

Astrofísica 2 - Estrelas

Júlio C. Fabris

Cosmo-ufes/PPGCosmo/Universidade Federal do Espírito Santo

Inverno Astrofísico, agosto de 2021

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.
- O interior das estrelas é uma grande usina de fusão nuclear.

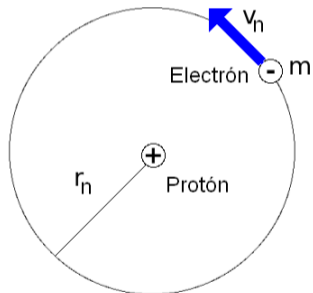
Estrelas

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 $13,6 eV$.
- Isto quer dizer que quando um elétron se junta ao próton para formar um átomo de hidrogênio, ele libera uma energia de $13,6 eV$.

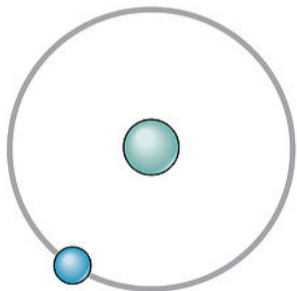
Estrelas

Átomos

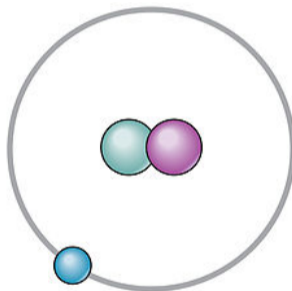
- Em seguida, vem um *isótopo* do hidrogênio, o *Deutério*, formado por um elétron, um próton e um nêutron.

O que é uma estrela

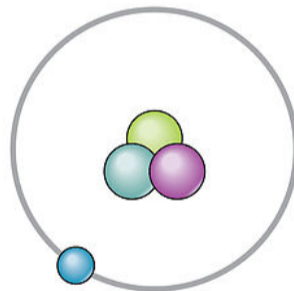
Os isótopos do hidrogênio



Protium (^1H)



Deuterium (^2H)



Tritium (^3H)

Estrelas

Átomos

- Quando um Deutério é formado na reação,



libera-se,

$$E_D \sim 2,2 \text{ MeV}. \quad (11)$$

- 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).

Estrelas

Átomos

- E quando dois Deutérios se juntam para formar o átomo de Hélio (dois elétrons, dois prótons e dois nêutrons,

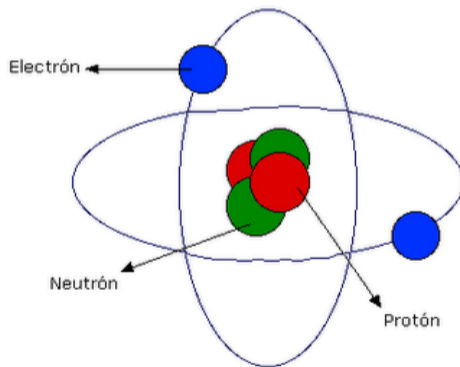


libera-se uma energia de

$$E_{He} \sim 20 \text{ MeV}. \quad (13)$$

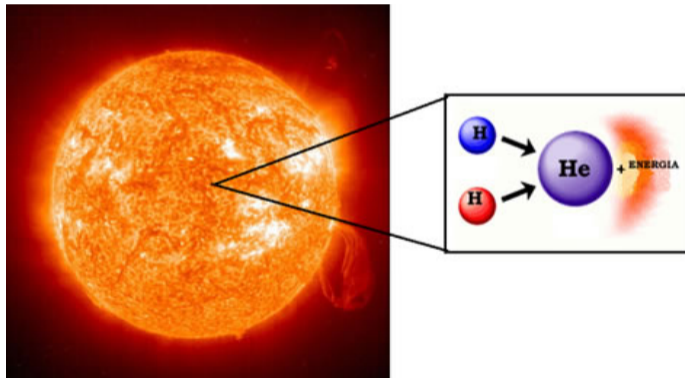
O que é uma estrela

Hélio



O que é uma estrela

O sol



Estrelas

Átomos no Sol

- O Sol tem aproximadamente,

$$N = 10^{57} \tag{14}$$

núcleos atômicos.

Estrelas

Átomos no Sol

- São precisos

$$R = 10^{39} \quad (15)$$

reações por segundo para manter a luminosidade solar.

Estrelas

Átomos no Sol

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

Estrelas

Transferindo energia no Sol

- As reações nucleares no Sol ocorrem em seu interior, onde a temperatura é de quase 20 milhões de graus.
- Essa energia gerada é transportada ao longo do Sol por três mecanismos principais:
 - 1 Radiação,
 - 2 Convecção,
 - 3 Condução.

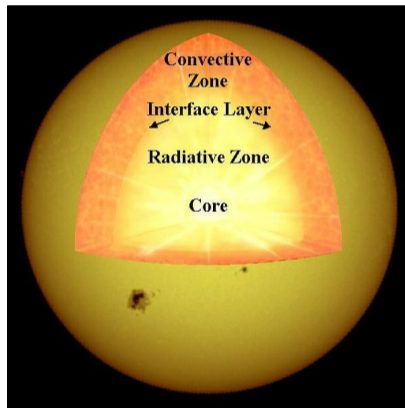
Estrelas

Transferindo energia Sol

- Os mais eficazes costumam ser a radiação e a convecção.
- Mas tudo depende do tipo de estrela, sua massa, seu tamanho e sua composição química.

O que é uma estrela

O interior do Sol



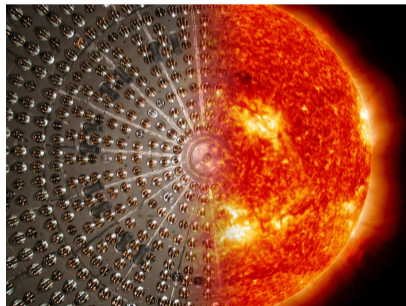
Estrelas

Neutrinos solares

- As reações nucleares no interior do Sol geram um fluxo de neutrinos que atinge a Terra.
- Estes neutrinos são detectados.

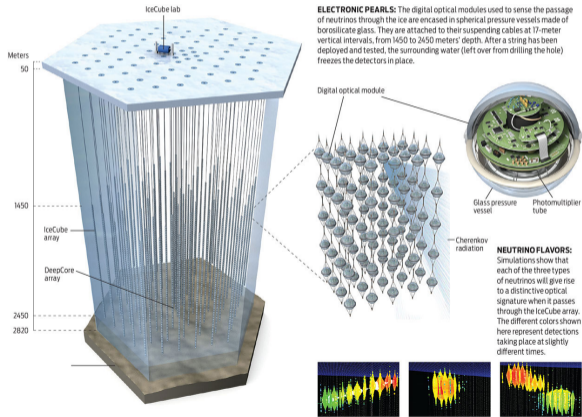
O que é uma estrela

Neutrinos solares



O que é uma estrela

Neutrinos solares



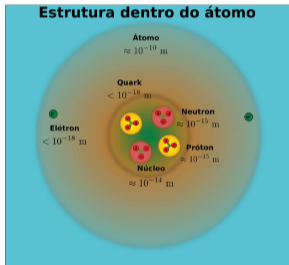
Estrelas

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.

O que é uma estrela

Neutrinos solares



(a) Estrutura atômica, fora de escala.

Três Gerações da Matéria (Férmions)

	I	II	III	
massa →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nome →	u up	c charm	t top	γ fóton
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g glúon
	$< 2,2$ eV	$< 0,17$ MeV	$< 15,5$ MeV	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Léptons	ν_e neutrino do elétron	ν_μ neutrino do múon	ν_τ neutrino do tau	Z ⁰ força fraca
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e elétron	μ múon	τ tau	W [±] força fraca
				Bósons (Forças)

(b) Partículas elementares de acordo com o modelo padrão.

Figura 2.8: Estrutura da matéria de acordo com o modelo padrão.

Estrelas

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

Átomos no Sol

- A estimativa de bilhões de anos está de acordo com as datações geológicas.
- Em particular está de acordo com as datações obtidas a partir do decaimento radioativo do elemento químico urânio.
- Técnicas e princípios completamente diferentes levam aos mesmos resultados.
- Isto mostra a robustez do conhecimento acumulado sobre a estrutura e evolução das estrelas.

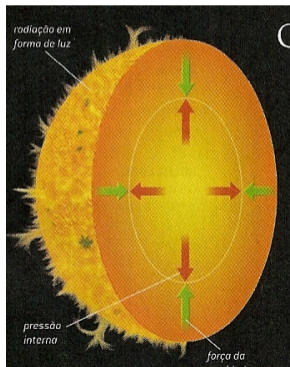
Estrelas

O equilíbrio

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

Estrelas

O equilíbrio



Estrelas

O interior das Estrelas



Estrelas

O interior das Estrelas

- Segunda lei de Newton para um elemento de massa submetido à atração gravitacional e à ação da pressão:

$$\begin{aligned}
 \vec{F} &= \rho \Delta V \vec{a} = -G \frac{m(r) \rho \Delta V}{r^2} \hat{r} + [p(r) - p(r + \Delta r) A] \hat{r} \\
 &= -G \frac{m(r) \rho \Delta V}{r^2} \hat{r} + \frac{p(r)}{dr} \Delta V \hat{r}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

Estrelas

O interior das Estrelas

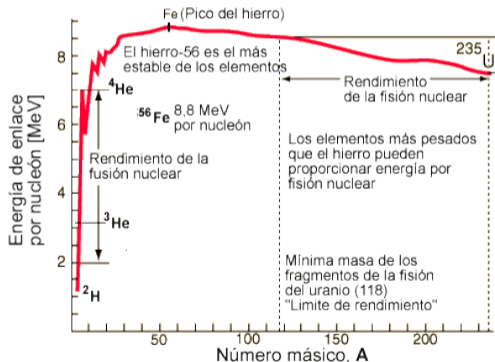
- Em equilíbrio, $\vec{a} = 0$:

$$\frac{dp}{dr} = -G \frac{m(r)\rho(r)}{r^2}, \quad (17)$$

$$m(r) = 4\pi \int_0^r \rho(r') r'^2 dr'. \quad (18)$$

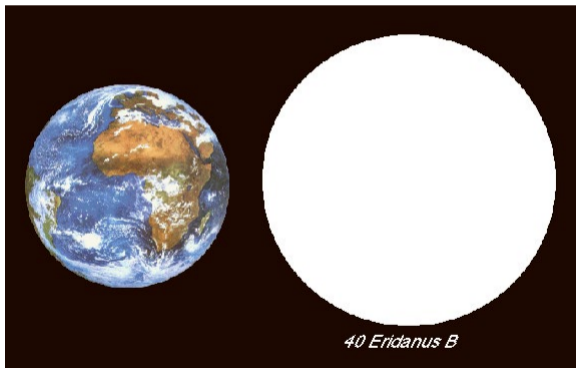
Fases da vida de uma estrela

A síntese dos elementos



Fases da vida de uma estrela

E depois?



Fases da vida de uma estrela

E depois?

- Estrelas com massa entre $8 M_{\odot}$ e $40 M_{\odot}$ 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 :

$$\rho_N \sim 10^{15} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad (19)$$

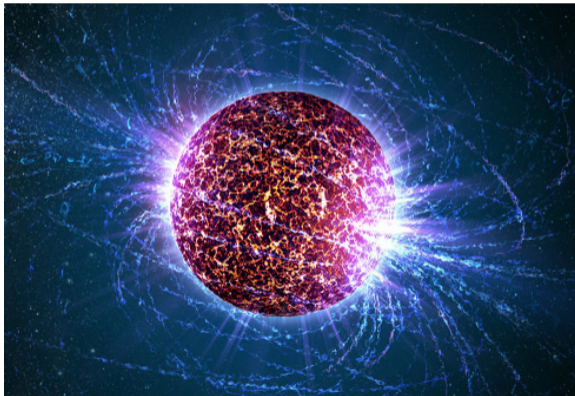
Fases da vida de uma estrela

E depois?

- O estudo das estrelas de nêutrons constitui uma arena onde se encontram os estudos de teorias de gravidade e física das partículas elementares.

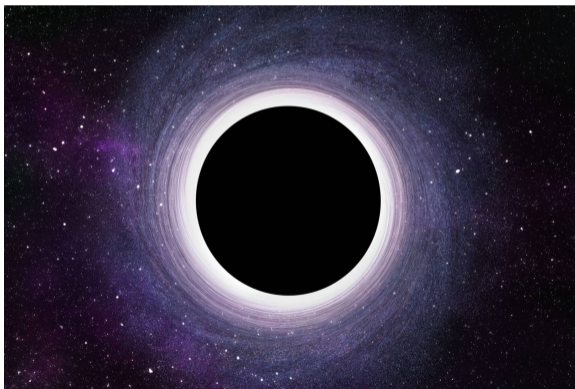
Fases da vida de uma estrela

E depois?



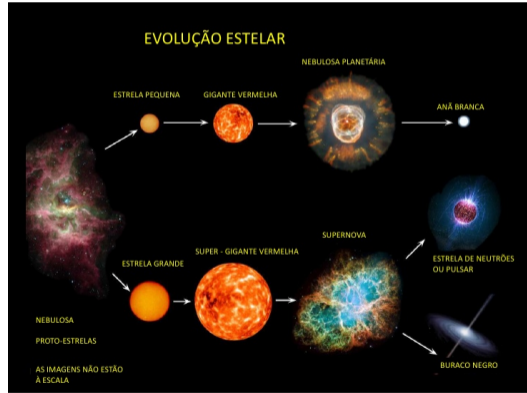
Fases da vida de uma estrela

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

- Os elementos químicos mais pesados que o Ferro são sintetizados na explosão das supernovas.

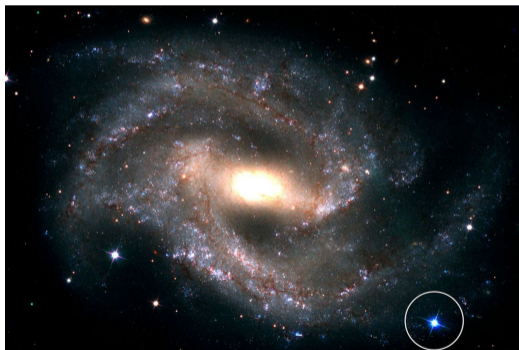
Fases da vida de uma estrela

Supernovas

- O remanescente de uma supernova é, geralmente, uma estrela de nêutron.
- A explosão de uma supernova sintetiza os elementos químicos mais pesados que o Ferro.

Fases da vida de uma estrela

Supernovas



Fases da vida de uma estrela

Supernovas



Fases da vida de uma estrela

Supernovas

- Supernovas são eventos muito raros: ocorre praticamente uma supernova por século na nossa galáxia.
- A última que ocorreu na nossa galáxia foi em 1987.
- Na verdade, ela ocorreu na Grande Nuvem de Magalhães, galáxia satélite da Via Láctea.

Fases da vida de uma estrela

Supernovas



Fases da vida de uma estrela

Supernovas



Fases da vida de uma estrela

Supernovas

- Como previsto foi detectado um fluxo de neutrino associado a esta supernova.
- Mas a estrela de nêutrons remanescente não foi detectada.
- Estaria o pulsar orientado no sentido "errado"?
- Nossa teoria de estrutura e evolução estelar funciona? Em princípio sim.