

Expansión del Universo

Ricardo Moreno, Susana Deustua, Rosa M. Ros

International Astronomical Union, Colegio Retamar (Madrid, España), Space Telescope Science Institute (Baltimore, USA), Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España)

Resumen

Este taller contiene siete actividades sencillas de realizar, en las que vamos a trabajar los conceptos clave de la expansión del Universo: en la primera veremos de qué se trata el efecto Doppler, en la segunda, tercera, cuarta y quinta experimentaremos cualitativamente con la expansión de un alambre, una goma, de un globo y de una superficie de puntos respectivamente. En la sexta actividad veremos de forma cuantitativa, la expansión de una superficie e incluso calcularemos la constante de Hubble para ese caso. En la séptima detectaremos la radiación de fondo de microondas. La última actividad se simulan lentes gravitacionales que sirven para analizar como se detecta la materia oscura.

Objetivos

- Comprender qué es la expansión del Universo.
- Comprender que no hay un centro del Universo.
- Comprender qué es la Ley de Hubble.
- Comprender el significado de la materia oscura y simular lentes gravitacionales

El Origen del Universo

La teoría sobre el origen del Universo más aceptada hoy día se conoce con el nombre de Big Bang: hubo un evento singular original, que inició una expansión del propio espacio. Pero no son las galaxias las que se mueven “a través del espacio”, sino que es el espacio entre ellas el que se expande, arrastrando a las galaxias. Por esa razón no se puede hablar de un centro del Universo, como no se puede hablar de un país que esté en el centro de la superficie terrestre.

La velocidad de recesión de una galaxia y la distancia a la que están de nosotros es proporcional. La constante que las relaciona es la llamada constante de Hubble. La ley de Hubble relaciona de forma lineal la distancia de una galaxia con la velocidad con que se aleja.

La primera prueba del Big Bang vino con la observación del corrimiento al rojo en los espectros de las galaxias. La prueba que dio el espaldarazo definitivo a la teoría del Big Bang, fue la detección de la radiación de fondo de microondas.

Corrimiento al rojo

Si en el laboratorio miramos con un espectroscopio la luz que nos llega de un gas caliente, por ejemplo hidrógeno, veremos unas líneas de colores que son típicas de ese gas, a unas longitudes de onda fijas. Si hacemos lo mismo con la luz que nos llega desde una remota galaxia, vemos esas líneas pero desplazadas (figura 1). Es el llamado corrimiento al rojo, pues para la mayoría de las galaxias el desplazamiento es hacia ese color.

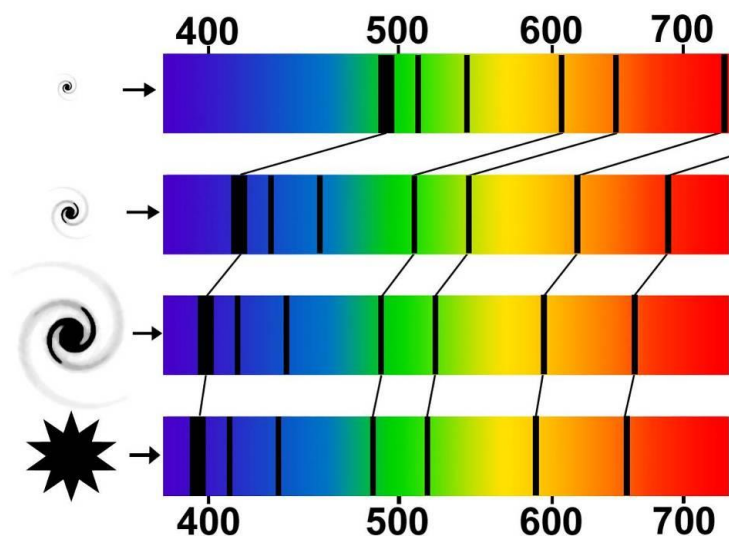


Fig.1: Cuanto más alejada está la galaxia, su espectro se desplaza más hacia el rojo, lo que nos dice que se aleja a mayor velocidad de nosotros.

Ese corrimiento al rojo de la luz es debido al alejamiento de la galaxia respecto a nosotros, de forma similar a un silbido de una locomotora o de como una moto cambia su tono según se acerque o se aleje de nosotros. Cuanto mayor sea ese corrimiento, mayor será la velocidad.

Estudiando el espectro de las galaxias de nuestro grupo local, se obtiene que la Gran Nube de Magallanes se aleja de nosotros a 13 km/s, y la Pequeña se acerca a 30 km/s. Andrómeda se acerca a 60 km/s mientras que M 32 (una de sus galaxias satélite) se aleja a 21 km/s. En otras palabras, las galaxias cercanas tienen movimientos relativos pequeños y de forma irregular.

Pero si vamos al cúmulo de Virgo, a una distancia media de 50 millones de a.l., veremos que todas se alejan de nosotros a velocidades entre 1.000 y 2.000 km/s. Y en el supercúmulo de Coma Berenice, a 300 millones de a.l., las velocidades de alejamiento oscilan entre 7.000 y 8.500 km/s. Pero si miramos en dirección opuesta, obtenemos que M 74 se aleja de nosotros a 800 km/s y M 77 a 1.130 km/s. Y si apuntamos a galaxias más lejanas y débiles, la velocidad de recesión es aún mayor: NGC 375 se aleja a 6.200 km/s, NGC 562 a 10.500 y NGC 326 a 14.500 km/s. Miremos hacia donde miremos, todas, excepto las muy cercanas, se alejan de nosotros. ¿Estarán enfadadas con la nuestra? El corrimiento al rojo de las líneas espectrales, puede medirse mediante el análisis espectroscópico. Los astrónomos usan un instrumento un poco más sofisticado, pero esencialmente igual que el que se muestra y construye en el taller del espectro solar.

Actividad 1: El efecto Doppler

El efecto Doppler es el que hace variar la longitud de onda de un sonido cuando la fuente está en movimiento. Lo experimentamos en el sonido de motos o coches en una carrera: el sonido es distinto al acercarse y al alejarse. O en un coche de bomberos que pasa junto a nosotros, en el silbato de un tren en movimiento, etc.

Se puede reproducir haciendo girar en un plano horizontal un zumbador, por ejemplo un reloj despertador. Introducimos el reloj en una bolsa de tela (figura 2a) y lo atamos con una cuerda. Al hacerlo girar sobre nuestras cabezas (figura 2b), se puede oír que cuando se acerca al espectador, la λ se acorta y el sonido es más agudo. Cuando se aleja, la λ se alarga y el sonido es más grave. El que está en el centro de giro no detecta ninguna variación.



Fig. 2a: Reloj despertador, bolsa y cuerda.



Fig. 2b: Lo hacemos girar sobre nuestras cabezas. Los espectadores oyen la diferencia de tono

Este es el efecto Doppler debido al desplazamiento. Pero no es el que tienen las galaxias con la expansión. Las galaxias no se mueven a través del espacio, sino que es el espacio entre ellas el que se expande.

Actividad 2: El “estiramiento” de los fotones

El Universo, al expandirse, “estira” los fotones que hay en él. Cuanto más tiempo dura el viaje del fotón, más estiramiento sufre. Se puede hacer un modelo de ese estiramiento con un cable semirrígido, del que se usa en las instalaciones eléctricas empotradas de las casas. Se corta aproximadamente un metro, y se dobla con la mano haciendo varios ciclos de una senoide, representando varias ondas (figura 3a).

Se toma el cable con las dos manos y se estira (figura 3b) y se observa que la longitud de onda aumenta, como ocurre en la radiación que nos llega desde una galaxia. Cuanto más lejos está de nosotros, más tiempo ha tenido para estirarse y se ha desplazado más hacia el rojo (λ mayores).

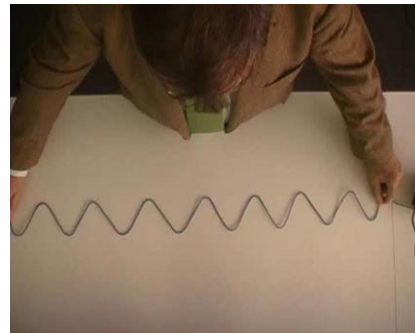
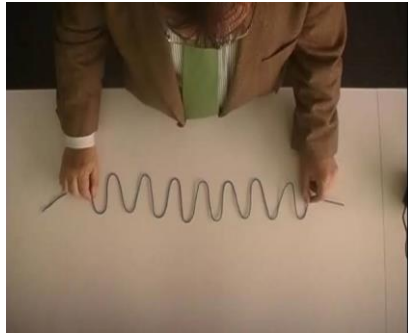


Fig. 3a: Ondas hechas con cable semirrígido Fig. 3b: Mismas ondas, estiradas, con una longitud de onda mayor

Ley de Hubble

Fue *Edwin Hubble* (figura 4) quien se dio cuenta en 1930 del desplazamiento al rojo de las galaxias, y estableció la ley que lleva su nombre: cuanto más lejana está una galaxia, más de prisa parece que se aleja de nosotros. Esto indica que el Universo se expande en todas direcciones, por lo que todos los cuerpos que están en él se van alejando unos de otros. El que veamos alejarse de nosotros a todas las galaxias no significa que estemos en el centro: lo mismo observaría un extraterrestre desde cualquier lugar del Universo, como pasa en una explosión de unos fuegos artificiales: todas las partículas luminosas se van separando entre sí movidas por la explosión de la pólvora.

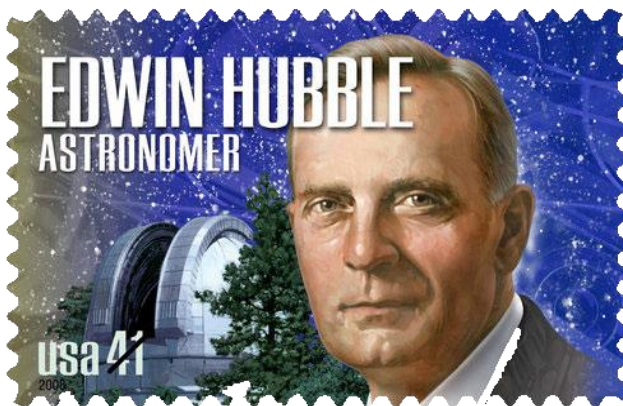


Fig. 4: Edwin Hubble

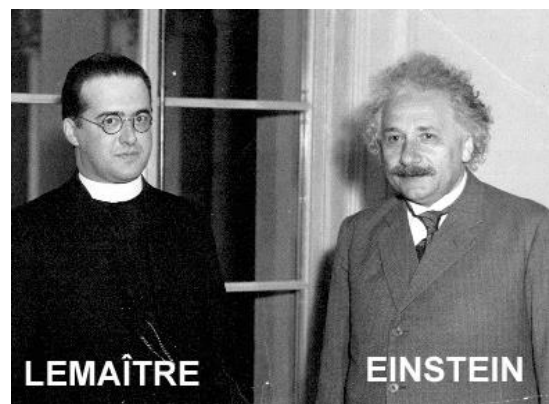


Fig. 5: George Lemaître y Albert Einstein

Sin embargo, el modelo real no es el de unas galaxias moviéndose a través del espacio, sino que es el espacio entre ellas el que se expande, arrastrando a las galaxias.

Si el espacio se expande en todas direcciones, significa que dando marcha atrás al tiempo, la materia debió estar concentrada en algún momento inicial en el que todo empezó.

Así fue como George Lemaître (figura 5) estableció el modelo del Universo más aceptado hoy día: hubo una gran explosión original y en ella estamos montados todavía. En esa expansión es el propio espacio el que va dilatándose.

Para entender esto imaginemos un globo de goma con una serie de puntos dibujados en su superficie, que representan las galaxias (figura 6). Según lo vamos hinchando, el espacio de goma elástica entre las motas va aumentando. De igual forma según pasa el tiempo, el espacio va expandiéndose, y la materia contenida en él va separándose entre sí.

Por tanto, la velocidad aparente de recesión de una galaxia y la distancia a la que están de nosotros es proporcional. La constante que las relaciona es la llamada *constante de Hubble*. La ley de Hubble relaciona la distancia de una galaxia con la velocidad aparente con que se aleja:

$$v=H \cdot d$$

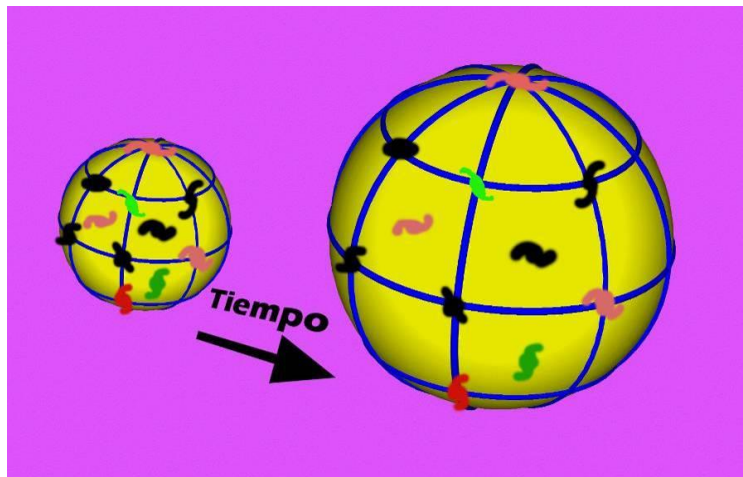


Fig. 6: Según pasa el tiempo, el espacio va expandiéndose y la materia contenida en él va separándose entre sí.

Para determinar su valor bastaría saber la velocidad y la distancia de algunas galaxias. La velocidad con que una galaxia parece alejarse es fácil de medir con precisión por el *corrimiento al rojo*, pero la distancia a la que está, especialmente en el caso de las más lejanas, es más difícil. Los científicos no se ponen de acuerdo en el valor de la constante de Hubble. Según se use un método u otro salen unos valores, que en general oscilan entre 50 y 100 km/s por *Megaparsec*. El valor más aceptado actualmente es aproximadamente 70, lo que indica una edad del Universo de 13.700 millones de años.

Actividad 3: El universo en una goma elástica

Edwin Hubble descubrió que todas las galaxias parecen alejarse de nosotros. Cuanto más lejos están, más rápidamente lo hacen. La llamada Ley de Hubble establece que la velocidad aparente de alejamiento de una galaxia respecto a nosotros es proporcional a su distancia. No es que las galaxias se muevan por el espacio, es el mismo espacio que hay entre ellas el que se agranda. La Ley de Hubble es, por tanto, una consecuencia lógica de la expansión del Universo. Y aunque todas las galaxias parezcan alejarse de nosotros, no significa que estamos en el centro del Universo.

Para realizar esta experiencia, hay que hacer unas marcas sobre la goma cada cm con un rotulador. Cada una representará una galaxia (la A, B, C, etc.). Nuestra galaxia será la primera.

Sitúa la goma cerca de la regla (figura 7a). Haz que nuestra galaxia coincida con la marca del 0 cm. Las otras galaxias A, B, C, ... coincidirán con las marcas 1, 2, 3, 4...cm. Estira la goma (figura 7b) de tal forma que nuestra galaxia se mantenga en la marca de 0 cm, y que la siguiente (la A) se sitúe sobre la de 2 cm. La distancia de esta galaxia a la nuestra se ha

duplicado. ¿Qué ha pasado con la distancia entre las demás galaxias B, C, D y la nuestra?, ¿también se han duplicado?



Fig. 7a: Goma sin estirar.



Fig. 7b: Goma estirada.

Supón que el tiempo que ha durado el estiramiento de la goma ha sido 1 segundo. Las velocidades con que aumentan la distancia de las otras galaxias respecto de la nuestra ¿son todas iguales o unas se alejan más deprisa que otras?

Para simular lo que vería un habitante de una "galaxia" vecina, puedes mantener fijo en el estiramiento la galaxia B. ¿Cómo verá la nuestra y las otras galaxias? ¿También le parece que todas se alejan de la suya?

Actividad 4: El Universo en un globo

En la expansión del Universo, es el espacio entre las galaxias el que se expande. Las propias galaxias no se expanden, no cambian de tamaño. Lo que está unido fuertemente por la gravedad, no aumenta su dimensión.



Fig. 8a: Los trozos de porexpán pegados en el globo a medio hinchar



Fig. 8b: Los trozos de porexpán se alejan cuando el globo está más hinchado

Hay un sencillo experimento que permite mostrar este aspecto. Basta usar un globo que lo inflamos un poco al principio. Después pegamos sobre su superficie con adhesivo unos cuantos trocitos de porexpán (también valen monedas). A continuación seguimos inflando el globo hasta llegar al máximo que podamos. Los trocitos de porexpán se irán separando unos de otros (figuras 8a y 8b). Algunos parecerán alejarse más que otros, pero ninguno se acercará ni cambiará de tamaño. Es un modelo muy sencillo de la expansión del universo.

Actividad 5: Cálculo de la constante de Hubble

La Ley de Hubble dice que la velocidad aparente de alejamiento de una galaxia v es proporcional a la distancia d a la que esté de nosotros:

$$v = H \cdot d$$

La velocidad v realmente es la velocidad de aumento de la distancia que hay desde esa galaxia a nosotros, ya que la galaxia parece moverse, pero realmente es el espacio entre ella y nosotros el que se expande. La constante H se llama constante de Hubble, y se puede calcular sabiendo distancias y velocidades del aumento de distancias a algunas galaxias. Despejando en la fórmula anterior:

$$H = \frac{v}{d}$$

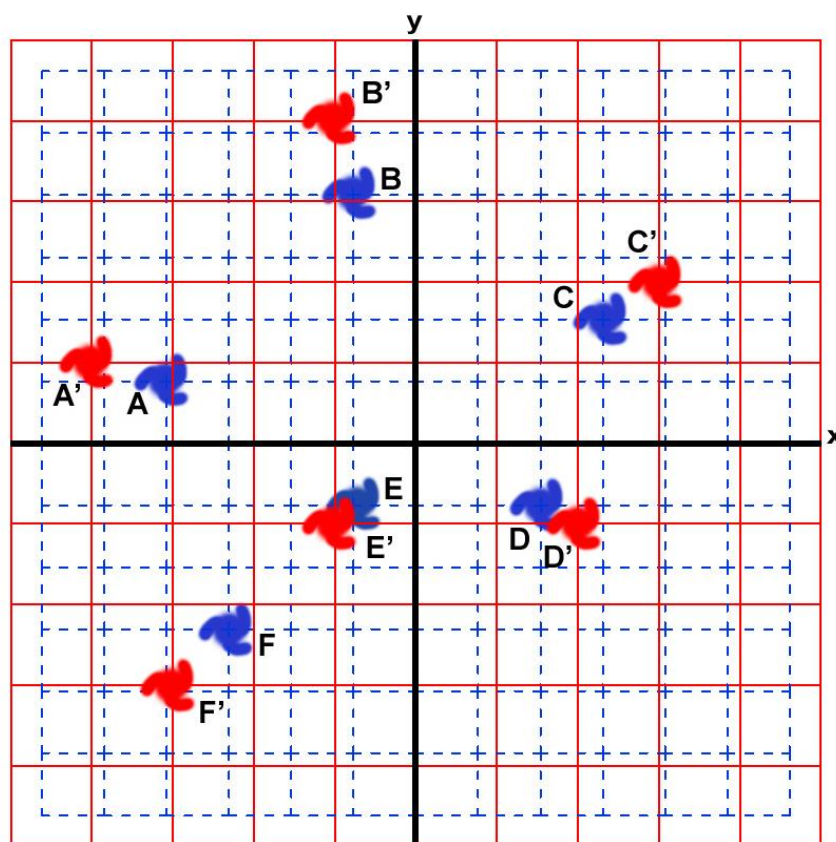


Fig 9: La cuadrícula de trazo continuo (rojo) es la misma que la de trazo discontinuo (azul) pero expandida. Las galaxias están fijas a las cuadrículas.

En el diagrama de la figura 9 se muestra el espacio, representado por una cuadrícula azul de líneas a trazos, con nosotros en el centro y varias galaxias en azul a cierta distancia de nosotros. Al cabo de cierto tiempo, supongamos 10 segundos, el espacio se ha expandido y queda representado en rojo, tanto la cuadrícula (en líneas continuas) como las galaxias.

Galaxia	Coordenadas x,y	d =distancia al origen	Δd	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
A	(-4, 1)				
A'	(-4, 1)				
B	(-1, 4)				
B'	(-1, 4)				
C	(3, 2)				
C'	(3, 2)				
D	(2, -1)				
D'	(2, -1)				
E	(-1, -1)				
E'	(-1, -1)				
F	(-3, -3)				
F'	(-3, -3)				

Tabla 1: Con las coordenadas escritas como ejemplo.

Galaxia	Coordenadas x,y	d =distancia al origen	Δd	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
A					
A'					
B					
B'					
C					
C'					
D					
D'					
E					
E'					
F					
F'					

Tabla 2: Se rellena con los datos de la figura 9.

Para rellenar la tabla 1, en cada fila se ponen los datos de una galaxia. Por ejemplo, las coordenadas se estiman con las cuadrículas azul (líneas de trazos) o roja (líneas continuas), según sea la galaxia A o la A' respectivamente, la distancia d se obtiene midiendo con una regla la longitud en cm que hay desde nosotros (en el centro) al centro de esa galaxia. Los datos de la columna Δd se obtienen restando las distancia de A' y la de A. Y en la última columna hay que usar en el denominador la distancia antes de expandirse (por ejemplo, la de A, no la de A'). Se comprueba que:

- Las coordenadas de cada galaxia no varían con la expansión (las galaxias no se mueven a través del espacio).
- El valor H es bastante constante, independientemente de las galaxias.

El Big Bang

Actualmente, la teoría del origen del Universo como una gran explosión es la más aceptada en la comunidad científica, aunque no faltan quienes la ponen en duda porque aún hay detalles que quedan sin explicación. En 1994 la revista americana *Sky & Telescope* hizo un concurso para bautizarla de nuevo. Se recibieron 12.000 propuestas, pero ninguna consiguió desbancar a la que ya tenía: teoría del Big Bang o de la Gran Explosión. El nombre se lo puso despectivamente el astrónomo Fred Hoyle, a quien, con ciertos prejuicios antirreligiosos, le sonaba demasiado acorde con la idea de un Creador.

De la observación de un Universo en expansión se deduce que, dando marcha atrás al tiempo, hubo un principio en el que se produjo la explosión, dando origen al espacio y al tiempo tal como ahora lo conocemos. Y cabe preguntarnos ¿qué fue lo que la produjo? ¿por qué ocurrió? La ciencia no da respuesta, ya que sólo trabaja con el funcionamiento de lo ya existente. La ciencia sí intenta explicar cómo se produjeron los hechos a partir del Big Bang, pero no por qué existe la materia. Ese tipo de preguntas corresponde responderlas a los filósofos, que tratan de la metafísica (más allá de la física).

Algunos intentos de explicar la causa por parte de algunos físicos recurriendo a conceptos como fluctuaciones cuánticas de la nada confunden el vacío con la nada: el vacío cuántico existe, pues tiene espacio y cierta energía. El concepto de nada no es científico, es metafísico, y significa ausencia de toda existencia, por lo que ni siquiera hay en ella espacio. En la nada, nada puede ni existir ni fluctuar. Otras teorías hablan de multi-universos, pero por definición, son imposibles de comprobar (si pudiésemos observar de alguna forma otro universo, entraría a formar parte del nuestro, ya que nuestro universo es toda la materia que está a nuestro alcance de alguna manera). Por esa razón, esas teorías tampoco son científicas.

Volvamos a la ciencia. En el instante inicial toda la materia y energía estaban en una singularidad infinitamente pequeña y densa. El Big Bang fue la explosión del espacio al comienzo del tiempo. Y a partir de ese momento la materia empezó a funcionar con unas leyes que estaban escritas en su interior, y que condujeron al Universo a la situación actual.

Actividad 6: No hay un centro de expansión

En la figura 10 aparece un dibujo con muchos puntos, que simulan las galaxias en un momento determinado. Hagamos de él una primera fotocopia en papel transparente y luego otra en otro papel transparente, ligeramente ampliada (por ejemplo un 105%).

Si las superponemos en un retroproyector de transparencias, obtenemos una imagen (figura 11a) que representa significativamente el espacio al expandirse con el tiempo: hay un punto en el que coinciden las dos transparencias, y se observa muy bien el desplazamiento de todos los demás puntos que es radial, y tanto mayor cuanto más alejado esté del punto coincidente. Parecería como si los puntos se alejaran más deprisa cuanto más lejos estén del punto coincidente.

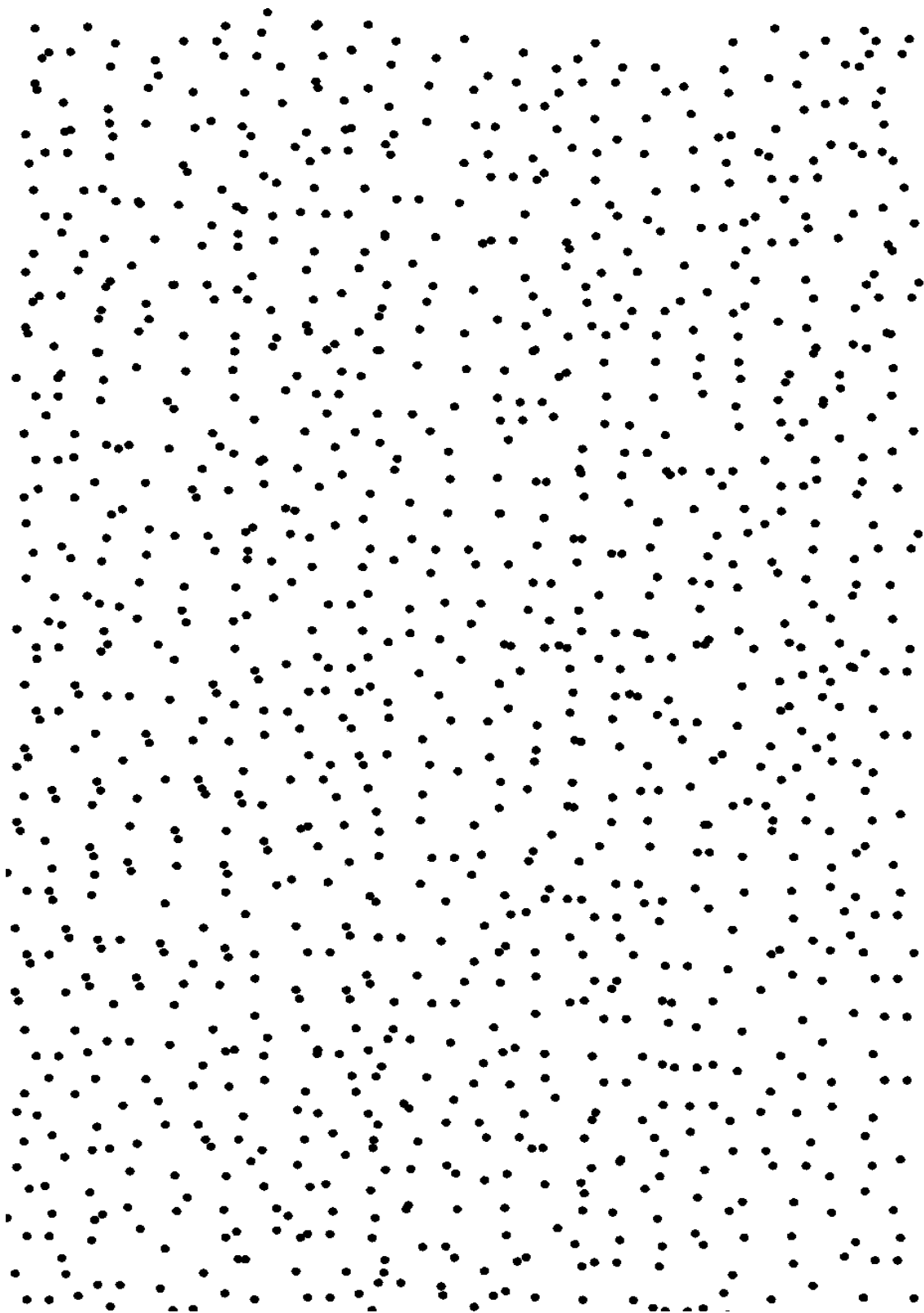


Fig. 10: Fotocopiar esta página en una transparencia, y luego en otra ampliada 105 %

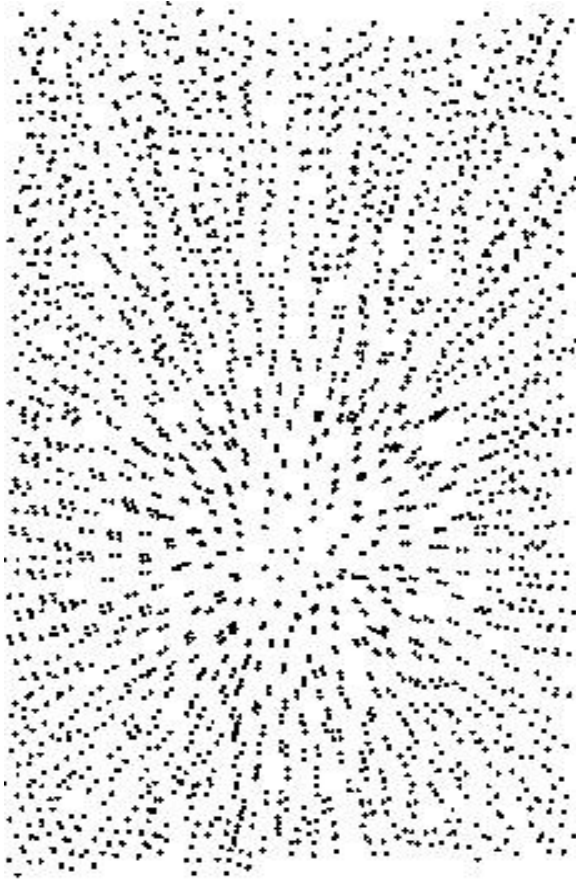


Fig. 11a: Superposición de dos transparencias una de ellas ampliada un 105 %.

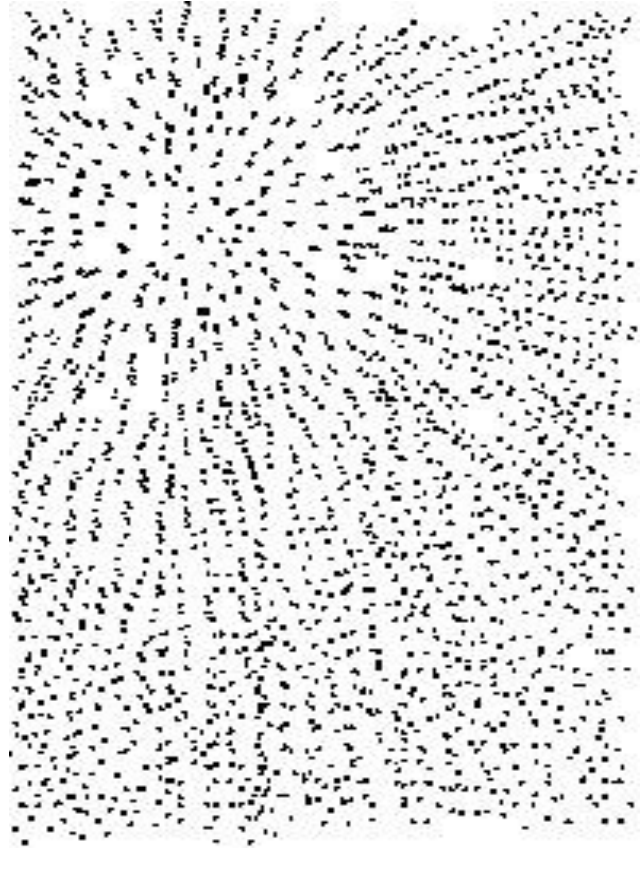


Fig. 11b: Si hacemos coincidir otro punto, también parece que todo se aleja de él: no hay un centro de expansión

Pero si el punto coincidente es otro (figura 11b), ocurre lo mismo. Así pasa en el espacio: desde nuestra galaxia vemos que todas se alejan de nosotros, y más rápido cuanto más lejos esté del observador. Nos parece que estamos en el centro del Universo, pero no es así, ya que un observador situado en otra galaxia vería lo mismo y le parecería estar él en el centro. Realmente no hay ningún centro.

Desarrollo del Universo

Para hacernos una idea de la historia posterior, supongamos que todo el tiempo desde el Big Bang hasta ahora lo comprimimos en un año, del 1 de enero al 31 de diciembre (ver figura 12). Hasta abril no se formó nuestra Vía Láctea. En agosto se formó el Sol, y la Tierra tuvo forma esférica a finales de ese mes. Pero no es hasta octubre cuando el oxígeno se hace presente en nuestra atmósfera. Aunque unas células vivas muy sencillas aparecen enseguida sobre la Tierra, las células con núcleo como las actuales aparecen el 2 de diciembre y el día 12 los primeros organismos pluricelulares. El 19 aparecen los primeros peces, y el 21-22 las plantas, insectos y anfibios. El 25 aparecen los dinosaurios, que duran hasta el 28. En el día

30 los mamíferos viven ya sobre la Tierra, pero no es hasta el 31 de diciembre, a las 11 de la noche, cuando aparece el hombre. A las 11 h. y 57 minutos es cuando vive el hombre de Neanderthal y en el último minuto cuando se pintan las cuevas de Altamira. Cinco segundos antes de las doce de la noche es cuando nace Jesucristo. El último siglo serían las últimas dos décimas de segundo.

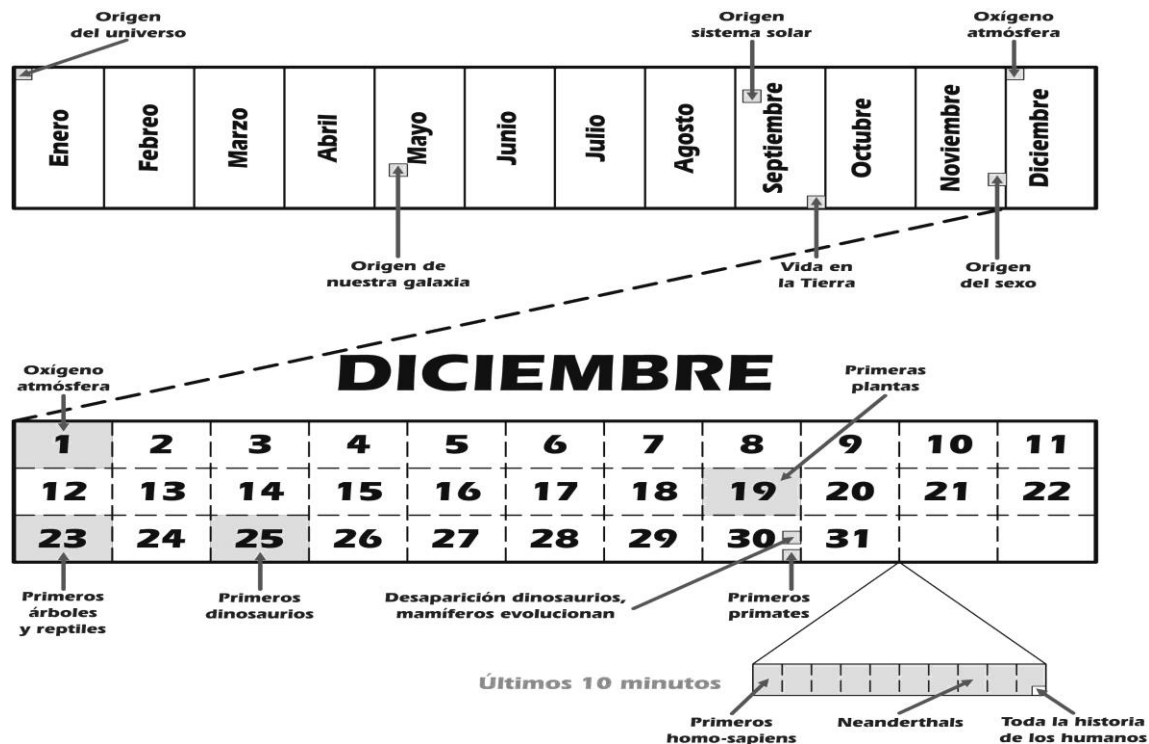


Fig.12: Calendario Cósmico. Toda la historia de la civilización humana ocurrió en los últimos 21 segundos.

Radiación de fondo de microondas

En el comienzo, a temperaturas elevadísimas, las cuatro fuerzas que ahora conocemos estaban unificadas. La gravedad, la fuerza electromagnética, la fuerza nuclear fuerte y la débil —estas dos últimas sólo actúan en el interior de los átomos, y por tanto son menos famosas entre la gente— estaban unidas. Enseguida se separaron y se formaron los fotones, los electrones, los protones y las demás partículas elementales. A la vez que se expandía, el Universo se iba enfriando. Al cabo de 300.000 años la temperatura bajó lo suficiente para poderse formar los átomos, principalmente hidrógeno y helio. La densidad bajó y los fotones quedaron libres para poder moverse en todas direcciones: se hizo la luz. Los científicos dicen que el Universo se volvió transparente. Esos fotones siguen viajando por el espacio actualmente, aunque éste se ha enfriado y dilatado tanto que la longitud de onda ha aumentado muchísimo (figura 13) y se han convertido en fotones mucho más fríos, que transmiten una energía de sólo 2,7 grados Kelvin. Es la llamada radiación de fondo de microondas (Cosmic Microwave Background o CMB).

Esta radiación de fondo fue detectada por primera vez en 1964 por Penzias y Wilson, en Estados Unidos. Estaban intentando eliminar todos los ruidos parásitos en su radiotelescopio cuando captaron una emisión de 7,35 cm de longitud de onda que siempre estaba presente, independientemente de la zona hacia la que apuntara la gigantesca antena. Se revisó toda la instalación, e incluso se pensó en que unos pájaros que anidaron en la antena podían ser los causantes, pero no se pudo eliminar ese ruido de fondo. Se llegó a la conclusión de que procedía de un cuerpo emisor que tenía una temperatura de $2,7^{\circ}$ Kelvin —la temperatura actual del Universo— y que no se encontraba en ningún lugar determinado, sino en todos: era el Universo mismo el que emitía aquella radiación de fondo, como una reliquia del Big Bang. Son emisiones en el campo de las microondas, similares a las de los hornos caseros, pero con muy poca energía: sólo podría calentar los alimentos a $2,7^{\circ}$ K.



Fig. 13: Al pasar el tiempo, el espacio se expande, y los fotones que viajaban por él en el inicio, han dilatado mucho su longitud de onda. Es la radiación de fondo de microondas.

Aunque parecía una radiación extraordinariamente uniforme, G. Smoot, R. Mather y otros colegas suyos lograron apreciar ligerísimas variaciones en las mediciones que hizo el satélite COBE (figura 14a), del orden de millonésimas de grado. De forma simultánea se detectaron esas fluctuaciones desde tierra en el llamado experimento de Tenerife, en el Instituto de Astrofísica de Canarias. Y en el año 2001 la NASA lanzó el telescopio WMAP, para estudiar esa radiación de fondo con bastante más resolución (figura 14b).

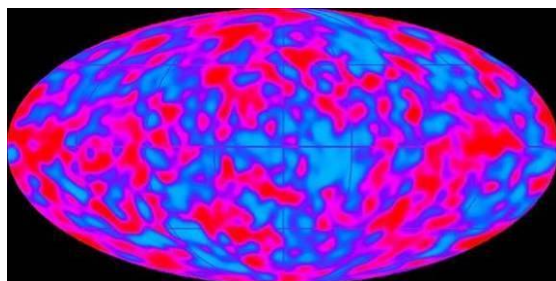


Fig. 14a: Imagen del COBE

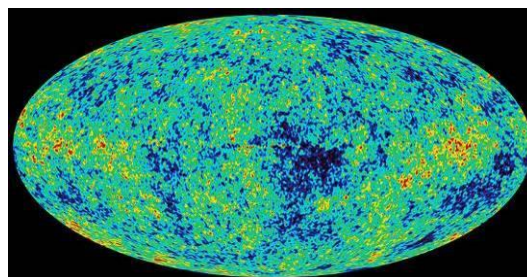


Fig. 14b: Imagen del WMAP

Aunque pequeñas, esas ligeras variaciones son las huellas de los grumos de materia a partir de los cuales se empezaron a formar las galaxias. Aún no sabemos qué fue lo que originó esas fluctuaciones de densidad. Lo que sí podemos afirmar es que esas arrugas en la materia se

produjeron, y empezaron a producirse las condensaciones de las proto-galaxias, cuando habían pasado sólo unos cientos de millones de años desde el Big Bang. Casi a la vez se debieron formar las primeras estrellas en esas galaxias primitivas.

Actividad 7: Detección de la radiación de fondo de microondas

Alrededor de 300.000 años después del Big Bang, los fotones se separaron de la materia y empezaron a viajar libres por el Universo. Al expandirse el espacio, esos fotones fueron ampliando su longitud de onda. Según los cálculos, ahora tendrían una longitud de onda de unos 2 mm, que corresponde a la región de las microondas, y equivale a la que emitiría un cuerpo negro que estuviera a 2,7 grados Kelvin.

Como se ha mencionado antes Penzias y Wilson, en 1964 detectaron por primera vez la radiación de fondo de microondas, una radiación fósil que procede muy uniformemente de todas direcciones. También nosotros podemos detectar esa radiación de fondo con un simple televisor (figura 15). Para ello, sintoniza el televisor en un canal analógico vacío. La imagen está compuesta de multitud de puntos cambiantes continuamente. Aproximadamente un 10 %, es decir, uno de cada diez proviene de la radiación de fondo del Universo.



Fig 15: Algunos puntos de una pantalla de TV analógica no sintonizada provienen del fondo de microondas

¿Por qué es oscura la noche?

Este era el título de un interesante artículo que el alemán Heinrich Olbers publicó en 1823. Anteriormente ya se lo había planteado Kepler en 1610 como demostración de que el Universo no podía ser infinito. Edmund Halley, un siglo después, encontró en el firmamento algunas zonas especialmente brillantes y propuso que el cielo no brilla uniformemente durante la noche porque -a pesar que el Universo es infinito- las estrellas no se distribuían de manera uniforme. Incluso el escritor Edgar Allan Poe (1809-49), escribió sobre este fenómeno¹. Sin embargo el tema pasó a la historia como la Paradoja de Olbers.

¹ En "Eureka", ensayo científico publicado en febrero de 1848, daba la siguiente explicación a los "vacíos" oscuros observados entre las estrellas: "Podríamos comprender los vacíos que nuestros telescopios encuentran en



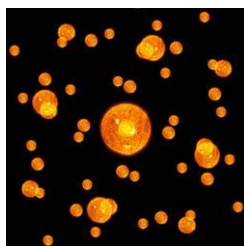
Fig. 16a: Johannes Kepler, Fig. 16b: Edmund Halley, Fig. 16c: Heinrich Olbers y Fig. 16d: Edgar Allan Poe

La respuesta parece trivial, pero no es así después de leer el artículo del alemán. El razonamiento al que apuntaba Olbers llevaba a la paradoja de que el cielo nocturno debía ser tan brillante como el más esplendoroso día. Veamos su argumento.

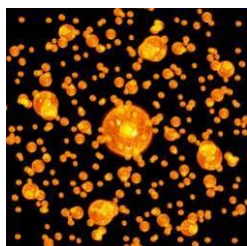
Olbers partía de los siguientes principios:

- 1.- El Universo tiene una extensión infinita.
- 2.- El número de estrellas se distribuye más o menos uniformemente a lo largo de todo el Universo.
- 3.- Todas las estrellas tienen una luminosidad media similar a lo largo y ancho del Universo.

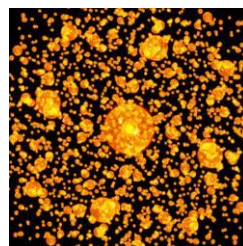
Miremos al Universo desde la Tierra. Supongamos una primera capa esférica de estrellas en la bóveda celeste, a una distancia R_1 . El número de estrellas que contiene será N_1 . Supongamos una segunda capa esférica a una distancia mayor R_2 . Cada una de sus estrellas nos ilumina menos por estar más lejos, pero a la vez esa capa es mayor y contiene más estrellas, según el principio nº 2, y se contrarresta la menor iluminación (la intensidad de la luz disminuye proporcionalmente a $1/R^2$, y el área de la capa, y por tanto el número de estrellas, aumenta proporcionalmente a R^2). La conclusión es que la segunda capa ilumina a la Tierra exactamente igual que la primera. Y como según el principio nº 1 hay infinitas capas, la conclusión es que el cielo debería aparecer brillante durante la noche.



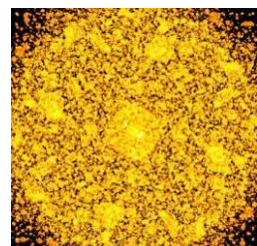
La luz que nos llega desde estrellas cercanas



Pero más lejos también hay estrellas que nos envían su luz



Cuanto más lejos, hay más estrellas



Desde cualquier punto del cielo nos debería llegar la luz de una estrella

Fig. 17: Extraída de wikimedia commons

innumerables direcciones suponiendo que la distancia hasta el fondo invisible es tan inmensa que ningún rayo de luz procedente de allí ha sido todavía capaz de alcanzarnos".

Otra forma de plantearlo: si observamos de noche el cielo, como hay infinitas estrellas, miremos hacia donde miremos, nuestra visual siempre debería acabar topando con la superficie de una estrella, y por lo tanto deberíamos ver allí un punto brillante. Y si eso ocurre en todo el cielo, debería aparecer totalmente brillante.

Evidentemente esto no es así. Esta paradoja de Olbers desató muchas controversias y no se pudo resolver correctamente hasta comienzos del siglo XX, con la teoría del Big Bang. El razonamiento en sí es correcto, pero fallan los principios de los que parte. En efecto, la luz de las estrellas lejanas, al estar el Universo en expansión, sufren un corrimiento hacia el rojo tanto más intenso cuanto más lejos están. Eso conlleva un debilitamiento en la intensidad de su radiación, por lo que el principio nº 3 de Olbers no es correcto. Pero sobre todo, también sabemos que cuanto más lejos esté una estrella, la luz que nos llega partió antes, es decir, la vemos como era hace tiempo. Las más lejanas que podríamos observar son las que se formaron poco después del Big Bang, pero más allá no podemos observar nada más, por lo que no hay infinitas capas de estrellas, o sea, también es falso el principio nº 1 de Olbers.

En el siglo XX, la solución a la paradoja de Olbers quedó resuelta con la expansión y sobre todo con la edad no infinita del Universo. ¡Afortunadamente, la noche podía seguir siendo oscura!

Lentes gravitacionales

Una manera de detectar la materia oscura es a través de las lentes gravitacionales. La masa de una lente gravitacional actúa como una lente óptica al distorsionar el espacio que la rodea y desviar la luz de un objeto distante. La materia que produce la distorsión no se ve ni se detecta con telescopios, sólo es posible ver su efecto, la acción de la gravedad, que es similar al de la materia normal de la cual están hechas todas las cosas.



Fig. 18a y 18b: Si el espacio es curvo, el camino más corto entre dos puntos es una curva



Fig. 18c: El camino más corto sobre la superficie terrestre no es una recta

La luz siempre sigue el camino más corto posible entre dos puntos. Pero si una masa está presente, el espacio se curva, y entonces el camino más corto posible es una curva como se puede ver en la figura 18a. Esta idea no es difícil para los estudiantes. Realmente podemos mostrárselo sobre un globo terrestre (figura 18c). Evidentemente ellos pueden entender que sobre la superficie de la Tierra las distancias entre dos puntos son siempre según una curva.

En general, podemos imaginar las lentes gravitacionales como una lente ordinaria, pero en la que la desviación de la luz es producida por una gran masa que hay en el camino de la luz, llamada deflector (figura 19a).

Las lentes gravitacionales producen una curvatura en los rayos de luz que hace que los objetos, si son puntuales (estrellas o cuásares), parezcan estar en un lugar diferente a donde están realmente o incluso se producen imágenes múltiples del objeto (figura 19b). Si los objetos son extensos (como las galaxias), las imágenes aparecen deformadas como arcos brillantes (figuras 20a, 20b y 20c).

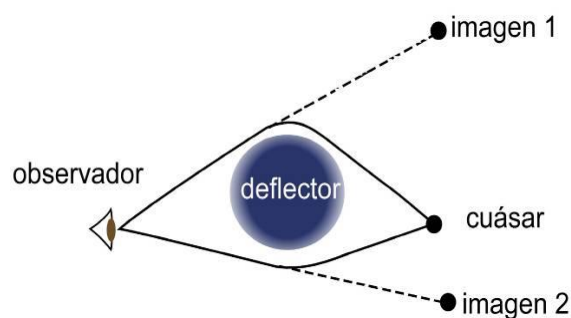


Fig. 19a: Al observador le parece que le llegan rayos luminosos desde dos lugares distintos, y ve dos imágenes.

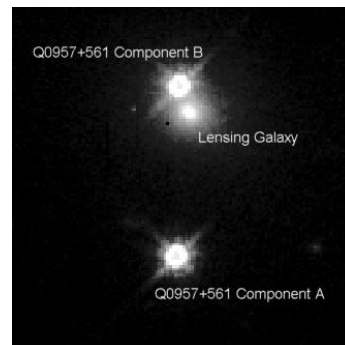


Fig. 19b: Fotografía de la imagen doble del Cuásar Q0957+561. El deflector es la galaxia cercana al componente B

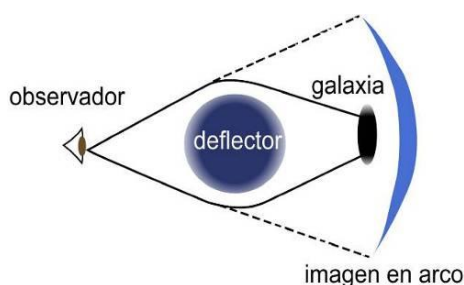


Fig. 20a: Si el cuerpo desviado es un objeto extenso, las imágenes obtenidas son un conjunto de arcos brillantes o un anillo completo.

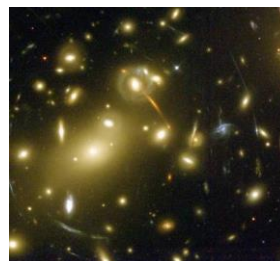


Fig. 20b: Arcos luminosos gigantes formado por el cúmulo de galaxias Abell 2218.



Fig. 20c: Anillo completo de una galaxia que está detrás del deflector brillante.

Actividad 8: Simulación de lente gravitacional con una copa de vino.

Podemos simular una lente gravitacional utilizando una copa de vino. El experimento permite “mostrar” cómo la materia puede introducir deformaciones en las imágenes observadas.

Es fácil comprobar que esta simulación da lugar a la "deformación del espacio" que se observa. Basta situar la copa sobre un papel milimetrado y observar a través del vino blanco (o zumo de manzana) y ver esta deformación (figuras 21a y 21b).



Fig. 21a y 21b: Sólo podemos ver la deformación de la cuadrícula si la copa está llena.

Veamos ahora cómo simular el anillo de Einstein o la multiplicidad de imágenes. Es suficiente tomar una linterna, situarla al otro lado de la copa de vino tinto y ver el rayo de la luz que pasa a través de ella.

Podemos ver y mover de derecha a izquierda y de arriba a abajo la luz de la linterna. Observamos que la luz, en general, no es puntual: se producen imágenes repetidas y de arriba a abajo. Observamos que la luz produce imágenes repetidas y en algunos casos algunos arcos. Esto es a consecuencia de que la copa actúa como un lente que deforma la trayectoria de la luz. En particular podemos observar a veces una figura amorfa, o un punto rojo brillante, cuatro puntos rojos o un arco entre los puntos rojos (figuras 22a, 22b y 22c).



Fig. 22a: La luz de la linterna se ve un arco entre dos puntos brillantes rojos, Fig. 22b: como una figura amorfa, y Fig. 22c: la cruz de Einstein.

También podemos simular la lente gravitacional mirando a través del pie de una copa. Si ponemos el pie de la copa sobre un papel milimetrado y observamos a través de él, podemos ver la deformación de la cuadrícula (figura 23). Moviendo lentamente de derecha a izquierda el pie de la copa sobre un objeto, por ejemplo un círculo rojo de unos 3 cm, iremos reproduciendo los diferentes objetos reales observados en las lentes gravitacionales (figuras 24a, 24b y 24c).



Fig. 23: Deformación de la cuadrícula.



Fig. 24a, 24b y 24c: El pie de copa es un simulador de diversos objetos: segmentos de arco, imágenes de la cruz y anillo de Einstein

Bibliografía

- Moreno, R *Experimentos para todas las edades*, Ed. Rialp, Madrid, 2008.
- Moreno, R, *Taller de Astrofísica*, Cuadernos ApEA, Antares, Barcelona, 2007.
- Moreno, R, *Historia Breve del Universo*, Ed. Rialp, Madrid, 1998.
- Moreno, A, Moreno, R, *Taller de Astronomía*, Ediciones AKAL, Madrid, 1996.
- Ríaza, E, Moreno, R, *Historia del comienzo: George Lemaître, padre del Big Bang*, Ediciones Encuentro, Madrid, 2010.
- Ros, R.M, *Experiments and exercises involving gravitational lenses*, Proceedings 1st ESO-EAAE Astronomy Summer School, Barcelona 2007.
- Ros, R.M, *Gravitational lenses in the classroom*, Physics Education, 43, 5, 506, 514, Oxford, 2008.

Fuentes Internet

- <http://www.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/index.shtml>
- <http://www.dsi.uni-stuttgart.de>
- <http://georgeslemaitre.blogspot.com/>
- <http://www-ra.phys.utas.edu.au/~jlovell/simlens>
- <http://leo.astronomy.cz/grlens/grl0.html>