

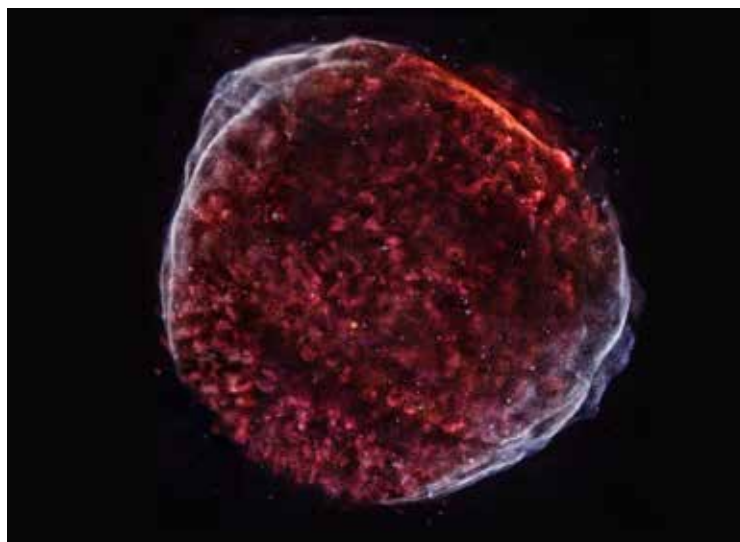
Gloria Dubner

IAFE, Conicet-UBA

Supernovas extremas

Los cataclismos estelares más espectaculares

Imagine la lectora o el lector su asombro si, en una noche cualquiera, descubre de pronto una estrella nueva dieciséis veces más brillante que Venus. Esa fue la sorpresa de los astrónomos chinos en el año 1006 cuando registraron la aparición de lo que ellos llamaban ‘una estrella invitada’, una estrella que aparecía donde no había una antes. El mismo asombro con el que los monjes de la abadía de San Galo, en los Alpes suizos, la describieron como ‘una estrella fulgurante y reverberante a los ojos, que causa alarma’. Lo que veían como una estrella nueva en realidad era la muerte espectacular de una estrella explotando, como lo que los científicos llamamos una supernova. La luz que recibían había viajado durante 7200 años hasta alcanzar sus ojos y un milenio después, podemos ver cómo semejante explosión modificó el cielo creando una bella nebulosa del tamaño de la luna llena conocido como SN 1006. Unos cincuenta años más tarde apareció otra estrella invitada, cuyos restos hoy forman la famosa *Nebulosa del Cangrejo*. En una galaxia como la nuestra se espera que exploten unas dos supernovas por siglo, pero en los últimos cua-



SN 1006, una nebulosa del tamaño de una luna llena formada tras la explosión de una estrella distante 7200 años luz de la Tierra y que fue vista entre el 30 de abril y el 1 de mayo del año 1006 como una estrella nueva dieciséis veces más brillante que Venus. Fue registrada por observadores de China, Japón, Egipto, Irak y Suiza, y sus descripciones permitieron descubrir sus restos en el espacio con gran precisión. Imagen en rayos X tomada con el telescopio espacial Chandra. Imagen NASA/CXC/Rutgers/J.Hughes *et al.*

¿DE QUÉ SE TRATA?

Recientes descubrimientos sobre explosiones ultravioletas de estrellas al final de su vida.

trocientos años la humanidad no tuvo otra oportunidad de maravillarse con la aparición de una estrella nueva y ha debido conformarse con descubrirlas e investigarlas en otras galaxias, en tanto que en la Vía Láctea solo puede estudiar los restos de explosiones pasadas.

Llevemos la imaginación aún más lejos y pensemos en el estallido de una supernova tan poderosa que, de haber



La Nebulosa del Cangrejo, resultado de una brillante explosión de supernova que se encuentra a unos 6500 años luz de la Tierra y fue descubierta el 4 de julio de 1054. En su centro hay una estrella de neutrones superdensa, un pulsar que gira una vez cada 33 milisegundos. La imagen es una combinación de datos tomados con el radiotelescopio Very Large Array y los telescopios espaciales Spitzer, Hubble y Chandra. Imagen Dubner y col.



Conjunto de cuatro telescopios robóticos de 14cm de diámetro ubicados en el observatorio Cerro Tololo (Chile) como parte del proyecto ASASSN para descubrir supernovas y otros eventos transitorios. Imagen Tom Holoien, users.obs.carnegiescience.edu/tholoien/

ocurrido, la hubiésemos visto como un segundo Sol iluminando la Tierra. Un evento así, catalogado con el nombre ASASSN-15lh, se detectó el 14 de junio de 2015 en una galaxia ubicada a 3800 millones de años luz, utilizando un pequeño telescopio robótico instalado en el norte de Chile. Esa explosión catastrófica brilló como 570 mil millones de soles juntos en un punto, y de haber ocurrido a la distancia de la estrella Sirio (a 8,2 años luz de la Tierra) la humanidad no hubiera sobrevivido para contarla. Son estas explosiones estelares excepcionales y superluminosas las que vamos a explorar aquí.

Primero hablaremos de estos eventos ‘normalmente extremos’, antes de adentrarnos en los ‘extremadamente extremos’. Al momento de la explosión de una estrella se libera al espacio una energía del orden de 10^{53} ergios (equivalente a unas 10^{32} bombas atómicas como la de Hiroshima explotando juntas en un sitio). Esa explosión produce el brillo de unos 200.000 millones de soles juntos. De esa enorme energía liberada casi instantáneamente, 99% se pierde en el espacio sin interactuar con nada. Pero el 1% de energía restante es aún una cantidad enorme de energía térmica y mecánica que modifica el espacio de diversas maneras hasta grandes distancias. Una importante región del cielo se verá alcanzada por sus efectos y jamás volverá a recuperar el estado físico y químico que tenía originalmente. La trascendencia que tiene una explosión de supernova para la dinámica y evolución de las galaxias y para el enriquecimiento de átomos en el universo es tal que se podría decir que la evolución misma del universo para llegar a ser lo que observamos hoy en día está regulada en gran medida por las explosiones estelares. Basta decir que la riqueza y variedad de especies atómicas con que cuenta el planeta Tierra, y que ha permitido el desarrollo de la vida, no existiría de no ser por el efecto que producen las supernovas.

¿A todas las estrellas les espera ese destino? ¿Cómo son las supernovas ‘normales’?

La respuesta a la primera pregunta es *no*. De hecho, ese final espectacular le está reservado a menos del 5% de las estrellas que pueblan el universo.

La duración de la vida de una estrella y su forma de muerte están esencialmente reguladas por su masa. Las estrellas con masas comparables a la del Sol tienen una larga vida, de unos 10.000 millones de años, y una buena parte de ellos transcurre convirtiendo, en su interior, hidrógeno en helio. Cuando el hidrógeno desaparece en el centro de la estrella, se puede decir que esta comienza su vejez. A partir de ese momento, la evolución será muy distinta en función de la masa.

La fusión nuclear en el centro de las estrellas es lo que las mantiene brillando y crea la presión dirigida hacia afuera necesaria para balancear la fuerza de atracción de la gravedad que, en sentido contrario, trata de compactarlas hacia el centro. Las estrellas mueren cuando se les acaban los átomos disponibles para fusionarse. Esa muerte puede ser apagándose lentamente –tal como le ocurre a la mayoría de las estrellas– y terminando como pequeños cuerpos fríos que, aunque no brillen significativamente, tardan miles de millones de años en extinguirse. O el fin de esos años de brillo y esplendor puede ser violento y catastrófico, explotando como supernovas.

Las explosiones de supernova obedecen a dos mecanismos distintos: las estrellas de gran masa (las que al final de su evolución tienen una masa de, por lo menos, ocho veces la del Sol) en un momento se quedan sin más átomos para fusionar; pero con mucha masa la gravedad gana, el núcleo colapsa y ocurren procesos físicos que transforman esa implosión en explosión. Por el lado de las estrellas pequeñas, si están de a pares, al final de sus días por influencia de la estrella compañera pueden sufrir un reencendido termonuclear catastrófico que en segundos las destruye completamente. En ambos casos al final se inyectan al espacio cantidades similares de energía, pero brillan distinto por las causas mismas de la explosión.

En las supernovas que se produjeron por colapso termonuclear, se produce al explotar una intensísima fisión nuclear que desencadena la fabricación de muchos elementos radiactivos. Esa radiactividad intensa las hace muy brillantes, con la peculiaridad de que prácticamente todas

las de este tipo alcanzan en el máximo de luz un brillo muy similar. Se las denomina *SN Ia* y las dos propiedades características de estas supernovas, su brillo notable y la homogeneidad con que este decae con el tiempo, las convirtieron en ‘velas patrón’, sabiendo que producen siempre el mismo brillo su reducción aparente sirve entonces para medir distancias, una herramienta de enorme utilidad para explorar el tamaño, la geometría y el destino del universo.

Las que resultan del colapso gravitacional del núcleo de estrellas masivas (denominadas *SN Ib, Ic, IIL, IIP y IIn*) no son tan brillantes y son menos homogéneas. Si bien este tipo de supernova no es tan espectacular, es especialmente trascendente porque deja como legado un objeto supercompacto en el centro: las estrellas de neutrones, y si la masa del núcleo es mayor que tres masas solares puede originar los inquietantes agujeros negros cuya atracción gravitacional es tan feroz que ni la luz puede escapar de ellos.

Las supernovas extremas: hipernovas y otras sorpresas

Con las supernovas convertidas en ganadoras de un premio Nobel por su utilidad para medir la expansión cósmica, se iniciaron búsquedas intensas para descubrir más supernovas y más lejos, y se encontraron ejemplares mucho más raros que lo esperado. Se las denomina en general *supernovas superluminosas (SNSL)* y pueden ser centenares de veces más brillantes que las normales. Algunos de estos ejemplares exóticos son *SN 2011kl, SN2013cu,*

¿QUÉ PROCESOS LLEVAN A EXPLOTAR A UNA SUPERNOVA ‘NORMAL’?

Las estrellas sobreviven fusionando átomos en su núcleo, y cada vez que se quedan sin combustible colapsan por acción de la gravedad; ese mismo colapso aumenta la temperatura, se reenciende el horno nuclear y se fusionan átomos más pesados. Si la estrella nació varias veces más grande que el Sol, tiene suficientes átomos como para repetir el proceso colapso-reencendido durante mucho tiempo, y en sucesivas etapas se irán fusionando átomos cada vez más complejos (de hidrógeno a helio, luego carbono, oxígeno, silicio, hierro). Ese horno requiere temperaturas cada vez más altas para encenderse y las reservas se gastan cada vez más rápido, y si al principio le servían para brillar millones de años, al final le alcanzan para prolongar la vida apenas unas pocas horas. Cuando llega al hierro el mecanismo no le sirve más, ya que contrariamente a los elementos anteriores al fusionarse el hierro no solo no libera energía, sino que la consume. Se acabaron allí las defensas de la estrella contra la gravedad, se produce el temido colapso gravitatorio, el núcleo estelar se compacta hasta lo indecible, una masa enorme (como un Sol y medio) queda apretada en una esfera de 10 a 15 kilómetros de radio, la fuerza de la gravedad es tal que en el centro de la estrella se rompe la estructura atómica, la materia pasa a estados degenerados, y queda formado un núcleo compacto formado solo por *neutrones*, cuyo interior profundo se piensa que está

compuesto por materia exótica de quarks u otro estado singular de la materia aún desconocido. Las capas externas de la estrella ‘se enteran’ súbitamente de que nada las respalda desde el centro, caen sobre este núcleo durísimo y, en un proceso en el que los neutrinos juegan un rol muy importante, esa tremenda implosión se convierte en explosión, y las capas gaseosas de la estrella, enriquecidas con átomos que se fabricaron en su núcleo, salen despedidas al espacio a velocidades de unos 10.000km/s. Así la implosión se transforma en *explosión de supernova*. En el centro quedan latiendo las estrellas de neutrones, girando a altas velocidades y con intensos campos magnéticos que producen chorros de radiación que, en el caso de que el eje magnético no este alineado con el eje rotacional, podemos detectar en la Tierra como ‘faros en el espacio’, y se denominan *pulsares*. A las estrellas pequeñas que se están apagando como enanas blancas también puede acecharlas un final explosivo. Cuando no están solas en el espacio, sino que tienen compañeras que orbitan a su alrededor y estas se inflan en la etapa de *gigante roja*, invaden su espacio con masa y las apartan del delicado balance físico en que estaban, induciéndolas a un reencendido fulminante de reacciones nucleares descontroladas que provoca un *colapso termonuclear*. En fracción de segundos destruye totalmente la estrella, que termina también explotando como supernova.

SN2016aps, SN2018cow, y ASASSN-15lh. Aunque el nombre incluye el año en que fueron detectadas, en muchos casos recién ahora se están publicando los resultados por la necesidad de investigar teorías que expliquen fuentes de energía diferentes de las ‘normales’.

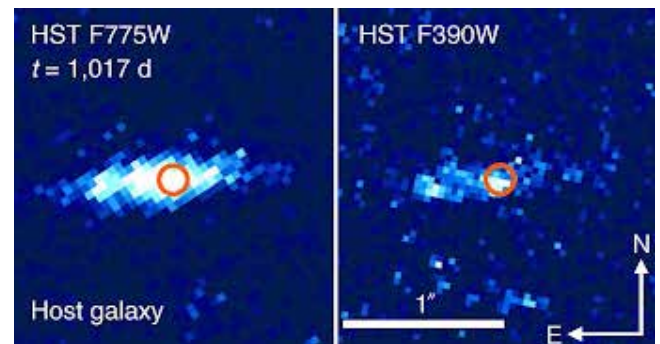
Se dice que la ASASSN-15lh fue la explosión estelar más luminosa jamás registrada. Fue quinientas veces más brillante que una supernova normal. Durante más de un mes, su luminosidad fue veinte veces mayor que la de toda la Vía Láctea. Todavía está en debate la naturaleza de este monstruo. Se ha sugerido que podría tratarse de una estrella que pasó dentro del radio de marea de un agujero negro supermasivo que la despedazó, o tal vez fue un *magnetar* (estrella de neutrones altamente magnetizada que gira muy rápido perdiendo energía por los polos magnéticos).

La SN2016aps fue tan brillante que su luz prácticamente eclipsó a la galaxia que la contenía. Se afirma que es la más masiva y energética de todos los tiempos. Cuando explotó emitió una energía diez veces superior a la alcanzada en los eventos normales. Recién en 2020 se llegó a cierto consenso sobre su naturaleza, proponiendo que la estrella que explotó debe haber sido entre 50 y 100 veces más grande que el Sol y se encontraba en un ambiente muy primitivo, casi sin átomos pesados. Se cree que el increíble tamaño de la estrella provenía de dos estrellas más pequeñas (pero aún enormes) que se fusionaron antes de la explosión, o una estrella muy grande embebida en una nube de gas también de decenas de masas solares. Se ha propuesto que en el núcleo muy masivo y muy caliente de la estrella pudo haber una extraña producción de materia y antimateria (electrones y positrones), y eso desembocó prematuramente en una explosión termonuclear descontrolada que, en lugar de colapsar en cuestión de minutos por la tremenda gravedad, destruyó completamente la estrella. Este tipo de explosión es denominada *supernovas de inestabilidad de pares pulsantes*, y solo puede ocurrir en estrellas muy antiguas y con masas exageradamente altas. La estrella que explotó probablemente existió en tiempos muy remotos del universo.

Las hipernovas magnetorrotacionales: son un modelo nuevo publicado en la revista *Nature* en julio de 2021, donde el sorprendente descubrimiento de átomos pesados como uranio, oro y zinc en una estrella químicamente muy primitiva (de unos 13.000 millones de años de edad) ubicada en el halo de nuestra galaxia llevó a los autores a proponer que la inesperada existencia de estos elementos indicaría que la estrella se formó con el material sobrante de una hipernova que debió explotar poco después del Big Bang como resultado de estrellas masivas muy magnetizadas girando muy rápidamente. Lo interesante de esta interpretación es que muestra una nueva fuente capaz de producir átomos pesados en el universo, aparte de la fusión de estrellas de neutrones.



Representación artística de una explosión como la que dio lugar a SN2016aps. Imagen M Weiss, BBC News.



La lejana galaxia a 4000 millones de años luz donde explotó SN2016aps, observada con el telescopio Hubble. El círculo rojo señala la supernova. Imagen Nicholl y col., *Nature Astronomy*, 4, 893, 2020.

La estrella que se comió un agujero negro y explotó: terminando casi la preparación de esta nota me sorprendió un artículo publicado en *Science* el 6 de septiembre de 2021, donde se informa lo que podría ser la primera demostración observacional de un hecho sobre el que, hasta el presente, se especulaba solo teóricamente. Los científicos analizaron una radiofuente transitoria muy luminosa (VT J121001+495647) que aparece curiosamente coincidente con una inusual fuente transitoria de rayos X (GRB 140814A, descubierta con un detector a bordo de la Estación Espacial Internacional) y las combinaron con nuevas observaciones en radio y luz visible. Estos investigadores concluyeron que esas emisiones se podían explicar en forma consistente como el resultado de varios pasos en la historia de dos estrellas.

Se sabe que la mayoría de las estrellas con masas mayores que las ocho masas solares nacen de a pares. En algunos casos la estrella que evoluciona más rápido explota como supernova, dejando una estrella de neutrones o un agujero negro orbitando cerquita de la compañera que sobrevivió. Cuando esta llega a la etapa de expansión puede atrapar al objeto compacto, el cual empieza a girar en espiral hacia el centro de la estrella, y se conjetura que a medida que viaja hacia adentro puede expulsar una espiral de material de la atmósfera de la estrella. Al llegar al núcleo



Esta ilustración muestra una estrella masiva que está a punto de explotar. Un objeto compacto (estrella de neutrones o agujero negro), dejado por su compañera binaria que explotó antes, va cayendo en espiral sobre ella. Al llegar al núcleo producirá la eyección de dos poderosos chorros y esto va a desencadenar la explosión prematura de la estrella. Ilustración artística de Chuck Carter, tomada de www.caltech.edu/about/news/a-black-hole-triggers-a-premature-supernova.

de la estrella, cae violentamente sobre este originando un par de chorros de energía simétricos que emergen a, casi, la velocidad de la luz, produciendo la emisión en rayos X detectada. En una interpretación novedosa se propuso que esos chorros desencadenaron una explosión de supernova. Después de unos cientos de años, la onda explosiva atravesó la mayor parte de la espiral expulsada y eso dio origen a la emisión que se detectó en ondas de radio.

Un dato importante es que, si bien la interacción entre un par de estrellas binarias es bastante común, se espera que esto ocurra entre 10.000 y 10 millones de años antes del colapso (cuando la estrella 'donante' todavía está transmutando hidrógeno en helio). En cambio, interacciones sincronizadas dentro de solo cientos de años antes del colapso del núcleo, como la que se desprende de este estudio, son extremadamente raras. Esa sincronización se explica mucho más naturalmente si el objeto intruso

atacando el núcleo de la estrella es lo que produce la explosión. Al final de este tipo de interacciones queda formado un sistema con dos objetos compactos (dos estrellas de neutrones o dos agujeros negros) orbitando entre sí y acercándose cada vez más hasta que, eventualmente, se fundirán en un solo objeto.

Los monstruos subluminosos

En el otro extremo de las sorpresas están las explosiones muy débiles, *supernovas subluminosas* con un brillo de apenas un décimo o un centésimo del brillo de una supernova común. En este grupo están las *kilonovas*, que resultan de la colisión de estrellas de neutrones. Estas brillan pocos días en el cielo, pero los efectos de esta fusión de objetos compactos impactan el tejido cósmico y originan ondas gravitacionales que viajan a través del universo y han sido detectadas por el observatorio LIGO. El caso de las kilonovas es interesante para los terráneos, ya que el 99% de la energía de la colisión va a parar al agujero negro resultante, pero el 1% restante alcanza para arrancar las capas externas. En ese proceso se produce una lluvia de elementos atómicos como mercurio, uranio, torio, y nacen allí dos metales muy valorados en nuestro planeta: oro y platino.

Están también las supernovas llamadas de *falsa alarma* o *impostoras*, provenientes de estrellas que nacieron con unas 70 a 150 masas solares y que explotan 'en cuotas'. Empiezan el proceso de explosión, eyectan un poco de su envoltura y recuperan así la estabilidad frenando por un tiempo el cataclismo, y ese proceso puede repetirse tres o cuatro veces, como la SN2009ip que arrojó materia cuatro veces hasta destruirse completamente.

Y están las que provienen de estrellas gigantes (que al nacer tendrían entre unas 300 a 1000 masas solares) y que al final de sus días experimentan una gravedad tan enorme que pueden llegar a aniquilarse a sí mismas, colapsando directamente a agujero negro sin pasar por ninguna fase explosiva. Cuando las ondas de choque de la explosión impactan, el gas circundante producen un brillo débil.

En todos los casos el quid de la cuestión es identificar la fuente de energía que impulsa estos sucesos y constituye un laboratorio extraterrestre de física de enorme valor para investigar física en condiciones extremas. **CH**

LECTURAS SUGERIDAS

- ALSABTI AW & P MURDIN**, 2017, *Handbook of Supernovae*, Springer, Nueva York.
- DUBNER G**, 2020, *Supernovas: el espectacular fin de las estrellas*, Paidós, Barcelona.
- GIACANI E y DUBNER G**, 2009, 'Supernovas: el fin catastrófico de una vida estelar', *CIENCIA HOY*, 19, 110: 8-15.
- MAZURE A**, 2009, *Exploding Superstars: Understanding supernovae and gamma-ray bursts*, Springer, Nueva York.



Gloria Dubner

Doctora en física, UNLP.
Investigadora superior del Conicet (jubilada),
vicepresidenta de la Academia Nacional de
Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ANCEFN).
IAFE-Conicet-UBA.
gdubner@gmail.com