

Cosmología para secundaria

Juan Tomé
cosmologica.amonaria.com

Actividad: Fotones que se estiran

Contexto

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, necesariamente, indirectas.

En concreto, lo que se observa desde aquí es que fotones procedentes de galaxias lejanas, 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. El aumento de longitud de onda de los fotones visibles se percibe como enrojecimiento, porque la longitud de onda de los fotones “rojos” es la mayor de las de los fotones visibles. Por eso dice que se produce un *desplazamiento al rojo* de la longitud de onda del fotón. Todos los fotones se estiran, sean o no del visible, y aunque el término *desplazamiento al rojo* no tiene sentido para fotones de longitud de onda mayor que la de fotones “rojos”, se aplica a todos ellos, significando “aumento de su longitud de onda”.

Existe además relación entre el aumento de longitud de onda, el *desplazamiento al rojo*, y la distancia a la fuente de la que proceden los fotones. El *desplazamiento al rojo* crece con la distancia a la fuente. Para distancias pequeñas (en sentido cosmológico) son proporcionales. La relación entre esas dos magnitudes constituye la ley empírica de Hubble, que en 1929 supuso la primera evidencia observacional de la expansión de nuestro universo. La constante de Hubble es la constante de proporcionalidad en esa relación.

La razón del aumento de la longitud de onda de un fotón mientras viaja desde la galaxia emisora hasta nosotros, es que los fotones se estiran con el espacio, al mismo ritmo que el espacio. El estiramiento de los fotones es la causa del *desplazamiento al rojo*. Cuanto mayor es la distancia, mayor es el tiempo de viaje para los fotones y mayor el tiempo que se están estirando. Esa es la raíz de que el desplazamiento al rojo crezca con la distancia a la fuente. Para distancias pequeñas (en sentido cosmológico) los tiempos de viaje, y por tanto de estiramiento, son aproximadamente

proporcionales a las distancias, lo que explica la ley empírica de Hubble. Así pues, el *desplazamiento al rojo* debido al estiramiento de los fotones es evidencia observacional de la expansión del universo, del estiramiento del espacio. Para distinguirlo de otros aumentos de longitud de onda de fotones que son debidos a otras causas, se le llama *desplazamiento al rojo cosmológico*.

En la práctica, constatar el desplazamiento al rojo requiere comparar las longitudes de onda de fotones que nos llegan de galaxias lejanas con la de fotones similares emitidos aquí. Conviene pensar lo que esto significa. Un fotón puede ser emitido como resultado de muchos procesos pero, en el contexto que nos ocupa, uno es el principal: liberación de energía en la corteza de átomos. Los fotones emitidos por átomos son *cuántos* de energía sobrante. Al liberar esa energía el átomo queda en un estado "que él prefiere" al anterior. Por eso la libera, por eso emite el fotón, por eso los átomos emiten luz. Midamos entonces, con un espectrógrafo, la longitud de onda de un fotón emitido, por ejemplo, por un átomo de calcio aquí y ahora, en el laboratorio y frente al espectrógrafo. Por otro lado, apliquemos un espectrógrafo a un telescopio para poder medir las longitudes de onda de los fotones que, procedentes de galaxias lejanas, terminen su recorrido por el universo captados por él. Si conseguimos reconocer entre ellos alguno que fue emitido por algún átomo de calcio de aquella galaxia, tendremos su longitud de onda estirada. Comparémosla con la del fotón emitido por el átomo de calcio en el laboratorio ahora y ya está.

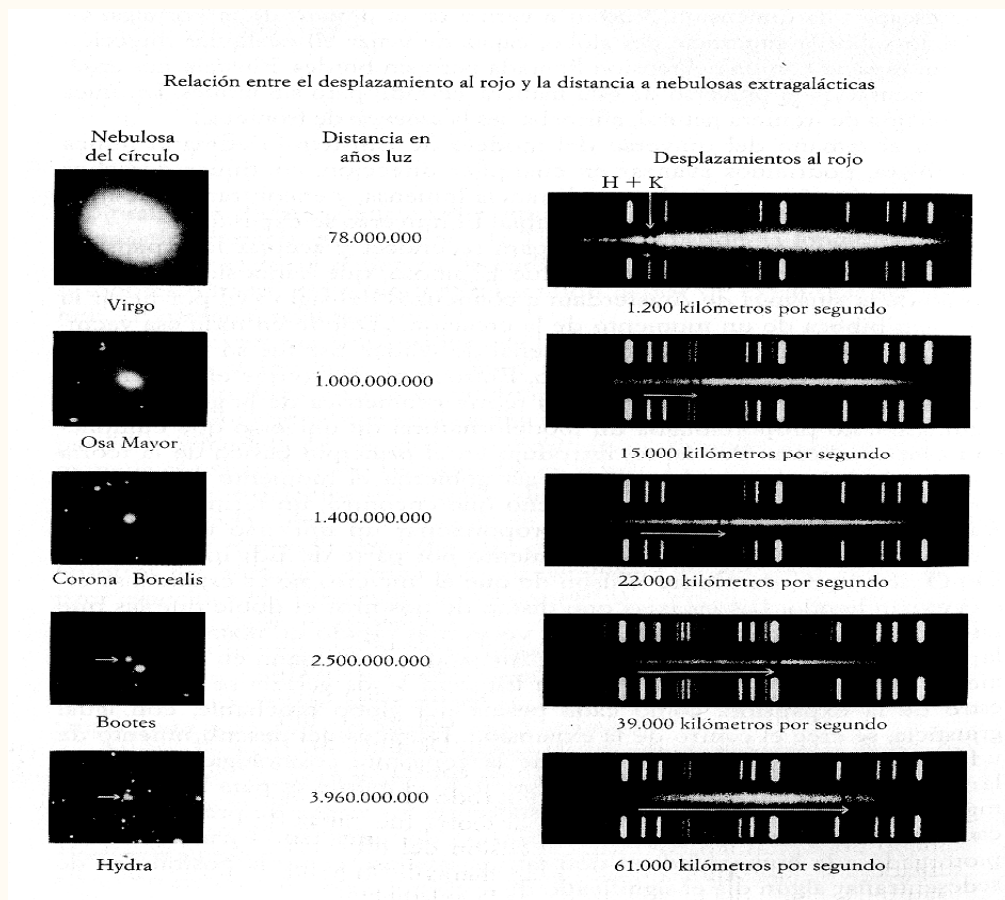


Imagen tomada de Wheeler, Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo, p 244

Pero ¿cómo podemos distinguir entre la multitud de fotones que atrapa el telescopio uno emitido por un átomo de calcio? ¿Cómo distinguirlos entre los emitidos por átomos de hidrógeno, de helio, de carbono, de neón o de cualquier otro elemento? Parece imposible que se pueda resolver el problema pero no es así. Todos los átomos de calcio emiten varios tipos de fotones. Pero todos, y siempre, los mismos. Hay pues un grupo de fotones, cuya longitud de onda se conoce, que forman parte de la luz emitida por un foco si en ese foco hay átomos de calcio emitiendo. Cuando al analizar una luz con un espectrógrafo se encuentra el grupo de fotones típico del calcio se dice que se ha encontrado la huella espectroscópica del calcio. Átomos de otros elementos emiten grupos distintos a los del calcio, tienen una huella distinta.

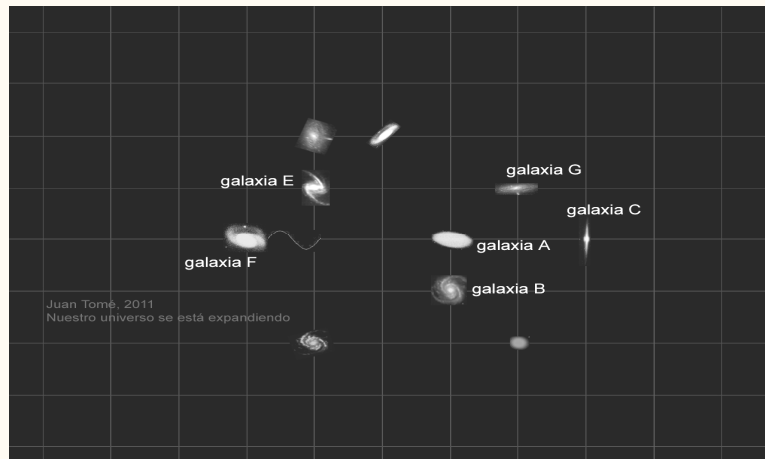
La huella del calcio en la figura de la página anterior es un punto luminoso aislado señalado en el primer espectro como "rayas H+K". En los espectros siguientes, obtenidos de luz procedente de galaxias más y más lejanas, la huella se desplaza hacia la derecha del espectro, hacia el rojo de los espectros de rayas que se toman como referencia. Al analizar la luz procedente de una galaxia lejana se encontrará que todos sus fotones están estirados por igual, desplazados al rojo por igual. Los fotones de la huella del calcio habrán cambiado sus longitudes de onda. Pero todo el grupo habrá cambiado en la misma proporción y su "aspecto de grupo" se mantendrá. Cada fotón del grupo no podrá ser reconocido por su longitud de onda, ya que cambió. Sin embargo, el grupo entero sí podrá ser reconocido. Aparecerá desplazado al rojo, pero con el mismo "aspecto de grupo". En la figura, una flecha marca el desplazamiento del "punto luminoso aislado", huella del calcio.

Pensemos en huellas que distintos animales con las patas manchadas de barro, un pato y un perro por ejemplo, dejan en una cama elástica. Supongamos que, andando el tiempo, el tejido de la cama elástica se da de sí y las huellas se estiran con él. Supongamos que al cabo de una temporada queremos identificar las huellas que aparecen en la cama elástica. Los rasgos aislados de las huellas (su longitud, el grosor de los dedos, la anchura de las membranas) habrán cambiado y, fijándose sólo en rasgos aislados, no se identificarían como de perro o pato. Pero atendiendo a la forma de la huella, a la huella en conjunto, sí podrían reconocerse como huellas estiradas de perro o pato. Las huellas espectroscópicas estiradas de un elemento, del calcio en nuestro ejemplo, no se reconocen por las longitudes de onda de cada fotón de la huella sino por el aspecto de conjunto.

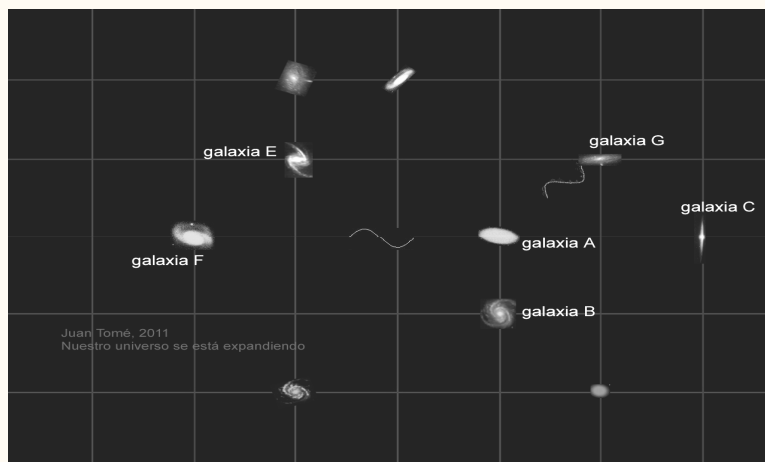
Desarrollo de la actividad

Parte 1: Estiramiento de fotones

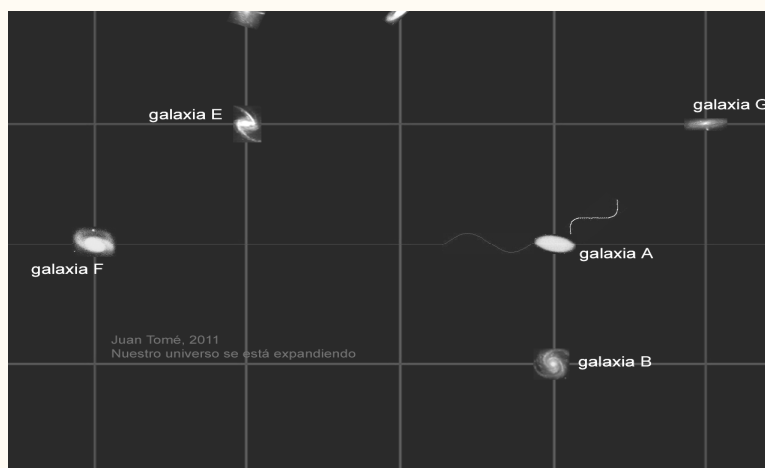
El siguiente argumento muestra el fundamento de la relación entre *desplazamiento al rojo* de los fotones y la distancia entre galaxia emisora y receptora. Las imágenes describen un universo en expansión. Las galaxias representadas mantienen sus posiciones en la cuadrícula pero la cuadrícula se estira.



En esta primera imagen, se emite un fotón (violeta por ejemplo) 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. 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. Se estiró más, durante más tiempo, porque su viaje fue más largo.

Trabajo que se propone

- a) Reescribir el argumento haciendo dibujos análogos a los mostrados aquí pero para otra galaxia receptora y otras galaxias emisoras.
- b) Colorear los fotones de acuerdo con su longitud de onda.

Parte 2: Los fotones más estirados del universo

La *radiación cósmica de fondo* (CBR en sus siglas inglesas) 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 interactuaba 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 que interactúan con los fotones mucho menos que las partículas cargadas libres. Los fotones pudieron empezar a viajar libremente, sin estorbos, sin sobresaltos, el universo se hizo transparente. La CBR es, según el modelo Big bang, lo que queda de aquella radiación que, como ahora, llenaba el universo en aquel momento. Libres de interacciones, aquellos fotones han conservado propiedades que aportan valiosa información sobre el estado del universo en aquella época y sobre su evolución. Son fotones fósiles, huella del estado del universo más antiguo del que se tienen datos observacionales.

A medida que el universo se expandía, que el espacio se estiraba, los fotones CBR se estiraban con él. Esta es la única transformación que sufrieron. Por tanto, fueron cambiando de color. Las figuras 1 a 5 representan un universo bidimensional (la superficie esférica representada) en expansión, por el que se mueven fotones de la CBR.

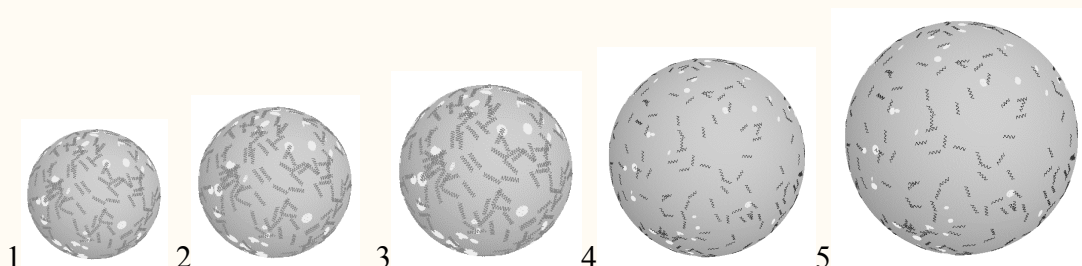


Imagen original de Edgard Wright en www.astro.ucla.edu/~wright/tiredlit.htm

Trabajo que se propone

Colorear los fotones en cada figura de forma que los colores elegidos sean acordes con el estiramiento que fueron sufriendo a medida que el universo se expandía.

Comentarios didácticos

A menudo se explica el *desplazamiento al rojo cosmológico* como un efecto Doppler cinemático debido al movimiento de las galaxias lejanas alejándose del observador. En esta interpretación, el desplazamiento 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 de un espacio estático 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.

Hay una razón que debería bastar para abandonar la interpretación Doppler del *desplazamiento al rojo cosmológico*. Según ese punto de vista, el desplazamiento al rojo sería mayor para las galaxias más lejanas porque su velocidad de alejamiento es mayor. Habrá distancias para las que el desplazamiento observado requiera velocidades de las galaxias mayores que las de luz, lo que no tiene sentido. No hay en cambio límite alguno para la velocidad de crecimiento de una distancia: el estiramiento es igual de rápido por doquier (de hecho, es bastante lento); pero basta tomar una distancia suficientemente grande para que su crecimiento por unidad de tiempo sea mayor que la de la luz. No importa, la velocidad de crecimiento de una distancia no es una velocidad de movimiento de nada.

La idea de estiramiento de fotones con el espacio permite establecer 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. La longitud de onda de los fotones cambia con la escala del universo como cualquier otra longitud cosmológica.

Los fotones de la CBR que detectamos ahora llevan casi 13.700 millones de años (la edad del universo) viajando sin interactuar con nada, hasta ese extremo es transparente nuestro universo. La primera materia con la que interactúan es la de los aparatos con los que se detectan. 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 estirándose. Ahora tienen la longitud propia de la radiación microondas, no visible, de longitud de onda más larga que la radiación infrarroja.

El descubrimiento de la CBR es una de las dos grandes aportaciones observacionales de la cosmología del siglo XX: la otra es el descubrimiento del *desplazamiento al rojo cosmológico* de la luz que nos llega de las galaxias lejanas. La capacidad del modelo Big bang de explicar satisfactoriamente la CBR fue determinante para preferirlo frente a otros que tenían dificultades para explicarla.

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.

www.astro.ucla.edu/~wright/tiredlit.htm