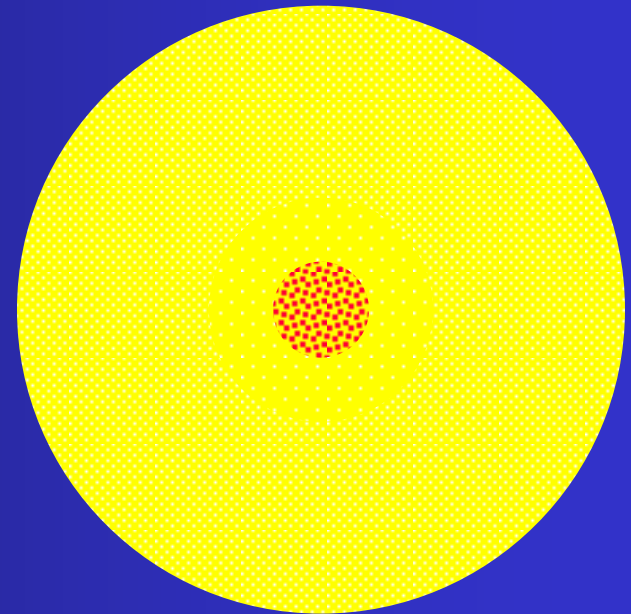


Estrelas e sua Evolução (#31)

**Jorge Meléndez, baseado
no Prof. R. Boczko**

IAG-USP

O que é uma estrela?

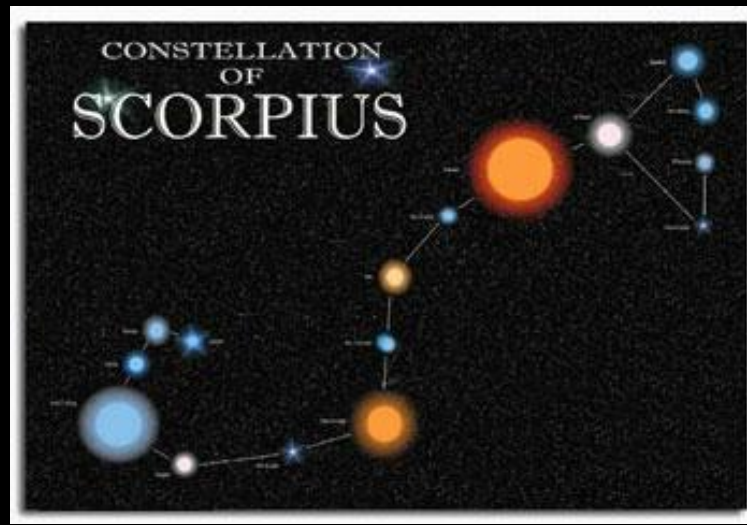


É um corpo **gasoso** no interior do qual ocorrem reações de **fusão nuclear** formando elementos mais pesados.

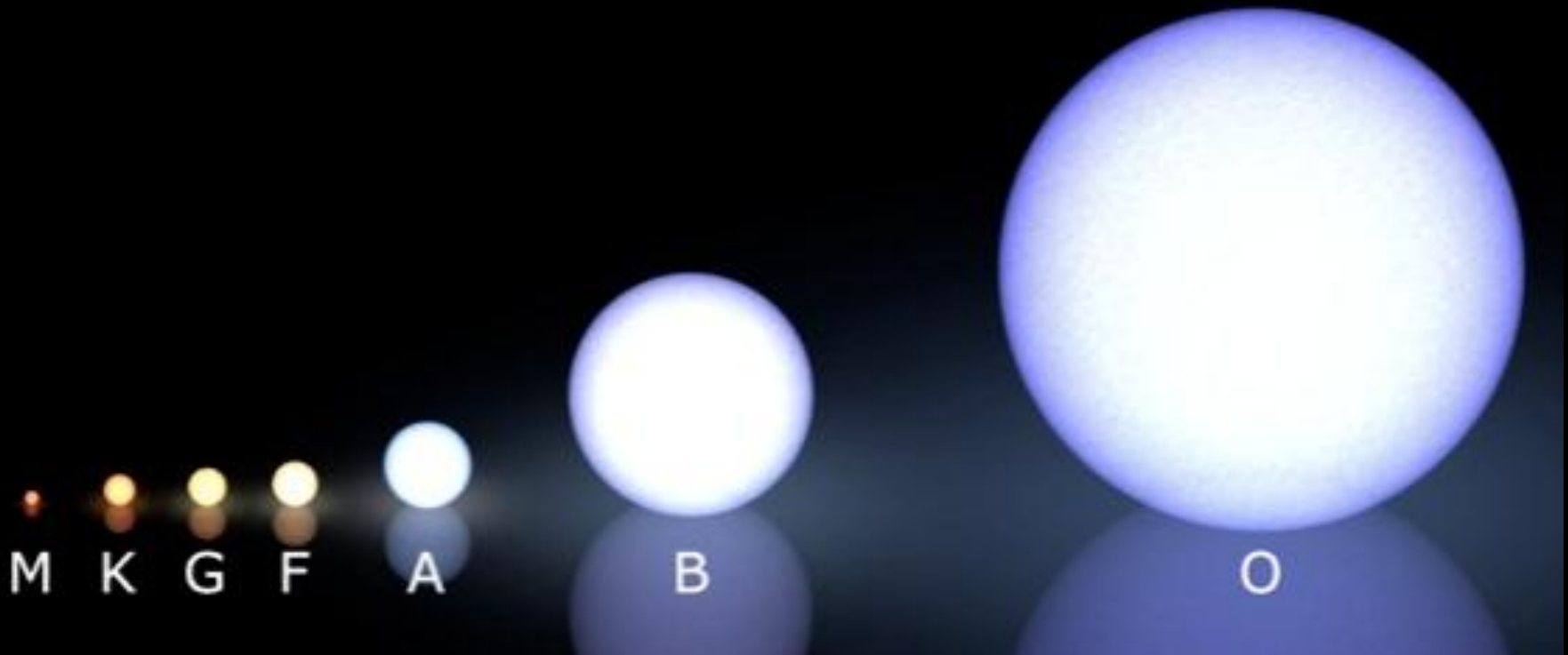
Variedade de estrelas



Variedade de estrelas



Tipos de estrelas: tamanhos relativos na fase principal da sua vida



Comparação do Sol a estrelas gigantes e supergigantes



Como classificar as estrelas ?



Como classificar as estrelas ?

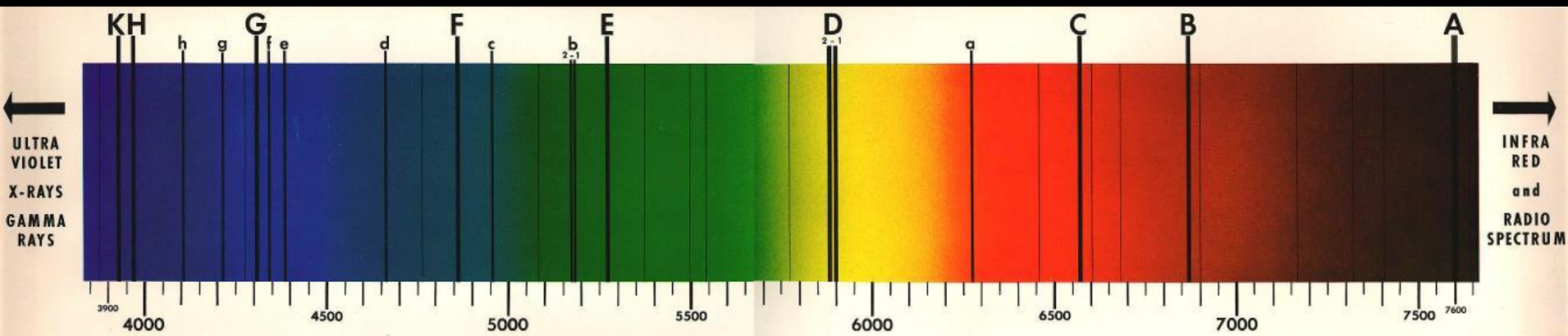
Espectroscopia: decomposição da Luz



Espectro contínuo do Sol: Newton (1643-1727)

Como classificar as estrelas ?

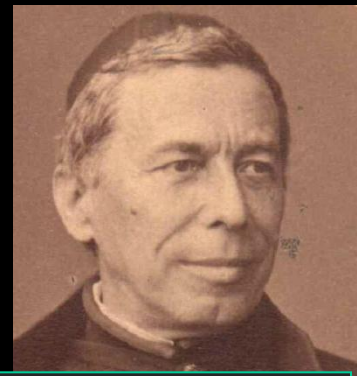
Espectro de Linhas: o DNA das estrelas



Joseph von
Fraunhofer (1787-1826)



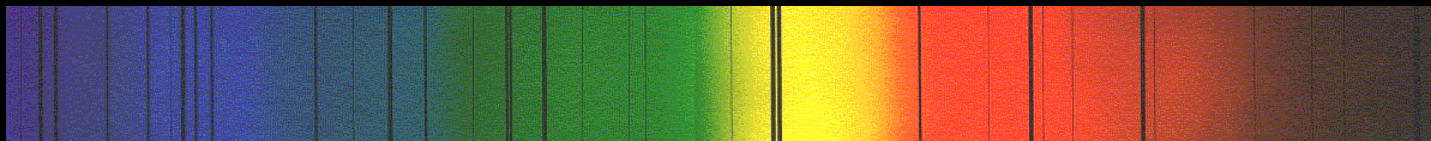
Classificação de estrelas



Padre Angelo Secchi (1860-1870): 3 tipos

- **Tipo I: branco-azul**
moderna classe A & F "cedo"
- **Tipo II: amarelas**, de tipo solar
atual classe G, K, F tardio
- **Tipo III: laranja-vermelho**,
moderna classe M

Outros tipos foram incluídos depois



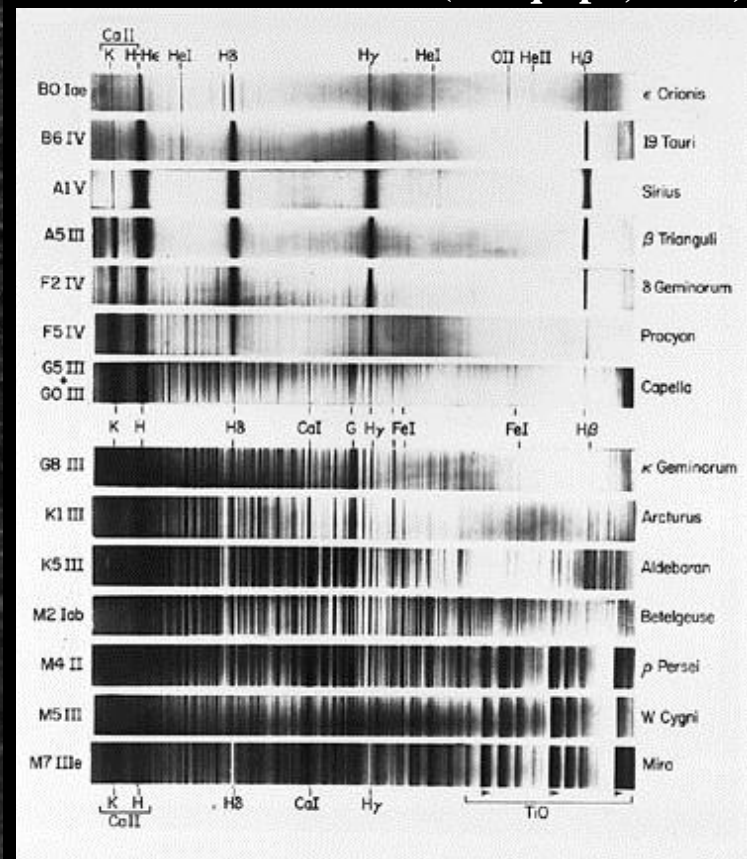
O sistema de classificação de Harvard

1890-1900s: classificação de Harvard (E. Pickering + Williamina Fleming + Antonia Maury + Annie J. Cannon):

O, B, A, F, G, K, M

Mulheres astrônomas @ Harvard

Baseado em espectros das estações Harvard N. & S. (Arequipa, Peru)



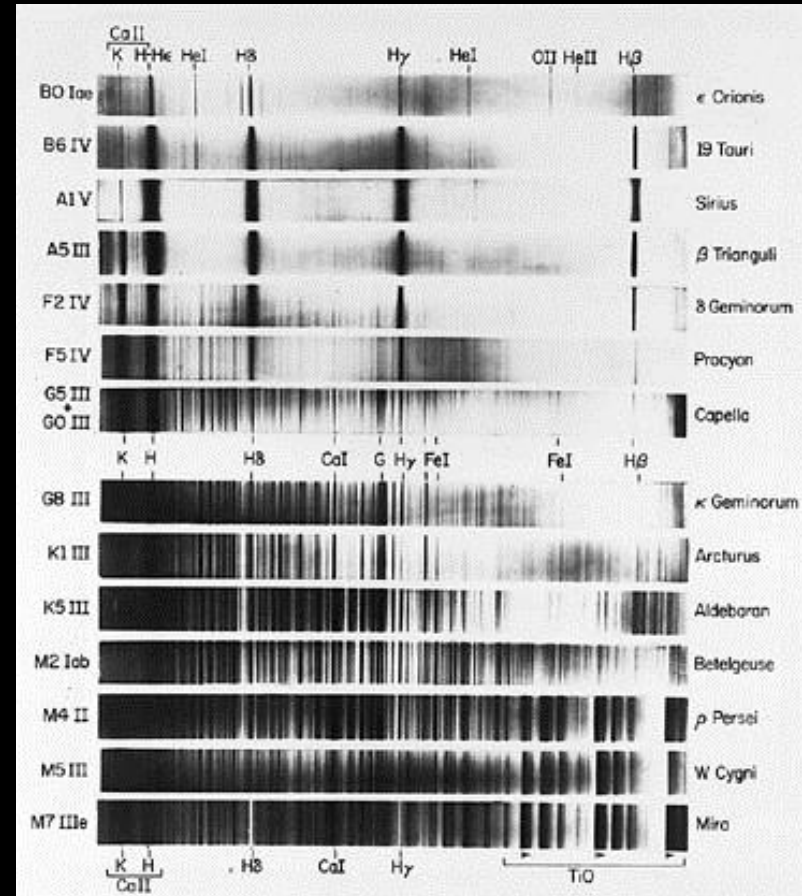
Classificação espectral de estrelas

Annie J. Cannon (1863-1941) classificou mais de 250 000 espectros!

*Refinou o sistema de classificação com sub-classes
(por exemplo, A0, A1, ... A9)*



Catálogo HD: baseado em espectros estelares obtidos em Harvard (EUA) e Arequipa (Peru)

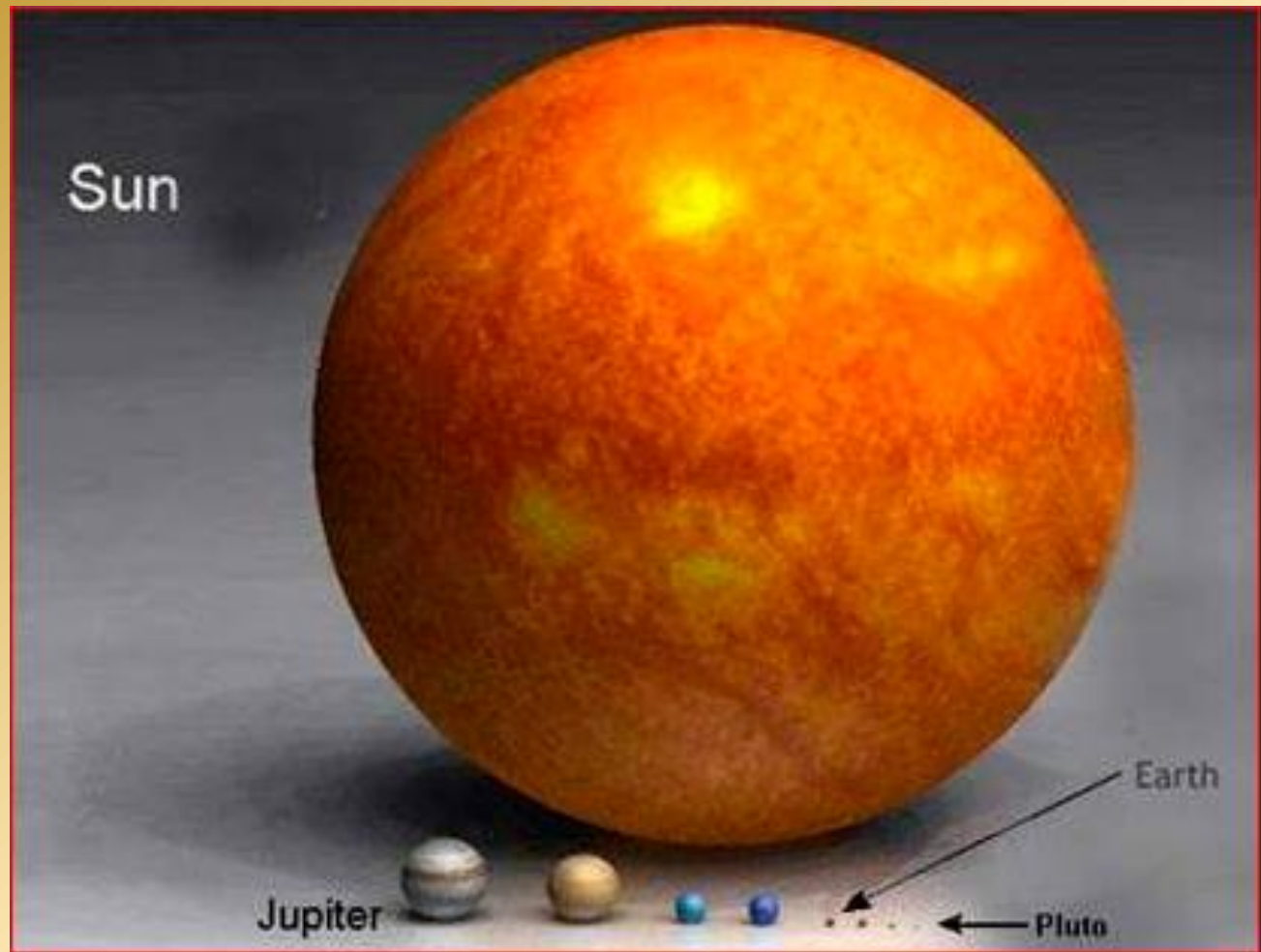


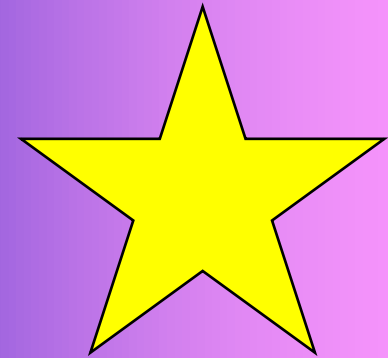
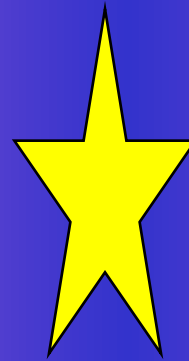
Massa das estrelas

SOL

Raio: 700 mil km

**Massa: 2×10^{30} Kg
(330,000 Terra)**





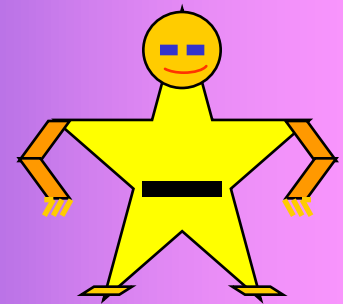
Classificação de estrelas segundo sua massa



Baixa massa
< 8 Massas solares



Massa intermediária
~ 8-25 M Sol



Alta massa
> 25 M Sol

Nascimento,

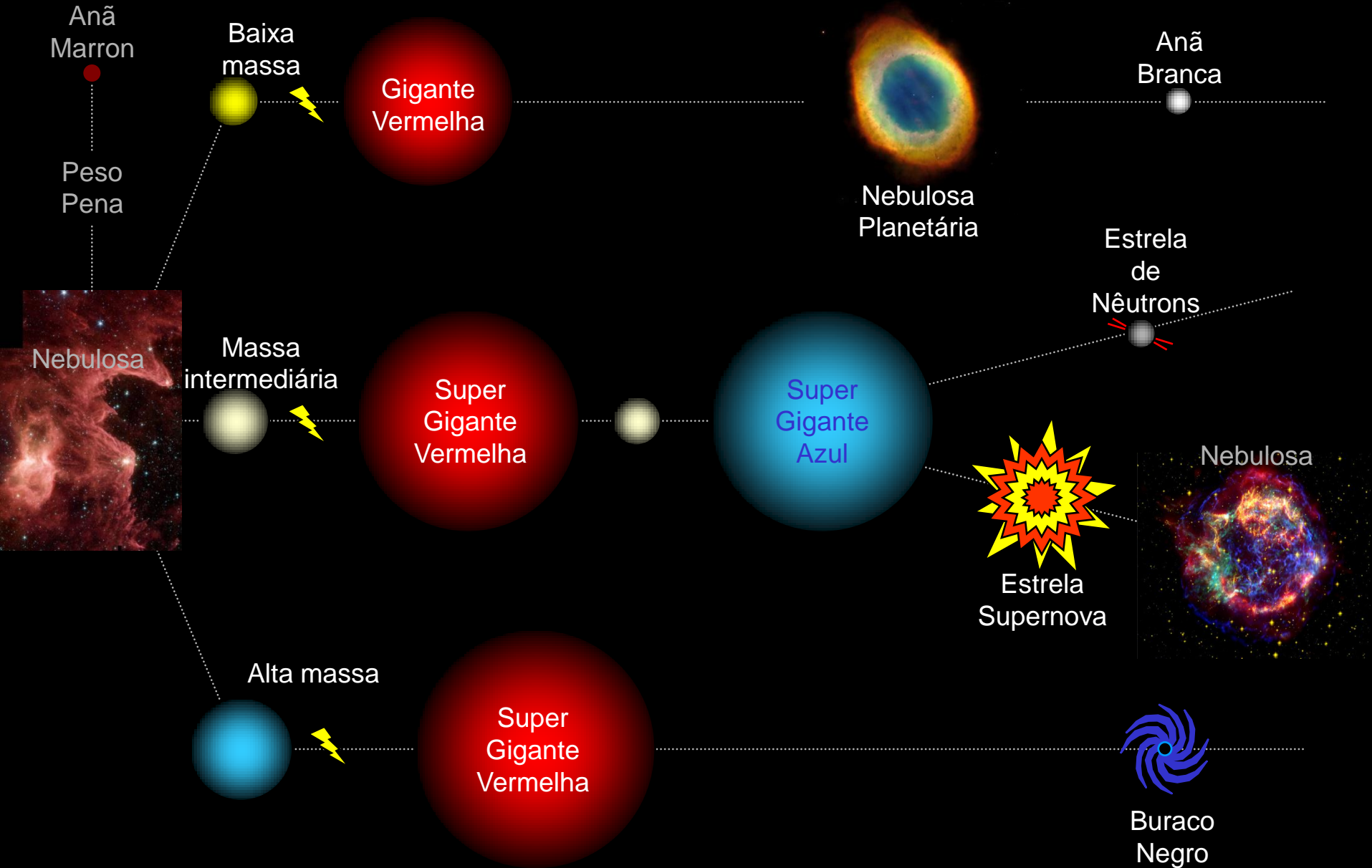
Vida e

Morte de

Estrelas



Evolução de uma estrela segundo sua massa



Estrela de
Massa intermediária

Reações
de fusão
nuclear

Super
Gigante
Vermelha

Super
Gigante
Azul

Super
Gigante
Azul

Estrela
Supernova

Nebulosa
enriquecida

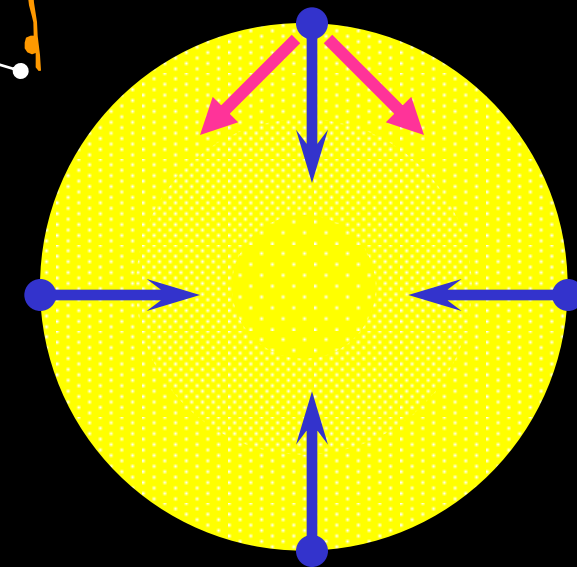
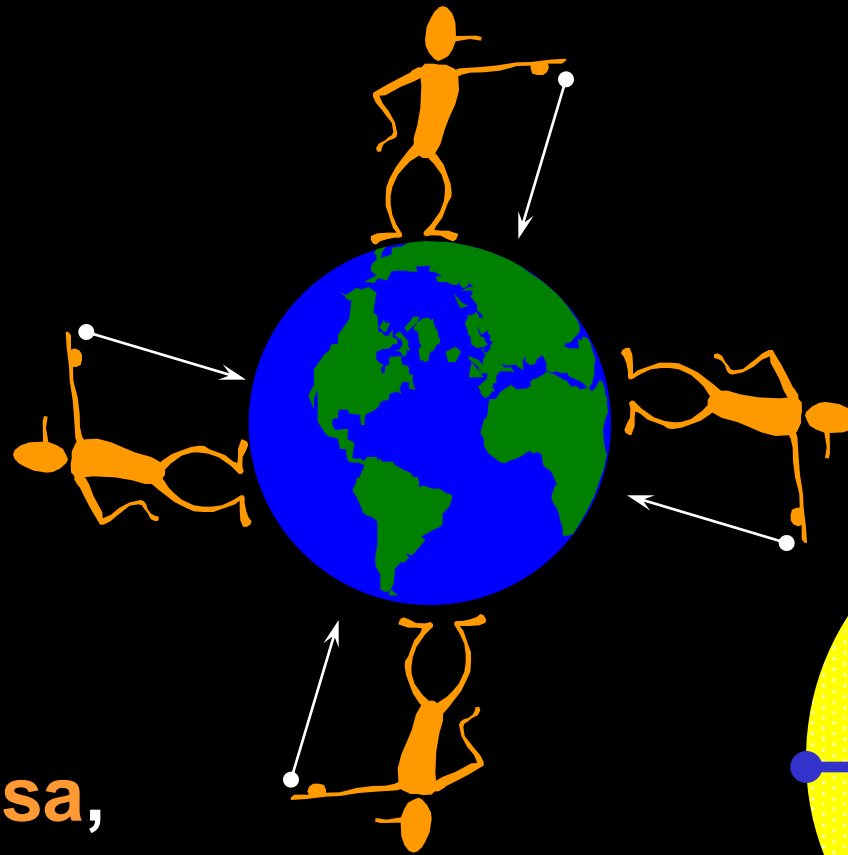
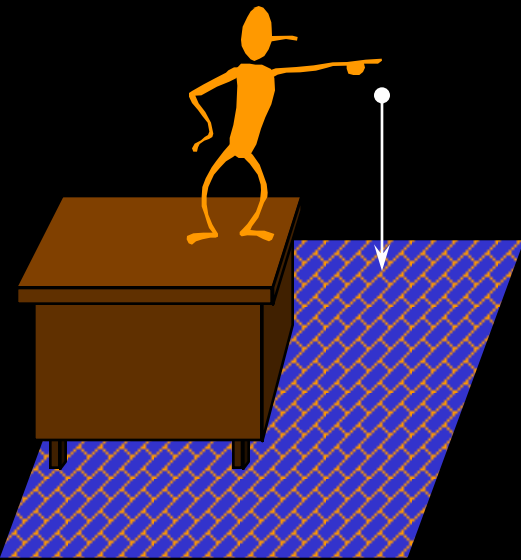
Nebulosa
primordial

Reciclagem de estrelas



**Como se formam
as estrelas?**

Pressão gravitacional



Existindo **massa**,
existe atração
gravitacional

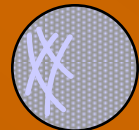
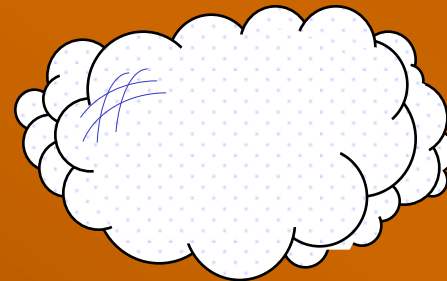
Contração gravitacional de uma nebulosa



Lei da atração gravitacional



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



A forma geométrica de menor energia é a esfera.

Possíveis causadores da contração gravitacional da nebulosa

Causas internas

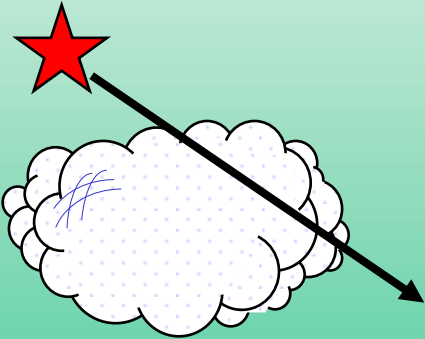
(Colapso espontâneo)



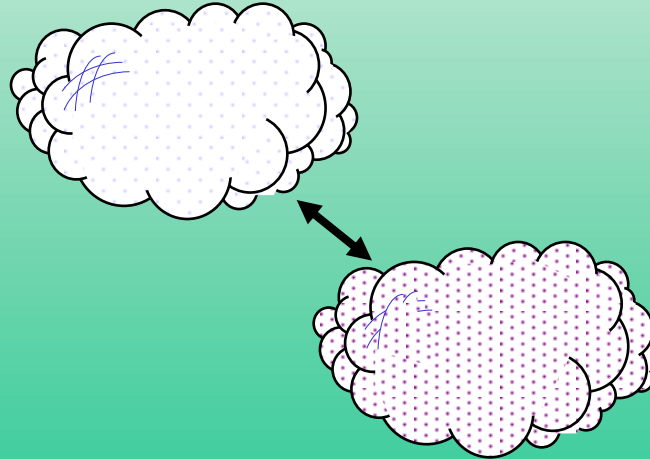
Autogravitação

Causas externas

(Colapso forçado)



Interação com uma estrela em passagem



Interação entre duas nebulosas



Ondas de choque provocadas por uma supernova



**Onde
nascem
as
estrelas?**

Nebulosa escura



Extinção interestelar



Foto no visível

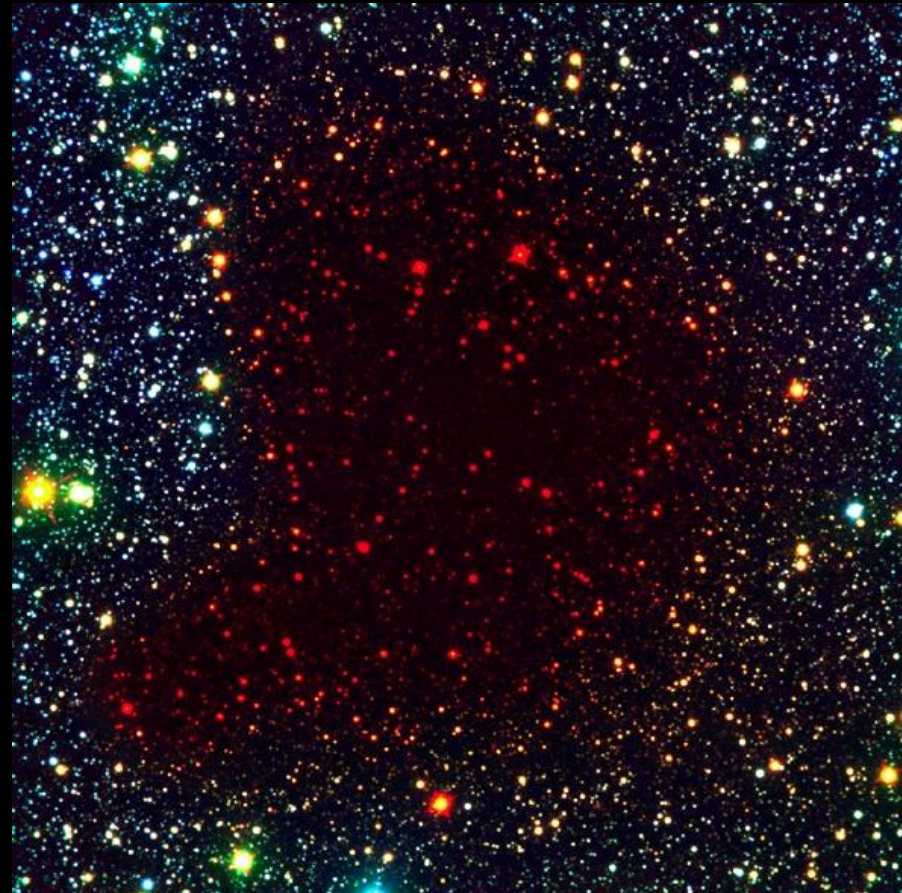


Foto no visível + infra-vermelho



**Nebulosa Escura
Cabeça do Cavalo
em Orion**

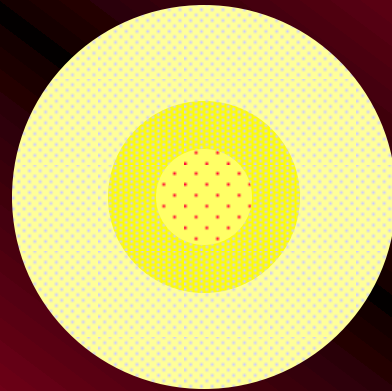
Proto-estrelas (NGC 2237)



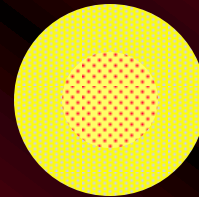
**De proto-estrela
à estrela**

Gestação de uma estrela

Nebulosa inicial



Emissão de energia térmica



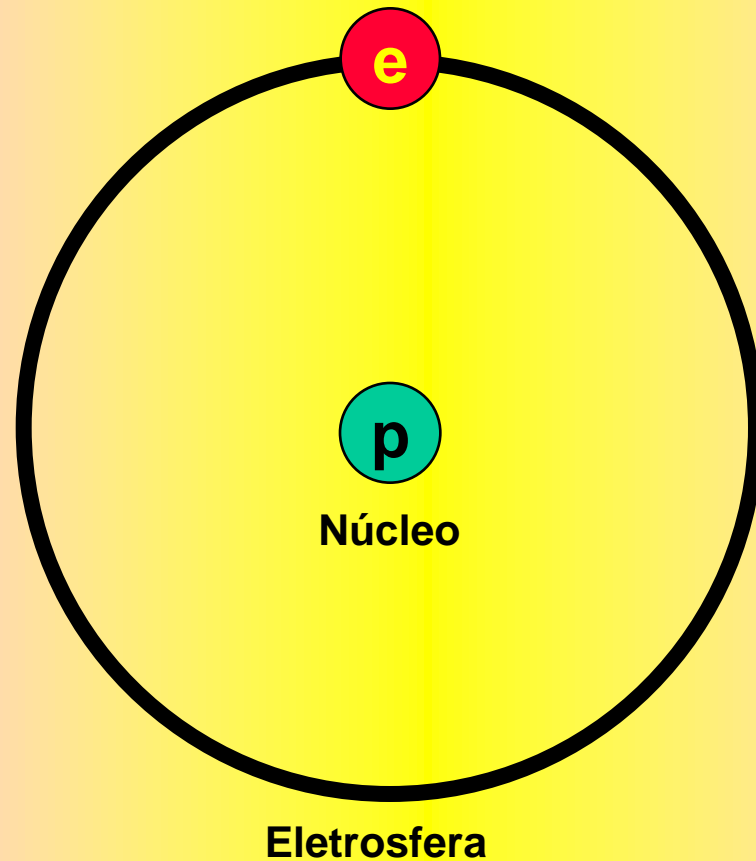
?

Modelo de representação de alguns átomos

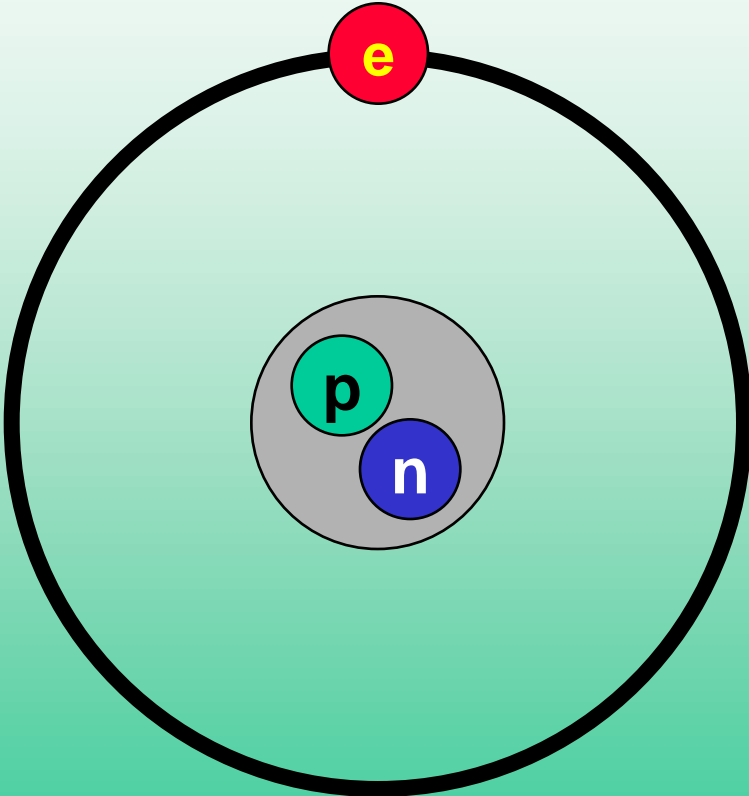


Modelo atômico

Átomo de Hidrogênio

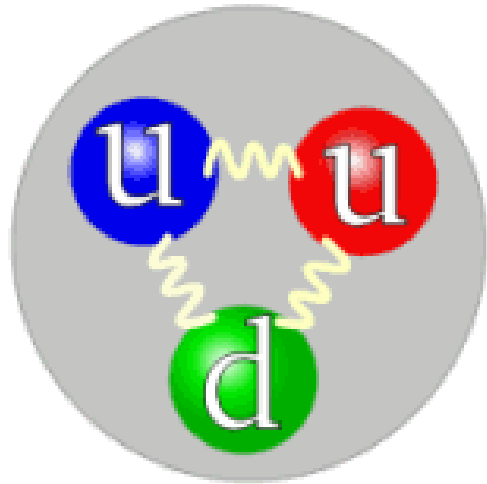


Deutério



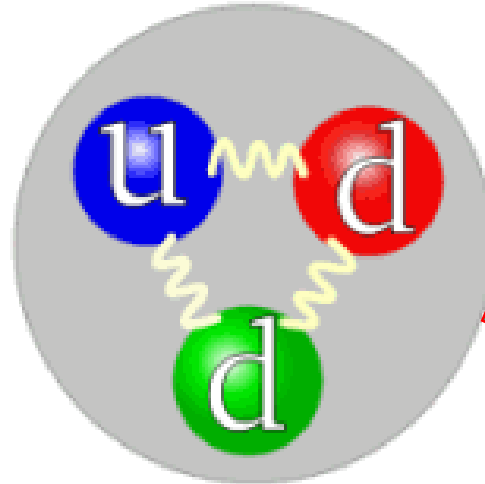
Próton e nêutron: são formados por quarks “u”e “d”

PRÓTON



Proton

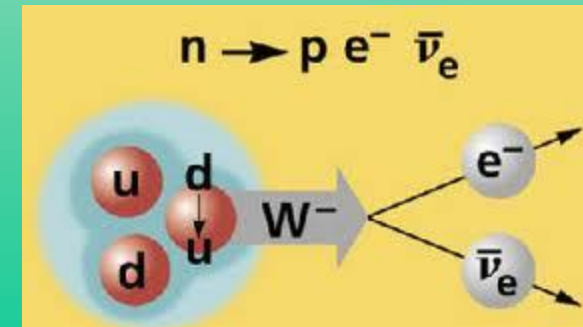
NÊUTRON



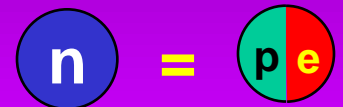
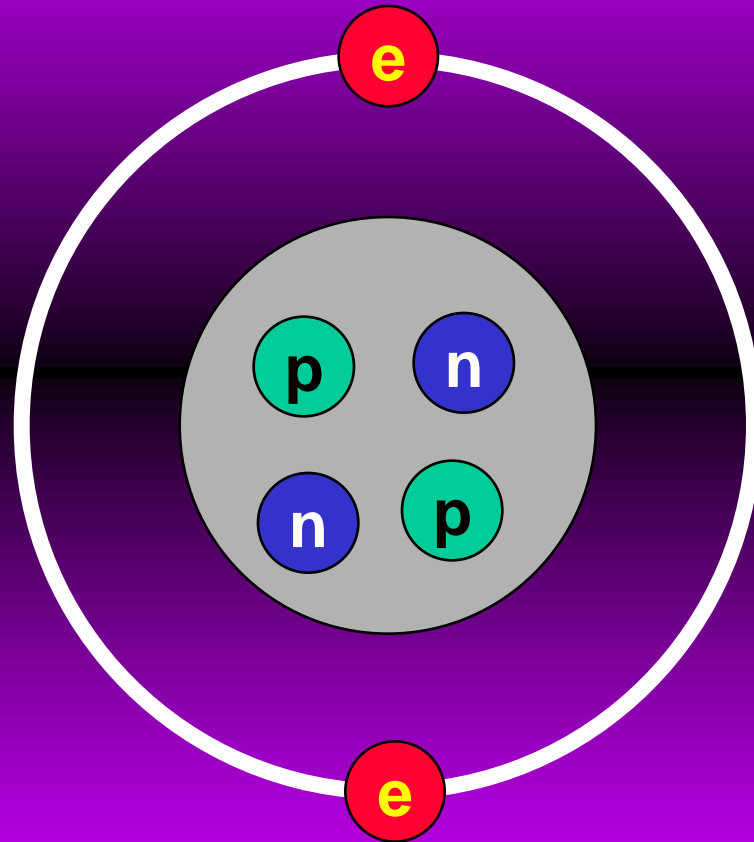
Neutron



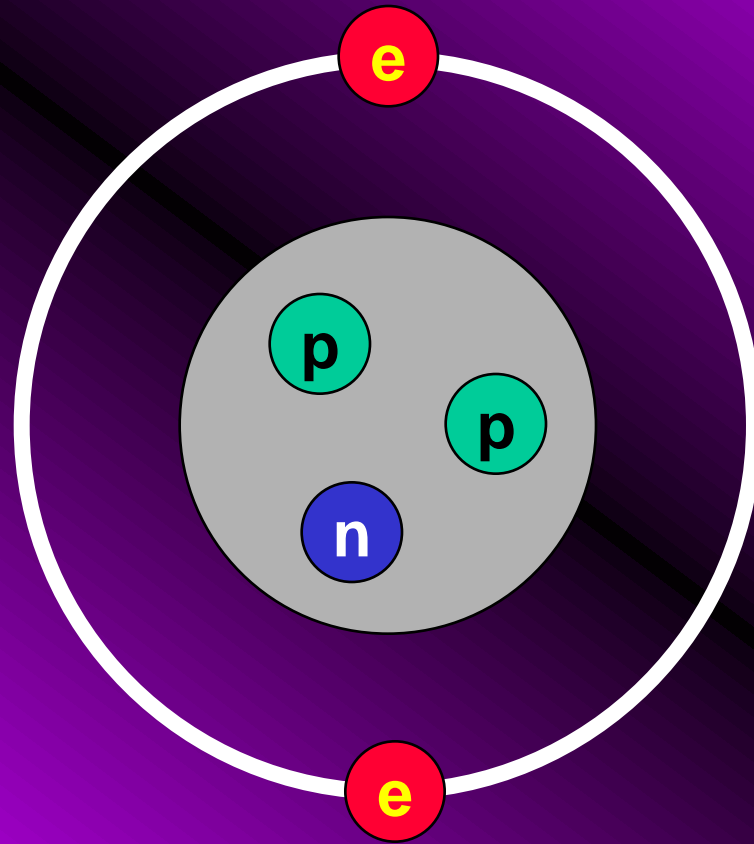
Quark composition of a proton and a neutron (diagrams from *Wikipedia*)



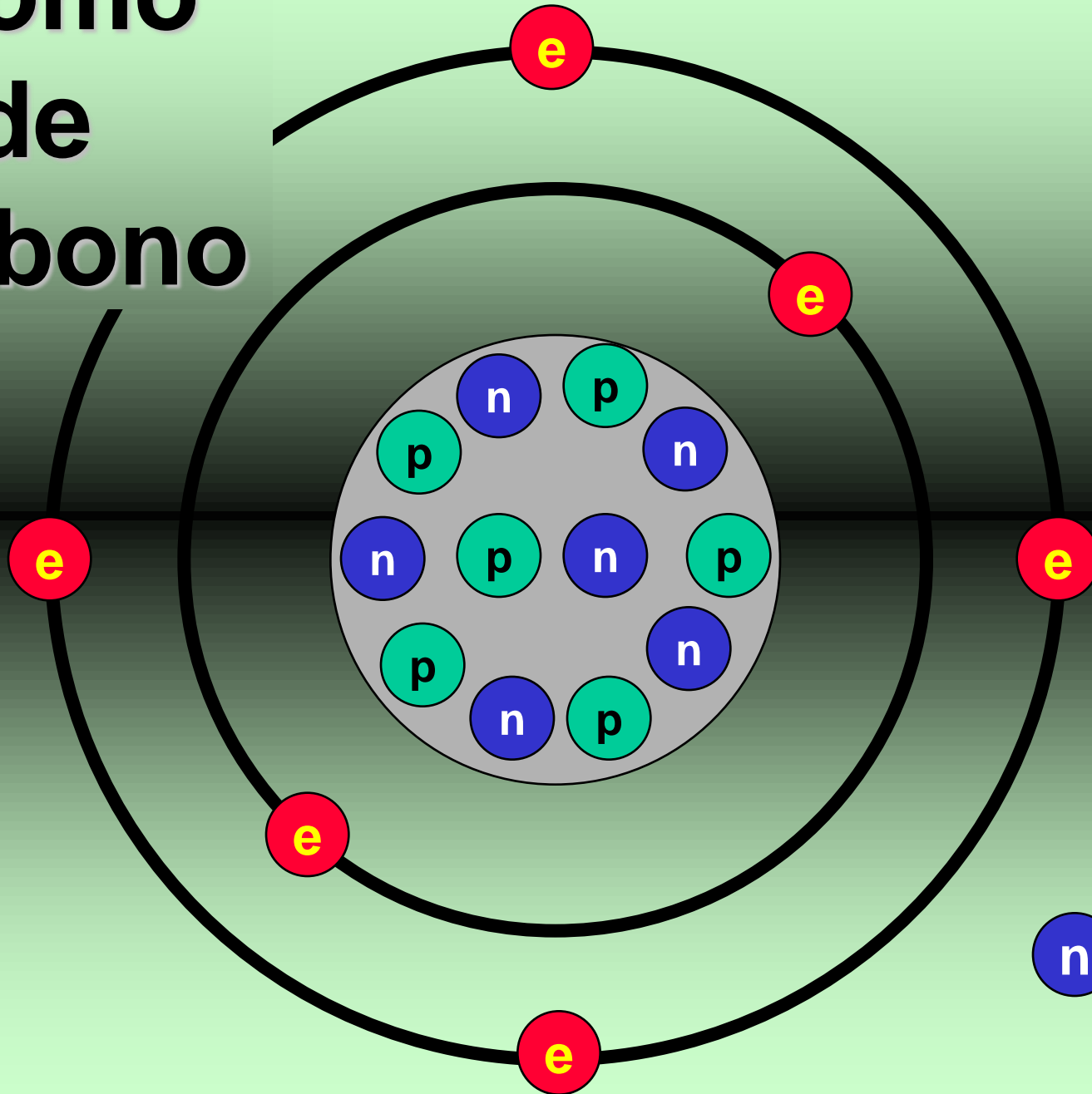
Átomo de Hélio 4



Átomo de Hélio 3

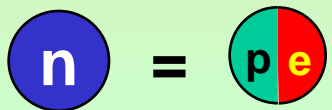
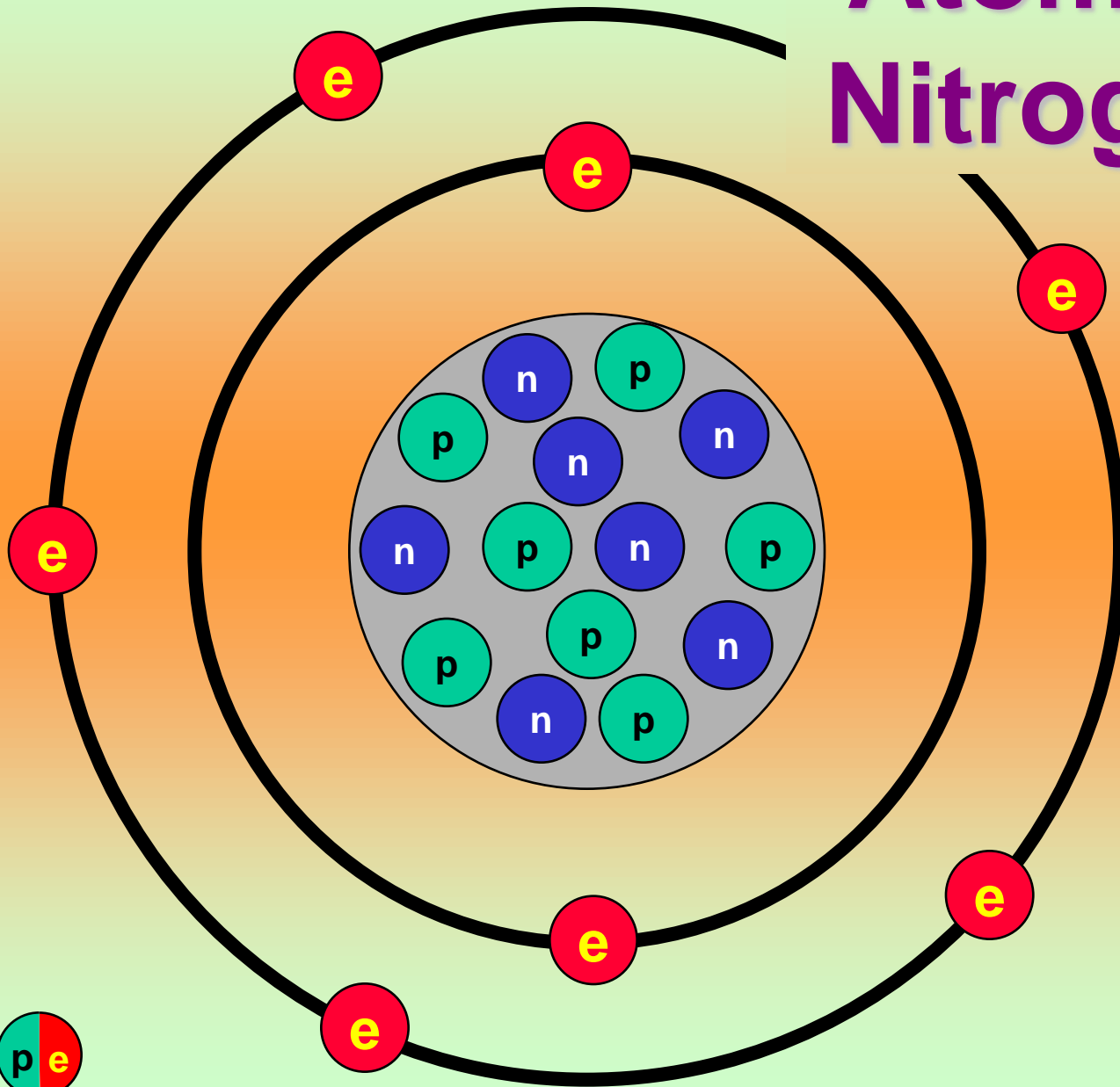


Átomo de Carbono

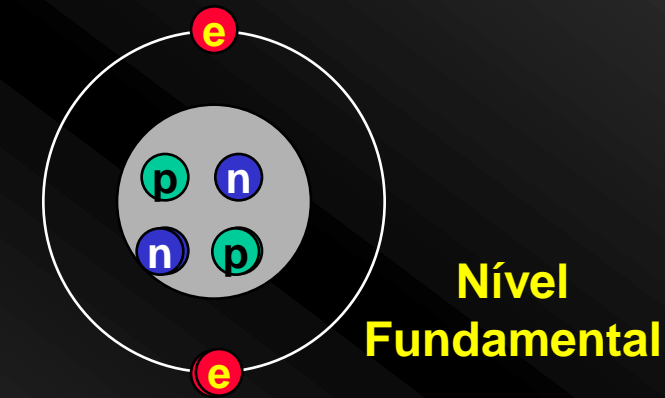


$$n = \begin{matrix} p \\ e \end{matrix}$$

Átomo de Nitrogênio

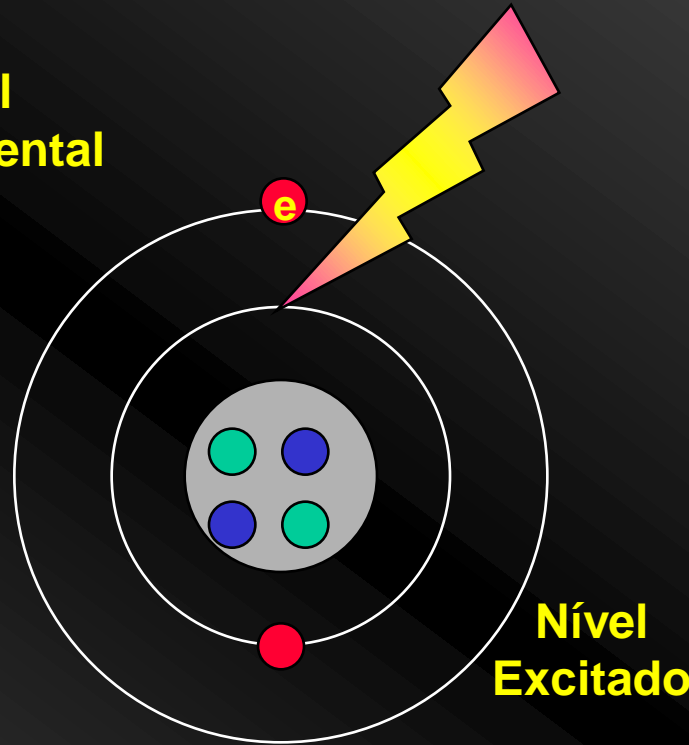


Átomos e Íons



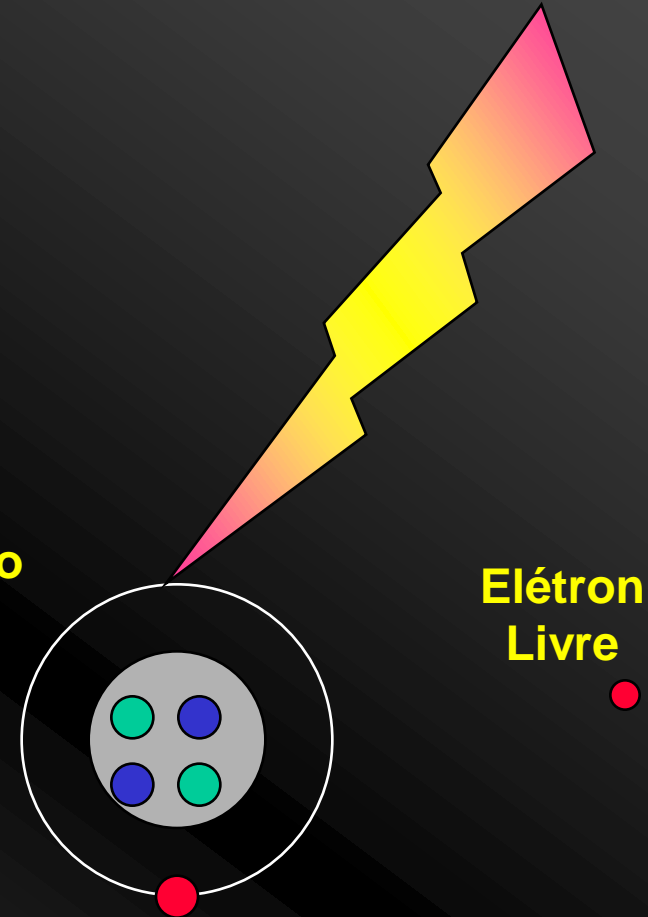
Átomo neutro

$$N_p = N_e$$



Átomo excitado

$$N_p = N_e$$



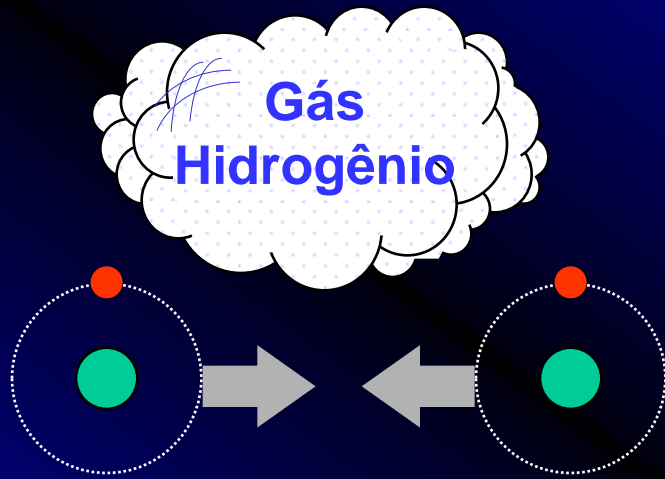
Íon = Átomo ionizado

$$N_p \neq N_e$$

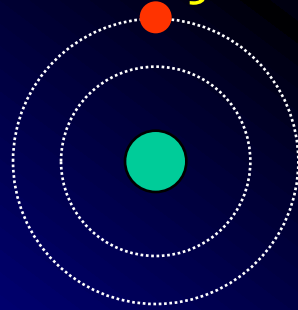
Convenção

- Próton +
- Nêutron
- Elétron -

Aquecimento da proto-estrela



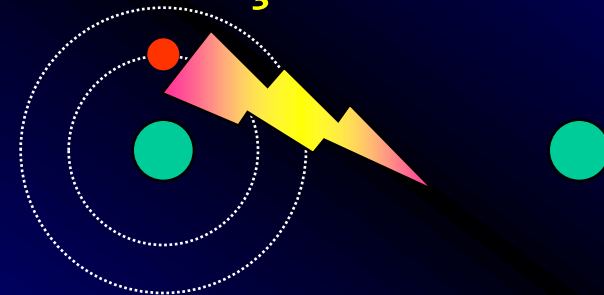
Excitação



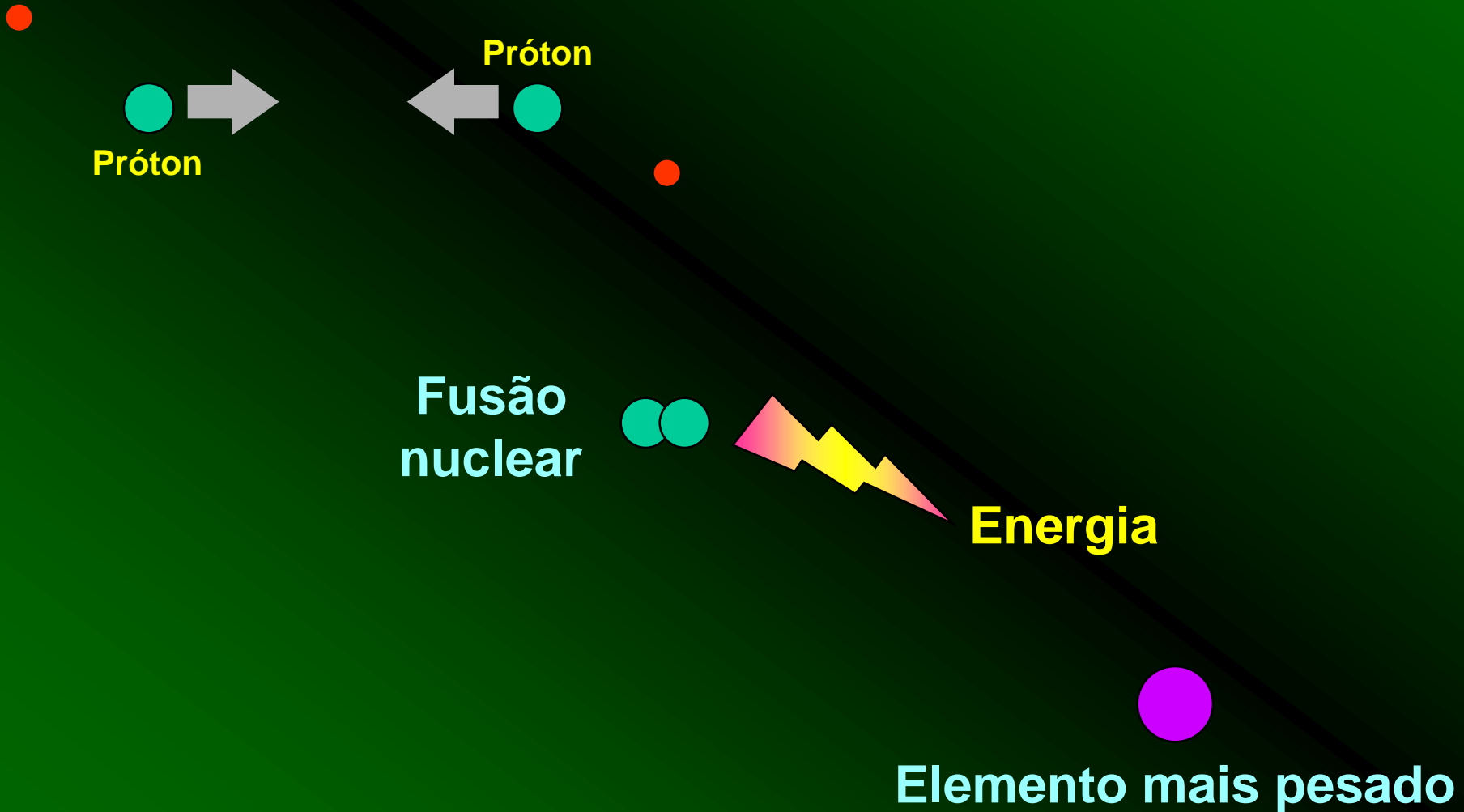
Ionização



Desexcitação

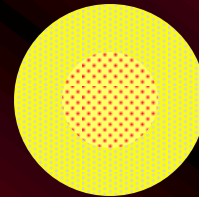
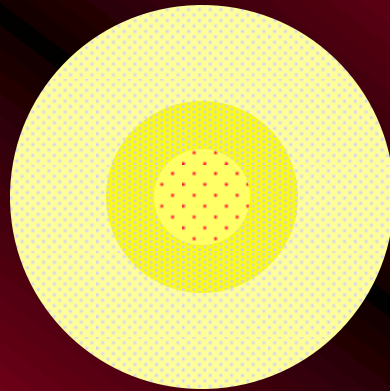


Fusão nuclear



Nascimento de uma estrela

Nebulosa inicial



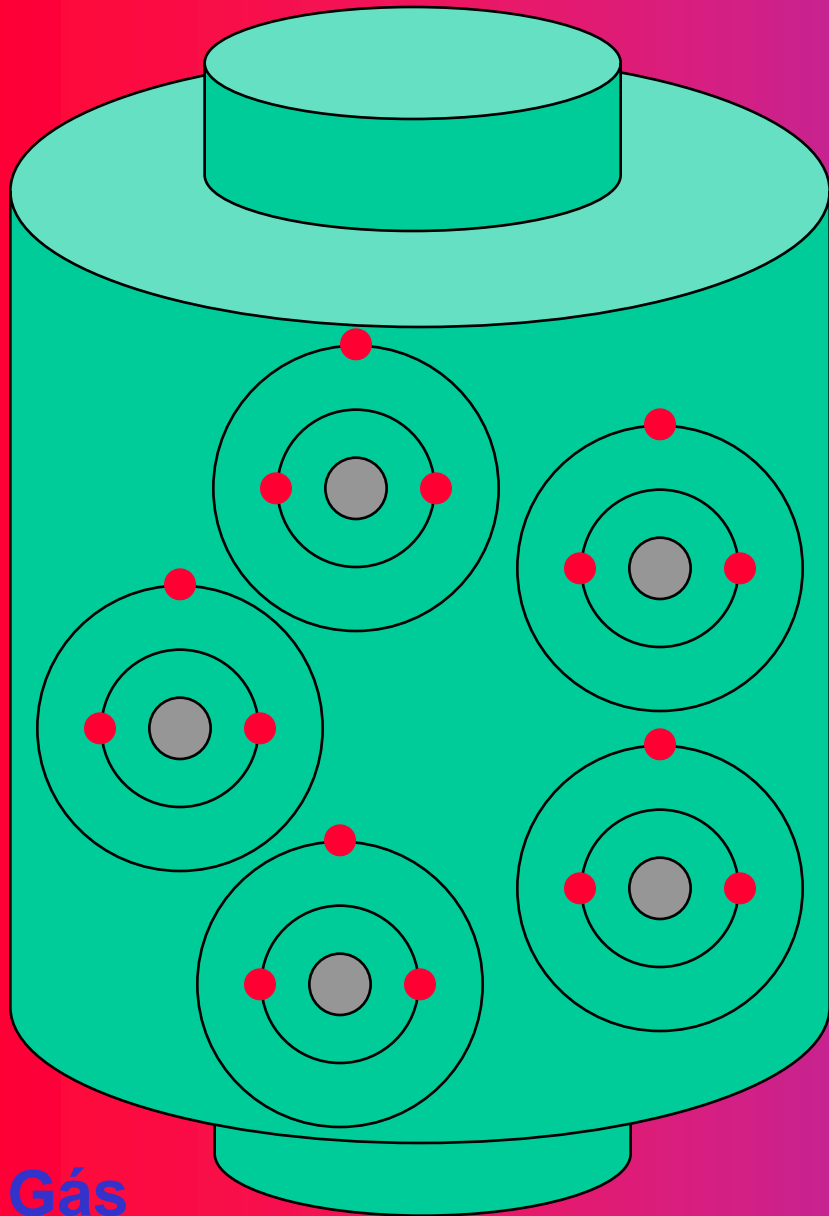
Início das
reações de
Fusão Nuclear

Nasceu a estrela !

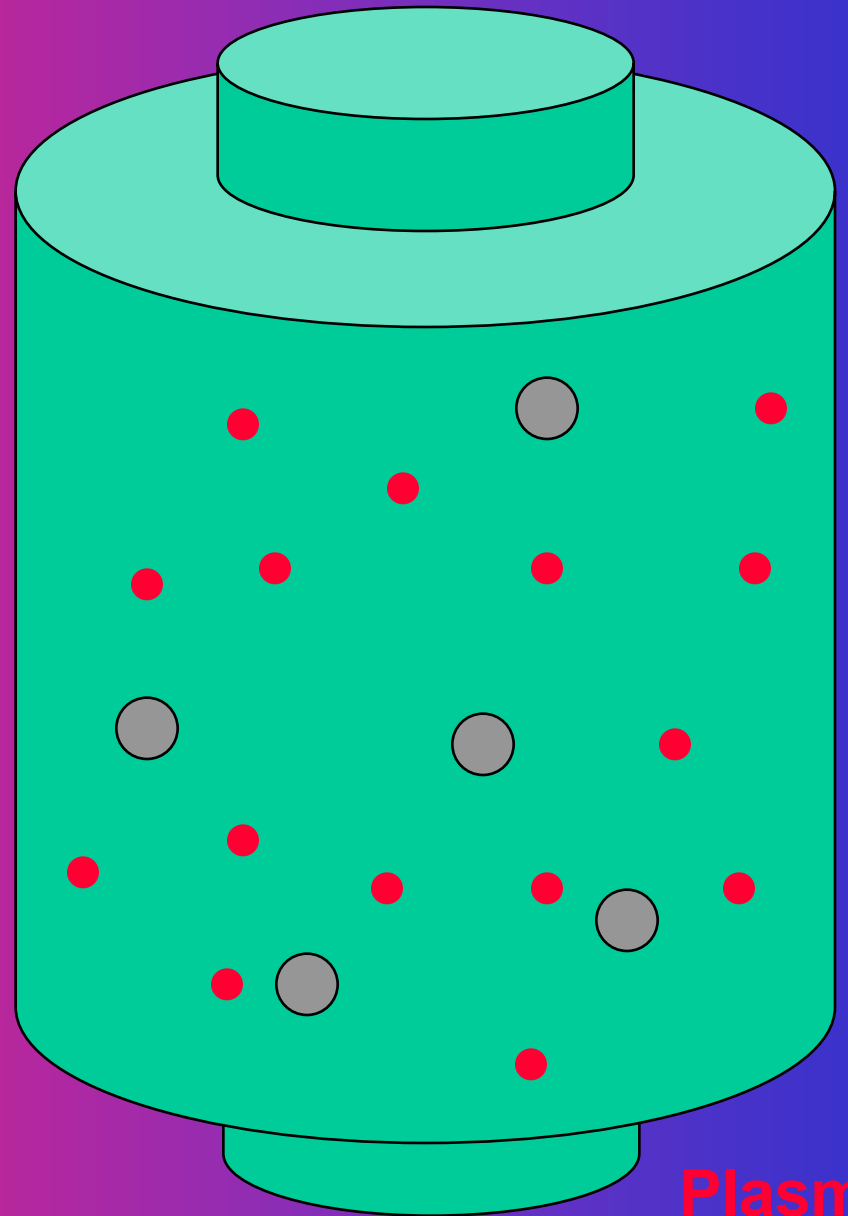
**O que há no
interior de
uma estrela?**



Gás e Plasma

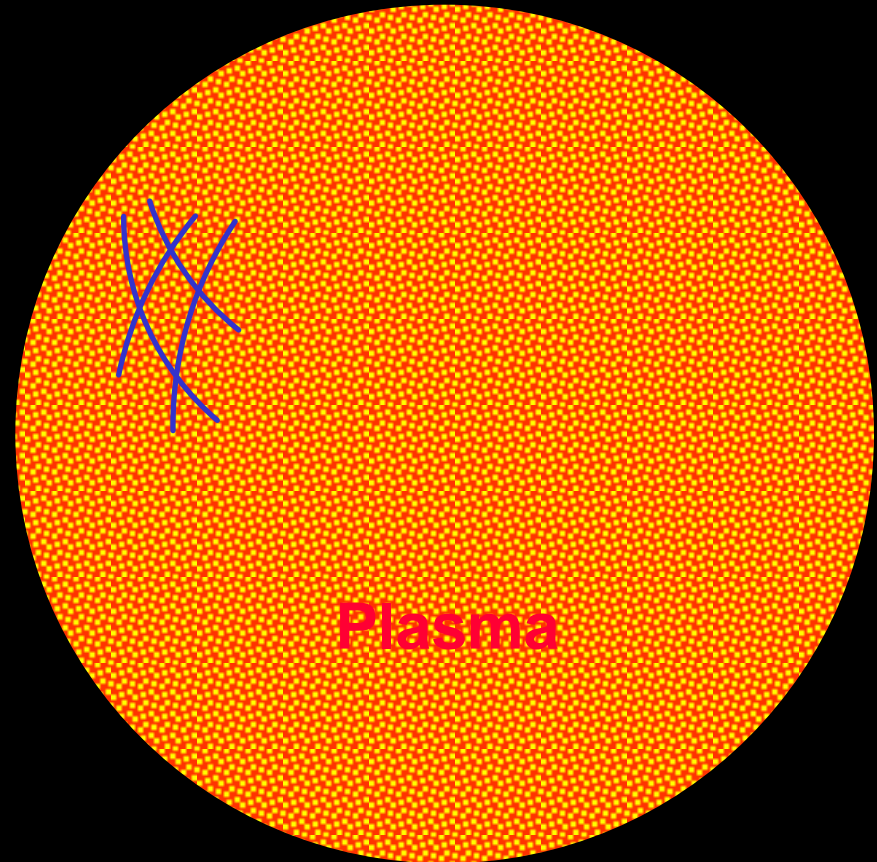
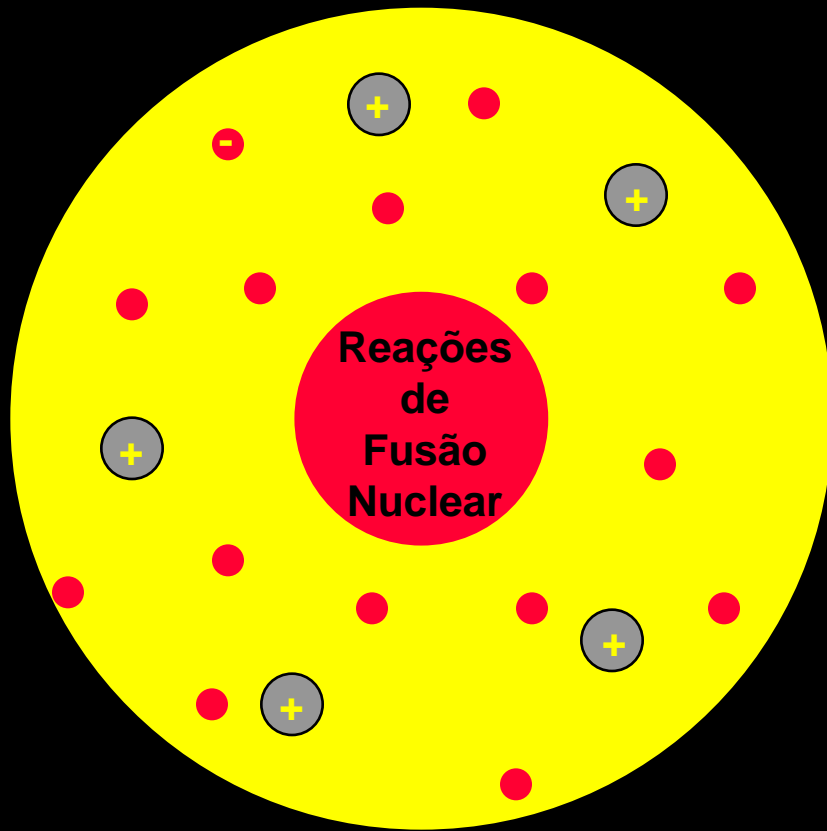


Gás



Plasma

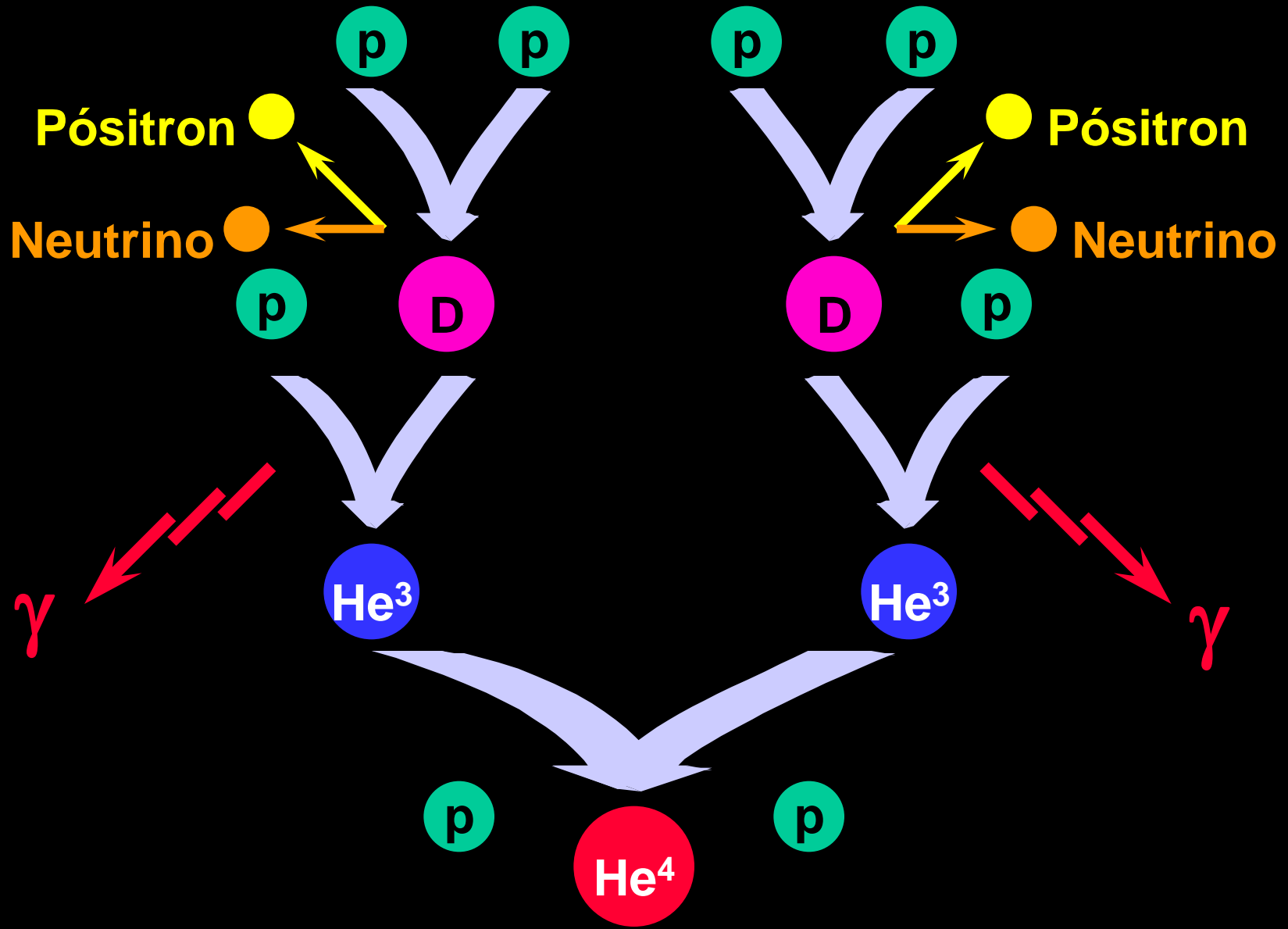
Estrela: corpo plasmático



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

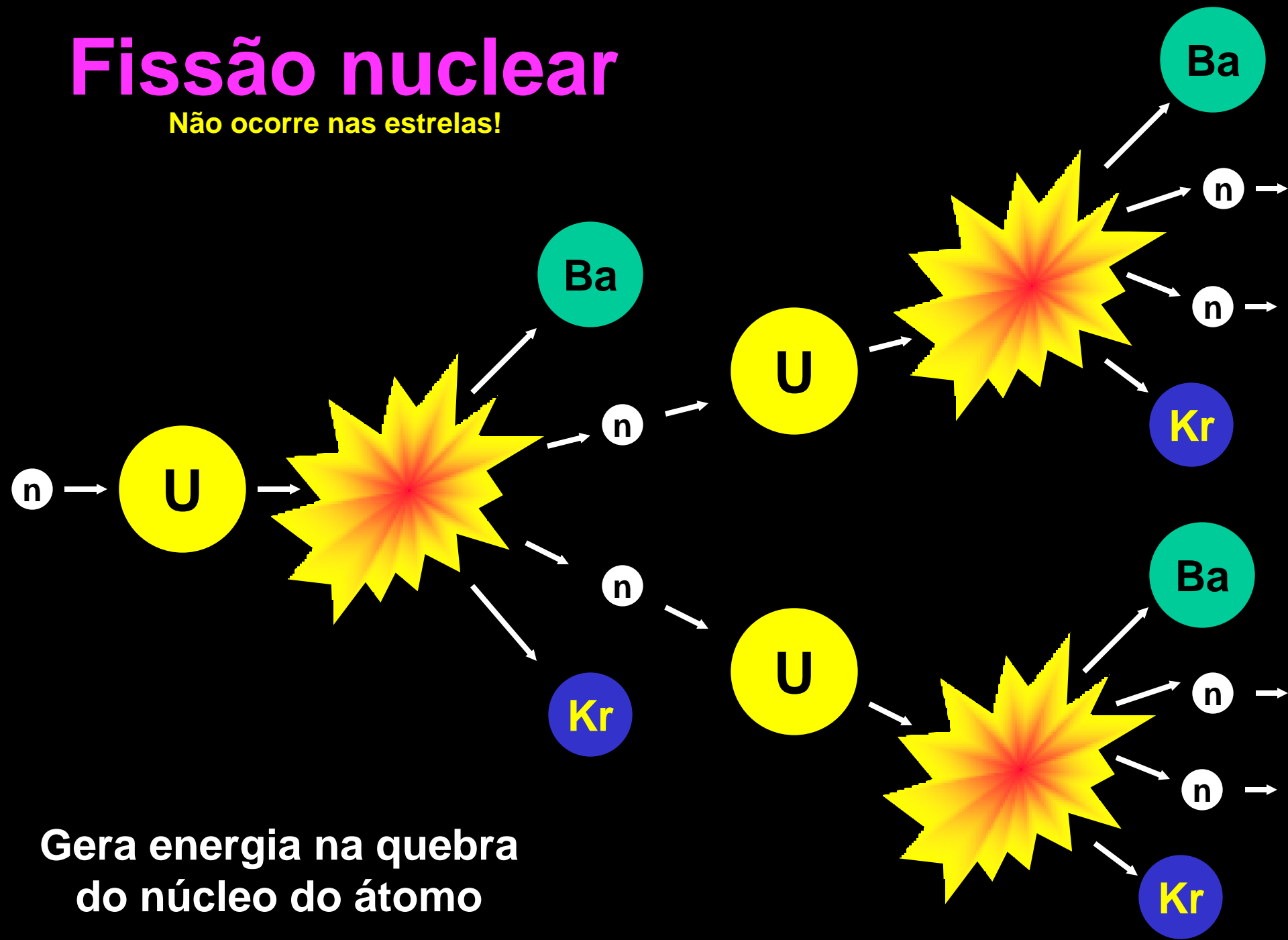
**Como é gerada a
energia no interior de
uma estrela?**

Fusão do hidrogênio

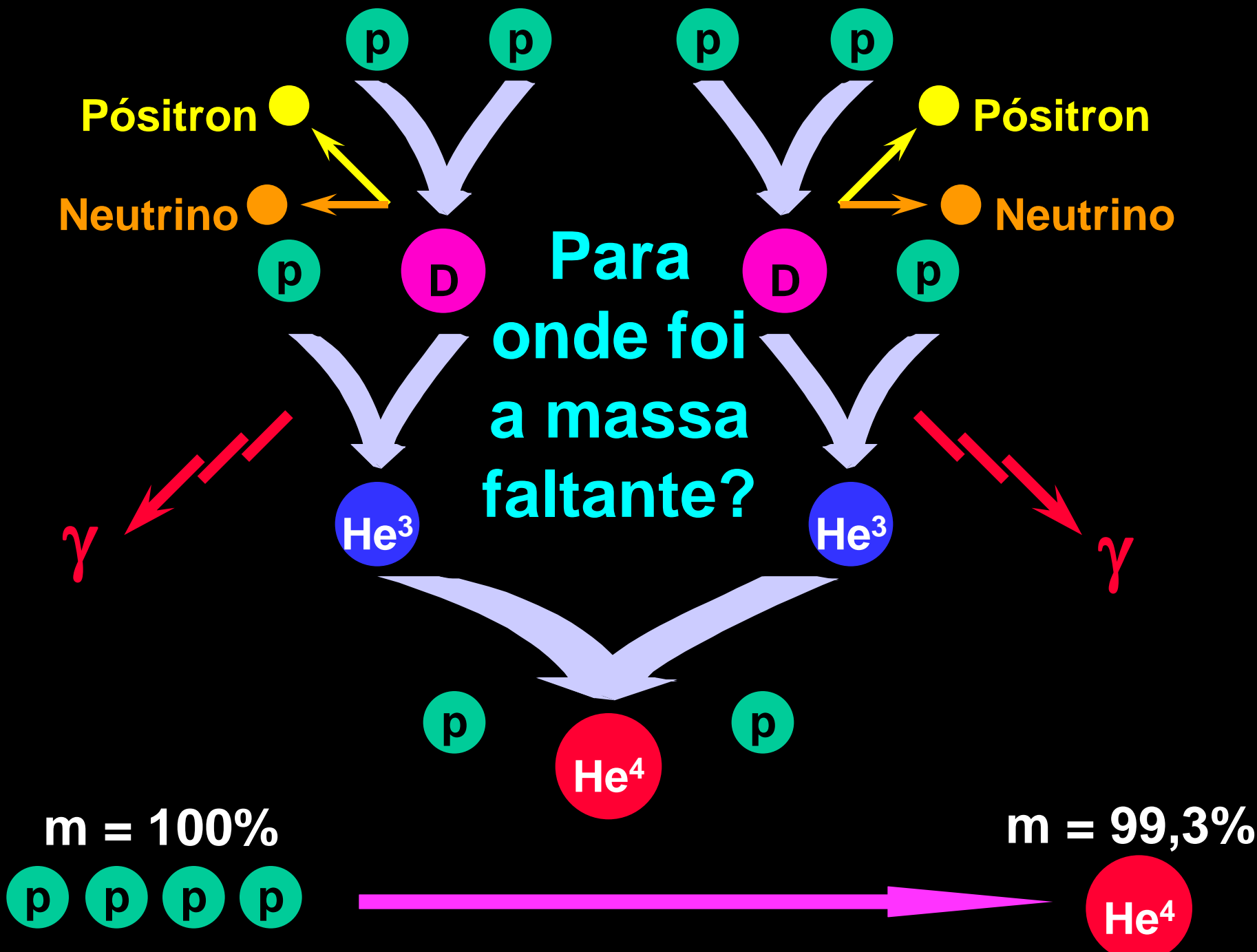


Fissão nuclear

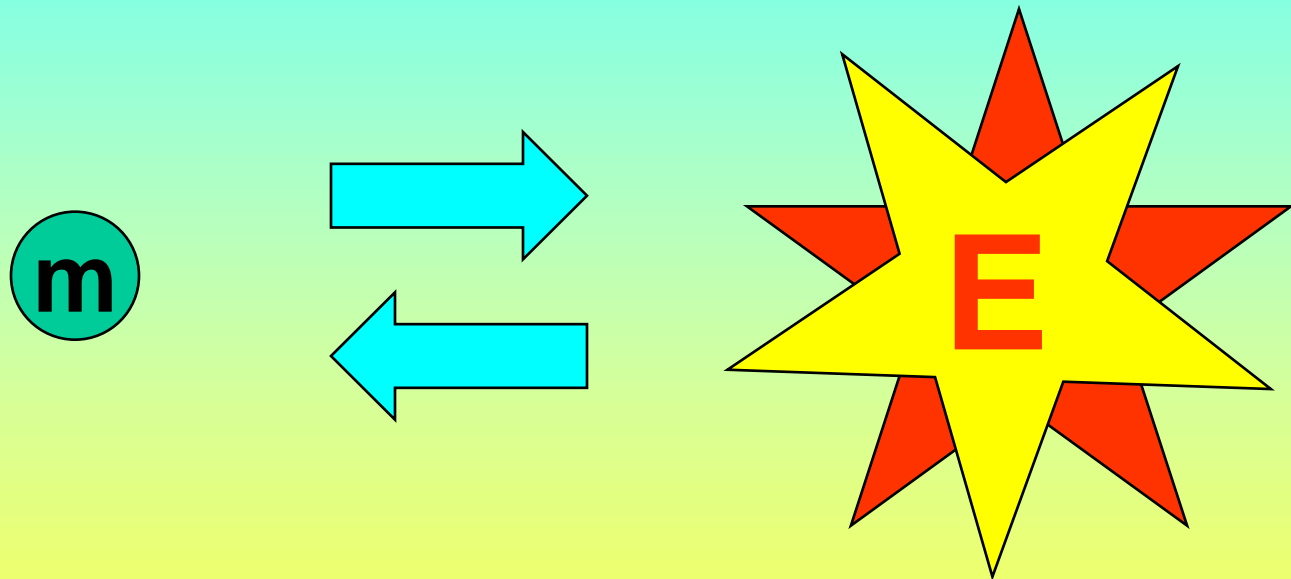
Não ocorre nas estrelas!



Gera energia na quebra do núcleo do átomo



Relação entre massa e energia



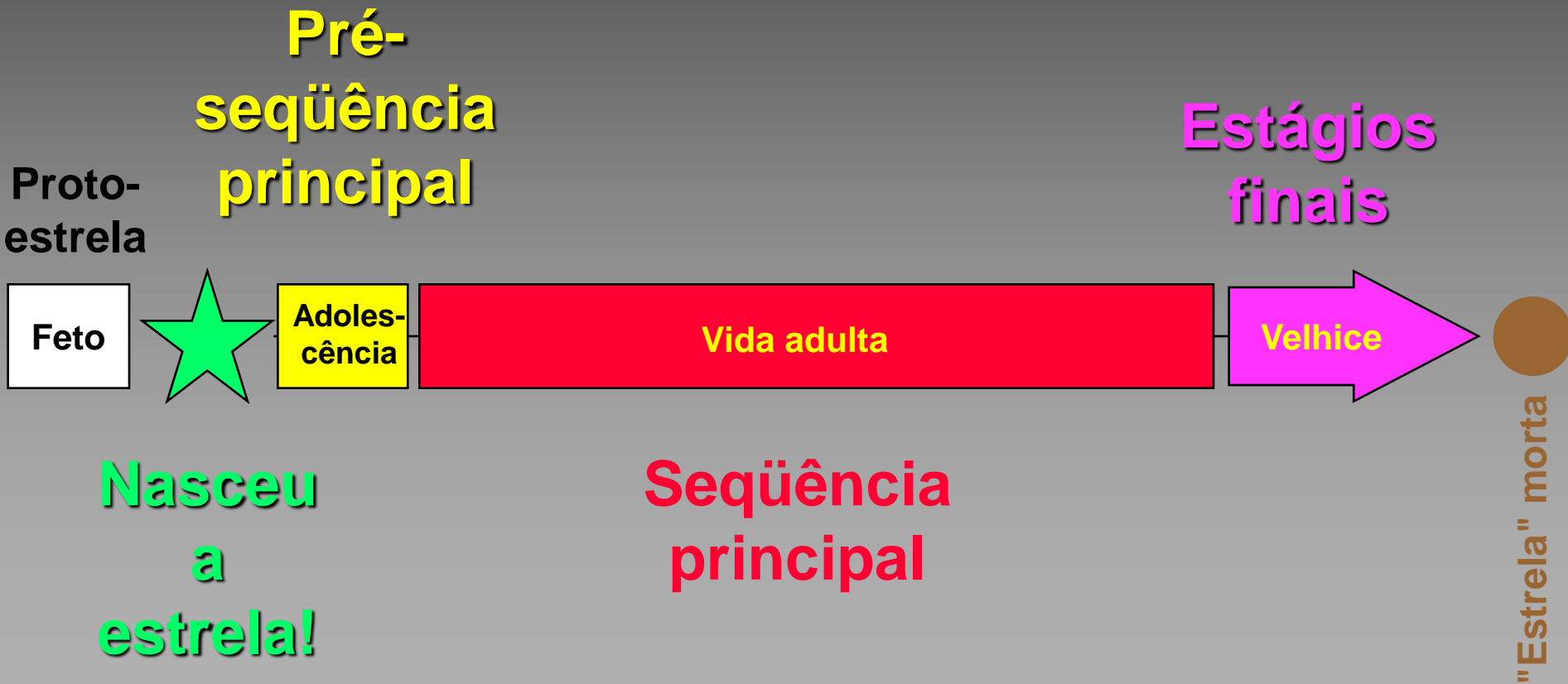
$$E = m c^2$$

c = velocidade da luz no vácuo

Geração de energia por fusão nuclear



Fases da formação e da vida de uma estrela



Variável T-Tauri original



Distância = 400 a.l.

Seqüência Principal

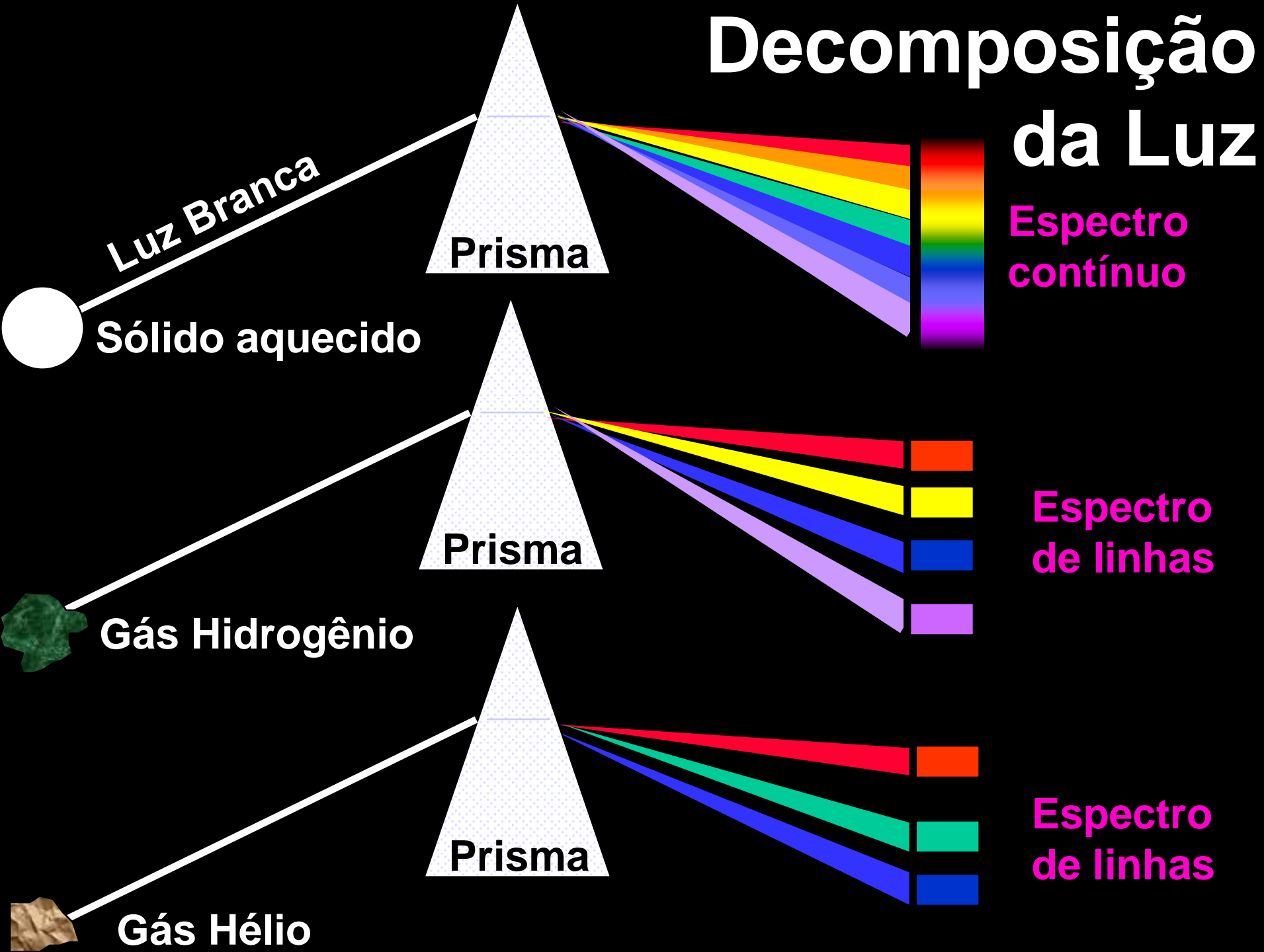
Quando uma estrela nasce,
diz-se que ela entrou no
Período Principal de sua vida,
também chamado de
Seqüência Principal.

A **Seqüência Principal** dura enquanto
houver **Hidrogênio** no núcleo da estrela.

**Como se descobre a
composição química
de uma estrela?**



Decomposição da Luz



Catálogo de Espectros

Hidrogênio

Hélio

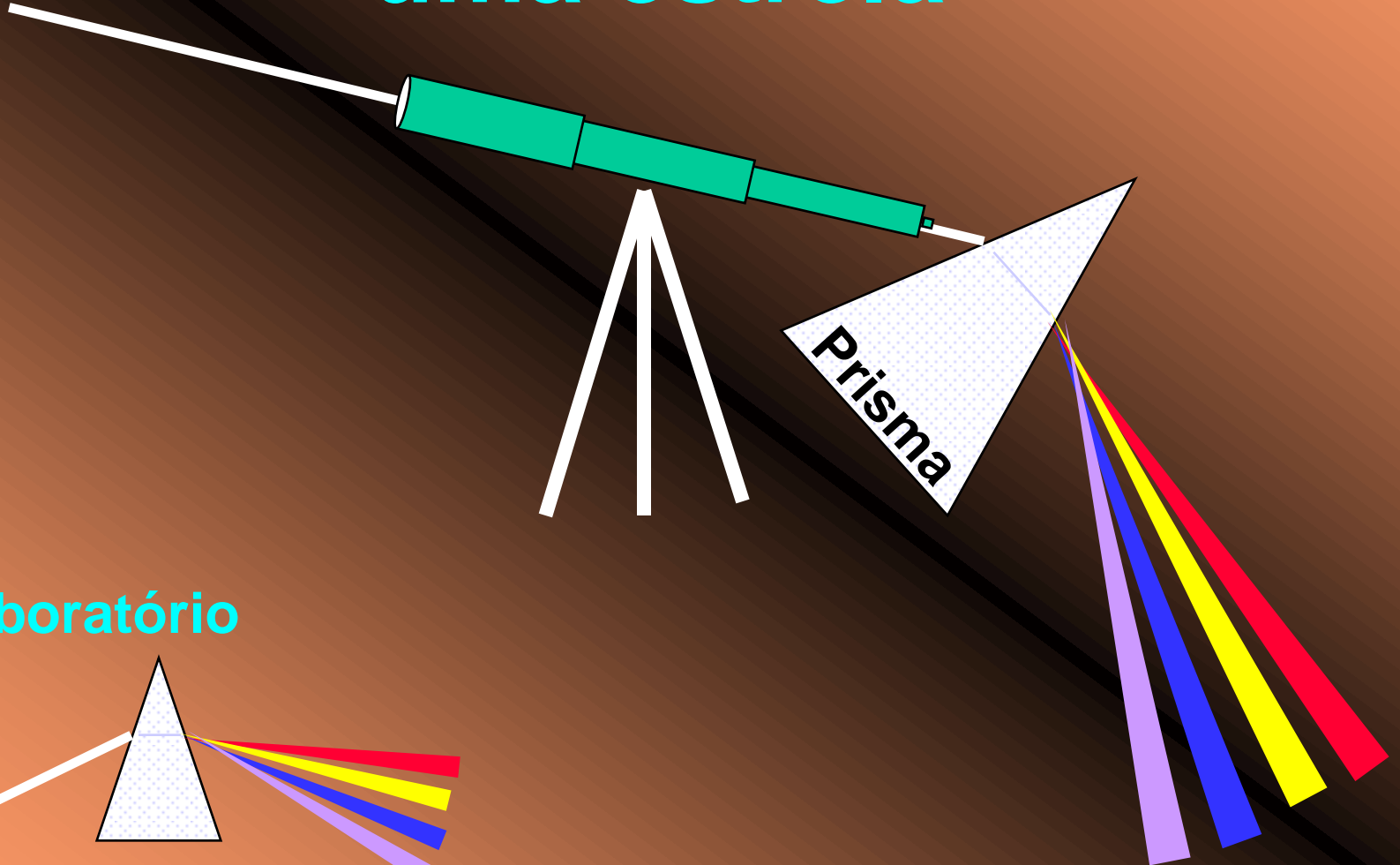
Oxigênio

Carbono

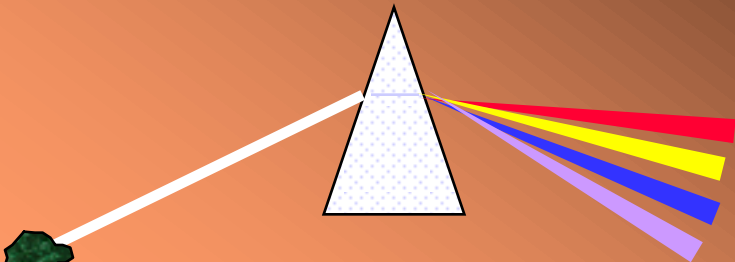
Nitrogênio

Neônio

Composição química de uma estrela



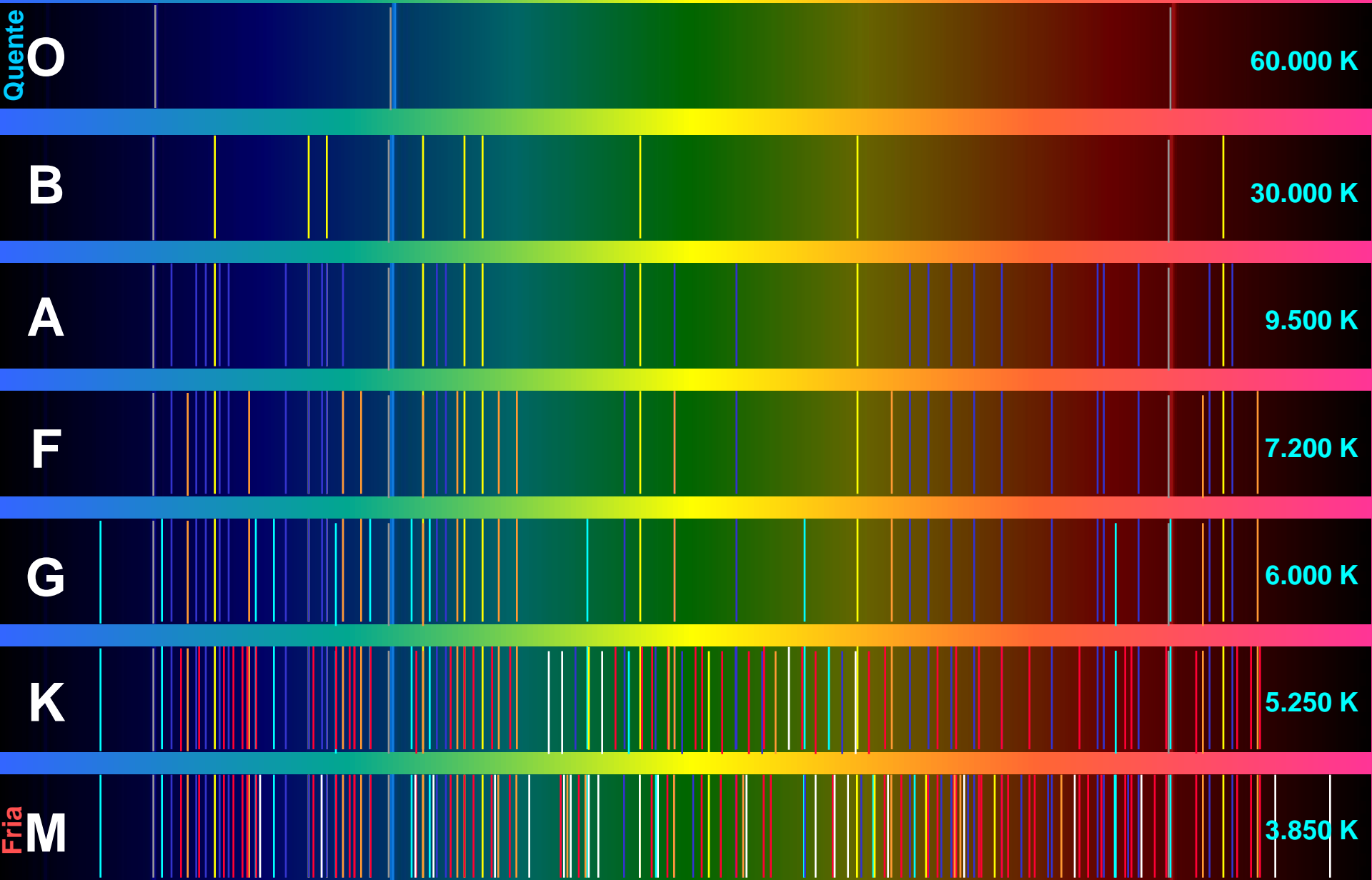
No Laboratório



Gás Hidrogênio

Hidrogênio!

Classificação espectral das estrelas



Estrelas irmãs

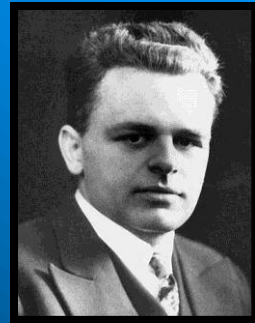
As estrelas nascem em agrupações ou aglomerados



Aglomerado Estelar

Nuvem Inicial

Glóbulos de Bok



Bart Bok
(~1940)

Aglomerado Estelar



**Região
com
formação
de
estrelas**



**Star-Forming Region NGC 2080
Hubble Space Telescope • WFPC2**

Estrelas irmãs:

aglomerados
abertos (jovens)

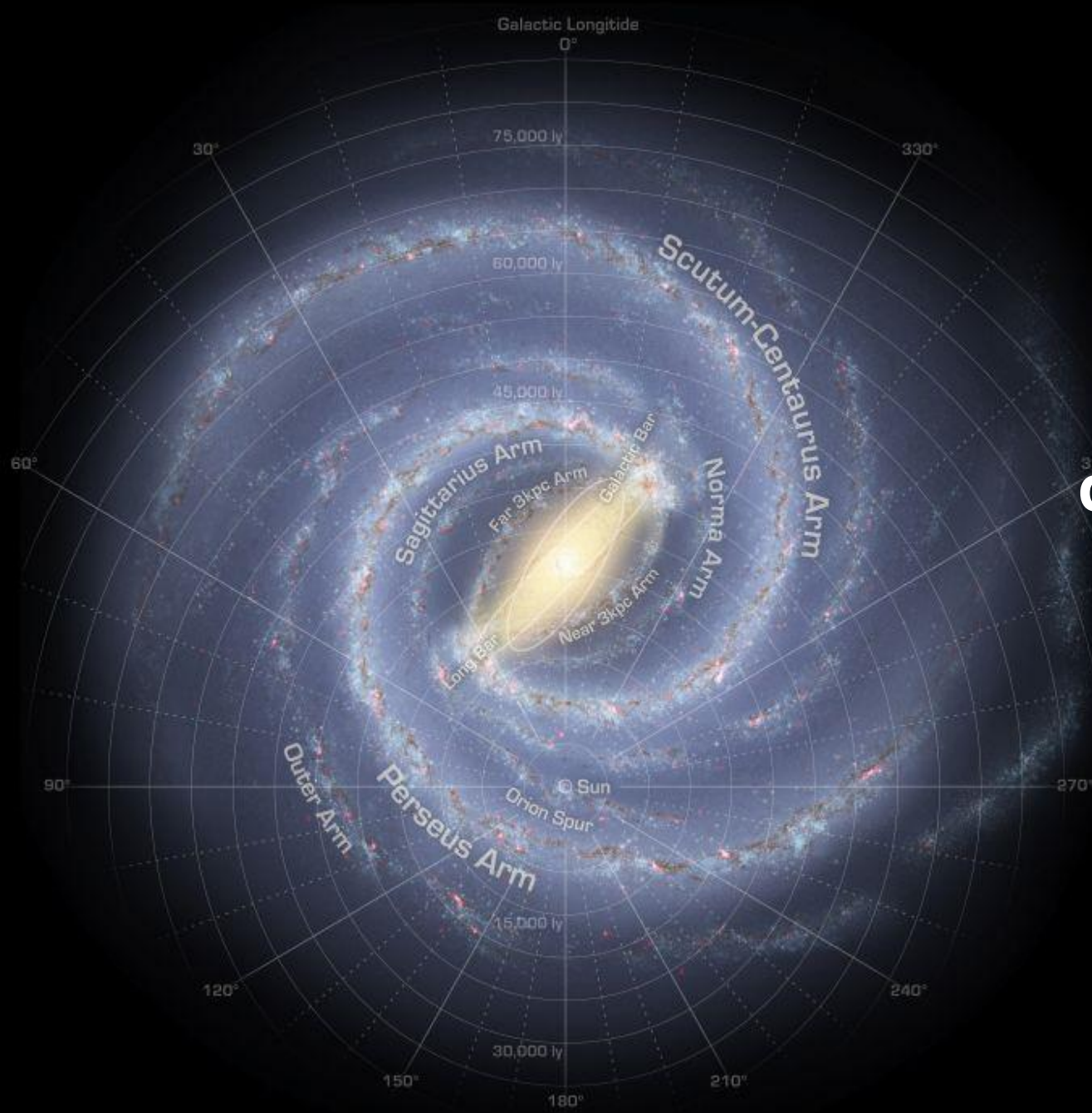


M36

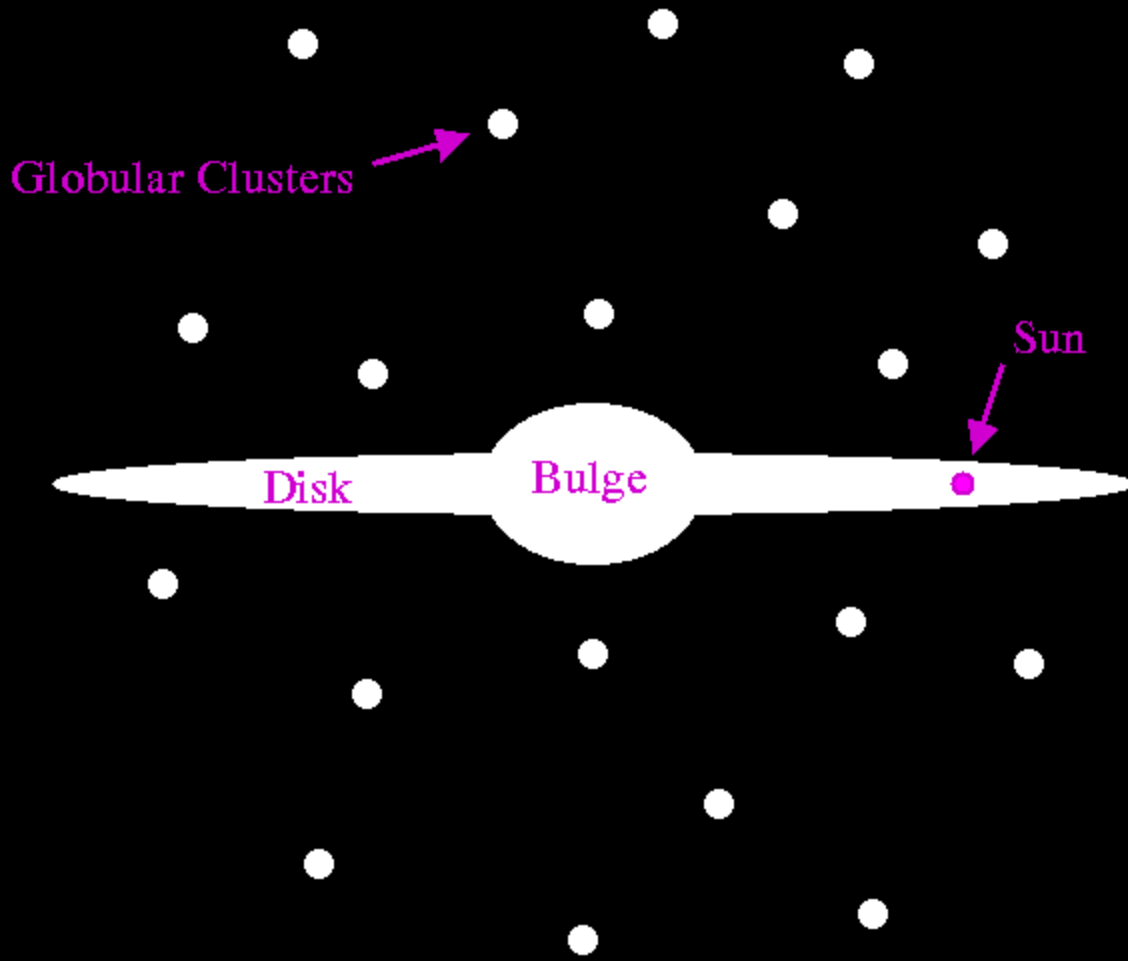
aglomerados
globulares
(velhos)



M80



**Aglomerados
abertos:
disco da nossa
Galaxia**



**Aglomerados
globulares:
halo da nossa
Galaxia**

Aglomerado aberto:

Plêiades (M45)

(7 Irmãs – Collca - Subaru)

3000 estrelas

$d = 400$ a.l.

$\phi = 13$ a.l.



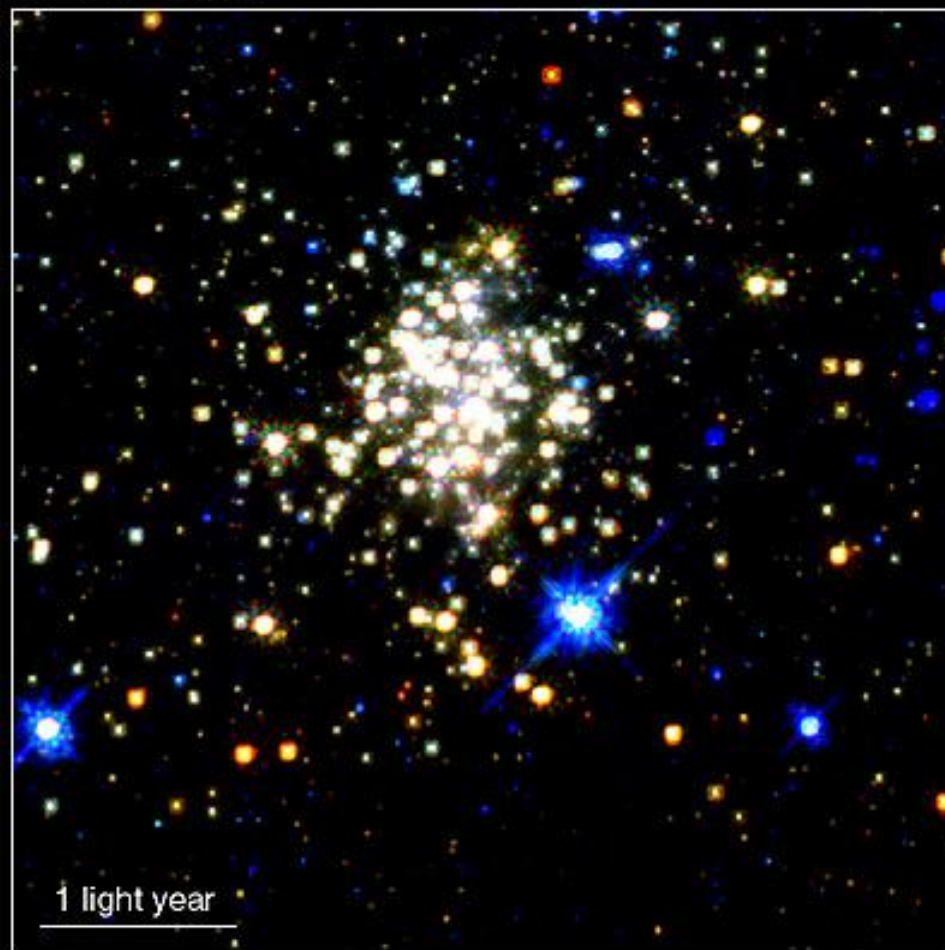
Aglomerado Aberto (Jovem)

(NGC 3293)

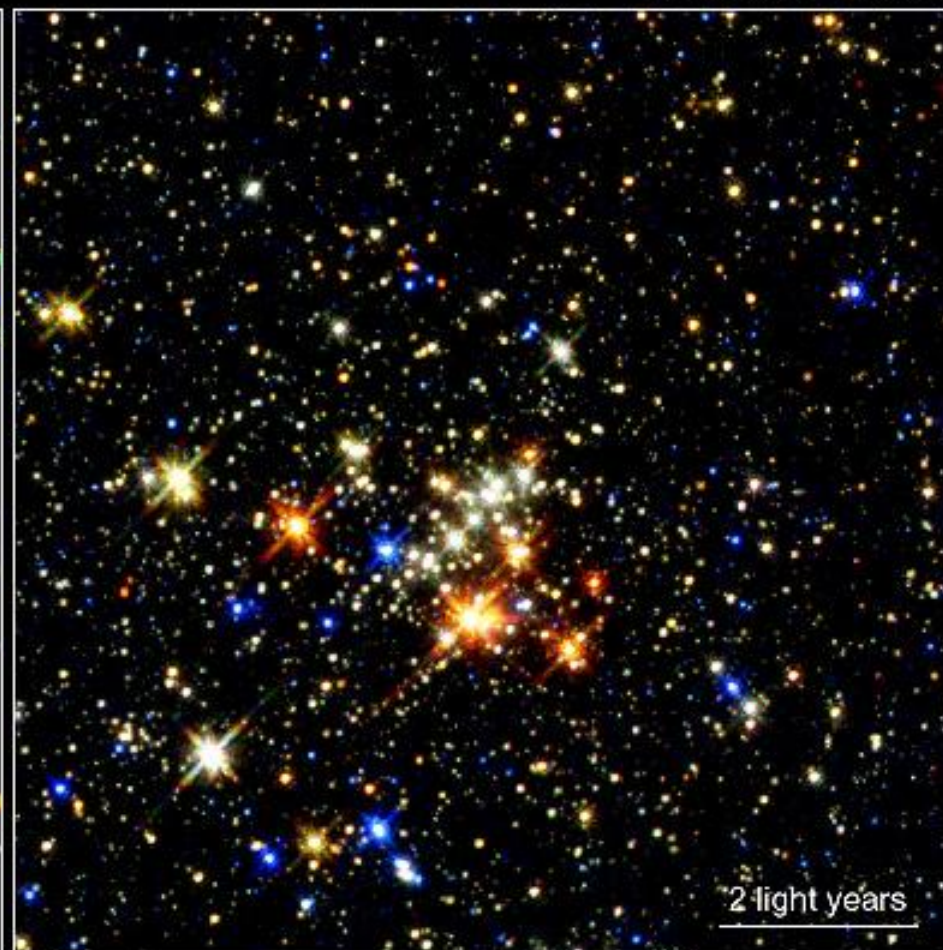


Aglomerados estelares

Arches Cluster



Quintuplet Cluster



Star Clusters Near the Center of the Galaxy

PRC99-30 • STScI OPO • D. Figer (STScI) and NASA

HST • NICMOS

Aglomerado globular M3



Aglomerado Globular Ômega Centauro



Formação de estrelas em outras galaxias



Andromeda Galaxy

**Large Magellanic Cloud
Galaxy**



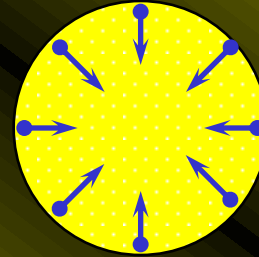
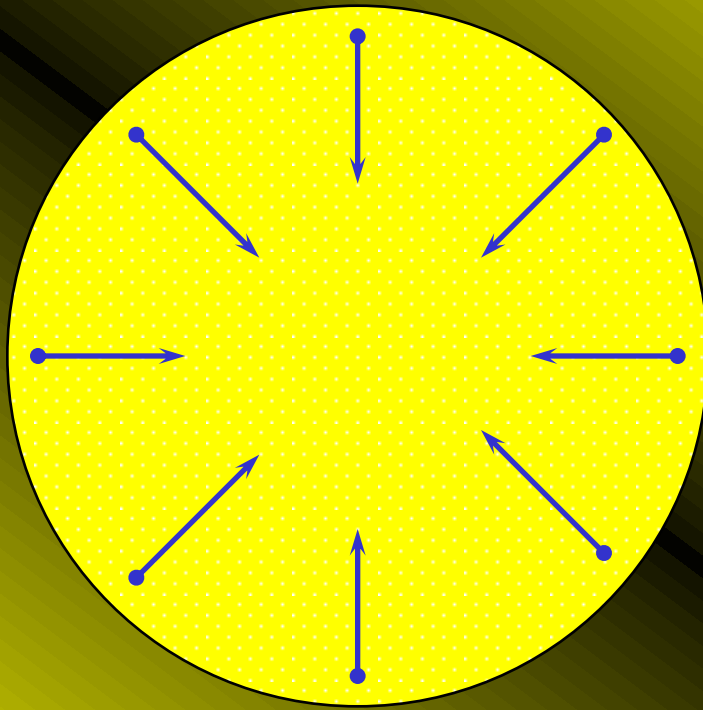
Formação de estrelas em outras Galaxias: Nebulosa LH95



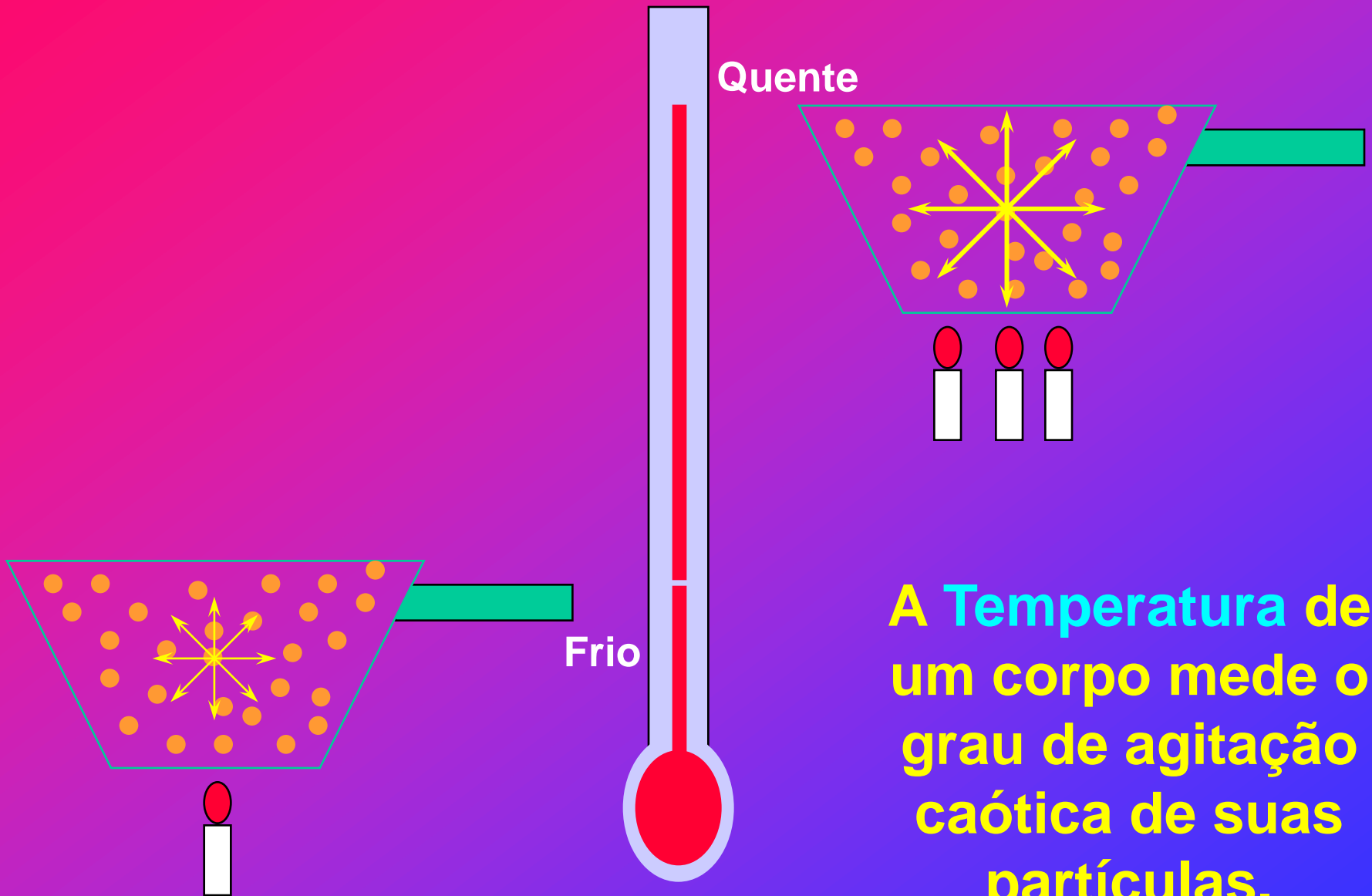
Região de formação de estrelas
Grande Nuvem de Magalhães

Constelação : Dorada
Distância = 160.000 a.l.
Diâmetro = 150 a.l.

Porque a estrela não colapsa?



Temperatura



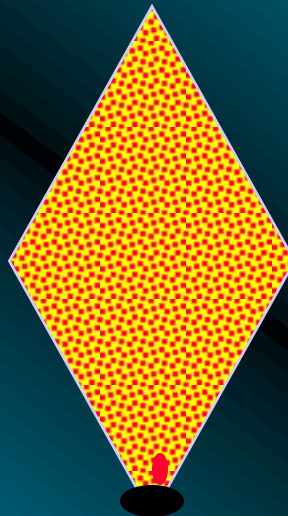
A Temperatura de um corpo mede o grau de agitação caótica de suas partículas.

Pressão Térmica

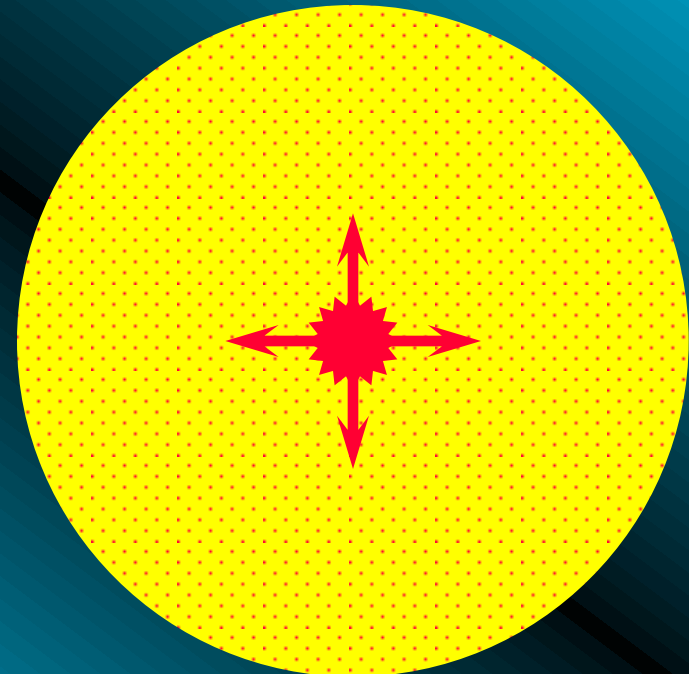


Ar
frio

Balão com
mecha apagada

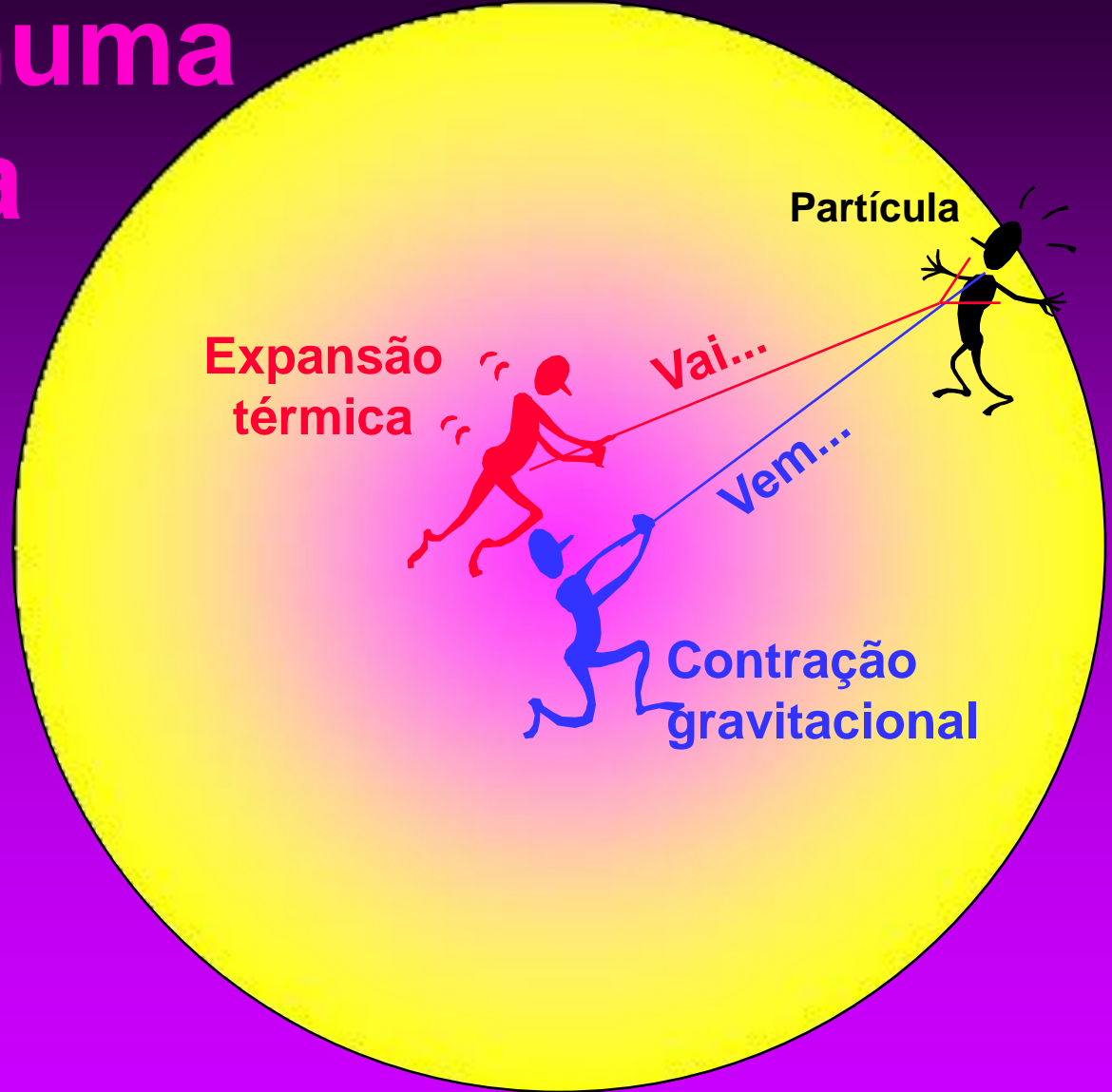


Mecha acesa



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

Pressões atuantes numa estrela



Elementos leves ↓

T ↓

$p_T < p_G$

R ↓



R ↓

T ↑

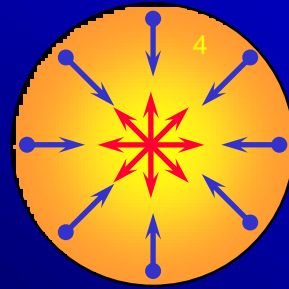


R ↓↓

T ↑↑

Fusões ↑↑

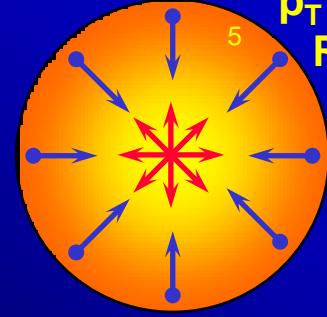
(Des)



T ↑

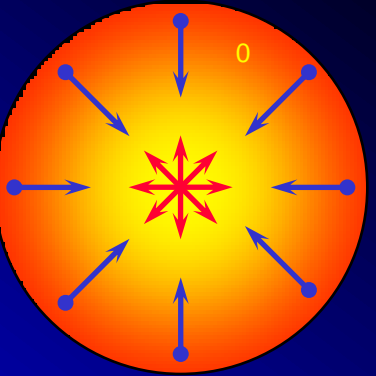
$p_T > p_G$

R ↑



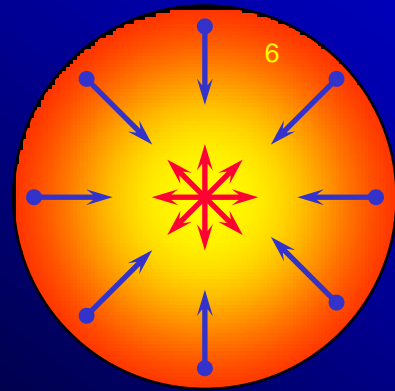
$p_T > p_G$

R ↑



$p_T = p_G$

Equilíbrio Estático



$p_T = p_G$

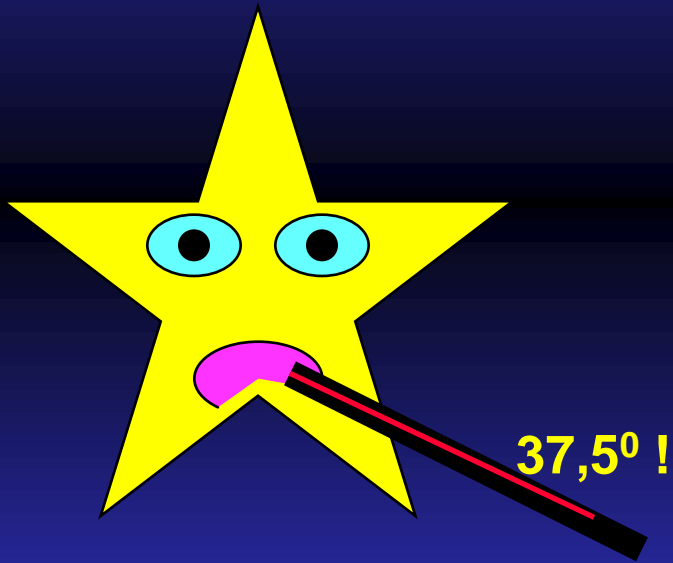
R = Raio

T = Temperatura

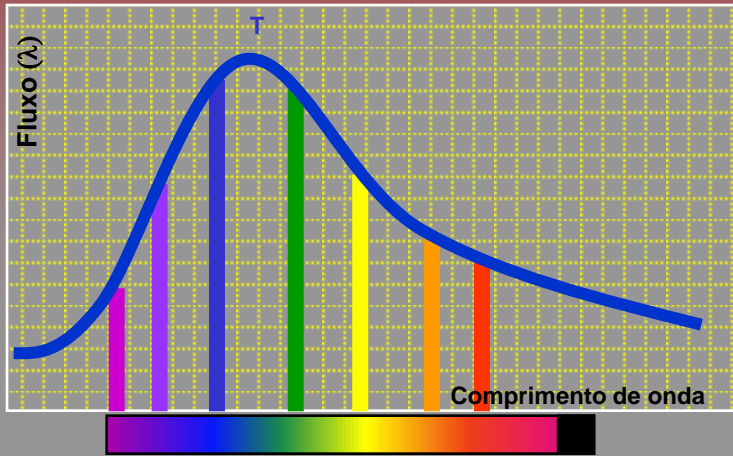
p_T = Pressão térmica

p_G = Pressão gravitacional

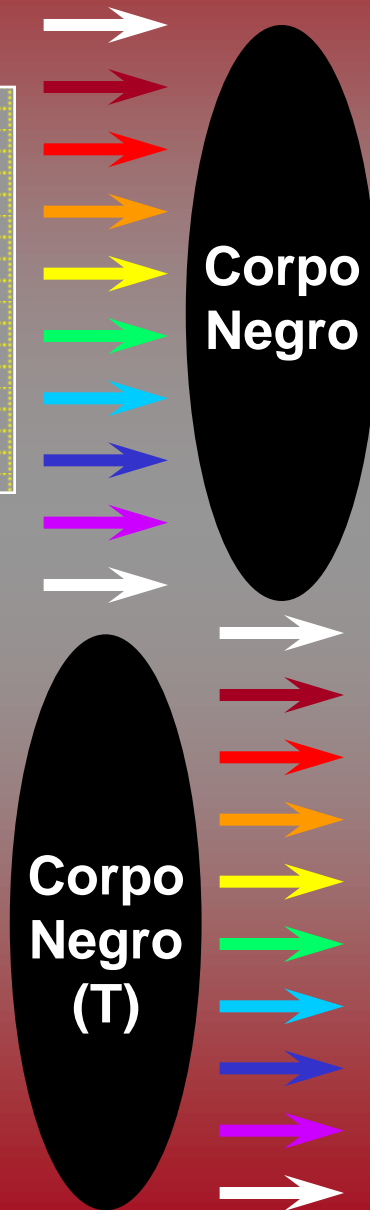
Como determinar a temperatura de uma estrela?



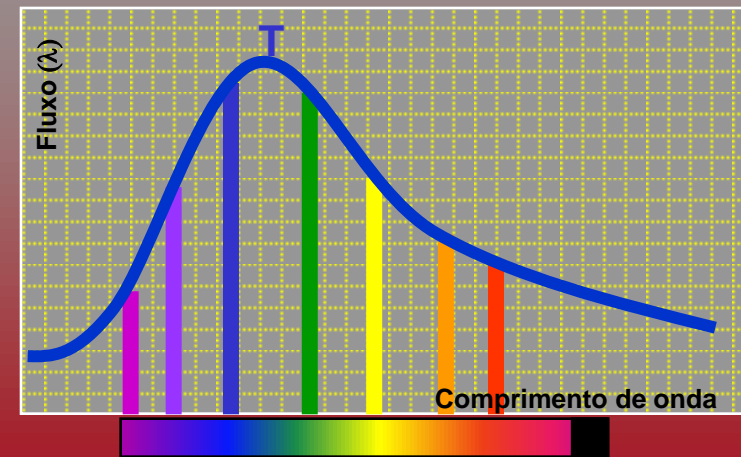
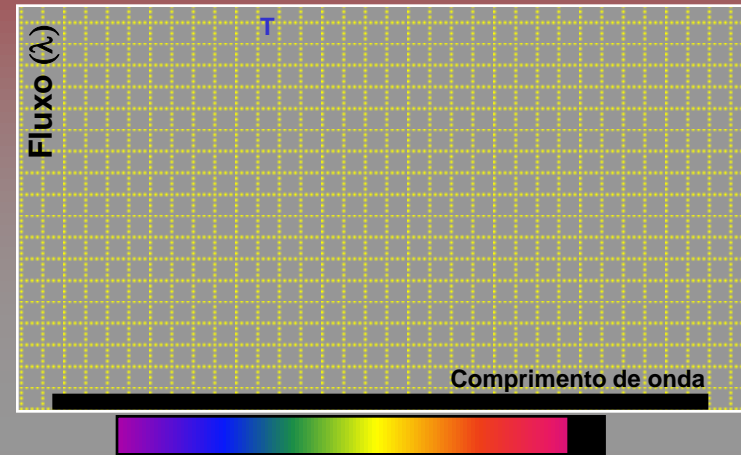
Corpo Negro



Emite o máximo de energia em todos os comprimentos de onda para uma dada temperatura.

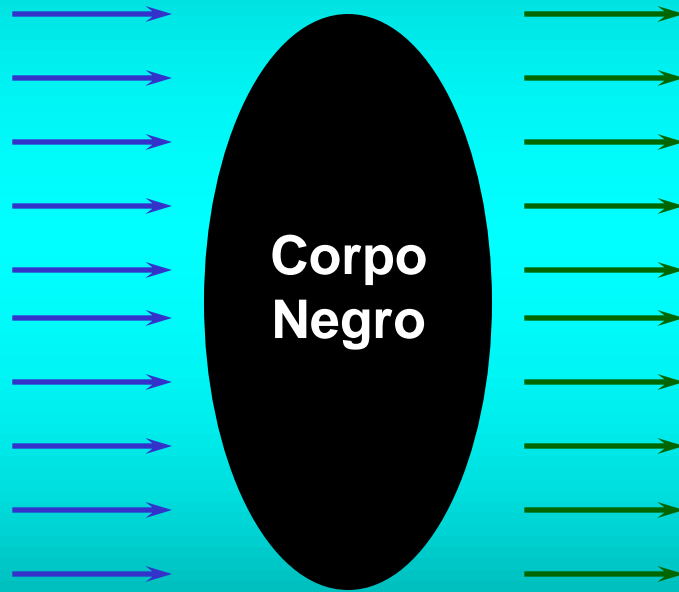


Absorve toda a energia que possa incidir sobre ele.



Corpo Negro

**Absorve toda
a energia que
possa incidir
sobre ele.**



**Emite o máximo
de energia em
todos os
comprimentos
de onda
para uma dada
temperatura.**

Telescópio com medidor de luz

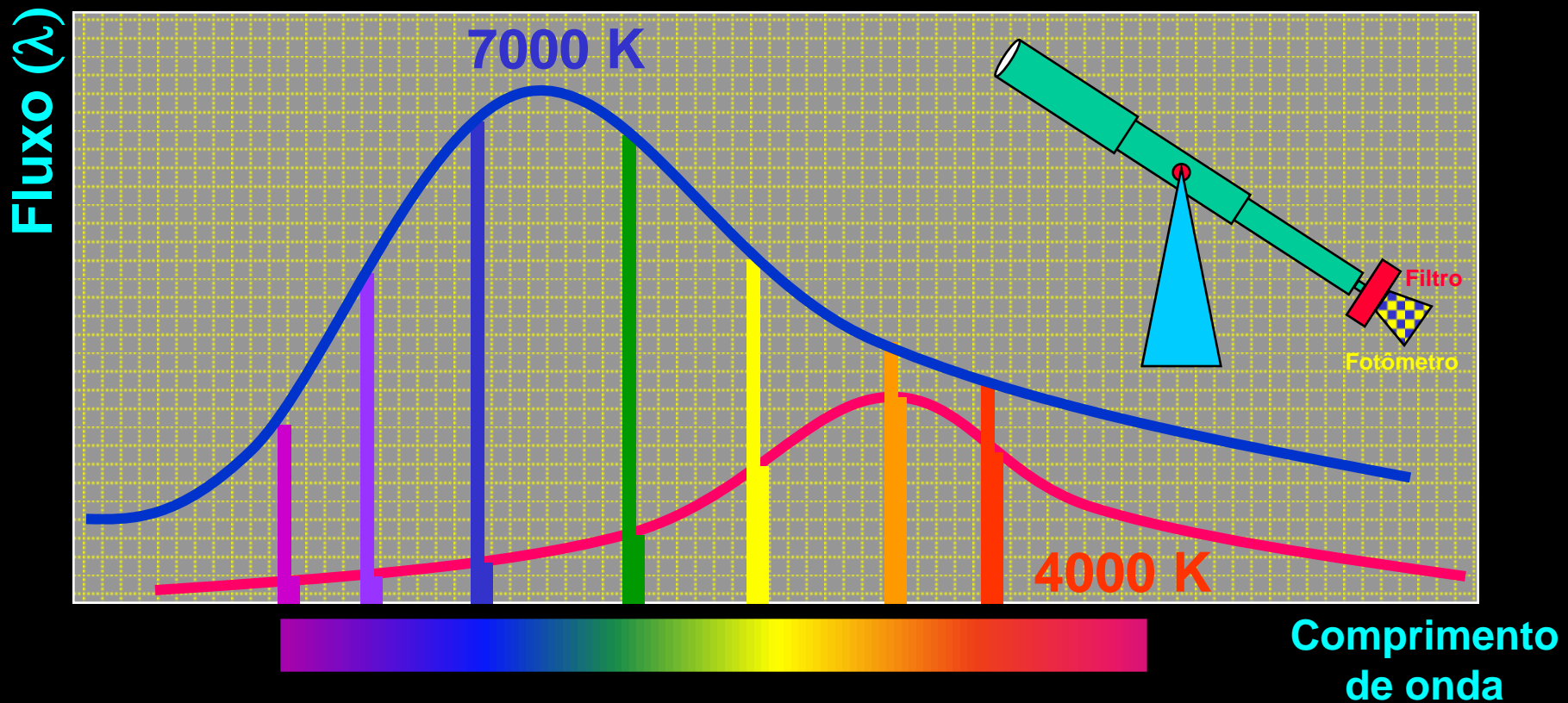


Filtro

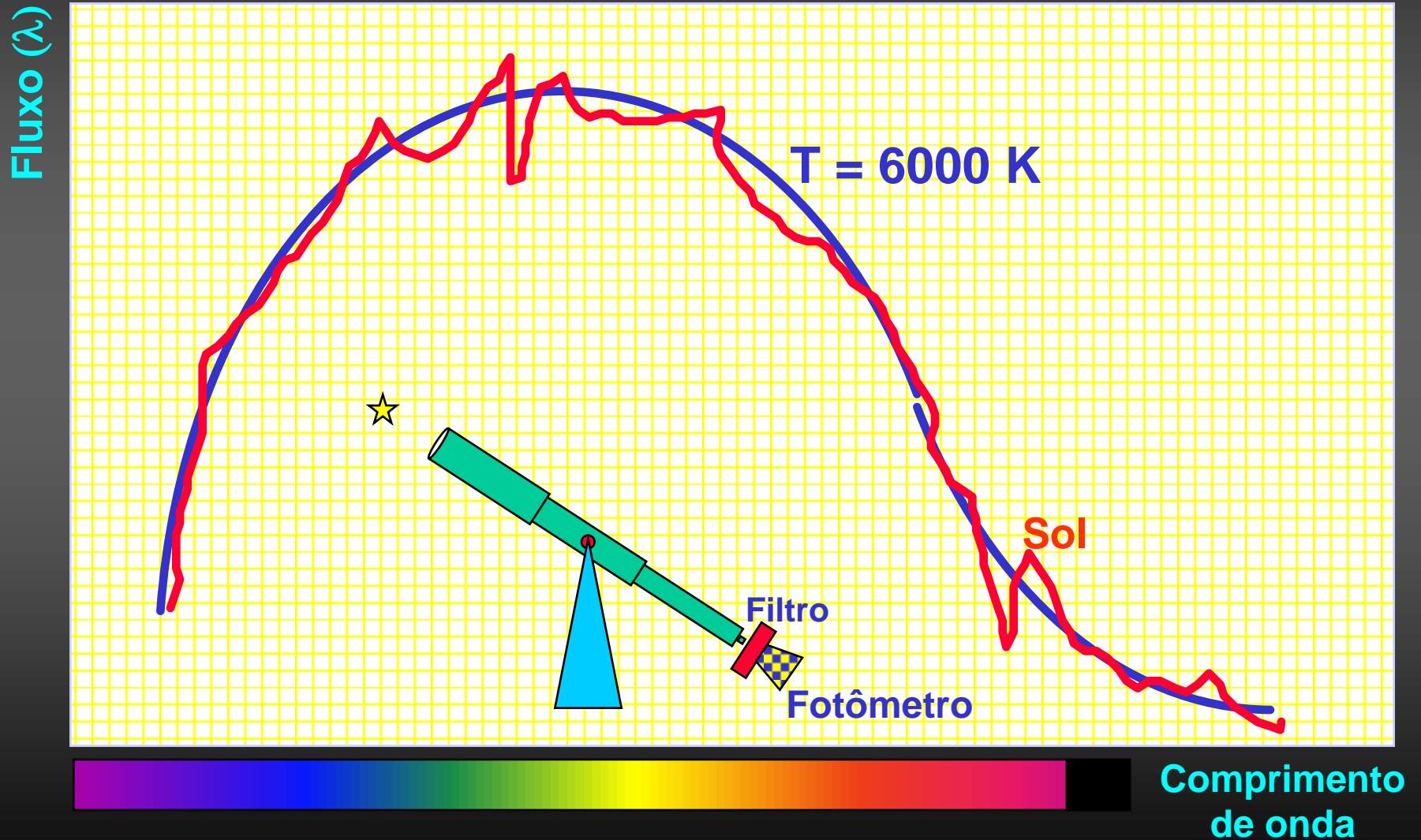
Fotômetro

Lei de Stefan - Boltzmann

$$F = \sigma T^4$$



Sol emitindo como Corpo Negro



Classificação espectral e temperatura

Oh! Be A Fine Girl, Kiss Me !



**Como se formou o
Sol
e o Sistema Solar ?**

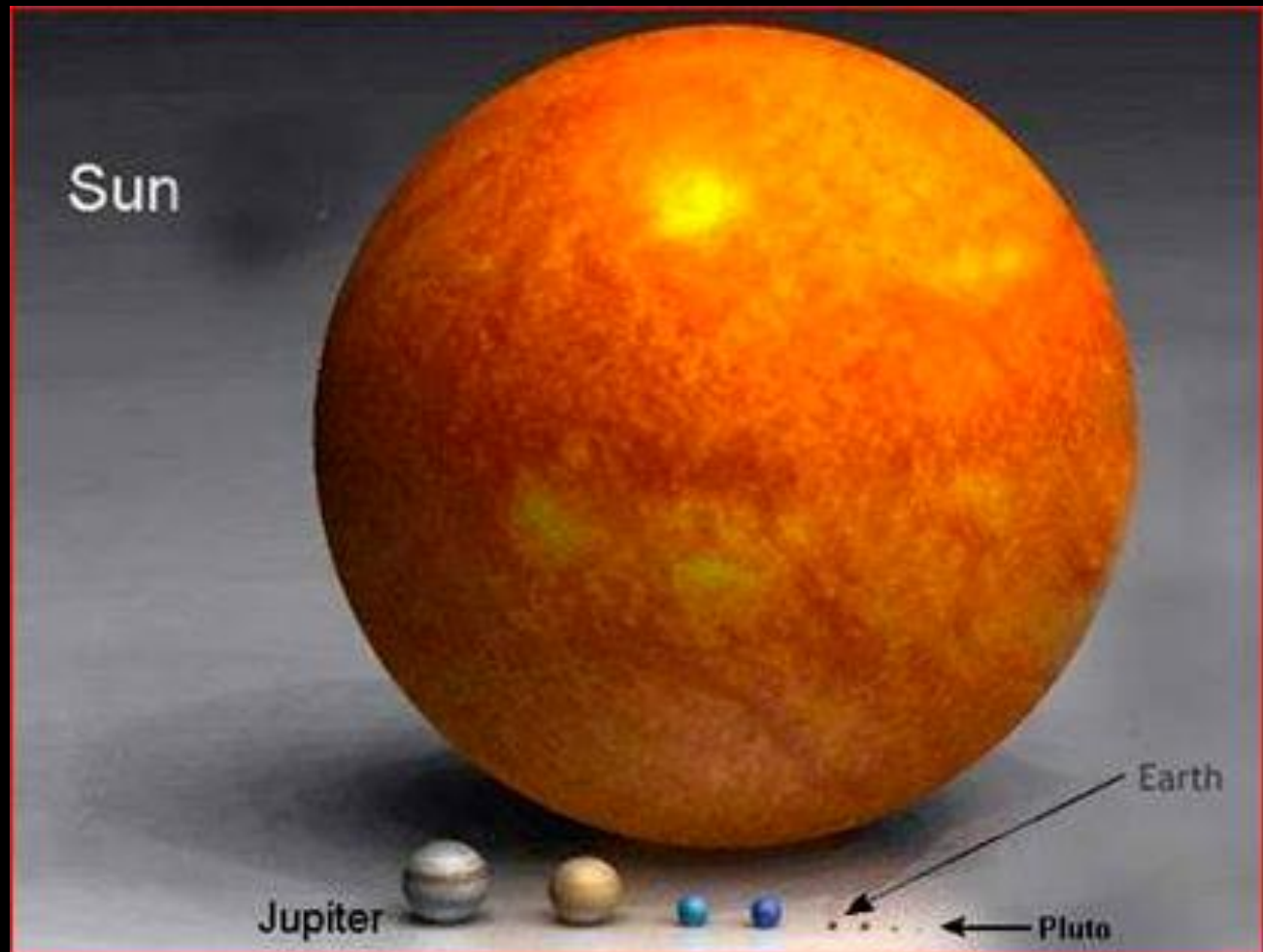
Cosmogonia

Comparação entre o Sol e os planetas do sistema solar

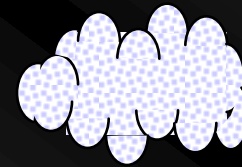
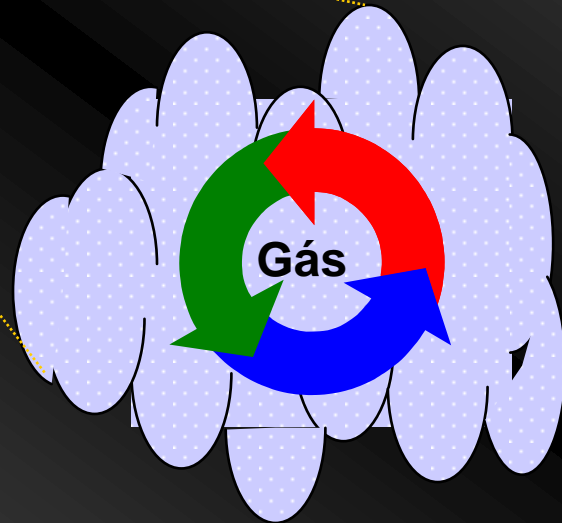
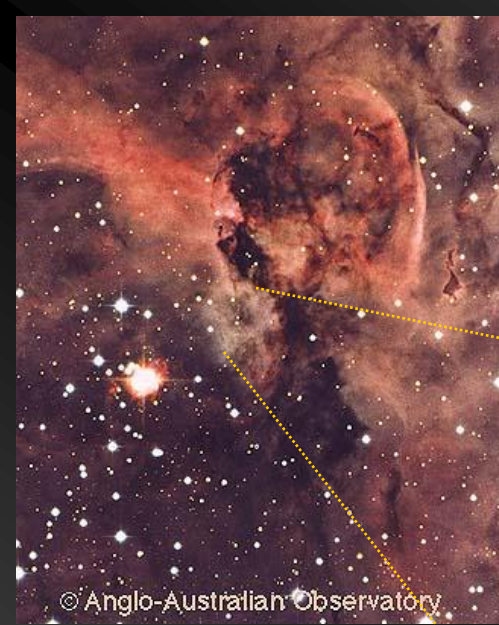
SOL

Raio: 700 mil km

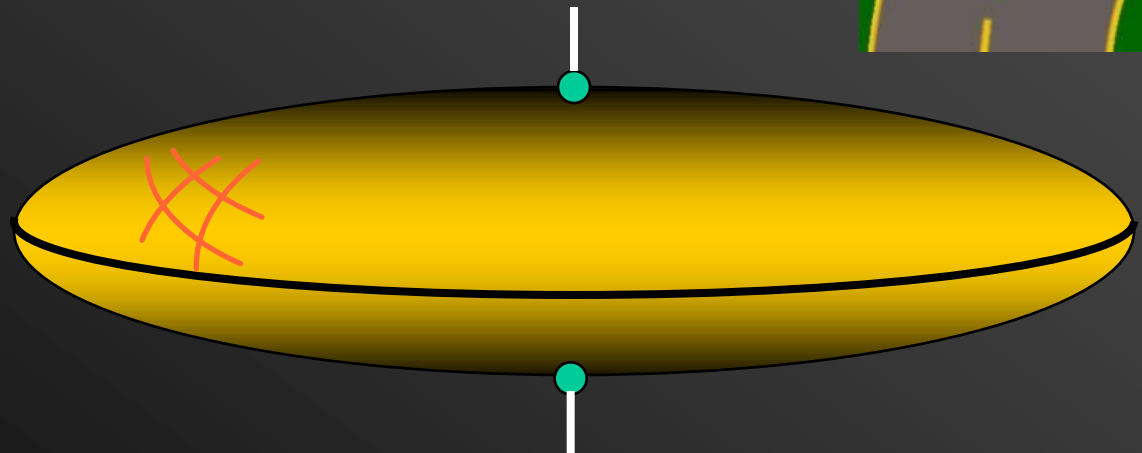
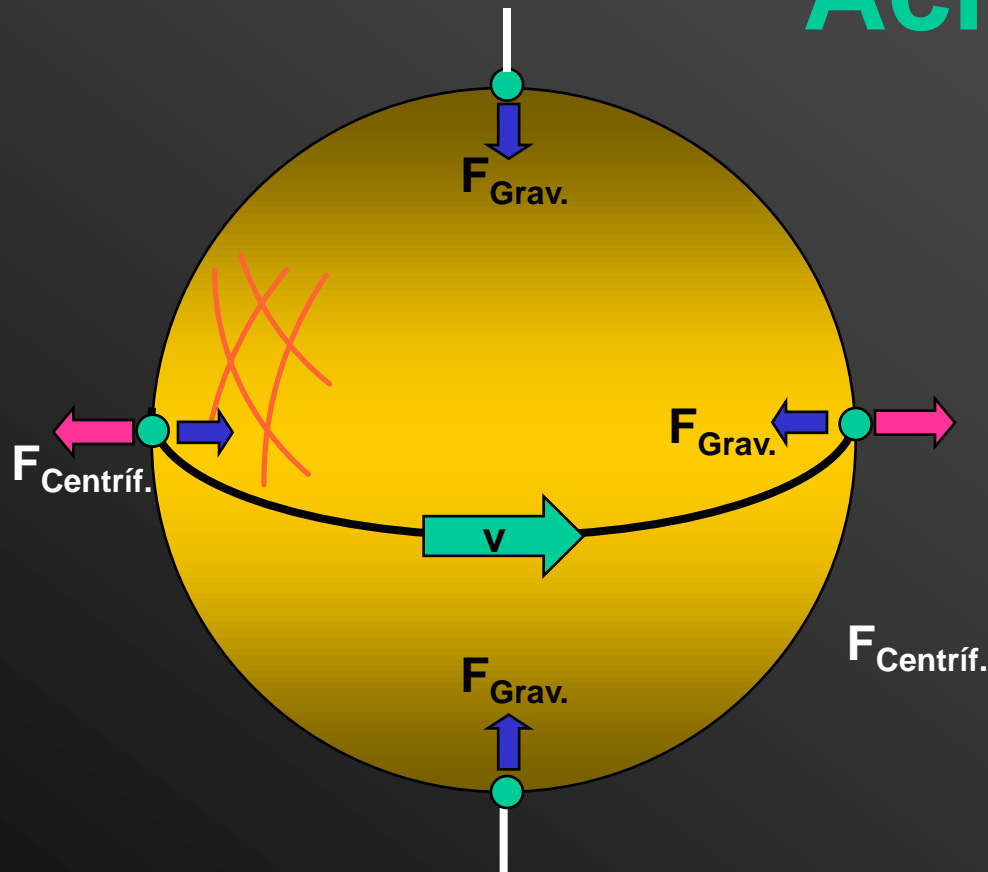
**Massa: 2×10^{30} Kg
(330,000 Terra)**



Contração da Nebulosa Solar



Achatamento da nebulosa



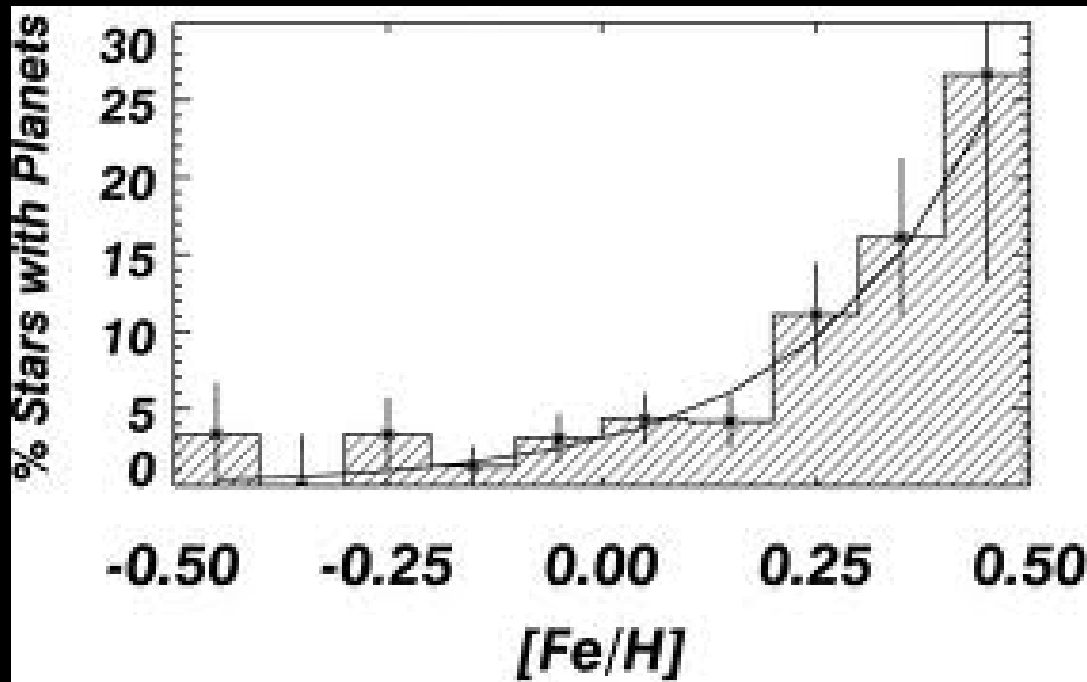
Formação do Sistema Solar



Planeta é um sub-produto da formação estelar.

Os processos de formação de planetas ainda não são muito bem entendidos

Porcentagem de estrelas com planetas



Metalicidade (quantidade de metais)

Correlação válida para estrelas de 1 massa solar :
Gonzalez 1997, Fischer & Valenti 2005, etc

Porcentagem de estrelas com planetas

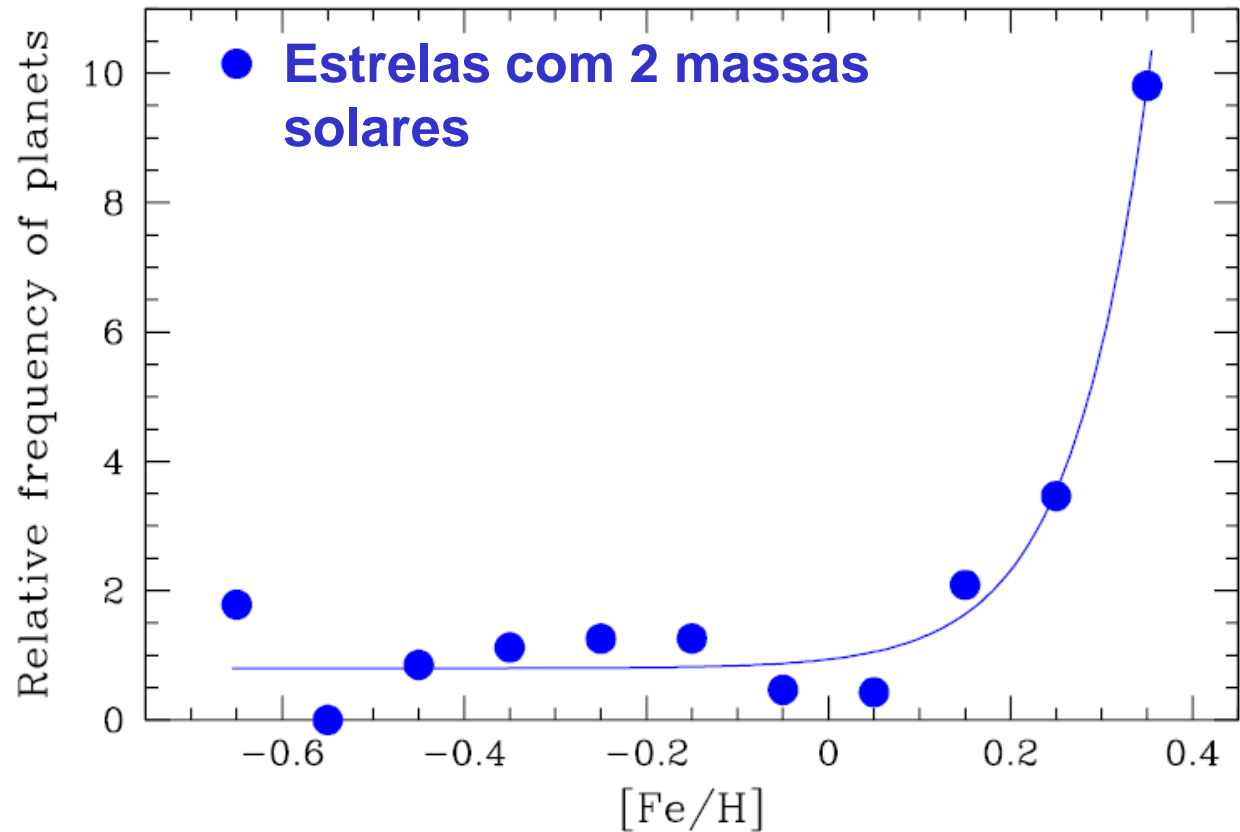


Fig. 3. Relative frequency of planet occurrence as a function of metallicity for giant stars (filled circles). The solid line represents the best exponential fit ($0.80 + 0.14 \times e^{[\text{Fe}/\text{H}]/0.0842}$).

Metallicidade (quantidade de metais)

**Correlação válida para estrelas mais massivas !
Meléndez et al. 2011**

LETTER TO THE EDITOR

A planet-metallicity correlation for intermediate-mass stars ★

Jorge Meléndez¹, Alan Alves-Brito², Iván Ramírez³, and Judith G. Cohen⁴

¹ Departamento de Astronomia do IAG/USP, Universidade de São Paulo, Rua do Matão 1226, Cidade Universitária, 05508-900 São Paulo, SP, Brazil. e-mail: jorge@astro.iag.usp.br

² Departamento de Astronomia y Astrofísica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

³ The Observatories of the Carnegie Institution for Science, 813 Santa Barbara Street, Pasadena, CA 91101, USA

⁴ Palomar Observatory, Mail Stop 105-24, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125, USA

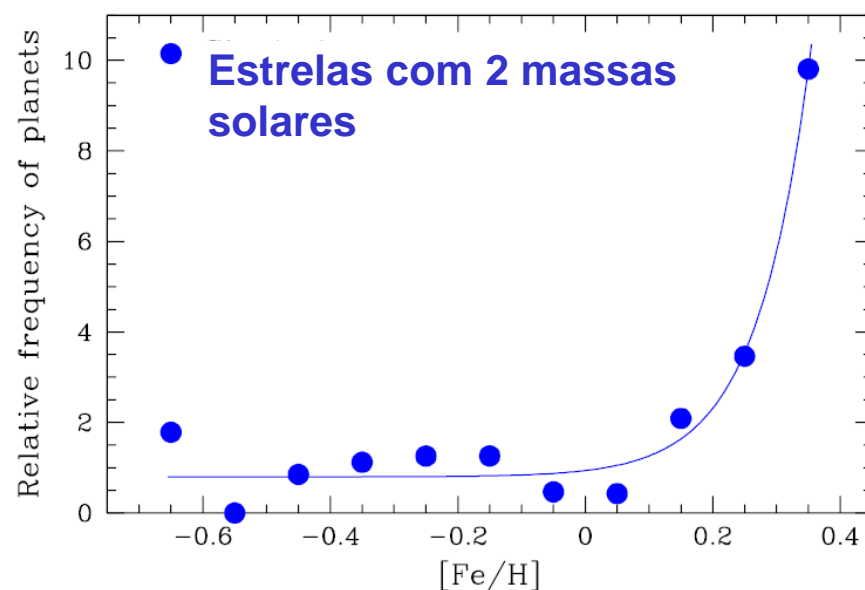
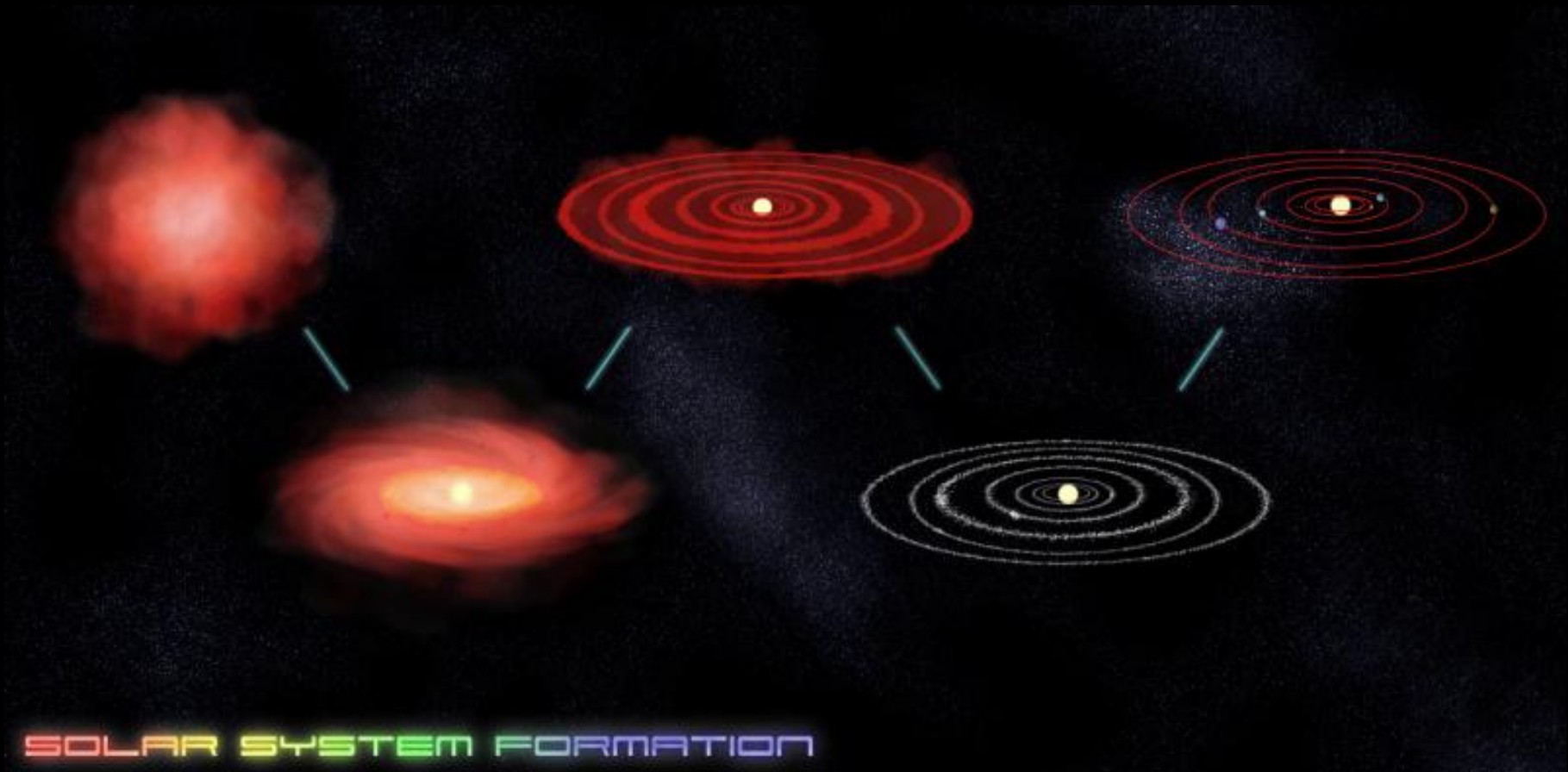
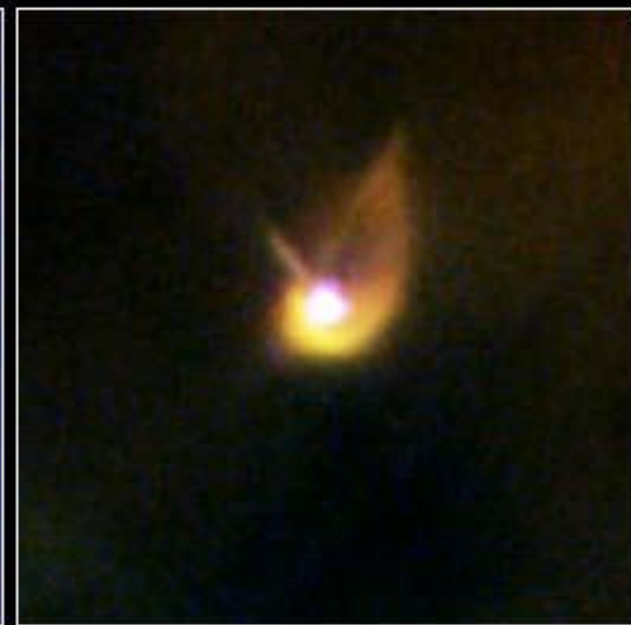
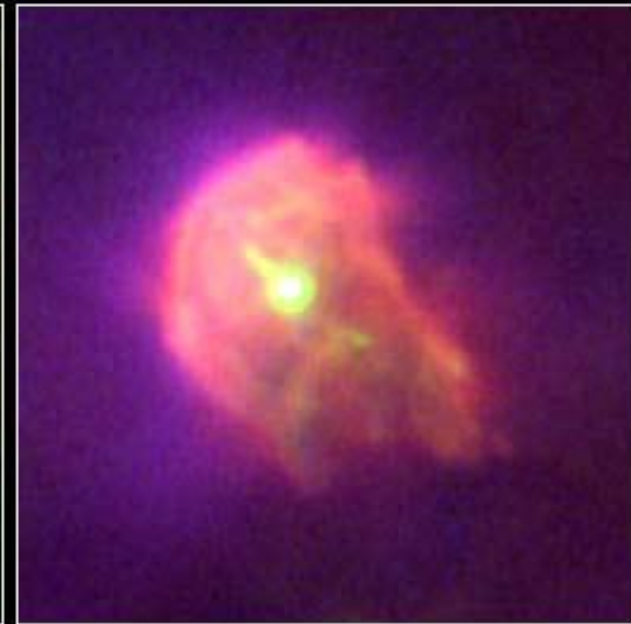


Fig. 3. Relative frequency of planet occurrence as a function of metallicity for giant stars (filled circles). The solid line represents the best exponential fit ($0.80 + 0.14 \times e^{[\text{Fe}/\text{H}]/0.0842}$).

Formação do sistema solar: discos



Discos de futuros sistemas planetarios extra- solares?



Protoplanetary Disks in the Orion Nebula HST • WFPC2

NASA, J. Bally (University of Colorado), H. Throop (SWRI),
and C.R. O'Dell (Vanderbilt University) • STScI-PRC01-13



E a Lua, como se formou?

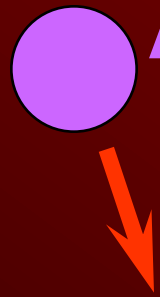
- Hipótese mais aceita:
Grande impacto (Big splash)

'TerLua'

1898-1974: Lua e Terra foram um só corpo "TerLua", e Lua foi ejetada por **centrifugação?**

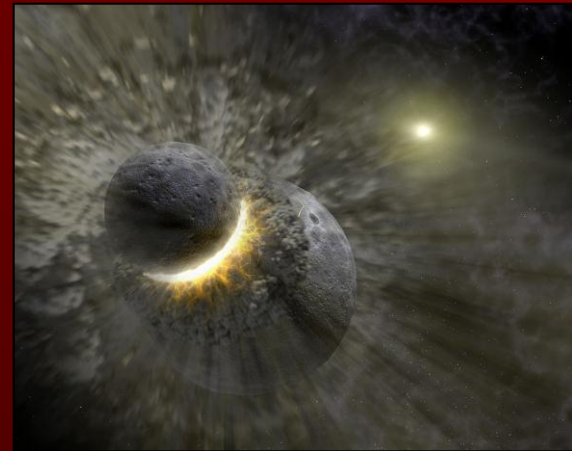
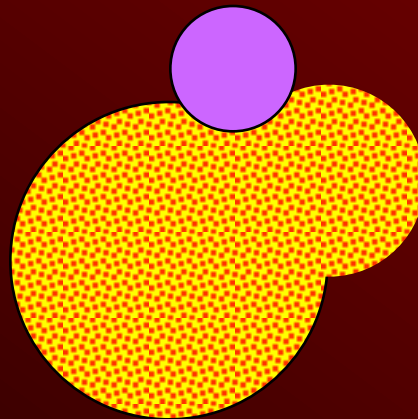
1975: OK, but the origin is due to a **giant impact** (original idea in 1946 by Reginald Daly)

Asteróide (?)

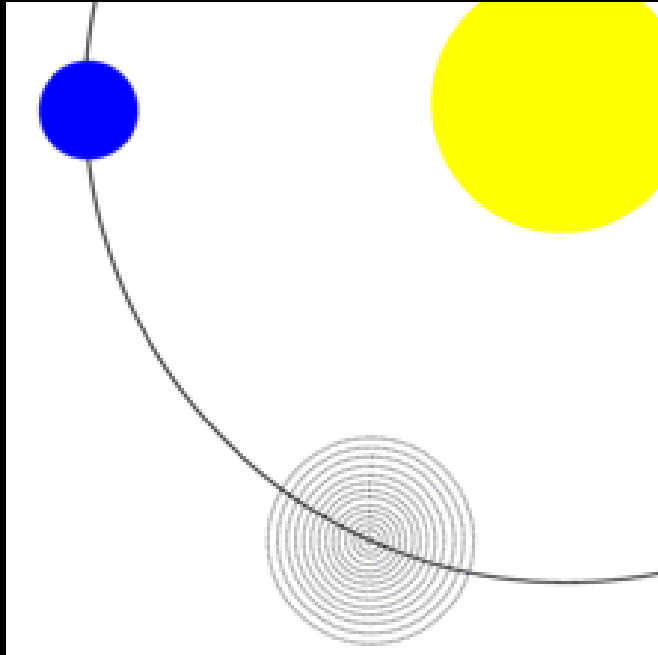


Lua e Terra:

choque catastrófico há 4.5×10^9 anos



Formação da Lua há 4.5 Gyr



Animação mostrando a criação da lua através de uma colisão entre a Terra(TerLua) e Téia (asteroide ou proto-planeta pequeno).

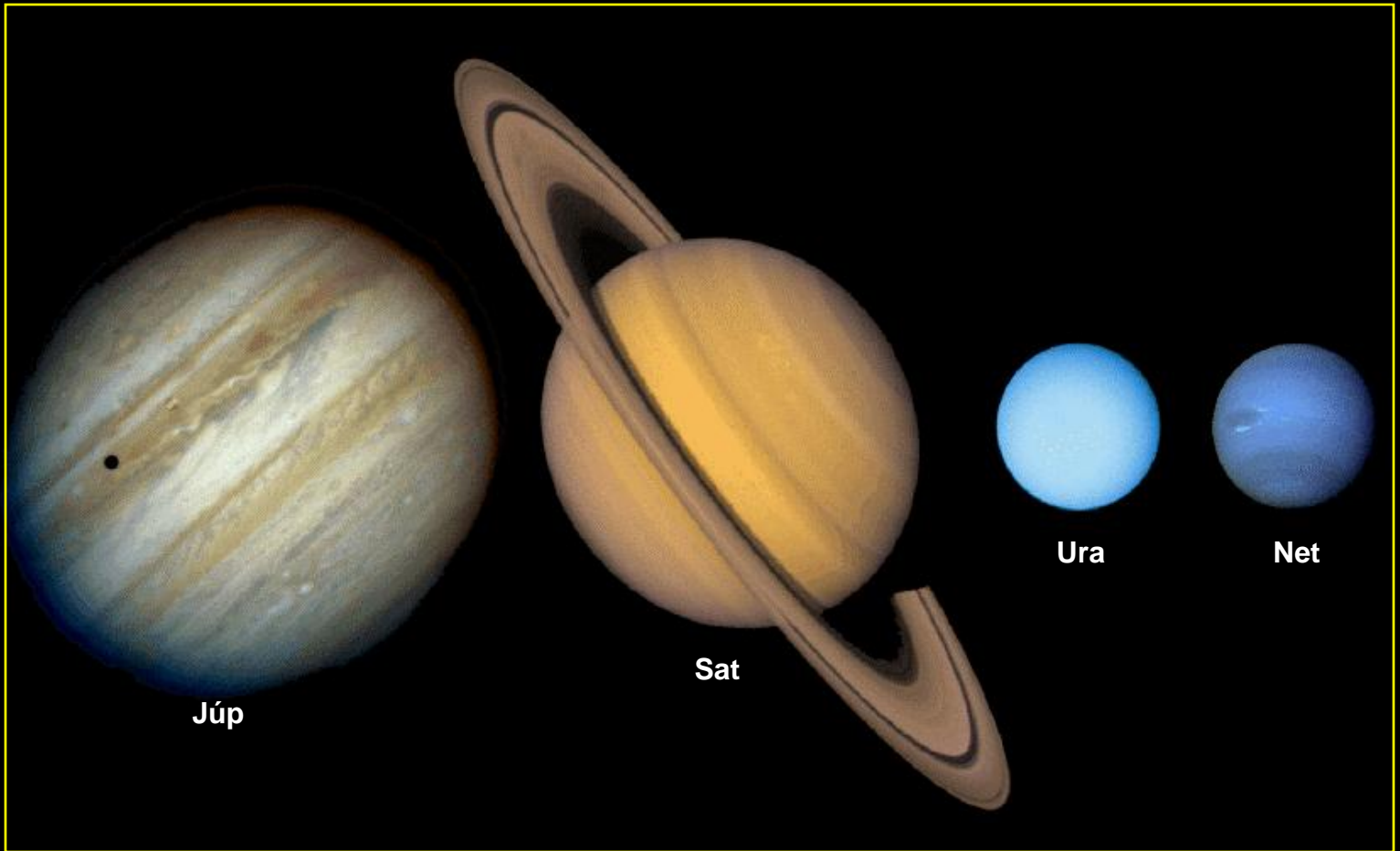


**Como se formou e
evoluiu a Terra ?**

Sol e Planetas

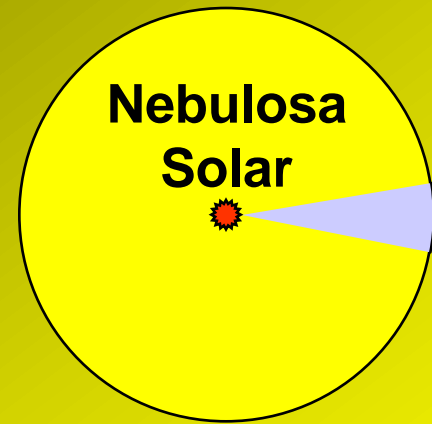
Mer Ter
Vên Mar

Planetas
Telúricos
ou
Rochosos

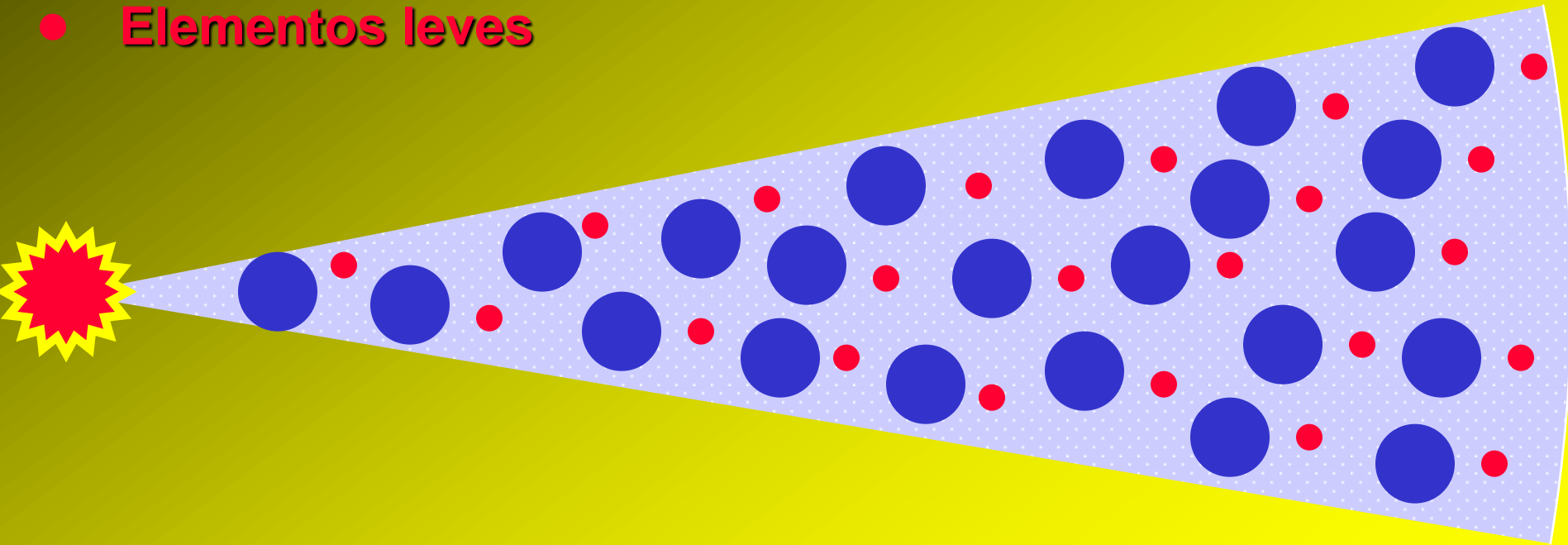


Planetas gasosos ou Jovianos

Distribuição inicial dos elementos químicos do Sistema Solar



-  Elementos pesados
-  Elementos leves

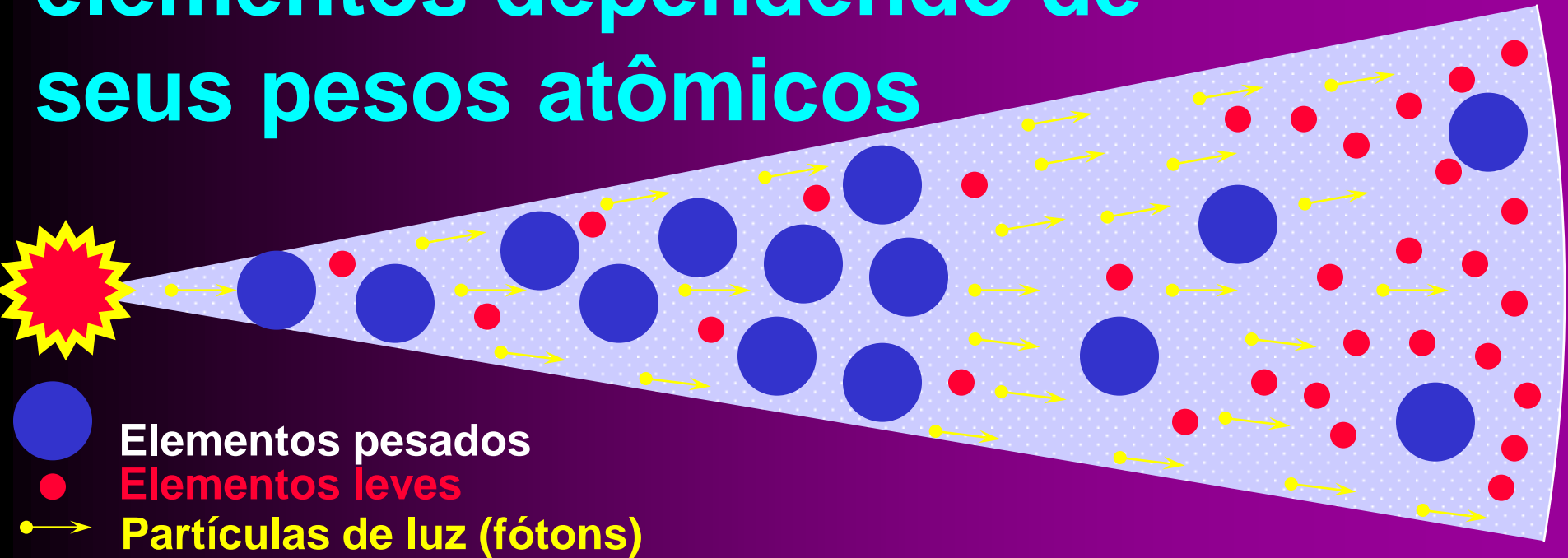


Redistribuição dos elementos **antes** da formação dos planetas





Redistribuição dos elementos dependendo de seus pesos atômicos



-  Elementos pesados
-  Elementos leves
-  Partículas de luz (fótons)

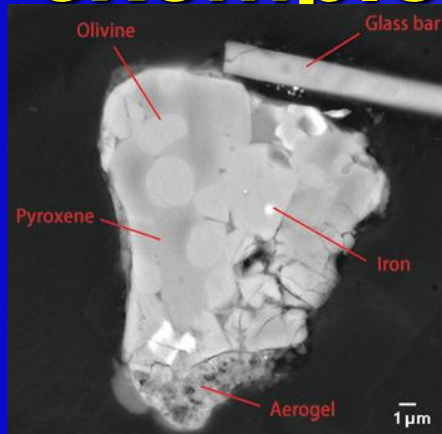
Temperatura no proto-disco planetario

1000-2000 K

100-1000 K

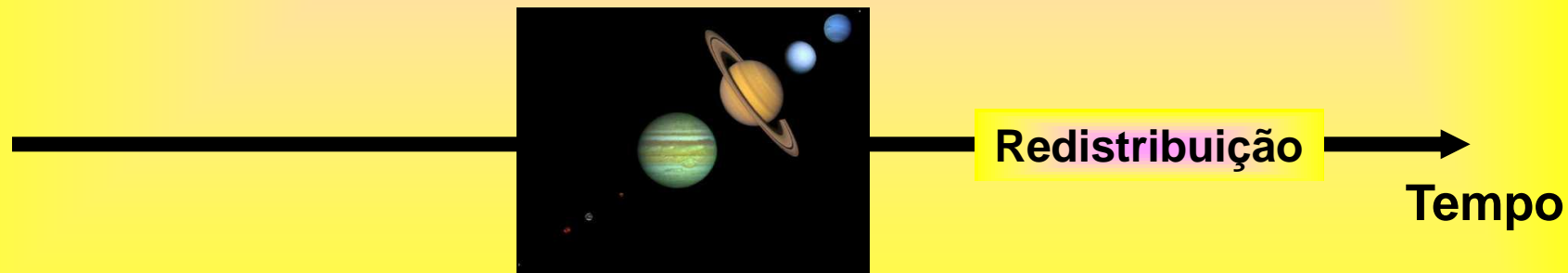
< 100 K

Condensação em sólidos (grãos)
apenas de elementos refratários (por
exemplo, Fe, Al, Ni) nas regiões mais
internas do sistema solar

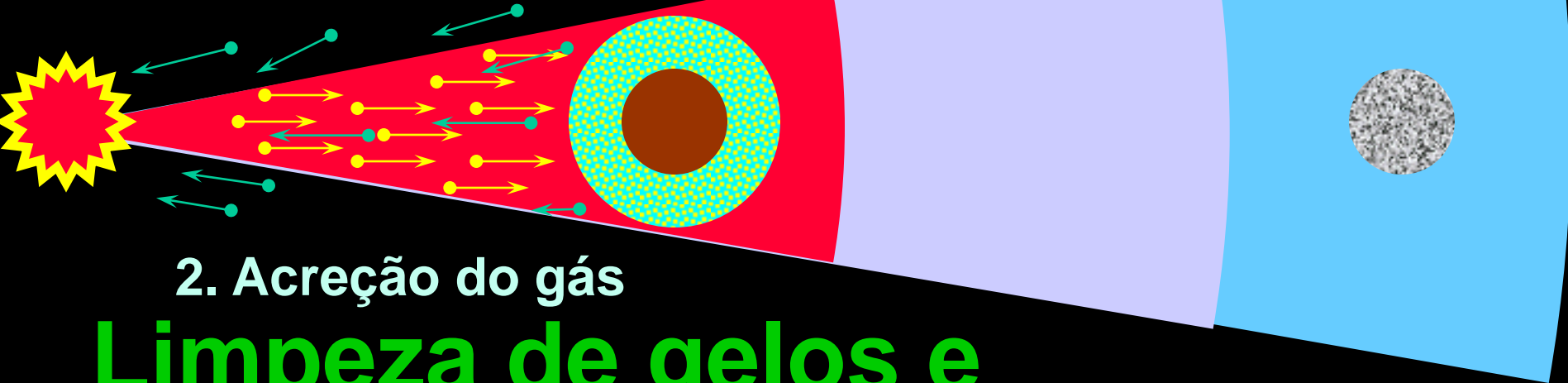


A section of cometary dust, thought to be primordial matter from the protoplanetary disk. Image courtesy of NASA.

Redistribuição dos elementos **depois** da formação dos planetas

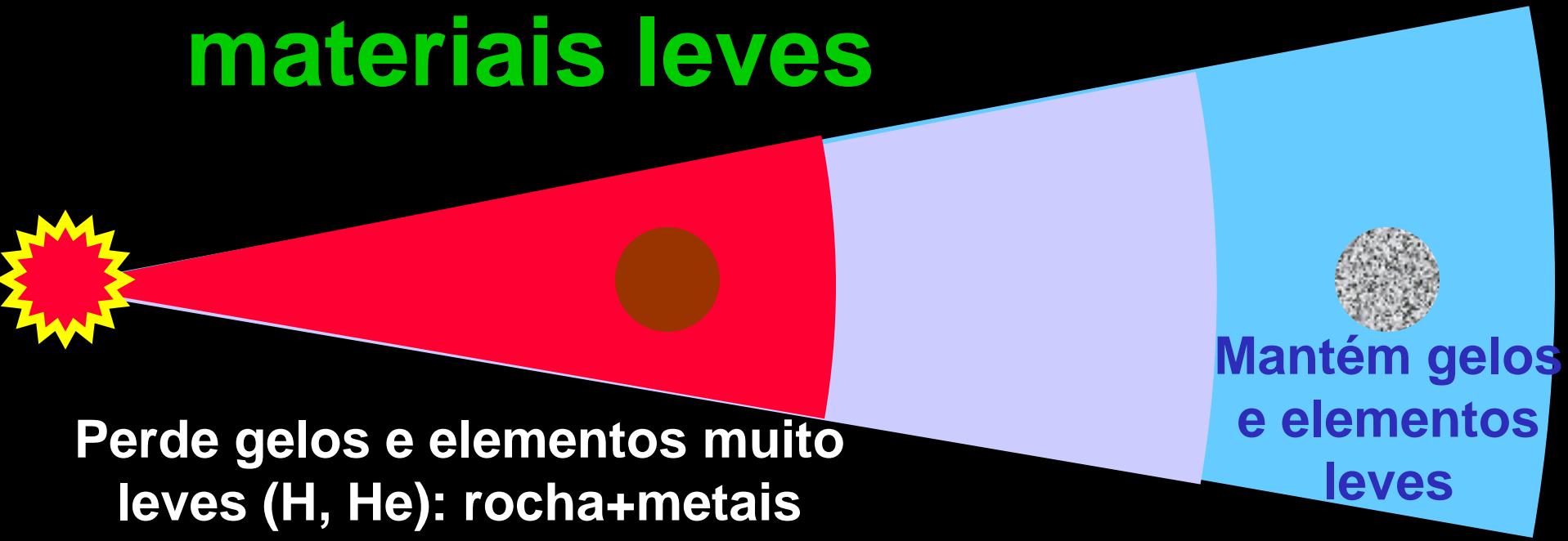


1. Limpeza por radiação solar



2. Acreção do gás

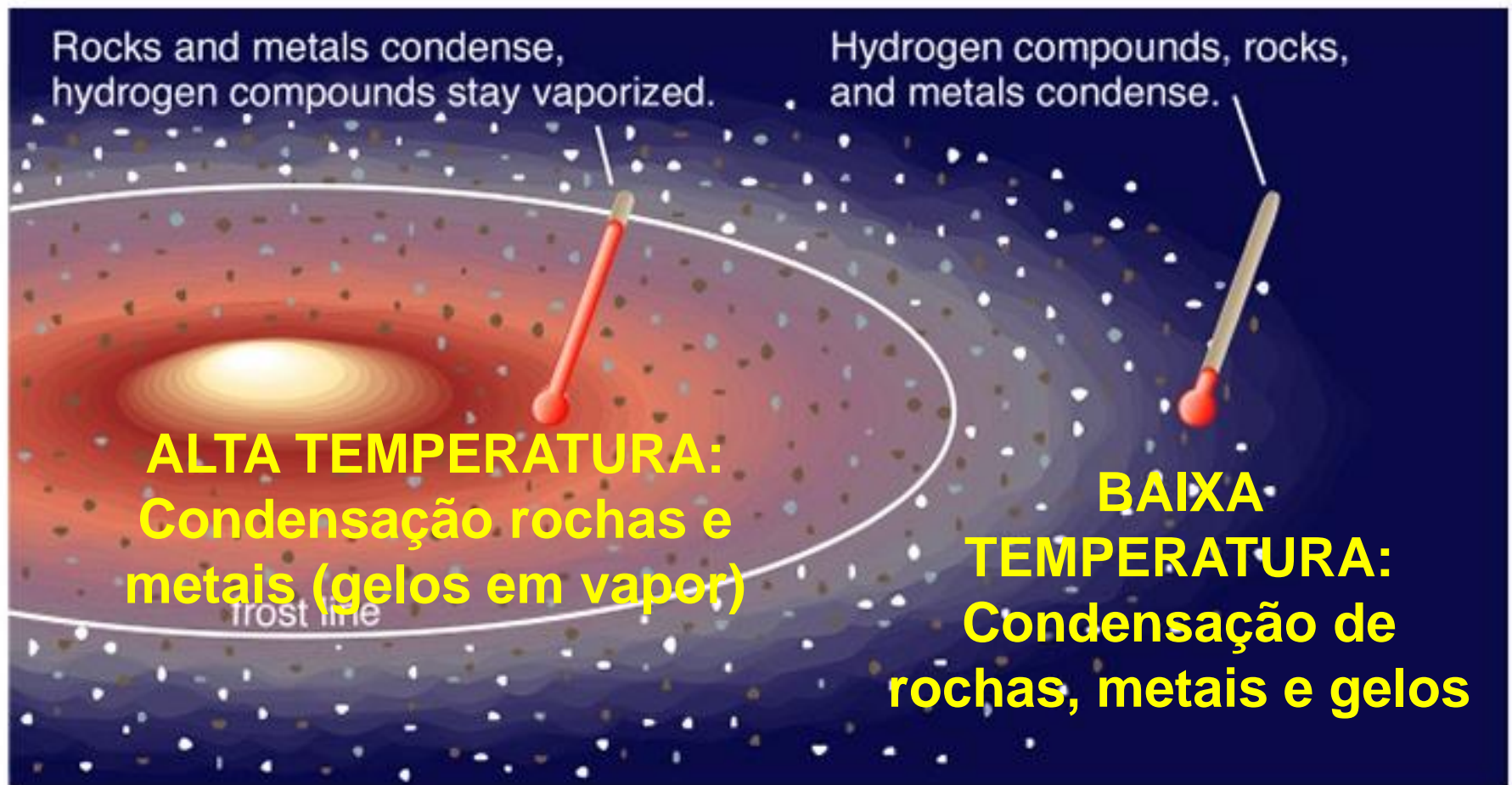
Limpeza de gelos e materiais leves



Perde gelos e elementos muito leves (H, He): rocha+metais

Mantém gelos e elementos leves

Condensação de elementos químicos no sistema solar: planetas rochosos e gasosos



Condensação de elementos químicos no sistema solar

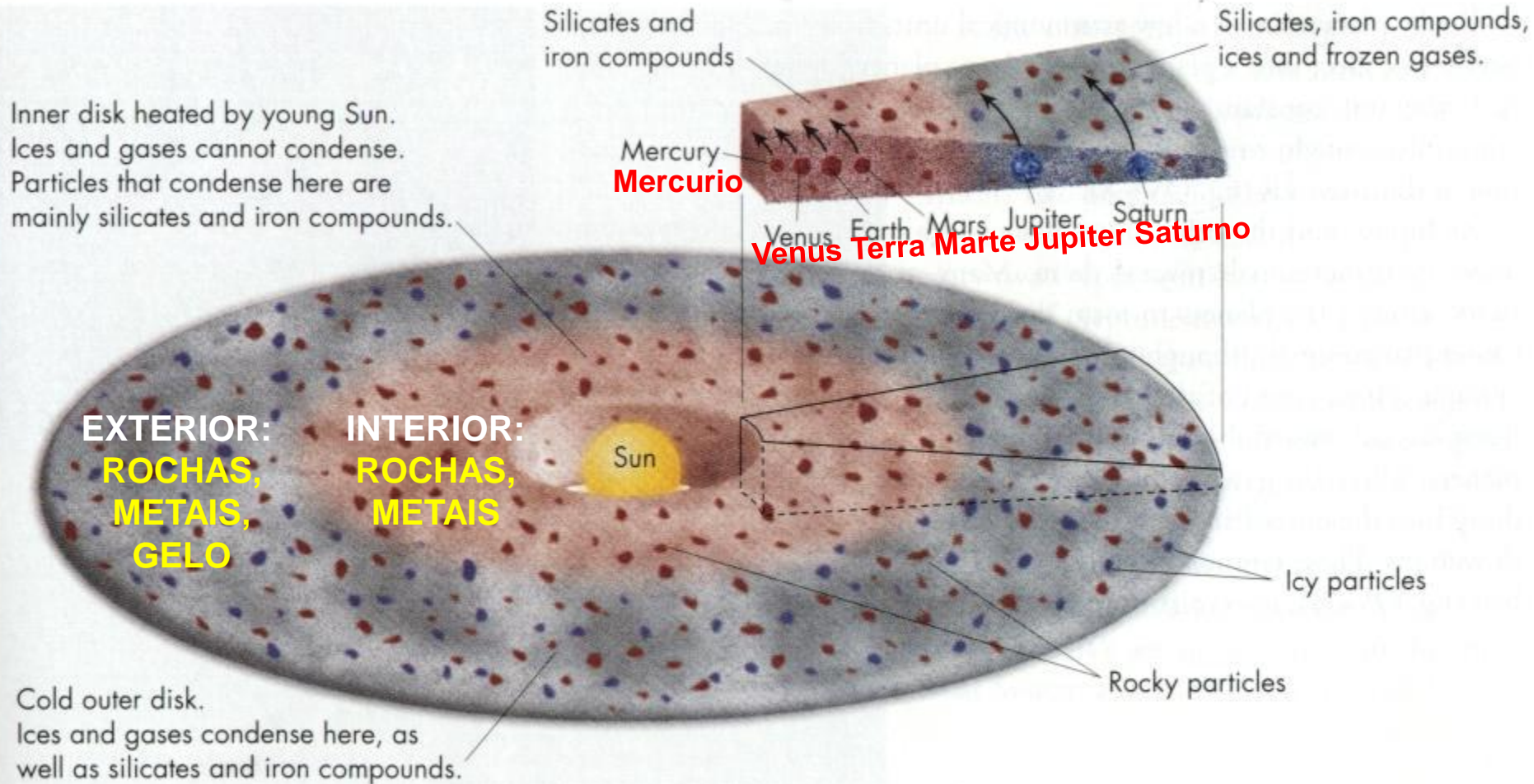


FIGURE OV4.6

Heat from the young Sun prevented ice from condensing in the inner parts of the Solar Nebula. The planetesimals—and ultimately the planets—that formed there are therefore composed mainly of rock and iron.

Durante o processo de condensação em planetesimais o Sol estava na fase final de acreção



O gás acretado pelo Sol nos estágios finais da formação do sistema solar seria deficiente em elementos químicos que formam rochas e metais



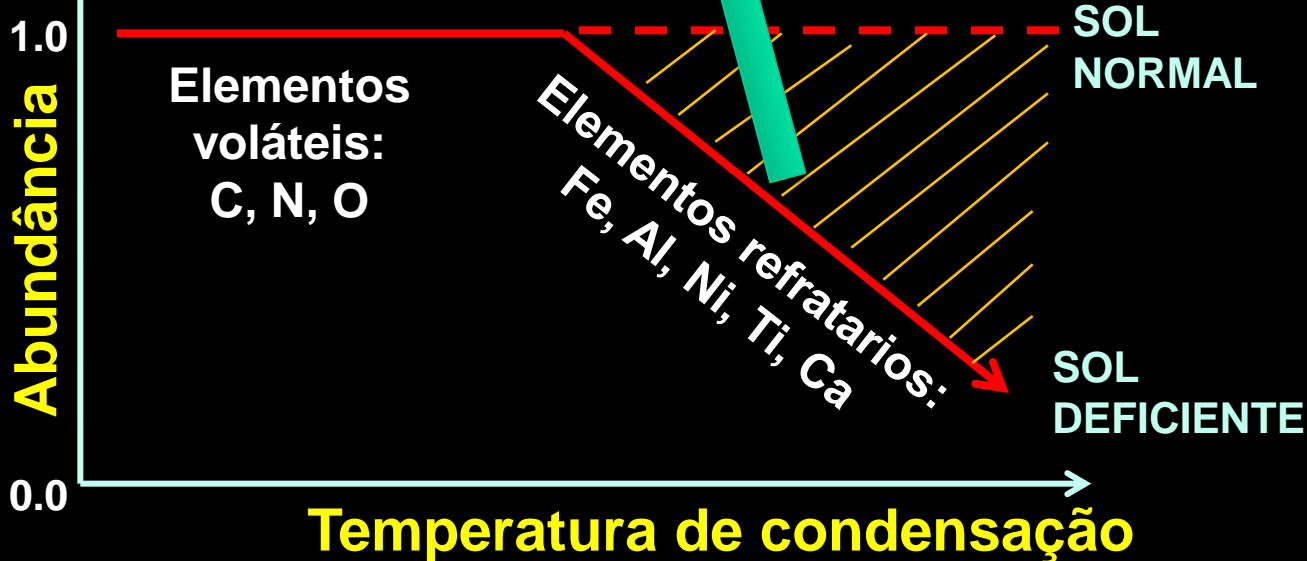
**As camadas mais externas do Sol
podem ser deficientes em elementos
químicos que formam rocha e metais**



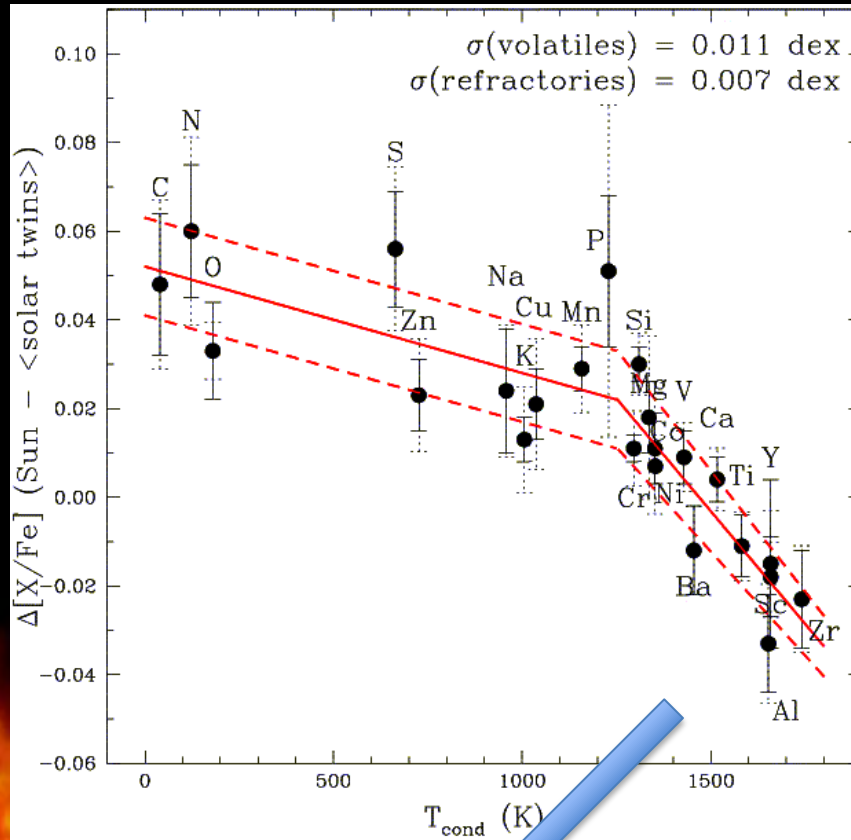
Abundância (Sol / estrelas)



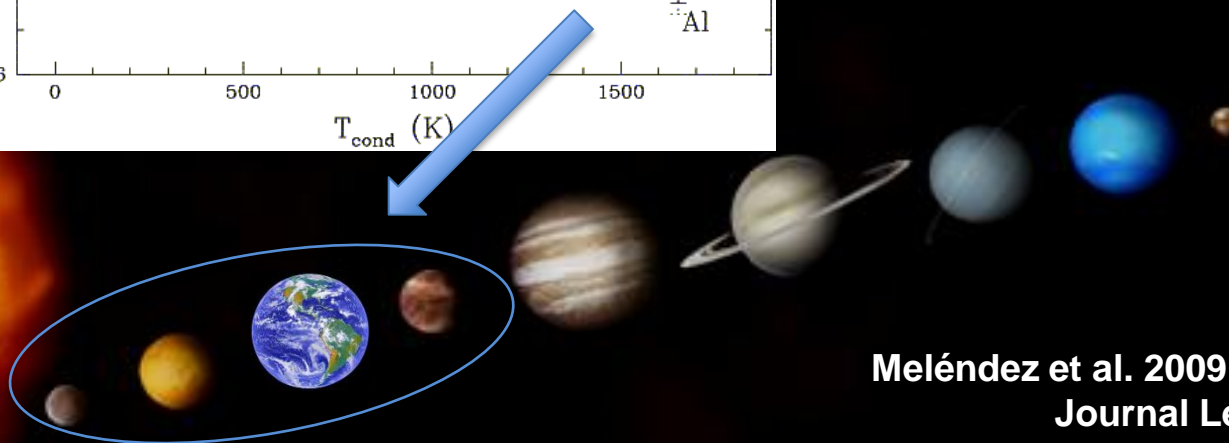
As camadas mais externas do Sol são de fato deficientes em elementos químicos que formam metais e rochas



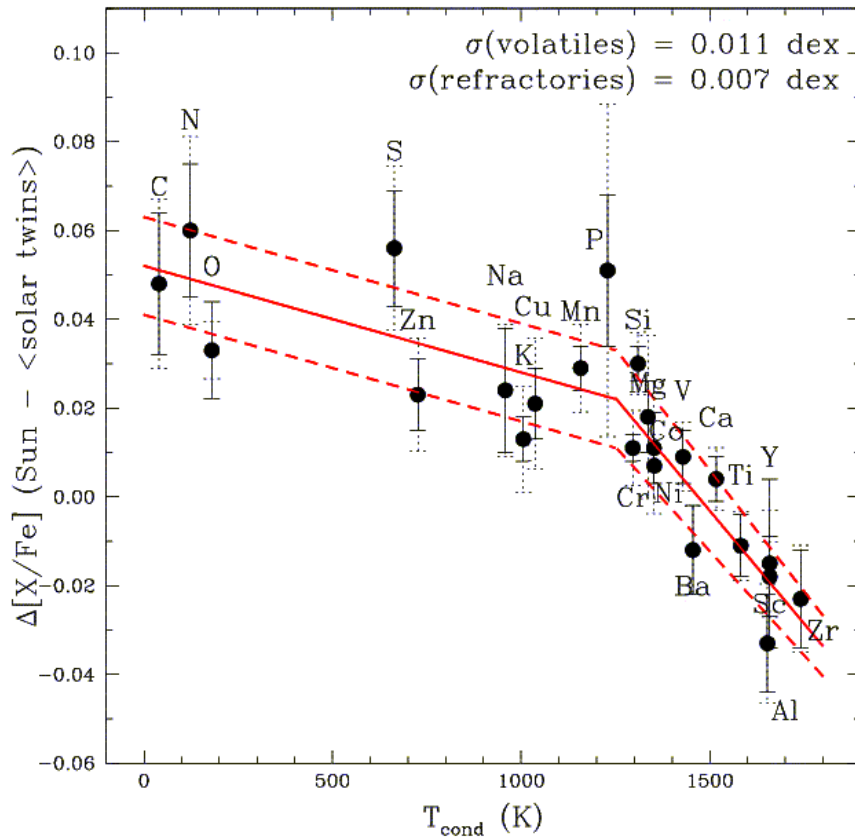
As camadas externas do Sol acretaram material deficiente em refractarios



O Sol é deficiente em refratarios porque esses elementos foram usados para formar os planetas terrestres!



Meléndez et al. 2009,
Astrophysical Journal Letters,
704, L66



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 704:L66–L70, 2009 October 10

© 2009. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in the U.S.A.

doi:10.1088/0004-637X/704/1/L66

THE PECULIAR SOLAR COMPOSITION AND ITS POSSIBLE RELATION TO PLANET FORMATION

J. MELÉNDEZ^{1,5}, M. ASPLUND², B. GUSTAFSSON³, AND D. YONG⁴

¹ Centro de Astrofísica da Universidade do Porto, Rua das Estrelas, 4150-762 Porto, Portugal; jorge@astro.up.pt

² Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Str. 1, Postfach 1317, D-85741 Garching, Germany

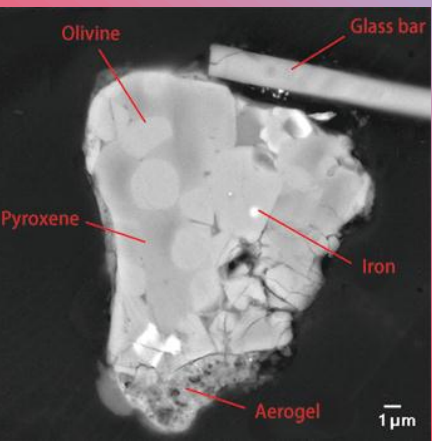
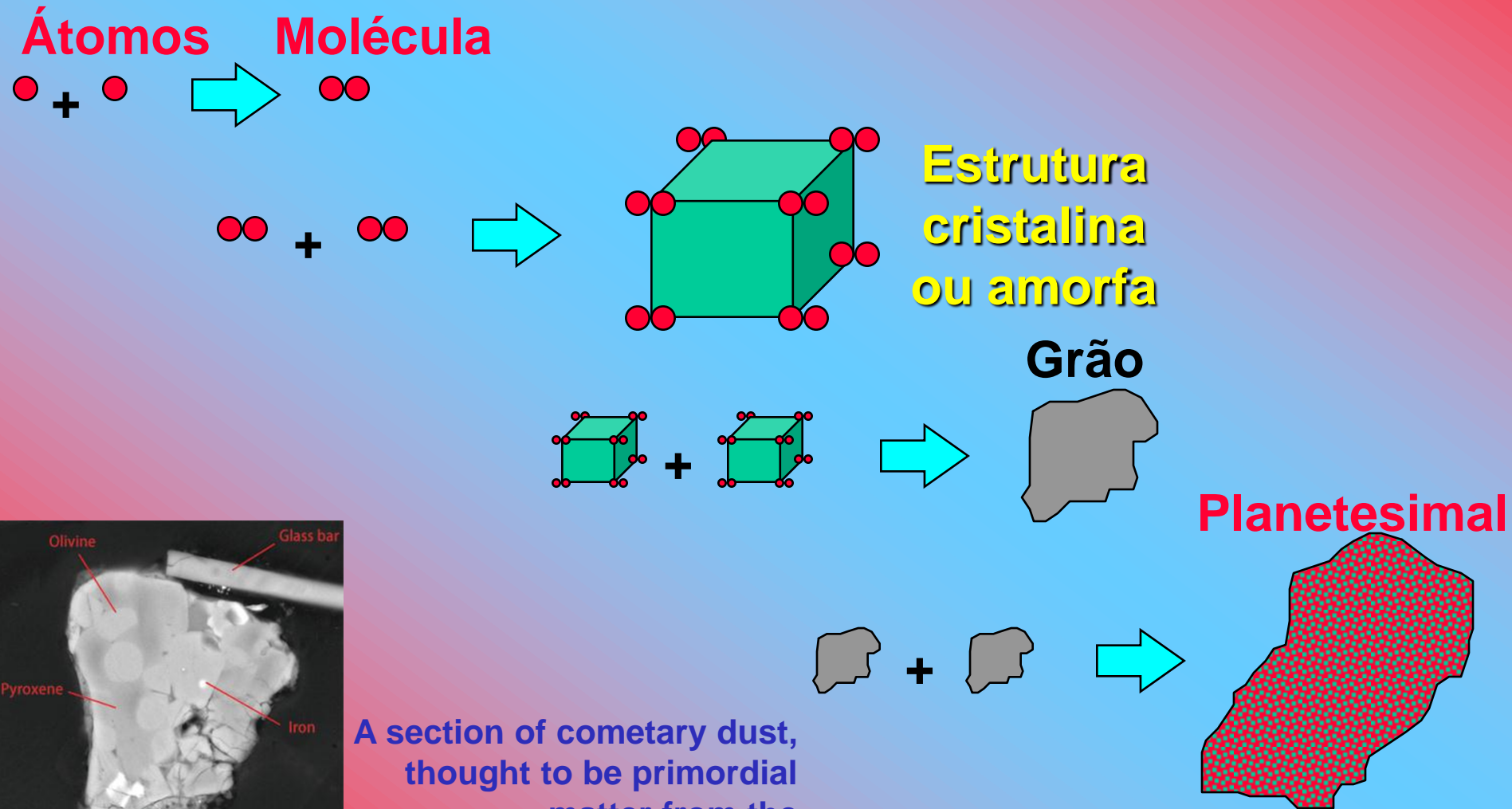
³ Institutionen för fysik och astronomi, Uppsala universitet, Box 515, SE-75120 Uppsala, Sweden

⁴ Research School of Astronomy & Astrophysics, Australian National University, Mount Stromlo Observatory, Cotter Road, Weston Creek, ACT 2611, Australia

Received 2009 August 1; accepted 2009 September 11; published 2009 September 25

Formação da Terra

Átomos, moléculas, grãos, planetesimais



A section of cometary dust, thought to be primordial matter from the protoplanetary disk, NASA.

Formação da Terra

Agregação de Planetesimais



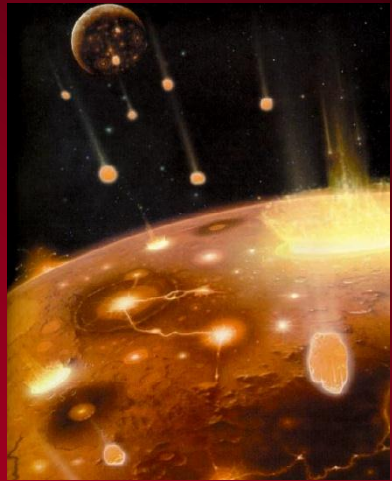
"Feto" Terra

"Bebê" Terra:
meio pastosa e
muito quente

Crosta
sólida e
mais fria

Região
interna
pastosa
e quente

"Criança" Terra



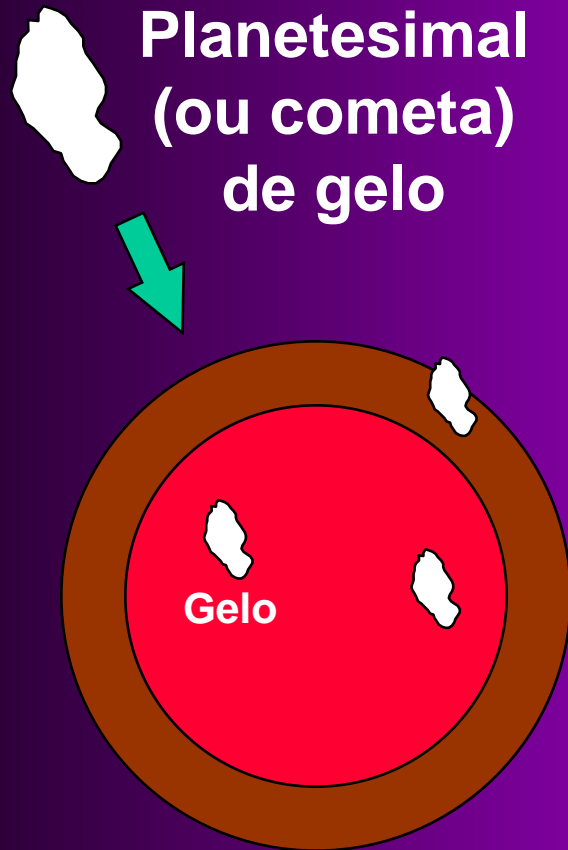
T.C. Chamberlin

R.F. Moulton

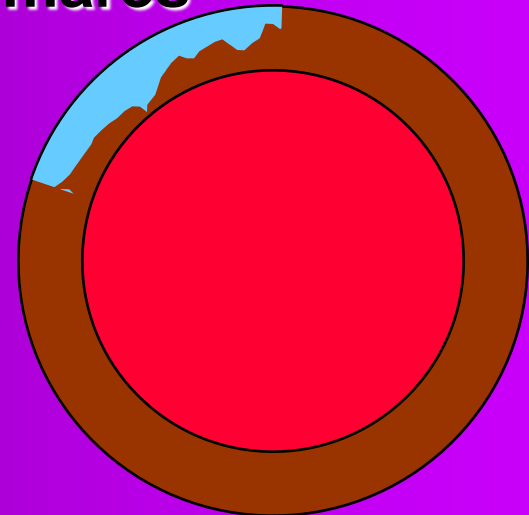
C.F. Weizsäcker

Água e atmosfera da Terra

Molhando a Terra...



Formando
os mares

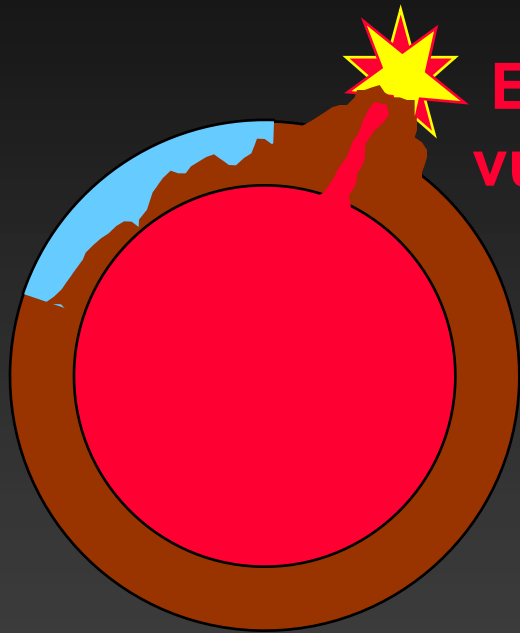


Águas da Terra

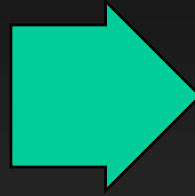


A maior parte da água existente na Terra foi trazida à Terra através de meteoritos ricos em H_2O (na forma de gelo) depois do resfriamento da crosta terrestre

Criando a atmosfera da Terra

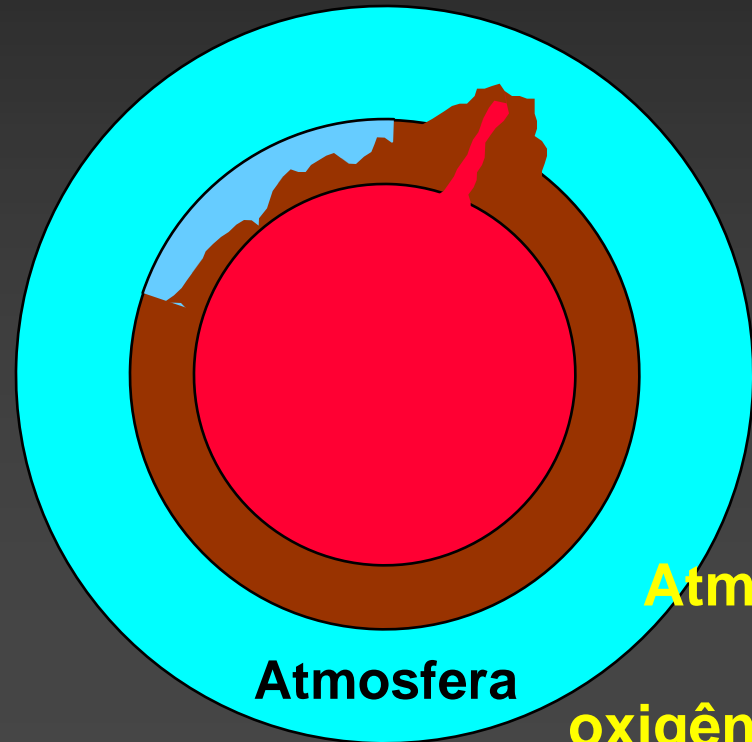


Erupção
vulcânica



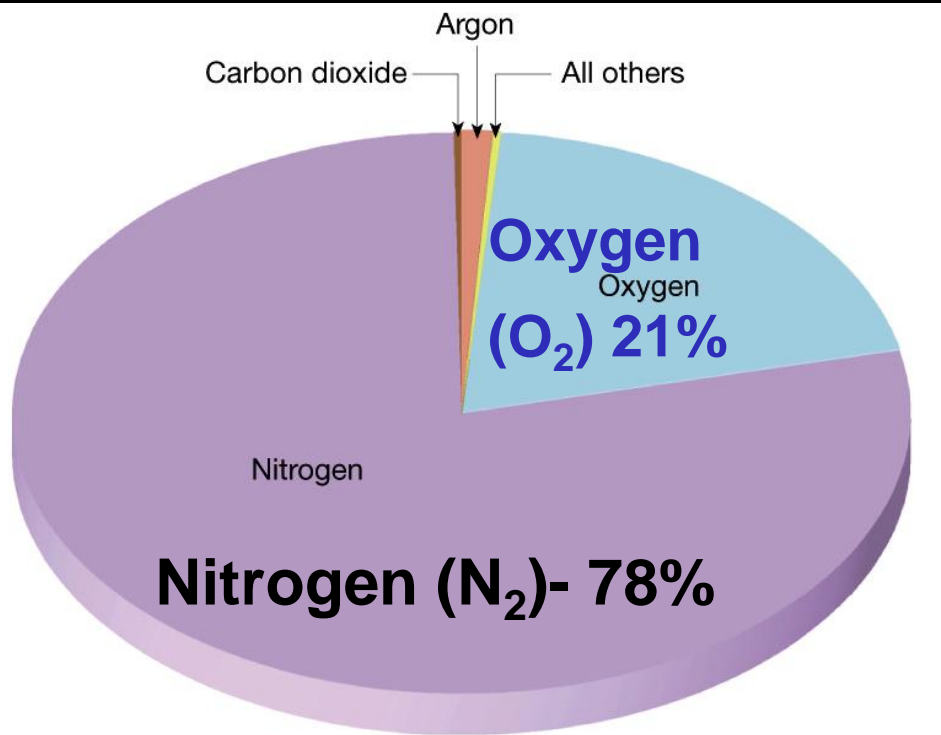
Liberou gases
presos nos
materiais do
interior da Terra

(H_2O , CO_2 , SO_2 , CO , S_2 , Cl_2 , N_2 , H_2) and NH_3
(ammonia) and CH_4 (methane)



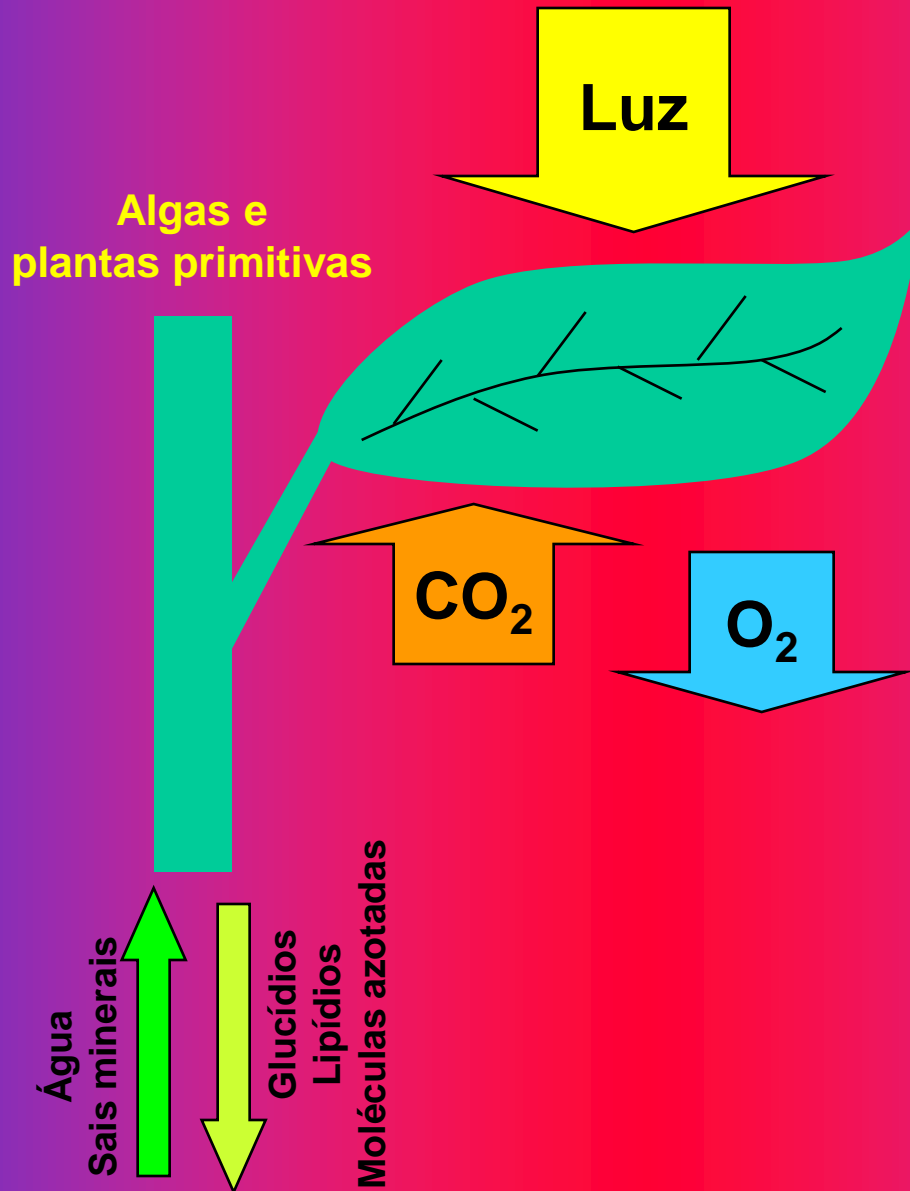
Atmosfera
sem
oxigênio (O_2)

Qual a origem do gas oxigênio na atmosfera?



Cianobactérias (2.5 - 3 Gyr ?) realizam a fotossíntese utilizando luz solar, água e dióxido de carbono para produzir carboidratos e oxigênio.

Fotossíntese



**Voltemos
às
estrelas !**

Plêiades

Estrelas Jovens



Sol

Estrela madura



Idade do Sol :
4,54 Bilhões de anos

Feto



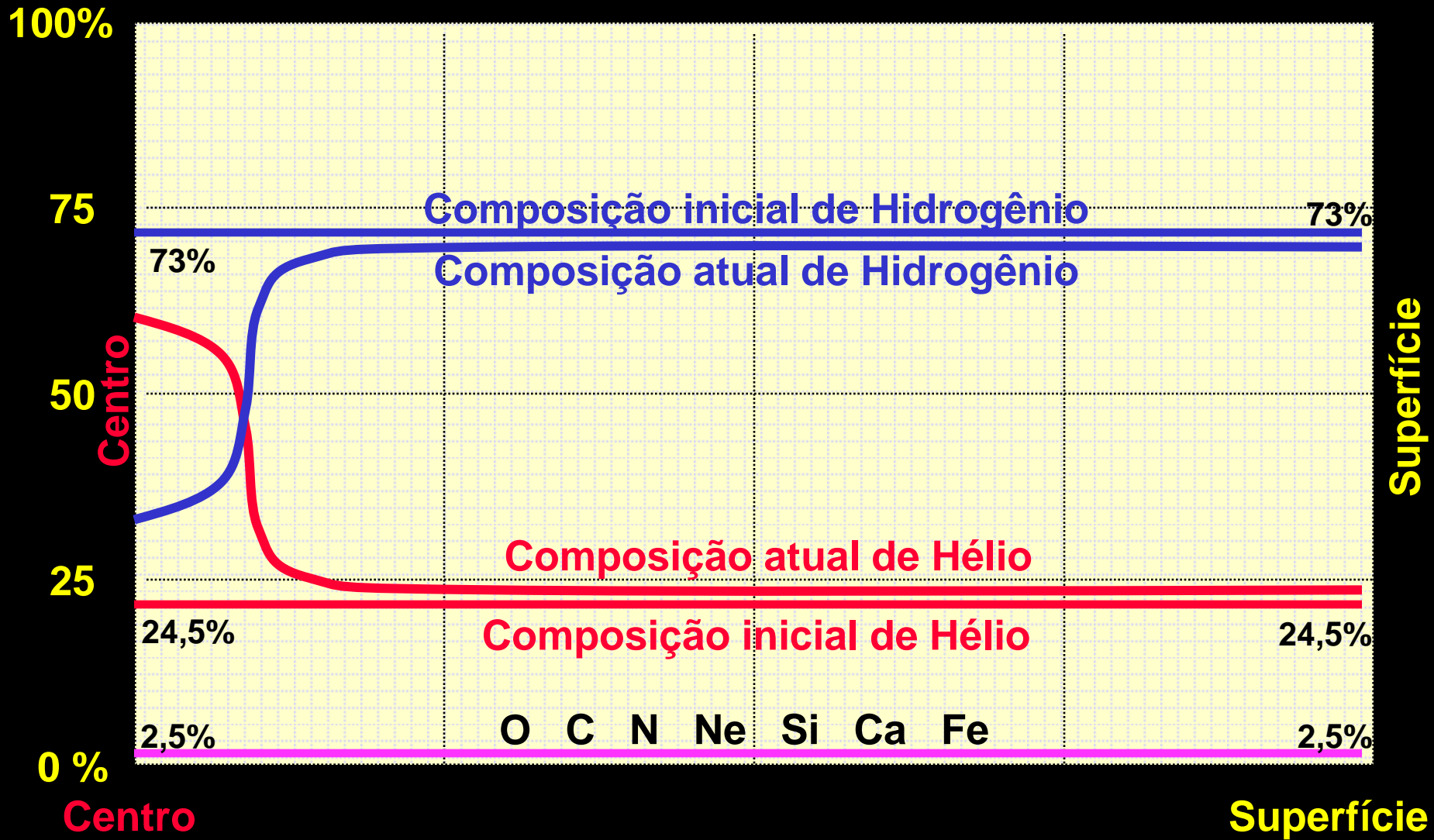
Adoles-
cência

Vida  adulta

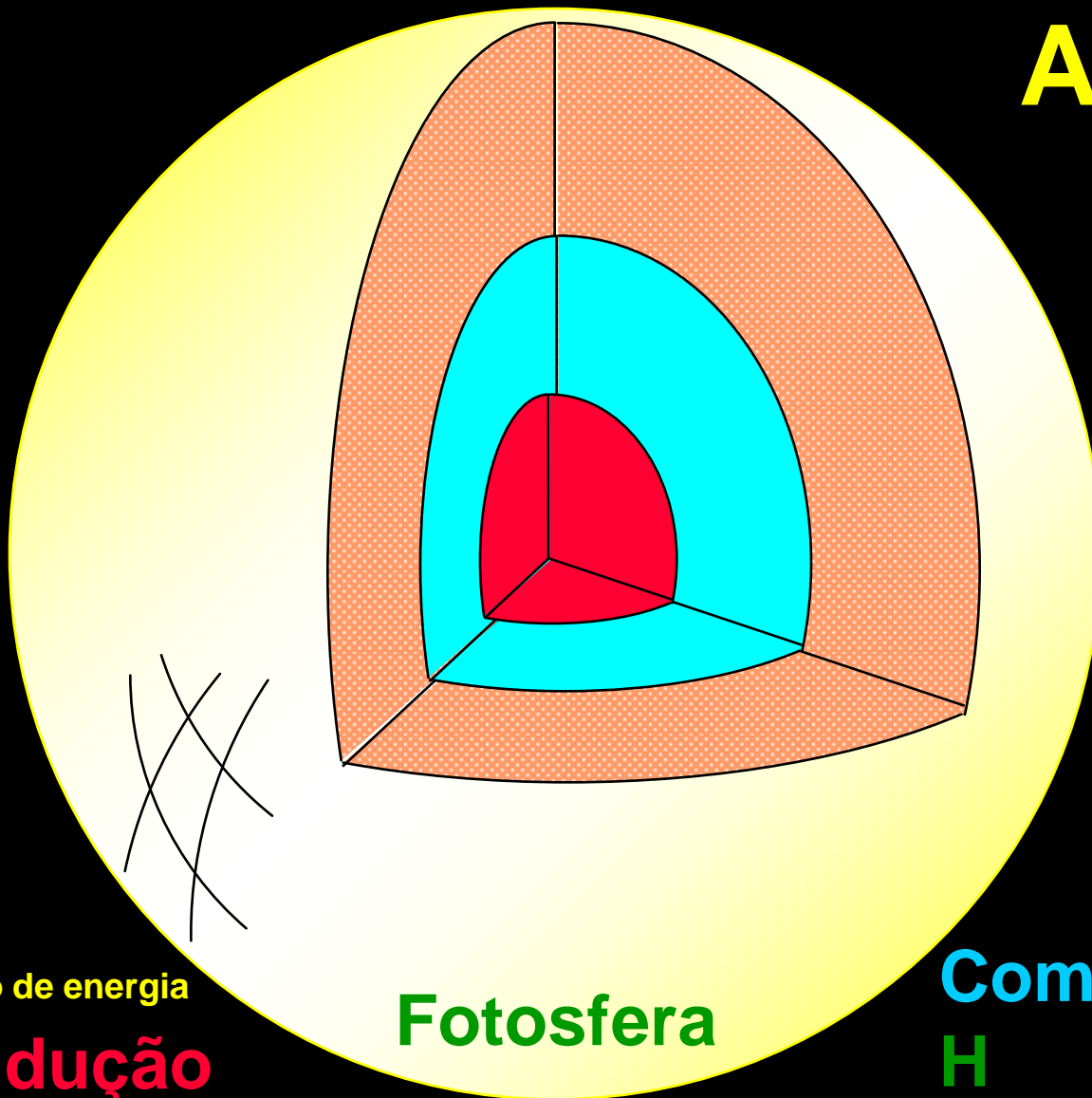
Velhice



Mudanças na composição química INTERNA do Sol



A estrela Sol



Transmissão de energia

● **Condução**

● **Radiação**

● **Convecção**

Fotosfera

Composição (em massa)

H = 73,0%

He = 24,5%

Outros = 2,5%

Propagação do calor

(transferência de energia devido à diferença de temperatura)

Convecção: movimento de material duma região para outra

Convecção

Convection

Conduction

Condução

Radiation

Radiation

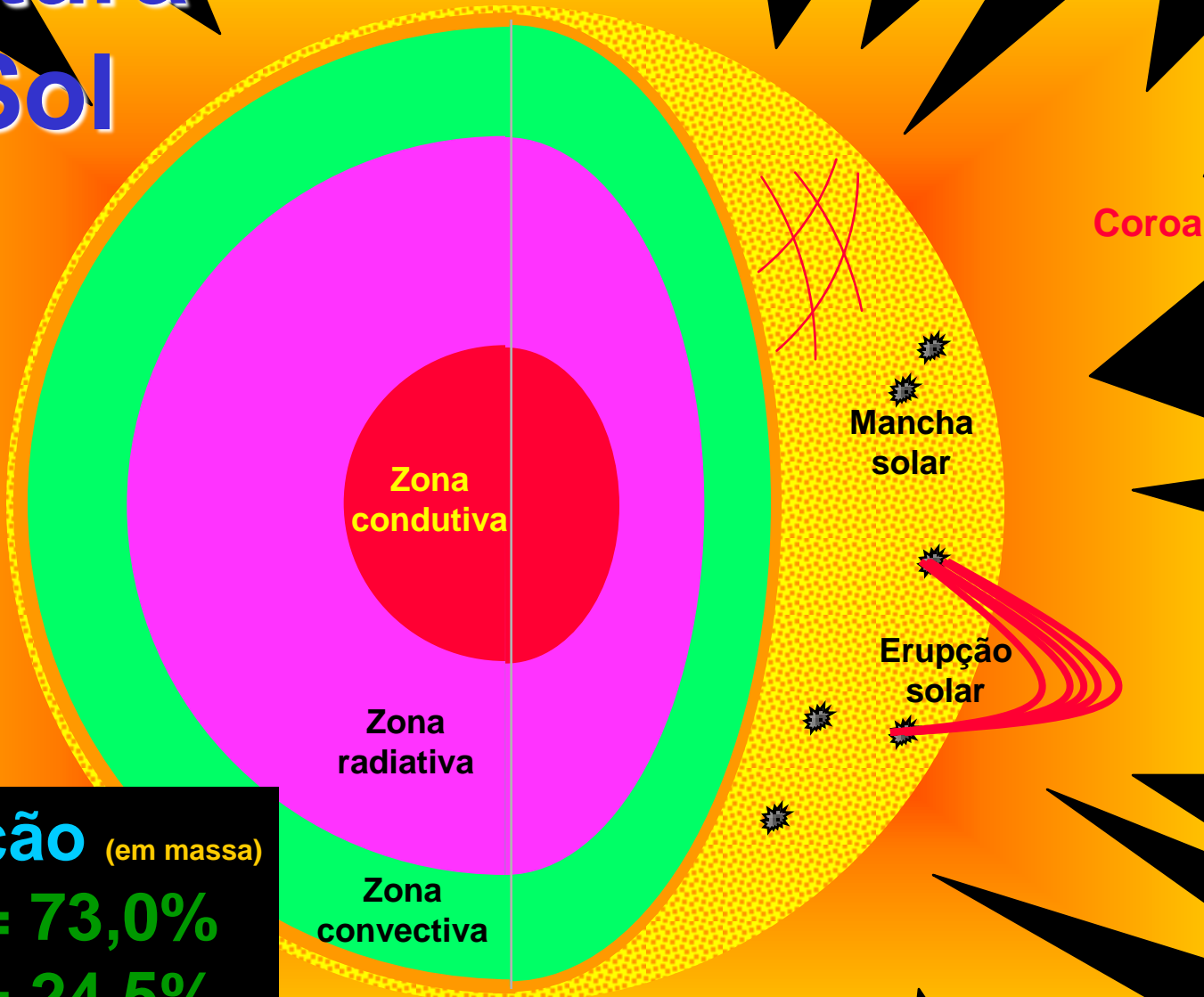
Radiação:

Meio de ondas
electromagnéticas

Condução:
Contato direto



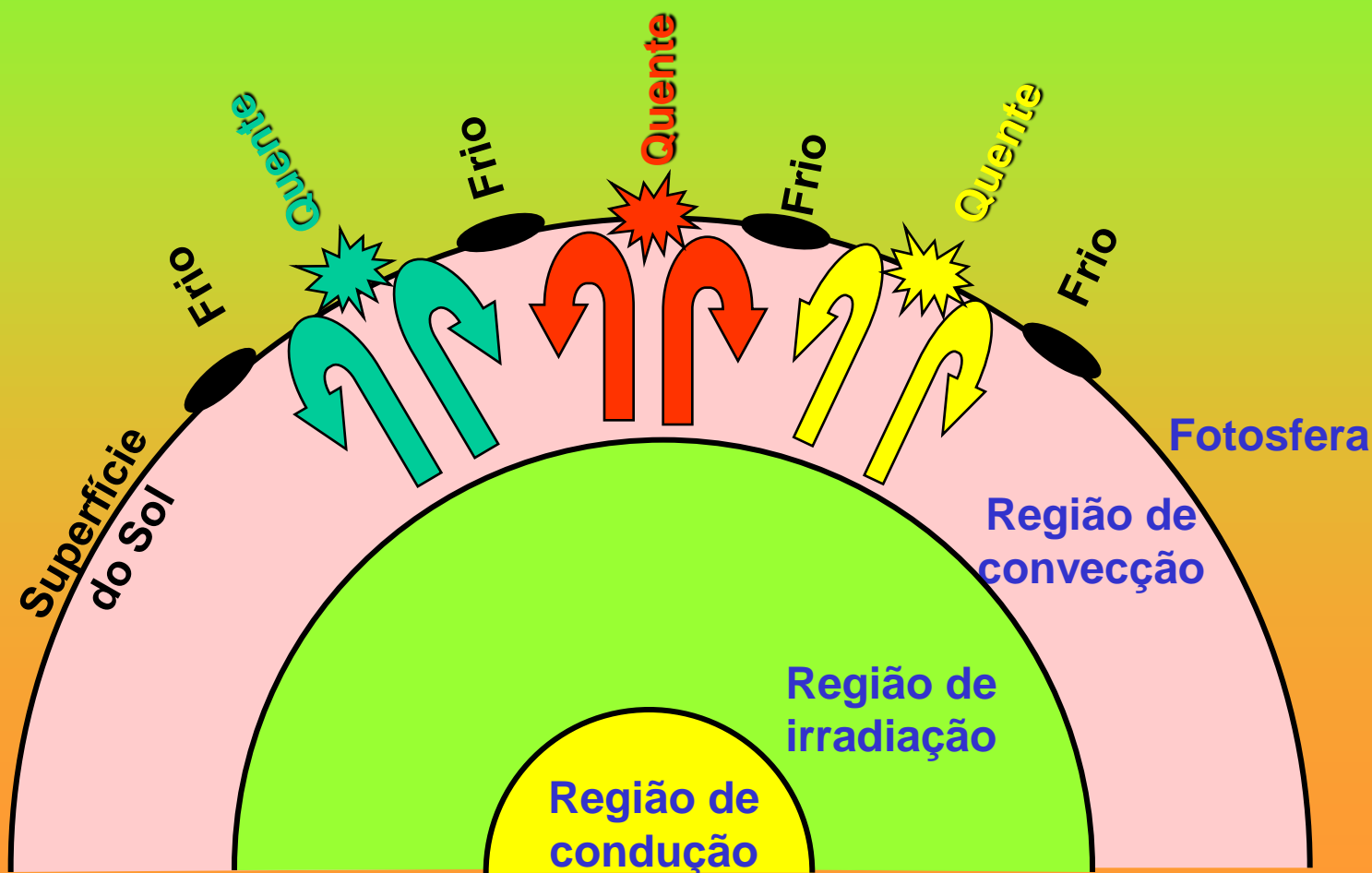
Estrutura do Sol



Composição (em massa)

H	= 73,0%
He	= 24,5%
Outros	= 2,5%

Convecção abaixo da fotosfera



Estrutura Granular (alveolar) do Sol

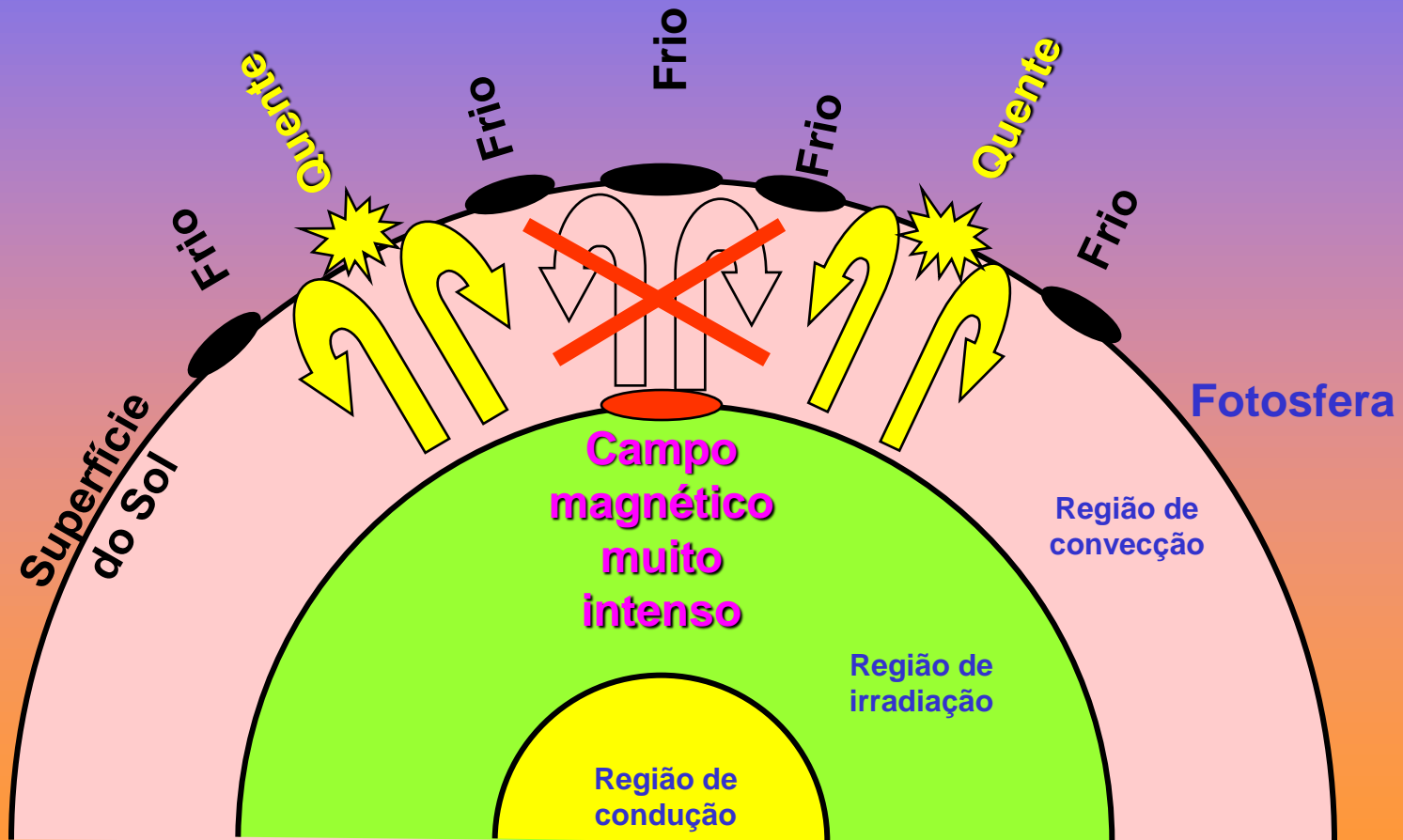
- Regiões **Claras**
 - Subida de gás quente
- Regiões **Escuras**
 - Descida de gás frio

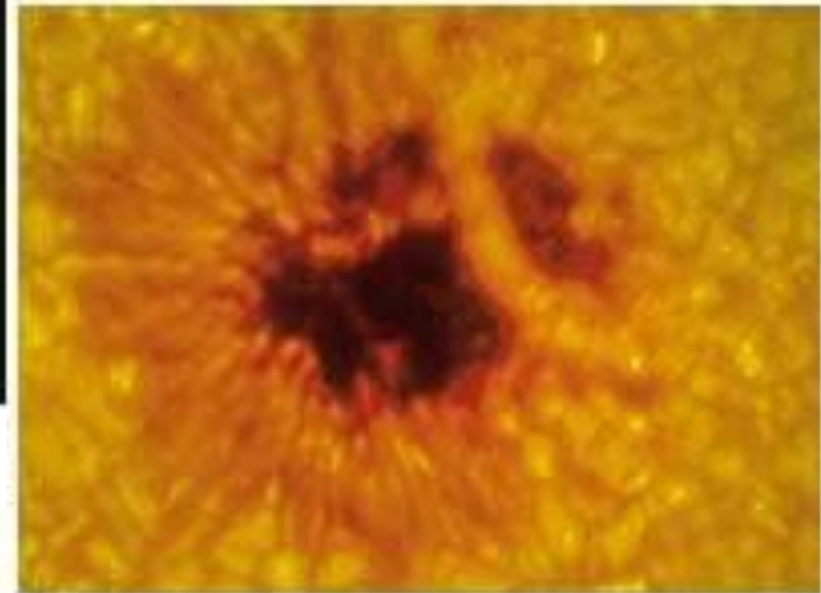
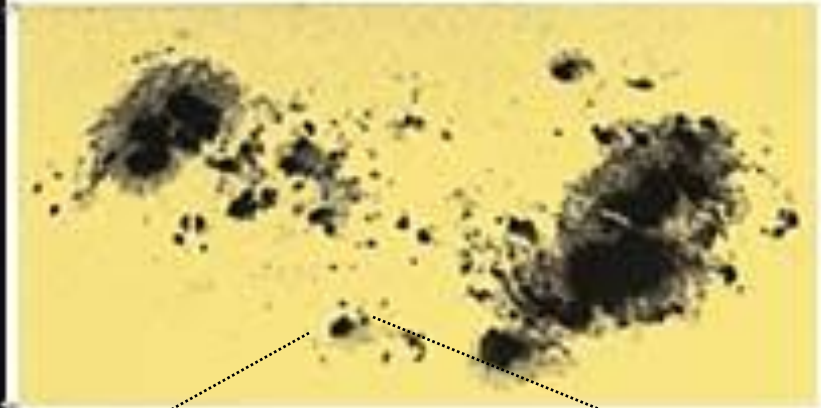
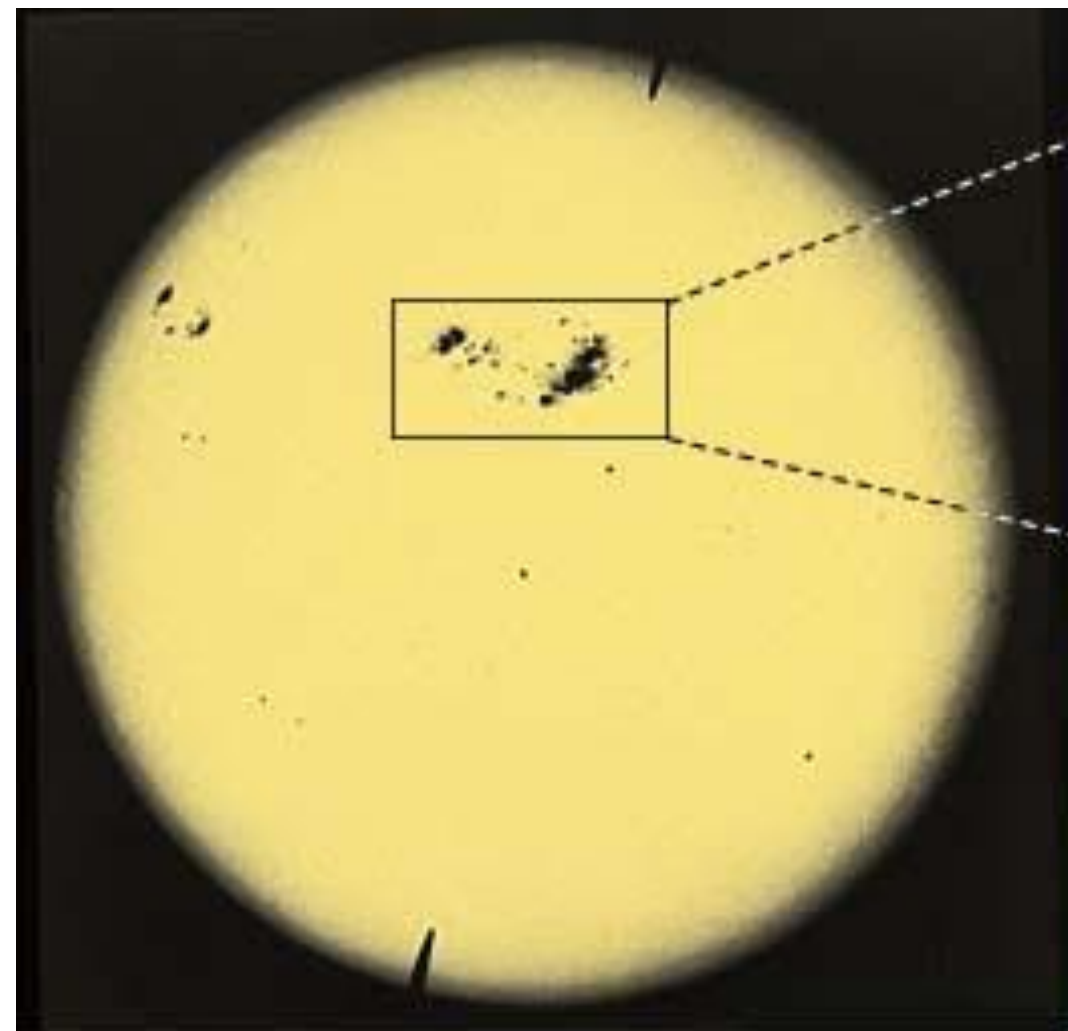
Diâmetro típico de um grânulo (alvéolo):

1000 km



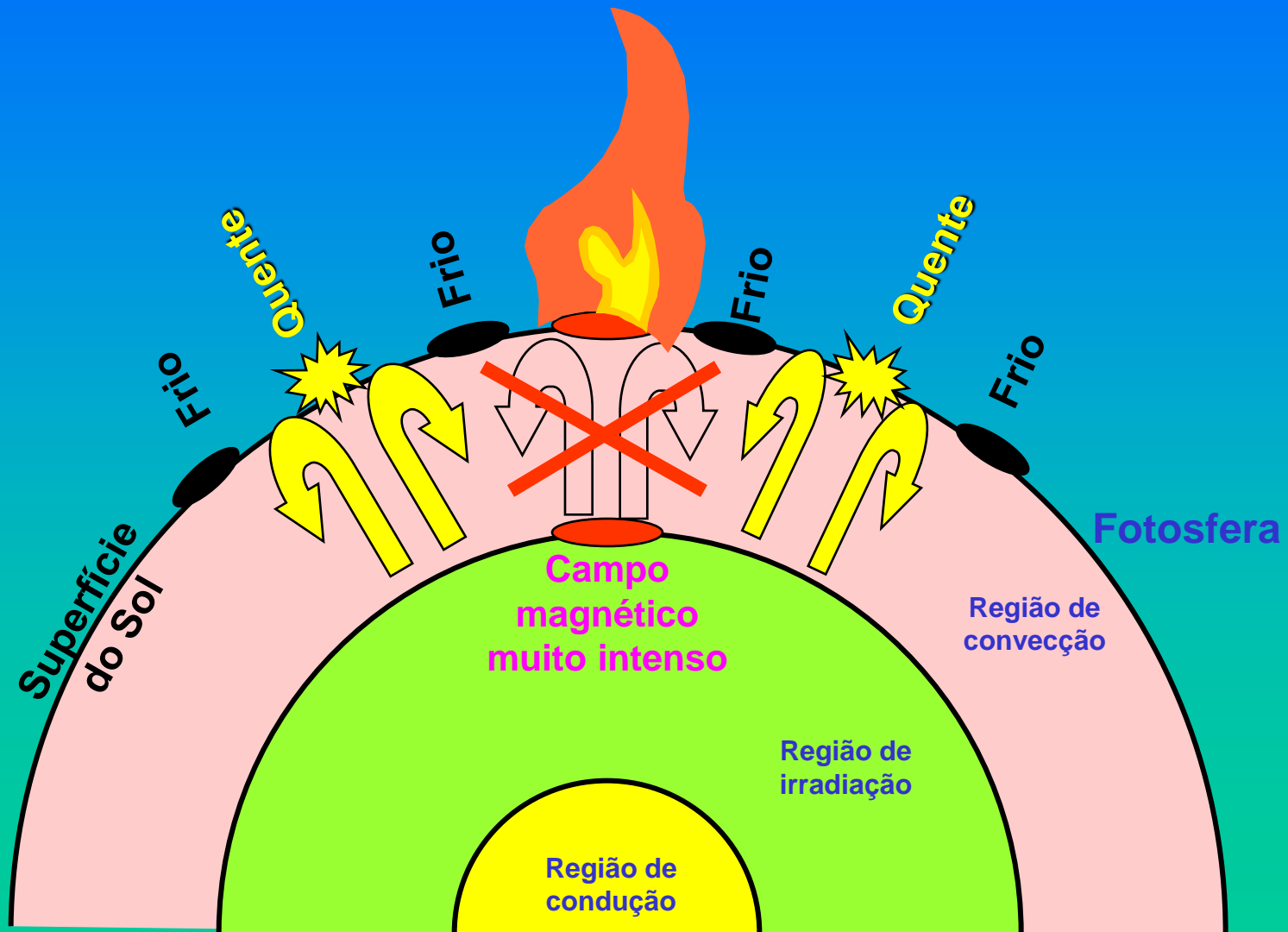
Formação de uma mancha solar





**Manchas
solares**

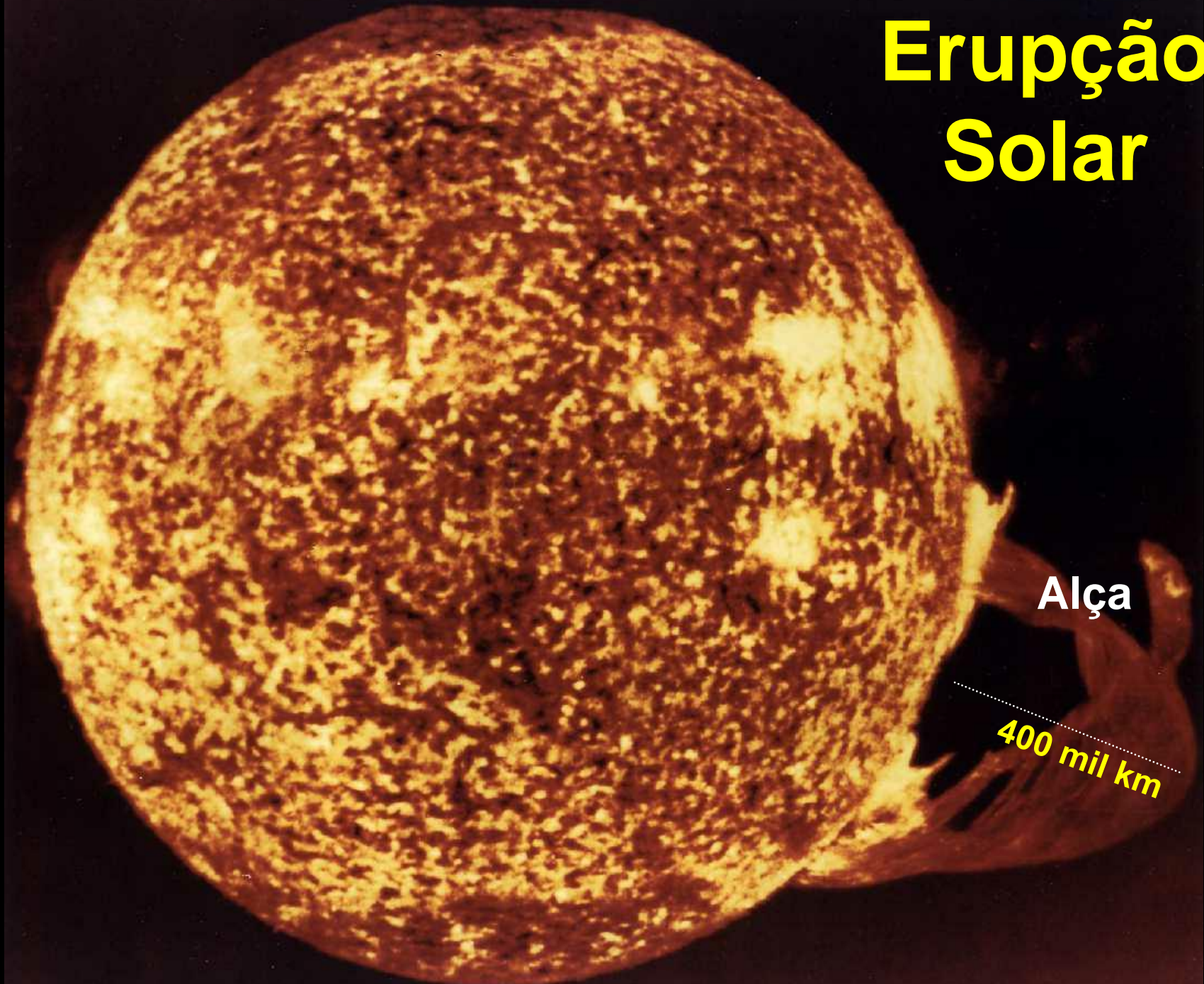
Erupção solar



Erupção Solar

Alça

400 mil km



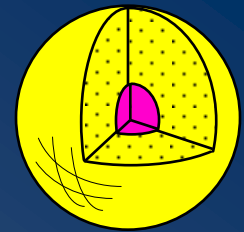
E ... qual será o futuro do Sol ?



Peso
Leve



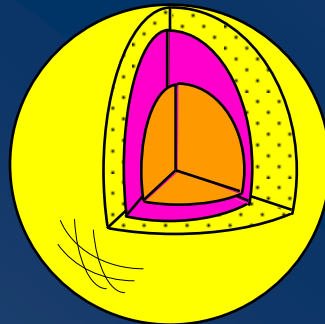
Evolução para Gigante Vermelha



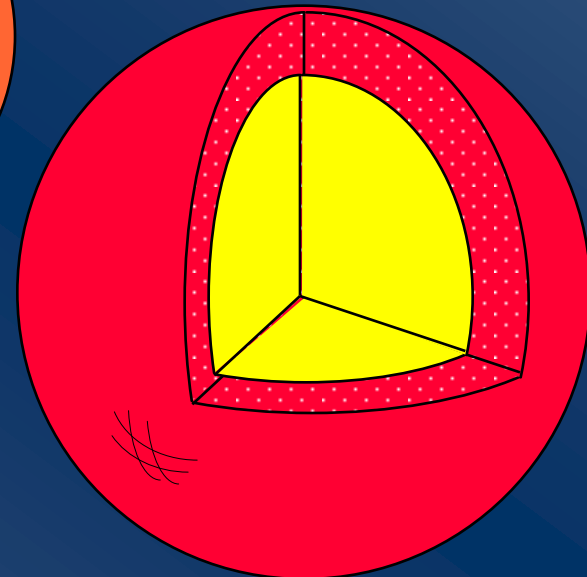
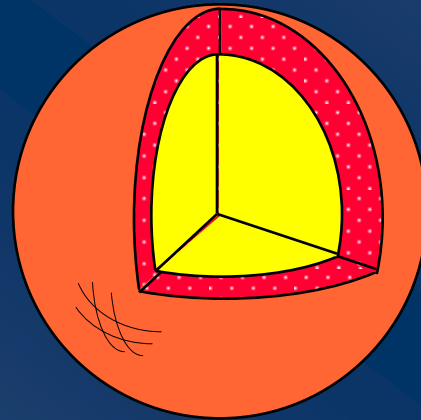
Passado



Hoje



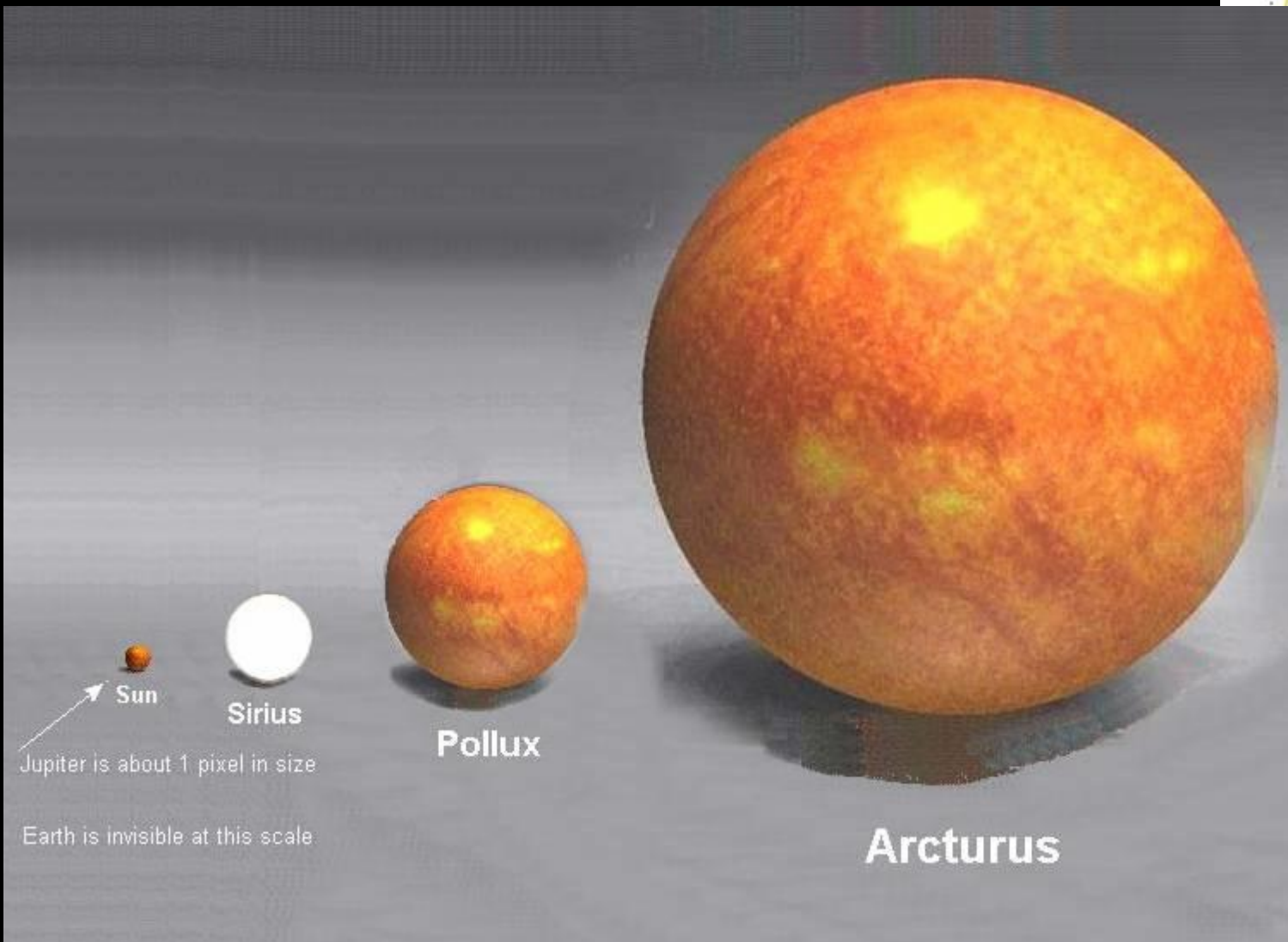
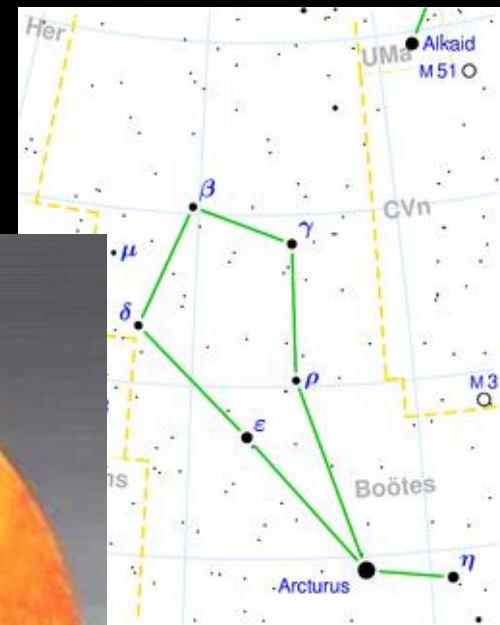
Futuro



Região de fusão nuclear

Arcturus

(Gigante vermelha)

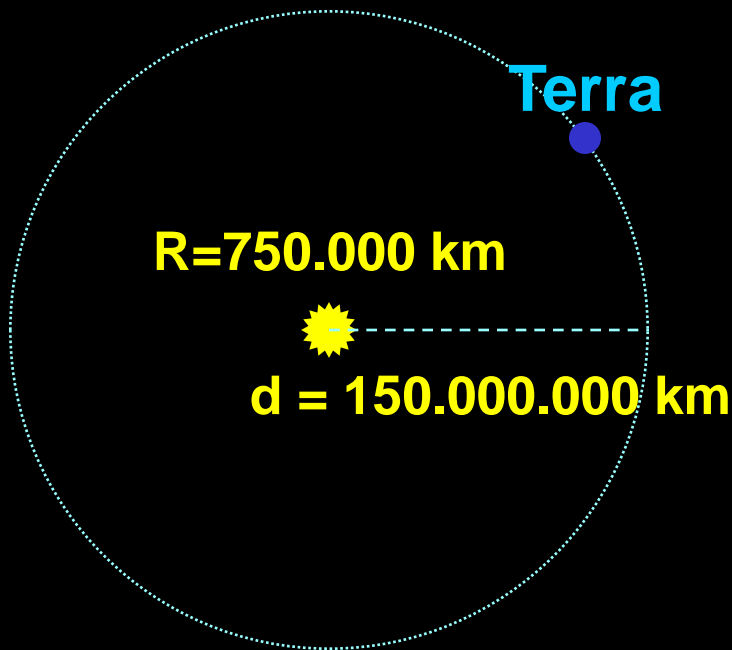


Jupiter is about 1 pixel in size

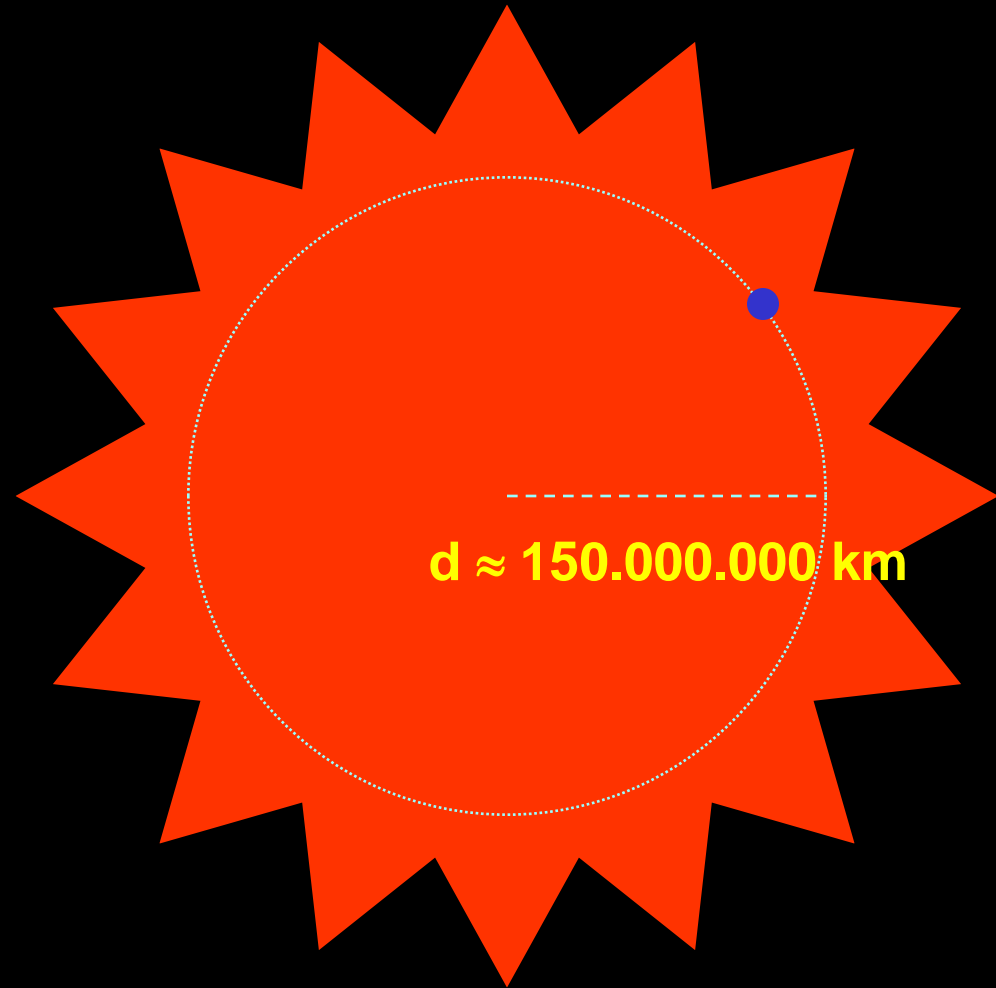
Earth is invisible at this scale

Arcturus

A gigante vermelha Sol

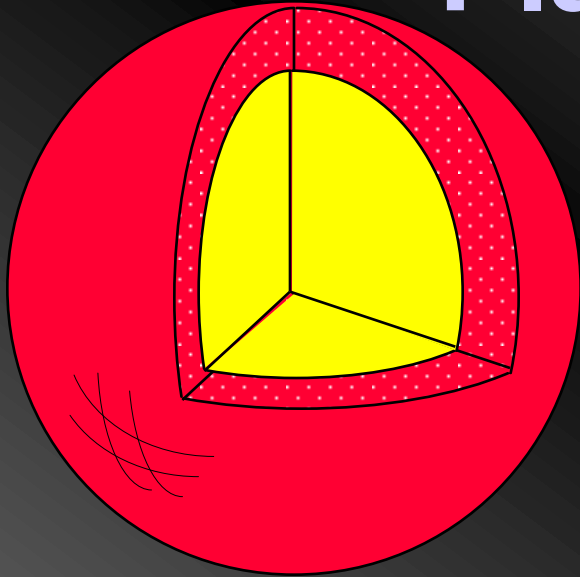


Hoje

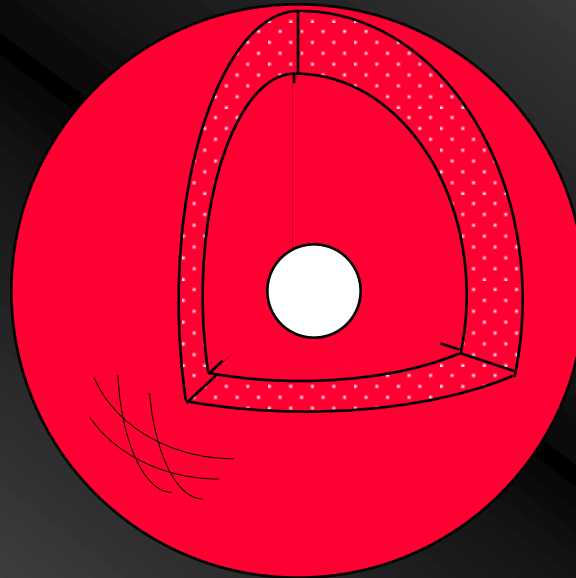


**Num futuro muito distante
(4,5 bilhões de anos)**

Evolução para Nebulosa Planetária e anã branca



Gigante vermelha



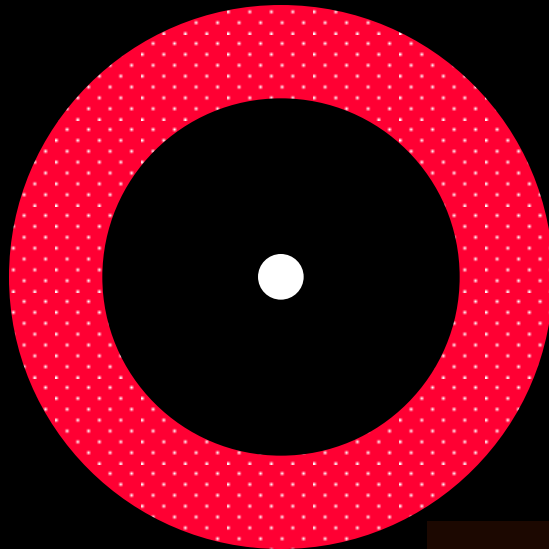
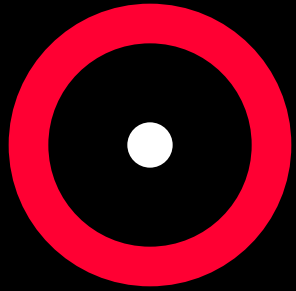
Nebulosa Planetária



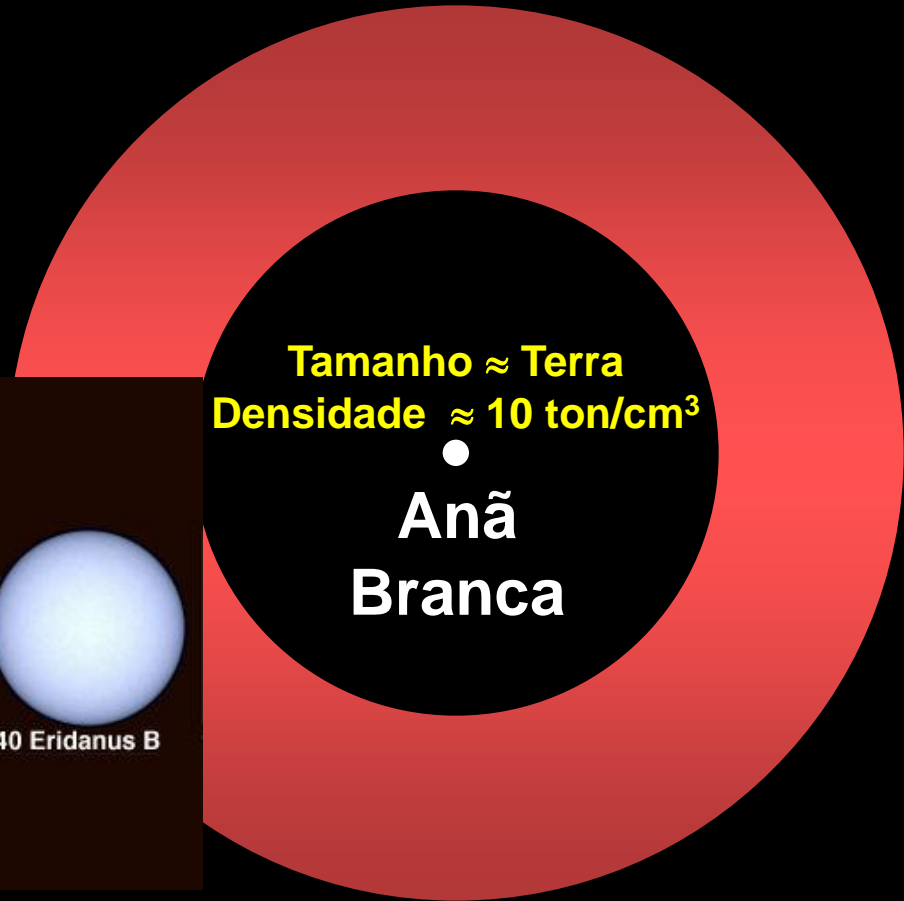
Anã Branca

Visão de uma Nebulosa Planetária

Evolução para Anã Branca



Gases que vão se espalhar pelo meio interestelar



Tamanho \approx Terra
Densidade $\approx 10 \text{ ton/cm}^3$

Anã Branca

Ocorre:

- ◆ Expansão da Casca
- ◆ Contração do núcleo



40 Eridanus B



Visão de uma
Nebulosa Planetária

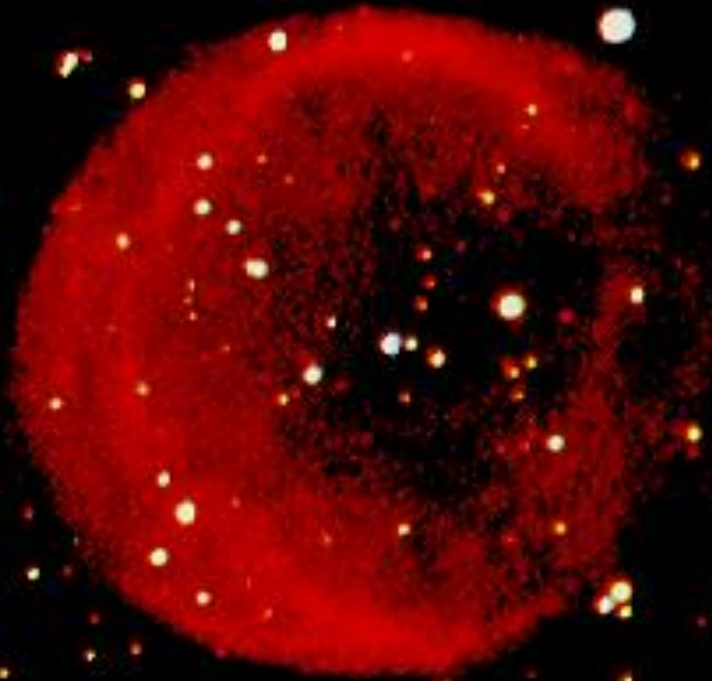
Nebulosa Planetária do Anel

(Constelação da Lira)



Nebulosa Planetária

(Constelação da Águia)

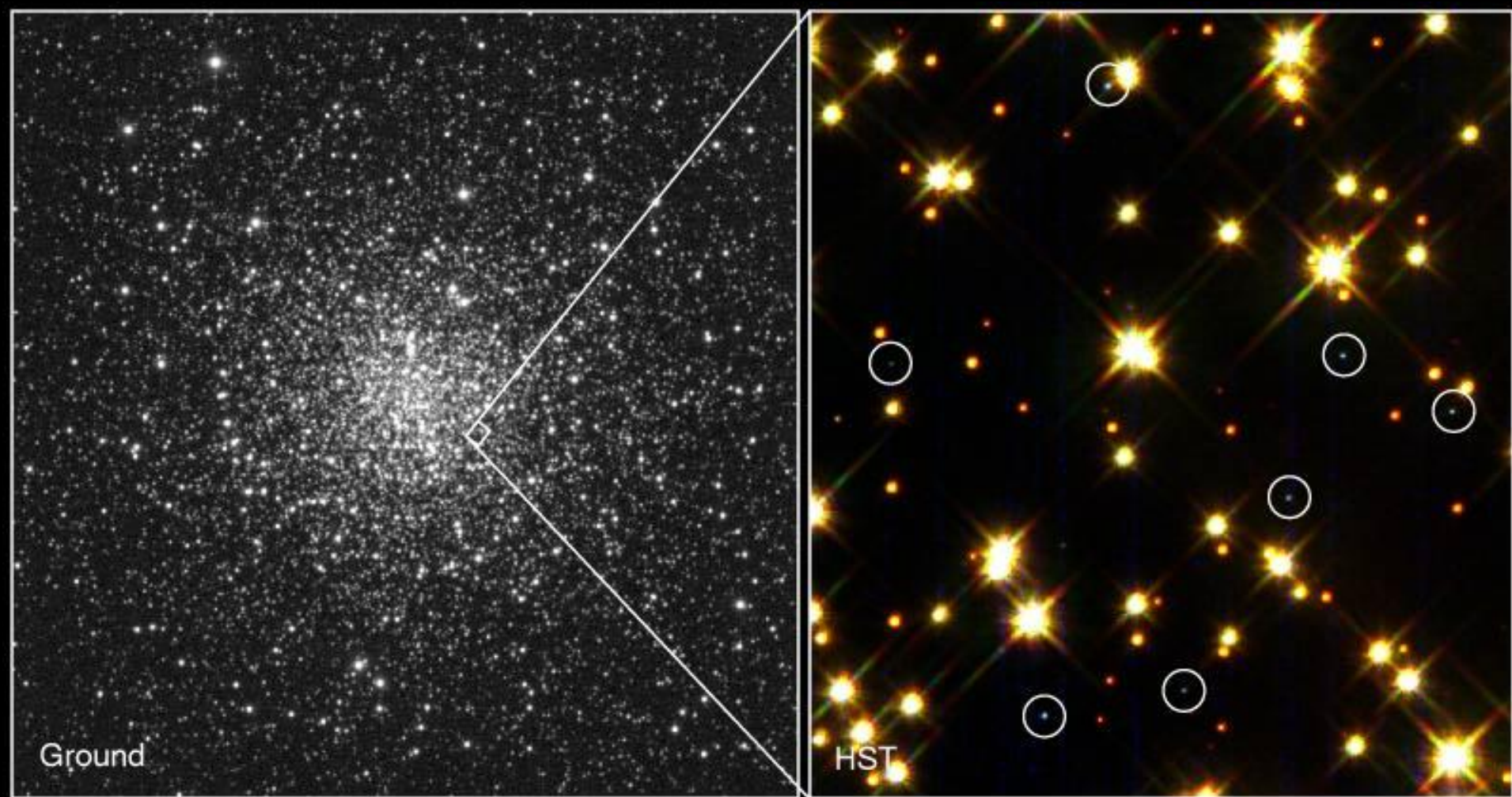


Nebulosas planetárias



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/>

Anãs-brancas em M4



White Dwarf Stars in M4

HST · WFPC2

PRC95-32 · ST ScI OPO · August 28, 1995 · H. Bond (ST ScI), NASA

Estrutura de uma anã branca

Degenerate matter
(helium, carbon or other
possible reaction
products)

Normal gas
(50 km thick)

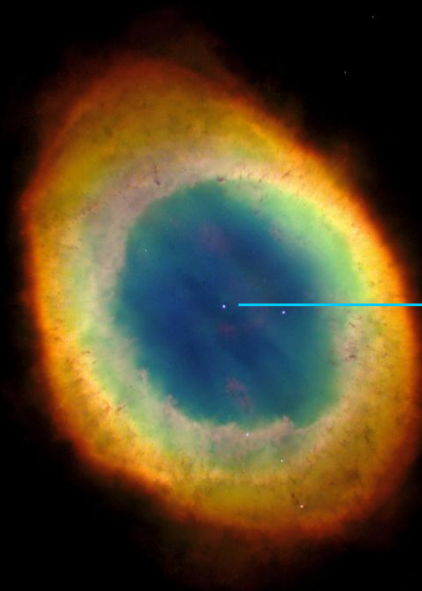
5000 to 6000 km

A pressão do gás NÃO
segue a dependência do
gás ideal clássico com a
temperatura e densidade

$$P \neq nkT / V$$



Massa marron



Nebulosa planetária

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



Anã branca

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

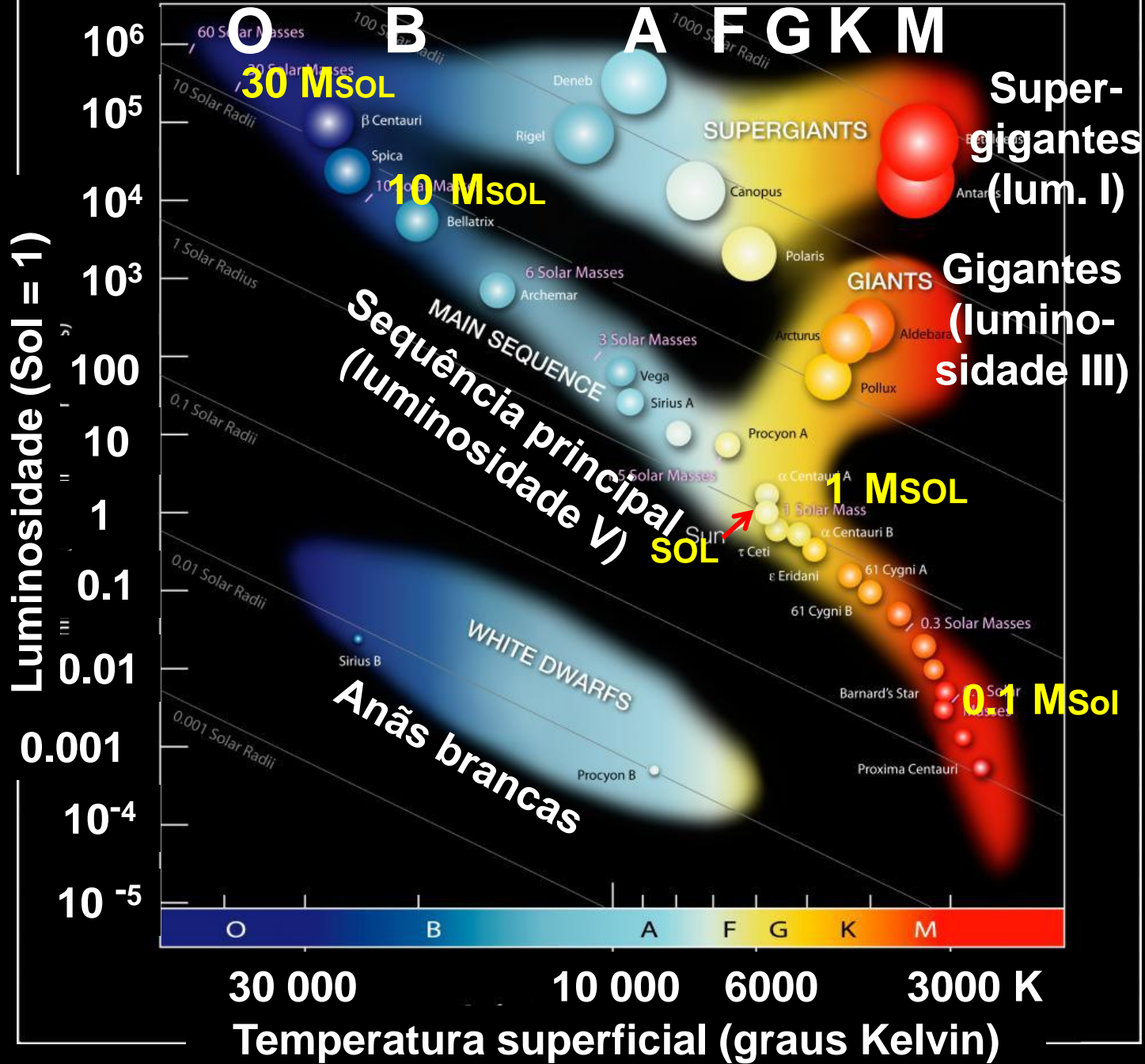


Massa marron

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

Não!

Diagrama H-R (Hertzsprung - Russell)

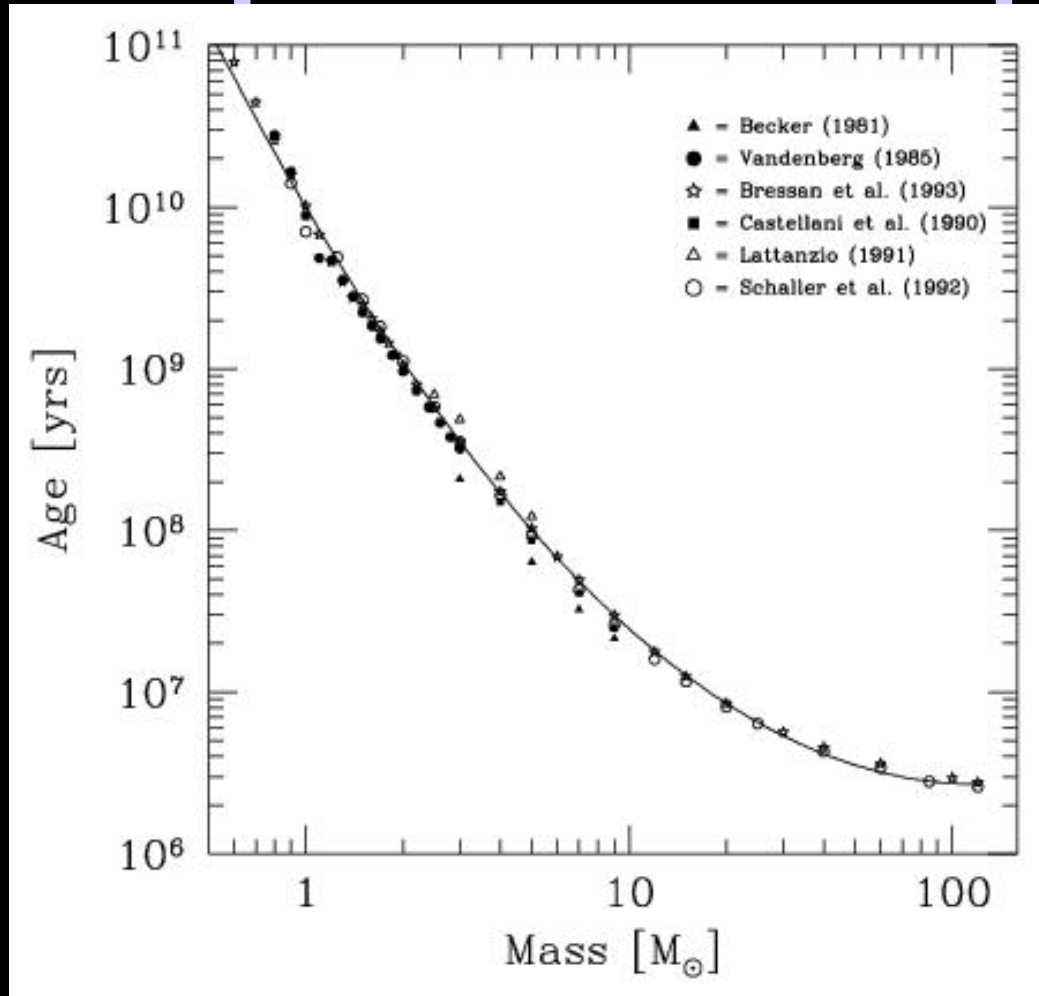


Propriedades fundamentais na seqüência principal (V): R, M, L em unidades solares

Classe estelar	RAIO	MASSA	Luminosidade	Temperatura
	R/R_{\odot}	M/M_{\odot}	L/L_{\odot}	K
O2	16	158 ?	2 000 000	54 000
O5	14	58	800 000	46000
B0	5,7	16	16 000	30 000
B5	3,7	5,4	750	15 200
A0	2,3	2,6	63	9 500
A5	1,8	1,9	24	8 700
F0	1,5	1,6	9,0	7 200
F5	1,2	1,35	4,0	6 400
G0	1,05	1,08	1,45	6 000
G2	1,0	1,0	1,0	5 800
G5	0,98	0,95	0,70	5 500
K0	0,89	0,83	0,36	5 250
K5	0,75	0,62	0,18	4 450
M0	0,64	0,47	0,075	3 850
M5	0,36	0,25	0,013	3 200
M8	0,15	0,10	0,0008	2 500
M9.5	0,10	0,08	0,0001	1 900

Tempo de vida de uma estrela (na Sequencia Principal)

Idade (anos)



Massa (M Sol)

Tempo de vida de uma estrela (na Sequencia Principal)

$$\tau_{SP} = \frac{1}{(M/M_{\odot})^2} 10^{10} \text{anos}$$

Exemplo: qual o tempo de vida do Sol?

$$T = 1/(1)^2 \times 10^{10} \text{anos} = 10^{10} \text{anos}$$

$$= 10 \times 10^9 \text{anos} = 10 \text{ Giga-anos} = 10 \text{ Ga} = 10 \text{ Gyr}$$

Qual o tempo de vida de uma estrela de 100 Massas solares?

$$\tau_{SP} = \frac{1}{(M/M_{\odot})^2} 10^{10} \text{ anos}$$

Estrela de 100 Massas Solares:

$$\begin{aligned} T &= 1/(100)^2 \times 10^{10} \text{ anos} = 1/(10^2)^2 \times 10^{10} \text{ anos} \\ &= 1/10^4 \times 10^{10} \text{ anos} = 10^{10-4} \text{ anos} = 10^6 \text{ anos} \\ &= 1 \text{ milhão de anos} = 1 \text{ Mega-ano} = 1 \text{ Myr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sol: } 10^{10} \text{ anos} &= 10^{4+6} \text{ anos} = 10\,000 \times 10^6 = \\ &10\,000 \text{ Myr} \end{aligned}$$

**Estrelas de baixa
massa (< 8 Massa_Sol)**

FIM