



**ASTROFÍSICA**  
*Para Todos*



**NÍVEL**  
**LEMAÎTRE**

# Astrofísica Geral

## Tema 12: A morte das estrelas

Alexandre Zabot

# Índice

Evolução final

Morte estelar

Cadáveres estelares

Supernovas

Bibliografia



# Índice

Evolução final

Morte estelar

Cadáveres estelares

Supernovas

Bibliografia



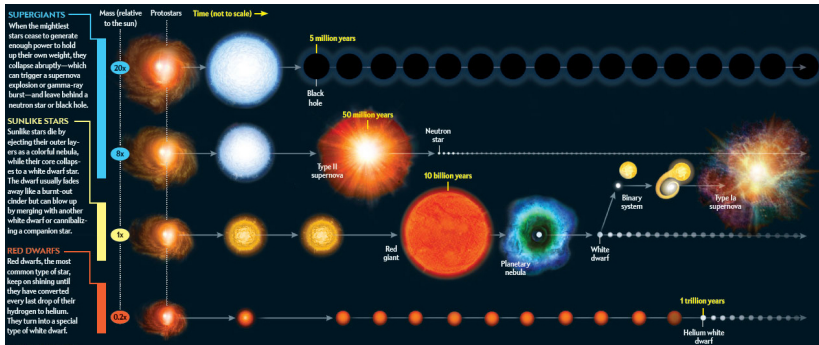
# Fusão estável

- ▶  $H \rightarrow He$
- ▶ He se acumula no centro do núcleo
- ▶ H funde em uma casca
- ▶ As próximas etapas dependem da massa da estrela



Interior de uma estrela adulta





Possíveis fins para uma estrela, de acordo com sua massa inicial.



# Índice

Evolução final

Morte estelar

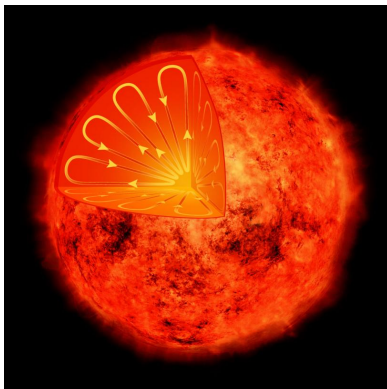
Cadáveres estelares

Supernovas

Bibliografia



## Anã vermelha ( $M/M_{\odot} \lesssim 0.8$ )

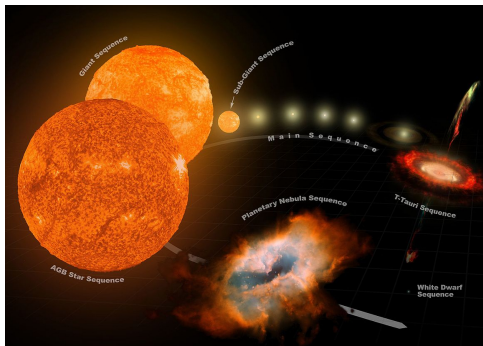


Anãs vermelhas não têm massa suficiente para que o núcleo possa queimar He. Irão consumir todo o H lentamente tornando-se Anãs Brancas de Hélio. Próxima centauri, a estrela mais próxima do Sol, é uma anã vermelha. São a maior parte das estrelas do universo.



## Estrelas como o Sol ( $0.8 \lesssim M/M_{\odot} \lesssim 8$ )

- ▶ He funde em C
- ▶ A estrela continua a expandir e avermelhar
- ▶ O núcleo não fica quente suficiente para fundir C
- ▶ Camadas externas são expelidas
- ▶ Nebulosa planetária
- ▶ Anã branca de C



Evolução final de estrelas com ( $0.8 \lesssim M/M_{\odot} \lesssim 8$ ).





# Nebulosa planetária



Nebulosa planetária do Olho do Gato, como o núcleo da estrela que se tornará uma Anã Branca.



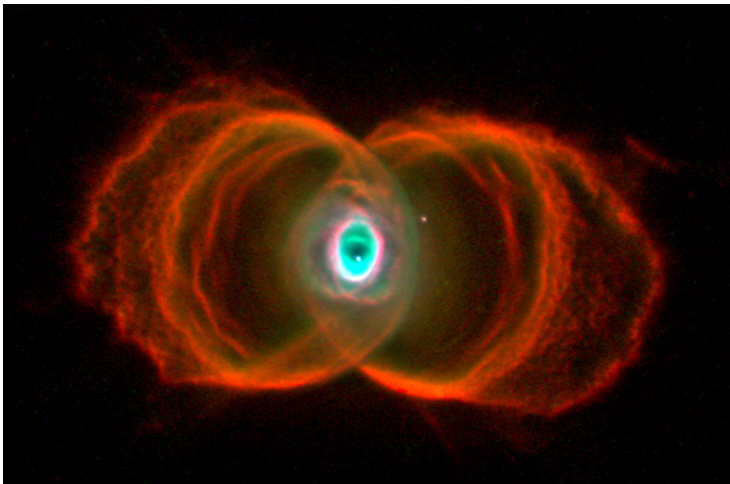
# Nebulosa planetária



Nebulosa planetária do Esquimó.



# Nebulosa planetária



Nebulosa planetária da Ampulheta.



# Nebulosa planetária

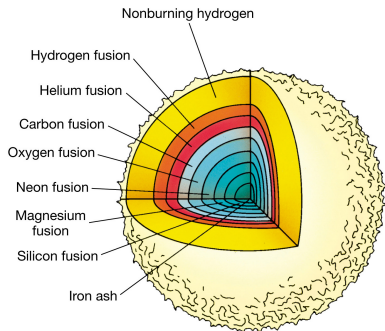


Nebulosa planetária da Formiga.



## Estrelas massivas ( $M/M_{\odot} \gtrsim 8$ )

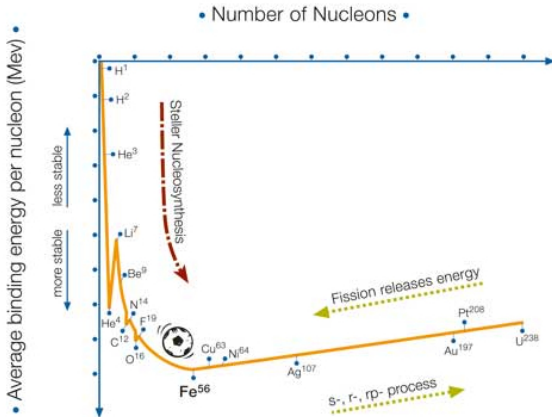
- ▶ O processo é semelhante ao de uma estrela de baixa massa
- ▶ Mas as estrelas massivas podem fazer fusão de elementos mais pesados
- ▶  $C \rightarrow O \rightarrow Ne \rightarrow Mg \rightarrow Si \rightarrow Fe$
- ▶ O processo pára no Fe
- ▶ O núcleo colapsa e a estrela explode em supernova
  - ▶ Se  $8 \lesssim M/M_{\odot} \lesssim 20$  o núcleo se torna uma estrela de nêutros
  - ▶ Se  $M/M_{\odot} \gtrsim 20$  o núcleo se torna um buraco negro



No final, uma estrela massiva é formada por várias camadas de elementos em fusão.



# O problema do Ferro



A partir do Fe, a fusão nuclear consome energia!



# Índice

Evolução final

Morte estelar

Cadáveres estelares

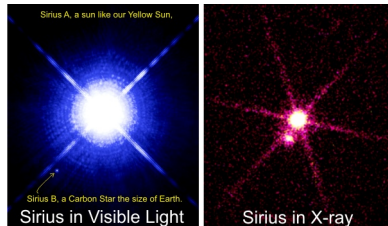
Supernovas

Bibliografia



# Anã branca

- ▶ Fim mais comum,  $\sim 98\%$  das estrelas
- ▶ Núcleo da estrela sem as camadas externas
- ▶ Não gera energia, só esfria



A estrela Sírius é uma estrela dupla. Sirius b, uma das estrelas do par, é uma anã branca.





# Limite de Chandrasekhar

- ▶ Gravidade “esmaga” átomos
- ▶ Acima de uma massa limite, a estrela colapsa
- ▶ Limite  $\sim 1.4M_{\odot}$
- ▶ Maior massa de uma Anã Branca

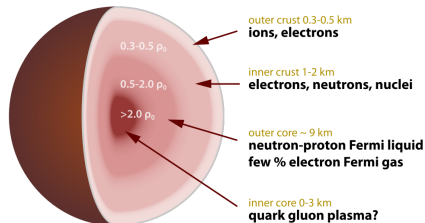


Subrahmanyan Chandrasekhar descobriu o massa limite que uma Anã Branca pode ter em 1930, aos 19 anos.



# Estrela de nêutrons

- ▶ Uma estrela em  $\sim 20$  km!
- ▶ Colocar  $1 \text{ km}^3$  da Terra em 1 caixa de fósforos
- ▶ Acontece quando se passa do limite de Chandrasekhar
- ▶ Difícil observar

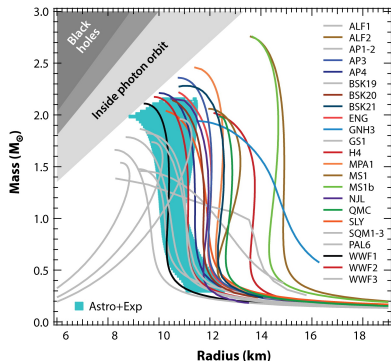


Estrutura de uma estrela de nêutrons.



# Limite de Tolman – Oppenheimer – Volkoff

- ▶ Núcleo composto por nêutros
- ▶ Gravidade “esmaga” nêutrons
- ▶ Acima de uma massa limite, a estrela colapsa
- ▶ Limite  $\sim 3M_{\odot}$
- ▶ Maior massa de uma estrela de nêutros

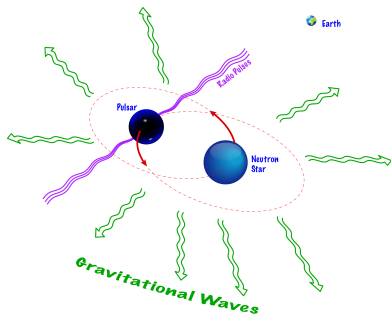


Relações Massa-Raio observadas para estrelas de nêutros. Özel & Freire, 2016.



# Pulsares

- ▶ Estrelas de nêutrons em alta rotação
- ▶ Emissão de partículas
- ▶ Perdem energia de rotação e se tornam estrelas de nêutron normais

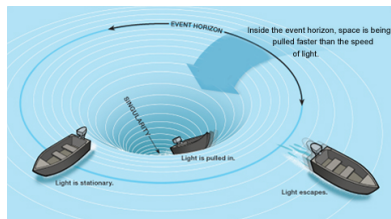


O par de Hulse – Taylor é um sistema binário de um pulsar e uma estrela de nêutrons, descoberto em 1974. A medida da diminuição do período de rotação permitiu determinar pela primeira vez a emissão de ondas gravitacionais. Os descobridores ganharam o Prêmio Nobel de Física em 1993.



# Buraco negro

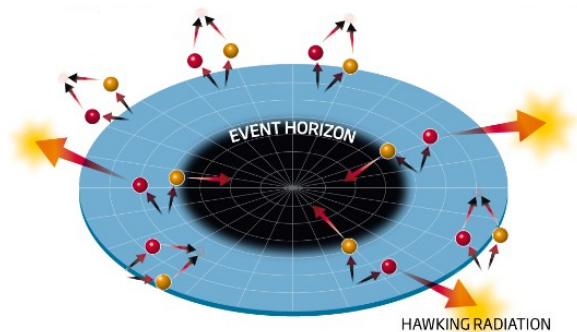
- ▶ Colapso numa singularidade
- ▶  $g = \frac{GM}{R}$
- ▶ Horizonte de eventos
- ▶ Buracos negros estelares e super-massivos.



Nada pode escapar da atração de um buraco negro a partir do seu horizonte de eventos.



# Evaporação de um Buraco Negro

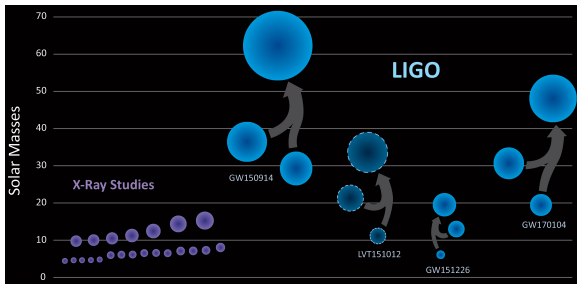


Stephen Hawking previu que um buraco negro emite radiação. Se ele não for “alimentado”, irá desaparecer.



# Detecção de um buraco negro

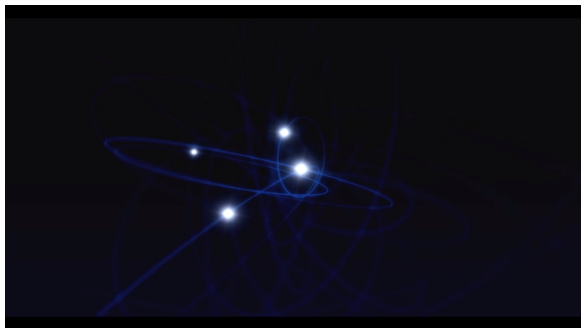
- ▶ Ondas Gravitacionais (LIGO)
- ▶ Movimento de estrelas (Sgr A\*)
- ▶ Discos de acréscimo
  - ▶ Binárias de Raios-X
  - ▶ AGNs: Núcleos Ativos de Galáxias
- ▶ Microlentes



Fusão de buracos negros detectadas pelo LIGO.



# Sagitário A



No centro da nossa Galáxia há um buraco negro supermassivo. Nesse vídeo são combinadas imagens reais do VLT com simulações para mostrar a órbita de estrelas em torno do “nada”.

<http://www.eso.org/public/chile/videos/eso0846e/>





# Índice

Evolução final

Morte estelar

Cadáveres estelares

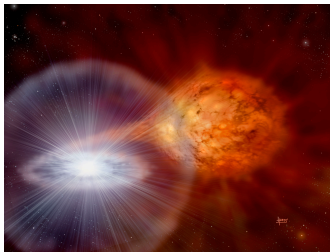
**Supernovas**

Bibliografia

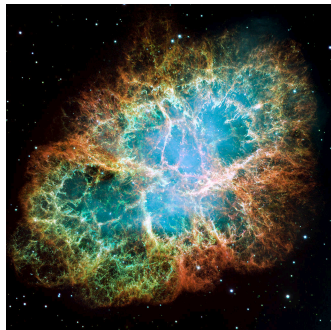


# Tipos de supernova

- ▶ Tipo Ia
  - ▶ explosão térmica em cadeia (thermal runaway)
  - ▶ compressão,  $T \uparrow$ , fusão  $\uparrow$ ,  $T \uparrow$ , explosão
- ▶ Outros tipos (Ib, II, etc)
  - ▶ colapso de estrela
  - ▶ Tipo I/II, sem/com linhas de H



Explosão de supernova tipo Ia.



Supernova do carangueijo, que explodiu em 1054 e foi visível a olho nu. Provavelmente foi originada por uma estrela de  $8-10 M_{\odot}$  numa SN tipo II.



# Enriquecimento químico

<b>H</b> B																				<b>He</b> B
<b>Li</b> C	<b>Be</b> C											<b>B</b> C	<b>C</b> S L	<b>N</b> S L	<b>O</b> S L	<b>F</b> L	<b>Ne</b> S L			
<b>Na</b> L	<b>Mg</b> L											<b>Al</b> \$ L	<b>Si</b> \$ L	<b>P</b> L	<b>S</b> S L	<b>Cl</b> L	<b>Ar</b> L			
<b>K</b> L	<b>Ca</b> L	<b>Sc</b> L	<b>Ti</b> \$ L	<b>V</b> \$ L	<b>Cr</b> L	<b>Mn</b> L	<b>Fe</b> \$ L	<b>Co</b> \$	<b>Ni</b> \$	<b>Cu</b> L	<b>Zn</b> L	<b>Ga</b> \$	<b>Ge</b> \$	<b>As</b> L	<b>Se</b> \$	<b>Br</b> \$	<b>Kr</b> \$			
<b>Rb</b> \$	<b>Sr</b> L	<b>Y</b> L	<b>Zr</b> L	<b>Nb</b> \$ L	<b>Mo</b> L	<b>Tc</b> L	<b>Ru</b> \$ L	<b>Rh</b> \$	<b>Pd</b> \$ L	<b>Ag</b> \$ L	<b>Cd</b> \$ L	<b>In</b> \$ L	<b>Sn</b> \$ L	<b>Sb</b> \$	<b>Te</b> \$	<b>I</b> \$	<b>Xe</b> \$			
<b>Cs</b> \$	<b>Ba</b> L		<b>Hf</b> \$ L	<b>Ta</b> \$ L	<b>W</b> \$ L	<b>Re</b> \$	<b>Os</b> \$	<b>Ir</b> \$	<b>Pt</b> \$	<b>Au</b> \$	<b>Hg</b> \$ L	<b>Tl</b> \$ L	<b>Pb</b> \$	<b>Bi</b> \$	<b>Po</b> \$	<b>At</b> \$	<b>Rn</b> \$			
<b>Fr</b> \$	<b>Ra</b> \$																			
		<b>La</b> L	<b>Ce</b> L	<b>Pr</b> \$ L	<b>Nd</b> \$ L	<b>Pm</b> \$ L	<b>Sm</b> \$ L	<b>Eu</b> \$	<b>Gd</b> \$	<b>Tb</b> \$	<b>Dy</b> \$	<b>Ho</b> \$	<b>Er</b> \$	<b>Tm</b> \$	<b>Yb</b> \$ L	<b>Lu</b> \$				
		<b>Ac</b> \$	<b>Th</b> \$	<b>Pa</b> \$	<b>U</b> \$	<b>Np</b> \$	<b>Pu</b> \$	<b>Am</b> M	<b>Cm</b> M	<b>Bk</b> M	<b>Cf</b> M	<b>Es</b> M	<b>Fm</b> M	<b>Md</b> M	<b>No</b> M	<b>Lr</b> M				

B	Big Bang
L	Estrelas grandes
\$	super-novas
C	Raios cósmicos
S	Estrelas pequenas
M	Homem fez

As supernovas geram o resto da tabela periódica além do Fe.

Esse processo causa o chamado de **Enriquecimento Químico** do universo.



# Índice

Evolução final

Morte estelar

Cadáveres estelares

Supernovas

Bibliografia



## Fontes para estudo

- ▶ O céu que nos envolve, capítulo 7
- ▶ Curso de Astronomia do Prof. Steiner, aulas 25 a 27 e 30.
- ▶ Várias seções em <http://astro.if.ufrgs.br/>
- ▶ Curso de Astronomia, Auta & Joel, Aula 13



REALIZAÇÃO

