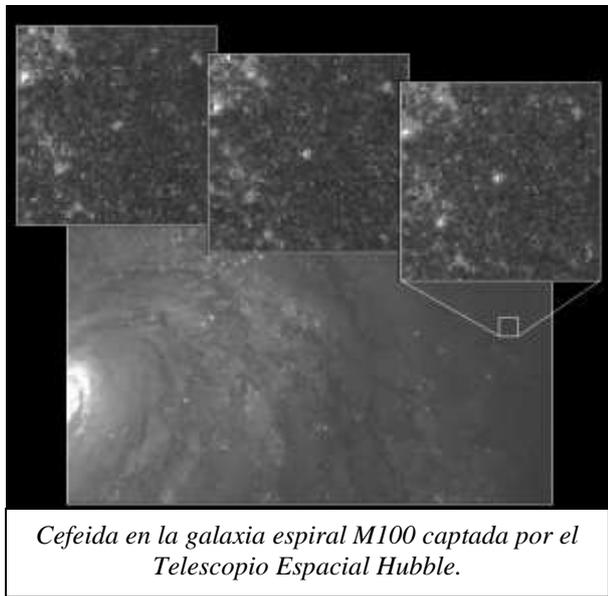


## MODELANDO EL COSMOS (III)\*

Ángel R. López Sánchez

### LAS DISTANCIAS A LAS GALAXIAS

Vimos en las entregas anteriores que el Universo no sólo está en expansión sino que quizás ésta no es constante. La pregunta a plantearse a continuación es: ¿cómo podemos medir si hay o no aceleración en la forma en la que las galaxias se separan entre sí? Entramos en la parte observacional de la Cosmología y lo hacemos con otra pregunta clave de la Astrofísica: *¿a qué distancia se encuentran las estrellas, las galaxias y los cúmulos de galaxias?* Dar respuesta a esta cuestión ha sido uno de los mayores retos de la Ciencia a lo largo de la Historia. Actualmente, sólo conocemos una técnica directa para calcular distancias astronómicas, que es el **paralaje estelar**. El satélite *Hipparcos* ha sido el que ha determinado con mayor precisión estas distancias, proporcionando los valores para unas 120.000 estrellas en una esfera de unos 1.600 años luz en torno al Sol. Todos los demás métodos que se usan para medir las distancias son indirectos, puesto que se necesitan conocimientos previos de *calibración* para su determinación. El ejemplo más famoso es el de las **cefeidas**. Este tipo de estrellas supergigantes amarillas tienen unas oscilaciones en su emisión de luz, siendo el período de variación de dicha oscilación proporcional al cambio de luminosidad emitido. Como existe una relación directa entre la luminosidad, magnitud aparente y distancia, podemos conocer lo lejos que se encuentra la estrella.



*Cefeida en la galaxia espiral M100 captada por el Telescopio Espacial Hubble.*

No nos engañemos: no todo es tan sencillo. Para usar este procedimiento, previamente los astrofísicos han tenido que desarrollar un modelo de estrella pulsante más o menos real y sobre él obtener la relación período-luminosidad. Si el modelo es incorrecto, las distancias son erróneas. En los años veinte, cuando Hubble estudió la velocidad de alejamiento de las galaxias por primera vez, sólo existía una relación empírica entre el período y la luminosidad de las estrellas cefeidas. Por eso las primeras medidas de la constante de Hubble fueron tan malas (la estimó en torno a 500 km/s/Mpc). Pero no seamos pesimistas: por ahora parece que los modelos van bien orientados y podemos dar con cierta precisión las distancias a estas estrellas. Como las cefeidas son estrellas supergigantes podemos verlas en galaxias cercanas e incluso más lejos con los grandes telescopios. Éste es el método que se ha usado para comprobar que la Ley de Hubble funciona. Pero no nos permite alcanzar distancias cosmológicas.

### SUPERNOVAS Y ACELERACIÓN DEL UNIVERSO

En los últimos años se ha estado desarrollando un método alternativo para medir distancias a objetos aún más lejanos a partir de **explosiones de supernova del tipo Ia**.

\* La 1º y 2º parte de este artículo se publicaron en los números 1 (2004) y 2 (2005) de *Isagogé*.

El modelo que se desarrolla ahora es el de cómo evoluciona un sistema compuesto por una estrella cuya materia es arrancada por una enana blanca compañera, llegándose a un momento en el que ésta se colapsa y el sistema explota. Como esta explosión se produce siempre bajo unas condiciones muy específicas, se puede suponer que la explosión de una supernova *siempre* va a tener un brillo similar. Y con esto, conocemos la distancia. Las observaciones de supernovas en galaxias muy lejanas parecen indicar que éstas se alejan a menor distancia de lo esperado por la Ley de Hubble, indicando que la expansión *se acelera*. A este resultado llegó el estudio realizado en 1998 por un amplio equipo de astrofísicos dirigidos por Perlmutter. El nombre de este trabajo es el *Proyecto de Supernovas Cosmológicas* y en él se estudian los parámetros cosmológicos usando 42 medidas de supernovas a alto y bajo *desplazamiento al rojo*.

Así, la expresión lineal de la ley de Hubble es sólo válida hasta una determinada distancia. Después, se modifica curvándose hacia arriba o hacia abajo dependiendo de la densidad total del Universo que, recordemos, consta tanto de la densidad provocada por la materia,  $\Omega_M$ , como aquella que proviene de la energía del vacío,  $\Omega_\Lambda$ . Si se consigue determinar experimentalmente la forma de esta ley del movimiento del Universo, se pueden ajustar los distintos modelos cosmológicos hasta encontrar el que mejor reproduzca las observaciones a distancias cosmológicas. Ése será el Universo en el que nos encontremos.

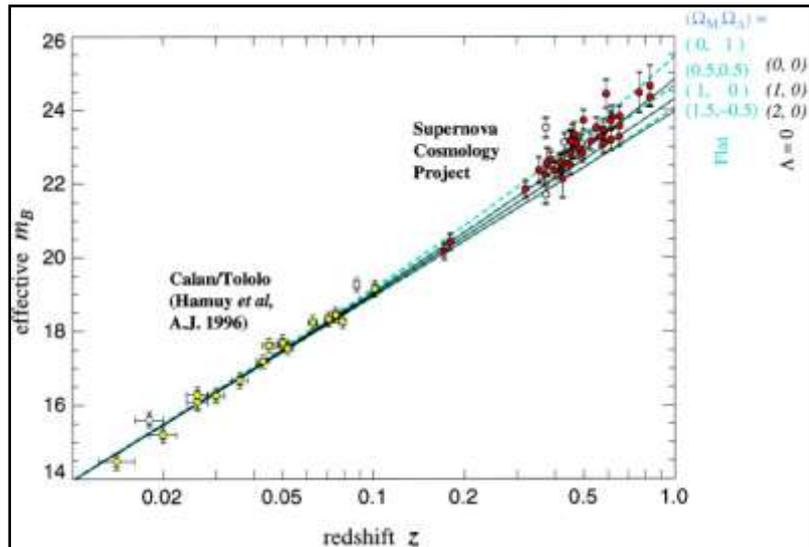
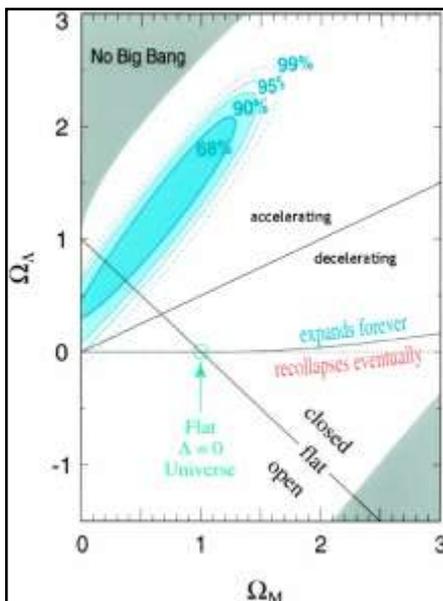


Diagrama del estudio de Perlmutter et al. en el artículo de 1998 aparecido en The Astrophysical Journal, mostrando qué distancia es capaz de alcanzarse usando las supernovas I a. Las líneas azules punteadas muestran distintos modelos de Universo. El modelo que mejor ajusta tiene un valor positivo distinto de cero para la constante cosmológica, lo que indicaría que el Universo acelera su expansión.



### ACORRALANDO A NUESTRO UNIVERSO

Sinteticemos todos los datos obtenidos por el momento y unámoslos en una misma gráfica, que es la que se muestra bajo estas líneas. En dicho diagrama, se representa la densidad de energía del vacío,  $\Omega_\Lambda$ , frente a la densidad de materia,  $\Omega_M$ , y se dibujan las zonas que corresponden a distintos modelos de universo. Existen situaciones prohibidas por la teoría del Big Bang (esquinas superior

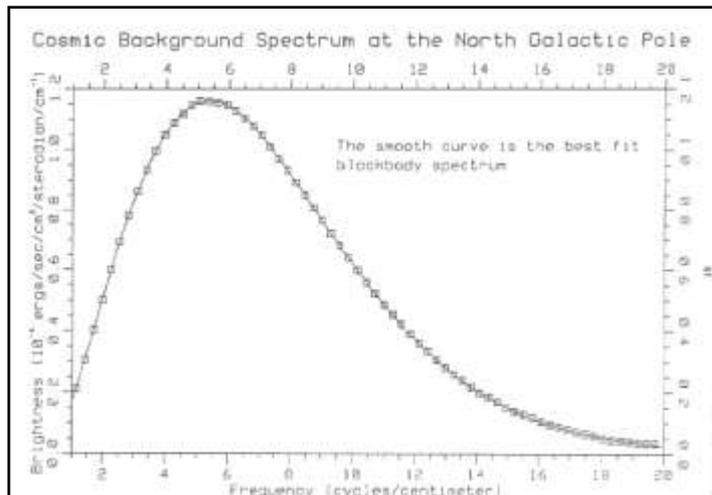
Diagrama que muestra distintos tipos de universo en función de la densidad de materia,  $\Omega_M$ , y la densidad de la energía del vacío,  $\Omega_\Lambda$ . La zona sombreada indica la acotación por los datos observacionales proporcionados por el estudio de supernovas Ia.

izquierda e inferior derecha) y tres curvas importantes. La primera de ella separa un universo en continua expansión con aquél que se colapsa. La segunda da cuenta de la geometría (abierta, plana o cerrada). La última separa la zona de un universo que se frena con otro que se acelera.

Superpuesta a la gráfica se encuentra una zona sombreada que indica la acotación que se tiene actualmente a nuestro Universo a partir de los datos observacionales. Aún sin ajustar con precisión los detalles (se necesitan muchísimas observaciones y desarrollos posteriores), se encuentra que nuestro Universo *se expandirá para siempre*, que esta expansión *se acelera* como consecuencia de la energía del vacío y que lo más probable es que su *geometría sea cerrada*. A esta conclusión se ha llegado con las observaciones disponibles gracias al estudio de las supernovas Ia a alto desplazamiento al rojo.

## LA RADIACIÓN CÓSMICA DE FONDO

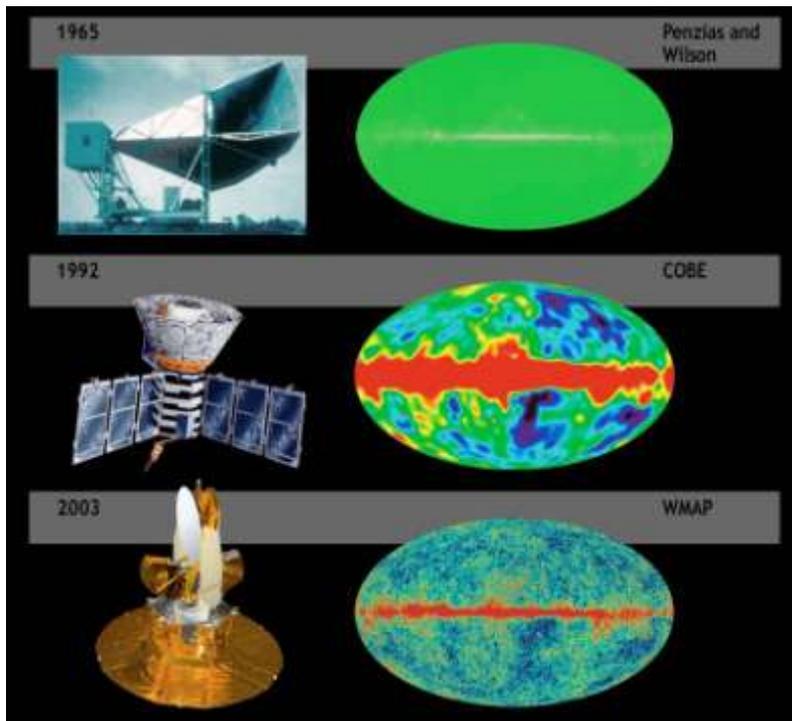
¿Podemos hacer una estimación alternativa de estos valores? Sí, usando la **radiación cósmica de fondo**. Mencionamos anteriormente que es el eco del Big Bang, el resultado de una transición de fase entre un universo gobernado por la radiación a otro gobernado por la materia. Es la época de la Recombinación, cuando los electrones y los núcleos se juntan para formar los átomos. Fue descubierta de forma accidental en 1965 por Penzias y Wilson, aunque ya se había predicho teóricamente como consecuencia del modelo del Big Bang. Quizás lo más sorprendente de esta radiación de fondo es que es *muy isotrópica*: tiene *casi* el mismo valor en cualquier parte del cielo. Se ajusta *perfectamente* a la radiación que emitiría un cuerpo con una temperatura de 2.726 grados kelvin (-270.424 grados centígrados) en equilibrio térmico. Bajo estas condiciones, la radiación cósmica de fondo se comporta como un **cuerpo negro**.



*La emisión de un cuerpo negro a 2.726 K se ajusta perfectamente a la emisión de la radiación cósmica de fondo. En el eje de abscisas se representa la frecuencia de la radiación. En el de ordenadas, el brillo.*

Sin embargo, aparecen pequeñas fluctuaciones en el valor de esta temperatura cuando se mira a distintas zonas del cielo. Estas **anisotropías** son de vital importancia, porque muestran que en el momento de la Recombinación existían zonas del Universo más densas y calientes, mientras que otras quedaban más frías. Las fluctuaciones deberían estar estrechamente relacionadas con la formación de la estructura a Gran Escala del Universo. El satélite **COBE** (*Cosmic Background Explorer*) estimó en 1992 que las anisotropías de la radiación cósmica de fondo sólo variaban la temperatura en 0.00003 grados. Pero COBE no tenía suficiente resolución angular para escudriñar las *semillas* de los supercúmulos de galaxias pues sólo podía muestrear zonas mayores que 7° (14 veces el tamaño aparente de la luna llena). Así, se lanzó en 2001 el satélite **WMAP** (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) que, además de ser más sensible y

eliminar errores sistemáticos que se habían encontrado en su predecesor, era capaz de escrutar el firmamento con una resolución de sólo 0.2°.



*La Radiación Cósmica de Fondo observada por tres instrumentos. (Arriba) Con la antena de Wilson y Penzias en 1965 se encontraba que la radiación era prácticamente isotrópica. (Centro) En 1992, el satélite COBE encontraba que las anisotropías tenían una variación de temperatura de 0.00003 K. (Abajo) WMAP pudo sondear a escalas angulares mucho más pequeñas, presentando sus resultados en 2003. La barra roja horizontal que aparece en los dos diagramas inferiores es consecuencia de la radiación de nuestra galaxia, la Vía Láctea. También se observa en el primer mapa de 1965.*

WMAP terminó su cartografiado en 2003. Los datos conseguidos se compararon con distintos modelos del Universo de forma parecida a como se hizo con las supernovas I a, consiguiendo una mayor precisión en los parámetros cosmológicos. Ahora no sólo ofrecían valores para la geometría del espacio (densidades de materia y densidad de energía del vacío) sino que también precisaban el valor de la constante de Hubble, fijaban la edad del Universo, derivaban la relación entre materia ordinaria y fotones, estimaban cuándo las primeras estrellas comenzaron a brillar (200 millones de años después del Big Bang) y cuándo se formó la imagen que vemos en el fondo cósmico (379.000 años tras la Gran Explosión).

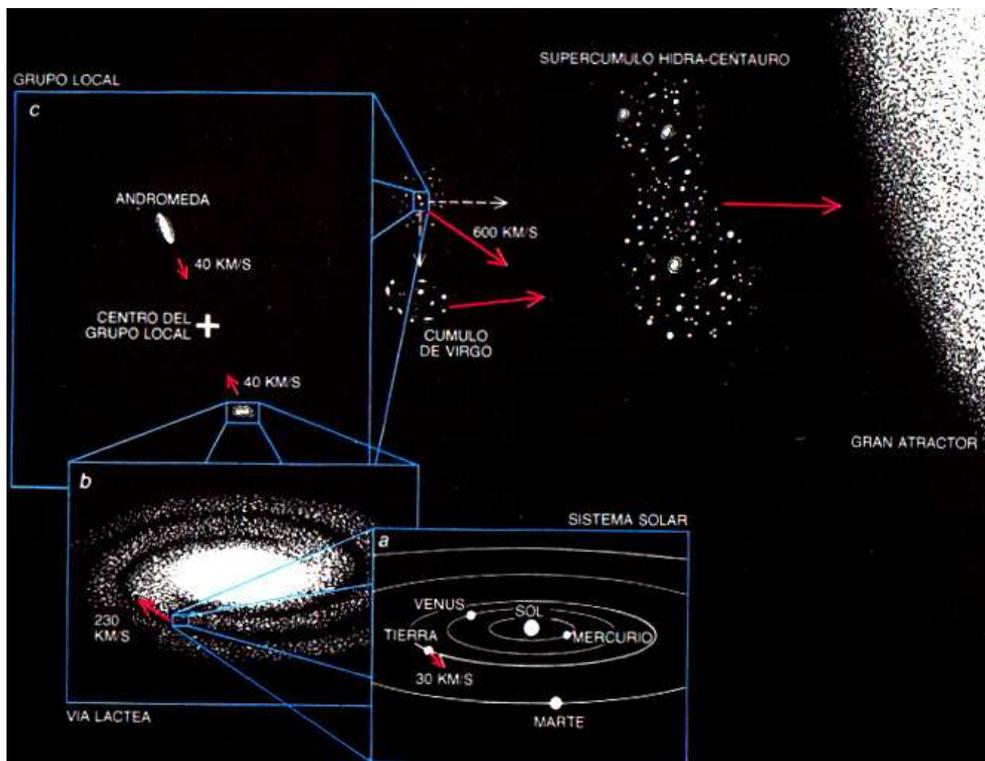
## LA ESTRUCTURA A GRAN ESCALA DEL UNIVERSO

No dejemos de hacernos preguntas. Si lo que vemos en la radiación cósmica de fondo es la distribución de materia cuando el Universo tenía 379.000 años, ¿se corresponde con la Estructura a Gran Escala que observamos? Dicho de otra manera, ¿podemos explicar la distribución actual de las galaxias a partir de las inhomogeneidades encontradas en la radiación cósmica de fondo? De nuevo debemos recurrir a la observación. ¿Cómo se localiza la materia en escalas cosmológicas? Esto ha sido un reto constante a lo largo de la Historia de la Astronomía, puesto que se puede resolver estudiando galaxias cada vez más y más lejanas; por ende, con mejores instrumentos de observación. Gracias al gran avance tecnológico de finales del siglo pasado *casi* hemos podido responder a la pregunta de *¿en dónde estamos?*

Nuestro planeta Tierra se encuentra orbitando una estrella más bien pequeña, aproximadamente a mitad de su vida, que gira alrededor de la galaxia de la **Vía Láctea**, entre los brazos espirales de Perseo y Sagitario. La Vía Láctea, junto con la galaxia de Andrómeda, las nubes de Magallanes, la galaxia del Triángulo y una treintena larga de galaxias enanas más forman el **Grupo Local**. Nuestro grupo de galaxias se mueve, por

acción gravitatoria, hacia el **Cúmulo de Virgo**, localizado a unos 50 millones de años luz y compuesto por más de mil galaxias. El cúmulo de Virgo es la región más densa del **Supercúmulo Local**, un agregado de más de 50 cúmulos y grupos en el que se incluye nuestro ya *diminuto* Grupo Local. La cinemática revela que parte de este supercúmulo se mueve hacia otro supercúmulo, el de **Hidra-Centauro**, a 140 millones de años luz. El supercúmulo de Hidra-Centauro (y el nuestro) también se mueve hacia una compleja estructura de *super-supercúmulos* de galaxias, el **Gran Atractor**, a 250 millones de años luz. Entre tal enormidad de galaxias ya nos encontramos perdidos, pero la distancia que nos separa a ese *mega*-agregado de galaxias sigue siendo *enana* comparada con lo que *resta* de espacio.

Aparte de estos supercúmulos se conocen muchísimos más repartidos por todo el cielo. Para estudiar su distribución espacial la mejor forma de analizarlos es mediante *diagramas de cuñas*, en los que se representa la distancia de cada galaxia en función de la dirección en la que se observa. En este sentido, el estudio más completo realizado hasta la fecha es el cartografiado *Sloan Digital Sky Survey*, que contiene la posición y *desplazamiento* al rojo (que se traduce en distancia) de cerca de un millón de galaxias en un radio de casi 4.000 millones de años luz. Las galaxias no se encuentran distribuidas homogéneamente a estas escalas, sino que forman las estructuras complejas que hemos señalado antes (cúmulos y supercúmulos). También aparecen grandes regiones aparentemente sin galaxias, los **vacíos** (el más famoso es el Vacío del Boyero). ¿Corresponde este irregular tejido a lo que se esperaría que evolucionara de las inhomogeneidades de la radiación cósmica de fondo? ¿Cómo explicamos la formación de tan vasta estructura?



*Movimiento absoluto del Grupo Local. Nuestro Sistema Solar (a) orbita entre dos brazos espirales de la Vía Láctea (b) que, a su vez, se mueve dentro del Grupo Local (c). Éste se desplaza tanto en dirección al cúmulo de Virgo como al supercúmulo de Hydra-Centauro. Todos están cayendo hacia una gigantesca concentración de galaxias a unas dos veces la distancia al supercúmulo de Hydra-Centauro: el Gran Atractor. Dibujo de Dressler, 1987. Observa que la galaxia de Andrómeda se acerca.*