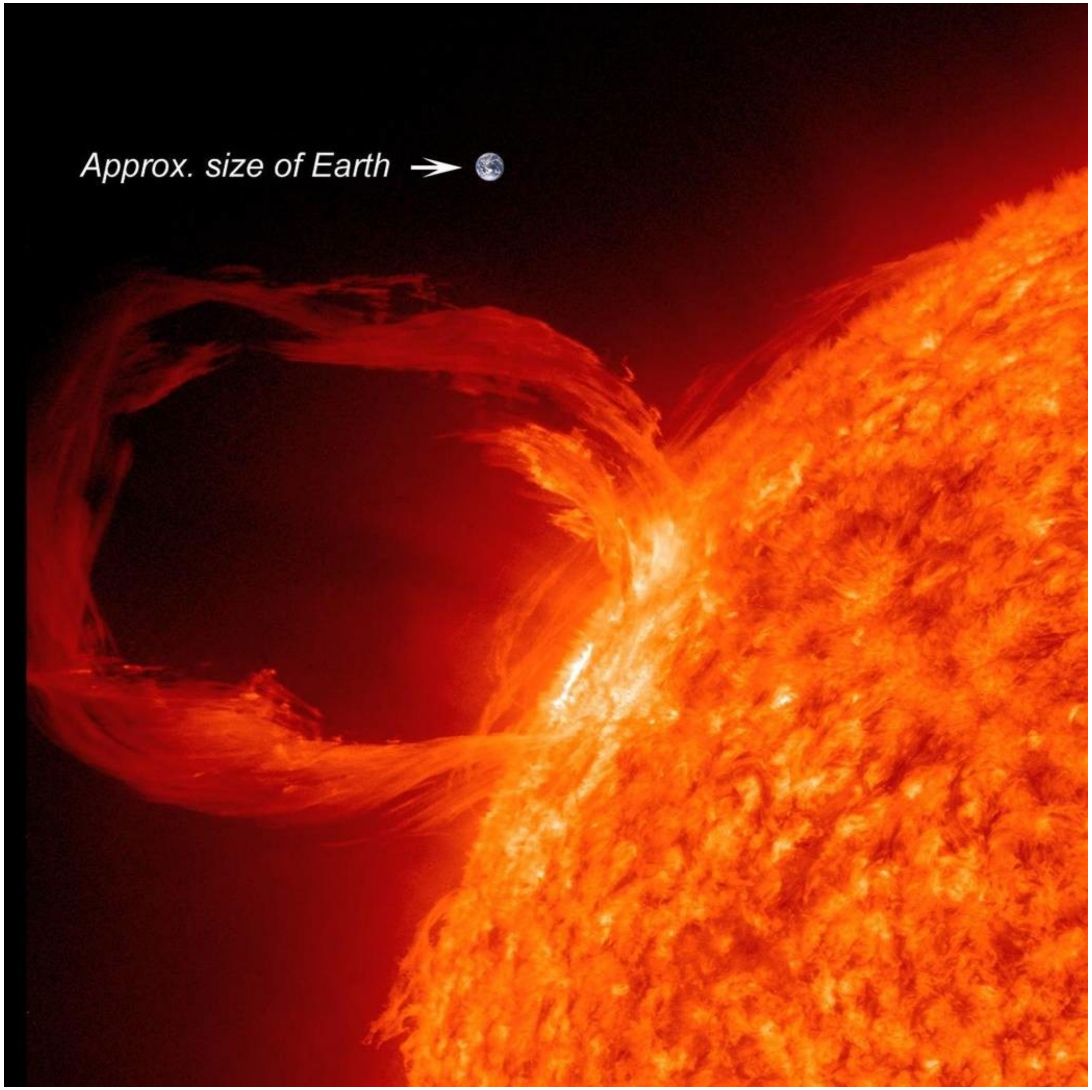
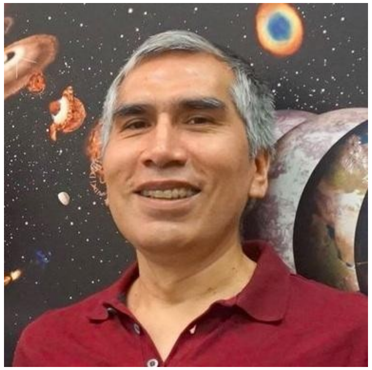
1.O Sol: A estrela do Sistema Solar

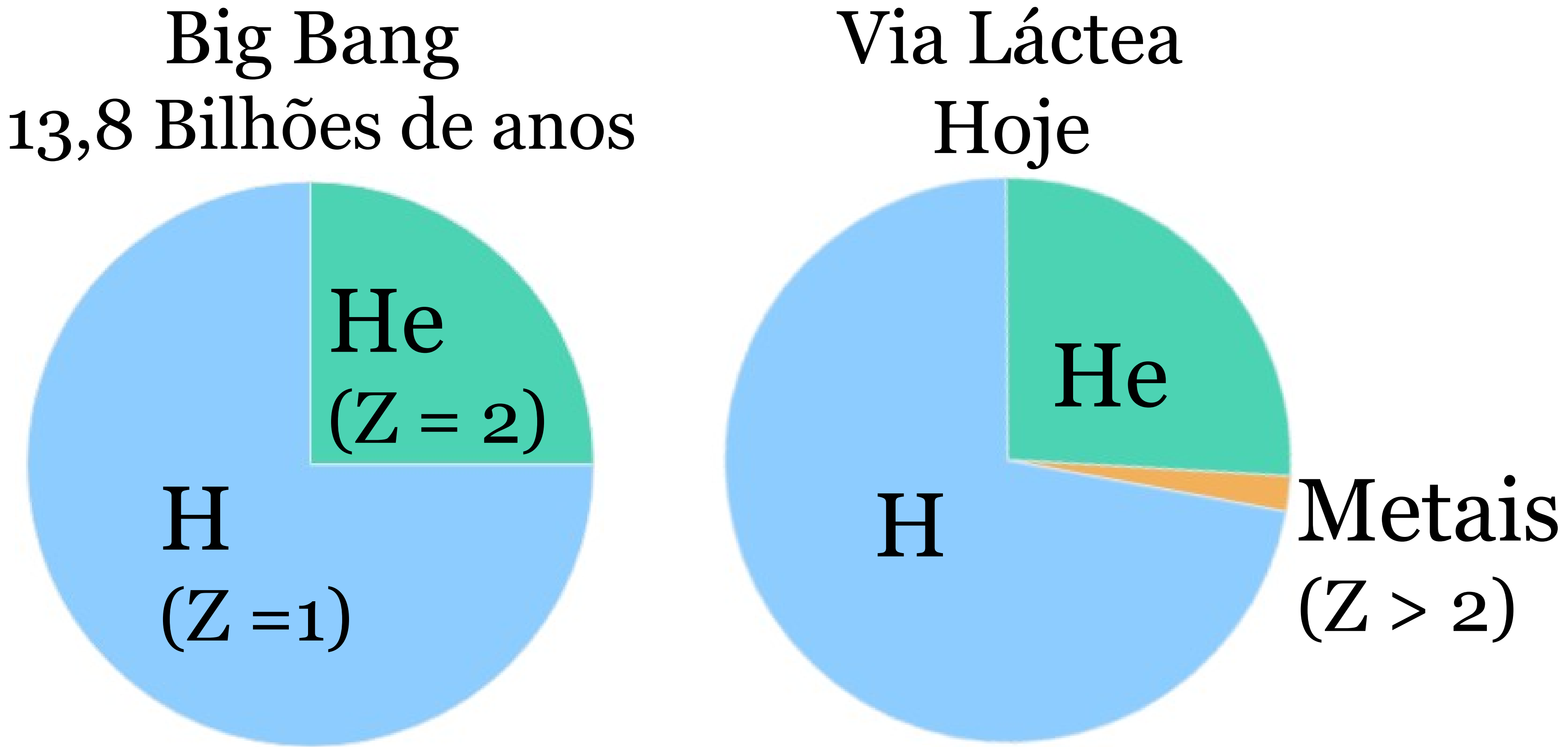




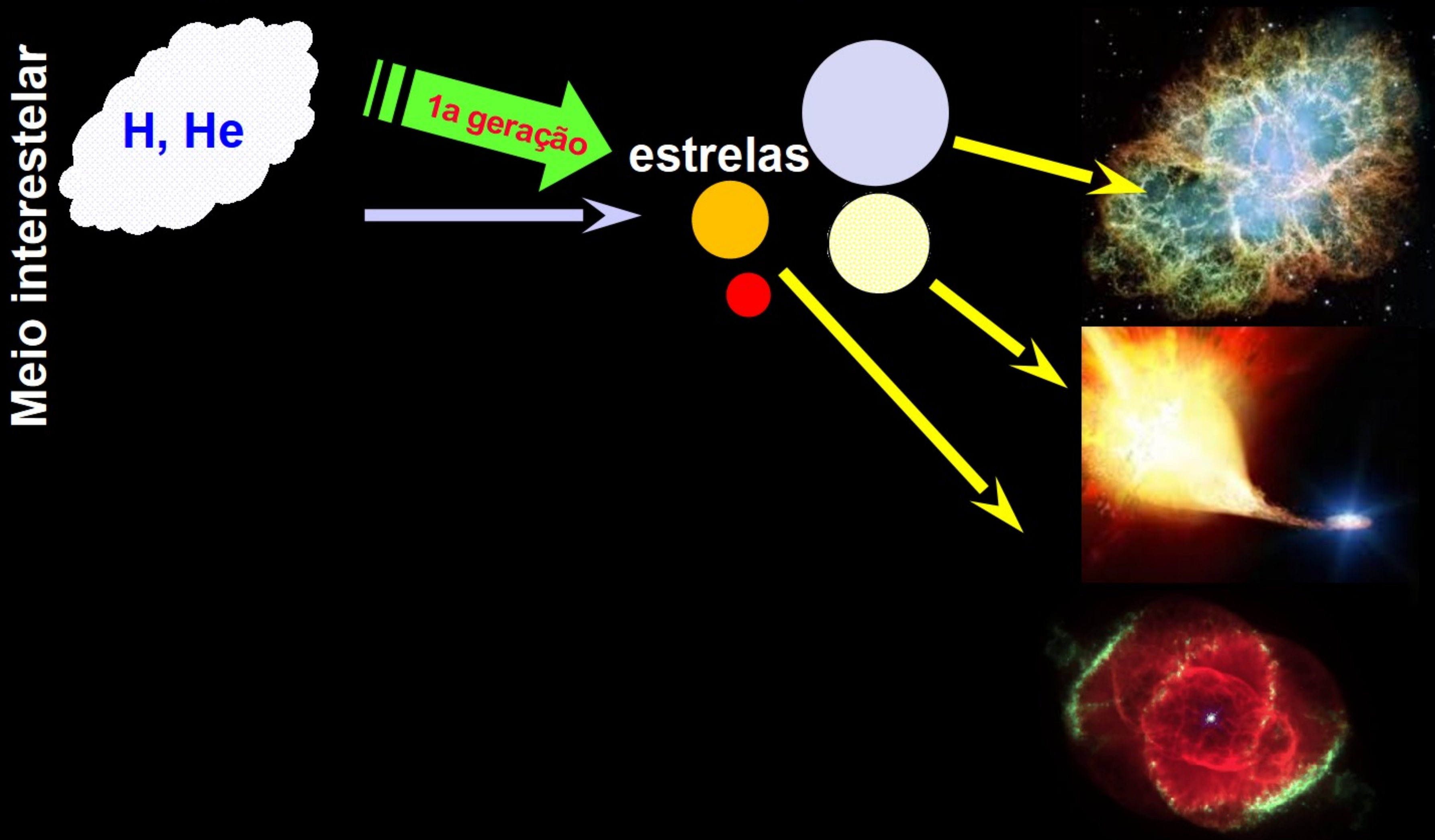
AGA0502, Planetas e Sistemas Planetários
Prof. Jorge Meléndez, IAG-USP

Composição química da matéria no universo

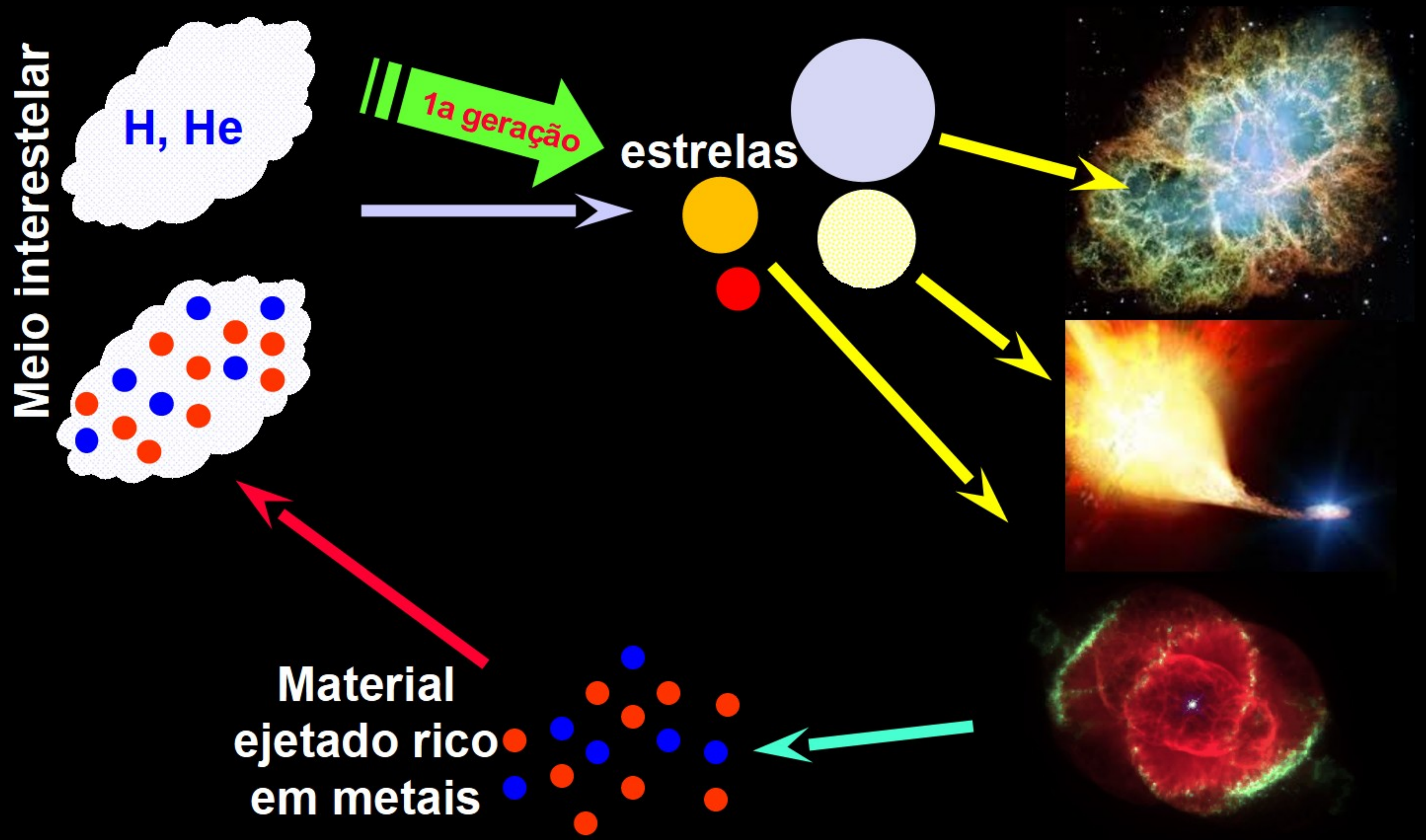
(em fração de massa)



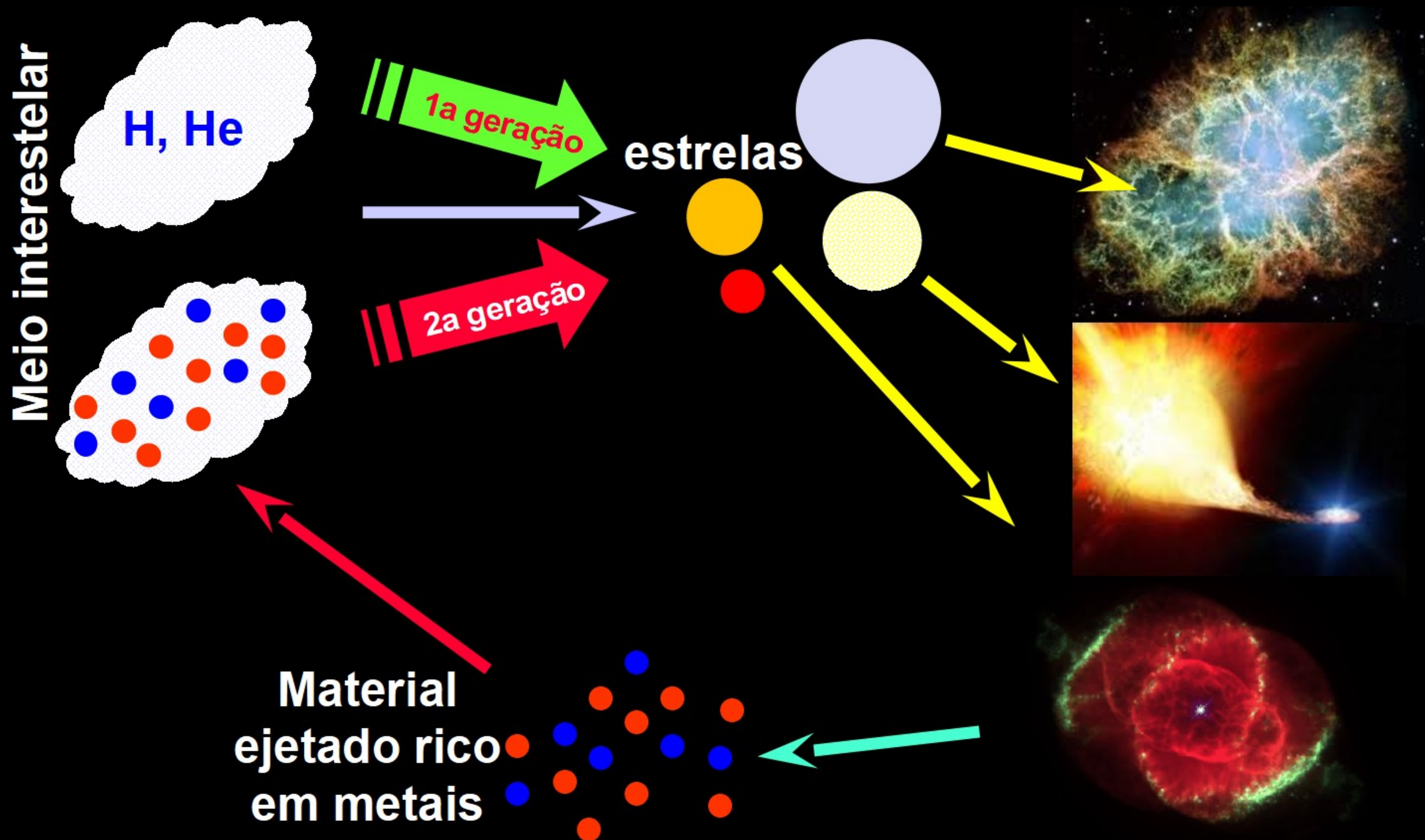
Evolução dos elementos químicos na Galáxia

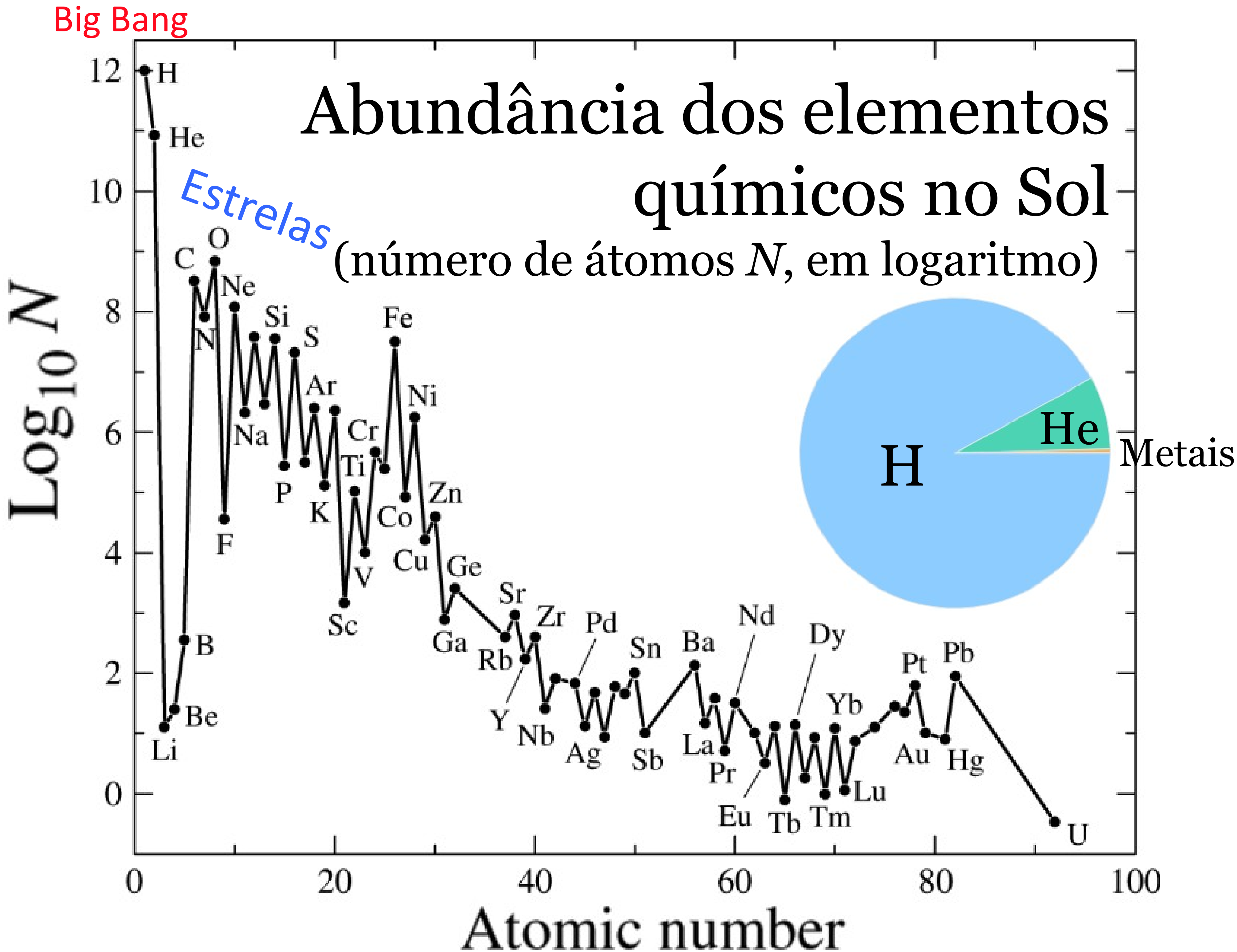


Evolução dos elementos químicos na Galáxia



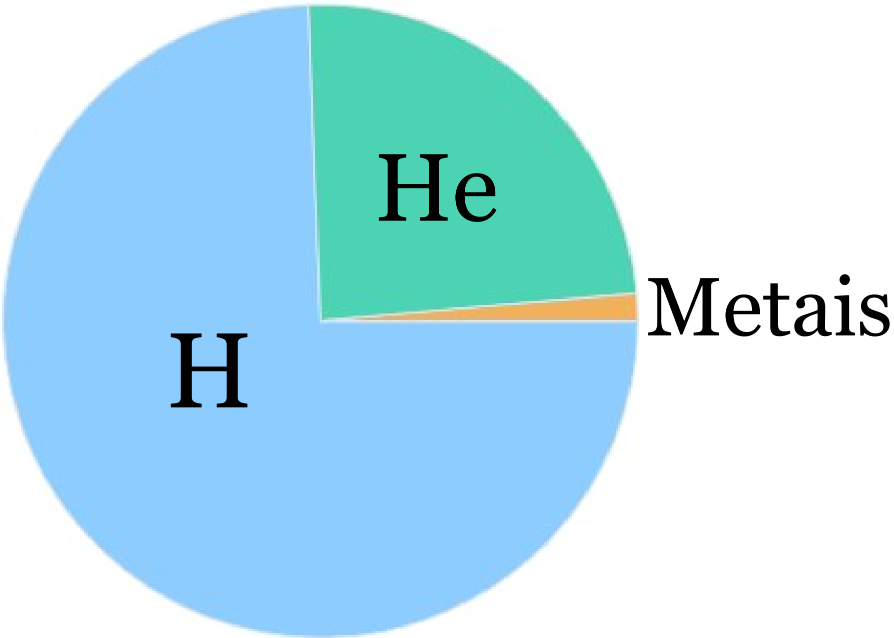
Evolução dos elementos químicos na Galáxia




Big Bang
Abundância dos elementos químicos no Sol
(número de átomos N, em logaritmo)
Estrelas
H
He
Metais
Log10 N
Atomic number
12
10
8
6
4
2
0
0
20
40
60
80
100
H
He
Li
Be
B
C
N
O
F
Ne
Na
Si
P
S
Ar
K
Sc
Ti
V
Cr
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Ga
Ge
Rb
Sr
Y
Zr
Nb
Pd
Ag
Sn
Sb
Ba
La
Pr
Nd
Eu
Tb
Dy
Tm
Yb
Lu
Pt
Au
Hg
Pb
U

Abundância dos elementos no Sol (hoje)

Fração de massa do Sol

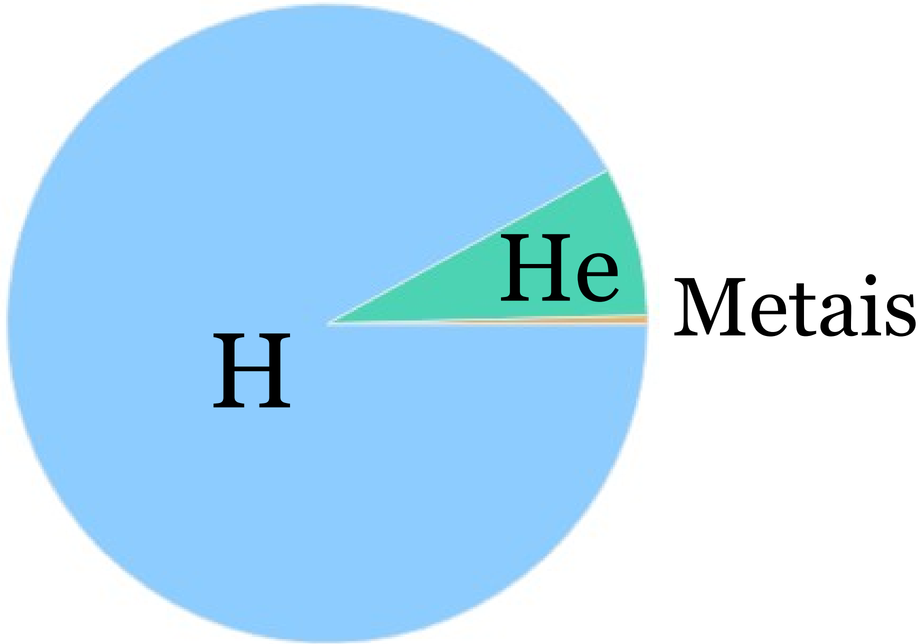


H (Z = 1):74,4 %

He (Z = 2): 24,2 %

Metais (Z > 2): 1,4 %

Número de átomos

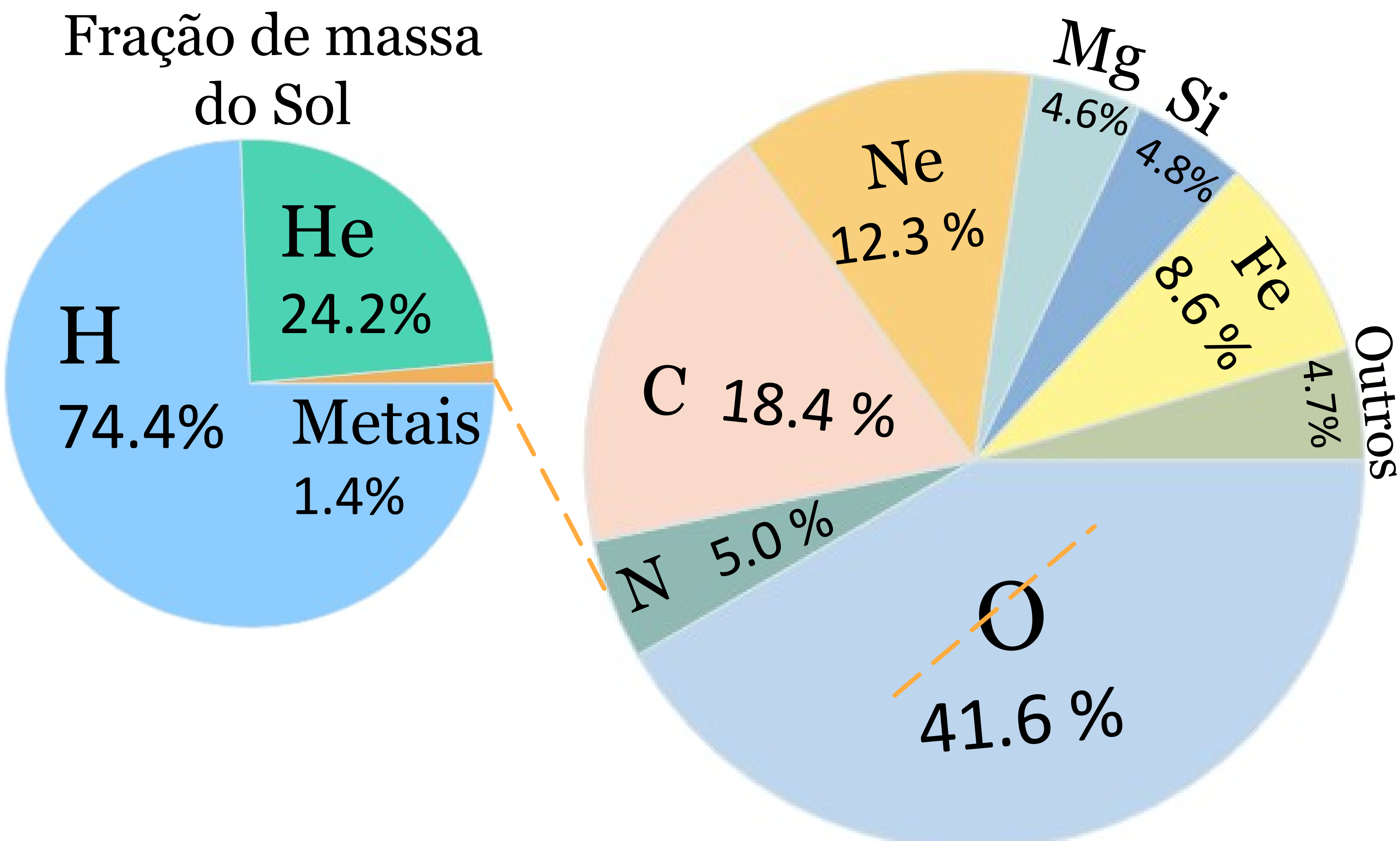


H: 92 %

He: 7,6 %

Metais: 0,4 %

Abundância dos elementos no Sol (hoje)



Dados: Asplund et al. 2021, arXiv:2105.01661

A composição química do Sol e as estrelas é determinada via a análise do espectro. As linhas escuras são devidas à absorção de diversos elementos químicos na atmosfera estelar

Formação de linhas espectrais (AGA0293)

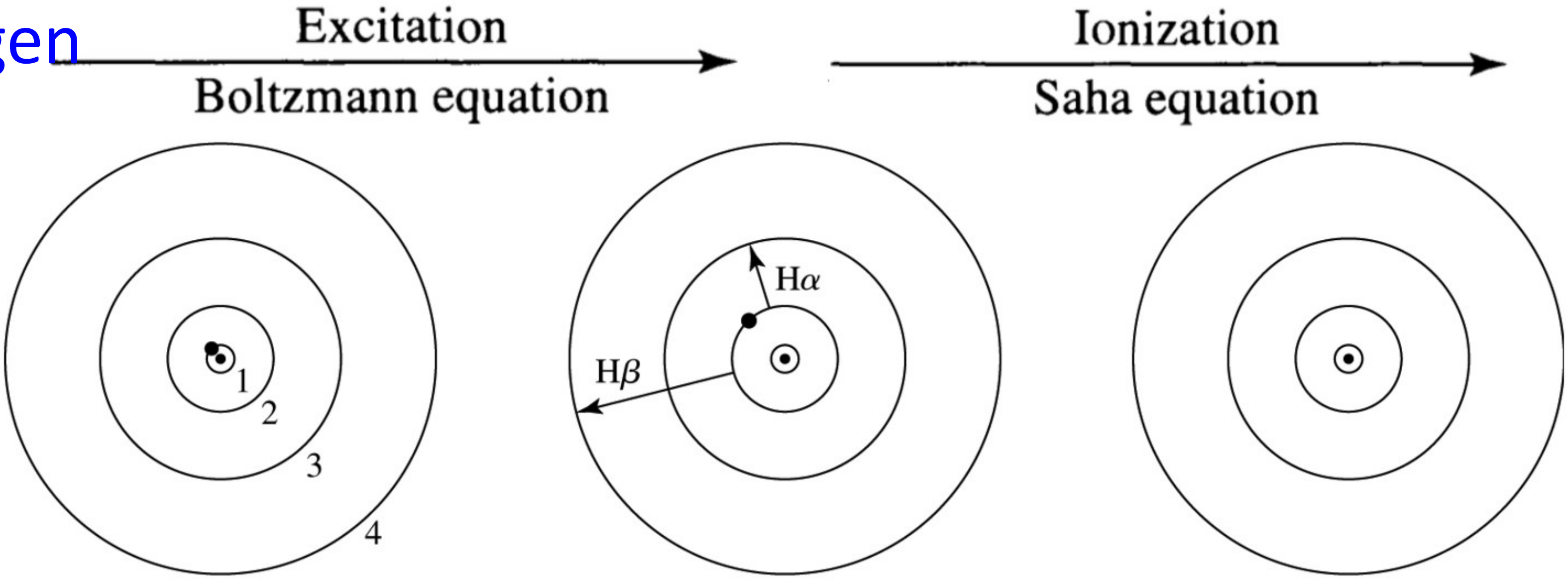
Equações de Boltzmann: $e^{-E_{nível}/kT}$ e Saha: $e^{-E_{ion}/kT}$

$$\frac{N_b}{N_a} = \frac{g_b\, e^{-E_b/kT}}{g_a\, e^{-E_a/kT}} = \frac{g_b}{g_a}\, e^{-(E_b-E_a)/kT}$$

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} = \frac{2kT\, Z_{i+1}}{P_e Z_i}\left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2}\right)^{3/2} e^{-\chi_i/kT}$$

(c) Bruna Barroso

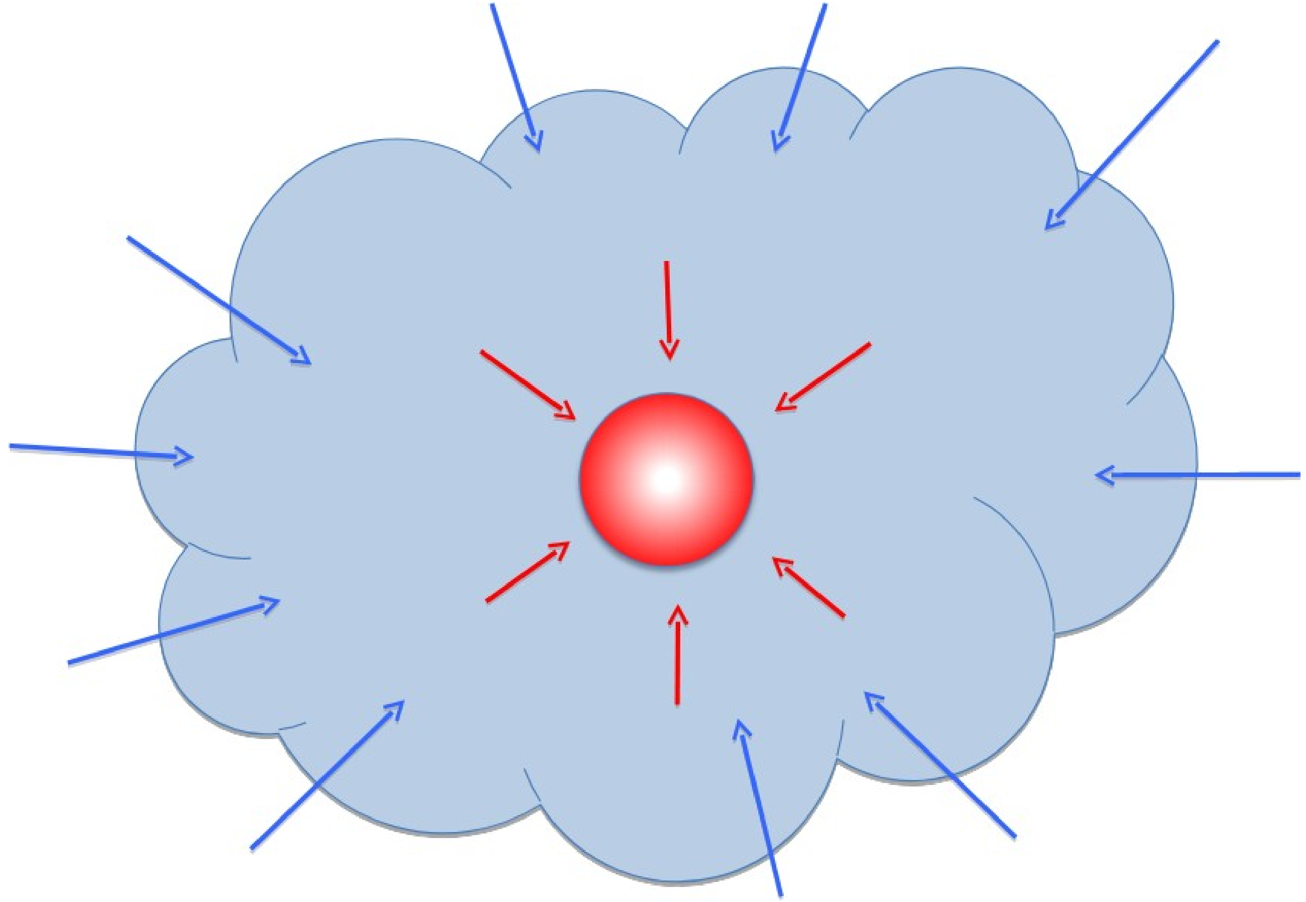
Hydrogen atom



(a) $T < 9900$ K (b) $T = 9900$ K (c) $T > 9900$ K

Formação do Sol

Colapso da nuvem: escala de tempo ~ 10^5 anos



Contração da proto-estrela ~ 40 x 10^6 anos

A contração do proto-Sol termina quando a temperatura central $T_c \sim 15 \times 10^6$ K.

Nessa temperatura é possível termos a fusão nuclear estável de hidrogênio em hélio, via a cadeia próton-próton.

O Sol passará a maior parte da sua vida na "Sequência Principal".

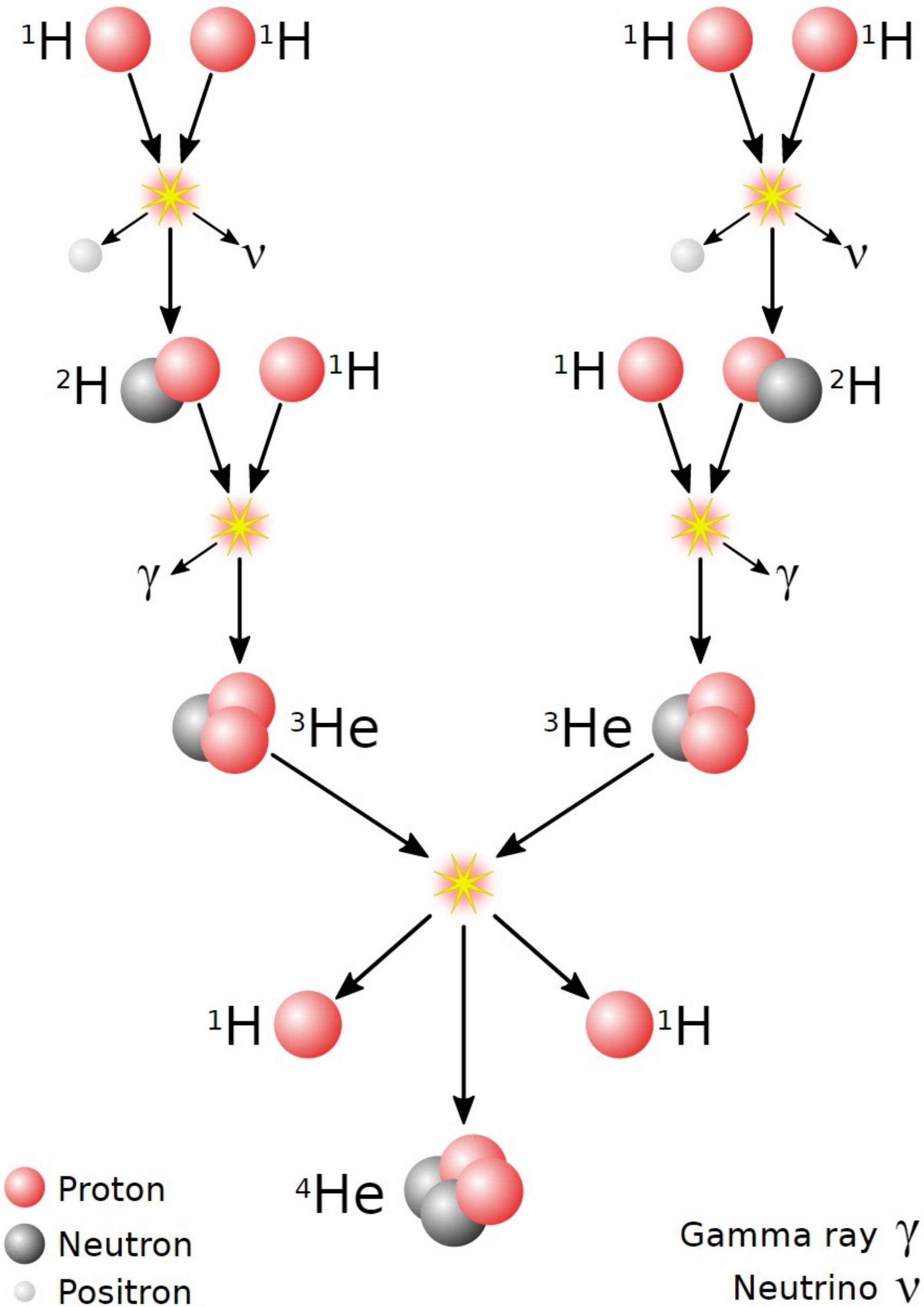
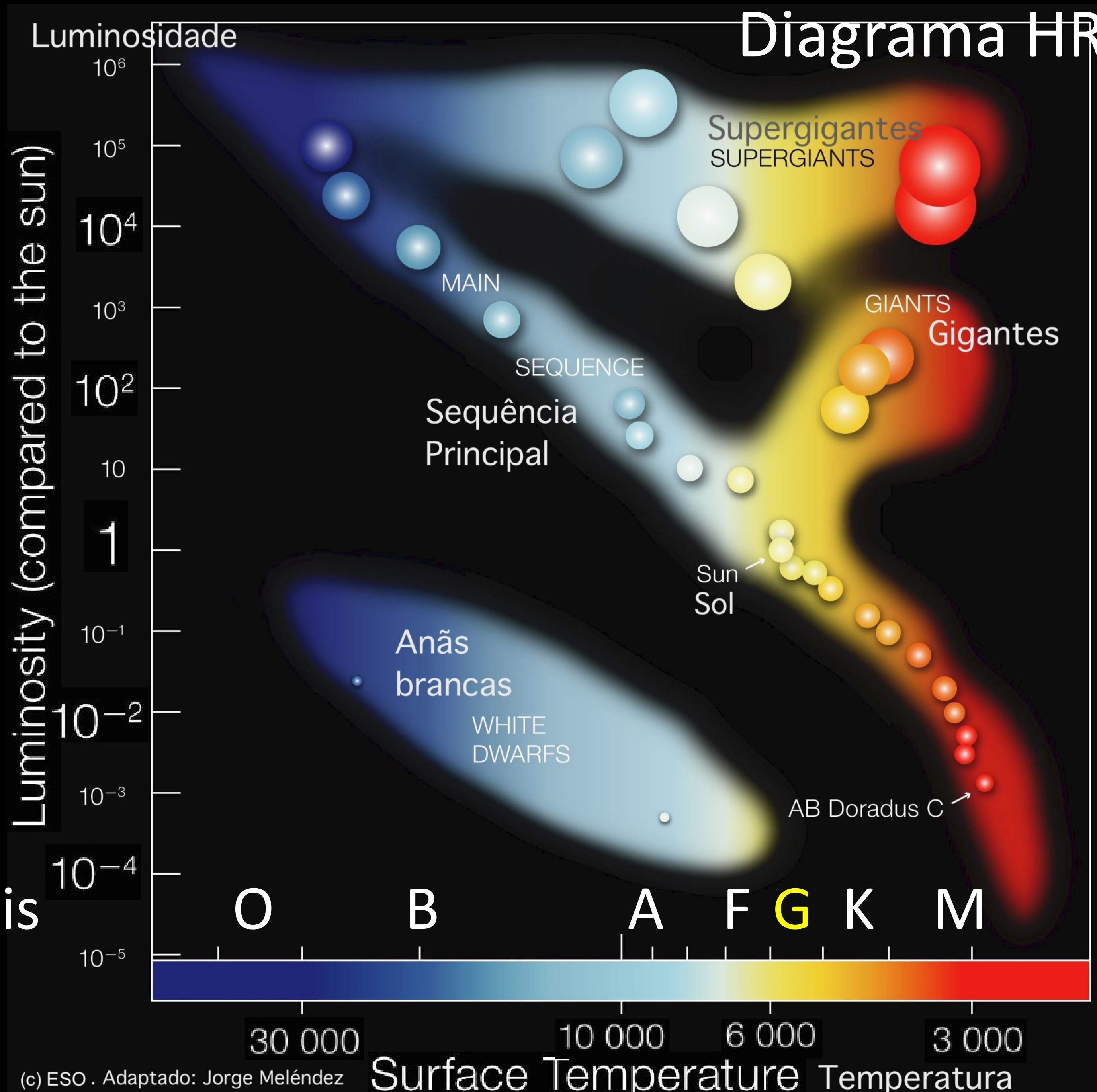


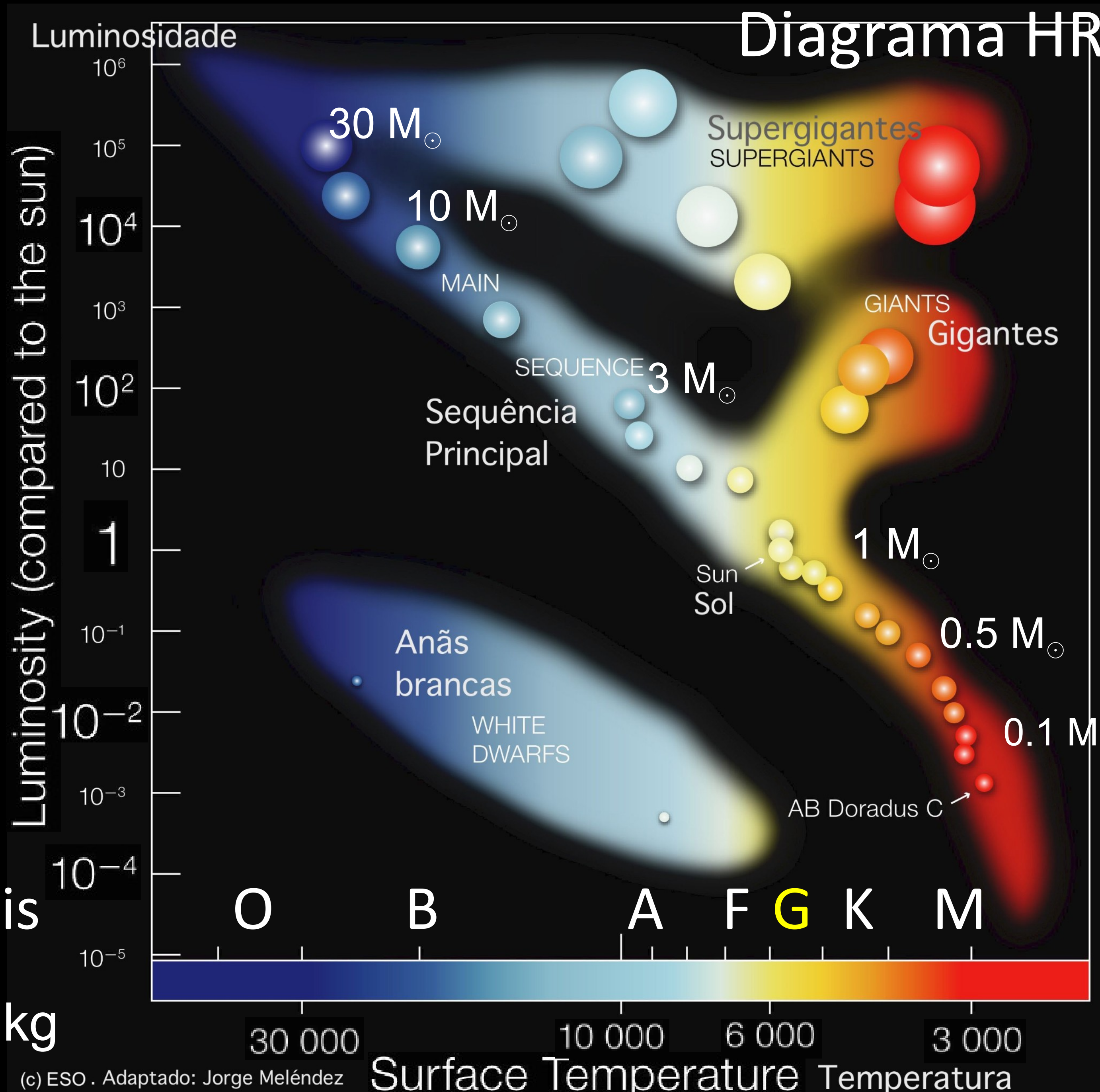
Diagrama HR



Tipos espectrais

Sol: tipo G2

Diagrama HR



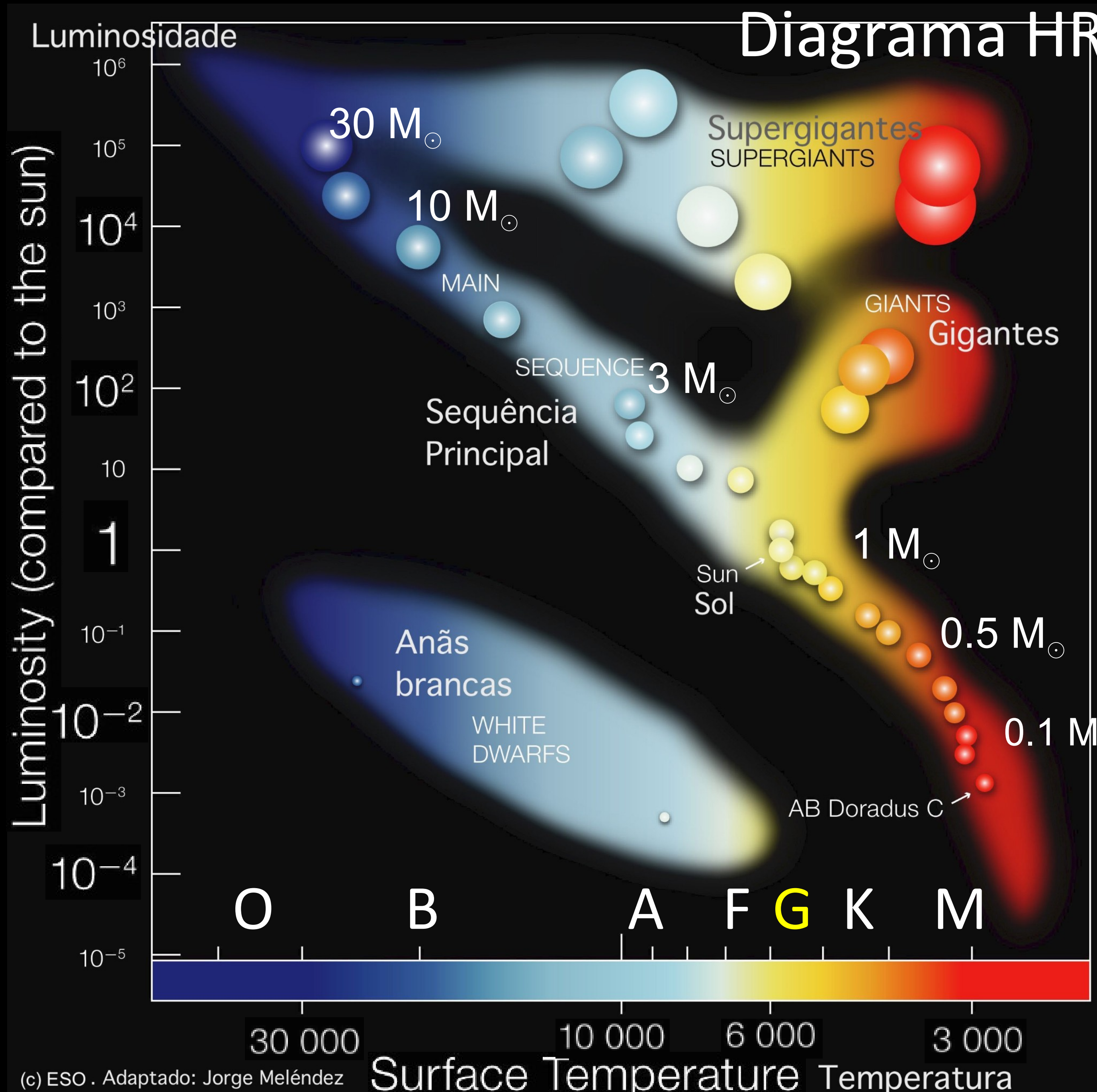
Tipos espectrais

$1\ M_\odot \sim 2 \times 10^{30}$ kg

Diagrama HR

Tempo de vida na sequência principal

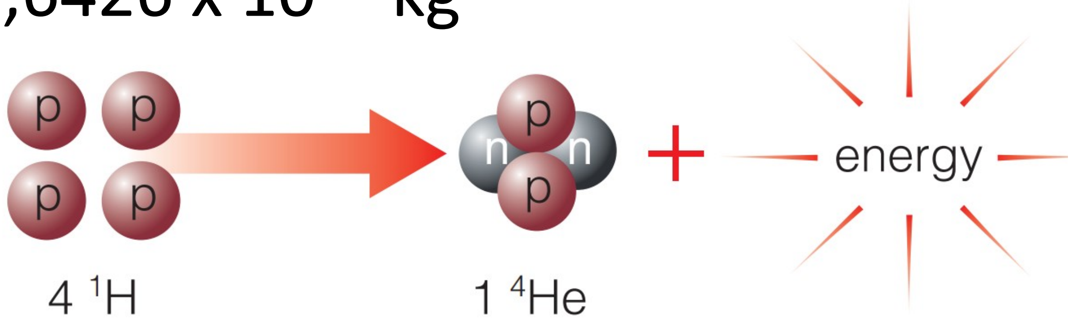
30 $M_\odot$	5 Myr
10 $M_\odot$	27 Myr
3 $M_\odot$	350 Myr
1.5 $M_\odot$	2.7 Gyr
1.25 $M_\odot$	5 Gyr
1.0 $M_\odot$	10 Gyr
0.75 $M_\odot$	30 Gyr
0.5 $M_\odot$	200 Gyr



Fusão nuclear como fonte de energia

massa próton p+ (núcleo de H): $1{,}6726 \times 10^{-27}$ kg
massa do núcleo de He: $6{,}6426 \times 10^{-27}$ kg

4 H ⇒ He + **energia**



4 ($1{,}6726 \times 10^{-27}$ kg) ⇒ $6{,}6426 \times 10^{-27}$ kg + **energia**
$6{,}6904 \times 10^{-27}$ kg ⇒ $6{,}6426 \times 10^{-27}$ kg + **energia**

Δ massa (4H - He) = $0{,}0478 \times 10^{-27}$ kg
energia E = mc² = $0{,}0478 \times 10^{-27}$ kg x c^2 = **26,8 MeV**

$0{,}0478 \times 10^{-27} / 6{,}6904 \times 10^{-27}$ = 0,7% da massa de 4 p+

Exemplo. É a energia nuclear suficiente para manter o Sol brilhando durante sua vida na sequência principal?

Por simplicidade, podemos supor que o Sol é 100% hidrogênio. Adotar que somente 10% da massa mais interna do Sol é quente o suficiente para fusão nuclear

$$E_{\text{nuclear}} = 0.1 \times 0.007 \times M_{\odot} c^2 = 1.3 \times 10^{44}\ \text{J}$$

1 $M_{\odot}$ = 1,9891 x 10^{30} kg

0,7% de 4H

$$t_{\text{nuclear}} = \frac{E_{\text{nuclear}}}{L_{\odot}} \sim 10^{10} \text{ anos}$$

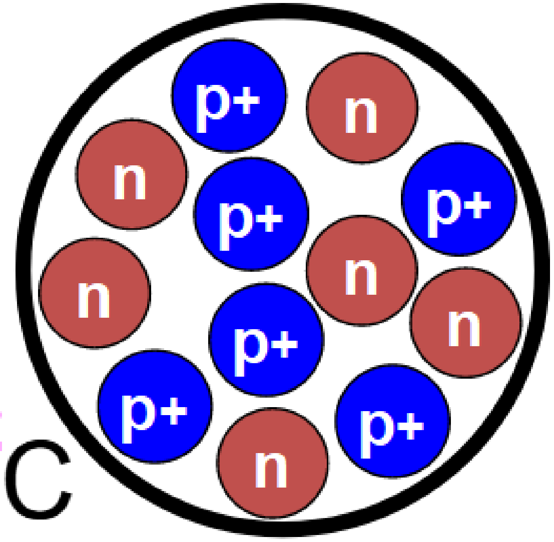
1 $L_{\odot}$ = 3,828 x 10^{26} W

Representação do elemento químico **X**

A = Número de núcleons = Z + Nêutrons

$${}^{A}_{Z}\mathbf{X}$$

$${}^{12}_{6}C$$



Z : Número de Prótons (número atômico)

A: Número de massa

Representação do elemento químico **X**

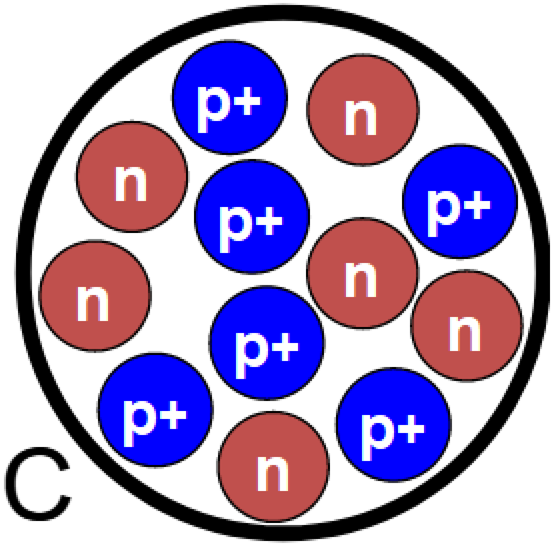
A = Número de núcleons = Z + Nêutrons

Isótopo de um elemento químico: igual número de prótons (Z) mas diferente número de nêutrons → diferente A.

Exemplo: urânio (Z = 92) tem como isótopos mais abundantes o urânio-238 ${}^{238}_{92}U$ e urânio-235 ${}^{235}_{92}U$

$${}^{A}_{Z}\mathbf{X}$$

$${}^{12}_{6}C$$



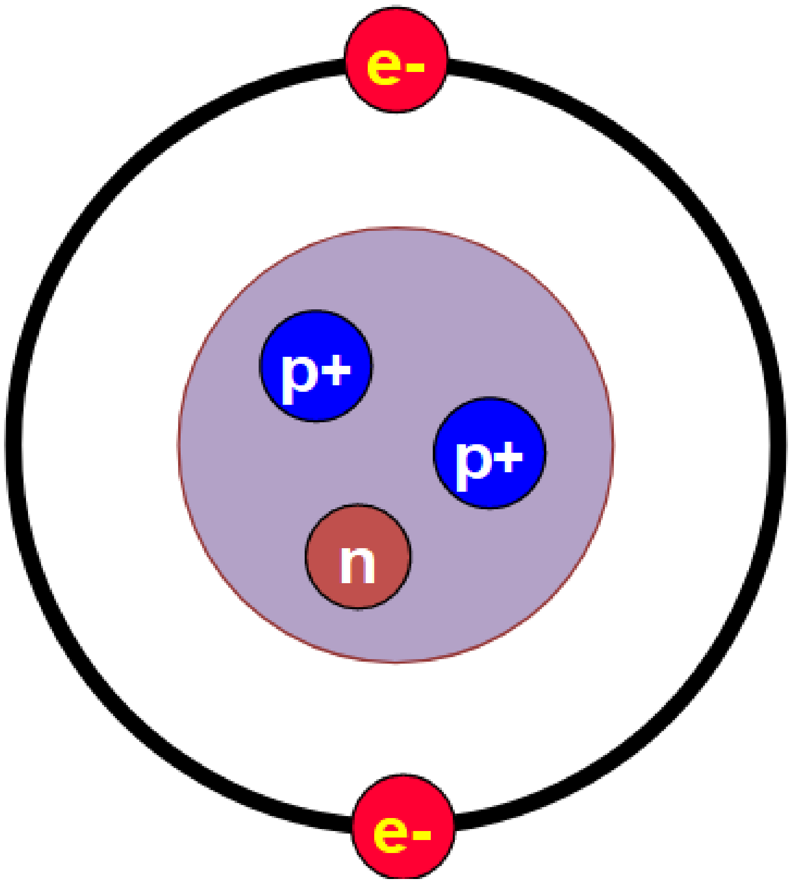
Z : Número de Prótons (número atômico)

A: Número de massa

Isótopos estáveis do hélio

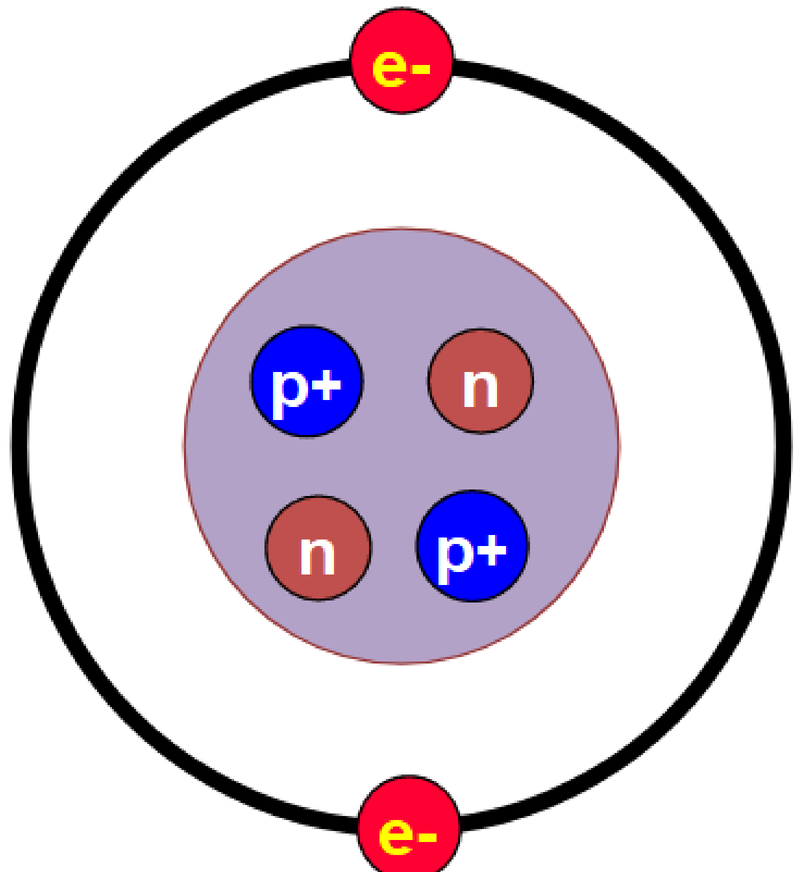
$^{3}_{2}He$ 0.0002%

Hélio 3 (tralphium)



$^{4}_{2}He$ 99.9998%

Hélio 4 (núcleo=partícula α)

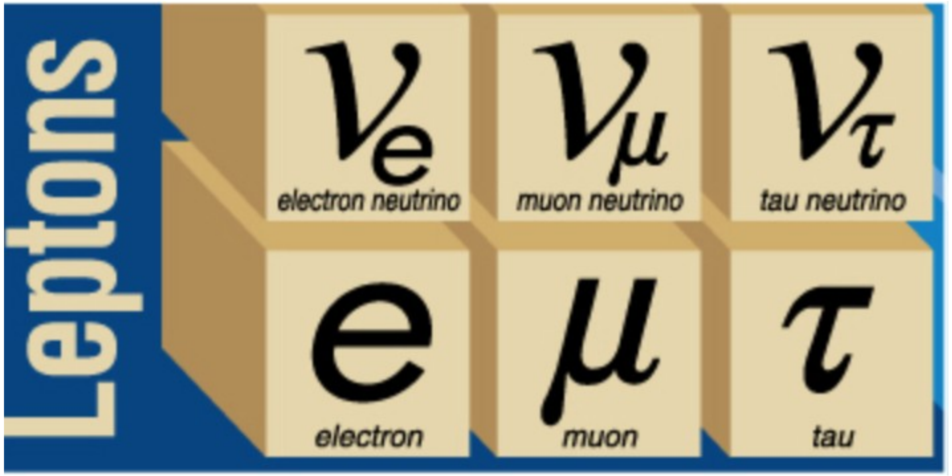


Também aparecem nas reações nucleares os elétrons [e^-] e neutrinos [ν_e], assim como suas antipartículas: pósitron [e^+] e antineutrino [$\bar{\nu}_e$]

Neutrinos ν

São partículas que quase não interagem com a matéria, $\sigma_\nu \sim 10^{-48}$ m^2

Percurso livre médio do neutrino ‘dentro’ do Sol é de ~ 10^{18}m, ou ~100 anos-luz, ou ~$1{,}4 \times 10^9\ R_\odot$



Antimatéria

- Mistura da matéria e antimatéria → aniquilamento.
- Colisão de uma partícula e antipartícula → energia

Por exemplo, colisão de elétron e antielétron (pósitron) resulta em fótons de alta energia (radiação gama γ):

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$$

São necessários 2 fótons para a conservação da quantidade de movimento (*momento*)

$^{A}_{Z}X$ A: Número de massa (p + n)
Z : Número de prótons (carga positiva)

Cadeia próton-próton, PP-I

Força fraca

$$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

$$^1_1H + ^1_1H \rightarrow ^2_1H + e^+ + \nu_e$$

$$^2_1H + ^1_1H \rightarrow ^3_2He + \gamma$$

$$^3_2He + ^3_2He \rightarrow ^4_2He + 2\,^1_1H.$$

69%

$^{A}_{Z}X$ A: Número de massa (p + n)

Z : Número de prótons (carga positiva)

Cadeia próton-próton, PP-I

Força fraca

$$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

$$^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu_e$$

$$^2_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$$

$$^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2\,{}^1_1\text{H}.$$

69%

Em resumo: $4\,{}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + 2\gamma$

Cadeia próton-próton, PP-II

$$^1_1\text{H} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^2_1\text{H} + e^+ + \nu_e$$

$$^2_1\text{H} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^3_2\text{He} + \gamma$$

$$^3_2\text{He} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^7_4\text{Be} + \gamma$$

$$^7_4\text{Be} + e^- \rightarrow ^7_3\text{Li} + \nu_e$$

$$^7_3\text{Li} + ^1_1\text{H} \rightarrow 2\,^4_2\text{He}.$$

31%

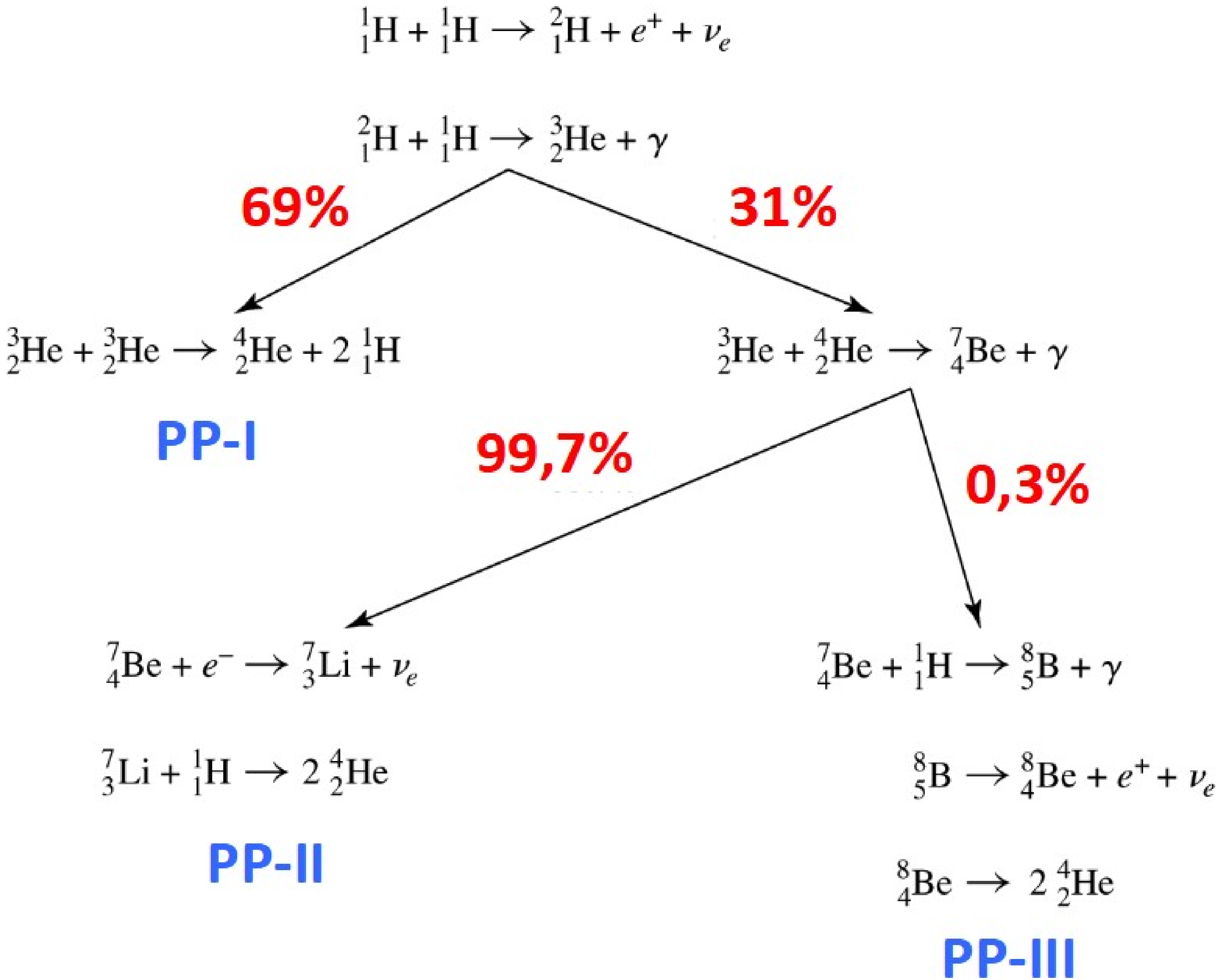
PP-III

$$^7_4\text{Be} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^8_5\text{B} + \gamma$$

$$^8_5\text{B} \rightarrow ^8_4\text{Be} + e^+ + \nu_e$$

$$^8_4\text{Be} \rightarrow 2\,^4_2\text{He}.$$

0,3%



$^{1}_{1}H + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{2}_{1}H + e^{+} + \nu_e$
$^{2}_{1}H + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + \gamma$
69%
31%
$^{3}_{2}He + ^{3}_{2}He \rightarrow ^{4}_{2}He + 2\,^{1}_{1}H$
$^{3}_{2}He + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{7}_{4}Be + \gamma$
PP-I
99,7%
0,3%
$^{7}_{4}Be + e^{-} \rightarrow ^{7}_{3}Li + \nu_e$
$^{7}_{4}Be + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{8}_{5}B + \gamma$
$^{7}_{3}Li + ^{1}_{1}H \rightarrow 2\,^{4}_{2}He$
$^{8}_{5}B \rightarrow ^{8}_{4}Be + e^{+} + \nu_e$
PP-II
$^{8}_{4}Be \rightarrow 2\,^{4}_{2}He$
PP-III

O Ciclo CNO

$$^{12}_{6}C + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{13}_{7}N + \gamma$$
$$^{13}_{7}N \rightarrow ^{13}_{6}C + e^{+} + \nu_e$$
$$^{13}_{6}C + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{14}_{7}N + \gamma$$
$$^{14}_{7}N + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{15}_{8}O + \gamma$$
$$^{15}_{8}O \rightarrow ^{15}_{7}N + e^{+} + \nu_e$$
$$^{15}_{7}N + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{4}_{2}He.$$

99,96%

0,04%

$$^{15}_{7}N + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{16}_{8}O + \gamma$$
$$^{16}_{8}O + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{17}_{9}F + \gamma$$
$$^{17}_{9}F \rightarrow ^{17}_{8}O + e^{+} + \nu_e$$
$$^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He.$$

O Sol queima He no fim da fase gigante vermelha, nas fases ‘ramo horizontal’ e ‘gigante AGB’ (asymptotic giant branch):

3 He → C

Processo triplo-alfa

T ~ 10^8 K

$$^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightleftharpoons ^{8}_{4}\mathrm{Be}$$

$$^{8}_{4}\mathrm{Be} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{12}_{6}\mathrm{C} + \gamma$$

C + He → O

T ~ 10^8 K

$$^{12}_{6}\mathrm{C} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{16}_{8}\mathrm{O} + \gamma$$

Outras reações em estrelas mais massivas que o Sol

Queima de C e O

T ~ 10^8 K

$$^{12}_{6}C + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{16}_{8}O + \gamma$$

$$^{16}_{8}O + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{20}_{10}Ne + \gamma$$

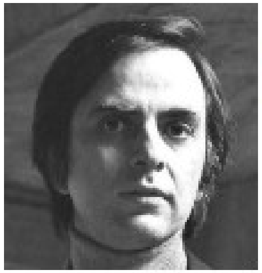
T ~ $6x10^8$K

$$^{12}_{6}C + ^{12}_{6}C \rightarrow \begin{cases} ^{16}_{8}O + 2\,^{4}_{2}He \quad *** \\ ^{20}_{10}Ne + ^{4}_{2}He \\ ^{23}_{11}Na + p^{+} \\ ^{23}_{12}Mg + n \quad *** \\ ^{24}_{12}Mg + \gamma \end{cases}$$

T ~ 10^9K

$$^{16}_{8}O + ^{16}_{8}O \rightarrow \begin{cases} ^{24}_{12}Mg + 2\,^{4}_{2}He \quad *** \\ ^{28}_{14}Si + ^{4}_{2}He \\ ^{31}_{15}P + p^{+} \\ ^{31}_{16}S + n \\ ^{32}_{16}S + \gamma \end{cases}$$

***: endotérmica



Carl Sagan: somos poeira de estrelas

$$4\,{}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2e^{+} + 2\nu_e + 2\gamma$$

$$\begin{aligned}
{}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{13}_{7}\mathrm{N} + \gamma \\
{}^{13}_{7}\mathrm{N} &\rightarrow {}^{13}_{6}\mathrm{C} + e^{+} + \nu_e \\
{}^{13}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + \gamma \\
{}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{15}_{8}\mathrm{O} + \gamma \\
{}^{15}_{8}\mathrm{O} &\rightarrow {}^{15}_{7}\mathrm{N} + e^{+} + \nu_e \\
{}^{15}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^{15}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{16}_{8}\mathrm{O} + \gamma \\
{}^{16}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{17}_{9}\mathrm{F} + \gamma \\
{}^{17}_{9}\mathrm{F} &\rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + e^{+} + \nu_e \\
{}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} &\rightarrow {}^{16}_{8}\mathrm{O} + \gamma \\
{}^{16}_{8}\mathrm{O} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} &\rightarrow {}^{20}_{10}\mathrm{Ne} + \gamma
\end{aligned}$$

$${}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{12}_{6}\mathrm{C} \rightarrow \begin{cases} {}^{16}_{8}\mathrm{O} + 2\,{}^{4}_{2}\mathrm{He} & *** \\ {}^{20}_{10}\mathrm{Ne} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \\ {}^{23}_{11}\mathrm{Na} + p^{+} \\ {}^{23}_{12}\mathrm{Mg} + n & *** \\ {}^{24}_{12}\mathrm{Mg} + \gamma \end{cases}$$

$${}^{16}_{8}\mathrm{O} + {}^{16}_{8}\mathrm{O} \rightarrow \begin{cases} {}^{24}_{12}\mathrm{Mg} + 2\,{}^{4}_{2}\mathrm{He} & *** \\ {}^{28}_{14}\mathrm{Si} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \\ {}^{31}_{15}\mathrm{P} + p^{+} \\ {}^{31}_{16}\mathrm{S} + n \\ {}^{32}_{16}\mathrm{S} + \gamma \end{cases}$$

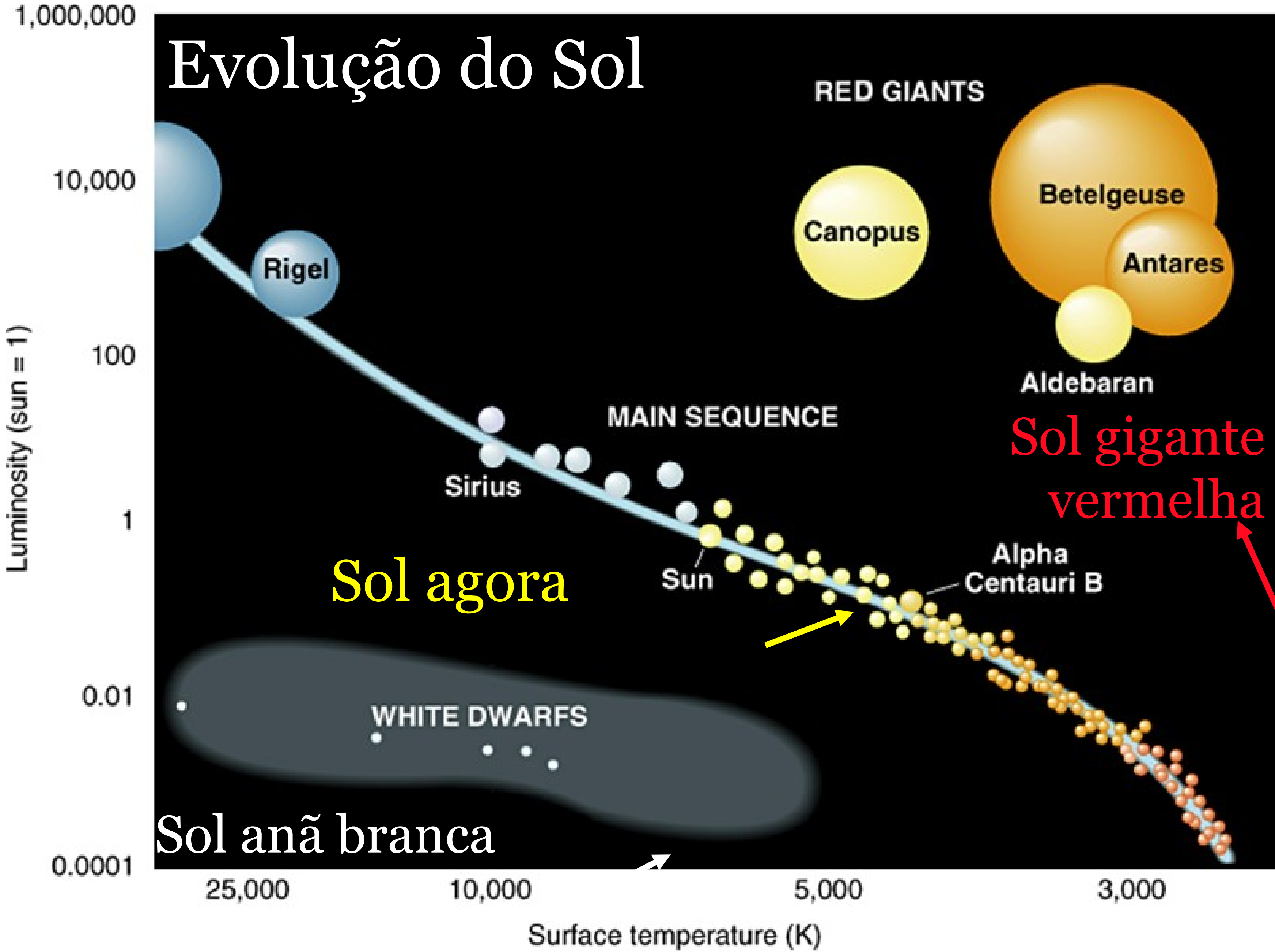
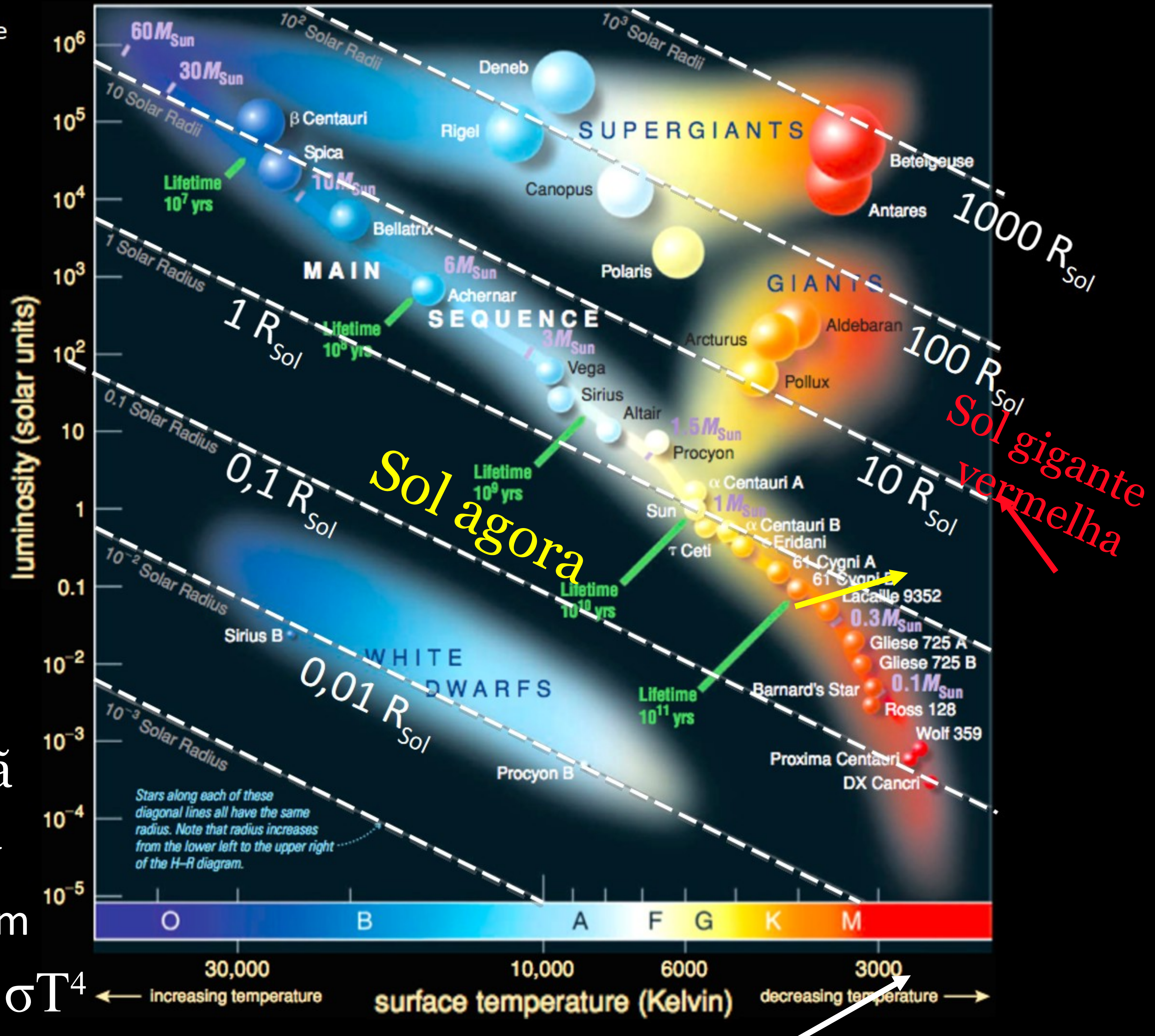


Figure 1 - The Hertzsprung-Russell Diagram. Dim cool stars are at the lower-right, bright hot stars are at the upper-left. The sizes shown for the stars are suggestive, not exact.

https://faculty.wcas.northwestern.edu/~infocom/The%20Website/evolution.html

Cosmic Perspective



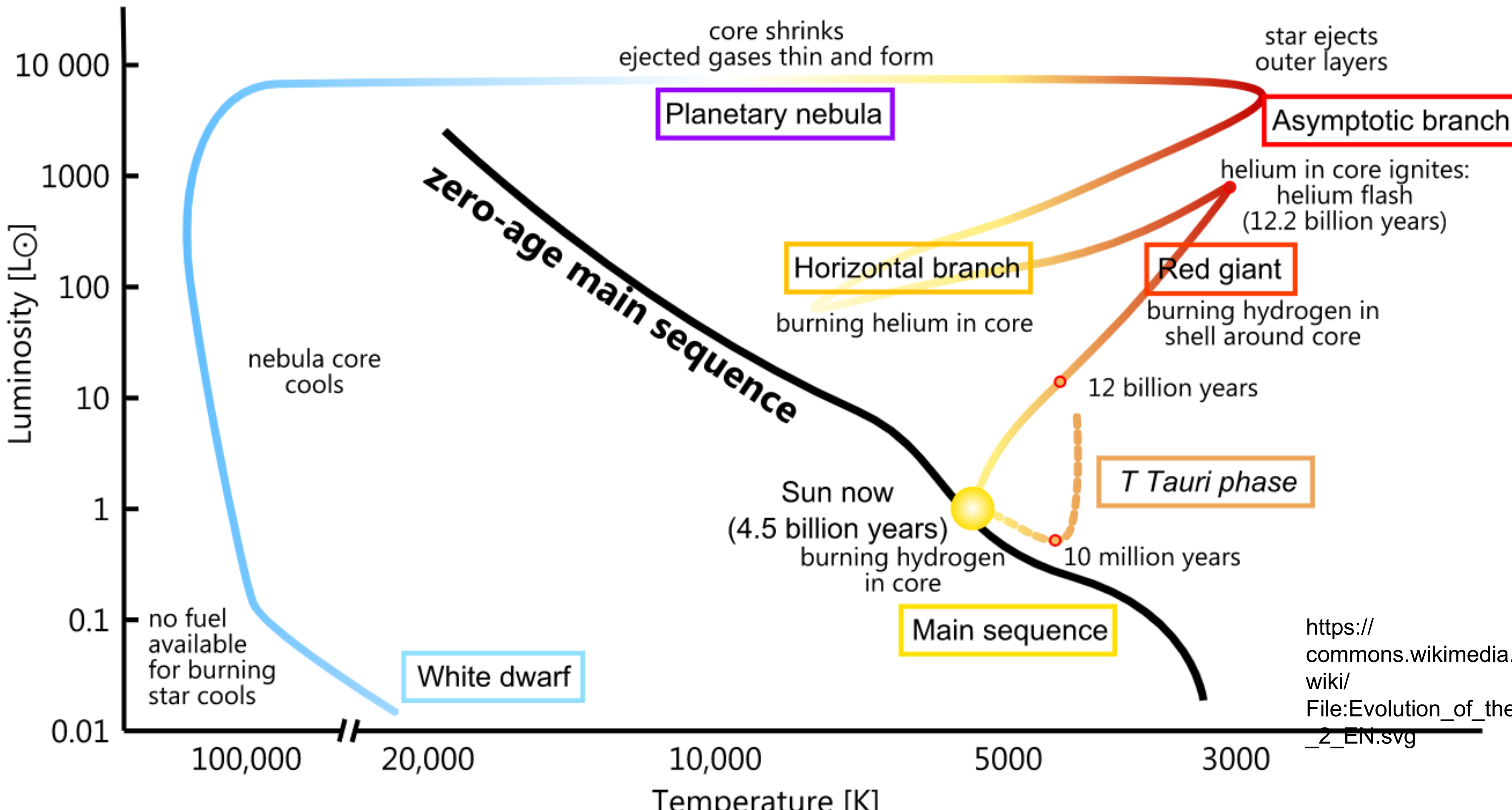
Sol anã branca

$R_\odot \sim 7 \times 10^8$ m

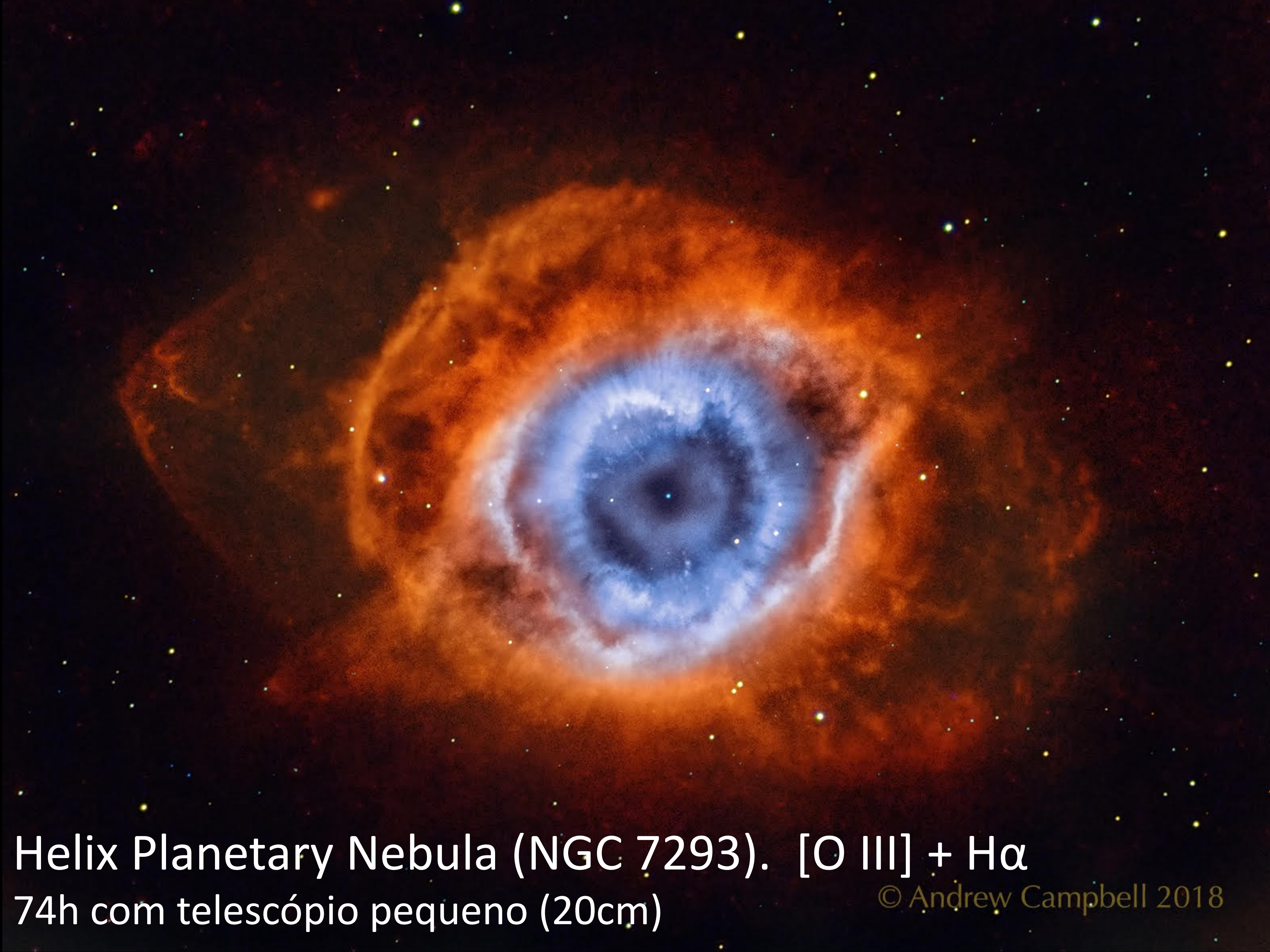
$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$

Evolução do Sol: sequência principal, gigante vermelha, ramo horizontal, gigante assintótica (AGB), nebulosa planetária, anã branca

	~9 Ga		~1 Ga		~100 Ma		~10 000 a		
Stage:	Main sequence	>	Red giant	>	Horizontal branch	>	Planetary nebula	>	White dwarf
Sun's age:	4.5 Ga (now)		12.2 Ga		12.3 Ga		12.3305 Ga		12.3306 Ga



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Evolution_of_the_Sun_2_EN.svg

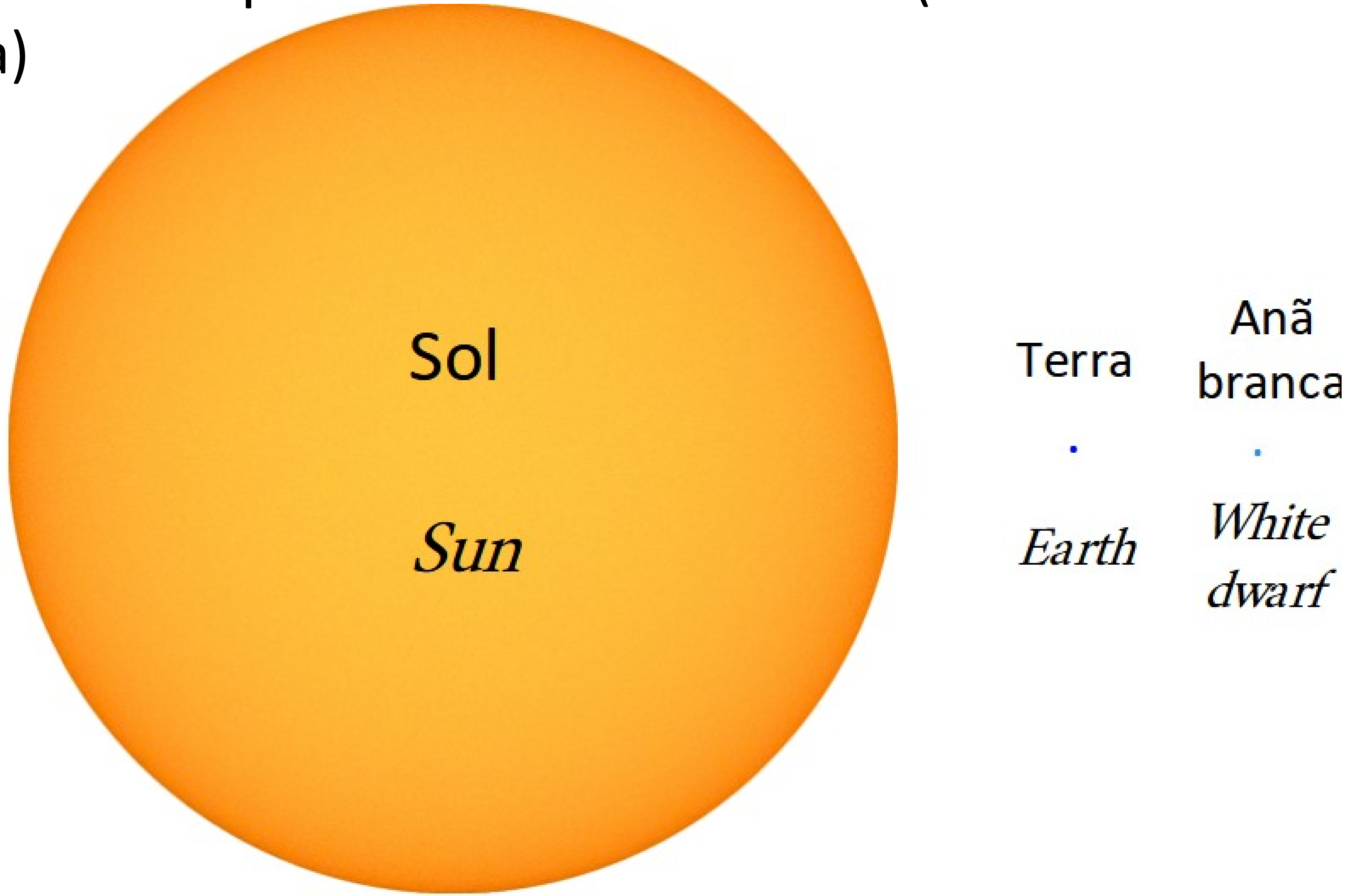


Helix Planetary Nebula (NGC 7293). [O III] + Hα

74h com telescópio pequeno (20cm)

NGC 6543. Nebulosa Olho de gato

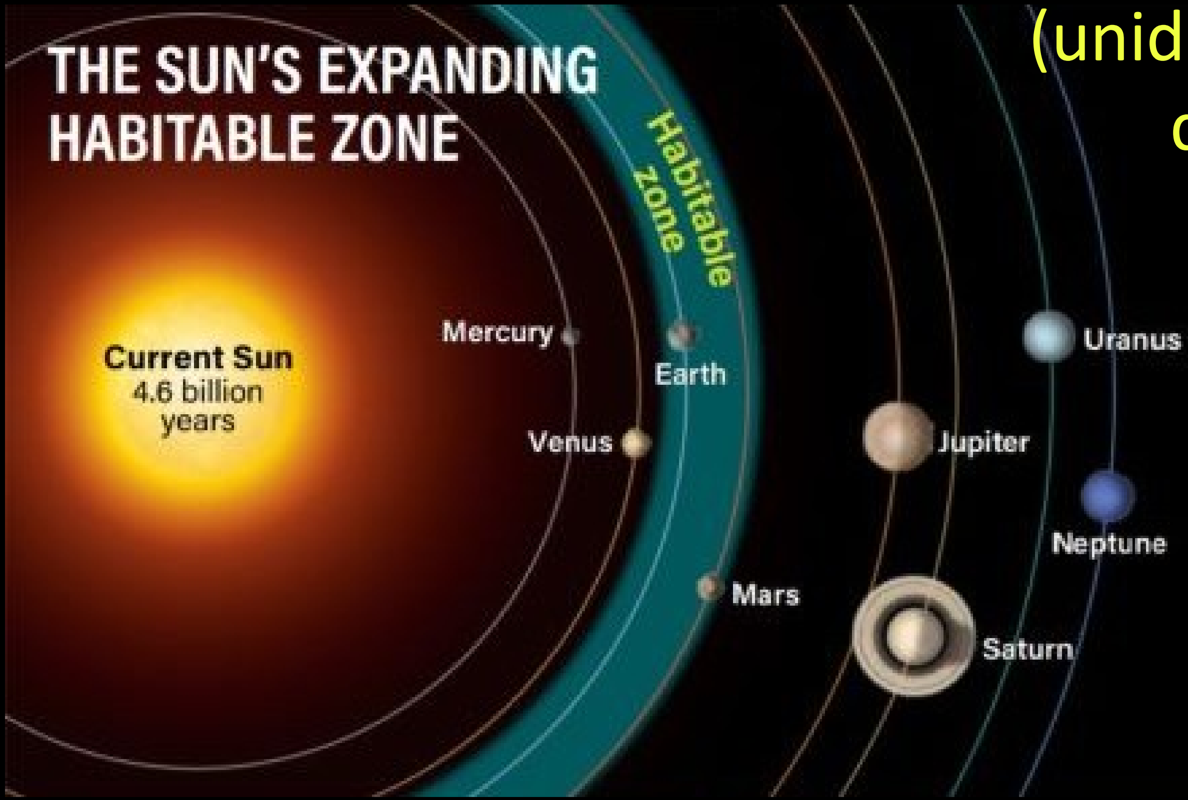
Estágio final da evolução do Sol é uma anã branca, um objeto com apenas 1% do raio do Sol (~ tamanho da Terra)



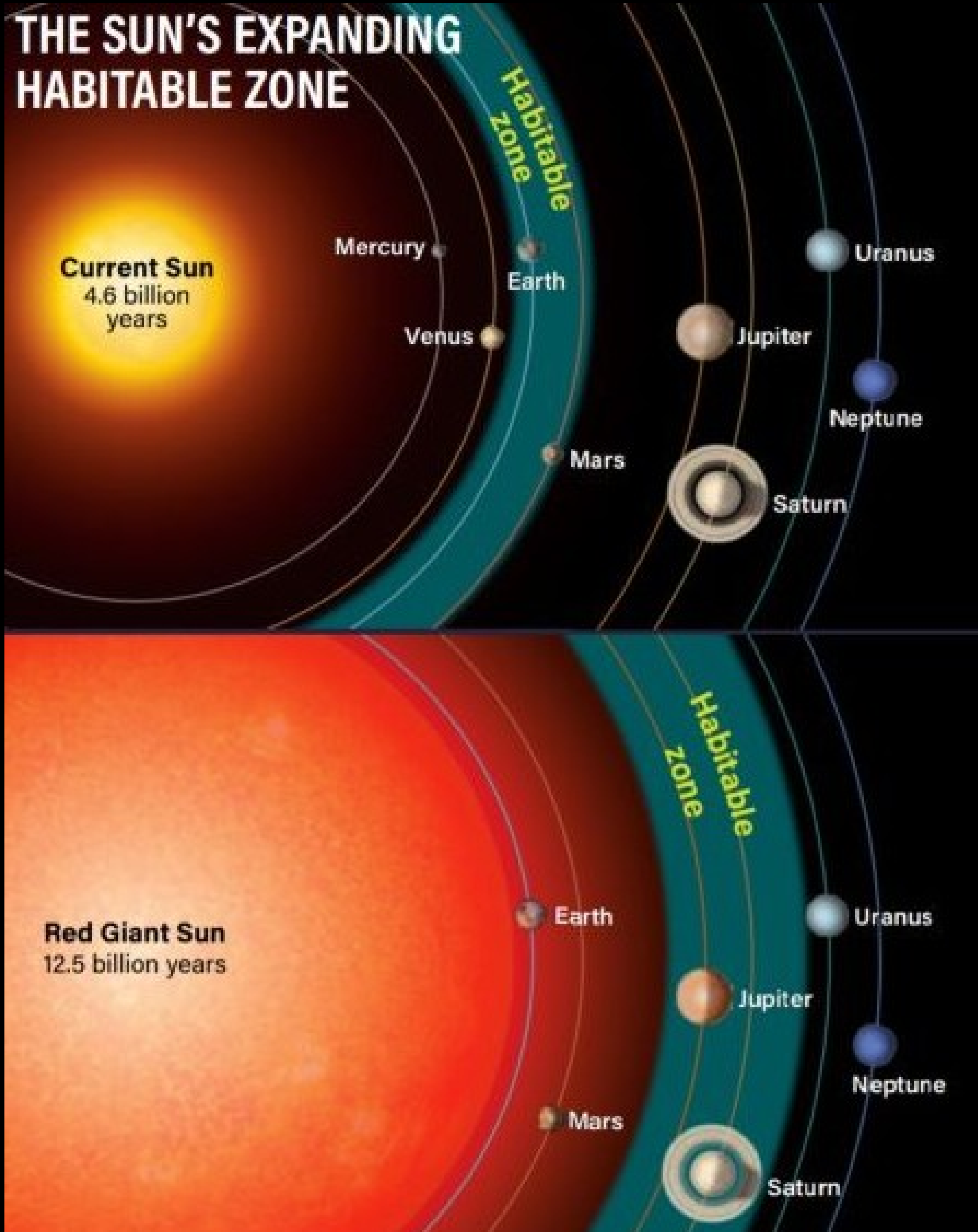
Zona habitável: região ao redor da estrela onde pode existir água líquida

Zona habitável do Sol agora

A zona habitável agora se encontra ~ 1 UA (unidade astronômica = distância Terra-Sol)



https://astronomy.com/magazine/ask-astro/2020/09/what-will-happen-to-the-planets-when-the-sun-becomes-a-red-giant



Zona habitável do Sol agora

Zona habitável do Sol gigante vermelha

https://astronomy.com/magazine/ask-astro/2020/09/what-will-happen-to-the-planets-when-the-sun-becomes-a-red-giant

Interior solar

$R_\odot$ = 696 000 km

Núcleo: $0,0 - 0,25\ R_\odot$

Zona radiativa: $0,25 - 0,71\ R_\odot$

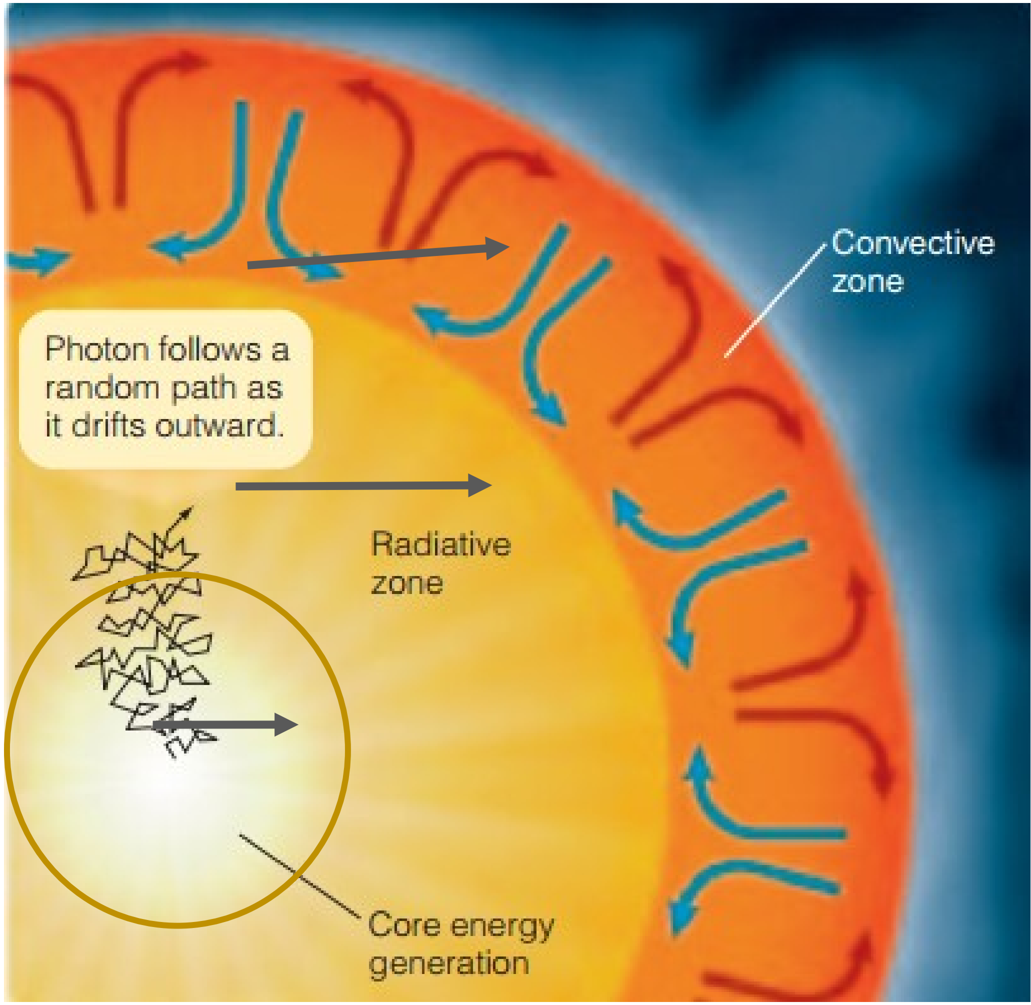
Zona convectiva: $0,71 - 1,0\ R_\odot$

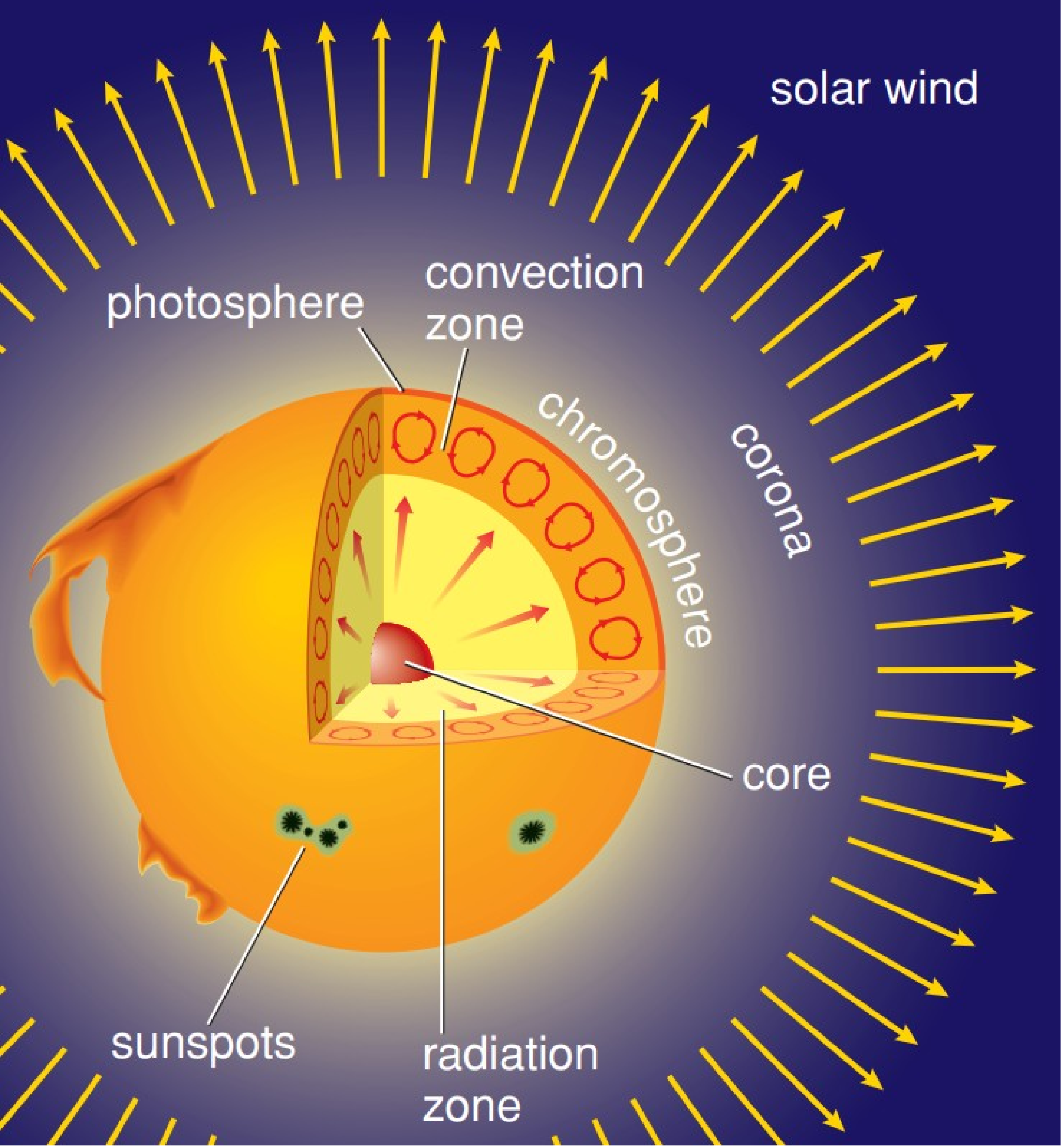
Fluxo de energia

Transporte de energia via convecção

Transporte de energia via radiação

Núcleo: geração de energia (fusão nuclear)





Atmosfera solar

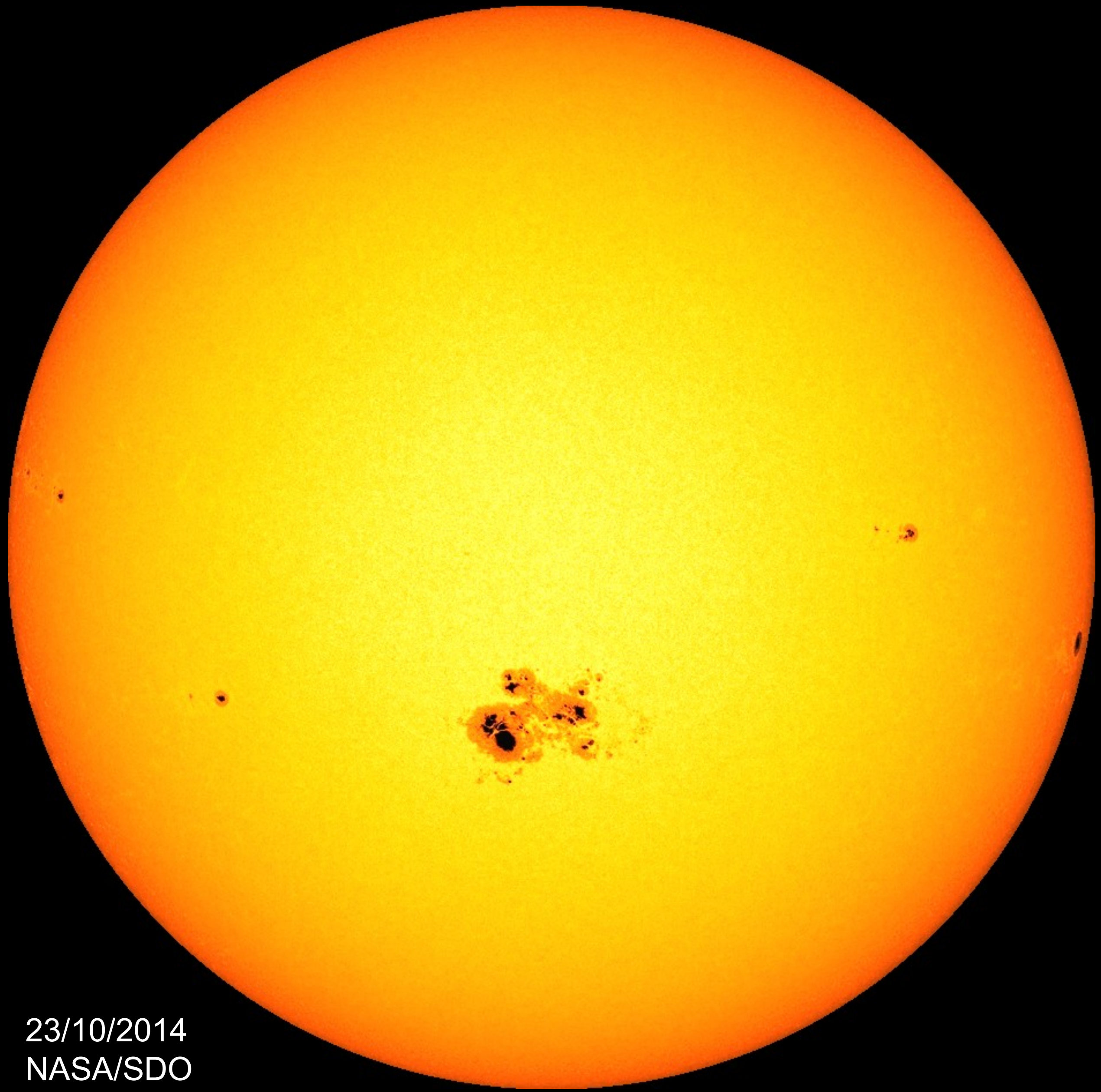
Fotosfera:
-100 a 500 km

Cromosfera:
500 a 2000 km

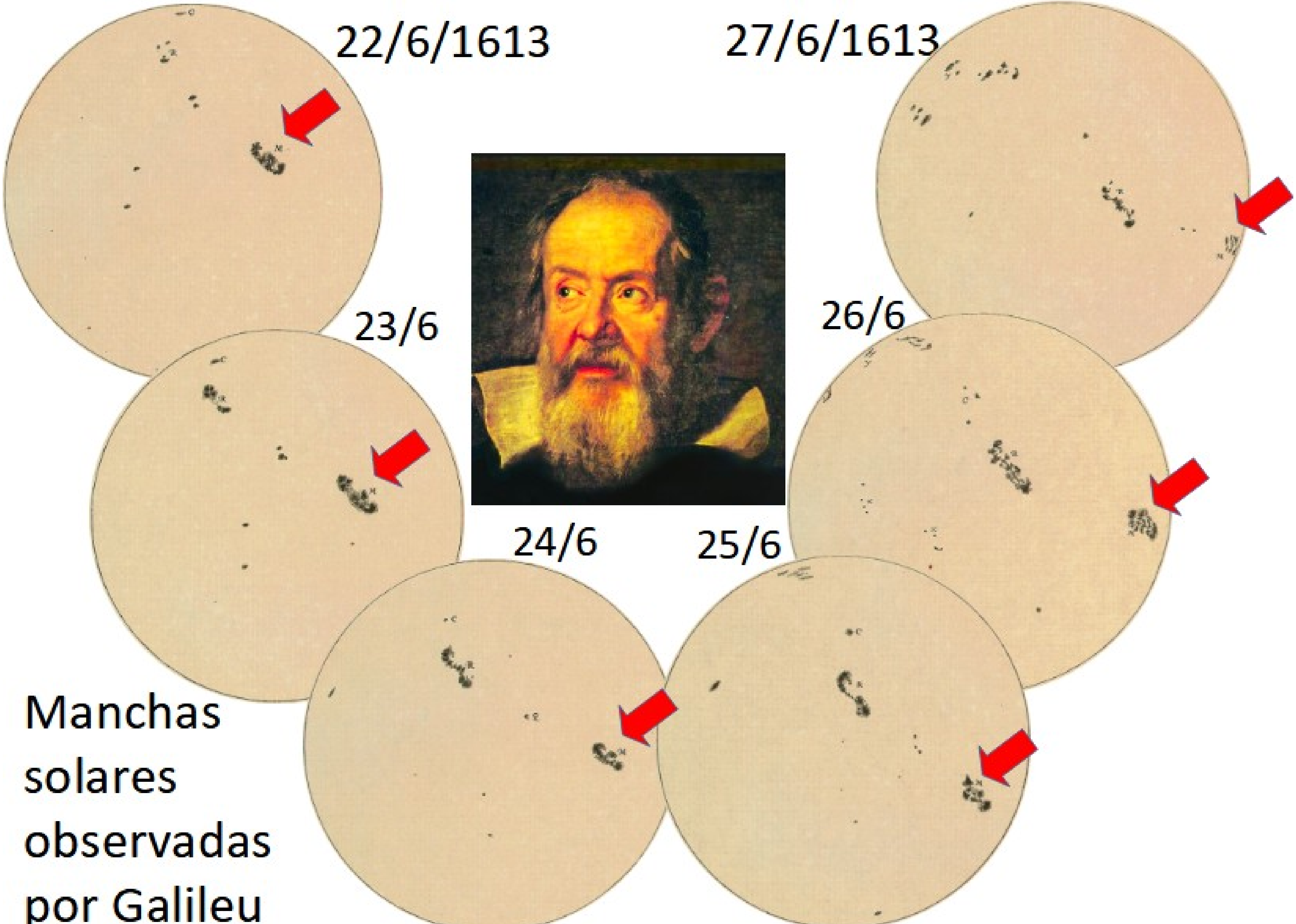
Coroa:
2000 a ~8 x 10^6 km

Vento solar:
até ~100 U.A.?

Manchas solares



23/10/2014
NASA/SDO



Manchas solares observadas por Galileu

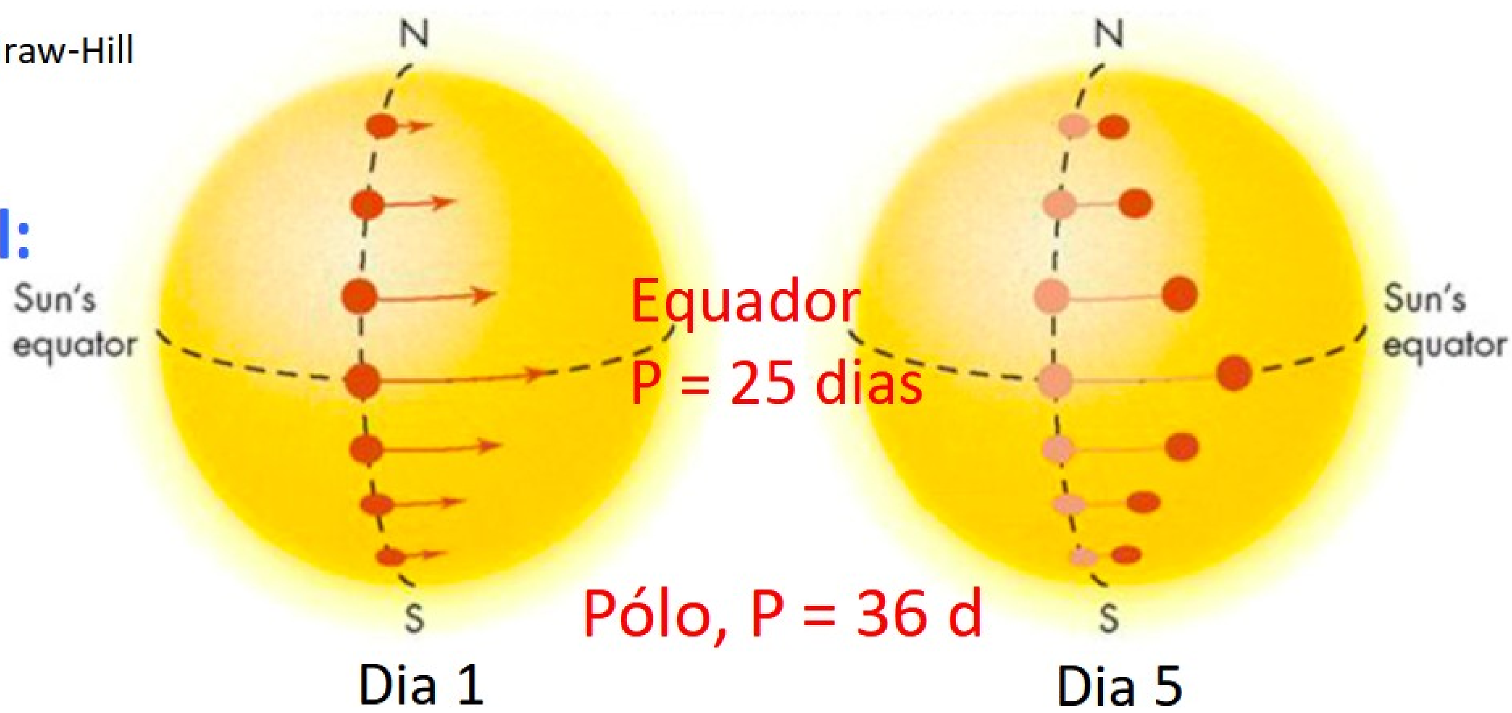
http://galileo.rice.edu/sci/observations/sunspot_drawings.html

O Sol não é um corpo rígido.
O equador roda mais rápido que o polo.

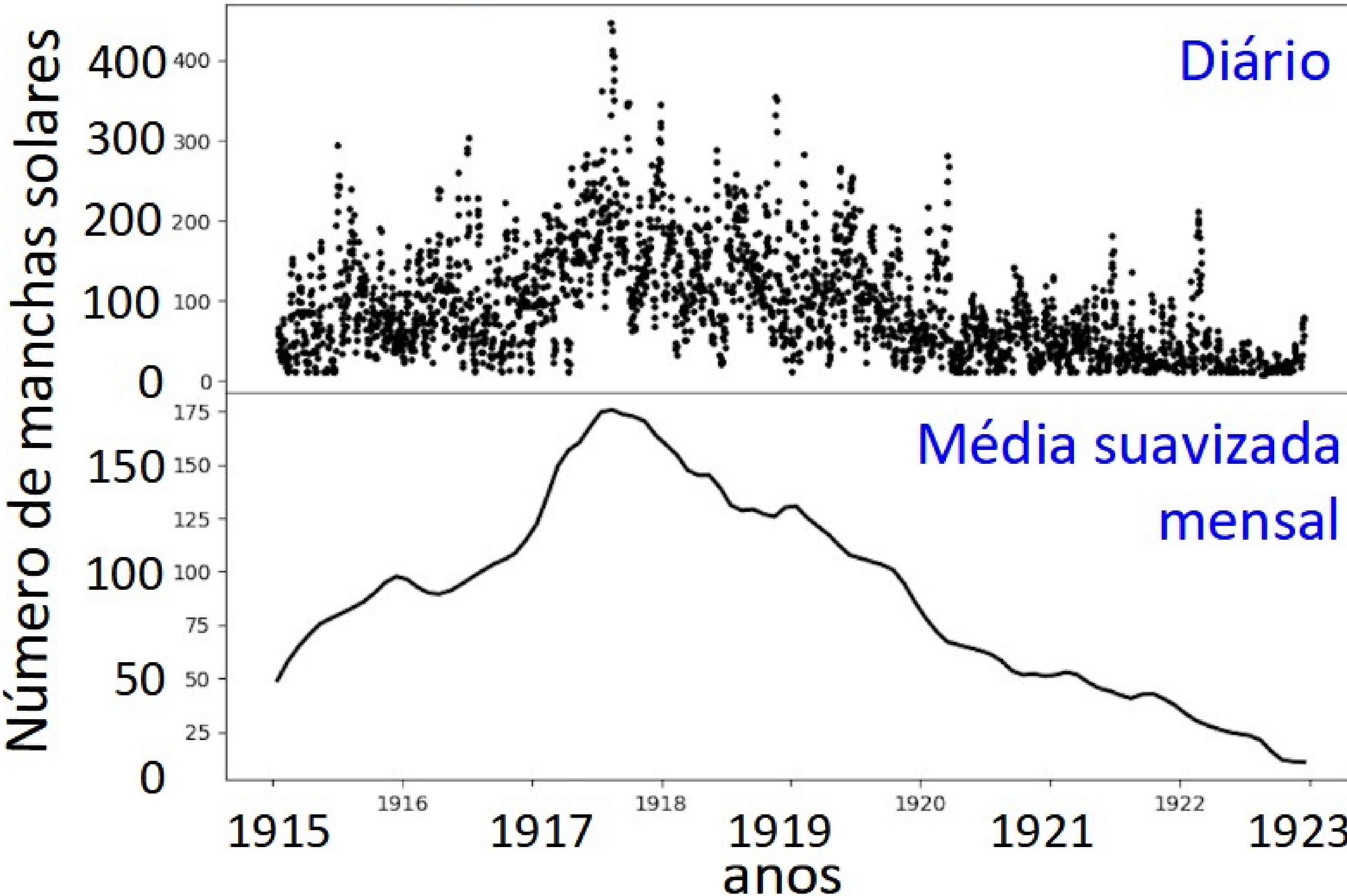
Adatado: (c) McGraw-Hill

Rotação diferencial:

Efeito nas manchas solares

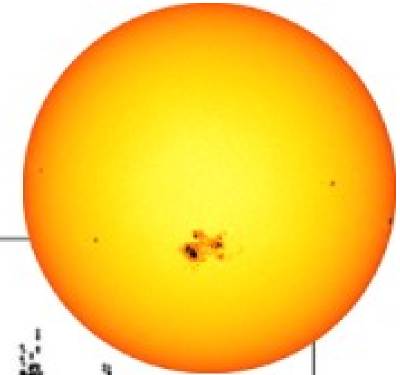


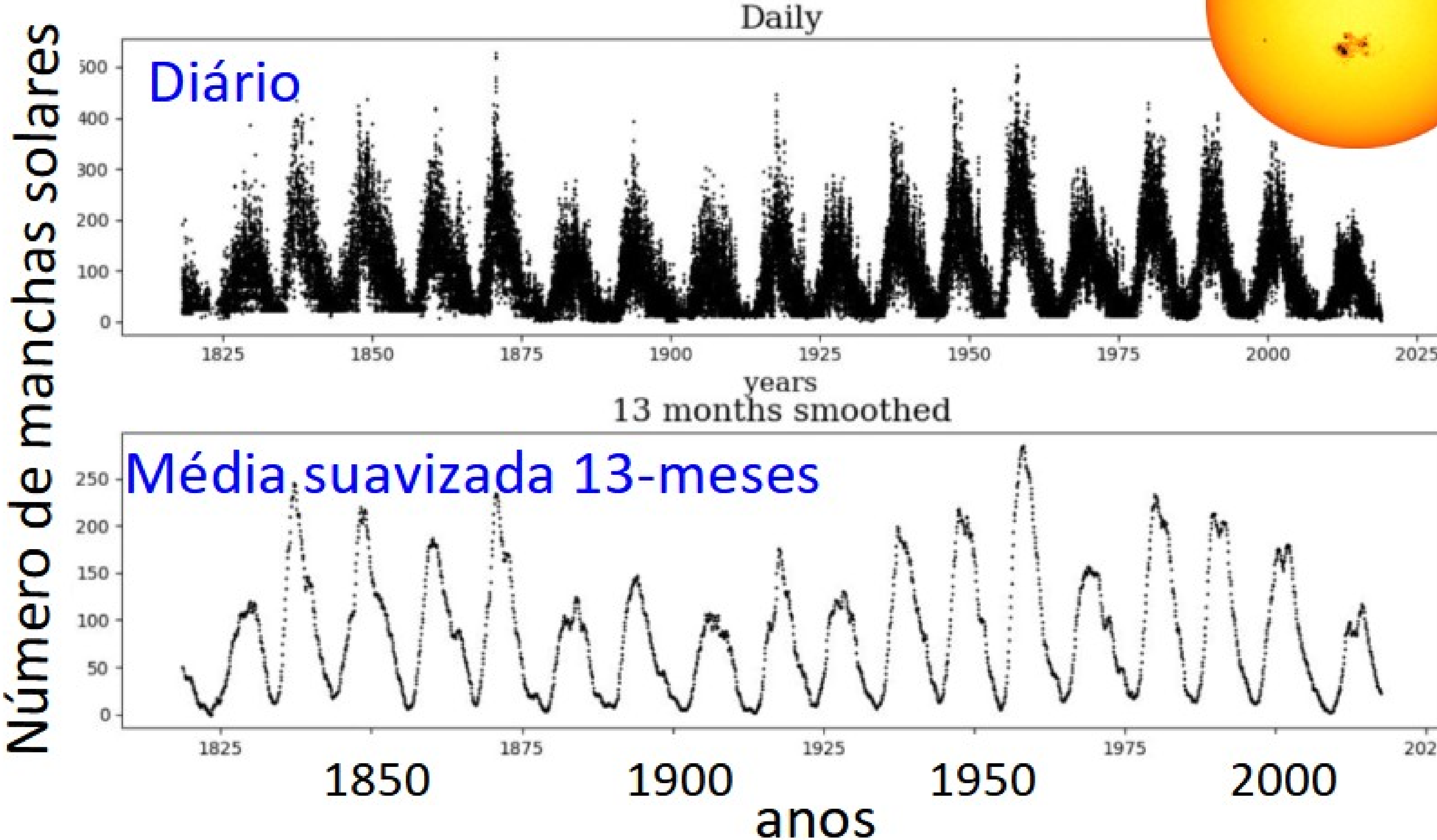
Variação do número de manchas



(c) Gabriela C. Silva, IF-USP (ex-aluna de IC do grupo SAMPA, IAG-USP, 2020)

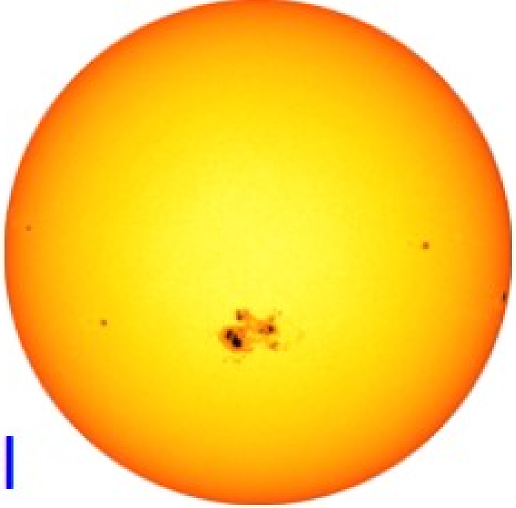
Número de manchas solares



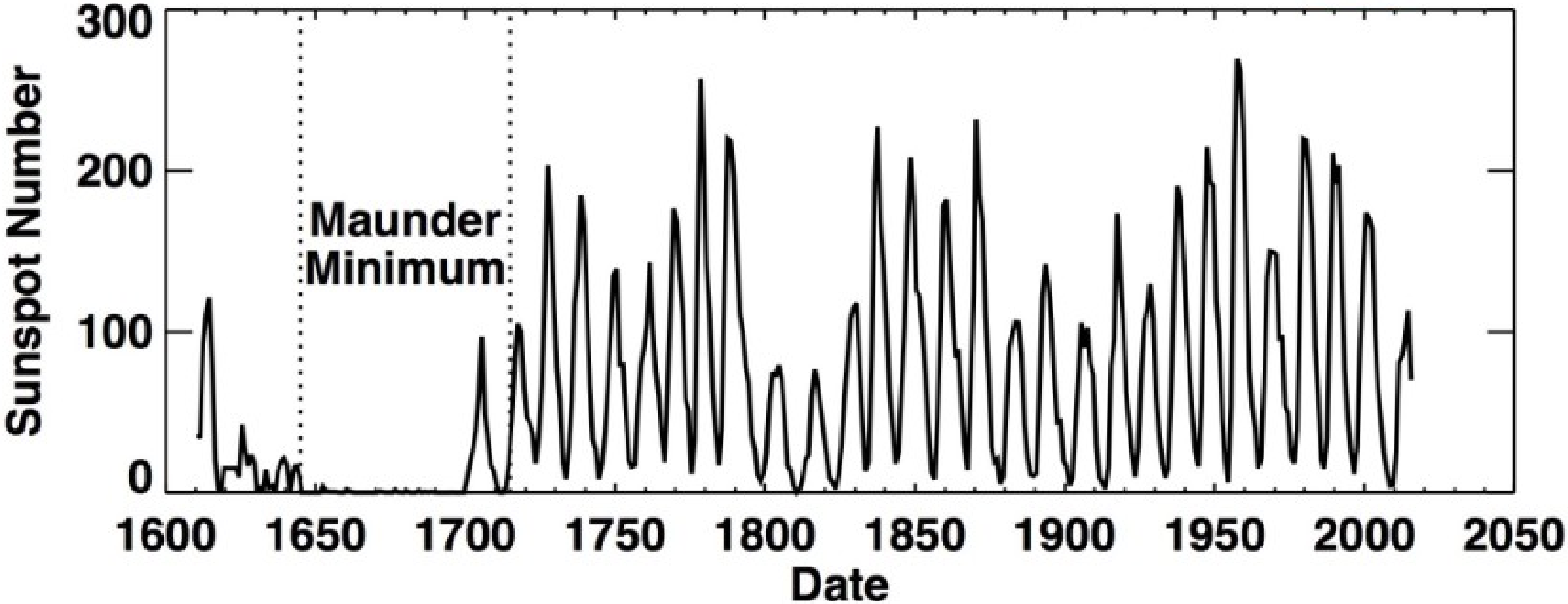


(c) Gabriela C. Silva, IF-USP (ex-aluna de IC do grupo SAMPA, IAG-USP, 2020)

Ciclo de manchas solares quase periódico ~ 11 anos



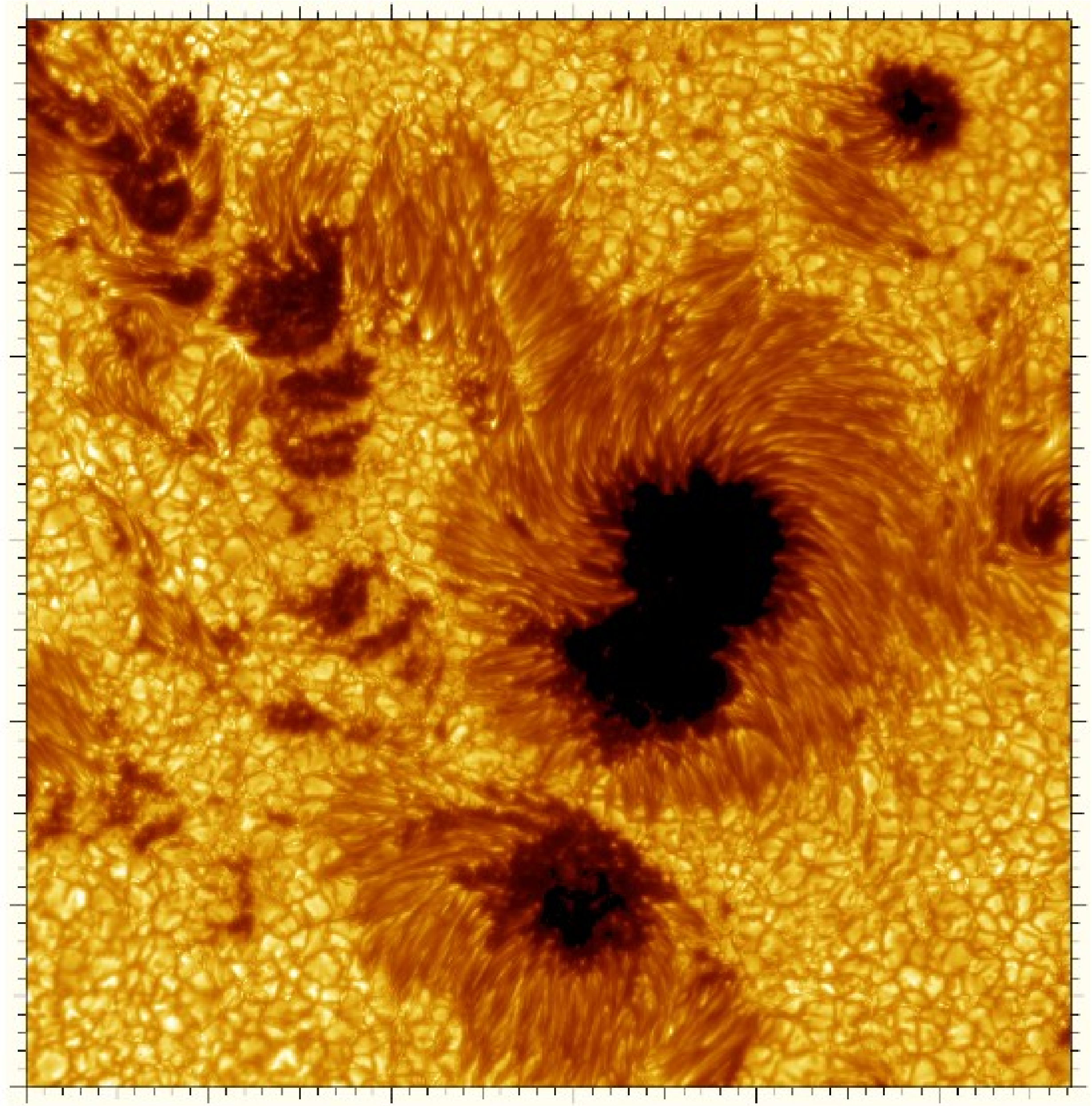
Média anual



(c) David Hathaway/NASA

Umbra: região mais escura.

Penumbra: região um pouco mais clara e com estrutura filamentar, que sugere linhas de campos magnéticos.



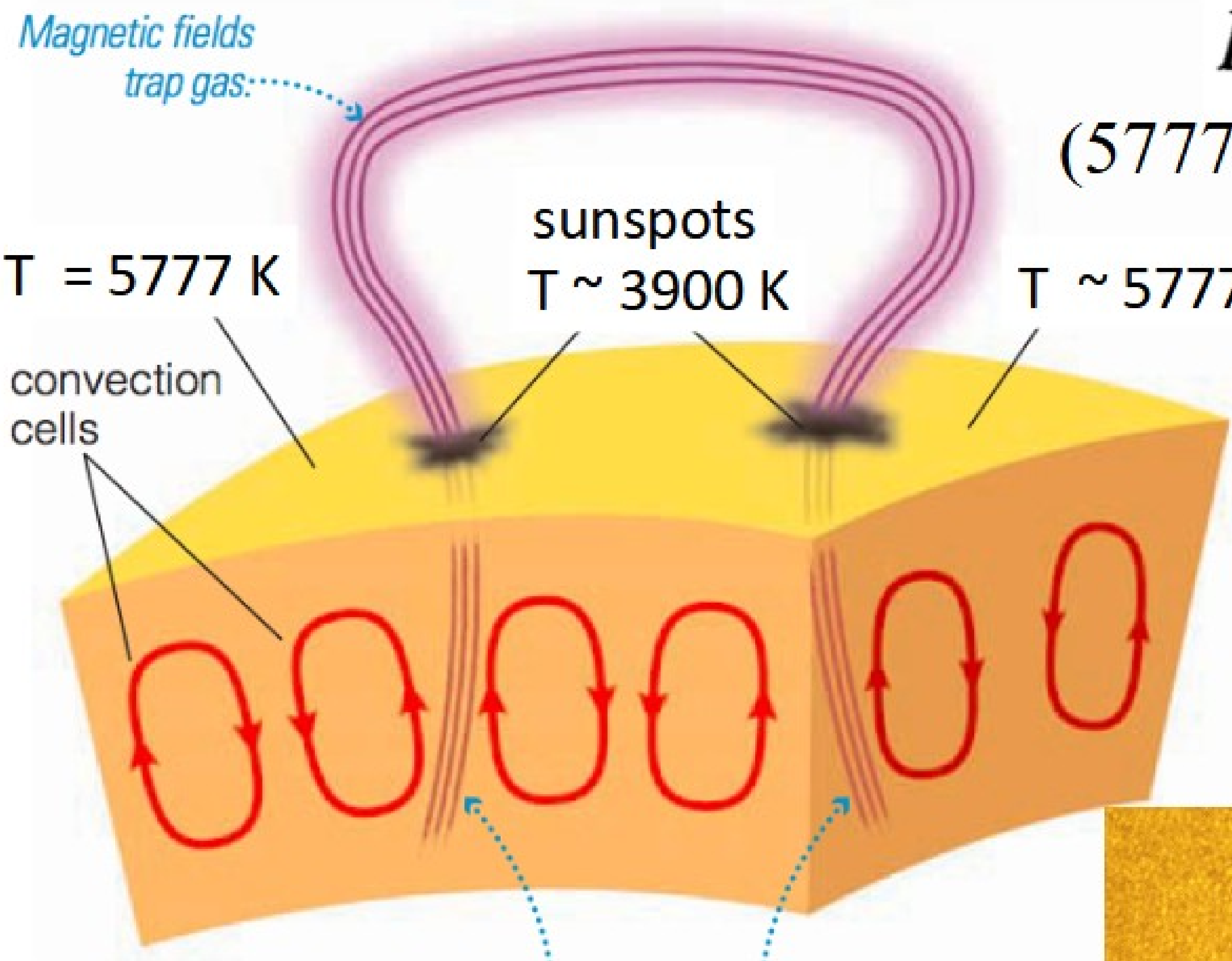
Sunspots observed on 15 July 2002.
The distance between 2 ticks is 1000 km

Nota: além dos grânulos, é possível observar algumas fáculas (pontos brilhantes)

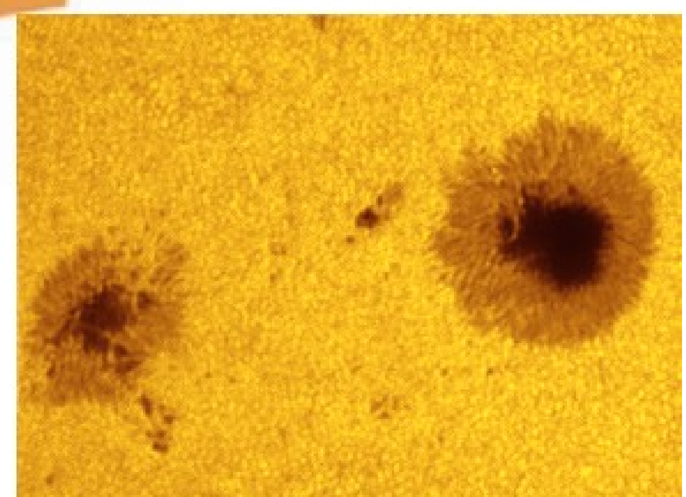
http://www.isf.astro.su.se/NatureNov2002/press_images_eng.html

$$F_{surf} = \sigma T_e^4$$

$$(5777/3900)^4 = 4,8$$

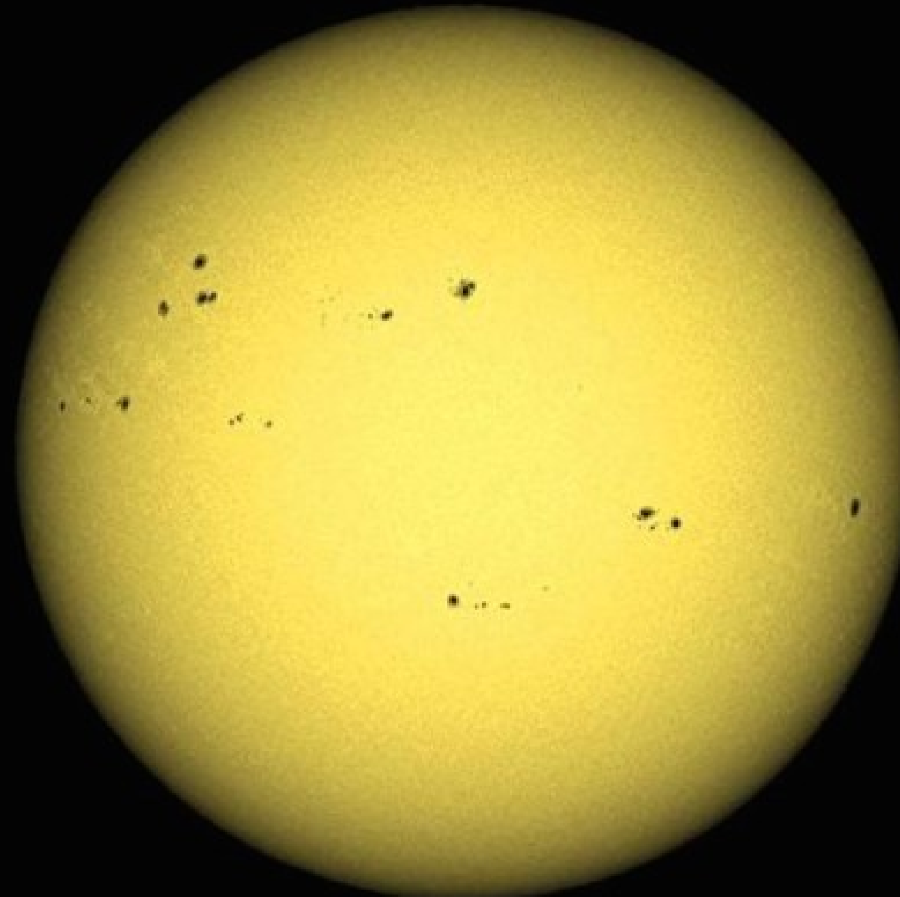


Magnetic fields of sunspots suppress convection and prevent surrounding plasma from sliding sideways into sunspot



Fotosfera solar

Sol no mínimo de atividade: sem manchas



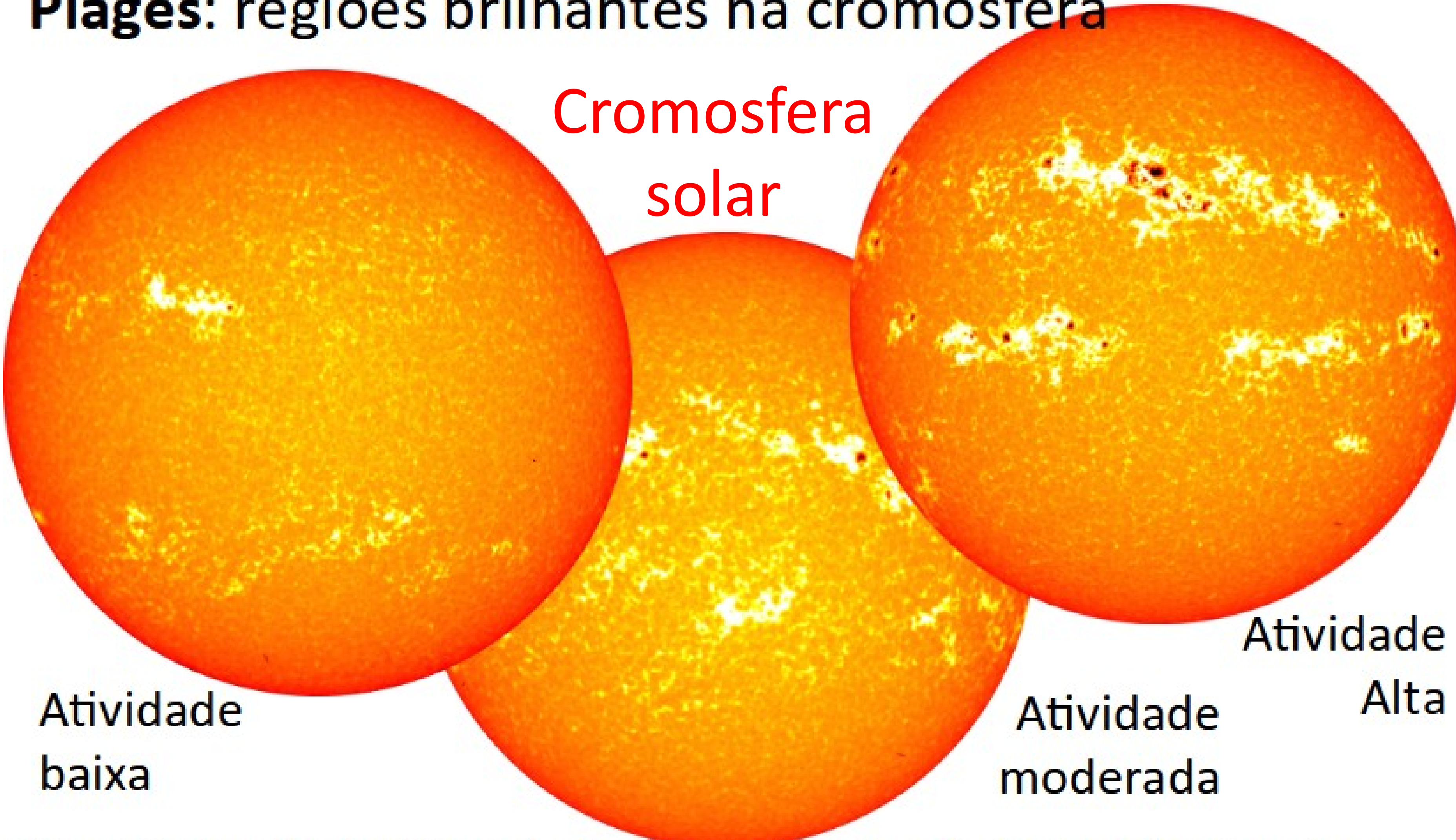
Sol no máximo de atividade: maior número de manchas

http://www.sciencemag.org/news/2011/06/end-sunspot-cycle

Manchas solares: regiões escuras

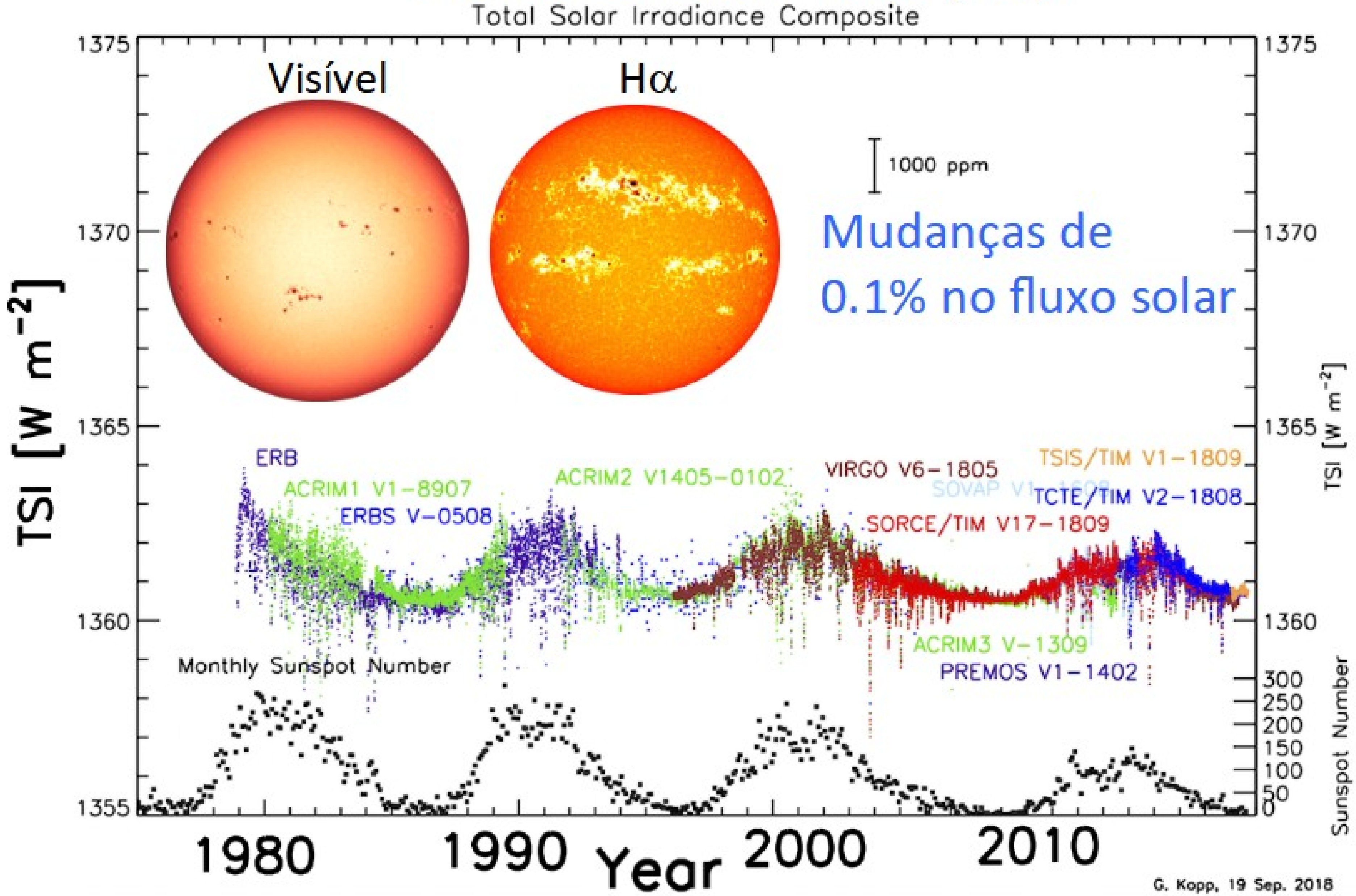
Plages: regiões brilhantes na cromosfera

Sol em Hα



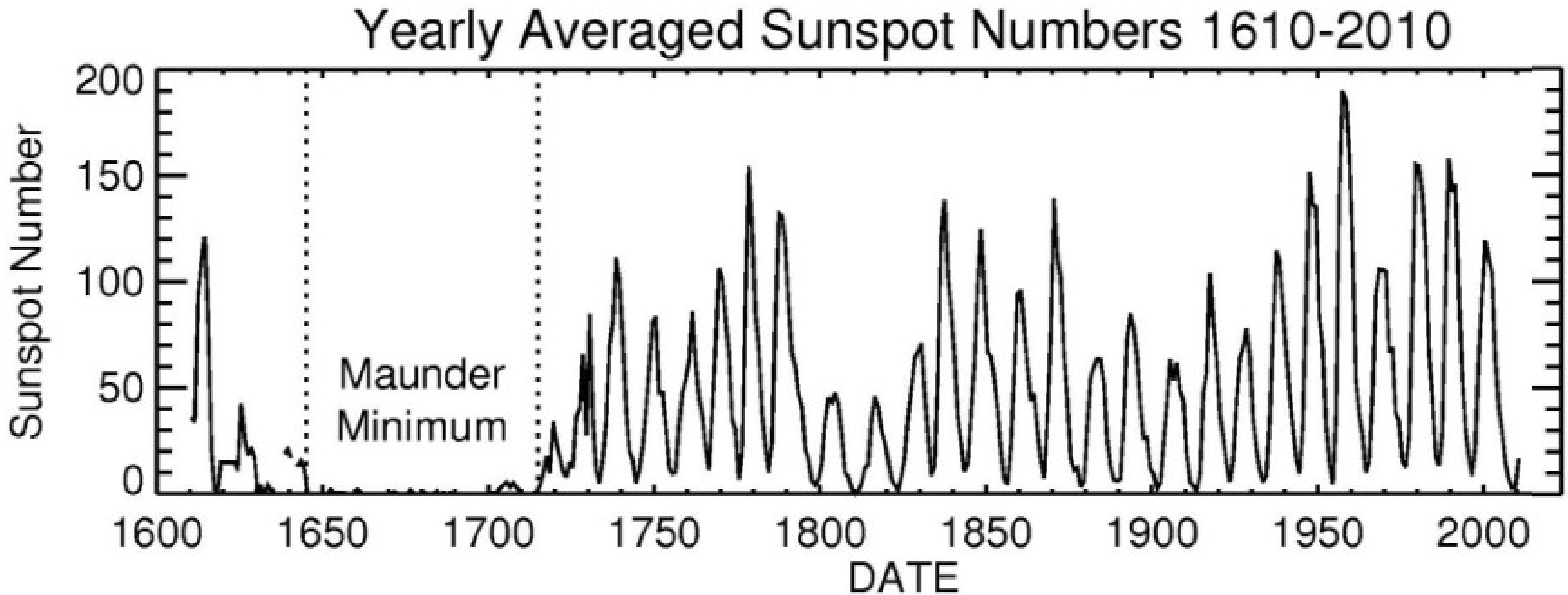
Views of the Sun showing different levels of activity. The color table has been altered to enhance faculae/plage (white regions) which are hotter than sunspots (red-black regions) and whose greater total area contribute to increasing the solar flux reaching the Earth. https://svs.gsfc.nasa.gov/2644

Irradiância Solar Total (TSI)

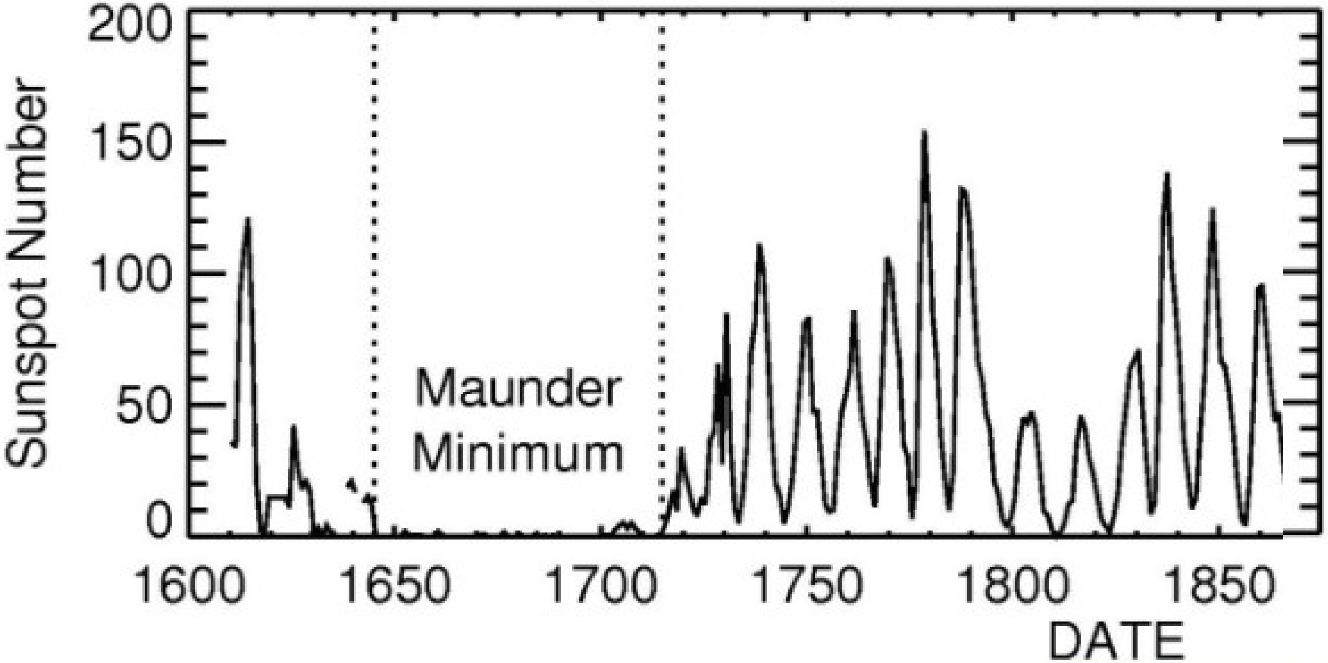


http://spot.colorado.edu/~koppg/TSI/

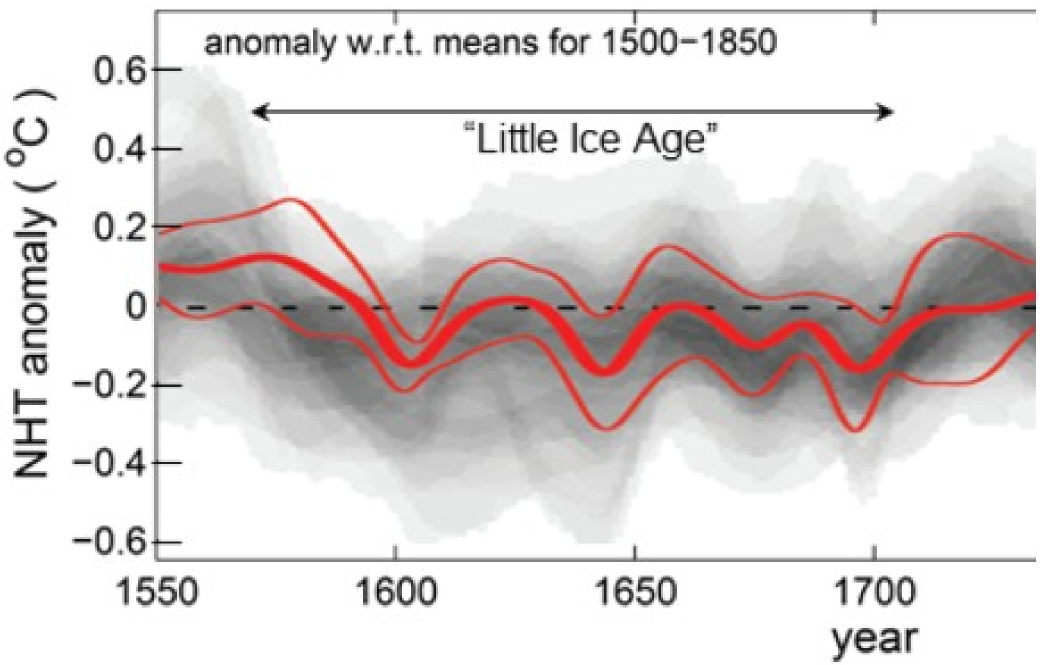
Mínimo de Maunder: entre 1645 e 1715 as manchas solares tornaram-se raras



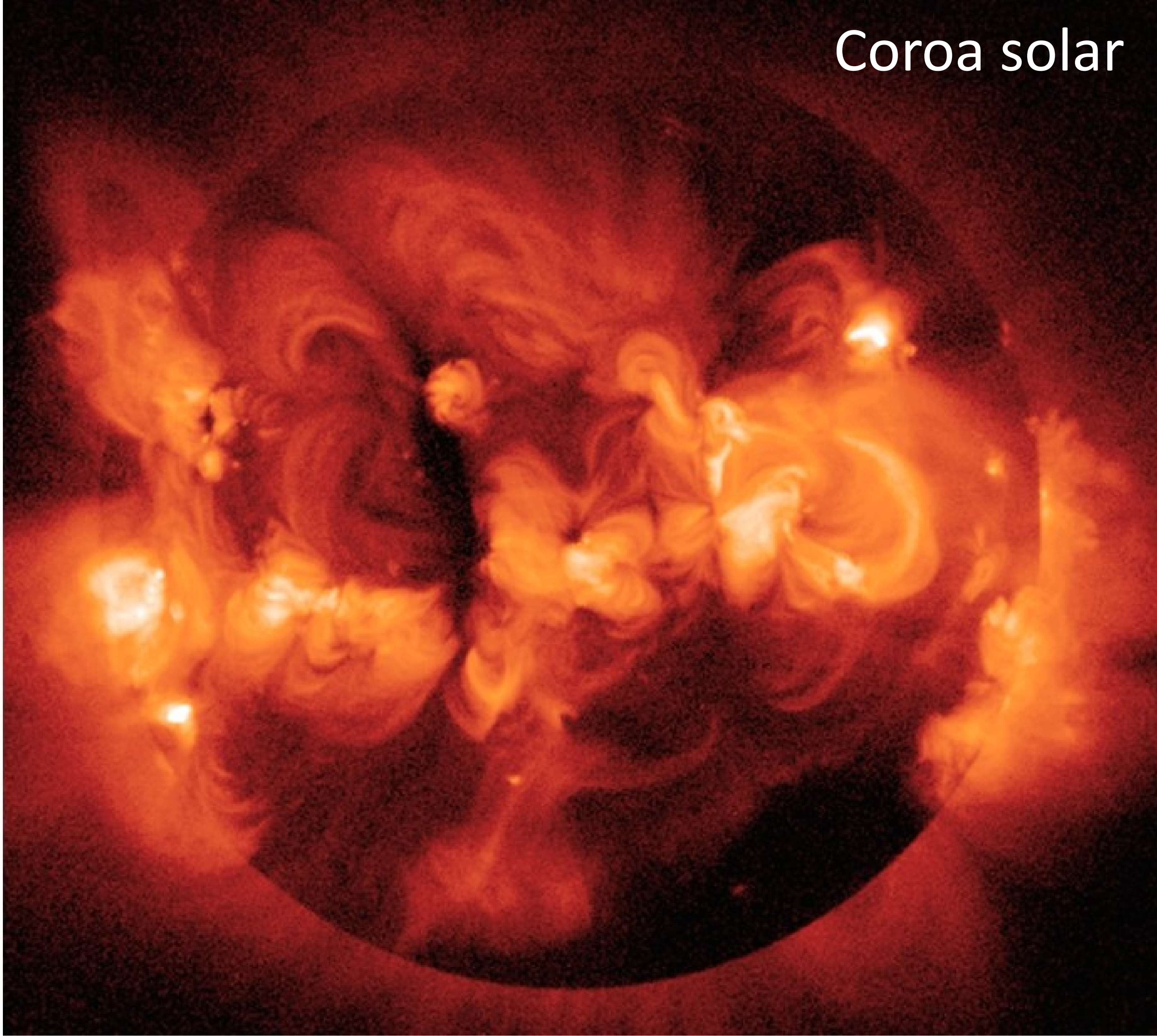
https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/solarcycle-primer.html



Talvez sem conexão com pequena idade de gelo



Coroa solar



Sol em raios-X pelo Yohkoh em 1991

Coroa solar em raios-X.
As regiões escuras têm um maior vento solar

Ciclo de atividade solar em raios-X pelo Yohkoh

Ago 1991 – Set 2001

~ máximo do ciclo 22 ao máximo do ciclo 23

Flare solar (erupção solar)

- Energia liberada de 10^{17} - 10^{25} J entre milisegundos a horas.
- Temperatura ~ 10^7 K
- Grandes flares podem alcançar uma altura de ~ 100 000 km

FIGURE 11.34 (a) A solar flare seen at the limb of the Sun, observed by the Yohkoh Soft X-ray Telescope, March 18, 1999, 16:40 UT. (From the Yohkoh mission of ISAS, Japan. The X-ray telescope

Proeminência solar quiescente

Estruturas de gás ionizado que se estendem até a coroa e podem durar semanas. Perto do limbo são brilhantes em $H\alpha$

Fig. 11.36. A quiescent hedgerow prominence. (c) Big Bear Solar Observatory

18/6/2017
(c) Eukasz Sujka

Gigantesca proeminência solar eruptiva

Uma proeminência solar eruptiva pode existir por apenas algumas horas, ejetando gás do Sol.

Elas podem se desenvolver a partir de proeminências quiescentes.

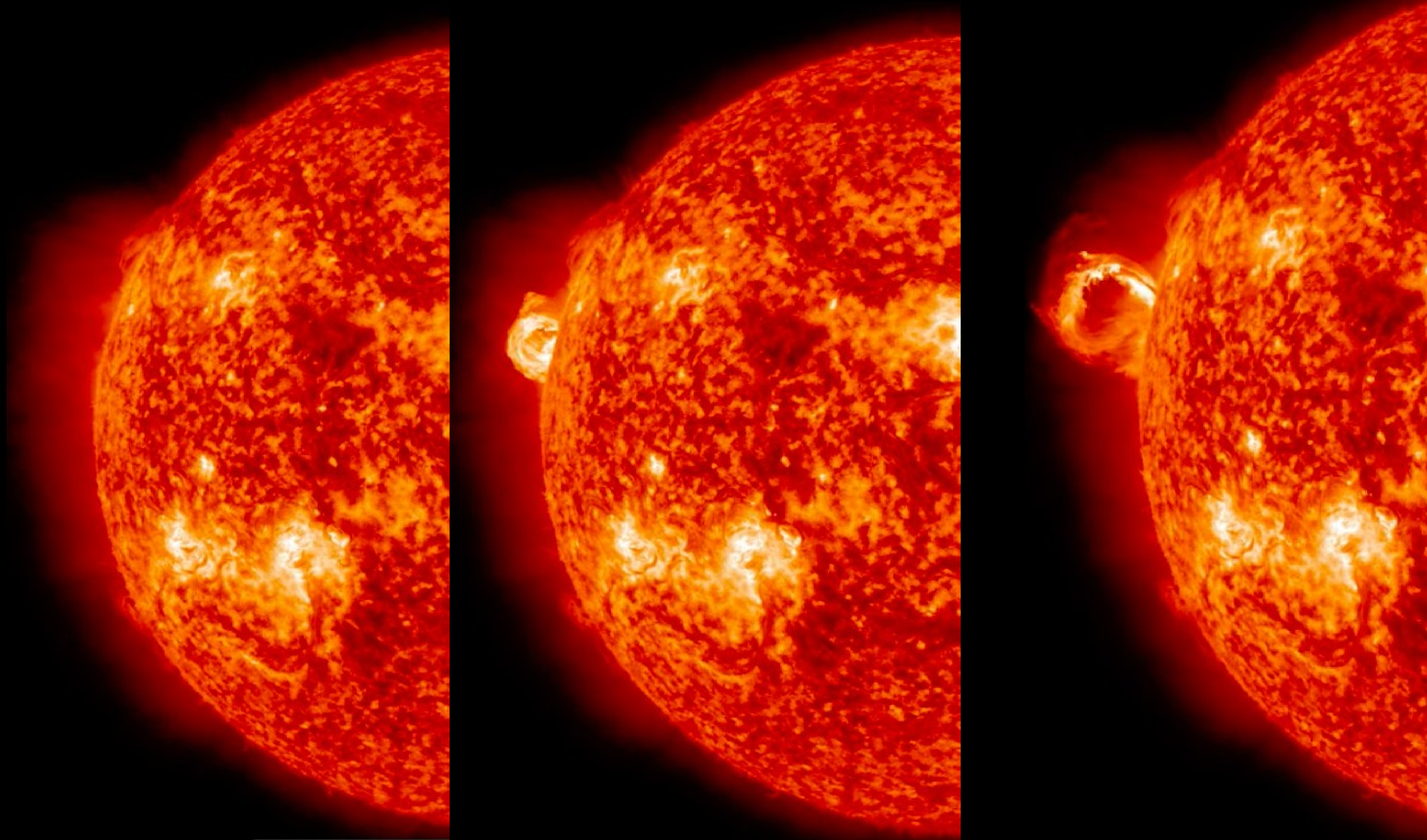
An **eruptive prominence** in extreme UV light on 30/3/2010. © NASA/SDO

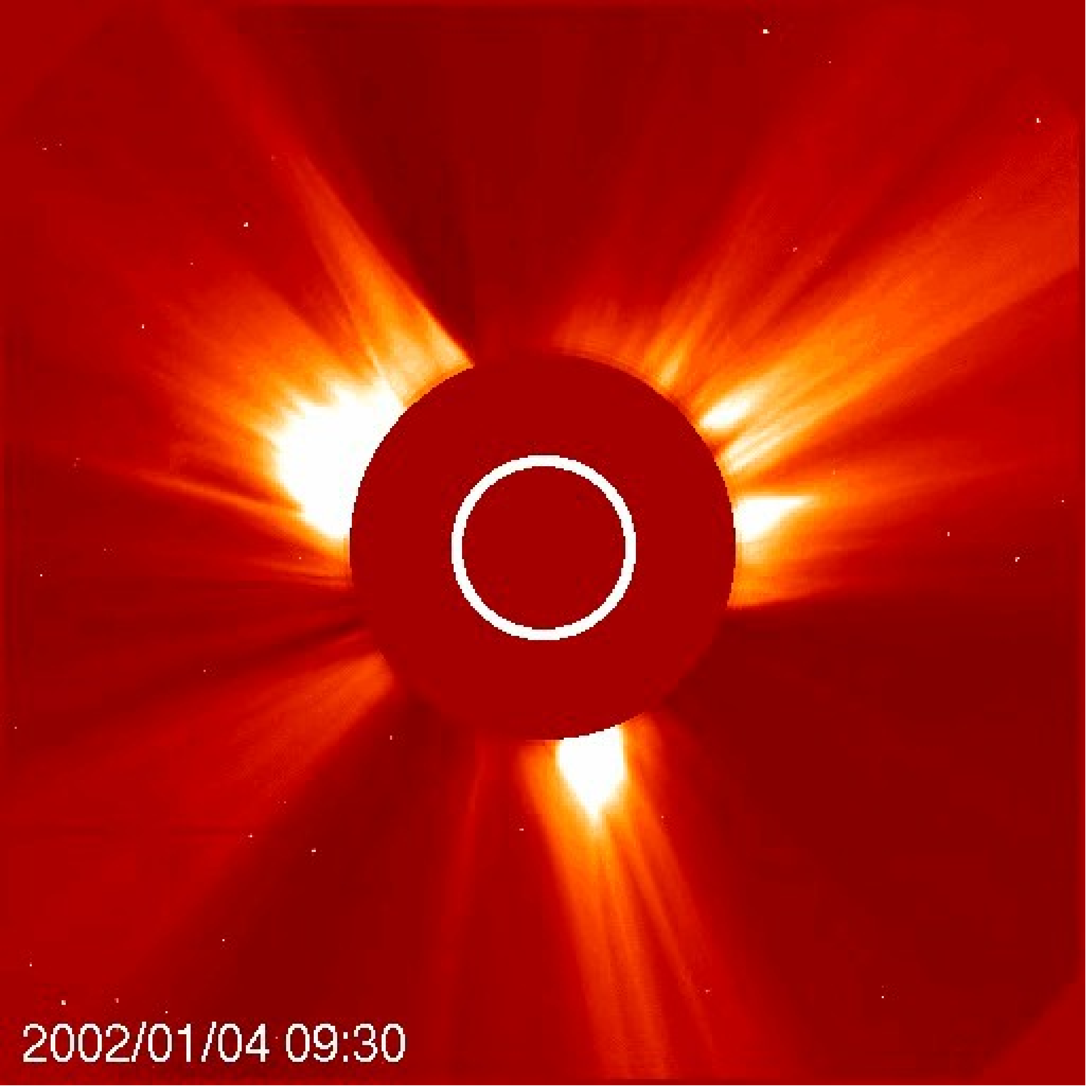
https://www.nasa.gov/content/goddard/what-is-a-solar-prominence

Ejeção de massa coronal (CME)

5×10^{12} kg a 5×10^{13} kg

v ~ 400 km/s a 1000 km/s





Tempestade solar CME irrompendo no Sol em 4/1/2002.
O disco do Sol é indicado pelo círculo branco. O Sol está oculto por um coronógrafo, que bloqueia a luz brilhante da superfície do Sol, permitindo-nos ver a fraca atmosfera estendida do Sol.

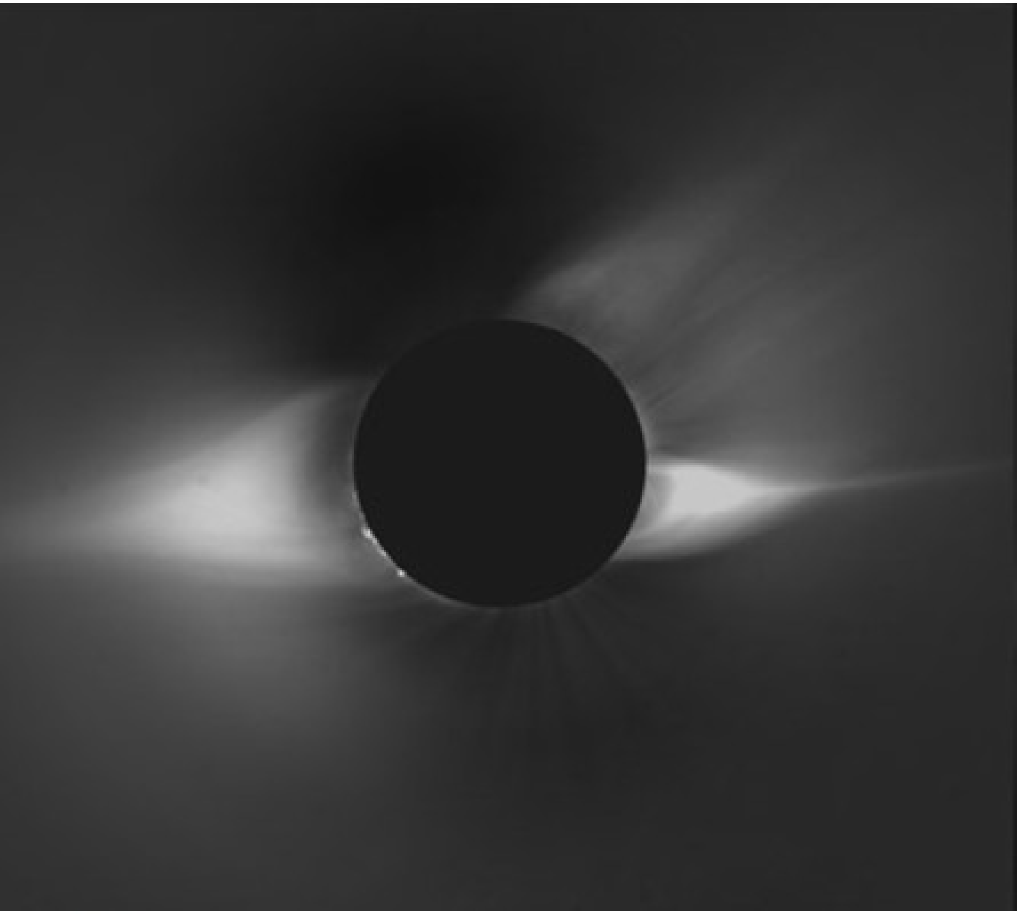
Coroa solar durante eclipse

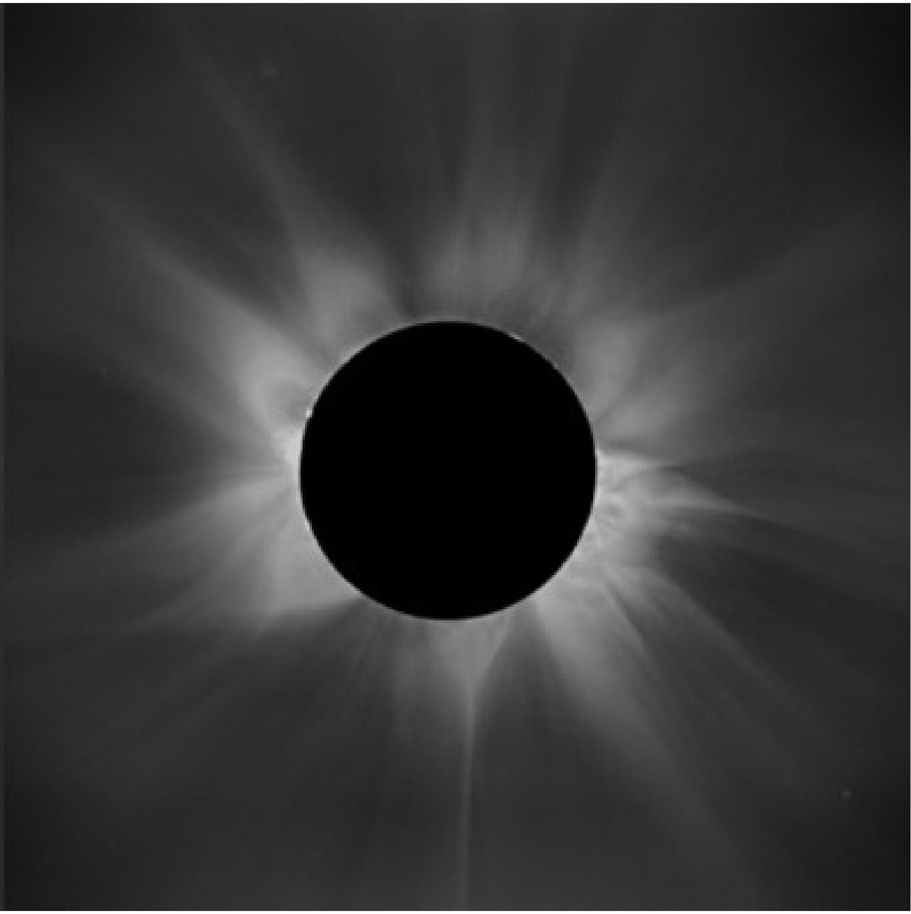
1994 (mínimo de atividade)

Mais estendida no equador, consistente com campo dipolar

1980 (máximo de atividade)

Coroa é mais complexa

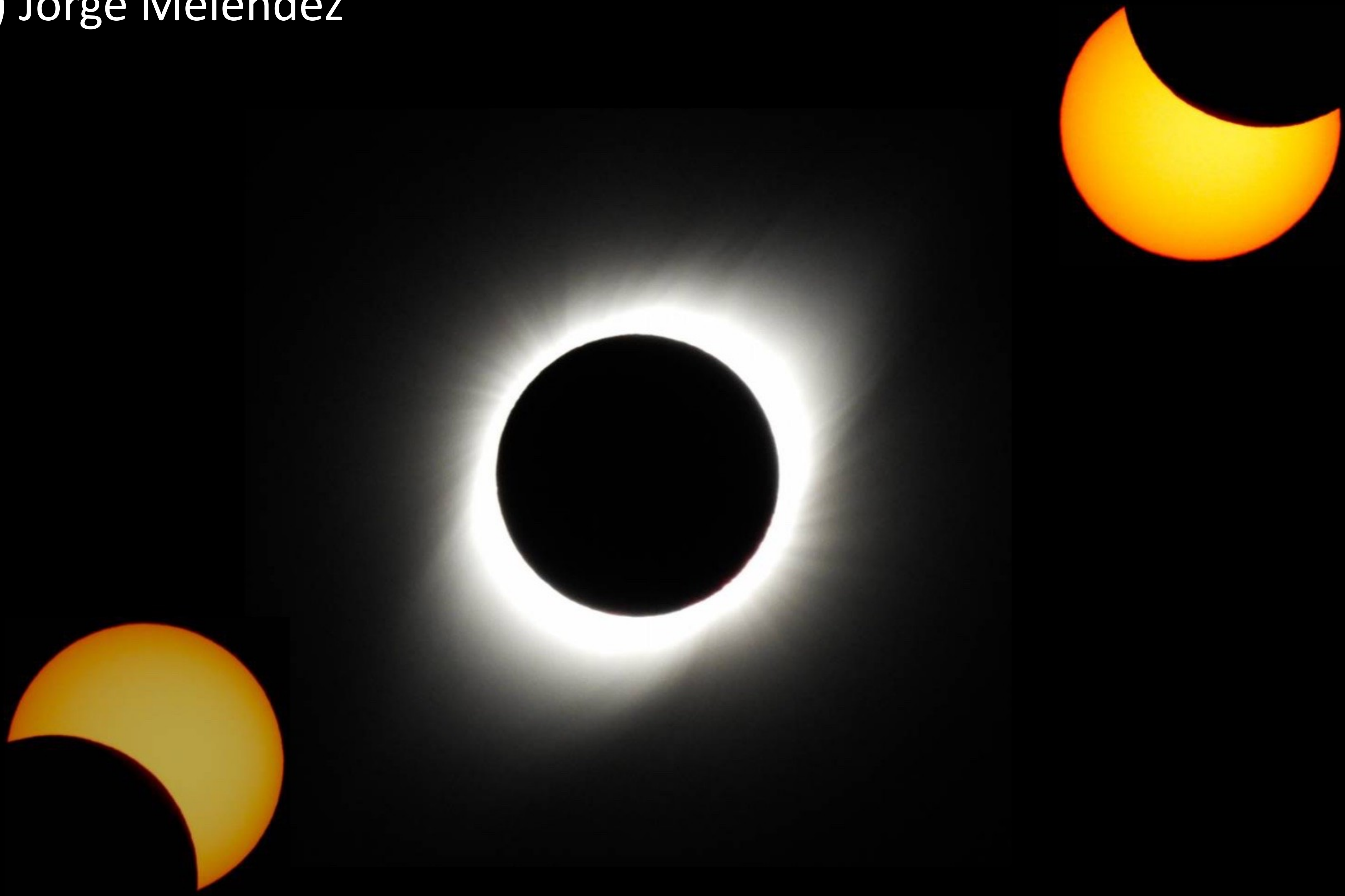




http://www.windows2universe.org/sun/images/eclipse/sun_eclipse_corona_max_vs_min_big_jpg_image.html

Eclipse solar, 2/jul/2019, Chile

(c) Jorge Meléndez



O Sol foi formado junto com outras estrelas a partir de uma nuvem em colapso → aglomerado de estrelas

NGC 602, aglomerado aberto jovem (5 Myr)

M67, aglomerado aberto de idade ~solar (4 Gyr)

https://apod.nasa.gov/apod/ap070809.html

Determinação de idades em aglomerados abertos

A idade por ser determinada pela posição do **Turnoff**, ou seja o ponto onde as estrelas deixam a sequência principal

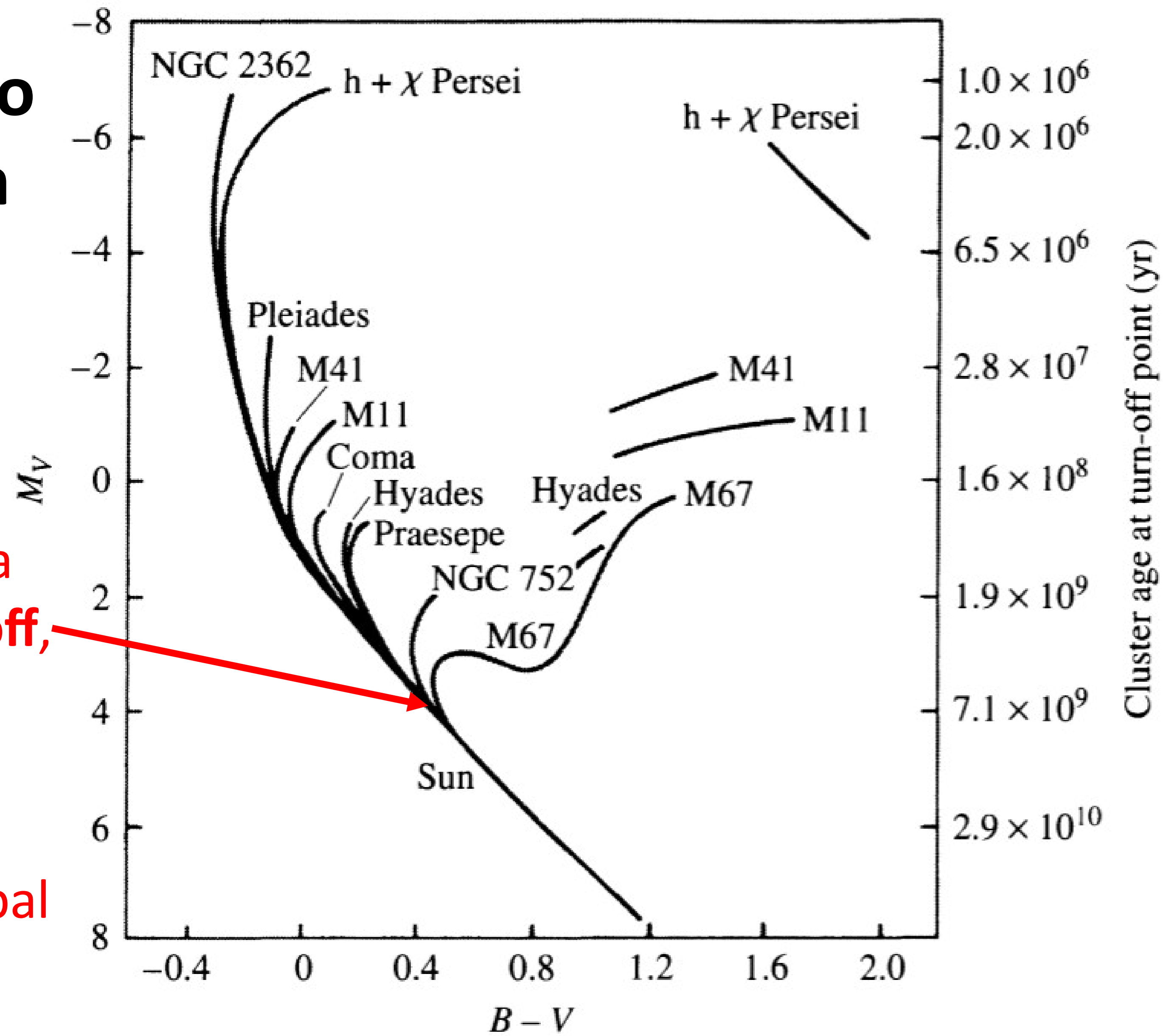
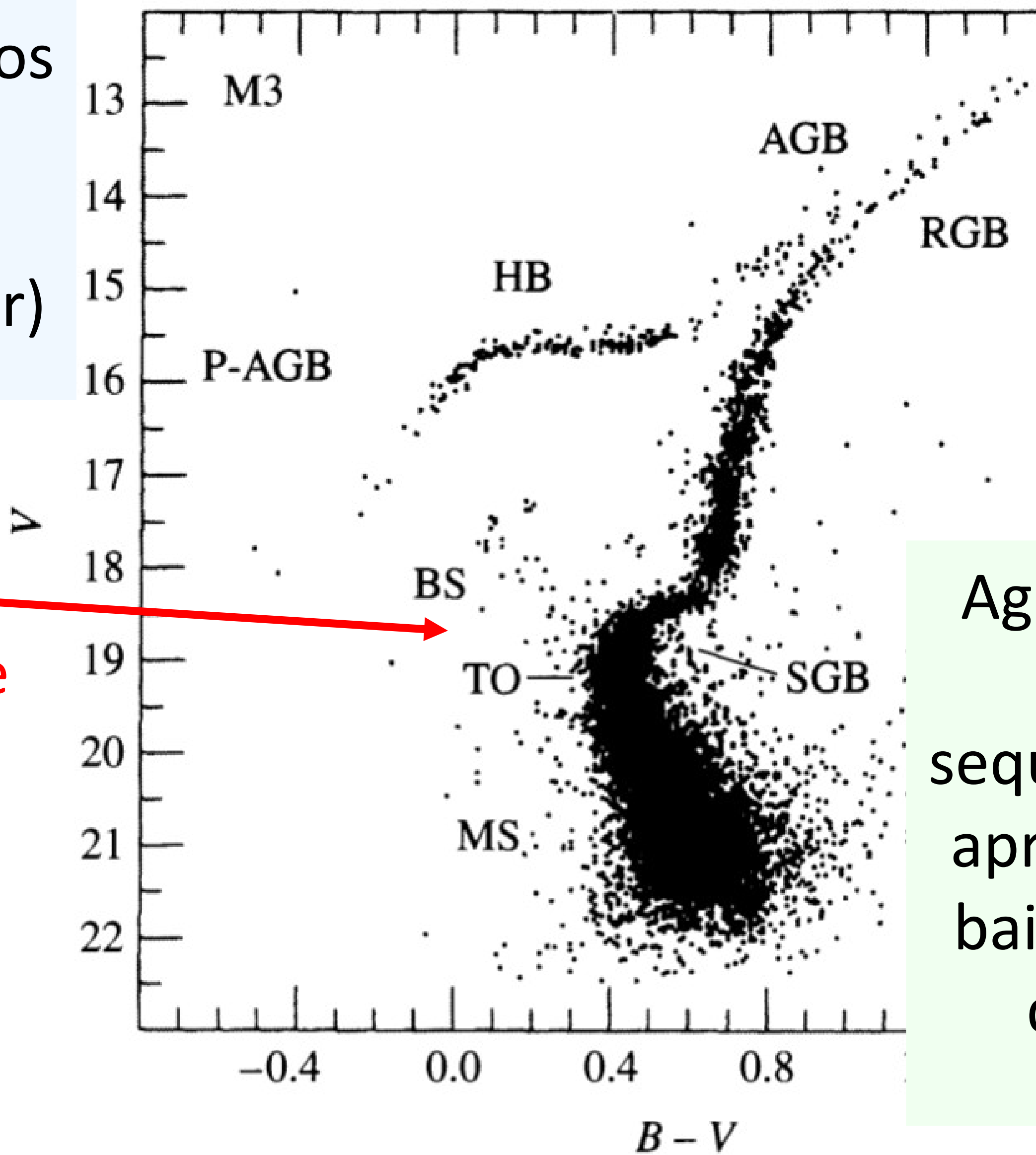


FIGURE 13.19 A composite color–magnitude diagram for a set of Population I galactic clusters. The absolute visual magnitude is indicated on the left-hand vertical axis, and the age of the cluster, based on the location of its turn-off point, is labeled on the right-hand side. (Figure adapted from an original diagram by A. Sandage.)

Aglomerados globulares são velhos (10 – 12 Gyr)



Turnoff, ponto onde as estrelas deixam a sequência principal

Aglomerado globular M3 (11 Gyr). A sequência principal só apresenta estrelas de baixa massa. 2 ramos de gigantes (RGB e AGB) são visíveis;

FIGURE 13.17 A color–magnitude diagram for M3, an old globular cluster. The major phases of stellar evolution are indicated: main sequence (MS); blue stragglers (BS); the main-sequence turn-off point (TO); the subgiant branch of hydrogen shell burning (SGB); the red giant branch along the Hayashi track, prior to helium core burning (RGB); the horizontal branch during helium core burning (HB); the asymptotic giant branch during hydrogen and helium shell burning (AGB); post-AGB evolution proceeding to the white dwarf phase (P-AGB). (Figure adapted from Renzini and Fusi