el evento y el detector, obtivimos la energía isotrópica E_{iso} :

$$E_{iso} = \frac{4\pi D_L^2 k}{1+z} S \quad (3.6)$$

donde $1+z$ es el factor de corrección debido a la expansión del universo, D_L es la distancia luminosa, S es la fluencia y k es un factor de corrección.

Tanto el corrimiento al rojo z como la fluencia S son valores conocidos para cada GRB de la muestra. La distancia luminosa D_L o distancia aparente de un objeto basada en qué tan brillante es y qué tan brillante parece ser, se puede calcular a partir de z :

$$D_L(z) = (1+z)D_c(z) \quad (3.7)$$

donde D_c es la distancia de comovimiento o *comoving distance*, que es la distancia entre dos objetos cercanos la cual permanece constante con la época si los dos objetos

se mueven con el flujo del Hubble [26]. Se calcula de la siguiente forma:

$$D_c(z) = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_m(1+z')^3 + \Omega_\Lambda}} \quad (3.8)$$

donde c es la velocidad de la luz y $(H_0, \Omega_m, \Omega_\Lambda)$ son parámetros cosmológicos, los cuales corresponden al ritmo de expansión del universo actual o parámetro de Hubble, la densidad de materia y la densidad de energía oscura, respectivamente. Los valores utilizados fueron $H_0 = 67,7 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_m = 0,307$ y $\Omega_\Lambda = 0,693$, considerando el modelo de universo ΛCDM [63].

El módulo *Cosmology* de *AstroPy* permite calcular cantidades dependiendo del modelo cosmológico. Tomando en cuenta el modelo ΛCDM , calculamos la distancia luminosa D_L a partir del corrimiento al rojo z .

Por otro lado, el factor de corrección k se debe a la diferencia entre la energía detectada por el instrumento en Tierra (denominador) respecto a la energía que emite el objeto en el sistema de referencia del objeto (numerador). Para calcular este factor, se considera el espectro del número de fotones del *GRB*, tanto en la banda de energía del detector con límites (e_1, e_2) , como en la banda de energía cosmológica típica en reposo $1 - 10^4 \text{ keV}$:

$$k = \frac{\int_{1/(1+z)}^{10^4/(1+z)} EN(E)dE}{\int_{e_1}^{e_2} EN(E)dE} \quad (3.9)$$

donde $N(E)$ es el número de fotones que, para el caso de *Swift*, sigue el modelo *CPL*. Al ser k una fracción de la energía total respecto a la energía detectada, siempre se cumplirá que $k > 1$.

Tomando en cuenta el valor de D_L y k , definimos una función para calcular la energía isotrópica y sus errores a partir de las derivadas de E_{iso} respecto a k y S .

3.2.3 Regresión de distancia ortogonal ODR

Para establecer la relación de Amati tomando en cuenta los errores de las energías E_{peak} y E_{iso} , utilizamos el método *ODR* por sus siglas en inglés (Orthogonal Distance Regression). Este método permite encontrar los mejores parámetros de ajuste en modelos con errores normalmente distribuidos. Esto se logra minimizando la suma de las distancias perpendiculares al cuadrado.

En los problemas de regresión normales los errores se miden verticalmente con respecto a la línea de ajuste. En la *ODR*, se calcula la distancia ortogonal de los puntos con respecto a la línea de ajuste. Así, se puede tener en cuenta los errores en

las medidas tanto para las variables independientes como para las dependientes lo cual añade más robustez al modelo.

El problema de la *ODR* es el siguiente: sea (X_i, Y_i) , con $i = 1, \dots, n$, un conjunto de datos observados cuyos valores reales subyacentes son (x_i, y_i) , donde, por simplicidad $x_i \in \mathbb{R}^1$ y $y_i \in \mathbb{R}^1$. Las mediciones en x e y tienen errores aleatorios δ y ϵ respectivamente, de tal forma que:

$$\begin{aligned} X_i &= x_i - \delta_i \\ Y_i &= y_i - \epsilon_i \end{aligned}$$

Asumiendo que existe una función f , posiblemente no lineal, que relaciona los valores de x_i e y_i y que existe un conjunto de p parámetros desconocidos representados por $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_p) \in \mathbb{R}^p$, entonces se satisface que $y_i = f(x_i, \beta)$ y por lo tanto:

$$Y_i = f(X_i + \delta_i; \beta) - \epsilon_i \quad i = 1, \dots, n \quad (3.10)$$

Cualquier procedimiento de optimización para encontrar los parámetros β debe considerar que las dos variables tienen errores asociados. Para considerar estos errores se utiliza la distancia ortogonal como medida de la desviación con respecto al modelo teórico tomando el error r_i como:

$$r_i^2 = \min_{\beta, \delta, \epsilon} \sum_{i=1}^n (\epsilon_i^2 + \delta_i^2) \quad (3.11)$$

sujeto a las restricciones:

$$y_i = f_i(x_i + \delta_i; \beta) - \epsilon_i \quad i = 1, \dots, n \quad (3.12)$$

Ya que las restricciones en la ecuación anterior son lineales en ϵ_i , se pueden eliminar y el problema de minimización quedaría como

$$\min_{\beta, \delta} \sum_{i=1}^n \left([f_i(x_i + \delta_i; \beta) - y_i]^2 + \delta_i^2 \right) \quad (3.13)$$

El algoritmo que permite resolver este problema fue propuesto por Boggs, Byrd and Schnabel en 1987 [16] y está disponible en el paquete *scipy.odr*. Para utilizarlo se necesita definir previamente la función que representa el modelo propuesto para el conjunto de datos, en este caso, un modelo lineal. La función *ODR* toma como entrada el conjunto de datos (X_i, Y_i) , los errores (δ_i, ϵ_i) , el modelo definido y valores

sugeridos para los parámetros β , obtenidos con una regresión por mínimos cuadrados. La función entrega como resultado el conjunto de parámetros β que resuelve el problema de optimización 3.13.

En nuestro caso, el conjunto de datos (X_i, Y_i) corresponde a los valores de las energías que intervienen en la *Relación de Amati* ($\log_{10}E_{iso}, \log_{10}[E_{peak}(1+z)]$). A su vez, al realizar la propagación de errores, tomamos en cuenta el cálculo de los logaritmos de las energías. Con ello obtuvimos un gráfico que representa la *Relación de Amati* tanto para los SGRBs como para los LGRBs, el cual presentamos en el Capítulo 4.

3.3 Análisis de las curvas de luz

A partir del gráfico de la *Relación de Amati*, identificamos una sub muestra en la que se encuentran aquellos SGRBs dentro la región definida para los LGRBs. El siguiente paso fue obtener las curvas de luz de estos eventos y analizar el valor de su retraso espectral.

3.3.1 Obtención de las curvas de luz

Los archivos de curvas de luz producidos por BAT se sitúan dentro de una carpeta con el nombre del GRB. El nombre del archivo se presenta de la siguiente forma: *sw00XXXXXXXX000b_4chan_64ms.lc*, donde *XXXXXXXX* es el *Trigger ID* de cada GRB y *4chan* hace referencia al número de bandas energéticas en las que se obtuvo la curva de luz. Los valores predeterminados de los rangos de energía son $15 - 25 \text{ keV}$, $25 - 50 \text{ keV}$, $50 - 100 \text{ keV}$ y $100 - 350 \text{ keV}$.

La forma de agrupar las intensidades de las curvas de luz en función del tiempo se realiza mediante intervalos regulares o (*bins*), los cuales en el tercer catálogo de Swift/BAT van desde 1 s hasta 2^n ms con $n = 1, \dots, 9$. En este caso, trabajamos con un tamaño de *bin* de 64 ms como se sugiere en la guía del tercer catálogo [38].

Tomando en cuenta lo anterior, escribimos un código que permite descargar el archivo *.lc* correspondiente a la curva de luz de la sub muestra. Esto lo realizamos tomando en cuenta el nombre y *Trigger ID* de cada evento, ya que para entrar en la carpeta respectiva que contiene el archivo de la curva de luz se necesita dichos datos. Para evitar conflictos debido al peso de estos archivos, el código que utilizamos fue ejecutado de forma local y se puede encontrar en el Anexo 1.

3.3.2 Cálculo de la CCF

Un método estándar para estimar el grado en que se correlacionan dos series temporales se logra calculando la Función de Correlación Cruzada CCF. Sean dos series x_i e y_i donde $i = 0, 1, 2, \dots, (N - 1)$, la CCF se define como [57]

$$CCF(d, x, y) = \frac{\sum_{i=1}^{N-d} (x_i - \bar{x})(y_{i+d} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.14)$$

donde d es el retraso, \bar{x} e \bar{y} son los promedios de las dos series x e y respectivamente y, el denominador en la expresión anterior es la normalización del coeficiente de correlación. De esta forma $-1 \leq CCF(d, x, y) \leq 1$. Un valor de la CCF cercano a -1 indica una correlación negativa alta pero de la inversa de una de las series. Esta función en definitiva permite obtener el coeficiente de correlación de Pearson comparando dos señales y desplazando en el tiempo la una respecto a la otra.

Estadísticamente, el retraso espectral se puede calcular a través de un análisis de correlación cruzada de los perfiles de pulso en diferentes bandas de energía [44]. Así, comparando las curvas de luz de las bandas energéticas más lejanas $15 - 25 \text{ keV}$ y $100 - 350 \text{ keV}$, calculamos la CCF para cada GRB de la sub muestra. Con la función `signal.correlate` de `SciPy`, que toma como entrada las dos señales que se desean comparar y devuelve una matriz que contiene índices del desplazamiento y el valor de 3.14 en cada índice, fue posible calcular la CCF.

Es importante destacar que no consideramos todo el rango temporal de la curva de luz en el cálculo de la CCF. Previamente la limitamos tomando en cuenta la sugerencia [38] para que el tiempo de la curva de luz empiece desde $t = 0$, restando al valor inicial t_{lc}^0 el tiempo de activación `TrigTime` del instrumento BAT. Por el otro lado, tomamos el valor de T_{90} como el tiempo máximo de la curva de luz. En consecuencia, el rango temporal t_{lc} considerado fue:

$$t_{lc}^0 - \text{TrigTime} < t_{lc} < T_{90} \quad (3.15)$$

3.3.3 Cálculo del retraso espectral

El máximo global del gráfico de la CCF en función de los índices de desplazamiento corresponde al retraso espectral τ y su valor se obtiene realizando un ajuste Gaussiano [57]. La función `curve_fit` de `SciPy` permite realizar este ajuste definiendo

la curva gaussiana como:

$$G(x) = A \exp \left[-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3.16)$$

donde A es la amplitud, x_0 es la media y σ la desviación estándar. Para realizar el ajuste, tomamos como entrada la tendencia representada por la curva anterior, los valores en x e y que en este caso corresponden al desplazamiento y la CCF respectivamente, y los parámetros de prueba $p = [A^*, x_0^*, \sigma^*]$.

Como resultado obtuvimos los valores óptimos $p_{opt} = p_{opt}(A, x_0, \sigma)$ de los parámetros para que la suma de los cuadrados de los residuos de $G(x, p) - y$ sea minimizada, junto con la covarianza estimada de p_{opt} . De esta forma, el valor del retraso espectral τ es igual al valor de la media contenido en p_{opt} y multiplicado por el tamaño del bin [13], que en este caso es 64 ms . De la misma forma, calculamos el error en τ .

Finalmente, para determinar si el valor del retraso espectral de un GRB es o no consistente con cero, analizamos error τ_{err} . Al cumplirse:

$$\tau \leq 3 \tau_{err} \quad (3.17)$$

se considera que el retraso espectral es consistente con cero y por tanto, corresponde a un SGRBs. Si esto no se cumple, el valor de τ es significativo y se trataría de un LGRB, esto ya que los retrasos espectrales causados por el hecho de que los fotones de rayos gamma más suaves suelen llegar más tarde que los fotones duros, siempre son significativos en los GRB largos [44, 13].

Capítulo 4

Resultados

En la Figura 4.1 presentamos algunos de los parámetros más relevantes de la muestra analizada la cual contiene 285 *GRBs* del tercer catálogo de *Swift*-BAT.

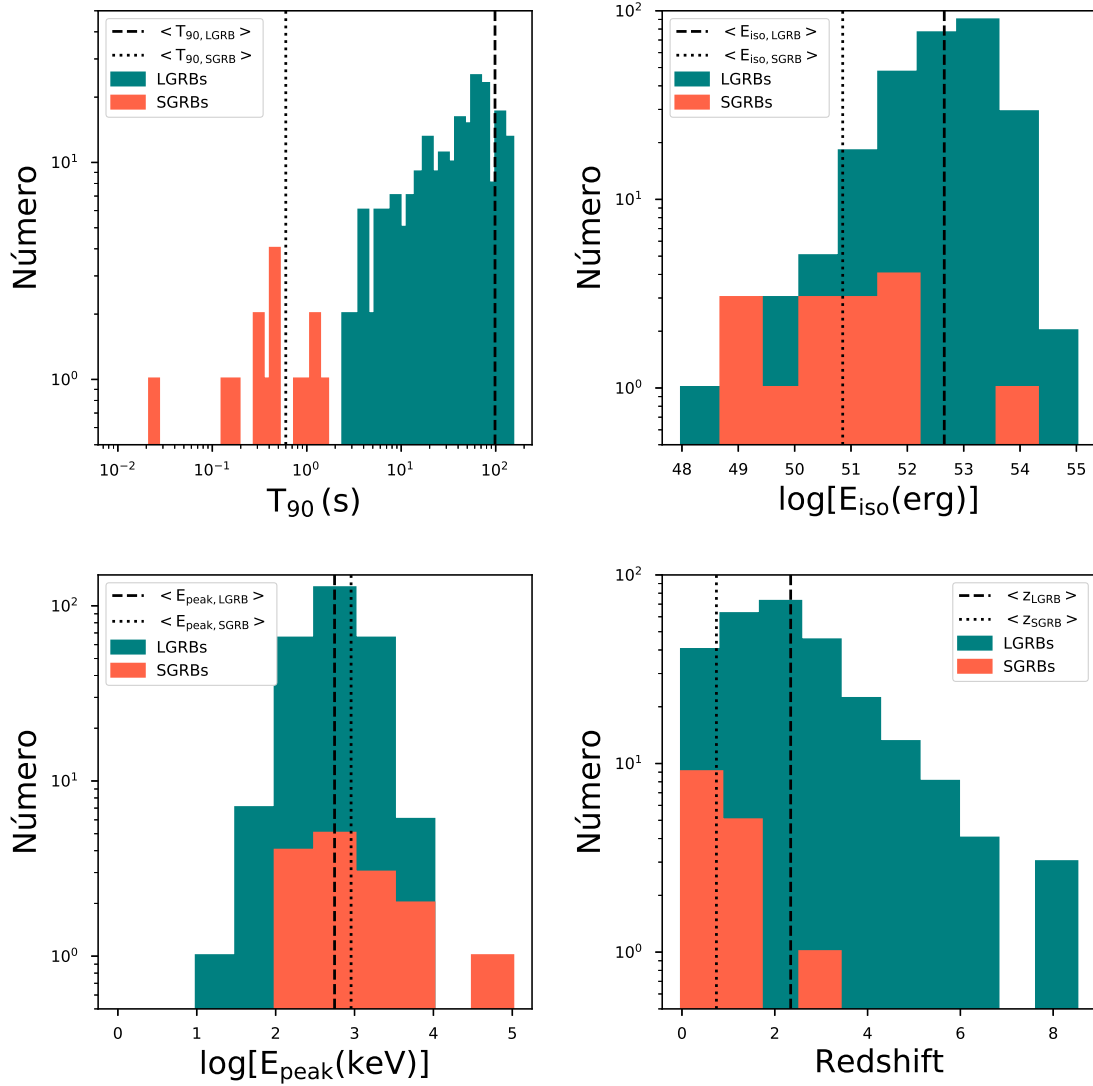


Figura 4.1: Histogramas del T_{90} , E_{iso} , E_{peak} y redshift z de la muestra analizada.

Los parámetros están diferenciados en dos poblaciones según el valor de la duración, los *SGRBs* ($T_{90} \leq 2$ s) en color naranja y los *LGRBs* ($T_{90} > 2$ s) en color verde. De forma general, comprobamos que el 9,23 % de los *GRBs* del tercer catálogo son cortos tal y como se indica en el reporte del tercer catálogo [35]. En el caso de la muestra con la que trabajamos, este porcentaje se redujo al 5,36 %.

La bimodalidad en la distribución de la duración podemos evidenciarla en el panel superior izquierdo de la 4.1. Este criterio es clave para la definición de dos poblaciones, a las que luego se asoció dos tipos de progenitores respectivamente.

En el **Anexo 2** se puede encontrar los histogramas de los parámetros más destacados para este trabajo, respecto a la población total de *GRBs* del tercer catálogo de Swif/BAT. También se evidencia la bimodalidad en la distribución.

4.1 Clasificación según T_{90} y H

El criterio de duración T_{90} es el eje central de la clasificación canónica de los *GRBs*. Según este parámetro, la muestra cuenta con 15 *SGRBs* y 270 *LGRBs*. Considerando la dureza H , la cual fue calculada a partir de la ecuación 3.1, obtuvimos el siguiente diagrama donde claramente se diferencia los eventos cortos de los largos.

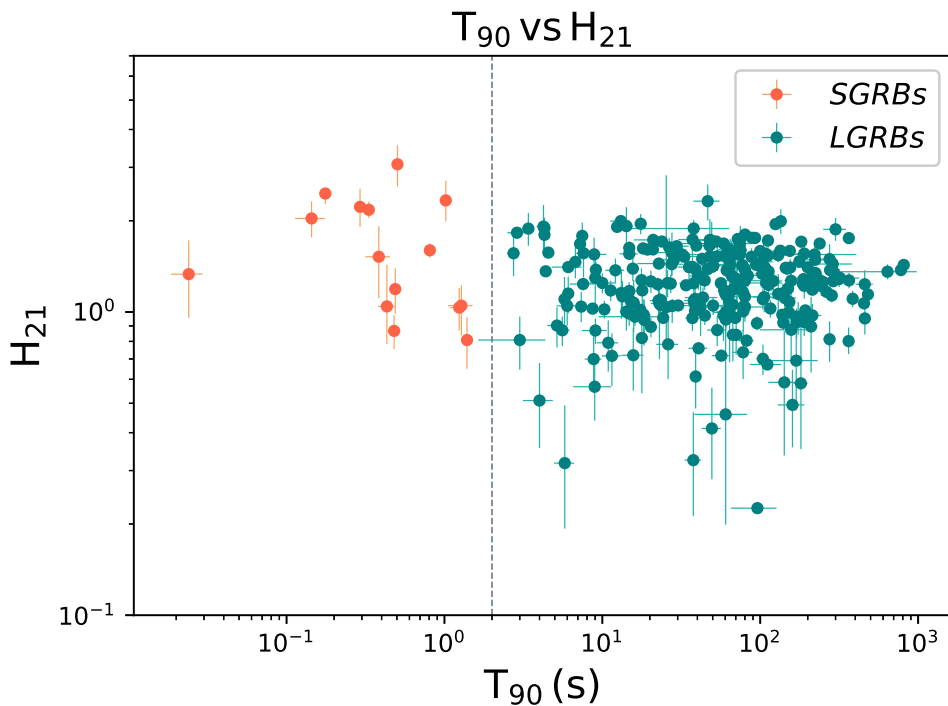


Figura 4.2: Diagrama duración y dureza. Los puntos naranjas y verdes representan los *GRB* cortos y largos, respectivamente; la línea discontinua separa los *GRB* largos y cortos a los 2 s. Todas las barras de error representan incertidumbres de 1σ .

Los valores medios de los parámetros T_{90} y H son $\langle T_{90} \rangle = 0,59$ s y $\langle H \rangle = 1,65$ para eventos cortos, y $\langle T_{90} \rangle = 98,36$ s y $\langle H \rangle = 1,26$ para eventos largos. La dureza en los *SGRBs* es mayor que en los *LGRBs* aunque no de forma tan marcada como en otros diagramas de este tipo.

4.2 Corrección a la energía de pico

Aplicando la correlación entre la energía de pico E_{peak} y el índice gamma Γ^{BAT} condensada en la ecuación 3.3, corregimos esta energía como se observa en el siguiente histograma.

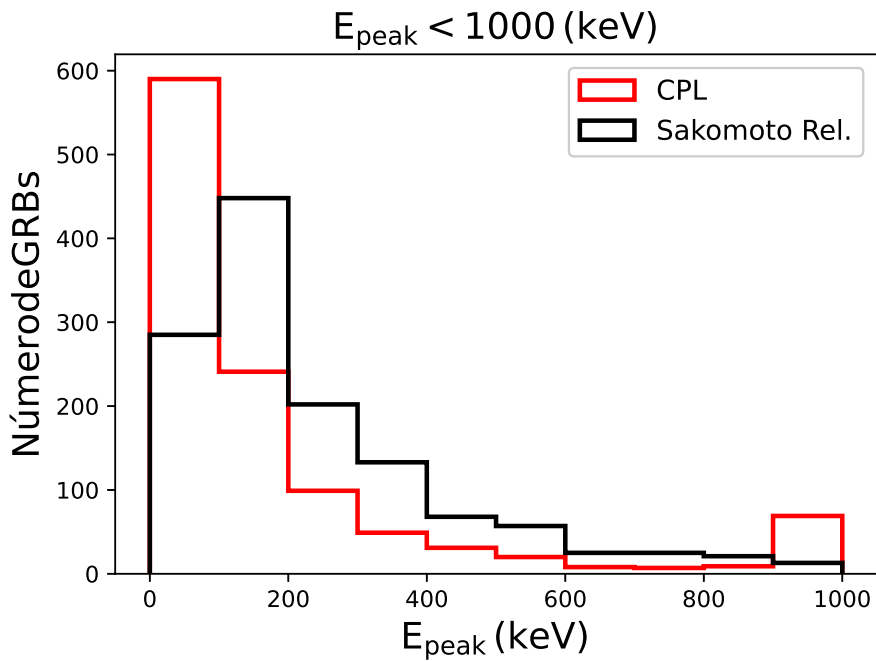


Figura 4.3: Corrección de E_{peak} a partir de la relación de Sakomoto [53] condensada en la ecuación 3.3, en contraste con $E_{peak,CPL}$.

Al comparar la energía de pico corregida con aquella reportada en el modelo *CPL*, evidenciamos una redistribución principalmente en las energías bajas de E_{peak} .

Respecto a si el E_{peak} calculado a partir del índice gamma Γ^{BAT} proviene de la misma distribución estadística que el E_{peak} obtenido de las detecciones de Fermi, corroboramos que esto es acertado. El resultado del K-S test al comparar las distribuciones de datos para E_{peak} corregido y el reportado por Fermi, arrojó un valor de distancia $D = 0,06$ y $p_{value} = 0,09$. Como $p_{value} > 0,05$, entonces no rechazamos la hipótesis nula H_0 . Esto quiere decir que los valores obtenidos para el E_{peak} son consistentes con los detectados por Fermi.

Por otro lado, al comparar la distribución de E_p de Fermi y la de *BAT* a partir del modelo *CPL*, obtuvimos $D = 0,23$ y $p_{value} = 4,88 \times 10^{-15}$. De esta forma, rechazamos la hipótesis nula, ya que $p_{value} \ll 0,05$, concluyendo así que los dos conjuntos de datos no provienen de la misma distribución.

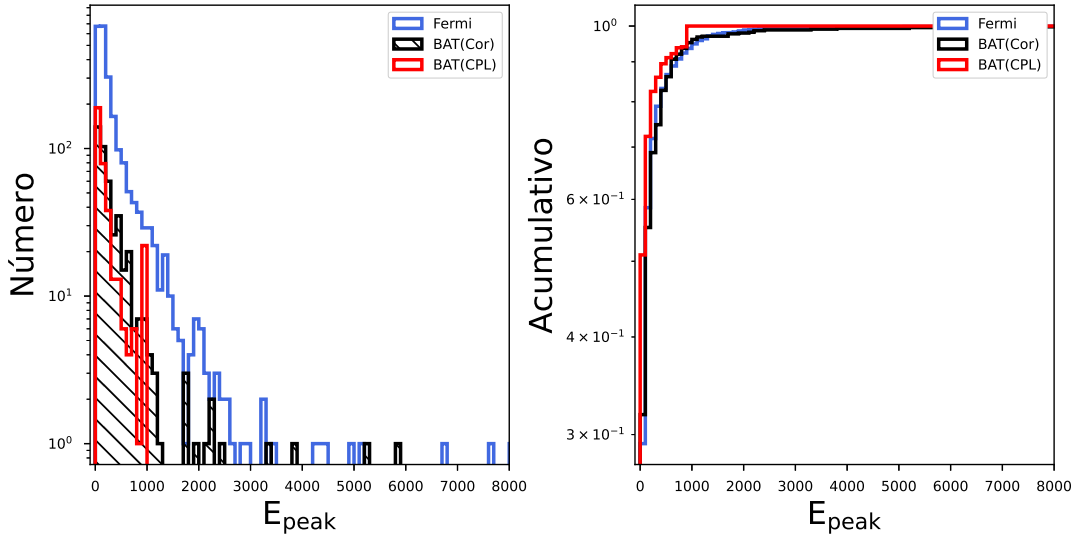


Figura 4.4: Derecha: Histograma de la corrección calculada para E_{peak} (negro), comparada con $E_{peak,CPL}$ (rojo) y $E_{peak,Fermi}$ (azul). Izquierda: Histograma acumulativo.

Los resultados anteriores se condensan en la Figura 4.4. La corrección para E_{peak} además de brindar valores más fiables y coherentes para esta energía, asegura que los valores de la energía isotrópica se encuentren dentro del rango esperado: $10^{48} - 10^{55}$ (*erg*). Cabe señalar que los histogramas anteriores ilustran la corrección de la energía de pico para la población total de *GRBs* del tercer catálogo. En particular, el histograma de la figura 4.3 señala esta corrección para valores de $E_{peak} < 1000$ *keV* y se lo ha presentado de esta forma para una mejor visualización de la corrección.

4.3 Relación de Amati

De forma general, los *GRB* largos y cortos siguen diferentes tendencias cuando se establece esta relación. Sin embargo, como observamos en la Figura 4.5, existen 8 *SGRBs* dentro de los límites de la región definida para los *LGRBs*. Tanto para las ráfagas cortas como para las largas, definimos una región de confianza del 68 % a partir de la matriz de covarianza obtenida al realizar la regresión lineal con el método *ODR*, el cual toma en cuenta los errores de la variable dependiente e independiente.

Los valores de energía isotrópica $E_{iso} > 10^{51}$ *erg* son relativamente altos para

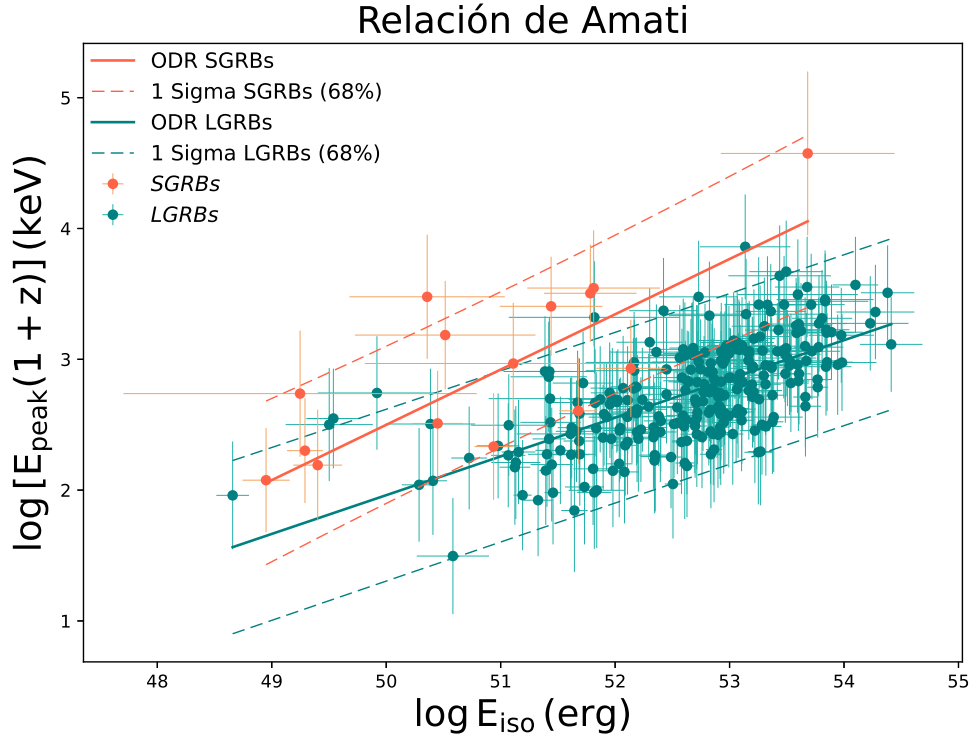


Figura 4.5: Diagrama de correlación $E_{p,z} - E_{iso}$ para los GRB cortos y largos de la muestra. Los límites discontinuos muestran la región 1σ para cada correlación mientras que la línea continua representa la línea de tendencia de la regresión.

aqueños típicamente observados en los SGRBs. En el diagrama anterior se aprecia 8 ráfagas cortas con un valor grande de E_{iso} , normalmente observado en las ráfagas largas. En contraste, un número similar de LGRBs poseen energías isotrópicas menores a las observadas en estas poblaciones.

Por otro lado, la correlación entre la energía isotrópica y la energía de pico se puede escribir también como $\log E_{p,z} = b + m \log E_{iso}$, donde $E_{p,z}$ es la energía de pico en el marco de reposo de la ráfaga. Con el fin de facilitar la obtención de un modelo lineal para los SGRBs y LGRBs, calculamos los logaritmos de las energías que intervienen en esta relación: $E_{p,z} = E_{peak}(1+z)$ y E_{iso} .

De esta forma, al realizar la regresión utilizando el método ODR, obtuvimos los siguientes parámetros correspondientes la línea de ajuste tanto para los SGRBs como para los LGRBs:

	Pendiente m	Corte con la absisa b
SGRBs	$0,42 \pm 0,09$	$-18,63 \pm 4,77$
LGRBs	$0,30 \pm 0,02$	$-12,85 \pm 1,07$

Cuadro 4.1: Parámetros óptimos de ajuste lineal en la Relación de Amati calculados por el método *ODR*.

Si tomamos como referencia el trabajo de Zhang donde se reporta el caso particular del GRB 200816A [63], los parámetros encontrados para las líneas de tendencia en la Relación de Amati son los siguientes: $m = 0,45^{+0,15}_{-0,18}$ y $b = -19,92^{+9,18}_{-7,60}$ para los *SGRBs*, mientras que para los *LGRBs* $m = 0,52^{+0,15}_{-0,07}$ y $b = -25,01^{+3,91}_{-4,25}$. Al comparar estos valores con aquellos obtenidos en el presente trabajo, nos percatamos que los *GRBs* cortos se encuentran dentro del rango establecido. Esto no ocurre con los *LGRBs*, sentando así una notoria diferencia en las tendencias de la Relación de Amati para las ráfagas largas, al utilizar datos de Fermi y Swift.

El criterio para escoger aquellos *SGRBs* dentro de la región de los *LGRBs* se basó en la inclusión de su error en esta región. Así, si el 50 % del error en $E_{peak,z}$ y E_{iso} para una ráfaga se sitúa en la región, consideramos que se trata de un *SGRB cuasipeculiar*. La decisión de inclusión dentro de dicha región la verificamos a través de una gráfica dinámica la cual se puede encontrar en el repositorio donde están almacenados todos los códigos elaborados para este trabajo.

4.4 Retraso espectral

Una vez identificados los 8 *SGRBs cuasipeculiares*, obtuvimos la curva de luz de estos eventos con el fin de calcular su retraso espectral. Ya que para el cálculo de este parámetro tomamos las dos bandas energéticas más lejanas, las cuales son 15 – 25 *keV* y 100 – 350 *keV*, la función cruzada de correlación *CCF* y el retraso espectral τ los denotamos como CCF_{41} y τ_{41} . En esta notación asumimos que a las bandas 25 – 50 *keV* y 50 – 100 *keV* les correspondería el número 2 y 3 respectivamente.

En el **Anexo 3** podemos visualizar las curvas de luz para estos 8 *GRBs* en sus 4 bandas energéticas. Calculamos la *CCF* limitando el tiempo en de las curvas de luz, para ello tomamos como cota el valor de T_{90} de cada evento. De esta forma nos aseguramos que al comparar las curvas de luz en dos bandas energéticas, no exista pérdida de información debido al ruido que puede presentarse posterior al pulso principal.

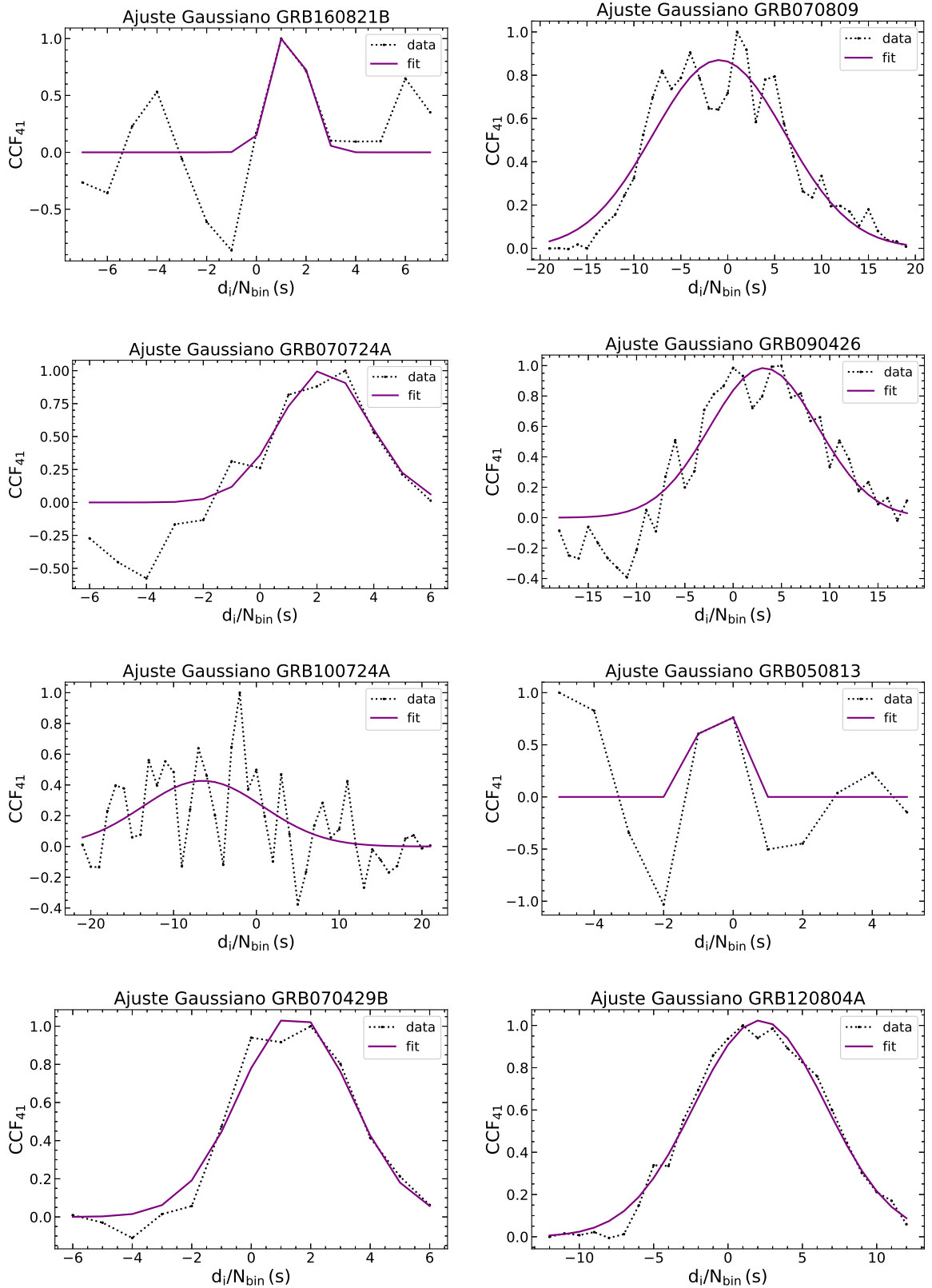


Figura 4.6: Ajustes gaussianos de la función de correlación cruzada CCF para los 8 GRBs cuasipeculiares.

Tras evaluar la *CCF* en las bandas energéticas mencionadas, obtuvimos un gráfico con los índices de desplazamiento y el valor de la *CCF* en cada uno de estos índices, como se muestra en la Figura 4.6. Delimitamos los índices de desplazamiento d_i , los cuales siempre son números enteros, de modo que se ha agrandado la región donde observamos una especie de campana. Para extraer el valor del retraso espectral es necesario conocer en qué valor de d_i ocurre el máximo de esta campana y para ello realizamos un ajuste gaussiano.

Por medio del ajuste obtuvimos los parámetros (A_G, μ_G, σ_G) de 3.16. El valor de la media es el que en definitiva da lugar al retraso espectral. Sin olvidar que trabajamos con curvas de luz con un valor de bin de 64 ms , el retraso espectral es igual a $\tau = \mu_G \times 64\text{ ms}$. Si este valor es consistente o no consistente con cero lo determinamos a partir de su error, tomando el criterio señalado en la parte final de la Metodología.

En el Cuadro 4.2 resumimos los valores de retraso espectral y sus errores.

Nombre	τ_{41} (ms)	τ_{41err} (ms)	τ_{41}/τ_{41err}
GRB160821B	80.8842	75.2079	1.0754
GRB070809	-60.2112	26.2144	-2.2963
GRB070724A	135.9872	20.8896	6.5489
GRB070429A	95.8464	27.4432	3.5046
GRB100724A	-81.1008	58.5728	-1.3793
GRB050813	-31.1296	673.06e3	-4.6257e-5
GRB090426	230.1952	34,816	6.5933
GRB120804A	138.4448	6.5536	20.6370

Cuadro 4.2: Valores de retraso espectral con su respectivo error y criterio para saber si el valor es consistente con cero.

Al analizar el error del retraso espectral identificamos 4 SGRBs con valores no consistentes con cero, esto ya que no cumplen con la condición descrita en el Capítulo 3. Como sabemos, se esperara que las ráfagas cortas tengan un valor de retraso espectral igual a cero. Sin embargo, los 4 SGRBs encontrados corresponden a los eventos *peculiares* que pretendimos encontrar mediante este trabajo.

Además, para el GRB 01608821B y el GRB 050813 el criterio para determinar si son o no consistentes con cero es muy pequeño comparado con el valor del criterio obtenido para otras ráfagas. Esto se debe a que en el ajuste gaussiano intervinieron pocos datos.

4.4.1 GRBs peculiares

Resumiendo el proceso anterior, después de determinar aquellos *GRBs cuasipe-*
*culi*ares a partir de la Relación de Amati, analizamos el valor de su retraso espectral. Encontramos que 4 de ellos son eventos *peculiares*, es decir que caen dentro de la región de los *LGRBs* en el diagrama de la Relación de Amati y poseen un valor de retraso espectral no consistente con cero.

En el Cuadro 4.3 reportamos valores de parámetros destacados para estas 4 ráfagas peculiares.

Name	TrigID	T_{90} (s)	H_{21}	z	$\log E_{\text{peak}}$ (keV)	$\log E_{\text{iso}}$ (erg)
GRB 070724A	285648	0.43	1.04	0.46	2.19	49.40
GRB 070429B	277582	0.49	1.19	0.90	2.51	50.45
GRB 090426	350479	1.24	1.03	2.61	2.61	51.68
GRB 120804A	529686	0.81	1.59	1.3	2.93	52.18

Cuadro 4.3: Información general de los *GRBs* peculiares.

Adicional a la información anterior, consultamos en la literatura información adicional para estos 4 eventos, haciendo énfasis en datos sobre su postluminiscencia y galaxia anfitriona. En el Cuadro 4.4 presentamos un breve resumen de lo encontrado.

Nombre	RA*	DEC*	SFR ($M_{\odot} \text{yr}^{-1}$)	Offset (")	$\tau \pm \tau_{\text{err}}$ (ms)	Ref
GRB070724A	27.8	-18.6	2.5	0.82 ± 0.01	-13 ± 261	[11]
GRB070429B	298	-32.4	1.1 ± 0.5	>0.6	-	[17]
GRB090426	189	32.9	14.4 ± 2.0	>0.2	-42 ± 178	[33, 7]
GRB120804A	234	-28.8	300	0.27 ± 0.15	27 ± 25	[12]

Cuadro 4.4: Información adicional de los *GRBs* peculiares encontrados.

Los parámetros presentados en el Cuadro 4.4 son la ascensión recta RA y declinación DEC, los equivalentes astronómicos de la longitud y latitud que, en lugar de proporcionar la posición en la Tierra, dan la posición de un objeto en la esfera celeste [36]. SFR se refiere a la tasa de formación de estrellas de la galaxia anfitriona, el Offset indica la ubicación relativa del GRB con respecto a la galaxia anfitriona [64]. Finalmente reportamos los valores de retraso espectral [61], con sus respectivos errores, consultados para los eventos peculiares que encontramos en este trabajo.

Capítulo 5

Conclusiones y Discusión

El método que desarrollamos en el presente trabajo para la búsqueda sistemática de GRBs tipo GRB 200826A, nos permitió encontrar 4 eventos peculiares, con duración de ráfagas típicamente cortas pero con características energéticas de LGRBs. Estas características se evidencian en dos puntos fundamentales, los cuales detallaremos a continuación.

El primer punto se centra en nuestro análisis de la energía isotrópica E_{iso} en función de la energía de pico E_{peak} , condensadas en la relación de Amati. Un indicio de GRBs a los que denominamos *cuasipeculiares*, lo evidenciamos al identificar los SGRBs en la región de confianza definida para los LGRBs, tal y como se observa en la Figura 4.5. Identificamos 8 SGRBs con un 50 % de error en E_{iso} y E_{peak} dentro de esta región de los LGRBs. El que cumplan con esta condición fue clave para la búsqueda de los GRBs peculiares.

En este punto debemos notar que, al considerar un mayor intervalo de confianza para las tendencias de los SGRBs y LGRBs en la Figura 4.5, aumentaría también el número de *GRBs cuasipeculiares*. El criterio para tomar una región de confianza al 68 % es suficiente para este trabajo ya que los errores para las energías no están tan constreñidos como en la muestra donde se analizó el GRB 200826A (comparar Figuras 2.10 y 4.5). En contraste, el trabajo antes mencionado tomó una región de $3 - \sigma$ como se observa en la Figura 2.10.

Debemos notar que para obtener la relación de Amati fue necesario realizar una corrección a la energía de pico. La correlación entre el índice gamma Γ^{BAT} y E_{peak} facilitó esta corrección, arrojando valores de E_{peak} similares a los detectados por *Fermi*. Esto lo confirmamos con la prueba K-S. Los valores que obtuvimos para E_{peak} fueron empleados en el cálculo de la energía isotrópica E_{iso} que interviene en la Relación de Amati.

El segundo punto clave que proponemos con la metodología desarrollada tiene que ver con el valor del retraso espectral. Recordemos que el retraso espectral lo calculamos a partir de la función de correlación cruzada *CCF*. Las bandas energéticas que consideramos en este trabajo fueron las dos más distantes en términos energéticos: $15 - 25 \text{ keV}$ y $100 - 350 \text{ keV}$. Para todos los GRBs de *Swift*/BAT las curvas de luz se presentan en 4 bandas energéticas como detallamos en el Capítulo 3 y observamos en el Anexo 2. Con esto en mente, una mejora en el cálculo del retraso espectral puede realizarse calculando la *CCF* para las distintas combinaciones de las bandas de energía, lo cual está más allá de los objetivos de este trabajo.

El resultado del retraso espectral para los 8 GRBs *cuasipeculiares* arrojó tanto valores positivos como negativos. Estos últimos, se explican ya que, al estar relacionado este parámetro con la evolución espectral de la ráfaga, el índice espectral α de baja energía en el modelo de Band evolucionaría de suave a duro, esto quiere decir que aumenta la proporción de fotones de baja energía respecto a los fotones de alta energía. Por otro lado, los ajustes gaussianos para el GRB 160821B y el GRB 050813 poseen una forma peculiar, no tan cercana a una campana, debido al poco número de puntos considerados para el cálculo de la *CCF*.

Dentro de los GRBs peculiares encontrados en este trabajo está el GRB 090426 y, tal como se vio en el Capítulo 2, corresponde en efecto a un evento peculiar [7, 33]. Considerando lo anterior y en particular el valor de retraso espectral reportado para el GRB 090426 (ver Cuadro 4.4), se podría pensar en un mejor cálculo del retraso espectral. Una estimación más robusta, considerando el corrimiento al rojo para las bandas energéticas de las curvas de luz, su binning y separación es posible, tal como se muestra en el artículo donde se presentan valores de retraso espectral para una muestra de SGRBs, considerando las bandas energéticas entre $15 - 70 \text{ keV}$ y $120 - 250 \text{ keV}$ [61].

Una pregunta válida es si se puede aplicar el mismo criterio que establecimos, respecto a la relación de Amati, para analizar aquellos LGRBs que se encuentran dentro de la región definida para los SGRBs en dicha relación. En efecto lo anterior lo podemos visualizar en la Figura 4.5. Sin duda esto va más allá del alcance de este trabajo. Para los LGRBs con comportamientos anómalos se analizó otras características. Por ejemplo, este es el caso del GRB 211211A descubierto por *Swift* en 2021 [50]. La identificación de una kilonova confirma que el progenitor de este estallido fue la fusión de objetos compactos.

A modo de resumen de la discusión anterior, la metodología que presentamos en este trabajo asegura la identificación de GRBs peculiares que son cortos en duración pero que de acuerdo a los pasos 1 y 2 muestran características de LGRBs. De hecho, es un abuso de lenguaje seguir con esta denominación la cual, como se ha evidenciado, tiende a que se sobrestime el origen de los GRBs.

En el caso de los 4 GRBs peculiares mencionados aquí, no es concluyente con certeza cuáles son los sus progenitores. Si bien las características que analizamos en este trabajo indican una posible consistencia con las propiedades de los LGRBs, esto no es un método que permita asegurar la asociación con los progenitores tradicionalmente asociados a las ráfagas largas. Es claro que, mientras más características de los GRBs entran en discusión, la clasificación canónica queda devaluada.

En efecto, para establecer si realmente estos GRBs tienen como progenitores a estrellas supermasivas, las cuales son asociados a LGRBs, es necesario analizar más información como del offset, el espectro en otras longitudes de onda de la postluminiscencia u otras características de la galaxia anfitriona. Sin embargo, el tratamiento que presentamos en este trabajo establece un primer paso importante de cómo buscar GRBs peculiares en grandes bases de datos.

Anexos

Anexo 1: Código para descargar las curvas de luz

```
import subprocess
import pandas as pd
import numpy as np
import os

#leemos el archivo amati_data.txt
datos = pd.read_csv('amati_data.txt',sep='\t')
#creamos 3 arreglos
GRB_names=np.array(datos['GRBname'])
number=np.array(datos['TrigID'])
t_90=np.array(datos['T90'])

N=len(datos)
#Creamos un vector con la misma longitud
number_ids=[0]*N
print(type(number_ids[1]))

for i in range (N):
    number_ids[i]=int(number[i])

print(type(number_ids[1]),number_ids[1])

def download_data(GRB_name,number_ids):
    #creamos la carpeta con el nombre del GRB
    command='mkdir '+str(GRB_name)
    proc = subprocess.run(command, stdout=subprocess.PIPE,shell=
    True)
```

```
os.chdir(str(GRB_name)+'/')
command='wget https://swift.gsfc.nasa.gov/results/batgrbcats/
'+str(GRB_name)+'/data_product/00'+str(number_ids)+'000-results/
lc/sw00'+str(number_ids)+'000b_4chan_64ms.lc'
proc = subprocess.run(command, stdout=subprocess.PIPE, shell=
True)
os.chdir('../')

for i in range (0,len(datos)):
    download_data(GRB_names[i],number_ids[i])
```

Anexo 2: Histogramas GRBs del tercer catálogo

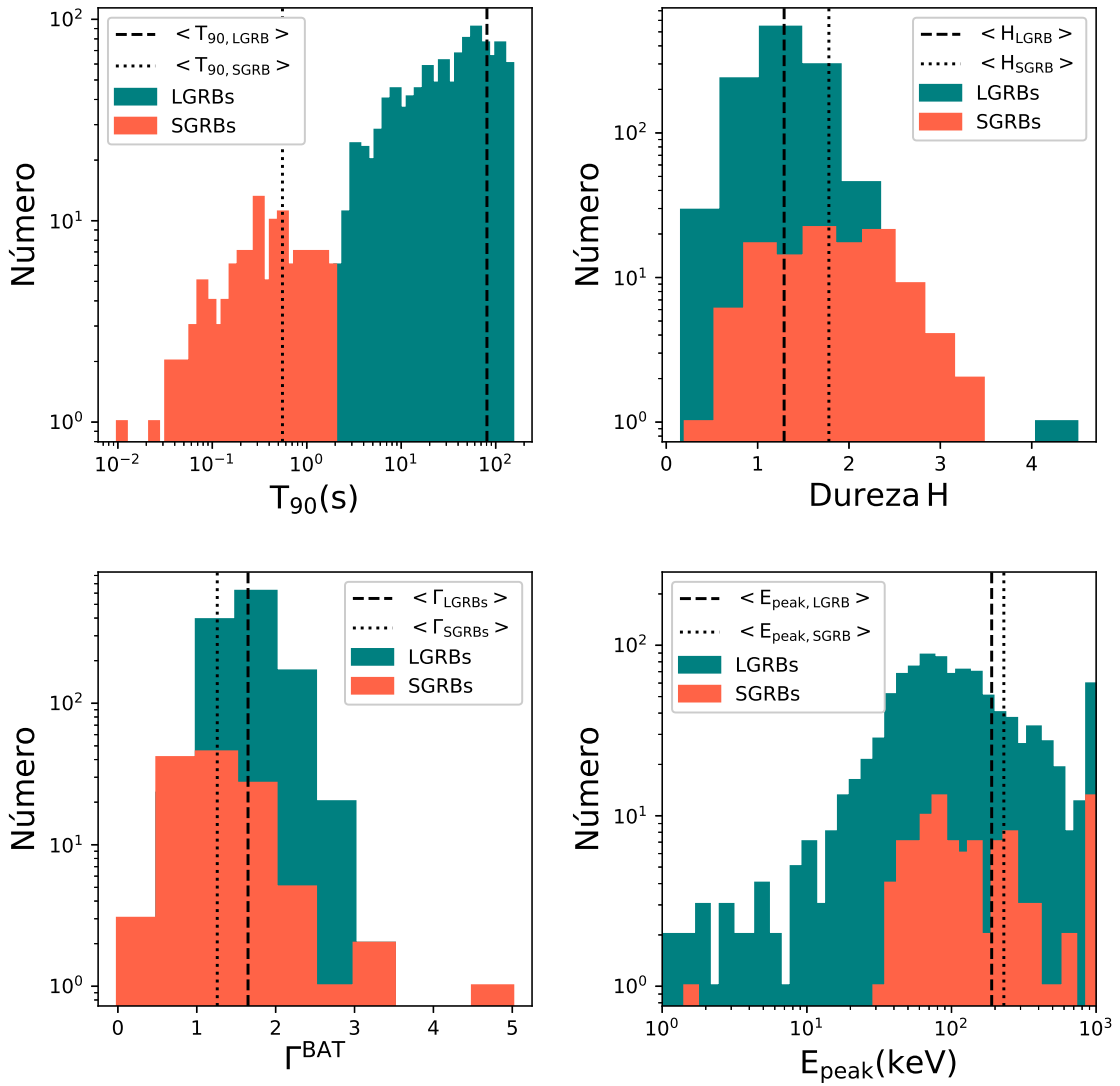


Figura 5.1: Histogramas de parámetros de los GRBs del tercer catálogo de Swift/-BAT.

Acompañando al histograma presentamos los valores medios de los parámetros tanto para las ráfagas cortas como para las largas. En el histograma superior izquierdo se evidencia la distribución bimodal de la duración. También se ha presentado el valor de la dureza (superior derecho), índice gamma (inferior izquierdo) y energía de pico (inferior derecho).

Anexo 3: Curvas de luz

Las curvas de luz para los 8 SGRBs *cuasipeculiares* se presentan a continuación.

GRB160821B

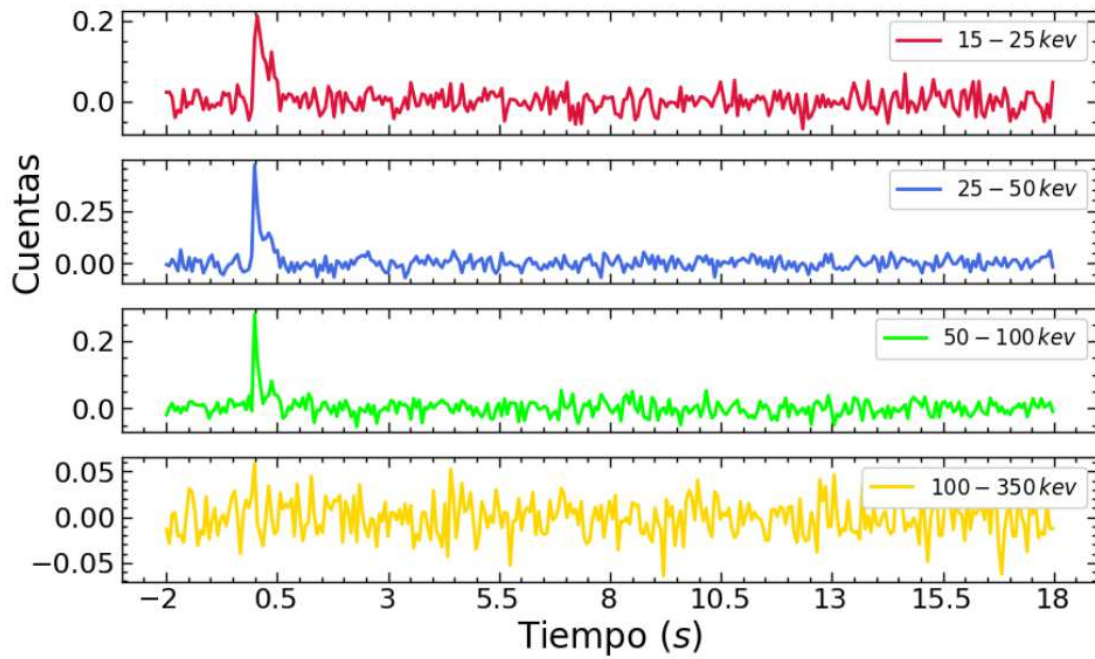


Figura 5.2: Curvas de luz GRB 160821B, $T_{90} = 0,48$ s.

GRB070809

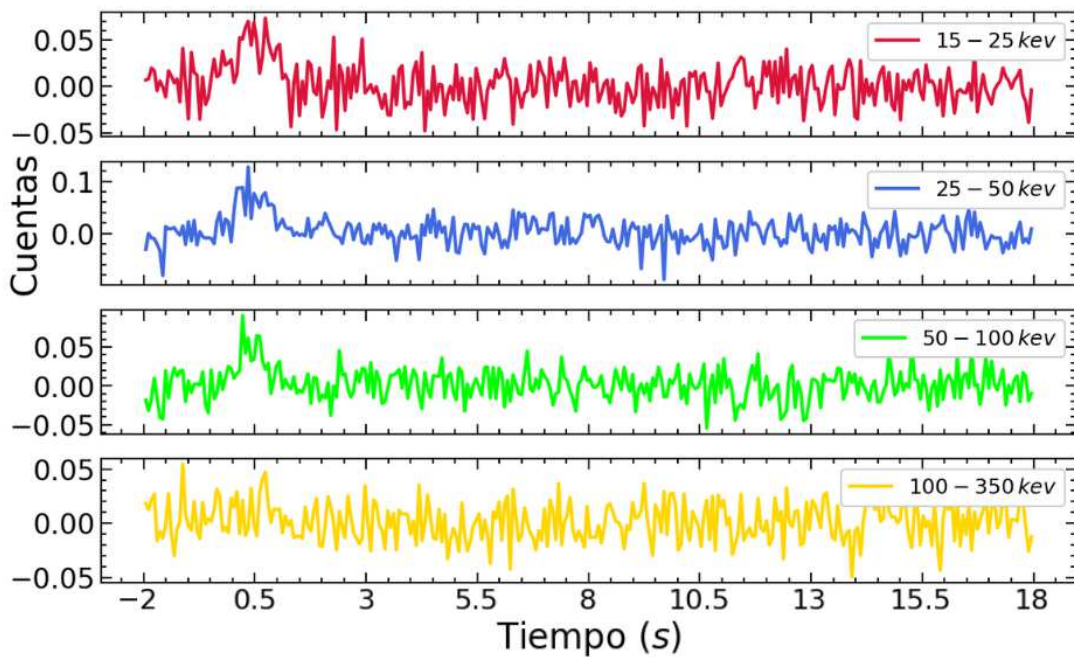


Figura 5.3: Curvas de luz GRB 070809, $T_{90} = 1,28$ s.

GRB070724A

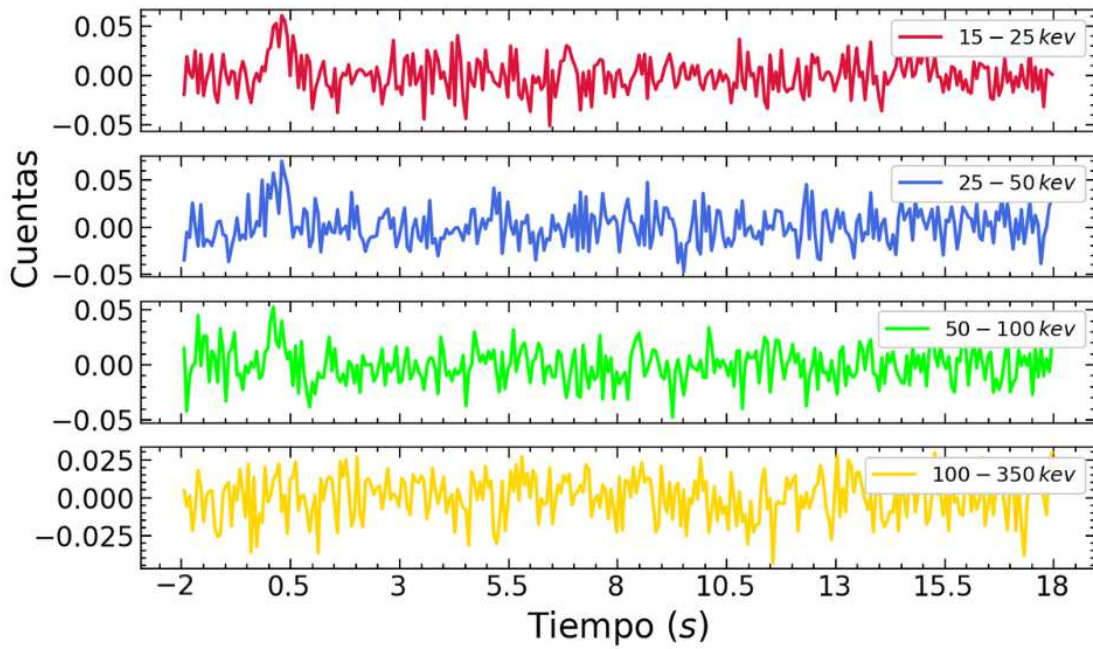


Figura 5.4: Curvas de luz GRB 070724A, $T_{90} = 0,43$ s.

GRB070429B

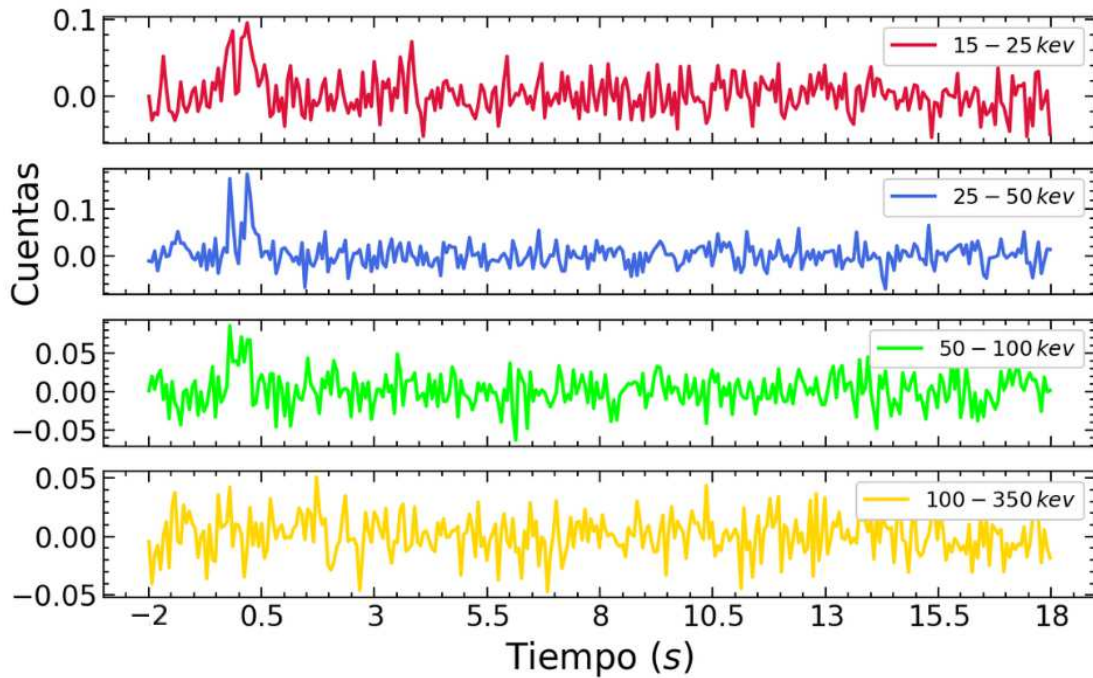


Figura 5.5: Curvas de luz GRB0 070429B, $T_{90} = 0,48$ s.

GRB100724A

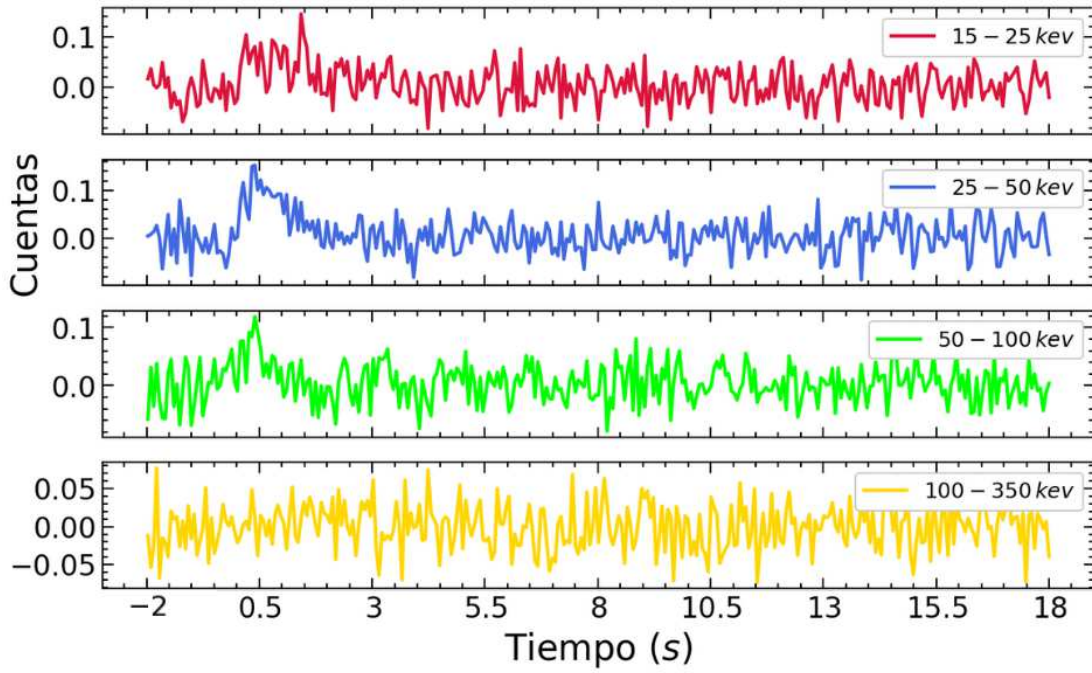


Figura 5.6: Curvas de luz GRB 100724A, $T_{90} = 1,39$ s.

GRB050813

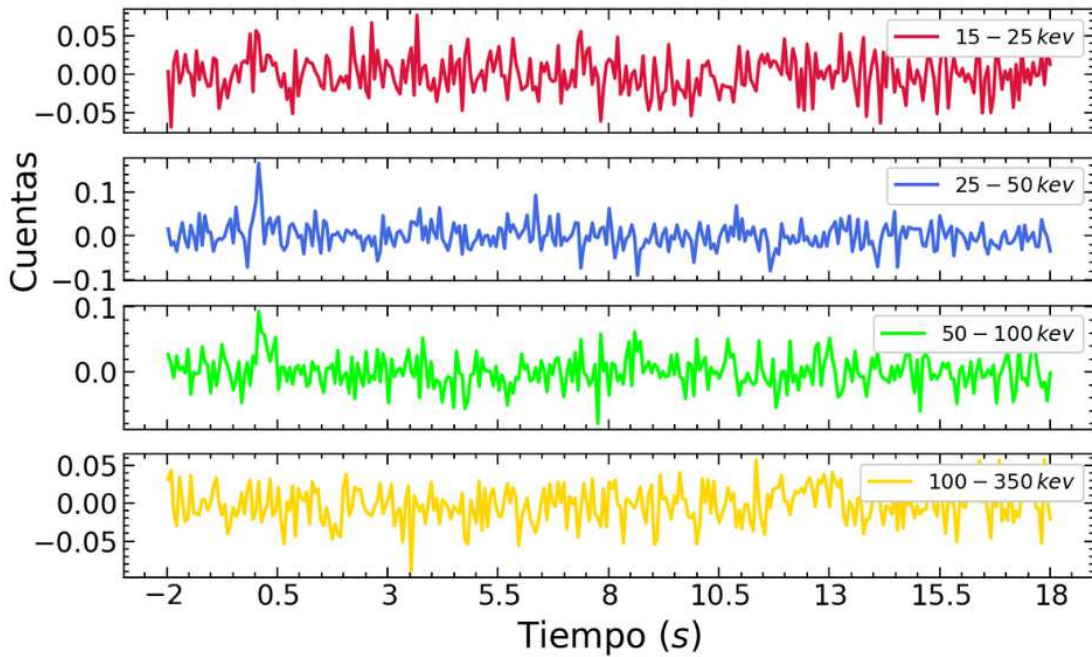


Figura 5.7: Curvas de luz GRB 050813, $T_{90} = 0,39$ s.

GRB090426

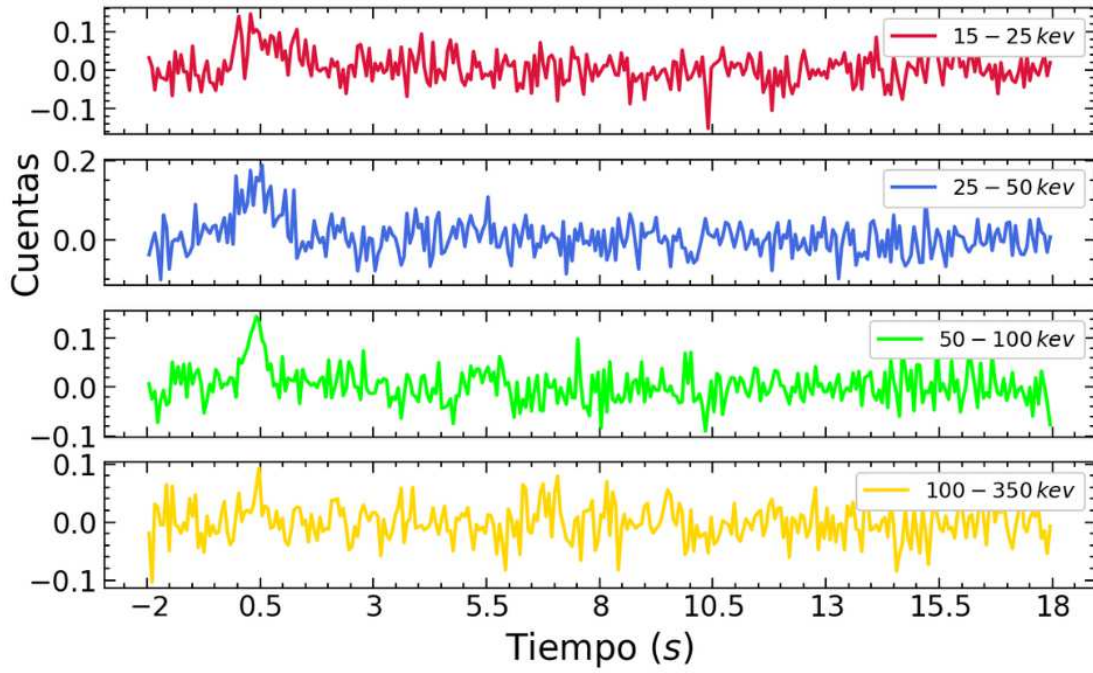


Figura 5.8: Curvas de luz GRB 090426, $T_{90} = 1,24$ s.

GRB120804A

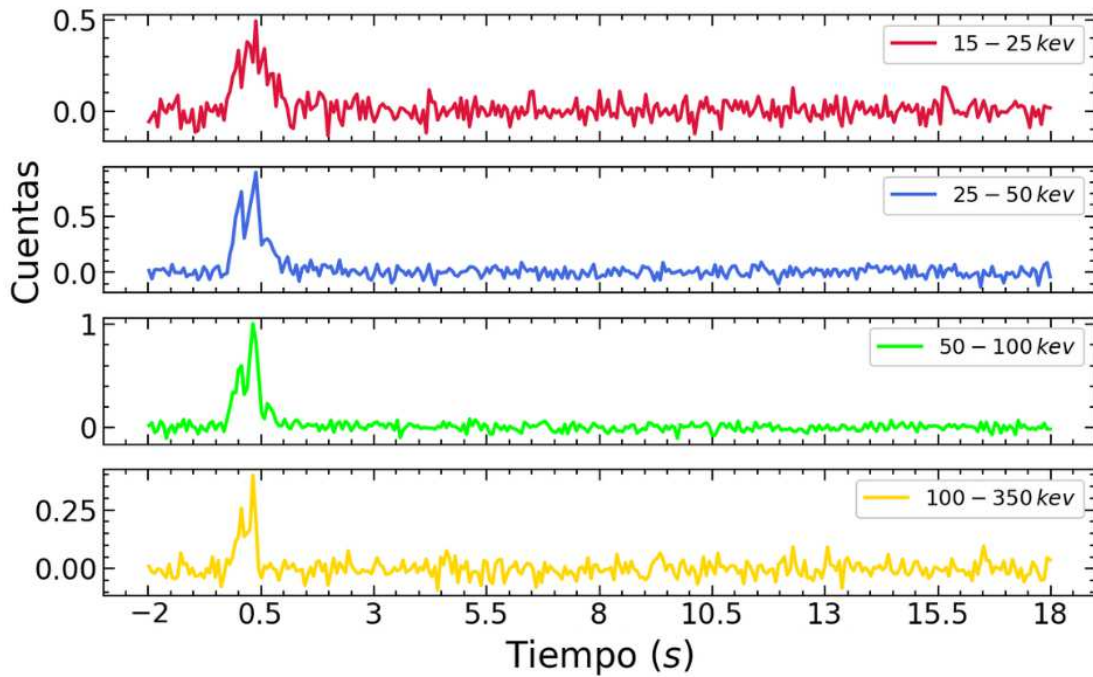


Figura 5.9: Curvas de luz GRB 120804A, $T_{90} = 0,81$ s.

Anexo 4: Información de la muestra

GRBname	TrigID	T ₉₀	T _{90err}	H	dH _{min}	dH _{max}	z	E _{peak}	E _{peak} ⁻	E _{peak} ⁺	E _{iso}	E _{iso} ⁻	E _{iso} ⁺
GRB200829A	993768	13.1	1.87	2.0	0.03	0.03	1.25	3.36	0.36	0.36	54.27	0.34	0.34
GRB200205B	954519	454.0	2.74	01.07	0.05	0.05	1.47	2.43	0.39	0.39	52.86	0.12	0.12
GRB191221B	945521	48.0	9.73	1.73	0.05	0.05	1.15	03.04	0.37	0.37	53.48	0.31	0.31
GRB191011A	928924	7.35	0.57	01.04	0.12	0.12	1.72	2.4	0.4	0.4	51.9	0.18	0.33
GRB191004B	927839	300.0	49.73	1.87	0.16	0.17	3.5	3.55	0.38	0.39	53.68	0.28	0.32
GRB190719C	915381	186.0	5.84	1.24	0.07	0.07	2.47	2.75	0.38	0.38	53.21	0.13	0.14
GRB190324A	894718	22.8	6.14	1.44	0.04	0.04	1.17	2.75	0.37	0.37	52.82	0.22	0.22
GRB190114A	883600	67.1	5.98	0.84	0.15	0.15	3.38	2.51	0.41	0.41	52.51	0.14	0.18
GRB190106A	882252	78.1	1.27	01.04	0.06	0.05	1.86	2.74	0.38	0.38	52.91	0.16	0.16
GRB181110A	871316	138.0	6.63	0.98	0.03	0.03	1.5	2.29	0.4	0.4	53.25	0.12	0.13
GRB181020A	867987	238.0	07.05	1.68	0.06	0.06	2.94	3.27	0.37	0.37	53.78	0.25	0.25
GRB181010A	866434	15.6	1.33	1.39	0.13	0.13	1.39	2.74	0.39	0.39	51.95	0.17	0.17
GRB180728A	850471	8.68	0.18	01.03	0.02	0.02	0.12	1.98	0.4	0.4	51.46	0.07	0.08
GRB180620B	843211	224.0	15.87	1.34	0.04	0.04	1.12	2.62	0.38	0.38	52.89	0.17	0.17
GRB180329B	819490	214.0	30.03	0.97	0.09	0.09	2.0	2.49	0.4	0.4	52.7	0.15	0.15
GRB180325A	817564	92.8	0.92	1.76	0.05	0.05	2.25	3.26	0.36	0.36	53.58	0.31	0.31
GRB180314A	814129	50.5	13.25	1.42	0.05	0.05	1.45	2.76	0.37	0.37	53.17	0.29	0.29
GRB171222A	799669	174.0	14.53	0.96	0.12	0.11	2.41	2.42	0.41	0.41	52.9	0.13	0.36
GRB171205A	794972	190.0	20.61	1.56	0.13	0.13	0.04	2.55	0.38	0.38	49.54	0.24	0.24
GRB170903A	770528	27.7	2.74	01.05	0.13	0.06	0.89	2.23	0.4	0.4	52.34	0.05	0.83
GRB170714A	762535	459.0	57.51	1.23	0.13	0.14	0.79	2.46	0.39	0.39	52.04	0.14	0.16
GRB170705A	760064	223.0	9.48	1.29	-	-	02.01	2.73	0.38	0.38	53.37	0.11	0.11
GRB170607A	756284	320.0	104.57	1.29	0.05	0.05	0.56	2.44	0.38	0.38	52.19	0.12	0.12
GRB170604A	755867	26.5	1.73	1.63	0.11	0.12	1.33	2.99	0.38	0.38	52.92	0.24	0.24
GRB170531B	755354	170.0	5.54	0.92	0.11	0.1	2.37	2.49	0.4	0.4	52.6	0.12	0.13
GRB170202A	736407	37.8	7.11	1.24	0.05	0.05	3.65	2.88	0.38	0.38	53.3	0.14	0.14
GRB170113A	732526	20.3	2.63	1.26	0.11	0.11	1.97	2.78	0.38	0.38	52.16	0.3	0.3
GRB161014A	717500	23.0	2.72	01.07	0.37	0.18	2.82	03.03	0.38	0.39	52.71	0.25	0.24
GRB160821B	709357	0.48	0.04	0.87	0.11	0.11	0.16	02.08	0.4	0.4	48.95	0.21	0.21
GRB160804A	707231	153.0	11.67	01.08	0.03	0.03	0.74	2.25	0.39	0.39	52.49	0.1	0.1
GRB160227A	676423	316.0	46.08	1.3	0.09	0.09	2.38	2.86	0.38	0.38	53.0	0.3	0.3
GRB160203A	672525	17.4	1.39	01.02	-	-	3.52	2.61	0.41	0.41	52.83	0.2	0.34
GRB160117B	670800	11.5	1.59	0.72	0.15	0.13	0.87	1.96	0.42	0.42	51.19	0.08	0.33
GRB151215A	667392	17.8	0.61	0.82	0.28	0.24	2.59	2.47	0.43	0.43	51.84	0.16	0.25
GRB151029A	662086	8.95	2.41	0.57	0.13	0.13	1.42	2.15	0.42	0.42	51.39	0.06	0.07
GRB151027B	661869	80.0	21.76	1.12	0.19	0.21	04.06	2.77	0.42	0.41	53.07	0.19	0.28
GRB150910A	655097	112.0	22.19	1.54	0.11	0.12	1.36	2.89	0.38	0.38	52.85	0.21	0.21
GRB150821A	652847	169.0	62.01	0.69	0.22	0.23	0.76	2.21	0.43	0.43	51.13	0.21	0.22
GRB150413A	637899	244.0	24.8	1.23	0.11	0.11	3.14	2.81	0.39	0.39	53.31	0.13	0.15
GRB150403A	637044	37.3	7.11	1.73	0.04	0.04	02.06	3.21	0.36	0.36	53.89	0.28	0.28
GRB150323A	635887	150.0	5.54	1.19	0.05	0.05	0.59	2.34	0.39	0.39	52.09	0.1	0.11
GRB150314A	634795	14.8	1.6	0.99	0.09	0.08	1.76	3.37	0.36	0.36	53.36	0.31	0.33
GRB150206A	630019	75.0	7.72	1.6	0.05	0.05	02.09	03.06	0.37	0.37	53.72	0.25	0.25
GRB141220A	621915	7.23	0.29	1.68	0.09	0.1	1.32	2.98	0.37	0.37	52.73	0.41	0.41
GRB141121A	619182	481.0	23.16	1.14	0.11	0.11	1.47	2.52	0.39	0.39	52.7	0.14	0.15
GRB141109A	618024	200.0	29.24	1.4	0.05	0.05	2.99	2.97	0.38	0.38	53.54	0.15	0.15
GRB140907A	611933	80.0	21.76	1.27	0.05	0.05	1.21	2.57	0.38	0.38	52.59	0.14	0.14
GRB140710A	603954	3.0	1.36	0.81	0.16	0.16	0.56	02.07	0.41	0.41	50.41	0.12	0.14

GRB140629A	602884	38.3	07.05	01.07	0.08	0.08	2.27	2.55	0.39	0.39	52.71	0.12	0.13
GRB140614A	601646	77.4	9.67	1.42	0.13	0.16	4.23	3.1	0.39	0.39	52.97	0.17	0.16
GRB140518A	599287	60.5	1.51	0.94	0.09	0.09	4.71	2.76	0.4	0.4	52.84	0.14	0.14
GRB140515A	599037	23.4	1.24	01.05	0.1	0.1	6.33	2.97	0.39	0.39	52.84	0.18	0.18
GRB140512A	598819	154.0	2.83	1.59	0.03	0.04	0.72	2.81	0.37	0.37	52.78	0.21	0.21
GRB140506A	598284	111.0	5.81	1.36	0.13	0.14	0.89	2.6	0.39	0.39	52.15	0.18	0.16
GRB140423A	596901	134.0	14.04	1.59	0.05	0.05	3.26	3.2	0.37	0.37	53.85	0.24	0.24
GRB140419A	596426	80.1	2.3	1.8	0.04	0.04	3.96	3.51	0.36	0.36	54.38	0.23	0.23
GRB140331A	594081	210.0	19.94	0.9	0.26	0.23	4.65	2.69	0.42	0.42	52.7	0.2	0.34
GRB140318A	592204	7.6	0.78	1.56	0.26	0.28	01.02	2.87	0.42	0.42	51.42	0.33	0.32
GRB140311A	591390	70.5	4.61	1.22	0.18	0.19	4.95	2.95	0.41	0.41	53.31	0.15	0.21
GRB140304A	590206	14.8	0.85	1.63	0.08	0.08	5.28	3.42	0.37	0.37	53.33	0.32	0.32
GRB140213A	586569	59.9	1.65	1.15	0.03	0.03	1.21	2.43	0.39	0.39	53.03	0.09	0.09
GRB140206A	585834	94.2	11.19	1.43	0.03	0.03	2.73	2.94	0.37	0.37	53.84	0.22	0.22
GRB140114A	583861	140.0	9.67	0.92	0.05	0.05	3.0	2.45	0.4	0.4	53.22	0.13	0.15
GRB131117A	577968	10.9	1.71	0.79	0.16	0.15	04.04	2.78	0.4	0.4	52.07	0.29	0.29
GRB131103A	576562	15.2	1.84	01.08	0.14	0.14	0.6	2.29	0.4	0.4	51.16	0.15	0.16
GRB131030A	576238	39.4	2.23	1.66	0.03	0.03	1.29	2.99	0.37	0.37	53.67	0.25	0.25
GRB130907A	569992	364.0	3.31	1.75	0.02	0.03	1.24	3.11	0.36	0.36	54.41	0.27	0.27
GRB130831A	568849	30.2	1.42	01.05	0.03	0.03	0.48	2.14	0.39	0.39	52.08	0.13	0.11
GRB130701A	559482	4.38	0.15	1.36	0.04	0.04	1.16	2.63	0.38	0.38	52.54	0.26	0.26
GRB130612A	557976	4.0	0.86	0.51	0.15	0.17	02.01	2.39	0.42	0.41	51.42	0.15	0.15
GRB130610A	557845	47.7	6.51	1.66	0.08	0.08	02.09	3.14	0.37	0.37	53.04	0.3	0.3
GRB130606A	557589	277.0	11.92	1.37	0.1	0.11	5.91	3.2	0.38	0.38	53.58	0.18	0.18
GRB130603B	557310	0.18	0.01	2.46	0.19	0.09	0.36	3.5	0.37	0.37	51.78	0.4	0.42
GRB130528A	556870	640.0	340.46	1.36	0.08	0.08	1.25	2.68	0.38	0.38	52.77	0.15	0.15
GRB130514A	555821	214.0	10.52	1.18	0.03	0.04	3.6	2.79	0.39	0.39	53.77	0.09	0.1
GRB130511A	555600	2.74	0.24	1.56	0.25	0.27	1.3	2.91	0.42	0.42	51.39	0.24	0.23
GRB130427B	554635	25.9	3.63	1.25	0.13	0.13	2.78	2.83	0.39	0.39	52.72	0.21	0.21
GRB130418A	553847	275.0	23.89	0.81	0.13	0.12	1.22	2.2	0.41	0.41	52.04	0.12	0.16
GRB130408A	553132	4.24	0.41	1.91	0.33	0.34	3.76	3.5	0.42	0.42	53.6	0.52	0.58
GRB130215A	548760	66.2	6.51	1.31	0.11	0.12	0.6	2.47	0.39	0.39	52.05	0.2	0.2
GRB130131B	547420	4.3	0.16	1.8	0.22	0.25	2.54	3.37	0.4	0.4	52.42	0.3	0.32
GRB121229A	544347	111.0	25.11	0.67			2.71	2.27	0.45	0.44	52.35	0.14	0.37
GRB121217A	542441	778.0	9.79	1.38	0.06	0.07	3.1	2.95	0.38	0.38	53.52	0.14	0.14
GRB121209A	540964	42.9	0.87	1.5	0.07	0.07	2.1	2.97	0.37	0.37	52.94	0.22	0.22
GRB121201A	540178	38.0	05.02	01.09	0.11	0.12	3.38	2.66	0.4	0.4	52.71	0.23	0.27
GRB121128A	539866	23.4	1.0	1.1	0.03	0.03	2.2	2.53	0.39	0.39	53.11	0.11	0.11
GRB121027A	536831	80.1	24.8	01.04	0.09	0.06	1.77	2.51	0.39	0.39	52.54	0.12	0.12
GRB120923A	534402	26.1	4.15	0.78	0.18	0.18	7.84	03.03	0.41	0.41	52.61	0.31	0.31
GRB120922A	534394	168.0	17.75	0.96	0.05	0.05	3.1	2.52	0.4	0.4	53.37	0.1	0.1
GRB120909A	533060	221.0	185.43	1.55	0.09	0.09	3.93	3.23	0.37	0.38	53.85	0.2	0.2
GRB120907A	532871	06.08	0.48	1.15	0.16	0.16	0.97	2.52	0.4	0.4	51.44	0.26	0.26
GRB120811C	530689	24.3	1.86	0.96	0.03	0.03	2.67	2.48	0.4	0.4	52.92	0.08	0.08
GRB120805A	530031	48.0	13.74	1.73	0.29	0.3	3.1	3.34	0.42	0.43	53.14	0.66	0.7
GRB120804A	529686	0.81	0.05	1.6	0.09	0.09	1.3	2.93	0.37	0.37	52.14	0.3	0.3
GRB120802A	529486	50.3	18.85	01.05	0.07	0.07	3.8	2.72	0.39	0.39	52.93	0.13	0.14
GRB120724A	528443	77.9	11.31	0.74	0.14	0.14	1.48	1.98	0.43	0.43	51.82	0.15	0.17

GRB120714B	526642	157.0	14.59	1.27	0.15	0.15	0.4	2.5	0.39	0.39	51.07	0.33	0.33
GRB120712A	526351	14.8	1.97	1.56	0.07	0.08	4.17	3.25	0.37	0.37	53.3	0.28	0.28
GRB120521C	522656	27.1	2.64	1.24	0.09	0.09	5.93	03.06	0.39	0.39	53.17	0.15	0.15
GRB120404A	519380	38.7	2.49	1.1	0.09	0.09	2.88	2.62	0.4	0.4	52.92	0.24	0.2
GRB120401A	519043	130.0	14.71	1.15	0.19	0.19	4.5	2.9	0.41	0.4	52.81	0.19	0.2
GRB120327A	518731	63.5	4.27	1.4	0.05	0.05	2.81	2.95	0.38	0.38	53.2	0.17	0.17
GRB120326A	518626	69.5	4.97	0.96	0.04	0.04	1.8	2.37	0.4	0.4	52.58	0.09	0.09
GRB120211A	514586	64.3	5.37	1.45	0.21	0.22	2.4	03.01	0.4	0.4	52.56	0.42	0.43
GRB120119A	512035	68.0	4.3	1.55	0.03	0.03	1.73	2.96	0.37	0.37	53.59	0.21	0.21
GRB120118B	512003	20.3	1.64	0.89	0.07	0.07	2.94	2.45	0.4	0.4	52.83	0.11	0.13
GRB111229A	510736	25.4	3.39	01.04	0.28	1.79	1.38	2.43	0.43	0.43	51.61	0.47	0.43
GRB111225A	510341	106.0	15.93	1.12	0.12	0.12	0.3	2.25	0.39	0.39	50.72	0.16	0.16
GRB111209A	509337	811.0	31.67	1.43	0.02	0.02	0.68	2.62	0.37	0.37	53.07	0.16	0.16
GRB111123A	508319	290.0	53.56	1.26	-	-	3.15	2.83	0.38	0.38	53.6	0.1	0.1
GRB111008A	505054	62.8	1.37	1.13	0.06	0.06	4.99	2.84	0.39	0.39	53.77	0.12	0.12
GRB110818A	500914	103.0	10.94	1.34	0.09	0.09	3.36	2.94	0.38	0.38	53.37	0.14	0.15
GRB110808A	458918	40.7	5.49	0.76	-	-	1.35	2.2	0.44	0.43	51.45	0.18	0.42
GRB110801A	458521	385.0	5.43	1.11	0.07	0.07	1.86	2.52	0.39	0.39	52.95	0.11	0.12
GRB110726A	458059	5.16	0.67	0.9	0.14	0.13	01.04	2.34	0.4	0.4	50.98	0.19	0.19
GRB110503A	452685	58.7	28.57	1.68	0.07	0.07	1.61	03.08	0.37	0.37	53.49	0.3	0.3
GRB110205A	444643	249.0	9.12	1.26	0.03	0.03	2.22	2.71	0.38	0.38	53.66	0.11	0.11
GRB110128A	443861	14.2	1.51	1.92	0.27	0.3	2.34	3.48	0.43	0.43	52.73	0.34	0.45
GRB110106B	441676	43.4	10.09	1.12	0.09	0.09	0.62	2.27	0.39	0.39	51.69	0.13	0.14
GRB101219B	440635	41.9	3.55	01.04	0.21	0.2	0.55	2.3	0.41	0.41	51.52	0.22	0.22
GRB100905A	433442	3.4	0.31	1.88	0.23	0.24	7.88	3.86	0.4	0.4	53.14	0.4	0.41
GRB100816A	431764	2.88	0.38	1.83	0.07	0.07	0.8	03.06	0.37	0.37	52.36	0.4	0.4
GRB100814A	431605	177.0	6.57	1.47	0.03	0.04	1.44	2.82	0.37	0.37	53.11	0.19	0.19
GRB100728B	430172	12.1	1.67	1.37	0.12	0.13	2.11	2.83	0.39	0.39	52.64	0.18	0.18
GRB100728A	430151	193.0	6.44	01.01	0.05	0.04	1.57	3.27	0.36	0.36	53.61	0.29	0.29
GRB100724A	429868	1.39	0.09	0.81	0.16	0.15	1.29	2.33	0.41	0.41	50.94	0.17	0.17
GRB100625A	425647	0.33	0.02	2.17	0.13	0.14	0.45	3.41	0.38	0.38	51.44	0.45	0.48
GRB100621A	425151	63.6	01.04	01.08	0.02	0.02	0.54	2.18	0.39	0.39	52.63	0.07	0.07
GRB100615A	424733	38.8	0.5	1.1	0.03	0.03	1.4	2.4	0.39	0.39	52.76	0.08	0.09
GRB100513A	421814	83.5	13.13	1.32	0.11	0.12	4.77	03.05	0.39	0.39	53.17	0.15	0.14
GRB100508A	421386	49.3	4.52	1.72	0.25	0.27	0.52	2.91	0.41	0.41	51.43	0.4	0.44
GRB100425A	420398	39.0	1.4	0.61	0.13	0.17	1.75	02.02	0.44	0.44	51.73	0.17	0.23
GRB100424A	420367	104.0	8.88	1.1	0.08	0.09	2.46	2.59	0.39	0.39	52.72	0.14	0.16
GRB100316A	416076	6.75	0.58	1.46	0.17	0.18	3.15	03.04	0.39	0.39	52.67	0.25	0.25
GRB100302A	414592	17.9	1.0	1.18	0.15	0.16	4.81	2.92	0.4	0.4	52.45	0.16	0.17
GRB100219A	412982	27.6	5.26	1.57	0.25	0.26	4.67	3.33	0.41	0.41	52.82	0.36	0.37
GRB100117A	382941	0.29	0.02	2.22	0.32	0.33	0.92	3.54	0.44	0.45	51.81	0.58	0.72
GRB091208B	378559	14.8	02.04	1.17	0.08	0.08	01.06	2.43	0.39	0.39	52.34	0.11	0.13
GRB091029	374210	39.2	2.95	01.06	0.04	0.04	2.75	2.58	0.39	0.39	52.92	0.1	0.1
GRB091024	373674	112.0	8.39	1.72	-	-	01.09	03.06	0.37	0.37	52.93	0.27	0.27
GRB091020	373458	38.9	2.97	1.38	0.05	0.05	1.71	2.78	0.38	0.38	52.86	0.15	0.15
GRB090814A	359951	78.1	4.85	01.01	0.14	0.14	0.7	2.27	0.4	0.4	51.4	0.17	0.17
GRB090809A	359530	8.87	1.74	1.55	0.25	0.21	2.74	3.13	0.41	0.41	52.3	0.29	0.29

GRB090726	358422	56.7	7.42	0.72	-	-	2.71	2.26	0.42	0.42	52.35	0.13	0.15
GRB090709A	356890	88.7	0.68	1.76	0.03	0.03	1.8	3.18	0.36	0.36	53.98	0.29	0.29
GRB090618	355083	113.0	0.35	1.36	0.02	0.02	0.54	2.49	0.38	0.38	53.32	0.14	0.14
GRB090530	353567	40.5	4.78	1.31	0.13	0.13	1.27	2.67	0.39	0.39	52.01	0.23	0.23
GRB090529A	353540	70.4	6.26	0.84	0.12	0.11	2.62	2.48	0.4	0.4	52.34	0.12	0.13
GRB090429B	350854	5.58	0.6	0.87	0.1	0.09	9.38	03.02	0.4	0.4	52.72	0.17	0.17
GRB090426	350479	1.24	0.15	01.03	0.17	0.17	2.61	2.61	0.41	0.4	51.68	0.17	0.18
GRB090424	350311	49.5	1.38	1.41	0.03	0.03	0.54	2.54	0.37	0.37	52.62	0.2	0.2
GRB090423	350184	10.3	0.64	01.02	0.07	0.07	8.26	03.04	0.39	0.39	52.97	0.19	0.19
GRB090407	348650	315.0	33.98	1.28	-	-	1.45	2.62	0.42	0.41	52.19	0.26	0.2
GRB090404	348428	82.0	8.82	0.8	0.04	0.04	2.87	2.29	0.41	0.41	53.27	0.11	0.22
GRB090205	342121	8.81	01.08	0.7	0.16	0.15	4.65	2.66	0.41	0.41	51.95	0.13	0.14
GRB090201	341749	74.3	01.02	1.55	0.04	0.04	2.1	2.98	0.37	0.37	53.98	0.3	0.3
GRB090113	339852	9.1	0.55	1.38	0.07	0.08	1.75	2.79	0.38	0.38	52.19	0.15	0.15
GRB090102	338895	28.3	1.43	1.6	0.08	0.09	1.55	2.99	0.37	0.37	53.16	0.23	0.23
GRB081230	338633	60.7	8.15	1.0	0.11	0.11	02.03	2.46	0.4	0.4	52.23	0.14	0.16
GRB081222	337914	33.0	2.43	1.52	0.03	0.03	2.77	03.06	0.37	0.37	53.42	0.22	0.22
GRB081221	337889	33.9	0.56	1.23	0.02	0.02	2.26	2.64	0.38	0.38	53.66	0.14	0.14
GRB081203A	336489	223.0	54.72	1.49	0.05	0.05	02.05	2.95	0.37	0.37	53.36	0.17	0.17
GRB081121	335105	17.5	1.22	1.95	0.15	0.15	2.51	3.46	0.38	0.38	53.83	0.42	0.43
GRB081118	334877	53.4	7.36	0.87	0.1	0.1	2.58	2.38	0.41	0.41	52.63	0.13	0.22
GRB081109A	334112	221.0	35.87	1.3	0.07	0.07	0.98	2.56	0.38	0.38	52.38	0.14	0.15
GRB081029	332931	275.0	29.79	1.49	0.17	0.18	3.85	3.17	0.39	0.39	53.27	0.26	0.27
GRB081028A	332851	284.0	18.54	1.13	0.06	0.06	03.04	2.71	0.39	0.39	53.2	0.13	0.13
GRB081008	331093	188.0	23.22	1.28	0.05	0.05	1.97	2.73	0.38	0.38	52.96	0.16	0.16
GRB080916A	324895	61.3	04.06	1.37	0.04	0.04	0.69	2.56	0.38	0.38	52.11	0.21	0.21
GRB080913	324561	7.46	0.46	1.78	0.19	0.19	6.73	3.64	0.38	0.39	53.44	0.45	0.46
GRB080906	323984	148.0	11.92	1.39	0.07	0.07	2.13	2.86	0.38	0.38	53.01	0.17	0.17
GRB080905B	323898	121.0	17.08	1.27	0.11	0.12	2.37	2.75	0.39	0.39	52.77	0.18	0.15
GRB080905A	323870	01.02	0.05	2.33	0.35	0.37	0.12	3.48	0.47	0.48	50.36	0.68	0.84
GRB080805	319036	107.0	9.67	1.4	-	-	1.5	2.76	0.38	0.38	52.61	0.14	0.14
GRB080804	319016	37.9	25.78	1.89	0.11	0.12	2.2	3.42	0.37	0.37	53.48	0.31	0.32
GRB080605	313299	18.1	0.54	1.62	0.03	0.03	1.64	03.01	0.37	0.37	53.51	0.25	0.25
GRB080604	313116	77.6	08.03	1.17	0.15	0.14	1.42	2.58	0.39	0.39	51.9	0.19	0.19
GRB080603B	313087	59.1	0.99	1.18	0.04	0.04	2.69	2.71	0.38	0.38	52.9	0.16	0.16
GRB080602	312958	74.3	4.34	1.67	0.13	0.14	1.82	3.1	0.38	0.38	53.07	0.36	0.36
GRB080517	311874	64.5	13.56	1.43	0.3	0.31	0.09	2.5	0.43	0.43	49.5	0.38	0.39
GRB080516	311762	5.76	0.14	1.1	0.19	0.2	3.2	2.69	0.41	0.41	52.11	0.18	0.27
GRB080413A	309096	46.4	0.29	1.38	0.04	0.04	2.43	2.89	0.38	0.38	53.09	0.15	0.15
GRB080411	309010	56.3	0.56	1.24	0.02	0.02	01.03	2.5	0.38	0.38	53.28	0.09	0.09
GRB080330	308041	60.4	22.13	0.46	0.26	0.55	1.51	1.84	0.48	0.46	51.64	0.12	1.67
GRB080319C	306778	29.6	5.72	1.65	0.07	0.07	1.95	3.11	0.37	0.37	53.11	0.3	0.3
GRB080319B	306757	125.0	1.88	1.95	0.02	0.02	0.94	3.27	0.36	0.36	54.23	0.33	0.33
GRB080310	305288	363.0	10.27	0.8	0.07	0.09	2.43	2.27	0.41	0.41	52.84	0.09	0.2
GRB080207	302728	292.0	4.86	1.35	0.05	0.05	02.09	2.81	0.38	0.38	53.2	0.19	0.19
GRB071227	299787	142.0	29.43	0.59	0.25	0.28	0.38	02.04	0.44	0.43	50.29	0.15	0.2
GRB071122	297114	71.4	8.45	1.28	0.24	0.26	1.14	2.58	0.42	0.42	51.69	0.18	0.21

GRB071117	296805	06.08	1.31	1.41	0.05	0.05	1.33	2.73	0.38	0.38	52.45	0.21	0.21
GRB071031	295670	181.0	18.42	0.58	0.23	0.4	2.69	2.21	0.43	0.43	52.61	0.08	0.37
GRB071025	295301	241.0	21.76	1.22	0.04	0.04	5.2	2.96	0.38	0.38	53.94	0.09	0.1
GRB071020	294835	4.3	0.35	1.89	0.03	0.05	2.15	3.42	0.36	0.36	53.25	0.3	0.3
GRB070810A	287364	09.04	1.63	0.87	0.09	0.08	2.17	2.37	0.4	0.4	52.11	0.11	0.12
GRB070809	287344	1.28	0.23	01.05	0.21	0.17	0.22	2.3	0.4	0.4	49.29	0.16	0.19
GRB070802	286809	15.8	1.52	01.07	0.22	0.21	2.45	2.67	0.41	0.41	51.83	0.2	0.22
GRB070724A	285948	0.43	0.05	01.04	0.26	0.39	0.46	2.19	0.43	0.42	49.4	0.21	0.21
GRB070714B	284856	65.6	5.78	1.53	0.18	0.19	0.92	2.82	0.39	0.39	51.72	0.27	0.27
GRB070612A	282066	365.0	31.43	1.27	0.07	0.07	0.62	2.44	0.38	0.38	52.4	0.14	0.14
GRB070611	282003	13.2	2.11	1.16	0.21	0.2	02.04	2.69	0.41	0.41	51.87	0.28	0.28
GRB070529	280706	109.0	12.58	1.55	0.15	0.16	2.5	03.08	0.39	0.39	53.05	0.21	0.22
GRB070521	279935	38.6	1.45	01.01	0.06	0.05	02.09	03.07	0.37	0.37	53.09	0.26	0.26
GRB070508	278854	20.9	0.45	1.61	0.02	0.02	0.82	2.83	0.37	0.37	53.08	0.23	0.23
GRB070506	278693	5.99	0.86	01.05	0.15	0.14	2.31	2.67	0.4	0.4	51.67	0.24	0.24
GRB070429B	277582	0.49	0.03	1.19	0.2	0.2	0.9	2.51	0.4	0.4	50.45	0.22	0.22
GRB070420	276321	77.0	3.33	1.43	0.04	0.05	03.01	2.98	0.37	0.37	53.85	0.22	0.22
GRB070419B	276212	238.0	8.69	1.27	0.03	0.04	1.96	2.69	0.38	0.38	53.26	0.1	0.1
GRB070419A	276205	160.0	30.76	0.49	0.14	0.15	0.97	1.92	0.43	0.43	51.33	0.13	0.16
GRB070328	272773	72.1	5.16	1.74	0.04	0.04	02.06	3.22	0.36	0.36	53.62	0.27	0.27
GRB070318	271019	130.0	17.51	1.54	0.08	0.08	0.84	2.79	0.37	0.37	52.18	0.22	0.22
GRB070306	263361	209.0	39.27	1.29	-	-	1.5	2.65	0.38	0.38	52.91	0.11	0.12
GRB070224	261880	48.0	21.76	-	-	-	1.99	2.16	0.43	0.43	51.81	0.17	0.3
GRB070208	259714	64.0	13.74	1.0	0.31	0.25	1.17	2.27	0.44	0.43	51.62	0.16	0.36
GRB070129	258408	460.0	15.32	0.95	0.11	0.1	2.34	2.44	0.4	0.4	52.92	0.15	0.19
GRB070103	254532	18.4	0.74	0.94	0.17	0.16	2.62	2.56	0.41	0.4	51.92	0.16	0.18
GRB061222B	252593	37.2	3.68	0.95	0.09	0.09	3.35	2.58	0.4	0.4	52.96	0.11	0.12
GRB061222A	252588	100.0	7.42	1.59	0.04	0.04	02.09	03.07	0.37	0.37	53.47	0.21	0.21
GRB061126	240766	52.6	6.57	1.71	0.05	0.05	1.16	03.04	0.37	0.37	52.99	0.26	0.26
GRB061110B	238174	135.0	10.7	1.99	0.18	0.19	3.43	3.67	0.39	0.39	53.49	0.32	0.37
GRB061110A	238108	44.5	3.59	1.27	0.09	0.09	0.76	2.48	0.39	0.39	51.62	0.12	0.14
GRB060927	231362	22.4	0.72	1.24	0.06	0.06	5.46	03.08	0.38	0.38	53.08	0.26	0.26
GRB060923A	230662	58.5	4.33	0.98	0.17	0.17	2.47	2.64	0.41	0.4	52.29	0.27	0.27
GRB060908	228581	19.3	0.79	1.61	0.06	0.06	1.88	03.05	0.37	0.37	52.97	0.32	0.32
GRB060906	228316	44.6	1.57	0.97	0.07	0.07	3.69	2.6	0.4	0.4	53.11	0.11	0.12
GRB060904B	228006	190.0	12.89	1.22	0.11	0.11	0.7	2.45	0.39	0.39	51.66	0.18	0.18
GRB060904A	227996	80.1	1.35	1.38	0.03	0.03	2.55	2.89	0.38	0.38	53.49	0.13	0.13
GRB060814	224552	145.0	2.93	1.4	0.03	0.03	1.92	2.82	0.37	0.37	53.54	0.16	0.16
GRB060801	222154	0.5	0.04	03.07	0.48	0.48	1.13	4.57	0.61	0.64	53.68	0.76	1.12
GRB060729	221755	113.0	13.44	1.23	0.1	0.1	0.54	2.38	0.39	0.39	51.69	0.14	0.14
GRB060719	220020	66.9	07.05	01.06	0.07	0.07	1.53	2.4	0.39	0.39	52.33	0.12	0.13
GRB060714	219101	116.0	5.45	01.03	0.07	0.07	2.71	2.57	0.39	0.39	52.99	0.11	0.12
GRB060708	217805	10.0	2.23	1.25	0.09	0.1	1.92	2.7	0.39	0.39	51.98	0.18	0.18
GRB060707	217704	66.6	3.88	1.18	0.1	0.1	3.42	2.85	0.39	0.39	52.87	0.31	0.31
GRB060607A	213823	103.0	17.08	1.46	0.06	0.07	03.07	03.06	0.37	0.37	53.16	0.23	0.23
GRB060605	213630	79.8	04.03	1.3	0.17	0.17	3.77	03.03	0.39	0.39	52.67	0.29	0.29
GRB060602A	213180	74.8	7.9	1.74	0.18	0.18	0.79	2.98	0.39	0.39	52.17	0.42	0.43

GRB060522	211117	69.1	3.59	1.29	0.13	0.13	5.11	3.13	0.39	0.39	53.07	0.32	0.32
GRB060510B	209352	263.0	5.49	1.17	0.05	0.05	4.94	2.89	0.39	0.39	53.61	0.1	0.11
GRB060505	208654	4.0	-60.19	1.72	0.32	0.33	0.09	2.74	0.43	0.43	49.92	0.52	0.56
GRB060502B	208275	0.14	0.03	02.04	0.27	0.28	0.29	3.19	0.41	0.42	50.52	0.79	0.84
GRB060502A	208169	28.4	5.99	1.49	0.07	0.07	1.5	2.86	0.37	0.37	52.58	0.25	0.25
GRB060428B	207399	96.0	30.76	0.23	-	-	0.35	1.5	0.44	0.44	50.58	0.32	0.32
GRB060418	205851	109.0	28.39	1.25	0.04	0.04	1.49	2.59	0.38	0.38	53.06	0.11	0.12
GRB060306	200638	60.9	02.04	1.14	0.07	0.07	1.56	2.53	0.39	0.39	52.4	0.15	0.15
GRB060223A	192059	11.3	0.65	1.18	0.09	0.09	4.41	2.92	0.39	0.39	52.66	0.2	0.2
GRB060210	180977	288.0	92.41	1.44	0.08	0.08	3.91	03.09	0.38	0.38	53.78	0.22	0.22
GRB060206	180455	7.55	1.33	1.24	0.06	0.06	04.06	2.92	0.38	0.38	52.75	0.19	0.19
GRB060124	178750	13.4	0.78	1.13	0.13	0.14	2.3	2.59	0.4	0.4	52.19	0.21	0.24
GRB060116	177533	105.0	16.6	1.54	0.17	0.18	6.6	3.42	0.39	0.39	53.71	0.29	0.3
GRB060115	177408	139.0	9.24	1.15	0.09	0.09	3.53	2.83	0.39	0.39	52.93	0.2	0.2
GRB060108	176453	14.2	1.3	1.0	0.14	0.1	02.03	2.39	0.4	0.4	52.2	0.12	0.72
GRB051117B	164279	09.02	0.8	1.3	0.27	0.28	0.48	2.51	0.42	0.42	50.39	0.39	0.39
GRB051111	163438	64.0	9.73	1.61	0.06	0.06	1.55	3.0	0.37	0.37	52.96	0.26	0.26
GRB051109B	163170	15.7	2.5	0.72	0.17	0.17	0.08	1.96	0.41	0.41	48.66	0.14	0.15
GRB051109A	163136	37.2	3.69	1.41	0.19	0.19	2.35	2.9	0.4	0.4	52.85	0.33	0.33
GRB051008	158855	12.4	0.83	1.91	0.06	0.06	2.77	3.44	0.36	0.36	53.84	0.38	0.38
GRB051006	158593	35.4	5.43	1.41	0.14	0.16	01.06	2.69	0.39	0.39	52.02	0.17	0.17
GRB051001	157870	190.0	13.92	0.93	0.09	0.09	2.43	2.43	0.4	0.4	52.71	0.14	0.16
GRB050922C	156467	4.55	0.27	1.57	0.05	0.05	2.2	03.05	0.37	0.37	52.79	0.25	0.25
GRB050922B	156434	157.0	57.45	0.87	0.17	0.17	4.5	2.56	0.42	0.42	53.39	0.25	0.46
GRB050915A	155242	53.4	6.87	1.53	0.16	0.17	2.53	03.08	0.39	0.39	52.6	0.3	0.3
GRB050908	154112	18.3	1.99	0.98	0.12	0.12	3.35	2.69	0.4	0.4	52.24	0.17	0.17
GRB050904	153514	182.0	9.91	1.71	0.06	0.07	6.29	3.57	0.37	0.37	54.1	0.2	0.2
GRB050822	151486	104.0	9.61	0.7	0.08	0.08	1.43	02.05	0.42	0.42	52.51	0.07	0.23
GRB050819	151131	37.7	4.46	0.32	0.11	0.14	2.5	2.0	0.44	0.44	51.84	0.25	0.26
GRB050814	150314	143.0	25.35	1.11	0.13	0.13	5.3	2.93	0.4	0.4	53.2	0.2	0.2
GRB050813	150139	0.38	0.07	1.52	0.41	0.4	0.72	2.97	0.46	0.47	51.11	1.3	1.39
GRB050803	148833	88.1	6.2	1.52	0.09	0.1	3.5	3.16	0.38	0.38	53.21	0.18	0.18
GRB050802	148646	27.5	4.96	1.44	0.13	0.13	1.71	2.84	0.38	0.38	52.63	0.21	0.21
GRB050730	148225	155.0	11.31	1.4	0.08	0.09	3.97	03.07	0.38	0.38	53.29	0.14	0.14
GRB050726	147788	46.5	8.75	2.32	0.32	0.31	0.16	3.32	0.43	0.43	51.82	0.75	0.86
GRB050714B	145994	49.4	6.87	0.41	0.13	0.15	2.44	2.15	0.43	0.43	51.98	0.13	0.14
GRB050603	131560	21.0	5.16	1.73	0.08	0.09	2.82	3.31	0.37	0.37	53.81	0.26	0.27
GRB050509B	118749	0.02	0.01	1.33	0.38	0.39	0.22	2.74	0.48	0.48	49.25	1.54	1.77
GRB050505	117504	58.9	4.16	1.53	0.12	0.12	4.27	3.22	0.38	0.38	53.43	0.29	0.29
GRB050502B	116116	17.7	1.16	1.27	0.12	0.12	5.2	03.09	0.39	0.39	52.68	0.21	0.21
GRB050406	113872	5.78	0.85	0.32	0.12	0.17	2.7	2.18	0.44	0.44	51.12	0.13	0.15
GRB050401	113120	32.1	0.35	1.55	0.08	0.08	2.9	3.1	0.37	0.37	53.66	0.24	0.24
GRB050319	111622	152.0	6.44	1.0	0.13	0.13	3.24	2.59	0.4	0.4	52.82	0.16	0.2
GRB050318	111529	16.1	6.63	0.97	0.06	0.06	1.44	2.39	0.39	0.39	51.97	0.13	0.13
GRB050315	111063	95.4	8.51	0.92	0.05	0.05	1.95	2.31	0.4	0.4	52.86	0.07	0.12
GRB050223	106709	22.7	2.72	01.09	0.12	0.12	0.58	2.27	0.4	0.4	51.07	0.15	0.16
GRB050219A	106415	23.8	1.37	1.71	0.06	0.06	0.21	2.7	0.37	0.37	51.43	0.54	0.54

GRB050126	103780	48.0	13.74	1.52	0.17	0.17	1.29	2.91	0.39	0.39	52.17	0.42	0.43
-----------	--------	------	-------	------	------	------	------	------	------	------	-------	------	------

Cuadro 5.1: Cuadro resumen de los parámetros más importantes de la muestra de 285 *GRBs* analizados

En negrita se encuentran aquellos *SGRBs* en la relación de Amati que aparecen en la región de los *LGRBs* de este diagrama. En total son 8.

Se debe señalar que los errores de cada parámetro se encuentran al 68 % de confianza y fueron calculados tomando en cuenta la ecuación 3.2 para la propagación de los mismos.

Bibliografía

- [1] Ahumada, T., Singer, L., Anand, S., y et al. Discovery and confirmation of the shortest gamma-ray burst from a collapsar. *Nature Astronomy*, 5(9):917–927, jul 2021.
- [2] Ahumada, T., Anand, S., Stein, R., Kumar, H., Sagues Carracedo, A., Andreoni, I., Coughlin, M., Singer, L., Kasliwal, M., Perley, D., Cenko, B., Bhalerao, V., y Kaplan, D. GRB200826A: Zwicky Transient Facility Identifies Optical Afterglow Candidate of a Fermi Short GRB (Trigger 620108997). *GRB Coordinates Network*, 28295:1, August 2020.
- [3] Ajello, M., Arimoto, M., Axelsson, M., Baldini, L., Barbiellini, G., y et al. A Decade of Gamma-Ray Bursts Observed by Fermi-LAT: The Second GRB Catalog. *The Astrophysical Journal*, 878(1):52, jun 2019.
- [4] Amati, L. The ep,i -eiso correlation in gamma-ray bursts: updated observational status, re-analysis and main implications. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 372(1):233–245, oct 2006.
- [5] Amati, L., Frontera, F., Tavani, M., Zand, J., Antonelli, A., Costa, E., Feroci, M., Guidorzi, C., Heise, J., Masetti, N., Montanari, E., Nicastro, L., Palazzi, E., Pian, E., Piro, L., y Soffitta, P. Intrinsic spectra and energetics of bepposax gamma-ray bursts with known redshifts. *Astronomy & Astrophysics*, 390(1):81–89, jul 2002.
- [6] Amati, L. To be short or long is not the question. *Nature Astronomy*, 5:877–878, July 2021.
- [7] Antonelli, L. A., D’Avanzo, P., Perna, R., Amati, L., Covino, S., Cutini, S., D’Elia, V., Gallozzi, S., Grazian, A., Palazzi, E., Piranomonte, S., Rossi, A., Spiro, S., Stella, L., Testa, V., Chincarini, G., Di Paola, A., Fiore, F., Fugazza, D., Giallongo, E., Maiorano, E., Masetti, N., Pedichini, F., Salvaterra, R., Tagliaferri, G., y Vergani, S. Grb426: the farthest short gamma-ray burst? *A&A*, 507, 2009.

- [8] Band, D., Matteson, J., Ford, L., Schaefer, B., Palmer, D., Teegarden, B., Cline, T., Briggs, M., Paciesas, W., Pendleton, G., Fishman, G., Kouveliotou, C., Meegan, C., Wilson, R., y Lestrade, P. BATSE Observations of Gamma-Ray Burst Spectra. I. Spectral Diversity. *Astrophysical Journal*, 413:281, August 1993.
- [9] Barthelmy, S., Chincarini, G., y Burrows, D. An origin for short γ -ray bursts unassociated with current star formation. *Nature*, 438:994–996, 2005a.
- [10] Barthelmy, S. D., Barbier, L. M., Cummings, J. R., Fenimore, E. E., Gehrels, N., Hullinger, D., Krimm, H. A., Markwardt, C. B., Palmer, D. M., Parsons, A., y et al. The Burst Alert Telescope (BAT) on the SWIFT Midex Mission. *Space Science Reviews*, 120(3-4):143–164, Oct 2005.
- [11] Berger, E., Cenko, S. B., Fox, D. B., y Cucchiara, A. Discovery of the very Red Near-Infrared and Optical Afterglow of the Short-Duration GRB 070724A. *The Astrophysical Journal*, 704(1):877–882, sep 2009.
- [12] Berger, E., Zauderer, B. A., Levan, A., Margutti, R., Laskar, T., Fong, W., Mangano, V., Fox, D. B., Tunnicliffe, R. L., Chornock, R., Tanvir, N. R., Menten, K. M., Hjorth, J., Roth, K., y Dupuy, T. J. The Afterglow and Ulirg Host Galaxy of the Dark Short GRB 120804A. *The Astrophysical Journal*, 765(2):121, feb 2013.
- [13] Bernardini, M. G., Ghirlanda, G., Campana, S., Covino, S., y et al. Comparing the spectral lag of short and long gamma-ray bursts and its relation with the luminosity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446(2):1129–1138, 2014.
- [14] Bevington, P. y Robinson, K. *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. McGraw-Hill Higher Education, 2003.
- [15] Bloom, J. *What Are Gamma-Ray Bursts?* Princeton University Press, 2011.
- [16] Boggs, P., Byrd, H., y Schnabel, R. A stable and efficient algorithm for non-linear orthogonal distance regressio. *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing*, pág. 1052–1078, 1987.
- [17] Cenko, S. B., Berger, E., Nakar, E., Kasliwal, M. M., Cucchiara, A., Kulkarni, S. R., Ofek, E., Fox, D. B., Harrison, F. A., Rau, A., Price, P. A., Gal-Yam, A., Dopita, M. A., y Penprase, B. E. Grbs 070429b and 070714b: The high end of the short-duration gamma-ray burst redshift distribution, 2008.

- [18] Costa, E., Frontera, F., Heise, J., Feroci, M., Zand, J., Fiore, F., Cinti, M. N., Fiume, D. D., Nicastro, L., Orlandini, M., Palazzi, E., Rapisarda, M., Zavattini, G., Jager, R., Parmar, A., Owens, A., Molendi, S., Cusumano, G., Maccarone, M. C., Giarrusso, S., Coletta, A., Antonelli, L. A., Giommi, P., Muller, J. M., Piro, L., y Butler, R. C. Discovery of an X-ray afterglow associated with the γ -ray burst of 28 February 1997. *Nature*, 387, jun 1997.
- [19] Doty, J., Dill, R., Crew, G. B., Brady, T., Francis, J., Huffman, G., Roberts, J., y Vanderspek, R. HETE: Novel Technology for a Small Space Mission. En Ricker, G. R. y Vanderspek, R. K., editors, *Gamma-Ray Burst and Afterglow Astronomy 2001: A Workshop Celebrating the First Year of the HETE Mission*, volume 662 of *American Institute of Physics Conference Series*, págs. 38–41, April 2003.
- [20] Ertley, C. Studying the polarization of hard x-ray solar flares with the gamma ray polarimeter experiment (grape). 01 2014.
- [21] Fruchter, A., Levan, A., y Strolger, L. Long γ -ray bursts and core-collapse supernovae have different environments. *Nature*, 441:463–468, 2006.
- [22] Gabriele Ghisellini. *Radiative Processes in High Energy Astrophysics*. Springer International Publishing, 2013.
- [23] Gehrels, N. The Swift Gamma-Ray Burst Mission. *AIP Conference Proceedings*, 2004.
- [24] Gehrels, N. y et, a. A short γ -ray burst apparently associated with an elliptical galaxy at redshift $z = 0.225$. *Nature*, 437:851–854, 2009.
- [25] Ghisellini, G., Celotti, A., y Lazzati, D. Constraints on the emission mechanisms of gamma-ray bursts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 313(1):L1–L5, 03 2000.
- [26] Harwit, M. *Astrophysical Concepts*. Springer New York, 2006.
- [27] Hodges, J. L. The significance probability of the smirnov two-sample test. *Arkiv for Matematik*, 3:469–486, 1958.
- [28] Ivezić, J., Connolly, A., VanderPlas, J., y Gray, A. *Statistics, Data Mining, and Machine Learning in Astronomy*. Princeton University Press, 2014.
- [29] Jin, Z.-P., Zhou, H., Covino, S., Liao, N.-H., Li, X., Lei, L., D’Avanzo, P., Fan, Y.-Z., y Wei, D.-M. A kilonova from an ultra-quick merger of a neutron star binary. 2021.

- [30] Kouveliotou, C., Meegan, C. A., Fishman, G. J., Bhat, N. P., Briggs, M. S., Koshut, T. M., Paciesas, W. S., y Pendleton, G. N. Identification of Two Classes of Gamma-Ray Bursts. 413:L101, August 1993.
- [31] Kumar, P. y Zhang, B. The physics of gamma-ray bursts & relativistic jets. *Physics Reports*, 561:1–109, feb 2015.
- [32] Levan, A. *Gamma-Ray Bursts*. 2514-3433. IOP Publishing, 2018.
- [33] Levesque, E. M., Bloom, J. S., Butler, N. R., Perley, D. A., Cenko, S. B., Prochaska, J. X., Kewley, L. J., Bunker, A., Chen, H.-W., Chornock, R., Filippenko, A. V., Glazebrook, K., Lopez, S., Masiero, J., Modjaz, M., Morgan, A., y Poznanski, D. Grb 090426: the environment of a rest-frame 0.35-s gamma-ray burst at a redshift of 2.609. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 401(2):963–972, jan 2010.
- [34] Li, Y., Zhang, B., y Yuan, Q. A comparative study of long and short GRBs. II. a multiwavelength method to distinguish type II (massive star) and type i (compact star) GRBs. *The Astrophysical Journal*, 897(2):154, jul 2020.
- [35] Lien, A., Sakamoto, T., Barthelmy, S. D., Baumgartner, W. H., Cannizzo, J. K., Chen, K., Collins, N. R., Cummings, J. R., Gehrels, N., Krimm, H. A., y et al. The Third Swift Burst Alert Telescope Gamma-Ray Burst Catalog. *The Astrophysical Journal*, 829(1):7, Sep 2016.
- [36] Longair, M. S. *High Energy Astrophysics*. Cambridge University Press, 3 edición, 2011.
- [37] Lü, H.-J., Liang, E.-W., Zhang, B.-B., y Zhang, B. A New classification Method for Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, 725(2):1965–1970, dec 2010.
- [38] Markwardt, C., Barthelmy, S., Cummings, J., Hullinge, D., Krimm, H., y Parsons, A. The SWIFT BAT Software Guide. NASA/GSFC, 2007.
- [39] Meegan, C. A., Fishman, G. J., Wilson, R. B., Paciesas, W. S., Pendleton, G. N., Horack, J. M., Brock, M. N., y Kouveliotou, C. Spatial distribution of γ -ray bursts observed by BATSE. *Nature*, 355(6356):143–145, January 1992.
- [40] Minaev, P. Y. y Pozanenko, A. S. The ep_i - eiso correlation: type i gamma-ray bursts and the new classification method. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492(2):1919–1936, dec 2019.

- [41] Nakar, E. Short-hard gamma-ray bursts. *Physics Reports*, 442(1-6):166–236, apr 2007.
- [42] Nicuesa, A., Klose, S., Greiner, J., Kann, D. A., Krühler, T., Rossi, A., Schulze, S., Afonso, P. M. J., Elliott, J., Filgas, R., Hartmann, D. H., Yoldaş, A. K., McBreen, S., Nardini, M., E., F. O., Rau, A., Schmidl, S., Schady, P., Sudilovsky, V., Updike, A. C., y Yoldaş, A. Multi-color observations of short GRB afterglows: 20 events observed between 2007 and 2010. *Astronomy & Astrophysics*, 548:A101, nov 2012.
- [43] Nicuesa, A., Klose, S., Rossi, A., Kann, D. A., Krühler, T., Greiner, J., Rau, A., , F. Olivares E., Afonso, P. M. J., Filgas, R., Küpcü Yoldas, A., McBreen, S., Nardini, M., Schady, P., Schmidl, S., Updike, A. C., y Yoldas, A. Grb 090426: Discovery of a jet break in a short burst afterglow. *A&A*, 531, 2011.
- [44] Norris, J. P., Marani, G. F., y Bonnell, J. T. Connection between energy-dependent lags and peak luminosity in gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 534(1):248–257, may 2000.
- [45] Perkins, D. *Particle Astrophysics*. Oxford University, Great Britain, 2009.
- [46] Pine, D. *Introduction to Python for Science and Engineering*. Taylor Francis Group, 2019.
- [47] Piran, T. The physics of gamma-ray bursts. *Reviews of Modern Physics*, 76(4):1143–1210, jan 2005.
- [48] Piran, T., Bromberg, O., Nakar, E., y Sari, R. The Long, the Short and the Weak - the origin of GRBs. pág. 10, 06 2012.
- [49] Qin, Y., Liang, E.-W., Liang, Y.-F., Yi, S.-X., Lin, L., Zhang, B.-B., Zhang, J., Lu, H.-J., Lu, R.-J., Lu, L.-Z., y Zhang, B. A Comprehensive Analysis of Fermi Gamma-Ray Burst Data. III. Energy-dependent T_{90} Distributions of GBM GRBs and Instrumental Selection Effect on Duration Classification. , 763, January 2013.
- [50] Rastinejad, J. C., Gompertz, B. P., Levan, A. J., Fong, W., Nicholl, M., Lamb, G., y et al. A kilonova following a long-duration gamma-ray burst at 350 mpc, 2022.
- [51] Rossi, A., Rothberg, B., Palazzi, E., Kann, D. A., D’Avanzo, P., Amati, L., Klose, S., Perego, A., Pian, E., Guidorzi, C., Pozanenko, A. S., Savaglio, S., Stratta, G.,

- Agapito, G., Covino, S., Cusano, F., D'Elia, V., Pasquale, M. D., Valle, M. D., Kuhn, O., Izzo, L., Loffredo, E., Masetti, N., Melandri, A., Minaev, P. Y., Guelbenzu, A. N., Paris, D., Paiano, S., Plantet, C., Rossi, F., Salvaterra, R., Schulze, S., Veillet, C., y Volnova, A. A. The peculiar short-duration GRB 200826a and its supernova*. *The Astrophysical Journal*, 932, jun2022.
- [52] Sakamoto, T., Barthelmy, S. D., Barbier, L., Cummings, J. R., Fenimore, E. E., Gehrels, N., Hullinger, D., Krimm, H. A., Markwardt, C. B., Palmer, D. M., Parsons, A. M., Sato, G., Stamatikos, M., Tueller, J., Ukwatta, T. N., y Zhang, B. The First Swift BAT Gamma-Ray Burst Catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 175(1):179–190, mar 2008.
- [53] Sakamoto, T., Sato, G., Barbier, L., Barthelmy, S. D., Cummings, J. R., Fenimore, E. E., Gehrels, N., Hullinger, D., Krimm, H. A., Lamb, D. Q., Markwardt, C. B., Palmer, D. M., Parsons, A. M., Stamatikos, M., Tueller, J., y Ukwatta, T. N. E_{peak} estimator for gamma-ray bursts observed by the swift burst alert telescope. *The Astrophysical Journal*, 693(1):922–935, mar 2009.
- [54] Soderberg, A. M., Kulkarni, S. R., Price, P. A., Fox, D. B., Berger, E., Moon, D.-S., Cenko, S. B., Gal-Yam, A., Frail, D. A., Chevalier, R. A., Cowie, L., Costa, G. S. D., MacFadyen, A., McCarthy, P. J., Noel, N., Park, H. S., Peterson, B. A., Phillips, M. M., Rauch, M., Rest, A., Rich, J., Roth, K., Roth, M., Schmidt, B. P., Smith, R. C., y Wood, P. R. AniHST/istudy of the supernovae accompanying GRB 040924 and GRB 041006. *The Astrophysical Journal*, jan 2006.
- [55] Thöne, C. C., Campana, S., Lazzati, D., de Ugarte Postigo, A., Fynbo, J. P. U., Christensen, L., Levan, A. J., Aloy, M. A., Hjorth, J., Jakobsson, P., Levesque, E. M., Malesani, D., Milvang-Jensen, B., Roming, P. W. A., Tanvir, N. R., Wiersema, K., Gladders, M., Wuyts, E., y Dahle, H. Variable Ly sheds light on the environment surrounding GRB 090426. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414(1):479–488, 06 2011.
- [56] Troja, E. The Neil Gehrels Swift Observatory Technical Handbook. 2020.
- [57] Ukwatta, T. N., Stamatikos, M., Dhuga, K. S., Sakamoto, T., Barthelmy, S. D., Eskandarian, A., Gehrels, N., Maximon, L. C., Norris, J. P., y Parke, W. C. Spectral Lags and the Lag-Luminosity Relation: An Investigation with Swift BAT Gamma-ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, 711(2):1073–1086, feb 2010.

- [58] Vedrenne, G. y Atteia, J.-L. *Gamma-Ray Bursts The Brightest Explosions in the Universe*. Praxis Publishing Ltd., 2009.
- [59] Virgili, F. J., Qin, Y., Zhang, B., y Liang, E. Spectral and temporal analysis of the joint swift/BAT-fermi/GBM GRB sample. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424(4):2821–2831, jul 2012.
- [60] Wiersema, K., van der Horst, A. J., Kann, D. A., Rol, E., Starling, R. L. C., Curran, P. A., Gorosabel, J., Levan, A. J., Fynbo, J. P. U., de Ugarte Postigo, A., Wijers, R. A. M. J., Castro-Tirado, A. J., Guziy, S. S., Hornstrup, A., Hjorth, J., Jelí nek, M., Jensen, B. L., Kidger, M., Martín-Luis, F., Tanvir, N. R., Tristram, P., y Vreeswijk, P. M. Spectroscopy and multiband photometry of the afterglow of intermediate duration gamma-ray burst 040924 and its host galaxy. *Astronomy & Astrophysics*, 481, feb 2008.
- [61] Xiao, S., Xiong, S.-L., Wang, Y., Zhang, S.-N., Gao, H., Zhang, Z., Cai, C., Yi, Q.-B., Zhao, Y., Tuo, Y.-L., Li, X.-Q., Wen, X.-Y., An, Z.-H., Peng, W.-X., Zheng, S.-J., Zhang, F., Song, L.-M., y Li, T.-P. A robust estimation of lorentz invariance violation and intrinsic spectral lag of short gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal Letters*, 924(2):L29, jan 2022.
- [62] Yang, J., Zhang, B. B., Ai, S. K., Liu, Z. K., Wang, X. I., Yang, Y. H., Yin, Y. H., Li, Y., Lü, H. J., y Zhang, B. A peculiar, long-duration gamma-ray burst from a neutron star-white dwarf merger. 2022.
- [63] Zhang, B.-B., Liu, Z.-K., Peng, Z.-K., Li, Y., Lü, H.-J., Yang, J., Yang, Y.-S., Yang, Y.-H., Meng, Y.-Z., Zou, J.-H., Ye, H.-Y., Wang, X.-G., Mao, J.-R., Zhao, X.-H., Bai, J.-M., Castro-Tirado, A. J., Hu, Y.-D., Dai, Z.-G., Liang, E.-W., y Zhang, B. A peculiar short-duration gamma-ray burst from massive star core collapse. *Nature Astronomy*, 5(9):911–916, jul 2021.
- [64] Zhang, B. *The Physics of Gamma-Ray Bursts*. 2019.
- [65] Zhang, B., Zhang, B.-B., Virgili, F. J., Liang, E.-W., Kann, D. A., Wu, X.-F., Proga, D., Lv, H.-J., Toma, K., Mészáros, P., Burrows, D. N., Roming, P. W. A., y Gehrels, N. Discerning the Physical Origins of Cosmological Gamma-Ray Bursts Based on Multiple Observational Criteria: The Cases of $z=6.7$ GRB 080913, $z=8.2$ GRB 090423, and some Short/Hard GRBs. *The Astrophysical Journal*, 703(2):1696–1724, sep 2009.