

Cosmología - Tema 6

Respuestas a las preguntas

Cedric Prieels

May 2017

1. Enumera los grandes retos de la cosmología actual y explica brevemente su relevancia.

Todavía queda mucho por saber sobre nuestro Universo. Por ejemplo, sabemos ahora que la materia barionica solamente compone el 4 % de la masa total del Universo, mientras que la materia oscura compone 26 % de esta masa total. Pero no sabemos casi nada todavía sobre esta materia oscura o sobre los 70 % restante, que están en forma de energía oscura. La cosmología es uno de los campos en física que deberían ser capaces de darnos más información sobre esta materia y energía oscura, dentro de relativamente poco tiempo.

La cosmología también quiere poder explicar el origen del Universo, porque poco sabemos todavía sobre el Big Bang, o sobre los procesos físicos responsable de la inflación del Universo a su principio. Es un campo de investigación muy interesante y que tiene una importancia muy alta hoy en día, como lo vamos a ver con las respuestas siguientes.

Por fin, el estudio de diferentes parámetros cosmológicos también debería permitirnos hacer proyecciones sobre el futuro del Universo. Sabemos que el Universo está en expansión acelerada, pero no sabemos si seguirá así para siempre o si esto cambiará en el futuro, hasta llegar a un punto en el cual el Universo podría incluso empezará a retractarse. Diferentes modelos existen para determinar el futuro del Universo, pero todavía no estamos seguros de cual es el correcto.

En resumen, la cosmología nos permite estudiar el principio del Universo, desde el Big Bang, determinar sus propiedades actuales y incluso estimar su destino dentro de incluso miles de millones de años.

2. Describe los problemas del modelo estándar del Big Bang y la manera en que la inflación cósmica los resuelve.

El Big Bang tiene tres problemas mayores : el problema de la planitud (algunos parámetros cosmológicos tienen valores fijos muy precisos y cualquiera pequeña desviación en estos parámetros puede resultar en una evolución del Universo completamente distinta), el problema del horizonte (consiste en saber porque observamos una temperatura constante a gran escala en el CMB, y porque zonas del Universo parecen estar en contacto causal aunque no deberían serlo, porque están demasiado lejanas) y el problema de las reliquias (los monopolos magnéticos deberían existir, pero no los vemos, y hay que saber porque).

El modelo de la inflación, que consiste en imaginar una expansión del tamaño del Universo de muchas ordenes de magnitud ($\simeq 10^{30}$) en poco tiempo ($\simeq 10^{-33}$ s) a su principio, permite resolver estos problemas. Por ejemplo, se supone que la inflación empuja el universo a ser plano (si miramos a la

ecuación de Friedmann, si el factor que representa la escala del Universo aumenta rápidamente por este tipo de ordenes de magnitud, entonces el Universo tiene que tener a ser más plano para respetar esta ecuación). Este modelo también permite resolver el problema del horizonte porque podemos suponer que las zonas demasiado lejanas para estar en contacto causal ahora estaban mucho más cercas antes de la inflación, permitiendo el intercambio de información. Por fin, podemos suponer que la inflación diluyó las reliquias del tipo de los monopolos magnéticos que deberíamos poder observar hoy en día. Es por lo tanto mucho más difícil encontrarlos, y podría entonces explicar porque no hemos sido capaces detectarlos todavía.

3. Identifica las predicciones del modelo de inflación. ¿Cuáles han sido confirmadas observacionalmente? ¿Cuáles no lo han sido todavía?

El modelo del Big Bang solo no permite explicar porque se han formado estructuras en el Universo, mientras que el modelo de la inflación nos dice que estas estructuras vienen de pequeñas fluctuaciones cuánticas del espacio tiempo mismo cuyo tamaño aumentó rápidamente durante la inflación. Es probablemente la predicción del modelo más fuerte porque no hay otra manera de explicar la formación de estructuras a gran escala, y esta predicción ya ha sido verificada.

La inflación también predice la existencia de perturbaciones gravitacionales llamadas ondas gravitacionales primordiales en el Universo. Todavía no se ha podido detectar este tipo de ondas gravitacionales porque hoy en día no se puede imaginar detectarlas directamente, dado que tienen una longitud de onda demasiado grande (muchísimo más por lo menos que los 4km de longitud que tiene de momento el instrumento LIGO que nos ha permitido detectar las primeras ondas gravitacionales que provienen de la colisión de dos agujeros negros), y es por supuesto complicado detectar variaciones debidas a una onda si solamente podemos observar una fracción muy pequeña de su longitud de onda. La única manera de detectar este tipo de onda ahora es gracias a observaciones indirectas, mirando por ejemplo las fluctuaciones del CMB, pero la existencia de ondas gravitacionales primordiales todavía es una predicción que queda sin ser verificada de la inflación (pero los estudios actuales de las anisotropas del CMB parecen estar en acuerdo con lo que se predice a partir del modelo de inflación).

4. Describe el tipo de experimento que actualmente puede detectar las ondas gravitacionales primigenias y el observable que debería de medir.

Como explicado en la cuestión precedente, la única manera imaginable hoy en día de detectar las ondas gravitacionales primordiales consiste en hacer observaciones indirectas, a partir por ejemplo del estudio del CMB, porque sabemos que este tipo de ondas debería haber dejado su huella en su polarización (no se puede imaginar detectarlas directamente, porque tienen una longitud de onda de tamaño cosmológico, y los detectores de ondas gravitacionales que tenemos son demasiado pequeños para poder detectar estas ondas). Lo que pasa es que medir la polarización del CMB es muy complicado porque está polarizado al nivel de unos microkelvin solamente, y cuesta mucho hacer medidas de precisión a este nivel, aunque ya se puedan hacer hoy en día. Existen además dos tipos de polarización, los modos E (debido al scattering de Thomson) y B (creado por fluctuaciones tensoriales que suponemos debidas al efecto lente o bien a las ondas gravitacionales primordiales). Por lo tanto, medir los modos B del CMB es crucial en este caso, pero por supuesto muy complicado (son muy débiles y hay que quitar correctamente todos los "foregrounds" que están entre nosotros y el CMB y que tienen un impacto sobre los datos medidos por ejemplo, y el efecto lente gravitatoria débil tiene a mezclar los dos modos de polarización, haciendo muy difícil la detección del modo B solamente).

5. Describe las magnitudes observables que se ven afectadas por las propiedades de la energía oscura. Explica dicha dependencia en términos de las ecuaciones de Friedmann.

La primera observable que nos puede dar información sobre la presencia o no de energía oscura es la distancia, angular o radial. Podemos medir distancias en el CMB (por ejemplo la velocidad del sonido recorre una distancia que se puede ver como el primer pico de su espectro de potencias), y esta distancia se puede después calcular a diferentes redshift (de esta manera, podemos determinar el valor del parámetro $H(z)$). Esto se puede relacionar con la ecuación de Friedmann porque se puede ver que puede escribirse con la ecuación (1) (para llegar a esta ecuación, solo hay que usar la ecuación de Friedmann con su forma general y acordarse de que se puede definir el parámetro H como siendo igual al ratio entre \dot{a} y a , y que este mismo parámetro a se puede expresar en función del redshift como $a = \frac{1}{1+z}$), donde vemos claramente que si $u_\phi(z) > u_\phi(0)$ (ϕ siendo una forma genérica de materia oscura), entonces el parámetro de Hubble es más alto comparado con otros modelos que tengan el mismo valor de densidad de materia y de curvatura. Esta es la primera observable que podemos medir, teniendo que ver con la geometría del Universo directamente.

$$\frac{H^2(z)}{H_0^2} = \Omega_m \cdot (1+z)^3 + \Omega_r \cdot (1+z)^4 + \Omega_k \cdot (1+z)^2 + \Omega_\phi \cdot \frac{u_\phi(z)}{u_\phi(z=0)} \quad (1)$$

Una otra magnitud que podemos medir es el factor de crecimiento que aparece en las ecuaciones de Friedmann, porque sabemos que la energía oscura tiene un impacto directo también sobre el ritmo de crecimiento de las fluctuaciones en el Universo : una expansión acelerada frena el crecimiento de estas fluctuaciones. No observemos lo mismo si las fluctuaciones están en un Universo dominado por la materia oscura o por la energía, por ejemplo. Esto se ve con la ecuación 2, donde $\delta(\vec{x}, t)$ es una expresión para las perturbaciones y $G(t)$ es la función de crecimiento lineal, que puede ser relacionada con el valor de $H(z)$ y por lo tanto con un modelo de energía oscura $u_\phi(z)$.

$$\delta(\vec{x}, t) = \delta(\vec{x}, t_i) \cdot \frac{G(t)}{G(t_i)} \quad (2)$$

6. Obtén la ecuación que describe la evolución de la densidad de energía de la energía oscura en función del redshift. Resuélvela en el caso de que el parámetro de la ecuación de estado sea constante.

Para conocer el valor de la densidad de materia en función del redshift, tenemos por supuesto que empezar considerando la ecuación de Friedmann, que puede tomar la forma (1) siguiente si $p = 0$ (Universo de polvo).

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4}{3}\pi G\rho + \frac{\Lambda}{3} = -\frac{4}{3}\pi G\rho_0 a^{-3} + \frac{\Lambda}{3} = -\frac{4}{3}\pi G\rho_0(1+z)^3 + \frac{\Lambda}{3} \quad (3)$$

Se puede ahora ver que, si usamos la definición de $\Omega = \frac{8\pi G\rho_0}{3H_0^2}$ y de $\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H_0^2}$, obtenemos (4) con un pequeño cálculo que nos exprime la dependencia de la densidad de energía en función del redshift z .

$$\frac{\ddot{a}}{a} = H_0^2 \cdot \left(\Omega_\Lambda - \Omega \frac{(1+z)^3}{2} \right) \quad (4)$$

Podemos hacer lo mismo con la segunda ecuación de Friedmann hasta llegar a (5).

$$\frac{\dot{a}}{a} = H_0 \cdot (\Omega(1+z)^3 + \Omega_R(1+z)^2 + \Omega_\Lambda)^{1/2} \quad (5)$$

Podemos resolver estas dos ecuaciones si consideramos que el parámetros de la ecuación de estado $\dot{\rho} = -3(\rho + p)\frac{\dot{a}}{a}$ sea constante ($p = \omega\rho$). Obtenemos (6), integrando simplemente la ecuación de estado precedente y cambiando p por su valor $\omega\rho$.

$$\Omega_{DE}(a) = \Omega_{DE}(0)a^{-3(1+\omega)} \quad (6)$$

7. Describe brevemente los experimentos cosmológicos futuros Euclid, SKA y CORE, teniendo en cuenta su potencialidad así como sus limitaciones.

Euclid (ESA) tiene por objetivo principal la medida de la aceleración del Universo (a partir del redshift de galaxias a distancias diferentes de la Tierra) y de su variación con el tiempo, para entender un poco mejor la materia y la energía oscura. La relación entre el redshift y la distancia de estas galaxias debería darnos información sobre la contribución de la energía oscura sobre la aceleración de la expansión del Universo. También podrá medir diferentes propiedades de la materia oscura a partir del efecto de lente gravitatoria, como su distribución en el Universo. Este detector podrá medir galaxias que tengan un redshift máximo de más o menos 2 solamente, y tiene por objetivo la medida de unos 15000 grados cuadrados del cielo (10 mil millones de fuentes).

El detector SKA (Square Kilometer Array) es un radiotelescopio que tendrá una superficie equivalente de 1 kilómetro cuadrado, gracias a la interferometría de las imágenes que proviene de diferentes antenas (unos 3000) dispersadas. El detector debería poder detectar objetos que tengan un redshift hasta 6, y trabajará en la zona de frecuencias entre 0,1 y 25 GHz. Su objetivo principal consiste en hacer un survey del cielo, para poder encontrar nuevos objetos desconocidos. Es un detector importante para la cosmología también porque es sensible a la famosa línea de 21cm del H, y podrá por lo tanto dar información sobre la presencia de H en el Universo y sobre la estructura a gran escala del Universo. Los surveys hechos por SKA deberían permitir testear diferentes modelos de materia oscura, y modelos sobre el Universo primordial. Siendo un detector en el hemisferio sur de la Tierra, no podrá por lo tanto observar todo el cielo, solo menos de una mitad.

Por fin, CORE es un satélite que permitirá estudiar el origen del Universo también, y debería poder determinar la masa de los neutrinos y el origen de los campos magnéticos en el Universo, que sigue desconocida, mirando a la polarización en microondas del cielo, en 15 bandas entre 45 y 795 GHz. Nos permitirá así estudiar las fluctuaciones de modo B de las primeras ondas gravitacionales producidas, porque podrá hacer un mapa de los modos tensoriales producidos durante la inflación (en teoría, podrá detectar hasta 3 sigmas esta fluctuaciones, incluso si solo valen el 0,1 % de los modos escalares). Por fin, CORE buscará signos de non-gaussianidad primordial, que no hemos podido encontrar hasta ahora.

8. Explica que cantidades habría que medir para distinguir si la expansión acelerada del universo se debe a modificaciones de la gravedad o a la energía oscura.

Para poder distinguir entre el modelo de energía oscura y el modelo de gravitación modificada, existen dos métodos principales. La primera manera consiste en parametrizar el índice de crecimiento del Universo usando las ecuaciones de Friedmann, para ver si podemos detectar diferencias entre las observaciones y las predicciones del modelo teórico (el objetivo principal consiste en intentar ver si observemos alguna diferencia entre el factor de escala $H(z)$ y observables que tienen que ver con $G(z)$, la función de crecimiento lineal). Para lograr este objetivo, podemos escribir la función $G(z)$ (o de la misma manera, $G(a)$) en función de un parámetro libre γ y de la densidad de energía $\Omega(a)$ a un momento dado de la evolución del Universo.

$$G(a) = \frac{D(a)}{a} = \exp \left(\int_0^a \left(\frac{da'}{a'} \cdot (\Omega_m(a')^\gamma - 1) \right) \right) \quad (7)$$

Se puede demostrar que con el modelo actual de la gravitación, el parámetro γ toma un valor de 0,55 y si podemos detectar desviaciones de este valor, de su escala o bien de su dependencia con el redshift, sería el signo de que el modelo de la gravitación actual no parece correcto. Habría por lo tanto probablemente que mirar a teorías alternativas de la gravitación para explicar las observaciones.

Un otro método para distinguir entre materia oscura y gravedad modificada consiste en usar el efecto de lente gravitatorio. Podemos escribir los potenciales gravitatorios relativísticos (ψ , que tiene que ver con la luz) y non-relativísticos (Φ , que tiene que ver con la materia) y estudiarlos un poco más en detalle porque una teoría modificada de la gravedad tiene que modificar un poco estos potenciales. Podemos escribir la ecuación de Poisson del crecimiento de materia de la manera siguiente, usando estos dos potenciales.

$$\begin{cases} \nabla^2(\psi) = 4\pi G_N a^2 \delta_\rho G_{matiera} \\ \nabla^2(\Phi + \psi) = 8\pi G_N a^2 \delta_\rho G_{luz} \end{cases}$$

Cualquier desviación de uno de los parámetros $G_{matiera}$ o G_{luz} que aparecen en estas ecuaciones sería un signo de la existencia de una teoría de la gravedad modificada.