Astrofísica Nuclear

Elvis do A. Soares
Instituto de Física, UFRJ, Rio de Janeiro

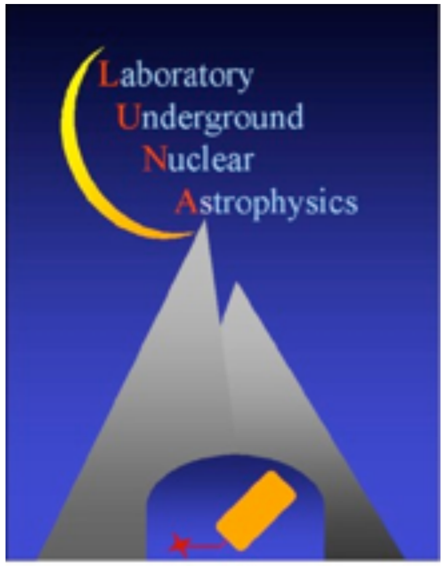
Física de Astropartículas e Cosmologia
Instituto de Física - UFRJ, 08 de junho de 2016

Introdução

Astrofísica Nuclear

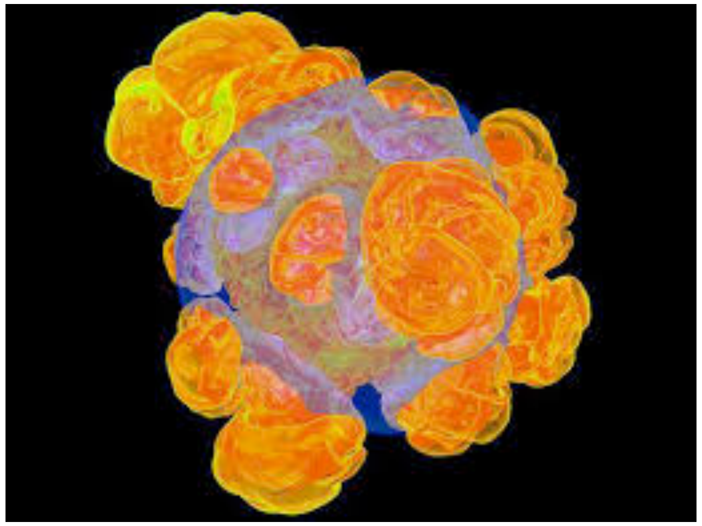
- **Objetivo:** entender os processos nucleares que ocorrem no Universo.
- Esses processos nucleares contribuem para a **origem dos elementos químicos** e a **geração de energia em estrelas**.

Luna experiment

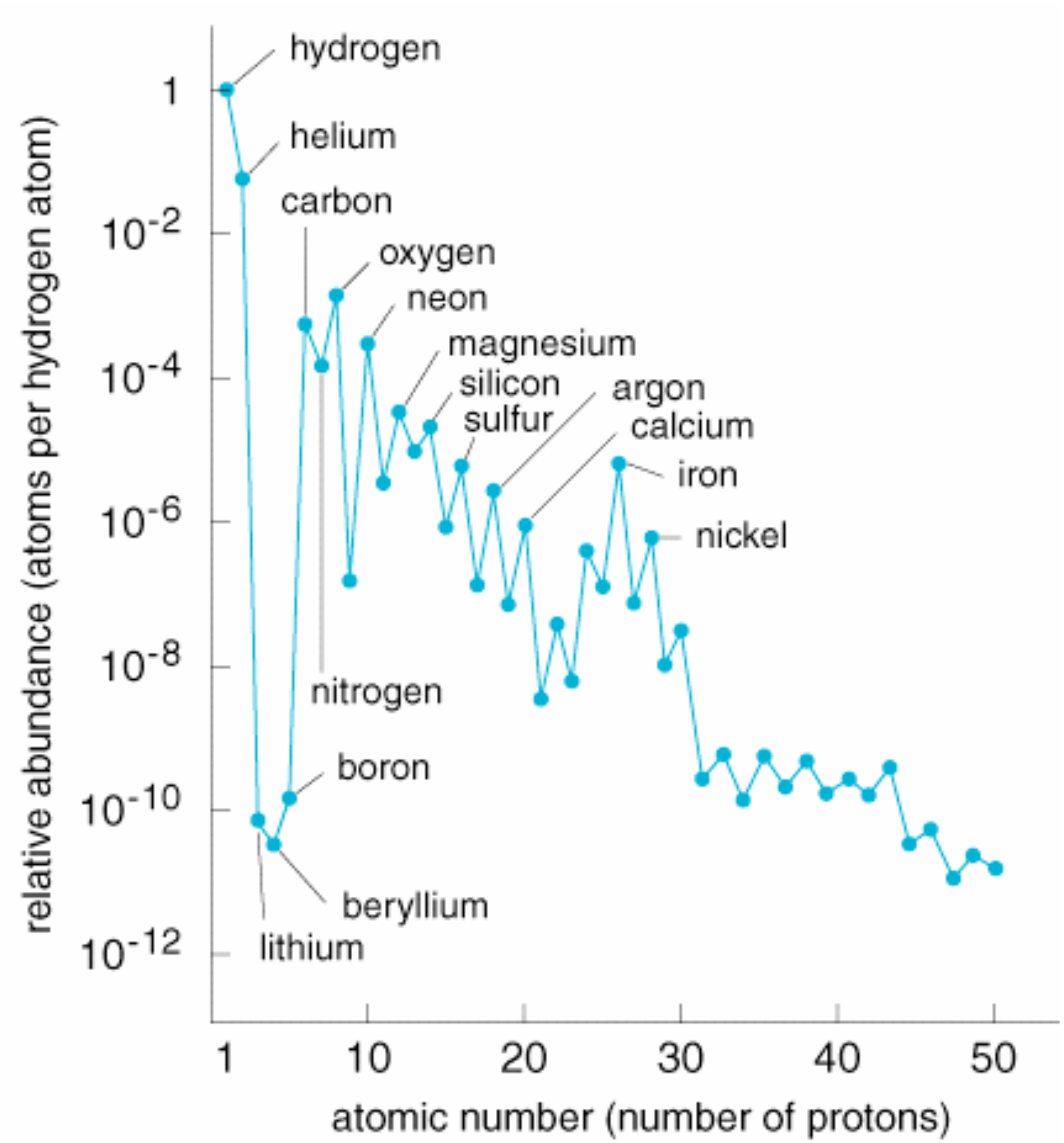


X-ray Observatory Chandra

Modelagem de Supernovas

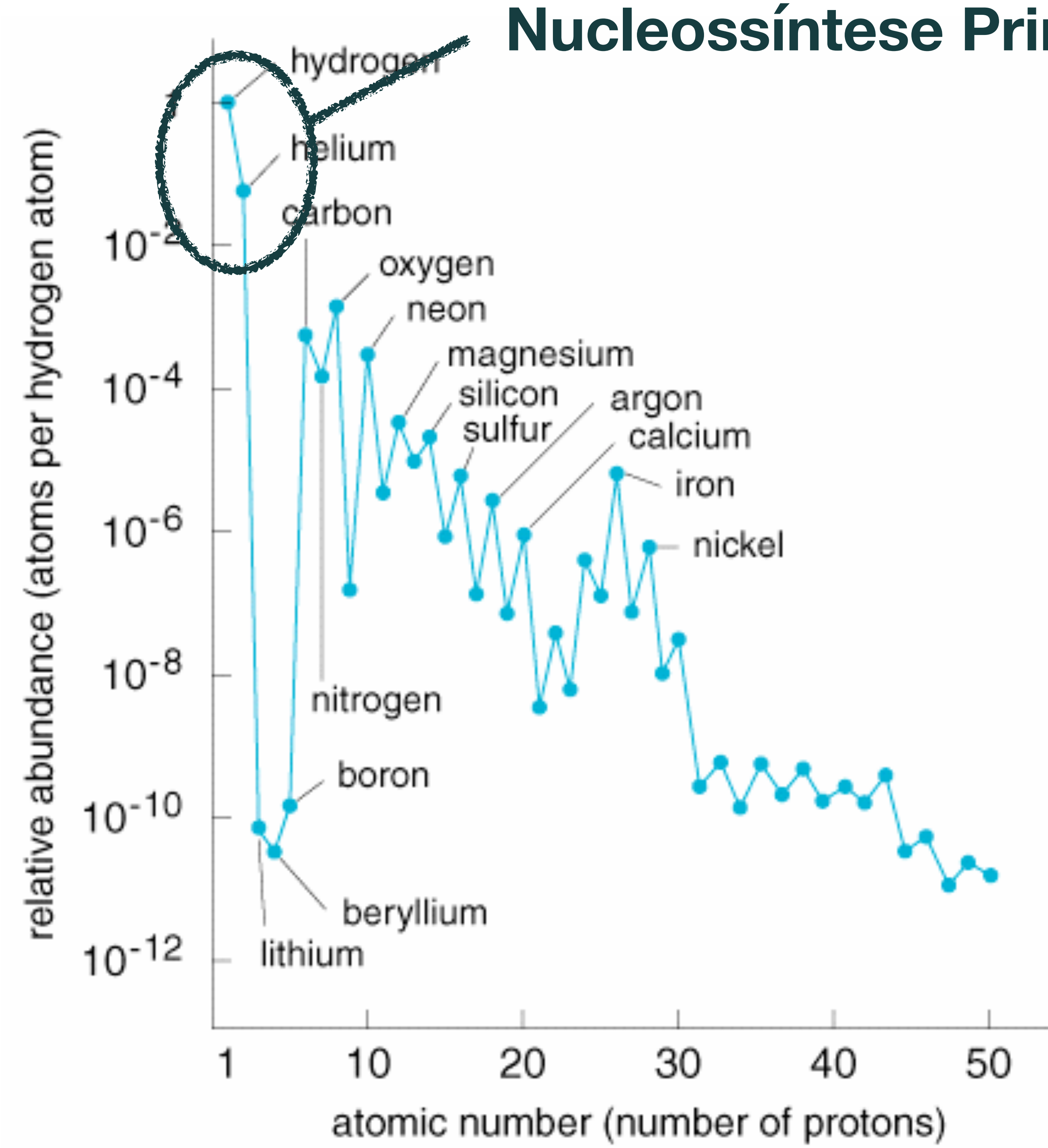


Origem dos elementos

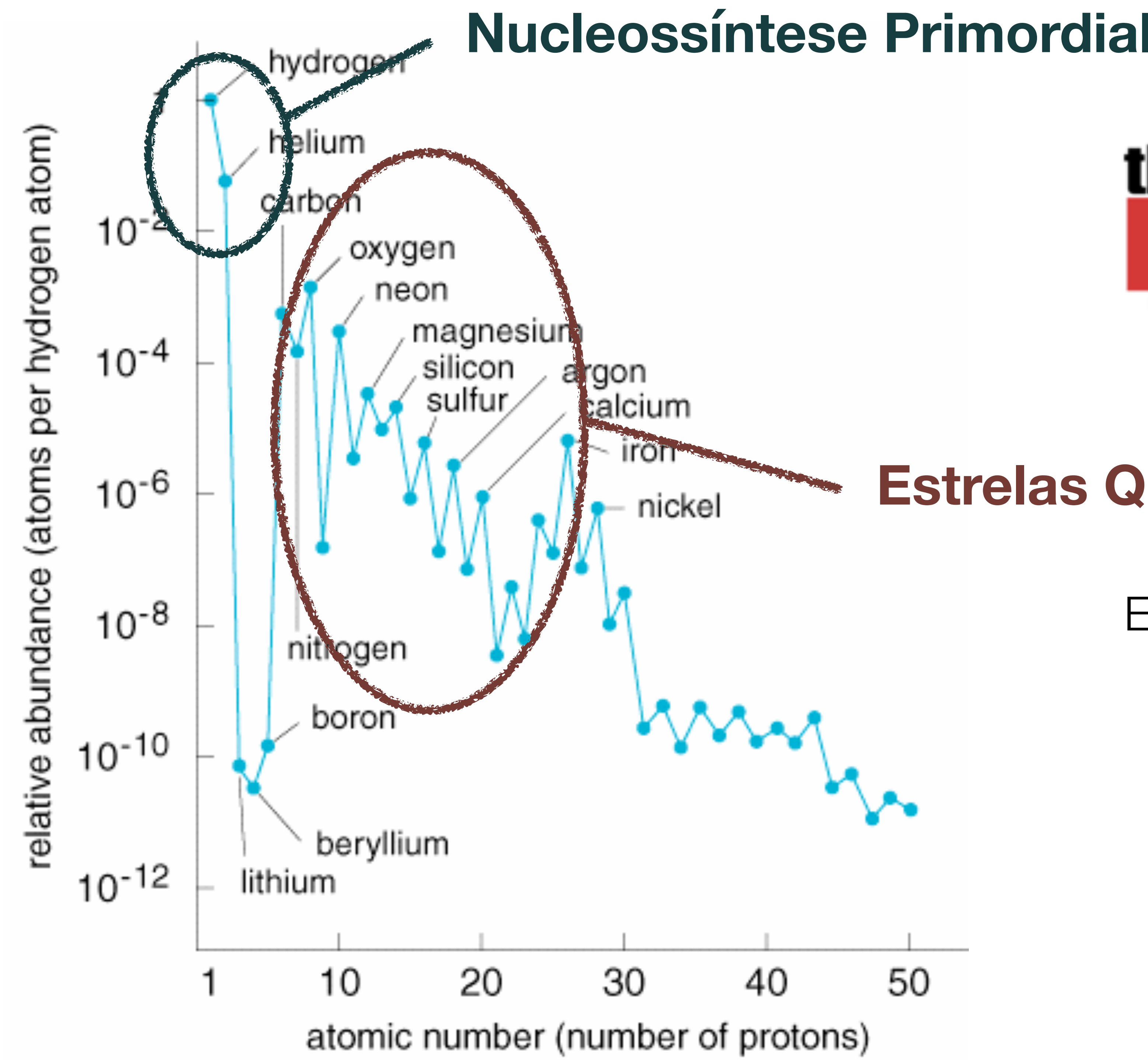


Origem dos elementos

Nucleossíntese Primordial

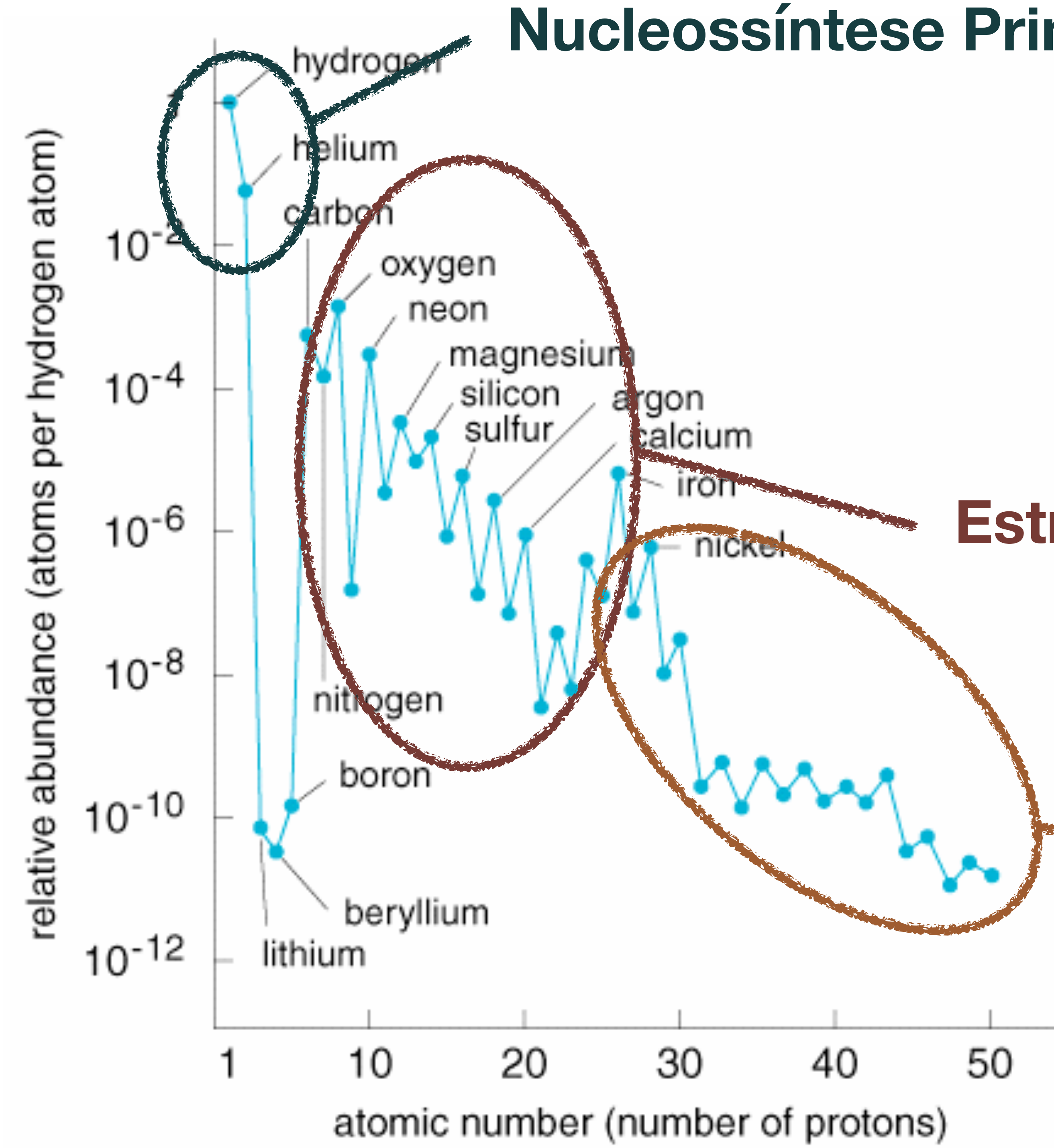


Origem dos elementos



Estrelas são responsáveis por destruir Hidrogênio e produzir metais!

Origem dos elementos



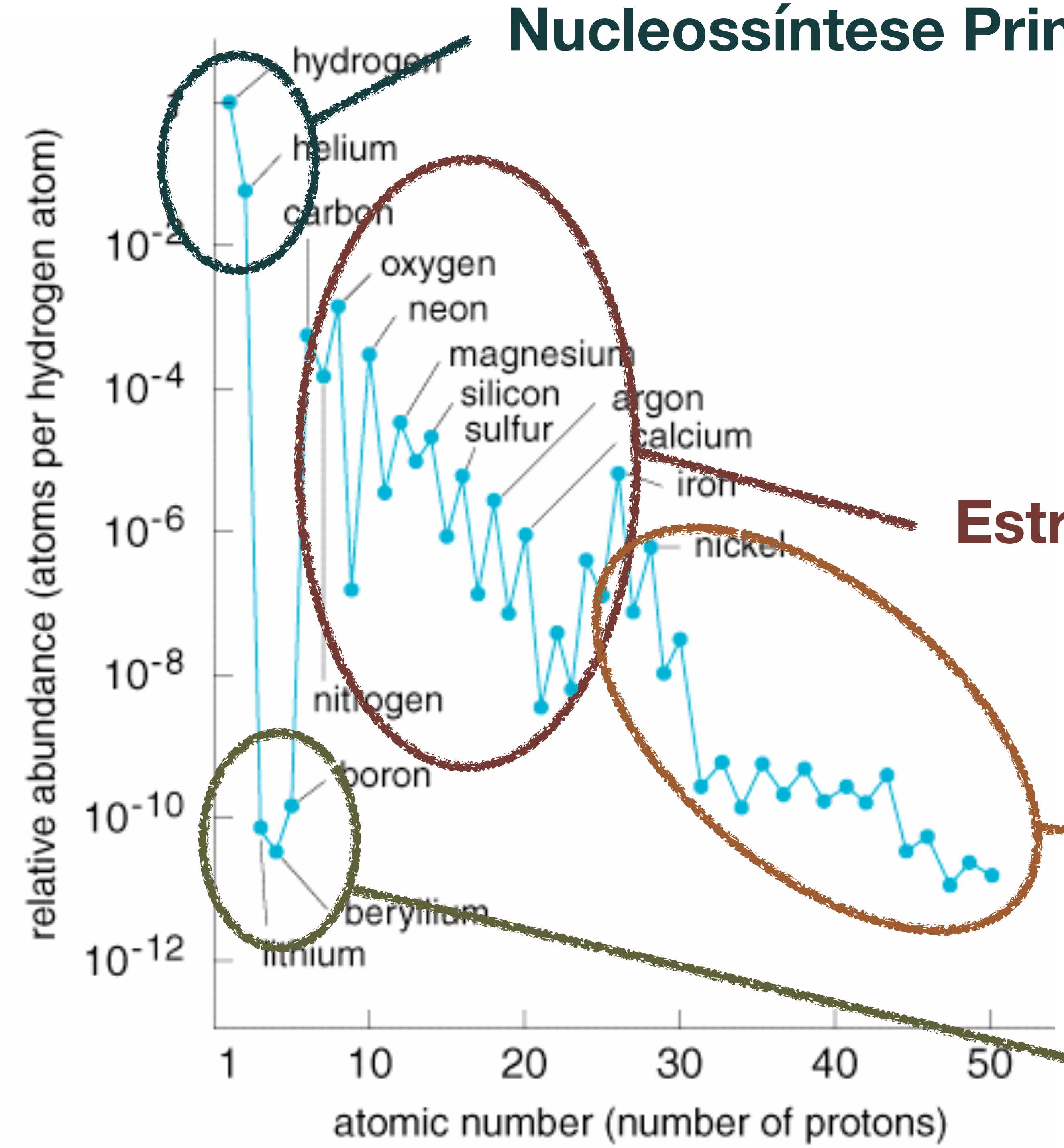
Nucleossíntese Primordial

Estrelas Quentes

Estrelas são responsáveis por destruir Hidrogênio e produzir metais!

Supernovas

Origem dos elementos



Nucleossíntese Primordial

Estrelas Quentes

Supernovas

Interações de Raios Cósmicos

Estrelas são responsáveis por destruir Hidrogênio e produzir metais!

Tipos de Processos Nucleares

- **Transferência** (interação forte)

$$^{15}N(p,\alpha)^{12}C \qquad \sigma \simeq 0.5 \text{ b at } E_p = 2.0 \text{ MeV}$$

- **Captura** (int. eletromagnética)

$$^{3}\text{He}(\alpha,\gamma)^{7}\text{Be} \qquad \sigma \simeq 10^{-6} \text{ b at } E_p = 2.0 \text{ MeV}$$

- **Fraca** (interação fraca)

$$p(p,e^{+}\nu)d \qquad \sigma \simeq 10^{-20} \text{ b at } E_p = 2.0 \text{ MeV}$$

$$\text{b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

O que são estrelas?

- Esferas luminosas auto-gravitantes:

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm\rho}{r^2}, \qquad \frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

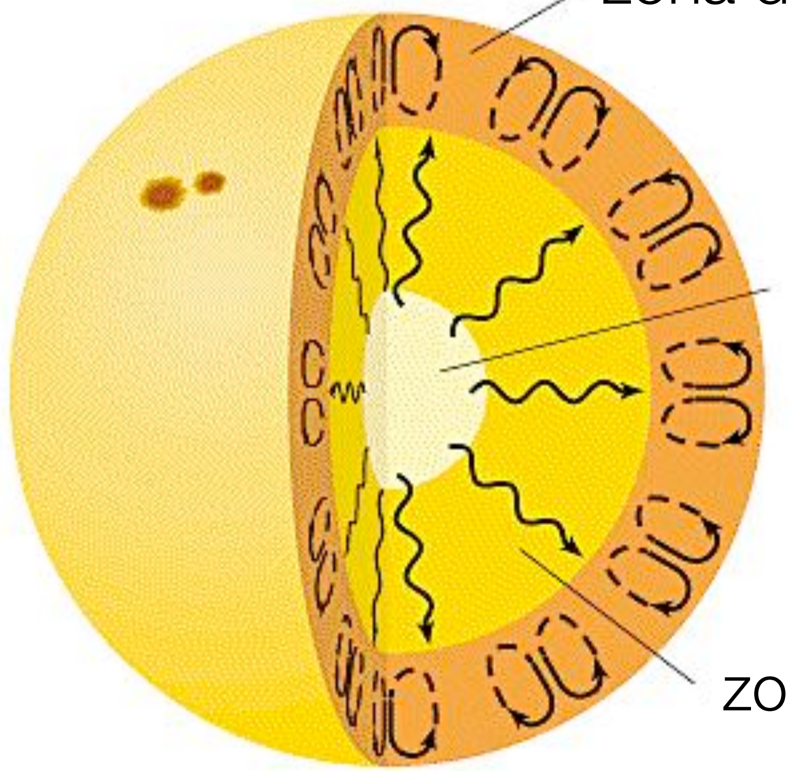
$$\kappa \frac{dT}{dr} = -\frac{L}{4\pi r^2}, \qquad \frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon$$

- Plasmas astrofísicos

$$P(\rho, T, Y_i) \qquad \kappa(\rho, T, Y_i)$$

- Reatores nucleares auto-regulados:

$$\epsilon(\rho, T, Y_i)$$



O que são estrelas?

- Esferas luminosas auto-gravitantes:

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm\rho}{r^2}, \qquad \frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

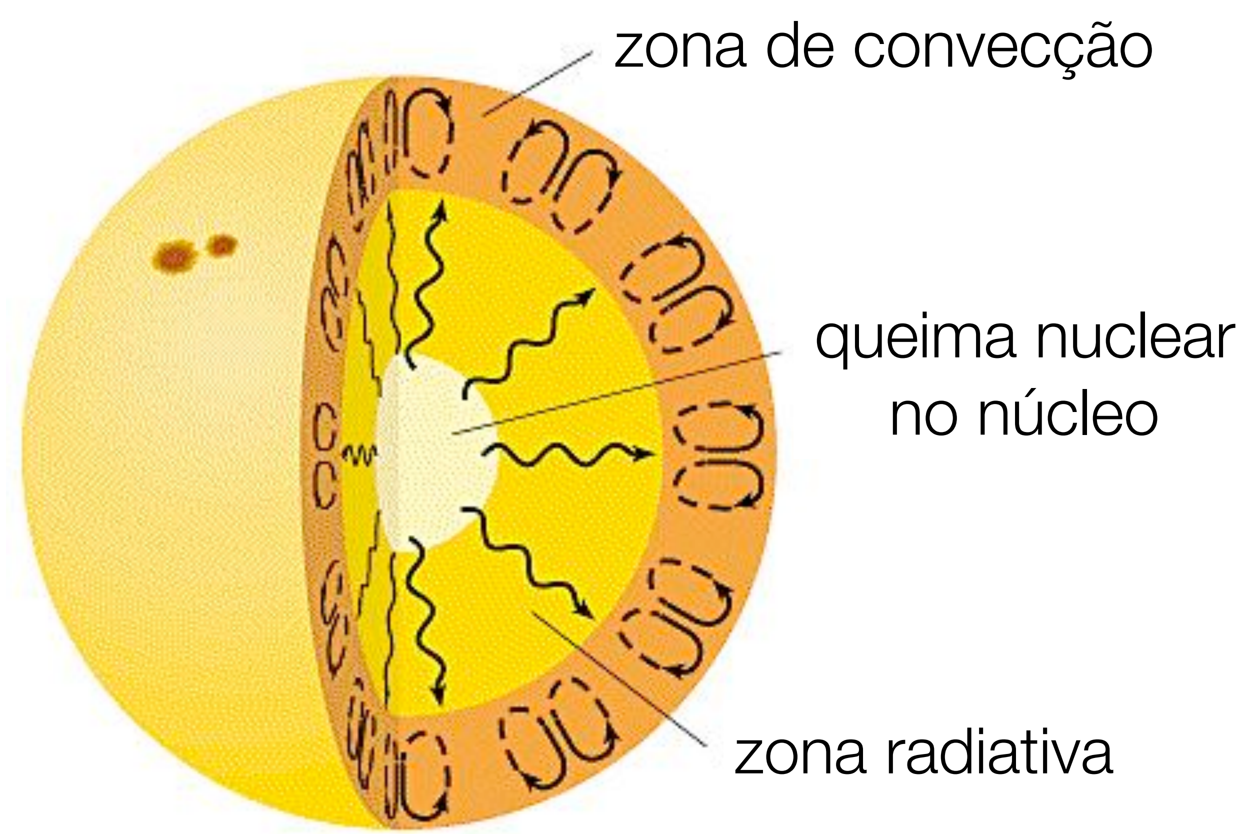
$$\kappa\frac{dT}{dr} = -\frac{L}{4\pi r^2}, \qquad \frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon$$

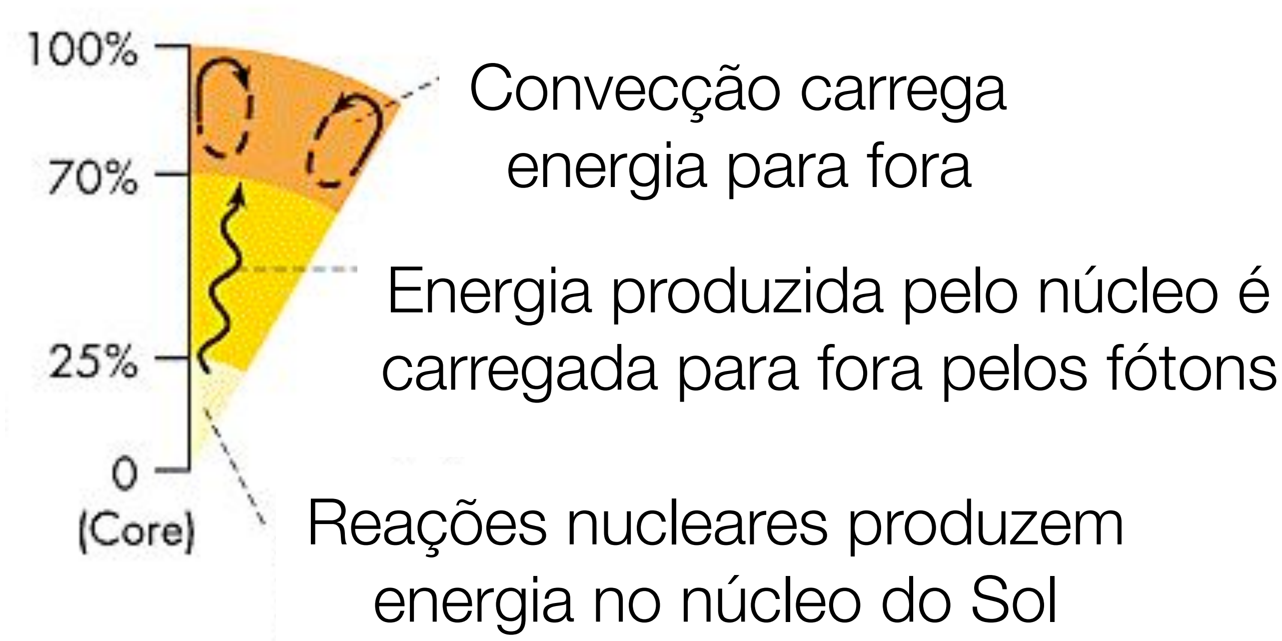
- Plasmas astrofísicos

$$P(\rho, T, Y_i) \qquad \kappa(\rho, T, Y_i)$$

- Reatores nucleares auto-regulados:

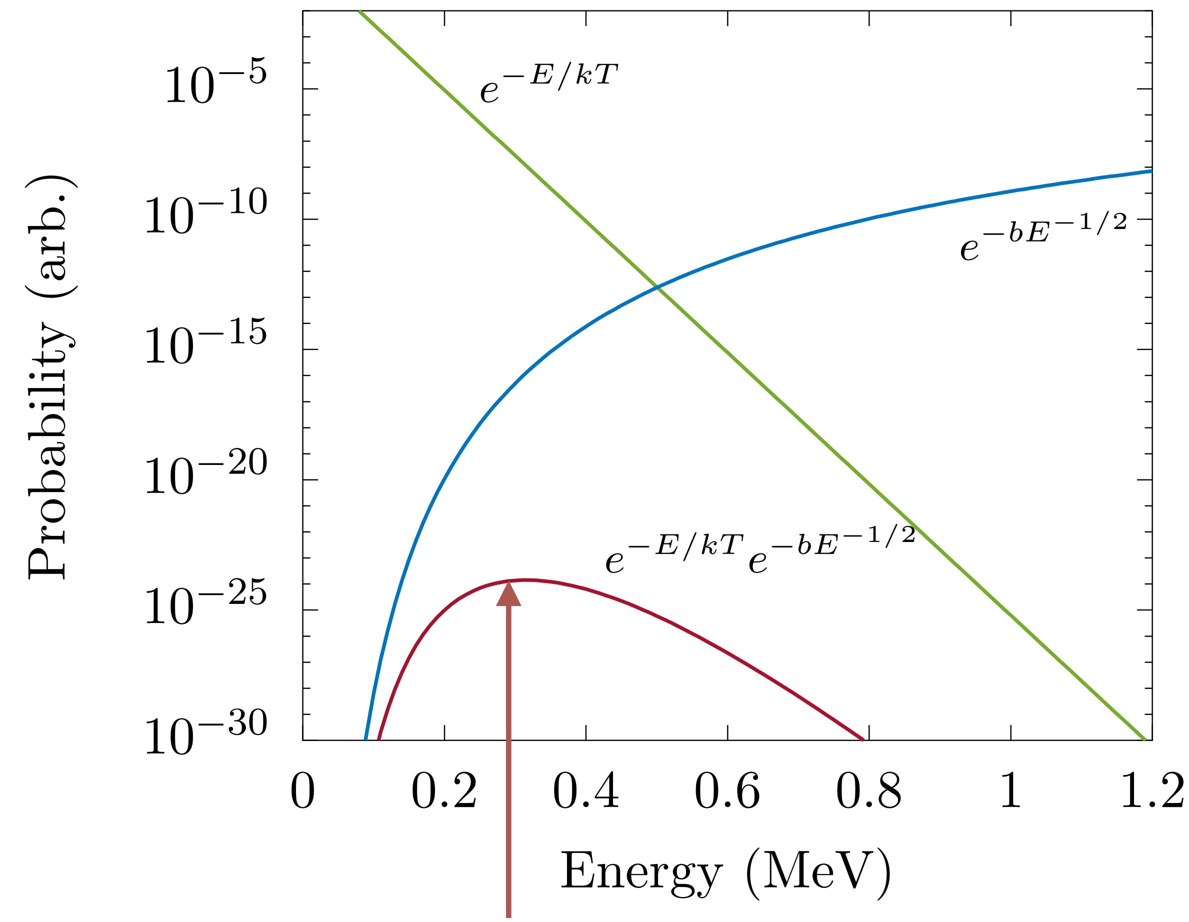
$$\epsilon(\rho, T, Y_i)$$



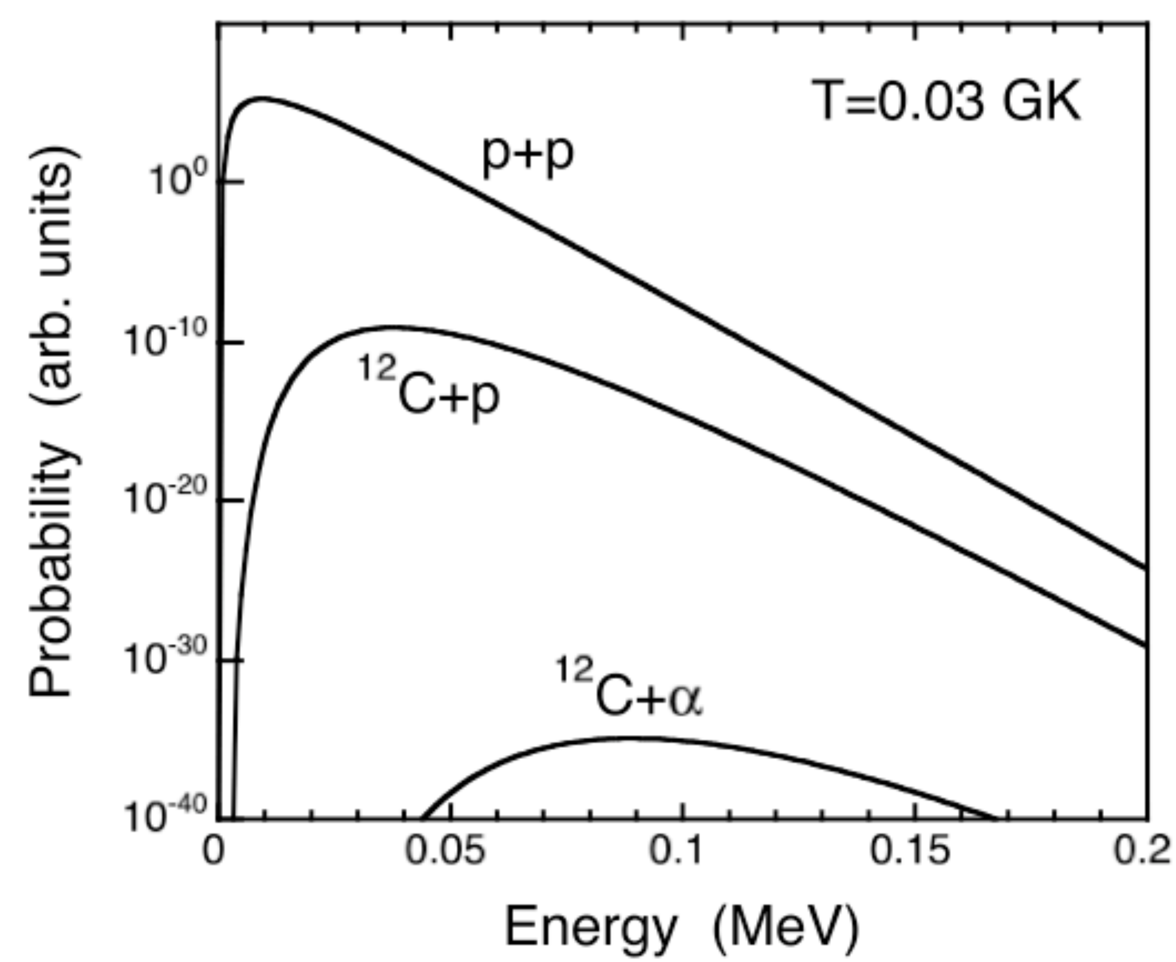


Reações Termonucleares

- Em ambientes estelares, núcleos são térmicos: **distribuição de Maxwell-Boltzmann**
- Barreira Coulombiana : **tunelamento quântico**
- Probabilidade de reação tem um pico em uma energia!



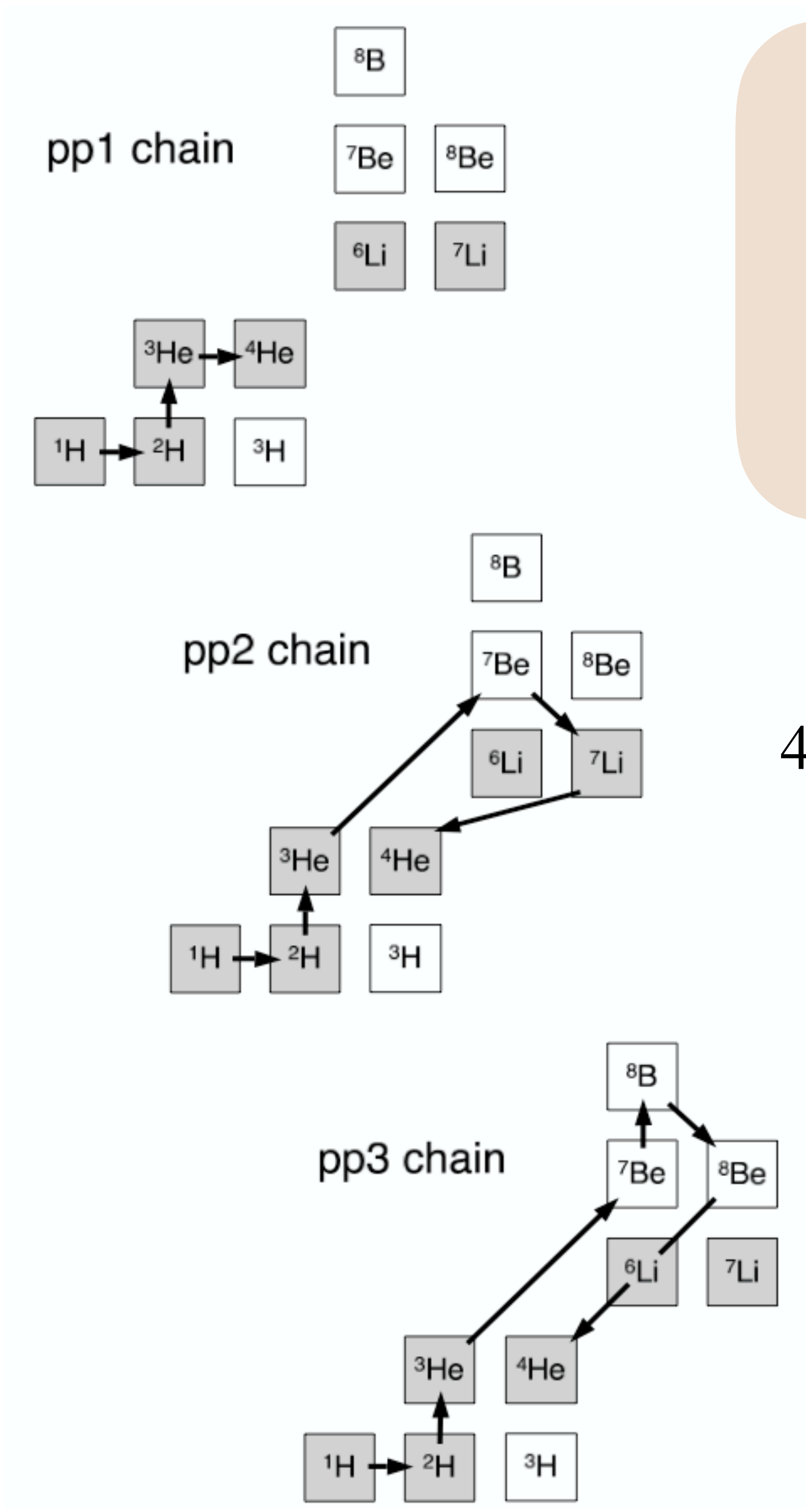
Pico de Gamow!



Alguns estágios da Queima Nuclear

Queima de Hidrogênio: ciclo p-p

Sun (T=15.6 MK), stellar core (T=8-55 MK), shell of AGB stars (T=45-100 MK)



cadeia pp1

$p(p,e^+\nu)d$

$d(p,\gamma)^3He$

$^3He(^3He,2p)\alpha$

cadeia pp2

$p(p,e^+\nu)d$

$d(p,\gamma)^3He$

$^3He(\alpha,\gamma)^7Be$

$^7Be(e^-,\nu)^7Li$

$^7Li(p,\alpha)\alpha$

cadeia pp3

$p(p,e^+\nu)d$

$d(p,\gamma)^3He$

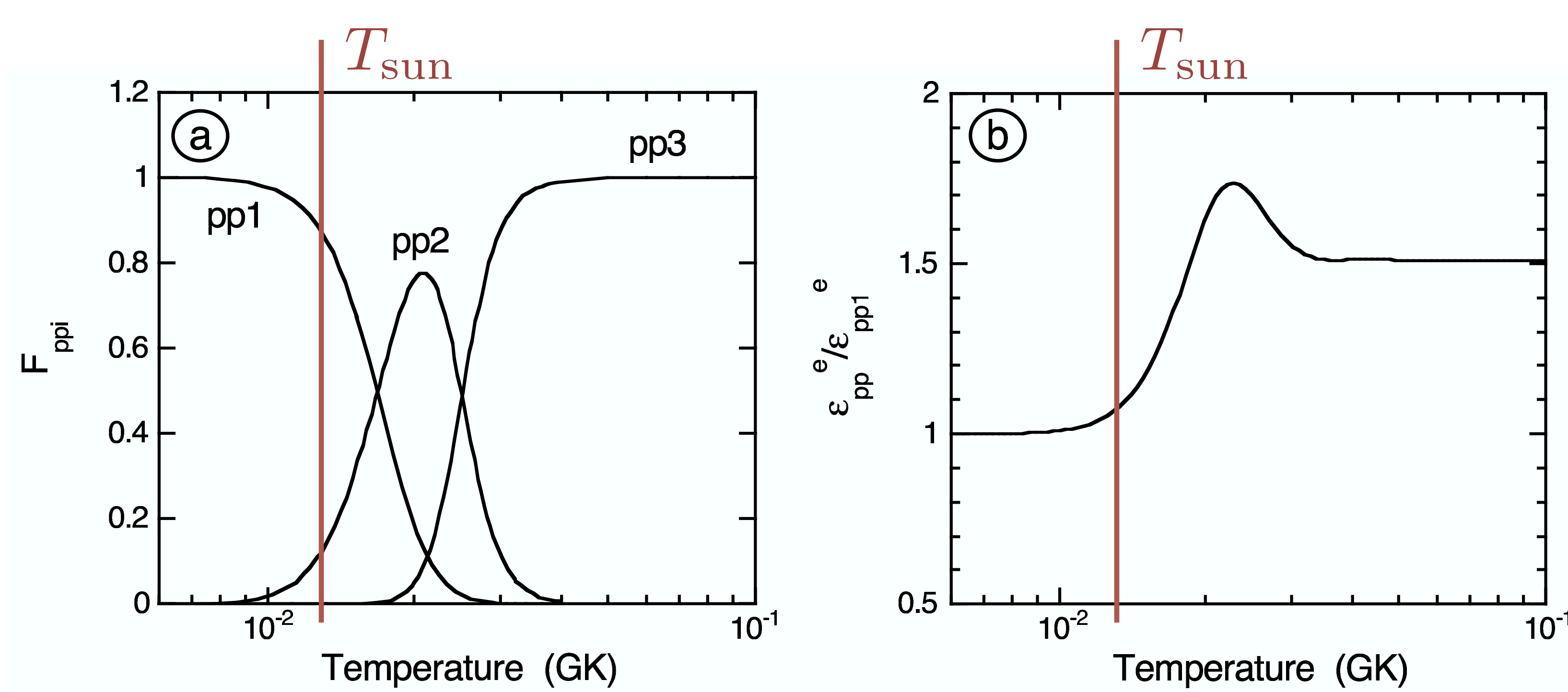
$^3He(\alpha,\gamma)^7Be$

$^7Be(p,\gamma)^8B$

$^8B(\beta^+\nu)^8Be$

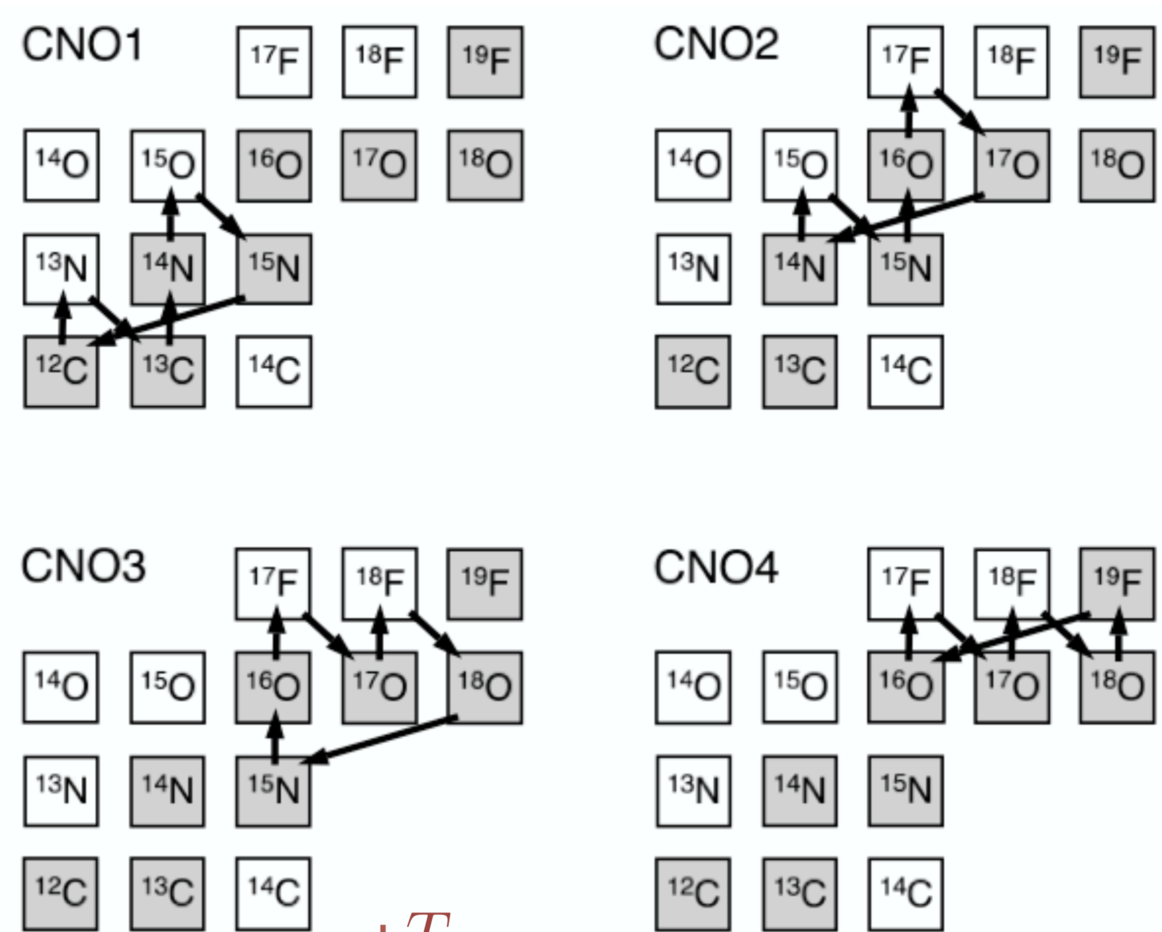
$^8Be(\alpha)\alpha$

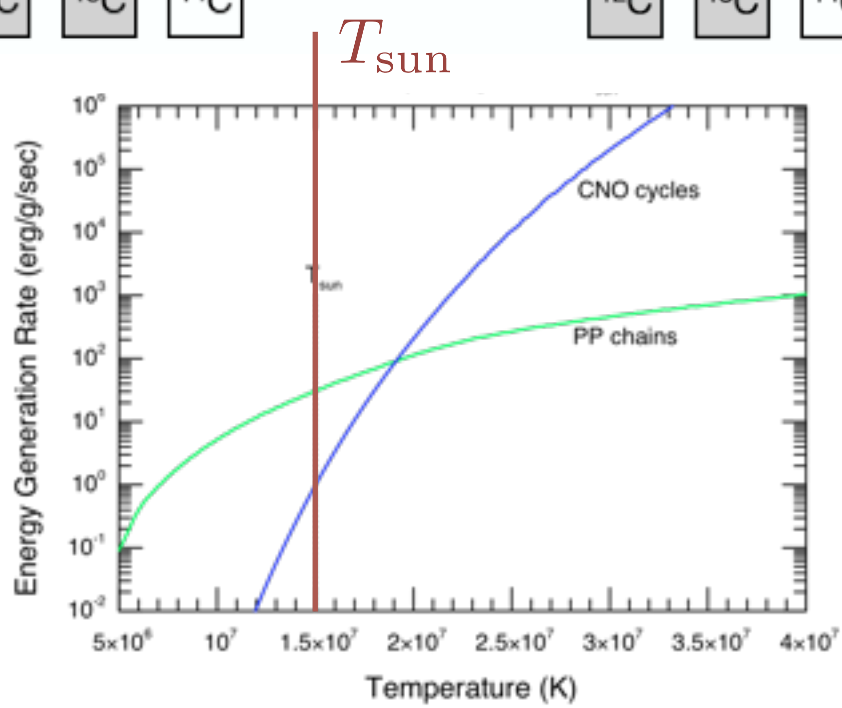
$$4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + 26.73 \text{ MeV}$$



Queima de Hidrogênio: ciclo CNO

Sun (T=15.6 MK), stellar core (T=8-55 MK), shell of AGB stars (T=45-100 MK)





CNO1

^{12}C(p,γ)^{13}N

^{13}N($\beta^+\nu$)^{13}C

^{13}C(p,γ)^{14}N

^{14}N(p,γ)^{15}O

^{15}O($\beta^+\nu$)^{15}N

^{15}N(p,α)^{12}C

CNO2

^{14}N(p,γ)^{15}O

^{15}O($\beta^+\nu$)^{15}N

^{15}N(p,γ)^{16}O

^{16}O(p,γ)^{17}F

^{17}F($\beta^+\nu$)^{17}O

^{17}O(p,α)^{14}N

CNO3

^{15}N(p,γ)^{16}O

^{16}O(p,γ)^{17}F

^{17}F($\beta^+\nu$)^{17}O

^{17}O(p,γ)^{18}F

^{18}F($\beta^+\nu$)^{18}O

^{18}O(p,α)^{15}N

CNO4

^{16}O(p,γ)^{17}F

^{17}F($\beta^+\nu$)^{17}O

^{17}O(p,γ)^{18}F

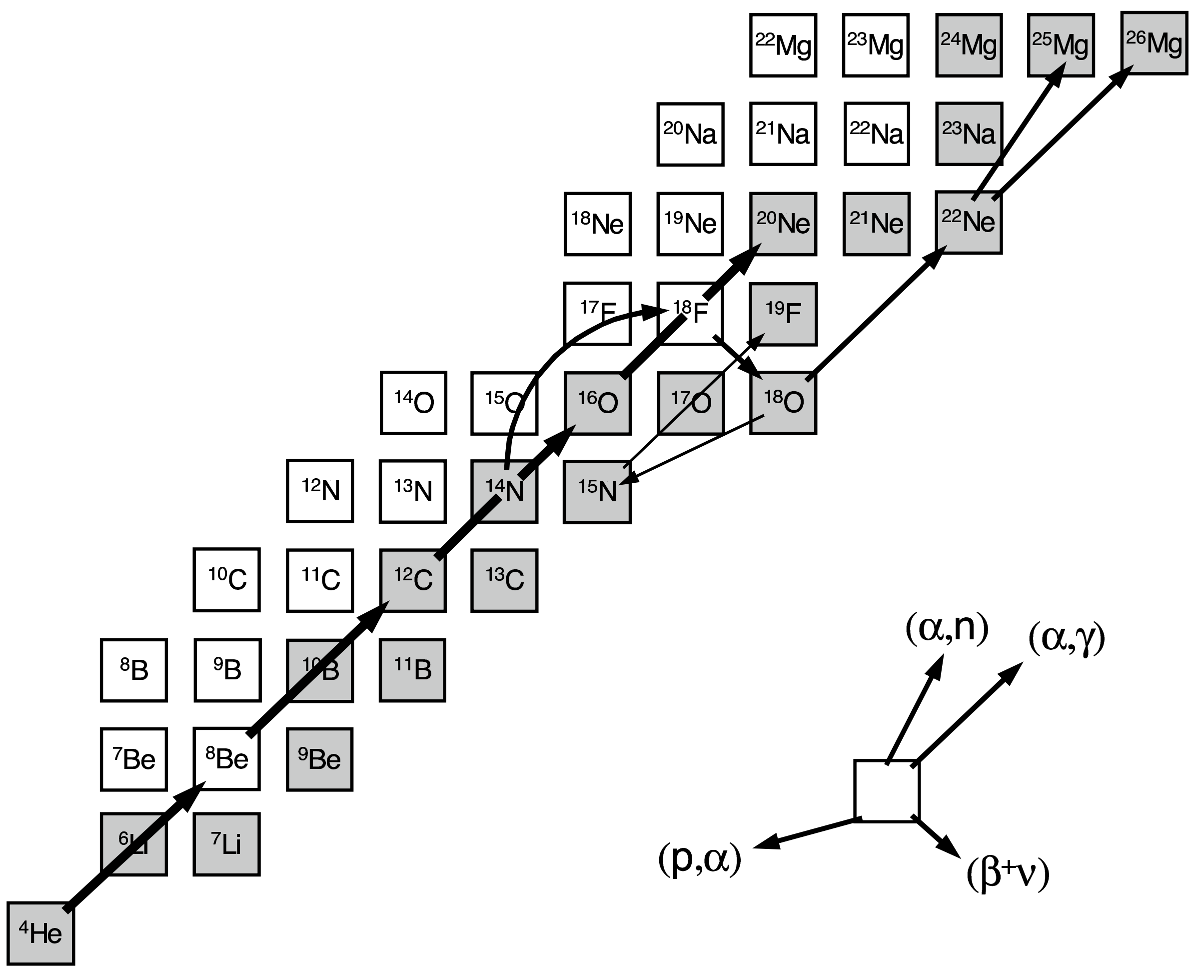
^{18}F($\beta^+\nu$)^{18}O

^{18}O(p,γ)^{19}F

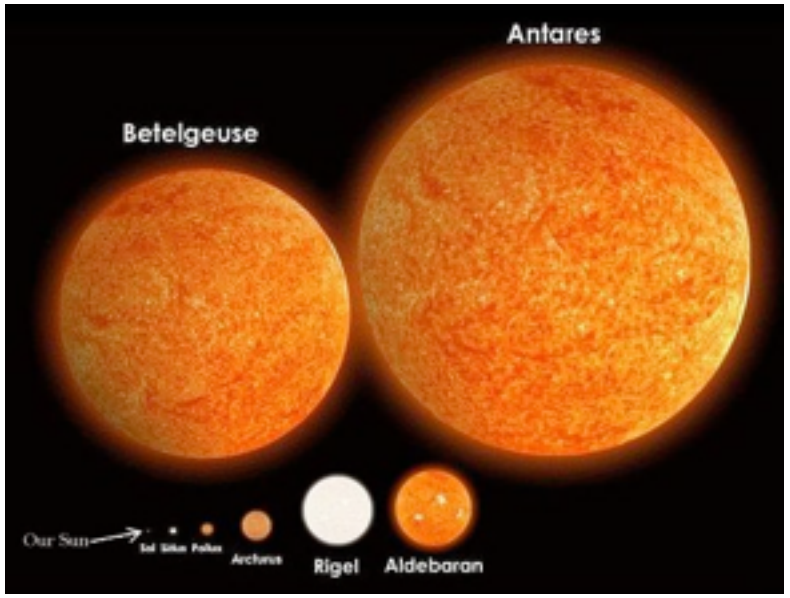
^{19}F(p,α)^{16}O

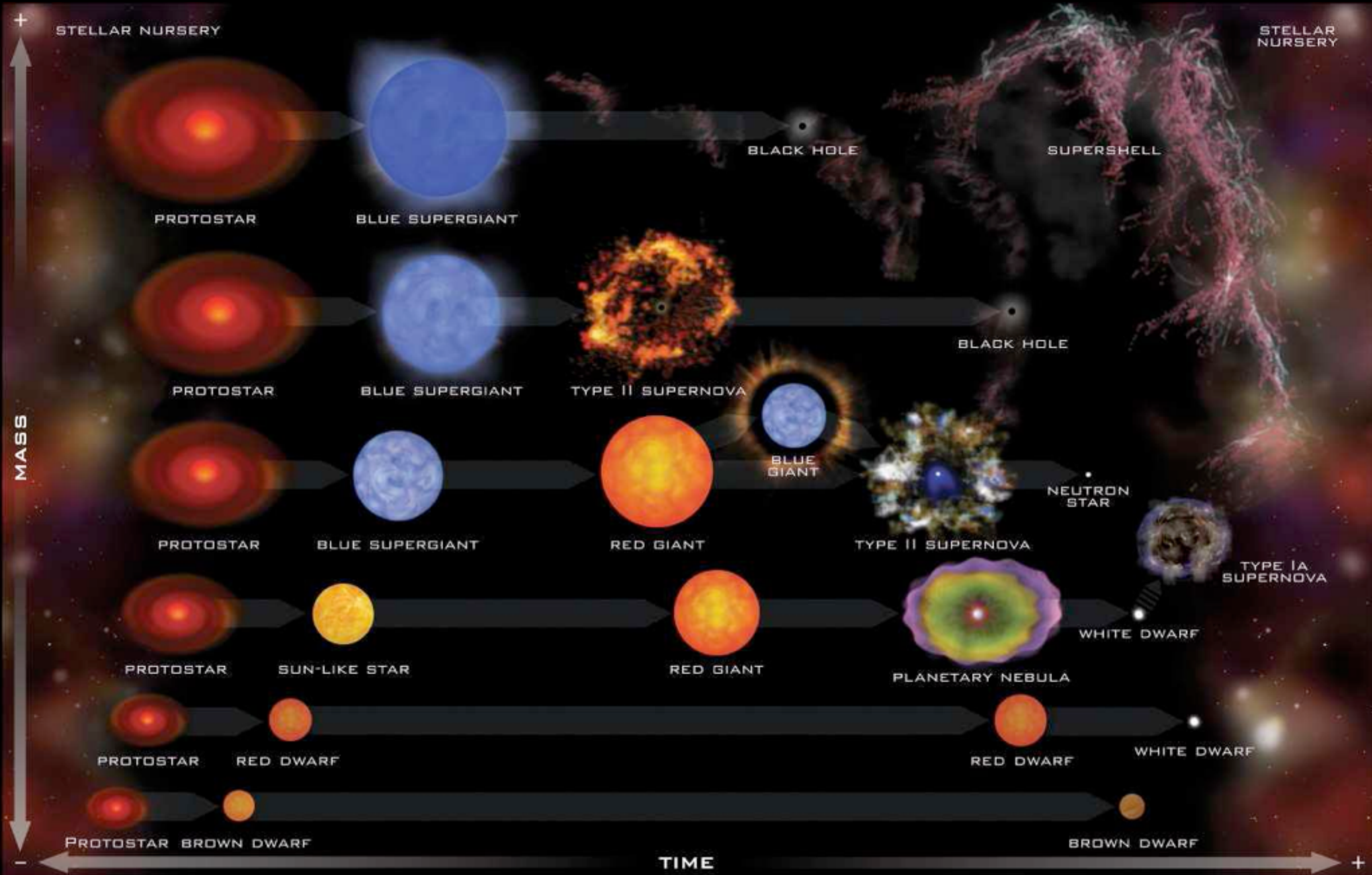
Queima de Hélio

Massive stars (T=100-400 MK)



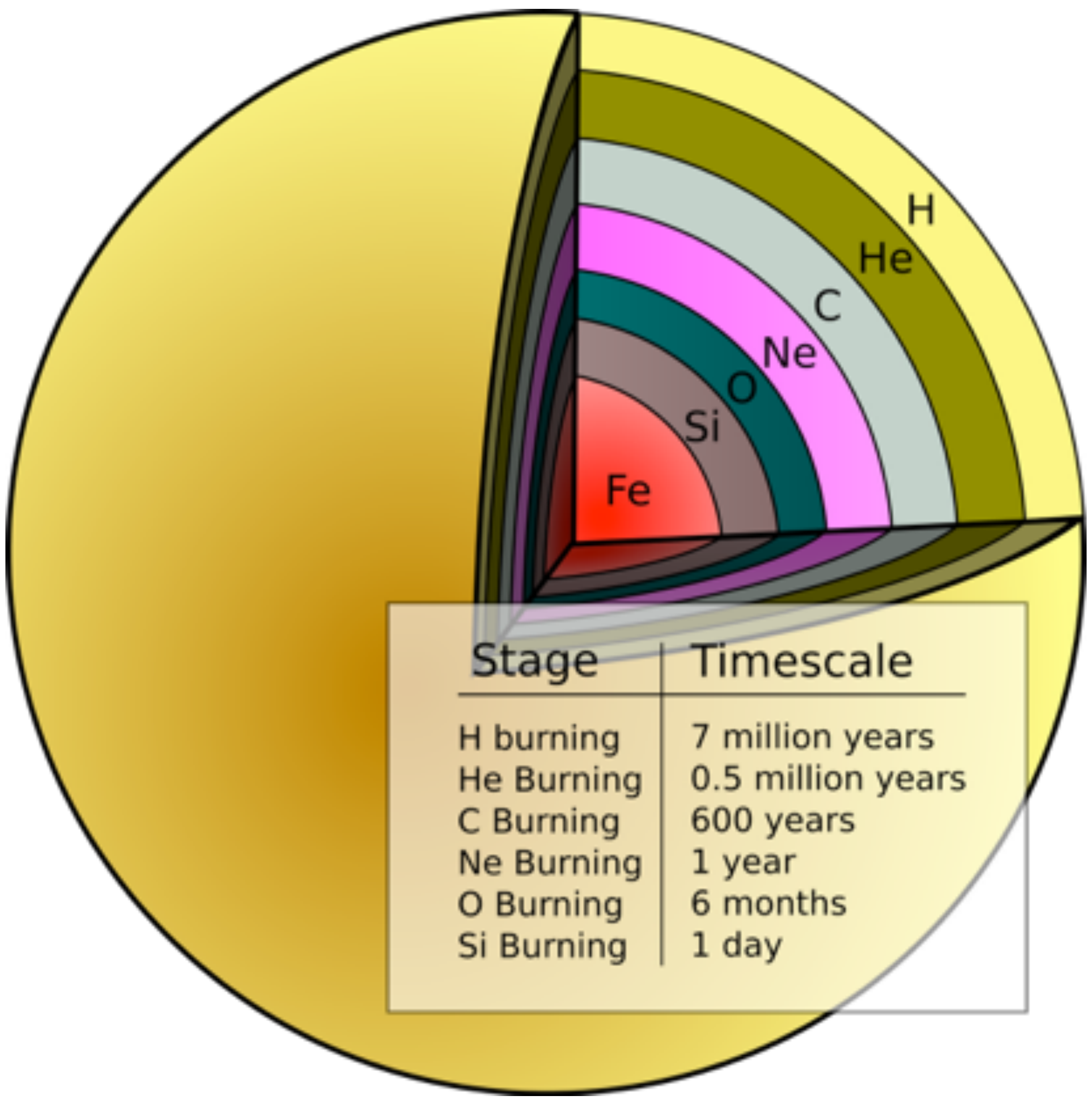
$$^{4}\mathrm{He}(\alpha\alpha,\gamma)^{12}\mathrm{C}$$
$$^{12}\mathrm{C}(\alpha,\gamma)^{16}\mathrm{O}$$
$$^{16}\mathrm{O}(\alpha,\gamma)^{20}\mathrm{Ne}$$
$$^{20}\mathrm{Ne}(\alpha,\gamma)^{24}\mathrm{Mg}$$





STELLAR NURSERY
PROTOSTAR
BLUE SUPERGIANT
BLACK HOLE
SUPERSHELL
STELLAR NURSERY
PROTOSTAR
BLUE SUPERGIANT
TYPE II SUPERNOVA
BLACK HOLE
PROTOSTAR
BLUE SUPERGIANT
RED GIANT
BLUE GIANT
TYPE II SUPERNOVA
NEUTRON STAR
TYPE IA SUPERNOVA
PROTOSTAR
SUN-LIKE STAR
RED GIANT
PLANETARY NEBULA
WHITE DWARF
PROTOSTAR
RED DWARF
RED DWARF
WHITE DWARF
PROTOSTAR
BROWN DWARF
BROWN DWARF
MASS
TIME
+
−
+
−

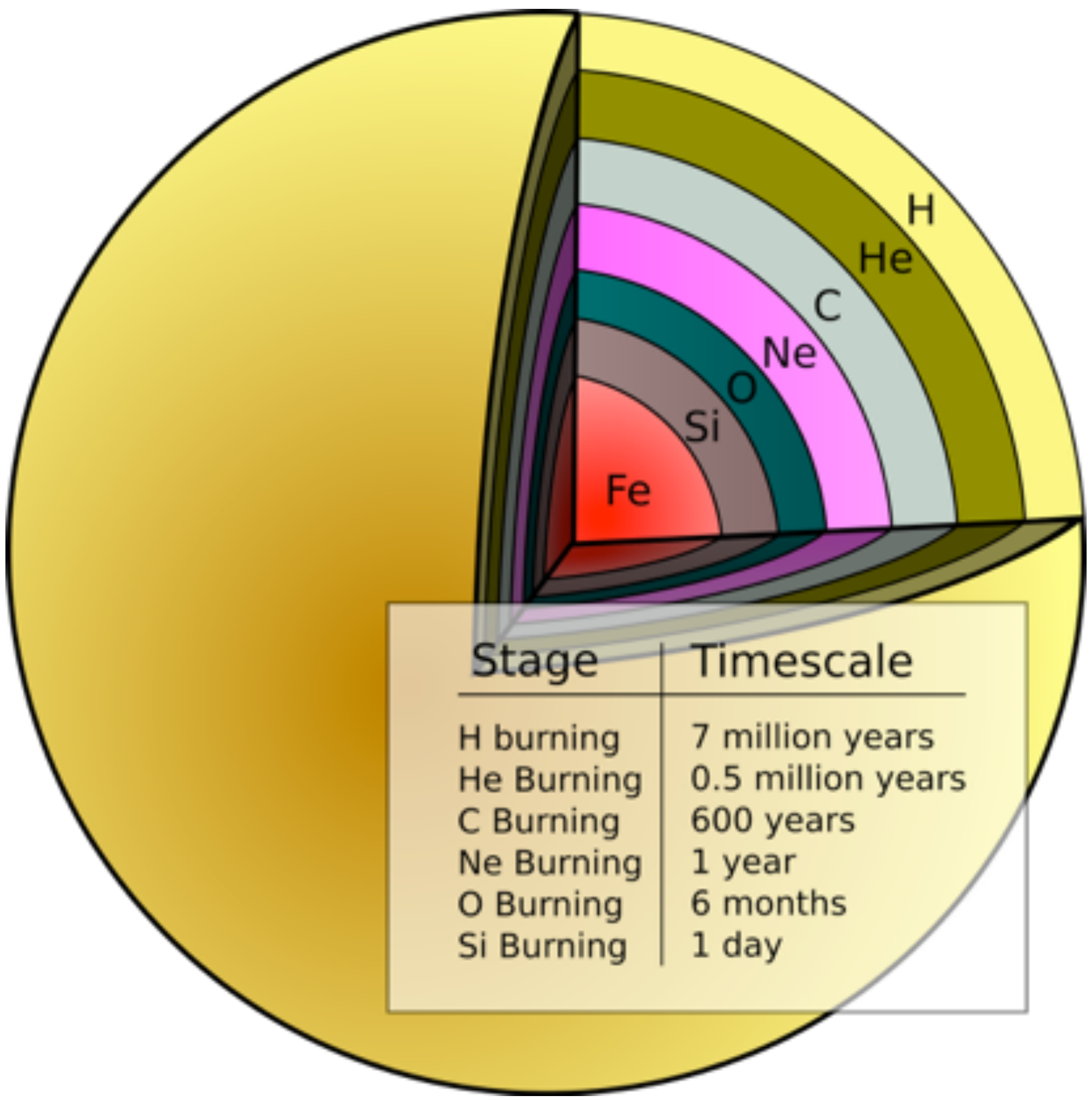
Supernova do Tipo II: Colapso do caroço



$25\ M_\odot$

- Depois da queima do Si não há mais combustível.
- Núcleo tem massa crítica de $1.4\ M_\odot$ acima da qual, elétrons não sustentam a gravidade.
- captura eletrônica e fotodesintegração: remove energia interna, reduz a pressão
- Caroço de milhares de km colapso para uma proto-estrela de neutros com km de raio apenas.

Supernova do Tipo II: Colapso do caroço



Stage	Timescale
H burning	7 million years
He Burning	0.5 million years
C Burning	600 years
Ne Burning	1 year
O Burning	6 months
Si Burning	1 day

$25\ M_{\odot}$

- Depois da queima do Si não há mais combustível.
- Núcleo tem massa crítica de $1.4\ M_{\odot}$ acima da qual, elétrons não sustentam a gravidade.
- captura eletrônica e fotodesintegração: remove energia interna, reduz a pressão
- Caroço de milhares de km colapso para uma proto-estrela de neutros com km de raio apenas.

colapso do caroço!

Supernovas do Tipo Ia:
Explosão Termonuclear

- Energia cinética do material ejetado: $E_{\mathrm{kin}} \sim 10^{51}$ erg

- Brilho uniforme (vela padrão da cosmologia): $M_v \sim -19.3$

- sem H e He no espectro $\rightsquigarrow$ objeto explosivo: **Anã Branca de C+O**

- **Deflagração ou detonação de carbono** de uma anã-branca que atinge sua massa limite (limite de Chandrasekhar, $1.4\ M_\odot$).

Unicamente degenerado

Duplamente degenerado

15 Questões-chave em Astrofísica Nuclear

(i) Why do predictions of helioseismology disagree with those of the standard solar model?

(ii) What is the solution to the lithium problem in Big Bang nucleosynthesis?

(iii) What do the observed light-nuclide and s-process abundances tell us about convection and dredge-up in massive stars and AGB stars?

(iv) What are the production sites of the γ-ray emitting radioisotopes ^{26}Al, ^{44}Ti and ^{60}Fe?

(v) What is the origin of about 30 rare and neutron deficient nuclides beyond the iron peak (p-nuclides)?

(vi) What causes core-collapse supernovae to explode?

(vii) What is the extend of neutrino-induced nucleosynthesis (ν-process)?

(viii) What is the extend of the nucleosynthesis in proton-rich outflows in the early ejecta of core-collapse supernovae (νp-process)?

(ix) What are the sites of the r-process?

(x) What causes the discrepancy between models and observations regarding the mass ejected during classical nova outbursts?

(xi) Which are the physical mechanisms driving convective mixing in novae?

(xii) What are the progenitors of type Ia supernovae?

(xiii) What is the nucleosynthesis endpoint in type I X-ray bursts? Is there any matter ejected from those systems?

(xiv) What is the impact of stellar mergers on Galactic chemical abundances?

(xv) What are the production and acceleration sites of Galactic cosmic rays?

J. Jose & C. Iliadis, "The Unfinished Quest for the Origin of the Elements", review article submitted to *Reports on Progress in Physics* (2011)

Obrigado!