



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## FACULTAD DE CIENCIAS

### AMBIENTE GALÁCTICO Y EXTRAGALÁCTICO DE GRBS PECULIARES

### ESTUDIO DE LOS GRBS: GRB070724A Y GRB070429B MEDIANTE LOS INSTRUMENTOS XRT Y BAT DEL OBSERVATORIO NEIL GEHRELS *SWIFT*

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO  
COMO REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
FÍSICO

NICOLÁS ALONSO NORIEGA CRUZ

[nicolas.noriega@epn.edu.ec](mailto:nicolas.noriega@epn.edu.ec)

DIRECTOR: NICOLÁS ALEJANDRO VÁSQUEZ PAZMIÑO

[nicolas.vasquez@epn.edu.ec](mailto:nicolas.vasquez@epn.edu.ec)

DMQ, JULIO 2024



## CERTIFICACIONES

Yo, NICOLÁS ALONSO NORIEGA CRUZ, declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito 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.

---

Nicolás Alonso Noriega Cruz

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Nicolás Alonso Noriega Cruz, bajo mi supervisión.

---

Nicolás Alejandro Vásquez Pazmiño  
**DIRECTOR**



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el(los) producto(s) resultante(s) del mismo, es(son) público(s) y estará(n) a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Nicolás Alonso Noriega Cruz

Nicolás Alejandro Vásquez Pazmiño



## RESUMEN

Las ráfagas de rayos gamma (o GRBs por sus siglas en inglés) suelen ser clasificados de acuerdo a su variabilidad temporal sus parámetros espectrales. Históricamente, los GRBs han sido clasificados con respecto al parámetro  $T_{90}$  (describe su duración temporal), de manera que si  $T_{90} < 2$  se considera un GRB corto (o SGRB por sus siglas en inglés) y si  $T_{90} > 2$  se considera un GRB largo (o LGRB por sus siglas en inglés). Estas sub-poblaciones de GRBs suelen asociarse con diferentes tipos de progenitores: los SGRBs con 'fusiones' de objetos compactos (agujeros negros y estrellas de neutrones), mientras que los LGRBs con el colapso gravitacional de estrellas masivas. Esta clasificación es conocida como la clasificación canónica. Sin embargo, tanto en la literatura como en el presente trabajo, existe evidencia que la clasificación canónica no es adecuada en ciertos casos.

Este estudio detalla el análisis temporal y espectral de los GRB 070429B y GRB 070724A, previamente reportados como posibles candidatos a GRBs peculiares. Además, se explora su entorno galáctico, lo cual permite contrastar la información temporal y espectral. Finalmente, los resultados obtenidos evidencian que la clasificación canónica no es óptima, al menos para los GRBs estudiados, para determinar los progenitores de GRBs.

***Palabras clave:*** GRB, Astronomía de rayos gamma y estimadores temporales.

## ABSTRACT

Gamma-ray bursts (GRBs) can be classified based on temporal variability and spectral parameters. Historically,  $T_{90}$  has been the main parameter used for classification. GRBs with  $T_{90} < 2$  are considered short GRBs (SGRBs), while those with  $T_{90} > 2$  are considered long GRBs (LGRBs). These sub-populations of GRBs are typically associated with different types of progenitors: SGRBs with mergers of compact objects (such as black holes and neutron stars) and LGRBs with collapsars (gravitational collapse of massive stars). This is known as the canonical classification. However, both the literature and this study provide evidence that this classification is not always definitive.

This work details the temporal and spectral analysis of GRB 070429B and GRB 070724A, previously identified as potential candidates for peculiar GRBs. Additionally, the galactic environment of these events is explored, allowing for a comparison of temporal and spectral information. The results demonstrate that the canonical classification is not optimal for determining the progenitors of the GRBs analyzed in this study.

**Keywords:** GRB, Gamma-ray astronomy and temporal estimators.



---

# Índice general

---

<b>1. Estudio de los GRBs: GRB 070724A y GRB 070429B</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo general . . . . .	1
1.2. Objetivos específicos . . . . .	1
1.3. Alcance . . . . .	2
1.4. Marco teórico . . . . .	2
1.4.1. Características observacionales de los GRBs . . . . .	2
1.4.2. Progenitores y sus galaxias anfitrionas . . . . .	6
1.4.3. Física de los GRBs . . . . .	8
<b>2. Metodología</b>	<b>11</b>
2.1. Observatorio Espacial <i>Swift</i> . . . . .	11
2.1.1. BAT . . . . .	12
2.1.2. XRT . . . . .	13
2.2. Procesamiento de datos . . . . .	14
2.2.1. Análisis temporal . . . . .	15
2.2.2. Análisis espectral . . . . .	19
2.2.3. Análisis de ambiente galáctico . . . . .	24
<b>3. Resultados, conclusiones y recomendaciones</b>	<b>25</b>
3.1. Resultados . . . . .	25

3.1.1. Resultados del análisis temporal . . . . .	25
3.1.2. Resultados del análisis espectral . . . . .	28
3.1.3. XRT . . . . .	30
3.1.4. Discusión ambiente galáctico . . . . .	31
3.2. Conclusiones y recomendaciones . . . . .	32
<b>Bibliografía</b>	<b>34</b>

---

## Índice de figuras

---

1.1.	Gráfica de la función espectral de Band [5]. . . . .	6
1.2.	Diagrama de la evolución de GRBs, donde se presentan las etapas de emisión temprana y postluminiscencia, extraído de [37] . . . . .	9
2.1.	Área efectiva del detector BAT del satélite <i>Swift</i> (rango de energía efectiva de 15 a 150 keV) en el año de 2007, año de detección de los GRBs en análisis. . . . .	13
2.2.	Área efectiva del detector XRT en sus dos modos de operación: PC y WT (rango de energía efectiva de 0.3 a 10 keV) en el año de 2007, año de detección de los GRBs en análisis. . . . .	15
2.3.	Quality maps de los GRBs 070429B ( <i>izquierda</i> ) y 070724A ( <i>derecha</i> ), respectivamente. . . . .	16
2.4.	Proceso para obtener los tiempos de emisión para GRB 070429B. <i>Panel izquierdo</i> : Curva de luz ordenada según el <i>rate</i> , en orden descendente. <i>Panel derecho</i> : Suma acumulativa de la curva de luz ordenada. . . . .	17
2.5.	Curvas de luz para las bandas 15 – 25 y 50 – 150 keV conjuntamente con la función de correlación cruzada para los GRBs 070724A ( <i>izquierda</i> ) y 070429B ( <i>derecha</i> ). . . . .	18
2.6.	Ajustes gaussianos de las funciones de correlación cruzada . . . . .	18
2.7.	Imágenes del GRB 070724A obtenidas por <i>Swift</i> -XRT. . . . .	19
2.8.	Mapas de exposición de GRB070724A . . . . .	22

3.1. Curvas de luz en tres bandas energéticas (15 – 25, 25 – 50 y 50 – 150 keV) de los GRBs 070724A y 070429B. . . . .	26
3.2. Curva de luz estándar de la postluminiscencia de los GRBs, extraída de [73]. . . . .	27
3.3. Curva de luz en el canal de energía de XRT (0,3 – 10 keV) para el GRB 070429B. . . . .	28
3.4. Curva de luz en el canal de energía de XRT (0,3 – 10 keV) para el GRB 070724A. . . . .	29
3.5. Espectro en BAT (15 – 150 keV) para el GRB070724A, la columna de hidrógeno para la absorción galáctica fue de $1,20e + 20 \text{ cm}^2$ . . . . .	29
3.6. Espectro en BAT (15 – 150 keV) para el GRB070429B, la columna de hidrógeno para la absorción galáctica fue de $1,93e + 20 \text{ cm}^2$ . . . . .	30
3.7. Espectro en XRT (0,3 – 10 keV) para el GRB 070724A, la columna de hidrógeno para la absorción galáctica fue de $1,20 \times 10^{20} \text{ cm}^2$ . . . . .	31
3.8. Espectro en XRT (0,3 – 10 keV) para el GRB 070429B, la columna de hidrógeno para la absorción galáctica fue de $1,93 \times 10^{20} \text{ cm}^2$ . . . . .	31

# Capítulo 1

---

## Estudio de los GRBs: GRB 070724A y GRB 070429B

---

### 1.1. Objetivo general

Explorar y comprender los actuales avances de la astrofísica en el estudio de los estallidos de rayos gamma (GRBs por sus siglas en inglés, *Gamma Ray Bursts*) con el fin de identificar características peculiares en dos GRBs, los cuales son candidatos a "peculiares" como lo reporta [\[22\]](#).

### 1.2. Objetivos específicos

Para los dos GRBs candidatos a "peculiares" (GRB 070724A y GRB 070429B), se plantea como objetivo:

1. Adquirir una comprensión detallada y generar las curvas de luz, en diferentes bandas, correspondientes para los dos GRBs de esta investigación.
2. Analizar exhaustivamente y obtener los espectros, en diferentes bandas, correspondientes para los dos GRBs de este estudio.
3. Utilizar las curvas de luz para calcular y determinar los estimadores temporales clave que caracterizan a los GRBs.

4. Realizar un análisis exhaustivo de los diferentes modelos espectrales y aplicarlos para determinar el modelo que mejor explique los datos espectrales.
5. Interpretar los resultados obtenidos con el propósito de evaluar la viabilidad de la hipótesis de que los GRBs bajo estudio sean considerados como candidatos a fenómenos peculiares, determinando si los datos respaldan o descartan esta hipótesis.

## 1.3. Alcance

El proyecto contiene las técnicas de procesamiento y análisis de datos observacionales de libre acceso en Astronomía. Los eventos GRB 070724A y GRB 070429B presentan características temporales asociadas a GRBs cortos y características espectrales asociadas a GRBs largos. Además, se analizará las propiedades espectrales y temporales de estos dos GRBs con los datos observacionales de los instrumentos Burst Alert Telescope (BAT) y X-ray Telescope (XRT) de *Swift*. El instrumento BAT del telescopio *Swift* trabaja en el rango 15-150 keV [26], mientras que el instrumento XRT contribuye con información en el rango de los X-rays suaves 0.3-10 keV.[19] Para la generación de espectros y curvas de luz se utilizará la herramienta HEASoft [49]. La vecindad galáctica de los GRBs reporta una distribución relacionada con el tipo de GRBs [27, 68]. El estudio además de analizar la evolución temporal de estos 4 GRBs también busca caracterizar su ambiente galáctico. Para este propósito se utilizarán bases de datos y catálogos de galaxias vecinas para obtener indicadores como el índice de color y tasa de formación estelar (SFR por sus siglas en inglés) para comparar con estudios previos [68, por ejemplo]. Los estudiantes realizarán una contribución científica para algún evento científico con los resultados de su trabajo de integración.

## 1.4. Marco teórico

### 1.4.1. Características observacionales de los GRBs

Los estallidos de rayos gamma (GRBs por sus siglas en inglés), son eventos astronómicos transitorios que se caracteriza por una emisión de corta duración de rayos gamma (desde decenas de keV hasta MeV)[74]. La duración del fenómeno

ronda entre unos pocos milisegundos hasta miles de segundos. Como otros eventos astronómicos, los GRBs exhiben parámetros temporales como espectrales, los cuales fueron analizados en el presente estudio para la muestra en cuestión.

## Introducción Histórica

Durante la guerra fría, el temor a la proliferación de armas nucleares impulsó el desarrollo de varios programas espaciales, entre ellos *Kosmos* en la Unión Soviética y *Vela* en los Estados Unidos[42]. Estos programas tenían como objetivo la detección de potenciales pruebas nucleares mediante la detección de rayos gamma. A finales de la década de los sesenta, se produjo la primera detección de un GRB. Los datos recopilados por estos satélites no coincidían con los patrones esperados para una prueba nuclear, y con el tiempo, la detección de más eventos (hasta dieciséis observaciones en 1972 [28]) ayudó a definir el origen astrofísico de los GRBs. Estas detecciones llevó a numerosas especulaciones por parte de físicos sobre su origen y propiedades. Sin embargo, no fue hasta el lanzamiento del observatorio espacial *Compton Gamma Ray Observatory* (CGRO) y su instrumento Burst And Transient Source Experiment (BATSE) que se obtuvo información adicional para un estudio más profundo.

## Origen Cosmológico de los GRBs

En sus primeros años de estudio, el origen de los GRBs era objeto de debate, con modelos relacionados con orígenes galáctico y extragaláctico. Sin embargo, el consenso se inclinó hacia un origen extragaláctico o cosmológico, impulsado por la isotropía de las detecciones del instrumento BATSE del Observatorio CGRO [16, 55]. La naturaleza extragaláctica de estos eventos fue reforzada con la misión espacial BeppoSAX. Esta misión espacial obtuvo una cantidad significativa de detecciones de varios GRBs, siendo el GRB 970508 uno de los más destacados, ya que se logró detectar su galaxia anfitriona y determinar su corrimiento al rojo ( $z = 0,835$ ), confirmando su origen cosmológico [46]. Con el tiempo, y con el aumento tanto en el número de detecciones como en la sensibilidad de los instrumentos, se confirmó el origen cosmológico de los GRBs. Sin embargo, sus progenitores seguían siendo incierto y un tema de búsqueda constante.

## Variabilidad temporal de GRBs

Dentro del estudio de los GRBs, el análisis de sus parámetros temporales es crucial para comprender diversas propiedades y características de estos fenómenos. Uno de los parámetro de mayor relevancia es la duración de la emisión temprana (misma que se la define en 1.4.3); sin embargo, debido a la variabilidad temporal en la emisión de cada GRB, no es sencillo definirla de manera precisa. Por esta razón, se han desarrollado diversas aproximaciones, siendo la más utilizada el  $T_{90}$ . Además del  $T_{90}$ , existen otros parámetros temporales que proporcionan información adicional y complementan la caracterización de los GRBs. A continuación, se definen algunos parámetros temporales:

- **$T_{90}$  y  $T_{50}$ :** El  $T_{90}$  representa el tiempo durante el cual se detecta el 90 % de la fluencia total del GRB[72]. Se calcula integrando la curva de luz<sup>1</sup> del GRB y determinando los tiempos en los que se alcanzan el 5 % y el 95 % de la fluencia total [30]. Mediante este proceso, se obtiene una medida 'robusta' debido a que se ignoran las fases extremas de la emisión, que son aquellas donde usualmente la detección es comparable al background.

El  $T_{90}$  particularmente ha permitido identificar una distribución bimodal de los GRBs. La clasificación canónica de los GRBs con respecto al  $T_{90}$  es: *i*) GRBs cortos (SGRBs) con  $T_{90} < 2$  segundos, y *ii*) GRBs largos (LGRBs) con  $T_{90} > 2$  segundos [41].

De manera análoga, el  $T_{50}$  es el parámetro que representa el tiempo durante el cual se detecta el 50 % de la fluencia total.

- **Tiempo de emisión  $\tau_{N\%}$ :** El tiempo de emisión  $\tau_{N\%}$  corresponde al tiempo donde se tiene  $N\%$  de la fluencia total. Fue propuesto como un parámetro temporal complementario que permita caracterizar el estado de 'alta emisión' del GRB [47].
- **Retraso o Lag Espectral  $\tau_{B_1B_2}$ :** El retraso o lag espectral  $\tau_{B_1B_2}$  se define como el intervalo de tiempo entre la detección en una banda energética ( $B_1$ ) y otra banda ( $B_2$ ) [52]. El lag espectral podría estar relacionado con los dos tipos de GRBs, es decir entre el 90 % y el 95 % de los SGRBs poseen un lag espectral

---

<sup>1</sup>Una curva de luz es la gráfica de la intensidad de la luz (del objeto o fenómeno en estudio) en función del tiempo.[72]



consistente con cero, mientras que en general los LGRBs no son consistentes con cero [51].

## Modelos espectrales de GRBs

El análisis espectral de los GRBs permite comprender los procesos físicos y mecanismos de radiación que originan estos fenómenos. Los GRBs poseen un espectro no térmico<sup>2</sup>, que se extiende a bandas de alta energía. Usualmente, los procesos no-térmicos se suelen describir con una distribución de tipo ley potencial (power-law). Para que la energía siga esta distribución, se requiere que los electrones sean acelerados en un ambiente de no equilibrio.

Observacionalmente, se encontró que los espectros en rayos-gamma de los GRBs pueden ser descritos mediante la función de “Band”, la cual es un modelo empírico, y es definida como [4]:

$$N(E) = \begin{cases} A \left( \frac{E}{100\text{keV}} \right)^\alpha \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right), & E < (\alpha - \beta)E_0, \\ A \left[ \frac{(\alpha - \beta)E_0}{100\text{keV}} \right]^{\alpha - \beta} \exp\left[(\beta - \alpha) \left( \frac{E}{100\text{keV}} \right)^\beta\right], & E \geq (\alpha - \beta)E_0, \end{cases} \quad (1.1)$$

donde  $A$  representa la normalización del espectro, y  $E_0$  indica la energía de ruptura del espectro. Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ <sup>3</sup> corresponden a los índices espectrales de baja y alta energía, respectivamente. Estos dos regímenes energéticos están separados por  $E_0$ .

La energía de ruptura  $E_0$  está relacionada con la energía pico  $E_p$ <sup>4</sup> a través de la siguiente relación:

$$E_p = (2 + \alpha)E_0. \quad (1.2)$$

La Fig. 1.1 muestra un espectro de GRB caracterizado por la función de Band con parámetros genéricos. Dado que esta función está definida por tramos, se pueden apreciar claramente las dos secciones de la misma, delimitadas por la energía de corte

---

<sup>2</sup>Se dice que un gas en equilibrio térmico a cierta temperatura produce un espectro ‘térmico’, como por ejemplo la radiación de un cuerpo negro.

<sup>3</sup>Ambos parámetros son negativos.

<sup>4</sup>La energía pico es la máxima energía presente en el espectro  $E^2N(E)$  (siendo  $N$  el número de fotones).

(see Eq. 1.1).

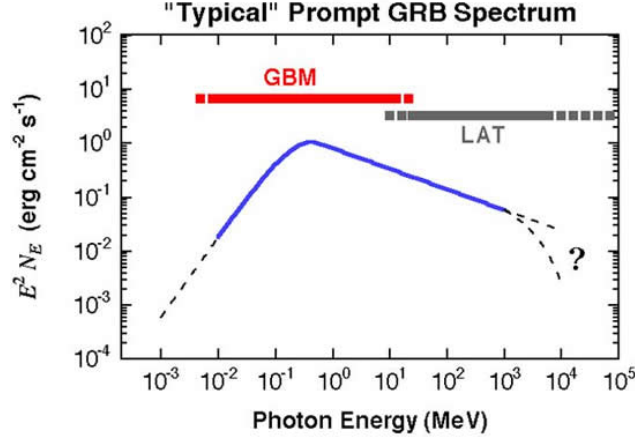


Figura 1.1: Gráfica de la función espectral de Band [5].

En caso que el instrumento no posea un ancho de banda de energía amplio (como en el caso de *Swift*) o si el GRB es difuso, los espectros suelen ajustarse mediante una función “cutoff power law” [60, 61, 44], la cual se define como:

$$N(E) = K_{50}^{\text{CPL}} \left( \frac{E}{50 \text{ keV}} \right)^{\alpha^{\text{CPL}}} \exp \left( -\frac{E}{E_c} \right), \quad (1.3)$$

donde el parámetro de normalización está medido a 50 keV,  $E_c$  es la energía de ruptura cutoff, y  $\alpha^{\text{CPL}}$  es el índice espectral. Entonces, la energía pico en el espectro  $E^2 N(E)$  en este modelo es:

$$E_p = (2 + \alpha) E_c. \quad (1.4)$$

En caso que la detección esté cercana al umbral de detección del instrumento o la detección del GRB sea débil, el ajuste se simplifica a un modelo “power law” [60, 61, 44], la cual se define como:

$$N(E) = K_{50}^{\text{PL}} \left( \frac{E}{50 \text{ keV}} \right)^{\alpha^{\text{PL}}} \quad (1.5)$$

### 1.4.2. Progenitores y sus galaxias anfitrionas

De acuerdo a la clasificación canónica de los GRBs basada en el  $T_{90}$ , los SGRBs tienen  $T_{90} < 2$  segundos y los LGRBs tienen  $T_{90} > 2$  segundos. Esta clasificación ha sido ampliamente utilizada debido a su correlación con los progenitores de estos

eventos astronómicos.

### GRBs cortos (SGRBs)

Los principales candidatos a progenitores de los SGRBs son fusiones de objetos binarios compactos, como un sistemas binario de estrellas de neutrones<sup>5</sup> y un sistema compuesto por un agujero negro y una estrella de neutrones [43]. También se consideran posibles progenitores las fusiones de enana blanca-estrella de neutrones [75], enana blanca-agujero negro [33] y enana blanca-enana blanca [59], sin embargo no existe evidencia observacional.

Los datos de *Swift* han proporcionado indicios sobre la relación de los GRBs cortos y sus galaxias anfitrionas, abarcando galaxias de tipo temprano [36, 10, 14] (representando  $\approx 15\%$  de la población) hasta galaxias de tipo tardío (representando  $\approx 50\%$  de la población) [31]. Sin embargo, algunas galaxias de SGRBs han sido clasificadas como “no concluyentes” ( $\approx 20\%$  de la población [31]), mientras que alrededor del  $\approx 15\%$  de SGRBs no han sido asociados con una galaxia anfitriona (llamados “hostless” en inglés, e.g., [66, 8]).

### GRBs largos (LGRBs)

Los GRBs largos han sido asociados con el colapso gravitacional de estrellas masivas ( $\gtrsim 20 M_{\odot}$ ) [17]. La evidencia sobre la conexión entre los LGRBs y las supernovas tipo Ic de línea ancha (broad-line Type Ic en inglés) es irrefutable, por lo que el colapso gravitacional de estrellas masivas es el principal candidato a progenitor de los LGRBs [34, 39, 40]. Las supernovas tipo I se caracterizan por la ausencia de hidrógeno en sus espectros, a diferencia de las supernovas tipo II [29]. Las supernovas tipo Ic se distinguen por la ausencia de la línea de helio en su análisis espectral [29]. Debido a estas características particulares, la población de supernovas tipo Ic es menor en comparación con las demás.

La asociación de los LGRBs con el colapso gravitacional de estrellas masivas (o ‘collapsars’ en inglés) indica que sus galaxias anfitrionas generalmente son compactas o irregulares, y poseen un alto índice de formación estelar, baja metalicidad y, en pocos casos, son galaxias espirales de gran diseño<sup>6</sup> (como probablemente es la Vía

---

<sup>5</sup>Por ejemplo, el único evento de ondas gravitacionales detectado junto con su contraparte electromagnética es el eventos GW 170817/GRB 170817A [1]

<sup>6</sup>En un estudio de 42 galaxias tan solo una correspondía al caso de galaxia espiral de gran

Láctea) [57, 62, 32].

Sin embargo, a pesar de la evidencia existente, se han encontrado excepciones a la clasificación canónica de los GRBs y sus progenitores [2, 65], e incluso se ha observado que la correlación varía dependiendo del detector [18]. Luego de varias décadas, el origen estelar de los GRBs es concluyente.

### 1.4.3. Física de los GRBs

Las primeras detecciones de GRBs promovieron diferentes modelos teóricos para explicar su origen, así como sus propiedades espectrales y temporales. Actualmente, el más aceptado debido a la evidencia que lo respalda es el modelo de la “bola de fuego” (o ‘fireball’<sup>7</sup> en inglés) [20, 38, 54].

El modelo asume un plasma de radiación ópticamente opaco, donde si la temperatura es lo suficientemente alta, se formarán pares de partículas. Sin embargo, debido a la opacidad del medio, la radiación no logrará escapar. El plasma formado por pares y radiación se comportará como un fluido perfecto cuya ecuación de estado será  $p = \rho/3$ , donde  $p$  y  $\rho$  representan la presión y la densidad de energía del plasma, respectivamente. El fluido se expande (debido a su propia presión), produciendo un enfriamiento a una tasa de  $\mathcal{T} \propto R^{-1}$ , donde  $\mathcal{T}$  y  $R$  son la temperatura local y el radio de expansión, respectivamente. Al descender la temperatura por debajo del umbral de producción de pares, estos comenzarán a aniquilarse hasta llegar a una temperatura local de  $\sim 20$  keV, donde el número de pares habrá descendido lo suficiente y el plasma se convierte en ópticamente delgado, permitiendo que los fotones puedan escapar libremente [58]. La emisión de los GRBs suele tener dos fases diferentes que serán explicadas a continuación: emisión temprana y postluminiscencia.

#### Emisión temprana (Prompt emission)

Observacionalmente, la emisión temprana se define como la fase inicial de un GRB en la que se detecta un exceso de energía, en rayos gamma, en comparación con la emisión de fondo, en un umbral de energía por debajo de los MeV hasta los keV (rayos-X duros) [72].

---

diseño[32]

<sup>7</sup>El término ‘fireball’ se refiere a un plasma de radiación ópticamente opaco cuya energía inicial es mayor en comparación a su masa en reposo [58]

Por otro lado, los estudios teóricos han intentado descifrar el mecanismo de conversión y producción de la radiación gamma. El modelo más aceptado es el de choques internos (*internal shocks*), debido a su capacidad para explicar la estructura temporal de los GRBs. En este modelo, se considera que la fuente produce múltiples capas de plasma con diferentes factores de Lorentz. Las capas más rápidas alcanzan a las más lentas, produciendo un frente de choque, lo que provoca un tipo de aceleración conocido como *aceleración de choque difuso*<sup>8</sup> (un mecanismo también llamado aceleración de Fermi de segundo orden), donde las partículas presentes en la región del choque son aceleradas a velocidades ultra-relativistas [11].

Durante la etapa de choques internos, las partículas cargadas con suficiente energía son aceleradas por la dispersión de perturbaciones magnéticas. En este proceso, las partículas cargadas pueden cruzar el frente de choque múltiples veces y ser aceleradas mediante los *procesos de Fermi de primer orden*, que son mucho más eficientes. La partícula cruzará el el frente de choque múltiples veces hasta obtener suficiente energía y escapar [11].

Sin embargo, a pesar de su amplio uso, el modelo sigue planteando interrogantes, como la variabilidad del flujo entre las capas. El estado en el que las capas internas son más veloces que las externas es inestable [69], y las consecuencias totales de este fenómeno aún no se comprenden completamente.

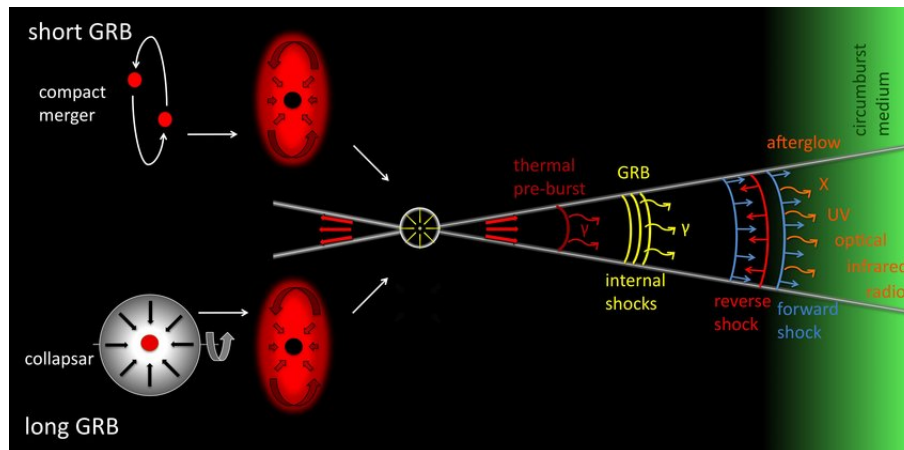


Figura 1.2: Diagrama de la evolución de GRBs, donde se presentan las etapas de emisión temprana y postluminiscencia, extraído de [37]

<sup>8</sup>En inglés se lo conoce como diffusive shock acceleration.

## Postluminiscencia (Afterglow)

Observacionalmente, la postluminiscencia o afterglow de un GRB se define como la etapa posterior a la emisión temprana [72]. Desde el punto de vista teórico, el modelo comúnmente utilizado para explicar la postluminiscencia es el de choques externos (*external shocks*). Este modelo ocurre después de la fase emisión temprana, cuando el material eyectado (compuesto de partículas y radiación) se frena al interactuar con el medio interestelar (alrededor del progenitor) a través de choques relativistas, llamados *choques externos*. Esta interacción produce dos choques: uno en dirección al medio interestelar y otro en dirección a la fuente (desde un sistema de referencia co-móvil). Durante la fase de choques externos, las partículas cargadas del medio interestelar y el material eyectado son aceleradas y emiten radiación mediante procesos de dispersión inversa de Compton y/o radiación sincrotrón, lo que resulta en radiación que cubre un amplio rango del espectro electromagnético, desde el radio hasta los rayos-X [11].

La Figura 1.2 muestra las distintas etapas de la emisión de un GRBs indicando los diferentes tipos de progenitores que puede tener un GRB dependiendo si estos son largos o cortos (Considerando la clasificación canónica). La primera etapa es la emisión térmica presente antes del evento, posteriormente, (en amarillo) se observa la emisión temprana relacionada con los choques internos, finalmente, (en azul y rojo) se observa la post luminiscencia y el posible medio interestelar (en verde).

# Capítulo 2

---

## Metodología

---

En particular para este trabajo, los GRBs en estudio (GRB 070429B y GRB 070724A) fueron detectados por el instrumento BAT a bordo del observatorio espacial *Swift*. Para este análisis, se utilizaron los datos de estos fenómenos recopilados en el tercer catálogo de *Swift*<sup>1</sup> de los instrumentos BAT y XRT<sup>2</sup>.

### 2.1. Observatorio Espacial *Swift*

El observatorio espacial Neil Gehrels *Swift* se lanzó en 2004 y, durante su primera década de operación, registró aproximadamente 900 detecciones[35] de GRBs. Este observatorio está dedicado principalmente al estudio de los GRBs y cuenta con tres instrumentos principales:

- **BAT (Burst Alert Telescope):** Detecta los GRBs y determina su ubicación inicial. Trabaja principalmente en el rango de 15-150 keV.
- **XRT (X-Ray Telescope):** Observa la postluminiscencia en rayos X. Trabaja principalmente en el rango de 0.3-10 keV.
- **UVOT (Ultraviolet/Optical Telescope):** Estudia la postluminiscencia en ultravioleta y óptico.

---

<sup>1</sup>El tercer catálogo de *Swift* incluye datos de las dos versiones anteriores, con la incorporación de nuevas características, como la refinación del pre-procesamiento de las detecciones [44]

<sup>2</sup>Se excluyen los datos del instrumento The Ultra-violet Optical Telescope (UVOT) debido a la no detección o la insuficiente resolución proporcionada por este instrumento

Los datos recopilados son públicos y se encuentran en diversos catálogos disponibles en línea. Estos catálogos están diseñados para filtrar los datos según las necesidades de los investigadores.

En el presente trabajo se usó la base de datos disponible en [HEASARC](#) la cual contiene la información recopilada por los instrumentos del observatorio *Swift*. A continuación, se detalla la información proporcionada por los instrumentos BAT y XRT, que son fundamentales para este estudio.

### 2.1.1. BAT

El instrumento BAT es uno de los tres instrumentos que se encuentran a bordo de *Swift*, es un telescopio de tecnología *coded-aperture* altamente sensible con un amplio campo de visión (FOV por sus siglas en inglés). Este se encarga principalmente de la detección de los GRBs, en una amplia fracción del cielo, y de localizar su posición. Su precisión es de 1 – 4 arcmin en los 20 seg después del inicio del evento.

#### Aspectos técnicos

BAT consiste en un detector plano diseñado con 32768 placas de CdZnTe. Sobre este detector, a una altura de 1 metro, se encuentra la máscara de apertura codificada (*coded aperture mask*<sup>3</sup>). Además, el sistema cuenta con un escudo para reducir el ruido de fondo y un sistema de control térmico que permite mantener los detectores dentro del margen de temperatura operacional [26]. El rango de energía de detección abarca aproximadamente de 15 a 150 keV (como se muestra en la Fig. 2.1, el área efectiva para energías de 15 y 150 keV corresponde a > 50% de la eficiencia total del detector).

#### Operación de BAT y datos disponibles

El instrumento BAT opera en dos modos básicos: el modo *burst*, que determina la posición de los eventos, y el modo *survey*, que recopila información en la región de los rayos X duros ( $\sim 30$  keV). Al igual que muchas misiones en órbita, debido a

---

<sup>3</sup>Debido a las limitaciones tecnológicas, es imposible producir imágenes de rayos gamma usando instrumentos ópticos tradicionales. Por ello, se emplea el método de apertura codificada (*coded-aperture*). Este método, en términos generales, consiste en utilizar un patrón bidimensional (en el caso del *Swift*-BAT, placas de plomo dispuestas según un patrón específico) que se modifica según el evento detectado. Luego, el patrón detectado se decodifica para extraer los datos de interés.



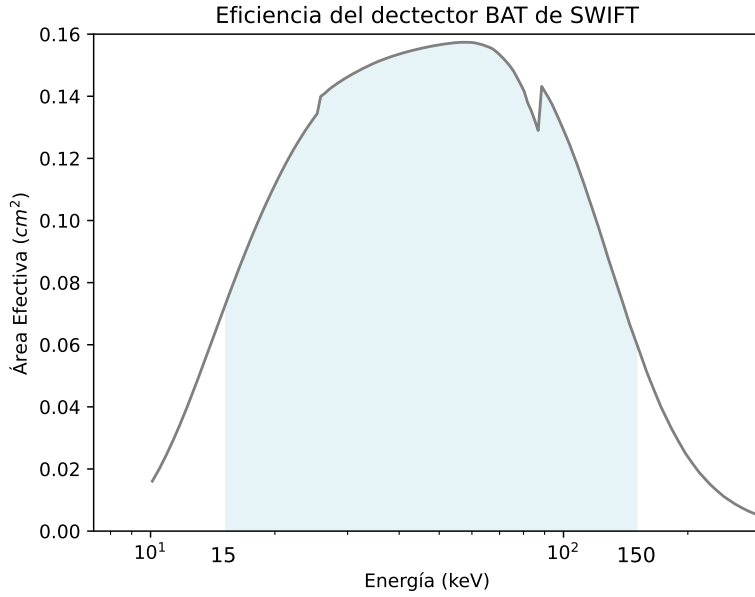


Figura 2.1: Área efectiva del detector BAT del satélite *Swift* (rango de energía efectiva de 15 a 150 keV) en el año de 2007, año de detección de los GRBs en análisis.

las limitaciones tecnológicas, los observatorios no tienen la capacidad de almacenamiento de datos extenso ni de envío continuo de datos a Tierra. Por lo tanto, solo se transmiten los datos de detecciones relevantes.

### 2.1.2. XRT

XRT es el otro instrumento principal que se encuentran a bordo de *Swift* para estudiar GRBs. Este se encarga principalmente de la detección de la postluminiscencia de los GRBs en rayos-X y, en ciertos, casos de refinar la posición de los eventos en el rango de  $\sim$ arcsegundos de precisión para observaciones con un tiempo de exposición de  $\sim$ 100 segundos.

#### Aspectos técnicos

XRT posee un telescopio Wolter 1 de 'incidencia rasante' para enfocar los rayos-X hacia un dispositivo de carga acoplada (CCD por sus siglas en ingles). Este telescopio de rayos-X tiene un FOV de 23 arcmin, y 18 arcsec de resolución, cuyo rango de energía de detección es de 0,2 – 10 keV [19]. XRT, al operar de manera autónoma, va intercambiando entre sus distintos modos de lectura dependiendo de la tasa de cuentas en la CCD. Estos modos son:

- **Modo Imagen (IM):** En este caso, el CCD funciona de manera similar a una CCD en el óptico, es decir, acumulando la carga eléctrica generada por los fotones de rayos-X sin identificar eventos individuales. Por lo tanto, no proporciona datos espectroscópicos. Sin embargo, su utilidad radica en refinar la posición de las fuentes de rayos X en el campo de visión.
- **Modo Fotodiodo (PD):** El modo de fotodiodo es un modo de alta frecuencia diseñado para proporcionar información temporal precisa de fuentes extremadamente brillantes. En el caso de los GRBs, este modo genera una curva de luz con una resolución temporal de 0,14 ms.
- **Modo *Windowed Timing* (WT):** Este modo, en lugar de leer completamente la matriz del CCD, selecciona una ventana que abarca 200 columnas del CCD correspondientes a 8 arcmin del FOV. La información almacenada es unidimensional, sumando la carga a lo largo de cada fila de la ventana de 200 columnas. Este modo posee una sensibilidad temporal de 1,8 ms, lo que es útil para el análisis de fuentes brillantes que podrían saturar el detector en modos de lectura más amplios.
- **Modo *Photon-counting* (PC):** En el modo PC se captura la imagen completa junto con la resolución espectral permitida por el instrumento. Sin embargo, la resolución temporal está limitada a 2.5 segundos. En este modo, se lee toda la matriz del CCD cada 2.5 segundos, lo que permite obtener detalles espectrales y de imagen, pero con una menor capacidad para resolver eventos temporales rápidos. La Fig.2.2 muestra el área efectiva de XRT en los modos PC y WT, destacando una ligera reducción en el área efectiva del modo PC debido a que el modo captura la totalidad de la matriz del CCD, mientras que WT detecta una pequeña ventana de la CCD aumentando el área efectiva de detección.

## 2.2. Procesamiento de datos

Los datos fueron obtenidos de la base de datos [HEASARC](#). Estos están clasificados según el instrumento que los detectó (BAT, XRT y/o UVOT) y, adicionalmente, incluyen datos auxiliares. También, es necesario considerar la base de datos de calibración (CALDB, por sus siglas en inglés) asociada a los instrumentos de alta energía *Swift*-BAT y *Swift*-XRT.

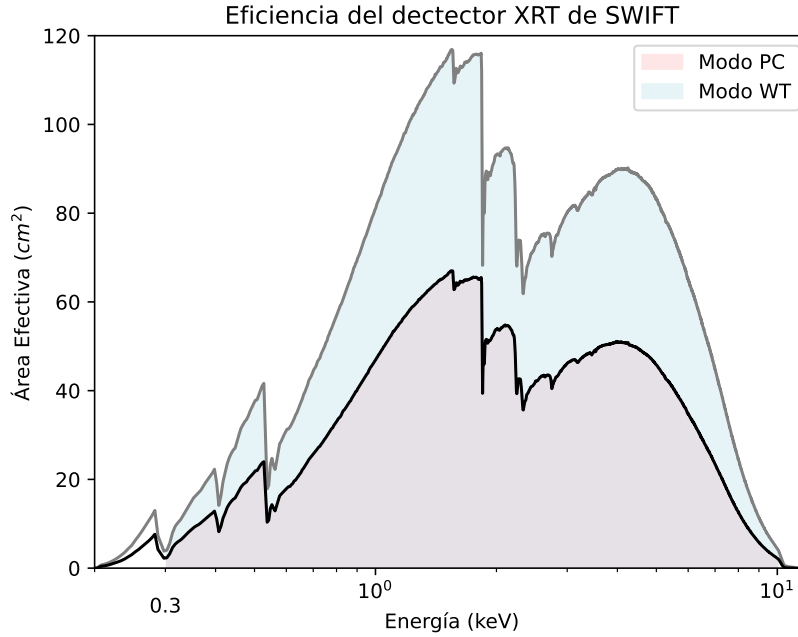


Figura 2.2: Área efectiva del detector XRT en sus dos modos de operación: PC y WT (rango de energía efectiva de 0.3 a 10 keV) en el año de 2007, año de detección de los GRBs en análisis.

Los datos mencionados deben ser procesados para obtener los productos necesarios para el análisis temporal y espectral. Para este propósito, se utilizó el software específico de *Swift*-BAT y XRT, ambos integrados en el conjunto de herramientas FTOOLS de HEASoft<sup>4</sup>. En este estudio se empleó la versión 6.31.1 de HEASoft. Además, se utilizaron los paquetes de software específicos de BAT y XRT, y adicionalmente, se empleó XSPEC [3] para realizar los distintos ajustes de los espectros.

### 2.2.1. Análisis temporal

Para el análisis temporal, se considera diferentes aproximaciones para ambos instrumentos:

1. BAT, que proporciona información sobre la emisión temprana mediante el tiempo de emisión  $\tau_{N\%}$ , el  $T_{90}$  y el retraso espectral  $\tau_{B_1 B_2}$ ; y
2. XRT, que aporta datos sobre la postluminiscencia del GRB, permitiendo distinguir la presencia o ausencia de 'emisión extendida', 'jet break', entre otros.

<sup>4</sup>HEASoft es un paquete que unifica diversos programas necesarios para el procesamiento de datos astronómicos en altas energías. [12, 49]

Por lo tanto, XRT genera información relevante sobre la evolución de la radiación emitida y, en ocasiones, ofrece indicios claros las propiedades de la postluminiscencia.

## BAT

Para obtener la curva de luz del detector BAT, es necesario utilizar los paquetes que forman parte de HEASoft. Se necesita generar un 'quality map' (qmap), el cual se usa para excluir las regiones deterioradas del detector en el rango de energía de 15 a 150 keV. Esta imagen es temporal, ya que posteriormente se identifican las secciones del detector con ruido utilizando los archivos de CALDB (los cuales almacenan el historial de errores operacionales de los detectores que, eventualmente, afectan el análisis). La Figura 2.3 presenta los 'quality map' generadas de los GRBs 070429B y 070724A.

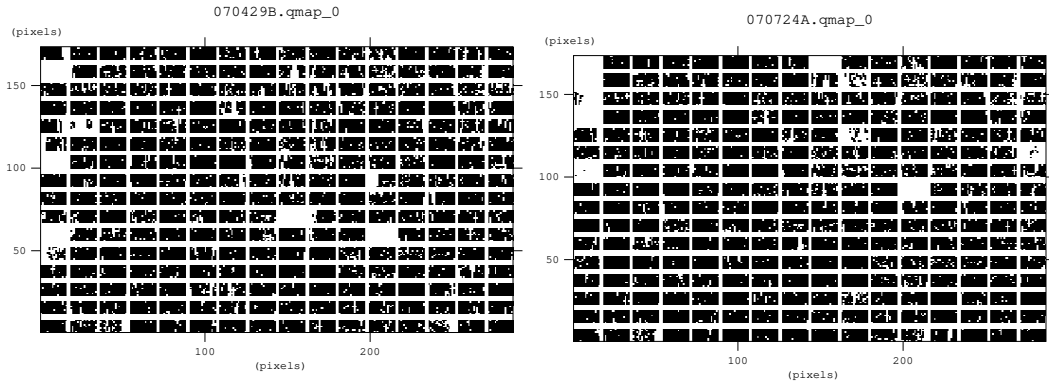


Figura 2.3: Quality maps de los GRBs 070429B (*izquierda*) y 070724A (*derecha*), respectivamente.

Una vez generado el 'quality map', se obtuvo las curvas de luz para ambos GRBs. Las curvas de luz se generaron utilizando las bandas energéticas de 15 – 25, 25 – 50, 50 – 150 y 15 – 150 keV con una resolución temporal de 128 ms. Usando estas curvas de luz, se calcularon los estimadores temporales  $T_{90}$  y el  $T_{50}$  para cada una de las bandas mediante el paquete *battblocks* de HEASoft, el cual emplea un algoritmo de bloques bayesianos<sup>5</sup> y calcular ambos parámetros temporales mencionados.

Posteriormente, se calcularon los tiempos de emisión  $\tau_{90\%}$  y  $\tau_{50\%}$  para la banda energética de 15 – 150 keV utilizando un algoritmo implementado en Python. En este proceso, se toma la curva de luz dentro de un intervalo de tiempo simétrico

<sup>5</sup>Este algoritmo consiste en dividir, de manera óptima, los datos de una serie en segmentos contiguos.[63]

que cubre la totalidad del evento. Luego, se ordena el *rate* de manera descendente y se realiza una suma acumulativa de los datos ya ordenados para determinar el punto donde se alcanza el 50% y el 90% del total de cuentas. Estos puntos definen los tiempos  $\tau_{50\%}$  y  $\tau_{90\%}$  respectivamente. En la Fig.2.4 se puede observar la curva ordenada (izquierda) y la suma acumulativa (derecha) para el GRB 070429B.

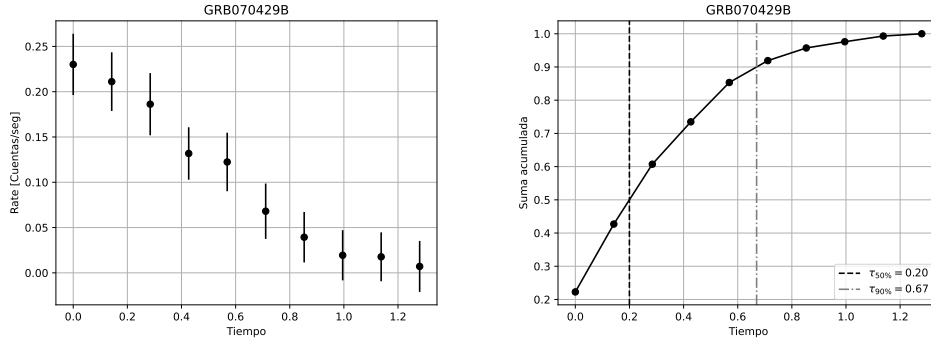


Figura 2.4: Proceso para obtener los tiempos de emisión para GRB 070429B. *Panel izquierdo:* Curva de luz ordenada según el *rate*, en orden descendente. *Panel derecho:* Suma acumulativa de la curva de luz ordenada.

Finalmente, se calcula el retraso espectral (mediante un código en Python) entre las bandas energéticas de 15 – 25 y 50 – 150 keV, el cual está dado por  $\tau = d \times \text{tamaño del bin}$  (en este caso el tamaño del bin es de 128 ms). Para esto, el primer paso es calcular la función de correlación cruzada (CCF por sus siglas en inglés) usando la ecuación:

$$CCF_{Band}(d, x, y) = \frac{\sum_{i=\max(1,1-d)}^{\min(N,N-d)} x_i y_{i+d}}{\sqrt{\sum_i x_i^2 \sum_i y_i^2}}, \quad (2.1)$$

donde los datos de la primera banda energética 15 – 25 keV corresponden a  $y_i$ , mientras que los de la segunda banda 50 – 150 keV corresponden a  $x_i$  [6, 67]. Las CCF calculadas para ambos GRBs se muestran en la Fig. 2.5.

Una vez obtenida la CCF, se realiza un ajuste gaussiano de la forma  $f(x) = A \times \exp(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2})$  a la función resultante (ver Fig. 2.5, paneles del fondo). El principal interés es obtener  $\tau$ , que corresponde a la media de la función gaussiana, es decir  $\mu$ . Esto se puede entender mejor al comparar la forma del ajuste con la Eq.2.2 expuesta por Band para interpretar la CCF donde considera que las curvas de luz tienen la forma de  $x = \exp(-t/t_h)$  y  $y = \exp(-t/t_s)$  donde el subíndice h y s<sup>6</sup> corresponden a las bandas más y menos energéticas respectivamente. [6].

<sup>6</sup>Debido a los términos en inglés *hard* y *soft*

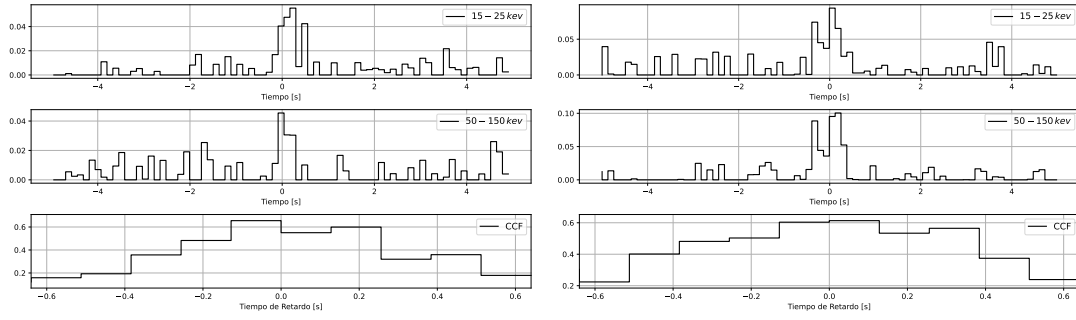


Figura 2.5: Curvas de luz para las bandas 15 – 25 y 50 – 150 keV conjuntamente con la función de correlación cruzada para los GRBs 070724A (*izquierda*) y 070429B (*derecha*).

$$CCF_{Band}(d, x, y) = \begin{cases} 2\sqrt{\frac{t_h t_s}{t_h + t_s}} \exp(-\tau/t_s), & \tau > 0, \\ 2\sqrt{\frac{t_h t_s}{t_h + t_s}} \exp(\tau/t_s), & \tau \leq 0. \end{cases} \quad (2.2)$$

El ajuste gaussiano para las CCF calculadas de ambos GRBs en análisis se muestran en la Fig.2.6.

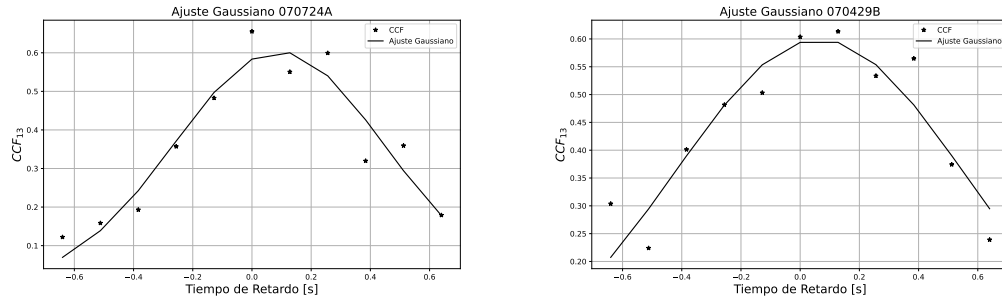


Figura 2.6: Ajustes gaussianos de las funciones de correlación cruzada

## XRT

Las curvas de luz de XRT se obtuvieron utilizando el paquete HEASoft, el cual permite leer y procesar las observaciones obtenidas por *Swift*-XRT. Para generar las curvas de luz, se usó una imagen obtenida por XRT para definir dos regiones: una que cubre la fuente y otra al fondo (una sección libre de cualquier fuente de rayos-X que servirá para restar la contaminación proveniente del medio circundante a la fuente). Para esto, se utilizó HEASoft y *SAOImageDS9*[64] (DS9, la cual una herramienta para la visualización de datos astronómicos). Para generar las regiones de extracción en las imágenes, se utilizaron las posiciones recalculadas de los GRBs,

disponibles en [24] y [21]. En el caso de GRB 070429B, se extrajo una región circular de 0.013 arcsec de radio, mientras que para GRB 070724A se extrajo una sección circular de YY arcsec de radio. Este proceso se aplicó en ambos modos del instrumento, WT y PC, como se puede ver en la Fig. 2.7. Posteriormente, se ejecuta una *Corrección de exposición*, que consiste en determinar las secciones decompuestas del CCD de XRT y corregirlas. Finalmente, se corrige la curva de luz substrayendo la curva de luz obtenida del fondo, reescalado por un factor definido como la tasa entre el área de la región de la fuente y la del fondo.

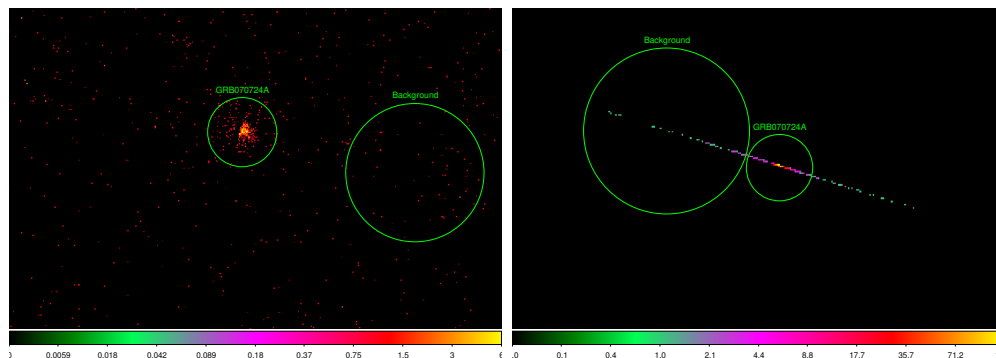


Figura 2.7: Imágenes del GRB 070724A obtenidas por *Swift*-XRT.

## 2.2.2. Análisis espectral

El análisis espectral es diferente para los instrumentos BAT y XRT. Para cada instrumento, se han extraído los datos de acuerdo al proceso estándar definido por 'The SWIFT BAT Software Guide'[45]. Por otro lado, el espectro ha sido modelado utilizando las funciones 'power law' y 'cutoff power law' (esta última solo para los datos de BAT) para comparar la calidad del ajuste. Los ajustes se han realizado usando XSPEC version: 12.13.0c [3] de HEASoft, que emplea el análisis estadístico de máxima verosimilitud (MLE, por sus siglas en inglés), considerando dos casos: que los datos sigan una estadística gaussiana o poissoniana.

Asimismo, para imitar la absorción tanto del medio interestelar (ISM, por sus siglas en inglés) como de la Vía Láctea, se han incluido modelos multiplicativos que incorporan los modelos de absorción de Tubingen-Boulder en el medio interestelar. Estos modelos calculan la sección transversal de los rayos-X absorbidos por el medio como la suma de las secciones transversales de los rayos-X debidas al ISM en sus fases gaseosa, granular y molecular [70]. Para el análisis espectral se usó los modelos  $TBabs*zTBabs$ , donde el primero es responsable de modelar la absorción galáctica

y el segundo la absorción intrínseca (es decir, del medio alrededor del progenitor). Cada uno de estos modelos de absorción tienen como parámetros libres la densidad de columna de hidrógeno (aunque la componente  $zTBabs$  tiene un parámetro adicional que es el redshift). En nuestro modelo, el parámetro de la columna de hidrógeno de la absorción galáctica se ha obtenido mediante el catálogo HI4PI<sup>7</sup>, mientras que el *redshift* obtenido a partir de la literatura.

## BAT

Para obtener el espectro, se requirieron dos archivos. El primer archivo proporciona un espectro en función de los canales, y el segundo archivo (conocido como matriz de respuesta) contiene la equivalencia entre los canales del detector y los bins de energía. Para generar estos archivos, al igual que en el análisis temporal, es necesario contar con el 'quality map' generado.

Para obtener el espectro en función de los canales, se utilizó el paquete de HEASoft *batbinevent*, que requiere varios elementos, como el 'quality map', el tiempo de inicio del evento y su duración y evitar introducir cuentas extras del ruido de fondo. Una vez obtenido el espectro, este debe corregirse aplicando un vector de error sistemático mediante el paquete *batphaseserr*, lo cual permite tener en cuenta los residuos de la matriz de respuesta (la matriz de respuesta de los detectores está incluida en los archivos presentes en CALDB).

Una vez obtenido el espectro corregido, es necesario verificar que las coordenadas del evento respecto al instrumento coincidan usando el paquete *batupdatephakw*. Finalmente, una vez verificado lo anterior, y dado que las coordenadas de los GRBs en análisis eran conocidas, se obtiene la matriz de respuesta.

Los archivos previamente generados fueron ajustados usando los modelos 'cutoff pow law'(CPL) y 'pow law'(PL) y las componentes de absorción  $TBabs*zTBabs$  implementados en XSPEC. Existen varios criterios que permiten determinar que modelo posee un mejor ajuste con respecto a los datos [44], los principales son:

- Todos los parámetros y sus errores deben estar acotados.
- El factor de normalización y los flujos no sean consistentes con cero
- El límite inferior no posea una mayor amplitud al inferior.

---

<sup>7</sup>HI4PI es un catálogo de la emisión del hidrógeno HI del cielo basado en las detecciones realizadas por EBHIS (Effelsberg-Bonn HI Survey) y GASS (Galactic All-Sky Survey)[7]



- El valor de la probabilidad de hipótesis nula<sup>8</sup> sea cercano a uno.
- Si  $\Delta\chi^2 \equiv \chi_{PL}^2 - \chi_{CPL}^2 > 6$  y el ajuste satisface todos los criterios anteriores se adopta el modelo (CPL).

Los Cuadros 2.1 y 2.2 muestran los parámetros de los modelos, flujos y  $\chi^2$  de los ajustes realizados para GR B070429B y GRB 070724A, considerando que los datos siguen tanto una estadística gaussiana como poissoniana, respectivamente.

BAT		GRB 070429B		GRB 070724A	
Parametro		CPL	PL	CPL	PL
$N_h$	$\frac{10^{22} \text{atom}}{\text{cm}^2}$ Col. de H <sup>9</sup>	$3139,76^{+3139,76}_{-3139,76}$	$5120,64^{+4685,02}_{-3169,53}$	$3,84001e - 12^{+1967,7}_{-4,20366e-10}$	$595,534^{+1543,81}_{-598,795}$
$\alpha$		$1,63849^{+2,31447}_{-2,55667}$	$3,16334^{+1,01719}_{-0,740314}$	$1,15612^{+1,54616}_{-1,13592}$	$2,24576^{+0,803016}_{-0,528684}$
$\beta$	[keV]	35,4767	N/A	$52,0309^{+172,706}_{-52,0309}$	N/A
$K$	$\frac{\text{fotones}}{\text{keV/cm}^2}$	$23,8749^{+42374}_{-23,8774}$	$2153,09^{+99733,7}_{-2153,09}$	$1,84841^{+285,706}_{-1,84841}$	$47,2402^{+976,979}_{-47,7938}$
$Flux$	$\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^2/\text{s}}$	$6,3244e - 08$	$6,5143e - 08$	$5,8868e - 08$	$6,0887e - 08$
$Lum$	[ergs/s]	$2,4394e + 50$	$2,3635e + 50$	$4,7643e + 49$	$4,4622e + 49$
$\chi^2$		49,86	50,30	49,93	50,19
G.D.L		54	55	54	55
P.H.N		$6,35e - 01$	$6,55e - 01$	$6,32e - 01$	$6,58e - 01$

Cuadro 2.1: Parámetros obtenidos usando estadística gaussiana, donde: **1.**–  $N_h$  es la columna de hidrógeno correspondiente a la absorción intrínseca. **2.**–  $\alpha$  es el índice de fotones o índice espectral de baja energía, que caracteriza la inclinación de la pendiente del espectro. **3.**–  $\beta$  corresponde a la energía 'cutoff'. **4.**–  $K$  el factor de normalización para la banda 15 – 150 keV. **5.**–  $F$  es el flujo, que mide la cantidad de energía emitida por unidad de área por unidad de tiempo. **6.**–  $Lum$  es la luminosidad, que indica la cantidad total de energía emitida por el objeto por unidad de tiempo, para el cálculo de la luminosidad se considera el modelo cosmológico  $\Lambda$ CDM los parámetros de  $H_0 = 70,0$ ,  $q_0 = 0,00$  y  $\Lambda_0 = 0,730$ . **7.**–  $G.D.L$  los grados de libertad. **8.**–  $P.H.N$  la probabilidad de hipótesis nula.

## XRT

En el caso de XRT, fue necesario generar las imágenes obtenidas por el instrumento. Dado que son las mismas utilizadas en el análisis temporal, se emplearon las imágenes previamente generadas, así como las regiones que filtraban tanto el evento como el ruido de fondo. Una vez definidas estas regiones, se generó el espectro tanto del fondo como del evento para ambos GRBs, utilizando los datos recopilados por los modos PC y WT del instrumento.

<sup>8</sup>Probabilidad de que el modelo reproduzca los datos

BAT	GRB 070429B		GRB 070724A	
Parametro	CPL	PL	CPL	PL
$N_h$ $\left[ \frac{10^{22} \text{atom}}{\text{cm}^2} \right]$	2979,48	1444,81	0,233177	$2,76918E - 11$
$\alpha$	1,00257	2,27593	1,12448	1,00586
$\beta[\text{keV}]$	22,1021	N/A	57,3524	N/A
$K$ $\left[ \frac{\text{fotones}}{\text{keV}/\text{cm}^2} \right]$	4,76073	$63,8808_{-63,8808}^{+5,87657e+16}$	1,58892	$0,425903_{-0,427056}^{+7,98697e+17}$
$Flux$ $\left[ \frac{\text{ergs}}{\text{cm}^2/\text{s}} \right]$	$6,1898e - 08$	$7,2731e - 08$	$6,2907e - 08$	$8,9064e - 08$
$Lum[\text{ergs}/\text{s}]$	$2,4713e + 50$	$2,4979e + 50$	$4,9391e + 49$	$4,8498e + 49$

Cuadro 2.2: Parámetros obtenidos usando estadística poissoniana, donde: **1.**–  $N_h$  es la columna de hidrógeno correspondiente a la absorción intrínseca. **2.**–  $\alpha$  es el índice de fotones o índice espectral de baja energía, que caracteriza la inclinación de la pendiente del espectro. **3.**–  $\beta$  corresponde a la energía 'cutoff'. **4.**–  $K$  el factor de normalización para la banda 15 – 150 keV. **5.**–  $F$  es el flujo, que mide la cantidad de energía emitida por unidad de área por unidad de tiempo. **6.**–  $Lum$  es la luminosidad, que indica la cantidad total de energía emitida por el objeto por unidad de tiempo, para el cálculo de la luminosidad se considera el modelo cosmológico  $\Lambda$ CDM los parámetros de  $H_0 = 70,0$ ,  $q_0 = 0,00$  y  $\Lambda_0 = 0,730$ .

Los datos presentes en el CALDB permiten obtener las matrices de respuesta de los detectores. No obstante, es necesario generar un archivo de respuesta auxiliar específico para cada observación. Para ello, se utiliza el paquete *xrtmkarf*, que requiere previamente la generación de un mapa de exposición mediante el paquete *xrtexpomap*. Este mapa corrige la pérdida de flujo causada por los píxeles del CCD que no se usan para la obtención de datos. Además, este proceso permite corregir los píxeles comprometidos por el impacto de un micrometeorito en el instrumento en mayo de 2005. En las Fig. 2.8(b) y Fig. 2.8(a) se observan los mapas de exposición tanto para WT como para PC del GRB070724A.

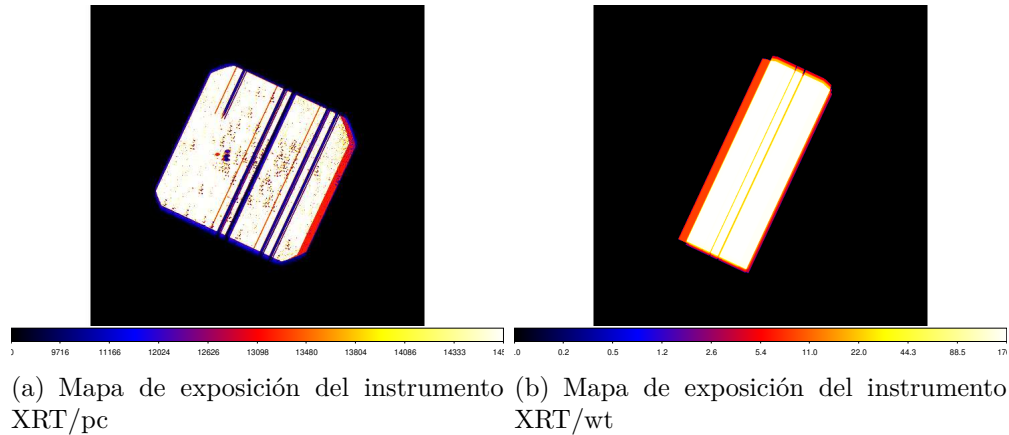


Figura 2.8: Mapas de exposición de GRB070724A

Con el espectro del evento, el espectro del fondo, el archivo de respuesta auxiliar y los datos del CALDB, se procesa el espectro generado restando el ruido de fondo y corrigiendo las secciones descompuestas del detector. Finalmente, se obtiene un espectro refinado que se utiliza para encontrar el mejor ajuste y proceder con su análisis en XSPEC.

Los resultados para ambos GRBs se presentan en los Cuadros 2.3 y 2.4 , donde se detallan los valores de los parámetros, flujos y  $\chi^2$  de los ajustes realizados tanto para GRB070429B como para GRB070724A en ambos modos, PC y WT. Es de gran importancia mencionar que para el caso de GRB070429B, se ha omitido el ajuste debido a la debilidad del evento no se han recolectado un número significativo de datos.

<b>XRT</b>	<b>GRB 070429B</b>		<b>GRB 070724A</b>	
<b>Parametro</b>	<b>PC</b>	<b>WT</b>	<b>PC</b>	
$N_h$ $\left[ \frac{10^{22} \text{atom}}{\text{cm}^2} \right]$	$5,75946^{+17,869}_{-5,11498}$	$0,409197^{+0,164196}_{-0,120198}$	$0,677414^{+0,396641}_{-0,281233}$	
$\alpha$	5,13939	$1,64463^{+0,18451}_{-0,169199}$	$2,01250^{+0,376997}_{-0,316086}$	
$K$ $\left[ \frac{\text{fotones}}{\text{keV}/\text{cm}^2} \right]$	$1,77089E - 04^{+0,0162604}_{-0,000177089}$	$7,13951E - 02^{+0,0150775}_{-0,0121643}$	$1,49559E - 03^{+0,000686653}_{-0,000440897}$	
$Flux$ $\left[ \frac{\text{ergs}}{\text{cm}^2/\text{s}} \right]$	$2,7319e - 14$	$4,1592e - 10^{+5,378e-11}_{-4,462e-11}$	$5,261e - 12^{9,45e-13}_{-7,63e-13}$	
$Lum$ [ergs/s]	$1,1194e + 44$	$2,5694e + 47^{+1,986e+46}_{-2,134e+46}$	$3,4695e + 45^{+4,925e+44}_{-5,235e+44}$	
$\chi^2$	27,54	129,91	129,91	
G.D.L	41	597	597	
P.H.N	$9,47e - 01$	1,00	1,00	

Cuadro 2.3: Parámetros obtenidos usando estadística gaussiana

<b>XRT</b>	<b>GRB 070429B</b>		<b>GRB 070724A</b>	
<b>Parametro</b>	<b>PC</b>	<b>WT</b>	<b>PC</b>	
$N_h$ $\left[ \frac{10^{22} \text{atom}}{\text{cm}^2} \right]$	$0,958892^{+2,78638}_{-0,859871}$	$0,375676^{+0,125771}_{-0,108731}$	$0,582965^{+0,281801}_{-0,220695}$	
$\alpha$	$1,92183^{+0,125771}_{-0,789493}$	$1,49307^{+1,25339}_{-0,108731}$	$1,83545^{+0,281801}_{-0,2541}$	
$K$ $\left[ \frac{\text{fotones}}{\text{keV}/\text{cm}^2} \right]$	$3,42367E - 05^{7,72807e-05}_{-1,84565e-05}$	$9,91799E - 02^{+0,0175692}_{-0,0145975}$	$2,04149E - 03^{+0,000692621}_{-0,000478651}$	
$Flux$ $\left[ \frac{\text{ergs}}{\text{cm}^2/\text{s}} \right]$	$1,396e - 13^{+5,58e-14}_{7,383e-14}$	$7,0649e - 10^{+7,281e-11}_{-7,699e-11}$	$9,0288e - 12^{+1,3612e-12}_{-1,4528e-12}$	
$Lum$ [ergs/s]	$4,1467e + 44^{1,3723e+44}_{3,6521e+44}$	$4,2081e + 47^{+2,979e+46}_{3,611e+46}$	$5,7673e + 45^{4,487e+44}_{6,113e+44}$	

Cuadro 2.4: Parámetros obtenidos usando estadística poissoniana

### 2.2.3. Análisis de ambiente galáctico

El análisis temporal y espectral nos proporciona información detallada del evento. Sin embargo, también es fundamental analizar su entorno galáctico, ya que complementa los datos espectrales y temporales. Entre los aspectos relevantes se incluye el tipo de galaxia anfitriona. Como se mencionó en 1.4.2, los GRBs, dependiendo de si son cortos o largos, suelen tener diferentes tipos de galaxias anfitrionas.

Otro factor importante es el *redshift*, que se obtiene mediante métodos espectroscópicos. Se ha reportado que, en su mayoría, los GRBs cortos presentan un *redshift* pequeño, cuya media en SGRBs es de  $z \approx 0,25$ , mientras que en los LGRBs es de  $z \approx 2,5$  [48]. La tasa de formación estelar (SFR por sus siglas en inglés) también es crucial, ya que proporciona información sobre la edad y el tipo de galaxia. Finalmente, el desplazamiento entre la posición del GRB y su galaxia anfitriona (*offset*) también es un indicador del tipo de GRB. Por ejemplo, “offsets” grandes suelen estar asociado con SGRBs [8].

A continuación, el Cuadro 2.5 presenta los diferentes parámetros que fueron recopilados de la literatura.

GRB	RA (J2000)	DEC (J2000)	Redshift	SFR [ $M_{\odot} yr^{-1}$ ]	Offset	Ref
GRB 070429B	21 : 52 : 03,729	-38 : 49 : 42,84	0,904	$1,1 \pm 0,5$	$< 0,6''$	[15] [56] [24]
GRB 070724A	01 : 51 : 14,05	-18 : 35 : 39,1	0,457	2.5	$0,82'' \pm 0,01''$	[9] [25] [23] [13]

Cuadro 2.5: Parámetros relativos al análisis del entorno galáctico

# Capítulo 3

---

## Resultados, conclusiones y recomendaciones

---

### 3.1. Resultados

A través de la metodología explicada en las secciones anteriores, se obtuvieron los productos necesarios para el análisis de los GRBs, abarcando el análisis temporal y espectral de los instrumentos BAT y XRT de *Swift*. Los productos generados, junto con la información obtenida del entorno galáctico, permiten dilucidar los progenitores de estos GRBs.

#### 3.1.1. Resultados del análisis temporal

Los resultados del análisis temporal proporcionan información valiosa sobre la variabilidad temporal de los GRBs. Este análisis permite estudiar tanto el progenitor que originó el GRB, así como la energía liberada por la interacción con el medio interestelar. Para ello, se emplean parámetros cuantitativos y cualitativos.

Por un lado, se obtuvieron parámetros temporales como el  $T_{90}$ , crucial para el estudio de las curvas de luz de BAT relacionadas con la emisión temprana del evento. Por otro lado, se utilizan métodos cualitativos para analizar la estructura de la curva de luz obtenida por XRT, y se comparan estos resultados con la literatura existente.

## BAT

BAT es el instrumento que permite la detección de la emisión temprana de los GRBs. El análisis temporal se resume en obtener la curva de luz en diferentes canales energéticos y obtener los diferentes parámetros temporales mediante. Las curvas de luz obtenidas se las puede ver en la Fig.3.1.

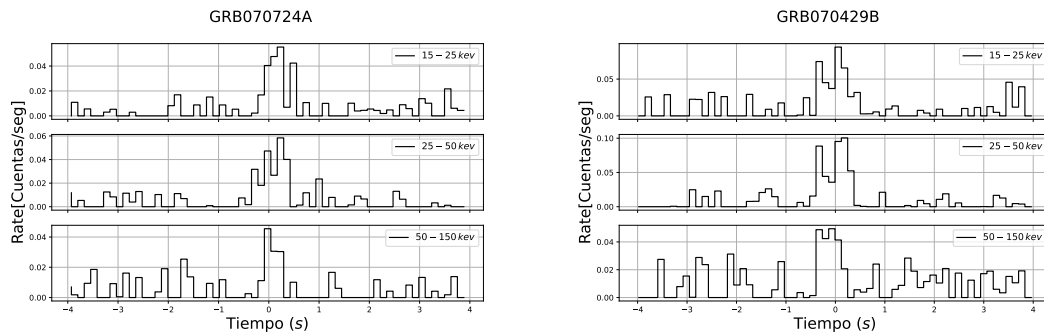


Figura 3.1: Curvas de luz en tres bandas energéticas (15 – 25, 25 – 50 y 50 – 150 keV) de los GRBs 070724A y 070429B.

Mediante sus curvas de luz se pudo obtener los diferentes parámetros que se encuentran en Cuadro 3.1 .

GRB	$T_{90}(15 - 150 \text{ keV})$ [s]	$T_{50}$ [s]	$\tau_{90\%}$ [s]	$\tau_{50\%}$ [s]	$\tau_{13}$ [s]
GRB 070429B	$0,64 \pm 0,181$	$0,384 \pm 0,128$	$0,67 \pm 0,128$	$0,2 \pm 0,128$	$0,071 \pm 0,029$
GRB 070724A	$0,384 \pm 0,181$	$0,256 \pm 0,128$	$0,83 \pm 0,128$	$0,14 \pm 0,128$	$0,064 \pm 0,025$

Cuadro 3.1: Parámetros obtenidos del análisis temporal

El  $T_{90}$  de ambos eventos tienen una duración menor a los 2 segundos, por tanto, ambos corresponden al grupo de SGRBs, que, de acuerdo con la clasificación canónica, los posibles progenitores de estos eventos son fusiones de objetos compactos, tal como se mencionó en la sección §1.4.2. Adicionalmente, se obtuvo el  $T_{90}$  para cada banda espectral, como se muestra en el Cuadro 3.2. Estos valores son  $< 2$  segundos, lo cual son consistentes con resultados previos. Además, en la banda de 50–120 keV, el  $T_{90}$  es consistente con cero, que estaría asociado con la sensibilidad del detector en estas bandas (como se evidencia en 2.1) y/o una posible emisión más débil del GRB en estas energías.

GRB	$T_{90}(15 - 25 \text{ keV})$	$T_{90}(25 - 50 \text{ keV})$	$T_{90}(50 - 150 \text{ keV})$
GRB 070429B	$0,768 \pm 0,286$	$0,64 \pm 0,286$	$0,512 \pm 0,572$
GRB 070724A	$0,512 \pm 0,286$	$0,64 \pm 0,286$	$0,512 \pm 0,64$

Cuadro 3.2:  $T_{90}$  en diferentes bandas energéticas

Se calculó el retraso espectral, un parámetro sobre todo importante para los LGRBs. Sin embargo, en el presente estudio, se encontró que ambos eventos presentan un retraso espectral no consistente con cero, lo que constituye una primera evidencia de la peculiaridad de estos eventos.

La discrepancia entre el tiempo de emisión  $\tau_{90\%}$ ,  $\tau_{50\%}$  y los parámetros  $T_{90}$ ,  $T_{50}$ , especialmente el hecho de que  $\tau_{90\%} > T_{90}$ , pone de manifiesto la necesidad de nuevos parámetros que caractericen con mayor precisión la variabilidad temporal del fenómeno.

Las curvas de luz de los GRBs presentan formas irregulares y carecen de escalas de tiempo características. Esto hace que su interpretación sea compleja, especialmente en el caso de los SGRBs, donde la duración del evento es tan breve que la detección no logra capturar una cantidad amplia de datos.

## XRT

Las observaciones realizadas por el instrument XRT proporciona información crucial sobre la 'postluminiscencia' de los GRBs. El análisis se realizó de forma cualitativa, comparando las distintas etapas de la 'postluminiscencia'. Para ello, se tomó como referencia la Fig.3.2, el cual representa la curva de luz estándar de la postluminiscencia de los GRBs.

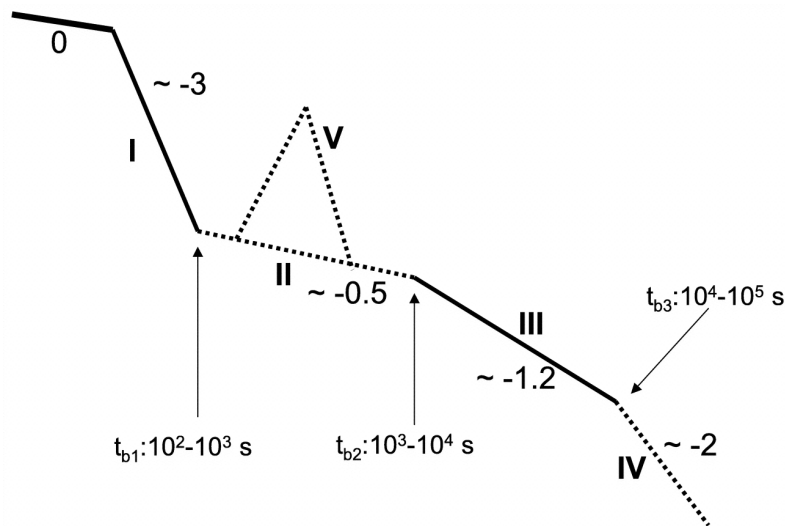


Figura 3.2: Curva de luz estándar de la postluminiscencia de los GRBs, extraída de [73].

El primer análisis del XRT se llevó a cabo para el evento GRB 070429B, y es-

tuvo limitado por el bajo número de fotones recolectados por el detector, es decir, una baja relación señal ruido (SNR por sus siglas en inglés). Como se observa en la Fig.3.3, se obtuvieron pocos fotones en el modo PC y ninguno en el modo WT. Esto estaría asociado al flujo intrínseco del objeto en el rango de los rayos-X. Desafortunadamente, no es posible extraer información relevante de la curva de luz.

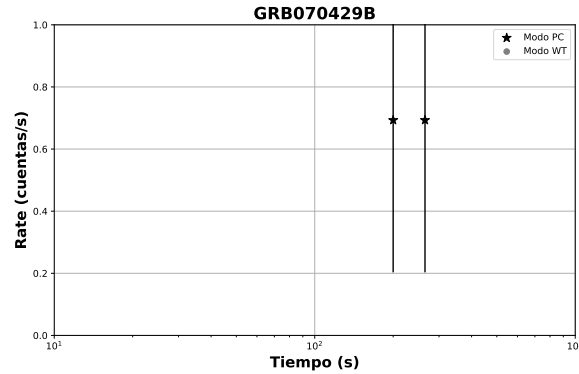


Figura 3.3: Curva de luz en el canal de energía de XRT (0,3 – 10 keV) para el GRB 070429B.

Por otro lado, la detección de la 'postluminiscencia' del GRB 070724A por parte del instrumento XRT tuvo un alto SNR. En la Fig. 3.4 se observa la curva de luz obtenida, y se distinguen dos fases que componen la curva de luz, como se muestra en 3.2. La primera sección, denominada  $I$ , está asociada a la fase de decaimiento, mientras que la segunda sección, denominada  $V$ , corresponde a la región de '*X-ray flares*'. La evidencia sugiere que esta región está directamente relacionada con el mecanismo principal responsable de la emisión temprana. Por lo tanto, la duración del GRB probablemente sea mucho más larga de lo que reporta el  $T_{90}$  [71], aportando mayor evidencia a la peculiaridad del evento GRB 070724A.

### 3.1.2. Resultados del análisis espectral

#### BAT

Para el análisis espectral se realizaron múltiples ajustes con diferentes modelos espectrales y asumiendo diferentes tipos de estadísticas. Para seleccionar aquel que se ajuste mejor a los datos obtenidos por BAT se tomaron en cuenta los criterios mencionados en §2.2.2 y se ha seleccionado aquella que cumpla con la mayoría de los criterios. No obstante, en el caso de BAT no se ha obtenido un ajuste que satisfaga



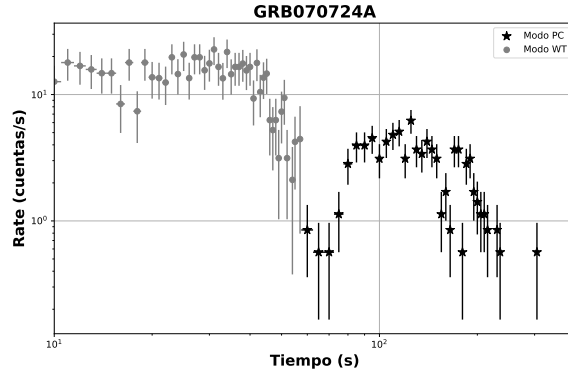


Figura 3.4: Curva de luz en el canal de energía de XRT (0,3 – 10 keV) para el GRB 070724A.

la totalidad de los criterios, lo cual se debe a la baja duración del evento y de la SNR.

Para el análisis espectral de los dos GRBs se seleccionó la estadística gaussiana con el modelo de 'power law', ya que la mayoría de parámetros se encuentran acotados, el valor de la probabilidad de hipótesis nula es cercana a 0,7 y el valor de  $\frac{\chi^2}{G.D.L}$  es cercano a uno. Los parámetros se los puede encontrar en 2.2.2 mientras que en Figs. 3.5 y 3.6 se presentan los espectros para ambos GRBs.

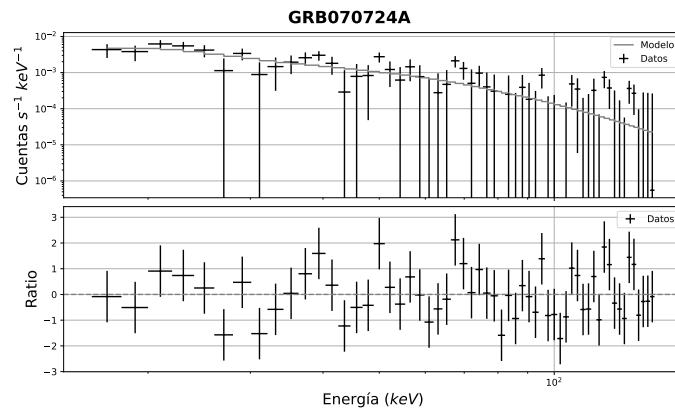


Figura 3.5: Espectro en BAT (15 – 150 keV) para el GRB070724A, la columna de hidrógeno para la absorción galáctica fue de  $1,20e + 20 \text{ cm}^2$ .

En la literatura, se encuentran análisis comparativos del parámetro  $\alpha$ , que es el índice de fotones o índice espectral a bajas energías, de los GRBs detectados por los telescopios espaciales BATSE y *Fermi*-GBM. Aunque estos datos no corresponden al detector *Swift*-BAT utilizado en nuestro estudio, el fenómeno subyacente es el mismo, por lo que es válido realizar el análisis comparativo.

En [50], se menciona que la media de  $\alpha$  para los LGRBs suele ser aproximada-

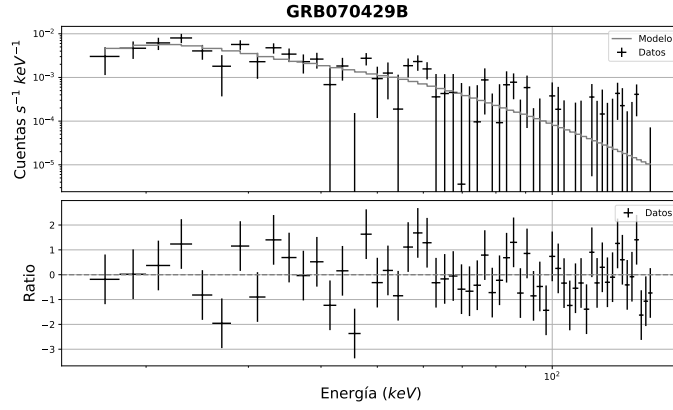


Figura 3.6: Espectro en BAT (15 – 150 keV) para el GRB070429B, la columna de hidrógeno para la absorción galáctica fue de  $1,93e + 20 \text{ cm}^2$ .

mente  $\sim -1$ , mientras que para los SGRBs, la media de  $\alpha$  es alrededor de  $\sim -0,5$ . En nuestro análisis, los parámetros  $\alpha$  obtenidos son consistentes con 0, acercándose más a la media de los SGRBs que a la de los LGRBs.

### 3.1.3. XRT

Como se mencionó anteriormente, se realizaron múltiples ajustes utilizando diferentes modelos y asumiendo diferentes estadísticas. Para seleccionar el modelo que mejor se ajusta a los datos obtenidos por XRT, se consideraron los criterios especificados en §2.2.2, eligiendo aquel que cumpliera con la mayoría de estos. En el caso del XRT, se encontró que casi todos los criterios fueron satisfechos.

En este caso, se ha optado por utilizar la estadística poissoniana debido a que todos los parámetros extraídos para ambos GRBs en análisis estaban acotados, y la prueba de  $\frac{\chi^2}{G.D.L}$ , en el caso de utilizar la estadística gaussiana, arrojó valores significativamente distintos de 1. Los parámetros se los puede encontrar en §2.2.2 mientras que las Figs. 3.7 y 3.8 muestran los espectros de la postluminiscencia para ambos GRBs.

Ambos ajustes son significativos. No obstante para GRB 070429B no se tienen las suficientes cuentas para el modo WT.

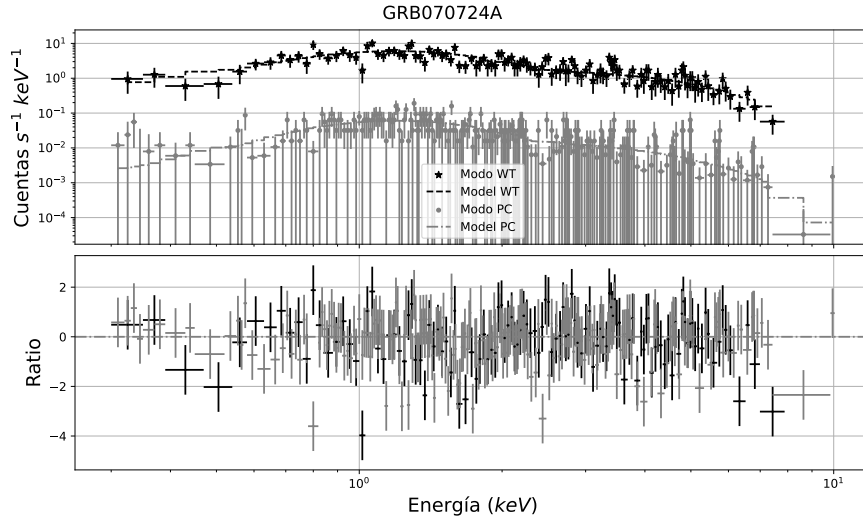


Figura 3.7: Espectro en XRT (0,3 – 10 keV) para el GRB 070724A, la columna de hidrógeno para la absorción galáctica fue de  $1,20 \times 10^{20} \text{ cm}^2$ .

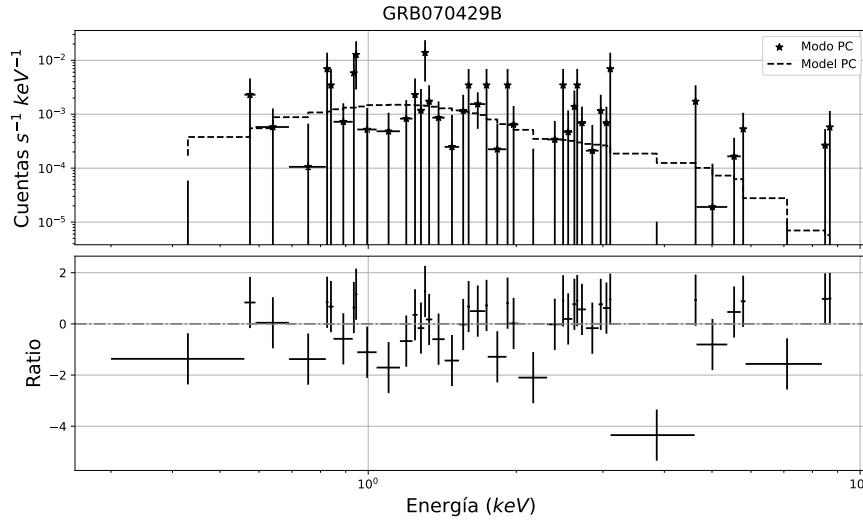


Figura 3.8: Espectro en XRT (0,3 – 10 keV) para el GRB 070429B, la columna de hidrógeno para la absorción galáctica fue de  $1,93 \times 10^{20} \text{ cm}^2$ .

Todos los programas usados para el análisis temporal y espectral, obtención de parámetros y gráficas, se encuentran en el siguiente [repositorio](#).

### 3.1.4. Discusión ambiente galáctico

El primer parámetro que aporta información sobre el tipo de GRB según la clasificación canónica es el *redshift*. En [48] se menciona que las galaxias anfitrionas de los SGRBs suelen tener *redshift* pequeños, con una media de aproximadamente 0.25. Datos más actuales [53] indican que la media del *redshift* es  $z = 0,64^{+0,83}_{-0,32}$ . La

diferencia entre ambos estudios radica en la población de GRBs analizada: la primera se centra en SGRBs detectados por BATSE, mientras que la segunda se basa en datos de Swift. La media de los *redshift* de las galaxias anfitrionas en ambos estudios respalda la clasificación canónica de los GRBs, ya que sus valores son congruentes con las medias reportadas en la literatura.

El segundo parámetro analizado es la tasa de formación estelar (SFR). Según [53], los GRBs cortos tienen una media de  $SFR = 1,44_{-1,35}^{+9,37}$ . Además, se menciona que aproximadamente el  $\approx 84\%$  de los SGRBs tienen galaxias anfitrionas en etapa de formación estelar. Los SFR de los GRBs en estudio son congruentes con la media reportada, y en [53] se indica que ambas galaxias anfitrionas están en etapa de formación estelar.

Finalmente, el offset suele ser un parámetro clave para identificar el tipo de progenitor del evento, ya que los GRBs con un alto offset generalmente tienen como progenitor eventos de fusión. En [27] se presenta el offset transformado a kiloparsecs, con un valor de aproximadamente 6 para GRB 070429B y de aproximadamente 5.52 para GRB 070724A. Ambos valores no se los pueden catalogar como un offset alto, por lo tanto, la evidencia no es sólida para asociarlos con un evento de fusión como progenitor.

## 3.2. Conclusiones y recomendaciones

El retraso temporal en las curvas de luz, pone de manifiesto la peculiaridad de los eventos y refleja que la clasificación canónica basada en el parámetro temporal  $T_{90}$  no permite asociar de manera óptima el progenitor de los GRBs.

La discrepancia entre  $T_{90}$  y el tiempo de emisión, así como la presencia de 'X-ray Flares', evidencia que  $T_{90}$  no es un parámetro adecuado para caracterizar la variabilidad temporal del evento.

La información del entorno galáctico permite contrastar los resultados con la literatura existente. No obstante, debido a que los SGRBs no están asociados a un tipo específico de galaxia anfitriona, no se pudo llegar a una conclusión definitiva.

Para mejorar los ajustes de los espectros, especialmente en el caso de BAT, se podría considerar cambiar el modelo utilizado, siempre y cuando sea coherente con la interpretación física de los GRBs. Además, es posible mejorar la reducción de datos para obtener datos filtrados de mayor calidad, lo cual permitiría lograr un

ajuste más preciso.

La experiencia en el procesamiento y análisis de datos de libre acceso y en software libre facilita la adaptación a cualquier herramienta. Por tanto, la experiencia acumulada a lo largo del desarrollo de este análisis ha sido sumamente beneficiosa.

Teniendo en cuenta las recomendaciones presentadas, los resultados obtenidos se presentarán en el simposio de ondas gravitacionales que tendrá lugar en la Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional (IAU).

---

## Referencias bibliográficas

---

- [1] Benjamin P Abbott, Robert Abbott, TD Abbott, F Acernese, K Ackley, C Adams, T Adams, P Addresso, RX Adhikari, VB Adya, et al. Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: Gw170817 and grb 170817a. *The Astrophysical Journal Letters*, 848(2):L13, 2017.
- [2] Tomas Ahumada, Leo P Singer, Shreya Anand, Michael W Coughlin, Mansi M Kasliwal, Geoffrey Ryan, Igor Andreoni, S Bradley Cenko, Christoffer Fremling, Harsh Kumar, et al. Discovery and confirmation of the shortest gamma-ray burst from a collapsar. *Nature Astronomy*, 5(9):917–927, 2021.
- [3] K. A. Arnaud. XSPEC: The First Ten Years. In George H. Jacoby and Jeanette Barnes, editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems V*, volume 101 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 17, January 1996.
- [4] D Band, J Matteson, L Ford, B Schaefer, David Palmer, B Teegarden, T Cline, M Briggs, W Paciesas, G Pendleton, et al. Batse observations of gamma-ray burst spectra. i-spectral diversity. *Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X)*, vol. 413, no. 1, p. 281-292., 413:281–292, 1993.
- [5] David Band. Overview: Grb spectral analysis, 2008.
- [6] David L Band. Gamma-ray burst spectral evolution through cross-correlations of discriminator light curves. *The Astrophysical Journal*, 486(2):928, 1997.
- [7] N Ben Bekhti, L Flöer, R Keller, J Kerp, D Lenz, B Winkel, J Bailin, MR Calabretta, L Dedes, HA Ford, et al. Hi4pi: a full-sky h i survey based on ebhis and gass. *Astronomy & Astrophysics*, 594:A116, 2016.

- [8] E Berger. A short gamma-ray burst “no-host” problem? investigating large progenitor offsets for short grbs with optical afterglows. *The Astrophysical Journal*, 722(2):1946, 2010.
- [9] E. Berger, S. B. Cenko, D. B. Fox, and A. Cucchiara. DISCOVERY OF THE VERY RED NEAR-INFRARED AND OPTICAL AFTERGLOW OF THE SHORT-DURATION GRB 070724A. *The Astrophysical Journal*, 704(1):877–882, September 2009.
- [10] Edo Berger, Paul Antony Price, Stephen B Cenko, Avishay Gal-Yam, AM Soderberg, M Kasliwal, DC Leonard, PB Cameron, Dale A Frail, Shrinivas R Kulkarni, et al. The afterglow and elliptical host galaxy of the short  $\gamma$ -ray burst grb 050724. *Nature*, 438(7070):988–990, 2005.
- [11] PN Bhat and Sylvain Guiriec. An overview of the current understanding of gamma-ray bursts in the fermi era. *arXiv preprint arXiv:1111.4909*, 2011.
- [12] J. K. Blackburn, R. A. Shaw, H. E. Payne, J. J. E. Hayes, and Heasarc. FTOOLS: A general package of software to manipulate FITS files. Astrophysics Source Code Library, record ascl:9912.002, December 1999.
- [13] J. S. Bloom. GRB 070724: pre-imaging shows a source in the XRT error circle. *GRB Coordinates Network*, 6658:1, January 2007.
- [14] Joshua S Bloom, JX Prochaska, D Pooley, CH Blake, RJ Foley, Saurabh Jha, E Ramirez-Ruiz, J Granot, AV Filippenko, Steinn Sigurdsson, et al. Closing in on a short-hard burst progenitor: constraints from early-time optical imaging and spectroscopy of a possible host galaxy of grb 050509b. *The Astrophysical Journal*, 638(1):354, 2006.
- [15] S. Bradley Cenko et al. GRBs 070429B and 070714B: The High End of the Short-Duration Gamma-Ray Burst Redshift Distribution, 2008.
- [16] Michael S. Briggs, William S. Paciesas, Geoffrey N. Pendleton, Charles A. Meegan, Gerald J. Fishman, John M. Horack, Martin N. Brock, Chryssa Kouveliotou, Dieter H. Hartmann, and Jon Hakkila. Batse observations of the large-scale isotropy of gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 459:40, March 1996.
- [17] Omer Bromberg, Ehud Nakar, Tsvi Piran, et al. An observational imprint of the collapsar model of long gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 749(2):110, 2012.

- [18] Omer Bromberg, Ehud Nakar, Tsvi Piran, et al. Short versus long and collapsars versus non-collapsars: a quantitative classification of gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 764(2):179, 2013.
- [19] David N Burrows, JE Hill, JAea Nousek, JA Kennea, A Wells, JP Osborne, AF Abbey, A Beardmore, K Mukerjee, ADT Short, et al. The swift x-ray telescope. *Space science reviews*, 120:165–195, 2005.
- [20] G Cavallo and MJ Rees. A qualitative study of cosmic fireballs and  $\gamma$ -ray bursts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 183(3):359–365, 1978.
- [21] S. B. Cenko, A. Rau, E. Berger, P. A. Price, and A. Cucchiara. GRB 070724: P60 and Gemini observations. *GRB Coordinates Network*, 6664:1, January 2007.
- [22] J. A. Chacón. Búsqueda sistemática de grbs peculiares, tipo grb200826a, en el tercer catálogo de swift/bat. *Quito : EPN, 2022.*, 2022.
- [23] S. Covino, S. Piranomonte, S. D. Vergani, P. D’Avanzo, and L. Stella. GRB 070724: optical observations. *GRB Coordinates Network*, 6666:1, January 2007.
- [24] A. Cucchiara, S. B. Cenko, D. B. Fox, E. Berger, and J. S. Bloom. GRB070429B: position correction. *GRB Coordinates Network*, 6370:1, January 2007.
- [25] A. Cucchiara, D. B. Fox, S. B. Cenko, E. Berger, P. A. Price, and J. Radomski. GRB070724: host galaxy redshift. *GRB Coordinates Network*, 6665:1, January 2007.
- [26] Barthelmy et al. The burst alert telescope (bat) on the swift midex mission. *Space Science Reviews*, 120(3–4):143–164, October 2005.
- [27] Fong et al. Short grb host galaxies. i. photometric and spectroscopic catalogs, host associations, and galactocentric offsets. *The Astrophysical Journal*, 940(1):56, November 2022.
- [28] Klebesadel et al. Observations of gamma-ray bursts of cosmic origin. *Astrophysical Journal*, vol. 182, p. L85, 182:L85, 1973.
- [29] Alexei V Filippenko. Optical spectra of supernovae. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 35(1):309–355, 1997.



- [30] Gerald J Fishman, Charles A Meegan, Robert B Wilson, Martin N Brock, John M Horack, Chryssa Kouveliotou, Sethanne Howard, William S Paciesas, Michael S Briggs, Geoffrey N Pendleton, et al. The first batse gamma-ray burst catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 92, no. 1, p. 229-283, 92:229–283, 1994.
- [31] Wen-fai Fong, Edo Berger, Ryan Chornock, Raffaella Margutti, Andrew J Levan, Nial R Tanvir, Rachel L Tunnicliffe, Ian Czekala, Derek B Fox, Daniel A Perley, et al. Demographics of the galaxies hosting short-duration gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 769(1):56, 2013.
- [32] AS Fruchter, AJ Levan, L Strolger, PM Vreeswijk, SE Thorsett, D Bersier, I Burud, JM Castro Cerón, AJ Castro-Tirado, C Conselice, et al. Long  $\gamma$ -ray bursts and core-collapse supernovae have different environments. *Nature*, 441(7092):463–468, 2006.
- [33] Chris L. Fryer, S. E. Woosley, Marc Herant, and Melvyn B. Davies. Merging white dwarf/black hole binaries and gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 520(2):650–660, August 1999.
- [34] TJ Galama, PM Vreeswijk, J Van Paradijs, C Kouveliotou, T Augusteijn, F Patat, J Heise, PJ Groot, RAMJ Wijers, E Pian, et al. On the possible association of sn 1998bw and grb 980425. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 138(3):465–466, 1999.
- [35] Neil Gehrels, Guido Chincarini, PE Giommi, KO Mason, JA Nousek, AA Wells, NE White, SD Barthelmy, David N Burrows, Lynn R Cominsky, et al. The swift gamma-ray burst mission. *The Astrophysical Journal*, 611(2):1005, 2004.
- [36] Neil Gehrels, CL Sarazin, PT O'brien, B Zhang, Lieven Barbier, Scott D Barthelmy, A Blustin, David N Burrows, J Cannizzo, JR Cummings, et al. A short  $\gamma$ -ray burst apparently associated with an elliptical galaxy at redshift  $z= 0.225$ . *Nature*, 437(7060):851–854, 2005.
- [37] Andreja Gomboc. Unveiling the secrets of gamma ray bursts. *Contemporary Physics*, 53(4):339–355, 2012.
- [38] Jeremy Goodman. Are gamma-ray bursts optically thick? *Astrophysical Journal, Part 2-Letters to the Editor (ISSN 0004-637X)*, vol. 308, Sept. 15, 1986, p. L47-L50., 308:L47–L50, 1986.

- [39] C Graziani, DQ Lamb, and GH Marion. Evidence against an association between gamma-ray bursts and type i supernovae. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 138(3):469–470, 1999.
- [40] RM Kippen, MS Briggs, JM Kommers, C Kouveliotou, K Hurley, CR Robinson, J Van Paradijs, DH Hartmann, TJ Galama, and PM Vreeswijk. On the association of gamma-ray bursts with supernovae. *The Astrophysical Journal*, 506(1):L27, 1998.
- [41] Chryssa Kouveliotou, Charles A Meegan, Gerald J Fishman, Narayana P Bhat, Michael S Briggs, Thomas M Koshut, William S Paciesas, and Geoffrey N Pendleton. Identification of two classes of gamma-ray bursts. *Astrophysical Journal, Part 2-Letters (ISSN 0004-637X)*, vol. 413, no. 2, p. L101-L104., 413:L101–L104, 1993.
- [42] Andrew Levan. *Gamma-Ray Bursts*. 2514-3433. IOP Publishing, 2018.
- [43] Li-Xin Li and Bohdan Paczyński. Transient events from neutron star mergers. *The Astrophysical Journal*, 507(1):L59–L62, November 1998.
- [44] Amy Lien, Takanori Sakamoto, Scott D Barthelmy, Wayne H Baumgartner, John K Cannizzo, Kevin Chen, Nicholas R Collins, Jay R Cummings, Neil Gehrels, Hans A Krimm, et al. The third swift burst alert telescope gamma-ray burst catalog. *The Astrophysical Journal*, 829(1):7, 2016.
- [45] CB Markwardt, SD Barthelmy, JC Cummings, D Hullinger, HA Krimm, and A Parsons. The swift bat software guide. *NASA/GSFC, Greenbelt, MD*, 6, 2007.
- [46] MR Metzger, SG Djorgovski, SR Kulkarni, CC Steidel, KL Adelberger, DA Frail, E Costa, and F Frontera. Spectral constraints on the redshift of the optical counterpart to the  $\gamma$ -ray burst of 8 may 1997. *Nature*, 387(6636):878–880, 1997.
- [47] Igor G Mitrofanov, Dmitriy S Anfimov, Maxim L Litvak, Anton B Sanin, Yuriy Yu Saevich, Michael S Briggs, William S Paciesas, Geoffrey N Pendleton, Robert D Preece, Thomas M Koshut, et al. The emission time of gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 522(2):1069, 1999.
- [48] Ehud Nakar. Short-hard gamma-ray bursts. *Physics Reports*, 442(1-6):166–236, 2007.

- [49] Nasa High Energy Astrophysics Science Archive Research Center (Heasarc). HEASoft: Unified Release of FTOOLS and XANADU. Astrophysics Source Code Library, record ascl:1408.004, August 2014.
- [50] Lara Nava, Giancarlo Ghirlanda, Gabriele Ghisellini, and Annalisa Celotti. Fermi/gbm and batse gamma-ray bursts: comparison of the spectral properties. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 415(4):3153–3162, 2011.
- [51] Jay P Norris and Jerry T Bonnell. Short gamma-ray bursts with extended emission. *The Astrophysical Journal*, 643(1):266, 2006.
- [52] JP Norris, GF Marani, and JT Bonnell. Connection between energy-dependent lags and peak luminosity in gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 534(1):248, 2000.
- [53] Anya E. Nugent, Wen-Fai Fong, Yuxin Dong, Joel Leja, Edo Berger, Michael Zevin, Ryan Chornock, Bethany E. Cobb, Luke Zoltan Kelley, Charles D. Kilpatrick, Andrew Levan, Raffaella Margutti, Kerry Paterson, Daniel Perley, Alicia Rouco Escorial, Nathan Smith, and Nial Tanvir. Short GRB Host Galaxies. II. A Legacy Sample of Redshifts, Stellar Population Properties, and Implications for Their Neutron Star Merger Origins. , 940(1):57, November 2022.
- [54] Bohdan Paczynski. Gamma-ray bursters at cosmological distances. *Astrophysical Journal, Part 2-Letters to the Editor (ISSN 0004-637X)*, vol. 308, Sept. 15, 1986, p. L43-L46., 308:L43–L46, 1986.
- [55] Bohdan Paczynski. How far away are gamma-ray bursters? *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 107:1167, December 1995.
- [56] D. A. Perley, J. S. Bloom, M. Modjaz, D. Poznanski, and C. C. Thoene. GRB 070429B: probable host galaxy and redshift. *GRB Coordinates Network*, 7140:1, January 2007.
- [57] Daniel A Perley, T Krühler, S Schulze, A de Ugarte Postigo, J Hjorth, Edo Berger, SB Cenko, R Chary, A Cucchiara, R Ellis, et al. The swift gamma-ray burst host galaxy legacy survey. i. sample selection and redshift distribution. *The Astrophysical Journal*, 817(1):7, 2016.
- [58] Tsvi Piran. Gamma-ray bursts and the fireball model. *Physics Reports*, 314(6):575–667, 1999.

- [59] J. A. Rueda, R. Ruffini, Liang Li, R. Moradi, N. Sahakyan, and Y. Wang. The white dwarf binary merger model of grb 170817a. *International Journal of Modern Physics D*, 31(07), February 2022.
- [60] T Sakamoto, SD Barthelmy, L Barbier, JR Cummings, EE Fenimore, N Gehrels, D Hullinger, HA Krimm, CB Markwardt, DM Palmer, et al. The first swift bat gamma-ray burst catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 175(1):179, 2008.
- [61] T Sakamoto, SD Barthelmy, WH Baumgartner, JR Cummings, EE Fenimore, N Gehrels, HA Krimm, CB Markwardt, DM Palmer, AM Parsons, et al. The second swift burst alert telescope gamma-ray burst catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 195(1):2, 2011.
- [62] Sandra Savaglio, Karl Glazebrook, and D Le Borgne. The galaxy population hosting gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 691(1):182, 2009.
- [63] Jeffrey D. Scargle. Studies in astronomical time series analysis. v. bayesian blocks, a new method to analyze structure in photon counting data\*. *The Astrophysical Journal*, 504(1):405, sep 1998.
- [64] Smithsonian Astrophysical Observatory. SAOImage DS9: A utility for displaying astronomical images in the X11 window environment. Astrophysics Source Code Library, record ascl:0003.002, March 2000.
- [65] Eleonora Troja, CL Fryer, B O’Connor, G Ryan, S Dichiara, A Kumar, N Ito, R Gupta, RT Wollaeger, JP Norris, et al. A nearby long gamma-ray burst from a merger of compact objects. *Nature*, 612(7939):228–231, 2022.
- [66] RL Tunnicliffe, Andrew J Levan, Nial R Tanvir, A Rowlinson, DA Perley, JS Bloom, SB Cenko, Paul T O’Brien, BE Cobb, K Wiersema, et al. On the nature of the ‘hostless’ short grbs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 437(2):1495–1510, 2014.
- [67] TN Ukwatta, M Stamatikos, KS Dhuga, T Sakamoto, SD Barthelmy, A Eskandarian, N Gehrels, LC Maximon, JP Norris, and WC Parke. Spectral lags and the lag–luminosity relation: an investigation with swift bat gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 711(2):1073, 2010.
- [68] J. L. VELA. Propiedades observacionales de la vecindad galáctica de las galaxias anfitrionas de grbs largos y cortos. *Quito : EPN, 2022.*, 2022.

- [69] Eli Waxman and Tsvi Piran. Stability of fireballs and gamma-ray bursts. *arXiv preprint astro-ph/9406024*, 1994.
- [70] J. Wilms, A. Allen, and R. McCray. On the Absorption of X-Rays in the Interstellar Medium. , 542(2):914–924, October 2000.
- [71] Bin-Bin Zhang, Bing Zhang, Kohta Murase, Valerie Connaughton, and Michael S Briggs. How long does a burst burst? *The Astrophysical Journal*, 787(1):66, 2014.
- [72] Bing Zhang. *GRB Phenomenology*, page 27–121. Cambridge University Press, 2018.
- [73] Bing Zhang, Yi Zhong Fan, Jaroslaw Dyks, Shiho Kobayashi, Peter Mészáros, David N Burrows, John A Nousek, and Neil Gehrels. Physical processes shaping gamma-ray burst x-ray afterglow light curves: theoretical implications from the swift x-ray telescope observations. *The Astrophysical Journal*, 642(1):354, 2006.
- [74] Bing Zhang and Peter Mészáros. Gamma-Ray Bursts: progress, problems & prospects. *International Journal of Modern Physics A*, 19(15):2385–2472, January 2004.
- [75] Shu-Qing Zhong, Long Li, and Zi-Gao Dai. Grb 211211a: A neutron star–white dwarf merger? *The Astrophysical Journal Letters*, 947(2):L21, 2023.