no significa que esos procesos sean realmente los responsables de la distribución de fotones observada y por tanto no se pueden deducir condiciones físicas de la región de emisión; son simplemente ajustes convenientes, representados por pocos parámetros, que en algún caso sí pueden proporcionar algún detalle físico como la temperatura de una gas ópticamente delgado en el caso de *bremsstrahlung*. De hecho diversos autores [78][58] han señalado que frecuentemente diferentes ajustes producen resultados igualmente buenos (ver Figura 2.8a) debido a que proporcionan suficientes grados de libertad. Una característica bien establecida [79][80][81] del espectro de los GRBs es su caída siguiendo una ley de potencias más allá de aproximadamente 1 MeV, esto ha llevado a proponer la parametrización [81]:

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}E} = A \left(\frac{E}{100\ \mathrm{keV}}\right)^{\alpha} \exp\left(-E/E_0\right), \qquad E \leq (\alpha-\beta)\, E_0$$

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}E} = A\, (\alpha-\beta) \left(\frac{E_0}{100\ \mathrm{keV}}\right)^{\alpha-\beta} \left(\frac{E}{100\ \mathrm{keV}}\right)^{\beta}, \qquad E > (\alpha-\beta)\, E_0$$

Valores típicos son $\alpha \sim -1$, $\beta \sim -2$ y $E_0 = kT \sim 150$ keV, donde k es la constante de Boltzmann y T la temperatura del plasma donde se produce la emisión de *bremsstrahlung* (suponiendo que éste es el auténtico proceso ocurriendo en la fuente). La subclase de los SGRs en cambio muestra un espectro más blando, $kT \sim 30$ keV, sin corte en altas energías para seguir una ley de potencias, pues el espectro está bien representado con la primera parte del ajuste mostrado arriba. En la Figura 2.8b se muestra el espectro típico de los GRBs clásicos junto con el de un SGR, el típico de una explosión de rayos X y el de la Nebulosa del Cangrejo, con el propósito de servir de comparación.

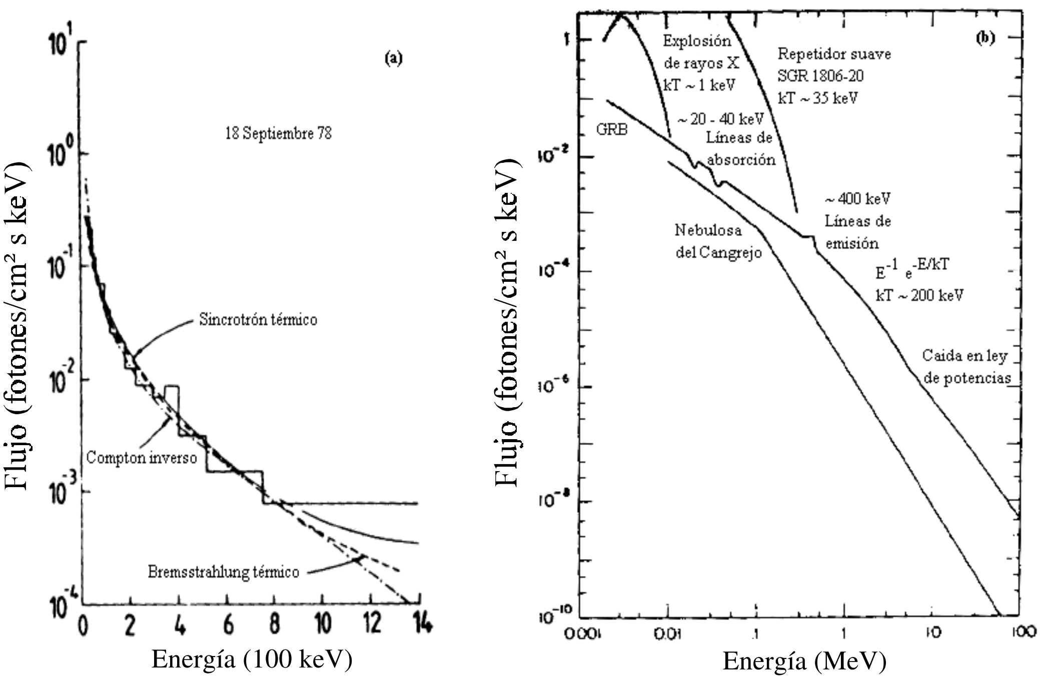

Figura 2.8: **(a)** Espectro del GRB 780918 ajustado a diferentes mecanismos de emisión. Todos ellos parecen encajar igualmente bien. **(b)** Espectro típico de un GRB mostrando algunas características menos frecuentes (líneas). También aparece el espectro de un SGR, una explosión de rayos X (cuerpo negro de $kT \sim 1$ - 2 keV) y la Nebulosa del Cangrejo. Figuras tomadas de [4].

Se ha reseñado [3] que la energía de corte E_0 puede contener información valiosa acerca de los procesos radiativos subyacentes, en particular se espera un cambio del índice espectral a través de la degradación del flujo de fotones por diversos procesos, como la creación de pares electrón - positrón debido a interacciones γ - γ o γ - campos magnéticos, sucesivas dispersiones Compton o un cambio en la opacidad debido a una reducción relativista de la sección eficaz de Klein - Nishina. En todos estos casos la energía de corte se espera cerca de la correspondiente a la masa en reposo del electrón, sin embargo los resultados obtenidos hasta ahora no son concluyentes, pues se observa un rango demasiado amplio en la variación de esta energía, aunque la dispersión podría explicarse por efectos de desplazamiento al rojo. También se ha indicado [4] que los fotones de más alta energía (> 10 MeV), susceptibles de ser suprimidos por los procesos anteriores, podrían ser producidos en zonas alejadas de la fuente principal y así eludir su degradación. Otra posibilidad para la observación de fotones de alta energía es que el material de la fuente se mueva a velocidades relativistas, produciendo así una emisión anisótropa concentrada en un haz enfocado hacia el observador de modo que se evite la autoabsorción [1].

Un aspecto importante del espectro es conocer hasta dónde se extiende la emisión en las colas de alta energía. EGRET ha detectado emisión en el rango del GeV en 5 de aproximadamente 150 GRBs que tuvieron lugar dentro de su campo de visión [1]. Estos 5 GRBs son también los más brillantes registrados por BATSE, de modo que las observaciones son compatibles con que en todos los GRBs haya emisión GeV pero no es detectada por falta de sensibilidad de los satélites. Hasta ahora no se ha observado emisión en el rango del TeV ni a mayor energía. Una detección positiva en este rango restringiría definitivamente la posición de los GRBs a la Galaxia, ya que de otro modo no debería observarse emisión debido a la interacción de los fotones de energía > TeV con los fotones del fondo intergaláctico de radiación infrarroja y con los del fondo universal de radiación de microondas. El objetivo de este trabajo es precisamente la búsqueda de fotones de energía > 20 TeV en los datos del periodo 92/93 tomados con el experimento HEGRA.

De los espectros observados se deduce que el máximo de la potencia emitida en los GRBs se encuentra a más altas energías que en ninguna otra fuente de la Galaxia (por ejemplo explosiones de rayos X o fulguraciones solares). La mayor parte de la potencia se radia en la banda 100 keV - 1 MeV, incluso una fracción significativa es emitida en la cola de más altas energías; en cambio en la zona de rayos X por debajo de 30 keV sólo es radiada alrededor del 2% de la potencia total. Este último hecho es lo que se denomina "la escasez de rayos X" [82][83] y supone una fuerte restricción a aquellos modelos teóricos en los que los rayos X duros y los rayos γ serían degradados a rayos X blandos mediante algún mecanismo reprocesador. Por ejemplo, si los rayos γ son emitidos isótropamente cerca de la superficie de una estrella de neutrones, entonces parte de la radiación sería interceptada por la estrella y reemitida en forma de rayos X blandos de radiación de cuerpo negro. Puesto que esto no se observa, o bien la emisión es anisótropa en dirección contraria a la de la estrella, o bien la región emisora está lo suficientemente alejada como para que el ángulo sólido subtendido por la estrella de neutrones sea pequeño.

Mientras que el espectro de la mayoría de los GRBs es claramente no térmico, algunos de los detectados por GINGA muestran una emisión de rayos X térmica antes y después de la emisión principal a altas energías que se ajusta al espectro de un cuerpo negro de $kT \sim 1.5$ keV. Asumiendo que esta radiación fue emitida isótropamente y que proviene de un cuerpo negro de emisividad definida, a partir del flujo de rayos X observado se puede deducir [84] que la relación entre el radio de la fuente y su distancia a la Tierra es R(km) ~ D(kpc). Este resultado encaja con modelos en los que el origen de los GRBs estaría en las estrellas de neutrones de nuestra Galaxia.

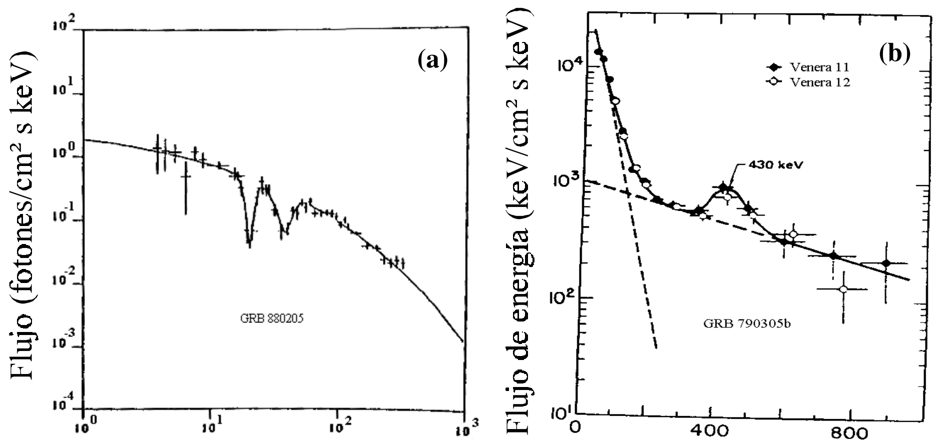

Figura 2.9: **(a)** Espectro del GRB 880205 observado por GINGA. Se ven claramente dos líneas de absorción. **(b)** Espectro del GRB 790305b registrado por KONUS mostrando una línea de emisión. Figuras tomadas de [4].

Se han observado líneas de absorción a ~ 20 - 50 keV con anchuras de ~ 4 - 14 keV en aproximadamente el 10% de todos los GRBs previos a BATSE [3][4]. No obstante existe controversia en este punto debido a que las observaciones, pese a producirse con diversos detectores, no fueron confirmadas simultáneamente por varios de ellos, ni, posteriormente, BATSE ha registrado ninguna línea. La controversia se mantiene debido a que la mayor parte de los experimentos no alcanzan una buena resolución a la energía relativamente baja en la que se producen las líneas; además la formación de éstas es algo transitorio dentro de un fenómeno transitorio y muchos de los detectores no tienen la suficiente resolución temporal para realizar una buena observación. Por tanto no está claro si la no detección simultánea o la falta de confirmación por parte de BATSE es realmente contradictorio. Algunos mecanismos que explicarían la formación de falsas líneas son: la integración de un espectro con una energía de corte rápidamente cambiante [85] y la superposición de dos espectros, uno de *bremsstrahlung* y otro más suave de cuerpo negro [86].

Pese a la controversia, hay 3 casos bien establecidos de líneas de absorción. Éstos son los GRB 870303, GRB 880205 y GRB 890929 registrados por el satélite GINGA [87] (ver Figura 2.9a). Se han interpretado estas líneas como debidas a absorción ciclotrón resonante en intensos campos magnéticos. Los electrones ocupan niveles discretos de Landau y producen una absorción resonante de los fotones con energías que son armónicos de la energía fundamental $E_a = heB/m_ec \approx 11.6 \cdot B$ (keV), donde B es el campo magnético en unidades de 10^{12} gauss. De las líneas observadas se deduce que los campos magnéticos deben tener una intensidad de ~ 2 - $5 \cdot 10^{12}$ G, valores presentes en la superficie de las estrellas de neutrones como es bien sabido por el estudio de los pulsares.

También han sido vistas líneas de emisión a energías alrededor de 450 keV por varios experimentos (principalmente KONUS), incluso simultáneamente. No obstante BATSE no ha detectado ninguna línea de emisión y esto sí resulta una contradicción con las observaciones previas [5]. Al igual que las líneas de absorción, la realidad de las líneas de emisión es también controvertida. Asumiendo que son reales, éstas se interpretan como líneas de aniquilación electrón - positrón desplazadas al rojo gravitacionalmente. En este caso la línea estaría a la energía $E_e = m_ec^2\ (1 - 2GM/Rc^2)^{1/2}$, donde M y R son la masa y el radio de la fuente respectivamente. Los desplazamientos observados son z ~ 0.1 - 0.3, lo que encaja con lo esperado para los potenciales gravitatorios presentes en la superficie de las estrellas de neutrones. Algunas de las líneas observadas se encuentran a mayor energía que 511 keV, explicándose entonces como líneas de aniquilación desplazadas al azul formadas en una fotosfera en expansión, o alternativamente se interpretan como líneas de desexcitación nuclear.

Entre la subclase de los SGRs no se han encontrado líneas de absorción ni de emisión a excepción de la primera aparición del SGR 0526-66 (GRB 790305b), que mostró una línea de emisión a 430 keV (ver Figura 2.9b). Esta línea es interpretada en el mismo sentido que las de los GRBs clásicos.

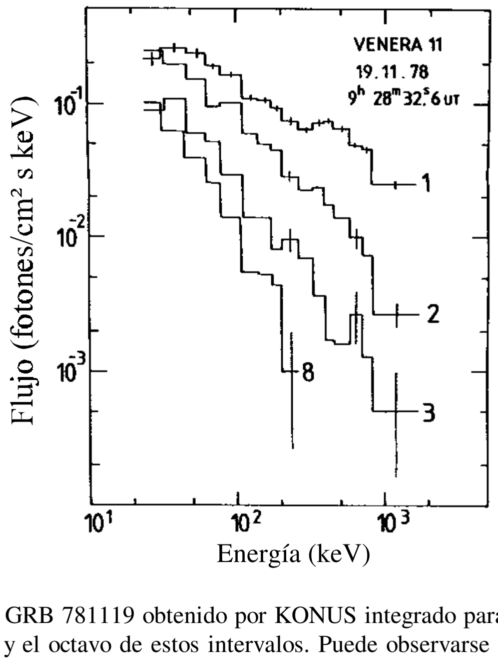

Figura 2.10: Espectro del GRB 781119 obtenido por KONUS integrado para intervalos de 4 s. Se muestra el primero, el segundo, el tercero y el octavo de estos intervalos. Puede observarse que el espectro se suaviza con el tiempo y que la prominencia alrededor de 420 keV en el intervalo 1 desaparece en los demás. Figura tomada de [4].

El espectro continuo y las líneas en los GRBs muestran una rápida variabilidad, en algunos casos en escalas inferiores a los 250 ms [88] e incluso 30 ms en el caso del GRB 790305b [89]. Se observan patrones caóticos de cambio, pero en general se constata un cambio sistemático de espectro duro a blando en la evolución de la mayor parte de los GRBs (ver Figura 2.10). Esto parece ser indicativo de que al rápido proceso explosivo inicial sigue una fase lenta de enfriamiento [59]. Las líneas, si están presentes, suelen ser más intensas al principio y decaen mucho más rápidamente que el continuo. Se ha observado una correlación entre la temperatura de *bremsstrahlung* del espectro y el flujo [90] (ver Figura 2.11) y hay algunos indicios de retraso entre los cambios de dureza y los de intensidad en algunos segundos [91], lo que de confirmarse podría imponer serias restricciones a los modelos teóricos.

Los flujos observados están comprendidos entre 10^{-8} y 10^{-4} erg/cm^2 s, donde el primer límite está proporcionado por la sensibilidad de los detectores y el segundo por los GRBs más brillantes detectados hasta ahora. Tomando un flujo y una duración típicos, 10^{-6} erg/cm^2 s y 10 s, se obtiene que la fluencia media es 10^{-5} erg/cm^2. Para obtener la luminosidad o la energía total liberada en el GRB necesitamos saber la distancia a la que se encuentra la fuente y si la emisión es isótropa, o por el contrario está concentrada en un haz interceptado por el detector. Ninguno de los dos aspectos es conocido aún, pero suponiendo que la emisión es isótropa se pueden realizar algunos cálculos interesantes. En la Sección 2.1 fue introducida la subclase de los SGRs, de cuyos tres únicos ejemplos se conoce o sospecha su localización: Gran Nube de Magallanes, centro galáctico y disco galáctico. En los tres casos, considerando emisión isótropa, los flujos observados permiten deducir que la luminosidad es unas pocas veces 10^{41} erg/s si las distancias asumidas son ciertas. En el caso de los GRBs clásicos se han propuesto variados modelos que requieren una gran diversidad de escalas de distancia: 1 UA[8] (Sistema Solar), 1 pc (estrellas locales), 1 kpc (disco galáctico), 10 kpc (halo galáctico), 100 kpc (halo galáctico extenso), 1 Mpc (extragaláctico) y 1 Gpc (cosmológico). En estos casos la energía total emitida estaría comprendida entre 10^{23} y 10^{51} erg, a efectos comparativos diremos que la energía liberada en una explosión de supernova es 10^{53} erg, mientras que el Sol tiene una luminosidad de $4{\cdot}10^{33}$ erg/s.

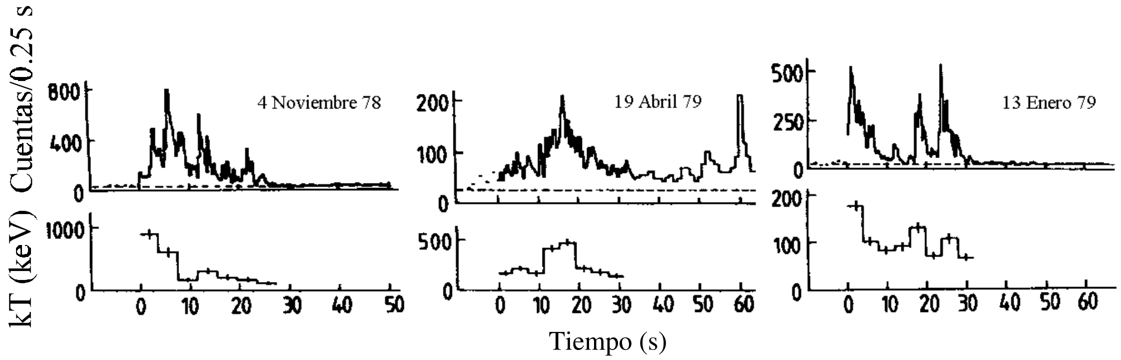

Figura 2.11: Perfil temporal de tres GRBs vistos por KONUS y sus variaciones espectrales. Parece haber una correlación entre los picos de intensidad y los máximos de dureza espectral. Figura tomada de [4].

2.3 Contrapartidas en otras energías

La identificación sin lugar a dudas de una contrapartida en otras longitudes de onda sería un paso importantísimo hacia la resolución del misterio de los GRBs. Por esta razón se han llevado a cabo numerosas búsquedas en prácticamente todos los rangos posibles: radio, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X y rayos γ de VHE (muy alta energía, 100 GeV < E < 100 TeV) y UHE (energía ultra alta, E > 100 TeV). Este tipo de exploración en el intervalo del visible demostró ser clave en el desarrollo inicial de la astronomía radio y de rayos X y se espera que tenga el mismo papel en el estudio de los GRBs. Para realizar satisfactoriamente esta tarea es imprescindible disponer de localizaciones precisas de los GRBs a fin de evitar asociaciones aleatorias dentro de los intervalos de error. Lamentablemente sólo una pequeña fracción es localizada con errores del orden de minutos de arco, esto sucede cuando tres o más

[8] 1 unidad astronómica = $1.5{\cdot}10^{11}$ m.

vehículos espaciales de la IPN (red interplanetaria) detectan el mismo GRB, lo que permite deducir una posición bastante precisa mediante los retrasos temporales relativos.

La búsqueda pretende encontrar contrapartidas en otras longitudes de onda del GRB observado o de otro previo o posterior suponiendo que la fuente sea repetitiva, o bien encontrar el objeto en un estado normal antes o después de su manifestación explosiva. Entre los métodos usados están:

- Búsqueda en un catálogo: Conocidas las coordenadas del GRB se puede mirar qué objetos interesantes están dentro del intervalo de error. Entre éstos estarían pulsares, fuentes de radio, remanentes de supernova, estrellas cercanas, enanas blancas, etc. Obviamente esta búsqueda proporciona contrapartidas observadas durante el periodo de normalidad de la fuente. Usando este método se realizó la asociación entre el GRB 790305b y el remanente de supernova N49 en la Gran Nube de Magallanes.
- Búsqueda simultánea: Telescopios en tierra o abordo de vehículos espaciales cubriendo diversos rangos de energía vigilan el cielo en busca de súbitos incrementos de brillo. Sus detecciones son cotejadas posteriormente en busca de coincidencias espaciales y temporales. De esta forma se ha establecido un límite inferior de 6 a la magnitud óptica del GRB 720514 con la red Prairie usada para seguir las trazas de meteoros [92]. La búsqueda de contrapartidas ópticas de los GRB 781124, GRB 790107 y GRB 790325 con la red checoslovaca Fireball también ha resultado negativa [93]. Coincidencias positivas han resultado a las energías de los rayos X, algunos ejemplos son el suceso del Apolo XVI, el GRB 720427 [94] y los GRB 720514 (ver Figura 2.12) y GRB 740723 [95].

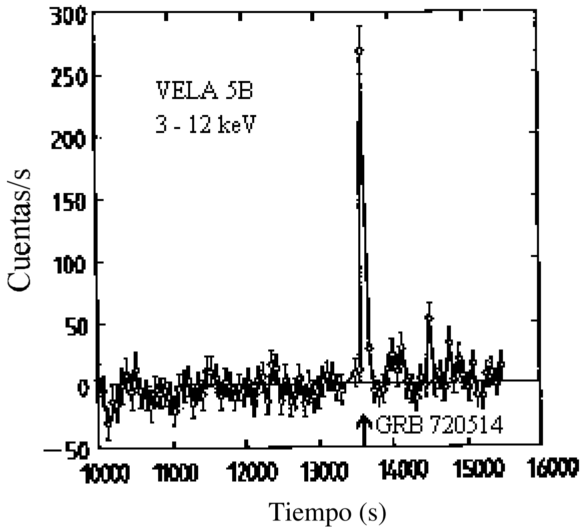

Figura 2.12: Perfil temporal de las cuentas en rayos X entre 3 y 12 keV registradas por el satélite VELA 5B en la dirección del GRB 720514, cuya aparición está indicada por la flecha. Las cuentas tienen el fondo sustraído y parecen mostrar una pulsación después del pico principal. Figura tomada de [4].

- Búsqueda alertada: Recientemente se ha establecido el sistema BACODINE [96] por el cual BATSE avisa a los observatorios con capacidad para orientar sus instrumentos cada vez que detecta un GRB. Así puede hacerse un seguimiento de la zona del cielo en la que se produjo el GRB en diversas longitudes de onda tan sólo unos segundos o minutos después de su inicio. Debido al escaso tiempo que BACODINE lleva en activo todavía no hay resultados publicados.
- Búsqueda con posterioridad: Una vez acaecida la etapa explosiva del objeto puede examinarse el cielo en busca de su contrapartida en estado de enfriamiento o de normalidad. Ninguna exploración ha obtenido resultados convincentes, incluyendo reconocimientos en rayos X realizados con los satélites HEAO-B, EXOSAT y GINGA [4].
- Búsqueda en placas fotográficas de exploraciones estándar del cielo: Existen registros fotográficos de todo el cielo realizados sistemáticamente desde principios de siglo, entre ellos se encuentra el reconocimiento del cielo llevado a cabo en el Observatorio Palomar. Estos registros alcanzan una magnitud óptica límite alrededor de 21 y en ellos se pueden buscar las contrapartidas de los GRBs actuales cuando las fuentes estaban probablemente en un estado normal. Hasta ahora no se han encontrado contrapartidas convincentes a ningún GRB de esta forma.