



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“Espectroscopia de Destellos de Rayos Gamma
a energías de KeV a MeV utilizando los
detectores BATSE Y EGRET-TASC”.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

F Í S I C O

P R E S E N T A

MIRIAM CARRILLO BARRAGÁN

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. MARÍA MAGDALENA GÓNZALEZ SÁNCHEZ



2007

A mis padres.

Agradecimientos

*”Aun en los momentos más terribles
o más desesperados no estás solo.
En algún lugar del mundo siempre
hay alguien pensando en ti.”*

Primero que nada quiero agradecer a Dios y a la vida por la oportunidad de llegar a este momento y concluirlo.

*Agradezco a mi familia **Carrillo Barragán**, muy en especial a mis padres por darme la oportunidad de vivir y de estudiar una carrera profesional para valerme por mí misma. A ti **Mamá Carmen** por todo tu apoyo, comprensión, confianza, amor y sobre todo por aceptarme tal y como soy. A ti **Papá Norberto** por todo tu apoyo, amor y por compartir una etapa de tu vida a mi lado. A mis hermanos por creer en mí, por su confianza, su respeto y cariño. A ti **Luis** y **Martha** por el apoyo al inicio de mi carrera y de mi vida fuera de Tlaxcala; a ti **Carlos** por tus palabras de aliento y tu ejemplo; a ti **Maye** por tu amor y tu apoyo para seguir adelante; a ti **Fer** por tu confianza y tus palabras cuando más lo necesite. A mis sobrinos **Natalia**, **Ivan** y **Nadia** por hacerme recordar lo que es ser niño y disfrutarlo.*

*Quiero agradecer también a mi otra familia, mis abuelos **Maxi Sánchez** y **Luis Barragán**, por su ejemplo de lucha constante y entrega al trabajo. A mis tíos **Rogelio** y **Mary** por su apoyo y por hacerme sentir su cariño; a mi prima **Irandi** por estar conmigo, por tu confianza y por el privilegio de estar al lado de **Joseph**. A mis primas **Marisol** y **Wendy** y a sus familias por su cariño y hospitalidad.*

*Quiero agradecer a mi familia adoptiva, a cada verdadero amigo que me ha brindado su amistad durante mi vida y que me acepta tal y como soy. **Ariana** gracias por seguir con esta amistad a pesar de todas las adversidades y la distancia. **Jonathan** y **Guillermo** gracias por sus consejos y su apoyo al inicio de mi carrera. **Fernando***

gracias por tu amistad sincera y por tu apoyo para seguir adelante y terminar la carrera y la tesis. **Ericka** gracias por tu confianza y apoyo en los momentos difíciles y felices y por compartir una linda etapa juntas. **Abril** gracias por tu cariño, tu compañía y por compartir a **Ro** conmigo. **Natzin** gracias por estar conmigo ayer y hoy y por compartir tu casa conmigo. **María Elena** gracias por tus palabras de aliento, por tus consejos, tu apoyo, tu cariño y por ser parte de esta gran familia. **Eliut** y **Kike** gracias por los momentos de alegría y diversión en las bicis. **Eliuh**, **Vero** y **Jael** gracias por aceptarme en su vida y ser parte de la mía. **Marco** y **Manuel** gracias por las tardes de pláticas y café en la facultad. A mis amigos de Universum: **Felipe**, **Miguel**, **Mike**, **Karla**, **Aix**, **Vane**, **Eric** y **Juan Carlos** por dejarme ser con ustedes y por esos momentos inolvidables en el museo.

Quiero agradecer también al **Colegio Madrid**, por darme la oportunidad de compartir mis conocimientos con sus alumnos, por la experiencia docente y por el apoyo recibido por parte de los profesores y amigos: **Gerardo**, **Julio**, **Nadine** y **Tere**.

Quiero agradecer a la **Dra. Blanca Soria** por enseñarme y guiarme en esta vida para ser feliz y amarme. A los **Drs. Ardón** por enseñarme a cuidar de mí y de mi interior.

Quiero agradecer a mi asesora, la **Dra. María Magdalena González** por su invitación a realizar este gran trabajo, por sus conocimientos y su tiempo, por su apoyo como asesora y amiga, por sus consejos, su respeto y por motivarme día a día.

También quiero agradecer al **Dr. José Rubén Alfaro**, no solo por aceptar ser parte de este trabajo sino por su calidad humana para conmigo y por sus palabras de aliento para darme ánimos y seguir adelante.

Agradezco al **Dr. Dany Page** su apoyo académico y económico durante este trabajo y hasta hoy. Agradezco también a mis sinodales al **Dr. Stan Kurtz**, **Dr. William Lee** y **Dr. Vladimir Ávila**, por su tiempo y sus aportaciones en la revisión y corrección de este trabajo.

A la **UNAM** y a la **Facultad de Ciencias** por darme una formación integral y de calidad.

Y a todos los que han estado a mi lado y me han brindado su apoyo y cariño...

GRACIAS!!!

Índice general

Introducción	ix
1. Los destellos de rayos gamma	1
1.1. Propiedades de los Destellos de Rayos Gamma	1
1.1.1. Variabilidad Temporal y Duración	3
1.1.2. Características Espectrales	4
1.1.3. Distribución Espacial y Luminosidad	4
1.1.4. Distancia	7
1.1.5. Colimación y Jets	8
1.1.6. Contrapartes	10
1.1.7. Conexión con Supernovas	12
1.1.8. Emisión a Altas Energías (>1MeV)	14
1.1.9. Los destellos de rayos gamma como fuentes de emisión no elec- tromagnética	17
1.2. Progenitores y Modelo Teórico	20
1.2.1. Progenitores	20
1.2.2. Modelo Teórico de la Bola de Fuego	20
1.3. Importancia del estudio de destellos a Altas Energías	22
2. Los Detectores BATSE y EGRET-TASC	25
2.1. Conceptos Básicos de los Detectores Satelitales.	25
2.1.1. Centelladores	26
2.1.2. Fotomultiplicadores	27
2.1.3. Convertidores Digitales	29
2.2. El detector BATSE	30
2.2.1. Descripción y Objetivos	30
2.2.2. Tipos de Almacenamiento de datos	31
2.3. El detector EGRET-TASC	32

2.3.1. Descripción y Objetivos	32
2.3.2. Calibración	33
2.3.3. Tiempo Muerto	34
2.3.4. Matriz de Respuesta	35
3. Análisis Espectral	39
3.1. Ajuste espectral combinando datos de los detectores BATSE y EGRET-TASC	39
3.2. Metodología	40
3.2.1. Selección de Espectros	40
3.2.2. Ruido	42
3.2.3. Modelos fenomenológicos	42
3.2.4. Factor de Normalización	46
3.2.5. Ajustes Espectrales	48
4. Resultados	53
4.1. Espectros con Emisión	53
4.2. Resultados del Ajuste Espectral	54
4.2.1. GRB910814	57
4.2.2. GRB981203	58
4.2.3. GRB990728	58
4.3. Resultados Generales	58
Conclusiones	69
Bibliografía	70

Introducción

*”Cuando está realmente oscuro
se ven más brillantes las estrellas.”*

Charles A. Beard.

Parte esencial de la condición humana es cuestionarse acerca de su origen y del origen de su entorno. Una de esas interrogantes es la formación y evolución del universo. A pesar de la imposibilidad de viajar hacia el cosmos, el hombre ha ideado maneras de estudiarlo, entre ellas analizando la radiación que llega a la tierra de fuentes cósmicas haciendo uso de satélites para explorarlas más de cerca y fuera de la atenuación atmosférica.

Cada día misteriosas explosiones de rayos gamma provenientes de distintas direcciones iluminan nuestro cielo, aunque son invisibles para nuestros ojos no lo son para los satélites. Dichas explosiones son breves (30ms-1000s) pero muy brillantes pues emiten fotones de muy alta energía (MeV-GeV).

Los destellos de rayos gamma fueron detectados por primera vez en 1967 por los satélites VELA, destinados a vigilar el tratado de pruebas atómicas a partir de la detección de la radiación producida por las bombas nucleoaatómicas (rayos x, rayos gamma y neutrones). Después de la primera detección de estos destellos, se plantearon varias preguntas sobre su origen y formación generando especulaciones y teorías relacionadas con hoyos negros, explosiones tipo supernovas y estrellas de neutrones para tratar de explicar la emisión de tan alta energía en tan poco tiempo.

La falta de resolución temporal, espacial y de energía de los detectores existentes para el estudio de estos destellos, dio pauta a una nueva generación de detectores satelitales. En 1991 la NASA lanzó el Observatorio Compton de Rayos Gamma (CGRO) equipado con los detectores BATSE, EGRET, OSSE y COMPTEL capaces de detectar emisión con energías entre 20 keV hasta 30 GeV. Gracias a las observaciones de

CGRO se dio un paso más en el conocimiento de estos destellos. Actualmente se sabe que son los eventos más energéticos y brillantes del universo, que liberan en unos segundos (30ms-1000s) casi toda su energía total (10^{52} ergs) en forma de fotones con energías de décimos a cientos de keV. Sólo una fracción de esta energía es liberada como contrapartes (en radio, óptico y rayos x) simultáneas y/o posteriores a los fotones iniciales que pueden durar hasta semanas. Además su distribución espacial es isotrópica y se encuentran a distancias cosmológicas. Hay pocas observaciones de emisión de rayos gamma a altas energías (cientos MeV) y no se explica con los modelos actuales. Básicamente las limitaciones de estas observaciones son la baja estadística reflejada en una baja significancia y/o carencia de espectros. Por esta razón, el objetivo de mi tesis es la búsqueda de emisión de rayos gamma a altas energías (cientos de MeV) combinando las observaciones de los detectores BATSE y EGRET-TASC, en particular para destellos con duración mayor a un segundo.

En el primer capítulo se discuten los primeros hechos observacionales más importantes que dieron pauta al estudio de los destellos de rayos gammas, así como sus tipos de emisión, proceso de formación, y los modelos teóricos que surgieron después de su detección. El segundo capítulo se enfoca en las propiedades generales de detectores de rayos gamma, así como las características y componentes de los detectores BATSE y EGRET-TASC. En el tercer capítulo se discute la metodología para el análisis de los datos de los destellos de rayos gamma. En el cuarto capítulo se realiza la búsqueda de emisión significativa de un conjunto de destellos de BATSE con un flujo de fotones menor a 10 fotones y una fluencia observada en el 4to canal de BATSE ($>300\text{KeV}$) mayor a $>5 \times 10^{-4} \text{erg/cm}^2$. Posteriormente se les ajustan los modelos fenomenológicos para determinar los parámetros físicos que describen el comportamiento de cada espectro de los destellos. Finalmente se dan los resultados de este análisis espectral, sus principales características físicas y las conclusiones generales del conjunto de destellos estudiados.

Capítulo 1

Los destellos de rayos gamma

*”Vivir es cambiar y ser perfecto
es haber cambiado muchas veces.”*

John H. Newman.

1.1. Propiedades de los Destellos de Rayos Gamma

Los destellos de rayos gamma fueron detectados de manera fortuita el 2 de julio de 1967 por los satélites militares VELA [KL73]. Estos satélites contaban con detectores de rayos x, rayos gamma y neutrones para vigilar que no se realizaran pruebas atómicas espaciales y se cumpliera el tratado de no-proliferación nuclear entre los países de Estados Unidos, Gran Bretaña y la URSS. Los primeros destellos fueron detectados por el satélite VELA 4, pero sólo con los satélites VELA 5 y VELA 6 se logro estimar la dirección de dichos eventos. En la figura 1.1 podemos observar la curva de luz del primer destello observado, es decir, el número de cuentas observadas en el detector por segundo como función del tiempo. Esta curva de luz presenta dos picos, el primero con duración de un segundo y el segundo con duración de más de dos segundos.

Posteriormente alrededor de 16 destellos fueron detectados por la serie de satélites VELA y todos mostraban curvas de luz de diferente duración, variabilidad y sin ninguna estructura en común. Para julio de ese año se tenía un registro de 16 destellos con emisión en energías entre 0.2 a 1.5 MeV y duración entre 1 a 30 segundos. Estos resultados fueron publicados hasta 1973 [KL73]. Estas observaciones dieron pauta al desarrollo de nuevos instrumentos con mejor resolución temporal y de energía para determinar el origen de estos misteriosos destellos, y de numerosas teorías para explicar su origen. El 14 de marzo de 1971 la NASA lanzó el satélite IMP-6 [AL00], sobre el cual iba un detector de rayos gamma cuya tarea principal era monitorear ráfagas solares, que también observó destellos de rayos gamma. En septiembre de ese mismo año se lanzó el

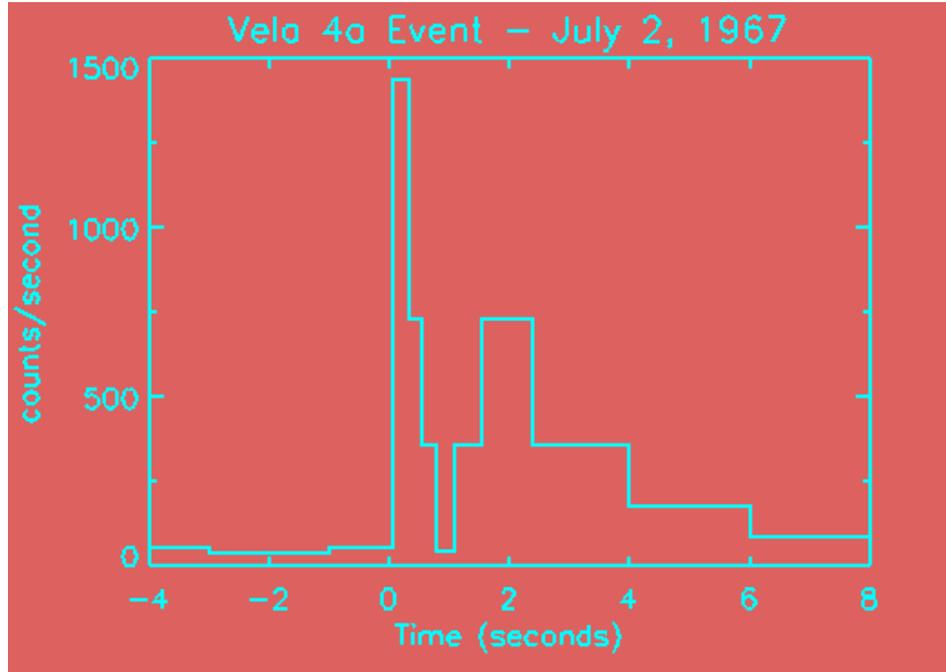


Figura 1.1: Curva de luz del destello de rayos gamma registrado el 2 de julio de 1967 por el satélite VELA 4. Esta gráfica muestra las cuentas por segundo observadas en el detector como función del tiempo.

Observatorio Solar Orbital (OSO-7), el cual tenía un telescopio destinado a medir rayos x duros (10 a cientos de keV) y monitorear destellos rayos gamma. En 1976 empezó la red interplanetaria integrada por varios satélites: Helios 2, PVO (Pioneer Venus Orbiter), ISEE 3 (International Sun-Earth Explorer), Venera 11 y 12, PROGNOZ 7. Estos satélites localizaron varios destellos con errores menores a un minuto de arco por medio de triangulación.

Sin embargo, debido a la falta de resolución angular, a la poca sensibilidad y al limitado rango de energía que tenían estos detectores, no se obtuvo más información de estos destellos sino hasta 1991 con el lanzamiento del Observatorio Compton de Rayos Gamma (CGRO) [webCGRO] que fue capaz de detectar un destello por día. Este detector satelital constaba de cuatro detectores: uno para detectar fuentes variables y destellos de rayos gamma (BATSE), un telescopio de rayos gamma energéticos (EGRET), un espectrómetro centellador orientado (OSSE) y un telescopio compton de proyección de imagen (COMPTEL), Fig. 1.2. Juntos cubrían un amplio rango de

energía de seis ordenes de magnitud desde 10 keV hasta 100 GeV. Particularmente BATSE cubría el cielo en un rango de energía de 20 a 2000 keV con espectros con un tiempo de acumulación de 64 milisegundos y una resolución angular de 4° , lo cual permitía estudiar con detalle la evolución temporal y la morfología de las curvas de luz de los destellos de rayos gamma. La tarea principal de EGRET fue detectar los fotones de muy alta energía provenientes de estos destellos. A partir de la gran información proporcionada por CGRO hoy sabemos que estos destellos son intensas explosiones de rayos gamma (fotones con energías de keV hasta MeV), con varias propiedades que se discuten a continuación.

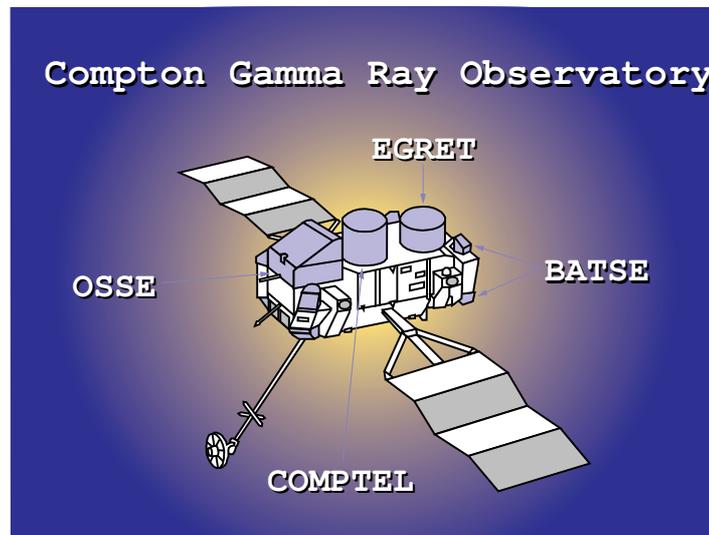


Figura 1.2: Detectores que conformaban el Observatorio Compton de Rayos Gamma: BATSE, EGRET, COMPTEL y OSSE. Juntos cubrían un amplio rango de energía de seis ordenes de magnitud desde 10 keV hasta 100 GeV.

1.1.1. Variabilidad Temporal y Duración

Una de las características notables de los destellos de rayos gamma es la diversidad en su estructura temporal y su rango de duración, Fig. 1.3. Algunos destellos tienen curvas de luz altamente variables con múltiples picos, mientras otras muestran picos suaves bien definidos [FI95]. Sin embargo, algunos destellos presentan ambos perfiles en la misma curva de luz. La duración de un destello se define como el tiempo de acumulación del 90 % del conteo total observado por el detector y es desde unos cuantos milisegundos hasta miles de segundos. La distribución de la duración de los destellos

presenta un comportamiento bimodal que junto con su dureza espectral, que indica la forma del espectro, sugieren una clasificación en dos categorías: los destellos largos $T_{90} > 2$ segundos y los destellos cortos $T_{90} < 2$ segundos [KO93, LA01], sin ninguna diferencia evidente en sus morfologías. Los destellos largos se caracterizan por tener un espectro más suave que los cortos, Fig. 1.4 y Fig. 1.5. Aproximadamente del total de los destellos detectados por BATSE, el 75 % son largos y 25 % son cortos. A pesar de que no es claro el porqué de esta distribución, se especula que tienen diferentes progenitores [LA76, RE99].

1.1.2. Características Espectrales

Las propiedades espectrales de los destellos de rayos gamma fueron también estudiadas por BATSE a partir de la medición de fotones en cuatro canales de energía (20-50 keV, 50-100 keV, 100-300 keV y 300 keV) [FO95]. Los espectros térmicos (los cuales siguen una distribución de Planck) son descartados de la mayoría de los destellos ya que se pueden describir con dos funciones de potencia suavemente conectadas. Los espectros generalmente se muestran como gráficas ($E^2 dN/dE$) o $\nu F\nu$, que dan información del flujo de energía por unidad de logaritmo de energía, Fig 1.6. Los espectros se pueden describir a partir de la función de Band (para detalles ver Capítulo 3), con tres parámetros espectrales independientes. El índice espectral para las energías más bajas α , el índice espectral para las energías altas β y la energía de transición o pico del espectro E_{peak} . En una muestra de 156 destellos brillantes de BATSE se encontró que las distribuciones de los índices espectrales tienen valores promedio de $\alpha \sim -1,05 \pm 1$, $\beta \sim -2,3_{-1,8}^{+1}$ y $E_{peak} \sim 250$ keV, [PR00]. Todos los destellos en general presentan esta forma general descrita por la función de Band y no hay indicios de algún corte o cambio de pendiente a bajas o altas energías. La observación de espectros no-térmicos en los destellos de rayos gamma implican procesos radiativos tales como radiación sincrotrón, dispersión inversa Compton y Bremsstrahlung, que probablemente son los procesos responsables de la emisión a keV.

1.1.3. Distribución Espacial y Luminosidad

Antes de las observaciones del satélite BeppoSAX en 1996 (ver sección 1.1.4), se debatía sobre el origen galáctico o cosmológico de los destellos de rayos gamma. Algunas observaciones sugerían su origen galáctico [AT91] por la gran cantidad de energía emitida en unos cuantos segundos. Si suponemos que las fuentes de destellos de rayos gamma se distribuyen homogéneamente en un espacio euclidiano, es decir, la densidad y luminosidad son independientes de la posición a lo largo del volumen del espacio

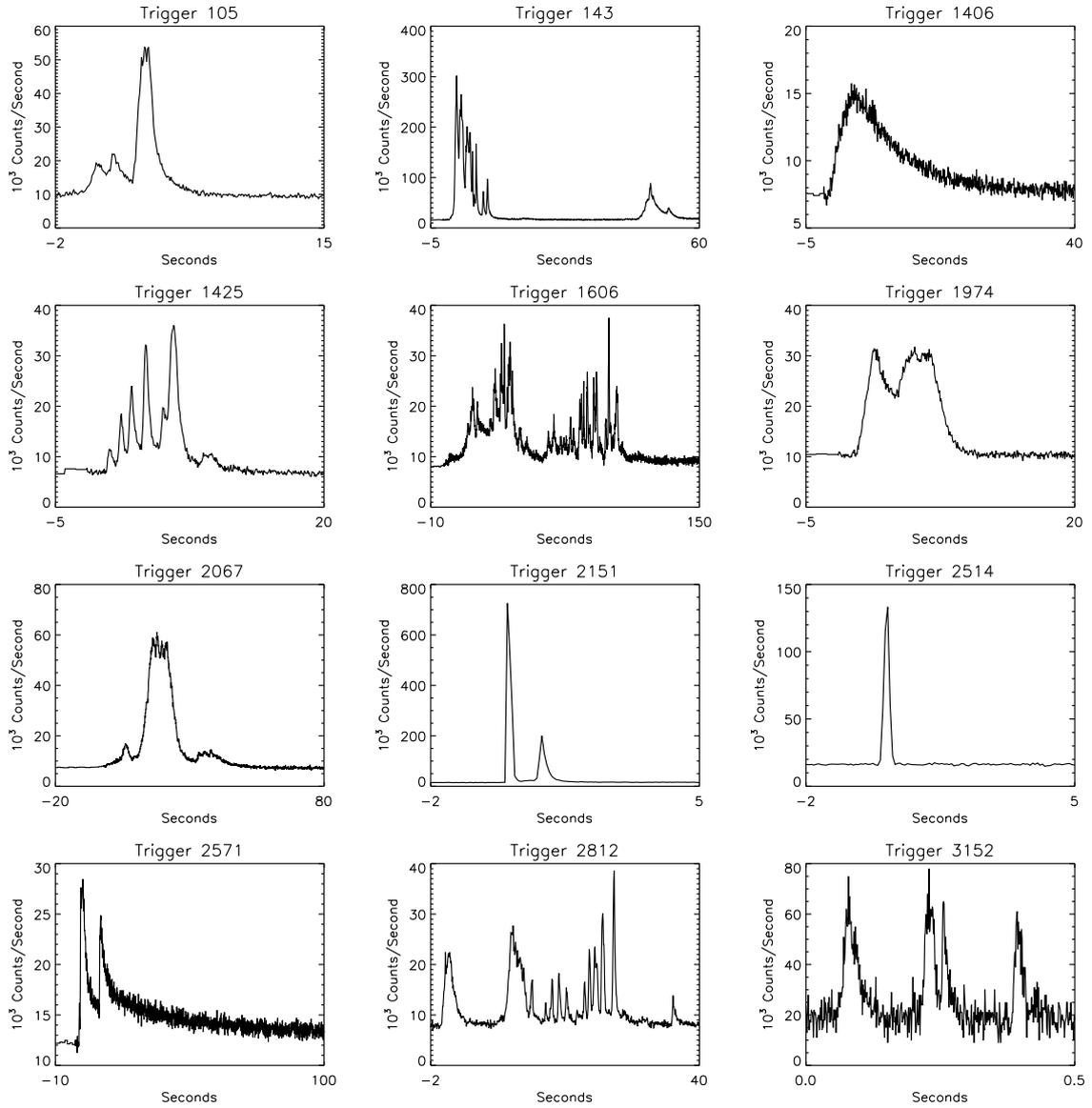


Figura 1.3: Variabilidad de las curvas de luz de los destellos de rayos gamma mostrando su diversidad temporal con perfiles suaves, variables y con múltiples picos.

observado y suponiendo una energía total emitida constante, entonces el número de destellos $N(s)$, con un flujo de fotones por encima de un valor mínimo dado S , cumple con $\log N(s) \propto -3/2 \log S$. Pero las observaciones de BATSE muestran una desviación signifi-

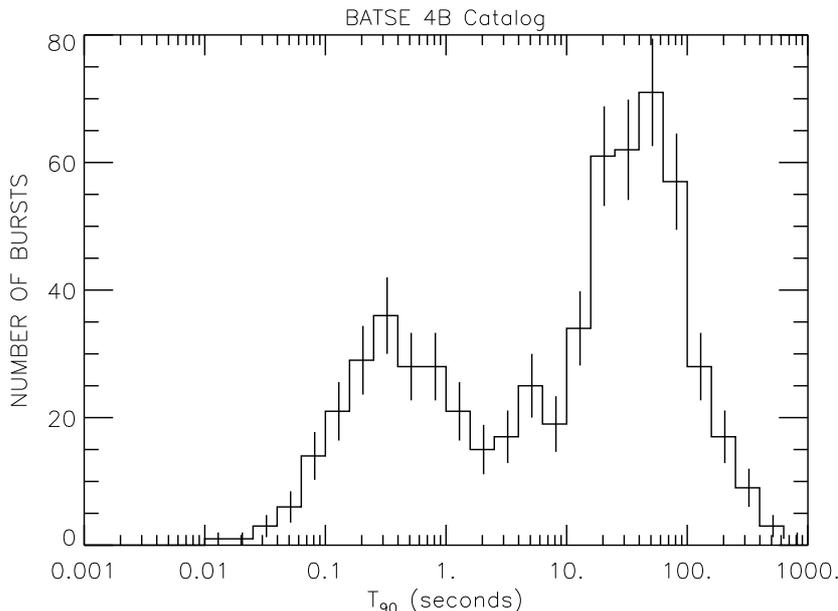


Figura 1.4: Distribución de la duración, T_{90} , de los destellos de rayos gamma. T_{90} se define como el intervalo de tiempo en el cual 90 % del flujo de fotones es detectado y su distribución tiene un comportamiento bimodal.

ficativa de esta relación cuando se incluyen destellos con bajo flujo de fotones [ME92], Fig. 1.7. Esta desviación se explica por la expansión del universo y en consecuencia sugiere su origen cosmológico. Con el lanzamiento del Observatorio Compton fue posible la localización de estos destellos a partir de una gran muestra de destellos débiles y fuertes. BATSE determinó la dirección de fuentes de rayos gamma comparando el promedio de cuentas de sus detectores individuales y mostró que su distribución en coordenadas galácticas era isotrópica, Fig. 1.9 y 1.8. Además tomando en cuenta los momentos de la distribución se cuantificó la distribución de 1637 destellos en coordenadas galácticas, [PA99]. BATSE detectó cada destello en función de la declinación de cada destello, con un momento dipolar debido a la incapacidad de detección durante el paso de CGRO sobre la anomalía del sur atlántico y con un momento cuadrupolar debido a la obstrucción de la tierra. El momento dipolar y cuadrupolar de la distribución de los 1637 destellos en coordenadas Galácticas fueron $\langle \cos\theta \rangle = -0.025 \pm 0.014$ y $\langle \sin^2 b - \frac{1}{3} \rangle = -0.001 \pm 0.007$, donde θ es el ángulo entre la dirección del destello y el centro Galáctico, y b es la longitud Galáctica. Estos valores son consistentes con los esperados de una distribución isotrópica para el mismo número de destellos, $\langle \cos\theta \rangle = -0.009$ y $\langle \sin^2 b - \frac{1}{3} \rangle = -0.004$, [PA99].

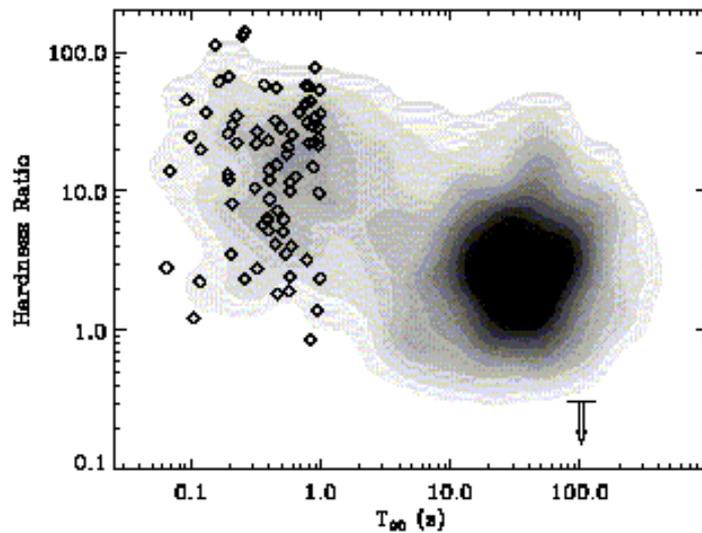


Figura 1.5: Relación entre la dureza espectral y la duración T_{90} de los destellos de BATSE. La dureza es una medida de la forma del espectro y se observa que se dividen en dos clases: cortos y largos. Los diferentes niveles de gris son los contornos de densidad. Los diamantes indican la posición de 76 destellos cortos seleccionados para la búsqueda de su contraparte en rayos x [LA01].

1.1.4. Distancia

A pesar de las numerosas hipótesis del origen cosmológico de los destellos de rayos gamma no había ninguna evidencia observacional en favor de su origen galáctico o isotrópico. En abril de 1996 se lanzó el satélite italiano-holandés de rayos X, BeppoSAX, el cual contenía una cámara de campo ancho (WFC) con un rango de energía de 2 a 30 keV y un instrumento de campo estrecho (NFI) con un rango de energía de 0.1 a 10 keV. Ambos instrumentos permitían detectar la emisión en rayos X, óptico, radio, así como su localización con un error de algunos minutos de arco. BeppoSAX detectó la emisión de rayos gamma a keV del destello GRB970228 [C097] y después de 8 horas observó emisión en rayos X del mismo destello, la cual también fue observada hasta 3 días después de la emisión a keV, Fig. 1.10.

A partir de telescopios terrestres se pudo medir el corrimiento al rojo en las contrapartes de varios destellos y comprobar su origen cosmológico. La medición del corrimiento al rojo se obtuvo de la espectroscopia de los destellos de rayos gamma en galaxias anfitrionas y de algunas líneas de absorción que presentaban los espectros. Hasta octu-

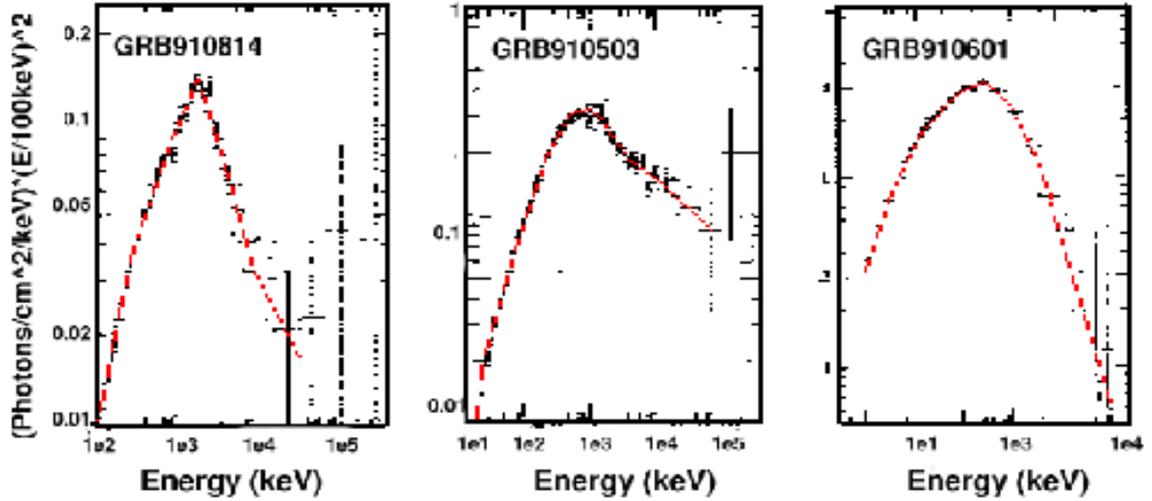


Figura 1.6: Espectros típicos de destellos de rayos gamma. En gráficas $\nu F\nu$ (ver texto) los espectros son funciones crecientes que generalmente alcanzan su máximo alrededor de 250 MeV para luego decrecer monótonamente. No se han observado cortes en el espectro a altas energías.

bre de 2005 se tenían cerca de 61 mediciones de corrimiento al rojo entre un rango de <0.1 hasta 6.5 [KL05], Fig. 1.11. Debido a la sensibilidad de BeppoSAX, el corrimiento al rojo fue medido para destellos de larga duración, la distribución del corrimiento al rojo para destellos cortos era completamente desconocida hasta antes del lanzamiento de SWIFT en el 2004. A partir de entonces SWIFT midió el corrimiento al rojo de 8 destellos cortos en un rango de $z \sim 0.1-1.0$, [ZH07].

1.1.5. Colimación y Jets

Hay varias razones para creer que la emisión de los destellos de rayos gamma es colimada y no isotrópica. Para referirnos al factor de colimación en estos destellos debemos tomar en cuenta dos cantidades importantes. La primera es el ángulo geométrico de colimación el cual es la apertura angular del jet, θ_j . La segunda es el ángulo de colimación relativista, $1/\Gamma$, debido a que la emisión de una partícula u objeto que se mueve con un cierto factor de Lorentz Γ está colimada en un cono de apertura angular de $1/\Gamma$ en la dirección de movimiento. Inicialmente el jet es ultra-relativista con $1/\Gamma < \theta_j$ y un observador frente al haz solo recibe información dentro del cono de luz relativista. Conforme el tiempo avanza, la velocidad del jet disminuye lentamente y el material

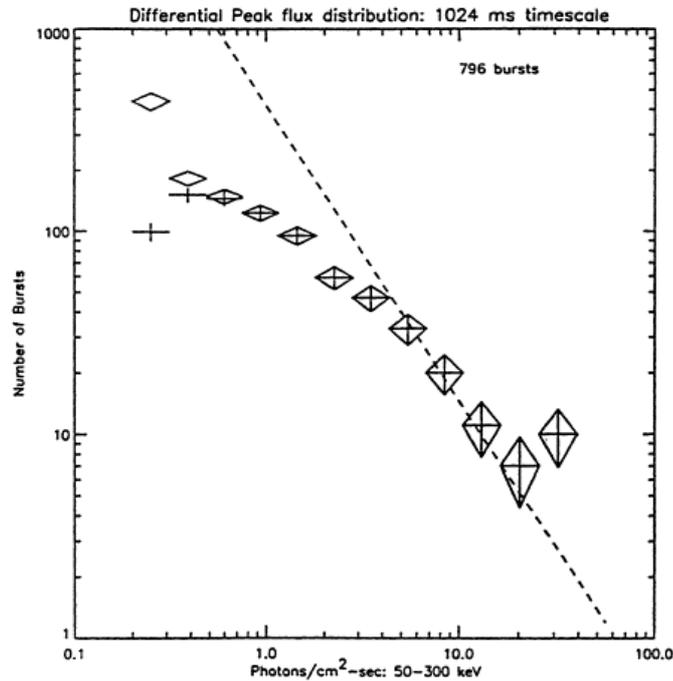
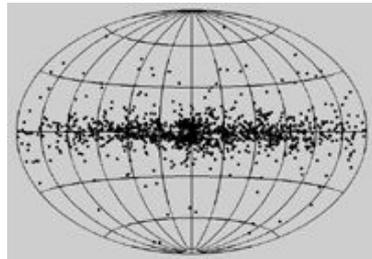


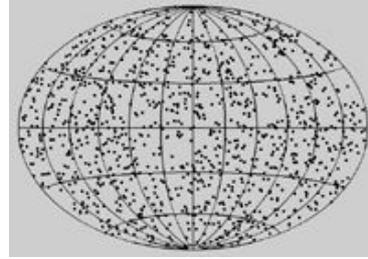
Figura 1.7: Distribución de luminosidad de los destellos de rayos gamma con flujo de energía mayor a un valor dado S_{min} . La línea punteada corresponde a la distribución de luminosidad de destellos en una geometría Euclidiana, asumiendo una distribución homogénea de destellos y una misma energía total emitida.

expulsado se aleja de la fuente, el valor de Γ disminuye y el ángulo de colimación relativista se vuelve más grande que el ángulo de colimación geométrica, es decir, $1/\Gamma > \theta_j$. Al disminuir la colimación relativista se ve cada vez una fracción más grande del material expulsado hasta que la colimación relativista es tan grande que se puede ver todo el material expulsado, Fig. 1.12. Las observaciones de cambios en la pendiente de las curvas de luz de destellos detectados en el óptico están relacionadas con el momento en que el ángulo de colimación geométrica es igual al de la colimación relativista, Fig. 1.13. A partir de estas observaciones se estimaron ángulos de colimación que han sido usados para corregir la energía total liberada inferida en el caso isotrópico. La distribución de energía isotrópica se extiende en cuatro ordenes de magnitud $10^{51} - 10^{54} \text{ erg}$, mientras que la distribución de energía colimada se acerca a un mismo valor de 10^{51} erg Fig. 1.14. [FR01].

Distribution of Gamma-Ray Bursts on the Sky



Expected



Observed

Figura 1.8: *Distribución angular de destellos de rayos gamma. A la izquierda la esperada si tuviesen un origen galáctico y a la derecha la observada por el detector BATSE.*

1.1.6. Contrapartes

Las observaciones de las contrapartes de los destellos de rayos gamma fueron revolucionados con el lanzamiento del detector satelital BeppoSAX en abril 1996, [VA00]. Anteriormente la probabilidad de observaciones simultaneas de algún destello con telescopios en otras longitudes de onda era muy pequeña debido al corto campo de visión de los telescopios comparado con la incerteza en la localización de los destellos dada por los detectores satelitales. BeppoSAX tenía la capacidad de detectar emisión simultanea de destellos de rayos gamma en rayos X duros y bajos. En 1997 detectó la primera emisión en rayos X proveniente del destello GRB970228 [C097]. Esta contraparte provenía de un destello con un doble pico, el primer pico duró aproximadamente 15 segundos y el segundo pico alrededor de ~ 40 segundos, y era más suave que el primero. La cámara de campo ancho (WFC) de BeppoSAX detectó esta emisión a keV y ocho horas después el instrumento de campo estrecho de BeppoSAX observó hacia el mismo destello y detectó una emisión en rayos X que duro hasta 3 días después de la emisión a keV (ver Fig. 1.10). Las curvas de luz de las contrapartes de los destellos de rayos gamma se describen por medio del proceso de emisión sincrotrón (ver sección 1.2.2.) y presentan una distribución de una ley de potencia de la forma $N(E_e)dE_e \propto E^p dE_e$, donde p es proporcional a la frecuencia de emisión del proceso, $p \propto \nu_e^2$. La curva de luz esta

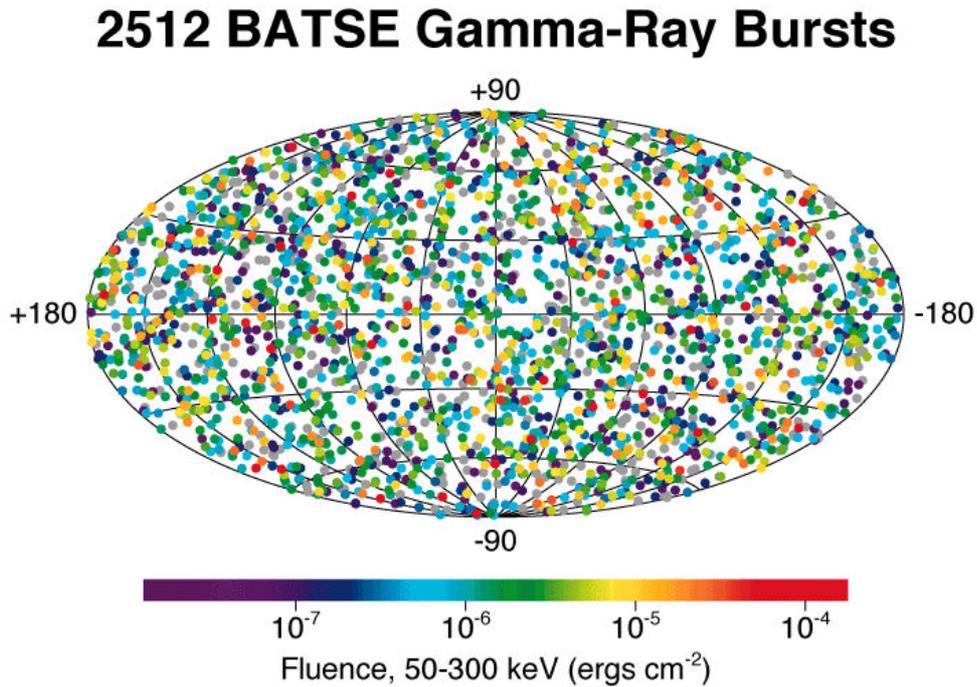


Figura 1.9: Distribución espacial isotrópica de los destellos de rayos gamma a partir de datos de BATSE.

caracterizada por tres regiones: la frecuencia de autoabsorción de sincrotrón ν_a , la frecuencia de inyección ν_m , y la frecuencia de enfriamiento ν_c , [SA98]. En la figura 1.15 se observa la curva de luz característica de las contrapartes. Comparando esta curva con las curvas de luz observadas en el óptico, rayos X y radio se muestran el claro comportamiento de la ley de potencia, de la forma $F_{o,x} \sim t^\alpha \nu^\beta$ con $\alpha \sim -1$ y $\beta \sim -0,7$ para el óptico, y $\alpha \sim -0,9$ y $\beta \sim 1,4$ para rayos X [ME03]. Un ejemplo de la curva de luz observada del destello GRB030226 con emisión en el óptico se muestra en la figura 1.13.

Las contrapartes han sido observadas para destellos largos principalmente en rayos X, radio y óptico. No todos los destellos tienen una contraparte detectada. Alrededor del 60% de los destellos detectados en rayos X por BeppoSAX, han sido detectados en el óptico. Para el otro 40% de los destellos no se ha tenido suficiente tiempo de detección para ser ópticamente trascendentes. En cambio la emisión en radio ha sido detectada en la mitad de los destellos con contrapartes [ZH03].

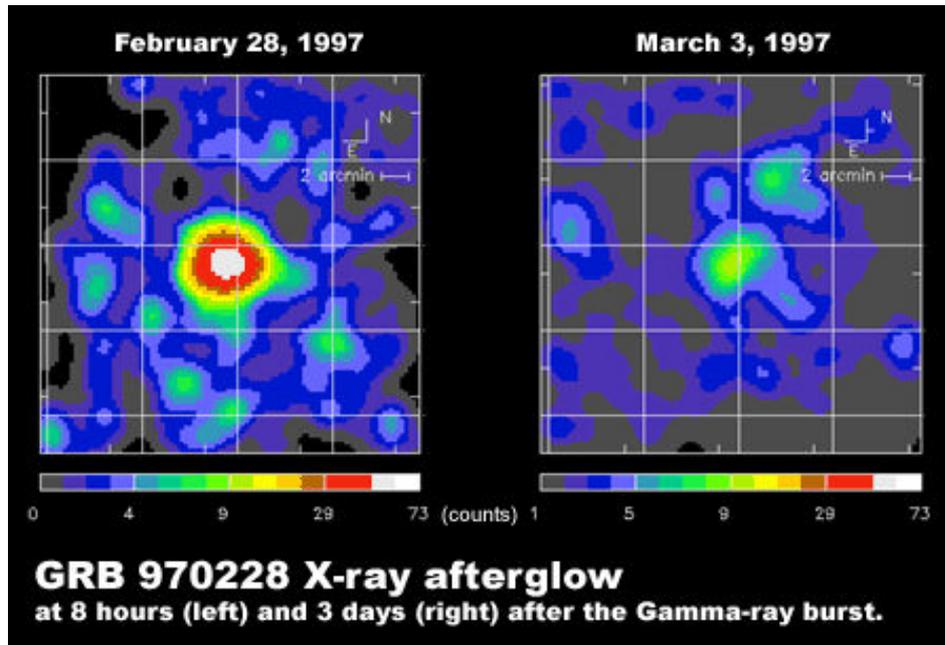


Figura 1.10: Primera detección de un contraparte en rayos X. Destello GRB970228. A la izquierda la emisión en rayos X se observó con una diferencia de 8 horas después de la emisión a keV y a la derecha la misma región 3 días después de la emisión a keV.

1.1.7. Conexión con Supernovas

Se han hecho varios intentos de relacionar los destellos de rayos gamma con otros objetos astronómicos. El primer indicio reportado de una posible asociación fue el destello GRB980425 con la supernova SN1998bw [KU98, GA98]. Dicho destello no presentó contraparte en el óptico y la supernova se presentó varios días después del destello. Posteriormente se observó una clara asociación entre el destello GRB030329 con la supernova SN2003dh, [ME03a]. GRB030329 fue muy brillante, y con corrimiento al rojo de $Z = 0,1685$. Alrededor de 7.67 días después el espectro en el óptico empezó a mostrar anchos picos típicos de una supernova. Mientras la contraparte del destello se desvanecía, el espectro de la supernova comenzaba a aumentar. Cuando el espectro de la supernova SN2003dh fue comparada con el espectro de la supernova SN1998bw, se observó que tenían las mismas características generales, Fig. 1.16. Con estas observaciones se confirmó la conexión de supernovas con destellos de rayos gamma largos predichas por la teoría [VA00] (ver sección 1.2.1.).

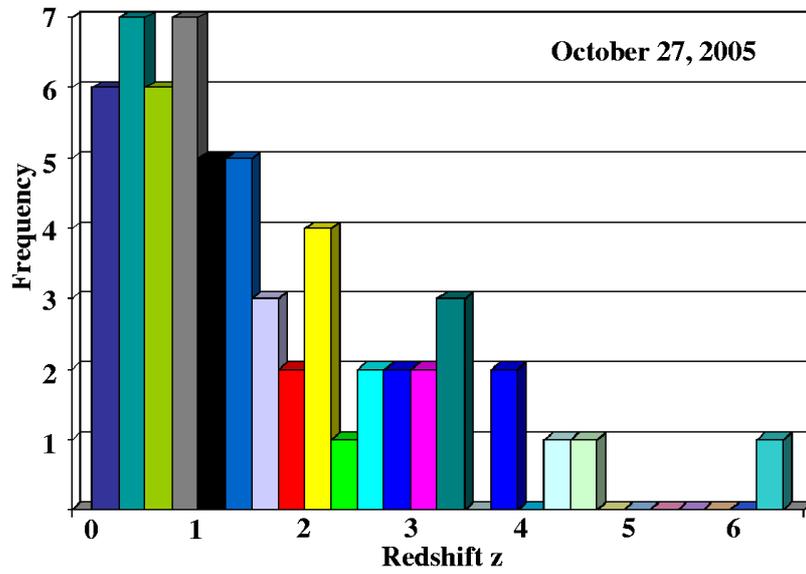


Figura 1.11: Distribución del corrimiento al rojo de los destellos de rayos gamma que se conocen hasta octubre de 2005, publicada por S. Klose.

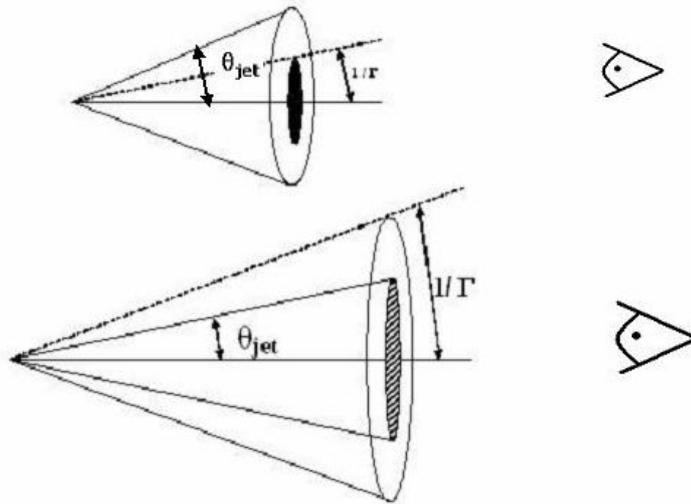


Figura 1.12: Ángulos de colimación geométrica (θ_j) y relativista ($1/\Gamma$) del jet en un destello.

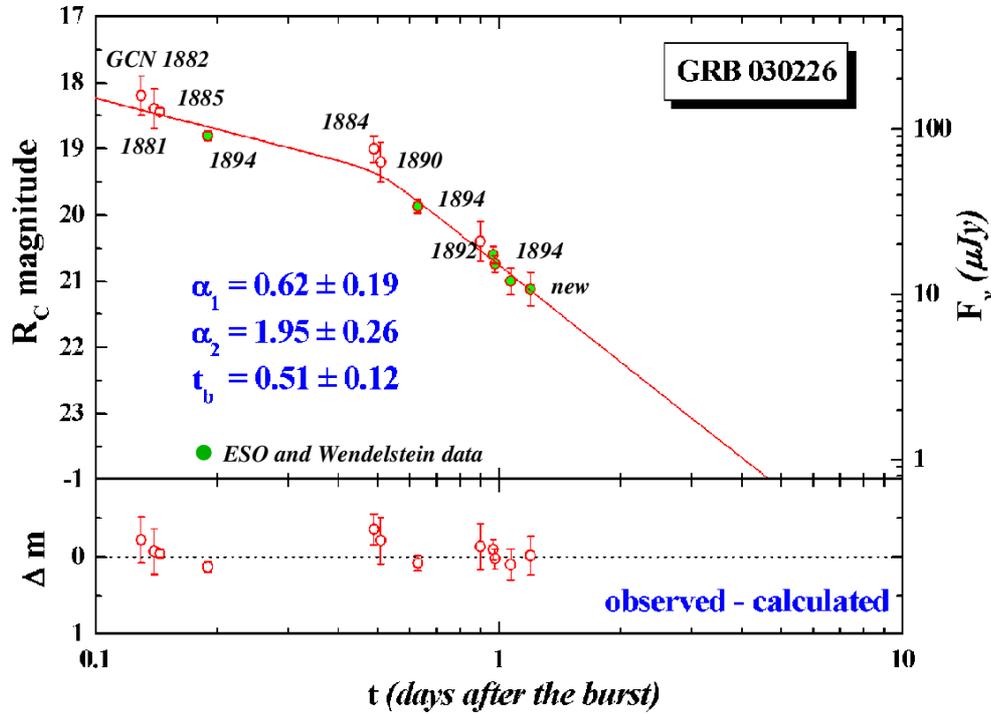


Figura 1.13: Curva de luz de GRB030226 en el óptico. Esta curva se obtuvo a partir de la compilación de datos (círculos rojos) y de las observaciones hechas por el telescopio ESO (puntos verdes). La línea sólida corresponde al modelo ajustado y se describe a partir de una ley de potencial decreciente con un cambio de pendiente de $\alpha_1 = -0,62$ y $0,5$ días después un $\alpha_2 = -1,95$. La ventana de abajo muestra la diferencia de magnitudes observadas y calculadas del destello.

1.1.8. Emisión a Altas Energías ($>1\text{MeV}$)

La física de los destellos de rayos gamma en un principio se enfocó en el estudio de su emisión en energías de keV a MeV para entender su naturaleza y posteriormente en la observación de las contrapartes para su localización. Actualmente se concentra en la observación de destellos cortos en los rayos X suaves. Debido al bajo flujo de fotones y a la necesidad de desarrollar las técnicas de observación, las observaciones a energías mayores a $>\text{MeV}$ son contadas. El satélite de Máxima Misión Solar (SMM) tenía un rango de energía entre $0.3 - 9 \text{ MeV}$ y detectó 73 explosiones en un periodo de 3.5 años [MA85], de las cuales más del 60% tenían una emisión significativa arriba de 1 MeV .

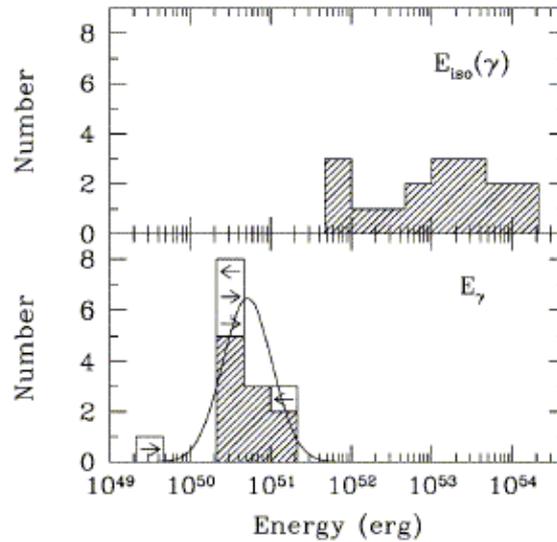


Figura 1.14: Distribución de la energía emitida por los destellos de rayos gamma. La distribución de energía isotrópica (arriba) se extiende en cuatro ordenes de magnitud $10^{51} - 10^{54} \text{erg}$, mientras que la distribución de energía colimada (abajo) se acerca a un mismo valor de 10^{51}erg .

EGRET era sensible en energías de 30 MeV a 30 GeV y detectó siete explosiones, cuatro de ellas con emisión por encima de 100 MeV [DI01]. La más importante de estas observaciones fue la del destello GRB940217, que presentó emisión fotónica a energías de GeV simultánea y posterior a la emisión inicial a energías de keV [HU94]. Un fotón con la máxima energía de 18 GeV fue observado 90 minutos después de la emisión a keV. En este mismo periodo de tiempo la tierra se interpuso entre EGRET y el destello, ocultando la emisión del destello por casi 4000 segundos, Fig. 1.17.

Posteriormente combinando datos de los detectores EGRET y BATSE se obtuvo un espectro extendido desde 0.03 hasta 200 MeV y se encontró que el destello GRB941017 presentaba dos componentes espectrales [GO03], una, ya conocida a energías de keV, posiblemente producto de radiación de sincrotrón y la segunda más larga a energías $> \text{MeV}$ (hasta 200 MeV), con diferente evolución temporal y con tres veces más energía que la componente a bajas energías. Además no se observa ningún máximo en el flujo de energía de la segunda componente al menos hasta 200 MeV. Esta segunda componente no es consistente con emisión sincrotrón y/o dispersión inversa de compton [GO03], Fig. 1.18.

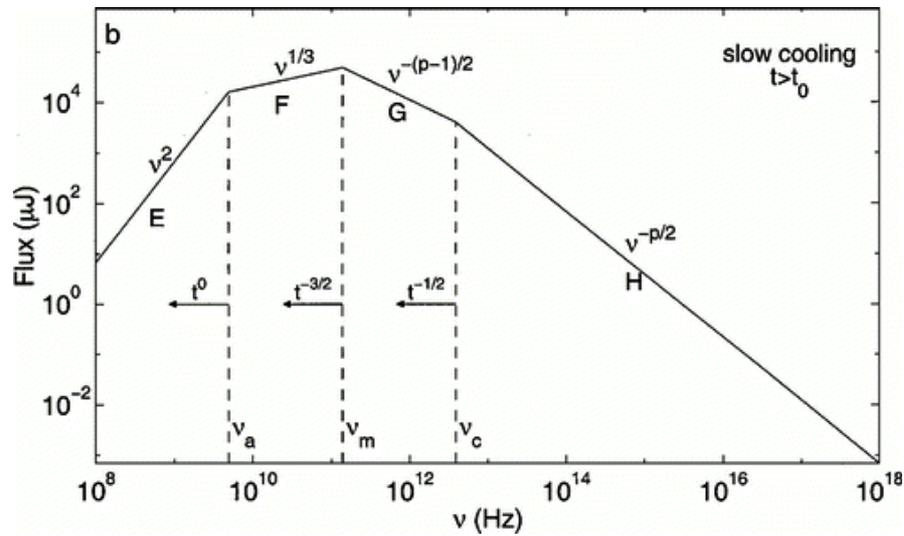


Figura 1.15: Curva de luz esperada para las contrapartes (radio, óptico, rayos x) de los destellos de rayos gamma caracterizada por la emisión sincrotrón. La curva muestra las tres frecuencias típicas ν_a, ν_m y ν_c . La región E muestra la región de frecuencia bajas caracterizada por la radiación de cuerpo negro y a partir de la región F se muestra la emisión sincrotrón.

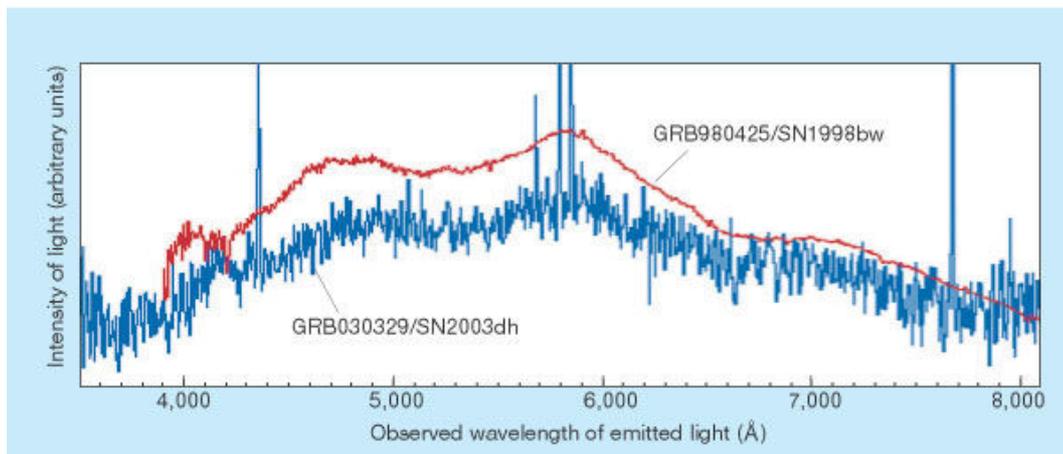


Figura 1.16: Espectros de los destello GRB980425 y GRB030329 relacionados con las supernova SN1998bw y SN2003dh respectivamente.

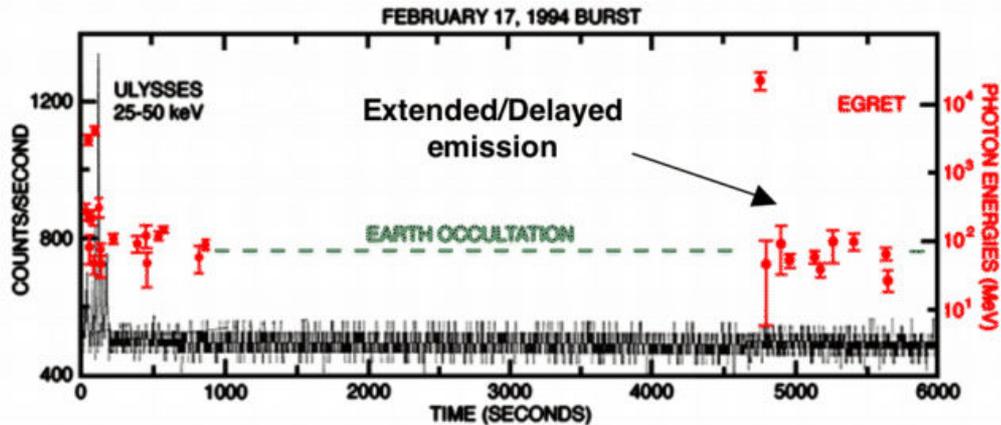


Figura 1.17: Observación de emisión fotónica de altas energías (GeV) del destello GRB940217 por EGRET. La línea negra sólida muestra la emisión a keV observada por Ulysses en un rango de energía de 25-50 keV. Los puntos rojos con su barra de error representan cada uno de los fotones observados por EGRET. El eje de la izquierda indica al número de cuentas por segundo observado por Ulysses y el eje de la derecha la energía de los fotones observada por EGRET.

Por otro lado, Milagrito observó el destello GRB970417 a energías de TeV, con una significancia de $\sim 3,7\sigma$ sobre el ruido. La emisión observada es mayor a la esperada cuando se extrapola la emisión observada a energías de keV [AT04], Fig. 1.19.

1.1.9. Los destellos de rayos gamma como fuentes de emisión no electromagnética

Dos importantes canales no electromagnéticos en los cuales los destellos de rayos gamma pueden ser fuentes prominentes, son los rayos cósmicos y los neutrinos, ninguno de los cuales ha sido observado. Los modelos de los destellos de rayos gamma involucran ondas de choque, donde los electrones pueden acelerarse para después radiar la energía cinética ganada en forma de fotones con energía de keV y contrapartes de destellos de rayos gamma. En estos mismos modelos también se considera que bariones (principalmente protones) pueden ser acelerados en las mismas ondas de choque o en el proceso explosivo del progenitor. Si los iones acelerados no se quedarán encerrados en el sistema y no interactuarán con materia y radiación durante su propagación podrían llegar a la

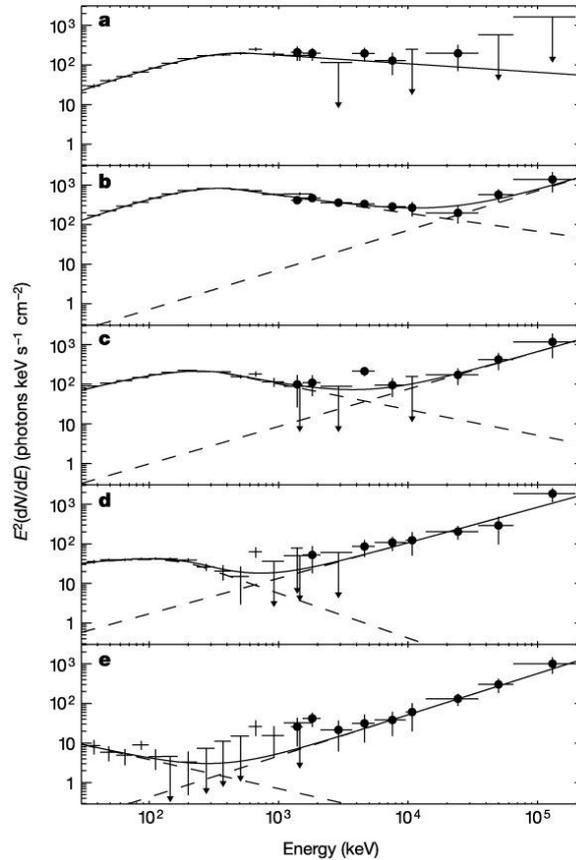


Figura 1.18: Espectro de GRB941017. Las cruces representan los datos de BATSE, los círculos sólidos los datos de TASC y la línea sólida el ajuste a los datos usando una función de Band para describir energías por debajo de 1MeV y una ley de potencias para energías de MeV. Se observan dos componentes, una a keV y otra $>MeV$ inconsistente con el modelo de emisión sincrotrón. E^2dN/dE es graficada en 5 diferentes intervalos de tiempo consecutivos (a:-18-14s, b:14-47s, c:47-80s, d:80-113 s, e:113-211s).

tierra y ser detectados como rayos cósmicos. Las discusiones acerca de los destellos de rayos gamma como posibles aceleradores de rayos cósmicos está dirigida a explicar la parte del espectro de rayos cósmicos por arriba de $10^{18}eV$ (la región del tobillo). Hasta ahora no hay pruebas claras de que los destellos de rayos gamma sean fuentes de rayos cósmicos ultra-energéticos.

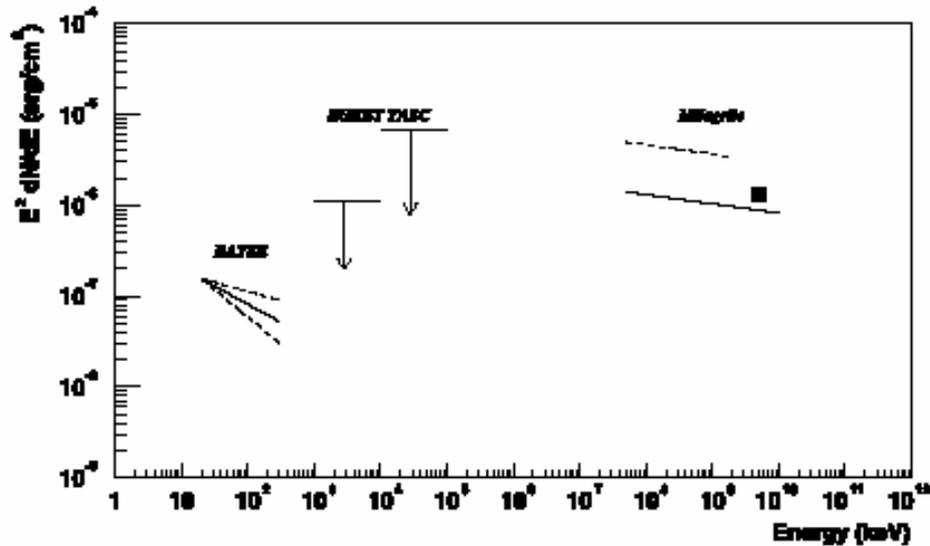


Figura 1.19: Distribución espectral del destello GRB970417. A partir de una ley de potencia se muestran los datos de BATSE y sus límites superiores a un 1 MeV y 10 MeV dados por el detector EGRET-TASC. Además se muestran los 3 posibles espectros consistentes con las observaciones de Milagrillo con emisión $> \text{TeV}$.

Sin tomar en cuenta si los destellos de rayos gamma pueden acelerar protones a ultra altas energías ($> \text{TeV}$), deben ser capaces de acelerar protones a algunas altas energías. Esto implica que los neutrinos y los fotones de altas energías deben acompañar a la emisión observada por debajo de los MeVs, simplemente por las interacciones $p\gamma$, pp y pn . Existen varios sitios donde los neutrinos de diferentes energías pueden ser generados dentro de destello de rayos gamma. Sin embargo, todavía no se tiene reportes de detecciones de neutrinos provenientes de destellos de rayos gamma. Los actuales y futuros detectores Cherenkov de neutrinos de hielo o agua tales como AMANDA-II, ANTARES y ICECUBE, harán posible la detección de destellos de rayos gamma en este nuevo canal.

Por otro lado la fusión de objetos compactos, tales como estrellas de neutrones y hoyos negros, han sido consideradas como posibles fuentes de ondas gravitacionales, sin tener en cuenta si estas pudieran producir destellos de rayos gamma. Sin embargo, ya que estos eventos son también considerados candidatos a progenitores de destellos de rayos gamma, es de esperarse que los destellos de rayos gamma estén asociados con un destello de ondas gravitacionales. La coincidencia entre una señal de una onda gravita-

cional y un destello de rayos gamma tendría profundas implicaciones en el estudio de los destellos de rayos gamma. Primero, ayudaría a identificar los progenitores de estos destellos. Segundo ayudaría a resolver el debate acerca de la localización de la emisión temprana de los GRB, es decir, si se da en los choques internos o externos, ya que las ondas gravitacionales están asociadas con la formación del mecanismo central. Y tercero, ayudaría a entender la configuración y estructura de los jets de los destellos de rayos gamma.

1.2. Progenitores y Modelo Teórico

1.2.1. Progenitores

Debido a la gran cantidad de energía liberada por los destellos de rayos gamma y al no ser repetitivos, se cree que sus progenitores están asociados a la muerte de estrellas masivas [WO93] y/o fusión de objetos compactos (estrellas de neutrones y hoyos negros) [EI89], Fig. 1.20. Se cree que la fusión de un sistema binario podría ser el progenitor de los destellos cortos, aunque recientemente se han observado contrapartes de destellos cortos y sea encontrado que estos destellos ocurren en algunas galaxias tipo elípticas con baja formación de estrellas, [GE05, BL05, BE05, FO05]. Por otro lado el modelo del colapso central de una estrella masiva (colapsar o hipernova) podría ser el progenitor de destellos largos ya que se han observado varios casos de asociación entre destellos largos y el tipo de supernovas Ibc, [GA98, ST03, HJ03, MA04, CA06]. Los diferentes modelos proporcionan diferentes valores para la energía total liberada, duración, variabilidad, carga bariónica, etc. Observaciones en diferentes rangos de energía podrían ayudar a descubrir el mecanismo del motor central, como se explica en la siguiente sección.

1.2.2. Modelo Teórico de la Bola de Fuego

Una de las teorías más aceptada para explicar el origen de los destellos de rayos gamma, es la teoría estándar de la bola de fuego, [PA86, GO86]. Esta teoría considera una fuente compacta y variable que produce un chorro colimado de fotones, pares electrón-positrón y con una pequeña cantidad de bariones. Inicialmente su densidad es tan grande que la radiación no puede escapar debido a la alta opacidad del medio, esto hace que la bola de fuego empiece a expandirse adiabáticamente bajo su propia presión ($P = e/3$ donde e es la densidad de energía de los fotones) y comience a enfriarse ($T \propto 1/r$), Fig. 1.21. En el proceso de enfriamiento y expansión, el chorro se acelera

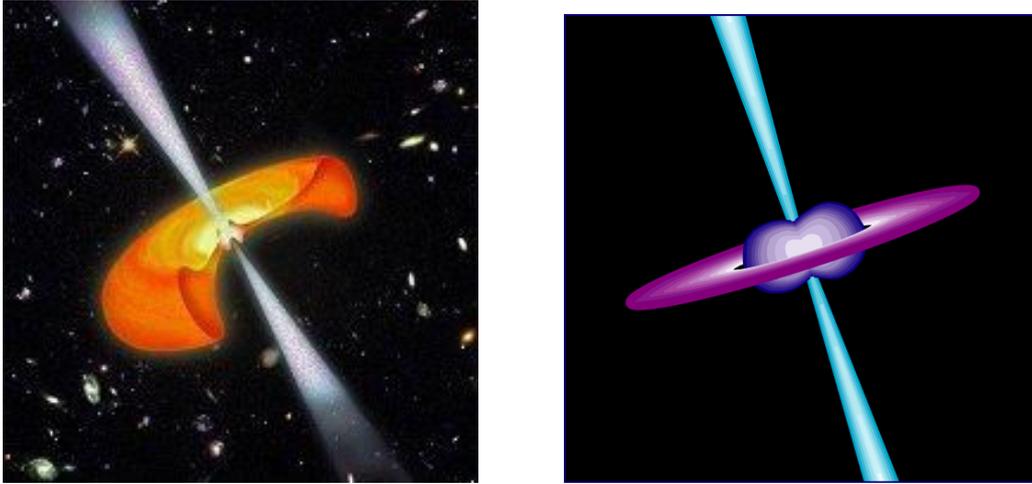


Figura 1.20: Posibles modelos de los progenitores de los destellos de rayos gamma. A la derecha la muerte de estrellas masivas y a la izquierda la fusión de objetos compactos.

hasta velocidades ultra-relativistas (la energía cinética de la masa bariónica aumenta). La expansión es tal que el medio se vuelve ópticamente delgado permitiendo que la radiación escape. Es en este punto donde la emisión a energías de keV se produce a partir de un mecanismo llamado choque de capas internas [KO97]. Estas capas son material (fotones, e^+e^- , bariones) expulsado por el progenitor a diferentes velocidades como resultado de la variabilidad del progenitor. La capa de velocidad menor será alcanzada por la capa de velocidad mayor produciendo una onda de choque y en estas ondas de choque es donde se aceleran los electrones. La observación de la variabilidad en las curvas de luz de los destellos de rayos gamma requieren de una fuente intermitente y de choques internos entre capas, así cada pico de la curva corresponde a un episodio del proceso de emisión de la fuente que generó una onda de choque.

Eventualmente la bola de fuego continúa expandiéndose hasta que barre suficiente medio interestelar para frenarse y formarse otra onda de choque. A este proceso se le llama choque de capas externas [ME93]. En ambos procesos, choques de capas internas y externas, se transfiere energía cinética de los bariones a los electrones debido a procesos de aceleración de Fermi y al campo magnético presente. Estos electrones radian esta energía por procesos no térmicos, en particular la radiación sincrotrón (emisión de electrones relativistas girando en un campo magnético aleatorio). Aunque la emisión de sincrotrón explica las observaciones de las contrapartes y se cree que es la causante de las observaciones a keV, tiene dificultades para explicar varios hechos observacionales

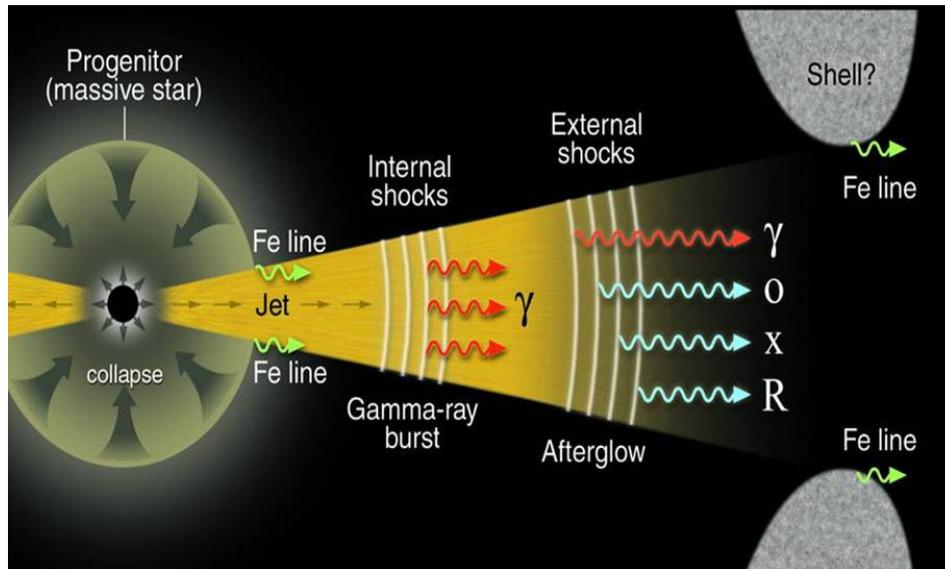


Figura 1.21: Modelo de la Bola de Fuego.

en el rango de energía de keV. Por ejemplo la llamada línea de muerte, en la cual el índice espectral a bajas energías no debe exceder el valor $-2/3$. Una buena cantidad de espectros de BATSE parecen violar este límite. Existen varias propuestas para resolver esta aparente inconsistencia, una de ellas es la sensibilidad de BATSE para poder determinar el índice espectral a bajas energías. Aunque el modelo sincrotrón sigue siendo el más aceptado, algunos mecanismos de radiación alternativos se han propuesto para interpretar la emisión a keV. La extensión natural de la radiación de sincrotrón involucra la dispersión inversa Compton, en la cual los fotones de baja energía interactúan con electrones energéticos y ganan energía. Si la emisión sincrotrón típica se observa en el óptico, entonces la emisión a keV podría ser resultado de la emisión sincrotrón inversa Compton. En otro caso si la radiación sincrotrón se observa en keV entonces la emisión sincrotrón inversa Compton se presentará en GeV y las observaciones a altas energías serían de gran importancia.

1.3. Importancia del estudio de destellos a Altas Energías

Fue hasta el 2003 cuando algunas consecuencias del modelo teórico de la bola de fuego fueron observadas. Dos de estas principales consecuencias son la conexión con

supernovas [VA00] y la emisión temprana polarizada. Sin embargo no se pueden despreciar las observaciones en el rango de energía por arriba de keV, ya que las siguientes inconsistencias fueron también observadas:

- Por ejemplo en la observación de EGRET del destello GRB940217 (ver sección 1.1.8), a pesar de que el espectro a energías de GeV era consistente con la extrapolación del espectro a energías de keV, es difícil de explicar la presencia de fotones a energías de GeV una hora después de la emisión a keV, pues implicaría una larga actividad en el progenitor.
- La observación de Milagrito del destello GRB970417 (ver sección 1.1.8) es inconsistente con la extrapolación a keV. Sin embargo, se puede explicar con radiación inversa de Compton de la parte a keV.
- Las observaciones del destello GRB941017 en el que se observó una componente espectral en energías de MeV que:
 1. Contiene el doble de la energía que en el rango de los keV, implicando más energía emitida en el destello.
 2. No muestra la misma evolución temporal que la componente a energías de keV sugiriendo un nuevo proceso radiativo diferente a la dispersión inversa Compton.
 3. Su máximo en el flujo de energía no fue observado, implicando que para ser dispersión inversa Compton tendría todavía más energía difícil de explicar pues su máximo estaría en energías de GeV.
 4. Su índice espectral es demasiado duro y constante en el tiempo para ser explicado por los procesos radiativos electrónicos convencionales.

Por lo tanto es importante la observación de emisión de energía por arriba de los cientos de keV para la comprensión de los mecanismos de emisión involucrados en los destellos. Además de que permite proporcionar límites superiores a la intensidad del campo magnético involucrado, así como a las velocidades relativistas a las que el chorro es acelerado. Se espera que el detector GLAST (lanzado para el 2007) con una sensibilidad en el rango de energías de 10 keV a 300 GeV y el funcionamiento de Milagro ($> \text{GeV}$), contribuyan al conocimiento de los destellos de rayos gamma a altas energías. Mientras tanto, la única forma de obtener información es analizando datos experimentales de detectores pasados (EGRET y TASC), lo cual es la motivación de esta tesis.

Capítulo 2

Los Detectores BATSE y EGRET-TASC

”Aprende del árbol y deja caer las hojas secas del pasado para que abonen el suelo, donde tus raíces preparan el futuro.”
René Trossero.

2.1. Conceptos Básicos de los Detectores Satelitales.

Los instrumentos de detección dedicados al estudio y observación de destellos de rayos gamma tienen que tomar en cuenta las características de la emisión que se quiere observar en su diseño. Por ejemplo, el tamaño del detector está determinado por la energía de la emisión a observar (para los intereses de esta tesis de keV - MeV) y del flujo del destello (fotones por unidad de segundo y por unidad de área), claramente dentro de las limitaciones de peso y espacio del satélite. Por otro lado, el flujo del destello y su duración nos determinan el tiempo muerto permitido en el sistema de detección. Además, la naturaleza aleatoria de los destellos requiere de detectores con amplio campo de visión. Por lo tanto es importante conocer los detectores involucrados para entender sus limitaciones y las consideraciones del análisis de esta tesis. De tal modo en las siguientes secciones se describen los elementos básicos de los detectores satelitales para después describir los detectores involucrados en el análisis, BATSE y EGRET-TASC.

2.1.1. Centelladores

Los fotones de rayos gamma son altamente penetrables por lo que se requiere de detectores más grandes que los necesarios para partículas cargadas. Además, se observan indirectamente, es decir, a partir de su interacción con la materia, a través de tres procesos que dependen de la energía del fotón: efecto fotoeléctrico ($E \lesssim 300keV$), dispersión Compton ($\sim 300keV < E \lesssim 8MeV$) y creación de pares ($\gtrsim 8MeV$). En estos procesos se generan partículas cargadas que depositan su energía en el centellador a partir de procesos de ionización y excitación. Esta energía se trasmite por el centellador en forma de fotones visibles [SC01], Fig. 2.1.

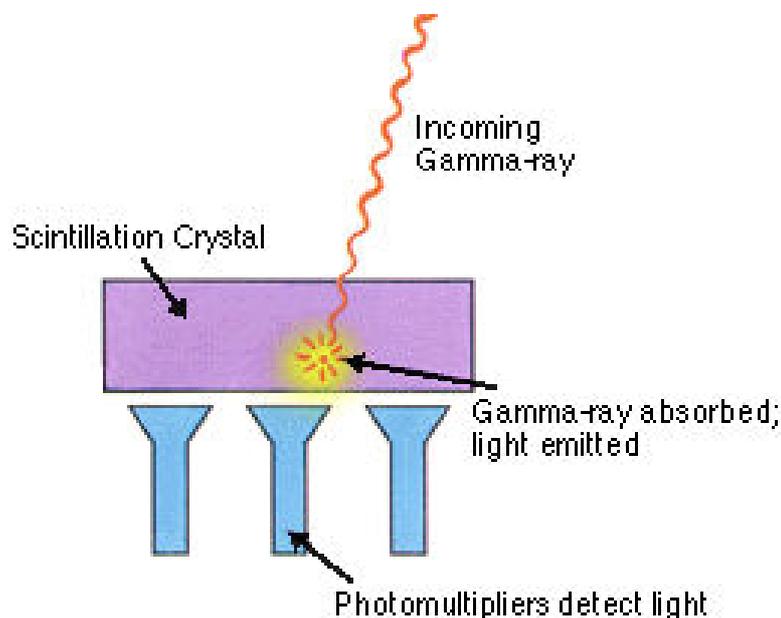


Figura 2.1: Esquema de la detección de un fotón en un sistema que usa centelladores.

Un material centellador ideal posee las siguientes propiedades: debe convertir la energía cinética de las partículas cargadas en luz detectable con una alta eficiencia. Su conversión preferentemente debe ser lineal, es decir, la luz producida debe ser proporcional a la energía depositada. El centellador debe ser transparente a longitudes de onda de su propia emisión para una buena transmisión de luz. El tiempo de decaimiento de la luminiscencia provocada debe ser corto para disminuir el tiempo de respuesta del centellador. Debe ser práctico para su fabricación en grandes tamaños y su índice de refracción debe ser parecido al del vidrio (1.5) para permitir el acoplamiento eficaz entre él y un tubo fotomultiplicador.

Los centelladores están hechos de varios materiales, pueden ser orgánicos e inorgánicos. El proceso de emisión en los centelladores orgánicos está basado en las transiciones dentro de los niveles de energía de una sola molécula, por lo tanto es independiente del estado físico del centellador (sólido, líquido o gaseoso). La probabilidad de que un fotón interactúe dentro del centellador orgánico es baja debido a su baja densidad y bajo número atómico de sus elementos. Por lo tanto, estos centelladores son poco eficientes para detectar fotones pero debido a su corto tiempo de respuesta (ns) para partículas cargadas son utilizados como vetos o escudos de anticoincidencia.

Por otro lado, en los centelladores inorgánicos el proceso de emisión se basa en su red cristalina, la cual está caracterizada por su banda de valencia y de conducción. En condiciones normales los electrones se encuentran ligados a la red cristalina y la banda de conducción, donde los electrones pueden moverse libremente, está vacía. Cuando una partícula cargada pasa a través de un cristal excita a un electrón desde la banda de valencia hacia la banda de conducción creando un par electro-hoyo. Después un electrón se recombinará con un hoyo, emitiendo su energía como un fotón. En los cristales puros existe esta recombinación pero es un proceso ineficiente debido al gran ancho de la banda (gap) que divide a la banda de valencia de la de conducción, a que la longitud de onda de los fotones que emiten está fuera de la longitud de onda del visible y a que son malos centelladores (un cristal puro de CsI tiene solo $\sim 5\%$ de luz producida de un cristal dopado CsI(Tl)). Para mejorar la eficiencia de los cristales puros se les agregan pequeñas impurezas llamadas activadores que modifican la red cristalina y crean niveles de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción. Ejemplos de estos activadores son Tl y Na. La excitación de los niveles del activador es más eficiente y la longitud de los fotones emitidos está dentro del visible. Las propiedades más importantes de un centellador inorgánico son: su densidad, su índice de refracción, su tiempo de decaimiento y la luz total producida. La densidad del material debe ser alta para incrementar la probabilidad de absorción de fotones. Además mientras más luz sea producida mejor será la resolución de energía del detector. Los cristales más usados son el yoduro de sodio activado con talio NaI(Tl), el yoduro de cesio activado con talio CsI(Tl) y el yoduro de cesio activado con sodio CsI(Na). Su índice de refracción es parecido al del vidrio permitiendo un buen acoplamiento entre él y el vidrio ventana de entrada del fotomultiplicador [KN89].

2.1.2. Fotomultiplicadores

Los fotomultiplicadores (PMT, por sus siglas en inglés) son instrumentos capaces de convertir una señal óptica débil de un centellador en una señal electrónica. Los fotomultiplicadores están compuestos por un recipiente de vidrio sellado al alto vacío.

La cara que esta conectada con el centellador tiene una capa fotosensible o fotocátodo, que cuando los fotones llegan, a partir del efecto fotoeléctrico, hacen que el fotocátodo emita electrones de baja energía (unos pocos eV). Estos electrones son acelerados por medio de una diferencia de voltaje y guiados al primer dinodo. Los dinodos son electrodos de metal con alta capacidad de emisión de electrones secundarios. Cada electrón que cae sobre la superficie del dinodo genera aproximadamente 10^5 electrones secundarios, estos son acelerados y guiados al siguiente dinodo, y así sucesivamente. Este proceso se conoce como efecto cascada y genera de 10^5 a 10^7 electrones por cada fotón que llega al fotocátodo. El número final de electrones que determina la ganancia del fotomultiplicador, depende del número de dinodos y del voltaje aplicado. Finalmente, la carga amplificada es colectada en el ánodo. De esta manera se obtiene una señal lo suficientemente grande para poder ser manejada con amplificadores y analizadores de pulsos convencionales, Fig. 2.2.

La Fig. 2.3 muestra cómo la ganancia depende del voltaje aplicado al fotomultiplicador. Esta gráfica es la curva característica de la ganancia de un fotomultiplicador y muestra el número de cuentas detectadas en función del voltaje. La zona casi plana corresponde al *plateau* o meseta y determina la estabilidad del fotomultiplicador y su voltaje de operación.

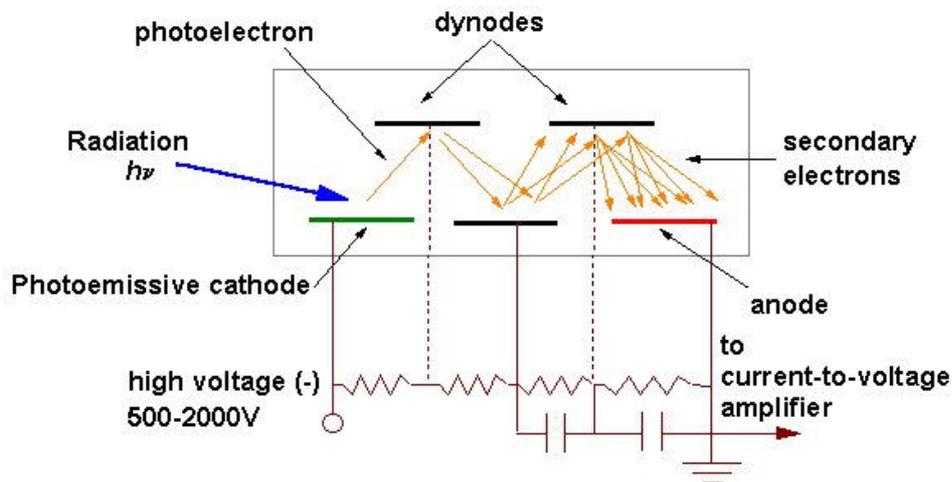


Figura 2.2: Esquema de un fotomultiplicador mostrando cómo los fotones interactúan con el fotocátodo y a partir del efecto fotoeléctrico se generan electrones. Posteriormente estos electrones serán multiplicados en los dinodos y acelerados por medio de un voltaje, generando una carga amplificada.

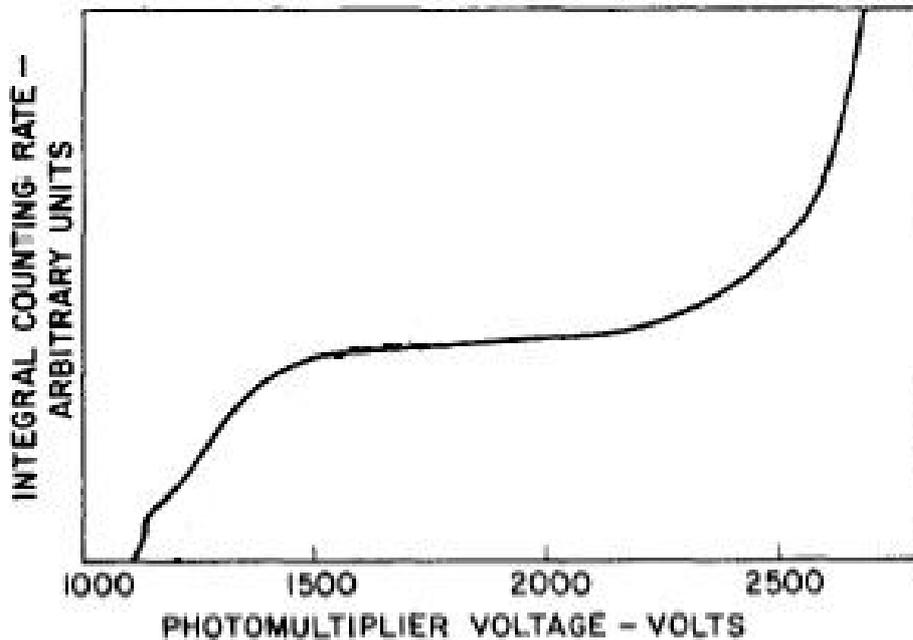


Figura 2.3: Meseta característica de la ganancia de un fotomultiplicador en función del voltaje aplicado al fotomultiplicador. La meseta determina el rango de estabilidad así como el voltaje de operación del fotomultiplicador.

2.1.3. Convertidores Digitales

El objetivo de un convertidor digital es la traducción de una propiedad del pulso en una señal digital, tal como el tiempo que este pulso está sobre cierto voltaje umbral. En general se espera que estas propiedades estén relacionadas con la carga o energía depositada en el centellador. La digitalización se traduce en un canal entre 0 y 8129 canales para después comprimirse en sólo 256 canales y ser almacenada. Dentro de este proceso el convertidor digital no puede digitalizar otro pulso, aunque llegue un evento al centellador y se genere señal en el fotomultiplicador, al tiempo que le toma al convertidor procesar la información se le llama tiempo muerto. Por lo tanto el convertidor digital solo puede leer cierta cantidad de cuentas por segundo, teniendo una limitación en lo que puede registrar.

2.2. El detector BATSE

2.2.1. Descripción y Objetivos

El experimento para detectar fuentes variables y de destellos, BATSE [webBATSE], era uno de cuatro detectores abordo del Observatorio Compton de Rayos Gamma (CGRO) [webCGRO] . Constaba de 8 módulos centelladores colocados en cada esquina de la nave espacial de CGRO y orientados en diferentes direcciones. Cada módulo contenía dos detectores, un detector de área amplia LAD (Large-Area-Detector) con mayor sensibilidad y respuesta direccional, y un espectroscopio SD (Spectroscopy Detector) con mejor cobertura y resolución de energía, Fig. 2.4.

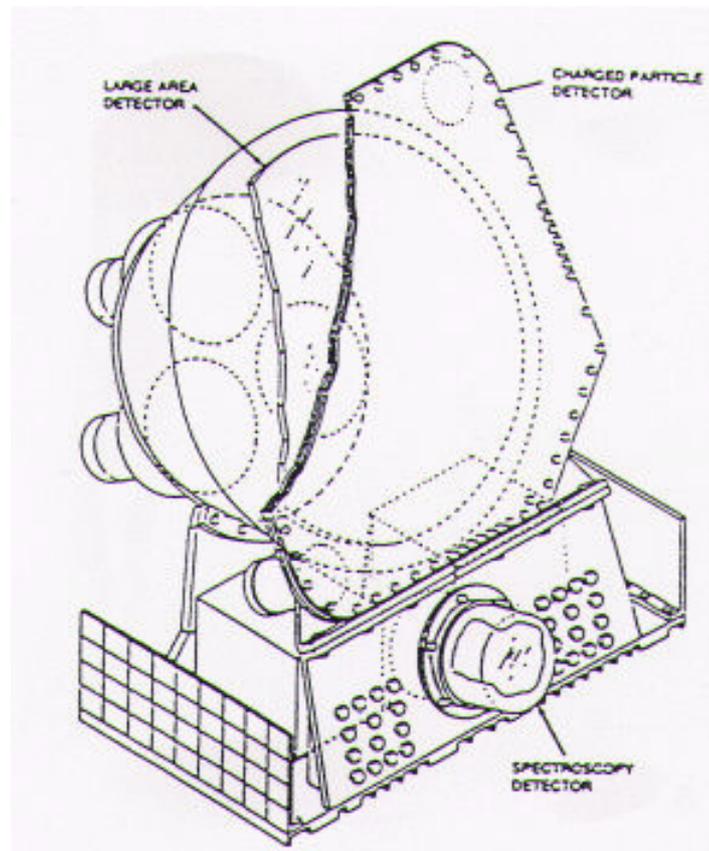


Figura 2.4: Esquema de uno de los ocho módulos centelladores de BATSE. El cual contenía un detector de área amplia (LAD) y un espectroscopio (SD).

El detector LAD era un disco de cristal centellador NAI de 50.4 cm de diámetro y 1.27 cm de ancho, con una área sensible de 2025 cm². Un colector de luz acoplado al cristal transfiere la luz a los tubos fotomultiplicadores. Adicionalmente, el cristal estaba rodeado por una delgada cubierta de plomo y una capa de estaño para reducir el ruido instrumental. Delante del cristal había un plástico centellador de 6.35 mm de grosor, que servía como escudo de anticoincidencia para discriminar la radiación de fondo debido a las partículas cargadas. El rango de energía del LAD era 20 keV-1.9 MeV. El espectrómetro SD era un cristal de NAI(Tl) con un diámetro de 12.7 cm y un espesor de 7.62 cm, con una área sensible de 127 cm². Este estaba acoplado a un fotomultiplicador. El cristal también estaba cubierto de los lados y por detrás por un escudo de estaño y plomo para evitar el ruido instrumental y enfrente tenía una ventana de berilio que permitía una buena transmisión debajo de 7 keV. Debido al espesor del cristal, el SD podía medir energías arriba de los 100 MeV a partir de la producción de pares. SD tenía un rango de energía ajustable entre 0.01 y 100 MeV dependiendo de la ganancia de los tubos fotomultiplicadores. Los pulsos dentro del detector son procesados a alta velocidad por un circuito discriminador y un sistema analizador para minimizar la distorsión espectral por el exceso de cuentas. La señal de los LADs se digitalizaba en 128 canales de energía y en 256 canales para los SDs. Cada detector era independiente. El principal objetivo de BATSE fue la detección, localización y estudio de las explosiones de rayos gamma. Gracias a su gran área efectiva para observaciones de baja sensibilidad y a su versátil sistema de datos, suministró el más sensible y detallado sistema de observación. Desde su operación BATSE observó 0.85 explosiones por día y su más importante e inesperada observación fue la isotropía de los destellos de rayos gamma.

2.2.2. Tipos de Almacenamiento de datos

Los datos eran procesados y acumulados en distintos formatos con diferente resolución de energía y diferentes tiempos de acumulación en la unidad central electrónica. Los diferentes tipos de datos contenían un espectro (HERB) para cada uno de los cuatro detectores con mayor número de cuentas observadas y un espectro (MER) sumado sobre estos mismos cuatro detectores. Los datos de BATSE tenían tiempos de acumulación de 2, 16, 64 o 128 ms. Los formatos más apropiados para este trabajo fueron los MER, HERB y CONT. Los datos con resolución media de energía o MER contienen espectros en sólo 16 canales de energía y para un tiempo de acumulación de 16 ms para los primeros 2048 espectros, seguido por 64 ms para los 2048 espectros restantes con una extensión temporal total de 164 s. Estos datos tienen resolución media de energía y se utilizan para analizar destellos cortos y brillantes.

Los datos con alta resolución en energía o HERB contienen espectros en 128 canales de energía en un rango de 0.03 - 2 MeV en un tiempo de acumulación de 64 ms. Estos datos se utilizan para analizar destellos muy brillantes y largos, aunque no cubran todo el tiempo del destello. Los datos continuos o CONT tienen espectros en sólo 16 canales de energía con un tiempo de acumulación de 2.048 seg. Estos datos tienen resolución media de energía y se utilizan cuando el destello fue muy largo y brillante.

2.3. El detector EGRET-TASC

2.3.1. Descripción y Objetivos

El telescopio de rayos gamma energéticos o EGRET (Energetic Gamma Ray-Experiment Telescope) tenía como objetivo mapear e investigar las fuentes de radiación a altas energías entre 20 MeV y 30 GeV. Este instrumento combinaba la resolución espacial y de energía para obtener una mejor información en la posición de dichas fuentes. EGRET estaba constituido por un arreglo vertical de cámaras de chispas y un calorímetro de NaI(Tl), TASC (Total Absorption Shower Counter) de 20 cm. de espesor y área de 76 x 76 cm². TASC estaba montado debajo de la cámara de chispas. El instrumento estaba cubierto por un domo de anticoincidencia que era un plástico centellador de 2 cm. de espesor, Fig. 2.5. El campo de visión de EGRET (incluyendo las cámaras de chispas) era de 20 grados, lo que disminuía el número de destellos que se podían observar.

TASC constaba de 36 bloques de NaI(Tl) ópticamente acoplados y conectados a dos grupos de ocho tubos fotomultiplicadores (PMT). Cada grupo de fotomultiplicadores alimentaba un analizador de altura de pulsos (PHA, por sus siglas en inglés). Un PHA procesaba los eventos de energías desde 1 MeV hasta 200 MeV, mientras que el otro procesaba eventos a energías de 0.02 GeV hasta 30 GeV. Los PHAs digitalizaban las señales en 4096 canales, para después comprimirlos y almacenarlos en solo 256. A pesar de que TASC formaba parte de EGRET y estaba encargado de medir la energía de cada evento útil de la cámara de chispas, este era también un detector independiente sensible a todo tipo de partículas provenientes de cualquier dirección. Como TASC no estaba cubierto por el domo de anticoincidencia, no le era posible diferenciar entre fotones y partículas cargadas, por lo tanto la información física solo podía obtenerse de los espectros acumulados en un cierto tiempo. Su modo normal de adquisición de datos de TASC es el llamado modo solar correspondiente a un tiempo de acumulación de 32.77 seg. Como TASC no era capaz de identificar un exceso de cuentas sobre el ruido, es decir, no tenía disparador (trigger) propio, BATSE le servía como tal. Al recibir la señal

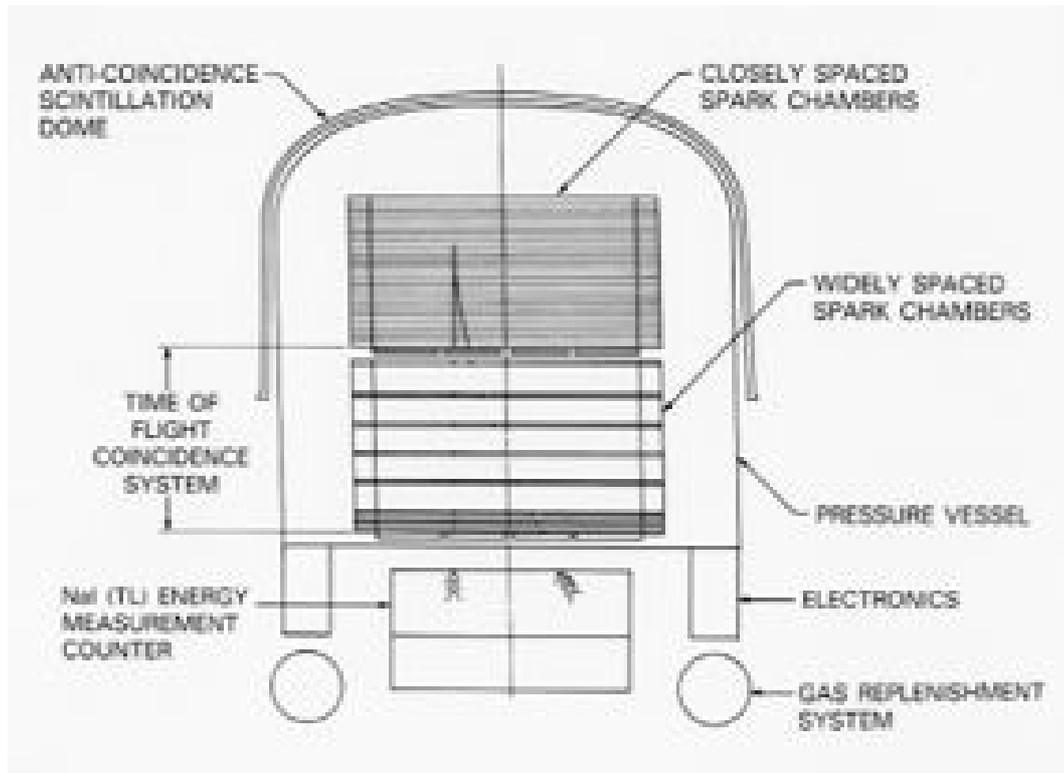


Figura 2.5: Diagrama de los componentes de EGRET. En la parte inferior del detector se encuentra el calorímetro TASC.

de BATSE, TASC cambiaba su modo de adquisición de datos al modo burst, donde la información se acumulaba en intervalos de tiempo secuenciales de 1,2,4 y 16 segundos [KA88, HA92].

2.3.2. Calibración

Dentro de la estructura de CGRO había dos materiales radioactivos con líneas espectrales definidas potasio-40 (1.46 MeV) y torio-232 (2.615 MeV). La línea de potasio-40 se usó para determinar la equivalencia entre la energía y el voltaje correspondiente a cada canal, es decir para calibrar los espectros de TASC. En este análisis la equivalencia energía-voltaje se considera constante durante una hora alrededor del momento en que se detecta un destello. Estos espectros se acumulan (de 50 a 100 destellos) para encontrar la línea de potasio-40. La equivalencia energía-voltaje se determina usando los espectros tipo solar pero sirve para calibrar los espectros tipo burst. La equivalencia

energía-voltaje (EV) se calcula de la siguiente manera:

$$EV = \frac{1,46MeV}{K40chan - ZEROchan}$$

donde $K40chan$ es el canal en el que se encuentra la línea de potasio-40 y $ZEROchan$ es el canal que corresponde a una energía de 0 MeV [NO92, TH93].

2.3.3. Tiempo Muerto

Todos los espectros ya sean del tipo solar o burst, deben ser corregidos por el tiempo muerto del detector debido principalmente a la electrónica. En el caso de la electrónica de TASC, no se conocía el tiempo muerto para cada evento (ya que además depende de la energía) Sin embargo, dos formas distintas de estimar el tiempo muerto fueron analizadas y validadas en un trabajo anterior [GO05], obteniendo que la mejor considera el tiempo de registro, digitalización y almacenamiento del convertidor digital, así como el tiempo de sondeo y tiempo de riesgo, y se explican a continuación.

Anteriormente mencionamos que el convertidor digital tarda cierto tiempo para registrar, digitalizar y almacenar un pulso. Durante este tiempo nuestro detector esta inhabilitado para digitalizar otro destello, ya que los digitalizadores necesitan de 0 a 256 μ segundos para digitalizar el evento que arriba dependiendo de su energía. Después, en alrededor de 165 μ segundos se comprime y almacena la información. Durante este proceso se sondea al sistema cada 512 μ segundos para saber si sigue ocupado o si ya está libre (tiempo de sondeo). Finalmente se toman 20 μ segundos para evitar añadir otros eventos a la información que se esta procesando (tiempo de riesgo). De esta manera se estimó el tiempo muerto del detector para cada espectro tomando en cuenta el número de cuentas en cada canal de energía con las siguientes expresiones:

$$DeadTime_{CCSP} = 10^{-6}seg(256 \sum_i (C_{last}^i N_i) + 165 \sum_i N_i + N_1)$$

donde 10^{-6} es el factor de conversión de μ seg. a seg., $256 \sum_i$ se multiplica por el factor $C_{last}^i N_i$ que depende de la energía de cada canal, es decir, dependiendo de la energía del pulso es el tiempo que tardara en almacenarlo en el canal que le corresponda según su energía. Así para el ultimo canal tomará un tiempo de 256 y un $C_{last}^i=1$. Después se añaden los 165 μ seg. que tarda en comprimir y almacenar la información de todos los canales, así como el tiempo de sondeo N_i . Finalmente a partir de la siguiente expresión

se calcula el tiempo muerto derivado de todo este proceso tomando en cuenta el tiempo muerto de registro, almacenamiento y sondeo ($DeadTime_{CCSP}$) y el tiempo de riesgo (20μ).

$$DeadTime_{CCSP} = DeadTime_{der} \exp(-DeadTime_{der} \times 20 \times 10^{-6} \text{seg})$$

2.3.4. Matriz de Respuesta

Deducir el flujo de fotones que llega al detector desde un espectro observado requiere del conocimiento de la respuesta del detector a la radiación para diferentes energías y diferentes direcciones de incidencia en el detector. Esta respuesta depende no sólo del material del detector sino también de sus alrededores, en este caso la nave espacial y los otros detectores en ella. Un detallado modelo de masa del satélite y los detectores en él se simuló con el código Monte Carlo EGS-4 [NE85]. En el código se simulan seis mil fotones para cada una de las siguientes energías: 0.75, 0.80, 0.90, 1, 1.20, 1.50, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100, 120, 150 y 200 MeV en la dirección de cada destello. La figura 2.6, muestra el número de fotones detectados a una energía dada, normalizado por el número total de fotones simulados a tres diferentes energías y dos distintas direcciones. Podemos observar que la mayoría de las energías de los fotones se reconstruyen muy cerca de su valor original. La interacción predominante es la producción de pares. Las grandes dimensiones de TASC permiten la aniquilación del positrón resultante dentro del calorímetro. Cuando la energía de los fotones aumenta, la probabilidad de detener dentro del calorímetro a los electrones resultantes decrece y la energía reconstruida de los fotones también decrece, es por esto que la distribución de energías reconstruida se ensancha conforme aumenta la energía del fotón incidente. La eficiencia de un detector se obtiene a partir de la simulación de Monte Carlo calculando:

$$E_{eff} = \frac{\# \text{ de fotones observados o detectados}}{\# \text{ de fotones simulados}}$$

entonces, el área efectiva del detector se obtiene como:

$$A_{eff} = A_{sim} \bullet E_{eff}$$

donde A_{sim} es el área considerada en la simulación que es mucho mayor y contiene el área del detector. La figura 2.7 muestra el área efectiva de TASC como función del ángulo. Como se observa, para ángulos $\sim 90^\circ$ el área efectiva es menor que 0° , esto es principalmente a que TASC no es un cubo y el área subtendida a 90° es $76 \times 20 \text{ cm}^2$ y a 0° es $76 \times 76 \text{ cm}^2$.

La respuesta de TASC fue calculada y almacenada en una matriz con cada celda correspondiente a una energía simulada y un intervalo de energía reconstruido. Cada intervalo de energía corresponde a un intervalo (bin) de energía del espectro medido. Los valores de cada celda fueron interpolados a partir de la simulación Monte Carlo.

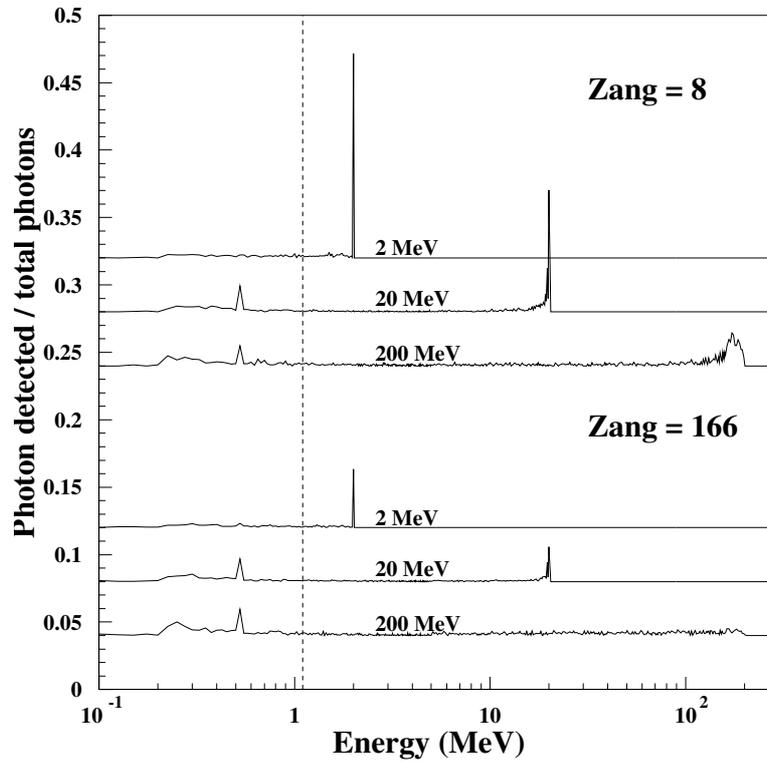


Figura 2.6: Simulación de la respuesta de TASC para fotones que llegan con diferente energía y ángulo zenit.

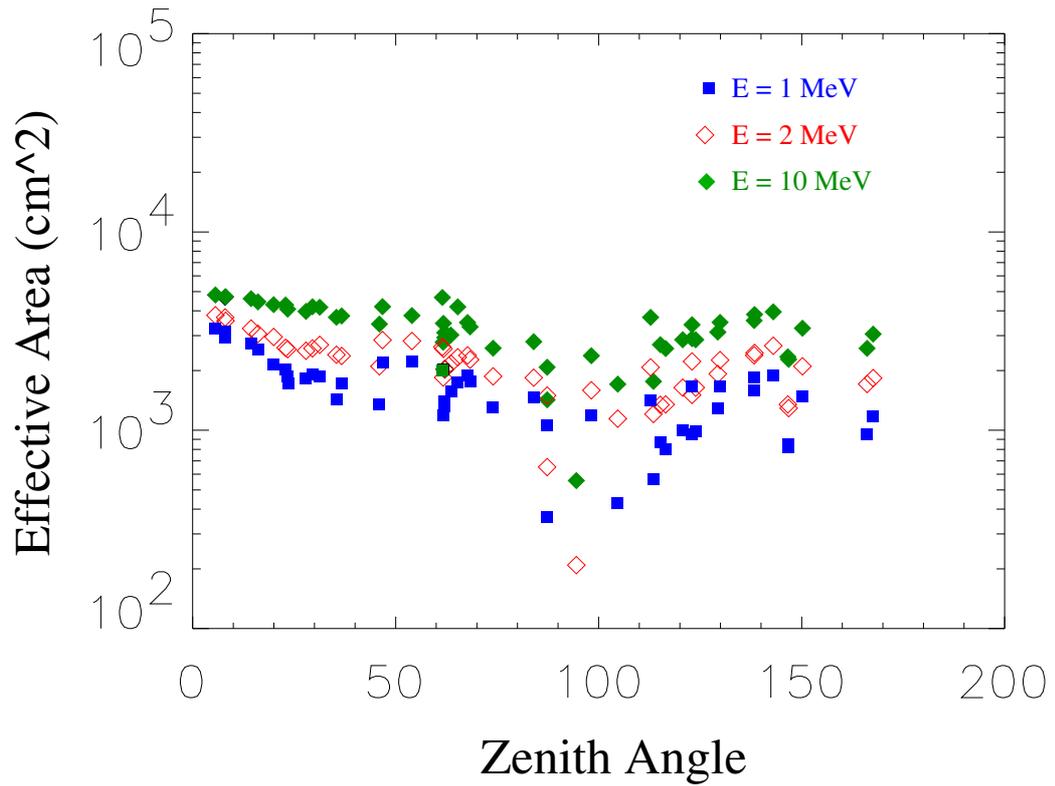


Figura 2.7: Área efectiva de TASC en función del ángulo en que arriban los fotones. El ángulo corresponde a la dirección con respecto al arreglo de cámaras de chispas. 90° representa la dirección del detector COMPTEL (ver figura 1.2).

Capítulo 3

Análisis Espectral

*”La gente realmente grande
te hace sentir que tú
también puedes serlo.”*
Mark Twain.

3.1. Ajuste espectral combinando datos de los detectores BATSE y EGRET-TASC

Las observaciones en todos los rangos de energía juegan un papel fundamental en el conocimiento de los destellos de rayos gamma. Por ejemplo, durante la fase de emisión temprana del destello, analizando la evolución temporal de sus espectros obtenemos información importante del mecanismo de radiación que toma lugar en dichos destellos. Las observaciones de BATSE han proporcionado espectros en un rango de energía de 0.02 a unos cuantos MeV a los que se les ha podido estudiar su evolución temporal. En general, cuando el espectro del destello se describe por dos funciones de potencia unidas suavemente a una energía ≈ 1 MeV, la determinación de esta energía y el índice de la función de potencia que describe el espectro a energías mayores es pobre. Esto se puede solucionar teniendo un espectro en un rango de energías más amplio. Por esto, el objetivo de este trabajo es combinar las observaciones de BATSE y EGRET-TASC para obtener un mejor espectro con un amplio rango de energía desde 0.03 hasta 200 MeV y estudiar su evolución temporal. Ya que el formalismo de este análisis es el mismo que el utilizado en el trabajo de González [GO05], en este capítulo sólo se resumen las generalidades más importantes para su comprensión.

3.2. Metodología

3.2.1. Selección de Espectros

En el trabajo de González [GO05] se analizaron los 43 destellos más brillantes tanto en fluencia de energía como en flujo de fotones del catálogo de BATSE, para los que sólo 18 destellos tuvieron más de un espectro significativo en TASC. En particular, 3 destellos mostraron una componente a energías de MeV diferente a la observada en energías de keV. El hecho de que sólo 3 destellos de 43 presentaran esta componente se ha explicado como una consecuencia de la baja sensibilidad de TASC. Sin embargo, aunque otros autores se lo han atribuido a características especiales e intrínsecas de estos tres destellos, prediciendo así la baja incidencia de esta componente en las observaciones futuras de GLAST. Por lo tanto, en este trabajo se analizan destellos con alta fluencia de energía pero bajo flujo de fotones, para completar el estudio anterior y tratar de discernir entre ambas explicaciones.

De la base de datos de BATSE, se tomó un conjunto de destellos con un flujo de fotones menor a 10 fotones y una fluencia de energía en el cuarto canal de BATSE (>300 KeV) mayor a $5 \times 10^{-4} \text{ erg/cm}^2$. En la figura 4.1 se muestran los destellos seleccionados para este análisis junto con los más brillantes del catálogo de BATSE. Se identifican los destellos que presentaron sólo uno, más de uno y ningún espectro significativo en TASC tanto en este trabajo como en el de González [GO05].

Tomando en cuenta estas dos condiciones de selección obtuvimos una lista de 25 destellos. Posteriormente se obtuvieron de la base de datos de EGRET los espectros de TASC en el modo solar y burst [ftpEGRET], y para BATSE los espectros tipo MER, HERB y CONT. Los espectros de BATSE están en una base de datos pública en formato FITS (Flexible Image Transport System) listos para su análisis con el software RMFIT [PR94] (ver sección 3.2.5). Los datos de TASC no son públicos y necesitaron ser calibrados, reducidos y corregidos por el tiempo muerto del detector. Además los espectros de TASC se revisaron uno a uno y corrigieron cuando fue posible todos los espectros que tenían errores debido a una mala e intermitente telemetría de los datos del satélite a la base terrestre. Ejemplos del tipo de errores encontrados son múltiples ceros en canales consecutivos y desfaseamiento de todo el espectro por un canal. Dentro de este proceso reiterativo para corregir los datos, existieron errores difíciles de detectar donde espectros parecían tener emisión hasta de 25σ debido a cuentas inventadas en varios canales consecutivos generando un falso exceso de señal sobre el ruido. También se calibró cada espectro como se describe en la sección 2.3.2 y se calcularon las res-

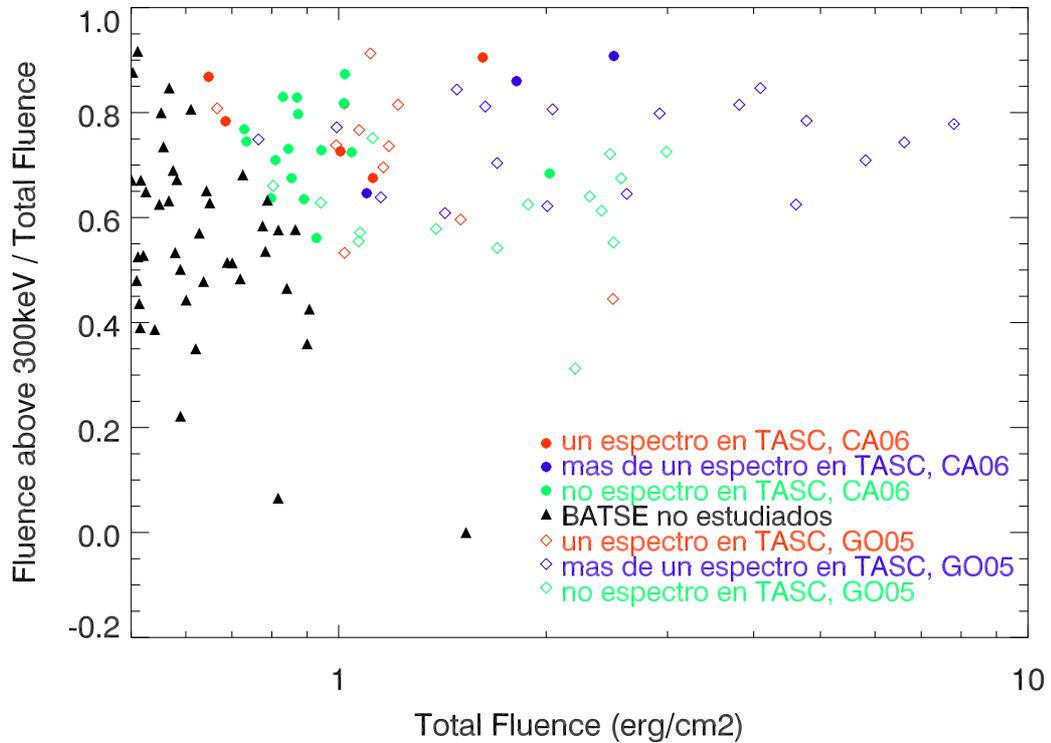


Figura 3.1: Destellos seleccionados de la base de datos de BATSE. Los triángulos negros corresponden a los destellos de BATSE sin estudiar. Los círculos sólidos son los estudiados en este análisis y los círculos huecos son los estudiados por González. Los círculos verdes corresponden a los destellos sin detección en TASC. Los círculos rojos y azules corresponden a los destellos con un espectro y más de un espectro significativa en TASC, respectivamente.

puestas del detector (ver sección 2.3.4) para cada destello. Por ultimo, los espectros se corrigieron por el tiempo muerto y se cambiaron a formato FITS para poder analizarlos con los modelos fenomenológicos usando el software RMFIT en IDL.

Para poder hacer el ajuste primero se decidía qué tipo de espectro (solar o burst) era el adecuado. Para esto se inspeccionaban ambos espectros para observar cuál abarcaba la duración del destello (T_{90}) y que formato tenía más espectros con significancia de al menos 3σ sobre el ruido. En la tabla 3.1 se muestran los 25 destellos analizados con el

número de espectros significantes (3σ) en TASC. Los destellos con más de un espectro significativo se analizaron utilizando modelos fenomenológicos.

3.2.2. Ruido

El proceso del ajuste se realizó a espectros con el ruido sustraído. El ruido se modeló canal a canal de energía. La dependencia temporal del ruido se modelaba con un polinomio de 4º grado utilizando espectros media hora antes y después del destello para luego interpolar y obtener la contribución del ruido a los espectros correspondientes al destello. Para algunos destellos la determinación del ruido fue difícil debido a que sucedían entre máximos y mínimos de la evolución temporal del ruido, haciendo que la determinación de significancia en algunos destellos fuera difícil. En estos casos se obtenían datos de 15 órbitas antes y después del destello, correspondiente a la misma posición del detector con respecto al campo magnético de la tierra, para modelar el ruido y sustraerlo correctamente.

3.2.3. Modelos fenomenológicos

Para poder entender el proceso de ajuste es necesario considerar los siguientes conceptos: la función diferencial de flujo de fotones, el espectro observable y espectro teórico. La función diferencial de flujo de fotones es el número de fotones por unidad de energía por unidad de área y por unidad de tiempo que llegan al detector de la fuente. Esta función diferencial de fotones es modificada por el detector, generando un espectro observable o número de cuentas por unidad de energía por unidad de área y por unidad de tiempo. A partir de los modelos fenomenológicos, que son una descripción del flujo diferencial de fotones por funciones simples, y simulando la respuesta del detector se obtiene un espectro teórico que se compara con el espectro observable. El proceso de encontrar el mejor espectro observable original es reiterativo. Se va ajustando el modelo hasta obtener la mejor descripción de los datos. A partir del ajuste del modelo se obtienen parámetros físicos que caracterizan a cada destello. Tales como la energía pico del espectro, la amplitud o normalización, el índice a bajas energías y el índice altas energías. La función χ^2 indica la desviación entre el espectro observable y el teórico. La mínima χ^2 nos da el mejor conjunto de parámetros. Como se menciono anteriormente estos modelos son en general dos funciones de potencia, una creciente y otra decreciente unidas en una energía dada. Las más comunes son la ley de potencias (Power Law), la función Band (Band function) y la ley de potencia suavemente fracturada (Smoothly Broken Power Law) [BA93, PR98, PR00] Fig. 3.2. A continuación se describe la función de cada modelo y sus parámetros.

BATSE id	GRB	Fluencia >300 keV	Flujo de ph<10	No. Espectros en TASC
678	910814	2.28e-04	5.82	6
7247	981203	1.56e-04	3.52	4
7766	990915	1.46e-04	8.24	1
2533	930916	1.38e-04	7.90	ninguno
3360	950117	8.91e-05	0.96	ninguno
6944	980724	8.32e-05	3.68	ninguno
2891	940323	8.32e-05	7.06	1
8008	000302	7.57e-05	8.62	ninguno
2855	940301	7.57e-05	8.05	1
6576	980124	7.31e-05	9.71	1
8087	000429	7.21e-05	5.06	ninguno
7678	990728	7.10e-05	8.29	4
2571	931008	6.96e-05	3.10	ninguno
4039	951219	6.89e-05	5.08	ninguno
1385	920210	6.87e-05	3.34	ninguno
2929	940414	6.18e-05	5.41	ninguno
2606	931026	5.77e-05	2.12	ninguno
6629	980306	5.74e-05	6.64	ninguno
7688	990802	5.65e-05	3.76	ninguno
2993	940526	5.62e-05	2.58	1
1989	921015	5.61e-05	2.65	ninguno
6115	970306	5.47e-05	2.10	ninguno
3860	951011	5.37e-05	3.81	1
5486	960605	5.21e-05	8.48	ninguno
5591	960831	5.08e-05	3.67	ninguno

Tabla 3.1: Lista de los 25 destellos analizados. La primera columna muestra el id dado por BATSE. La segunda, tercera y cuarta columna muestra la fecha de cada destello (GRB), su fluencia de energía observada por BATSE para energías mayores a 300 keV y el flujo de fotones ($<10 \text{ ph/s} \cdot \text{cm}^2$) observado por BATSE. La última columna muestra el número de espectros observados por TASC con emisión significativa mayor a 3σ .

La ley de potencia es la siguiente:

$$f(E) = AE^\alpha$$

donde A es la amplitud medida en fotones $s^{-1}cm^{-2}keV^{-1}$ y α es el índice espectral.

La función Band es la siguiente:

$$\begin{aligned} f_{GRB}(E) &= A(E/100)^\alpha e^{(-E(2+\alpha)/E_{peak})}, \\ &\text{si } E < (\alpha - \beta)E_{peak}/(2 + \alpha) = E_{break}, \\ f_{GRB}(E) &= A \{[(\alpha - \beta)E_{peak}/[100(2 + \alpha)]]^{\alpha-\beta} e^{(\beta-\alpha)}(E/100)^\beta, \\ &\text{si } E \geq (\alpha - \beta)E_{peak}/(2 + \alpha), \end{aligned}$$

donde A es la amplitud medida en fotones $s^{-1}cm^{-2}keV^{-1}$, α es el índice espectral para bajas energías, β es el índice espectral para altas energías y E_{peak} es la energía pico en el espectro y E esta dado en keV.

La función que describe al modelo de Smoothly Broken Power Law es la siguiente:

$$f_{SBPL}(E) = A(E/E_{piv})^\beta 10^{(\beta-\beta_{piv})},$$

con

$$\begin{aligned} \beta &= m\Delta \ln(e^\alpha + e^{-\alpha}/2), \\ \beta_{piv} &= m\Delta \ln(e^{\alpha_{piv}} + e^{-\alpha_{piv}}/2), \\ \alpha &= \log_{10}(E/E_b)/\Delta, \quad \alpha_{piv} = \log_{10}(E_{piv}/E_b)/\Delta, \\ m &= \lambda_2 - \lambda_1/2, \quad b = \lambda_1 + \lambda_2/2 \end{aligned}$$

donde A es la amplitud en $s^{-1}cm^{-2}keV^{-1}$, E_{piv} es la energía de pivote, λ_1 es el índice inferior de la ley de potencia, E_b es el corte de energía medido en keV, Δ es el corte de escala medido en décadas de energía y λ_2 es la índice superior de la ley de potencia.

Como se observa en la figura 3.2, la función de la ley de potencias tiene un comportamiento monótono creciente o decreciente y se utiliza cuando los datos tiene un comportamiento lineal en una gráfica log-log. Las funciones Band y SBPL son funciones crecientes que alcanzan un máximo para después decrecer. Sin embargo, la función Band tiene cambios suaves alrededor de la energía de transición o pico en comparación

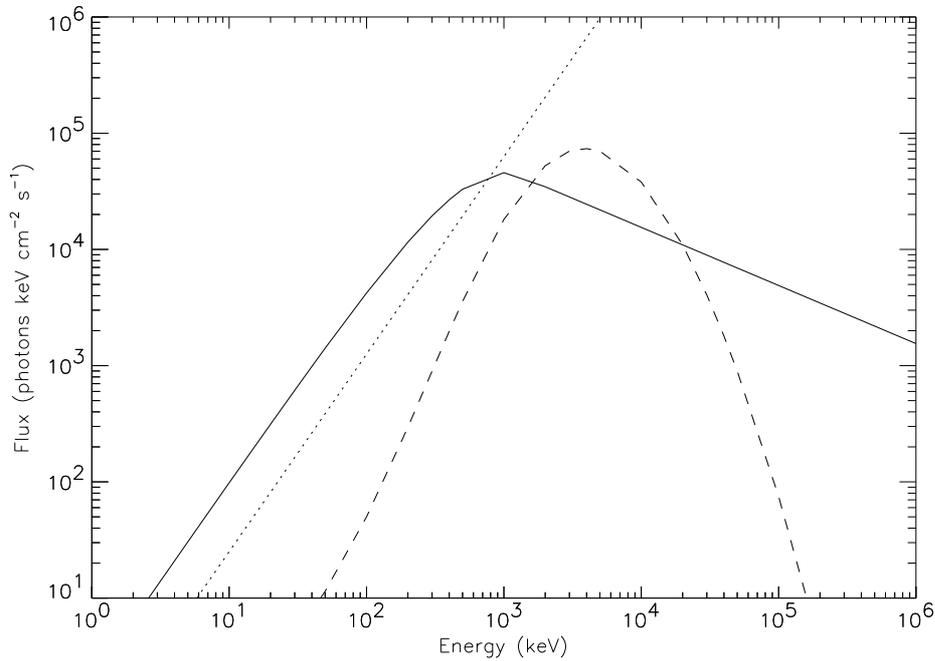


Figura 3.2: *Diferentes modelos fenomenológicos para la función diferencial de flujo de fotones. La línea punteada muestra una ley de potencia, la curva solida la función SBPL y la curva segmentada la función Band.*

con la función SBPL que tiene cambios abruptos. Ambas funciones se utiliza cuando el pico esta más allá del rango de BATSE ($>MeV$), sin embargo la función Band es incapaz de describir el comportamiento de los datos cuando el E_{peak} se encuentra a las energías más altas debido a que su suave comportamiento no le permite ajustar los últimos datos. Por ejemplo el E_{peak} del destello GRB940127 esta en el limite del rango de BATSE y la función Band es incapaz de determinar el valor de β , por eso que se fijo a un valor promedio, en cambio la función SBPL permite un cambio abrupto y puede obtener el valor de β burdamente, fig.3.4.

En este análisis se utilizó la función Band ya que para nuestros resultados a altas energías es indiferente cual modelo usar. Las gráficas 3.3 y 3.4 muestran los valores del índice espectral a bajas (α) y altas energías (β) del ajuste utilizando las funciones de Band y SBPL a datos de BATSE y TASC, de una muestra de cinco destellos (GRB920311, GRB920622, GRB930506, GRB940127 y GRB940703) analizados en el

trabajo de González [GO05]. Observamos que los valores de α difieren en ambos modelos ya que están gobernados por los datos y errores de BATSE que se deben a fluctuaciones físicas del evento. En cambio los valores de β difieren muy poco en ambos modelos y se encuentran dentro de línea sólida que indica la igualdad de los valores en ambos modelos debido a que los errores a altas energías se deben a fluctuaciones estadísticas de los datos de TASC. La figura 3.5 ejemplifica la dispersión de los datos de BATSE y TASC.

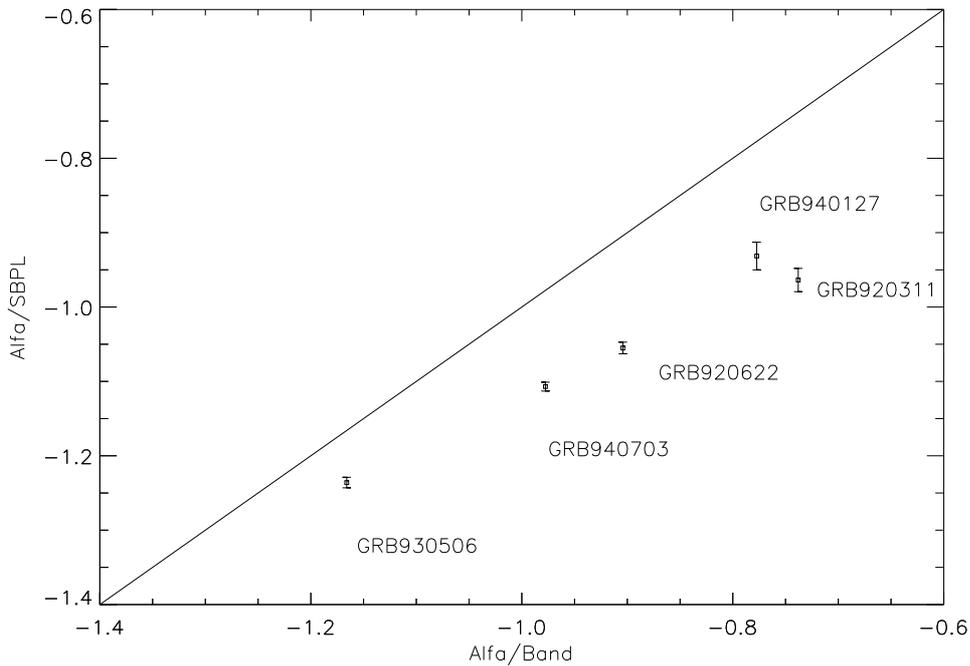


Figura 3.3: Valor del índice espectral para bajas energías, α , para la función de Band y SBPL, con sus respectivos errores, de una muestra de cinco de destellos usando los datos de BATSE. La línea sólida indica la igualdad de los valores en ambos modelos. Observamos que α es diferente en cada modelo ya que esta gobernado por los errores de los datos de BATSE que se deben a fluctuaciones físicas del evento.

3.2.4. Factor de Normalización

Cuando se quiere combinar datos de diferentes detectores se debe considerar un factor de normalización en el ajuste debido a que no se conoce perfectamente la res-

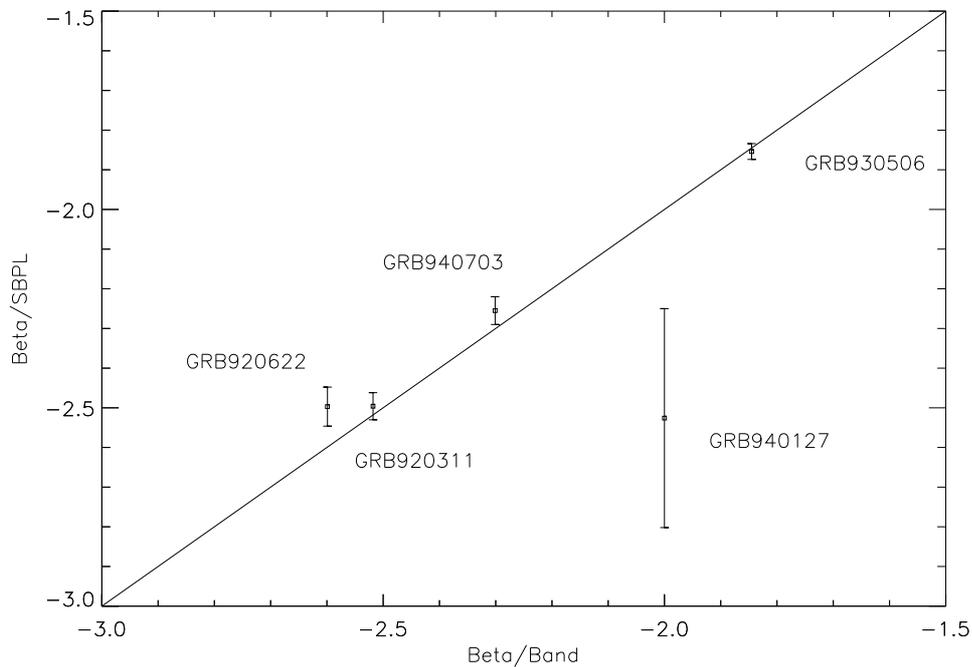


Figura 3.4: Valor del índice espectral para altas energías, β , para la función Band y SBPL, con sus respectivos errores. La línea sólida indica la equivalencia de ambos modelos. Observamos que la determinación de β no depende del modelo. La determinación de β de GRB940127 es burda usando la función SBPL ya que su E_{peak} está en el límite de rango de BATSE, es por eso que su incertidumbre es grande. En cambio la función Band es incapaz de determinar la β y por eso se fija a un valor promedio.

puesta de los detectores a la radiación. La respuesta de los detectores depende de sus componentes y sus alrededores. En nuestro caso la respuesta del detector BATSE en función de la dirección del destello es mejor conocida que la del detector TASC, ya que BATSE cuenta con 8 detectores LAD situados en cada esquina de la nave espacial y siempre hay un detector que observe el evento sin atravesar parte de otro detector o del satélite. En cambio TASC está situado en la parte superior del satélite pero en la parte baja del detector completo EGRET. Por lo tanto, cuando un destello sucede por debajo del satélite, la respuesta del detector debe incluir una buena descripción o modelo del satélite que atraviesa la emisión. En nuestro ajuste se obtiene el factor de normalización de cada destello y los datos de TASC son normalizados a los de BATSE.

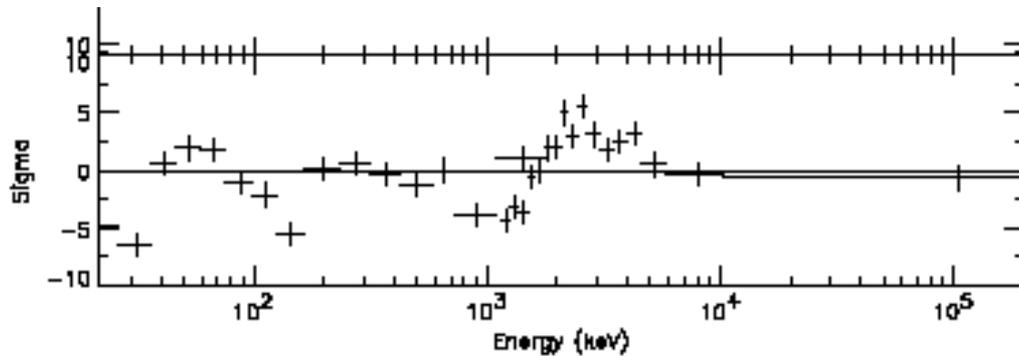


Figura 3.5: *Dispersión de los datos de BATSE y TASC. Esta gráfica muestra la dispersión en sigmas de los datos de BATSE y TASC con respecto al ajuste. Las cruces $< 1\text{MeV}$ son los datos de BATSE y tienen fluctuaciones físicas, mientras que las cruces $> 1\text{MeV}$ son los datos de TASC que tienen fluctuaciones estadísticas.*

3.2.5. Ajustes Espectrales

El ajuste de modelos se lleva a cabo por medio del software RMFIT escrito por la colaboración de BATSE. Este programa trabaja dentro del ambiente de IDL y tiene las siguientes opciones interactivas:

- Selección de espectros y canales de energía para el ajuste espectral.
- Selección de espectros y canales de energía considerados para modelar el ruido.
- Suma y multiplica diferentes modelos fenomenológicos, incluyendo funciones definidas por el usuario, para describir el flujo diferencial de fotones.
- Mezcla programas compatibles a través de IDL.
- Combina varios conjuntos de datos de diferentes detectores, instrumentos o naves espaciales. Esto es debido a que se puede incluir un factor de normalización entre los conjuntos de datos.

En resumen el proceso de ajuste es el siguiente:

1. Se combinan los espectros de BATSE hasta empatar los tiempos correspondientes a los espectros de TASC. Por ejemplo para el destello GRB990728 se tienen espectros con un tiempo en TASC de -11 a 21 seg y 21 a 54 seg. Entonces se juntan espectros de BATSE para tener los mismos intervalos de tiempo, fig. 3.6 y 3.7.

2. En los espectro de BATSE y TASC seleccionamos los que corresponden al destello y ajustamos el ruido alrededor de estos espectros aproximadamente 500 seg. antes y después del destello, como se describió en la sección 3.2.2. Para determinar la significancia de los espectros, se seleccionan uno por uno tanto en BATSE como en TASC, y se veía que tan significantes son respecto al ruido en su tasa de conteo como función de la energía. Su significancia debe ser al menos $\geq 3\sigma$ sobre el ruido. También se eliminaron destellos falsos debido a errores en los datos que provocaban un falso exceso de señal sobre el ruido. El modelaje del ruido no es trivial y es muy importante para distinguir entre un destello y variaciones del ruido. Principalmente en destellos que sucedían entre máximos y mínimos del ruido. En este caso se comparó con datos de 15 órbitas antes y después del destello para modelar y comparar el ruido. Las figuras 3.6 y 3.7 muestran los espectros significantes del destello GRB990728 en BATSE y TASC respectivamente, y el ajuste del ruido. En este caso, el ruido se ajusta a partir de $t=-100$ seg hasta $t=400$ seg. en BATSE debido a la falta de datos. La figura 3.8 muestra la dependencia con la energía de los espectros seleccionados de BATSE y TASC. Se puede observar el exceso de cuentas sobre el ruido debido al destello observado.
3. Tomando en cuenta los espectros que corresponden al destello en TASC y BATSE, se ajusta la función Band junto con el factor de normalización, para combinar los datos de los dos detectores. En este análisis se fijo el factor de normalización durante toda la duración del destello. Su valor fue obtenido a partir de ajustar el espectro más significativo en TASC con su correspondiente en BATSE.
4. Una vez ajustado el modelo, se obtienen varias gráficas que nos dan información del destello. La gráfica con más significado físico y que facilita analizar los detalles del espectro es la que nos muestra el flujo de energía por unidad de logaritmo de energía en función de la energía ($\nu F\nu$). Además se obtienen los parámetros que caracterizan al destello tales como E_{peak} , Amplitud, α, β y por medio de la χ^2 se evalúa que tan bueno es el ajuste.

Los resultados de los ajustes se muestran en el siguiente capítulo.

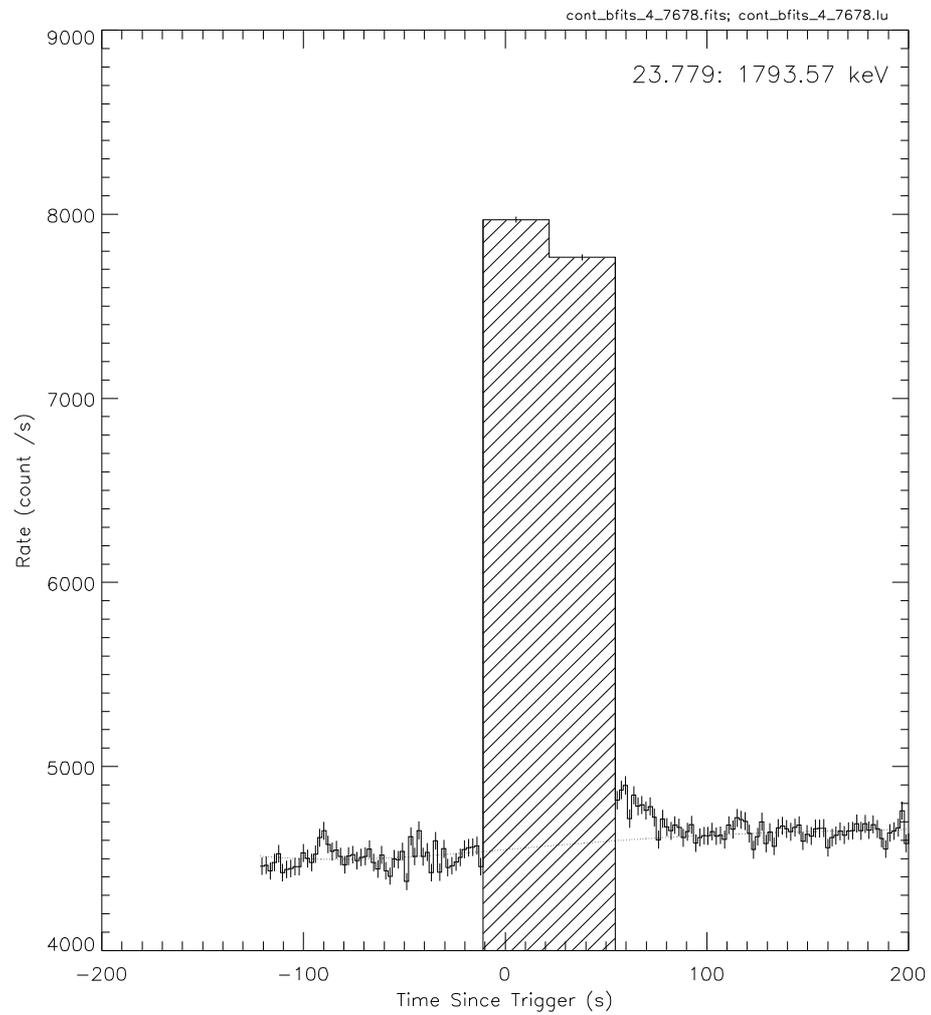


Figura 3.6: Curva de luz observada por BATSE para el destello GRB990728. Los símbolos representan los datos de BATSE. La línea sólida corresponde al polinomio de 4^o grado que mejor describe al ruido. La parte sombreada corresponde a los espectros de BATSE combinados para empalmar los tiempo de los espectros de TASC.

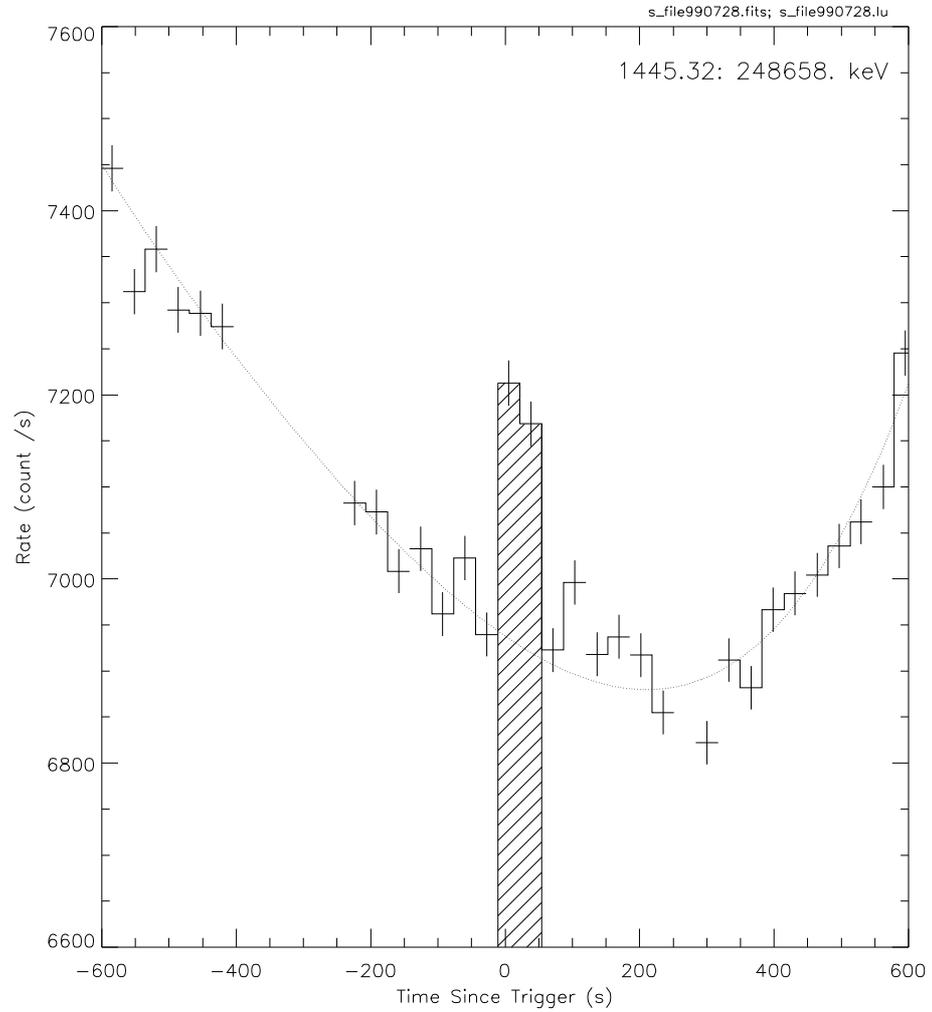


Figura 3.7: Curva de luz observada por TASC para el destello GRB990728. Los símbolos representan los datos de TASC. La línea sólida corresponde al polinomio de 4º grado que mejor describe al ruido. La parte sombreada corresponde a los espectros significantes en TASC.

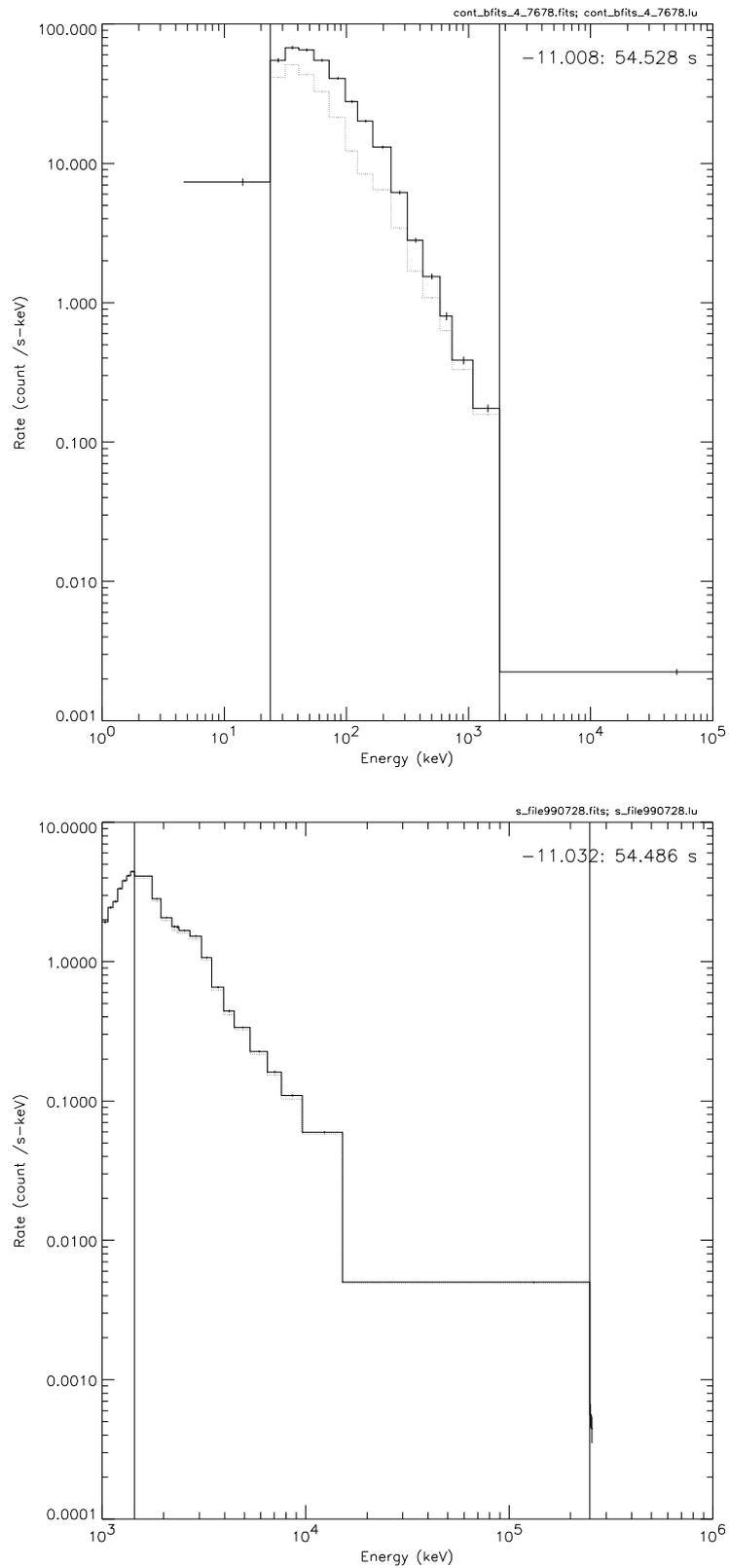


Figura 3.8: Tasa de conteo observada por BATSE (arriba) y TASC (abajo) como función de la energía para el destello GRB990728. Los símbolos son los datos, la línea punteada es la interpolación del ruido durante el destello como función de la energía.

Capítulo 4

Resultados

*"Aprende de ayer, vive para hoy
y ten esperanza en mañana."*
Thomas Jefferson.

4.1. Espectros con Emisión

Este análisis se enfocó sólo en los destellos con más de un espectro significativo en EGRET-TASC, a fin de caracterizar los espectros a altas energías y observar su evolución temporal. De los 25 destellos estudiados sólo 9 destellos presentaron emisión significativa mayor a 3σ en los espectros de EGRET-TASC. Estos destellos son GRB910814, GRB981203, GRB990915, GRB940323, GRB940301, GRB980124, GRB990728, GRB940526, y GRB951011. Sólo 3 de ellos (GRB981203, GRB910814 y GRB990728) tienen más de un espectro significativo en TASC. Estos destellos se encuentran entre los 40 más brillantes del catalogo de BATSE (> 300 MeV) y se muestran en la figura 4.1 junto con los destellos más significantes del trabajo de González [GO05]. Se observa que los destellos que tuvieron emisión están situados en la parte superior derecha y corresponden a los de mayor fluencia y con mayor parte de la energía observada dentro del 4to. canal de BATSE.

La tabla 4.1 muestra el tipo de espectro de TASC usado en el análisis, el T_{90} de cada destello determinado por los datos de BATSE y el tiempo cubierto por los espectros significantes en TASC. También se indica si la curva de luz del destello vista por BATSE tiene un sólo pico o múltiples picos, Fig.4.2. Las curvas de luz de BATSE y TASC de estos tres destellos se muestran en las figuras 4.3, 4.4 y 4.5.

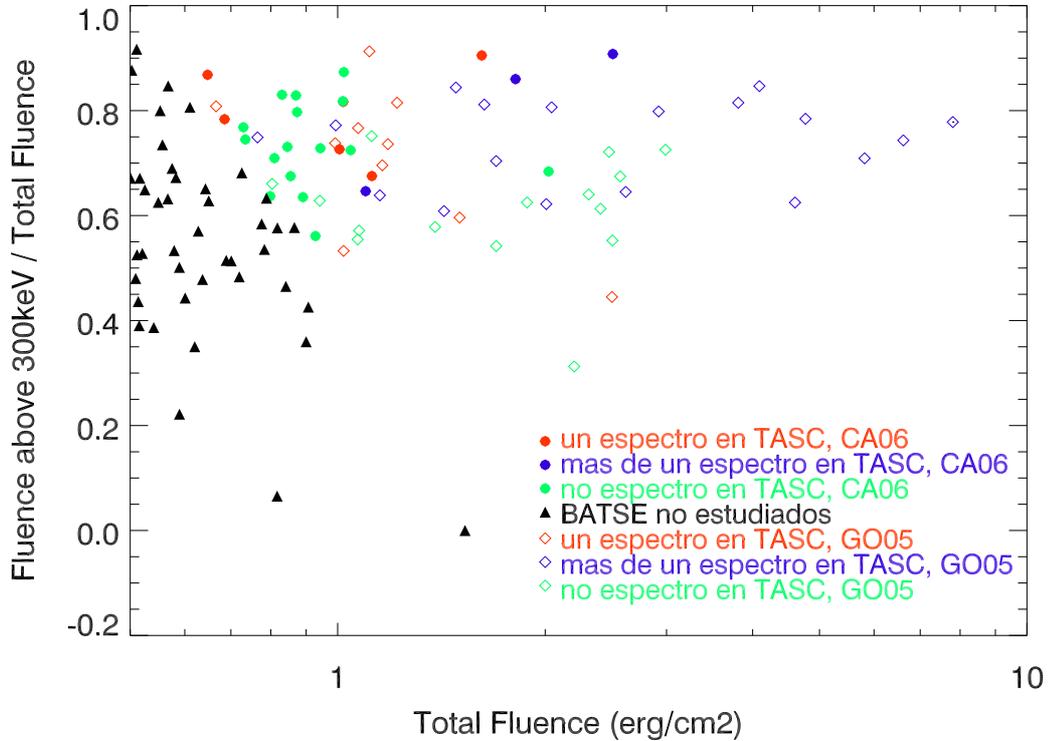


Figura 4.1: Destellos seleccionados de la base de datos de BATSE. Los triángulos negros corresponden a los destellos de BATSE sin estudiar. Los círculos sólidos son los estudiados en este análisis y los diamantes son los estudiados por González. Los círculos y diamantes verdes corresponden a los destellos sin detección en TASC. Los círculos y diamantes rojos corresponden a los destellos con sólo un espectro significativo en TASC. Los círculos y diamantes azules son los destellos con más de un espectro significativo en TASC.

4.2. Resultados del Ajuste Espectral

La tabla 4.2 muestra el tipo de espectro de BATSE y el factor de normalización utilizado en el ajuste y determinado como se explica en la sección 3.2.4. La figura 4.6 muestra la relación entre el factor de normalización y la dirección del destello de los datos analizados en este trabajo junto con los analizados por González [GO05]. Se observa la dependencia de la respuesta de TASC con la dirección del destello

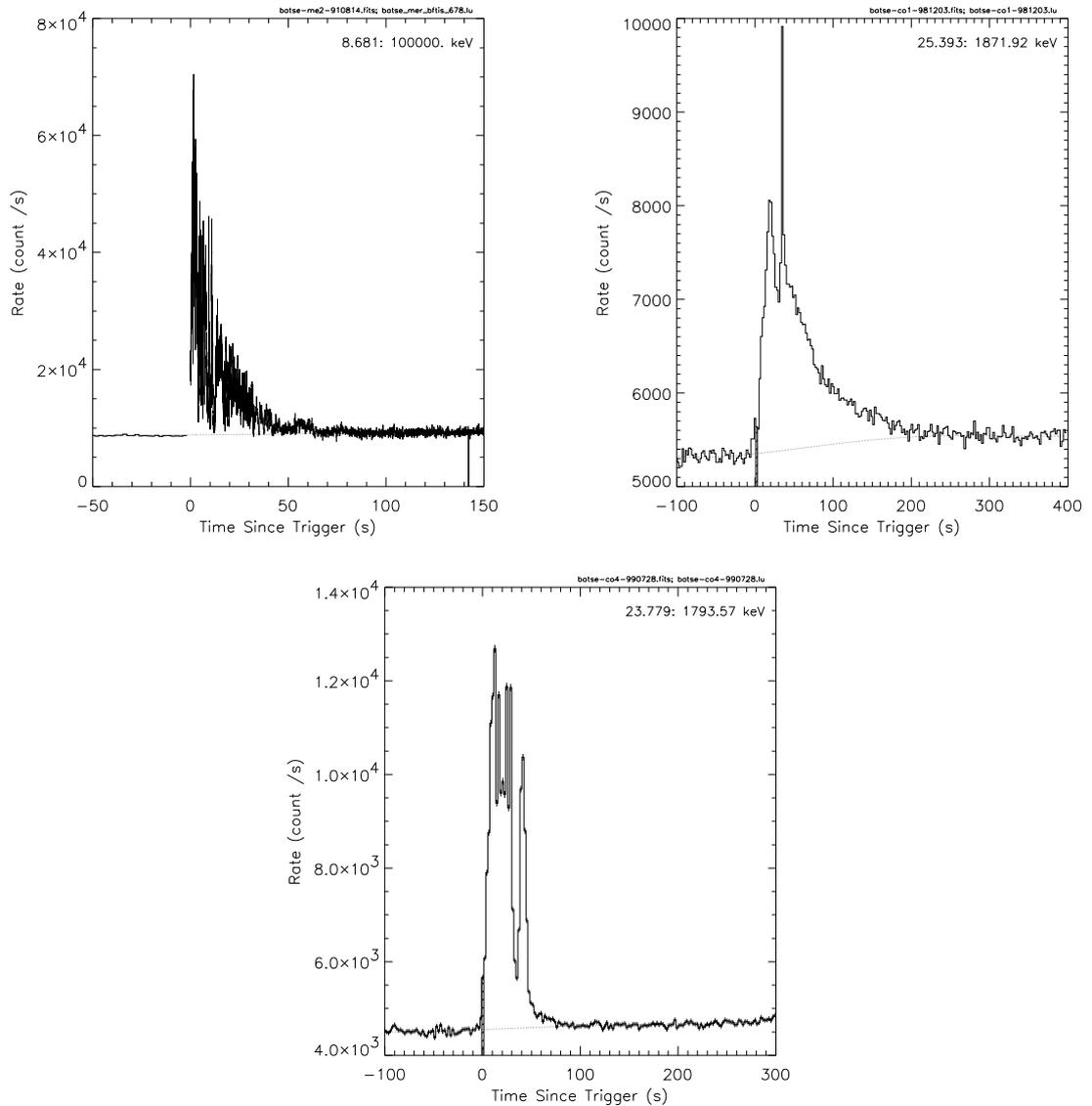


Figura 4.2: Estructura temporal de las curvas de luz. La curva de luz del destello GRB910814 tiene un solo pico (superior-izquierda). En cambio las curvas de luz de los destellos GRB981203 (superior-derecha) y GRB990728 tienen 2 picos (inferior). La línea sólida representa el polinomio de 4^o grado que mejor describe al ruido.

independientemente del tipo de espectro CONT y HER. El comportamiento de los

BATSE id	GRB	Tipo de espectro	BATSE T90 (s)	Tiempo de TASC (s)	Multipicos
678	910814	4b	53.89	22.88 (0.42)	n
7247	981203	1b, 3s	180.74	123.00 (0.68)	y
7766	990915	1s	77.95	26.00 (0.33)	n
2891	940323	1b	60.74	3.99 (0.06)	n
2855	940301	1s	42.50	32.77 (0.77)	n
6576	980124	1s	45.06	32.77 (0.73)	y
7678	990728	2s	42.75	43.45 (1.02)	y
2993	940526	1b	44.80	3.99 (0.89)	n
3860	951011	1b	31.49	1.99 (0.63)	n

Tabla 4.1: Lista de espectros con emisión significativa ($>3\sigma$) en EGRET-TASC, de los cuales sólo 3 tienen más de un espectro con mayor significancia para ser analizados. La primera columna muestra el id dado por BATSE, la segunda columna muestra la fecha de cada destello (GRB). La tercer columna muestra el tipo de espectro (solar o burst) de TASC usando en el análisis. La cuarta y quinta columna muestran el T90 determinado por BATSE y el tiempo determinado por TASC de cada destello. La cifra entre paréntesis corresponde al cociente entre tiempo de TASC y el T90 de BATSE. La ultima columna indica si el destello presenta uno o más picos en su curva de luz.

espectros tipo MER se debe a que son el promedio de los cuatro detectores más brillantes que observaron al destello.

La tabla 4.3 muestra los valores del ajuste a los espectros sólo de BATSE usando la función Band. También se muestra el valor de χ^2 y los grados de libertad (d.o.f.) en el ajuste. El $\chi^2/\text{d.o.f.}$ fue minimizado para encontrar los mejores parámetros de la función Band que describen los datos.

En la tabla 4.4 se muestran los parámetros del ajuste utilizando la función Band, tomando en cuenta los espectros de ambos detectores. Comparando los parámetros en cada intervalo de tiempo para cada destello en las tablas, observamos que se mejoran dichos valores ya que en general su incertidumbre es menor, así como el cociente $\chi^2/\text{d.o.f.}$ Esto se muestra más cuando el E_{peak} y el índice de altas energías, β , se encuentran fuera del rango de BATSE. Por ejemplo el destello GRB910814 en su primer episodio (0 a 1 seg.) tiene un E_{peak} de 1793 ± 388 keV cuando se ajusta sólo BATSE y 2267 ± 107 keV con datos de BATSE y TASC. El valor neto de $\chi^2/\text{d.o.f.}$ me indica el mejor ajuste y esta determinado por los datos de BATSE debido a que el error

BATSE id	GRB	Espectro de BATSE	N
678	910814	mer	0.88
7247	981203	cont	0.37
7678	990728	cont	0.55

Tabla 4.2: Información de los destellos de BATSE con más de un espectro significativa en TASC. La primera y segunda columna muestran el id dado por BATSE y la fecha de cada destello (GRB). La tercer y cuarta columna muestran el tipo de espectro de BATSE y el factor de normalización para cada destello utilizado en el análisis.

asociado es menor que el asociado a los datos de TASC. Sin embargo incluyendo datos de TASC lo importante es minimizarlo y además la determinación de los parámetros es mucho mejor.

En las gráficas 4.7, 4.8 y 4.9 podemos observar el flujo de energía y la evolución temporal del espectro de los destellos GRB910814, GRB981203 y GRB990728 respectivamente. Las cruces representan los datos de BATSE y los círculos los datos de EGRET-TASC respectivamente. La línea sólida representa el modelo Band ajustado. A continuación se discuten los resultados de estos destellos.

4.2.1. GRB910814

El destello GRB910814 presento un sólo pico en su curva de luz de BATSE y tuvo 4 espectros significantes en TASC. La emisión de este destello fue de 5σ sobre el ruido en BATSE y 10σ sobre el ruido en TASC. Su espectro muestra el comportamiento general observado para la mayoría de los destellos del trabajo de González [GO05], sin cortes a altas energías al menos hasta 200 MeV (Fig.4.7) y descrito por una sola función Band. De la tabla 4.4 se deduce que el destello tiene una evolución temporal del Epeak de duro a suave (hard-to-soft), es decir, su E_{peak} evoluciona hacia menores energías. En cambio su β tiene un evolución temporal de suave a duro (soft-to-hard), es decir, su índice para altas energías se vuelve menos negativo. Además es un destello muy brillante y corto, su flujo de energía tiene un pico muy intenso (Fig.4.7) con una amplitud de 10^4 (fotones $keV/s cm^2$) en 2 MeV en el primer episodio (0-1 seg) y de 7×10^3 en su ultimo episodio (7-22 seg). Aunque la emisión siguió después de los 22 seg. no hubo espectro en TASC que cubriera ese tiempo (Fig.4.3) debido a la selección entre espectros tipo burst y solar. Este destello tuvo limitaciones de los datos no del detector.

4.2.2. GRB981203

El destello GRB981203 presento dos picos en su curva de luz de BATSE y tuvo 3 espectros significantes en TASC. La emisión de este destello fue de 7σ sobre el ruido en BATSE y 6σ sobre el ruido en TASC. Su espectro muestra el comportamiento general observado para la mayoría de los destellos del trabajo de González [GO05], sin cortes a altas energías al menos hasta 11 MeV (Fig.4.8) y descrito por una sola función Band. La evolución temporal en el primer episodio (7 a 21 seg.) del primer pico no se puede determinar ya que sólo se tiene el valor promedio del Epeak contenido en un espectro tipo burst. El segundo pico tiene una evolución temporal de suave a duro (soft-to-hard) en Epeak y de duro a suave en β . Este destello fue tenue con un flujo de energía menor a 10^3 fotones $keV/s cm^2$, y tuvo una detección marginal en su último episodio (64-97 seg, Fig.4.8) presentando un Epeak >4.5 MeV que no esta bien determinado. En este caso el problema es la sensibilidad del detector porque el pico esta a muy altas energías y el índice de altas energías no esta muy pronunciado. El Epeak observado es el más alto que se ha presentado en los destellos analizados tanto en este trabajo como en el de González, implicando mayores factores de Lorentz a los inferidos en otros trabajos.

4.2.3. GRB990728

El destello GRB990728 presento dos picos en su curva de luz de BATSE y tuvo 2 espectros significantes en TASC. La emisión de este destello fue de 7σ sobre el ruido en BATSE y 5σ sobre el ruido en TASC. Su espectro muestra el comportamiento general observado para la mayoría de los destello del trabajo de de González [GO05], sin cortes a altas energías al menos hasta 10 MeV (Fig.4.9) y descrito por una sola función Band. La evolución temporal del destello no se puede determinar debido a que cada espectro tiene información de un pico diferente. Este destello fue tenue con flujos de energía $< 2 \times 10^3$ fotones $keV/s cm^2$ y largo, con un β bastante suave y un Epeak muy bajo hacia energías de keV. Los datos de TASC cubrieron la duración del destello, es decir, al menos durante 54 seg. hubo emisión a altas energías para ser detectada por TASC.

4.3. Resultados Generales

De 25 destellos estudiados, 9 tuvieron emisión significativa ($> 3\sigma$) y sólo 3 tuvieron más de un espectro significativo en TASC. Los espectros de estos tres destellos (GRB910814, GRB981203, GRB990728) muestran el comportamiento general observado en la mayoría de los destellos de González [GO05], sin cortes a altas energías y descrito por una sola función Band. Ningún destello muestra evidencia de alguna

componente a altas energías.

Se observo el mayor Epeak reportado en la literatura (>4.5 MeV) en el destello GRB981203, teniendo fuertes implicaciones físicas, pues implicaría el factor de Lorentz más alto determinado en trabajos anteriores. Lo que significa que se esperan mayores velocidades a las que se aceleran los electrones para producir esta energía.

El que sólo se hayan observado 9 destellos con TASC, hace pensar que los destellos restantes no fueron lo suficientemente brillantes para ser detectados debido a la baja sensibilidad de TASC. Finalmente con este análisis se ha completado el estudio del catálogo de BATSE de destellos brillantes.

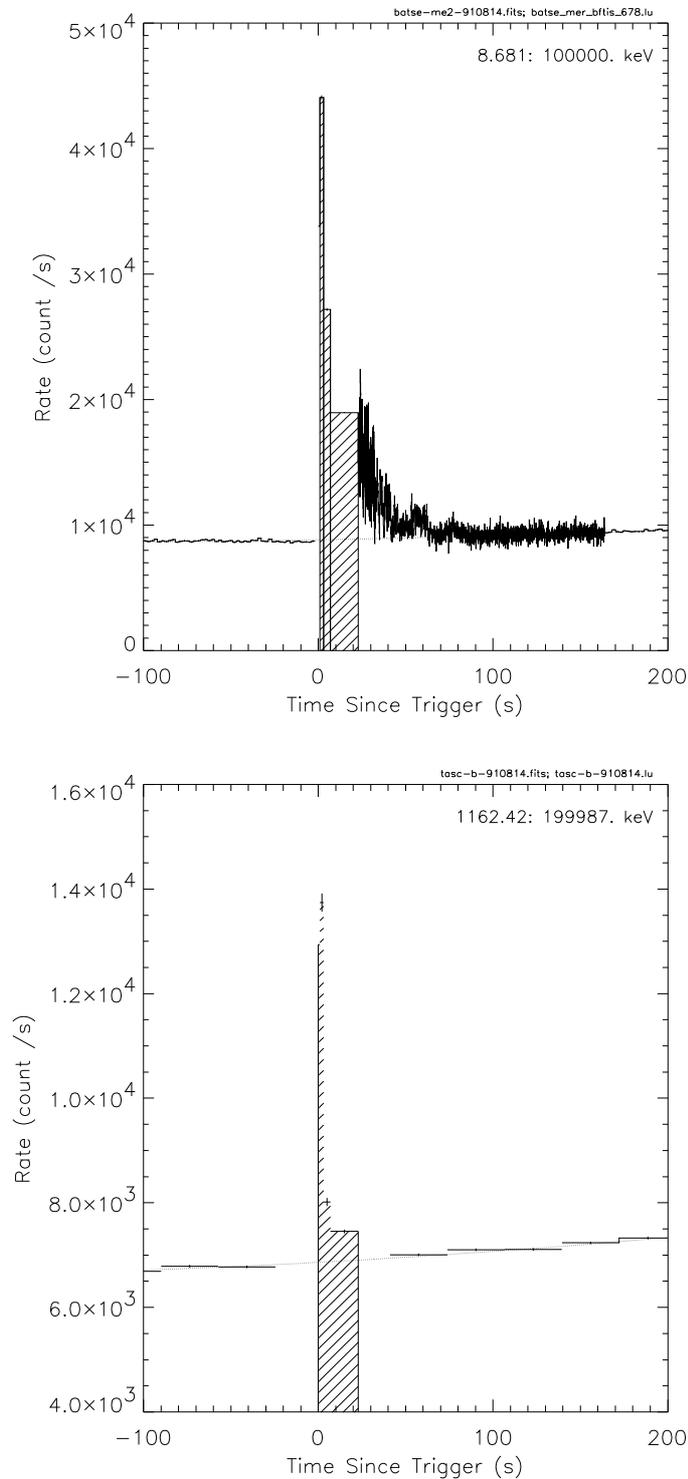


Figura 4.3: Curvas de luz del destello GRB910814. La curva superior es la observada por BATSE y la curva inferior la observada por TASC. La línea sólida en ambas curvas representa el polinomio de 4^o grado que mejor describe al ruido. La parte sombreada (superior) corresponde a los espectros de BATSE combinados para empalmar los tiempo de los espectros de TASC (inferior).

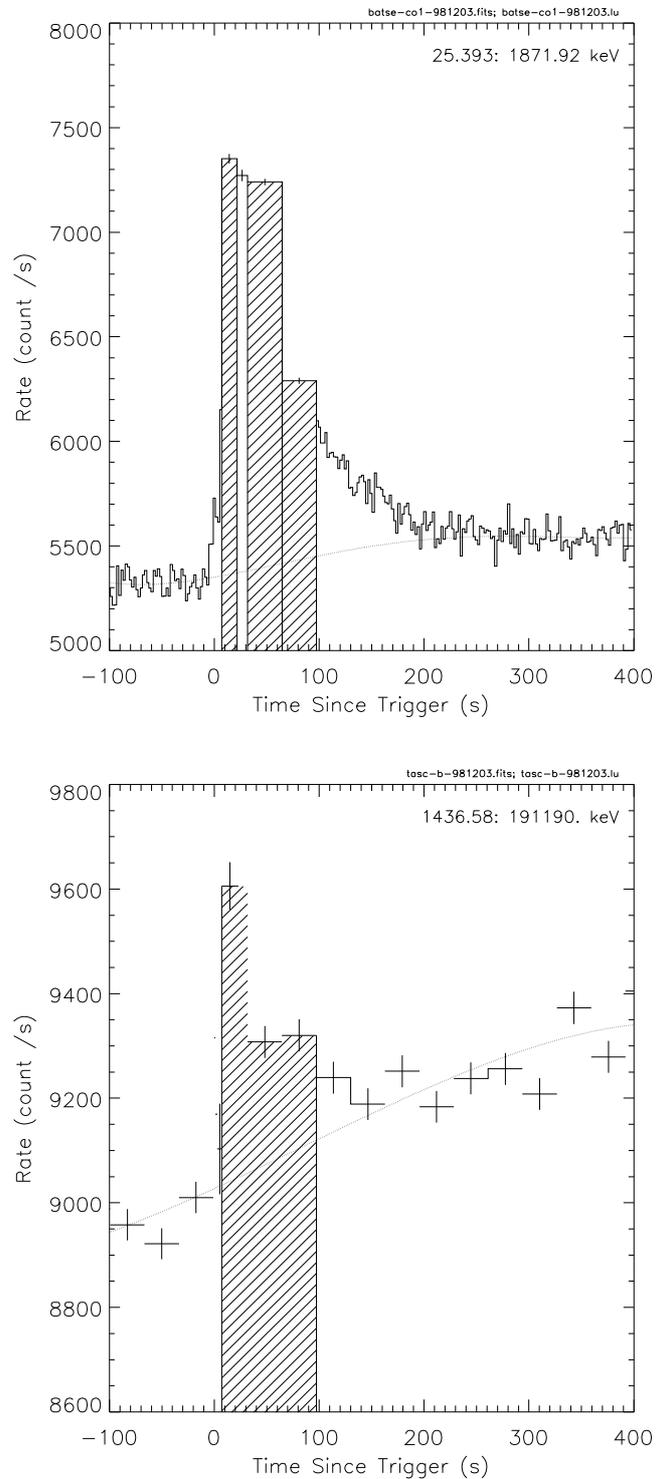


Figura 4.4: Curvas de luz del destello GRB981203. La curva superior es la observada por BATSE y la curva inferior la observada por TASC. La línea sólida en ambas curvas representa el polinomio de 4º grado que mejor describe al ruido. La parte sombreada (superior) corresponde a los espectros de BATSE combinados para empalmar los tiempo de los espectros de TASC (inferior).

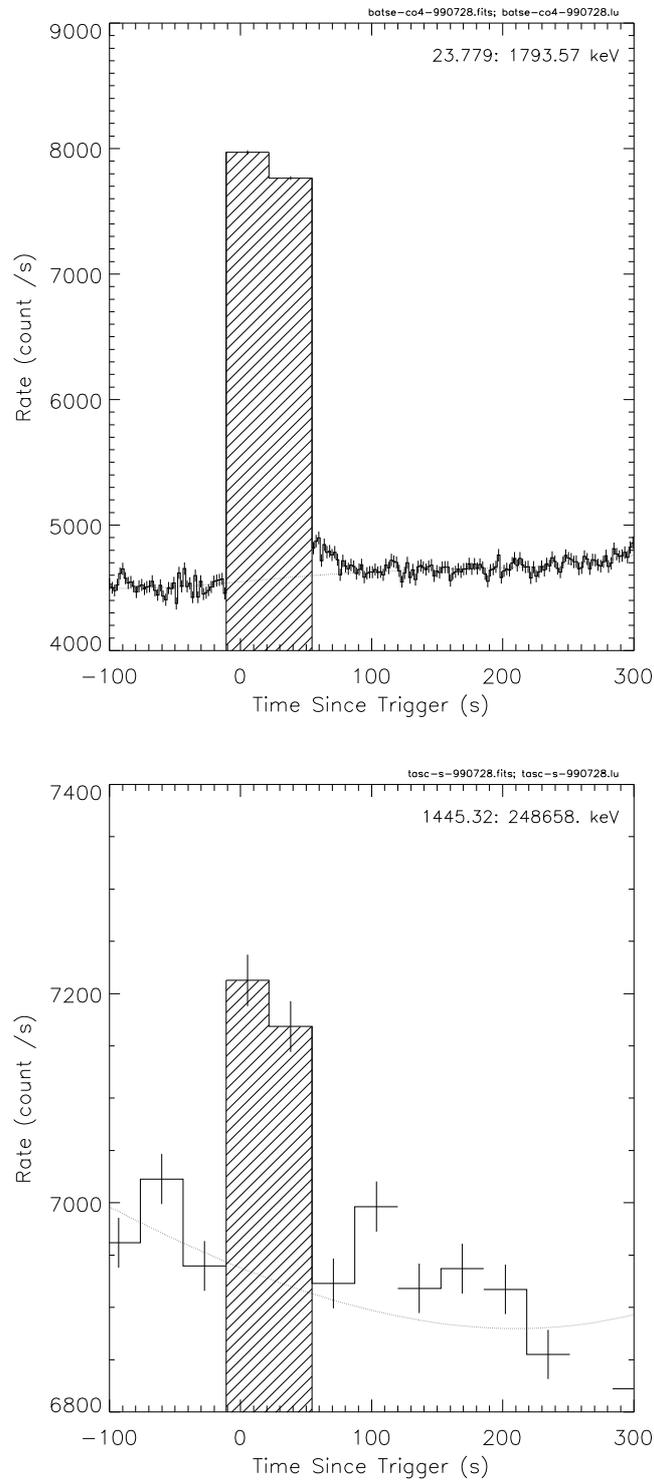


Figura 4.5: Curvas de luz del destello GRB990728. La curva superior es la observada por BATSE y la curva inferior la observada por TASC. La línea sólida en ambas curvas representa el polinomio de 4º grado que mejor describe al ruido. La parte sombreada (superior) corresponde a los espectros de BATSE combinados para empalmar los tiempo de los espectros de TASC (inferior).

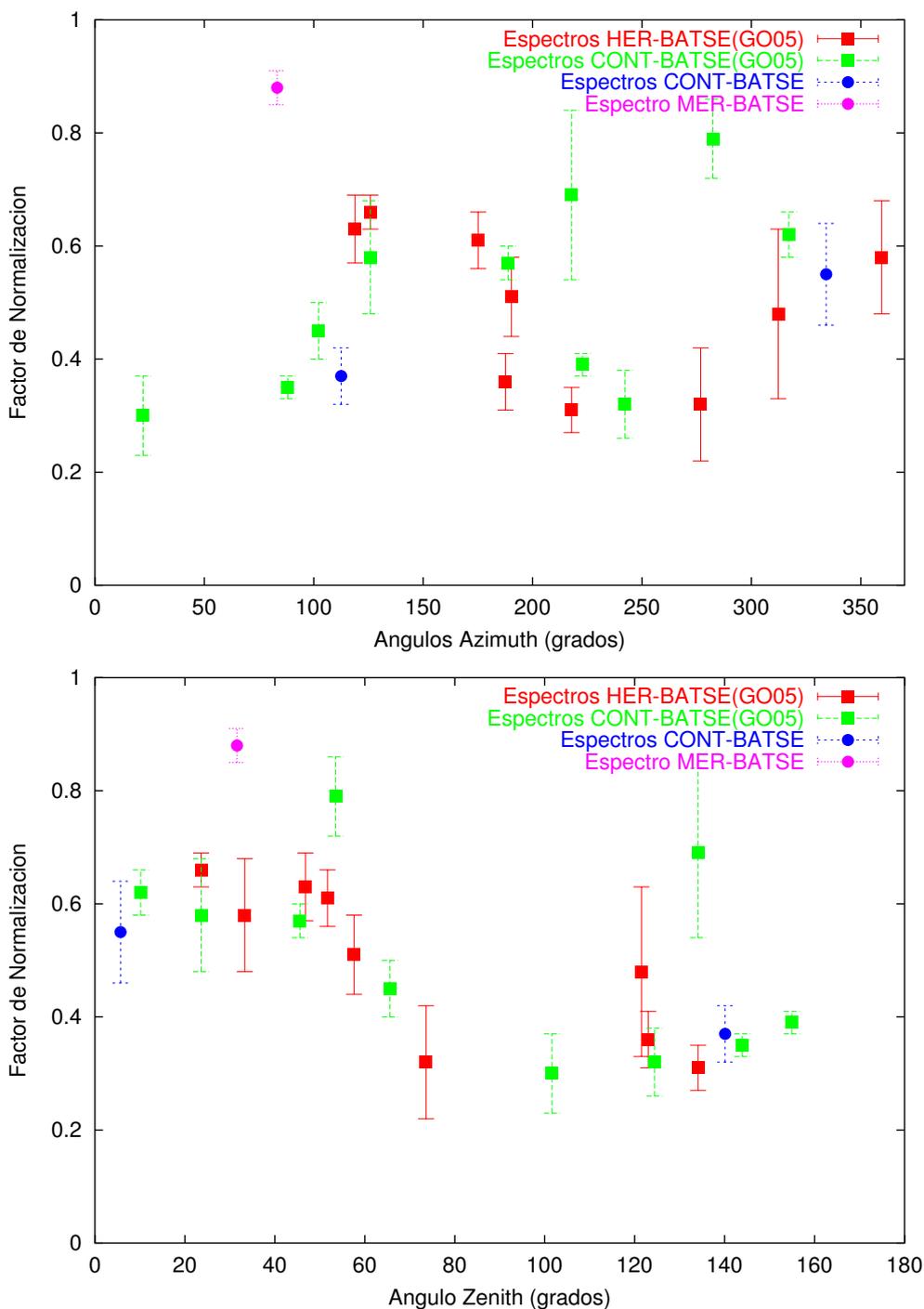


Figura 4.6: Factor de normalización en función de la dirección del destello. En la gráfica superior como función del ángulo azimutal y en la inferior como función del ángulo zenit. Los puntos rojos y verdes corresponden a los analizados por González. Los puntos azules y rosas los analizados en este trabajo. Se observa una correlación del factor de normalización con los ángulos zenit y azimutal.

Tiempo de trigger (seg)	$A(\times 10^{-3})$ ($phcm^{-2}s^{-1}keV^{-1}$)	E_{peak} (keV)	α	β	$\chi^2/d.o.f. = \chi_{red}$
GRB910814					
0 a 1	19.7 ± 0.8	1793 ± 388	-0.17 ± 0.06	-2.19 ± 1.13	$18/10 = 1.8$
1 a 3	32.4 ± 0.6	1523 ± 133	-0.26 ± 0.03	-1.91 ± 0.21	$17/10 = 1.7$
3 a 7	23.9 ± 0.4	1039 ± 63	-0.49 ± 0.03	-1.95 ± 0.01	$14/10 = 1.4$
7 a 22	16.5 ± 0.2	810 ± 45	-0.90 ± 0.02	-2.01 ± 0.07	$74/10 = 7.4$
GRB981203					
7 a 21	9.33 ± 1.1	531 ± 156	-0.69 ± 0.15	-1.49 ± 0.05	$14/10 = 1.4$
31 a 64	8.99 ± 1.18	524 ± 230	-1.01 ± 0.16	-1.61 ± 0.08	$16/10 = 1.6$
64 a 97	4.39 ± 1.64	459 ± 455	-0.93 ± 0.44	-1.61 ± 0.19	$18/10 = 1.8$
GRB990728					
-11 a 21	22.95 ± 0.76	366 ± 18	-0.77 ± 0.04	-2.49 ± 0.14	$60/10 = 6$
21 a 54	21.83 ± 0.82	340 ± 20	-0.95 ± 0.05	-2.50 ± 0.17	$36/10 = 3.6$

Tabla 4.3: Parámetros del ajuste espectral de la función Band tomando sólo los espectros de BATSE. En la primera columna se muestra el tiempo de inicio y fin de cada espectro respecto al trigger, en la segunda columna la amplitud ($phcm^{-2}s^{-1}keV^{-1}$), en la tercera columna el E_{peak} con errores equivalentes a σ . La cuarta y quinta columna el índice espectral de bajas y altas energías y finalmente la razón entre χ^2 y los grados de libertad.

Tiempo de trigger (seg)	$A(\times 10^{-3})$ ($phcm^{-2}s^{-1}keV^{-1}$)	E_{peak} (keV)	α	β	$\chi^2/d.o.f. = \chi_{red}$
GRB910814					
0 a 1	19.4 ± 0.4	2267 ± 107	-0.28 ± 0.03	-2.52 ± 0.10	$238/230 = 1.0$
1 a 3	31.6 ± 0.3	1911 ± 55	-0.34 ± 0.02	-2.36 ± 0.05	$354/230 = 1.5$
3 a 7	23.5 ± 0.2	1129 ± 36	-0.51 ± 0.02	-2.41 ± 0.08	$291/230 = 1.3$
7 a 22	16.8 ± 0.2	857 ± 37	-0.92 ± 0.02	-2.11 ± 0.05	$322/230 = 1.4$
GRB981203					
7 a 21	7.67 ± 0.20	1356 ± 237	-0.96 ± 0.05	-1.88 ± 0.05	$293/216 = 1.4$
31 a 64	8.64 ± 0.48	704 ± 171	-1.06 ± 0.09	-1.93 ± 0.06	$260/216 = 1.2$
64 a 97	3.38 ± 0.19	4559 ± 2410	-1.31 ± 0.08	-2.22 ± 0.36	$200/216 = 0.9$
GRB990728					
-11 a 21	23.58 ± 0.78	350 ± 15	-0.75 ± 0.04	-2.34 ± 0.05	$290/230 = 1.3$
21 a 54	22.92 ± 0.94	312 ± 17	-0.90 ± 0.05	-2.26 ± 0.04	$286/230 = 1.2$

Tabla 4.4: Parámetros del ajuste espectral de la función Band tomando los espectros de BATSE y EGRET-TASC en varios intervalos de tiempo. En la primera columna se muestra el tiempo de inicio y fin de cada espectro respecto al trigger, en la segunda columna la amplitud ($phcm^{-2}s^{-1}keV^{-1}$), en la tercera columna el E_{peak} con errores equivalentes a σ . La cuarta y quinta columna el índice espectral de bajas y altas energías y finalmente la razón entre χ^2 y los grados de libertad.

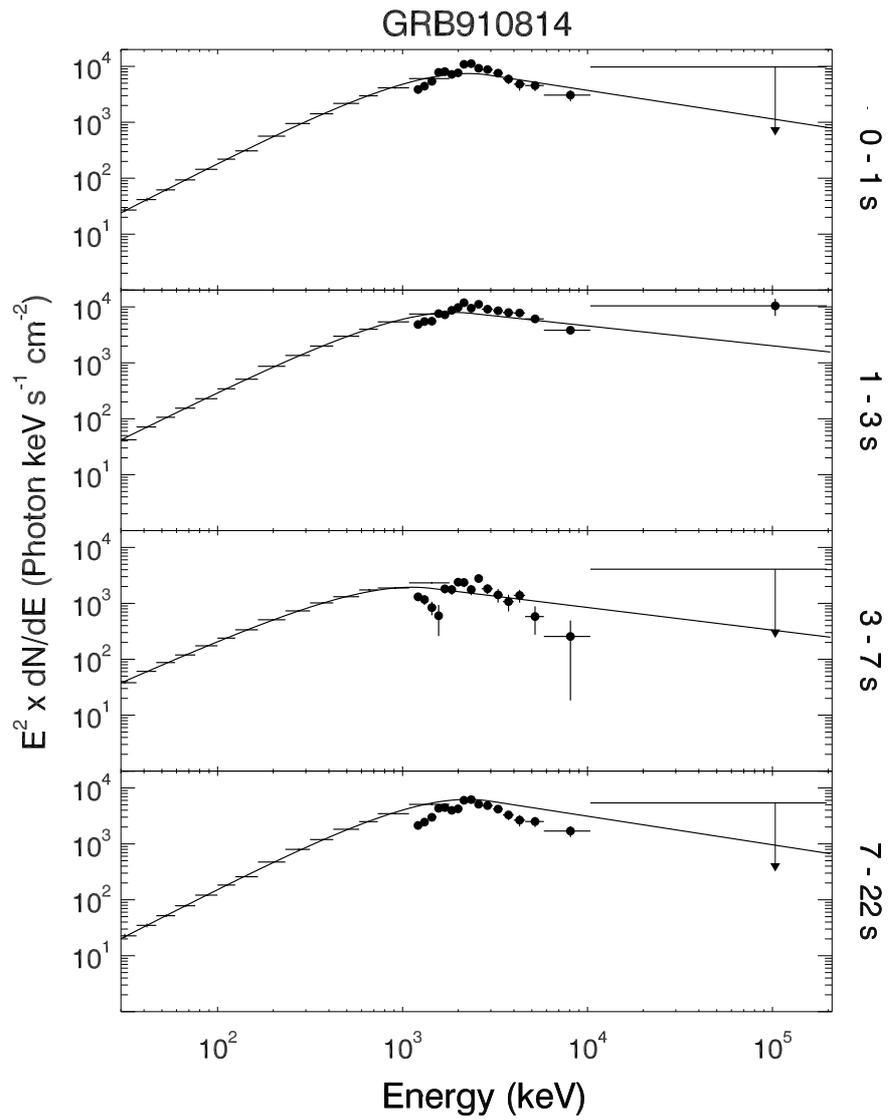


Figura 4.7: Espectro del destello GRB910814, donde las cruces y los círculos son los datos de BATSE y EGRET-TASC respectivamente. La línea sólida corresponde al modelo de Band ajustado. Las flechas corresponden a los límites superiores para observar 2σ sobre el ruido.

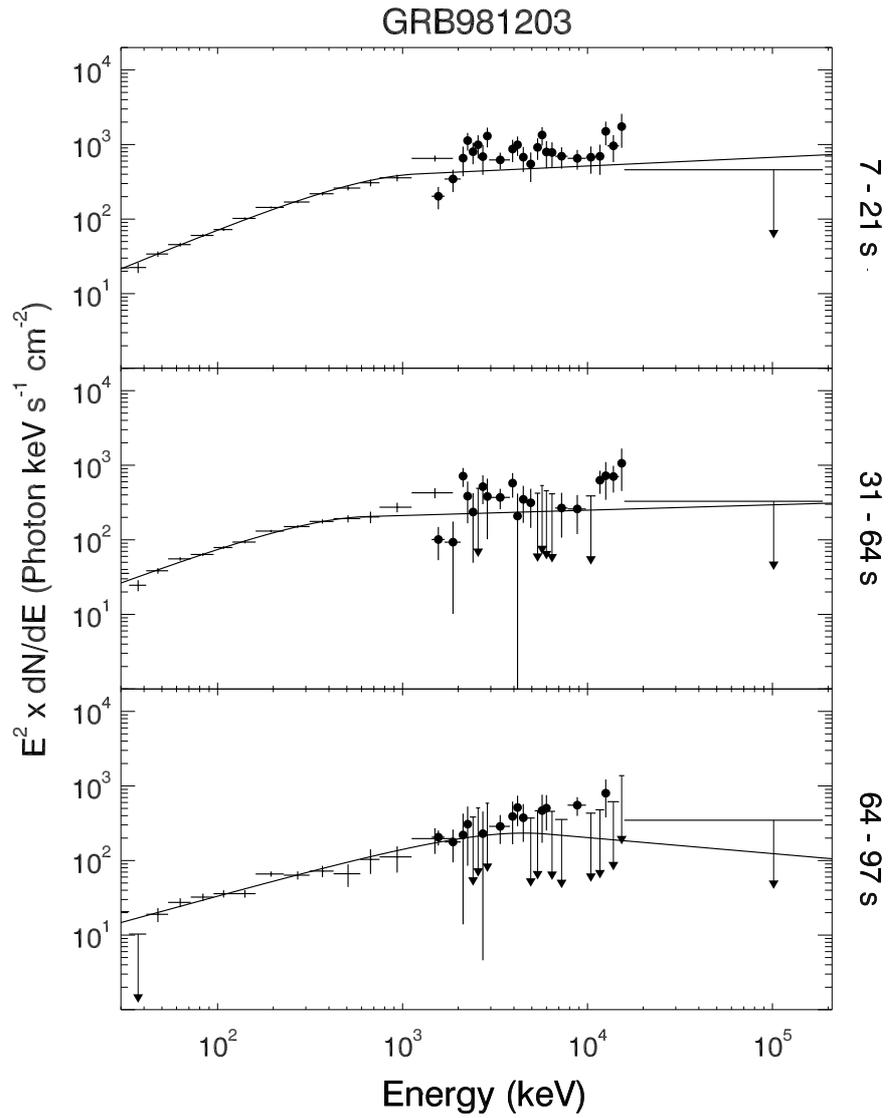


Figura 4.8: Espectro del GRB981203, donde las cruces y los círculos son los datos de BATSE y EGRET-TASC respectivamente. La línea sólida corresponde al modelo de Band ajustado. Las fechas indican los límites superiores para observar 2σ sobre el ruido.

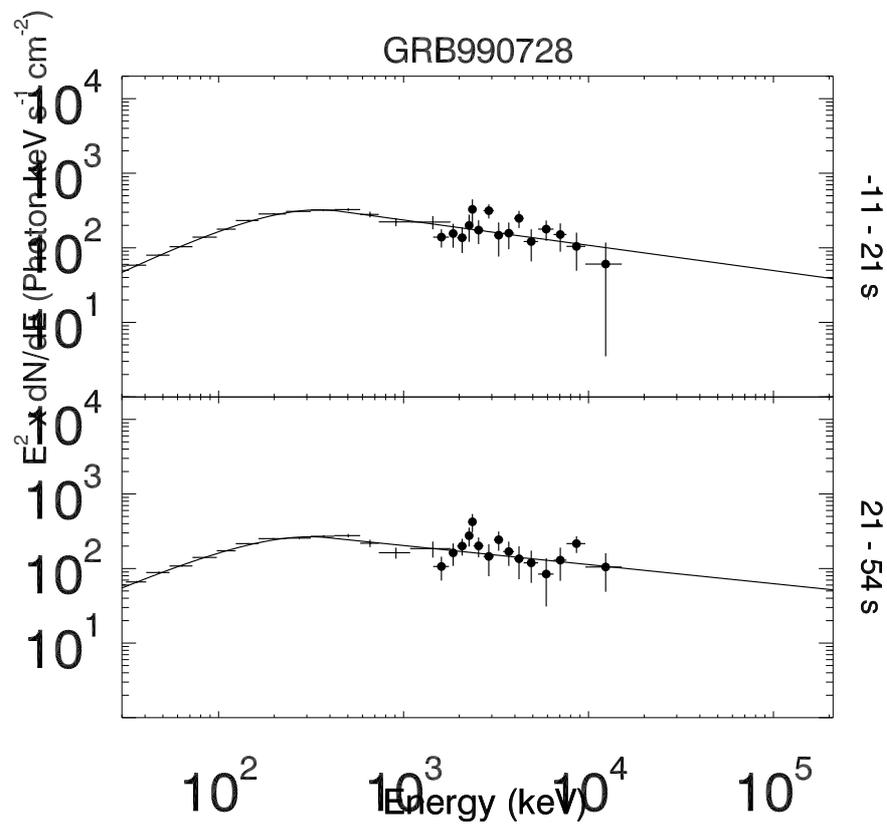


Figura 4.9: Espectro del GRB990728, donde las cruces y los círculos son los datos de BATSE y EGRET-TASC respectivamente. La línea sólida corresponde al modelo de Band ajustado. Las flechas indican los límites superiores para observar 2σ sobre el ruido.

Conclusiones

*”Cuando el conflicto comienza
en tu interior significa que
lo que deseas vale la pena.”*

Roberto Browning.

En este análisis se usaron espectros más amplios en un rango de energía desde 0.03 hasta 200 MeV para caracterizar el espectro de tres destellos de rayos gamma a altas energías, así como su evolución temporal. Se mejoraron los parámetros que caracterizan a cada destello ajustándoles la función Band y usando los datos de los detectores BATSE y EGRET-TASC. Debido a que la respuesta de nuestros detectores no es perfectamente conocida, se usó un factor de normalización para ajustar simultáneamente los datos de los dos detectores BATSE y EGRET-TASC en cada destello. Este factor fue diferente para cada destello, pero constante dentro de un mismo destello.

De 25 destellos estudiados, solo 9 destellos presentan emisión significativa ($> 3\sigma$) en EGRET-TASC y solo 3 (GRB910814, GRB981203 y GRB990728) de ellos tienen más de un espectro significativo en TASC. Las curvas de luz de BATSE de dos destellos (GRB981203 y GRB990728) muestran múltiples picos, mientras que el destello GRB910814 sólo tuvo un pico en su curva de luz. No se observa una evolución temporal generalizada. Todos los espectros muestran el comportamiento general observado para la mayoría de los destellos del análisis de González [GO05], sin cortes a altas energías al menos hasta 200 MeV. Observamos que nuestro análisis es independiente del modelo que usemos, ya sea Band o SBPL. Ya que los valores de E_{peak} y β de cada destello son consistentes en ambos casos. Se observó el mayor E_{peak} (>4.5 MeV) en el destello GRB981203, teniendo fuertes implicaciones físicas, pues implicaría un mayor factor de Lorentz.

El que sólo se hayan observado 9 destellos de los 25 con TASC, hace pensar que los

destellos restantes no fueron lo suficientemente brillantes para ser detectados debido a la baja sensibilidad de TASC. En el trabajo de González [GO05], para los 43 destellos más brillantes del catalogo de BATSE mostró 18 destellos con emisión significante en más de un espectro de TASC, esto es un 42 % y sólo uno (GRB941017) presentó la componente a altas energías. Mientras que en este trabajo el 12 % de los destellos tuvieron emisión significante en más de un espectro de TASC. Los destellos que tuvieron emisión tanto en este trabajo como en el de González corresponden a los de mayor fluencia de energía total y su fracción en el 4to. canal de BATSE, pues estan situados en la parte superior derecha de la gráfica que muestra la fluencia $> 300keV/FluenciaTotal$ en función de la fluencia total o flujo de energía (erg/cm^2) (ver figura 4.1). Se espera que con el detector GLAST se observe la componente a altas energías en un mayor número de destellos. Con este análisis se ha completado el catálogo de BATSE de destellos brillantes.

Bibliografía

- [AL00] Alvarez-Muñiz J., Halzen F. & Hooper D. W., *Phys.Rev.D.*, **62**, 093015 (2000).
- [AT04] Atkins R., Benbow W., Berley D., Blaufuss E., Bussons J., Coyne D.G., De-Young T., Dingus B.L., Dorfan D.E., Ellsworth R.W., Fleysher L., Fleysher R., Gisler G., Gonzalez M.M., Goodman J.A., Haines T.J., Hays E., Hoffman C.M., Kelley L.A., McEnery J.E., Miller R.S., Mincer A.I., Morales M.F., Nemethy P., Noyes D., Ryan J.M., Samuelson F.W., Shoup A., Sinnis G., Smith A.J., Sullivan G.W., Williams D.A., Westerhoff S., Wilson M.E., Xu X. & Yodh G.B., *ApJ*, **604**, L25 (2004).
- [AT91] Atteia J.L., Barat C., Jourdain E., Niel M., Vedrenne G., Blinov N., Chernenko A., Dolidze V., Kozlenkov A., Kuznetsov A., Mitrofanov I., Pozanenko A., Sunyaev R. & Terekhov O., *Nature*, **351**, 296 (1991).
- [BA93] Band D., Matteson J., Ford L., Schaefer B., Palmer D., Teegarden B., Cline T., Briggs M., Paciesas W., Pendleton G., Fishman G., Kouveliotou C., Meegan C., Wilson R. & Lestrade P., *ApJ*, **413**, 281 (1993).
- [BE05] Berger, E., et al., *astro-ph/0508115* (2005)
- [BL05] Bloom, J.S., et al., *astro-ph/0505480* (2005)
- [CA98] Catelli, J.R., Dingus B.L. & Schneid E.J., *AIPC*, **428**, 309 (1998).
- [CA06] Campana, S., et al., *Nature*, submitted. (2006)
- [C097] Costa, E., et al., *Nature*, 387, 783 (1997).
- [DI01] Dingus, B.L., *In High-Energy Gamma Ray Astronomy. AIP Conference Proceedings*, ed. Aharonian F.A. & Heinz J.V., **558**, 383 (2001).
- [DI01b] Dingus B.L., *Gamma-Ray Bursts and afterglow astronomy 2001. AIP Conference Proceedings*, ed. Ricker G.R. & Vanderspek R.K., **662**, 294 (2001).

- [DI98] Dingus, B., Catelli J.R. & Schneid E.J., *AIPC*, **428**, 349 (1998).
- [EI89] Eichler, D., et al., *Nature*, **340**, 126 (1989).
- [FI95] Fishman G.J. & Meegan C.A., *ARAA*, **33**, 415 (1995).
- [FO95] Ford, L.A., et al., *ApJ*, **439**, L307 (1995).
- [FO05] Fox, D.B., et al., *Nature*, **437**, 845 (2005)
- [FR01] Frail, D.A., et al., *ApJ*, **562**, L55 (2001).
- [GA98] Galama, T.J., et al., *Nature*, **395**, 670 (1998).
- [GE05] Gehrels, N., *Nature*, **437**, 845 (2005)
- [GO86] Goodman, J., *ApJ*, **308**, L47 (1986)
- [GO03b] González M.M., Kaneko Y., Preece R. & Dingus B.L., *GAMMA-RAY BURST AND AFTERGLOW ASTRONOMY 2001. AIP Conference Proceedings*, **662**, 267 (2003).
- [GO05] González M.M., *PhD. tesis: Gamma-Ray Bursts, Their High Energy Emission as Observed by EGRET.*, (2005).
- [GO03] González M.M., Dingus B.L., Kaneko Y., Preece R.D., Dermer C.D. & Briggs M.S., *Nature*, **424**, 749 (2003).
- [GO04b] González M.M., Dingus B.L., Kaneko Y., Preece R.D. Dermer C.D. & Briggs M.S., *Gamma-Ray Bursts. AIP Conference Proceedings*, ed. Fenimore E.E. & Galassi M., **727**, 203 (2004).
- [HA92] Hartman R.C., Bertsch D.L., Fichtel C.E., Hunter S.D., Kanbach G., Kniffen D.A., Kwok P.W., Lin Y.C., Mattox J.R. & Mayer-Hasselwander H.A., *In its The Compton Observatory Science Workshop*, 116 (1992).
- [HU94] Hurley K, Dingus B.L., Mukherjee R., Sreekumar P., Kouveliotuo C., Meegan C., Fishman G.J., Band D., Ford L., Bertsch D., Cline T., Fichtel C., Hartaman R., Hunter S., Thompson D.J., Kanbach G., Mayer-Hasselwander H., von Montigny C., Sommer M., Lin Y., Nolan P., Michelson P., Kniffen D., Mattox J., Schneid E., Boer M. & Niel M., *Nat*, **372**, 652 (1994).
- [HJ03] Hjorth, J., et al., *Nat*, **423**, 847 (2003)

- [KA88] Kanbach G., Bertsch D.L., Fichtel C.E., Hartman R.C., Hunter S.D., Kniffen D.A., Hughlock B.W., Favale A., Hofstadter R. & Hughes E.B., *Space Science Reviews*, **49**, 69 (1988).
- [KO97] Kobayashi, S., et al. *ApJ* **513**, 679 (1997)
- [KL73] Klebesadel R.W., Strong I.B. & Olsen R.A., *ApJ*, **182**, L85 (1973).
- [KL05] Klose, S. <http://www.mpe.mpg.de/jcg/grbrsh.html>
- [KN89] Knoll G.F., *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley & Sons, (1989).
- [KO93] Kouveliotou C., Meegan C.A., Fishman G.J., Bhat N.P., Briggs M.S., Koshut T.M., Paciasas W.S. & Pendleton G.N., *ApJ*, **413**, L101 (1993).
- [KU98] Kulkarni, S.R., et al., *Nature*, 395, 663 (1998)
- [LA76] Lattimer, J. M. & Schramm, D. N. *ApJ* **210**, 549 (1976)
- [LA01] Lazzati, D., Ramirez-Ruiz, E. & Guisellini, G. *A&A* **379**, L39-L43 (2001)
- [MA85] Matz, S.M., et al., *ApJ*, **288**, L37 (1985)
- [MA04] Malesani, D., et al., *ApJ*, **609**, L5 (2004)
- [ME93] Mészáros, P. & Ress, M.J. *ApJ* **405** 405 (1993)
- [ME03] Mészáros P., *astroph/0311321* , (2003).
- [ME03a] Mészáros P., *Nature*, **423**, 809 (2003).
- [ME92] Meegan C.A., Fishman G.J., Wilson R.B., Horack J.M., Brock M.N., Paciasas W.S., Pendleton G.N. & Kouveliotou C., *Nature*, **355**, 143 (1992).
- [MI03] Mitrofanov I.G., *Nature*, **426**, 139 (2003).
- [NE85] Nelson W.R., Hirayama H. & Rogers D.W.O., *SLAC Rep.*, 265 (1985).
- [NO92] Nolan P.L., Bertsch D.L., Fichtel C.E., Hartman R.C., Hofstadter R., Hughes E.B., Hunter S.D., Kanbach G., Kniffen D.A., Lin Y.C., Mattox J.R., Mayer-Hasselwander H.A., Michelson P.F., von Montigny C., Pinkau K., Rothermel H., Schneid E., Sommer M., Sreekumar P. & Thompson, D.J., *IEEE Transactions Nucl. Sci.*, **39**, 993 (1992).
- [PA86] Paczynski, B., *ApJ*, **308**, L43 (1986).

- [PA99] Paciesas, W.S., et al., *ApJ*, **122**, 465 (1999)
- [PE04] Pe'er A. & Waxman E., *ApJ*, **603**, L1 (2004).
- [PE95] Pendleton G.N., Paciesas William S., Mallozzi R.S., Koshut T.M., Fishman G.J., Meegan C.A., Wilson R.B., Horack J.M., Lestrade J.P., *NIMSA*, **364**, 567 (1995).
- [PR00] Preece R.D., Briggs M.S., Mallozzi R.S., Pendleton G.N., Paciesas W.S. & Band D.L., *ApJ*, **126**, 19 (2000).
- [PR94] Preece R.D., Brock M.N. & Briggs M.S., *WINGSPAN, Windows Gamma Spectral Analysis*, Internal BATSE Documentation, (1994).
- [PR98] Preece R.D., Pendleton G.N., Briggs M.S., Mallozzi R.S., Paciesas W.S., Band D.L., Matteson J.L. & Meegan C.A., *ApJ*, **496**, 849 (1998).
- [PR98a] Preece R.D., Briggs M.S., Mallozzi R.S., Pendleton G.N., Paciesas W.S., Band D.L., *ApJ*, **506**, L23 (1998).
- [RE99] Rees, M. J., *A&AS*, **138**, 491 (1999).
- [ST03] Stanek, K.Z., et al., *ApJ*, **591**, L17 (2003)
- [SC01] Schönfelder V., *The Universe in Gamma Rays* (2001)
- [SA98] Sari, R., Piran, T. & Narayan, R., *ApJ*, **497**, L17 (1998)
- [SC93] Schneid E.J., Bertsch D.L., Dingus B.L., Fichtel C.E., Hartman R.C., Hunter S.D., Kanbach G., Kniffen D.A., Kwok P.W., Lin Y.C., Mattox J.R., Mayer-Hasselwander H.A., Michelson P.F., von Montigny C., Nolan P.L., Pinkau K., Rothermel H., Sommer M., Sreekumar P. & Thompson D.J., *AIP*, **280**, 850 (1993).
- [TH93] Thompson D.J., Bertsch D.L., Fichtel C.E., Hartman R.C., Hofstadter R., Hughes E.B., Hunter S.D., Hughlock B.W., Kanbach G., Kniffen D.A., Lin Y.C., Mattox J.R., Mayer-Hasselwander H.A., von Montigny C., Nolan P.L., Nel H.I., Pinkau K., Rothermel H., Schneid E.J., Sommer M., Sreekumar P., Tieger D. & Walker A.H., *ApJS*, **86**, 629 (1993).
- [VA00] van Paradijs J., Kouveliotou C., & Wijers R.A.M.J., *Ann.Rev.Astron.Astrophys*, **38**, 379-425 (2000)

- [WI92] Winkler C., Bennett K., Bloemen H., Collmar W., Connors A., Diehl R., Vandordrecht A., den Herder J.W., Hermsen W., Kippen M., Kuiper L., Lichti G., Lockwood J., McConnell M., Morris D., Ryan J., Schonfelder V., Stacy C., Steinle H., Strong A., Swanenburg B., Taylor B.G., Varendorff M. & de Vries C., *A&A*, **255**, L9 (1992).
- [WO93] Woosley S. E., *ApJ*, **405**, 273 (1993)
- [ZH03] Zhang B., Mészáros P., astro-ph/0311321.
- [ZH07] Zhang B., astro-ph/0701520v1, preprinter (2007)
- [webBATSE] <http://coss.gsfc.nasa.gov/batse>
- [webCGRO] <http://coss.gsfc.nasa.gov/>
- [ftpEGRET] <ftp://coss.gsfc.nasa.gov/pub/data/egret>