

Cartografiando el universo joven

Autores: Andreu Font-Ribera (IFAE), Héctor Gil-Marín (ICC-UB), Santiago Ávila (IFT-UAM)

El Sondeo Espectroscópico Extendido de las Oscilaciones Acústicas (eBOSS, por sus siglas en inglés) presenta el mayor mapa tridimensional de galaxias hasta la fecha. En este mapa se pueden reconocer las oscilaciones acústicas de bariones, unas ondas que se produjeron durante la infancia del universo, y que quedaron grabadas en la distribución de materia en el cosmos. Con estos patrones, los cosmólogos han medido con gran precisión la historia de la expansión del Universo, dando un importante paso hacia el objetivo de caracterizar la naturaleza de la energía oscura, ese misterioso componente que acelera la expansión del Universo.

El misterio de la energía oscura

En 1998 cambió significativamente la manera en que entendemos el Universo. Dos equipos independientes de astrónomos que estudiaban la distancia a supernovas lejanas concluían que la expansión del Universo se acelera.

Hasta entonces se pensaba que el Universo se expandía debido al empujón inicial del Big Bang y que, dada la naturaleza atractiva de la gravedad, esa expansión sería cada vez más lenta. El hecho de que la expansión se acelere implica que, o bien la teoría de la gravedad de Einstein es insuficiente cuando la aplicamos al conjunto del Universo, o bien hay un misterioso componente en el Universo con gravedad repulsiva: la energía oscura.

Pocos años más tarde, la expansión acelerada del Universo fue confirmada por otras observaciones, entre las que destaca la medida de las anisotropías del fondo cósmico de microondas. Esta radiación fue emitida 380 mil años después del Big Bang, miles de millones de años antes de que se formaran las primeras galaxias, y nos permite estudiar la infancia de nuestro universo.

En el verano de 2020, el Sondeo Espectroscópico Extendido de las Oscilaciones Bariónicas (eBOSS, de sus siglas en inglés) presentó un nuevo estudio que ofrece una visión complementaria a la incógnita de la expansión acelerada del universo. Se trata del mayor mapa tridimensional de la distribución de galaxias lejanas, y se utilizó para reconstruir la expansión del Universo durante los últimos 11 mil millones de años. La combinación de estas observaciones nos permite discernir entre distintos modelos teóricos que buscan explicar la aceleración.

Viendo el Universo crecer

¿Cuánto hace que se acelera el universo? ¿Ha cambiado la aceleración con el tiempo? Distintos modelos de energía oscura predicen distintas historias de la expansión del Universo, y esto ha motivado que varios proyectos internacionales intenten medir el crecimiento del universo a lo largo del tiempo.

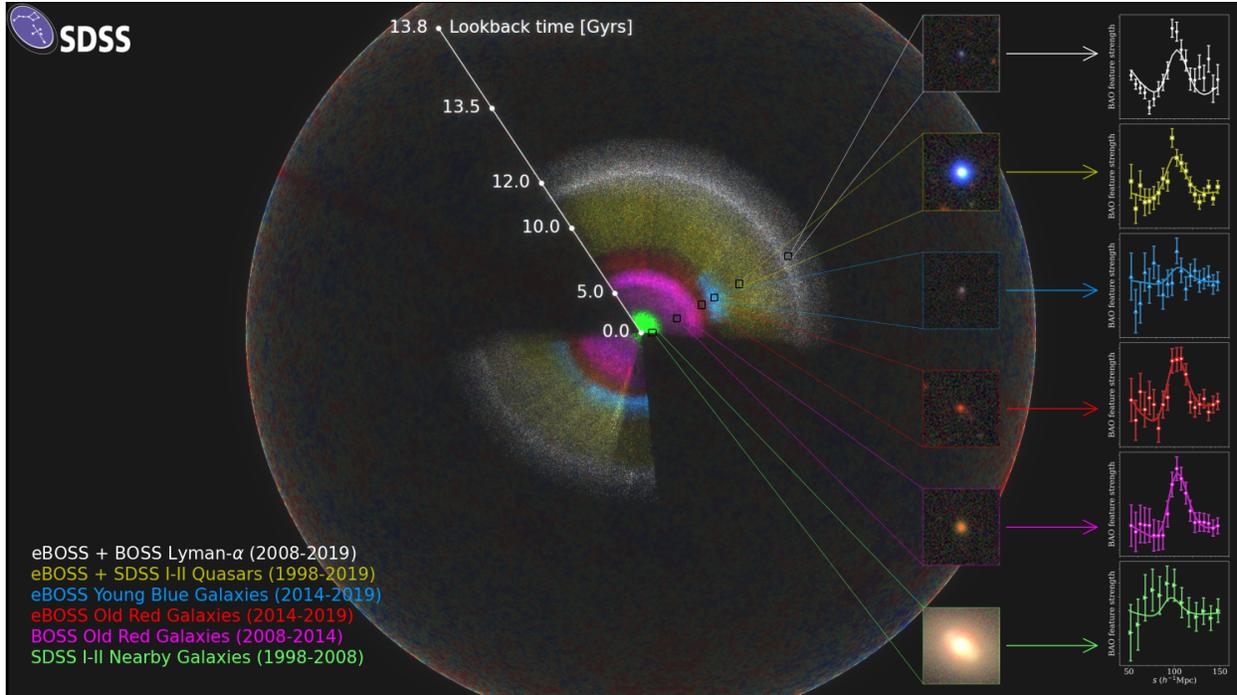
La luz que recibimos ahora proveniente de galaxias lejanas fue emitida hace mucho tiempo. Durante su viaje el Universo ha ido creciendo, provocando que la longitud de onda de la luz se estire, llegando al telescopio con un color más rojizo que en el momento de su emisión. Este desplazamiento al rojo se puede medir en los espectros de las galaxias, y nos permite calcular el tamaño relativo del universo en el momento de emisión respecto a su tamaño actual –lo que se conoce como su *factor de escala*–. Pero, ¿cuánto hace que se emitió esta luz?

Si tuviéramos una medida de la distancia recorrida por la luz, podríamos inferir el tiempo transcurrido desde su emisión, ya que conocemos su velocidad. Sin embargo, la medición de distancias a galaxias lejanas supone uno de los grandes retos de la cosmología moderna. Durante décadas los cosmólogos han buscado estructuras con un tamaño conocido, capaces de ser observadas a distancias cosmológicas y que puedan ser utilizadas como *regla estándar*. La medición del tamaño aparente (o tamaño angular) de estas estructuras permitiría calibrar la distancia a éstas utilizando argumentos geométricos.

Una regla para medir el universo: las oscilaciones acústicas de bariones

Poco después del Big Bang, el Universo estaba formado por un plasma muy denso y caliente, compuesto por radiación (fotones) y materia ordinaria (bariones). La competición entre la fuerza de la gravedad y la presión del plasma causó que ondas acústicas de bariones (BAO, por sus siglas en inglés) se propagaran en el Universo. Durante cientos de miles de años el plasma se fue enfriando con la expansión del universo hasta cruzar una temperatura crítica, alrededor de 3000K, cuando los protones y electrones que componían el plasma empezaron a formar átomos neutros de hidrógeno. En este punto las interacciones electromagnéticas ya no eran suficientes como para mantener el estado de plasma y las ondas acústicas se congelaron, dejando una huella en la distribución de materia en el Universo. La distancia recorrida por las ondas, conocida como el *horizonte de sonido*, nos ofrece una regla estándar que podemos utilizar para medir la distancia a galaxias muy lejanas.

Si una muestra de galaxias tiene valores similares de desplazamiento al rojo, podemos deducir que su luz fue emitida en la misma época, por lo que están a una distancia similar de nosotros. Cuando analizamos estadísticamente la distribución de galaxias en estos mapas, podemos detectar que en todos ellos hay una probabilidad mayor de que dos galaxias estén separadas por un cierto ángulo en el cielo. Este pico en la función de probabilidad, conocido como pico de BAO, se corresponde al horizonte de sonido de las ondas acústicas, ¡del que conocemos el tamaño! Con nuestra medida de la posición angular del pico, y trigonometría básica, podemos calcular la distancia a la que se encuentra cada conjunto de galaxias.

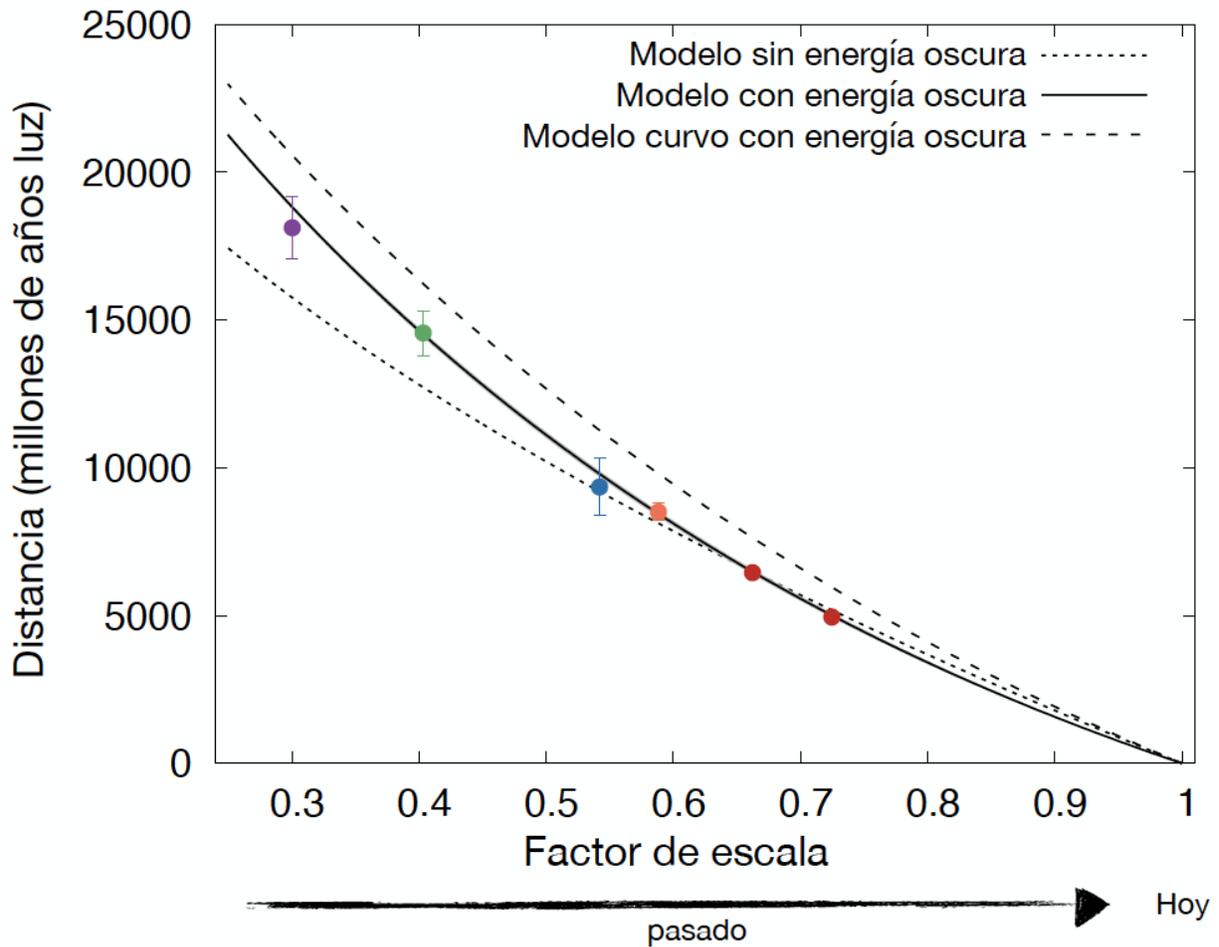


Pie de imagen: Mapas de galaxias obtenidos con el telescopio de la Fundación Sloan, en el observatorio astronómico de Apache Point (Nuevo México, EEUU). Los mapas obtenidos por eBOSS representan la culminación de más de veinte años de observaciones cosmológicas con este telescopio. Nosotros estamos situados en el centro del mapa, y en distintos colores se muestran las posiciones de distintos tipos de galaxias estudiadas por eBOSS. Los recuadros muestran la imagen típica de las galaxias correspondientes a cada muestra, así como el pico de BAO detectado. Las galaxias más lejanas nos permiten estudiar el Universo tal y como era hace más de 11 mil millones de años. La esfera exterior muestra las fluctuaciones en la radiación de fondo de microondas, y delimita el universo observable. Crédito de imagen: Anand Raichoor (EPFL), Ashley Ross (Ohio State University) y la colaboración de eBOSS.

Para poder construir estos mapas de galaxias y detectar el pico de BAO, necesitamos medir el desplazamiento al rojo de millones de galaxias. Con este objetivo, en 2008 se construyó un instrumento para el telescopio de la Fundación Sloan, en el observatorio astronómico de Apache Point (Nuevo México, EEUU), capaz de obtener el espectro de mil galaxias simultáneamente, y medir su desplazamiento al rojo con gran precisión. Utilizando este instrumento, eBOSS ha construido mapas con más de 2 millones de galaxias lejanas, y medido el pico de BAO en seis épocas distintas de la evolución del Universo, logrando conseguir medir la distancia a muestras de galaxias que emitieron su luz cuando el Universo tenía un 30% del tamaño actual.

Los resultados presentados por eBOSS, mostrados en el gráfico anexo, confirman que la expansión del Universo está acelerando. En combinación con observaciones del fondo de radiación de microondas de *Planck*, encontramos un modelo que consigue explicar todos los datos de manera coherente. Este modelo es el de un universo formado solamente por un 5%

de materia ordinaria, un 26% de materia oscura, y un 69% de energía oscura. La misma combinación de datos nos indica que la densidad de energía oscura parece ser constante en el tiempo, en línea con las predicciones del modelo de energía oscura más sencillo: la constante cosmológica propuesta por Einstein hace un siglo.



Pie de imagen: Medidas presentadas por eBOSS de la distancia a distintas muestras de galaxias, en función del factor de escala. El factor de escala nos indica cual era el tamaño del Universo relativo al tamaño a día de hoy, y está directamente relacionado con desplazamiento al rojo medido en los espectros de las galaxias. Las barras de error muestran el intervalo de confianza del 95%. La línea continua corresponde a la predicción del modelo estándar de la cosmología, compuesto por un 69% de energía oscura, mientras que la línea de puntos muestra la predicción para un modelo sin energía oscura. La línea discontinua corresponde al modelo de Universo ligeramente curvo que mejor se adapta a las medidas del fondo de radiación de microondas del satélite Planck.

Un universo de geometría Euclídea

La teoría general de la relatividad de Einstein describe cómo la materia deforma el espacio-tiempo a su alrededor, donde la geometría tradicional de Euclides no es válida. Si analizamos escalas muy grandes, comparables con la totalidad del universo observable, ¿recuperamos la geometría Euclídea?

En los últimos años se han publicado artículos sugiriendo que quizás vivimos en un universo cerrado, con curvatura positiva. Estos artículos utilizan datos presentados por el satélite *Planck* que estudió las anisotropías en la radiación de fondo de microondas, y concluyen que el universo es curvo con una probabilidad mayor al 95%.

Sin embargo, estos modelos curvos predicen una expansión del universo incompatible con las medidas de BAO de eBOSS. Si combinamos los datos de *Planck* y de eBOSS, obtenemos un resultado diez veces más preciso y compatible con un universo plano, con geometría Euclídea.

Discrepancias en las medidas de la expansión

Uno de los grandes debates en cosmología es la determinación del valor de la expansión del Universo a día de hoy, lo que se conoce como la constante de Hubble, H_0 . Por un lado, tenemos las medidas “locales”, que utilizan información de galaxias cercanas para medir la expansión del Universo actual. Por ejemplo, la colaboración SH0ES, liderada por Adam Riess, publicó recientemente una medida de $H_0 = 74.0 \pm 2.8$ km/s/Mpc (el error asociado representa una incertidumbre estadística del 95%). Por otro lado, medidas realizadas a partir de las observaciones de las anisotropías del fondo de radiación de microondas realizadas por el satélite *Planck* estiman $H_0 = 67.4 \pm 1.0$ km/s/Mpc. Estas dos medidas, aunque estiman la misma cantidad, provienen de datos muy distintos, cuando el universo era muy joven (anisotropías del fondo de radiación de microondas) y cuando el universo es más viejo (medidas locales), y por lo tanto son susceptibles a fenómenos de muy distinta naturaleza.

Las mediciones de las BAO a distintas épocas permiten a eBOSS ajustar un modelo para la expansión del Universo y extrapolarlo hasta nuestros días, lo que supone una nueva medida de H_0 . Para asegurarse que la medida es independiente de la obtenida por *Planck*, eBOSS realiza una calibración independiente del horizonte de sonido, nuestra regla estándar, utilizando datos de las abundancias de elementos primordiales, tales como hidrógeno y helio. De esta manera, eBOSS determina que el ritmo de expansión es de $H_0 = 67.3 \pm 1.9$ km/s/Mpc. Estos resultados nos indican que tanto eBOSS como *Planck* encuentran esencialmente el mismo valor de H_0 . ¿Hay algún problema entonces con las medidas locales de H_0 , o bien estamos observando los efectos de un nuevo fenómeno que todavía no hemos sido capaces de identificar? De momento no existe una respuesta satisfactoria, y tendremos que esperar a que futuras observaciones (por ejemplo las basadas en ondas gravitacionales o en lentes gravitacionales) tengan la suficiente precisión para ser contrastadas con las actuales y puedan arrojar luz sobre este misterio

Una mirada al futuro

Después de 20 años de observaciones cosmológicas, el telescopio de la Sloan Foundation se utilizará a partir de ahora para otros estudios. El relevo en estudios de la expansión lo va a tomar otro telescopio en Estados Unidos, esta vez en Kitt Peak (Arizona): el Instrumento Espectroscópico de Energía Oscura (DESI, por sus siglas en inglés). Con un nuevo sistema robótico que permite analizar simultáneamente 5000 galaxias, DESI ha empezado este año un programa de 5 años para construir un mapa aún más detallado del universo, con catálogos de galaxias 10 veces más grandes que eBOSS.

En 2022 la Agencia Espacial Europea planea el despegue de Euclid, un satélite con un potente telescopio a bordo para estudiar la expansión y geometría del universo desde el espacio. Tanto DESI como Euclid cuentan con la contribución esencial de distintas instituciones españolas que han contribuido en su diseño y construcción, y que participarán en el análisis de los datos. A la vez que proporcionen mejores datos para estudiar la expansión del universo, estos experimentos nos permitirán también estudiar otros fascinantes fenómenos, como la medición de la masa de los neutrinos a partir de su impacto en la distribución de materia en el universo.