

# Las explosiones de rayos gamma un campo abierto para la astrofísica

## *Gamma-ray bursts an open field for astrophysics*

Andrés Baquero Larriva  
Universidad del Azuay, obaquero@uazuay.edu.ec

Recibido: 27-09-2017. Aceptado después de revisión: 17-01-2018

**Resumen:** Las explosiones de rayos gamma (GRBs), son los fenómenos astrofísicos más energéticos y luminosos desde el Big Bang, y pueden liberar más energía en pocos segundos de lo que nuestro Sol emitirá en todo su vida esperada de diez mil millones de años. Su frecuencia de detección es de alrededor de una explosión por día, aunque debido a que no todas las explosiones se dirigen hacia la tierra, se estima que la tasa real es de alrededor de una cada minuto en el universo. Los GRBs juegan actualmente un rol muy importante en el área de estudio de la astrofísica de altas energías, ya que encierran toda una física nueva por el hecho de explorar nuevos procesos físicos y mecanismos de radiación que expliquen la liberación de tan grandes energías, además de la exploración de sus galaxias anfitrionas y objetos astrofísicos que puedan ser catalogados como sus posibles progenitores. A esto se suma su utilidad para el estudio de las primeras fases del universo, ya que podrían estar asociados a las primeras generaciones de estrellas y las últimas fases de desarrollo de las mismas. Este artículo busca brindarle al lector un amplio espectro sobre el entendimiento hasta ahora alcanzado en el estudio de los GRBs y los problemas físicos aún abiertos que son estudiados por los astrofísicos hoy en día.

**Palabras claves:** Astrofísica, explosiones de rayos gamma, GRB.

**Abstract:** Gamma-ray bursts (GRBs) are cataclysmic astrophysical phenomena of short duration, but of high intensity that release energy comparable to the power released in the Big Bang, the great explosion that gave birth to the universe, currently play a crucial role the study of high-energy astrophysics area, since they enclose a whole new physics by exploring new physical processes and the mechanisms of radiation that explain the release of such great energies, in addition to the exploration of its host galaxies and astrophysical objects that are cataloged as their possible progenitors. Therefore its usefulness for the study of the first phases of the universe, since it may be associated with the first generations of stars and the last phases of their development as well. This article seeks to provide the reader with a broad spectrum of the understanding that has been reached in the study of GRBs and the still open physical problems that are being studied by astrophysicists nowadays.

**Keywords:** Astrophysics, gamma-ray bursts, GRB.

## 1. Introducción

Los rayos gamma son producidos por los objetos más calientes y más energéticos del universo, como las estrellas de neutrones y los púlsares, las explosiones de supernova y las regiones alrededor de los agujeros negros. En la Tierra, los rayos gamma son generadas por explosiones nucleares, relámpagos y en alguna desintegración radiactiva.

Las explosiones de rayos gamma, más conocidas como GRBs por sus siglas en inglés (gamma-ray bursts) son los eventos astrofísicos más violentos y energéticos después del Big Bang, fueron descubiertas fortuitamente en la década de los 60 y desde ese momento han llamado la atención de los astrofísicos por su gigantesca liberación de energía, lo cual conlleva al desarrollo de nuevos modelos físicos, que incluyan mecanismos de radiación responsables de generar energías tan altas, otro aspecto relevante son las grandes distancias a las que se dan los GRBs, haciéndolos útiles para el estudio del universo primigenio, además de la identificación de las fuentes astrofísicas responsables de tan grandes explosiones, llamados progenitores.

En los últimos 15 años se ha logrado un gran avance en el entendimiento de los GRBs, debido al lanzamiento de las misiones Swift (2004) y Fermi (2008), por parte de la NASA, las cuales han permitido un estudio más profundo desde el punto de vista observacional, ya que se encuentran vinculadas con telescopios en tierra, esto ha permitido establecer con mucha mayor certeza el lugar en el espacio donde se dan y las galaxias anfitrionas de estos fenómenos astrofísicos.

A lo largo del presente artículo, se hará una revisión de la historia que hay detrás del descubrimiento de los GRBs, el desarrollo de las investigaciones a partir de la década de los 60; se expondrán las dos fases fundamentales que componen a un GRB, detallando los modelos físicos planteados hasta la fecha, con el fin de explicar la física subyacente a los GRBs; se detallarán además los estudios realizados con el fin de alcanzar una clasificación definitiva, que catalogue de la manera más completa estas explosiones; por último se expondrán los tipos de progenitores que han sido vinculados a los GRBs y mayormente aceptados por la comunidad científica.

## 2. Historia de los GRBs

En plena guerra fría, un año después de la crisis de los misiles de Cuba de 1962, John F. Kennedy y Nikita Jrushchov, líderes de los Estados Unidos y la Unión Soviética respectivamente, en búsqueda de frenar la escalada armamentista nuclear, firmaban el Tratado de prohibición parcial de ensayos nucleares en la atmósfera, en el espacio exterior y bajo el agua (TPPEN), quedando restringidos los ensayos nucleares únicamente a ser realizados bajo tierra. Dado esto, los Estados Unidos comenzaron rápidamente un ambicioso programa espacial, con el fin de monitorear posibles explosiones nucleares realizadas por la Unión Soviética en el espacio, para lo cual lanzaron los satélites militares VELA.

Se lanzaron un total de seis pares de satélites VELA entre 1964 y 1970, los cuales eran capaces de detectar los rayos X, rayos gamma y neutrones producidos en los primeros segundos de las explosiones nucleares. Aunque cientos de miles de eventos fueron detectados, la mayoría se podían relacionar con fuentes terrestres y partículas cargadas provenientes del universo, además nunca fueron identificadas pruebas nucleares de origen

humano, por lo que el misterio de la procedencia de estos eventos seguía siendo un misterio y levantaría gran interés en la comunidad de astrofísicos de la época.

Un evento en particular, observado el 2 de julio de 1967, el cual no podía ser atribuido a ninguna fuente conocida, ya que no existía actividad solar anómala en ese día y se podía descartar una fuente de este tipo, es reconocida como la primera detección de una explosión de rayos gamma o GRB. Por asuntos de seguridad nacional de los Estados Unidos, la existencia de los GRBs; recién fue anunciada a la comunidad científica en 1973 por Ray Klebesadel, Ian Strong y Roy Olson del Laboratorio Nacional de Los Alamos [1]. En este primer artículo se reportaron 16 GRBs entre julio de 1969 y julio de 1972.

Con el fin de indagar en el misterio de los GRBs, los investigadores del Laboratorio Nacional de Los Alamos, se centraron primeramente en determinar en qué parte del cielo se daban estos eventos. Los rayos X y especialmente los rayos gamma, no son posibles de enfocar, debido a la muy alta energía de sus fotones, lo mejor que podían hacer los detectores en los satélites VELA era literalmente detener los fotones y registrar la energía y el tiempo en el que éstos arribaban al detector. Esta información permitiría triangular y reconstruir el origen de estos eventos en el cielo, al utilizar la diferencia temporal en la llegada de los fotones entre los diferentes satélites VELA. Se pudo evidenciar entonces que estos eventos astrofísicos no tenían fuentes cercanas a la tierra como el sol, la luna u otro sistema solar conocido en ese entonces [2].

En la década de los 80, a las estrellas de neutrones cercanas eran consideradas como las principales candidatas a progenitores de los GRBs, ya que eran las fuentes de rayos X más conocidas y concordaban con los pocos modelos físicos que trataban de explicar estas explosiones [3]. A partir de aquí existe un largo periodo de investigación dedicado al estudio de las características temporales y espectrales de los GRBs, principalmente en el análisis de las curvas de luz, la búsqueda de posibles periodicidades y la determinación de si su espectro era de naturaleza térmica o no [3].

En 1991 se puso en funcionamiento el Observatorio de Rayos Gamma Compton (CGRO Compton Gamma-Ray Observatory) y su experimento BATSE (Burst And Transient Source Experiment) [4], el cual poseía un detector de rayos gamma de gran sensibilidad, que podía monitorear casi la totalidad del cielo y localizar el lugar de donde provenían las explosiones. Gracias a este experimento se pudo evidenciar que los GRBs mostraban una distribución isotrópica y que sus fuentes se encontraban fuera de la vía láctea, como se puede evidenciar en la figura 1 [5].

El catálogo de GRBs detectados por BATSE, también permitió la primera clasificación de GRBs, diferenciándolos por su duración en “GRBs largos”, a los que tienen una duración mayor a los 2 segundos y “GRBs Cortos” con una duración menor a los 2 segundos [6]. Se comprobó además que gran parte del espectro era de naturaleza no térmica, la alta variabilidad espectral, la ausencia de periodicidades y líneas de absorción en sus curvas de luz, entre los 20-40 keV, las cuales eran esperadas para corroborar el modelo de estrellas de neutrones como progenitor [3].

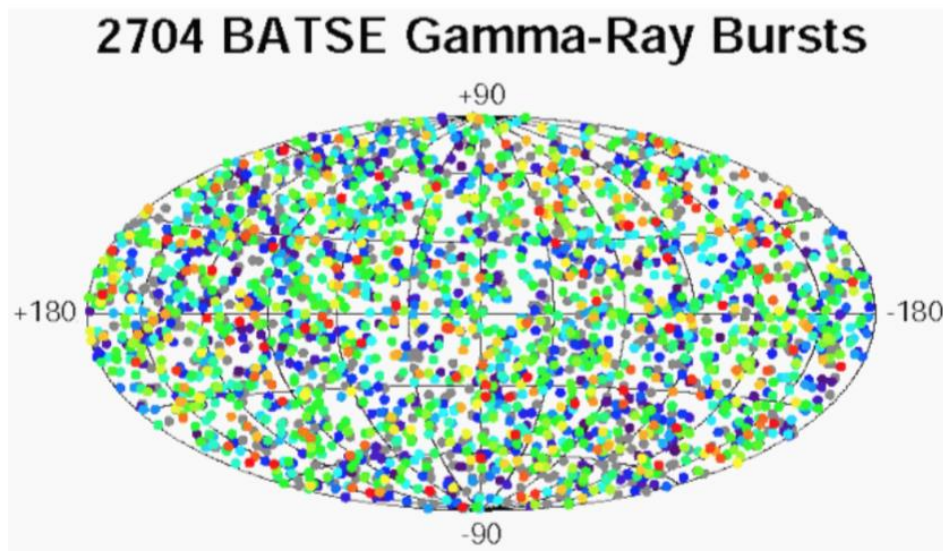


Figura 1. Distribución de GRBs detectados por BATSE[4].

A partir de BATSE, como suele ocurrir muchas veces en la ciencia, se encontraron más preguntas que respuestas, ya que la isotropía y la distribución no-homogénea de las explosiones, presentaban fuertes argumentos en contra del modelo de estrellas de neutrones cercanas como progenitor. Se evidenció además que los GRBs deberían proceder de fuentes a distancias cosmológicas, liberando energías enormes sobre los  $10^{52}$  erg, haciéndolos los eventos astrofísicos más energéticos en el universo, luego del Big Bang. El problema sobre qué objetos astrofísicos podrían generar tan altas energías seguía abierto, especialmente por la naturaleza de su espectro no-térmico, ya que no existían mecanismos de radiación conocidos que generen dichas energías.

En resumen las tres principales preguntas que se hacían los astrofísicos en la década de los 90 eran: ¿A qué distancias se dan estas explosiones?, ¿Qué son los GRBs?, y ¿Cómo se generan los GRBs?.

La primera pregunta tuvo su respuesta a partir del 28 de febrero de 1997, cuando el satélite italiano de rayos X BeppoSAX [7], detectó la post-luminiscencia en rayos X del GRB 970228 [8]. Esta post-luminiscencia es radiación de menor energía emitida luego de la emisión temprana de los GRBs y permanece visible por horas permitiendo su estudio con telescopios ópticos terrestres. El descubrimiento de la post-luminiscencia de los GRBs hizo posible la medición del corrimiento al rojo, los cuales en su mayoría eran superiores al  $z = 1$ , esto permitió identificar galaxias anfitrionas, y ubicar la fuente de los GRB, en las regiones de formación estelar de estas galaxias, las cuales fueron estudiadas con el telescopio espacial Hubble. Este descubrimiento abría las puertas hacia la idea de plantear las explosiones de estrellas supermasivas, que terminarían formando agujeros negros, lo cual derivaría en la emisión de jets relativistas, estos jets son chorros de materia que se encuentran generalmente asociados a discos de acreción, tanto en formación estelar, donde el jet es formado por materia con exceso de momento angular que no es incorporado en la estrella que está formándose, como en agujeros negros, esto explicaría parte de la gran energía de estas explosiones. Esto se reforzaría además gracias también a BeppoSAX, ya que en 1998 el GRB 980425, fue asociado con la SN 1998bw, descubriéndose la primera evidencia directa de progenitores de GRBs relacionados con supernovas [9]. Aunque persistía el problema de que

la mayoría de supernovas no producen jet relativistas y ocurren en una tasa de alrededor de una por segundo en el universo observable, mientras que los GRBs ocurren con una frecuencia de alrededor de un evento diario, es decir no todas las explosiones de supernovas generan GRBs.

La misión BeppoSAX también arrojó algunos descubrimientos en torno a los GRBs, como la confirmación de la existencia de los XRF o flashes de rayos X, los cuales son emitidos en energías significativamente más bajas que los GRBs clásicos. Se descubrieron además las llamadas “emisiones oscuras” (“*dark bursts*” en inglés), y la existencia de una correlación entre la energía isotrópica radiada por los GRBs y la energía pico de su espectro, lo cual abría la posibilidad de utilizar a los GRBs, como parangones para la medición de distancias en el universo a gran escala, ya que permitía conocer su luminosidad específica [3].

Posteriormente en 2002 fue lanzado el satélite espacial de la NASA HETE-2 (High Energy Transient Explorer) [10], el cual tenía la capacidad de computar la localización del GRB detectado y transmitir sus coordenadas en pocos segundos a telescopios localizados en tierra, esto permitió la realización de estudios sobre las fases iniciales de la post-luminiscencia de los GRBs. Además en marzo de 2003 HETE-2 detectó un GRB extremadamente brillante asociado a una supernova con un corrimiento al rojo de  $z = 0.17$ , confirmando a las supernovas como posibles progenitores de los GRBs largos.

Quizás, el mayor avance hasta el momento en cuanto al estudio de los GRBs, se ha dado a partir de noviembre del 2004 cuando fue lanzado el telescopio espacial Swift [11], el cual ha revolucionado el entendimiento de los GRBs y su utilidad para el estudio del universo primigenio. Swift cuenta con una sofisticada capacidad de localización de los GRBs superando a HETE-2, lo que ha permitido realizar observaciones coordinadas con telescopios en tierra, con tiempos de respuesta mucho más cortos [12]. Además, el telescopio espacial Swift ha sido de gran importancia para el estudio de los GRBs cortos, ya que pudo descubrir la primera post-luminiscencia de este tipo de GRBs, al detectarla en el GRB 050509B [13]. Esto permitió la identificación de galaxias anfitrionas, estableciéndose que los GRBs cortos y largos son fenómenos intrínsecamente diferentes [14].

El 11 de Julio de 2008 fue lanzada la misión espacial Fermi (FGST Fermi Gamma-Ray Space Telescope) [15], siendo la mayor misión de la NASA dedicada a la observación de rayos gamma de alta energía hasta la época. Posee un telescopio de gran área y un monitor de GRBs, que al trabajar en conjunto conforman una poderosa herramienta, para el estudio espectral dependiente del tiempo, en una mayor banda de energía que su predecesor Swift, por lo que esta misión espacial ha sido de gran repercusión en el estudio de los mecanismos físicos responsables de la emisión de alta energía de los GRBs.

### 3. Fases durante la explosión de un GRB

Como se detalló en la sección anterior, múltiples telescopios espaciales en colaboración con telescopios terrestres ópticos, han permitido identificar algunas características propias de la emisión de los GRBs, como la identificación de dos fases fundamentales que se dan en estos eventos astrofísicos. A estas fases se las han denominado como *Emisión temprana* y *Post-luminiscencia*, las principales características y problemas abiertos de éstas se detallarán a continuación.

### 3.1 Emisión Temprana

La emisión temprana de un GRB hace relación a la emisión en forma de un jet de radiación de alta energía en rayos gamma y de menor energía usualmente en rayos X, que ocurre simultáneamente durante la explosión. Esta emisión dura típicamente unos pocos segundos, sin repetición y con una curva de luz altamente variable [16].

#### 3.1.1. Propiedades temporales

El equipo de colaboración de la misión espacial BATSE, introdujo el parámetro  $T_{90}$  como medida de duración de los GRBs, el cual es definido como el intervalo de tiempo desde el cual el GRB emite el 5 % de su energía hasta el 95 %. Es decir el 90 % de fotones detectados [17]-[19]. Desde entonces usualmente se cuantifica la duración de los GRBs con el parámetro  $T_{90}$ , siendo este parámetro dependiente de la sensibilidad del detector.

#### 3.1.2 Curvas de Luz

Existe una gran diversidad en las curvas de luz de los GRBs, algunas son suaves o muestran múltiples picos bruscos bien separados, mientras otras presentan solamente uno o dos pulsos suaves distinguibles, además los pulsos varían desde pulsos muy cortos a pulsos muy largos [20]. Afortunadamente en las curvas de luz se puede distinguir una superposición entre componentes rápidas y lentas, lo cual puede arrojar información sobre el motor central del GRB [18].

#### 3.1.3 Propiedades espectrales

El espectro de los GRBs usualmente se ajusta al modelo fenomenológico llamado “función de Band”[21], que utiliza dos leyes de potencia que se ajustan suavemente a una energía de quiebre  $(\alpha - \beta)E_0$ , donde  $\alpha$  es el índice espectral de baja energía,  $\beta$  el índice espectral de alta energía y  $E_0$  la energía de quiebre [22]. Los índices típicos son  $\alpha \sim -1 \pm 1$  y  $\beta \sim -2 \pm \frac{1}{2}$ , para los GRBs observados por BATSE en la banda de 20-2000 keV [23] y confirmado por los GRBs detectados por Fermi [18, 24, 25, 26]. También se han detectado GRBs cuyo espectro se ajusta a una ley de potencia de corte y otros a una ley de potencia simple, si es que el GRB no es lo suficientemente brillante o el detector es sensible únicamente a una banda de energía muy estrecha.

Se ha observado en algunos GRBs una superposición de al menos tres componentes espectrales. Una componente que se ajusta a la función de Band, otra componente de tipo térmico y una componente que se ajusta a una ley de potencia. Sin embargo se ha considerado más ampliamente al espectro que se ajusta a la función de Band como el espectro típico de los GRBs [18].

#### 3.1.4 Modelos físicos de emisión temprana

Luego de más de 40 años de observaciones, la física referente a la emisión temprana de los GRBs, no ha sido completamente entendida, las principales incógnitas se basan en las siguientes preguntas, las cuales son más específicas que las planteadas en la sección 2 del presente artículo y que aún no ha podido ser completamente respondidas [27] :

- ¿Cuál es la composición del jet de un GRB?

- ¿Cuál es el mecanismo de disipación de energía en el jet?
- ¿Dónde se encuentra la región de disipación de energía y emisión temprana?
- ¿Cuál es el mecanismo de aceleración de partículas en la región de disipación de energía?
- ¿Cuál es el mecanismo de radiación de las partículas?

Se podría decir que la pregunta más fundamental es la primera, ya que la respuesta a esta incógnita afecta a las respuestas del resto de preguntas [20].

Para tratar de responder a esta pregunta explicaremos primeramente algunos de los modelos tradicionales, propuestos sobre la física subyacente a la emisión de un GRB.

#### 3.1.4.1 Modelo de Fireball (Bola de fuego)

El modelo de “fireball” o bola de fuego tradicional es uno de los modelos físicos más aceptados por la comunidad científica relacionados con la emisión propia y post-luminiscencia de los GRBs, se basa en la liberación de energía gravitacional durante un evento catastrófico (como el colapso del núcleo de una estrella masiva o la colisión de dos estrellas compactas), siendo depositada en la base del motor central en forma de calor térmico. Esta bola de fuego entonces se expande bajo su propia presión térmica y es acelerada a velocidades relativistas [28, 29]. La mayor parte de la energía térmica es convertida en energía cinética del flujo de salida [30], y una menor parte es liberada como fotones a la atmósfera [31]. Además la energía cinética del flujo de salida es disipada por choques internos y externos [32], a la vez que la eyección es desacelerada por el medio circundante a la explosión, dando lugar a la post-luminiscencia del GRB [33].

#### 3.1.4.2 Modelo Electromagnético (EM Electromagnetic Model)

El modelo de fireball tiene un enfoque dominado por la materia, en cambio el modelo EM o Modelo Electromagnético, describe a los GRBs como fenómenos puramente electromagnéticos [34]. Aquí la emisión se debe primordialmente al campo magnético. Pequeños bariones son cargados desde el motor central, generando un valor extremadamente grande, de la tasa entre el flujo de Poynting y el flujo de materia (tasa entre la densidad de energía magnética comóvil y la densidad de energía de la masa en reposo) denominado  $\sigma$ . El modelo EM predice que la energía magnética es directamente convertida en la energía de partículas y energía de radiación, a través de un radio de desaceleración que mantiene estable sus niveles altos de  $\sigma$ , lo cual es muy difícil de mantener [20].

#### 3.1.4.3. Modelos Magnetohidrodinámicos

Existe un amplio rango de modelos magnetohidrodinámicos (MHD) de GRBs, los cuales esquematizan un escenario en el cual la eyección de los GRBs se da a través de una combinación de componentes de materia y campos electromagnéticos [35, 36].

Para dilucidar cuál modelo sería el más realista es de vital importancia especificar qué tan alto sería el nivel de  $\sigma$  en el sitio de la emisión del GRB, ya que esta tasa es una función del radio, y tanto la aceleración magnética como la disipación probablemente deberían variar constantemente durante la eyección. Esto conlleva la complicación de que es muy difícil establecer la localización del  $R_{GRB}$  (radio de la emisión temprana del GRB). Los valores de  $\sigma(R_{GRB})$  y  $R_{GRB}$  son mutuamente dependientes. Se han establecido diferentes modelos para la emisión temprana de GRBs con algunas combinaciones de estos parámetros [20].

Las recientes observaciones de las post-luminiscencias en rayos X de GRBs por la misión Swift sugieren que el lugar de la emisión debe ser en el interior, debajo de los choques internos, donde la eyección es desacelerada [37]. Se restringe entonces el lugar de la emisión entre el radio de fotosfera  $R_{ph}$  (por debajo del cual los fotones son opacos) y el radio de deceleración  $R_{dec}$  (por encima del cual el chorro desacelera debido a la interacción entre la eyección y el medio)[20].

Se puede entonces evidenciar que no existe un consenso general sobre la interpretación de la emisión propia de los GRBs. De acuerdo a la localización del sitio de la emisión se pueden identificar tres tipos de modelos principales [18]: 1. modelos de fotosfera disipativa [38, 39], los cuales interpretan a la emisión temprana como una emisión de fotones comptonizados casi térmicos desde la fotosfera de la eyección; 2. modelos de choques internos [40, 41], interpretan a la emisión temprana como consecuencia de radiación sincrotrón de electrones acelerados a través de choques internos; 3. modelos forzados de disipación magnética con radio de emisión grande, por reconexión magnética y turbulencia, ICMART [42], que interpretan a la emisión temprana como radiación sincrotrón de electrones acelerados en la región de disipación magnética. Los dos primeros modelos tienen un  $\sigma \ll 1$  y el tercer modelo tiene un  $\sigma \geq 1$  en la región de emisión [18].

La gran variabilidad en las curvas de luz de los GRBs es interpretada de forma diferente en los tres tipos de modelos. Los modelos de la fotosfera relacionan las variabilidades directamente con la actividad del motor central, en el cual se generan fluctuaciones intrínsecas en la potencia del jet desde el agujero negro, mientras que la componente lenta podría ser causada por la modulación de la cobertura estelar cuando el jet es eyectado desde el motor central [43]. En los modelos de choques internos, la componente rápida se debe a muchos choques internos con radio pequeño y la componente lenta a los choques internos con radio grande [44]. En el modelo ICMART, la componente lenta se deriva de la actividad del motor central. Cada pulso ancho se debe a una emisión simple o evento CMART, la rápida variabilidad puede ser causada por los pequeños jets producidos en las regiones de reconexión local dentro del jet [45].

### 3.2 Post-luminiscencia

La post-luminiscencia de los GRBs es la emisión de amplio espectro, detectada luego de la fase de emisión temprana. Se caracteriza por tener un espectro y una curva de luz con segmentos múltiples de ley de potencia en un instante dado y en una banda de observación determinada. Antes de ser detectadas las primeras post-luminiscencias, ya habían sido predichas teóricamente [46] y luego de veinte años de observaciones, las post-luminiscencias han sido bien estudiadas tanto de forma fenomenológica como física [18].

#### 3.2.1 Post-luminiscencia en rayos X

A partir del lanzamiento de la misión Swift en 2004, se comenzó un estudio sistemático de la post-luminiscencia en rayos X, ya que Swift permitía la observación a partir de decenas de segundos luego de la primera detección [18]. Se ha logrado establecer una curva de luz canónica que describe las curvas de luz de la mayoría de GRBs, la cual incluye cinco componentes [47]: una fase de decaimiento abrupta, una fase de decaimiento superficial (o meseta), una fase de decaimiento normal, una de aceleramiento tardío del tipo rotura del jet y erupciones erráticas de rayos X [18]. Se ha evidenciado empíricamente que los datos de las post-luminiscencias en rayos X pueden ajustarse a una superposición entre dos componentes



correspondientes a las fases de emisión del GBR, emisión temprana y post-luminiscencia, aunque no existen modelos físicos que predigan específicamente la formas matemáticas que se dan en la gran variabilidad de curvas de luz observadas [48, 49].

### *3.2.2 Modelos físicos de post-luminiscencias*

El modelo físico más aceptado para describir las post-luminiscencias de los GRBs es el modelo de choque externos [18, 50]. Este modelo establece que la eyección relativista o bola de fuego es desacelerada por el medio circundante a la explosión. Esto se da ya sea por la existencia de un medio interestelar (ISM) con densidad constante o debido a viento estelar estratificado, cualquiera de estas dos condiciones, desarrolla un par de ondas de choque: una onda de choque de larga duración que se propaga hacia adelante en el medio y una onda de choque de corta duración que se propaga en reversa a través de la eyección [51, 52]. Las dos ondas de choques aceleran electrones, ocasionando la emisión de radiación sincrotrón de amplio espectro con frecuencias características que evolucionan en el tiempo [46]. Las ondas de choque hacia adelante dan lugar a la post-luminiscencia de larga duración y las ondas propagadas en reversa generan emisiones ópticas y de radio adicionales [46].

La misión espacial Swift permitió analizar los primeros momentos de la emisión de las post-luminiscencias y se descubrieron características, en las curvas de luz, no predichas por el modelo de choques externos (como la fase de decaimiento abrupta, la fase de decaimiento superficial, o las erupciones erráticas de rayos X). Por lo que se planteó que la emisión de las post-luminiscencias se deben tanto a choques externos como a regiones de disipación de energía interna. Esta energía interna se produce por ondas de choque internas o por la existencia de regiones de disipación magnética, las cuales tienen lugar gracias a una actividad tardía del motor central [18]. La fase de decaimiento abrupta y las erupciones erráticas de rayos X deben tener un origen interno y la fase de decaimiento superficial, decaimiento normal y las fases tardías tendrían su origen en los choques externos [53].

En la última década se ha llegado a un consenso en la comunidad científica respecto a que las post-luminiscencias con energía correspondiente a los GeV que se dan luego de la emisión temprana tienen su origen en los choques externos, mientras que las emisiones del orden de los GeV que se dan durante la fase de emisión temprana podría deberse a una contribución desde la región interna de disipación [53]-[56]. Se piensa que el mecanismo de radiación dominante debe ser el de radiación sincrotrón, aunque también podría darse radiación de tipo sincrotrón por procesos auto-Compton, que por ejemplo han sido detectados en el GRB 130427A [57].

## **4. Clasificación de GRBs**

Definir un esquema de clasificación para los GRBs, ha sido una de las tareas más difíciles, ya que los GRBs muestran una gran diversidad de un evento a otro, sin embargo en general, se han propuesto dos tipos de esquemas de clasificación, unos basados en aspectos fenomenológicos y otros relativos a la física subyacente de estos eventos astrofísicos.

### *4.1 Esquemas de clasificación fenomenológicos*

#### *4.1.1 Clasificación basada en duración y dureza espectral*

El catálogo de GRBs detectados por BATSE, mostró una distribución bimodal con una brusca separación a los 2s [6], como se puede observar en la figura 2, esta bimodalidad fue corroborada por detectores posteriores [58]-[60]. Se estableció entonces una clasificación canónica de GRBs que los estereotipa como GRBs largos a los que tienen duración ( $T_{90} > 2s$ ) y GRBs cortos con ( $T_{90} < 2s$ ). Se ha corroborado mediante múltiples observaciones, que los GRBs largos muestran espectros más suaves que los cortos [61]. Este esquema de clasificación presenta una falencia ya que se pueden dar ambigüedades en cuanto a la identificación como cortos o largos de algunos GRBs, debido a que el parámetro  $T_{90}$  depende de la banda de energía en la que trabaje el detector y de la sensibilidad del mismo. Algunos GRBs cortos detectados por Swift, presentaban una emisión extendida suave con duración desde los 10 a los 100 segundos [63], por lo que algunos autores han sugerido la existencia de una tercera clase de GRBs con duración intermedia [19, 64]. Recientemente se ha sugerido una población de GRBs con una duración mucho mayor, aunque sigue siendo debatida la idea de que formen parte de un tipo nuevo de GRBs [65, 66].

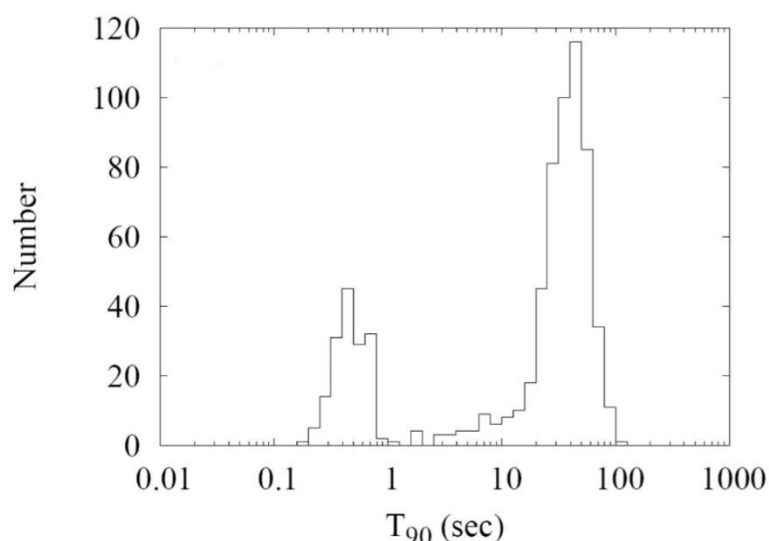


Figura 2. Bimodalidad encontrada en las detecciones de BATSE[6].

#### 4.2. Clasificación física

Debido a estas inconsistencias en los esquemas de clasificación fenomenológicos se han planteado esquemas de clasificación basados en la física intrínseca de estos fenómenos astrofísicos. Estos esquemas se han fundamentado en las propiedades observacionales identificadas y los modelos físicos teóricos propuestos en los últimos cuarenta años de observación de los GRBs. Se han clasificado a los GRBs en las siguientes categorías [18].

##### 4.2.1 Clasificación basada en el tipo de progenitor (Estrella masiva Tipo II vs. Estrella compacta Tipo I)

Las observaciones han establecido que los dos tipos de GRBs canónicos, deben corresponder a tipos diferentes de progenitores, a los GRBs largos se les ha relacionado con la muerte de estrellas masivas, y a los cortos con con la colisión de estrellas compactas [18]. Lamentablemente esta correlación de los GRBs largos y cortos con sus correspondientes

progenitores no siempre se cumple en las observaciones [27]. Por ejemplo los GRBs 060614 y GRB 060505 son GRBs cercanos de larga duración, que no tienen asociación con supernovas y además muestran algunas propiedades de GRBs cortos [67]-[70]. Otro caso es el de los GRBs 090423 y GRB 080916 de alto corrimiento al rojo,  $z = 8.2$  y  $z = 6.7$ , respectivamente, con duración menor a un segundo en el marco de referencia en reposo, a estos se le asoció a estrellas masivas [71]-[74].

En aras de superar estas inconsistencias, en paralelo al esquema de clasificación GRBs cortos vs. largos, se propuso un nuevo esquema de clasificación, diferenciando a los GRBs en Tipo I, asociados a estrellas masivas y GRBs Tipo II asociados a estrellas compactas [75, 76]. Pero este esquema de clasificación continuaba siendo incompleto, ya que observacionalmente los GRBs Tipo I y II muestran comportamientos superpuestos cuando se toman en cuenta criterios observacionales individuales [77], por lo que se ha sugerido establecer un criterio múltiple, para lograr una clasificación adecuada. Se ha planteado entonces un criterio observacional múltiple, para identificar la categoría física de cualquier GRB. Este criterio múltiple no se basa únicamente en la duración, dureza espectral y luminosidad, sino que tiene en cuenta otros criterios que tiene relación con el lugar donde se produce el GRB como la asociación con supernovas, tipo de galaxias anfitrionas, tasa de formación estelar y el medio circundante a la explosión, además se tienen en cuenta propiedades energéticas del GRB como la energía pico y energía isotrópica, y otras propiedades temporales como el lag espectral [78].

## 5. Identificación de progenitores

Como hemos podido evidenciar hasta el momento, la identificación de progenitores para los GRBs no es una labor fácil. En los últimos años se han utilizado dos enfoques en búsqueda de resolver este problema abierto de los GRBs. Por un lado, gracias al gran desarrollo tecnológico de los telescopios espaciales como Swift y Fermi, los cuales trabajan en conjunto con telescopios en tierra, se ha analizado un gran volumen de datos observacionales. El otro enfoque se basa en el desarrollo de modelos teóricos (colapso de estrellas masivas, colisión de estrellas de neutrones) y la utilización de métodos numéricos y analíticos para investigar si se puede reproducir la explosión de un GRB teóricamente [27].

Para las estrellas masivas, típicamente relacionadas a GRBs largos, se han evidenciado dos hechos observacionales de vital importancia para establecerlas como progenitores. El primer hecho tiene que ver con que algunos GRBs detectados han sido asociados a supernovas tipo Ic (sin líneas espectrales de absorción de hidrógeno y sin líneas espectrales o líneas espectrales débiles de hidrógeno) [79]-[84]. El segundo hecho es la identificación de galaxias anfitrionas enanas con formación estelar intensa, y el hecho de que las localizaciones de los GRBs definidas apuntan a las regiones de formación estelar más brillantes dentro de las galaxias anfitrionas [85, 86]. Teóricamente, para producir un jet relativista gracias al colapso de una estrella masiva que alcance la energía observada en los GRBs, se requiere que exista un gran momento angular en el núcleo de la estrella [87]. Gracias a esto el eje de giro provee una dirección natural preferida para la propagación del jet [27].

Se puede concluir entonces que existen tres requerimientos para establecer a una estrella masiva como progenitor de un GRB: 1. Estas estrellas deben pertenecer a las regiones más brillantes de formación estelar de la galaxia anfitriona; 2. La envoltura de hidrógeno se ha perdido en su mayoría, lo que apunta a un progenitor de estrella tipo Wolf-Rayet; 3. El

núcleo de la estrella debe acarrearse un gran momento angular. Teniendo en cuenta estas restricciones se pueden establecer algunos sistemas de progenitores posibles, como el colapso de una estrella masiva con gran momento angular, esto se lograría cuando la estrella pierda su envoltura de hidrógeno (lo cual requiere de fuertes vientos y gran metalicidad) y además se tiene un núcleo de rotación rápida (lo cual requiere baja metalicidad), siendo esto físicamente contradictorio. Se ha argumentado entonces que la rápida mezcla de hidrógeno con helio podría resultar en generar helio a partir de la quema de hidrógeno sin la necesidad de eyectar la cobertura de hidrógeno, y por lo tanto sin perder momento angular [88]. Alternativamente, podría establecerse sistemas de progenitores relacionados con el colapso de una estrella masiva en un sistema binario cerrado, y la fusión de dos estrellas de Helio, la ventaja de este tipo de sistemas binarios es que retendrían el momento angular en el núcleo al expulsar la envoltura de hidrógeno [87].

Se debe tener en cuenta algunos aspectos con el fin de validar la idea de estrellas masivas como progenitor de GRBs. Primeramente, existen únicamente entre cinco y seis casos robustos que asocian GRBs con supernovas, de estos solamente un caso el del GRB 030329 es un GRB típico, los demás son GRBs con corrimiento al rojo pequeño (cercanos), presentan una baja luminosidad y podrían formar parte de una población distinta con un progenitor distinto o un motor central diferente [89, 90]. Es evidente que no se cuenta con evidencia suficiente para establecer de forma concluyente a las estrellas masivas como progenitor de la mayoría de GRBs. Teniendo en cuenta esto se ha planteado la idea de que no se han asociado más GRBs con supernovas, debido a que observacionalmente es muy difícil detectar la presencia de una supernova en la mayoría de estos eventos, ya que los GRBs de alta luminosidad usualmente tienen un corrimiento al rojo grande y presentan típicamente una post-luminiscencia brillante apreciable ópticamente, lo cual eclipsaría la señal de una supernova [27].

Por otro lado una gran parte de GRBs largos, no presentan post-luminiscencia detectable, denominados “GRBs Oscuros”, por lo que no se ha podido determinar sus galaxias anfitrionas, debido a esto la idea general de asignar galaxias anfitrionas enanas con formación estelar intensa a los GRBs de este tipo de progenitor puede ser muy sesgada. En relación a este aspecto el telescopio espacial Chandra ha observado el GRB oscuro GRB 090417B y se ha podido identificar a su galaxia anfitriona, la cual es una galaxia similar a nuestra Vía Láctea, con absorción y difracción de radiación electromagnética por gases pesados [91].

Otro aspecto es la idea propuesta de la existencia de baja metalicidad, ya que se debe mantener el momento angular, la cual no ha podido ser establecida en su totalidad por las observaciones [86], aunque sí existen algunos argumentos a favor de esta condición. [92]-[94].

Para el otro tipo de progenitor planteado, relacionado con sistemas binarios de objetos compactos, se han desarrollado dos modelos, la fusión de dos estrellas de neutrones [28, 95, 96] y la fusión de una estrella de neutrones y un agujero negro [97]. Los sistemas binarios de estrellas de neutrones han sido observados en nuestra galaxia, y se conoce que sus órbitas se contraen debido a la radiación gravitacional, predicha por la teoría de la relatividad general, por lo que están condenadas a fusionarse algún día [98, 99]. Al contrario los sistemas estrella de neutrones y agujero negro no han sido observados, lo cual no significa que sean mucho menos frecuentes que los sistemas binarios de estrellas de neutrones, sino que son más difíciles de detectar. En definitiva, ambos modelos son capaces de interpretar varias

características de los GRBs cortos [100, 101]. Sin embargo existen algunos aspectos a tener en cuenta, como que en un pequeño grupo de GRBs cortos se ha detectado un corrimiento al rojo superior a 1 [102], otros muestran una luminosidad típica de GRBs largos [103]. Como vemos la evidencia observacional todavía no es concluyente, sin embargo todo apunta a que los dos tipos de progenitores planteados serían los mejores candidatos de acuerdo a los modelos físicos hasta ahora planteados.

## 6. Conclusiones

A lo largo del presente artículo hemos podido revisar algo de la historia de los GRBs, y los múltiples intentos que han realizado diferentes investigaciones científicas, con el fin de dilucidar las muchas preguntas generadas a partir del descubrimiento fortuito de estos eventos astrofísicos.

Un entendimiento completo de la física subyacente de los GRBs es todavía algo muy lejano debido a la naturaleza misma de estas cataclísmicas explosiones. Como hemos mencionado anteriormente son los eventos más energéticos que hemos podido detectar en el universo a excepción de la gran explosión del Big Bang, la energía liberada por estas explosiones es muy difícil de imaginar en la experiencia humana, por ejemplo si una explosión de este tipo se diera dentro de nuestra galaxia, la vía láctea, y estuviera dirigido hacia la Tierra, lo más probable es que se daría una gran extinción de la vida en nuestro planeta, de hecho existen investigaciones que proponen el hecho de una gran extinción hace 400 millones de años dada en la Tierra [104].

Gracias al avance tecnológico observacional en los últimos cuarenta años se han dado grandes pasos al identificar galaxias anfitrionas, y hemos identificado el lugar de estas explosiones con corrimientos al rojo relativamente grandes, lo que los hace eventos cosmológicos bastante lejanos, esto su vez conlleva grandes complicaciones en cuanto a entender cómo se generan estas grandes explosiones, al respecto de esto se han planteado algunos modelos físicos como los modelos de Fireball, Electromagnéticos y Magnetohidrodinámicos, con el fin de definir la composición y los mecanismos de disipación del jet generado en la explosión. De acuerdo a la localización del sitio de la emisión se han plantado los modelos de fotosfera disipativa, los modelos de choques internos y modelos forzados de disipación magnética con radio de emisión grande. En cuanto a los mecanismos de aceleración de las partículas en la región de disipación de energía se han propuesto modelos como la aceleración de Fermi con choques internos y externos, los mecanismos de radiación sincrotrón y procesos auto-compton como los responsables aunque no explican completamente las altas energías alcanzadas por los GRBs.

Al respecto de la clasificación de los GRBs, poco a poco la comunidad científica ha ido abandonando a la clasificación canónica de GRBs largos y cortos, que se basaba únicamente en la duración y dureza espectral (nivel energético de los fotones que forman el espectro), pasando a clasificaciones más complejas que tienen en cuenta muchas propiedades fenomenológicas e incluyen varios tipos de GRBs, aunque sigue latente la complicación de la catalogación de los GRBs, debido a la gran variabilidad existente entre estas explosiones.

La definición de progenitores sigue aún abierta aunque se ha logrado obtener evidencia observacional que relaciona ciertos eventos de GRBs con explosiones de Supernovas y se ha planteado teóricamente a la fusión de sistemas binarios de estrellas de neutrones y agujeros

negros como otro tipo de progenitor, aunque la evidencia observacional no es todavía concluyente en este sentido.

## Referencias

- [1] R. W. Klebesadel, I. B. Strong, R. A. Olson. «Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin». *Bulletin of the American Astronomical Society.*, vol. 5, pp. 322, June 1973.
- [2] J. S Bloom, *What are gamma-ray burst?*. Princeton University Press, 2011.
- [3] G. Vedrenne. y J.L. Atteia. *Gamma-Ray Bursts: The Brightests explosions in the Universe*. Springer, 2009
- [4] Goddard Space Flight Center. The Burst And Transient Source Experiment. Fecha de Consulta: 9 de Agosto de 2016, Disponible en: <http://cosscc.gsfc.nasa.gov/batse/>.
- [5] C. A. Meegan et al. «Spatial distribution of gamma-ray bursts observed by BATSE». *Nsat*, 355:143–145, January 1992.
- [6] C. Kouveliotou et al. «Identification of two classes of gamma-ray bursts». *ApJl*, 413:L101–L104, August 1993.
- [7] BeppoSAX Mission Home Page. BeppoSAX Science Data Center. Fecha de Consulta: 31 de Agosto de 2016, Disponible en <http://www.asdc.asi.it/bepposax/latestnews.html>.
- [8] E. Costa et al. «Discovery of an X-ray afterglow associated with the  $\gamma$ -ray burst of 28 February 1997». *Nat*, 387:783–785, June 1997.
- [9] T. J. Galama et al. «An unusual supernova in the error box of the  $\gamma$ -ray burst of 25 April 1998». *Nat*, 395:670–672, October 1998.
- [10] Goddard Space Flight Center. The HETE-2 Satellite. Actualizada 01 abril de 2004, Fecha de Consulta: 31 de Agosto de 2016, Disponible en <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/hete2/hete2.html>.
- [11] Goddard Space Flight Center. The Swift Gamma-Ray Burst Mission. Fecha de Consulta: 31 de Agosto de 2016, Disponible en:<http://swift.gsfc.nasa.gov/docs/swift/swiftsc.html>.
- [12] N. Gehrels et al.«The Swift Gamma-Ray Burst Mission», *ApJ*, vol. 611, pp.1005–1020, August 2004.
- [13] N. Gehrels et al. «A short  $\gamma$ -ray burst apparently associated with an elliptical galaxy at redshift  $z = 0.225$ . *Nat*, 437:851–854, October 2005.
- [14] B. Zhang. «Gamma-Ray Bursts in the Swift Era». *Cjaa*, vol 7, pp. 1–50, February 2007.
- [15] Goddard Space Flight Center. Fermi Gamma-Ray Telescope. Fecha de Consulta: 31 de Agosto de 2016, Disponible en:<http://fermi.gsfc.nasa.gov/>
- [16] T. Piran. «The physics of gamma-ray bursts», *Reviews of Modern Physics*, vol. 76, Issue 4, pp. 1143-1210, October 2004.
- [17] T.M. Koshut, et al.. « *T90* as a measurement of the duration of GRBs. *Bulletin of the American Astronomical Society* », *Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 2, pp. 886, May 1995.
- [18] B. Zhang, et al. «GRB Observational Properties», *Space Science Reviews*, vol. 202, pp. 3-32, December 2016.
- [19] A. Baquero. «Recientes avances en la clasificación de explosiones de rayos gamma cortas en astrofísica», *Revista Maskana*, vol. 7 No. 2, pp. 139-146, December 2016.
- [20] B. Zhang, «Gamma-Ray Burst Prompt Emission», *International Journal of Modern Physics D*, vol. 23, pp.1430002, December, 2014.
- [21] D. Band, et al. «BATSE observations of gamma-ray burst spectra. I - Spectral diversity», *ApJ*, vol. 413, pp. 281-292, August 1993.
- [22] A. Baquero, “Clasificación de ráfagas de rayos gamma largas usando lag espectral y acf con correcciones cosmológicas”, Tesis de Maestría, Dep. Física, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2014.
- [23] R. D. Preece, et al. «The BATSE Gamma-Ray Burst Spectral Catalog. I. High Time Resolution Spectroscopy of Bright Bursts Using High Energy Resolution Data», *ApJs*, vol.126, pp. 19-36, January 2000.
- [24] B. Zhang et al. «A Comprehensive Analysis of Fermi Gamma-ray Burst Data. I. Spectral Components and the Possible Physical Origins of LAT/GBM GRBs», *ApJ*, vol.730, pp. 141, April 2011.
- [25] L. Nava et al. «Spectral properties of 438 GRBs detected by Fermi/GBM», *Aap*, vol.530, pp. A21, ju5e 2011.
- [26] D. Gruber, et al. «The Fermi GBM Gamma-Ray Burst Spectral Catalog: Four Years of Data», *ApJs*, vol.211, pp. 12, March 2014.
- [27] B. Zhang, «Open questions in GRB physics», *Comptes Rendus Physique*, vol. 12, pp. 206-225, April 2011.

- [28] B. Paczynski, «Gamma-ray bursters at cosmological distances», *ApJl*, vol. 308, pp. L43-L46, Spetember 1986.
- [29] J. Goodman, «Are gamma-ray bursts optically thick?», *ApJl*, vol. 308, pp. L47-L50, September 1986.
- [30] A. Shemi y T. Piran, «The appereance of cosmic fireballs», *ApJl*, vol. 365, pp. L55-L58, December, 1990.
- [31] P. Mészáros y M.J. Rees, «Steep Slopes and Preferred Breaks in Gamma-Ray Bursts Spectra: The Role of Photospheres and Comptonization», *ApJ*, vol. 530, pp. 292-298, February, 2000.
- [32] M.J. Rees y P. Mészáros, «Unsteady outflow models for cosmological gamma-ray bursters», *ApJl*, vol. 430, pp. L93-L96, August, 1994.
- [33] M.J. Rees y P. Mészáros, «Relativistic fireballs - Energy conversion and time-scales», *MNRAS*, vol. 258, pp. 41P-43P, September, 1992.
- [34] M. Lyutikov y R. Blandford, «Electromagnetic explosions in Gamma-Ray Bursts», *AAS/ High Astrophysics Division*, vol. 35, pp. 622, March, 2003.
- [35] D. Giannios, «Prompt GRB emission from gradual energy dissipation», *Aap*, vol. 480, pp. 305-312, March, 2008.
- [36] J. C. McKinney y D. A. Uzdensky «A reconnection switch to trigger gamma-ray burst jet dissipation», *MNRAS*, vol. 419, pp. 573-607, January, 2012.
- [37] B. Zhang, et al. « Physical Processes Shaping Gamma-Ray Burst X-Ray Afterglow Light Curves: Theoretical Implications from the Swift X-Ray Telescope Observations», *ApJ*, vol. 642, pp. 354-370, May, 2006.
- [38] M.J. Rees y P. Mészáros. « Dissipative Photosphere Models of Gamma-Ray Bursts and X-Ray Flashes», *ApJ*, vol. 628, pp. 847-852, August, 2005.
- [39] K. Murase et al. « The Role of Stochastic Acceleration in the Prompt Emission of Gamma-Ray Bursts: Application to Hadronic Injection», *ApJ*, vol. 746, pp. 164, February, 2012.
- [40] M.J. Rees y P. Mészáros. «Unsteady outflow models for cosmological gamma-ray bursters», *ApJl*, vol. 430, pp. L93-L96, August, 1994.
- [41] F. Daigne «Reconciling observed gamma-ray burst prompt spectra with synchrotron radiation?», *Aap*, vol. 526, pp.A110, February, 2011.
- [42] B. Zhang y H. Yan. «The Internal-collision-induced Magnetic Reconnection and Turbulence (ICMART) Model of Gamma-ray Bursts», *ApJ*, vol. 726, pp. 90, January, 2011.
- [43] B. J. Morsony, et al. «The Origin and Propagation of Variability in the Outflows of Long-duration Gamma-ray Bursts», *ApJ*, vol. 723, pp. 267-276, November, 2010.
- [44] F. Hascoet, et al. «Accounting for the XRT early steep decay in models of the prompt gamma-ray burst emission», *Aap*, vol. 542, pp. L29, June, 2012.
- [45] B. Zhang y B. Zhang. «Gamma-Ray Burst Prompt Emission Light Curves and Power Density Spectra in the ICMART Model», *ApJ*, vol. 782, pp. 92, February, 2014.
- [46] P. Mészáros y M.J. Rees, «Optical and Long-Wavelength Afterglow from Gamma-Ray Bursts», *ApJ*, vol. 476, pp. 232-237, February, 1997.
- [47] J. A. Nousek, et al. «Evidence for a Canonical Gamma-Ray Burst Afterglow Light Curve in the Swift XRT Data», *ApJ*, vol. 642, pp. 389-400, May, 2006.
- [48] P. T. O' Brien et al. «The Early X-Ray Emission from GRBs», *ApJ*, vol. 647, pp. 1213-1237, August, 2006.
- [49] R. Willingale, et al. «{Testing the Standard Fireball Model of Gamma-Ray Bursts Using Late X-Ray Afterglows Measured by Swift», *ApJ*, vol. 662, pp. 1093-1110, June, 2007.
- [50] H. Gao, et al, « A complete reference of the analytical synchrotron external shock models of gamma-ray bursts», *Nar*, vol. 57, pp. 141-190, December 2013.
- [51] P. Mészáros y M.J. Rees, «Relativistic fireballs and their impact on external matter - Models for cosmological gamma-ray bursters», *ApJ*, vol. 405, pp. 278-284, March, 1993.
- [52] R. Sari y T. Piran, «Hydrodynamic Timescales and Temporal Structure of Gamma-Ray Bursts», *ApJl*, vol. 455, pp.L143, December, 1995.
- [53] B. Zhang, et al. «Curvature Effect of a Non-Power-Law Spectrum and Spectral Evolution of GRB X-Ray Tails», *ApJ*, vol. 690, pp. L10-L13, January, 2009.
- [54] P. Kumar y R. Barniol Duran. « On the generation of high-energy photons detected by the Fermi Satellite from gamma-ray bursts », *MNRAS*, vol. 400, pp. L75-L79, November, 2009.
- [55] P. Kumar y R. Barniol Duran. «External forward shock origin of high-energy emission for three gamma-ray bursts detected by Fermi», *MNRAS*, vol. 409, pp.226-236, November, 2010.
- [56] A. Maxham, et al. «Is GeV emission from Gamma-Ray Bursts of external shock origin? », *MNRAS*, vol. 415, pp. 77-82, July, 2011.
- [57] M. Ackerman, et al. « Fermi-LAT Observations of the Gamma-Ray Burst GRB 130427A », *Science*, vol. 343, pp. 42-47, January 2014.

- [58] T. Sakamoto, et al. «The Second Swift Burst Alert Telescope Gamma-Ray Burst Catalog», *ApJs*, vol. 195, pp. 2, July 2011.
- [59] W. S. Paciesas, et al. «The Fermi GBM Gamma-Ray Burst Catalog: The First Two Years», *ApJs*, vol. 1999, pp. 18, March 2012.
- [60] A. Lien, et al. «The Third Swift Burst Alert Telescope Gamma-Ray Burst Catalog», *ApJ*, vol. 829, pp. 7, September 2016.
- [61] G. J. Fishman y C. A. Meegan. «Gamma-Ray Bursts», *Araa*, vol. 33, pp. 415-458, 1995.
- [62] Y. Qin, et al. «A Comprehensive Analysis of Fermi Gamma-Ray Burst Data. III. Energy-dependent T<sub>90</sub> Distributions of GBM GRBs and Instrumental Selection Effect on Duration Classification», *ApJ*, vol. 763, pp. 15, January 2013.
- [63] J. P. Norris y J. T. Bonnell. «Short Gamma-Ray Bursts with Extended Emission », *ApJ*, vol. 643, pp.266-275, May, 2006.
- [64] J. Hakkila, et al. «How Sample Completeness Affects Gamma-Ray Burst Classification», *ApJ*, vol. 582, pp. 320-329, January, 2003.
- [65] M. Boer, et al. «Are Ultra-long Gamma-Ray Bursts Different?», *ApJ*, vol. 800, pp. 16, February, 2015.
- [66] H. Gao y P. Mészáros. « Relation between the Intrinsic and Observed Central Engine Activity Time: Implications for Ultra-long GRBs », *ApJ*, vol. 802, pp. 90, April, 2015.
- [67] N. Gehrels, et al.. «A new  $\gamma$ -ray burst classification scheme from GRB060614», *Nature*, vol. 444, pp. 1044–1046, December, 2006.
- [68] J. P. U. Fynbo, et al. «No supernovae associated with two long-duration  $\gamma$ -ray bursts». *Nature*, vol 444, pp. 1047–1049, December, 2006.
- [69] M. Della Valle, et al. « An enigmatic long-lasting  $\gamma$ -ray burst not accompanied by a bright supernova». *Nature*, vol 444, pp. 1047–1049, December, 2006.
- [70] B. Zhang, et al. « Making a Short Gamma-Ray Burst from a Long One: Implications for the Nature of GRB 060614». *ApJ*, vol 655, pp. L25-L28. January, 2007.
- [71] B. Zhang, et al. «Discerning the Physical Origins of Cosmological Gamma-ray Bursts Based on Multiple Observational Criteria: The Cases of  $z = 6.7$  GRB 080913,  $z = 8.2$  GRB 090423, and Some Short/Hard GRBs». *ApJ* vol. 703, pp.1696–172. October. 2009.
- [72] N. R. Tanvir, et al. «A  $\gamma$ -ray burst at a redshift of  $z \approx 8.2$ ». *Nature*, vol. 461, pp.1254–1257. October. 2009.
- [73] R. Salvaterra, et al. «GRB090423 at a redshift of  $z \approx 8.1$ ». *Nature*, vol. 461, pp.1258–1260. October. 2009.
- [74] J. Greiner, et al. «GRB 080913 at Redshift 6.7». *ApJ*, vol. 693, pp.1610–1620. March, 2009.
- [75] B. Zhang, et al. « Astrophysics: A burst of new ideas ». *Nature*, vol. 444, pp.1010-1011. December, 2006.
- [76] B. Zhang, et al. «A Comprehensive Analysis of Swift XRT Data. I. Apparent Spectral Evolution of Gamma-Ray Burst X-Ray Tails». *ApJ*, vol. 666, pp.1002-1011. September, 2007.
- [77] Y. Li, et al. «A Comparative Study of Long and Short GRBs. I. Overlapping Properties». *ApJs*, vol. 227, pp.7. November, 2016.
- [78] B. Zhang, et al. «Discerning the Physical Origins of Cosmological Gamma-ray Bursts Based on Multiple Observational Criteria: The Cases of  $z = 6.7$  GRB 080913,  $z = 8.2$  GRB 090423, and Some Short/Hard GRBs ». *ApJ*, vol. 703, pp.1696-1724. October, 2009.
- [79] T.J. Galama, et al. «An unusual supernova in the error box of the gamma-ray burst of 25 April 1998». *Nature*, vol. 395, pp.670-672. October, 1998.
- [80] J. Hjorth, et al. «A very energetic supernova associated with the gamma-ray burst of 29 March 2003 ». *Nature*, vol. 423, pp.847-850. June, 2003.
- [81] K. Z. Stanek, et al. «Spectroscopic Discovery of the Supernova 2003dh Associated with GRB 030329 ». *ApJ*, vol. 591, pp. L17-L20. July, 2003.
- [82] S. Campana, et al. «The association of GRB 060218 with a supernova and the evolution of the shock wave ». *Nature*, vol. 442, pp. 1008-1010. August, 2006.
- [83] E. Pian, et al. «An optical supernova associated with the X-ray flash XRF 060218». *Nature*, vol. 442, pp. 1011-1013. August, 2006.
- [84] R. L. C. Starling, et al. « Discovery of the nearby long, soft GRB 100316D with an associated supernova ». *MNRAS*, vol. 411, pp. 2792-2803. March, 2011.
- [85] A. S. Fruchter, et al. « Long  $\gamma$ -ray bursts and core-collapse supernovae have different environments». *Nature*, vol. 411, pp. 463-468. May, 2006.
- [86] S. Savaglio, et al. « The Galaxy Population Hosting Gamma-Ray Bursts.». *ApJ*, vol. 691, pp. 182-211. January, 2009.
- [87] S. E. Woosley, et al. «The Progenitor Stars of Gamma-Ray Bursts.». *ApJ*, vol. 637, pp. 182-211. February, 2006.



- [88] S. -C. Yoon y N. Langer. «Evolution of rapidly rotating metal-poor massive stars towards gamma-ray bursts». *Aap*, vol. 443, pp. 643-648. November, 2005.
- [89] A. M. Soderberg, et al. «Relativistic ejecta from X-ray flash XRF 060218 and the rate of cosmic explosions». *Nature*, vol. 442, pp. 1014-1017. August, 2006.
- [90] E. Liang, et al. «Low-Luminosity Gamma-Ray Bursts as a Unique Population: Luminosity Function, Local Rate, and Beaming Factor». *ApJ*, vol. 662, pp. 1111-1018. June, 2007.
- [91] S. T. Holland, et al. «GRB 090417B and its Host Galaxy: A Step Toward an Understanding of Optically Dark Gamma-ray Bursts». *ApJ*, vol.717, pp. 223-234. July, 2010.
- [92] C. Wolf y P. Podsiadlowski. «The metallicity dependence of the long-duration gamma-ray burst rate from host galaxy luminosities». *MNRAS*, vol.375, pp. 1049-1058. July, 2010.
- [93] L. -X. Li. «Star formation history up to  $z = 7.4$ : implications for gamma-ray bursts and cosmic metallicity evolution». *MNRAS*, vol.388, pp. 1487-1500. August, 2008.
- [94] Y. Niino, et al. «Luminosity Distribution of Gamma-Ray Burst Host Galaxies at redshift  $z = 1$  in Cosmological Smoothed Particle Hydrodynamic Simulations: Implications for the Metallicity Dependence of GRBs». *ApJ*, vol.726, pp. 88. January, 2011.
- [95] D. Eichler, et al «Nucleosynthesis, neutrino bursts and gamma-rays from coalescing neutron stars ». *Nature*, vol.340, pp. 126-128. July, 1989.
- [96] R. Narayan, et al. «Gamma-ray bursts as the death throes of massive binary stars ». *ApJ*, vol.395, pp. L83-L86. August, 1992.
- [97] R. Narayan, et al. «Cosmological gamma-ray bursts ». *Acta Astronomica*, vol. 41, pp. 257-267. 1991.
- [98] J. H. Taylor y J. M. Weisberg. «Further experimental tests of relativistic gravity using the binary pulsar PSR 1913 + 16». *ApJ*, vol. 345, pp. 434-450, October 1989.
- [99] M. Kramer y I. H. Stairs. «The Double Pulsar» *ARAA*, vol. 46, pp. 541-572, September, 2008.
- [100] E. Nakar. «Short-hard gamma-ray bursts». *Physics Reports*, vol. 442, pp.166-236, April, 2007.
- [101] W. H. Lee y E. Ramirez-Ruiz. «The progenitors of short gamma-ray bursts». *New Journal of Physics*, vol. 9, pp.17, January, 2007.
- [102] E. Berger, et al. «A New Population of High-Redshift Short-Duration Gamma-Ray Bursts». *ApJ*, vol. 664, pp. 1000-1010, August, 2007.
- [103] A. de Ugarte Postigo, et al. «GRB 060121: Implications of a Short-/Intermediate-Duration  $\gamma$ -Ray Burst at High Redshift». *ApJ*, vol. 648, pp. L83-L87, September, 2006.
- [104] Melott, et al. «Did a gamma-ray burst initiate the late Ordovician mass extinction?». *International Journal of Astrobiology*, vol. 3, pp. 55-61, January, 2004.