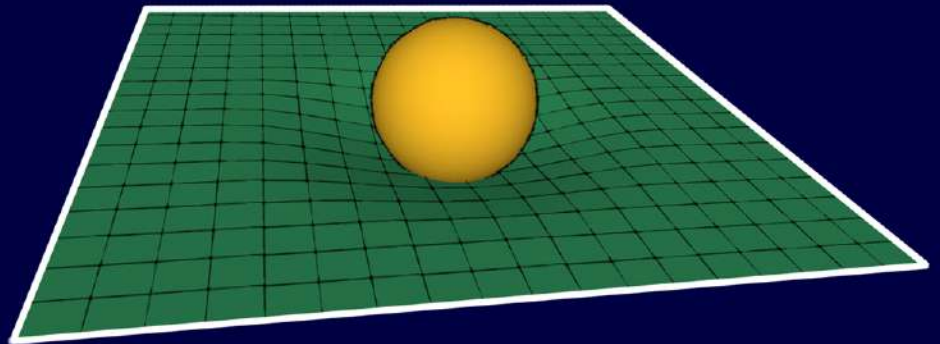


Cosmología para Secundaria

Juan Tomé Escribano



Cosmología para Secundaria

Juan Tomé Escribano

Publicaciones de ApEA
Asociación para la Enseñanza de la Astronomía

Nº 23 (Secundaria) – Junio 2012

Publicaciones de ApEA
Asociación para la Enseñanza de la Astronomía

Dirección:

Rosa M. Ros (Vocal Editora de Publicaciones de ApEA)

Edición 2012

Comisión de redacción:

Antonio Acedo del Olmo

Ederlinda Viñuales

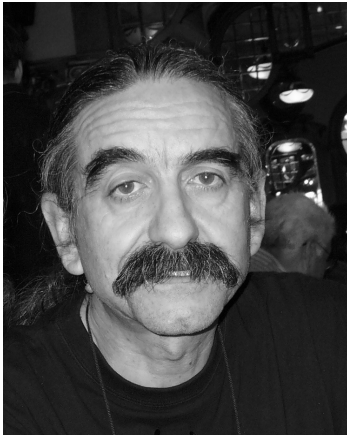
Ricardo Moreno

Simón García

Edita: Antares Producción & Distribución, S.L.

ISBN: 978-84-937604-0-3

AUTOR



Juan Tomé Escribano

Catedrático de Física y Química de Enseñanza Secundaria. Profesor en el IES Jaranda, de Jarandilla de la Vera (Cáceres). Miembro fundador de la Asociación para la Enseñanza de la Astronomía (ApEA). Ha dedicado tiempo y esfuerzos a la introducción de la Cosmología en Enseñanza Secundaria, publicando trabajos, presentando ponencias y dirigiendo talleres en distintos foros.

Índice

Presentación	7
Objetivos	9
Clave 1: Nuestro universo es mucho más de lo que se ve	11
Clave 2: Nuestro universo es transparente	13
Clave 3: Mirar lejos en el universo es contemplar su pasado	15
Clave 4: El universo está en desequilibrio termodinámico	19
Clave 5: El espacio se está estirando	23
Clave 6: Los fotones se estiran con el espacio	35
Clave 7: Los átomos de aquí son átomos del universo	41
Clave 8: Nuestro universo tiene historia	44
Apéndice: Toques cosmológicos para observaciones nocturnas	47
Bibliografía	49

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, con una estructura similar:

- Desarrollar el significado de cada uno de esos ocho enunciados.
- Presentar actividades posibles para trabajarlos con los alumnos.
- Hacer los comentarios didácticos que puedan ser útiles a los profesores.

El conjunto podría constituir un curso de Cosmología para Secundaria. Pero, dado que los contenidos relativos al universo están dispersos en distintas asignaturas y cursos del currículo actual, se ha pretendido que cada capítulo tenga entidad propia y que las actividades que se plantean puedan realizarse como actividades complementarias en temas de distintas asignaturas en los que, habitualmente, no se trabajan contenidos relacionados con la Cosmología. Por ejemplo:

- La actividad planteada en el capítulo 1 es imprescindible cuando se estudia el espectro de la radiación electromagnética en Física de 2º de Bachillerato y muy útil en el estudio del efecto invernadero en 1º de Bachillerato, cuando se necesita distinguir entre visible e infrarrojo.

- Todas las actividades propuestas en los capítulos 2 y 3 son apropiadas para 4º ESO, al estudiar Cinemática. Se tratan de actividades sobre viajes de fotones por el universo y sobre el movimiento de la Tierra y el Sol. Sólo requieren conocer la relación entre velocidad, tiempo de viaje y distancias recorridas por móviles que tienen velocidad constante.
- Contenidos relacionados con el equilibrio térmico se tratan, con distinta profundidad, en 4º ESO y 1º de Bachillerato. Pueden encontrarse momentos en esos dos cursos para plantear las actividades del capítulo 4.
- Las actividades sobre corrimiento al rojo cosmológico del capítulo 6 pueden plantearse en Química o en Física de 2º de Bachillerato, al estudiar los espectros de emisión y el fundamento del análisis a la llama y espectroscópicos. También podría hacerse al estudiar el espectro de la radiación electromagnética en Física de 2º Bachillerato, al asociar longitudes de onda y percepción del color.
- Al estudiar los modelos atómicos y el Sistema Periódico en 1º de Bachillerato o Física nuclear en 2º de Bachillerato, puede realizarse la actividad sobre nucleosíntesis estelar del capítulo 7, que relaciona formación de elementos, reacciones de fusión y estabilidad nuclear.
- Las actividades del capítulo 8, relativas a la historia del universo, pueden ser apropiadas para la Biología de 1º de Bachillerato o para la Geología de 2º de Bachillerato, proporcionando un marco universal para las edades geológicas y biológicas en la Tierra.
- En los contenidos de Cosmología de la asignatura de Ciencias para el Mundo Contemporáneo, de 1º de Bachillerato, podrían desarrollarse completamente mediante las actividades de los capítulos 4, 5, 6, 7 y 8.

El apéndice final del cuaderno sugiere cómo plantear reflexiones de carácter cosmológico en el contexto de observaciones astronómicas nocturnas. Se pretende de esta forma, que los profesores que enseñan Astronomía y realizan observaciones con sus alumnos, no pierdan la ocasión de darles un “toque” cosmológico, aprovechando las conversaciones sobre el universo que siempre surgen en los corros que se forman al calor de los telescopios.

Objetivos

Desde mi punto de vista, el pensamiento general está ausente en la Enseñanza Secundaria en el contexto de las asignaturas de ciencias. Esta carencia de la formación científica puede ser una de las raíces de la percepción separada de las dos culturas (humanista y científica) por parte de los alumnos. De otra manera, desde las ciencias no se plantean casi nunca cuestiones que han sido siempre preocupación de los humanos. La Cosmología es un campo de reflexión sobre lo global y pudiera ser un campo de interés tanto para estudiantes de ciencias como de humanidades.

Más allá de los aspectos científicos concretos del modelo Big Bang, hay cuestiones de Cosmología que tienen interés para los alumnos: distintas concepciones personales del universo, del origen, de los límites espaciales y temporales; modelos históricos; propiedades generales de nuestro universo (expansión, oscuridad de la noche); lugar y papel de la especie humana en el universo; discusiones sobre vida inteligente en otros lugares, posibilidades de comunicación, etc. Este tipo de cuestiones no se tratan en clases de Ciencias ni siquiera cuando distintos tópicos curriculares (estructura del universo, velocidades de señales luminosas, gravitación, equilibrio termodinámico, evolución biológica y del género humano, etc.) pudieran dar pie a ello. El universo no está presente en el currículo como objeto al que es posible aplicar lo que se aprende en las asignaturas científicas.

La intención de este cuaderno es facilitar la inclusión de algunas cuestiones cosmológicas en la enseñanza de las ciencias en secundaria. Esta intención general podría separarse en objetivos más concretos:

- Mostrar que cuestiones básicas de Cosmología pueden presentarse de manera asequible a alumnos de este nivel.
- Aportar materiales didácticos para que los profesores puedan hacerlo. Incluyen el soporte teórico necesario, actividades de aula que ordenen el trabajo de los alumnos y sugerencias didácticas que faciliten el trabajo de los profesores.
- Señalar, para evitarlos, errores posibles en la enseñanza de la cosmología, sobre todo los referidos al estado inicial del universo en el modelo Big Bang, a la idea de expansión y al desplazamiento al rojo de fotones.
- Sugerir momentos curriculares oportunos para introducir contenidos de cosmología en diversas asignaturas de 4º ESO, 1º y 2º de Bachillerato.

Se trata, en resumen, de poner a disposición de los profesores materiales útiles para enseñar Cosmología en secundaria, con el convencimiento de que puede hacerse y de que enriquece la enseñanza de las ciencias.

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, 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 los 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"¹ que el ojo humano no está preparado para detectar, pero 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".

¹ En todo lo que sigue, luz (sin entrecomillar) significa luz visible, radiación electromagnética visible. Y el entrecomillado "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 quásares (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 300.000 años, el suceso más antiguo del que se tiene noticia observacional directa.²

Actividades

Actividad 1: Una luz que no se ve

Las cámaras digitales y las de teléfonos móviles son sensibles a la “luz” infrarroja. Los mandos a distancia emiten ese tipo de radiación. Las siguientes fotografías muestran un mando a distancia inactivo y el mismo mando con una tecla pulsada.



La cámara capta la “luz” infrarroja. Pero si se mira el mando mientras se hacen las fotografías, el ojo no distingue diferencia alguna. La evidencia es indiscutible: existen emisores de “luz” que el ojo no ve y existen detectores que “ven” la “luz” que el ojo no ve.



Fig. 1 y 2 del mando a distancia, con la emisión infrarroja captada por la cámara de fotos.

Comentarios didácticos

Realizada en una observación nocturna, la actividad deja claro que, cualquier noche, lo mismo que desde el mando a distancia, llegan a nuestros ojos “luces” que no percibimos. Los objetos que las emiten quedan para nosotros, como el mando a distancia, confundidos con el fondo oscuro de la noche.

² Para detalles sobre la radiación cósmica de fondo, ver la Actividad 18.

Clave 2: Nuestro universo es transparente

La radiación electromagnética aporta casi toda la información con la que se construye el conocimiento sobre el universo.³ 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, *fonones*⁴ 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 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 fonones. Hay una propiedad de nuestro universo que hace posible que los fonones 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 fonones 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.

Actividades

Actividad 2: Años luz de soledad

Calcular cuántos kilómetros han recorrido sin interaccionar con nada, en soledad:

1. Los fonones que nos llegan a los ojos procedentes de la Luna, el Sol, de Sirio.
2. Los fonones que llegan a un telescopio de aficionado que está apuntado al cúmulo globular de Hércules y a otro apuntado a Andrómeda.

³ 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 (Greene, “El tejido del cosmos”, pp. 532-535).

⁴ 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 fonones.

3. Los fotones que llegan a un telescopio profesional que está apuntado a Gliese (una estrella con un planeta terrestre), a otros apuntando a galaxias de los cúmulos de Virgo y Coma, o a galaxias o cuántares todavía más lejanos.

Los datos necesarios se dan en la siguiente tabla. Hay que tener en cuenta que un año luz es la distancia que recorre la luz en un año, a 300.000 km/s.

Luna, nuestro satélite	1'27 segundos-luz
Sol, nuestra estrella	8'33 minutos-luz
Sirio, la estrella más brillante	8'6 años-luz
Gliese, una estrella con un planeta terrestre	20'5 años-luz
Cúmulo globular de Hércules, en nuestra galaxia	25000 años-luz
Andrómeda, la gran galaxia vecina	$2'52 \cdot 10^6$ años-luz
Una galaxia del cúmulo de Virgo	$50 \cdot 10^6$ años-luz
Una galaxia del cúmulo de Coma	$320 \cdot 10^6$ años-luz
Galaxias lejanas detectadas por el Gran Telescopio de Canarias	$12000 \cdot 10^6$ años-luz
El cuántar más lejano, en la Osa Mayor	$13000 \cdot 10^6$ años-luz

Comentarios didácticos

La actividad es útil para la comprensión del *segundo-luz*, del *minuto-luz* y del *año-luz* como unidades de distancia y sus equivalentes en km. Junto con la siguiente actividad, sirven para establecer órdenes de magnitud de distancias en el Sistema Solar, la Vía Láctea y en el universo observable.

Actividad 3: El ti vivo Tierra

Vivimos sobre la Tierra sin ser del todo conscientes de que supone vivir montados en un caballito de un ti vivo de dimensiones astronómicas que nos da una vuelta gratis alrededor del Sol (del que dista 150 millones de km) cada año. Contamos nuestras edades en años sin ser del todo conscientes que ese es el número de vueltas que llevamos dadas en nuestras vidas en torno a nuestra estrella. El Sol, a su vez, rota con la galaxia dando una vuelta alrededor de su centro (del que dista 26000 años-luz) cada 250 millones de años.



Fig. 3 y 4 Imágenes tomadas de la lección sobre relatividad de la página Cosmoeduca del IAC.

1. Calcular en km/s la velocidad de la Tierra en su giro alrededor del Sol y la del Sol en su giro alrededor de la galaxia. Compararlas con la velocidad de la luz.
2. Calcular los kilómetros recorridos por una persona a lo largo de su vida a bordo del planeta Tierra. (Hacerlo sumando la distancia recorrida girando alrededor del Sol con la recorrida por el Sol girando alrededor de la galaxia).

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.⁵

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.⁶

Actividades

Actividad 4: Los años luz

Italo Calvino, en “Las cosmicómicas”, narra experiencias de Qfwfq, personaje que nació con el universo y tiene su edad: unos catorce mil millones de años. Se

⁵ 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.

⁶ Harrison, Cosmology, pp. 440 y 447.

entiende que le hayan podido ocurrir multitud de peripecias. Ha tenido tiempo de tener noticias de galaxias alejadas de él millones de años-luz. En el relato titulado "Los años luz" Calvino cuenta una experiencia inquietante de Qfwfq, relativa a un intercambio de mensajes con seres muy distantes, algo imposible para nosotros, limitados a una vida abrumadoramente corta en relación con los tiempos precisos para comunicaciones con seres de otras galaxias. Se propone leer el texto y luego hacer el trabajo que se explica al final.

"Una noche observaba el cielo con mi telescopio. Desde una galaxia situada a cien millones de años luz de distancia, noté que asomaba un cartel. Decía: TE VI. Hice rápidamente el cálculo: la luz de la galaxia había tardado cien millones de años en alcanzarme, y como desde allí arriba veían lo que sucedía aquí con cien millones de años de retraso, el momento en que me habían visto debía de remontarse a doscientos millones de años.

Aun antes de verificar en mi agenda qué había hecho yo aquel día, me asaltó un presentimiento espeluznante: justo doscientos millones de años antes, ni un día más ni uno menos, me había sucedido algo que siempre he tratado de ocultar. [...] Pensé en responder de inmediato yo también con un cartel [...] y después esperar el tiempo necesario para que desde allí vieran mi letrero y el tiempo igualmente largo para que yo viese la respuesta de ellos y pudiera proceder a las debidas rectificaciones. En conjunto se hubieran necesitado otros doscientos millones de años e incluso algunos millones más, porque mientras las imágenes iban y venían a la velocidad de la luz, las galaxias seguían alejándose entre sí y ahora aquella ya no estaba donde yo la veía, sino un poco más allá, y la imagen de mi cartel debía correrle detrás. En fin era un sistema lento que me hubiera obligado a discutir de nuevo, más de cuatrocientos millones de años después de sucedidos, unos acontecimientos que hubiese querido hacer olvidar en el tiempo más breve posible.

La mejor línea de conducta que se me presentaba era hacer como si nada, minimizar el alcance de lo que podían haber llegado a saber. Por eso me apresuré a poner bien a la vista un cartel que decía simplemente ¿Y QUÉ HAY CON ESO? [...] La distancia que nos separaba (la galaxia había zarpado de su muelle de cien millones de años luz hacía un millón de siglos, internándose en la oscuridad) haría quizás menos evidente que mi ¿Y QUÉ HAY CON ESO? replicaba al TE VI de doscientos millones de años atrás, pero no me pareció oportuno incluir en el cartel referencias más explícitas, porque si la memoria de aquella jornada, pasados tres millones de siglos, se había ido oscureciendo, no quería ser justamente yo quien la refrescara.

[..]Vosotros diréis que bien podía importarme un rábano lo que pensarán de mí algunos habitantes desconocidos de una constelación aislada. En realidad lo que me preocupaba no era la opinión limitada al ámbito de este o aquel cuerpo celeste, sino la sospecha de que las consecuencias de haber sido visto por ellos podrían haber sido ilimitadas. [...]

En este estado de ánimo seguía mirando en trono todas las noches con el telescopio. Y al cabo de dos noches me di cuenta de que también en una galaxia situada a cien millones de años y un día luz habían puesto el cartel TE VI. No cabía duda de que también ellos se referían a aquella vez: lo que siempre había tratado de esconder había sido descubierto no desde un cuerpo celeste solamente, sino

también desde otro, situado en una zona completamente distinta del espacio. Y desde otros más: las noches siguientes continué viendo nuevos carteles con el TE VI que se alzaban en nuevas constelaciones. Calculando los años luz resultaba que la vez que me habían visto era siempre la misma. [...]

Era como si en el espacio que contenía todas las galaxias la imagen de lo que había hecho aquel día se proyectara en el interior de una esfera que se dilataba continuamente a la velocidad de la luz: los observadores de los cuerpos celestes que iban entrando en el radio de la esfera estaban en condiciones de ver lo que había sucedido." (Italo Calvino, "Las cósmicas", pp. 155-160)

Trabajo sobre el texto

1. Calcular la distancia a la primera galaxia que colgó el cartel TE VÍ en km y en parsec. (Tener en cuenta que un año luz es la distancia que recorre la luz en un año, a 300.000 km/s, y un parsec es una distancia igual a 3'26 años luz).
2. Representar en viñetas sucesivas:
 - Lo que hizo Qfwfq y había tratado de ocultar.
 - El momento en que en la primera galaxia cuelgan el cartel de TE VÍ.
 - El momento en que Qfwfq ve ese cartel.
 - El momento en que pone el cartel ¿Y QUÉ HAY CON ESO?
 - Los momentos en que las siguientes galaxias cuelgan el cartel TE VÍ.
 - La esfera en que se extiende la imagen de lo que Qfwfq hizo y quiso ocultar.
3. Poner fecha a cada una de esas viñetas.
4. Explicar el párrafo final.
5. Hacer un comentario personal sobre el texto.
6. Escribir un final para las tribulaciones de Qfwfq.

Comentarios didácticos

Se muestra a continuación un ejemplo del tipo de trabajo que presentan alumnos de 4º ESO.

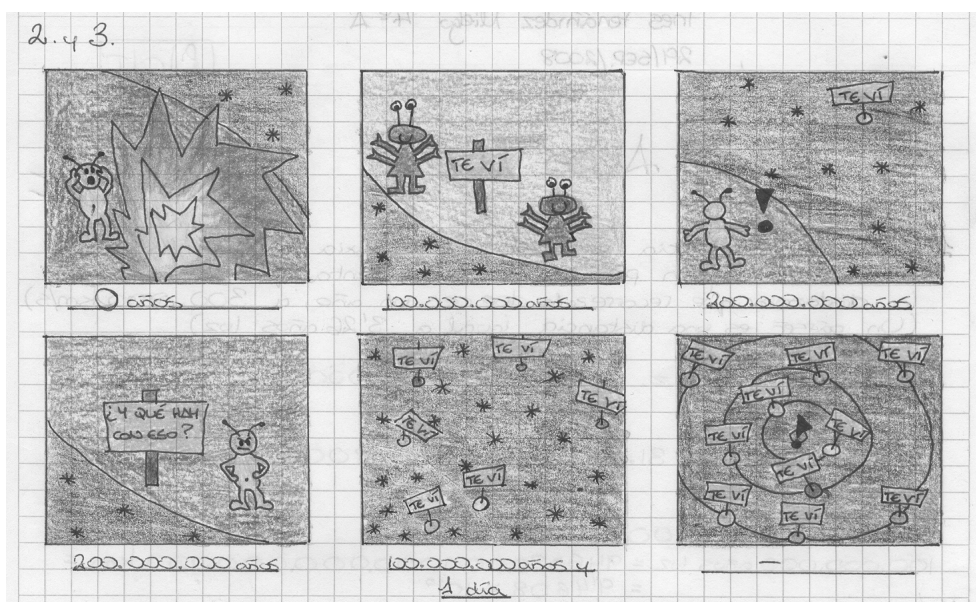


Fig. 5: Ejemplo de trabajo de alumnos.

Actividad 6: Palomas mensajeras

Felipe III heredó de su padre, Felipe II, los títulos de Rey de España y de Portugal. Los imperios coloniales de las dos naciones, territorios de todo el planeta, quedaban bajo su administración. Durante su reinado se publicó el Quijote, en 1605 la primera parte y en 1615 la segunda.

Supongamos que, previendo la importancia futura de la novela, ordenara que el día 1 de enero de 1616 empezara, en capitales de todo el imperio, la grabación mural en piedra del primer párrafo del Quijote que, como bien es sabido, dice así:

"En un lugar de la Mancha, de cuyo nombre no quiero acordarme, no ha mucho tiempo que vivía un hidalgo de los de lanza en astillero, adarga antigua, rocín flaco y galgo corredor. Una olla de algo más vaca que carnero, salpicón las más noches, duelos y quebrantos los sábados, lantejas los viernes, algún palomino de añadidura los domingos, consumían las tres partes de su hacienda. El resto della concluían sayo de velarte, calzas de velludo para las fiestas con sus pantuflos de lo mismo, y los días de entre semana se honraba con su vellorí de lo más fino. Tenía en su casa una ama que pasaba de los cuarenta, y una sobrina que no llegaba a los veinte, y un mozo de campo y plaza, que así ensillaba el rocín como tomaba la podadera. Frisaba la edad de nuestro hidalgo con los cincuenta años; era de complexión recia, seco de carnes, enjuto de rostro, gran madrugador y amigo de la caza. Quieren decir que tenía el sobrenombre de Quijada o Quesada (que en esto hay alguna diferencia en los autores que deste caso escriben), aunque por conjeturas verosímiles se deja entender que se llamaba Quejana; pero esto importa poco a nuestro cuento: basta que en la narración dél no se salga un punto de la verdad." (Miguel de Cervantes, "El ingenioso hidalgo Don Quijote de la Mancha")

Supongamos también que, para controlar el trabajo, ordenara que cada mañana, desde cada capital, le fueran enviadas palomas mensajeras que llevaran en su pata un papelito en el que un notario del reino hubiera escrito todo lo esculpido hasta ese día.

1. Escribir los mensajes que el Rey hubiera recibido en su corte de El Escorial la mañana del día 12 de enero de 1616, procedentes de Valencia (distante 380 km), Nápoles (a 1650 km), Cabo Verde (a 3230 km), La Habana (a 7400 km), Perú (a 9300 km), Buenos Aires (a 10000 km) y Filipinas (a 11800 km). Suponer que cada día se esculpían 10 letras y que las palomas viajaban a una media de 30 km/h.
2. Calcular las distancias a Valencia, Nápoles, Cabo Verde, La Habana, Perú, Buenos Aires y Filipinas en días-paloma.

Comentarios didácticos

Con los datos supuestos, el día señalado no se habría recibido todavía noticia (paloma) alguna de Buenos Aires y Filipinas. Puede aprovecharse para discutir la idea de "imperio observable" en una fecha dada y para calcular la velocidad a la que se extendía el "imperio observable" y la distancia que se extendía cada día.

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.⁷ 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. 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).

⁷ 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.

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.⁸

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.⁹

Actividades

Actividad 7: Evolución de sistemas en *desequilibrio*

La siguiente tira de imágenes representa estados sucesivos de dos depósitos de agua conectados por un tubo que los une por el fondo. El agua pasa de uno a otro. Se aprovecha el paso de agua para mover una "miniturbina".



Fig. 6: Estados sucesivos de depósitos de agua.

La siguiente tira representa estados sucesivos de una enorme caja imaginaria, aislada, que tuviera una estrella dentro. En la viñeta inicial, la temperatura de la estrella es 6000 K y la de la caja 100 K.



Fig. 6: Estados sucesivos de una caja con una estrella dentro.

⁸ La oscuridad de la noche es una evidencia. Pero la pregunta "¿por qué es oscura la noche?" no tiene una respuesta evidente y ha ocupado a diversos pensadores a lo largo de la historia de la astronomía. Bondi, ya en el siglo XX, llamó "Paradoja de Olbers" a las reflexiones sobre esa cuestión. Desde entonces es un tema frecuente en trabajos de cosmología de muy distintos niveles. "Darkness at night", de Harrison es un trabajo de referencia. Más detalles en Tomé, "La paradoja de Olbers".

⁹ Se puede ver desarrollada esta idea en Tomé, "Universo y vida", www.cosmologica.amonaria.com.

Se propone completar las viñetas que faltan en las dos tiras. En la primera, dibujando niveles de agua en los depósitos. En la segunda, dando valores a la temperatura de la caja. (Se sugiere pensar primero en el estado final y luego completar las dos viñetas intermedias).

Actividad 8: Evolución de sistemas en desequilibrio en expansión

Repetir la actividad 7 con estas dos tiras. Ahora, el depósito de la derecha es cada vez más grande. La caja que calienta la estrella también se expande.

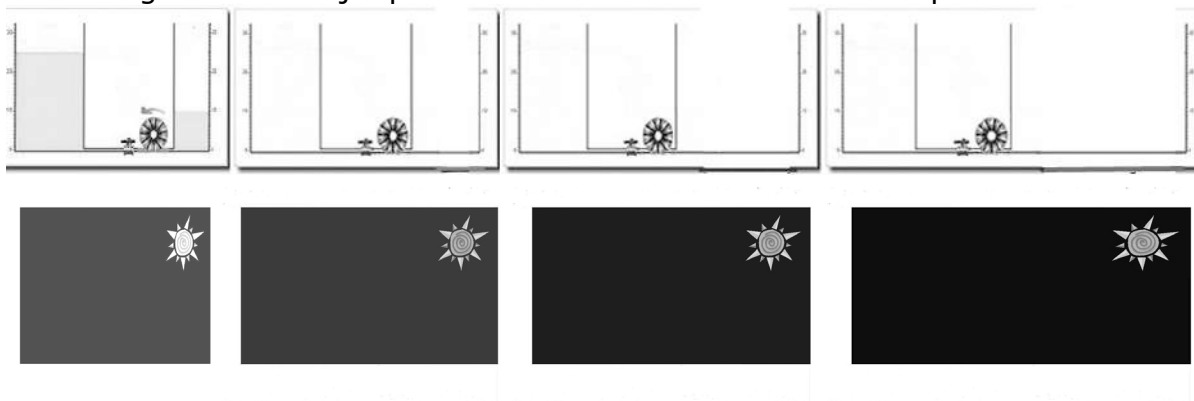


Fig. 7 y 8: Tiras para repetir la actividad 7.

Comentarios didácticos

Se pretende ilustrar la idea de que la temperatura (como “nivel de energía” en analogía con el nivel de agua) es la magnitud que determina el equilibrio termodinámico, independientemente del tamaño de los sistemas. Cuando el recipiente final se expande, el equilibrio puede no alcanzarse. Al trasladar la analogía al universo (las estrellas serían el depósito con nivel más alto y el universo sería el recipiente con nivel más bajo), el problema que surge es que no hay en el universo nada parecido a paredes de recipientes. Los alumnos no ven manera de que el “nivel” (de lo que sea) suba o baje en algo ilimitado.



Fig. 9 y 10: Figuras para ilustrar los comentarios didácticos.

El mejor modo de razonar para salvar esta objeción es mostrar que se podría considerar el universo dividido en cajas, tan grandes como se quiera, razonar sobre lo que sucedería en una caja, mostrar que todas las cajas serían equivalentes y luego, mentalmente, quitar las paredes de las cajas.¹⁰

Las “miniturbinas” sirven para poner la base de una idea general muy interesante: que siempre que exista un desequilibrio (sea del nivel del agua, sea de temperatura o de cualquier otro tipo), la evolución del sistema puede poner en marcha procesos que aprovechan los flujos de materia o de energía que se producen al avanzar hacia el equilibrio. Si hubiera una fuente de materia (un grifo por ejemplo alimentando el

¹⁰ Idea desarrollada en Harrison, “Darkness at night”, pp. 197-203.

recipiente grande) o de energía (reacciones nucleares en el caso de las estrellas) el desequilibrio podría mantenerse y los procesos continuar. La idea es importante porque el planeta Tierra es un sistema así. El flujo de energía solar, posible por el desequilibrio termodinámico entre Sol y universo (la temperatura externa del Sol es 5800 K y la del universo es 2'7 K), mantiene todos los procesos de la vida en la Tierra.¹¹

Actividad 9: Alentar para calentarse, soplar para enfriarse

1. Comprobar que cuando se expulsa aire con la boca abierta el aire sale caliente, debido a la temperatura corporal. En cambio, si se sopla, es decir, si se mantiene la boca hinchada con aire comprimido dentro y se deja escapar por un hueco pequeño formado por los labios, sale frío.
2. Comprobar que si se deja salir durante un tiempo el gas comprimido en un recipiente metálico (cualquier insecticida de spray por ejemplo) el enfriamiento del recipiente es notable.
3. Explicar ambos hechos en términos de enfriamiento por expansión.

Comentarios didácticos

Esta actividad es importante para argumentar que la expansión ha sido la causa del enfriamiento. El enfriamiento hizo posible la formación de estructuras como las estrellas conduciendo al estado de desequilibrio termodinámico actual, que pone en marcha "miniturbinas" como las de la vida en la Tierra. Expansión, noches estrelladas y vida quedan así conectadas.

Actividad 10: Estrellas calientes pero universo frío

Las estrellas emiten al universo enormes cantidades de energía y hay innumerables estrellas en el universo. Sin embargo, la temperatura del universo es 2'7 K, esto es, sólo 2'7 grados por encima del cero absoluto, -270'3 grados centígrados.¹² Hay tres explicaciones lógicas posibles para este hecho experimental:

1. La energía que emiten las estrellas es mucha pero hay muy pocas en relación con el tamaño del universo y lo calientan muy poco, muy lentamente.
2. No ha pasado tiempo suficiente para calentarlo más.
3. El universo se está expandiendo y las estrellas no dan abasto para calentarlo.

Decir razonadamente cuál de estas tres explicaciones es compatible con el modelo Big Bang, que describe un universo caliente en su estado inicial y que luego se va enfriando.

Actividad 11: Predecir el futuro

Razonar sobre la evolución de la temperatura del universo en el futuro,

1. Suponiendo que en este momento cesara su expansión.
2. Aceptando, como se deduce de distintas observaciones, que seguirá expandiéndose y que, además, lo hará cada vez más deprisa.

¹¹ Schneider y Sagan, "Termodinámica de la vida", pp. 111-113, 209.

¹² 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.

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.

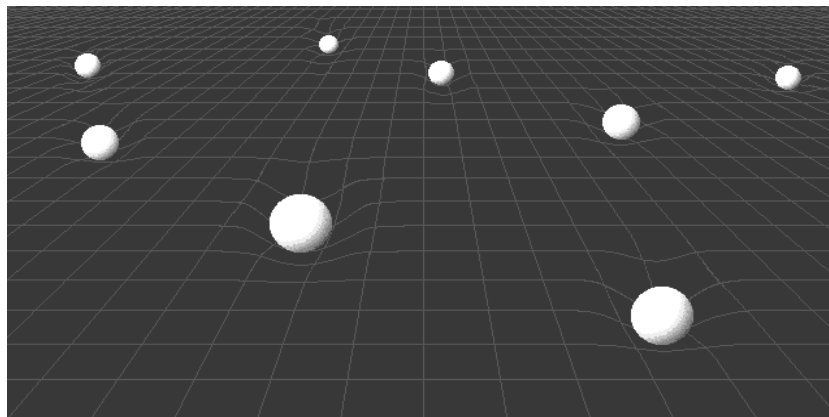


Fig. 11: Ilustración para mostrar el “estiramiento del espacio” tomada de www.atlasoftheuniverse.com

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*.¹³

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 considere¹⁴. 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 cuál sea la posición que ocupan en él¹⁵.

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 prisa 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 de prisa que las cercanas" pero no lo es tanto decir que "las galaxias lejanas se muevan más de prisa 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

¹³ 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.

¹⁴ 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.

¹⁵ En este contexto significa que observadores en distintas galaxias deben percibir lo mismo como efecto de la expansión.

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.”

Actividades

Actividad 12: Entender la expansión como estiramiento del espacio

Esta actividad reúne textos y analogías 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.

Analogía del “pastel de pasas”

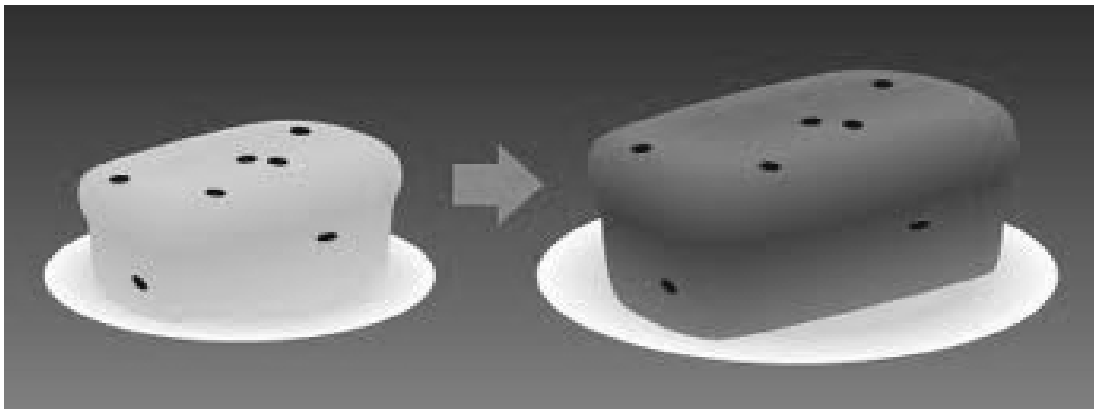


Fig. 12: Pastel de pasas tomado de www.physics.hku.hk/~nature/CD/regular_e/lectures/chap19.html

".. 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 el 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." (Cayetano López, "Universo sin fin", p. 160).

Analogía del “globo que se hincha”

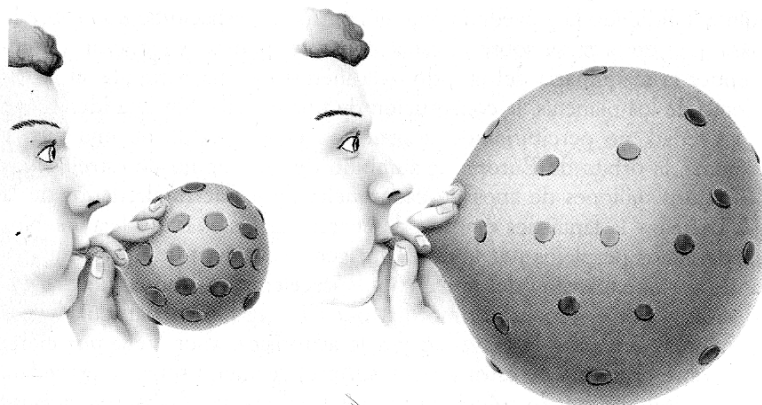


Fig. 13: Globo que se hincha tomado de Wheeler, Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo, p 242

"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 [...].

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" (Wheeler, Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo, pp. 241-242).

Comentarios didácticos

El uso de analogías jugó un papel importante en el establecimiento y difusión del paradigma de la expansión como estiramiento del espacio. Ahora lo sigue jugando en la divulgación y la didáctica de la expansión. Pero todas las analogías tienen inconvenientes que conviene conocer para evitar la transmisión de ideas erróneas.

La analogía de la red elástica representa un universo bidimensional plano que se puede imaginar infinito. En rigor, las galaxias representadas en la red deberían ser objetos planos, monedas por ejemplo, como en la analogía del globo. No puede haber objetos tridimensionales en universos bidimensionales.

La del “pastel de pasas” es tridimensional, como nuestro espacio, pero se refiere a un sistema limitado, lo que no casa en absoluto con el universo. Los modelos teóricos de universo nunca tienen fronteras. Son autocontenidos, bien porque sean infinitos o porque sean finitos pero curvados sobre sí mismos, de forma que no tengan límites, que se puedan recorrer sin encontrar bordes, sin salirse de ellos.

La analogía del globo que se hincha es la más conocida de todas. Es original de Eddington, que la propuso en 1931 por primera vez. Representa un universo bidimensional, estrictamente la superficie del globo, no su interior ni su exterior. Todo lo que no es esa superficie no existe, o mejor, no es realidad física. En esa representación el universo tiene dos dimensiones y es curvo, finito e ilimitado. 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.

Actividad 13: Películas del Big Bang y la expansión.

En esta actividad se presentan dos películas imaginarias representativas de dos concepciones distintas sobre el Big Bang y la expansión del universo. Se trata de verlas, leer sus guiones y elegir razonadamente la que corresponda a la concepción científica.

La película del Big Bang como explosión del espacio

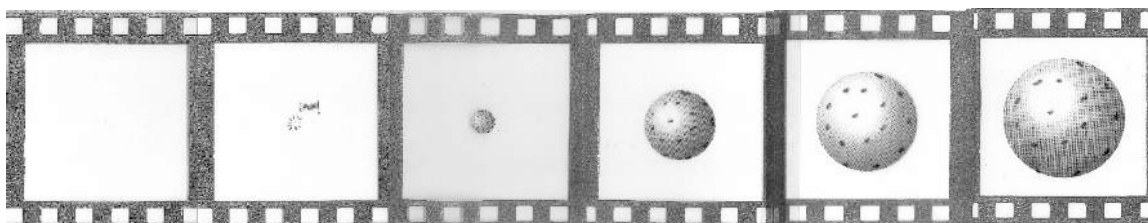


Fig. 14: Película del Big Bang.

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 del Big Bang como explosión de materia

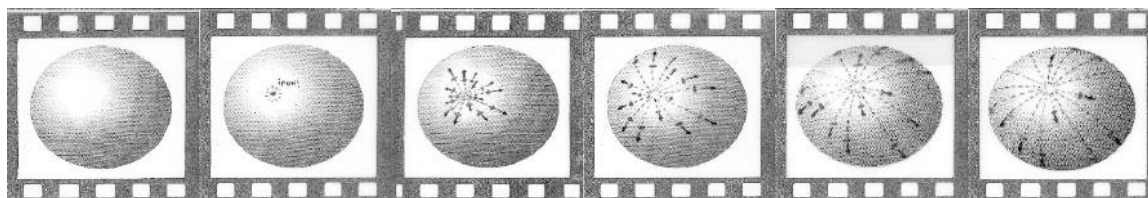


Fig. 15: Película del Big Bang como explosión de materia.

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.

Comentarios didácticos

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, son las claves para preferir la primera película. La existencia y las propiedades (uniformidad, isotropía, espectro de cuerpo negro) de la radiación cósmica de fondo (Actividad 18) también permite elegir: ninguna explosión localizada podría producir una radiación que llenara el universo como lo llena esa.

Aunque la idea de expansión como estiramiento del espacio está actualmente bien asentada, todavía se encuentran publicaciones y textos que interpretan la expansión como movimiento de alejamiento mutuo de galaxias lanzadas a través del espacio por una "gran explosión" inicial, como chispas luminosas de fuegos artificiales. El mismo nombre "Big Bang" puede contribuir a la persistencia de la idea errónea de que fue una gran explosión que ocurrió en algún lugar de un espacio vacío y que los productos de la explosión se expandieron por ese espacio.¹⁶ Las películas propuestas sirven para distinguir entre "explosión del espacio" y "explosión en el espacio". Esa es su utilidad.

Pero es importante señalar que la película correcta describe la evolución, desde el estado Big Bang, de un universo bidimensional finito e ilimitado, la superficie de una esfera, como en la analogía del globo que se hincha. En ese caso, el estado Big Bang sería finito, de extensión tan pequeña como se quiera. Pero si el universo es espacialmente infinito, como sugieren los datos actuales, ya había una extensión infinita en el estado Big Bang. Como en el universo finito, la "explosión" sería de todo el universo. Pero, en este caso, se trataría de una "explosión" que tuvo lugar en todos los puntos de una extensión infinita, idea muy lejana a la de un punto que concentraba toda la materia y que explotó.¹⁷ Entender el Big Bang como un estado descrito por sus propiedades internas es clave para no incurrir en errores sobre él.

Precisamente, el principal inconveniente de las dos películas (y de las analogías de la actividad anterior) es que presentan el universo visto "desde fuera", lo que está bien para los dioses de esos universos pero no para sus habitantes, sobre todo si son científicos. Esta es una cuestión muy importante en cosmología: no se puede salir del universo y es obligado razonar sobre él desde dentro. Al presentar cualquier analogía debe hacerse constar esto si se quiere evitar que alguien piense que nuestro universo se expande en un espacio exterior a él, ajeno a él, inaccesible pero existente, un espacio como el del horno donde se expanden el pastel de pasas, como el de la habitación donde se hincha el globo o se estira la red elástica o como el del estudio de cine donde se grabaron las películas.

¹⁶ Mc Vittie, en Distance and large redshift, pp. 260-261.

¹⁷ Greene, El tejido del cosmos, pp. 317-321.

No se puede salir del universo. La evolución del universo solo puede “verse” desde dentro. Si hubiera habido observadores en todas las épocas de esa evolución, la película posible sería una sucesión de estados cada vez más fríos, cada vez más oscuros, cada vez menos densos, con presencia de objetos calientes. Desde dentro, la película sería algo así:

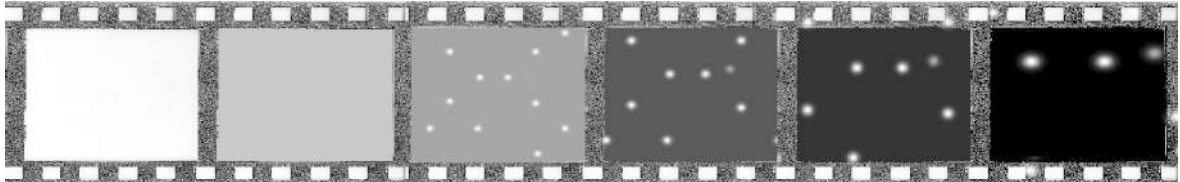


Fig. 16: Película sobre la evolución del universo.

Del fotograma inicial, el que corresponde al Big Bang, solo podría decirse que era un estado de densidad y temperatura singulares, un estado borroso porque, con el conocimiento físico actual, no queda perfectamente definido. Eso sí, ese fotograma y esta película valdrían para estado Big Bang finito o infinito, para universo finito o infinito.

Actividad 14: “Cómo ver la expansión en la mesa de trabajo”

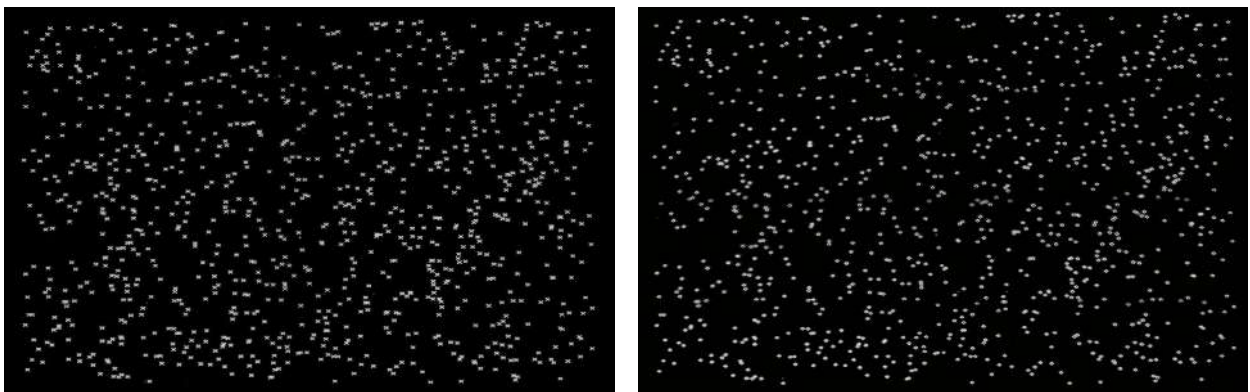


Fig. 17 y 18: Vincent Van Icke, “The physical universe: space, time and matter”.

Las dos figuras anteriores serían representaciones planas de un universo en dos momentos sucesivos de su expansión. Muestran una misma distribución de galaxias. Las dos figuras son exactamente iguales, excepto por un pequeño cambio en la escala: la segunda es una fotocopia de la primera ampliando al 105%.

Se trata ahora de *jugar* con esas imágenes, superponiéndolas para tener una imagen de la evolución de ese universo. 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.

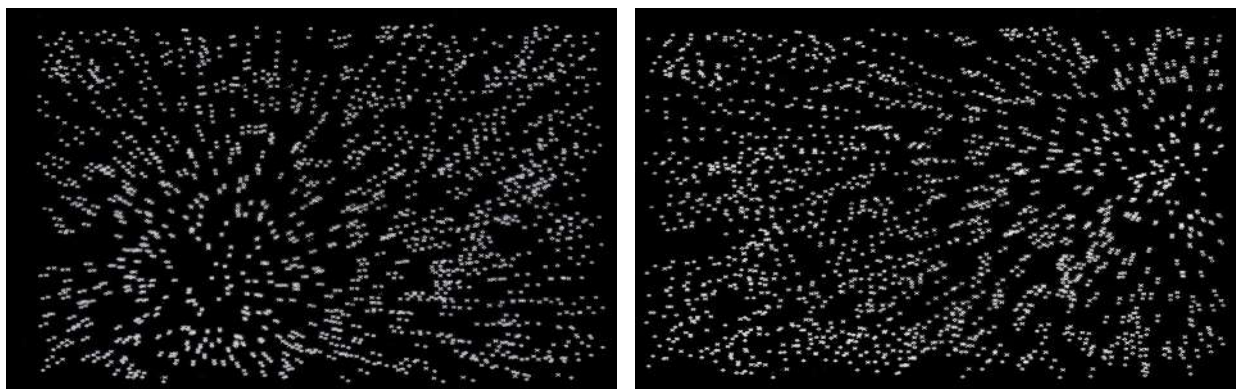


Fig. 19 y 20: Imágenes superpuestas.

Comentarios didácticos

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. Cualquiera que sea la galaxia que se tome como centro de la superposición el resultado es el mismo. Fascina comprobarlo porque hace evidente que no existe 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.

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 que los alumnos puedan manipular las superposiciones para que tengan el placer de ver el efecto que se produce.¹⁸ En <http://www.exploratorium.edu/hubble/tools/center.html> un applet en flash permite jugar en la pantalla del ordenador con imágenes similares.

Actividad 15: La relación velocidad-distancia en un *universo de papel*

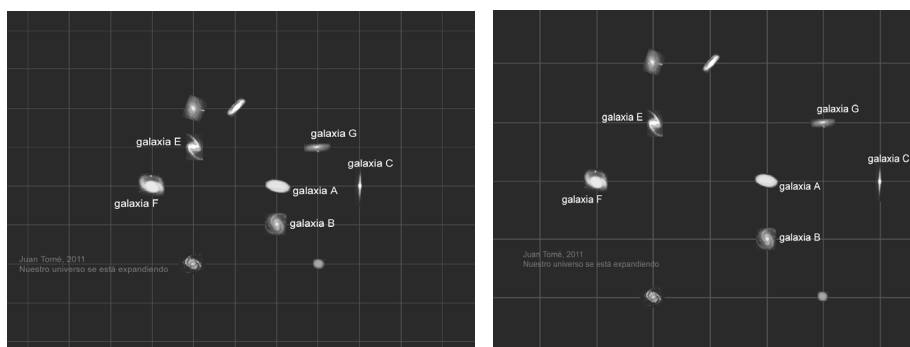


Fig. 21 y 22: Universo de papel en dos momentos de su expansión.

Estas figuras representan un universo de dos dimensiones plano, *universo de papel*, visto “desde fuera”. Se muestra la misma distribución de galaxias en dos momentos distintos. Debe entenderse que la distribución de galaxias se extiende fuera de los

¹⁸ Para recibir las figuras preparadas, en tamaño A4, solicitar a Juan Tomé, casa@amonaria.com.

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 ese universo.

Trabajo que se propone

Si se superponen las dos imágenes, haciendo coincidir por ejemplo la galaxia E, aparecen claramente los desplazamientos del resto respecto de ella. La galaxia E sería la galaxia del observador que va a estudiar la expansión.

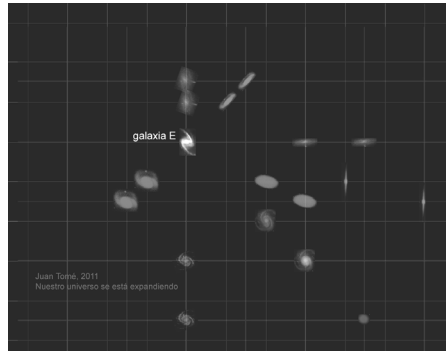


Fig. 23: Imágenes superpuestas.

Pues bien, basta ahora una regla para construir una tabla con los valores de las coordenadas de distintas galaxias (que son las mismas en t_1 y en t_2) y con los valores de D (distintos en t_1 y en t_2) "medidos" para distintas galaxias, a partir de los cuales se puede establecer la relación velocidad-distancia y mostrar sus consecuencias.

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

Fig. 24: Para resumir los resultados de la actividad".

Comentarios didácticos

1. Las cuatro primeras filas de la tabla dejan claro que las galaxias no cambian de posición en el retículo de coordenadas pero sus distancias cambian por el cambio de escala, por el estiramiento del espacio.

2. El aumento de distancia (fila 5ª de la tabla), resultará proporcional a la distancia, cosa que está en la base de la relación *velocidad-distancia*.

3. El aumento unitario de distancia (fila 6ª), resultará igual para todas las galaxias, reflejando el hecho de que la expansión por cambio de escala es uniforme.

4. La velocidad de aumento de la distancia (la velocidad de alejamiento) para cada galaxia (fila 7ª) se calcula tomando un valor cualquiera para el intervalo temporal que separa las dos imágenes superpuestas (un intervalo de decenas de segundos es apropiado para un *universo de papel*). Resultará proporcional a la distancia.

5. La velocidad unitaria de aumento de distancias (fila 8ª), medida en cm/s por cada cm de distancia, resultará igual para todas las galaxias, y es **H**, la llamada *constante de Hubble*, de ese *universo de papel* para el tiempo t_1 . Si se representan los valores de V_{AD} frente a **D**, resultará una recta. Su pendiente será la misma constante de Hubble calculada en esta fila.¹⁹

Para nuestro universo real, el valor de la constante de Hubble es, con los datos actuales, próximo a 70 (km/s)/Mpc. Esto quiere decir que al ritmo de expansión actual, una distancia de 1 Mpc, esto es 10^6 pc ó $3'08 \cdot 10^{19}$ km, aumenta 70 km en un segundo, muy poco en relación con esa distancia.

6. La edad del *universo de papel* (fila 9ª), es el cociente entre la distancia "actual" y el ritmo de incremento de distancias, que da el tiempo que tardó en alcanzarse la distancia actual entre dos galaxias cualesquiera partiendo de un estado en que las galaxias (todas) estuvieran a distancia cero. Es decir, el tiempo que tardó en alcanzarse la escala actual desde un estado de escala cero (estado Big Bang). Como era de esperar, resulta independiente de la distancia elegida para calcularlo. Por otra parte, a partir de las relaciones que se dan en la tabla, es fácil probar que es el inverso de la constante de Hubble.

Para nuestro universo, con el valor de la constante de Hubble de 70 (km/s)/Mpc, se obtienen 14000 millones de años para su edad.²⁰

¹⁹ En general, salvo para universos en expansión exponencial, en cada momento de la historia de un universo en expansión la constante de Hubble toma un valor distinto, que es igual para todos los puntos del universo en ese momento. La constante de Hubble toma su nombre de Edwin Hubble, que formuló en 1929 la relación en la que aparece.

²⁰ Se trata de una estimación basada en la simplificación de ritmo de expansión constante. En nuestro universo real, el ritmo de expansión decreció con el tiempo, por efecto de la gravitación. Las evidencias experimentales actuales muestran que ahora la expansión es acelerada, por algún tipo de causa cosmológica con efecto opuesto al de la gravitación. Pero las variaciones del ritmo no son grandes y la aproximación de ritmo constante es buena si se toman intervalos temporales "pequeños" respecto del "ahora". Este no es el caso de la estimación de la edad del universo y el cálculo debe ser corregido teniendo en cuenta otros parámetros del modelo.

7. 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.

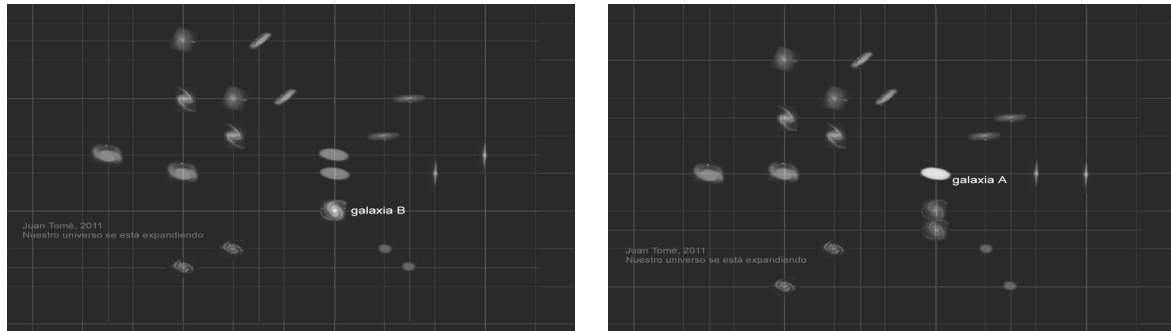


Fig. 25 y 26: Superposiciones centradas en diferentes galaxias.

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_{AD} frente a D . Se hace así evidente la equivalencia de todos los observadores, la no existencia de un centro o un origen de la expansión.

8. No debe confundirse la relación teórica *velocidad-distancia* con la Ley de Hubble, que establece la relación *desplazamiento al rojo-distancia* y que se explica en el siguiente capítulo.²¹ La relación velocidad-distancia es una relación teórica de proporcionalidad que no tiene límites de validez porque es una consecuencia lógica del carácter uniforme que se supone para la expansión. La Ley de Hubble es una relación observacional entre dos magnitudes medibles, el *desplazamiento al rojo* y la distancia, que resultan ser proporcionales solo para distancias pequeñas desde el punto de vista cosmológico. Por eso debe quedar bien claro que la actividad sirve para establecer la relación teórica *velocidad-distancia* en universos en expansión uniforme, no la Ley de Hubble.²²

Actividad 16: Cuerda elástica luminosa

Una cuerda elástica larga es un modelo unidimensional de universo en expansión. La cuerda elástica permite materializar un estiramiento uniforme, muy difícil de

²¹ Harrison, The redshift-distance and velocity-distance laws, p. 28.

²² La Ley de Hubble es empírica porque establece una relación entre dos magnitudes, z ($z = \Delta\lambda/\lambda$ es la medida del aumento de longitud de onda, del *desplazamiento al rojo*) y D , determinadas por procedimientos experimentales independientes. La medida de z es directa puesto que se obtiene analizando aquí, con un espectrógrafo, la luz que nos llega de una fuente lejana. En cambio, la medida de D no es directa y los problemas se multiplican. Los valores de D se deducen de magnitudes medibles (luminosidad por ejemplo) mediante relaciones teóricas. 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. En todo caso, 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". (Moles, La constante de Hubble, p 18). La Ley de Hubble, que se puede poner $z \cdot c = H \cdot D$, no es una relación válida para todas las distancias sino para valores de $z \ll 1$ o, lo que es equivalente, para distancias pequeñas desde el punto de vista cosmológico (Harrison, The redshift-distance and velocity-distance laws, p 28-29 y 31). Cuando la velocidad de alejamiento entre emisor y receptor no es comparable a la velocidad de la luz, se cumple que $v = zc$ y entonces, $zc = HD$ se puede poner como $v = HD$, siendo este el origen de la confusión entre Ley de Hubble y relación velocidad-distancia.

hacer con objetos bidimensionales, sean planos (redes elásticas por ejemplo) o curvos (superficies de globos que se hinchan).

Trabajo que se propone

Tomar una cuerda elástica de varios metros. En distintas zonas de la cuerda, hacer marcas separadas 10 cm, otras separadas 20, otras separadas 30, todas ellas irregularmente repartidas. En algunas de las marcas, fijar lámparas leds alimentadas por pilas botón. Colocar una de ellas en el centro de la cuerda y otras dos en los extremos. Dos personas sostienen la cuerda por sus extremos.

1. A oscuras, con los leds encendidos, estirar la cuerda desde un extremo con el otro fijo, que juega el papel de *observador*. Se ve que los leds más distantes del *observador*, aumentan su distancia a él más deprisa. Encender la luz y mostrar que los leds siguen estando en sus marcas, que no se han movido respecto de la cuerda. Repetir la experiencia con el otro extremo fijo (el *observador* ahora) y repetirla una vez más estirando desde los dos extremos (*observador* en el led central). Hacer notar que todos los *observadores* son equivalentes.
2. Con la luz encendida y los leds apagados, estirar la cuerda desde un extremo. Se verá que las marcas alejadas del *observador* “se mueven” más deprisa que las cercanas. Pero al medir las distancias entre cualquier par de marcas separadas inicialmente 10 cm se verá que todas son iguales. Aunque unas “se movían” más deprisa que otras, la cuerda se estiraba al mismo ritmo por todas partes. El resultado es el mismo si se tira del otro extremo o de los dos a la vez.
3. Con la luz encendida y los leds apagados, estirar la cuerda desde un extremo. Medir ahora las distancias entre dos marcas cualesquiera separadas inicialmente 10 cm, entre cualesquiera dos separadas inicialmente 20 y entre cualesquiera dos separadas inicialmente 30. A pesar del resultado anterior o, más bien, precisamente por el resultado anterior, los aumentos de distancias serán proporcionales a las distancias iniciales: las separadas 20 habrán aumentado su distancia el doble que las separadas 10 (estén donde estén y “se movieran” como “se movieran”) y las separadas 30 lo habrán hecho el triple.

Comentarios didácticos

La clave de todo es que la goma se estira entera, como un todo, por todas partes por igual. La esencia del estiramiento uniforme del espacio, de la expansión de nuestro universo, es que es una propiedad del conjunto, no de sus partes.

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 se 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.²³ 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

²³ Edwin Hubble, A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae.

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 de 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.

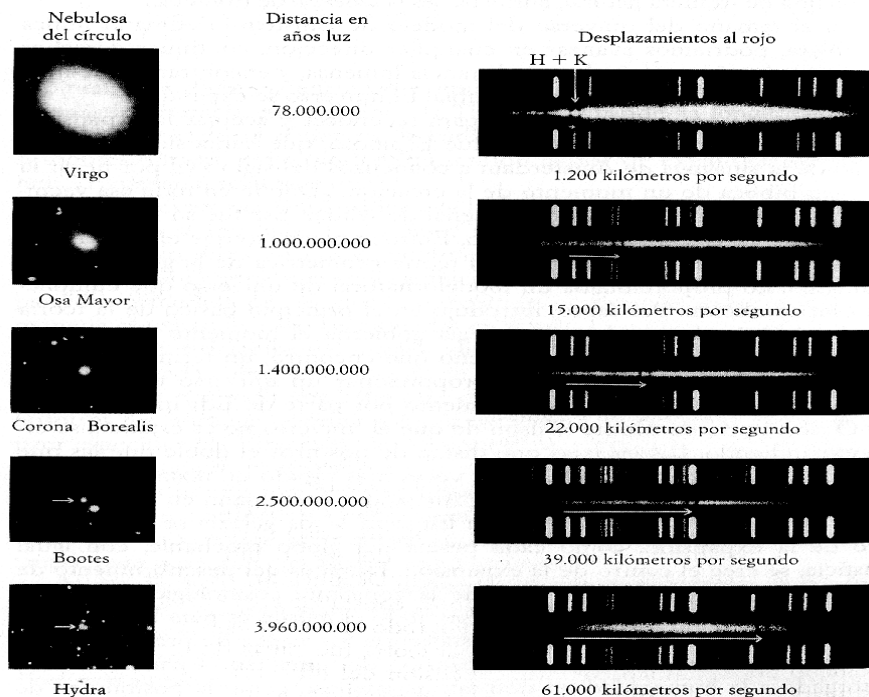


Fig. 27: Relación entre el desplazamiento al rojo y las distancias a nebulosas extra galácticas. Imagen tomada de Wheeler, Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo, p. 244.

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.

Actividades

Actividad 17: Estiramiento de fotones

Esta actividad muestra el fundamento de que el *desplazamiento al rojo* de los fotones dependa de la distancia entre la galaxia emisora y la receptora.

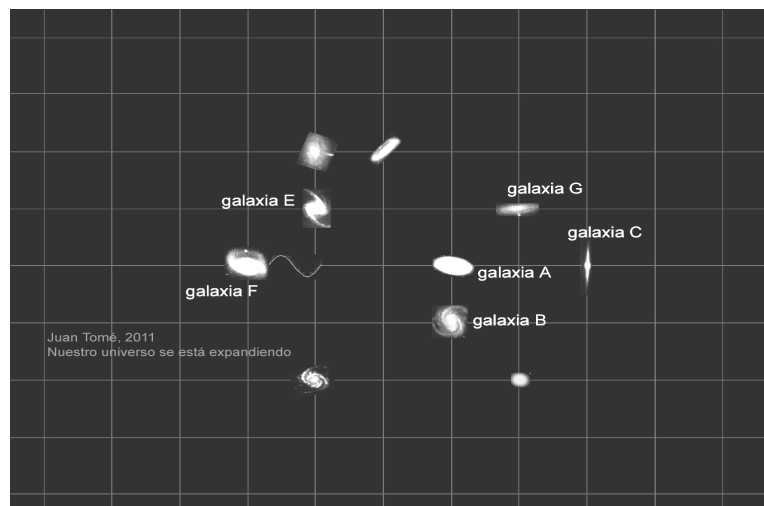


Fig. 28. Primera imagen para realizar esta actividad.

En esta primera imagen (figura 28), se emite un fotón (violeta por ejemplo) en la galaxia F y empieza su viaje hacia la galaxia A.

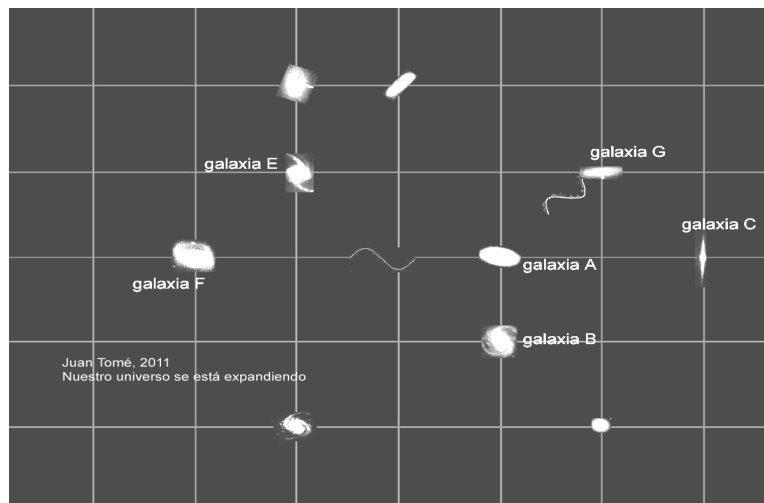


Fig. 29. Segunda imagen para realizar esta actividad.

En la segunda (figura 29), 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.

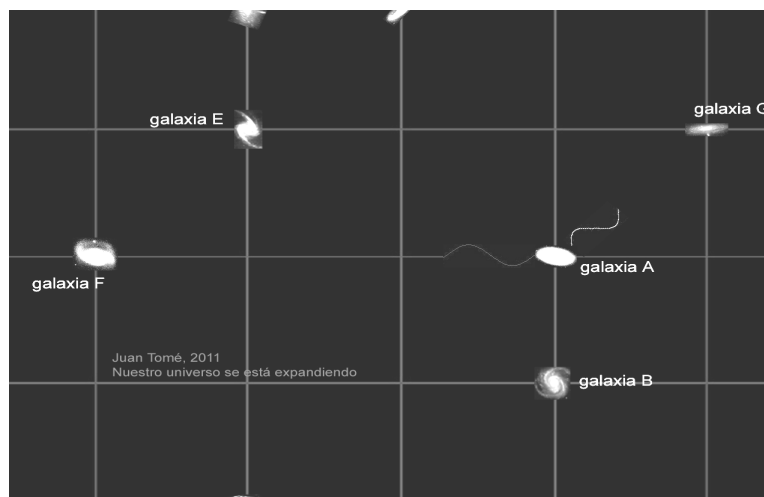


Fig. 30. Tercera imagen para realizar esta actividad.

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.

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.²⁴ La longitud de onda de los fotones cambia con la escala del universo como cualquier otra longitud cosmológica.²⁵

Actividad 18: 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 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 que interaccionan con los fotones mucho menos que las partículas cargadas libres. 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. La CBR

²⁴ Guth, "El universo inflacionario", p. 100.

²⁵ 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 $z \ll 1$. Para ver cómo trabajar sobre esa proporcionalidad cuantitativamente, con modelos de universo en expansión, Tomé, "Taller: Nuestro universo se está expandiendo", en www.cosmologica.amonaria.com

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.²⁶ 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. Los modelos 1 a 5, de la figura 31, representan un universo bidimensional (la superficie esférica representada) en expansión por el que se mueven fotones de la CBR.

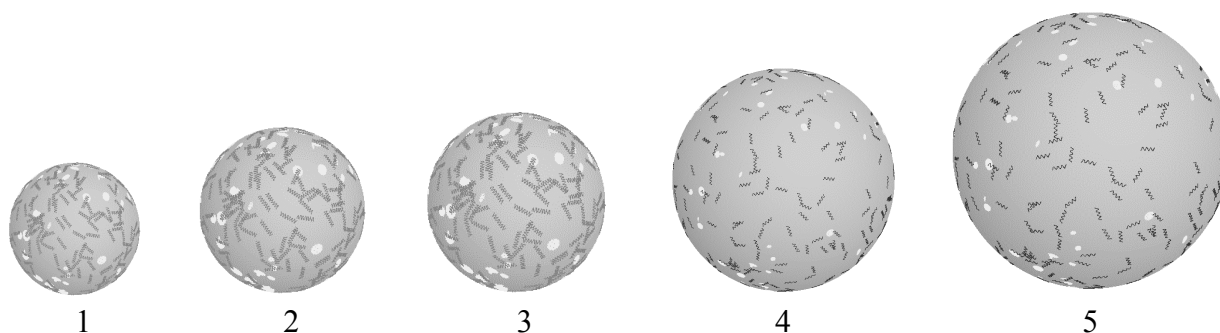


Fig. 31: Universo bidimensional. Imagen de E. Wright en www.astro.ucla.edu/~wright/tiredlit.htm

Trabajo que se propone

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

Comentarios didácticos

Los fotones de la CBR que detectamos ahora 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. 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.²⁷

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.

²⁶ El carácter de radiación de cuerpo negro de la CBR revela que el estado que la originó era de equilibrio termodinámico. Sus inhomogeneidades son las semillas de la estructura a gran escala del universo actual y aportan datos sobre la materia oscura.

²⁷ Todos los fotones emitidos por cualquier objeto del universo son posteriores. Además, son muy pocos en relación con los CBR, mayoría aplastante en el universo. El desplazamiento 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 actual del universo ($T = 2.7$ K). De acuerdo con la definición de z (nota 22) la longitud de onda de los fotones CBR se habría multiplicado por 1101 desde que se *desacoplaron* de la materia.

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*.²⁸ 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.

²⁸ Longair, "La evolución de nuestro universo", pp 138-143

Actividades

Actividad 19: Hijos de las estrellas

D.R. Altschuler, en su libro "Hijos de las Estrellas", trata la nucleosíntesis estelar implicando muy directamente al lector, haciéndole sentirse parte de ese proceso universal. El texto que sigue sintetiza su preludio y de sus dos primeros capítulos.

"Todas las cosas de nuestro mundo, incluidos usted y yo (perdone el apelativo de cosas), lo que comemos y bebemos y la desconcertante variedad de fenómenos que observamos, son la complicada manifestación de un sistema muy simple construido con noventa y dos combinaciones diferentes [los elementos estables de la tabla periódica] de tan sólo tres partículas: neutrones, protones y electrones. Esos elementos (en la mayoría de los casos bastan unos pocos) pueden crear moléculas orgánicas que contienen carbono y son los componentes de todos los seres vivos o de los minerales que forman las rocas. [...] La maravillosa diversidad de fenómenos que observamos surge, con raras pero importantes excepciones, de reacciones químicas entre estos compuestos, los cuales se combinan o dividen para formar otros nuevos. [En] estas reacciones químicas [...] la identidad de los átomos participantes nunca cambia. Sin embargo, las reacciones nucleares alteran la identidad de los átomos participantes, [...] transforman un elemento en otro.

Observe su mano. Se compone de átomos, sobre todo de hidrógeno, carbono y oxígeno, unos átomos que no siempre existieron y que fueron creados por las estrellas. Las estrellas se componen sobre todo de hidrógeno. Una estrella es un enorme caldero en el que [a partir del hidrógeno] se "cocinan" algunos de los elementos de la tabla periódica, proceso que conocemos como nucleosíntesis. [La energía que se libera en el proceso mantiene la temperatura del horno estelar, la cadena de reacciones termonucleares y evita el colapso del centro de la estrella aplastada por el peso de sus capas externas].

Cada segundo que pasa, [la estrella se acerca al agotamiento de su hidrógeno, su combustible]. ¿Qué ocurre entonces cuando una estrella consume todo el hidrógeno disponible en su centro? [...] Tres átomos de helio pueden combinarse para dar lugar a carbono, y este a su vez puede combinarse con otro átomo de helio para producir oxígeno, neón y magnesio. Si la estrella dispone de suficiente masa, puede albergar en su centro temperaturas lo bastante altas para crear elementos más pesados aún (como silicio, níquel y hierro) a partir de reacciones nucleares con carbono y oxígeno, neón y magnesio. [...] [Pero] una vez que la mayoría del material del centro de una estrella masiva se convierte en hierro [...] el astro no puede continuar produciendo energía [mediante reacciones termonucleares]. Ahí estriba la razón de que el hierro sea un elemento especial.

Cuando carece de la fuente de energía que genera la presión interna necesaria para mantener el equilibrio, la estrella se colapsa bajo su propio peso. En un santiamén se forma el infierno. Por un breve instante, mientras la estrella se colapsa, la temperatura aumenta a valores sin precedentes y ocasiona un relámpago de reacciones nucleares. [...] Entonces el astro se aniquila en una explosión titánica dando lugar a uno de los sucesos más energéticos que se conocen en el universo [la explosión supernova]. En unos pocos días, el brillo de la estrella moribunda

aumenta en un factor de 100 millones y la hace visible desde vastas distancias. Durante los primeros segundos de la explosión, los neutrones y protones viajan tan rápido que chocan violentamente con los elementos livianos que fueron producidos en el interior de la estrella a lo largo de su vida, de manera que en un breve instante se fabrican todos los elementos de la tabla periódica más pesados que el hierro, como el oro, el iridio y el platino. Como estos elementos se gestan de esta manera tan especial, existen en una abundancia muchísimo menor que los elementos más livianos. [...] Cada explosión supernova devuelve varias masas solares de material enriquecido con elementos pesados al medio interestelar.

Tal vez ahora aprecie de manera diferente el oro y el platino de sus joyas. Sin duda, se trata de materiales costosos porque son raros y bellos, pero lo que les confiere su verdadero valor es saber que lo que llevamos en la mano se formó hace más de cinco mil millones de años durante la explosión de una estrella gigante en algún rincón de la galaxia.

En un hermoso día de otoño que quizás haya comenzado con un buen café, tómese la tarde libre si tiene tiempo y acuda a un paraje natural lejos del bullicio y las luces de la ciudad, donde tal vez sólo se oiga el ladrido distante de un perro. Encuentre un buen lugar y espere a que la Tierra gire hasta que el Sol se esconda, de manera que la zona del planeta en la que usted se halla se enfrente al sereno resplandor del oscuro cielo nocturno. Entonces contemplará el universo. [...] Póngase cómodo y contemple durante un buen rato el impresionante espectáculo que le brindan las miles de estrellas que lucen en silencio contra el cielo oscuro. [...] Pasado un tiempo se sentirá casi hechizado y experimentará simultáneamente una nostalgia que viene de muy adentro y una gran alegría, ambas relacionadas con una profunda intuición que le dice que está contemplando nuestro origen. Nuestro origen está en las estrellas.” (D.R. Altschuler, “Hijos de las Estrellas”, pp. 9-45)

Trabajo sobre la lectura

1. Recoger palabras o frases del texto cuyo significado se dude o se desconozca.
2. Calcular la masa perdida por el Sol cada segundo sabiendo que su potencia (la energía que emite cada segundo es $4 \cdot 10^{26}$ W. A continuación estimar el tiempo que le queda de vida sabiendo que su masa es $2 \cdot 10^{30}$ kg pero que solo el 10% de ella es hidrógeno cercano al centro y susceptible de ser combustible de las reacciones termonucleares. La masa que se transformará en energía en esas reacciones es el 0,66% (datos de Altschuler, Hijos de estrellas, página 37).
3. Inventar la historia de uno de nuestros átomos de carbono, haciendo verosímil el cómo y dónde se formó y cómo pudo llegar a nuestro cuerpo.
4. Teniendo en cuenta el origen de nuestros átomos, discutir la afirmación: “Mi edad es años”.
5. Formular preguntas que se ocurran tras la lectura.

Clave 8: Nuestro universo tiene historia

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". Pero esa historia no ha sido simple. No ha sido nada parecido a unos fuegos artificiales cósmicos que agotaran en un destello todo el potencial del estado inicial llevándolo directamente al apagado estado final. Al universo le han pasado, y le pasarán todavía, muchas cosas. En particular, se han formados sistemas locales tan interesantes como galaxias, como estrellas, sistemas como la Tierra, del que somos parte. 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 esta "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, 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 lo hicieron posible [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.”

Actividades

Actividad 20: Calendario cósmico

Carl Sagan, en “Dragones del edén”, situó los que consideró hechos principales de la historia del universo, de la evolución biológica en la Tierra y de la humanidad en un “calendario cósmico” que comprime en un año los 13700 millones de años transcurridos desde el Big Bang hasta ahora. Del mes de diciembre se especifican los días para poder colocar hechos relevantes de la evolución biológica. El último minuto del año se amplía también para poder colocar los hitos de la prehistoria y la historia humana, que cabe en esos 60 segundos. Se presenta aquí una versión con imágenes de esa idea de Sagan.

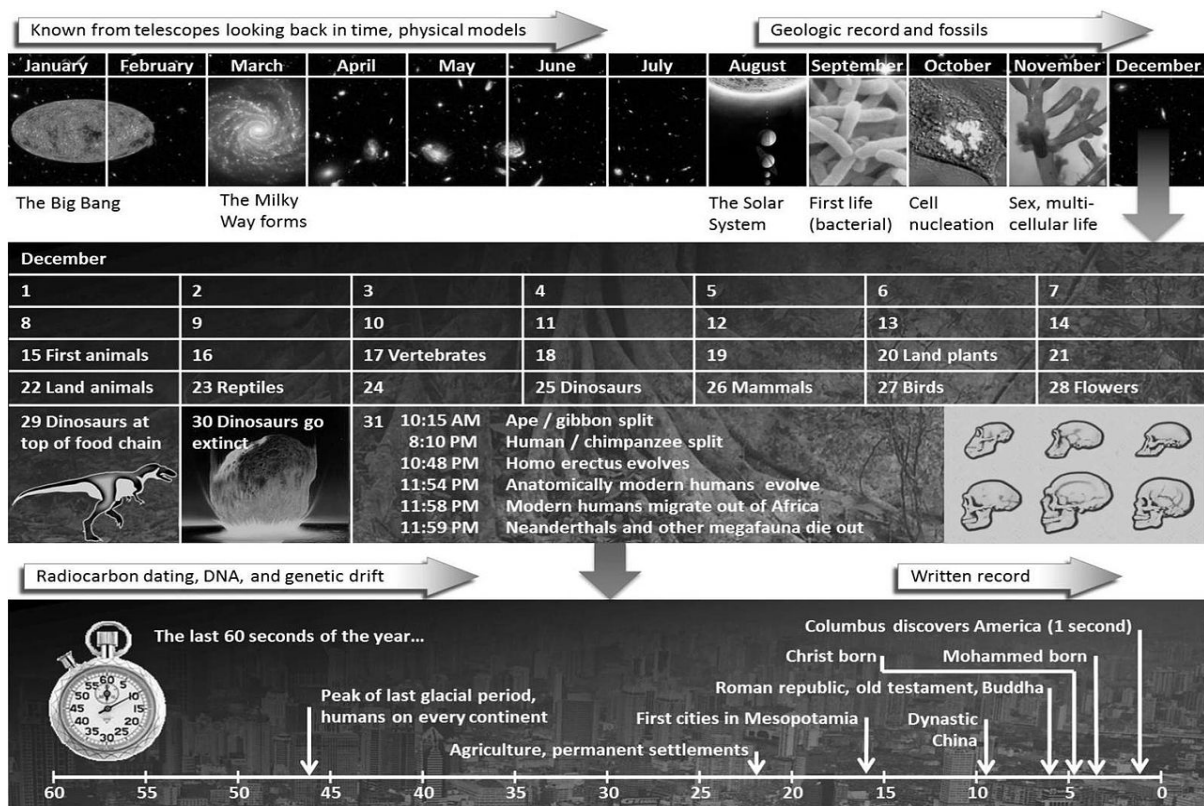


Fig. 32: Calendario cósmico. [Wikipedia.org/wiki/File:Cosmic_Calendar.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/File:Cosmic_Calendar.jpg)

Trabajo que se propone

Situar en el calendario, en el día (y hora, si procede) que les corresponda, los hechos citados en la historia resumida que se ha presentado en este capítulo, haciendo constar los años transcurridos desde el estado Big bang hasta esos hechos.

Actividad 21: Día geológico

La figura comprime en 24 horas los 4550 millones de años de la historia de nuestro planeta. Se propone colocar en el reloj los hechos de la historia geológica de la Tierra que se citan en la historia resumida del universo que se ha presentado en este capítulo, haciendo constar los años transcurridos desde el estado Big Bang, los transcurridos desde la formación de la Tierra y la hora del día que les corresponde.

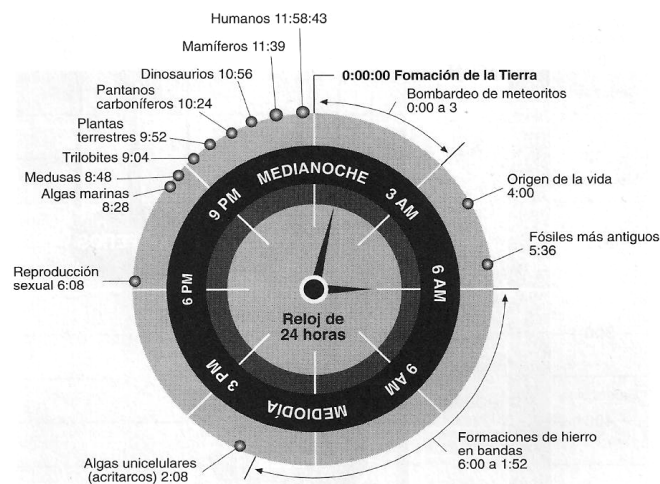


Fig. 33: Tiempo geológico ajustado a la escala de un día. Tomado de Schopf, "La cuna de la vida", p. 24.

Comentarios didácticos

Los períodos temporales de los que podemos tener experiencia o de los que nos podemos hacer idea son mucho más pequeños que los de escala de tiempo geológico y cósmico. Analogías como las del "año cósmico" o "día geológico" deben servir para relacionar órdenes de magnitud de unos y otros.

Desde el punto de vista cosmológico, los sucesos determinantes en la historia del universo se sitúan muy al principio. En general, desde la formación de las primeras estrellas y galaxias la historia del universo es rutinaria. Para nosotros, la formación del sistema solar y la aparición de la vida son noticias de primera página. Ambos son sucesos antiguos: el sistema solar lleva existiendo casi la mitad que el universo y la vida un tercio de la historia del universo. Desde el punto de vista biológico es importante notar que el aumento explosivo de la diversidad y la complejidad ocupa solo el último cuarto de la historia de la Tierra. Por último, es importante darse cuenta de que el conocimiento científico sobre el universo se ha construido en el último segundo del año cósmico.²⁹

²⁹ El espacio alcanzado y el tiempo vivido por los humanos son minúsculos en relación con las dimensiones universales. Solo el hecho de que podamos recibir noticias de muy lejos (y por tanto de tiempos muy antiguos) a las que se puede dar significado con ayuda de principios simplificadores (principio de homogeneidad, de validez universal de leyes físicas y construcciones matemáticas) justifica la construcción de conocimiento científico sobre el universo.

Apéndice: Toques cosmológicos para observaciones nocturnas

Existe una amplia tradición de observaciones astronómicas nocturnas de carácter escolar que se programan para complementar trabajos de aula. Generalmente, se enmarcan en el campo de la astronomía de posición. Algunas cuestiones astrofísicas suelen plantearse a lo largo de las observaciones: jerarquía de sistemas, color de las estrellas o evolución estelar por ejemplo. En cambio, pocas cuestiones de cosmología se plantean al contemplar el cielo nocturno, como si el conocimiento de carácter cosmológico no pudiera asociarse a observaciones sencillas que no requieran grandes medios. Sin embargo, la noche ofrece muchas posibilidades para la reflexión sobre las propiedades de nuestro universo y conviene aprovecharlas para enriquecer y profundizar la comprensión de lo que se ve. Las claves teóricas para esas posibles reflexiones son las que se han expuesto en este cuaderno.

Lo que se propone aquí es llamar la atención sobre hechos significativos que generalmente pasan desapercibidos, y describirlos en términos que conviertan al observador en participante de esos hechos, de forma que adquieran significado personal. Lo que sigue es un listado de posibles llamadas de atención de ese tipo.

1. Ver un objeto celeste es captar con los ojos fotones emitidos por él.

Este es el hecho más básico de cualquier observación nocturna y conviene formularlo en esos términos. Hay que darse cuenta, compartiendo la visión de cualquier estrella, de que los fotones que llegan a los ojos de cualquiera de las personas que observan fueron compañeros de viaje de los que llegan a los ojos de las otras. Hay que darse cuenta de que de la estrella salieron muchos más, en todas direcciones. Hay que reconocer que algunos de ellos, que no acertaron con ojos de los que miran, serán absorbidos por sus abrigos, por el suelo en el que se está de pie o por el planeta en el que vivimos, que otros no acertaron con el planeta esa noche y continuarán su viaje, que otros habrán llegado a destinos insospechados.

2. Si llegan fotones a nuestros ojos desde objetos lejanos es porque el universo es transparente.

Ver la Luna, los planetas, estrellas de nuestra galaxia o de Andrómeda o de alguna otra galaxia al telescopio supone la transparencia del universo. Los fotones que llegan a los ojos viajaron distancias y tiempos enormes y, sin embargo, el cristalino o el objetivo del telescopio es la primera materia que tocan. Cuando se esté viendo Andrómeda hay que poder decir: "Están llegando a mis ojos fotones emitidos desde Andrómeda, que llevan viajando dos millones y medio de años sin topar con materia alguna".

3. Mientras se dice "trescientos mil", la luz recorre trescientos mil kilómetros.

Como decir "trescientos mil" a velocidad normal dura un segundo aproximadamente, la luz recorre trescientos mil kilómetros cada vez que se dice. Se puede jugar con eso para tomar conciencia de las enormes distancias del universo. Se puede, por ejemplo, encender un puntero láser (de los que se usan para señalar objetos en el cielo) cuando esté dirigido a la Luna que está a 380000 km. Esto significa que se enciende el láser, se dice "trescientos mil" y los fotones emitidos por el láser estarán a punto de llegar allí. La distancia a Sirio son 8'6 años luz. Eso significa que si se enciende el láser apuntando a Sirio y se empieza a repetir "trescientos mil" sin parar, como un mantra, pasarían unos ocho años y medio hasta que la luz del láser llegue allí, habiendo recorrido 300000 km cada vez que el mantra se pronunció. Si el láser se apunta a Andrómeda habría que esperar dos millones y medio de años, y se tiene que hacer notar que Andrómeda es un objeto "cercano". Marte en conjunción superior está a 4 minutos 20 segundos-luz, 260 repeticiones del mantra. Se puede encender el láser apuntando a Marte, empezar a repetir "trescientos mil" e intentar aguantar hasta que la luz llegue a él. Es como ir radiando la carrera de la luz. La experiencia es interesante y algunos lo consiguen. Con Venus próximo a la cuadratura, la luz del láser tarda unos ocho minutos en llegar a él, quinientas repeticiones del mantra. Eso ya no lo aguanta nadie.

4. Todas las imágenes que se ven son del pasado.

Se repite muchas veces y es bien sabido que la velocidad finita de la luz pone delante de los observadores del cielo nocturno un álbum de fotos de su pasado. Mirar distintos objetos, cada vez más lejanos, es ir pasando páginas del álbum hacia atrás, hacia el pasado. Cualquier observación astronómica podría ordenarse según esta idea. Así, la imagen de la Luna, la de la última página del álbum, es de hace un segundo. Las de Marte o Venus de hace minutos. Las de Júpiter y

Saturno, en el mejor de los casos, de algo más de media y una hora respectivamente. La de Mirach, (la estrella de la constelación de Andrómeda que sirve de referencia para localizar la galaxia del mismo nombre), es de hace 200 años, de cuando se promulgaba la Constitución de 1812 en las Cortes de Cádiz. Imágenes del Gran cúmulo de Hércules son de hace 25000 años, de cuando se extinguieron los *Neandertales*. Cualquier imagen de la galaxia de Andrómeda es de hace 2'5 millones de años, de cuando apareció la primera especie del género homo, *Homo habilis*, nuestro precursor evolutivo.

5. **Además de los fotones que se ven nos llegan fotones que no se ven.**

Nuestros ojos no detectan todas las radiaciones, sólo las visibles. Así que hay objetos celestes "luminosos" que no se ven y las imágenes de los que se ven las construimos solo con una parte de la "luz" emitida por el objeto. La actividad 6 debería realizarse durante las observaciones nocturnas, planteándola como búsqueda de uno o varios mandos a distancia, encendidos en la oscuridad de la noche. La detección mediante teléfonos móviles de puntos luminosos que el ojo no ve, es más valiosa, desde el punto de vista didáctico, en el contexto de la oscuridad de la noche que en el contexto del aula. Podría aprovecharse cualquier observación nocturna para señalar que desde cualquier dirección, sin proceder de ningún objeto, nos llegan fotones no visibles desde el fondo oscuro del universo. Son los fotones de la CBR que han llenado el universo desde el momento en que se hizo transparente.

6. **Ver estrellas de noche es ver objetos calientes en un universo frío.**

Las estrellas, lo mismo que la llama de un mechero encendido en el lugar de observación, se ven porque contrastan con el fondo oscuro de la noche. El contraste de luminosidad revela contraste de temperatura. El cielo nocturno pone delante de nuestras narices el desequilibrio termodinámico del universo, la propiedad de carácter cosmológico más fácil de observar y a la que no se presta atención.

El desequilibrio termodinámico del universo es importante porque está asociado a la vida. Desde el lugar de observación se escucharán sonidos de actividad en el planeta, desde ruidos de motores a cantos de ranas. Y se puede reconocer que toda esa actividad está sostenida por el desequilibrio termodinámico del universo. Podría ser que, contemplando el cielo nocturno, cualquiera le diga a otro: "¿Lo ves?, este estado del universo hace posible que estemos vivos". Y el otro le conteste: "Sí, lo veo".

7. **Desequilibrio termodinámico y expansión están relacionados.**

La observación del desequilibrio termodinámico del universo no es suficiente para deducir su expansión. Pero conviene reconocer que la expansión explica la oscuridad, la frialdad del universo y hace posible el desequilibrio. La actividad 3 puede realizarse durante la observación para ayudar a comprenderlo. También puede repetirse la actividad 16, después de hacerla en el aula. La noche realza partes de su potencial didáctico.

8. **Los átomos de nuestro cuerpo son como los de estrellas lejanas.**

No es lo mismo hablar de nucleosíntesis estelar en el aula que reconocer, a la vista del cielo nocturno, que en esas estrellas se están produciendo núcleos de carbono que formarán átomos exactamente iguales que los nuestros, con la misma capacidad de formar sustancias complejas que los nuestros. Tal vez en algún lugar las formen.

Hay que decir, a la vista del cielo nocturno, que los núcleos de nuestros átomos de carbono estuvieron alguna vez en el interior de una estrella como las que se ven y que de eso puede hacer 10000 millones de años. Es probable que los átomos de todas las personas que observan hayan compartido origen y proximidad. Los átomos de las personas que observan debieron "conocerse" mucho, mucho, mucho antes de que las personas existieran y se conocieran.

Así pues, para realizar una observación de carácter cosmológico "basta" salir de noche, mirar al cielo, contemplar estrellas brillantes sobre fondo oscuro, reconocerlas lejanas, saber de las limitaciones de nuestros ojos como detectores de radiación electromagnética, conocer que la velocidad de la luz es finita, tener alguna experiencia del enfriamiento por expansión y saber un poco de física de ondas, atómica y nuclear. Parece mucho pero conviene darse cuenta de que todo ello forma parte del currículo de secundaria. Lo único que pasa es que todo ese conocimiento se presenta disperso a nuestros alumnos. Está en nuestras manos darle unidad. El material necesario para realizar una observación como la propuesta no debe ser el problema. Mechero, puntero láser, cuerda elástica luminosa, mando a distancia y teléfono móvil son suficientes aunque se puede pasar sin ellos. En cambio, la palabra y la conversación son imprescindibles.

Bibliografía

- Altschuler, D.R., 2001, Hijos de las estrellas, Cambridge University Press, Madrid, 2001.
- Bondi, H., 1960, Cosmología, Ed Labor, Barcelona, 1972.
- Calvino, I., Las cósmicas, Ed Minotauro, Barcelona, 1992.
- Cervantes, M., El ingenioso hidalgo Don Quijote de la Mancha, Salvat Ed., Barcelona.
- Greene, B., 2004, El tejido del cosmos, Ed Crítica, Barcelona, 2006.
- Harrison, E., 2000, Cosmology, Cambridge University Press, Cambridge.
- Harrison, E., 1987, Darkness at night, Harvard University Press, Cambridge.
- 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.
- Guth, A., 1997, "El universo inflacionario", Ed Debate, Madrid, 1999.
- 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, Tribuna de Astronomía nº 138, Madrid.
- Sagan, C., 1977, Los dragones del edén, RBA Ed, Barcelona, 1993.
- Schneider, E., Sagan, D., 2005, "La termodinámica de la vida", Ed Tusquets, Barcelona, 2008.
- Schopf, J., 1999, La cuna de la vida, Ed Crítica, Barcelona, 2001.
- Tomé, J., 2003, La paradoja de Olbers, Publicaciones de ApEA, Cuaderno nº 6.
- Tomé, J., 2005, Taller: Nuestro universo se está expandiendo, www.cosmologica.amonaria.com
- Tomé, J., 2011, Universo y vida, www.cosmologica.amonaria.com
- Van Icke, V., 1994, The physical universe: space, time and matter, ESO, Munich, (conferencia inédita).
- Wheeler, J.A., 1990, Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo, Alianza Ed, Madrid, 1994.

Fuentes Internet

- www.astro.ucla.edu/~wright/tiredlit.htm
- www.atlasoftheuniverse.com
- www.exploratorium.edu/hubble/tools/center.html
- www.iac.es/cosmoeduca/relatividad/unpaseoespecial.htm
- www.physics.hku.hk/~nature/CD/regular_e/lectures/chap19.html
- www.wikipedia.org/wiki/File:Cosmic_Calendar.jpg



ApEA, la Asociación para la Enseñanza de la Astronomía, nació en 1995 para acoger a todas las personas que se dedican a la enseñanza de la Astronomía en centros educativos, planetarios, museos de la ciencia, agrupaciones de aficionados y clubes de estudiantes.

ApEA engloba a todos los interesados en la enseñanza de todos los niveles educativos reglados -desde la enseñanza primaria hasta la universitaria- así como los no reglados. También organiza reuniones de formación para sus socios y publica materiales de interés didáctico, como la presente colección.

Más información en www.apea.es

