

Universidad de Granada
Facultad de Ciencias



Trabajo de investigación del tercer ciclo para optar al
DIPLOMA DE ESTUDIOS AVANZADOS

Martin Jelínek
Instituto de Astrofísica de Andalucía CSIC

POSTLUMINISCENCIAS DE EXPLOSIONES DE RAYOS
GAMMA E INSTRUMENTACIÓN PARA SU ESTUDIO

Director de la tesis: Alberto J. Castro-Tirado, PhD.
Programa del estudio: Métodos y Técnicas Avanzadas en Física

Granada 2007

Postluminiscencia de explosiones de rayos gamma e instrumentación para su estudio

Martin Jelínek

Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC

3.9.2007

RESUMEN

Este trabajo versa sobre explosiones de rayos gamma (GRBs), observadas a modo de fogonazos de corta duración, por parte de radiación gamma de origen cósmico. Podemos decir que son uno de los fenómenos más energéticos del Universo, los cuales fueron descubiertos en 1967. La deficiencia de datos observacionales conllevó la aparición de una gran cantidad de modelos teóricos, la mayoría de los cuales suponían un origen galáctico, pero los datos de BATSE (1991–2001) revelaron que la distribución celestial era isótropa, lo que implicaba un origen cosmológico. Con la primera detección de la contrapartida en rayos X y en el óptico del GRB 970228, y el primer corrimiento rojo medido ($z = 0.835$ para GRB 970508), el origen cosmológico quedaba fuera de dudas. Estas contrapartidas se conocen como “postluminiscencias” y fueron predichas por algunos modelos teóricos con anterioridad a 1997. El primer capítulo de este trabajo presenta una introducción breve sobre las observaciones y teoría de los GRBs y sus postluminiscencias.

En el capítulo siguiente se realiza una revisión de las observaciones realizadas en las dos estaciones robóticas de observación del proyecto BOOTES desde su primera luz en el año 1998 hasta el presente. Este recorrido describe las diferentes estrategias desarrolladas para obtener su primer objetivo científico: detección de las contrapartidas ópticas de explosiones

de rayos gamma. En detalle se tratan los GRBs observados durante el periodo 2004 – 2007.

En el tercer capítulo presentamos el telescopio robótico FRAM y su descubrimiento y observación del brillante *flash* óptico de GRB 060117, hechos con su cámara de campo amplio. Para esta postluminiscencia encontramos un rápido decaimiento del flujo siguiendo una ley de potencias con $\alpha = -1.7 \pm 0.1$ y alcanzando una magnitud máxima de $R = 10.1$ mag. Observaciones posteriores por otros instrumentos impusieron un límite a los flujos óptico y de radio, consistente con un decaimiento rápido. Interpretamos los datos dentro del modelo estándar de “bola de fuego” con un índice de la distribución de electrones $p \simeq 3.0$ y que proporciona una solución satisfactori, en el óptico, en el ámbito de una transición entre una onda de choque reversa y una onda de choque expansiva producidas en el GRB.

Por último exponemos las conclusiones alcanzadas y las líneas de investigación a proseguir.

ÍNDICE

I.	EXPLOSIONES CÓSMICAS DE RAYOS GAMMA	3
1.1	Módelos teóricos	8
1.2	Postluminiscencias ópticas	11
1.3	Presente y futuro	12
II.	SEGUIMIENTO DE GRBS CON BOOTES ÓPTICO:	
	CAPÍTULO 5: LA ERA DE SWIFT	13
2.1	A Spectroscopic Robotic Observatory	13
2.2	Administración del observatorio: RTS2	15
2.3	Análisis de las imágenes: JIBARO	15
2.4	Observaciones de la fase temprana de los GRBs con BOOTES	17
2.5	Conclusiones	20
III.	EL BRILLANTE FLASH ÓPTICO DEL GRB 060117	21
3.1	Seguimiento	22
3.2	Adquisición y reducción de datos	23
3.3	Discusión	25
3.4	Conclusiones	27
IV.	CURSOS	29
4.1	Astrofísica y cosmología	29
4.2	Colorimetría de materiales e imágenes	30
4.3	Formación y evolución de galaxias	30
4.4	Modelización del sistema visual humano: Aspectos cromáticos y refractivos	31
4.5	Radioastronomía	32
4.6	Técnicas de teledetección del sistema terrestre . .	32
4.7	Teledetección espacial de atmósferas planetarias .	32

I. EXPLOSIONES CÓSMICAS DE RAYOS GAMMA

Explosiones de rayos gamma (GRBs¹, a modo de fogonazos cortos de la radiación gamma de origen cósmica fueron descubiertos por satélites Vela en 1967, siendo unos de los más energeticos fenómenos del Universo (Klebesadel, Strong, & Olson, 1973). Los GRBs se definen como pulsos breves (desde pocos milisegundos hasta algunos cientos segundos) (Fig. 2) de fotones gamma de alta energía (del orden de MeVs). La imposibilidad de enfocar los rayos gamma dificultan su localización exacta, y la deficiencia de los datos observa-

¹ ingl. *gamma ray bursts*

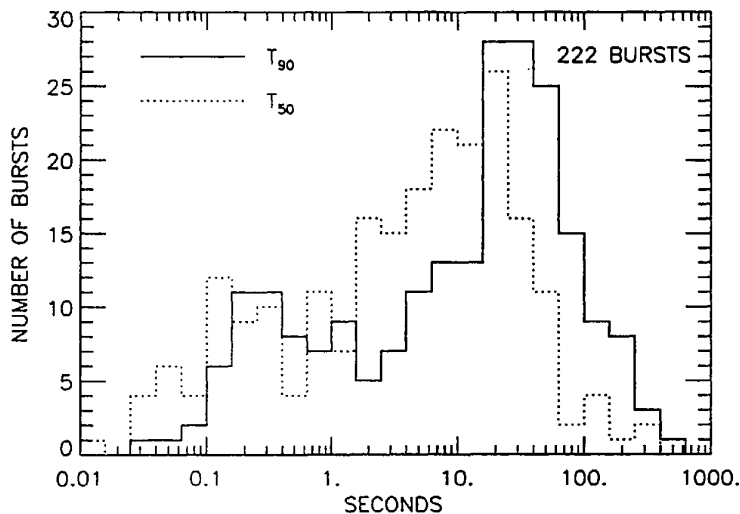


Figure 1: Distribución bimodal de los GRBs del primer catálogo BATSE (Fishman et al., 1994; Fishman & Meegan, 1995).

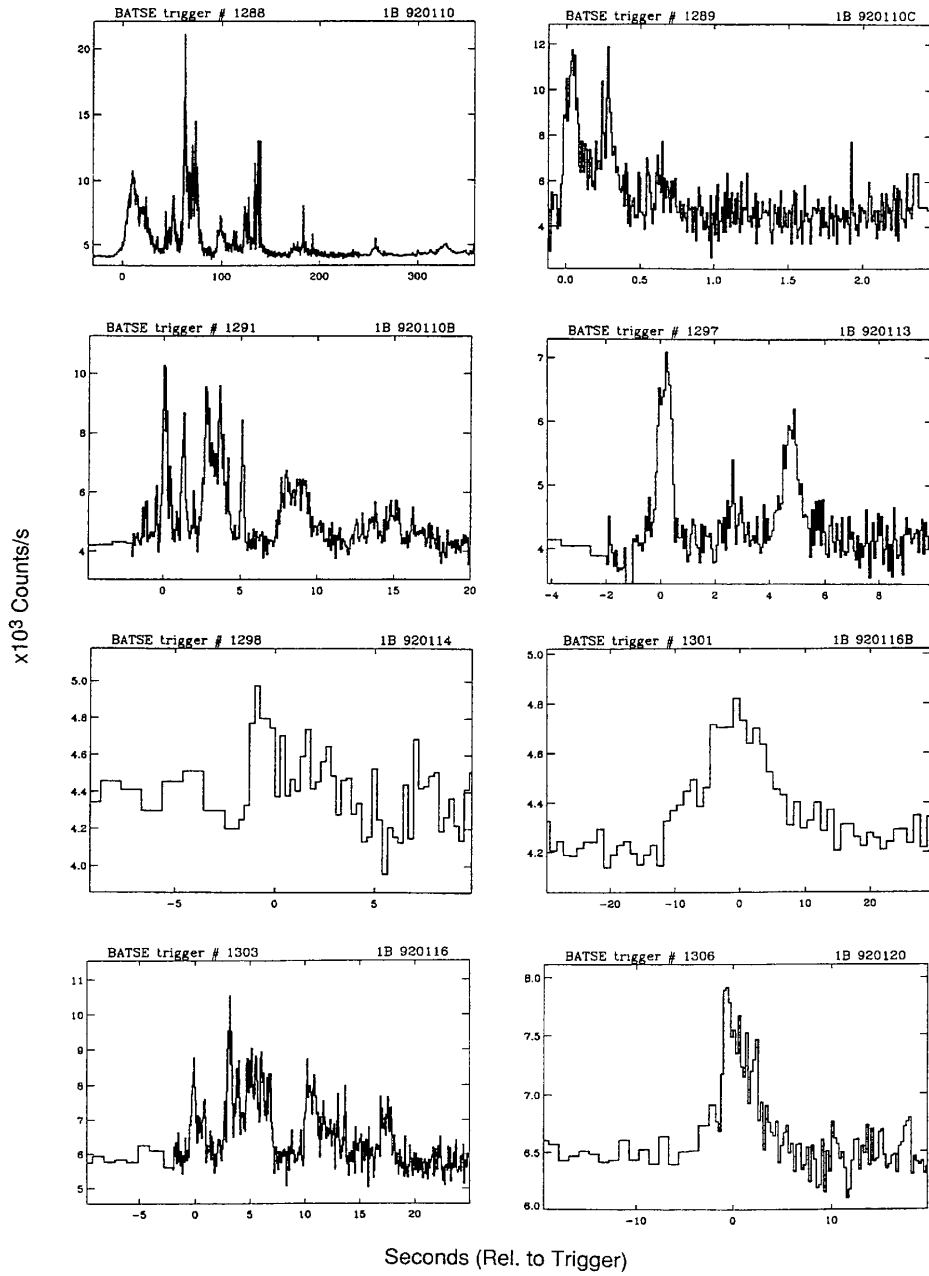


Figure 2: La página de curvas de luz de GRBs del primer catálogo BATSE (Fishman et al., 1994; Fishman & Meegan, 1995).

1121 BATSE Gamma-Ray Bursts

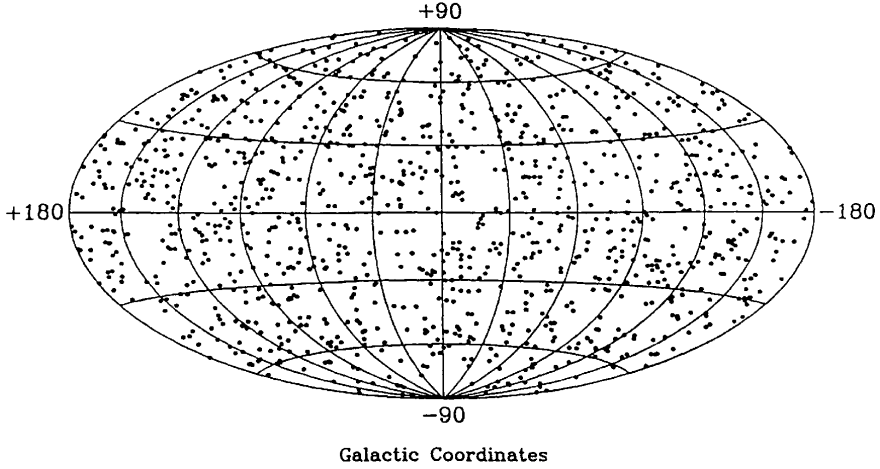


Figure 3: Distribución isotrópica de 1121 GRBs vistos por BATSE durante tres primeros años de su servicio. No se observa ninguna anisotropía. (Fishman et al., 1994; Fishman & Meegan, 1995).

cionales conllevó una abundancia de modelos teóricos, la mayoría de los cuales la apoyaba el origen galáctico, pero BATSE² mostró que la distribución de GRBs en el hemisferio celeste era isótropa (Fig. 3), lo que apoya su origen a distancias cosmológicas. Sólo la primera detección de la contrapartida en rayos X (Costa et al., 1997) y en el óptico (van Paradijs et al., 1997) del GRB 970228, y el primer corrimiento al rojo³ ($z = 0.835$ para GRB 970508) certificó este origen cosmológico. Estas contrapartidas se refieren como “postluminiscencias” y fueron predichas por algunos modelos teóricos (Paczynski & Rhoads, 1993). En el presente, el corrimiento rojo se ha medido ya para más que cien postluminiscencias y su valor medio está en $\langle z \rangle \sim 2.0$.

El examen de las duraciones de GRBs detectados por BATSE arroja una distribución bimodal⁴ (Fig. 1) con GRBs *cortos*, con du-

² Burst And Transient Source Explrer, el experimento al bordo del satélite Compton, 1991–2001

³ ingl. *redshift*

⁴ Soft Gamma Repeaters (SGR) como un grupo de fuentes galacticos fueron separado antes como fuentes estelares, y conocidos.

ración media <2 s, y *largos*, que duran >2 s (Kouveliotou et al., 1993). Hoy en día está aceptado que los GRBs largos (LGRBs) están asociados con estrellas masivas y que la explosión se origina cuando ésta sufre un colapso dando lugar al nacimiento de un agujero negro (Woosley, 1993). Esta teoría está justificada con la observación de una componente adicional de supernova superpuesta a la post-luminiscencia del GRB y está de acuerdo con la distribución de los corrimientos rojos observados (Fryer, Woosley, & Hartmann, 1999). Cuando se han hecho las observaciones de las galaxias anfitrionas, los GRBs largos se encontraron en las regiones de formación de estrellas, favoreciendo esta teoría (Gorosabel et al., 2006).

Sólo hace unos años, gracias a las localizaciones precisas del satélite *Swift*, se descubrieron las contrapartidas de los GRBs cortos (SHBs⁵). Al igual que LGRBs, los GRBs cortos se encuentran a distancias cosmológicas, aunque la distribución de corrimientos al rojo sugiere distancias más bajas. Esto está de acuerdo con el mod-

⁵ De ingl. *short hard burst*: corto y duro, ahora creemos, que la dureza es bastante discutible.

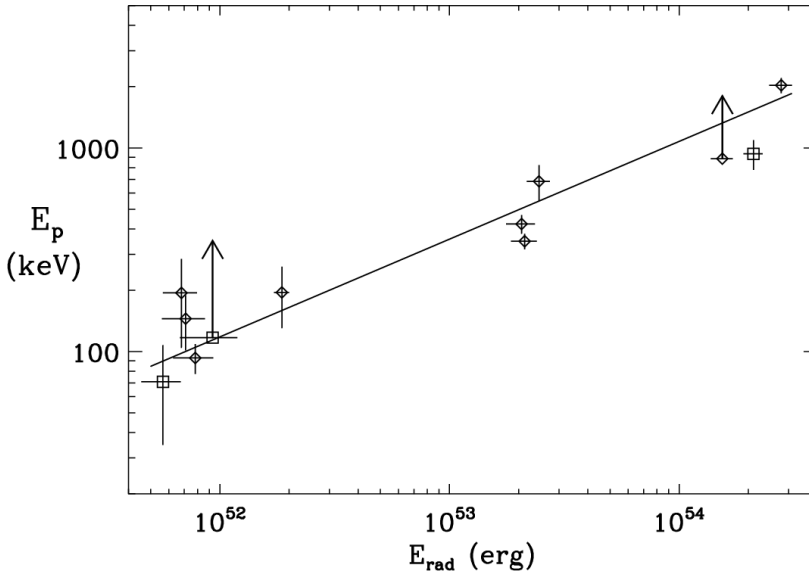


Figure 4: La relación de Amati - E_p es el máximo en el espectro γ , E_{rad} es la energía emitida por el GRB en rayos gamma. (Amati et al., 2002).

elo de la coalescencia de estrellas de neutrones o agujeros negros al cabo de varios miles de millones de años. Además, la observación de las galaxias anfitrionas que albergan los GRBs cortos enseña, que éstas son de tipos más tardías que las que acogen los LGRBs, lo que apoya este modelo.

La eficaz penetratoria de la emisión gamma junto con la energía desalojada enorme, hace GRBs visibles a través de gran extensión de corrientes rojas. Pues estos son muy interesantes para la explotación del Universo de redshift grande. Si los LGRBs estan realmente asociados con las muertes de las estrellas masivas, se pueden usar para seguir la historia de formacion de estas (y estrellas en común) en el Universo. Además, GRBs se pueden usar también como un mecanismo de selección de las galaxias distantes (Djorgovski et al., 2003),

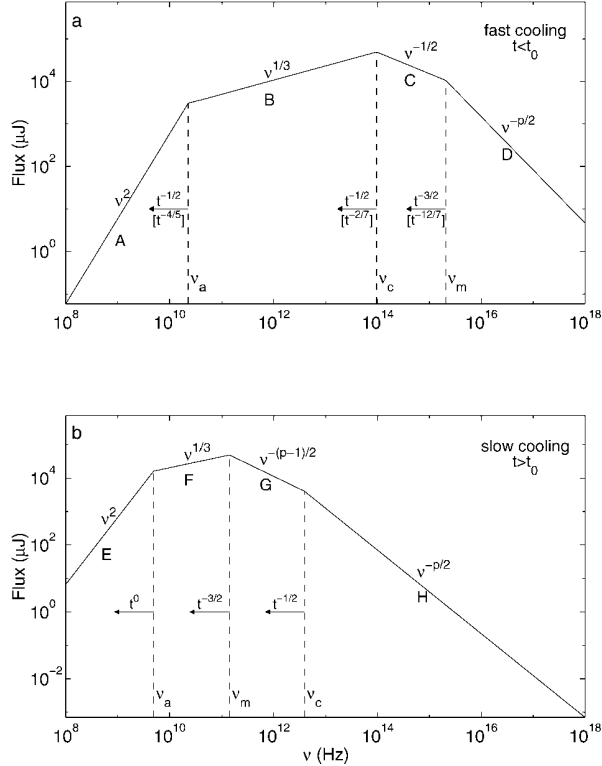


Figure 5: El espectro multirango como se predice para una onda de choque relativista con una distribución de electrones en forma de ley de potencia como la descrita en el texto. Se muestran dos casos de enfriamiento lento ($t > t_0$) y rápido ($t < t_0$)(de Sari et al., 1998).

que tiene la ventaja sobre otros mecanismos de selección, que no hay preferencia para las galaxias brillantes y se puede explotar la parte débil de la función de luminosidad. Postluminiscencias ópticas se encontraron aprovechable para el estudio del ambiente galáctico concediendo aforo de la extinción local.

Los GRBs no solo se pueden usar como identificadores para otros estudios, los atributos syos mismos pueden ser útiles para explotar cosmología. Antes que esto sea posible, hace falta una indicación de la distancia, preferentemente basada solo en los atributos de la emisión de alta energía. Varios tantos indicadores habian sido propuestos, incluso la correlación *lag-luminosity* (Norris, 2002), correlación *variability-luminosity* (Fenimore & Ramirez-Ruiz, 2000) y la relación de Amati et al. (2002) (Fig. 4) desde el la energía equivalente isotrópica y pico del espectro de alta energía. Estas correlaciones no son, however, muy fuertes y esta difícil a usarlos para obtener estimaciones precisas de los parametros cosmológicos (Bloom et al., 2003). Ghirlanda et al. (2004) encontré, que el pico de energía del espectro de GRB esta mejor colimado con la energia corregida para la colimación que con el equivalente isotrópico. Sin embargo, en la luz de las medidas recientes, la corrección de colimación es un punto débil de este método.

1.1 Modelos teóricos

Las observaciones han proporcionado la visión completa del espectro multirango de un GRB, pero el mecanismo, que produce el GRB, es uno de los enigmas que aún tardará tiempo a resolverse. No en vano, hasta 1994 existían más que 150 modelos teóricos publicados (véase Nemiroff, 1994). El hecho de aceptar hoy en día que la gran mayoría – sino todos – los GRBs ocurran en otras galaxias, ha descartado casi todos los modelos existentes salvo aquellos que invocan mecanismos capaces de producir 10^{51-54} erg en pocos segundos tales como:

Coalescencia de estrellas de neutrones en un sistema binario (Narayan, Paczynski, & Piran, 1992): tales estrellas de neutrones perduran durante $\sim 10^9$ años, adquiriendo altas velocidades de escape que hacen que los sistemas se encuentren lejos de las regiones densas donde se formaron sus progenitores. Este modelo admite la variante de sustituir una de las componentes por un agujero negro. Este modelo se supone a solver los GRBs cortos, aunque hay solo justificaciones indirectas.

Supernova fallida, o de alta velocidad rotacional, en el que estrellas muy masivas producen una “bola de fuego sucia” con una luminosidad ~ 300 veces superior a una SN normal. El final de tales estrellas masivas se produce en 10^6 años, y una consecuencia natural de este modelo es que los GRBs estén asociados a regiones densas, con polvo abundante y en regiones adicivas de formación estelar. Porque se han onservado las firmas de supernovas en el espectro y en las curvas de luz de los GRBs cercanos, es esto el modelo favorecido para los GRBs largos.

Lo único que parece claro es, que una serie de choques internos son los, que producen la emisión γ , tal como la vemos, y que los choques externos son los responsables de la postluminiscencia, cuyo modelo detallamos a continuación.

Las características observacionales de las contrapartidas de los GRBs tienen acomodo dentro de los llamados modelos de “bola de fuego”⁶ (por ej. Meszaros et al., 1994). En ellos, una fuente compacta libera $\sim 10^{53}$ erg en pocos segundos. El plasma se acelera a velocidades relativistas (formando la llamada bola de fuego) y la radiación emitida se debe a electrones con factores de Lorentz muy altos. La onda esférica de choque se va moviendo por delante de la bola de fuego, va decelerándose va chocando y barriendo el medio interstelar que va encontrando a su paso, produciendo emisión sin-

⁶ de inglés *fireball models*

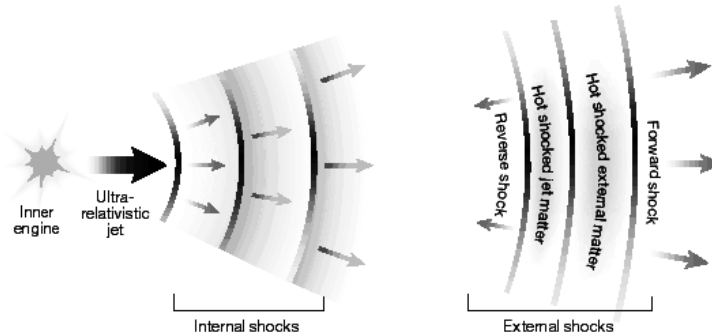


Figure 6: El espectro multirrango de un GRB – se puede observar la evolución en rayos X durante la fase temprana.

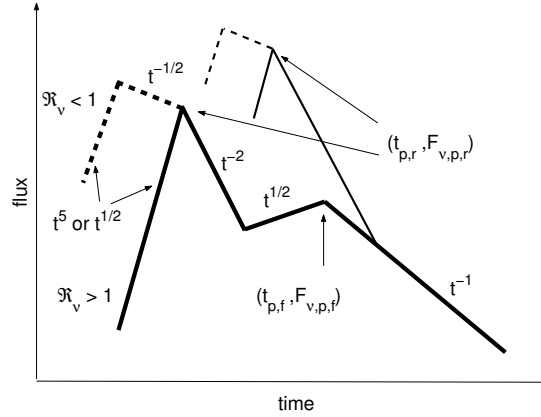


Figure 7: La curva de luz del GRB

crotrón que se observa – casi siempre – desde los rayos X hasta las ondas de radio (la ya resñada *postluminiscencia*).

Las propiedades de la onda de choque se pueden derivar a partir de las características del espectro de radiación sincrotrón (Sari et al., 1998), y el espectro multirango a quedar descrito por tres parámetros: la *frecuencia de sincrotrón* ν_m : la población de electrones presenta una distribución inicial de factores de Lorentz γ_e en forma de ley de potencias $dM d\gamma_e \propto \gamma_e^{-p}$ para valores mayores que un factor de Lorentz mínimo $\gamma_e \geq \gamma_m$ (i.e. por encima de la frecuencia de sincrotrón γ_m), qu corresponde a los electrones de menor energía inyectados. La *frecuencia de corte* ν_c : asociada al enfriamiento de los electrones: lento ($\nu_c > \nu_m$) o rápido ($\nu_c < \nu_m$); y el *flujo máximo* $F_{\nu, \max}$.

Aunque inicialmente $\nu_c < \nu_m$, al cabo de un tiempo t_0 , $\nu_c = \nu_m$, pues $\nu_c \propto t^{-\frac{1}{2}}$ y $\nu_m \propto t^{-\frac{3}{2}}$. En ese momento, la evolución de la onda de choque pasa a ser adiabática, con $\nu_c > \nu_m$ y el espectro varía como $F_\nu \propto \nu^{-\frac{p-1}{2}}$ para $\nu_m \leq \nu \leq \nu_c$; $F_\nu \propto \nu^{-\frac{p}{2}}$ para $\nu \geq \nu_c$ y $F_\nu \propto \nu^{\frac{1}{3}}$ para $\nu \leq \nu_m$. Véase Fig. 5.

Así pues, la evolución del flujo en función de tiempo para una determinada frecuencia viene en función de la evolución de ν_c ($\propto t^{-\frac{1}{2}}$) y ν_m ($\propto t^{-\frac{3}{2}}$). Para $\nu \leq \nu_c$ el flujo decae conforme a una ley de potencias de exponente α , $F \propto t^\alpha$ con $\alpha = \frac{2-3p}{4}$, lo que permite una segunda determinación independiente de p .

En la manera analógica con ahora descrito choque delantero se deriva también el choque reverso, cuya contribución puede ser im-

portante en el rango óptico durante los primeros segundos después de la explosión Sari & Piran (1999). Véase Fig. 6 y Fig. 7.

Aunque el comportamiento que se ha predicho se está observando, en varios de las postluminiscencias, aún quedan bastantes puntos por resolver.

1.2 Postluminiscencias ópticas

La historia de descubrimientos so conta aquí en puntos de los GRBs más importantes.

GRB 970228 La primera postluminiscencia asociada sin dudas a un GRB en rayos X (Costa et al., 1997) tanto como en el óptico, la óptica era detectada 20 horas después de la explosión γ (van Paradijs et al., 1997), gracias a la localización precisa de la emisión X por BeppoSAX.

GRB 970508 tiene el primer corrimiento rojo para la postluminiscencia de GRB: $z = 0.835$ (Metzger et al., 1997).

GRB 980425 es el GRB con la supernova de tipo Ic descubierta pronto después en la caja de error. La primera muestra del link desde GRBs y supernovas (Galama et al., 1998).

GRB 990123 era muy brillante fue acompañando con una postluminiscencia muy excepcional. Interpretado como la radiación del choque reverso (Akerlof et al., 1999; Sari & Piran, 1999).

GRB 030329 era tan cercano, que se podía detectar claramente la transición del espectro de la postluminiscencia al espectro de supernova. La conexión desde supernovas y GRBs está aceptada (Hjorth et al., 2003; Stanek et al., 2003).

GRB 041227 SGR1806-20 en nuestra Galaxia produce una explosión tan enorme, que se puede detectar el eco lunar. La curva de luz en rayos γ se parece a algunos GRBs cortos (Hurley et al., 2005).

GRB 050509B era un GRB corto localizado en rayos X con tanta precisión, que la galaxia anfitriona podía ser localizada. Aunque sin detección de la contrapartida, esto era la primera medida de la distancia de los GRBs cortos (Gehrels et al., 2005).

GRB 050709 la postluminiscencia del primer GRB corto descubierta en el óptico en la galaxia con $z = 0.1$: aunque cosmológicos, los GRBs cortos tienen la energía significativamente menor que los largos (Fox et al., 2005).

GRB 050904 era más distante con $z = 6.3$ descubierto. El bloque de Balmer causa, que la postluminiscencia sólo se puede observar en el infrarrojo (Haislip et al., 2006).

GRB 060121 era de corta duración, con atributos de ambos grupos introduce confusión, consideración del tercer tipo de GRBs y especulaciones de manera de desmembración de los GRBs (de Ugarte Postigo et al., 2006).

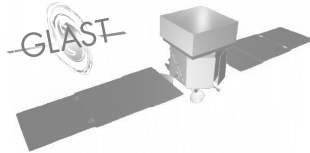
GRB 060218 era muy peculiar, cercano y débil, asociado a una supernova potente. Aumenta la discusión de que manera son los GRBs y supernovas asociadas (Campana et al., 2006b).

1.3 Presente y futuro

Hoy el día, *Swift* detecta cien GRBs al año, de estos, la postluminiscencia óptica se observa para casi 40%. Con la abundancia de GRBs, aparece más preguntas que respuestas. La antigua imagen de la única explosión tiene que tratarse con *X-ray flares*, los “reinicios” del motor interno, que ha descubierto *Swift*.

A los finales de este año esta preparado lanzamiento de nuevo satélite GLAST, que permitirá detectar los GRBs en el rango γ muy energético, y lleva un detector similar al BATSE original – que permitirá detectar muchos nuevos GRBs con relativamente baja precisión.

Si a esto añadimos la existencia de avanzados observatorios robóticos en tierra como la nueva generación de BOOTES, podemos estar seguros de que en los próximos años muchos de los misterios aún existentes, en este ahora enigmático campo, serán desvelados.



II. SEGUIMIENTO DE GRBS CON BOOTES ÓPTICO:

CAPÍTULO 5: LA ERA DE SWIFT

BOOTES es un sistema de telescopios robóticos con alta velocidad de apuntado para así poder observar la pronta emisión óptica de GRBs. La primera generación de estos instrumentos estaba basada en telescopios con un diámetro de 300 mm, combinados con varios sistemas de campo amplio para la observación de regiones más amplias de la bóveda celeste. La primera estación de BOOTES fue inaugurada el año 1998 en El Arenosillo (Huelva) y la segunda en 2001 en La Mayora (Málaga). La distancia entre las estaciones es 242.5 km, y ello posibilita la obtención de imágenes estereoscópicas para así poder discernir las fuentes atmosféricas y cercanas de las de origen astrofísico (Castro-Tirado et al., 2004)⁷.

La segunda generación de telescopios BOOTES empezó el año 2004 con BOOTES-IR – el telescopio de 0.6 m con la cámara infrarroja. La red de telescopios la conforman el telescopio de 0.6 m con el espectrógrafo de baja dispersión para la estación La Mayora y otro telescopio de 0.63 m campo amplio para El Arenosillo. Esta red nueva estará capaz de identificar y observar las contrapartidas en el rango óptico desde 400 nm hasta el infrarrojo cercano en $2.5 \mu\text{m}$.

2.1 A Spectroscopic Robotic Observatory

La primera estación de BOOTES, BOOTES-1, fue inaugurada el año 1998 en la Estación de Sondeos Atmosféricos (ESAt) en el Centro de Experimentación de El Arenosillo de INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) a 40 km de Huelva. La ubicación tiene un cielo

⁷ Se puede medir la paralaje de un objeto hasta $2 \times 10^8 \text{ km} \simeq 1 \text{ UA}$.

muY oscuro, con acceso de la bóveda celeste hasta el horizonte siendo la estadísticas del tiempo muy favorables ($<10\%$ noches nubladas). La estación tiene dos cúpulas: la antigua 1A, dedicada a las observaciones del campo amplio, alberga la cámara de todo cielo y un sistema basado en el teleobjetivo 400 mm, con el campo de visión 5×5 grados. La nueva cúpula - 1B, del año 2001, alberga el telescopio triple de 30 cm+2 $\times$ 20 cm, para observar en tres filtros simultáneamente.

objetivo	CCD	filtro	tesela	campo de visión	época
Nikkor FishEye 16 mm 1:2.8					
f16.2 mm/2.8	ST-8	-	114''	54° $\times$ 36°	7/2002 – 11/2002
<i>ZEA proj.</i>	AP16E	-	114''	153° $\times$ 153°	11/2002 – now
Nikkor 18 mm 1:2.8					
f18 mm/2.8	ST-8	-	104''	43° $\times$ 29°	11/1999 – 7/2002
	AP16E	-	104''	91° $\times$ 91°	9/2005 – 4/2006
Nikkor 50 mm 1:1.2					
f51.8 mm/1.2	ST-8	R/I/V	35.8''	15.3° $\times$ 10.2°	7/1998 – 8/2004
Nikkor 400 mm 1:2.8					
f400 mm/2.8	ST-8	R	4.6''	2.0° $\times$ 1.3°	10/2004 – 4/2005
<i>f=390 mm</i>	AP16E	R	4.6''	5.3° $\times$ 5.3°	7/2005 – 4/2006
Celestron 20 cm OTA + Meade 1:6.3 focal reducer					
d200mm/1:5.7	ST-9	V	3.55''	30' $\times$ 30'	5/2004 – 12/2005
<i>f=1160 mm</i>	ST-8	V	1.60''	42' $\times$ 28'	12/2005 – 4/2006
BOOTES-1A Meade 20 cm OTA + Meade 1:6.3 focal reducer					
d200mm/1:5.4	ST-9	I	3.75''	32' $\times$ 32'	11/2004 – 10/2005
<i>f=1100 mm</i>	ST-8	I	1.70''	44' $\times$ 29'	7/2005 – 4/2006
BOOTES-1B Meade 30 cm OTA					
d300mm/1:3.2	ST-8	R/-	1.90''	48' $\times$ 32'	7/1998 – 11/2000
<i>f=975 mm</i>					5/2005 – 6/2006
d300mm/1:3.7	ST-8	-	1.65''	43' $\times$ 28'	11/2000 – 5/2005
<i>spectrograph</i>					
d300mm/1:5.2	ST-8	R	1.17''	30' $\times$ 20'	1/2006 – 4/2006
<i>f=1580 mm</i>	CM-2	-	1.70''	29' $\times$ 29'	9/2006 – 11/2006
BOOTES-2 Meade 30 cm OTA					
d300mm/1:3.3	ST-9 (C1)	I	4.03''	34' $\times$ 34'	11/2002 – 8/2004
<i>f=1005 mm</i>					
d300mm/1:5.2	ixon	-	2.14''	18' $\times$ 18'	6/2007 – now
<i>f=1580 mm</i>					

Table 1: Combinaciones óptica/CCD usadas en BOOTES.



Figure 8: El telescopio BOOTES-1B en El Arenosillo (Huelva)

La segunda estación (BOOTES-2), en La Mayora, el centro de experimentación del CSIC⁸. BOOTES-2 tiene un telescopio de 30 cm con la cámara CCD de alta velocidad (EM-CCD).

Los instrumentos se encargan de la sistemática exploración del cielo, respondiendo las alertas de GCN, recibidas por internet.

2.2 Administración del observatorio: RTS2

RTS2 es un sistema de control de telescopios robóticos. Consiste de varios servidores específicos de mecanismos, un servidor central y varios clientes de observación, comunicando por la red TCP-IP usando un protocolo textual. El núcleo del sistema está propuesto como el sistema independiente del actual equipo observacional, con los puntos de acceso para controlar varios tipos de monturas, cúpulas, CCDs y otros dispositivos. Los elementos de observación (objetivos, metainformación de imágenes), están depositados en la base de datos POSTGRES y disponibles por la interfaz WWW.

2.3 Análisis de las imágenes: JIBARO

JIBARO⁹ de Ugarte Postigo et al. (2005) es un conjunto de programas creados en el ámbito de los proyectos BOOTES, para reducir y

⁸ Consejo Superior de Investigaciones Científicas

⁹ Joined utilities in **B**ootes for the **A**nalysis and **R**eduction of **O**bservations

analizar imágenes astronómicas en el tiempo real.

El resultado de este análisis es la metainformación sobre cada imagen, guardada en su cabecera y en la base de datos. La información se utiliza para mejorar en el modo automático el apuntado del telescopio (a recentrar o a construir el modelo de apuntado), durante el almacenamiento de los imágenes y simplifica la precisa fotometría de los imágenes obtenidos.

El programa de reducción recibe como entrada la imagen científica cruda que debe tratar así como las imágenes de calibración correspondientes. El programa realiza las operaciones necesarias para calibrar la imagen así como un cálculo de los errores debidos al proceso de reducción. Las correcciones actualmente implementadas en nuestra rutina son siguientes:

Corriente de oscuridad: Los detectores sufren de nonuniformidad de la carga básica que no depende de la iluminación. Este patrón y el ruido asociado depende de la temperatura¹⁰. La imagen de corriente de oscuridad es una imagen de igual tiempo de exposición que la imagen científica y a la misma temperatura, pero con el obturador cerrado. De la imagen científica se descuenta.

Campo plano: La respuesta de las teselas del CCD no es uniforme (debido a la diferente sensibilidad de cada elemento o a la diferente transmisión del sistema óptico), sino para la mayoría de ellas se puede corregir usando la imagen con la iluminación uniforme¹¹. La imagen normalizada se usa para dividir la imagen científica. Dos imágenes de campo plano pueden usarse para descubrir las teselas defectivas.

Detección de objetos: Una vez tenemos la imagen científica corregida podemos detectar los objetos y medir su brillo instrumental. Para ello existen diversas herramientas, basadas en la estructura similar.

Se detectan como objeto las teselas que exceden el valor del cielo

¹⁰ Y es por ello que las cámaras astronómicas deben refrigerarse a temperaturas muy bajas.

¹¹ Existen dos modos de realizar esta imagen, El primero se consigue apuntando el telescopio al cielo poco después del ocaso o poco antes del orto (sin estrellas, pero no tan brillante para sobreexponer el CCD). El segundo consiste de apuntar al interior de la cúpula iluminado con la lámpara preparada a tal efecto. Con ambos métodos se toman unas series de imágenes que se normalizan y se combinan para obtener una imagen del campo plano con el menor error posible.

en un cierto número de veces del ruido (teselas activas). Un objeto estará compuesto por teselas adyacentes y siempre deberán ser un número mayor que un mínimo establecido por el usuario, de modo que no se confundan con deefctos del chip como puntos calientes.

La salida del programa de detección es una lista con una línea por cada objeto, que contiene todos los datos característicos del mismo (posición y brillo *instrumental*, en unidades digitales).

Astrometría: Para registrar la imagen (describir la relación desde las coordenadas en la imagen $[x, y]$ y las coordenadas mundiales $[\alpha, \delta]$), se usan varion invariantes de geometría En esta manera se puede identificar el patrón de la imagen con el catálogo independientemente de la rotación y escala.

Cuándo se encuentra la transformación (cruda, con precisión a pocas teselas), se pueden identificar las parejas desde el catálogo y la imagen, y ajustar la transformación precisamente. Esta transformación se describe en la cabecera de la imagen y en la base de datos.

Fotometría: Teniendo la transformación de las coordenadas de la imagen a las coordenadas cel cielo, podemos buscar la correspondencia desde la lista de objetos encontrados en la imagen y el catálogo fotométrico. Una vez hecho esto, se realiza un ajuste, que relaciona los flujos medidas con las magnitudes de los objetos.

2.4 Observaciones de la fase temprana de los GRBs con BOOTES

Cámaras ASM Las cámaras de campo muy amplio de BOOTES constituyen del objetivo Nikkor FishEye 16mm 1:2.8 y de una CCD de formato largo. La primera camara se obtuvo el noviembre 2002, la segunda un año más tarde. La imagen cobra $\sim 90\%$ de la bóveda celeste y tiene una magnitud límite ~ 11.0 , sobre las condiciones optimales. El sistema de la camara de todo cielo toma imágenes cada 60 s durante toda la noche. Luego se puede buscar (manualmente) las imágenes si había sido algún GRB. Tab. 2. contiene las observaciones obtenidas.

Aunque se conocen GRBs que fueron más brillantes que es el límite de esta cámara de todo cielo (GRB 990123, GRB 030329, GRB 060117 (Sec. III), GRB 061007), este sistema aún no tenía la suerte.

Como los objetivos secundarios, estas camaras se usan para la

busca de bólidos nocturnos (se encontraron varios) y para la evaluación automática de las condiciones durante la noche.

BOOTES-1A: campo amplio Para observar el campo de HETE, de INTEGRAL o de Swift, el telescopio 1A estaba dotado con varios sistemas de campo amplio con el CCD de gran formato. Con este sistema, podíamos obtener las observaciones simultáneas de las cajas de error de GRBs de HETE y Swift (con el campo $90^\circ \times 90^\circ$.) y de INTEGRAL ($5^\circ \times 5^\circ$).

BOOTES-1B: el telescopio triple La experiencia con el sistema antiguo estaba bastante triste: aunque estaba capaz de observar, las monturas Meade no estaban diseñadas para el uso robótico en el observatorio remoto. Usando los programas sofisticados¹², se en todas maneras podía observar, pero todo el sistema era muy fragil y sufiera por desabastecimientos.

Durante el año 2002, ya estaba claro, que durante pocos años se lanzará *Swift* y que había que preparar la instrumentación a nueva situación.

¹² míos

GRB	exposición	límite	cámara	ref.
021201	45s	>10.0	1	Castro-Tirado et al. (2002)
030115	30s	>10.0	1	Castro-Tirado et al. (2003b)
030226	30s	>11.5	1	Castro-Tirado et al. (2003a)
041016	30s	>7	2	Jelínek et al. (2004)
041224	30s	>8.5	2	Castro-Tirado et al. (2005)
041226	30s	>7	2	Castro-Tirado et al. (2005)
050215B	45s	>10.0	2	Jelínek et al. (2005d)
050421	45s	>9.0	2	Jelínek et al. (2005e)
050505	45s	>9.2	2	Jelínek et al. (2005c)
050520	45s	>9	1	
050525	45s	>9	1	de Ugarte Postigo et al. (2005a)
050525	45s	>9	2	de Ugarte Postigo et al. (2005a)
051211A	45s	>10	2	Jelínek et al. (2005f)
060105	45s	>9	2	

Table 2: Observaciones de los campos de GRBs simultáneas con las explosiones con las cámaras de todo cielo BOOTES.

Se obtuvo la montura *Paramount*, por su confianza y velocidad bastante alta, y se preparó una plataforma de instalar tres telescopios a ella. Los tres telescopios eran de tipo Schmidt-Cassegrain, dos de los antiguos telescopios BOOTES (30 cm y 20 cm), uno particular de Alberto Castro-Tirado (20 cm). El telescopio de 30 cm llevó el espectrógrafo BOOTES y los telescopios pequeños observaron en filtros V y I (detalles de los instrumentos véase Tab. 1). El sistema era preparado para observación en el verano 2004 (Fig. 8). (En la mitad del año 2005, el espectrógrafo se ha cambiado para una cámara con filtro R.)

Cuándo se lanzó *Swift*, y cuándo se acertó a establecer la conexión a GCN (teniendo muchos problemas con las autorizaciones), empezaron los seguimientos. Éstos están compilados en la Tab. 3. Durante un año de su sevricio activo, BOOTES-1B obtuvo 4 detecciones de postluminiscencias de GRBs, y estableció 12 otros límites de flujo.

El 24 de Abril de 2004, la tormenta destruyó la gran parte de la electrónica de BOOTES, y aunque la montura se reparó y sirve

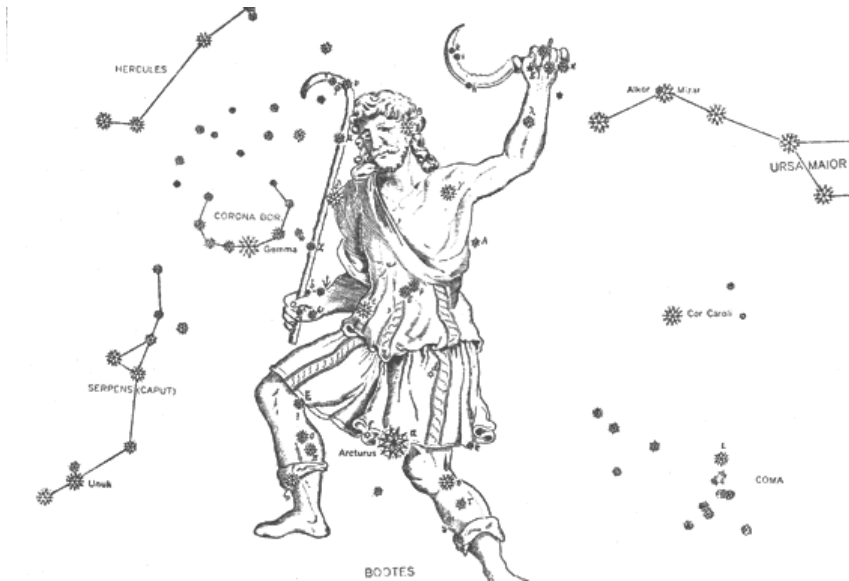
GRB	Δt_{GRB}	Δt_{GCN}	integración	magnitud	ref
050215c	22m	20.5m		V>16.5	Jelínek et al. (2005d)
050505	609s	70s		V>15,I>14	de Ugarte Postigo et al. (2005b)
050509B	62s	48s	10s,4min	V>11.5,12.5	
050525A	383s	28s	25s	V~15.5	Misra et al. (<i>en preparación</i>)
050528	71s	28s	60s	V>13.8,I>13.0	Jelínek et al. (2005b)
050730	233s	172s	300s	R>18.0	
050805A	136s	66s	5x300s	R>18.0	
050805B	62s	7.2s	10s	R>16.0	
050824	636s	55.8s	600s	R = 18.2	Sollerman et al. (2007)
050904	124s	43s	10s	R>16.6	Haislip et al. (2006)
					Jelínek et al. (2005a)
050922C	228s	62.3s	2x10 s	R~14.5	Jelínek et al. (<i>en preparación</i>)
051109A	54.8s	27s	10s	R ~ 16.2	Jelínek et al. (2005g)
051211B	23s	42s	10s	I>14	
051221B	3m55s	27.8s	10s	V>13.3	de Ugarte Postigo et al. (2005c)
060111	296s			R>16.5	
060421	61.2s	47.6s		R>17.1	
061110B	11m36s	82s		R>17	
070704	490s	173s		R>17.8	

Table 3: Seguimientos de GRBs hechos con BOOTES-1B. La tabla contiene todas las reacciones con menos que 30 min. Δt_{GRB} es el tiempo desde GRB y el comenzo de la obteneción de la primera imagen, Δt_{GCN} es el tiempo de reacción a la alerta (de la recepción del paquete hasta la exposición). Detecciones están acentuadas con negrilla. Esto es la versión ampliada de la tabla antiguamente publicada en Jelínek et al. (2006).

ahora en BOOTES-2, ya está claro, que la prioridad tiene la nueva generación, siendo preparada por años - los telescopios de 60 cm de alta velocidad. Paramount quedará en servicio como la montura para BOOTES-1A.

2.5 Conclusiones

BOOTES-1B enseñó que está capaz de seguir las postluminiscencias de GRBs y obtuvo 4 observaciones de ellas. Otros telescopios y sistemas de campo amplio soportaron este instrumento y pueden ofrecer unos límites complementarios, inaccesibles con seguimiento o una detección si la postluminiscencia sería muy brillante.



III. EL BRILLANTE FLASH ÓPTICO DEL GRB 060117

El GRB 060117 fue un evento brillante y de larga duración, siendo detectado por el satélite *Swift* el 17 de enero de 2006 a las 6:50:01.6 UT. Mostró una estructura de multi-pico con $T_{90}=16 \pm 1$ s y flujo máximo 48.9 ± 1.6 ph cm⁻²s⁻¹. Las coordenadas computadas por *Swift* estaban disponibles a los 19s y fueron distribuidas inmediatamente por la red GCN (Cummings et al., 2006).

FRAM recibió el aviso a las 06:50:20.8 UT, 19.2s después del disparo y comenzó inmediatamente a tomar imágenes. La primera exposición comenzó a las 06:52:05.4, 123.8s después del GRB. Ocho imágenes con diversas exposiciones fueron tomadas antes del final de la secuencia de observación (Fig. 10). Un objeto brillante se observó ya en la primera imagen, cayendo rápidamente en brillo ($F \propto t^{-\alpha}$ con $\alpha = 1.7$), siendo su presencia anunciada por Kubánek et al. (2006) por Kubánek et al. (2006) y Jelínek et al. (2006) justo después del descubrimiento. La apariencia del objeto es similar a las estrellas en la imagen, y no se movió más que 2'' en el curso de nuestra observación, descartando que fuera un objeto cercano de la Tierra que cruzaba el campo visual. Las condiciones atmosféricas durante la observación eran muy buenas, pero la Luna estaba casi llena (93%) y la posición del GRB estaba a no más de 5° sobre el horizonte. Por lo tanto, los límites de la magnitud de nuestra observación eran ~ 2.5 mag peor que el límite técnico del instrumento de FRAM en las condiciones óptimas. La tab.1 exhibe el registro de nuestras observaciones (véase también el la Fig.9), donde los errores de la magnitud no incluyen el error sistemático de la magnitud de USNO-B1.0 R1, que debe ser <0.1 mag.

La contrapartida óptica de GRB 060117 fue encontrada 128.8s

Table 4: Observaciones fotométricas de la banda R óptica del flash GRB 060117. Las magnitudes no están corregidas para la extinción galáctica ($A_R \sim 0.01$ mag). $T - T_0$ es el tiempo medio de exposición desde el GRB.

UT Date of exp. start	$T - T_0[s]$	$T_{\text{exp}}[s]$	R	δR
2006 Jan. 17.786169	128.8	10	10.12	0.13
2006 Jan. 17.786833	159.1	20	10.68	0.12
2006 Jan. 17.786343	199.3	30	11.22	0.14
2006 Jan. 17.787583	249.7	40	11.62	0.18
2006 Jan. 17.789109	382.4	10	12.09	0.45
2006 Jan. 17.789410	403.4	20	12.25	0.36
2006 Jan. 17.789815	452.9	30	12.49	0.37
2006 Jan. 17.790336	502.9	40	12.62	0.37

después de la explosión en las coordenadas

$$\alpha = 21^{\text{h}}51^{\text{m}}36^{\text{s}}23 \quad \delta = -59^{\circ}58'39''.3 \quad \pm 1''.5 \quad (\text{J2000}).$$

Las cantidades de error dan una incertidumbre de $1\text{-}\sigma$ incluyendo el error sistemático.

3.1 Seguimiento

Swift no podía observar el GRB con sus instrumentos X u ópticos, debido a su restricción que supone el Sol (Campana et al., 2006a). Un mes después, los días 14 y 15 de febrero de 2006, *Swift*/XRT (Burrows et al., 2005) apuntó a la posición de la explosión y no detectó ninguna fuente en la posición correspondiente con un límite de $3\text{-}\sigma$ de 1.0×10^{-3} cuentas s^{-1} , correspondiendo a un límite superior del flujo 0.2 – 10 keV de 2.3×10^{-14} erg $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. La explosión también fue detectada por *Konus-Wind* (Golenetskii et al., 2006) y por *Suzaku* WAM (Terada et al., 2006).

Desafortunadamente, las observaciones ópticas posteriores no pudieron ser obtenidas debido al tiempo nublado en Nueva Zelanda y Sudáfrica. Los límites divulgados por PROMPT (Nysewander et al., 2006) (observaciones que comenzaron 18.0 h después de que la explosión), sugieren un decaimiento asombrosamente rápido. La búsqueda para una posluminiscencia de radio tampoco dio frutos (Schmidt et al., 2006).

El pseudocorrimiento rojo de los datos de *Swift* surgiría $z \simeq 1.3 \pm 0.3$ (Cummings et al., 2006), mientras que la estimación del corrimiento rojo basada en los datos de rayos gamma de *Konus-Wind* da $z \simeq 0.45 \pm 0.2$ (Pelangeon & Atteia, 2006).

3.2 Adquisición y reducción de datos

FRAM es parte del observatorio del rayos cósmicos Pierre Auger en Argentina (Pierre Auger Collaboration, 2005), y su propósito principal es a supervisar en tiempo la transmisión atmosférica. FRAM trabaja como el sistema independiente, completamente robótico, basado en el RTS2 (Kubánek et al., 2004), y realiza una calibración fotométrica del cielo en varias longitudes de onda desde ultravioleta a óptico usando un telescopio de 0.2m y un fotomultiplicador fotoeléctrico. Como objetivo primario, FRAM observa un sistema de estrellas estándar elegidas y de una fuente de luz terrestre. De estas

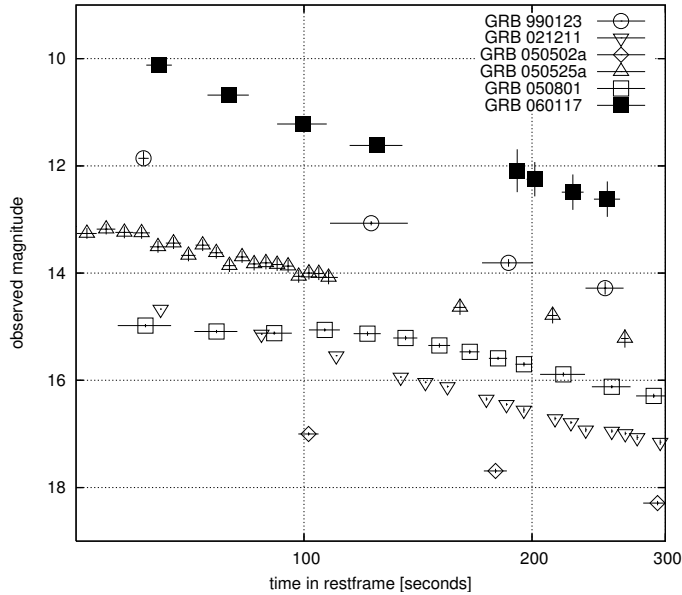


Figure 9: La curva de luz óptica del GRB 060117 comparada con algunos otros GRBs ópticamente brillantes: GRB 990123 (Akerlof et al., 1999), GRB 021211 (Li et al., 2003), GRB 050502a (Guidorzi et al., 2005), GRB 050525a (Blustin et al., 2006), and GRB 050801 (Rykoff et al., 2006). En esta figura usamos $z \approx 1.0$ para GRB 060117.

observaciones obtiene coeficientes de extinción inmediatos y la dependencia de la longitud de onda con la extinción. Además, FRAM puede seguir alarmas de GCN, usando su cámara de campo ancho con un filtro fijo de la banda R .

La cámara de campo ancho consiste de un teleobjetivo Carl Zeiss Sonnar 200 mm 1:2.8, una CCD SBIG ST7, y de un filtro R-Bessel. La cámara ST7 tiene una CCD de 768×512 teselas, modelo Kodak KAF-0402E que cubre un campo visual de $120' \times 80'$ con una escala de $9''.6$ /tesela. El diámetro eficaz de la lente es 57 mm y los magnitud límite 3σ bajo las condiciones óptimas alcanza $R \sim 15.0$ para 30 s exposición.

Las imágenes crudas son corregidas usando la media de varias exposiciones oscuras. Dado la corriente oscura significativa de la cámara, las exposiciones oscuras fueron tratadas para cada tiempo de exposición por separado. La corrección de campo plano fue aplicada usando la media de 40 exposiciones normalizadas de 1 s obtenidas a través del cielo crepuscular. La fotometría de la abertura fue hecha con la rutina en IRAF¹³ `phot` con el diámetro de la abertura de 2 teselas. Para conseguir una posición astrométrica exacta de la fuente, utilizamos las cuatro imágenes más significativas y computamos la posición media.

Las imágenes fueron calibradas astrométricamente y fotométricamente en marcha con `past`, el programa en el contexto de JIBARO (de Ugarte Postigo et al., 2005), usando todas las fuentes con la significación más de de $10\text{-}\sigma$ de la imagen comparado a las posiciones y las magnitudes $R1$ de USNO-B1.0 (Monet et al., 1998). `past` emplea un ajuste polinómico (sigma acortado) de la superficie de tercer grado. Los errores sistemáticos de USNO-B1.0 deben ser menos de $0''.2$ en el astrometría y menos de 0.1 mag para la fotometría. Dado que la extinción galáctica, tomada de las mapas publicadas por Schlegel et al. (1998) es muy baja ($E_{BV} = 0.038$), desechamos este valor en la discusión siguiente.

¹³ IRAF es distribuido por el National Optical Astronomy Observatory, que es funcionado por la Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., según los términos del acuerdo cooperativo con el National Science Foundation.

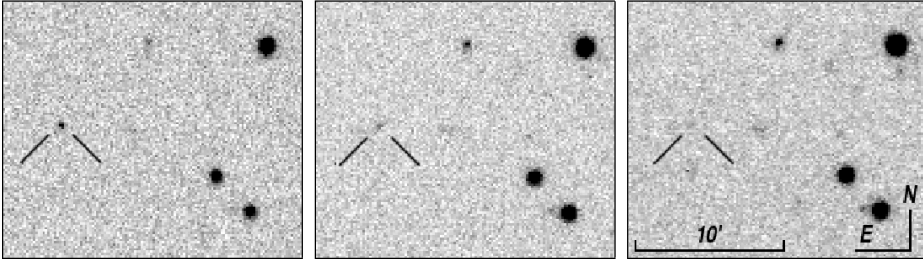


Figure 10: Detalles del campo del flash óptico del GRB 060117 observado por FRAM. Imágenes tomadas 129, 249, y 480s después de la alerta.

3.3 Discusión

En la búsqueda para la interpretación de la curva de luz, asumimos un medio interstelar uniforme, y que la influencia de la emisión interna del choque sobre la apariencia de curva de luz es insignificante porque nuestra observación comienza ~ 100 s después del final del GRB.

En el caso más simple, la curva de luz se puede ajustar con una sola ley de potencia con un índice temporal $\alpha = -1.73 \pm 0.12$. El $\chi^2/d.o.f.$ de este ajuste es 1.296. Si asumimos que este decaimiento se debe a la onda de un choque delantero puro, conseguimos el valor del índice de la ley de potencia de la distribución energética de electrones $p = 3.3 \pm 0.1$. Este valor es muy alto en comparación con otras fuentes ópticas conocidas¹⁴, pero es consistente con $p = 3.82^{+1.0}_{-0.5}$ según lo computado de los espectros del *Konus-Wind* del GRB (Golenetskii et al., 2006) (cf. Shen et al., 2005). En contraste, si el decaimiento lineal se debe a un choque reverso puro, conseguimos $p = 2.0 \pm 0.1$, cerca del valor típico de las fuentes esporádicas ópticas observadas hasta ahora. Debemos reseñar que la emisión de un choque reverso como el observado se espera este acompañada por un choque delantero con $\alpha_F \simeq -0.7$.

Otra posibilidad (siguiendo Shao & Dai, 2005) es interpretar los datos como curva de luz de tipo I (Zhang et al., 2003), que representa una transición entre el choque reverso y el delantero con el paso de la frecuencia ν_m a través de la banda observada en el tiempo $t_{m,f}$. Asumimos que la curva de luz es dominada inicialmente por un

¹⁴ Teóricamente, una fuente relativística debería tener siempre $p = 2.2$.

choque reverso, cayendo rápidamente, con

$$F_{\nu,r} \sim t_d^{-(27p+7)/35},$$

seguido por un choque delantero que aumenta como

$$F_{\nu,r} \sim t_d^{+1/2}$$

antes de $t_{m,f}$ y luego decae con

$$F_{\nu,f} \sim t_d^{-(3p-3)/4}.$$

Usando la minimización χ^2 para ajustar este escenario, obtenemos $p = 2.96 \pm 0.06$, la magnitud del máximo en la curva de luz del choque delantero $m_{m,f} = 11.82 \pm 0.04$, el instante del máximo $t_{m,f} = 301 \pm 4$ s (después de la explosión), y la magnitud del choque reverso al $t = t_{m,f}$ siendo $m_{m,r} = 12.43 \pm 0.05$ ($\chi^2/d.o.f.$ de este ajuste es 0.015). Los índices correspondientes del decaimiento son $\alpha_R = 2.49 \pm 0.05$ y $\alpha_F = 1.47 \pm 0.03$ (vea Fig 11). Si el tiempo de la travesía $t_\times$ (Zhang et al., 2003) coincide con el final del GRB (i.e. ~ 20 s), después podemos estimar la magnitud máxima de este OT como $R \sim 5$ mag, por la extrapolación posterior.

Nótese, que esto es solamente una de las interpretaciones plausibles. Puede haber otras explicaciones posibles para este comportamiento incluyendo cambio de la densidad en el medio (Lazzati et al., 2002) o inyección de la energía (Björnsson et al., 2004). Sin una observación multibanda es imposible distinguir cual de estas posibilidades ocurrió realmente.

La posición de la explosión y su distancia del Sol hizo que el objeto fue difícil de observar. PROMPT (Nysewander et al., 2006) demuestra que el OT brillante decayó muy rápido, y 20 horas después de la explosión que su magnitud era ya $I > 21.2$. Usando el procedimiento de Šimon et al. (2001) transformamos este límite al filtro de nuestra observación: $R \gtrsim 21.5$. De este límite entonces conseguimos la estimación de un decaimiento como $\alpha < -1.62$. Entre las tres interpretaciones que hemos postulado, sólo el escenario de choque delantero puro del choque es compatible con este límite sin tener que introducir una rotura del chorro inusualmente temprana, que se requiere para explicar los otros dos escenarios.

Pronto después del disparo de *Swift*, se sugirió que el GRB podía ser a un corrimiento rojo extremadamente bajo (Tanvir, 2006) debido

a la presencia de una galaxia próxima, PGC 128172, con $z = 0.04$ en el la zona de error de *Swift*. Sin embargo, este objeto descubierto está a $3'.1$ de esta galaxia, por consiguiente la distancia proyectada – 160 kpc – es aproximadamente cuatro veces más grande que el diámetro principal visible de esta galaxia. Además, el ángulo de posición de la posible contrapartida óptica (OT) con respecto al PGC 128172, que observamos prácticamente de canto, es 97° . La asociación del OT con esta galaxia es, por lo tanto, bastante inverosímil.

3.4 Conclusiones

GRB 060117 es (en términos de flujo máximo) el GRB más intenso detectado hasta ahora. Con el brillo máximo de $R = 10.1$ mag (véase Tab. 4), FRAM ha descubierto una de las emisiones ópticamente más brillantes jamás detectadas. El decaimiento óptico inicial fue uno de los más rápidos de posluminiscencias ópticas tempranas de todos los GRBs observados.

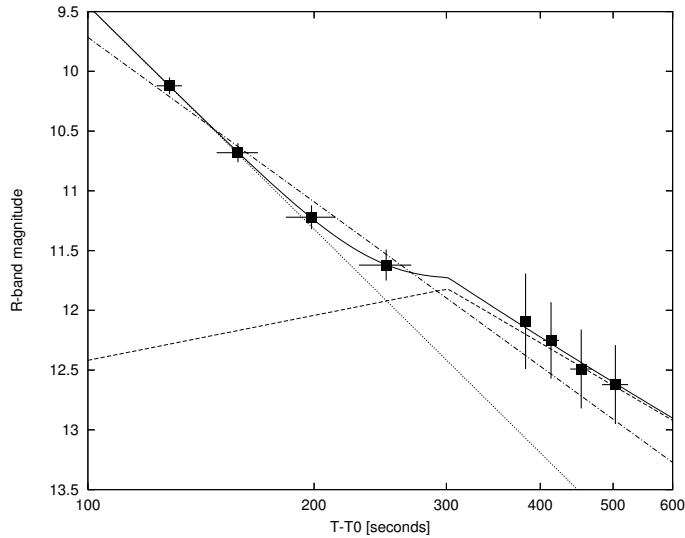


Figure 11: La curva de luz de la posluminiscencia del GRB 060117 en el filtro R. Las observaciones están ajustadas con una superposición de la emisión de las ondas de choque reverso (línea punteada) y choque delantero (línea discontinua). El ajuste lineal está indicado con la línea de trazo y punto.

Hemos presentado 3 escenarios para explicar la curva de luz. El cambio evidente en su pendiente no se explica en dos escenarios simples, donde suponemos la curva de luz observada solamente como el rastro de un choque bien delantero, o bien reverso. En el tercer escenario (preferido), la forma de la curva de luz se explica como una transición entre la emisión del choque reverso y delantero. La interpretación de únicamente un choque delantero está conforme con el límite de PROMPT, pero en discordancia con la valor de p . Otros dos escenarios (es decir éstos que implican choque reverso) resultan en un choque delantero decayendo relativamente lento, y los límites posteriores requieren una rotura temprana del jet a $t_j \sim 0.2$ d.

El progreso en el estudio del caso particular de GRB 060117 depende de la medida de su distancia. Por lo tanto las observaciones profundas y la identificación de la galaxia anfitriona con un telescopio grande es de suma importancia a realizar próximamente.

Una muestra más grande de observaciones rápidas de GRB es necesaria para decidir si esta clase de transición, sugerida ya para otras explosiones, es común o no.



IV. CURSOS

La fase de docencia de mi doctorado he estudiado durante los años 2004 – 2006 en el programa “Métodos y Técnicas Avanzadas en Física” de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada. Durante esta fase hay que realizar al menos 20 creditos, de cuáles más que mitad debe ser del programa principal. He seleccionado los cursos relacionados a mi especialización y de mi interés personal. La fase de docencia, junto con la siguiente, fase de investigación tutelada (en que hay que presentar y defender el trabajo de investigación), juntan la enseñanza de Tercer ciclo.

Los cursos que he cursado tienen una nivel generalmente bastante alta y no tengo ningún comentario acerca la alta profesionalidad de los profesores. Basicamente todas las materias fueron relevantes para mi especialización en los diversos cursos. Incluso en aquellos, en los que no esperaba un impacto directo a las explosiones de rayos gamma y diseño de los instrumentos para su observación. Se puede concluir, que no de causalidad, los tutores se esmeraban para hacernos llegar toda la información.

Por otro lado, la busca del plan de estudio no es optimal – tanto en las paginas web como preguntando al personal universitario – y esto sí creo debe mejorarse.

Sigue un resumen de los cursos que he atendido en orden alfabético.

4.1 Astrofísica y cosmología

El curso de cosmología de profesores Eduardo Battaner y Mariano Moles es una introducción a cosmología.

1. (Battaner) Gravedad. El principio Cosmológico.
2. (Moles) Clasificación de modelos cosmológicos. Parámetros cosmológicos.
3. (Moles) Tests globales. Escala de distancias. Determinación de

parámetros cosmológicos. 4. (Battaner) Materia oscura. Materia oscura en los cúmulos y en las galaxias. MOND. Otras alternativas. 5. (Battaner) Masa de Jeans. Formación de estructuras a gran escala. 6. (Battaner) Fondo Cósmico de Microondas. 7. (Moles) Distribución de galaxias a gran escala. Contraste de densidad empírico. 8. (Moles) Evolución cósmica de estructuras, cúmulos y galaxias.

4.2 Colorimetría de materiales e imágenes

profs. Enrique Hita Villaverde y Javier Romero Mora

Formar a los alumnos de tercer ciclo en los fundamentos de la Colorimetría, su métrica y su aplicación a la medida del color y el tratamiento de imágenes en color.

El alumno sabrá/ comprenderá: Las técnicas convencionales de medida del color en materiales opacos y transparentes. Las fórmulas de diferencia de color más usuales en la Ciencia y en la Industria. Los espacios de representación del color actuales. Las técnicas de medida del color en imágenes. Caracterizar el color de las imágenes.

El alumno será capaz de: Desarrollar sus propios programas de cálculo de coordenadas de cromaticidad. Evaluar la apariencia del color mediante métodos numéricos. Utilizar las fuentes bibliográficas comunes en Colorimetría. Adquirir imágenes en color con métodos digitales. Encontrar información relativa a la Colorimetría en bases de datos y revistas especializadas.

4.3 Formación y evolución de galaxias

profs. Emilio Alfaro y Enrique Perez.

El equilibrio entre la ionización y la recombinación en una nebulosa. El balance energético, entre el calentamiento y el enfriamiento de una nebulosa. La formación del espectro de emisión nebular. Poblaciones estelares Cinemática estelar Fósiles galácticos Modelos de formación El futuro desde el ayer

Introducir al alumno en la historia, metodología y técnicas de investigación de la formación de galaxias. Se hará especial énfasis en los aspectos multidisciplinar y multirango espectral del problema. El alumno aprenderá los mecanismos físicos básicos que regulan la estructura del medio interestelar ionizado.

4.4 Modelización del sistema visual humano: Aspectos cromáticos y refractivos

profs. José Antonio García y Luis Miguel Jimenez del Barco

Óptica Visual. Métodos y técnicas para la caracterización del sistema visual humano. Calidad visual y calidad óptica de la imagen retiniana. Cirugía refractiva: fundamentos ópticos y técnicas. Mecanismos de la visión del color. Anomalías. Teoría y modelos de la visión del Color. Métodos y técnicas psicofísicas de medida. Efectos en la percepción del color. Constancia del color y adaptación cromática. Investigación en Visión: resultados y tendencias actuales.

Los objetivos generales comprenden la formación y actualización en las diferentes técnicas, métodos no invasivos e instrumentación, empleados en la investigación sobre Física de la Visión y modelización del sistema visual humano, tanto en cuanto a visión del color se refiere, como a la evaluación y control de funciones visuales y de calidad de imagen retiniana, especialmente tras los procesos de cirugía refractiva.

Concretamente, el alumno sabrá/ comprenderá: el funcionamiento del ojo humano como sistema óptico los diferentes modelos esquemáticos y reducidos de ojo el concepto de ojo amétrope y emétrope las características de las diferentes ametropías visuales el proceso de formación de imágenes en el sistemas visual humano (SVH) las características de la imagen retiniana las aberraciones ópticas en la imagen retiniana los diferentes métodos, técnicas e instrumentos empleados para evaluar la imagen retiniana los diferentes métodos y técnicas para evaluar la función visual el fundamento óptico de las técnicas de cirugía refractiva y su estado actual el concepto de color físico, psicofísico y color percibido. los factores de los que depende la visión del color. las causas que originan la visión defectiva del color. las características de las diferentes discromatopsias. los tipos de discromatopsias, su clasificación y prevalencia el fundamento de las diferentes pruebas y test para la detección y clasificación de las discromatopsias. el fundamento de las teorías y modelos de la visión del color

El alumno será capaz de:

Contribuir a la elaboración de modelos visuales Evaluar la calidad visual de la imagen retiniana Emplear las diferentes pruebas de calidad de visión Realizar un análisis completo de la visión del color

Emplear las diferentes pruebas de detección de discromatopsias Contribuir a la elaboración de modelos de visión cromática Manejar los diferentes métodos de acceso a fuentes bibliográficas y revistas científicas Realizar correctamente las búsquedas bibliográficas apropiadas para poner a punto un tema científico concreto Presentar correctamente una memoria escrita de puesta a punto de una problemática científica, de la metodología para su estudio y resolución y del análisis de los resultados. Exponer correctamente un trabajo científico

4.5 Radioastronomía

profs. Antonio Alberdi y Lucas Lara

Breve descripción del contenido 1- Introducción a la astrofísica de ondas de radio 2- Procesos radiativos en radioastronomía: procesos térmicos y procesos no térmicos 3- Radiotelescopios: Observables en radioastronomía. El radiotelescopio de antena única. Receptores: espectrómetros. Interferometría: síntesis de apertura. Interferometría no conexa: VLBI 4- Escenarios astrofísicos para la radioastronomía: Medio interestelar. Radio supernovas. Púlsares. Núcleos activos de galaxias 5- Aspectos prácticos: Preparación de propuestas. Acceso a bases de datos. Métodos de reconstrucción de imágenes. Autocalibración, inversión de Fourier y deconvolución. Métodos de máxima entropía Nota: el apartado 5 tendría carácter práctico y se realizaría en el Instituto de Astrofísica de Andalucía

4.6 Técnicas de teledetección del sistema terrestre

profs. Francisco José Olmo Reyes y Lucas Alados Arboledas

4.7 Teledetección espacial de atmósferas planetarias

prof. Manuel Lopez Puertas.

El alumno sabrá/ comprenderá: Introducción general a la teledetección con instrumentación en plataformas espaciales. Tipos de órbitas, tipo de sondeo, Técnicas e instrumentación utilizada. Satélites meteorológicos. Satélites de desarrollo e investigación usados en la atmósfera terrestre. Teledetección en el infrarrojo: principios y principales dificultades. Procesado de datos de satélite (inver-

sión, asimilación). Satélites actualmente en uso para la observación de la atmósfera. Principales misiones planetarias a Venus y Marte. Principales misiones planetarias a los planetas gigantes y satélites.

El alumno será capaz de: Determinar (a grosso modo) la emisión emitida por un planeta en todo el intervalo espectral. Obtener la temperatura y abundancias de gases de una atmósfera planetaria dado un espectro infrarrojo.

REFERENCIAS

- Akerlof, C., Balsano, R., Barthelmy, S., et al. 1999, *Nature*, 398, 400
- Amati, L., Frontera, F., Tavani, M., et al. 2002, *A&Ap*, 390, 81
- Björnsson, G., Gudmundsson, E. H., & Jóhannesson, G. 2004, *ApJL*, 615, L77
- Bloom, J. S., Frail, D. A., & Kulkarni, S. R. 2003, *ApJ*, 594, 674
- Blustin, A., Band, D., Barthelmy, S., et al. 2006, *ApJ*, 637, 901
- Burrows, D. N., Hill, J. E., Nousek, J. A., et al. 2005, *Space Science Reviews*, 120, 165
- Campana, S., Barthelmy, S., Gehrels, N., et al. 2006a, *GCN* 4533
- Campana, S., Mangano, V., Blustin, A. J., et al. 2006b, *Nature*, 442, 1008
- Castro-Tirado, A. J., de Ugarte Postigo, A., Mateo Sanguino, T. J., et al. 2003a, *GRB Coordinates Network*, 1887, 1
- Castro-Tirado, A. J., de Ugarte Postigo, A., Mateo Sanguino, T. J., et al. 2002, *GRB Coordinates Network*, 1720, 1
- Castro-Tirado, A. J., Jelínek, M., Mateo Sanguino, T. J., de Ugarte Postigo, A., & the BOOTES team. 2004, *Astronomische Nachrichten*, 325, 679
- Castro-Tirado, A. J., Jelínek, M., de Ugarte Postigo, A., et al. 2005, *GRB Coordinates Network*, 2961, 1
- Castro-Tirado, A. J., Mateo Sanguino, T. J., de Ugarte Postigo, A., et al. 2003b, *GRB Coordinates Network*, 1826, 1
- Costa, E., Frontera, F., Heise, J., et al. 1997, *Nature*, 387, 783
- Cummings, J., Barbier, L., Barthelmy, S., et al. 2006, *GCN* 4538
- de Ugarte Postigo, A., Castro-Tirado, A. J., Guziy, S., et al. 2006, *ApJL*, 648, L83
- de Ugarte Postigo, A., Jelínek, M., Gorosabel, J., et al. 2005, in *Astrofísica Robótica en España*, ed. A. Castro-Tirado, B. de la Morena, & J. Torres, Madrid, 35–50
- de Ugarte Postigo, A., Jelínek, M., Gorosabel, J., et al. 2005a, *GRB Coordinates Network*, 3480, 1
- de Ugarte Postigo, A., Jelínek, M., Gorosabel, J., et al. 2005b, *GRB Coordinates Network*, 3376, 1
- de Ugarte Postigo, A., Jelínek, M., Vitek, S., et al. 2005c, *GRB Coordinates Network*, 4379, 1
- Djorgovski, S. G., Bloom, J. S., & Kulkarni, S. R. 2003, *ApJL*, 591, L13
- Fenimore, E. E. & Ramirez-Ruiz, E. 2000, *ArXiv Astrophysics e-prints*
- Fishman, G. J. & Meegan, C. A. 1995, *ARAA*, 33, 415
- Fishman, G. J., Meegan, C. A., Wilson, R. B., et al. 1994, 92, 229
- Fox, D. B., Frail, D. A., Price, P. A., et al. 2005, *Nature*, 437, 845

- Fryer, C. L., Woosley, S. E., & Hartmann, D. H. 1999, *ApJ*, 526, 152
- Galama, T. J., Vreeswijk, P. M., van Paradijs, J., et al. 1998, *Nature*, 395, 670
- Gehrels, N., Sarazin, C. L., O'Brien, P. T., et al. 2005, *Nature*, 437, 851
- Ghirlanda, G., Ghisellini, G., & Lazzati, D. 2004, *ApJ*, 616, 331
- Golenetskii, S., Aptekar, R., Mazets, E., et al. 2006, GCN 4542
- Gorosabel, J., Castro-Tirado, A. J., Guziy, S., et al. 2006, *A&Ap*, 450, 87
- Guidorzi, C., Monfardini, A., Gomboc, A., et al. 2005, *ApJL*, 630, L121
- Haislip, J. B., Nysewander, M. C., Reichart, D. E., et al. 2006, *Nature*, 440, 181
- Hjorth, J., Sollerman, J., Møller, P., et al. 2003, *Nature*, 423, 847
- Hurley, K., Boggs, S. E., Smith, D. M., et al. 2005, *Nature*, 434, 1098
- Jelínek, M., Castro-Tirado, A. J., Kubánek, P., et al. 2006, in *American Institute of Physics Conference Series*, Vol. 836, *Gamma-Ray Bursts in the Swift Era*, ed. S. S. Holt, N. Gehrels, & J. A. Nousek, 688–691
- Jelínek, M., Kubánek, P., Prouza, M., Nekola, M., & Hudec, R. 2006, GCN 4536
- Jelínek, M., Castro-Tirado, A. J., de Ugarte Postigo, A., et al. 2005a, *GRB Coordinates Network*, 3929, 1
- Jelínek, M., Castro-Tirado, A. J., de Ugarte Postigo, A., et al. 2005b, *GRB Coordinates Network*, 3500, 1
- Jelínek, M., Castro-Tirado, A. J., de Ugarte Postigo, A., et al. 2004, *GRB Coordinates Network*, 2822, 1
- Jelínek, M., Castro-Tirado, A. J., Gorosabel, J., et al. 2005c, *GRB Coordinates Network*, 3373, 1
- Jelínek, M., Castro-Tirado, A. J., Gorosabel, J., et al. 2005d, *GRB Coordinates Network*, 3029, 1
- Jelínek, M., Castro-Tirado, A. J., Gorosabel, J., et al. 2005e, *GRB Coordinates Network*, 3298, 1
- Jelínek, M., Castro-Tirado, A. J., Vitek, S., et al. 2005f, *GRB Coordinates Network*, 4333, 1
- Jelínek, M., de Ugarte Postigo, A., Castro-Tirado, A. J., et al. 2005g, *GRB Coordinates Network*, 4227, 1
- Klebesadel, R. W., Strong, I. B., & Olson, R. A. 1973, *ApJL*, 182, L85+
- Kouveliotou, C., Meegan, C. A., Fishman, G. J., et al. 1993, *ApJL*, 413, L101
- Kubánek, P., Jelínek, M., Nekola, M., et al. 2004, in *AIP Conf. Proc. 727: Gamma-Ray Bursts: 30 Years of Discovery*
- Kubánek, P., Jelínek, M., Prouza, M., Nekola, M., & Hudec, R. 2006, GCN 4535
- Lazzati, D., Rossi, E., Covino, S., Ghisellini, G., & Malesani, D. 2002, *A&Ap*, 396, L5
- Li, W., Filippenko, A. V., Chornock, R., & Jha, S. 2003, *ApJL*, 586, L9
- Meszáros, P., Rees, M. J., & Papathanassiou, H. 1994, *ApJ*, 432, 181
- Metzger, M. R., Djorgovski, S. G., Kulkarni, S. R., et al. 1997, *Nature*, 387, 878
- Monet, D. B. A., Canzian, B., Dahn, C., et al. 1998, *VizieR Online Data Catalog*, 1252, 0
- Narayan, R., Paczynski, B., & Piran, T. 1992, *ApJL*, 395, L83
- Nemiroff, R. J. 1994, *Comments on Astrophysics*, 17, 189
- Norris, J. P. 2002, *ApJ*, 579, 386
- Nysewander, M., LaChuyze, A., Reichart, D., et al. 2006, GCN 4548
- Paczynski, B. & Rhoads, J. E. 1993, *ApJL*, 418, L5+

- Pelangeon, A. & Atteia, J. L. 2006, GCN 4544
- Pierre Auger Collaboration. 2005, in Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conference, Pune, India
- Rykoff, E., Mangano, V., Yost, S., et al. 2006, ApJL, 638, L5
- Sari, R. & Piran, T. 1999, ApJ, 520, 641
- Sari, R., Piran, T., & Narayan, R. 1998, ApJL, 497, L17+
- Schlegel, D., Finkbeiner, D., & Davis, M. 1998, ApJ, 500, 525
- Schmidt, B., Wieringa, M., Frail, D. A., & Soderberg, A. 2006, GCN 4546
- Shao, L. & Dai, Z. G. 2005, ApJ, 633, 1027
- Shen, R., Kumar, P., & Robinson, E. 2005, astro-ph/0512489, 1
- Šimon, V., Hudec, R., Masetti, N., & Pizzichini, G. 2001, in ESA SP-459: Exploring the Gamma-Ray Universe, 441–444
- Sollerman, J., Fynbo, J. P. U., Gorosabel, J., et al. 2007, A&Ap, 466, 839
- Stanek, K. Z., Matheson, T., Garnavich, P. M., et al. 2003, ApJL, 591, L17
- Tanvir, N. 2006, GCN 4534
- Terada, Y., Yamaoka, K., Sugita, S., et al. 2006, GCN 4573
- van Paradijs, J., Groot, P. J., Galama, T., et al. 1997, Nature, 386, 686
- Woosley, S. E. 1993, ApJ, 405, 273
- Zhang, B., Kobayashi, S., & Mészáros, P. 2003, ApJ, 595, 950