

Autoridades Académicas

- Rector: **Dr. Guillermo R. Tamarit**
- Vicerrectora: **Mg. María Florencia Castro**
- Secretaria General: **Cdora. Mariana Passarello**
- Secretaria Académica: **TP. Pilar Traverso**
- Secretaria de Investigación, Desarrollo y Transferencia: **Dra. Carolina Cristina**
- Secretario de Extensión: **Lic. Juan Pablo Itoiz**
- Secretaria de Cultura: **Lic. Laura Durán**
- Secretario Legal y Técnico: **Abog. Carlos D. Pérez**
- Secretario de Relaciones Institucionales: **Cdor. Martín Palma**
- Secretaria Económico Financiera: **Cdora. Mariela García**
- Directora Centro de Edición y Diseño: **Mg. María de las Mercedes Filpe**

Director de la Revista
Dr. Ángel L. Plastino

Edita



CEDi Centro de Edición y Diseño. UNNOBA
Callao 289 3.º piso, CP. 1022
Tel 54 11 53531520. Ciudad Autónoma
de Buenos Aires, Argentina

Diseño y diagramación

CEDi Centro de Edición y Diseño

Año 9 N.º 10

Octubre de 2023

Publicación semestral

ISSN 2408-4492

Queda hecho el depósito
que marca la ley 11723

Sede Junín

Libertad 555, CP. 6000

Tel 54 236 4407750

Junín, prov. de Buenos Aires, Argentina

Sede Pergamino

Monteagudo 2772, CP. 2700

Tel 54 2477 409500.

Pergamino, prov. de Buenos Aires,

Argentina

*Se invita a potenciales colaboradores
a remitir sus trabajos al CEDi
(cedi@unnoba.edu.ar)*

www.unnoba.edu.ar



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento -
NoComercial - SinObraDerivada 4.0 Internacional.



CONSEJO EDITORIAL

Dr. Plastino, Ángel R.
UNNOBA

Dr. Tamarit, Guillermo R.
UNNOBA

Mg. Tavela, Danya V.
UNNOBA

Dra. Cristina, Carolina
UNNOBA

Mg. Filpe, Ma. de las Mercedes
UNNOBA

Arbitraje

La nuestra es una revista de divulgación que publica artículos originales, en el sentido de que no han aparecido antes en ningún otro medio.

Por ser una revista de divulgación, nuestra principal preocupación es que sus artículos sean accesibles a un público con formación universitaria. No juzgamos tanto el contenido como su accesibilidad.

Todos los artículos son arbitrados por el Consejo Editorial. La mayoría de ellos son el resultado de invitaciones especiales a reconocidos expertos en la áreas abordadas. Se aceptan también presentaciones espontáneas que se someten a riguroso escrutinio que aquí sí se centra en el contenido.

OBJETIVOS Y METAS

Existe gran retraso en el desarrollo de la divulgación de la ciencia y del pensamiento académico en general, en relación con los vertiginosos avances que se han registrado en estos últimos años. Esto ocasiona un pernicioso desfase entre la sociedad y sus científicos y académicos. Por ello resulta muy importante intentar llevar variados aspectos de la concomitante actividad al público, en formato accesible.

Esto constituye a la vez un desafío y una necesidad social. Para satisfacerla, *NÚCLEOS* propone que los propios científicos y académicos traten de ayudar a los ciudadanos a valorar su trabajo. *NÚCLEOS* pretende que nuestros autores-creadores acerquen a sus lectores una visión actualizada de recientes desarrollos, en particular aquellos que se originan en el país. Nos interesa ayudar a apreciar la relevancia del pensamiento creativo, acercándolo en forma directa desde y por sus protagonistas.

Fantásticas innovaciones y grandes sorpresas nos brindan hoy las ciencias y otras disciplinas académicas, con enormes consecuencias tecnológicas y humanas. Beneficia el desarrollo cultural de un pueblo que cierto tipo de investigaciones, hallazgos, descubrimientos y experimentos puedan ser transmitidos al público. Este forma parte de la sociedad de la información pero, en general, conoce muy poco sobre ciencia y tecnología, a pesar de que estas estén cambiando al mundo, transformando de modo radical la vida cotidiana. *NÚCLEOS* intenta, de forma modesta pero esperamos que eficaz, que se acerquen al público elementos esenciales del desarrollo actual del conocimiento.

Editorial

Acercamos al lector nuestro décimo número, con contenido variado que esperamos concite interés.

El título del primer artículo es una metáfora poética empleada para destacar la idea de que los átomos y elementos que componen nuestro cuerpo y todos los objetos en el universo se formaron en el interior de estrellas a lo largo de la historia del cosmos. Esta afirmación se basa en una comprensión científica de la formación de elementos químicos en el universo. En efecto, los átomos que constituyen la materia en la Tierra, incluyendo los que forman nuestro propio cuerpo, se originaron en el proceso de nucleosíntesis en el interior de estrellas masivas y en explosiones de supernovas. Durante estas etapas de la vida estelar, los núcleos ligeros como el hidrógeno y el helio se fusionaron para crear elementos más pesados, como el carbono, el oxígeno, el nitrógeno y otros elementos esenciales para la vida.

El trabajo sobre la Patagonia hace referencia a una temática que combina aspectos de geología, geografía, economía y política, y se centra en la explotación de hidrocarburos y otros materiales en la región norte de la Patagonia en América del Sur. Mucho de nuestro futuro depende de esta problemática.

El siguiente artículo sobre el concepto de “la construcción social del cielo” se refiere a la idea de que nuestras percepciones, interpretaciones y significados relacionados con el cielo y los astros son el resultado de influencias culturales, sociales y cognitivas. Se trata de una perspectiva que reconoce que nuestras nociones sobre el cielo no son simplemente observaciones neutrales de la naturaleza, sino que están moldeadas por nuestras experiencias culturales y nuestras interacciones sociales. El término “astronomía cultural” remite al estudio de cómo diferentes culturas y sociedades a lo largo de la historia han entendido y dado significado al cielo, las estrellas, los planetas y otros objetos celestes. Esta rama de la astronomía no solo se centra en los aspectos científicos de la observación de los cuerpos celestes, sino que también considera las dimensiones culturales y sociales de la astronomía. Aquí se hace foco en el Chaco.

Finalmente, hablamos del microscopio de efecto túnel (STM, por sus siglas en inglés). Se trata de una herramienta revolucionaria en la investigación científica que ha permitido a los científicos observar y manipular la materia a una escala nanométrica con una resolución sin precedentes. Cumplir 40 años de existencia es un hito significativo en la historia de la nanotecnología y la ciencia de materiales. El trabajo presenta aspectos destacados y fascinantes sobre el STM y su relevancia.

Dr. Ángel Luis Plastino
Director revista NÚCLEOS

TODOS TENEMOS EN NUESTRO INTERIOR ALGO DE ESTRELLA (MASIVA)

ROBERTO GAMEN* | GABRIEL FERRERO*

PALABRAS CLAVE: ESTRELLAS
MASIVAS, EVOLUCIÓN
ESTELAR, TÉCNICAS DE
OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA

RESUMEN: Las estrellas masivas revisten una importancia fundamental en el Universo. Además de ser objetos fascinantes, son las únicas (según sabemos) capaces de generar los átomos que constituyen a los seres vivos. El oxígeno del agua, el fósforo de los ácidos nucleicos, el calcio de los huesos y el sodio, que participa en el metabolismo celular y en la contracción muscular, fueron creados en las estrellas masivas. Sin estrellas masivas, la vida no podría existir como la conocemos. En este artículo, intentaremos explicar cómo se forman estos elementos químicos que posteriormente son expulsados al medio interestelar, donde se forman otras estrellas, sus sistemas planetarios y, eventualmente, seres vivos, seres humanos y astrónomos. Y cómo estos últimos pueden afirmar que todos tenemos en nuestro interior algo de estrella... masiva.

ABSTRACT: Massive stars are of fundamental importance in the Universe. They are fascinating objects, but they are also the only ones (as far as we know) capable of producing the atoms that make up all living things. Oxygen in water, phosphorus in nucleic acids, calcium in bones, and sodium, which is involved in cell metabolism and muscle contraction, were all created in massive stars. Without massive stars, life could not exist as we know it. In this article, we will try to explain how these chemical elements are formed and then released into the interstellar medium, where other stars, their planetary systems, and, eventually, living organisms, human beings and even astronomers, are born. And how can astronomers claim that we all have within us a little of a massive star.

KEYWORDS: MASSIVE
STAR, STELLAR EVOLUTION,
ASTRONOMICAL
OBSERVATION TECHNIQUES

* Instituto de Astrofísica de La Plata (CONICET, UNLP) y Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP)

INTRODUCCIÓN

Cuando contemplamos el cielo nocturno, vemos miles de luces blancas y algunas rojizas. Dejando de lado algún planeta ocasional, se trata de estrellas. Hay más de cien mil millones de estrellas solo en nuestra Galaxia, la Vía Láctea, pero nuestros ojos sólo pueden percibir a las más brillantes. De estas, las más cercanas están a unos pocos años luz de distancia¹ y las más lejanas, a unos 6000 años luz. La estrella más cercana a la Tierra es Próxima Centauri, que está apenas a 4,2 años luz, pero curiosamente no es visible a simple vista.

Hay estrellas de todos los tamaños. La mayoría de ellas son pequeñas, son parecidas a nuestro Sol, y hay otras pocas unas cien veces más grandes. A las estrellas similares al Sol las caracterizamos con temperaturas cercanas a los 6000 K,² pero también hay estrellas “muy frías”, con temperaturas de 600 K, y otras que pueden alcanzar temperaturas tan altas como 100 000 K. Hay estrellas muy grandes y frías y hay otras pequeñas y calientes. Pero también las hay muy grandes y calientes, y pequeñas y extremadamente frías. La gran variedad de estrellas que existe es la razón por la que los astrónomos nos empeñamos en definir parámetros que las describen para estudiarlas mejor.

Cuando los astrónomos comenzamos a comprender la física de las estrellas —los fenómenos que ocurren en ellas— notamos que a lo largo de sus vidas pueden presentar diferentes brillos, temperaturas y tamaños. Sabemos, por ejemplo, que el radio de una estrella como el Sol se puede multiplicar por 100 a lo largo de su historia, y su brillo y temperatura, por un factor mayor que 10. No es útil entonces diferenciar a las estrellas por estos parámetros solamente. Sin embargo, existe un parámetro fundamental que sí nos permite describir apropiadamente a las estrellas: su masa. La determinación de la masa estelar permite conocer o imaginar su vida, predecir su muerte, etc. Existen estrellas con tan poca masa como las enanas marrones, que poseen apenas unas décimas de la masa solar, y otras que pueden llegar a tener unas cien veces la masa del Sol. Las estrellas se suelen diferenciar como de masa baja (hasta 2 masas solares), intermedia (entre 2 y 8 masas solares) y alta (más de 8). A estas últimas las llamamos también *masivas* y es nuestro objetivo en este artículo describirlas y resaltar algunos de sus aspectos más interesantes.

Las estrellas masivas revisten una importancia fundamental en el Universo. Además de ser objetos fascinantes, son las únicas (según sabemos) capaces de generar los átomos que constituyen a los seres vivos. Por esto, intentaremos explicar cómo es que todos tenemos en nuestro interior algo de estrella... masiva. El oxígeno del agua, el fósforo de los ácidos nucleicos (ADN y ARN), el calcio de los huesos y el sodio, que participa en el metabolismo celular y en la contracción muscular, fueron creados en las estrellas masivas y eyectados al medio interestelar, ya sea durante algunas de sus etapas evolutivas o en las eyecciones propias de las supernovas. **Sin estrellas masivas, la vida no podría existir como la conocemos.** La pregunta que surge naturalmente de esta lectura es ¿cómo sabemos todo esto? ¿Cómo es que los astrónomos podemos decir todas estas cosas? A continuación, intentaremos responderlas.

¿CÓMO SABEMOS QUE UNA ESTRELLA ES MASIVA?

Esta es la primera pregunta que nos hacemos los astrónomos (al menos los que queremos seleccionarlas para estudiarlas). Para responderla contamos con toda la información que podemos recolectar de las estrellas. Pero, lamentablemente, esa información se limita a unas pocas cosas, a saber: brillos, posiciones y distribución de energía.

Los brillos los obtenemos a partir de las imágenes fotométricas (también conocidas como fotografías). Los astrónomos obtenemos fotografías del cielo y notamos que no todas las estrellas brillan con la misma intensidad. Luego, podemos realizar mediciones sobre

dichas imágenes para caracterizar sus brillos. Simultáneamente, podemos determinar sus posiciones en el cielo, al menos respecto a las otras que salieron en la foto. La técnica que usamos se llama fotometría, la cual consiste en captar imágenes del cielo con sofisticados instrumentos, como los telescopios y las llamadas cámaras CCD.³ Este registro de brillos estelares se puede realizar usando la misma porción de la luz que ven nuestros ojos, pero también usando otras regiones de la luz, que también emiten las estrellas. Se trata, por ejemplo, de la luz infrarroja, ultravioleta o incluso de rayos X. Estos diferentes “tipos” de luz guardan una profunda analogía con lo que habitualmente llamamos “colores” en la luz visible. Así, podemos notar que las estrellas emiten distintas intensidades de cada uno de estos “colores”, y además algunas varían su brillo cada vez que las volvemos a observar.

Esta idea de observar la luz en “colores” no es nueva. A Isaac Newton (1642–1726), entre muchas genialidades, se le había ocurrido experimentar con la luz del Sol. Dirigía un haz de luz hacia su oficina y la hacía pasar por un prisma que la dispersaba, y de ese modo obtenía un arco iris (Figura 2). Newton propuso que la luz blanca está formada por colores cuya combinación la hace verse así. Unos cien años después (a veces los genios se adelantan demasiado a sus tiempos), William Hyde Wollaston (1766–1828) mejoró la manera de obtener el arco iris del Sol y reconoció otros “patrones” o formas en él. Wollaston observó pequeñas zonas donde faltaba luz, “líneas oscuras” que parecían separar los colores (Figura 3). Fue Joseph von Fraunhofer (1787–1826) quien estudió en detalle estas líneas que se detectan en el arco iris solar. Como disponía de mejores instrumentos, pudo idear algunos experimentos. Usó, para Venus y Betelgeuse (una estrella muy brillante), el mismo procedimiento que se había utilizado para descomponer la luz del sol y descubrió en el “arco iris” de Venus las mismas líneas que se habían observado en el Sol. Sin embargo, notó que las líneas de Betelgeuse eran diferentes! Estos fueron los albores de la técnica astronómica llamada espectroscopía.

Los astrónomos llamamos *espectro* al arco iris que se forma al dispersarse la luz, pero seguimos llamando “líneas” a los patrones que se distinguen en los espectros. Hoy sabemos que la luz visible se puede considerar un caso particular de un fenómeno más amplio, que llamamos *radiación electromagnética*. Sabemos además que esta radiación está formada por ondas, que se pueden caracterizar por su longitud. Los diferentes colores de la luz corresponden entonces a diferentes longitudes de onda de esa radiación. Y claro, hay longitudes de onda que llamamos “azul” o “rojo”, pero a otras longitudes de onda no detectables por el ojo humano, las llamamos “infrarrojo” o “ultravioleta” (Figura 4).

Fraunhofer pudo detectar y medir unas quinientas líneas en el espectro solar y otras estrellas brillantes (como Sirio, Castor y Capella). Sus trabajos eran muy precisos y necesarios para la industria donde trabajaba, una firma alemana que producía instrumentos militares de vigilancia, en los que la calidad de los vidrios era fundamental. Esta precisión alcanzada le permitió comprobar que las líneas no estaban “para separar los colores” como había propuesto Wollaston, sino que estaban relacionadas con la naturaleza propia de las estrellas. Fraunhofer falleció a los 39 años de tuberculosis, sin saber el origen de las líneas oscuras. Fueron Gustav Kirchhoff (1824–1887) y Robert Bunsen (1811–1899) los primeros en realizar experimentos que permitieron demostrar que las líneas espectrales están relacionadas con los elementos químicos presentes en las estrellas. A Kirchhoff y Bunsen se les ocurrió comparar las líneas que obtenían del Sol y de otras estrellas con la luz que producían ciertas ampollas de vidrio con gases calientes en su interior. Así demostraron que el sodio produce líneas iguales a las llamadas D1 y D2, que había encontrado Fraunhofer en el espectro solar, y que, entonces, el Sol debía tener sodio. Dicho de otro modo: la química en las estrellas debía ser la misma que en la Tierra.

Reconocer las líneas espectrales sirve para identificar elementos químicos e inferir temperaturas estelares, entre otras cosas, pero —y esto es fundamentalmente en lo que nos ocupa este capítulo— también sirve para medir las velocidades de las estrellas respecto a nosotros.

A veces ocurre que observamos una misma estrella reiteradamente y notamos que la posición de sus líneas cambia. Las líneas no caen en el mismo lugar del espectro. Algunas veces están más hacia el azul y otras, hacia el rojo. Los astrónomos conocemos muy bien este fenómeno, tanto como un peatón cuando nota los cambios de sonido de una ambulancia que pasa frente a él. El fenómeno se denomina efecto Doppler, en honor a su



Figura 1. (a) Cúpula que alberga el telescopio de 2,15 metros en el Complejo Astronómico El Leoncito, San Juan, Argentina.



(b). Telescopio de 2,15 metros, llamado Jorge Sahade.

Figura 2. Isaac Newton utilizando la luz del sol para generar un arco iris en su oficina.

descubridor Christian Doppler (1803–1853). Cuando la estrella se mueve hacia nosotros sus líneas espectrales se corren hacia longitudes de onda más cortas; y, cuando se aleja, se corren hacia longitudes de onda más largas. Esos desplazamientos están directamente vinculados a la velocidad. Los astrónomos usamos el efecto Doppler para medir velocidades estelares y, si vemos que la velocidad de una estrella oscila periódicamente, es señal inequívoca que no está sola. En realidad, forma parte de un sistema binario. Aunque veamos un solo punto brillante en el cielo, estamos observando dos estrellas que se atraen mutuamente por sus fuerzas

gravitatorias y se mueven una alrededor de la otra. Tal como había predicho Isaac Newton, el movimiento dependerá de las masas de las estrellas.

Mediante la técnica espectroscópica, medimos la posición de las líneas en el espectro y, aplicando la ecuación del efecto Doppler, calculamos la velocidad proyectada sobre la línea de la visual, que llamamos velocidad radial. Las variaciones de la velocidad radial en el tiempo y las leyes del movimiento de los cuerpos de Newton nos permiten deducir las masas de las estrellas involucradas. Las tecnologías actuales nos permiten medir estas velocidades con una precisión que alcanza los dos kilómetros por hora, suficiente como para medir el movimiento de una estrella tipo solar, inducido por una compañera de muy baja



Figura 3. William Hyde Wollaston logra formar un arco iris más nítido y descubre las líneas oscuras.

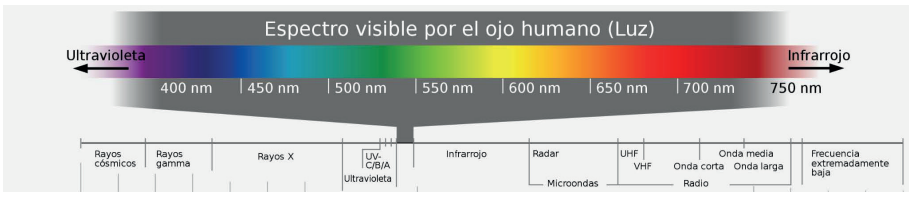


Figura 4. Espectro de la radiación electromagnética.

Fuente: Horst Frank, Jailbird. Imagen modificada para esta publicación.

masa o, más aún, por un planeta. Pero, para el caso de este artículo, las variaciones de velocidad radial de una estrella binaria nos permiten responder si una estrella es masiva o no.

¿CÓMO ES LA VIDA DE LAS ESTRELLAS MASIVAS?

Ahora que aprendimos cómo podemos determinar si una estrella es masiva, vamos a ver uno de los aspectos más interesantes de estas estrellas: el que se relaciona con su forma de vivir o, como decimos los astrónomos, su evolución. ⁵ Las estrellas no existieron desde siempre en el cielo, sino que alguna vez se formaron. Y una vez nacidas, viven (evolucionan) como si en su interior se jugara un partido entre las fuerzas gravitatorias, por un lado, que quieren hacer colapsar la estrella, y las fuerzas nucleares, por el otro, que buscan evitarlo. En las estrellas masivas, el partido termina con la victoria de la fuerza gravitatoria (agujero negro) o en un empate (estrella de neutrones). En ambos casos, en el intervalo antes de la definición, se producirá un evento extremadamente energético y singular, llamado *supernova de colapso gravitacional*.

La evolución de las estrellas, entonces, se puede resumir como esta contienda entre fuerzas antagónicas. Durante la mayor parte de la evolución, a la gravitación se le contrapone energía producto de fusiones nucleares. Las fusiones nucleares son un tipo de reacciones nucleares, es decir, reacciones entre núcleos atómicos. Las fusiones nucleares consisten en unir núcleos de átomos livianos para producir núcleos de átomos más pesados (o sea, conformados por mayor cantidad de protones y/o neutrones que los originales). Cuando estas reacciones ocurren entre ciertos núcleos atómicos, que mencionaremos a continuación, las reacciones generan energía, que se opondrá a la fuerza gravitatoria.

La primera fusión nuclear que realizan todas las estrellas es la que combina cuatro núcleos de hidrógeno y los convierte en uno de helio. Esta reacción es la que está ocurriendo actualmente en el Sol. De hecho, dentro del Sol en cada segundo se convierten 700 millones de toneladas de hidrógeno en helio, lo cual evita el colapso gravitatorio. Irremediablemente, cuando el hidrógeno se termine la gravitación hará lo suyo. En el interior del Sol, más precisamente en su región central, solamente habrá helio. El helio colapsará bajo la presión gravitatoria y esa región se calentará mucho más que cuando había hidrógeno. Estas temperaturas tan altas permitirán que sea ahora el helio el que se fusione, formando átomos de carbono, generando energía y continuando “la resistencia”. Esta nueva manera de generar energía durará mucho menos tiempo que la de hidrógeno y no todas las estrellas lograrán alcanzarla, sino solo aquellas con masas mayores a la mitad de la del Sol. Una vez que se termine el helio, se repetirá el fenómeno. La región central de la estrella contendrá ahora solamente carbono, que se comprimirá por efecto de la gravitación y se calentará hasta alcanzar la temperatura necesaria para comenzar a fusionar carbono, que se convertirá en otros elementos químicos más pesados, como el magnesio, el sodio, el neón, y el oxígeno. A medida que se fusionan núcleos atómicos más pesados, el tiempo durante el cual se genera energía va disminuyendo y solo las estrellas con mayores masas pueden alcanzar esas etapas.

Las estrellas de baja masa e intermedia, que no pueden alcanzar las temperaturas necesarias para lograr fusiones nucleares, logran un “empate técnico” cuando se pone en juego el Principio de Exclusión de Pauli. Este fenómeno cuántico, llamado así en honor a quien lo enunció, Wolfgang Ernest Pauli (1900–1958), prohíbe que dos partículas subatómicas, como los electrones, tengan iguales todos los números cuánticos que los describen. Este fenómeno se manifiesta como una fuerza repulsiva entre los electrones y genera una presión, denominada *presión de degeneración electrónica*, que evita el colapso de la estrella. A lo largo de la evolución estelar, cada vez que las fusiones nucleares se apagan, por falta de “combustible”, ⁶ la gravedad palpita el éxito. Pero, si entra en juego el Principio de Pauli, se logra un empate. Cuando termina el partido, en la zona central de la estrella nos queda una esfera formada por núcleos de helio, carbono y/u oxígeno, entre otras combinaciones, según el momento en que entró a jugar el Principio de Exclusión. Se forman así las llamadas enanas blancas. Se trata de objetos formados por núcleos de átomos degenerados, cuya presión logra compensar la fuerza gravitatoria por mucho tiempo. Aun así, como no ocurren fusiones nucleares, poco a poco se van enfriando y, por lo tanto, su brillo va disminuyendo, como si se fueran “apagando”. Se van haciendo cada vez más débiles, hasta que dejamos de verlas. Debido a que la evolución de estas estrellas se conoce relativamente

bien, las enanas blancas se utilizan como relojes cósmicos para determinar edades. La presencia de una enana blanca en un grupo de estrellas dado permite conocer la edad de todo el grupo, e incluso del Universo.

Las estrellas con masas mayores a unas ocho veces la del Sol pueden seguir obteniendo energía a partir de la fusión de elementos cada vez más pesados, como silicio, azufre, calcio, titanio, cromo y cobalto, hasta que su región central queda formada casi exclusivamente por átomos de hierro. Llegado este punto crucial, cualquier reacción nuclear ya no generará energía, sino todo lo contrario. Las estrellas no pueden generar energía a partir del hierro, ya sea fusionándolo en átomos más pesados o fisionándolo ⁷ en otros más livianos. El hierro en la zona central colapsa y se calienta (como mal perdedor). Pero esta vez el proceso comienza a destruir los átomos de hierro a través de una reacción llamada decaimiento alfa. La destrucción del hierro absorbe grandes cantidades de energía y ya no es posible sostener el equilibrio con la gravitación, el colapso es inevitable.

Estas sucesivas etapas de quema o fusión de elementos para generar energía duran tiempos muy diferentes y, además, estos tiempos dependen de la masa estelar. Calculamos que la etapa de fusión de hidrógeno en el Sol dura unos diez mil millones de años. Pero en una estrella de mucha menor masa, digamos 0.3 masas solares, la misma etapa puede durar unos quinientos mil millones de años. A una estrella masiva, en cambio, no le llevará más que unos pocos millones de años consumir todo su hidrógeno central. En las subsiguientes etapas de quema de elementos más pesados, como la energía generada es cada vez menor, para “cuidar el empate” deben quemar su combustible más rápido y, por lo tanto, las etapas duran cada vez menos. Una estrella del tipo solar durará algunos cientos de millones de años quemando helio. Una estrella masiva, en cambio, durará apenas algunos cientos de miles de años en la misma etapa. Rápidamente comenzará las fusiones de elementos más pesados, que no durarán más de unos pocos miles de años. De hecho, la quema de carbono puede durar menos de mil años; la de neón, un año; la de oxígeno, unos seis meses, y en pocas horas consume todo el silicio. Es decir que las estrellas masivas viven rápidamente. Desde que nacen hasta que mueren como supernovas, transcurren apenas algunas decenas de millones de años. Podríamos imaginar que, durante su vida, el Sol puede ver nacer y morir sucesivamente a unas doscientas generaciones de estrellas masivas.

Ahora retrocedamos un poco en la historia de una estrella masiva y volvamos al momento en que el núcleo de hierro, que tiene el tamaño de la Tierra y altísima densidad, se destruye y ya no puede soportar las capas externas de la estrella masiva, por lo que colapsa en pocos segundos. Imaginemos que esa enorme cantidad de hierro se precipita muy rápidamente hacia el centro de la estrella, desde todas las direcciones, a velocidades cada vez más altas a medida que se acerca al centro. Este colapso gravitatorio tiene entonces su espectacular contraparte. Existe una especie de “rebote” o “salpicadura” durante la cual grandes cantidades de materia son expulsadas violentamente de la estrella. ¡Se ha formado una supernova de colapso gravitacional! La estrella aumenta su brillo enormemente en muy poco tiempo debido a estas eyecciones de material estelar. La zona central se convierte en una estrella de neutrones o un agujero negro. En el primer caso, la estrella de neutrones logra un (pseudo) empate, ya que los neutrones hacen jugar, casi agónicamente, al Principio de Exclusión de Pauli. En el segundo caso, no hay Maradona ni Messi capaces de salvarla. El triunfo de la fuerza gravitatoria es inevitable. La fuerza estudiada por Isaac Newton hace lo suyo, ayudada por la formulación más moderna y acorde, realizada por el gran Albert Einstein (1879–1955). Ahora sí, terminó el partido.

¿QUÉ SON LOS VIENTOS ESTELARES?

Mientras que en el interior de las estrellas masivas se juega un tremendo partido, en la superficie de estas estrellas ocurre algo muy interesante también. La energía que liberan las reacciones nucleares en el centro de la estrella es transportada hacia sus capas externas de varias maneras. Una de ellas es la radiación electromagnética, que también podemos interpretar como una corriente (o un flujo, solemos decir) de fotones hacia el exterior de la estrella. Los fotones son partículas subatómicas que transportan la energía electromagnética. Esto hace que la superficie estelar esté sometida a una radiación enorme que proviene del interior de la estrella. Esa radiación origina una presión que, además de soportar la gravedad, impulsa el material hacia afuera y hace que una parte escape de la propia estrella.

Este fenómeno en que la presión de la radiación expulsa las capas externas de las estrellas masivas se conoce como viento estelar. Para ser rigurosos, prácticamente todas las estrellas producen estos vientos, incluso nuestro Sol. Las partículas que sopla el Sol, el viento solar, llegan mucho más allá de la órbita de Plutón, como bien demostraron las sondas Voyager. Pero el viento de las estrellas masivas es muchísimo más poderoso. Puede llegar a “soplar” a velocidades de un millón de kilómetros por hora. Por este motivo, pueden perder hasta el equivalente a una masa solar cada cien mil años o, lo que es lo mismo, diez soles en apenas un millón de años. (Recordemos que las estrellas masivas viven varios millones de años). Este material estelar viaja casi libremente hasta que “choca” con las grandes nubes de gas y polvo de donde se formó la estrella. Estas interacciones viento-nubes producen bellísimas formas, como pilares o cavidades (ver figuras).



Figura 5. Región de formación estelar NGC 7000, también llamada nebulosa de Norteamérica (por cómo se ve su forma en longitudes de onda ópticas).

Fuente: NASA/JPL-Caltech.

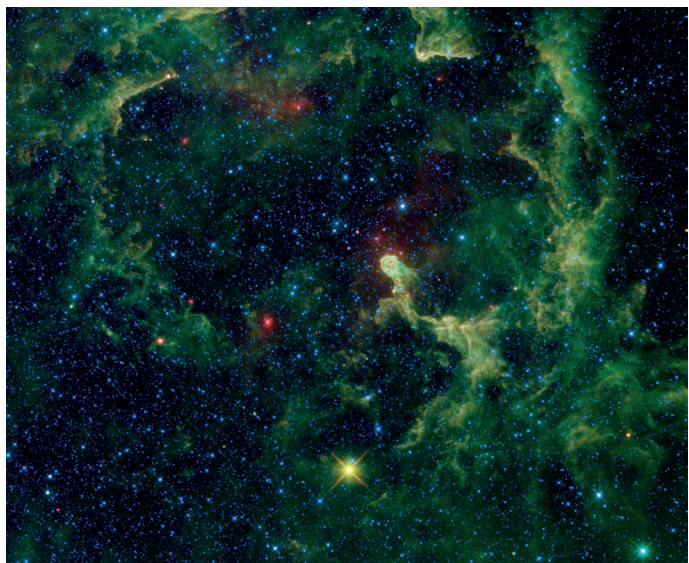


Figura 6. Vientos estelares en acción en la nebulosa IC1396A, también llamada “trompa de elefante”. El pilar brillante del centro está siendo esculpido por la acción de las estrellas masivas. Fuente: NASA/JPL-Caltech/UCLA.

Hemos descrito cómo las estrellas se las ingenian para producir energía que evite el colapso gravitatorio, pero no hemos dicho nada sobre cómo se forma una estrella. Cuando observamos a las estrellas a través de los telescopios, nos damos cuenta de que estas tienden a estar en grupos (ver figura). Por lo tanto, es natural suponer que han nacido también de forma grupal. Algunos grupos estelares están rodeados de gas y polvo. Si las estrellas son bolas de gas, no es un disparate pensar que provienen de nubes de gas aún mayores, y que es la gravedad la que hace colapsar grandes volúmenes de gas y los calienta hasta que alcanzan temperaturas como para fusionar hidrógeno y equilibrar la contracción. Estas grandes nubes interestelares son las maternidades donde se produce la formación estelar. La nube primordial se fragmenta en decenas o centenares o hasta cientos de miles de partes, y en cada una de ellas se origina una estrella. La mayoría de las estrellas nacientes son de baja masa, y unas muy pocas, masivas: apenas el 1 %. Este pequeño porcentaje es increíblemente notable. Mientras las demás estrellas están aún formándose, las estrellas masivas en poco tiempo comienzan su ciclo evolutivo y empiezan a emitir grandes cantidades de radiación, en forma de fotones, y de material, en forma de viento.

Imaginemos, entonces, esta incesante emisión de radiación y materia en el interior de una nube de gas. Si la densidad de la nube no es igual en todo su volumen, esperaríamos que el viento y la radiación viajen más fácilmente en las zonas menos densas y, entonces, de alguna manera vayan empujando el material allí presente, como lo haría una barredora de nieve. Podría ocurrir que el viento se choque con una zona muy densa que le impida avanzar, pero en cambio pueda hacerlo a sus alrededores. Esto podría originar algo parecido a una columna o pilar. Pues bien, todo esto que imaginamos que podría ocurrir los astrónomos hemos comprobado observacionalmente, a través de imágenes



Figura 7. Estrellas en formación en NGC 2264 (también conocida como “copo de nieve”). Imagen tomada en longitudes de onda infrarrojas. Fuente: NASA/JPL-Caltech/CfA.

fotométricas, que realmente sucede. Claro que no podemos verlo en imágenes tomadas en los colores que el ojo humano puede percibir, sino en imágenes infrarrojas. Sabemos, por tanto, que existen innumerables regiones de formación estelar donde las estrellas masivas están esculpiendo formas maravillosas en su propia nube natal (ver figura).

Los vientos y la radiación de las estrellas masivas modifican fuertemente las condiciones físico-químicas de la nube donde (recordemos) todavía se están formando las estrellas de masa baja e intermedia, e incluso planetas. Debemos aclarar, en este punto, que los frutos de los procesos nucleares todavía no son aportados al medio interestelar. Estos vientos solo acarrearán el material más externo de la estrella, que aún no ha sido enriquecido por las fusiones nucleares. Para que ello ocurra debemos hacer que la estrella masiva explote.

¿QUÉ SON LAS SUPERNOVAS?

Si la acción de los vientos estelares les pareció fascinante, veamos cómo es el fenómeno de las supernovas. Para ello, debemos volver al interior de la estrella masiva. En las últimas etapas de su evolución, la estructura de la estrella se asemeja a una cebolla, en cada una de cuyas capas está ocurriendo una fusión nuclear distinta. A su vez, esas capas se van desplazando hacia la superficie de la estrella, buscando combustible “fresco”,

como lo hace el fuego en un incendio forestal. Yendo desde la superficie hacia el centro, encontramos primero una capa donde se fusiona hidrógeno, después helio, luego carbono, oxígeno, neón, magnesio y silicio. Esta última va dejando hierro tras de sí (ver figura).

Esa región central, rica en hierro, que se va creando comienza a contraerse y a calentarse. Su temperatura sobrepasa los 5000 millones de grados. Los fotones generados son muy energéticos y pueden romper los núcleos de hierro y transformarlos en helio, proceso llamado desintegración alfa, que además absorbe energía de la estrella. Esto, a su vez, acelera la contracción de esa región, lo que aumenta su densidad, la cual, al alcanzar las 10 000 toneladas por centímetro cúbico, fomenta que los electrones conviertan a los protones en neutrones—proceso llamado *neutronización*—absorbiendo aún más energía de la estrella. Peor aún, la neutronización libera neutrinos. Los neutrinos son partículas subatómicas que prácticamente no interactúan con la materia, por lo que escapan fácilmente de la estrella, llevándose, además, más energía. Como se puede ver, todos los procesos que están teniendo lugar implican pérdida de energía y la gravedad ya se siente ganadora. La estructura estelar colapsa inevitablemente.

Pero esto no ocurre instantáneamente en toda la estructura de la estrella. Las capas una a una, consecutivamente, como en los dibujitos animados, van cayendo a velocidades que pueden alcanzar los 200 000 millones de km/h. El proceso ocurre como si a cada capa



Figura 8. Región de formación estelar NGC2467. Fuente: Observatorio Gemini.



Figura 9. Región de formación estelar M8, también llamada nebulosa de la Laguna. A partir de varias imágenes infrarrojas. Fuente: Observatorio Gemini/ Julia I. Arias y Rodolfo H. Barbá. (Universidad de La Serena y CONICET).



Figura 10. Imagen de una zona amplia del cielo, donde resaltan tres cúmulos estelares, M46, M47 y NGC 2423. Las estrellas tienden a nacer agrupadas.



Figura 11. Imagen infrarroja de la región de la nebulosa de Carina. En su centro hay una estrella muy masiva llamada Eta Carina, posiblemente en sus últimos años de evolución, cuyos poderosos vientos están esculpiendo columnas de gas y polvo. Fuente: NASA/JPL-Caltech/Universidad de Colorado.

repentinamente “le faltara el piso” y entrara en caída libre. Esta caída, sin embargo, se detiene cuando chocan con el núcleo de neutrones y se produce un rebote. En ese momento decimos que se ha formado la supernova. El hecho de que las capas no caigan todas simultáneamente, hace que las más internas, que ya colapsaron y rebotaron, en su veloz movimiento hacia afuera se encuentren con otras capas que “todavía” están cayendo. Esto produce una onda de choque. El partido se ha desquiciado. Esta onda de choque avanza hacia afuera de la estrella, cada vez más rápidamente, porque se encuentra con capas más frías y menos densas. En pocos minutos, la onda de choque alcanza la superficie, eyectando todo el material arrastrado a millones de kilómetros por hora y generando que la estrella aumente su brillo súbitamente. Una supernova puede brillar más que toda la galaxia donde habita. En unas semanas, emite la misma energía que nuestro Sol en toda su vida.

Antes de describir lo que ocurre en el material eyectado, que denominamos *eyecta*, debemos comprender que el núcleo de neutrones, que se ha desprendido de todas las capas externas, ahora sí puede empatarle a la gravedad poniendo en juego el Principio de Exclusión de Pauli. En este caso, a diferencia de lo que ocurre en las enanas blancas, que se sostienen por la degeneración electrónica, juega su rol la degeneración de los neutrones. La estrella que había nacido hace unas decenas de millones de años con unas 25 masas solares, por ejemplo, se ha convertido en una estrella de neutrones de apenas una masa solar. Bajo otras circunstancias, poco conocidas aún, el núcleo no puede sostener la gravedad de ninguna manera y colapsa totalmente formando lo que llamamos *agujero negro*.

La eyecta, el material arrastrado por la onda de choque, es laboratorio de otros procesos nucleares que implican interacciones entre las partículas subatómicas, los electrones, los neutrones, los neutrinos y los átomos del material preexistente. En los pocos segundos que dura la explosión, se originan casi todos los átomos más pesados que el hierro de la tabla periódica, tales como —entre muchos otros— el níquel (que usamos en nuestras

baterías y monedas), el arsénico (que además de ser notoriamente tóxico se ha vuelto muy importante en ciertos circuitos electrónicos), el bromo (un conocido desinfectante) y el rubidio (que se utiliza principalmente en las redes de fibra óptica y también para producir el hermoso color púrpura de los fuegos artificiales).

Finalmente, como con los vientos estelares, la materia eyectada (esta vez rica en elementos pesados) choca también contra el medio interestelar circundante y lo calien-

ta de forma tal que emite luz. A esta nueva estructura la llamamos remanente de supernova. Dura aproximadamente 100 000 años y se puede ver con telescopios (ver figura). El material estelar expulsado al espacio formará parte de nuevas nubes de gas en las que millones de años después se formará una estrella como el Sol, y los átomos de oxígeno, carbono, calcio y otros muchos podrán constituir seres vivos.

¿CUÁLES SON LOS DESTINOS DE LAS ESTRELLAS MASIVAS?

Una vez que la supernova de colapso gravitacional se ha producido, lo que quedó de la estrella, esa región central mayormente formada por neutrones, tiene dos opciones: hacer entrar a la cancha al Principio de Pauli y lograr un digno empate contra la gravedad, o dejarse vencer. Los modelos teóricos predicen que esta decisión depende de la cantidad de neutrones que quedaron en la cancha. Si, entre todos, no suman más de dos o tres masas solares, la degeneración podrá sostener la presión gravitatoria y tendremos una estrella de neutrones. En caso

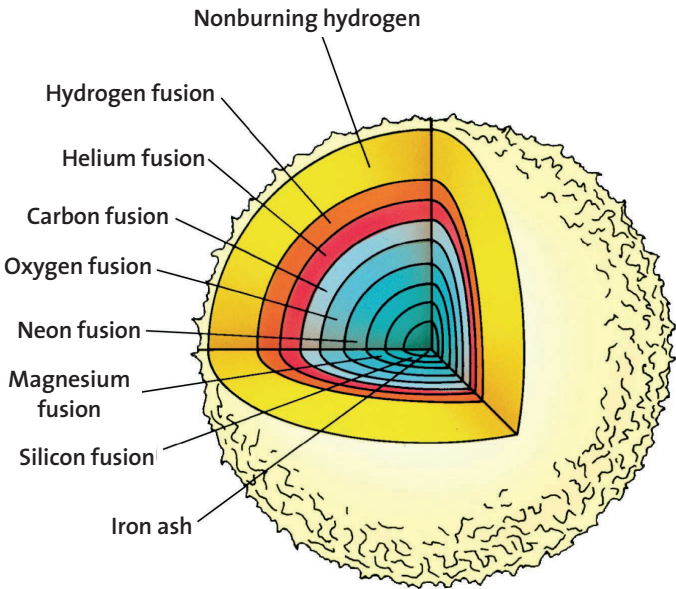


Figura 12. Esquema de la estructura de una estrella masiva minutos previos a su colapso gravitacional. <incorporar traducción al castellano, enviada aparte>

contrario, la gravedad completará su trabajo y redondeará una goleada épica, formando un objeto muy raro llamado agujero negro.

Las estrellas de neutrones logran equilibrar las presiones gravitatorias contrayéndose hasta tamaños del orden de apenas diez kilómetros (la distancia entre el centro de Junín y la laguna de Gómez, o desde el Obelisco hasta la General Paz) y, obviamente, densidades inimaginables: 900 000 000 000 (novecientas mil millones) de toneladas por metro cúbico. Al momento de su formación puede alcanzar temperaturas de un billón de kelvin (1 000 000 000 000 K). En unos miles de años logran enfriarse a un millón de kelvin, gracias a la emisión de neutrinos. Los fenómenos cuánticos que tienen lugar en estas estrellas están muy lejos de poder ser explicados en este texto de divulgación, pero lo que sí trataremos de hacer es mencionar algunas evidencias observacionales que nos describen, en parte, lo que ocurre allí.

Para poner en contexto histórico a las estrellas de neutrones, debemos decir que la existencia del neutrón fue descubierta en 1932 por James Chadwick (1891–1974) y, dos años después, Walter

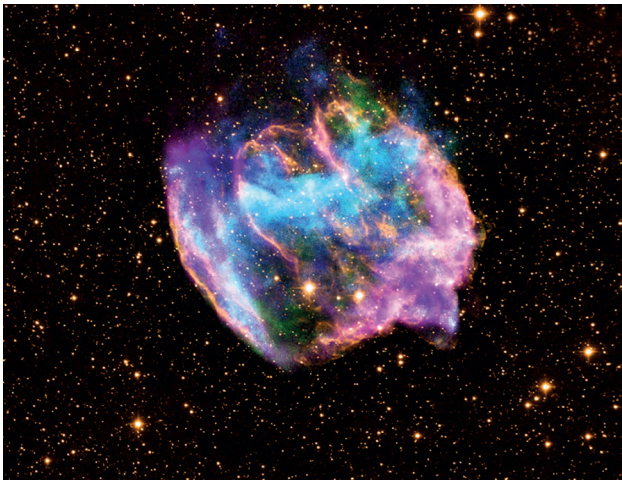


Figura 13. Imagen del remanente de supernova de colapso gravitacional W49B. Combinación en colores de imágenes obtenidas en distintas longitudes de onda: azul y verde, rayos X; rosa, ondas de radio; amarillo, infrarrojo. Fuente: Rayos X: NASA/CXC/MIT/L. López et al.; Infrarrojo: Palomar; Radio: NSF/NRAO/VLA.

Baade (1893–1960) y Fritz Zwicky (1898–1974) propusieron que las estrellas de neutrones se podrían producir en las supernovas. Pero las altas temperaturas que alcanzan hacen que la emisión de fotones desde estas estrellas sea fundamentalmente en rayos X y gamma, las cuales, a su vez, son las más absorbidas por el medio interestelar, y entonces hacen muy difícil su detección desde la Tierra. Por esta dificultad, no hubo muchos entusiastas que las buscaran. Sin embargo, la historia dio un cambio inesperado en 1967 cuando Susan Jocelyn Bell (1943–) descubrió una señal en ondas de radio muy extraña. Jocelyn estudiaba cuásares (galaxias muy lejanas) en frecuencias de radio utilizando un radiotelescopio especial que registraba las señales detectadas en papel. Se imprimían más de treinta metros por día y Jocelyn era la encargada de analizarlos. En agosto de 1967, encontró unas señales débiles que se repetían en el tiempo en períodos extremadamente regulares, diferentes a las esperadas de los cuásares. Cuando se las mostró a su director de tesis doctoral, este reaccionó con escepticismo y le pidió que revisara que no fueran señales propias de interferencias de emisoras de radio u otra cosa (eran muy frecuentes en esa época, porque los radiotelescopios estaban cerca de ciudades o caminos). Pero, en los meses siguientes, Jocelyn volvió a detectar esas señales, aún más intensas. El descubrimiento de estos *púlsares*, como fueron denominados muy pronto, se anunció el 9 de febrero de 1968, y aunque sus descubridores habían especulado y abandonado la idea de que se tratara de mensajes extraterrestres, algunos medios ingleses dieron la noticia como si realmente lo fueran (las *fake news* no son patrimonio de nuestros tiempos). Al descubrimiento del primer púlsar, CP 1919, le siguieron otros, incluyendo uno en la nebulosa del Cangrejo, famosa por ser el lugar del cielo donde se reportó una “supernova” en el año 1054, por parte de astrónomos chinos, árabes y norteamericanos. Este descubrimiento y la medición del período de 0.033 segundos con que repetían los pulsos llevó a Richard Van Evera Lovelace y sus colaboradores a proponer que los púlsares son estrellas de neutrones que rotan a gran velocidad. Debido a que los pulsos que se detectaban se repetían cada pocas centésimas de segundo, se debía tratar de objetos bien pequeños, y las “olvidadas” estrellas de neutrones volvieron a la consideración de los astrónomos. La combinación de altas rotaciones, altos campos magnéticos e intensa gravedad superficial hace que la emisión de los púlsares se concentre en una dirección particular, como la luz de un faro. Cada vez que el haz de radiación apunta hacia la Tierra, detectamos un pulso. La detección de los púlsares es considerada una de las evidencias más importantes de las teorías de evolución estelar.

El otro destino que una estrella masiva puede experimentar es convertirse en un agujero negro. Cuando la estrella no ha logrado desprenderse de suficiente masa como para llegar al final con menos de dos o tres masas solares, nada podrá detener a las fuerzas gravitatorias. Toda la masa se concentrará en un volumen tan pequeño (¿un punto?) que el campo gravitatorio será tan intenso que nada podrá escapar de allí, ni siquiera la luz. De allí su nombre. Si bien desde el siglo XVIII se había especulado con objetos de los cuales la luz no podría escapar, fue Karl Schwarzschild (1873–1916) el primero en teorizar un agujero negro a partir de una solución de la relatividad general. Pero no fue sino hasta el descubrimiento de Jocelyn Bell en 1967 que los “objetos colapsados” volvieron a ser considerados como posibilidades reales. Sin embargo, si nada escapa de ellos, ¿cómo es que los astrónomos aseguramos que existen? Fácil: midiendo los movimientos de los objetos que los rodean. ¡La misma técnica que utilizamos para medir las masas estelares! El primer objeto candidato a ser agujero negro fue Cygnus X-1, una fuente de rayos X. Betty Louise Webster y Paul Murdin, en enero de 1972, publicaron un trabajo en la revista *Nature* acerca de una estrella masiva, llamada HDE 226868, ubicada en la misma posición de Cygnus X-1. Descubrieron variaciones en su velocidad radial que coincidían con las variaciones reportadas en rayos X. Pero no solo eso: los momentos en que los rayos X se hacían más débiles hacían imposible pensar que los rayos X eran emitidos por la estrella visible; entonces, haciendo unas cuentas muy sencillas derivadas de las leyes del movimiento de Newton, encontraron que el objeto “invisible” que hacía bambolear a HDE 226868 no podía ser otra cosa que un agujero negro. Hoy hemos recolectado suficientes evidencias como para decir que Cygnus X-1⁸ tiene unas veinte masas solares y un radio de 44 km (radio de Schwarzschild, para ser rigurosos). Los modelos teóricos indican, además, que la estrella masiva que lo originó existió durante “apenas” cinco millones de años. Sí, es lo que está pensando, en cinco millones de años, esta estrella masiva se formó, evolucionó

y explotó como supernova. Posiblemente un tiempo insuficiente para desarrollar vida, si hubiera tenido planetas.

Un lector sagaz habrá notado que comenzamos este texto narrando las experiencias de Newton y Fraunhofer, entre otros, y cómo sus experimentos les permitieron entender el funcionamiento de la naturaleza. Lamentablemente, buena parte de los fenómenos que continuamos narrando no tienen su correlato experimental en la Tierra. Hasta ahora no es posible construir reactores nucleares que permitan fusionar hidrógeno en helio en forma estable, y mucho menos los elementos más pesados. La naturaleza, en especial el Universo y, específicamente, las estrellas masivas son un laboratorio único para estos procesos. Este mismo perspicaz lector ahora mismo se está preguntando cómo sabemos los astrónomos todo esto que contamos: que las estrellas nacen de una nube gigante, que fusionan átomos en sus núcleos, que las enanas blancas están sostenidas por degeneración electrónica, que la generación de ondas de choque en supernovas pueden emitir tanta energía abruptamente, etc. La respuesta no es trivial, o sí. Las leyes de la física, la teoría cuántica, la teoría general de la relatividad son las que explican toda la tecnología que usamos los seres humanos, desde apretar un botón del control remoto y cambiar el canal de la televisión hasta hacer videoconferencias, pasando por que nuestro celular nos informe nuestra posición en la Tierra, o posar una sonda sobre un asteroide, tomar una muestra y volver a la Tierra. Entonces, ¿por qué fallarían en explicar lo que ocurre en el Universo? Asumir que las leyes físicas que funcionan sobre nuestro planeta son las mismas que en todo el Universo es ciertamente una gran suposición, pero es la más sencilla y razonable y, además, ha demostrado incontables veces darnos resultados coherentes. Además, las nuevas tecnologías nos van acercando las tan necesarias evidencias. Pudimos construir un detector de neutrinos y detectar el flujo de estas partículas emitido por el Sol y, en 1987, los neutrinos emitidos por la supernova SN1987A. Y hace pocos años, logramos por primera vez detectar ondas gravitacionales. La existencia de las ondas gravitacionales fue predicha por Albert Einstein hace más de cien años, pero nunca habían sido detectadas. Los modelos predicen que las ondas gravitacionales detectadas fueron producidas por la unión de dos estrellas de neutrones para formar un solo objeto. Como sabemos que las estrellas masivas tienden a vivir en sistemas binarios (o múltiples) y que inexorablemente van a morir como estrellas de neutrones (o agujeros negros), es de esperar que con el tiempo terminen cayendo una sobre la otra, produciendo ondas gravitacionales. Se ha propuesto que es en realidad en estos violentos procesos donde se producen otros elementos de la tabla periódica como la plata, el iodo, el cesio, el iridio, el platino, el oro, el astato y el uranio, entre otros muchos.

Epílogo

Hace 13 000 millones de años, cuando se originó el Universo, solamente existían átomos de hidrógeno, helio y litio. Fueron las estrellas las que fabricaron todos los demás átomos que conocemos. Hemos contado cómo las estrellas masivas, durante sus vidas, pero especialmente en sus muertes como supernovas, y (“posmuertes”) como estrellas de neutrones coalescentes son las que producen todos los elementos fundamentales para la vida.

En efecto, en primer lugar, a través de la fusión de átomos de helio, producen carbono, átomo fundacional de todas las moléculas orgánicas que conocemos en la Tierra, como los azúcares, los carbohidratos, las proteínas, los ácidos nucleicos, etc. Posteriormente, la fusión de núcleos de carbono con núcleos de helio produce oxígeno, vital para la respiración, a través de la cual el reino animal adquiere la energía necesaria para su existencia. Las etapas sucesivas de otras reacciones nucleares crearán otros átomos más pesados, pero no menos importantes, como el calcio, el sodio, el hierro y el flúor, entre muchos otros.

Por eso decimos que, en nuestro interior, todos tenemos algo de estrella masiva.

NOTAS

- 1). El año luz es una unidad de distancia. Corresponde a la distancia que recorre la luz en el vacío, propagándose a 300 000 kilómetros por segundo en un año. Equivale a unos 9,5 millones de millones de kilómetros.
- 2). Utilizamos la unidad de temperatura del Sistema Internacional de Unidades, que se denomina *kelvin* y se abrevia K. Se denomina así en honor a William Thomson (1824–1907), o Lord Kelvin. Si a la temperatura expresada en kelvin le restamos 273, obtenemos la temperatura en grados Celsius, que es la que utilizamos habitualmente.
- 3). La sigla CCD indica en inglés lo que se conoce como un “dispositivo de carga acoplada”. Se trata de los mismos dispositivos que utilizan nuestros teléfonos celulares para tomar fotografías. Los CCD para uso astronómico son diferentes, por supuesto, pero comparten sustancialmente la misma tecnología. Los astrónomos también usamos otros tipos de dispositivos para este fin.
- 4). Muchos de los lectores seguramente saben que esta es solamente una manera de caracterizar la luz. Siguiendo los trabajos de Max Planck y Albert Einstein de comienzos del siglo XX, la radiación electromagnética se puede considerar también formada por “cuantos” (algo parecido a las partículas) que llamamos *fonones*.
- 5). Es claro que las estrellas no son seres vivos y, por lo tanto, no tienen vida. De hecho, los astrónomos técnicamente hablamos de “evolución estelar”. Sin embargo, la analogía con la vida de un ser vivo resulta útil y es usada ampliamente, por eso la utilizaremos también aquí.
- 6). En las estrellas no hay nada que se queme, ni ocurre realmente una combustión (como la que produce el fuego o la que se produce dentro del motor de un automóvil). Por eso mismo, en realidad no hay un combustible propiamente dicho. Pero, como la generación de energía es causada por las reacciones de fusión nuclear, solemos denominar, en sentido figurado, “combustible” al elemento químico que se está fusionando en cada etapa de evolución de la estrella. También hablamos de la “quemadura” de ese elemento.
- 7). La fisión nuclear es el proceso inverso de la fusión, o sea, sucede cuando se divide el núcleo de un átomo pesado en dos núcleos de átomos más livianos. Es el tipo de reacción que se utiliza en los reactores nucleares de generación eléctrica.
- 8). Existen agujeros negros con masas similares a las de las estrellas (no más de 150 masas solares) que se forman luego del colapso de una estrella masiva, y otros agujeros negros supermasivos (de millones de masas solares) cuyo origen es aún objeto de debate. Generalmente, se piensa que se forman y crecen absorbiendo muchas estrellas y juntándose con otros agujeros negros. Hay un fuerte consenso de que existe este segundo tipo de agujeros negros en la mayoría de los centros de las galaxias. De hecho, en nuestra Vía Láctea se cree que hay uno de 4.3 millones de masas solares, conocido como Sagitario A.

ROBERTO GAMEN

Cursó estudios de la licenciatura en Astronomía en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la UNLP, donde también realizó el doctorado. Fue becario posdoctoral en la Universidad de La Serena, Chile. Actualmente es investigador del CONICET y profesor de Astronomía Estelar en la UNLP. Lidera el proyecto OWN Survey, que intenta caracterizar observacionalmente a las estrellas masivas de nuestra Galaxia. Además, integra el Grupo de Estrellas Masivas y Agrupaciones Estelares (GEMAE), en el Instituto de Astrofísica de La Plata.

GABRIEL FERRERO

Nació en Uruguay, obtuvo la licenciatura en Física en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Lima, Perú) y el doctorado en Astronomía en la UNLP. Actualmente integra la Oficina Nacional del Observatorio Gemini y se desempeña como profesor de Sistemas Estelares e investigador en la UNLP. Su tema de investigación principal son las estrellas binarias masivas, que estudia utilizando técnicas espectroscópicas y fotométricas. Forma parte del grupo de investigación GEMAE.