



UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A
DISTANCIA

FACULTAD DE FILOSOFÍA

Máster Universitario en Filosofía Teórica y Práctica
Especialidad de Lógica, Historia y Filosofía de la Ciencia

Trabajo Fin de Máster

Historia del modelo cosmológico estándar LCDM

La cosmología física tras del modelo del big bang

Autor: Pilar Francisca Luis Peña

Tutor: Manuel Sellés García

Madrid, Septiembre 2015

RESUMEN

Desde que el big bang se asentara como modelo cosmológico estándar han pasado 50 años. En este periodo, la cosmología ha mantenido abierta la cuestión de cuál es la evolución del universo y a través de la teoría inflacionaria ha enfrentado el problema del horizonte y la planitud. Pero fundamentalmente, ha introducido una nueva cuestión esencial, ¿cómo se han formado las estructuras en un universo en expansión? En paralelo, las observaciones han ido revelando dos nuevos integrantes del cosmos, la materia y la energía oscuras, cuyas naturalezas desconocemos pero que son esenciales para abordar las cuestiones de la estructura y evolución del universo. El panorama teórico y observacional se ha ampliado tanto que se ha desarrollado un nuevo modelo cosmológico estándar, el LCDM (Lambda - Cold Dark Matter). Exponer el despliegue de hechos e ideas fundamentales de este proceso es el objetivo de este trabajo. También se presentan dos reflexiones finales; ¿en este medio siglo, ha dominado el aspecto teórico o observacional? y ¿el modelo LCDM puede ser considerado un nuevo paradigma cosmológico?

ABSTRACT

It has been 50 years since the Big Bang emerged as the standard cosmological model. In this period, Cosmology has kept open the question of what is the evolution of the Universe and it has faced the horizon and flatness problems by means of the Inflationary theory. But fundamentally, it has introduced a new key issue, how have structures been formed in an expanding universe? In parallel, observations have revealed two new components of Cosmos, dark matter and dark energy, whose natures are unknown but which are essential to address the issues of the structure and evolution of Universe. Theoretical and observational outlooks have expanded so much that it has been developed a new standard cosmological model, LCDM (Lambda - Cold Dark Matter). The goal of this work is to expose the deployment of facts and basic ideas of this process. Two final reflections are also presented; during this last half century, has it dominated the theoretical or observational aspect? and does LCDM model can be considered a new cosmological paradigm?

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
2. DESTINO, ESTRUCTURA Y ORIGEN DEL UNIVERSO DEL <i>BIG BANG</i>	11
2.1. El destino del universo	11
2.1.1. El problema de las distancias extragalácticas	12
2.1.2. ¿A qué ritmo se separan las galaxias?	19
2.1.3. ¿El universo se está desacelerando?	22
2.1.4. ¿Cuál es la densidad media del universo?	24
2.2. La estructura del universo	26
2.2.1. Historia del descubrimiento de las estructuras	26
2.2.2. ¿Como se formaron las estructuras?	33
2.2.3. Historia de los satélites COBE y WMAP	38
2.3. ¿Un origen inflacionario?	41
2.3.1. Los problemas del big bang	41
2.3.2. Transición de fase e inflación cósmica	43
2.3.3. Fluctuaciones cuánticas	45
3. LA MATERIA OSCURA SE ABRE CAMINO	46
3.1. La masa de los cúmulos galácticos	47
3.2. La velocidad de rotación uniforme de las galaxias	49
3.3. Los resultados de los satélites COBE y WMAP	52
3.4. Otras evidencias de la existencia de materia oscura	58
3.4.1. Lentes gravitacionales	58
3.4.2. La colisión del Cúmulo Bala	60
4. LA ENERGÍA OSCURA SE HACE EVIDENTE	62
4.1. Nacimiento de la constante cosmológica	62
4.2. Olvido y reaparición de la constante cosmológica	64
4.3. ¿Energía oscura o constante cosmológica?	68
5. EL NUEVO MODELO ESTÁNDAR LCDM O CONCORDANTE	71
5.1. Cantidad y distribución de la materia-energía del universo	73
5.2. Historia de los modelos teóricos tras el big bang	74
5.3. Las predicciones del modelo	77

6. LOS LÍMITES DE NUESTRO CONOCIMIENTO	79
6.1. Naturaleza de la materia oscura	
6.2. Naturaleza de la energía oscura	
6.3. Flaquezas del modelo inflacionario	
6.4. ¿Y antes del tiempo de Plank?	
7. CONCLUSIONES	
7.1. Equilibrio entre teorías y tecnociencia en la cosmología física ...	
7.2. ¿El modelo LCDM es un nuevo paradigma cosmológico?	
7.3. El molesto y sorprendente ajuste del universo	
BIBLIOGRAFÍA	

1. INTRODUCCIÓN

Si hay algo que siempre ha atraído al ser humano es preguntarse por la naturaleza del universo, aquello que abarca todo lo que conocemos: materia, energía, espacio y tiempo. Las ecuaciones de la relatividad general, presentadas por Albert Einstein (1879-1955) en 1915, permitieron el nacimiento de la cosmología física¹. Por primera vez, existía un marco teórico en el que se podía estudiar el universo como un “todo”. Las soluciones a estas ecuaciones no sólo podían describir el origen del universo, sino también su evolución. En 1922, Alexander Friedmann (1888-1925), el gran matemático ruso, propuso algunas soluciones. El universo que emergió de sus cálculos era dinámico, podía expandirse o contraerse.

La primera guerra mundial había frenado sensiblemente la investigación científica en Europa, pero en EEUU, se habían construido grandes telescopios en Arizona y California. En enero de 1915, Vesto Slipher (1875-1969), que había trabajado con un reflector de 61 centímetros² desde el observatorio Lowell (Flagstaff, Arizona), publicó la noticia de que las entonces “nebulosas espirales”, ahora galaxias espirales, parecían alejarse de nosotros a alta velocidad. Edwin Hubble (1889-1953) partió de los trabajos de Vesto Slipher y empezó sus propias observaciones en 1919 con el gran telescopio de 254 centímetros de Monte Wilson (Los Ángeles, California). Sus meticulosos trabajos cimentaron la cosmología observacional moderna³. En 1925 demostró que las nebulosas espirales de Andrómeda y el Triángulo eran universos-isla más allá de nuestra propia galaxia. En 1926 publicó un esquema de clasificación de galaxias, que perdura mejorado. En 1929 presentó la relación lineal entre la velocidad a la que se alejan las galaxias y su distancia, la famosa ley de Hubble, con la que se evidenciaba que el universo se expandía y que por lo tanto, debía haber tenido un lejano origen común. Finalmente, entre 1926 y 1936, demostró que la distribución de galaxias promedio era la

1 (Sellés García 2007) Pág.255.

2 El telescopio de Slipher tenía anexo un espectroscopio y en la fecha de publicación de su artículo había estudiado algo más de una docena de nebulosas espirales. ((J. Ostriker and Mitton 2014) págs. 63 y 74)

3 (J. Ostriker and Mitton 2014) Págs. 93-95.

misma en todas las direcciones del espacio, el universo resultaba ser estadísticamente homogéneo e isótropo⁴.

En 1927, el sacerdote católico belga Georges Lemaître (1894-1966) presentó una nueva solución a las ecuaciones de la relatividad general que consideraba las nuevas observaciones de la separación de las galaxias espirales. De hecho, se adelantó en dos años a Hubble en su interpretación de un universo en expansión. En su brillante solución, similar en muchos aspectos a la de Friedmann, se incorporaba el estudio termodinámico del universo en el que la suma de energía de la radiación, la masa y el trabajo aportado por la presión de la radiación se conservaban⁵. En 1931, Lemaître amplió su modelo de universo incluyendo la recién descubierta radiactividad y los desarrollos en física cuántica. Proponía que el origen del universo fuera un “gran átomo primigenio” que contuviera toda la masa del mismo en un volumen pequeño. Las sucesivas desintegraciones de este “átomo” habrían producido la materia ordinaria y la radiación cósmica. Posteriormente, Lemaître fue mejorando su modelo, conocido como teoría del “átomo primigenio”⁶, pero históricamente ya había nacido la primera formulación de la que se denominaría la teoría del big bang, base del actual modelo estándar LCDM.

Desde el descubrimiento de la radiactividad a finales del S.XIX, numerosos físicos se habían dedicado al estudio de las reacciones nucleares necesarias para sintetizar los elementos de la tabla periódica a partir de los constituyentes elementales del átomo. En 1946 el físico ruso-americano George A. Gamow (1904-1968) publicó un revolucionario artículo: *Expanding universe and the origin of elements*. Fue el primero en relacionar los estudios de nucleosíntesis de elementos con el modelo cosmológico de Friedmann–Lemaître. Gamow supuso una alta densidad inicial en el universo de $10^6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, para que se pudiera producir la nucleosíntesis primigenia, que dada la alta tasa de expansión del universo sólo podía haberse mantenido durante un periodo muy breve

4 Igual en todas las direcciones del espacio.

5 Los universos relativistas anteriores, tanto el de Einstein (1917) como el de de Sitter (1917) y el de Friedmann la materia estaba en reposo y uniformemente distribuida ((J. Ostriker and Mitton 2014) pág.259) y se despreciaba la radiación frente a la energía en forma de masa ((Sellés García 2007) pág.261).

6 El libro de G. Lemaître *L'Hypothèse de l'Atome Primitif* (La hipótesis del “átomo primigenio”) desarrolla su teoría.

en los primeros momentos del universo⁷. En este momento, nace completamente la teoría del big bang, a partir de las contribuciones conjuntas de estos tres gigantes de la ciencia del siglo XX. También se había producido la sorprendente unión entre la física de partículas y la cosmología, que hoy perdura.

En 1948, F. Hoyle (1915-2001), H. Bondi (1919-2005) y T. Gold (1920-2004) propusieron, en base a consideraciones matemáticas más que observacionales, la teoría del estado estacionario según la cual se generaba constantemente materia en el universo para compensar su evidente expansión, de tal manera que el universo no evolucionara, sino que mantuviera el mismo aspecto a grandes escalas con el paso del tiempo. En esta nueva teoría, sus creadores sostenían que la generación de materia de la “nada” era tan misteriosa como la generación de todo el universo de un “átomo primigenio”. Por otro lado, la publicación en 1957 sobre cómo se podían generar los elementos a partir del hidrógeno en el interior de las estrellas⁸ reforzó la teoría del estado estacionario. Ésta última se convirtió en rival de la recién bautizada teoría del “big bang” por el mismo Fred Hoyle⁹. Los cosmólogos estaban divididos en función de sus inclinaciones personales entre una y otra teoría. La primacía de uno u otro modelo tendría que estar acompañada de sólidas observaciones.

En paralelo, la cosmología observacional era plenamente consciente de la necesidad de tener mejores instrumentos para profundizar en el conocimiento del cosmos. En 1948, gracias al impulso de G.E. Hale¹⁰(1868-1938) y tras una guerra que ahora también había frenado la investigación científica en EEUU, se inauguró un nuevo observatorio en Monte Palomar (San Diego, California), equipado con un telescopio reflector de 508 centímetros de diámetro. En Europa, se redirigieron las grandes antenas radares que se habían diseñado con motivos bélicos hacia el cielo. Había nacido una

7 (Sellés García 2007) pág.281.

8 El trabajo presentado se tituló: *Synthesis of the Elements in Stars*, y fue apodada como teoría B2HF, en honor a sus creadores, el matrimonio Burbidge, W. Fowler y F. Hoyle ((J. Ostriker and Mitton 2014) pág.140).

9 Introdujo la nueva denominación en un programa de radio el 28 de marzo de 1949 ((J. Ostriker and Mitton 2014) pág.98).

10 También promovió la construcción del observatorio de Yerkes, de la universidad de Chicago, inaugurado en 1897. Y en 1904 con el apoyo económico de la Carnegie Institution de Washington fundó el observatorio de Monte Wilson.

nueva disciplina, la radioastronomía, capaz de ver el cielo en la franja de las ondas de radio. La sorpresa surgió cuando en 1952 el astrónomo de origen alemán Walter Baade (1893-1960) tuvo la idea de solapar la imagen de una radiofuente en la constelación del cisne con su espectro¹¹ óptico tomado en Monte Palomar¹². La radiofuente resultó estar a cientos de millones de años luz y ser, por tanto, extragaláctica. La radioastronomía empezaba a estar, entre otras funciones, al servicio de la cosmología. Sería desde este nuevo campo de instrumentación cosmológica que se iba a zanjar la disputa entre las dos teorías cosmológicas dominantes. La teoría del big bang y la del estado estacionario.

Por un lado, los estudios de radiofuentes habían demostrado que éstas no eran uniformes con el paso del tiempo, tal como preveía la teoría del estado estacionario. De hecho, los cuásares¹³ u “objetos cuasi-estelares”, potentes radiofuentes, se habían descubierto en 1963 y sus altos corrimientos al rojo¹⁴ indicaban que eran muy antiguos. Por otro lado, el descubrimiento accidental del fondo cósmico de microondas por Arno A. Penzias (n. 1933) y Robert W. Wilson (n.1936) en 1963¹⁵ fue una prueba importante a favor de la teoría del big bang. Dicha radiación era una predicción de la teoría del big bang hecha por G. Gamow y sus discípulos R. Alpher (1921-2007) y R. Herman (1914-1997). Por último, en 1964, los trabajos de F. Hoyle y R. Tayler (1929-1997) evidenciaron que la proporción de helio que se podía producir en las estrellas era muy inferior al detectado en el gas interestelar, del orden de un 25% frente a un 75% de hidrógeno. Para la mayor parte de la comunidad científica, este hecho fue una prueba

11 El espectro de una luz se obtiene separando las diferentes ondas electromagnéticas que la constituyen. El instrumento astronómico que realiza tal función es el espectroscopio. A partir del espectro de la luz que nos llegue de un objeto celeste, ya sea una nebulosa, estrella o galaxia, se puede conocer sus componentes químicos y su velocidad respecto al lugar de estudio.

12 (J. Ostriker and Mitton 2014) Págs. 100-101

13 Galaxias antiguas y brillantes con agujeros negros activos en su centro.

14 Magnitud física relacionada con el efecto Doppler de la luz. Cuando un cuerpo celeste emisor de luz se aleja de un observador sus líneas espectrales tienden a desplazarse hacia el rojo porque las longitudes de onda de la fuente luminosa se dilatan. En cambio, cuando la fuente luminosa se acerca al observador su espectro se desplaza hacia el azul de forma proporcional a su velocidad porque las longitudes de onda se acortan. Se evalúa a través de la expresión: $z=(\lambda-\lambda_0)/\lambda_0$ y es una forma de medir la velocidad a la que mueven las galaxias.

15 El descubrimiento fue interpretado en el mundo académico por R. Dicke y J. Peebles. En 1965 la radiación de microondas omnidireccional fue identificada como la radiación cósmica de fondo remanente del big bang ((Sellés García 2007) pág. 289).

más de la nucleosíntesis primordial predicha por Gamow y su equipo. En 1965, la teoría del estado estacionario pasó definitivamente a la historia y la del big bang se convirtió en el modelo cosmológico estándar.

El objetivo central de este trabajo es hacer un recorrido por los descubrimientos y cuestiones fundamentales de la cosmología científica en los últimos 50 años, desde la implantación del modelo del big bang hasta el momento actual, lo que se ha traducido en la implantación paulatina de un nuevo modelo cosmológico estándar, el modelo LCDM¹⁶ (*Lambda – Cold Dark Matter*, Lambda - Materia Oscura Fría) o concordante, que lo podemos definir como la versión ampliada y evolucionada del anterior en base a los nuevos datos observacionales. No obstante, por el carácter histórico del trabajo, las referencias y desarrollos previos a 1965 son inevitables en numerosos pasajes del documento.

Se presentan 6 apartados, más allá de la introducción. En el primero, “Destino, estructura y origen del universo del big bang”, tiene tres subapartados. Se aborda en primer lugar el problema de la evolución del universo, tema central de las investigaciones cosmológicas desde 1930 hasta el inicio de la década de 1970¹⁷. A continuación, se desarrolla la que pasó a ser la preocupación central de la cosmología en la década de 1970, saber cómo se habían formado las galaxias y cúmulos de galaxias en un universo en expansión. El último subapartado, trata del modelo inflacionario, la mayor aportación teórica al modelo estándar del big bang caliente, con el fin de responder a algunos de sus problemas tradicionales: el del horizonte y el de la planitud.

En el segundo apartado, “La materia oscura se abre camino”, se exponen los descubrimientos progresivos que fueron poniendo en evidencia que en el universo existe un tipo de materia diferente a la materia ordinaria, construida esta última a partir de átomos que conocemos en la tierra y que también se halla en las estrellas, la llamada materia bariónica¹⁸. La proporción en la que esta nueva materia aparece en el universo

16 También puede encontrarse la sigla del modelo LCDM escrita como Λ CDM, utilizando como primer grafema la letra griega lambda, λ , escrita en mayúscula.

17 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág. 144.

18 Los bariones son un tipo de partículas subatómicas formadas por tres quarks, los más importantes, por ser estables, son los protones y neutrones, componentes esenciales de los núcleos de los átomos de la tabla periódica de los elementos.

no es despreciable, está presente cinco veces más que la materia ordinaria, no se puede ver con nuestros instrumentos porque no emite luz y sólo la podemos detectar a través de su interacción gravitatoria con la materia ordinaria.

En el tercer apartado, “La energía oscura se hace evidente”, se expone cómo se ha desarrollado la tortuosa historia de este tercer ingrediente del universo. Einstein en 1917 fue el primero en hablar de él. Lo llamó “la constante cosmológica” y fue representada con la letra griega lambda, λ . La constante fue introducida como una necesidad en sus ecuaciones de la relatividad general para que el universo fuera estable y no colapsara gravitatoriamente. Con el descubrimiento de la expansión del universo la constante cosmológica fue relegada al olvido por innecesaria. Algunos cosmólogos volvieron a hablar de su posible existencia en 1995¹⁹, pero en 1998 volvió a surgir con fuerza tras la evidencia observacional de un universo que se expande aceleradamente. Desconocemos, igual que en el caso de la materia oscura su naturaleza, pero no podemos ignorarla porque está presente en el universo en una proporción tres veces superior a la de la materia, ordinaria y oscura, del universo.

En el cuarto apartado, “El nuevo modelo estándar LCDM o concordante”, se reunificarán las ideas desarrolladas en los tres anteriores, y se profundizará en los modelos de universo entre el del big bang y el LCDM. Se abordará cómo investigaciones tan diferentes como la determinación la constante de Hubble actual, H_0 , el estudio del fondo cósmico de microondas o los trabajos sobre supernovas Ia fueron convergiendo hacia una misma “composición” del universo, causa de la rápida aceptación del nuevo modelo estándar. Se hablará de las predicciones del modelo concordante y se cerrará con los últimos datos observacionales que lo apoyan.

En el quinto capítulo, “los límites de nuestro conocimiento”, se expondrán las preguntas sin respuesta del nuevo modelo cosmológico, punto de partida para el desarrollo futuro de la cosmología. El sentido común indica que una ciencia, que tiene por objeto “el estudio de todo lo que existe” no puede completarse mientras ignoremos parte de ese “todo”.

19 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág. 233.

En sexto y último apartado, “Conclusiones”, se presentarán tres grupos de reflexiones. El primero de ellos girará en torno a la cuestión de si ha tenido primacía la cosmología física o la observacional en el desarrollo del nuevo modelo cosmológico. Para ello, a lo largo de todo el trabajo se llamará la atención, no sólo en la historia de las grandes ideas de los últimos cincuenta años, sino que también en sus experimentos e instrumentos esenciales. A continuación, se cuestionará si el nuevo modelo cosmológico puede considerarse un nuevo paradigma cosmológico. Se seguirá haciendo una pequeña mención a los “incómodos ajustes finos del universo” que se han descubierto en este último medio siglo.

Nos hemos decantado por resaltar todos aquellos aspectos de la cosmología que se apoyan en datos experimentales, mencionando de forma más marginal los aspectos más especulativos de la cosmología física, que tienen interés desde el punto de vista de la histórico, pero que no han contribuido a la implantación del modelo LCDM.

2. DESTINO, ESTRUCTURA Y ORIGEN DEL UNIVERSO DEL *BIG BANG*

El estudio del origen, estructura y evolución del universo es el objetivo central de la cosmología. Mostrar el desarrollo de estas tres cuestiones en el marco del modelo estándar del big bang es el objetivo de este apartado.

2.1. El destino del universo

Después de la confirmación de la expansión del universo en 1929, el estudio de la evolución del universo pasó a ser uno de los temas de debate fundamentales, y lo sigue siendo en la actualidad. El primer parámetro que definió Hubble a este fin, y que no ha dejado de revisarse hasta la actualidad, fue la constante que lleva su nombre, H_0 . Con el paso del tiempo se definieron dos parámetros más complejos que el primero con el mismo fin, el parámetro de desaceleración, q_0 , y el parámetro densidad del universo, Ω_m . Numerosos recursos y experimentos se han dedicado a asignarles valor. Estos tres indicadores necesitan que dispongamos de buenas estimaciones de las distancias cósmicas, problema que no fácil de resolver. En un primer subapartado abordaremos el problema que ha supuesto determinar las medidas cósmicas para poder responder correctamente a la cuestión del destino del universo. A continuación, siguiendo el orden cronológico, se hará mención al estudio de H_0 , pasaremos después a conocer cómo se ha

introducido el parámetro q_0 , para cerrar con el significado e historia del parámetro Ω_m , indicador habitual para abordar la cuestión del destino del universo ¿tiene éste suficiente masa para compensar la expansión provocada por el big bang y colapsar sobre si mismo o está destinado a una expansión eterna?

2.1.1. El problema de las distancias extragalácticas

Conocer con la mayor exactitud posible las distancias extragalácticas es un objetivo básico de la cosmología. El conocimiento combinado de las distancias y velocidades de las galaxias, obtenidas a partir del corrimiento al rojo de sus líneas espectrales, permite conocer el ritmo de expansión del universo y, por lo tanto, su evolución. Las distancias a otras galaxias también permiten hacer cartografiados tridimensionales del cosmos a través de los cuales conocemos la estructura del universo y nos podemos cuestionar cómo se ha producido su evolución. La cosmología ha utilizado numerosas candelas estelares desde las clásicas cefeidas variables a las modernas supernovas Ia, fundamentales en la reciente confirmación de la energía oscura.

Actualmente, se utilizan dos métodos para conocer las distancias extragalácticas. El primero se basa en comparar la luminosidad aparente del cuerpo en estudio con la absoluta²⁰. El segundo consiste en conocer la invariabilidad del tamaño de algunos objetos celestes y comparar su tamaño angular aparente con el real²¹. Pero el camino hasta haber llegado a estas complejas técnicas de cálculo de distancias cosmológicas no ha sido sencillo ni corto.

Si hacemos un poco de historia, fue en 1908 cuando Henrietta Swan Leavitt (1868-1921), desde el Harvard College Observatory, estudió las características de veinticinco estrellas cefeidas²² en la galaxia satélite de la Vía Láctea, la Pequeña Nube de

²⁰ La distancia a un objeto astronómico se puede obtener a partir de la siguiente relación: $d_L = \sqrt{L/(4 \cdot \pi \cdot f)}$ donde f es el flujo de luz recibido y L su luminosidad ((Wickramasinghe and Ukwatta 2010) Pág. 548).

²¹ (J. Ostriker and Mitton 2014) Págs. 22-23.

²² Las estrellas cefeidas son estrellas variables que cambian de temperatura y de diámetro con periodos muy estables, lo que provoca que su la amplitud de su brillo también lo sea. La primera estrella cefeida fue descubierta por John Goodricke en 1874 en la constelación de Cepheus. Se trataba de Delta Cephei, la cuarta más brillante de la constelación. En nuestra galaxia se han descubierto del orden de 400, en las galaxias satélite de la nube de Magallanes unas 1000, pero en cambio en el cúmulo globular M13 de la constelación de Hércules sólo 3.

Magallanes. Como todas las estrellas cefeidas que estudió estaban a la misma distancia de la Tierra, pudo hallar una relación entre su luminosidad real y su período de pulsación. Observó que cuanto más brillante era la cefeida, mayor era su periodo²³. Todavía hoy, junto a otras estrellas variables como las RR Lyrae o las W Virginis, sirven para calibrar indicadores de distancias cósmicas de más abasto. Se pueden distinguir en galaxias exteriores hasta distancias máxima de unos 20 Mpc²⁴. Las variables cefeidas o RR Lyrae han sido utilizadas en descubrimientos esenciales en la cosmología.

Hubble descubrió estrellas cefeidas en las nebulosas espirales M33 y M31, las utilizó como candelas estelares para medir la distancia de estas nebulosas a la Tierra y demostró que estas estrellas no formaban parte de la Vía Láctea. La idea de los universos-isla de Thomas Wright (1711-1786) había sido finalmente confirmada, las nebulosas espirales eran grandes sistemas estelares situados a gran distancia de nuestra propia galaxia²⁵. En diciembre de 1924 hizo públicos sus resultados aumentando, sin precedentes, el tamaño del universo.

Entre 1926 y 1929 se dispuso a estudiar la distancia de una veintena de galaxias con el fin de hacer la correlación entre sus distancias y velocidades. Para las 7 más próximas utilizó sus estrellas cefeidas, para las 13 siguientes utilizó el brillo de sus estrellas más luminosas y para las más distantes utilizó el brillo de sus nebulosas gaseosas. A partir de la deducción de la ley que lleva su nombre, se percató de que esta progresión entre distancias y velocidades no podía superar a velocidad de la luz. Hizo una estimación del radio del universo²⁶ y de las galaxias que podía contener. A partir de su límite visual, máxima distancia que podía observar con su telescopio de 100

23 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág. 191.

24 Un parsec (pc) es la distancia que nos separa a una estrella cuyo paraje es de 1 segundo de arco. En cosmología 1 Mpc equivale a 3'26 millones de años luz. La buena resolución del telescopio espacial Hubble, puesto en órbita en 1990, ha permitido aumentar la distancia máxima que se puede medir con este tipo de estrellas variables. 20 Mpc es la distancia que nos separa del cúmulo de Virgo.

25 Thomas Wright publicó esta idea en su obra de 1750 *An Original Theory or New Hypothesis of the Universe* ((Kragh 2008) Pág. 131).

26 Se logra aislando el término distancia de la ley de Hubble: $D=V/H_0$, donde V tendría el valor de la velocidad de la luz en el vacío (aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s). De esta manera, D, sería la distancia teórica a una galaxia con la misma velocidad de recesión de la luz, la máxima velocidad del universo según la teoría de la relatividad especial. Evidentemente, H_0 es la constante de Hubble.

pulgadas²⁷, comprendió que la fracción del universo que podía observar era tan sólo el 0'15% del radio del universo observable²⁸.

También tuvo la idea de realizar una clasificación sistemática de todos los tipos de galaxias. Su objetivo era utilizar el “tipo” de una galaxia para poder estimar su distancia a partir de su tamaño angular aparente. Su esquema de clasificación de galaxias que fue publicado en 1926 se convirtió en un importante primer paso para crear un mapa de la estructura del universo. Evidentemente, se partía de la idea de que las dimensiones de un mismo tipo de galaxias era aproximadamente fijo.

Durante los 50 años marcados por los trabajos de Hubble y el heredero de su programa de investigación, Allan Sandage (1926-2010), entre 1920 y 1970, la mayor preocupación de la cosmología fue medir con la mayor precisión posible la constante de Hubble, H_0 y el parámetro de desaceleración del universo, q_0 .

Entre las décadas de 1950 y de 1990 se realizaron numerosos estudios para calibrar las galaxias y saber cómo utilizarlas mejor para determinar sus distancias teniendo en cuenta sus diferentes propiedades. Se correlacionaron luminosidad y tamaños con otras características como la forma y el color. En este sentido, es importante resaltar el *The Carnegie Atlas of Galaxies*, publicado por A. Sandage y J. Bedke (1928-2004) en 1994. Pero todos estos estudios ignoraban la evolución galáctica.

Una joven y brillante astrónoma, Beatrice Tinsley (1941-1981), entró en escena. Fue la primera en evidenciar en su tesis presentada en 1968, *Evolution of Galaxies and its Significance for Cosmology*, que si las galaxias evolucionan no pueden utilizarse como candelas estelares y que era necesario conocer su brillo como función de su antigüedad, de la misma manera que las estrellas varían significativamente su brillo con la edad²⁹. También publicó, en 1968, cómo cambia el brillo de la galaxias como función de la evolución de sus estrellas. Su artículo titulado *Evolution of the stars and gas in galaxies*, expone la evolución de las galaxias desde su nacimiento hasta sus 12000 millones de años, mostrando que en las galaxias elípticas es esencial tener en cuenta su

27 Equivale a 254 centímetros. $1''=2'54$ cm

28 (J. Ostriker and Mitton 2014) Págs. 88-89.

29 Desde 1950 se comprendía la evolución vital del Sol.

evolución para interpretar correctamente las relaciones entre la magnitud y el corrimiento al rojo³⁰. Evidenció que si se trabajaba sin tener en cuenta la evolución las galaxias más lejanas, se obtenían curvas de brillo más altas de las reales³¹, con lo que se deducían distancias más cortas de las reales para un mismo desplazamiento al rojo.

Al principio, Tinsley no recibió apoyo de los grandes cosmólogos como A. Sandage y John B. Oke (1928-2004) que insistía en que los problemas más importantes de la cosmología era estudiar el valor de la constante de Hubble, H_0 , y el parámetro de desaceleración, q_0 , y que el trabajo de Tinsley era pesimista³². Pero la joven astrofísica siguió defendiendo activamente su idea en diversos artículos entre 1970 y 1972, señalando que si no se tenía en cuenta la evolución de las galaxias, los cálculos de q_0 serían más altos que los valores reales, como así había sido.

La cosmología había dedicado mucho tiempo y recursos a la evaluación de H_0 y q_0 , ahora las pruebas que aportaba Tinsley hicieron que se replanteara el uso de las galaxias como candelas estelares, con lo que las medidas cosmológicas mejoraron. Pero lo que es más importante, puso en evidencia que las preguntas de la cosmología se debían redirigir, al menos en parte, hacia el importante y difícil problema de la formación de las estructuras como galaxias o cúmulos de galaxias en el universo. Se empezó a comprender que tanto o más importante que los parámetros globales del cosmos, lo eran sus estructuras internas³³.

En las décadas de 1960 y 1970, George O. Abell (1927-1983), tras haber presentado su catálogo de cúmulos de galaxias en 1958, desarrolló cómo calcular las distancias de los cúmulos a partir de su función luminosidad para llegar a las máximas distancias cósmicas. Pero este método no ha acabado implantándose porque carece de base física en las correlaciones que utiliza y porque puede introducir errores por sesgos observacionales como el efecto Scott y el efecto Bautz-Morgan. El efecto Scott supone

30 (Tinsley 1968) Págs.563 y 564.

31 Las galaxias más lejanas también son más jóvenes que aquellas que se hallan a distancias medias. El brillo de una galaxia joven es mayor que el brillo de una galaxia más antigua, porque en la primera dominan poblaciones de estrellas jóvenes, más brillantes, para un mismo volumen estelar, que estrellas más antiguas, dado que poseen mayores temperaturas superficiales.

32 (Oke and Sandage 1968) Págs. 21 y 30.

33 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág. 158.

que, a grandes distancias, la luminosidad de la galaxia más brillante depende del número de galaxias del cúmulo al que pertenece. Respecto al efecto Bautz-Morgan, señala el hecho de que al menos hay cinco tipos de cúmulos en los que la luminosidad de la galaxia más brillante es diferente además de que en la distancia no se pueden observar todos los tipos fácilmente. Resolver cómo calcular distancias extragalácticas fiables sigue siendo un buen reto de la cosmología.

El astrónomo de origen francés pero que se asentó en EEUU en 1957, Gérard H. De Vaucouleurs (1918-1995) hizo una importante aportación a este campo en 1978. Publicó una serie de artículos bajo el título de *The extragalactic distance scale*, en los que presentó un método que promediaba las distancias a las galaxias obtenidas a partir de indicadores tanto luminosos como de tamaño angular aparente. Utilizando este método revisó los cálculos de distancias extragalácticas de Hubble y de Sandage. También mejoró la secuencia de tipos de galaxias elaborada por Hubble.

De Vaucouleurs supo establecer claramente los calibradores de distancias del universo, los indicadores primarios, secundarios y terciarios. Exponía que los calibradores, que aportaban medidas precisas de referencia, se obtenían a partir del paralaje de estrellas y la luminosidad constante de los cúmulos globulares de nuestra propia galaxia, siendo éste su alcance. A continuación, se hallarían los indicadores primarios formados por variables cefeidas, RR Lyrae y Novas que actualmente pueden llegar hasta los 20 Mpc y que se ajustan a partir de los calibradores ya mencionados. Justo después estarían los indicadores secundarios, que hoy alcanzan distancias de 100 Mpc, estando constituidos por estrellas gigantes y supergigantes detectadas en las galaxias o en estructuras de luminosidad conocida como nebulosas planetarias o regiones nebulosas del tipo HII³⁴. Por último, estarían los indicadores terciarios, que se calibrarían a partir de los secundarios y estos a su vez a partir de los primarios, con lo que serían los que arrastrarían más error en sus cálculos. Los indicadores terciarios estarían formados por el diámetro aparente de las galaxias y sus luminosidades que

³⁴ Las nebulosas del tipo HII son nubes de gas y plasma de varios cientos de años luz diámetro. En su interior se forman estrellas masivas que emiten luz en el ultravioleta extremo, ionizando la nebulosa. Reciben su nombre por la gran cantidad de hidrógeno atómico ionizado que contienen. Por ser muy brillantes pueden ser vistas a gran distancia por lo que se utilizan para medir distancias cosmológicas.

medirían en el presente objetos más allá de los 100 Mpc³⁵.

Vale la pena citar que De Vaucouleurs en la década de 1950 también promovió la idea, antes de que fuera definitivamente comprobada, que los cúmulos de galaxias se agrupan formando supercúmulos de galaxias y que sus trabajos de 1978 resultaron ser efectivamente muy válidos para calibrar los diferentes indicadores estelares y para sistematizar el cálculo de distancias en cosmología. Con el fin de evitar los sucesivos errores arrastrados en los indicadores terciarios, fueron poco a poco mejorados por indicadores secundarios de largo alcance como el método del plano fundamental, el método de las fluctuaciones de brillo superficial o la relación Tully-Fisher.

El método del plano fundamental se aplica a galaxias elípticas y se basa en la relación de dispersión de velocidades-diámetro. Existe una relación lineal entre el logaritmo de la dispersión de velocidades de una galaxia elíptica y el logaritmo de su diámetro. Conociendo la dispersión de velocidades, se puede conocer el diámetro de la galaxia y éste se puede comparar con su diámetro aparente para deducir la distancia a la que se halla la galaxia³⁶.

El método de las fluctuaciones del método superficial utiliza fluctuaciones estadísticas de brillo píxel a píxel. Se parte de la premisa de que la luminosidad y la densidad de estrellas más brillantes de la galaxia no varían con el tiempo y que es independiente de la orientación de la galaxia. Bajo estas premisas el número de estrellas que captura cada unidad del detector dependerá únicamente de la distancia a la galaxia en estudio³⁷.

Por su lado, la relación de Tully-Fisher se aplica únicamente a galaxias espirales. Parte de la correlación entre la anchura de la línea espectral de 21cm (ondas de radio) y su luminosidad. Esto se debe a que la citada línea espectral está relacionada con la velocidad máxima de la curva de rotación de la galaxia, a su vez relacionada con la masa total de la galaxia. El método no tienen en cuenta los efectos evolutivos de las

35 (Cepa 2007) Pág. 32.

36 La limitación del método radica en la dificultad de medir tamaños y dispersiones de velocidad a grandes distancias, así como los efectos evolutivos en el brillo de las galaxias ((Cepa 2007) Págs. 27-28)

37 La limitación del método es la obtención de señal suficiente y los efectos evolutivos en las galaxias estudiadas ((Cepa 2007)Págs. 27-28)

galaxias por lo que su relación masa-luminosidad, desarrollada más abajo, se supone constante y permite conocer la luminosidad absoluta de la galaxia. Una vez conocida esta última, se puede conocer su distancia a partir de su luminosidad aparente³⁸.

No obstante, el último y más reciente tipo de medidor de largo alcance son las supernovas del tipo Ia. Puede determinar las máximas distancias, del orden de 10 Gpc, y ha servido para confirmar la existencia de la energía oscura como desarrollaremos más abajo. Estas supernovas se caracterizan porque no proceden de la muerte de una estrella masiva, sino que se producen cuando existe un sistema binario de estrellas formado por una enana blanca y una gigante roja próximas de tal manera que la enana blanca consigue robar materia a su masiva compañera. Cuando la enana blanca consigue acumular suficiente materia, sufre una implosión gravitatoria que desencadena la reacción termonuclear del carbono y oxígeno que se traduce en una explosión estelar muy característica, con un aumento de brillo constante y tipo de luz muy conocido. Ello permite que se conviertan en perfectas candelas estelares. Una última ventaja de este tipo de indicador de distancia es que al igual que el método del plano fundamental de galaxias elípticas o el método de Tully-Fisher para galaxias espirales es que puede calibrarse utilizando indicadores primarios, habitualmente cefeidas, con lo que introducen poco error respecto a los antiguos calibradores terciarios, los únicos que anteriormente llegaban al mismo rango de distancias³⁹.

Un par de curiosidades históricas respecto a las supernovas Ia, es que fue el visionario astrónomo Fritz Zwicky (1898-1974), descubridor de la materia oscura, quien en 1931 inventó el término “supernova” para hacer referencia a la muerte explosiva de estrellas suficientemente masivas. También fue el primero en proponer, en 1936, que las supernovas podían ser buenas candelas estelares⁴⁰. El tiempo le dio la razón con las

38 Las mayores limitaciones del método radica en que las medidas se toman mejor en las galaxias que se observan de canto, aunque en éstas el problema de la extinción de estrellas es mayor. Además de que el ángulo de la rendija del espectroscopio utilizado, ya sea centrado en la luz visible, o la infrarroja altera las las medidas de las velocidades ((Cepa 2007) Págs. 29 y 33).

39 El problema de este método radica en que sólo aporta información de las distancias a las galaxias en las que se observe este tipo de supernovas y no en todas ellas. Se trata más que de un indicador de distancias de una “sonda cosmológica” ((Cepa 2007)Págs. 29-32)

40 (J. Ostriker and Mitton 2014) Págs. 160-161.

supernovas del tipo Ia⁴¹, que de momento son los mejores indicadores de distancia de que disponemos, y con las que un siglo después de su nacimiento, en 1998, se demostró la existencia de la energía oscura.

El campo de estudio de las distancias estelares en cosmología sigue siendo muy fructífero. Baste mencionar el artículo publicado en 2010 por T. Wickramasinghe y T. N. Ukwatta, *An analytical approach for the determination of the luminosity distance in a flat universe with dark energy*, en el que se presenta un método analítico, que mejora los resultados ofrecidos por métodos numéricos anteriores, para evaluar las distancias en un universo “geoméricamente plano” o “euclídeo” y dominado por la energía oscura a partir de la luz recibida del objetos en estudio⁴². Es decir, en el que se presenta, cómo adaptar las medidas del cosmos al nuevo modelo LCDM.

2.1.2. ¿A qué ritmo se separan las galaxias?

En 1929, Hubble publicó sus datos de corrimiento al rojo de una veintena de galaxias cercanas relacionándolos con sus distancias a nuestra galaxia. Éstas se alejaban de nosotros, y lo hacía más rápido cuanto más lejos se hallaban. Se hizo evidente que el universo se expandía. Estudió la proporcionalidad entre ambas magnitudes, velocidad (V) y distancia (D) y obtuvo la llamada constante de Hubble en el universo actual (H_0) a partir de la ecuación: $V=H_0 \cdot D$. Esta constante, que describe el ritmo de expansión del universo, se convirtió en una herramienta para saber su antigüedad, y por lo tanto, cuánto tiempo lleva evolucionando el universo. Basta conocer la distancia entre dos galaxias y la velocidad a la que se separan⁴³ para estimar cuánto tuvo lugar el inicio de la expansión: $T_0=D/V =1/H$. Este resultado fue llamado tiempo de Hubble. El primer cálculo de Hubble le otorgó una antigüedad del orden de 2000 millones de años. Hoy

41 Zwicky junto a W. Baade en una conferencia dada en 1933 desarrollaron cómo una estrella masiva podía producir tras su muerte nuclear una estrella de neutrones tras una majestuosa explosión de supernova, mucho antes de que fueran confirmadas observacionalmente. Por lo que impulsaron la incorporación de un nuevo telescopio Schmidt de 18" en Monte Wilson. Con este instrumento descubrió una supernova en 1936 y seis en 1937. Él las identificó con supernovas II pero hoy sabemos que eran supernovas Ia. ((Kirshner 2006) Págs. 60).

42 (Wickramasinghe and Ukwatta 2010) Págs. 548 y 550.

43 Este cálculo es una aproximación de la edad del universo, por un lado se desprecian los efectos gravitatorios entre las galaxias en recesión, y por otro, se supone que el ritmo de expansión ha sido siempre el mismo.

sabemos que su cálculo de distancias era erróneo⁴⁴, por lo que obtuvo un tiempo de Hubble demasiado pequeño que se contradecía con la edad de las rocas más antiguas de la Tierra. Su gran logro en este punto es que estableció un método para saber cuánto tiempo lleva evolucionando el universo.

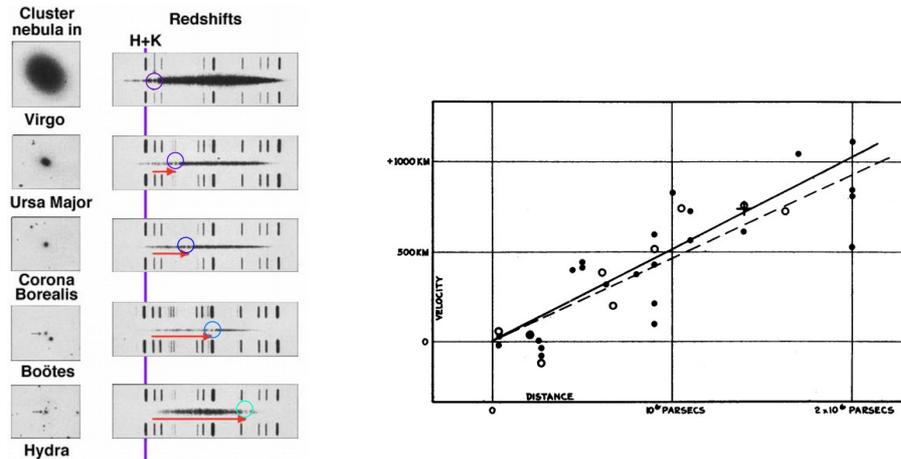


Figura 2.1. Imágenes relacionadas con el descubrimiento de la expansión del universo. La de la izquierda muestra 5 de los espectros estudiados por Vesto Slipher, en ellos se observa que el corrimiento al rojo es superior en las galaxias más distantes⁴⁵. En la derecha se halla la gráfica que publicó Hubble en 1929 en su artículo: *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*, para mostrar la correlación entre la velocidad de retroceso de las galaxias y su distancia a la Vía Láctea.

El primero en corregir el tiempo de Hubble fue W. Baade. Presentó sus resultados en 1952⁴⁶, el hecho de no localizar estrellas del tipo RR Lyrae en la galaxia de Andrómeda le indicó que debía estar más lejos de la Tierra de lo que había calculado Hubble. Calculó una nueva edad para el universo de 3600 millones de años.

44 Introdujo tres errores sistemáticos en su estimación: partió de una distancia a las nubes de Magallanes 3 veces inferior a la real, confundió cefeidas del tipo II con cefeidas de tipo I que tienen una relación periodo-luminosidad diferente y tomó por estrellas brillantes algunas nubes de gas excitadas por las radiaciones ultravioletas que recibían. Hoy en día sigue siendo un reto de la cosmología medir con exactitud el valor de H_0 y los cosmólogos no están libres de introducir errores sistemáticos o caer en el sesgo de Malmquist en sus observaciones ((Kirshner 2006) Págs. 125-127).

45 Fuente: <http://faculty.humanities.uci.edu/bjbecker/ExploringtheCosmos/lecture18.html>

46 Habían pasado 23 años después de la primera evaluación de Hubble. Este gran respeto por la obra de Hubble, con la baja estimación que arrojaba para el origen del universo, se convirtió en un problema para la aceptación de la teoría del átomo primigenio o del big bang después de la aportación de Gamow ((J. Ostriker and Mitton 2014) Pág. 100).

Estimar correctamente H_0 ha sido una búsqueda permanente en la cosmología desde que Hubble la estableciera, no sólo para conocer la edad del universo, sino también para conocer, a partir del espectro de su luz, la distancia a la que se hallan las galaxias próximas. La forma más habitual de calcular el valor de la constante ha sido a partir de las distancias y el espectro de las galaxias próximas, tal y como lo hizo Hubble la primera vez, pero este método introduce muchos errores por las dificultades implícitas al cálculo de las distancias cosmológicas como se ha desarrollado arriba.

En la búsqueda de un valor más preciso de H_0 , fue famosa la controversia entre el equipo formado por A. Sandage y Gustav A. Tamman (n. 1932) por un lado y De Vaucouleurs por el otro, entre 1975 y 1996. Los primeros eran partidarios de un valor cercano a 50 km/s/Mpc⁴⁷. El segundo de un valor de 100 km/s/Mpc y por tanto, de un universo más joven. Al poco tiempo se sumaron Richard B. Tully (n. 1943) y James R. Fisher (n. 1943) al debate, aportando un valor de 80 km/s/Kpc con técnicas de medida de la distancia mejoradas, acercándose al valor de De Vaucouleurs. En la larga contienda científica, Sandage fue acusado por De Vaucouleurs de realizar inconsistencias lógicas y de utilizar argumentos circulares. Tully lo acusaba de despreciar la cartografía de las masas próximas al Grupo Local, el cúmulo de galaxias al que pertenece la Vía Láctea. Por su lado, Sandage señalaba que De Vaucouleurs había caído en el sesgo de Malmquist⁴⁸ y a Tully y Fisher de despreciar la extinción.

El periodo más álgido de la controversia tuvo lugar en la década de 1980, momento en el que también se incorporaron a ella Marc Aaronson (1950-1987), John Huchra (1948-2010) y Jeremy R. Mould (n. 1949) que utilizando medidas infrarrojas midieron valores de 100 km/s/Mpc, e indicaron la necesidad de corregir los efectos del supercúmulo de Virgo para que los valores no surgieran próximos a los de Sandage que los despreciaba. La controversia fue tan grande que se produjeron duraderos odios y

47 Curiosamente Sandage había publicado un artículo en 1958, *Current Problems in the Extragalactic Distance Scale*, en el que dio un valor para H_0 de 75 Km/s/Mpc ((Sandage 1958) Págs. 513 y 522-524), más similar al valor actual. Con posterioridad redujo el valor a 50 Km/s/Mpc y lo mantuvo durante todos los años que duró la controversia.

48 El sesgo es una consecuencia de la atenuación que sufre la intensidad luminosa por unidad de superficie con la distancia. Al aumentar ésta última las fuentes más débiles dejan de observarse por hallarse por debajo de nuestro umbral de detección. Se acota limitando las observaciones en la distancia de tal manera que se asegure que los objetos más débiles sean detectados.

chistes que evidenciaban lo absurdo de la tensa situación humana que se creó. Incluso algunos cosmólogos llegaron a adoptar la postura política de utilizar como valor de H_0 , la media ente 100 y 50 Km/s/Mpc para no entrar en la disputa⁴⁹.

A partir de 1997, se empezaron a utilizar otros métodos como el uso de las supernovas Ia y las lentes gravitatorias junto con los datos suministrados por el telescopio espacial Hubble para tener datos más exactos. Se obtuvieron valores para H_0 entre 60 y 70 Km/s/Mpc, que son los que se admiten actualmente como válidos. Ninguno de los dos grupos resultó tener razón. Con estos valores, el tiempo de Hubble oscila entre los 16 y 14 Ga, respectivamente. Actualmente esta magnitud se estima en 13750 millones de años con un error estimado del 0'8%⁵⁰.

2.1.3. ¿El universo se está desacelerando?

Tras las primeras estimaciones de la constante de Hubble, la pregunta siguiente, en relación con la evolución del universo, era evidente, ¿toda la masa del universo será suficiente para invertir el proceso de expansión en algún momento de la historia del universo? A. Sandage, fue el primero en tratar de dar una respuesta observacional a esta pregunta. Bajo las indicaciones de W. Baade obtuvo sus datos con el nuevo gran telescopio de Monte Palomar de 200''⁵¹. Su objetivo era medir las velocidades de expansión de galaxias más lejanas y por lo tanto más antiguas. Si el universo se está desacelerando, la constante de Hubble, debía tener un valor mayor en el pasado.

Se definió el parámetro de desaceleración, q_0 , a partir del valor de la constante de Hubble actual, H_0 , y su ritmo de variación, dH/dt , que se podía obtener comparando su valor actual con valores del pasado. La expresión a evaluar era:

$$q_0 = -[1 + (dH/dt)/H_0^2]$$

Si su su valor absoluto resultaba ser mayor de $1/2$, el universo estaba destinado a volver a colapsar, en el caso contrario se expandiría indefinidamente⁵².

49 (Cepa 2007) Págs. 47-53.

50 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág. 100.

51 El diámetro del espejo principal es es 508 cm de diámetro. 1''=2'54 cm.

52 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág. 285.

Los valores que obtuvo Sandage se hallaban entre 0'5 y 1'0, con bastante grado de incertidumbre, por lo que llegó a la conclusión de que nuestro universo colapsaría en el futuro en un “big crunch”, el universo tendría una “geometría elíptica” o “cerrada”⁵³. La alta masa que observó del universo acabaría frenando su expansión.

El tiempo demostró que esta primera y precipitada interpretación fue incorrecta. Los inconvenientes eran numerosos. En primer lugar, los valores de la constante de Hubble actual, H_0 , no era correcta. En segundo lugar, las mediciones en galaxias lejanas introducían un error todavía mayor. En tercer lugar, no se tuvo en cuenta que las galaxias observadas habían evolucionado, por lo que no se podían comparar con objetos similares cercanos a la hora de estimar correctamente las distancias. En cuarto y último lugar, los cálculos no incluían los efectos de la constante cosmológica, que en aquel momento había sido olvidada por la mayor parte de los cosmólogos como se abordará en el apartado sobre la energía oscura⁵⁴.

Los resultados de Sandage son importantes porque significan la primera respuesta a la cuestión del destino del universo. Sus estudios observacionales son los únicos que han respondido que vivimos en un universo geoméricamente cerrado y parecían negar la posibilidad de un universo estacionario, aunque F. Hoyle interpretó que los datos obtenidos no eran definitivos.

El parámetro desaceleración fue utilizado en la década de 1950 para discernir entre los diferentes modelos teóricos de universo que se barajaban y su geometría ($q_0 = -1$ para un universo “estacionario” dominado por la densidad de energía de vacío, $q_0 < 1/2$ para un universo geoméricamente “hiperbólico”, $q_0 = 1/2$ para un universo “euclídeo” o $q_0 > 1/2$ para un universo “elíptico”). Baste mencionar como ejemplo el artículo publicado en 1956 de forma conjunta por F. Hoyle y A. Sandage, *The second-order term in the redshift-magnitude relation*, en el que se presenta la relación entre los parámetros H_0 , q_0 , ρ_0 (densidad crítica) y de éstos con los diferentes modelos del

53 Esta idea de la “geometría”, ofrece una descripción “visual” de la evolución del universo. Un universo cerrado, es un universo que acaba replegándose sobre si mismo, no se refiere a la curvatura espacio-temporal que puedan causar agrupaciones locales de masa a su alrededor, de acuerdo con la teoría general de la relatividad.

54 ((J. Ostriker and Mitton 2014) Pág.111)

universo, así como se citaba que con los datos del momento⁵⁵ vivíamos en un universo de alta densidad de geometría elíptica.

A partir de la década de 1960 fue más común el estudio de la evolución del universo a partir del parámetro densidad, Ω_m ⁵⁶, del que hablaremos en el subapartado siguiente. En cualquier caso, el parámetro desaceleración nunca ha sido olvidado. Curiosamente con la confirmación de la energía oscura en 1998, reaparece con un valor absolutamente inesperado en la historia de la cosmología física, $q_0 < -1$, indicando que vivimos actualmente en un universo cuya expansión no es desacelerada, sino acelerada, el signo del parámetro q_0 se ha invertido.

2.1.4. ¿Cuál es la densidad media del universo?

El parámetro de densidad, Ω_m , también fue creado para evaluar cuantitativamente el destino del universo. Se definió como el cociente entre la densidad media del universo⁵⁷, ρ_m , dividido por la densidad crítica, ρ_0 , aquella que provocaría un universo geoméricamente “plano” o euclídeo, en el que la expansión del universo quedase exactamente compensada por las fuerzas gravitatorias causadas por su masa. En un universo plano, Ω_m valdría exactamente uno, en un universo “cerrado” o elíptico su valor sería superior a la unidad y en un universo hiperbólico sería inferior a ésta.

El primero que hizo una estimación de la masa del universo fue Hubble a mediados de la década de 1920, tal y como se ha indicado más arriba, tomando la densidad media de galaxias del universo en cada dirección del espacio, que él mismo había calculado, y la masa media que asignó a cada galaxia. Inmediatamente se percató del importante significado que tenía este cálculo de cara al estudio de la evolución del universo.

A partir de la década de 1960, muchos grupos de investigación, entre ellos el famoso astrónomo holandés Jan Oort (1900-1992), se dedicaron a evaluar el valor del parámetro densidad⁵⁸. Los resultados obtenidos indicaban que Ω_m estaba por debajo de la unidad. Teniendo en cuenta la masa de las estrellas, planetas, todo el gas y polvo

⁵⁵ $H_0=180$ Km/s/Mpc, $T_0=2'5 \cdot 10^9$ años y $q_0 = 2'5$ ((Hoyle and Sandage 1956) Pág. 307).

⁵⁶ Los parámetro q_0 y Ω_m están relacionados a través de la expresión: $q_0=1/2 \cdot \Omega_m$ ((J. Ostriker and Mitton 2014) Pág. 285).

⁵⁷ La densidad media del universo se calcula a partir de la masa de una galaxia estándar, multiplicándola por el número medio de galaxias que existen por unidad de volumen.

interestelar el resultado salía aproximadamente de 0'03. Esto significaba que vivíamos en un universo geoméricamente “abierto” o hiperbólico, infinito y en infinita expansión⁵⁹.

Un universo abierto, sin energía oscura se expandiría siempre. Con energía oscura lo acabaría haciendo aceleradamente, la gravedad sería tan débil, a largo plazo, que no podrían existir estrellas, ni planetas, ni tan sólo átomos. La materia se separaría y se desintegraría hasta quedar reducida a simples partículas elementales. La aceleración final, debida a la energía oscura sería tan grande que no sólo anularía las fuerzas gravitacionales, sino también las electromagnéticas y nucleares débiles. El universo acabaría enfriándose (*big freeze*) o muriendo (*big rip*).

A los astrónomos les sorprendía la realidad de un universo con un parámetro de densidad tan bajo y que contradijera tanto los resultados obtenidos por el parámetro de desaceleración de Sandage. Se comenzó a hablar de la existencia de “materia ausente” en estrellas débiles, o en gas interestelar frío y poco denso que podía arrojar valores más altos para el parámetro densidad. Aunque la materia oscura ya había sido detectada por F. Zwicky y por Horace Babcock (1919-2003) en 1937 y la posibilidad de una constante cosmológica que se comportara de forma equivalente a la actualmente reconocida oscura, ya había sido introducida por Einstein en 1917, hubo que esperar a finales de la década de 1980 para que la materia oscura fuera aceptada y a finales de la década de 1990 para que lo fuera la energía oscura. La confirmación de la existencia de ambas, no sólo ha sentado las bases observacionales del nuevo modelo estándar LCDM, sino que ha variado totalmente el valor asignado al parámetro de densidad y por lo tanto, nuestro conocimiento acerca del destino del universo.

Con los datos actuales, teniendo en cuenta toda la masa bariónica, el componente de materia oscura y de energía oscura del universo, el universo es casi “plano”. Si no existiera energía oscura, un universo plano se expandiría con una tasa desacelerada que

58 A modo de ejemplo, el artículo: *The Density of the Universe* publicado en 1970 por J.H. Oort estimaba que la densidad media de las galaxias del universo era de $3 \cdot 10^{-31}$ gr/cm³ y que la densidad media de todo el universo era de al menos $0'5 \cdot 10^{-29}$ gr/cm³, la mitad de la densidad crítica utilizado en sus cálculos un valor para la constante de Hubble de 75 Km/s/Mpc ((Oort 1970) Pág.406). Nótese que la densidad media del universo es superior a la de las galaxias porque el gas interestelar es del orden del 90% de la materia bariónica.

59 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág.109.

tendería asintóticamente a cero. Con la existencia de la energía oscura, en un universo plano, la tasa de expansión sería baja en sus inicios, por el efecto más marcado de la gravedad, pero con el paso del tiempo se incrementaría. El destino de un universo así sería como en el caso de un “universo abierto” una muerte térmica en big freeze o big rip.

2.2. La estructura del universo

La materia del universo constituye estructuras por los efectos de las fuerzas gravitatorias. Las estructuras más simples son los planetas, las estrellas y los sistemas solares. Las estructuras intermedias las constituyen las majestuosas galaxias⁶⁰, agrupaciones de estrellas, gas, polvo y materia oscura. El siguiente nivel estructural está conformado por los cúmulos de galaxias⁶¹, éstos contienen, además de galaxias, gas caliente y pueden alcanzar diámetros de varios millones de años luz. Por último, los cúmulos de galaxias se unen a su vez formando supercúmulos de galaxias que pueden llegar a medir centenares de millones de años luz de longitud, conformando hilos luminosos de materia en el vacío del espacio. Nuestra galaxia, la Vía Láctea, forma parte del Grupo Local de Galaxias, ligado al Supercúmulo de Virgo⁶².

Conocer, a la mayor escala posible, las estructuras del universo y comprender cómo se han formado, en un universo homogéneo y en continua expansión, han sido importantes preguntas de la cosmología física tras el establecimiento del modelo del big bang.

2.2.1. Historia del descubrimiento de las estructuras

Desde que el ser humano elevó los ojos al cielo hasta el siglo XX, el universo estaba formado por tres tipos de estructuras: nebulosas⁶³, estrellas fijas y los cuerpos del

⁶⁰ En el universo visible se estima que existen del orden de 10^5 millones de galaxias, y cada una de ellas puede contener del orden de 10^5 millones de estrellas. Muchas galaxias contienen agujeros negros masivos en su centro, lo que las ayuda a mantener su materia ligada gravitatoriamente.

⁶¹ En los cúmulos, las galaxias orbitan entre sí pero, a veces, colisionan o se absorben unas a otras.

⁶² El Supercúmulo de Virgo junto con el resto de estructuras del universo visible se mueven hacia un misterioso punto llamado el Gran Atractor, cuyo centro está a 150 millones de años luz y del que no sabemos qué es, pero se cree que podría tratarse de una estructura aún mayor que los astrónomos llaman Laniakea, que significa en hawaiano "cielo inmenso".

⁶³ Las nebulosas eran conocidas desde la antigüedad, se trataba de objetos celestes difusos o lechosos.

sistema solar que se movían sobre el fondo de estrellas fijas. En el renacimiento se recupera el modelo heliocéntrico⁶⁴ y se descubre, gracias al telescopio de Galileo, que la Vía Láctea, esa franja lechosa que cruza el cielo, estaba formada por miles de estrellas. En el SXVII, la obra de Newton con la ley de gravitación universal explicó los movimientos de los cuerpos del sistema solar, siguiente estructura después de planetas y estrellas.

Respecto a las estructuras medias, las galaxias, Thomas Wright publicó en 1750 su obra *An Original Theory or New Hypothesis of the Universe*. Fue el primero en introducir la idea de que nuestra galaxia, estaba formada por innumerables estrellas en órbita alrededor de un centro, también afirmaba que existían en el universo otros sistemas estelares similares a la Vía Láctea. Un poco más tarde, en 1755, el filósofo Immanuel Kant (1724-1804), influido por la obra de T. Wright, publicó en su obra *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels* (Historia general de la naturaleza y teoría del cielo), que el origen de nuestra galaxia podía ser, igual que el del Sistema Solar, una gigantesca nube de gas y polvo en la que las partículas comenzaban a girar alrededor de las más densas por inestabilidades, con lo que introdujo una visión naturalista y evolucionista del cosmos. Mantuvo la idea de que podían existir otras agrupaciones de estrellas similares a la Vía Láctea, pero lo que es más importante, sugirió que la estructura de la Vía Láctea era de disco, frente a Wright que por una tendencia teológico-moralista había propuesto una estructura esférica⁶⁵. A estos posibles “otros mundos” se les comenzó a llamar “universos isla”, pero hasta el siglo XX dominó la idea de que las nebulosas formaban parte de nuestra propia galaxia.

A nivel observacional, William Herschel, en la década de 1780, fue el primero que desarrolló un mapa tridimensional de la estructura de nuestra galaxia y a finales del siglo XVIII junto con su hermana Caroline realizó el primer censo de nebulosas⁶⁶, pensaba que su forma se debía a la fuerza de atracción de la gravedad. Herschel

64 Aristarco de Samos en el siglo III aC ya enseñaba el modelo heliocéntrico del universo ((Kragh 2008) Págs 51-52).

65 (Kragh 2008) Págs. 130- 137.

66 Para realizar su catálogo de nebulosas utilizaron dos de los telescopios reflectores que el mismo William Herschel había construido, uno de 46 cm de diámetro, posteriormente otro de 120 cm y finalmente uno de 60 cm. Llegó a identificar más de 1500 nebulosas desde el cielo inglés.

inicialmente era de la idea, como T. Wright, de que algunas nebulosas podían ser lejanos universos fuera de nuestra galaxia, finalmente abandonó esta idea, situándolas en nuestra propia galaxia. En la década de 1840 las observaciones de Lord Rosse, con su gran telescopio reflector “Leviatan” de 183 cm de diámetro, mejoraron el conocimiento de las nebulosas espirales, que era el nombre que entonces se daba a las galaxias espirales, no obstante se mantenía la idea generalizada de que formaban parte de nuestra propia galaxia. Un siglo más tarde, a finales del siglo XIX, se empezó a utilizar la fotografía para empezar a ver detalles del cielo, entre ellas los diferentes tipos de nebulosas.

A principios del siglo XX James Keeler, desde el Observatorio Lick en California, con un telescopio reflector de 90 cm de diámetro, logró fotografiar tantas nebulosas blancas que predijo que existían del orden de 120.000⁶⁷. Hoy creemos que existen del orden 100.000 millones.

En 1917 Vesto Slipher, después de haber analizado el espectro de la luz que provenía de veinticinco galaxias, empezó a pensar que las nebulosas espirales debían ser los “universos-isla” y que la propia vía Láctea debía ser una nebulosa espiral vista desde dentro.

Harlow Shapley (1885-1972), desde el observatorio de Monte Wilson,⁶⁸ llevaba años estudiando las dimensiones de nuestra galaxia observando estrellas variables y cúmulos globulares, todos ellos con brillo conocido. En 1920 hizo públicos sus descubrimientos, el Sol no estaba, como se pensaba entonces en el centro de nuestra vía láctea, sino que estaba a unos 28.400 años luz del centro de la galaxia⁶⁹, cuyo centro se hallaba en la dirección de la constelación de Sagitario. Sin embargo, y curiosamente, Shapley seguía pensando que todo el universo era nuestra Vía Láctea. Hubo que esperar

67 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág.159.

68 El observatorio de Monte Wilson, fundado en 1904 por George Ellery Hale, dispuso en 1907 de un reflector de 152, en 1917 de otro de 254 centímetros, que fue hasta la construcción del observatorio de Monte Palomar, el más grande del mundo.

69 Los cálculos de Shapley de la posición del sistema solar en nuestra galaxia fueron muy buenos. Actualmente se piensa que nuestro sistema solar está a 28.000 años luz del centro de la Vía Láctea ((J. Ostriker and Mitton 2014) Pág.77).

a 1924 y a los trabajos de Hubble, para que se aceptara generalizadamente que nuestro universo, no era más que una galaxia entre tantas otras del universo.

A finales de la década de 1920 no quedaban dudas de que nuestra galaxia no era todo el universo, el tamaño del universo había dado un salto de gigante. Y fundamentalmente, de cara a las estructuras del universo, se empezó a constatar que el universo es uniforme e isótropo a gran escala. En todas las direcciones del espacio, observamos aproximadamente el mismo número y tipos de galaxias.

El brillante astrónomo de origen suizo, Fritz Zwicky del Caltech, consolidó los estudios fotográficos del cielo. Con un telescopio Schmidt⁷⁰ de 46 cm instalado en Monte Palomar en 1936, descubrió diecinueve supernovas. Después realizó el primer estudio fotográfico del hemisferio norte, donde descubrió 30.000 galaxias. Sus resultados finales fueron publicados en 1971, tras décadas de publicaciones parciales, con el título de *Catalogue of selected compact galaxies and of post-eruptive galaxies*.

En 1943, W. Baade, presentó sus descubrimientos al mundo, había observado desde el gran telescopio de 254 cm de diámetro de Monte Wilson, un patrón en la gran galaxia de Andrómeda. En los brazos exteriores de la espiral galáctica se hallaban estrellas jóvenes, las más brillantes eran estrellas gigantes rojas y azules, las llamó población I. En cambio, en el centro de la espiral y en sus próximos cúmulos globulares, las estrellas eran más antiguas, las llamó población II⁷¹.

Un nuevo telescopio Schimidt de 120 cm de diámetro, conocido como telescopio Oschin, se instaló en Monte Palomar en 1948. Disponía de un campo aparente de 36° cuadrados. Permitió hacer un sondeo cartográfico del cielo del hemisferio norte⁷² hasta una declinación de -33°. El famoso *Palomar Observatory Sky Survey, POSS*, tomó 2000 placas fotográficas en luz azul y roja, logró captar la luz miles de estrellas hasta la magnitud -22. Y lo que es más importante, confirmó las ideas de Zwicky acerca de la importancia de los cúmulos de galaxias como estructuras básicas del universo. George Abell fue quien clasificó los cúmulos que se habían fotografiado, publicando un

70 El telescopio Scmidt fue inventado en 1930 por Bernard Schmidt.

71 ((J. Ostriker and Mitton 2014) Pág.97). Actualmente sabemos que este patrón es común en la estructura de las galaxias espirales.

72 Este tipo de cartografiado celeste recibe el nombre de *Survey* en inglés.

catálogo en 1958, *The Distribution of Rich Clusters of Galaxies*, con 2400 de ellos, los más simétricos y formados por, al menos, 30 galaxias. También se realizaron cartografiados con instrumentos equivalentes desde el hemisferio sur, desde el Observatorio Anglo-Australiano.

En 1986, V. de Lapparent, M. Geller (n. 1947) y J. Huchra (1948-2010), publicaron un artículo sobre la estructura de las galaxias en el cosmos cercano: *A slice of the Universe*. El estudio, realizado con telescopios ópticos, placas fotográficas y desplazamiento al rojo, mostró que los cúmulos de galaxias se agrupaban entre sí, formando murallas e inmensos vacíos de millones de años luz de diámetro entre ellos. También mostró que se debían revisar las teorías sobre la formación de las grandes estructuras del universo⁷³.

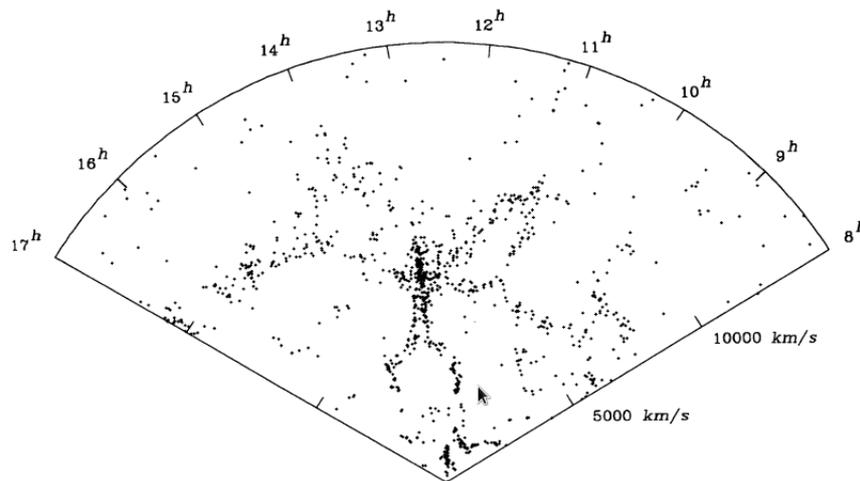


Figura 2.2. Histórica imagen publicada en el artículo de Lapparent, Geller y Huchra. Muestra un mapa de las galaxias con una velocidad obtenida por corrimiento al rojo inferior a 15.000 Km/s para una ascensión recta entre 8h y 17h para una pequeña franja de declinación entre los 26°5' y los 32°5'. Se utilizó un valor para la constante de Hubble, H_0 , de 100 Km/s/Mpc y se representaron 1061 galaxias con una magnitud aparente inferior a 15'5' ((de Lapparent, Geller, and Huchra 1986) Pág. L2).

Se han continuado realizando cartografiados extragalácticos, los más importantes han sido el proyecto *Exploración Digital del Espacio Sloan* (SDSS), subvencionado por la fundación Alfred P. Sloan y realizado desde el observatorio “Apache Point” de Nuevo México y el proyecto *2dF Galaxy Redshift Survey* (2dfGRS) elaborado en el

⁷³ ((de Lapparent, Geller, and Huchra 1986) Pág. L1)

Observatorio Anglo-Australiano. Por su gran valor científico, de cara al estudio de la homogeneidad, isotropía y composición del universo, se adjunta una imagen de cada uno de ellos.

El primero que se realizó, entre los años 1997 y 2003 fue el 2dfGRS.

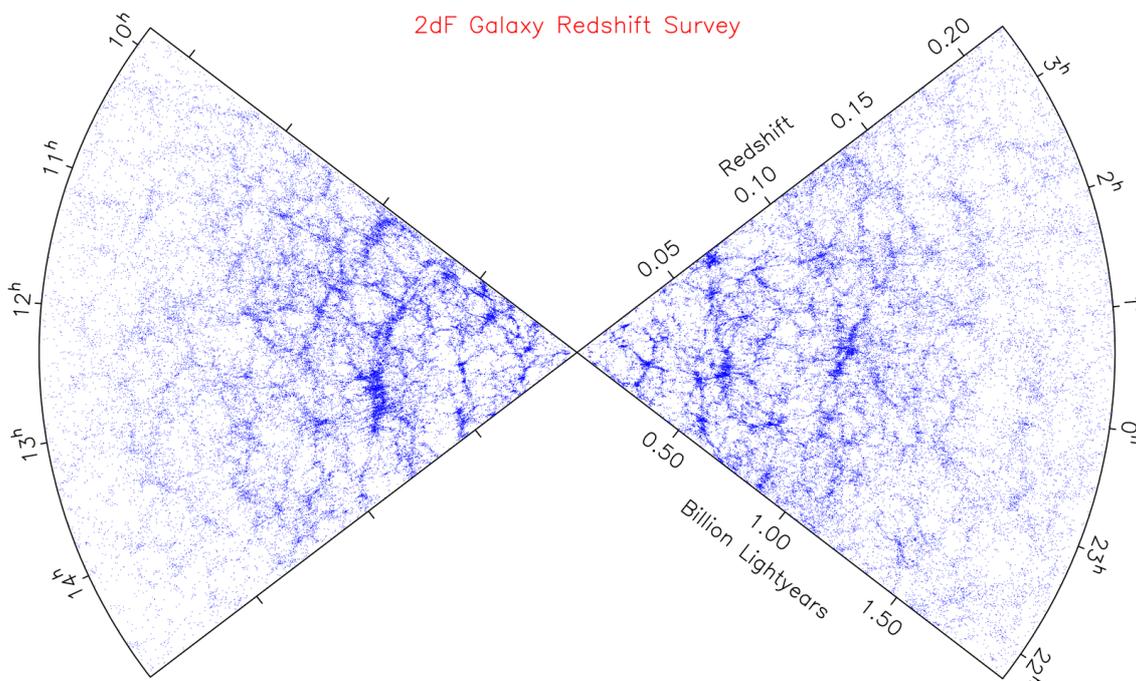


Figura 2.3. Cartografiado realizado con el instrumento 2dF (*2 degree Field*) por el observatorio Anglo-Australiano (1997-2003)⁷⁴. La imagen muestra la distribución de aproximadamente 75.000 galaxias. El proyecto cartografió galaxias situadas hasta distancias de 2.000 millones de años luz y desplazamientos al rojo superiores a $0'2$ ($z = v/c$). Las “lascas” de universo mostrado son de 5 grados de ancho, una apunta a una declinación de $7'5^\circ$ y la otra de -15° , y como se ven abarcan una ascensión recta de unos 75° . La disminución de galaxias con la distancia se debe al sesgo de Malmquist, al aumentar la distancia sólo se detectan las más brillantes.

Casi en paralelo se desarrolló el proyecto de cartografiado del SDSS, entre los años 2000 y 2006. Éste ha proporcionado el cartografiado más amplio realizado hasta el momento abarcando una cuarta parte del cielo visible. El telescopio utilizado es de ángulo amplio y de 2,5 metros de diámetro y las imágenes se han tomado en el espectro visible y en el espectro de corrimiento al rojo. El proyecto ha llegado a cartografiar 100

⁷⁴ Para saber más: <http://magnum.anu.edu.au/~TDFgg/>. Página oficial del 2dF GRS.

millones de objetos y el espectro de 1 millón de ellos. Uno de sus descubrimientos ha sido la gran muralla de Sloan que mide 1.370 millones de años luz, es la mayor estructura del universo conocido. En el año 2006 la exploración dejó de centrarse en el estudio de la estructura del universo a gran escala comenzó a estudiar la estructura y composición de la Vía Láctea.

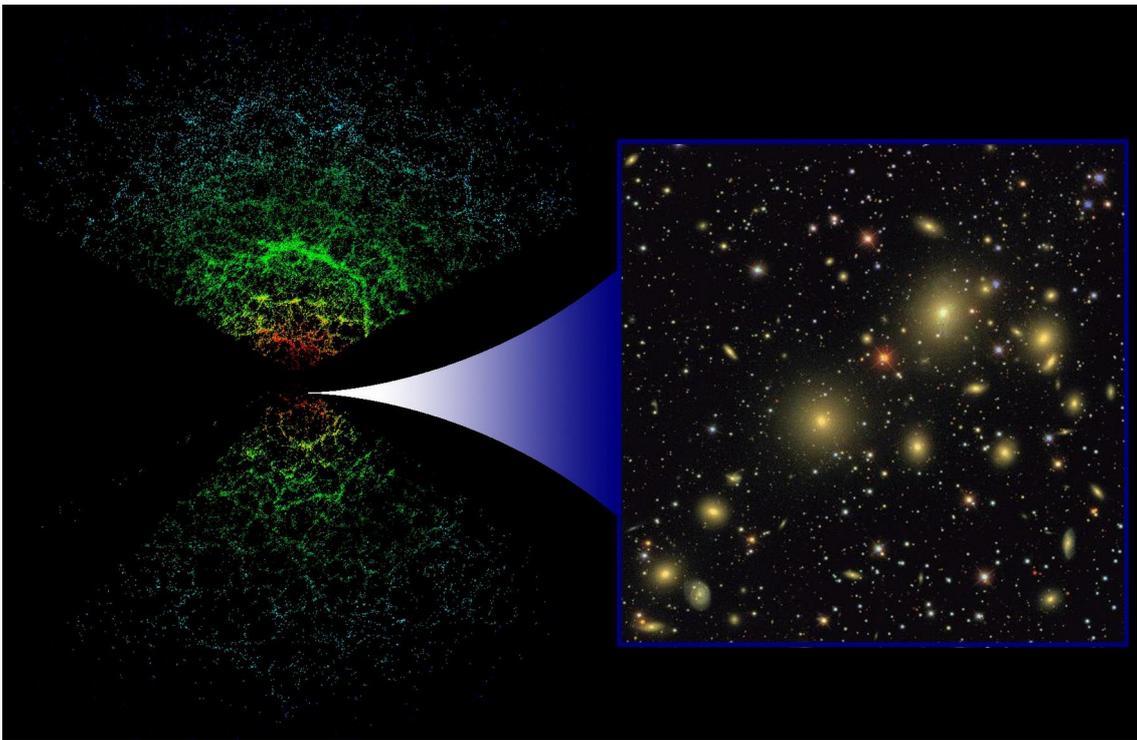


Figura 2.4. Imagen del SDSS publicada en 2003 cuando el proyecto ya había cartografiado 200.000 galaxias. Su objetivo final (2006) fue cartografiar 1 millón de galaxias para representarlas en tres dimensiones. En la parte superior de la imagen se observa la mayor estructura conocida, la muralla Sloan.

Los resultados obtenidos con este proyecto han sido fundamentales, la estructura a gran escala de los mapas del SDSS de galaxias, quásares y gas intergaláctico se ha convertido en un pilar central del modelo cosmológico estándar, para comprender la historia y futuro del universo. Los datos del SDSS han ayudado a demostrar que el universo está dominado por la materia oscura y la energía oscura, al mismo tiempo que apunta que las fluctuaciones cuánticas de la materia en el universo joven parece ser la causa de la estructura a gran escala del universo actual. Los resultados de este magnífico proyecto, constituyen el mayor catálogo actualizado del cielo, con un radio de 2000 millones de años luz.

2.2.2. ¿Como se formaron las estructuras?

En la década de 1960 surgió la gran pregunta; si el universo es homogéneo en las escalas mayores que somos capaces de observar, ¿cuál es el origen de las estructuras locales? Las preguntas se aumentaron en 1965 cuando se detectó la radiación cósmica de microondas y quedó descartado el modelo del estado estacionario. Si el universo había empezado con el big bang ¿cómo se habían formado estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias? y ¿cómo pueden formarse cúmulos de galaxias en un universo en expansión? El debate sobre el origen de las estructuras y su evolución se convirtió en un tema central de la cosmología. Se pensaba que en el universo primitivo se debía haber producido algún tipo de fluctuaciones seminales en el plasma caliente que por efecto de las fuerzas gravitatorias impulsaron la agrupación de materia hasta producir galaxias y cúmulos de galaxias. Se hizo evidente que la cosmología no podía quedar limitada al estudio de los parámetros globales del universo como H_0 , q_0 o Ω_m , una buena teoría cosmológica, debía ser capaz de explicar el proceso, nada trivial, de la formación y evolución de las estructuras cósmicas.

Para poder abordar la formación de estructuras, se debían que tener presentes tres procesos. Dos disgregan la materia: la expansión del universo y la agitación térmica, frente a la acción de las fuerzas gravitatorias que la agrupan. Además, se debía tener en cuenta que todos estos procesos había que estudiarlos en una época del universo remota, cercana al big bang en la que el universo primitivo debía tener una temperatura y ritmo de expansión elevados, que no favorecían la agregación de la materia.

Por otro lado, si las perturbaciones del plasma primitivo hubieran sido muy pequeñas, el universo seguiría siendo uniforme. Si hubieran sido demasiado grandes, la masa del universo habría colapsado dando lugar al nacimiento de agujeros negros de tamaño cósmico con lo que tampoco estaríamos aquí. La realidad fue que las condiciones fueron favorables, el 10% de la materia se agrupó, primero formando estrellas y luego galaxias⁷⁵, estructuras medias del universo, que no se expanden en el seno de un universo en expansión, sino que mantienen un equilibrio interno de distancias.

75 ((J. Ostriker and Mitton 2014) Pág.152). La formación de galaxias se produjo aproximadamente 600 millones de años después del big bang.

El primer astrónomo que estudió el proceso de formación de las estructuras del universo fue James H. Jeans (1877-1946). En 1902 presentó su trabajo sobre formación de estrellas a partir de nebulosas estables, demostró cómo pequeñas perturbaciones de materia podían crecer, sólo en base a los efectos de las fuerzas gravitatorias, hasta formar estrellas. La masa crítica, a partir de la que este proceso se puede iniciar, se llama “masa de Jeans” en su honor. Jeans estudió cómo se compensaban los efectos de agitación térmica de la materia con los efectos aglutinantes de las fuerzas gravitatorias, en un universo que todavía no se sabía que estaba en expansión.

Durante décadas los cosmólogos no enfrentaron la cuestión de la formación de las galaxias, estudiaban las galaxias como bloques básicos del edificio del universo, sin profundizar en su origen y evolución.

Finalmente, en la década de 1960 dos grupos de investigadores, de forma independiente, la escuela de Moscú con Yakov Zeldovich (1914-1987) y Rashid Sunyaev (n.1943) por un lado y la de Princeton con James Peebles (n. 1935) al frente, empezaron a estudiar las consecuencias de la inestabilidad gravitatoria clásica. Los primeros publicaron dos artículos bajo el título, *The interaction of matter and radiation in the hot model of the universe*⁷⁶. Por su lado, Peebles publicó numerosos artículos sobre el tema, pero se puede mencionar el libro de 1980, *The large-scale structure of the universe*, que incluye sus trabajos de dos décadas de investigación.

Una de las conclusiones, de ambos grupos, fue que las regiones más densas del universo debían expandirse más lentamente que las regiones con valores medios, ya que deben compensar una gravedad mayor, tendiendo a ser relativamente más densas. Por el mismo motivo, las regiones con menor densidad tenderán a expandirse más rápidamente que que las promedio, tornándose más diluidas en materia⁷⁷. Sus estudios fueron una actualización de los estudios de Jeans, de principios de siglo. Se desarrollaron las complejas matemáticas que describían el desarrollo y crecimiento de las estructuras en el universo.

76 El primer artículo fue publicado en 1969 y el segundo en 1970.

77 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág.162.

Los dos equipos trabajaron también en el problema de las fluctuaciones seminales del universo primitivo, estudiando cuáles debían ser los intervalos precisos de su densidad en la era de la recombinación⁷⁸ en la que se formaron los átomos de hidrógeno (380.000 años después del big bang aproximadamente, cuando había un desplazamiento al rojo de 1.000) para que se pudiera iniciar la formación de estructuras actuales. Ni demasiado pequeñas para romper la homogeneidad inicial, ni demasiado grandes para no colapsar masivamente antes de llegar a formarlas⁷⁹.

Antes de la época de la recombinación las ondas electromagnéticas no podían viajar por el universo, los electrones libres se comportaban como “niebla” para los fotones. Por este motivo, no podemos “ver” el universo anterior a esta época. Cuando en 1965, se confirmó la existencia de la huella de la recombinación primigenia, la radiación cósmica de fondo⁸⁰ (*Cosmic Microwave Background* o CMB), se pensó que un cartografiado de esta radiación debía indicar algún tipo de fluctuación en la materia de aquel momento. Las zonas más densas debían ser más brillantes, tener por tanto más temperatura, por el contrario que las zonas menos densas que debían ser más frías y en consecuencia menos brillantes.

En la década de 1960 los cosmólogos pensaban, a partir de sus cálculos, que aunque la materia debía tener fluctuaciones desde los tiempos más antiguos, para poder arrancar el proceso de agregación de la materia, las galaxias no se habrían formado hasta que el universo no hubiera alcanzado un desplazamiento al rojo inferior a 100 en una edad aproximada de 30 millones de años. En ese momento, habría bastado que el gas interestelar que alimentara la formación de las majestuosas galaxias hubiera tenido un exceso de densidad, respecto al resto del medio interestelar de una parte por 100.000 ($1/10^5$).

78 Recordemos de forma breve que el modelo del big bang explica que el universo pasa por varias “eras” o etapas diferentes en su desarrollo en sus primeras épocas. La era de Planck ($10^{-43}\text{s} < t < 10^{-35}\text{s}$), la de la gran unificación ($10^{-35}\text{s} < t < 10^{-11}\text{s}$), la electrodébil ($10^{-11}\text{s} < t < 10^{-6}\text{s}$), la hadrónica ($10^{-6}\text{s} < t < 1\text{s}$), la nucleosíntesis ($1\text{s} < t < 1000\text{s}$ - 15 min), la de la recombinación ($t > 380.000$ años) y la de formación de estructuras ($t > 30$ millones de años).

79 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág. 163.

80 Formada por la luz de los fotones que pudieron viajar libremente cuando los electrones quedaron ligados a los núcleos atómicos en la época de la recombinación. Actualmente, por el enfriamiento debido a la expansión del universo, se detecta en el espectro electromagnético de microondas.

A partir de la década de 1970 comienzan a publicarse artículos que reflejan que el “problema de formación de las estructuras del universo”, se convierte en un problema central de la cosmología. En 1972 James E. Gunn (n.1938) y J.R. Gott (n.1947) en un brillante artículo titulado, *On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution*, demostraron que aunque la densidad del universo sea inferior a la densidad crítica, el proceso de agregación de la materia para construir estructuras, tanto galaxias como cúmulos, sólo se producirá si la densidad “local” es algo superior a la densidad crítica⁸¹. En 1977, Martin Rees (n.1942) y Jeremiah P. Ostriker (n.1937), publicaron el estudio análogo, *Cooling, dynamics and fragmentation of massive gas clouds: clues to the masses and radii of galaxies and clusters*, en el que estudiaron el proceso físico determinante en las masas y radios de las galaxias, también estudiaron la época en que tuvo que empezar su formación⁸². Un poco más tarde, en 1978 M. Rees y Simon White (n. 1951), *Core condensation in heavy halos: a two-stage theory for galaxy formation and clustering*. Este artículo es importante porque ya incluye la importancia de la materia oscura en la formación de galaxias y cúmulos de ellas. El modelo que proponen parte de una densidad media de la materia del universo del 20% de la crítica, dentro de la cual la componente de materia oscura debía ser del 80% a la vista de la dinámica de los cúmulos de galaxias⁸³. Hoy sabemos, a partir de los datos de la sonda WMAP que la proporción de materia en el universo es del 27% de la densidad crítica y que dentro de la misma el 85% es materia oscura, por lo que su modelo estuvo bien planteado.

A partir de entonces, comenzó la búsqueda de las fluctuaciones que se esperaba habían impulsado la formación de estructuras. Se predijo que cuando se detectaran diferencias de $1/10^5$ en la radiación cósmica de fondo habrían quedado localizadas. A nivel histórico vale la pena mencionar que en el verano de 1953, George Gamow dio una conferencia sobre cosmología en la Universidad de Michigan, exponía su visión de la formación de los elementos en el big bang caliente. Mencionaba la idea de un “mar

81 (Gunn and Gott 1972) Pág. 3.

82 (Rees and Ostriker 1977) Pág. 557.

83 (White and Rees 1978) Págs. 341.

de radiación térmica” que se enfría con la expansión del universo⁸⁴. Este hecho es importante, porque los documentos publicados por el simposio, supone la primera referencia escrita explícita a la radiación cósmica de fondo. También planteó, que el momento en que el universo pasaba de estar dominado por la energía a estar dominado por la masa, determinaría la masa a la que se formarían las galaxias. Expuso que las nubes de gas que se podían convertir en galaxias debían estar definidas por la longitud y masa de Jeans. Mínimos que luego se descubrió que eran aproximadamente la masa y diámetro de las galaxias medias. Por todo ello, el brillante Gamow se convirtió en el primer cosmólogo que relacionó la radiación cósmica de fondo con la formación de estructura en el universo. Lamentablemente, no publicó sus resultados en ninguna revista científica, por lo que sus ideas no fueron suficientemente divulgadas ni desarrolladas en la comunidad científica. En este momento, entre 1948 y 1965, la cosmología física estaba dividida entre la validez del modelo estacionario o el modelo del big bang y la observacional volcada en la búsqueda de H_0 y q_0 .

El descubrimiento fortuito de la radiación cósmica de fondo (*Cosmic Microwave Background*, CMB) en 1963 por Penzias y Wilson cambió completamente el desarrollo de la cosmología. El modelo estacionario quedó definitivamente desestimado y se interpretó la radiación cósmica de fondo como una prueba del big bang. Aunque la relación entre las eventuales anisotropías de la CMB y las fluctuaciones seminales de materia eran conocidas teóricamente desde la década de 1970, hasta la década de 1990 no se dispuso de los instrumentos con la sensibilidad necesaria para poder detectarla. Los experimentos con radiotelescopios terrestres en la franja de microondas evidenciaron que no eran aptos para captar las sutiles diferencias, de 10 partes por millón o 10^{-5} , que debían ser detectadas.

Hoy sabemos que para que las regiones donde se inicia la formación de estructuras tengan una densidad de materia superior a la crítica, hace falta que también exista materia oscura. De tal manera, que las fuerzas gravitatorias sean lo suficientemente intensas para iniciar el proceso de formación. Los últimos datos indican que la materia oscura está en la proporción exacta para el inicio de la formación de las estructuras. No solo galaxias sino también cúmulos de galaxias. Lo único que se ha de cumplir para

84 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pags. 175-176.

iniciar la formación de cúmulos de galaxias es que la densidad media de galaxias sea superior al valor crítico. Las simulaciones por ordenador han confirmado las predicciones teóricas en el caso de formación de una única galaxia.

Por último, mencionar la imagen tomada en el espectro visible llamada Campo Ultra Profundo del Hubble (*Hubble Ultra Deep Field* o HUDF) obtenida entre septiembre de 2003 y enero de 2004 con el telescopio espacial Hubble. Es una prueba más de cómo las galaxias se han desarrollado, la imagen evidencia la gran variedad de estructuras del universo y su antigüedad. Las galaxias menos luminosas y más lejanas estaban formadas 600 millones de años después del big bang.

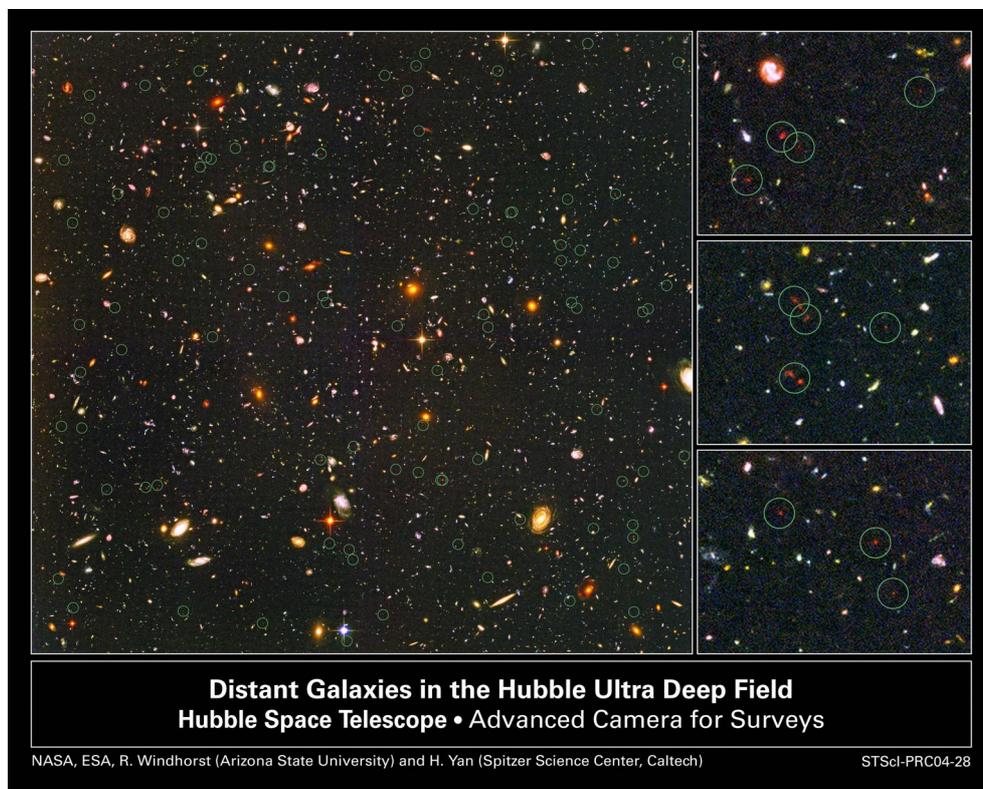


Figura 2.5. Imagen del Campo Ultra Profundo del Hubble (ESA/HUDF-JD2) en la que se han resaltado las galaxias más antiguas, con mayor desplazamiento al rojo.

2.2.3. Historia de los satélites COBE y WMAP

En 1975, a petición de los astrónomos, la NASA accedió a utilizar un satélite *Explorer* para misiones astronómicas, con el fin de obtener datos mejores del firmamento en el entorno libre de “ruido” del espacio. Se presentaron 121 proyectos, tres de los cuales proponían medir la radiación de fondo de microondas (CMB) para estudiar si en ella había rastros de las semillas primigenias de materia. Entre todas las

propuestas fue elegida la de la misión IRAS (*Infrared Astronomy Satellite*). No obstante, la NASA no desestimó el valor científico de una misión cuyo objetivo fuera medir con precisión la CMB. En 1976 la NASA sugirió utilizar un satélite lanzado desde un transbordador espacial que entrara en órbita polar y pidió a un representante de cada uno de los tres proyectos presentados en 1975 que trabajaran juntos para lograrlo. El satélite fue llamado *Cosmic Background Explorer* (COBE) y empezó a construirse en 1981. Estaba previsto que se lanzara a en 1988, pero la tragedia del transbordador *Challenger* de 1986, paró los lanzamientos del transbordador espacial.

Finalmente, el COBE fue lanzado en un cohete Delta en 1989, después de llevar cuatro años construido y almacenado esperando ser puesto en órbita. El satélite estaba equipado con tres instrumentos para realizar las medidas. En primer lugar, un Radiómetro Diferencial de Microondas (*Differential Microwave Radiometer* o DMR) para medir las esperadas irregularidades o anisotropías en la CMB, el responsable de este equipo era George F. Smoot (n.1945). En segundo lugar un Espectrofotómetro Absoluto del Infrarrojo Lejano (*Far Infrared Absolute Spectrophotometer* o FIRAS) para medir el espectro de la CMB, bajo la dirección técnica de John C. Mather (n.1946). Por último, también llevaba un “Experimento Difuso para el Fondo de Infrarrojos” (*Diffuse Infrared Background Experiment*, DIRBE), un detector de infrarrojo de múltiple longitud de onda cuyo objetivo era mapear las emisiones del polvo interestelar, su supervisor fue Mike Hauser.

El 13 de enero de 1990 la NASA difundió los primeros resultados, en la American Astronomical Society en Virginia. Aunque el satélite necesitaba un año más para completar un mapa completo del cielo, ya se disponía de un espectro que mostraba la intensidad de la CMB en función de la longitud de onda, tomada en una pequeña porción de cielo rastreada durante 9 minutos. Los resultados eran sorprendentes, se había obtenido una curva de radiación de “cuerpo negro⁸⁵” interpolando todos los datos, con su máximo en la temperatura de $2'736\pm 0'017\text{K}$, la temperatura actual de la CMB. Los primeros resultados fueron tan sorprendentemente concordante con las predicciones

⁸⁵ Estas curvas de radiación electromagnética de todos los cuerpos que tienen temperatura fue deducida por Max Planck en 1901.

teóricas, que el modelo estándar del big bang caliente de Friedman-Lemaître-Gamow quedó nuevamente consolidado.

Ese mismo día en Princeton, David T. Wilkinson (1935-2002), uno de los miembros de la misión COBE, también presentó los resultados obtenidos. Igual que en Virginia se produjo una ovación al observar la gráfica de radiación de cuerpo negro, pero instantáneamente surgió la pregunta de si las fluctuaciones detectadas eran suficientes para generar las estructuras del universo, la respuesta fue que también debía haber una gran cantidad de materia oscura para que el ritmo de crecimiento fuera el adecuado para llegar a formar las estructuras que se observan en la actualidad.

En 1992 se dispuso de los datos completos del COBE. Además de la confirmación de la radiación de cuerpo negro ya mencionada arriba, centrada en una temperatura próxima a los 3K, se obtuvo el valor de la velocidad de nuestra galaxia en su desplazamiento hacia el cúmulo de Virgo, y las buscadas fluctuaciones seminales de la materia.

La velocidad con la que nuestra galaxia se mueve hacia el cúmulo de Virgo resultó ser de 600 Km/s aproximadamente, respecto al marco de referencia en reposo dado por la radiación cósmica de microondas. Se obtuvo gracias a un patrón “dipolar” de variaciones en las temperaturas muy concreto, que tenía dos posibles valores, un valor próximo a +0'1% de densidad, sobre la densidad media en un octante del cielo, y otro con un valor próximo al -0'1% de densidad también sobre el valor medio, en otro octante de cielo, tal y como se muestra en la figura.

La componente debida al movimiento de la galaxia, y de todo el Grupo Local, respecto a al CMB fue fácil de restar al mapa general de datos obtenido. El resultado final fue, sorprendente, encajando de forma precisa con la predicción teórica, se obtuvo el valor necesario para que se produjera la conformación de estructuras en el universo. Las variaciones entre los máximos y mínimos del mapa celeste obtenido, eran justamente de 1 parte sobre 100.000. Se había obtenido el mapa de anisotropías buscado.

La misión COBE resultó ser uno de los proyectos más exitosos en la historia de la cosmología, los medios de comunicación y la sociedad hicieron eco de ello. De hecho, ha sido considerado como el punto de partida de la cosmología como una ciencia de

precisión. G. F. Smoot y J. C. Mather recibieron el Premio Nobel de Física en 2006 por su trabajo en la misión, por haber obtenido la curva de radiación de cuerpo negro y el mapa de las anisotropías de la CMB, las buscadas irregularidades seminales primigenias responsables de la formación de estructuras el universo.

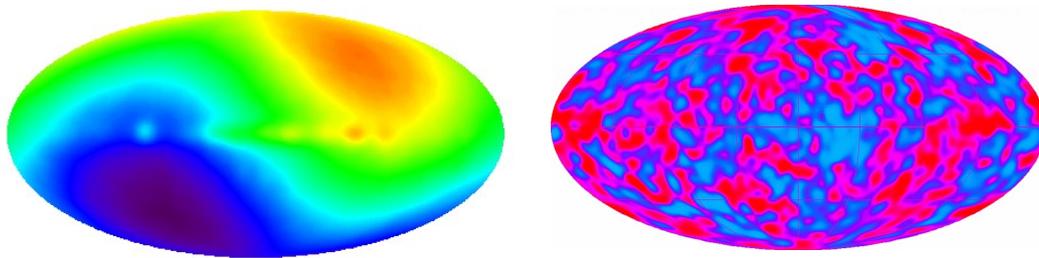


Figura 2.6. Imágenes de la misión COBE (NASA/COBE). Ambas imágenes fueron tomadas con el Radiómetro Diferencial de Microondas (DMR). La primera muestra la variación dipolar debida al movimiento de la galaxia. La segunda fue la imagen de las buscadas fluctuaciones seminales en la radiación cósmica de fondo (CMB). Las áreas representadas en rojo son las de mayor temperatura.

La misión que siguió al COBE en busca de datos más precisos fue la de la sonda WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), fue lanzada en junio de 2001 y rebautizada con el nombre de David T. Wilkinson, jefe del equipo del COBE que murió en 2002 sin poder estudiar los datos de la segunda misión. La misión de la WMAP fue dirigida por los astrónomos de Princeton Lyman A. Page (n.1957) y David Spergel (n.1961). Los datos más precisos que arrojó la misión fueron que las temperaturas detectadas oscilaban entre los valores de $2'7251\text{ K}$ y $2'7249\text{ K}$ ⁸⁶, los lugares más calientes eran las buscadas zonas del cosmos donde con el paso del tiempo se formarían galaxias. La mediciones de la WMAP afinaron el conocimiento de la masa, la edad, la geometría y en resumen el destino del universo.

2.3. ¿Un origen inflacionario?

El modelo del *big bang* caliente se había acabado de perfilar a finales de 1970, y parecía funcionar bien en muchos aspectos, pero había importantes cuestiones que no era capaz de resolver: el problema del horizonte, el de la planitud y el de los monopolos

⁸⁶ (J. Ostriker and Mitton 2014) Págs. 179-180.

magnéticos. En 1980 Alan Guth (n. 1947) ofreció una importante aportación a nivel teórico, la teoría inflacionaria, con la que que estos problemas quedaban resueltos.

2.3.1. Los problemas del big bang

El “problema del horizonte”, detectado a mediados de la década de 1970, consiste en que en el modelo del *big bang* caliente de Friedmann-Lemaître-Gamow, constituido únicamente por materia y radiación, el universo se dispersa antes de alcanzar el equilibrio. En cambio, el universo actual es uniforme e isótropo, las observaciones muestran que los cuásares más lejanos del hemisferio norte y del hemisferio sur, que no han estado nunca en contacto, son individualmente diferentes pero estadísticamente idénticos. Sin embargo, la distancia que la luz ha recorrido desde el *big bang* es inferior a las distancias que los separan, por lo que no han podido intercambiar ningún tipo de información. Una realidad que se había dado por sentada en el modelo del big bang, la homogeneidad e isotropía del universo, empezó a ser cuestionada seriamente, su porqué no tenía fácil respuesta.

El “problema de la planitud”, tal y como lo expone A.Guth en su obra de 1999: *El universo inflacionario*⁸⁷, está relacionado con el parámetro de densidad del universo⁸⁸. Para los cosmólogos la densidad crítica⁸⁹ del universo se hallaba entre los valores: $4'5 \cdot 10^{-30}$ y $1'8 \cdot 10^{-29}$ g/cm³, donde la incertidumbre se debía a la incertidumbre en la constante de Hubble⁹⁰. Pues bien, con esta referencia teórica y los datos observacionales de que se disponía, el parámetro densidad resultaba estar entre 0'1 y 2, $0'1 < \Omega_m < 2$ ⁹¹. La clave del “problema de la planitud” surge cuando se lleva el tiempo hacia atrás, si se observa la evolución del parámetro densidad en los primeros 30 segundos del universo,

87 (Guth 1999) Págs. 40-45.

88 Recordemos, tal y como se desarrolló en 2.1.4. que el parámetro densidad de materia, se define como el cociente ente la densidad del universo y la densidad crítica: $\Omega_m = \rho/\rho_c$.

89 La densidad crítica es aquella para la que la expansión del universo es compensada con la masa del mismo dando lugar a un universo geoméricamente plano.

90 El parámetro densidad queda relacionado con la constante de Hubble, H, con la siguiente expresión: $\Omega_m = \rho/\rho_c = ((8\pi/3)G\rho)/H^2$ ((Guth 1981) Pág. 347), donde G es la constante de gravitación universal: $6'67384 \cdot 10^{-11}$ Nm²/Kg².

91 Una curiosidad histórica: en su primer artículo de 1981 ((Guth 1981) Pág.347), quince años antes de los datos arriba señalados, el margen que se señalaba para el parámetro densidad era más amplio: $0'01 < \Omega_m < 10$, no obstante, el “problema de la planitud” ya era evidente, tal y como tan magistralmente había expuesto R. Dicke en su conferencia en la universidad de Cornell en noviembre de 1978.

éste resulta variar enormemente si se aleja por centésimas del valor 1 en el origen del universo. Si después del orden de 10.000 millones de años tras el big bang, el valor del parámetro densidad es tan próximo a la unidad, al universo geoméricamente plano, en su origen, el parámetro densidad debió estar alrededor de la unidad, un segundo⁹² después del big bang, con un error absoluto inferior a 10^{-15} . Aquí se produjo uno de los sorprendentes ajustes del universo, para un parámetro densidad inicial de $1-10^{-15}$ la densidad del universo se habría reducido con tanta rapidez que las galaxias no hubieran tenido tiempo de formarse, para un valor del parámetro densidad de $1+10^{-15}$ el universo habría alcanzado un tamaño máximo y habría colapsado por su masa antes de que las galaxias hubieran podido formarse⁹³. El “problema de la planitud” surgía ante la baja probabilidad de un valor tan preciso para el parámetro densidad un segundo después del big bang. Hacía falta un marco teórico que pudiera explicar este ajustado valor del parámetro densidad en los inicios del universo.

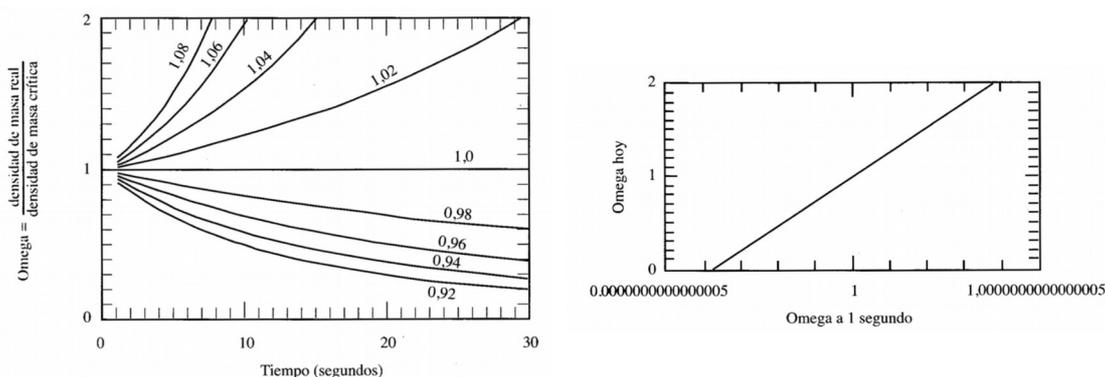


Figura 2.7. La primera imagen muestra la evolución del parámetro densidad entre el primero y trigésimo segundo del universo, se observa la rápida evolución de las curvas que se separan dos décimas de la unidad. La segunda imagen señala el pequeño margen de valores entre los que pudo oscilar el parámetro densidad un segundo después del big bang. (eje de abscisas) para presentar el intervalo de valores actuales (eje de ordenadas). Nótese que los intervalos para el eje de abscisas son de 10^{-16} . (Fuente: (Guth 1999) Pág.43).

92 En un tiempo de un segundo después del big bang se había iniciado la nucleosíntesis primigenia del universo, pero lo que es más importante, para este tiempo existen “evidencias empíricas directas” de la exactitud del modelo del big bang.

93 Este fino ajuste significa sin notación científica que el parámetro densidad debía hallarse 1 segundo después del big bang dentro del siguiente intervalo: (0'9999999999999999, 1'0000000000000001).

El tercer problema, era el de los monopolos magnéticos, partículas estables y pesadas que podrían imaginarse como densos nudos de campo magnético las previsiones teóricas indicaban que el universo debía contener un alto porcentaje de estas partículas, que sin embargo, no se habían detectado.

2.3.2. Transición de fase e inflación cósmica

A. Guth, especialista en física de partículas y monopolos magnéticos, trabajaba en la universidad de Cornell, cuando asistió a una conferencia de Robert Dicke (1916-1997) en noviembre de 1978 sobre el big bang. En ella exponía la idea de que algo importante le debía faltar al modelo cosmológico estándar para poder explicar el “problema de la planitud”. Poco después asistió a una conferencia de Steven Weinberg (n.1933) sobre la gran teoría unificada, teoría según la cual, tres de las fuerzas primordiales, la electromagnética, la nuclear fuerte y la débil, podían combinarse en una única teoría, además que comprendió las transiciones de fase del universo primitivo⁹⁴.

Guth tuvo la idea de que si el universo primitivo hubiera experimentado un breve periodo de inflación, en la que la expansión hubiera sido exponencial, estos problemas desaparecerían. Imaginó un universo con las fuerzas nucleares y electromagnéticas en equilibrio y con una gran cantidad de energía latente. Este universo se iba expandiendo y su temperatura bajando, hasta que al llegar a un valor crítico la simetría de fuerzas se rompió y comenzaron a dominar las nucleares frente a las electromagnéticas, tal y como pasa en el universo actual, todo el calor latente que tenía ese universo primitivo se habría liberado provocando una expansión exponencial. El fenómeno sería similar, salvando las distancias, al cambio de fase del agua cuando pasa de líquida a sólida, libera energía interior y se dilata. Guth publicó sus innovadoras ideas en enero de 1981 en un artículo titulado: *Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems*.

Calculó que la transición tenía que haberse producido 10^{-34} segundos después del big bang, momento en el que la luz podía haber recorrido hasta entonces $3 \cdot 10^{-26}$ metros. La expansión exponencial, que sólo se habría producido entre los 10^{-34} y 10^{-32} segundos habría provocado una inflación del espacio en un factor de 10^{43} o e^{100} , hasta los $3 \cdot 10^{17}$

94 (Guth 1999) Págs. 38, 134-142.

metros. Ese diámetro del universo tras la inflación se correspondería, por la expansión normal del universo con un diámetro actual de $3 \cdot 10^{42}$ metros, muy superior al universo observable de 10^{26} metros de diámetro⁹⁵.

Una de las consecuencias de esta inflación cósmica en este pequeño intervalo de tiempo, es que el universo que podemos observar, nació en una región lo suficientemente pequeña para que todas sus partes estuvieran en contacto causal y así explicar el problema del horizonte, es decir, la isotropía⁹⁶ a grandes escalas que tiene el universo visible. Si el universo fue isótropo en sus orígenes, es normal que lo siga siendo en la actualidad.

Respecto al “problema de la planitud”, si el universo sufrió una expansión exponencial, se produjo un estiramiento de la geometría del universo que habría “alisado” las arrugas que se hubieran podido producir en el principio.

Por último, los monopolos magnéticos no se podían producir con la disminución de la temperatura y la aceleración de la expansión, lo que explicaría su ausencia.

Guth pudo proponer este importante salto de gigante en el marco teórico de la cosmología porque tenía una sólida formación en física de partículas. Hoy la cosmología se ha convertido en una disciplina que exige ser especialista en amplios ámbitos de la física. Se cree que el universo inflacionario debía contener bosones de Higgs, y el Gran Colisionador de Hadrones de Ginebra (*Large Hadron Collider, LHC*), el instrumento científico mayor y más caro que se ha construido, parece haberlos detectado en 2012. Esto ha sido un gran apoyo para el paradigma inflacionario.

2.3.3. Fluctuaciones cuánticas

Desde que aparece la teoría inflacionaria, surge la idea de que en estos tempranos momentos del universo se podrían encontrar las semillas de las perturbaciones que con el tiempo hubieran dado lugar a las estructuras actuales del cosmos. De forma análoga a como con la solidificación del agua aparecen partículas sólidas independientes, la versión original de la teoría inflacionaria, proponía un caos primigenio que se condensaba y producía grandes perturbaciones. En una revisión posterior de la teoría,

95 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág 171.

96 La isotropía implica que las propiedades son idéntica en todas las direcciones del espacio.

las perturbaciones no habrían sido tan grandes⁹⁷, pero suficientes para convertirse en semillas de las estructuras del universo actual tras la expansión exponencial, del orden de 10^{43} , que se habría producido durante el periodo inflacionario la inflación.

Para describir el proceso han sido muy importantes el trabajo teórico de 1983 de James Bardeen (n. 1939), Paul Steinhardt (n. 1952) y Michael S. Turner (n.1949), *Spontaneous creation of almost scale-free density perturbations in an inflationary universe*, que profundizó en las escalas de las fluctuaciones y predijeron el espectro de las perturbaciones que posteriormente se detectaron en la radiación cósmica de fondo. Lo importante de este desarrollo teórico es que se ofreció dentro de la teoría inflacionaria un marco para explicar las fluctuaciones de la densidad en el universo primigenio, cosa que el modelo tradicional estándar del big bang no podía hacer.

A principios de la década de 1970 tres físicos, de manera independiente, habían llegado a los mismos resultados teóricos que con el modelo inflacionario. Se trata de Edward R. Harrison (1919-2007), Y. B. Zeldovich y Jim Peebles, también habían sugerido que el espectro de las perturbación debía de ser independiente de la escala⁹⁸. Es decir, que en todos los momentos en la evolución del universo, las perturbaciones en la escala máxima, la del horizonte⁹⁹, debía tener la misma pequeña amplitud. Si no hubiera sido así, en el pasado o en el futuro del universo, las perturbaciones cósmicas habrían sido tan grandes que grandes porciones del universo habrían colapsado en agujeros negros.

Los datos del satélite COBE y posteriores confirmaron la predicción del modelo inflacionario y de las propuestas de Harrison, Zeldovich y Pleebles. En la actualidad, el origen de las fluctuaciones primordiales, sigue siendo una de las áreas de investigación más importantes de la cosmología teórica.

3. LA MATERIA OSCURA SE ABRE CAMINO

97 Para profundizar en los detalles de la difícil predicción teórica de las perturbaciones de la densidad en el universo inflacionario, tanto de los valores aportados por Guth como por Bardeen, Steinhardt y Turner en 1983, ver los capítulos 13 y 14 de (Guth 1999).

98 Estas perturbaciones se piensa que forman un campo aleatorio gaussiano.

99 La escala del horizonte, es la máxima escala en cualquier momento de la historia del universo. Se obtiene multiplicando el tiempo transcurrido desde el big bang, por la velocidad de la luz por el tiempo.

La historia de la aparición de la materia oscura en el mundo de la cosmología no ha sido fácil, hubo que acumular muchas evidencias para que se la aceptara como ingrediente esencial de nuestro universo. Seguimos sin saber profundamente qué es, pero sí la podemos describir por sus efectos; no emite luz, aunque la absorbe, y es sensible y generadora de fuerzas gravitatorias. También sabemos que su proporción es seis veces superior a la llamada materia bariónica, la materia que conocemos en nuestro sistema solar y que tenemos descrita en la tabla periódica de elementos. En este apartado se presentarán las evidencias más importantes que se han ido acumulando a favor de la existencia de la materia oscura.

3.1. La masa de los cúmulos galácticos

El primero en hablar de la materia oscura y darle nombre fue el brillante y excéntrico astrónomo Fritz Zwicky, de origen suizo que en 1925, con 27 años, se trasladó a EEUU y comenzó a trabajar desde los observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar. Zwicky estaba analizando la dinámica de los cúmulos de galaxias y se percató de que la velocidad de las galaxias de esos cúmulos era muy grande, del orden de 1.000 Km/s, velocidad que provocaría su rápida dispersión, pero sin embargo, permanecían unidas en los cúmulos. La masa bariónica, la que se podía deducir a partir del brillo de las galaxias, era insuficiente en un factor de 100 para mantenerlas gravitacionalmente ligadas en la manera que lo estaban, así que razonó que debía existir otro tipo de materia extra, que denominó “materia oscura”, responsable de este fenómeno. Zwicky publicó sus descubrimientos en 1937, en el histórico artículo titulado: *On the Masses of Nebulae and Clusters of Nebulae*, pero hubo que esperar casi 40 años, entrada la década de 1970 para que los estudios sobre la materia oscura reaparecieran.

Antes de avanzar, vamos a profundizar en el revolucionario trabajo de Zwicky. Desde que el ingenioso aristócrata inglés Henry Cavendish (1731-1810), en 1798, calculó la masa de la Tierra y tras ella la constante de gravitación universal, los astrónomos estaban en condiciones de calcular la masas de sistemas gravitatorios formados por dos masas a partir de sus periodos orbitales. La ley de gravitación universal de Newton, $F=GMm/r^2$, era la ley física que de forma invariable regía estos movimientos. En el caso de sistemas más complejos, formados por más de dos masas,

desde estrellas en órbita a galaxias en órbita, los astrónomos utilizan otro principio físico, el teorema de virial¹⁰⁰, que también permite relacionar las masas con la cinemática de los cuerpos en estudio.

Pues bien, Ziwcky se dispuso a estudiar la dinámica de las galaxias del cúmulo de Coma Berenices, eligió este cúmulo porque era más cerrado y simétrico que los de Virgo o Piscis. El objetivo general de su estudio era presentar tres métodos alternativos para el estudio de la masa de las galaxias más allá de los métodos clásicos: la comparación de masa-luminosidad y el estudio de las curvas de rotación de las galaxias. Los tres métodos que aplicó fueron: el método del teorema de virial, el método de las lentes gravitatorias¹⁰¹ y consideraciones análogas al principio de Boltzmann para mecánica estadística. En el caso de su estudio de la masa de las galaxias del cúmulo a partir del teorema de virial halló que las velocidades de las galaxias, eran del orden de 1000 Km/s, lo que significaba que era necesaria una masa total en el cúmulo de 10^{15} masas solares. De hecho, la relación masa-luminosidad¹⁰², respecto a los valores solares, que obtuvo para el cúmulo de Coma fue de 500:1¹⁰³, cuando la relación masa-luminosidad para el disco de nuestra galaxia es de 3:1. Había hallado del orden de 160 veces más masa de la que corresponde a las estrellas en el interior de cada una de esas galaxias. Hoy en día, las mejores mediciones de este cúmulo han dado valores de 300:1 para la relación masa-luminosidad, unas 100 veces superior a su masa visible. También sabemos que los cúmulos galácticos, son las estructuras celestes que forman sistemas gravitatorios con mayor relación masa-luminosidad del universo.

Por el interés histórico del artículo de Zwicky vale la pena citar los fragmentos del artículo que introducen el concepto de “materia oscura”:

100 El teorema de virial es una ecuación que relaciona la energía cinética media de las masas con su energía potencial promedio. Fue desarrollado por Clausius en 1870.

101 Se desarrollará en el apartado 3.4.2.

102 La relación masa-luminosidad es una operación astrofísica en la que se compara la masa del cuerpo celeste en observación, con la masa del Sol, con lo que se obtiene el cociente A. También se compara la luminosidad del objeto en estudio, con la luminosidad del Sol, con lo que se obtiene el cociente B. Finalmente se dividen ambos cocientes, para llegar a una expresión A/B:1, que nos da información de cuanto más masivo que el Sol, es el cuerpo en estudio, para presentar la misma luminosidad del Sol. La relación masa-luminosidad de nuestro Sol, sería el valor de referencia 1:1.

103 (Zwicky 1937) Pág. 232.

“[...] Debemos saber cuánta “materia oscura” está incorporada en las nebulosas en forma de estrellas frías, cuerpos sólidos macroscópicos y microscópicos, y gases.

Por último, debemos saber en qué medida la luminosidad aparente de una nebulosa dada se ve disminuida por la absorción interna de la radiación debido a la presencia de la “materia oscura””¹⁰⁴

3.2. La velocidad de rotación uniforme de las galaxias

El estudio de la masa de las galaxias despegó gracias a las mejoras de los espectrógrafos que se acoplaban a los grandes telescopios, como el telescopio de 100 pulgadas de Monte Wilson. En 1937, el joven H. Babcock utilizó este telescopio para obtener la curva de rotación de la cercana galaxia de Andrómeda, es decir, para estudiar su velocidad angular en función de su distancia al centro galáctico. Se esperaba que la curva siguiera un patrón similar al de la rotación de los planetas del sistema solar, en la que la velocidad de rotación disminuye con la distancia al centro. También se esperaba poder hacer una estimación de la masa de la galaxia, de la misma manera que, que a partir de la velocidad de rotación de cualquier planeta del sistema solar y su distancia al centro del sistema se puede deducir la masa del Sol¹⁰⁵.

Los resultados de este estudio publicado en 1939, *The rotation of the Andromeda Nebula*, fueron sorprendentes, la velocidad de rotación no sólo no disminuía al aumentar el radio galáctico, sino que se mantenía constante, incluso, parecía aumentar a medida que se observaban puntos de la periferia. La única respuesta coherente con este fenómeno era que las galaxias debían poseer más masa a medida que nos alejamos de su centro, de la que parece existir a simple vista. Pero era una respuesta que chocaba con los conocimientos entonces convencionales.

Los estudios de Babcock fueron reforzados por los llevados a cabo en 1942 por Arthur Wyse (1909-1942) y Nicholas Mayall (1906-1993), *Distribution of Mass in the Spiral Nebulae M31 and M33*, acerca de la dinámica de las galaxias M31 y M33.

104 (Zwicky 1937) Pág 218.

105 Si se igualan la fuerza gravitatoria y la fuerza centrípeta, se obtiene: $v = \sqrt{GM/r}$ donde G es la constante de gravitación universal y M es la masa del sol, $M = 2 \cdot 10^{30}$ Kg y r es la distancia al centro del sistema solar.

También se percataron de que la distribución de la masa en la galaxia, para que hubiera concordancia con la curva de rotación, aumentaba significativamente al aumentar el radio. Este resultado era, una vez más sorprendente.

En 1959 F. Khan (1932-2015) y L. Woltjer (n. 1930) publicaron, *Intergalactic Matter and the Galaxy*, sus resultados también apuntaban a que debía haber masa extra en nuestra galaxia o en la vecina galaxia de Andromeda, M31. Se percataron de que de que la gran galaxia vecina de Andrómeda y la Vía Láctea se aproximan a una velocidad de 300 Km/s. Se dispusieron a analizar el fenómeno, porque la observación común es que las galaxias se separan unas de las otras tal y como había demostrado Hubble. La atracción observada, sólo se podía explicar como efecto de las fuerzas gravitatorias, que compensaban e invertían el impulso inicial de big bang. Cuando hicieron las estimaciones de las masas que debía haber detrás de estas galaxias, se observó que era de 10^{12} masas solares, significativamente superior a la masa debida a las estrellas y gas interestelar. Los posteriores estudios de J. Gunn, *Method for Detecting a Cosmological Density of Condensed Objects*, y de J. Oort, *The formation of galaxies and the origin of the high-velocity hydrogen*, tuvieron resultados similares.

En la década de 1970, como se acaba de ver, reaparecieron los estudios que hablaban de la existencia de la materia oscura. En 1973, Ostriker y Peebles, publicaron un artículo, *A Numerical Study of the Stability of Flattened Galaxies: or, can Cold Galaxies Survive?*, en el que exponían que nuestras galaxias y otras similares, con forma achatada, sólo podían mantenerse estables, tal y como reflejaban los estudios matemáticos, si estaban “incrustadas” en una “estructura esférica” de masa similar o superior a la materia visible, pero que no emitiera luz.

En 1974, Ostriker, Peebles y Yahil, publican un nuevo artículo, *The size and mass of galaxies, and the mass of the universe*, que recopilaba estudios previos sobre las curvas de rotación de numerosas galaxias. Señalaban que todos ellos ponían en evidencia que las masas de las galaxias debían ser multiplicadas por 10 o más para poder explicar las curvas de rotación planas de las galaxias estudiadas. En consecuencia, también la masa media total del universo debía ser en el mismo factor superior a la que hasta el momento se había estimado. El problema de la materia oscura volvía a estar en la agenda de los astrofísicos y cosmólogos pero curiosamente todavía no se le volvió a

dar ese ingenioso nombre, “materia oscura”, dado por Zwicky en 1937, toda esa masa extra que no emitía luz debía proceder de “estrellas débiles”¹⁰⁶.

Todos los estudios señalados sobre galaxias espirales dejaban entrever que para que se cumplieran las Leyes de Kepler en la rotación de las galaxias, la mayor parte de la masa de las mismas, el 90%, se distribuía a más de 100 Kpc del centro, cuando la luz de las galaxias se concentra a menos de 10 Kpc del centro. Unos resultados sorprendentes que hacían dudar del teorema de virial y se empezó a hablar en el ámbito de la divulgación científica de “materia ausente” en las regiones exteriores de las galaxias espirales, aunque lo que faltaba era la luz.

También se realizaron estudios sobre las masivas y abundantes galaxias elípticas. En el estudio de Herbert J. Rood de 1974, sobre la dinámica de las galaxias elípticas en sus cúmulos, *Empirical Properties of the Mass Discrepancy in Groups and Clusters of Galaxies*. Obtuvo que su relación masa-luminosidad era de 200:1, cuando la de las galaxias espirales algo superior a 100:1 y la del disco interior de nuestra galaxia de 3:1. Otra vez del orden de 65 veces más masa que luz emitida. A pesar de que el artículo comienza hablando de los resultados obtenidos por Zwicky en el cúmulo de Coma en 1933¹⁰⁷, hubo que esperar a finales de la década de 1980 para que toda la comunidad científica aceptara la “materia oscura” del visionario Zwicky como un componente esencial del universo.

Los datos que empezaron a inclinar la balanza provinieron de instrumentos de medición más potentes, el novedoso espectrógrafo de tubo de imagen fue el equipo utilizado para los datos aportados por el equipo formado por Vera Rubin (n. 1928), Kent Ford (n.1931) y Norbert Thonnar, *Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies. IV - Systematic dynamical properties, SA through SC*. La nueva técnica de naturaleza electrónica permitía medir la velocidad angular de las estrellas más exteriores de las galaxias. Los resultados de las décadas anteriores se repetían con mayor precisión, las curvas de rotación de las estrellas de las galaxias son planas. Lo que implica que la curva de distribución de masa de las galaxias aumenta al aumentar el

106 (J. P. Ostriker, Peebles, and Yahil 1974)

107 (Rood, Herbert J., 1974). Pág. 451.

radio para que se puedan cumplir las leyes de Kepler en las estrellas que giran alejadas del centro galáctico. A modo de cierre se puede citar un último artículo publicado en 1980 por el mismo grupo de investigadores, que compara la rotación de 21 galaxias, *Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 /R = 4kpc/ to UGC 2885 /R = 122 kpc/.*

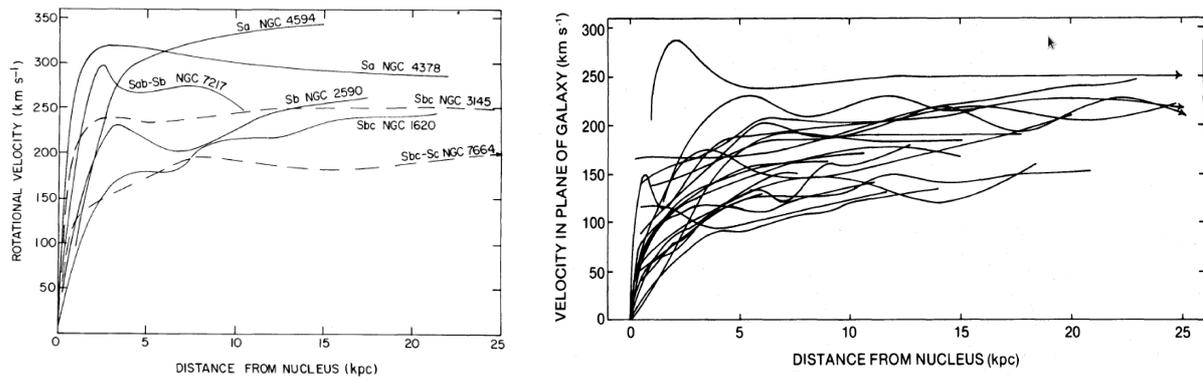


Figura 3.1. La imagen muestra el resultado de dos de los estudios realizados por el equipo formado por Rubin, Kent y Ford. Ambas imágenes muestran las curvas de rotación de galaxias realizadas con el nuevo espectrógrafo de tubo de imagen. La imagen de la izquierda ((Rubin, Thonnard, and Ford, W. K. 1978) Pág. L109) muestra la curva para 7 galaxias. La imagen de la derecha ((Rubin, Thonnard, and Ford, W. K. 1980) Pág.480) presenta los resultados para 21 galaxias. Las evidencias a favor de la materia oscura, cada vez, eran mayores.

A finales de la década de 1980, el salto se había producido, no se podía considerar un modelo del cosmos válido si ignoraba esta materia desconocida que no emitía luz. Su proporción era del orden de 10 veces la masa de las estrellas o 5 veces la masa total atómica y ordinaria del cosmos, teniendo en cuenta no sólo la masa de las estrellas sino también la masa del gas interestelar, muy superior a la masa estelar. Habían pasado 50 años desde la correcta intuición e interpretación de Zwicky de la dinámica de los cúmulos estelares. Hizo falta una buena recopilación de datos para aceptar la existencia de este nuevo y molesto ingrediente cósmico, del que seguimos ignorando su naturaleza.

3.3. Los resultados de los satélites COBE y WMAP

Dos de los experimentos más importantes de la cosmología, las sondas COBE y WMAP, se han dedicado a confirmar si en la CMB (*Cosmic Microwave Background*) ya

estaban presentes las perturbaciones seminales¹⁰⁸ en la densidad de materia que permitirían, por efecto de las leyes de la gravedad, conformar las estructuras del universo actual.

El satélite COBE, *Cosmic Background Explorer*, fue lanzado en 1991 con instrumentación muy sensible, a fin de detectar el espectro de radiación global y sus fluctuaciones tal y como se ha mencionado más arriba¹⁰⁹. Los resultados fueron concluyentes, efectivamente existían fluctuaciones en la distribución primigenia de la materia del universo estudiadas a partir de las variaciones de temperatura de la CMB, pero eran muy pequeñas, del orden de 10^{-5} , insuficientes para generar las perturbaciones gravitatorias necesarias para el desarrollo de las grandes estructuras del universo actual. Sólo podían llegar a producir galaxias y cúmulos de galaxias, si a la materia bariónica se le añadía materia oscura en la misma proporción que existe en el universo actual en galaxias y cúmulos de galaxias. Para que las fluctuaciones seminales de materia que había cartografiado el COBE produjeran las estructuras actuales, era necesario añadir una proporción extra de materia oscura de entre cinco y diez veces la materia atómica¹¹⁰.

Vamos a profundizar en los resultados de los datos de la sonda COBE. Partiremos de la imagen derecha de la figura 2.6., en ella vemos un mapa¹¹¹ de la distribución de temperaturas en el plasma primigenio¹¹² justo después de la recombinación atómica¹¹³, momento en que los electrones quedaron ligados a los núcleos y los fotones pudieron empezar a viajar por el universo en línea recta. Las zonas de ese plasma donde se concentraba más materia también debían ser la zonas donde la temperatura era más alta, por este motivo, el mapa de temperaturas captado por el COBE se corresponde con el

108 Como se expuso en el punto 2.3.3. estas perturbaciones seminales, según la teoría inflacionaria, se cree que se produjeron durante la fase de inflación del universo, entre los 10^{-34} y 10^{-32} primeros segundos del universo.

109 Apartado 2.2.3.

110 (J. Ostriker and Mitton 2014) Págs. 212-213.

111 Este mapa es una proyección de tipo “mapamundi”, similar a los que se realizan para el globo terráqueo. Está representando la radiación primitiva de fotones en una esfera imaginaria que rodea la Tierra, esfera dilatada por la expansión del universo desde sus 380.000 años hasta la actualidad.

112 Formado por núcleos atómicos, electrones y fotones.

113 Este momento especial en la historia del universo debería llamarse la combinación atómica, dado que antes de que se produjera no existían átomos en el universo.

mapa de densidades del universo primigenio, amplificado por la propia expansión del universo desde el momento de la recombinación atómica.

Otra idea importante es que estas fluctuaciones del plasma primigenio eran ondas mecánicas estacionarias, similares a las ondas de sonido que se crean en la cuerda de una guitarra. Las ondas mecánicas se caracterizan, frente a las electromagnéticas, porque necesitan un medio material para producirse¹¹⁴. Son estacionarias, cuando están confinadas en un espacio de tal manera que no pueden propagarse, y sólo pueden oscilar. Si seguimos con la analogía de la guitarra, sabemos que las notas que emite una misma cuerda están relacionadas con su longitud, cuando es más corta, las longitudes de la onda¹¹⁵ también lo son y su sonido más agudo y al contrario. Por otro lado, sabemos que cuando una cuerda suena se produce un armónico principal, λ_1 , cuya longitud de onda es el doble de la cuerda de la guitarra, L , pero también se producen otros armónicos que tienen por longitudes de onda, λ_n , fracciones de la longitud de onda del armónico principal. De tal manera que $\lambda_2 = L$, $\lambda_3 = 2L/3$, $\lambda_4 = L/2$ y así sucesivamente siguiendo la sucesión: $\lambda_n = 2L/n$. Todos estos armónicos se producen de forma simultánea en la cuerda de la guitarra y suman sus amplitudes para cada punto del espacio en un momento determinado. Pues bien, de la misma manera que en una guitarra, la longitud de onda del armónico principal del plasma primigenio, y la de todos los armónicos sucesivos, debía estar relacionado con las dimensiones del cosmos en el momento de la recombinación de los núcleos 380.000 años después del big bang, y eso fue lo que justamente halló el satélite COBE.

Si se mira la figura 2.6. (derecha) se observa a simple vista que hay un patrón entre los máximos y mínimos de temperatura dominante, a modo de “granulado básico” que corresponde con el armónico principal, que se repite a una distancia angular aparente de aproximado de un grado¹¹⁶. Por otro lado, la esfera en la que se ha medido la CMB, está por efectos de la expansión cósmica, que ha dilatado el espacio unas mil veces desde la

114 Las ondas electromagnéticas no necesitan medio alguno para transmitirse, se basan en las oscilaciones de los campos eléctricos y magnéticos, que de acuerdo con las leyes del electromagnetismo se realimentan mutuamente.

115 La longitud de onda es el espacio que hay entre dos puntos equivalentes de una onda. Habitualmente dos máximos o dos mínimos.

116 (Casas 2010) Pág. 57. Para tener una referencia visual, recordaremos que el tamaño angular medio del Sol visto desde la Tierra es de 32' 03", es decir, de aproximadamente medio grado.

recombinación atómica a una distancia del orden de 46.000 millones de años luz, lo que significa que la longitud de onda del armónico fundamental en la actualidad es de unos mil millones de años luz. En el momento de la recombinación debió tener una longitud del orden de un millón de años luz, acorde con las dimensiones del universo en ese momento. Un primer resultado importante de esta “huella” del universo primitivo que es la CMB.

Antes de avanzar, es pertinente llamar la atención sobre un hecho fundamental relacionado con la proporción de materia bariónica del universo. Entre los 100 y 300 segundos del universo tuvo lugar, según predice el modelo estándar del big bang la nucleosíntesis primordial, que tenía que producir un 75% de Hidrógeno, un 25% de Helio, un 0'01% de Deuterio y un 10^{-8} % de Litio. Las observaciones de estos elementos en las nebulosas lejanas, y por lo tanto antiguas, que están iluminadas por la luz de cuásares ha confirmado esta estimación teórica, respecto a la materia bariónica primitiva del universo lo que significó un gran éxito de la teoría del big bang. Pero lo que es más importante en el contexto que nos ocupa, el hecho de que en el universo actual, observado en galaxias cercanas, la proporción de materia bariónica del universo siga siendo la misma (4% de la $\Omega_{\text{crítica}}$) sirvió para confirmar que la materia oscura no es materia bariónica. Así pues, la proporción de materia bariónica contenida en el CMB, posterior a la nucleosíntesis primordial, debía coincidir con proporción de materia bariónica actual del universo.

En junio de 2001 se envió al espacio el satélite de la NASA Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), durante 7 años estuvo obteniendo datos más precisos de las perturbaciones seminales de la radiación cósmica de fondo. También se mejoraron las predicciones teóricas.

Los resultados del satélite WMAP señalaban que la $\Omega_{\text{oscura}} = 0'23 \pm 0'01$, es decir, Si a la materia oscura se le sumaba la materia bariónica el resultado era: $\Omega_{\text{materia}} = 0'27 \pm 0'01$, resultado observacional concordante con los primeros cálculos de Ostriker, Peebles y Yahil de 1974, que habían obtenido una Ω_{materia} del orden de 0'2. La materia total del universo resultaba ser una cuarta parte de la densidad de la materia crítica, la que produce un equilibrio entre la expansión y la gravedad¹¹⁷.

117 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág. 213.

Pero vamos a profundizar en cómo se obtuvieron estos datos a partir del estudio de las ondas mecánicas estacionarias del plasma primigenio a partir de los datos de la sonda WMAP tras 7 años recopilando datos.

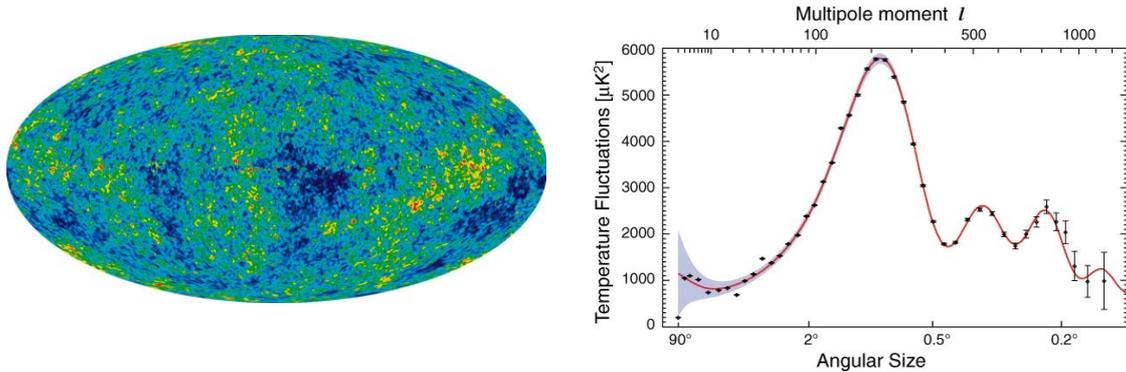


Figura 3.2. Imágenes de la misión WMAP (NASA/WMAP). La imagen de la izquierda fue tomada por su preciso Radiómetro Diferencial de Microondas (DMR). La segunda muestra las fluctuaciones térmicas de los armónicos del CMB en función de su tamaño angular.

Según muestra la imagen de la derecha, se produce un máximo de interferencia en las ondas estacionarias primordiales para la distancia angular de 1° (armónico fundamental). Este armónico se corresponde con la máxima compresión del plasma primordial regido por fuerzas gravitatorias y que por tanto, tiene relación con la densidad de materia del plasma primordial, tanto bariónica como oscura. Este primer pico arrojó un valor para la densidad de materia primigenia del 27% de la densidad crítica. Teniendo en cuenta que la densidad de materia de la materia oscura es del 4% de la crítica a partir de los datos de la nucleosíntesis primordial, la proporción de materia oscura del plasma primigenio resultaba ser del 23% de la densidad crítica, la misma proporción que se observa en el universo actual.

El segundo armónico (segundo máximo), contiene información de los procesos de expansión del plasma primordial causado por la presión del plasma, que de forma similar a la que la presión de las ondas de sonido tendería a recuperar el equilibrio de la densidad y de la temperatura. Por otro lado, las fuerzas gravitatorias que tienden a mantener la materia agregada no ayudan al proceso de expansión, por lo que el valor de este pico es inferior al anterior, dominado por los efectos gravitatorios del plasma. Otra información que ofrece este pico está relacionada con la densidad de materia bariónica o

común porque la presión del plasma, causante de la expansión, es generada fundamentalmente por los fotones del plasma que interactúan con los protones y electrones de la materia bariónica. Por este motivo, la materia oscura no participa del proceso de expansión. Si se analiza la cantidad de materia bariónica causante de este pico, su densidad resulta ser, en concordancia absoluta con todos los otros resultados, del 4% de la densidad crítica. Además de confirmarse una vez más, que la materia oscura no puede ser materia ordinaria, formada por protones y neutrones, debe tener otra naturaleza.

Los siguientes armónicos hacen referencia a la compresión del plasma primordial si son impares, como el fundamental, y a procesos de expansión si son pares, como el segundo pico comentado. Los detalles de todo el análisis de la proporción de materia ordinaria y oscura en el universo a partir de la huella dejada en la CMB por el plasma primitivo y su correlación con las predicciones teóricas son sutiles. Pero a nivel histórico es de interés mencionar los trabajos que se avanzaron a los datos. En 1966 Sakharov publicó *The initial stage of an expanding universe and the appearance of a nonuniform distribution of matter*. Cuatro años más tarde, en 1970, Sunyaev y Zeldovich presentaron *Small-Scale Fluctuations of Relic Radiation* por un lado y Peebles y Yu *Primeval Adiabatic Perturbation in an Expanding Universe*. La concordancia entre las previsiones teóricas y los datos del COBE obtenidos dos décadas más tarde fue un éxito rotundo de la teoría. No sólo han supuesto un gran éxito para el modelo del big bang, sino también un sólido apoyo para el nuevo modelo LCDM.

Pero la radiación cósmica de fondo todavía aportó una información extra fundamental. Su imagen celeste mostraba que el ángulo visual de la misma era plano, por lo que el universo temprano también lo era. Es decir, su densidad coincidía con la crítica. La imagen 3.3. muestra a la izquierda cómo sería la geometría de un universo en función del parámetro densidad y en la derecha se relaciona esta geometría con la obtenida del estudio de la CMB. Vivimos en un universo geoméricamente plano y con un parámetro densidad de valor unitario.

Vale la pena observar que tras los resultados del COBE no se acabaron de interpretar correctamente por la falta de un marco teórico más amplio y porque los datos no eran todavía suficientemente precisos. Aunque los picos de las ondas estacionarias

del plasma primigenio, señalaban que sólo había un 23% de materia oscura y un 4% de materia bariónica en el universo, no se interpretó que debía faltar un tercer ingrediente en el universo, el que después sería conocido como la “energía oscura”. En 1992 se interpretaron los resultados esperando encontrar más materia bariónica y oscura en el universo hasta llegar a la densidad crítica necesaria para tener un universo plano.

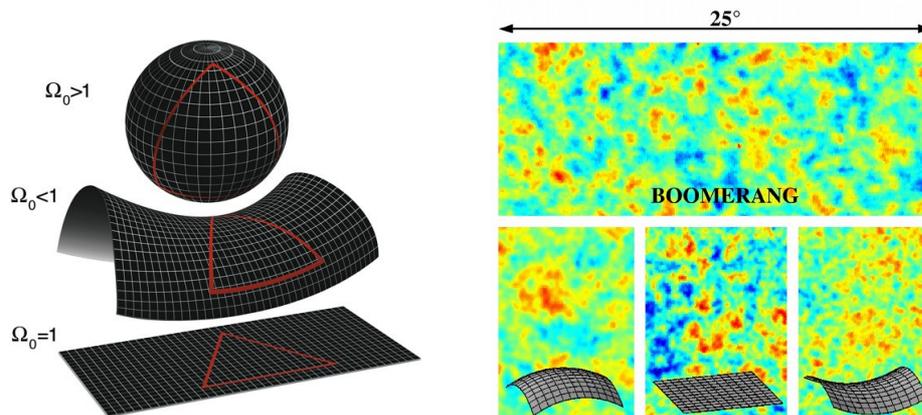


Figura 3.3. En la imagen de la izquierda (NASA/WMAP) se representa de arriba a abajo la imagen geométrica de un universo elíptico ($\Omega_0 > 1$), hiperbólico ($\Omega_0 < 1$) o plano ($\Omega_0 = 1$). En la imagen de la derecha (Proyecto BOOMERANG¹¹⁸) se muestran la imagen obtenida por el proyecto BOOMERANG¹¹⁹ del CMB y se simula cómo habrían sido los resultados en un universo elíptico (izquierda) o hiperbólico (derecha).

3.4. Otras evidencias de existencia de materia oscura

En proceso de asentamiento del concepto y realidad de la materia oscura, hubo quien empezó a plantearse a la luz de los datos si el problema no estaría en las leyes de Newton de la gravitación, que quizás hubieran variado su expresión con el paso del tiempo o que quizá no se cumplan de la misma manera cuando las distancias respecto al centro sean altas. Incluso se ha llegado a plantear si existe alguna interacción más allá de la conocida gravitación que afecte a las masas, pero cada vez existen más evidencias a favor de la existencia de la materia oscura.

3.4.1. Lentes gravitacionales

¹¹⁸ http://cmb.phys.cwru.edu/boomerang/press_images/index.html

¹¹⁹ El proyecto BOOMERANG (*Balloon Observations Of Milimetric Extragalactic Radiation And Geophysics*) consistió en un globo que sobrevoló la región Antártica en 1998 y en 2003. En 1998 midió las anisotropías del CMB, en 2003 la temperatura y polarización de las anisotropías.

Einstein fue el primero en introducir la idea de las lentes gravitatorias y en 1937 Zwicky predijo que galaxias y cúmulos de galaxias debían constituir las lentes gravitatorias más potentes del universo. Hoy en día se ha comprobado ampliamente que es así, pero lo que es más importante, estos cúmulos poseen más masa que la bariónica de sus estrellas y gas interestelar para poder explicar la deformación que sufre la trayectoria de la luz en sus proximidades. La proporción de materia extra coincide con la que Zwicky halló para explicar la dinámica de los cúmulos de galaxias¹²⁰. Una vez más la existencia de la materia oscura se hace evidente.

La teoría de la relatividad predice de forma precisa cómo los rayos de luz se curvan, de manera similar a como lo haría una masa, al acercarse a un cuerpo masivo. Este hecho fue confirmado por primera vez por Arthur S. Eddington (1882-1944) durante el eclipse solar del 29 de mayo de 1919, desde la isla de Príncipe¹²¹, donde gracias al oscurecimiento del cielo se pudo observar el desplazamiento aparente que experimentaban las estrellas cercanas al Sol durante el eclipse. Cuando este fenómeno se aplica a la luz que proviene de cuerpos que se hayan detrás de una zona masiva, como la que puede constituir un cúmulo de galaxias, éstos cuerpos aparecen con una imagen algo deformada, similar a arcos, alrededor de la imagen del cúmulo, tal como se puede observar en la figura 3.4. en el esquema de la izquierda y en la derecha alrededor del cúmulo cúmulo de galaxias SDSS J1038+4849.

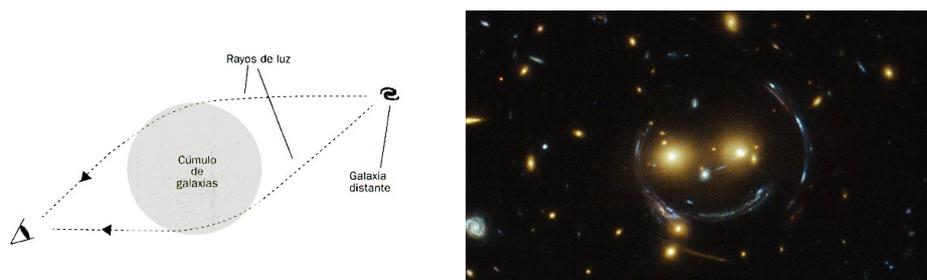


Figura 3.4. En la imagen de la izquierda ((Casas 2010), Pág.26) se muestra un esquema de como distorsiona el recorrido de la luz una lente una lente gravitacional, multiplicando y deformando la imagen de partida, desde el punto de vista del observador. En la imagen de la derecha tomada por el telescopio espacial Hubble¹²² se observa el

120 (Zwicky 1937) Págs. 237-238.

121 Golfo de Guinea.

122 Fuente: <https://www.nasa.gov/content/hubble-sees-a-smiling-lens>

cúmulo de galaxias SDSS J1038+4849 y el efecto de lente gravitacional que se observa a su alrededor en forma de arcos azules.

Lo importante del fenómeno, ampliamente estudiado, es que conociendo la curvatura de los rayos de luz se puede determinar un mapa tridimensional de la distribución de la masa de la lente gravitacional. Cuando este tipo de estudios se ha aplicado a los cúmulos de galaxia, se ha obtenido repetidamente que la masa que deben poseer es superior en 6 veces a la que se observa en materia bariónica, convirtiéndose en un elemento más de confirmación de la existencia de la materia oscura. Cuando el método se ha aplicado a galaxias individuales ha permitido obtener detallados mapas tridimensionales de la distribución de la materia oscura en las galaxias, incluso en regiones alejadas del centro, donde por la ausencia de materia luminosa -cuya dinámica se pueda estudiar- se hace muy difícil su determinación.

3.4.2. La colisión del Cúmulo Bala

El Cúmulo Bala¹²³ de la constelación de Carina es un ejemplo especial de materia oscura, la materia bariónica o atómica se halla claramente separada de la materia oscura. Se trata de dos lejanos cúmulos de galaxias que se aproximan a gran velocidad. En la colisión el gas interestelar, que constituye el 90% de la masa bariónica de los cúmulos, queda a medio camino entre ellos, lo que indicaría que en este espacio intermedio debería estar el centro de masas alrededor del cual se mueve el sistema. Pero, en cambio, los centros gravitatorios de cada cúmulo se halla próximos a las galaxias de cada cúmulo, que sólo constituyen el 10% de la materia de cada cúmulo. Otra vez, se hace necesario que haya un componente de materia oscura, que normalmente no interacciona entre si, ni en la colisión del gas interestelar, para explicar el fenómeno.

El cúmulo bala, no sólo es gigantesco en la escala espacial con un diámetro aproximado de 1 Mpc, sino que también lo es en la temporal. Las galaxias del cúmulo llevan atravesándose cientos de millones de años, de hecho se cree que las galaxias se cruzaron hace 150 millones de años. En la figura 3.5. se observa en color rosa la imagen obtenida en el espectro de rayos X (altas energía del espectro electromagnético) de las nubes de gas caliente interaccionando después del choque de ambos cúmulos. Las

123 Catalogado como: 1E 0657-56, está situado a 3.400 millones de años luz.

velocidades a las que se aleja el gas de la nube de la derecha es del orden de 4.500 Km/s y como tiene forma de bala es la responsable del nombre atribuido al cúmulo. Las galaxias de cada uno de los cúmulos están muy separadas entre sí, motivo por el que no han interactuado. Pero las nubes de gas interestelar de cada cúmulo sí que han sufrido una fuerte fricción elevando su temperatura y bajando su velocidad, motivo por el que han quedado retrasadas respecto a las galaxias de los cúmulos, dando lugar a una situación especial en la que la masa del polvo interestelar de los cúmulos (90% de la materia ordinaria) ha quedado separada de las galaxias (10% de la materia ordinaria) hecho que ha facilitado el estudio de la ubicación de la materia oscura que ha resultado hallarse en la zona de las galaxias, más fría y representada en azul.

Este cúmulo es probablemente la evidencia actual más grande de la existencia de la materia oscura, por hallarse tan claramente separada del gas interestelar de los cúmulos donde radica la mayor parte de la masa bariónica del cúmulo. Pero además da información sobre la naturaleza de la materia oscura. Por un lado muestra que interactúa poco con la materia ordinaria¹²⁴, sólo lo hace gravitacionalmente. Por otro lado, evidencia que tampoco interactúa demasiado entre sí, o al menos no lo hace como un gas de materia ordinaria, de otra manera, no se habría cruzado la materia oscura con la misma facilidad que lo hicieron las galaxias debido a la enorme distancia que las separaba.

El estudio de la masa del sistema se realizó a partir del efecto de lente gravitacional como muestra el artículo publicado en 2004 por D. Clowe, A. González y M. Markevitch titulado: *Weak-lensing mass reconstruction of the interacting cluster 1e 0657558: direct evidence for the existence of dark matter*. El mismo equipo de científicos publicó unos meses antes, también en 2004 un primer artículo en el que se presentaba el descubrimiento de este cúmulo tan especial: *Direct constraints on the dark matter self-interaction cross-section from the merging galaxy cluster 1e 0657-56*. Pero el último y definitivo artículo sobre el tema lo publicaron en 2006: *A direct empirical proof of the existence of dark matter*.

124 Por este motivo cuesta tanto de detectar, como se desarrollará en el apartado 6.1.



Figura 3.5. Cúmulo Bala. En la imagen compuesta las nubes de gas caliente están representadas en rosa, las azules representan las zonas donde se halla la materia oscura y las galaxias. (Fuente: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.; Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al. Optical: NASA/STScI; Magellan / U.Arizona / D.Clowe et al.)

El cúmulo Bala es prácticamente una “fotografía” de la materia oscura, pero no es el único caso conocido, el cúmulo MACS J0025.4-1222 presenta una situación similar¹²⁵.

4. LA ENERGÍA OSCURA SE HACE EVIDENTE

Desde 1998 se confirmó, en base al estudio de las supernovas Ia, la existencia de una sutil fuerza, que aumenta con la distancia, y hace que las galaxias y cúmulos de galaxias se separen entre sí. Su naturaleza nos es desconocida pero es necesaria incluirla en nuestra visión del cosmos para obtener predicciones fiables del universo que nos rodea. A esta enigmática fuerza la llamamos energía oscura o constante cosmológica. En este apartado expondremos su descubrimiento, redescubrimiento y los datos observacionales en los que se apoya.

4.1. Nacimiento de la constante cosmológica

Desde que Isaac Newton (1643-1727) desarrolló la ley de gravitación universal, y con el impulso de E. Halley (1656-1742) en 1687 se hicieron públicos sus descubrimientos en la monumental obra *Philosophiæ naturalis principia mathematica*,

¹²⁵ (Casas 2010) Pág. 30.

una pregunta empezó a estar en el aire. Si la gravedad es una fuerza que atrae a todos los cuerpos con masa, ¿qué es lo que impide que las estrellas, entonces concebidas como estacionarias, no colapsen irreversiblemente unas contra otras? Newton, de fuertes sentimientos religiosos y consciente de sus limitaciones, respondió que era una evidencia de la providencia divina.

Pierre-Simon Laplace (1749-1827), fue el primero dar una solución racional al problema en su obra *Exposition du système du monde*, publicada en 1796, si la gravedad en vez de actuar de manera instantánea se propagara a velocidad finita, el universo sería estable. Pero sus cálculos tenían errores. A principios del siglo XX, H. Shapley demostró que vivimos en una galaxia en rotación, por lo que la “fuerza centrípeta” evita el colapso gravitatorio de la galaxia, de la misma manera que la traslación de los planetas en su órbita impide su colapso hacia el Sol¹²⁶. Pero el problema de la estabilidad gravitatoria del universo a gran escala quedaba sin resolver.

La situación cambió cuando Einstein presentó su teoría general de la relatividad con sus ecuaciones covariantes en 1915. En su forma tensorial más compacta, son:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \cdot R = 8 \cdot \Pi \cdot T_{\mu\nu}$$

El miembro de la izquierda indica que la geometría del espacio-tiempo queda distorsionado por las masas de los cuerpos celestes, desde estrellas a galaxias. El miembro de la derecha describe el movimiento en las masas en el seno de un espacio-tiempo curvado por ellas, simboliza la materia y energía del universo. Las ecuaciones covariantes, también llamadas ecuaciones de campo, incluyen todos los tipos de movimientos; uniformes o acelerados, rectilíneos o circulares y son válidas para todo tipo de sistemas de referencia, acelerados o no.

Cuando Einstein en 1917 se propuso aplicarlas al universo como un todo observó que había tres soluciones posibles relacionadas con la antigua pregunta de la evolución de las masas en el universo, ¿tienden al colapso o no? La primera opción era la de un universo estático e infinito, pero la rechazó porque acabaría colapsando sobre si mismo. La segunda era un universo finito y también estático, pero de nuevo, estaba condenado

126 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág. 218.

al colapso hacia su centro. La tercera opción, por la que se inclinó, era un universo finito pero sin límites en el que las masas hacen que el espacio se curve a modo de esfera, por lo que sus límites desaparecen. Pero con esta opción el universo, según lo indicaban las ecuaciones de campo, debía ser dinámico en expansión o en contracción. En ese mismo año, 1917, V. Slipher desde el observatorio Lowell ya empezaba a entrever que el universo estaba en expansión, pero Einstein no lo sabía por lo que modificó sus ecuaciones para permitir una solución estática a este universo finito pero sin límites. Agregó un término a las ecuaciones de campo de tal manera que compensase la gravedad a gran escala al que llamó “constante cosmológica” y utilizó la letra griega lambda (λ) para simbolizarlo. Las ecuaciones de campo quedaron así:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \cdot R = 8 \cdot \Pi \cdot T_{\mu\nu} + \lambda \cdot g_{\mu\nu}$$

Aunque Einstein había introducido la constante cosmológica para poder tener un universo estático, de Sitter, Friedman y Lemaître señalaron que un universo así era inestable¹²⁷ y el físico Richard Tolman (1881-1948) lo demostró matemáticamente en 1934 en un artículo titulado *Effect of inhomogeneity on cosmological models*¹²⁸.

Cuando las publicaciones de Hubble de 1929 evidenciaron la realidad de la expansión del universo Einstein retiró la constante cosmológica, el término de fuerza positiva que compensaba los efectos gravitatorios de atracción de las ecuaciones de la relatividad general. No obstante, había quedado constatación de que un término extra con efectos expansivos o contractivos extra sobre todo el universo podía ser aplicado a las ecuaciones de campo o covariantes. Cuando la energía oscura fue descubierta experimentalmente, este término volvió a aparecer en ellas aunque con un sentido diferente por el que lo introdujo Einstein, el universo actual no es estático ni decelerado, sino se expande aceleradamente.

¹²⁷ Si se tiene dos galaxias en equilibrio, gracias a los efectos repulsivos de la constante cosmológica que compensa las fuerzas gravitatorias de atracción, resulta ser un sistema en equilibrio inestable. Una pequeña separación entre ellas provocaría que la fuerza de repulsión dominase sobre la de atracción, quedando destinadas así a separarse irreversiblemente. De la misma manera, si se unieran ligeramente respecto a su posición de equilibrio, tenderían a unirse al dominar la fuerza de atracción sobre los efectos de la constante cosmológica ((J. Ostriker and Mitton 2014) Pág. 227).

¹²⁸ (Tolman 1934) Pág. 173.

4.2. Olvido y reaparición de la constante cosmológica

Algunos destacados científicos apoyaron las posibilidades cosmológicas de la constante cosmológica. El primero de ellos, Arthur Eddington (1882-1944) que hizo menciones positivas al término lambda en su libro *The Mathematical Theory of Relativity* de 1920. El segundo fue el visionario Lemaître que utilizó la constante cosmológica en un artículo de 1934, *Evolution of the expanding universe*, como una energía negativa de vacío en el marco de su modelo de inestabilidad del átomo primigenio¹²⁹. Además Lemaître ya señaló entonces lo que hoy es aceptado como uno de los indicadores a favor de la energía oscura: que su presencia también evita tiempos de nacimiento del universo demasiado pequeños. Pero tras los trabajos de Hubble de 1929, la mayor parte de los cosmólogos dejaron de lado la posibilidad de la existencia de una constante cosmológica que no veían imprescindible en un universo que ya se había demostrado que estaba en expansión, en acuerdo con la predicción de las ecuaciones covariantes de la relatividad general.

La cosmología durante décadas se centró en la búsqueda de los dos parámetros que se consideraban esenciales para conocer el universo: la constante de Hubble H_0 y el parámetro de desaceleración q_0 . La mayoría de los cosmólogos esperaban encontrar un universo cuyo parámetro de desaceleración, q_0 , fuera de valor $\frac{1}{2}$, lo que es equivalente a que su parámetro de densidad, Ω_m , fuera 1. Es decir, un universo con métrica euclídea o plana, en el que el impulso del big bang fuera exactamente compensado por las fuerzas gravitatorias.

Los resultados de las observaciones se alejaban de un universo con métrica euclídea. Como se ha desarrollado en el apartado 2.1.3., A. Sandage fue el primero en asignar valor a q_0 a partir del estudio de galaxias lejanas, y obtuvo un valor grande, entre 0'5 y 1 que hablaría de un universo con métrica elíptica. A partir de la década de 1960, como se expuso en el apartado 2.1.4., otros cosmólogos, como J. Oort, con técnicas mejoradas que introducían menos error, se volcaron en el estudio de Ω_m . Los resultados, a partir de las observaciones, para el parámetro de densidad del universo, Ω_m , siempre eran inferiores a 1 independientemente de que se tuviera en cuenta la

129 (Lemaître 1934) Pág. 12.

materia bariónica, o se incluyera también la materia oscura. Las evidencias apuntaban a un universo que estaría en eterna expansión.

Así, durante décadas, una vez eliminada la constante cosmológica, la visión de la evolución del universo en el marco del modelo del big bang, ha sido que vivimos en un universo que en sus primeros tiempos, cuando el corrimiento al rojo, z ¹³⁰, era elevado, el parámetro densidad, Ω_m , se acercaba al valor unitario, en el que la densidad del universo se igualaría con la densidad crítica según indica la ecuación:

$$\Omega_m(z) = \Omega_{m,0} \cdot \left[\frac{(1+z)}{(1+\Omega_{m,0} \cdot z)} \right]$$

Obsérvese que $\Omega_{m,0}$ es el valor de la densidad de la materia en el universo en el momento actual para el que z vale 0. La ecuación también predecía que medida que pasa el tiempo, y el corrimiento al rojo disminuye, también disminuye el valor de la densidad de materia, con lo que los efectos de la gravedad se hacían cada vez más débiles y el universo acabaría en un big rip o big freeze.

Esta visión, sin constante cosmológica, sólo fue alterada por un artículo publicado en 1974 por J. Richard Gott, James E. Gunn, David Schramm y Beatrice Tinsley con el título de *An unbound universe?*. En su brillante artículo exponían que los mejores datos del momento, utilizando un valor para la constante de Hubble en el presente (H_0) de 60 Km/s/Mpc, asignaban al parámetro densidad (Ω_m) un valor de aproximadamente $0'06 \pm 0'02$, es decir, del 6% de la densidad de masa crítica. En esas condiciones, si no se tenía en cuenta la posibilidad de la constante cosmológica diferente de cero, vivíamos en un universo hiperbólico. Es decir, que era necesaria una constante cosmológica no nula para que el universo pudiera ser elíptico o euclídeo. Por lo que considerar la constante cosmológica de nuevo era fundamental desde el punto de vista de la evolución y dinámica del universo¹³¹. Unos años más tarde, en 1978, B. Tinsley publicó un artículo

130 Tal y como se introdujo en la nota nº 13, el corrimiento al rojo se define con la siguiente expresión: $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$. Cuanto más alejada está de nosotros una galaxia, de acuerdo con ley de Hubble mayor es su velocidad de recesión y por lo tanto el valor de su corrimiento al rojo: z . Los cuásares o galaxias más lejanas presentan corrimientos al rojo entre 6 y 7, en el momento actual el corrimiento al rojo vale 0 y en el corrimiento de la época más lejana de la que nos llega información electromagnética, la época en la que se formó la CMB el corrimiento al rojo es del orden de 1080.

131 (Gott, J. R. et al. 1974) Págs.549-550. Es de destacar el correcto razonamiento de los autores a la luz de los datos para volver a hablar de la necesidad de la constante cosmológica, y los acertados valores que utilizaron para H_0 y Ω_m muy próximos a los valores actuales.

más atrevido en la revista *Nature* con el título, *Accelerating Universe revisited*, en el que afirmaba apoyándose en los datos registrados, que de los modelos de universo de Friedman en expansión, sólo eran posibles los que incluyeran una constante cosmológica positiva.

Entre 1975 y 1995 se produjo un gran desarrollo en la tecnología de los grandes telescopios y su instrumentación, tanto terrestres como espaciales, lo que permitió que cada vez se dispusiera de mejores datos. La cosmología se centró en el estudio del desplazamiento al rojo de las galaxias más lejanas y se iniciaron los grandes estudios extragalácticos con el objetivo de conocer, a gran escala, la estructura del universo visible. El objetivo prioritario era poder establecer con precisión las distancias a otras galaxias y así llegar a un valor más fino de la constante de Hubble tal y como se ha desarrollado en los apartados 2.1.1. y 2.1.2.

En relación con la constante cosmológica aparecieron dos nuevos artículos muy significativos en 1995, el primero de Lawrence Krauss (n. 1954) y Michael Turner (n. 1949) *The cosmological constant is back*, el segundo *Cosmic concordance* de J. Ostriker y Paul J. Steinhardt (n.1952). En ambos, se introdujo la olvidada constante cosmológica con el fin de que las edades de las diferentes estructuras del universo fueran coherentes, teniendo presentes todas las observaciones recientes, incluyendo los importantes datos del satélite COBE sobre la CMB.

La situación era que si se tomaban los mejores valores de la constante de Hubble sin tener en cuenta la constante cosmológica, y se llevaba el tiempo hacia atrás, resultaba una edad para el universo más pequeña que la edad de las estrellas más antiguas, cosa que era una gran contradicción. En cambio, si se tenía en cuenta una constante cosmológica positiva que acelerase la separación de las galaxias más allá del impulso inicial provocado en los primeros instantes del universo, la constante de Hubble resultaba ser menor y con ello la edad del universo mayor, salvando así la gran contradicción con la edad de las estrellas más antigua.

De forma concreta Krauss y Turner recordaron que sin constante cosmológica, en un universo plano la edad del universo se obtiene a partir de la expresión: $t_0=2/(3H_0)$, utilizando un valor para H_0 de 80 Km/s/Mpc se obtenía un valor para t_0 de $8'2 \cdot 10^9$ años, mientras que la edad de los cúmulos globulares más antiguos es de $16 \pm 3 \cdot 10^9$ años, lo

que implica una evidente contradicción. En cambio, si se utiliza una constante cosmológica que implique una densidad media del orden del 80% de la crítica, y una densidad de materia del 20%, entonces la edad del universo se obtendría a partir de la expresión: $t_0=1/H_0$, obteniéndose un valor de $13'2 \cdot 10^9$ utilizando un mismo valor para la constante de Hubble (H_0) de 80 Km/s/Mpc ¹³². Por su lado Ostriker y Steinhardt proponían un valor para el parámetro densidad debido a la constante cosmológica de $\Omega_\Lambda=0'65\pm 0'1$ ($65\pm 10\%$ de la densidad crítica) y para la densidad de materia de $\Omega_m=1-\Omega_\Lambda$ ($35\pm 10\%$ de la densidad crítica) insistiendo en que nuestro universo es plano a partir de los datos obtenidos con la sonda COBE¹³³, tal y como se ha señalado en el apartado 3.3.

Aunque numerosos cosmólogos volvían a introducir el valor de la constante cosmológica como parámetro que ayudaba a describir mejor nuestro universo, hubo que esperar a 1998 para que dos grupos de investigadores independientes demostraran de forma irrevocable, a partir de medidas en supernovas del tipo Ia, que el universo está en expansión acelerada.

4.3. ¿Energía oscura o constante cosmológica?

A finales de la década de 1990 dos equipos independientes, el *Supernova Cosmology Project* y el *High-z Supernova Search Team*, iniciaron la tarea de recuperar los estudios del parámetro desaceleración, q_0 , que había iniciado A. Sandage en la década de 1950. Contaban con mejores medios técnicos que Sandage, telescopios mayores y detectores electrónicos, superiores en sensibilidad a las antiguas placas fotográficas. Pensaban utilizar para la determinación del parámetro desaceleración supernovas Ia, las más brillantes y estables conocidas, por lo que esperaban sondear lejanas galaxias. Su objetivo era conocer a partir del parámetro desaceleración el parámetro densidad, Ω_m , para evaluar así, de forma indirecta, la densidad de materia del universo¹³⁴.

132 (Krauss and Turner 1995) Págs. 2-3.

133 (J. P. Ostriker and Steinhardt 1995) Págs. 1-2.

134 Pensaban relacionar q_0 y Ω_m con la expresión: $\Omega_m = 2 q_0$, válida para un universo sin constante cosmológica ((Goldhaber et al. 1995) Pág 439). En la página 438 del mismo artículo citado se detalla la obtención del parámetro de desaceleración a partir de la magnitud aparente y la absoluta de las supernovas.

En 1995, Saul Perlmutter (n.1959) y su equipo del *Supernova Cosmology Project* que trabajaban para el laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, publicaron un artículo: *Discovery of the most distant supernovae and the quest for Ω* , en el que se anunciaban los estudios que se iban a realizar con 30 supernovas¹³⁵ lejanas del tipo Ia con el fin calcular el parámetro de desaceleración, q_0 . Los primeros datos de su equipo fueron publicados en enero de 1998 en el artículo: *Discovery of a supernova explosion at half the age of the Universe*. Se obtuvo un valor de sólo 0'06 (6%) para la densidad de energía oscura, un valor muy bajo, que hacía despreciar los efectos de la posible constante cosmológica, que por otro lado era el resultado esperado. Pero como el equipo había utilizado una muestra muy pequeña de supernovas Ia sus resultados no eran definitivos¹³⁶.

En septiembre de 1998, el segundo equipo dirigido por Adam Riess (n.1969), y que contaba con la participación de grandes astrónomos como Brian P. Schmidt (n.1967) y Robert Kirshner (n.1949), anunció que la expansión del universo se estaba acelerando en el importante artículo, *Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant*. Ya se habían estudiado 10 supernovas Ia con desplazamientos al rojo (z) comprendidos entre 0'16 y 0'62. Con las que se había estimado una antigüedad para el universo del orden de $14'2 \pm 1'7 \cdot 10^9$ años, acorde con las estrellas más antiguas. Respecto al parámetro desaceleración, q_0 , habían obtenido un inesperado signo negativo, lo que indicaba que realmente el universo se estaba acelerando, lo que precisaba de la existencia de una “constante cosmológica” positiva que impulsara dicha aceleración¹³⁷.

135 Con el objetivo de tener una incertidumbre en el resultado del 30% ((Goldhaber et al. 1995) Pág.438)

136 De hecho, el estudio se centró en la supernova SN1997ap descubierta el 5 de marzo de 1997 en el observatorio de Cerro Tololo (Chile) poseyendo un alto desplazamiento al rojo ($z=0'83$), de ahí el título del artículo. No obstante el estudio se complementó comparando los resultados con la supernova SN1996cl que poseía el mismo corrimiento al rojo ((Perlmutter et al. 1998) Págs. 51 y 53).

137 (Riess et al. 1998) Pág. 1009.

En 2001, los dos grupo habían acumulado una gran cantidad de datos precisos en las mediciones de las supernovas Ia, el valor de la densidad de energía oscura del universo resultaba ser de 0'7 (70% de la densidad crítica) aproximadamente¹³⁸.

En 2001, la sonda WMAP se lanzó al espacio, con el fin de obtener mediciones más precisas de la radiación cósmica de fondo. Tras siete años tomando datos, la sonda no sólo cumplió su objetivo, sino que también proporcionó valores precisos de los parámetros cosmológicos. Los resultados de sus medidas fueron¹³⁹:

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1 \pm 0'0023 \mp 0'0055$$

Donde el parámetro densidad de materia, Ω_m , incluía no sólo la materia atómica conocida, sino también la materia oscura, y Ω_Λ hace referencia a parte del parámetro densidad debido a la recién descubierta “energía oscura”. Esta enigmática energía se está comportando como la “renacida” constante cosmológica de Einstein: λ (lambda). No obstante una de las preguntas de la cosmología actual es si la energía oscura es realmente constante, tal como la había creado Einstein o si ha variado con el tiempo.

Los datos obtenidos tanto del estudio de las supernovas Ia como los logrados por la sonda WMAP eran concordantes e indicaban que vivimos en un universo geoméricamente plano o euclídeo en el que la energía oscura producirá una expansión acelerada cada vez mayor, dado que sus efectos se incrementan al expandirse el universo y aumentar la cantidad de espacio. De hecho, la aceleración del universo comenzó a producirse 5000 años después aproximadamente del big bang. El destino de nuestro universo, a la luz de los datos actuales es que se acabe enfriando en un big freeze y que las estructuras, incluso las más simples, como son los átomos, se acaben “rompiendo” con la expansión cada vez más acelerada que impulsa la energía oscura.

138 Por la confirmación de la expansión acelerada del universo, Perlmutter, Riess y Shmidt recibieron el premio Nobel de Física en 2011.

139 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág.238.

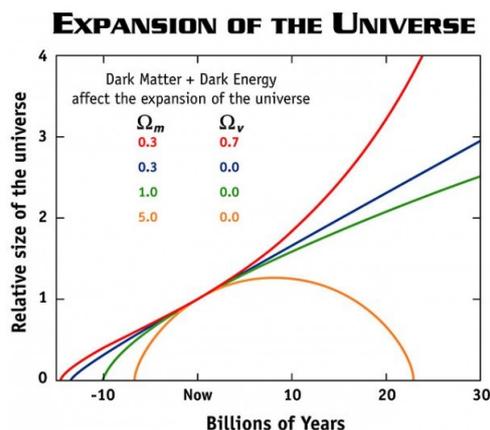


Figura 4.1. Representación de la evolución del radio del universo en función del parámetro densidad, tanto para la materia como para la energía.

Una curiosidad, es que es muy difícil notar los efectos de la energía oscura porque su densidad es muy pequeña. El volumen total de la Tierra equivaldría únicamente a 7 miligramos de masa¹⁴⁰, pero como en el espacio dominan los espacios “vacíos”, en ellos dominan los efectos de la “energía oscura”, constante por unidad de volumen, al menos en una determinada época del universo.

Lo importante, desde el punto de vista histórico, es que con todos estos datos provenientes de experimentos y métodos diferentes, se estaba conformando un nuevo modelo estándar del universo, el modelo LCDM (*Lambda Cold Dark Matter*, lambda materia oscura fría) que describe nuestro universo conocido, aunque la naturaleza de la materia y la energía oscura se nos escapa, tal y como se desarrollará en el apartado 5 del trabajo.

5. EL NUEVO MODELO ESTÁNDAR LCDM O CONCORDANTE

Desde que Einstein presentara la teoría de la relatividad general en 1915 y comenzara la cosmología física, ha pasado exactamente un siglo. Periodo de tiempo en el que los cosmólogos se han esforzado en profundizar no sólo en el origen, sino también en el contenido, la estructura y evolución del cosmos. En estos años, no sólo se han ido mejorando los medios técnicos para obtener mejores datos del cosmos, sino que también se han ido puliendo los marcos teóricos en los que encuadrarlos. Si en los

¹⁴⁰ (Casas 2010) Pág. 60.

primeros 50 años de la cosmología física se estableció el modelo estándar del big bang que pone el acento en el nacimiento del universo y sus diferentes etapas “vitales”, en los últimos 50 años el acento ha estado en profundizar en la composición, estructura y evolución del universo. De tal manera que se ha logrado un nuevo modelo cosmológico estándar, el LCDM, que es una versión ampliada del modelo del big bang a la luz de los datos y aportaciones teóricas de los últimos 50 años.

Empezaremos por repasar cómo ha ido avanzando nuestro conocimiento de la composición del universo, clave para entender su evolución y haremos una mención a cómo se distribuye la materia encontrada. Después, repasaremos los derroteros de los modelos teóricos surgidos, en la última mitad de siglo, hasta llegar al modelo LCDM. A continuación, se presentarán las predicciones del nuevo modelo estándar gracias a las simulaciones por ordenador.

5.1 Cantidad y distribución de la materia-energía del universo

Conocer la composición del universo es fundamental para conocer su evolución. Si conocemos la composición del universo podemos conocer su densidad, ρ , y con esta última podemos conocer su geometría o evolución comparándola con la densidad crítica, ρ_c . Si es inferior a la crítica vivimos en un universo abierto (o hiperbólico) que se expande eternamente. Si es igual a la densidad crítica nuestro universo es plano (o euclídeo) en el que llega un momento en que la expansión del universo es compensada con las fuerzas gravitatorias de atracción de la materia. Si es superior a la crítica, nuestro universo es cerrado (o elíptico) y su destino del universo es colapsar sobre sí mismo a causa de las fuerzas gravitatorias¹⁴¹.

Por este motivo, los cosmólogos han dedicado, y siguen dedicando muchos esfuerzos, a conocer el contenido de materia del universo. A principios de siglo XX, analizando las líneas espectrales de la luz que llegaba de las estrellas cercanas de nuestra galaxia, se supo que el 97'9%¹⁴² de la composición de las estrellas era hidrógeno y helio. El restante 2'1% de la composición de nuestra galaxia estaría formada por los

141 Estas predicciones para la evolución del universo se hacen bajo la suposición de que la constante cosmológica de Einstein es nula. Suposición que fue habitual para los cosmólogos hasta que en 1998 se confirmó la energía oscura y se asoció con la olvidada constante cosmológica de Einstein.

142 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág. 246.

demás elementos químicos. Éstos se generarían en el interior de las estrellas durante su vida, o en el momento de su muerte si lo hacen como supernovas, tal y como demostraron en 1957 Hoyle, Fowler y el matrimonio Burbidge. Así, hasta principios de la década de 1980 se pensaba que probablemente la mayor parte de la masa ordinaria o bariónica (formada por protones y neutrones) del universo se hallaba en las galaxias en forma de estrellas.

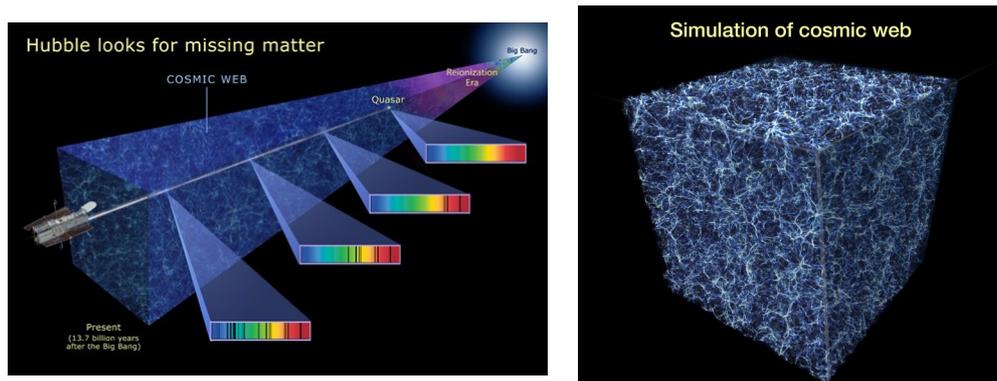


Figura 5.1. Estas imágenes (NASA/STScI-PR08-20) hacen referencia a un estudio del telescopio espacial Hubble publicado en 2008¹⁴³ para profundizar en la “red cósmica” de gas intergaláctico. En la imagen de la izquierda se muestra cómo la información se ha obtenido a partir de las líneas espectrales provenientes de la luz de cuásares lejanos, que ha cruzado el gas del medio intergaláctico. La de la derecha muestra, a la luz del estudio, cómo es la estructura tridimensional del gas intergaláctico, 90% de la masa de la materia bariónica del universo.

El panorama cambió en la década de 1980. Analizando la luz que procedía de cuásares lejanos, se observó que poseían líneas espectrales de hidrógeno y helio sin ionizar. Como en el interior de las estrellas no hay átomos neutros, sino que la materia se halla en estado de plasma, en el que los núcleos atómicos y electrones están disociados, estas líneas espectrales sólo podían proceder de gas interestelar que cruzaba la luz en su recorrido. A lo largo de la década se fue confirmando que la mayor parte del espacio intergaláctico está “cruzado” por una especie de “telaraña cósmica” compuesta básicamente de hidrógeno y helio, aunque también se hallan en ellas pequeñas

¹⁴³ El estudio citado se publicó en 2008 la revista *Astrophysical Journal*. Sus autores fueron Charles Danforth y Shull. El estudio utilizó los espectrógrafos FUSE e ITS del telescopio espacial Hubble para analizar los gases intergalácticos cruzados por la luz proveniente de 28 cuásares. Su análisis representa una de las observaciones más detalladas de la estructura del gas intergaláctico.

proporciones de otros elementos que seguramente han llegado allí en explosiones estelares o “vientos solares” provenientes de galaxias cercanas. La conclusión de estos estudios fue sorprendente, sólo el 10% de la materia bariónica gestada en la nucleosíntesis primordial, se hallaba en el interior de las estructuras del universo, el resto se hallaba suspendida en los “filamentos” del medio intergaláctico de una red cósmica. Las galaxias y cúmulos de galaxias se encontrarían en seno de esta recién descubierta estructura de gas intergaláctico que cruza el espacio.

En paralelo, a partir de 1970 se fue asentando entre la comunidad científica la existencia de la materia oscura del universo. Sumando esta nueva componente de masa del universo a la materia bariónica, la densidad de materia del universo, a partir de los datos de la sonda WMAP, es del $27.2 \pm 1.5\%$ de la densidad crítica.

El último componente del universo, la energía oscura, se acabó de confirmar en 1998 con el descubrimiento de la expansión acelerada del universo revelado por los estudios de las supernovas Ia. Como materia y energía están relacionadas con la famosa ecuación de la relatividad especial: $E=m \cdot c^2$, la alta densidad de energía del universo también debía ser añadida a la masa del universo. Una vez más ofreceremos los datos proporcionados por la sonda WMAP tras 7 años de observación: $72.8 \pm 1.6\%$ de la densidad crítica.

El balance final de la materia del universo, compuesta por tres ingredientes: materia bariónica, oscura y energía oscura es del $1.002 \pm 0.005\%$ de la densidad crítica. Finalmente vivimos en un universo geoméricamente plano o euclídeo.

En cuanto a la la distribución de la materia y energía en el universo. Ésta ha resultado hacerlo de manera homogénea e isotrópica. Esta conclusión se ha fundamentado en los grandes proyectos de cartografiado del universo como el 2dfGRS (2003) y el SDSS (2006) así como en los estudios del fondo cósmico de microondas de las sondas COBE (1992), WMAP (2001-2010). Los resultados han sido coincidentes: en las mayores escalas que se ha observado el universo no se ha detectado ningún tipo de asimetría ni rotación. Vivimos en un universo isótropo, homogéneo además de plano. Ver respectivamente las figuras 2.3, 2.4 y 3.2.

5.2. Historia de los modelos teóricos tras el big bang

Profundizaremos en el estudio de la planitud del universo. Partiremos de la solución a las ecuaciones de campo de Einstein de la relatividad general presentadas por Friedman en 1922, incluyendo el término de la constante cosmológica, añadiendo la posibilidad de curvatura y escribiéndolas de forma adimensional para un universo plano, queda la siguiente expresión¹⁴⁴:

$$1 = \Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_k$$

Donde Ω_m es el parámetro densidad de materia -que incluye tanto la materia bariónica conocida como la oscura-, Ω_Λ el parámetro densidad de energía oscura y Ω_k es el parámetro de curvatura del universo. A partir de los datos de la sonda WMAP los valores que se han obtenido para los dos primeros términos son: $\Omega_m = 0.272 \pm 0.015$, $\Omega_\Lambda = 0.728 \pm 0.016$. Con lo que su suma ya proporciona el deseado valor de 1 necesario para vivir en un universo plano. Recordemos que el parámetro densidad, Ω , se obtiene dividiendo la densidad de universo, ya sea de materia bariónica, oscura o energía oscura, por la densidad crítica: $\Omega = \rho/\rho_c$. Por lo que de forma análoga a como se definió con la densidad del universo, también podemos definir la métrica del universo en función de los valores del parámetro densidad: un universo plano tiene $\Omega=1$ ($\rho=\rho_c$), un universo cerrado $\Omega>1$ ($\rho>\rho_c$) y un universo abierto $\Omega<1$ ($\rho<\rho_c$).

La historia de los valores que han ido adquiriendo estos parámetros desde la implantación del modelo del big bang es la historia del modelo LCDM o concordante. Utilizaremos para exponerlo la brillante idea del triángulo cósmico presentada por Paul Steinhardt en un artículo de 1999 junto con J. Norris Bahcall (1934-2005), J. Ostriker y S. Perlmutter, *The Cosmic Triangle: Assessing the State of the Universe*. Las lecturas de los datos del triángulo cosmológico de Steinhardt se obtienen haciendo proyecciones paralelas a los lados del triángulo equilátero para cualquier valor del interior. Según la geometría básica, la suma de estas proyecciones ha de tener el mismo valor que cada uno de sus lados. En este caso, el lado del triángulo es 2, para tener más flexibilidad en la representación pero según la ecuación de campo de Einstein de la relatividad general escrita arriba, la suma de Ω_m , Ω_Λ y Ω_k siempre debe dar 1.

144 (Bahcall 1999) Pág. 6.

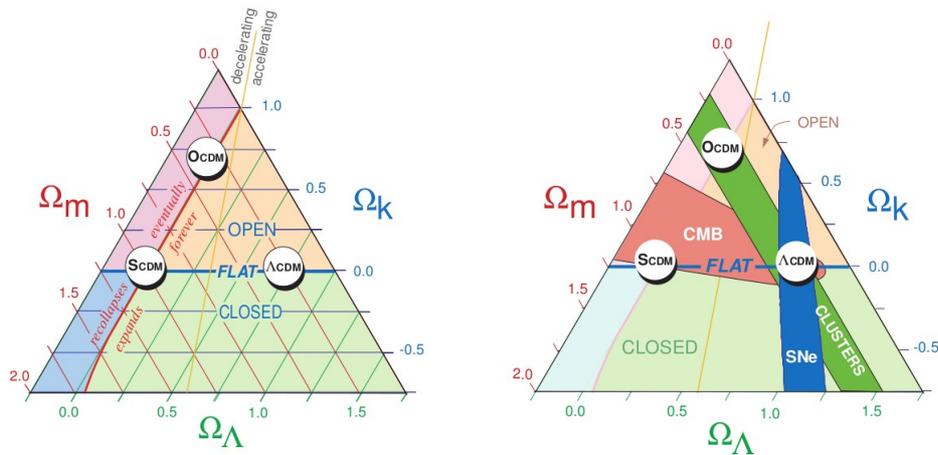


Figura 5.2 Dos imágenes del triángulo cósmico de P. Steinhart ((Bahcall 1999) Págs. 21-22). La imagen de la izquierda, con sus líneas paralelas a los lados del triángulo ayuda a leer los valores de Ω_m , Ω_Λ y Ω_k . La imagen de la derecha aporta dónde se sitúan los datos de observaciones tan importantes como las del fondo cósmico de microondas (CMB) proporcionados por la sonda WMAP, las de los cúmulos de galaxias o *clusters*, o las de las Supernovas Explosivas Ia (Sne).

Hasta la década de 1970, en la que no se había aceptado la existencia de la materia oscura dominó la visión de un universo en el que lo único que existía era la materia bariónica u ordinaria, la densidad de energía oscura también era nula, porque se negaba la existencia de la constante cosmológica. Fue el universo que osciló entre un valor para la curvatura del espacio negativa, a partir de las primeras medidas de Sandage (con densidad de materia superior a la crítica) y un universo de curvatura del espacio positiva y por lo tanto un universo abierto para los valores de densidad de materia obtenida por otros investigadores como J. Oort que obtuvieron valores más precisos para el parámetro de densidad de materia del universo, siempre por debajo de la unidad. En el triángulo cósmico el primer universo de Sandage se situaría en la franja celeste a la izquierda y abajo del triángulo y el de J. Oort próximo a la punta de la franja lila de la izquierda.

En la década de 1980, ya estaba aceptada la existencia de la materia oscura. Se había llegado a la conclusión de que la materia oscura superaba a la materia ordinaria en una proporción 5:1. El componente de materia del universo, a partir de los datos observacionales, teniendo en cuenta la materia ordinaria o bariónica y la materia oscura fría suponía un 27'2% de la densidad de materia del universo. Como la densidad de la

energía oscura seguía sin tenerse en cuenta, continuaba resultando un universo abierto, con curvatura del espacio positiva. A este modelo se le llamó universo OCDM, *Open Cold Dark Matter* o universo abierto materia oscura fría. En el triángulo de los modelos cosmológicos queda situado en la parte superior del triángulo.

No obstante en la década de 1980 y la de 1990 hubo cosmólogos que por motivos “estéticos”, más que observacionales, buscaron un universo geoméricamente plano. Como no tenían en cuenta la componente de energía oscura, apoyaban el modelo SCDM, *Standard Cold Dark Matter*, o modelo Estándar Materia Oscura Fría. Forzaban un valor de densidad de materia igual a la crítica, de tal manera que la componente de curvatura del espacio fuera uno. Pero fue un modelo que no se implantó porque no era coherente con las observaciones. Este modelo fue apoyado más por cosmólogos “teóricos” que por cosmólogos “observacionales” que se decantaban, en base a los datos de la materia del universo, por el modelo OCDM.

Por último, con el inicio del siglo XXI y la confirmación de la componente de densidad de energía oscura, se implanta el modelo LCDM, *Lambda Cold Dark Matter*, o Lambda Materia Oscura Fría. Modelo concordante con los datos observacionales y que proporciona una geometría del universo finalmente plana. En resumen, en el modelo concordante o modelo LCDM, sintetiza nuestro conocimiento de la composición y métrica del universo a la luz de la investigación de los últimos 50 años. Un universo con materia bariónica y oscura ($\Omega_m=0.27$), energía oscura ($\Omega_\Lambda=0.73$) y finalmente plano ($\Omega_k=0$) tal y como esperaban encontrar los físicos con el modelo SCDM.

Vale la pena citar que los resultados más recientes de la sonda de la ESA *Planck Surveyor* puesta en órbita en 2009 con el fin de obtener datos del CMB más precisos que sus antecesores, las sondas COBE y WMAP de la NASA no ha hecho más que confirmar los datos previamente obtenidos. Según los datos de 2015: $\Omega_m=0.3089\pm 0.0062$, $\Omega_\Lambda=0.6911\pm 0.0062$ y $\Omega_k=0.0008\pm 0.0040$ ¹⁴⁵ con lo que $\Omega_m+\Omega_\Lambda+\Omega_k=1.0008\pm 0.0164$, es decir nuestro universo es plano con un 31% de densidad

145 Datos obtenidos del informe: *Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters*, Pág. 31.

de materia (bariónica y oscura) y un 69% de energía oscura. También se ha obtenido un valor para la constante de Hubble, H_0 de 67.74 ± 0.46 Km/s/Mpc.

5.3. Las predicciones del modelo

Los cosmólogos teóricos ponen a prueba la validez del modelo LCDM haciendo simulaciones en potentes ordenadores que se ejecutan durante meses. Parten de la imagen que disponemos del universo primitivo gracias a la radiación cósmica de fondo y hacen que la materia interaccione regida por las leyes de Newton.

Las simulaciones comienzan con un universo joven donde las fluctuaciones de materia no son grandes tras la fase de inflación cósmica. Entonces, el plasma primigenio aparecen ondas mecánicas que se propagan en él, tal y como se desarrolló en el apartado 3.3. A medida que pasa el tiempo, la gravedad va provocando que la materia se agrupe, con lo que las ondas mecánicas aumentan su amplitud, chocan y rompen, produciendo las semillas del universo actual, con sus filamentos, vacíos y cúmulos de galaxias. En el universo joven, habitualmente sólo se tiene en cuenta la materia oscura, por estar en una proporción mucho más elevada en el universo que la materia ordinaria, pero cuando ya comienza la formación de galaxias, entonces sí que se tiene en cuenta la materia ordinaria o bariónica¹⁴⁶.

Además, es importante recordar, tal y como se desarrolló al explicar el segundo pico del espectro de las ondas estacionarias del plasma primigenio en el apartado 3.3, que la materia oscura no interaccionó con los fotones del plasma causantes de las expansiones del plasma. Por lo tanto, la materia oscura ayudó a la agregación de la materia desde el plasma primitivo, ésta nunca se expandía, sólo se contraía por efecto de las fuerzas gravitatorias¹⁴⁷. En cambio, la materia bariónica sólo pudo empezar a agregarse después de la recombinación atómica.

Por otro lado, la materia oscura que se utiliza en los cálculos es del tipo “frío” de ahí el nombre del nuevo modelo estándar: “Lambda-Cold Dark Matter” o materia

146 (J. Ostriker and Mitton 2014) Págs. 261 y 262.

147 Los científicos piensan que es posible que en el centro del Sol haya una porción de materia oscura considerable concentrada dado que no interacciona con el plasma y sólo estaría sometida a las fuerzas gravitatorias ((Casas 2010) Pág. 66)

oscura fría. Si no lo fuera, si la materia oscura fuera “caliente”, tendría tanta velocidad o energía cinética que escaparía de los cúmulos de galaxias y no los mantendría unidos.

Cuando se quieren resultados más precios de las simulaciones, se toma desde el principio la existencia de la materia ordinaria, los campos de radiación y se desarrollan cálculos hidrodinámicos. Este tipo de simulaciones se están llevando a cabo en numerosas universidades y laboratorios.

Los resultados, son predicciones de lo que los telescopios ópticos, infrarrojos y de rayos X ven y verán. Es decir, los cosmólogos comparan los resultados de estas complejas simulaciones, que requieren gran potencia de cálculo, con imágenes actuales o pasadas en la evolución del cosmos. Dominan la imagen en la comunidad científica de que los resultados son buenos y reafirman el nuevo modelo cosmológico estándar LCDM. En las citadas simulaciones, parece que la formación de las galaxias tiene lugar en las épocas correctas, e incluso se han logrado simulaciones que predicen el medio intergaláctico y la estructura de las galaxias masivas con un buen grado de detalle¹⁴⁸.

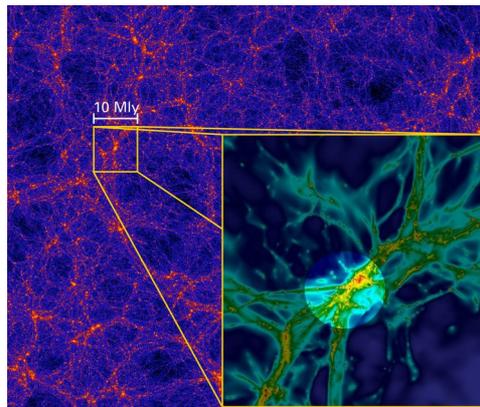


Figura 5.3. Las simulaciones por ordenador (S. Cantalupo) confirman que la materia del universo se estructura en una red cósmica de filamentos como se muestra en la imagen principal. El recuadro muestra una porción de la red cósmica de 10 millones de años-luz de diámetro. Los filamentos contienen fundamentalmente materia oscura (23% materia del universo) y bariónica (4% de la materia del universo, de la cual el 90% es gas intergaláctico). El círculo resalta la formación de un cuásar, con mayor temperatura, que ilumina su entorno¹⁴⁹.

148 (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág. 264.

149 En el año 2013, Sebastiano Cantalupo, desde el telescopio Keck I en Hawaii pudo fotografiar, por primera, vez un fragmento de filamento de gas intergaláctico (IGM, Intergalactic Medium) gracias a la luz emitida por el cuásar UM 287 situado a 9500 Millones de años luz de nosotros. El descubrimiento fue coherente con sus predicciones teóricas en base a simulaciones por ordenador, publicadas en 2005: *Fluorescent ly emission from the high-redshift intergalactic medium*.

Un último resultado importante: las imágenes del cosmos presentados por el SDSS desde Nuevo México y por el, *2dF Galaxy Redshift Survey* (2dFGRS), han confirmado las predicciones de la distribución del plasma primitivo en el momento de la recombinación atómica. Es decir, hay concordancia entre la longitud de onda de las estructuras a gran escala y la longitud de onda del plasma primitivo cuando en las simulaciones se tiene en cuenta la proporción exacta de materia oscura, materia ordinaria, energía oscura del universo y la expansión del universo en el tiempo que ha pasado desde la recombinación atómica hasta la actualidad¹⁵⁰. Las estructuras del universo actual también nos dan información de la composición del cosmos.

En cuanto a las predicciones hacia el futuro del modelo LCDM se pueden realizar, pero al no poderse comprobar carecen de verdadero valor científico. No obstante, mencionaremos las ideas generalmente aceptadas en este punto, acerca de la evolución futura del universo. Por la mayor influencia progresiva de la energía oscura, recordemos que sus efectos aumentan con la expansión del espacio, se piensa que se está iniciando un proceso de inflación similar al que parece que se vivió en los primeros instantes del universo y que se desarrolló en el punto 2.3. En la figura 4.1. se puede observar este aumento acelerado del “radio del universo” por efecto de la energía oscura. Las previsiones en esta línea serían que cuando el Sol muera, aproximadamente en 5.000 millones de años la nueva “inflación cósmica se habrá iniciado”, al mismo tiempo la vecina galaxia de Andrómeda y la Vía Láctea se habrán fundido en una gran galaxia¹⁵¹. Por otro lado, la treintena de galaxias que forma el “Grupo Local”, el cúmulo de galaxias del que forma parte la Vía Láctea, permanecerá gravitacionalmente unido, como los otros cúmulos del universo, pero el millón de galaxias que hemos logrado cartografiar con el proyecto SDSS se dejarán de ver progresivamente. Cuando el universo tenga 100.000 millones de años la luz que nos llegará de otras galaxias más allá de las del Grupo Local, estará tan debilitada por la distancia y tan desplazada hacia el rojo que dejaremos de verlas, incluso la CMB se habrá expandido tanto con la

150 (Casas 2010) Pág. 67.

151 Este hecho se espera que se produzca en unos 3000 millones de años, a la galaxia que se forme, probablemente elíptica, se le ha dado el nombre de Lactómeda.

expansión del espacio que dejaremos de percibirla¹⁵². El destino final, cuando las estrellas acaben de consumir su combustible, será que el cielo se tornará frío y vacío, se habrá producido un big rip o big freeze.

6. LOS LÍMITES DE NUESTRO CONOCIMIENTO

El modelo LCDM es “transitorio” en cuanto que acota los componentes del universo y su comportamiento en él, pero no ofrece una respuesta sobre la naturaleza de la materia ni de la energía oscuras. En este apartado nos acercaremos brevemente a las líneas de investigación que se han desarrollado y se desarrollan para responder esta cuestión. Pero también señalaremos otras limitaciones teóricas importantes de la cosmología física en relación a los primeros instantes del universo: las limitaciones del modelo inflacionario y la necesidad de una teoría cuántica de la gravedad. Todas estas cuestiones han marcado, marcan y marcarán, sin duda, numerosos estudios .

6.1. Naturaleza de la materia oscura

Todavía no se conoce ninguna partícula que pueda constituir la materia oscura. En un primer momento se pensó que los neutrinos podían ser buenos candidatos porque no interactúan con los fotones, pero su masa¹⁵³ es demasiado pequeña para provocar los efectos que se observan en la materia oscura. Por otro lado, su pequeña masa les confiere una velocidad tan elevada de propagación que no permitiría que se formaran grandes estructuras con ellos.

Existen numerosos experimentos para detectar partículas de “materia oscura”. Los experimentos habitualmente se llevan a cabo bajo tierra, para que no se vean afectados ni por los rayos cósmicos ni por la actividad humana. El laboratorio del LHC en Ginebra tiene numerosos experimentos en este sentido.

El consenso actual es que la materia oscura, además de no interactuar con los fotones tiene que ser “fría”, es decir, debe estar formada por partículas que en los inicios

152 (Casas 2010) Págs. 94-95.

153 Los neutrinos, postulados por Wolfgang Pauli (1900-1958) en 1930 y confirmados experimentalmente en 1956, son abundantes en el universo pero poseen una baja muy masa. En 1998 se concluyó que sólo contribuyen con el 1% al balance de densidad de materia del universo (J. Ostriker and Mitton 2014) Pág. 249.

del universo se movían con suficiente lentitud como para permitir que la materia se agrupase y formase las galaxias a su alrededor. Se cree que podría estar formada por las llamadas WIMP (*Weakly Interacting Massive Particles*), partículas masivas que interactúan débilmente. Serían parecidas a los neutrinos, en cuanto que no interaccionan con los fotones pero tendrían que tener una masa superior. Si además su masa y sus interacciones estuvieran en el entorno de la escala electrodébil (1 TeV) explicarían fácilmente las propiedades observadas en la materia oscura y su necesaria abundancia.

De momento, los únicos experimentos que han arrojado datos favorables son aquellos impulsados por la colaboración DAMA / LIBRA en el Laboratorio Nacional Gran Sasso, a 1400 metros de profundidad. Se han detectado centelleos que varían periódicamente con la traslación anual de la Tierra cuando estas supuestas partículas, WIMP, impactan sobre los detectores de yoduro sódico puro. Se cree que esta variación en las detecciones varían en función de si la Tierra va a favor o en contra del propio giro de la galaxia respecto a su centro. Las primeras detecciones tuvieron lugar en 1996. No obstante el hecho de que ningún otro experimento haya arrojado resultados positivos también puede deberse a que no se trate de partículas WIMP sino de otro tipo de partícula 8 veces más masiva que el protón.

Un campo de estudio importante en relación a la materia oscura es la búsqueda de las partículas supersimétricas. Si existiesen partículas supersimétricas que sólo fueran sensibles a la interacción débil, podría tratarse de las partículas WIMP. La supersimetría implica que para cada partícula conocida fermiónica (quarks y leptones) tendría que existir una partícula supersimétrica bosónica. En este sentido, se tienen candidatos en los compañeros supersimétricos de los bosones de la interacción electrodébil y de los bosones de Higgs, los llamados neutralinos.

6.2. Naturaleza de la energía oscura

La primera forma de interpretar la aceleración positiva del universo en su expansión es introducir la constante cosmológica en las ecuaciones de campo de la relatividad general, como ya hizo Einstein en 1917. Lo que significa asignar a la constante cosmológica, λ , un ilógico, extraño e insignificante. Los datos observacionales le asignan un valor 10^{-120} veces inferior a las predicciones teóricas de la física de partículas.

Pero hay otra posibilidad, se trata de interpretarla como un campo de fuerzas, llamado con frecuencia quintaesencia, como el quinto elemento propuesto por los filósofos antiguos. Según los físicos de partículas, esta interpretación es más lógica que la anterior, aunque la anterior sea más frecuente probablemente por el precedente teórico que introdujo Einstein en 1917 al “inventar” el concepto de la “constante cosmológica” e introducirlo de forma coherente en sus ecuaciones.

Hay incluso propuestas de relacionar, en el marco del campo de fuerzas, la quintaesencia responsable de la energía oscura, con la existencia de la materia oscura, con lo que los misterios de nuestro actual modelo cosmológico quedarían reducidos. De momento no hay resultados claros a favor de esta posibilidad pero es un área de estudio en la que trabajan grupos teóricos en todo el mundo.

Es importante señalar que los modelos más factibles para la quintaesencia predicen más estructuras en el universo que los que únicamente tienen en cuenta la existencia de la constante cosmológica, es decir, predice que se deberían encontrar mayores cúmulos galácticos y más cúmulos de cúmulos. Esto significa que estas teorías son comprobables, que afinando los estudios de la estructura del universo, se podrá discernir en unos años cuál de las dos opciones es mejor para explicar la aceleración positiva de la expansión del universo.

6.3. Flaquezas del modelo inflacionario

El modelo inflacionario que presentó Alan Guth en 1981, logró responder a muchas preguntas que el big bang no respondía. Einstein y Lemaitre entre otros, planteaban como premisa de partida, que el universo debía ser homogéneo e isótropo desde sus orígenes, pero no argumentaban el porqué. Con la teoría del universo inflacionario se explica el problema del horizonte, es decir, el de la homogeneidad e isotropía del universo, y el de la planitud, así como la causa de que en el momento actual haya tan pocos monopolos magnéticos tal y como se desarrolló en el apartado 2.3. Además, el modelo predice un espectro de perturbaciones iniciales tras el periodo inflacionario correcto en gran detalle.

Pero el modelo inflacionario, tiene críticas, y es que puede producir todos los efectos positivos señalados, pero también puede dar lugar a un universo muy inestable.

Para que la inflación funcione correctamente llegamos un problema de “ajuste fino” en sus características difíciles de justificar entre todas las posibles.

Esto ha hecho que se hayan desarrollado alternativas al modelo inflacionario como el universo cíclico de Paul Steinhardt y Neil Turok, desarrollado en 2002, que también explica la homogeneidad y planitud del universo gracias a otros mecanismos. Desde esta perspectiva, el origen del universo actual no sería un origen “absoluto” del tiempo y el espacio, sino un nuevo comienzo tras un big crunch, en el que un universo anterior pasa de una fase compresión a otra de expansión con el aumento de la temperatura que esta situación implicaría.

Otra alternativa teórica al modelo inflacionario, inspirado en la teoría de cuerdas, es un universo “cíclico” en base a choques periódicos, de aproximadamente 1000 millones de años, entre membranas o “branas” tridimensionales dentro de un espacio con una cuarta dimensión espacial. Cada vez que las “branas” que se hallan a una distancia corta “chocan” acabaría el universo anterior y comenzaría uno nuevo. En este universo de “branas” la energía oscura ayudaría a crear la homogeneidad de cada “universo-brana”, cuando las “branas” están en una etapa de separación. Pero cuando entre las “branas” vuelve a dominar la atracción y “chocan”, en el tiempo del “choque” se produce el “intercambio de información” necesario entre las “branas” para que el nuevo universo sea isótropo, homogéneo y plano.

El modelo inflacionario es teórico y no acaba de responder a todos los problemas que plantea, por ello surgen posibilidades teóricas alternativas. No obstante, en la cosmología física es fundamental separar los hechos observacionales que han dado lugar al nuevo modelo LCDM de las especulaciones teóricas, necesarias pero no contrastadas.

6.4. Predicciones previas al tiempo de Planck y hacia el futuro

Una de las características de una buena teoría científica es que puede realizar buenas predicciones y buenas explicaciones. Cuando se han realizado simulaciones del modelo LCDM llevando el tiempo hacia atrás, las predicciones del modelo son correctas pero hay un tiempo que no se puede superar, es el llamado tiempo de Planck, en honor al Max Planck, fundador de la teoría cuántica. Este tiempo, definido por el mismo Planck, se obtiene de la siguiente expresión:

$$t_p = \sqrt{h \cdot G / c^5} = 5'4 \cdot 10^{-44} (s)$$

En ella, h es la constante de Planck, G es la constante de la gravitación universal y c es la velocidad de la luz. Antes de este tiempo no podemos aplicar las ecuaciones de la teoría general de la relatividad porque éstas no se cumplen en las dimensiones cuánticas. Einstein y sus ayudantes intentaron superar este problema, Edward Witten (n.1951) también y más recientemente todos los teóricos de cuerdas, pero no se ha logrado desarrollar satisfactoriamente una teoría cuántica de la gravedad para ir más allá de este tiempo.

7. CONCLUSIONES

En este último apartado, a modo de reflexión, y a la vista del desarrollo histórico y científico de la cosmología física en los últimos 50 años, nos planteamos dos cuestiones pertinentes en relación con la filosofía de la ciencia: ¿en este tiempo ha dominado el aspecto observacional o el teórico en la cosmología? Y, ¿hasta qué punto el nuevo modelo cosmológico estándar LCDM puede ser considerado un nuevo y revolucionario paradigma cosmológico?

7.1. Equilibrio entre teorías y tecnociencia en la cosmología física

Es habitual dar un gran valor al despegue que ha realizado la cosmología física, en los últimos 50 años, gracias al desarrollo de la instrumentación y las tecnologías de la información. A principios de la década de 1960, los cosmólogos debatían entre qué modelo cosmológico respondía mejor a la realidad, si modelo estacionario de Hoyle, Bondi y Gold o el modelo del big bang caliente de Friedman, Lemaître y Gamow. No podían decantarse por uno u otro modelo porque no se disponía de datos fiables suficientes. Se inclinaban hacia uno u otro en base a creencias personales antes que por la evidencia de datos contrastables. La situación cambió con la confirmación, en 1965, de la radiación cósmica de fondo. La evidencia a favor del modelo del big bang fue tan grande que el modelo estacionario se abandonó.

Desde entonces, la cosmología física no ha dejado de avanzar gracias a los nuevos telescopios, tanto terrestres como en órbita, en todas las franjas del espectro electromagnético o el descubrimiento en 1970 de los detectores electrónicos de luz

CCD. Hoy en día no se puede presentar una teoría para explicar hechos observacionales que no sea consistente con una gran cantidad de datos, tomados desde las altas frecuencias de los rayos X a las bajas frecuencias de las ondas de radio, pasando por el ultravioleta, la luz visible y el infrarrojo.

Por otro lado, de acuerdo con la ley de Gordon Moore (n.1929), la potencia de cálculo de los ordenadores en los últimos 50 años se ha multiplicado por dos cada año o dos años¹⁵⁴. Este hecho, ha permitido que las simulaciones en superordenadores programados siguiendo las leyes de la física desarrollen complejas o largas operaciones matemáticas. De esta manera, se han podido contrastar los modelos teóricos con los datos, tanto del universo actual como yendo hacia atrás en el tiempo al observar los objetos más lejanos. El avance de las observaciones y de la capacidad de cálculo de la cosmología apoyada en el de la tecnociencia, es decir, en la tecnología apoyada a su vez en los avances de la ciencia, es innegable.

No obstante, el historiador de la ciencia Helge Kragh (n.1944), defiende la idea de que en el desarrollo histórico de la cosmología física, no hay que sobrevalorar los resultados experimentales, que ha tenido la misma importancia la obtención de datos precisos del universo como el haberlos interpretado correctamente en un marco teórico acertado¹⁵⁵. Vamos a revisar algunos estudios significativos de los últimos 50 años con la finalidad de observar si han dominado en ellos aspectos teóricos u observacionales.

A principios de la década de 1930 se mejoraron los espectrógrafos anexos a los telescopios, lo que permitió estudiar mejor la rotación y masa de las galaxias. Son de destacar las mejoras introducidas por N. Mayal al telescopio de 36 pulgadas del observatorio Lick, durante la realización de su doctorado finalizado en 1934¹⁵⁶. Es un ejemplo de cómo la tecnociencia impulsa a la ciencia.

154 Un dato concreto es que los chips de memoria de los ordenadores en 1975 tenían 16.000 transistores mientras que en el año 2000 tenían 1000 millones de transistores. Con lo que su potencia de cálculo ha quedado multiplicada por un factor de 10^5 ((Mack 2011) Págs. 202-203).

155 (Kragh 2008) Págs.395 y 401.

156 El tema del doctorado fue sugerido por Hubble a Mayall, *A study of the distribution of extragalactic nebulae based on plates taken with the Crossley reflector*.

En 1936, Zwicky pudo observar supernovas, hacer el primer mapa del universo y descubrir los cúmulos de galaxias gracias al recién descubierto telescopio Schmidt (1930), y la instalación en Monte Palomar en 1936 de un ejemplar de 46 cm de diámetro. Un poco más tarde en 1937, supo interpretar correctamente el movimiento de las galaxias del cúmulo de Coma como materia oscura, al mismo tiempo que predice que los cúmulos de galaxias serán las lentes gravitatorias más poderosas del universo. Zwicky es un ejemplo de genialidad a la hora de saber obtener buenos datos y lo que es más difícil, de interpretarlos correctamente en un nuevo marco conceptual.

La década de 1960 nos presenta dos ejemplos de interpretación incorrecta de los datos. Sandage introdujo un valor precipitado del parámetro de desaceleración apoyado en datos no suficientemente fiables, que llevó a una deducción precipitada de la métrica del universo como elíptica o cerrada. El hecho evidencia la importancia de disponer de los mejores datos posibles antes de encuadrarlos en marcos teóricos. El otro ejemplo, es el ofrecido por Margaret y Geoffrey Burbidge, cuando estudiaban las curvas de rotación de las galaxias. En su caso, los datos eran correctos, habían obtenido unos valores de rotación de las estrellas más alejadas de los centros galácticos más altas de los normales. Es cierto que no pudieron extender a radios lejanos su estudio por limitaciones en sus instrumentos de medida, pero no dieron la importancia suficiente a los que sí que obtuvieron, aun siendo relativamente cercanos al núcleo galáctico. Sufrieron un sesgo inconsciente, causado por el tipo de datos que esperaban encontrar, que las velocidades de rotación disminuyeran al alejarse del centro galáctico.

La década de 1970 ofrece interesantes ejemplos del valor de la correcta interpretación conceptual de los datos antes de la acumulación indiscriminada de los mismos. El artículo de Ostriker, Peebles y Yahil *The size and mass of galaxies, and the mass of the universe*, recopiló acertadamente estudios previos sobre las curvas de rotación de numerosas galaxias. Señalaron que las masas de las galaxias debían ser multiplicadas por 10 o más para poder explicar las curvas de rotación planas de las galaxias estudiadas. No aportaron datos nuevos, pero supieron interpretar correctamente los numerosos y fiables datos disponibles. En la misma línea, el artículo publicado en 1974 por J. Richard Gott, James E. Gunn, David Schramm y Beatrice Tinsley con el título de *An unbound universe?* planteó, contra la idea mayoritaria, la necesidad de introducir de nuevo la constante cosmológica ante la evidencia de un universo con una

densidad de materia baja y que al mismo tiempo pudiera tener una métrica diferente de la abierta. Introdujeron la idea mucho antes de que fuera aceptada por toda la comunidad científica en 1998.

En la década de 1980, hemos visto ejemplos del valor inestimable de los datos fiables. Los datos de V. Rubin y K. Ford respecto a la materia oscura triunfan porque se apoyan en un mejor instrumento, el espectrógrafo de tubo de imagen. Su publicación que comparaba la rotación de 21 galaxias, *Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 /R = 4kpc/ to UGC 2885 /R = 122 kpc/*, fue una importante prueba a favor de la materia oscura. La duda acerca de si esa masa oscura extra que parecía haber en el universo, era realmente un nuevo tipo de materia, o si se trataba de la más revolucionaria idea de que las leyes de Newton, o su versión ampliada de la relatividad general, dejaban de ser válidas, se decantó hacia la idea de que realmente se trataba de una materia nueva, aunque desconocida. La acumulación de los datos, igual que en el debate entre el modelo estacionario y el big bang, acabo por aclarar el panorama conceptual.

En la década de 1990 y 2000 los datos de los satélites, COBE y WMAP, y la observación de las supernovas Ia, han permitido convertir la cosmología en una ciencia de precisión, hecho fundamental para su desarrollo científico, pero lo que es más importante, sus pruebas a favor de la existencia de la materia y energía oscuras, han asentado el el nuevo modelo cosmológico LCDM, de naturaleza más observacional que teórico.

Los ejemplos citados parecen apuntar a que la idea de Kragh, tan propia de la filosofía de la ciencia de que los datos sólo tienen valor dentro de un marco conceptual, parece haberse cumplido una vez más. Un correcto marco teórico y observacional son los dos ejes en que se apoya, por igual, esta moderna disciplina científica. Los datos precisos apoyados en refinadas técnicas experimentales que sirvan para contrastar la teoría son fundamentales. Desde los datos aportados por las sondas COBE, WMAP o Plank, pasando por los grandes cartografiados de cielo como el SDSS y el 2dfGRS o las evidencias acumuladas de la existencia de la materia y la energía oscura. Sin ellos la cosmología no habría avanzado como lo ha hecho en el siglo XX, y no se habría asentado como una disciplina científica de precisión. Pero sin un marco teórico que

permitiera una correcta interpretación de nuestro universo, tampoco se hubiera logrado. Sin el salto de gigante en el marco teórico que dio Einstein con la teoría de la relatividad general, no hubiera nacido la cosmología física, y sin las certeras interpretaciones de las evidencias como las de Zwicky ante la realidad de la materia oscura o las de Tinsley ante la la necesidad de introducir de nuevo la constante cosmológica tampoco.

Una brillante teoría, como la de la relatividad general, sin su comprobación experimental no es completamente aceptada en la comunidad científica. Motivo por el que grandes edificios teóricos en los que se apoya o se podría apoyar la cosmología actual como la teoría inflacionaria o la teoría de “branas” respectivamente no acaban de cimentarse con solidez. Así como los datos observacionales, por precisos y metódicos que sean, hasta que no son completa y correctamente interpretados en un nuevo marco teórico, no son más que indicadores de los límites de nuestro conocimiento. Es el caso de la materia y la energía oscuras hasta que no haya teorías finales y convincentes acerca de su naturaleza.

Zwicky fue demasiado revolucionario, no estaba preparada la comunidad científica para recibir su descubrimiento, ni a nivel de datos, ni a nivel de marco teórico. Su descubrimiento, aunque brillante a todos los niveles, en datos y desarrollo de ideas, no tenía precedentes que los apoyaran. La confirmación de la energía oscura fue novedosa, pero estaba encuadrada en un marco teórico discutido largamente lo que permitió que fuera aceptada rápidamente. Los trabajos teóricos de Einstein (1917), Lemaitre (1933), Schramm-Tinsley-Gunn (1974) o Krauss-Turner (1995) prepararon el marco conceptual en el que encajarla.

El problema actual de la cosmología es más teórico que observacional, hemos observado la materia oscura, la energía oscura, pero no podemos responder sobre su naturaleza, faltan observaciones pero falta fundamentalmente un marco teórico para ellas. De la misma manera, falta desarrollar una teoría cuántica de la gravedad que explique satisfactoriamente el inicio del universo. Una buena teoría científica debe poder predecir y explicar correctamente los fenómenos que estudia. De momento, el modelo LCDM ha logrado buenas predicciones, tal y cómo han mostrado las simulaciones por ordenador, pero le falta poder explicar las naturalezas de la materia y energías oscuras.

No obstante, otro punto crítico en el desarrollo de esta ciencia de naturaleza observacional es que se puedan mantener los costosos equipos producto de la tecnociencia que la apoyan: desde el LHC¹⁵⁷ a los grandes telescopios o sondas espaciales. Para que la cosmología siga avanzando precisa no sólo de un marco teórico más amplio apoyado en el trabajo de la comunidad científica internacional, sino de la colaboración de los estados para soportar sus costosos y complejos experimentos y observaciones.

7.2. ¿El modelo LCDM es un nuevo paradigma cosmológico?

Es habitual definir la cosmología como la ciencia que estudia el origen, estructura y destino del universo. Si revisamos el aporte del nuevo modelo LCDM a la cosmología, éste ha ampliado nuestra visión de la estructura y evolución del universo. El descubrimiento de la energía y de la materia oscuras, componentes mayoritarios en nuestra visión actual del cosmos, son determinantes para responder a las cuestiones de la estructura y evolución del universo. Sin la presencia de la materia oscura en el universo no se podrían haber formado las estructuras a media y gran escala que observamos en todas las direcciones del espacio, como galaxias, cúmulos de galaxias, supercúmulos y murallas. Sin la energía oscura, no podríamos comprender la expansión acelerada que vive el cosmos en el presente y no habiéramos podido explicar lo que se esperaba a nivel teórico y observacional, a la luz de los datos de las sondas COBE y WMAP, que vivimos en un universo geoméricamente plano o euclídeo.

Respecto a la respuesta a la cuestión del origen del cosmos, ésta ha quedado “prácticamente intacta”, en los últimos 50 años que han transcurrido desde que se estableciera el modelo del big bang. Sí que se debe tener presente la importante aportación teórica de la comúnmente aceptada teoría del modelo inflacionario como complemento a nuestra visión de los primeros instantes del universo. Pero la teoría inflacionaria no ha alterado la visión de ese origen “explosivo” y caliente en el que surgió todo, en todo caso la ha “ampliado” o “matizado”. La existencia de la energía y materia oscuras son incuestionables en el nuevo modelo LCDM que le dan su nombre.

¹⁵⁷ Large Hadron Collider del CERN en Ginebra, el más potente, grande y caro acelerador de partículas del mundo en el que se recrean los primeros instantes del big bang y se profundiza en el Modelo Estándar la física de partículas, lo que puede ayudar a aclarar la naturaleza de la materia y energías oscuras.

En cambio, el modelo inflacionario podría ser sustituido por otros modelos, como el de “branas” o el del “universo cíclico” para explicar los problemas tradicionales del horizonte y de la planitud asociados al tradicional modelo del big bang caliente.

Según el historiador Helge Kragh, el salto conceptual en la visión de universo tras los descubrimientos de Hubble de la expansión del universo a finales de la década de 1920 significó la implantación de un nuevo paradigma en cosmología. Podemos añadir que en la confrontación entre el modelo del big bang y el del universo estacionario en la década de 1950 y la primera parte de la de 1960, la confirmación de la CMB en 1965 permitió la implantación definitiva del modelo del big bang tras un periodo de crisis en el que conviven dos modelos rivales, basados en paradigmas incompatibles. Pero Kragh plantea que a veces se atribuye el nombre de nuevo paradigma revolucionario al modelo LCDM de forma demasiado “ligera”, que más bien el modelo LCDM es una ampliación, en base a la continuidad en las observaciones, del modelo del big bang¹⁵⁸.

Es evidente que el nuevo modelo LCM amplía suficientemente el modelo del big bang como para ser considerado un nuevo modelo. La pregunta es, siguiendo las ideas del gran filósofo de la ciencia T. Kuhn expuestas en su obra, *La estructura de las revoluciones científicas*, si podemos reconocer al nuevo modelo LCDM como un nuevo paradigma cosmológico cómo lo han empezado a definir algunos historiadores de la ciencia como Simon Mitton (n.1946) entre otros. ¿Después de un periodo de ciencia “normal” y tras un periodo de crisis, se ha producido un nuevo “paradigma”, una nueva concepción “revolucionaria” del universo en que vivimos que haya dejado atrás la visión anterior? ¿Han estado en puja dos paradigmas rivales durante un periodo breve de tiempo que sean absolutamente excluyentes?

La opinión de Kragh en este punto es que la historia demuestra que en pocas ocasiones hay cambios de paradigmas “revolucionarios” en la historia de la ciencia, en el sentido fuerte que planteó Kuhn en 1962, pero sí existen muchos pequeños cambios de paradigma y revoluciones en un sentido más “débil” en la historia de la ciencia en general y de la cosmología en particular. Un ejemplo que expone es la mal llamada “revolución Copernicana”. Ésta no fue tan rápida como muchas veces se quiere hacer

158 (Kragh 2008) Págs.393-394.

creer. Implicó un significativo periodo de convivencia entre la antigua visión geocéntrica y la heliocéntrica en que el modelo antiguo y nuevo se comparaban y evaluaban “racionalmente y sistemáticamente” y que no estuvo exento de modelos mixtos como el de Tycho Brahe. En cambio, el menos llamativo salto de la décadas de 1910 y 1920 en el que pasamos de la visión de que todo el universo era la Vía Láctea a incluir en él muchas otras galaxias es mayor, significa un salto conceptual, o cambio de paradigma, más importante y rápido¹⁵⁹.

Para dilucidar una respuesta, puede ser de interés buscar la definición de Kuhn de “paradigma” en su revolucionaria obra de 1962: “Considero a éstos como realizaciones científicas universalmente reconocidas que, durante cierto tiempo, proporcionan modelos de problemas y soluciones a la comunidad científica”¹⁶⁰. Mi opinión es, siguiendo en este punto a la de Kragh, que efectivamente el modelo LCDM no es “revolucionario” respecto al modelo del big bang, en un sentido “fuerte” en cuanto que no parte de hipótesis diferentes a las bases del modelo anterior. En este sentido, es evidente que es un ampliación del modelo anterior a la luz de las nuevas observaciones y preguntas que se desarrollan en los 50 años que los separan. Es significativo que las cuestiones acerca de la formación y evolución de las estructuras del universo, motores teóricos del nuevo modelo, se plantearan a principios de la década de 1970, justo después de la implantación del big bang como modelo estándar. Pero también es cierto, si nos ceñimos a la definición de paradigma de Kuhn arriba citada, que sí que puede ser definido como un nuevo paradigma ya que a día de hoy es un modelo ampliamente “reconocido” y proporciona “modelos de problemas y soluciones a la comunidad científica”.

Concluyo que el modelo LCDM aporta una visión suficientemente nueva de la composición y evolución del cosmos para considerarlo un nuevo paradigma, aunque se haya ido gestando en el seno del modelo anterior. Si Hubble comprendió entre 1926 y 1929 que la velocidad de la luz y la de recesión de las galaxias imponía un radio máximo al universo, y que con un telescopio de 100 pulgadas sólo alcanzábamos a ver el 0'15% del mismo, con lo que el tamaño del universo más allá del visible quedó

159 (Kragh 2008) Págs. 392-393.

160 (Kuhn 1962) Pág. 13.

aumentado 670 veces. Ahora, reconocer que sólo conocemos la naturaleza del 4% del universo, es un salto conceptual probablemente equivalente, si no lo es mayor. No obstante, es cierto que, que no conocer la naturaleza de la materia y energía oscuras, “nuevos ingredientes” fundamentales del cosmos nos evidencia que en el fondo estamos en un periodo de “crisis” y que el “paradigma” LCDM es sólo un paso intermedio previo a un previsible y futuro “nuevo paradigma” probablemente más revolucionario. Habrá que esperar a que los acontecimientos históricos sigan su curso. Al fin y al cabo, la historia de la cosmología la podemos definir como la historia de incrementar nuestra visión de las dimensiones, componentes y evolución del universo.

Es evidente que estamos en un punto intermedio más, como tantos otros del pasado, en nuestro conocimiento del universo. Habrá que seguir expectantes a los derroteros históricos de una de las ramas del saber humano más fascinantes e imbricada con la reflexión filosófica.

BIBLIOGRAFÍA

- Bahcall, N. A. 1999. "The Cosmic Triangle: Revealing the State of the Universe." *Science* 284 (5419): 1481–88.
- Casas, Alberto. 2010. *El Lado Oscuro Del Universo*. Vol. 12. Editorial CSIC - CSIC Press.
- Cepa, Jordi. 2007. *Cosmología Física*. Madrid: Akal.
- De Lapparent, V., M. J. Geller, and J. P. Huchra. 1986. "A Slice of the Universe." *The Astrophysical Journal* 302 (March): L1.
- Goldhaber, Gerson, Brian Boyle, Peter Bunclark, Dave Carter, Richard Ellis, Silvia Gabi, Ariel Goobar, et al. 1995. "Discovery of the Most Distant Supernovae and the Quest for Ω ." *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* 38 (1-3): 435–39.
- Gott, J. R., III, D. N. Schramm, B. M. Tinsley, and James E. Gunn. 1974. "An Unbound Universe." *The Astrophysical Journal* 194 (December): 543.
- Gunn, James E., and J. Richard, III Gott. 1972. "On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution." *The Astrophysical Journal* 176 (August): 1. doi:10.1086/151605.
- Guth, Alan H. 1981. "Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems." *Physical Review D* 23 (2): 347–56.
- . 1999. *El Universo Inflacionario: La Búsqueda de Una Nueva Teoría Sobre Los Orígenes Del Cosmos*. Debate.
- Hoyle, Fred, and Allan Sandage. 1956. "The Second-Order Term in the Redshift-Magnitude Relation." *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 68 (August): 301.
- Kirshner, Robert P. 2006. *El Universo Extravagante: Estrellas Explosivas, Energía Oscura Y Cosmos Acelerado*. Madrid: Ediciones Siruela.
- Kragh, Helge. 2008. *Historia de La Cosmología: De Los Mitos Al Universo Inflacionario*. Barcelona: Crítica.
- Krauss, Lawrence M., and Michael S. Turner. 1995. "The Cosmological Constant Is Back." *General Relativity and Gravitation* 27 (11): 1137–44.
- Kuhn, Thomas S. 1962. *La Estructura de Las Revoluciones Científicas*. 2nd ed. Madrid: Fondo de Cultura Economica.
- Lemaître, G. 1934. "Evolution of the Expanding Universe." *Proceedings of the National Academy of Sciences of*

- Mack, Chris A. 2011. "Fifty Years of Moore's Law." *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* 24 (2). IEEE: 202–7.
- Oke, J. B., and Allan Sandage. 1968. "Energy Distributions, K Corrections, and the Stebbins-Whitford Effect for Giant Elliptical Galaxies." *The Astrophysical Journal* 154 (October): 21.
- Oort, J. H. 1970. "The Density of the Universe." *Astronomy and Astrophysics* 7.
- Ostriker, J., and S. Mitton. 2014. "El Corazón de Las Tinieblas. Materia Y Energía Oscuras: Los Misterios Del Universo Invisible." Barcelona: Ediciones de Pasado y Presente.
- Ostriker, J. P., P. J. E. Peebles, and A. Yahil. 1974. "The Size and Mass of Galaxies, and the Mass of the Universe." *The Astrophysical Journal* 193 (October): L1.
- Ostriker, J. P., and Paul J. Steinhardt. 1995. "Cosmic Concordance." *Astrophysics; General Relativity and Quantum Cosmology*, May, 8.
- Perlmutter, S., G. Aldering, M. Della Valle, S. Deustua, R. S. Ellis, S. Fabbro, A. Fruchter, et al. 1998. "Discovery of a Supernova Explosion at Half the Age of the Universe" 391 (6662): 51–54.
- Rees, M. J., and J. P. Ostriker. 1977. "Cooling, Dynamics and Fragmentation of Massive Gas Clouds - Clues to the Masses and Radii of Galaxies and Clusters." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 179: 541–59.
- Riess, Adam G., Alexei V. Filippenko, Peter Challis, Alejandro Clocchiatti, Alan Diercks, Peter M. Garnavich, Ron L. Gilliland, et al. 1998. "Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant." *The Astronomical Journal* 116 (3): 1009–38.
- Rubin, V. C., N. Thonnard, and Jr. Ford, W. K. 1978. "Extended Rotation Curves of High-Luminosity Spiral Galaxies. IV - Systematic Dynamical Properties, SA through SC." *The Astrophysical Journal* 225 (November): L107.
- . 1980. "Rotational Properties of 21 SC Galaxies with a Large Range of Luminosities and Radii, from NGC 4605 /R = 4kpc/ to UGC 2885 /R = 122 Kpc/." *The Astrophysical Journal* 238 (June): 471.
- Sandage, Allan. 1958. "Current Problems in the Extragalactic Distance Scale." *The Astrophysical Journal* 127 (May): 513.
- Sellés García, Manuel A. 2007. *Introducción a La Historia de La Cosmología*. Madrid: UNED.
- Tinsley, Beatrice M. 1968. "Evolution of the Stars and Gas in Galaxies." *The Astrophysical Journal* 151 (February): 547.

- Tolman, RC. 1934. "Effect of Inhomogeneity on Cosmological Models." *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- White, S. D. M., and M. J. Rees. 1978. "Core Condensation in Heavy Halos: A Two-Stage Theory for Galaxy Formation and Clustering." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 183 (3): 341–58.
- Wickramasinghe, T., and T. N. Ukwatta. 2010. "An Analytical Approach for the Determination of the Luminosity Distance in a Flat Universe with Dark Energy." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 406 (1): 548–50.
- Zwicky, F. 1937. "On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae." *The Astrophysical Journal* 86 (3): 217–46.