



12

Historia del universo

PARA COMENZAR

- **Explica el significado de la frase: «Mirar más lejos es mirar hacia el pasado». ¿Cómo utilizamos este hecho para conocer la historia del universo?**

La velocidad de la luz es muy grande, pero finita. Esto quiere decir que la luz que recibimos de un astro tarda más tiempo cuanto más lejos de nosotros esté dicho astro. Por eso, si miramos objetos muy lejanos, los vemos tal y como eran cuando la luz salió de allí, es decir, en el pasado.

Este hecho permite conocer la historia del universo, puesto que al observar objetos situados a diferentes distancias los vemos en momentos diferentes de la historia del universo.

- **¿Qué edad tenía el universo cuando emitió la galaxia MACS0647-JD la luz que vemos en la imagen?**

Si la edad es el 3,6 % de su edad actual, 13 800 millones de años:

$$\frac{3,6}{100} \cdot 13\,800 \text{ millones de años} \approx 500 \text{ años}$$

ACTIVIDADES

1. **Júpiter se encuentra a una distancia del Sol de 5,2 ua. Calcula esta distancia en años luz y en pársecs.**

Aplicamos el factor de conversión correspondiente para expresarlo en años luz:

$$5,2 \cancel{\mu\text{a}} \cdot \frac{1 \text{ año luz}}{9,46 \cdot 10^{15} \cancel{\text{m}}} \cdot \frac{1,5 \cdot 10^{11} \cancel{\text{m}}}{1 \cancel{\mu\text{a}}} = 8,25 \cdot 10^{-5} \text{ años luz}$$

Y en pársecs:

$$5,2 \cancel{\mu\text{a}} \cdot \frac{1 \text{ pc}}{206\,265 \cancel{\mu\text{a}}} = 2,52 \cdot 10^{-5} \text{ pc}$$

2. **La distancia del Sol al centro de la Vía Láctea es 8500 pc. Calcula esta distancia en años luz y en unidades astronómicas.**

De nuevo aplicamos los factores de conversión correspondientes.

$$8500 \cancel{\text{pc}} \cdot \frac{3,2616 \text{ años luz}}{1 \cancel{\text{pc}}} = 2,77 \cdot 10^4 \text{ años luz}$$

$$8500 \cancel{\text{pc}} \cdot \frac{206\,265 \text{ ua}}{1 \cancel{\text{pc}}} = 1,75 \cdot 10^9 \text{ ua}$$

3. **Utilizando la información que se muestra en este epígrafe, explica cómo se puede deducir la distancia a la que se encuentra una estrella cefeida cuyo periodo es de cuatro días.**

El periodo de la cefeida está relacionado con la magnitud absoluta, M , o luminosidad de la cefeida. Es decir, si medimos el periodo podemos conocer cuánta luz emite la cefeida. Por otra parte, observando la estrella desde Tierra podemos conocer su brillo, es decir, su magnitud aparente, m , o cuánta energía nos llega. Y comparando la energía que emite (luminosidad) con la energía que recibimos (brillo), deducimos la distancia.

4. Completa un esquema numerado con los pasos que hay que seguir para deducir la distancia a una nebulosa. ¿Podríamos elegir cualquiera de sus estrellas para el estudio?

Para deducir la distancia a una nebulosa:

1. Identificamos un objeto, o mejor varios, de luminosidad conocida.
2. Medimos el brillo o magnitud aparente de dicho objeto.
3. Comparamos la magnitud absoluta con la magnitud aparente y deducimos la luminosidad.

No se puede elegir cualquier estrella para realizar el estudio porque no conocemos la luminosidad de todas las estrellas. En el caso de las cefeidas se aprovecha el hecho de que el periodo de variación en el brillo de la estrella está relacionado con la luminosidad o magnitud absoluta de la estrella.

5. Razona cuál crees que es la mayor utilidad de la ley de Hubble en astronomía.

La ley de Hubble permite conocer la distancia a objetos lejanos en el universo midiendo el desplazamiento de las líneas espectrales.

6. Razona por qué los primeros elementos químicos que se crearon fueron el H y el He y estaban en una proporción 3:1.

El H y el He son los elementos que tienen menos protones en su núcleo. Y al comienzo del universo no existían núcleos, sino distintas partículas moviéndose con altas energías. En un núcleo de H hay una sola partícula: un protón. En un núcleo de He hay cuatro partículas: dos protones y dos neutrones. Por eso se formaron más núcleos de H que de He.

7. Explica cómo se formó la radiación cósmica de fondo.

A medida que el universo se fue enfriando, los núcleos atómicos fueron capaces de retener a los electrones girando alrededor de ellos. En ese momento la luz pudo atravesar una cantidad apreciable de espacio, pues hasta entonces los fotones eran continuamente dispersados por los electrones libres no ligados a los átomos. Esto sucedió unos 400 000 años después del nacimiento del universo.

Estos fotones son los que constituyen la radiación cósmica de fondo.

8. ¿Cómo se explica la aparición de las primeras estrellas y galaxias?

Las primeras estrellas y galaxias se formaron gracias a la acumulación de materia debido a la atracción gravitatoria. Las primitivas inhomogeneidades de densidad en el universo hicieron que la masa se agrupase en torno a ciertas acumulaciones de materia que se fueron haciendo cada vez más grandes debido a la atracción gravitatoria.

9. ¿Qué queremos decir al señalar que la evolución de una estrella depende de su masa?

Pues que el tiempo de la vida de la estrella y las diferentes fases por las que pasa dependen de la masa de la estrella. Las estrellas más masivas queman su combustible mucho más rápidamente, por lo que su vida es mucho más corta que la de las estrellas de menos masa.

Además, una estrella masiva puede acabar sus días formando una explosión de supernova, por ejemplo, algo que no puede lograr una estrella de poca masa como el Sol.

10. ¿Cómo se explica la abundancia de distintos elementos químicos si en los primeros minutos de vida del universo solamente se formaron hidrógeno, helio y un poco de litio?

Los elementos químicos más pesados que el litio se han formado en el interior de las estrellas en reacciones de fusión nuclear. Y los elementos más pesados que el hierro se han generado en las explosiones de supernova.

11. Explica qué hechos experimentales hicieron pensar a los astrónomos que en el universo había más materia de la que podemos detectar con nuestros telescopios.

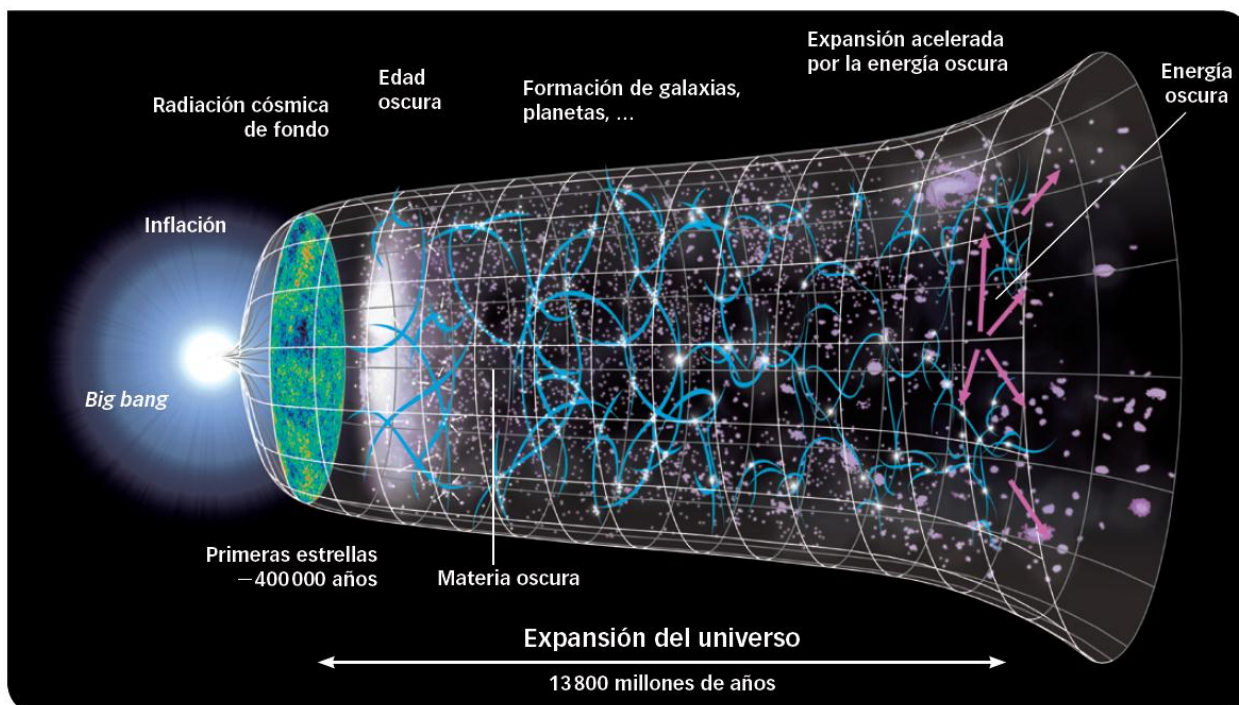
En primer lugar se observó en los cúmulos de galaxias que las galaxias se movían a una velocidad tan grande que el cúmulo debería haberse disgregado.

A continuación la observación de la velocidad de rotación de diferentes estrellas alrededor del centro de su galaxia permitió saber que esta velocidad se mantenía constante a medida que nos alejamos del centro galáctico, algo que no debe ocurrir si la masa de la galaxia es la que se infiere de las observaciones, que muestran una acumulación de materia en el núcleo galáctico.

Como las estrellas de la periferia se mueven más o menos a la misma velocidad alrededor del centro galáctico que las estrellas más internas, esto quiere decir que hay materia en la periferia que no vemos, pero que ejerce una fuerza gravitatoria sobre las estrellas haciendo que aumente su velocidad alrededor del centro galáctico.

12. ¿Qué quiere decir que la expansión del universo se está acelerando? Explícalo con un esquema.

Quiere decir que la velocidad de las galaxias más lejanas es cada vez mayor. Si medimos la velocidad de recesión de las galaxias en la actualidad, es mayor que la que tenían en el pasado.



13. Explica con pocas palabras la relación existente entre la física de partículas y la cosmología.

La física de partículas estudia las características de partículas que se forman cuando chocan entre sí otras partículas con una energía muy elevada. Estas condiciones son precisamente las que reinaban cuando el universo tenía solo unos instantes de vida. Por eso, estudiar el comportamiento de la materia con estas altas energías nos proporciona información sobre las condiciones reinantes en el universo temprano.

14. Explica por qué debería existir la misma cantidad de materia que de antimateria en el universo según la teoría del big bang.

Cuando dos partículas chocan con una energía elevada, puede dar lugar a la aparición de varias partículas y antipartículas, pero el número de partículas y de antipartículas se conserva. Es decir, si chocan una partícula y su antipartícula, se pueden formar varias partículas, pero siempre se forman el mismo número de partículas y de antipartículas.

Por eso, en el universo temprano deberían haberse formado el mismo número de partículas y de antipartículas. Por ejemplo, un fotón puede dar lugar a un electrón y un positrón si tiene la energía suficiente.

15. ¿Por qué resulta tan difícil de estudiar la materia oscura?

Porque es una materia invisible que no interacciona ni con la materia ordinaria ni con la radiación. Solamente se dejan sentir sus efectos gravitatorios, pero no se ha detectado qué partículas hipotéticas podrían constituir esa materia oscura.

16. Resume la información del texto en unas pocas líneas.

Respuesta personal. El satélite Planck lanzado por la Agencia Espacial Europea (ESA) ha descubierto que las primeras estrellas nacieron más tarde de lo que se pensaba hasta ahora. Lo ha hecho estudiando las propiedades de la radiación cósmica de fondo.

17. Según el texto, ¿qué información puede extraerse del análisis de la radiación cósmica de fondo?

Del análisis de la radiación cósmica de fondo puede deducirse cómo estaba agrupada la materia en el momento en que se formó esta radiación. Además, también puede conocerse información sobre la edad del universo, la temperatura del universo cuando se formó esta radiación o el ritmo al que se expande el universo.

18. Explica qué es la luz polarizada.

La luz polarizada es luz que tiene una dirección preferente para la dirección en que vibran los campos eléctricos y magnéticos que forman la luz. Cuando la luz está sin polarizar, estos campos eléctricos y magnéticos vibran por igual en todas las direcciones del espacio.

19. ¿Cómo ha llegado la luz que capta el telescopio Planck? ¿De dónde procede? ¿Qué significan los diferentes colores que muestra la imagen obtenida por la sonda Planck?

El telescopio Planck capta luz emitida en el universo en el momento en que la luz comenzó a tener libertad para recorrer el universo. Anteriormente, la luz se veía dispersada continuamente por los electrones libres presentes en el universo, que no se habían unido a los núcleos atómicos. En el momento en que los electrones se unieron a los núcleos y se formaron los átomos, la luz tuvo libertad para atravesar el universo y esa es precisamente la luz que recibimos como radiación cósmica de fondo.

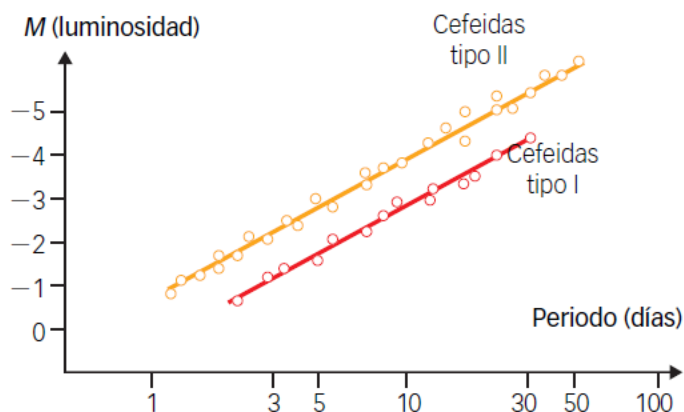
La luz procede de los fotones presentes en el universo cuando comenzaron a unirse electrones y núcleos, cuando el universo tenía unos 4000 000 años.

Los diferentes colores que muestra la imagen obtenida por Planck representan variaciones en la temperatura en diferentes regiones del universo primitivo. Estas variaciones de la temperatura están relacionadas con fluctuaciones en la densidad.

20. ¿Qué datos han permitido deducir que las primeras estrellas nacieron más tarde de lo que se creía hasta ahora?

El estudio de la polarización de la radiación cósmica de fondo. La polarización de la radiación refleja cuáles eran las condiciones cuando comenzaron a formarse los átomos, es decir, cuando se pasó de una amalgama de protones, electrones y neutrinos a la formación de átomos y la posibilidad para los fotones que ahora constituyen la radiación de fondo de viajar por el universo sin verse continuamente dispersados por electrones libres.

21. Observa la gráfica.



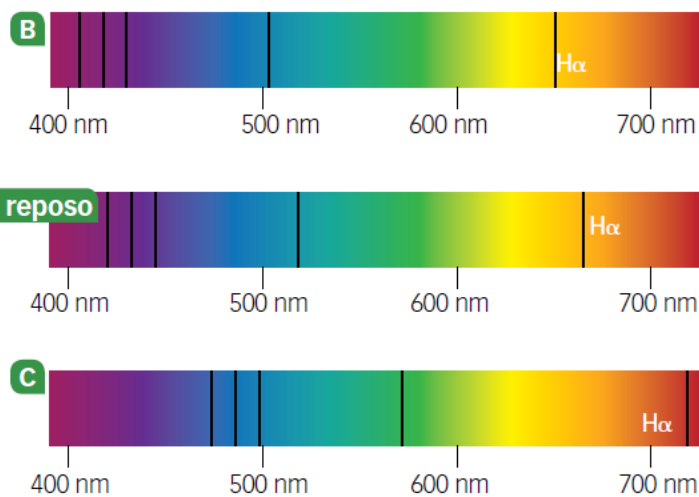
- ¿Qué cefeida emitirá más luz, una de tipo I con un periodo de 5 días o una con un periodo de 10 días?
- ¿Qué cefeida emitirá más luz, una de tipo II con un periodo de 5 días o una de tipo I con un periodo de 10 días?
- Si ambas se observan desde la Tierra con el mismo brillo, ¿cuál estará a mayor distancia?

- Emitirá más luz una cefeida de tipo I con un periodo de 5 días, pues su magnitud absoluta es algo mayor, según se aprecia en la gráfica.
- La de tipo I también, pues su magnitud absoluta es mayor.
- Si ambas se observan con el mismo brillo, estará a mayor distancia aquella que tiene una mayor luminosidad, es decir, la cefeida de tipo I.

22. Imagina ahora que dos cefeidas de tipo I con periodos de 5 y 10 días respectivamente se han observado con el mismo brillo en diferentes galaxias. ¿En cuál de ellas cabría esperar un mayor desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales? ¿Por qué?

La cefeida que tiene un mayor periodo de variabilidad será también la que tiene una magnitud absoluta mayor, es decir, la más luminosa. Por tanto, si ambas tienen el mismo brillo, la cefeida más luminosa es la que se encuentra más lejos de la Tierra; es decir, es aquella en la que deberían aparecer líneas espectrales con mayor desplazamiento al rojo.

23. El espectro A corresponde al obtenido en un laboratorio en la Tierra. Los espectros B y C corresponden a estrellas situadas en diferentes galaxias.



- ¿Cuál de las dos galaxias se está acercando a la Tierra?
- ¿Cuál se está alejando de la Tierra?
- ¿Cómo es posible que una galaxia se esté acercando a la Tierra si el universo se está expandiendo?

- Se está acercando a la Tierra la galaxia B, pues se ve que las líneas del espectro están desplazadas hacia el azul con respecto al espectro obtenido en reposo.
- Se está alejando a la Tierra la galaxia C, pues se ve que las líneas del espectro están desplazadas hacia el rojo con respecto al espectro obtenido en reposo.
- Porque el fenómeno de expansión del universo es un fenómeno global, a gran escala, pero puede ocurrir que las velocidades peculiares de galaxias cercanas sean mayores que la velocidad de recesión correspondiente al fenómeno de la expansión del universo.

24. Una galaxia se encuentra a 10 millones de años luz de nuestro planeta.

- Calcula a qué velocidad se aleja de nosotros.
- Suponiendo que se moviese a esa velocidad, ¿qué distancia recorrería en 100 años?

Datos: $H_0 = 21,8 \text{ (km/s)/millón de años luz}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

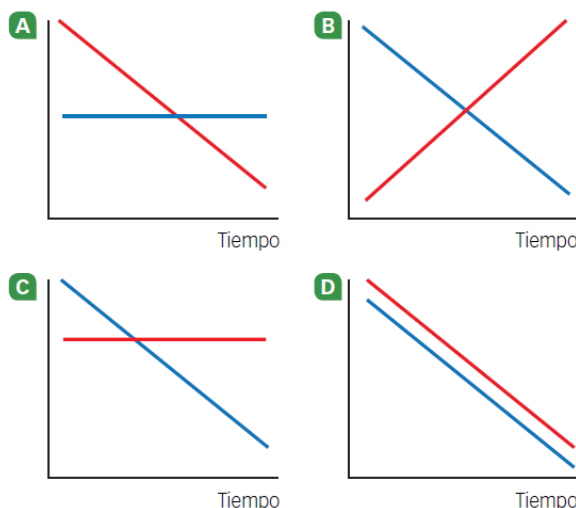
a) La velocidad a la que se aleja la galaxia puede calcularse a partir de la ley de Hubble:

$$v = H_0 \cdot d = 21,8 \text{ (km/s)/millón de años luz} \cdot 10 \text{ millones de años luz} = 218 \text{ km/s}$$

b) La distancia recorrida en 100 años sería:

$$v = \frac{d}{t} \rightarrow d = v \cdot t = 218 \frac{\text{km}}{1 \cancel{\text{s}}} \cdot \frac{3600 \cancel{\text{s}}}{1 \cancel{\text{h}}} \cdot \frac{24 \cancel{\text{h}}}{1 \cancel{\text{día}}} \cdot \frac{365,25 \cancel{\text{días}}}{1 \text{ año}} \cdot 100 = 6,88 \cdot 10^{11} \text{ km/año}$$

25. Señala cuál de las siguientes gráficas muestra una correcta variación de la **temperatura** y de la **densidad** del universo.



Tanto la temperatura como la densidad del universo eran mayores cuando el universo era más joven, y en ambos casos su valor va disminuyendo a lo largo de la historia del universo. Por tanto, la gráfica correcta es la d.

26. La radiación cósmica de fondo está formada por fotones ubicados en la región de microondas del espectro electromagnético. Cuando se formaron, ¿cómo era su longitud de onda, mayor o menor que ahora? Explica tu respuesta.

Cuando se formaron la longitud de onda de los fotones era mucho menor que ahora. A medida que el universo se ha expandido, también lo ha hecho la longitud de onda de los fotones que ahora constituyen la radiación cósmica de fondo. La expansión del universo causa que se «estiren» los fotones.

27. ¿Qué momento del universo podríamos llegar a observar analizando la luz que llega al telescopio más potente que se pueda construir? Explica tu respuesta relacionándola con la radiación cósmica de fondo.

Con el telescopio más potente podríamos llegar a observar el instante en que se formó la radiación cósmica de fondo, es decir, cuando el universo tenía unos 4000 000 años. Antes de esa época el universo no era transparente a los fotones presentes, por lo que no podemos observar fotones procedentes de una época más antigua.

28. ¿Tiene sentido hablar de antes del *big bang*? Explica tu respuesta.

El *big bang* es el nombre de la teoría que explica la evolución del universo, y también el término con el que se conoce al instante en que nació nuestro universo. En principio, podemos pensar que el universo nació en ese instante y no podemos hablar de instantes anteriores.

Sin embargo, existen teorías que se atreven a hablar de instantes anteriores al *big bang*. Por ejemplo, que hablan de universos cíclicos en los que el universo «rebota» y vuelve tras expandirse a contraerse y realizar un ciclo inverso a la expansión que actualmente vivimos.

29. La radiación de fondo de microondas está formada por fotones. Ahora pertenecen a la región de las microondas.

- ¿Cómo era su longitud de onda cuando fueron emitidos?
- Si los detectamos con una frecuencia de 160,2 GHz, ¿qué longitud de onda tienen?
- La intensidad de la radiación de fondo de microondas es de 10^{-9} W/cm^2 . Determina entonces cuántos fotones atraviesan en un segundo una superficie cuadrada de 5 cm de lado.

Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

- Cuando fueron emitidos tenían una longitud de onda menor que ahora.
- La longitud de onda puede calcularse aplicando la expresión que relaciona la frecuencia, la longitud de onda y la velocidad de la luz en el vacío:

$$c = \lambda \cdot f \rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{160,2 \cdot 10^9 \text{ Hz}} = 1,87 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,87 \text{ mm}$$

- La intensidad de la radiación indica la energía por unidad de tiempo y unidad de superficie. Entonces:

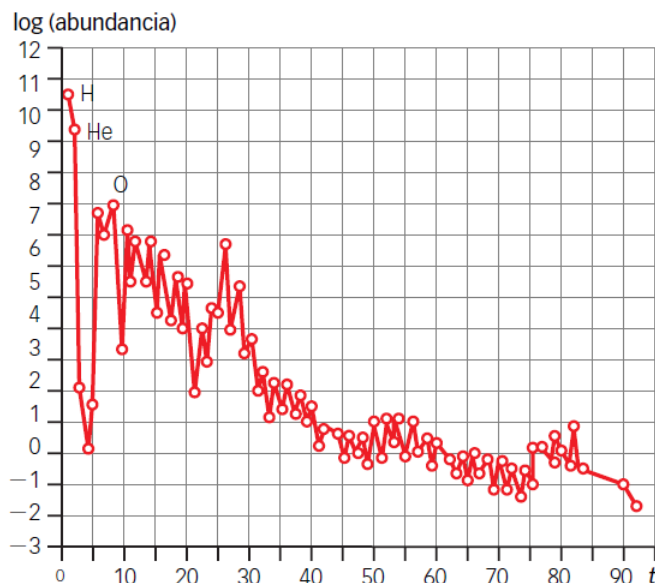
$$I = \frac{N \cdot E_{\text{Fotón}}}{t \cdot S} \rightarrow N = \frac{I \cdot t \cdot S}{E_{\text{Fotón}}} = \frac{I \cdot t \cdot S}{h \cdot f} = \frac{10^{-9} \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot 1 \text{ s} \cdot 5^2 \text{ cm}^2}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot 160,2 \cdot 10^9 \text{ Hz}} = 2,35 \cdot 10^{14} \text{ fotones}$$

30. La vida existe sobre la Tierra unos 13 800 millones de años después del *big bang*, cuando la temperatura del universo es de unos 2,7 K. Explica cómo es posible que, en estas circunstancias, tenga lugar la vida que conocemos.

La temperatura mencionada en el enunciado es la temperatura correspondiente a la radiación cósmica de fondo, como si fuese la temperatura media del universo. A esa temperatura la vida tal y como la conocemos no puede existir. Sin embargo, la temperatura, evidentemente, no es constante en diferentes regiones. Existen regiones donde la temperatura es mucho mayor. Y por eso existen regiones donde las condiciones para la vida, hablando de la temperatura, son adecuadas.

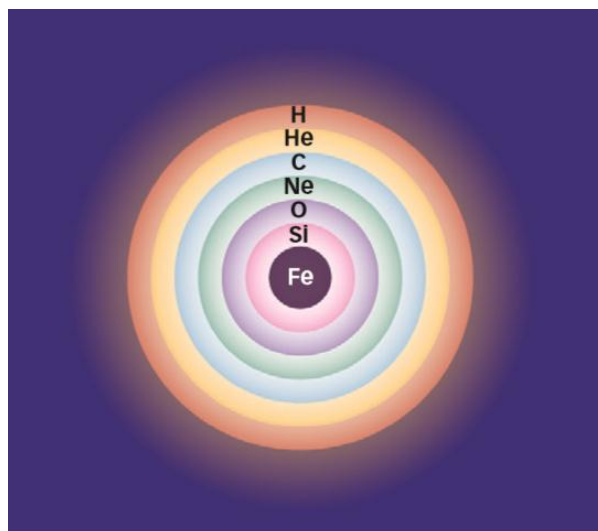
31. La gráfica siguiente muestra las abundancias relativas de los distintos elementos del sistema periódico en el sistema solar.

- ¿Dónde y en qué época del universo se han formado los tres elementos más abundantes?
- ¿Y el fósforo?
- Explica cómo y dónde se han formado los elementos con número atómico Z mayor que el hierro.



- a) Los elementos más abundantes son H, He y O. El H y el He se formaron en los primeros instantes del universo, aunque el He sigue formándose en cierta medida en el interior de muchas estrellas. El O, por el contrario, solo se ha podido formar en el interior de las estrellas, tras reacciones de fusión nuclear en las que el H y el He se van transformando sucesivamente en elementos más pesados.
- b) El fósforo se ha formado en el interior de las estrellas.
- c) Los átomos pertenecientes a elementos con número atómico mayor que el hierro solo pueden formarse durante las explosiones de supernova. En el interior de las estrellas el elemento más pesado del que se forman átomos es el hierro, pues para los siguientes elementos que le siguen en número atómico es necesario aportar energía, pues al hierro le corresponde la mayor energía de enlace por nucleón.

32. La siguiente imagen ilustra cómo se distribuye la materia en una estrella justo antes de convertirse en supernova.



- a) Explica la estructura que se muestra.
 - b) ¿De qué depende que se formen o no ciertas sustancias en el interior de la estrella?
 - c) ¿Se formará siempre un agujero negro?
 - d) ¿Qué relación tienen las explosiones de supernova con los elementos químicos presentes en la Tierra? Pon un ejemplo de objeto que uses habitualmente y cuyos átomos se hayan formado necesariamente en una explosión de supernova.
- a) La estructura indica que en el núcleo más interno existen núcleos de hierro. A medida que nos desplazamos hacia el exterior de la estrella el número atómico de los átomos presentes va disminuyendo, hasta llegar a las capas más externas, donde el elemento más abundante es el hidrógeno.
 - b) Que se formen ciertas sustancias depende de la masa de la estrella. En las estrellas poco masivas, como el Sol, se forman los elementos ligeros que siguen al hidrógeno en orden de número atómico. En las estrellas más masivas, sin embargo, se pueden formar átomos más pesados.
 - c) No siempre se formará un agujero negro, porque esto depende de que la estrella tenga una masa inicial mucho mayor que la del Sol.
 - d) En las explosiones de supernova se forman los átomos de los elementos químicos más pesados que el hierro. Por tanto, todos los átomos presentes en la Tierra que corresponden a átomos de elementos químicos con número atómico mayor que 26, el número atómico del hierro, se han formado en explosiones de supernova. Por ejemplo, los átomos de oro, de plata, de plomo, etc., se han formado en el interior de una supernova.

33. Explica por qué las estrellas de neutrones tienen una densidad enorme: una sola estrella tiene un diámetro de unos pocos kilómetros.

Porque en una estrella de neutrones los electrones se unen a los protones de los núcleos y se forman neutrones, de manera que no existe el espacio vacío típico de los átomos, en los que los electrones giran alrededor de los núcleos a cierta distancia, de tal modo que la mayor parte de los átomos está vacío. Esto hace posible que en unos pocos kilómetros pueda condensarse toda la materia de una estrella.

34. ¿Es lo mismo materia oscura que agujero negro?

No, agujero negro es una acumulación de materia muy densa que no permite escapar ni siquiera a la luz. Mientras que la materia oscura, que debería llamarse materia invisible, es materia que no podemos detectar salvo por sus efectos gravitatorios sobre materia cercana.

35. Explica qué se entiende por materia oscura y energía oscura. Razona qué evidencias podemos tener de las mismas.

La materia oscura hace referencia a materia que no interacciona con la materia ordinaria y cuyos efectos únicamente se dejan notar por sus efectos gravitatorios sobre otros tipos de materia. La energía oscura es algo muy diferente: no se sabe muy bien en qué consiste, pero su consecuencia es una especie de repulsión gravitatoria a gran escala en el universo.

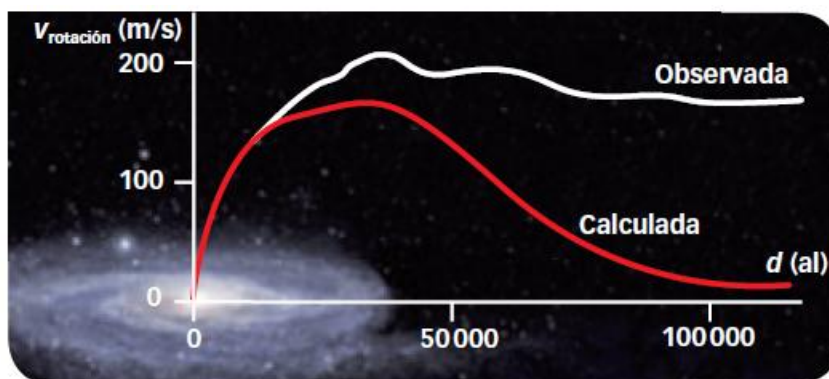
De la materia oscura tenemos varias evidencias. Por ejemplo, en los cúmulos galácticos se observa menos materia de la necesaria para que las galaxias del cúmulo no escapen del mismo. Y en las galaxias espirales se observa que la velocidad de las estrellas no disminuye como sería de esperar a medida que nos alejamos del núcleo galáctico, lo que indica la existencia de materia que no podemos ver. También se buscan evidencias de la materia oscura en detectores de partículas o en experimentos realizados en colisionadores de partículas.

De la energía oscura tenemos una evidencia: la aceleración en la expansión del universo deducida del estudio de supernovas lejanas.

36. Explica la frase: «La materia oscura es transparente».

Quiere decir que la materia oscura no interacciona con la luz. Es decir, los fotones pasan a través de la materia oscura sin interactuar con ella en absoluto.

37. Explica la siguiente gráfica relacionada con el descubrimiento de materia oscura en las galaxias.



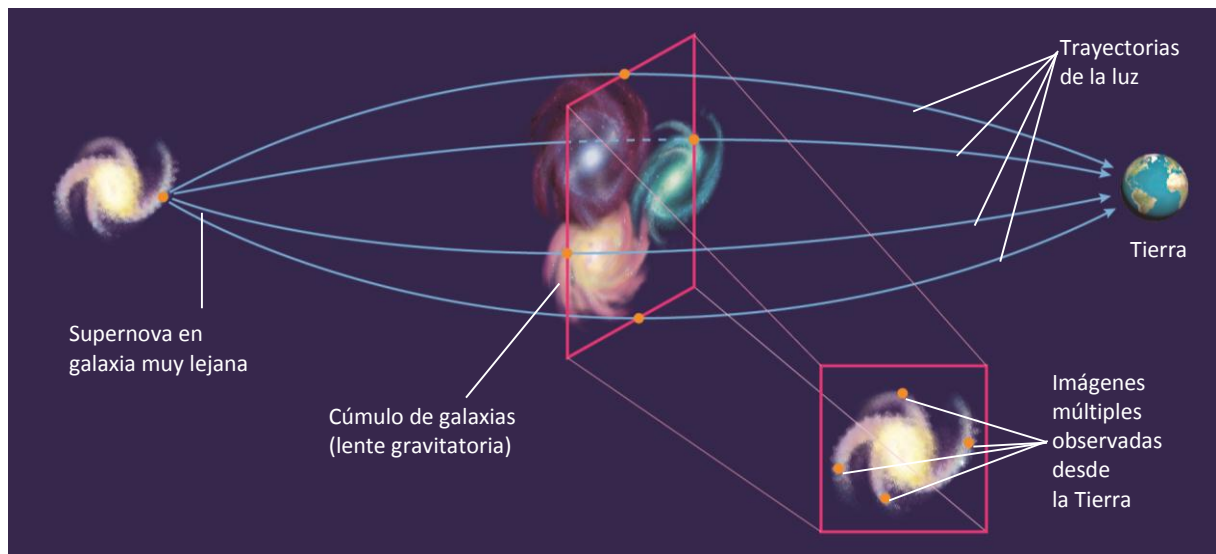
La velocidad de rotación de las estrellas alrededor del núcleo galáctico debería disminuir a medida que nos alejamos del centro galáctico, pues la cantidad de materia va disminuyendo. Sin embargo, se aprecia que la velocidad se mantiene prácticamente constante, lo que confirma la existencia de materia que no podemos ver, pero cuyos efectos gravitatorios se dejan notar.

38. La siguiente imagen obtenida por el telescopio espacial Hubble en 2014 muestra múltiples imágenes de una supernova observada en una galaxia situada a 9300 millones de años luz de la Tierra. Se aprecian múltiples imágenes de la supernova porque el cúmulo de galaxias situado entre la supernova y nuestra galaxia actúa como una lente y desvía la luz.



- Haz un esquema que muestre la situación de la Tierra, la galaxia que aloja la supernova y el cúmulo de galaxias que provoca la aparición de múltiples imágenes.
- Explica cómo pueden aprovecharse imágenes como esta para estudiar la materia oscura.

- a) Entre la supernova y la Tierra existe un cúmulo de galaxias que desvía la luz procedente de la supernova, la desdobra y esto hace que apreciemos varias imágenes de la supernova en regiones diferentes y adyacentes del cielo.



- b) Este tipo de imágenes nos permite llegar a medir la masa que tiene el cúmulo que actúa como lente gravitatoria y que modifica la trayectoria de la luz de las estrellas lejanas. A partir de estas imágenes se puede deducir la masa de los objetos intermedios y comparar este valor con la masa deducida de la materia visible.

39. ¿Por qué los grandes colisionadores de partículas nos sirven para comprobar cuáles eran las condiciones del universo en los instantes posteriores al *big bang*?

Porque en los colisionadores las partículas involucradas alcanzan energías similares a las que tenían cuando el universo acababa de nacer. Y las reacciones observadas en los colisionadores serían parecidas a las que tuvieron lugar en los primeros instantes de vida del universo.

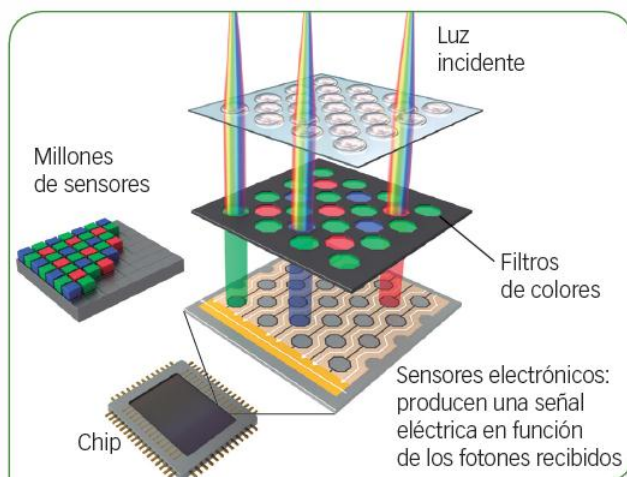
40. Una de las debilidades del modelo estándar es que no permite hacer un estudio de la interacción gravitatoria similar al de las otras interacciones fundamentales. Busca información y argumenta sobre las posibilidades de detectar el gravitón en experimentos similares a los que se llevaron a cabo en el LHC para detectar otras partículas.

Respuesta personal. La detección del gravitón no parece estar cercana experimentalmente hablando. Realmente no hay predicciones que muestren que en un futuro inmediato algunos experimentos vayan a detectar gravitones.

FÍSICA EN TU VIDA

1. Explica con un esquema la formación de imagen en una cámara digital.

En una cámara digital la luz que llega por el objetivo llega hasta un sensor después de pasar por filtros de varios colores: rojo, verde y azul. Al incidir sobre el chip, se aprovecha el efecto fotoeléctrico y los fotones incidentes provocan la aparición de pequeñas corrientes en el sensor de la cámara. Esta corriente luego se amplifica y se convierte en información útil, de manera que la imagen se forma identificando a qué sensores han llegado los fotones.



2. ¿Por qué la cosmología y otros campos de la astronomía experimentaron un notable avance con la llegada de las cámaras CCD?

Porque la llegada de los sensores digitales hizo que aumentara espectacularmente la eficiencia de los detectores, de manera que se aprovechaba una mayor cantidad de la luz que llegaba al sensor. Esto hizo que los tiempos necesarios para obtener imágenes de los objetos más tenues y lejanos se acortaran.

Y además, los detectores digitales permiten manipular las imágenes mucho más fácilmente, con lo cual es posible, por ejemplo, tomar muchas imágenes con un tiempo de exposición de unos pocos minutos, y luego sumar digitalmente las imágenes para conseguir imágenes más nítidas.

Esto ha permitido, por ejemplo, obtener imágenes de objetos muy lejanos y tenues que no habrían podido detectarse empleando las películas fotográficas tradicionales.

3. Si un sensor CCD es capaz de obtener una imagen de una galaxia utilizando un tiempo de exposición de 45 minutos, ¿cuánto tiempo habría sido necesario empleando una película fotografía analógica? ¿Se habría podido tomar realmente la imagen con un telescopio terrestre?

La respuesta de los sensores digitales es mucho más eficiente que la de las películas fotográficas. En concreto, los sensores digitales aprovechan en torno a un 70 % de la luz que reciben, mientras que las películas fotográficas solamente convierten en información útil el 2 % de los fotones que llegan.

Por tanto, un sensor digital es 35 veces más eficiente, de manera que si un CCD necesita 45 minutos para obtener una imagen de una galaxia, empleando una película fotográfica el tiempo necesario es:

$$45 \text{ min} \cdot 35 = 1575 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 26,25 \text{ h}$$

Este tiempo de exposición es mayor que el tiempo que dura una noche en latitudes convencionales en cualquier época del año, por lo que la imagen no se habría podido tomar con una película fotográfica. Además, en el caso de las películas fotográficas las imágenes no pueden tratarse digitalmente de una manera tan sencilla para sumar y restar el fondo del cielo, por ejemplo, con lo cual si queremos obtener imágenes de una galaxia como esta, los sensores CCD han ofrecido la única opción viable.

