

Universidad de Granada
Facultad de Ciencias



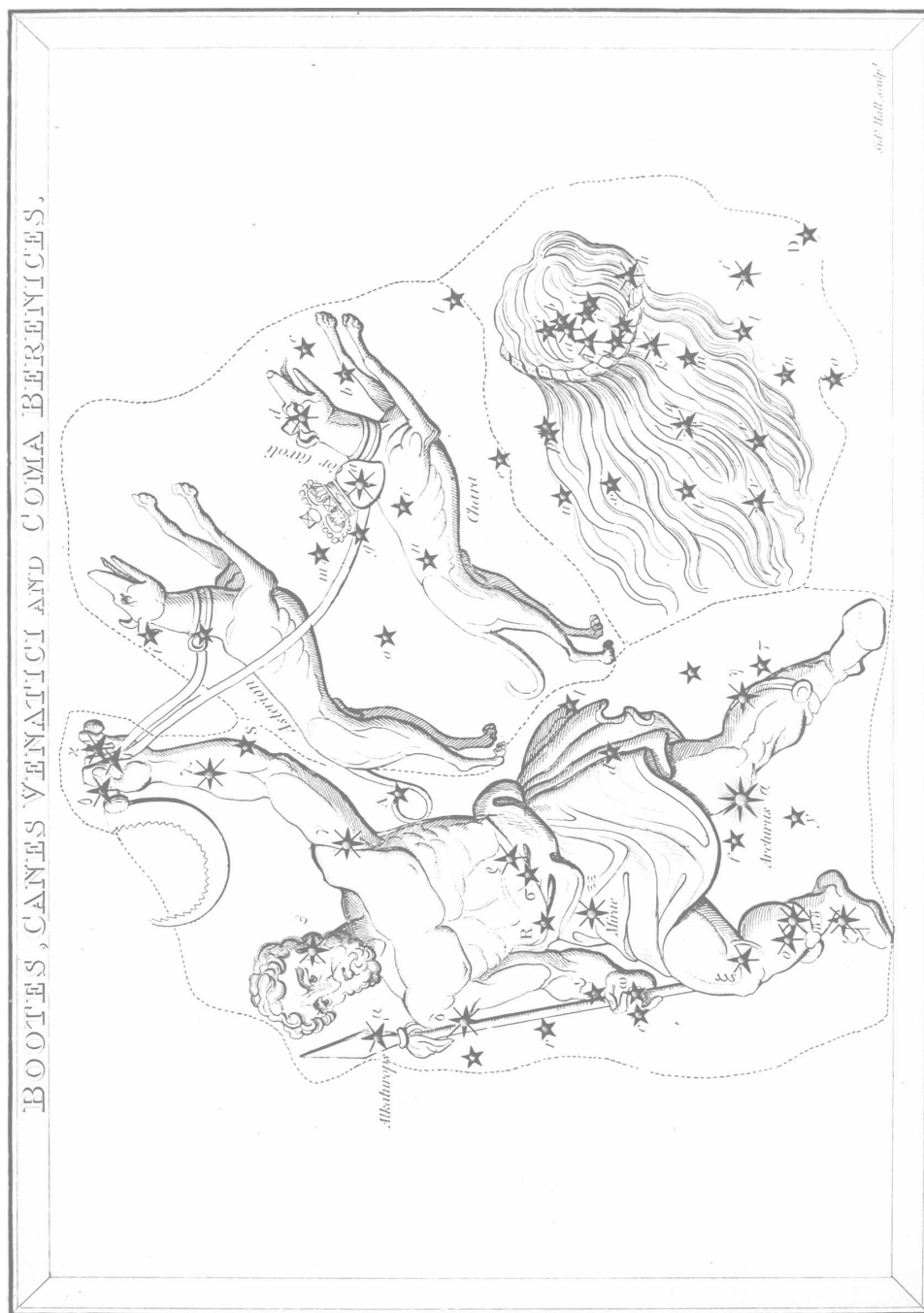
Trabajo de investigación del tercer ciclo para optar al
DIPLOMA DE ESTUDIOS AVANZADOS

Martin Jelínek
Instituto de Astrofísica de Andalucía CSIC

ESTUDIO DE EXPLOSIONES DE RAYOS GAMMA
MEDIANTE TELESCOPIOS ROBÓTICOS

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

Granada 2007



Estudio de explosiones de rayos gamma mediante telescopios roboticos

Martin Jelínek

Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC

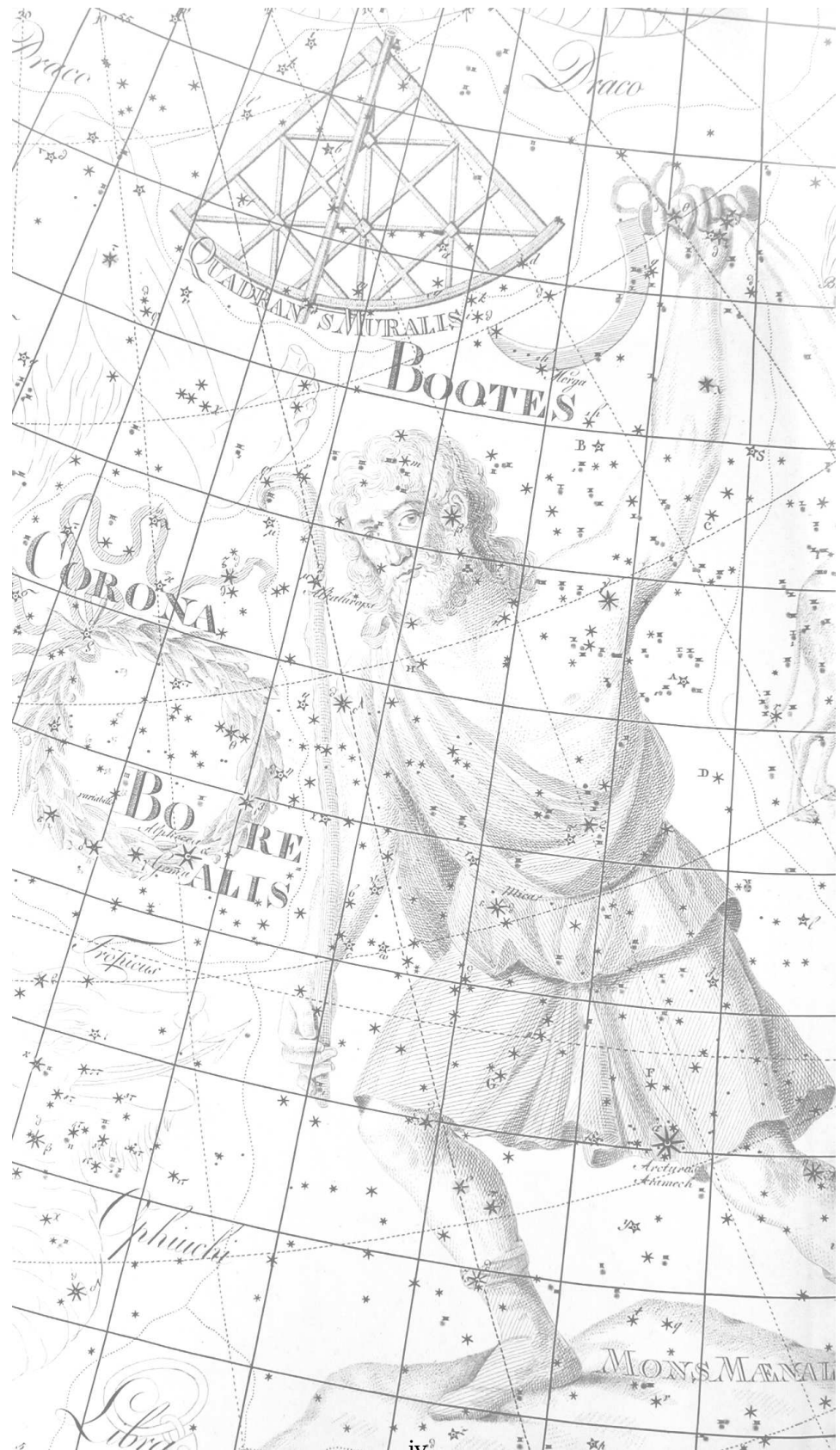
3.9.2007

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 satisfactoria, 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.



ÍNDICE

I. EXPLOSIONES CÓSMICAS DE RAYOS GAMMA	3
1.1 Modelos teóricos	7
1.2 Postluminiscencias ópticas: una cronología	9
1.3 Presente y futuro	10
II. SEGUIMIENTO DE GRBS CON BOOTES ÓPTICO:	
CAPÍTULO 5: LA ERA DE SWIFT	11
2.1 Un observatorio robótico estereoscópico	11
2.2 Administración del observatorio: RTS2	12
2.3 Análisis de las imágenes: JIBARO	13
2.4 Observaciones de la fase temprana de GRBs con BOOTES	14
2.5 Conclusiones	16
III. EL BRILLANTE FLASH ÓPTICO DEL GRB 060117	17
3.1 Seguimiento	17
3.2 Adquisición y reducción de datos	18
3.3 Discusión	20
3.4 Conclusiones	22
IV. CURSOS DE DOCTORADO	23

se stellam vnā. In vtroq3 humero singulas. In vtraq3 māma sin-
gulas. sed clariore dextrā: et sub ea alterā obscurā: et i cubito dextro
clarā vnā. In zona vnā clari⁹ ceteris lucens ē. hec stella arctur⁹ ap-
pellat⁹. In vtrisq3 pedib⁹ singulas: quę oīo sunt quatuordecim.



Boötes



Oronā humero sinistro prope contingere arctophi-
lax videt⁹: quę ante engonasin dextri pedis calce cō-
iungit. hec cancro et leone exoriente occidere: cū scor-

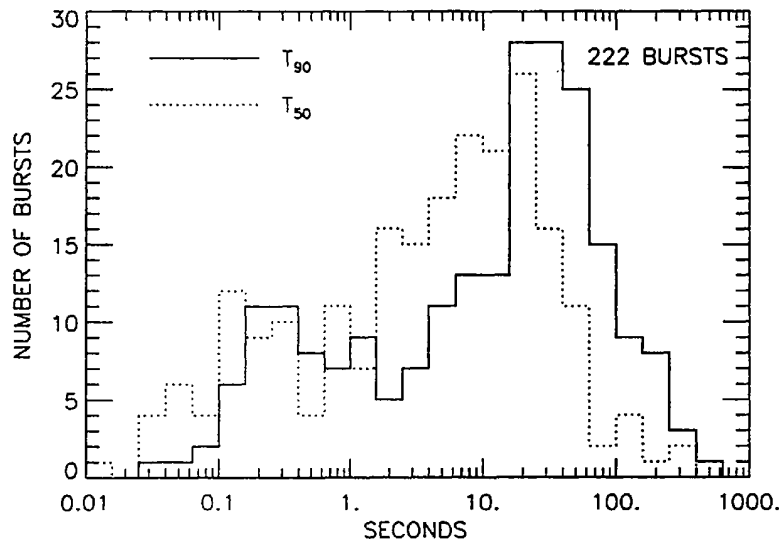
I. EXPLOSIONES CÓSMICAS DE RAYOS GAMMA

Las explosiones de rayos gamma (GRBs¹, a modo de fogonazos cortos de la radiación gamma de origen cósmica) fueron descubiertas por los 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 MeV). La imposibilidad de enfocar los rayos gamma dificultan su localización exacta, y la deficiencia de los datos observacionales 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. Con 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) se certificó este origen cosmológico. Estas contrapartidas se refieren como “postluminiscencias” y fueron predichas por algunos

1) ingl. *gamma ray bursts*

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

3) ingl. *redshift*



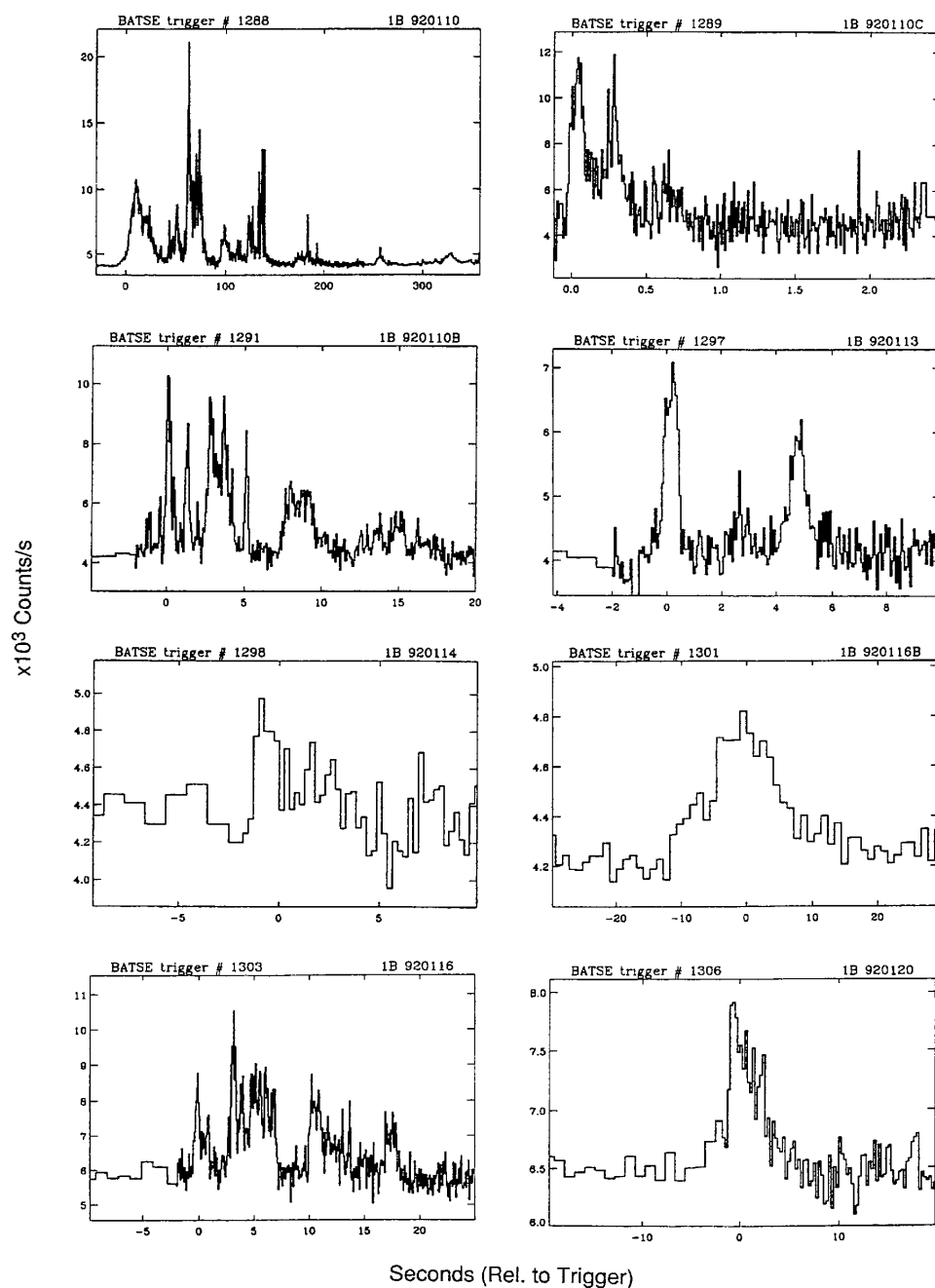


Figure 2: La página de curvas de luz de GRBs del primer catálogo BATSE (Fishman et al. 1994; Fishman & Meegan 1995).

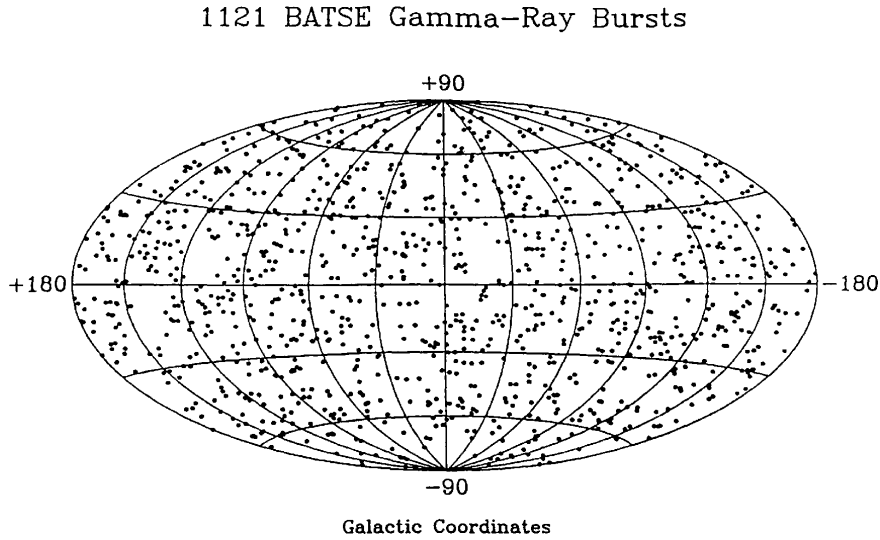


Figure 3: Distribución isotrópa de 1121 GRBs vistos por BATSE durante los tres primeros años de operación. No se observa ninguna anisotropía. (Fishman et al. 1994; Fishman & Meegan 1995).

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 duración 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 postluminiscencia 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 modelo 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.

El poder de penetración de la emisión gamma junto con la enorme energía

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

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

liberada, hace, que los GRBs son visibles a través de un gran rango de corrientes rojas. Estos son muy interesantes para el estudio del Universo a corrimiento rojo muy alto. Si los LGRBs están realmente asociados con las muertes de las estrellas masivas, se pueden usar para seguir la historia de formación de éstas en el Universo. Además, los GRBs se pueden usar también como un mecanismo de selección de las galaxias distantes (Djorgovski et al. 2003), lo que tiene la ventaja sobre otros mecanismos de selección, ya que no hay preferencia para las galaxias brillantes y se puede explorar la parte débil de la función de luminosidad.

Los GRBs no solo se pueden usar como identificadores para otros estudios, sino que sus propiedades pueden ser útiles para estudios cosmológicos. Antes que esto sea posible, hace falta una indicación de la distancia, preferentemente basada solo en las propiedades de la emisión de alta energía. Varios tantos indicadores habían 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) considerando la energía equivalente isotrópica y el pico del espectro de alta energía. Estas correlaciones no son muy fuertes y es difícil usarlas para obtener estimaciones precisas de los parámetros cosmológicos (Bloom et al. 2003). Ghirlanda et al. (2004) encontró, que el pico de energía del espectro de GRB está mejor colimado con la energía corregida para la colimación que con la energía equivalente isotropa. Sin embargo, a la luz de las medidas recientes, la corrección de colimación es un punto débil de este método.

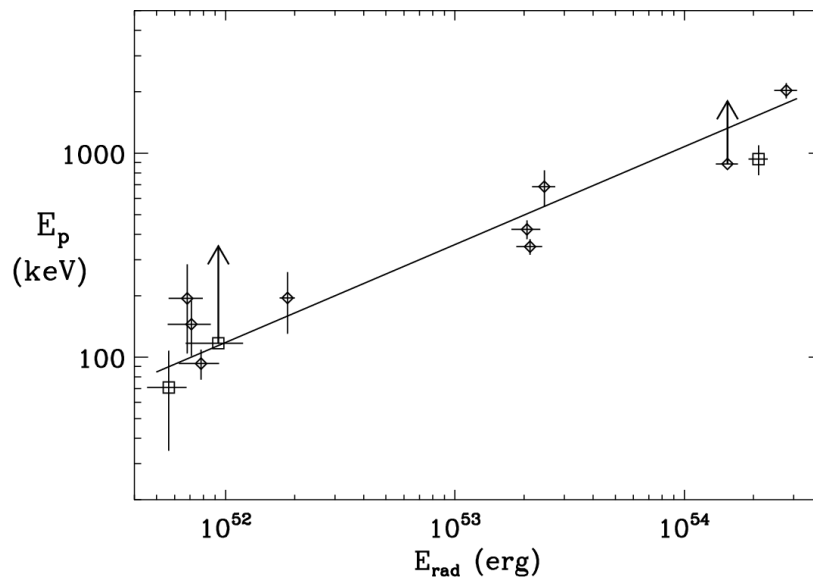


Figure 4: La relación de Amati E_p es el valor máximo de la energía en el espectro γ , E_{rad} es la energía emitida por el GRB en rayos gamma (Amati et al. 2002).

1.1 Modelos teóricos

Las observaciones han proporcionado una visión completa del espectro multirango de un GRB, pero el mecanismo que produce el GRB es uno de los enigmas que aún tardará tiempo en 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 ocurren 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 utiliza para explicar los GRBs cortos, aunque hay solo justificaciones indirectas.

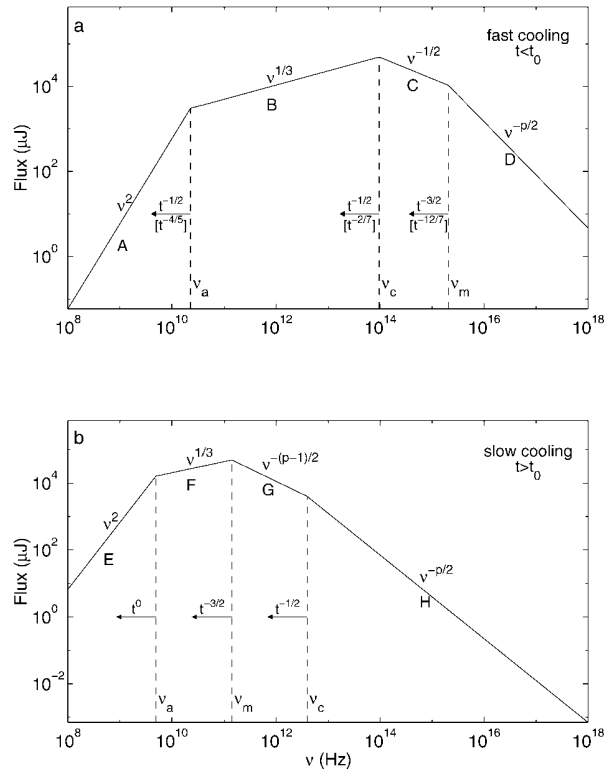


Figure 5: El espectro multirango como se predice para una onda de choque relativista con una distribución de electrones en forma de ley de potencia como la descrita en el texto. Se muestran dos casos de enfriamiento lento ($t > t_0$) y rápido ($t < t_0$) (de Sari et al. 1998).

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 activas de formación estelar. Dado que se han observado evidencias de supernovas en el espectro y en las curvas de luz de los GRBs cercanos, es este 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 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 chocando y barriendo el medio interestelar que va encontrando a su paso, produciendo emisión sincrotrón que se observa – casi siempre – desde los rayos X hasta las ondas de radio (la ya reseñada *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 que queda 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), que 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* $F_{\nu, \max}$.

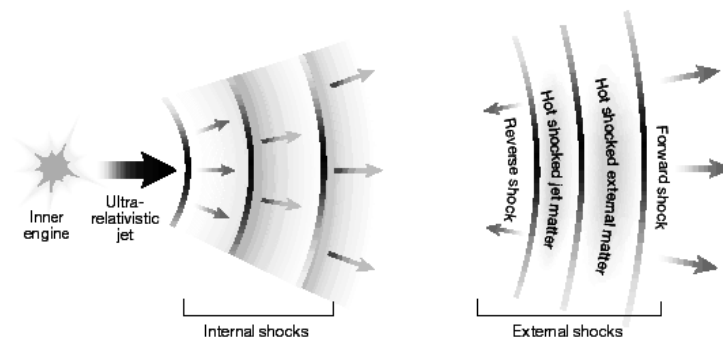


Figure 6: Esquema del GRB: los choques internos son los responsables del GRB (rayos- γ) mientras que los choques externos causan la postluminiscencia.

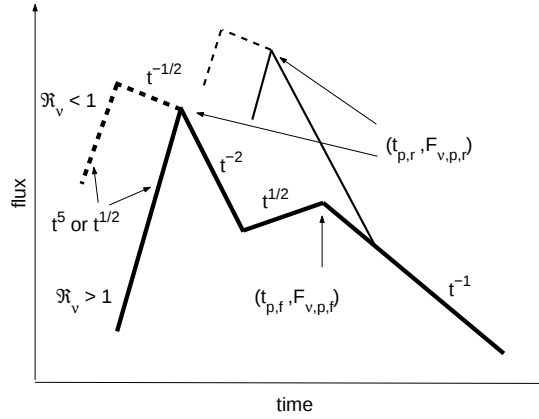


Figure 7: La curva de luz de un GRB típico (Zhang et al. 2003).

Aunque inicialmente $\nu_c < \nu_m$, al cabo de un tiempo t_0 , $\nu_c = \nu_m$. Las frecuencias características evolucionan como $\nu_c \propto t^{-\frac{1}{2}}$ 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 la Fig. 5.

Así pues, la evolución del flujo en función de tiempo para una determinada frecuencia viene en función de la evolución de $\nu_c (\propto t^{-\frac{1}{2}})$ y $\nu_m (\propto t^{-\frac{3}{2}})$. 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 .

De manera análoga al choque delantero se deriva también el choque reverso, cuya contribución puede ser importante en el rango óptico durante los primeros segundos después de la explosión Sari & Piran (1999). Véase las 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: una cronología

La historia de descubrimientos de GRBs se describe aquí haciendo énfasis en los puntos más importantes.

GRB 970228 fue la primera postluminiscencia asociada sin dudas a un GRB tanto en rayos X (Costa et al. 1997) como en el óptico, siendo 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 medido para la postluminiscencia de un GRB: $z = 0.835$ (Metzger et al. 1997).

GRB 980425 es un GRB con una supernova de tipo Ic descubierta poco después en la caja de error. La primera muestra de la relación entre GRBs y supernovas (Galama et al. 1998).

GRB 990123 fue muy brillante y acompañado por una postluminiscencia excepcional. Interpretado como la radiación del choque reverso (Akerlof et al. 1999; Sari & Piran 1999).

GRB 030329 fue 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 fue un GRB corto localizado en rayos X con tanta precisión, que la galaxia anfitriona pudo ser localizada. Aunque sin detección de la contrapartida, facilitó la primera medida de la distancia de los GRBs cortos (Gehrels et al. 2005).

GRB 050709 fue la postluminiscencia del primer GRB corto descubierta en el óptico en una galaxia con $z = 0.1$: aunque cosmológicos, la energía liberada por los GRBs cortos es bastante inferior que los largos (Fox et al. 2005).

GRB 050904 fue el GRB descubierto más distante hasta la fecha con $z = 6.3$. El bosque de Lyman- α causa que la postluminiscencia sólo se pueda observar en el infrarrojo (Haislip et al. 2006).

GRB 060121 fue de corta duración, con atributos de ambos grupos que inducen a confusión, pudiendo pertenecer al tercer tipo de GRBs (de Ugarte Postigo et al. 2006).

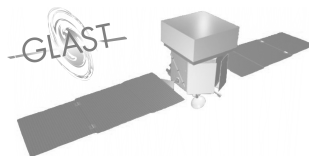
GRB 060218 fue muy peculiar, cercano y débil, asociado a una supernova potente, avivando la discusión de en que manera están asociados los GRBs y supernovas (Campana et al. 2006b).

1.3 Presente y futuro

Hoy el día, *Swift* detecta cien GRBs al año, y de éstos, la postluminiscencia óptica se observa para casi el 40%. Con la abundancia de GRBs, aparecen más preguntas que respuestas. La antigua imagen de la única explosión tiene que tratarse ahora con *X-ray flares*, los “reinicios” del motor interno, que ha descubierto *Swift* (Burrows et al. 2005; Chincarini et al. 2005).

A finales de este año 2007 se está preparado el lanzamiento del nuevo satélite *GLAST*, que permitirá detectar los GRBs en el rango γ muy energético (hasta GeV), y lleva un detector similar al BATSE original – que permitirá detectar nuevos GRBs con precisión relativamente baja.

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

BOOTES⁷ 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)⁸.

7) Burst Observer and Optical Transient Exploring System

8) Se puede medir la paralaje de un objeto hasta 2×10^8 km ≈ 1 UA.

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 Un observatorio robótico estereoscópico

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 muy oscuro, con acceso de la bóveda celeste hasta el horizonte siendo las 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 + 2×20 cm, para observar en tres filtros simultáneamente. La segunda estación (BOOTES-2), en La Mayora, el centro de experimentación del CSIC⁹. BOOTES-2 tiene un telescopio de 30 cm con la cámara CCD de alta velocidad (EM-CCD) (véase Tab. 1).

9) Consejo Superior de Investigaciones Científicas

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.

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

2.3 Análisis de las imágenes: JIBARO

JIBARO¹⁰ (de Ugarte Postigo et al. 2005) es un conjunto de programas creados en el ámbito de los proyectos BOOTES, para reducir y 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 de modo automático el apuntado del telescopio (para recentrar o para construir el modelo de apuntado) durante el almacenamiento de las imágenes y simplifica el posterior proceso fotometría.

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 no-uniformidad de la carga básica que no depende de la iluminación. Este patrón y el ruido asociado depende de la temperatura¹¹. 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. El resultado se substrahe de la imagen científica.

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), para la mayoría de ellas se puede corregir usando una imagen con una iluminación uniforme¹². La imagen normalizada se usa para dividir la imagen científica. Dos imágenes de campo plano pueden usarse para descubrir las teselas defectuosas.

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

10) Joined utilities in Bootes for the Analysis and Reduction of Observations

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

12) 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.

Se detectan como objeto las teselas que exceden el valor del cielo 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 defectos 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 del cielo $[\alpha, \delta]$), se usan varios invariantes de geometría. De 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 con precisión. Esta transformación se escribe 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 de cielo, podemos buscar la correspondencia entre 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 GRBs con BOOTES

Cámaras ASM Las cámaras de campo muy amplio de BOOTES están constituidas por un objetivo Nikkor FishEye 16mm 1:2.8 y una CCD de gran formato. La primera cámara se adquirió en el noviembre 2002, la segunda un año más tarde. La imagen cubre $\sim 90\%$ de la bóveda celeste y tiene una magnitud límite ~ 10.0 , en

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.

condiciones óptimas. El sistema de cámara de todo cielo toma imágenes cada 60 s durante toda la noche. Luego se puede buscar (manualmente) las imágenes por si hubiera habido algún GRB. La Tab. 2. contiene las observaciones obtenidas.

Aunque se conocen GRBs que fueron más brillantes que el límite de esta cámara de todo cielo (GRB 990123, GRB 030329, GRB 060117 (Sec. III), GRB 061007), este sistema aún no ha tenido la oportunidad de captar ninguna.

Como objetivos secundarios, estas cámaras 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 CCD de gran formato. Con este sistema, podíamos obtener las observaciones simultáneas de las cajas de error de GRBs de *HETE* y *Swift* (con campo de $90^\circ \times 90^\circ$) y de *INTEGRAL* ($5^\circ \times 5^\circ$).

BOOTES-1B: el telescopio triple La experiencia con el sistema antiguo era bastante limitada: aunque era capaz de observar, las monturas Meade no estaban diseñadas para el uso robótico. Usando programas sofisticados, se podía observar, pero todo el sistema era muy frágil y sufría por desgaste.

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 de menos de 30 min. Δt_{GRB} es el tiempo desde el GRB y el comienzo de la obtención de la primera imagen, Δt_{GCN} es el tiempo de reacción a la alerta (desde la recepción del paquete hasta la primera exposición tomada). Las detecciones están acentuadas con negrita. Esta es la versión ampliada de la tabla anteriormente publicada en Jelínek et al. (2006).

Durante el año 2002, ya estaba claro, que en pocos años se lanzaría *Swift* y que había que preparar la instrumentación para una afortunada nueva situación.

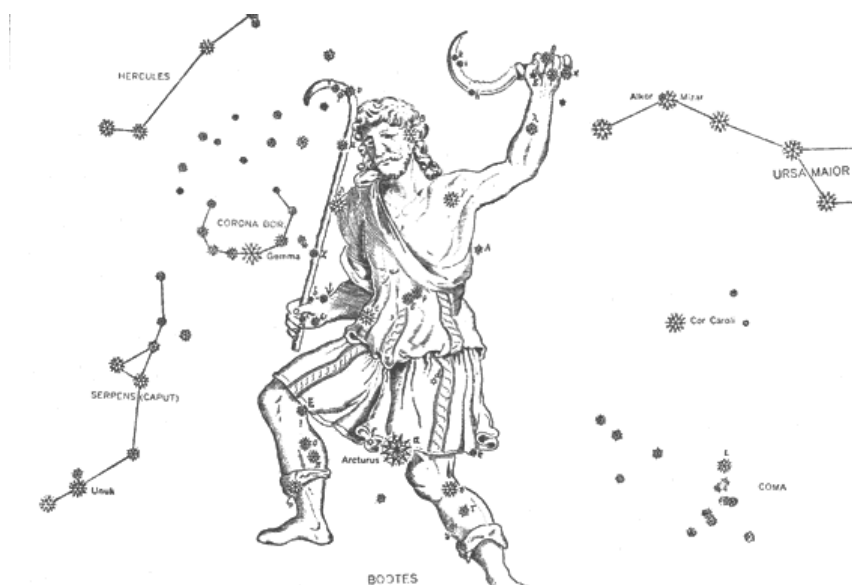
Se obtuvo la montura *Paramount*, por su fiabilidad y velocidad, y se preparó una plataforma para instalar tres telescopios en ella. Los tres telescopios eran de tipo Schmidt-Cassegrain, dos de los antiguos telescopios BOOTES (30 cm y 20 cm), y uno particular, propiedad de Alberto Castro-Tirado (20 cm). El telescopio de 30 cm llevó el espectrógrafo BOOTES y los telescopios pequeños observaron en filtros V y I. El sistema estaba preparado para la observación en verano de 2004 (Fig. 8). A mediados del año 2005, el espectrógrafo se cambió para una cámara con filtro R.

Cuando se lanzó *Swift*, y cuando se pudo establecer la conexión a GCN (teniendo muchos problemas con las autorizaciones), empezaron los seguimientos. Estos están compilados en la Tab. 3. Durante un año de servicio activo, BOOTES-1B obtuvo 4 detecciones de postluminiscencias de GRBs, y estableció 12 límites flujo óptico.

El 24 de abril de 2006, una tormenta destruyó la gran parte de la electrónica de BOOTES. Aunque la montura se reparó y sirve ahora en BOOTES-2, la prioridad es la nueva generación de los telescopios de 60 cm de alta velocidad. La Paramount quedará en servicio como la montura para BOOTES-1A.

2.5 Conclusiones

BOOTES-1B enseñó que era posible a diseñar y construir un instrumento capaz de seguir las postluminiscencias de GRBs y obtuvo 4 observaciones de ellas. Otros telescopios y sistemas de campo amplio apoyan este instrumento y pueden ofrecer unos límites complementarios, o detecciones si la postluminiscencia fuese 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 $48.9 \pm 1.6 \text{ ph cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Las coordenadas computadas por *Swift* estaban disponibles a los 19 s y fueron distribuidas inmediatamente por la red GCN (Cummings et al. 2006).

FRAM recibió el aviso a las 06:50:20.8 UT, 19.2 s después del disparo y comenzó inmediatamente a tomar imágenes. La primera exposición comenzó a las 06:52:05.4, 123.8 s 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. 4 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 128.8 s 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 $1-\sigma$ 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

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_{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

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 cm^{-2} 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 comienzan 18.0 h después de que la explosión), sugieren un decaimiento asombrosamente rápido. La búsqueda para una postluminiscencia de radio tampoco dio frutos (Schmidt et al. 2006).

El pseudocorrimiento rojo de los datos de *Swift* surgiría $z \simeq 1.3 \pm 0.3$ (Cumings 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 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 $9.''6/\text{tesela}$. 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 IRAF ¹³ 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 $0.''2$

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.

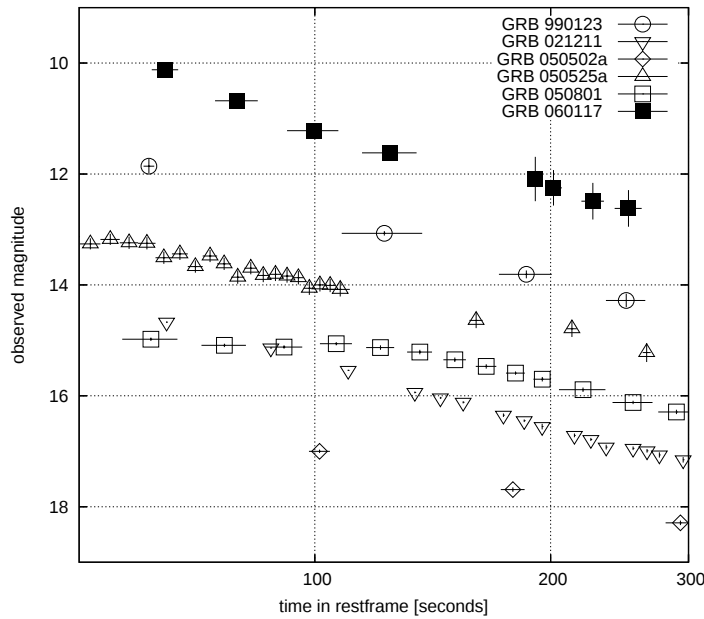


Figure 9: La curva de luz óptica del GRB 060117 comparada con algunos otros GRBs ópticamente brillantes: GRB 990123 (Akerlof et al. 1999), GRB 021211 (Li et al. 2003), GRB 050502a (Guidorzi et al. 2005), GRB 050525a (Blustin et al. 2006), and GRB 050801 (Rykoff et al. 2006). En esta figura usamos $z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

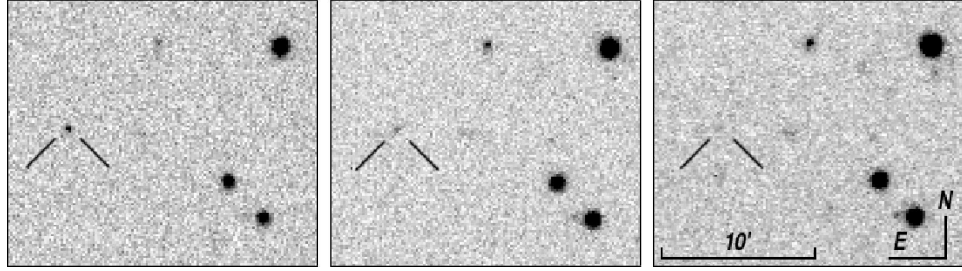


Figure 10: Detalles del campo del flash óptico del GRB 060117 observado por FRAM. Imágenes tomadas 129, 249, y 480s después de la alerta.

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.

3.3 Discusión

En la búsqueda para la interpretación de la curva de luz, asumimos un medio interestelar 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 choque reverso, cayendo rápidamente, con

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

seguido por un choque delantero que aumenta como

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

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

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_x (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 con-

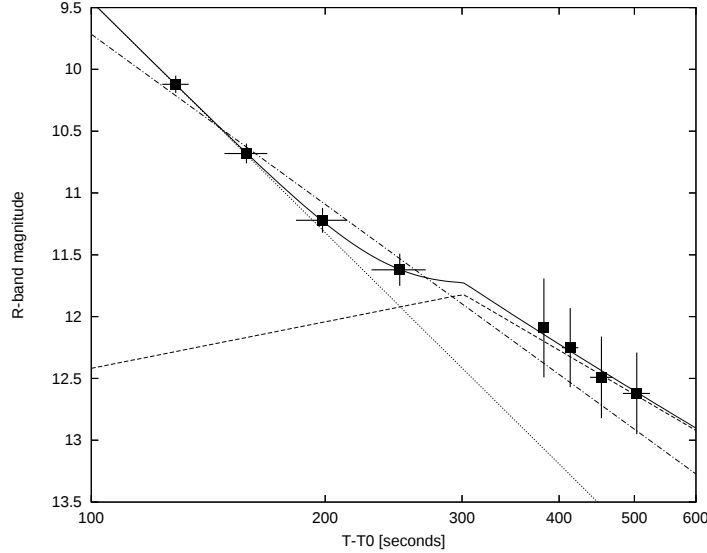


Figure 11: La curva de luz de la postluminiscencia del GRB 060117 en el filtro R. Las observaciones están ajustadas con una superposición de la emisión de las ondas de choque reverso (línea punteada) y choque delantero (línea discontinua). El ajuste lineal está indicado con la línea de trazo y punto.

seguimos 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 postluminiscencias ópticas tempranas de todos los GRBs observados.

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 DE DOCTORADO

He realizado la fase de docencia de mi doctorado y 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 créditos, de cuáles más que mitad deben ser del programa principal. He seleccionado los cursos relacionados con mi especialización y con 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), forman la enseñanza de Tercer ciclo.

Los cursos que he seguido tienen un nivel generalmente alto y no tengo ningún comentario acerca la alta profesionalidad de los profesores. Básicamente 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 búsqueda del plan de estudio no es óptima – tanto en las paginas web como preguntando al personal universitario – y esto sí creo que debe mejorarse.

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

Astrofísica y cosmología

El curso de cosmología de los profesores Eduardo Battaner y Mariano Moles es una introducción a cosmología. Empieza con la teoría de gravedad y con el principio Cosmológico. Se explican la clasificación de modelos cosmológicos y parámetros cosmológicos, la escala de distancias y determinación de parámetros cosmológicos. Luego se introduce el tema de la materia oscura y su “observación” en los cúmulos y en las galaxias, el tema de formación y distribución de estructuras a gran escala y su evolución y de fondo cósmico de microondas.

Créditos: 3

Calificación: sobresaliente

Colorimetría de materiales e imágenes

El objetivo primario del curso de colorimetría de los profs. Enrique Hita Villaverde y Javier Romero Mora es a enseñar a los alumnos, cuánta ciencia es en la sola

fotografía a color. O en otras palabras, explicar los fundamentos de la métrica y su aplicación de colorimetría a la medida del color y el tratamiento de imágenes en color.

El curso empieza con la introducción a las técnicas convencionales de medida del color. Luego se explican los espacios de representación del color actuales, como CIE1391, CIE Luv o CIELAB y sus ventajas para diferentes aplicaciones. Se completa con las técnicas de medida y caracterización del color en imágenes.

Créditos: 3

Calificación: sobresaliente

Formación y evolución de galaxias

El curso, impartido por los profs. Emilio Alfaro y Enrique Pérez tiene dos partes básicas. Enrique Pérez explica los detalles de la formación del espectro de emisión nebular como una consecuencia del equilibrio entre la ionización y la recombinación, y del calentamiento y el enfriamiento de la misma. Emilio Alfaro se enfoca a las poblaciones estelares, la cinemática estelar, y a los modelos de formación de las galaxias.

Créditos: 3

Calificación: aprobado

Modelización del sistema visual humano: Aspectos cromáticos y refractivos

El curso, impartido por los profs. José Antonio García y Luis Miguel Jiménez del Barco comprende una intruducción a óptica visual.

programa: 1. Métodos y técnicas para la caracterización del sistema visual humano. 2. Calidad visual y calidad óptica de la imagen retiniana. Cirugía refractiva: fundamentos ópticos y técnicas. 3. Mecanismos de la visión del color. 4. Anomalías. 5. Teoría y modelos de la visión del Color. 6. Métodos y técnicas psicofísicas de medida. 7. Efectos en la percepción del color. 8. Constancia del color y adaptación cromática. 9. Investigación en Visión: resultados y tendencias actuales.

Créditos: 3

Calificación: notable

Radioastronomía

El curso, impartido por los profs. Antonio Alberdi y Lucas Lara (q.e.p.d) empieza con una introducción a la astrofísica de ondas de radio. Da una resumen de los procesos radiativos en radioastronomía, tanto térmicos como no térmicos.

La parte técnica se enfoca a radiotelescopios: qué son las observables en radioastronomía, como funciona el radiotelescopio de antena única y como se hace la

interferometría (síntesis de apertura, VLBI). La parte científica comprende unos escenarios atrofísicos para la radioastronomía: Medio interestelar, radio supernovas, púlsares y núcleos activos de galaxias.

Créditos: 3

Calificación: aprobado

Técnicas de teledetección del sistema terrestre

El curso, impartido por los profs. Lucas Alados Arboledas y Francisco José Olmo Reyes, está dedicado principalmente a la detección y medidas meteorológicas en la atmósfera terrestre con el acento a aerosoles. *programa:* Composición y estructura térmica de la atmósfera. Aerosoles. Ecuación de estado y evolución adiabática. Ecuación de transferencia radiativa. Dispersión de Mie. Dispersión de Rayleigh. Polidispersión de partículas. Función fuente de dispersión.

Créditos: 3

Calificación: notable

Teledetección espacial de atmósferas planetarias

El curso, impartido por el prof. Manuel Lopez Puertas presenta una 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 (inversión, 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.

Créditos: 3

Calificación: aprobado



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
- Chincarini, G., Moretti, A., Romano, P., et al. 2005, *astro-ph/0506453*, 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

REFERENCIAS

- 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., LaCluyze, A., Reichart, D., et al. 2006, GCN 4548
- Paczynski, B. & Rhoads, J. E. 1993, *ApJL*, 418, L5+

REFERENCIAS

- 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