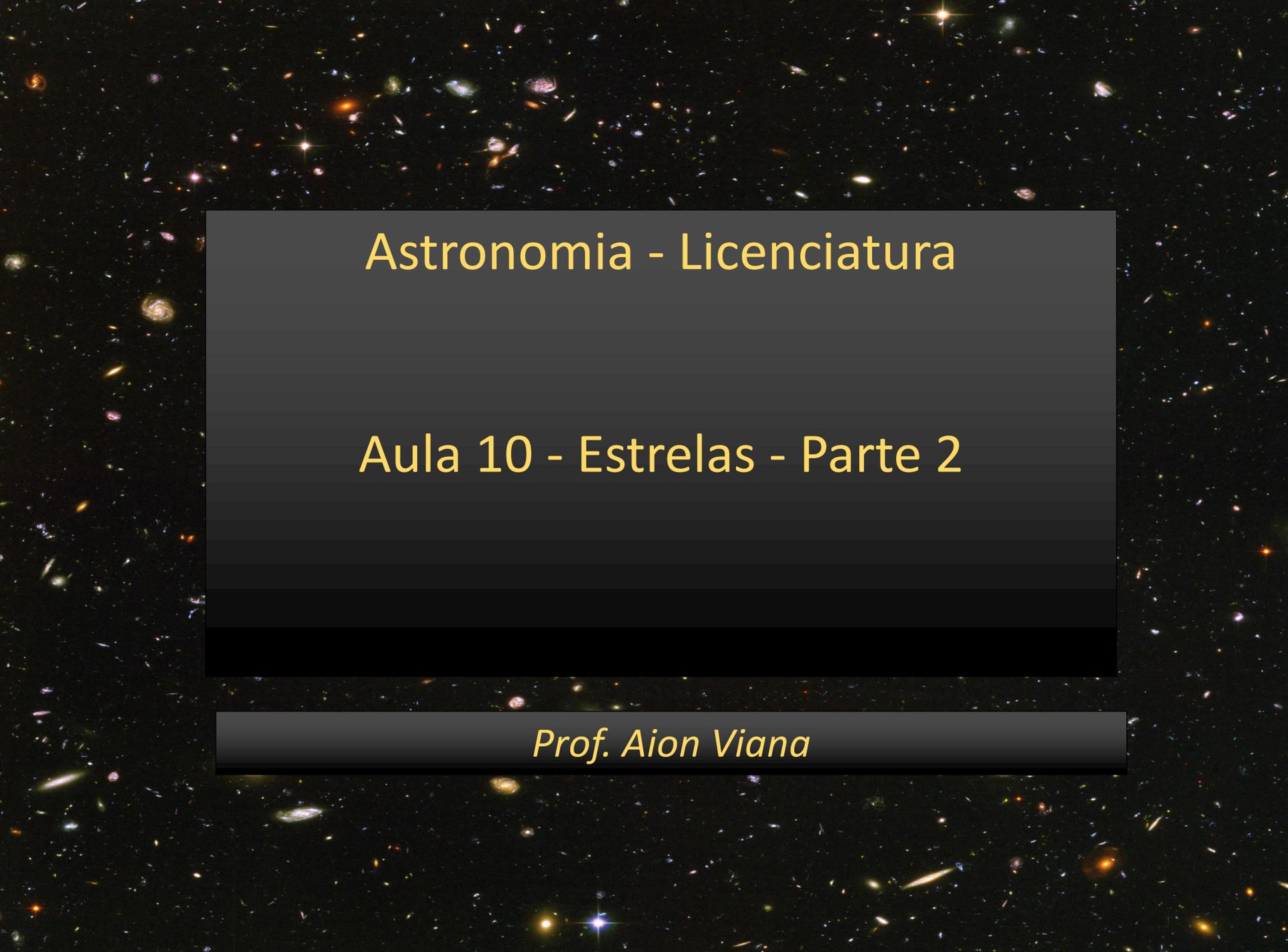


Agradecimentos

Estas aulas contou com o material do Professor Valter Líbero do IFSC-USP que teve a colaboração do Professor Roberto Boczko, do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, IAG-USP e da equipe do Centro de Divulgação da Astronomia, CDA



Astronomia - Licenciatura

Aula 10 - Estrelas - Parte 2

Prof. Aion Viana

Índice:

Parte 1

Magnitudes, brilho e luminosidade
Magnitude aparente e absoluta
Relação distância-magnitude
Radiação de Corpo Negro: Lei de Wien e
Temperatura estelar
Lei de Stefan-Boltzmann e raio estelar
Diagrama H-R e a Sequência Principal

Parte 2

O que são estrelas
Como e onde nascem
Porque não colapsam
Composição química
Reação próton-próton
Evolução do Sol
Evolução estelar

Parte 2 – Evolução Estelar

Diagrama H-R

Hertzsprung, 1911, **Russel**, 1913

as propriedades de uma estrela
estão correlacionadas

Existe relação entre **L** e **T**

obtidas da magnitude aparente
e da distância

obtidas do espectro de cores

Essa relação depende
da idade da estrela

Tipo Espectral O

B

A

F

G

K

M

-10

1.000.000

-5

10.000

0

100

+5

$L_{\text{Sol}} \equiv 1$

+10

1/100

+15

1/10.000

+20

1/1.000.000

Tipo espectral

Magnitude visual absoluta M_v

Magnitude absoluta

Brilho

Variáveis no diagrama de Hertzsprung-Russell Diagrama H-R

Luminosidade

Luminosidade / L_{Sol}

Temperatura

80.000 K

60.000

40.000

30.000

20.000

15.000

10.000

7.500

5.000

Temperatura
superficial

2.500

Tipo Espectral

O

B

A

F

G

K

M

Supergigantes azuis

Supergigantes vermelhas

Gigantes vermelhas

Sequência Principal

Anãs Brancas

Tipos de estrelas

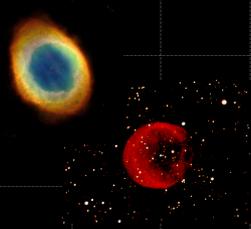
Diagrama H-R

Magnitude visual absoluta M_v

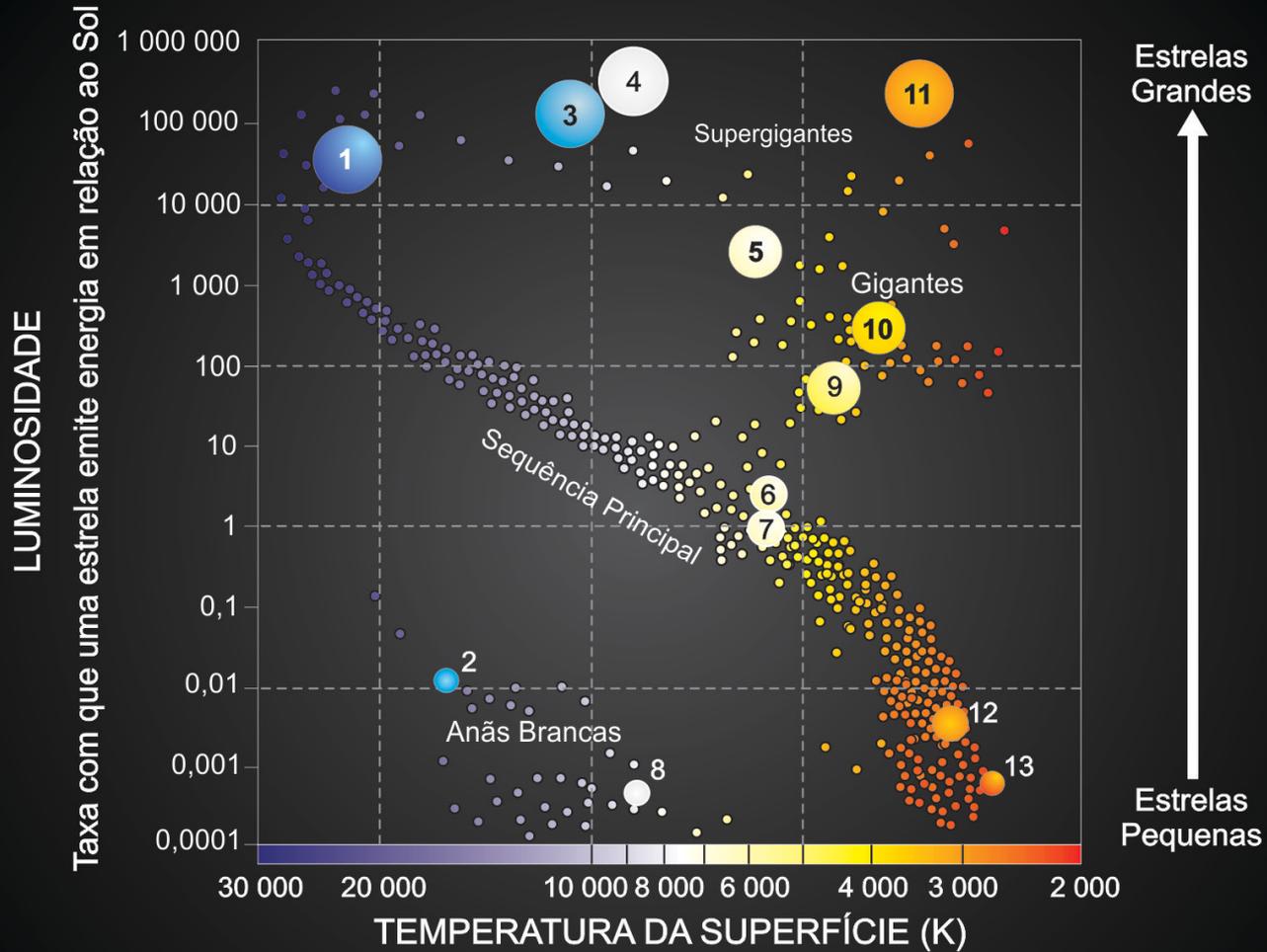
Luminosidade / L_{Sol}

Temperatura superficial

80.000 K 60.000 40.000 30.000 20.000 15.000 10.000 7.500 5.000 2.500

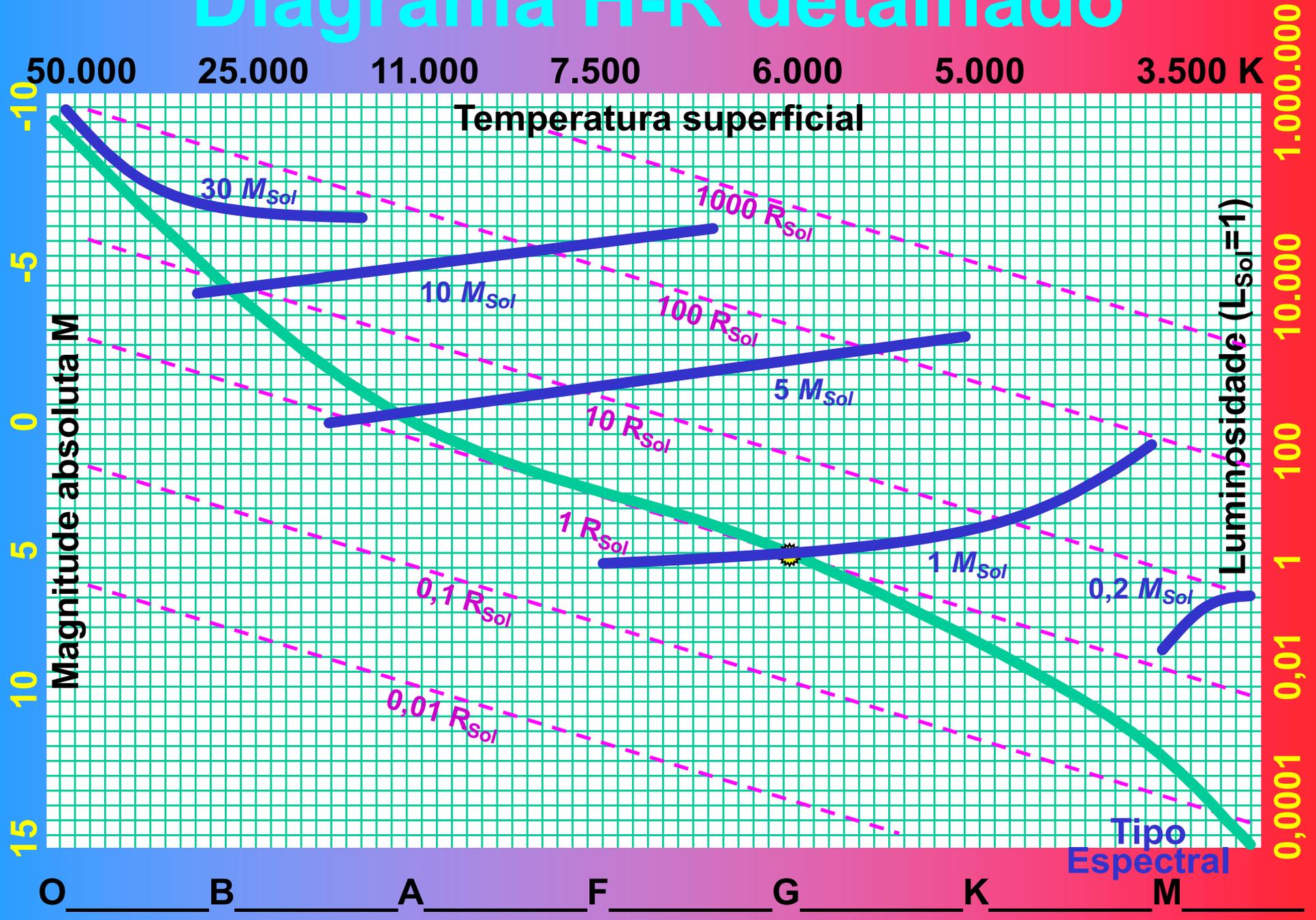


Características das estrelas

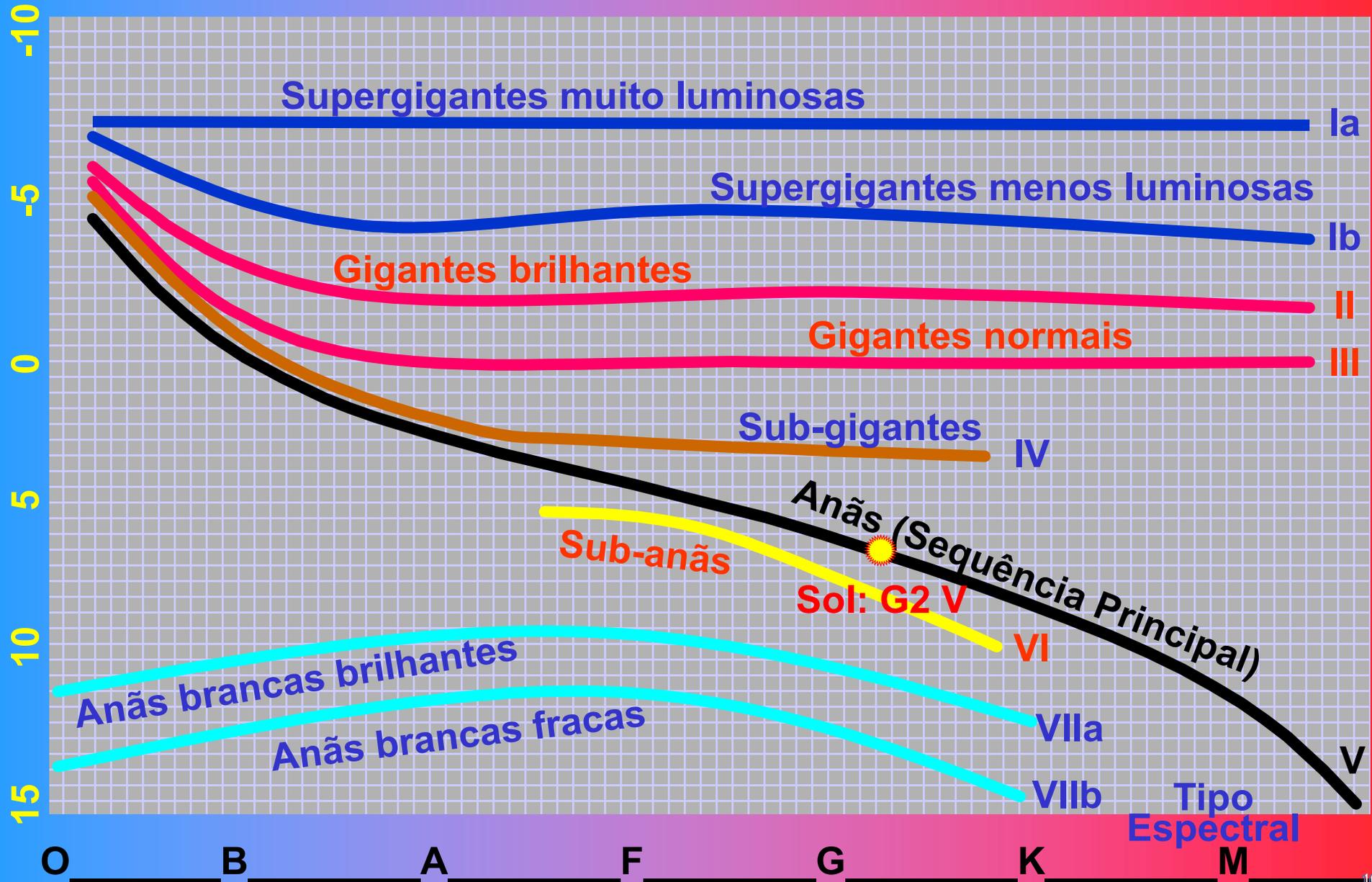


- | | | |
|---------------|--------------------|-------------------------|
| 1 - Spica | 6 - Alpha Centauri | 11 - Betelgeuse |
| 2 - Eridani B | 7 - Sol | 12 - Estrela de Barnard |
| 3 - Rigel | 8 - Procyon B | 13 - Próxima Centauri |
| 4 - Deneb | 9 - Pollux | |
| 5 - Polaris | 10 - Aldebaran | |

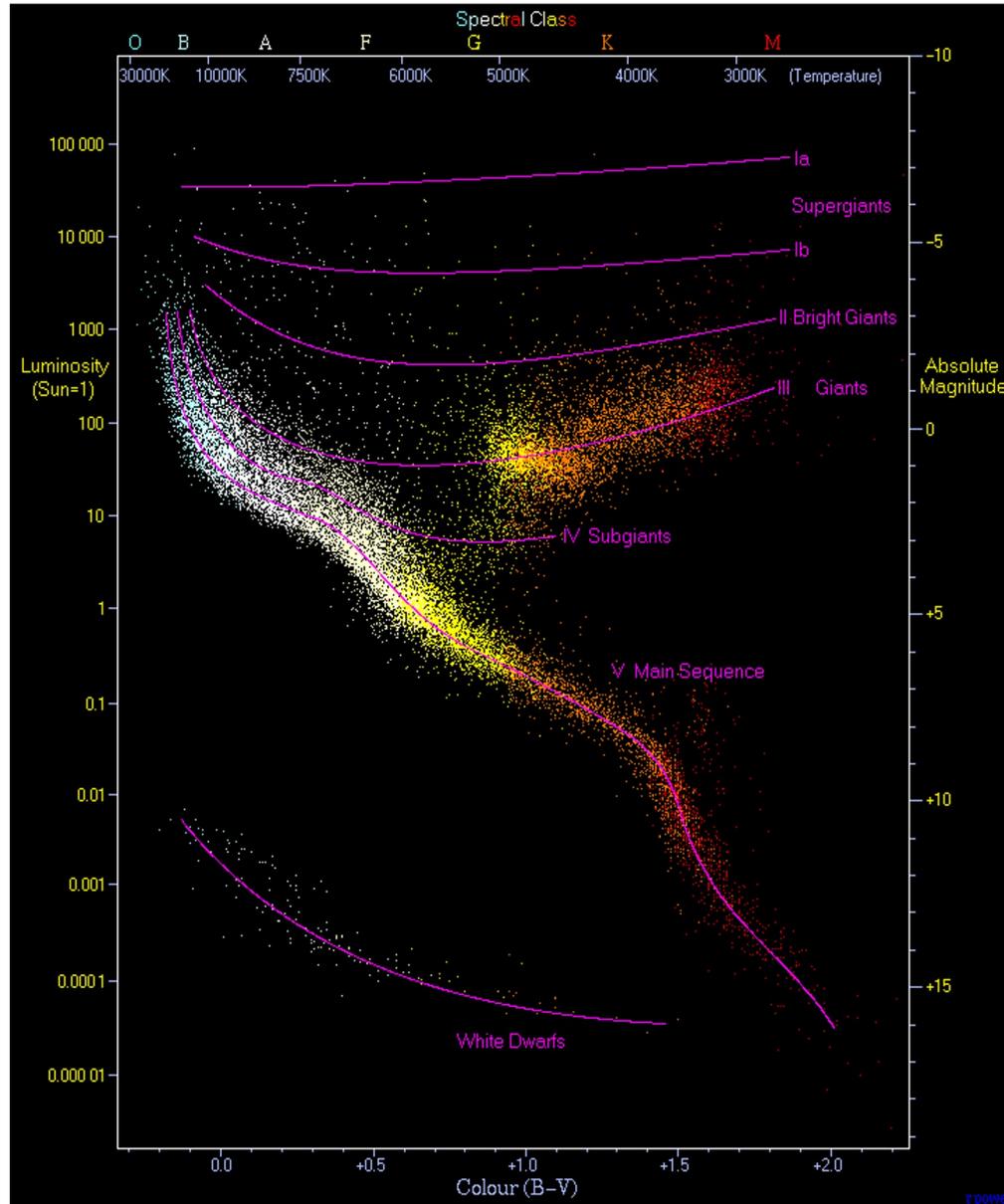
Diagrama H-R detalhado



Classes de Luminosidade



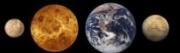
Um diagrama Hertzsprung - Russell observacional com 22.000 estrelas plotadas do Catálogo Hipparcos e 1.000 do Catálogo Gliese de estrelas próximas.



Sol, uma estrela típica

110 Terras; +1 milhão em volume

150.000.000 Km

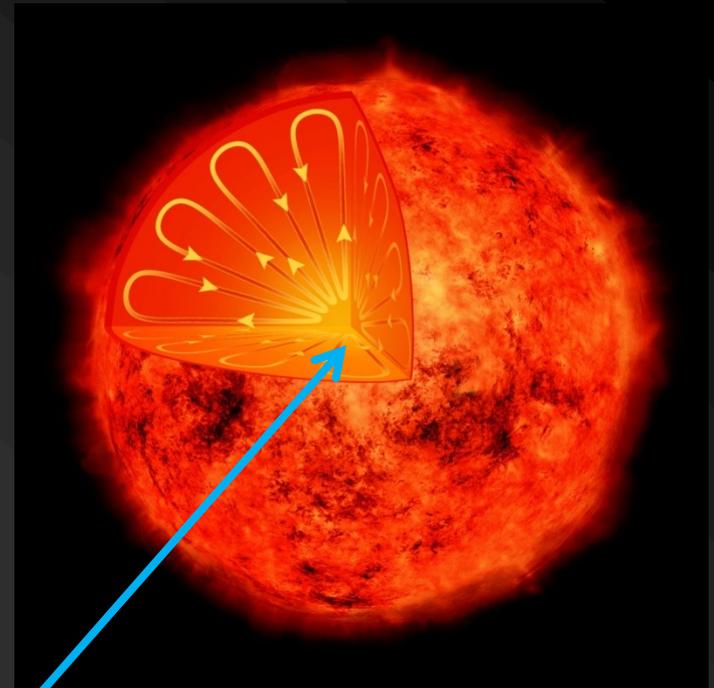


Massa = 333.000 a da Terra;
- 99,9 % da massa do S.S.
- 74% H, 24% He, ...

Idade: 4,5 bilhões de anos

Mas, o que é uma estrela?

Em essência, um corpo “gasoso” no interior do qual ocorrem reações de **fusão nuclear** formando elementos químicos mais *pesados*.



milhões de graus

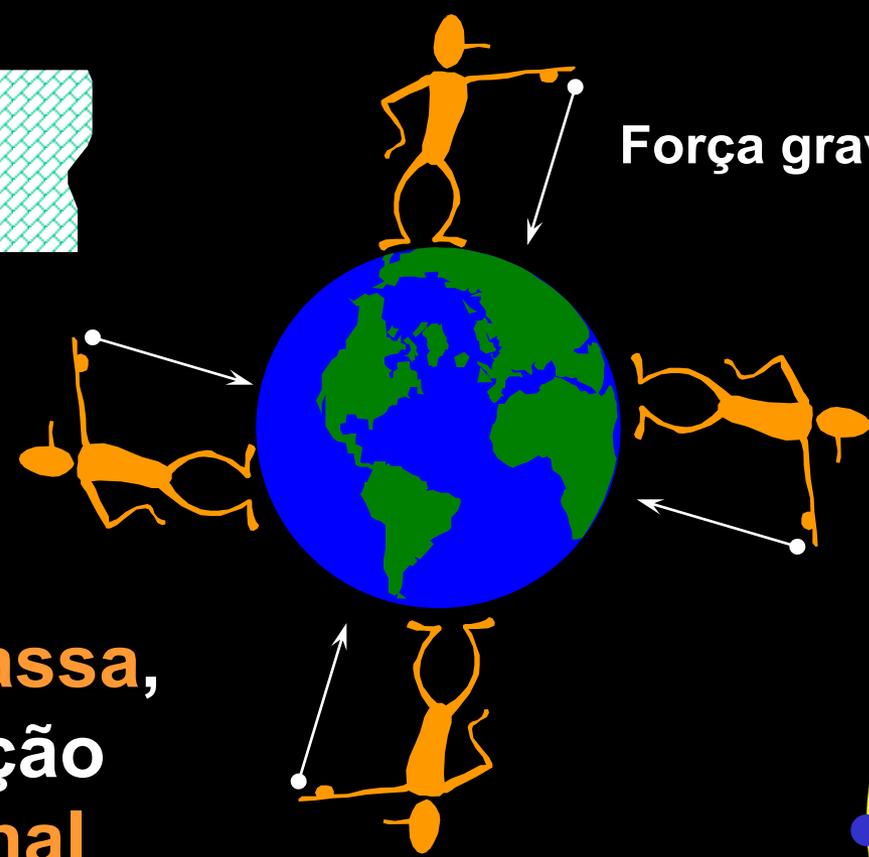
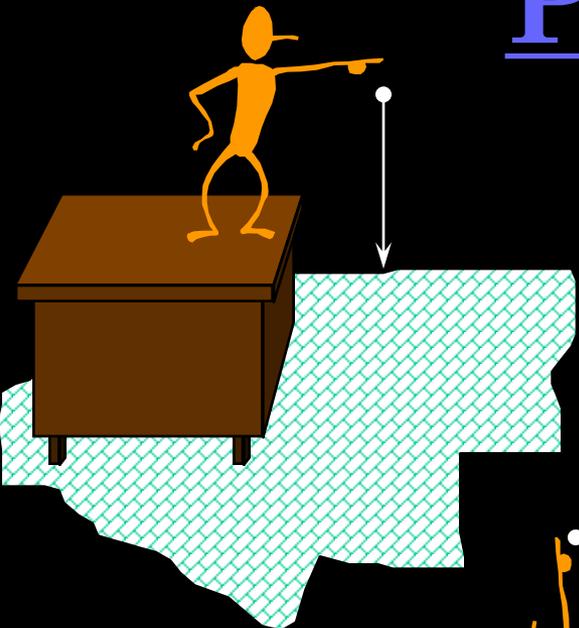
$H \rightarrow He \rightarrow C \dots$



As estrelas nascem!

**Receita: muito hidrogênio
processo: gravidade + calor
resultado: reação nuclear**

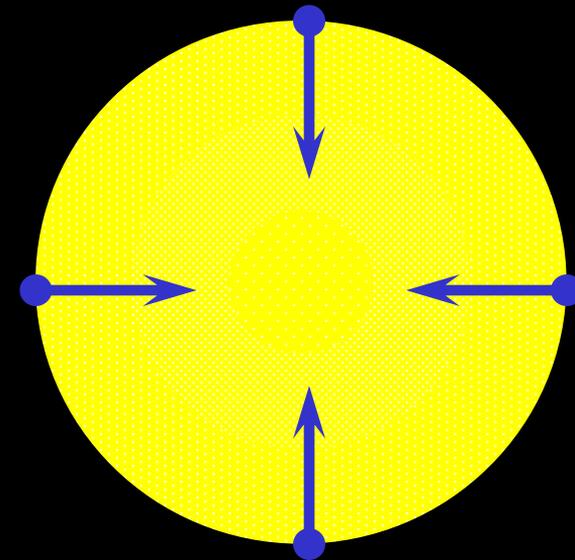
Pressão gravitacional



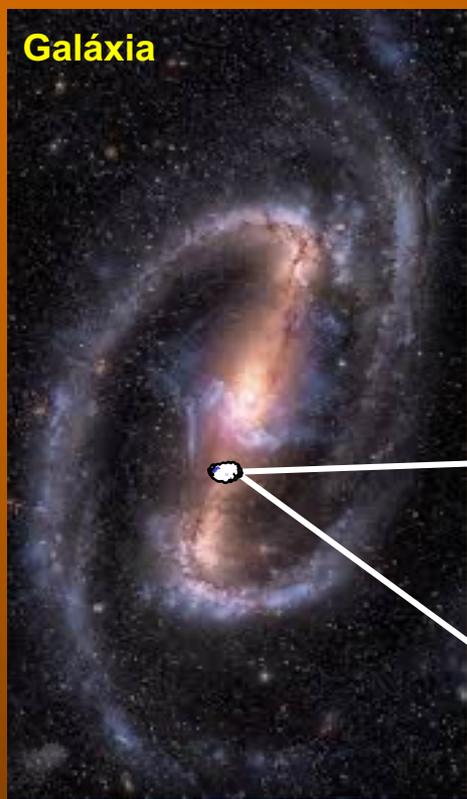
Força gravitacional

Existindo **massa**,
existe atração
gravitacional

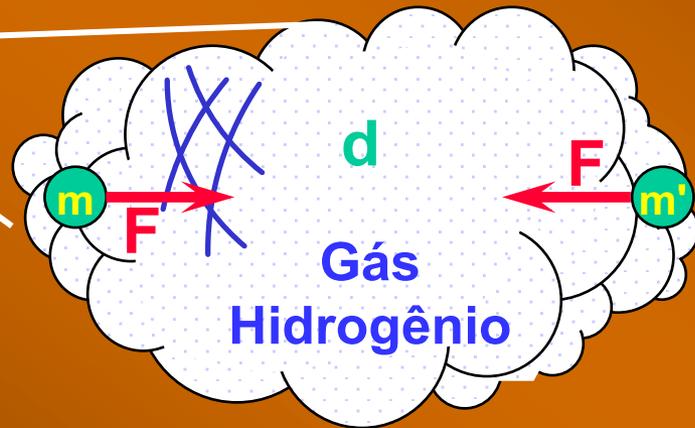
Pressão
gravitacional



Galáxia

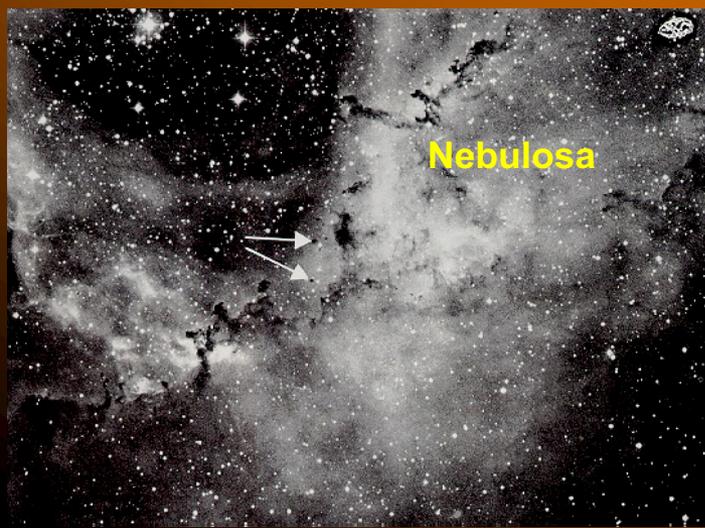


Contração gravitacional de uma nebulosa

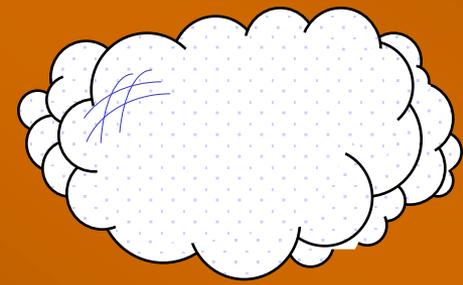


Lei da atração gravitacional

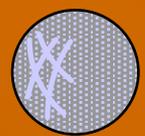
$$F = G m m' / d^2$$



Nebulosa



A forma geométrica de menor energia é a esfera.



Protoestrela

Aglomerado Estelar

Nuvem Inicial

Glóbulos de Bok

A contração de 'pequenas' regiões leva à fragmentação da nuvem:

- maiores estrelas: $100 M_{\text{solar}}$
- nuvem: $1.000.000 M_{\text{solar}}$



Aglomerado Estelar



Glóbulos de Bok



Glóbulos de Bok

Estrelas jovens
massivas

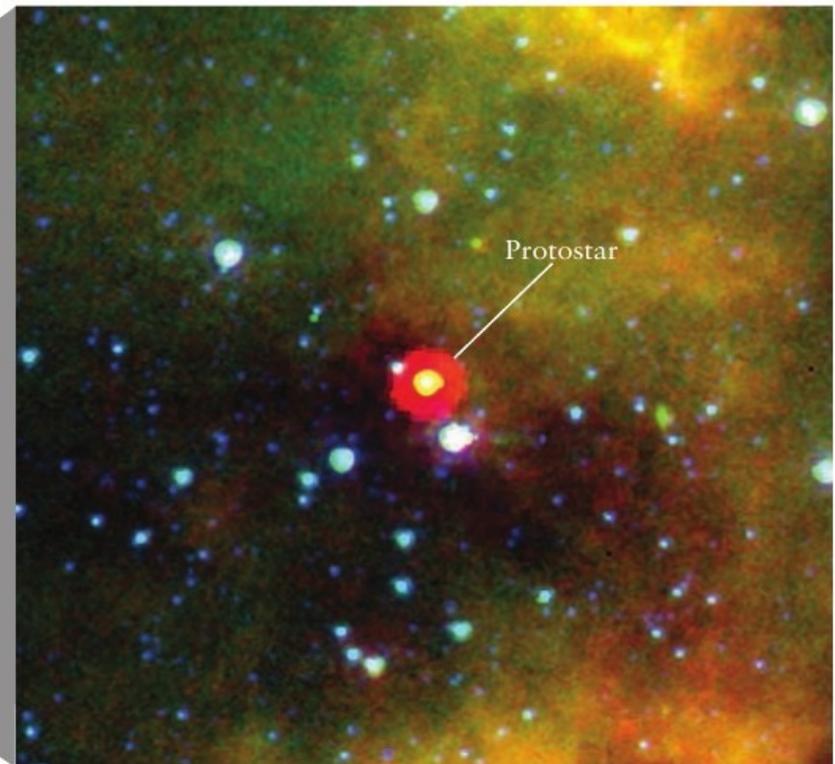
**Nebulosa
da Roseta
em
Monoceros**

Glóbulos de Bok



a A dark nebula

R I V U X G



b A hidden protostar within the dark nebula

R I V U X G

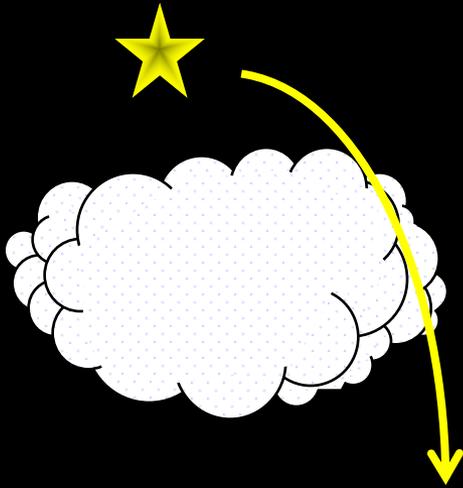
FIGURE 12-9 Protostar in a Bok Globule (a) This visible-light image shows a small dark nebula (equivalently, a Bok globule) called L1014 located in the constellation Cygnus. (b) When

viewed in the infrared, a protostar is visible within the nebula. (a and b: NASA/JPL-Caltech/N. Evans [Univ. of Texas at Austin]/DSS)

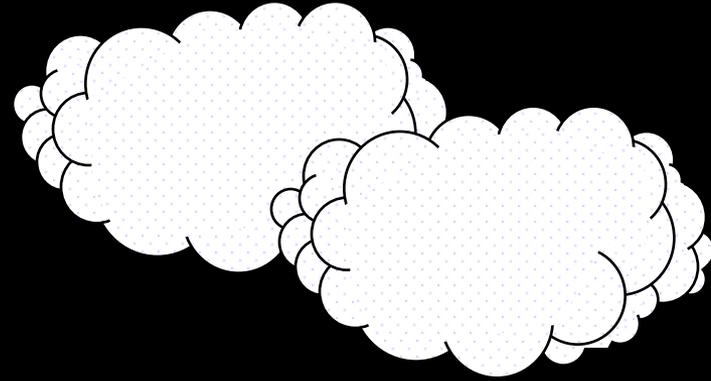
**Glóbulo de Bok no visível e no infra-vermelho.
De 100 – 1000 (~2 – 50 massas solares ~ 1 ano-luz) se
formam numa nuvem molecular gigante**

O que pode causar uma contração:

Uma perturbação pode aumentar a densidade de massa numa região -> colapso.



Passagem de uma estrela



Interação com outra nuvem

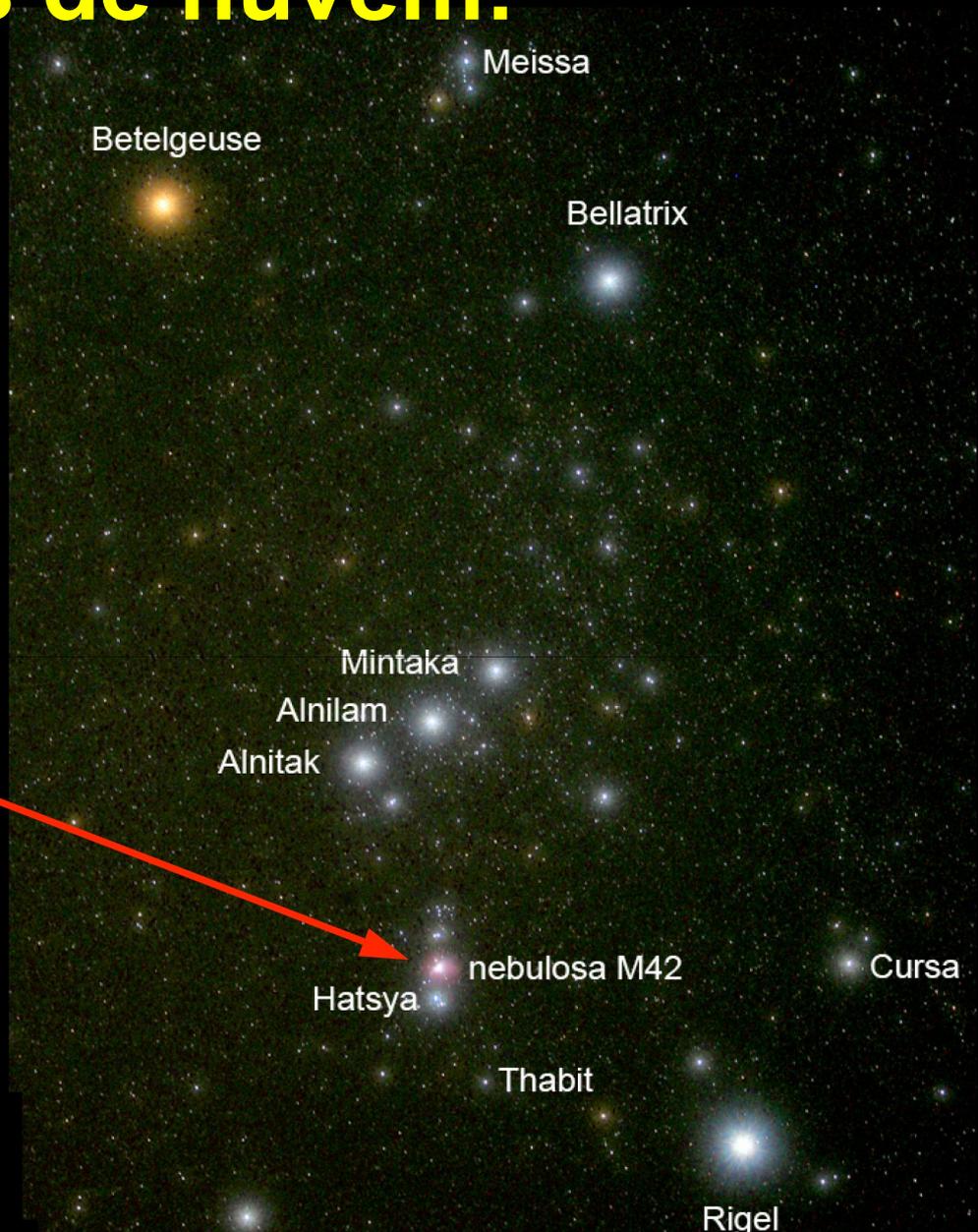


Ondas de choque

Outros exemplos de nuvem:

Constelação de Órion

A grande nebulosa de Órion

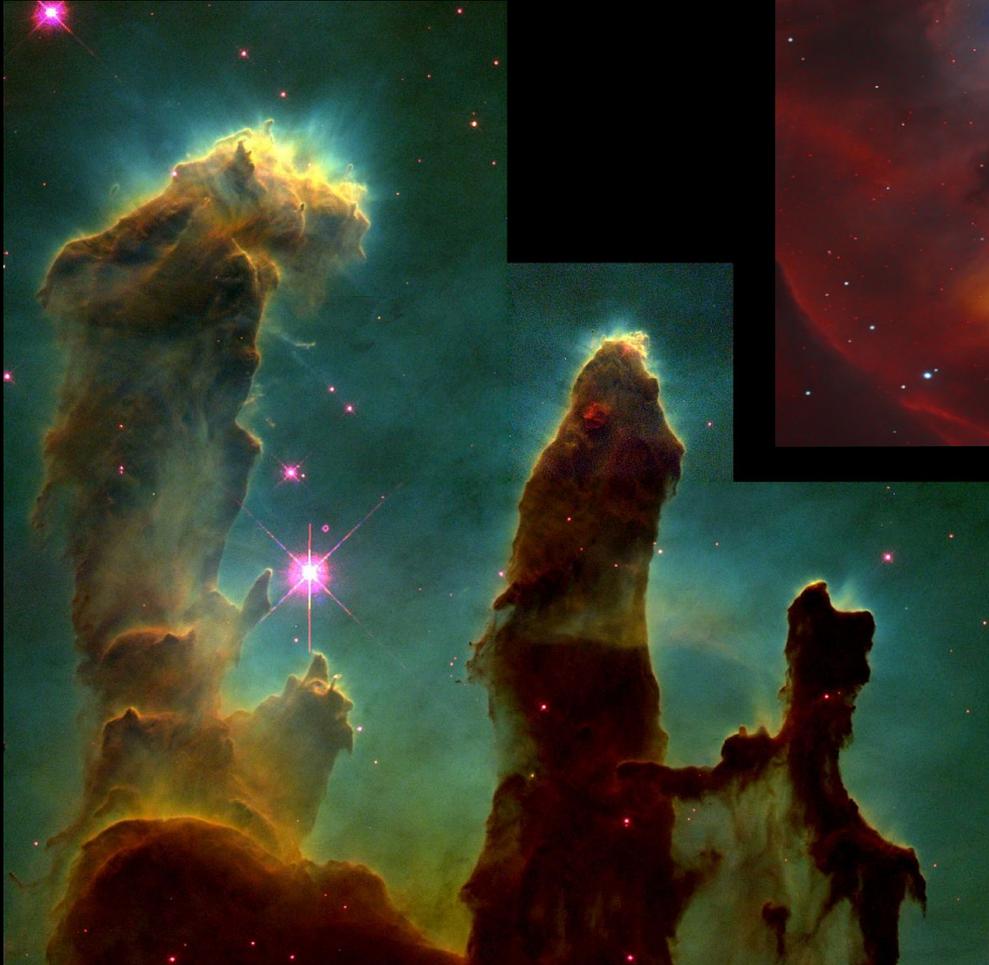


Nebulosa de Órion

- pertence à nuvem de Órion
- 25 anos-luz de extensão
- 1500 al de distância
- 700 estrelas
- estrelas jovens e velhas
- 200.000 massas solares



Berçários estelares



**Nebulosa
Trífida
(Sagitário,
5.000al,
40al diam.)**

**Imagem (Hubble) conhecida como *Pilares da Criação*, que mostra uma infinidade de estrelas se formando na Nebulosa da Águia.
(7.000al de nós!)**



Berçários estelares



Nuvem de gás
(e poeira)



Nebulosa Escura
da Cabeça do
Cavalo



Berçário de estrelas

Nebulosa escura

Barnard 68



Foto no visível

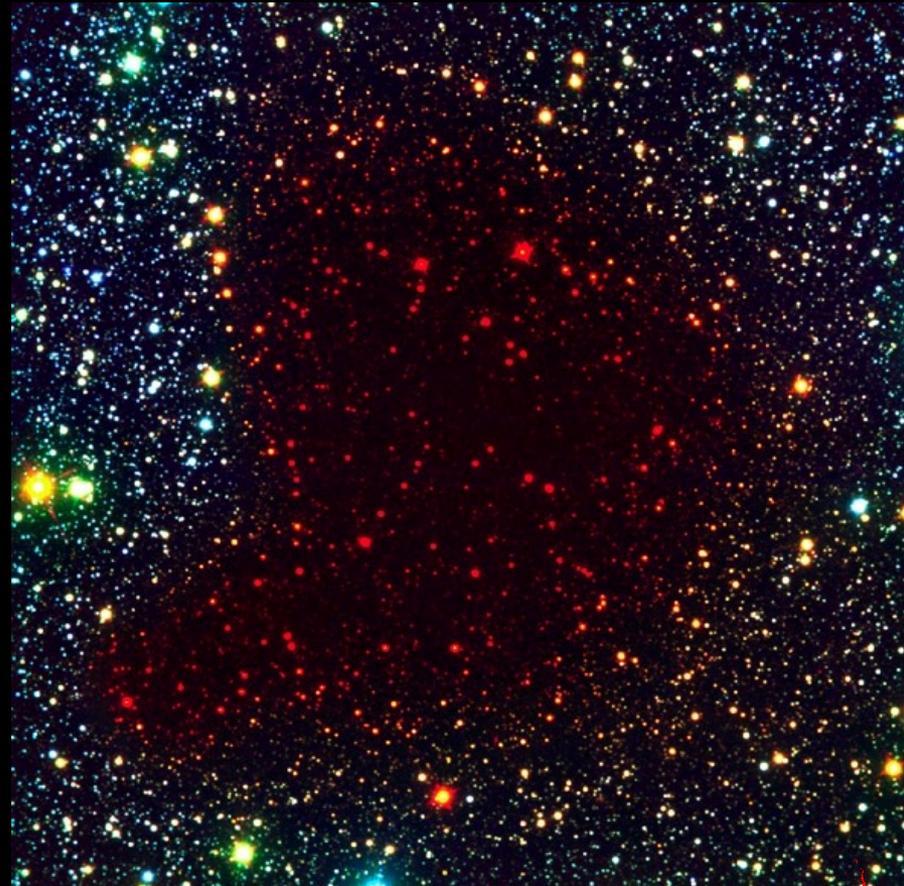
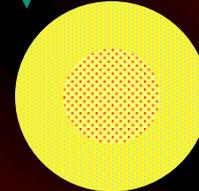
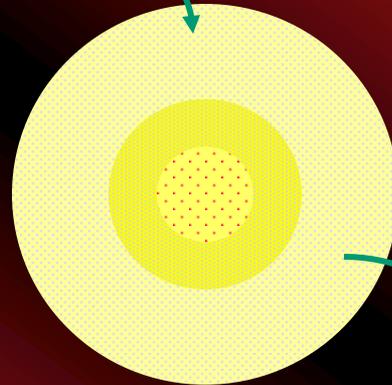


Foto no visível + infra-vermelho



Nascimento de uma estrela

Nuvem
Inicial



início das
reações de
fusão nuclear:

H -> He



nascimento
da estrela

protoestrela

- Raio ~ 20 a 100 R_{sol}
- Temperatura superficial ~ 3.000 C
- Temperatura central ~ 1.000.000 C
- Luminosidade ~ 100 a 1000 a do Sol

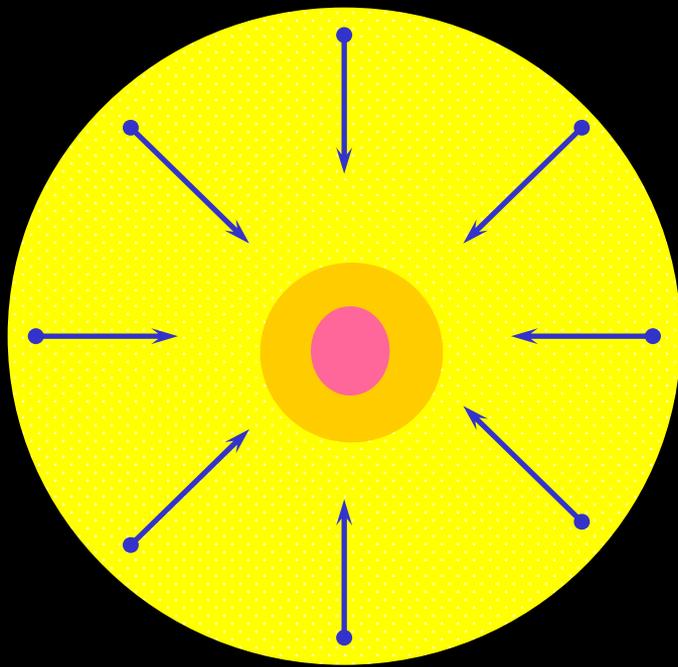
Sua fonte de energia, neste estágio, é a conversão de energia potencial gravitacional em térmica.

Com o colapso, a velocidade de rotação aumenta e parte da nuvem se concentra num disco perpendicular ao eixo de rotação: região onde poderão se formar planetas.



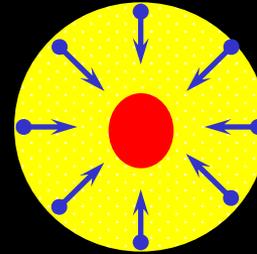
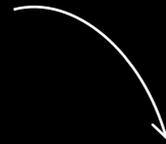
Por que uma estrela não colapsa?

(quem disse que não!)

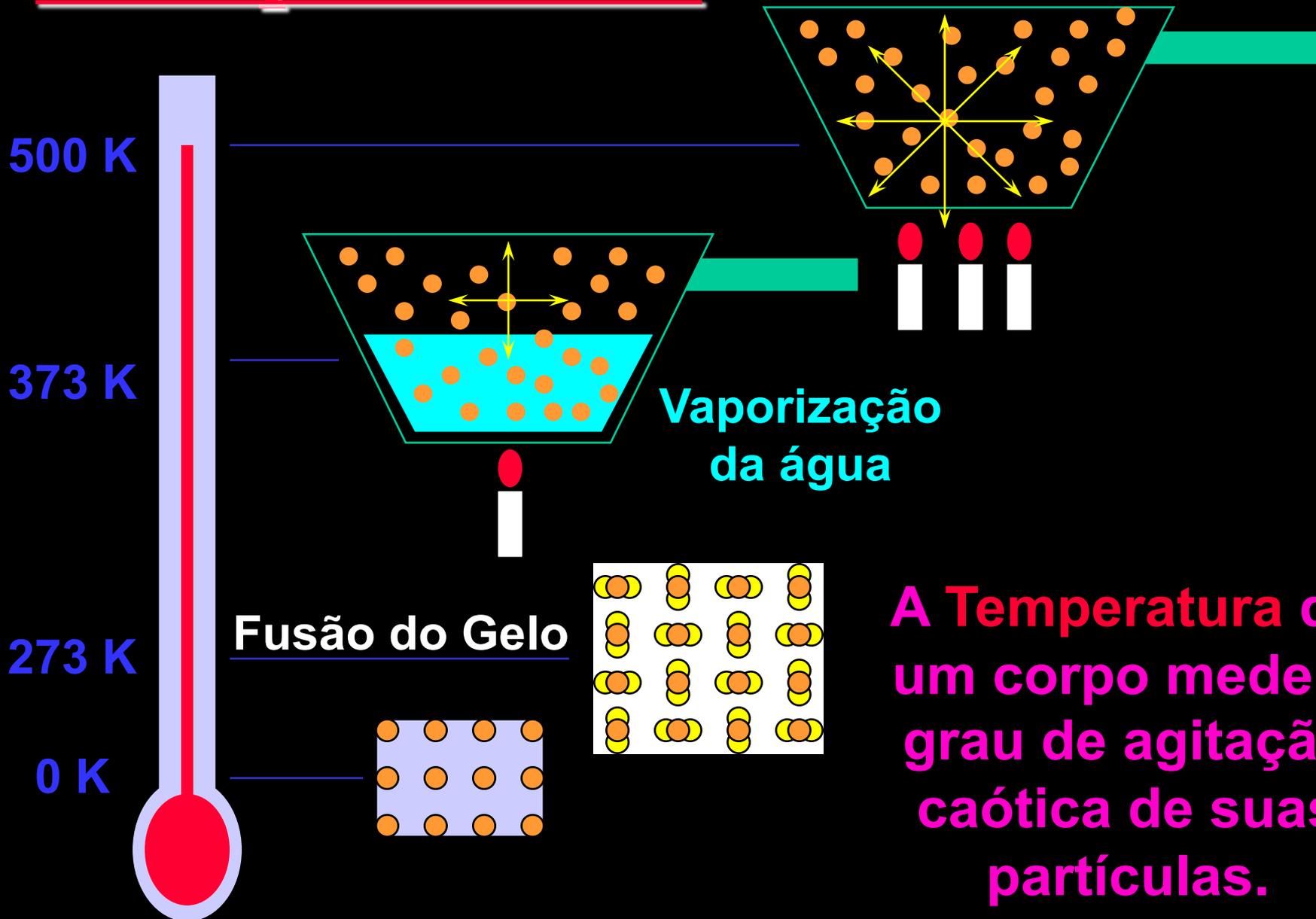


As camadas externas exercem pressão gravitacional nas internas, então por que ela não implode?

Resposta: equilíbrio com radiação!



Temperatura

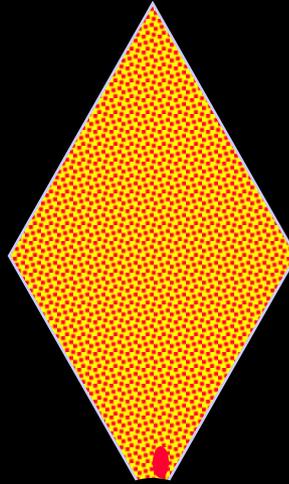


Pressão Térmica

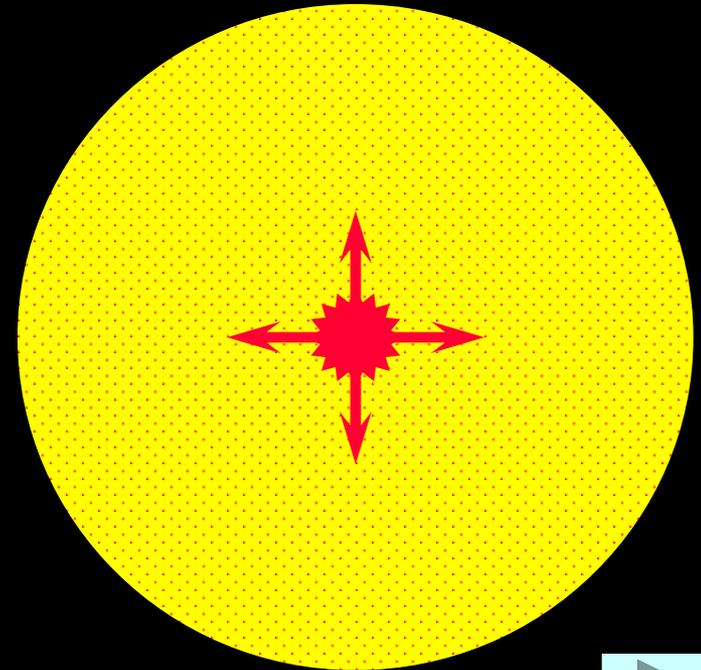


Ar
frio

Balão com
mecha apagada



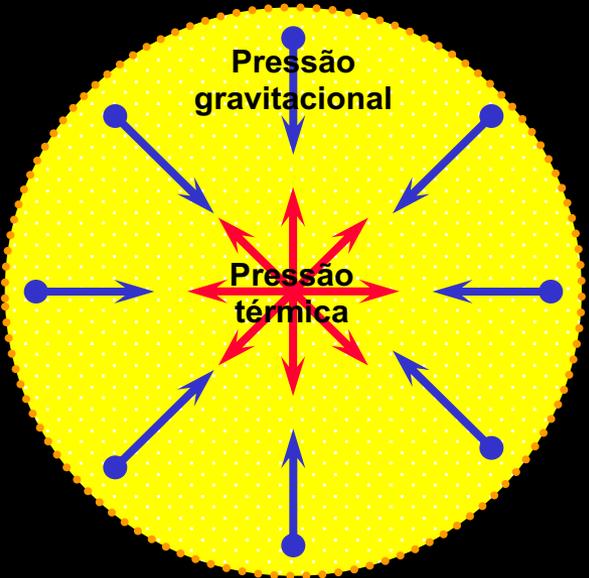
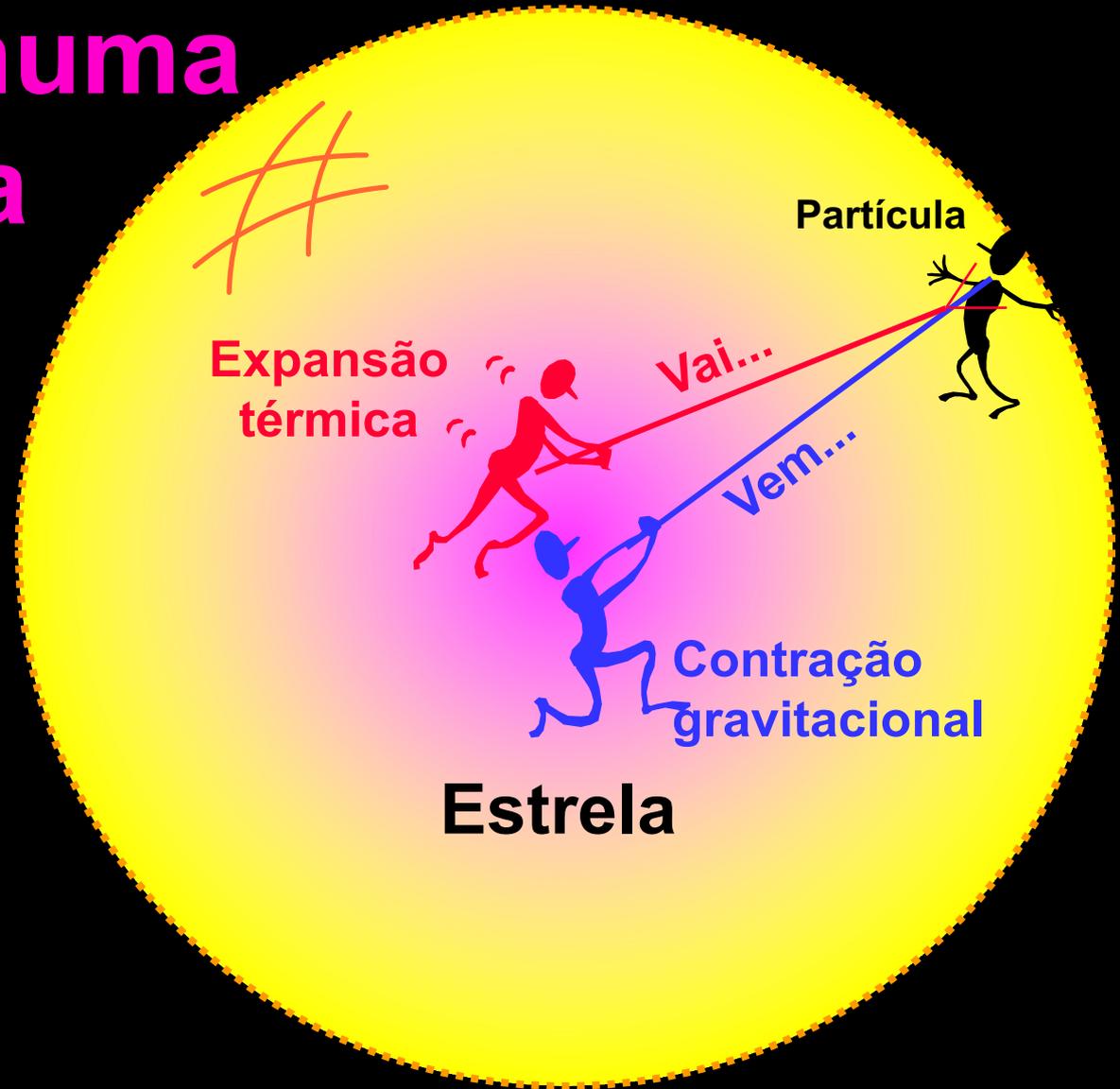
Mecha acesa



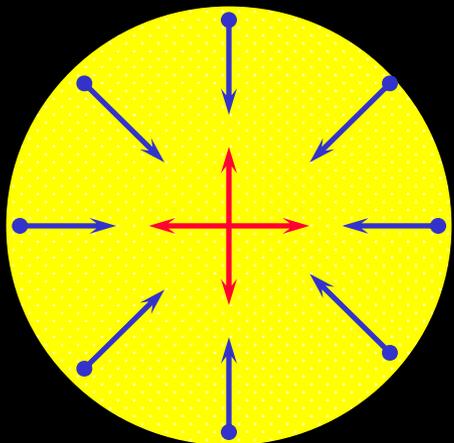
Devido à **temperatura**,
existe a **pressão térmica**.



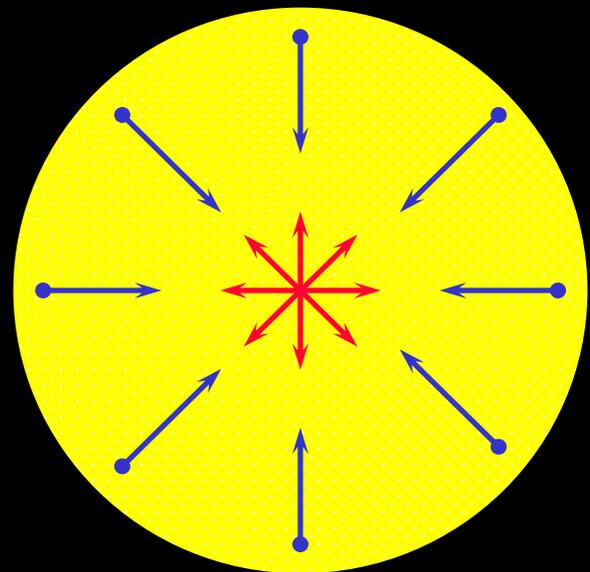
Pressões atuantes numa estrela



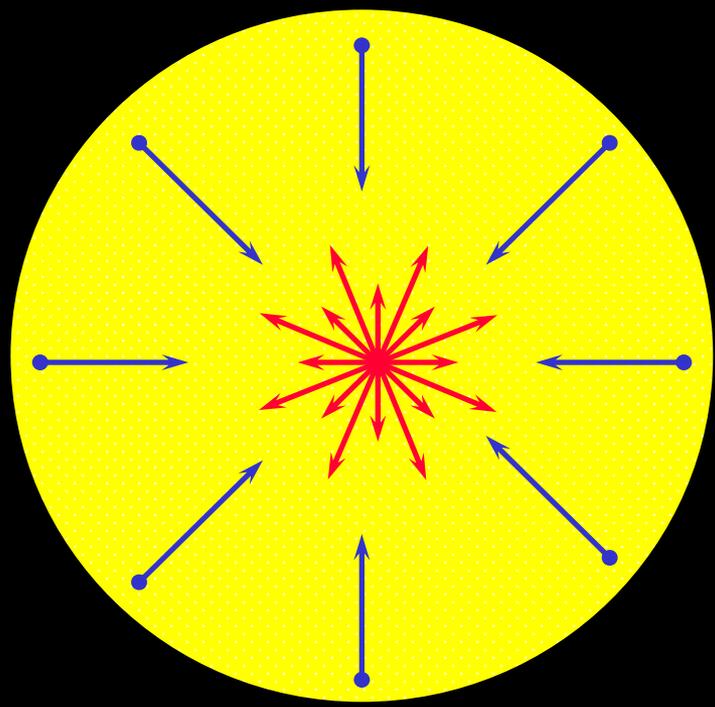
(Des)equilíbrio estático



$P_T < P_G$
Contração



$P_T = P_G$
Equilíbrio



$P_T > P_G$
Expansão

P_T = Pressão Térmica
 P_G = Pressão Gravitacional



Sequência Principal

Quando uma estrela nasce,
diz-se que ela entrou no

Período Principal

de sua vida, também chamado de

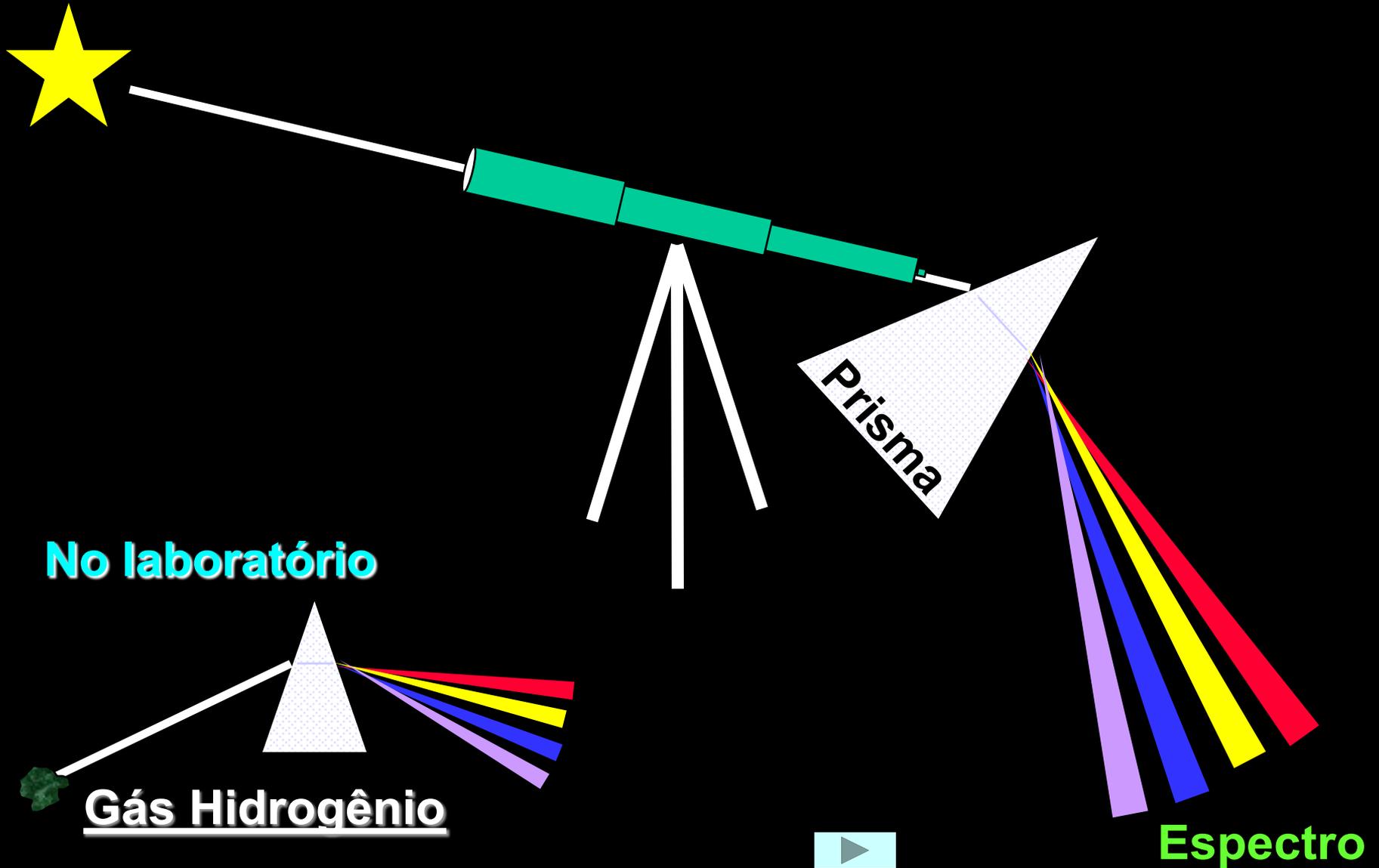
Sequência Principal.

É sua fase de maior **equilíbrio**.

A **Sequência Principal** dura enquanto
houver **hidrogênio** no núcleo da estrela.

Composição química
de uma
estrela

Espectroscopia



No laboratório

Gás Hidrogênio



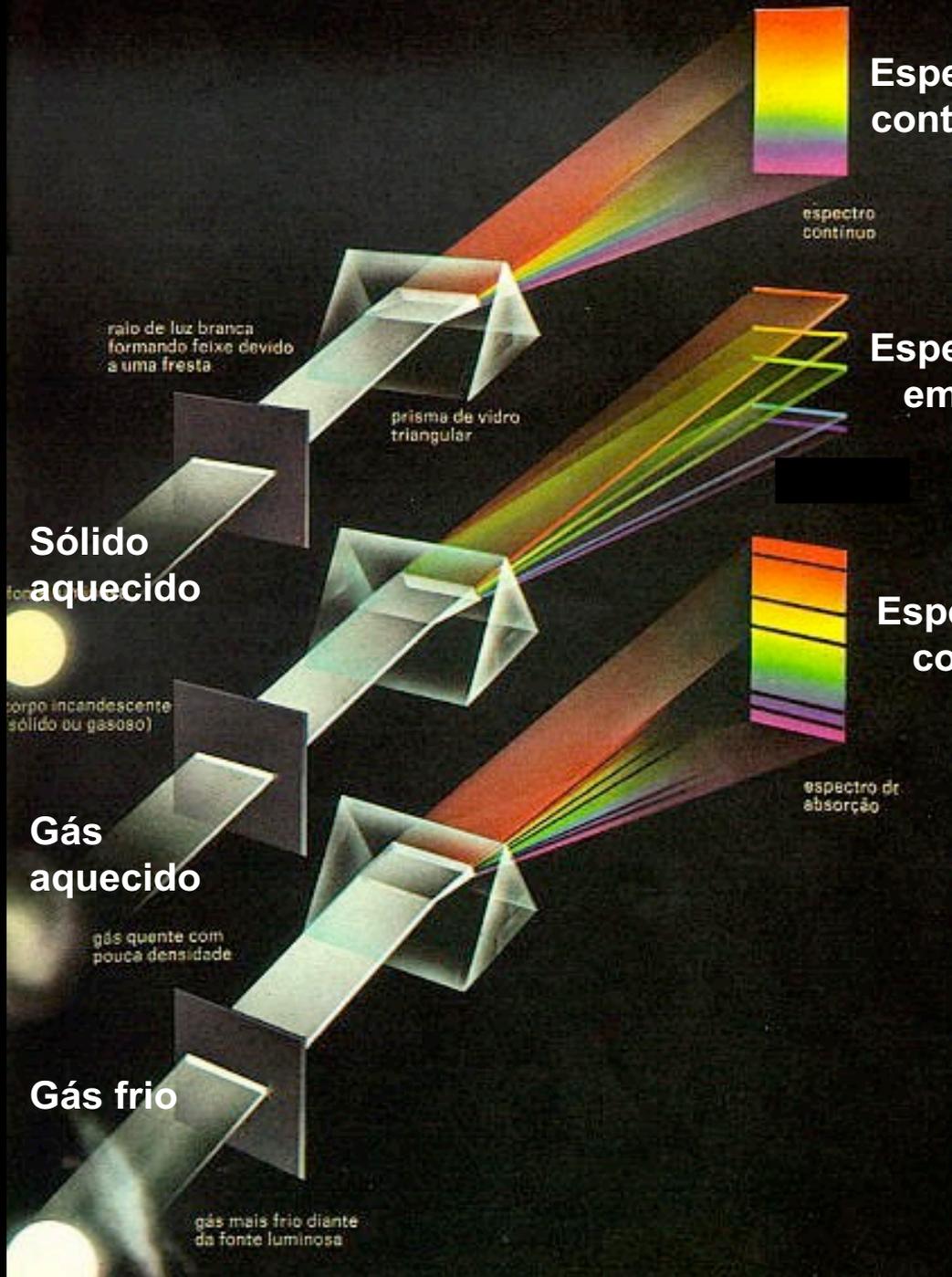
Espectro

Espectro contínuo

Decomposição da Luz

Espectro de emissão

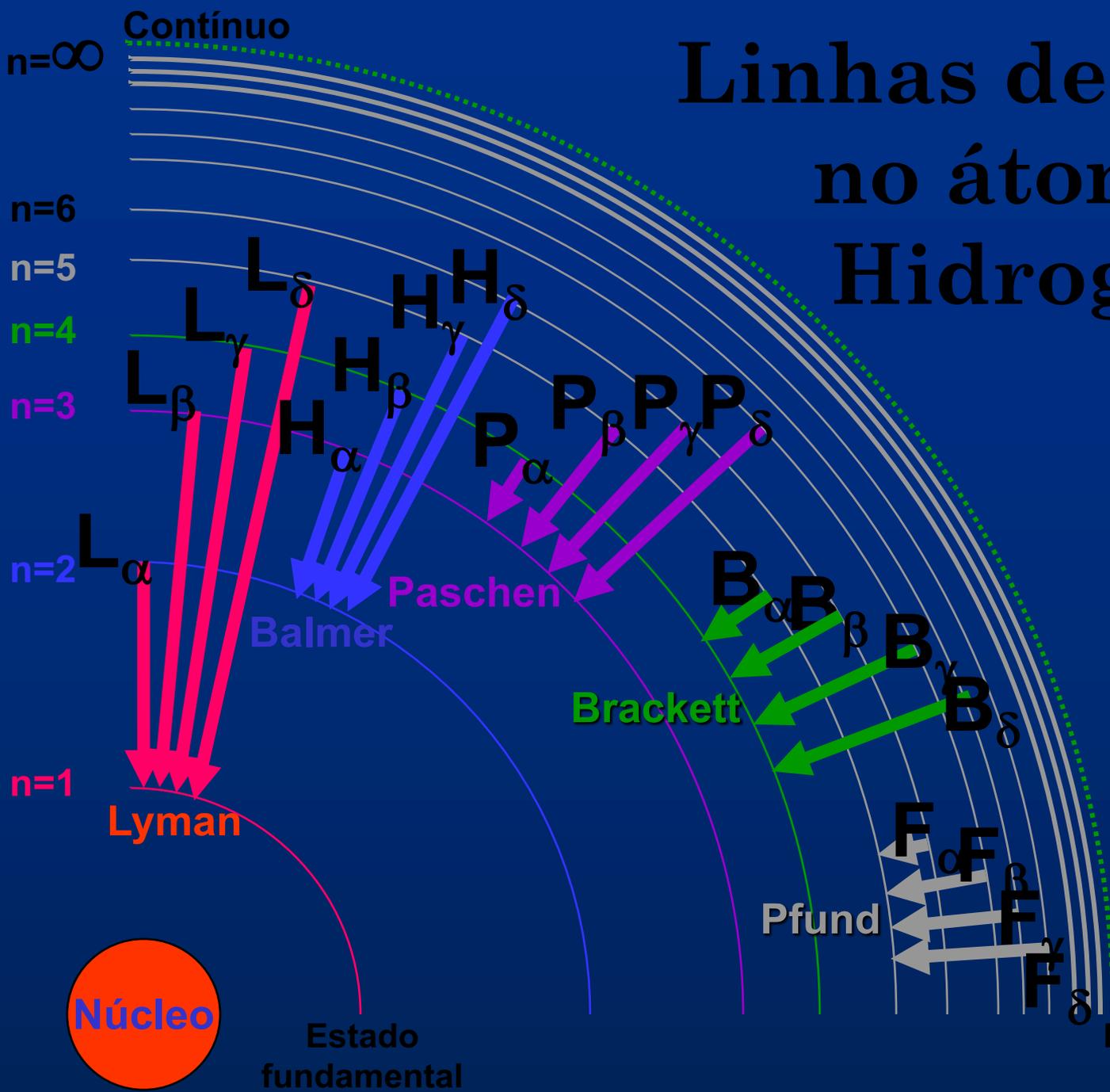
Espectro contínuo com linhas de absorção



A técnica mais preciosa em astronomia !



Linhas de emissão no átomo de Hidrogênio



Origen:
transição de uma
camada externa
para uma interna.



Estado fundamental

Nível limite externo



Hidrogênio

The image shows the visible emission spectrum of hydrogen. It consists of a dark background with several discrete vertical lines of light. The most prominent lines are in the red, green, and blue-violet regions, with a few fainter lines in between. The lines are separated by dark gaps, characteristic of a line spectrum.



Hélio

The image shows the visible emission spectrum of helium. It features a series of vertical emission lines. Notable lines include a bright yellow line, a red line, and a blue-violet line, with several other lines in the green and cyan regions. The lines are sharp and distinct against the dark background.



Oxigênio

The image shows the visible emission spectrum of oxygen. It displays a complex pattern of vertical emission lines. There are several strong lines in the red and orange regions, and a cluster of lines in the blue and violet regions. The lines vary in intensity and width.



Carbono

The image shows the visible emission spectrum of carbon. It contains numerous vertical emission lines, with a high density of lines in the blue and violet regions. There are also several lines in the red and orange regions. The overall appearance is that of a very rich line spectrum.



Nitrogênio

The image shows the visible emission spectrum of nitrogen. It features a series of vertical emission lines, with a notable line in the red region and several lines in the blue and violet regions. The lines are sharp and well-defined.



Neônio

The image shows the visible emission spectrum of neon. It displays a series of vertical emission lines, including a prominent red line and several lines in the blue and violet regions. The lines are sharp and distinct.

Percentagem dos elementos, no caso do Sol:

74 % hidrogênio

24 % hélio

0,8 % oxigênio

0,3 % carbono

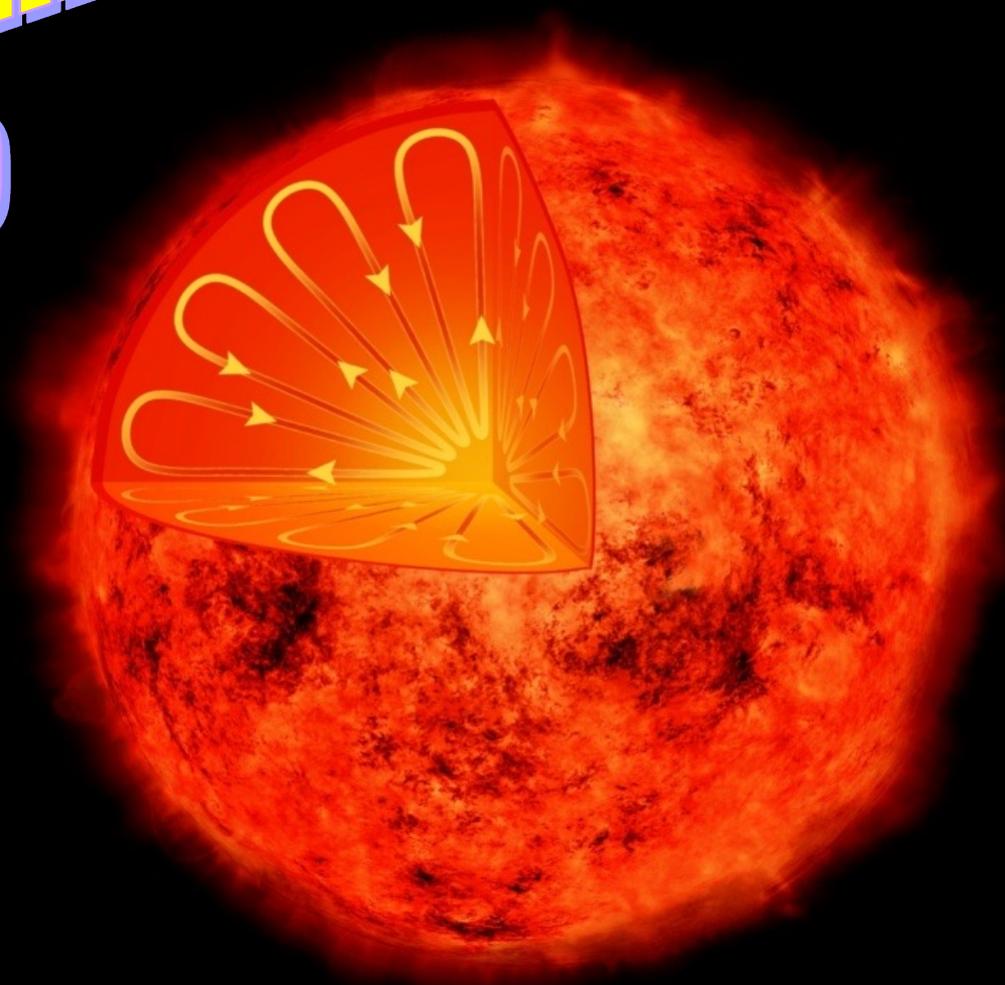
0,2 % ferro

▪

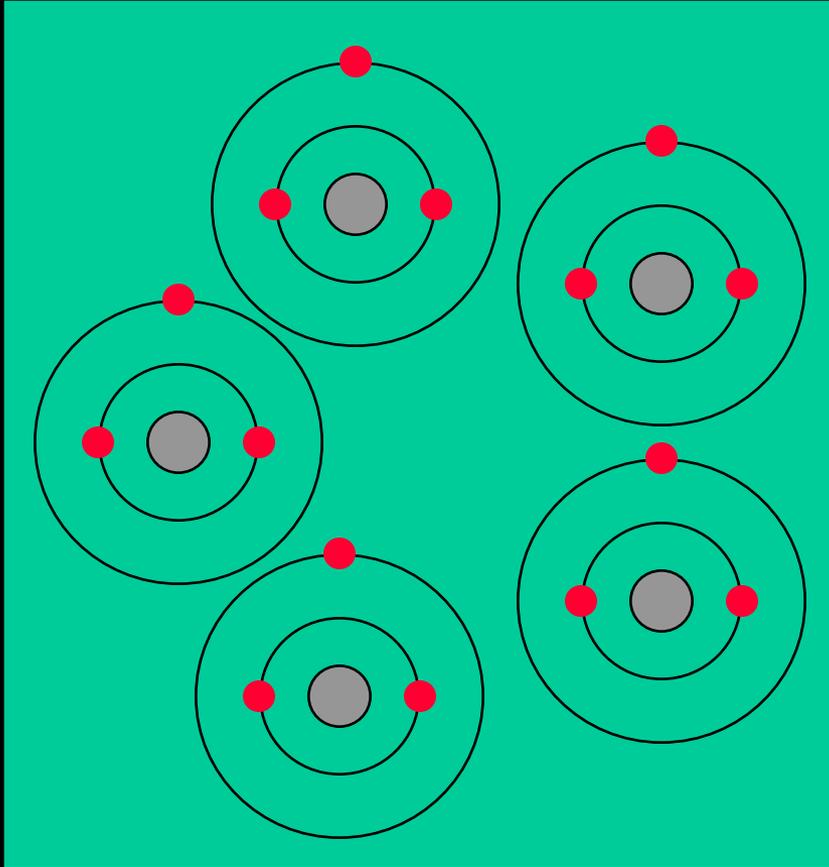
▪

▪

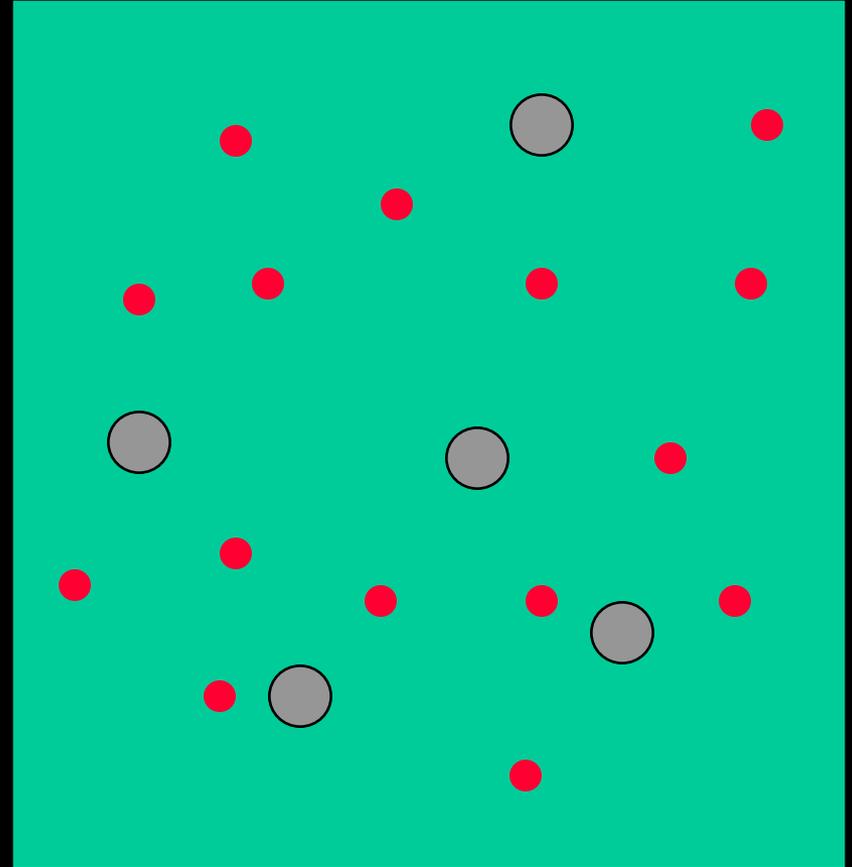
O que
esquenta uma
estrela ?



Gás e Plasma



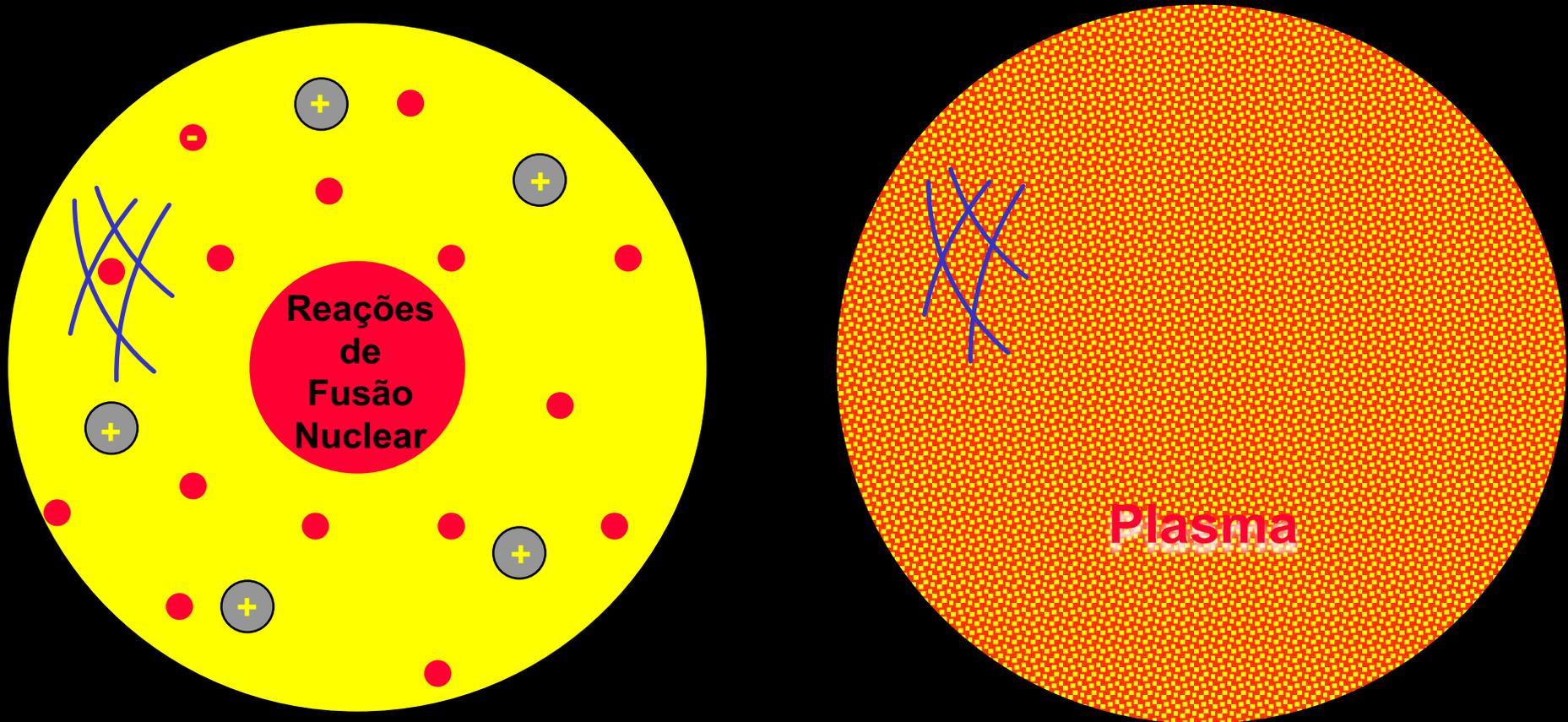
Gás



Plasma

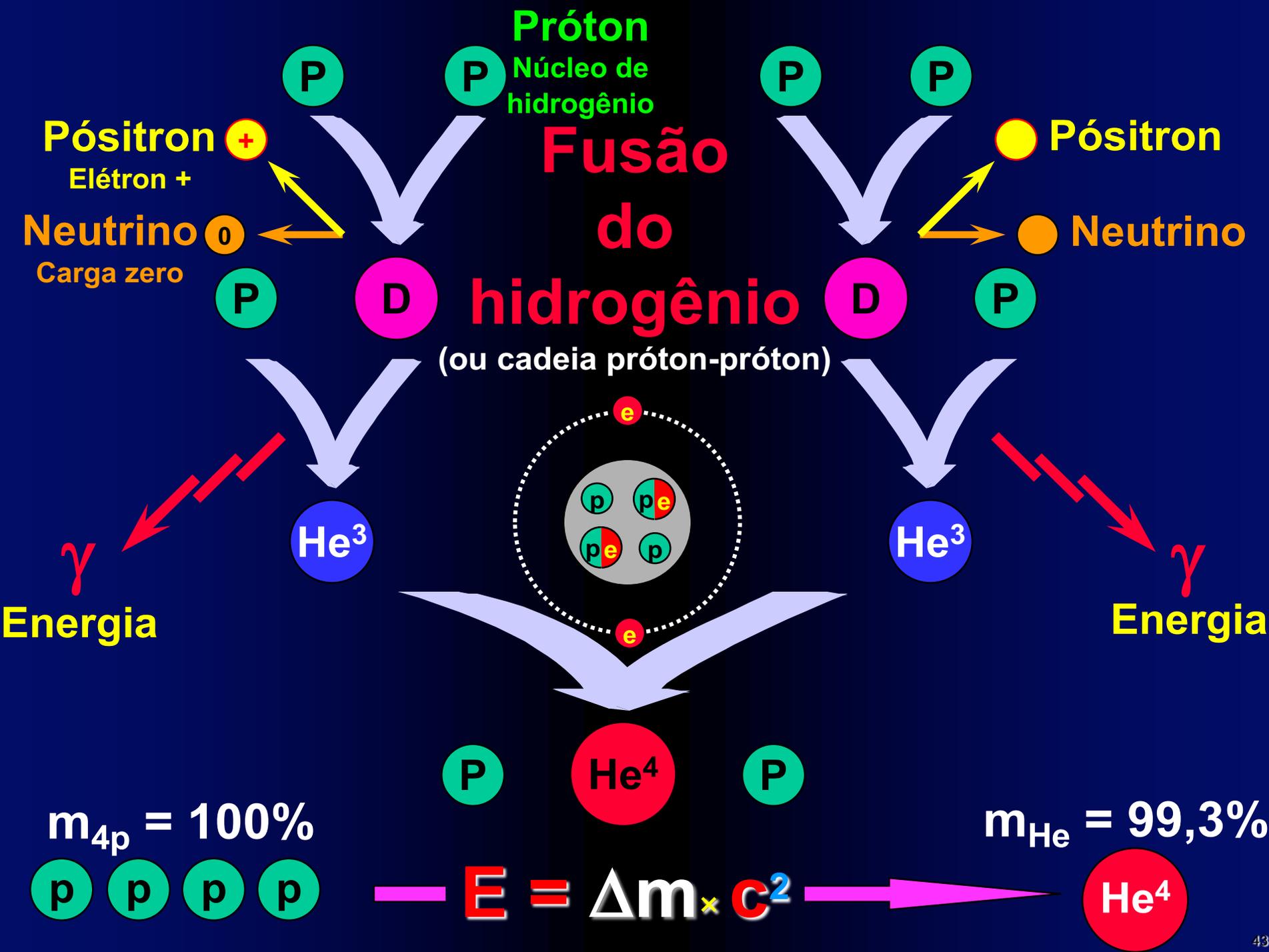


Estrela: corpo plasmático



- Temperatura muito alta
- Átomos ionizados
- Matéria na forma de plasma

Mas como é gerada a energia no interior de uma estrela?



Um pouco de conta:

4 átomos de H tem $6,693 \cdot 10^{-27}$ Kg

1 átomo de He tem $6,645 \cdot 10^{-27}$ Kg

Perda de massa = $0,048 \cdot 10^{-27}$ Kg

Assim, $E = m c^2 = 4,3 \cdot 10^{-12}$ J

Para acender uma lâmpada de 60 W por 12 horas, o Sol destrói 2.000.000.000.000.000.000 (2×10^{18}) átomos de H.

**o Sol converte
600 milhões de toneladas
de H em He por segundo!
Calma! Não vai faltar H tão cedo!
Ele tem hidrogênio para “queimar”
por mais 5 bilhões de anos!**

Um pouco de conta:

4 átomos de H tem $6,693 \cdot 10^{-27}$ Kg

1 átomo de He tem $6,645 \cdot 10^{-27}$ Kg

Perda de massa = $0,048 \cdot 10^{-27}$ Kg

Assim, $E = m c^2 = 4,3 \cdot 10^{-12}$ J

Para acender uma lâmpada de 60 W por 12 horas, o Sol destrói 2.000.000.000.000.000.000 (2×10^{18}) átomos de H.

**o Sol converte
600 milhões de toneladas
de H em He por segundo!
Calma! Não vai faltar H tão cedo!
Ele tem hidrogênio para “queimar”
por mais 5 bilhões de anos!**

Lembrem-se:

1 g de H => 1 mol =>

$N_A = 6,02 \times 10^{23}$ átomos

$M_{sol} = 2 \times 10^{33}$ g -> 73%

de H -> $0,73 \cdot 2 \times 10^{33} \cdot$

$6,02 \times 10^{23} = 8,8 \times 10^{56}$

átomos de H

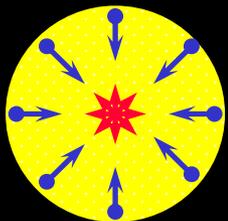
Exercício: Sabendo que

$L_{sol} = 3,8 \times 10^{26}$ W

EVOLUÇÃO estelar

Lembra do (des)equilíbrio?

Desequilíbrio causa evolução.

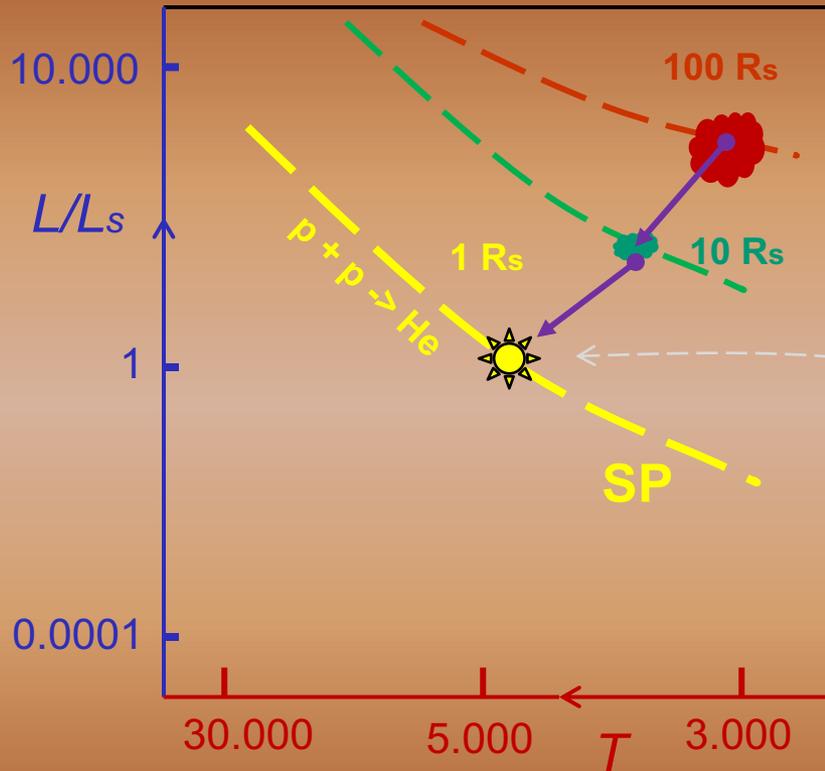


$$P_T = P_G$$

Enfim, será que é o fim?



Evolução do Sol



- começa como protoestrela gigante

- contração: $T \uparrow$ $R \downarrow$ $L \downarrow$

Quando a temperatura é suficiente para reações termonucleares: a estrela entra na

Sequência Principal



Para chegar na SP,

1 M_s -> 10.000.000 anos

15 M_s -> 10.000 anos

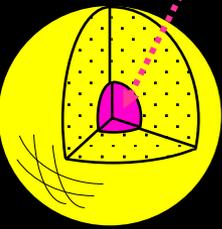
0.05 M_s -> nunca chega (anã marrom)





Evolução para Gigante Vermelha

Região com fusão nuclear



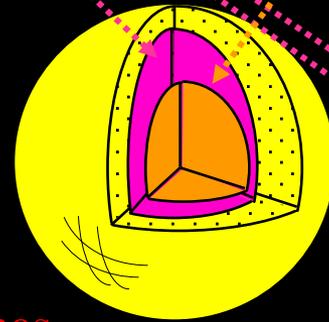
Sol no passado

0



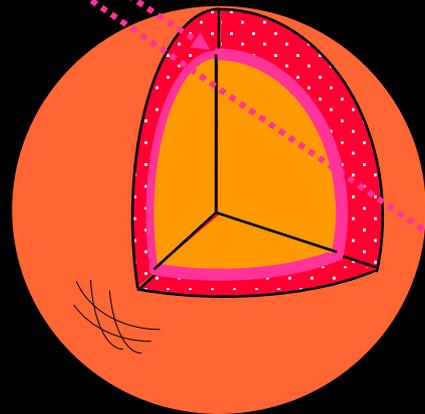
Sol hoje

Idade do Sol :
4,52 Bilhões de anos



Sol num futuro próximo

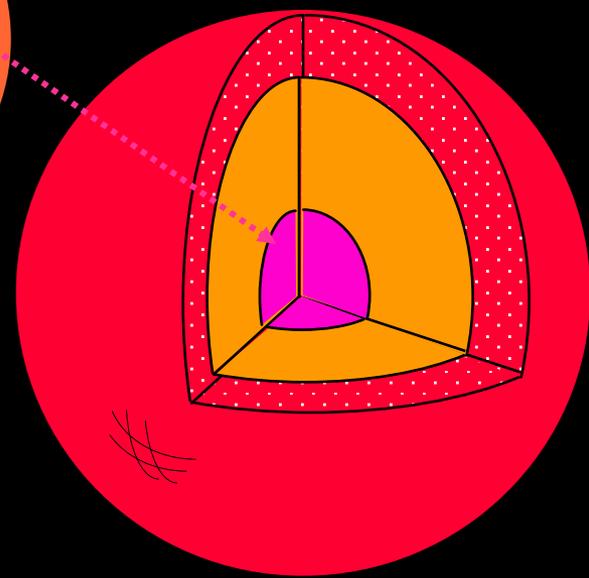
Núcleo inerte de He



Futuro muito distante

9 Bilhões de anos

Flash do He!

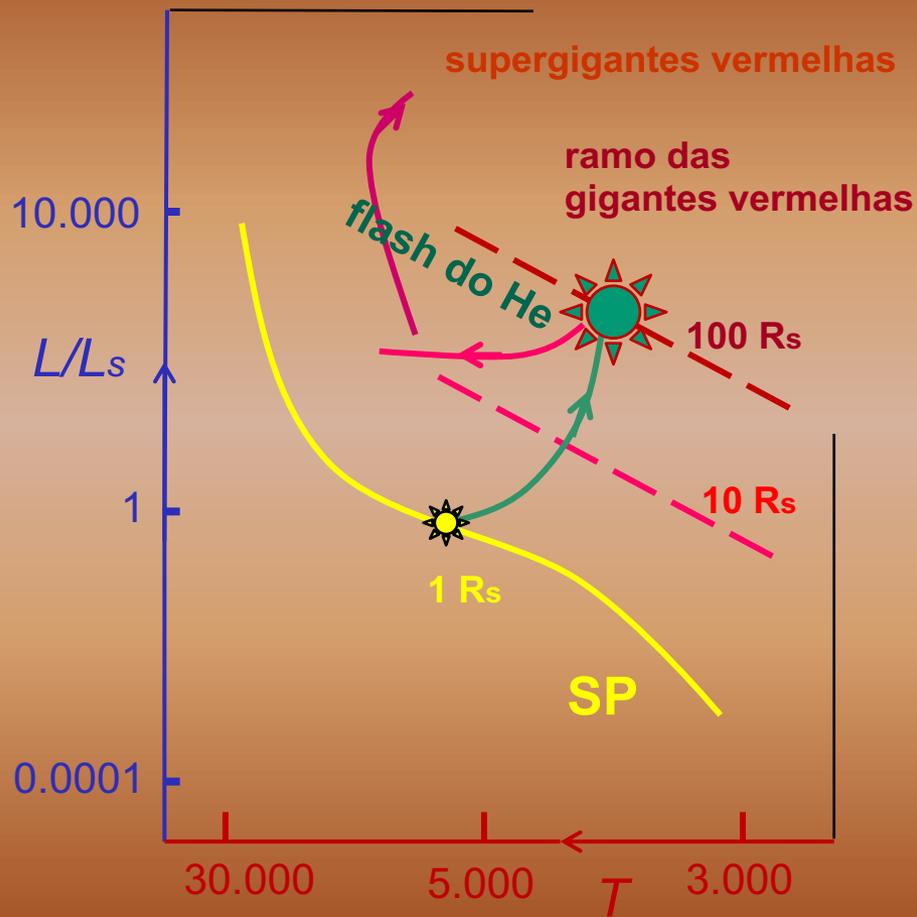


Após bilhões de anos na sequência principal, o **hidrogênio começa a se exaurir**. A estrela, então, ruma para um novo estágio. No caso do Sol, ele se tornará um estrela enorme e vermelha, pois a radiação vencerá momentaneamente (por alguns “poucos” milhões de anos!) a gravidade, expulsando as camadas externas da estrela, que se esfria e avermelha. Essa nova fase se chama **Gigante Vermelha**. Isso acontecerá com o nosso Sol daqui uns 5 bilhões de anos.

Note que a luminosidade da estrela aumentou muito, pois seu raio é enorme, embora sua temperatura superficial tenha diminuído.

Nesse estágio de evolução, o núcleo será composto por essencialmente hélio, com temperatura de cerca de 100 milhões de graus, suficientes para **converter He em carbono**. Esse momento se chama **Flash do Hélio**.

Saindo da SP



relativa estabilidade
após o flash do He:
~10% do tempo na SP

Em torno do núcleo, He continua sendo gerado.

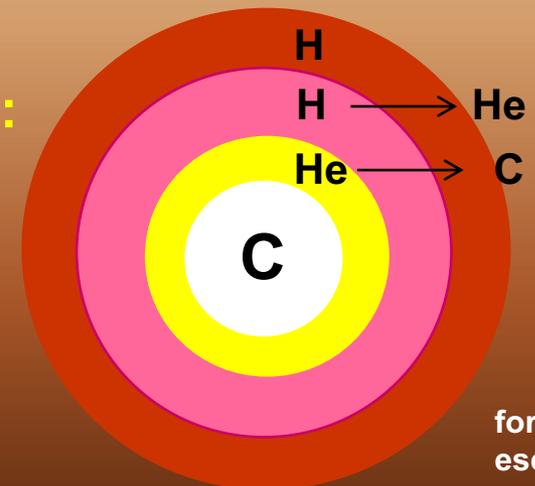
Massa de He aumenta -> aumenta T ,
que aumenta a taxa de produção de He.

Logo, a luminosidade aumenta.

T alcança valores suficiente para o flash do He:

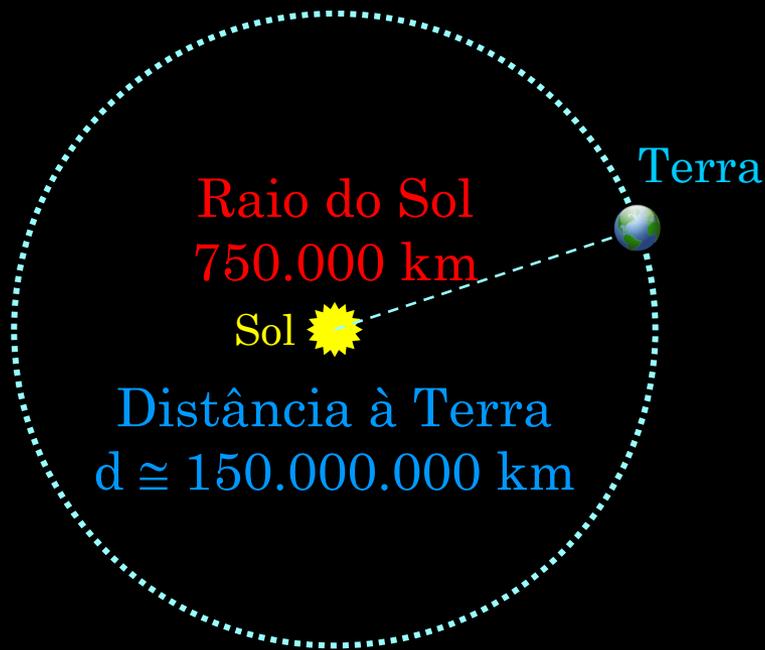


Estrutura:

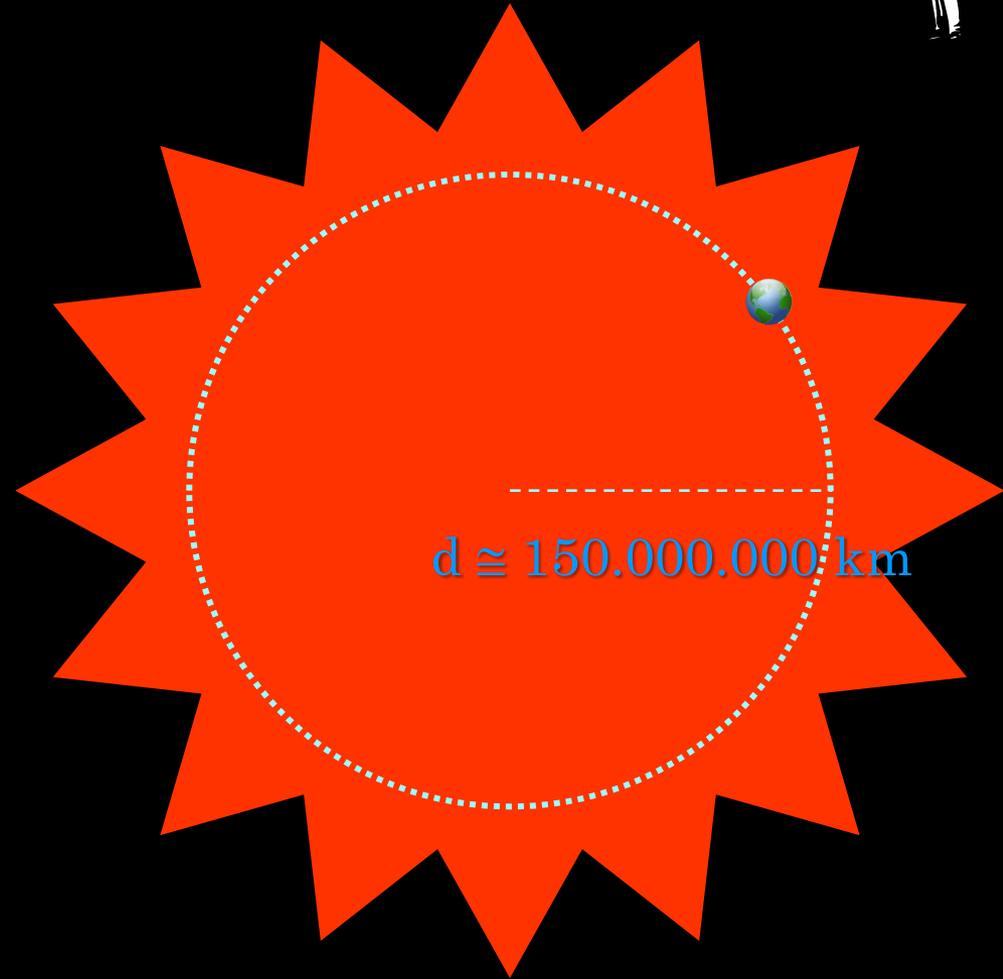


fora de
escala

A gigante vermelha Sol

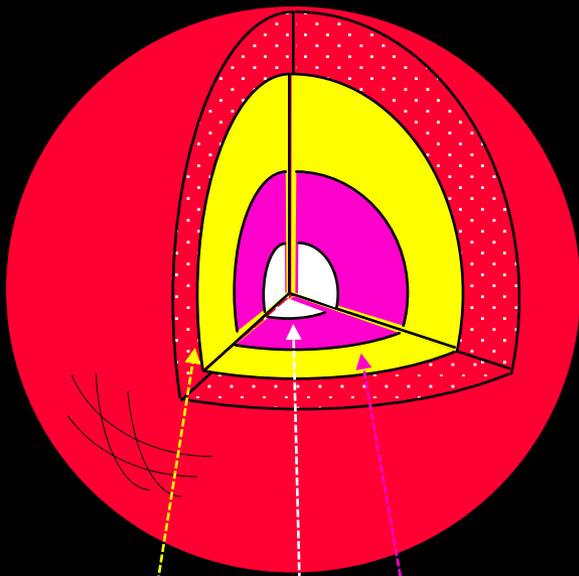


Hoje



Num futuro muito distante
(+ 4,5 bilhões de anos)

Evolução para Nebulosa Planetária e anã branca

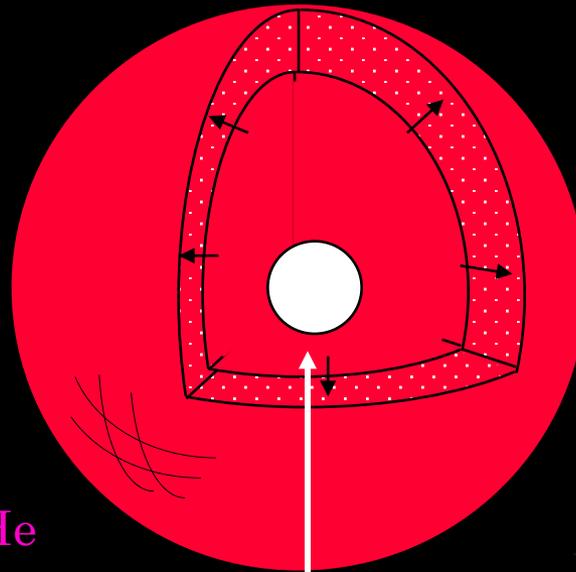


Gigante
vermelha

Fusão de H

Fusão de He

Núcleo inerte de C e O



Nebulosa
Planetária

O que resta no
centro é uma
Anã Branca

Na fase em que as reações no núcleo cessam, a queima nas camadas mais externas fica instável, e a estrela pulsa, ejetando o envelope mais externo.

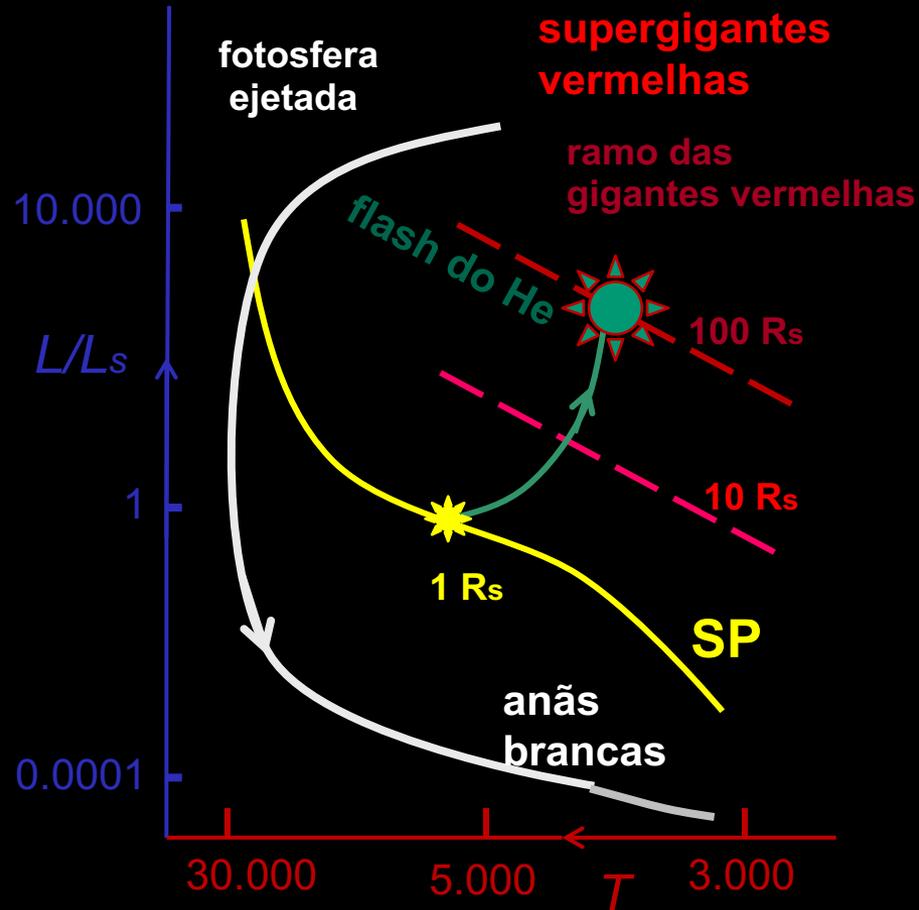
Resultado: o surgimento de uma nebulosa planetária



Nebulosa Planetária do Anel
(Constelação da Lira)

Após alguns milhões de anos no ramo das Gigantes Vermelhas, a forte radiação emanada do centro da estrela, devido à conversão de He em C, expulsa as camadas exteriores para longe. O núcleo fica exposto e ele brilha muito. Sua temperatura é alta, cerca de 100 milhões de graus, mas seu tamanho é “pequeno”, não muito maior que a Terra. Daí as estrelas nessa fase se chamarem **Anãs Brancas**. É o destino do Sol!

Saindo do ramo das gigantes: Anãs Brancas



Núcleo de Carbono, recoberto de He.

$T \sim 5.000 - 80.000 \text{ K}$

Raio \sim raio da Terra.

0.5 a 1.5 $\sim M_{sol}$;

Dens. $\sim 3 \text{ ton/cm}^3$

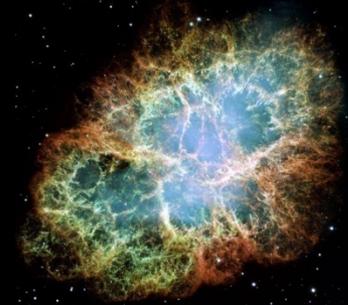
Nebulosa Planetária

Com o aumento da luminosidade, há ejeção das camadas externas:

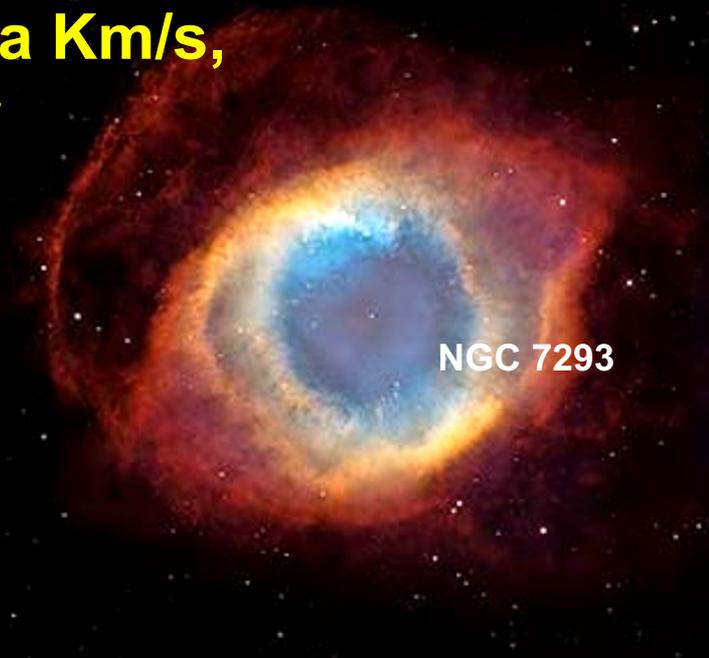
- 1- devido ao aumento de raio, que diminui a gravidade**
- 2- devido à pressão de radiação**

As camadas externas se desprendem a Km/s, e tornam-se parte do meio interestelar

Parece ter um objeto central circundado por matéria, lembrando um sistema planetário. Daí o nome Nebulosa Planetária.



M1



NGC 7293

Nebulosas planetárias

Estrelas perto do fim da vida



Hubble Space Telescope photographs of planetary nebulae. In 4.5 billion years, our Sun will become a planetary, and then become a white dwarf star. <http://hubblesite.org/>

Southern Crab Nebula
HST WFC3/UVIS

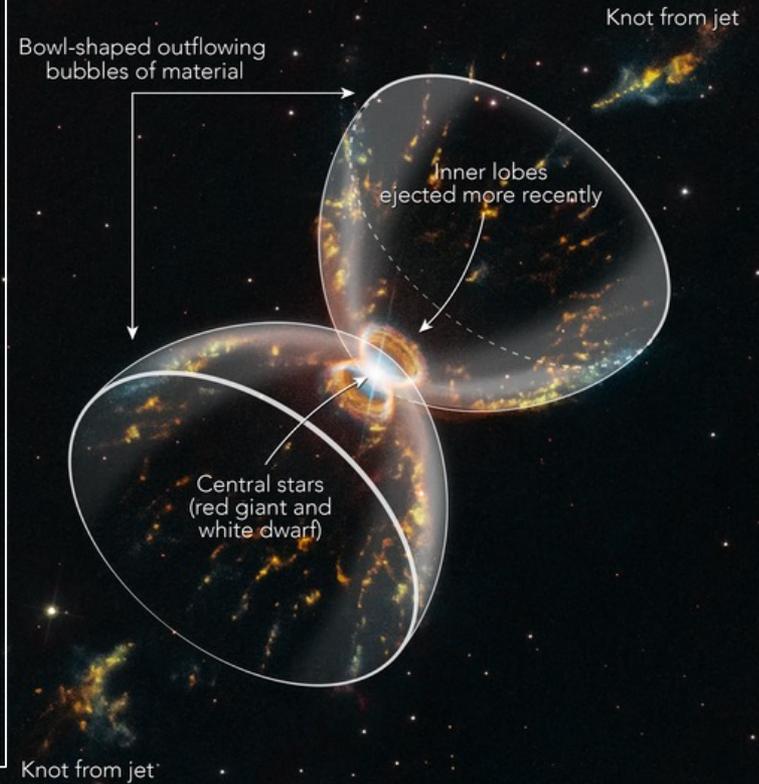
F502N
F656N
F658N
F673N

1 light-year
0.3 parsecs 30"



Tri- dimensão (Sistema Binário)

Shape of the Southern Crab



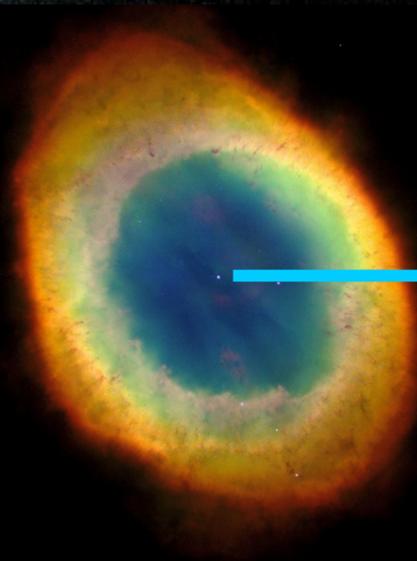
Anã Negra



Fim completo da reações de fusão nuclear:
~~morreu a estrela!~~



Ocorrem as últimas reações de fusão nuclear perto da superfície da estrela



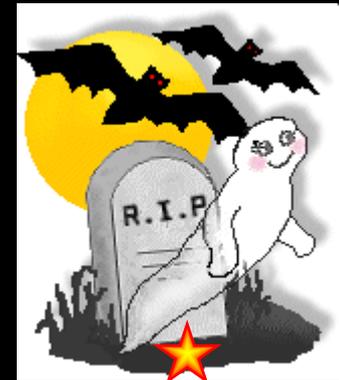
Nebulosa planetária

Anã branca

Anã negra



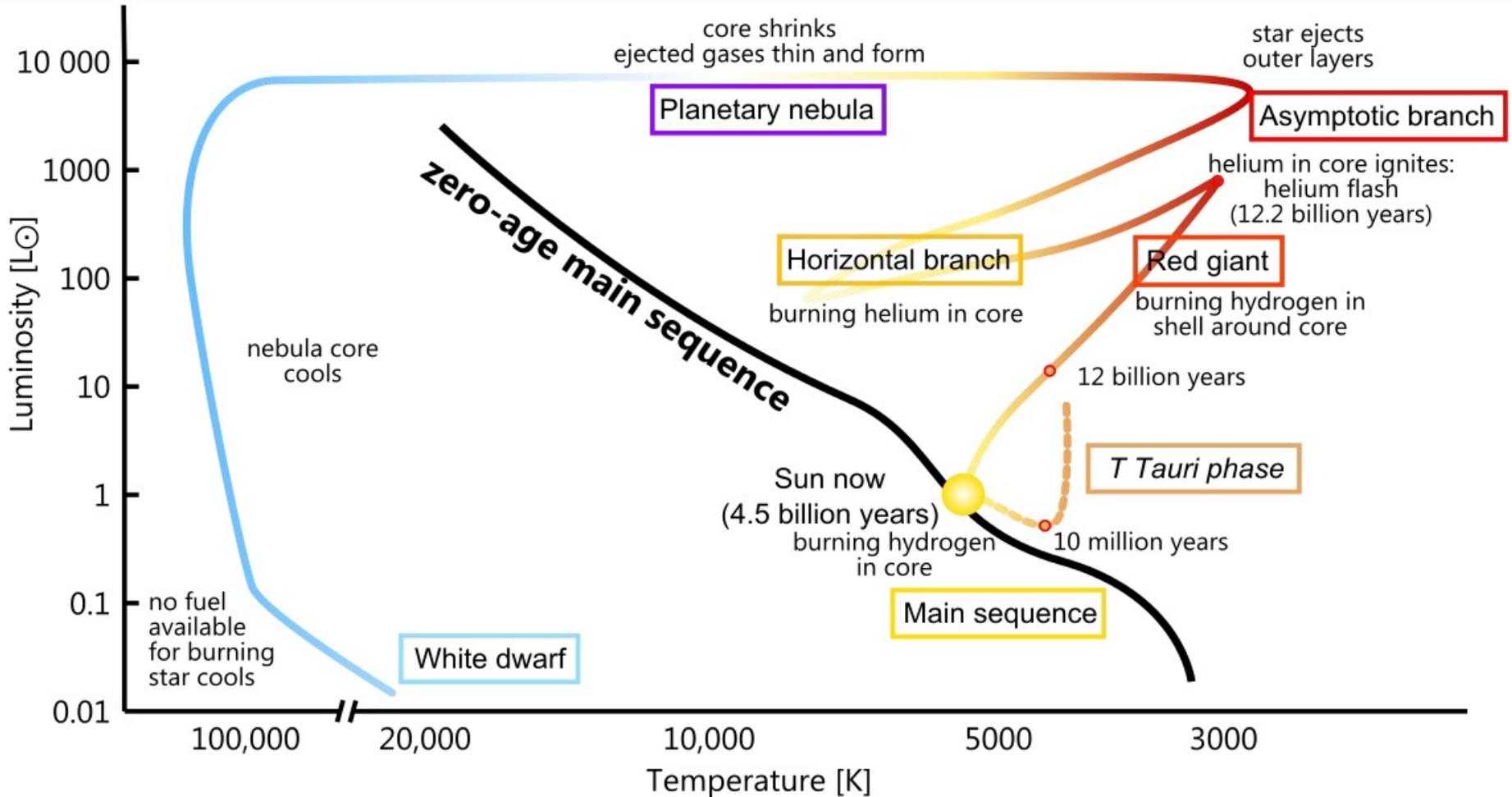
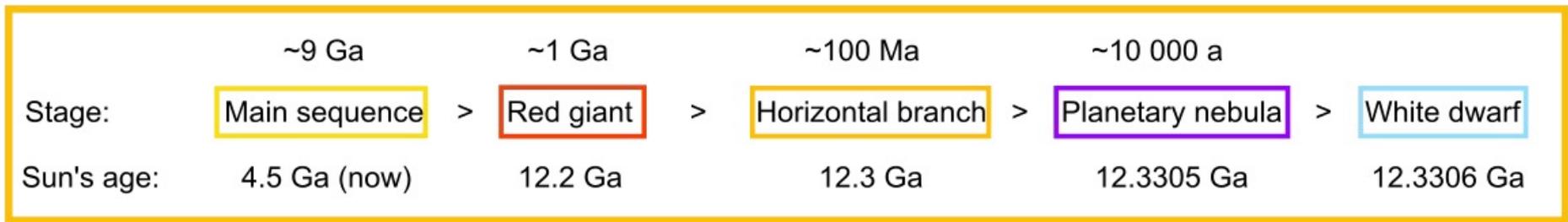
$M \approx 1.0 M_{\text{sun}}$
 $R \approx 5800 \text{ km}$
 $V_{\text{esc}} \approx 0.02c$



Evolução do Sol



Resumo esquemático da evolução do Sol



**Todas as estrelas
evoluem como o Sol ?**

Não!

Evolução de uma estrela segundo sua massa

