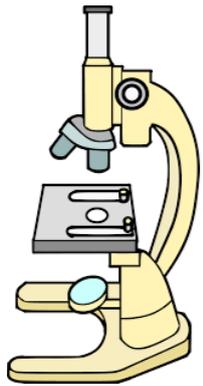


# Pergunta para discussão:



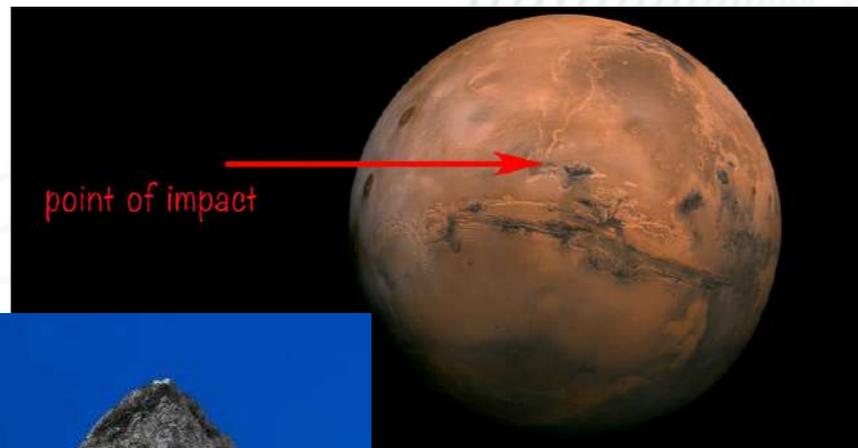
*Como sabemos do que as estrelas são feitas?*

3 dias de viagem



rocha da lua

7 meses de viagem



meteorito de Marte

7 anos de viagem



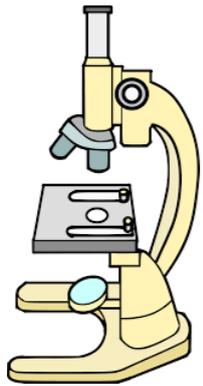
Parker Solar Probe

Levantem a mão para responder, ou coloquem suas respostas no chat!



Proxima Centauri: 4.2 anos luz

# Pergunta para discussão:

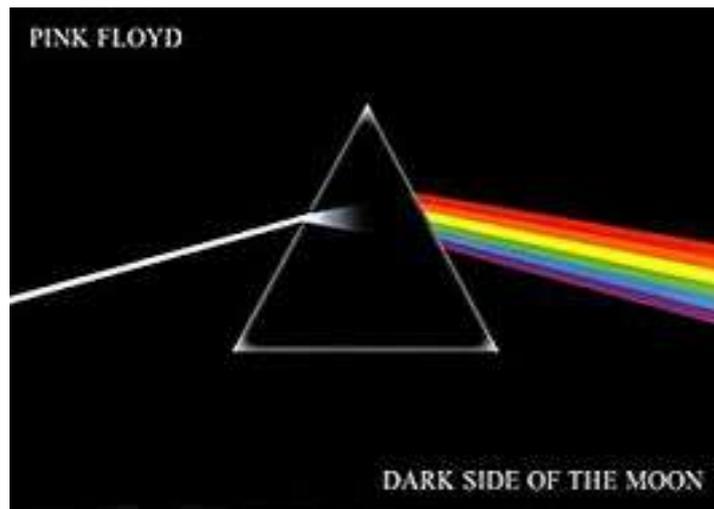
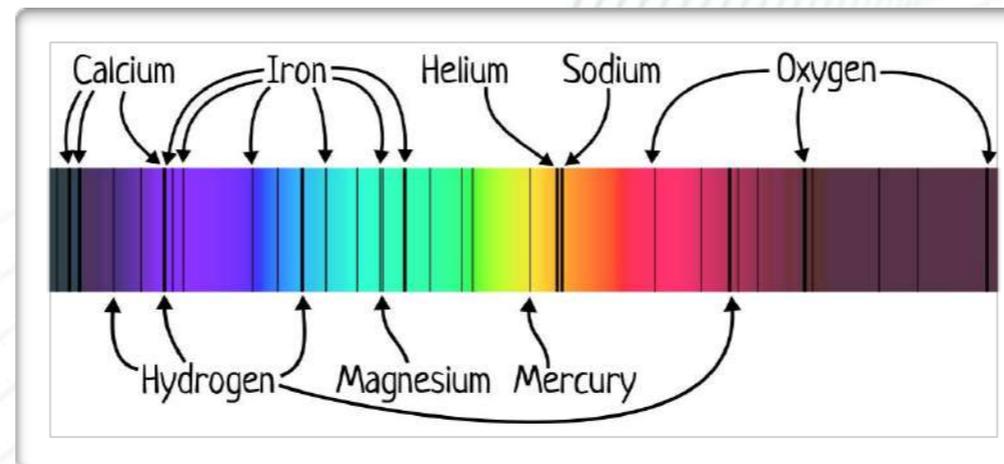


*Como sabemos do que as estrelas são feitas?*

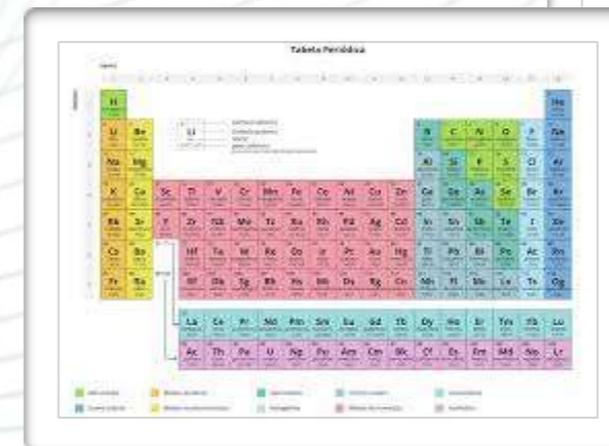
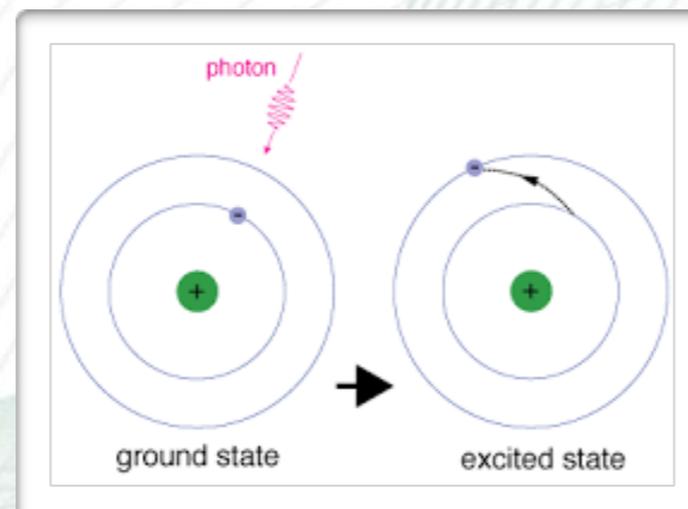


Cecilia Payne - 1925

Linhas espectrais do sol

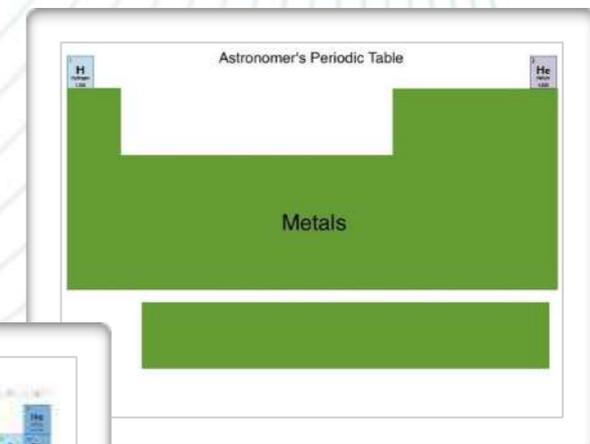


átomo ionizado



Tablea Periódica

Tabela periódica

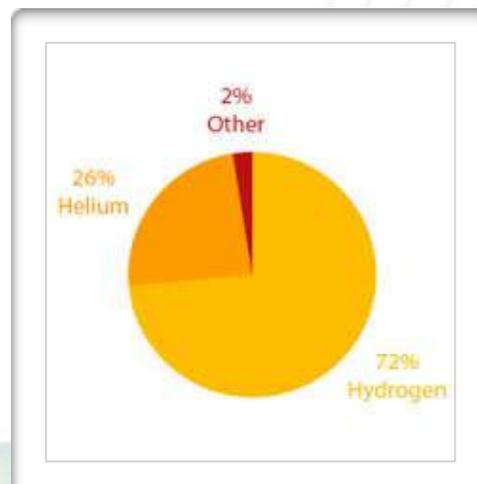


Astronomer's Periodic Table

Metals

Tabela periódica para um astrônomo

Composição do sol



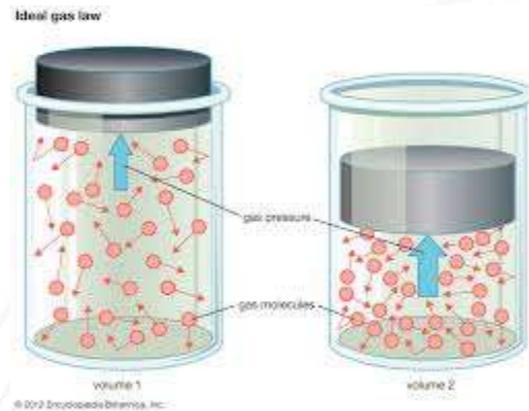
# Equação de Estado

Infelizmente, espectroscopia não funciona para estrelas de nêutrons: o espectro não tem linhas!

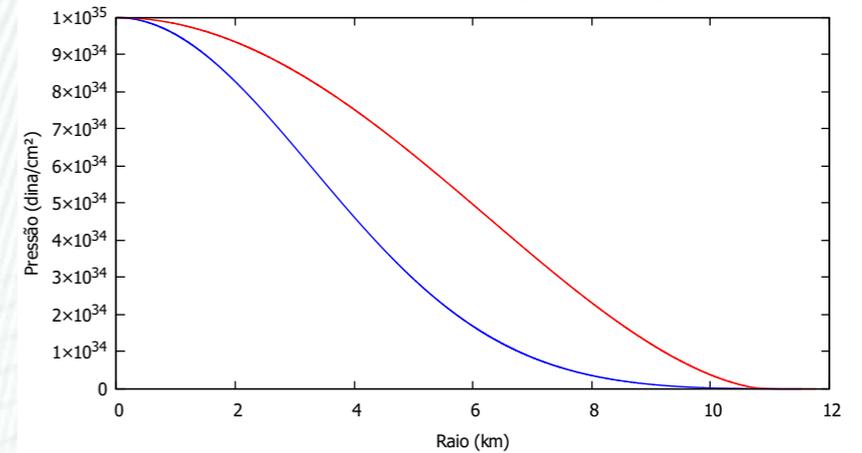
Para um gás ideal:

$$PV = nRT$$

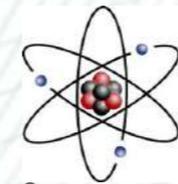
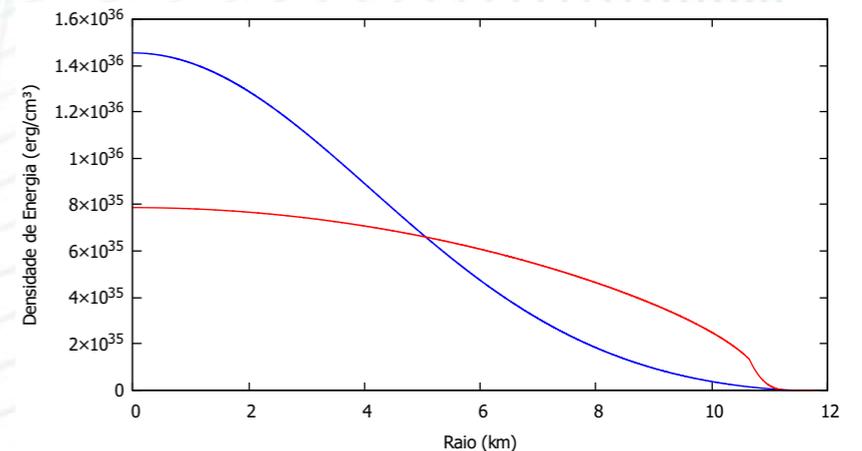
$$P = P(\rho, T)$$



pressão



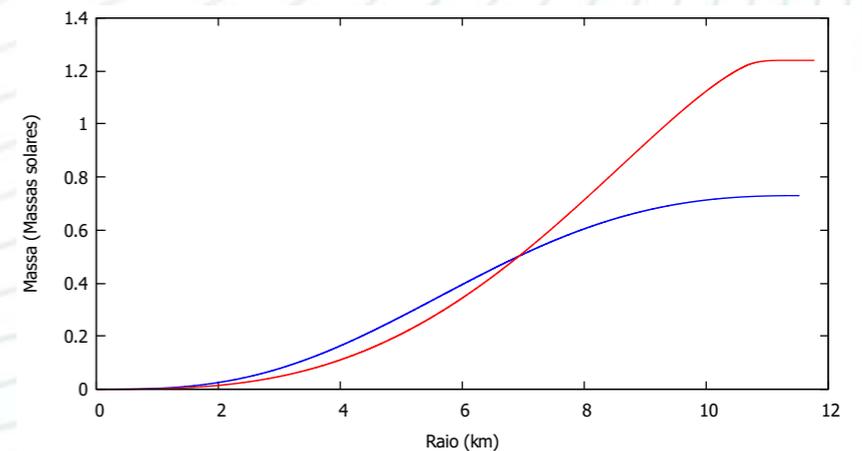
densidade



densidade nuclear:

$$2 \times 10^{35} \text{ erg/cm}^3$$

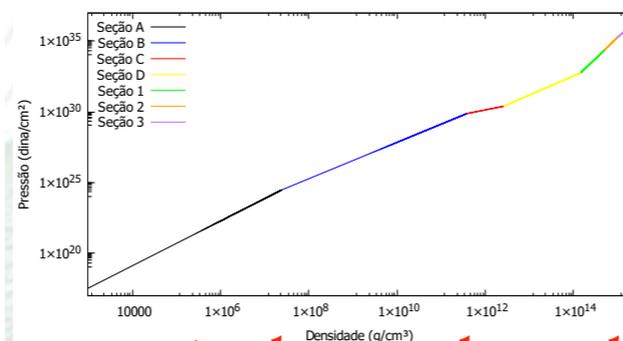
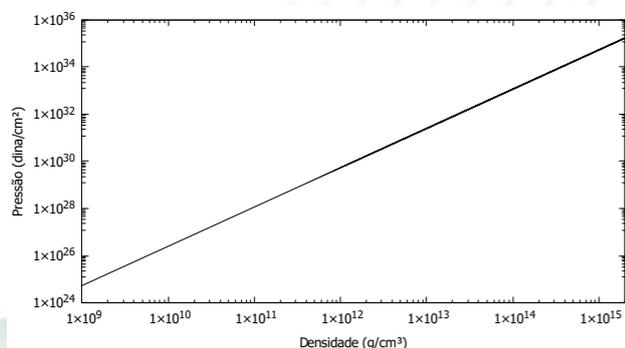
massa



Simplificando (muito) mais:

$$P = P(\rho) = \kappa \rho^{\Gamma}$$

equação de estado politrópica



equação de estado realista

perfis radiais de  $p(r)$ ,  $\rho(r)$ ,  $M(r)$  dentro da estrela

# Massa Máxima

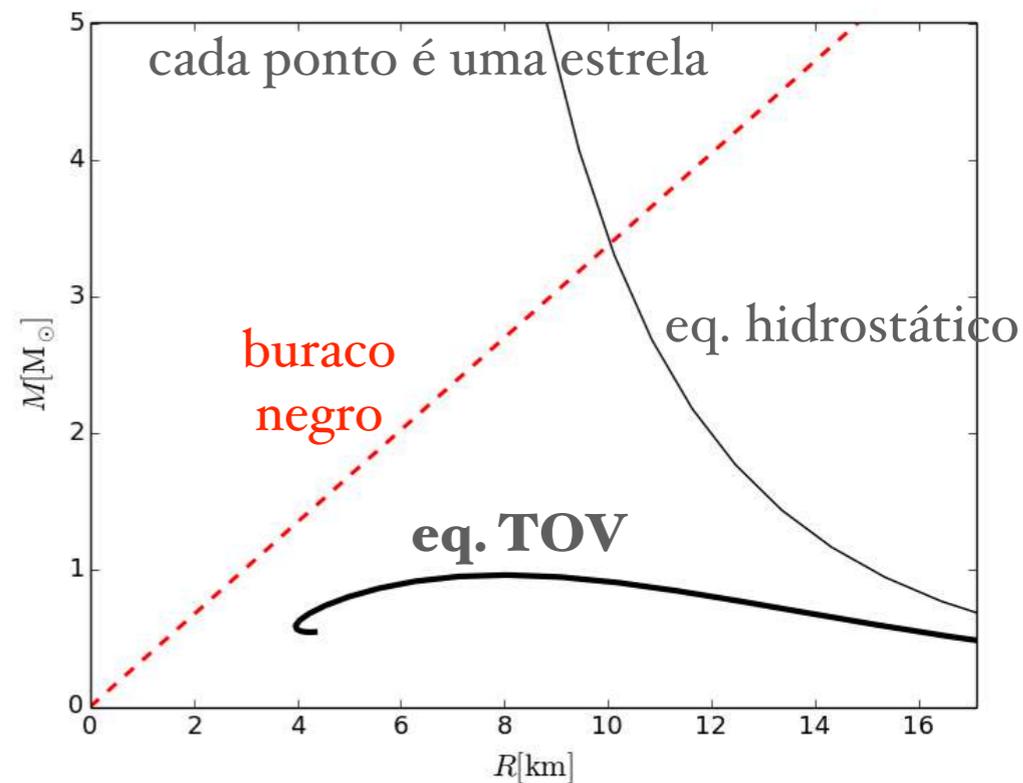
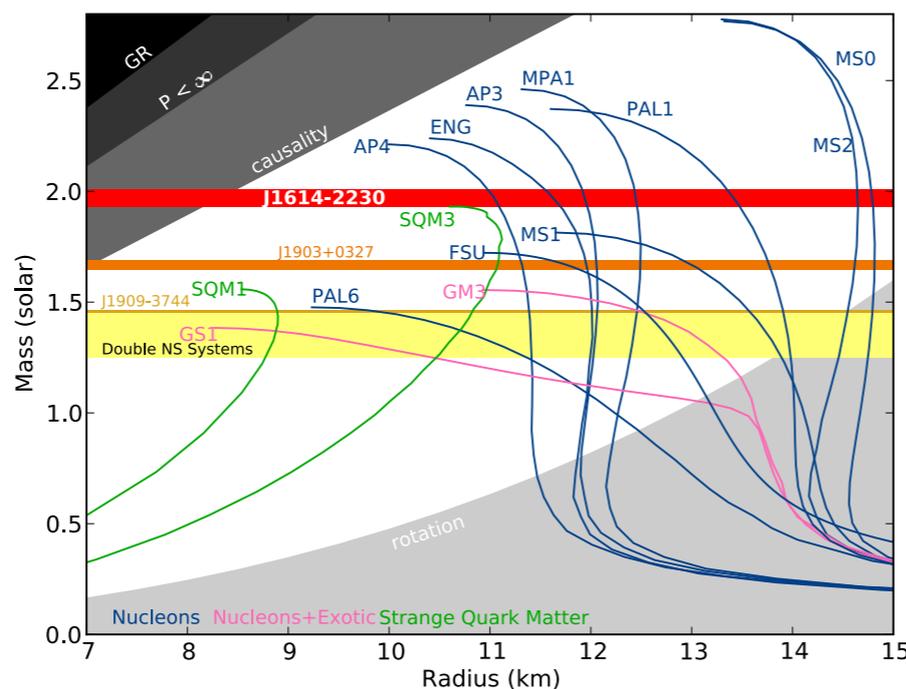
Se a densidade central aumentar,  
a massa total aumenta, certo?  
Errado!

Equação de Tolman-Oppenheimer-Volkoff

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

(é a versão **relativística** da equação Newtoniana de equilíbrio hidrostático: faça  $c \rightarrow \infty$ )

Cada *modelo* de equação de estado prevê uma curva diferente.  
Quais são os modelos *viáveis*?



Enquete:

Buracos negros são grandes?

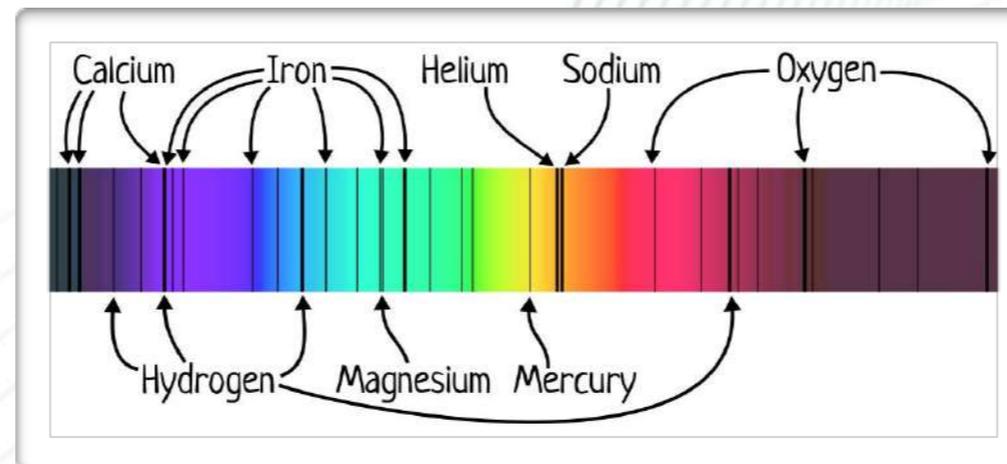
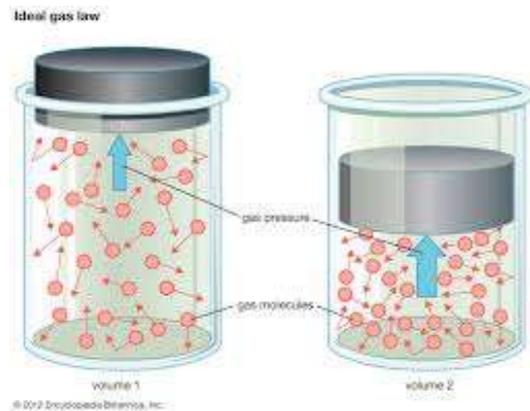
Raio de Schwarzschild:

$$R = 2GM/c^2$$

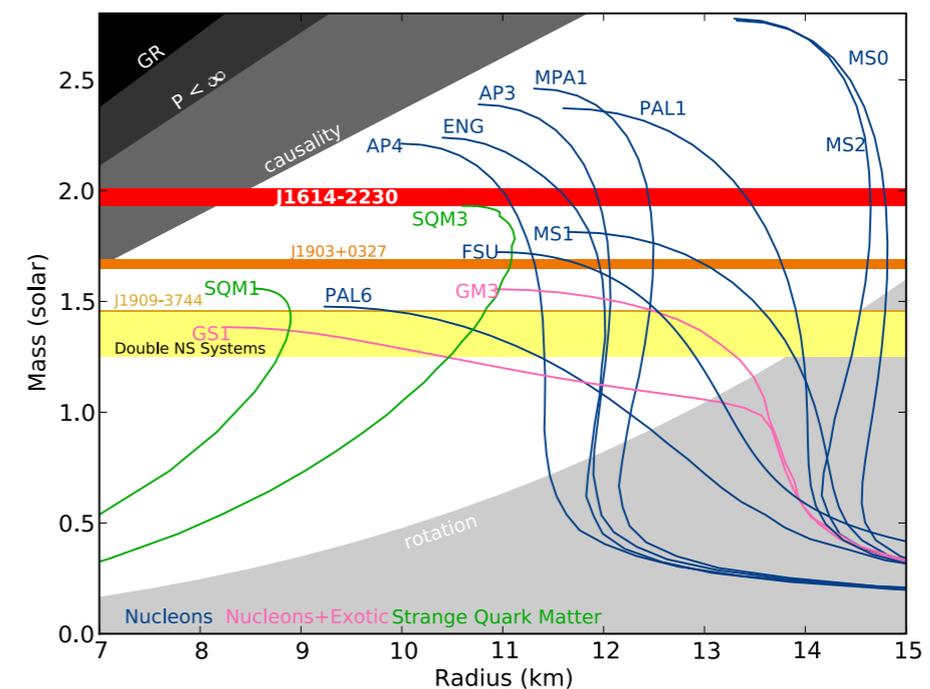
A massa da Terra é  $\sim 6 \times 10^{24}$  kg

Se a Terra virasse um buraco negro, qual seria o seu raio?

# Perguntas?

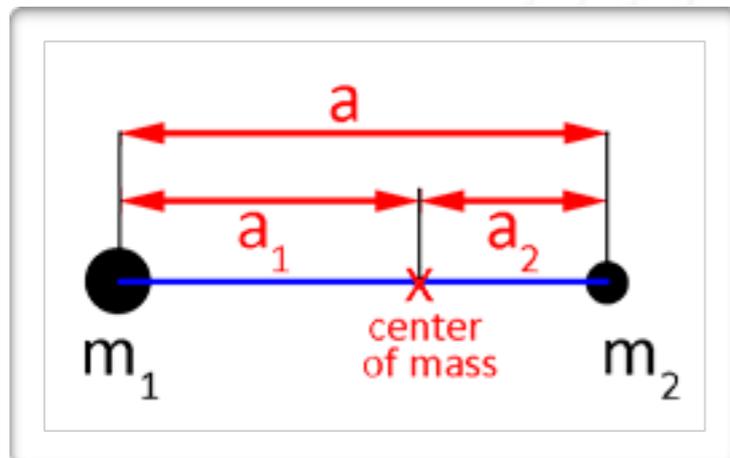
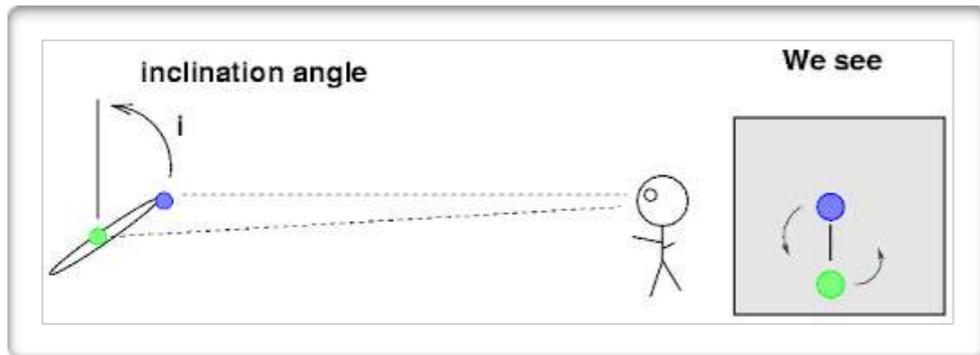


Vamos ver as perguntas mais votadas no *slido* sobre os temas vistos até agora. Perguntas mais gerais serão respondidas no final!



# Como medir a massa de uma estrela de nêutrons (em um sistema binário)

Efeito Doppler



$$a = a_1 + a_2$$

$$m_1 a_1 - m_2 a_2 = 0$$

$$q = m_1 / m_2$$

Se conseguimos medir:

$P$  - período do binário

$$v_1 = \frac{2\pi}{P} a_1 \sin i \text{ (Doppler)}$$

Usando a 3ª lei de Kepler:

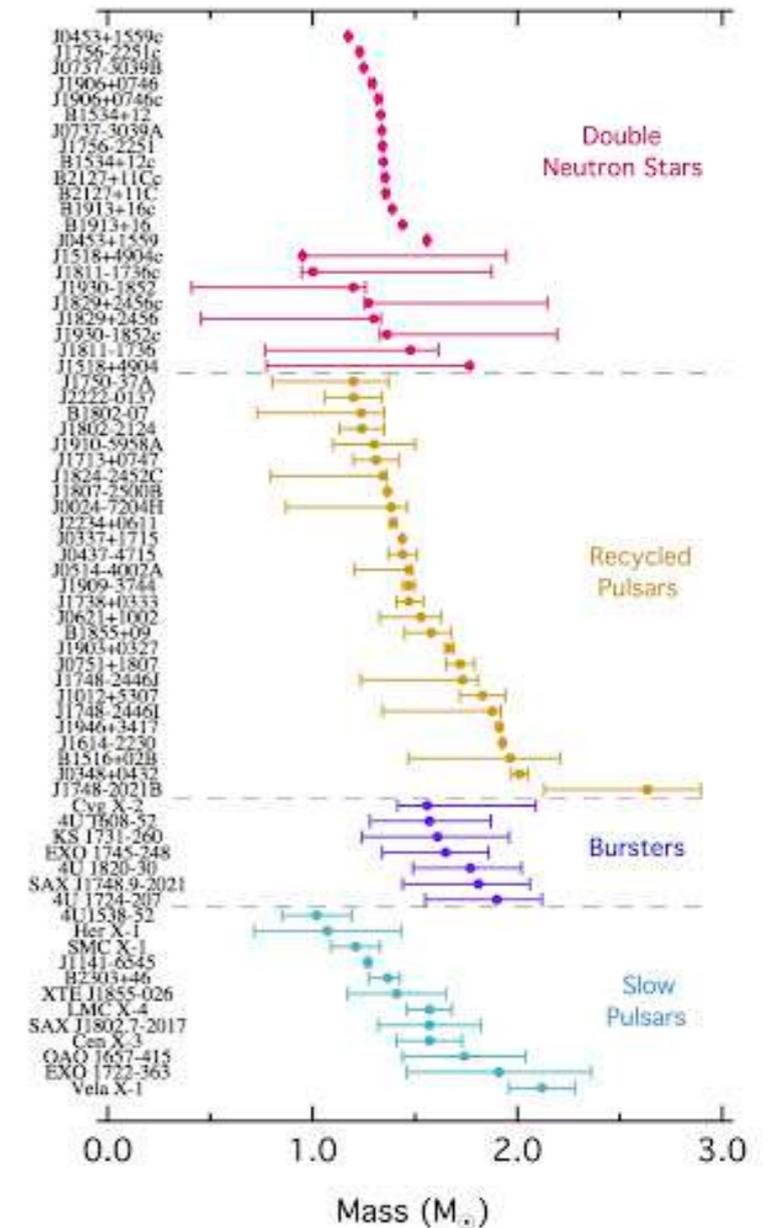
$$\frac{P^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)}$$

podemos escrever

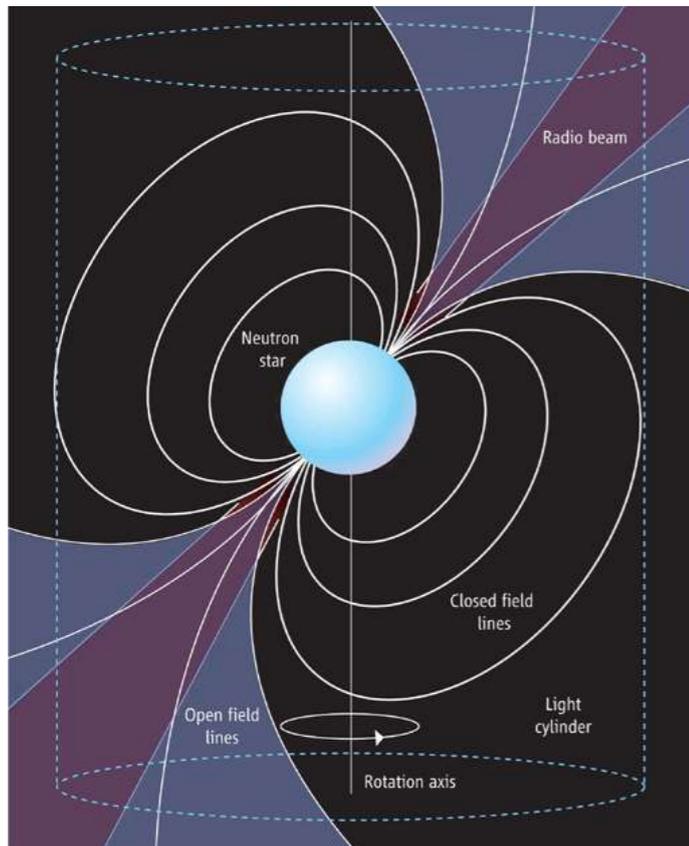
$$f_1(m_1, m_2, i) \equiv \frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{P v_1}{2\pi G}$$

Se conseguirmos medir  $f_1$  e  $f_2$ , podemos encontrar

$$m_1 = \frac{f_1 q (1 + q^2)}{\sin^3 i}$$



# Qual é a idade de um pulsar?



O campo magnético freia a rotação de um pulsar  $\frac{dE}{dt} \propto -B^2$

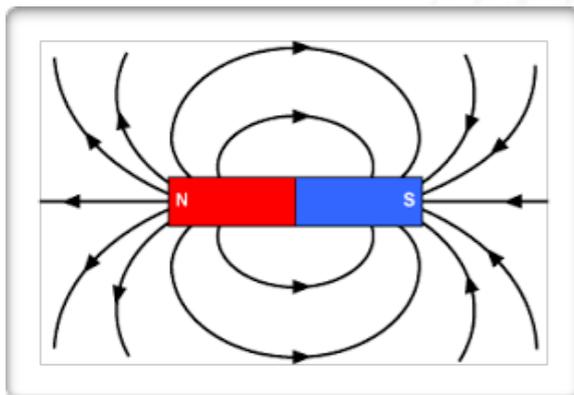
Podemos medir:  $P$  - período

$\dot{P} = \frac{dP}{dt}$  - taxa de variação do período

Assim podemos calcular

$$t = \frac{1}{2} \frac{P}{\dot{P}}$$

a idade do pulsar

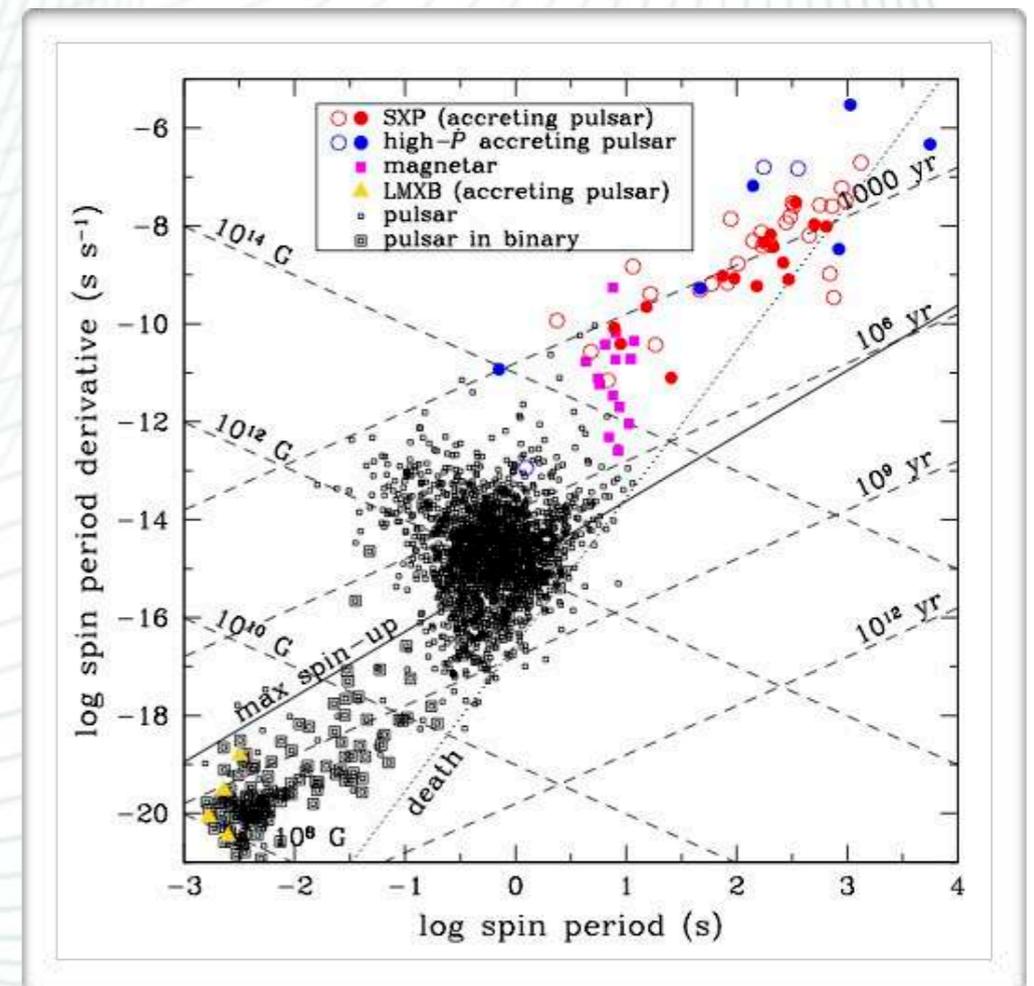


magnetares podem ter

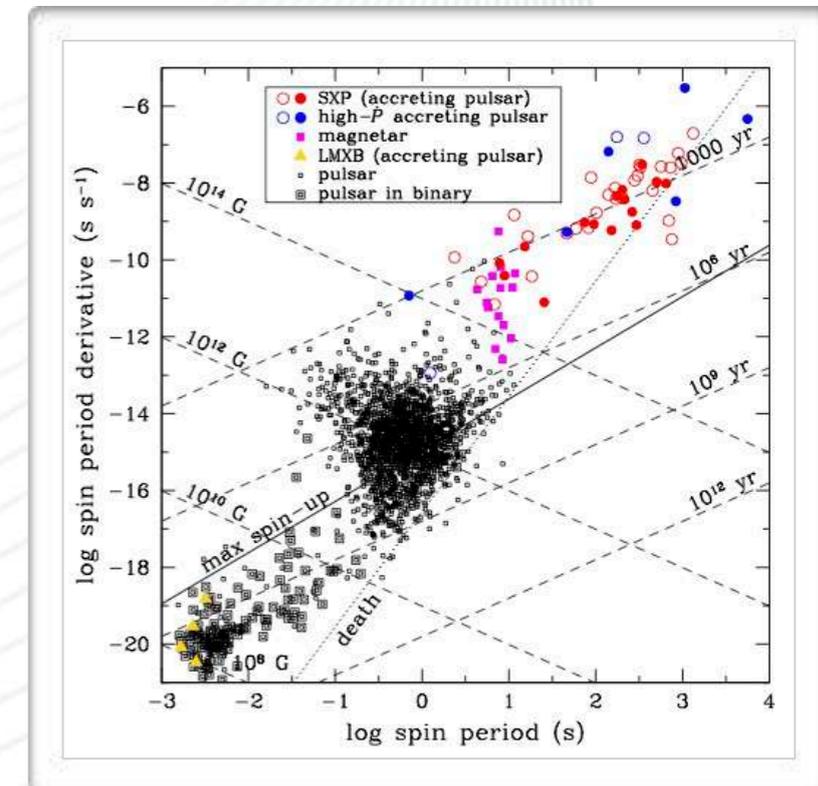
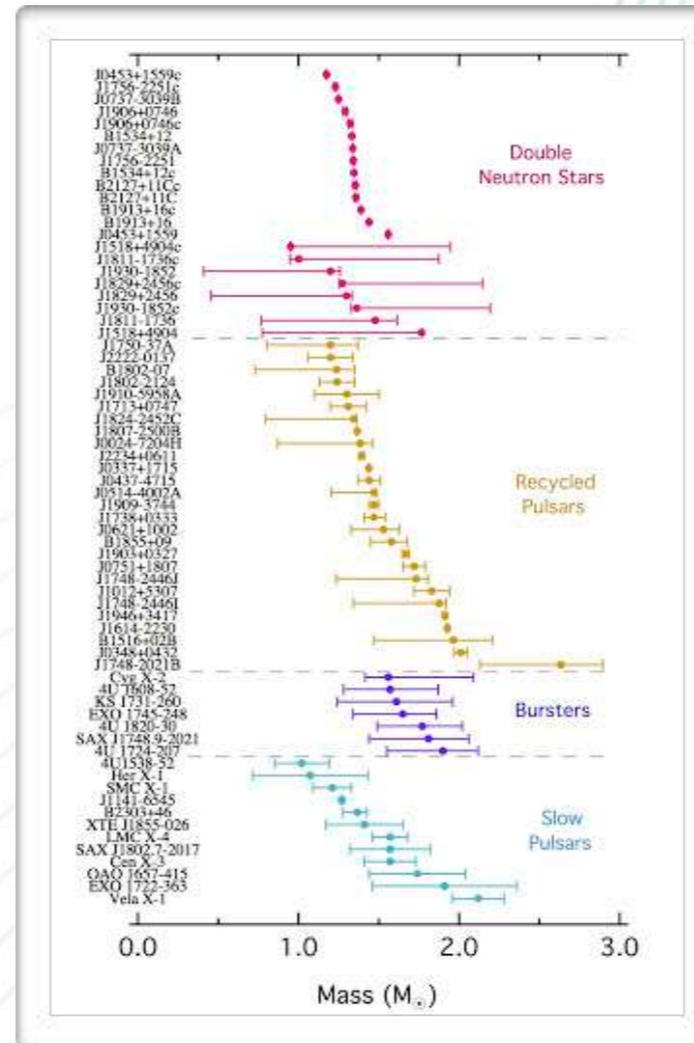
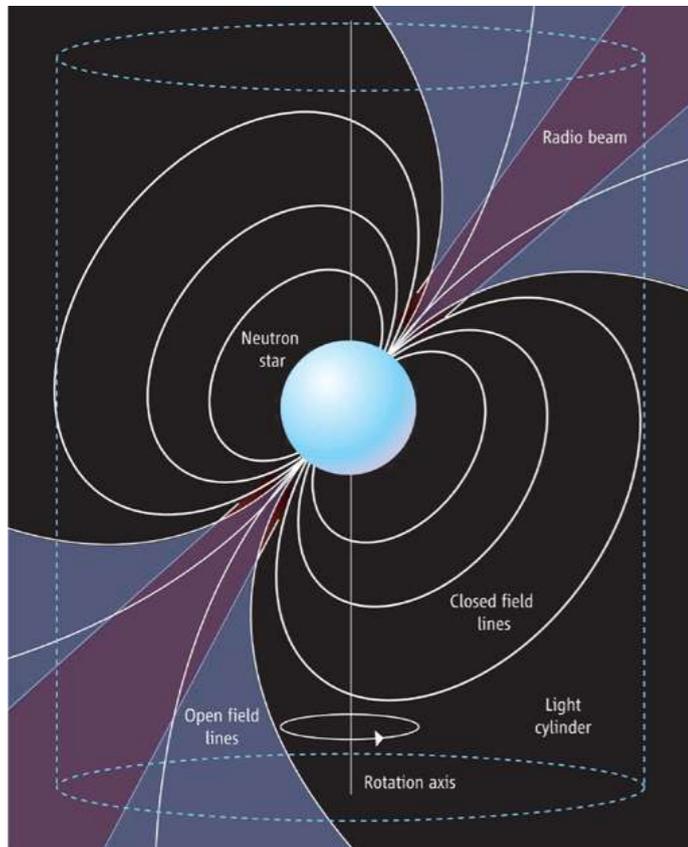
$$B \sim 10^{15} \text{ G}$$

campo magnético da Terra  $\sim 0.5 \text{ G}$

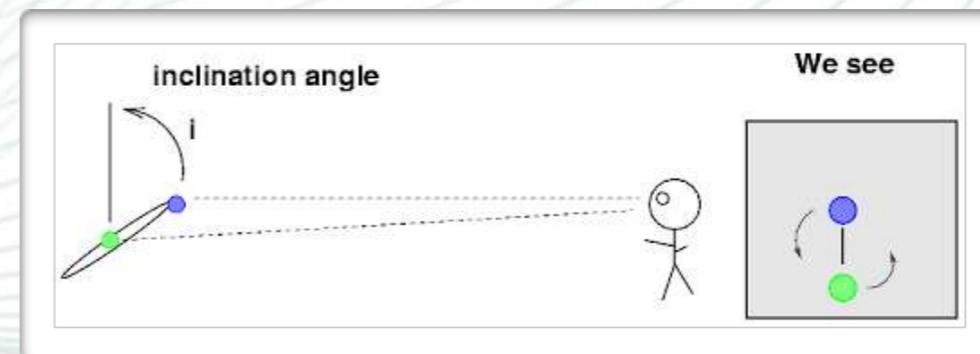
campo magnético do Sol  $\sim 10 \text{ G}$



# Perguntas?



Vamos ver as perguntas mais votadas no *slido* sobre os temas vistos até agora. Perguntas mais gerais serão respondidas no final!



# Discussão em grupos

*Como medir o raio de uma estrela de nêutrons?*

Instruções para a discussão:

- 1 os alunos vão em grupos de 5 para as salas de discussão
- 2 cada grupo escolhe um representante
- 3 a discussão será finalizada em 10 min
- 4 o representante escreve a resposta do grupo na planilha (280 caracteres)