

Nuestro universo se está expandiendo

(La teoría y la práctica en la didáctica de la expansión)

Juan Tomé, IES Jaranda (Jarandilla de la Vera, Cáceres)
casa@amonaria.com

Taller "Nuestro universo se está expandiendo"

Juan Tomé, IES Jaranda (Jarandilla de la Vera, Cáceres)
casa@amonaria.com

Presentación

Este Taller se presentó en los VI Encuentros ApEA, en San Sebastián, en Junio 2005. Su contenido aparece publicado en las Actas de aquellos encuentros.^A

Su planteamiento teórico y las actividades prácticas que se presentaron tenían la intención de precisar lo siguiente:

- ❑ Que el significado que la cosmología actual adjudica a la proposición "nuestro universo se está expandiendo" es que *el espacio es dinámico, que se está estirando y que en su estiramiento arrastra las galaxias, que no se mueven respecto del sustrato.*
- ❑ Que el "corrimiento cosmológico al rojo" de la luz que nos llega de galaxias lejanas es el *estiramiento de fotones debido al estiramiento del espacio durante su viaje, que no es efecto Doppler cinemático debido a la velocidad de alejamiento de las galaxias.*

La primera idea está actualmente bien asentada y son pocas las publicaciones que interpretan la expansión como movimiento de alejamiento mutuo de galaxias lanzadas *a través* del espacio por la "gran explosión" inicial, como chispas luminosas de fuegos artificiales. Es cierto que se encuentran imágenes y frases que transmiten esa idea traicionando el pensamiento explícito de sus autores. El mismo nombre "Big bang" se puede considerar desacertado en ese sentido¹. Pero en lo esencial todo el mundo está de acuerdo: el aumento de distancias entre galaxias a causa de la expansión no tiene nada que ver con el alejamiento de dos objetos a causa de sus movimientos respecto de un sistema de coordenadas.

Por el contrario, la interpretación del "corrimiento cosmológico al rojo" como efecto Doppler cinemático es común en libros de texto, de divulgación y en trabajos específicos sobre didáctica de la expansión. En esta interpretación, el corrimiento al rojo de la luz es debido al alejamiento de las galaxias respecto de nosotros, de forma similar a como el silbido de una locomotora o el ruido de una moto cambia su tono según se acerque o se aleje del observador. Pero asociar el alejamiento de las galaxias al de locomotoras y motos, hace pensar en *movimiento propio de las galaxias a través del espacio* y no en el *espacio dinámico que se estira arrastrando galaxias que no se mueven respecto de la red de coordenadas espaciales*. Se induce así una idea sobre la que existe el amplio acuerdo de que es errónea.

^A Tomé J., Nuestro universo se está expandiendo, Actas VI Encuentros ApEA, pp 75-90

El hecho de que la interpretación Doppler del "corrimiento cosmológico al rojo" subyazca al trabajo seminal de Hubble de 1929 ^B, puede explicar su persistencia en trabajos de divulgación y de didáctica de la cosmología. Sin embargo, la interpretación consistente con la idea de expansión como estiramiento del espacio es la de estiramiento de los fotones. De hecho, a menudo, autores que adoptan la interpretación Doppler para el "corrimiento cosmológico al rojo", explican que los fotones de la radiación cósmica de fondo tienen ahora longitudes de onda propias de las microondas porque se han ido estirando con el espacio desde el momento en que empezaron a viajar libremente por el universo, allá por el año 300000 después del Big bang. Pues bien, los fotones procedentes de galaxias lejanas nos llegan después de viajar por el universo mucho tiempo. Lo correcto es explicar que nos llegan estirados porque, al igual que los de la radiación cósmica de fondo, se han ido estirando con el espacio durante el tiempo de viaje.

El taller "Nuestro universo se está expandiendo" fue una propuesta fundamentada y detallada para trabajar con los alumnos de secundaria en coherencia con la interpretación científica actual de la expansión del universo y de la Ley de Hubble. Al volver a publicarlo ahora se incluyen imágenes y notas que no se publicaron en las actas e los VI Encuentros por razones de espacio y se añaden algunos párrafos para remarcar sus intenciones originales.

Las referencias bibliográficas se notan al pie. Los comentarios aclaratorios al texto se notan al final del trabajo para que su lectura tenga continuidad.

^B Hubble, A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae

La teoría en el taller

Cuando la comunidad científica dice "nuestro universo se está expandiendo" está pensando lo siguiente: "El espacio de nuestro universo se está estirando uniformemente. Está cambiando uniformemente la escala del retículo de coordenadas. Por eso, todas las galaxias están separándose entre sí *aunque no se desplazan por el espacio, aunque no cambian su posición en el retículo.*"

Pero la expansión de nuestro universo no es sólo una idea teórica. Hay observaciones que la apoyan. Se dice habitualmente que la expansión del universo tiene como consecuencia que "desde cualquier galaxia se ve que las demás se alejan". Desde luego eso no puede verse ni notarse de forma directa. Más ajustado a la realidad sería decir que la expansión universal tiene como consecuencia que "desde cualquier galaxia, podrán hacerse observaciones de las que se infiera que las demás se alejan".

En otros términos, las observaciones que muestran la expansión son indirectas. En concreto, lo que se observa desde aquí es que fotones procedentes de cualquier galaxia lejana, situadas en cualquier dirección respecto al observador, llegan con una longitud de onda mayor de la que se supone tenían en el momento de la emisión. Es decir, llegan estirados, *desplazados al rojo*.

Pues bien, no sólo se constata que los fotones llegan estirados. Hay algo más: aparece una relación "sencilla" entre el estiramiento observado de los fotones ($z = \Delta\lambda/\lambda$) y la distancia a la galaxia que los emitió (D). Resulta que z y D son proporcionales. El primer trabajo que demostraba de forma convincente esa relación fue el que Hubble publicó en 1929. En su honor, se la conoce como Ley de Hubble.²

Hubble había realizado a lo largo de aquella década un enorme trabajo de puesta a punto de métodos de determinación de distancias a "nebulosas", consiguiendo establecer una buena colección de ellas y demostrando de paso que tales "nebulosas" eran galaxias como la nuestra, muy alejadas. Concluido ese trabajo se dedicó a relacionar sus distancias con los *desplazamientos al rojo* de la luz que llegaba de aquéllas (medidos por él y otros observadores, Slipher, Humason), encontrando la proporcionalidad citada.

Sin embargo, Hubble no presentó sus resultados como proporcionalidad entre z y D , sino como proporcionalidad entre v (velocidad de alejamiento de la galaxia emisora) y D . Las magnitudes que Hubble medía³ eran z y D pero las magnitudes que representó, obteniendo una recta típica de proporcionalidad, fueron v y D . Entre la medición y la presentación de resultados hubo un proceso de interpretación de lo observado.⁴

La interpretación de Hubble se basó en el efecto Doppler⁵, un fenómeno clásico que origina desplazamiento al rojo aproximadamente proporcional a la velocidad de alejamiento del emisor. Esa es la relación que permite pasar de la proporcionalidad entre desplazamientos al rojo y distancias a la proporcionalidad entre la velocidad de alejamiento y distancias.⁶

Al poner la velocidad de alejamiento *de las galaxias* en un papel protagonista, esta interpretación de la relación de proporcionalidad entre desplazamiento al rojo y distancia transmite una idea implícita no deseable: la idea de que el espacio es estático y que son las galaxias las que se mueven a través de él.⁷

La interpretación alternativa a la de Hubble, la que liga desplazamiento al rojo con el estiramiento de fotones causado por estiramiento del espacio, es más coherente con la idea de espacio dinámico que arrastra a las galaxias en su expansión mientras mantienen sus coordenadas.⁸ En esta interpretación no hay referencias a velocidades propias de las galaxias, toda la atención se centra en las magnitudes que definen propiedades del espacio y de su expansión.

La magnitud clave para describir la expansión como estiramiento del espacio se llama "*factor de escala espacial*" ($R(t)$). Es una función del tiempo que crece a medida que se expande la cuadrícula que sirve para determinar posiciones espaciales, a medida que se estira la red de coordenadas, a medida que aumenta la escala espacial del universo. La función "*factor de escala espacial*" contiene la información necesaria sobre el ritmo de la expansión y sobre las variaciones de éste a lo largo de la historia del universo. Por tanto, permite establecer cuánto cambia la distancia entre dos galaxias lejanas, a causa del estiramiento del espacio que las separa, en un intervalo temporal dado.⁹

También permite establecer (y esto es importante de cara al enfoque didáctico que se propone) cuánto cambia la longitud de onda de un fotón durante su viaje de una galaxia a otra a causa de ese estiramiento. Aunque la prueba es compleja, el resultado es extremadamente sencillo e intuitivo: la longitud de onda de los fotones viajeros se estira como las distancias entre galaxias durante ese tiempo, cambia como cambia el factor de escala. Es decir, la longitud de onda de los fotones cambia con la escala del universo, lo mismo que cualquier otra longitud cosmológica.¹⁰

Trabajando con las mismas aproximaciones que se hacen en las presentaciones habituales de la Ley de Hubble, relacionar el cambio de longitud de onda de los fotones con el cambio de escala espacial del universo y con la distancia no resulta más complicado que relacionarlo con el efecto Doppler debido a la *velocidad de alejamiento de las galaxias*.

Por otra parte, la función "*factor de escala espacial*" juega un papel central en la descripción de la evolución del universo, no sólo de su pasado sino también de su futuro. A partir de ella se pueden introducir cuestiones sobre la edad del universo y sobre sus posibles finales, asignando el significado correcto a expresiones como *Big bang* o *Big crunch*.

La práctica en el taller

En coherencia con todo lo anterior, las actividades que siguen sirven para explicar el estiramiento de los fotones (*el desplazamiento al rojo*), la relación entre el estiramiento de los fotones y la distancia, así como relación *velocidad-distancia*, apoyándose sólo en la idea de estiramiento del espacio, de forma que se puedan evitar los efectos no deseados de las interpretaciones de la Ley de Hubble basadas en el efecto Doppler.

Actividad 1 : ¿Cómo puede interpretarse la expansión?

En esta actividad se presenta a los alumnos la cuestión de opción múltiple que aparece a continuación^C. Las cuatro opciones que se ofrecen corresponden a las cuatro maneras más comunes de entender la "expansión del universo". Aunque la mayoría de los alumnos encuentran en una de las cuatro la que más se acomoda a su manera de pensar, se ofrece la posibilidad de precisar lo que consideren necesario. El objetivo es discutir los resultados, lo que ofrece la posibilidad de precisar conceptos y establecer algunas ideas clave de la cosmología.

Cuestión de opción múltiple

Diversas observaciones astrofísicas parecen mostrar que las galaxias están alejándose unas de otras, que se separan entre sí. En el modelo de universo más extendido en la actualidad, la "expansión del universo" sirve para explicar esas observaciones.

A continuación se os presentan cuatro maneras distintas de entender la "expansión del universo". Elige la que más encaje (aunque sea con matizaciones) con tus ideas sobre ella. Si quieres puedes escribir las matizaciones que creas oportuno. Si tu manera de entender "expansión del universo" es completamente distinta de todas ellas, escríbela aparte. Después discutiremos todas las opiniones.

- *"La expansión del universo consiste en que, a medida que las galaxias se separan entre sí, se va añadiendo espacio donde el universo acaba, es decir, se va creando espacio donde antes no existía".*
- *"La expansión del universo consiste en que, a medida que las galaxias se separan entre sí, ocupan cada vez más espacio del universo. Antes de que las galaxias lo ocuparan, ese espacio del universo estaba vacío."*
- *"La expansión del universo consiste en que todo el espacio del universo se va estirando. Al estirarse el espacio, aumenta la distancia entre las galaxias, se separan entre sí."*
- *"La expansión del universo consiste en que se separan entre sí las galaxias de la parte de universo que podemos conocer. El universo es mucho más que esa parte y, en conjunto, no se ve afectado por la expansión."*

^C Esta cuestión forma parte de una encuesta diseñada por el autor para conocer las concepciones de los alumnos acerca del Big Bang, la expansión y de los límites espaciales y temporales del universo.

Actividad 2 : Qué es la expansión según distintos autores

Esta actividad reúne textos de distintos autores que tratan de explicar el significado de "expansión del universo". Se propone leerlos para, rumiando distintas formas de decir lo mismo, ir comprendiendo el significado que acepta la cosmología científica actual.

Texto 1 (Jagjit Singh, "Teorías de la cosmología moderna", p 164)

"Si adoptamos la noción usual, la del sentido común, acerca del espacio absoluto (descartado por Einstein), podemos concebir la expansión del universo material hacia el espacio exterior vacío como la difusión de un gas hacia el vacío circundante. Pero si nos adherimos a la teoría "relacional" del espacio adoptada por Einstein, nada hay –ni siquiera espacio vacío- fuera del universo. Su expansión es simplemente un cambio en las relaciones de escala del universo como conjunto respecto a las dimensiones lineales de sus constituyentes típicos: el diámetro de un átomo o el radio del electrón o del protón por ejemplo. Dicho con otras palabras, en el primer caso hay movimiento en el espacio mientras que en el segundo hay movimiento del espacio."

Texto 2 (Ferris, T., "Informe sobre el universo", p 36)

"[...] Si tenemos esto en cuenta, podemos evitar el incurrir en la noción localista de que las galaxias están moviéndose a través de un espacio estático, como los fragmentos de una bomba. No habría que pensar en el universo como algo que se expande "en" un espacio preexistente. Todo el espacio que el universo ha tenido alguna vez ha estado en el universo desde el principio, y este espacio se está estirando"

Texto 3 (Freeman. P. Dickson, "La bóveda de la noche", p 240)

"En términos generales, la expansión del universo significa que están aumentando las distancias entre las unidades cosmológicas básicas, las galaxias. Es muy fácil caer en la trampa de pensar, en términos habituales, que expansión significa expansión a las regiones circundantes. Tras ello se halla la vieja idea del espacio absoluto: cuando algo se expande, ocupa más de tal espacio. Tal idea no es aplicable al universo en general; éste ya ocupa todo el espacio, y nos hemos acostumbrado a la idea de que el espacio puede ajustarse a su contenido material. Si se expande el sistema de la materia, la densidad se hará menor porque habrá menos materia por unidad de volumen, y el espacio se hará mayor, sencillamente porque el espacio es donde está la materia.

No se está sugiriendo que la expansión del universo se relacione con las cosas a pequeña escala; no significa, por ejemplo, que la Tierra se expanda, ni la propia galaxia, quizá ni aún los conjuntos de galaxias. Estas estructuras están unidas por la gravitación; la escala de tamaño es tal que en estos casos la gravedad predomina localmente sobre todo aquello que pudiera causar una dispersión. Así, la expansión del universo no tiene nada que ver con la proposición de Reichenbach del "duplicamiento nocturno", en que la pregunta es si podríamos saber acerca de él si, durante una noche, las dimensiones de todo lo que hay en el universo, átomos y demás se duplicaran súbitamente."

Actividad 3 : Para entender la expansión como estiramiento del espacio

Existen distintas analogías ideadas para facilitar la comprensión del fenómeno de la expansión del universo. Algunas de ellas son verdaderos clásicos en las obras de divulgación. Se presentan a continuación textos de distintos autores sobre esas analogías. Se propone su lectura y comentario.

Texto 1 (Cayetano López, "Universo sin fin", p 160)

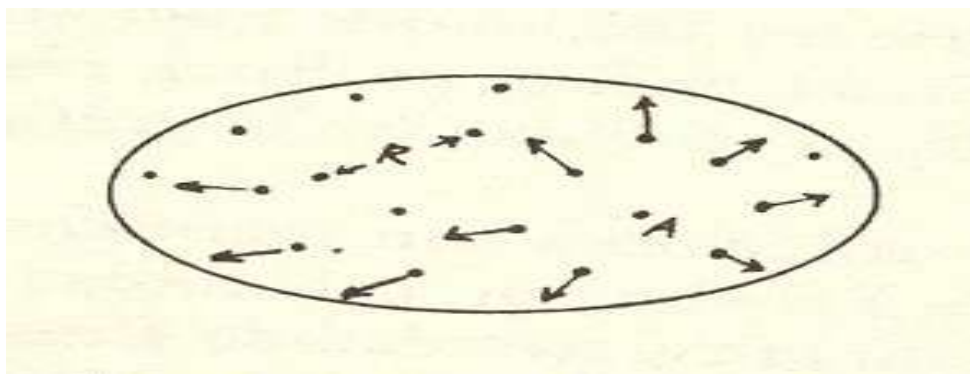
"... es como si una masa de pan contuviera en su interior unas cuantas pasas; al meterla en el horno y expandirse la masa uniformemente, las pasas se alejan unas de otras sin que pueda identificarse ninguna de ellas en especial como centro de la expansión. [...] Y del mismo modo que en la porción de pan, [en el cosmos] los puntos que se alejan unos de otros no se repelen por ninguna fuerza, ni proceden de explosión alguna, sino que se ven arrastrados por la expansión del sustrato material en el que están embebidos, así se interpreta esa deriva generalizada, no como el resultado de una fuerza repulsiva, ni de una explosión en el sentido convencional de la palabra, sino una expansión del sustrato, en este caso del propio espacio, que arrastra las galaxias y las separa unas de otras."

Texto 2 (Shipman, Los agujeros negros, los cuásars y el universo, p 349)

"La analogía que al autor le parece más apropiada es la mencionada por George Gamow, consistente en un entramado tubular, construido con tubos huecos, y en el que las galaxias vienen representadas por niños que están situados en los nudos del entramado. Cuando los tubos se alargan, toda la estructura se expande, alejándose cada [niño] de los restantes, puesto que aumenta la longitud de los tubos que los separan, a medida que corre el tiempo y va aumentando la dilatación. Cada [niño] parece encontrarse en el centro del proceso de expansión, pero en realidad no existe tal centro, dado que la estructura completa y entera es la que está experimentando la expansión. La idea de que es la estructura la que se expande es la clave para comprender la idea del universo en expansión"

Texto 3 (P.C.W. Davies, "El espacio y el tiempo en el universo contemporáneo", pp 275-277)

"Una manera muy popular de describir esta expansión consiste en recurrir a una analogía con una hoja de hule [elástico]."

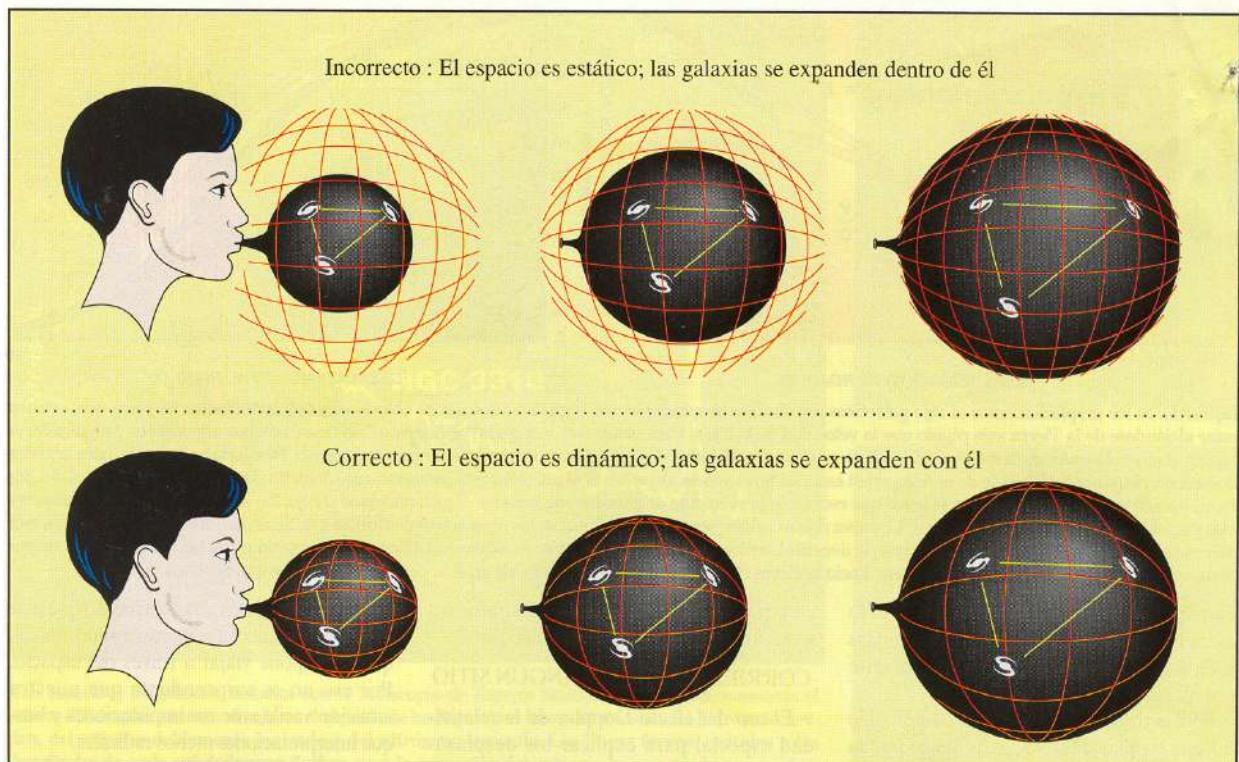


Una hoja de esta naturaleza, cubierta uniformemente de puntos negros se muestra en la figura. Estos puntos representan a las galaxias (o, estrictamente hablando, a conglomerados de galaxias), y la hoja de hule representa el espacio. La expansión del universo puede ser descrita como un estiramiento de la hoja de hule. Para que la expansión sea uniforme el estiramiento debe ser igual en todas las direcciones y en todos los puntos. A medida que la hoja es estirada, todos los puntos se alejan unos de otros. Desde un determinado punto, por ejemplo A, el resto de los puntos parecen alejarse los unos de los otros, y más velozmente los lejanos que los cercanos. Desde la perspectiva de uno cualquiera de ellos, todos los demás parecen estar alejándose, de modo que a él le parece estar en el centro de una expansión general. Esto es falso, obviamente, pues desde todos los puntos se presenciaría ese mismo fenómeno. La expansión no tiene centro; lo único que hay es un cambio universal en la escala de distancias (por ejemplo, R). No hay centro de expansión ni centro del universo. Claro está que la hoja de hule sí tiene centro, pero esto puede ser evitado si se hace la hoja infinitamente grande o si con ella se forma una esfera.

Gracias a esta analogía, también debe haber quedado claro que la expansión del universo es una expansión del espacio mismo y que no debe pensarse que se trata de una emigración de las galaxias hacia un vacío preexistente."

Texto 4 (Odenwald y Tresch, Desplazamientos al rojo de las galaxias, p 354)

"Muchos textos de Astronomía ilustran la cosmología del Big bang y la expansión del universo con un globo que se está inflando con las galaxias pintadas sobre él. Esta es una analogía perfectamente apropiada, sólo si se hace notar que las galaxias están fijadas en las mismas coordenadas espaciales durante la expansión. No se mueven en el sentido familiar de viaje a través del espacio intergaláctico. El propio espacio se está expandiendo y arrastrando a las galaxias con él."



Texto 5 (Wheeler, Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo, p 241-242)

"Para visualizar el universo en expansión, inflamos un globo parcialmente, pegamos monedas en su superficie representando galaxias, e hinchamos más el globo. Cada moneda ve a las compañeras de su alrededor alejarse de ella. Más aún, las monedas separadas por el doble de distancia se alejan el doble de rápido.



Un estudiante de bachillerato me preguntó en una ocasión una cuestión que tipifica la reacción de mucha gente ante la idea de un universo en expansión. "Si el universo se está expandiendo como usted dice, ¿está todo en él, incluido nosotros, haciéndose más grande? En caso contrario, ¿qué es lo que ocupa las partes del universo que resultan de esa expansión?". La pregunta del estudiante refleja un malentendido habitual: si la distancia entre un cúmulo de galaxias y otro se expande, y además la distancia entre el Sol y la Tierra se expande, la longitud de un metro se expande, el diámetro de cada átomo también se expande [...] no tendría sentido hablar de expansión en absoluto. ¿Expansión relativa a qué?

En el universo en expansión, sólo la distancia entre un cúmulo de galaxias y otro se expande. Los átomos no se expanden. Los metros no se expanden. Nosotros no nos expandimos. El globo con su firmamento de monedas proporciona una representación afortunada del universo en expansión. A medida que el universo se expande, la distancia entre moneda y moneda se expande, pero las monedas en sí no."

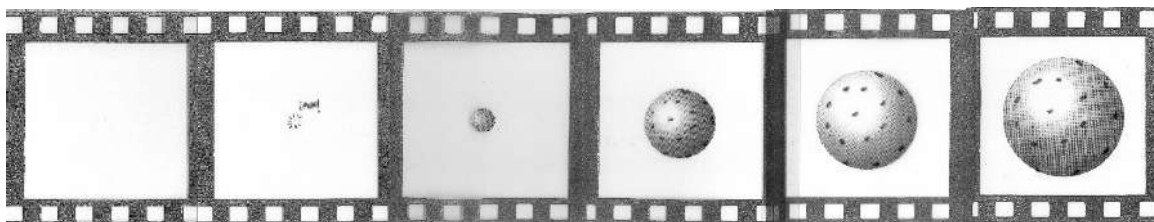
Actividad 4 : Dos películas de la expansión. ¿Cuál es la correcta?

Salir del universo y hacer una película de su evolución colmaría la ilusión de cualquier cosmólogo. Pero salir fuera del universo no es irse muy lejos y ver desde allí, eso seguiría siendo ver desde dentro. No se conseguiría salir fuera viajando en ninguna de las direcciones posibles de nuestro espacio tridimensional. Para salir fuera habría que escapar de ese espacio hacia un exterior inconcebible. Y hacer una película de la expansión del universo implica además salirse del tiempo, perder su noción, situarse en un estado en que cambia lo que se ve y no cambia el observador. Ver una película de la expansión del universo es salirse de la realidad espaciotemporal. Es como ir al cine.

En las películas siguientes, nuestro universo de tres dimensiones espaciales se representa por la superficie de una esfera¹¹. Todo lo que no es esa superficie (su exterior y su interior) no existe, o mejor, no es realidad física. En esa representación el universo tiene dos dimensiones y es curvo. Los seres que habitaran un universo de dos dimensiones serían como cromos, sellos, pegatinas o calcomanías. No tendrían grosor y no podrían concebirlo aunque fueran inteligentes. No podrían imaginar cómo, "hacia dónde" o "hacia qué" salir de su superficie-universo. Es la misma imposibilidad que nos limita a nosotros para imaginar nuestro universo tridimensional *desde fuera de esas dimensiones*. Recurrir a analogías bidimensionales es una prueba de nuestra limitación tridimensional.

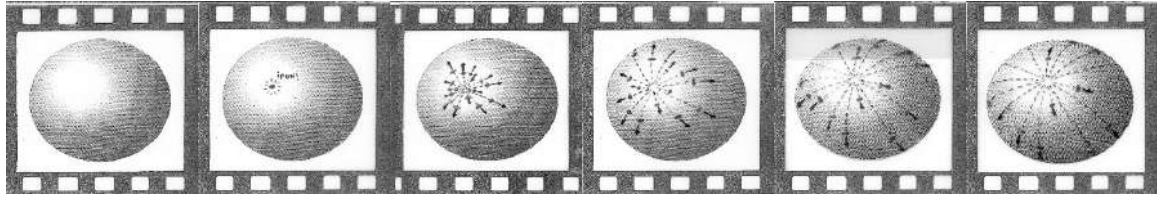
Pues bien, después de leer estos comentarios de la crítica, se trata ahora de ver las "pelis", leer sus guiones y elegir la que mejor cuente la expansión.¹²

La película de la expansión si se concibe como estiramiento del espacio



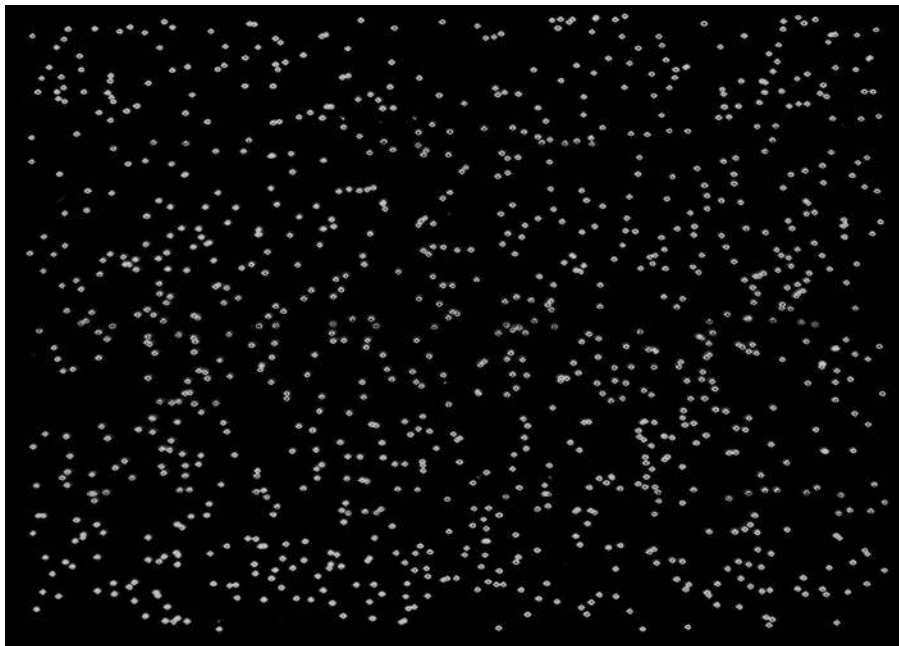
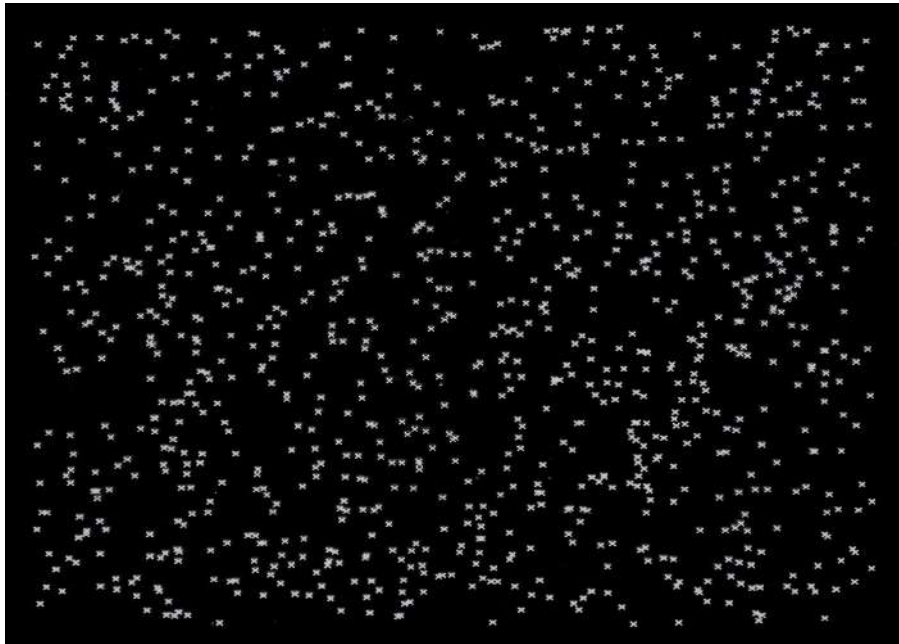
En un ipum! aparece un universo (representado por la superficie esférica de las figuras, no por el volumen encerrado por esa superficie) que se expande. Sus estructuras básicas a escala cosmológica, las galaxias (o, mejor, cúmulos de galaxias), cuya distribución es homogénea, mantienen sus coordenadas en la superficie, no cambian de sitio, no se mueven respecto de la superficie. Las distancias entre esas estructuras aumentan a medida que la superficie se estira. La homogeneidad de la distribución se mantiene en todo momento. La densidad de materia (el número de estructuras por unidad de superficie) es la misma por todas partes pero a lo largo del tiempo disminuye porque el número de estructuras es siempre el mismo pero la superficie aumenta.

La película de la expansión si se concibe como explosión de materia



En algún lugar de un espacio estático que no se expande (representado por la superficie esférica de las figuras, no por el volumen encerrado por esa superficie), se produce una explosión de materia. Las estructuras resultantes de esa explosión, las galaxias (o, mejor, cúmulos de galaxias), se mueven a través de ese espacio, cambian de sitio, cambian sus coordenadas. Las distancias entre esas estructuras aumentan a medida que viajan porque sus trayectorias divergen a partir del lugar donde se produjo la explosión. La distribución de materia no es homogénea en ningún momento, hay zonas donde hay materia y zonas donde la materia expulsada en la explosión todavía no llegó. La densidad de materia es distinta en distintas zonas pero la densidad media de materia en ese universo (el total de materia dividida por el total de superficie, cantidades ambas que no varían) se mantiene a lo largo del tiempo.

Actividad 5 : “Cómo ver la expansión en la mesa de trabajo”



Las dos figuras anteriores ^D corresponderían a la misma distribución de galaxias, en la primera representadas por aspás y en la segunda por cuadrados. Las dos figuras son exactamente iguales, excepto por un pequeño cambio en la escala: la segunda se calcó de la primera y luego se hizo una fotocopia ampliando al 105%. ^E

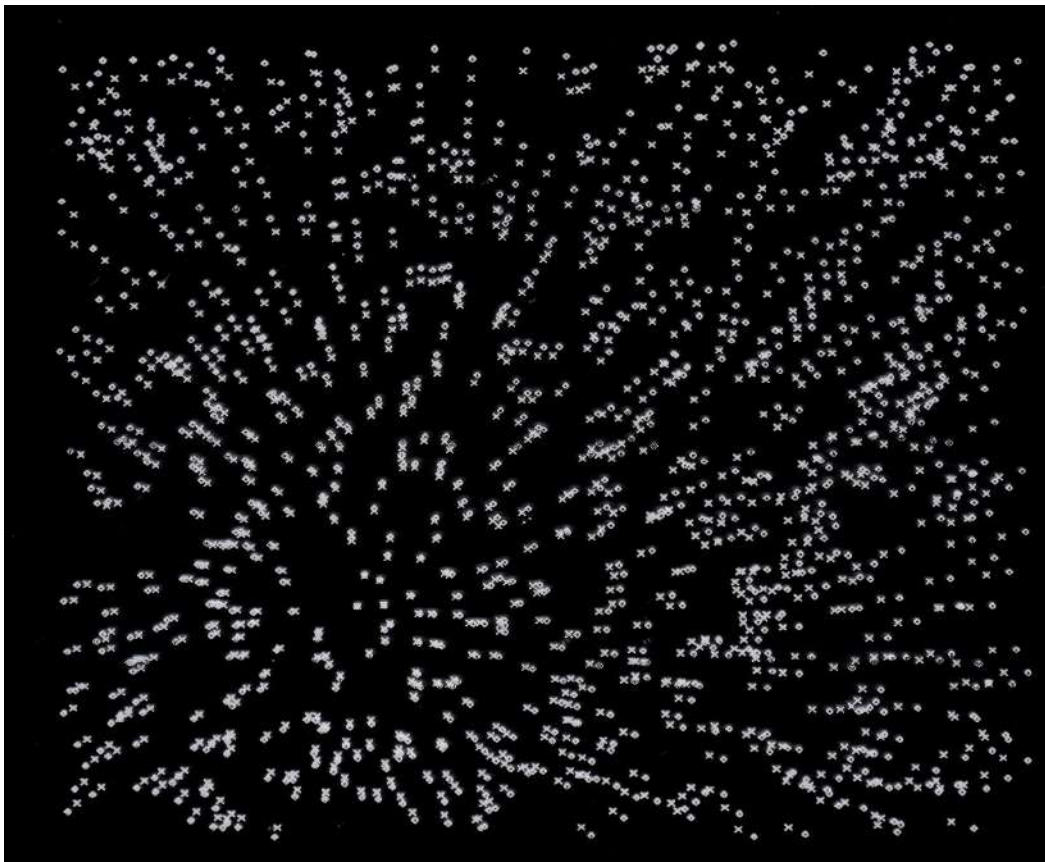
^D Las figuras y la idea para la que se crearon son originales de Vincent Van Icke, que las puso a disposición de quienes tuvimos la suerte de asistir su conferencia “Space, time and matter”, en la sede de la ESO, Munich, en 1994, con motivo de unos Encuentros Europeos sobre Enseñanza de la Astronomía.

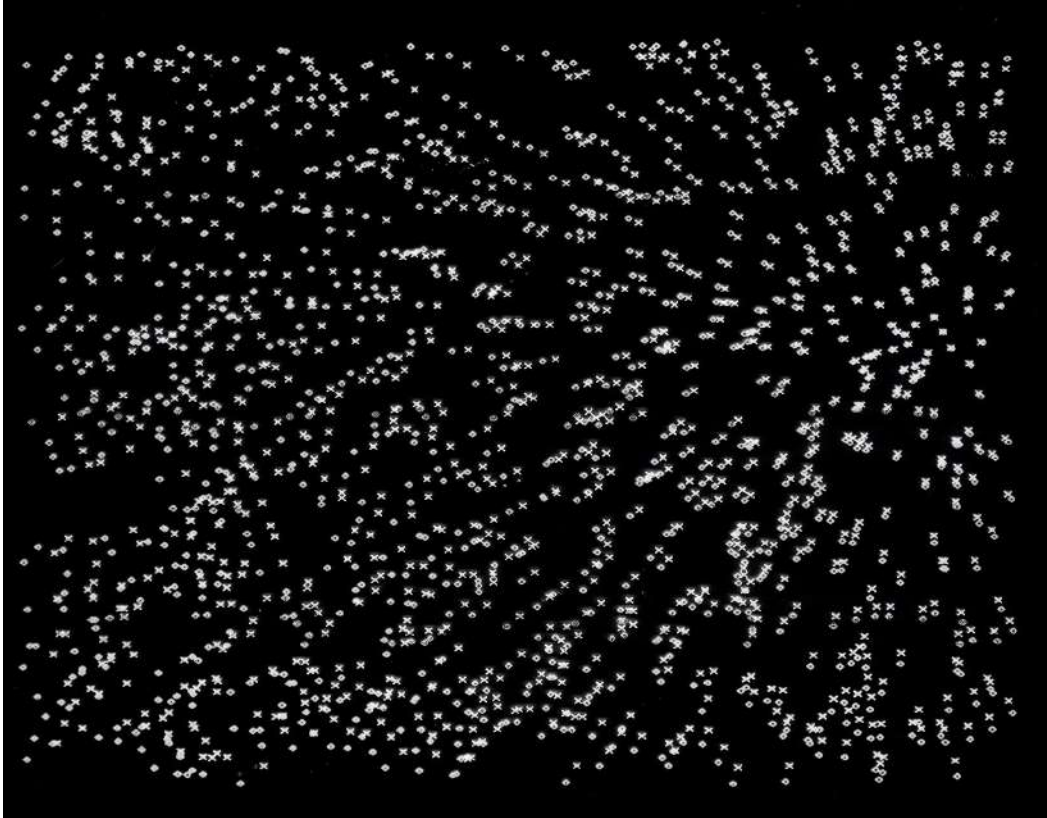
^E Si se desea recibir las figuras preparadas, solicitar a Juan Tomé, casa@amonaria.com

Las figuras así construidas serían modelos planos de un universo en dos momentos sucesivos de su expansión, en los que los valores correspondientes de la función "*factor de escala espacial*" habrían pasado de 1 a $1'05$. No hay diferencia entre los dos estados sucesivos de ese universo, tan sólo el cambio de escala.

Se trata ahora de *jugar* con esas imágenes, superponiéndolas para tener una imagen de la evolución de ese universo. La imagen original y la ampliada deben imprimirse en acetato transparente y ver la superposición al trasluz, sobre un cristal, o proyectar la imagen mediante proyector de transparencias. Se recomienda, en cualquier caso, que los alumnos puedan manipular las superposiciones para que tengan el placer de ver el efecto que se produce. En el siguiente enlace <http://www.exploratorium.edu/hubble/tools/center.html> un applet en flash permite jugar en la pantalla del ordenador con imágenes similares. Programas de edición de imagen también permiten *jugar* a la superposición.

Las dos figuras que siguen son dos superposiciones posibles cualesquiera. En la primera se centró la superposición en una "galaxia" del cuadrante inferior izquierdo de la distribución. En la segunda se centró en una "galaxia" del borde derecho de la distribución





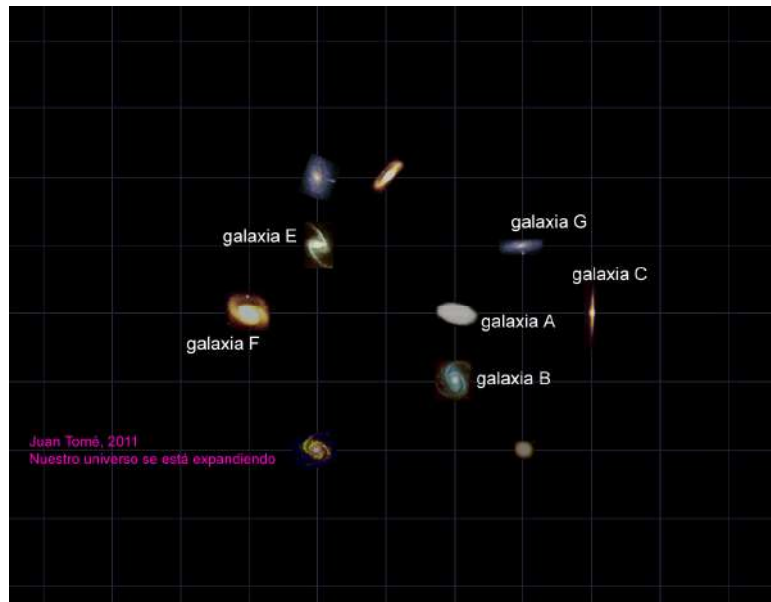
Es espectacular el efecto de fuga que se produce con centro en la galaxia que se utiliza como referencia para la superposición. Esa galaxia sería la del observador, que percibe que las demás se alejan de la suya.

Las superposiciones muestran también que la distancia entre las dos posiciones de una misma galaxia es tanto mayor cuanto mayor es la distancia a la galaxia del observador. El incremento de distancia es tanto más rápido cuanto más lejana es la galaxia que observa. El observador podría interpretar ese hecho diciendo que las galaxias lejanas se alejan más rápido que las cercanas y establecería una relación velocidad-distancia. Si se quiere ser cuidadoso con el lenguaje, conviene aclarar que esa velocidad no es una "velocidad de las galaxias" sino una "velocidad de aumento de distancias". Las superposiciones hacen evidente que las galaxias no se han movido, no han cambiado sus posiciones en ese "universo plano". Las distancias entre galaxias han aumentado, y han aumentado más entre galaxias lejanas que entre galaxias cercanas. Pero como las galaxias no se han movido, hablar de "velocidad de alejamiento de las galaxias" es equívoco. Se ajusta más a la realidad decir "velocidad de aumento de distancias" que depende del ritmo de expansión, del ritmo de cambio de escala, no del movimiento de galaxias.

Por último, es fascinante probar que cualquiera que sea la galaxia que se tome como centro de la superposición el resultado es el mismo. Fascina porque hace evidente que no existe de un centro o un origen de la expansión (normalmente asociado al *sitio* dónde se habría producido la *explosión inicial*), que todas las galaxias, todos los observadores, son equivalentes a la hora de describir lo que *ven*, que se satisface el Principio Copernicano. Y todo como consecuencia, **únicamente**, del cambio de escala, del estiramiento uniforme del espacio que subyace a la distribución de galaxias.

Actividad 6 : La relación velocidad-distancia en un *universo de papel*

Hubble presentó su ley como una relación de proporcionalidad entre la velocidad de alejamiento de una galaxia y la distancia que la separa del observador que mide esa velocidad. Es fácil comprender esta forma de interpretar la Ley de Hubble si se piensa en la red que se estira a ritmo constante. Pero 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, que es una relación empírica.



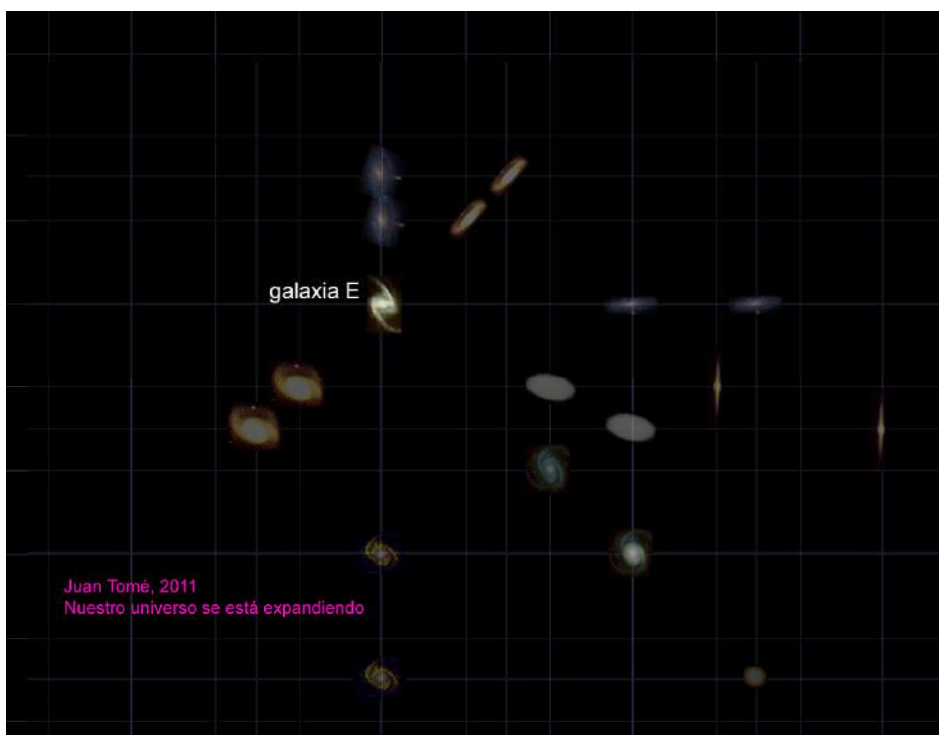
Las dos figuras anteriores muestran la misma distribución de galaxias en dos momentos distintos de un universo en expansión. Se representa un universo de dos dimensiones plano, *universo de papel*, visto "desde fuera". Debe entenderse que la distribución de galaxias se extiende fuera de los márgenes 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.

La clave de la relación velocidad-distancia es 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 pasa de medir como 1 a medir como 1'5. Dos galaxias (A y B) separadas por una cuadrícula (*en las dos imágenes*) pasarán de estar separadas como 1 a estar separadas como 1'5. Su separación aumentó 0'5. En cambio, dos galaxias (A y C) separadas por dos cuadrículas (*en las dos imágenes*), 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).

Conviene insistir en que las galaxias no se mueven, mantienen sus coordenadas. Su separación es debida al aumento de tamaño del retículo de coordenadas, al estiramiento de la red de coordenadas espaciales. Más que "velocidad de alejamiento de las galaxias" se trataría de una "velocidad de aumento de las distancias" porque el uso de esas tramas deja claro que las galaxias no se mueven de "su sitio", de sus coordenadas. Es cierto pues que, respecto de una dada, "las galaxias lejanas se separan más deprisa que las cercanas" pero no es cierto que "las galaxias lejanas se muevan más deprisa que las cercanas". Ninguna se mueve respecto del retículo de coordenadas.

Trabajo que se propone

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. En esa superposición, la galaxia E sería la galaxia habitada por el 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. Así, 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.

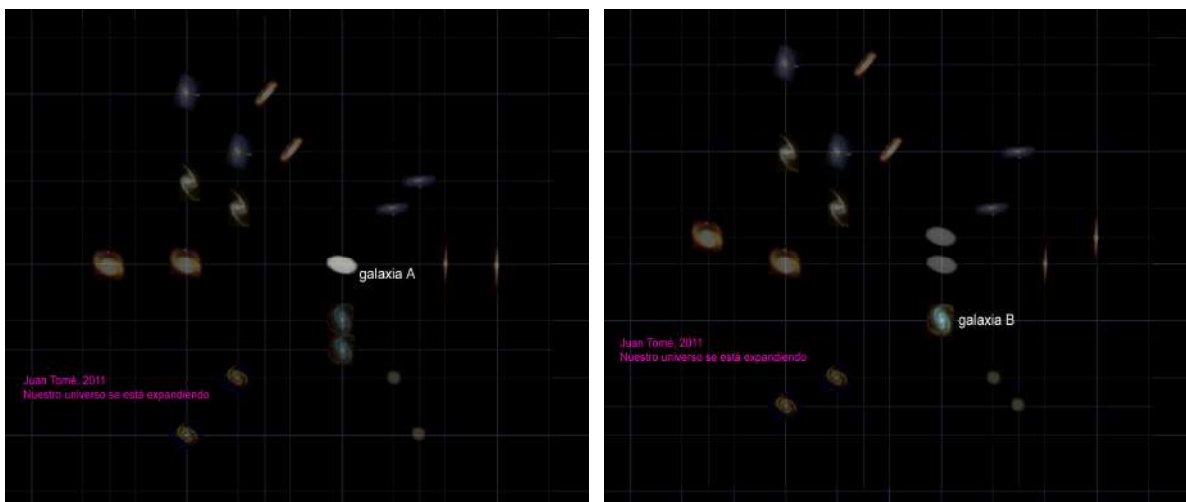
Galaxia en el universo de papel	A	B	C	F
Coordenadas en t_1				
Coordenadas en t_2				
Distancia en t_1 [cm]				
Distancia en t_2 [cm]				
Aumento de la distancia $\Delta D = D_2 - D_1$				
Aumento de distancia por unidad $\Delta D / D_1$				
Velocidad de aumento de la distancia $V_{\Delta D} = \Delta D / \Delta t$ [cm/s]				
Velocidad de aumento de la distancia por unidad (constante de Hubble) $H = (\Delta D / \Delta t) / D_1$ [(cm/s) s ⁻¹]				
Edad estimada del universo de papel $\Delta t_{\text{Big bang-ahora}} = D_1 / V_{\Delta D} = H^{-1}$ [s]	Juan Tomé, 2011 Nuestro universo se está expandiendo			

A partir de los valores "medidos", se pueden calcular:

1. El aumento de distancia (fila 5ª de la tabla), que resultará proporcional a la distancia, cosa que está en la base de la relación velocidad-distancia.
2. El aumento unitario de distancia (fila 6ª) que resultará igual para todas las galaxias, reflejando el hecho de que la expansión por cambio de escala es uniforme.

3. La velocidad de aumento de la distancia (la velocidad de alejamiento) para cada galaxia (fila 7ª), 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.
4. La velocidad unitaria de aumento de distancias (fila 8ª), medida en cm/s por cada cm de distancia, que resultará igual para todas las galaxias, y que es la constante de Hubble de ese *universo de papel* para el tiempo t_1 . Si se representan los valores de $V_{\Delta D}$ frente a D , resultará una recta. Su pendiente será la misma constante de Hubble calculada en esta fila.¹³
5. La edad del universo de papel (fila 9ª), 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.¹⁴ 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.

Actividad 7: Corriendo junto al espacio que se estira

En esta actividad se propone trabajar con un objeto real que se estire, que cambie de escala: una cuerda elástica de escalada. Los alumnos podrán participar de su "expansión" con su propio movimiento, percibiendo lo que se quiere explicar no sólo mediante la reflexión intelectual sino también por medio de sensaciones motoras.

Se trata de fijar un extremo de la cuerda elástica y extenderla en un espacio amplio al aire libre. Una vez extendida se hacen varias marcas equidistantes a lo largo de la cuerda. En el extremo fijo se sitúa un alumno que representa el papel del observador y que permanecerá quieto. En alguna de las marcas se cuelgan galaxias recortadas en cartulina, coloreadas tan artísticamente como se quiera y se miden sus distancias al observador. Junto a marcas en las que no haya galaxias colgadas se sitúan distintos alumnos. Otro, corriendo, tira del extremo libre estirando la cuerda, estirando el espacio.

Los alumnos que están junto a las marcas las acompañarán a medida que "se muevan". Tendrán que moverse tanto más deprisa cuánto mayor sea la distancia que separa su marca del observador, la que está en el extremo fijo. Es evidente que el ritmo de estiramiento es el mismo para toda la cuerda elástica, que es uniforme. Pero, a la vez, se hace evidente que la velocidad de aumento de las distancias es mayor cuanto más separada está una marca de la posición del observador.

Después de recorrer una distancia elegida, el alumno que estira la cuerda parará. Después de hacer notar que las galaxias siguen en el mismo lugar del "espacio-cuerda elástica", que no se han movido respecto al espacio, sino que han sido arrastradas por su estiramiento, con una cinta métrica, se miden las nuevas distancias de las galaxias al observador. Se mide también el tiempo que tardó en estirarse el espacio (el tiempo que el alumno corrió estirando la cuerda elástica) y se está en condiciones de rellenar la misma tabla que la de la actividad anterior, obteniéndose las mismas conclusiones, esta vez para un espacio unidimensional en expansión uniforme.

En algún texto de divulgación^F, para explicar la Ley de Hubble, se propone pensar en una colección de móviles (coches, corredores) que avanzan a distintas velocidades (constantes) por una carretera o pista rectilínea. Los móviles están ordenados por velocidades: cuánto más rápidos sean más adelante están. Es cierto que, en un intervalo temporal dado, las distancias entre dos de esos móviles aumenta proporcionalmente a la distancia que los separa. Es cierto también que cualquiera de los móviles ve que el resto se aleja de él: los más rápidos que él se alejan hacia delante y los menos rápidos que él se alejan como si se movieran marcha atrás. El problema de esa analogía es que asocia el movimiento a los coches o a los corredores, no al sustrato, no a la carretera o a la pista. La analogía correcta sería la de una carretera o una pista que se estira mientras varios coches o corredores se encuentran parados en ella. Por eso el papel de la cuerda elástica en esta actividad es esencial. El de los alumnos que corren junto al espacio que se estira es secundario.

^F Ver Komarov, Nueva astronomía recreativa, pp 157-158

Actividad 8 : Estiramiento de fotones

El uso de tramas también permite explicar que el estiramiento de los fotones causado por el estiramiento del espacio es proporcional (con los límites de validez establecidos en la nota 2) a la distancia entre las galaxias emisoras y la receptora. La secuencia de imágenes siguiente muestra cómo hacerlo.



En esta primera imagen, se emite un fotón (violeta) en la galaxia F y empieza su viaje hacia la galaxia A.

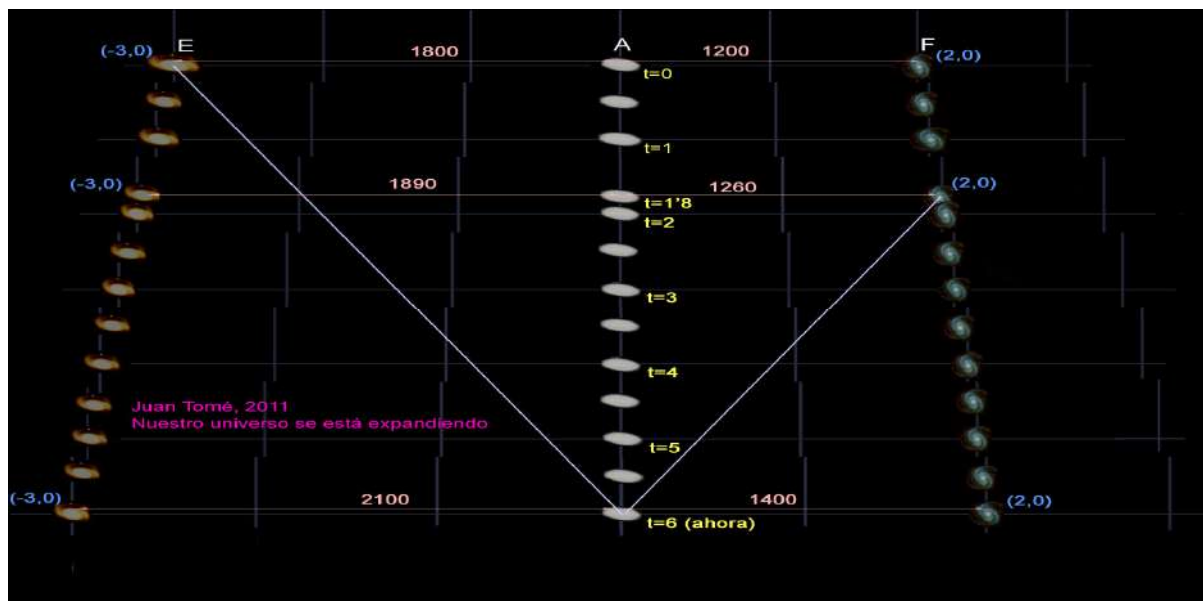


En la segunda, cuando ese fotón hizo parte de su camino, cuando le queda por recorrer una distancia igual a la que en ese momento separa las galaxias G y A, se emite otro igual en la galaxia G y empieza su viaje hacia la galaxia A. Ese momento es tal que ambos fotones llegarán a la vez a la galaxia A. El fotón que sale de G es de la misma longitud de onda que tenía el primero en el momento de salir de F. Pero en esta segunda imagen el fotón que salió de F ya está algo estirado (verde, por ejemplo) porque durante el tiempo que llevaba viajando se estiró el espacio.



En la tercera, ambos fotones son detectados por observadores de la galaxia A.¹⁵ El que procede de F llega con una longitud de onda (rojo, por ejemplo) mayor que el que procede de G (amarillo, por ejemplo), aún siendo iguales en el momento de la emisión. La razón es que estuvo estirándose más tiempo porque su viaje fue más largo.

El siguiente diagrama muestra las situaciones sucesivas de tres galaxias alineadas en un universo que se expande a ritmo constante. La unidad de distancia aumenta $1/36$ unidades cada unidad de tiempo.¹⁶ La distancia entre las galaxias A y E crece 50 unidades cada unidad de tiempo. La distancia entre las galaxias A y F crece $33\frac{1}{3}$ unidades cada unidad de tiempo, de acuerdo con la relación velocidad-distancia. Las galaxias permanecen fijas y mantienen sus coordenadas.



En un momento, señalado como $t=0$, un fotón violeta de la galaxia E, de longitud de onda $\lambda_0=400$ nm, empieza su viaje hacia la galaxia A, a la que llega en $t=6$, el "ahora" del observador en la galaxia A, porque se ha tomado $c=300$ como velocidad de la luz en ese universo.¹⁷

En $t=1'8$, cuando la galaxia F dista 1260 unidades de distancia de la galaxia A, un fotón emitido en F, también violeta de $\lambda_0=400$ nm, empieza su viaje hacia la galaxia A, viajando también a $c=300$, y llegará a A 4'2 unidades de tiempo después, en $t=6$, a la vez que el fotón procedente de E.

Cuando el observador en A mida las longitudes de onda de los fotones recibidos, encontrará los fotones estirados en la misma proporción que las distancias. Así, obtendrá $\lambda=400(2100/1800)=466'66$ nm para el fotón procedente de E. En cambio, para el que procede de F obtendrá $\lambda=400(1400/1260)=444'44$ nm.

Y los corrimientos al rojo, dados por z , serán:

- $z_E=(466'66-400)/400=0'166$ para el fotón procedente de E.
- $z_F=(444'44-400)/400=0'111$ para el fotón procedente de F.

El observador encuentra que $(z_E/z_F)=(D_{EA}/D_{FA})=1'5$, es decir encuentra que el corrimiento al rojo es proporcional a la distancia.

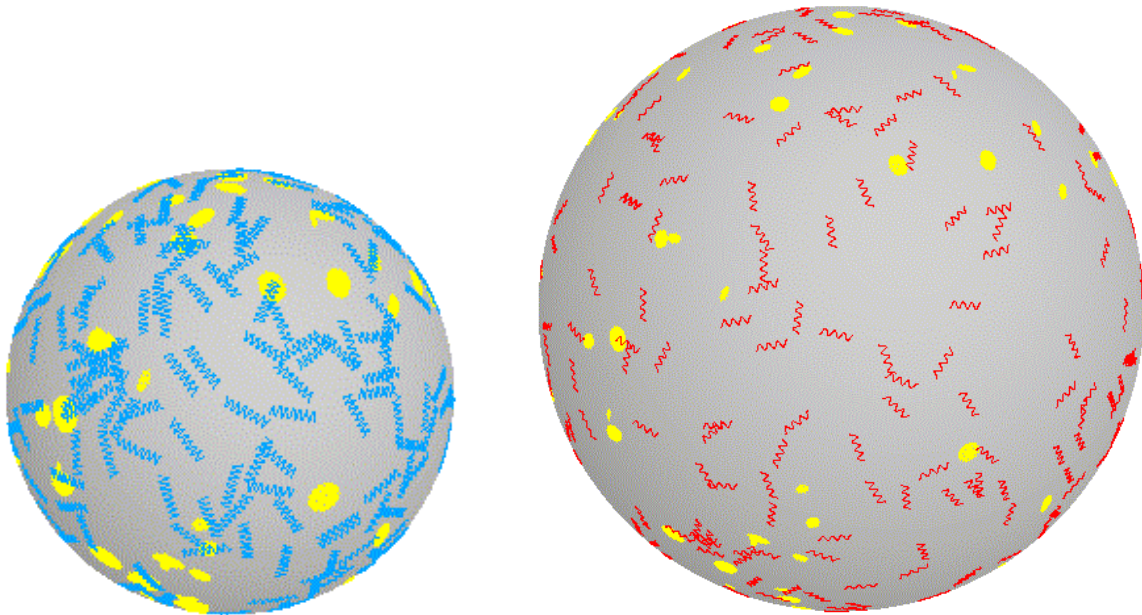
El razonamiento realizado explica, por tanto, la ley empírica de Hubble. Y lo hace de un modo que, desde el punto de vista de la didáctica, tiene mucho atractivo:

1. Es sencillo porque se apoya sólo en argumentos geométricos y de proporcionalidad.
2. El hecho físico que lo sustenta (que los fotones se estiran como cualquier otra distancia en los universos en expansión) es riguroso e intuitivo.
3. No recurre al Efecto Doppler, un fenómeno que, aparte de desconocido para muchos alumnos, no es la causa del estiramiento de los fotones.
4. En todo su desarrollo no aparece ninguna referencia a *velocidades de las galaxias*, que mantienen sus coordenadas en el diagrama, que se mantienen en reposo respecto a la red de coordenadas, afianzando la idea de que su separación es debida al estiramiento del espacio.

Actividad 9 : Los fotones más estirados del universo

La radiación cósmica de fondo (CBR) es un conjunto de fotones que llena el universo por doquier. Proceden de un estado del universo muy antiguo (sólo 300000 años después del estado Big bang) en el que la radiación estaba en equilibrio termodinámico con materia cargada (núcleos de hidrógeno, helio y litio no ligados a electrones, que también existían libres) con la que interaccionaba continuamente. En aquel momento, cuando la expansión enfrió el universo lo suficiente, núcleos y electrones pudieron ligarse y formar átomos de hidrógeno, helio y litio, estructuras neutras. Además, también a causa de la expansión, bajó la densidad de materia y los fotones pudieron empezar a viajar libremente, sin estorbos, sin sobresaltos. El universo se hizo transparente y ya no ha dejado de serlo. La radiación cósmica de fondo es, según el modelo Big bang, lo que queda de la radiación que, en equilibrio con la materia, llenaba el universo en aquel momento.

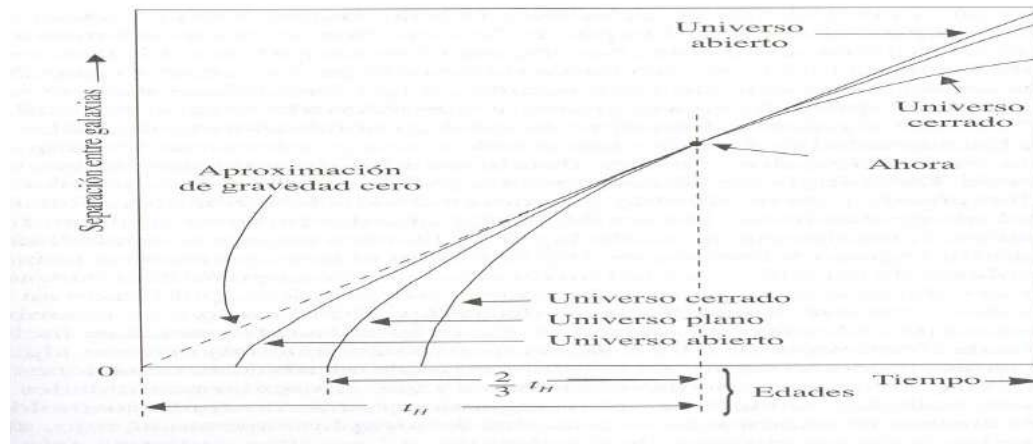
Los fotones de la CBR que detectamos ahora son los fotones más antiguos del universo.¹⁸ Llevan casi 13.700 millones de años (la edad del universo) viajando sin interaccionar con nada, hasta ese extremo es transparente nuestro universo. La primera materia con la que interaccionan es la de los aparatos con los que se detectan.



A medida que el universo se expandía, que el espacio se estiraba, los fotones CBR se estiraban con él. En algún momento fueron azules, en alguno posterior fueron rojos⁶. Ahora tienen la longitud propia de la radiación microondas. Los fotones CBR son los que más se han estirado a lo largo de su vida porque son los más antiguos, los que llevan más tiempo viajando, los que llevan más tiempo estirándose¹⁹. Son fotones fósiles, huella de un estado muy antiguo del universo.

⁶ La imagen original es de Edgard Wright y puede verse en www.astro.ucla.edu/~wright/tiredlit.htm

Actividad 10 : La edad del universo y su futuro



Las curvas de la figura^H representan cómo crece el "factor de escala" (dado por la separación entre dos galaxias cualesquiera) a lo largo de la historia del universo. Las curvas se han dibujado de forma que coincidan los puntos de cada una de ellas que corresponden al presente (señalado en la gráfica como "ahora"). En ese punto sus pendientes (el ritmo de expansión) son iguales. Pero se ve que esos ritmos de expansión no son iguales en el pasado para distintos tipos de universo.

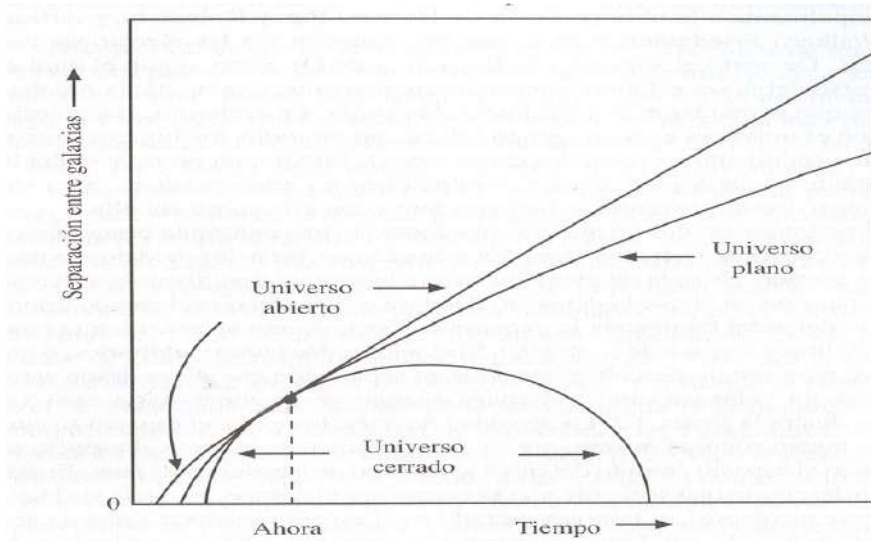
El universo es cerrado si contiene suficiente materia para que la atracción gravitatoria detenga la expansión y sea capaz de invertir su sentido, haciendo que el espacio se encoja después de alcanzar un estiramiento máximo. El universo es abierto si la materia que contiene no es suficiente para detener la expansión nunca. Y hay una posibilidad intermedia: que la materia contenida sea la justa para detener la expansión en un tiempo infinito. Este caso es el del universo plano²⁰.

Los puntos donde las curvas cortan al eje de tiempos son los momentos en que las galaxias estaban a distancia cero, el estado inicial en los universos Big bang. La distancia entre el "ahora" y esos puntos es la edad de cada tipo de universo. Como en todos los casos el ritmo de expansión ha ido disminuyendo, queda claro que si el universo es cerrado será más joven que si es abierto porque el ritmo disminuyó más deprisa. El universo plano tendría una edad intermedia entre las de ambos.

La línea de puntos de la gráfica corresponde a un universo sin materia, al de gravedad cero, aquel en que, por tanto, no hay disminución del ritmo de expansión. Un universo sin materia es sólo una aproximación del real. Es el universo cuya edad, el "tiempo de Hubble", resulta ser $t_H = 1/H_0$. El universo cuyo ritmo de expansión no disminuye tiene una edad mayor que cualquier otro. El "tiempo de Hubble" calculado en esa aproximación es una estimación superior de la edad real del universo. Para el caso de universo plano, la edad real sería $\frac{2}{3}$ de t_H .²¹

^H Tomada de Guth, El universo inflacionario, p 75

La historia del universo determina su futuro. Si se amplía la gráfica representando las curvas para valores de t muy posteriores al "ahora", se encuentran respuestas para el futuro de los distintos tipos de universo.¹ El universo cerrado colapsa. El futuro encogimiento de su espacio conduce a que, en algún momento, la distancia entre galaxias vuelva a ser cero, como al principio. Ese final se conoce como Big crunch. El universo abierto o el plano nunca llegan al colapso. En ellos las distancias entre galaxias crecen indefinidamente, la densidad de materia en ellos llegaría a ser cero en un tiempo infinito.²²



Se sugiere, para trabajar con los alumnos, explicar la gráfica inicial. Luego, sin mostrar la gráfica que da los posibles finales, pedir a los alumnos que continúen hacia el futuro las curvas que representan la evolución del "factor de escala". A la vista de las gráficas propuestas, discutir las y extraer consecuencias sobre finales posibles.

¹ Tomada de Guth, El universo inflacionario, p 64

Notas

¹ Mc Vittie, en *Distance and large redshift*, pp 260-261, comenta las connotaciones inapropiadas del término "big bang".

² Se puede expresar la Ley de Hubble así: $\mathbf{z \cdot c = H \cdot D}$

(\mathbf{c} es la velocidad de la luz y \mathbf{H} se llama constante de Hubble)

Se trata de una relación empírica, que han ido confirmando resultados observacionales posteriores. De tal modo que, dice Moles, "la ley de Hubble constituye un hecho de experiencia irrefutable, y el primer elemento que hay que considerar cuando se pretende construir una teoría cosmológica". (Ver Moles, *La constante de Hubble* p 18). Sin embargo no es una relación válida para todas las distancias sino para valores de $z \ll 1$ o, lo que es equivalente, para distancias mucho menores que la llamada "distancia de Hubble", la distancia a la que $z=1$ y que conlleva una velocidad de crecimiento igual a la de la luz. Teóricamente, para valores fuera de ese rango, la relación z - D deja de ser lineal, salvo en modelos cosmológicos en los que H sea constante en el tiempo, que no es el caso de los modelos Big bang. En términos de distancias, la aproximación de proporcionalidad será válida para distancias pequeñas desde el punto de vista cosmológico. Cuanto menor sea la distancia a la galaxia emisora, menor será el tiempo de viaje de los fotones y no será importante el cambio de H . Por otra parte, para distancias pequeñas el universo puede considerarse plano y los efectos de la geometría no son importantes. (Ver Harrison, *The redshift-distance and velocity-distance laws*, p 28; Layzer, *Construcción del universo*, p 247)

³ La medida de \mathbf{z} es directa puesto que se obtiene analizando aquí, con un espectrógrafo, la luz que nos llega de una fuente lejana. El principal problema de esa medida es eliminar posibles causas de variaciones de la longitud de onda de la luz recibida, por ejemplo, las debidas a efecto Doppler por movimientos propios de la fuente.

En cambio, la medida de \mathbf{D} no es directa y los problemas se multiplican. Los valores de \mathbf{D} se deducen de medidas de luminosidad. Para ello, atendiendo a alguna propiedad (períodos de oscilación del brillo de estrellas, tamaño y forma de galaxias, pautas de evolución de luminosidad de supernovas, etc), se establece que dos objetos son del mismo tipo y se supone que, por tanto, deben tener el mismo brillo intrínseco. Si, desde aquí, los vemos igual de brillantes es que están a la misma distancia. Pero si uno se ve menos brillante que el otro debe ser a causa de su mayor distancia. Midiendo brillos aparentes y suponiendo brillos intrínsecos iguales, la distancia se infiere mediante relaciones teóricas que establecen cómo varía el brillo con la distancia.

Además, para distancias cosmológicas, las relaciones teóricas dependen del modelo de universo. Mc Vittie, en *Distance and large redshift*, lista hasta siete conceptos distintos de distancia, distinguiendo entre distancias teóricas y distancias basadas en procedimientos observacionales. Así pues, \mathbf{D} no es un número dado por un aparato que midiera distancias sino un número calculado mediante relaciones teóricas exclusivamente o mediante relaciones teóricas a partir de números dados por aparatos que miden intensidades (y otras propiedades) de la luz que nos llega de fuentes lejanas. La elección del modelo, la necesidad de suposiciones simplificadoras, lo laborioso y sutil del proceso de selección y análisis de las colecciones de datos, junto a la complejidad y las dificultades de tipo práctico que conlleva los procedimientos de medida como los descritos, están en el origen de las imprecisiones y las discusiones acerca del valor de la constante \mathbf{H} , parámetro fundamental de la Ley de Hubble. Para dar una idea de las dificultades en la determinación de distancias, basta considerar que el primer valor que dio Hubble a esa constante era del orden de diez veces mayor que el aceptado actualmente.

⁴ La ley de Hubble es, una ley observacional porque establece una relación entre dos magnitudes, \mathbf{z} y \mathbf{D} , determinadas por procedimientos experimentales independientes. Pero toda ley observacional (toda observación, dicen los filósofos de la ciencia), es susceptible de diversas interpretaciones teóricas. Es decir, la teoría puede dar distintas razones para explicar por qué se da esa relación, llamar la atención sobre distintos fenómenos consistentes con esa relación. En este sentido se dice que no existe observación pura, observación libre de teoría.

⁵ La razón es que Hubble "estaba trabajando en el seno de un área de problemas bien delimitado y empleando un método bien definido." (Smith, El universo en expansión, p 237) Era, esencialmente, el mismo método que, desde las primeras medidas espectrales de velocidades radiales de estrellas de nuestra galaxia, había servido para determinar la velocidad relativa del Sol respecto de estrellas de la galaxia. Las medidas de velocidad radial de las estrellas se basaba en la interpretación del corrimiento (al rojo o al azul) de su luz como efecto Doppler cinemático causado por el movimiento propio de las estrellas respecto del Sol. Cuando el método, hacia 1915, (Smith, El universo en expansión, p 212) se aplica para determinar la velocidad relativa del Sol respecto de las "nebulosas espirales", el desplazamiento al rojo de la luz que llega desde esos objetos se siguió interpretando como efecto Doppler. Hubble, astrónomo observacional, interpretó sus observaciones según su formación y en el seno del paradigma de su campo de trabajo.

⁶ Cuando se cumplen los supuestos que se contemplaron en la nota 2, lo que equivale a que la velocidad de alejamiento del emisor no es comparable a la velocidad de la onda, a c , la velocidad de la luz en nuestro caso, se cumple que $v=zc$. Entonces, $zc=HD$ se puede poner como $v=HD$, siendo v la velocidad de alejamiento de la galaxia emisora.

Teóricamente, la relación **velocidad-distancia** debe ser lineal sin límites de validez. Es una consecuencia de la expansión uniforme del espacio, el único tipo de expansión compatible con el principio de homogeneidad e isotropía, que debe cumplirse para cualquier momento de la historia del universo. Pero en esa relación teórica v no es la velocidad de ningún objeto, sino la velocidad de aumento de una distancia dada. No debe confundirse la relación teórica **velocidad-distancia** con la ley empírica de Hubble, que debe entenderse como una relación corrimiento al rojo-distancia. (Ver Harrison, The redshift-distance and velocity-distance laws, p 28-29 y 31)

⁷ El artículo de Hubble de 1929, "A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae", incluye la idea de velocidad en el título. Pero el mismo Hubble, en 1931, publicó junto a Humason "The velocity-distance relation among extra-galactic nebulae", donde advierte que usan el término "velocidad" en el sentido de "velocidad aparente" sin prejuzgar su significado cosmológico. La cosmología teórica de la época (de Einstein, Friedman, De Sitter, Lemaitre, Eddington) estaba construyendo los modelos en expansión y estaba todavía lejos de poder ofrecer una interpretación clara de los resultados de Hubble.

⁸ En 1923 Weyl propuso el principio que lleva su nombre y que conduce a la interpretación de la separación de las galaxias como debida al aumento de escala de la trama de coordenadas con el tiempo. A partir de esa idea llegó a una expresión que mostraba la relación entre enrojecimiento y cambio de escala de la trama de coordenadas espaciales. Este sería el origen de la interpretación del desplazamiento al rojo cosmológico como estiramiento de los fotones que viajan de una galaxia a otra mientras el espacio se estira. (Ver Smith, El universo en expansión, p 232). Textos de diversa índole apoyan explícitamente esa idea: Dias, O universo e suas escalas; Ferris, Informe sobre el universo, p 36; Guth, El universo inflacionario, pp 99-101; Harrison, Darkness at night, pp 186-189; Harrison, The redshift-distance and velocity-distance laws, p 29; Layzer, Construcción del universo, p 239; Moles, La constante de Hubble, p 17; Narlikar, La estructura del universo, pp 135-136; Narlikar, Fenómenos violentos en el universo, pp 197-198; Rees, Seis números nada más, pp 92, 96; Shrivastava, Red shift in light , pp 293-294; Weimberg, Los tres primeros minutos del universo, p 36.

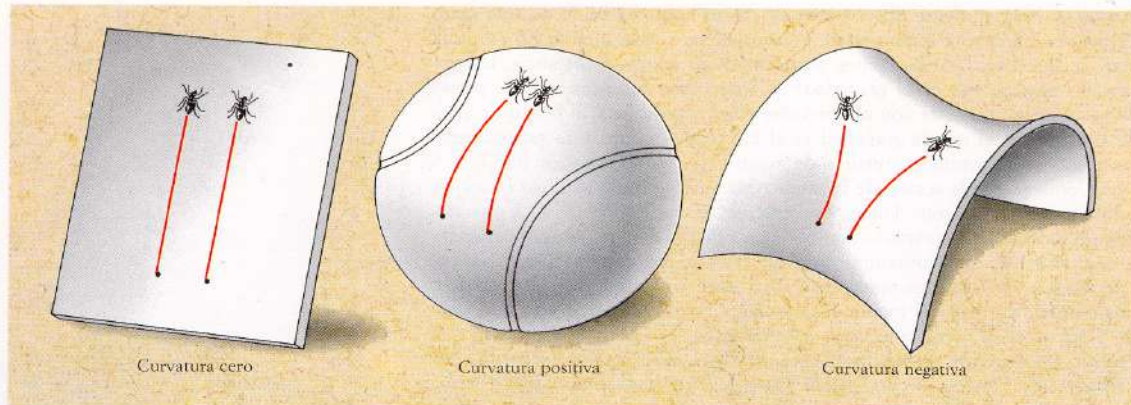
⁹ La función $R(t)$ depende del modelo cosmológico con el que se trabaje. Su forma matemática no es importante en esta discusión. $R(t)$ crecerá en universos en expansión. Su pendiente da la velocidad de expansión en cada momento. En épocas del universo de expansión frenada por la masa será una curva cada vez menos inclinada. En épocas de expansión acelerada por algún tipo de constante cosmológica, como parece ser la actual, será una curva cada vez más inclinada. Si en alguna época la velocidad de expansión es constante o tiende a serlo, $R(t)$ se aproximará a una recta. Las curvas de la Actividad 10 representan las funciones $R(t)$ para distintos universos posibles.

¹⁰ Por ejemplo, si un fotón sale de una galaxia lejana en t_1 y llega a la nuestra en t_2 , y durante ese tiempo la escala del universo pasó de $R(t_1)$ a $R(t_2)$, entonces la distancia entre las galaxias habrá pasado de D_1 a D_2 y λ_1 habrá pasado a λ_2 , cumpliéndose la siguiente proporción:

$$\lambda_2/\lambda_1 = D_2/D_1 = R(t_2)/R(t_1)$$

Así, si $R(t_2) = 2R(t_1)$, es decir si la escala del universo se dobló, las distancias (cualquiera) se doblaron y las longitudes de onda (cualquiera) se doblaron. Si $R(t_2) = 1.1R(t_1)$, es decir si la escala creció un 10%, también las distancias y las longitudes de onda crecieron un 10%. Esa relación es válida para todo rango, toda $R(t)$ y todo modelo basado en la Teoría de la Relatividad Generalizada que asuma el principio cosmológico de homogeneidad e isotropía. La relación se establece sin referencia alguna a velocidades y no conlleva proporcionalidad entre z y D , salvo para distancias pequeñas o $z \ll 1$.

¹¹ Además de la superficie esférica, hay otros tipos de superficies que también pueden representar nuestro universo: una superficie plana y una superficie curva como la de una silla de montar. (En la actividad "La edad del universo y su futuro" se discuten distintas posibilidades para el espacio de nuestro universo). El dibujo que se presenta está tomado de Wheeler, "Un viaje por la gravedad y el espaciotiempo", p 76.



La superficie de una esfera es finita e ilimitada. Sus habitantes ("insectos sello", "insectos cromo" o "insectos calcomanía") pueden recorrerla siempre hacia adelante sin encontrar final, sin encontrar un cartel que diga "aquí se acaba este universo". Pero su recorrido sin límites no es infinito, volverán al punto de partida al cabo de un tiempo medible. La superficie plana y la de silla de montar son infinitas e ilimitadas. En el dibujo están cortadas para que quepan en el papel. Si sus habitantes las exploran yendo siempre hacia adelante no encontrarán límites y la longitud de su camino, encontrando siempre nuevos lugares, será infinita.

Desde dentro de estos universos podría saberse si son de un tipo u otro estudiando sus propiedades geométricas. Por ejemplo, estudiando las propiedades de las paralelas: en el universo-superficie plana dos habitantes que avanzaran adelante en la misma dirección (avanzando en paralelo) mantendrían sus distancias (es la propiedad de las paralelas de Euclides); en el universo-superficie esférica, haciendo lo mismo (yendo los dos en la dirección del "polo norte" por ejemplo) estarían cada vez más cerca; y en el universo-superficie silla de montar, avanzando en paralelo estarían cada vez más lejos.

¹² Es interesante señalar que la relación velocidad-distancia se cumpliría en ambas películas. En la primera porque del estiramiento uniforme del espacio resulta que los aumentos de distancias son proporcionales a la distancia estirada. En la segunda porque las galaxias más distantes de una dada son las que tienen velocidades más dispares de la suya. En la primera el corrimiento al rojo sería debido al estiramiento del espacio. En la segunda sería efecto Doppler. La ley observacional de Hubble sería compatible con ambas películas.

La teoría (el principio de homogeneidad, el de equivalencia de todo observador y la idea de espacio ligada a la distribución de materia, propia de la Teoría de la Relatividad Generalizada), en cambio, sí permite elegir entre las dos películas, prefiriendo sin duda la primera.

La existencia y las propiedades (uniformidad, isotropía, espectro de cuerpo negro) de la Radiación Cósmica de Fondo (CBR) también permite elegir entre las dos películas: ninguna explosión localizada podría producir una radiación que llenara el universo como lo llena la CBR.

¹³ La constante de Hubble no es constante en el tiempo en ese universo. Si se calculara para t_2 , superponiendo estados del universo de papel en t_2 y otro posterior t_3 , se obtendría otro valor distinto. En general, salvo para universos en expansión exponencial, en cada momento de la historia de un universo la constante de Hubble toma un valor, el mismo para todos los puntos del universo en ese momento.

¹⁴ En nuestro universo, el ritmo de expansión decreció a medida que pasaba el tiempo, por efecto de la gravitación. Las evidencias experimentales actuales muestran que la expansión ahora es acelerada, que el ritmo es creciente, por efecto de algún tipo de constante cosmológica con un efecto opuesto al de la gravitación. Pero las variaciones del ritmo no son grandes y la aproximación de ritmo constante es buena si no se toman intervalos temporales grandes respecto del "ahora". Este no es el caso de la estimación de la edad del universo como inversa de la constante de Hubble. El resultado de este cálculo da un límite superior para la edad del universo. Ver más detalles en la Actividad 10.

¹⁵ Está claro que no todas las observaciones de corrimiento al rojo se han realizado el mismo día a la misma hora. Se han realizado a lo largo de los últimos cien años. Pero cien años es un intervalo temporal extremadamente pequeño en relación con los tiempos de viaje de los fotones que se observan. Por eso se considera que todos los fotones observados llegan aquí en el mismo tiempo cósmico.

¹⁶ Eso quiere decir que la función de escala para ese universo es:

$$R(t) = 1 + (1/36) t \quad (\text{si } t=0 \text{ cuando sale el fotón de la galaxia E})$$

El ritmo de expansión, la variación de la escala en cada momento, resulta constante:

$$R'(t) = 1/36$$

Y la constante de Hubble para ese universo, la variación unitaria de escala en cada momento, es la siguiente función del tiempo:

$$H(t) = R'(t)/R(t) = (1/36)/[1+(1/36)t]$$

La edad de un universo que se expande a ritmo constante es la inversa del valor de la constante de Hubble en el momento en que se calcula la edad. Para el universo del diagrama, en efecto:

$$1/H(t=6) = R(t=6)/R'(t) = 42$$

Para nuestro universo, como el ritmo de expansión no es constante, $R(t)$ no puede ser lineal. En relación con el problema del estiramiento de fotones la aproximación de ritmo de expansión constante vale para fotones que no hayan viajado mucho tiempo en relación con la edad del universo, que no tengan por tanto un corrimiento al rojo grande. Se toma como buena la aproximación para valores de $z \ll 1$.

¹⁷ Todos los cálculos que siguen no tienen en cuenta que mientras los fotones viajan de una galaxia a otra el espacio se estira entre ellas. Son aproximados. De nuevo, la aproximación es válida en las condiciones descritas en la nota 2.

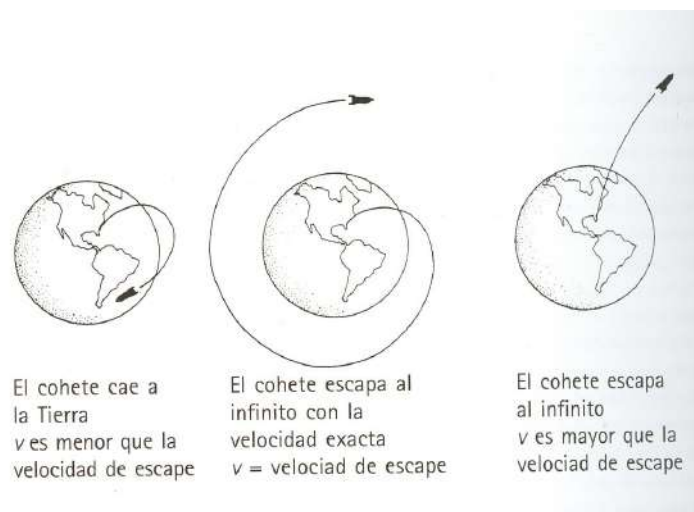
Si se tiene en cuenta el estiramiento del espacio durante el viaje, suponiendo geometría plana para ese universo, se obtienen $z_E=0'1813$ y $z_F=0'1174$, con lo que $z_E/z_F=1'54$, no exactamente igual a la relación $D_{EA}/D_{FA}=1,50$.

Para ver las relaciones matemáticas correspondientes ver Bondi, *Cosmología*, pp 98-102 (aproximación newtoniana) y 121-124 (cálculo relativista); Harrison, *The redshift-distance and velocity-distance laws*, pp 29-30; Layzer, *Construcción del universo*, pp 239-247; Mc Vittie, *Distance and large reshift*, pp 249-251.

¹⁸ Todos los fotones emitidos por cualquier objeto del universo son posteriores. Éstos, además, son muy pocos en relación con los CBR. Los fotones CBR son la enorme mayoría de todos los fotones del universo.

¹⁹ El corrimiento al rojo para los fotones de la CBR es del orden de $z=1100$, que es también la relación entre la temperatura del universo cuando empezaron su viaje (T próxima a 3000 K) y la temperatura actual del universo ($T = 2.7$ K).

²⁰ La analogía de la figura siguiente (Longair, *La evolución de nuestro universo*, p 110) sirve para entender esto. El universo plano es un universo "lanzado" con la "velocidad de escape". En Física se llama así a la velocidad mínima con que debe lanzarse un objeto desde un cuerpo celeste para que escape de su campo gravitatorio, es decir, para que no vuelva a caer. Con esa velocidad llegaría "justo" al infinito. Lanzado con velocidades menores caería de nuevo. Y con velocidades mayores, como diría Buzz Lightyear en la película *Toy's Story*, llegaría "al infinito y más allá".



A cada tipo de universo corresponde un tipo de geometría. El universo cerrado tendría una geometría análoga a la de la superficie esférica. El abierto, análoga a la de silla de montar. Y el universo plano sería de geometría euclídea. El primero sería un universo finito pero ilimitado. Los otros dos serían infinitos. (Ver más detalles sobre geometrías en la nota 11)

²¹ Los resultados de observaciones de la radiación cósmica de fondo realizadas por el satélite WMAP, apoyan el carácter plano de nuestro universo y le asignan una edad de 13700 millones de años. (NASA/WMAP Science Team, <http://map.gsfc.nasa.gov>)

²² No se tienen en cuenta en todo este párrafo posibles universos cuyo ritmo de expansión aumente, lo que requiere la existencia de constante cosmológica. El consenso actual es que este caso de nuestro universo ahora, lo que conduce a un futuro de expansión permanente y acelerada. De todos modos eso no afecta a la discusión sobre el pasado y a las estimaciones del tiempo transcurrido desde el estado Big bang.

Bibliografía citada

Bondi, H., 1960, *Cosmología*, Ed Labor, Barcelona, 1972

Davies, P.C.W., 1977, *El espacio y el tiempo en el universo contemporáneo*, Ed Fondo de Cultura Económica, México, 1982

Dias, J., 2002, *O universo e suas escalas*, *Gazeta de Física* vol 25 fascículo 1, Ed Sociedade Portuguesa de Física, Lisboa

Dickson, F. P. 1968, *La bóveda de la noche*, Ed Fondo de Cultura Económica, México, 1975

Ferris, T., 1997, *Informe sobre el universo*, Ed Crítica, Barcelona, 1998

Guth, A., 1997, *El universo inflacionario*, Ed Debate, Madrid, 1999

Harrison, E., 1987, *Darkness at night*, Harvard university press

Harrison, E., 1993, *The redshift-distance and velocity-distance laws*, *Astrophysical Journal*, vol 403, pp 28-31

Hubble, E., 1929, *A relation between distance and radial velocity among extragalactic nebulae*, *Proceeding National Academy of Sciences*, vol 15, 168-173

Hubble, E y Humason, M., 1931, "The velocity-distance relation among extragalactic nebulae", *Astrophysical Journal*, vol 74, pp 43-80

Komarov, V., 1983, *Nueva astronomía recreativa*, Ed Mir, Moscú, 1985

Layzer, D., 1984, *Construcción del universo*, Ed Prensa Científica, Barcelona, 1989

Longair, M., 1996, *La evolución de nuestro universo*, Cambridge University Press, Madrid, 1998

López, C., 1999, *Universo sin fin*, Ed Santillana, Madrid

Mc Vittie, G. C., 1974, *Distance and large redshift*, *Q.J.Royal Astronomical Society*, vol 15, pp 246-263

Moles, M., 1997, *La constante de Hubble: los avatares de un parámetro*, *Tribuna de Astronomía* nº 138, Madrid

Narlikar, J., 1977, *La estructura del universo*, Ed Alianza, Madrid, 1987

Narlikar, J., 1982, *Fenómenos violentos en el universo*, Ed Alianza, Madrid, 1987

NASA/WMAP Science Team, 2010, <http://map.gsfc.nasa.gov>

Odenwald, S. y Tresch, R., 1993, Desplazamientos al rojo de las galaxias, Revista Cosmos, Mayo 1993

Rees, M., 2000, Seis números nada más, Ed Debate, Madrid, 2001

Shipman, H.L., 1980, "Los agujeros negros, los cuásars y el Universo", Ed Alambra, Madrid, 1982

Shrivastava, P.K., 2009, Red shift in light , Physics Education, Octubre-Diciembre, pp 291-296;

Singh, J., 1970, "Teorías de la cosmología moderna", Alianza Ed, Madrid, 1982

Smith, R.W., 1982, "El universo en expansión", Ed Alianza Universidad, Madrid, 1993

Tomé, J, 2005, "Nuestro universo se está expandiendo", Actas VI Encuentros para la enseñanza de la Astronomía, Ed ApEA-KutxaEspacio, San Sebastián, 2005

Van Icke, V., 2004, The physical universe: space, time and matter, ESO, Munich, (conferencia inédita)

Weimberg, S., 1977, Los tres primeros minutos del universo, Ed Alianza, Madrid, 1980

Wheeler, J.A., 1990, Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo, Alianza Ed, Madrid, 1994

Wright, E., Cosmological fads and falacies, www.astro.ucla.edu/~wright/errors.htm

www.exploratorium.edu, 2001, <http://www.exploratorium.edu/hubble/tools/center.html>