

Capturando la Esencia del Universo

Formación de elementos pesados por fusión de estrellas de neutrones

26 de noviembre de 2019

Wilder Chicana Nuncebay
Instituto Politécnico Nacional

La confirmación de la formación, o *nucleosíntesis*, de los elementos pesados mediante la fusión de dos estrellas de neutrones es reciente, y está relacionada con el origen de los elementos químicos que pueblan el Universo. Aunque existían pistas de cómo y dónde podrían formarse los elementos pesados, aún quedaba pendiente el tema de su abundancia. Finalmente, hace poco más de dos años, ésta incógnita parece haberse despejado y he aquí, brevemente, su interesante historia.

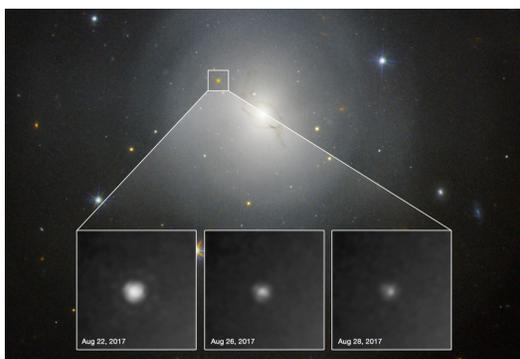
El modelo estándar de formación del Universo nos dice que los elementos ligeros (hidrógeno, helio y una pequeña fracción bien definida de isótopos de litio y berilio) se formaron en la llamada *nucleosíntesis primordial*, cuando se originó el Universo. Al mismo tiempo, se estableció la imposibilidad de que todo el helio, que se observa actualmente en el Universo, se hubiera formado allí. En la búsqueda de la solución a este problema se entendió que las estrellas eran el horno donde se realizaba la alquimia cósmica de transmutar elementos ligeros en elementos cada vez más pesados mediante procesos de fusión nuclear. A este proceso se le conoce como *nucleosíntesis estelar*.

¿Todos los elementos de la tabla periódica se formaron así? No. Las estrellas como el Sol producen elementos más pesados que el hidrógeno y el helio, pero detienen su producción cuando forman

carbono y éste se acumula en su núcleo ya que, por tener poca masa, estas estrellas no pueden alcanzar temperaturas lo suficientemente altas para producir la fusión del carbono en elementos más pesados. Por otra parte, las estrellas con diez o más masas solares producen elementos cada vez más pesados que el carbono, pero cuando llegan a formar hierro su producción se detiene debido a que este elemento, a diferencia de los previamente formados que liberan energía al transmutarse, toma de su entorno la energía necesaria para su formación, y entonces, al perder la energía que las sostenía, las capas externas de la estrella comienzan a desplomarse sobre el núcleo. Esto provoca un incremento catastrófico de la temperatura y al final, produce una tremenda explosión llamada supernova, que expulsa sus capas externas al espacio exterior. La supernova tiene energía suficiente para alimentar la formación del hierro y otros elementos más pesados. Entonces, ¿así es como se originan los elementos más pesados que el hierro? Sí. A este proceso se le llama *nucleosíntesis explosiva*.

Sin embargo, cuando se hicieron mediciones más detalladas surgió un nuevo problema: el de la abundancia de los elementos pesados, la cual era considerablemente superior a la que se esperaba si se hubiera producido únicamente por supernovas. Para explicar esta discrepancia, surgió la idea de aprovechar un proceso que originalmente se había propuesto para formar elementos pesados en

supernovas: la nucleosíntesis por captura de neutrones rápidos, o proceso-r, que con una pequeña modificación permitiría una formación abundante de elementos pesados. Solo requería de un mecanismo mucho más energético y de menor duración que una supernova. Este mecanismo, planteado teóricamente hace más de treinta años, hoy se conoce como *kilonova*, y se llamó así porque su energía sería mil veces superior a la de una supernova. Pero ¿cómo se produciría una kilonova? Mediante la fusión o colisión de un par de objetos masivos ultra compactos (dos estrellas de neutrones, o una estrella de neutrones y un hoyo negro), lo cual generaría una violenta explosión que brillaría principalmente en rayos gamma, y que además agitaría el espacio-tiempo produciendo intensas ondas gravitatorias que, con mucho esfuerzo y con un poco de suerte, podrían detectarse.



Observaciones realizadas, durante una semana completa, por el Telescopio Espacial Hubble (HST) de la kilonova GW170817. ESA/Hubble.

Increíblemente todo esto dejó de ser pura especulación cuando, el 17 de agosto de 2017, se detectó una emisión de ondas gravitatorias, desde la fuente GW170817, en coincidencia con la detección del esperado destello de rayos gamma. La presencia de estos rayos indicaba que el fenómeno correspondía al choque de dos estrellas de neutrones. Poco después dicho evento, que tuvo una duración de 18 días, se observó en luz visible, lo que permitió determinar que la emisión se originó a 130 millones de años luz de la Tierra. A esto siguió la observación del fenómeno en luz infrarroja y ondas de radio desde observatorios de diferentes partes del mundo. Cuando se evaluaron las mediciones se concluyó que, al fin, se había detectado la inequívoca firma de una kilonova.

Lo relevante para nuestra historia es que, en las observaciones posteriores, se detectó la presencia de elementos pesados, muchos de ellos radiactivos, entre los cuales había una gran abundancia de oro y platino. A partir de la fusión de dos estrellas de neutrones, cada una con aproximadamente la masa

del sol, la kilonova produjo varios miles de veces la masa de la Tierra en elementos pesados, y al menos diez veces la masa de la Tierra en forma de oro y platino! Esto quiere decir que el platino y el oro que existen en nuestro planeta, muy probablemente, se formaron en una kilonova que los esparció por el espacio exterior, arrojándolos hacia una nube de la cual se formó posteriormente el Sistema Solar. La cantidad de masa eyectada por la kilonova y la tasa de formación de elementos pesados medidos indican que, efectivamente, los eventos cataclísmicos del tipo producido por la fusión de objetos masivos ultra compactos serían el modo dominante para la producción del proceso-r que, aunque no es el único sería el más eficiente para la formación de elementos pesados.

En otro giro de tuerca a esta historia, tras un minucioso estudio de la radiación electromagnética emitida por GW170817, mediante el espectrógrafo X-shooter instalado en el Very Large Telescope (VLT) del Observatorio Europeo del Sur (ESO), pudo confirmarse el 24 de octubre de este año, la primera detección en el espacio de un elemento pesado recién formado: el estroncio. El proceso responsable de su formación tenía que ser el proceso-r (de captura rápida de neutrones) en el que un núcleo atómico captura neutrones lo suficientemente rápidos como para permitir la creación de elementos muy pesados y que sólo ocurre de forma natural en ambientes extremos donde los átomos son bombardeados por un enorme número de neutrones. Y ya que esto es justamente lo que se observa durante una kilonova, es la primera vez que fue posible asociar directamente el material recién formado mediante la captura rápida de neutrones, con el evento resultante de la fusión de estrellas de neutrones, vinculando este proceso tan largamente debatido con tales fusiones.

Así pues, este notable resultado supone la obtención de la última pieza del rompecabezas de la nucleosíntesis, y la respuesta definitiva a la pregunta sobre el origen y abundancia de los elementos pesados en el Universo.



Recreación artística de la formación y emisión de estroncio al medio interestelar, durante una fusión de estrellas de neutrones. /ESO/L. Calçada/M. Kommesser