

# Anãs Brancas e Estrelas de Nêutrons

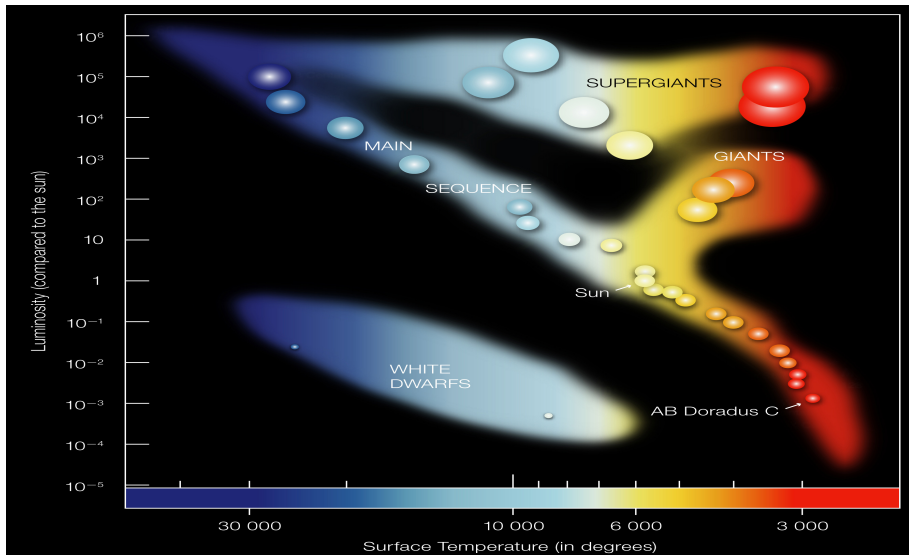
Tulio Ottoni (PPGCosmo/OV-UFRJ)

## Inverno Astrofísico 2022

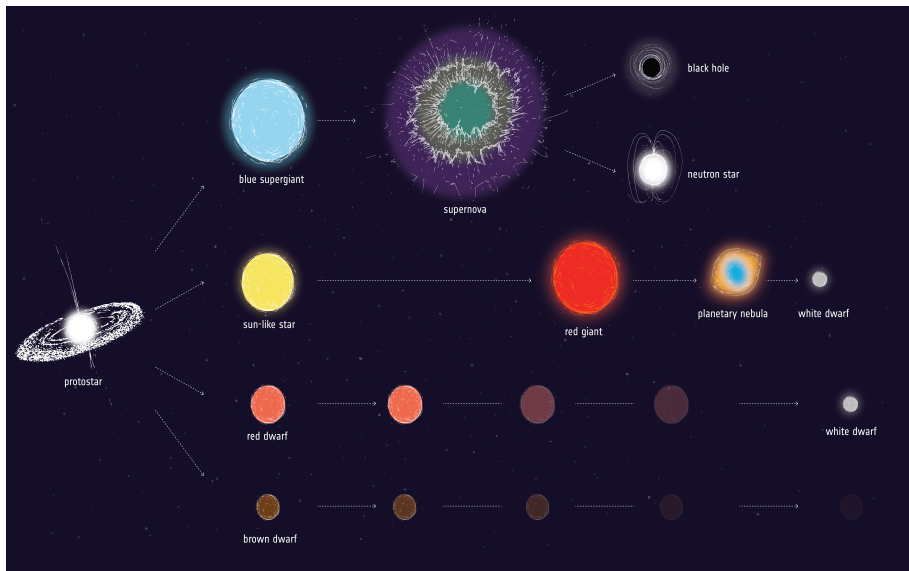


Domingos Martins-ES, 1 de Outubro de 2022.

# O Diagrama HR



# Evolução Estelar



# Estrutura Estelar

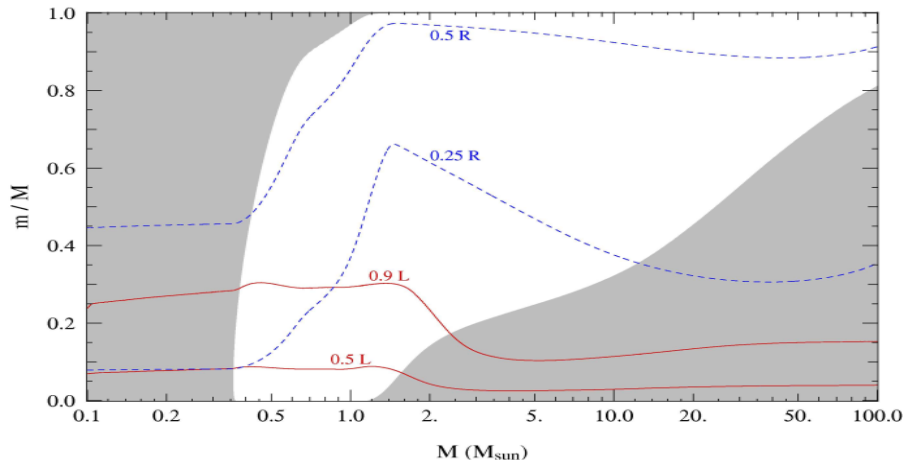


Diagrama que mostra a estrutura de estrelas, de acordo com a massa. Em branco são regiões radiativas e em cinza regiões convectivas. As linhas azuis indicam onde está 1/4 e 1/2 do raio e as vermelhas indicam onde a luminosidade da estrela é produzida.



Temos 4 equações que descrevem a estrutura de estrelas isoladas.

## Estrutura Mecânica

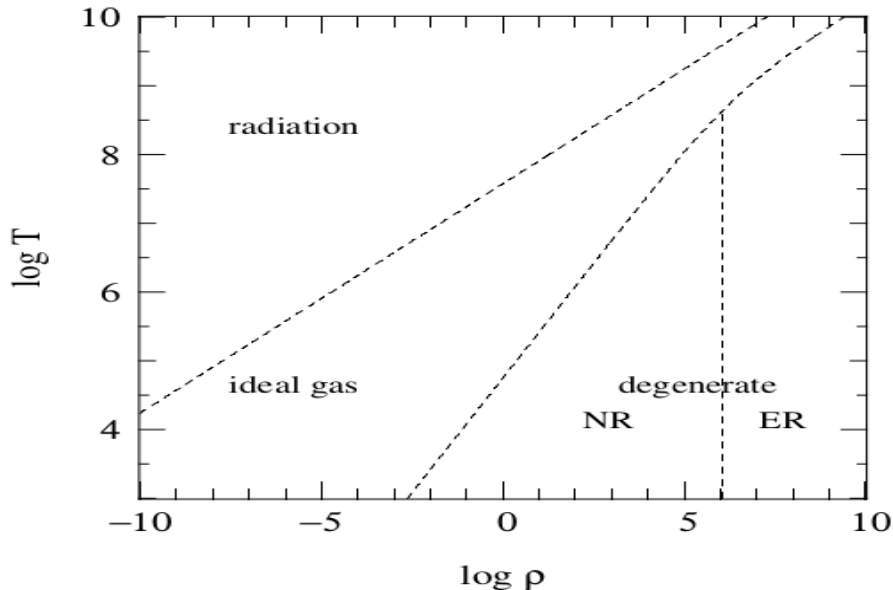
$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{G\rho(r)M(r)}{r^2}$$
$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi\rho r^2$$

## Estrutura Térmica:

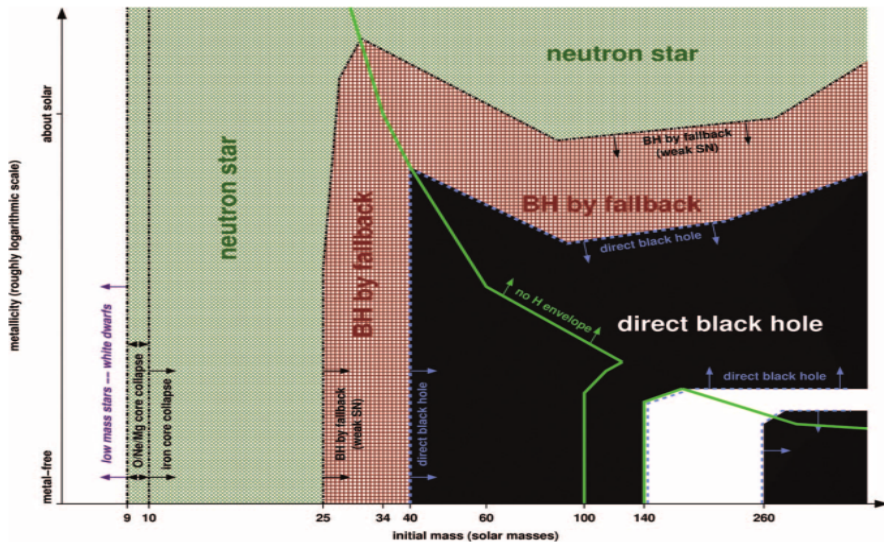
$$\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \epsilon(\rho, T)$$
$$\frac{dT(r)}{dr} = -\frac{\kappa(\rho, T) \rho(r) L(r)}{4caT^3(r) 4\pi r^2}$$

+ Equação de Estado  $P(\rho, T) = ?$  (Sequência Principal)

# Equações de Estado Relevantes



# O Destino das Estrelas



Fonte: A. Heger et al. 2003. (astro-ph/0212469)

# Nebulosa Planetária

Ao fim da sua vida, a queima nuclear faz com que a estrela de  $M < 8M_{\odot}$  perca parte de sua Massa

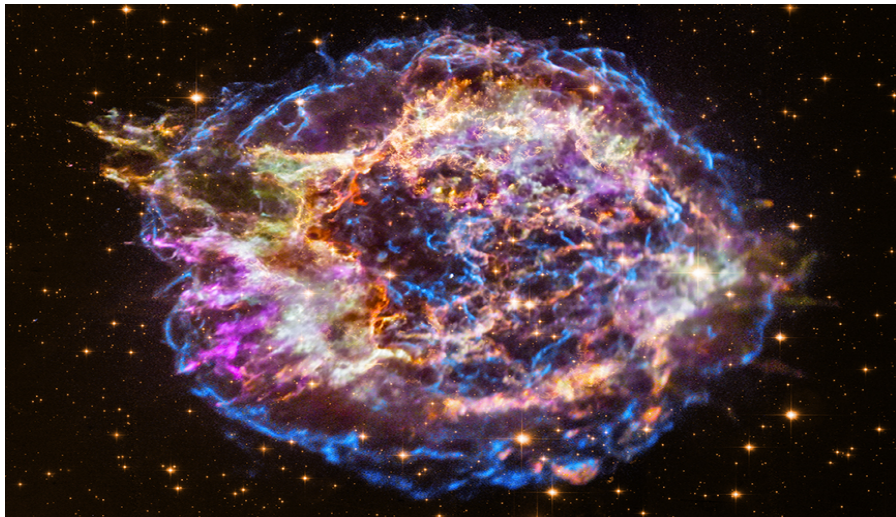


# Supernovas



# Supernovas

Cass A, restos de uma supernova a 11.000 anos-luz da Terra.



# Anãs Brancas

# Propriedade Básicas das Anãs Brancas

- Massa:  $M \sim M_{\odot} = 1.98 \times 10^{30} \text{Kg}$
- Raio:  $R \sim 6.000 \text{Km}$
- Densidade Média:  $\bar{\rho} = 10^3 \text{Kg/cm}^3$
- $T_{\text{eff}} \sim 100.000 \text{K}$

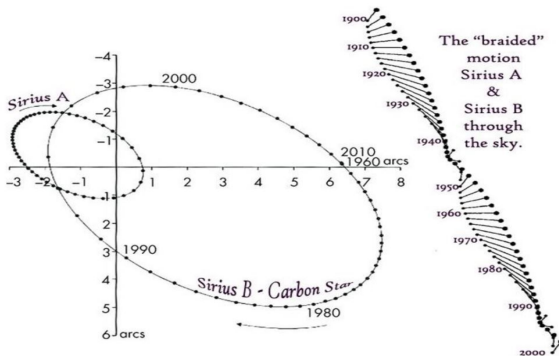


Impressão Artística de uma Anã Branca, o destino final da maioria das estrelas no Universo.



# História das Anãs Brancas

- Em 1844, Friedrich Bessel analisando o movimento de Sirius e Procyon previu que deveria existir uma estrela "invisível" nesses sistemas.
- Em 1862 Alvan Clark viu Sirius B com seu telescópio recém desenvolvido.



Movimento orbital do sistema Sirius A e B.

# Sistema Binário Sirius A e B



Óptico e Raios-X.

# História das Anãs Brancas

- Em 1926, Ralph H. Fowler usando a recém desenvolvida mecânica quântica mostrou que elétrons degenerados poderiam gerar uma pressão que equilibraria a atração gravitacional de uma Anã Branca.
- Entre 1931 e 1935, S. Chandrasekhar calculou com detalhes a estrutura de uma Anã Branca sustentada pela degenerescência eletrônica. Em particular, ele mostrou que existe um limite  $M \sim 1.4M_{\odot}$  além do qual essas estrelas não se mantêm estáveis.



O jovem Subrahmanyan Chandrasekhar

$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi\rho(r)r^2 \quad \left( M(r) = \int_0^r 4\pi\rho(r')r'^2 dr' \right)$$
$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{GM(r)\rho(r)}{r^2}$$

Falta uma **Equação de Estado**, que descreve a termodinâmica da anã branca.

**Essa equação de estado deve vir da Mecânica Quântica**

Em geral, a **Equação de Estado** é uma relação complicada

$$P = P(\rho, T, X_i).$$

Porém fazemos algumas simplificações (justas). Primeiro admitimos uma equação chamada barotrópica

$$P = P(\rho).$$

Em seguida, supomos uma forma **politrópica**

$$P = K\rho^\Gamma \quad \text{ou} \quad P = K\rho^{1+\frac{1}{n}} \quad (\Gamma \equiv 1 + 1/n)$$

# Estrutura de uma Anã Branca

Logo,

$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi\rho(r)r^2 \quad (1)$$

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{GM(r)\rho(r)}{r^2} \quad (2)$$

$$P = K\rho^{1+\frac{1}{n}} \quad (3)$$

Podemos unificar essas três equações. Primeiramente, diferenciamos a equação 2

$$\frac{d}{dr} \left( \frac{r^2}{\rho(r)} \frac{dP(r)}{dr} \right) = -G \frac{dM(r)}{dr} = -4\pi G\rho(r)r^2, \quad (4)$$

Definimos agora

$$\xi = \frac{r}{r_0} \quad (5)$$

$$\rho(r) = \rho_c \theta^n(r), \quad (6)$$

# Estrutura de uma Anã Branca

Assim, substituindo essas novas variáveis na equação, temos

$$\frac{1}{\xi^2} \frac{d}{d\xi} \left( \xi^2 \frac{d\theta}{d\xi} \right) = -\theta^n \left( \frac{4\pi G r_0^2}{(1+n)\rho_c^{\frac{1-n}{n}} K} \right).$$

Conseguimos eliminar o termo constante entre parênteses se definirmos a distância característica como

$$r_0 = \sqrt{\frac{(1+n)\rho_c^{\frac{1-n}{n}} K}{4\pi G}}, \quad (7)$$

E ficamos finalmente com

$$\frac{d^2\theta}{d\xi^2} + \frac{2}{\xi} \frac{d\theta}{d\xi} + \theta^n = 0 \quad (8)$$

conhecida como **equação de Lane-Emden**.

O fator de ocupação dos estados para férmions é

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-\mu)/k_B T} + 1} \leq 1, \quad (9)$$

onde  $\mu$  é o potencial químico.

Para baixas densidades e altas temperaturas,

$$f(E) \approx e^{\frac{-E}{k_B T}}, \quad (10)$$

que é o fator de ocupação clássico de Maxwell-Boltzmann.



# Equação de Estado

A densidade de férmions é dada pelo número de estados e o fator de ocupação

$$n = \frac{g}{h^3} \int_0^{\infty} f(E) 4\pi p^2 dp, \quad (11)$$

onde  $g$  representa a degenerescência de cada estado. Para os elétrons  $g=2$ . No caso de um gás de elétrons completamente degenerado, a ocupação dos estados é dada por

$$f(E) = \begin{cases} 1 & \text{se } E < E_F \\ 0 & \text{se } E > E_F. \end{cases} \quad (12)$$

Podemos assim encontrar o momento de Fermi em termos da densidade

$$n = \frac{8\pi}{h^3} \int_0^{p_F} p^2 dp \quad \Rightarrow \quad n = \frac{8\pi}{3h^3} p_F^3 \quad (13)$$

A Pressão eletrônica será dada por

$$P_e = \frac{1}{3} \int_0^{\infty} p v(p) n(p) dp \quad (14)$$

Considerando o caso degenerado no limite não relativístico ( $p=mv$ )

$$P_e = \frac{1}{3} \int_0^{p_F} \frac{8\pi p^4}{h^3 m_e} dp = \frac{8\pi}{15 h^3 m_e} p_F^5 = \frac{h^2}{20 m_e} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{2/3} n_e^{5/3} \quad (15)$$

Para o caso ultra relativístico ( $v=c$ )

$$P_e = \frac{1}{3} \int_0^{p_F} \frac{8\pi c}{12 h^3} p^4 = \frac{hc}{8} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{1/3} n_e^{4/3} \quad (16)$$

Apesar da pressão ser gerada pelos elétrons a densidade é fornecida pelos íons

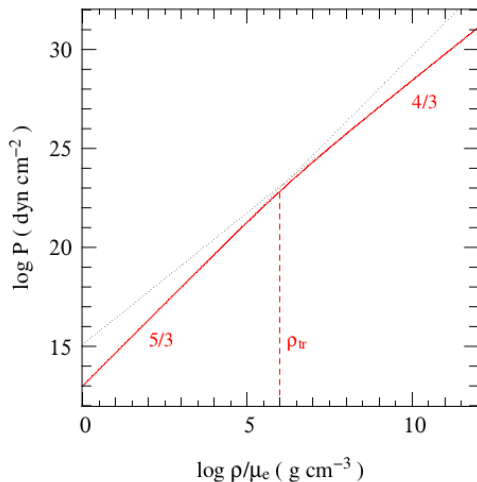
$$n_e = \frac{1}{\mu_e} \frac{\rho}{m_U} \quad (17)$$

onde  $\mu_e$  é o peso médio por elétrons e  $m_U$  é a massa atômica unitária. Assim,

$$P_e = K_{NR} \left( \frac{\rho}{\mu_e} \right)^{5/3}, \quad K_{NR} = \frac{h^2}{20m_e m_U^{5/3}} \left( \frac{3}{\pi} \right)^{2/3} \quad (18)$$

$$P_e = K_{UR} \left( \frac{\rho}{\mu_e} \right)^{4/3}, \quad K_{UR} = \frac{hc}{8m_U^{4/3}} \left( \frac{3}{\pi} \right)^{1/3} \quad (19)$$

# Equação de Estado



Relação entre pressão e densidade para um gás de elétrons degenerados.

Fonte: Lectures on Stellar Structure by O. R. Pols

# O limite de Chandrasekhar

O estudo da equação de Lane-Emden se mostra relevante para as anãs brancas.

$$\frac{1}{\xi^2} \frac{d}{d\xi} \left( \xi^2 \frac{d\theta}{d\xi} \right) = -\theta^n. \quad (20)$$

O raio da estrela é dado por

$$R = r_0 \xi_1 = \sqrt{\frac{(1+n) \rho_c^{\frac{1-n}{n}} K}{4\pi G}} \xi_1. \quad (21)$$

Já a massa da estrela é dada por

$$M(r) = \int_0^R 4\pi r'^2 \rho(r') dr' = 4\pi r_0^3 \rho_c \int_0^{\xi_1} \xi'^2 \theta^n d\xi'. \quad (22)$$

$$= -4\pi r_0^3 \rho_c \left[ \xi^2 \frac{d\theta}{d\xi} \right]_{\xi=\xi_1} \quad (23)$$

# O limite de Chandrasekhar

Encontramos assim uma relação Massa x Raio

$$M \propto R^{\frac{3-n}{1-n}}. \quad (24)$$

Para um gás degenerado não relativístico,  $\Gamma = 5/3 \Rightarrow n = 1.5$

$$M \propto \frac{1}{R^3} \quad (25)$$

Já para o caso relativístico  $\Gamma = 4/3 \Rightarrow n = 3$

## Massa de Chandrasekhar

A massa não depende mais do raio e nem da densidade central, assumindo um valor limite

$$M_{CH} \approx 1.46M_{\odot}. \quad (26)$$

# Diagrama Massa x Densidade Central

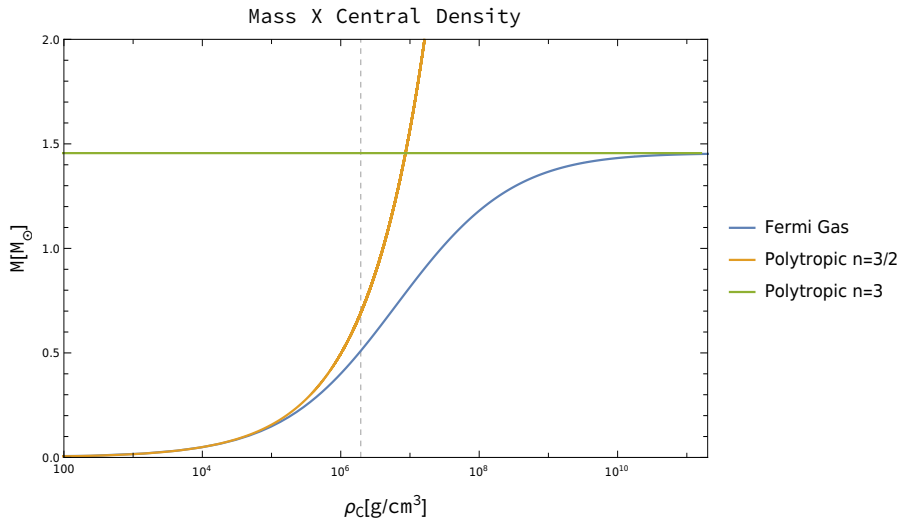
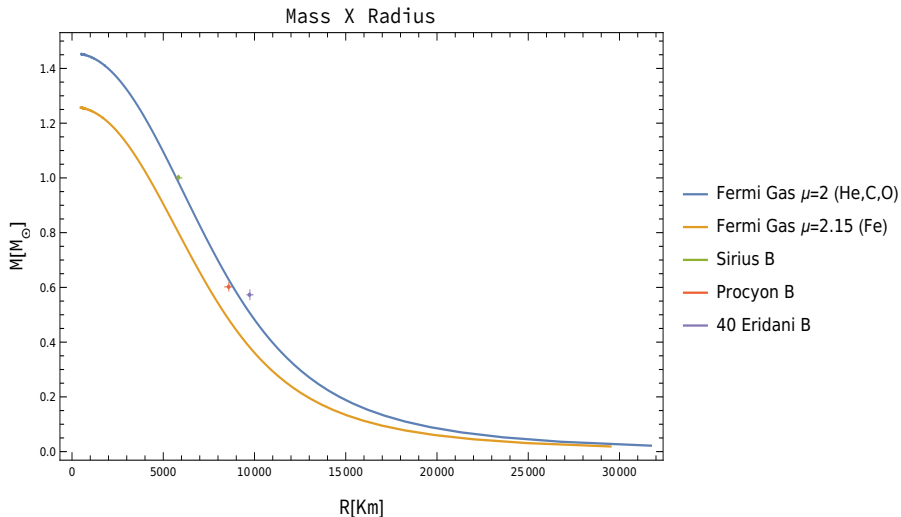


Gráfico mostrando o gás de Fermi junto com as aproximações politrópicas. A linha pontilhada vertical marca a transição entre os regimes da EOS.

# Diagrama Massa x Raio

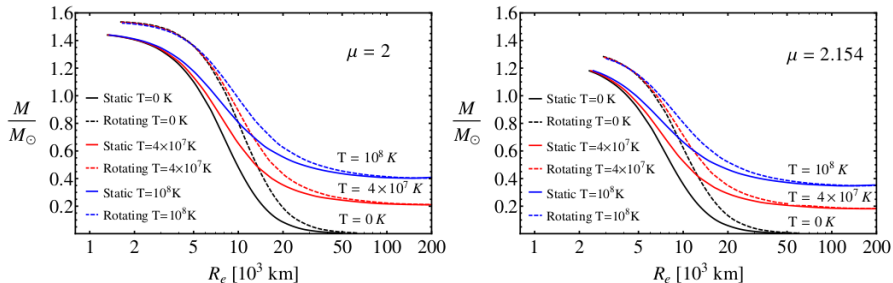


Curva Massa x Raio construída para vários valores da densidade central.



# Correções Importantes na Estrutura Mecânica

## Temperatura Finita e Rotação.



A temperatura e a rotação tornam a estrela maior, para uma dada massa.  
(arXiv:1909.10899)

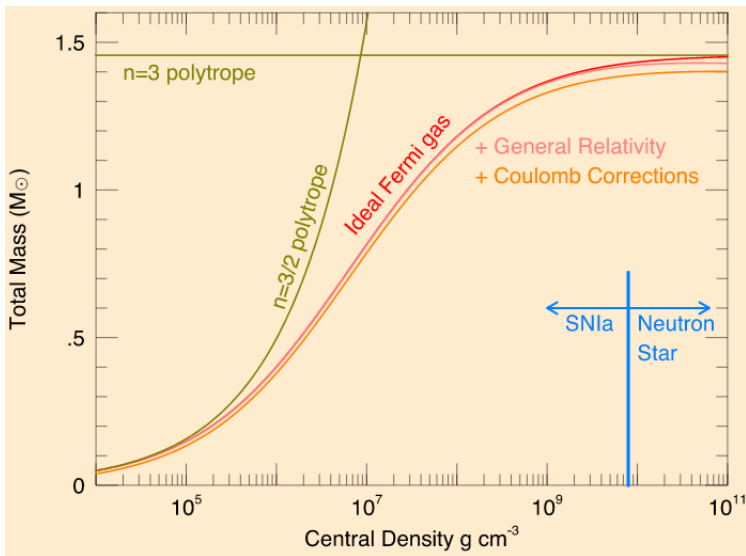
De forma geral, podemos escrever a pressão total como

$$P = P_0 - P_C - P_{TF} - \dots \quad (27)$$

Onde  $P_C$  é correção devido aos íons e  $P_{TF}$  a correção de Thomas-Fermi.

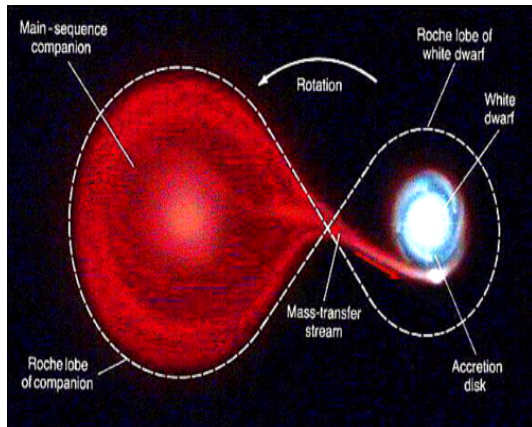
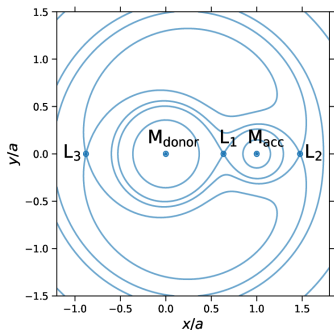
Outro fator importante é o campo magnético e correções da Relatividade Geral para as configurações mais compactas.

# Diagrama Massa X Raio



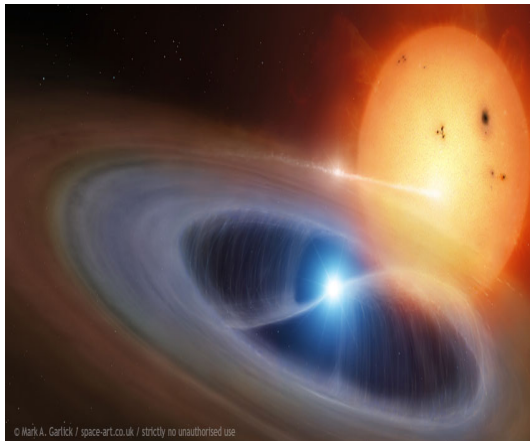
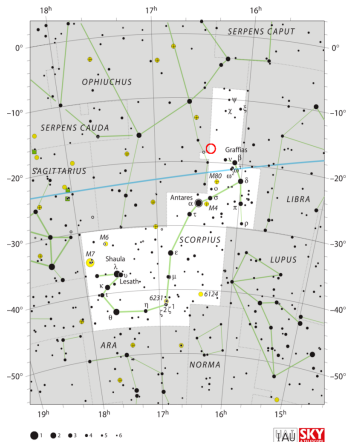
Fonte: <https://cococubed.com/codepages/coldwd.shtml>

# Sistemas Binários e Acreção de Massa



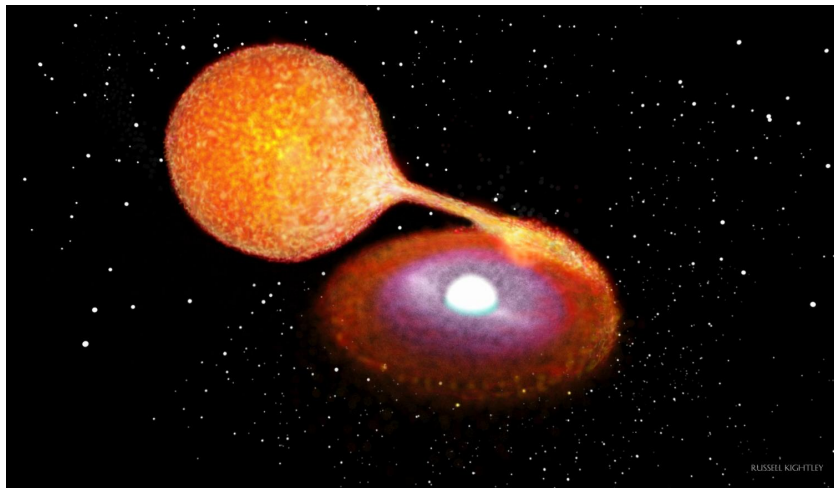
Na esquerda temos as superfícies equipotenciais do sistema binário. Os pontos de potencial constante, onde a força de atração é nula, são chamados **pontos de Lagrange**. Na direita, caso uma estrela gigante atinja um tamanho correspondente ao  $L_1$ , preencherá seu **lobulo de Roche** e começará a perder massa, caso a deformação seja grande.

# Variáveis Cataclísmicas



Sistemas binários com anãs brancas podem gerar surtos de vez em quando, o mais conhecido desses chamados de *Novae*, causada pela queima do hidrogênio acretado na superfície. U Sco é um sistema desses. O último surto foi reportado dia 6 desse mês de Junho, onde a estrela foi de magnitude 17 para 7,8 em apenas 14 horas!!

# Supernovas do tipo Ia

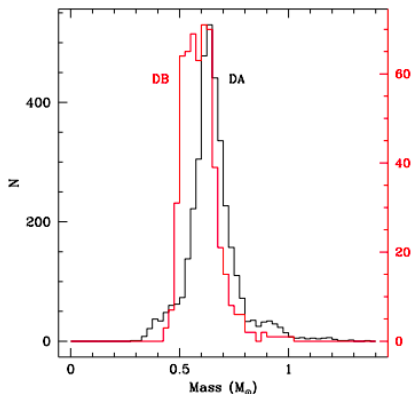


Quando a Anã Branca compartilha a órbita com uma estrela gigante ela começa a roubar sua massa. Caso atinja a massa de Chandrasekhar ela explode ou colapsa em uma estrela de nêutrons.

# Classificação das Anãs Brancas

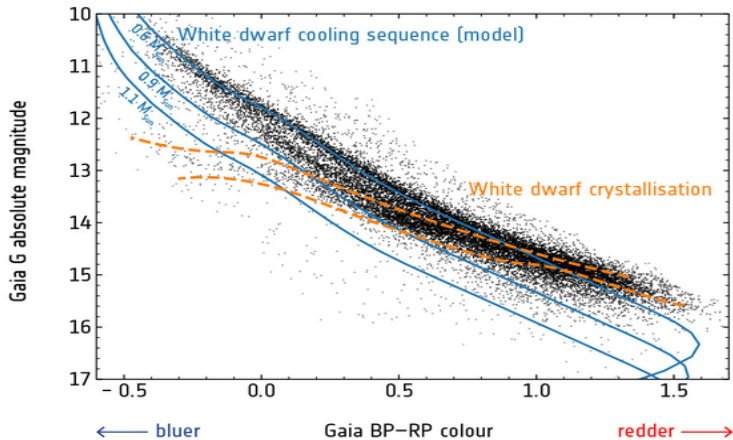
Do ponto de vista espectral, as Anãs Brancas mais comuns são

- DA com atmosfera rica em hidrogênio
- DB com atmosfera rica em Hélio



A distribuição de massas das anãs brancas mais comuns mostra um pico por volta de  $M = 0.6M_{\odot}$ . Fonte: S. O. Kepler et al. 2016

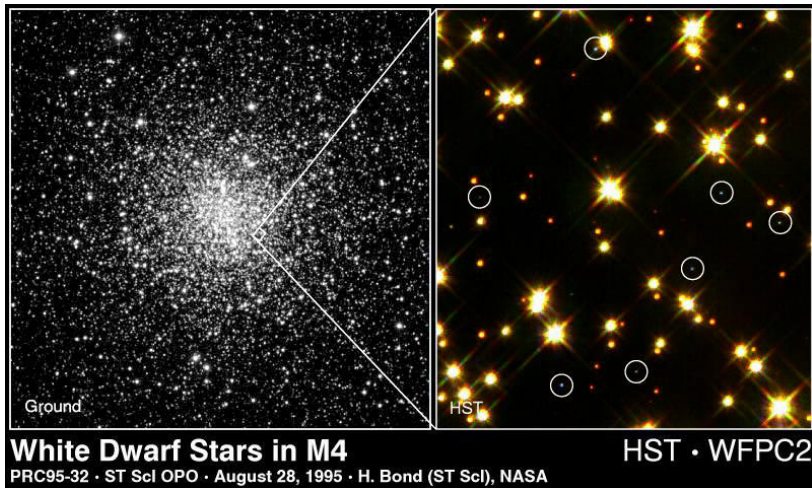
# Resfriamento de uma Anã Branca



A teoria de resfriamento de uma Anã Branca é razoavelmente simples e seu entendimento permite o uso de anãs brancas como um cronômetro cósmico.

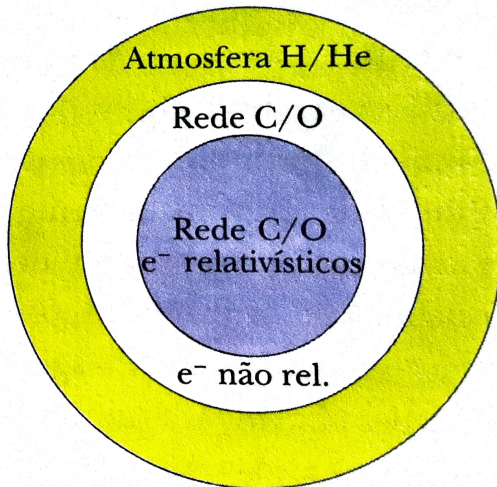


# Anãs Brancas em M4



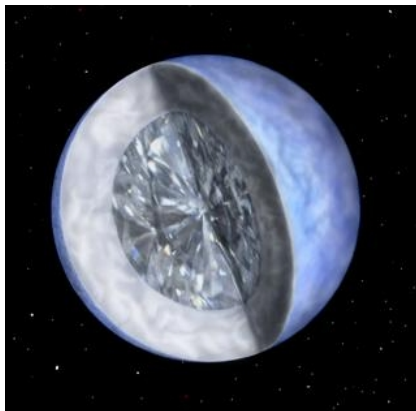
Anãs Brancas identificadas pelo Hubble no aglomerado mais próximo da terra, localizado a 7.000 anos-luz. Elas permitem uma estimativa da idade do aglomerado.

# O Interior de uma Anã Branca



# O Interior de uma Anã Branca

Já a composição interior da maioria das Anãs Brancas é basicamente Carbono e Oxigênio.

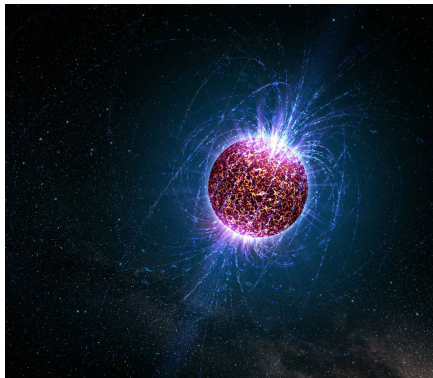


Depois de Cristalizar, a Anã Branca vira basicamente uma estrela de diamante. Existem evidências sísmicas dessa cristalização (Nature 565, 202–205 (2019)).

# Estrelas de Nêutrons

# Propriedades Básicas das Estrelas de Nêutrons

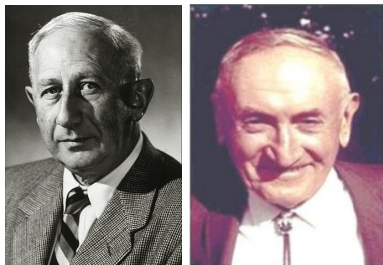
- Massa:  $M \sim 1 - 3M_{\odot}$
- Raio:  $R \sim 9 - 15\text{Km}$
- Densidade Média:  $\bar{\rho} \sim 10^6 \text{Kg/cm}^3 \sim (2 - 3)\rho_0$
- Gravidade Superficial:  $g \sim GM/R^2 \sim 10^{12} \text{m/s}^2$
- $T_{\text{eff}} \sim 600.000\text{K}$



Impressão Artística de uma estrela de nêutrons.

# História das Estrelas de Nêutrons

- Em 1931, Lev Landau, então com 23 anos, escreve um artigo sobre estrelas densas onde especula sobre a possibilidade de estrelas tão massivas quanto núcleos atômicos.
- No início de 1932, J. Chadwick publica um artigo na *Nature* com a descoberta dos nêutrons.
- W. Baade e F. Zwicky fazem a previsão teórica correta, em 1934, de que Estrelas de Nêutrons se formam em explosões de Supernovas.



Walter Baade e Fritz Zwicky.

# História das Estrelas de Nêutrons

- Em 1939, J. R. Oppenheimer, G. M. Volkov e R. C. Tolman derivam a equação de equilíbrio hidrostático no contexto da Relatividade Geral. Equação que é fundamental para o entendimento das Estrelas de Nêutrons. Com um modelo de nêutrons não interagentes eles encontram uma massa máxima  $M_{max} \sim 0.7M_{\odot}$ .
- Após a Segunda Guerra começam estudos mais detalhados da equação de estado para a matéria nuclear, com Wheeler, Harrison, Cameron e Zeldovich.
- Nos anos 60, as esperanças de se detectar a primeira Estrela de Nêutrons aumentaram com a astronomia de raios-X, assim como a possibilidade das emissões térmicas e de neutrinos desses objetos.

# História das Estrelas de Nêutrons

- Em 6 de Agosto de 1967, Jocelyn Bell, uma estudante supervisionada por Antony Hewish, descobre uma tênue fonte de rádio com um período extremamente estável de  $1.3373012 \text{ s}$

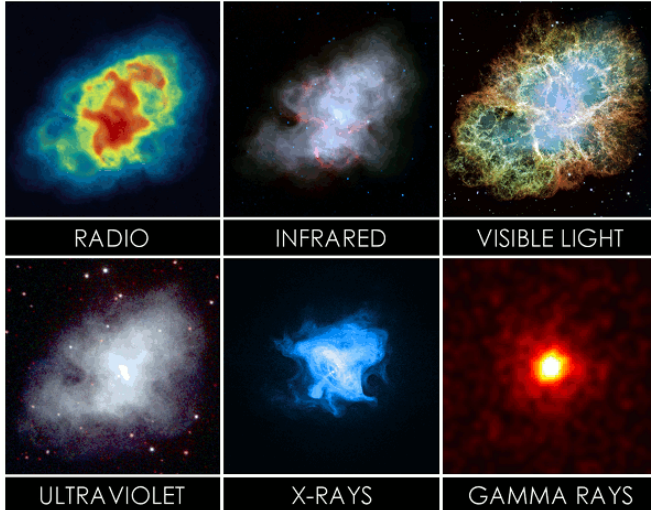


Jocelyn Bell e a felicidade da descoberta dos pulsares, com um radiotelescópio ao fundo.

- Em trabalhos posteriores, principalmente de F. Pacini e T. Gold, se consolida a ideia de que esses pulsos são provenientes de uma Estrela de Nêutrons magnetizada com rotação.



# Pulsar do Caranguejo



Pulsar do Caranguejo energizando a nebulosa em seu entorno, fenômeno conhecido como *Plerion*, ou Pulsar Wind Nebula.

# História das Estrelas de Nêutrons

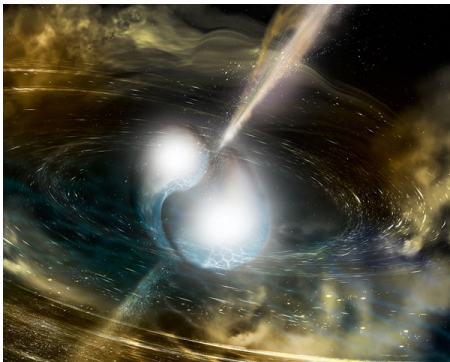
- Em 1974, Russel Hulse e Joseph Taylor descobriram um pulsar usando o radiotelescópio de Arecibo. O pulsar tinha um período de  $59\text{ms}$  com uma variação periódica de 8 horas. Logo eles perceberam que o pulsar compartilhava a órbita com outra estrela de nêutrons.



Hulse e Taylor na época em que ganharam o Prêmio Nobel pela descoberta indireta das ondas gravitacionais.

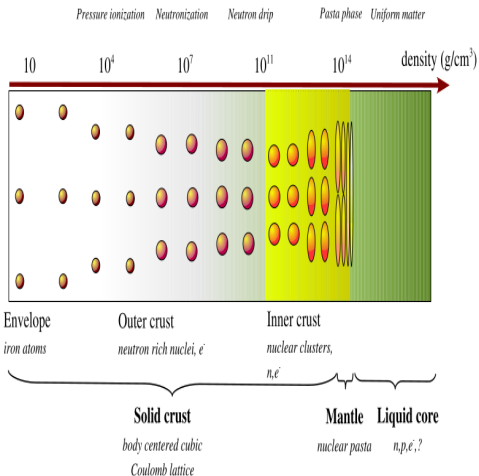
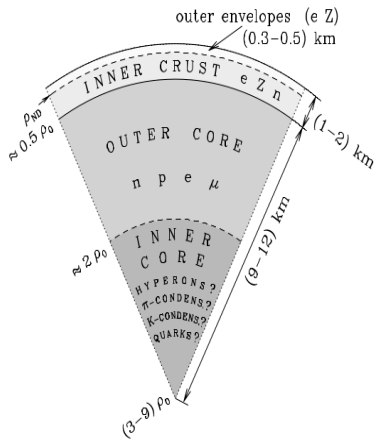
# História das Estrelas de Nêutrons

- Em 2017, a colaboração LIGO anunciou a primeira detecção de ondas gravitacionais provenientes da coalescência de duas estrelas de nêutrons. O evento também foi visto por instrumentos óticos.



Colisão de gigantes.

# O interior de uma Estrela de Nêutrons



- $10^7 \leq \rho \leq 10^{11} \text{ g/cm}^3$

Em densidades superiores às encontradas em Anãs Brancas, começa a acontecer o decaimento beta inverso



e a matéria se torna rica em nêutrons.

- $10^{11} \leq \rho \leq 5 \times 10^{12} \text{ g/cm}^3$

Aumentando ainda mais a densidade atingimos o limiar conhecido como *neutron drip*. O gás de nêutrons livres passa a dominar a pressão com sua degenerescência.

No núcleo da Estrela de Nêutrons é onde ocorre a física realmente interessante (e desconhecida)

- $\rho \sim \rho_0 = 2.3 \times 10^{17} \text{Kg}/\text{m}^3$

$\rho_0$  é a densidade de saturação nuclear.

# A Estrutura de uma Estrela de Nêutrons

Estrela Relativística na área!

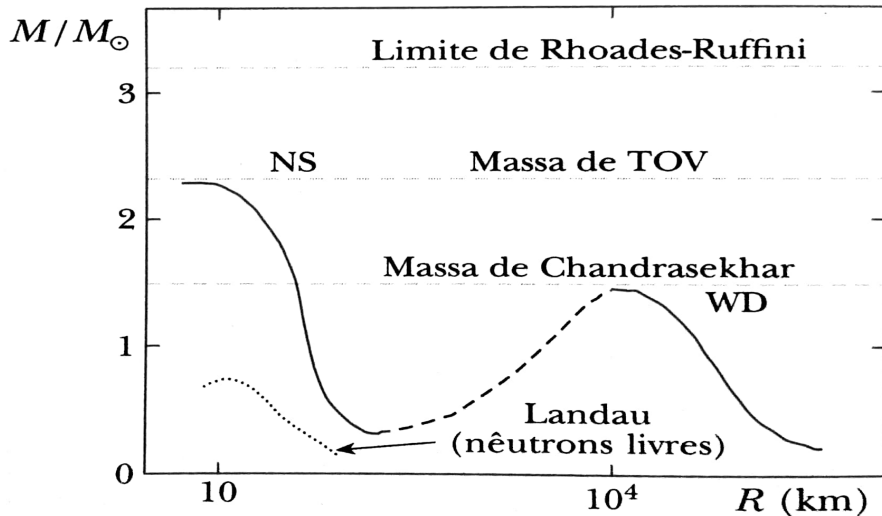
$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM\rho}{r^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{dP}{dr} = -G\frac{(M + 4\pi r^3 P/c^2)(\rho + (\epsilon + P)/c^2)}{r^2(1 - 2GM/rc^2)}$$

Equilíbrio Newtoniano

Equilíbrio Relativístico (TOV)

- $\rho(r) \rightarrow \rho(r) + (\epsilon(r) + P(r))/c^2$ ; Mudança na inércia.
- $m(r) \rightarrow m(r) + 4\pi r^3 P(r)/c^2$ ; Massa gravitacional ativa.
- $r^2 \rightarrow r^2(1 - 2Gm(r)/rc^2)$ . Curvatura Espacial.

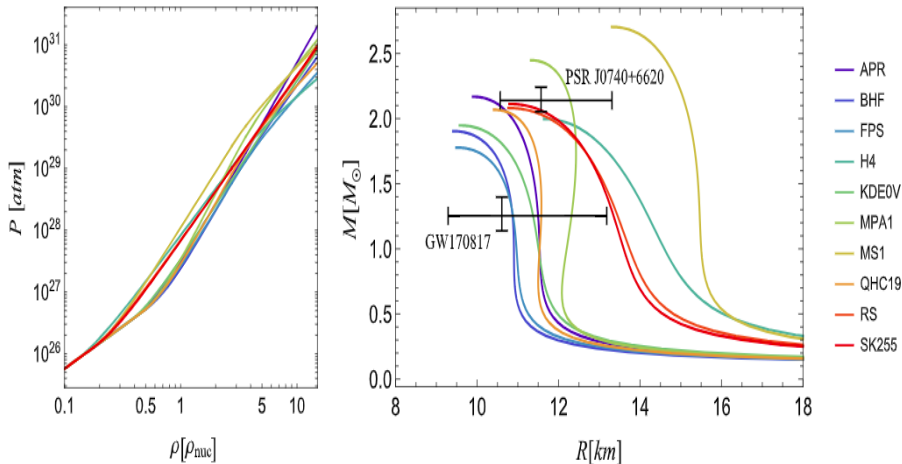
# O Diagrama Massa x Raio



Fonte: Kip Thorne, Black Holes and Time Warps.

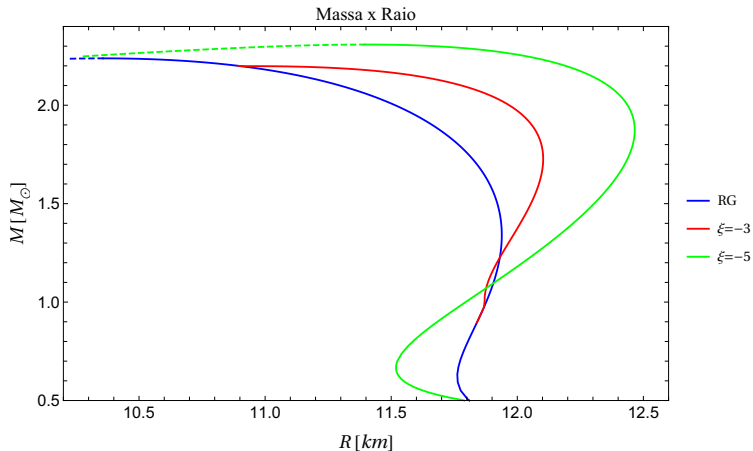


# O Diagrama Massa x Raio



O diagrama massa x raio para vários modelos de equação de estado com dois vínculos observacionais. Fonte: Raissa F. P. Mendes, Estrelas de nêutrons e seus múltiplos mensageiros, Cadernos de Astronomia, Vol. 2, N. 2

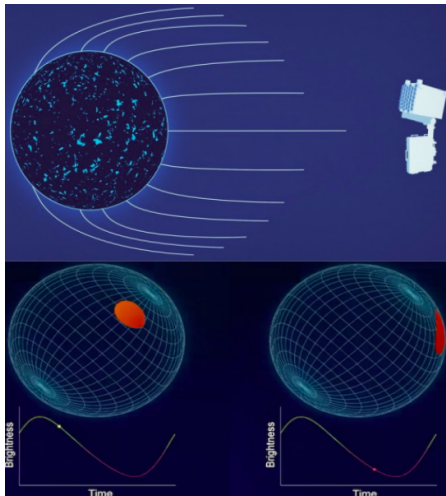
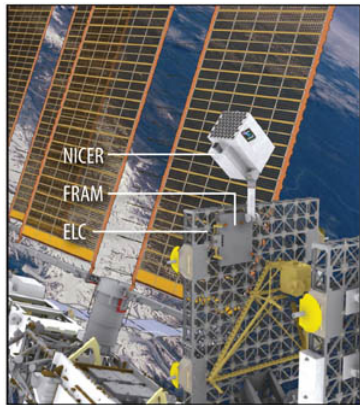
# O Diagrama Massa x Raio - Gravidade Modificada??



Teorias alternativas mudam a estrutura da estrela. Como diferenciar entre gravidade modificada e nossa ignorância da equação de estado supranuclear?

# Experimentos Importantes

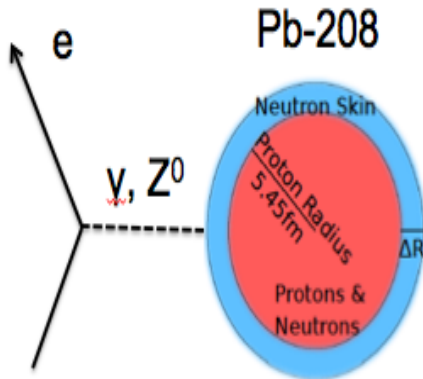
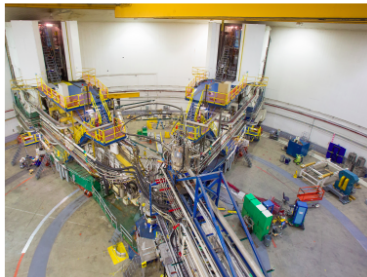
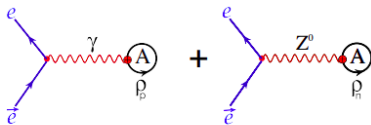
- NICER



Neutron Star Interior Explorer.

# Experimentos Importantes

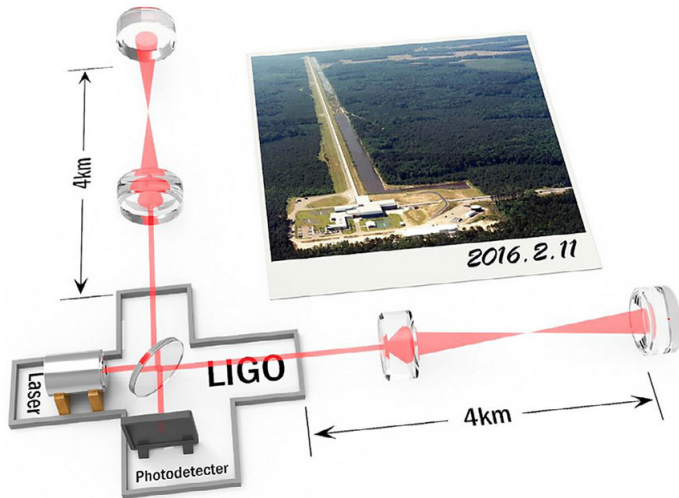
- PREX (Lead Radius Experiment)



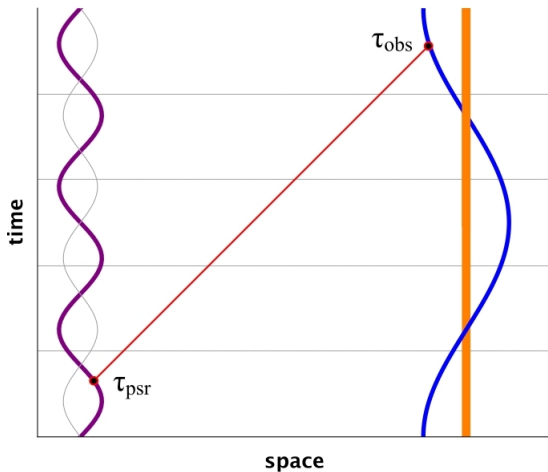
Medida da "pele" de nêutrons no laboratório, que é crucial para determinar as propriedades das estrelas de nêutrons astrofísicas.

# Experimentos Importantes

- LIGO-VIRGO-KAGRA

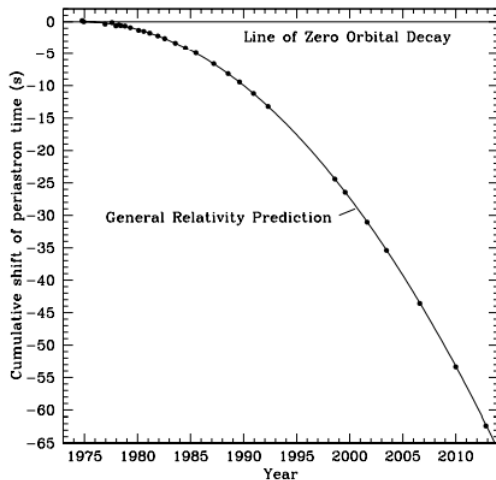


# Testando a Relatividade com Pulsares



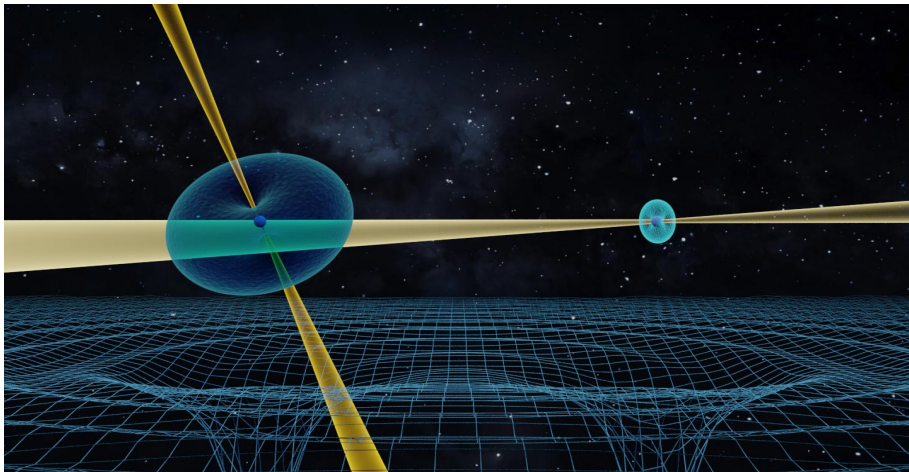
A ideia da cronometragem de pulsares é conectar o tempo observado com o tempo no referencial do Pulsar.

# Testando a Relatividade com Pulsares



Decaimento do período observado ao longo dos anos para o pulsar Hulse-Taylor. A concordância com a Relatividade Geral é espetacular.

# Testando a Relatividade com Pulsares



Ano passado saiu um estudo (DOI: [10.1103/PhysRevX.11.041050](https://doi.org/10.1103/PhysRevX.11.041050)) que junta 16 anos de observações do pulsar duplo. A concordância com a Relatividade Geral em suas previsões é de 99.99%. (Video)



# Testando a Relatividade com Pulsares

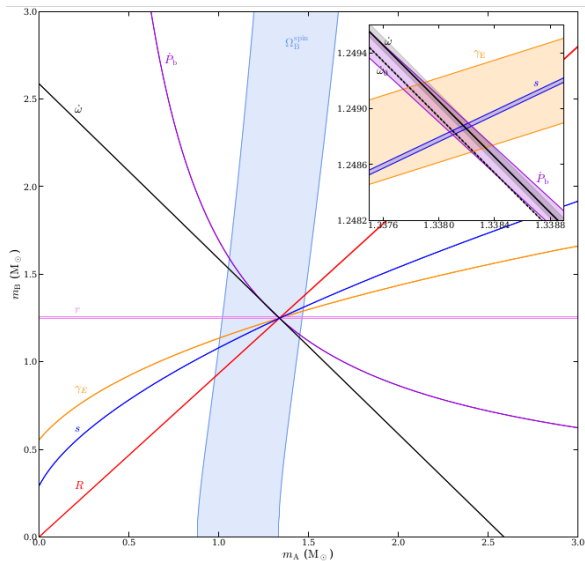
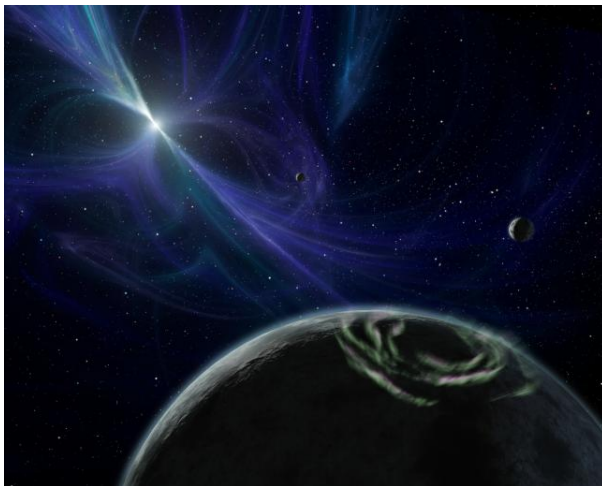


Diagrama Massa X Massa.

# Exoplaneta de Pulsar



Planetas descobertos em 1992, por meio da cronometragem de pulsares, orbitando o pulsar PSR B1257+12. Créditos: NASA/JPL-Caltech

## Apoio:



## Realização:



Obrigado!!!