

## Capítulo 7

# ESTÁGIOS FINAIS DE ESTRELAS

Flavio D'Amico\*

---

\* e-mail: [flavio.damico@inpe.br](mailto:flavio.damico@inpe.br)

---

## ESTÁGIOS FINAIS DE ESTRELAS

---

<b>7.1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>7.2 OBJETOS COMPACTOS.....</b>	<b>3</b>
<b>7.3 MATÉRIA EXTREMAMENTE Densa .....</b>	<b>4</b>
<b>7.4 ANãs BRANCAS .....</b>	<b>8</b>
7.4.1 Variáveis Cataclísmicas.....	9
<b>7.5 ESTRELAS DE NêUTRONS .....</b>	<b>11</b>
7.5.1 Pulsares.....	12
7.5.2 Binárias de raios-X .....	14
<b>7.6 BURACOS NEGROS.....</b>	<b>17</b>
7.6.1 Histórico .....	18
7.6.2 Detalhes Observacionais.....	19
<b>7.7 CONCLUSõES.....</b>	<b>19</b>
<b>7.8 BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>21</b>

## 7.1. INTRODUÇÃO

Eu tenho que começar o meu Capítulo agradecendo ao Hugo, autor do Capítulo sobre estrelas. Nele, o Hugo deixou a dica de como me dirigir à vocês para apresentar os objetos compactos: objetos de 3ª idade!!! Deve ser a minha pouca experiência (comparada com a do Hugo) que não me permitiu pensar em um nome tão sugestivo.

Minha tarefa aqui é a de apresentar para vocês esses objetos que são frutos da evolução estelar. Esses objetos estelares de 3ª idade são os seguintes: anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros. No Capítulo sobre estrelas o Hugo já mencionou, inclusive, como estas 3 classes de estrelas se formam.

Eu creio que uma abordagem mais apropriada para os nossos objetivos aqui é a *observacional*. Portanto, ao invés de me preocupar com aspectos teóricos mais pormenorizados sobre esses objetos, eu vou procurar enfatizar o conhecimento que nós Astrofísicos adquirimos desses objetos a partir da *observação* dos mesmos. Mas é claro que uma introdução um pouco mais formal se faz necessária.

## 7.2. OBJETOS COMPACTOS

As estrelas de 3ª idade são conhecidas pelo nome de *objetos compactos*. Uma anã branca, por exemplo, tem o seu raio da ordem do raio da Terra, mas uma massa de  $\sim 1,4 M_{\odot}$ . Ou seja: uma anã branca típica é um objeto estelar com uma massa cerca de 40% maior do que a massa solar *compactada* em um volume 1 milhão de vezes menor do que o Sol!!! Como isso é possível?? Pense, agora, em uma estrela de nêutrons, que tem uma massa (típica) da ordem de  $1,4 M_{\odot}$  e um raio de apenas 15 km!! Como é possível que um objeto estelar assim exista?? Anãs brancas e estrelas de nêutrons, assim, caracterizam-se por ter uma densidade média elevada e são chamados de *objetos compactos*, assim como os buracos negros.

**Exercício 1** - Qual a densidade média de uma anã branca?

(estejam prevenidos que astrofísicos gostam de trabalhar usando unidades no sistema cgs!)

$$\rho = M/V = 1,4 \times 2 \times 10^{33} / (10^9)^3 \sim 3 \times 10^6 \text{ g cm}^{-3}$$

**Exercício 2** - Qual a densidade média de uma estrela de nêutrons?

$$\rho = M/V = 1,4 \times 2 \times 10^{33} / (15 \times 10^5)^3 \sim 10^{15} \text{ g cm}^{-3}$$

Compare as densidades calculadas acima com a densidade da água, por exemplo.

**Exercício 3** - Suponha que você retire, da superfície de uma anã branca, uma colherzinha com  $1 \text{ cm}^3$  de matéria. Qual a massa que você acabou de retirar?

Já que sabemos a densidade média, fica fácil:

$$M = \rho V \sim 10^7 \cdot 1 \sim 10^7 \text{ g} \sim 10 \text{ toneladas!}$$

Vamos passar essa resposta para algo mais mensurável: um elefante africano adulto pesa cerca de 6 toneladas. Assim essa colherzinha de material pesa tanto quanto 1,7 elefantes!!

**Exercício 4** - Qual o valor da aceleração da gravidade  $g$  em uma estrela de nêutrons?

Vejamos (dessa vez eu vou usar o SI para as unidades):

$$g = G \cdot M / R^2 = 6,7 \times 10^{-11} \times 1,4 \times 2,0 \times 10^{30} / (15 \times 10^3)^2 \sim 10^{12} \text{ m s}^{-2}$$

### 7.3. MATÉRIA EXTREMAMENTE DENSA

Vamos recordar, em três ou quatro frases, o que o Hugo nos mostrou sobre as estrelas, apontando para o que me interessa em descrever aqui. As estrelas queimam combustível nuclear, principalmente em sua região central, para gerar uma pressão de radiação (de dentro para fora) de maneira a contrabalançar o colapso gravitacional (de fora para dentro). Na maior parte de suas vidas as estrelas transformam Hidrogênio em Hélio. Quando esta fase acaba, as estrelas usam o “combustível” resultante para um novo ciclo que forneça a tão necessária pressão de radiação, que evita a morte da estrela (vou falar mais adiante sobre o termo “morte” que eu acabei de usar). Assim no novo ciclo (como o Hugo nos mostrou) a estrela transforma Hélio em Carbono. E assim sucessivamente: Carbono em Oxigênio, Oxigênio em Silício, etc.. Enquanto a queima de Hidrogênio e Hélio sustenta a estrela por grande parte de sua vida (como o Hugo nos mostrou), as queimas sucessivas são “rápidas”: a queima de Carbono na região central demora alguns mil anos; a queima de Oxigênio demora apenas **1 ano**; a queima de Silício **apenas uma semana!**

Para que a estrela comece a queimar Hélio, a temperatura interna tem que aumentar: momentaneamente a pressão gravitacional vence a batalha, a estrela diminui de tamanho e a temperatura interna aumenta iniciando a queima de Hélio. Identicamente em relação aos outros ciclos: sempre a gravidade vence a batalha para aumentar a temperatura interna para que um novo ciclo de queima comece.

De acordo com o que eu descrevi acima surge, pelo menos, uma questão imediata: e se o aumento de temperatura não for suficiente para iniciar a queima do combustível armazenado? Se isso acontecer, como vimos, a estrela não é capaz de gerar pressão de radiação para conter o colapso gravitacional. Se ela não encontrar um outro mecanismo capaz de conter o colapso, a estrela morrerá. O termo “morte”, que eu já usei duas vezes, é errôneo. Por isso eu agradei ao Hugo no começo por me emprestar a frase “estrelas de 3ª idade”. Nós veremos mais adiante que estes objetos compactos (estas nossas estrelas de 3ª idade) ainda produzem energia. Há, ainda, um detalhe muito importante (que o Hugo já chamou atenção): a fusão só é um processo exoenergético até núcleos mais leves do que o do Ferro. Ou seja, se o núcleo estelar for formado

exclusivamente por Ferro, não é mais possível para a estrela ganhar energia a partir da fusão nuclear.

Corrigindo, então, a minha afirmação acima: as estrelas que não atingem o limiar de temperatura necessário para iniciar um novo ciclo de queima nuclear poderão colapsar se não acharem um outro mecanismo físico que forneça uma pressão qualquer capaz de suportar o colapso gravitacional.

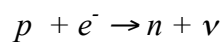
Exatamente neste ponto entra o assunto desta seção: a matéria extremamente densa. A distância entre os elétrons e o núcleo de um átomo é muito grande. Uma boa imagem (para aqueles que conhecem) é o estádio do Maracanã na Cidade Maravilhosa: se, no Maracanã o núcleo do átomo estiver na marca do meio do campo, as órbitas do elétron estarão nas arquibancadas. Para aqueles que não conhecem o Maracanã, eu preciso ser mais específico: os diâmetros dos átomos, incluindo os *orbitais eletrônicos*, estão compreendidos entre 1 e 5 Å (1 Å equivale a  $10^{-10}$  m) enquanto que o diâmetro dos núcleos dos átomos é da ordem de  $10^{-4}$  Å. Em outras palavras, um átomo como um todo é, grosso modo, linearmente cerca de 10000 vezes maior do que um núcleo atômico. Fica claro que existe um grande vazio entre as órbitas eletrônicas e o núcleo. E se esse espaço vazio fosse diminuído, obrigando tanto os elétrons a se aproximarem mais uns dos outros como também os átomos? Bem, não é difícil aceitar que a densidade média da matéria aumentaria, como é o caso dos objetos compactos.

Pois é exatamente isso que acontece em uma anã branca. O colapso gravitacional é freado graças a pressão fornecida pelos elétrons. Como as distâncias médias entre os elétrons diminuem muito e como estes se repelem mutuamente, os elétrons adquirem velocidades altíssimas (relativísticas) gerando uma *pressão de degenerescência*: os elétrons são ditos *degenerados*. É esta pressão de degenerescência que dá origem (que sustenta contra o colapso gravitacional) a uma anã branca.

Percebam que, quase de maneira intuitiva (usando, também conhecimentos rudimentares de mecânica quântica), nós chegamos à conclusão de que uma classe de objeto astrofísico “sustentado” pela pressão de degenerescência deve existir. A observação das anãs brancas, assim, é um dos trunfos da teoria de evolução estelar, um dos pilares da astrofísica.

E o que acontece quando a pressão aumenta mais ainda? O que acontece com a estrutura nuclear? É neste momento que eu aproveito para chamar a atenção de vocês de uma coisa que se chama *interdisciplinaridade*. Nós sabemos, da física de partículas, alguns fatos interessantes.

Sabemos que quando a densidade aumenta muito, os núcleos desaparecem, ou seja: a energia de ligação dos núcleos diminui com o aumento da densidade. Assim, sob circunstâncias extremas de densidade, temos que prótons ( $p$ ), nêutrons ( $n$ ) e elétrons ( $e^-$ ) estão livres. Sabe-se também que, com o aumento da densidade, há um aumento significativo na seção de choque da reação



( $\nu$  é um neutrino). Ou seja, a reação acima é eficientíssima em um regime de altas densidades. Ou seja, quando a densidade é muito grande, nós temos um verdadeiro *mar de nêutrons*.

Estes são os argumentos teóricos que nos permitem imaginar a existência de *estrelas de nêutrons*. Neste tipo de objeto o colapso gravitacional é inibido devido à *pressão de degenerescência dos nêutrons*, de maneira semelhante ao caso das anãs brancas. Esse mar de nêutrons forma, basicamente, uma estrutura cristalina extremamente eficiente tanto para conter o colapso gravitacional quanto equipartir eficientemente a energia para toda a estrela, por exemplo, tornando a temperatura uniforme em toda a estrela rapidamente.

Algum leitor (ou leitora!) mais aguçado (a) e atento (a) já deve estar fazendo o raciocínio descrito a seguir. Em alguns casos, a pressão de degenerescência dos elétrons é capaz de conter o colapso gravitacional. Em outros casos, a pressão de degenerescência dos nêutrons é capaz de fazê-lo. E quando nem esta nem aquela forem suficientes para conter o colapso?

Neste caso, obviamente, o colapso gravitacional continua, indefinidamente. Nós temos a formação de um *buraco negro*, um objeto celeste no qual a densidade é infinita, uma das criaturas mais maravilhosas, sem dúvida, do zoológico cósmico.

Embora, obviamente, o processo de formação de anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros seja entendido hoje em dia com um detalhamento bem maior do que o

simples descrito acima, espero ter conseguido passar, quase intuitivamente, como se formam esses objetos. Vou desprezar aqui uma descrição mais rigorosa de quais estrelas transformar-se-ão, no final de suas vidas, em anãs brancas, ou estrelas de nêutrons ou buracos negros. De maneira geral, seguindo as últimas informações disponíveis na literatura, levando-se em consideração vários mecanismos complexos de perda de massa, pode-se dizer que estrelas acima de  $8 M_{\odot}$  terminarão suas vidas como estrelas de nêutrons **ou** buracos negros, enquanto que estrelas com massa inferior a  $5 M_{\odot}$  terminarão suas vidas como anãs brancas (Glendenning 2000).



#### 7.4. ANÃS BRANCAS

Nós já vimos alguns detalhes de como as anãs brancas se formam, tanto aqui como no capítulo do Hugo. Eu só quero acrescentar mais alguns detalhes históricos ao que já foi discutido.

Desde 1915 a massa da estrela companheira de Sirius, Sirius B, já era conhecida como sendo da ordem de  $0,75 - 0,95 M_{\odot}$  (esta é, aliás, a anã branca mais bem estudada até hoje). Ficava claro que, com uma massa dessa ordem e com um raio da ordem de  $10^9$  cm, esta estrela não podia mais iniciar um novo ciclo de queima nuclear e que seu destino seria irradiar energia lentamente, esfriando sua temperatura (ver o capítulo do Hugo).

Em 1914 Walter Sydney Adams (nascido na Síria, mas radicado nos EUA, 1876-1956: Adams1915) mediu o desvio gravitacional (veja o capítulo do Francisco Jablonski) de várias linhas de Sirius B e pode determinar seu raio. Como a massa da estrela já era conhecida, ficou claro a existência de estrelas com densidades da ordem de  $10^6 \text{ g cm}^{-3}$ . Era, então, necessário explicar-se como uma estrela com uma densidade tão alta como essa podia existir. A resposta veio em 1926, quando Sir Ralph Fowler (inglês, 1899-1944: Fowler 1926), usando a recém proposta estatística de Fermi-Dirac, mostrou que a pressão de degenerescência dos elétrons poderia conter o colapso gravitacional nas anãs brancas.

Um outro feito, este fantástico e histórico para a Astrofísica, aconteceu em 1930, quando Subrahmanyan Chandrasekhar (indiano, 1910-1995: Chandrasekhar 1931), usando agora já a teoria especial da relatividade, mostrou que uma anã branca tem uma máxima massa possível. Esta massa é da ordem de  $1,4 M_{\odot}$ . Em homenagem ao seu descobridor, este limite máximo de massa em uma anã branca é conhecido como *Massa de Chandrasekhar*. Também neste trabalho, Chandrasekhar apontou as anãs brancas como o estágio final de evolução de estrelas de pequena massa.

Vale a pena transcrever aqui as palavras de Chandrasekhar, que foi laureado com o prêmio Nobel de Física em 1983 (a tradução é minha, a partir do texto em inglês de Shapiro e Teukolsky de 1983): "A história de vida de uma estrela de pequena massa

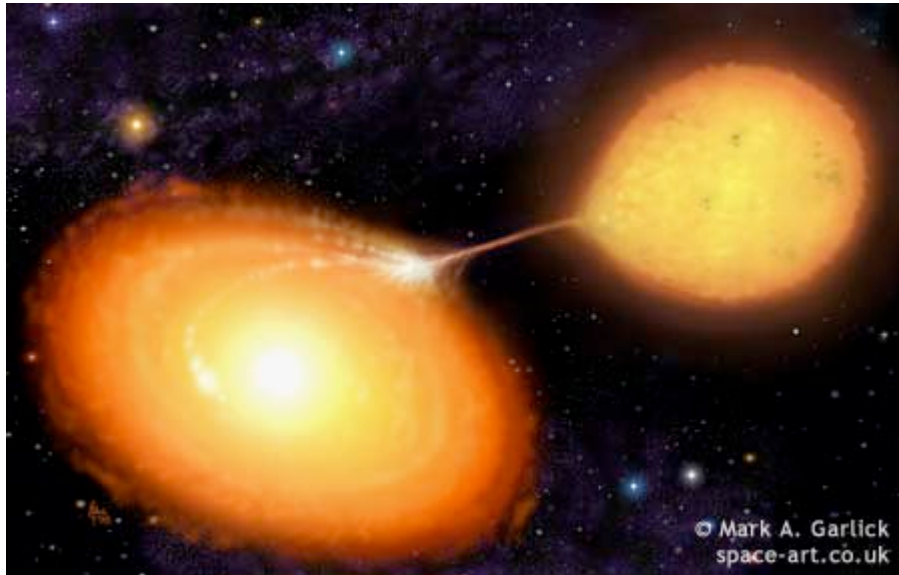
precisa ser essencialmente diferente da de uma estrela de grande massa. Para uma estrela de pequena massa o estágio de anã branca é um passo natural antes do caminho até a completa extinção. Uma estrela de grande massa não pode passar pelo estágio de anã branca, o que nos deixa margem para especularmos sobre outras possibilidades de evolução".

#### 7.4.1. Variáveis Cataclísmicas

Seguindo a minha idéia de ressaltar os aspectos observacionais dos objetos compactos, descrevo rapidamente as variáveis cataclísmicas.

Quando presentes em sistemas binários, algumas anãs brancas podem receber matéria de uma estrela companheira. Esta estrela companheira, geralmente, é uma estrela da sequência principal. Estes sistemas binários, com a presença de uma anã branca, são chamados de variáveis cataclísmicas (veja Figura 1). Estes sistemas são de **extrema** importância para a astrofísica, e uma descrição pormenorizada deles está totalmente fora do objetivo deste capítulo. No entanto, eu quero ressaltar a importância desses objetos por uma razão específica. Estes objetos são ótimos para que se estudem os chamados discos de acréscimo, ou, em um neologismo corriqueiramente usado, **discos de acreção**. Discos de acreção estão presentes em vários outros objetos astrofísicos e são as variáveis cataclísmicas que nos permitem saber e estudar a física desses discos detalhadamente. Não fosse a existência das variáveis cataclísmicas, provavelmente nós não poderíamos saber tantos detalhes sobre os discos.

Dependendo da intensidade do campo magnético da anã branca, as variáveis cataclísmicas são classificadas em várias classes, cada uma delas importante para se estudar o aspecto dos discos e também da transferência de matéria em sistemas binários.



**FIGURA 1 - UMA REPRESENTAÇÃO ARTÍSTICA DE UMA VARIÁVEL CATACLÍSMICA. (Reprodução usada com a permissão do autor)**

## **7.5. ESTRELAS DE NÊUTRONS**

De todos os objetos compactos, as estrelas de nêutrons são a minha classe favorita por razões óbvias: grande parte do meu trabalho atualmente é dedicado a estudar sistemas binários contendo estrelas de nêutrons. Provavelmente, então a minha descrição aqui será mais rica do que no caso das anãs brancas, o que me obriga a pedir desculpas por este tratamento diferenciado.

A ideia de que estrelas de nêutrons existiam é relativamente antiga. Em um artigo em 1934, Walter Baade (nascido na Alemanha, mas radicado nos EUA, 1893-1960) e Fritz Zwicky (nascido na Suíça e também radicado nos EUA, 1898-1974) propuseram a existência das estrelas de nêutrons (Baade e Zwicky, 1934), objetos de maior densidade do que as anãs brancas. Neste artigo os autores também, podem dizer: *profetizaram* (já que nenhuma evidência existia na época) que estrelas de nêutrons nascem em explosões de supernovas (veja o capítulo do Hugo sobre estrelas). Em 1939 Robert Oppenheimer (americano, 1904-1967) e George Michael Volkoff (russo, 1914-2000) publicaram um artigo com os primeiros cálculos estruturais sobre uma estrela de neutrons (Oppenheimer e Volkoff, 1934). Outros trabalhos seguiram-se sobre o tema, mas as estrelas de nêutrons foram “deixadas de lado” pelo simples fato de que , com a

tecnologia disponível na época, elas não podiam ser observadas. Na década de 60, entretanto, duas descobertas fantásticas reavivaram o interesse em estudá-las: a descoberta da primeira fonte não solar de raios-X, Scorpius X-1 (ou Sco X-1) pelo italiano (laureado com o prêmio nobel de física de 2002) Riccardo Giacconi (nascido em 1931: Giacconi et al. 1962) e a, não-menos fascinante, descoberta do primeiro pulsar rádio por, na época uma jovem doutoranda, Jocelyn Bell (inglesa, nascida em 1943: Hewish et al. 1968). Ainda em 1968 duas descobertas também fantásticas: a do pulsar de Vela (Large, Vaughan e Mills 1968) e a do pulsar do Caranguejo (*Crab*, em inglês: Staelin e Reifenstein, 1968), ambos localizados em restos de supernovas, conforme a predição de Baade e Zwicky. Com a descoberta de Sco X-1 e dos pulsares de Vela e do *Crab* as estrelas de nêutrons entraram definitivamente no vocabulário corriqueiro da Astrofísica.

Para finalizar esta introdução eu quero chamar atenção para um detalhe observacional importantíssimo sobre as estrelas de nêutrons: elas têm uma máxima massa possível, ou seja, não é possível, para uma estrela de nêutrons, ter massa maior do que, aproximadamente,  $3 M_{\odot}$ . Como esse limite superior de massa é derivado (e se ele é de 3 ou 2,5 ou 2,2  $M_{\odot}$ ) é uma questão que está fora dos objetivos deste Capítulo.

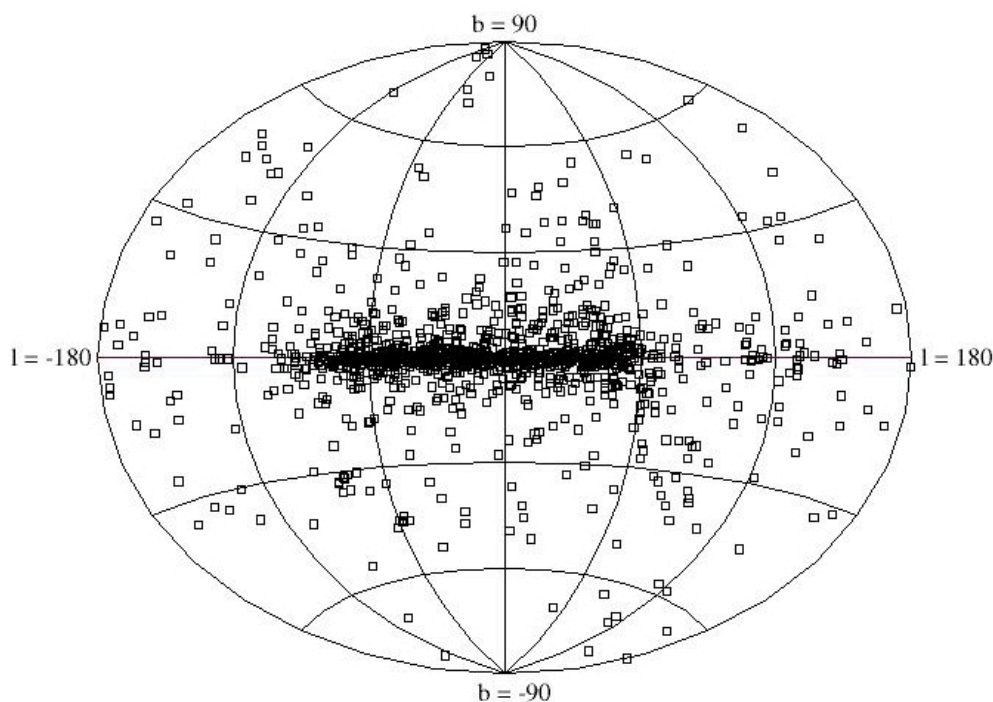
### 7.5.1. Pulsares

É interessante notar como o desenvolvimento teórico do nosso conhecimento sobre as estrelas de nêutrons está povoado de trabalhos *proféticos*! Foi assim também com o trabalho de Franco Pacini (italiano, nascido em 1939) em 1967 (Pacini, 1967). Pacini previu que uma estrela de nêutrons em rotação, cujo eixo do campo magnético (assumido dipolar) não coincida com o eixo de rotação, deve emitir uma intensa radiação pulsada, na faixa de rádio.

Quase imediatamente após essa previsão, como vimos, Jocelyn Bell descobriu o primeiro pulsar rádio. Hoje temos mais de 1200 pulsares conhecidos (ver Figura 2).

Pulsares rádio são extremamente importantes para a astronomia. O estudo detalhado desses sistemas nos fornece as melhores determinações para as massas das estrelas de nêutrons (ver Figura 4), um parâmetro importantíssimo para a física de partículas, já que, uma vez que o raio seja conhecido (admitamos que o raio de uma estrela de

nêutrons é da ordem de 15 km) com a determinação da massa nós podemos conhecer a densidade média das estrelas de nêutrons e, daí, elaborarmos modelos para o comportamento da matéria a altas densidades.



**FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO (EM COORDENADAS GALÁCTICAS) DOS 1300 PULSARES CONHECIDOS (ATÉ FEVEREIRO DE 2004). DADOS OBTIDOS DE <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>**

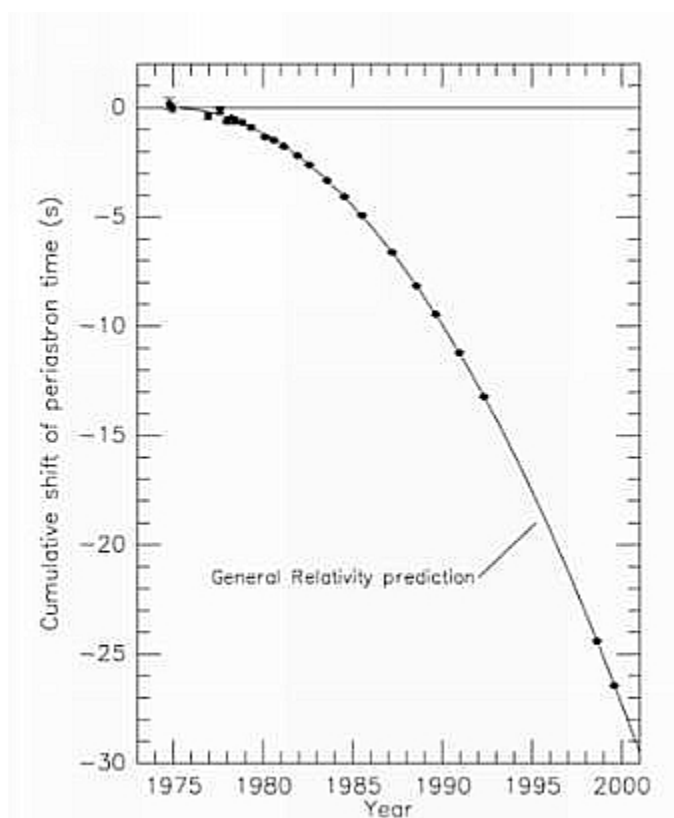
Os pulsares rádio também forneceram a melhor evidência (indireta) que dispomos até hoje da existência de ondas gravitacionais, previstas pela teoria geral da relatividade de Einstein. Estudando o sistema PSR B1913+16, Russel Hulse (americano, nascido em 1950) e Joseph Taylor (americano, nascido em 1941) puderam verificar que o tempo de chegada do pulso de um dos dois pulsares constituintes do sistema chegava sempre cada vez mais adiantado em relação ao observado anteriormente: em outras palavras, a diferença temporal entre a chegada de dois pulsos consecutivos é cada vez menor (Figura 3).

Esta diminuição temporal é totalmente compatível com um modelo que prevê que a emissão de ondas gravitacionais. Por este trabalho, Hulse e Taylor foram laureados com o Nobel de física em 1993.

### 7.5.2. Binárias de raios-X

Enquanto que nos pulsares a fonte de energia é a energia de rotação da estrela de nêutrons, nos pulsares de raios-X a fonte de energia é gravitacional.

Nos pulsares de raios-X uma estrela de nêutrons suga matéria de uma estrela companheira normal (geralmente uma estrela da seqüência principal), se esta estrela companheira está em certas etapas de seu estágio evolutivo. O mecanismo de transferência de matéria pode se dar através de ventos



**FIGURA 3 - DIFERENÇA OBSERVADA ENTRE TEMPOS CONSECUTIVOS DE CHEGADA DOS PULSOS EM PSR B1913+16. A CURVA CHEIA MOSTRA O MODELO QUE EXPLICA ESTAS DIFERENÇAS COM AJUDA DA TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL.**

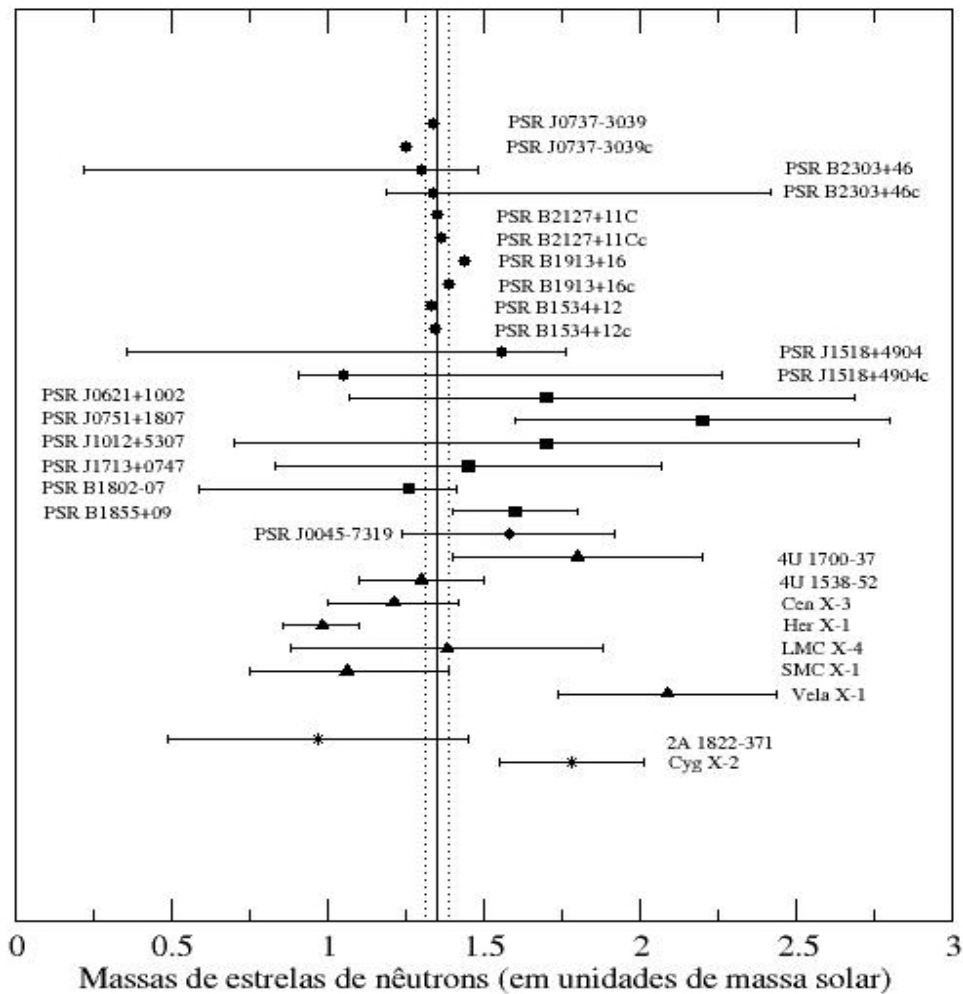
**FONTE: WEISBERG E TAYLOR, 2003.**

estrelares ou por uma distorção esférica da estrela companheira (uma análise detalhada desses dois processos está fora dos objetivos deste texto). Por conservação de momento angular, em algumas situações, um *disco de acréscimo* é formado (analogamente ao caso das anãs brancas). Discos de acréscimo são uma excelente maneira de se emitir em

raios-X, faixa onde as binárias de raios-X são preferencialmente observadas. Reside exatamente aí a importância em se estudar esses sistemas, que são responsáveis pela emissão de parte dos fenômenos mais energéticos observados. Como se dá a produção de raios-X? Qual o espectro característico? Qual as regiões emissoras? Estas são algumas das (várias) linhas de pesquisa nesta classe de objetos .

Em algumas binárias de raios-X também é possível se fazerem determinação de massas. Embora com menos precisão do que no caso dos pulsares, estas determinações tem sua importância. Por exemplo (ver Figura 4) os sistemas binários denominados *Vela X-1* e *Cyg X-2* fornecem as únicas evidências experimentais de massas de estrelas de nêutrons que são maiores do que  $1,5 M_{\odot}$ .

Vem também das binárias de raios-X as únicas determinações diretas de campos magnéticos em estrelas de nêutrons. Os valores obtidos fornecem campos da ordem de  $10^{12}$  G, absolutamente concordantes com modelos de evolução estelar e com o que é estimado no caso dos pulsares rádio.



**FIGURA 4. MASSAS DE ESTRELAS DE NÊUTRONS. OS CÍRCULOS SÃO SISTEMAS BINÁRIOS COM DUAS ESTRELAS DE NÊUTRONS; OS QUADRADOS SÃO SISTEMAS COM UMA ESTRELA DE NÊUTRONS E COM UMA ANÃ BRANCA; O LOSANGO É UM SISTEMA COM UMA ESTRELA DE NÊUTRONS E UMA ESTRELA DA SEQÜÊNCIA PRINCIPAL; TRIÂNGULOS E ASTERISCOS SÃO BINÁRIAS DE RAIOS-X. DADOS EXTRAÍDOS DE: THORSETT E CHAKRABARTY 1999, STAIRS ET AL. 2002, LYNE ET AL. 2004, SPLAVER ET AL. 2002, NAGASE 1989, ASH ET AL. 1999, QUAINIRELL ET AL. 2003, JONKER, VAN DER KLIS E GROOT 2003, NICE, SPLAVER E STAIRS 2004, OROSZ E KUULKERS 1999 E DE [HTTP://WWW.JOHNSTONARCHIVE.NET/RELATIVITY/BINPULSETABLE.HTML](http://www.johnstonarchive.net/relativity/binpulsetable.html)**



## 7.6. BURACOS NEGROS

Os buracos negros são, com certeza, os objetos astrofísicos que mais fascinam o público leigo em Astrofísica. São objetos que cativam a curiosidade e a imaginação de todos que, um dia, ouviram falar de uma *estrela* tão densa que não deixa nem a luz escapar do seu potente campo gravitacional.

Como já vimos nas nossas seções anteriores sobre anãs brancas e estrelas de nêutrons, ambas têm uma máxima massa possível. O que acontece, então, com um objeto compacto que ultrapassa a maior massa permitida para uma estrela de nêutrons? A resposta, de acordo com a Teoria Geral da Relatividade, é de que nada impede o colapso. Com o procedimento gradual do colapso, o campo gravitacional perto do objeto torna-se cada vez mais intenso. Eventualmente, nada mais pode escapar do campo gravitacional do objeto para o mundo externo, nem mesmo a luz. Acaba de nascer um buraco negro. Toda a matéria está colapsada para o que chamamos de *singularidade*. Para podermos especular sobre física na região da singularidade, nós precisamos de uma teoria além da relatividade Geral. Esta teoria é a teoria quântica da gravitação que, efetivamente, não existe.

**Exercício 5** - Expresse, dimensionalmente, uma fórmula para a densidade usando  $c$ ,  $G$  e  $h$ . Qual o valor, em ordem de grandeza, da densidade obtida?

Eu não vou resolver detalhadamente aqui, mas a fórmula seria algo como:

$$\rho \propto c^5 G^{-2} h^{-1} \sim 10^{93} \text{ g cm}^{-3},$$

ou seja, uma teoria quântica da gravitação tem que responder neste regime de densidades!!!!

Um buraco negro é definido simplesmente como uma região do espaço-tempo que não pode se comunicar com o universo externo. A região que separa o buraco negro do universo exterior (a última região da qual podemos extrair alguma informação) é chamada de *horizonte de eventos*.

### 7.6.1. Histórico

Ainda em 1795, Pierre-Simon Laplace (francês, 1749-1827: Laplace 1795) notou que, como consequência da teoria corpuscular da luz de Newton e também da gravitação Newtoniana, a luz não poderia escapar do campo gravitacional de um objeto com massa grande e com raio pequeno. Apesar desta idéia trazer a *lembrança* da existência de um buraco negro, ela foi esquecida, mesmo após a formulação da teoria geral da relatividade!

Em Dezembro de 1915, somente um mês após a publicação dos artigos de Einstein sobre a teoria geral da relatividade, Karl Schwarzschild (alemão, 1873-1916: Schwarzschild 1916) derivou a solução analítica para o comportamento do campo gravitacional nas vizinhanças de um corpo (suposto esférico), sem rotação. Existem várias histórias sobre esta solução de Schwarzschild. Uma delas diz que, supostamente, Einstein escreveu a Schwarzschild dizendo que não esperava que suas equações tivessem solução (?!). Há, entretanto, um forte indício contra essa *estória* que é uma carta que Einstein escreveu a Schwarzschild dizendo que achara esplêndida a solução dada. Apesar disso, nenhum dos dois se deu conta que estavam em mãos com as equações que descreviam o comportamento de um buraco negro esférico, não-rotacional e eletricamente neutro. Hoje em dia nós nos referimos a estes tipos (hipotéticos, eu posso adiantar) de buracos negros como *buracos negros de Schwarzschild*, em sua homenagem.

Em 1930 Chandrasekhar descobriu o limite superior de massa para uma anã branca, como já vimos. Em 1962, também como vimos, os pulsares foram descobertos, confirmando a existência das estrelas de nêutrons. Rapidamente, todos trabalhos históricos sobre colapso gravitacional que envolvia a teoria geral da relatividade prevendo a existência dos buracos negros foram resgatados (por exemplo: Oppenheimer e Snyder 1939, Kerr 1963). Em 1968, John Archibald Wheeler (americano, nascido em 1911) cunhou o termo *buracos negros*.

### 7.6.2. Detalhes Observacionais

Como nós podemos ter tanta certeza da existência dos buracos negros? Eu acho que a resposta dessa pergunta tem duas partes. Isto é, deixa claro, uma visão pessoal.

Primeiro, a existência dos objetos compactos eu creio ser uma prova forte da existência dos buracos negros. Vimos que uma estrela tem a capacidade de conter o colapso gravitacional por pressão de degenerescência de elétrons ou nêutrons dando origem, estas, as estrelas de nêutrons e àquelas as anãs brancas. Vimos, também, que existe uma massa superior possível tanto para as estrelas de nêutrons quanto para as anãs brancas. Toda essa formulação entra na teoria da evolução estelar e todas as partes se encaixam, fazendo da teoria de formação estelar um dos pilares da Astrofísica. A idéia dos buracos negros surge da soma do colapso gravitacional de uma estrela massiva, resultado da teoria de evolução estelar, com a teoria da relatividade geral. Novamente, neste caso, tudo se encaixa perfeitamente.

Segundo, a Natureza nos deu a sorte de poder observar alguns objetos compactos em sistemas binários, como as binárias de raios-X que eu descrevi anteriormente. A observação de raios-X é um dos indícios (apenas indícios, prestem atenção!) da presença de um objeto compacto em um sistema binário.

O que acontece, então, quando nós medimos a massa de um objeto compacto e esta massa é maior do que  $4 M_{\odot}$ ? Como, à luz do que estudamos sobre os objetos compactos até agora, vocês caracterizariam este objeto? A meu ver, mesmo que não possamos ver um buraco negro, pela própria natureza intrínseca desses objetos, é o nosso conhecimento das anãs brancas, das estrelas de nêutrons, da teoria de evolução estelar e da teoria da relatividade geral que torna a existência dos buracos negros tão fácil de ser entendida, tão natural de ser aceita.

## 7.7. CONCLUSÕES

Com este Capítulo eu espero que vocês tenham tido uma introdução ao tema dos objetos compactos. Como eu já deixei claro várias vezes, uma abordagem profunda e mais pormenorizada foi, propositadamente, deixada de lado. Existem vários temas que eu não mencionei aqui como, por exemplo, a existência de buracos negros supermassivos e a existência de estrelas de nêutrons com campos magnéticos superiores a  $10^{12}$  G.

Considerem, assim, este Capítulo como a sua primeira leitura, introdutória sobre o tema. Eu espero que sirva como referência para pesquisas e leituras futuras.

## 7.8. BIBLIOGRAFIA

Adams, W. S. 1915, PASP, 27, 236.

Baade, W., e Zwicky, F. 1934, Phys. Rev., 45, 138.

Chandrasekhar, S. 1931, ApJ, 74, 81.

Fowler, R. H. 1926, MNRAS, 87, 114.

Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, F. R., Rossi, B. B. 1962, Phys. Rev. Lett., 9, 439

Glendenning, N. K. "Compact Stars: Nuclear Physics, Particle Physics and General Relativity (second edition)", Springer, 2000.

Heap, S. R., e Corcoran, M. F. 1992, ApJ, 387, 340.

Hewish, A., et al., 1968, Nature, 217, 709.

Jonker, P. G., van der Klis, M., e Groot, M. 2003. MNRAS, 339, 663.

Laplace, P. S. "Le Système du Monde", Vol II, Paris (edição inglesa: "The System of the World", editado pela W. Flint de Londres, 1809), 1795.

Large, M. I., Vaughan, A. E., e Mills, B. Y. 1968, Nature, 220, 340.

Lyne, A. G., et al. 2004, Science, 303, 1153

Nagase, F. 1989, PASP, 41, 1.

Nice, D. J., Spaver, E. M., e Stairs I. H. Em "Young Neutron Stars and their environment (IAU Symp. Vol 218", F. Camilo e B. M. Gaensler (eds.), no prelo (ver astro-ph/0311296).

Oppenheimer, J. R., e Volkoff, G. M. 1939, Phys. Rev., 55, 374.

Orosz, J., e Kuulkers, E. 1999, MNRAS, 305, 132.

Pacini, F. 1967, Nature, 216, 567.

Reynolds, A. P., Bell, S. A., e Hilditch, R. W. 1992, MNRAS, 256, 631.

- Schwarschild, K. 1916. *Sitzungsber. Dtsch. Akad. Wiss. Berlin, Kl. Math. Phys. Tech.*, p. 189 (texto original em alemão).
- Shapiro, S. L., e Teukolsky, S. A. 1983 “Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars: the physics of compact objects”, John Wiley & Sons, 1983.
- Splaver, E. M. et al. 2002, *ApJ*, 581, 509.
- Staelin, D. H., e Reifenstein, E. C. 1968, *Science*, 162, 1481.
- Stairs, I. H. et al. 2002, *ApJ*, 581, 501.
- Thorsett, S. E., e Chakrabarty, D. 1999, *ApJ*, 512, 1988.
- Weisberg, J. M., e Taylor, J. H. 2003 em “Radio Pulsars”. *ASP Conference Proceedings*, Vol. 302, M. Bailes, D. J. Nice, e S. E. Thorsett (eds). *Astronomical Society of the Pacific Press*, p.93.