

Cosmología para secundaria

Juan Tomé
cosmologica.amonaria.com

Actividad: El estiramiento del espacio

Contexto

Para la cosmología moderna, la “expansión del universo” es un estiramiento del espacio. Imaginemos una trama de coordenadas universal, un conjunto de líneas perpendiculares entre sí que se extendiera por todo el espacio y que formarían un retículo útil para decir dónde se encuentra la galaxia tal o la galaxia cual. Pues bien, decir que el espacio se estira quiere decir que, al pasar el tiempo, cada cuadrícula del retículo se haría más grande. Pueden imaginarse galaxias fijas en posiciones concretas del retículo y pensar en lo que sucede con las distancias entre ellas al estirarse la red: las distancias espaciales aumentaron porque cada cuadrícula se amplió.

Mientras el espacio se estira en el sentido descrito, las galaxias mantienen sus coordenadas en el retículo, “no cambian de sitio” pero se alejan unas de otras atrapadas en la red que se va estirando. Las galaxias se alejan entre sí porque el espacio se estira entre ellas. El alejamiento de las galaxias no es debido a que se muevan *a través de un espacio estático* sino a que las galaxias en reposo *son separadas al estirarse un espacio dinámico*. En este sentido profundo se dice que el modelo de universo actual es dinámico. El dinamismo es una propiedad del espacio del universo no de sus objetos componentes. La expansión del universo es una expansión del espacio mismo sin movimiento de las galaxias en él o a través de él.

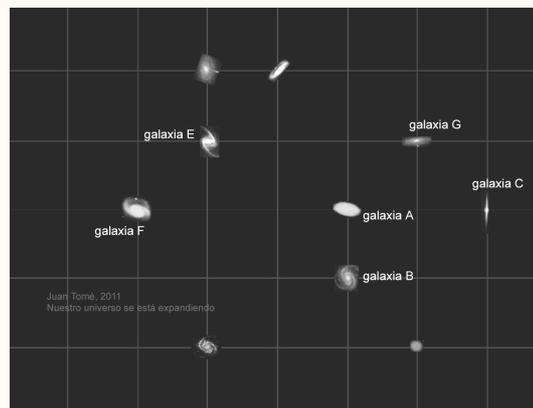
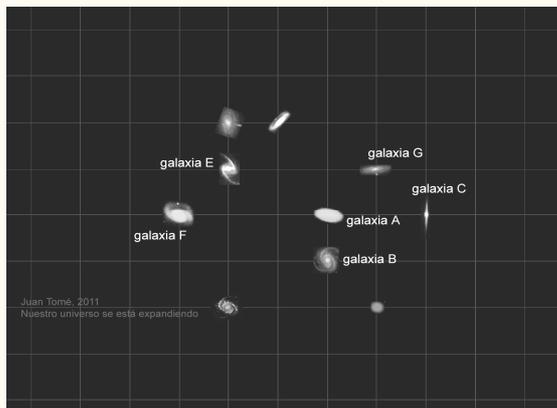
Al pensar en el estiramiento del espacio, los cosmólogos piensan en uno muy especial: el que sucede por todas partes, al mismo ritmo por doquier. No hay partes que se estiren mientras otras no lo hacen o se encogen, no hay partes que se estiren más deprisa que otras, no hay estiramiento en unas direcciones y en otras no. El estiramiento es “uniforme”. La expansión es “uniforme”.

El estiramiento uniforme del espacio tiene una propiedad singular que lo hace preferible a cualquier otro modo de expansión: que es compatible con el Principio de Homogeneidad, que establecen que, a gran escala, las propiedades del universo son las mismas en cualquier zona que se considere. Por otra parte, la expansión entendida como estiramiento uniforme del espacio es compatible con el Principio Copernicano, el que establece que todos los observadores deben ser equivalentes para describir las propiedades del universo, independiente de cual sea la posición que ocupan en él.

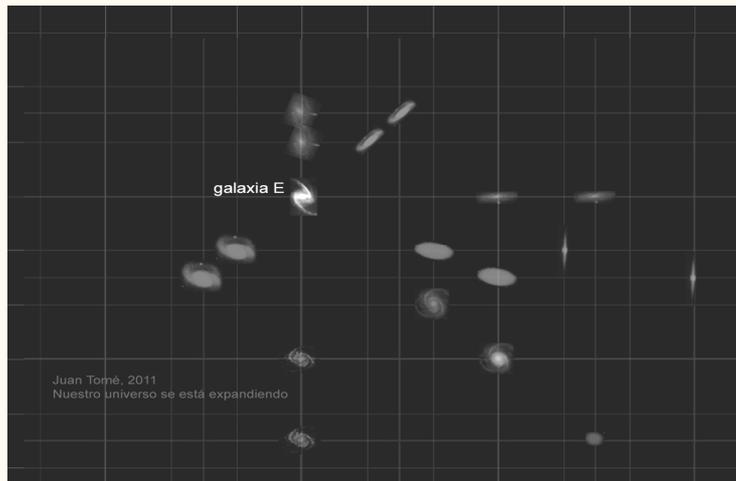
De la condición de uniforme de la expansión se deduce que el incremento de distancias entre dos galaxias es proporcional a la distancia que las separa. Supongamos un período de tiempo tal que cada cuadrícula de la red de coordenadas pasa de medir como 1 a medir como 1'5. Dos galaxias separadas por una cuadrícula pasarán de estar separadas como 1 a estar separadas como 1'5. Su separación aumentó 0'5. En cambio, dos galaxias separadas por dos cuadrículas pasarán de estar separadas como 2 a estar separadas como 3. La distancia entre éstas aumentó 1, el doble de lo que aumentó la distancia entre las otras.

Dado que esas separaciones se producen en el mismo período de tiempo, se puede decir que éstas (las que están a dos cuadrículas de distancia) se separan el doble de deprisa que aquéllas (las que están a una cuadrícula de distancia). Esta es la clave de la llamada relación de proporcionalidad *velocidad-distancia*. Como las galaxias mantienen sus coordenadas y su separación es debida al estiramiento de la red de coordenadas espaciales, la velocidad a la que se refiere esa relación es "velocidad de aumento de las distancias" más que "velocidad de las galaxias al alejarse". Así pues, es correcto decir "las galaxias lejanas se separan más deprisa que las cercanas" pero no lo es tanto decir que "las galaxias lejanas se muevan más deprisa que las cercanas". Ninguna se mueve respecto del retículo de coordenadas. La relación velocidad-distancia es una consecuencia lógica de que la expansión sea uniforme, de que sea una propiedad del conjunto del universo, de que afecte a todas partes por igual. Es independiente de que la expansión sea rápida o lenta, de que el ritmo de expansión sea constante o varíe con el tiempo, es independiente de la historia del universo.

Desarrollo de la actividad



Las dos figuras anteriores muestran la misma distribución de galaxias en dos momentos distintos de un universo en expansión. Se representa un universo de dos dimensiones plano, *universo de papel*, visto "desde fuera". Debe entenderse que la distribución de galaxias se extiende fuera de los márgenes de la figura, hasta el infinito. La segunda imagen, a escala 1:1'5 (una vez y media la primera), es posterior a ella en la historia de la expansión. Si se superponen las dos imágenes, haciendo coincidir por ejemplo las imágenes de la galaxia E, aparecen claramente los desplazamientos del resto respecto de ella.

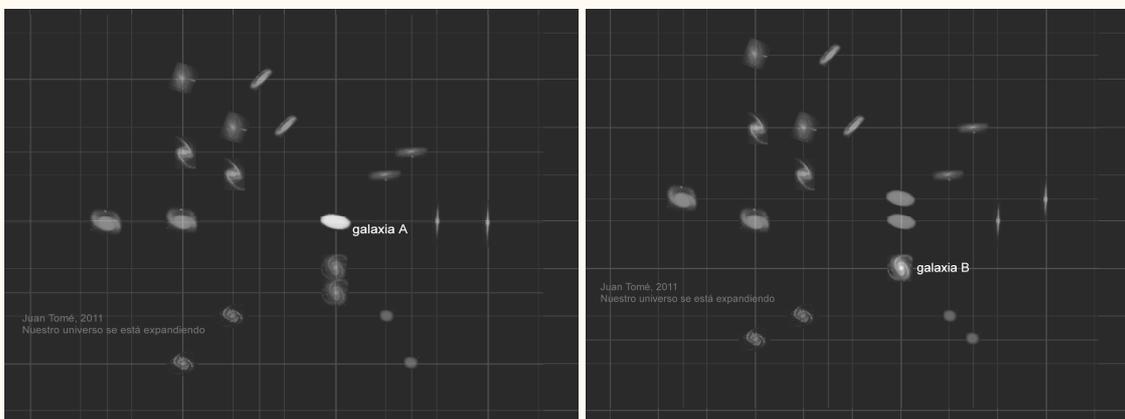


La galaxia E sería la galaxia del observador que va a estudiar la expansión. Pues bien, basta ahora una regla para construir una tabla con los valores de las coordenadas de distintas galaxias (que son las mismas en t_1 y en t_2) y con los valores de **D** (distintos en t_1 y en t_2) “medidos” para distintas galaxias, a partir de los cuales se puede establecer (ordenado los cálculos en la siguiente tabla) la relación velocidad-distancia y mostrar sus consecuencias.

Galaxia en el universo de papel	A	B	C	F
Coordenadas en t_1				
Coordenadas en t_2				
Distancia en t_1 [cm]				
Distancia en t_2 [cm]				
Aumento de la distancia $\Delta D = D_2 - D_1$				
Aumento de distancia por unidad $\Delta D / D_1$				
Velocidad de aumento de la distancia $V_{\Delta D} = \Delta D / \Delta t$ [cm/s]				
Velocidad de aumento de la distancia por unidad (constante de Hubble) $H = (\Delta D / \Delta t) / D_1$ [(cm/s)·cm]				
Edad estimada del universo de papel $\Delta t_{\text{Big bang-ahora}} = D_1 / V_{\Delta D} = H^{-1}$ [s]				

Comentarios didácticos

1. Las cuatro primeras filas de la tabla dejan claro que las galaxias no cambian de posición en el retículo de coordenadas pero sus distancias cambian por el cambio de escala, por el estiramiento del espacio.
2. El aumento de distancia (fila 5ª de la tabla), resultará proporcional a la distancia, cosa que está en la base de la relación velocidad-distancia.
3. El aumento unitario de distancia (fila 6ª), resultará igual para todas las galaxias, reflejando el hecho de que la expansión por cambio de escala es uniforme.
4. La velocidad de aumento de la distancia (la velocidad de alejamiento) para cada galaxia (fila 7ª) se calcula tomando un valor cualquiera para el intervalo temporal que separa las dos imágenes superpuestas (darlo en segundos parece apropiado para un *universo de papel*). Resultará proporcional a la distancia.
5. La velocidad unitaria de aumento de distancias (fila 8ª), medida en cm/s por cada cm de distancia, resultará igual para todas las galaxias, y es **H**, la llamada constante de Hubble, de ese *universo de papel* para el tiempo t_1 . Si se representan los valores de V_{AD} frente a **D**, resultará una recta. Su pendiente será la misma constante de Hubble calculada en esta fila.
6. La edad del universo de papel (fila 9ª), es el cociente entre la distancia "actual" y el ritmo de incremento de distancias, que da el tiempo que tardó en alcanzarse la distancia actual entre dos galaxias cualesquiera partiendo de un estado en que las galaxias (todas) estuvieran a distancia cero. Es decir, el tiempo que tardó en alcanzarse la escala actual desde un estado de escala cero (estado Big bang). Como era de esperar, resulta independiente de la distancia elegida para calcularlo. Por otra parte, a partir de las relaciones que se dan en la tabla, es fácil probar que es el inverso de la constante de Hubble. Se trata de una estimación basada en la simplificación de ritmo de expansión constante. Como el cambio de escala considerado es muy grande, resultará que la edad de ese universo no es muy distinta del intervalo temporal elegido entre las dos imágenes.



Distintos alumnos pueden hacer ese trabajo tomando distintas galaxias como posición del observador. Las figuras siguientes (superposiciones centradas en las galaxias A y B) serían la base del trabajo de alumnos “habitantes” de esas galaxias.

Todos obtendrán los mismos valores para el aumento unitario de distancias, para la constante de Hubble y para la edad de *ese universo de papel*, además de la misma gráfica $V_{\Delta D}$ frente a D . Se haría así evidente la equivalencia de todos los observadores en el universo, la no existencia de un centro o un origen de la expansión.

No debe confundirse la relación teórica *velocidad-distancia* con la ley de Hubble, que establece la relación *desplazamiento al rojo-distancia*. La relación velocidad-distancia es una relación teórica de proporcionalidad que no tiene límites de validez porque es una consecuencia lógica del carácter uniforme que se supone para la expansión. La Ley de Hubble es una relación observacional entre dos magnitudes medibles, el *desplazamiento al rojo* y la distancia, que resultan ser proporcionales solo para distancias pequeñas desde el punto de vista cosmológico. Por eso debe quedar bien claro que la actividad sirve para establecer la relación teórica velocidad-distancia en universos en expansión uniforme, no la Ley de Hubble.

Bibliografía

<http://cosmologica.amonaria.com/wp-content/uploads/2012/12/Taller-Expansi%C3%B3n-web-ApEA-MAY-2011-def-notas-def-pie-y-final-color-papel-blog.pdf>

Tomé, J. 2012, Cosmología para secundaria, Publicaciones ApEA, Antares Ed.