• Búsqueda en placas fotográficas sucesivas: Este tipo de búsqueda asume que los GRBs son repetitivos y por tanto busca emisión transitoria de luz que hipotéticamente acompañó a un GRB en el pasado en posiciones dadas por GRBs observados en la actualidad. Estos transitorios ópticos (OTs) son puestos de manifiesto cuando se observa un objeto con aspecto de estrella en una placa fotográfica, pero no aparece en aquellas tomadas antes o después. Se han encontrado OTs dentro de los intervalos de error de varios GRBs, pero existe cierto debate acerca de su autenticidad porque es común la presencia de defectos en las placas fotográficas. No obstante existen casos más difíciles de rebatir, por ejemplo, dentro del intervalo de error del GRB 791101 se ha encontrado el transitorio óptico 1959 OT en dos placas expuestas simultáneamente en la misma zona del cielo [97]. Otro ejemplo consiste en la localización de tres OTs (1946 Marzo OT, 1946 Agosto OT y 1954 OT) en la misma posición, cerca, pero no dentro del intervalo de error del GRB 790325b [98].

Así pues, pese a la gran cantidad de búsquedas realizadas, ninguna de ellas ha llevado a la identificación de una contrapartida de emisión estable salvo el caso de N49, e incluso ésta es cuestionada (ver Sección 2.1).

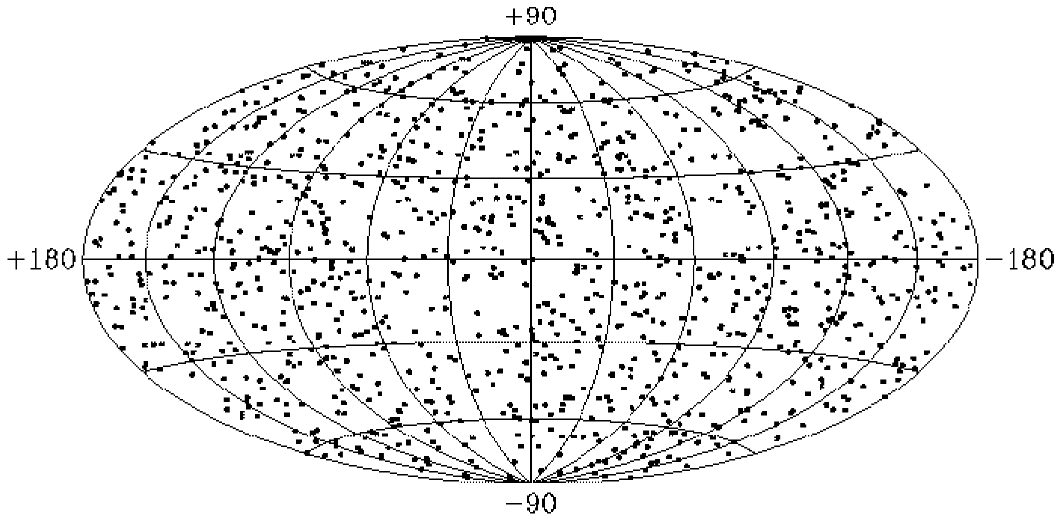

Figura 2.13: Distribución en coordenadas galácticas de los 1122 GRBs que forman el tercer catálogo de BATSE. El mapa parece completamente isótropo. Figura tomada de [6].

2.4 Propiedades estadísticas

La imposibilidad de identificar los GRBs con algún tipo de objeto astrofísico ya conocido hace muy difícil el entendimiento de su origen. Un recurso que puede ayudar a esclarecer el misterio es el estudio de sus propiedades estadísticas, esencialmente las referentes a la distribución angular en el cielo y al brillo. Hoy día se dispone de cerca de 2000 GRBs registrados a lo largo de más de 25 años con muy diversos detectores. Estos GRBs fueron observados a un ritmo que dependía del flujo umbral de los experimentos y que en la actualidad es prácticamente uno por día debido a la sensibilidad sin precedentes de BATSE. Su flujo umbral para un GRB de un segundo de duración es $3{\cdot}10^{-8}$ erg/cm^2 y se estima que al satélite todavía le quedan algunos años más de vida.

La Figura 2.13 muestra la distribución en el cielo en coordenadas galácticas de los 1122 GRBs que forman el tercer catálogo de BATSE. A simple vista se observa una perfecta isotropía y en especial no aparece una concentración hacia el plano de la Galaxia o en su centro. Se ha llevado a cabo un estudio más detallado basado en el análisis de los momentos dipolares y cuadrupolares de la distribución angular por el equipo científico de BATSE [6]. Sus resultados aparecen en la Tabla 2.1, donde el valor esperado de los momentos ha sido obtenido con una simulación de Monte Carlo que tiene en cuenta la exposición no uniforme del cielo de BATSE. Este análisis confirma la isotropía de la muestra, no apareciendo especial tendencia hacia la concentración en puntos privilegiados del Universo a diferentes escalas de distancia:

• Local: No hay concentración hacia la estrella más cercana, Alfa Centauro.

• Galáctica: Tampoco se manifiesta el plano galáctico ni hay agrupación en su centro.

• Extragaláctica: No se observa un exceso en, o entorno a, las galaxias más próximas, las Nubes de Magallanes y M31 (Nebulosa de Andrómeda).

• Cosmológica: También hay ausencia de aglomeración hacia el cúmulo de galaxias más cercano (y al cual pertenecemos), el Cúmulo de Virgo.

Tabla 2.1: Momentos de la distribución angular de GRBs del catálogo 3B de BATSE. Tabla tomada de [6].

Momento	**Tipo**	**Coordenadas**	**Observado**	**Esperado**	**Desviación (σ)**
$\langle \cos \theta \rangle$	dipolar	galácticas	-0.002	-0.013	+0.6
$\langle \mathrm{sen}^2\, b - 1/3 \rangle$	cuadrupolar	galácticas	-0.003	-0.005	+0.3
Watson	dipolar	independiente	0.5	5.2	-1.2
Bingham	cuadrupolar	independiente	5.8	13.6	-1.2

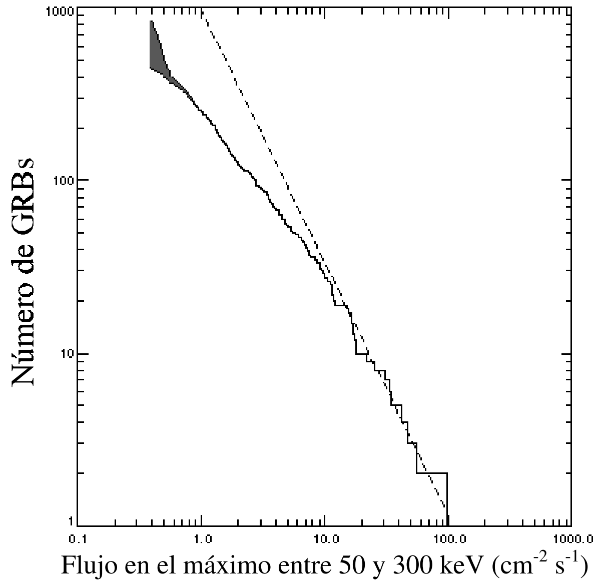

Figura 2.14: Histograma cumulativo del número de GRBs del tercer catálogo de BATSE por encima de un cierto flujo en el máximo en función del flujo en el máximo. La línea continua representa lo observado y la discontinua muestra el comportamiento esperado para una distribución uniforme. Se ve un claro defecto de GRBs débiles, lo que indica que BATSE podría estar observando el límite de la distribución. Figura tomada de [6].

Si se representa el número N de GRBs por encima de una cierta fluencia S (o flujo en el máximo indistintamente) en función de S, lo que se espera obtener en el caso de una distribución homogénea de los GRBs (y emisión isótropa) es una ley de la forma $N(>S) \propto S^{-3/2}$. Esta relación aparece porque el número de fuentes depende cúbicamente de la distancia y el brillo disminuye con la inversa del cuadrado de la distancia. La Figura 2.14 muestra esta representación para los datos del tercer catálogo de BATSE. En ella se observa una desviación clara de la ley esperada en caso de uniformidad, indicando que BATSE alcanza a ver el "borde" de la distribución espacial de los GRBs (en realidad no tiene por qué haber borde, la desviación puede ser causada por la estructura a gran escala del Universo). La desviación es lo suficientemente grande como para no poder ser causada sólo por efectos de selección, algo que había sido indicado por algunos autores [4][99]. No obstante, con el fin de minimizar estos efectos, el equipo de BATSE ha aplicado un método que ya fue usado en los primeros estudios de las radiogalaxias y los quasares, la técnica V/V_{max}. Con este procedimiento se halla el volumen observado V en relación al volumen máximo que podría haber sido explorado V_{max} a través del cociente entre la distancia a la que se encuentra el GRB y la máxima distancia a la que podría haber estado y todavía ser detectado usando el mismo algoritmo de detección. Este cociente no es conocido, pero se obtiene directamente de la razón entre las cuentas por segundo en el máximo y la que hay antes de producirse el GRB (fondo). Ya que al usar esta técnica se tiene en cuenta el criterio fundamental de detección (rango de energía, tiempo de integración, nivel umbral, etc.), el procedimiento está prácticamente libre de los efectos de selección. En el caso de tener una distribución homogénea de la población de GRBs el cociente V/V_{max} sigue una distribución uniforme entre 0 y 1, por tanto su valor esperado es $\langle V/V_{max}\rangle = 0.5$ y su varianza es $\sigma = (12N)^{-1/2}$, donde N es el tamaño de la muestra. El valor obtenido para el tercer catálogo de BATSE es $\langle V/V_{max}\rangle = 0.33 \pm 0.01$ [6], que confirma el resultado anterior de una población no uniforme.

2.5 Modelos

Desde el descubrimiento de los GRBs han aparecido más de un centenar de modelos [7], algunos de ellos altamente especulativos. Durante la época previa al lanzamiento del satélite CGRO con el experimento BATSE abordo, predominaban los modelos basados en una estrella de neutrones como objeto principal. Algunos elementos del soporte experimental ya han sido mostrados en secciones previas, éstos son:

- La rápida variabilidad indica que se trata de una fuente muy compacta.
- Algunos excesos sobre el continuo del espectro son interpretados como líneas de emisión debidas a aniquilación e^+ - e^- y desplazadas al rojo por un potencial gravitatorio que encaja con el de una estrella de neutrones.
- Algunos defectos respecto del continuo se explican como líneas de absorción ciclotrón producidas en presencia de un intenso campo magnético igual al que existe en las cercanías de algunas estrellas de neutrones.
- La periodicidad observada en al menos un caso puede ser interpretada como debida a la rotación o a la precesión de la estrella.
- La posible identificación del GBS 0526-66 con el remanente de supernova N49 en la Gran Nube de Magallanes sería una vinculación directa, ya que las estrellas de neutrones son formadas en las explosiones de supernova.
- Las repeticiones de algunas fuentes se interpretan como capturas sucesivas de materia por la misma estrella de neutrones.
- La falta de contrapartidas ópticas en el periodo de calma puede ser explicada porque las estrellas de neutrones aisladas son pobres emisores de luz.
- Existen modelos y estudios que suponiendo que la fuente es una estrella de neutrones obtienen resultados coherentes teniendo en cuenta detalles como la luminosidad, el límite de Eddington, la autoabsorción sincrotrón, la interacción γ - γ y la emisión térmica de rayos X, pero exigen que las fuentes no estén mucho más allá de algunos kpc.

Estas consideraciones por separado no son suficientemente concluyentes, pero el conjunto de ellas produce una imagen acorde con lo que se ha llamado el paradigma de las estrellas de neutrones de la Galaxia. Esta visión del fenómeno recibió el calificativo de paradigma debido a la fuerte creencia y convencimiento que en ella se tenía con anterioridad al lanzamiento de CGRO. La aparente isotropía y homogeneidad en la distribución de GRBs que mostraban los datos del momento se interpretaba como la consecuencia de la exploración de un pequeño volumen alrededor de la Tierra, pero las cosas deberían cambiar a los ojos del mucho más sensible detector BATSE. Los cálculos realizados de las órbitas de las estrellas de neutrones en la Galaxia, la luminosidad de los GRBs y el nivel umbral de BATSE predecían que el disco de nuestra galaxia aparecería en la distribución de GRBs, rompiendo así la isotropía.

Los primeros resultados de BATSE sorprendieron a la comunidad científica y eliminaron el viejo paradigma o al menos lo pusieron en serias dificultades. En la sección anterior se mostró cómo la distribución de GRBs permanece isótropa mientras que muestra un claro déficit de GRBs débiles bien por encima del nivel umbral de detección de BATSE. Además los espectros no confirmaron la presencia de líneas de emisión ni de absorción. Este resultado es incompatible con el paradigma de las estrellas de neutrones galácticas, porque esta población no puede ser tan inhomogénea en el espacio y al mismo tiempo aparecer isótropa en el cielo. La única forma de sobrevivir que tiene este modelo es situar las estrellas de neutrones en un halo extenso de la Galaxia; este halo tiene que ser lo suficientemente grande como para evitar la anisotropía que resultaría de la excéntrica posición de la Tierra en la Galaxia, pero al mismo tiempo tampoco puede ser excesivamente grande porque se detectarían anisotropías hacia las galaxias vecinas, como las Nubes de Magallanes y M31. Es interesante señalar en este punto que son descartables los modelos que sitúan el origen de los GRBs en la materia oscura, ya que el radio mínimo estimado del hipotético halo es 50 kpc, valor que es inconsistente con la posición de la materia oscura deducida mediante estudios de la dinámica galáctica.

Así pues los hechos, hoy día hay tres ubicaciones principales para las fuentes de GRBs compatibles con sus propiedades observadas, en especial la distribución en el cielo y en el espacio:

1. Sistema Solar: En la escala de distancias de 10 - 1000 UA se encuentra la Nube de Oort en la que la densidad de cometas es lo suficientemente alta como para que las colisiones entre ellos den cuenta del número de GRBs observado. Estos cometas han de ser de largo periodo porque los de corto periodo tienen una distribución demasiado anisótropa. Las colisiones tendrían lugar a una velocidad relativa típica de 1 km/s y los rayos γ serían generados por procesos electrostáticos [100], que aunque no muy bien conocidos, encajan dentro de la escala de energía necesaria, unos 10^{25} erg. Este modelo explica la ausencia de repeticiones, la creación de líneas de absorción ciclotrón y líneas de emisión de aniquilación e^+ - e^- desplazadas al rojo.

Se ha propuesto una variante consistente en las colisiones cometa - agujero negro primordial (PBH) [101] en lugar de las cometa - cometa. Los agujeros negros primordiales son hipotéticos objetos que se habrían formado en la juventud del Universo a partir de fluctuaciones de densidad. En la actualidad su masa sería similar a la de una pequeña montaña (10^{14} g) y tendrían un radio inferior al de un electrón. El encuentro de los dos cuerpos produciría un rápido colapso de la masa del cometa y su calentamiento a temperaturas kT ~ 10 MeV. Este proceso genera una pequeña “bola de fuego” que se propaga a través del material del cometa vaporizándolo e ionizando completamente el gas. La duración del fenómeno vendrá determinada por el tiempo de tránsito del PBH a lo largo de las dimensiones del cometa, esto es, $\tau \sim D_{\mathrm{Cometa}}/V_{\mathrm{PBH}} \sim 10^{2\,-\,11}$ cm/$10^{6\,-\,7}$ cm/s ~ μs - días, que es un rango demasiado grande cuando se compara con el de los GRBs. La cantidad de energía emitida alcanza los requerimientos, sin embargo este modelo exige unas condiciones muy favorables en cuanto a la concentración de PBHs en la Nube de Oort para explicar la tasa observada de GRBs.

Estos mismos objetos, los PBHs, por sí solos también han sido considerados como fuente de un tipo de GRBs, aquellos más cortos y de espectro más duro [8][9]. Hawking mostró [102] que los PBHs se evaporan a través de mecanismos cuánticos a un ritmo que es inversamente proporcional al cuadrado de su masa. Al mismo tiempo la temperatura y la luminosidad se incrementan a medida que el PBH pierde masa. En la etapa final se produce una aceleración del mecanismo de evaporación que culmina en una súbita explosión de rayos γ. Este modelo predice la generación de fotones en el rango del GeV, pero sólo puede dar cuenta de los GRBs más cortos porque se espera que la emisión dure algunos milisegundos. La generación de energía con este proceso llega a alcanzar 10^{34} erg, por tanto estas fuentes no es necesario que estén confinadas en las cercanías del Sistema Solar, sino que pueden estar distribuidas en el halo galáctico.

2. Halo galáctico extenso: Antes se mostró cómo el paradigma de las estrellas de neutrones, puesto en serias dificultades por los resultados de BATSE, se vio obligado a cambiar para sobrevivir. El escenario del disco galáctico fue reemplazado por un halo extenso y la escala de distancia se multiplicó por 100 ó 1000, incrementándose desde 100 - 1000 pc hasta 100 kpc. La liberación de energía que ahora se requiere es 10^{41} erg, la cual puede ser proporcionada mediante la fusión nuclear de 10^{22} g (10^{-11} M_{Sol}) de hidrógeno en helio. Una cantidad similar de energía estaría disponible en el campo gravitatorio de la estrella de neutrones (también puede ser un agujero negro) para la misma cantidad de masa. El objeto capturaría esta materia procedente del medio interestelar (alguna nube densa ocasional), de una compañera (viento estelar o trasvase por el lóbulo de Roche), o bien mediante la colisión con un cometa o un asteroide [4]. Si la materia atrapada es gaseosa, probablemente se acumule en un disco de acrecimiento donde la fricción la convertirá en un plasma de alta temperatura. Los campos magnéticos de la estrella canalizarán el plasma hacia la región polar, donde el material se acumula y aumenta su presión hasta que comienza la fusión constante del hidrógeno en helio. Cuando éste alcanza una masa crítica explota, entonces la presión del plasma supera a la del campo magnético, expandiéndose y arrastrando las líneas de campo, a lo largo de las cuales son acelerados los electrones, que por efecto Compton inverso dan lugar a los rayos γ a partir de los rayos X suaves emitidos por el plasma caliente. Si la materia capturada por la estrella de neutrones es sólida (cometa o asteroide) es más probable que se produzca un impacto directo de los dos cuerpos. Esto daría lugar a la formación de una “bola de fuego” (en una manera similar a la descrita anteriormente para la colisión cometa - PBH) que sería la responsable de la producción del GRB.

Otros modelos de generación de GRBs a partir de estrellas de neutrones se basan en exóticos procesos tales como “terremotos” de la corteza o del núcleo, fulguraciones, eyecciones de pedazos de materia nuclear superdensa, etc. [4][9]. Puesto que los campos magnéticos están “congelados” en la superficie, la creación de velocidades transversas a través de movimientos internos de la estrella induciría campos eléctricos en los que serían acelerados electrones y positrones. Los fotones térmicos de baja energía emitidos por la estrella sufrirían entonces un proceso Compton inverso con los e^+/e^- relativistas y darían lugar a la emisión característica de los GRBs.

3. Cosmológico: Los modelos situados en esta escala de distancias no fueron inicialmente muy tenidos en cuenta por dos razones fundamentales: 1) requieren una enorme liberación de energía y por tanto 2) la densidad de fotones sería tan alta (recordemos que las fuentes han de ser compactas tal y como se deduce de sus variaciones temporales) que la opacidad por interacción γ - γ y creación de pares e^+ - e^- suprimiría la parte más energética del espectro. No obstante estos impedimentos pueden superarse si la emisión no es isótropa, sino que está limitada en un haz hacia el observador. Hoy día, sin embargo, los modelos cosmológicos son los más aceptados, en parte debido a la ausencia de pruebas en favor de un origen galáctico. Dada la no uniformidad e isotropía que muestra la distribución de los GRBs, la solución geométrica más favorecida es el escenario cosmológico. Debido a la gran distancia a la que se encontrarían las fuentes, estos modelos pueden formular predicciones acerca de los efectos del desplazamiento al rojo: los GRBs más débiles, esto es, lejanos, deberán mostrar un espectro más blando y tener mayor duración (debido a la dilatación temporal) que los cercanos (más intensos). Además pueden ocurrir efectos de lente gravitacional que se detectarían como ecos que tienen el mismo perfil temporal y espectral pero que están desfasados, de hecho algunos autores sugieren que los SGRs son la manifestación de ese fenómeno [103][104]. En la literatura existen evidencias a favor y en contra de estos efectos, siendo el principal inconveniente la alta variabilidad de los GRBs y la falta de un perfil estándar. Un reciente estudio del equipo de BATSE compara el perfil temporal promediado para muchos GRBs divididos en dos grupos, brillantes y débiles [5][105]. Los impulsos se han normalizado en intensidad y se han alineado en torno al pico más alto. Los resultados muestran que, en promedio, los GRBs más débiles tienen mayor duración (ver Figura 2.15), indicando así que la dilatación temporal podría estar presente, aunque esta interpretación no es única [106].

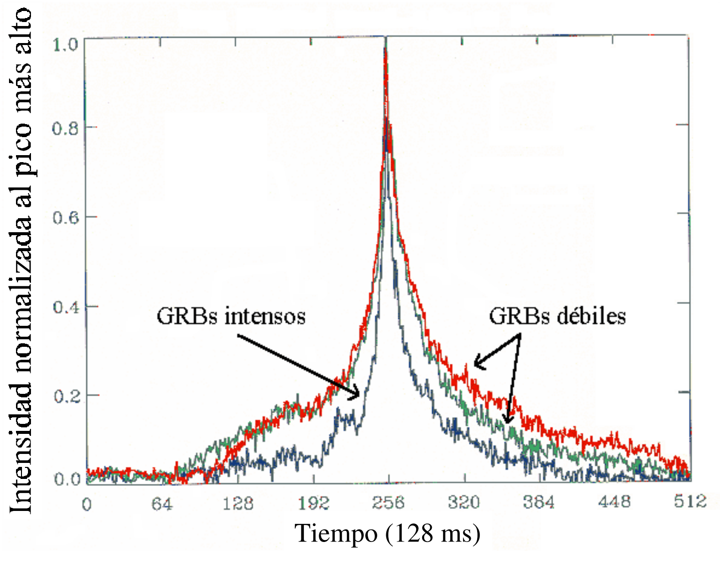

Figura 2.15: Perfil temporal promedio para GRBs de BATSE intensos y débiles. El pico más alto ha sido normalizado y alineado. Los GRBs débiles son en promedio más largos que los intensos, lo que tiene implicaciones para los modelos teóricos (ver texto). Figura tomada de [5].

Una de las hipótesis con mayor aceptación supone que los GRBs son originados en galaxias normales como la nuestra cuando un sistema binario compuesto por dos estrellas de neutrones, dos agujeros negros o uno de cada, colapsa debido a la pérdida de energía orbital que es radiada en forma de ondas gravitacionales [103]. Si la hipótesis es correcta, entonces BATSE puede vislumbrar hasta un radio máximo de desplazamiento al rojo $z \sim 1$. La observación de este tipo de sistemas en la Galaxia permite estimar que ocurren de una a diez de estas colisiones por cada millón de años. Esta tasa de