



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

# CIAA 2007

## Flavio D'Amico

Divisão de Astrofísica, INPE, Brasil

`damico@das.inpe.br`



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

# CIAA 2007

## Flavio D'Amico

Divisão de Astrofísica, INPE, Brasil

`damico@das.inpe.br`

Aula : Estágios Finais de Estrelas

- Bom dia !!!
- Estória: a primeira vez que essa aula apareceu no CIAA . . .
- A principal argumentação dos professores é o foco que algumas revistas de divulgação dão aos chamados objetos compactos.
- Isto define meu objetivo nesta aula. Aos alunos que, por um acaso, já saibam mais profundamente sobre o tema, as minhas desculpas.
- Minha apresentação vai ser bastante **qualitativa**: assim sendo, me interrompam quantas vezes vocês queiram.

# 1. INTRODUÇÃO

- O estudo dos estágios finais de evolução estelar é, na verdade, uma complementação ao estudo da evolução estelar

# 1. INTRODUÇÃO

- ▶ O estudo dos estágios finais de evolução estelar é, na verdade, uma complementação ao estudo da evolução estelar
- ▶ Assim sendo, eu preciso agradecer ao Hugo Vicente Capelato que apresentou-nos a evolução estelar...

# 1. INTRODUÇÃO

- ▶ O estudo dos estágios finais de evolução estelar é, na verdade, uma complementação ao estudo da evolução estelar
- ▶ Assim sendo, eu preciso agradecer ao Hugo Vicente Capelato que apresentou-nos a evolução estelar...
- ▶ ...porque eu seria incapaz de agradecer a mim mesmo...

# 1. INTRODUÇÃO

- ▶ O estudo dos estágios finais de evolução estelar é, na verdade, uma complementação ao estudo da evolução estelar
- ▶ Assim sendo, eu preciso agradecer ao Hugo Vicente Capelato que apresentou-nos a evolução estelar...
- ▶ ...porque eu seria incapaz de agradecer a mim mesmo...
- ▶ Falando sério: nós nada mais vamos fazer aqui do que tratar da teoria da **Evolução Estelar**, que é um dos Pilares da Astrofísica

➤ O Hugo, aliás, no seu Capítulo deixou uma boa dica para se referir aos objetos oriundos dos estágios finais da evolução estelar: **objetos de 3<sup>a</sup> idade**.

➤ Esses objetos são os seguintes: Anãs Brancas, Estrelas de Nêutrons e Buracos Negros.

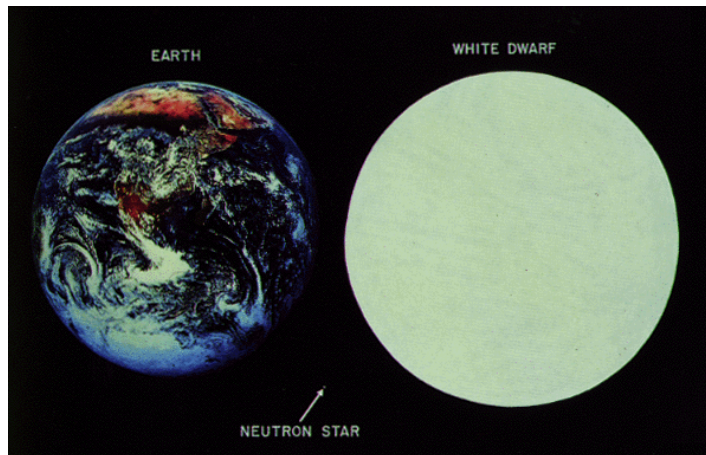


## 2. OBJETOS COMPACTOS

- ▶ As estrelas de 3ª idade são conhecidas pelo nome de **objetos compactos**.
- ▶ Uma anã branca têm um raio da ordem do raio da Terra e uma massa de  $\sim 1,4 M_{\odot}$ .
- ▶ Uma estrela de nêutrons tem um raio da ordem de 15 km e uma massa da ordem de  $1,4 M_{\odot}$ .

## 2. OBJETOS COMPACTOS

- ▶ As estrelas de 3ª idade são conhecidas pelo nome de **objetos compactos**.
- ▶ Uma anã branca têm um raio da ordem do raio da Terra e uma massa de  $\sim 1,4 M_{\odot}$ .
- ▶ Uma estrela de nêutrons tem um raio da ordem de 15 km e uma massa da ordem de  $1,4 M_{\odot}$ .



➤ Como objetos estelares tão densos podem existir?

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

$\rho =$

► Como objetos estelares tão densos podem existir?

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

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

➤ Como objetos estelares tão densos podem existir?

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

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

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

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

➤ compare as densidades acima com a densidade da água, por exemplo.

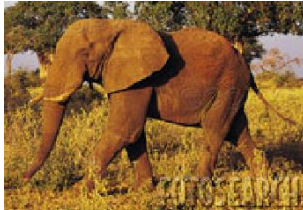
► **Exercício 3.** Suponha que você retire da superfície de uma anã branca uma colherzinha com  $1 \text{ cm}^3$  de matéria. Qual a massa que você acabou de retirar?

► **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?

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

► **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?

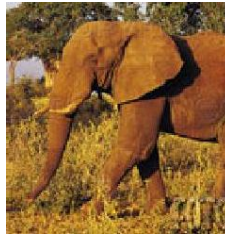
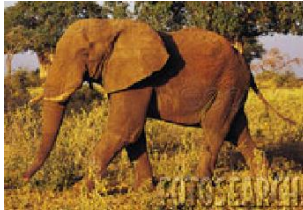
$$M = \rho \cdot V \sim 10^7 \cdot 1 \sim 10^7 \text{ g} \sim 10 \text{ toneladas}$$





► **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?

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



► querem fazer a mesma conta para uma estrela de nêutrons?

### 3. MATÉRIA EXTREMAMENTE DENSA

- Vida Estelar: contrabalançar a gravitação.
- eu já usei esse termo antes: batalha diária.
- na maior parte da vida, conversão de Hidrogênio em Hélio: depois Hélio em Carbono, Carbono em Oxigênio, Oxigênio em Silício, ...
- na seqüência princial → maior parte da vida de uma estrela
- as outras queimas são rápidas: a queima de Carbono (na região central) demora alguns mil anos; a de Oxigênio, **só 1 ano**; a de Silício **só uma semana!!!**
- a pressão gravitacional, momentâneamente, vence a batalha para uma nova queima começar.

- ▶ e se esse aumento de temperatura não for suficiente para começar uma nova queima para conter o colapso gravitacional?
- ▶ se isso não acontecer, ou a estrela acha outro mecanismo para conter o colapso ou então ela *morre*, colapsa.
- ▶ outro detalhe: a fusão só é exoenergética até o Ferro.

► matéria extremamente densa

➤ matéria extremamente densa



- ▶ a imagem do Maracanã foi só pra fazer uma comparação com um átomo
- ▶ trocando em miúdos: diâmetro atômico é da ordem de  $1 - 5 \text{ \AA}$
- ▶ diâmetro nuclear:  $10^{-4} \text{ \AA}$
- ▶ se EU fosse a escala natural para medir o tamanho de um núcleo atômico...
- ▶ eu espero ter mostrado que, em um átomo, existe um grande vazio
- ▶ e se os elétrons se aproximassem um dos outros, o que acontece com a densidade?

➤ pois é exatamente isso que acontece no caso de uma **anã branca**: a pressão que impede o colapso gravitacional é devida aos elétrons

➤ pressão de degenerescência dos elétrons.

➤ é esta pressão que dá origem (sustenta contra o colapso gravitacional) a uma **anã branca**.

➤ a observação das **anãs brancas** é mais um dos trunfos da teoria de evolução estelar, um dos pilares da Astrofísica.

➤ e se a pressão aumentar ainda mais? o que acontece com a estrutura nuclear?

➤ Física de Partículas:  $p + e^- \longrightarrow n + \nu$

➤ com o aumento da densidade: mar de nêutrons!!!

➤ argumentos teóricos construídos a partir desses fatos permitem-nos imaginar a existência das **estrelas de nêutrons**

➤ as **estrelas de nêutrons** são sustentadas pela pressão de degenerescência dos nêutrons.



➤ e se nem a pressão de degenerescência dos nêutrons for capaz de conter o colapso gravitacional?

➤ neste caso, o colapso gravitacional não para...

➤ e um **buraco negro** é formado: um objeto de densidade infinita!!!!

➤ é claro que o processo de formação dos objetos compactos seja entendido de maneira bem mais detalhada do que a que eu descrevi.

➤ quais estrelas terminam suas vidas como anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros?

➤ a pergunta não é simples de se responder, mas as estrelas acima de  $8 M_{\odot}$  devem terminar suas vidas como estrelas de nêutrons OU buracos negros

➤ e as de massa inferior a  $5 M_{\odot}$  como anãs brancas.

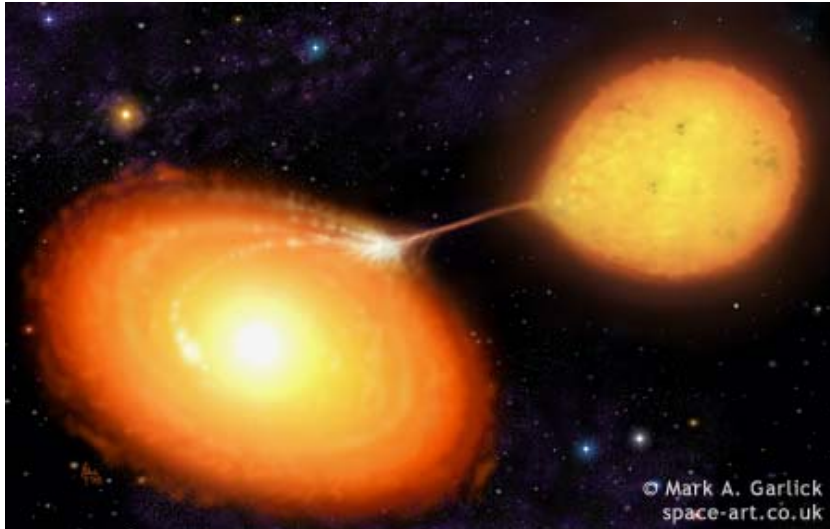
## 4. ANÃS BRANCAS

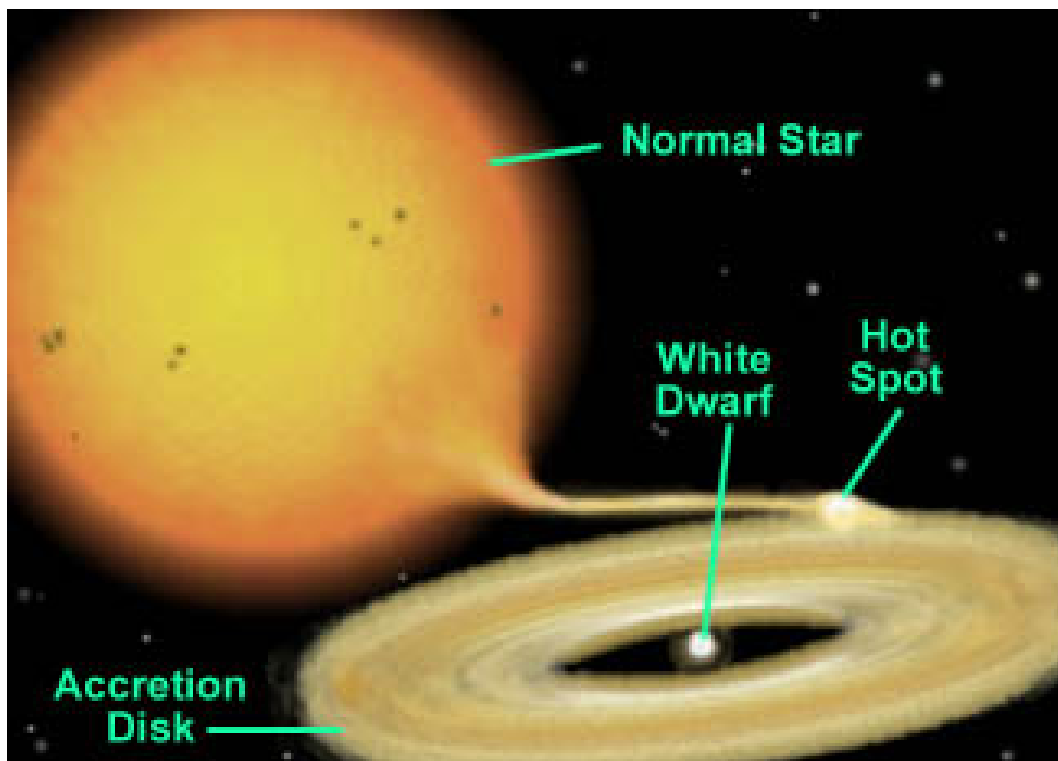
- ▶ Nós já vimos alguns detalhes de como as anãs brancas se formam
- ▶ só mais um pouco de história...
- ▶ 1915: a massa da companheira de Sirius (Sirius B) já era conhecida. Com uma massa da ordem de  $0,75 - 0,95 M_{\odot}$  e com um raio da ordem do raio da Terra, já se sabia que essa estrela não podia iniciar um novo ciclo de queima nuclear
- ▶ 1914: Walter Sydney Adams mediu o desvio gravitacional de várias linhas em Sirius B e, como a massa já era conhecida, pode medir o seu raio.

- ▶ em 1928 Sir Ralph Fowler, usando a recém proposta estatística de Fermi-Dirac, explicou como Sirius B, com uma densidade de  $10^6 \text{ g cm}^{-3}$ , podia existir.
- ▶ em 1930 Subrahmanyan Chandrasekhar, usando a teoria da relatividade, mostrou que uma anã branca tem uma máxima massa possível, que é da ordem de  $1,4 M_{\odot}$ .
- ▶ também neste trabalho Chandrasekhar apontou as anãs brancas como o estágio final de vida das estrelas de pequena massa.
- ▶ o limite de massa das anãs brancas ficou conhecido com o nome de **limite de Chandrasekhar**, e *Chandra* ganhou o Nobel de Física de 1983.
- ▶ texto na apostila

## 4.1 Variáveis Cataclísmicas

- Sistemas binários com uma anã branca
- **EXTREMAMENTE** importantes: discos de acreção (acresção.)





## 5. ESTRELAS DE NÊUTRONS

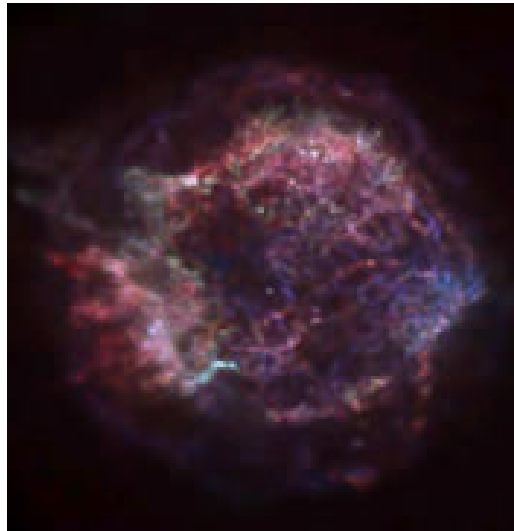
► Um pouco de história...

► 1934 → Baade e Zwicky propõem que uma classe de objetos de densidade maior que as anãs brancas existem, as **estrelas de nêutrons**. Profetizam que elas nascem em explosões de supernovas.

## 5. ESTRELAS DE NÊUTRONS

► Um pouco de história...

► 1934 → Baade e Zwicky propõem que uma classe de objetos de densidade maior que as anãs brancas existem, as **estrelas de nêutrons**. Profetizam que elas nascem em explosões de supernovas.

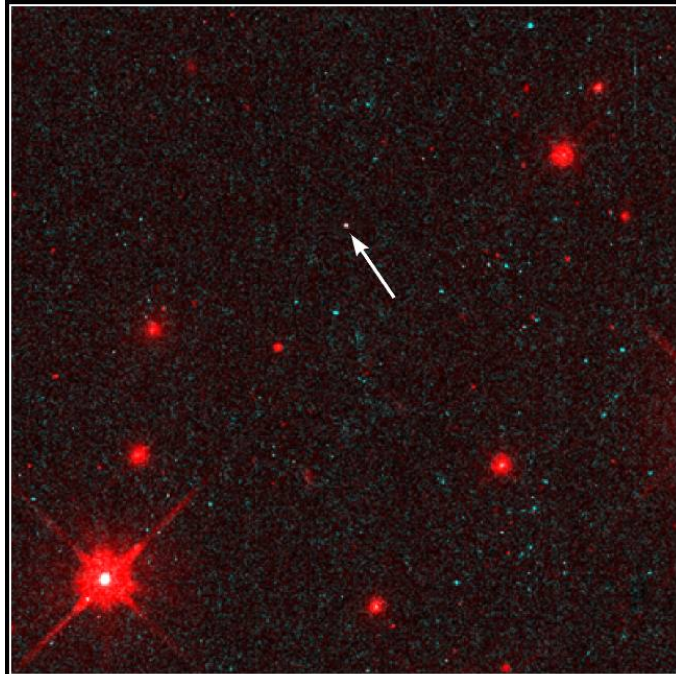




► Oppenheimer e Volkoff, 1939 → primeiros cálculos estruturais

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{G[\rho(r) + P(r)/c^2][m(r) + 4\pi r^3 P(r)/c^2]}{r^2 [1 - 2Gm(r)/r c^2]}$$

► depois desse trabalho as estrelas de nêutrons foram “deixadas de lado”...



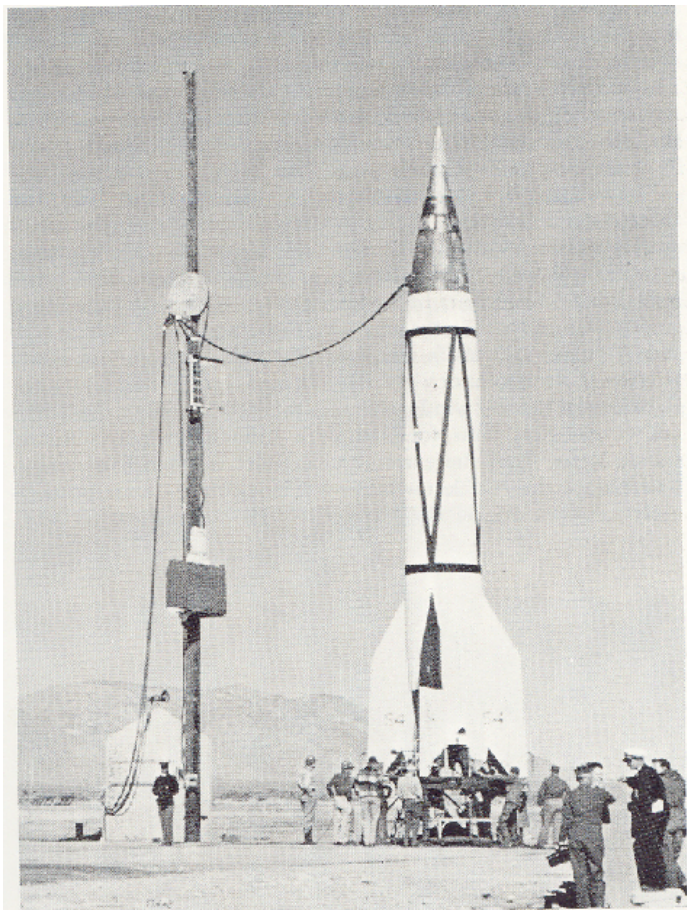
**Isolated Neutron Star RX J185635-3754** HST • WFPC2

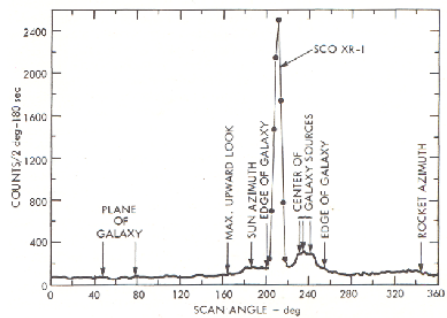
PRC97-32 • ST ScI OPO • September 25, 1997

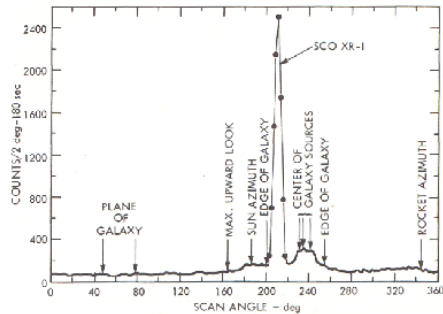
F. Walter (State University of New York at Stony Brook) and NASA

► Na década de 60, duas descobertas fantásticas reavivaram o interesse pelas estrelas de nêutrons: a descoberta de Sco X-1 e a descoberta do primeiro pulsar rádio.







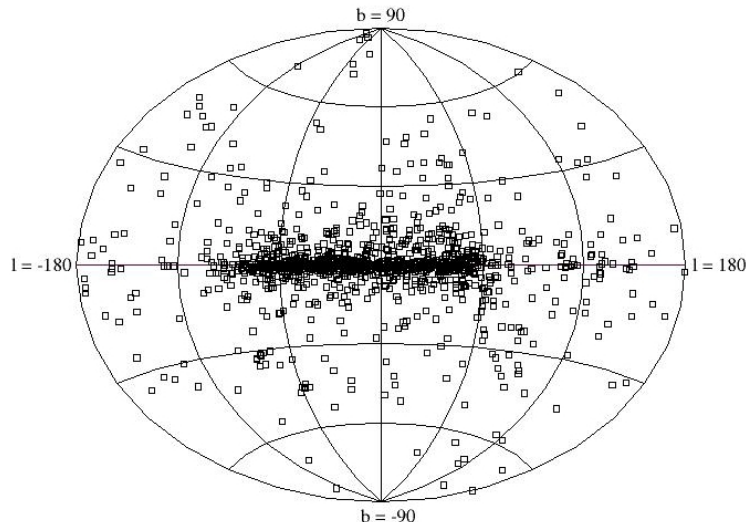


► Após essas duas descobertas, as **estrelas de nêutrons** entraram no vocabulário corriqueiro da Astrofísica (Ricardo Giacconi foi agraciado com o Nobel de Física de 2002).

► Massa máxima  $\longrightarrow 3 M_{\odot}$ .

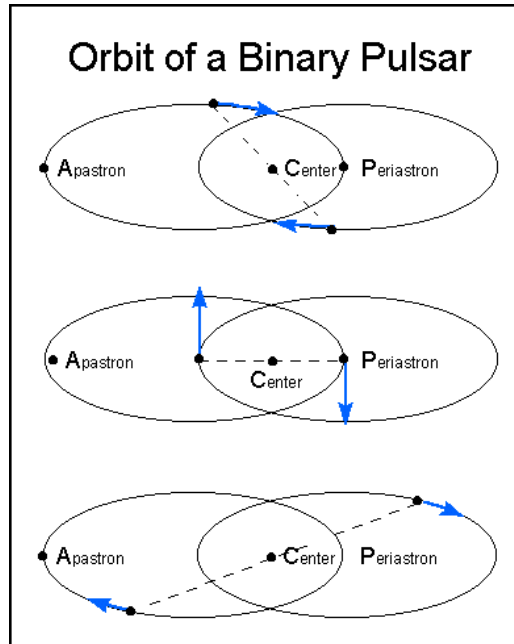
## 5.1 Pulsares

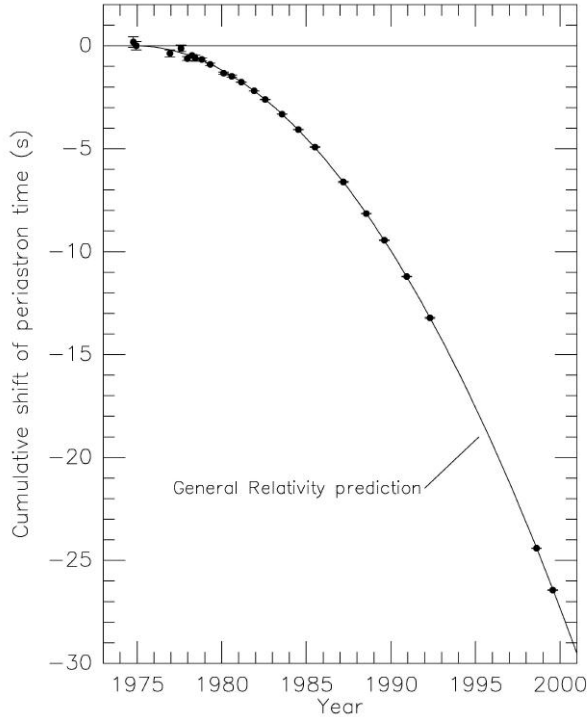
- ▶ Descobertos em 1968, mas *profetizados* em 1967, por Franco Pacini
- ▶ Fonte de energia  $\longrightarrow$  energia cinética de rotação.
- ▶ Atualmente  $\longrightarrow$  mais de 1200 conhecidos





► Outros estudos com pulsares → ondas gravacionais com o pulsar PSR B1913+16

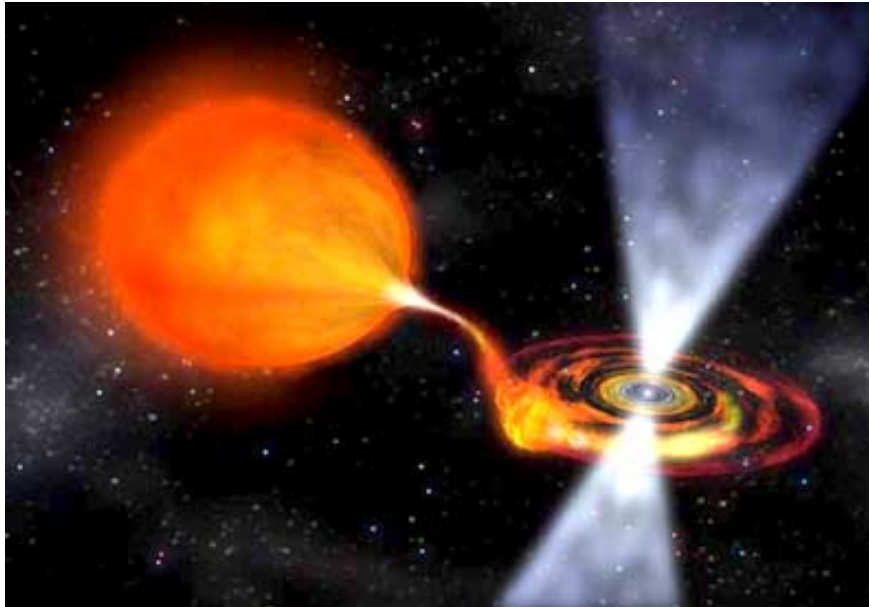




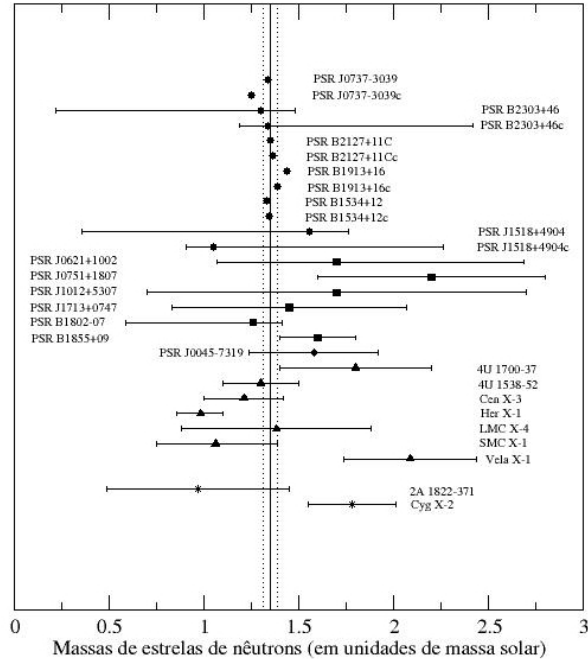
► Russel Hulse e Joseph Taylor foram laureados com o Nobel de Física de 1993.

## 5.2 Binárias de raios-X

► ao contrário dos pulsares, a fonte de energia é gravitacional



## ► Massas de estrelas de nêutrons



## 6. BURACOS NEGROS

- ▶ Os buracos negros são, talvez, os objetos astrofísicos que mais fascinam o público leigo em Astrofísica
- ▶ Como pode existir um objeto que não deixe nem mesmo a luz escapar do seu potente campo gravitacional?
- ▶ Eu acho que, de certa forma, a ordem das coisas é invertida, ou seja, o fato do campo gravitacional ser intenso é uma **consequência** da existência dos buracos negros.
- ▶ Como nós, astrofísicos, podemos ter tanta certeza da existência desses objetos?

1. 🍷 Estrelas  $\longrightarrow$  evolução estelar  $\longrightarrow$  um dos **PILARES** da Astrofísica

1. 🍷 Estrelas  $\longrightarrow$  evolução estelar  $\longrightarrow$  um dos **PILARES** da Astrofísica

2. 🍷 Anãs brancas têm uma massa máxima permitida, **BEM ESTABELECIDADA**

1. 🖱️ Estrelas  $\longrightarrow$  evolução estelar  $\longrightarrow$  um dos **PILARES** da Astrofísica
2. 🖱️ Anãs brancas têm uma massa máxima permitida, **BEM ESTABELECIDADA**
3. 🖱️ Estrelas de nêutrons têm uma massa máxima permitida



1. 🖱️ Estrelas  $\longrightarrow$  evolução estelar  $\longrightarrow$  um dos **PILARES** da Astrofísica
2. 🖱️ Anãs brancas têm uma massa máxima permitida, **BEM ESTABELECIDADA**
3. 🖱️ Estrelas de nêutrons têm uma massa máxima permitida
4. 🖱️ E se, a luz do que estudamos (que eu recordei acima), nós medirmos a massa de um objeto compacto e ela for maior do que  $4 M_{\odot}$  ?

1. 🖱️ Estrelas  $\longrightarrow$  evolução estelar  $\longrightarrow$  um dos **PILARES** da Astrofísica
2. 🖱️ Anãs brancas têm uma massa máxima permitida, **BEM ESTABELECIDADA**
3. 🖱️ Estrelas de nêutrons têm uma massa máxima permitida
4. 🖱️ E se, a luz do que estudamos (que eu recordei acima), nós medirmos a massa de um objeto compacto e ela for maior do que  $4 M_{\odot}$  ?

**NADA DETEM O COLAPSO!!!!**

1. 🖱️ Estrelas  $\longrightarrow$  evolução estelar  $\longrightarrow$  um dos **PILARES** da Astrofísica
2. 🖱️ Anãs brancas têm uma massa máxima permitida, **BEM ESTABELECIDADA**
3. 🖱️ Estrelas de nêutrons têm uma massa máxima permitida
4. 🖱️ E se, a luz do que estudamos (que eu recordei acima), nós medirmos a massa de um objeto compacto e ela for maior do que  $4 M_{\odot}$  ?

**NADA DETEM O COLAPSO!!!!**

► de acordo com a Teoria da Relatividade Geral toda a matéria colapsa para um ponto, uma *singularidade*.

- A relatividade Geral permite-nos dizer que a singularidade é formada, mas não permite dizer mais nada sobre a Física além desse limite
- para especular sobre a Física na região da singularidade, nós precisamos de uma teoria quântica da gravitação que, efetivamente, ainda não existe
- essa teoria quântica da gravitação tem que responder em um regime de densidades da ordem de  $10^{93} \text{ g cm}^{-3}$  ...

► Um buraco negro é definido como uma região do espaço tempo que não pode se comunicar com o universo externo.

► uma das grandezas que caracterizam um buraco negro é o **Raio de Schwarzschild**

► uma derivação simplória do raio de Schwarzschild é a seguinte: a velocidade de escape é dada por

$$\frac{1}{2} m v_{\text{esc}}^2 = \frac{G M m}{R}$$

quando  $v_{\text{esc}} = c$  temos  $R = R_{\text{Sch}}$

$$R_{\text{Sch}} = \frac{G M}{c^2}$$

$$R_{\text{Sch}} = \frac{GM}{c^2}$$

- Transformando alguém aqui da sala em um buraco negro...
- Agora transformando o Sol...

- Esta aula foi sobre estágios finais de estrelas
- Eu não falei sobre **outros** tipos de buracos negros
- Nem sobre **outros** tipos de estrelas de nêutrons.
- Eu espero que tenha servido como introdução ao assunto dos objetos compactos.

- Esta aula foi sobre estágios finais de estrelas
- Eu não falei sobre **outros** tipos de buracos negros
- Nem sobre **outros** tipos de estrelas de nêutrons.
- Eu espero que tenha servido como introdução ao assunto dos objetos compactos.

**MUITO OBRIGADO, ESTE É O FIM!!!!**