

Estrellas Degeneradas: Enanas Blancas, Estrellas de Neutrones y de Quarks

A. Pérez Martínez¹, Daryl Manreza Paret² y

A. Ulacia Rey³

¹ Instituto de Cibernética Matemática y Física, ICIMAF
Calle E esq 15 No. 309 Vedado, Habana, 10400, Cuba
aurora@icmf.inf.cu

² Facultad de Física, Universidad de la Habana

³ Instituto de Cibernética Matemática y Física, ICIMAF
Calle E esq 15 No. 309 Vedado, Habana, 10400, Cuba
alain@icmf.inf.cu

In Astrophysics are known like Degenerate Stars to extremely dense objects: White Dwarfs and the Neutrons Stars. The present work is devoted to give an overview of the formation of White Dwarfs and Neutron Stars, their main characteristics and the astronomical observations that prove their existence. The possible existence of Quarks Stars are discussed. We also consider the presence and the possible origin of magnetic field on these objects.

Introducción

Nuestra existencia, la presencia de la Tierra y los planetas se deben al proceso de envejecimiento de las primeras estrellas con la consecuente aparición de Huecos Negros, Estrellas Neutrónicas y Enanas Blancas.

Las teorías más aceptadas de la formación de estructura en el Universo consideran que en los primeros diez minutos de su creación se formaron los elementos más ligeros (Hidrógeno (H) y Helio (He)). Luego a partir de un gas difuso de estos elementos y debido a la atracción gravitacional estos gases difusos crearon las Galaxias y dentro de ellas numerosas estrellas.

Los elementos más pesados importantes para la vida Carbono (C), Oxígeno (O), Hierro (Fe) fueron creados con la muerte de las primeras estrellas cientos de millones de años después.

Se considera entonces que el mecanismo por el cual el medio interestelar se enriqueció y se enriquece de metales¹

¹ En Astronomía se consideran metales los elementos más pesados que el Helio.

se debe a el proceso de envejecimiento de las estrellas ligeras y masivas. A consecuencia de ese proceso natural, ellas expelen gran parte de su masa en forma de explosión de Supernovas.

En este trabajo analizaremos cómo ocurre este proceso para las distintas estrellas. Estudiaremos las principales características de los remanentes estelares: Enanas Blancas, Estrellas Neutrónicas y las hipotéticas Estrellas de Quarks. Todas ellas son también llamadas estrellas degeneradas porque su estabilidad está sujeta a la presión del gas degenerado de fermiones: electrones, neutrones o quarks según sea la estrella.

La muerte de una estrella

La luminosidad, el color y el tiempo de vida de una estrella dependen de su masa. Una estrella naciente pasa su vida tratando de equilibrar la fuerza gravitatoria, que intenta comprimirla, con la presión de radiación que intenta expandirla. En el momento en que la estrella logra el equilibrio entre estas fuerzas entra a formar parte de la llamada secuencia principal.

Las observaciones astronómicas han mostrado que las estrellas pueden ser clasificadas en una secuencia regular, donde las más brillantes son precisamente las más calientes.

Esta secuencia se representa en el diagrama HR o secuencia principal, construido de manera independiente por los astrónomos Ejnar Hertzsprung danés y el norteamericano Henry Norris Russell, y que muestra la relación que existe entre la luminosidad y el color de las estrellas observadas. La luminosidad se define a partir de la ecuación de radiación de un cuerpo negro como:

$$L \sim 4\pi R^2 \sigma T^4, \quad (1)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzman, R es el radio de la estrella y T es la temperatura.

El diagrama HR puede hacerse coincidir con un diagrama teórico que representa la temperatura versus la luminosidad. En la Figura 1 puede verse el diagrama HR. Los espectros de emisión de las estrellas son muy diversos, pero en general es posible agruparlos en siete clases principales que van desde el rojo hasta el azul. Estos colores están asociados a las temperaturas de la superficie y a la composición de las estrellas.

Cuando ya una estrella ha consumido la mayor parte del Hidrógeno original empieza a mostrar signos de envejecimiento. Su centro se empieza a contraer y su exterior a expandir. Se convierte en una gigante roja que se enfría y pierde su brillo.

En el interior de la estrella ocurren procesos termonucleares de fusión, en los cuales tres núcleos de Helio se fusionan para formar Carbono y liberar energía, de esta misma forma

se crean elementos más pesados como el Hierro y el Níquel los que, producto de su densidad, se van concentrando hacia el interior de la estrella hasta que no es posible compensar el intenso campo gravitacional y la estrella colapsa[1].

Este remanente estelar es conocido como una Enana Blanca (EB).

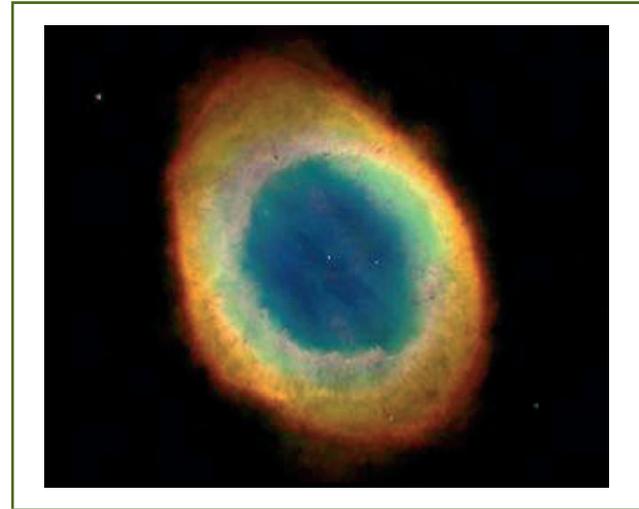
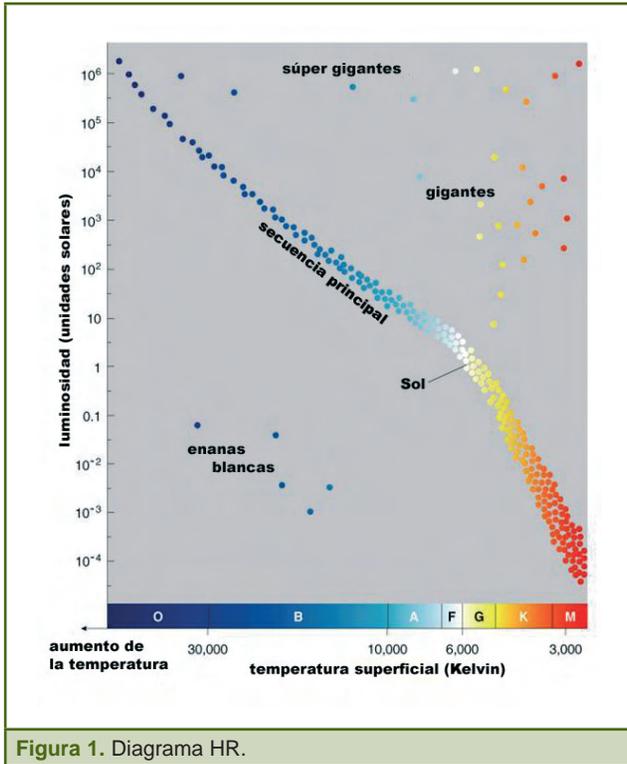


Figura 2. El final de una estrella de masa pequeña: Nebulosa Planetaria.

Figura 1. Diagrama HR.

Se prevén tres destinos dependiendo de la masa de las estrellas²:

- Si $M_{\odot} < M < 4M_{\odot}$ se convertirán en Enanas Blancas (EBs).
- Si $4M_{\odot} < M < 10M_{\odot}$ explotan como una Supernova y su residuo es una Estrella de Neutrones (ENs)
- Si $10M_{\odot} < M$ sufren explosión como una Supernova y su remanente será un Huecos Negro (HN).

El final de una estrella de masa pequeña

Para una estrella de masa pequeña $M < 4M_{\odot}$, el Helio es el último elemento que fusiona.

Cerca del final de su vida la estrella crea un núcleo muy caliente de Carbón. Las capas exteriores de la estrella son eyectadas como una nebulosa planetaria (ver Figura 2).

La primera Enana Blanca encontrada, fue la compañera de la estrella aparentemente más brillante del cielo, Sirio. En 1844 Friedrich Bessel (matemático y astrónomo alemán) observó que Sirio mostraba en su movimiento por el cielo un extraño “bamboleo”. Bessel lo atribuyó a la presencia de una estrella-compañera, pero ella no se observó hasta que Alvan Clark (óptico norteamericano) mientras probaba un nuevo telescopio, vio una tenue estrella. En 1925, el espectro de la estrella compañera confirmó que era una estrella con aproximadamente la misma temperatura de Sirio A.

Sirio y su compañera están en órbita, una alrededor de la otra, y esto permitió que a principios del siglo XX se determinaran las masas de ambas usando la tercera Ley de Kepler obteniéndose que la masa de Sirio A era 2,3 veces la masa Solar mientras la de Sirio B era de tan sólo una masa Solar. A partir de sus brillos y suponiendo que la temperatura superficial de ellas es de 8000 K (usando la ecuación (1) se pudo también determinar sus tamaños mostrando que Sirio B tiene un diámetro de 10.000 km (menor que el de la Tierra), mientras que el de Sirio A es de 1.000.000 km.

Este sistema binario tiene un período de rotación de 50 años, con una máxima separación en el cielo de 7.6 arco-segundos.

En la Figura 3 vemos una foto tomada a Sirio A y B por el Telescopio Espacial Hubble (TEH). Se puede ahí comparar la extraordinaria luminosidad de Sirio A frente a la de su compañera.

En el 2005 se refinaron las mediciones del diámetro de Sirio B con la ayuda del TEH. El diámetro obtenido fue de 12000

² Tomamos el Sol como referencia siendo $M_{\odot} = 1,989 \times 10^{33}g$, $R_{\odot} = 6,9559 \times 10^{10}cm$ y $L_{\odot} = 3,90 \times 10^{33}ergs^{-1}$ su masa, radio y luminosidad respectivamente

km y su masa es $0,98 M_{\odot}$ en concordancia con los resultados obtenidos a principios del siglo pasado.

Lo que si resultó un misterio para la Física de principios del siglo XX era explicar que fuerza estaba compensando la atracción gravitacional en un Astro como Sirio B tan pequeño, poco luminoso pero tan masivo. En estas estrellas no hay combustible nuclear y por tanto no hay presión térmica que sostenga el colapso.

Pero con las teorías cuánticas aparece la explicación. En 1926 el físico inglés Paul Dirac formula la estadística a la que obedecen los fermiones bautizada posteriormente como “Estadística de Fermi-Dirac” y que tiene en cuenta el Principio de Exclusión de Pauli: dos fermiones (partículas idénticas indistinguibles) no pueden ocupar el mismo estado cuántico.

Ese mismo año el físico y astrónomo británico R. H. Fowler aplicó la estadística de Fermi-Dirac para explicar el enigma de las EBs. Fowler identificó a la presión que mantiene la estrella compensando la gravedad. Esta presión era la del gas degenerado de electrones.

En 1926 R. H. Fowler trabajó junto con Paul Dirac en aplicar la mecánica estadística para explicar la estabilidad de una estrella Enana Blanca (EB).

En 1930 el físico hindú Subrahmanyan Chandrasekhar propuso el primer modelo de Enanas Blancas que tomaba en cuenta los efectos de la Teoría General de la Relatividad y la ecuación de estado del gas degenerado de electrones. él encontró que el límite para la masa máxima de estas estrellas era de $1,44 M_{\odot}$ (este valor se conoce como el límite de Chandrasekhar), esto quiere decir que sólo existen EBs con masas menores de $1,44 M_{\odot}$ más allá de este valor ellas colapsarían.

A continuación haremos una derivación simplificada del límite de Chandrasekhar que se le debe al físico ruso Liev D. Landau y que puede hacerse de manera análoga para Estrella Neutrónicas [1].

Supongamos que tenemos N fermiones en una estrella de radio R y por tanto la densidad de los mismos es $n \approx \frac{N}{R^3}$ y el volumen por fermión es entonces $1/n$. Usando el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, se puede escribir para el momentum del electrón $p \sim \hbar n^{1/3}$. La energía de Fermi del gas relativista de partículas es entonces:

$$E_F = pc \sim \frac{\hbar c N^{1/3}}{R},$$

y la Energía Gravitacional por fermión:

$$E_G = -\frac{GMm_B}{R},$$

donde M la masa de la estrella aun cuando la presión se debe a los electrones la masa es debida a los bariones³ $M \sim Nm_B$. La condición de energía cero garantiza la estabilidad de la estrella y está dada por:

$$E = E_F + E_G = 0,$$

a partir de ella se puede calcular el número máximo de bariones (se toma $m_B \sim 10^{-24}$ g) y la masa máxima de la EB dada por las expresiones:

$$N_{\max} = \left(\frac{\hbar c}{Gm_B^2}\right)^{3/2} \sim 2 \cdot 10^{57}, \quad M_{\max} \sim 1,5M_{\odot},$$

y usando que $E_F \geq mc^2$ se puede determinar la expresión para el radio máximo

$$R \leq \left(\frac{\hbar}{mc}\right) \left(\frac{\hbar c}{Gm_B^2}\right)^{1/2}.$$

Tomando m para EBs como la masa del electrón obtenemos:

$$R_{EB} = 5 \times 10^8 \text{ cm} \sim 5000 \text{ km}.$$

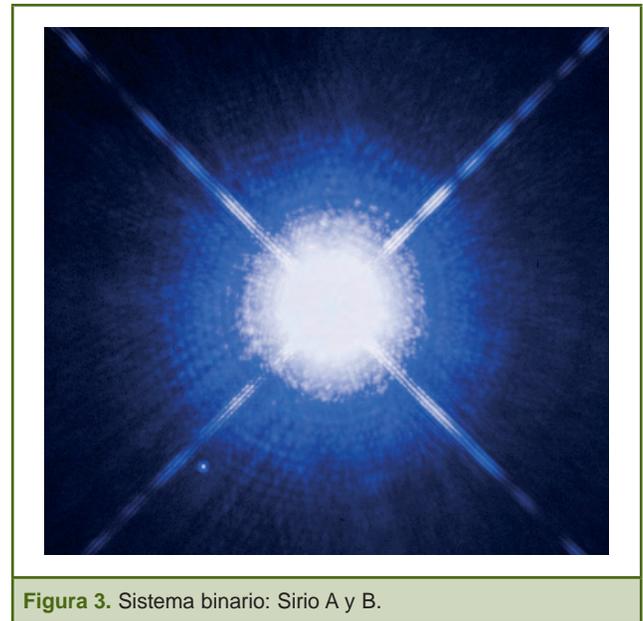


Figura 3. Sistema binario: Sirio A y B.

Lo que usualmente le ocurre a una estrella de masa pequeña es su conversión en una EB Sus características fundamen-

³ Hadrones: familia de partículas elementales formadas por quarks y que interactúan a través de la interacción fuerte. Los bariones son hadrones fermiónicos. Los nucleones: neutrones y protones son bariones y están formados por combinaciones de tres quarks.

tales son su alta densidad, del orden de una tonelada por centímetro cúbico, su pequeño tamaño, con radios del orden de 1000 kilómetros y su pobre luminosidad $0,01L_{\odot}$. A pesar de ser poco luminosas pueden observarse con telescopios ópticos y por tanto ellas se pueden colocar en el diagrama HR (Figura 1).

Ellas flotan como bolas de carbono caliente a través del espacio mientras se enfrían gradualmente y mueren. Pero esta es sólo una posibilidad.

Como la mayoría de las estrellas aparecen como binarias, es decir acompañadas de otra estrella, esta compañera podría variar la historia de la estrella. En este caso la EB puede recibir H de su compañera y este ir a su superficie. La Figura 4 muestra este proceso.

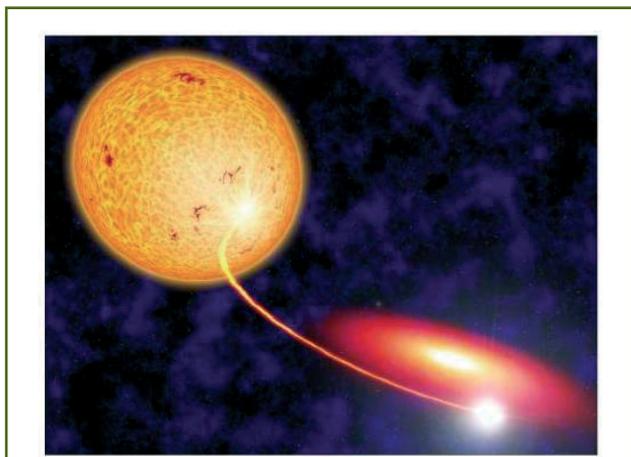


Figura 4. Una EB acreta masa de su compañera.

Si la EB recibe suficiente H, en su superficie puede comenzar a ocurrir fusión nuclear. La luminosidad de la EB podría incrementarse rápidamente y esto producirá que se observe en el cielo una gran luminosidad. Este fenómeno se conoce como una Nova y puede durar unas semanas. Después de la fusión, la EB retorna a su estado previo pero este ciclo de fusión puede repetirse varias veces.

Ahora bien, en este proceso puede pasar dos cosas, una que la EB disminuya su masa y otra que la masa se incremente. ¿Pero, qué pasaría si se incrementara más allá de la masa límite de $1,4M_{\odot}$?

En ese caso la EB explota. Esta explosión se conoce como una Supernova (Supernova tipo Ia).

Los espectros de emisión de estas Supernovas se caracterizan por carecer de líneas de Helio y presentar, en cambio, una línea de Silicio a los 6150 \AA .

Los sistemas binarios que las originan evolucionan bajo condiciones muy determinadas. Se supone que ocurra para EBs que tengan además de Carbono, Oxígeno y que acre-

ten masa de su compañera, generalmente una gigante roja, hasta alcanzar la masa de Chandrasekhar. En ese instante ocurre la explosión. Este caso tan particular de explosión puede demorar miles de años y tiene igual probabilidad de ocurrencia para una binaria de nuestra galaxia o para una que esté muy distante de la nuestra: ambas tendrán curvas de luminosidad versus tiempo prácticamente idénticas.

Por esto las Supernovas tipo Ia se encuentran en todas las Galaxias incluyendo las elípticas, no muestran ninguna preferencia por regiones de formación estelar y pueden estar en regiones longevas de las Galaxias. El parecido en las formas y en la magnitud de las curvas de luz de estas estrellas han hecho que se hayan convertido en lo que tanto buscaban los astrónomos: “candelas estándar” que permiten medir distancias extragalácticas.

Como se observa en la Figura 5 son tan luminosas que su brillo es varias veces superior al de las Galaxias a que pertenecen. Para medir la energía emitida por una Supernova se ha definido una unidad de medida llamada “foe” y que equivale a 10^{44} Joules ($1 \text{ Joule} = 10^7 \text{ erg}$).



Figura 5. Supernova tipo Ia: 1994D explotó en las cercanías de la Galaxia NGC 4526.

Del 1998 hasta la fecha se han estudiado más de 60 Supernovas tipo Ia. Las observaciones de ellas han venido a revolucionar la Cosmología [2]. Las mediciones de distancias obtenidas a partir de ellas han conducido a los astrónomos a la conclusión de que el Universo está expandi-

éndose aceleradamente pero aun la causa de dicha aceleración no ha sido descubierta. Todo lo que conocemos es tan sólo un 3% de la materia que lo compone, el resto, la llamada energía oscura responsable de esta aceleración constituye un 70% y es materia no atractiva. Hay además un 27% de materia atractiva desconocida llamada materia oscura, y es responsable de la velocidad anómala con que rotan las Galaxias.

Novas y Supernovas

Tanto una Nova como una Supernova causan una brillantez en el cielo repentina. Las Supernovas son dramáticamente más brillantes que las Novas (ver Figura 5) de ahí su nombre pero son diferentes eventos. Las Supernovas son procesos explosivos en los que las estrellas se deshacen de la mayor parte de su materia.

Las Supernovas se clasifican atendiendo a las líneas de absorción que aparecen en sus espectros. Si aparecen líneas de Hidrógeno son llamadas Supernova tipo I. Dentro de esta clasificación se les nombra a, b y c dependiendo de otras líneas que aparezcan en sus espectros.

Estas Supernovas tipo I tienen la particularidad de que con su explosión no queda rastro de la estrella que la produjo, son Supernovas Termonucleares. Con este cataclismo salen disparados elementos pesados como el Hierro y el Níquel a 1000 km/s. Su compañera, si sobrevive, sigue su movimiento en la dirección que llevaba como una bala, libre de la atracción gravitacional que la ataba a la EB.

Por otro lado las Supernovas tipo II son aquellas que no tienen líneas de Hidrógeno son también conocidas como Supernovas Gravitacionales y sí tienen asociados remanentes estelares. Como veremos más adelante se asocian a la explosión de estrellas más masivas.



Figura 6. Supernova 1987A: en rayos X y luz visible.

El 23 de Febrero de 1987 los astrónomos contemporáneos tuvieron el privilegio de observar la explosión de una Supernova, la SN 1987A (ver Figura 6) cuya estrella progenitora era la estrella gigante azul Sanduleak que se

encontraba en la Nebulosa de Magallanes a 160 000 años luz de la Tierra⁴. La Supernova 1987A es la explosión ocurrida más cercana a nuestra Galaxia, sólo superada por la observada por Kepler en 1604 que ocurrió dentro de nuestra Galaxia. 1987A fue un evento trascendental porque sirvió además para detectar neutrinos en tres laboratorios terrestres (Superkamiokande II, IMB, y Baksan). Estos laboratorios detectaron 11, 8 y 5 neutrinos respectivamente. La detección de ellos es una prueba de que el 99% de la energía que se libera en estas explosiones se hace en forma de neutrinos. Otra prueba importante como resultado de esta explosión es que por primera vez se pudo comprobar que tanto a los neutrinos como a los antineutrinos les tomó el mismo tiempo alcanzar la Tierra, sólo ocurrió una demora de menos de 12 segundos entre unos y otros. Por primera vez hay una evidencia experimental de que la materia, la antimateria y la radiación reaccionan de igual modo con la Gravedad. Esto era algo predicho por las teorías pero no había ninguna prueba que lo demostrara.

La Supernova 1987A está en constante observación, aún no se ha observado su remanente, si las teorías están correctas debiera formarse una EN.

El final de una estrella más masiva

¿Que pasa cuando la estrella es más masiva (Estrellas de $M > 4M_{\odot}$)? Las estrellas más masivas pasan al principio por el mismo ciclo que las de menor masa, pero como tienen núcleos tan calientes la conversión de $H \rightarrow He$ pasa por etapas en las que aparecen $C_{12} + O_{16} \rightarrow Ne_{20} + Mg_{24} + O_{16} \rightarrow Si_{28} + S$ (Carbono 12, Oxígeno, Neón, Magnesio, Silicio y Azufre) sirviéndole el azufre como combustible nuclear hasta dejar como último residuo a un núcleo de Fe_{56} .

Cuando la fusión se detiene las capas exteriores explotan en una supernova de la estrella maciza. La luminosidad llega a ser $L = 10^9 L_{\odot}$. El núcleo de la estrella entonces hace un último esfuerzo para salvarse. Una reacción nuclear convierte todos sus electrones y protones del centro en neutrones. De esta manera nace una Estrella Neutrónica. Las estrellas neutrónicas son muy pequeñas, por ejemplo si la estrella progenitora fuera como nuestro Sol terminaría teniendo de 10 a 20 km de radio. Esto significa densidades de 1000 millones de toneladas por centímetro cúbico, sería ella como un núcleo atómico del diámetro de una ciudad.

Estrellas Neutrónicas

La teoría que sustenta a las Estrellas Neutrónicas antecedió a la observación de las mismas. Esto se debe a que ellas no son visibles con telescopios ópticos, no aparecen en el diagrama HR.

⁴ Se calcula que el Homo Sapiens apareció hace 200.000 años.

Tras el trascendental descubrimiento del neutrón por James Chadwick en 1932, Walter Baade y Fritz Zwicky en 1934 proponen la existencia de ENs. En su modelo, la presión degenerada del gas de neutrones compensaba la presión gravitacional como mismo ocurría con el gas de electrones en las Enanas Blancas.

En 1939 Oppenheimer y Volkoff desarrollan el primer modelo que consideraba la presión del gas degenerado de neutrones y la Relatividad General y obtuvieron las siguientes características para un objeto como este:

- Una densidad $\rho = 10^9 \text{tn/cm}^3$.
- Una masa entre $1,44-3M_{\odot}$ pero tan compacta que la estrella tendría un diámetro de $\sim 10 \text{ km}$.
- Una velocidad de escape⁵ de $V = \frac{1}{2}c$ donde c es la velocidad de la luz.

Numerosos trabajos teóricos aparecieron en torno a la idea de la existencia de ENs pero sólo lograron relevancia treinta años después cuando se descubren por azar los Pulsares.

Pulsares

En 1967 Jocelyn Bell, entonces estudiante de doctorado del profesor Antony Hewish de Cambridge, descubre la primera fuente de radio (Pulsar), en el Radio Observatorio de dicha Universidad. En ese entonces nadie sabía, tampoco Jocelyn ni su profesor, a que atribuirle esta fuente de radio. Al tratarse de un suceso inusual, algunos científicos especularon que estas fuentes eran una evidencia de que una civilización extraterrestre trataba de hacer contacto con la nuestra: los famosos Little Green Men (LGM) u Hombrecitos verdes aparecieron como explicación.

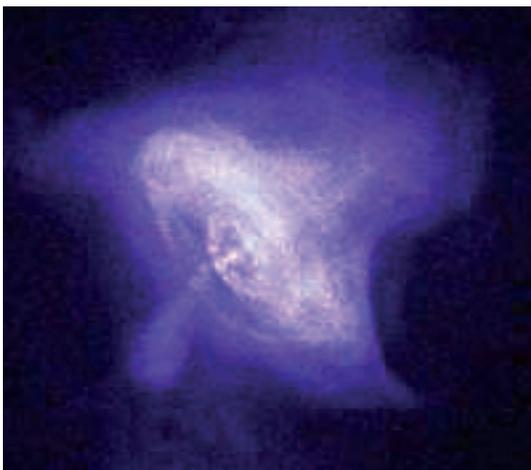


Figura 7. Pulsar del Cangrejo.

Jocelyn y Hewish dedicaron tiempo y esfuerzo a analizar estas señales y descartar las civilizaciones extraterrestres como candidatas a explicarlas [3].

Este primer pulsar descubierto por la persistencia y cuidadosa labor de Jocelyn lleva el nombre de CP 1919, debería llamársele Bell en honor a su descubridora. Un poco después fue observado el Pulsar del Cangrejo (Figura 7) que se encuentra a 7000 años luz en la Constelación de Tauro.

El Cangrejo es un pulsar extremadamente rápido, y por ello a pesar de que había sido observado con anterioridad muchas veces, los telescopios ópticos habían sido incapaces de observar el “guiño” que hace treinta veces cada segundo. Es decir, emite radiación en el visible apagándose y encendiéndose en perfecta sincronización con los pulsos de radio.

En esta misma época, final de los 60 y principios de los 70, fueron descubiertos más y más pulsares con períodos de pulsación en el rango de 0.25 seg a 1.5 seg. En la Figura 8 se grafica el período de 0.71 seg del Pulsar PSR 0329+54.

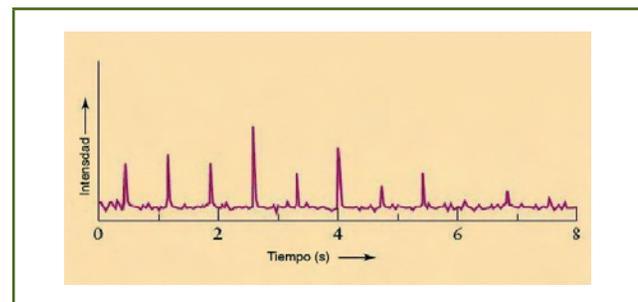


Figura 8. Pulsar PSR 0329+54 con intervalos de 0.714s.

El descubrimiento de los pulsares es considerado uno de los descubrimientos más trascendentales de la Astronomía del siglo XX. Por esto en 1974 se otorga de manera compartida el Premio Nobel de Física a los astrónomos Ryle por el desarrollo de los Radiotelescopios y a Antony Hewish por el trascendental descubrimiento de los Pulsares. Jocelyn quedó excluida de este premio pero el propio Hewish en su conferencia Nobel reconoció el valor que tuvo en el hallazgo la persistencia y diligencia de Jocelyn.

Las EBs en rotación fueron las primeras candidatas que aparecen para explicar a que objeto astrofísico podría asociársele un pulsar.

Sin embargo, aún una EB del tamaño de la Tierra era demasiado grande para rotar en menos de un segundo y no deshacerse. Había que buscar materia más compacta para describir este suceso.

En este momento cobran vida entonces los trabajos teóricos acerca de la existencia de ENs. En 1968 Gold identifica los

⁵ Velocidad mínima inicial para “escapar” de la gravitación

pulsares con Estrellas Neutrónicas en rotación con campos magnéticos superficiales del orden de 10^{12} Gauss[4].

Por otro lado la detección del Pulsar del Cangrejo en el Centro de la Nebulosa del Cangrejo y su correspondencia con el remanente de una Supernova hace que los astrónomos concluyan que los pulsares estaban relacionados con las Supernovas y son por tanto uno de los posibles remanentes estelares.

En los pulsares el campo magnético, que se debe a las corrientes eléctricas que viajan en la profundidad de la estrella de neutrones, rota con ella creando un fuerte campo eléctrico que hace que los electrones en la superficie fluyan por los polos magnéticos de la estrella. Esta radiación barre el espacio mientras la estrella rota como ocurre con un Faro, entonces sólo podemos detectarlos cuando estamos en la dirección de esta radiación.

Ellos rotan decenas o inclusive cientos de veces por segundo y emiten un haz de ondas de radio con un ciclo de encendido-apagado muy exacto, son cronómetros perfectos y se han medido sus cifras significativas hasta trece dígitos sólo comparable con los relojes atómicos. Los pulsos se detectan desde la banda de radio hasta los rayos γ .

Además sus períodos de rotación se incrementan lentamente y nunca decrecen salvo ocasionales “glitches”o “sideramotos”. Es decir, la rotación del pulsar disminuye siempre volviéndose con la “edad” más y más lentos y consecuentemente aumentando su período de rotación. No obstante tienen ocasionales aumentos de la velocidad de rotación que son los llamados “glitches”o sideramotos y que ocurren tan sólo por unos días. Tras estos eventos el pulsar continúa envejeciendo y rotando más despacio cada vez.

En la actualidad se conocen aproximadamente 1500 pulsares que se clasifican en:

- Pulsares Normales: 0,1–8,5 segundos
- Pulsares de Milisegundos: 1,5–25 milisegundos. Se conocen unos 80.

Los pulsares de milisegundos en más de un 50% se corresponden con sistemas binarios. El más estudiado y por tanto más famoso es el PSR B1913+16 [5]. Su período de rotación es de 59 milisegundos y la órbita que recorre es de 7.75 horas. Su descubrimiento se considera la primera evidencia observacional de la existencia de ondas gravitacionales. La distancia entre este pulsar y la estrella neutrónica compañera disminuye 3.1 mm por cada órbita. Por tanto en 300 millones de años ellas se acercarán tanto que se fundirán.

A este pulsar binario se le determinaron por primera vez de forma precisa la masa de las dos estrellas de neutrones que lo forman. Se confirmó además la Relatividad General como una descripción precisa de las interacciones en campos gravitacionales fuertes. Se confirmaron tres efectos que ella predice. Por este descubrimiento y todos los resultados

que con su observación obtuvieron Rusell Hulse y J. H Taylor se les otorga el Premio Nobel de Física en 1993.

Otro pulsar binario todavía más singular es el J0737-3039 descubierto en diciembre de 2003. Está formado por dos Estrellas Neutrónicas que están separadas 800.000 km una de la otra, equivalente a dos veces la distancia de la Tierra a la Luna. Así, orbitan alrededor del centro de masas cada 2.4 horas. En 85 millones de años llegarán a pegarse o fundirse con la consecuente liberación de una energía colosal en forma de ondas gravitacionales.

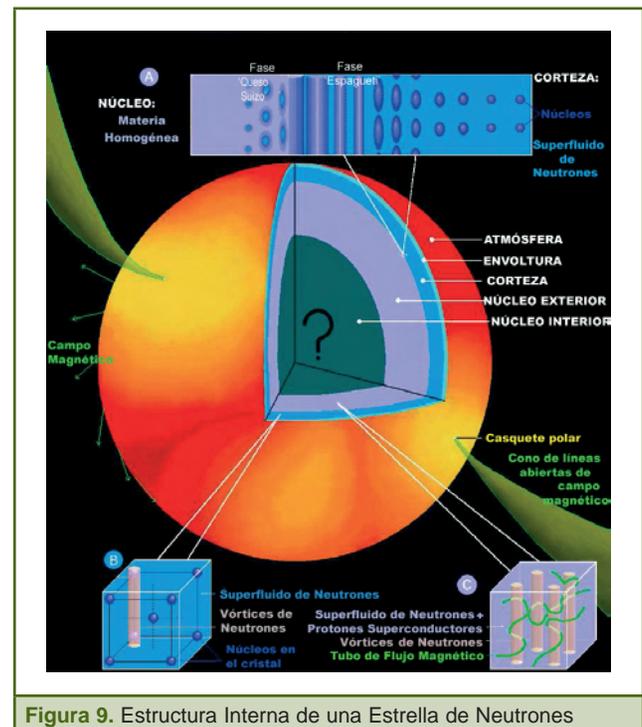


Figura 9. Estructura Interna de una Estrella de Neutrónica

El interior de una Estrella Neutrónica

Entender la composición interna de las ENs es uno de los retos en los que la comunidad de Astrofísicos ha trabajado y trabaja intensamente. Debido a que estos objetos tienen una insólita densidad en tan solo 20 km se concibe que la materia adopte extrañas formas[6].

El modelo mas aceptado de su interior es el siguiente. Yendo de la superficie hacia su interior podemos dividir su estructura en cinco partes: una atmósfera, una envoltura, una corteza, un núcleo externo y uno interno (ver la Figura 9) que concentra la mayor parte de la masa de la estrella. En la atmósfera hay elementos ligeros como Hidrógeno, Helio, Carbono y Óxigeno. Ella juega un papel importante en el espectro emergente de fotones. La envoltura es trascenden-

tal en la transferencia y transporte de la energía térmica a la superficie de la estrella.

La corteza tiene un ancho de uno o dos kilómetros y su densidad varía de manera muy drástica unos cuatro órdenes de magnitud (10^{11} g/cm^3 – 10^{14} g/cm^3). Contiene primeramente núcleos que varían en tanto la densidad aumenta en esos dos kilómetros, comenzando por núcleos de Hierro 56, (Fe_{56}) hasta llegar a núcleos con número bariónico $A \sim 200$ (el número bariónico es la parte entera del número atómico) extraordinariamente pesados ricos en neutrones e inestables, sólo posibles de obtener en laboratorios donde se aceleren isótopos muy particulares.

Estos núcleos están formando una red cristalina y están tan enriquecidos en neutrones que no asimilan más neutrones luego ellos se salen de los núcleos (a esto se le llama “goteo de neutrones”) y se hallan formando un superfluido. De esta forma coexisten los núcleos en fase cristalina con el superfluido de neutrones en un estadio de la materia irreproducibile en un laboratorio terrestre. En la interfase corteza-núcleo el cristal y superfluido de conjunto atraviesan una continua transformación donde la materia nuclear pasa de una dimensión a otra. A estas transiciones se les llama de manera jocosa “Pasta Nuclear” y comienza con el acercamiento cada vez mayor de los núcleos de la red llegando a forman conglomerados nucleares tridimensionales como albóndigas, que se deforman y estiran adoptando forma de espaguetis y al juntarse más forman capas nucleares en una dimensión en forma de lasaña intercaladas con el fluido de neutrones. Finalmente se recobra la estructura tridimensional quedando algo como un queso suizo donde los neutrones libres del superfluido aparecen confinados como las burbujas del queso. Así se llega finalmente a una transición total de la materia nucleónica en una “salsa”, un superfluido uniforme de neutrones.

Ya en el núcleo encontramos el 99% de la masa de la estrella. La parte exterior del mismo está compuesta por un fluido de nucleones (neutrones y protones) electrones y muones. La proporción de ellos es de un 95% de neutrones y un 5% de protones siempre compensados por los electrones que garantizan la neutralidad de la carga de la estrella. Los neutrones forman un Superfluido y los protones un Superconductor.

Las teorías del interior del núcleo son aún más extravagantes. Un condensado de Bose-Einstein, hiperones y toda suerte de partículas exóticas pudieran formarlo. Una variante que también se concibe es que esté formado por fases mezcladas de hadrones y materia de quarks.

El estudio de las ENs se mueve en varias direcciones. Entre las más importantes está el estudio de su composiciones interna, la explicación de los sideramotos o glitches con un posible origen en la fricción del superfluido y la corteza de la estrella. También se intenta comprender la emisión de

radiación de ellas y los mecanismos de acreción y rotación que responden a esta radiación.

Estrellas de Quarks

Un remanente estelar aun más exótico pudiera ser una Estrella de Quarks (EQs). Ellas aguardan por evidencias experimentales y observacionales porque presuponen la existencia de quarks deconfinados⁶.

Un objeto así podrá tener una superficie de quarks desnuda cuya presión se desvanecería en la frontera con una súper alta densidad de materia, o una fina capa de materia normal soportada por las fuerzas coulombianas sobre la superficie de materia de quarks.

La idea de la existencia de Estrellas de Quarks apareció en 1969 cinco años después de la predicción de Gell- Man de los quarks.

Las EQs aparecen en teoría a partir de la conjetura de Bodmer de 1971 [7] que afirma que a suficientemente alta densidad, la Materia Extraña (ME) compuesta por quarks u (up-arriba), d (down-abajo) y s (strange-extraño) es absolutamente más estable que la materia nuclear, en este caso, el núcleo de Hierro (Fe_{56}). Si esto último se cumple, el último estado de la materia será Materia Extraña (quarks u, d y s deconfinados). Esta conjetura nos diría que la materia “normal” es entonces metaestable, ella comprimida a una densidad suficientemente alta podría espontáneamente convertirse en ME no confinada.

La materia de quarks resultaría entonces de dos posibles transiciones de fase de la materia hadrónica. Una, la ocurrida al inicio del Universo a muy altas temperaturas y densidades muy bajas. Otra, la conjeturada por Bodmer a muy altas densidades (del orden o mayores que la densidad nuclear $n_0 \sim 2,5 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$). Esta transición de fase estaría ocurriendo por siempre en el Universo; cada vez que una estrella masiva explotara en forma de Supernova, con la consecuente aparición de una Estrella Neutrónica.

Un rasgo esencial de las EQs (que las distingue de las ENs) es el hecho de que no requieren de la presencia de la gravedad para ser estables. Ellas tendrían un estado ligado de energía que se debe a la interacción fuerte y garantiza la cohesión de la estrella.

Otra característica que las hace diferentes de las ENs es que la masa de las EQs es proporcional a su radio al cubo, es decir la relación Masa-Radio (M-R) es $M \sim R^3$ y en el caso de las ENs esta relación es $M \sim R^{-3}$. Esto hace suponer que puedan tener radios menores que las ENs.

A pesar de que las Estrellas de Quarks son hipotéticas algunas observaciones de destellos de Rayos Gamma para su

⁶ Una de las propiedades fundamentales de los quarks es el confinamiento, no se encuentran libres en la Naturaleza debido a que opera entre ellos la interacción fuerte o de color.

explicación requieren de estrellas con radios $R \sim 6$ km. Una alternativa para explicar estas observaciones sería suponer que lo que estamos presenciando es una EQs.

La investigación sobre Materia de Quarks tiene vertientes intensas de trabajo. Una de ellas está dedicada a obtener en el laboratorio quarks deconfinados pero a altas temperaturas equivalente a la materia al inicio del Universo es decir la obtención del plasma Quark Gluón en esas condiciones. Un experimento en este sentido se viene llevando a cabo en Brookhaven New York donde hay un Colisionador Relativista de Iones Pesados (conocido por sus siglas en inglés RHIC).

Por otro lado está la investigación relacionada con obtener observaciones Astrofísicas que justifiquen la existencia de Estrellas de Quarks formadas también por quarks deconfinados para densidad bariónica muy alta. Las teorías han llegado muy lejos y afirman que la Materia de Quarks en los núcleos de ENs podría estar en una fase Superconductora de Color (donde los quarks están apareados como los pares de Cooper en la Superconductividad ordinaria) que las distinguiría de su estado "neutro"[8].

A pesar de lo exótico que resultan estas estrellas su búsqueda es esperanzadora porque tienen características que las diferenciarían rápidamente de las ENs. La relación M-R es una de ellas y también está el hecho del abrupto cambio de la densidad en EQs, de 10^{14} g/cm^3 a cero dada por la diferencia en la estructura interna de ambas.

Campos Magnéticos

El origen y evolución de los campos magnéticos en Enanas Blancas y Estrellas de Neutrones es hoy día uno de los temas que más ocupa a la comunidad de Astrónomos y Astrofísicos dedicados a estudiar estos objetos.

Las mediciones de la intensidad de estos campos se hacen de manera indirecta por ello con el refinamiento de las observaciones astrofísicas en el transcurso de los años los valores que se han presumido que sean máximos o constituyan cotas para ellos han ido incrementándose. En el presente las observaciones apuntan a afirmar que las EBs pueden tener campos de hasta 10^8 - 10^9 Gauss mientras que para Estrellas Neutrónicas las intensidades llegan a ser de hasta 10^{15} Gauss en su superficie pudiendo llegar a suponer que en su interior están entre 10^{17} y 10^{19} Gauss.

El origen de tan intensos campos magnéticos en Estrellas Neutrónicas se le atribuye primeramente al hecho de que son ellas el resultado del colapso de una estrella progenitora que debió tener un campo magnético de cientos de Gauss. La compresión que le ocurre a estas estrellas hace que el radio de la progenitora disminuya 10^5 órdenes y se puede calcular usando las Ecuaciones de Maxwell que si un objeto magnetizado unos 100 Gauss se comprime así su campo crecerá hasta 10^{12} Gauss. Este efecto basta para explicar

el campo magnético que se detecta en los radio pulsares pero no es suficiente para entender la posibilidad de que algunas ENs tengan campos magnéticos superiores de hasta 10^{15} Gauss [9].

Hay otro efecto que ocurre dentro de algunas de ellas que pudiera explicar campos magnéticos mil veces mayores.

Dentro de las ENs el "gas de partículas" circula por convección, es decir, la temperatura no es uniforme luego hay partes del gas que están más calientes que otras. Como el gas es un buen conductor eléctrico cualquier línea de campo magnético lo arrastra moviéndolo con él. De esta manera el campo puede amplificarse. Este efecto se conoce como el Efecto Dinamo y se piensa que es el que origina el campo magnético en todas las estrellas e incluso en planetas; está presente durante toda la vida de las estrellas de una manera "sedada" pero para las EN cuyo núcleo rota rápidamente la convección llega a ser muy violenta.

La primera simulación numérica hecha para ENs a partir de un modelo con convección puede verse en [10] y los resultados muestran que si una Estrella Neutrónica naciente tiene una temperatura de 3×10^9 K el fluido caliente circula en diez milisegundos y luego cesa. Esta furiosa convección explica el magnetismo de este tipo de estrella de neutrones [11].

En otras palabras, este modelo nos explicaría que si una estrella naciente de neutrones entrega el 10% de su energía cinética al campo magnético este puede llegar a 10^{15} Gauss que es 10^3 veces superior a los campos que se deducen que tengan los radio pulsares.

Entonces, si el efecto dinamo opera globalmente dependerá de la relación rotación-convección. Así una EN con períodos de rotación del orden o superiores al período de convección de 10 milisegundos logrará campos de 10^{15} Gauss. Ellas son las llamadas Magnetars (Magnetic Stars-Estrellas Magnéticas).

Por otro lado el Efecto Dinamo no tendrá lugar en pulsares como el Pulsar del Cangrejo que rota una vez cada 20 milisegundos, mucho menor que el período de convección. En ese caso el campo magnético no se incrementaría mas allá de 10^{12} Gauss.

Para entender cuan intensos son estos campos y cuan desconocida debe ser el comportamiento de la materia sometida a ellos, recordemos que, el campo magnético terrestre es solo del orden de un Gauss, el imán que se encuentra en un motor de un refrigerador es de 100 Gauss y en los laboratorios terrestres sólo se han logrado campos de hasta 10^6 Gauss.

La "edad" de los pulsares por ejemplo el del Cangrejo y Vela puede calcularse con un modelo de momento dipolar magnético y da excelentes resultados probando así que campos de 10^{12} Gauss son una de las características más importantes de estos asombrosos objetos estelares.

Hemos visto dos mecanismos que de conjunto podrían explicar campos magnéticos intensos en las ENs llamadas Magnetars.

No obstante a pesar de que estas teorías son reconocidas por la comunidad científica no se descartan otras ideas para explicar los colosales campos magnéticos que en ENs aparecen[12].

Telescopios e Instrumentos de Observación

En los últimos 40 años ha ocurrido un sorprendente desarrollo de la Astrofísica. Señales del Universo en otras longitudes de onda fuera del espectro visible han podido observarse. La creación de radiotelescopios, el desarrollo de los satélites y de instrumentos de detección de rayos X y radiación gamma colocados en satélites hacen que hoy día los astrónomos, astrofísicos y físicos cuenten con un sin número de observaciones, algunas que aún se resisten a explicación con las teorías que tenemos.



Figura 10. Telescopio Hubble.

En particular las estrellas neutrónicas y los pulsares le deben a los Radiotelescopios su descubrimiento. El Telescopio Espacial Hubble (ver Figura 10) puesto en órbita el 24 de abril de 1990 como un proyecto conjunto de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y de la ESA (European Space Agency) y que puede captar radiación en el visible, en el infrarrojo próximo y en el ultravioleta ha tomado numerosas datos de Supernovas, Enanas Blancas, Estrellas Neutrónicas etc. Su papel ha sido decisivo en la “cacería” de Supernovas tipo Ia.

También está el Observatorio de Rayos X Chandra y el Observatorio de Rayos Gamma Compton, estos últimos se encuentran en órbita al igual que el Hubble. En la Tierra podemos mencionar una serie de radiotelescopios entre ellos el VLA (Very Large Array) en Estados Unidos, el RTGM (Radio Telescopio Gigante en Metroondas) en la India y el ATCA (Australia Telescope Compact Array)

Modelo de una EB/EN efectos de Relatividad General

Tanto las EBs como las ENs deforman el espacio tiempo de manera importante porque hay concentrada mucha materia en una región espacial muy pequeña luego los efectos de la Teoría General de la Relatividad son importantes a tomar en cuenta.

Para el estudio de las Enanas Blancas y de las Estrellas de Neutrones se emplea la siguiente metodología.

Primero se introduce el modelo de las partículas que forman la estrella y sus interacciones, se escribe su Lagrangiana y el tensor de Energía-Momentum.

Se obtienen las Ecuaciones de Estado $P = P(\rho)$ (ρ es la densidad) que describen el comportamiento termodinámico del sistema cuando hemos supuesto que la estrellas es degenerada.

Se introduce entonces una métrica en este caso esférica: $ds^2 = e^{2\Phi} dt^2 + 2^{2\Lambda} dr^2 + r^2 d\Omega^2$ [13] donde r es la coordenada radial t la temporal, Ω es el ángulo sólido y Φ y Λ son funciones de r . Con esto se obtiene la ecuación para la masa, la ecuación de equilibrio hidrostático de Tolman Oppenheimer Volkov (TOV) y la ecuación para la fuente Φ de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{dm}{dr} &= 4\pi r^2 \rho \\ \frac{dP}{dr} &= -\frac{\rho m}{r^2} \left(1 + \frac{P}{\rho}\right) \left(1 + \frac{4\pi Pr^3}{m}\right) \left(1 - \frac{2m}{r}\right)^{-1} \\ \frac{d\Phi}{dr} &= \frac{m + 4\pi r^3 P}{r(r - 2m)} \end{aligned}$$

donde m es la masa, P es la presión y ρ la densidad de energía. Una solución analítica que frecuentemente se encuentra en los libros de Relatividad para estas ecuaciones resulta de suponer una estrella esférica con densidad de energía uniforme $\rho = \rho_0$. Esta suposición posibilita la integración del sistema de ecuaciones anterior, teniendo en cuenta las condiciones de frontera para el centro $P(r=0) = P_c$, $\Phi(r=0) = \Phi_0$, $m(r=0) = 0$ y a la distancia R (periferia) $P(R) = 0$, $m(R) = M_{Total}$. Así se obtiene para la masa y la presión las expresiones,

$$\begin{aligned} m(r) &= \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_0 \text{ para } r < R \\ P(r) &= \rho_0 \frac{\left[(1 - 2Mr^2/R^3)^{1/2} - (1 - 2M/R)^{1/2} \right]}{\left[3(1 - 2M/R)^{1/2} - (1 - 2Mr^2/R^3)^{1/2} \right]} \end{aligned}$$

y la presión en el centro de la estrella se obtiene de evaluar en $r = 0$,

$$P_c = \rho_0 \frac{\left[1 - (1 - 2\frac{M}{R})^{1/2} \right]}{\left[3(1 - 2\frac{M}{R})^{1/2} - 1 \right]}$$

Así para un sistema con densidad de energía uniforme, la presión central aumenta con el radio y con la masa ya que $M = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0$. Esto tiene sentido pues a medida que se inyecte más y más materia a la estrella mayor será la presión central. Ahora, si esta presión central se hace infinita la estrella colapsa, y es fácil notar que esto ocurre para la relación:

$$R_{\max} = \frac{9}{4}M_{\max} \text{ ó } \left(\frac{2M}{R} = \frac{8}{9}\right)$$

es decir no hay estrellas con densidad de energía uniforme con una relación masa radio igual o mayor que 8/9.

Realmente todos los modelos estelares no son tan triviales como el anterior, por ejemplo si incluimos la acción de un campo magnético B homogéneo, en la ecuación de estado, las presiones se vuelven anisotrópicas y por tanto la presión ecuatorial de la estrella pudiera hacerse cero y ocurrir un colapso magnético [14]. La simetría ya no sería esférica, lo que da lugar a ecuaciones de campo mucho más complicadas (ecuaciones diferenciales no lineales).

Conclusiones

Este trabajo ha intentado describir el camino que recorre una estrella antes de morir. Dependiendo de la masa ellas durarán decenas de millones de años o tan sólo cientos de ellos. Su tormentoso fin las convierte en objetos extremadamente densos y exóticos cuyo máximo exponente en el presente son las ENs. Ellas se han vuelto laboratorios que permiten estudiar el comportamiento de la materia en regímenes extremos: altas densidades, campos magnéticos intensos. Su complejidad requiere que para explicarlas dominemos toda la Física que conocemos: la Relatividad General porque en muy poco espacio está concentrada mucha materia y el espacio tiempo se deforma de manera apreciable, la interacción electromagnética porque hay interacción de partículas cargadas que compensan la carga de la estrella resultando una estrella neutra, la interacción electrodébil porque hay constante decaimiento de neutrinos y la fuerte porque o hay quarks deconfinados o hay hadrones conformados por quarks.

Con el desarrollo de radiotelescopios cada vez más potentes, y la posibilidad de explorar el Universo en otras longitudes de onda con detectores espaciales hemos “presenciado” la agonía de estos objetos. La modelación computacional

también ha dado respuestas a muchas interrogantes pero quedan muchas que esperan por respuestas. Algunas de ellas, relacionadas con la estructura de la materia, podrían ser respondidas a partir del próximo año cuando el LHC (Large Hadron Collider) puesto en funcionamiento en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN) comience a entregar datos.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el patrocinio del Proyecto de Nacional de Ciencias Básicas 0407 del CITMA (CUBA) así como el apoyo de la RED Caribeña de Mecánica Cuántica Partículas y Campos auspiciada por el ICTP. Nos es grato reconocer las sugerencias y comentarios de A. Cabo y H. Pérez Rojas.

Referencias bibliográficas

- [1] STUART L. SHAPIRO, SAUL A. *Teukolsky Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars*. The Physics of Compact Objects edited by John Wiley & Sons, Inc (1983) Canada.
- [2] S. PERLMUTTER ET AL., *Astrophys. J.* 517, (1999) 565.
- [3] A. HEWISH, S. J. BELL, J. D. H. PILKINGTON, P. F. SCOTT, AND R. A. COLLINS, *Nature* 217 (1968) 709.
- [4] T. GOLD, *Nature* 218 (1968) 731.
- [5] TAYLOR, J. H., FOWLER, L. A. AND WEISBERG, J.M., *Nature* 277, (1979) 437.
- [6] J. M. LATTIMER, M. PRAKASH astro-ph/0002232.
- [7] A. R. BODMER, *Phys. Rev. D* 4 (1971) 1601.
- [8] MARK ALFORD, KHRISNA RAJAGOPAL, SANJAY REDDY AND FRANK WILCZEK. *Phys. Rev. D* 64 (2001). K. RAJAGOPAL Y F. WILCZEK. *Phys. Rev. Lett.* 86 (2001) 3492.
- [9] C. KOUVEKIZTON ET AL. *Nature* 393 (1998) 235.
- [10] J. M. LATTIMER, M. PRAKASH. *Astrophys. J.* 550 (2001) 426.
- [11] R. C. DUNCAN AND C. THOMPSON. *Astrophys. J.* 392, (1992) L9-L13.
- [12] A. PEREZ MARTINEZ, H. PEREZ ROJAS, H. MOSQUERA CUESTA. *Chin. Phys. Lett.* Vol 21 No. 11 (2004) 2117-2119.
- [13] CHARLES W. MISNER, KIP. S. THORNE AND JOHN ARCHIBALD. *Wheeler Gravitation*, edited by W. H. Freeman and Company New York (1998).
- [14] A. PÉREZ MARTINEZ, H. PÉREZ ROJAS, H. J. MOSQUERA CUESTA, *Eur. Phys. J.* , C 29, (2003) 111-123.