

EN LAS FRONTERAS DE LA FÍSICA:

2. El fondo cósmico de microondas: inflación, ondas gravitacionales, materia oscura y energía oscura.

Dr. José Alberto Rubiño Martín. Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), Tenerife.

En los últimos diez años, los científicos hemos avanzado enormemente en la comprensión de las propiedades globales de nuestro Universo, de cómo se originó, y de cómo tuvo lugar la formación de las estructuras que hoy día observamos. En gran medida, dicho avance ha sido consecuencia del estudio detallado del Fondo Cósmico de Microondas (FCM), una radiación fósil que se genera en los primeros instantes tras el origen del Universo. En esta conferencia, se revisan algunos de los conceptos claves en la Cosmología actual (inflación, ondas gravitacionales, materia oscura y energía oscura), usando como hilo conductor el estudio del FCM.

El Universo a gran escala.

La observación del Universo con telescopios nos muestra una enorme variedad de estructuras. Observamos cómo las estrellas se agrupan formando galaxias. Las galaxias, a su vez, no se distribuyen uniformemente, sino que muchas de ellas se presentan agrupadas en estructuras mayores, denominadas cúmulos de galaxias. En las escalas correspondientes a los cúmulos de galaxias, observamos que el Universo presenta una gran riqueza de estructuras; las galaxias y los cúmulos se agrupan en grandes estructuras, como filamentos o “paredes”, y también observamos zonas de grandes vacíos.

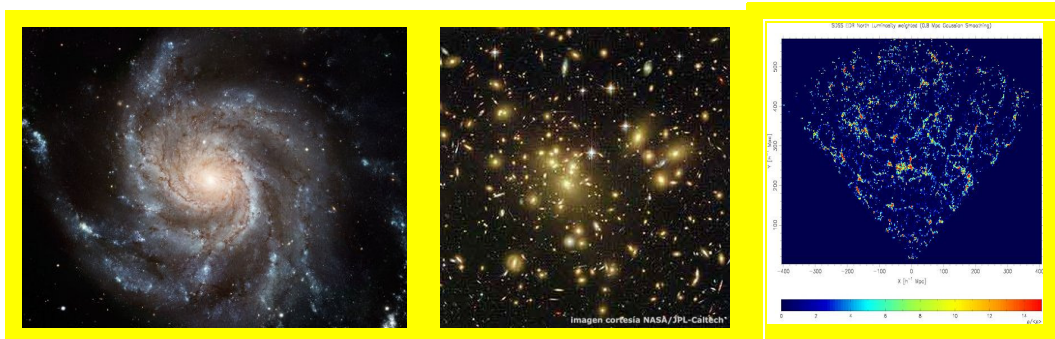


Fig. 1. Izquierda: Galaxia Espiral. Centro: Cúmulo de galaxias. Derecha: Distribución de galaxias en el Universo local, según el cartografiado Sloan Digital Sky Survey (ver referencia [3]). En la imagen de la derecha se aprecian estructuras (paredes y grandes vacíos) en la distribución de galaxias (en rojo alta densidad de galaxias, en azul baja densidad).

Nuestro modelo cosmológico. El modelo de Big Bang.

El modelo ampliamente aceptado por la comunidad científica, y que mejor describe la variedad de estructuras que observamos en el Universo, es el modelo de Big Bang. Básicamente, dicho modelo nos indica que hace unos trece mil millones de años, la región del Universo que observamos hoy día ocupaba unos pocos milímetros. La materia se encontraba en un estado con temperaturas y densidades muy elevadas. Desde este estado inicial, el Universo se ha expandido y ha formado las estructuras que hoy conocemos.

Pilares fundamentales del modelo de Big Bang.

El modelo de Big Bang se construye a partir de dos herramientas teóricas: la Teoría de la Relatividad General de A. Einstein, y el denominado Principio Cosmológico (PC). Este último sugiere que el Universo es, a muy gran escala, estadísticamente homogéneo e isotrópico, es decir, si comparamos regiones distintas suficientemente grandes del Universo, sus propiedades estadísticas (por ejemplo, densidad promedio de galaxias) serán idénticas. Las observaciones de la distribución de estructuras a gran escala (véase Fig. 2) son compatibles con el PC.

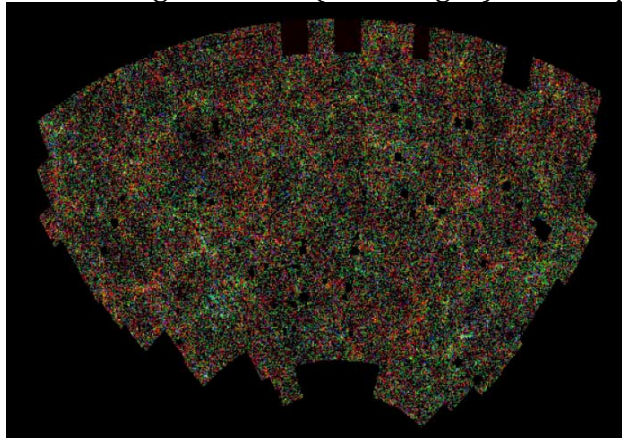


Fig. 2. Survey APM. La imagen muestra una región de unos 30 grados cuadrados, y contiene más de un millón de galaxias. A muy grandes escalas, el Universo se presenta muy homogéneo. Sin embargo, en escalas más pequeñas, se observan grandes estructuras (paredes, vacíos: ver figura 1 panel derecho). Imagen tomada de ref. [2].

Desde el punto de vista de la observación, el modelo de Big Bang se sustenta en tres pilares fundamentales:

- La expansión del Universo. Descubierta en 1929 por Edwin Hubble, nos indica que las galaxias se alejan unas de otras con una velocidad (v) que es proporcional a la distancia (r) que las separa. Matemáticamente, $v=H*r$. La constante de proporcionalidad H es conocida como la “constante de Hubble”.
- La síntesis de elementos ligeros en el Universo primitivo. Originalmente, el modelo de Big Bang fue propuesto por George Gamow en 1946, como posible explicación para poder entender cómo se generan los núcleos de los elementos más ligeros (Deuterio, Helio, Litio) en el Universo. Las teorías de evolución estelar nos indican que estos elementos se destruyen dentro de las estrellas. Para entender entonces su origen, Gamow propone que si el Universo pasó por una etapa en su pasado en la cual la densidad y temperatura eran muy elevadas, podrían darse entonces las condiciones para la formación de dichos elementos.
- El Fondo Cósmico de Microondas (FCM). Si el Universo atravesó en el pasado por una fase en la que la temperatura era muy elevada, la teoría de Gamow predecía que debiera existir un resto fósil de esa época en forma de radiación. El FCM fue descubierto por Penzias & Wilson en 1964 (Premio Nobel de Física en 1978), y fue interpretado por Dicke, Peebles, Roll & Wilkinson (1965) como la señal fósil del pasado de nuestro Universo.

El Fondo Cósmico de Microondas.

Esta radiación se observa hoy día en el dominio espectral de las microondas. Tiene dos características principales. En primer lugar, su distribución espectral de energía corresponde con gran precisión a la de un cuerpo negro con una temperatura de 2.7 K. Es, de hecho, el mejor cuerpo negro que jamás hemos medido en la naturaleza.

La segunda característica es que dicha radiación es extremadamente homogénea e isotrópica. Las desviaciones respecto a la temperatura promedio (2.7 K) son menores de una parte en 10^5 . Como se discute a continuación, el grado de precisión con el cual el FCM se aleja de la homogeneidad tiene unas implicaciones esenciales en la evolución del Universo.

La primera detección del grado de inhomogeneidad del FCM fue obtenida por el satélite COBE, lanzado por la NASA a finales de los 80. En 1992, COBE confirmó el espectro de cuerpo negro del FCM, y mostró que las *anisotropías* (desviaciones respecto a la homogeneidad) se encontraban a nivel de 10^{-5} . Por este descubrimiento, los investigadores responsables de la misión COBE (J. Mather y G. Smoot) recibieron el Nobel de Física en 2006.

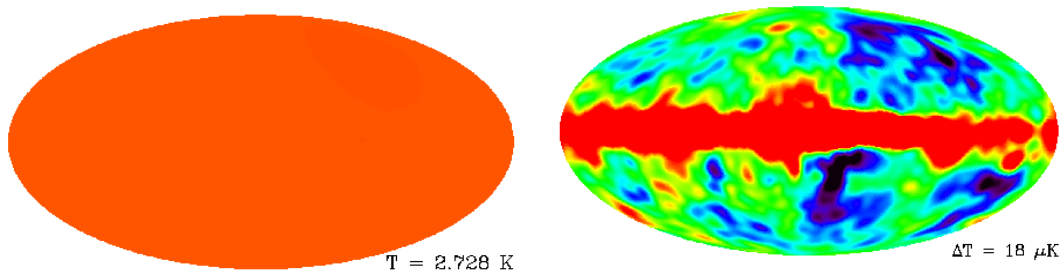


Fig. 3. Mapas de cielo obtenidos por el satélite COBE. Izquierda: La temperatura del FCM es homogénea e isotrópica. Esta imagen nos habla de un pasado del Universo muy diferente a la situación actual. Derecha: Anisotropías del FCM. Fuera del plano de la Galaxia, observamos las fluctuaciones primordiales en la distribución de materia. El nivel de fluctuaciones es de 10^{-5} . Tomada de ref. [5].

El FCM y el modelo de Big Bang.

Dentro del modelo estándar, el FCM se habría generado cuando el Universo tenía una edad de 360.000 años (hoy día tiene 13.700 millones de años). En aquel momento, la temperatura media del Universo habría descendido lo suficiente como para que se empezasen a formar átomos neutros. Los fotones, que hasta entonces interactuaban con los electrones libres en el plasma cósmico, quedaron completamente libres, formando el FCM. Por tanto, esencialmente el FCM es una “fotografía” de cómo era el Universo cuando tenía 360.000 años de edad.

Formación de estructura en el Universo. Las anisotropías del FCM.

Dentro del modelo de Big Bang, todas las estructuras que observamos en el Universo actual (galaxias, cúmulos de galaxias, etc.) crecen por efecto de la atracción gravitatoria a partir de pequeñas irregularidades en la distribución de materia que existía en el Universo primitivo. Estas “semillas originales” también habrían dejado su huella en el mapa del FCM, en forma de *anisotropías* en la distribución de temperaturas. Por tanto, estudiar dichas anisotropías nos proporciona una información muy valiosa acerca del pasado de nuestro Universo, y de las propiedades globales del modelo cosmológico.

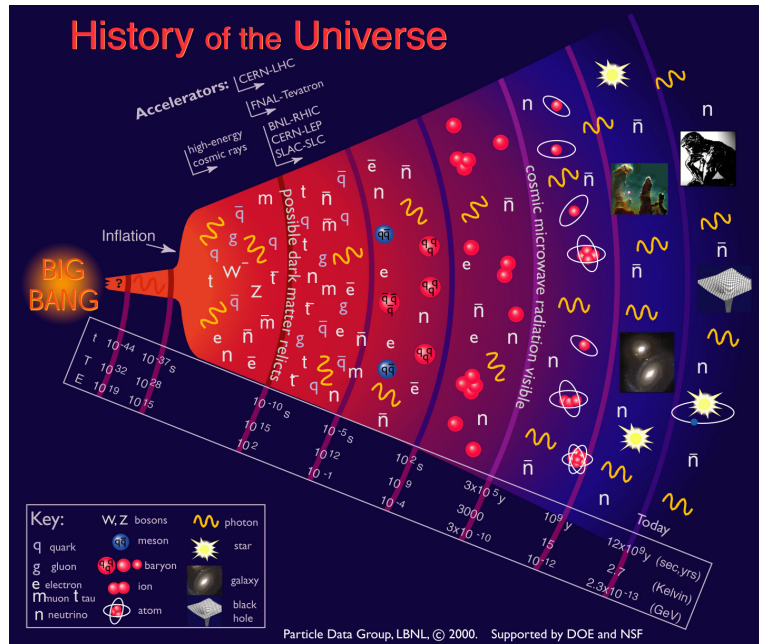


Fig. 4. Representación de las distintas etapas en la evolución del Universo. Imagen tomada de <http://sciencematters.berkeley.edu>

La teoría de la Inflación: las “condiciones iniciales” de nuestro Universo.

¿Cómo se generan esas semillas originales que constituyen las “condiciones iniciales” de nuestro Universo? La teoría más ampliamente aceptada es la *inflación*, propuesta por A. Guth a principios de los 80. Básicamente, la inflación sugiere que nuestro Universo atravesó por un periodo de expansión acelerada en sus primeros instantes (aproximadamente en 10^{-34} s tras el Big Bang). Aunque originalmente la teoría fue propuesta para intentar explicar la homogeneidad del FCM (“problema del horizonte”) y la geometría global del Universo (“problema de la planitud”), la teoría tenía dos predicciones esenciales. La primera de ellas, consistía en un mecanismo natural para la generación de las semillas originales de la distribución de densidad. Esta predicción ha sido verificada por los experimentos del FCM.

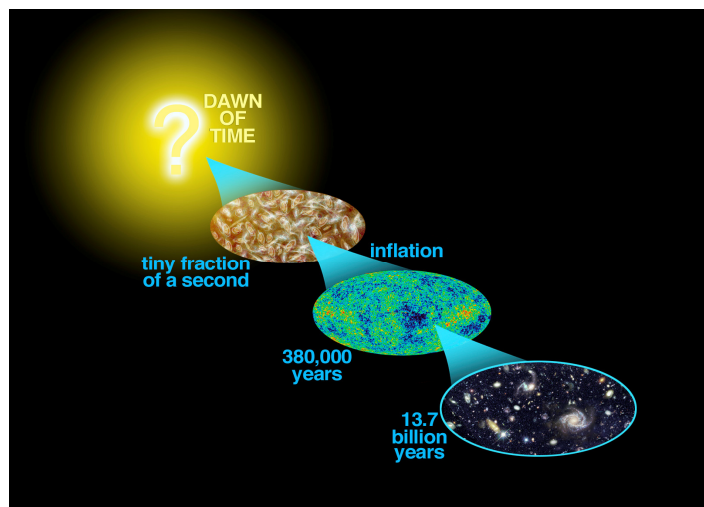


Fig. 5. Tres de las etapas de la evolución del Universo en el modelo de Big Bang, mencionadas en el texto: inflación, la formación del fondo cósmico de microondas, y el Universo actual. Ver ref. [2]

Observaciones de las anisotropías del FCM. Implicaciones cosmológicas.

Desde la detección de COBE, un gran número de experimentos han observado las anisotropías del FCM. Especialmente en los últimos años, el avance tecnológico en la sensibilidad de los receptores de microondas ha sido espectacular, de forma que experimentos desde tierra, montados en globos estratosféricos, o incluso un nuevo satélite de la NASA (WMAP) nos proporcionan una imagen muy completa de cómo era el Universo a la edad de 360.000 años.

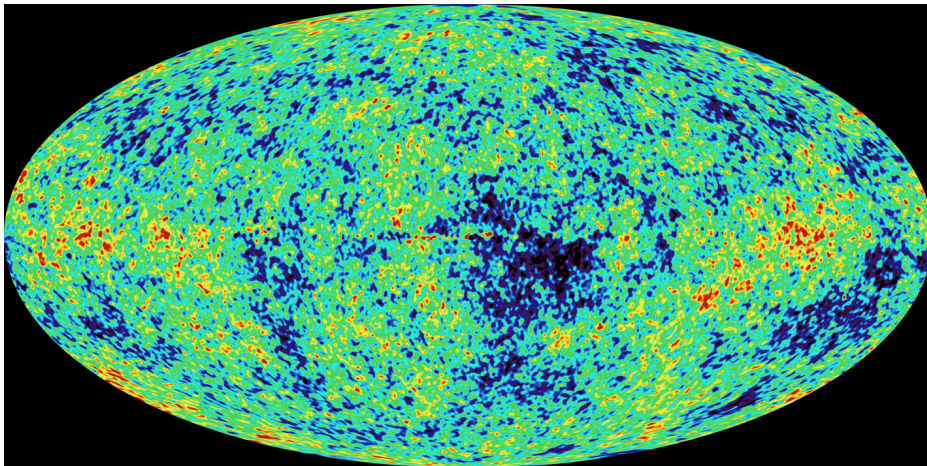


Fig. 6. Mapa del FCM obtenido por el satélite WMAP en el año 2003. (ver ref. [6]).

El estudio detallado de esos mapas permite obtener restricciones muy precisas de los valores de los parámetros cosmológicos que describen nuestro Universo, así como información acerca de las condiciones iniciales, es decir, de cómo ocurrió la inflación. En particular, sabemos que la materia ordinaria (bariónica) de la cual estamos hechos constituye solamente el 4.6% del total de la densidad de energía del Universo. El 23% del total es debido a un tipo de materia no ordinaria, de la cual no conocemos su naturaleza, denominada materia oscura. El 72% restante está en una forma de energía, que también desconocemos, y que denominamos energía oscura, o energía de vacío. Esta sorprendente conclusión (desconocemos la naturaleza última del 95% de la densidad de energía del Universo) es capaz, sin embargo, de dar explicación a todas las observaciones que existen hoy día relacionadas con la distribución de materia a gran escala: el FCM, la distribución de las galaxias, las medidas de supernovas de tipo Ia, las medidas de abundancias de elementos ligeros, las medidas de la constante de Hubble y las distintas determinaciones de la edad del Universo.

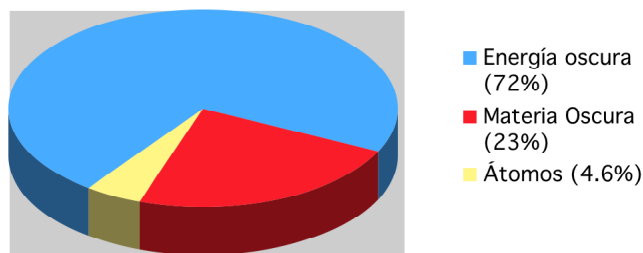


Fig. 7. Formas de energía que en la actualidad contribuyen a la densidad de energía total del Universo.

La materia oscura.

¿Qué es la materia oscura? Las observaciones sólo nos proporcionan evidencia de su existencia a través de sus consecuencias dinámicas. Además del FCM, otras evidencias independientes de la existencia de la materia oscura son: la dinámica de cúmulos de galaxias, el efecto de lente gravitatoria, la curva de rotación de galaxias espirales, la emisión de rayos X en cúmulos de galaxias, y la distribución espacial de galaxias. Pero aun desconocemos su naturaleza última, la partícula responsable. Sea cual sea, sabemos que debe ser una partícula masiva, y que no puede interactuar con la luz.

La energía oscura.

¿Qué es la energía oscura? Al igual que en el caso anterior, hoy día solamente tenemos información indirecta de su existencia, a través de sus implicaciones en la dinámica del Universo. Sea lo que sea la energía oscura, está provocando que el ritmo de expansión del Universo se esté acelerando en la actualidad. Aparte del FCM, otras evidencias en Astrofísica de la existencia de energía oscura provienen del estudio de: supernovas de tipo Ia, la edad del Universo, y la distribución espacial de galaxias a gran escala.

Próximos desafíos experimentales en el FCM.

Aunque en los últimos años hemos avanzado mucho en la comprensión de las propiedades globales de nuestro Universo, una gran cantidad de cuestiones siguen sin respuesta. ¿Cuál es la naturaleza de la energía oscura? ¿Cuáles son sus propiedades? ¿Cuál es la naturaleza de la materia oscura? ¿Qué partícula(s) es(son) responsable(s)? ¿Existe un fondo de ondas gravitacionales generados en inflación? ¿Cómo ocurrió la inflación? En la próxima década, esperamos que los experimentos de FCM contribuyan a esclarecer alguna de estas preguntas. En particular, destacaremos dos: el satélite Planck, y el experimento Quijote CMB.

El satélite Planck.

Será lanzado por la Agencia Espacial Europea (ESA) durante 2009, con el objetivo de obtener los mapas más precisos jamás obtenidos del FCM. Del estudio de esos mapas, podremos alcanzar precisiones del orden de (o mejores que) 1% en la determinación de los parámetros del modelo.



Fig. 8. Imagen del satélite Planck, tomada de la página web de la ESA [7].

Ondas gravitacionales. El Experimento Quijote-CMB.

La otra gran predicción de la mayoría de los modelos de inflación es la existencia de un fondo de ondas gravitacionales generadas durante los primeros instantes del Universo. Las ondas gravitacionales son una predicción de la Teoría de la Relatividad General de Einstein, de la cual hoy día no tenemos evidencia directa. Un gran número de experimentos intentarán, en los próximos años, la detección de la huella de dichas ondas gravitacionales en los mapas del FCM. Dicha huella está asociada a una señal muy característica en la polarización del FCM. Entre otras iniciativas, el experimento QUIJOTE-CMB, que realizará observaciones desde el Observatorio del Teide de la polarización del FCM en el rango de frecuencias entre 10 y 30 GHz, intentará obtener evidencia de la existencia de ese fondo de ondas gravitacionales en los próximos años.

Para saber más:

- [1] Diccionario. <http://astronomia2009.es/astrodiccionario.html>
- [2] Modelo de Big Bang. <http://wmap.gsfc.nasa.gov/universe>, <http://aether.lbl.gov/>
- [3] Estructura a gran escala. <http://www.sdss.org>, <http://msowww.anu.edu.au/2dFGRS/>
- [4] El FCM. <http://background.uchicago.edu/~whu/beginners/introduction.html>
- [5] Satélite COBE. http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/c_edresources.cfm
- [6] Satélite WMAP. <http://wmap.gsfc.nasa.gov/>
- [7] Satélite Planck. <http://planck.esa.int>
- [8] Experimento Quijote-CMB. <http://www.iac.es/project/cmb/quijote/>

Granada, 6 de Abril 2009.