producción puede explicar el ritmo de detección de BATSE si la emisión es isótropa, sin embargo antes vimos que esto originaba problemas. Por el contrario, si atribuimos una emisión anisótropa a los GRBs, entonces la tasa de observación es demasiado alta en varios órdenes de magnitud para poder ser explicada por la hipótesis del colapso de sistemas binarios formados por objetos compactos.

La colisión de los dos cuerpos libera tanta energía como una explosión de supernova, principalmente en forma de neutrinos energéticos. La manera de convertir esta energía a la forma electromagnética sería probablemente a través de la aniquilación neutrino - antineutrino, $\nu_x + \bar{\nu}_x \rightarrow e^+ + e^-$, siguiendo un proceso similar al que ocurre en las explosiones de supernova tipo II. Así tendría lugar la formación de una "bola de fuego" con una energía inicial de 10^{50} erg, pero ésta debe ser convertida con una eficiencia bastante alta a rayos γ para poder dar cuenta del espectro observado. En una primera etapa la "bola de fuego" es ópticamente espesa dando lugar a un espectro térmico, pero a medida que se enfría se va volviendo ópticamente delgada. Entonces la emisión por efecto Compton inverso y sincrotrón produce un enfriamiento más efectivo y genera un espectro no térmico como el que es observado. Un problema que surge a todos los modelos cosmológicos basados en la formación de una "bola de fuego" es la contaminación por materia bariónica. La concentración de la gran cantidad de energía que requieren los modelos cosmológicos en un volumen reducido implica luminosidades muy por encima del límite de Eddington. Esto generaría un fuerte viento de plasma que contaminará la "bola de fuego" con materia bariónica, pudiendo entonces producirse un enfriamiento más eficiente a través del incremento de la energía cinética del viento, y en consecuencia, la emisión de alta energía sería suprimida. Para solucionar este inconveniente se ha propuesto que la emisión puede venir parcialmente (o en su totalidad) de la interacción de la "bola de fuego" en expansión con materia circundante. Esto produce una explicación sencilla de por qué las escalas de tiempo de los GRBs observados son mucho mayores que las implicadas en los modelos basados en "bolas de fuego" y también de por qué se han observado algunos de los fotones más energéticos detectados hasta ahora retrasados respecto de la emisión principal [2][10].

Otras explicaciones para los GRBs que los sitúan a distancias cosmológicas incluyen: formación de estrellas de neutrones inducida por la captura de materia en una enana blanca, creación de chorros relativistas en las proximidades de un agujero negro masivo o por la colisión de estrellas normales, estrellas extrañas, oscilaciones de cadenas cósmicas superconductoras situadas a $z \sim 1000$, descargas eléctricas (relámpagos) entre nubes moleculares ionizadas, etc. [7].

3. Rayos cósmicos y cascadas atmosféricas

A principios de siglo se comprobó que electroscopios cuidadosamente aislados perdían carga. Este fenómeno se atribuyó a la ionización producida por algún tipo de radiación proveniente de la Tierra (la radiactividad se había descubierto recientemente, a finales del siglo XIX). En 1912 Victor Hess asciende en globo hasta los 5000 metros y comprueba que la ionización aumenta con al altura, demostrando así el origen extraterrestre de la radiación, hecho por el cual recibiría el premio Nobel de Física en 1936. Fue Robert Millikan quien en 1926 bautiza esta radiación con el nombre de rayos cósmicos aunque aún se desconoce su naturaleza, de hecho existe un gran debate sobre si son rayos γ o partículas energéticas. A partir de 1929 con el descubrimiento de la cámara de niebla y el contador de Geiger - Müller se observa la aparición de trazas curvadas, lo que demuestra la existencia de partículas cargadas en la radiación, aunque se atribuyen a electrones arrancados del átomo por rayos γ cósmicos. En 1933 Arthur Holly Compton descubre el efecto geomagnético, por el cual la intensidad de la radiación cósmica varía con la latitud geomagnética, mostrando así la abundancia de partículas cargadas en la radiación primaria. Bruno Rossi demostró la predominancia de la carga positiva debido a la mayor intensidad de la radiación en el oeste que en el este. En esta misma fecha Carl Anderson descubre la traza de una nueva partícula, que más tarde recibiría el nombre de positrón. En 1937 Seth Neddermeyer y Carl Anderson descubren otra nueva partícula subatómica, el muon, en la radiación cósmica. El positrón y el muon fueron las primeras de una serie de nuevas partículas subatómicas descubiertas en la radiación cósmica, dando lugar al nacimiento de una nueva rama de la ciencia, la física de partículas elementales, que hasta el desarrollo de los aceleradores de partículas en los años 50 tuvo en los rayos cósmicos la principal fuente de investigación.

En 1938 Pierre Auger comprueba que detectores de partículas separados por muchos metros registran la llegada simultánea de partículas. Este es el descubrimiento de las cascadas atmosféricas extensas, que Auger supone iniciadas por un rayo γ de energía ~ 1 PeV. En los años 40 con el desarrollo de las emulsiones nucleares y los vuelos en globo hasta los 30 km de altura se descubren trazas de núcleos atómicos desde $Z = 1$ hasta 30. Se comprueba que los rayos cósmicos están formados en un 99% de protones y partículas alfa (núcleos de helio), pero que los núcleos pesados ($Z > 2$) constituyen aproximadamente el 10% de la masa de los rayos cósmicos. En los años 50 se consolida la astrofísica de los rayos cósmicos y se empieza a trabajar en modelos sobre su origen. En los años 60 con el desarrollo de nuevos detectores (Cherenkov, centelleo, chispas, semiconductores) y nuevos vehículos (globos, aviones, cohetes, satélites) se profundizó en el estudio de la radiación cósmica al librarse de la influencia de la atmósfera terrestre. Así se descubrieron dos isótopos de helio, electrones y positrones y trazas de núcleos con $Z > 90$, todo ello en la componente primaria que aún no ha interaccionado con la atmósfera.

3.1 Propiedades de los rayos cósmicos

Desde un punto de vista amplio se entiende por radiación cósmica toda clase de partículas y radiación energética que llega a la Tierra procedente del espacio, entre lo que podemos distinguir núcleos atómicos, rayos gamma, electrones, positrones, neutrinos y otras partículas elementales. No obstante se emplea a menudo esta denominación para referirse únicamente a la componente material y en particular a los núcleos atómicos debido a que son la componente mayoritaria (ver Figura 3.1). Desde el punto de vista de la propagación se distinguen tres componentes:

1. Primordial: La que fue generada en las fuentes y que por tanto depende de la composición química de las mismas y del mecanismo de aceleración.

2. Primaria: Es el resultado de la interacción de la componente primordial con el medio interestelar, produciéndose ionizaciones, fragmentaciones, deflexiones, etc.

3. Secundaria: Son los productos resultantes de la interacción de la componente primaria con la atmósfera, principalmente rayos gamma, electrones, positrones, muones y neutrinos.

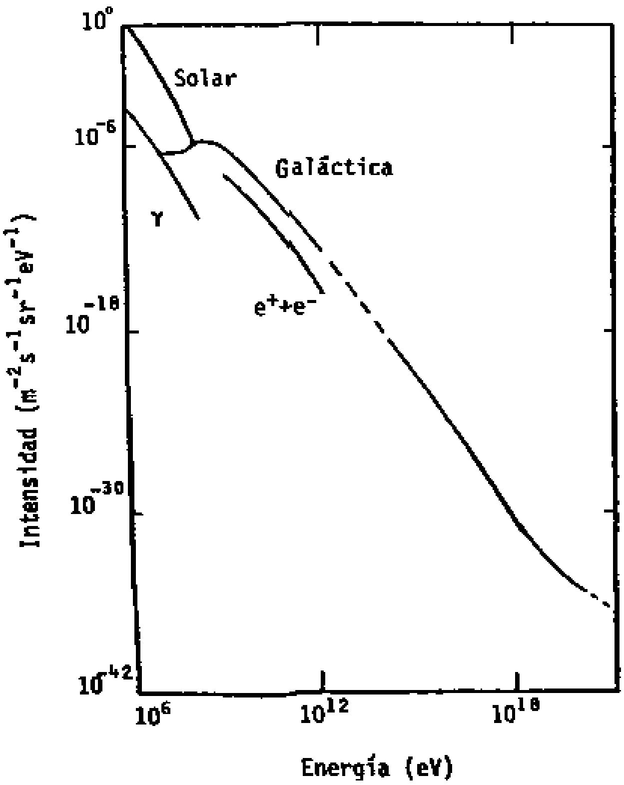

Figura 3.1: Espectro global de los núcleos atómicos de la radiación cósmica indicando su origen. También se muestra el espectro de los rayos γ y de los electrones y positrones de la radiación cósmica. Figura tomada de [13].

Los datos de los que se dispone corresponden a mediciones sobre las componentes primaria y secundaria, por tanto hay que usar modelos sobre la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera terrestre y sobre la propagación en el medio interestelar para deducir la componente primordial. Ésta ha de contrastarse con las predicciones realizadas por los modelos de producción y aceleración para comprobar si entendemos realmente el origen de la radiación cósmica.

Es interesante señalar que existe una energía límite inferior de los rayos cósmicos con carga eléctrica para poder entrar en la atmósfera debido a la presencia del campo magnético terrestre. Esta energía depende de la partícula primaria, de la dirección de llegada y de la latitud geomagnética, por ejemplo, para un protón con incidencia vertical es de 14 GeV en el ecuador geomagnético mientras que a 50º de latitud es 1.5 GeV [11].

El rango de energía del que se dispone de datos mediante observación directa se extiende aproximadamente entre 0.1 MeV y 100 TeV, por encima de esta energía el flujo comienza a ser demasiado pequeño para ser detectado de manera eficiente por experimentos en globos, aviones o vehículos espaciales. Por ejemplo, el flujo de rayos cósmicos provenientes de todas direcciones por encima de 1 MeV es de unas 200 partículas por segundo y por metro cuadrado, en cambio con más de 1 EeV sólo llega una partícula por semana en un metro cuadrado. ¡Y por encima de 100 EeV llega una partícula por kilómetro cuadrado cada siglo! La observación más allá de los 100 TeV se realiza mediante la técnica de las cascadas atmosféricas extensas que más tarde se explicará y que ha logrado ampliar el rango gracias al incremento del área efectiva de los experimentos al usar la atmósfera terrestre como parte misma del detector. Así se han observado las partículas más energéticas jamás detectadas: el 15 de octubre de 1991 el detector Fly's Eye (Utah, EE. UU.) registró una cascada atmosférica iniciada por una partícula primaria de energía igual a unos 320 EeV y el 3 de diciembre de 1993 el detector AGASA (Akeno, Japón) observó una cascada iniciada por un rayo cósmico de una energía aproximada de 200 EeV [12] (la mayor energía conseguida hasta ahora en los aceleradores de partículas de los laboratorios es aproximadamente 1 TeV en el centro de masas).

Por debajo de 1 GeV el espectro está fuertemente influenciado por la modulación del Sistema Solar, pero desde 1 GeV hasta 1 PeV el espectro de los rayos cósmicos sigue una ley de potencias en la que el flujo es proporcional a $E^{-2.7}$, cerca de 1 PeV se produce una acentuación en la pendiente del espectro que se denomina “la rodilla”, entonces el índice espectral pasa a ser aproximadamente -3.1. Entre 3 y 5 EeV parece aumentar aún más la pendiente, pero al llegar a los 10 EeV se produce un aplanamiento del espectro con un índice espectral entre -2.5 y -2.8 [3]. Estos datos por encima de 1 PeV no son completamente seguros debido a los grandes errores asociados por la falta de estadística y la pérdida de resolución en energía de esta parte del espectro. No obstante los cuatro experimentos implicados (Haverah Park, Yakutsk, Fly’s Eye y AGASA) ven con mayor o menor significancia las características del espectro antes expuestas. La Figura 3.1 y la Figura 3.2 muestran el espectro de las componentes más importantes de la radiación cósmica primaria. En ellas se observa que todos los espectros obedecen aproximadamente al mismo comportamiento, diferenciándose en un factor de escala, siendo los protones la componente dominante seguida por los núcleos de helio.

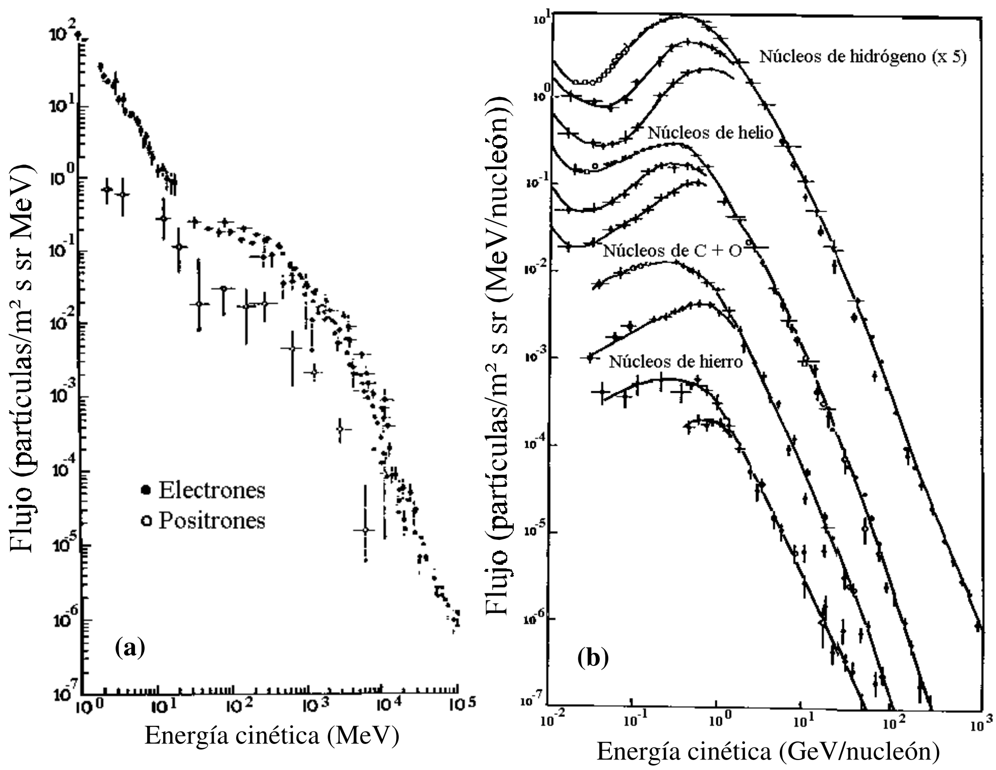

Figura 3.2: **(a)** Espectro de los electrones y positrones de la radiación cósmica. **(b)** Ídem de los núcleos más abundantes medido en las cercanías de la Tierra. Por debajo de algunos GeV/nucleón los espectros están muy influenciados por la modulación del Sistema Solar. Las diferentes curvas para la misma especie representan las medidas en distintos periodos de actividad solar, la intensidad más baja correspondiendo a la mayor actividad. Figuras tomadas de [13].

La composición de los rayos cósmicos en su parte de núcleos atómicos es bien conocida hasta energías de 100 TeV mediante detección directa. Los núcleos más abundantes son el hidrógeno (~ 96%) y el helio (~ 3%), a los cuales siguen los de carbono, nitrógeno y oxígeno y después el hierro, como en el Sistema Solar. Se observa el efecto par - impar, por el cual los núcleos de carga par son más abundantes que los de carga impar, algo que ocurre en toda la Naturaleza. Los núcleos del litio al boro y los del escandio al manganeso muestran una sobreabundancia en la radiación cósmica respecto al Sistema Solar, esto es debido al efecto de fragmentación y astillamiento que se produce en los núcleos de carbono, nitrógeno, oxígeno y hierro en su propagación por el medio interestelar. En cuanto a las abundancias relativas de distintos isótopos se encuentra un razonable acuerdo entre las previsiones y lo observado, que por supuesto difiere en algunos casos de los valores del Sistema Solar debido a los efectos de fragmentación antes mencionados, por ejemplo la razón $^{6}Li/^{7}Li$ es aproximadamente 1 para la radiación cósmica mientras que vale 0.08 en el Sistema Solar. La antimateria, al igual que en el resto de la Naturaleza, está ausente entre los núcleos de la radiación cósmica salvo en el caso del hidrógeno. El cociente antiprotón/protón encontrado es ~ $3 \cdot 10^{-4}$, que está de acuerdo con las previsiones teóricas de formación por las interacciones con el medio interestelar. Para el resto de los iones se tienen limites superiores en los que el cociente antinúcleo/núcleo varía entre 10^{-2} y 10^{-5} según el elemento [13]. La

Figura 3.3 muestra las abundancias relativas de los núcleos de la radiación cósmica y de algunos isótopos.

Se observa que los núcleos pesados tienen un espectro más plano que los de hidrógeno y helio (ver Figura 3.2b), lo que produce un incremento de la componente pesada según nos acercamos a la “rodilla” del espectro, de forma que aquí las proporciones están igualadas entre los distintos grupos. Determinar la composición más allá de este punto es extremadamente difícil porque las observaciones no son directas, sino a través de la componente secundaria que enmascara la naturaleza del primario; no obstante los resultados parecen indicar que el aumento de la fracción pesada debe parar en algún punto antes de los 300 PeV, porque a partir de esta energía los resultados sugieren un incremento de la fracción ligera [3].

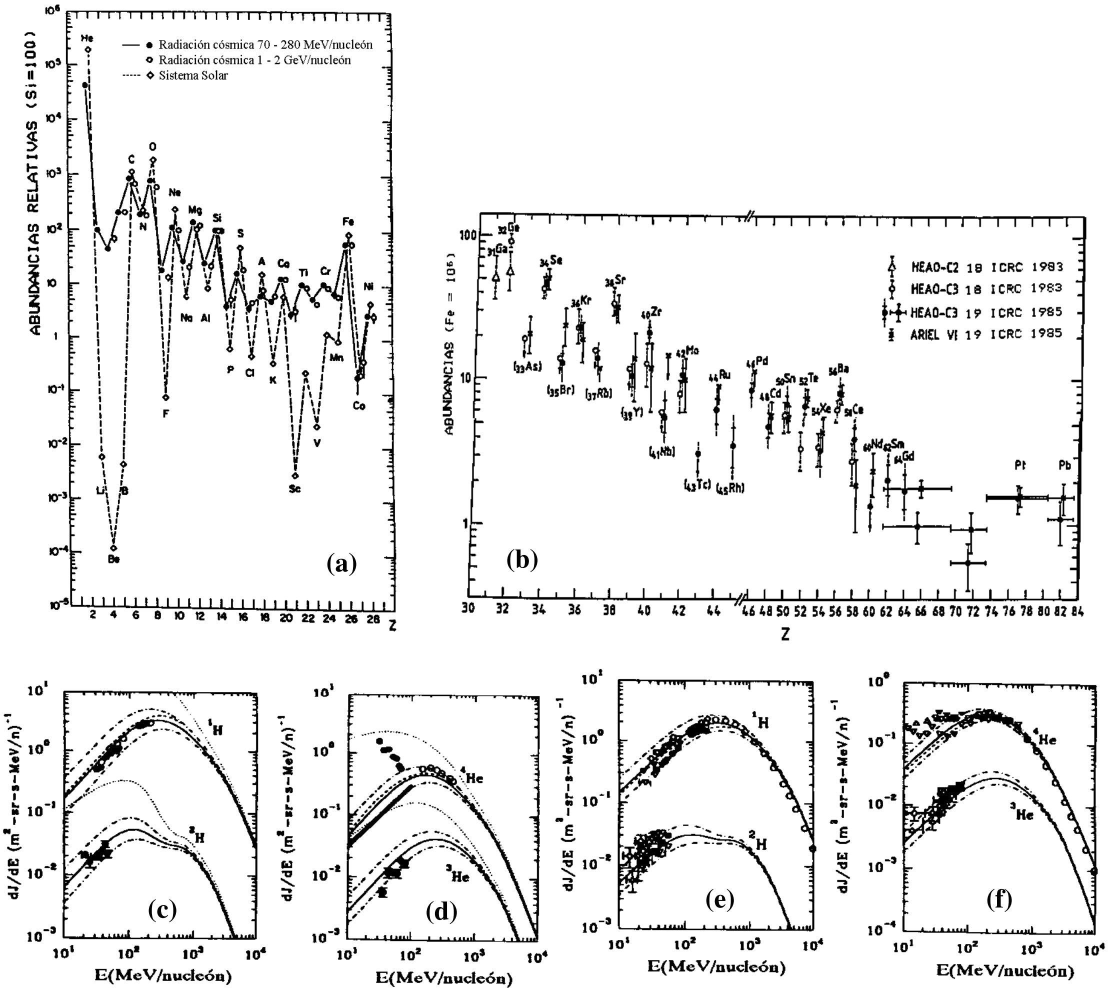

Figura 3.3: **(a)** Abundancias relativas de los núcleos en la radiación cósmica (en dos intervalos energéticos) y en el Sistema Solar. **(b)** Abundancias relativas de la componente ultra pesada de la radiación cósmica. **(c)** Espectro de los isótopos ^{1}H y ^{2}H medido a 27 UA de la Tierra por el Voyager 2. **(d)** Ídem para ^{3}He y ^{4}He. **(e)** Ídem para ^{1}H y ^{2}H medido cerca de la Tierra por varios satélites. **(f)** Ídem para ^{3}He y ^{4}He. Figuras tomadas de [13].

El estudio de las anisotropías es un tema muy importante para esclarecer el origen de la radiación cósmica. Las partículas neutras, tales como fotones, neutrones y neutrinos, no son desviadas por el campo magnético galáctico o intergaláctico, por tanto apuntan hacia su lugar de origen (a menos que hayan sufrido alguna interacción en el camino o sean el producto de la interacción de otras partículas en el medio interestelar, lo cual proporciona un fondo difuso). Esto permite averiguar cuáles son sus fuentes y descubrir el mecanismo de producción con el estudio del objeto en todo el espectro electromagnético. El neutrón tiene una vida media de 18.5 minutos, lo que lo hace inobservable en la radiación cósmica (exceptuando aquellos procedentes del Sol) salvo quizá a las energías más altas, ya que con, por ejemplo, 1 EeV la dilatación temporal relativista alarga su vida media hasta 30000 años. Otras partículas