



Cosmología para secundaria

Juan Tomé
cosmologica.amonaria.com

Actividad: Átomos universales

Contexto

La expansión del universo se entiende como un estiramiento del espacio. Esa idea teórica está apoyada por observaciones astrofísicas. En concreto, lo que se observa desde aquí es que fotones procedentes de galaxias lejanas, situadas en cualquier dirección respecto al observador, llegan estirados, es decir, con una longitud de onda mayor de la que se supone tenían en el momento de la emisión. Se interpreta que los fotones se estiran con el espacio durante su tiempo de viaje. El estiramiento de los fotones se percibe como enrojecimiento, porque la longitud de onda de los fotones "rojos" es la mayor de las de los fotones visibles. Por eso dice que, a causa de la expansión del universo, se produce un *desplazamiento al rojo* de la longitud de onda del fotón.

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. Pero la luz emitida por esas galaxias tarda mucho en llegar a nosotros, hasta miles de millones de años. El átomo que la emitiera es, por tanto, un átomo antiguo, muy antiguo. Entonces, ¿cómo estar seguros de que los átomos que emiten los fotones ahora, 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 las luces que emiten son comparables? La respuesta es extraordinaria: los átomos de aquí y ahora puede ser tan antiguos como los de las galaxias lejanas y se formaron en procesos similares.

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

vida de algunas estrellas, son los que aportan la energía necesaria para formar núcleos de los elementos más pesados que el hierro. La misma explosión supernova que los origina, los dispersa por el universo, junto con los menos pesados que los de hierro que se habían ido formando a lo largo de la vida de la estrella que explota.

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

Nuestros átomos, y los de los materiales que nos rodean, no son átomos formados aquí. No son locales, son universales. Se formaron mediante procesos que han sucedido en cualquier parte del universo. Existían antes de que se formara el sistema solar. Son, por tanto, mucho más antiguos que nosotros, más que la Tierra, más que el Sol.

Desarrollo de la actividad

Lectura: “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 preludeo 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. Consultando al profesor o las fuentes necesarias, listarlas escribiendo su significado.
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.

Comentarios didácticos

Las reacciones nucleares que tienen lugar en el interior de las estrellas son reacciones de fusión, de aglomeración de núcleos ligeros para formar núcleos más pesados. En esas reacciones se libera energía porque la energía nuclear (energía asociada a la estructura de un núcleo) de los núcleos resultantes de la reacción es menor que la de los núcleos de partida. O de otra forma, los núcleos resultantes son más estables que los de de partida. Los núcleos de hierro son los más estables de todos. Por eso las reacciones de fusión no pueden conducir a núcleos más pesados que los

de hierro, no serían rentables energéticamente. De hecho, entre núcleos más pesados que el hierro pueden producirse reacciones nucleares de fisión, de división, que conducen a núcleos más ligeros que los de partida pero más pesados que los de hierro. En estas reacciones de fisión también se libera energía.

La energía emitida por el Sol, como cualquier energía, tiene una masa asociada según la relación de equivalencia de Einstein, $E=m \cdot c^2$. Por eso el Sol está disminuyendo su masa continuamente, en una cantidad exactamente igual a la masa de la energía emitida. Conviene cuidar el lenguaje al respecto y evitar expresiones como "*la energía emitida por el Sol, proviene de la pérdida de la masa*", que pueden hacer pensar que en las reacciones nucleares hay energía que *aparece* y masa que *desaparece*, que no se conservan ni la una ni la otra. Lo cierto es que el balance (de masa o de energía o de masa-energía) cuadra si se entiende que la relación de Einstein significa que toda masa tiene una energía equivalente y que toda energía tiene una masa equivalente. Lo mismo pasa en las reacciones químicas, pero como la masa de la energía liberada en ellas es tan pequeña (porque la energía liberada es pequeña) los balances de masa y energía pueden cuadrarse por separado sin que el error cometido sea medible experimentalmente.

La masa del Sol disminuye unos 4'5 millones de toneladas cada segundo, una cantidad enorme para nosotros pero no tanto comparada con la masa del Sol. Esa comparación permite estimar el tiempo de vida del Sol según se propone en el trabajo sobre la lectura. La estimación es simplista porque supone que el Sol mantendrá el ritmo de emisión de energía y no se tiene en cuenta que cuando se agoten las posibles reacciones nucleares a partir de hidrógeno, se producirán otras a partir de helio y otros núcleos ligeros.

Bibliografía

Altschuler, D.R., 2001, Hijos de las estrellas, Cambridge University Press, Madrid, 2001

Tomé, J. 2012, Cosmología para secundaria, Publicaciones ApEA, Antares Ed.