



Universidade Federal do ABC

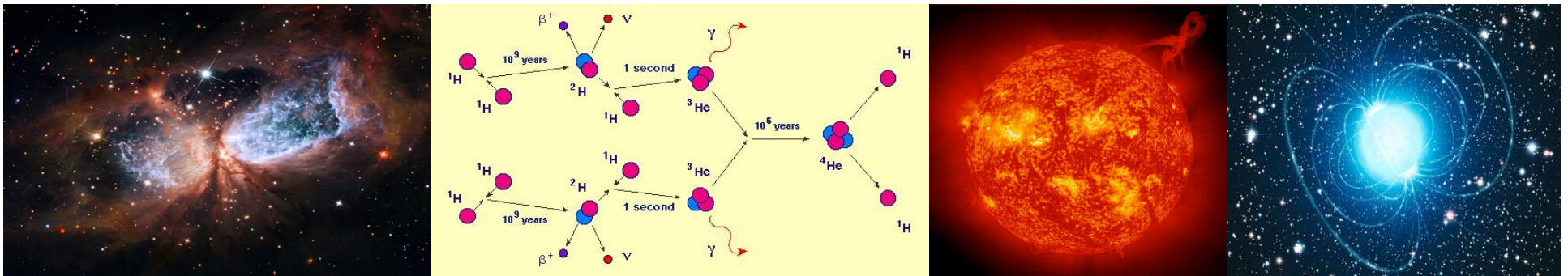
Introdução à Física Estelar

16. Estrelas de Nêutrons

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Estelar.html>



Estrelas de Nêutrons

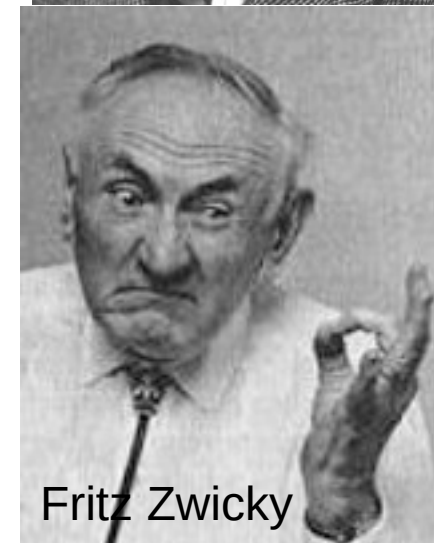
Lembrete (aula Evolução Estelar): O que sobra do **caroço** de uma estrela explodida é um Buraco Negro (aula que vem), no caso de estrelas de $> \sim 25 M_{\odot}$, ou, no caso de **estrelas** entre ~ 8 e $\sim 25 M_{\odot}$, uma **Estrela de Nêutrons**, objeto mais extremo ainda que uma Anã Branca.

Há mais que 10 mio. delas na Galáxia!

A existência de **Estrelas de Nêutrons** foi sugerida em 1934 pelos astrônomos alemão e suíço Walter Baade e Fritz Zwicky (os mesmos que criaram a palavra Supernova), dois anos após a descoberta do nêutron por James Chadwick.



Walter Baade



Fritz Zwicky

Estrelas de Nêutrons

Em 1939, George **Gamov** previu que, se um **núcleo degenerado** alcança densidades suficientemente **altas**, **prótons** e **elétrons** **combinarão** para formar **nêutrons**.

Isso causaria uma **diminuição repentina** da **pressão** resultando no **colapso** da **estrela** para um **núcleo** de **nêutrons**.

=> Uma Estrela de Nêutrons deve ter **massa próxima** ou **maior** que o **limite** de **Chandrasekhar**, $M_{ns} \gtrsim 1.4 M_{\odot}$.

Porém, no mesmo ano, **Tolman**, **Oppenheimer** e **Volkoff** (TOV) calcularam, usando um modelo **relativístico** de um **gás degenerado** de **nêutrons livres**, um **limite superior** de $0.7 M_{\odot}$, e concluíram que Estrelas de Nêutrons **não** podem **existir**.



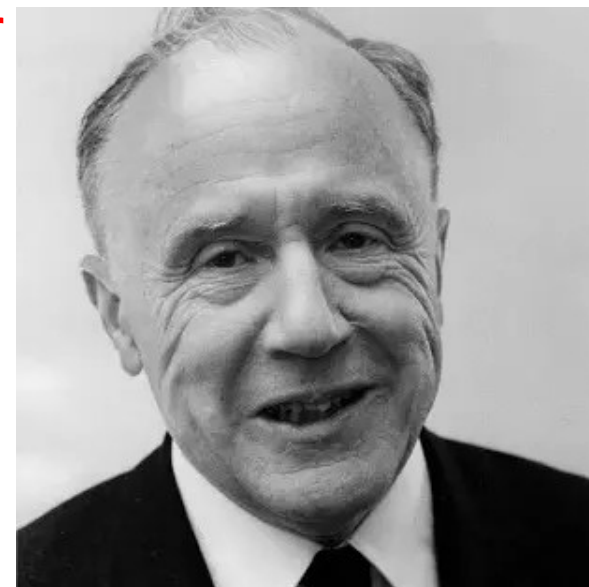
Георгий Антонович
Гамов (1904-1968)

Estrelas de Nêutrons

Na década de 1950 (trabalhos de **Wheeler** e **Cameron**), foram construídos **modelos** de **Estrelas de Nêutrons** implementando **equações de estado** mais **realistas**, segundo aqueles elas consistem de

- uma **crosta**, com uma equação de estado de **e^- degenerados**,
- um **núcleo**, uma **mistura** de **gases** ideais de **Fermi**, de **nêutrons**, **prótons**, **elétrons** e possivelmente **híperons** (**bárions** contendo um quark ***strange***),

levando a estimativas para o **limite superior** da ordem de **$2 M_{\odot}$** .



John Archibald Wheeler
(1911-2008)



Alastair Graham Walter
Cameron (1925-2005)

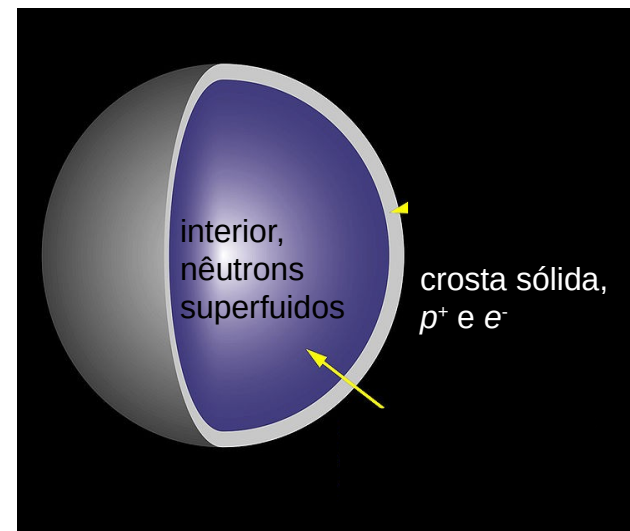
Estrelas de Nêutrons

Estrelas de Nêutrons consistem na maior parte de **nêutrons** (lógico), formados “fusionando” os prótons e elétrons dos átomos do **núcleo** de uma estrela, quando a pressão de degenerescência eletrônica não conseguia mais suportar o peso da estrela (=> aula Supernovas).

Elas são basicamente **núcleos atômicos**

gigantes, com $A = M_{ns} / m_n \geq M_{Ch} / m_n \approx 10^{57}$, mas por um fator $> 10^{10}$ mais densos que núcleos atômicos normais ($\sim 2 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$).

Mas a **composição** da matéria super-densa no interior é **incerta**: É possível que seja algo mais exótico, contendo, além dos **nêutrons** e alguns **prótons** e **elétrons**, **outros quarks** que só *up* e *down* (i. e. **strange**), ou partículas de alta energia como **kaons** e **pions**.



Estrelas de Nêutrons

O que agora evita o colapso total da estrela é uma pressão chamada **pressão de degenerescência neutrônica** (similar à eletrônica, mas com nêutrons), que consegue conter o colapso para objetos até uns 2.2 a 2.9 massas solares, dependendo do estado de rotação da estrela.

As fórmulas pra pressão de degenerescência neutrônica são as mesmas que pra eletrônica, substituindo m_e por m_n (ou m_H) e μ_e por 1, tal que ela também **independe** da **temperatura**.

Seguindo esta lógica, uma estimativa para o **raio** de uma Estrela de Nêutrons (que, igual como antes para Anãs Brancas sub-estima o verdadeiro valor por um fator 3) é

$$R_{ns} \approx \frac{(18\pi)^{2/3}}{10} \frac{\hbar^2}{GM_{ns}^{1/3}} \left(\frac{1}{m_H}\right)^{8/3},$$

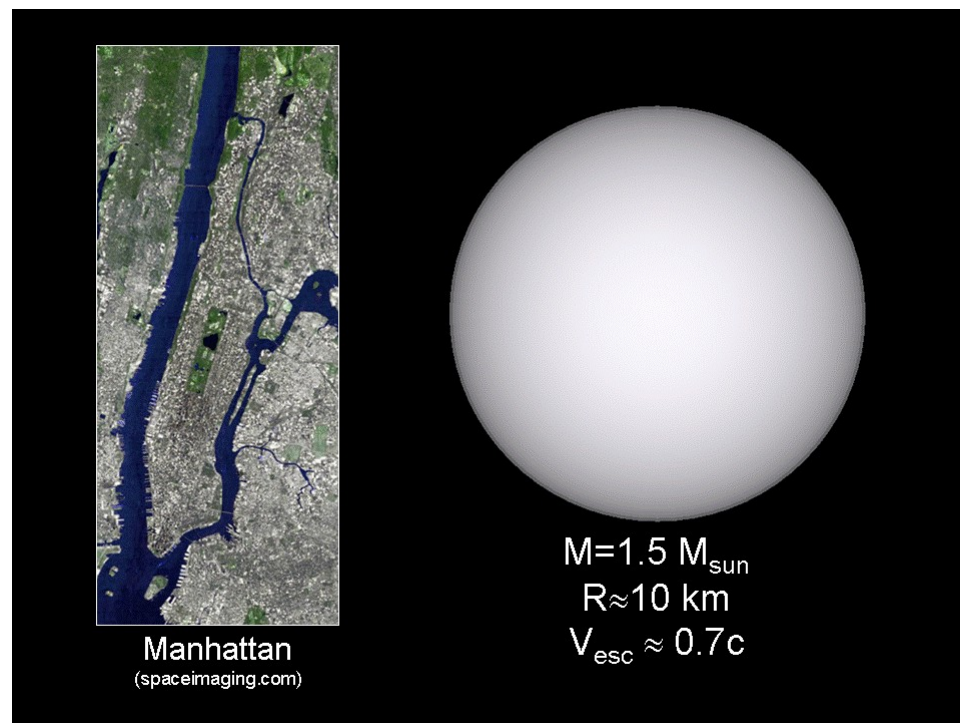
o que dá, para $M_{ns} = 1.4 M_{\odot}$, uns 4.4 km.

=> Estrelas de Nêutrons têm raios da ordem de 10 km!

Estrelas de Nêutrons

Estrelas de Nêutrons são ainda **muito mais densas** que **Anãs Brancas** , concentrando massas de **≥ 1.4 massas solares** numa bola com diâmetro de **~ 10 km** :

- Um pedacinho de material de Estrela de Nêutrons na superfície da Terra cairia pro centro da Terra, furando um buraquinho no caminho.
- Visitando uma Estrela de Nêutrons você se desfaria em partículas sub-atômicas.



Estrelas de Nêutrons

Outra consequência do campo gravitacional forte na superfície de uma Estrela de Nêutrons vemos calculando, usando **física newtoniana**, a **velocidade de escape**:

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{2GM_{\text{ns}}/R_{\text{ns}}} = 1.93 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 0.643 c,$$

da ordem da **velocidade da luz**!

Ou: **Energia potencial gravitacional** de um objeto de massa m na **superfície** de uma **Estrela de Nêutrons**:

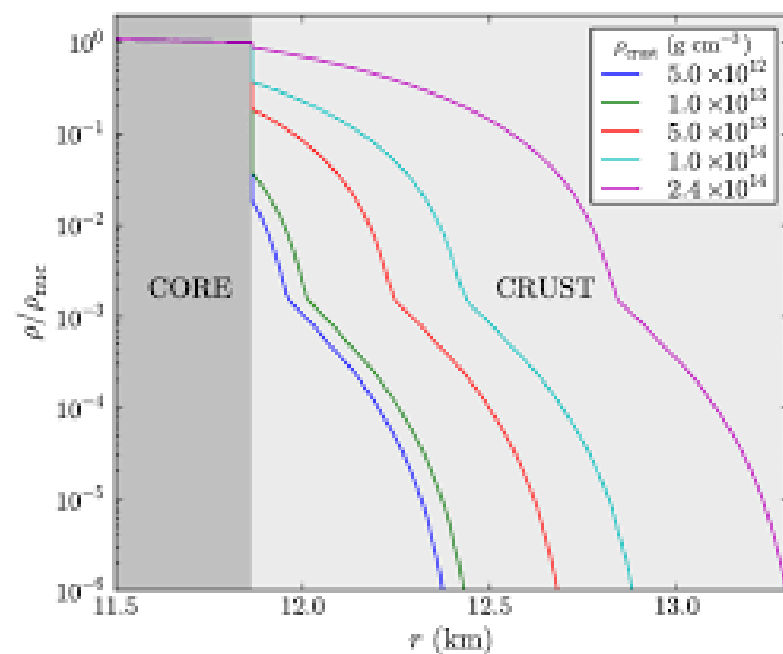
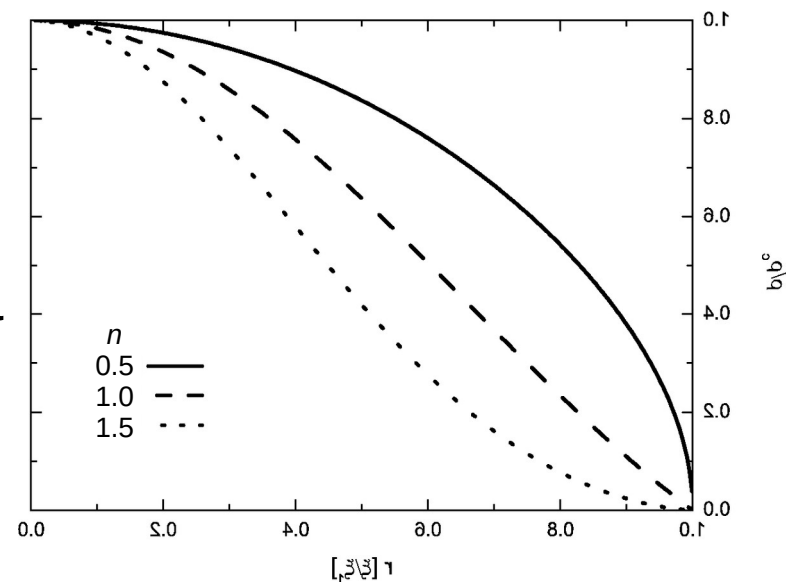
$$GM_{\text{ns}}m/R_{\text{ns}} = 0.207 mc^2, \text{ da ordem da } \mathbf{energia \ de \ repouso}$$

=> Para o tratamento correto de Estrelas de Nêutrons precisaríamos usar a Teoria da **Relatividade Geral**.

Estrelas de Nêutrons

Por isto, e por não sabermos ao certo, o que tem dentro, a **equação de estado não** é a mesma que para **Anãs Brancas**, com índices politrópicos entre 1.5 ($P = K\rho^{5/3}$) e 3 ($P = K\rho^{4/3}$), mas com índices de 0.5 ($P = K\rho^3$) a 1 ($P = K\rho^2$), levando a **perfis de densidade menos concentrados** no centro.

Em baixo: perfis de densidade segundo modelos mais sofisticados (não-politrópicos) de Estrelas de Nêutrons.



Estrelas de Nêutrons

As propriedades de matéria nestas densidades ainda não são bem entendidas, mas sabemos que no **interior** os **nêutrons** se encontram em um estado **superfluido** e os **prótons**, num estado **supercondutor**.

A **crosta interna** deve consistir de **núcleos pesados**, **nêutrons livres** e **elétrons relativísticos e degenerados**.

A **crosta externa** são na maior parte **núcleos pesados** e **elétrons**.

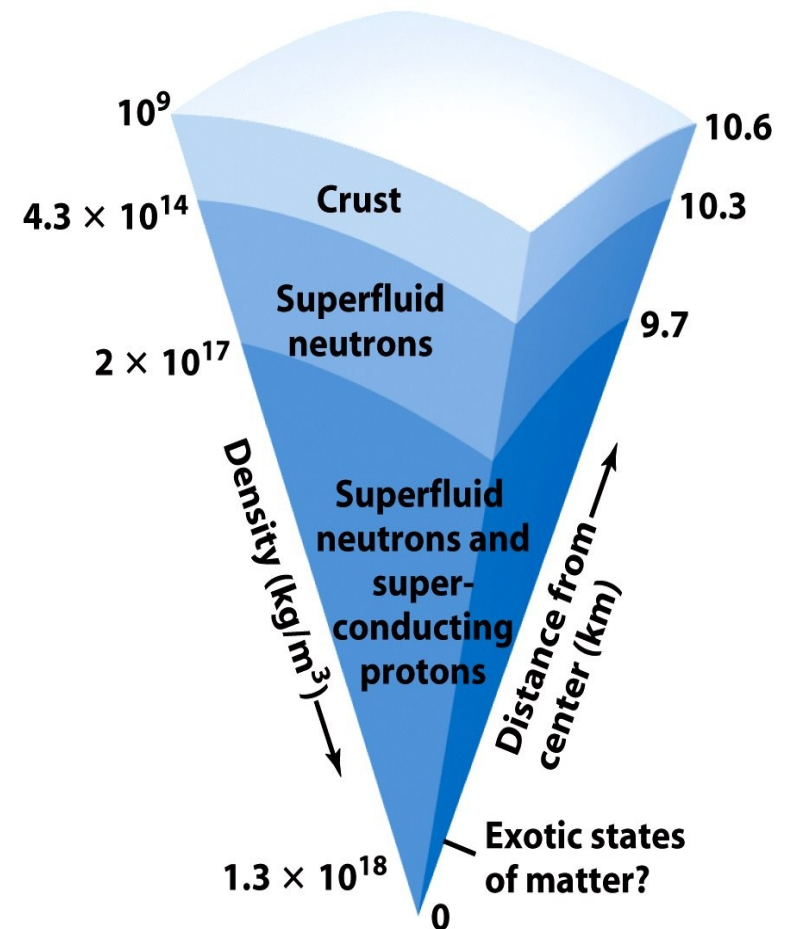
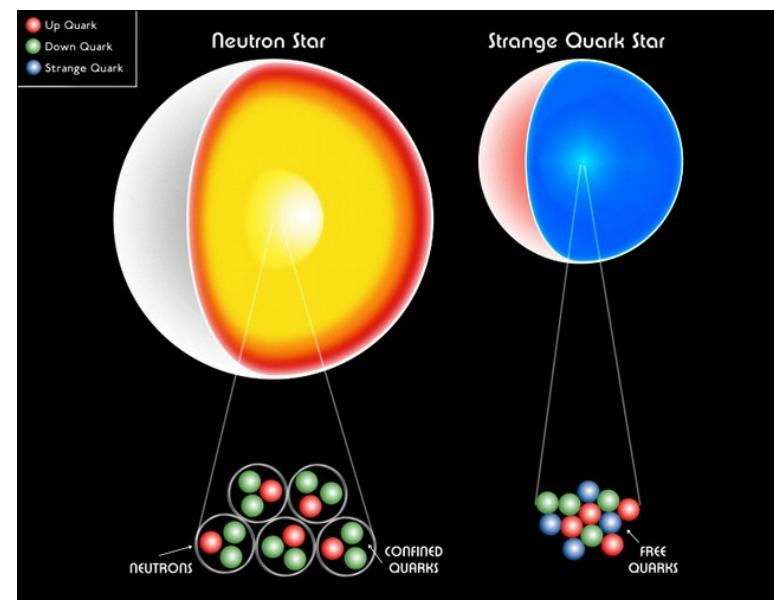
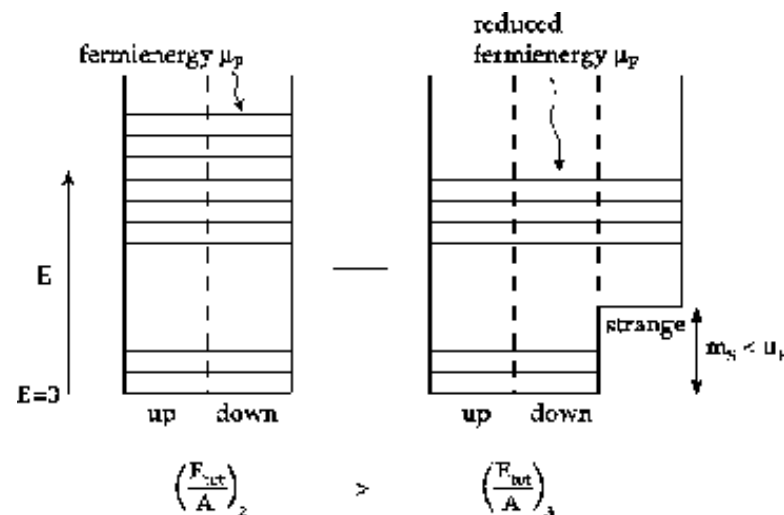


Figure 21-9
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Estrelas de contendo quarks *strange*

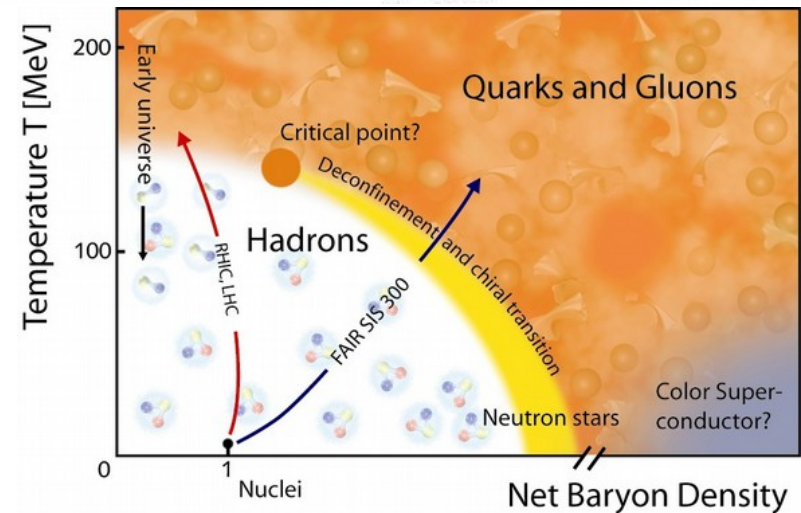
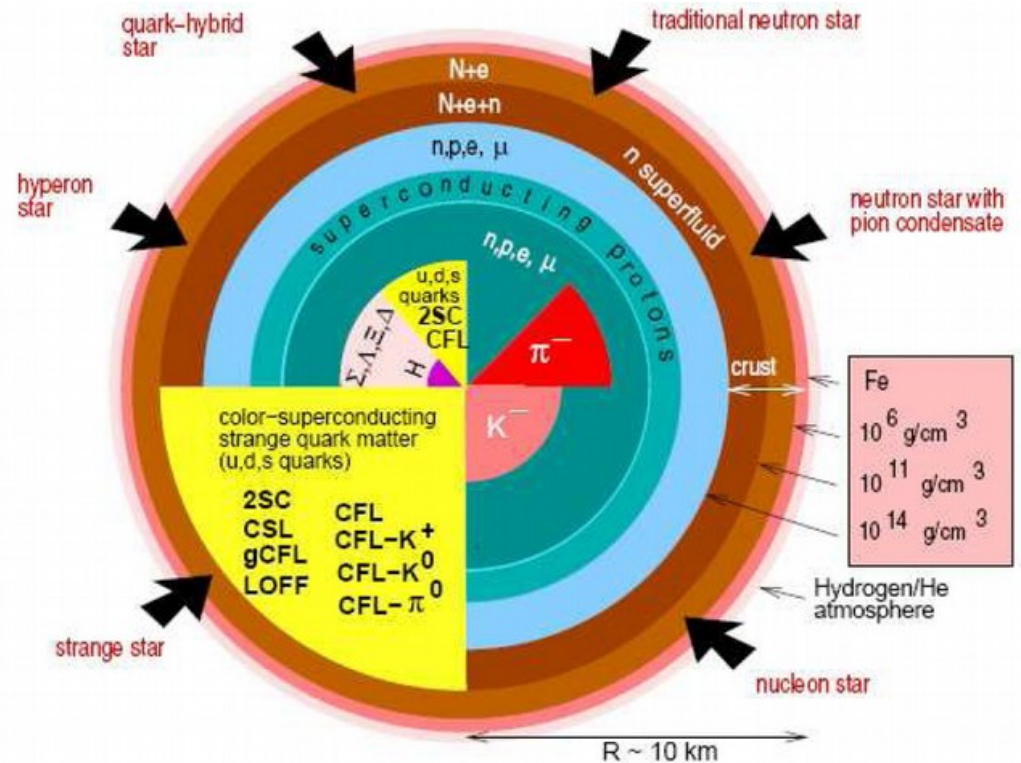
Como mencionado, há previsões, de que no **interior** de uma Estrela de Nêutrons poderia ter **partículas** contendo **quarks *strange***, como **híperons** e **káons**, já que, num **gás** de **Fermi denso** e **frio**, distribuir um certo número de quarks sobre **3 tipos** (u, d, s) permite **energias** por **partícula** mais **baixas** e **densidades** mais **altas**, do que tendo que distribuí-lo sobre apenas 2 tipos, mesmo com o 3º começando com energias mais altas. Chamamos este corpo celeste hipotético de ***strange* (quark) star**.



Estrelas de contendo quarks *strange*

De fato, há várias hipóteses sobre a composição destas “estrelas”, cada uma com seu próprio nome.

Diagrama da fases da matéria nuclear

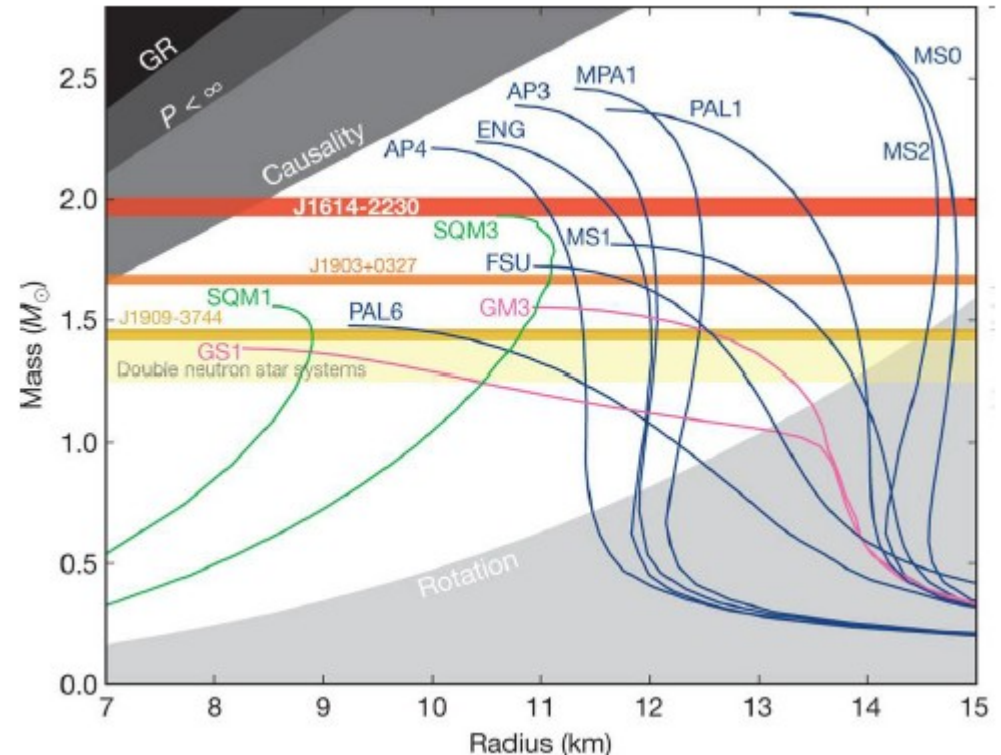
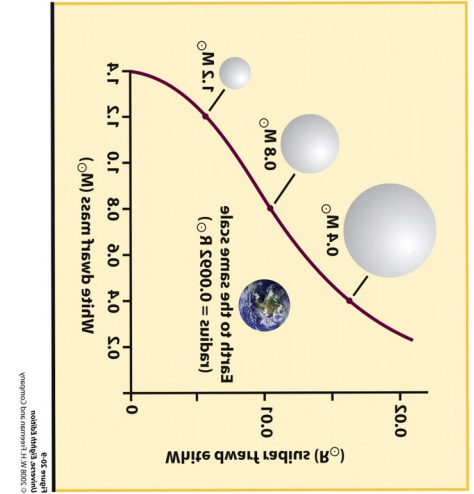


Estrelas de Nêutrons

Para estes objetos, **não** vale a **relação massa-raio** ou volume das **Anãs Brancas**, $M \cdot V = \text{const.}$

Modelos mais **realistas** prevêm relações bem diferentes, dependendo da **composição** do **interior** da Estrela de Nêutrons.

Mas a estimativa de **raios** da ordem de 10 km se mantém.



Estrelas de Nêutrons

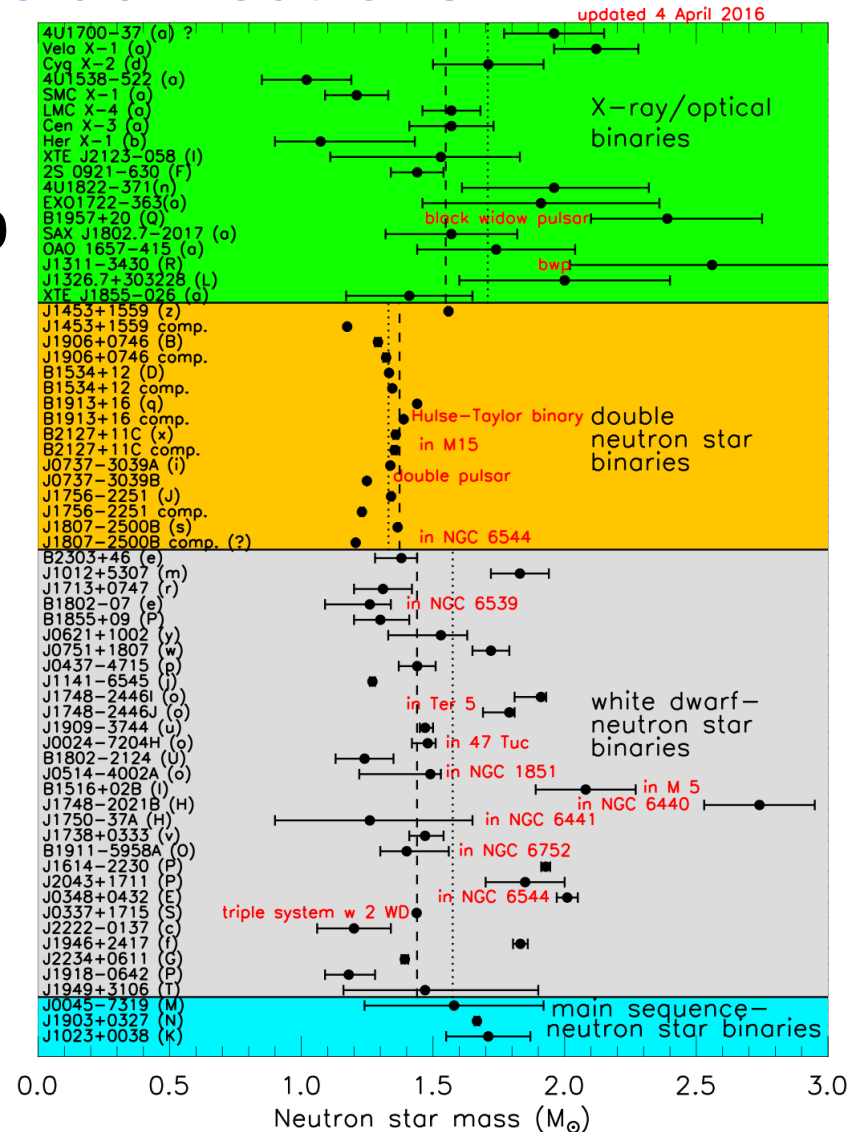
Como medir massas de Estrelas de Nêutrons?

Se fazem parte de uma **binária**

- pelas **propriedades orbitais** do par (=> aula sobre binárias)

- Se está **acretando** material, pelos comprimento de onda e intensidade dos **raios X** emitidos no processo

- Se a companheira for uma **Anã Branca**, pelo **atraso de Shapiro** (*Shapiro time delay*) => próximo slide



Estrelas de Nêutrons

Atraso de Shapiro

É um efeito **relativístico**:

A luz da Anã

Branca leva **mais tempo** para

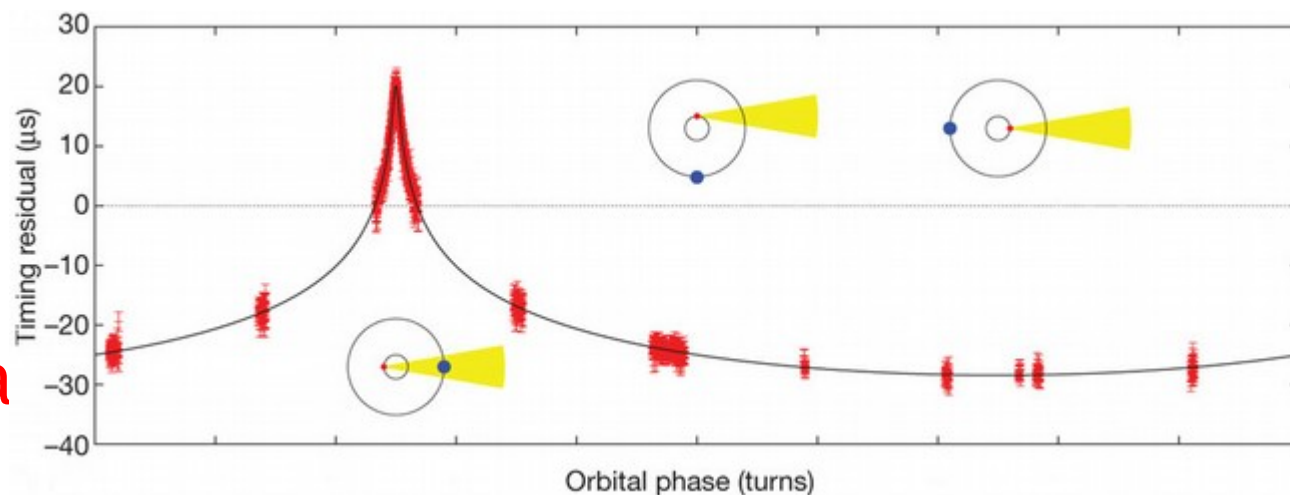
chegar em nós,

quando ela **passa atrás** da Estrela

de Nêutrons, por passar pelo “**poço de potencial gravitacional**” desta.

Para este método funcionar, o sistema binário tem que ser visto **edge-on**.

Exemplo: PSR J1614-2230: $M_{\text{ns}} = 1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$.



Estrelas de Nêutrons

Para **Estrelas de Nêutrons** também existe uma **massa máxima**, mais difícil de calcular que a massa de Chandrasekhar, que não é determinada pelo "volume zero", mas sim por uma instabilidade dinâmica que sinaliza a não acomodação de oscilações radiais, e que depende da **rotação** da estrela.

Ela é de **2.2 massas solares** para Estrelas de Nêutrons **estáticas**, e de **2.9 massas solares** para Estrelas de Nêutrons em **rotação** rápida.

Acima destas massas não conhecemos nenhum mecanismo que ia conter o **colapso total** do objeto, resultando em um **Buraco Negro** (sem Supernova).

Estrelas de Nêutrons

Rotação e Campos Magnéticos

Uma Estrela de Nêutrons é basicamente um **caroço** de ferro **colapsado**, cujo **raio** R_i **diminuiu** para $R_f \approx 10$ km.

Neste colapso, o **momento angular** $\omega \cdot R^2$ e o **fluxo magnético** através da **superfície** S , $\int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$, são **conservados**, tal que:

período rotacional: $P_f = P_i \cdot (R_f/R_i)^2$ (de ms a s)

campo magnético: $B_f = B_i \cdot (R_i/R_f)^2$ (de 10^7 T a 10^{10} T, ou até 10^{11} T para um tipo de EdN chamado **magnetar**, os campos magnéticos mais fortes conhecidos).

Estrelas de Nêutrons giram muito rapidamente, e têm **campos magnéticos muito fortes!**

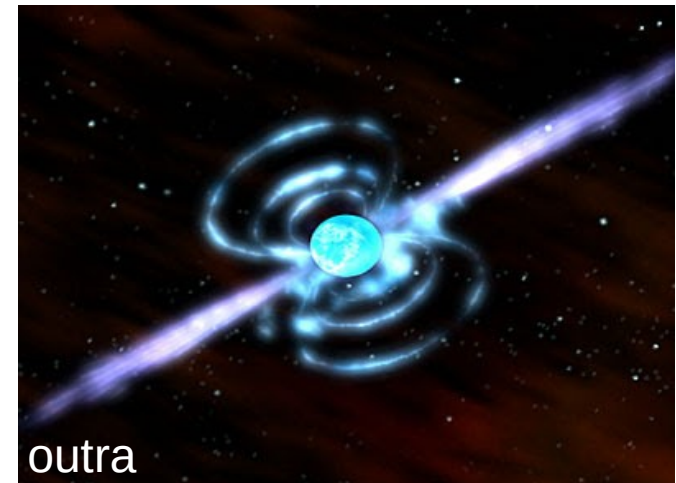
Estrelas de Nêutrons

Outra maneira de entender estes **campos magnéticos fortes** é pela **rotação rápida** e os **prótons supercondutores** do interior.

Pelos **polos** deste **campo** magnético saem **jatos** de **radiação energética** (p.e. raios X).



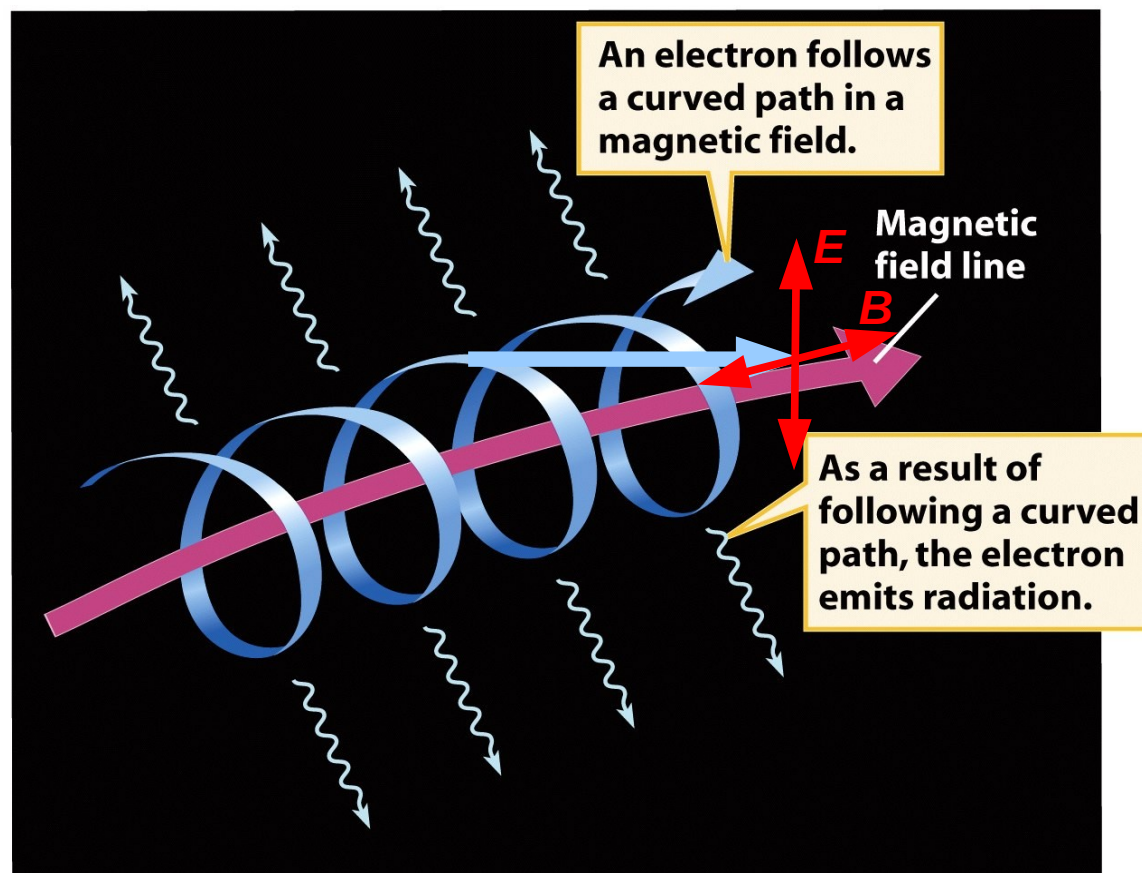
interpretação artística de uma
Estrela de Nêutrons



outra

Estrelas de Nêutrons

Os **elétrons** emitidos pela Estrela de Nêutrons fazem caminhos helicoidais em torno das linhas de campo emitindo **radiação** na **direção** do seu **movimento**, devido aos seus **movimentos curvados**, e altamente **polarizada** chamada **radiação síncrotron** se ela é **~perpendicular** às **linhas do campo**, ou **radiação de curvatura**, se ela é **~paralela** às **linhas do campo**.



Ela **leva** um pouco da **energia** e do **momento angular** da **Estrela de Nêutrons** junto.

Estrelas de Nêutrons

O **espectro** da radiação síncrotron é bem **característico** e pode facilmente ser separada da radiação térmica da Estrela de Nêutrons.

Ele pode se estender das **ondas rádio** até os **raios gama**.

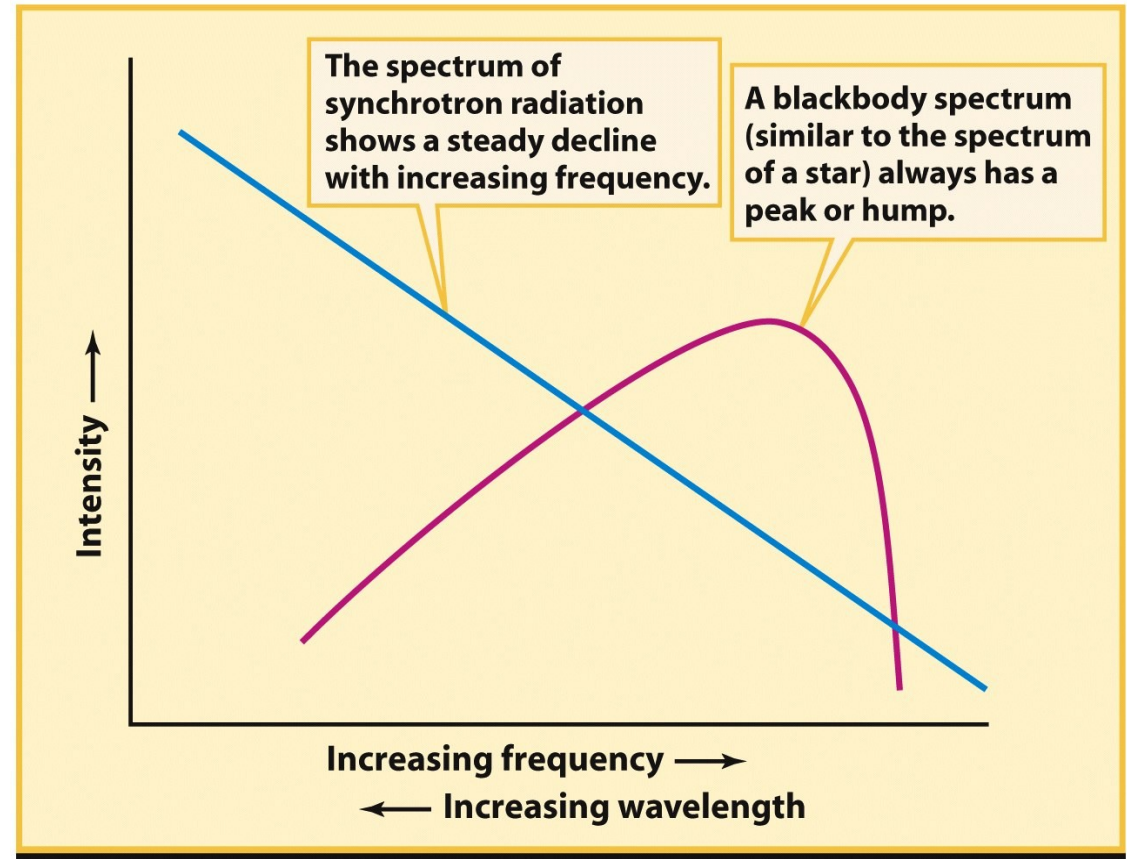
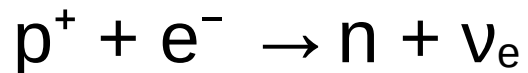
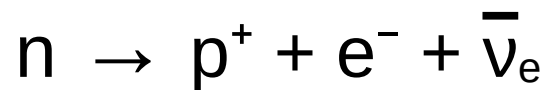


Figure 21-6b
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Estrelas de Nêutrons

A **temperatura** no **interior** de uma Estrela de Nêutrons é inicialmente $\sim 10^{11}$ K, mas cai dentro de um dia para $\sim 10^9$ K (perda de energia por um processo sugerido por Gamov e Mário Schenberg, batizado por eles como **processo Urca**, em homenagem ao cassino do mesmo nome em RJ:



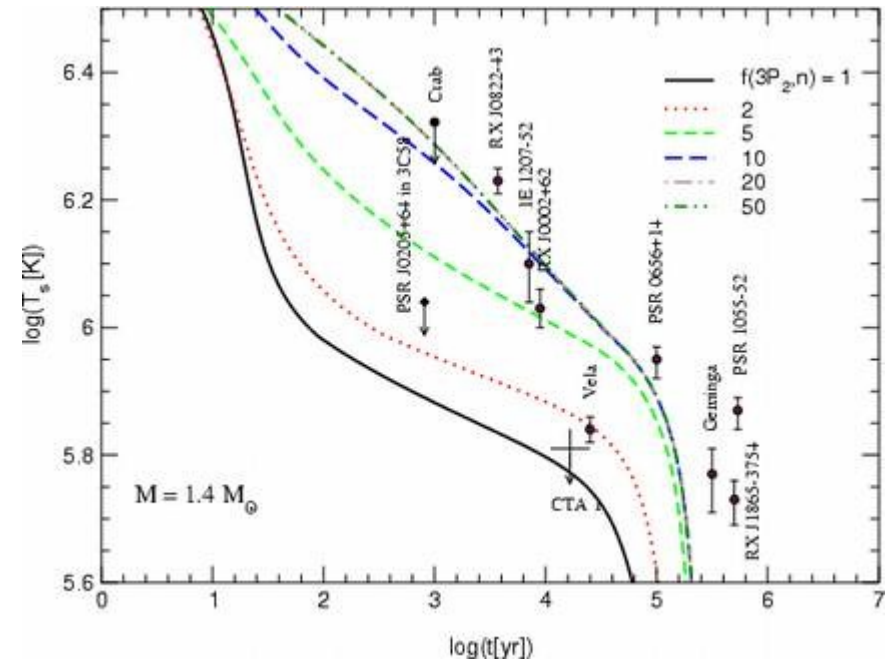
Os núcleons alternam entre n e p^+ , emitindo e absorvendo elétrons e produzindo grandes números de neutrinos e anti-neutrinos,

e em poucos centenas de anos para $\sim 10^8$ K.

Estrelas de Nêutrons

Depois, a Estrela de Nêutrons se **resfria** a uma **taxa mais moderada**, e a **temperatura na superfície** é da ordem de **1 mio. K**.

Os **detalhes** destes **processos** de **resfriamento** podem dar **dicas** sobre a **composição** no **interior** da Estrela de Nêutrons.

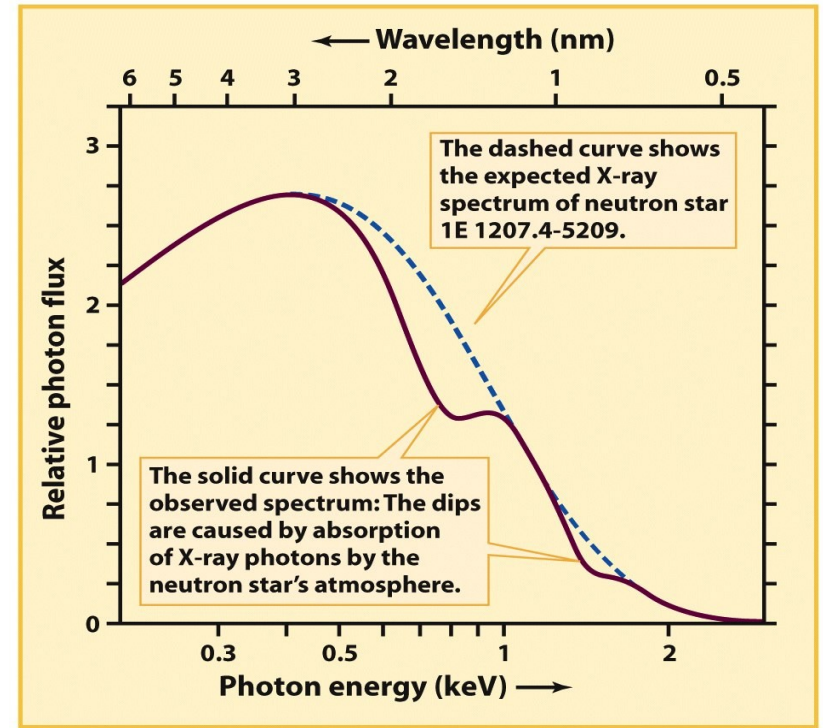
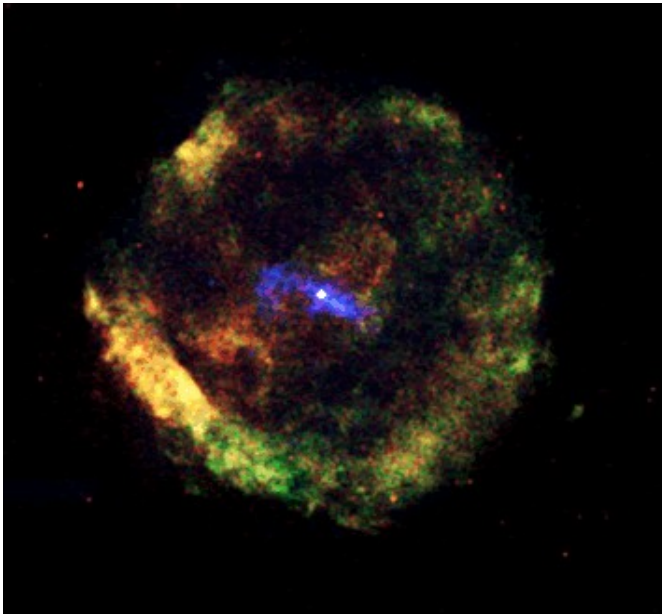


O **pico** da **radiação** de um corpo negro desta temperatura é em $\lambda_{\max} = 2.9 \text{ nm}$, nos **raios X**.

Estrelas de Nêutrons

Por isto é mais fácil identificar **Estrelas de Nêutrons** olhando para a radiação nos **raios X**.

em baixo: Os restos de uma supernova observada pelos chineses em 386 nos raios X.



X-ray spectrum

Figure 21-10b
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

O espectro de uma Estrela de Nêutrons

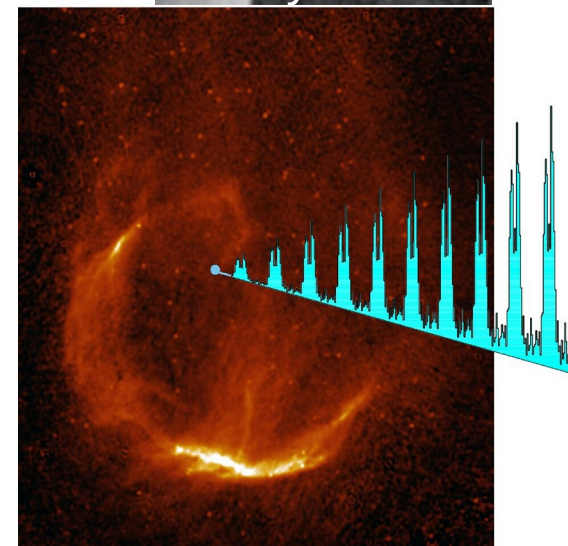
Estrelas de Nêutrons

Como foram **descobertas** as Estrelas de Nêutrons?

Em 1967, uma estudante de graduação chamada Susan **Jocelyn Bell** encontrou uma **fonte** estranha de **raios rádio** na **Nebulosa Cygnus**, “**piscando**” a cada 1.337 301 s.

Como o sinal era **extremamente regular**, ela e seu patrão de tese acreditavam que vinha de uma **outra civilização**.

Se falou de “LGM” (*Little Green Men*). Mas logo ela achou outro objeto similar, em outra região do céu, tornando a hipótese “LGM” muito **improvável**.



Pulsares

Uma explicação mais aceita hoje é que se trata de uma **Estrela de Nêutrons girando** em torno de um eixo, outro que o eixo do campo magnético, tal que o **jato de radiação** “varre” a Terra a cada 1.337 s.

Só objetos **muito pequenos** podem girar tão rapidamente, senão se desfariam pela “força centrífuga”, isto é, $\omega^2 R$ deve ser menor que $GM/R^2 \Rightarrow R < (GM/\omega^2)^{1/3}$.

Uma Estrela de Nêutrons que faz isto foi chamada **Pulsar**.

Juntando a isto o fato, de que os Pulsares se encontram em **Nebulosas “pós-Supernovas”**, deve se tratar de **Estrelas de Nêutrons**.



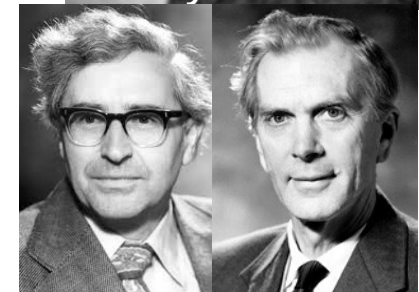
Pulsares

O padrão de tese da Jocelyn Bell, Antony Hewish e um colaborador, Martin Ryle, ganharam por esta descoberta o prêmio Nobel em 1974, mas estranhamente a própria Jocelyn Bell, não.

Por isto, às vezes, chamam este prêmio de 1974 de “No-Bell”.

Desde então, Jocelyn foi “re-compensada” com inúmeros outros prêmios:

J. Robert Oppenheimer Memorial Prize (1978), Beatrice M. Tinsley Prize (1986), Herschel Medal (1989), Michael Faraday Prize (2010), Royal Medal (2015), Grande Médaille (2018), Special Breakthrough Prize in Fundamental Physics (2018), ...



Antony
Hewish

Martin
Ryle



Pulsares

A Nebulosa do Caranguejeo durante – e entre pulsos

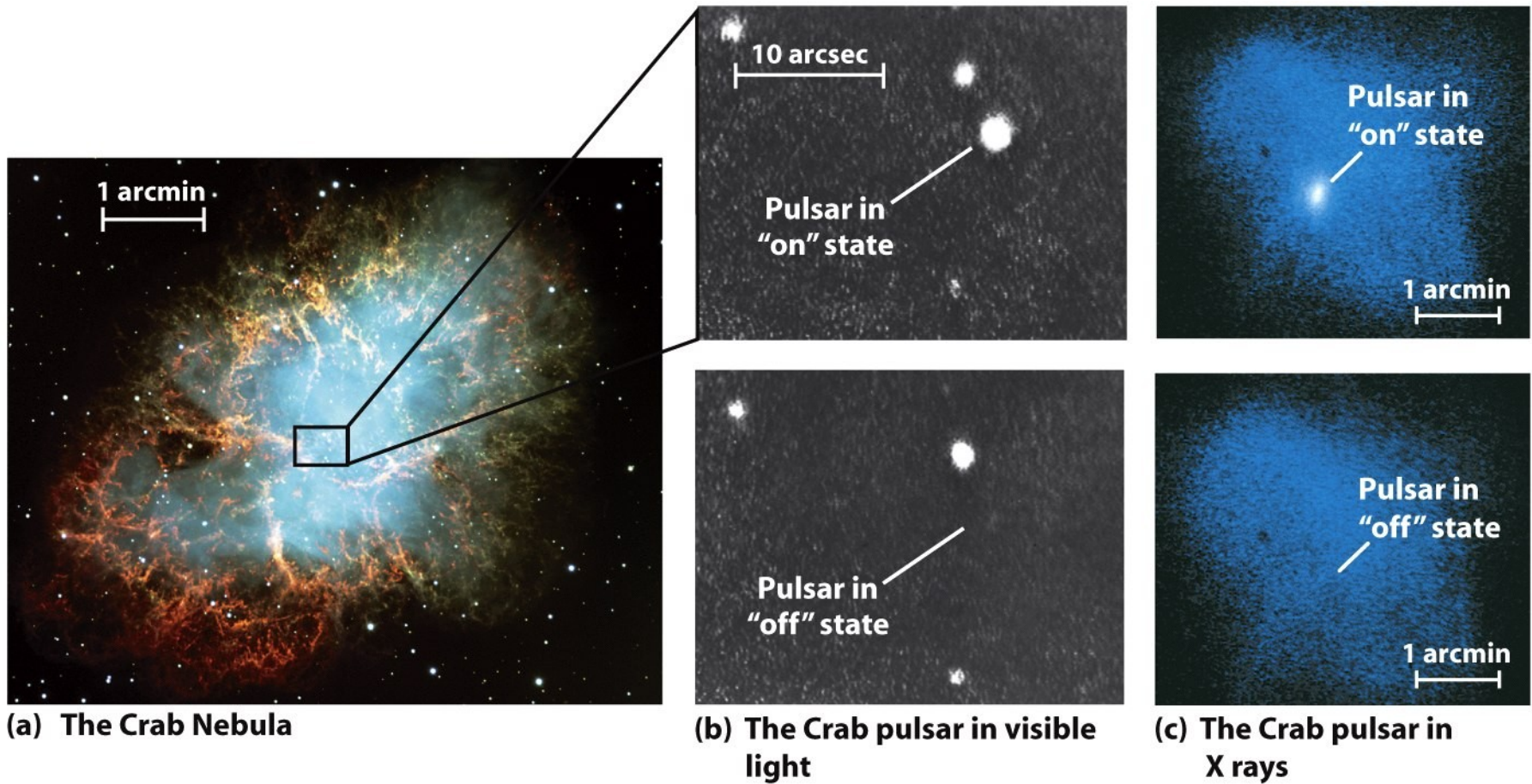
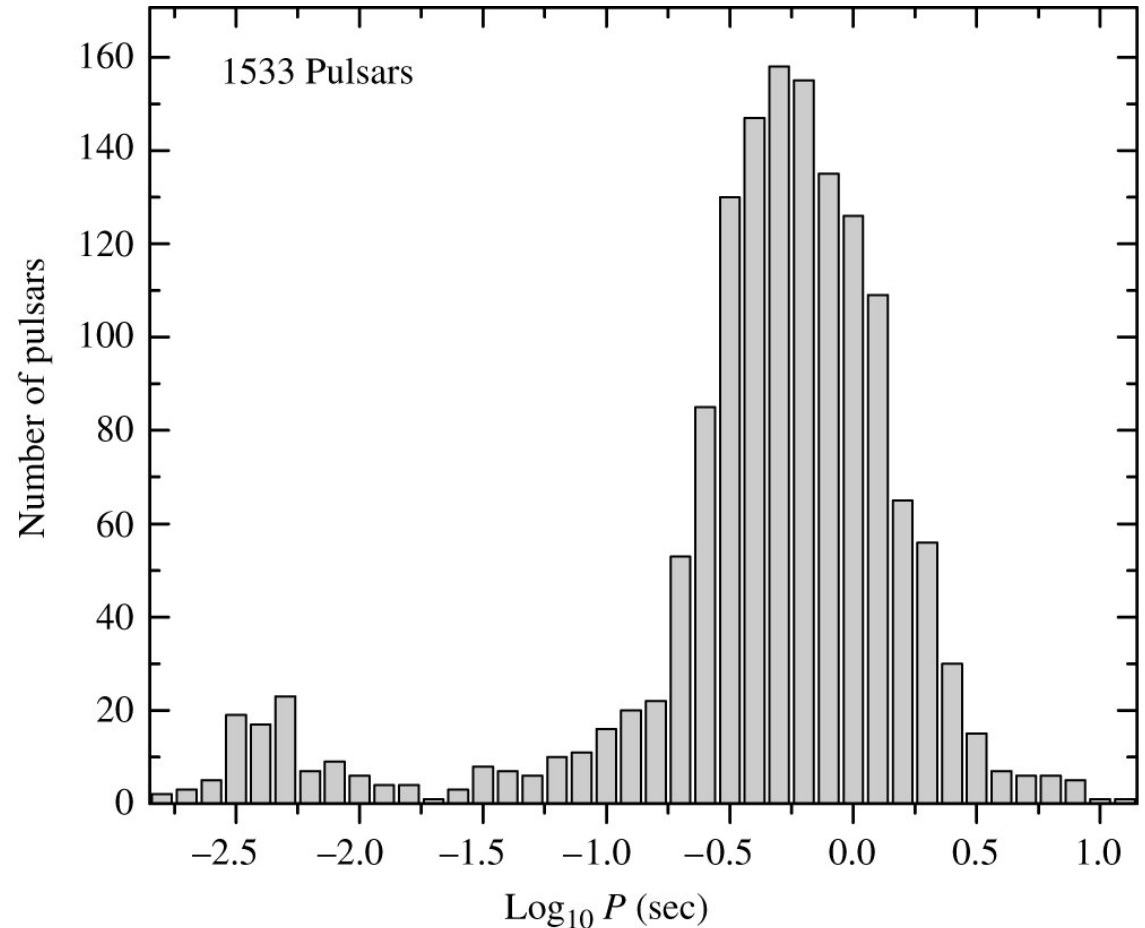


Figure 21-4
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Pulsares

Foram descobertas mais de 1500 outros pulsares até hoje, maioria com **períodos de 0.25 s a 2 s**, mas alguns pulsando **muito rapidamente**.

O pulsar da Nebulosa do Caranguejo pulsa a cada 33 ms, e o de PSR J1 748-2446ad, a cada 1.39 ms.



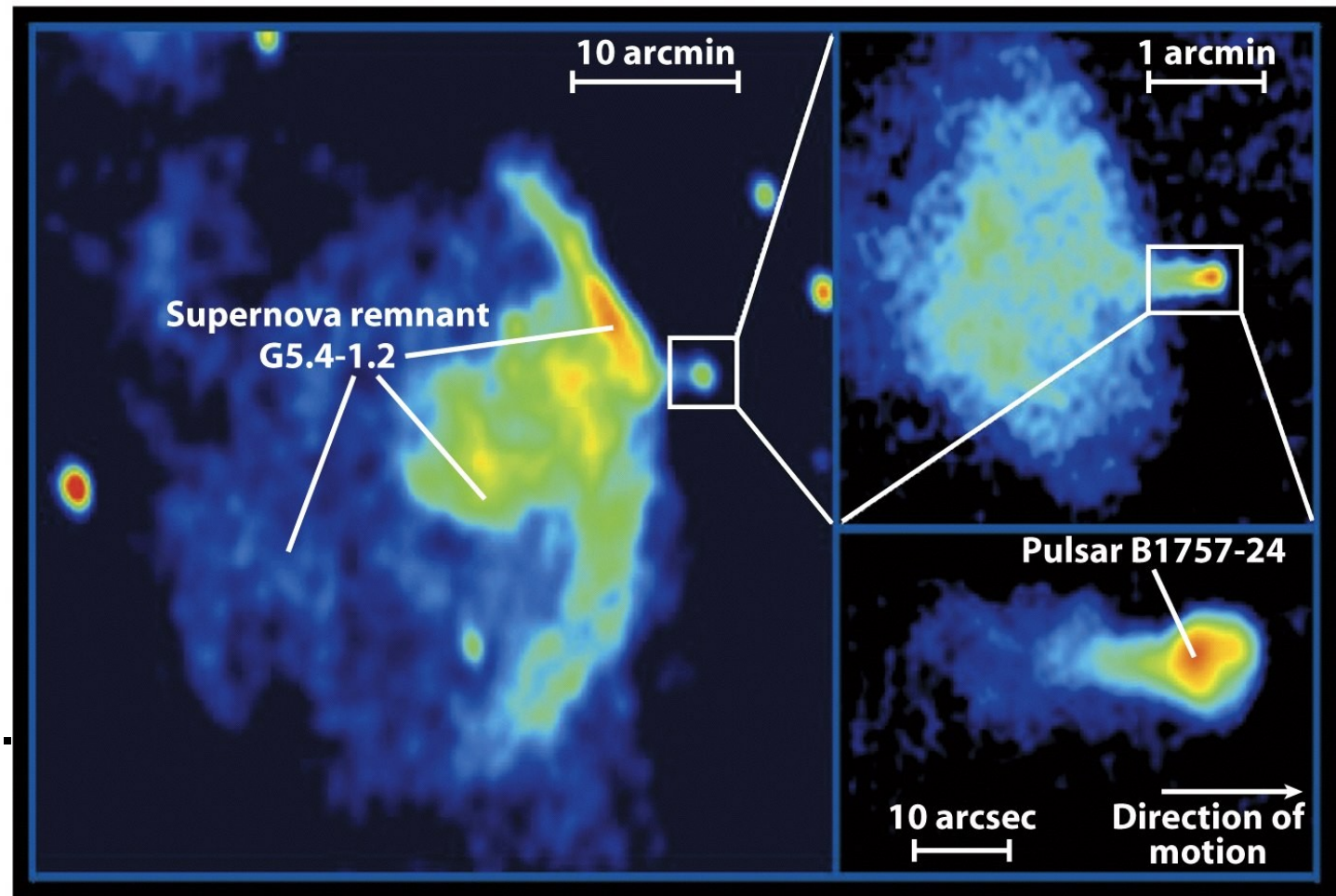
Distribuição dos períodos dos pulsares descobertos até 1993

Pulsares

Pulsares

movem-se muito mais **rapidamente** no espaço que estrelas “normais”, com velocidades de até ~ 1000 km/s. Isso é consistente

com pulsares nascendo em **Supernovas**, já que estes eventos **não** devem ter uma **simetria** perfeitamente esférica. O resultado é que o Pulsar pode receber um “kick”.



Pulsares

O período de um Pulsar aumenta gradualmente com o tempo, com dP/dt da ordem de 10^{-15} . Isto corresponde aos energia e momento angular perdidos pela radiação dos jatos.

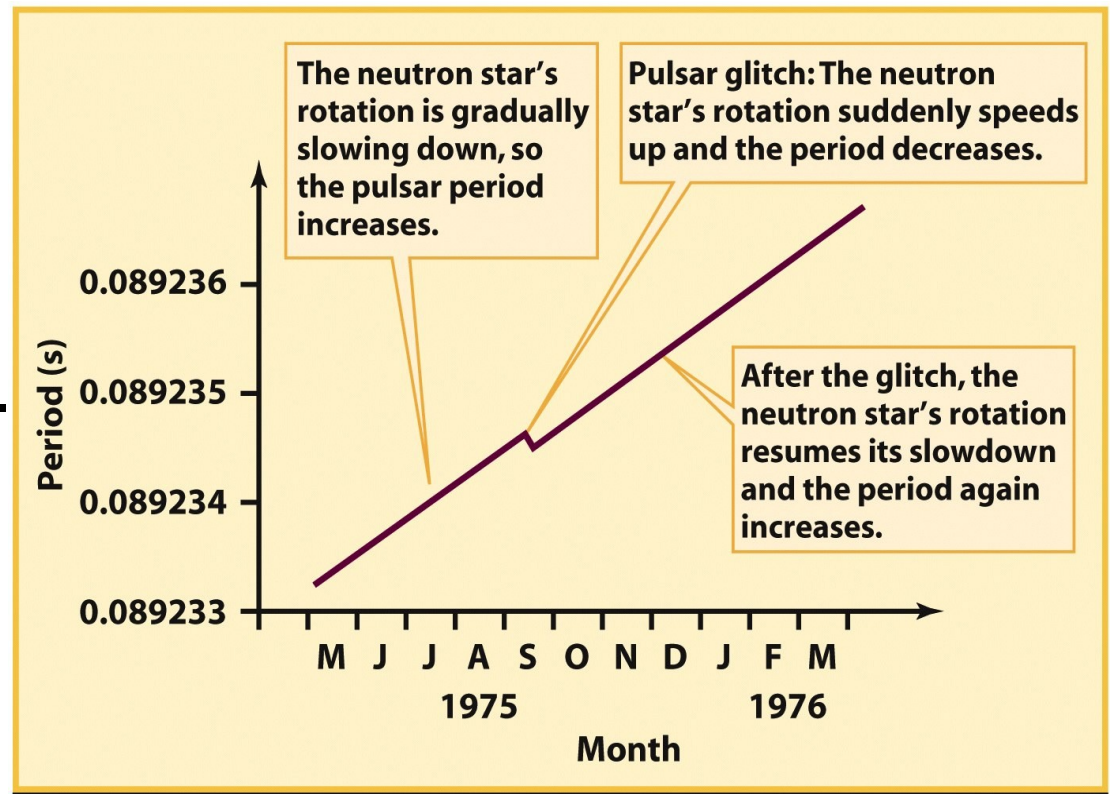


Figure 21-8
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

A esta taxa, eles levariam $\sim 10^{15}$ períodos de pulsação = $\sim 10^7$ anos para pararem de “pulsar”.

Pulsares

O diagrama dP/dt vs. P ou $\dot{P}-P$ é usado para **classificar** os pulsares.

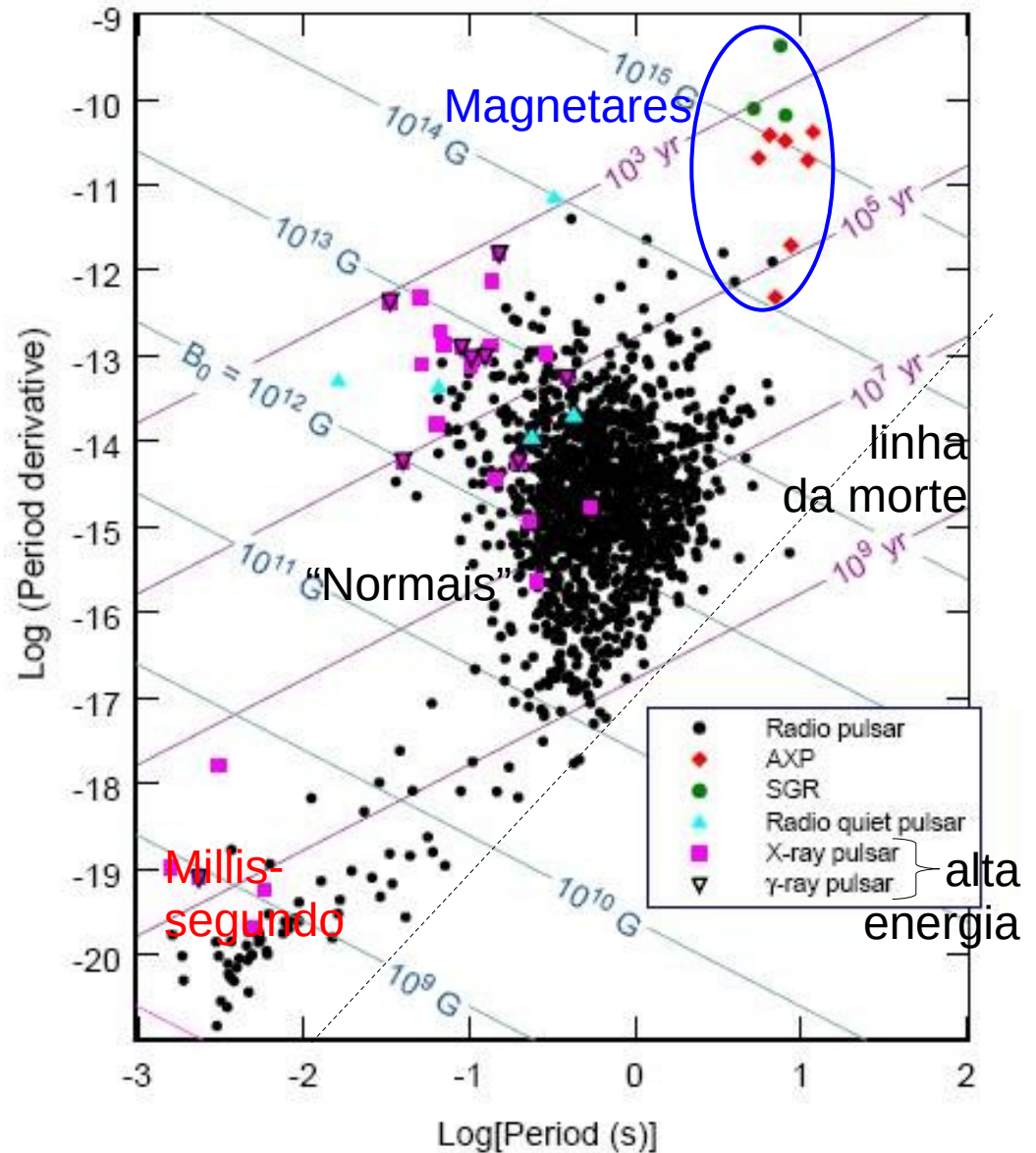
Linhas de campo magnético constante

Linhas de idades características

Linha da morte: A emissão em rádio “desliga”

SGR: *Soft gamma-ray repeaters*

AXP: *Anomalous X-ray pulsars*



Pulsares

Em intervalos de tempo irregulares acontece um “*glitch*”, **pequena redução repentina do período**, de $\Delta P/P \approx 10^{-6}$ a 10^{-8} , provavelmente o resultado de “**reajustes**” (terremotos) da **crosta**, que fazem esta se distribuir um pouco mais pro interior.

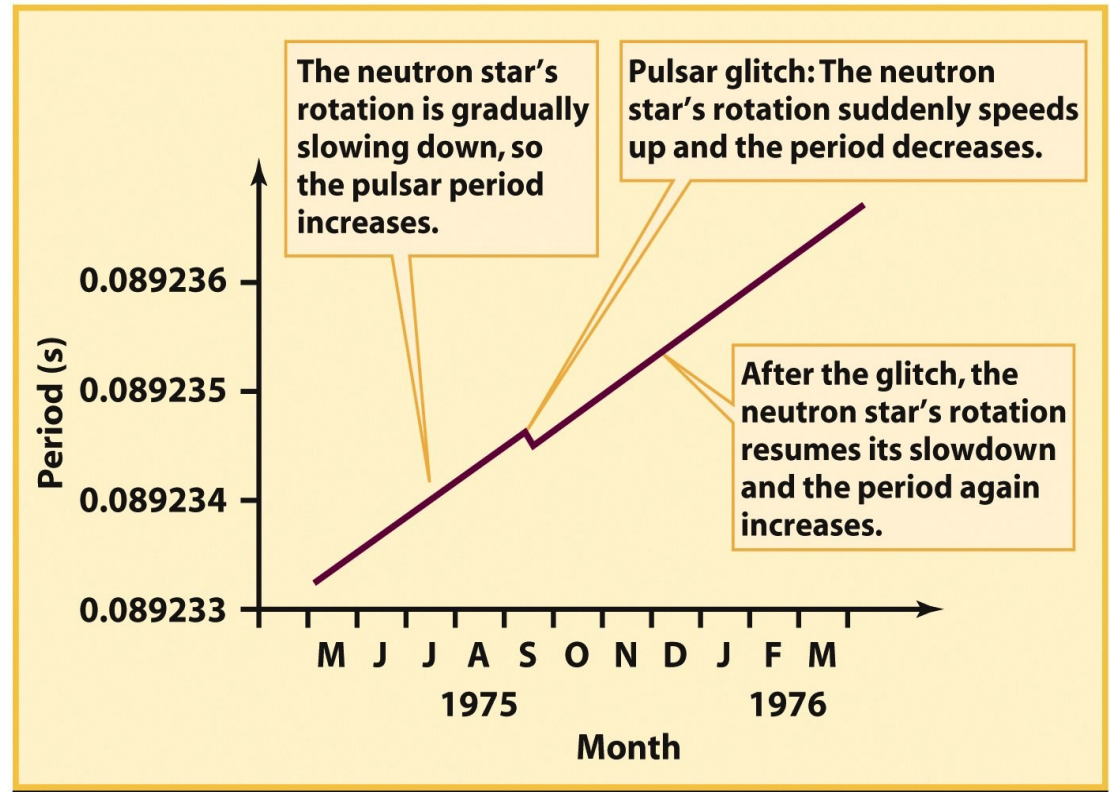


Figure 21-8
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Pulsares

A **interação** de **material** expulso por Pulsares na direção **equatorial**, ou dos seus **jatos** com sua própria **Nebulosa** também pode causar **radiação** que às vezes pode ser **observada**.

Esta interação tende a **acelerar** a **expansão** da **Nebulosa**.

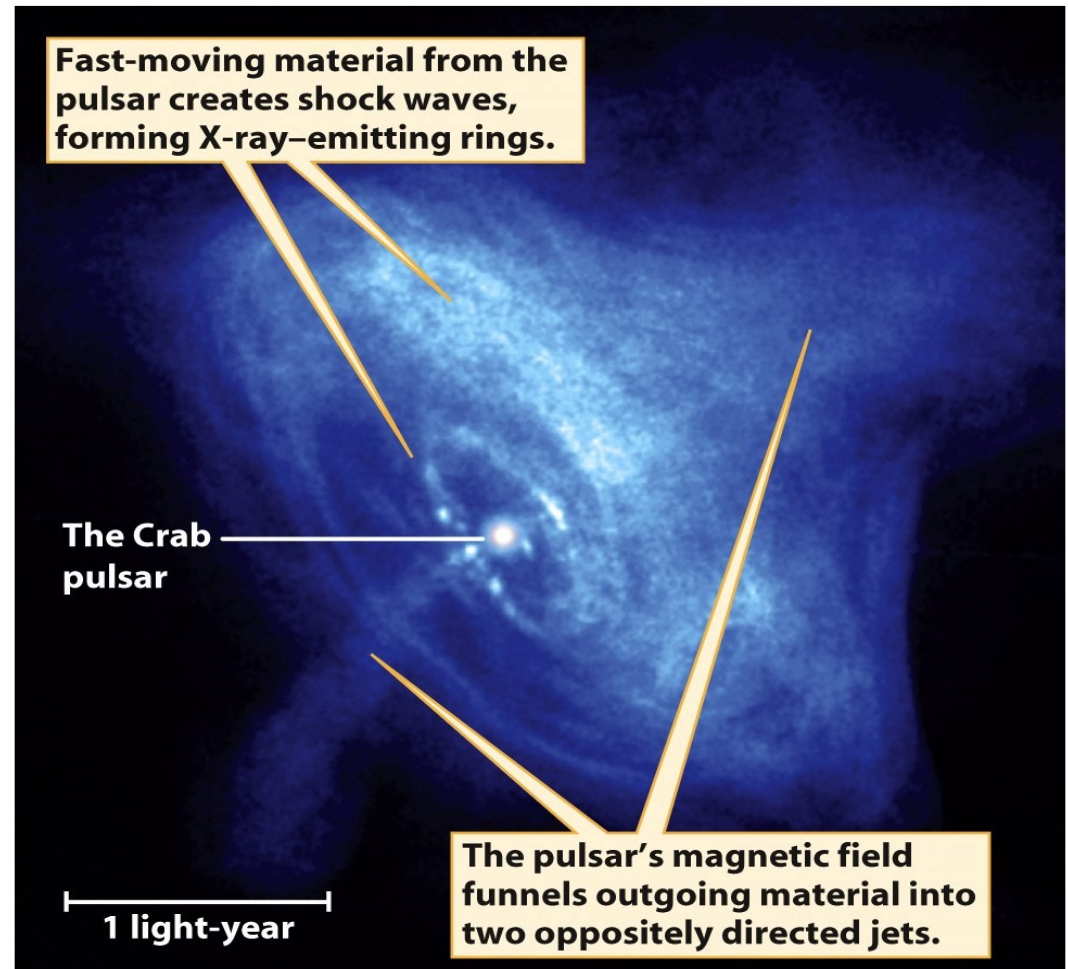
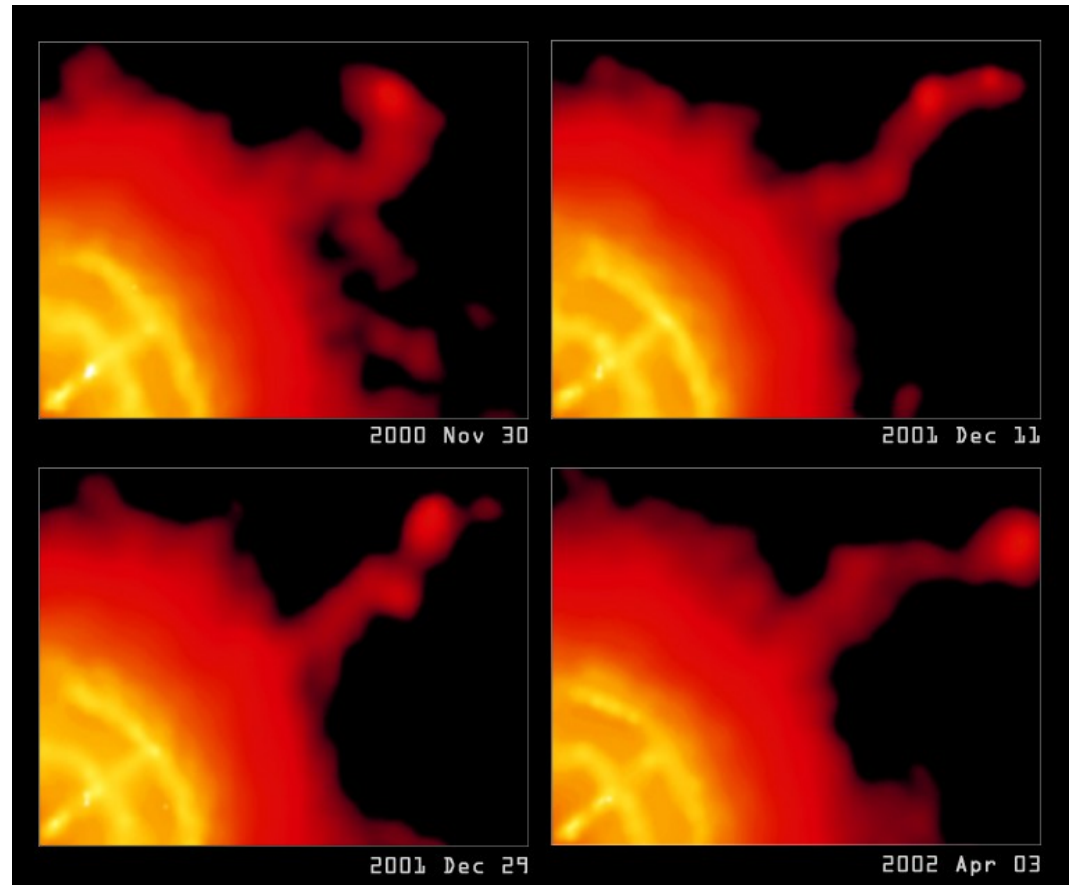


Figure 21-7
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Pulsares

Observando os arredores do Pulsar por vários meses, pode-se ver a **propagação da frente de choque dos jatos na Nebulosa.**

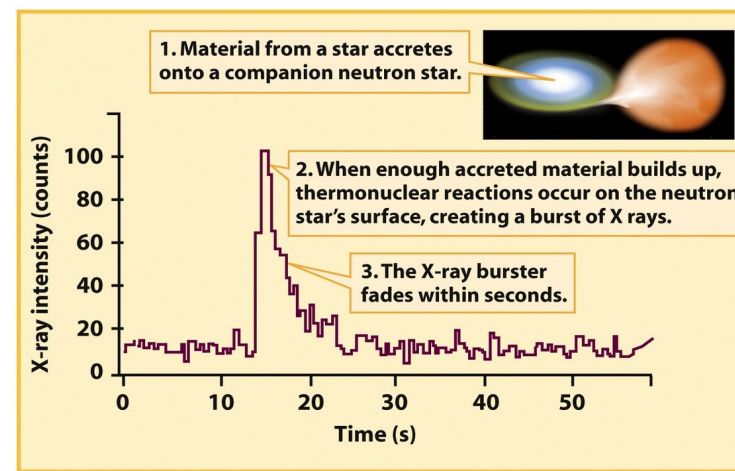
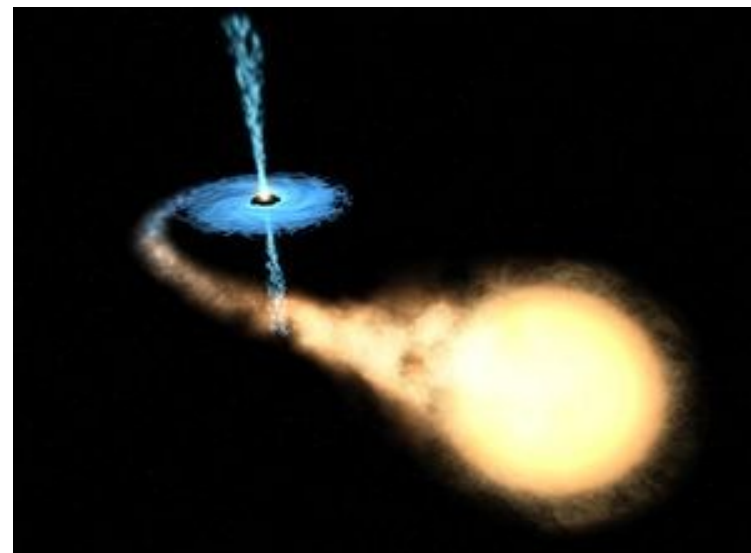


A Nebulosa de Vela ao longo de um ano e meio

Binárias com Estrelas de Nêutrons

Igual como Anãs Brancas, **Estrelas de Nêutrons** também podem fazer parte de **sistemas binários**, que é o caso pra maioria dos Pulsares de milissegundos.

Nestes sistemas podem ocorrer fenômenos similares às **Novas**, as **Erupções de Raio X de longa duração**, liberando até 100 000 vezes a potência do Sol por poucos segundos).

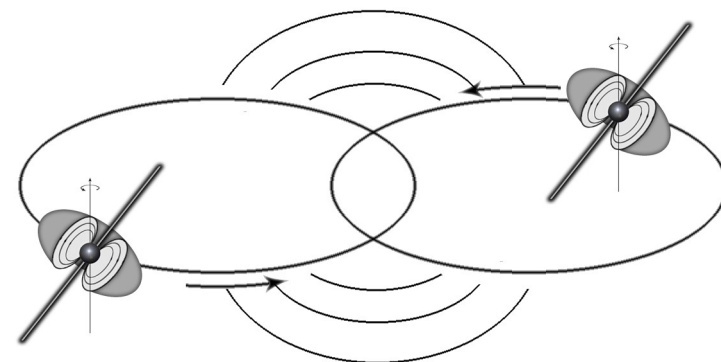


Curva de luz de uma erupção de raio X

Binárias com Estrelas de Nêutrons

Sistemas de duas Estrelas de Nêutrons

Em certos casos, **duas Estrelas de Nêutrons** numa **binária** podem ser **alinhadas** tal, que conseguimos saber quase tudo sobre o sistema, caso quando uma é um **Pulsar**.



Desenho esquemático do pulsar binário Hulse-Taylor

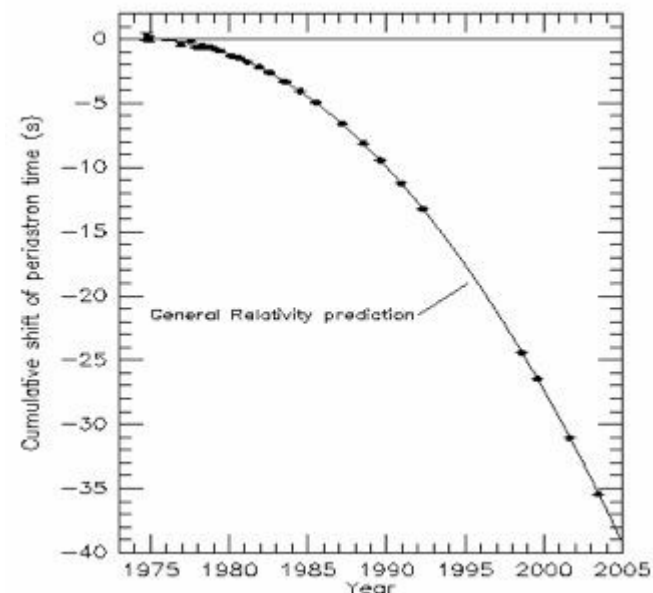
No sistema Hulse-Taylor conhecemos as **massas** das duas Estrelas de Nêutrons com uma precisão de **0.0002 massas solares**, e os parâmetros de pulsação e orbitais com precisão maior ainda.

Binárias com Estrelas de Nêutrons

Sistemas de duas Estrelas de Nêutrons

Mas a propriedade mais útil deste sistema é que ele permite **corroborar** a **Teoria da Relatividade Geral**.

Segundo esta, dois objetos de **alta massa** como Estrelas de Nêutrons **orbitando-se** em **curta distância** deveriam emitir **ondas gravitacionais**, resultando em uma **rotação** do **periastron** (ponto de maior aproximação das duas) de $\sim 4.23^\circ$ por ano, fato **confirmado** nas **observações** (\Rightarrow aula Relatividade)



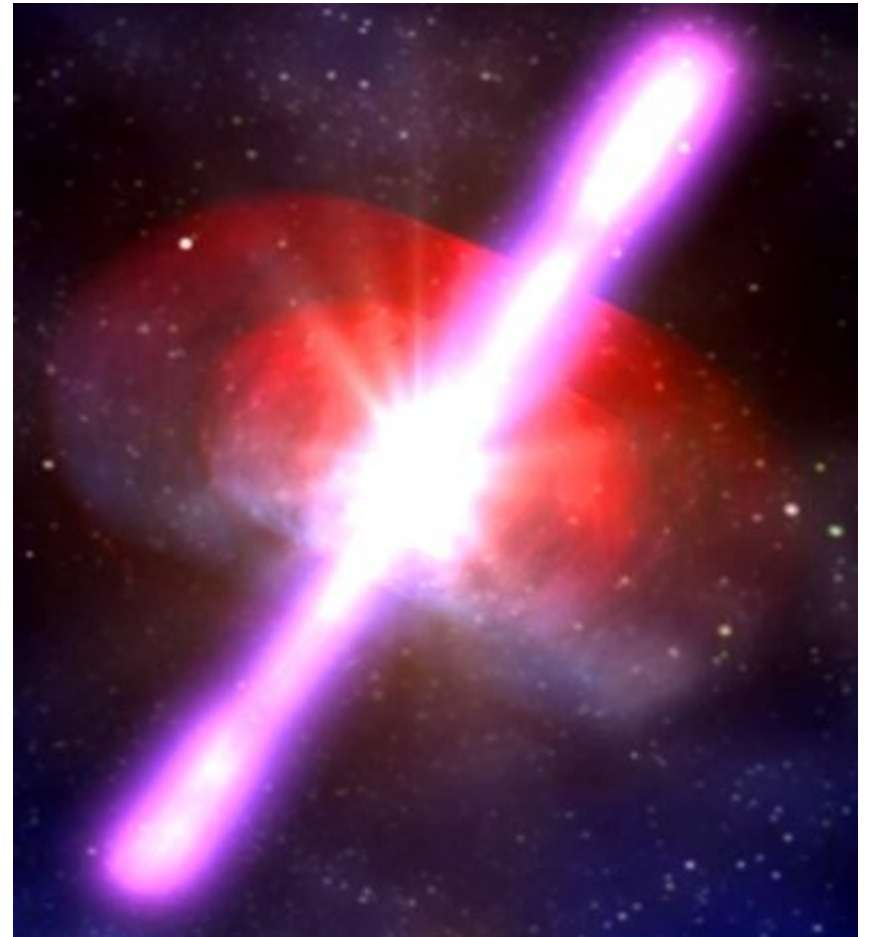
Atraso acumulado da passagem pelo periastron no sistema Hulse-Taylor

Binárias com Estrelas de Nêutrons

Sistemas de duas Estrelas de Nêutrons

Acredita-se que **binárias** de duas **Estrelas de Nêutrons** terminam na **fusão** das duas, formando uma **Estrela de Nêutrons** de **maior massa** ou um **Buraco Negro** , acompanhado por uma **erupção de raios gama** (ou uma erupção de Raio X) **de curta duração** .

Mais sobre Surtos de Raios X e Gama na próxima aula.





Universidade Federal do ABC

Introdução à Física Estelar

FIM PRA HOJE

