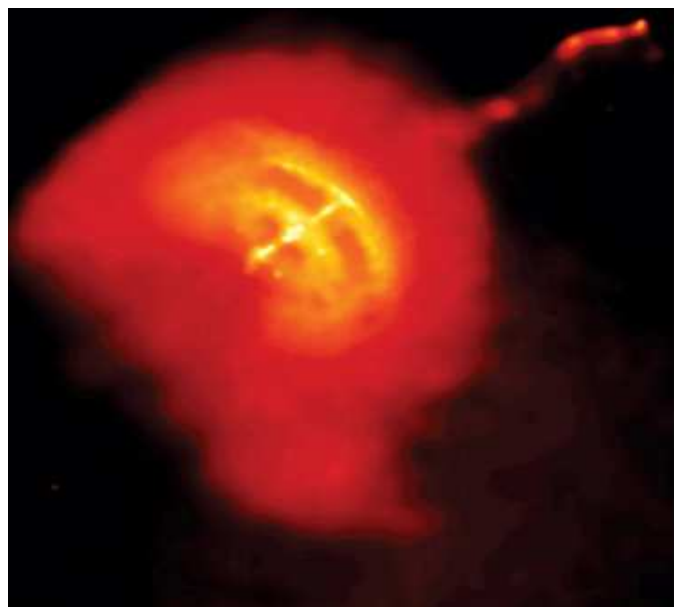


The background of the cover is a vibrant cosmic image. It features a bright, glowing nebula or galaxy core in shades of white, yellow, and orange, surrounded by swirling clouds of purple, pink, and blue. The overall effect is a sense of deep space and celestial wonder.

Guilherme Frederico Marranghello

Estrelas de Nêutrons

casaloberta
editora



Guilherme Frederico Marranghello

Estrelas de Nêutrons

casarAberta
editora



Editores

Ivana Bittencourt dos Santos Severino

José Isaías Venera

José Roberto Severino

Rua Lauro Müller, n. 83, centro | Itajaí | CEP. 88301.400

Fone/Fax: (47) 30455815

Ficha catalográfica elaborada por Helka Sampaio - CRB: 5/1432.

M358	Marranghello, Guilherme Frederico Estrelas de nêutrons / Guilherme Frederico Marranghello. – Itajaí, SC : Casa Aberta, 2014. 76 p. ; il. color. ; Bibliografia ISBN 978-85- 62459-53-5 1. Estrelas de nêutrons. 2. Astrofísica nuclear. 3. Raios X (Emissão). 4. Movimento das estrelas. I. Título. CDD 523.8 21. ed.
------	--

Índices para catálogo sistemático:

1. Estrelas : Estrelas de nêutrons 523.8

Revisão: João Francisco de Borba

Revisão de conteúdo: Fabricio Ferrari

Projeto gráfico, capa e diagramação: J. I. Venera

Conselho Editorial

Dr. André Luis Ramos Soares (UFSM)

Dr. Antônio Emilio Morgia (UFAM)

Dra. Casimira Grandi (UnTn - Universidade de Trento)

Dra. Clara Dornelles (UniPampa)

Dr. José Bento Rosa da Silva (UFPE)

Dr. José Roberto Severino (UFBA)

Dr. Lourival Andrade Jr. (UFRN)

Dr. Pedro de Souza (UFSC)

Dr. Raquel Alvarenga Sena Venera (Univille)

Msc. José Isaías Venera (Univali)

O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa Observatório da Educação, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES/Brasil.

Sumário

Prefácio	09
1 – Introdução	11
2 – Evolução Estelar	21
3 – A História das Estrelas de Nêutrons	31
4 – Propriedades de Estrelas de Nêutrons	39
5 – Física Nuclear em Estrelas de Nêutrons	47
6 – Experimentos	51
7 – Alguns Fatos	65
8 – Considerações Finais	71
9 – Sites da Internet	73
10 – Conceitos Úteis	75

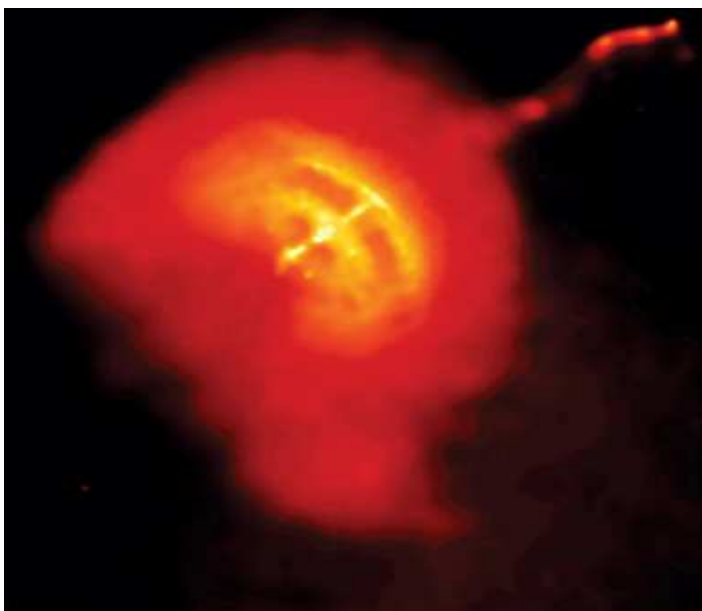


Prefácio

Graduei-me bacharel em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 1998, mesmo ano em que iniciei o curso de mestrado em Física Nuclear, seguido de um doutorado na mesma área. Devido às aplicações de meus modelos teóricos ao estudo sobre estrelas de nêutrons e o fascínio que estes objetos me despertaram, meu trabalho evoluiu para estudos astrofísicos, rendendo-lhe o título *Transição de fase em estrelas de nêutrons e a emissão de ondas gravitacionais* para minha tese de doutorado, em 2003. Entre 2004 e 2005, realizei estudos de pós-doutorado no Observatório de Nice, na França. Em 2006, continuei minhas pesquisas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, em São José dos Campos-SP. Desde 2006, trabalho na Universidade Federal do Pampa, em Bagé-RS.

Este livro descreve, de forma mais ampla e com uma linguagem mais abrangente, os estudos que foram realizados ao longo de uma, ainda curta,

carreira. Sendo assim, tem como finalidade popularizar e difundir os trabalhos que são realizados dentro das instituições de pesquisa que, na maioria das vezes, não chegam ao conhecimento público.



1 – Introdução

Não podemos começar este livro senão fazendo-nos uma pergunta: O que são estrelas de nêutrons? Para responder esta pergunta, devemos fazer uma pequena revisão histórica sobre a física dos constituintes básicos da matéria, o que nos leva à Grécia antiga. Por volta do ano 450 a.C., Demócrito chamou de átomo, que em grego significa indivisível, o elemento mais fundamental da matéria. Nesta época, Demócrito ainda não imaginava o que deveria ser este elemento, mas tinha certeza que, ao dividirmos um material em pedaços cada vez menores, deveríamos chegar à algo, tão pequeno e fundamental, que não pudesse mais ser dividido.

Desde esta época, da Grécia antiga, uma das paixões dos físicos tem sido destruir a matéria em pedaços cada vez menores, a fim de encontrar este constituinte fundamental da natureza. Mas, Demócrito ainda teria que esperar até o final do século XIX para que os físicos encontrassem este constituinte fundamental da da matéria, este minúsculo tijolo que

acreditavam ser a base para toda a física: o átomo.

No início do século XX, o físico inglês Joseph John Thomson, que foi laureado com um prêmio Nobel de Física pelo estudo da condução de eletricidade em gases, propôs um modelo para o átomo que ficou conhecido como o modelo de Pudim de Ameixas. Nesta época, Thomson já havia descoberto a existência do elétron. Seu modelo atômico descrevia estas partículas, portadoras de carga elétrica negativa, distribuídas uniformemente dentro de uma pasta esférica com carga positiva, daí a semelhança com um pudim de ameixas.

Ernest Rutherford, outro físico inglês, ex-estudante de Thomson e também vencedor de um prêmio Nobel¹, realizou, em 1911, um experimento que resultou no fim do modelo de Pudim de Ameixas. Rutherford mostrou que a matéria não deveria estar distribuída uniformemente como um pudim de carga positiva, mas sim, concentrada em regiões muito pequenas, chamadas de núcleo, e rodeadas por uma nuvem com minúsculas partículas de carga negativa. Dividindo o que se acreditava ser indivisível, Lorde Rutherford formulou um novo modelo no qual um átomo, que possui um tamanho médio aproximadamente igual a 10^{-10} metros, tem praticamente toda sua massa, além de toda sua carga positiva, concentradas

¹ Rutherford recebeu o prêmio Nobel de Química em 1908.

em uma região aproximadamente igual a 10^{-15} metros.

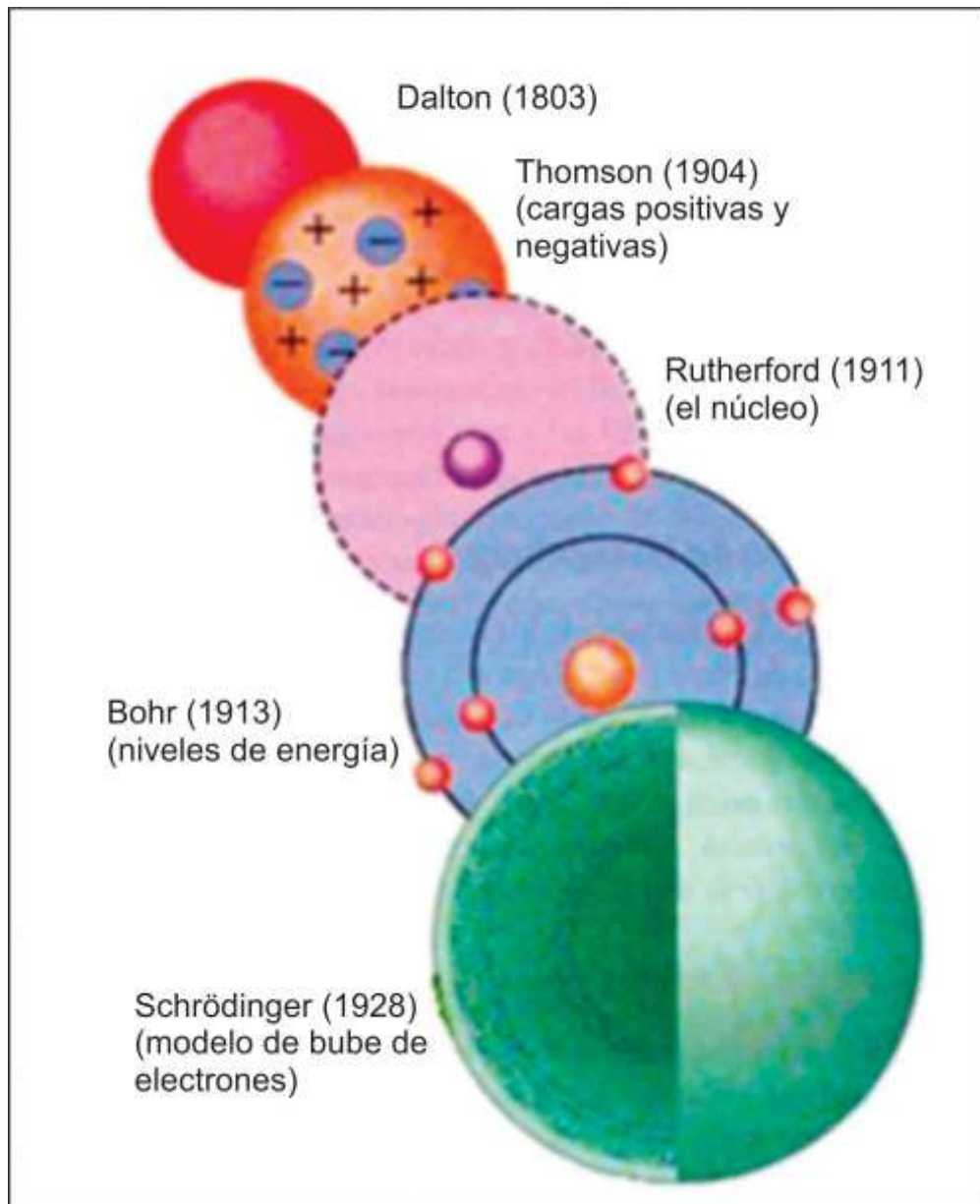


Figura 1: A evolução dos modelos atômicos desde a ideia de Dalton (esferas rígidas) até o modelo de Erwin Schrödinger.

Fonte: http://1.bp.blogspot.com/-2N3mIMIU1_k/UZZEEa8QbLI/AAAAAAAAAAc/fJq9s9bVG0I/s1600/image%5B31%5D.png

A Física Atômica ainda estava engatinhando quando a Física Quântica apareceu revolucionando as pesquisas e descrevendo modelos cada vez mais elaborados para os átomos. Muitos foram os físicos laureados com o prêmio Nobel de Física: Max Planck, em 1918, pela formulação do quantum de energia; Niels Bohr, em 1922, por um modelo atômico mais elaborado; Werner Heisenberg, em 1932, pela criação da mecânica quântica; Erwin Schrodinger e Paul Adrien Maurice Dirac, em 1933, por uma teoria atômica extremamente avançada. Entretanto, foi em 1935 que o inglês James Chadwick recebeu o prêmio pela descoberta de uma partícula que não possui carga elétrica e que está presente no núcleo atômico, o nêutron. Se o átomo já havia sido dividido, em 1932, quando Chadwick fez a descoberta do nêutron, o próprio núcleo do átomo também estava sendo dividido entre prótons e nêutrons.

Agora, eram três os constituintes fundamentais da matéria: o elétron, com carga elétrica negativa, o próton, com carga elétrica positiva, e o nêutron, com carga elétrica nula. Desse modo, os elementos do núcleo atômico não podem estar unidos pela força elétrica, uma vez que o nêutron não apresenta carga elétrica e, os prótons, com suas cargas elétricas iguais, se repeliriam. Sendo assim, o próton e o nêutron devem estar ligados dentro do núcleo por uma força de atração mais forte que a força elétrica de repulsão, o que lhe rendeu exatamente o

nome de Força Forte. Essa é a força de ligação dos constituintes do núcleo, mas que, curiosamente, não atinge os elétrons. Como físicos adoram criar modelos para descrever o comportamento da matéria, iniciou-se o período dos modelos nucleares.

Nesta nova era de descobertas sobre as partículas nucleares, apareceram outras partículas, menos famosas que os prótons, nêutrons e elétrons, mas de grande importância nos estudos dos processos físicos que nos cercam. Estas partículas são criadas quando duas outras partículas, que podem ser prótons ou elétrons, colidem. Utilizando a famosa fórmula de Einstein para a equivalência entre massa e energia, $E=mc^2$, a energia de colisão pode criar diferentes partículas. Hoje, conhecemos uma infinidade de partículas como os *píons*, *káons*, *sigmas*, *lambdas*, *múons*, *neutrinos*, dentre muitos outros. Um dos físicos mais importantes na pesquisa sobre a Força Forte foi o japonês, Hideki Yukawa, que também recebeu o prêmio Nobel de Física, em 1949, por seus trabalhos referentes ao estudo da força nuclear.

Todas estas partículas, as quais acreditávamos serem finalmente os constituintes fundamentais da matéria e que seriam indivisíveis, foram classificadas de acordo com o tipo de força responsável por sua interação com a matéria. Os Hádrons são aqueles que interagem através da Força Forte como os prótons e nêutrons. Como possuem massa, também interagem através da força gravitacional e, quando

possuem carga elétrica, também interagem por meio da força Coulombiana (como também é conhecida a força elétrica). Os léptons (elétrons e múons) também podem interagir através das forças gravitacional e Coulombiana, mas não interagem pela Força Forte, mas sim por meio de uma outra força, que não poderia ter outro nome senão Força Fraca, pois a magnitude desta força é extremamente inferior à Força Forte.

Em 1964, quando novamente acreditava-se ter encontrado o constituinte fundamental da matéria, Murray Gell-Mann e Yuval Ne'eman propuseram uma regra para descrever um conjunto de partículas elementares. Logo em seguida, Gell-Mann e George Zweig, que trabalhavam de forma independente, chegaram à conclusão que os Hádrons deveriam ser constituídos por partículas ainda menores e mais elementares que foram chamadas de Quarks. Hoje, são seis os quarks conhecidos, chamados pelo seu nome em inglês de: *up*, *down*, *strange*, *charm*, *top* e *bottom*. O próton, por exemplo, é formado por uma combinação entre dois quarks *up* e um quark *down*, enquanto o nêutron é formado por dois quarks *down* e um quark *up*.

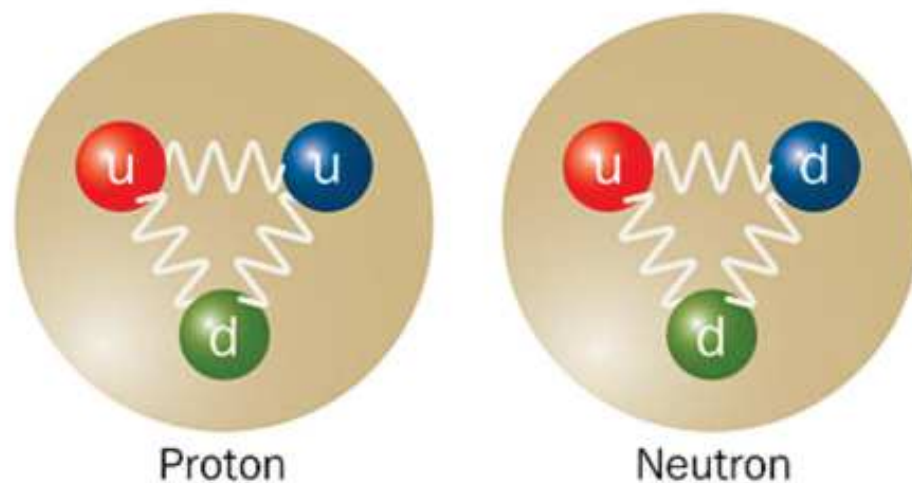


Figura 2: As estruturas do próton (esquerda) e do nêutron (direita) como conhecemos hoje por meio da Teoria de Quarks.

Fonte: <https://www.sciencenews.org/article/standard-model-gets-right-answer-proton-neutron-masses>

Evidências experimentais da existência dos quarks já foram obtidas utilizando técnicas semelhantes às utilizadas por Rutherford no início do século. Atualmente, existem gigantescos aparatos conhecidos como colisionadores de partículas nos quais núcleos atômicos são jogados uns contra os outros com a finalidade de estudar as propriedades da matéria. Quando esta matéria encontra-se concentrada de uma forma tão densa que poderíamos esquecer todo o trabalho realizado anteriormente e falarmos apenas das interações dos quarks. Neste estado da matéria não existiriam nêutrons nem prótons, apenas um plasma, ou pasta, de quarks e glúons, que são os responsáveis pela interação entre dois quarks.

Mas a pergunta que devemos nos fazer é:

o que toda essa história tem a ver com o estudo de estrelas de nêutrons? O nome estrela de nêutrons pode nos dar a falsa impressão de que esta seja uma estrela composta unicamente por nêutrons. Entretanto, apesar desta ideia não ser correta, já serve como primeira abordagem ao problema, assim como foi idealizada logo após a descoberta do próprio nêutron por Landau, ainda em 1932. Este objeto pode ser descrito de forma ainda simplificada, porém um pouco mais precisa do que está descrita acima, como um gigantesco núcleo atômico: uma esfera com aproximadamente 10 km de raio e uma massa levemente superior àquela do Sol, que possui um raio de 700.000 km. Isto faz com que a densidade de uma estrela de nêutrons atinja valores de 10^{15} g/cm³ (levemente superior à densidade encontrada no interior dos núcleos atômicos) e uma atração gravitacional, em sua superfície, cerca de 10^{11} vezes maior do que a atração da gravidade que sentimos na Terra.

Dentro deste gigantesco núcleo atômico, composto por cerca de 10^{57} partículas, encontramos o nêutron em grande quantidade, mas também encontramos os prótons, os elétrons e até mesmo outros adernos, como as partículas lambda e sigma. Na superfície destas estrelas, como a densidade é mais baixa, podemos encontrar núcleos inteiros, como os núcleos de ferro. Da mesma forma, a região central destas estrelas é muito densa devido à pressão exercida pelas camadas superiores. Caso esta densidade atinja valores críticos

muito altos, podemos ter em seu interior um caroço formado por aquele plasma de quarks e glúons que os grandes colisionadores de partículas desejam estudar.

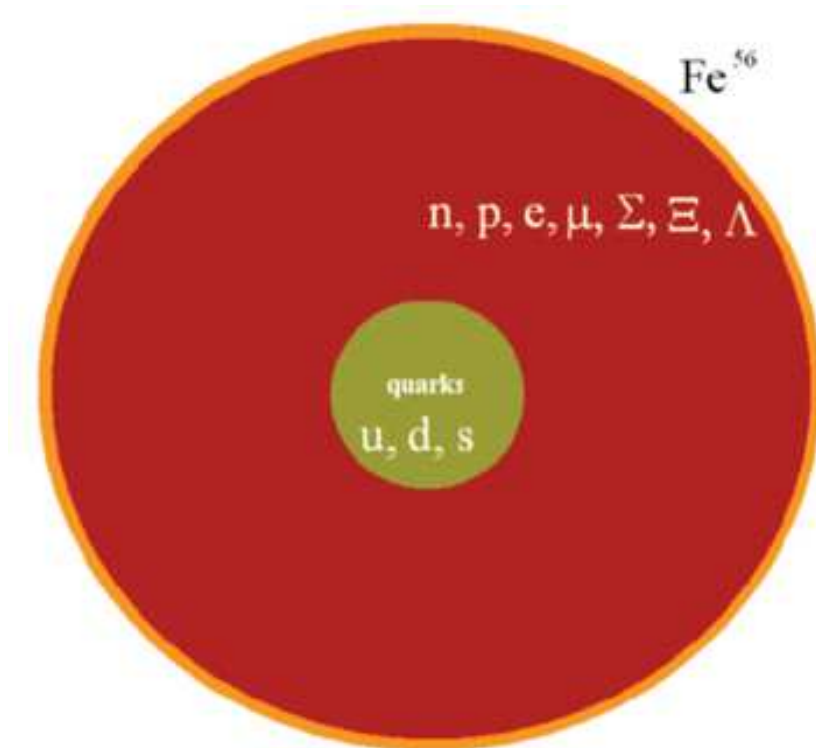


Figura 3: Estrutura hipotética de uma estrela de nêutrons com um caroço composto por quarks livres envoltos em uma manta de matéria nuclear (nêutrons, prótons, elétrons, muons, sigmas, lambdas e cascadas.) E, por fim, contida em uma fina casca composta essencialmente por átomos de ferro remanescentes da evolução estelar.

Fonte: Desenho elaborado pelo autor.



2 – Evolução Estelar

De maneira direta e usual diz-se que estrelas de nêutrons são as cinzas remanescentes, ou um dos produtos finais da evolução estelar. Na verdade, existe um longo caminho, que pode durar entre 10^6 e 10^{12} anos, que leva a este produto final. O destino final de uma estrela vai depender basicamente da sua massa inicial, levando a diferentes caminhos que podem terminar sob a forma de uma Anã Branca, de uma Estrela de Nêutrons ou de um Buraco Negro.

O nascimento de uma estrela ocorre quando uma grande nuvem de gás, formada basicamente de Hidrogênio, começa a se contrair devido à atração gravitacional entre estas moléculas de H^2 . Foi James Jeans¹ quem determinou o valor da massa que esta nuvem deve ter, para que uma ligeira perturbação possa dar origem a uma contração mais

¹ James Jeans (1877-1946) não deve ser confundido com o ator James Jean (1931-1955).

violenta e a formação de uma estrela. Uma, agora então, esfera de H^2 , que ainda não brilhe como uma estrela, começa a se contrair e fazer com que o centro desta futura estrela fique cada vez mais denso.

Hans Albrecht Bethe desvendou o mistério sobre a produção de energia em estrelas, o que lhe rendeu um prêmio Nobel em 1967. Quando o gás de Hidrogênio que se encontra na região mais central atinge uma densidade muito elevada ocorre um processo conhecido por fusão termonuclear, pelo qual Hidrogênios são fundidos de forma a originar núcleos de Hélio He^4 . Esse processo de fusão libera uma grande quantidade de energia que é capaz de parar o colapso do gás e assim dar origem ao nascimento de uma estrela. O brilho que enxergamos são os fótons que, originados nas reações nucleares do interior da estrela, escapam e chegam até nós.

Esse processo segue até o ponto no qual praticamente todo o gás de Hidrogênio já tenha sido convertido em Hélio que, por ter maior massa que o Hidrogênio, localiza-se na região mais central da estrela, enquanto o restante do gás, que não foi utilizado nas reações, localiza-se na região mais superficial. O que acontece deste ponto em diante não passa de uma repetição desse processo, com uma pequena troca de atores. Agora será o gás de Hélio que vai se contrair até o ponto no qual um novo processo de fusão termonuclear terá início, originando elementos cada vez mais pesados como o Carbono C^{12} , o nitrogênio

N^{14} e o oxigênio O^{16} . Estes processos devem se suceder, deixando o interior da estrela com uma estrutura de camadas, formato semelhante a uma cebola no qual encontraremos os elementos mais pesados na região mais central da estrela e os elementos mais leves em uma região mais superficial.

Durante estes processos de fusão termo-nuclear, a estrela se expande e se contrai diversas vezes equilibrando a pressão exercida pela gravitação e aquela gerada pelas reações. Nestas diferentes etapas de evolução, as estrelas passam a ser conhecidas por gigantes e supergigantes vermelhas devido ao seu tamanho e à mudança de sua cor. Essa mudança da cor está relacionada à temperatura da estrela e, por fim, ao elemento químico que está sendo processado em seu interior.

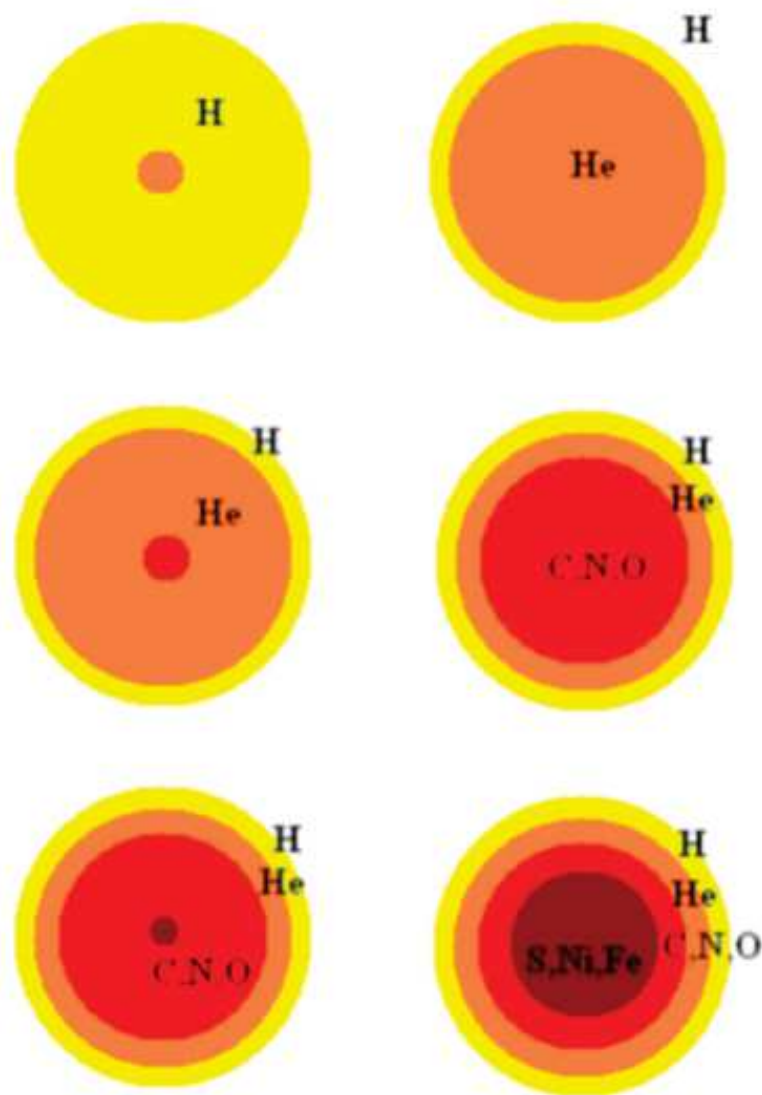


Figura 4: Processo de evolução estelar, em ordem da esquerda superior até a direita inferior. Em uma primeira etapa, o Hidrogênio é transformado em Hélio.

Logo após, é a vez do Hélio ser convertido em Carbono, Nitrogênio e Oxigênio. Por fim, elementos mais pesados são formados no interior da estrela.

Fonte: Desenho elaborado pelo autor.

Este processo não continua infinitamente, mas termina quando o elemento Ferro é formado na região mais central da estrela. Isso acontece porque a

fusão de Ferro em elementos mais pesados não é mais exotérmica, mas sim endotérmica, o que significa dizer que estas reações, que até este momento liberavam energia, sustentavam o colapso das estrelas e nos forneciam seu espetáculo no céu, agora fazem exatamente o contrário, elas necessitam de energia para acontecer. Neste momento, em que a estrela deixa de produzir seu combustível, a matéria que está nas camadas mais externas das estrelas vai colapsar (cair) em direção à região central composta pelo Ferro.

Quando toda a matéria estelar começa a cair em direção ao caroço de ferro tem origem um dos mais fantásticos e misteriosos eventos da natureza, a explosão de uma supernova: uma onda de choque se forma a apenas alguns quilômetros da superfície do caroço de Ferro enquanto a matéria, que estava na superfície, continua caindo em sua direção. Muitos fenômenos acontecem durante uma supernova e muitas são as teorias para tentar explicá-las, entretanto, o que acontece no final é bem conhecido: a matéria externa, ao cair sobre o caroço de Ferro, é expelida em uma violenta explosão e se espalha pelo universo que, anteriormente composto por um gás de Hidrogênio, e agora, povoado também por uma pequena fração de Hélio, Carbono, Nitrogênio, Oxigênio, Silício entre outros elementos. Desta forma são produzidos os elementos químicos que, após viajarem em grande velocidade através do Universo, são encontrados aqui na Terra, e do qual somos formados.

A estrela de nêutrons, propriamente dita, começa a nascer quando um caroço de Ferro é formado no interior destas estrelas e assim permanecerá praticamente intacto após a explosão da supernova. Este caroço, que é impulsionado a grandes velocidades, cerca de 500 a 1000 km/s após a explosão, sofre uma metamorfose devido à energia liberada em todo esse processo, fazendo com que os núcleos de Ferro sejam dissolvidos em prótons, nêutrons, elétrons... E assim terá nascido uma estrela de nêutrons com a forma de um grande núcleo.

Lembramos que o processo de evolução estelar depende da massa da estrela inicialmente formada por H^2 . Primeiramente, o tempo de evolução destas estrelas será menor quanto maior for a sua massa inicial, isso porque uma maior massa deve gerar uma maior compressão da estrela, fazendo com que ela atinja mais rapidamente as densidades críticas para a fusão de elementos químicos mais pesados. Outro fato extremamente importante é que o processo descrito até aqui diz respeito apenas às estrelas com massa maior que, algumas vezes, maior que a massa do Sol. Estrelas como o nosso Sol devem interromper o processo de fusão termonuclear antes mesmo de atingir o elemento Ferro. Estrelas, de pouca massa (< 8 massas solares), que seguem este caminho, terminam sua vida expelindo parte de sua superfície, de maneira menos espetacular que uma supernova e deixando estrelas com massas próximas à massa do Sol, porém, com um raio de al-

guns poucos milhares de quilômetros. Estes objetos são conhecidos como anãs brancas.

A matéria ficou tão compactada nestas estrelas que a pressão exercida pelos elétrons que a compõem resiste ao colapso das camadas superiores. O próprio nome, anãs, descreve seu tamanho, aproximadamente igual ao tamanho da Terra. Seu brilho difere do brilho das estrelas que ainda possuem sua fornalha termonuclear ativa (acesa) e, como a cor da estrela depende essencialmente da temperatura desta fornalha, as anãs brancas apresentam um espectro de cores bem distinto de outras estrelas.



Figura 5: O Sol deve passar pelo estágio de gigante vermelha em 5 bilhões de anos antes de terminar sua vida como uma anã branca. Nesta fase, o Sol será muito maior e a sua atração gravitacional deverá engolir os planetas mais próximos do sistema solar, inclusive a Terra.

Fonte: Astro.if.ufrgs.br

Estrelas com massa maior que 20 vezes a massa do Sol evoluem rapidamente, atingem a etapa final de sua vida, explodem como uma supernova. Entretanto, devido à sua gigantesca atração gravitacional, formam como produto final os famosos Buracos Negros, de onde nada pode escapar, nem mesmo a luz.

2.2 Buracos Negros

Buracos negros podem ser divididos em três categorias: estelares, são os produtos finais da evolução estelar, conforme vimos até aqui, e possuem entre 5 e 100 massas solares; buracos negros de massa intermediária podem atingir até cerca de 1000 massas solares; ainda existe a classe de buracos negros supermassivos, localizados no centro das galáxias, que podem atingir mais de um milhão de vezes a massa solar.

Buracos negros não possuem uma superfície, em seu lugar aparece o que chamamos de horizonte de eventos. Como já indica o nome, este horizonte define a região a partir de onde não recebemos mais informação do que ocorre em seu interior. Como não podemos ver um buraco negro diretamente, deve-se inferir sua existência indiretamente. Uma forma de fazer isto é estudando o movimento de planetas, estrelas e galáxias que possam estar orbitando ao seu redor. Outra forma bastante interessante de

descobrir um buraco negro é feita ao observar matéria que possa estar caindo em sua direção (antes do horizonte de eventos) devido à proximidade de uma estrela e, esta sim, emitindo radiação em diferentes regiões do espectro².

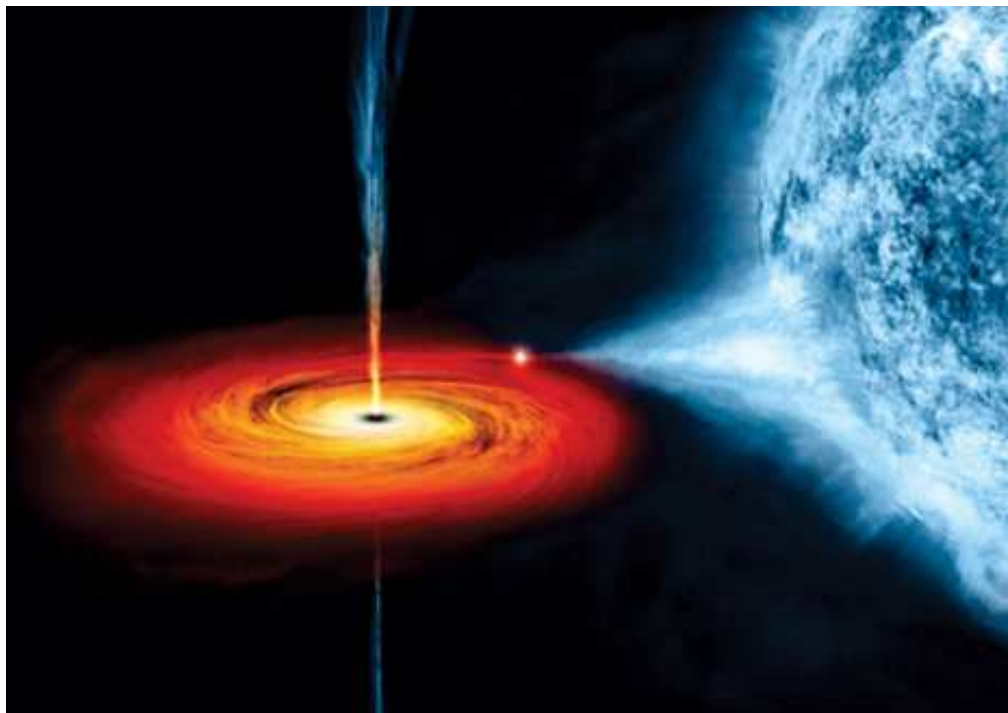


Figura 6: Desenho do que deve ocorrer quando a matéria de uma estrela está sendo capturada por um buraco negro e emitindo radiação. Crédito: Nasa/CXC/M.Weiss

Fonte: <http://chandra.harvard.edu/>

² Para saber um pouco mais sobre o espectro de radiação, veja o último capítulo deste livro.

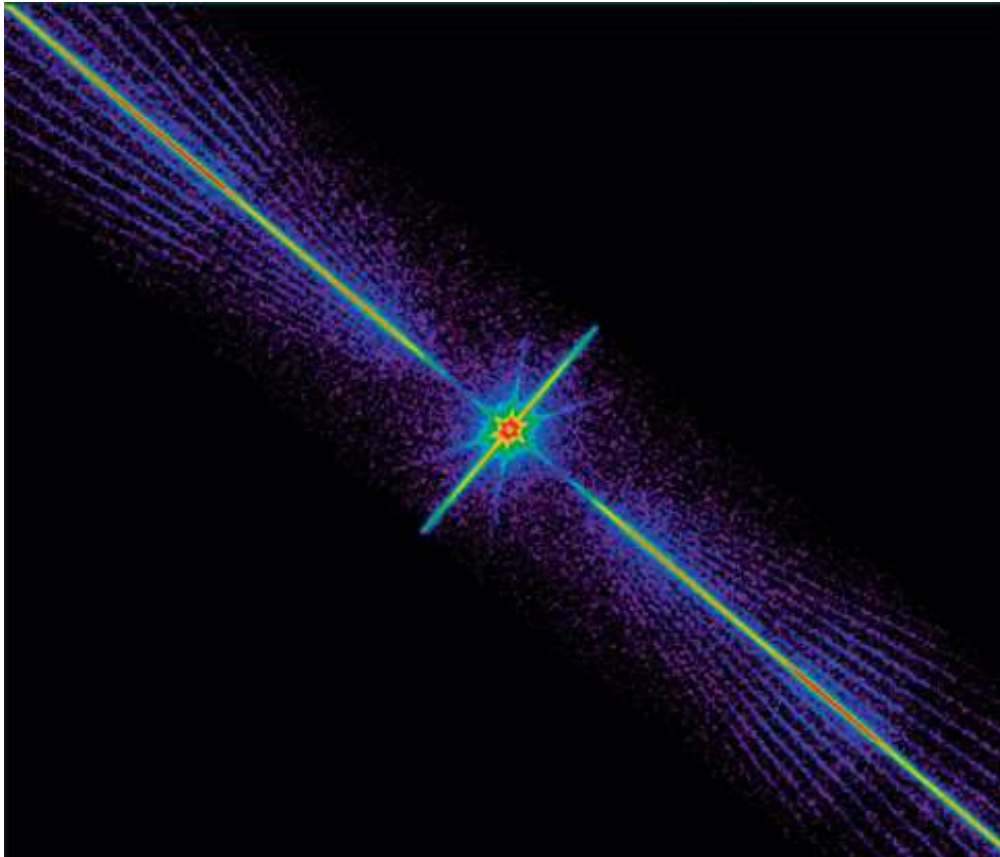
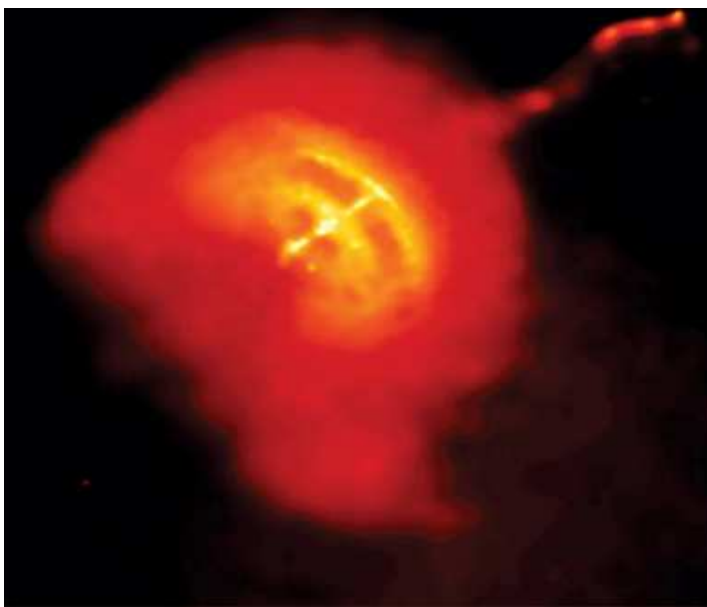


Figura 7: Intensidade de raios-X, representada em cor falsa, feita pelo Telescópio Espacial Chandra, do qual falaremos posteriormente, de um candidato a buraco negro. Crédito: NASA/SAO/CXC/J.McClintock & M.Garcia

Fonte: <http://chandra.harvard.edu/>



3 – A História das Estrelas de Nêutrons

A história das estrelas de nêutrons tem seu início com o físico de maior renome mundial, Albert Einstein, com o desenvolvimento da Teoria da Relatividade Geral. Isto porque não podemos estudar estes objetos com a Teoria da Gravitação Clássica de Newton. Estrelas de nêutrons são objetos tão densos que a sua força gravitacional distorce tão fortemente a estrutura do espaço à sua volta, que exige que as correções estudadas por Einstein sejam incluídas nos cálculos de qualquer uma de suas propriedades. Mas a história ainda exigiu mais tempo, e muito desenvolvimento científico, para que estes objetos extremamente compactos fossem concebidos teoricamente pela mente de físicos e astrofísicos. Logo após a descoberta do nêutron, por Chadwick, em 1932, começaram a ser elaboradas as primeiras ideias de que tal objeto pudesse ser o produto final de uma evolução estelar que terminara com a explosão de

uma supernova. Essa proposta foi feita por Walter Baade e Fritz Zwicky, em 1934, considerando que a energia adquirida pelo caroço durante o colapso final de uma estrela era suficiente para impulsionar uma supernova.

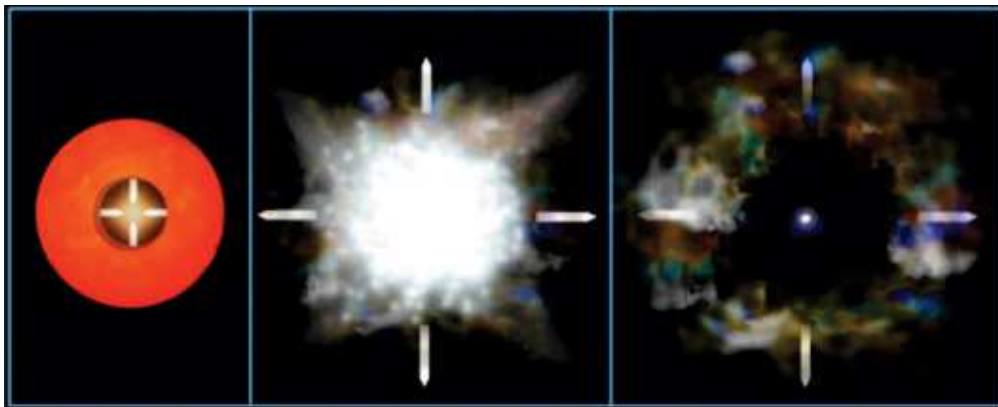


Figura 8: Evolução final de uma estrela que, após chegar ao estágio de Gigante Vermelha, explode como uma supernova e deixa uma estrela de nêutrons remanescente. Crédito: NASA/CXC/SÃO

Fonte: Astro.if.ufrgs.br

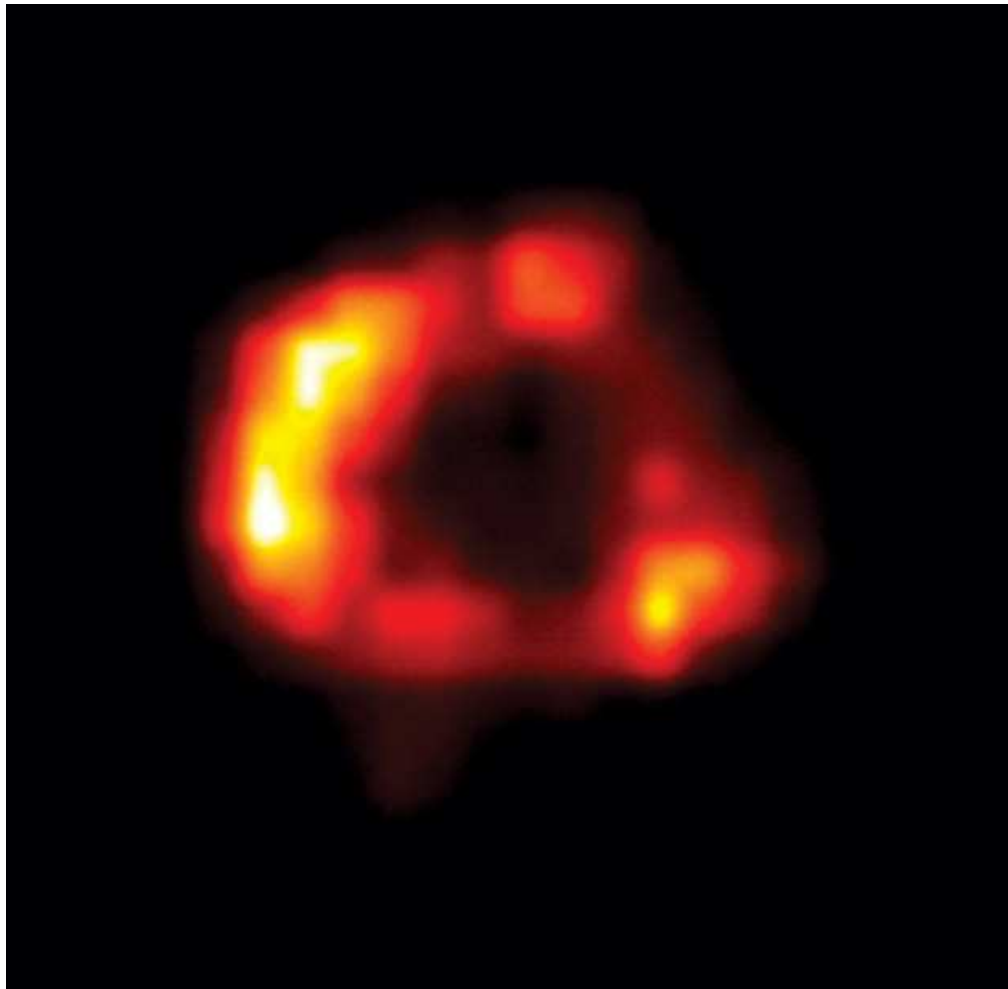


Figura 9: Imagem da supernova 1987A registrada pelo satélite Chandra. Crédito: NASA/CXC/SAO/PSU/ D.Burrows et AL.

Fonte: <http://chandra.harvard.edu/>

Foi em 1939 que J. R. Oppenheimer, G. M. Volkoff e R. C. Tolman encontraram uma solução para as equações de Einstein que se adequava perfeitamente ao estudo de estrelas de nêutrons. Estas equações descrevem a estrutura de uma estrela esférica na qual a pressão exercida pela gravitação é contrabalançada pela pressão dos nêutrons (dentre outras partículas) que formam a estrutura interna da

estrela. Estrelas de nêutrons são mantidas contra a pressão exercida pela força gravitacional de forma similar às anãs brancas, entretanto, ao invés dos elétrons estarem extremamente compactados, são os nêutrons, prótons e outros hádrons que exercem pressão contra o colapso gravitacional. Mais tarde, e até hoje, ainda existem trabalhos que utilizam as equações de Einstein para obter resultados mais realísticos nos quais a inclusão de características importantes são acrescentadas, como a rotação da estrela e a presença de um campo magnético.

Novamente, uma teoria teve que esperar muito tempo por sua confirmação, pois, foi apenas em 1967 que o primeiro pulsar foi detectado. Pulsar é o nome que usamos para falar de uma estrela de nêutrons em movimento de rotação. O nome pulsar está intimamente relacionado a esse movimento de rotação. Como um farol que indica o caminho aos navegantes, uma estrela de nêutrons em rotação emite uma luz muito bem direcionada, sendo detectada na Terra como pulsos isolados, daí o nome Pulsar. Anthony Hewish havia desenvolvido um novo radiotelescópio para estudar quasares quando, um mês após ter entrado em operação, sua estudante, Jocelyn Bell, noticiou a detecção de uma fonte de pulsos periódicos. Mais um trabalho que recebeu o prêmio Nobel, em 1974. Logo após, foram detectados cerca de 250 pulsares, durante os anos 70, que agora já ultrapassam o número de 1.500 pulsares.

A história ainda reservou ao ano de 1974 a descoberta de um pulsar que ficou conhecido pelos nomes de seus descobridores, Russel Hulse e Joe Taylor. Este pulsar não está viajando sozinho pelo Universo, ele está orbitando ao redor de outra estrela, o que chamamos de um sistema binário. Este sistema binário obteve notoriedade devido a um estudo de 20 anos em que foi determinada a redução do período orbital (tempo que uma estrela leva para dar uma volta completa ao redor da outra). O resultado mais incrível deste trabalho está no fato deste decaimento concordar com as previsões realizadas por meio da teoria de Einstein com menos de 1% de erro. Para Einstein, este decaimento é causado pela emissão de Ondas Gravitacionais, das quais falaremos mais tarde. Até hoje, esta é a maior evidência da existência destas ondas, além de um incrível teste sobre a teoria de Einstein. Russel e Taylor foram agraciados com o prêmio Nobel em 1993.

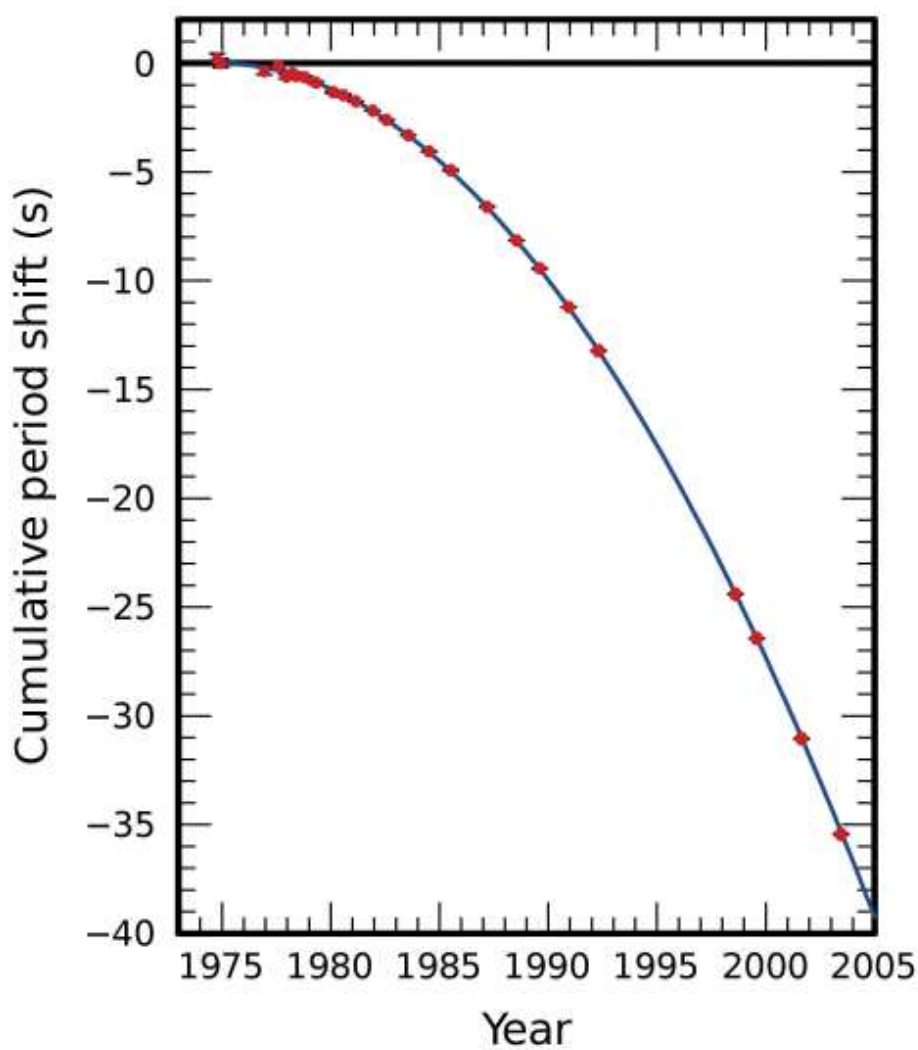


Figura 10: Os dados obtidos por Russel e Taylor para o decaimento do período orbital, comparados com a previsão teórica realizada utilizando as equações de Einstein para a perda de energia do pulsar devido à emissão de ondas gravitacionais.

Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/PSR_B1509-58



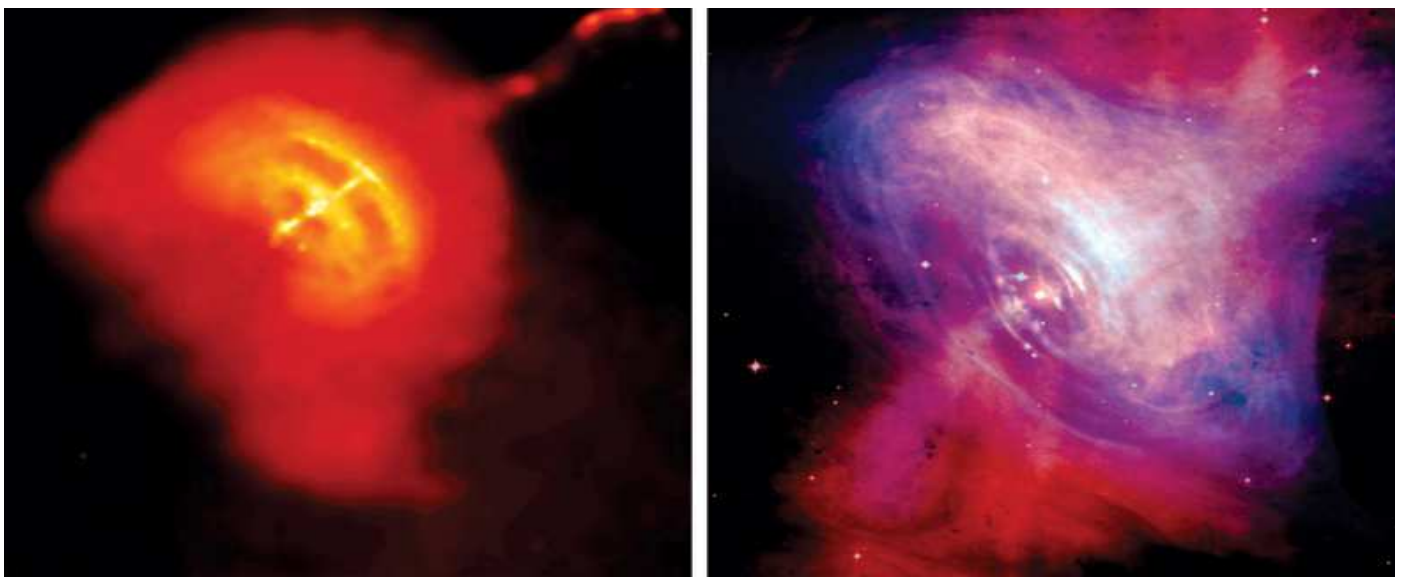
Figura 11: Russel Hulse e Joe Taylor.

Fonte: [http://th.physik.uni-frankfurt.de/~jr/physpic groups.html](http://th.physik.uni-frankfurt.de/~jr/physpic%20groups.html)

Até poucos anos, pulsares eram encontrados em sistemas binários nos quais a sua companheira poderia ser uma anã branca ou uma outra estrela normal. Recentemente, foi encontrado o primeiro sistema binário onde ambas as estrelas foram detectadas direta e independentemente como pulsares ativos. O sistema é formado pelos pulsares PSR J0737-3039A e PSR J0737-3039B que possui uma órbita de apenas 2.4 horas. Esta descoberta, que

ainda necessita a coleta de dados durante alguns anos, promete dar novo impulso ao estudo de estrelas de nêutrons, isto porque ela deverá impôr relevantes considerações sobre sua estrutura. Após coletados e analisados, os dados provenientes deste sistema devem ser capazes de nos fornecer uma medida precisa da massa e do raio destas estrelas. Atualmente, as medidas de massa e, principalmente, de raio de pulsares, possuem uma incerteza muito grande, pois são muito difíceis de serem medidos.

Ainda podemos citar outras descobertas relevantes, realizadas apor intermédio de diferentes instrumentos, como Parkes, na Austrália, Jodrell Bank, em Cambridge, Arecibo, em Porto Rico ou até mesmo pelo Telescópios Espaciais Hubble e Chandra. Estes objetos incluem o pulsar mais rápido, o pulsar de maior massa ou o de menor raio. Todas estas descobertas têm grande relevância no estudo sobre a estrutura interna destes objetos, a qual ainda permanece um mistério após tanto tempo de pesquisa. Estas consequências serão discutidas a seguir.



4 – Propriedades de Estrelas de Nêutrons

Estrelas de nêutrons são objetos que possuem algumas características bastante conhecidas e outras que ainda são um mistério para os cientistas. Atualmente, já conhecemos mais de 1.500 pulsares que estão espalhados pela nossa galáxia e, alguns poucos, em sua vizinhança.

Entretanto, estudos mostram que eles devem existir em um número muito maior, que pode chegar a 250.000 dentro da Via Láctea, então, porque detectamos um número tão inferior? A resposta é simples quando conhecemos algumas das propriedades dos pulsares. A primeira delas é a dificuldade que possuímos de enxergá-los no espectro visível, mesmo com os telescópios mais poderosos. Isto acontece porque, diferentemente das estrelas que conhecemos, não existe mais nenhum tipo de reação nuclear (responsável pelo brilho das estrelas) dentro dos pulsares. Os pulsares também são fontes muito

pequenas, lembre-se que um pulsar é cerca de 70.000 vezes menor que o nosso Sol. O pulsar JO437-4715 é o pulsar mais brilhante, e também o mais próximo de nós. Ele está localizado a cerca de 140 parsecs de distância, o que significa aproximadamente 4.200.000.000.000.000 de quilômetros, ou 10^7 vezes a distância entre a Terra e o Sol.

Mas os pulsares são conhecidos por emitirem radiação sob outra forma, principalmente nas faixas de raios-X e de rádio. Entretanto, devido a um campo magnético muito forte existente nos pulsares, esta radiação não é emitida em todas as direções, mas apenas em uma direção específica determinada pelo campo magnético, como se a radiação fosse água conduzida por dentro de uma mangueira, que fariam o papel do campo magnético e da radiação. Se girarmos esta mangueira, da mesma forma que um pulsar está em rotação, sem levantá-la ou abaixá-la, estaremos direcionando a água da mesma forma que o campo magnético da estrela direciona a radiação. O que acontece então é que o pulsar apenas será detectado se este jato de radiação atravessar a Terra onde estão os detectores.

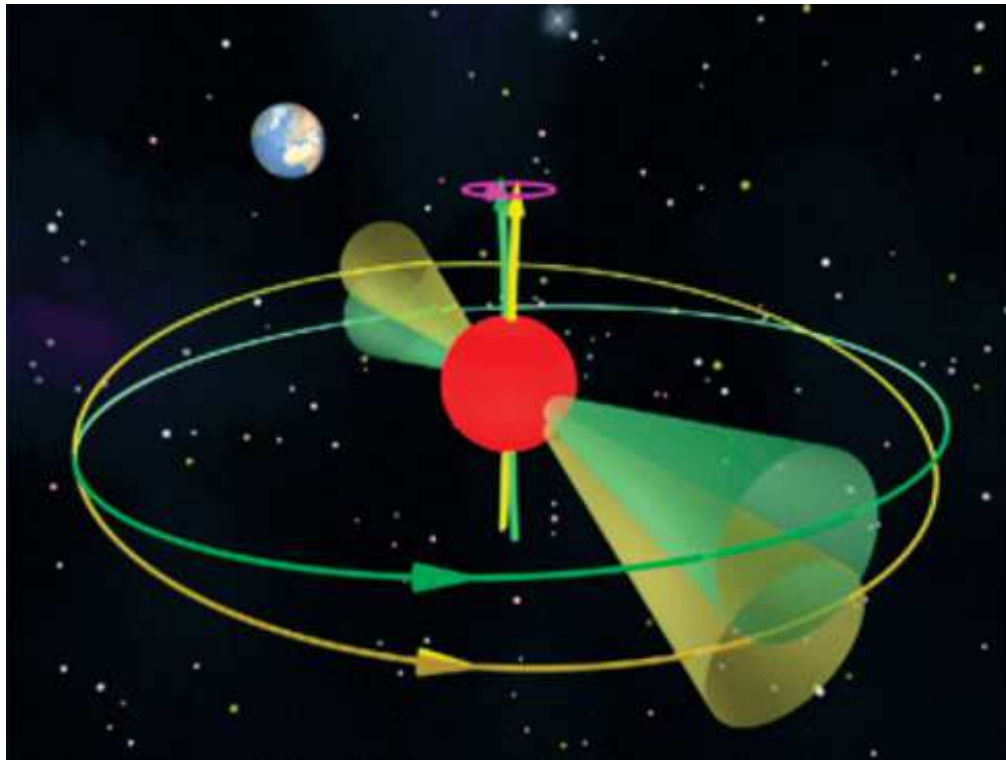


Figura 12: Ilustração sobre a estrutura de um pulsar, na qual os eixos de rotação e campo magnético estão desalinhados. O cone de radiação do pulsar atravessa a Terra, podendo ser detectado.

Fonte: <http://www.spaceref.com/news/viewpr.html?pid=2331>

Pulsares também emitem radiação em outras regiões do espectro, como na região dos raios gama. Logo após a descoberta dos pulsares através da radioastronomia, os pulsares de Vela e do Caranguejo foram descobertos por meio do estudo de raios gama. Atualmente, mesmo que já conheçamos mais de 1.500 pulsares, apenas sete deles são detectados através deste tipo de radiação. Um exemplo de como os pulsares emitem vários tipos de radiação está explicitado na figura abaixo.

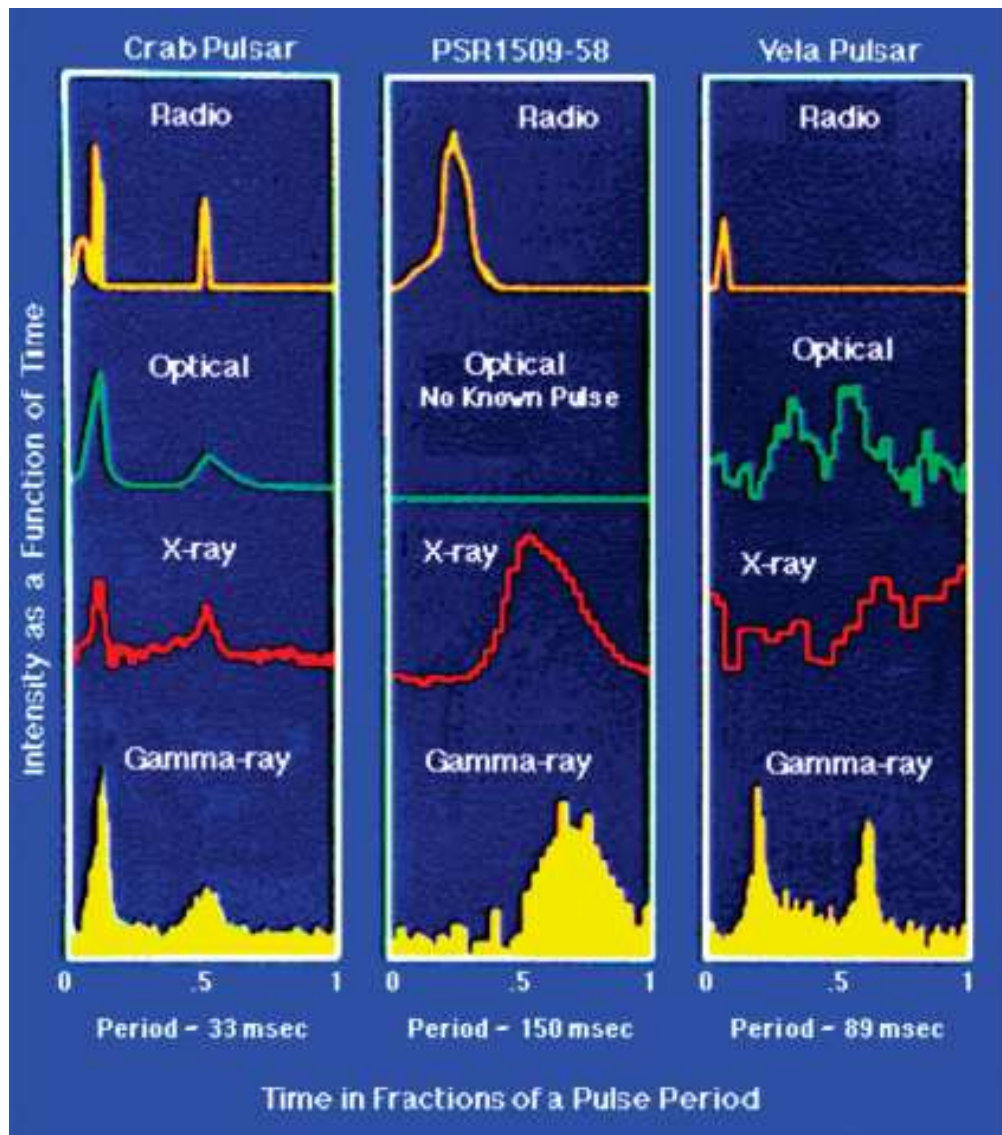


Figura 13: A figura mostra a intensidade da radiação emitida por três diferentes pulsares nas regiões do espectro de rádio, óptico, de raios-X e gama ao longo do tempo. Crédito: NASA/HEASARC

Fonte: <http://chandra.harvard.edu/>

Uma propriedade dos pulsares que somos capazes de determinar por meio de observações, apesar de alguns possuírem uma grande incerteza em suas medidas, é a massa. A maioria dos pulsares

possuem massas muito próximas a 1.4 vezes a massa do Sol. Entretanto, recentemente têm sido descobertos pulsares com massas muito maiores e muito menores que este valor e os pulsares conhecidos até hoje podem possuir massas que variam entre 1 e 2 vezes a massa solar.

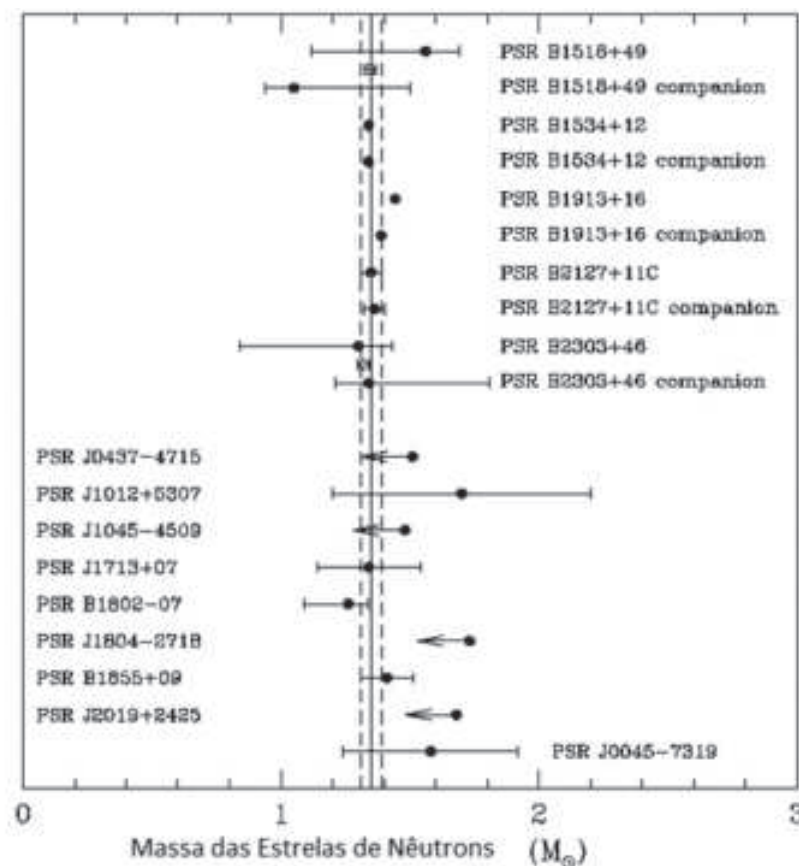


Figura 14: As massas de alguns pulsares conhecidos com suas barras de erro. A faixa vertical marca o centro da distribuição das massas dos pulsares próxima a 1.4 massas solares.

Fonte: <http://www.astro.washington.edu/users/ben/a510/NSTARS.new.html>

Estrelas de nêutrons possuem campos magnéticos um trilhão de vezes maiores que aqueles en-

contrados na Terra. Porém, ainda existe uma classe de estrelas de nêutrons capazes de gerar campos magnéticos mil vezes ainda mais fortes. Este tipo de estrelas de nêutrons, cujo estudo alcança todos os limites da relatividade e da mecânica quântica, são conhecidos como Magnetares.

Em março de 1979, duas espaçonaves russas que orbitavam após realizarem uma missão espacial foram atingidos por uma grande quantidade de raios gama. Alguns segundos mais tarde, um satélite da Nasa que orbitava o Sol também foi atingido. Finalmente, alguns laboratórios americanos, além de sete satélites russos, também detectaram a incrível quantidade de radiação que atravessou o nosso sistema solar. Algo assim já era conhecido, entretanto, com uma energia 100 vezes menor e, felizmente, nenhum satélite sofreu avarias mais graves. Apenas em 1998, Duncan, Thompson e Kouveliotou, após a detecção de outros eventos, mais fracos que o primeiro e que foram detectados vindos da mesma direção no céu, propuseram um sistema por meio do qual estrelas de nêutrons supermagnetizadas pudessem emitir estas explosões de raios gama. Estes objetos ficaram conhecidos como magnetares e estas explosões de raios gama seriam consequências de um abalo sísmico ocorrido no interior destes objetos, o equivalente a um terremoto que alcançaria facilmente 20 vezes a força de um abalo sísmico na Terra. Já são 12 os candidatos a magnetares em nossa galáxia ou próximos a ela.

Segundo os pesquisadores que formulam teorias a respeito deste estranho objeto, um magnetar deve evoluir e apagar-se muito mais rápido que uma estrela de nêutrons normal, tornando-se dificilmente detectáveis e podendo estar, aos milhares, escondidos em nosso universo.

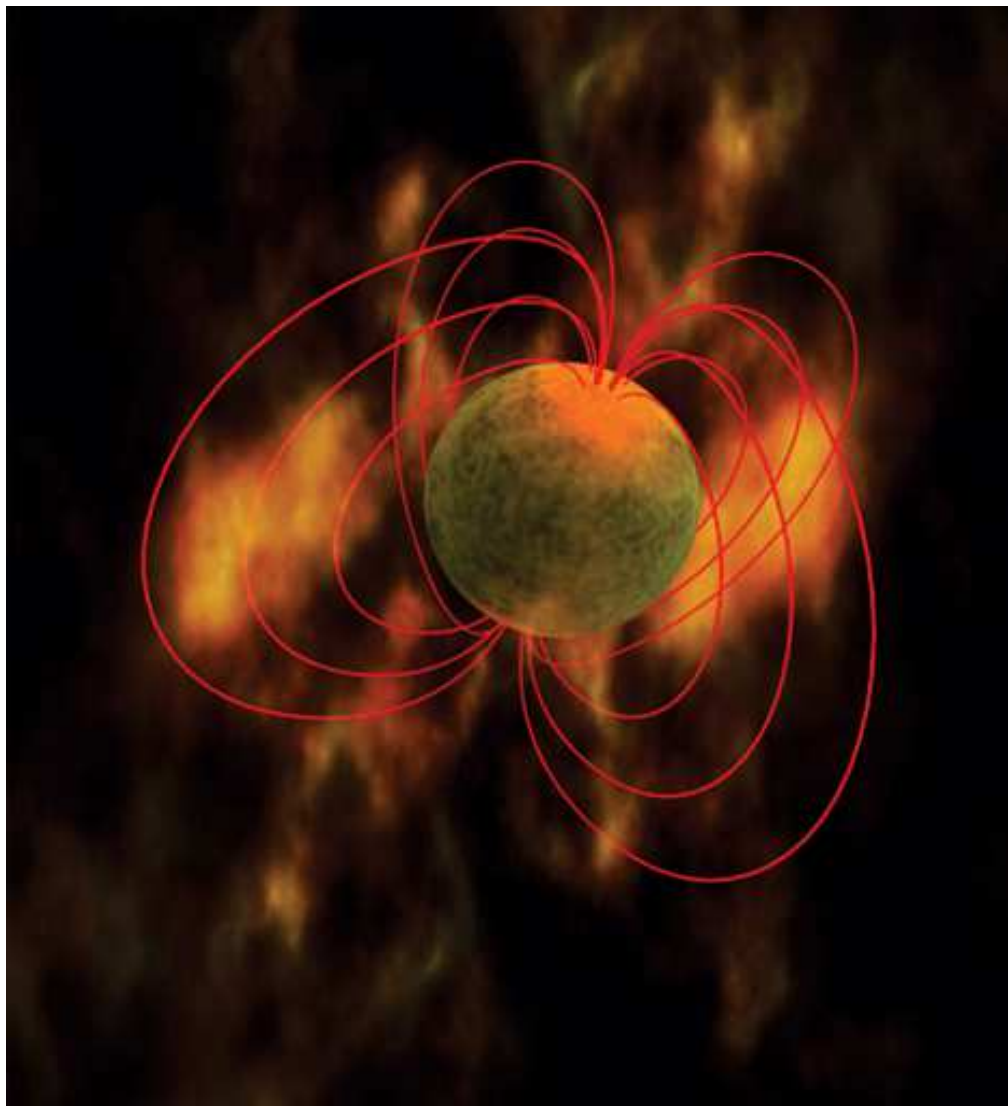


Figura 15: Concepção artística de um magnetar e as linhas de seu campo magnético. Crédito: Dr. Robert Mallozzi, University of Alabama in Huntsville.

Fonte: <http://chandra.harvard.edu/>



5 – Física Nuclear em Estrelas de Nêutrons

A física nuclear desempenha papel fundamental no estudo de estrelas de nêutrons. Como já introduzimos no início deste livro, podemos encarar estes objetos como núcleos gigantes, com cerca de 10^{57} partículas. Sendo assim, devemos esperar que algumas das propriedades nucleares também estejam presentes nestas estrelas. É sabido, da física nuclear, que os núcleos de elementos mais leves possuem aproximadamente o mesmo número de prótons e nêutrons, entretanto, quanto maior e mais pesado for o núcleo, maior é a diferença entre a quantidade de prótons e nêutrons, sendo o último, em maior quantidade. Por isso, é fácil entendermos porque as estrelas de nêutrons possuem este nome, mas vale lembrar que prótons, elétrons e outras partículas podem estar presentes em seu interior.

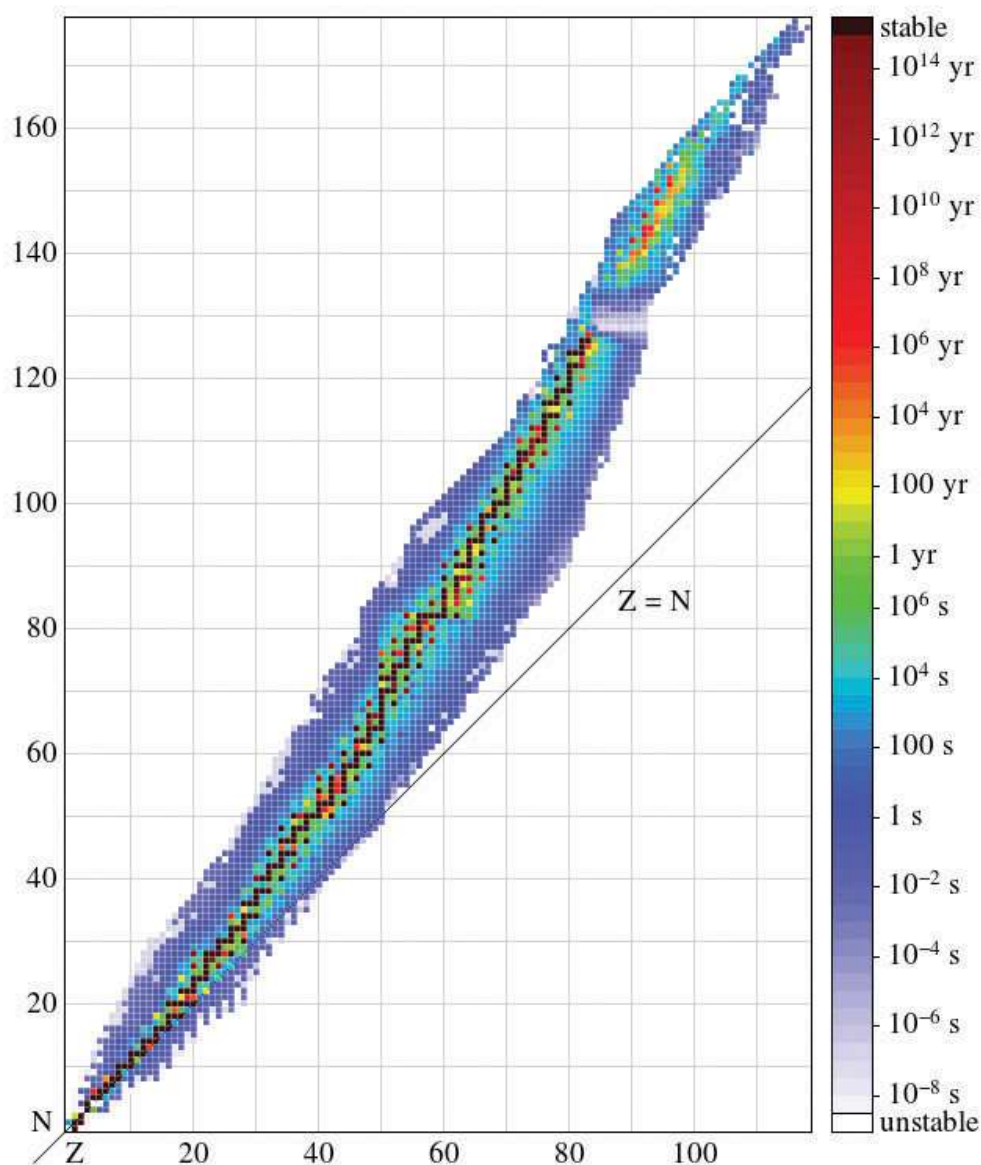


Figura 16: Na figura acima aparecem os núcleos conhecidos relacionados de acordo com o seu número de prótons Z e o número de nêutrons N . A linha que aparece em azul corresponde a um número igual de prótons e nêutrons $Z=N$.

Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_number

Recentemente, foram encontrados alguns objetos cujas características diferem um pouco daquelas encontradas em estrelas de nêutrons normais.

O raio destes objetos compactos possui um valor inferior ao raio encontrado para a maioria dos pulsares. O raio das estrelas de nêutrons não é medido diretamente, mas sim, determinados a partir de outras medidas que levam em conta a distância e a temperatura do objeto. O raio inferido, em particular, para a estrela RXJ1856.5-3754, é aproximadamente igual a 6 km, enquanto estrelas de nêutrons com massa similar a deste objeto (1 massa solar) possuem raios superiores a 10 km. O problema encontra-se no fato de não ser possível reproduzir esta estrutura a partir de modelos teóricos tradicionais da física nuclear. A única forma de descrever, teoricamente, uma estrela com tais características, seria admitir que seu interior não é composto por prótons, nêutrons, sigmas ou lambdas, mas sim, composto por quarks livres. Na verdade, os quarks que sempre estiveram armazenados em pequeninas sacolas, em números de 3 para os bárions e 2 para os mésons, estariam agora confinados em uma gigantesca sacola com cerca de 10^{57} quarks. Como os quarks podem ser mais comprimidos do que a matéria nuclear ordinária (aquela composta por prótons, nêutrons, elétrons etc.), estrelas formadas unicamente por quarks devem ser menores do que as estrelas de nêutrons que descrevemos até o momento.

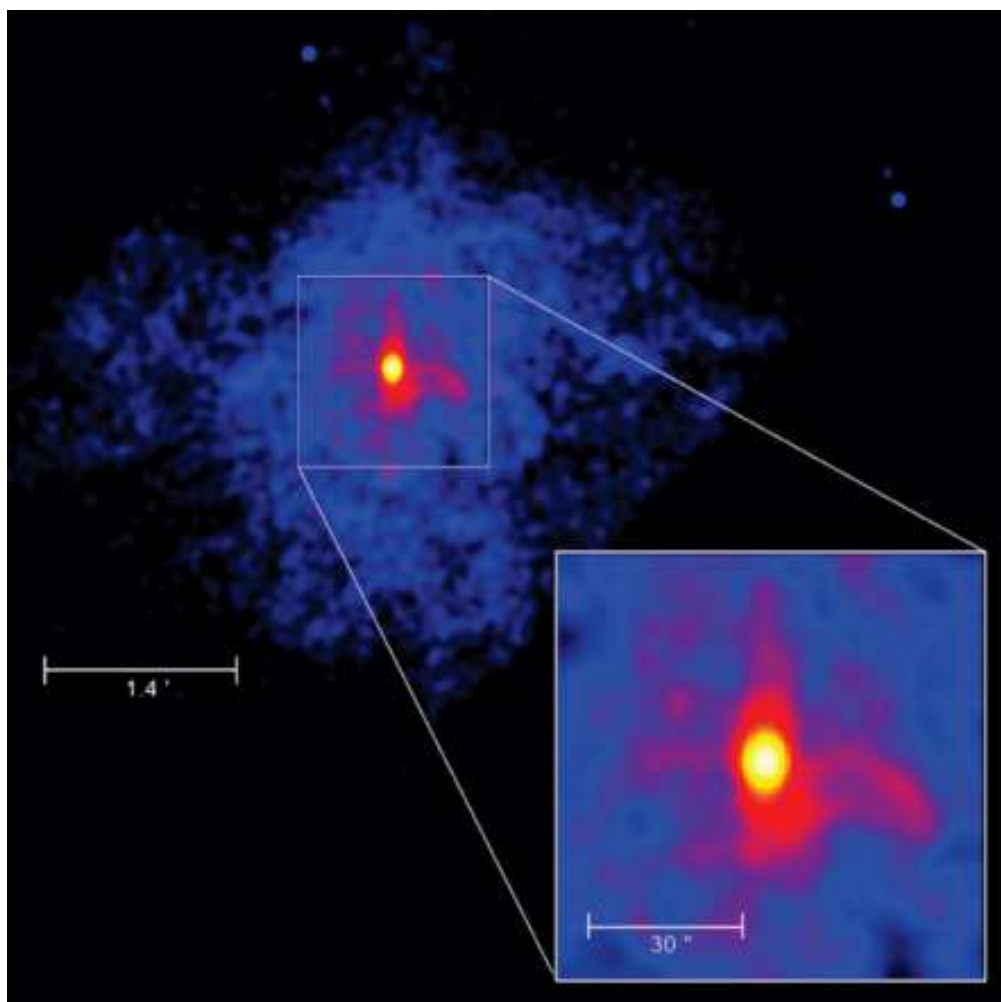


Figura 17: Imagem em cor falsa do pulsar RXJ1856.5-3754, que apresenta características distintas da grande maioria dos pulsares conhecidos. Observações feitas pelos telescópios Hubble e Chandra indicam um raio muito inferior ao raio de estrelas de nêutrons. Crédito: NASA/SAO/CXC/P.Slane et al.

Fonte: <http://chandra.harvard.edu/>



6 – Experimentos

Um dos experimentos que mais contribuem atualmente ao estudo de estrelas de nêutrons é o Observatório Espacial de Raios-X Chandra, um satélite cuja órbita ao redor da Terra varia entre 16.000 km e um terço do caminho entre a Terra e a Lua. Desenvolvido pela NASA e lançado ao espaço pelo ônibus especial Columbia, em 23 de julho de 1999, o Chandra foi desenvolvido para observar raios-X de regiões altamente energéticas, como os remanescentes de supernovas.



Figura 18: Telescópio Espacial de Raios-X Chandra. Crédito: NASA/CXC/NGST.

Fonte: <http://chandra.harvard.edu/>

O telescópio espacial Hubble ficou mundialmente conhecido pelas belas imagens do Universo, que nos trouxe ao longo de sua viagem. Lançado em 1990, o Hubble foi mantido em órbita até o ano 2010. Além de belas imagens, o telescópio espacial também coletou inúmeros dados e, dentre suas diversas contribuições, ajudou para o estudo de pulsares.



Figura 19: Telescópio Espacial Hubble. Crédito: NASA

Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_Space_Telescope



Figura 20: Conjunto de antenas que, juntas, formam o “Very Large Array Telescope” Crédito: S. Winfrey (U. Michigan), NRAO

Fonte: <http://www.vla.nrao.edu/>

O observatório de ondas de rádio VLA (Very Large Array) é formado por 27 antenas que se localizam no Novo México, EUA. Trabalhando em conjunto, esse gigantesco detector é um importante instrumento na pesquisa sobre os pulsares. Ficou popularmente conhecido no filme *Contato*, dirigido por Robert Zemeckis, adaptado do livro de mesmo nome escrito por Carl Sagan. Assim como no filme, quando o sinal do primeiro pulsar foi detectado, com pulsos igualmente espaçados, os cientistas acreditaram estar recebendo sinais de seres extraterrestres.



Figura 21: Telescópio de Arecibo.

Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Arecibo_Observatory

O maior observatório de radioastronomia é o Arecibo, localizado em Porto Rico e fundado em novembro de 1963, ele possui um refletor esférico com 305 metros de diâmetro. Suspenso por torres e cabos, a 150 metros de altura está uma plataforma que pesa 900 toneladas. Este detector opera em sinais que variam de 50 a 10.000 megahertz. O Arecibo também já estreou no cinema, ao lado de James Bond.

Atualmente, uma nova era inicia-se com a construção de detectores de ondas gravitacionais. Como já vimos antes, estas ondas estão previstas na teoria de Einstein, além de já ter sido obtido evidência de sua existência ao analisarmos o pulsar de Hulse e Taylor. Existem diferentes tipos de detectores de ondas gravitacionais, sendo divididos em detectores interferométricos e de massa ressonante. Ambos detectores constituem, hoje, juntamente com colisionadores de partículas, os experimentos nos quais a mais alta tecnologia está envolvida, em que a precisão de cada componente é importante e levada ao seu limite. Também são alguns dos experimentos de maior investimento financeiro. Albert Abraham Michelson recebeu o prêmio Nobel pela invenção do interferômetro, a base para a detecção de ondas gravitacionais, em 1907. Um interferômetro consiste em um feixe de laser, dividido em dois braços que se reencontram, após refletirem em espelhos, antes de atingirem o detector. O detector irá enxergar um

espectro de interferência que apresentará a soma das ondas provenientes de cada feixe. Se os feixes estiverem em fase, ou seja, quando as cristas das ondas estão alinhadas, deveremos enxergar uma faixa luminosa, caso contrário, quando os feixes estão fora de fase, e uma crista alinha-se ao vale da outra onda, deverá ocorrer a anulação da onda e uma faixa escura aparecerá no detector.

O processo de detecção de ondas gravitacionais faz uso desta propriedade dos interferômetros. Juntamente com os espelhos que refletem o laser, estão presas grandes quantidades de massa. Quando uma onda atravessa o detector, ela deforma a estrutura do espaço, empurrando as massas, de tal forma que o espectro de interferência observado no detector irá se alterar. Esta alteração do conjunto de faixas de interferência caracteriza a passagem de uma onda gravitacional.

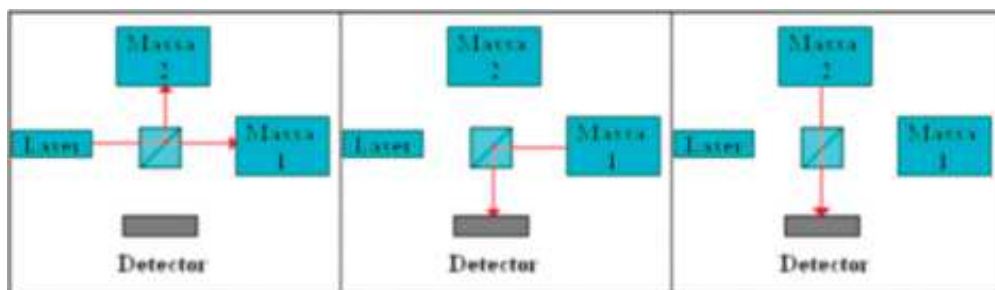


Figura 22: O feixe é dividido no primeiro quadro, refletido por cada massa nos quadros seguintes e analisado no fotodetector.

Fonte: Desenho elaborado pelo autor.

Existem detectores interferométricos na Alemanha, Japão, Austrália, Itália e EUA. O detector de ondas gravitacionais Virgo é uma colaboração franco-italiana, localizado em Cascina, na Itália, apenas alguns poucos quilômetros de Pisa. O detector possui dois braços de 3 km cada, mas o feixe de laser viaja várias vezes dentro de um túnel onde é feito vácuo para criar uma distância efetiva maior, uma vez que a amplitude das oscilações causadas pela passagem de uma onda gravitacional é proporcional a esta distância.



Figura 23: O Observatório europeu de ondas gravitacionais Virgo, em Pisa.

Fonte: <http://www.nikhef.nl/~vdbroeck/research.html>

Os detectores Ligo estão localizados nos Estados Unidos, em Hanford e Livingston. Cada braço dos detectores possui 4 km de extensão. Sistemas avançados de tecnologia moderna são implementados para reduzir o ruído na leitura dos dados. Os aparelhos destes detectores são bastante sensíveis e podem detectar eventos como terremotos ou simples caminhões cruzando uma rua. Para evitar que algum evento qualquer seja confundido com a passagem de uma verdadeira onda gravitacional, além de muita tecnologia, deseja-se que a onda seja detectada ao mesmo tempo por, no mínimo, dois detectores. Além disso, ainda devem ser verificados quaisquer eventos que possam ter ocorrido no mesmo instante em que a onda foi detectada, como, por exemplo, a explosão de uma supernova.



Figura 24 e 25: Os dois locais onde se encontram os interferômetros laser para a detecção de ondas gravitacionais LIGO, nos EUA.

Fonte 1: <http://physicsworld.com/cws/article/news/2008/jan/16/cosmic-explosion-but-no-gravitational-waves>

Fonte 2: <http://www.scientificamerican.com/article/gravitational-wave-ligo/>

O pioneiro no desenvolvimento de um equipamento para a detecção de ondas gravitacionais foi Joseph Weber que projetou e construiu o primeiro detector de ondas gravitacionais em 1965. Entretanto, seu projeto não foi baseado na interferometria de Michelson, mas, sim, no que chamamos de massa ressonante. A ideia é, ao mesmo tempo, genial e simples. Basta construir uma barra imensa que, ao ser atravessada por uma onda gravitacional, terá seus modos de oscilação excitados, como são excitados os modos de vibração de um sino ou de um xilofone, e sua deformação detectada por sensores como os que vemos nas fotos a seguir. Weber acreditou ter detectado ondas gravitacionais, mas, infelizmente, a ideia da detecção foi errônea.



Figura 26: Joseph Weber acreditou ter detectado a passagem de uma onda gravitacional com sua barra ressonante coberta de detectores.

Fonte: <http://www.scientificamerican.com/article/gravitational-wave-ligo/>

Em 1965, o detector de Weber trabalhava em temperatura ambiente, o que não ocorre atualmente. Os detectores mais modernos estão resfriados a temperaturas inferiores a 1 K (inferiores a -272°C). A ideia de barras ressonantes também foi praticamente descartada, dando início a uma nova geração de detectores, de forma esférica. No Brasil, a pesquisa sobre ondas gravitacionais está principalmente relacionada ao detector de esfera ressonante Mario Schenberg. A

antena brasileira para detecção de ondas gravitacionais possui uma esfera de 65cm de diâmetro, feita de uma liga de Cobre e Alumínio, pesa cerca de uma tonelada e deverá ser resfriada a uma temperatura de 20 mK. Duas outras antenas idênticas à brasileira são o mini-GRAIL, na Holanda e SFERA, na Itália.



Figura 27: Foto do detector Mario Schenberg, localizado no estado de São Paulo. Acima da esfera pode-se ver o sistema de massas que diminuem a vibração do sistema.

Fonte: <http://www.das.inpe.br/graviton/portugues.html>

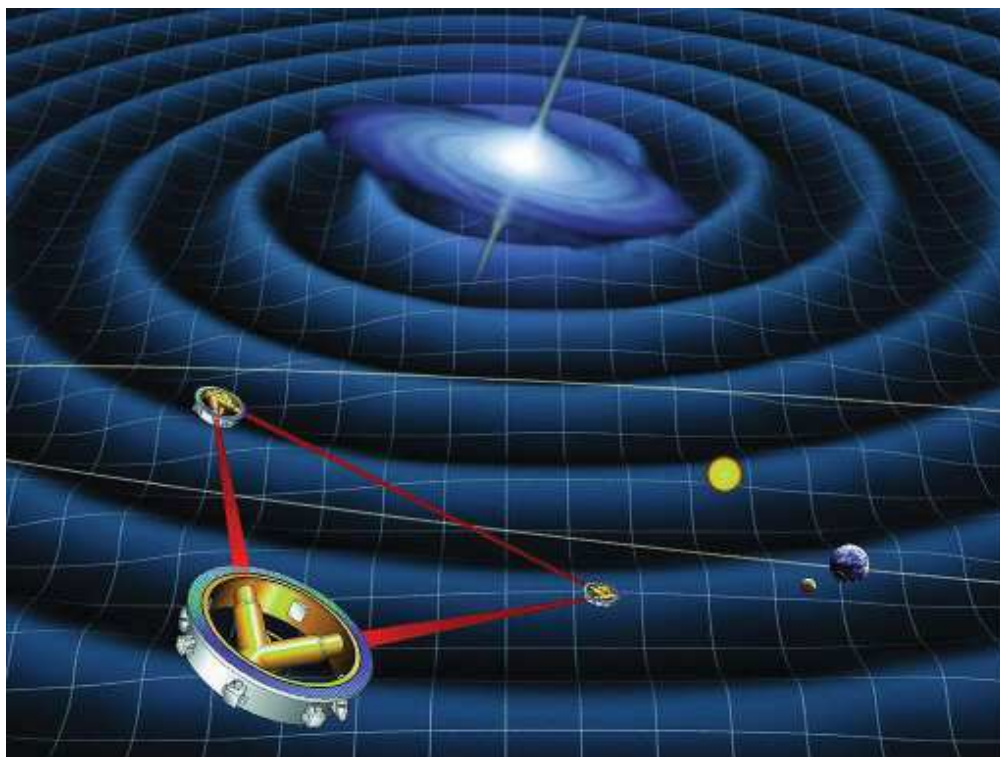


Figura 28: Esquema do detector Schenberg onde a esfera de metal está inserida em uma câmara criogênica e suspensa por um sistema de amortecimento de vibrações.

Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_Interferometer_Space_Antenna

São vários experimentos espalhados pelo mundo inteiro que procuram detectar as ondas gravitacionais. São experimentos no Brasil, Itália, Alemanha, EUA, Japão e Austrália, mas nenhum tão espetacular, ousado e promissor como o projeto do interferômetro espacial LISA, que em inglês quer dizer (Antena Espacial Interferométrica a Laser). Este projeto pretende colocar três naves espaciais, separadas por uma distância fixa de 5.000.000 km, formando um gigantesco interferômetro. Como a distorção causada pela passagem de uma onda

gravitacional é proporcional ao tamanho do percurso do feixe de laser, teoricamente, estas oscilações devem ser mais facilmente visualizadas pelo LISA. Entretanto, é fácil imaginar a dificuldade de realizar um projeto tão ousado.

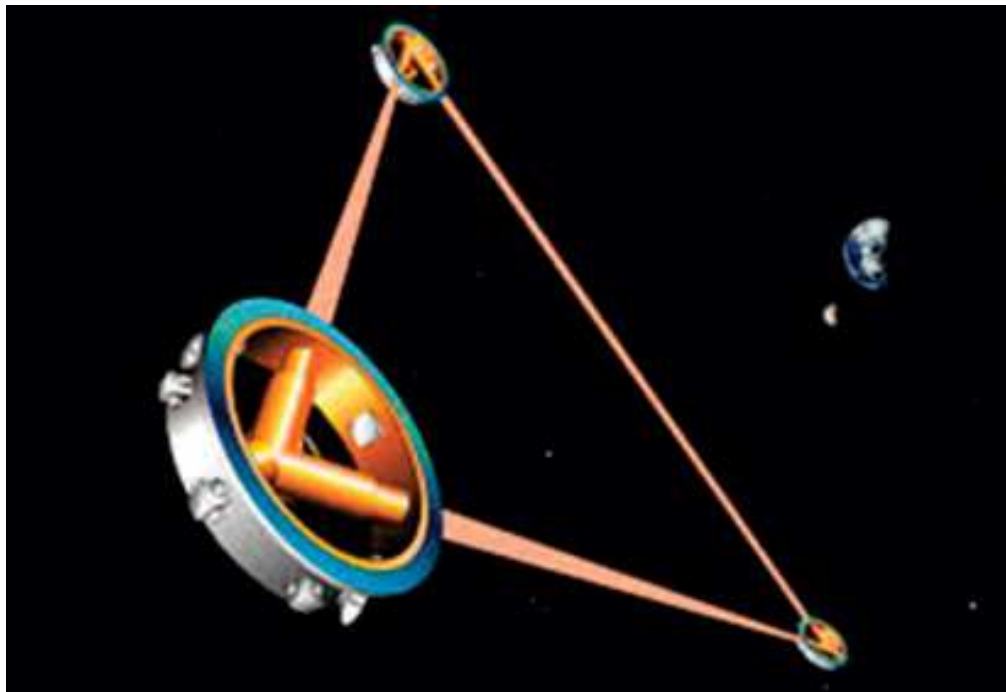


Figura 29: Desenho de como as três espaçonaves devem alinhar-se, formando o maior interferômetro jamais construído, orbitando ao redor da Terra.

Fonte: <http://www.examiner.com/article/lisa-hopes-to-detect-gravitational-waves-for-the-first-time>

Um sistema que deve ser detectado pelo LISA é o sistema binário RX J0806.3+1527, detectado pelo telescópio espacial Chandra, que mostra que a variação de intensidade do espectro de raios-X varia com um período de 321.5 segundos. Isso implica que este sistema é formado por duas anãs brancas que estão orbitando uma em volta da outra, a cada 5 minutos.

Este tempo de órbita significa que estas estrelas estão separadas por apenas 150.000 km (um quinto da distância entre a Terra e a Lua). De acordo com a teoria de Einstein, assim como o pulsar de Hulse e Taylor produz ondas gravitacionais, este tipo de sistema também o produz, liberando grandes quantidades de energia transportadas pelo universo com a mesma velocidade da luz. Conforme o sistema perde energia, ele se aproxima, diminuindo a distância e o tempo orbital. Observações no espectro óptico e de raios-X indicam que o período de rotação deste sistema está diminuindo cerca de 0.0012 segundos a cada ano, o que significa uma redução da órbita de quase um metro por dia. A figura abaixo mostra os dados coletados pelo Chandra, além de uma imagem de como deveríamos ver este sistema muito importante para o estudo das Ondas Gravitacionais.

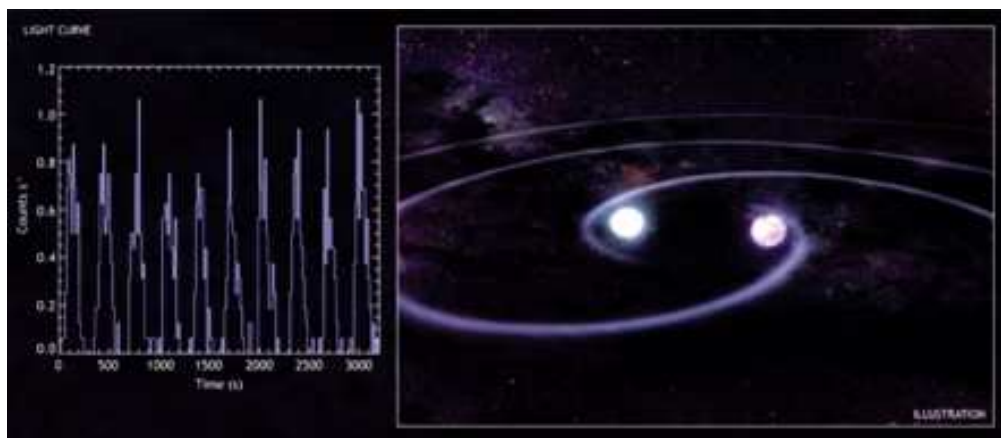


Figura 30: À esquerda, dados obtidos pelo Chandra que indicam a possível emissão de ondas gravitacionais pelo sistema binário, à direita. Crédito: NASA/CXC/GSFC/T. Strohmayer; GSFC/D. Berry

Fonte: <http://chandra.harvard.edu/>



7 – Alguns Fatos



Figura 31: O pulsar Vela em cor falsa. Créditos: NASA/PSU/
G.Pavlov et al

Fonte: <http://chandra.harvard.edu/>

A figura anterior mostra o Pulsar Vela. Jatos de partículas altamente energéticas podem ser vistos juntamente com dois arcos que devem ser formados devido a uma onda de choque, causada pela fuga de partículas. Os jatos de elétrons ou pósitrons, que são as antipartículas dos elétrons, têm sua origem na combinação entre uma grande velocidade de rotação e um intenso campo magnético presentes na estrela. Estes jatos alcançam cerca de 5 trilhões de quilômetros.



Figura 32: Pulsar do Caranguejo. Crédito: NASA/CXC/ASU/J e NASA/HST/ASU/J.

Fonte: <http://chandra.harvard.edu/>

Existem registros, que datam de 1054, feitos pelos chineses sobre uma estrela que apareceu no céu, com brilho incrivelmente intenso, com tamanho próximo ao da Lua e que era visível mesmo durante o dia, num período de três meses. Mais tarde, este evento foi identificado como uma supernova. O remanescente, ou seja, os restos deste evento, foi identificado como o pulsar do Caranguejo. A imagem mostra uma combinação de imagens feitas pelos telescópios Hubble e Chandra. Na imagem pode-se visualizar jatos de partículas aceleradas pelo pulsar, além de anéis que emitem luz no espectro dos raios-X.

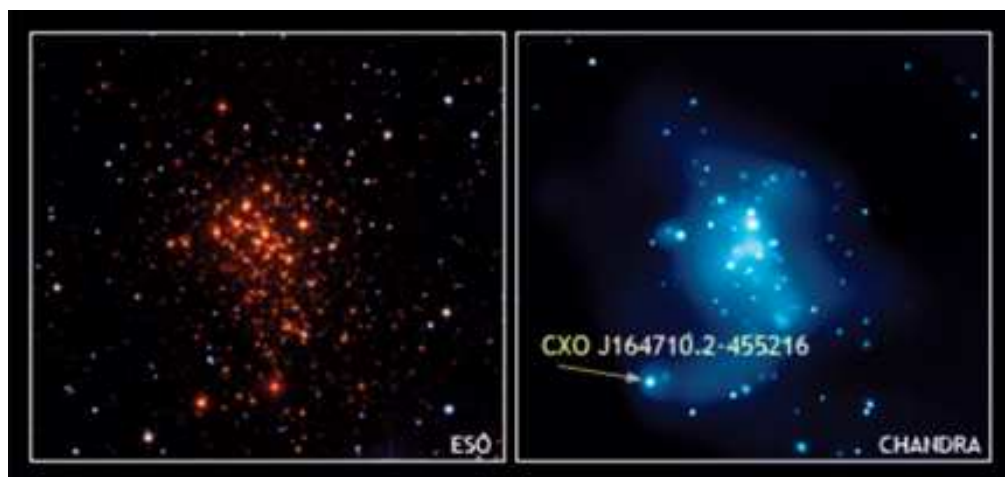


Figura 33: Aglomerado de Westerlund, à esquerda e, em detalhe, um pulsar ali encontrado. Crédito: NASA/CXC/UCLA/M.Muno et al.

Fonte: <http://chandra.harvard.edu/>

A imagem revelada no espectro óptico, à esquerda, do Westerlund 1, mostra um aglomerado denso de jovens estrelas, muitas com massas aproximadamen-

te iguais a 40 massas solares. Alguns astrônomos acreditavam que repetidas colisões entre estes objetos teriam levado à formação de um buraco negro de massa maior que 100 massas solares. Uma pesquisa realizada com o observatório Chandra, conforme mostra a figura à direita, não encontrou evidências deste tipo de buraco negro, o que os pesquisadores do Chandra encontraram foi uma estrela de nêutrons (CXO J164710.2-455216), uma descoberta que pode revolucionar o estudo sobre a formação de buracos negros de massas estelares. Afinal de contas, se uma estrela de nêutrons pode ser formada na explosão de uma supernova cuja estrela original possuía uma massa igual a 40 massas solares, qual deverá ser a massa de uma estrela para que um buraco negro seja formado?

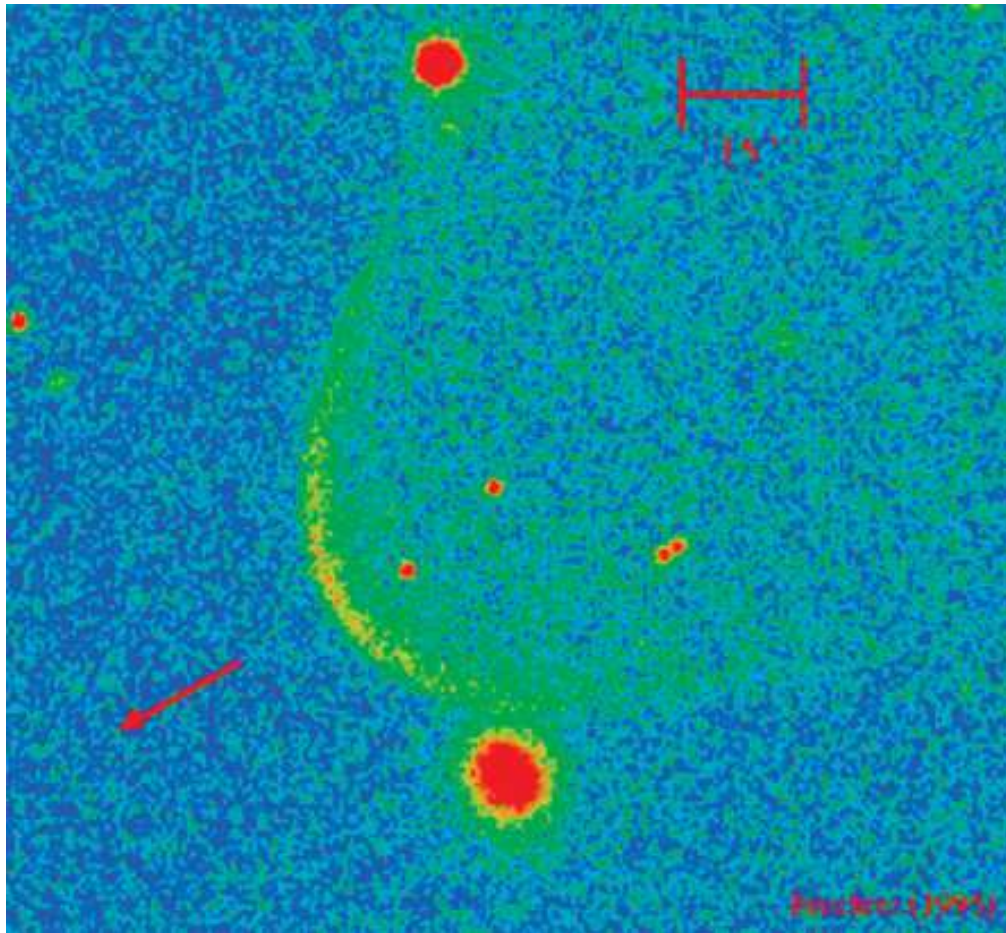
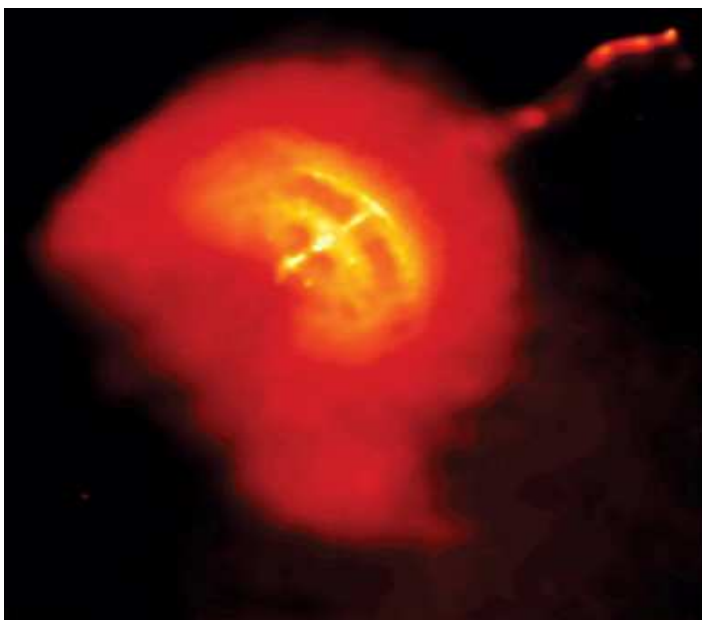


Figura 34: Sistema binário viajando pelo Universo, em cor falsa. Crédito: Andy Fruchter

Fonte: <http://www.jb.man.ac.uk/pulsar/Education/Tutorial/tut/node53.html>

A figura acima mostra um sistema binário formado por um pulsar e uma anã branca. Este sistema se desloca pelo universo com grande velocidade, criando a onda de choque que podemos observar como uma curva que parece unir as estrelas. Apesar de sempre falarmos em estrelas esféricas, é fácil imaginar que objetos com uma física tão complexa não podem ser exatamente esféricos e muito menos

possuir uma estrutura homogênea devido às reações nucleares turbulentas que ocorrem em seu interior. Quando ocorre a explosão de uma supernova, esta característica se manifesta lançando, devido à conservação de momento, as estrelas de nêutrons remanescentes em uma determinada direção, a grandes velocidades. O pulsar mais rápido conhecido é o B1508+55 que se move para fora de nossa galáxia a cerca de 1100 km/s, conforme foi recentemente medido pelo VLBA, um conjunto de rádio telescópios espalhados desde o Havaí até as Ilhas Virgens.



8 – Considerações Finais

Após descrevermos o aspecto evolutivo das estrelas, falamos sobre o esforço que vem se realizando para detectar pulsares, obter novos dados e analisá-los. Lembramos que a existência das estrelas de nêutrons foi prevista em 1932, logo após a descoberta do nêutron. Cálculos mais profundos foram realizados ainda em 1939 e, apenas em 1967, foi detectado o primeiro pulsar, quase que por acaso.

Foi possível ver, ao longo deste pequeno livro, que para estudar estrelas de nêutrons, precisamos ter conhecimento de astrofísica, mecânica quântica, física nuclear, relatividade geral e restrita, eletromagnetismo e muito mais. Quando consideramos também a detecção de sinais destes objetos precisamos ter conhecimento de eletrônica, física de estado sólido, criogenia, computação e muito mais.

Os avanços tecnológicos obtidos na construção de satélites e dos detectores de ondas

gravitacionais, seja os interferométricos ou de massa ressonante, são de grande relevância. E com este avanço, desvendamos cada vez mais mistérios sobre as estrelas de nêutrons e pulsares, sem esquecer, é claro, dos dados sobre anãs brancas e buracos negros, que estão sempre caminhando lado a lado com o desenvolvimento de física de estrelas de nêutrons.

Após a descoberta do nêutron, em 1932, e a hipótese de que estrelas de nêutrons seriam as cinzas remanescentes da vida fabulosa e brilhante de uma estrela que explodiu em uma poderosa supernova, estes objetos só poderiam ser imaginados e descritos como a morte das estrelas. Mas, inúmeras descobertas científicas ao longo destes últimos 70 anos nos mostraram que ainda existe muita vida nesta fase final da evolução estelar. São cerca de 22 milhões de anos em que as estrelas ainda irradiam beleza e, misteriosamente, nos fornecem informações sobre o Universo e a vida aqui, em nosso pequeno planeta Terra.



9 – Sites da Internet

O leitor pode encontrar mais informações, mais técnicas, fotos ou animações em vídeo, utilizando alguns sites da internet. O site do telescópio espacial Chandra (<http://chandra.harvard.edu>) possui informações sobre estrelas de nêutrons, anãs brancas, buracos negros e outros assuntos relacionados à pesquisa desenvolvida neste centro de detecção de raios-X. O leitor ainda pode visitar os sites dos detectores de ondas gravitacionais para obter mais detalhes sobre os projetos em desenvolvimento (<http://www.virgo.it>), ou o site do telescópio espacial Hubble, no qual podem ser encontrados vídeos sobre os seus 15 anos de atividade.

O site do departamento de astronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (<http://astro.if.ufrgs.br>) possui um hipertexto que descreve detalhadamente o processo de evolução estelar.



10 – Conceitos Úteis

Na física, como na matemática, existem números muito grandes e também muito pequenos que exigiriam diversas linhas apenas para escrevê-los, por isso, uma notação simplificada foi desenvolvida, como mostram as igualdades abaixo:

$0,1 = 10^{-1}$	$0,01 = 10^{-2}$
$1,0 = 10^0$	$10 = 10^1$
$100 = 10^2$	

Por exemplo, uma estrela de nêutrons possui aproximadamente

[illegible]

Algumas destas unidades também receberam nomes especiais como:

10^6 = mega	10^3 =quilo
10^{-3} = mili	10^{-6} = micro
10^{-9} = nano	

Quando falamos das dimensões de um núcleo, usamos frequentemente as medidas do tamanho em fermis (10^{-15}).

O que é o espectro eletromagnético? Podemos

enxergar luz azul, amarela, vermelha... A luz pode ser facilmente compreendida como uma onda, na qual a mudança da cor desta luz está relacionada à sua frequência ou comprimento de onda. Mas, também existe luz que não enxergamos, isto simplesmente porque nossos olhos não têm capacidade de decifrar luzes com comprimentos de onda muito grandes ou muito pequenos, como, por exemplo, a região do infravermelho. Aparelhos especiais, como vemos na TV, pelos quais câmeras especiais fazem imagens noturnas, traduzem as informações colhidas para que nossos olhos possam enxergá-las.

Desta mesma forma, estrelas que não emitem radiação na região do espectro visível são captadas por telescópios especiais como o Chandra, pelo qual as informações captadas são traduzidas para nossa compreensão. Veja, abaixo, as diferentes regiões do espectro eletromagnético:

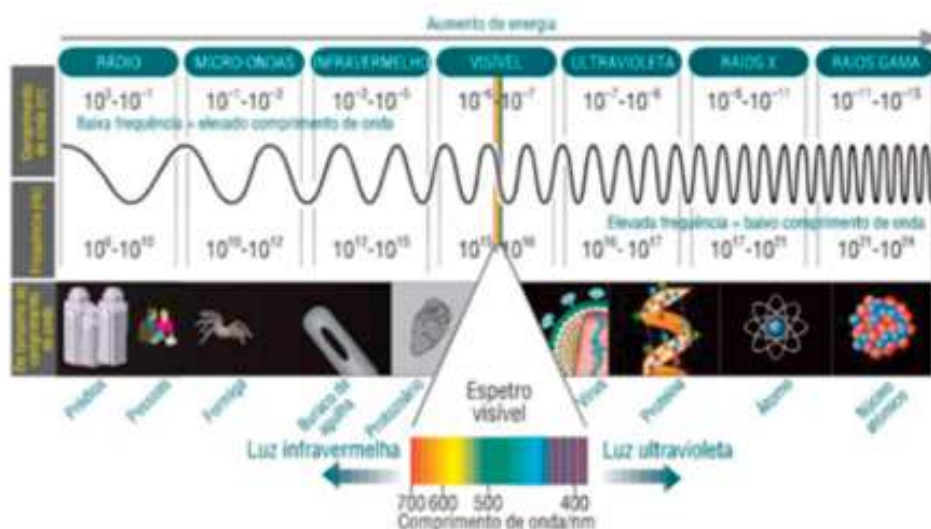


Figura 35: Espectro eletromagnético

Fonte: <http://andre-godinho-cfq-8a.blogspot.com.br/2013/06/espectro-eletromagnetico.html>



O autor doutorou-se em Física pela UFRGS onde trabalhou com Estrelas de Nêutrons e Ondas Gravitacionais. Aprofundou os estudos durante dois estágios pós-doutorais, um no Observatório de Nice, na França e outro no INPE, em São José dos Campos. Desde 2006 é professor da Unipampa, em Bagé.

