

Erupciones de rayos gamma

Florencia L. Vieyro

1. Introducción

En los años 60, las potencias mundiales de Estados Unidos y la Unión Soviética se encontraban en medio de la guerra fría, un enfrentamiento político, económico y tecnológico, que comenzó luego de la Segunda Guerra Mundial y finalizó con la caída de la Unión Soviética en 1991. Uno de los aspectos de este período, fue la carrera armamentista, en la que ambas superpotencias estaban en constante desarrollo de armas más poderosas y eficaces, entre las que se encontraban las armas Nucleares. Dado el excesivo y devastador daño que los ensayos nucleares generan sobre el planeta, en el año 1963, los gobiernos de estos países firmaron el Tratado de Prohibición de Pruebas nucleares, por el cual se prohibían los ensayos con armas nucleares, con la excepción de realizarlas bajo tierra. Sin embargo, el gobierno de EEUU sospechaba que la USSR podría intentar realizar en forma secreta pruebas nucleares sin respetar el tratado, por lo que lanzó al espacio una serie de satélites llamados Vela, con el fin de detectar radiación gamma -de muy alta energía- emitida por los ensayos nucleares en el espacio.

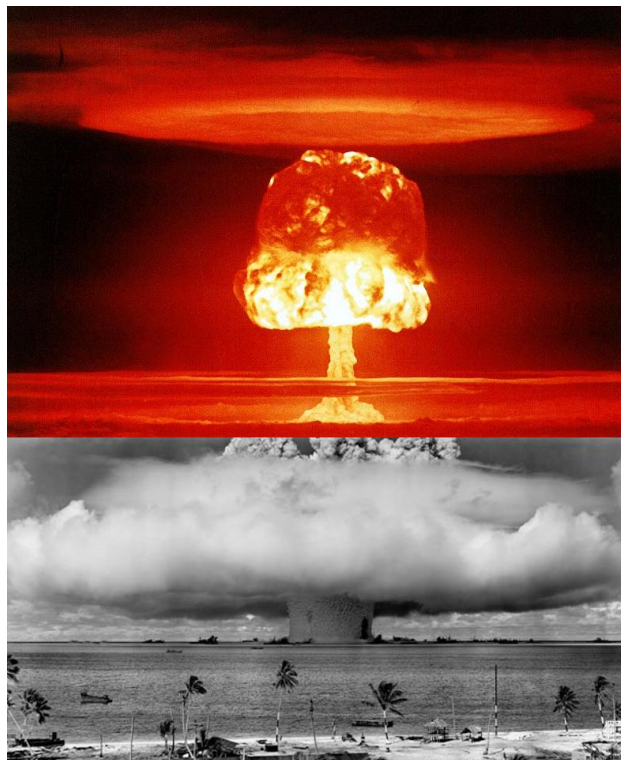


Figura 1:
(Arriba) Detonación de una bomba termonuclear, en las Islas Marshall, el 26 de marzo de 1954. Esta fue una entre las decenas de detonaciones que el gobierno de Estados Unidos hizo como parte de un programa de pruebas nucleares.
(Abajo) Explosión de una bomba atómica debajo del agua.

Entre los años 1967 y 1970 estos satélites detectaron 16 explosiones de rayos gamma, pero que no tenían las características usuales de una explosión nuclear. Una bomba nuclear produce un muy intenso estallido de rayos gamma que dura alrededor de una millonésima de segundo, y luego su intensidad decae. Las señales que los satélites detectaron no mostraban el intenso estallido inicial, ni tampoco decrecía su intensidad como esperaban. Dado que no conocían el origen de estas señales, su existencia se mantuvo en secreto por más de 6 años. En el año 1973, un equipo del Laboratorio Científico de los Álamos, de la Universidad de California, liderado por Ray Klebesadel, descartó la

posibilidad de que estos eventos tuvieran origen en la Tierra o en el Sol, y publicó las observaciones de las nuevas fuentes a las que llamó *Erupciones o estallidos de rayos gamma*, conocidas como GRBs por sus siglas en inglés (*Gamma-Ray Bursts*, Klebesadel et al., 1973).

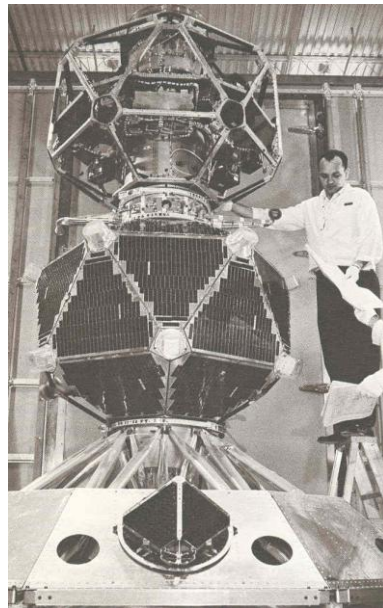


Figura 2: Dos satélites Vela preparados para ser puestos en órbita.

Las erupciones de rayos gamma son eventos transitorios, lo que significa que ocurren en un período de tiempo corto y luego se apagan. Durante el tiempo que están encendidos, producen más radiación gamma que el resto del universo. Los GRBs son los fenómenos más energéticos conocidos en el universo desde el Big Bang. Luego del destello inicial en rayos gamma, se da un período de *postluminiscencia o afterglow*, en donde se puede detectar el evento a energías más bajas (por ejemplo, rayos X, ultravioleta, visible o radio-ondas).

La noticia del descubrimiento de estas nuevas fuentes, rápidamente despertó el interés en la comunidad científica. Surgieron muchas teorías especulativas sobre cual podía ser el origen de los GRBs, los cuales se pensaba que se producían en la Galaxia. Sin embargo, el gran avance en la teoría de GRBs se dió luego del lanzamiento del observatorio de rayos gamma COMPTON, que se lanzó en 1991. Este observatorio tenía a bordo un instrumento llamado BATSE, por sus siglas en inglés (*Burst and Transient Source Explorer*), destinado a estudiar fuentes que fueran transitorias.

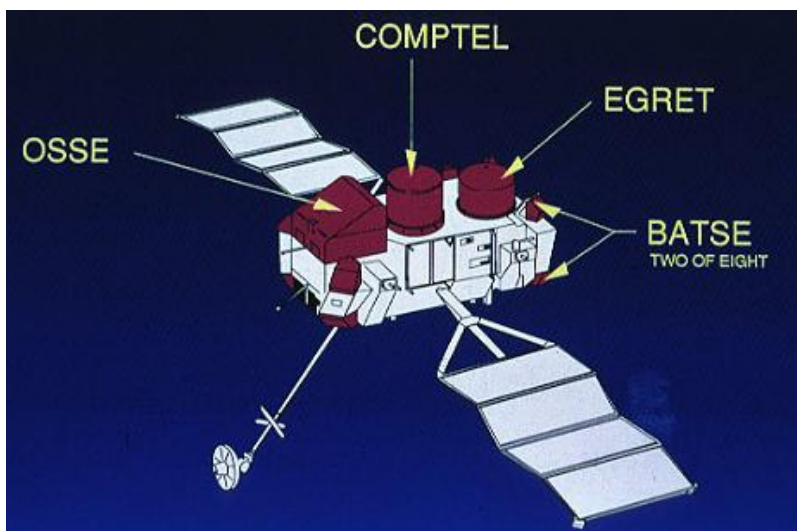


Figura 3: Observatorio de Rayos Gamma COMPTON, lanzado el 5 de abril de 1991. Constaba con diversos instrumentos entre los cuales se encontraban los detectores BATSE.

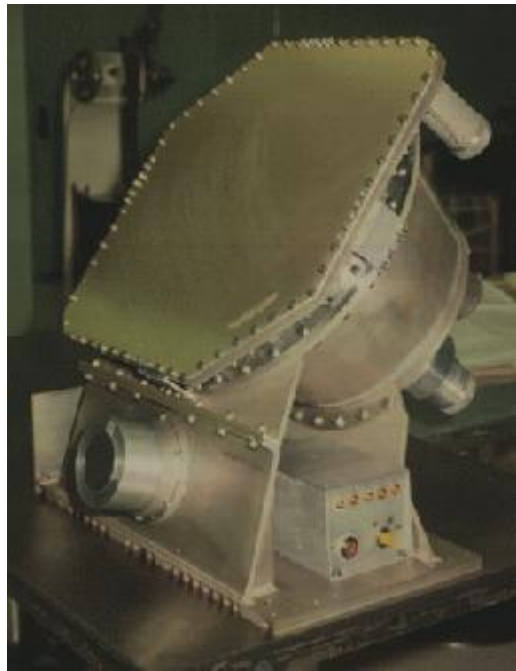


Figura 4: El experimento BATSE (Burst and Transient Source Experiment) diseñado con el fin de detectar fuentes transitorias. Luego de sólo un año de operación, ya había detectado 261 eventos.

Con este instrumento se detectaron más de 2700 eventos, con un promedio de un evento por día. En particular, con estas observaciones se pudieron obtener dos resultados fundamentales para entender la naturaleza de estas fuentes:

- Su origen es extragaláctico;
- Hay dos clases de eventos.

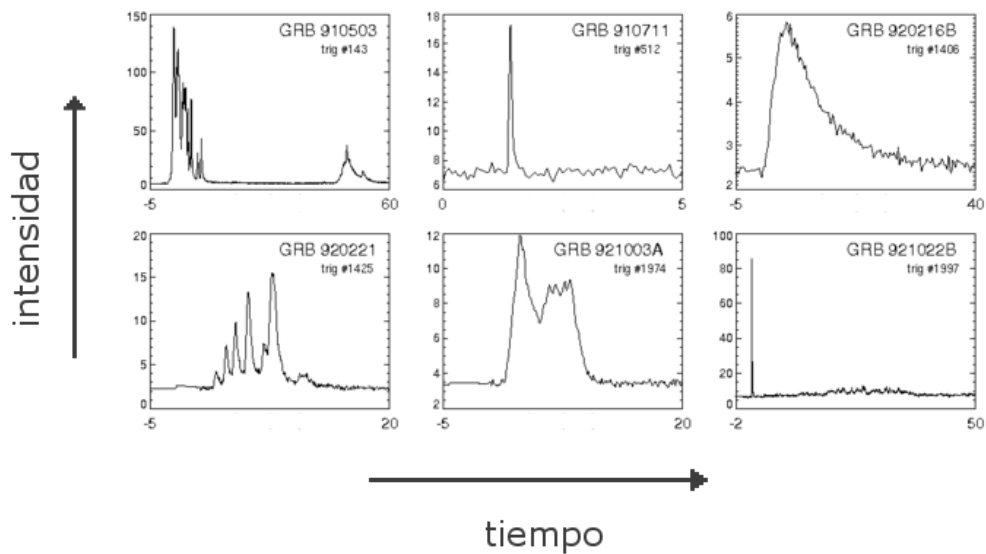


Figura 5: Intensidad de la radiación detectada en función del tiempo, para distintos eventos detectados por BATSE.

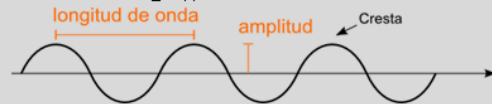
Radiación electromagnética



James Clerk Maxwell (1831-1879): físico escocés que desarrolló la teoría del electromagnetismo, la cual permitió hacer una descripción ondulatoria de la luz.

Los campos eléctricos y magnéticos, generados por partículas que tienen carga eléctrica, se propagan en forma de ondas, llamadas *ondas electromagnéticas*. Una onda puede caracterizarse por su amplitud A (altura de la cresta) y por su longitud de onda λ (distancia entre dos crestas), como muestra la Fig. (i).

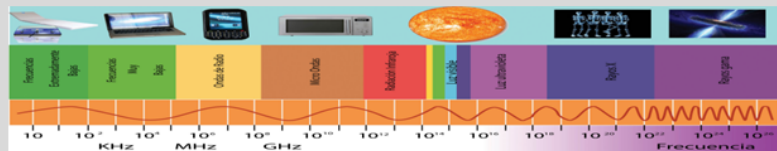
Figura i: esquema de una onda.



El conjunto de ondas electromagnéticas de todas las longitudes de onda es lo que se conoce como *espectro electromagnético*. La luz que vemos- luz visible- es sólo una pequeña ventana de lo que es el espectro electromagnético.

El término *radiación electromagnética*, se refiere a las ondas electromagnéticas que emiten los objetos, y que se propagan por el espacio transportando energía; la radiación electromagnética emitida por un objeto astrofísica puede ser detectada desde la Tierra. La longitud de onda, da cuenta de cómo es la energía que transporta las ondas: para longitudes de onda largas, la energía es baja, mientras que para longitudes de onda corta la energía es alta. Es muy usual hablar de *frecuencia* de la radiación en lugar de longitud de onda; la frecuencia es inversamente proporcional a λ , o sea que alta frecuencia implica alta energía, mientras que baja frecuencia corresponde a rangos del espectro de alta energía. La Fig. (ii) muestra los distintos rangos del espectro electromagnético, con un ejemplo del tipo de objeto que emite radiación a esa energía. Como puede verse en el gráfico, la radiación gamma es la de mayor energía en el espectro electromagnético.

Figura ii: espectro electromagnético.



2. Origen: ¿en dónde se producen los estallidos de rayos gamma?

Así como para localizar un punto sobre la superficie de la tierra es usual usar dos coordenadas, por ejemplo, latitud y longitud, para localizar dos puntos en el cielo, también se usan dos coordenadas. Unas coordenadas muy útiles son las *coordenadas galácticas*. La galaxia en donde se encuentra el sistema solar, la Vía Láctea, es una galaxia espiral y tiene básicamente dos componentes: un disco y un halo. El halo es una estructura esferoidal (como una pelota de rugby) que envuelve la galaxia, en donde la concentración de estrellas es muy baja y apenas tiene nubes de gas. El disco es una componente achatada, y es la región de la galaxia que más gas y estrellas jóvenes contiene. El sistema solar y, consecuentemente, el planeta Tierra también, se encuentran en el plano del disco, aproximadamente a la mitad entre el centro y el borde de la galaxia. Para definir la *latitud galáctica* se toma como referencia el disco de la Vía Láctea (así como para definir la latitud geográfica se toma la línea del Ecuador terrestre): todos los objetos en el disco tienen una latitud galáctica igual a 0° . Por otro lado, para definir la *longitud galáctica*, se toma como referencia la línea que va en dirección al centro de la galaxia (en analogía a la longitud terrestre que se mide a partir de la línea llamada *meridiano de Greenwich*): un objeto en dirección al centro galáctico tiene una longitud galáctica igual a 0° , mientras que uno en dirección contraria tiene una longitud de 180° .

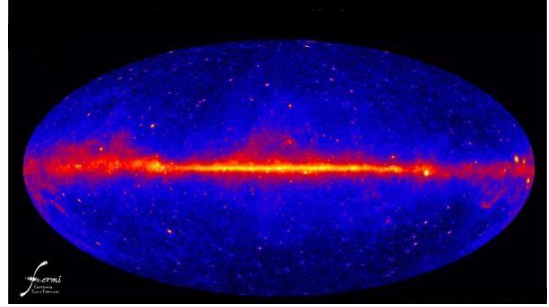


Figura 6: (Izquierda) Estructura espiral de la Galaxia NGC. (Derecha) Imagen del perfil del plano galáctico tomada por el satélite de rayos gamma Fermi.

Teniendo este sistema de coordenadas en mente, se puede analizar cuál es el origen de los GRBs. La Fig. (7) muestra un mapa del cielo, en donde se han marcado todos los estallidos de rayos gamma detectados por BATSE durante los 9 años que operó el instrumento.

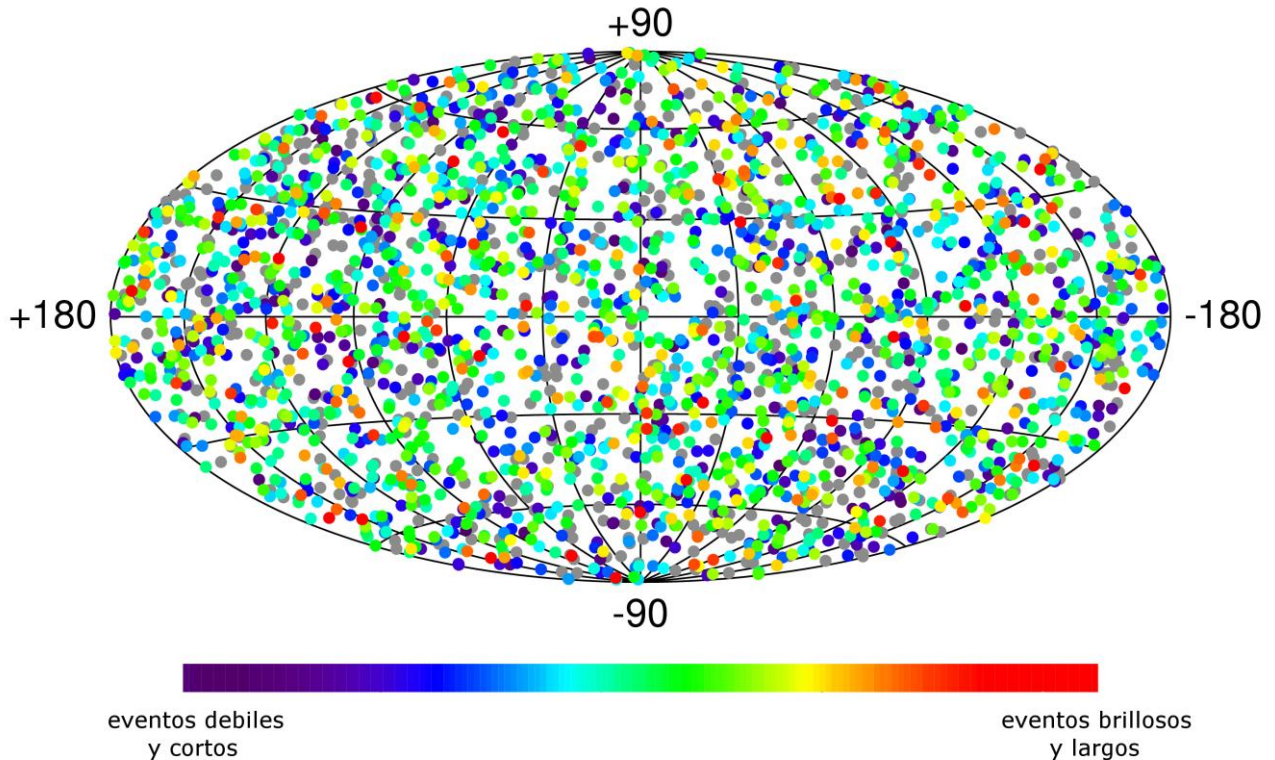


Figura 7: Mapa en coordenadas galácticas con los más de 2700 eventos detectados por BATSE en sus 9 años de operación.

Las coordenadas de ese mapa son coordenadas galácticas y cada punto en el mapa representa un evento. Si los estallidos de rayos gamma fueran eventos que se producen dentro de la Vía Láctea, entonces sería esperable que la mayor parte de los puntos del mapa estuvieran concentrados en plano de la galaxia (con latitud galáctica igual 0°), y también con una mayor concentración hacia el centro galáctico, es decir, en el centro del mapa. Sin embargo, en el mapa puede verse que la distribución de puntos es homogénea. Esto significa que se detectan la misma cantidad de GRBs en todas las direcciones que se observen, lo que nos indica que el origen de estos eventos debe ser extragaláctico, es decir, fuera de la Vía Láctea.

Este resultado pudo comprobarse posteriormente, cuando se midieron las distancias a estos eventos y se determinó que ocurrían en galaxias muy lejanas (Schilling & Greenberg-Slovin, 2002)

3. Clasificación

En el mapa de los eventos detectados por BATSE, puede verse que aparecen distintos colores. Los colores indican lo que se conoce como fluencia, que es una medida de toda la energía que emitió la fuente a lo largo del intervalo de tiempo que duró el evento. Los episodios marcados en rojos son aquellos que fueron muy brillantes y de larga duración; los de color púrpura son los episodios que fueron débiles y cortos. En algunos casos no se pudieron obtener suficientes datos como para estimar la fluencia, y esos eventos aparecen en color gris.

Al graficar el número de eventos que se detectaron en función de la duración de los mismos, se obtiene el histograma de la Fig. (8). En este gráfico se pueden distinguir dos grupos de eventos: unos largos, con duraciones de más de 10 segundos, y otros cortos, con duraciones menores al segundo.

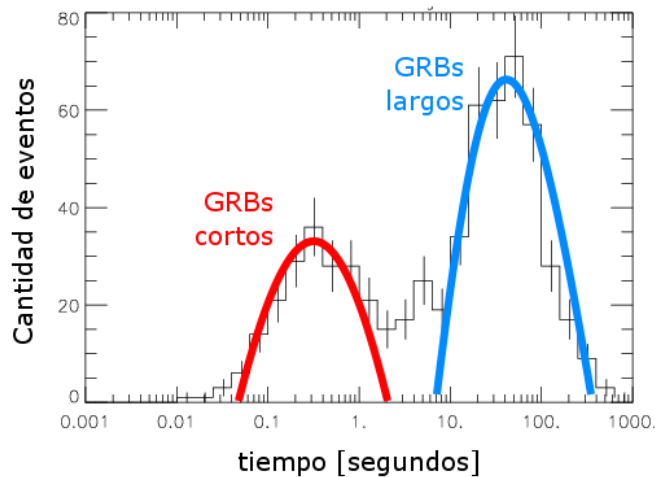


Figura 8: Histograma de la distribución del número de eventos detectados en función de su duración.

Los GRBs largos son los más frecuentes. Dado que también suelen ser los más brillantes, es más frecuente que se detecte su postluminiscencia en otros rangos del espectro electromagnético. Esto permitió asociarlos al colapso de estrellas muy masivas.

Los GRBs cortos no están asociados a la muerte de estrellas masivas, sino que tienen un origen diferente. La verdadera naturaleza de estos eventos aún es incierta, pero la principal hipótesis es que se originan en la colisión de dos objetos compactos (dos estrellas de neutrones o una estrella de neutrones con un agujero negro).

En este trabajo se hablará, principalmente, de los modelos que describen los GRBs largos.

4. Mucha energía

Las distancias a las que se producen estos fenómenos son cosmológicas, del orden de 100 millones de años luz¹ o valores mayores. Teniendo en cuenta estas distancias, y si se supone que se libera la misma cantidad de energía en todas las direcciones, entonces se estima que estos eventos deberían producir una cantidad de energía 20 órdenes de magnitud mayor a la energía total contenida en el Sol (esto equivale a tomar toda la energía en reposo del sol, usando la famosa ecuación $E_0=mc^2$, y convertirla en radiación, Bloom et al. 2001). Consecuentemente, luego de que se determinó que el origen de los GRBs es extragaláctico, surgió otra pregunta: ¿cómo generan tanta energía?

Al estudiar los espectros de estas fuentes, se encontraron indicios de que la radiación liberada en la explosión no se emite en todas las direcciones, sino que se concentra hacia una dirección, es decir que está confinada o *colimada* en un haz o jet; también se determinó que el jet es relativista, lo que significa que viaja a una velocidad cercana a la velocidad de la luz (Kulkarni et al. 1999). Estudios posteriores reforzaron esta hipótesis, y actualmente está aceptado que la emisión de los GRBs está colimada en jets relativistas.

En los casos en que el jet no apunta en la dirección a la Tierra, entonces los rayos gamma emitidos no son detectados. Esto sugiere que en realidad ocurren muchos más eventos de este tipo en el universo, de los que se detectan en la Tierra.

En los casos en que el jet del GRB apunta en la dirección hacia la Tierra, toda la energía está concentrada en un haz angosto, lo cual hace que parezca mucho más brillante al caso en que si su energía hubiera sido emitida en todas las direcciones por igual. Cuando se tiene en cuenta este efecto, los requerimientos energéticos disminuyen de manera considerable, y se obtienen energías que son comparables a las de una *supernova*, es decir, la explosión de una estrella muy masiva, un fenómeno ampliamente estudiado.

Otro efecto que también relaja la cantidad de energía requerida para explicar las observaciones, es el efecto Doppler relativista. El efecto Doppler se produce cuando un emisor y/o receptor de ondas se encuentra en movimiento. La existencia de este fenómeno puede verse en una situación cotidiana, usando las ondas sonoras. Si se presta atención al sonido que emite una ambulancia, se verá que el mismo sonido que se escucha cuando la ambulancia se acerca, no es el mismo al que se escucha cuando se aleja. Esto se debe a que, como el emisor del sonido- en este caso la ambulancia- está en movimiento con respecto al que lo recibe, la frecuencia de la onda sonora cambia. En el caso de la luz (i.e., ondas electromagnéticas) ocurre lo mismo, la frecuencia o energía de la onda será detectada de manera distinta si el emisor está en movimiento. En el caso en que las velocidades son cercanas a la velocidad de la luz, se habla de efecto Doppler relativista. Para el caso de los GRBs, dados que la radiación está siendo emitida por un haz relativista, la radiación que se detecta es de mayor energía a la que en realidad produce la fuente.

Si bien con estos dos efectos- radiación colimada y efecto Doppler relativista- se reduce la cantidad de energía que deben explicar los modelos que tratan de representar a estos eventos, aún siguen siendo los fenómenos de origen estelar más energéticos del universo, por lo que es un desafío para los científicos poder explicar cuál es su origen.

A continuación se describe el modelo del *Colapsar*, que sería el progenitor de los GRBs de larga duración. Luego, se describe el modelo de la Bola de Fuego o *firewall* para la producción de la radiación gamma (Zhang & Mészáros 2004).

¹ Un año luz es una unidad de longitud, y equivale a la distancia que la luz recorre en un año. Esta medida es, aproximadamente, 9.5 billones de kilómetros (tener presente que un billón es un uno seguido de ¡doce ceros!)

5. GRBs de larga duración: colapsar

Para poder comprender cómo son las etapas finales en la vida de una estrella, es necesario entender de qué manera funciona una estrella. Una estrella normal se puede describir, de manera simplificada, como una esfera de gas que está en equilibrio por el balance de dos fuerzas: por un lado la fuerza gravitatoria que tiende a hacer que la estrella colapse, y por otro lado la presión de las reacciones nucleares en su interior que tienden a expandir la estrella. La estrella es estable mientras que las reacciones nucleares en su interior proveen la presión necesaria para contrarrestar la gravedad. La quema en el interior transforma el núcleo de hidrógeno- que es el elemento químico más abundante en el universo- en helio; cuando el hidrógeno se acaba en el centro de la estrella, el núcleo se contrae hasta alcanzar la temperatura necesaria para la ignición del siguiente elemento. En el caso de estrellas masivas (con masas mayores a 5 veces la masa del sol) este proceso se repite, y se fusionan elementos cada vez más pesados hasta que queda un núcleo de hierro. Para que el hierro se fusione, no alcanza con la contracción del núcleo, por lo que ante una fuente de energía que se oponga a la gravedad, la estrella colapsa completamente, formando un *agujero negro*. Los agujeros negros son regiones del espacio-tiempo rodeadas por un horizonte de eventos; este horizonte separa la región que constituye el agujero negro del resto del universo, y es la superficie límite del espacio a partir de la cual ninguna partícula, incluyendo a los fotones, puede salir.

En el caso de una estrella muy masiva ($M \sim 100M_{\text{sol}}$), el agujero negro que se forma puede capturar y acretar material de las capas interiores de la estrella. Como la estrella está rotando, el material al caer forma un disco ultradenso alrededor del agujero negro. El campo magnético asociado al disco es el que permite la colimación y el lanzamiento del jet. Este jet se propaga empujando las capas de la estrella, y eventualmente emerge de la superficie.

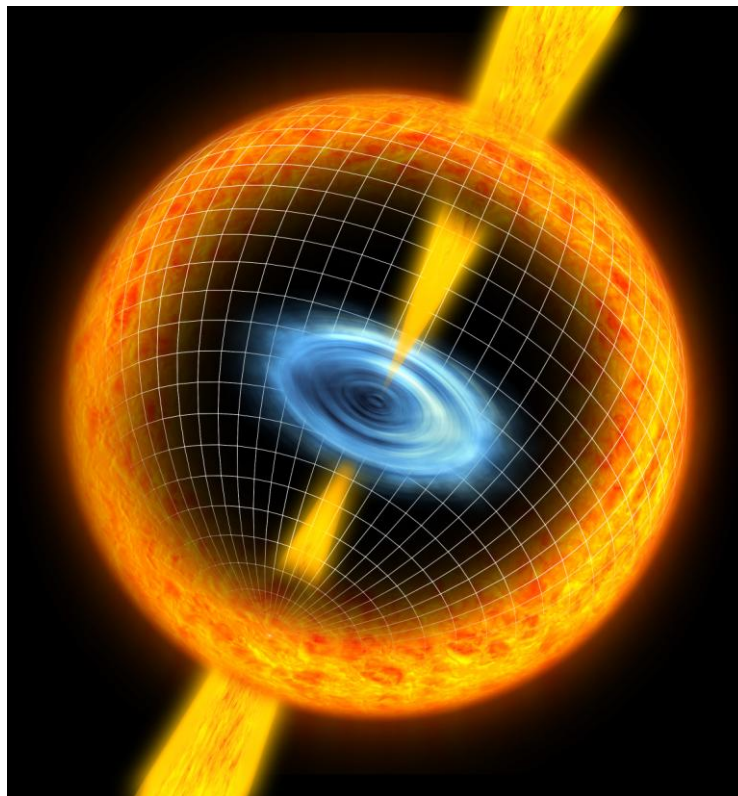


Figura 9: Representación artística de la formación de un GRB de larga duración.

6. Modelo de la Bola de Fuego

El ingrediente principal para el modelo estándar, así como para todos los modelos de GRBs, es que el material se está moviendo a velocidades relativistas y está colimado en forma de jet o haz, como se mencionó en las secciones anteriores.

Cuando la fuente de energía central se enciende, es decir, cuando partes del disco de acreción comienzan a ser eyectadas, una cáscara en expansión comienza a propagarse por las capas de la estrella. A medida que se propaga, esta cáscara va acumulando material estelar en el frente, por lo que su velocidad va disminuyendo (si bien se mantiene en un régimen relativista). Diferentes capas son emitidas de forma intermitente. Dado que las cáscaras que se mueven detrás tienen una velocidad mayor, las distintas capas comenzaran a chocar entre sí. Esto produce *ondas de choque*, que son discontinuidades en las propiedades (presión, densidad, etc.) del fluido. En estas ondas de choque internas, se aceleran partículas hasta energías muy altas, y que son las que generan la emisión en gamma que se observa.

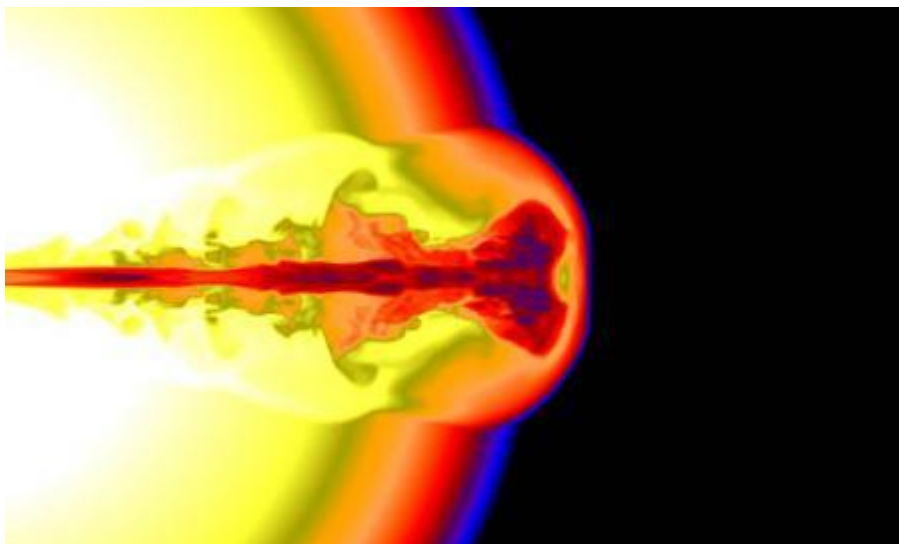


Figura 10: Imagen obtenida a partir de una simulación hidrodinámica de la propagación del jet dentro de la estrella. La imagen muestra el momento en que el jet emerge de la superficie de la estrella (Zhang et al. 2004).

Una vez que el jet ya salió de la estrella, al interactuar con el medio externo, se generaran dos ondas de choque externas; una se propaga en el mismo sentido que el jet, y otra viaja en dirección contraria, como un rebote. Aquí nuevamente se pueden acelerar partículas, y esas son las responsables de la emisión a energías más bajas (rayos X, visible, radio, etc.) que se detecta en el período de postluminiscencia.

Este modelo da un mecanismo mediante el cual se puede producir la radiación gamma detectada de estos eventos, y también es capaz de reproducir otras características que se observan en los espectros en la postluminiscencia; sin embargo, aún hay muchas preguntas que no se pueden responder con el mismo. Existen otros modelos que también tratan de resolver muchas cuestiones relacionadas a los GRBs, pero el de la bola de fuego es el más aceptado actualmente.

7. GRBs como laboratorios cósmicos

Las erupciones de rayos gamma constituyen laboratorios naturales extremos, en los cuales se ponen a prueba las teorías. Su estudio, permite mejorar el conocimiento en diversos campos, por ejemplo, dan información sobre las etapas finales de estrellas muy masivas, se piensa también que

han tenido un papel muy importante en etapas muy tempranas del universo, por lo que podían dar información sobre el universo primordial

Las erupciones de rayos gamma, además de ser los eventos más energéticos que se conocen en la naturaleza, pueden ser fuentes prominentes de rayos cósmicos y de neutrinos. Los rayos cósmicos son partículas cargadas muy energéticas que penetran la atmósfera y son detectadas en tierra. El origen de los rayos cósmicos más energéticos aún es incierto, pero hay muchos científicos que sugieren que los GRBs podrían ser los responsables. Los neutrinos son partículas con una masa muy pequeña, y que casi no interactúan, lo que hace que su detección sea muy difícil. Se cree que los GRBs podrían ser fuentes de neutrinos de muy alta energía, aunque hasta la fecha aún no se han detectado.

Si bien se ha realizado un gran avance en las últimas décadas en el estudio y comprensión de las erupciones de rayos gamma, aún quedan muchas preguntas abiertas. Con el uso de los instrumentos de última generación, los años venideros serán muy excitantes para continuar con el estudio de estos fenómenos tan extremos.

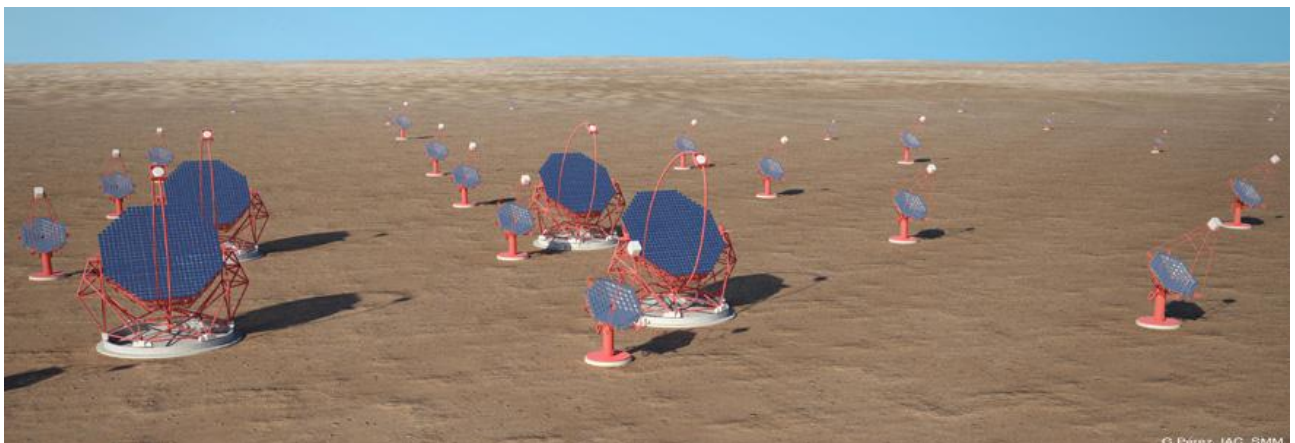


Figura 11: Ilustración de lo que será el instrumento CTA o Cherenkov Telescope Array. Este proyecto propone la construcción de la última generación de detectores terrestres de radiación gamma de muy alta energía. El comienzo de la construcción está previsto para fines del año 2014.

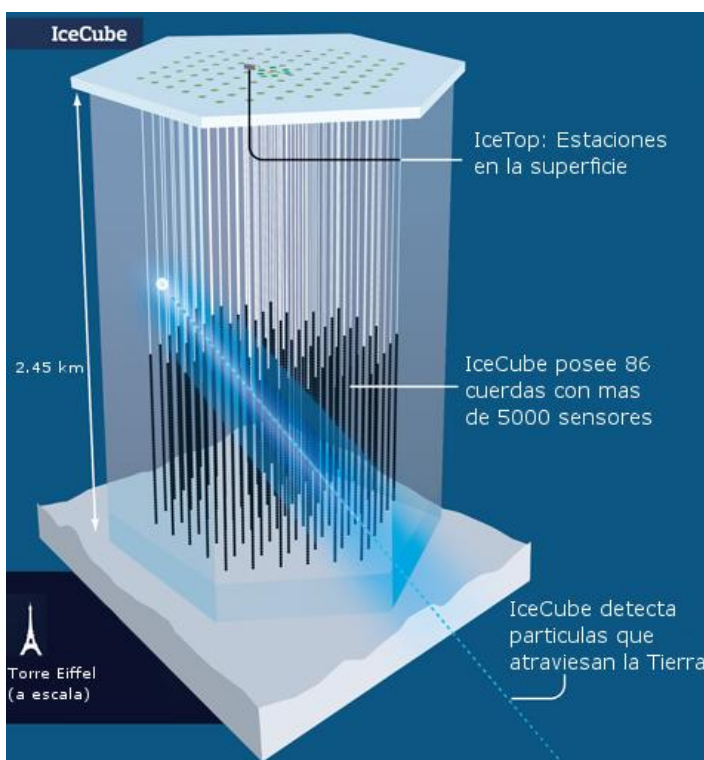


Figura 12: El observatorio IceCube, es un detector de neutrinos construido en Antártida; consta de más de 5000 sensores, distribuidos en un volumen de un kilómetro cúbico debajo del hielo antártico. Su construcción finalizó en 2011, y en este año se hicieron las primeras dos detecciones de neutrinos de muy alta energía, con un posible origen extragaláctico.

8. Referencias

- [1] Bloom, J. S., Frail, D. A., & Sari, R., *AJ* **121**, 2879 (2001)
- [2] Klebesadel, R.W., Strong, I.B., y Olson, R.A., *Astrophysical Journal Letters* **182**: L85 (1973)
- [3] Kulkarni, S.R. et al., *Nature* **398**, 389 (1999)
- [4] Schilling, G. & Greenberg-Slovin, N., *Nature* **418**, 6895, 276 (2002)
- [5] Zhang, B. & Mészáros, P., *International Journal of Modern Physics A* **19**, 2385 (2004)
- [6] Zhang, W., Woosley, S.E. & Heger, A., *Astrophysical Journal* **608**, 365 (2004)