



18

El Universo

- 18.1 Algunas observaciones “ingenuas”
- 18.2 La ley de Hubble
- 18.3 La expansión del Universo
- 18.4 El Big Bang
- 18.5 Historia del Universo
- 18.6 Trabajos escolares

Cualquiera que sea su distancia exacta, sabemos que la mayor parte de las galaxias lejanas están situadas a miles de millones de años luz de nosotros. Pero, ¿qué sabemos de su velocidad y de la dirección de su movimiento? ¿Están moviéndose todas en la misma dirección y con velocidades parecidas? Si pudiéramos responder a estas preguntas estaríamos en mejores condiciones para formarnos una imagen del Universo.

Colin A. Ronan, *Secretos del Cosmos*

Este capítulo, último del curso, está dedicado a la Cosmología que se centra en el estudio del Universo, considerado como una unidad, como un solo objeto. Se pretende encontrar las mejores respuestas posibles a preguntas como ¿Cuál fue su origen? ¿Cómo está organizado? ¿Es estático o cambiante? ¿De qué está hecho? ¿Cuál podría ser su futuro? ¿Cuál es su tamaño? Siempre dentro del campo científico, sin entrar en resbaladizos interrogantes más adecuados para la filosofía, en este último siglo ha habido tres campos cuyos avances han sido muy importantes en Cosmología.

Primero los instrumentos de observación: telescopios terrestres cada vez más potentes, telescopios puestos en órbita fuera de la molesta atmósfera terrestre, instrumentos capaces de detectar todo tipo de radiaciones electromagnéticas en todo el espectro, desde los rayos γ hasta las ondas de radio.

Segundo, las mejoras en los aceleradores de partículas que nos permiten entender mejor el mundo de lo infinitamente pequeño, que paradójicamente está íntimamente unido al comportamiento del Universo a gran escala.

Y en tercer lugar los desarrollos teóricos tanto en lo referente a las grandes estructuras cósmicas (como la Teoría General de la Relatividad) como a las mínimas partículas subatómicas (Mecánica y Electrodinámica Cuánticas). Gracias a todo este esfuerzo conjunto hemos podido avanzar algo. Ahora mismo disponemos de un marco general, de una teoría sobre el Universo, bastante coherente pero sembrada de múltiples cuestiones abiertas.

Presentar este modelo, ampliamente aceptado por los especialistas, de una forma clara y asequible es una tarea casi imposible: los conocimientos requeridos para una cabal comprensión del mismo requieren Matemáticas y Física de muy, muy altos vuelos. Pero esa es nuestra misión, intentarlo. A ello vamos.

18.1 ALGUNAS OBSERVACIONES “INGENUAS”

Puede parecer que las observaciones significativas desde el punto de vista cosmológico van a necesitar grandes y costosos equipos, fotografías de lejanas galaxias o de otros objetos exóticos y nada familiares. Sin embargo algunas cuestiones cotidianas que por eso mismo nos parecen habituales y nada sorprendentes pueden encerrar cuestiones de interés acerca de la naturaleza del Universo si pensamos un poco en ellas.

Salgamos una fresca noche de otoño a contemplar el cielo. Una vez puesto el Sol la oscuridad va ganando terreno y poco a poco empiezan a aparecer aquí o allí las luces de las estrellas. Casiopea se percibe con claridad, así como las Pléyades, al final de una de las piernas de Perseo. A la izquierda resplandece Capella y más baja la rojiza Aldebarán ya en la banda zodiacal. Quizá tengamos la suerte de ver en ella algún planeta. Lo normal, nada de lo que sorprenderse. Meditemos un poco: el cielo (el Universo) es oscuro pero está poblado de luces.



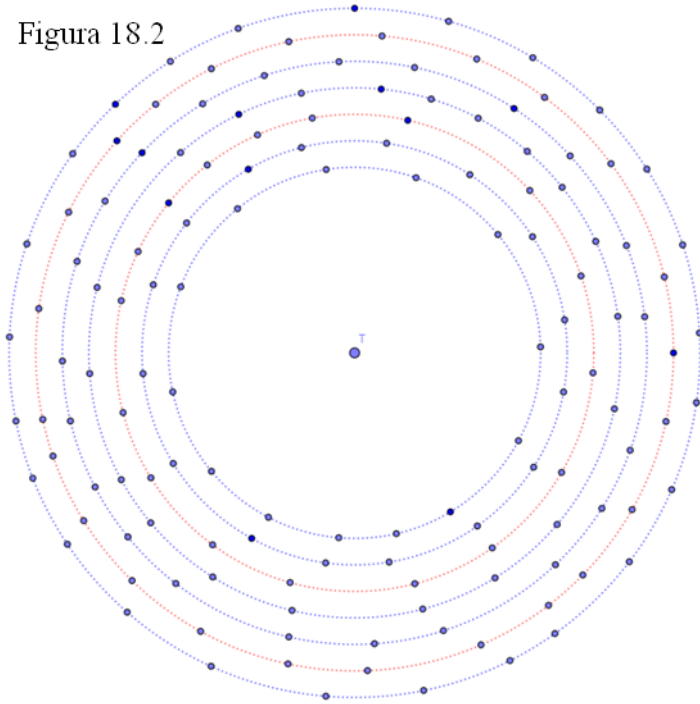
Los fotones que salieron de Capella hace unos 43 años nos están llegando ahora a nosotros sin ningún impedimento, no se han tropezado con nada que los haya desviado o absorbido en su largo viaje. Pues claro, ¿qué hay de raro en todo ello? Pues eso significa que **el Universo es transparente**. Quizá alcancemos a distinguir, con el rabillo del ojo, la débil mancha de la galaxia de Andrómeda. También nos llegan ahora sus fotones y esos han viajado nada menos

que 2,5 millones de años sin contratiempo alguno. El cielo, el espacio, el Universo no obstaculiza para nada las luces que nos llegan de él.

Se nos aparece como una enorme esfera fría en la que hay algunos (muchos) puntos calientes. Las estrellas desparraman enormes cantidades de energía al exterior pero el cielo sigue estando frío y oscuro. Si en un recipiente con agua fría (a 15° por ejemplo) echamos un poco de agua hirviendo (100°) y removemos, al poco todo el líquido del recipiente se habrá mezclado y las temperaturas se habrán equilibrado quedando el agua pongamos que a 18° . Esto no ocurre en el Universo que está en un permanente estado de **desequilibrio termodinámico**. Las estrellas emiten calor, pero el Universo en conjunto está cada vez más frío. ¿Cómo puede ser?

Sin embargo esa energía emitida por las estrellas sí que puede servir para mantener en marcha ciertos sistemas que requieren un aporte continuo de ella, como por ejemplo la vida en la Tierra. La fotosíntesis precisa de los fotones de la luz solar para producir moléculas ricas en energía que los seres vivos utilizarán luego para poder realizar sus funciones (ver tema 11). Sin el desequilibrio térmico del Universo no sería posible nuestra existencia.

Figura 18.2



Por la noche nos llegan fotones de todas partes del cielo. ¿De todas? Ciertamente no y eso también debería sorprendernos. En 1823 el astrónomo alemán H. W. Olbers planteó que si el Universo es infinito y las estrellas se distribuyen de manera uniforme por él, entonces (figura 18.2), miremos en la dirección que miremos, nuestra visual acabará tropezando siempre con alguna estrella cuyos fotones deberían llegar a la retina: el cielo debería lucir todo él, en todas direcciones, y no debería ser oscuro tal y como lo vemos con nuestros propios ojos. ¡Vaya! Este problema, conocido como la **paradoja de Olbers** no es trivial. Se podría soslayar si el Universo no fuera transparente, si estuviera lleno de

alguna sustancia imperceptible que interceptara la luz (esta fue la primera idea que pareció plausible para salir del atolladero). También se puede argumentar que debe haber tantos objetos oscuros como estrellas. Estos objetos oscuros (nebulosas, planetas, enanas marrones) taponarían la llegada de la luz más lejana. Pero ninguno es solución: tanto esa supuesta sustancia opaca como esos objetos oscuros, al absorber la luz se calentarían y acabarían reemitiendo esa energía antes bloqueada. Algo falla. Pero tiene solución (naturalmente, ¡tiene que tenerla!). Un poco de paciencia.

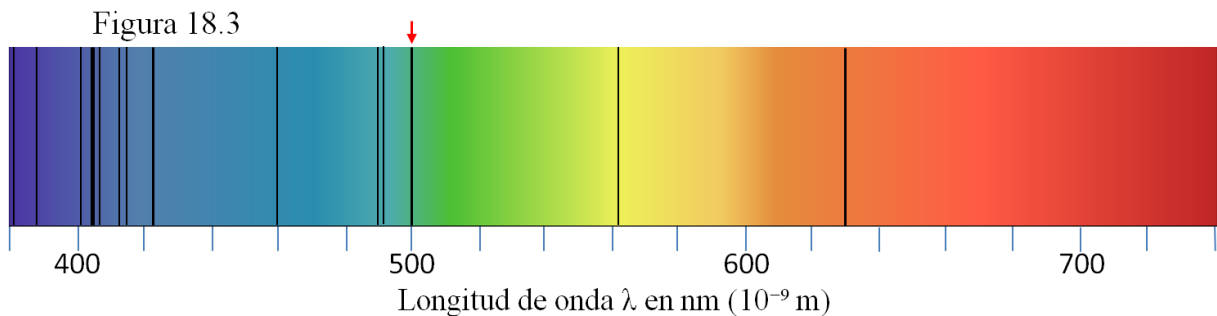
Del mismo modo que en otras partes de este curso (modelo de las dos esferas, sistema heliocéntrico para el Sistema Solar) ahora lo que buscamos es encontrar un modelo para el Universo que dé cuenta de todas estas cuestiones satisfactoriamente.

18.2 LA LEY DE HUBBLE

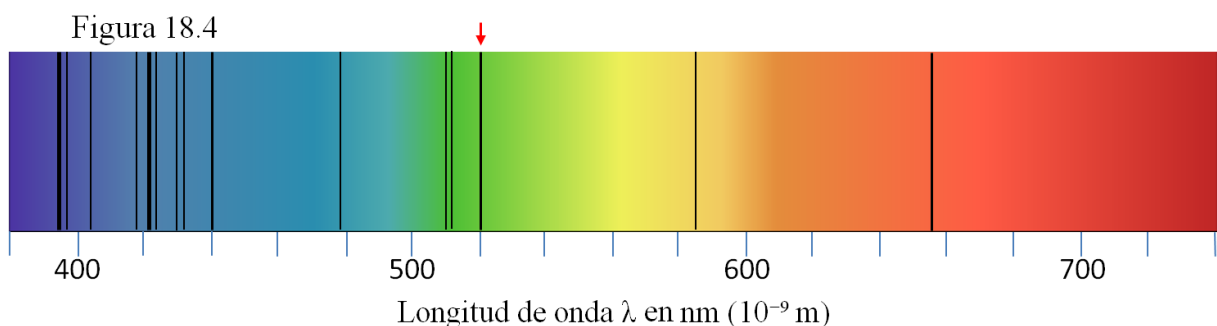
El desplazamiento al rojo

Ya se ha visto que uno de los principales recursos de los astrónomos es el espectro, ese arco iris surcado por múltiples rayas oscuras. Gracias al estudio de los espectros se han podido averiguar muchas cuestiones acerca de las estrellas. Ahora vamos a utilizarlos para estudiar la estructura del Universo a gran escala.

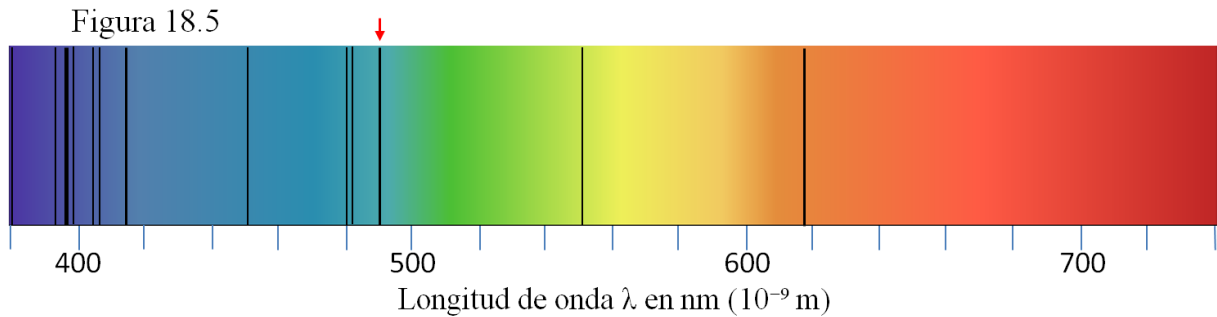
La figura 18.3 es un esquema muy simplificado del espectro ordinario de la luz solar, en el que sólo se han representado algunas rayas oscuras características. Una de ellas, la de 500 nanómetros (nm) de longitud de onda, se ha señalado con una flecha roja.



El espectro (figura 18.4, también esquematizado, como todos los que aparecerán en este tema) producido por una lejana galaxia es muy parecido al ordinario correspondiente al Sol: la secuencia de rayas oscuras es la misma. Pero hay una pequeña diferencia: todas las rayas están un poco desplazadas hacia la derecha, hacia el rojo. La línea que tenía una $\lambda_0 = 500$ nm ahora aparece con $\lambda = 520$ nm.



También hay objetos (estrellas, nebulosas o alguna galaxia, como Andr6meda) cuyo espectro presenta un desplazamiento hacia el azul (figura 18.5).



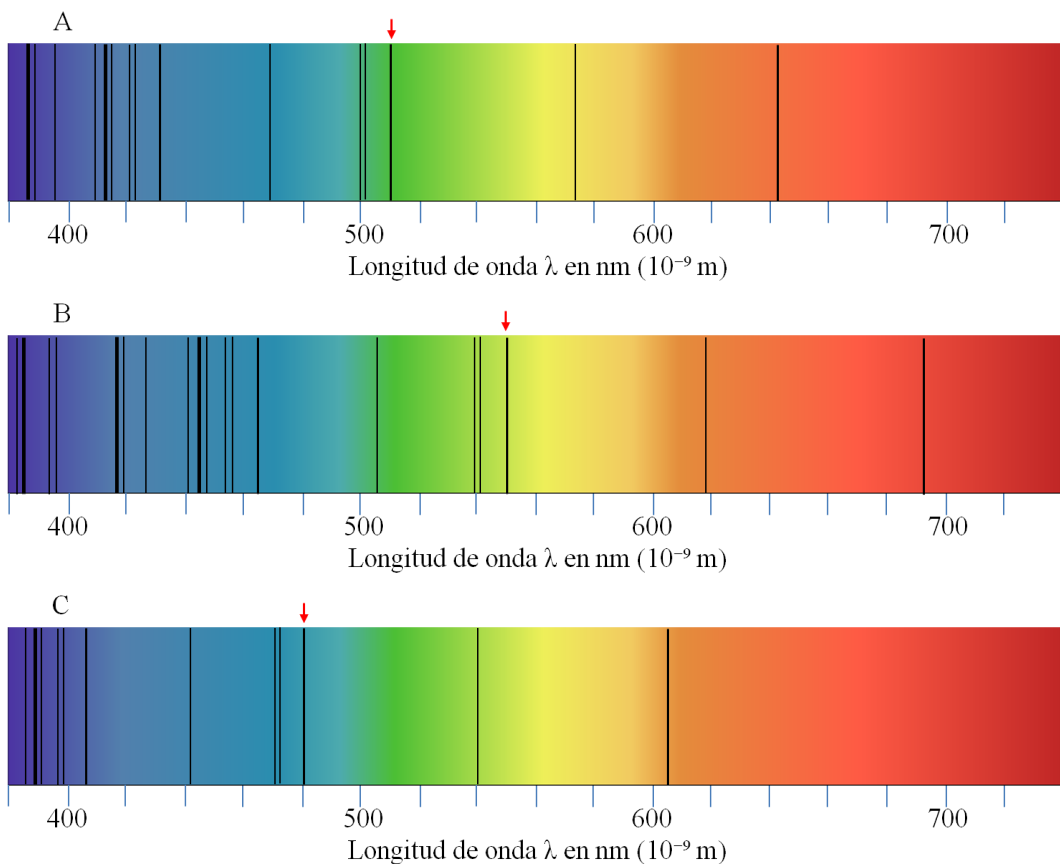
En astronomía siempre (aunque sea hacia el azul) se habla del desplazamiento al rojo (o *redshift*, de su nombre en inglés) que se cuantifica de esta manera: $z = \Delta\lambda / \lambda_0 = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$

Por ejemplo, en la figura 18.4, $\lambda_0 = 500$, $\lambda = 520 \rightarrow \Delta\lambda = 20 \rightarrow z = 20/500 = 0,04$

En cambio en la figura 18.5, $\lambda_0 = 500$, $\lambda = 490 \rightarrow \Delta\lambda = -10 \rightarrow z = -10/500 = -0,02$

Ejercicio 18.1

Calcula el valor de z en estos tres espectros:



Haz clic [aquí](#) para ver la solución.

El valor de z indica en qué fracción la longitud de onda inicial λ_0 ha variado y es equivalente al porcentaje: un valor de $z = 0,02$ nos viene a decir que λ_0 se ha ampliado en un 2%. Y si tuviéramos $z = 0,15$ es que la longitud de onda ha aumentado un 15%.

El efecto Doppler

La primera interpretación de esos desplazamientos de las rayas espectrales daba por supuesto que el objeto emisor en cuestión está en movimiento respecto a nosotros. Es lo que se conoce como el **efecto Doppler**: siempre que una fuente de luz se aleje del observador, éste verá las rayas oscuras desplazadas hacia el rojo. Y, al revés, si la fuente de luz se acerca al observador las rayas se desplazarán hacia la izquierda, hacia el violeta, apareciendo las líneas espectrales con una λ algo menor (figura 18.4).

Lo mismo sucede con las ondas sonoras. Todos hemos tenido esta experiencia: si una ambulancia se está acercando velozmente hacia nosotros las ondas que emite las recibimos con una menor longitud de onda (y por tanto con una frecuencia mayor) y oiremos su sirena con un tono más agudo. En cambio, cuando ya haya pasado y se aleje recibiremos su señal desplazada hacia longitudes de onda mayores (menor frecuencia y la sirena nos parecerá más grave).

Para las ondas electromagnéticas (que se propagan a la velocidad de la luz $c = 300.000 \text{ km/s}$) y si la velocidad v a la que se mueve el foco emisor con respecto al observador es mucho más pequeña que la velocidad de la luz ($v \ll c$) se puede mostrar sin mucha dificultad (ver la ampliación) que $z = \frac{v}{c}$ ($\rightarrow v = z \cdot c$)

Es decir, el valor numérico de z es la fracción de la velocidad de la luz a la que se mueve ese objeto.

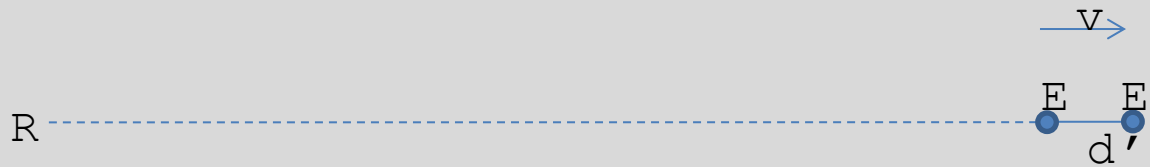
Ejercicio 18.2

Calcula la velocidad a la que se alejan o acercan los objetos que han producido los espectros A, B y C del ejercicio anterior.

Haz clic [aquí](#) para ver la solución.

Si el emisor y el receptor se alejan entre sí a una velocidad v elevada (más del 20% de la velocidad de la luz) hay que corregir la fórmula anterior por otra algo más complicada que tiene en cuenta los efectos relativistas.

Ampliación: el Efecto Doppler



R es un receptor y E un emisor que se aleja de R a una velocidad v . E emite una onda electromagnética con un periodo T y una longitud de onda λ . Así que en la posición E de la figura el emisor lanza una cresta de su onda que llegará a R un tiempo después. Cuando han pasado T segundos emite la siguiente cresta pero, como se ha alejado, ahora la salida de la segunda cresta ocurre en E', que está d metros más lejos. Como E se desplaza a una velocidad v respecto a R, resulta que $d = v \cdot T$.

¿Cuánto tiempo tarda esa segunda cresta en recorrer la distancia d extra?

Las ondas electromagnéticas se desplazan a la velocidad de la luz (c) por lo que tardará en ir de E a E' un tiempo $t = d/c = v \cdot T/c = T \cdot v/c$

Y esa segunda cresta será recibida en R con un retraso de $T \cdot v/c$, es decir el período con el que la onda llega a R no es T , sino $T' = T + T \cdot v/c = T \cdot (1+v/c)$

El periodo se ha “estirado” en un factor $1 + v/c$

La longitud de onda recibida en R será

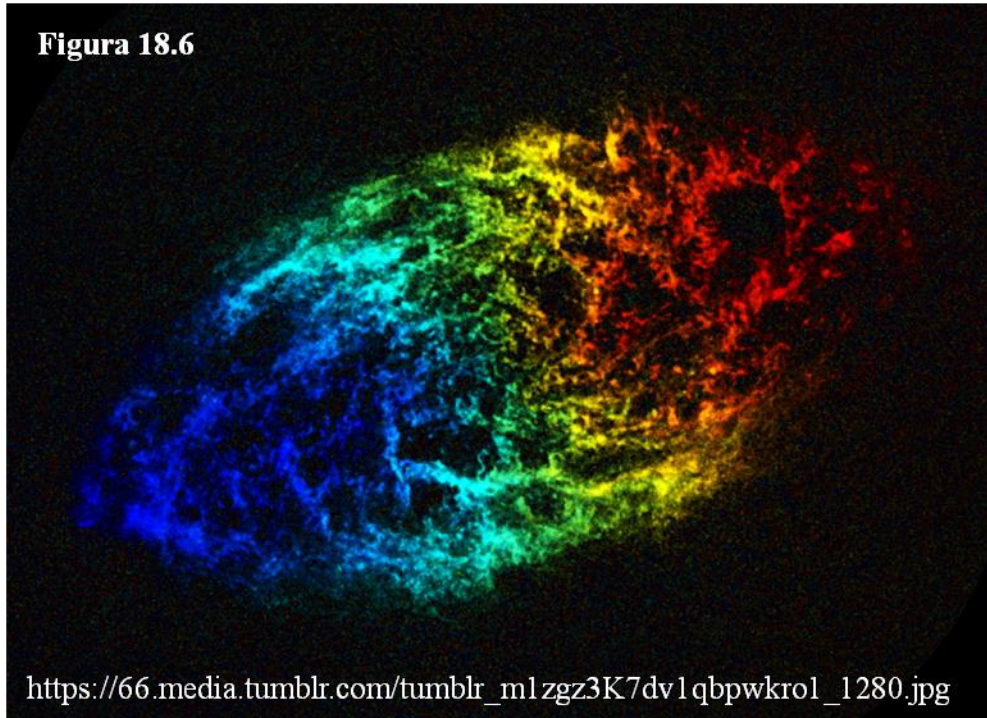
$$\lambda' = c \cdot T' = c \cdot T \cdot (1 + v/c) = \lambda \cdot (1 + v/c) \rightarrow \lambda'/\lambda = 1 + v/c \quad [1]$$

La longitud de onda también se ha “estirado” en un factor $1 + v/c$

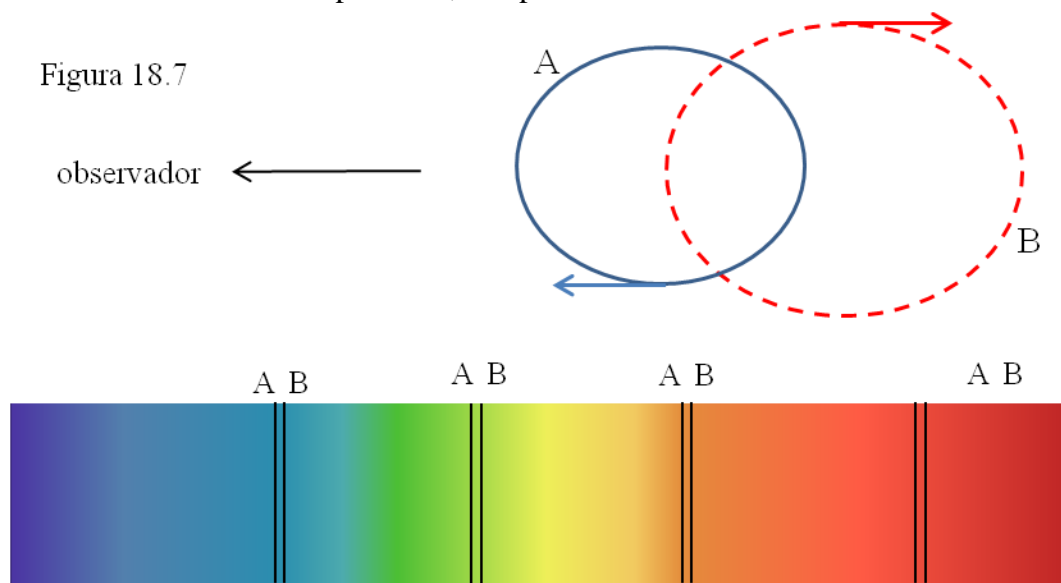
$$\text{Pero } z = (\lambda' - \lambda) / \lambda = \lambda'/\lambda - 1 \rightarrow \lambda'/\lambda = 1 + z \quad [2]$$

Por lo que igualando [1] y [2] resulta $z = v/c$

El efecto Doppler tiene muchas utilidades en Astronomía. El movimiento de rotación de una galaxia puede detectarse porque debido a él un extremo de ella se acerca a nosotros mientras que el opuesto se aleja, provocando un desplazamiento al violeta en el primer caso y al rojo en el segundo. En esta imagen de la galaxia del Triángulo (figura 18.6, en ondas de radio) se observa cómo las estrellas de la izquierda se están acercando mientras que las de la derecha se alejan.



Otro comportamiento similar ocurre en las estrellas binarias espectroscópicas: son dos estrellas que orbitan la una en torno a la otra alrededor de un centro de masas común, tan cercanas entre sí que es imposible verlas separadas ni siquiera con los mejores telescopios. Sin embargo, esa rotación conjunta hace que en ciertos momentos una estrella se esté acercando a nosotros (la A en la figura 18.7) mientras la otra se aleje. Entonces en el espectro veremos que las líneas se han desdoblado en sus dos componentes, una por cada estrella.



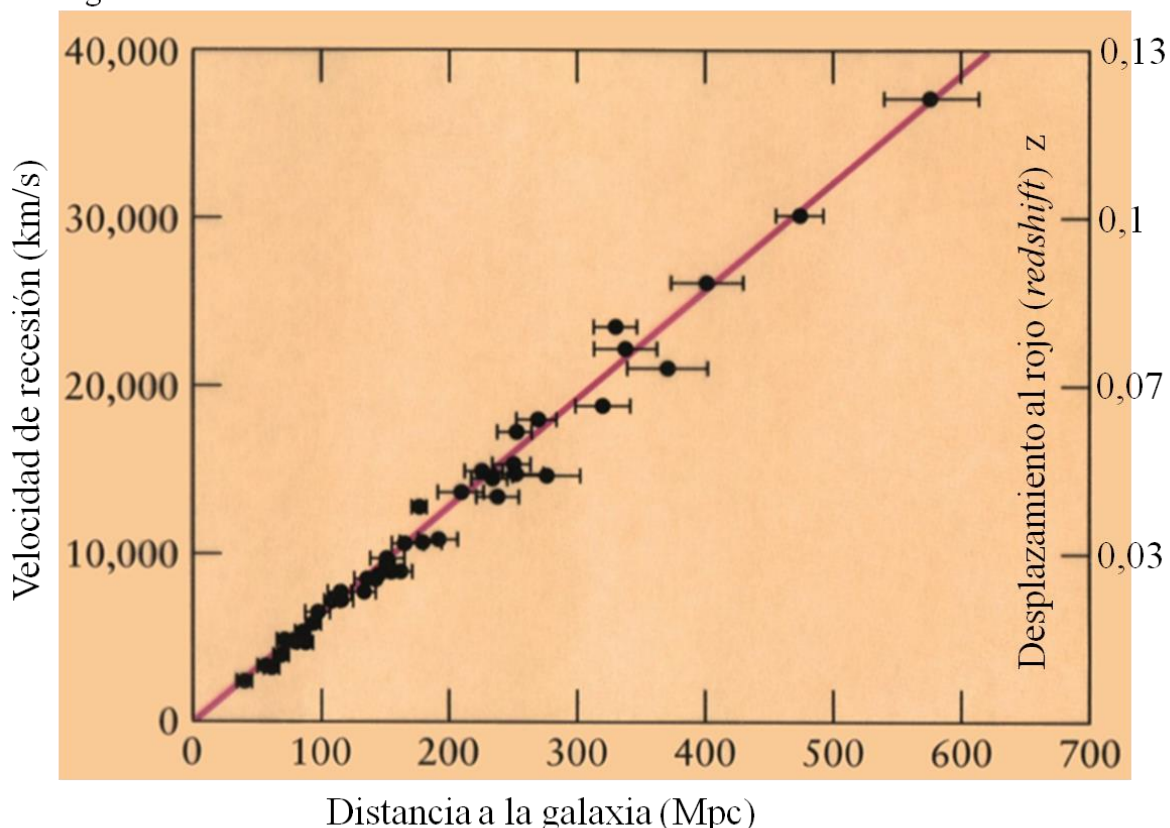
La ley de Hubble

Entre los años 1910 y 1930 se pudieron estudiar los espectros de muchas galaxias gracias a la construcción de nuevos telescopios cada vez más grandes y potentes. La primera conclusión de esos estudios (debida al astrónomo norteamericano Vesto Melvin Slipher) fue muy sorprendente: prácticamente todas las galaxias presentan desplazamientos hacia el rojo. Suponiendo que son debidos al efecto Doppler, la conclusión es que prácticamente todas las galaxias se están alejando de nosotros, como si huyeran.

En 1929 el astrónomo estadounidense **Edwin Hubble** y en 1931 el propio Hubble y su colaborador Humason hicieron otro descubrimiento importantísimo. Determinaron, lo mejor que pudieron con los métodos entonces conocidos, las distancias y los desplazamientos al rojo de muchas galaxias y confeccionaron una tabla parecida a la del ejercicio 3. Luego hicieron una gráfica con los datos de la misma y encontraron una relación asombrosa.

En el eje horizontal se marcan las distancias, en megaparsec (Mpc) que es la unidad habitual en Astronomía ($1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc} = 3,26 \cdot 10^6 \text{ años luz} = 3,26 \text{ Mal}$) y en el vertical tanto el desplazamiento al rojo (z) como las velocidades de alejamiento (de recesión, en km/s) deducidas. Cada galaxia se coloca en la posición que le corresponda. Los pequeños segmentos horizontales en cada punto indican la incertidumbre en la medida de sus distancias.

Figura 18.8



<https://obsesionporelcielo.podbean.com/mf/web/r82wgz/LeyHubble.jpg>

¡Resulta que todas las galaxias estudiadas se sitúan prácticamente sobre una recta! Si una galaxia está el doble de lejos que otra, la más lejana tendrá un *redshift* (y una velocidad) doble que la más cercana, siempre distanciándose de nosotros, del observador.

Esta es la **ley de Hubble**: los desplazamientos al rojo son proporcionales a las distancias. La formulación clásica, interpretando el *redshift* como debido al efecto Doppler, es $v = H_0 \cdot d$, donde H_0 es la pendiente de esa recta, se llama la constante de Hubble y, como iremos viendo, es uno de los parámetros más importantes en Cosmología. En realidad la velocidad de recesión no se ha medido, sino calculado. Lo que se mide es el desplazamiento al rojo z . Por eso sería más correcta esta otra formulación:

$$z \cdot c = H_0 \cdot d \quad \rightarrow \quad z = (H_0/c) \cdot d$$

en la que queda más clara la proporcionalidad entre el *redshift* y la distancia.

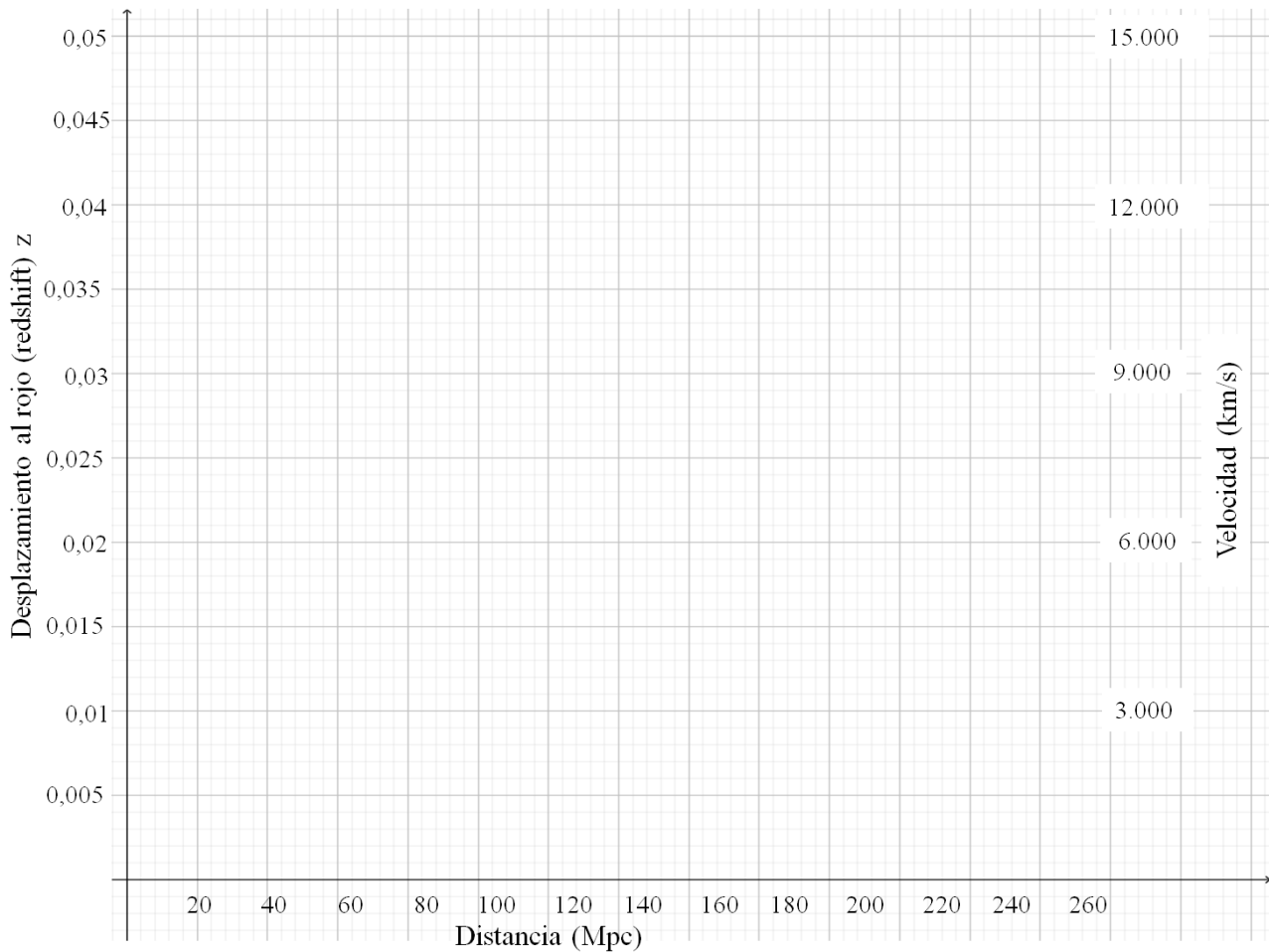
Es una ley empírica, obtenida contrastando los datos del *redshift* z observado con las distancias calculadas a esas galaxias, con algunas dudas, mediante los métodos ya vistos de las cefeidas y de las supernovas tipo Ia. Sabemos que es válida, porque se ha podido verificar, para galaxias no muy lejanas (hasta unos 600 Mpc equivalentes a 2.000 Mal) y valores de $z < 0,15$, pero más allá se ha comprobado que desaparece la proporcionalidad.

Ejercicio 18.3

Dada la importancia máxima de la ley de Hubble te proponemos esta tarea que es, en esencia, repetir lo mismo que hizo el brillante astrónomo norteamericano. Con el añadido de que podrás hacer una estimación de ese parámetro crucial (la constante de Hubble H_0).

En esta tabla se dan las distancias y los desplazamientos al rojo (z) para los principales cúmulos de galaxias próximos a nosotros.

Cúmulo	Distancia (Mpc)	z	$z \cdot c = v$ (km/s)	v/d
Virgo	15	0,003		
Centaurus	45	0,011		
Cáncer	65	0,015		
Coma	95	0,022		
Leo A	145	0,033		
Hércules	165	0,038		
Pegasus II	180	0,042		
Cygnus A	220	0,050		



- a) Utilizando los datos de la tabla, señala en este gráfico el punto que corresponde a cada uno de los cúmulos de galaxias.
- b) Traza en tu gráfica una recta que pase por el origen de coordenadas y por todos los puntos que puedas.
- c) Utilizando la gráfica, averigua el desplazamiento al rojo z de una galaxia que esté situada a 120 Mpc.
- d) Ahora vamos a hacerlo al revés: si observamos en el espectro de una galaxia un desplazamiento de las rayas oscuras $z = 0,03$, ¿a qué distancia está esa galaxia?
- e) Completa la tercera y la cuarta columna, con los cocientes $v/d = H_0$ de cada cúmulo de galaxias. Deberías obtener resultados bastante parecidos (la constante de Hubble H_0). Las pequeñas oscilaciones de los valores en esa columna se deben a los errores e incertidumbres en la medición de las distancias.

Haz clic [aquí](#) para ver la solución.

El valor preciso de la constante de Hubble H_0 es decisivo en Cosmología. Nos va a servir, entre otras cosas, nada menos que para determinar la edad del Universo. La medición del desplazamiento al rojo de las líneas espectrales se hace con una altísima precisión. En cambio, no ocurre lo mismo con el cálculo de las distancias a las galaxias o cúmulos de galaxias en el que sigue habiendo algunas dudas.

Hubo un largo debate sobre ello. Algunos equipos daban $H_0 = 50$, otros más bien se inclinaban por valores de $H_0 = 100$. Se trabajó y se sigue investigando intensamente para tratar de ajustarlo más. Actualmente, los últimos resultados parecen estar de acuerdo en que el valor de H_0 debe estar comprendido entre 67 y 74. Podemos aceptar $H_0 = 70$ km/s/Mpc como un valor de compromiso por el momento, a la espera de nuevas mediciones.

Con la ley de Hubble en la mano ya totalmente formulada

$$v = z \cdot c = 70 \cdot d$$

disponemos ahora de otra herramienta para calcular distancias a galaxias no muy lejanas sin tener que esperar a detectar cefeidas o a que explote alguna supernova en ellas. Ya hemos dicho que la medida del desplazamiento al rojo, del *redshift* z es muy fiable a partir del espectro de una galaxia. Ahora, a partir de ese dato ya será posible hallar la distancia de esa galaxia.

Ejemplo

En una galaxia del supercúmulo de Horologium (una constelación austral) la línea espectral que en el laboratorio tiene una $\lambda_0 = 500$ nm se observa desplazada al rojo con una $\lambda = 533,5$ nm.

Calculemos primero el valor de z : $z = 33,5 / 500 = 0,067$

Luego la velocidad de recesión de esa galaxia será $z \cdot c = 300.000 \cdot 0,067 = 20.100$ km/s

Y, finalmente, sustituyendo en la fórmula de la ley de Hubble:

$$20.100 = 70 \cdot d \quad \rightarrow \quad d = 20.100 / 70 = 287 \text{ Mpc} = 936 \text{ Mal}$$

Ejercicio 18.4

Del espectro de las galaxias del lejano cúmulo llamado Hydra II deducimos que su desplazamiento al rojo es $z = 0,2$. Este valor de z está algo más allá del rango de validez de la ley de Hubble. Nos arriesgaremos un poco.

- ¿Cuál es su velocidad de recesión?*
- ¿A qué distancia están esas galaxias?*

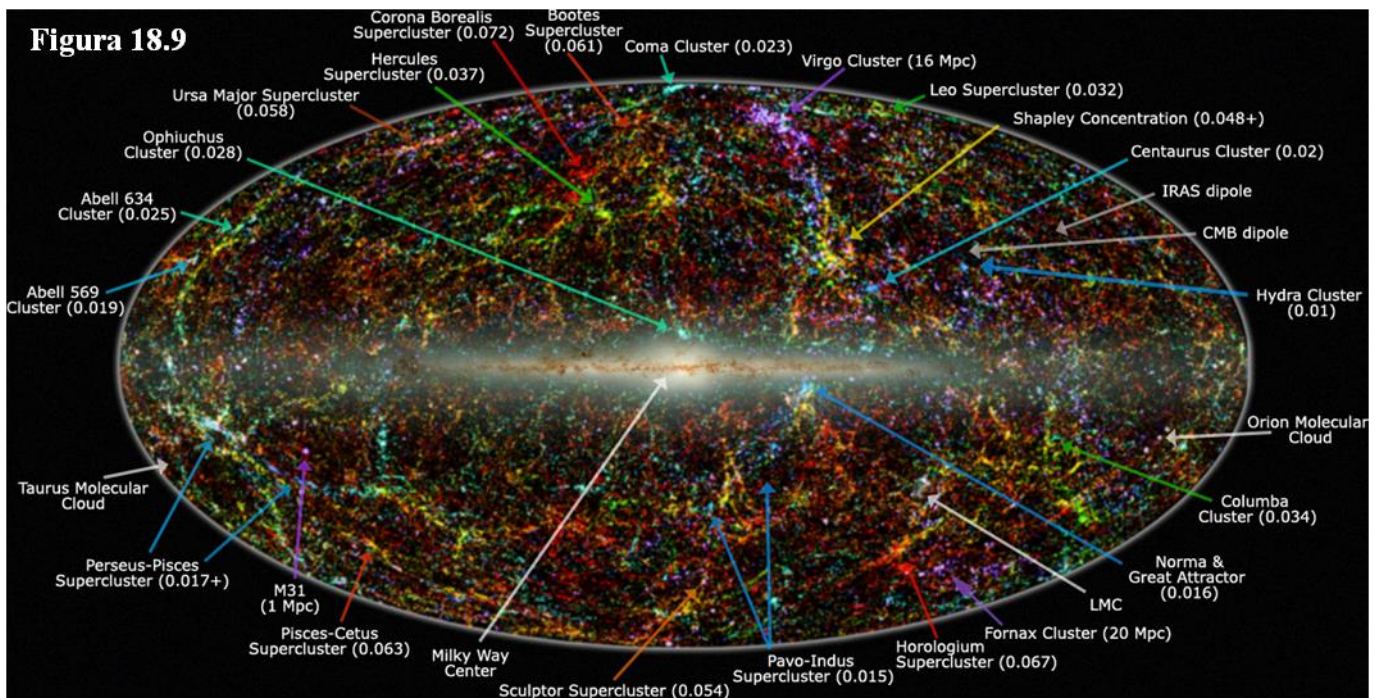
Haz clic [aquí](#) para ver la solución.

Estructura a gran escala del Universo

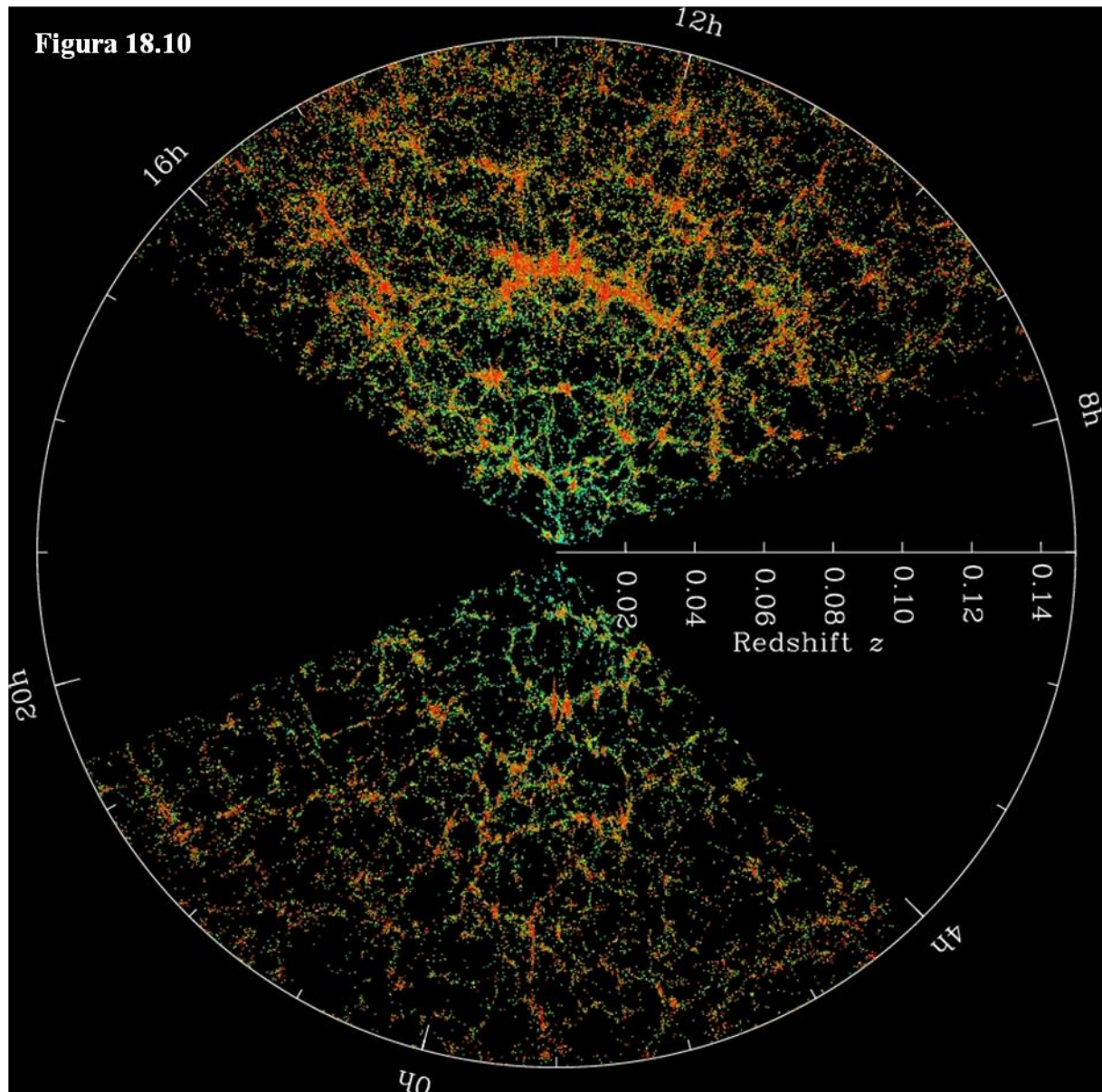
De esta forma se han podido realizar sondeos profundos del Universo para intentar descubrir cómo se organizan en el espacio los cúmulos y supercúmulos de galaxias.

En esta imagen (figura 18.9) de nuestro entorno se sitúan todos los cúmulos con $z < 0,075$ (o sea, bastante cercanos), en azul o violeta los más próximos (como el de Virgo) y en rojo los más lejanos (como el de Horologium). Entre paréntesis se indica para cada uno su *redshift* z o, si están muy próximos, directamente su distancia. El formato es el que ya vimos en el tema 16, con el plano central de la Vía Láctea haciendo de ecuador. La elipse es la proyección de toda la esfera celeste.

No se aprecia mucha estructura, todo lo más que hay zonas de más concentración y otras de menos. Sí parece que hay cierta tendencia de los cúmulos a formar como alineaciones, como filamentos.



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/2MASS_LSS_chart-NEW_Nasa.jpg



<http://www.sdss.org/wp-content/uploads/2014/06/orangepie.jpg>

En este otro mapa (del Sloan Digital Sky Survey), que llega ya al límite de posibilidades de la ley de Hubble ($z < 0,15$), sí que se ve en la parte superior (hacia las 12 h de ascensión recta) una imponente concentración alargada en horizontal (las zonas naranjas son de alta densidad de galaxias, las zonas verdes también contienen galaxias, aunque no tantas, y las oscuras son espacios desprovistos de ellas). Y sí que se muestra con claridad que los cúmulos forman alineaciones con grandes huecos vacíos en medio. En tres dimensiones la apariencia podría ser la de burbujas vacías en cuya superficie se aglutinan las galaxias.

Ejercicio 18.5

¿Cuál es el radio del mapa del Sloan Digital Sky Survey, en millones de años luz?

Haz clic [aquí](#) para ver la solución.

18.3 LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

*La característica más desconcertante de la ley de Hubble - la velocidad de recesión de una galaxia es proporcional a la distancia que la separa de nosotros - se puede expresar con una pregunta muy sencilla: ¿por qué precisamente de **nosotros**? ¿Qué magia tenemos para que las galaxias nos rehúyan? ¿Y cómo saben las galaxias a qué distancia se hallan de nosotros para guiar sus pasos de un modo acorde?*

Isaac Asimov, *El Universo*

¿Qué impresión sacamos de la ley de Hubble? Parece que las galaxias o los cúmulos de galaxias se separan de nosotros y que sus distancias aumentan más cuanto más lejos estén. Es como si fuéramos el centro de esa fuga.

Pero ya sabemos que estas apariencias son engañosas: la Tierra no es el centro del Universo, ni el Sol está en el centro de la Vía Láctea, ni la Vía Láctea destaca especialmente entre las demás galaxias. Debe haber alguna explicación lógica para esa aparente posición central. No tiene sentido que seamos unos observadores privilegiados.

Buscamos un modelo, una teoría de todo el Cosmos, en la que encajen todas las pistas de que disponemos. No solamente la ley de Hubble. También tenemos que dar cuenta coherentemente de lo recogido en el primer apartado de este tema, las llamadas observaciones “ingenuas”. ¿Cómo puede ser que el Universo se esté enfriando pese a la energía difundida por las estrellas? ¿Y la paradoja de Olbers?

Otra cuestión preocupaba a los teóricos. Si el Universo está repleto de materia y la gravedad ejerce su atracción, ¿por qué no se han ido aglomerando todas las galaxias? ¿Cómo es que no se ha producido un colapso gravitatorio de todas ellas?

La respuesta a tantos interrogantes fue abriéndose paso y hacia mediados del siglo XX emergió la idea de la expansión del Universo. Es todo el Cosmos el que está dilatándose y creciendo a medida que transcurre el tiempo. Si imaginamos una red de coordenadas tridimensional (figura 18.11), cada galaxia, o cada cúmulo de galaxias, ocupa una posición, unas coordenadas, en esa red. Pero toda la retícula está creciendo de forma que la unidad (la arista de cada cubo, el lado de cada cuadrado) se está haciendo mayor. Las galaxias no se dilatan (los puntos de la figura 18.11 no han crecido) pero sí sus distancias.

Así puede comprenderse por qué el Universo se sigue enfriando. El calor emitido por las estrellas tiene que calentar un espacio cada vez más grande y no alcanza para ello. Es como tener un horno con una vela dentro. En principio la vela debería hacer aumentar la temperatura del horno, pero ¿qué sucede si éste es cada vez más y más grande? Si el ritmo de expansión es suficientemente alto la llama de la vela será incapaz de contrarrestar el enfriamiento debido a la expansión.

Lo mismo sucede con el presunto colapso gravitatorio; también aquí si el ritmo de expansión es lo bastante intenso puede vencer a la atracción gravitatoria. Ésta sí que es capaz de mantener unidas las grandes estructuras, las galaxias y los cúmulos de galaxias cuyas dimensiones no se alteran por causa de la expansión.

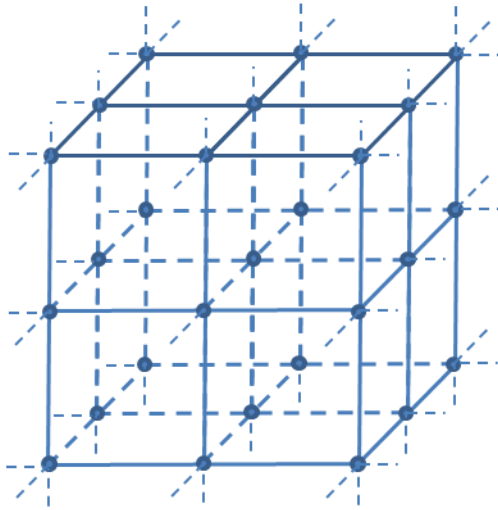
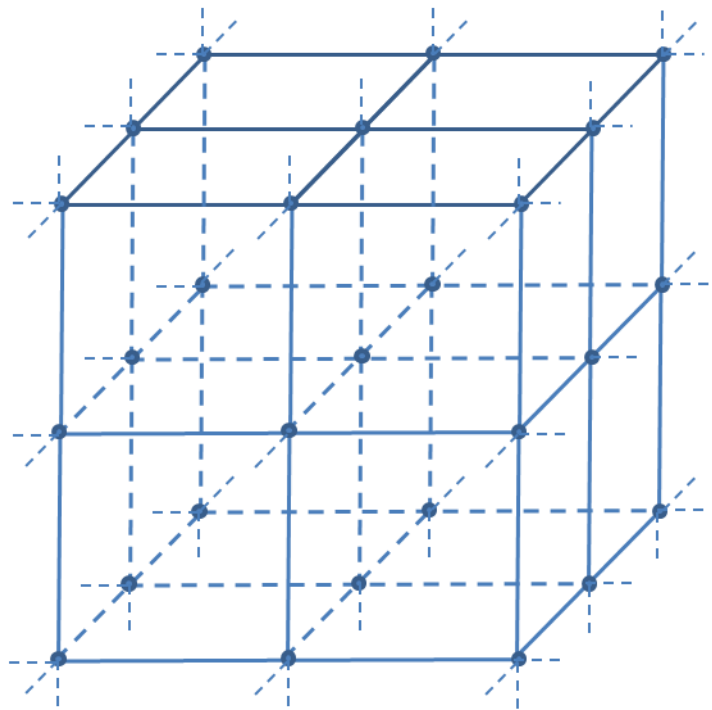


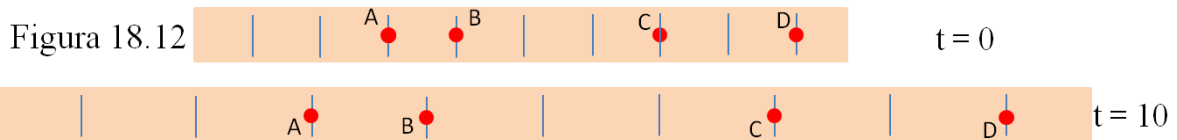
Figura 18.11



Más adelante (en el apartado “Desplazamiento al rojo cosmológico”) veremos con detalle cómo la expansión puede dar cuenta del *redshift* de la luz que nos llega de las galaxias y de la ley de Hubble, así como de la paradoja de Olbers.

Modelos de la expansión

- Imagina una cinta elástica en la que hay unas marcas igualmente espaciadas (10 cm) y en algunas de ellas hemos pegado un círculo rojo. Ahora vamos estirando poco a poco la cinta y en diez segundos se hace bastante más larga, arrastrando con ella los círculos rojos **que permanecen en sus marcas** (que están al final a 17 cm una de otra).



Los puntos rojos no se han movido, ha sido toda la cinta la que se ha hecho más larga ¿Qué es lo que nos parece ver desde A?

Hagamos una pequeña tabla. d_0 es la distancia inicial para $t = 0$ entre A y los otros puntos y d_1 es la distancia final ($t = 10$ s), con la cinta estirada, Δd es el incremento en la distancia y $\Delta d/t$ es el ritmo de aumento de las distancias. Todas las distancias en cm y $\Delta d/t$ en cm/s.

	d_0	d_1	Δd	$\Delta d/t$
B	10	17	7	0,7
C	40	68	28	2,8
D	60	102	42	4,2

Desde A se ve que la distancia al punto más cercano (B) aumenta a 0,7 cm/s, la distancia a C (que está más lejos) también crece a mayor ritmo (a 2,8 cm/s) y la distancia al más alejado (D) es la que aumenta más acusadamente (a 4,2 cm/s). Más o menos lo mismo que vemos nosotros hacer a las galaxias y cúmulos. ¿Es A el centro?

Veamos qué pasa si repetimos la tabla, ahora anotándolo todo desde C:

	d_0	d_1	Δd	$\Delta d/t$
A	40	68	28	2,8
B	30	51	21	2,1
D	20	34	14	1,4

¡Exactamente la misma tónica! La cinta hace el papel del Universo (pero de una sola dimensión) y los círculos rojos serían **las galaxias que no se han movido de sus marcas**. Desde cada punto de observación parece que todas se alejan precisamente de ese punto.

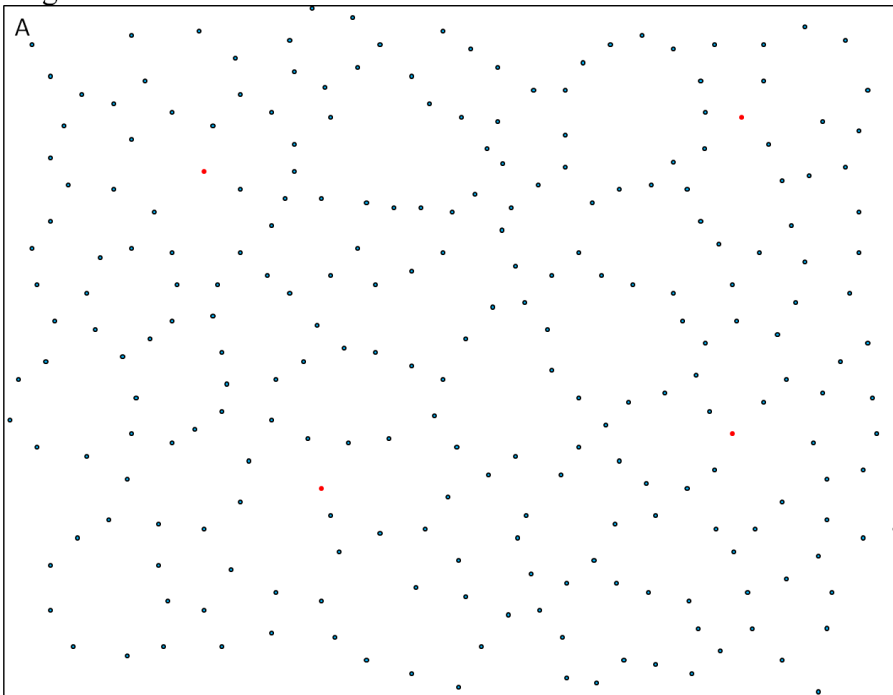
Ejercicio 18.6

Haz una tabla como las anteriores, desde B y desde D.

Haz clic [aquí](#) para ver la solución.

➤ Hagamos otra simulación, pero ahora en un universo de dos dimensiones.

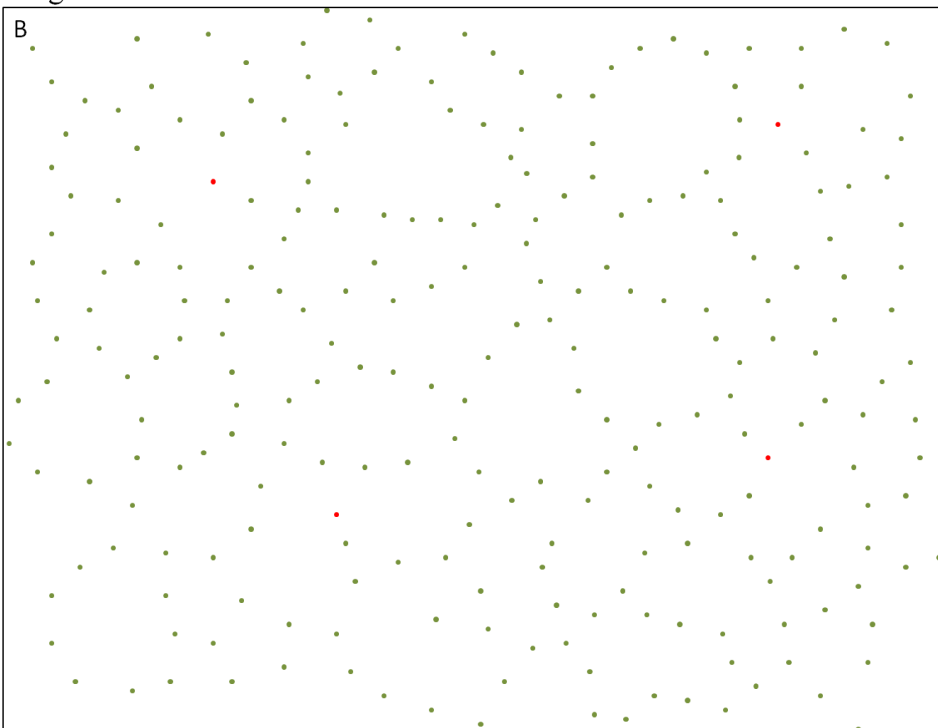
Figura 18.13



En este primer dibujo (A) se han colocado unos cuantos puntos. Cada uno sería una galaxia (o cúmulo) y se han situado de forma que simulen la distribución que parecen tener (figura 18.10), agrupadas en líneas, en filamentos, que dejan en medio huecos vacíos. Hay cuatro señalados en rojo, ahora se verá por qué.

La figura 18.14 es la misma que la anterior pero un poco ampliada. Ningún punto se ha movido, es todo el dibujo en bloque el que se ha hecho más grande (más ancho y más alto).

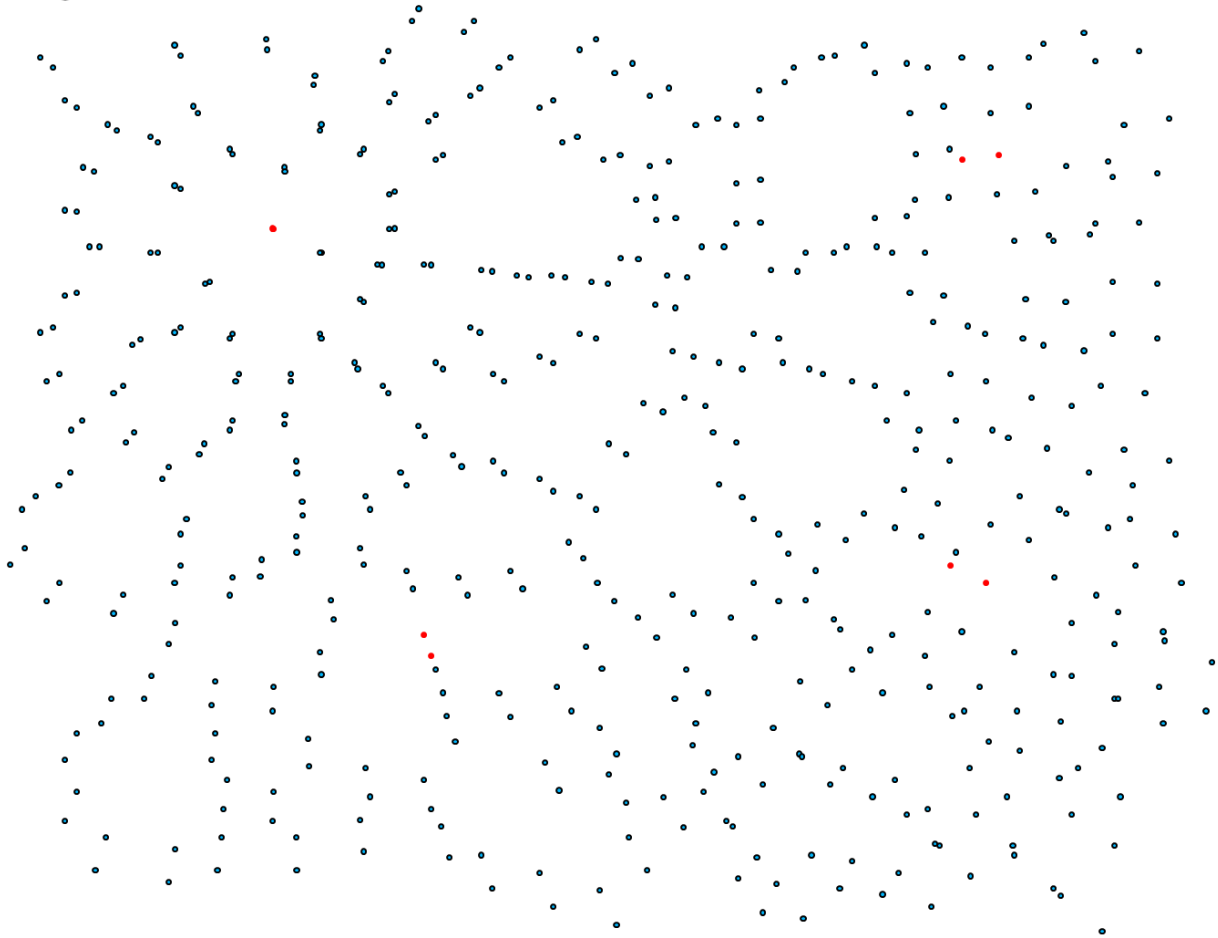
Figura 18.14



La verdad es que no se aprecia diferencia alguna. No se nota pero sí, está un poco más ampliada (un 5%).

La sorpresa viene cuando superponemos ambas figuras A y B haciendo coincidir el cúmulo rojo situado arriba a la izquierda:

Figura 18.15

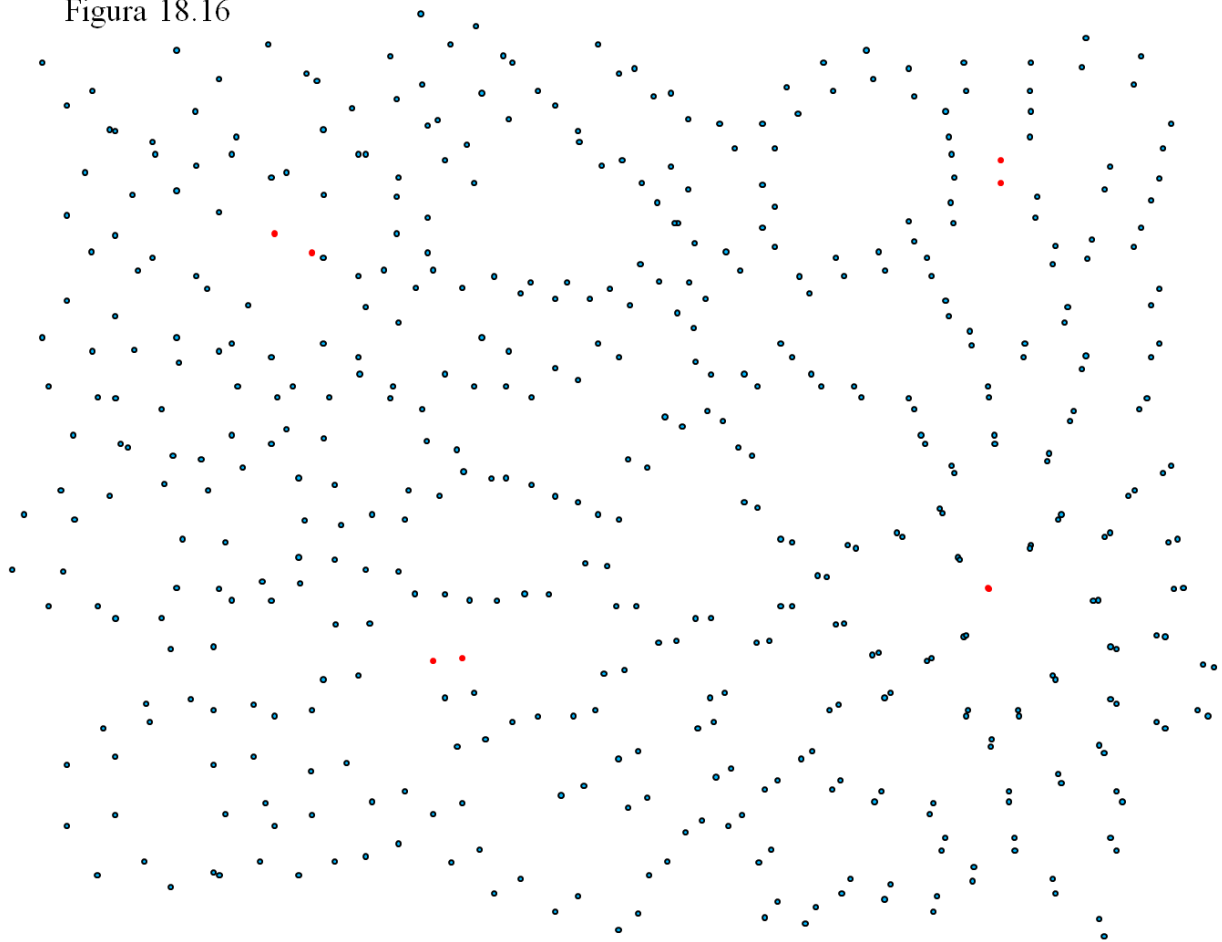


La sensación de fuga desde el punto rojo es irresistible. Desde allí todas las galaxias parecen haberse desplazado. Muy poco las más cercanas, pero más y más a medida que nos vamos alejando.

Pero los puntos no se han desplazado, cada uno sigue estando en la misma posición, en las mismas coordenadas que al principio. Ha sido todo el dibujo, todo el sistema de referencia, toda la red de coordenadas la que se ha dilatado.

Y lo mismo va a pasar si hacemos coincidir las dos figuras en cualquier otro cúmulo (con esa coincidencia estamos suponiendo que nosotros vemos ese cúmulo quieto, es decir, que estamos en él). Veamos ahora desde el punto rojo de la esquina inferior derecha:

Figura 18.16

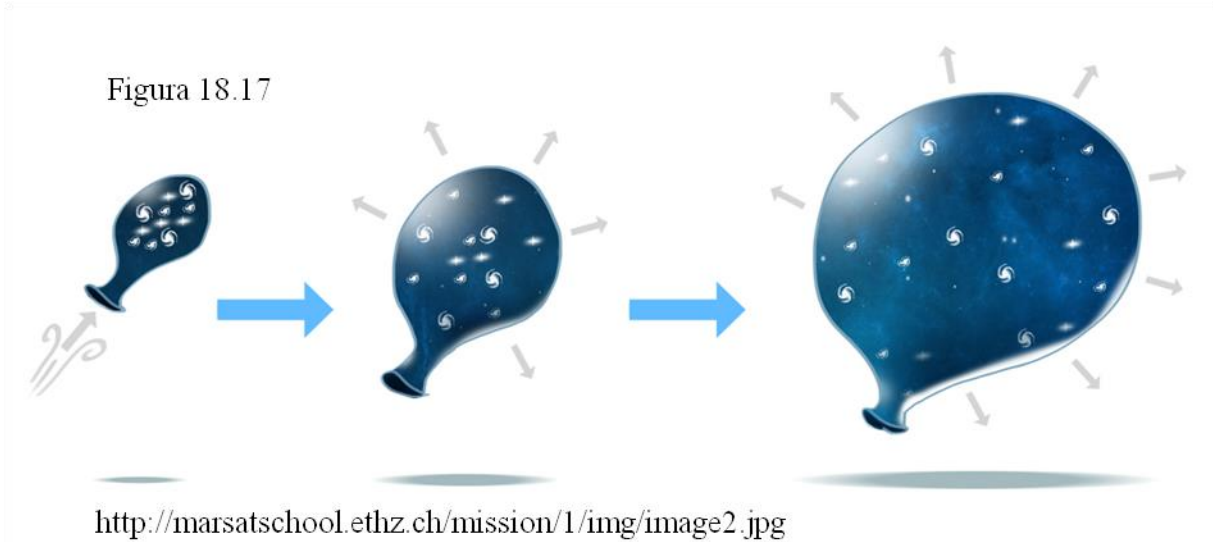


¡Lo mismo! Todo parece alejarse de nosotros, estemos donde estemos, poco las galaxias cercanas y más a medida que nos alejamos.

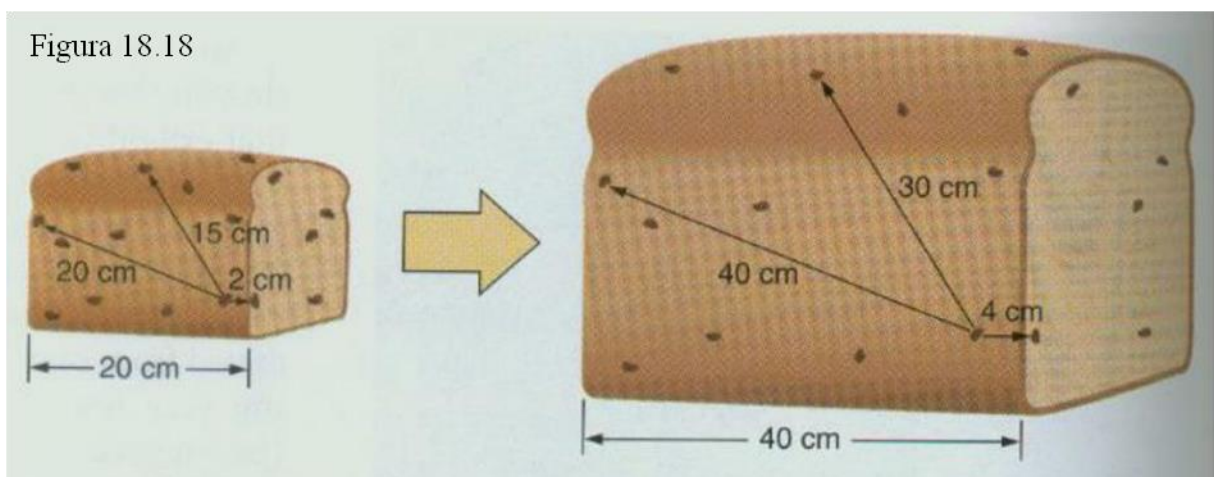
No es que todo huya de nosotros, es que todo se aleja de todo. Es el propio espacio el que está dilatándose arrastrando con él a las galaxias de tal modo que desde cualquiera de ellas el espectáculo de la recesión es absolutamente similar.

Cada galaxia está situada en un punto de la red de coordenadas espaciales. Es la propia red la que está constantemente dilatándose y llevando consigo a cada una de ellas.

- Otras dos analogías suelen utilizarse para mostrar esta notable propiedad de nuestro Universo. Una es un globo en el que se han pegado unos pequeños círculos de papel que van a representar las galaxias. A medida que el globo se hincha todos los círculos se van separando unos de otros, aunque los círculos no se hacen más grandes, del mismo modo que las galaxias se separan unas de otras pero ellas mismas se mantienen con su tamaño invariable.



- El otro modelo es el de un pastel en cuya masa se han colocado, desperdigadas por su interior, unas cuantas pasas. Al irse calentando en el horno el pastel “sube”, toda la masa se dilata, se expande en todas direcciones y las pasas/galaxias se van separando entre sí.

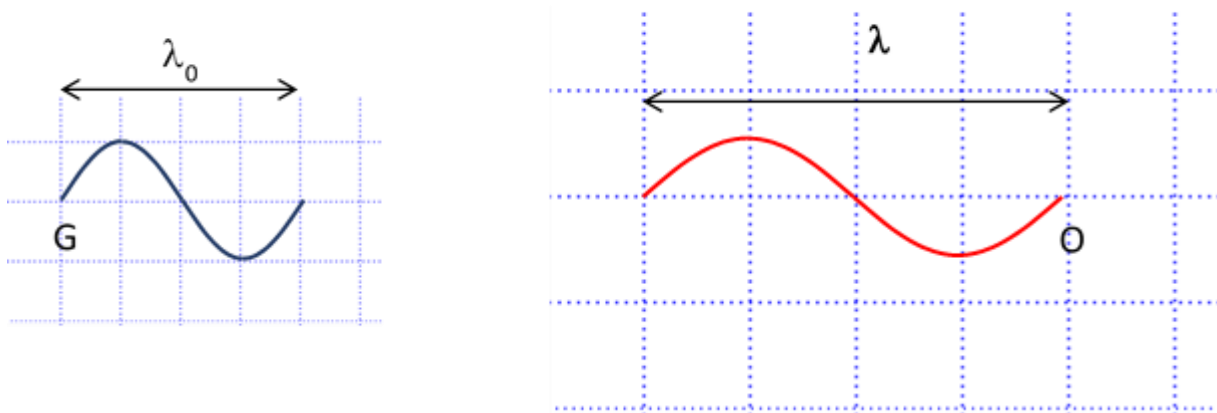


Desplazamiento al rojo cosmológico

La interpretación correcta del corrimiento al rojo de las líneas espectrales es que, al viajar por un espacio que crece constantemente, cualquier fotón, cualquier onda, también se dilata en su recorrido y exactamente al mismo ritmo que lo hace el Universo. Un fotón que salió de una galaxia con una $\lambda_0 = 520$ nm (verde) se irá “estirando” a medida que el espacio lo hace, con lo que su longitud de onda aumenta y puede llegarnos con una $\lambda = 650$ nm (rojo).

Al igual que las galaxias se van distanciando, un fotón que viaja por la retícula universal va teniendo una longitud de onda cada vez mayor a medida que el espacio entre las líneas de la retícula va creciendo.

Figura 18.19



Un fotón violeta que sale de la galaxia G, se convertirá en un fotón rojo, al llegar a un observador situado en O.

La clásica visión de este estiramiento como debido al efecto Doppler a causa de la velocidad de alejamiento de la galaxia emisora debe dejarse de lado.

Además, esta interpretación nos va a permitir calcular en qué factor ha crecido el Universo desde que el fotón se emitió hasta que fue registrado por nuestros equipos. Supongamos, como antes, que esa lejana galaxia emite un fotón verde ($\lambda_0 = 520$ nm) y que nos llega a nosotros con $\lambda = 650$ nm (ya en la zona roja del espectro) pero siempre ocupa (figura 18.19) cuatro cuadrículas de la red. Pues eso quiere decir que si la distancia entre dos puntos de la malla cósmica antes medía 520 ahora mide 650 (sean nanómetros o millones de años luz), todas las distancias entre vértices de la retícula han aumentado en la misma proporción): un crecimiento de $650 / 520 = 1,25$ o, de otra manera, el Universo se ha estirado un 25%.

El cociente λ / λ_0 nos da el factor por el que se ha multiplicado el tamaño de la unidad de la malla de coordenadas desde que el fotón fue despedido de aquella lejana galaxia hasta que nosotros lo hemos recogido. Y es bastante fácil llegar a una formulación general de la expansión en términos del desplazamiento al rojo z .

$$z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 = (\lambda / \lambda_0) - 1 \quad \rightarrow \quad \lambda / \lambda_0 = z + 1$$

Los modelos cosmológicos establecen hipótesis sobre el ritmo de la expansión mediante el término factor de escala espacial $R(t)$ que es función del tiempo. Si en el instante t_1 la galaxia G emite un fotón con una λ_1 y un tiempo después (t_2) es detectado en otra galaxia G' con una λ_2 , entonces en el intervalo (t_1, t_2) el universo se ha expandido en un factor λ_2/λ_1 y lo mismo habrán hecho las distancias entre G y G' . El factor de escala espacial también se habrá multiplicado por ese mismo factor:

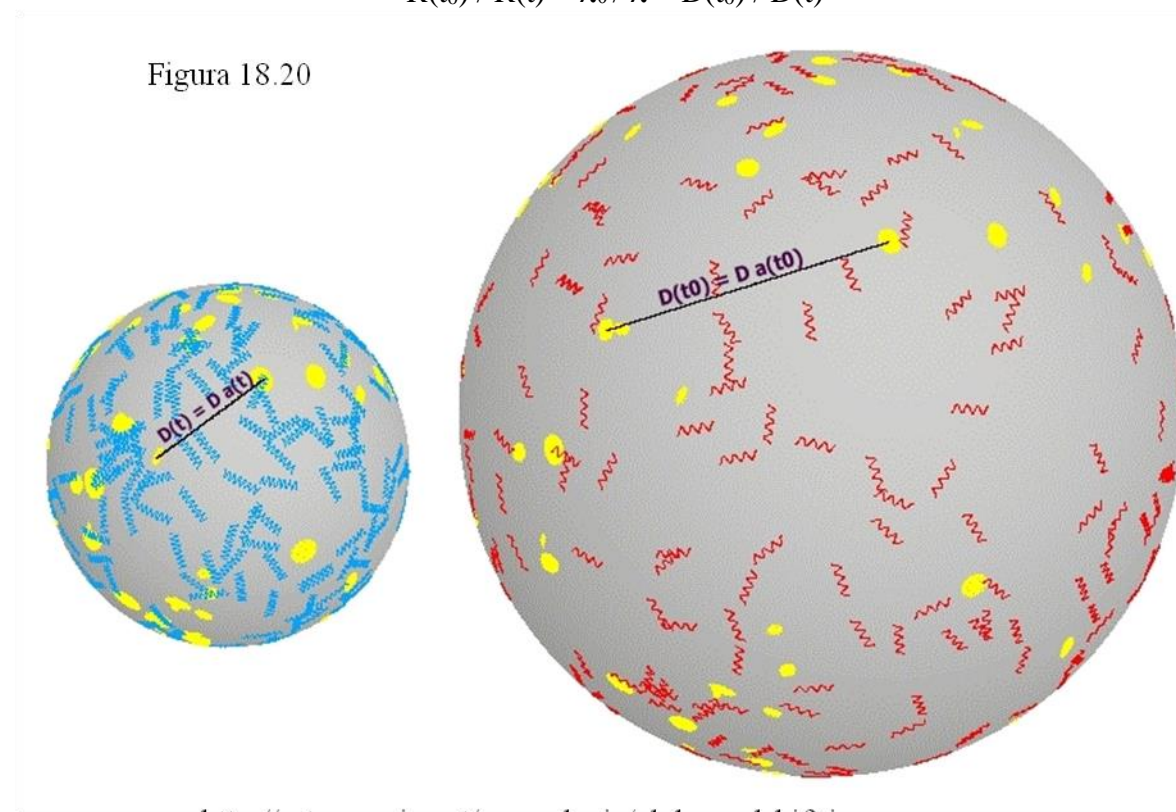
$$R(t_2) / R(t_1) = \lambda_2 / \lambda_1 = d_2 / d_1$$

Siendo d_1 la distancia entre G y G' en el instante t_1 y $d_2 = d(G, G')$ en t_2 .

En la figura 18.20 aparece una superficie esférica que representa el Universo (solo la superficie, como en el modelo del globo que se hincha) en un instante t (a la izquierda) y en el instante actual (t_0) a la derecha. Los fotones azules de la izquierda (con longitud de onda λ) se han estirado y convertido en rojos a la derecha (λ_0). Las distancias entre las galaxias (círculos amarillos) también han aumentado en la misma proporción que la longitud de onda.

En estos dibujos el *redshift* es $z = 1$, por lo que $\lambda_0 / \lambda = 1 + z = 2$, es decir, las distancias entre dos galaxias típicas cualesquiera del Universo actual (t_0) son el doble que las correspondientes a un tiempo anterior t . El factor de escala espacial habrá variado de igual forma:

$$R(t_0) / R(t) = \lambda_0 / \lambda = D(t_0) / D(t)$$



<http://astronomia.net/cosmologia/globosredshift.jpg>

18.4 EL BIG BANG

Acabamos de ver que las distancias en el Universo actual son 1,25 veces mayores que hace unos 3.000 millones de años. Si lo pensamos al revés, hace 3.000 millones de años las distancias entre galaxias típicas eran $1 / 1,25 = 0,8$ (el 80%) de las actuales. ¿Y antes? Pues más pequeñas. ¿Y mucho, mucho antes? Más pequeñas todavía. El Universo ha ido creciendo y haciéndose cada vez más vacío. La densidad de galaxias o cúmulos ha ido decreciendo constantemente, por lo que hace mucho tiempo el Cosmos debía ser mucho más denso que en la actualidad.

Al principio de los tiempos las distancias en el Universo eran mucho más reducidas y fueron creciendo y creciendo hasta convertirse en lo que vemos hoy día. Esta es la propuesta que hicieron algunos astrónomos, el primero de ellos el belga Georges Lemaître quien en 1931 hablaba de un inicial “átomo primitivo”. Otros, en cambio, se resistieron a esta escenografía. Uno de ellos, el inglés Fred Hoyle, con la sana intención de mofarse de lo que le parecía un disparate, la bautizó como el Big Bang (la Gran Explosión). Le salió el tiro por la culata (nunca mejor dicho) pues su denominación ha hecho fortuna y ahora esta teoría, bien asentada entre los especialistas, es conocida con ese nombre por todo el mundo. Hay que advertir que, efectivamente, el nombre de “Big Bang” sugiere una explosión y no debe entenderse como tal. No hay una fuerza, un impulso, primordial que lanza todas las galaxias hacia fuera. Es todo el Cosmos el que se expande y expande, desde fases iniciales tremendamente densas y compactas hasta llegar al estado actual en el que las galaxias están considerablemente separadas y los espacios vacíos son lo más abundante.

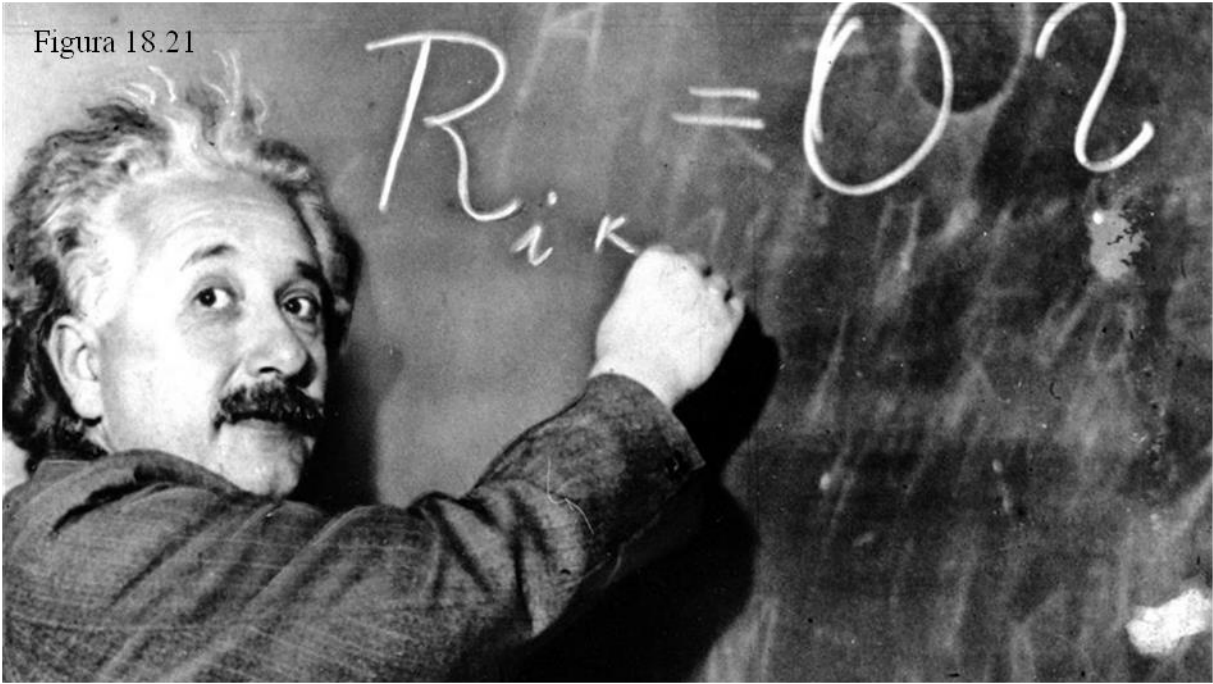
Teoría General de la Relatividad

Dada a conocer por Einstein en 1915-16 formulaba una nueva teoría de la gravedad. El espacio y el tiempo tenían que ser considerados como indisolubles, como una única entidad, y la geometría del espacio-tiempo, curvado por las masas existentes, era la que gobernaba el movimiento de los cuerpos. Tuvo un éxito inmediato al conseguir explicar satisfactoriamente las anomalías en el avance del perihelio de Mercurio (que la Mecánica newtoniana no podía justificar) y al predecir la curvatura de los rayos de luz al pasar cerca de una masa importante, como fue corroborado en 1919, durante un eclipse de Sol, por el inglés A. S. Eddington.

Einstein aplicó su nueva teoría al Universo en conjunto estableciendo como hipótesis de partida el llamado **Principio Cosmológico**: el Universo es homogéneo e isótropo a gran escala. La homogeneidad quiere decir que la densidad de materia en todo el Universo es la misma (considerando grandes espacios); las concentraciones de masa como estrellas o galaxias son alteraciones locales que no afectan a ese principio globalmente. La isotropía nos señala que el Universo es idéntico en todas las direcciones, que no hay ninguna orientación privilegiada (también a gran escala). Consiguió establecer unas ecuaciones (de enorme complejidad matemática) que ofrecían un modelo del comportamiento del Universo.

Sin embargo las soluciones que encontró para estas ecuaciones no se ajustaban a un Universo estático (esto era en 1917, antes de que se descubriera el desplazamiento al rojo de prácticamente todas las galaxias), así que introdujo en ellas un término (la constante cosmológica) para acomodarse a la idea entonces dominante. Cuando supo que el espacio estaba en expansión consideró la introducción de esa constante como el mayor error de su vida.

Figura 18.21



https://www.nationalgeographic.com.es/medio/2018/03/17/einstein__1280x720.jpg

Para lo que nos interesa aquí lo importante es que la Teoría General de la Relatividad ha sido corroborada innumerables veces y que es el marco de referencia para todos los estudios teóricos sobre Cosmología. Estos desarrollos empezaron muy pronto: en 1922 Friedmann encontró unas soluciones (sin constante cosmológica) que daban como resultado un Universo en expansión y en 1927 Georges Lemaître las utilizó para esbozar los primeros modelos de la teoría del Big Bang. Otros hitos destacados han sido el estudio del comportamiento de un agujero negro o la predicción de la existencia de ondas gravitacionales, ambos basados en la teoría de Einstein.

Paralelamente se lograron (en el último siglo) importantísimos y numerosos avances teóricos en la comprensión de la naturaleza e interacciones de las **partículas subatómicas** (protones, neutrones, electrones, quarks, neutrinos) que han permitido entender el funcionamiento de la materia en condiciones extremas, como los procesos de fusión nuclear en el interior de las estrellas, en los estallidos de supernovas, la emisión de potentes chorros de energía en las cercanías de un agujero negro, o lo que sucedió en los primeros instantes densos y calientes de nuestro Universo.

Lo que queremos transmitir es que casi todo lo que creemos saber sobre la evolución del Universo está fundamentado en conocimientos teóricos de gran complejidad. Pero esos resultados teóricos predicen ciertos resultados y la mayoría de esas predicciones que han podido ser contrastadas con observaciones han pasado satisfactoriamente ese examen.

Edad del Universo

Por asombroso que parezca una de las primeras cuestiones que estamos ya en condiciones de estimar es el tiempo que ha transcurrido desde que todo comenzó. Y la clave está de nuevo en la ley y la constante de Hubble.

Haciendo la importante simplificación de suponer que H_0 no ha variado a lo largo del tiempo, es decir, que la constante de Hubble es verdaderamente constante, que la expansión del Universo es uniforme, el argumento es el siguiente.

El valor que hemos aceptado para H_0 es de 70 km/s/Mpc. ¿Qué significa en términos de la expansión? Que si en la red de coordenadas consideramos un cuadrado de 1 Mpc de lado, ese lado crece $H_0 = 70$ km cada segundo. O bien que si dos galaxias distan 1 Mpc, su distancia va a aumentar $H_0 = 70$ km cada segundo. Hay que reconocer que es un ritmo extremadamente lento. 70 km es una longitud irrisoria frente a 1 Mpc. Harán falta mil millones de años para que su distancia crezca un 7,35 %.

¿Cuánto tiempo ha tenido que transcurrir, desde el principio del Universo, desde el Big Bang, para que la distancia entre esas dos galaxias sea de 1 Mpc?

$$t = 1 \text{ Mpc} / 70 \text{ km/s} = 1 / H_0$$

Pero si las galaxias están a 2 Mpc, entonces estarían situadas a dos cuadrículas (cada una de 1 Mpc de lado); como cada cuadrícula se expande 70 km cada segundo ahora la distancia entre esas galaxias crecerá $2 \cdot 70 \text{ km} = 2 \cdot H_0 \text{ km}$ cada segundo.

En general, si dos galaxias están a d Mpc su distancia aumenta, debido a la expansión uniforme del Universo, $d \cdot H_0 \text{ km}$ cada segundo.

¿Cuánto tiempo ha sido necesario, desde el Big Bang, para que su distancia sea d Mpc? Es decir, ¿cuál es la edad del Universo?

$$t = d \text{ Mpc} / d \cdot H_0 \text{ km/s} = 1 / H_0$$

La edad del Universo es el inverso de la constante de Hubble. ¡No depende de d sino solo del valor de H_0 ! Parece increíble, pero es lo lógico. No puede depender de en qué punto cósmico nos encontremos. Da lo mismo elegir una u otra galaxia o cúmulo para hacer este razonamiento.

Ahora solo queda hacer cuentas que consisten exclusivamente en convertir todos los valores a las mismas unidades, los Mpc a km y, al final, los segundos a años:

$$H_0 = 70 \text{ km/s} / \text{Mpc}$$

$$1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc} = 3,26 \cdot 10^6 \text{ años luz}$$

$$1 \text{ año luz} = 300.000 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365,25 \text{ km} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ km}$$

$$1 \text{ Mpc} = 3,26 \cdot 10^6 \cdot 9,46 \cdot 10^{12} \text{ km} = 3 \cdot 10^{19} \text{ km}$$

$$H_0 = 70 \text{ km/s} / 3 \cdot 10^{19} \text{ km}$$

$$\text{Edad del universo} = 1 / H_0 = 3 \cdot 10^{19} \text{ km} / 70 \text{ km/s} = 4,4 \cdot 10^{17} \text{ s}$$

$$1 \text{ año} = 365,25 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} = 3,15 \cdot 10^7 \text{ s}$$

Edad del Universo = $4,4 \cdot 10^{17} / 3,15 \cdot 10^7 = 1,4 \cdot 10^{10}$ años = $14.000 \cdot 10^6$ años (14.000 millones de años).

Este es un tiempo que concuerda bien con otros indicios que ya se tenían, como la edad de las estrellas más viejas encontradas en cúmulos globulares y que se estimaba aproximadamente en esa misma cantidad. Y desde luego, más que suficiente para que el Sol se haya formado como estrella de tercera generación, la Tierra haya podido generar y destruir todo tipo de rocas y en ella la vida haya conseguido ir evolucionando desde las formas más primitivas. Los más recientes cálculos de que tenemos noticia dan una edad de 13.800 millones de años.

Ejercicio 18.7

a) *¿Cuál sería la edad del Universo si $H_0 = 67 \text{ km/s/Mpc}$?*

b) *¿Y si fuera $H_0 = 74 \text{ km/s/Mpc}$?*

Haz clic [aquí](#) para ver la solución.

La expansión soluciona ¡por fin! la paradoja de Olbers. El desplazamiento al rojo de la luz de las galaxias distantes ha tenido tiempo más que suficiente para salir del rango visible a medida que su longitud de onda se ha ido estirando a causa de la expansión. La inmensa mayoría de los fotones que pueblan el universo fueron generados apenas 370.000 años después del Big Bang (ver el subapartado “Radiación cósmica de fondo” en el epígrafe siguiente) y nos llegan ya en las frecuencias de las microondas. Solo una pequeña fracción de los fotones que se siguen produciendo en las estrellas y galaxias nos llegan como luz visible y esos son los puntos brillantes que pueblan la oscuridad de las noches.

18.5 HISTORIA DEL UNIVERSO

A partir de ese estado inicial inimaginablemente denso y caliente, comienza un proceso continuo de expansión y enfriamiento. A medida que el Universo se expande su temperatura va reduciéndose permitiendo gradualmente que vayan apareciendo los diferentes componentes que ahora nos son familiares: protones, neutrones y electrones, luego átomos, más adelante esos átomos van uniéndose y llegan a formar estrellas, planetas y galaxias. Es un proceso continuo de expansión, enfriamiento y formación de estructuras.

En el tema 11 vimos que la película de la formación de la Tierra y la aparición en ella de la vida y su evolución posterior es muy lenta al principio y se va acelerando progresivamente de forma que en el último tramo se aglomeran los acontecimientos relevantes (al menos para nosotros). De forma similar, pero al revés, la historia del Universo tiene también un periodo inicial brevísimo (¡unos 20 minutos!) en el que se suceden en fracciones infinitesimales de segundo, cambios sustanciales en su composición, su estructura y su comportamiento para luego, en cambio, irse tranquilizando y evolucionando mucho más pausadamente.

El estado inicial es lo que los teóricos llaman una **singularidad** en la que los parámetros característicos (temperatura, densidad) toman valores sólo concebibles en el abstracto mundo matemático. A partir de ese estado inicial surgen el espacio, el tiempo, la materia y comienza a evolucionar nuestro Universo.

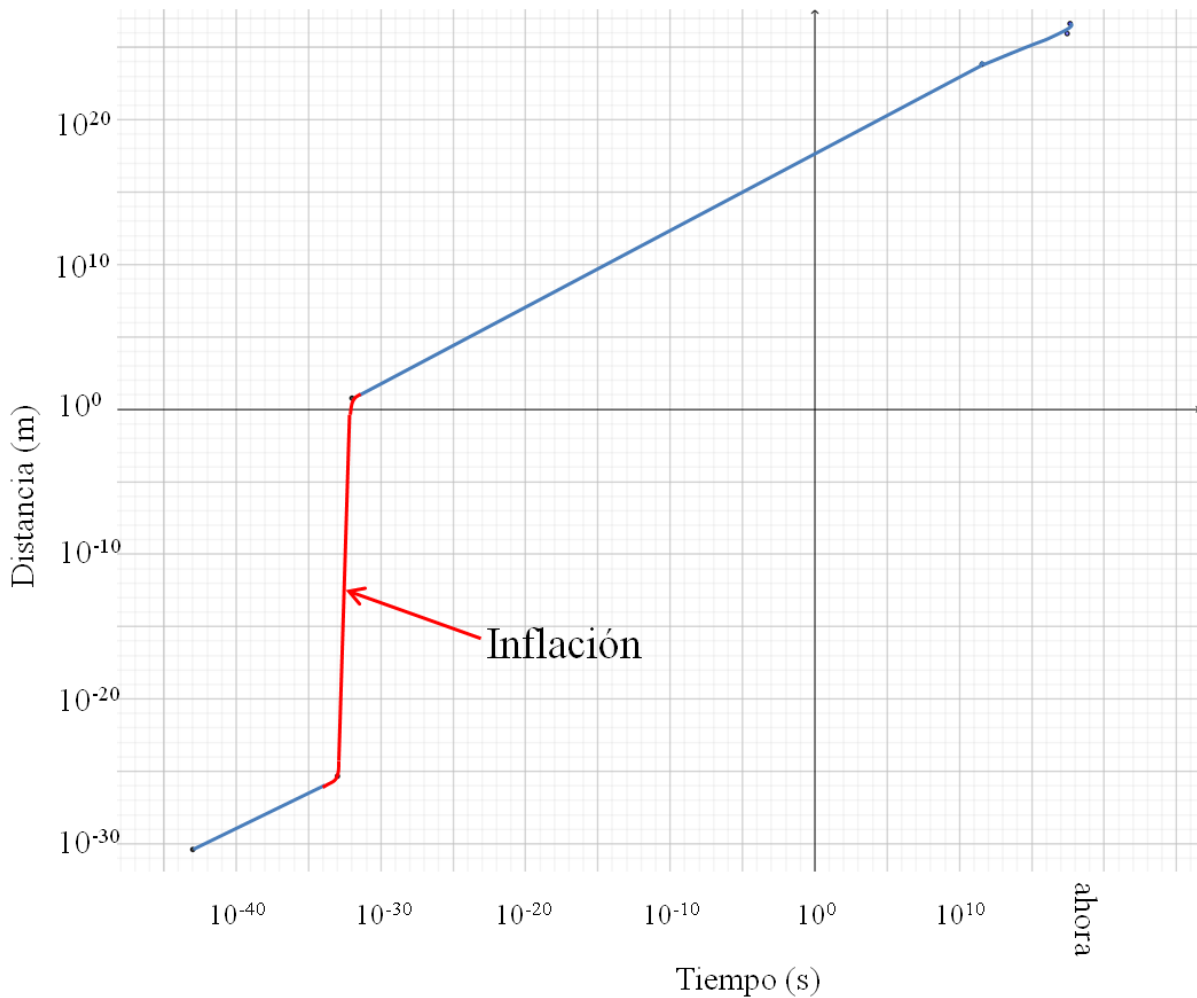
Los primeros instantes

Antes de $t=10^{-43}$ s (el llamado tiempo de Planck) la cosa empieza bastante mal: de esta primera etapa no se puede saber nada. Las leyes conocidas no tienen validez en esas condiciones extremas. Pero a partir de ahí los teóricos han sido capaces de reconstruir lo que pasó.

Entre $t = 10^{-43}$ y $t = 10^{-12}$ segundos las cuatro **fuerzas** existentes en la Naturaleza (gravedad, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil) que al principio estaban “acopladas” (cada una actuaba como una mera manifestación de una única fuerza) fueron desacoplándose, actuando cada una de forma independiente. Estas fuerzas son las que consiguen estructurar la materia. Si la temperatura es muy alta las partículas se agitan de tal forma que las fuerzas no pueden agruparlas. Por eso los protones, átomos, moléculas, estrellas y galaxias solo pudieron irse organizando a medida que la temperatura descendía.

En el minúsculo intervalo entre $t = 10^{-33}$ s y $t = 10^{-32}$ s se produce la **inflación**, una expansión tan acelerada (figura 18.22) que las distancias se multiplicaron por un factor de 10^{26} mientras la temperatura descendía de 10^{28} a 10^{22} K. Esta hipótesis fue propuesta por Alan Guth en 1980 para intentar resolver algunos problemas que las teorías anteriores no eran capaces de afrontar: la geometría actual del Universo (ver el último apartado, Futuro del Universo) y la validez del Principio Cosmológico (homogeneidad e isotropía).

Figura 18.22



En el intervalo entre $t = 10^{-12}$ y $t = 10^{-6}$ segundos nuestro Cosmos está constituido por un denso y ardiente plasma de **quarks** y electrones. La temperatura es tan alta ($>10^{12}$ K) que los quarks no pueden aglutinarse para formar protones o neutrones (y sus antipartículas). Esto ya puede suceder entre $t = 10^{-6}$ y 1 segundo después del Big Bang.

En ese brevísimo lapso de tiempo los **protones y neutrones**, conforme van apareciendo, se aniquilan inmediatamente con sus antipartículas dando como resultado dos fotones. Ambos procesos de ida y vuelta (simbolizados así para una pareja protón – antiprotón: $\gamma + \gamma \leftrightarrow p^+ + p^-$) se suceden ininterrumpidamente en ambos sentidos, lo mismo que las similares de los neutrones. Pero, a medida que sigue la expansión y el enfriamiento, los fotones dejan de tener energía suficiente como para engendrar protones o neutrones. El proceso $\gamma + \gamma \rightarrow p^+ + p^-$ deja de producirse pero la opuesta, la aniquilación $p^+ + p^- \rightarrow \gamma + \gamma$, sigue adelante, de modo que el número de protones y neutrones se reduce frente al de fotones. Al final hay $2 \cdot 10^9$ fotones por cada partícula de materia. La radiación domina absolutamente el panorama.

En principio había la misma cantidad de partículas que de antipartículas, pero ¿qué ha ocurrido con la **antimateria**? En el cosmos actual no hay ni rastro de ella. Tuvo que existir alguna asimetría que la hiciera desaparecer. No tiene que ser muy considerable: parece que con que hubiera mil millones + una partículas de materia ordinaria por cada mil millones de partículas de antimateria sería suficiente.

Otra cuestión importante es que, pese a que inicialmente debía haber el mismo número de protones que de neutrones, el decaimiento espontáneo del neutrón descomponiéndose en un protón y un electrón ($n \rightarrow p^+ + e^-$) dio como resultado que el número de protones era 7 veces mayor que el de neutrones al final de este periodo ($t = 1$ s).

Entre $t = 1$ s y $t = 10$ s después del Big Bang, con temperaturas del orden de 10^{10} K los fotones comienzan a generar partículas menos pesadas (**electrones** e^- y sus antipartículas, los positrones e^+) que inmediatamente se aniquilan. Ahora las reacciones son $\gamma + \gamma \leftrightarrow e^+ + e^-$. Igual que antes con los protones, al cabo de un tiempo ya los fotones no tienen energía suficiente, no hay más creación de electrones y solo se da el aniquilamiento $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ y la proporción del número fotones frente al de partículas de materia sigue aumentando.

Cuando $t = 10$ s la temperatura del Universo es de unos 10^9 K. Está formado por una sopa incandescente de fotones, neutrinos, protones, neutrones y electrones. Hay una sola partícula de masa (protón, neutrón o electrón) por cada $2 \cdot 10^9$ fotones, es decir el Universo sigue absolutamente dominado por la **radiación** frente a la materia. En cuanto a la materia había igual número de protones que de electrones, pero solo un neutrón por cada 7 protones.

Nucleosíntesis primordial

En el lapso desde $t = 2$ minutos hasta $t = 20$ minutos se dan las condiciones para que comiencen las reacciones de fusión nuclear (las que hemos visto darse en el interior de las estrellas). Los protones chocan entre sí con tanta energía que pueden vencer su repulsión eléctrica y unirse para dar núcleos atómicos un poco mayores: es lo que se conoce como nucleosíntesis primordial, la primera fabricación de núcleos atómicos. El 25% de los protones y todos los neutrones existentes se unen para dar núcleos de He.

Como prosigue la expansión y el enfriamiento las condiciones para esta nucleosíntesis tuvieron muy poco tiempo para actuar. El resultado final es un 75% de protones (núcleos de H que no se combinaron), 25 % de núcleos de helio, y trazas de núcleos de ${}^7\text{Li}$, ${}^3\text{He}$ y de deuterio (${}^2\text{H}$). Varias veces hemos hablado de la composición general del Universo como formada esencialmente por H y He. La razón de ello está en esta nucleosíntesis primordial. Esto es todo el material que quedó tras el Big Bang. Todos los demás elementos fueron sintetizados, mucho tiempo después, en los núcleos de las estrellas y en las explosiones de supernovas.

Estas cantidades, estos porcentajes de los núcleos atómicos existentes cuando $t = 20$ minutos se han podido deducir de los estudios teóricos y también se pueden obtener de lo que ahora observamos en el cosmos actual. Ambos resultados concuerdan plenamente, refuerzan la predicción de que hubiera 7 protones por cada neutrón y son una de las pruebas más **concluyentes** que vienen a confirmar la existencia del Big Bang.

Cuando $t = 20$ minutos después del Big Bang, el Universo se ha expandido hasta tener un radio de 3.000 años luz y la temperatura ha descendido hasta $T = 10^7$ K. La nucleosíntesis no puede seguir avanzando y todo el espacio queda lleno de un plasma formado por fotones, por los núcleos atómicos de H y de He y por electrones, con gran dominio de la radiación, de los fotones, sobre la materia. Este plasma es **opaco** porque los fotones y los electrones están permanentemente interactuando de forma que el recorrido libre de los fotones es nulo.

47.000 años después del Big Bang la **materia** (la “ordinaria” y la oscura) comienza a dominar frente a la radiación (fotones y neutrinos). Como consecuencia el ritmo de expansión se reduce debido a la atracción gravitatoria y las mínimas variaciones de densidad producidas durante la inflación se ven amplificadas, preludivo la formación de grandes estructuras (galaxias).

La radiación cósmica de fondo

Cuando $t = 370.000$ años, la temperatura había bajado hasta unos “confortables” $T = 3.000$ K. En este momento se produce otro cambio drástico, la llamada **recombinación**: los núcleos atómicos son ya capaces de retener a los electrones y se forman verdaderos átomos de H y de He que son neutros. Esto provoca que los fotones dejen de interactuar tan activamente como antes con las partículas cargadas (sobre todo con los electrones), su recorrido deja de estar limitado y el Universo se hace transparente. Desde ese momento los fotones pueden viajar libremente por todo el espacio llenándolo de una radiación que ha llegado hasta nosotros en forma de registro fósil, la radiación cósmica de fondo de microondas.

La existencia de esta radiación residual que debería llenar todo el Universo fue predicha por el físico ucraniano-estadounidense George Gamow en 1948 y detectada accidentalmente por A. Penzias (a la derecha en la figura 18.23) y R. Wilson en 1964 mientras probaban una antena para comunicaciones terrestres. Su presencia confirmada por numerosas observaciones es una prueba abrumadora a favor de la teoría del Big Bang. De hecho, ha sido objeto de varias misiones científicas (los satélites COBE, WAMP, Planck y otros) para estudiarla detenidamente.



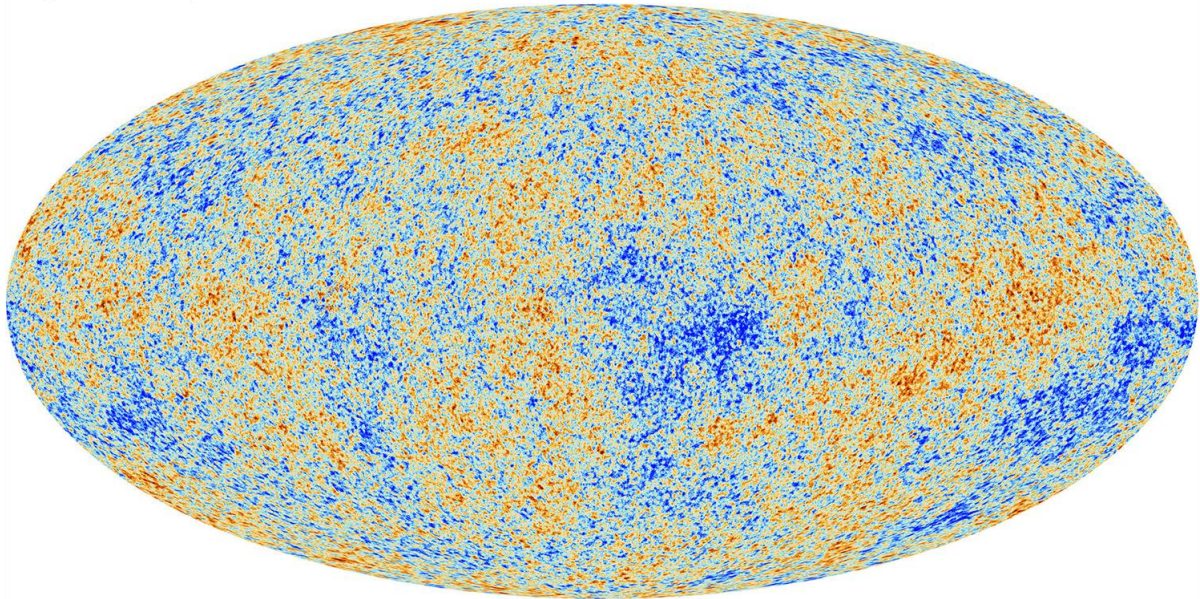
<https://4.bp.blogspot.com/-UD2JpPMh5IY/UegnkLrxOqI/AAAAAAAAADGM/aAACcAZrfFY/s400/Arno+Penzias+y+Robert+Wilson.jpg>

La radiación cósmica de fondo de microondas es una débil señal que se recibe desde cualquier punto del cielo. Los fotones que nos llegan ahora son esos primeros que comenzaron a viajar libremente 370.000 años después del Big Bang. Por eso se han expandido lo mismo que el Universo en todo este tiempo y los detectamos con una longitud de onda del orden de 1 cm, es decir, dentro de la banda de **microondas** del espectro electromagnético, y un desplazamiento

al rojo nada menos que de $z = 1.100$. Es una radiación extraordinariamente uniforme que se acomoda perfectamente a la emisión de un objeto a unos 2,7 K, tal y como las predicciones teóricas habían adelantado (G. Gamow, R. Alpher, R. Herman, en 1948-50).

La imagen siguiente (figura 18.24) obtenida por la misión Planck de la ESA muestra esa radiación en todo el cielo: no es totalmente uniforme; se observa una muy leve anisotropía. Los colores indican ligeras variaciones en la longitud de onda (y por tanto en la temperatura).

Figura 18.24



https://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2013/03/planck_cmb/12583930-4-eng-GB/Planck_CMB_pillars.jpg

Formación de estructuras

Como ya dijimos, desde $t = 47.000$ años la radiación empieza a perder su predominio sobre la materia y la gravedad empieza a actuar. Pero la gravedad, para que comience a acumular la materia en algunas zonas, necesita que haya algunos puntos más densos que otros. Si la distribución de la materia en el cosmos fuera exactamente uniforme no habría un punto de arranque, un punto donde el equilibrio se rompiera a favor de la progresiva acumulación de masa en un efecto de bola de nieve (en cuanto en un punto hay más densidad que en otro, allí resulta atraída la masa circundante que a su vez hace aumentar la atracción gravitatoria de esa primera aglomeración, que atrae a más material de los alrededores, etc.).

Precisamente la radiación cósmica de fondo nos da también información sobre su distribución: las zonas azules tienen una densidad ligeramente superior a la media y las naranjas un poco menor. Estas **inhomogeneidades** van a ser las semillas sobre las que la gravedad va a ir actuando para formar las conocidas y familiares estructuras de estrellas y galaxias.

Hasta que empiecen a formarse galaxias y estrellas no existen más fotones que los liberados en la recombinación, pero estos ya se han “estirado” lo suficiente como para tener una longitud de onda fuera del rango visible. En el Universo no hay nada de luz visible y por eso se denomina a esta época como la “edad oscura”.

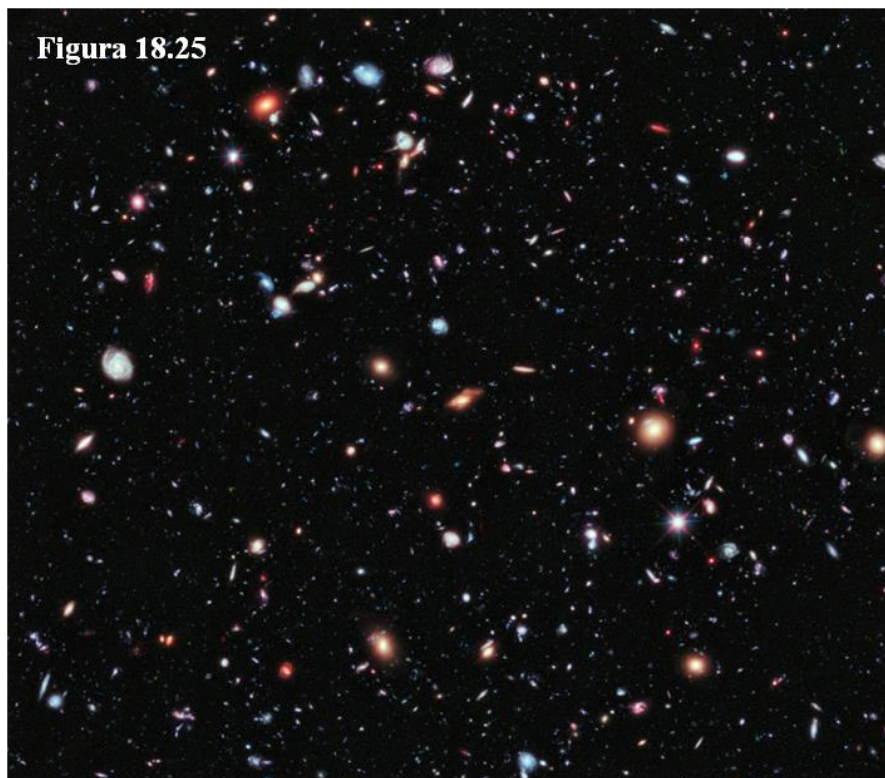
A partir de unos $150 \cdot 10^6$ años después del Big Bang, con $T = 60$ K, ya pueden formarse las primeras moléculas de hidrógeno (H_2) que constituirán las nubes moleculares necesarias para que el material aglutine y comienzan a aparecer gradualmente las **primeras estrellas** dentro de protogalaxias.

Este proceso se prolonga hasta unos 1.000 millones de años después del Big Bang, cuando nuestro Cosmos tienen una temperatura $T = 19$ K y ya se va pareciendo al que vemos en la actualidad. Las grandes **estructuras** van formándose poco a poco, desde pequeñas (protogalaxias) a más y más grandes (galaxias, cúmulos y supercúmulos). Las primeras estrellas que se formaron obviamente solo contenían H y He, pero las más masivas tendrían una vida tan corta como unos pocos millones de años y al final de su ciclo habrían producido y diseminado por el espacio muchos átomos de elementos más pesados que pasarían al medio interestelar de forma que la siguiente generación de estrellas ya podría contar con ellos.

La **Vía Láctea** comenzó a formarse cuando la edad del Universo era de unos 5.000 millones de años y, dentro de ella, nuestro Sistema Solar comenzó su andadura 9.200 millones de años después del Big Bang (hace 4.600 Ma).

A los 8.800 Ma desde el inicio hay otro cambio importante: mientras la materia se hizo con las riendas de la situación la gravedad había ralentizado la tasa de crecimiento del Universo, pero en ese momento la **energía oscura** comienza a dominar sobre la materia, acelerando el ritmo de expansión puesto que ejerce una acción repulsiva.

Esta imagen del telescopio espacial Hubble, la famosa *Ultra Deep Field* (campo ultra profundo) muestra galaxias muy lejanas y por tanto nos enseña una mínima parte del Universo tal y como era hace miles de millones de años.



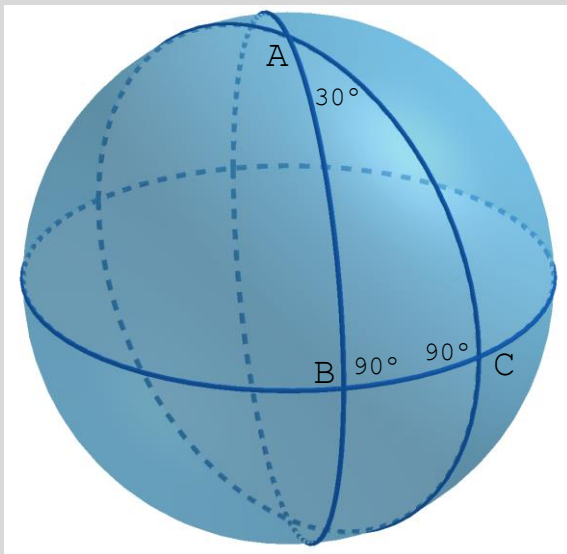
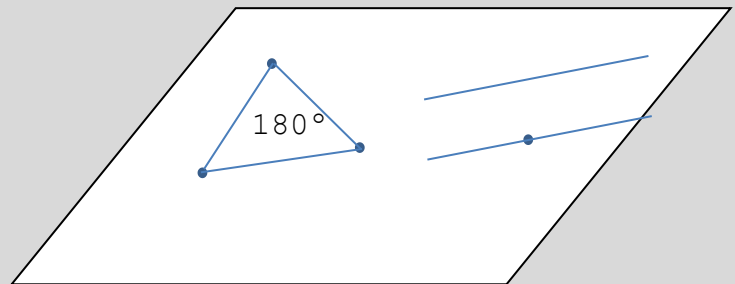
https://www.nasa.gov/images/content/690958main_p1237a1.jpg

Futuro del Universo

Según la teoría general de la relatividad la curvatura del universo depende de su densidad (de masa + energía + materia oscura, ρ). Hay un valor destacado de la densidad del que todo depende: la **densidad crítica** $\rho_c = 5,5$ átomos de H/m^3 . En función de cómo sea ρ en comparación con ρ_c así será la curvatura.

Ampliación: Geometría y curvatura

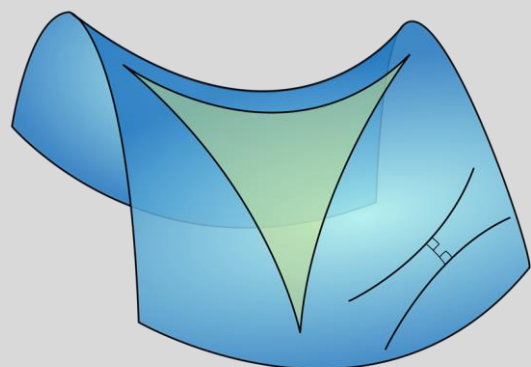
La Geometría clásica, de todos conocida y familiar es la Euclídea. En ella la distancia más corta entre dos puntos es la línea recta, por un punto exterior a una recta solo puede pasar una paralela y los ángulos de un triángulo suman 180° . Todo esto puede visualizarse en un plano:



Sin embargo, pueden existir otros tipos de geometrías. Consideremos una superficie esférica (como la terrestre). La línea que une dos puntos con una distancia mínima no es una recta (esto lo saben bien los navegantes y los pilotos de aviones) sino un arco de círculo máximo. Aquí no hay rectas; lo más parecido, las “rectas” en esta geometría, son arcos. Además, en el triángulo esférico ABC los ángulos suman más de 180° y por C (exterior a la “recta” AB) no hay ninguna “recta” paralela a AB puesto que dos círculos máximos siempre se cortan:

Hay aún una tercera posibilidad, la geometría sobre una superficie similar a una silla de montar (lo que los matemáticos llaman *paraboloide hiperbólico*).

Sobre ella los ángulos de un triángulo suman menos de 180° y existen infinitas “rectas” paralelas.



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/8/89/Hyperbolic_triangle.svg/1920px-Hyperbolic_triangle.svg.png

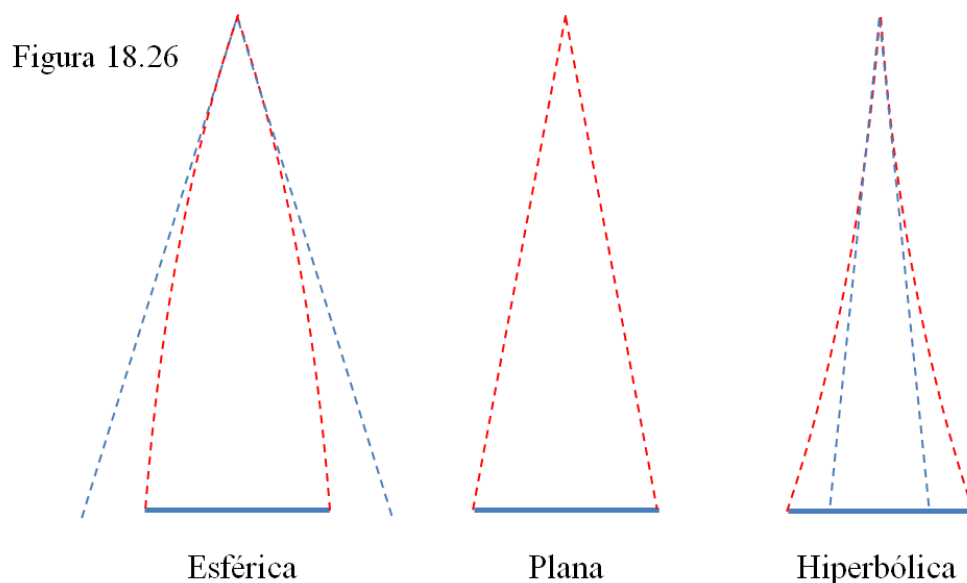
Si $\rho > \rho_c$ la geometría es esférica, de curvatura positiva, las “paralelas” convergen (en realidad no hay paralelas) y el universo es cerrado.

Si $\rho = \rho_c$ la geometría es plana (la familiar geometría euclídea), de curvatura nula y el quinto postulado de Euclides es el clásico (por un punto exterior a una recta solo se puede trazar una paralela a dicha recta).

Si $\rho < \rho_c$ la geometría es hiperbólica, de curvatura negativa, las “paralelas” divergen (hay muchas paralelas) y el universo es abierto; ejemplo clásico: una silla de montar, un collado en las montañas.

Densidad	Geometría del espacio	Curvatura del espacio	Tipo de Universo
$\rho > \rho_c$	esférica	positiva	cerrado
$\rho = \rho_c$	euclídea	nula	plano
$\rho < \rho_c$	hiperbólica	negativa	abierto

¿Cómo podemos averiguar en qué caso nos encontramos? En una geometría esférica los objetos grandes muy lejanos tienden a verse aparentemente mayores de lo que son, en la plana tal cual y en una geometría hiperbólica la curvatura hace que parezcan de menor tamaño aparente.



Bueno, pues con datos de la radiación de fondo de microondas, parece deducirse que los objetos grandes y lejanos se ven con su tamaño inalterado, es decir, la geometría del universo es muy aproximadamente plana. En consecuencia, la densidad de masa ρ debe ser aproximadamente igual a la densidad de masa crítica ρ_c . El Universo es **plano**.

Pero resulta que la densidad de masa que se ha podido detectar (la masa observable de estrellas, galaxias, nubes, polvo más la materia oscura deducida) es del orden de $1,6 \text{ átomos/m}^3$, es decir mucho menor que la que tiene que haber. Nos falta una densidad de unos 4 átomos/m^3 . ¿Dónde está? Tiene que haber algo que haga prácticamente 0 la curvatura del Universo, pero no se detecta de ninguna manera. Pues a eso le llamamos la **energía oscura**: nada menos que algo así

como el 70% del contenido del Universo.

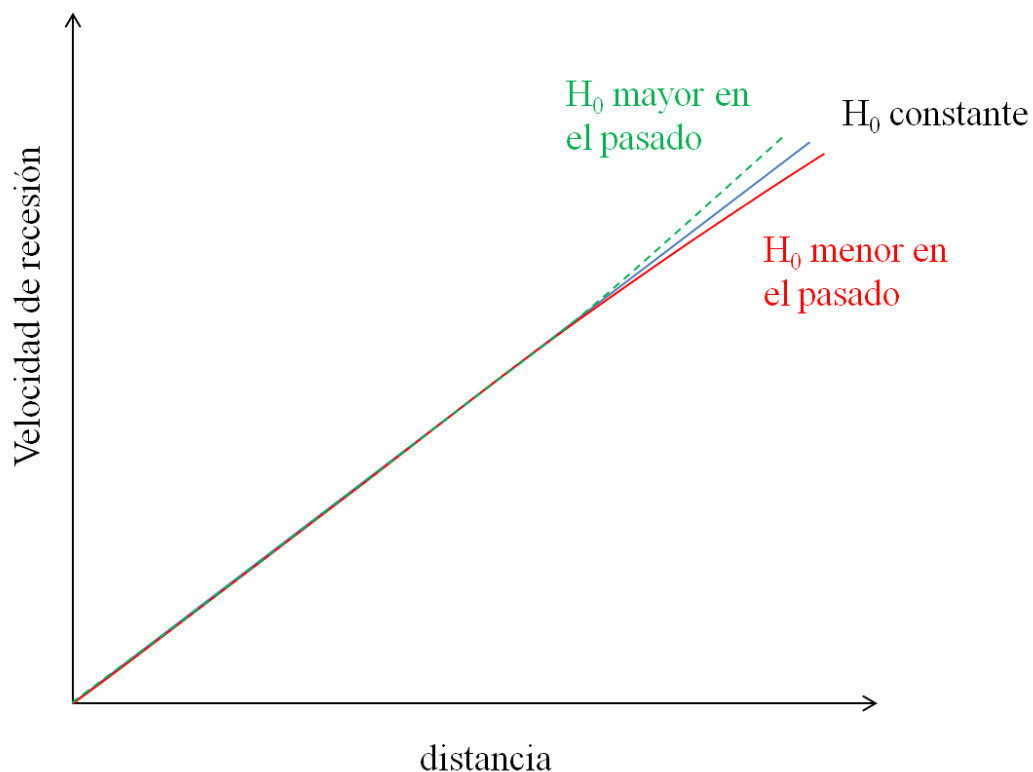
El futuro parece que básicamente depende de dos tendencias opuestas:

- a) La gravedad, debida a la densidad (de masa + energía + materia oscura) que tiende a frenar la expansión; precisamente debido al crecimiento del espacio esa densidad va disminuyendo.
- b) La energía oscura, indetectable de momento, que debe existir y que se opone a la atracción gravitatoria, acelerando la expansión; a pesar de la expansión parece que la densidad de energía oscura se mantiene constante con lo cual, a medida que envejece, en el Universo irá preponderando la energía oscura.

Si finalmente predominara la gravedad la expansión se frenaría y luego todo se contraería hasta un hipotético Big Crunch (Gran Colapso) al que podría suceder otro Big Bang: estaríamos en un universo pulsátil en el que después de la expansión se produce una contracción y así sucesivamente. En caso contrario se expandirá indefinidamente y todo irá envejeciendo y muriendo; la densidad de materia (y energía) será cada vez menor.

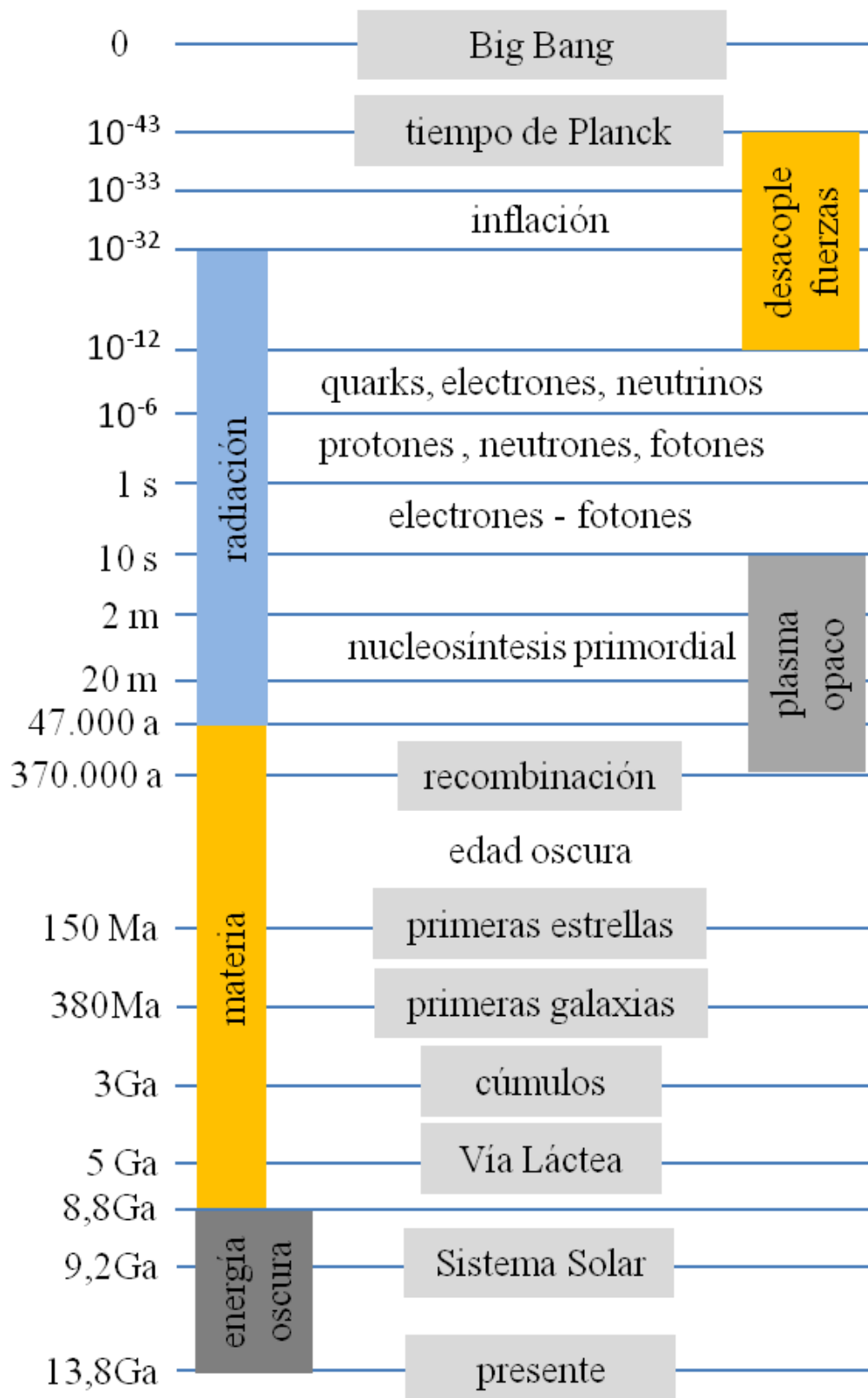
Mediciones de distancias con supernovas tipo Ia parecen indicar que el Universo está **acelerando** su expansión: en los últimos 2.000 millones de años la tasa de expansión, la constante de Hubble, se ha mantenido invariable, pero los indicios apuntan a que el ritmo de crecimiento de las distancias entre las galaxias o cúmulos era menor antes (el valor de la constante de Hubble también era menor): en el Universo “joven” los cúmulos de galaxias no se alejaban tan deprisa como en el actual. Según esto la gravedad está siendo vencida por la energía oscura. De ser cierto el Universo continuará siempre expandiéndose y enfriándose y acabará apagándose lenta pero inexorablemente.

Figura 18.27



En este esquema se recogen los hitos más importantes de la Historia de nuestro Universo:

Figura 18.28



18.6 TRABAJOS ESCOLARES

Modelos para comprender la expansión del universo

- Una cinta elástica, con marcas. Al estirla se estira todo. Es una buena imagen de un universo unidimensional en expansión.
- Otra forma de hacerse una idea de lo que significa la expansión del Universo consiste en utilizar un globo.

Consigue un globo de color azul celeste. Inflalo un poco y pega sobre él pequeños círculos de papel (valen “gomets” adhesivos de los que se venden en papelerías) que van a representar los cúmulos de galaxias. Hazlo de forma que te quepan 15 o 20 en todo el globo.

Dibuja en él algunas ondas para ver cómo se estiran y aumenta su longitud de onda

Desinfla completamente el globo: todas las galaxias dibujadas han quedado apelotonadas.

Luego ve hinchando el globo poco a poco. ¿Qué ocurre con las galaxias?

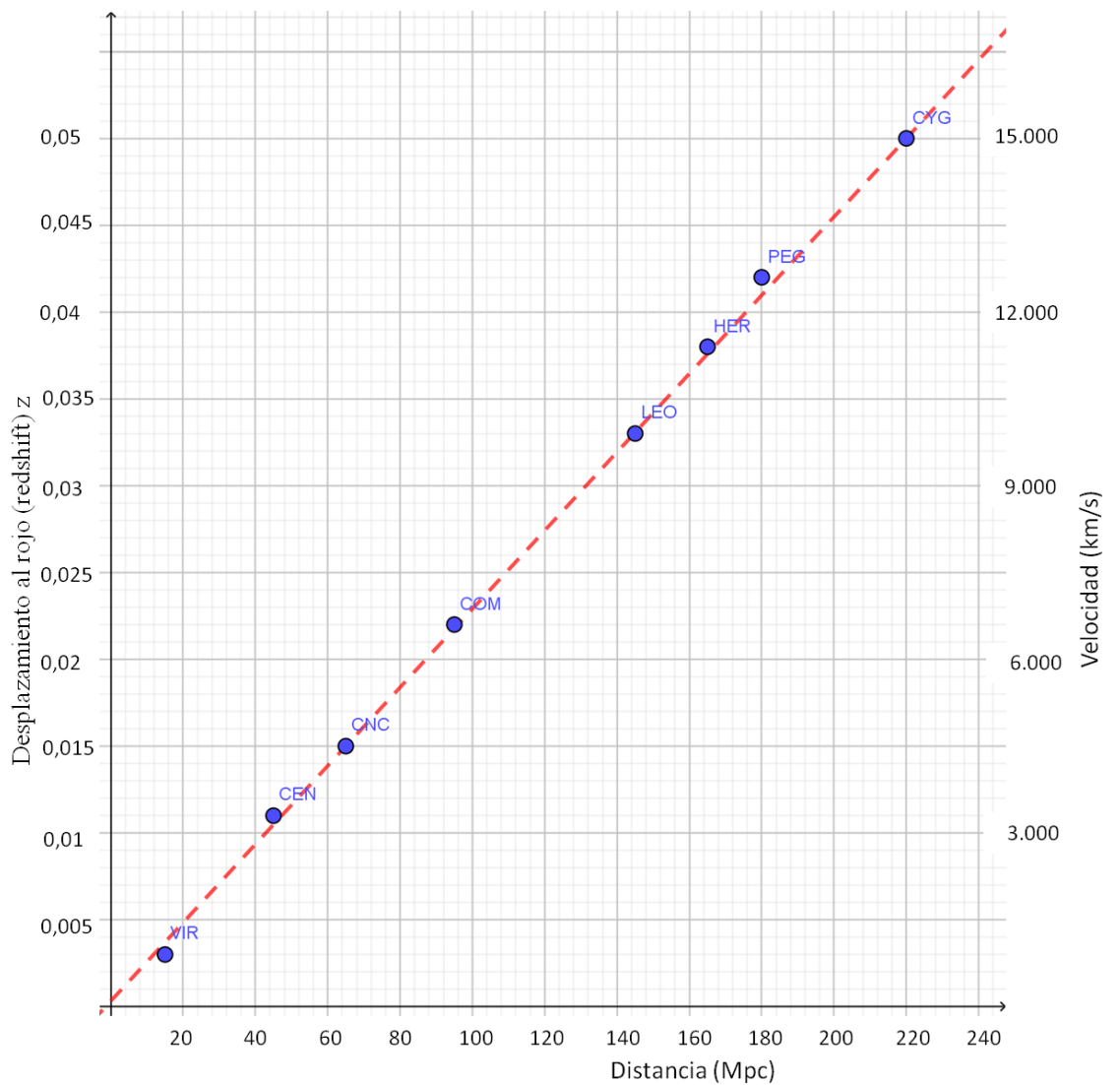
Ejercicio 18.1

- a) $\lambda_0 = 500 \text{ nm}$ $\lambda = 510 \text{ nm}$ $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$ $z = 10 / 500 = 0,02$
- b) $\lambda_0 = 500 \text{ nm}$ $\lambda = 550 \text{ nm}$ $\Delta\lambda = 50 \text{ nm}$ $z = 50 / 500 = 0,1$
- c) $\lambda_0 = 500 \text{ nm}$ $\lambda = 480 \text{ nm}$ $\Delta\lambda = -20 \text{ nm}$ $z = -20 / 500 = -0,04$

Ejercicio 18.2

- a) $v = 0,02 \cdot 300.000 = 6.000 \text{ km/s}$
- b) $v = 0,1 \cdot 300.000 = 30.000 \text{ km/s}$
- c) $v = -0,04 \cdot 300.000 = -12.000 \text{ km/s}$ (se acerca)

Ejercicio 18.3 a y b



- c) $z = 0,0275$
- d) 130 Mpc
- e)

Cúmulo	Distancia (Mpc)	z	Velocidad (km/s)	v/d
Virgo	15	0,003	1.000	65,20
Centaurus	45	0,011	3.210	70,71
Cancer	65	0,015	4.500	69,20
Coma	95	0,022	6.600	69,41
Leo A	145	0,033	10.000	69,07
Hercules	165	0,038	11.400	69,21
Pegasus II	180	0,042	12.690	70,48
Cygnus A	220	0,050	15.000	68,20

Ejercicio 18.4

- a) $v = 300.000 \cdot 0,2 = 60.000 \text{ km/s}$
b) $60.000 = 70 \cdot d \rightarrow d = 60.000 / 70 = 857 \text{ Mpc} = 2.794 \text{ Mal}$

Ejercicio 18.5

Con $z = 0,15 \rightarrow v = 45.000 \text{ km/s} \rightarrow d = 643 \text{ Mpc} = 2.096 \text{ Mal}$

Ejercicio 18.6

En B	d_0	d_1	Δd	$\Delta d/t$
A	10	17	7	0,7
C	30	51	21	2,1
D	50	85	35	3,5

En D	d_0	d_1	Δd	$\Delta d/t$
A	60	102	42	4,2
B	50	85	35	3,5
C	20	34	14	1,4

Ejercicio 18.7

- a) Si $H_0 = 67 \text{ km/s/Mpc} \rightarrow H_0 = 67 \text{ km/s} / 3 \cdot 10^{19} \text{ km}$
Edad del Universo = $1 / H_0 = 3 \cdot 10^{19} \text{ km} / 67 \text{ km/s} = 4,48 \cdot 10^{17} \text{ s}$
 $1 \text{ año} = 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} = 3,15 \cdot 10^7 \text{ s}$
Edad del Universo = $4,48 \cdot 10^{17} / 3,15 \cdot 10^7 = 1,42 \cdot 10^{10} \text{ años} = 14.200 \cdot 10^6 \text{ años} (14.200 \text{ millones de años})$
- b) Si $H_0 = 74 \text{ km/s/Mpc} \rightarrow H_0 = 74 \text{ km/s} / 3 \cdot 10^{19} \text{ km}$
Edad del Universo = $1 / H_0 = 3 \cdot 10^{19} \text{ km} / 74 \text{ km/s} = 4,05 \cdot 10^{17} \text{ s}$
 $1 \text{ año} = 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} = 3,15 \cdot 10^7 \text{ s}$
Edad del Universo = $4,05 \cdot 10^{17} / 3,15 \cdot 10^7 = 1,287 \cdot 10^{10} \text{ años} = 12.870 \cdot 10^6 \text{ años} (12.870 \text{ millones de años})$