

Objetos compactos y campos magnéticos intensos

A. Pérez Martínez^a, Daryl Manreza Paret^b y A. Ulacia Rey^a

a) Instituto de Cibernética Matemática y Física, ICIMAF, Calle E esq. 15 No. 309 Vedado, Habana, 10400, Cuba; aurora@icmf.inf.cu, alain@icmf.inf.cu
 b) Facultad de Física, Universidad de la Habana

Sumario. En Astrofísica se conocen como objetos compactos a las Enanas Blancas, Estrellas Neutrónicas y Huecos Negros. En este trabajo describiremos cómo se forman estos objetos, sus principales características y las observaciones astronómicas que prueban su existencia. Nos referiremos además a la acción de los campos magnéticos sobre estos objetos.

Abstract. In Astrophysics are considered as compact objects the White Dwarfs, Neutrons Stars and Black Holes. 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. We also consider the role of the magnetic field on these objects. PACS: Astrofísica 95.30. Qd, Enanas Blancas 97.20. Rp, Estrellas de Neutrones 97.60 Jd, 9 Quarks 14.65.-q.

1 Introducción

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

Las teorías más aceptadas de formación de estructura en el Universo consideran que en los primeros diez minutos de creado el Universo se formaron los elementos más ligeros (Hidrógeno (H) y Helio (He)) y a partir de un gas difuso de estos elementos y por 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. Es decir, el medio interestelar se enriqueció de metales, (en Astronomía se consideran metales los elementos más pesados que el He) cuando las estrellas ligeras o masivas, en el proceso de envejecimiento, expulsaron la mayor parte de su masa con la consecuente explosión de Supernovas. Las estrellas siguen muriendo y este es el proceso natural de enriquecimiento del Universo de metales aún hoy día. En este

trabajo analizaremos como ocurre este proceso para las distintas estrellas. Estudiaremos las principales características de los remanentes estelares: Enanas Blancas y Estrellas Neutrónicas.

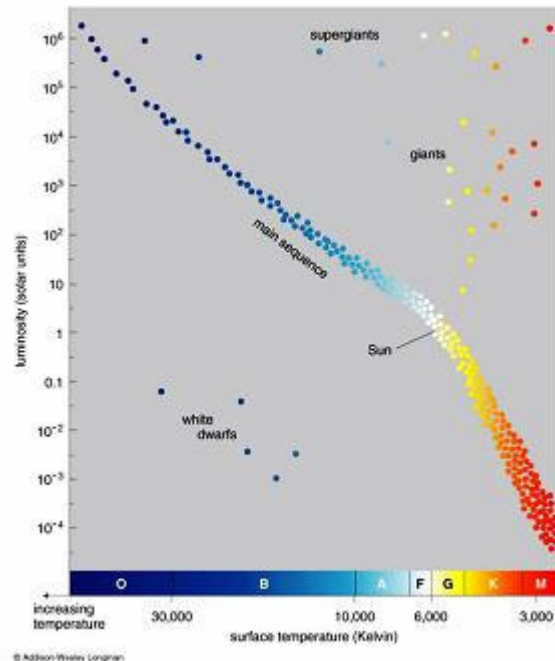


Figura 1. Diagrama de HR

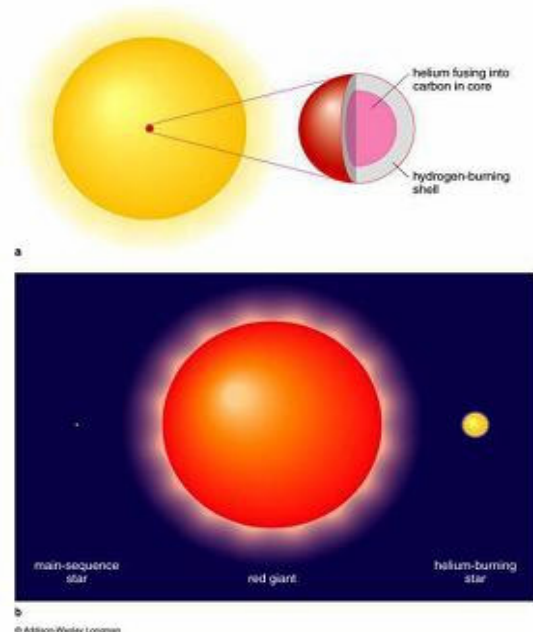


Figura 2. La etapa final de una estrella de masa pequeña.

2 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 in-

tenta 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:

$$L \sim 4\pi R^2 \sigma T^4.$$

donde σ es la constante de Stefan - Boltzmann, 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 colapsa¹. Se prevén tres destinos dependiendo de la masa de las estrellas:

- 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 Huevo Negro (HN).

Tomamos el Sol como referencia siendo $M_{\odot} = 1,989 \times 10^{33}$ g, $R_{\odot} = 6,9599 \times 10^{10}$ cm y $L_{\odot} = 3,90 \times 10^{33}$ ergs⁻¹ su masa, radio y luminosidad respectivamente.

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.

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 se determinaran las masas de ellas usando la tercera Ley de Kepler. Se obtuvo que las masas de Sirio A y B son de $2,3 M_{\odot}$ y $1 M_{\odot}$ respectivamente. A partir del brillo y la temperatura (usando la ecuación (1) y suponiendo que la temperatura superficial de ellas es de 8000°K) se pudo también determinar sus tamaños mostrando que Sirio B tiene un diámetro de 10.000 km (menos que el de la Tierra), mientras que el de Sirio A es de 1.000.000 km.

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



Figura 3. El final de una estrella de masa pequeña: Nebulosa Planetaria.

Este sistema binario tiene un período de rotación de 50 años, con una máxima separación en el cielo de 7.6 arcosegundos. En la Figura 4 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 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 XIX era explicar que fuerza estaba compensando la atracción gravitacional en un Astro como Sirio B tan pequeño, po-

co 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 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 la masa máxima para estas estrellas era de $1.44 M_{\odot}$. Una derivación simplificada del límite de Chandrasekhar puede darse utilizando los argumentos de Landau que son válidos también para Estrellas Neutrónicas. Supongamos que tenemos N fermiones en una estrella de radio R y por tanto la densidad de los mismos es $n \sim N/R^3$ 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 bariones $M \sim nm_B$. 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 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 la masa del electrón obtenemos:

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

Normalmente la etapa final de una estrella de masa pequeña es su conversión en una EB (ver Figura 2). Sus características fundamentales son sus altas densidades, del orden de una tonelada por centímetro cúbico, sus pequeños tamaños, radios del orden de 1000 kilómetros y su pobre luminosidad $0,01 L_{\odot}$. A pesar de ser poco luminosas pueden observarse con telescopios ópticos y se encuentran en el diagrama HR (Figura 1).

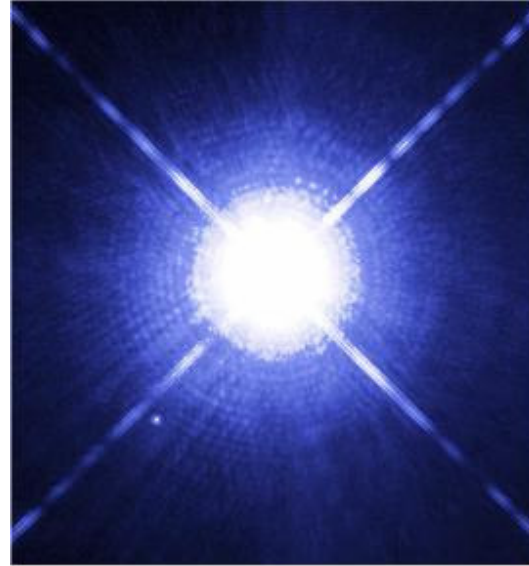


Figura 4. Sistema binario: Sirio A y B.

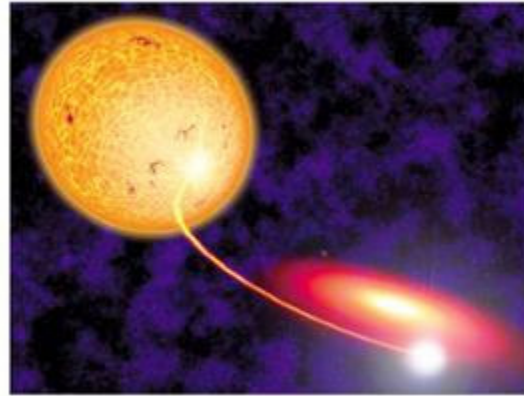


Figura 5. Una EB acretaando masa de su compañera.

Elas flotan como bolas de carbono caliente a través del espacio mientras se enfrían gradualmente y mueren. Pero esta es sólo una posibilidad. La mayoría de las estrellas aparecen como binarias. Una EB con una compañera puede recibir H de su compañera y este ir a su superficie. La Figura 5 muestra este proceso. Si la EB recibe suficiente H en su superficie, la fusión puede comenzar en ella. La luminosidad de la EB podría incrementarse rápidamente, aparecería en el cielo una gran luminosidad, que se conoce como una Nova y este es un proceso que puede durar unas semanas (ver Figura 8). Después de la

fusión, la EB retorna a su estado previo. Este ciclo puede repetirse varias veces. Ahora bien, en este proceso puede pasar que la EB disminuya su masa pero, ¿qué pasaría si se incrementara más allá de la masa límite de $1,4 M_{\odot}$?

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 Å.

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

Como se observa en la Figura 6 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. Del 1998 hasta la fecha se han estudiado más de 60 Supernovas tipo Ia. Las observaciones de ellas han venido a revolucionar la cosmología². Las mediciones de distancias obtenidas a partir de ellas han conducido a los astrónomos a la conclusión de que el Universo está expandiéndose 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 6) 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 espec-

tros.

Estas supernovas 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.



Figura 6. Supernova tipo Ia: 1994D explotó en las cercanías de la Galaxia NGC 4526.

Por otro lado las supernovas tipo II son aquellas que no tienen líneas de Hidrógeno. Como veremos más adelante se asocian a la explosión de estrellas más masivas. El 23 de febrero de 1987 los astrónomos contemporáneos tuvieron el privilegio de observar la explosión de una supernova, la SN 1987A (ver Figura 7) cuya estrella progenitora era la estrella gigante azul Sanduleak que se encontraba en la nebulosa de Magallanes a 160 000 años luz de la Tierra (el Homo Sapiens tiene 200 000 años de existencia).

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 (SuperkamiokandeII, 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 es 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, solo 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, aun 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 $C_{12} + O_{16} \rightarrow Ne_{20} + Mg_{24} + O_{16} \rightarrow Si_{28} + S$ 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 masiva. 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. Una EN es muy pequeña. Una estrella que fuera como nuestro Sol terminaría teniendo de 10 a 20 km. Esto significa densidades de 1000 millones de toneladas por centímetro cúbico.

Estrellas Neutrónicas. La teoría que sustenta a estas estrellas 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.

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:

- Densidad $\rho = 10^9 \text{ ton/cm}^3$.
- Una masa de $2M_{\odot}$ pero tan compacta que tendría un diámetro de $D \sim 10 \text{ km}$.
- Una velocidad de escape de $v = c/2$ donde c es la velocidad de la luz.

Al igual que las EBs, una EN también tenía un límite para su masa, este puede igualmente calcularse usando los argumentos de Landau. Numerosos trabajos teóricos aparecieron en torno a la idea de las ENs que 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. Jocelyn y Hewish dedicaron tiempo y esfuerzo a analizar estas señales y descartar las civilizaciones extraterrestres como candidatas a explicarlas.

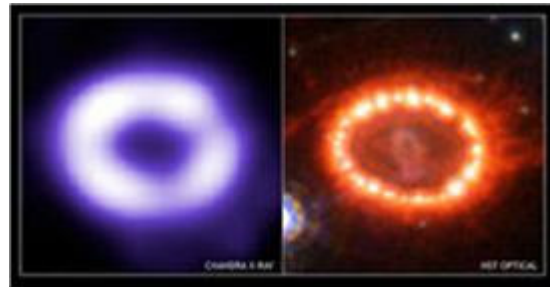


Figura 7. Supernova 1987A: en rayos X y luz visible.

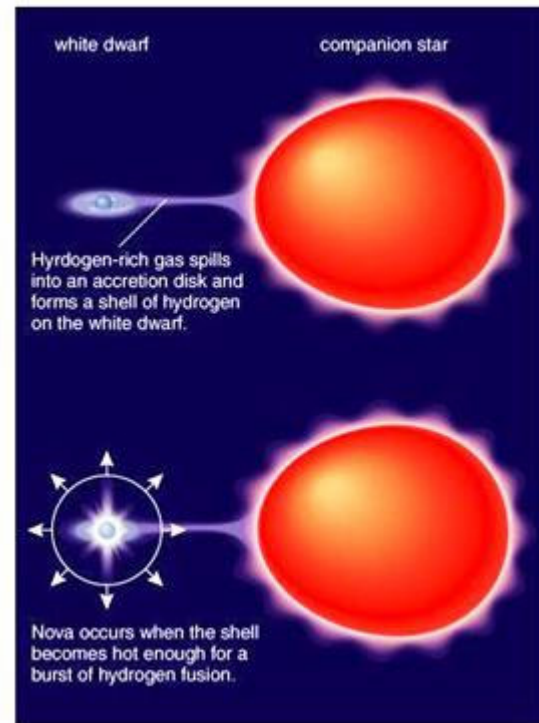


Figura 8. Una Nova.

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 10) que se encuentra a 7000 años luz en la Constelación de Tauro. El Cangrejo es un pulsar extremada-

mente 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 la misma época fueron descubiertos más y más pulsares con períodos de pulsación en el rango de 0.25 a 1.5 segundos. En la Figura 9 se grafica el período de 0.71 s del Pulsar PSR 0329+54.

El descubrimiento de los pulsares es considerado uno de los descubrimientos más trascendentales de la Astronomía del siglo XX. Por esto el Premio Nobel de Física de 1974 se le otorga a los astrónomos Ryle por el desarrollo de los Radiotelescopios y a Antony Hewish por el trascendental descubrimiento de los Pulsares. Joselyn quedó excluida de este premio, no obstante ha obtenido otros muchos reconocimientos por este hallazgo.

Las primeras candidatas para explicar que objeto astrofísico se correspondía con un pulsar fueron las EBs en rotación. Sin embargo, aun una EB del tamaño de la Tierra es demasiado grande para rotar en menos de un segundo y no deshacerse. Habría que buscar materia más compacta para describir este suceso. Cobran vida entonces los trabajos teóricos acerca de la existencia de ENs. En 1968 Gold identifica los pulsares con Estrellas Neutrónicas en rotación con campos magnéticos superficiales del orden de 10^{12} Gauss.

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 un remanente estelar (ENs).

Los pulsares 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 Gamma.

Además sus períodos de rotación se incrementan lentamente y nunca decrecen salvo ocasionales 'glitches' o 'sideramotos'. Es decir, la rotación del pulsar disminuye siempre. Con la 'edad' ellos se van volviendo más y más lentos y consecuentemente su período de rotación va aumentando. No obstante tienen ocasionales aumentos de la velocidad de rotación que son los 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 (ver ref. [4]).

Su período de rotación es de 59 milisegundos y la órbita que recorre es de 7.75 horas. Su descubrimiento se considera como la primera evidencia observacional de la existencia de ondas gravitacionales. La distancia entre este pulsar y la estrella neutrónica compañera disminuye 3.1mm por cada órbita. Por tanto en 300 millones de años ellas tanto se acercarán que se fundirán.

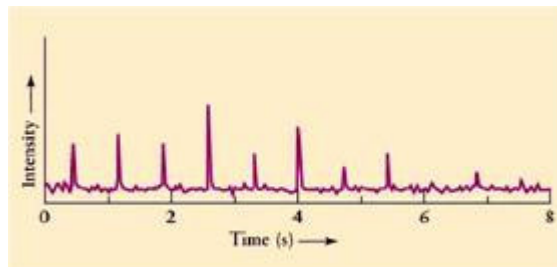


Figura 9. Pulsar PSR 0329+54 con intervalos de 0.714s.

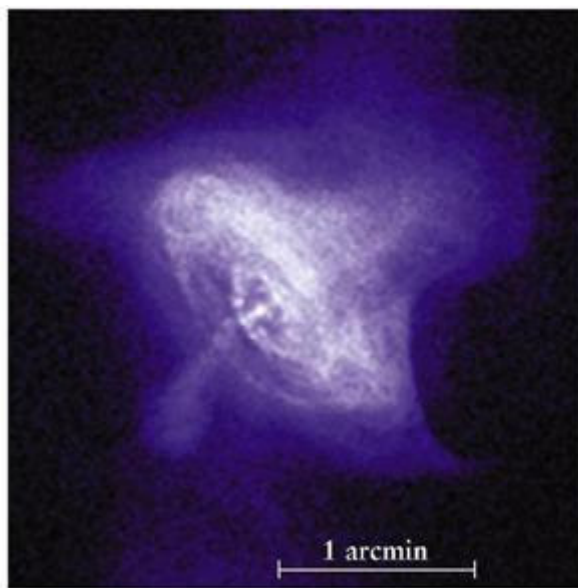


Figura 10. Pulsar del Cangrejo.

Con este pulsar se 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 Russell 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 800.000km 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

llegarían a pegarse o fundirse con la consecuente liberación de una energía colosal.

Campos Magnéticos y Estrellas Neutrónicas.

El origen de intensos campos magnéticos en Estrellas Neutrónicas se le atribuye primeramente al hecho de que son ellas el resultado del colapso de una estrella 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 el electromagnetismo nos dice que si un objeto magnetizado unos 100G se comprime de ese modo el campo crecería hasta 10^{12} Gauss. Este efecto basta para explicar el campo magnético que se detecta de manera indirecta en los radio pulsares pero no es suficiente para entender la posibilidad de que algunas ENs tengan campos magnéticos superiores⁶.

Ocurre además otro efecto dentro de las estrellas. En ellas el gas circula por convección, es decir, hay partes del gas tibias y otras más frías. 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, y este proceso 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 de estos modelos puede verse en la ref. [3] y los resultados muestran que para una Estrella Neutrónica naciente con temperaturas de 3×10^9 $^{\circ}K$ el fluido caliente circula en diez milisegundos y luego cesa. Esta furiosa convección explica el magnetismo de este tipo de estrella de neutrones⁵. Es decir este modelo nos explica 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 tienen 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 lograría campos de 10^{15} Gauss y se les llamaría 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 menos que el período de convección. En ese caso el campo magnético no es tan intenso, se supone que sea 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 de un Gauss, el imán de un motor de refrigerador es de 100 Gauss. En 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 di-

polar 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.

El estudio de las ENs se mueve en dos direcciones: el estudio de su composición interna, las explicación de los sideramotos o glitches y su posible origen a partir de la fricción del superfluido y la corteza de la estrella y el estudio de 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), que espera por evidencias experimentales y observacionales. Un objeto así podrá tener una superficie de quark desnuda cuya presión se desvanecería en la frontera y una súper alta densidad de materia, o una fina capa de materia normal soportada por las fuerzas coulombianas sobre la superficie de materia de quark.

La idea de la existencia de Estrellas de Quarks apareció en 1969 cinco años después de la predicción de Gell-Man de los quarks. La materia de quarks puede aparecer: como una transición de fase de la materia hadrónica al inicio del Universo como la conversión de Estrellas Neutrónicas en Estrellas de Quarks a densidades extremadamente altas. Las EQs aparecen en teoría a partir de la conjetura de Bodmer⁸ en 1971 que afirma que a suficientemente alta densidad, la Materia Extraña compuesta por quarks u, d, s 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 sería Materia Extraña (ME) (quarks u, d y s no confinados). 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.

Las EQs no requerirán de la presencia de la gravedad para ser estables ellas tendrían un estado ligado de energía, que no necesitaría de la gravedad para mantenerse unida.

Otra característica que las hace diferentes de las ENs es que la relación Masa-Radio ($M - R$) para una Estrella de Quarks es $M \sim R^3$ y la relación para una EN $M \sim R^{-3}$. La relación $M - R$ permitiría obtener EQs con radios más pequeños a los que usualmente se considera que tienen las ENs.

Algunas observaciones de destellos de rayos gamma para su explicación requieren de estrellas con radios $R \sim 6km$. Una alternativa para explicar estas observaciones sería suponer que estamos en presencia de EQs.

La investigación sobre materia de quarks tiene dos vertientes intensas de trabajo. Una de ellas dedicada a obtener en el laboratorio quarks deconfinados pero a altas temperaturas equivalente a la materia al inicio del Universo.

La otra es la relacionada con obtener observaciones astrofísicas que justifiquen la existencia de una Estrella

de Quarks (formadas también por quarks deconfinados para densidad bariónica muy alta).

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 además de la diferencia en la estructura interna de ambas.

3 Instrumentación

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.

En particular las estrellas neutrónicas y los pulsares le deben a los radiotelescopios su descubrimiento. El Telescopio Espacial Hubble (ver Figura 11) 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)

4 Modelo de una EB/EN usando RG

Tanto las EBs como las ENs deforman el espacio tiempo de manera importante pues 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 $P = P(\rho)$ que describen el comportamiento termodinámico del sistema.

Si suponemos que el sistema es degenerado, la presión sólo es expresada en términos de la densidad de partículas. Se introduce entonces una métrica en este caso esférica: $ds^2 = -e^{2\Phi} dt^2 + e^{2\Lambda} dr^2 + r^2 d\Omega^2$ (ver ref.

[9]) donde r es la coordenada radial, t la temporal, Ω es el ángulo sólido, Φ y Λ son funciones de r .

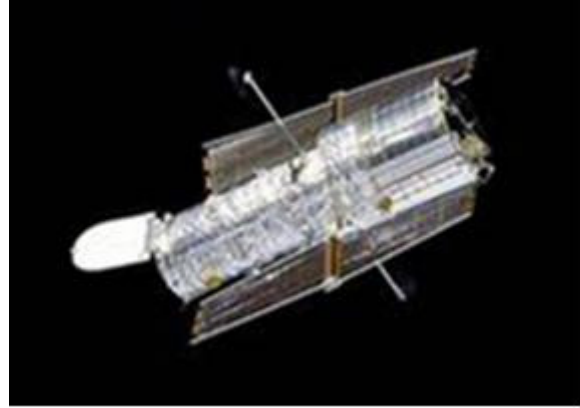


Figura 11. Telescopio Hubble

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 de la siguiente forma:

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho,$$

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{\rho m}{r^2} \left(1 + \frac{P}{\rho}\right) \left(1 + \frac{4\pi Pr^3}{m}\right) \left(1 - \frac{2m}{r}\right)^{-1}$$

$$\frac{d\Phi}{dr} = \frac{m + 4\pi r^3 P}{r(r - 2m)}$$

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,

$$m(r) = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_0 \text{ para } r < R,$$

$$P(r) = \rho_0 \frac{[(1 - 2Mr^2/R^3)^{1/2} - (1 - 2M/R)^{1/2}]}{[3(1 - 2M/R)^{1/2} - (1 - 2Mr^2/R^3)^{1/2}]}$$

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

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

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 sería la presión central. Ahora si esta presión central se hace infinita la estrella colapsa, y es fácil notar que esto ocurre para la relación:

$$R_{\max} = \frac{9}{4} M_{\max} \quad \text{ó} \quad \frac{2M}{R} = \frac{8}{9}.$$

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 magnético⁷. La simetría ya no sería esférica, lo que da lugar a ecuaciones de campo mucho más complicadas (ecuaciones diferenciales no lineales).

5 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 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 tenemos interacción de partículas cargadas que compensan la carga resultando una estrella neutra, la interacción electrodébil porque hay constante decaimiento de neutrinos y la fuerte porque o tenemos quarks desconfiados o tenemos nucleones o 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 el próximo año cuando el LHC (Large Hadron Collider) sea puesto en funcionamiento en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares.

Agradecimientos

Los autores desean 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

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 Canada (1983).
2. S. Perlmutter et al., *Astrophys. J.* 517, 565 (1999).
3. J. M. Latimer, M. Prakash, *Astrophys. J.* 550 426 (2001).
4. Taylor, J.H., Fowler, L.A. and Weisberg, J.M., *Nature* 277, 437 (1979).
5. R. C. Duncan and C. Thompson *Astrophys. J.* 392, L9-L13 (1992).
6. C. Kouvezizton et al *Nature* 393, 235 (1998).
7. A. Pérez Martínez, H. Pérez Rojas, H.J. Mosquera Cuesta, *Eur. Phys. J., C* 29, 111-123 (2003).
8. A. R. Bodmer, *Phys. Rev. D* 4 1601 (1971).
9. Charles W. Misner, Kip. S. Thorne and John Archibald Wheeler *Gravitation*, edited by W. H. Freeman and Company New York (1998).