



Claves de cosmología para secundaria

Juan Tomé

casa@amonaria.com

www.cosmologica.amonaria.com

Índice

Presentación	3
Clave 1: Nuestro universo es mucho más de lo que se ve	4
Clave 2: Nuestro universo es transparente	6
Clave 3: Mirar lejos en el universo es contemplar su pasado	7
Clave 4: El universo está en desequilibrio termodinámico	8
Clave 5: El espacio se está estirando	10
Clave 6: Los fotones se estiran con el espacio	12
Clave 7: Los átomos de aquí son átomos del universo	15
Clave 8: Nuestro universo tiene historia	16
Notas	18
Fuentes citadas	20

Presentación

El modelo de universo del Big bang es el paradigma científico dominante en cosmología. Proporciona el marco en el que observaciones de carácter cosmológico, principios y explicaciones teóricas encajan de forma consistente, permitiendo plantear investigaciones para avanzar en el conocimiento del universo.

El modelo Big bang describe un universo evolutivo, con historia, que empezó en un estado caliente, deslumbrante y denso y que, de acuerdo con los datos actuales, terminará en un estado frío, oscuro y vacío. La historia del universo, según el modelo Big bang, es la historia de su expansión, la del enfriamiento causado por la expansión y la de la formación de estructuras complejas que han surgido a medida que el enfriamiento las ha hecho posibles, a medida que las interacciones entre componentes simples pudieron actuar para formarlas.

Conocer y comprender el cuerpo teórico y los hechos experimentales que sostienen el modelo Big bang excede, está claro, de las posibilidades de la enseñanza secundaria. Pero es posible elegir algunas claves y presentarlas a los alumnos de este nivel de forma que se comprendan los aspectos esenciales del modelo y de cómo se llega a establecer. En mi opinión, estas claves serían las siguientes:

- Nuestro universo es mucho más que lo que se ve.
- Nuestro universo es transparente.
- Mirar lejos en el universo es contemplar su pasado.
- El universo está en desequilibrio termodinámico.
- El espacio se está estirando.
- Los fotones se estiran con el espacio
- Los átomos de aquí son átomos del universo.
- Nuestro universo tiene historia.

Cada una de esas claves se trata en un capítulo de este cuaderno, desarrollando el significado de cada uno de esos ocho enunciados. El conjunto reúne los elementos teóricos necesarios para abordar un curso básico de cosmología dirigido a alumnos de secundaria. Pero, dado que los contenidos relativos al universo están dispersos en distintas asignaturas y cursos del currículo actual, el texto puede ser útil a profesores de distintas asignaturas cuando trabajen contenidos relacionados con la cosmología.

En trabajo aparte (que se puede ver en Actividades de cosmología para secundaria) se presenta una colección de actividades útiles para trabajar con los alumnos cada una de estas claves, incluyendo comentarios didácticos para los profesores.

Este trabajo, junto a la colección de actividades, ha sido publicado por ApEA (Asociación para la Enseñanza de la Astronomía) y editado por Antares.

Clave 1: Nuestro universo es mucho más de lo que se ve

El Sol, la estrella que se ve de día, y todas las estrellas que se vean cualquier noche desde cualquier punto de la Tierra pertenecen a la Vía Láctea. La Vía Láctea es nuestra galaxia, un conjunto de miles de millones de estrellas y otros objetos, polvo y gas, un sistema material que no se dispersa a causa de la atracción gravitatoria conjunta. En nuestra galaxia, como en cualquier otra, aparte de estrellas brillantes y sus posibles "sistemas solares", hay más cosas. Hay cúmulos (agrupaciones de estrellas) de distinto tipo; cadáveres estelares, restos de estrellas que murieron (púlsares y agujeros negros por ejemplo), que alguna vez brillaron pero ya no lo hacen; hay objetos oscuros (que no emiten luz o emiten poca y por eso a veces se les llama marrones); y hay nebulosas, que son nubes de gas y polvo de distinto origen. De todo ese zoológico de objetos, sólo las estrellas saltan a la vista.

La Vía Láctea no es la única galaxia del universo. Desde la Tierra se ven tres: la Gran Nube de Magallanes, la Pequeña Nube de Magallanes y Andrómeda, que son vecinas de la nuestra. Las Nubes de Magallanes se ven desde el hemisferio sur, Andrómeda desde el hemisferio norte. Las Nubes de Magallanes no pasan desapercibidas al "ojo desnudo" y fueron descritas en mitologías aborígenes australes. Andrómeda desafía la agudeza visual de los humanos. Conociendo su posición en el cielo se puede, a simple vista, percibir una mancha blanquecina sobre su entorno negro y decir "he visto Andrómeda". Con prismáticos es fácil verla. Los observadores aficionados, ayudados de telescopios, ven muchas más galaxias. Las ven como pequeñas luminosidades difusas, algodonosas, de distintas formas, en las que no llegan a distinguir sus objetos componentes. Ni sus nebulosas ni sus estrellas ni, por supuesto, los planetas y satélites de sus posibles sistemas solares aparecen ante sus ojos. Y telescopios de los grandes observatorios han detectado cientos de millones de galaxias muy lejanas, de luminosidad muy débil, que escapan a las posibilidades de observación de los aficionados.

Lo visible en el universo es mucho. Sin embargo lo observable, lo que incluye lo visible y lo no visible, es mucho, mucho más. La razón es que hay muchos objetos en el universo que emiten tipos de "luz"^A que el ojo humano no está preparado para detectar, "luz" no visible que puede ser detectada mediante instrumentos apropiados. El universo no acaba en el universo visible: hay que extenderlo hacia el universo de la "luz" no visible.

La luz es un tipo de radiación electromagnética, una forma de energía que, liberada por un objeto material, se propaga como una onda electromagnética, una onda un poco más desconocida que otras pero onda al fin y al cabo. Todas las radiaciones electromagnéticas tienen propiedades similares. Pero unas son visibles y otras no. Al considerar el conjunto de todas las radiaciones electromagnéticas, el "universo visible" se incluye en el más amplio "universo de la radiación electromagnética" que se puede definir como "el conjunto de objetos celestes cuyas emisiones de radiación electromagnética pueden ser detectadas aquí, en la Tierra, con los instrumentos disponibles en esta época".

^A En todo lo que sigue, luz (sin entrecorillar) significa luz visible, radiación electromagnética visible. Y el entrecorillado "luz" se refiere a la "luz no visible" o, más propiamente, a la radiación electromagnética no visible.

El universo de la radiación electromagnética es mucho más rico que el visible. Primero, porque los objetos emisores en visible los son también de radiación no visible y el análisis de estas radiaciones mejora el conocimiento de su estructura y de los procesos físicos que ocurren en ellos: el Sol, por ejemplo, emite en el visible el 41% del total de energía emitida pero en el infrarrojo, radiación que no se ve pero calienta, emite el 52 % . Estudiar el Sol sólo a partir de su luz visible sería atender a menos de la mitad de los procesos que hacen que el Sol sea el Sol. Segundo porque el catálogo de objetos celestes se amplía con especies exóticas de las que no se tenía noticia en el visible: los agujeros negros (que se localizan por las emisiones de Rayos X que se producen en su entorno) o los cuásares (que son fortísimos emisores de ondas radio) por poner dos ejemplos. Tercero porque se descubren huellas no visibles de fenómenos que acontecen o acontecieron en el universo: por ejemplo las emisiones de rayos γ que se producen en explosiones muy potentes en la escala cósmica; o la *radiación cósmica de fondo*, una "luz" de tipo microondas que llena todo el espacio y que se interpreta como resto fósil de algo que acaeció cuando el universo tenía tan sólo 300000 años, el suceso más antiguo del que se tiene noticia observacional directa.

Clave 2: Nuestro universo es transparente

La radiación electromagnética aporta casi toda la información con la que se construye conocimiento sobre el universo.¹ La mayor parte de los objetos celestes son, desde el punto de vista observacional, fuentes de radiación electromagnética y nada más. La información más elemental, la de tener noticia de su existencia, aparece al captar sus radiaciones. Las propiedades como tamaños, masas, composición, movimientos, etc., que les dotan de "personalidad", se deducen al analizar las radiaciones captadas. Las observaciones astrofísicas y cosmológicas consisten, casi en su totalidad, en recoger aquí y ahora, con el fin de analizarlos, *fotones*² mensajeros emitidos por fuentes lejanas, que debieron viajar hasta aquí sin incidentes, sin topar en su camino con nada de materia con la que interaccionar, de forma que pueda reconocerse su origen y de forma que sus propiedades, que nos dan información de la fuente, no hayan sido alteradas durante el viaje.

Es decir, que el viaje sin sobresaltos es una condición esencial para poder observar el universo mediante radiación electromagnética, mediante fotones. Hay una propiedad de nuestro universo que hace posible que los fotones nos puedan llegar desde lugares inconcebiblemente lejanos sin alteraciones. Es una obviedad pero conviene hacerla explícita: nuestro universo es transparente a la radiación electromagnética. En otros términos, que en nuestro universo los fotones viajan "como Perico por su casa", sin impedimentos ni frenos, sin oposición. Más claro: que cuando se ve una estrella cualquier noche es porque algún fotón que se emitió allí ha viajado hasta el ojo sin problemas y ha sido capturado y analizado por él; que ver la estrella es posible porque el cristalino que enfoca el fotón hacia la retina es la primera materia que el fotón encuentra en su viaje por el universo después de haber sido lanzado desde la estrella a ciegas, en una dirección cualquiera. Y si el fotón no se hubiera topado con ese ojo, no hubiera sufrido ese accidente, habría seguido su camino normal, mucho más largo, como el de muchos de sus compañeros emitidos en la estrella a la vez que él, que todavía no acertaron con ningún estorbo con el que relacionarse, con el que interaccionar.

Clave 3: Mirar lejos en el universo es contemplar su pasado

La investigación del universo se basa en una colección de noticias que, procedentes de distintos lugares y momentos, llegan aquí y ahora, traídas por fotones. Los fotones son muy rápidos, son lo más rápido que existe, pero no son infinitamente rápidos. Por tanto necesitan tiempo para llegar desde su origen hasta nosotros. Esto quiere decir que las noticias con las que construimos el universo no siempre son noticias frescas: cuánto más lejana es la fuente, más antiguas son las noticias recibidas *ahora* de ella. Los fotones que llegan *aquí ahora* informan de cómo era la fuente en el momento de su emisión y de eso puede hacer hasta miles de millones de años, tan lejos hemos llegado a ver. Por eso los astrofísicos y los cosmólogos dicen que “mirar lejos es mirar al pasado”.

Esto puede ser desconcertante al principio y puede parecer un problema. Sin embargo es, más bien, una ventaja porque al observar el universo no sólo se está mirando a distintos sitios sino a distintos tiempos. La “tardanza” de los fotones nos permite ver el universo en distintas épocas. Los fotones que llegan de objetos cercanos nos informan del universo tal como es ahora; los que llegan de un poco más lejos nos cuentan del universo en un pasado próximo; y los que llegan de fuentes muy lejanas proyectan ante nosotros aquí, ahora, “sin movernos del sillón”, imágenes del universo como era hace mucho tiempo. El conjunto de observaciones relativas a objetos situados a la misma distancia es un corte, una “fotografía” del universo correspondiente a una época de su existencia. La observación astrofísica es una observación “tomográfica” en el tiempo. En el contexto de los modelos de universo cambiantes, la observación astrofísica proporciona una película de su historia.³

En los modelos de universo que tienen un origen, evolutivos, la edad del universo impone un límite al tamaño del universo observable: las fuentes más lejanas que podemos observar ahora son aquellas situadas a una distancia tal que los fotones provenientes de ellas tardaron en llegar hasta nosotros un tiempo igual a la edad del universo. Podrá haber fuentes situadas más lejos que esas pero no podrán ser observadas porque los fotones que pudieran haber emitido no han tenido tiempo suficiente de llegar hasta aquí. A medida que pase el tiempo, a medida que la edad del universo sea mayor, nos podrán ir llegando fotones de fuentes más alejadas. El tamaño del universo observable crece con la edad del universo. Es cuestión de paciencia: cada año el radio del universo observable crece un año luz.

Clave 4: El universo está en desequilibrio termodinámico

El Sol, nuestra estrella próxima, inunda nuestro entorno de luz cada día y nos enmascara que el universo, esto se ve cualquier noche, es un lugar oscuro salpicado de puntos brillantes, estrellas como el Sol pero más lejanas. Nos bastan los ojos, nuestros detectores de luz, para observar todo eso.

Los buenos emisores de luz son objetos calientes: bombillas, velas, estrellas. Los malos emisores de luz, objetos oscuros, son fríos: el universo que contemplamos por las noches por ejemplo.

Pero nuestro universo no ha sido siempre así. Su estado inicial, el estado Big bang, fue el más caliente de todos los de su historia. Lo que pasa es que, desde entonces, la temperatura del universo ha ido bajando sin descanso.

Sólo hay dos formas de que un sistema se enfríe:

- La primera, cediendo energía a otro sistema más frío. De esta forma, su "nivel de energía" (su temperatura) disminuye.⁴ Para que un sistema se enfríe de esta forma es necesario que haya otro que reciba la energía cedida. Ambos sistemas estarán relacionados, no pueden estar aislados. El proceso de enfriamiento continúa hasta que se igualan las temperaturas de los dos sistemas.
- La segunda, expandiéndose, aumentando su tamaño sin recibir ni ceder energía. De este modo, la cantidad de energía del sistema se mantiene pero su "nivel" (su temperatura) baja. Es como si una piscina se estirara: mantendría la misma cantidad de agua pero el nivel del agua descendería porque se repartiría por más superficie. Un sistema puede enfriarse al expandirse aunque esté aislado.

Para el universo, sistema aislado por excelencia, intercambiar energía con otro sistema es imposible. Por principio, no existe sistema material alguno aparte de él. El universo es todo lo que existe. No puede, por tanto, enfriarse cediendo energía a otro sistema. Para el universo no hay alternativa, la única vía posible de enfriamiento es la expansión.

Nuestro universo fue caliente al principio pero, desde entonces, la expansión no ha dejado de enfriarlo.⁵ Ahora el universo es oscuro porque es muy frío. Pero está salpicado de estrellas y otros potentes emisores de radiación, muy calientes. Hay que reconocer que al contemplar una noche estrellada se tiene delante una especie de enorme, enorme, enorme recipiente muy frío (el universo, la negrura de la mayor parte de la bóveda celeste) que contiene objetos muy calientes mucho más pequeños que él (las estrellas y cualquier otro objeto emisor de luz o, en general, de radiación).

Cuando un sistema tiene unas partes a una temperatura y otras a otra se dice que está en *desequilibrio termodinámico*. Ese es el estado actual de nuestro universo. Esto se ve todas las noches, aunque no todas las noches caemos en la cuenta. Si el universo estuviera en equilibrio termodinámico los objetos celestes serían tan oscuros como el fondo o, si se quiere, el fondo sería tan brillante como los objetos celestes porque no habría diferencia de temperatura entre unos y otro. Si el

universo estuviera en equilibrio termodinámico, nuestras noches no serían estrelladas.

El desequilibrio termodinámico es necesario para que haya flujos de energía, que irán de las partes calientes a las partes frías. Los flujos de energía pueden poner en marcha distintos procesos, generar cambio, hacer que "pasen cosas". Los sistemas en equilibrio termodinámico han alcanzado uniformidad por todas partes, han llegado a un estado estable en el que no puede pasar nada. Son sistemas "muertos". Nuestro universo no es así. Todavía está en desequilibrio, está "vivo".

Expresión local del desequilibrio universal, el Sol, nuestra estrella caliente, vierte al universo frío un enorme torrente de energía. La Tierra intercepta una pequeña parte, suficiente para poner en marcha todos los procesos de la vida.^B

^B Se puede ver desarrollada esta idea en Tomé, "Universo y vida", www.cosmologica.amonaria.com

Clave 5: El espacio se está estirando

En el modelo de universo Big bang, la expansión explica su evolución y sus propiedades actuales. El enfriamiento que la expansión conlleva permitió la formación de estructuras. Cuando la temperatura bajó lo suficiente pudieron ligarse protones y neutrones para formar núcleos de hidrógeno, helio y litio; cuando bajó más, pudieron ligarse núcleos y electrones para formar átomos y el universo se hizo transparente; cuando bajó aún más, pudo actuar la atracción gravitatoria para que se encendieran estrellas a partir de nubes de gas y se alcanzara su estado actual de desequilibrio termodinámico. Precisamente porque el papel de la expansión es clave conviene precisar su significado científico.

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 hará más grande. Las distancias espaciales aumentan porque cada cuadrícula se amplía. Podría pensarse por analogía en una red elástica, de las que se usan por ejemplo para guardar balones, o en una media elástica de red, o en una venda elástica. Cuando se estira la red, la media o la venda, cambia la escala del retículo pero no hay más red, más media o más venda. También pueden imaginarse galaxias fijas en posiciones concretas del retículo y pensar en lo que sucede con las distancias entre ellas al estirarse la red, la media o la venda.

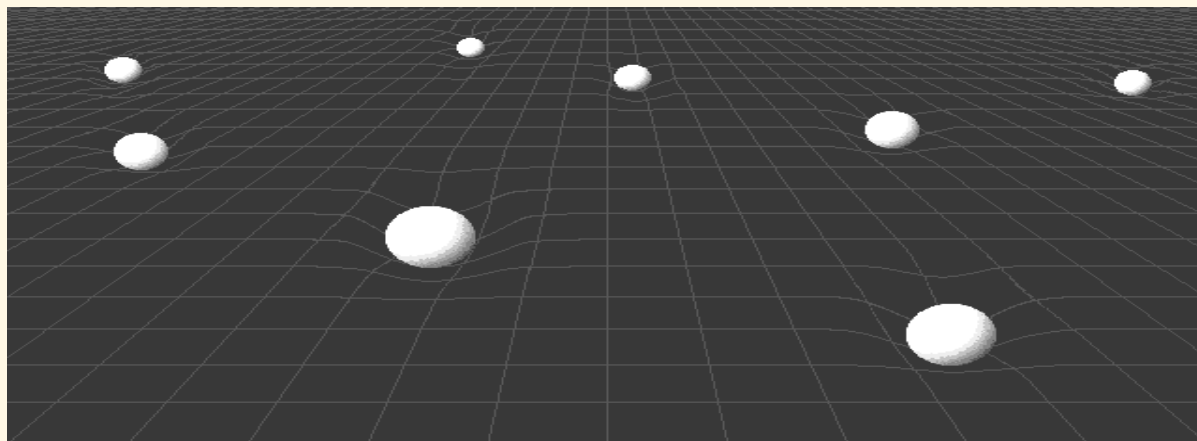


Figura tomada de www.atlasoftheuniverse.com

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*.⁶

El estiramiento uniforme del espacio tiene una propiedad singular que lo hace preferible a cualquier otro modo de expansión: que es compatible con los principios de Homogeneidad e Isotropía, que establecen que, a gran escala, las propiedades del universo son las mismas en cualquier zona y cualquier dirección que se considere.⁷ 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.⁸

De que el estiramiento del espacio sea uniforme, 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 las galaxias que están a dos cuadrículas de distancia se separan el doble de deprisa que 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.

En resumen, 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. En su estiramiento arrastra las galaxias, que no se mueven respecto del sustrato. Por eso, todas las galaxias están separándose entre sí aunque no se desplazan por el espacio, aunque no cambian su posición en el retículo de coordenadas. Desde cualquier galaxia, en particular desde la nuestra, podrán hacerse observaciones de las que se infiera que las galaxias se separan entre sí y que lo hacen más rápidamente cuanto más separadas están."

Clave 6: Los fotones se estiran con el espacio

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 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. 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.

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.

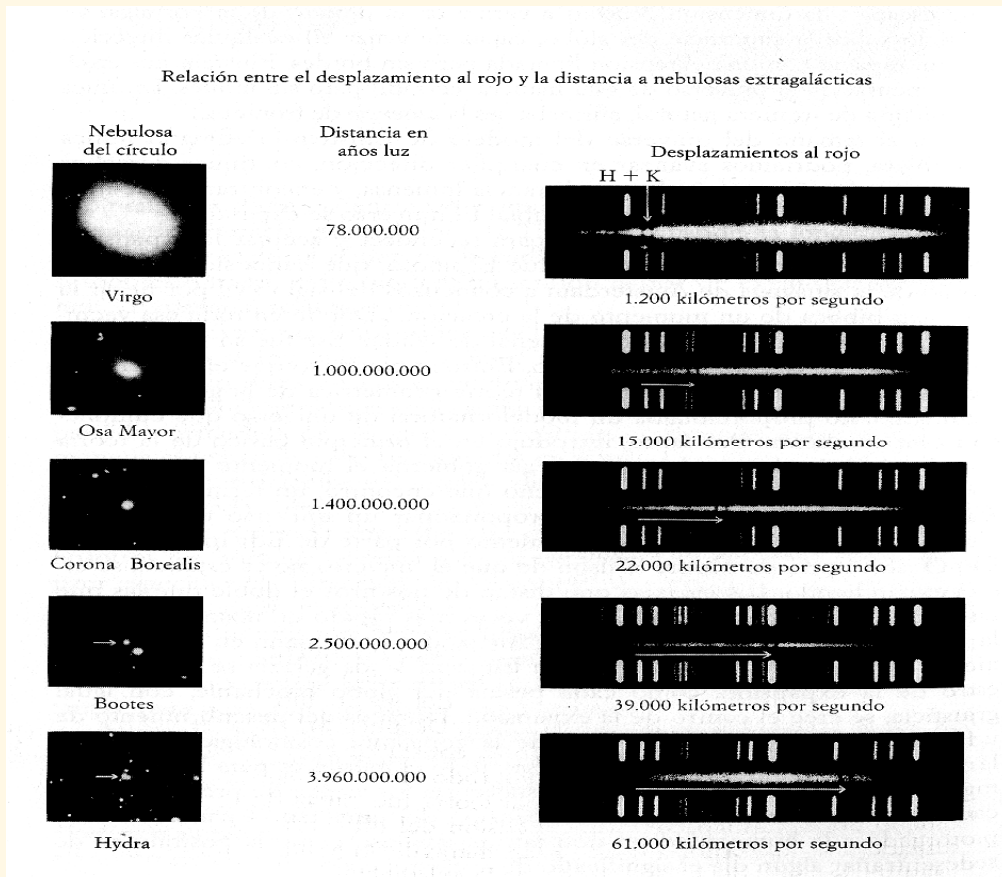


Imagen tomada de Wheeler, Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo, p 244

La huella del calcio en la figura 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".

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.

Clave 7: Los átomos de aquí son átomos del universo

Hay una cuestión interesante sobre la identificación de huellas de elementos en la luz recibida de fuentes lejanas. La luz emitida por esas fuentes tardó mucho en llegar a nosotros, hasta miles de millones de años. El átomo que la emitió (de calcio en el ejemplo que hemos estado manejando) es, por tanto, un átomo antiguo, muy antiguo. Entonces, ¿cómo estar seguros de que los átomos de calcio de ahora, los que emiten los fotones frente al espectrógrafo en el laboratorio, son iguales que los de antes, los que emitieron su luz en la galaxia lejana hace miles de millones de años? ¿Cómo estar seguros de que la huella espectroscópica de un átomo de calcio de ahora es igual a la de los átomos de calcio que emitieron luz en otra época del universo? La respuesta es extraordinaria: los átomos de aquí y ahora puede ser tan antiguos como los de las galaxias lejanas y se formaron en procesos similares.

Los núcleos de isótopos de hidrógeno, helio y litio, los más ligeros de todos los elementos, se formaron en los primeros minutos del universo, mediante procesos que se conocen como *nucleosíntesis primordial*. Los núcleos de elementos más pesados se forman en el interior de las estrellas en procesos que se conocen como *nucleosíntesis estelar*. Cuando se forman estrellas, la masa acumulada se comprime por interacción gravitatoria hasta alcanzar temperaturas suficientes para poner en marcha reacciones de fusión de núcleos de hidrógeno y helio. A partir de ellos se van formando núcleos de elementos más y más pesados, liberando energía en cada paso, la energía que las estrellas emiten al universo. El proceso tiene un límite: núcleos de hierro con 26 protones y entre 28 y 32 neutrones. A partir de ahí, las reacciones de fusión para dar núcleos más pesados no son rentables energéticamente y tales núcleos no se producen en el interior de las estrellas. Sucesos catastróficos, las explosiones *supernova* del final de la vida de algunas estrellas, son los que aportan la energía necesaria para formar núcleos de los elementos más pesados que el hierro. La misma explosión supernova que los origina, los dispersa por el universo, junto con los menos pesados que los de hierro que se habían ido formando a lo largo de la vida de la estrella que explota.

Dado que nuestro sistema solar tuvo origen en una nube de gases y polvo hace unos 5000 millones de años, todos los núcleos de los átomos de la Tierra debían estar ya formados en aquella época, estar presentes en aquella nube. Habría allí, junto a átomos de hidrógeno, helio y litio con núcleos formados en el universo primitivo, átomos con núcleos formados en estrellas antiguas (oxígeno, carbono, nitrógeno, calcio, fósforo, cloro, potasio, azufre, sodio, magnesio, hierro, entre otros) y átomos más pesados con núcleos formados en alguna explosión supernova previa a la formación de dicha nube. Así pues, los átomos de nuestro cuerpo y nuestro entorno debieron estar en la nube de gas y polvo de la que se formó el Sistema solar hace 5000 millones de años. Tienen, como mínimo, esa edad. Y lo mismo pasa con los átomos de calcio del laboratorio cuya huella espectroscópica se compara con la que nos llega de átomos de calcio de galaxias lejanas.

Nuestros átomos, y los de los materiales que nos rodean, no son átomos formados aquí. No son locales, son universales.

Clave 8: Nuestro universo tiene historia

El estado inicial de nuestro universo, según el modelo Big bang, era muy denso y muy caliente. Su temperatura era tan alta que ninguna estructura podía formarse. Si se hubiera mantenido así, en ese estado inicial uniforme, caótico, no hubiera pasado nada que fuera digno de contarse. No se hubieran formado protones ni neutrones ni átomos ni estrellas ni planetas ni células ni vivos pluricelulares ni hubiera habido aquí evolución biológica. Desde luego, no hubiera habido cerebros complejos capaces de contar que allí no pasaba nada. Pero, desde el mismo estado inicial, el universo se expandía y en consecuencia se enfriaba, por la misma razón que se enfría el aire que se expande al salir, entre los labios, de la boca hinchada que lo presiona, que lo aprisiona. La expansión mantenida produjo el enfriamiento mantenido y las interacciones (físicas, químicas, biológicas), agazapadas a la espera de temperaturas favorables, pudieron actuar sucesivamente, de las más fuertes a las más débiles, a medida que la temperatura descendía más y más. Primero la interacción *fuerte*, luego la *electromagnética*, luego la *gravitatoria*. Luego, aquí, la interacción *química* y la *biológica* han conformado la ecosfera.⁹ La materia se fue organizando y el universo pasó de aquel estado inicial simple y desestructurado al estado estructurado y complejo del que somos parte.

El estado inicial del universo puede considerarse como de equilibrio inestable, un lápiz de punta es una imagen muy usada para explicarlo. La expansión lo desestabiliza y ese universo, en ese estado ya desequilibrado, por eso mismo "vivo", empieza a evolucionar hacia algún estado final de estabilidad, muerto, en el que no fuera posible proceso alguno. Pero esa evolución no ha sido simple, nada parecido a la caída del lápiz hasta estrellarse contra la mesa o a unos fuegos de artificio cósmicos que agotaran en un destello todo el potencial de cambio del estado inicial. La caída tiene discontinuidades, los cambios posibles encuentran diques que los detienen parcialmente: las interacciones. Las estructuras que se forman suponen bloqueos locales de la caída general. La rapidez de la expansión y, en consecuencia, la del enfriamiento, congela las estructuras formadas, que son estructuras estables posibles, pero no las más estables posibles. Son como repisas en un muro vertical que tienen otras más abajo. En todas se puede descansar. La caída se transforma en bajada escalonada, con muchos caminos posibles. Se deja una repisa y se puede reposar en otra que todavía atesora capacidad de cambio. Se puede seguir bajando, se tiene la posibilidad de cambios posteriores, se pueden enriquecer las estructuras, puede aparecer la complejidad local.

El modelo Big bang es el primero de la historia de la cosmología que describe un universo evolutivo, un universo cambiante, con historia. Esencialmente, es la historia de un sistema que parte de un estado "vivo", con un enorme potencial de cambio, de poner en marcha multitud de procesos, y que acabará en un estado en el que se habrá agotado toda posibilidad de cambio, un estado "muerto". Los procesos que han conducido desde el estado inicial al actual han sido complicados, han dado lugar a sistemas complejos, han permitido nuestra existencia. Nuestro universo está todavía en evolución, todavía está "vivo".

Escribir con detalle esa historia requiere gran cantidad de conocimientos físicos, químicos, biológicos, astrofísicos y cosmológicos. Pero, a grandes rasgos, sostenida por las siete claves ya explicadas, la historia podría contarse, brevemente, así:

"En ningún momento, en ningún lugar, porque el espacio y el tiempo iban a nacer con él, empezó nuestro universo en un estado de temperatura y densidad singulares. Explotó ese estado y empezó a contar el tiempo, a estirarse el espacio, a enfriarse el universo y a formar grumos la materia. [Hace 13700 millones de años]

Cuando la temperatura bajó lo suficiente, las partículas elementales pudieron formar núcleos de hidrógeno, helio y litio. [Tres primeros minutos del universo] Cuando bajó más y esos núcleos pudieron capturar electrones y formar átomos de hidrógeno, de helio y de litio, el universo se hizo transparente y la luz pudo viajar, sin estorbos, a través de él. [300000 años después del estado Big bang] Aquellos primeros fotones libres vagan por el universo desde entonces y, estirados con el espacio, pueden detectarse ahora como radiación de fondo de microondas.

Se amontonaron los átomos primitivos en nubes de gas que la gravitación fue apretando en distintos objetos celestes que se agruparon en galaxias. Se encendieron estrellas calientes en un universo cada vez más frío, en desequilibrio termodinámico, y se formaron planetas alrededor de muchas de ellas. Desde entonces hubo día y noches estrelladas en el universo. [Unos 1000 millones de años después del estado Big bang]

En el interior de estrellas, a partir de núcleos de hidrógeno, se cocinaron elementos más pesados. Explosiones supernova [Desde hace unos 9000 millones de años] fecundaron el universo de todos los tipos de átomos del sistema periódico, piezas de todas las estructuras químicas y biológicas que estaban por venir. Nubes de gas enriquecido en elementos pesados, estrellas de nuevas generaciones y sus sistemas planetarios las hicieron posibles. [El sistema solar hace unos 5000 millones de años]

Al menos en este planeta, aprovechando los flujos de energía que la estrella Sol vierte al universo, en interacción con el medio material del que se desgajan, prosperaron complejos sistemas materiales en desequilibrio. Algunos resultaron ser autorreplicantes. [Hace 3800 millones de años] Comenzaron los vivos a vivir, a multiplicarse, a evolucionar, cambiaron el planeta, lo hicieron más habitable, se diversificaron, primero lentamente y luego explosivamente. [Hace 550 millones de años]

En especies animales muy desarrolladas evolucionaron cerebros que alcanzaron la capacidad de construir imágenes de su entorno y de sí mismos. [Hace un millón de años] Ahora, una de esas especies puede reflexionar sobre el universo que la contiene y escribir esta historia con los datos que le llegan, a lomos de fotones, desde lugares próximos y remotos, desde el presente y el pasado."

Notas

¹ Las ondas electromagnéticas no son las únicas que, en la actualidad, permiten deducir existencia y propiedades de objetos del universo. Se están empezando a obtener resultados de trabajos de detección de neutrinos y se preparan detectores de ondas gravitatorias, que podrían aportar información completamente nueva sobre el universo.

² Un fotón es un "cuanto de luz" o, más imprecisamente, una "partícula de luz". La luz (visible o no) es una onda electromagnética. Pero cuando interacciona con la materia se comporta como si estuviera constituida por partículas. Se dice que tiene un comportamiento dual. Cuando se trata de la interacción entre materia y radiación electromagnética, es apropiado hablar de fotones.

³ Un test observacional "sencillo" para decidir si el universo evoluciona o no es comparar la tipología de objetos situados a distintas distancias: si los tipos de objetos que se ven cuando se mira lejos-pasado son los mismos que cuando se mira cerca-ahora, es que el universo no evoluciona, no cambia con el tiempo, es estacionario. Si la tipología de objetos es distinta quedará patente la evolución y se tendrán datos de las fases del proceso.

⁴ La idea de temperatura como medida del "nivel de energía" de un sistema requiere precisiones. La temperatura de un sistema material es una medida de la energía cinética media (de la agitación térmica) de las partículas constituyentes del sistema. Pero cuando se habla de temperatura del universo se trata de la temperatura de la radiación que lo llena (la radiación de fondo de microondas) o, con más precisión, la temperatura de un cuerpo negro con un espectro como el de esa radiación (Ver Actividad 18). De todas formas la idea es útil, en un caso como "nivel" de la energía cinética media de las partículas y en otro como "nivel" de la energía de radiación.

⁵ Nuestro universo es muy frío. Está tan solo a 2 grados y siete décimas por encima del cero absoluto. Eso quiere decir que cualquier objeto, en cualquier lugar del universo alejado de todo emisor de energía, se iría enfriando (si su temperatura fuera mayor que 2'7 K) o calentando (si su temperatura fuera menor de 2'7 K) hasta llegar a esa temperatura. El universo es un recipiente muy grande que, además está en expansión, al parecer acelerada. Ni todas las estrellas juntas vertiendo energía durante toda su vida, conseguirán aumentar su temperatura. El universo continuará en desequilibrio termodinámico y enfriándose.

⁶ 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. 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. La función $R(t)$ depende del modelo cosmológico con el que se trabaje. $R(t)$ 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.

⁷ En este contexto, significan que las galaxias están distribuidas por igual a gran escala y que las observaciones relativas a la expansión no dependen de la dirección en la que se observe.

⁸ En este contexto significa que observadores en distintas galaxias deben percibir lo mismo como efecto de la expansión.

⁹ Las interacciones establecen una jerarquía de estructuras en el universo. La interacción gravitatoria es responsable de las grandes estructuras, planetas, estrellas, galaxias y de la estructura del universo a gran escala. La interacción fuerte ordena el núcleo atómico. Las reacciones nucleares son procesos del núcleo en los que la corteza atómica no juega ningún papel. La interacción electromagnética ordena la corteza de los átomos. Las reacciones químicas y bioquímicas, las de la vida, son procesos de la corteza atómica, electromagnéticos por tanto, procesos a los que los núcleos de los átomos que participan son ajenos. Los procesos biológicos son propios de sistemas vivos, a nivel interno o debidos a interacciones con otros vivos. Las interacciones ecológicas o sociales corresponderían a un nivel de organización distinto al de los vivos individuales. Las leyes que rigen cada interacción, las propiedades de los sistemas a que dan lugar, las energías implicadas en los procesos, son distintas en cada uno de los niveles de esa jerarquía de estructuras. Su origen en que las interacciones son diferentes entre sí.

Fuentes citadas

- Tomé, J., 2011, Universo y vida, www.cosmologica.amonaria.com
- Wheeler, J.A., 1990, Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo, Alianza Ed, Madrid, 1994
- www.atlasoftheuniverse.com