



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

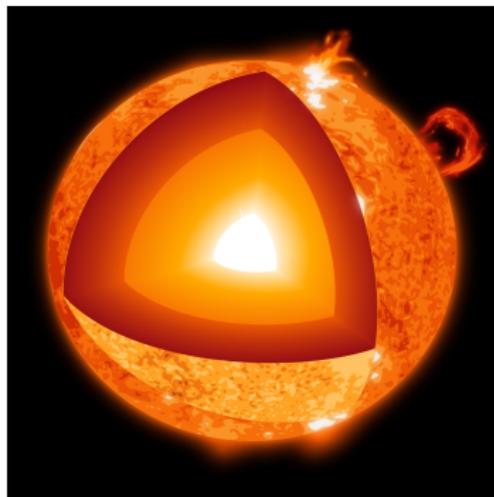
Supernovas

Bibliografia



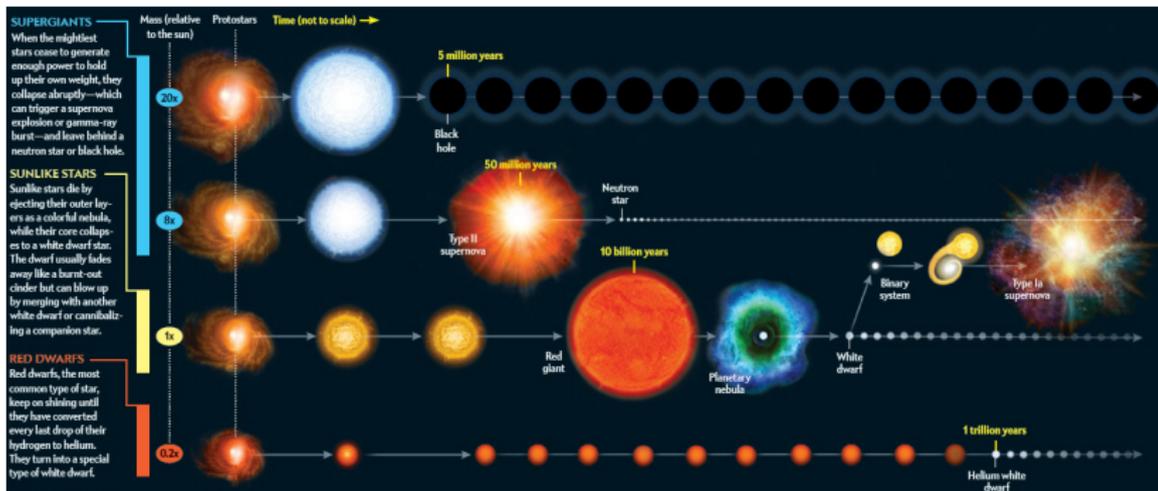
Fusão estável

- ▶ $H \rightarrow He$
- ▶ 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

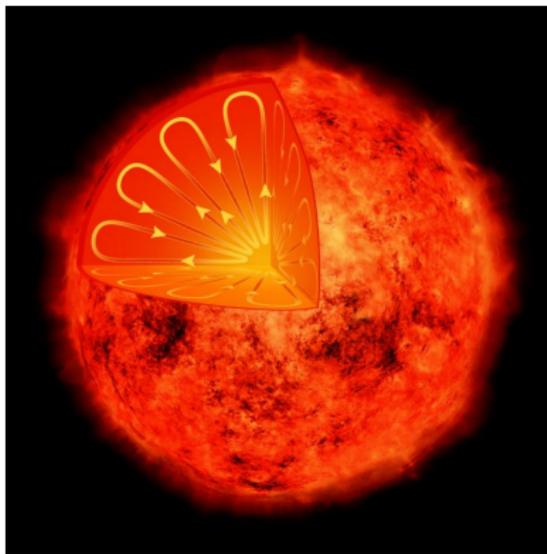
Cadáveres estelares

Supernovas

Bibliografia



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

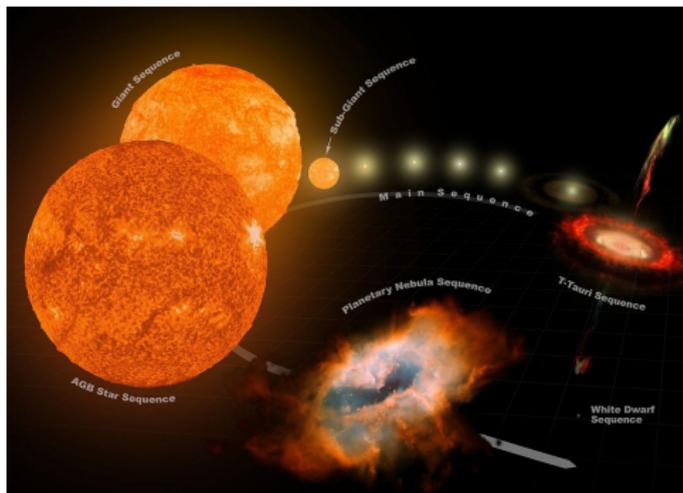


Anãs vermelhas não têm massa suficiente para que o núcleo possa queimar He. Irão consumir todo o H lentamente tornando-se Anãs Brancas de Hélio. Próxima centauri, a estrela mais próxima do Sol, é uma anã vermelha. São a maior parte das estrelas do universo.



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.



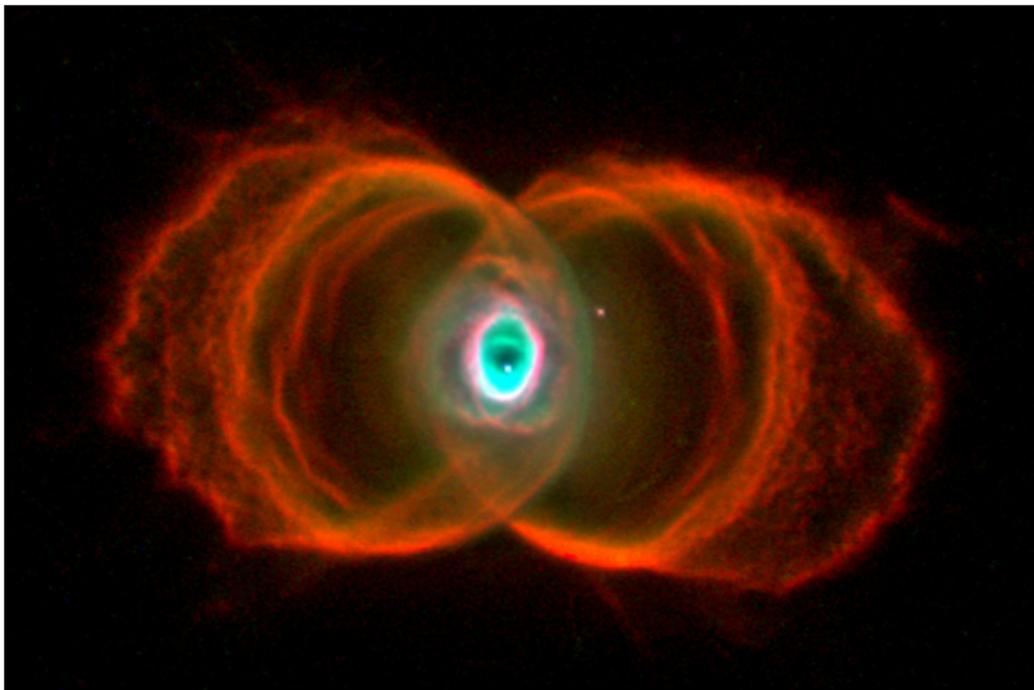
Nebulosa planetária



Nebulosa planetária do Esquimó.



Nebulosa planetária



Nebulosa planetária da Ampulheta.



Nebulosa planetária

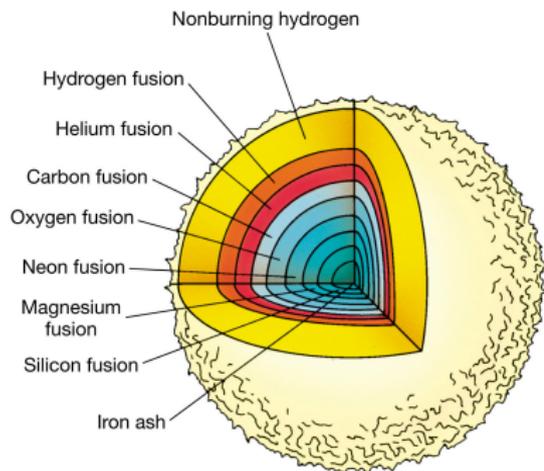


Nebulosa planetária da Formiga.



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

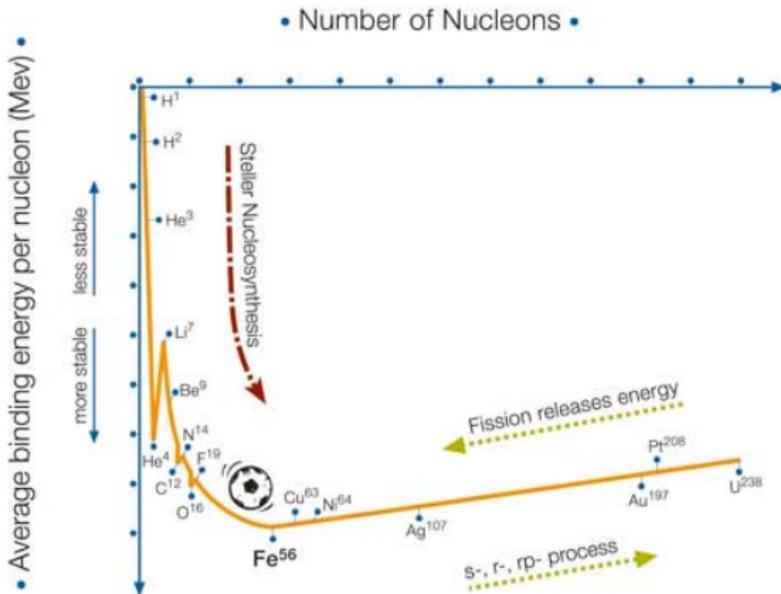
- ▶ O processo é semelhante ao de uma estrela de baixa massa
- ▶ Mas as estrelas massivas podem fazer fusão de elementos mais pesados
- ▶ $C \rightarrow O \rightarrow Ne \rightarrow Mg \rightarrow Si \rightarrow Fe$
- ▶ O processo pára no Fe
- ▶ O núcleo colapsa e a estrela explode em supernova
 - ▶ 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

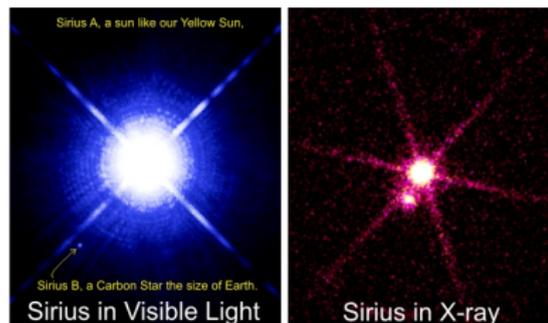
Supernovas

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

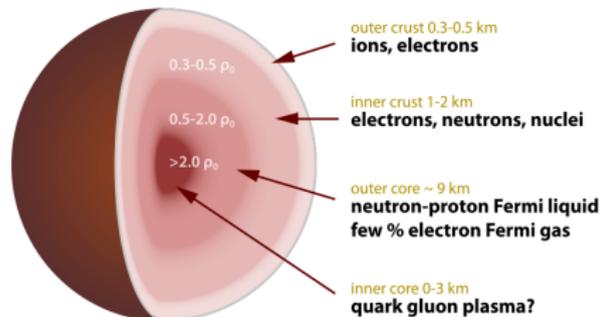


Subrahmanyan Chandrasekhar descobriu o massa limite que uma Anã Branca pode ter em 1930, aos 19 anos.



Estrela de nêutrons

- ▶ Uma estrela em ~ 20 km!
- ▶ Colocar 1 km^3 da Terra em 1 caixa de fósforos
- ▶ Acontece quando se passa do limite de Chandrasekhar
- ▶ Difícil observar

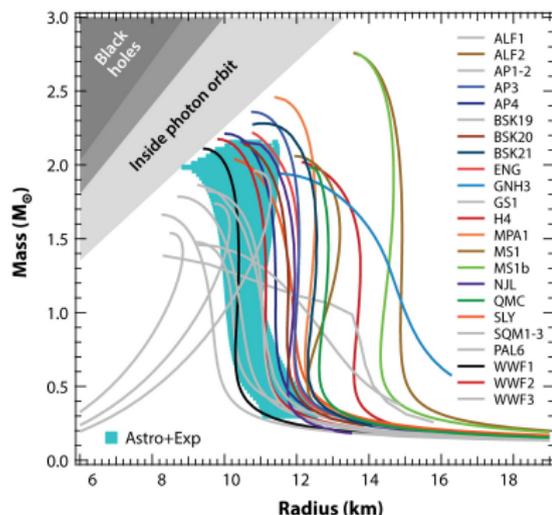


Estrutura de uma estrela de nêutrons.



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

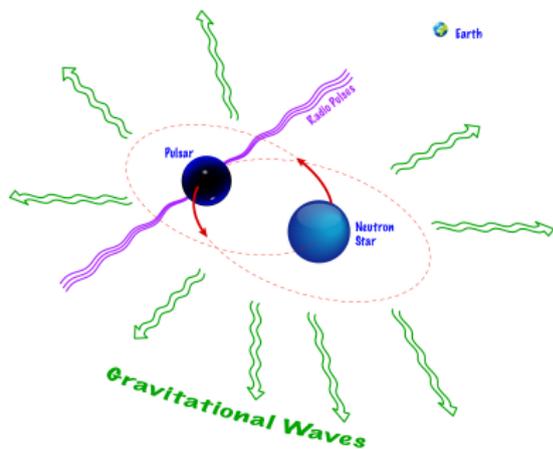


Relações Massa-Raio observadas para estrelas de nêutros. Özel & Freire, 2016.



Pulsares

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

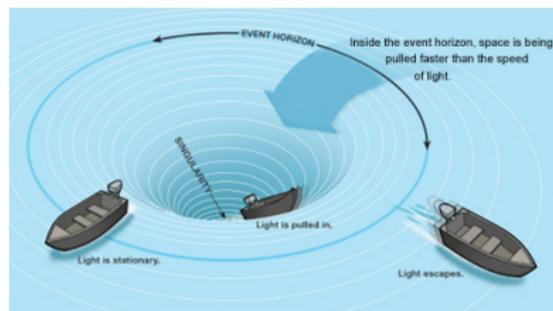


O par de Hulse – Taylor é um sistema binário de um pulsar e uma estrela de nêutrons, descoberto em 1974. A medida da diminuição do período de rotação permitiu determinar pela primeira vez a emissão de ondas gravitacionais. Os descobridores ganharam o Prêmio Nobel de Física em 1993.



Buraco negro

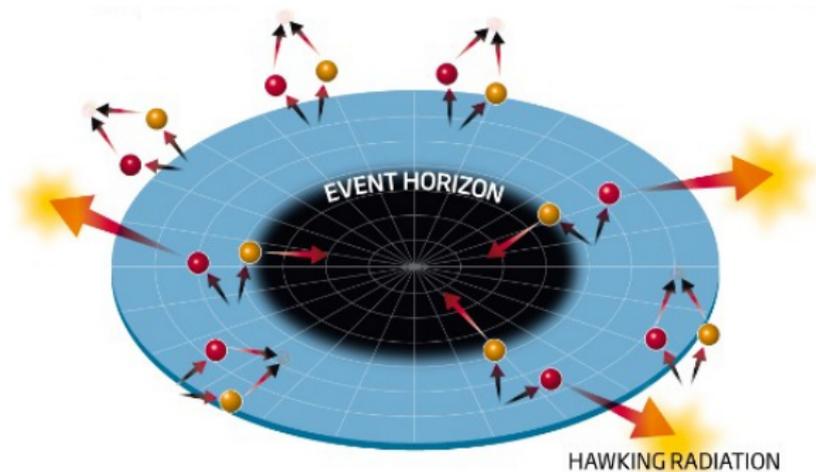
- ▶ Colapso numa singularidade
- ▶ $g = \frac{GM}{R}$
- ▶ Horizonte de eventos
- ▶ Buracos negros estelares e super-massivos.



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



Evaporação de um Buraco Negro

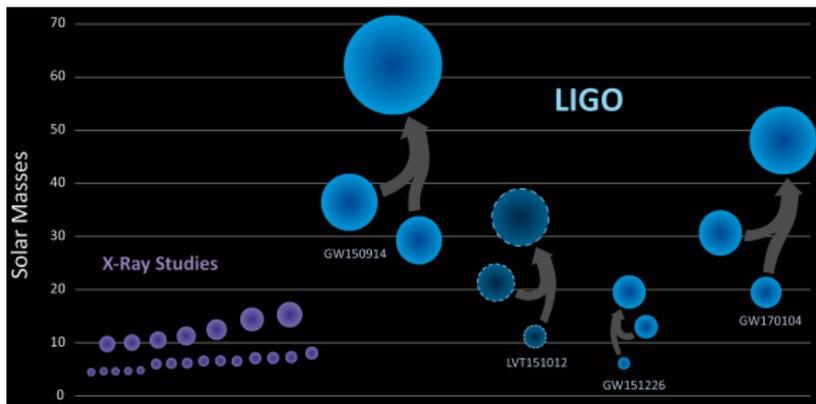


Stephen Hawking previu que um buraco negro emite radiação. Se ele não for “alimentado”, irá desaparecer.



Detecção de um buraco negro

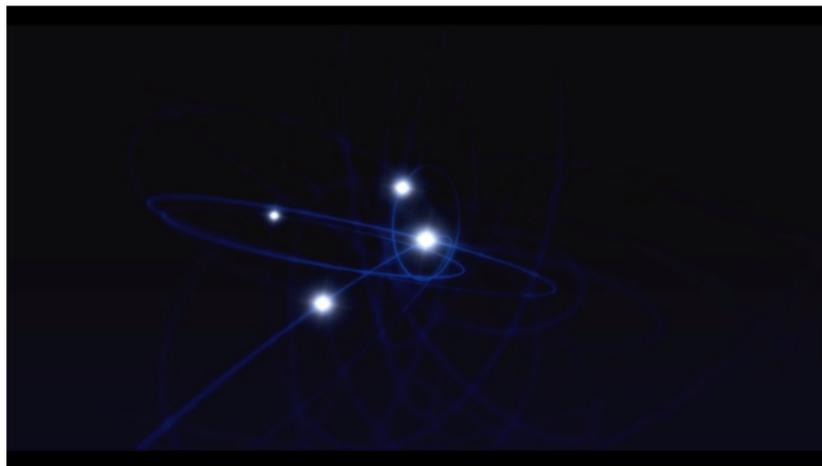
- ▶ Ondas Gravitacionais (LIGO)
- ▶ Movimento de estrelas (Sgr A*)
- ▶ Discos de acréscimo
 - ▶ Binárias de Raios-X
 - ▶ AGNs: Núcleos Ativos de Galáxias
- ▶ Microlentes



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

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

