

Explosiones Largas de Rayos Gamma (LGRBs) como candelas estándar

Alexander Moreno Sánchez

Centro Colombiano de Cosmología y Astrofísica

Bogotá. D. C, Colombia.

amorenosa@unal.edu.co

Resumen

Las explosiones de rayos gamma (GRBs) se han propuesto como fuentes de luz estándar (candelas estándar) las cuales permiten probar modelos cosmológicos al igual que las Supernovas Ia, haciendo uso del diagrama de Hubble del Universo en el rango de altos desplazamientos al rojo. Sin embargo, la calibración de GRBs no resulta tan fácil como la calibración de supernovas (SN Ia). Muchos de los métodos de calibración usados en la actualidad involucran correcciones a la luminosidad deducidas de forma empírica, por ejemplo, uno de los supuestos considerados de tales métodos de calibración es que la correlación empírica es universal sobre todos los desplazamientos al rojo. En este trabajo, se intenta comprobar hasta qué medida esta hipótesis es válida, para ello se supone que los GRBs siguen exactamente el diagrama de Hubble del Universo al igual que las SN Ia, aquí se consideran corrimientos al rojo pequeños ($z < 1.4$) y corrimientos al rojo altos ($z > 1.4$), respectivamente. Se ha encontrado que la relación a bajos z para GRBs difiere de los z altos en más tres niveles de confianza. Puede decirse que este resultado es insustancial para los modelos cosmológicos.

PACS: 97.60.Bw, 26.30.Ef, 07.85.-m, 97.70.Rz

Palabras Claves: parámetros cosmológicos, ráfagas de rayos gamma, supernovas, diagrama de Hubble.

Abstract

The gamma-ray bursts (GRBs) have been proposed as standard light sources (standard candles) which allow you to test cosmological models like Ia supernovae, using the Hubble diagram of the universe in high redshift range. However, calibration GRBs is not as easy as the calibration of supernovae (SN Ia). Many calibration methods currently used involve corrections brightness empirically deduced, for example, one of the assumptions of such calibration methods it is that the empirical correlation is universal on all redshifts. In this paper, we try to see to what extent this hypothesis is valid, This assumes that GRB follow exactly the Hubble diagram of the universe as the SN Ia, here They considered the small red shifts ($z < 1.4$) and the high red shifts ($z > 1.4$), respectively. It has been found that the ratio at low GRB differs z for z in the high confidence levels plus three?. It can be said that this result is pointless for cosmological models.

PACS: 97.60.Bw, 26.30.Ef, 07.85.-m, 97.70.Rz

Keywords: cosmological parameters, gamma ray bursts, supernovae, Hubble diagram.

1 Introducción

Las explosiones de rayos gamma (GRBs) son las explosiones más luminosas de todo el universo conocido. La energía isotrópica equivalente liberada en unos pocos segundos puede ser del orden de $10^{48} \sim 10^{55}$ ergs. Gracias a su extremado brillo, los GRBs son detectados en altos corrimientos al rojo, por ejemplo $z \gtrsim 9$, como el caso de la GRB más distante conocida hoy día catalogada como GRB 090429B, la cual se encuentra con un redshift de $z \approx 9.4$. Debido al alto corrimiento al rojo, los GRBs se han propuesto como objetos o indicadores estándar de distancia, en otros términos como candelas estándar, los cuales permiten trazar el diagrama de Hubble del universo en el rango de altos corrimientos al rojo. En efecto, los GRBs han sido ampliamente usados, junto con otras candelas estándar tales como las supernovas tipo Ia (SN Ia), para restringir y probar diferentes modelos cosmológicos. La consistencia de la luminosidad de SN Ia hace que ellas sean indicadores ideales de distancia para trazar el diagrama de Hubble del universo local, es decir a bajos corrimientos al rojo. Sin embargo, debido a que tenemos pocos conocimientos acerca de los mecanismos de explosión de GRBs, implica que los GRBs como candelas estándar son mucho menos estándar o mucho menos constantes en sus propiedades de luminosidad, a diferencia de lo que sucede con las SN Ia[1].

No obstante, aun se puede calibrar los GRBs usando correlaciones de luminosidad empíricas encontradas en explosiones de rayos gamma largas LGRBs. Estas correlaciones incluyen la relación de Amati ($E_{peak} - E_{iso}$), la relación de Ghirlanda ($E_{peak} - E_{\gamma}$), la relación de Yonetoku ($E_{peak} - L_{iso}$), la relación de Firmani ($T_{0.45} - E_{peak} - L_{iso}$), relación de Liang-Zhang ($t_b - E_{peak} - E_{iso}$), relación de lag-luminosidad ($\tau_{lag} - L_{iso}$), relación de variabilidad-luminosidad ($V - L_{iso}$). Entre estas correlaciones de luminosidad, la relación de Amati es la más ampliamente usada. Esto es parcialmente debido a que las propiedades del espectro tales como la energía en el pico E_{peak} , los índices α, β en el espectro y el flujo de fotones S los cuales son necesarios para analizar la relación de Amati pueden fácilmente ser observados con bastante precisión, ya que el número de GRBs es grande.

Infelizmente, todas estas correlaciones dependen de un modelo cosmológico específico. Por lo tanto tenemos un problema de circularidad cuando se usan GRBs para restringir modelos, es decir los datos obtenidos de GRBs están determinados por un modelo cosmológico que a su vez queremos restringir. Recientemente, algunos métodos independientes del modelo se han propuesto para calibrar GRBs, tales como métodos bayesianos, método de distancia luminosidad, método de dispersión, entre otros, pero realmente estos métodos aun no pueden zafarse del problema de circularidad[2].

Un método completamente independiente del modelo y libre del problema de la circularidad es usar la escalera de distancias para calibrar GRBs, el cual consiste, primeramente, en calcular el módulo de distancia a bajos corrimientos al rojo de GRBs (es decir $z < 1.4$) usando interpolación cúbica de SN Ia. Entonces, la distancia, así como la energía equivalente isotrópica a bajos redshift de GRBs se puede obtener. De este modo se puede deducir la correlación de luminosidad empírica, tal como la relación de Amati. Directamente, extrapolando la correlación de luminosidad empírica para altos z (es decir $z > 1.4$) de GRBs, inversamente se puede obtener el módulo de distancia para GRBs de altos z . Ya que el módulo de distancia de SN Ia es directamente extraído de su curva de luz sin involucrar algún modelo cosmológico, este método de calibración es, por supuesto, completamente independiente del modelo. Recientemente, un método similar se ha propuesto, la única diferencia es que se usa la aproximación de Padé en lugar de la interpolación cúbica para derivar el módulo de distancia para GRBs a bajos z . Una asunción subyacente, pero aun no demostrada, es que la correlación de luminosidad empírica sea universal para todos los redshift. Si la correlación de luminosidad empírica evoluciona con el redshift, este método de calibración puede quedar invalidado. En efecto, se han investigado seis correlaciones de luminosidad empíricas para diferentes rangos de redshift, encontrando que la pendiente de la relación de Amati para GRBs de alto z es menor que la pendiente para GRBs de bajo z , aunque el intercepto no varía significativamente con el redshift. Hechos similares fueron encontrados en las restantes cinco correlaciones de luminosidad. Debido a la gran incertidumbre se concluye que no hay evidencia significativa de evolución de la correlación de luminosidad con el redshift[3].

Aquí, se centrará el asunto, en chequear la dependencia de la relación de Amati con el redshift. Primero, se hace uso de el conjunto de datos Union 2.1 para restringir el diagrama de Hubble del universo en el rango de $z < 1.4$. Entonces directamente se extrapola el diagrama de Hubble para el rango de redshift alto. Asumiendo que los GRBs siguen el mismo diagrama de Hubble con lo cual se puede calcular la distancia de luminosidad y

la energía isotrópica equivalente. Posteriormente, se estudia la relación de Amati para bajos y altos redshift.

2 Medida de distancias en cosmología

En cosmología existen muchas maneras distintas de especificar la distancia entre dos puntos, debido a la expansión del Universo, las distancias entre objetos comóviles está cambiando según cambia el factor de escala. La constante de Hubble H_0 es la constante de proporcionalidad entre la velocidad de recesión v (velocidad con la que se alejan las galaxias) y la distancia D en la expansión del Universo (distancia a la que se encuentra una galaxia),

$$v = H_0 D , \quad (1)$$

las dimensiones de H_0 son inversas del tiempo, usualmente se escribe

$$H_0 = 100h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} , \quad (2)$$

donde h es un factor que parametriza el desconocimiento del valor exacto de H_0 , se considera $0.6 < h < 0.9$. El inverso de la constante de Hubble es el llamado tiempo de Hubble,

$$t_H = \frac{1}{H_0} = 9.78 \times 10^9 \text{ h}^{-1} \text{ yr} = 3.09 \times 10^{17} \text{ h}^{-1} \text{ s} , \quad (3)$$

igualmente se define la distancia de Hubble como la distancia que recorre la luz en el tiempo de Hubble

$$D_H = c \times t_H = \frac{c}{H_0} = 3000h^{-1} \text{ Mpc} = 9.26 \times 10^{25} h^{-1} \text{ m} . \quad (4)$$

Estas cantidades determinan la escala del Universo, es decir que permiten parametrizar cualquier distancia o tiempo. Además, es convencional en cosmología trabajar en unidades geométricas con $c = t_H = D_H = 1$ [7].

2.1 Distancia Comóvil (Línea de Visión)

Se define como la distancia entre dos objetos en el Universo que permanece constante con la época, si los dos objetos se mueven con el flujo de Hubble. En cosmología estándar se define la función de Hubble, que corresponde a la ecuación de Friedman en términos de densidades

$$H(z) = \sqrt{\Omega_0(1+z)^3 + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_\Lambda} . \quad (5)$$

La distancia comóvil total se obtiene de

$$D_c = D_H \int_0^z \frac{dz}{H(z)} , \quad (6)$$

esta medida de distancia se puede considerar como la medida fundamental de distancia, ya que permite obtener las otras medidas de distancia en términos de ésta[7].

2.2 Distancia Comóvil (Transversal)

La distancia comóvil entre dos eventos con el mismo corrimiento al rojo o distancia pero separados por algún ángulo permite definir la distancia comóvil transversal, la cual se define mediante las siguientes expresiones[7]

$$D_M = D_H \frac{1}{\sqrt{|\Omega_k|}} \text{Senh}[\sqrt{\Omega_k} \frac{D_c}{D_H}] ; \quad \Omega_k > 0 , \quad (7)$$

$$D_M = D_H ; \quad \Omega_k = 0 , \quad (8)$$

$$D_M = D_H \frac{1}{\sqrt{|\Omega_k|}} \text{Sen}[\sqrt{\Omega_k} \frac{D_c}{D_H}] ; \quad \Omega_k < 0 . \quad (9)$$

2.3 Distancia Diametral Angular

Esta distancia se define como la razón del tamaño físico transversal de un objeto a su tamaño angular. Es usada para convertir separaciones angulares en las imágenes de telescopios en separaciones en las fuentes. La distancia diametral angular se relaciona con la distancia comóvil transversal mediante[7]

$$D_A = \frac{D_M}{1+z} . \quad (10)$$

2.4 Distancia de Luminosidad

La distancia de luminosidad se define como la relación entre el flujo bolométrico S y la luminosidad bolométrica L ,

$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi S}} , \quad (11)$$

se relaciona con la distancia comóvil transversal y la distancia diametral angular de la siguiente forma[7]

$$D_L = (1+z)D_M = (1+z)^2 D_A . \quad (12)$$

2.5 Volumen Comóvil

Se define como el volumen de un flujo de Hubble que encierra una cierta cantidad de objetos que no evolucionan y que permanece constante con el corrimiento al rojo. El elemento de volumen comóvil en un ángulo sólido $d\Omega$ y en un intervalo de corrimiento al rojo dz es[7]

$$dV_C = D_H \frac{(1+z)^2 D_A^2}{E(z)} d\Omega dz . \quad (13)$$

La integral del elemento de volumen comóvil desde el presente hasta un corrimiento al rojo z da el volumen comóvil total

$$V_C = \left(\frac{4\pi D_H^3}{2\Omega_k} \right) \left[\frac{D_M \sqrt{1 + \frac{\Omega_k D_M^2}{D_H^2}}}{D_H} - \frac{\text{Sen} h^{-1} \frac{\sqrt{|\Omega_k|} D_M}{D_H}}{\sqrt{|\Omega_k|}} \right] ; \quad \Omega_k > 0 , \quad (14)$$

$$V_C = \frac{4\pi D_M^3}{3} ; \quad \Omega_k = 0 , \quad (15)$$

$$V_C = \left(\frac{4\pi D_H^3}{2\Omega_k} \right) \left[\frac{D_M \sqrt{1 + \frac{\Omega_k D_M^2}{D_H^2}}}{D_H} - \frac{\text{Sen}^{-1} \frac{\sqrt{|\Omega_k|} D_M}{D_H}}{\sqrt{|\Omega_k|}} \right] ; \quad \Omega_k < 0 . \quad (16)$$

El volumen comóvil y su integral son usados frecuentemente para predecir el número de conteos o las densidades de luminosidad.

Como se ha mencionado anteriormente, se cuenta hoy día con una gran cantidad de datos de LGRBs a alto corrimiento al rojo lo cual posibilitaría estimar el volumen comóvil de manera más amplia a lo obtenido con SN Ia.

2.6 El tiempo retrospectivo (lookback time)

El tiempo retrospectivo de un objeto es la diferencia entre la edad del Universo hoy y la edad del Universo en el tiempo en que fueron emitidos los fotones. Es usado para predecir propiedades de objetos de alto corrimiento al rojo, es decir objetos muy viejos a edad temprana del Universo, con modelos de evolución. Se puede obtener la expresión[7]

$$t_L = t_H \int_0^z \frac{dz}{(1+z)H(z)}. \quad (17)$$

Ya que este tipo de relación permite estudiar el universo a edad temprana o muy temprana es interesante notar que con los datos de GRBs de alto corrimiento al rojo, se puede obtener estimas muy importantes para este parámetro, quizá mejor que las obtenidas con SN Ia.

2.7 Probabilidad de intersección de objetos

Dada una población de objetos con densidad de número comóvil $n(z)$ y sección eficaz $\sigma(z)$, el diferencial de probabilidad dP de que una línea de visión interseccione uno de estos objetos en un intervalo de corrimiento al rojo dz a un corrimiento al rojo z , está dado por[7]

$$dP = n(z)\sigma(z)D_H \frac{(1+z)^2}{H(z)} dz. \quad (18)$$

Se puede definir $n(z)\sigma(z)D_H = 1$ para obtener una expresión adimensional. Entonces, es posible hacer la siguiente pregunta ¿cuál es la probabilidad dP de que una línea de visión se cruce o intercepte con un objeto en el intervalo de corrimiento al rojo dz en un corrimiento al rojo z ?. Se hacen preguntas de este tipo con frecuencia en el estudio de las líneas de absorción de QSO, AGNs, o GRBs, este es un aspecto importante para estudiar mediante la relación anterior, ya que se cuenta con una gran cantidad de datos de GRBs.

3 Escala de distancias en cosmología

La causa fundamental de incertidumbre en la medida de distancias a objetos lejanos estriba en que no puede usarse un mismo método o indicador de distancia para todas las distancias, sino que hay que usar indicadores distintos según la lejanía. Aunque algunos indicadores pueden utilizarse para un amplio rango de distancias, deben calibrarse previamente mediante otros indicadores. Los indicadores más precisos, pero que sólo se pueden utilizar a cortas distancias, son los llamados calibradores, los cuales permiten determinar los demás indicadores, en particular los llamados indicadores primarios, que se utilizan para medir distancias a objetos muy lejanos como para emplear los calibradores estándar. Los indicadores primarios sirven, a su vez, para calibrar los indicadores secundarios, los cuales permiten medir distancias lejanas como para utilizar indicadores primarios. Finalmente, los indicadores primarios y secundarios se utilizan para calibrar los indicadores terciarios, los cuales se emplean para medir las distancias de los objetos más lejanos[8].

El indicador más destacado y que cubre un mayor rango de distancias lo constituyen las supernovas tipo Ia (SN Ia). A diferencia de las otras supernovas, cuyos progenitores son estrellas de gran masa, las SN Ia proceden de sistemas binarios compuestos por una enana blanca y una gigante roja que se encuentran suficientemente próximas como para que se produzca captura de masa de la gigante roja por parte de la enana blanca, conduciendo a un mecanismo de explosión. La gran luminosidad del máximo, su relativa uniformidad, junto con la posibilidad de determinar si se ha observado el mismo o no, sitúa a las supernovas Ia como indicadores privilegiados para determinación de grandes distancias, de tal forma que pueden calificarse de indicadores ideales (candelas estándar), permitiendo ser observadas a grandes distancias de forma casi independiente de la escala de distancias.

A finales de los años noventa se encontró que las SN Ia situadas a escalas cosmológicas eran más débiles (menos brillantes) de lo esperado, es decir que se hallaban más lejos de lo que correspondería a su corrimiento al rojo, lo cual llevó a concluir que el universo se halla en un estado de expansión acelerada, por tal razón estos objetos constituyen un referente privilegiado para estudiar y discriminar modelos cosmológicos[8].

4 Metodología y datos

Las SN Ia son usualmente consideradas como indicadores ideales de distancia para trazar el diagrama de Hubble del universo debido a su poca variabilidad en su luminosidad, como se anotaba anteriormente. Los GRBs como candelas estándar son mucho menos consistentes y más variables que las SN Ia, ya que los mecanismos de explosión de GRBs no son conocidos claramente. Por tanto, las SN Ia son frecuentemente usadas para calibrar el módulo de distancia de los GRBs.

En un espaciotiempo isotrópico espacialmente plano, la distancia de luminosidad puede ser expresada como una función del corrimiento al rojo, así

$$D_L(z) = (1+z) \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{1}{E(z)} dz, \quad (19)$$

donde $c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ es la velocidad de la luz, $H_0 = 70 \text{ Km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ es la constante de Hubble en la época actual y $E(z) \equiv \frac{H(z)}{H_0}$ es el parámetro de Hubble normalizado. En el modelo ΛCDM , tenemos

$$E^2(z) = \Omega_M(1+z)^3 + (1-\Omega_M), \quad (20)$$

donde Ω_M es la densidad de materia actual. De otro lado, en el modelo $w\text{CDM}$ tenemos

$$E^2(z) = \Omega_M(1+z)^3 + (1-\Omega_M)(1+z)^{3(1+w)}, \quad (21)$$

donde $w = \frac{p}{\rho}$ que denota la ecuación de estado de energía oscura. En la parametrización de Chevallier-Polarski-Linder la ecuación de estado de la energía oscura es dada como $w_{de} = w_0 + \frac{w_1 z}{(1+z)}$, y en este caso $E(z)$ puede expresarse como

$$E^2(z) = \Omega_M(1+z)^3 + (1-\Omega_M)(1+z)^{3(1+w_0+w_1)} \exp\left(-\frac{3w_1 z}{1+z}\right). \quad (22)$$

En la práctica, es conveniente definir una cantidad sin dimensiones llamada módulo de distancia, el cual es

$$\mu(z) = 5 \log \frac{D_L(z)}{\text{Mpc}} + 25, \quad (23)$$

así, los parámetros cosmológicos de mejor ajuste pueden ser obtenidos minimizando χ^2 , es decir

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\mu_{teo}^i - \mu_{obs}^i)^2}{\sigma_{\mu_i}^2} \quad (24)$$

donde μ_{teo}^i es el i -ésimo módulo de distancia teórico calculado de la expresión anterior, μ_{obs}^i es el i -ésimo módulo de distancia observado, y σ_{μ_i} es el error en la medida [4] [5].

5 GRBs y la relación de Amati

La relación de Amati es una correlación entre la energía equivalente isotrópica E_{iso} y la energía del pico en el espectro en el marco de referencia comóvil $E_{p,i}$, así la relación de Amati puede ser parametrizada como

$$\log \frac{E_{iso}}{\text{erg}} = a + b \log \frac{E_{p,i}}{300 \text{ keV}}, \quad (25)$$

donde

$$E_{iso} = 4\pi d_L^2 S_{bol} (1+z)^{-1}, \quad (26)$$

es la energía equivalente isotrópica en la banda de energía de $10 \text{ keV} - 10 \text{ MeV}$, y S_{bol} flujo bolométrico, es decir la magnitud bolométrica de una estrella como su luminosidad en todo el espectro electromagnético. La incertidumbre de E_{iso} , puede ser obtenida como

$$\sigma_{E_{iso}} = 4\pi d_L^2 \sigma_{S_{bol}} (1+z)^{-1}, \quad (27)$$

y la incertidumbre de $d_L(z)$ es absorbida en la dispersión intrínseca σ_{int} , con esto podemos definir

$$x \equiv \log \frac{E_{iso}}{erg} \quad , \quad y \equiv \log \frac{E_{p,i}}{300kev} \quad , \quad (28)$$

con lo cual se puede escribir la parametrización como

$$y = a + bx \quad , \quad (29)$$

y las incertidumbres de y y x son dadas por

$$\sigma_y = \frac{1}{\ln 10} \frac{\sigma_{E_{iso}}}{E_{iso}} \quad , \quad \sigma_x = \frac{1}{\ln 10} \frac{\sigma_{E_{p,i}}}{E_{p,i}} \quad . \quad (30)$$

La pendiente y el intercepto de la relación de Amati, es decir b , y a , pueden ser obtenidos directamente ajustando la ecuación de la línea recta para y con los datos de GRBs observados. Sin embargo, la gráfica de la relación de Amati en el plano (x, y) muestra barras de errores significativas en ambos ejes. Junto con, la dispersión intrínseca que domina sobre la medida de los errores. Por lo tanto, el método ordinario de χ^2 no funciona. Podemos encontrar diferentes parámetros de mejor ajuste dependiendo de si minimizamos la suma de residuos cuadrados en los ejes x y y . Para evitar tal problema, usamos el método de ajuste consistente en usar la función de probabilidad conjunta para la pendiente b , y el intercepto a , y la dispersión intrínseca σ_{int} dada como

$$\mathcal{L}(\sigma_{int}, a, b) \propto \prod_i \frac{1}{\sqrt{\sigma_{int}^2 + \sigma_{y_i}^2 + b^2 \sigma_{x_i}^2}} \exp \left[-\frac{(y_i - a - bx_i)^2}{2(\sigma_{int}^2 + \sigma_{y_i}^2 + b^2 \sigma_{x_i}^2)} \right] \quad , \quad (31)$$

y la función menos log-probabilidad está dada por

$$-\ln \mathcal{L}(\sigma_{int}, a, b) = \frac{1}{2} \sum_i \ln(\sigma_{int}^2 + \sigma_{y_i}^2 + b^2 \sigma_{x_i}^2) + \frac{1}{2} \sum_i \frac{(y_i - a - bx_i)^2}{\sigma_{int}^2 + \sigma_{y_i}^2 + b^2 \sigma_{x_i}^2} + cte \quad , \quad (32)$$

la suma barre todos los datos de GRBs y los parámetros de mejor ajuste son aquellos que minimizan el lado derecho de la expresión anterior, es importante notar que la relación de Amati depende de la distancia de luminosidad $D_L(z)$, la cual a su vez depende del modelo cosmológico[5] [6].

6 Probando parámetros cosmológicos con GRBs

Recientes estudios anotan que los GRBs pueden ser considerados como candelas estándar (una candela estándar es una fuente o foco luminoso que emite la misma cantidad de luz en cualquier parte del universo). Las energías del frente de rayos gamma de los GRBs, después de ser corregida por la geometría cónica del jet, resultan apiñados alrededor de un valor medio de $10^{50} ergs$ ($10^{50} ergs = 10^{43} J$), entonces debido al descubrimiento de que los GRBs se encuentran a distancias cosmológicas, es decir con un redshift elevado, y debido a que el proceso de formación de la explosión se da casi de la misma forma puede considerarse que el fenómeno produce casi siempre la misma cantidad de luz, por lo tanto puede pensarse y observarse que los GRBs se pueden considerar como candelas estándar los cuales permitiran probar o ajustar parámetros cosmológicos.

Los GRBs aunque estan asociados con la muerte de estrellas masivas y de corta vida, así la rata de eventos de GRBs por unidad de volumen cosmológico deben ser un trazador de la historia global de la formación de estrellas, con ello se cuenta con la información necesaria para desarrollar simulaciones de GRBs distribuidos en un modelo cosmológico. Parámetros universales como la densidad fraccional de materia Ω_m y la densidad fraccional de energía de constante cosmológica Ω_Λ , se pueden restringir o ajustar mediante el diagrama de Hubble y de técnicas de maxima verosimilitud. Se encuentra en la literatura los siguientes datos para parámetros de tres modelos cosmológicos[5] [6]

Los parámetros cosmológicos de mejor ajuste y su incertidumbre a un sigma del conjunto de tatos Union 2.1, para tres modelos cosmológicos diferentes.

Modelo	Ω_m	ω	ω_0	ω_1
Λ CDM	0.2798 ± 0.0130	—	—	—
ω CDM	0.2755 ± 0.0640	-0.9903 ± 0.1431	—	—
CPL	0.2962 ± 0.0640	—	-1.0090 ± 0.2249	-0.2455 ± 2.9514

7 GRBs como indicadores de distancia

Es difícil observar SN Ia con $z > 2$, aun con excelentes plataformas en el espacio, como lo es SNAP, esto limita enormemente la observación, porque aspectos muy interesantes de la evolución ocurren mucho antes de la época mencionada. Las explosiones de rayos gamma son los eventos transitorios más luminosos a distancias cosmológicas, ya que debido a su luminosidad los GRBs pueden ser detectados con redshift altos, por ejemplo GRB090423 con un $z = 8.2$. Sin embargo en comparación con las SN Ia, los fotones de GRBs son casi inmunes a la extinción producida por el polvo cósmico, así que el flujo de rayos gamma es una medida directa de la energía emitida por la fuente. Por lo tanto los GRBs son potencialmente más prometedores como candelas estándar. Como se mencionó anteriormente en los últimos años se han encontrado diferentes relaciones empíricas de luminosidad que hacen posible el uso de los GRBs como indicadores de distancia, las relaciones encontradas son: $\tau_{lag} - L$, $V - L$, $E_p - E_{iso}$, $E_p - L$, $E_p - E_\gamma$, $\tau_{RT} - L$, donde encontramos lo siguiente τ_{lag} es el corrimiento temporal en la curva de luz, L es la luminosidad isotrópica en el pico de la curva de luz, V es la variabilidad de la explosión cuando su curva de luz es puntiaguda o suave, se obtiene calculando la varianza normalizada de la curva de luz observada alrededor de una curva suavizada, E_p es el pico de energía en la curva obtenido para el GRB, E_{iso} es la energía equivalente isotrópica de rayos gamma, E_γ es la energía del rayo gamma corregida por colimación, τ_{RT} es el tiempo de surgimiento mínimo o más corto en la cual la curva de luz alcanza la mitad del flujo del pico de la curva.

Estos indicadores de luminosidad permiten hacer uso de los GRBs como candelas estándar, sin embargo, existe un problema conocido como problema de circularidad en la calibración de estas relaciones de luminosidad. Debido a la pobre información disponible de GRBs a bajos redshift, dichas relaciones de luminosidad dependen de la cosmología asumida, que a su vez se suponen deben ser probadas mediante candelas estándar. Algunos autores intentan saltar el problema de la circularidad usando una aproximación que dependa lo menos posible de los modelos cosmológicos, el método Bayesiano, y el método de ajustar relaciones de parámetros de GRBs simultáneamente con parámetros cosmológicos. Sin embargo, estos métodos estadísticos no han podido librarse plenamente del problema de la circularidad ya que se requiere un modelo particular para realizar el ajuste. Esto significa que los parámetros de las relaciones de calibración están aun acoplados a los parámetros cosmológicos derivados de un modelo cosmológico dado.

Para solventar el problema de circularidad completamente, se debe calibrar las relaciones de GRBs de manera independiente a la cosmología, de este modo un nuevo método se ha propuesto, el cual es muy similar a la calibración seguida para SN Ia que consiste en usar variables cefeidas en la misma galaxia lo cual evita el problema de circularidad. Las variables cefeidas han sido consideradas como candelas estándar a primer orden, permitiendo calibrar las SN Ia, que son consideradas como candelas estándar secundarias. Similarmente si consideramos SN Ia como candelas estándar podemos calibrar las relaciones de GRBs con un gran número de SN Ia como objetos que al mismo redshift deben tener la misma distancia de luminosidad en cualquier cosmología.

En consecuencia se implementa un método de interpolación que permite obtener el módulo de distancia de GRBs en el rango de redshift de SN Ia por interpolación de datos de SN Ia en el diagrama de Hubble. Entonces, si asumimos que las relaciones de luminosidad de GRBs no evolucionan con el redshift, podemos extender la calibración de relaciones de calibración para redshift altos y derivar el módulo de distancias para GRBs y con los módulos de distancia se puede restringir los parámetros cosmológicos[6].

8 Calibración de la relación de luminosidad

Como se mencionó, con los datos de SN Ia con bajo redshift donde se conoce el módulo de distancia, permite obtener la relación de luminosidad de GRBs. Este método es uno de los procesos de interpolación que hace

uso de los abundantes datos de SN Ia y así obtener el módulo de distancia de GRBs en el rango de GRBs con $z < 1.4$. La luminosidad del pico isotrópico de un GRB se obtiene mediante

$$L = 4\pi D_L^2 P_{bolo} \quad , \quad (33)$$

y la energía del rayo gamma equivalente es dada por

$$E_{iso} = 4\pi D_L^2 S_{bolo} (1+z)^{-1} \quad , \quad (34)$$

y la energía corregida por colimación es

$$E_\gamma = E_{iso} f_{beam} = 4\pi D_L^2 S_{bolo} f_{beam} (1+z)^{-1} \quad , \quad (35)$$

donde, como se ha indicado D_L es la distancia de luminosidad de la explosión, P_{bolo} es el flujo bolométrico del pico de energía, S_{bolo} es la fluencia de los rayos gamma, mientras $f_{beam} = (1 - \cos \theta_{jet})$ es el factor radiante del jet, θ_{jet} es el ángulo de apertura de la mitad del jet. Además, se asume que cada GRB tiene jets bipolares y E_γ es la energía verdadera de los dos jets bipolares.

Por conveniencia, las relaciones de luminosidad involucradas pueden ser escritas en la forma de ley de potencias

$$\log y = a + b \log x \quad , \quad (36)$$

donde a es el intercepto, b la pendiente de la relación respectiva, y es la luminosidad, x es el parámetro medido del GRB en el marco en reposo, que puede ser $\tau_{lag}(1+z)^{-1}$, $E_p(1+z)$, $\tau_{RT}(1+z)^{-1}$. Entonces, primero se obtiene el módulo de distancia de GRBs a bajos z , usando interpolación de splines cúbicos de SN Ia, entonces el módulo de distancia μ de los GRBs y su correspondiente error σ_μ el cual se obtiene mediante la siguiente expresión

$$\sigma_\mu = \left[\left(\frac{z_{i+1} - z}{z_{i+1} - z_i} \right)^2 \varepsilon_{\mu,i}^2 + \left(\frac{z - z_i}{z_{i+1} - z_i} \right)^2 \varepsilon_{\mu,i+1}^2 \right]^{1/2} \quad , \quad (37)$$

donde $\varepsilon_{\mu,i}$, $\varepsilon_{\mu,i+1}$ son los errores de las SN Ia para redshift cercanos a z_i y z_{i+1} respectivamente. De este modo el módulo de distancia predicho es definido como[6]

$$\mu = 5 \log D_L + 25 \quad . \quad (38)$$

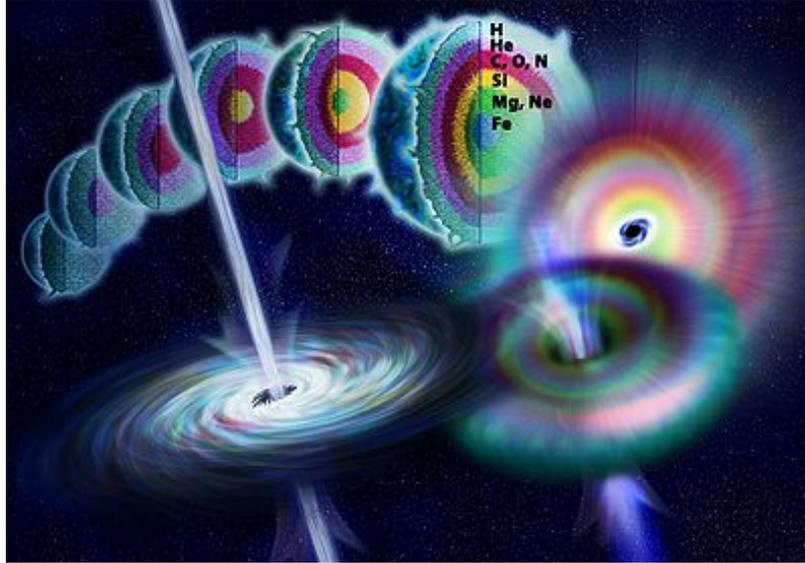


Ilustración artística de la evolución de un progenitor de GRB que conduce a una explosión de rayos gamma. Imagen tomada de Google imagenes.

9 Conclusiones

En los apartados anteriores se ha ilustrado de forma breve, algunos aspectos de los métodos de calibración de LGRBs, se muestran algunos resultados y se sugieren algunos elementos importantes para calibrar estas fuentes luminosas. Un hecho notable que se ha resaltado es el de considerar explosiones de rayos gamma como candelas estándar bajo ciertas consideraciones o correcciones empíricas, se espera que en el futuro con nuevos datos y con un conocimiento más cercano de los mecanismos de producción de energía de dichas fuentes se logre obtener una estimación más confiable de su luminosidad y variabilidad de tales fuentes luminosas. También es importante resaltar, aunque no se menciona anteriormente, que una considerable parte de la energía producida en estos eventos se debe transformar en forma de ondas gravitacionales, en este momento los modelos que consideran este hecho se encuentran en desarrollo, por lo tanto es de esperar que en el futuro se tengan datos y aparezcan grandes descubrimientos en torno a dicho proceso.

References

- [1] Hai-Nan Lin., Xin Li., Sai Wang., Zhe Chang., 2015, Are long gamma-ray bursts standard candles?, astro-ph.He/1504.07026v1
- [2] Amati L., 2003, Chin. J. Astron. Astrophys. Supp., 3,455
- [3] Amati L., 2006, MNRAS, 372,233
- [4] Amati L., et al., 2002, A&A, 390, 81
- [5] T. Di Girolamo., M. Vietri., G. Di Sciascio., 2004, Probing cosmological parameters with GRBs, astro-ph/0401244v1
- [6] Jun-Jie., Qing-Bo Ma., Zue-Feng Wu., 2015, Utilizing the Updated Gamma-Ray Bursts and SN Ia, Hindawi ID 576093
- [7] D. W. Hogg, *Institute for Advanced Study*, Princeton NJ, astro-ph/9905116v4, 2000.
- [8] S. Perlmutter, *Institute for Nuclear and Particle Astrophysics*, Berkeley, Cal, astro-ph/9812133v1, 1998.