

ASTROFÍSICA

# Una nueva clase de estrellas desafía los modelos de nucleosíntesis estelar

El descubrimiento de estrellas muy ricas en fósforo podría ayudar a entender el enigmático origen de uno de los cinco elementos esenciales para la vida en la Tierra

DOMINGO ANÍBAL GARCÍA HERNÁNDEZ Y THOMAS MASSERON



HASTA HOY, la única prueba observacional de la síntesis estelar de fósforo procedía del remanente de la supernova Casiopea A (imagen). Sin embargo, los modelos de evolución química global de nuestra galaxia no podían dar cuenta de todo el fósforo observado en la Tierra y en la Vía Láctea recurriendo únicamente a las supernovas. Ahora, los astrónomos han encontrado una nueva fuente de este elemento, aunque aún ignoran cómo lo producen las nuevas estrellas.

Todo lo que nos rodea está hecho de átomos. Los diferentes tipos de átomos que existen en la naturaleza quedaron recogidos en la célebre tabla periódica de Mendeléiev, que en 2019 celebró su 150.º aniversario. Pero ¿cuál es el origen de los elementos químicos? ¿Cómo genera la naturaleza cada especie atómica?

En 2019 los científicos también celebramos otro aniversario menos famoso: el centésimo cumpleaños de la astrónoma Margaret Burbidge, quien tristemente fa-

llecó en abril del año pasado. En 1957, Margaret, su esposo Geoffrey y los astrofísicos William Fowler y Fred Hoyle abordaron la pregunta sobre el origen de los elementos químicos en un artículo que bien puede considerarse uno de los trabajos científicos más importantes de todos los tiempos. Conocido como «artículo B<sup>2</sup>FH», en referencia a las iniciales de sus autores, en él establecieron que prácticamente todos los átomos que existen en la naturaleza (a excepción del hidrógeno y otros

pocos átomos muy ligeros, creados poco después de la gran explosión) se sintetizaron en el interior de las estrellas mediante reacciones nucleares, un proceso conocido como nucleosíntesis estelar. Así pues, el origen de todo lo que vemos, incluidas nuestras propias células, se remonta al corazón de las estrellas.

Desde entonces, las siguientes generaciones de astrónomos han intentado descifrar qué tipo particular de estrella y qué cadena concreta de reacciones nucleares

da lugar a cada uno de los elementos de la tabla periódica. Sin embargo, y a pesar de todos los avances logrados durante las últimas décadas, aún persisten algunas incógnitas. Una de ellas atañe al origen de uno de los elementos esenciales para la vida en la Tierra: el fósforo.

Junto con el carbono, el nitrógeno, el oxígeno y el azufre, el fósforo es uno de los cinco elementos necesarios para la vida tal y como la conocemos. Desempeña un papel clave en el ADN y en los procesos de intercambio de energía en las células. No obstante, los astrónomos se han preguntado durante décadas sobre su origen estelar, ya que todos los modelos predicen menos fósforo del que observamos en la Vía Láctea. Ello sugiere que, hasta ahora, las posibles fuentes de este elemento se han subestimado o pasado por alto.

El año pasado, nuestro grupo de investigación del Instituto de Astrofísica de Canarias, en colaboración con expertos del Centro de Investigación en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (CITIC) de La Coruña, dio un paso importante en esta dirección al identificar un nuevo tipo de estrellas muy ricas en fósforo. Estas estrellas no solo podrían contribuir a explicar la abundancia de este elemento esencial para la vida, sino que han planteado nuevas incógnitas, ya que su composición química desafía todos los modelos de nucleosíntesis estelar. En particular, apuntan a una fuente hasta ahora desconocida de elementos pesados, un hallazgo que podría tener importantes implicaciones para entender la evolución química de la galaxia.

### El enigma del fósforo

En su trabajo de 1957, Burbidge y sus colaboradores distinguieron dos grandes familias de elementos químicos: aquellos cuyos átomos se crean en reacciones de fusión nuclear (la unión de dos núcleos) y aquellos originados cuando un núcleo captura un protón o un neutrón. Los procesos de fusión nuclear dan lugar al hierro y a los átomos más ligeros que este, mientras que las capturas protónicas o neutrónicas originan los elementos más pesados. Estos últimos incluyen algunos tan notables como el oro, la plata, el plomo o el plutonio. El fósforo y los demás elementos esenciales para la vida pertenecen a la primera clase.

Según los modelos de nucleosíntesis, las reacciones que dan lugar al fósforo se producen en dos entornos principales:

bien en explosiones de supernova, o bien en gigantes rojas muy evolucionadas. Estas últimas, conocidas en lenguaje técnico como «estrellas de la rama asintótica de las gigantes», constituyen las etapas tardías de las estrellas similares al Sol, justo antes de formar nebulosas planetarias y morir como enanas blancas.

Hasta ahora, sin embargo, verificar con detalle esta hipótesis se había enfrentado a un problema: la ausencia de un instrumento astronómico capaz de detectar con eficiencia las débiles líneas espectrales del fósforo en el infrarrojo cercano; es decir, la «huella dactilar» de este elemento. Eso cambió hace poco gracias al Experimento de Evolución Galáctica del Observatorio de Apache Point (APOGEE), un sondeo masivo en el infrarrojo cercano de cientos de miles de estrellas de la Vía Láctea. Este proyecto es uno de los cuatro experimentos del Sondeo Digital del Cielo Sloan, la colaboración astronómica más productiva del mundo.

La cantidad de información proporcionada por estos estudios masivos es tal que, para extraerla, en los últimos años se han puesto en marcha varias colaboraciones interdisciplinarias entre astrónomos y expertos en computación y ciencia de datos. En verano de 2019, durante uno de los cafés matutinos habituales en el Instituto de Astrofísica de Canarias, los autores de este artículo y otros investigadores nos preguntamos sobre la posibilidad de aplicar métodos de ciencia de datos a las grandes bases de datos espectroscópicas, como la del proyecto APOGEE. En concreto, buscábamos una aplicación para un código desarrollado por un estudiante de doctorado y sus supervisores en el CITIC, el cual había sido diseñado para explorar enormes bases de datos de espectros estelares. ¿Podía emplearse dicho código para indagar el origen estelar del fósforo?

### Una nueva clase de estrellas

La pauta era simple: aplicar el algoritmo a los espectros de APOGEE y seleccionar aquellos que mostrasen fuertes líneas espectrales de fósforo. Al hacerlo, identificamos con éxito un grupo de 15 estrellas muy ricas en este elemento. Sin embargo, estas resultaron ser muy distintas de lo que esperábamos. Aparte de su elevada abundancia en fósforo, incluían cantidades sorprendentemente altas de otros elementos ligeros, como silicio, magnesio y aluminio: una composición que no guardaba ninguna relación con las prediccio-

nes teóricas relativas a las gigantes rojas o las explosiones de supernova.

De hecho, las proporciones observadas de elementos ligeros no se correspondían con las predicciones de ningún modelo de nucleosíntesis estelar. Nuestros resultados, publicados en agosto en la revista *Nature Communications*, indicaban que estas estrellas no habían creado el fósforo por sí mismas. Pero tampoco formaban parte de sistemas binarios, por lo que no pudieron haberlo adquirido a partir de una gigante roja compañera. Todo apuntaba a que habían nacido en un entorno ya enriquecido con fósforo, debido posiblemente a la «contaminación» de estrellas muy masivas. ¿Podíamos caracterizar a estas estrellas progenitoras?

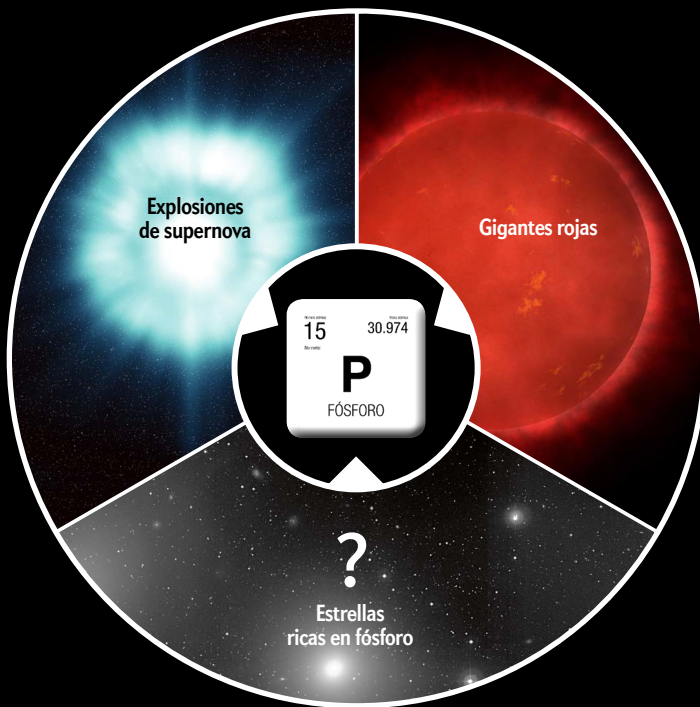
Para obtener más pistas, decidimos estudiar el patrón de elementos pesados en las estrellas ricas en fósforo; en particular, el de aquellos generados por captura de neutrones. Esto nos trae de vuelta al artículo fundacional de Burbidge y sus colaboradores. En él, los autores habían establecido dos mecanismos de captura de neutrones según la velocidad del neutrón: el «proceso *r*» (del inglés *rapid*) y el «proceso *s*» (de *slow*). En general, el primero se ha asociado a explosiones de supernova, mientras que el segundo se considera ligado a las gigantes rojas evolucionadas.

Los espectros del proyecto APOGEE correspondían al infrarrojo cercano. No obstante, analizar la abundancia de elementos pesados exige disponer de espectros ópticos. En aquel momento solo contábamos con un espectro óptico de una de las estrellas ricas en fósforo. Y aunque los datos no eran de la calidad deseada, ello bastó para obtener información sobre algunos elementos pesados, como rubidio, estroncio, bario, lantano o europio. Estos podrían revelar qué tipo de proceso (*s* o *r*) era el responsable de la formación de los elementos pesados y, de esta manera, elucidar los progenitores de las enigmáticas estrellas ricas en fósforo.

Sin embargo, tras una comparación exhaustiva con modelos teóricos muy diversos, el patrón químico observado seguía sin parecerse al predicho por ninguno de ellos. En particular, era muy llamativo el elevado contenido de bario, un «elemento *s*», así como la baja cantidad de europio, cuya formación está dominada por el proceso *r*. Pero la limitada calidad de aquel espectro no nos permitió analizar la abundancia de otros elementos

## EL MISTERIO DEL FÓSFORO

EL ORIGEN ESTELAR DEL FÓSFORO, un elemento esencial para la vida, carece todavía de explicación. Según todos los modelos, este elemento debería sintetizarse en dos entornos principales: gigantes rojas y explosiones de supernova. Sin embargo, las cantidades de fósforo predichas por estos procesos son inferiores a las observadas en la Vía Láctea.



Un trabajo reciente ha descubierto una nueva clase de estrellas muy ricas en fósforo. No obstante, su composición química no se corresponde con las predicciones de ningún modelo de nucleosíntesis estelar. Además de su alto contenido en fósforo, presentan abundancias sorprendentemente elevadas de otros elementos ligeros, como el silicio, el magnesio y el aluminio. Al mismo tiempo, apuntan a la existencia de una fuente hasta ahora desconocida de elementos químicos pesados, como el bario.

pesados; en particular la de plomo, un elemento muy interesante para discernir entre los procesos  $s$  y  $r$ , o incluso para esclarecer la existencia de un mecanismo intermedio conocido como «proceso  $i$ ».

### Una nueva fuente de elementos pesados

Llegados aquí, nos propusimos obtener espectros ópticos de otras estrellas ricas en fósforo. Aquella no fue una tarea sencilla, puesto que estas estrellas son por lo general muy débiles en la zona visible del espectro electromagnético, y solo una de ellas mostraba un brillo lo suficientemente intenso. Con todo, su observación con el Telescopio Óptico Nórdico (un instrumento de 2,5 metros de diámetro ubicado en el Observatorio del Roque de Los Muchachos, en La Palma) nos permitió obtener un espectro de gran cali-

dad. Este no solo confirmó las peculiares abundancias de elementos pesados que ya habíamos advertido anteriormente, sino que nos proporcionó información sobre otros elementos químicos.

Para caracterizar dicho espectro, comparamos las abundancias de elementos pesados con las observadas en tres tipos de estrellas (CH, EMP y CEMP) consideradas, respectivamente, como los estándares de los procesos  $s$ ,  $r$  e  $i$ . Dicha comparación presentaba la ventaja de ser independiente de todos los posibles parámetros e incertidumbres inherentes a los modelos teóricos de nucleosíntesis estelar. Ello nos permitió concluir que las nuevas estrellas ricas en fósforo presentaban una sobreabundancia de elementos pesados de tipo  $s$ . Los resultados se publicaron a finales de 2020 en *The Astrophysical Journal Letters*.

El proceso  $s$  asociado a las nuevas estrellas ricas en fósforo ha resultado ser distinto del que ocurre en las gigantes rojas evolucionadas; durante décadas, el único entorno estelar conocido donde tiene lugar la captura de neutrones lentos. Las diferencias más notables son una mayor proporción de bario frente a lantano (situado justo al lado en la tabla periódica) y un contenido de europio y plomo menor de lo esperado. Dado que, además, las abundancias de fósforo y otros elementos ligeros descartan que las gigantes rojas puedan ser las progenitoras de las estrellas ricas en fósforo, podemos concluir que estas últimas —sean cuales sean— constituyen un nuevo entorno estelar para la formación de elementos pesados.

Estos resultados desafían la teoría de formación de elementos químicos en el interior de las estrellas y podrían tener importantes implicaciones para entender la evolución química de la Vía Láctea. El hallazgo guiará los esfuerzos teóricos y observacionales para explicar las progenitoras de estas desconcertantes estrellas ricas en fósforo, al tiempo que podría constituir una pista clave para entender el origen de este elemento esencial para la vida en la Tierra. Dependiendo de la frecuencia con que ocurra la peculiar nucleosíntesis asociada a estas estrellas, el fenómeno podría explicar el fósforo presente en nuestro planeta y arrojar luz sobre la habitabilidad de otras partes de la galaxia.

**Domingo Aníbal García Hernández**  
y **Thomas Masseron**  
son investigadores del Instituto  
de Astrofísica de Canarias.

#### PARA SABER MÁS

**Phosphorus-rich stars with unusual abundances are challenging theoretical predictions.** Thomas Masseron et al. en *Nature Communications*, vol. 11, art. 3759, agosto de 2020.

**Heavy-element abundances in P-rich stars: A new site for the  $s$ -process?** Thomas Masseron et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 904, art. L1, noviembre de 2020.

#### EN NUESTRO ARCHIVO

**Estrellas masivas.** Artemio Herrero en *lyC*, marzo de 2008.

**La tabla periódica de las estrellas.** Ken Crowell en *lyC*, septiembre de 2011.

**Supernovas extremas.** Anna Y. Q. Ho en *lyC*, febrero de 2021.