

LA MUERTE DE UNA ESTRELLA Y EL NACIMIENTO DE UN AGUJERO NEGRO

Ya desde el siglo XVIII, la noción de estrella oscura de John Michell mostraba que, para lograr un campo gravitacional lo suficientemente fuerte para atrapar la luz, el cuerpo celeste debe poseer una densidad extrema. Los estudios teóricos muestran que este tipo de comportamientos solo pueden ser obtenidos mediante procesos físicos típicos de los entornos estelares. Por esta razón, en este capítulo describiremos superficialmente algunas de las etapas de la evolución estelar, para mostrar que la muerte de una estrella puede dar lugar al nacimiento de un agujero negro.

Nacimiento, Vida y Muerte de una Estrella

Las estrellas son creadas en grandes nubes de gas y polvo que se encuentran en las galaxias. Debido a los cambios en presión y densidad dentro de estas nubes, eventualmente se

dan las condiciones para que una cantidad apropiada de material se condense. Se dice que esta nube que se mantiene debido a la presión interna del gas que la conforma es una *protoestrella*. Si el material acumulado es el adecuado, la nube puede contraerse debido a su propia gravedad, de tal manera que su temperatura interior puede aumentar hasta el punto en el cual se inician los procesos nucleares de fusión. Esta etapa de formación puede durar millones de años y el resultado final es la emisión de radiación electromagnética debido a la conversión nuclear de hidrógeno en átomos de elementos más pesados. Se dice entonces que a nacido una estrella, la cual poseerá una temperatura en su núcleo de alrededor de 15 millones de grados Celsius y contendrá hidrógeno suficiente como para brillar durante billones de años.

Fusión Nuclear

La *fusión nuclear* es el proceso en el cual dos o más núcleos atómicos se combinan para formar uno o más núcleos. Usualmente, la masa de los núcleos producidos no es igual a la suma de los núcleos iniciales. Esta diferencia de masa se manifiesta como una absorción o liberación de energía.

En el interior de las estrellas, la fusión nuclear se presenta al combinar núcleos de átomos ligeros (Hidrógeno y Helio principalmente), para formar núcleos de átomos mas pequeños que el del hierro-56 (Fe^{56}). Cuando esto ocurre, se libera energía en forma de radiación y partículas subatómicas, lo que proporciona el brillo y calor que percibimos de las estrellas.

Cuando el proceso de fusión da como resultado núcleos mas pesados que el Fe^{56} , no se libera sino que se absorbe energía. Es por esta razón que en el interior de las estrellas no se producen estos elementos más pesado, es decir, dentro de las estrellas solamente se sintetizan elementos hasta el Hierro.



Esta imagen muestra la región IC2944, también conocida como λ Centauri Nebula, localizada en la constelación Centaurus a 6500 años-luz de la Tierra. En la fotografía se pueden observar nubes de gas y un conjunto de estrellas jóvenes muy brillantes. Las regiones oscuras son nubes opacas y densas de polvo denominadas globulos de Thackeray.

[Crédito Imagen: ESO](#)

La vida de las estrellas se caracteriza por ciertas propiedades físicas como temperatura y luminosidad. De acuerdo con las observaciones astronómicas, la mayoría de los objetos estelares siguen un patrón de evolución de estas características conocido como la secuencia principal. Mientras siguen este camino evolutivo, las estrellas se encuentran en un estado de equilibrio, produciendo grandes

cantidades de luz, calor y partículas elementales como positrones y neutrinos debido a los procesos nucleares internos, que llegan a liberar la energía equivalente a cientos de millones de armas nucleares cada segundo y que dan como resultado una presión que intenta despedazar el cuerpo celeste. Sin embargo, durante la vida de la estrella, la presión interna es controlada o balanceada por la fuerza de gravedad. De hecho, sin los procesos internos, la estrella colapsaría inmediatamente bajo su propia gravedad.

El estado de equilibrio de la estrella puede durar billones de años, pero eventualmente el hidrógeno que utiliza como combustible comenzará a disminuir⁸ y con ello, los procesos nucleares se vuelven menos eficientes. Esto producirá que la temperatura interna disminuya, al igual que la presión, y por lo tanto la gravedad contraerá la estrella. Con la contracción, la presión en el núcleo aumentará y eventualmente se alcanzará la temperatura adecuada para que otro tipo de procesos nucleares se enciendan, involucrando la conversión de elementos como el helio, el litio, etc. en elementos cada vez más pesados. La liberación de energía involucrada hará crecer el tamaño de la estrella nuevamente. Estos eventos de contracción y expansión se repetirán una y otra vez, dando como resultado pulsaciones en el tamaño y en la luminosidad de la estrella.

La sucesiva producción de elementos cada vez más pesados junto con la acción de la gravedad tendrá como resultado que, después de un cierto tiempo, la estrella tenga una estructura de capas con los elementos más pesados localizados en el núcleo y los elementos más livianos (principalmente Helio e Hidrógeno) en las capas externas. En

⁸ En el lenguaje científico se suele decir que una estrella emitiendo radiación en este estado de equilibrio se encuentra dentro del camino evolutivo de la secuencia *principal*. Esta fase termina cuando se ha utilizado aproximadamente el 10% del hidrógeno total inicial de la estrella.

este punto y ya en la última etapa de la vida de la estrella, la disminución de la presión interna tendrá como resultado una contracción de tamaño que a su vez incrementará la temperatura encendiendo por última vez la fusión nuclear. En un intento final por mantenerse, la presión interna aumentará tanto, que la estrella aumentará su radio hasta adquirir un tamaño enorme. Así, la estrella se convierte en lo que se denomina una *gigante o supergigante roja*, dependiendo de la masa inicial que ella posea. El radio puede alcanzar los billones de kilómetros mientras que su temperatura disminuirá notablemente. La estrella puede permanecer en el estado de gigante o supergigante por algunos millones de años hasta que los procesos nucleares vuelvan a disminuir y el colapso vuelva a ocurrir.

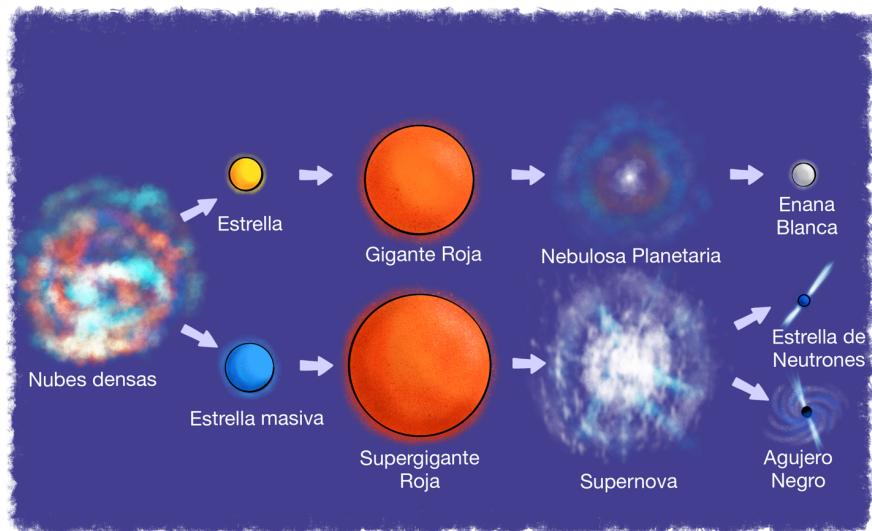


Diagrama simplificado de la evolución estelar. A partir de una nube densa de gas y polvo se presenta el colapso gravitacional que da lugar a la estrella. Dependiendo de la masa presente, ésta se catalogará como estrella masiva o no. Luego de millones de años y al consumir la mayor parte de su combustible nuclear, las estrellas crecerán para convertirse en gigantes o supergigantes rojas. En el primer caso, el desprendimiento de las capas exteriores del cuerpo dará lugar a una nebulosa planetaria y a un remanente llamado Enana Blanca. En el caso de las estrellas masivas, se presenta un evento de supernova seguido del colapso al estado final de Estrella de Neutrinos o de Agujero Negro.

A partir de este punto en su evolución, el fin de la estrella es inevitable. El resultado final de la muerte estelar depende de la masa que posee la estrella en este momento y de cuanta de ella logre perder antes del colapso final. A continuación, describimos los tres estados finales conocidos.

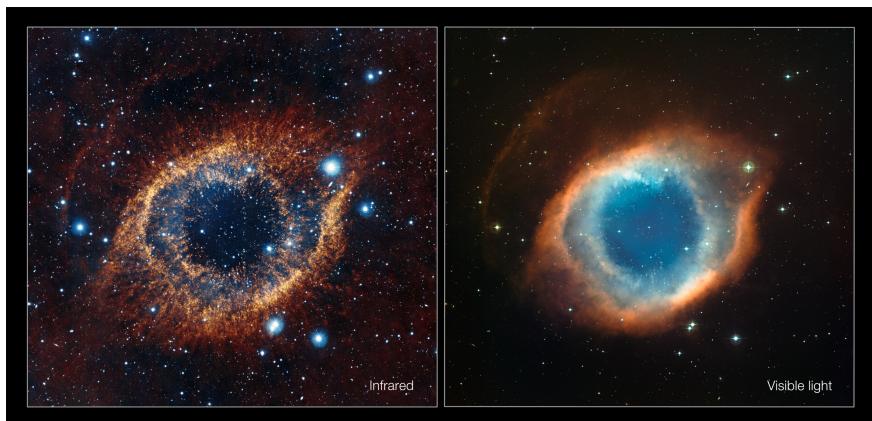
Enanas Blancas

Las estrellas con masas del orden de la masa del Sol poseen en su interior temperaturas y presiones lo suficientemente grandes para fusionar nuclearmente los elementos livianos hasta llegar a poseer un núcleo formado principalmente de carbón. En su última etapa, este tipo de estrellas crece para convertirse en una gigante roja. Debido al gran tamaño que adquiere, las capas más externas están sujetas a una gravedad débil y por lo tanto pueden desprenderse del objeto dejando una nube de gas y polvo, conocida como *nebulosa planetaria*, rodeando el núcleo que pronto colapsará bajo su propio peso.

Los estudios del astrofísico Subrahmanyan Chandrasekhar sobre la evolución estelar a comienzos del siglo XX mostraron que si la masa del núcleo residual, luego de la expulsión de las capas exteriores, no supera las 1.4 masas solares⁹, el colapso gravitacional se detiene porque se logra un estado de equilibrio con la presión producida por el rápido movimiento de los electrones en su interior (en el lenguaje científico, este mecanismo se denomina presión de degeneración de electrones). El remanente de la muerte de esta clase de estrellas se denomina una *enana blanca*, que

⁹ El límite de Chandrasekhar de 1.4 masas solares fue encontrado en 1930 durante su viaje desde la India hasta Inglaterra para comenzar sus estudios de doctorado.

corresponde a un cuerpo celeste caliente y poco luminoso, con el tamaño aproximado de la Tierra. Debido a la masa que posee y a su pequeño tamaño, la densidad de una enana blanca es tan grande que una cucharadita del material que la compone equivale a miles de toneladas de masa. De igual forma, esta enorme densidad hace que el campo gravitacional en su entorno sea tan grande que la velocidad de escape desde su superficie sea del orden de los 5000 km/s (es decir 14500 veces la velocidad del sonido en el aire). El estado de enana blanca es estable, haciendo que estos remanentes permanezcan en equilibrio gravitacional indefinidamente gracias a la presión de degeneración electrónica, sin necesidad de recurrir reacciones nucleares.



La nebulosa planetaria NGC7293, también conocida como Helix Nebula, posee un diámetro de aproximadamente 5.8 años-luz y se encuentra ubicada a 650 años-luz de la Tierra en la dirección de la constelación Aquarius. Esta nube de gas se formó cuando una estrella de masa similar a la del Sol perdió sus capas externas durante su proceso de muerte. El remanente corresponde a una enana blanca con una temperatura de 120.000 grados Celsius que continúa iluminando la nebulosa, principalmente con rayos ultravioleta, para producir las imágenes mostradas. En el lado izquierdo se observa una imagen en infrarrojo mientras que la imagen del lado derecho corresponde al visible. En algunos millones de años, la enana blanca se enfriará y dejará de iluminar, con lo que la nebulosa planetaria también dejará de emitir radiación y desaparecerá para los telescopios.

Crédito Imagen: ESO/VISTA/J. Emerson. Acknowledgment: Cambridge Astronomical Survey Unit

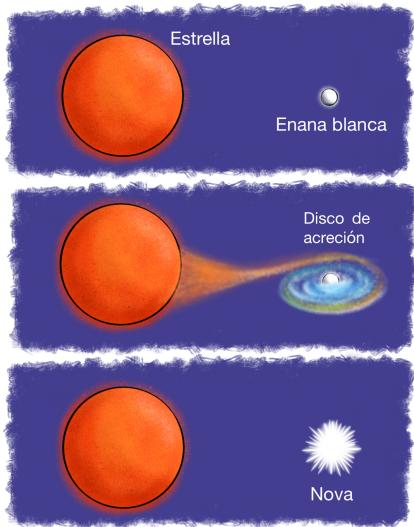
Presión de degeneración electrónica

Durante el colapso estelar, los electrones están sujetos a una enorme presión, debido a la gigantesca fuerza gravitacional, que los empuja hacia las regiones más internas de los átomos en los que residen. Al acercarse unos a otros, los electrones deberán adquirir los mismos valores de propiedades físicas como posición y velocidad, entre otras.

Ahora bien, uno de los resultados de la mecánica cuántica, conocido como el *Principio de Exclusión de Pauli*, asegura que dos partículas fermiónicas, como electrones o neutrones, dentro de un sistema confinado, como lo es un átomo, no pueden poseer exactamente las mismas propiedades físicas al mismo tiempo. Volviendo al proceso de colapso gravitacional durante la muerte estelar, cuando la enorme gravedad pretende llevar los electrones al centro del átomo y por lo tanto al mismo estado cuántico, estos se oponen moviéndose rápidamente en resistencia a la compresión. El estado de un gas de partículas en esta situación se denomina, en el lenguaje científico, *degenerado* y el movimiento aleatorio de las partículas se manifiesta macroscópicamente como una presión, efecto que se conoce como *presión de degeneración electrónica*.

De acuerdo con los cálculos de S. Chandrasekhar, si la masa que colapsa no supera el límite de 1.4 masas solares, la fuerza de gravedad será equilibrada por la presión de degeneración electrónica, dando lugar a una enana blanca. Por otra parte, si la masa supera este límite, el colapso continuará, venciendo la presión de degeneración, hasta que los electrones caerán al núcleo atómico para combinarse con los protones y dar lugar a una estrella de neutrones. En este caso, el equilibrio del remanente se debe a que la gravedad será contrarrestada por la *presión de degeneración neutrónica*.

Con el paso del tiempo, las enanas blancas se enfrian lentamente haciéndose cada vez menos luminosas y más difíciles de detectar. Sin embargo, cuando estos remanentes pertenecen a sistemas binarios donde la compañera es una estrella, se puede presentar un proceso interesante. La estrella puede perder parte de su masa en las capas externas debido al viento estelar. Este material puede ser atraído para caer hacia la enana blanca y al chocar con su superficie le inyecta energía, produciendo explosiones periódicas denominadas *novas*. Estas han podido observarse, incluso a simple vista, desde la Tierra.



Enana blanca acompañada de una estrella de la secuencia principal o gigante en un sistema binario.

Debido a procesos como el viento estelar, la estrella puede donar materia que cae hacia la enana blanca formando un disco de acreción. Estas partículas aceleradas emiten radiación durante su proceso de caída.

La colisión de las partículas con la superficie libera una gran cantidad de energía que puede reanimar los procesos internos de la enana blanca durante algún tiempo, con un aumento de luminosidad que se denomina *Nova*.

El viento estelar puede empujar el material de una estrella en un sistema binario hacia una enana blanca. Durante la caída, el material forma un disco de acreción que se calienta y por lo tanto se emite radiación electromagnética. Cuando las partículas colisionan con la superficie de la estrella de neutrones liberan energía y pueden reanimar la dinámica del gas de electrones. Esto produce un proceso denominado Nova, en el cual se presenta un aumento en el brillo de la enana blanca.

Estrellas de Neutrones

La segunda posibilidad para el final de una estrella se presenta cuando la masa de la estrella original es del orden de las decenas de masas solares. En este caso, los procesos nucleares internos a lo largo de la vida de la estrella son tan poderosos que pueden lograr sintetizar elementos tan pesados como el hierro¹⁰.

La última fase de la evolución estelar para estrellas masivas corresponde al estado de supergigante roja, en el cual las capas externas están compuestas de los elementos más livianos mientras que el núcleo está constituido principalmente de hierro. La región interna es tan pesada y la gravedad tan fuerte que el colapso tiene lugar en fracciones de segundo. Cuando la masa del núcleo supera el límite de Chandrasekhar, el colapso gravitacional no puede ser equilibrado por la degeneración electrónica. Así, la densidad del núcleo crece tanto que los protones y electrones de los átomos se fusionan para dar lugar a neutrones y partículas livianas como los neutrinos que rápidamente escapan del remanente. Mientras tanto, las capas mas externas caen y colisionan con el núcleo súper-denso, para rebotar con una liberación extrema de energía y materia denominada *supernova*. Se estima que en estos procesos se puede expulsar hasta un 80% de la masa inicial de la estrella. El material liberado forma un envoltorio gaseoso llamado *remanente de supernova*, que sigue expandiéndose por millones de años e iluminando gracias a la radiación emitida por el remanente de la estrella. Se calcula que este tipo de explosiones suceden tan solo 1 o 2 veces por siglo en nuestra Galaxia, pero tienen un papel fundamental en la evolución del

¹⁰ De acuerdo con la física nuclear, no existen procesos de fusión que puedan liberar energía a partir del hierro, por lo que este elemento resulta ser el final de las cadenas de reacciones nucleares en la estrella.

Universo. Diferentes modelos teóricos muestran que gracias a la enorme liberación de energía durante una supernova se pueden crear elementos más pesados que el hierro, como el cobalto o el oro, los cuales no son producidos por fusión.

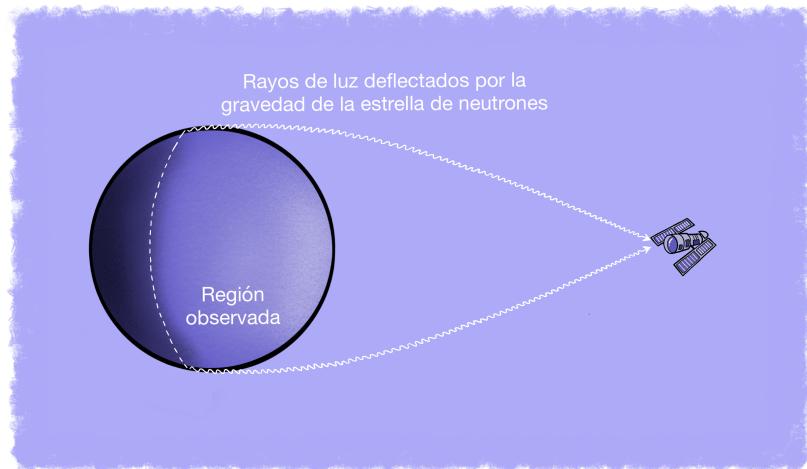
El resultado del proceso de colapso del núcleo estelar será un remanente cuya gravedad es soportada por la presión de degeneración neutrónica¹¹. Debido a su composición, el remanente se denomina una *estrella de neutrones*, poseerá un diámetro de 10 a 20 kilómetros y una densidad tan grande que una cucharadita del material corresponderá a trillones de toneladas de masa. La velocidad de escape desde la superficie de la estrella de neutrones puede superar los 200,000 km/s, es decir más del 66% de la velocidad de la luz.

La idea de las estrellas de neutrones fue propuesta originalmente durante la década de 1930 por físicos como Fritz Zwicky y Walter Baade. Sin embargo, debido al desarrollo de la segunda guerra mundial, su estudio a profundidad fue pospuesto hasta la década de 1950, cuando fue retomado principalmente por el grupo de Robert Oppenheimer, George Volkoff, Richard Tolman y Hartland Snyder. Los modelos numéricos desarrollados por este grupo mostraron que el colapso gravitacional puede detenerse gracias a la presión de degeneración de neutrones solo si la masa del núcleo no supera las 2.8 masas solares, conocido como el límite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV)¹².

¹¹ Este mecanismo es análogo al de la presión de degeneración electrónica y también está basado en el principio de exclusión de Pauli.

¹² Desafortunadamente, el cálculo de este límite superior de masa no es exacto debido a que los detalles del comportamiento de la materia nuclear con densidades tan altas no son conocidos en la actualidad. Sin embargo, la observación de diferentes pulsars y en particular el evento de ondas gravitacionales GW170817 registrado por LIGO parecen indicar un límite muy cercano al TOV.

Las estrellas de neutrones son parte de los denominados *objetos compactos* (debido a que su densidad es extremadamente alta) y por ello comparten algunas de las propiedades físicas que poseen los agujeros negros. Por ejemplo, su extrema gravedad modifica las trayectorias de los rayos de luz. Así, aún cuando los rayos de luz que se mueven radialmente pueden escapar de una estrella de neutrones, el intenso campo gravitacional reducirá la energía de la radiación, provocando una disminución en su frecuencia. A este efecto se le conoce como *corrimiento al rojo gravitacional* y se ha medido experimentalmente no solamente en este escenario sino también debido a otras fuentes de gravedad e incluso a nivel cosmológico. De igual manera, un rayo de luz emitido en dirección tangente a la superficie de la estrella de neutrones seguirá una trayectoria curva debido al efecto de la gravedad. Esto provocará que, para un observador ubicado a una distancia adecuada de la



La enorme gravedad producida por la estrella de neutrones logra desviar los rayos de luz de tal manera que un observador lejano logra ver más de la mitad de la superficie de la esfera. Este efecto produce una imagen distorsionada de la estrella de neutrones.

estrella de neutrones, más de la mitad de la superficie sea visible.

De acuerdo con la relatividad general la gravedad también afecta el paso del tiempo. Este efecto se conoce como *dilatación temporal gravitacional* e implica que dos observadores, uno cerca y otro lejos de la fuente de gravedad, medirán intervalos de tiempo diferentes. Cuanto más cerca se encuentre un observador del centro de gravedad, mas cortos serán los intervalos de tiempo comparados con los del observador lejano. De esta manera, si fuese posible visitar una estrella de neutrones, un observador en órbita alrededor del cuerpo celeste podría ver cómo los movimientos de un astronauta en la superficie lucirían en cámara lenta. De forma inversa, la persona en la superficie verá como todo lo que ocurre en la nave en órbita ocurre con una velocidad mayor. Sin embargo, cabe aclarar que cada uno de estos personajes actuaría de forma normal en cada una de sus respectivas localidades. Debido a la masa típica de las estrellas de neutrones, la dilatación temporal no es tan extrema como se ha mostrado en la ciencia ficción para el caso de los agujeros negros. Sin embargo, los cálculos muestran que para un observador muy lejano, cualquier proceso físico que ocurra en la superficie de una estrella de neutrones puede lucir hasta un 25% mas lento de lo normal.

Campos Magnéticos, Magnetars y Pulsars

Las estrellas poseen campos magnéticos y, cuando ocurre el colapso gravitacional, estos son arrastrados y concentrados de tal forma que siguen existiendo una vez formada la estrella de neutrones con una magnitud mucho mayor de lo que era originalmente. Igualmente, el momento angular presente en la estrella original también puede conservarse durante el

proceso de colapso y por ello las estrellas de neutrones suelen presentar una rotación muy rápida.

El efecto de la rotación combinado con los campos magnéticos es generar gigantescas corrientes eléctricas que aceleran los electrones y positrones¹³ del entorno para que se muevan en helicoides alrededor de las líneas de campo. Es bien conocido desde el estudio de la electrodinámica que las partículas cargadas aceleradas emiten radiación electromagnética. Por la forma de movimiento de los electrones y los positrones en el entorno de la estrella de neutrones, a esta se le denominada *radiación de sincrotrón* y su frecuencia se ubica en las ondas de radio. Ahora bien, ya que usualmente el eje de simetría del campo magnético y el eje de rotación no coinciden, los haces de ondas de radio son observados desde regiones lejanas como una serie de pulsos regulares (con un efecto tipo faro). Las frecuencias de estos pulsos corresponden con la frecuencia de la rotación de la estrella de neutrones sobre sí misma, la cual puede ser del orden de los hertz¹⁴. Debido a esta forma particular de emisión, las estrellas de neutrones suelen llamarse también *pulsars*. Es importante notar aquí que la energía para producir la radiación proviene de la rotación del pulsar y por ello, con el paso del tiempo, el periodo de rotación de la estrella aumentará (es decir su frecuencia disminuirá).

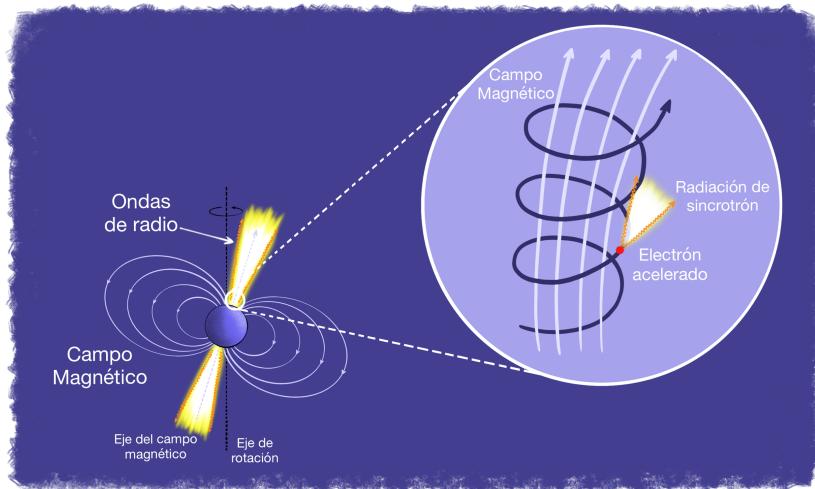
De acuerdo con algunos modelos, la naturaleza de este campo tiene en un origen en la dinámica interna. Por esta razón, las estrellas de neutrones no deberían ser de un

¹³ Los positrones corresponden a las antipartículas de los electrones, con la misma masa, pero carga eléctrica de signo contrario. En el entorno de la estrella de neutrones se pueden encontrar estas partículas libres o pueden ser creadas como pares de partícula-antipartícula debido a la gran energía acumulada en la región.

¹⁴ Esto quiere decir que las estrellas de neutrones rotarán con una frecuencia de algunas vueltas sobre si mismas cada segundo.

cuerpo sólido total, sino que deben poseer una estructura que permite la existencia de corrientes persistentes.

Cuando la estrella de neutrones posee una velocidad de rotación muy alta y un campo magnético extremadamente fuerte, se denomina un *magnetar*¹⁵. En este caso se puede proporcionar la potencia necesaria para producir radiación electromagnética de altas energías, incluso en las frecuencias de los rayos X y los rayos gamma.

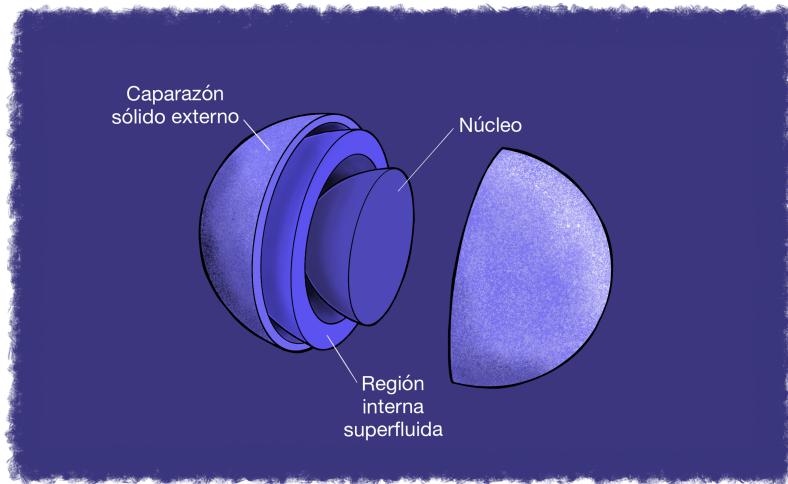


La existencia de campos magnéticos combinada con la rotación de la estrella de neutrones genera corrientes eléctricas que obliga a los electrones y positrones a moverse en helicoides alrededor a las líneas de campo magnético. Debido a su movimiento, emiten radiación de sincrotrón, cuyas frecuencias están típicamente en las ondas de radio para los pulsars o en los rayos X y gamma para los magnetars.

¹⁵ Un magnetar puede llegar a rotar sobre sí mismo a razón de miles de vueltas por segundo y su campo magnético puede tener valores de 10^9 a 10^{11} Teslas. Este valor es tan grande que su poder es suficiente para deformar las órbitas electrónicas en los átomos y hacer imposible la vida en su entorno.

Estructura Interna de una Estrella de Neutrones

Actualmente, los detalles del comportamiento de la materia degenerada condensada a densidades tan altas como en el interior de las estrellas de neutrones no son conocidos. Sin embargo, casi todos los modelos teóricos y la existencia de los fuertes campos magnéticos concuerdan en que la estructura de una estrella de neutrones no es completamente sólida, sino que se compone de varias capas. Al parecer, la región más externa es un caparazón sólido, seguido de una capa de material líquido y finalmente un núcleo sólido de materia degenerada.



La estructura interna de una estrella de neutrones no se conoce con total certeza, pero los modelos teóricos y algunas observaciones de los cambios en la emisión electromagnética indican la existencia de varias regiones: un caparazón externo rígido compuesto de elementos pesados, una región interna de neutrones y posiblemente otras partículas en estado superfluido y finalmente un núcleo con composición desconocida.

Desde el punto de vista de la observación, la emisión electromagnética de los pulsars puede dar claves acerca de los detalles de esta estructura. Como se describió antes, la señal de pulsos posee un periodo que va aumentando a

medida que la energía rotacional se transforma en la energía transportada por los jets. Sin embargo, el decrecimiento en el periodo no es constante, sino que se ha observado que ocasionalmente se presentan ciertos “saltos” en los que el periodo disminuye un poco. Para comprender porque sucede esto, debe recordarse que cuando un objeto como estos se encuentra girando sobre sí mismo tendrá una forma que no es completamente esférica, sino más bien corresponde a un esferoide con un abultamiento en la región ecuatorial. La forma específica depende de la velocidad de rotación: cuanto mayor sea su velocidad, mayor será su deformación con respecto a la esfera. Mientras la energía de rotación se transforma en radiación electromagnética, la velocidad de rotación disminuye y por lo tanto la forma de la estrella debe cambiar. Si la estrella de neutrones estuviese compuesta de un fluido, el cambio de forma se daría continua y suavemente, pero si la estrella posee un cascarón externo sólido, el intento de deformación se irá acumulando en la forma de esfuerzos hasta el momento en el que se logre vencer la resistencia del cascarón y éste se quiebre. Luego, la deformación se transmite a las capas internas dependiendo de la rigidez de cada una de ellas. Es allí, en estos momentos de quiebre y cambio de forma de las diferentes capas, que se libera energía produciendo un repentino cambio en la velocidad de rotación (o equivalentemente un brusco cambio en el periodo) que se puede medir a partir de la radiación electromagnética de los jets.

De esta forma, la combinación de observaciones detalladas y un buen modelo teórico ha permitido obtener datos interesantes acerca de la estructura del cascarón externo y de las capas más internas de la estrella de neutrones. Al parecer, el cascarón rígido externo está compuesto principalmente de hierro junto con otros elementos pesados como el níquel, el germanio o el criptón, todos sintetizados

durante el evento de supernova¹⁶. Por debajo del cascarón se encuentra una región compuesta de principalmente por neutrones libres (con algunos protones y/o electrones) en un estado superfluido¹⁷. Finalmente, la región más interna presenta la densidad mas alta y no existe un acuerdo entre los científicos acerca de las propiedades de la materia que se encuentra allí. Algunos autores piensan que esta formado de un gas degenerado de neutrones mientras que otros han sugerido que, debido a la gran densidad se podría llegar a vencer la presión de degeneración neutrónica y que el resultado sería un núcleo formado de un gas degenerado de quarks¹⁸.

El Proceso de Acreción

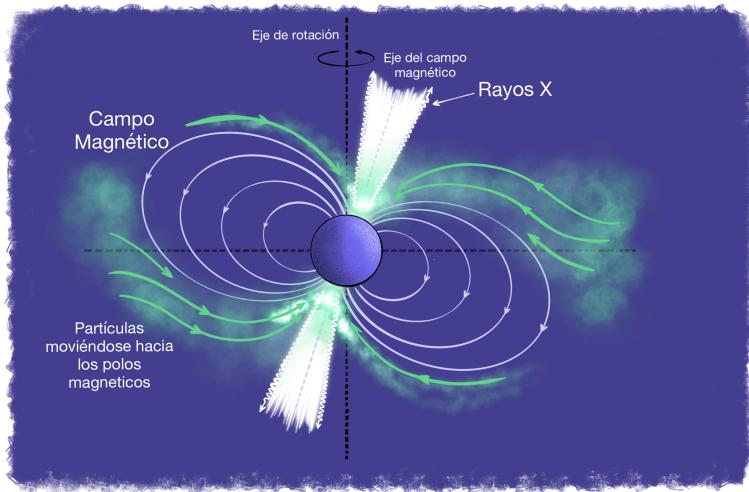
Otro de los procesos físicos que hace que las estrellas de neutrones emitan radiación es la *acreción*. Este proceso se presenta cuando materia cae hacia la estrella de neutrones. Esto puede ocurrir, por ejemplo, a partir del remanente de supernova que rodea la estrella de neutrones, el cual esta formado por plasma (gas caliente). También se puede presentar acreción cuando la estrella de neutrones se encuentra dentro de un sistema binario y el objeto compañero es una estrella de la secuencia principal o una

¹⁶ Estos y otros elementos pesados suelen ser inestables en circunstancias usuales, de tal forma que decaerían rápidamente produciendo electrones y neutrinos. Sin embargo, en el escenario de la estrella de neutrones, la altísima densidad y el Principio de Exclusión de Pauli evitan el decaimiento porque los electrones que se producirían ocuparían un mismo estado cuántico.

¹⁷ En el estado de superfluidez, los constituyentes se mueven libremente y no existe viscosidad interna.

¹⁸ En este modelo, los neutrones colapsarían debido al campo gravitacional, transformándose en un gas degenerado de las partículas fundamentales denominadas *quarks*, que componen los denominados hadrones (protones, neutrones, etc.)

estrella gigante o supergigante. En este caso, procesos como el viento estelar pueden hacer que parte de su material se desplace hacia la estrella de neutrones para ser atrapados por su campo gravitacional. Las partículas cargadas se mueven en caída libre y, al interactuar con el campo magnético, son arrastradas hacia los polos magnéticos de la estrella. Allí impactan en la superficie de la estrella de neutrones con velocidades del orden del 30% al 50% de la velocidad de la luz, produciendo la emisión de dos haces de radiación, principalmente rayos X, en la dirección de los polos norte y sur magnéticos. Al superponer con el movimiento de rotación, se produce el mismo efecto de faro presente en los pulsars, pero con radiación más energética.



Debido a que el eje magnético y el eje de rotación de una estrella de neutrones no siempre coinciden, la radiación electromagnética producida por la fuerte colisión de las partículas que caen a la superficie llega a un observador lejano como una serie de pulsos con la frecuencia de rotación de la estrella.

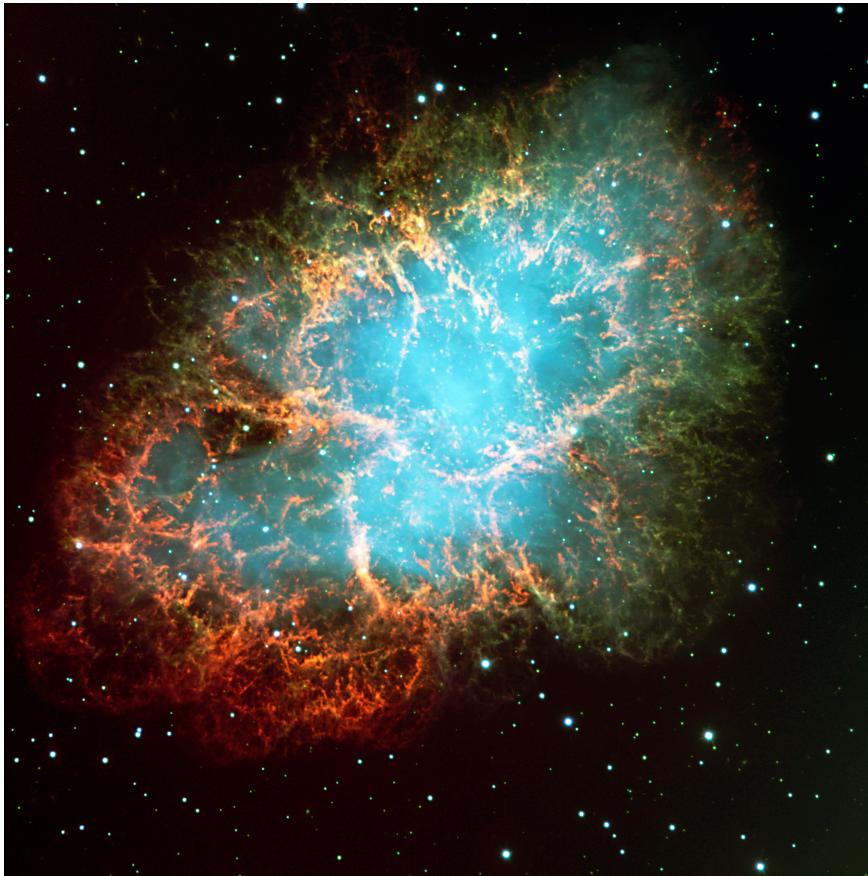
Evidencia Observacional de los Pulsars

La primera observación directa de un pulsar se reportó en noviembre de 1967 por parte de Jocelyn Bell y Anthony

Hewish como una señal consistente en una serie de pulsos regulares de ondas de radio repitiéndose cada 1.3 segundos. Inicialmente no se reconoció esta señal como la de un pulsar y, debido a su gran regularidad, incluso se consideró la posibilidad de que esta fuese una señal artificial, por lo que inicialmente se le denominó en forma de broma como LGM-1, haciendo referencia al nombre "Little Green Man 1". Hoy en día se sabe que esta fuente corresponde a un pulsar de ondas de radio con una masa de 1.4 masas solares ubicado en la dirección de la constelación Vulpécula y recibe el nombre de PSR B1919+21¹⁹.

Uno de los ejemplos más conocidos de estrellas de neutrones y de eventos de supernova corresponde al ocurrido en la constelación de Tauro y que se conoce hoy en día como la *Nebulosa del Cangrejo*. La explosión fue observada aproximadamente en el año 1054, según fue consignado en algunos manuscritos chinos y japoneses en donde se describe como se vio nacer una nueva estrella en el cielo. En el centro del remanente de supernova se encuentra una estrella de neutrones, reportada en 1968 por John Cocke, Michael Disney y Don Taylor, girando para producir una señal con una frecuencia de 30 Hz. La gran velocidad angular de este pulsar y la radiación electromagnética que produce explica el brillo del remanente de supernova con luz azul difusa, tal y como se observa hoy en día (casi 10 siglos después de la explosión).

¹⁹ La designación PSR B1919+21 contiene varios datos importantes: las letras PSR se refieren a las iniciales de Fuentes Pulsantes de Radio en inglés (Pulsating Source of Radio), la letra B corresponde a la época 1950.0 (cuando se utiliza la letra J se refiere a la época 2000.0). Finalmente, los números 1919+21 corresponden a la ascensión recta y declinación en grados para la época dada.



La nebulosa del cangrejo, también conocida como M1 en el catálogo de Messier, corresponde a un remanente de supernova localizado en la constelación de Tauro. Esta fotografía muestra una composición de varias frecuencias: el color verde corresponde a la emisión del hidrógeno eyectado en el evento de supernova mientras que el color azul se debe principalmente a la emisión de electrones relativistas expulsados por la estrella de neutrones en el centro de la nebulosa y que se mueven bajo la acción de campos magnéticos (radiación de sincrotrón).

[Crédito Imagen: ESO](#)

Otro ejemplo es el evento conocido como SN1987A, correspondiente a una supernova registrada en febrero 23 de 1987. Esta tuvo lugar en la Gran Nube de Magallanes, a solo

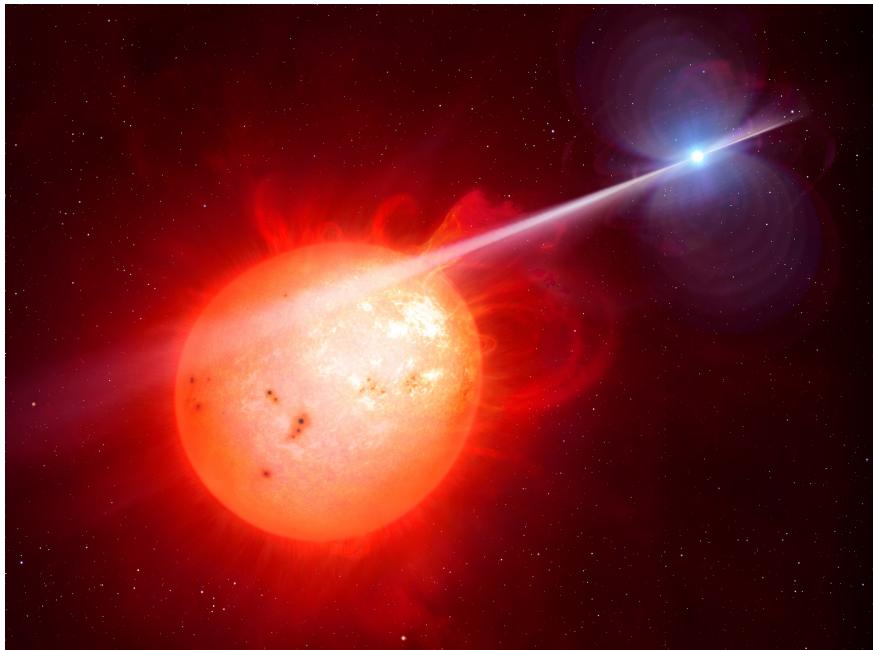
170.000 años-luz de la Tierra, y los registros fotográficos muestran claramente el aumento de luminosidad de la estrella que perduró por varios meses. Además, los detectores Kamiokande II (Japón) y el IMB (USA) registraron los neutrinos producidos por la formación de la estrella de neutrones, confirmando las predicciones descritas sobre el colapso gravitacional. Finalmente, las observaciones espectroscópicas confirmaron la existencia de cobalto durante el evento SN1987A, lo que confirma las ideas de la síntesis de materiales pesados en las supernovas.

Actualmente no existe evidencia directa de la estrella de neutrones dentro del remanente. Las razones que explicarían el por qué aún no ha sido observada incluyen que se encuentre rodeada de espesas nubes de material que la ocultan, que el campo magnético que posee es muy débil como para producir los jets de partículas o que eventualmente el remanente de esta supernova no sea un pulsar sino un agujero negro.



En la imagen se observa el evento de supernova SN1987A en la Gran Nube de Magallanes antes (izquierda) y después (derecha) de la explosión. Nótese el gran aumento en la luminosidad de la fuente.

[Crédito Imagen: ESO](#)



En esta imagen se muestra la impresión artística del sistema AR Scorpii, en donde una enana roja y una enana blanca constituyen un sistema binario. La enana blanca posee propiedades de pulsar, emitiendo pulsos con un periodo de 1.97 minutos debido al intenso campo magnético que posee y a la materia disponible de la estrella compañera. Su emisión incluye frecuencias desde el ultravioleta hasta las ondas de radio.

[Crédito Imagen: M. Garlick/University of Warwick/ESO](#)

En el año 2017, los astrofísicos David Buckley, Tom Marsh y Boris Gänsicke reportaron la primera enana blanca con características de pulsar en el sistema AR Scorpii, a 380 años-luz de la Tierra. Este objeto posee una masa de tan solo 0.6 masas solares y pertenece a un sistema binario con un periodo de 3.6 horas en donde el segundo miembro es una enana roja²⁰ de 0.3 masas solares. La enana blanca posee un

²⁰ Una enana roja es una forma especial de estrellas con masas de hasta 0.5 masas solares que fusionan hidrógeno al igual que las estrellas

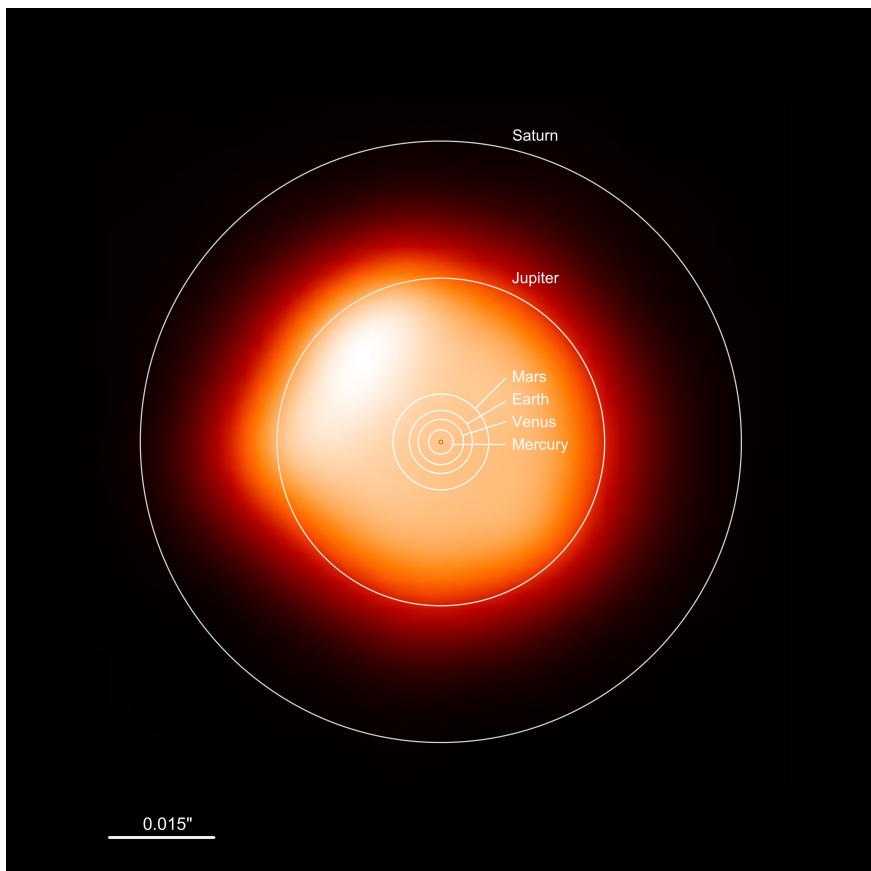
campo magnético 100 millones de veces más grande que el campo de la Tierra y un periodo de rotación sobre si misma de 1.97 minutos. En este caso, el enorme campo magnético es el responsable de producir los jets de radiación electromagnética en frecuencias desde el UV hasta las ondas de radio. Para detalles ver el articulo de D. Buckley et. al. (2017).

Aún cuando no es posible predecir cuando va a ocurrir un evento de supernova, los astrónomos si conocen algunas estrellas que se encuentran en sus últimas etapas de evolución. Un caso interesante es el de la estrella Betelgeuse, de la constelación de Orión. Ésta es una de las más brillantes en el cielo y se sabe que se encuentra en la fase de supergigante roja. La masa estimada para Betelgeuse es de aproximadamente 11.6 masas solares y su radio de 955 veces el radio del Sol. A pesar de ser mucho mas grande y masiva, su temperatura, de unos 3590 Kelvin, es notablemente inferior a la del Sol. A finales de 2019 y comienzos de 2020, el brillo de esta estrella disminuyó considerablemente, por lo que muchos científicos alrededor del mundo han sugerido que está entrando en una fase pre-supernova. Si esta explosión tiene lugar, sería la supernova más cercana que la humanidad habría observado, a tan solo 624.5 años-luz de la Tierra. Con ello, Betelgeuse se convertiría en la estrella más brillante en el cielo (exceptuando el Sol) por varios meses e incluso llegaría a verse a plena luz del día.

Ahora bien, algunos astrónomos han manifestado que la disminución del brillo no implica necesariamente que la supernova ocurrirá pronto ya que, a lo largo de la historia, Betelgeuse ha tenido variaciones de brillo notables e incluso

usuales, pero más lentamente. Por esta razón es menos caliente y no muy brillante

existe evidencia de algunos cambios de color. Por ello, algunos científicos aseguran que Betelgeuse puede permanecer otros 100 000 años en el estado actual, haciendo que el evento de supernova no ocurra durante nuestra escala de vida. Sin embargo, para la fecha de escritura de este libro, la comunidad científica se encuentra expectante ante cualquier cambio en la situación.



Esta es una imagen de la estrella Betelgeuse tomada por los radiotelescopios en el Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). Para comparación de su tamaño, se indican las órbitas de los 6 primeros planetas en el sistema solar. Nótese que el tamaño de Betelgeuse es un poco mayor que la órbita de Júpiter.

[Crédito Imagen: ALMA \(ESO/NAOJ/NRAO\)/E. O'Gorman/P. Kervella](#)

Para finalizar este apartado sobre evidencia observacional de las supernovas y las estrellas de neutrones, consignamos la siguiente tabla con datos relevantes de algunos de los pulsars y magnetars conocidos en la actualidad.

PSR	Distancia (años-luz)	Masa de la estrella de neutrones (Masas Solares)	Periodo	Notas
B1919+21	1000	1.4	1.34 s	Primer pulsar observado
J1748-2446ad	18000	?	1.4 ms	Menor periodo medido
J0250+5854	5200	?	23.5 s	Mayor periodo medido
J1311-3430	?	2.1 - 2.7	2.5 ms	Primer pulsar de rayos Gamma
J0835-4510	959	?	89.33 ms	Pulsar más brillante
Cen X-3	18.6	1.21	4.84 s	Primer pulsar de rayos X

Tabla 1. Datos interesantes sobre algunos de los pulsars conocidos en el Universo.

Agujeros Negros

El tercer caso posible, de acuerdo con los modelos teóricos actuales, para la muerte de una estrella es el que da origen a los agujeros negros. De acuerdo con las ecuaciones de la física, cuando el núcleo posee una masa que supera el límite TOV de 2.8 masas solares después del evento de supernova, el colapso gravitacional no puede detenerse mediante la presión de degeneración de neutrones. Ya que en la actualidad no se conoce otro mecanismo ni proceso físico que pudiese balancear la gravedad en este escenario, se asume que el colapso no se detiene y por lo tanto toda la

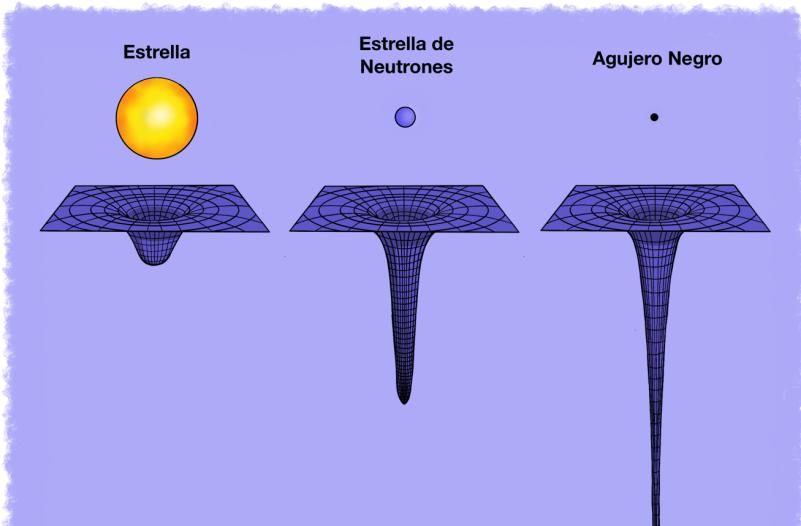
materia del núcleo es comprimida hasta el punto central. El resultado será un objeto completamente colapsado y con densidad infinita.

De acuerdo con los cálculos de R. Oppenheimer y G. Snyder en 1939, durante el colapso total, la materia cruzaría el correspondiente radio de Schwarzschild y a partir de ese punto nada podría escapar²¹. Desde el punto de vista histórico es notable que este resultado no fue aceptado completamente por la comunidad científica debido a que los cálculos, los cuales se realizaban sin el uso de computadoras, eran simplificados asumiendo que el colapso se producía de forma perfectamente esférica. Debido a esta suposición y a que el tipo de objetos resultantes poseían propiedades muy extrañas que van en contra del sentido común, muchos científicos del siglo XX, incluyendo al mismo Einstein, llegaron a pensar que los agujeros negros no podrían existir en el Universo.

Uno de los argumentos que más se exponía en contra de la formación de un agujero negro era que cualquier pequeña perturbación a la simetría esférica se vería amplificada durante el colapso, lo que seguramente llevaría a una distribución de materia diferente a la de un agujero. Solo hasta comienzos de la década de 1970, los físicos Stephen Hawking y Roger Penrose lograron demostrar que el proceso de colapso descrito desde la relatividad general siempre lleva a la formación de un agujero negro, incluso en el caso en el que existan desviaciones de la simetría esférica. Uno de los

²¹ Algunos autores han propuesto que el colapso gravitacional para masas superiores al límite de TOV podría detenerse debido a la presión de degeneración de quarks y con ello se obtendría un objeto muy denso denominado *estrella de quarks*. Sin embargo, el tamaño de este remanente no superaría el radio de Schwarzschild, por lo que un observador externo no podría distinguir esta situación de un agujero negro.

resultados más interesantes de este estudio es que las asimetrías existentes en la estructura que colapsa son expulsadas en forma de *ondas gravitacionales*. Con ello, el agujero negro final terminará en un estado estacionario, el cual se caracterizará por solo dos características, su masa y su momento angular²².



Representación geométrica de tres cuerpos celestes diferentes. La densidad de materia define la deformación del espacio-tiempo en cada caso. Nótese que la profundidad del pozo gravitacional producido por la estrella de neutrones es mayor que la producida por la estrella. En el caso del agujero negro, la densidad de materia infinita asociada se manifiesta como un pozo de profundidad infinita, indicando también la imposibilidad de escapar del campo gravitacional producido por este objeto.

²² El resultado completo implica que el agujero negro solo se caracteriza por su masa, su momento angular y eventualmente su carga eléctrica. Sin embargo, a nivel astrofísico los objetos no suelen poseer carga neta, por lo que este parámetro no es relevante. Los científicos suelen referirse coloquialmente a esta ausencia de otras características físicas diciendo que “los agujeros negros no tienen pelo” y el resultado matemático se conoce como el *teorema del no-pelo*.

Así, tanto los desarrollos teóricos actuales como las observaciones recientes parecen indicar que los procesos naturales de la evolución de las estrellas llevan inevitablemente a la formación de estos objetos que se conocen hoy en día como agujeros negros de origen estelar. De acuerdo con los estimados, para que una estrella se convierta finalmente en un agujero negro estelar, debe poseer una masa inicial de alrededor de 10 masas solares, ya que con ello se da cuenta de la masa que pierde durante el evento de supernova (la cual se estima en un 70 o 80% de la masa inicial) y se asegura que subsista la masa suficiente, por encima del límite TOV, para que el remanente colapse totalmente.

Ahora que conocemos el origen natural de los agujeros negros (al menos de los que poseen tamaños estelares), estamos listos para abordar su descripción detallada, exponiendo sus características, propiedades físicas y efectos sobre su entorno.