



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIAS

AMBIENTE GALÁCTICO Y EXTRAGALÁCTICO DE GRBS PECULIARES

ESTUDIO DE LOS GRBS 090426 Y 120804A MEDIANTE EL OBSERVATORIO ESPACIAL NEIL GEHRELS SWIFT COMPONENTE B

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

ESTEBAN FERNANDO CÁRDENAS ANDINO

esteban.cardenas@epn.edu.ec

DIRECTOR: NICOLÁS ALEJANDRO VÁSQUEZ PAZMIÑO

nicolas.vasquez@epn.edu.ec

DMQ, 07 2024

CERTIFICACIONES

Yo, ESTEBAN FERNANDO CÁRDENAS ANDINO, 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.

Esteban Fernando Cárdenas Andino

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Esteban Fernando Cárdenas Andino, 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.

Esteban Fernando Cárdenas Andino

Nicolás Alejandro Vásquez Pazmiño

RESUMEN

Este trabajo presenta un análisis de los GRB090426 y GRB120804A utilizando datos del Observatorio Neil Gehrels Swift. Estos GRBs muestran características temporales similares a GRBs cortos mientras exhiben propiedades espectrales típicas de GRBs largos. Mediante el estudio de la evolución temporal y el entorno galáctico de estos estallidos, la investigación busca proporcionar información sobre su naturaleza peculiar y posibles progenitores. Los hallazgos contribuyen a una comprensión más amplia de la clasificación de GRBs y los procesos astrofísicos que rigen estos eventos cósmicos de alta energía.

Palabras clave: Ráfagas de rayos gamma (GRBs), Rayos Gamma, Observatorio Neil Gehrels Swift, astrofísica de altas energías, evolución temporal, análisis espectral.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the GRB090426 and GRB120804A utilizing data from the Neil Gehrels Swift Observatory. These GRBs exhibit temporal characteristics of short GRBs while displaying spectral properties typical of long GRBs. By studying the temporal evolution and galactic environment of these bursts, the research aims to provide insights into their peculiar nature and potential progenitors. The findings contribute to the broader understanding of GRB classification and the astrophysical processes governing these high-energy cosmic events.

Keywords: Gamma-Ray Bursts (GRBs), Neil Gehrels Swift Observatory, high-energy astrophysics, temporal evolution, spectral analysis.

Índice general

1. Estudio de los GRBs GRB090426 y GRB120804A con el observatorio espacial Neil Gehrels Swift	1
1.1. Objetivo general	1
1.2. Objetivos específicos	1
1.3. Alcance	1
1.4. Marco teórico	2
1.4.1. Gamma Ray Burst (GRB)	2
1.4.2. Historia y Descubrimiento	3
1.4.3. Fenomenología de los GRBs	6
1.4.4. Progenitores de los GRBs	12
1.4.5. GRBs peculiares	13
2. Metodología	14
2.1. El observatorio espacial Neil Gehrels Swift	14
2.2. Obtención de curvas de luz y espectros con HEASoft	17
2.3. Estimadores Temporales y Espectrales	17
2.3.1. Estimadores temporales	17
2.3.2. Duraciones T_{90} y T_{50}	17
2.3.3. Tiempos de emisión τ_{90} / τ_{50}	19
2.3.4. Estimadores de energía	20

2.3.5. Ley de potencias y Función de Band	20
2.3.6. Cálculo de lag espectral mediante CCF	20
3. Resultados, conclusiones y recomendaciones	22
3.1. Resultados	22
3.1.1. GRB090426	22
3.1.2. GRB120804A	26
3.1.3. Parámetros de los GRBs	29
3.2. Conclusiones y recomendaciones	30
Bibliografía	32

Índice de figuras

1.1. Mapa del el cielo en coordenadas galácticas para GRBs detectados por BAT [24].	5
1.2. Curva de luz del GRB150821A en distintas bandas de energía. Fuente: nasa.gov	7
1.3. Espectro del GRB150821A. Fuente:swift.gsfc.nasa.gov.	8
1.4. Espectro $E^2N(E)$	9
1.5. Ilustración del modelo del la bola de fuego [15]	11
1.6. Distribución de GRBs detectados por BATSE [38].	12
2.1. Eficiencia de BAT	15
2.2. Eficiencia de XRT	15
2.3. Modos de XRT (A)Modo WT (B) Modo PC	16
2.4. Observatorio espacial Swift con sus instrumentos [37].	16
2.5. Curva de luz y CDF (a)GRB090426 (b)GRB120804A	18
2.6. Reordenamiento de cuentas y curva de luz para el cálculo del tiempo de emisión (a)GRB090426 (b)GRB120804A	19
2.7. Cálculo del lag mediante ajuste gaussiano de la CCF (a)GRB090426 (b)GRB120804A	21
3.1. Curva de luz obtenida con BAT del GRB090426 en distintas bandas.	22

3.2. Espectro obtenido con BAT del GRB090426 ajustado a una ley de potencias	23
3.3. Curva de luz obtenida con XRT del GRB090426	24
3.4. Espectro de XRT GRB090426	24
3.5. GRB 090426 a) Uvot b)XRT c) DSS2	25
3.6. Curva de luz GRB120804A en distintas bandas	26
3.7. Espectro obtenido con BAT del GRB120804A ajustado a una ley de potencias.	27
3.8. Curva de luz obtenida con XRT del GRB120804A	27
3.9. Espectro de XRT GRB120804A	28
3.10.GRB 120804A a) Uvot b)XRT c) DSS2	29

Capítulo 1

Estudio de los GRBs GRB090426 y GRB120804A con el observatorio espacial Neil Gehrels Swift

1.1. Objetivo general

Revisar los últimos avances en astrofísica de altas energías enfocada en el estudio de GRBs mediante la reducción de datos astronómicos de libre acceso del observatorio espacial Neil Gehrels Swift .

1.2. Objetivos específicos

Analizar los GRBs candidatos a peculiares GRB090426 y GRB120804A, obtener sus curvas de luz, espectro y estudiar su ambiente galáctico para buscar una interpretación adecuada sobre su comportamiento fuera de la clasificación canónica.

1.3. Alcance

El proyecto constituye una introducción a las técnicas de procesamiento y análisis de datos observacionales de libre acceso en Astronomía

Gamma. Los eventos: GRB090426 y GRB120804A presentan características temporales asociadas a GRBs cortos y características espectrales asociadas a GRBs largos. La vecindad galáctica de los GRBs reporta una distribución sensible al tipo de GRB. El estudio, además de analizar la evolución temporal de estos GRBs, también busca caracterizar su ambiente galáctico.

Adicionalmente, este trabajo ha sido seleccionado para ser presentado en la XXXII IAU General Assembly en la conferencia The High Energy Gamma-ray Universe: Results and perspectives with wide-field ground-based facilities en Ciudad del Cabo, Sudáfrica.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Gamma Ray Burst (GRB)

Los GRBs destacan por su extraordinaria luminosidad, posicionándose como los fenómenos más brillantes del universo, después del Big Bang. La magnitud de la energía liberada durante estas explosiones es tal que puede eclipsar temporalmente a las galaxias que las albergan. En cuestión de segundos, estas emiten una cantidad de energía comparable a la que el Sol emitiría a lo largo de toda su existencia. [22]

El estudio de los GRBs es un tema de gran relevancia en la astrofísica debido a que estos eventos nos brindan información crucial sobre procesos de altas energías. Además, nos permiten estudiar la evolución estelar y contribuyen significativamente a revelar la naturaleza del universo temprano [4].

La investigación de estos fenómenos no se limita únicamente a la astronomía de rayos gamma. Hemos sido capaces de extender nuestra observación más allá, detectando sus evolución en múltiples longitudes de onda, como rayos X, ultravioleta, radio y óptico. Además, la existencia de sus contrapartes en ondas gravitacionales se confirmó en detecciones de Ligo [3], y existe la posibilidad prometedora de detectarlos en el futuro a través de sus emisiones de neutrinos [18]. Este enfoque multidisciplinario enriquece nuestra comprensión de los GRBs y nos brinda

una perspectiva más completa de estos fascinantes eventos cósmicos.

1.4.2. Historia y Descubrimiento

Los GRBs fueron descubiertos de manera fortuita gracias a los satélites enviados para monitorear pruebas nucleares durante el Tratado de Prohibición Parcial de Ensayos Nucleares en 1963. En este contexto, los Estados Unidos lanzaron los satélites Vela, mientras que la Unión Soviética lanzó el satélite Kosmos. Estos satélites, inicialmente diseñados para detectar explosiones nucleares en la atmósfera terrestre, registraron señales inesperadas de intensos estallidos de rayos gamma que provenían del espacio exterior. Este hallazgo inesperado marcó el comienzo del estudio científico de los GRBs y abrió una ventana hacia la comprensión de los fenómenos cósmicos más energéticos del universo [22].

Observaciones tempranas y BATSE

Durante las décadas de 1960 y 1970, los GRBs fueron detectados en múltiples ocasiones por detectores instalados en satélites, a pesar de que ninguno de ellos había sido diseñado con ese propósito.[20]. Este descubrimiento marcó el inicio de una nueva era en la investigación, donde durante la década de los 1970 se propusieron más de 30 modelos para intentar explicar los mecanismos y orígenes de estos fenómenos [29]. Sin embargo, los métodos de triangulación utilizados por los satélites inicialmente proporcionaban un margen de error demasiado amplio para determinar con precisión la ubicación del origen de las emisiones, lo que supuso una gran complicación en el estudio de estos eventos [19].

Durante la década de los 1980, los GRBs se convirtieron en un tema central de debate en la astrofísica, y los esfuerzos por entender su naturaleza se intensificaron. En consecuencia, y debido al creciente interés en astronomía por parte de la NASA con su programa Great Observatories, surgieron observatorios espaciales como el Compton Gamma-ray Observatory (CGRO), el Hubble Space Telescope (HST), el Chandra X-ray Observatory (CXO) y el Spitzer Space Telescope [22]. Cada uno de estos contribuyó a la comprensión de estos fenómenos. Sin embargo, el CGRO (1991) marcó una gran diferencia desde su lanzamiento, principal-

mente debido a su instrumento Burst and Transient Source Experiment (BATSE), que contaba con 15 detectores de rayos gamma y fue capaz de detectar y medir la posición de miles de GRBs con una precisión nunca antes vista. Probablemente, el resultado más destacado fue la observación de la isotropía de los eventos, lo cual confirmaba el origen cósmico de los GRBs. Además gracias a las mediciones de BATSE se pudo encontrar una distribución bimodal en los parámetros temporales de los GRB, esto sugería dos orígenes distintos. [11].

BeppoSAX, HETE2 y los afterglows

Un paso crucial para avanzar en la comprensión de los GRBs fue la detección de su emisión en longitudes de onda más grandes, lo cual posteriormente se conocería como afterglow, esto requería un gran esfuerzo debido a la baja precisión con la que se localizaban las emisiones de rayos gamma. BeppoSAX (1996), un satélite italo-holandés enfocado en astronomía de rayos X, adquirió gran reconocimiento al detectar el primer afterglow en rayos X de los eventos GRB970228 y GRB970508. Estas detecciones, mucho más precisas posicionalmente, permitieron la posterior detección en óptico y radio, y por ende la identificación de sus galaxias anfitrionas, revolucionando así el campo [42]. El High Energy Transient Explorer (HETE) fue un satélite estadounidense con participación japonesa y francesa. Su principal objetivo fue la detección de las contrapartes de GRBs en múltiples longitudes de onda. La misión HETE se perdió en el lanzamiento, pero HETE-2, lanzada en el 2000, junto con BeppoSAX, logró detectar y localizar con precisión más de 100 GRBs, permitiendo un amplio estudio de sus afterglows y sus corrimientos al rojo.

La era del Swift

El Observatorio Espacial Neil Gehrels Swift (2004) es un observatorio dedicado a detectar, localizar y estudiar GRBs, producto de una colaboración entre Estados Unidos, Reino Unido e Italia. Swift permitió una reducción considerable en el tiempo de respuesta para detección de GRBs, abriendo la posibilidad de estudiar los GRBs cortos con mucho mayor detalle.

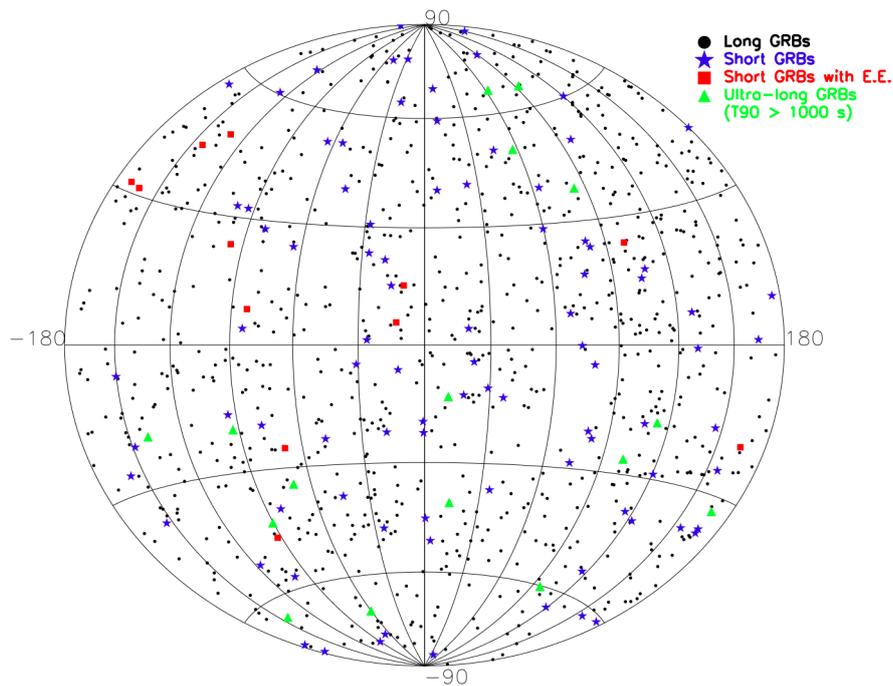


Figura 1.1: Mapa del el cielo en coordenadas galácticas para GRBs detectados por BAT [24].

Telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi (FGST)

El Telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi (FGST), fue lanzada el 11 de junio de 2008. Este telescopio lleva dos instrumentos principales: un Telescopio de Área Grande (LAT: 20 MeV – 300 GeV), que cubre el 20 % del cielo en cualquier momento y escanea todo el cielo cada tres horas, y un Monitor de GRBs (GBM: 8 keV – 40 MeV), que monitorea todo el cielo en busca de cualquier evento de estallido. Los dos instrumentos cubren más de 7 órdenes de magnitud en energía y han hecho posible estudiar los espectros de banda ancha de la emisión rápida de GRB con un detalle sin precedentes [42].

La era de al astrofísica multimensajera

Los GRBs son emisores de ondas gravitacionales y posiblemente de neutrinos. El experimento IceCube se encuentra en la búsqueda de estos neutrinos; sin embargo, hasta la fecha no se han encontrado indicios de estos [2] [18]. El panorama es distinto en cuanto a las ondas gravitacionales. En 2017, el evento GW170817 fue detectado por Advanced LIGO y Advanced Virgo; la emisión fue asociada al GRB corto 170817A [3], y sus contrapartes detectadas en óptico, radio y rayos X fueron ampliamente estudiadas [14] [39]. A raíz del evento GW170817, el estudio de los GRBs se ha centrado en poder detectar y estudiar todas estas emisiones, dando inicio a la actual era multi mensajera.

1.4.3. Fenomenología de los GRBs

Es necesario definir los parámetros temporales y energéticos que rigen la evolución de un GRB. A continuación se resume los principales observables de estas transientes.

Definición 1.1. Prompt Emission - Emisión temprana

Emisión rayos gamma de corta duración por encima del ruido de fondo que permite la detección del estallido y su localización aproximada en el cielo.[42].

Definición 1.2. Afterglow o postluminiscencia

Radiación posterior a los GRBs, que se extiende desde frecuencias de radio hasta el óptico, es generada por la interacción entre el chorro relativista y el medio circundante [26].

Definición 1.3. Curva de luz

Las curvas de luz representan el número de rayos gamma detectados en función del tiempo, como se observa en la figura 1.2.

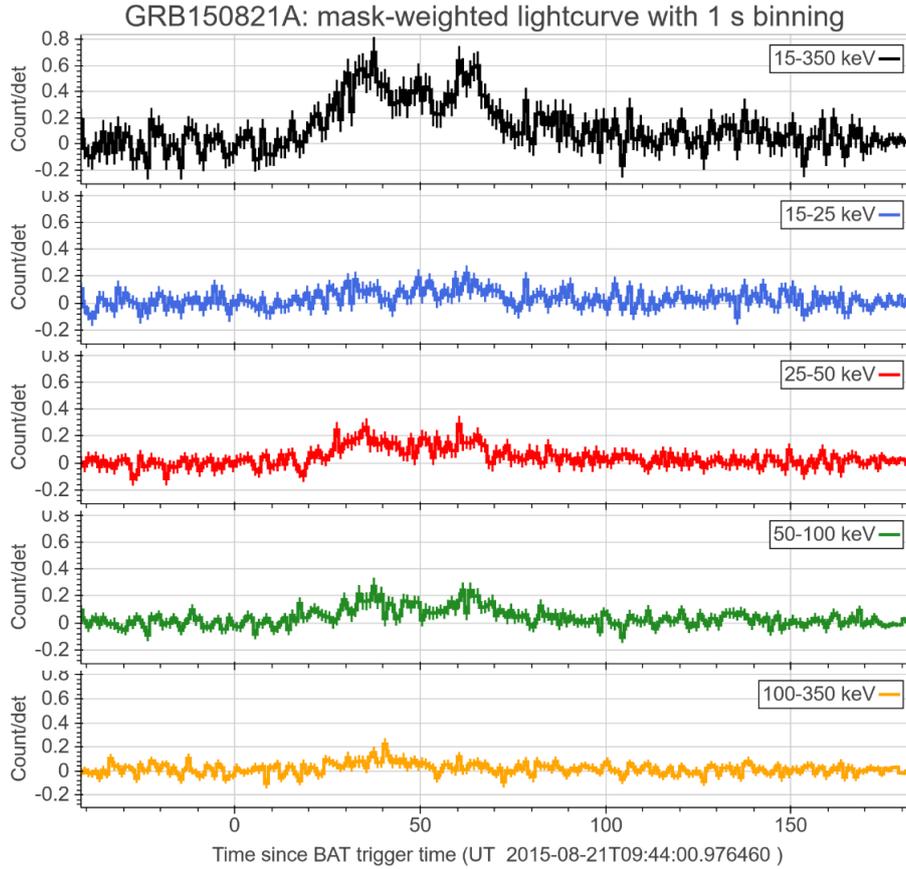


Figura 1.2: Curva de luz del GRB150821A en distintas bandas de energía. Fuente: nasa.gov

Definición 1.4. T_{90} y T_{50}

El T_{90} es el intervalo de tiempo entre los momentos en que el detector recoge el 5% y el 95% de la fluencia total, corresponde al 90% de la fluencia total. El T_{50} es el intervalo de tiempo entre los momentos en que el detector recoge el 25% y el 75% de la fluencia total, corresponde al 50% de la fluencia total. [42].

Definición 1.5. Tiempos de emisión (τ_{90} y τ_{50})

El tiempo de emisión se describe como el período durante el cual se emite un $N\%$ de la fluencia total, representado por τ_{90} o τ_{50} . Esta definición incluye los intervalos de tiempo con mayor fluencia en orden decreciente hasta alcanzar el $N\%$ de la fluencia total. Este intervalo de tiempo no considera los períodos de baja emisión de los estallidos, por lo que el tiempo de emisión refleja las fases de alta potencia de la emisión [27].

Definición 1.6. Lag Espectral

Un lag espectral es el tiempo de retraso de los picos de los pulsos en diferentes canales de energía como se puede observar en la figura 1.2, y se calcula usando métodos cuantitativos como la función de correlación cruzada (CCF) [42].

Definición 1.7. Espectros

En astronomía de altas energías, los espectros se presentan habitualmente como intensidad en función de la frecuencia (o energía), en lugar de la longitud de onda que se utiliza más frecuentemente en astronomía óptica, y se muestran en una escala logarítmica. El espectro de conteo de fotones sin procesar $C(E)$, en unidades de $cts \cdot s^{-1} \cdot keV^{-1}$, representa los conteos de fotones detectados como función del bin de energía. Debido a que los detectores suelen tener diferentes sensibilidades en distintos bins de energía, el espectro de conteo está fuertemente influenciado por la función de respuesta instrumental del detector, mostrando una forma irregular aunque el espectro intrínseco sea regular [42].

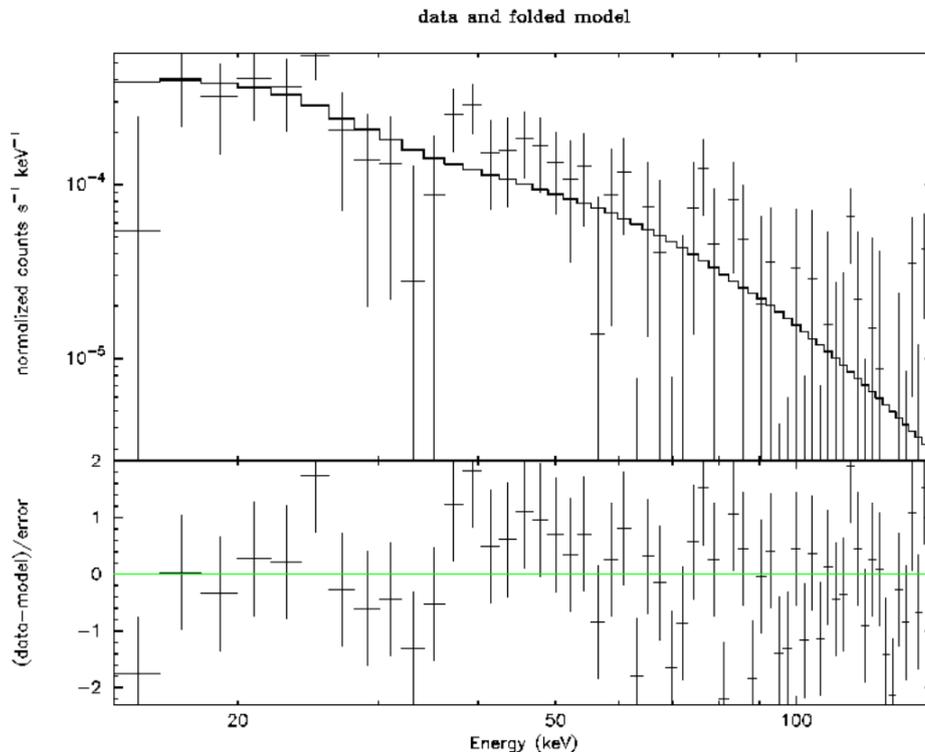


Figura 1.3: Espectro del GRB150821A. Fuente:swift.gsfc.nasa.gov.

Definición 1.8. Energía pico (E_{peak})

El pico de energía en el espectro $E^2N(E)$ se llama el pico de energía (E_{peak}) [42] como se observa en la figura 1.4, su relación con la energía de corte viene dada en por la ecuación 2.1.

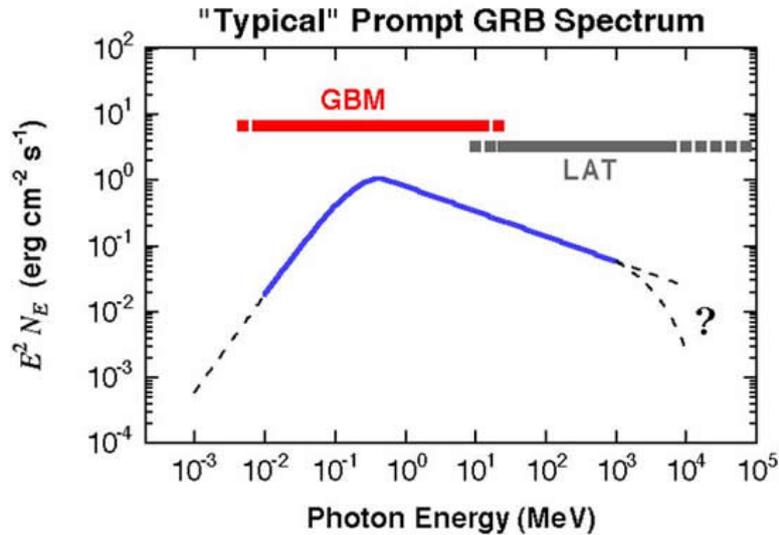


Figura 1.4: Espectro $E^2N(E)$

Definición 1.9. Energía isotrópica (E_{iso})

La energía liberada por el GRB asumiendo una emisión isotrópica [17].

Definición 1.10. Corrimiento al rojo (z)

El corrimiento al rojo suele explicarse como el alargamiento de las longitudes de onda de los fotones a medida que viajan por el espacio en expansión.

Técnicas de medición de corrimiento al rojo

Existen dos maneras mediante las cuales se mide usualmente el corrimiento al rojo. Cada una posee diferentes magnitudes de error; sin embargo, ambas son útiles en contextos distintos.

Corrimiento al rojo fotométrico

Esta técnica utiliza la fotometría (es decir, la medición del brillo del objeto observado a través de varios filtros estándar) para determinar el

corrimiento al rojo y, por ende, mediante la ley de Hubble, la distancia del objeto observado [8].

Corrimiento al rojo espectroscópico

La técnica de corrimiento al rojo espectroscópico compara las líneas de emisión de los elementos medidas en el laboratorio con las líneas de emisión de los objetos astronómicos, mediante esta comparación se puede estimar la distancia de una manera más precisa.

Definición 1.11. Star formation rate (SFR) - Tasa de formación estelar

Es una medida de la formación de estrellas en una galaxia, usualmente tiene unidades de masa solares por año. Su determinación toma en cuenta la metalicidad de las estrellas y su función de luminosidad.

Definición 1.12. Offset

Desplazamiento del GRB respecto al centro de su galaxia anfitriona.

Clasificación canónica

La clasificación canónica de los GRBs se basa en su duración (T_{90}), agrupándolos en dos tipos, en SGRBs (menos de 2 segundos) asociados con fusiones de objetos compactos (mergers), y LGRBs (más de 2 segundos) relacionados con el colapso de estrellas masivas. Esta clasificación ayuda a entender sus orígenes y las condiciones astrofísicas que los generan [21]. Sin embargo, esta clasificación no refleja con total certeza los progenitores de los GRBs. Los eventos seleccionados para este trabajo se consideran peculiares, ya que sus estimadores temporales y espectrales no coinciden con lo esperado dentro de la clasificación canónica, lo que pone en duda la naturaleza de sus progenitores.

El modelo de la bola de fuego (Fireball)

El modelo de la bola de fuego planteó una forma de explicar energías de hasta 10^{54} erg, con densidades de energía extremadamente altas. Esto,

a su vez, limitó de gran forma los posibles procesos responsables de esta emisión [33].

La idea detrás de este modelo, asume el colapso gravitacional del progenitor, que a su vez impulsa una expansión relativista de diferentes capas de material desde la fuente hacia el exterior. A medida que las capas de material con diferentes velocidades relativistas se expanden, estas interactúan como si sufrieran una colisión debido a sus distintos factores de Lorentz. En el marco de referencia del flujo, la energía de los fotones generados es alta. Sin embargo, en el marco de referencia del observador, la energía de estos fotones se reduce por un factor de Γ^{-1} debido a los efectos relativistas de la expansión.

Para que el flujo alcance factores de Lorentz tan altos, es necesario que la cantidad de materia ordinaria en el flujo sea muy baja, para evitar emisión térmica. Una cantidad de bariones débil significa que hay poco material pesado presente para ser acelerado, lo que permite que una mayor fracción de la energía inicial se convierta en movimiento relativista en lugar de calentarse y mover una masa significativa.

Las diferentes eyecciones de material que fueron emitidas en distintos momentos durante la explosión terminarán por interactuar entre sí. Cuando estas eyecciones interactúan, se generan choques y diversos mecanismos de radiación. Estos choques son capaces de producir rayos gamma, lo que explica las propiedades y las energías observadas en los estallidos de rayos gamma [28], explicando así la emisión de radiación de origen no térmica. En la figura 1.5 se observa la geometría de la emisión.

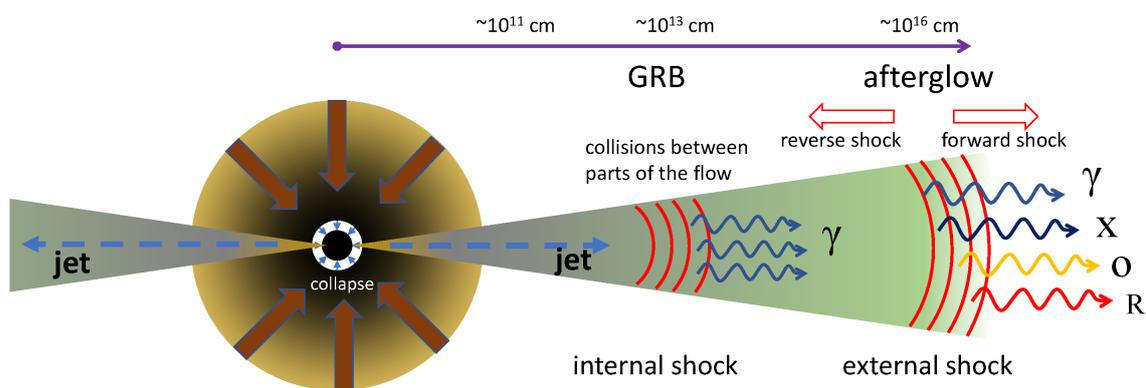


Figura 1.5: Ilustración del modelo de la bola de fuego [15]

1.4.4. Progenitores de los GRBs

Al estudiar la distribución de duraciones de poblaciones de GRBs, se puede observar al menos dos componentes gaussianas en escala logarítmica con su línea de separación en 2 segundos [21]. Observaciones posteriores en diversas longitudes de onda sugirieron que estas dos clases provienen de orígenes distintos.

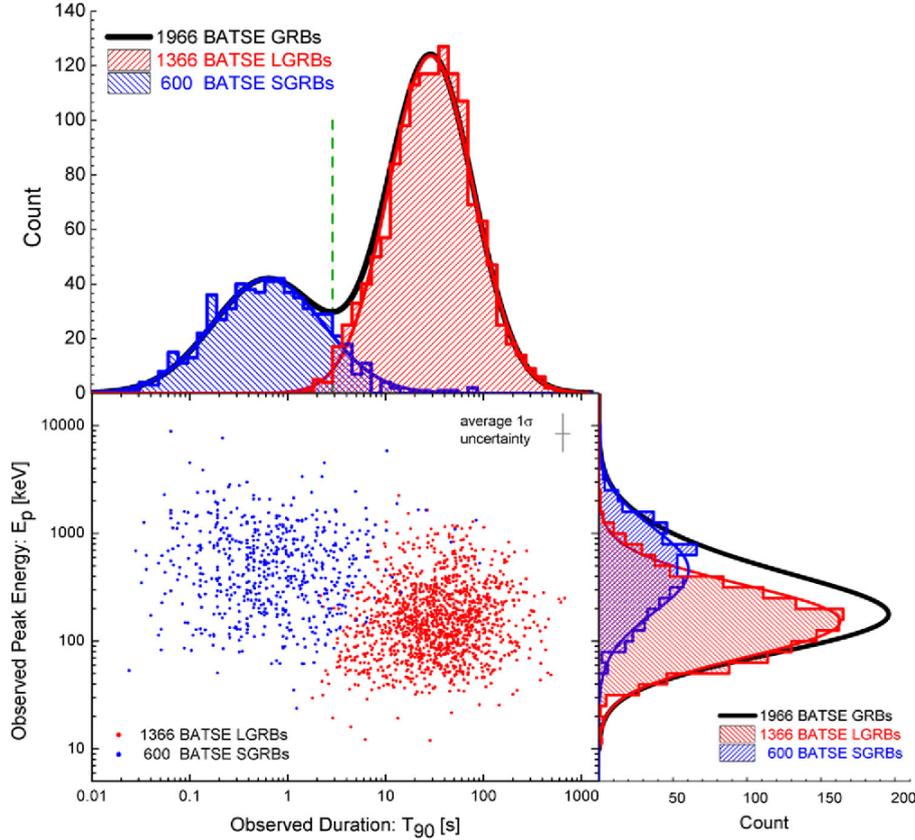


Figura 1.6: Distribución de GRBs detectados por BATSE [38].

GRBs largos (LGRBs)

Las observaciones de algunos afterglows posteriores a GRBs mostraron que estos eventos se originaban en regiones de alta formación estelar [31]. Pronto se propuso que los GRB largos están asociados con eventos de colapso de estelar. Simultáneamente, se propuso el modelo del colapsar. Este modelo postula que un GRB se genera por un jet relativista que emerge del colapso de una estrella masiva y atraviesa su envoltura estelar [25].

Se ha descubierto que al menos algunos estallidos de rayos gamma largos están vinculados con ciertas supernovas de tipo Ic de línea ancha. Desde el punto de vista físico, las supernovas se producen a través del colapso del núcleo de una estrella masiva o mediante explosiones de combustión termonuclear descontrolada en enanas blancas que están acumulando material [42].

Se cree que la diversidad de supernovas es principalmente afectada por la masa inicial y la pérdida de masa de la estrella progenitora. Las supernovas con envolturas despojadas y pobres en hidrógeno provienen de estrellas progenitoras que han perdido una parte considerable de sus envolturas antes de la explosión. Entre estas están las supernovas de Tipo IIb (ricas en helio, con poco hidrógeno), Ib (ricas en helio, sin hidrógeno) y Ic (sin hidrógeno ni helio) [6].

GRBs cortos

En el pasado, se creía que los GRB cortos provenían de la fusión de estrellas de neutrones o de la fusión entre una estrella de neutrones y un agujero negro [16]. Sin embargo, estas afirmaciones fueron confirmadas observacionalmente en 2017 gracias a la detección de ondas gravitacionales provenientes de la fusión de dos estrellas de neutrones asociada al GRB 170817A [3].

1.4.5. GRBs peculiares

La clasificación de los GRBs en largos y cortos basada en su T_{90} ha demostrado ser insuficiente para identificar sus progenitores. Los eventos que presentan propiedades temporales y espectrales que no se ajustan a la clasificación canónica se denominan GRBs peculiares. Esta tesis se centra en el cálculo de varios parámetros que pueden ayudar a esclarecer los progenitores de estos eventos.

Capítulo 2

Metodología

El observatorio espacial Swift fue el instrumento utilizado para obtener los datos astronómicos para el análisis de los GRBs peculiares del presente estudio. La búsqueda de contrapartes en las detecciones realizadas por Fermi no arrojó coincidencias. A continuación, se presenta una descripción del observatorio espacial Swift junto con los procesos para el análisis de datos. Los códigos desarrollados se encuentran disponibles en la plataforma github, mediante el siguiente hipervínculo: [Códigos](#).

2.1. El observatorio espacial Neil Gehrels Swift

1. El Burst Alert Telescope (BAT) es un instrumento de campo de visión (FOV) de 4 arco minutos sensible en el rango de 15-350 keV. Debido a la naturaleza de la radiación detectada y la incapacidad de enfocarla con lentes o espejos, BAT utiliza la técnica de apertura codificada con un campo de visión de 1.4 estereorradianes. La técnica de máscara codificada también es útil en astronomía de rayos X y gamma para obtener un gran campo de visión manteniendo la capacidad de imagen. Este instrumento es responsable de calcular la posición y evaluar si el evento es lo suficientemente relevante como para dirigir los otros instrumentos de la nave espacial [7]. En la figura 2.1 se observa la eficiencia de BAT en función de la energía.

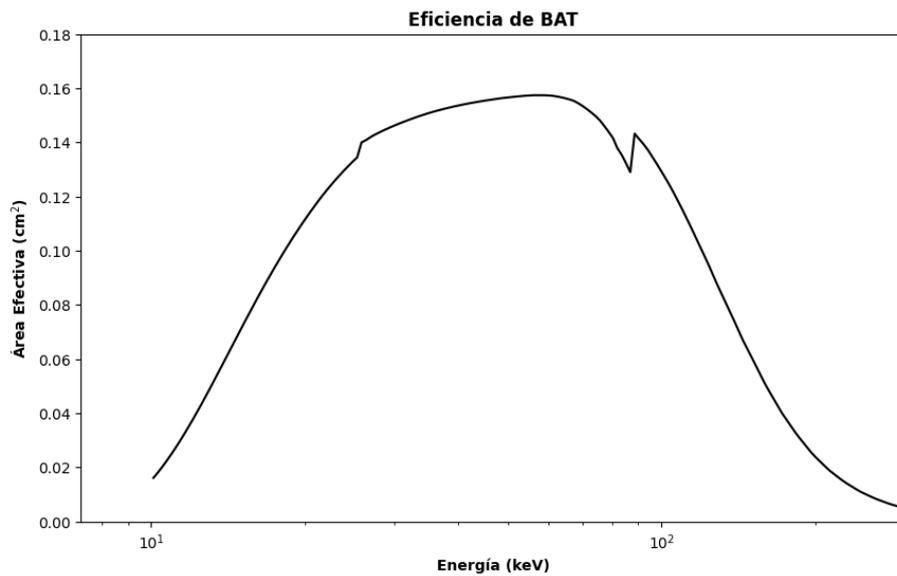


Figura 2.1: Eficiencia de BAT

2. El Telescopio de Rayos X (XRT) tiene un área efectiva de 110 cm², diseñado para medir flujos, espectros y curvas de luz de los GRBs y sus postluminescencias. El XRT cubre más de siete órdenes de magnitud de flujo. A diferencia del BAT, el XRT tiene un rango de precisión de 5 segundos de arco y es capaz de apuntar al evento detectado en diez segundos; su rango de energía es de 0.2-10 KeV como se observa en la figura 2.3 [12].

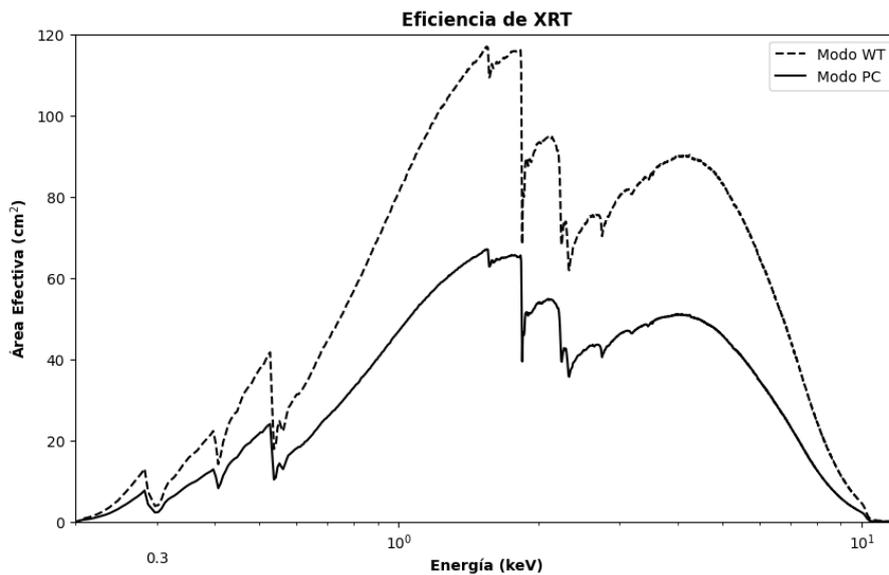


Figura 2.2: Eficiencia de XRT

XRT cuenta con dos modos de observación, el modo PC cubren una región bidimensional de 600 por 600 píxeles (aproximadamente 24x24 minutos de arco). En el modo WT los datos aparecen como una única franja de datos unidimensional, orientada según el ángulo de giro de la nave espacial, como se puede ver en la figura 2.3.

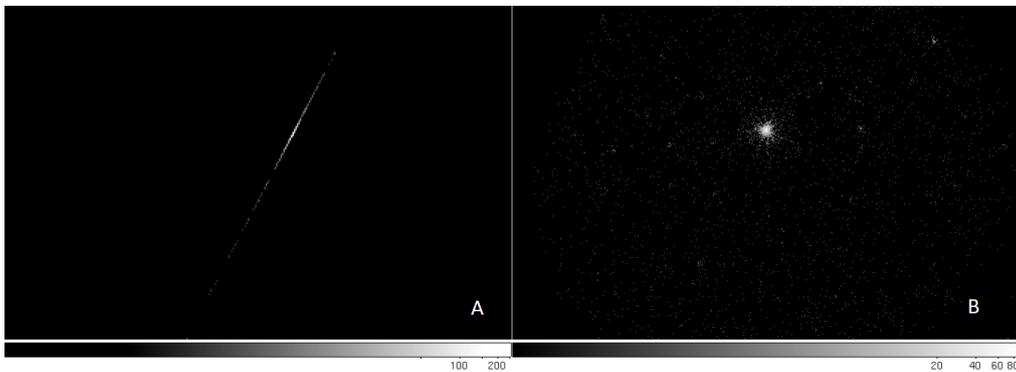


Figura 2.3: Modos de XRT (A)Modo WT (B) Modo PC

3. El Telescopio Ultravioleta/Óptico (UVOT) fue diseñado para mediciones simultáneas en el rango ultravioleta y óptico (170-650 nm), el instrumento está co-alineado con el XRT. El UVOT se enfoca en el estudio de la postluminescencia [34].

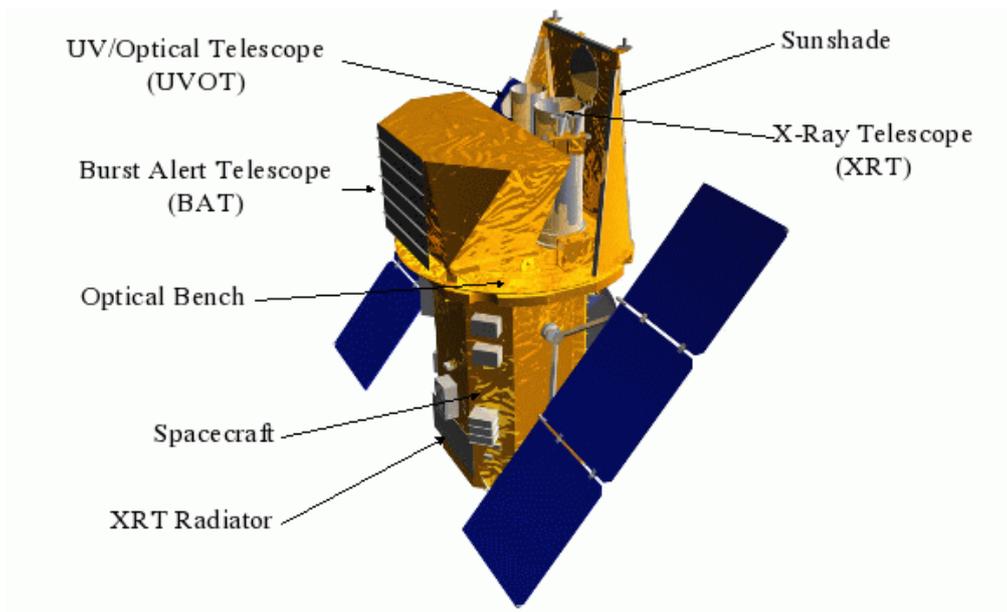


Figura 2.4: Observatorio espacial Swift con sus intrumentos [37].

2.2. Obtención de curvas de luz y espectros con HEASoft

Los datos utilizados en este trabajo provienen del tercer catálogo del Swift [24]. Para la reducción y análisis de datos, se empleó HEASoft (High Energy Astrophysics Software), un conjunto de herramientas y aplicaciones desarrolladas por la NASA específicamente para el análisis de datos en astrofísica de altas energías, como rayos X y rayos gamma. En este estudio, se utilizó la versión 6.33.2 de HEASoft [1].

La calibración de los datos se realizó utilizando el sistema de base de datos de calibración CALDB versión 20230607 de HEASARC, que almacena y organiza conjuntos de datos de calibración para instrumentación astronómica de alta energía, permitiendo a usuarios y software acceder y determinar los conjuntos de datos de calibración necesarios. Las curvas de luz se generaron con un tamaño de bin de 256 ms.

2.3. Estimadores Temporales y Espectrales

2.3.1. Estimadores temporales

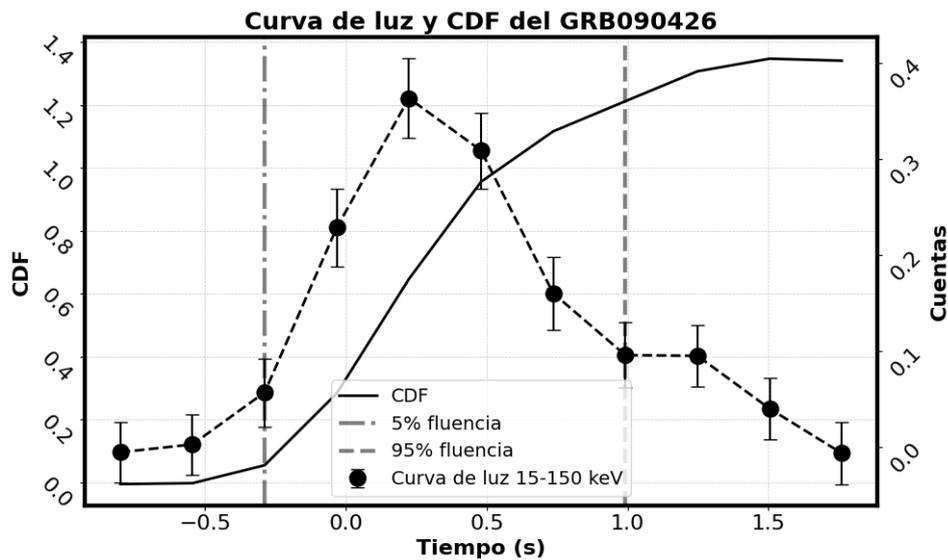
Determinar la duración de los transientes de alta energía es todavía una tarea complicada. Las mediciones de duración difieren según los instrumentos utilizados, dependen de la sensibilidad y respuesta del mismo. Este problema es especialmente notable en el caso de los GRBs, por la variabilidad en sus curvas de luz y, en algunos casos, la imposibilidad de captar la totalidad del evento.

2.3.2. Duraciones T_{90} y T_{50}

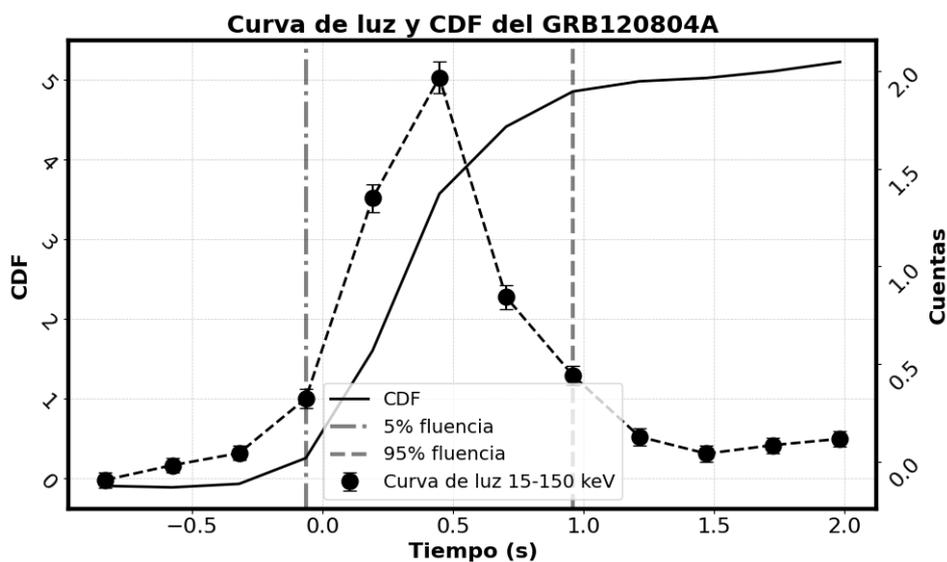
Los estimadores temporales duración T_{90} y T_{50} son dependientes de la energía y del instrumento de medición definidos anteriormente. Los estimadores temporales presentados en el tercer catálogo fueron calculados mediante la herramienta battblocks de HEASARC [24]. En este trabajo se desarrolló un nuevo algoritmo alternativo para el cálculo de los paráme-

tros T_{90} y T_{50} detallado a continuación:

Se realiza la suma acumulada de las cuentas de la curva de luz (CDF), las cuentas negativas y el ruido de la curva son tomados en consideración. Posteriormente, se evalúa los tiempos correspondientes a la detección del 5% y el 95% de la fluencia, su diferencia es el T_{90} , tal y como se puede observar en la figura 2.5. En el caso del T_{50} , se realiza el mismo procedimiento entre el 25% y el 75%.



(a)

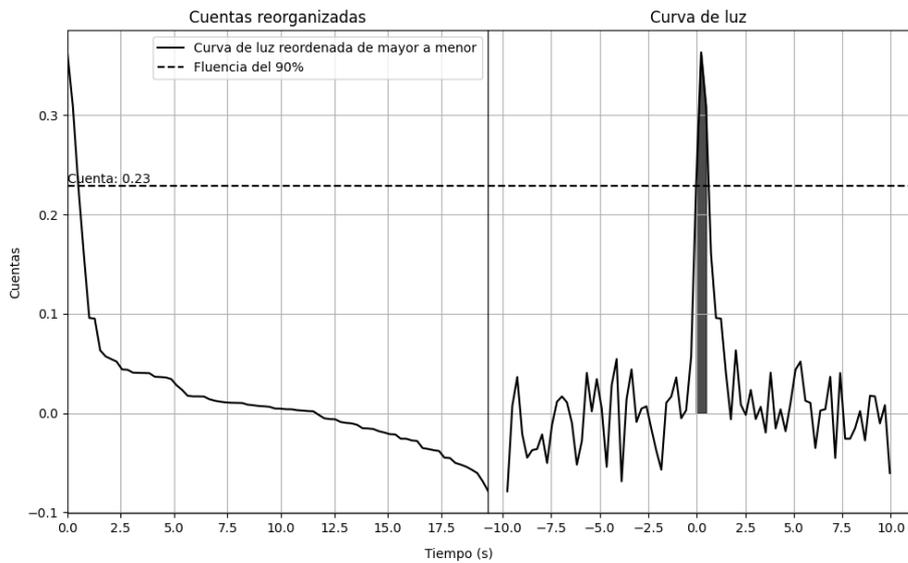


(b)

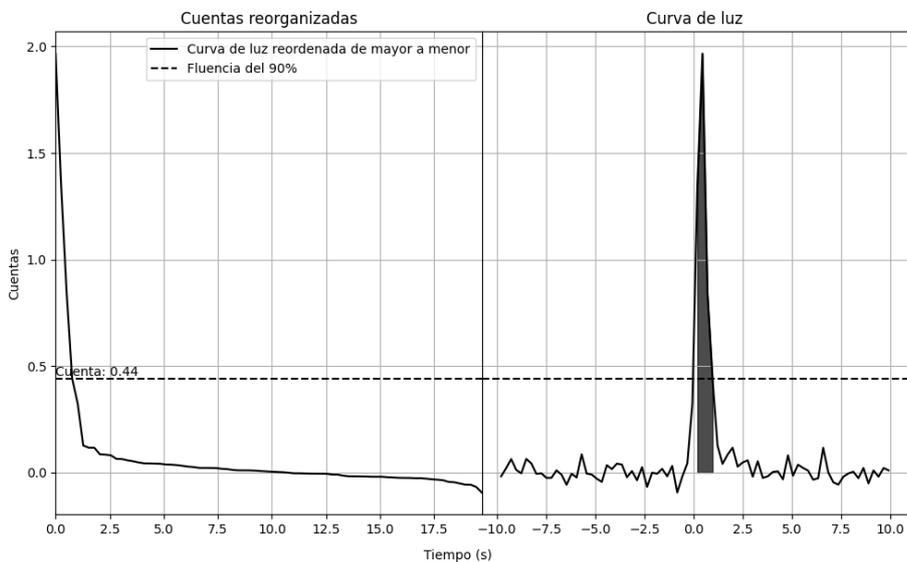
Figura 2.5: Curva de luz y CDF (a)GRB090426 (b)GRB120804A

2.3.3. Tiempos de emisión τ_{90} / τ_{50}

El tiempo de emisión o tiempo de Mitrofanov se calcula realizando un reordenamiento de las cuentas de mayor a menor, para posteriormente calcular el valor de la integral donde se encuentra el 90% de la fluencia, posteriormente se considera únicamente las cuentas por encima de este valor, tal y como se muestra en la figura 2.6.



(a)



(b)

Figura 2.6: Reordenamiento de cuentas y curva de luz para el cálculo del tiempo de emisión (a)GRB090426 (b)GRB120804A

2.3.4. Estimadores de energía

Para hacer el análisis espectral utilizamos el modelo cosmológico Λ CDM con un valor de la constante de Hubble $H_0 = 70 \text{ km Mpc}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Además, conocemos que en modelos de ley de potencias y ley de potencias cortadas, la energía pico está relacionada con una energía de corte [42].

$$E_{peak} = (2 + \alpha)E_{cut} \quad (2.1)$$

2.3.5. Ley de potencias y Función de Band

La dependencia típica de un afterglow en rayos X (y óptico) respecto al tiempo y la energía sigue una ley de potencias [32], dicha dependencia se puede evidenciar en las figuras 3.3, 3.4, 3.8 y 3.9. Cuando la banda de energía del detector es amplia, el espectro de un GRB generalmente se ajusta con dos leyes de potencias con diferentes pendientes unidas por una energía de corte (E_0) conocida como la función Band [5]:

$$N(E) = \begin{cases} A \left(\frac{E}{100 \text{ keV}} \right)^\alpha \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right), & E < (\alpha - \beta)E_0 \\ A \left[\frac{(\alpha - \beta)E_0}{100 \text{ keV}} \right]^{\alpha - \beta} \exp(\beta - \alpha) \left(\frac{E}{100 \text{ keV}} \right)^\beta, & E \geq (\alpha - \beta)E_0 \end{cases} \quad (2.2)$$

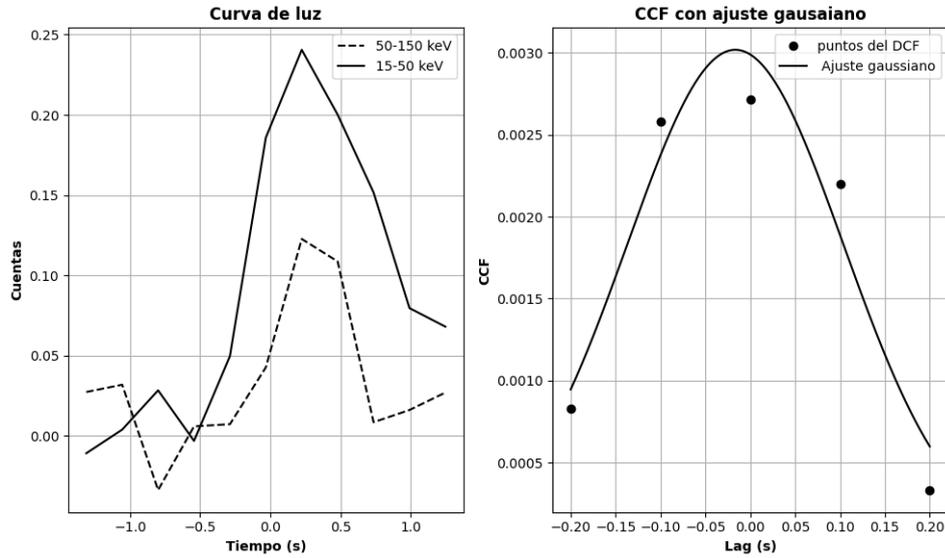
Donde A es la normalización del espectro, E_0 es la energía de quiebre en el espectro, y α y β (ambos negativos) son los índices espectrales de fotones de baja energía y alta energía, respectivamente.

2.3.6. Cálculo de lag espectral mediante CCF

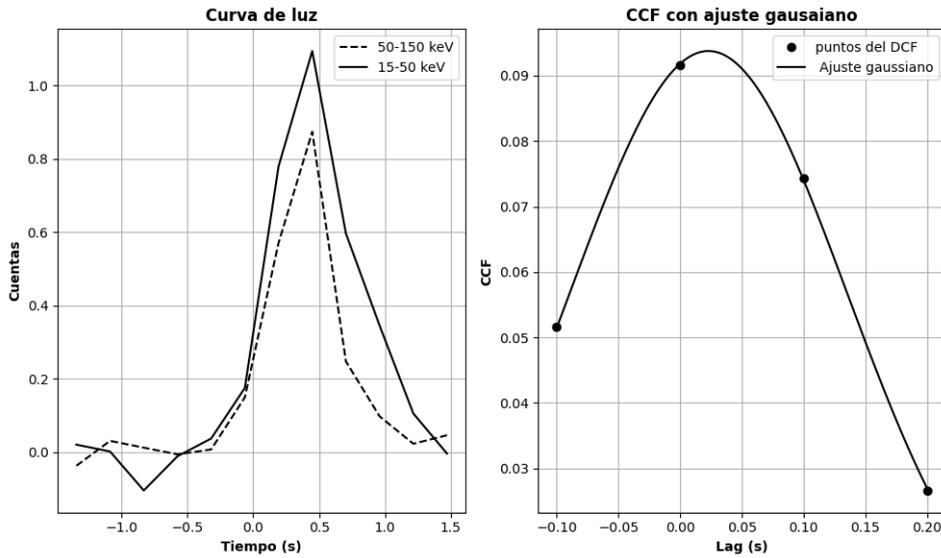
El lag espectral es un parámetro de fundamental importancia para entender la estructura temporal y espectral de un GRB, es especialmente útil para estudiar la propagación de los chorros relativistas y la estructura interna [30].

Una característica para el cálculo óptimo de una CCF es alineación temporal y de resolución de nuestros datos, por lo que se usa los datos del mismo GRB en diferentes canales, en este caso se usa un canal de 15-50 keV y otro canal de 50-150 keV. El cálculo de la CCF se realizó mediante un código desarrollado en Python adjunto en el GITHUB y basándose en

el trabajo de Zhaosheng Li [13], solo se consideran los puntos de la CCF que sean aptos para un ajuste gaussiano. Un lag espectral positivo indica que la emisión en baja energía se retrasa con respecto a la emisión en alta energía, lo cual es consistente con modelos de emisión interna donde los fotones de alta energía se producen antes y más cerca de la fuente central [43].



(a)



(b)

Figura 2.7: Cálculo del lag mediante ajuste gaussiano de la CCF (a)GRB090426 (b)GRB120804A

Capítulo 3

Resultados, conclusiones y recomendaciones

3.1. Resultados

3.1.1. GRB090426

Las curvas de luz generadas con BAT (Rayos gamma) en tres bandas energéticas, de 15-50 keV, 15-150keV y 50-150keV se utilizaron para el análisis de datos. Se calculó el T_{90} y τ_{90} para cada banda, obteniendo:

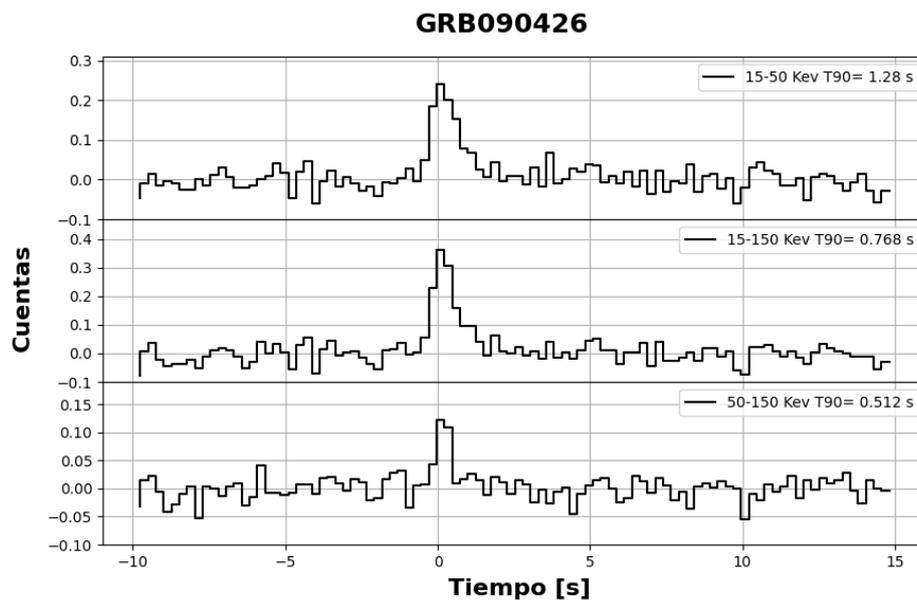


Figura 3.1: Curva de luz obtenida con BAT del GRB090426 en distintas bandas.

1.28s, 0.768s, 0.512s respectivamente como se observa en la figura 3.1. Lo cual sugiere fuertemente que el algoritmo desarrollado para el cálculo del T_{90} es altamente dependiente de la energía de la banda. El tiempo de emisión (τ_{90}) tiene un valor de 0.51s como se observa en la figura 2.6 parte (a).

El lag espectral entre las bandas 15-50keV y 50-150keV es de 4.249s como se puede observar en la figura 2.7 parte (a).

El espectro obtenido para BAT, se ajusta mediante un modelo de ley de potencias y ley de potencias cortada con parámetros $z=2.609$ [23] y $nH=1.44E+20$.

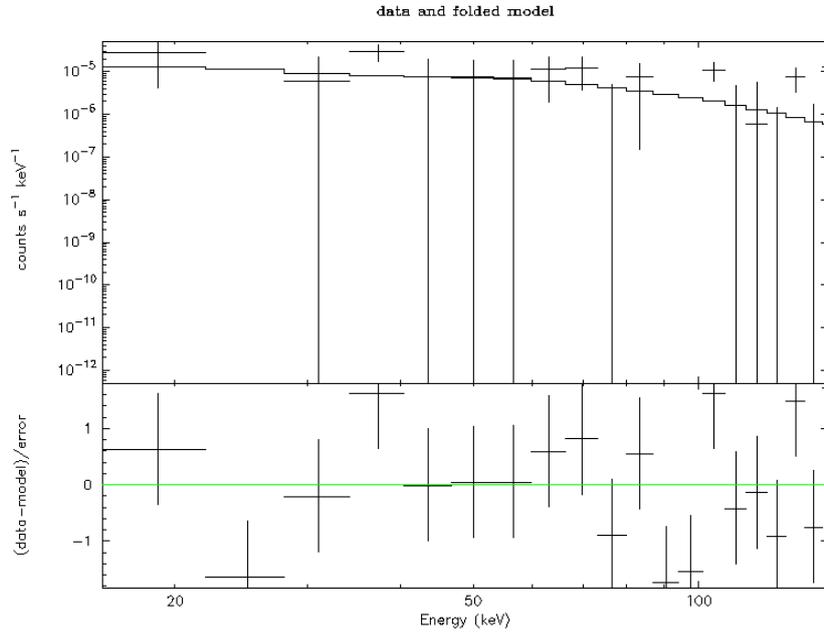


Figura 3.2: Espectro obtenido con BAT del GRB090426 ajustado a una ley de potencias

Parámetro	Ley de potencias	Ley de potencias cortada
nH	$1.44 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$	$1.44 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$
Índice espectral	1.842[+3.24101,-1.78101]	0.922050 +- 7.1903
z	2.609	2.609
E_{cut}	-	52.1579 keV +- 343.162
Norm	6.64E-02 +- 0.155786	6.05016E-03 +- 0.13067
χ^2	47.99	47.81
Probabilidad de la hipótesis nula	6.98e-01	7.1e-01

Cuadro 3.1: Parámetros de ajuste del espectro de BAT para el GRB090426.

Además, se presenta la curva de luz obtenida con XRT (Rayos x, 0.2-10

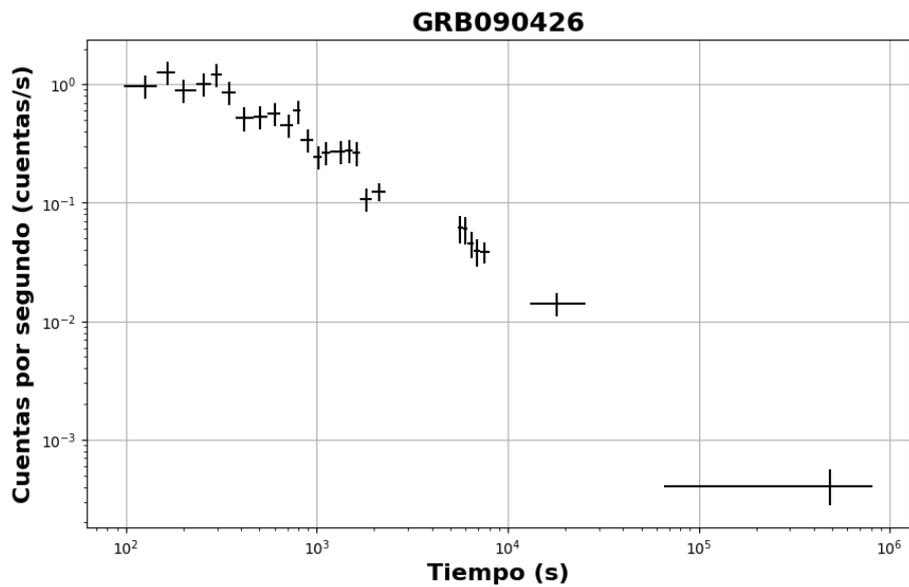


Figura 3.3: Curva de luz obtenida con XRT del GRB090426

keV [12]) correspondiente al afterglow. Como se puede observar en la figura 3.3, existen zonas donde no hay mediciones. Esto puede ser causado por la órbita geocéntrica del satélite y en consecuencia el bloqueo del objetivo durante cierto tiempo a causa de la tierra. El espectro obtenido por XRT se ajusta a un fit de ley de potencias.

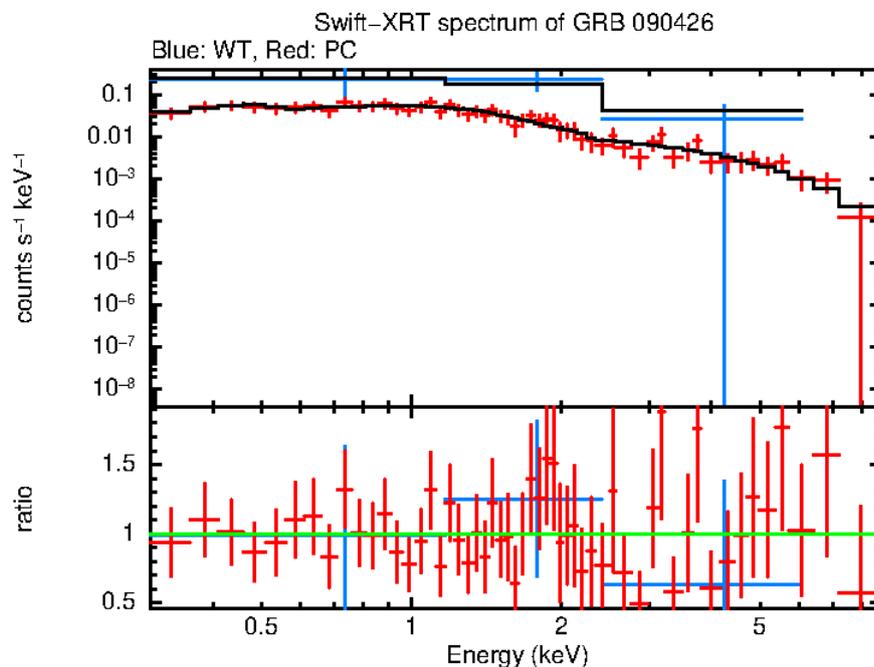


Figura 3.4: Espectro de XRT GRB090426

Parametro	Modo WT	Modo PC
NH galatico	$1.58 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$	$1.58 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$
NH intrinseco	$1.6 (+82.4, -1.6) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$	$6 (+6, -6) \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$
z	2.609	2.609
Índice espectral	1.5 (+2.3, -1.1)	1.95 (+0.16, -0.15)
Flujo (0.3-10keV)	$7(+8, -4) \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$4.4(+0.5, -0.4) \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Cuadro 3.2: Parámetros de ajuste del espectro de XRT para el GRB090426.

Además, se presenta una recopilación de las observaciones astronómicas del GRB090426 con distintos telescopios. Como es esperable, la

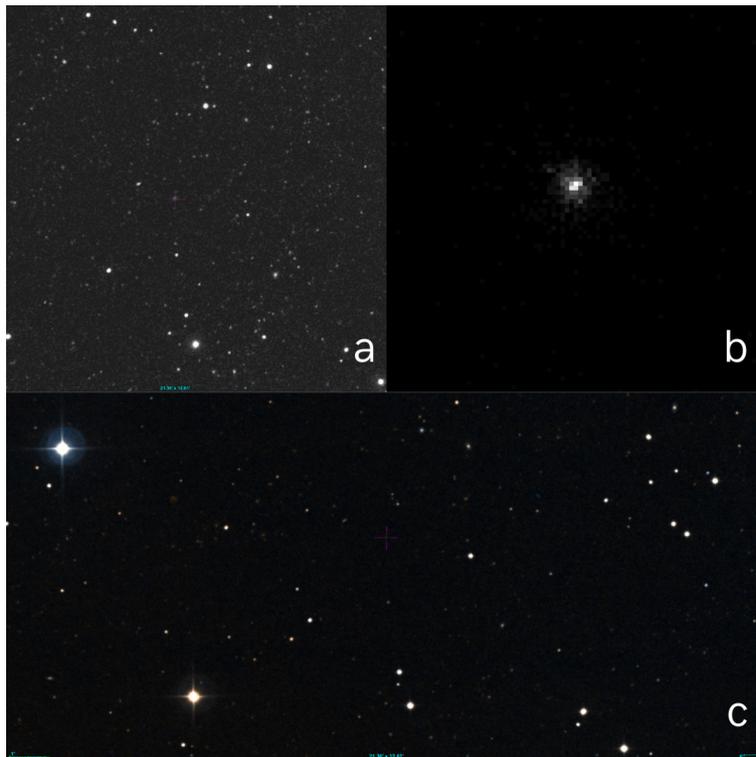


Figura 3.5: GRB 090426 a) Uvot b) XRT c) DSS2

observación de Uvot señala un pequeño y tenue punto, mientras que la observación de XRT es más clara. Se añadió una imagen obtenida del catálogo DSS2 de la zona del cielo de donde proviene la emisión, sin embargo, el tiempo en el que fue la captura de la imagen no corresponde con el tiempo de detección de Swift y por ende no se espera observar rastros del afterglow.

3.1.2. GRB120804A

Las curvas de luz de BAT, se realizaron nuevamente en tres bandas energéticas, de 15-50 keV, 15-150keV y 50-150keV. Se calculó el T90 y

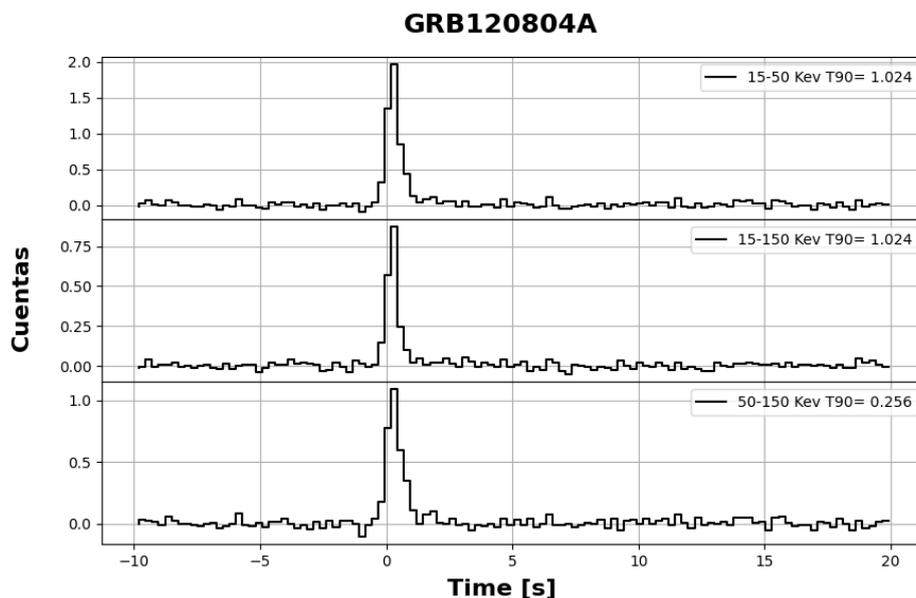


Figura 3.6: Curva de luz GRB120804A en distintas bandas

t90 para cada banda, obteniendo: 1.024s, 1.024s, 0.256s respectivamente, como se observa en la figura 3.6. El tiempo de emisión tiene un valor de 077.s como se observa en la figura 2.6 parte (b).

El lag espectral entre las bandas 15-50keV y 50-150keV es de 5.86s como se puede observar en la figura 2.7 parte (a).

El espectro obtenido para BAT, se ajusta mediante un modelo de ley de potencias y ley de potencias cortada con parámetros $z=1.3$ [10] y $nH=9.5E+20$.

Parámetro	Ley de potencias	Ley de potencias cortada
NH	$9.5X10^{20} \text{ cm}^{-2}$	$9.5X10^{20} \text{ cm}^{-2}$
Índice espectral	1.49061[+1.41823,-0.7828592]	1.21095 +- 3.90983
z	1.3	1.3
E_{cut}	-	189.745 keV +- 1751.01
Norm	$3.30296E-02$ +- $8.90365E-02$	$1.4887E-02$ +- 0.186479
χ^2	56.46	56.43
Probabilidad de la hipótesis nula	4.20e-01	3.84e-01

Cuadro 3.3: Parámetros de ajuste del espectro de BAT para el GRB120804A.

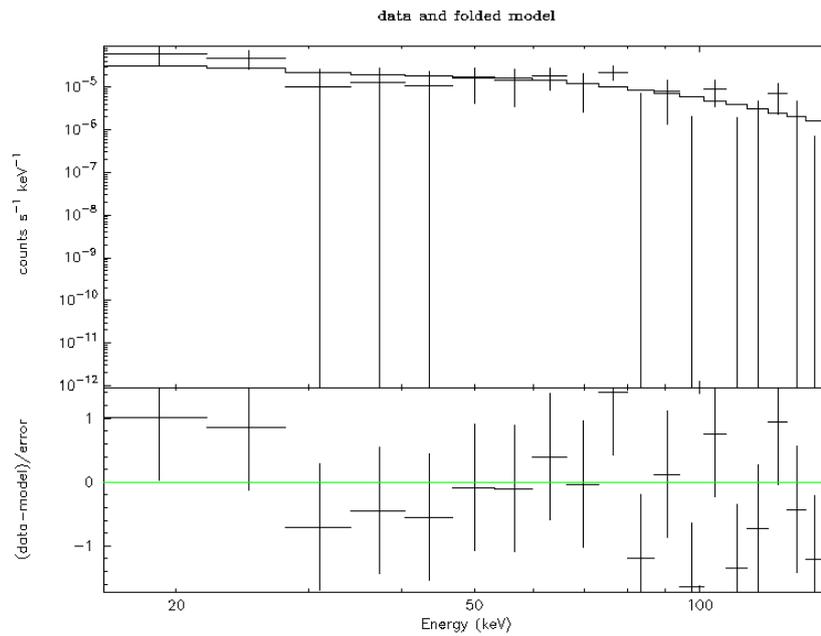


Figura 3.7: Espectro obtenido con BAT del GRB120804A ajustado a una ley de potencias.

Ademas, se presenta la curva de luz obtenida con XRT (Rayos x, 0.2-10 keV [12]) correspondiente al afterglow.

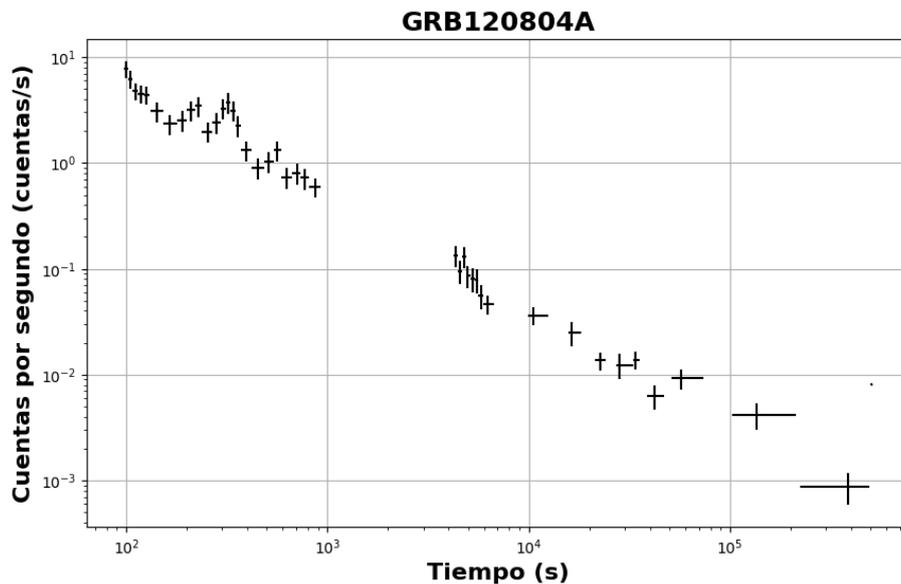


Figura 3.8: Curva de luz obtenida con XRT del GRB120804A

El espectro obtenido por XRT se ajusta a una ley de potencias, la cual se aplica a ambos espectros tomados en los modos PC y WT. En el espec-

tro se observa un repunte en el conteo de fotones entre los 100 y 1000 segundos, lo cual podría indicar alguna reemisión de radiación proveniente del GRB. Además, se aprecia una disminución de la intensidad después de este intervalo. Como es esperable y de la misma forma que para el GRB090426, existe un espacio con ausencia de datos debido a la órbita del observatorio espacial. Este vacío de datos limita temporalmente el análisis continuo del evento, pero no impide obtener conclusiones significativas sobre su evolución y características principales.

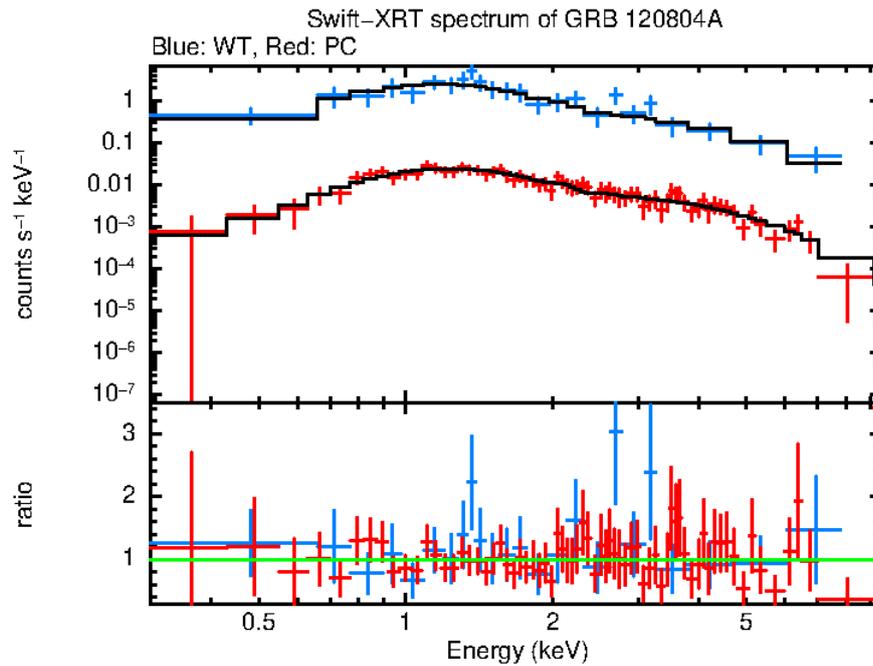


Figura 3.9: Espectro de XRT GRB120804A

Parámetro	Modo WT	Modo PC
nH galáctico	$1.58 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$	$1.58 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$
nH intrínseco	$2.0 (+2.3, -1.4) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$	$2.84 (+1.08, -0.9) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$
z	1.3	1.3
Índice espectral	2.1 (+0.5, -0.4)	1.92 (+0.19, -0.18)
Flujo (0.3-10keV)	$1.7(+0.5, -0.4) \times 10^{-10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$3.12(+0.32, -0.29) \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Cuadro 3.4: Parámetros de ajuste del espectro de XRT para el GRB120804A.

Además, se presenta una recopilación de las observaciones astronómicas del GRB090426 con distintos telescopios.

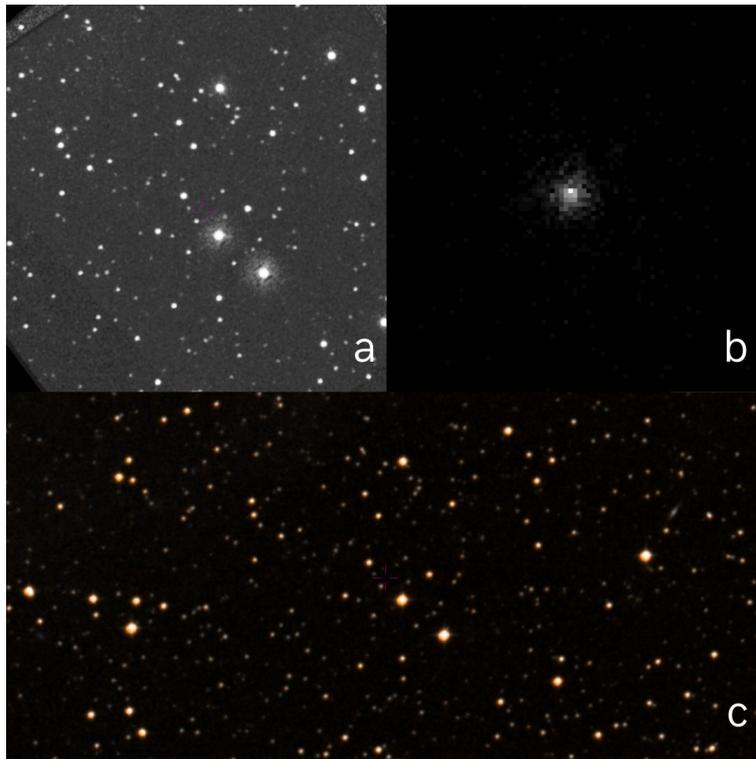


Figura 3.10: GRB 120804A a) Uvot b)XRT c) DSS2

Las observaciones en UVOT muestran un punto difícilmente observable; sin embargo, la imagen de XRT es clara. La imagen de DSS2 muestra la zona del espacio donde ocurrió el evento en el rango visible.

3.1.3. Parámetros de los GRBs

A continuación se muestra una recopilación de los estimadores temporales y espectrales calculados. Además, se presenta información que permite entender el ambiente galáctico en el que se desarrollan estos eventos.

GRB	z	Lag[ms]	T_{90} [s]	τ_{90} [s]
GRB 090426	2.609 [23]	4.25	1.28	0.51
GRB 120804A	$1,3^{+0,3}_{-0,2}$ [10]	5.86	1.024	0.77

Cuadro 3.5: Parámetros de los GRBs

GRB	SFR [$M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$]	Offset
GRB 090426	3.1 [40]	$< 0,2''$ [23]
GRB 120804A	300 [10]	$0,27'' \pm 0,15''$ [10]

Cuadro 3.6: Parámetros galácticos: star formation rate (SFR) y offset

3.2. Conclusiones y recomendaciones

Las curvas de luz en diferentes bandas energéticas evidencian que los estimadores temporales y la variabilidad dependen de la energía de la banda.

El GRB090426, a pesar de tener $T_{90} < 2$ s, se encuentra en un entorno de baja metalicidad y posee propiedades características de un LGRB proveniente de una supernova [41]. Su tasa de formación estelar está dentro del límite inferior observado normalmente en LGRBs [36], con un offset no mayor a $0.2''$. La alta luminosidad del *afterglow* y las líneas de absorción marcadas refuerzan la hipótesis de un progenitor asociado a una supernova. Además, su corrimiento al rojo ($z = 2,609$) indica que probablemente se originó en regiones de formación estelar del universo temprano. Se sugiere que esta explosión estaría asociada a un evento de colapso estelar y no a la fusión de dos objetos compactos, pese a tener un lag espectral propio de un evento de fusión. El ajuste de ley de potencias es el mejor para describir el espectro de BAT y XRT.

El GRB120804A posee un $T_{90} < 2$, también se encuentra en una galaxia con una tasa de formación estelar extremadamente alta (SFR de $300 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$) y un offset alto de $0.27'' \pm 0.15''$. Con un *redshift* $z = 1,3$, este GRB también está asociado a una región de gran formación estelar, aunque en un periodo cosmológico más reciente comparado con el GRB090426. Los espectros también se ajustan a una ley de potencias. En el espectro de XRT se evidencia un flash entre los 100 y 1000 segundos, lo que sugiere la existencia de mecanismos de reemisión, como un ambiente estelar rico, lo cual es respaldado por las características de la galaxia anfitriona. Sin embargo, su lag espectral es consistente con el de un evento de fusión de objetos compactos. El ajuste de ley de potencias cortada posee un E_{cut} en el orden de cientos de keV, lo cual se encuentra en los rayos X duros, lo que puede indicar nuevamente un medio denso.

Los espectros se ajustan a leyes de potencias, lo cual refleja el hecho de que se tratan de emisiones no térmicas y nos pueden brindar información muy valiosa sobre los mecanismos de aceleración detrás de las emisiones. Los valores de índice espectral cercanos a dos indican emisión sincrotrón en ambos casos [35].

Los ajustes realizados para los espectros mediante los modelos presentados son buenos, ya que el χ^2 sobre el número de grados de libertad (56 grados de libertad) es cercano a 1. Somos capaces de obtener una buena estadística pese a la poca cantidad de datos.

Los SGRBs generalmente se encuentran en galaxias con poblaciones estelares evolucionadas y tasas de formación estelar (*SFR*) de 0.01 a aproximadamente $40 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ [9], lo cual contrasta con la información sobre el progenitor del GRB090426. Esta discrepancia, junto con las observaciones del entorno galáctico, posiciona a este evento como un buen candidato a GRB peculiar. Por otro lado, el GRB120804A presenta características temporales típicas de un evento de fusión, mientras que su entorno galáctico es más típico de un evento de colapso estelar, catalogándolo igualmente como peculiar.

La observación y estudio de los GRBs en múltiples frecuencias y mensajes son necesarios para continuar develando sus progenitores y mecanismos de radiación. De igual manera, es necesario mejorar las técnicas en el proceso estadístico de los datos para tener en cuenta de una mejor manera el comportamiento de los detectores en el régimen de altas energías. El desarrollo tecnológico de instrumentación de altas energías es actualmente un reto en la astrofísica.

Referencias bibliográficas

- [1] *Astronomical Data Analysis Software and Systems IV*, volume 77 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, January 1995.
- [2] M.G. Aartsen, et al. A combined maximum-likelihood analysis of the high-energy astrophysical neutrino flux measured with icecube. *The Astrophysical Journal*, 809(1):98, aug 2015.
- [3] B.P. Abbott, et al. Gw170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Physical Review Letters*, 119(16), October 2017.
- [4] J-L. Atteia. Gamma-ray bursts: towards a standard candle luminosity, 1997.
- [5] D. Band, et al. BATSE Observations of Gamma-Ray Burst Spectra. I. Spectral Diversity. , 413:281, August 1993.
- [6] Jennifer Barnes, et al. A grb and broad-lined type ic supernova from a single central engine. *The Astrophysical Journal*, 860(1):38, June 2018.
- [7] Scott D. Barthelmy, et al. The burst alert telescope (bat) on the swift midex mission. *Space Science Reviews*, 120(3-4):143-164, October 2005.
- [8] W. A. Baum. Problems of extra-galactic research, 1962.
- [9] E. Berger. The host galaxies of short-duration gamma-ray bursts: Luminosities, metallicities, and star formation rates. *The Astrophysical Journal*, 690(1):231-237, December 2008.

- [10] E. Berger, et al. THE AFTERGLOW AND ULIRG HOST GALAXY OF THE DARK SHORT GRB 120804A. *The Astrophysical Journal*, 765(2):121, February 2013.
- [11] Michael S. Briggs, et al. Batse observations of the large-scale isotropy of gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 459:40, March 1996.
- [12] David N. Burrows, et al. The swift x-ray telescope. *Space Science Reviews*, 120(3–4):165–195, October 2005.
- [13] Li Chen and Dehua Wang. Spectral lags obtained by ccf of smoothed light curves. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 124(914):297–303, April 2012.
- [14] D.A. Coulter, et al. Swope supernova survey 2017a (sss17a), the optical counterpart to a gravitational wave source. *Science*, 358(6370):1556–1558, December 2017.
- [15] Shlomo Dado, Arnon Dar, and Alvaro De Rújula. Critical tests of leading gamma ray burst theories. *Universe*, 8(7), 2022.
- [16] P. D’Avanzo. Short gamma-ray bursts: A review. *Journal of High Energy Astrophysics*, 7:73–80, September 2015.
- [17] Heussaff, V., Atteia, J.-L., and Zolnierowski, Y. The epeak – eiso relation revisited with fermi grbs - resolving a long-standing debate?. *AA*, 557:A100, 2013.
- [18] Shigeo S. Kimura. Neutrinos from gamma-ray bursts, 2022.
- [19] Ray W. Klebesadel, et al. Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin. *AIP Conference Proceedings*, 727(1):3–6, 09 2004.
- [20] R.W. Klebesadel, et al. A catalog of gamma-ray bursts with earth crossing times. Aug 1982.
- [21] Chryssa Kouveliotou, et al. Identification of two classes of gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 413:L101, August 1993.
- [22] Andrew Levan. *Gamma-Ray Bursts*. 2514-3433. IOP Publishing, 2018.

- [23] M. Levesque, et al. GRB090426: 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, January 2010.
- [24] Amy Lien, et al. The third swift burst alert telescope gamma-ray burst catalog. *The Astrophysical Journal*, 829(1):7, September 2016.
- [25] A. I. MacFadyen and S. E. Woosley. Collapsars: Gamma-ray bursts and explosions in “failed supernovae”. *The Astrophysical Journal*, 524(1):262–289, October 1999.
- [26] Davide Miceli and Lara Nava. Gamma-ray bursts afterglow physics and the vhe domain. *Galaxies*, 10(3):66, May 2022.
- [27] Igor G. Mitrofanov, et al. The Emission Time of Gamma-Ray Bursts. , 522(2):1069–1078, September 1999.
- [28] P. Mészáros. The fireball model of gamma-ray bursts. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 143:33–49, 2001.
- [29] Robert J. Nemiroff. A century of gamma ray burst models, 1994.
- [30] J. P. Norris, G. F. Marani, and J. T. Bonnell. Connection between energy-dependent lags and peak luminosity in gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 534(1):248–257, May 2000.
- [31] Bohdan Paczyński. Are gamma-ray bursts in star-forming regions? *The Astrophysical Journal*, 494(1):L45–L48, February 1998.
- [32] Luigi Piro. *X-Ray Afterglows and Features of Gamma-Ray Bursts*, page 97–105. Springer-Verlag.
- [33] M. J. Rees and P. Meszaros. Unsteady outflow models for cosmological gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 430:L93, August 1994.
- [34] Peter W.A. Roming, et al. The Swift Ultra-Violet/Optical Telescope. , 120(3-4):95–142, October 2005.
- [35] G.B. Rybicki and A.P. Lightman. *Radiative Processes in Astrophysics*. A Wiley-Interscience publication. Wiley, 1991.

- [36] S. Savaglio, K. Glazebrook, and D. Le Borgne. The galaxy population hosting gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 691(1):182–211, January 2009.
- [37] Sheetal Saxena. *Multiwavelength Studies Of Gamma-Ray Emitting Radio Galaxies*. doctoralthesis, Universität Würzburg, 2020.
- [38] Amir Shahmoradi and Robert J. Nemiroff. Short versus long gamma-ray bursts: a comprehensive study of energetics and prompt gamma-ray correlations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451:126–143, 2014.
- [39] B.J. Shappee, et al. Early spectra of the gravitational wave source gw170817: Evolution of a neutron star merger. *Science*, 358(6370):1574–1578, December 2017.
- [40] C. C. Thöne, et al. Variable Ly sheds light on the environment surrounding GRB 090426. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414(1):479–488, 06 2011.
- [41] Li-Ping Xin, et al. Probing the nature of high-z short grb 090426 with its early optical and x-ray afterglows: Early optical afterglows of grb090426. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 410(1):27–32, September 2010.
- [42] Bing Zhang. *The Physics of Gamma-Ray Bursts*. Cambridge University Press, 2018.
- [43] Bing Zhang, et al. Physical Processes Shaping Gamma-Ray Burst X-Ray Afterglow Light Curves: Theoretical Implications from the Swift X-Ray Telescope Observations. , 642(1):354–370, May 2006.