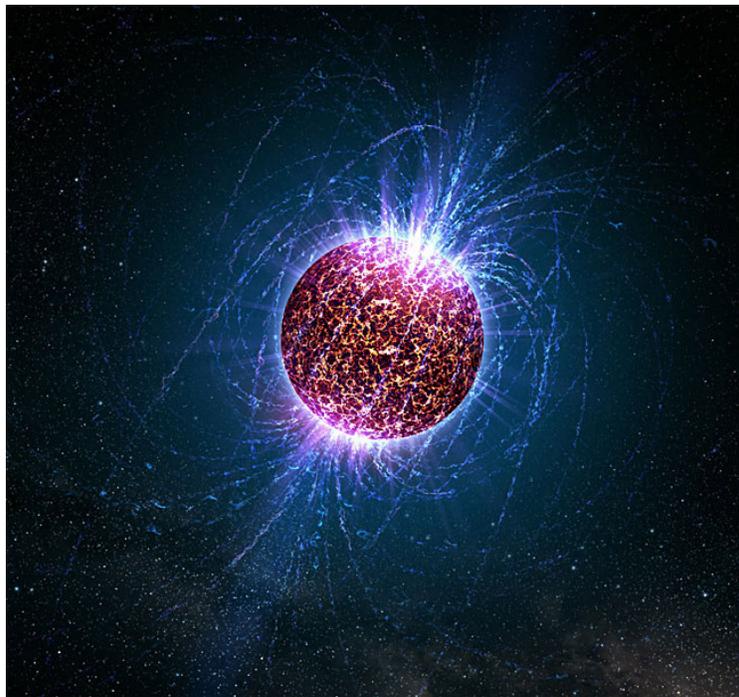


ESTRELLAS DE NEUTRONES



INDICE:

1.- INTRODUCCIÓN	3
2.- HISTORIA.....	3
3.- ESTRUCTURA DE UNA ESTRELLA DE NEUTRONES.....	4
4.- CAMPO MAGNÉTICO Y VELOCIDAD DE ROTACIÓN	5
5.- PÚLSAR.....	6
6.- MAGNETAR.....	9
7.- CÓMO DEDETECTAR ESTRELLAS DE NEUTRONES.....	10
8.- ESTRELLAS DE NEUTRONES CON SU PROPIO BRILLO DE LUZ.....	11
9.- ESTRELLAS DE NEUTRONES Y RELATIVIDAD	12
10.- TEORÍA Y OBSERVACIÓN DE ESTRELLAS DE NEUTRONES.....	13
11.- MECANISMOS DE GENERACIÓN DE NEUTRONES.....	14
12.- MECANISMO DE ESTABILIDAD FRENTE AL COLAPSO GRAVITACIONAL.....	15
Masa de Oppenheimer-Volkov	
13.- ANEXO: Diagrama H-R y secuencia principal.....	17
14.- GLOSARIO.....	18
15.- BIBLIOGRAFÍA.....	20

1.- INTRODUCCIÓN:

Las estrellas no son estables, (en realidad sólo lo parecen porque en comparación con un ser humano viven mucho tiempo), desde que nacen del gas cósmico hasta que mueren, sus núcleos se van contrayendo constantemente. Para impedir el colapso total, la estrella debe hallar siempre nuevas fuentes de energía que le alarguen la vida. La combustión nuclear del hidrógeno puede mantener una estrella de masa similar a la del Sol millones de años, y la combustión de otros elementos como el helio puede alargar el período. Las estrellas parecen estables durante su época de combustión nuclear, pero en realidad siguen contrayéndose, aunque muy despacio. Al final, mueren por la presión implacable de la gravedad y porque toda fuente de energía es finita.

Las características de un remanente estelar, es decir, lo que queda después de que el astro ha llegado al final de su vida al expulsar las capas exteriores, dependen de su masa. Las estrellas de masa baja o de masa similar a la del Sol explotan dejando una nebulosa planetaria con una estrella enana blanca en su centro que radia energía excitando el material nebuloso; mientras que las estrellas mayores explotan en *supernovas* dejando, bien sea estrellas de neutrones o agujeros negros

La estrella, que durante su permanencia en la *secuencia principal*, tenga una masa comprendida entre las 9-10 masas solares hasta las 40 ó 50, originará una *supernova*, (más allá de este límite superior, que tampoco se conoce con exactitud, se originará un agujero negro). Si además, su núcleo post-desplome (residuo de la supernova) tienen una masa $M \geq 1,44 M_{\odot}$, (*límite de Chandrasekhar*) se convertirá en una estrella de neutrones.

Una estrella de neutrones es un remanente estelar dejado por una estrella supergigante después de agotar el combustible nuclear en su núcleo y explotar como una supernova tipo II, Tipo IB o Tipo IC. Como su nombre indica, este tipo de estrellas está compuesto principalmente de neutrones, con otro tipo de materiales tanto en su corteza sólida hecha de hierro, como en su interior, que puede contener tanto protones y electrones, como piones y kaones. Las estrellas de neutrones tienen masas comprendidas entre 1.44 - 2.1 M_{\odot} , con un diámetro de 10-20 Km, presentan un campo gravitatorio en su superficie cien mil millones de veces superior al que se experimenta en la superficie terrestre, (10^{12} G), y rotan extremadamente rápido (hasta una vuelta por cada 1.5 milisegundos). Por debajo de su corteza sólida, de unos cuantos metros de espesor, los neutrones forman una materia tan densa que una cucharada de la misma podría llegar a pesar ¡1.000 millones de toneladas! ($= 10^{15}$ gm/cm³).

2.- HISTORIA

En 1934 los astrónomos Walter Baade y Fritz Zwicky (un año después del descubrimiento del neutrón) propusieron a las estrellas de neutrones como posibles subproductos de una supernova. No recibieron mucha atención, ya que no existían entonces objetos conocidos a los cuales se pudiera asociar una estrella de neutrones.

En 1967 el equipo de radioastrónomos liderados por Antony Hewish descubrió los **púlsares**, (trabajo por el que ganó el Premio Nobel en 1974), y fueron rápidamente

asociados a las estrellas de neutrones por T. Gold en 1968. La explicación se basó en que los intensos campos magnéticos estimados para las estrellas podían dar cuenta de la estabilidad de los pulsos recibidos, y predijo que la frecuencia de los pulsos emitidos debía decaer lentamente en el tiempo, debido a la pérdida de energía rotacional; esto fue luego comprobado al descubrirse la disminución de la frecuencia de los pulsos del púlsar de la Nebulosa del Cangrejo. Este argumento fue puesto sobre firmes bases teóricas por J. Ostriker y J. Gunn en 1969 con el modelo de frenado por dipolo magnético.

3.- ESTRUCTURA DE UNA ESTRELLA DE NEUTRONES:

La estructura interna de una estrella de neutrones está aún en el territorio de la teoría. Se han propuesto varios modelos, y uno de los más aceptados es el siguiente:

Las estrellas de neutrones están compuestas mayoritariamente de neutrones y en menor parte por hierro y otros elementos metálicos. En la región externa puede tener una atmósfera con una temperatura de millones de grados kelvin y una densidad baja (de unos cuantos miligramos por centímetro cúbico); por debajo de ésta se encuentra una corteza sólida de pocos metros de espesor compuesta principalmente por núcleos de hierro, y a mayor profundidad por neutrones; por debajo de esta capa hay un superfluido de neutrones y protones superconductores. En el centro de la esfera la presión podría romper los neutrones separando los quarks que los constituyen. (Casi el 98% de la estructura de la estrella corresponde al núcleo).



No existe seguridad teórica sobre la composición material de la superficie de la corteza de una estrella de neutrones, pero lo que es casi seguro es que la parte superior de la corteza, a densidades del orden de 10 g/cm^3 , debe ser de hierro, pero no se descarta la presencia, a densidades más bajas, de elementos más ligeros como el hidrógeno, helio, carbono u oxígeno, o que el hierro solamente esté presente en el exterior de la parte superior de la corteza.

La superficie sólida de una estrella de neutrones podría estar recubierta de un envoltorio gaseoso de poco espesor (unos cuantos cm) semejante a una atmósfera y, bajo ésta, habría una capa líquida, como un océano de pocos metros de profundidad, soportada por un casco sólido.

Las capas exteriores de la corteza deben estar formadas de materias semejantes a las que conocemos en la Tierra, pero al adentrarnos en ella, es decir, avanzando en densidad, aparecen núcleos atómicos más exóticos y con más neutrones, que solamente se conocen por experimentos de laboratorios producidos en

cantidades muy pequeñas y de efímera duración. Ahora, esos núcleos son estables en la corteza de la estrella gracias a la presión y densidad a que están expuestos.

Adentrándonos hacia el interior de la corteza de la estrella llegamos al nivel de densidad de $4,3 \times 10^{11} \text{ g/cm}^3$. En ese tramo, nos encontramos con un material imposible de ser reproducido en los laboratorios. Aparte de los núcleos y electrones se encuentra la presencia de un líquido superfluido de neutrones transitando entre los núcleos.

La parte inferior de la corteza se encuentra a un rango de densidad de aproximadamente $1,3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$. A baja densidad, los núcleos de hierro están constituidos por neutrones en un 55% y por protones en un 45%; mientras, los aglomerados nucleares tienen un 95% de neutrones y un 5% de protones. En el espacio entre el límite de la parte inferior de la corteza y el núcleo, su composición también podría ser de aglomerados nucleares, o sea, un material compuesto en un 95% de neutrones y un 5% de protones

Pero además de los núcleos de neutrones y protones, la estrella tiene electrones en toda su estructura.

El núcleo de la estrella es un fluido y se puede diferenciar una sección exterior constituida principalmente de neutrones y protones y los electrones necesarios para mantener la carga eléctrica nula, y una sección interior. Describir la sección exterior del núcleo, teóricamente no es demasiado complicado puesto que la densidad que se da es muy cercana a la de un núcleo atómico; pero el caso de la sección interior es bien distinto: algunas teorías se decantan por la idea de que la parte más profunda del núcleo de una estrella de neutrones lo forma un *condensado piónico*, otros defienden la postura de que está formado por quarks.

4.- CAMPO MAGNÉTICO Y VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE LAS ESTRELLAS DE NEUTRONES

Cualquier estrella común gira y tiene campos magnéticos morfológicamente similares a los de la Tierra. Cuando una estrella llega a ser una supernova, una parte de su campo magnético original es expulsado por la explosión y otra parte del campo, que se encuentra atrapado en el plasma, se desploma en el núcleo de la estrella que implosiona para convertirse en estrella de neutrones. Como:

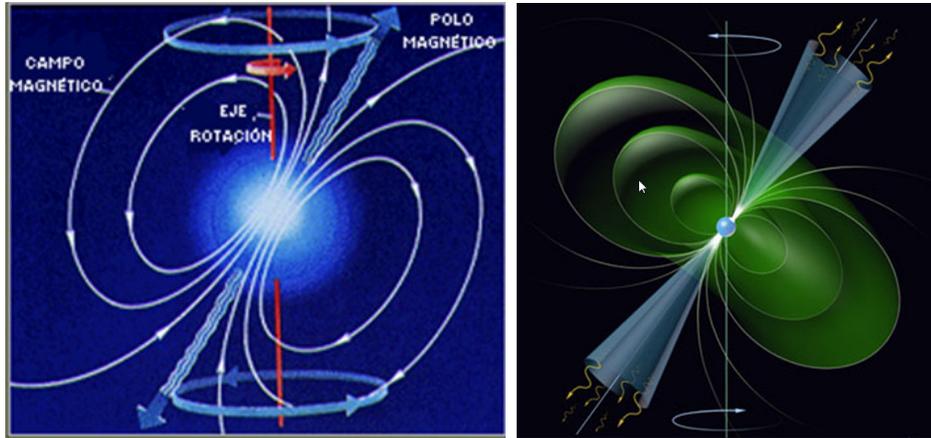
$$B \propto \frac{\Phi}{R^2}$$

(Φ es el flujo del campo magnético, B es el campo magnético y R es el radio del objeto antes del colapso)

y el flujo se conserva en el proceso, y ahora el radio es mucho menor, el campo magnético de la estrella de neutrones tiene que ser mucho mayor que el original.

Por ejemplo, si la estrella es grande, de radio 1.000.000 de kms, y colapsa convirtiéndose en una pequeña estrella de neutrones de unos 10 kms, o sea, se reduce en 100.000 veces, parte del campo magnético original, que pudo haber sido de unos 100 Gauss, (NOTA: El campo magnético de la Tierra es de 0,5 gauss, el de un pequeño imán es de 100 gauss y el de un gran electroimán 15.000 gauss) , se eyecta junto con los gases que son expulsados en la explosión y otra parte del campo magnético es

arrastrado por el plasma y depositado en la nueva estrella; su magnitud va a depender de la densidad que tenga el plasma. Como el nuevo radio de la estrella es 100.000 veces menor, entonces el campo magnético de la estrella de neutrones debe ser igual a $100 \text{ Gauss} \times (100.000)^2 = \text{mil millones de Gauss}$.



Así como se produce el incremento del campo magnético de la estrella de neutrones, también se genera un aumento en la velocidad de rotación de ésta (debido al principio de conservación del momento angular) al igual que sucede con las patinadoras artísticas cuando éstas juntan piernas y brazos. En una estrella de neutrones el eje de giro y el eje del campo magnético, (determinado por los polos norte y sur de la estrella de neutrones), no tienen por qué coincidir. Así pues, la estrella de neutrones gira rápidamente y el campo magnético gira sobre su eje independientemente, a gran velocidad a su alrededor. Las partículas cargadas eléctricamente de las proximidades de la estrella de neutrones caen en ella, emitiendo así un haz de radiación que gira con la estrella, como el foco de luz de un faro. Este “efecto de faro” da como resultado la radioseñal pulsante que distingue a las estrellas de neutrones, y su frecuencia corresponde exactamente a la rotación que cada una de ellas realiza.

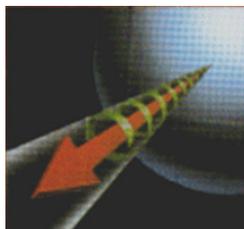
5.- PÚLSAR

Los púlsares, (observados por primera vez en los años sesenta con ayuda de los radiotelescopios), son fuentes de energía que emiten radiación en ráfagas de extraordinaria regularidad. Sus señales se repiten periódicamente en intervalos que se extienden desde los varios segundos a milésimas de segundo. Tan precisos eran los períodos de los primeros púlsares observados, que sus descubridores estuvieron tentados a asociarlos con seres extraterrestres inteligentes, pero en realidad eran la prueba de la existencia de las estrellas de neutrones. *Una estrella de neutrones puede ser un púlsar solamente si su velocidad de rotación es suficientemente alta.*

A través de su superficie, una estrella de neutrones arroja un importante número de partículas cargadas eléctricamente, electrones y protones fundamentalmente. Al verse obligadas a moverse en espiral en el seno del campo magnético de la estrella, estas partículas emiten energía electromagnética en

diferentes formas, incluyendo ondas de radio, ópticas, ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Esta energía es emitida desde cada uno de los polos magnéticos de la estrella, formando dos potentes haces de energía que el movimiento de rotación de la estrella convierte en un haz giratorio, semejantes a los rayos de luz de un faro. Los observadores terrestres sólo pueden detectar estas emisiones cuando el eje de estos conos de radiación apuntan directamente a la Tierra: los radiotelescopios detectarán dicha señal cada vez que estos haces de radiación en rotación barran nuestro planeta.

Este modelo describe satisfactoriamente la mayoría de los más de setecientos púlsares detectados hasta la fecha. La mayoría de las estrellas de neutrones giran sobre sus ejes varias veces por segundo, pero se ha localizado una, la más rápida observada, que gira una vez cada 1,6 milisegundos. Se cree que este pulsar tan rápido probablemente pertenece a un sistema estelar binario, y que adquirió su extraordinaria velocidad de rotación en el proceso de absorción total del momento angular de su acompañante.



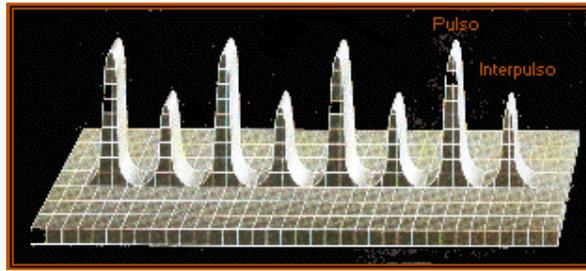
conos de radiación que abandonan la estrella en la dirección de su eje magnético.

Los púlsares están constantemente perdiendo energía, convirtiendo su energía cinética de rotación en radiación y/o en viento de partículas. La observación sistemática de los púlsares ha demostrado que su velocidad de rotación disminuye con la edad. Las estrellas de neutrones jóvenes solamente pueden ser radio-púlsares durante unas decenas de millones de años, (lo que en términos astronómicos es un tiempo corto).

Todos los púlsares son estrellas de neutrones pero no todas las estrellas de neutrones son púlsares. De la reducida muestra de púlsares observados se extrapola que deben existir, en toda la Vía Láctea, unas cuantas centenas de millones de estrellas de neutrones que ya no son púlsares

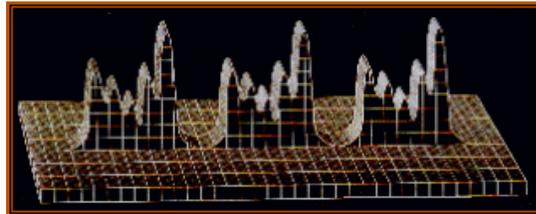
Si una estrella de neutrones tiene una compañera, es posible que vuelva a reactivarse como un púlsar.

A principios de 1969, los astrónomos advirtieron “fallos” en la regularidad del pulso emitido por algunas estrellas de neutrones, había una aceleración del giro. A partir de modelos matemáticos se ha llegado a la conclusión de que estos “fallos” se deben a resquebrajamientos que se producen en la corteza sólida de la estrella de neutrones, (como temblores o terremotos). Estos resquebrajamientos hacen que la estrella se vaya encogiendo muy poco a poco y lo mismo que la patinadora que gira sobre hielo al encoger los brazos y las piernas lo hace más rápidamente, la estrella de neutrones al encogerse gira más y más deprisa.



En el diagrama se muestran la distribución de los pulsos de radio emitidos por una estrella de neutrones. Pulsos más débiles, se alternan con otros de mayor intensidad, una indicación de que los haces de radiación que emanan de los dos polos magnéticos de la estrella pueden tener intensidades distintas.

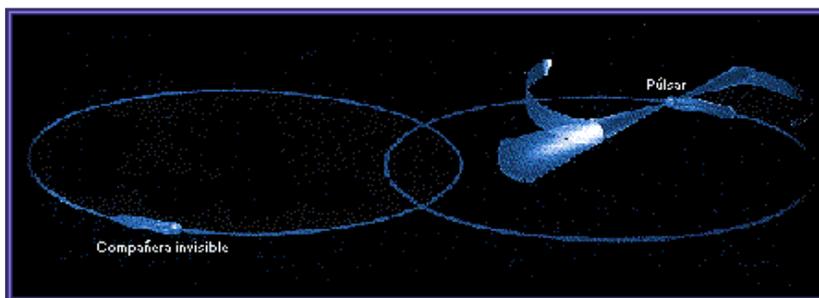
Uno de los más curiosos e inusuales púlsares conocido con PSR 1237+25 emite una radioemisión compuesta por cinco pulsos individuales. Se cree que este extraño objeto cósmico emite cinco haces cónicos de radiación independientemente desde sus polos magnéticos.



Cada conjunto de pulsos del PSR 1237+25 se compone de la suma de cinco subpulsos. La altura de los distintos picos representa la intensidad relativa de los cinco haces de radiación. Aunque la forma de estos quintuples pulsos cambia periódicamente, el intervalo temporal entre dos pulsos consecutivos (que sólo depende de los detalles de la rotación de la estrella de neutrones) permanece constante.

Púlsares en Pareja:

El más famoso púlsar de radio en un sistema binario es el Hulse-Taylor ó PSR 1913 + 16 que se supone que tiene a otra estrella de neutrones como compañera.



La segunda de estas estrellas no es detectable desde la Tierra, probablemente porque su haz de radiación nunca barre esta parte de la galaxia. Sin embargo, la señal proveniente de PSR 1913+16 configura un patrón de pulso que nos indica que está

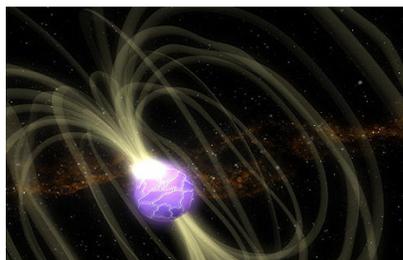
orbitando en torno a otro objeto. Como consecuencia del efecto Doppler, la frecuencia de los destellos de radiación del púlsar aumenta cuando su trayectoria orbital le lleva a acercarse a la Tierra, mientras que disminuye cuando, siguiendo su órbita, se aleja de nosotros. Ambas estrellas de neutrones se encuentran bastante cerca una de la otra, ya que su período orbital no sobrepasa las ocho horas, pero no se transfieren materia entre ellas. Las señales del púlsar revelan que ambas estrellas de neutrones están perdiendo energía orbital, acercándose una a la otra paulatinamente. Ello indicaría que esa pérdida de energía sería ocasionada por la generación de ondas gravitacionales, una forma de radiación, que de acuerdo con la teoría de la relatividad general de Einstein, debería ser emitida por dos masas en órbita.

El púlsar más rápido:

Hay un púlsar que emite señales con intervalos de 1,6 milisegundos, se trata del púlsar PSR 1937+21. Este púlsar goza de dos importantes distinciones astronómicas. No sólo emite destellos de radiación a un ritmo de 600 veces por minuto, lo que lo convierten en el púlsar más rápido conocido hasta la fecha, sino que, lo más extraordinario, *es tan preciso como un reloj atómico*. Se cree que originalmente este púlsar formó parte de un sistema binario que incluía una estrella convencional. A medida que la inmensa gravedad de la estrella de neutrones arrebatava materia de su compañera, aquella empezó a girar más rápidamente; y así la segunda estrella evolucionó con el tiempo convirtiéndose en una gigante roja que al final explotó como una supernova, dejando tras de sí a PSR 1937+21 en compañía de una nueva estrella de neutrones cuyas emisiones no son detectables desde la Tierra

6.- MAGNETAR:

Es una estrella de neutrones con un inmenso campo magnético, (los magnetares son los imanes más potentes del universo), por lo cual estaría imposibilitado para emitir pulsaciones en ondas de radio.



Desde 1979 se empezó a detectar (desde varios satélites) radiaciones de gran intensidad de rayos gamma que emanaban desde las cercanías de un remanente de una supernova conocido como N49 ubicado en la Gran Nube de Magallanes. *Cada una de estas radiaciones no tenían una duración mayor que dos décimas de segundo, pero emitían una energía equivalente a la que irradia el Sol durante un año*. Esas mismas radiaciones volvieron a ser detectadas 1986, pero no fue hasta 1996 cuando empezó a comprenderse el origen de esas fenomenales explosiones gamma. El instrumento de observación de rayos RXTE del satélite Compton, logró captar emisiones de rayos X

que provenían desde SGR 1806-20 de una duración de 7,5 segundos. Las estrellas magnetares, corresponderían a un tipo de estrellas de neutrones con una existencia aproximada de 10.000 años, con un campo magnético superior a varios miles de millones de Gauss, lo que les permitiría almacenar una temperatura en la superficie del orden de los 10.000.000°C (el Sol en su superficie está a 6000°C) y, a su vez, energetizar los rayos X que provienen desde la rotación de su corteza exterior. La superficie de este tipo de estrellas de neutrones sería como una costra metálica magnetizada con una fuerza equivalente a 150 millones de veces la producida por la gravedad de la Tierra. A esa intensidad magnética, las fuerzas que se desplazan por la estrella deben hacer que las capas superficiales de la estrella estén en un permanente ambiente sísmico, acompañadas de erupciones de rayos gamma. Actualmente se conoce la existencia de 6 magnetares y se cree que no son astros aislados y escasos, sino todo lo contrario, que en nuestra galaxia deben contarse por miles.

Los rayos gamma portan millones de veces más energía que los fotones visibles, pero la atmósfera terrestre nos protege bloqueando los procedentes del espacio exterior.

7.- CÓMO DEDETECTAR ESTRELLAS DE NEUTRONES

Estas estrellas las podremos detectar a partir de:

EMISIONES DE RADIO: La ubicación en el cielo de radioseñales pulsantes fue el primer método que permitió descubrir estrellas de neutrones. Las partículas cargadas eléctricamente que caen en la estrella de neutrones, emiten neutrones como el foco de luz de un faro. Como la estrella de neutrones gira rápidamente, las frecuencias de las pulsaciones que se generan con la caída de partículas en su superficie coinciden con las rotaciones de la estrella.

RAYOS X: Se ha podido descubrir algunas estrellas de neutrones porque son fuentes de rayos X. La intensa gravedad de una estrella de neutrones puede arrebatar partículas de polvo desde una estrella cercana. Como las partículas se calientan y aceleran, emiten rayos X. Si bien, estos rayos no son emitidos directamente por la estrella, no obstante delatan su presencia por los efectos que genera el polvo en sus alrededores. Como los rayos X no penetran nuestra atmósfera, se usan satélites para detectar las fuentes de rayos X en el cielo.



XMM-NEWTON-Observatorio de rayos X. Permite investigar estrellas de neutrones

Cuando las estrellas de neutrones son viejas, tienen un campo magnético mucho más débil que cuando son jóvenes, y el gas de hidrógeno que van arrebatando a las estrellas compañeras (en los sistemas binarios), se distribuye por toda la superficie de las estrellas de neutrones, en vez de concentrarse en los polos como sucede cuando son jóvenes. La materia adquirida se asienta sobre la superficie de las estrellas de neutrones y no emiten rayos X hasta que hayan acumulado un stock suficiente. Una vez acumulada cierta cantidad de material sobre sus superficies estallan en un espectacular fogonazo termonuclear en el cual se pueden distinguir grandes emisiones de rayos X y gamma

RAYOS GAMMA: Se diferencian de los rayos X en su origen, debido a que estos últimos se producen a nivel extranuclear, por fenómenos de frenado electrónico; mientras que los rayos gamma proceden de núcleos atómicos o de la aniquilación positrón-electrón, y son por ello una forma de radiación de muy alta. En general, los rayos gamma producidos en el espacio no llegan a la superficie de la Tierra, pues son absorbidos en las capas altas de la atmósfera. Para observar el universo en estas frecuencias, es necesario utilizar globos de gran altitud u observatorios espaciales, (en ambos casos se utiliza el efecto Compton para detectarlos).

De las más de seiscientas estrellas de neutrones halladas hasta la fecha, unas diez han sido ubicadas por ser fuentes de emisión de rayos gamma.

ROTACIÓN DE LAS ESTRELLAS: Muchas estrellas rotan una alrededor de la otra, (igual que lo hacen los planetas orbitando al Sol). Cuando se observa a una estrella en movimiento circular entorno a algo, aunque éste algo no se pueda ver, las características del movimiento de la estrella estudiada puede indicar la estructura y naturaleza del objeto circundado.

Otra forma de detección de estrellas de neutrones es mediante los efectos que genera la gravedad de un cuerpo masivo sobre los rayos de luz emitidos por un objeto ubicado detrás del primero, (fue predicho por Einstein en su teoría de la relatividad general y comprobado en el eclipse de Sol ocurrido el 29 de mayo de 1919. La gravedad del Sol dobló los rayos de luz que procedían de una estrella que se encontraba ubicada detrás del él).

8.- ESTRELLAS DE NEUTRONES CON SU PROPIO BRILLO DE LUZ

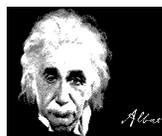
Hasta ahora, solamente tenues puntitos pulsantes de luz visible se habían podido detectar como emisiones desde estrellas de neutrones. La observación óptica de este tipo de estrella es una tarea difícil y compleja.

La tecnología actual ha permitido algún avance en la ubicación por medios ópticos de estrellas de neutrones en el espacio, pero cuantitativamente no se pueden considerar todavía como sustanciales.

Exceptuando las observaciones y de la luz visible pulsante emanada desde el púlsar de la nebulosa de El Cangrejo, sigue siendo muy difícil realizar hallazgos ópticos de estrellas de neutrones. Se estima que hay centenares de millones de estrellas de neutrones en nuestra galaxia y que en realidad los púlsares y las fuentes binarias de

rayos X forman una pequeña fracción de ellas. Hasta la fecha, se han podido reconocer ópticamente, por la luz visible que irradian, un total de ocho estrellas de neutrones, comparado con las más de seiscientas conocidas por sus pulsaciones de radio, y las más de veinte detectadas por sus emisiones de rayos X y gamma, es una cifra ridícula.

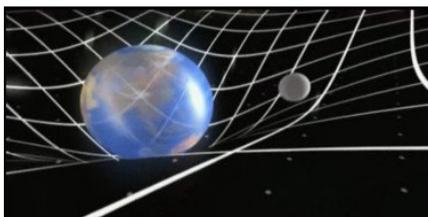
Recientemente tras la detección de una serie de explosiones del magnetar SGR 0418+5729 por parte de los satélites de la NASA Fermi y Swift, el equipo de investigadores solicitó al Gran Telescopio Canarias una observación óptica profunda del objeto, consiguiendo al parecer unas imágenes sin precedente con las que se pretende avanzar en la comprensión de cómo y dónde se produce la radiación emitida por los estas estrellas de neutrones, ayudando así a aclarar aspectos básicos de la física de campos magnéticos ultra-fuertes.



9.- ESTRELLAS DE NEUTRONES Y RELATIVIDAD

El púlsar PSR 1913 +16 en la constelación El Águila, es especialmente peculiar, pues presenta una frecuencia de pulsación que crece y decrece en un ciclo regular de siete horas y cuarenta y cinco minutos. Fue descubierto en 1974 y su descubridor lanzó la hipótesis de que el púlsar estaba orbitando en torno a una compañera no visible (quizá un segundo púlsar, cuya emisión no apuntara hacia la Tierra, impidiendo así su observación). Algunas propiedades del sistema binario del PSR 1913 +16 lo convierten en el terreno de pruebas adecuado para la teoría de la relatividad.

La teoría de la relatividad general de Einstein establece que la gravedad no es exactamente una fuerza como Newton la concibió, sino que aparece por la curvatura que experimenta el tejido espacio-temporal en las cercanías de un cuerpo masivo.



Einstein predijo que las ondas gravitatorias producidas por los cuerpos masivos debería restarles una pequeña parte de su energía. En un sistema binario de púlsares, esta pérdida de energía debería dar lugar a una órbita cada vez más cerrada y a un correspondiente aumento en la velocidad orbital. De esta manera, el púlsar necesitaría invertir un tiempo menor para completar su órbita, un cambio que puede ser calculado usando las ecuaciones de Einstein. El púlsar fue observado sistemáticamente durante cinco años desde su descubrimiento y se ha comprobado que la estrella de neutrones cambiaba su período orbital tal y como dice la teoría de la relatividad. (La aceleración orbital atribuible a las ondas gravitatorias es muy pequeña: un segundo cada 10.000 años)

10.- TEORIA Y OBSERVACIÓN DE ESTRELLAS DE NEUTRONES

Si el átomo fuese un estadio de fútbol, el núcleo sería como la cabeza de un alfiler. En otras palabras, el átomo está casi vacío. Por otra parte, tanto la masa del neutrón como la del protón son unas dos mil veces superiores a la del electrón, lo que implica que la mayor parte de la masa de un átomo la constituye el núcleo, y como éste es tan pequeño y con tanta masa almacenada, su densidad es inmensa. La mayoría de los núcleos tienen una densidad entorno a $2,8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$; comparando con la materia que forma una estrella de neutrones, encontramos que en ésta se ha eliminado el vacío entre los núcleos, aglomerándose y densificando entonces la materia. Debido a la masa total, la fuerza de gravedad incrementa aun más la aglomeración nuclear, compactando más la materia, que alcanza en el centro de la estrella de neutrones una densidad varias veces superior a la densidad nuclear. La estrella de neutrones no tiene la misma densidad en sus diferentes secciones, (las capas de materia que se encuentran cercanas a la superficie tienen densidades más bajas).

Las observaciones astronómicas de estrellas de neutrones nos han ido permitiendo confirmar parte de lo que se suponía que podía ser su naturaleza:

MASA:

Por ahora, nada impide seguir aceptando la vigencia teórica sobre el desenlace final de la vida de una estrella en función de la magnitud de su masa.

Las observaciones han permitido hacer mediciones de la masa de las estrellas de neutrones, obteniéndose un valor de 1,4 masas solares. Los modelos teóricos señalan que si la masa del núcleo de la estrella en el momento del colapso es superior al *límite de Chandrasekhar* (un valor igual a 1,44 masas solares) la supernova origina una estrella de neutrones. (Se desconoce cuál es el límite superior a partir del cual se originaría un agujero negro, pero se especula con valores en torno a las 4 ó 5 masas solares).

Límite de Chandrasekhar : Masa crítica según la cual una estrella colapsa como enana blanca (si la suya es inferior), o como estrella de neutrones (o agujero negro) si es superior. Este límite corresponde, a 1,44 masas solares.

Masa de Oppenheimer-Volkov: Masa límite por encima de la cual la presión de degeneración cuántica de los neutrones no puede contrarrestar la gravedad. (más adelante - ver pag 14 - obtendremos su valor teórico).

VELOCIDAD DE ROTACIÓN:

La velocidad de rotación de las estrellas de neutrones que se halla predeterminada en los distintos modelos teóricos, es otra de las cuestiones coincidentes con la observación. Se conocen, hasta ahora, dos pulsares con un período de rotación de 1,6 milisegundos, es decir, que rotan más de seiscientas vueltas por segundo. A esa velocidad de rotación, la fuerza centrífuga puede llegar a superar a la de gravedad y producir la eyección de materia desde el ecuador de la estrella, pero esto todavía está lejos de contradecir a los modelos teóricos que, al igual que predicen la existencia de una masa tolerada para distintos eventos estelares, también estiman una velocidad máxima de rotación para una estrella de neutrones. Sólo en el caso de

que se hallara un púlsar con una velocidad de rotación inferior al milisegundo, es decir, dando más de mil vueltas por segundo, estaríamos en presencia de un objeto cuyo comportamiento está fuera de las actuales descripciones teóricas.

ENFRIAMIENTO:

Las primeras etapas de enfriamiento de una estrella de neutrones se producen por la emisión de neutrinos: partículas que se desprenden cuando un protón y un electrón se unen para formar un neutrón. En los primeros millones de años de su existencia, cuando la estrella está caliente, salen del núcleo los neutrinos en forma rápida y furiosa. Con el tiempo, cuando ya quedan menos protones y electrones que combinarse, comienza a disminuir la cascada de neutrinos, y en estas condiciones el enfriamiento de la estrella se produce principalmente por la emisión de rayos X de su superficie.

El satélite ROSAT ha logrado detectar emisiones térmicas de superficie de varios pulsares. Ello ha permitido medir la temperatura de estos objetos y, a su vez, poder hacer las comparaciones correspondientes con las estimaciones de modelos teóricos de evolución térmica. Las estrellas de neutrones nacen desde supernovas con una temperatura del orden de 10^{11}K y entran en un proceso de enfriamiento debido a la emisión de neutrinos que se genera desde sus núcleos y de la radiación térmica que se da en sus superficies. Pese a que la emisión de neutrinos es una cuestión sensible al tipo de partículas que hay en el núcleo de una estrella, las predicciones de los modelos térmicos, hasta ahora, no han sido desmentidas por las observaciones experimentales, aunque existen posibilidades de que se tenga que hacer alguna de corrección.

11.- MECANISMOS DE GENERACIÓN DE NEUTRONES EN UNA ESTRELLA DE NEUTRONES:

Inverse beta decay:

La captura electrónica (“inverse beta decay”) se caracteriza por la absorción por parte del núcleo de un electrón situado en uno de los orbitales más internos (capas K ó L). Este electrón se combina con un protón nuclear generando un neutrón que permanece en el núcleo y se emite un neutrino. El hueco dejado por el electrón capturado es inmediatamente ocupado por otro electrón de una órbita más externa, emitiéndose una radiación electromagnética de alta energía correspondiente al diferencial energético entre ambos orbitales. El núclido hijo mantiene su número **máximo** y disminuye una unidad su número atómico, por lo que las consecuencias son idénticas a las derivadas de la desintegración positrónica. El proceso puede simbolizarse así:



En los elementos pesados es más frecuente la captura electrónica porque los orbitales electrónicos tienen radios más pequeños.

Luego, mediante el “inverse beta decay”, los electrones ultrarelativistas enriquecen la proporción de neutrones en una estrella fría tan comprimida.

12.- MECANISMO DE ESTABILIDAD FRENTE AL COLAPSO GRAVITACIONAL.

Masa de Oppenheimer-Volkov

Las reacciones termonucleares proporcionan la temperatura necesaria para contrarrestar el colapso gravitacional de las estrellas. La vida de las estrellas se debe al balance energético entre la energía gravitatoria que tiende a colapsar la estrella hacia su centro y la energía de radiación que tiende a expandirla hacia fuera. Cuando se agota el combustible de fusión termonuclear desaparece la energía de radiación y sólo queda la energía gravitatoria que la hace implosionar. Si la masa de la estrella es muy grande, no existe ninguna fuerza capaz de frenar esta implosión y se convierte en un agujero negro, (por ejemplo, nuestro Sol no es lo suficientemente grande y no se convertirá en un agujero negro). Cada vez las reacciones de fusión involucran elementos más pesados; el estadio final será una estrella esencialmente fría en la que la atracción gravitacional ya no estará equilibrada por la presión térmica clásica:

$$\text{Para un gas clásico: } pV = N_{Total}k_B T \Rightarrow p = \frac{N_{Total}k_B T}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

sino por la presión de degeneración cuántica de los gases de fermiones:

$$\boxed{\text{Energía gravitatoria} \sim \text{Energía de degeneración de los fermiones}}$$

La energía gravitatoria será la energía potencial de una distribución esférica de masa (suponiendo la densidad constante):

$$U_{esferea} = -\frac{3GM^2}{5R}$$

Y la energía de degeneración de los fermiones, esto es, la presión de degeneración cuántica viene dada por la expresión ultrarrelativista:

$$E = Npc \sim \frac{\hbar N^{4/3}}{R}$$

Luego:

$$\frac{3GM^2}{5R} \sim E = Npc \sim \frac{\hbar N^{4/3}}{R}$$

donde N es el número total de partículas, ($N \equiv N_{nucleones}$), M la masa de la estrella. R su radio y G es la constante de gravitación ($G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$),

Para una estrella de neutrones se puede tomar como una buena aproximación que sólo está compuesta por neutrones, así pues tendremos que:

$$N \equiv N_{nucleones} = N_{neutrones}$$

$$M = N_{nucleones} \cdot m_{neutrón} \Rightarrow N_{neutrones} = \frac{M}{m_{neutrón}}$$

Luego:

$$\frac{\hbar N_{neutrones}^{4/3}}{R} \sim \frac{3G(N_{nucleones} \cdot m_{neutrón})^2}{5R}$$

Por lo tanto, la **masa de Oppenheimer-Volkov**, esto es, la masa por encima de la cual la presión de degeneración cuántica de los neutrones no puede contrarrestar la gravedad vendrá dada por la expresión:

$$M = \left(\frac{5 \hbar c}{3 G}\right)^{3/2} \frac{1}{m_{neutrón}^2} \Rightarrow \boxed{M = 7.969675857 \cdot 10^{30} kg} \Leftrightarrow \boxed{M = 3.98 M_{Sol}}$$

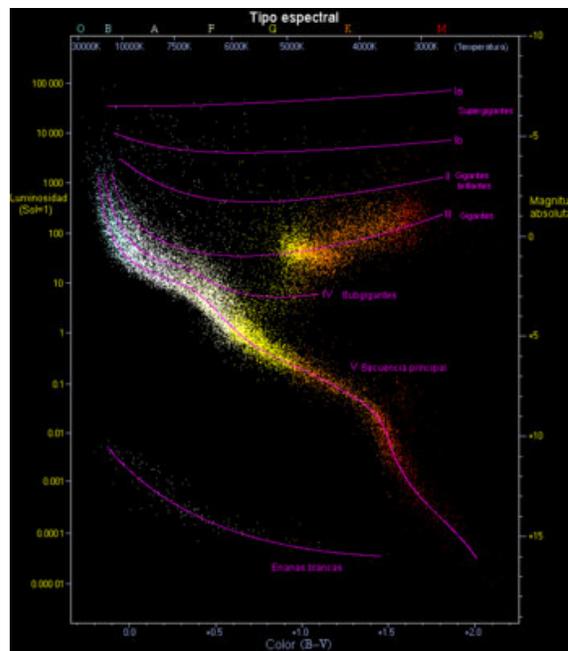
$$(m_{neutrón} \cong m_{protrón} = 1.67 \cdot 10^{-27} kg; M_{Sol} = 2.004 \cdot 10^{30} kg)$$

13.- ANEXO: Diagrama H-R y secuencia principal

Diagrama de Hertzsprung-Russell:

Comúnmente abreviado como **diagrama H-R** muestra el resultado de numerosas observaciones sobre la relación entre la clasificación espectral con la *magnitud absoluta*, *luminosidad* y *temperatura* superficial de las estrellas.

El diagrama H-R se utiliza para diferenciar tipos de estrellas y para estudiar la evolución estelar. Un examen del diagrama muestra que las estrellas tienden a encontrarse agrupadas en regiones específicas del mismo. La predominante es la diagonal que va de la región superior izquierda (caliente y brillante) a la región inferior derecha (fría y menos brillante) y se denomina **secuencia principal**. En este grupo se encuentran las estrellas que extraen su energía de las reacciones termonucleares de fusión del hidrógeno en helio. En la esquina inferior izquierda se encuentran las enanas blancas, y por encima de la secuencia principal se encuentran las gigantes rojas y las supergigantes.



Una de las complicaciones de realizar un diagrama H-R es que la cantidad del eje vertical, la magnitud absoluta, no es observable directamente. La cantidad observada es la magnitud aparente en alguna banda, y para obtener una magnitud absoluta se necesita una distancia, pero las distancias en astronomía son notablemente difíciles de obtener.

Secuencia Principal:

La lucha entre la gravedad, que busca comprimir a la joven estrella y la presión generada por las reacciones termonucleares en su interior, será la constante que

tendrá lugar en su interior y determinará la evolución de la misma. Esta segunda fase en la vida de toda estrella se denomina *Secuencia Principal (SP)*. Comparativamente, las otras son apenas instantes imperceptibles en términos de tiempo cosmológico y ocupa el 90% de su existencia. Durante la SP la estrella quema el hidrogeno que posee en el núcleo, mediante fusión nuclear convirtiéndolo en helio y otros elementos más pesados. Dependiendo de su masa esta etapa durará de 2 a 3 millones de años si se trata de estrellas gigantes y muy calientes; miles de millones de años si su masa es similar a la del Sol; o decenas o incluso centenas de miles de millones de años tratándose de estrellas de poca masa como las enanas rojas. Finalmente la estrella comienza a contraerse debido a que la presión comienza a ceder ante la gravedad, (al agotarse el combustible que la alimenta), conllevando a un aumento de la temperatura evitando así el colapso gravitacional, gracias a lo cual el núcleo procesa capas intermedias de hidrógeno aún sin procesar. Haciendo una analogía, esto sería como un latido en la vida de la estrella que le permite alargar su existencia temporalmente. Cuando el hidrogeno se termina, la estrella pasa a la etapa de vejez la cual es muy diferente en los tipos de estrellas dependiendo de su masa.

Cómo evoluciona una estrella en el diagrama HR:

La evolución de una estrella está dada en principio por la cantidad de materia de la cual está formada, en otras palabras la masa de la estrella. Básicamente una estrella de mayor masa consume su combustible de forma más rápida que una de menor masa, transitando a través del diagrama H-R más rápidamente, estando poco tiempo dentro de la secuencia principal. Antes de entrar en la secuencia principal y convertirse por definición en una estrella, la misma debe formarse a partir de la contracción de una nube de gas y polvo. A partir de este punto la estrella comienza su recorrido por el diagrama H-R, comenzando desde arriba a la izquierda si se trata de una estrella muy luminosa y caliente de gran masa o desde abajo a la derecha si es una estrella más fría y menos luminosa de masa más baja.

14.- GLOSARIO

Estrella: Cúmulo de materia en estado de plasma que emite radiación electromagnética, en un continuo proceso de colapso (por la fuerza de la gravedad), en la que interactúan diversas fuerzas que equilibran dicho proceso (reacciones termonucleares).

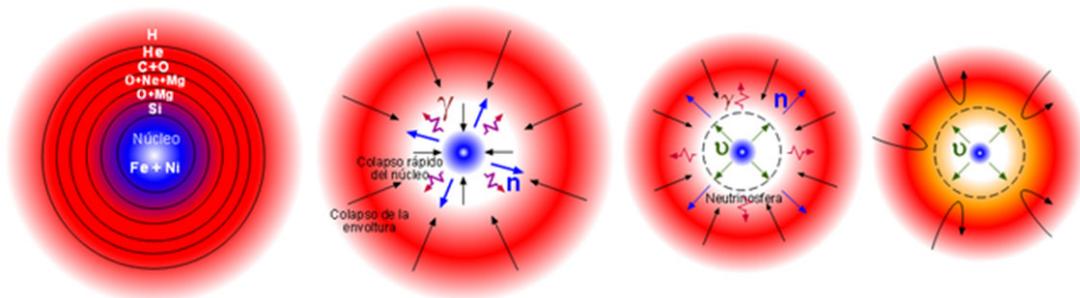
Supernova: Es una explosión estelar. Las supernovas producen destellos de *luz* intensísimos que pueden durar desde varias semanas a varios meses. Se caracterizan por un rápido aumento de la intensidad hasta alcanzar un máximo, para luego decrecer en brillo de forma más o menos suave hasta desaparecer completamente.

Una manera de producirse es a partir de *estrellas* masivas que ya no pueden desarrollar reacciones termonucleares en su núcleo, y que son incapaces de sostenerse por la *presión de degeneración* de los *electrones*, lo que las lleva a contraerse repentinamente (colapsar) y generar, en el proceso, una fuerte emisión de energía. La explosión de supernova provoca la expulsión de las capas externas de la estrella por

medio de poderosas ondas de choque, enriqueciendo el espacio que la rodea con *elementos* pesados. Los restos eventualmente componen *nubes* de *polvo* y *gas*. Cuando el frente de onda de la explosión alcanza otras nubes de gas y polvo cercanas, las comprime y puede desencadenar la formación de nuevas *nebulosas solares* que originen, después de cierto tiempo, nuevos sistemas estelares (quizá con *planetas*).

Estos residuos estelares en expansión se denominan remanentes y pueden tener o no un objeto compacto en su interior, (por ejemplo una estrella de neutrones). Dicho remanente terminará por diluirse en el medio interestelar al cabo de millones de años.

Las masas de las estrellas que dan lugar a supernovas están entre alrededor de las 10 masas solares hasta las 40 o 50. Más allá de este límite superior (que tampoco se conoce con exactitud), se origina un agujero negro.



En la figura se aprecian las fases de una supernova: La primera fase es un colapso rápido del núcleo incapaz de sostenerse. Esto conlleva una fuerte emisión de fotones y neutrones que son absorbidos por las capas interiores frenando así su colapso. Simultáneamente un frente de choque de neutrinos se genera durante la neutrinización del núcleo compacto. Finalmente, la neutrinosfera choca contra la cubierta y transmite su momento expulsando las capas y produciendo la explosión de supernova

Supergigante roja: Estrella supergigante (de clase de luminosidad I) de tipo espectral K o M. Son las estrellas más grandes (en términos de volumen) que se encuentran en el universo, aunque no las más masivas, y como su nombre indica, su superficie posee un color rojizo y ligeramente oscuro. Las estrellas con más de unas 10 masas solares después de consumir su hidrógeno se transforman en supergigantes rojas durante su etapa de fusión de helio. Estas estrellas no son las más calientes, si no, relativamente, las más frías.

Presión de degeneración: Una enana blanca está sostenida por la degeneración de electrones, mientras que una estrella de neutrones no colapsa debido al efecto combinado de la presión de neutrones degenerados y la presión debida a la parte repulsiva de la interacción fuerte entre bariones.

15.- BIBLIOGRAFÍA:

- **Revista Investigación y Ciencia:**
 - **Estrellas y Galaxias.** Tema 47 – Primer trimestre 2007
 - **Enfriamiento de estrellas de neutrones** Miralles, Juan A. y Pons, José Antonio. Nº 393 - JUNIO 2009
 - **¿Existen estrellas de quarks?** Thoma, Markus. Nº 373 - OCTUBRE 2007
 - **En busca de la materia extraña** Crawford, Henry J. y Greiner, Carsten H. Nº 210 - MARZO 1994
 - **Las fuentes de brotes celestes de rayos X** Lewin, Walter H. G. Nº 58 - JULIO 1981

- **Enciclopedia interactiva *Wikipedia***