

Astrofísica, Cosmologia e Gravitação

Júlio C. Fabris

Cosmo-ufes/PPGCosmo/Universidade Federal do Espírito Santo

Novembro/Dezembro de 2020

O que é uma estrela
oo

O que é uma estrela
o

O que é uma estrela
oooo

O que é uma estrela
ooo

Estrelas
oooooooooooooooooooooooooooooooooooo

Distância das Est
o

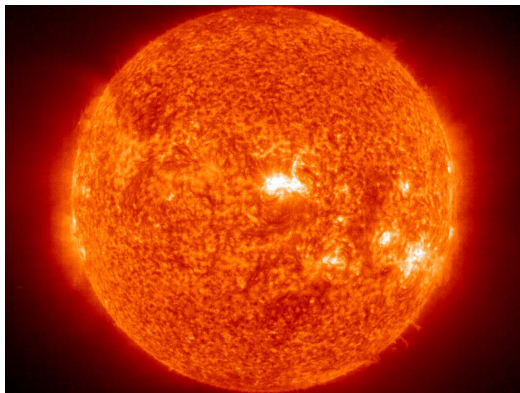


Estrelas

- Quantas estrelas existem?
- A olho nu podemos ver aproximadamente 6.000 estrelas.
- Mas, existem bilhões de estrelas em grandes sistemas chamados de *galáxias*
- E existem bilhões de galáxias (conhecidas!).

O Sol

- O Sol é a *nossa* estrela.



O Sol

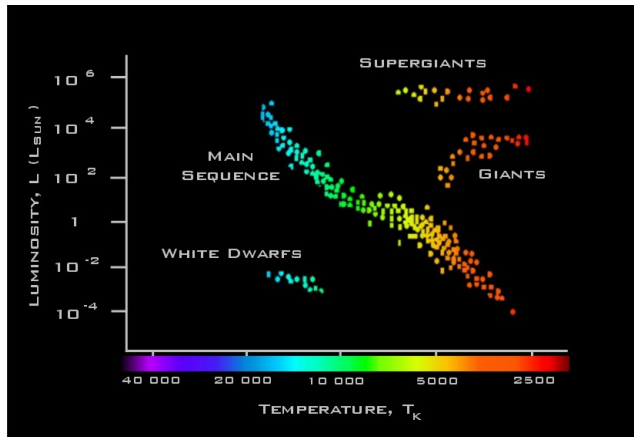
- O Sol está a 150.000.000 de km de nós.
- A temperatura na sua superfície é de aproximadamente 6.000 graus.
- Mas a temperatura no seu interior pode chegar a quase 20 milhões de graus.
- Ele é formado sobretudo pelos elementos químicos hidrogênio e hélio, mas com traços de outros elementos como o carbono, nitrogênio, silício,etc.

O Sol

- O Raio do Sol é $R_{\odot} \approx 700.000$ km (cem vezes o raio da Terra).
- A Massa do Sol é $M_{\odot} \approx 2 \times 10^{30}$ kg.
- A Luminosidade do Sol (energia emitida por segundo) é $L_{\odot} \approx 3 \times 10^{26}$ W.

As estrelas

- As outras estrelas são todas como o Sol?
- A resposta é negativa: o Sol é um tipo de estrelas muito comum, mas existe. uma grande variedade de estrelas com diferentes massas, tamanhos, temperaturas, cor, composição química, etc.



O Brilho das estrelas

- O que faz as estrelas brilharem são as reações nucleares em seu interior.
- As estrelas são formadas principalmente por hidrogênio e hélio.
- Estes elementos se fundem gerando elementos químicos mais pesados.
- Temos um exemplo de fusão nuclear: o interior das estrelas é uma grande usina de fusão nuclear.

O que é uma estrela

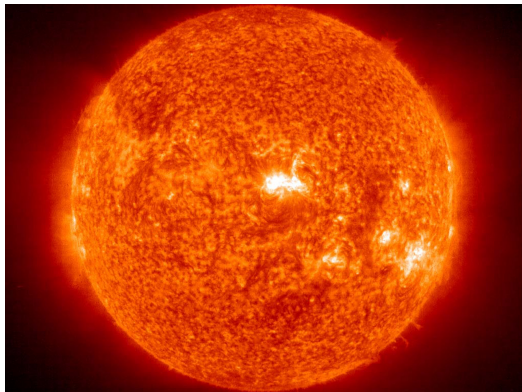
As estrelas

- Uma estrela é, essencialmente, uma grande esfera gasosa.
- Características:
 - Raio de algumas dezenas de quilômetros a centenas de milhões de quilômetros,
 - Massa de $0.01 M_{\odot}$ a $100 M_{\odot}$.

$$M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg.} \tag{1}$$

O que é uma estrela

O sol



O Sol

Características do Sol

- O Sol é a estrela mais perto de nós e a que "sustenta" o sistema solar.

① Massa:

$$M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg.} \quad (2)$$

② Luminosidade:

$$L_{\odot} = 3,9 \times 10^{26} \text{ W.} \quad (3)$$

③ Distância média da Terra:

$$D_{ST} = 150.000.000 \text{ km.} \quad (4)$$

- A distância média do Sol à Terra define a Unidade Astronômica (U.A.).

O Sol

Características do Sol

- A massa do Sol é aproximadamente 100 vezes maior que a massa do resto do Sistema Solar.

O Sol

Características do Sol

- Nós recebemos do Sol a energia de

$$P_{\odot} \sim 7 \times 10^{22} \text{ J/s.} \quad (5)$$

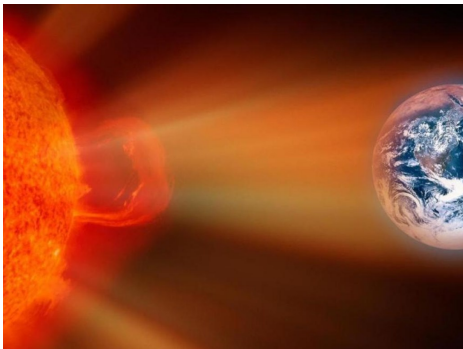
- A capacidade de Itaipu é

$$P_{\text{Itaipu}} \sim 10^{10} \text{ J/s.} \quad (6)$$

- A que recebemos do Sol corresponde a alguns trilhões de Itaipus!

O que é uma estrela

O Sol



O Sol

Origem de sua energia

- Qual é a origem desta energia toda?
- Um sistema físico pode ser caracterizado por sua energia interna.
- No caso de um sistema gasoso como o Sol, a maior parte de sua energia está sob a forma de *energia potencial*.
- Para uma esfera de massa M , a energia potencial é dada por

$$E_p \sim G \frac{M^2}{R}. \quad (7)$$

O Sol

Origem de sua energia

- Entretanto, existe uma fórmula famosa na física:

$$E = mc^2. \tag{10}$$

- Esta fórmula sugere que *massa* pode se transformar em energia.

Estrelas

Como extrair a energia

- Uma forma de *extrair* esta energia é através das *reações nucleares*

Estrelas

Unidade

- Uma unidade de energia usada em física nuclear é o elétron-volt = eV :

$$1\,eV = 1,6 \times 10^{-19}\,J, \quad (13)$$

$$1\,MeV = 10^6\,eV. \quad (14)$$

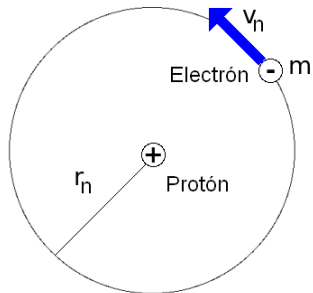
Estrelas

Átomos

- O átomo mais simples que existe é o *átomo de hidrogênio*.
- Ele é formado por um próton e um elétron.

Estrelas

Átomo de hidrogênio



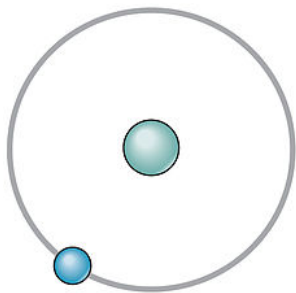
Estrelas

Átomos

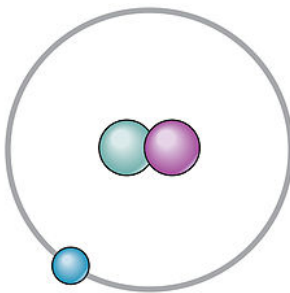
- O elétron é 1.800 vezes mais leve que o próton.
- Elétron e próton, no átomo de hidrogênio, têm uma energia de ligação de $13,6 \text{ eV}$.
- Isto quer dizer que quando um elétron se junta ao próton para formar um átomo de hidrogênio, ele libera uma energia de $13,6 \text{ eV}$.

O que é uma estrela

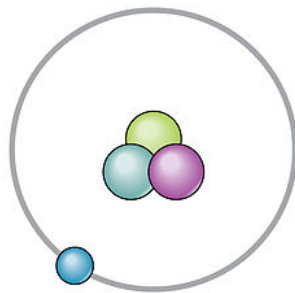
Os isótopos do hidrogênio



Protium (^1H)



Deuterium (^2H)



Tritium (^3H)

Estrelas

Átomos

- Quando um Deutério é formado na reação,

$$n + H \rightarrow D, \quad (15)$$

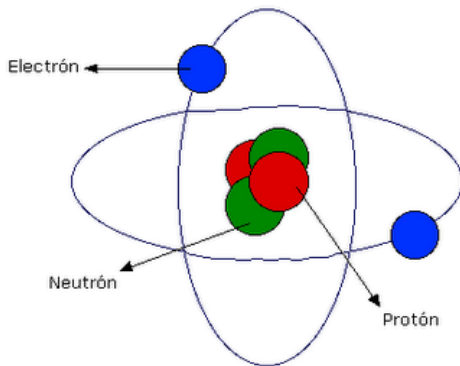
libera-se,

$$E_D \sim 2,2 \text{ MeV}. \quad (16)$$

- O motivo para este valor é que o próton e o nêutron estão ligados por uma interação muito mais intensa (a interação forte) que a interação entre o próton e o elétron (a interação eletromagnética).

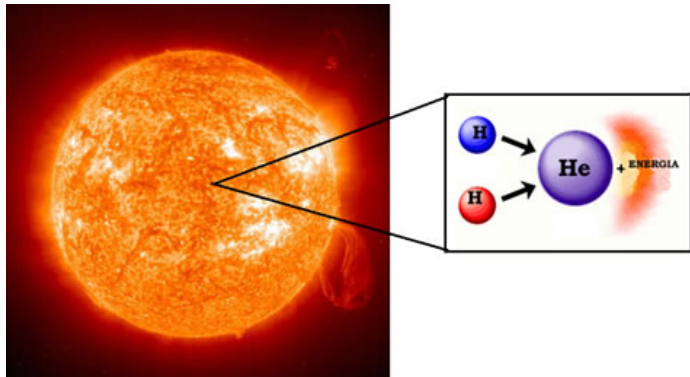
O que é uma estrela

Hélio



O que é uma estrela

O sol



Estrelas

Átomos no Sol

- O Sol tem aproximadamente,

$$N = 10^{57} \quad (19)$$

núcleos atômicos.

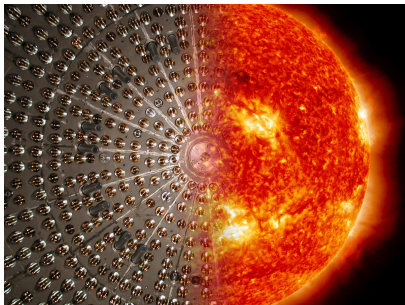
Estrelas

Átomos no Sol

- A esta taxa o sol pode "viver" bilhões de anos!

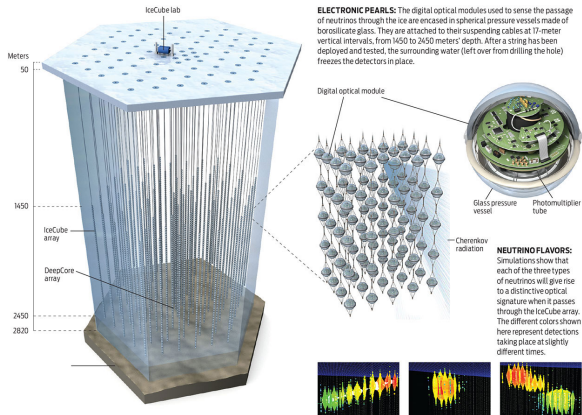
O que é uma estrela

Neutrinos solares



O que é uma estrela

Neutrinos solares



Estrelas

Neutrinos solares

- No entanto apenas um terço do que se esperava.
- Problema?
- Não tanto: existem três famílias de neutrinos e a *falta de neutrinos* pode ser explicada se o neutrino tiver massa.

Neutrinos solares

- O problema do neutrino solar foi resolvido e confirmou a existência de três famílias de partículas elementares.
- O levou à certeza de há algo que se suspeitava: o neutrino tem massa, pequena, mas tem.
- Isto é confirmado por observações do universo em seus primeiros momentos.

Estrelas

O equilíbrio

- A pressão criada pelas reações nucleares no interior das Estrelas contrabalançam a atração gravitacional, deixando o sistema em equilíbrio.

α Centauro

- As estrelas estão a uma enorme distância de nós.
- A estrela mais próxima do Sistema Solar é α Centaurus que fica a aproximadamente 50 trilhões de km.

Distância das Estrelas

Ano-luz

- α -Centaurus está a aproximadamente 4,6 a.l..
- Mas, nós podemos ver estrelas (as gigantes) que chegam estar a centenas de anos luzes de nós.

Distância das Estrelas

Paralaxe

- Como medimos a distância que as estrelas estão de nós?
- Existem vários métodos
- Para estrelas relativamente "próximas" usamos a **paralaxe**.

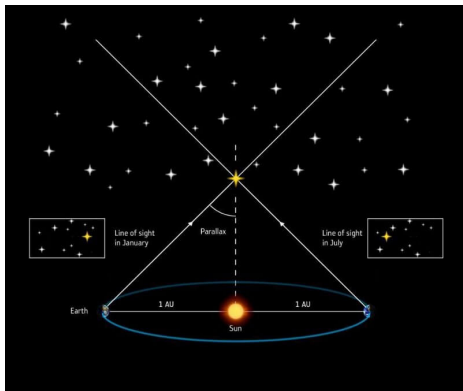
Distância das Estrelas

Paralaxe

- A paralaxe baseia no fato que, ao longo do percurso da órbita da Terra em torno do Sol, as estrelas mais próximas parecem mudar de posição em relação às mais longínquas.

Distância das Estrelas

Paralaxe



Distância das Estrelas

Paralaxe

- Mesmo para a estrela mais próxima, α Centaurus, o ângulo de paralaxe é muito pequeno, menor que 1 segundo de arco.
- Isto ocorre porque as estrelas estão a distâncias muito maiores (dezenas de trilhões de quilômetros) que a base de observação (300 milhões de quilômetros).
- Para α Centaurus, o ângulo de paralaxe é da ordem de 0,8 segundos de arco.

Distância das Estrelas

Paralaxe

- Uma distância equivalente ao ângulo de paralaxe de 1 segundo de arco é igual a 3,6 anos luzes.
- Essa distância define uma nova unidade: o parsec.
- Em astronomia e cosmologia, usa-se mais frequentemente o parsec e seus derivados:
 - 1 parsec = 1 pc,
 - 1 mil parsecs = 10^3 pc = 1 kpc,
 - 1 milhão de parsecs = 10^6 pc = 1 Mpc.

Distância das Estrelas

Paralaxe

- As estrelas próximas estão a distâncias da ordem de parsec.
- Distâncias no interior da galáxia são da ordem de kpc.
- Distância entre galáxias são da ordem de Mpc.

Distância das Estrelas

Paralaxe

- Os paralaxes das estrelas próximas são medidos desde o final do século XVIII.
- Mas, recentemente, as medidas foram muito melhoradas e estendidas para estrelas mais longínquas através do satélite *Hipparcos* da ESA.

Distância das Estrelas

Hipparcos



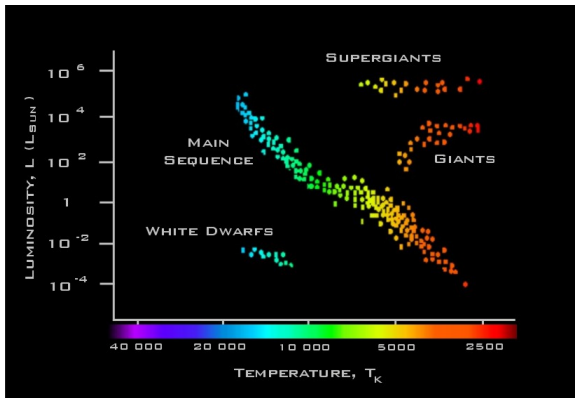
Fases da vida de uma estrela

E depois?

- O que acontece quando todo o hidrogênio tiver se convertido em hélio?
- Tudo depende da massa das estrelas!
- Em princípio, elementos químicos cada vez mais pesados (até o ferro) serão sintetizados.

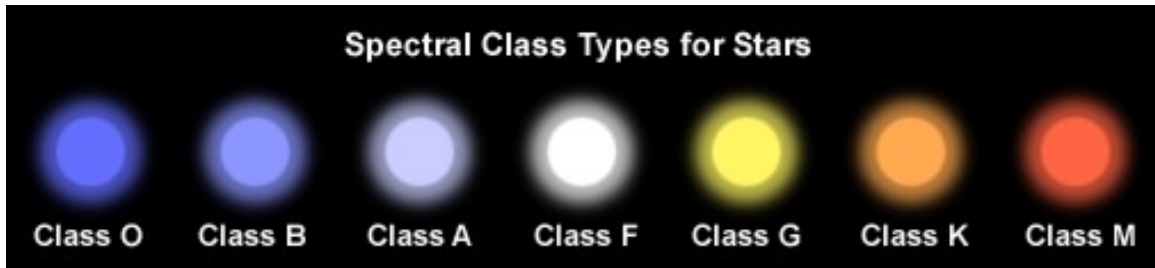
Classificando as estrelas

O diagrama de Hertzsprung-Russel



Classificando as estrelas

Tipos espectrais



Classificando as Estrelas

Espectro

- Como classificamos o espectro das estrelas?
- Resposta: decompondo a luz que recebemos dela usando um **espectrógrafo**.

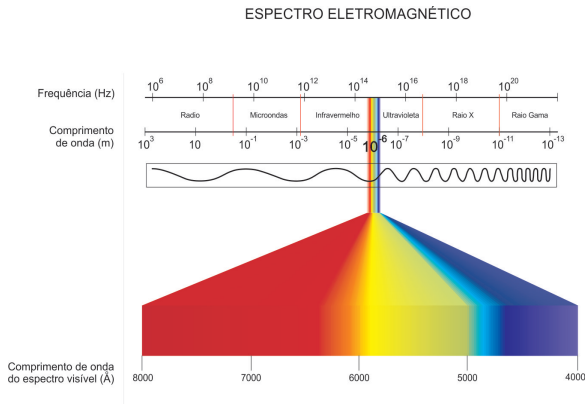
Classificando as estrelas

Espectrógrafo



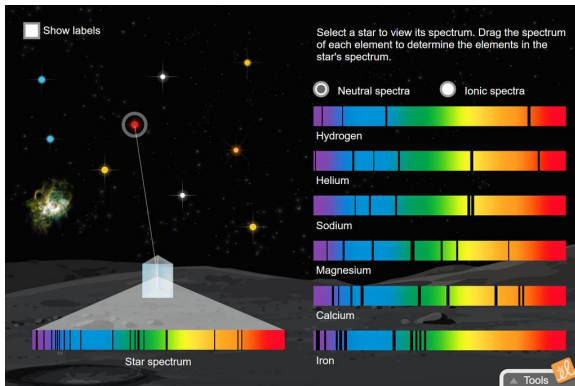
Classificando as estrelas

Espectrógrafo



Classificando as estrelas

Espectrógrafo



Classificando as estrelas

Usando o diagrama H-R para medir distâncias

- Inicialmente o diagrama de H-R foi construído usando estrelas cujas distâncias foram medidas usando paralaxe.
- Assim, todas as estrelas no diagrama tinham sua luminosidade (energia emitida por unidade de tempo) conhecidas.
- Em outras palavras, conhecemos a *magnitude absoluta* dela (a quantidade real de energia que ela emite) além da *magnitude aparente*, que está relacionada à energia que dela recebemos.

Classificando as estrelas

Usando o diagrama H-R para medir distâncias

- Podemos usar depois o diagrama H-R para medir a distância de estrelas mais longínquas:
 - 1 Identificamos o tipo espectral da estrela,
 - 2 localizamos sua posição no diagrama H-R,
 - 3 descobrimos assim sua luminosidade absoluta,
 - 4 conhecendo sua luminosidade aparente, determinamos sua distância.
- Tal método funciona até certas distâncias, também não tão grandes, da ordem de kpcs.

Classificando as Estrelas

vela padrão



Distância das Estrelas

Cefeidas

- Entre as estrelas cuja distância foi medida por paralaxe, identificou-se uma classe especial chamada de *Cefeidas*.
- As Cefeidas tem um brilho variável, com um período de dias.
- Descobriu-se que o período de variação do brilho de uma Cefeida está diretamente relacionado à sua magnitude absoluta.

Distância das Estrelas

Cefeida

- A magnitude aparente m é aquela que nós medimos, está relacionada com a quantidade de luz que recebemos da estrela.
- Uma estrela do mesmo tipo pode parecer com uma magnitude aparente pequena ou grande por estar muito longe ou próxima.

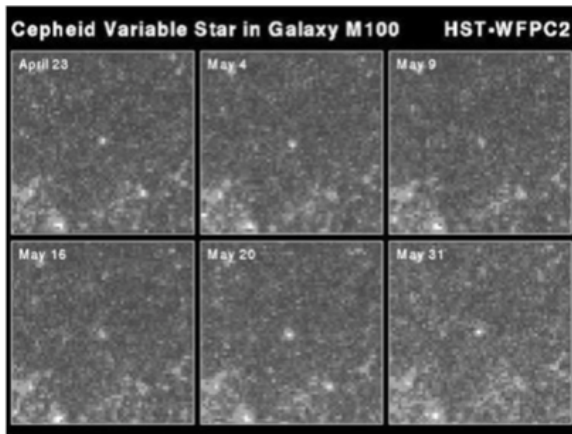
Distância das Estrelas

Cefeida

- A magnitude absoluta M é aquela que está relacionada com a quantidade de luz que a estrela de fato emite.
- Se soubermos a magnitude absoluta de uma estrela e medirmos a aparente, podemos deduzir a distância que está a estrela.
- Uma vez que o período de variabilidade do brilho da Cefeida está relacionada à sua magnitude absoluta, medindo a sua magnitude aparente, sabemos a sua distância.

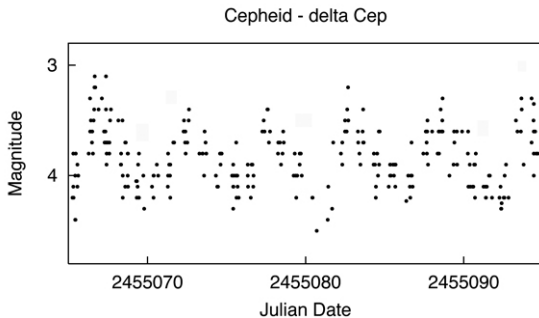
Distância das Estrelas

Cefeida



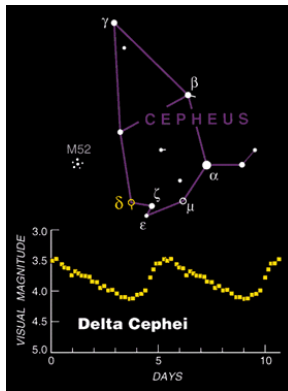
Distância das Estrelas

Cefeida



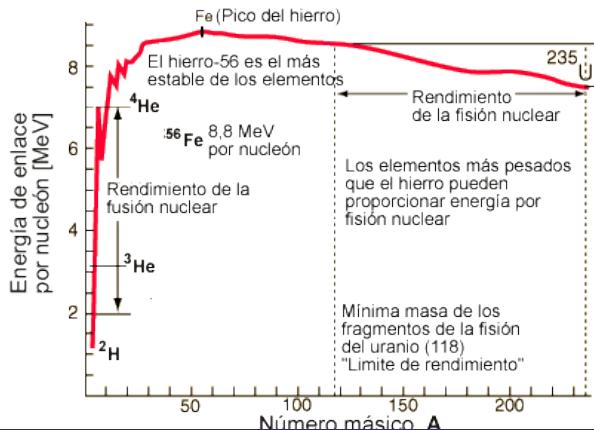
Distância das Estrelas

Cefeida



Fases da vida de uma estrela

A síntese dos elementos



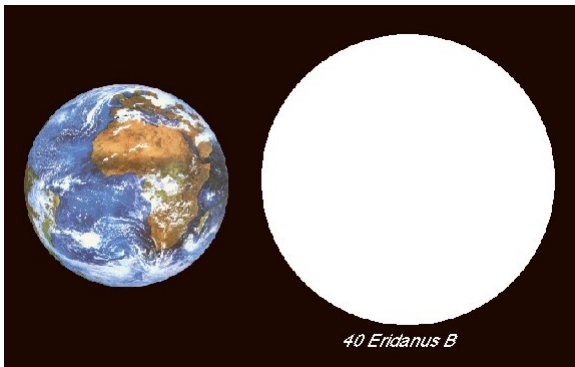
Fases da vida de uma estrela

E depois?

- Estrelas com massa inferior a $4 M_{\odot}$ se converterão em Anãs Brancas, estrelas cujo equilíbrio é mantido por um fenômeno quântico chamado degenerescência eletrônica.
- Estas estrelas não apresentam mais reações nucleares, mas são muito quentes, e lentamente atingem a morte térmica.

Fases da vida de uma estrela

E depois?



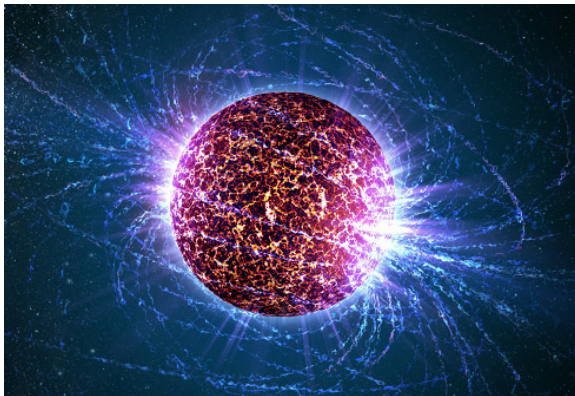
Fases da vida de uma estrela

E depois?

- Estrelas com massa entre $4 M_{\odot}$ e $8 M_{\odot}$ se converterão em Estrelas de Nêutrons, estrelas cujo equilíbrio é mantido pela degenerescência dos nêutrons.
- Estas estrelas têm densidade semelhante a de um núcleo atômico: são como imensos núcleos atômicos, com raio de aproximadamente 10 km .

Fases da vida de uma estrela

E depois?



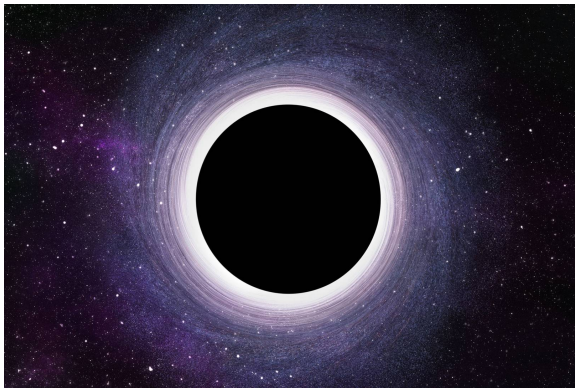
Fases da vida de uma estrela

E depois?

- Estrelas com massa maior que $8 M_{\odot}$ devem se converter em buracos negros.

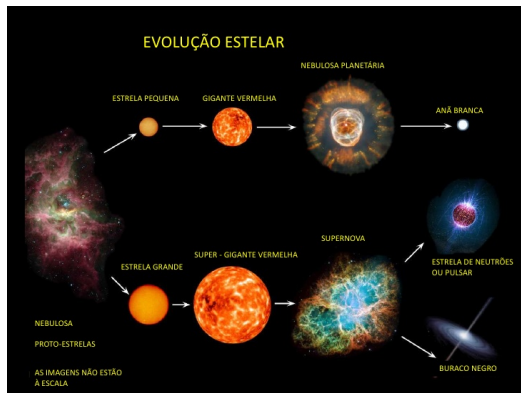
Fases da vida de uma estrela

E depois?



Fases da vida de uma estrela

E depois?



Fases da vida de uma estrela

Supernovas

- Algumas estrelas, mais massivas em geral, podem no final da vida explodir.
- Quando explodem elas se tornam *Supernovas*.
- Brilham tanto como uma galáxia, mas só por algumas semanas.

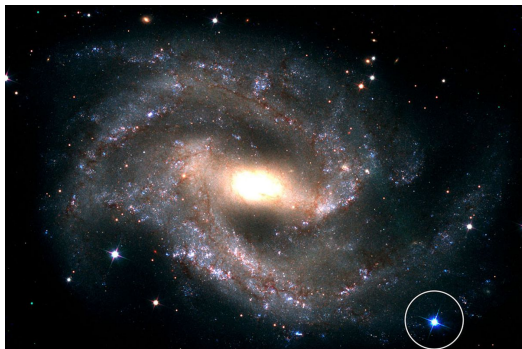
Fases da vida de uma estrela

Supernovas



Fases da vida de uma estrela

Supernovas



Fases da vida de uma estrela

Supernovas



Fases da vida de uma estrela

Supernovas



Fases da vida de uma estrela

Supernovas



Supernovas

- Como previsto foi detectado um fluxo de neutrino associado a esta supernova.
- E foi detectada a estrela de nêutron remanescente.
- Nossa teoria de estrutura e evolução estelar funciona!