

Estrellas de neutrones o neutrones estrellados

Federico García

Introducción

Las estrellas de neutrones son los objetos más compactos que se conocen en la naturaleza. Con masas de entre una vez y media y dos veces la masa del Sol, y radios de alrededor de una docena de kilómetros, alcanzan densidades promedio superiores a la densidad de saturación nuclear, que es la densidad a la que se encuentran los nucleones, protones y neutrones, dentro de los núcleos atómicos normales. Esto sugiere que, en su interior, la materia pierde la identidad atómica con la que la conocemos a densidades normales, para transformarse en un continuo de nucleones compactados, que podríamos ilustrar figuradamente como “neutrones estrellados”.

Su origen se remonta al colapso final del núcleo de estrellas “normales” de masas intermedias (por ejemplo, de alrededor de diez veces la masa del Sol) que ocurre cuando éstas agotan su combustible nuclear y explotan como supernovas. Las estrellas normales, que son grandes masas de gas, se mantienen en equilibrio hidrostático gracias a la presión suministrada por ese mismo gas y por la radiación originada en las reacciones termonucleares que ocurren en su núcleo. Cuando el combustible para esas reacciones se acaba, la fuerza de gravedad comprime al núcleo de la estrella en lo que se denomina el colapso gravitatorio. Durante ese proceso, los protones y los electrones de los núcleos atómicos se combinan para formar neutrones, emitiendo neutrinos. Estos neutrones forman una fase de materia nuclear continua que origina una presión suficientemente fuerte como para volver a sostener toda esa estructura, dando origen a lo que conocemos como “estrella de neutrones”.

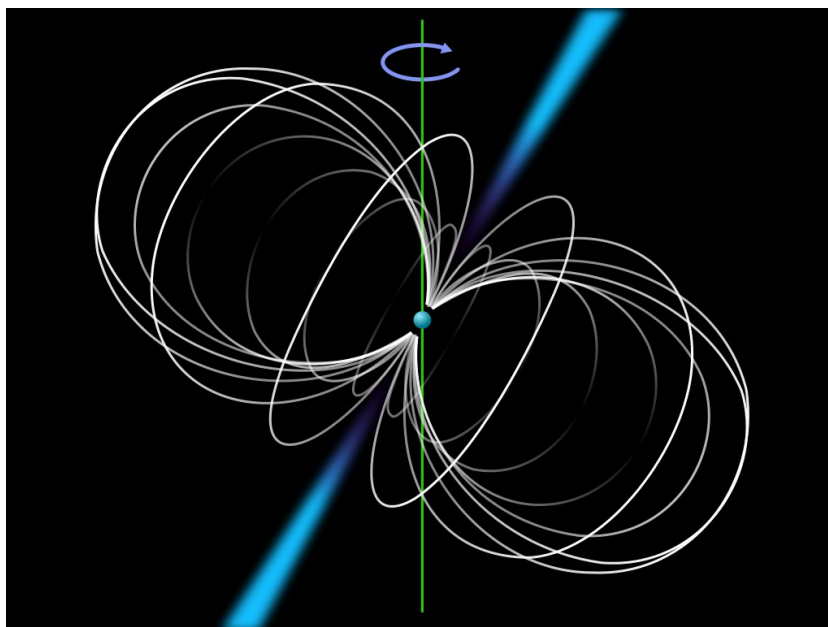
La idea de una estrella compuesta esencialmente por neutrones y formada como resultado de la contracción del núcleo de una estrella normal, al final de su evolución, durante una explosión de supernova fue desarrollada en los años '30 por los astrónomos Baade y Zwicky. Siguiendo esa propuesta, Tolman, Oppenheimer y Volkoff llevaron a cabo los primeros cálculos teóricos de la estructura de estas estrellas, basados en los desarrollos de Chandrasekhar para las estrellas enanas blancas, pero dentro del marco de la gravitación de Einstein. De esta manera encontraron que las estrellas de neutrones deberían presentar masas no mayores al 70% de la masa del Sol y radios de tan solo una decena de kilómetros.

Durante el proceso de formación, las estrellas de neutrones heredan dos propiedades fundamentales de la estrella que les da origen: su rotación y su campo magnético. Por un lado, debido a la conservación del momento angular, la fuerte compresión a la que es sometido el núcleo de la estrella normal para formar la estrella de neutrones, da lugar a un gran incremento en la velocidad de rotación, por lo que las estrellas de neutrones presentan períodos de rotación que van desde algunos segundos hasta pocos milisegundos, es decir que completan incluso miles de vueltas sobre sus ejes en tan solo un segundo. Por otro lado, debido a la conservación del flujo magnético, la compresión también da lugar al origen de los campos magnéticos macroscópicos más intensos que se conocen en la naturaleza, alcanzando típicamente los diez billones de Gauss. Un campo magnético inmenso si se lo compara con el terrestre que es de apenas medio Gauss.

Descubrimiento

Tuvieron que pasar más de 30 años para que, en 1967, la estudiante de doctorado Bell, quien era

supervisada por el astrónomo Hewish, analizando observaciones en ondas de radio, descubriera una serie de pulsos coherentes con un período corto y muy regular asociados a una fuente puntual en el cielo, a la que se denominó “pulsar”. Del análisis de estos pulsos pudo determinarse que se trataba de un objeto en rápida rotación ya que la radiación observada no podía ser explicada por oscilaciones acústicas. Rápidamente se la asoció con una estrella de neutrones en rápida rotación y con un campo magnético muy intenso, capaz de acelerar electrones hasta velocidades relativistas, que emiten radiación sincrotrón y de curvatura (no térmica en ambos casos) en la dirección de sus polos magnéticos, como muestra la figura 1 (crédito: Wikipedia).

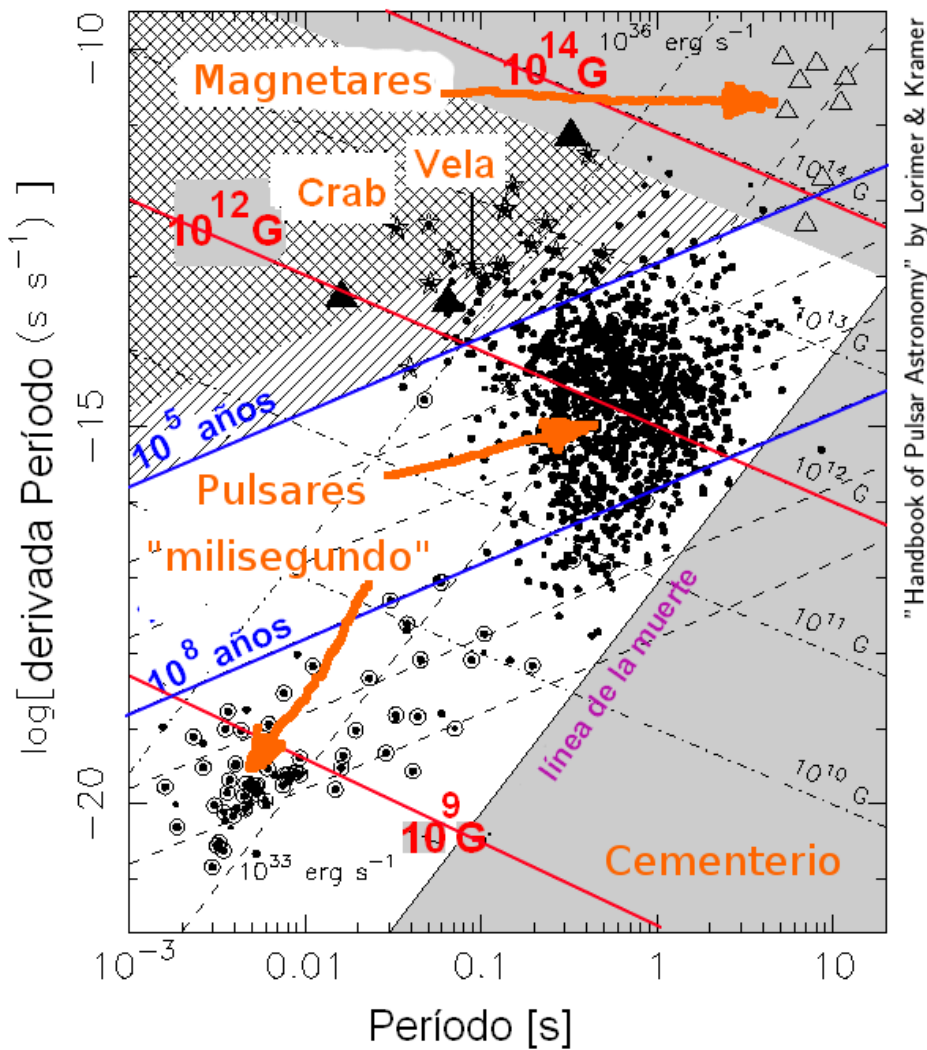


Unos años después, un pulsar fue detectado en la dirección del remanente de la supernova del año 1054, conocida como la Nebulosa del Cangrejo, lo que permitió confirmar la visionaria predicción de Baade y Zwicky acerca de su origen. El pulsar del Cangrejo es una de las fuentes más brillantes en el cielo radioastronómico y presenta un período de apenas 33 milisegundos que crece lentamente en el tiempo.

Clasificación

La radiación electromagnética liberada por los pulsares a través de sus magnetosferas es emitida a expensas de la disminución de su energía rotacional. Es por esto que a medida que transcurre el tiempo, sus períodos de rotación, P , van creciendo, por lo que la variación del período, es decir, su “derivada”, \dot{P} , es siempre positiva. Suponiendo que la radiación electromagnética emitida por el pulsar coincide con la energía rotacional que va perdiendo a lo largo del tiempo, la intensidad de su campo magnético y su edad característica quedan determinadas por estas dos cantidades que pueden ser obtenidas a partir de las observaciones.

Así, puede entonces construirse un gráfico en el que las abscisas corresponden al logaritmo de los períodos y las ordenadas al logaritmo de las derivadas de los períodos y poner en él todas las estrellas de neutrones conocidas, formando así lo que se denomina el “diagrama $P-\dot{P}$ ”. A partir de las características observacionales de las estrellas de neutrones y su posición en el diagrama surge una clasificación fenomenológica que resulta determinada esencialmente por la intensidad del campo magnético de cada estrella (ver la figura 2, adaptada de Lorimer & Kramer, “Handbook of Pulsar Astronomy”).

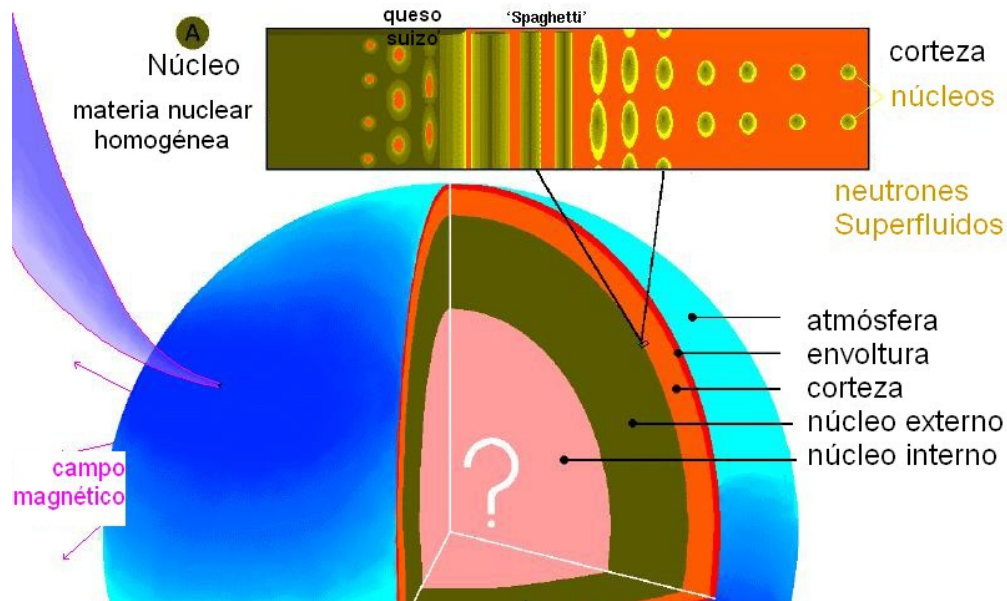


En la figura se observa que la gran mayoría de las estrellas de neutrones se presentan como pulsares, con campos magnéticos del orden de diez billones de Gauss. Un segundo grupo bastante numeroso es el de los pulsares con períodos del orden del “milisegundo”, que presentan campos magnéticos unas mil veces menores a los pulsares normales. En el extremo superior derecho del diagrama, se encuentran las estrellas de neutrones con los campos magnéticos más intensos, desde unas cien hasta mil veces mayores a los pulsares normales. A estos objetos se los denomina “magnetares”. Finalmente, en el diagrama también se destacan los pulsares jóvenes, asociados a los remanentes de supernova, como Vela y Crab (el Cangrejo). La región inferior derecha del diagrama suele denominarse “cementerio” ya que si bien no se conocen razones que impidan la existencia de estrellas de neutrones con esos períodos y derivadas de períodos, la radiación proveniente de sus magnetosferas más allá de la “línea de la muerte” es tan débil que difícilmente podrían ser detectadas.

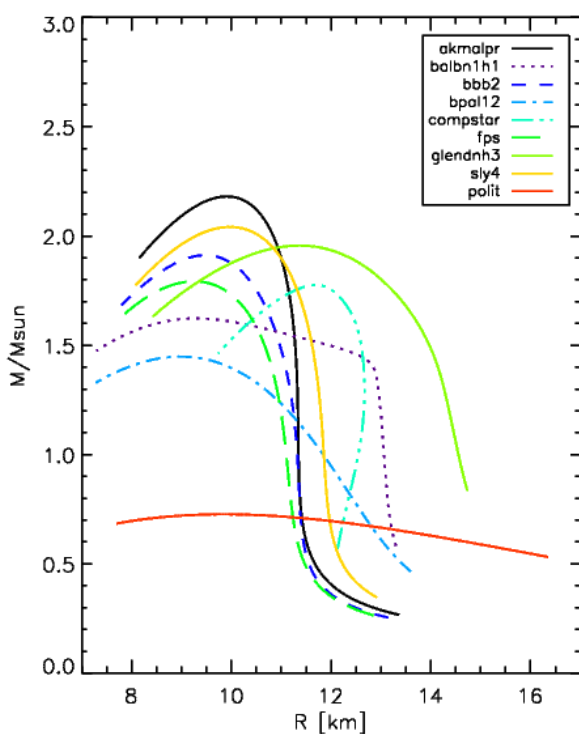
Estructura interna

La estructura interna de las estrellas de neutrones se divide en una serie de capas características a medida que la densidad de la materia que las compone aumenta hacia su interior, como muestra la figura 3 (adaptada de D. Page). La zona más externa está formada por una atmósfera de unos pocos centímetros de espesor seguida de una envoltura líquida de algunos metros de profundidad, también denominada océano. A densidades mayores al millón de gramos por centímetro cúbico, comienza a desarrollarse la corteza, que es una red cristalina sólida. A medida que la profundidad aumenta, los núcleos que conforman la red se vuelven más y más pesados y su porcentaje de neutrones crece

rápida hasta que, en la parte más interna de la corteza los neutrones logran escapar de los núcleos formando un gas de neutrones que inunda a la red cristalina. La corteza sólida tiene una muy alta conductividad, por lo que es capaz de soportar grandes corrientes eléctricas que dan origen a los intensos campos magnéticos observados. Su espesor es de aproximadamente un kilómetro, por lo que representa un 10% de la estrella. Alrededor de la densidad de saturación nuclear, a unos mil billones de gramos por centímetro cúbico, la red cristalina se transforma en un continuo de materia nuclear y comienza a desarrollarse el núcleo de la estrella, con un espesor de una decena de kilómetros. Poco se sabe acerca de la composición y propiedades de la región más interna del núcleo, debido a que las densidades alcanzadas por la materia en esa zona, no pueden ser reproducidas en los laboratorios terrestres.



A su vez, es la región más interna, y por ende de más alta densidad, la que determina en mayor medida cuál será el radio y la masa total de la estrella, dada una cierta densidad central. La forma en la que se comportan la densidad y la presión en el interior de la estrella determina la ecuación de estado que las relaciona. Para cada modelo escogido para representar a la materia nuclear, existe



una cierta ecuación de estado, y así, para cada ecuación de estado propuesta, puede calcularse una familia de estrellas de neutrones con una masa y un radio bien determinados. La figura 4 muestra los diagramas masa-radio obtenidos para una serie de ecuaciones de estado diferentes que se indican en la leyenda.

De la figura se infiere que si pudiéramos determinar con precisión la masa y el radio de las estrellas de neutrones, encontraríamos entonces cuál de todas las ecuaciones de estado conocidas es la que mejor representa a estas estrellas y, en consecuencia, esto nos permitiría dilucidar cómo es el comportamiento de la materia nuclear a alta densidad, transformando a las estrellas de neutrones en poderosos laboratorios físicos.

Estrellas de neutrones en rayos X

En general, las estrellas de neutrones que observamos se encuentran a temperaturas del orden de los millones de grados, por lo que resultan brillantes en la banda de los rayos X. Así, durante el año 1970, el satélite de rayos X *UHURU* pudo observarlas por primera vez. Con el correr de los años, sucesivas misiones espaciales con instrumentos más sensibles fueron capaces de observarlas y determinar, a través de sus espectros térmicos, la temperatura de muchas de ellas.

Como estas estrellas no tienen mecanismos internos para producir energía térmica, pasan toda su vida enfriándose. Durante su formación adquieren una temperatura inicial muy alta, de algunos miles de millones de grados que, con el correr de los años, va disminuyendo paulatinamente, debido a la emisión de neutrinos y la conducción de su calor interno hasta la superficie, desde donde es irradiado. El estudio de la evolución térmica de estas estrellas resulta ser otra forma de conocer el comportamiento de la materia en su interior.

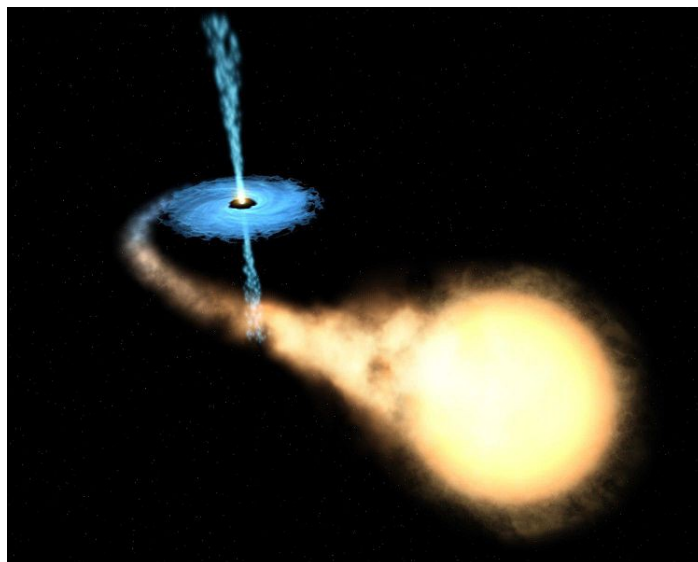
Determinación del cociente masa/radio

Debido a su intenso campo gravitatorio, los fotones que emergen de su superficie sufren un corrimiento al rojo gravitacional muy significativo por lo que las líneas de absorción y emisión de su espectro deberían observarse fuertemente desplazadas. Este corrimiento al rojo gravitacional está directamente relacionado con el cociente entre la masa y el radio de la estrella, por lo que su determinación observacional, junto a una estima independiente de la masa o el radio, permite conocer ambas magnitudes.

En general, para los valores típicos de masa y radio esperados para estos objetos, el corrimiento al rojo gravitacional en la superficie es de alrededor del 35% y la velocidad necesaria para escapar de la superficie de la estrella, de aproximadamente el 70% de la velocidad de la luz.

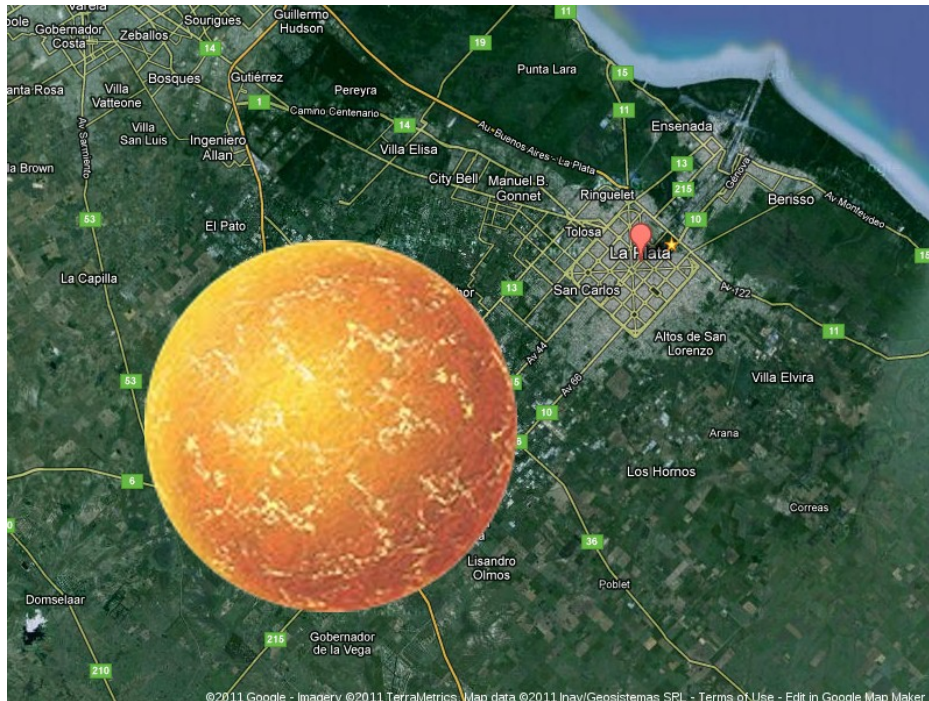
Estrellas de neutrones en sistemas binarios

Actualmente se conocen en total unas dos mil estrellas de neutrones, de las cuales aproximadamente unas trescientas se encuentran en sistemas binarios, ya sea con compañeras normales, enanas blancas o con otra estrella de neutrones. Cuando las estrellas de neutrones en sistemas binarios sufren un proceso de acreción de materia de sus estrellas compañeras, el sistema binario se vuelve una intensa fuente de rayos X. Esto se debe a que la materia que cae a la superficie de la estrella de neutrones emite radiación al ser acelerada por su intenso campo gravitatorio y también debido al fuerte rozamiento o viscosidad de la parte más interna del disco que forma la materia antes de caer. La figura 5 (crédito: NASA/ESA) es una representación artística de esta situación física.



Determinación de radios

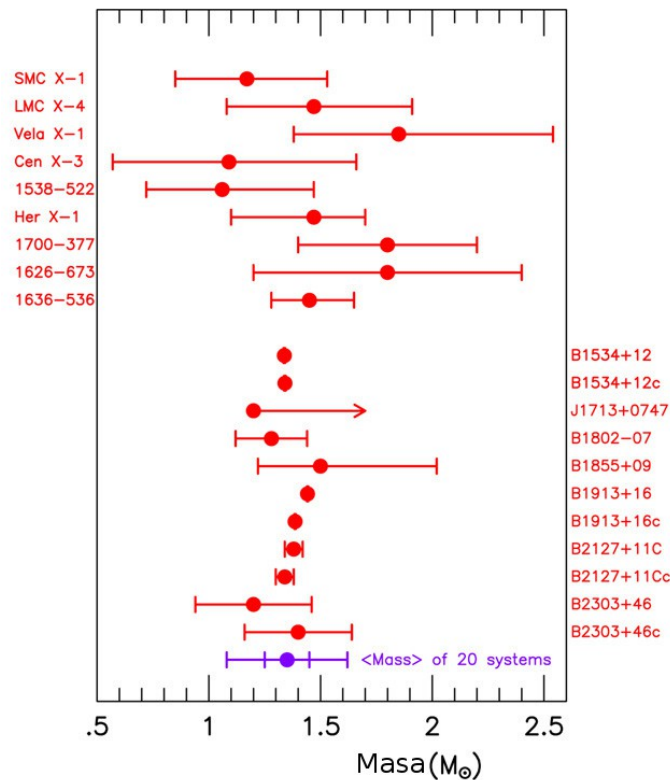
En algunos casos, la acumulación del material acretado sobre la superficie sólida de la estrella, que generalmente se compone de núcleos livianos de Hidrógeno y Helio, puede dar lugar a reacciones termonucleares capaces de liberar grandes cantidades de radiación en tan solo algunos segundos, en lo que se denomina “erupción de rayos X”. Estas erupciones elevan fuertemente la temperatura superficial de la estrella que luego se enfría emitiendo radiación térmica como un cuerpo negro, con un espectro bien determinado. Cuando la distancia al sistema binario es bien conocida, el área de emisión y por lo tanto, el radio de la estrella de neutrones, pueden ser determinados con gran precisión, incluso aunque se trate de radios de unos diez a quince kilómetros a distancias de miles de años luz. La figura 6 (adaptada de un mapa de Google) muestra una comparación entre el tamaño de una estrella de neutrones y los alrededores de la Ciudad de La Plata.



Determinación de masas

La interacción gravitatoria entre la estrella de neutrones y su compañera permite realizar estimas de sus masas ya sea por su movimiento orbital, explicado dentro del marco de la gravitación newtoniana, como el caso de las estrellas normales o los planetas, o por la determinación de la evolución de sus órbitas en el tiempo, cosa que puede ser bien explicada por la teoría de la relatividad general de Einstein.

En el caso particular en que el plano orbital de un sistema binario que contiene un pulsar coincide con la dirección en la que se encuentra el Sistema Solar, el paso de la estrella compañera por delante del pulsar produce un retardo en la detección de sus pulsos, conocido como *retardo de Shapiro*, que está directamente relacionado con las masas de ambas estrellas, lo que permite determinarlas, como en el caso del sistema J1614-2230, con un error del orden de tan solo el 5%. La figura 7 (adaptada de F.X. Timmes) muestra las masas determinadas en una serie de estrellas de neutrones.



Otros fenómenos asociados con estas estrellas

Ondas gravitacionales

Así, las estrellas de neutrones pueden convertirse también en laboratorios para verificar las más osadas predicciones de la teoría de la relatividad general, como es la existencia de las ondas gravitacionales. En este sentido, el estudio del pulsar binario PSR B1913+16, permitió a Taylor y Hulse encontrar la primera evidencia indirecta en esta dirección, al observar que el sistema binario pierde energía rotacional, supuestamente a expensas de la emisión de ondas gravitacionales, de acuerdo con la teoría.

Erupciones de rayos gamma

Uno de los eventos explosivos más intensos que se conocen en la naturaleza son las llamadas “erupciones de rayos gamma”. Se trata de fenómenos de algunos segundos de duración que ocurren una o dos veces por día en cualquier dirección del cielo, por lo que se piensa que tienen un origen cosmológico y no Galáctico (es decir que no todos se originan dentro de la Vía Láctea). Estos se dividen, según su duración, en largos y cortos. Se piensa que los primeros están relacionados con el colapso de estrellas muy masivas que explotan como supernovas formando *jets* relativistas en sus núcleos que, cuando apuntan en la dirección del observador, dan como resultado una fuerte emisión en rayos gamma de unos cien segundos de duración. El caso de los cortos podría tener origen en la fusión de dos estrellas de neutrones en un sistema binario compacto en el que, a medida que se pierde energía rotacional en forma de ondas gravitacionales, las estrellas espiralan una entorno a la otra hasta colisionar dando lugar a la formación de un *jet* relativista que canaliza una explosión de rayos gamma de menos de un segundo de duración.

Conclusiones

En este breve artículo se han intentado explicar las características más generales de las estrellas de neutrones. Desde su composición y estructura interna, hasta su fenomenología observacional asociada, intentando hacer hincapié en algunas técnicas observacionales que permiten deducir

algunas de sus propiedades. Debido a que la materia dentro de estas estrellas se encuentra en condiciones muy especiales, imposibles de reproducir en los laboratorios terrestres, el desarrollo de modelos precisos y el análisis cuidadoso de las observaciones las transforman en escenarios únicos para poder estudiar el comportamiento de la materia en situaciones extremas de alta densidad, grandes campos gravitatorios e intensos campos magnéticos.

Bibliografía

Referencias en la red:

- Artículos de Wikipedia en castellano: Estrella_de_neutrones, Púlsar, Magnetar.
- Artículos de Wikipedia en inglés: Neutron_Stars, Pulsars, Magnetar, PSR_1913+16, Gamma-ray_burst_progenitors, Xray_burster.

Libros:

- Haensel, P., Potekhin, A.Y., Yakovlev, D.G. (2007), Neutron Stars 1: Equation of State and Structure, Ed. Springer.
- Lorimer, D.R. y Kramer, M. (2005), Handbook of Pulsar Astronomy, Ed. Cambridge University Press.
- Shapiro, S. y Teukolsky, S. (1983), Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars, The Physics of Compact Objects, Ed. Wiley.

Artículos:

- Baade W. y Zwicky, F. 1934, Proc. Nat. Acad. Sci. (U.S.A.) 20, 254.
- Hewish, A., Bell, S.J., Pilkington, J.D.H., Scott, P.F., Collins, R.A. 1968, Nature 217, 709.
- Lewin, W. H.G., van Paradijs, J., Taam, R.E 1993, "X-Ray Bursts", Space Science Reviews 62 (3-4): 223–389
- Oppenheimer, J.R. Y Volkoff, G.M. 1939, Physical Review 55, 374.
- Tolman, R.C. 1939, Physical Review 55, 364.
- Demorest et al 2010, Nature 467, 1081.