Básicamente estos experimentos consisten en varios cristales centelleadores situados en uno o más satélites o globos, registrando el nivel normal de llegada de fotones en un rango comprendido entre 1 keV y 100 MeV según el caso. Los fotones son distinguidos de los rayos cósmicos con un sistema de anticoincidencias: si la partícula incidente tiene carga, produce una señal de centelleo en un segundo cristal (que rodea al primero) de espesor insuficiente para que un fotón deje una energía apreciable. Se decide que ha llegado un fotón cuando se detecta energía en el primer cristal pero no en el segundo. Cuando se produce un incremento en el número de fotones contados en un cierto intervalo de tiempo que sobrepasa con una significancia prefijada el fondo esperado, se dispara la alerta que inicia el registro y almacenamiento de los datos. La dirección de llegada de los fotones se determina mediante el retraso relativo de la señal entre varios de los detectores, si éstos se encuentran alejados (abordo de distintos satélites o globos), o bien por la intensidad relativa de las señales si los detectores están abordo del mismo aparato, ya que la eficiencia de los detectores depende de su orientación respecto de la fuente. El campo cubierto suele ser 4π sr y la precisión en la localización es de varios grados, a menos que el suceso sea visto por 3 ó más detectores bastante separados (a escala del Sistema Solar), en cuyo caso el error en la localización puede reducirse a tan sólo algunos minutos de arco.

Otra posibilidad es registrar las interacciones y trazas que la llegada de un fotón produce a través del efecto Compton o la creación de pares electrón - positrón en cámaras de chispas. Este método permite una muy buena determinación de la dirección de llegada, errores entre 5 minutos de arco y 1º, pero restringe el campo de observación a menos de 1 sr. Este tipo de instrumentos no suelen estar dedicados a la detección de GRBs, sino a la búsqueda de fuentes de emisión constante y sólo son orientados hacia algún GRB después de que otro detector dio el aviso, buscando así extender la detección del GRB a un rango de energía entre 800 keV y 30 GeV[2]. Este es el caso de los instrumentos COMPTEL y EGRET abordo de CGRO [1] y PHEBUS abordo de GRANAT [56].

En las siguientes secciones se van a exponer brevemente las propiedades principales de los GRBs, aunque podemos adelantar que la más notable de sus características es la individualidad: cada GRB tiene prácticamente un perfil único en tiempo y energía. Asimismo se mostrarán algunos de los modelos teóricos con más aceptación entre los investigadores.

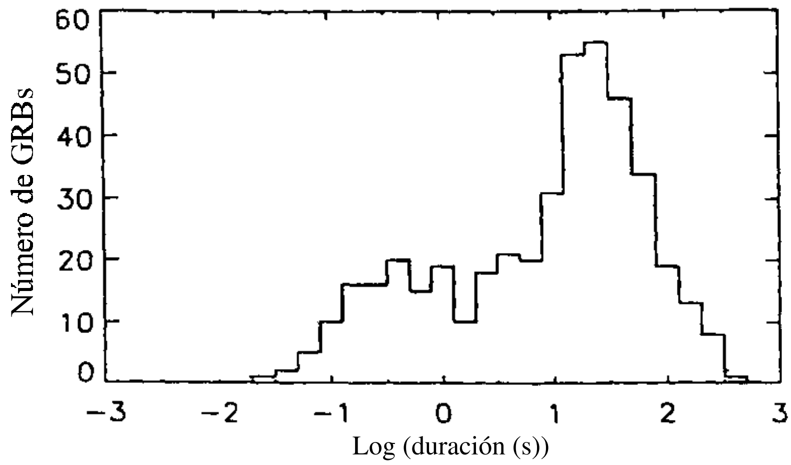

Figura 2.2: Histograma de la duración de 433 GRBs observados por BATSE. La presencia de dos tipos distintos es clara. Figura tomada de [9].

2.1 Desarrollo temporal

En el estudio de las propiedades temporales de los GRBs se pueden distinguir los siguientes aspectos: duración, tiempo de subida y de bajada, variabilidad, periodicidad y repeticiones.

---

[2] 1 GeV = 10^9 eV, 1 TeV = 10^{12} eV, 1 PeV = 10^{15} eV, 1 EeV = 10^{18} eV.

La duración de los GRBs no es una cantidad bien definida porque, entre otros factores, depende del rango de energía [57] y de las características del detector, por ejemplo, su sensibilidad, el tamaño de su memoria, etc. En cualquier caso, se encuentran GRBs que duran desde algunos milisegundos hasta los más largos que llegan a cerca de mil segundos, abarcando así una enorme escala de cinco órdenes de magnitud. La distribución de duraciones es claramente bimodal (ver Figura 2.2), con un máximo principal centrado alrededor de 20 segundos y otro secundario en aproximadamente 0.2 segundos; una separación entre estas dos hipotéticas clases de GRBs estaría cerca de los 2 segundos. Estudios de correlación entre ambas clases muestran que los GRBs cortos son más "duros" que los largos, entendiéndose por dureza el cociente entre las cuentas integradas en las bandas de energía 100 - 300 keV y 50 - 100 keV[3]. No se ha encontrado ninguna otra correlación con la duración, mostrando ambas clases las mismas estadísticas de brillo y distribución angular.

Los tiempos de subida pueden ser extremadamente cortos, como en el caso del GRB 790305b[4] en el que fue inferior a 0.25 ms, pero al igual que las duraciones, los tiempos de subida se extienden de manera continua a lo largo de varios órdenes de magnitud. Los tiempos de bajada muestran un comportamiento similar. Varios autores [58][59] han estudiado la relación del tiempo de subida con el de bajada y también con la energía del GRB, encontrando cierta correlación como muestra la Figura 2.3. En ella se puede ver que los tiempos de subida son algo mas cortos que los de bajada, aunque del mismo orden. También se comprueba que los tiempos de subida y de bajada crecen con la duración del GRB, pero decrecen con la energía.

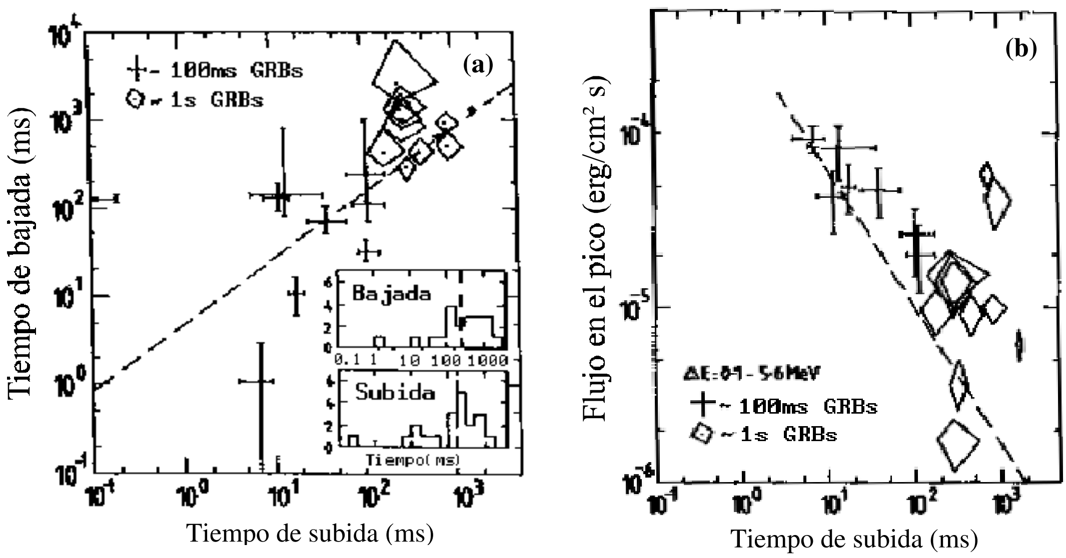

Figura 2.3: **(a)** Tiempos de bajada frente a los de subida para 20 GRBs de un sólo pico. Las cruces representan a los GRBs cortos (~ 100 ms) y los rombos a los largos (~ 1 s). Las figuras interiores son histogramas del número de sucesos en función del tiempo de subida y de bajada. **(b)** Flujo en el máximo extrapolado al rango 0.1 - 5.6 MeV para la misma muestra. Figuras tomadas de [4].

La observación de cambios importantes en el flujo de fotones que no están asociados con modificaciones sistemáticas como la subida inicial y la bajada final demuestra la presencia de variabilidad en un GRB. Ésta es una de las características más individuales de los GRBs, cada uno tiene un perfil diferente de los demás: hay GRBs que apenas muestran una estructura visible a lo largo de segundos, mientras que otros presentan una fuerte variabilidad en escalas tan cortas como 0.2 ms [60]

[3] Estos intervalos de energía dependen un poco del detector con el que se tomaron los datos del GRB. Aquí hemos presentado los rangos usados con el detector BATSE que es el que domina el campo actualmente.

[4] El convenio habitual para denominar a los GRBs emplea la notación GB o GRB *aammdd*, donde *aa* indica el año, *mm* el mes y *dd* el día en el que ocurrió el GRB. Si hubo más de un GRB en el mismo día se añade una letra *a*, *b*, *c*, etc. en orden de ocurrencia (el catálogo de BATSE usa las letras en orden de intensidad, ninguna letra para el más intenso, *b* para el siguiente en intensidad y así sucesivamente). Si la dirección de la fuente se determina con una precisión mejor que 1° entonces se denota GBS *hhmmdd* donde *hh* y *mm* son la horas y minutos de ascensión recta y *dd* los grados de declinación de la fuente.

(ver Figura 2.4). Durante 1 ms la luz viaja una distancia de $3 \cdot 10^7$ cm, que es aproximadamente 10 veces el radio de una estrella de neutrones; suponiendo que la variabilidad es producida por perturbaciones en la región emisora que se transmiten a la velocidad de la luz (límite superior), vemos que el escenario de los GRBs parece estar en objetos bastante compactos. No obstante algunos autores [61] han señalado la posibilidad de que los GRBs sean una superposición de explosiones de microsegundos, en cuyo caso podrían cometerse errores sistemáticos en la medida de algunas propiedades de los GRBs, como la forma del espectro y por supuesto, la estimación del tamaño de la región emisora.

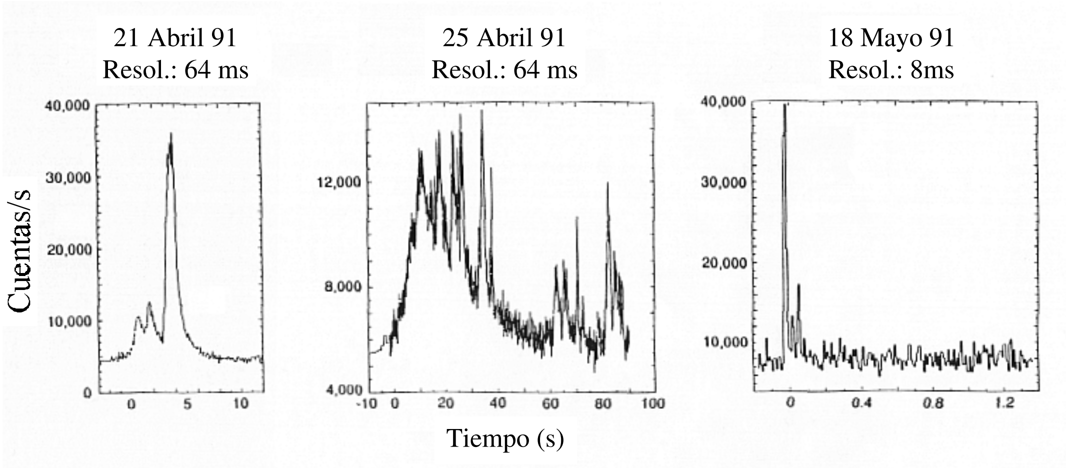

Figura 2.4: Desarrollo temporal entre 50 y 300 keV de tres GRBs de BATSE. Puede apreciarse la variedad de duraciones así como la variabilidad y la gran complejidad de algunos sucesos. Figura tomada de [5].

La aparición de periodicidad en un GRB podría deberse a rotación o precesión de la fuente u oscilaciones en el plasma que la rodea, aunque es bastante difícil demostrar la existencia de un periodo en una muestra de datos no mucho más larga que el periodo mismo y en un fenómeno transitorio por su misma naturaleza. Hasta ahora sólo hay un caso de periodicidad indisputable, se trata del GRB 790305b con un periodo aproximado de 8 segundos [62] (ver Figura 2.5). Otros casos en los que se sospecha de periodicidad son: GRB 771029 ($P \approx 4$ s) [63][64], GRB 781104 ($P = 0.280$ s) y GRB 781023 ($P = 0.143$ s) [65], GRB 790113 ($P = 5.7$ s) [66], GRB 781102 ($P \sim 15$ s) [67] y algunos otros [68].

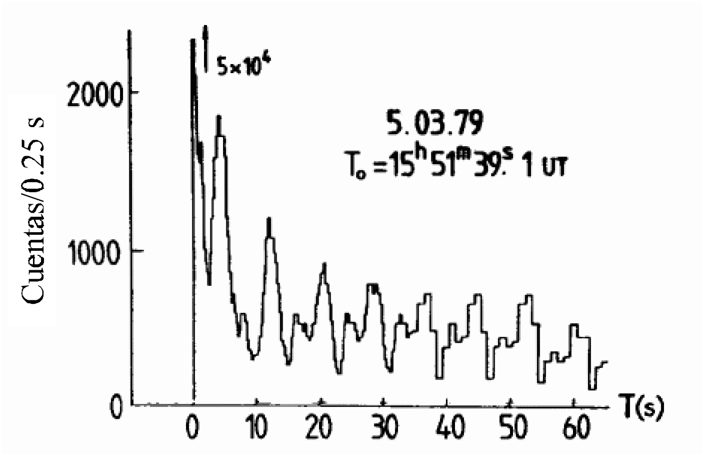

Figura 2.5: Desarrollo temporal del GRB 790305b según fue visto por el experimento KONUS. Muestra una clara pulsación después del primer pico con un periodo ~ 8 s. Figura tomada de [4].

El creciente número de GRBs detectados y sus generalmente grandes incertidumbres en la dirección de origen van incrementando la probabilidad de superposiciones aleatorias, dificultando así el estudio de las repeticiones, no obstante hay tres casos bien establecidos de repetidores:

GBS 0526-66. La primera manifestación detectada de esta fuente fue el GRB 790305b, después se observaron 3 repeticiones en el periodo que va desde Marzo de 1979 a Enero de 1980 con los satélites

Venera 11 y 12 [62] y otras 13 apariciones en el intervalo Diciembre 1981 - Abril 1983 con los Venera 13 y 14 [69][70]. Ninguna de las repeticiones fue tan intensa como la primera ni mostró las pulsaciones de aquella. El intervalo medio entre ellas fue de 38.6 días, siendo 12.8 horas el más corto y 100 días el más largo. La intersección de las bandas de error en la determinación de la dirección de la fuente ha permitido identificar este objeto con el remanente de supernova N49 en la Gran Nube de Magallanes (ver Figura 2.6), aunque se ha cuestionado [69] esta asociación debido a que la distancia (~ 55 kpc[5]) y el flujo (~ 10^{-3} erg[6]/cm^2 s, en su **primera** manifestación) implicados proporcionan un valor de luminosidad (~ 10^{45} erg/s) que viola el límite de Eddington[7]. No obstante existen modelos [71] que permiten la liberación de esa energía superando el problema mencionado.

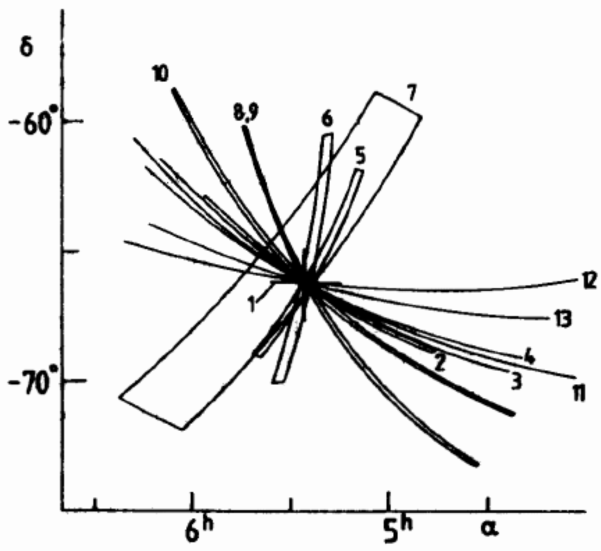

Figura 2.6: Bandas de error en la localización de 13 de las repeticiones del GBS 0526-66. Su intersección ha permitido localizar la fuente con una precisión de minutos de arco. Figura tomada de [4].

GBS 1806-20. Su primera aparición fue el GRB 790107 [67] y después se observó otras 110 veces a lo largo de 8 años [72][73][74], aunque más de la mitad de ellas tuvieron lugar dentro de tan sólo dos semanas. Únicamente en 18 de estas repeticiones se obtuvo la dirección con precisión (con ayuda de la información recogida por varios experimentos), el resto de las asociaciones lo fueron en base a las semejanzas del espectro de energía y del perfil temporal. La posición deducida de esta fuente resulta muy cercana al centro galáctico ($l \approx 9^\circ\!.8$, $b \approx -0^\circ\!.24$). Recientemente BATSE también ha detectado esta fuente.

GBS 1900+14. La primera observación fue el GRB 790324 y en los tres días siguientes se detectaron dos apariciones más [62][75]. Las asociaciones se hicieron en base a su coincidencia espacial (dentro de los intervalos de error) y a la similitud en el espectro de energía. Además la intensidad en el máximo fue prácticamente la misma en los tres casos. La localización de esta fuente permite pensar que se trata de un objeto galáctico por su cercanía al plano de la Galaxia (l ~ 47º, b ~ 4º). Durante su primera etapa BATSE detectó tres sucesos más provenientes de esta fuente [76].

Todos los GRBs asociados con estas fuentes tienen en común ciertas características: son de corta duración (~ 100 ms) y con un perfil simple, tienen un espectro "blando" que se mantiene constante a lo largo de toda la emisión y parecen estar relacionados con la Galaxia y su galaxia satélite. Este hecho ha llevado a proponer una clase de GRBs denominados "repetidores suaves" (SGRs, *Soft Gamma Repeaters*) que en algunos modelos [77] son considerados como la manifestación local de los GRBs que normalmente ocurrirían en otras galaxias, no obstante la mayoría de los modelos no tratan de explicar

[5] 1 parsec = $3.1 \cdot 10^{16}$ m.
[6] 1 ergio = 10^{-7} Julios.
[7] El límite de Eddington determina la máxima luminosidad que puede soportar un sistema autogravitante en equilibrio, esto es, cuando la presión de radiación iguala a la presión debida a la fuerza gravitatoria.

ambas clases simultáneamente. La gran mayoría de los GRBs detectados pertenecen a la categoría de GRBs "clásicos", cuyas características son: duración larga (~ 10 s) y perfil complejo, espectro duro que tiende a suavizarse a lo largo de la emisión e isotropía en la distribución de sus localizaciones. Entre esta clase de GRBs no se ha encontrado evidencia de repetidores, siendo el análisis bastante difícil debido a las grandes incertidumbres asociadas a las localizaciones, no obstante se ha podido establecer un límite inferior (3σ) de 8 años para el tiempo medio de repetición de los GRBs por encima del umbral de detección [74].

2.2 Espectro de energía

La caracterización energética de los GRBs se realiza a través del estudio de los siguientes puntos: espectro, líneas de absorción y de emisión, variabilidad del espectro y energía total liberada.

El intervalo de energía cubierto en el estudio de los GRBs, basado en una gran variedad de detectores abordo de muchos satélites, sondas y naves espaciales (ver Figura 2.7), se extiende aproximadamente desde 1 keV hasta 100 MeV, aunque algunos detectores no dedicados a GRBs han conseguido extender el rango. Este es el caso de EGRET abordo de CGRO, donde también está situado BATSE, que ha detectado los fotones más energéticos jamás recibidos de un GRB. El fotón detectado con mayor energía hasta ahora pertenece al GRB 940217, con una energía de 18 GeV llegó una hora y media después de la alerta de BATSE [2]. Algo a tener en cuenta es que los detectores no miden la energía de los fotones directamente, sino la energía que depositan en el detector. Por ello hay que deconvolucionar el espectro obtenido con la función respuesta del aparato, previamente calibrado, para obtener el flujo diferencial de fotones medido en la Tierra (número de fotones por unidad de superficie del receptor, por unidad de tiempo y por unidad de intervalo de energía). Este procedimiento puede introducir errores de consideración cuando se trabaja con poca estadística, como puede ser el caso de los GRBs de corta duración o poco intensos, especialmente en los intervalos energéticos más altos.

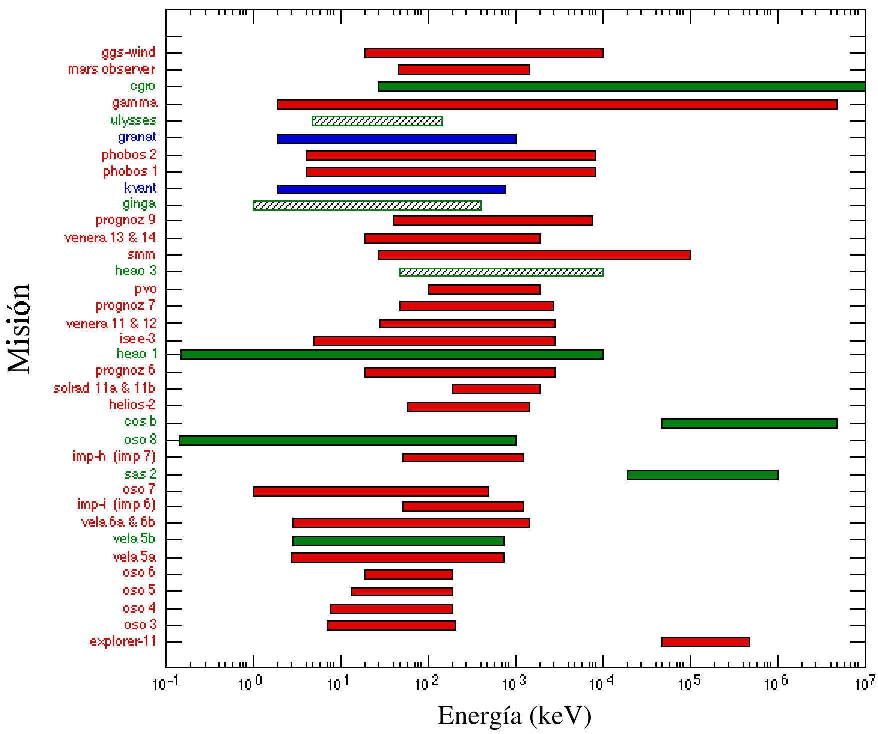

Figura 2.7: Lista de las misiones espaciales más importantes en rayos X y γ y su cobertura en energía. Figura tomada de [5].

Aunque no existe lo que podríamos llamar un espectro estándar de los GRBs, en general éste se ajusta bien al deducido para la emisión *bremsstrahlung* (radiación de frenado) y sincrotrón de fuentes térmicas ópticamente delgadas. Pero asimilar el espectro al de mecanismos fundamentales de radiación