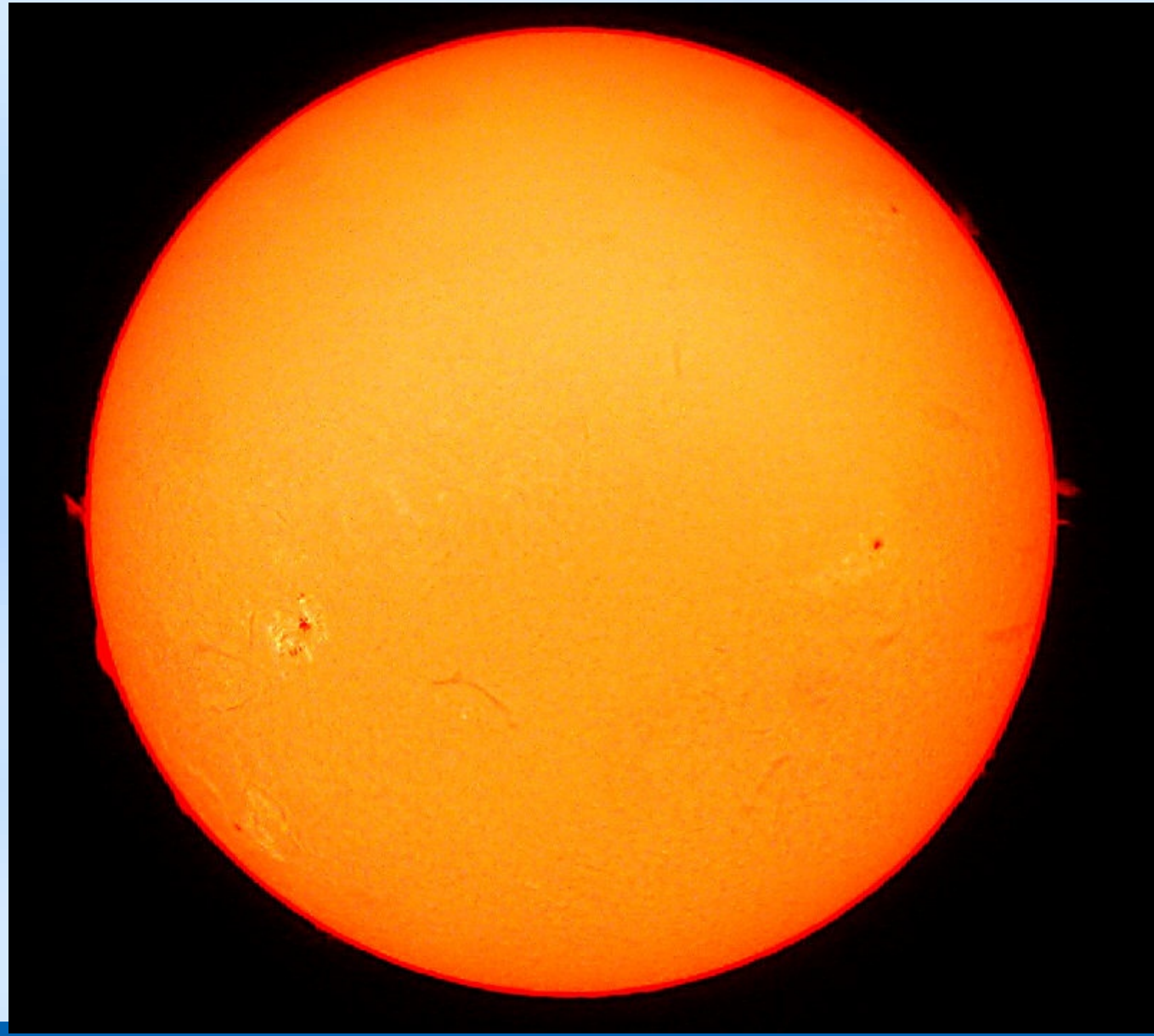


Czy Słońce Wybuchnie?

Alex Schwarzenberg-Czerney



Ważna Rola Oszacowań



Parametry Słońca i Stałe

PARAMETRY SŁOŃCA

$$M_{\odot} \approx 2.0 \cdot 10^{33} \text{ g} \approx 330000 M_{\oplus}$$

$$R_{\odot} \approx 7.0 \cdot 10^{10} \text{ cm} \approx 110 R_{\oplus}$$

$$L_{\odot} \approx 3.8 \cdot 10^{33} \text{ erg/s}$$

$$(T_e \approx 5800 \text{ K})$$

$$t_{\odot} = 4.6 \pm 0.1 \cdot 10^9 \text{ lat}$$

$$\rho_0 \sim 1 \text{ g/cm}^3$$

STAŁE

$$G \approx 6.7 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/(\text{kg s}^2)$$

$$k \approx 1.38 \cdot 10^{-16} \text{ erg/K}$$

$$\mu_H \approx 1.67 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

$$c \approx 3.0 \cdot 10^{10} \text{ cm/s}$$

Odręczne notki dostępne w:

https://users.camk.edu.pl/alex/papers/sun_stab.pdf

Wiedza Empiryczna

EMPIRYCZNA WIEDZA O STABILNOŚCI ☺

$M = \text{const}$ przez $\sim 4_{10^9}$ lat wiek planet
 $R = R_{\odot}(1 \pm 0.01)$ zmieniła obrotowe starożytnie
przez ~ 2000 lat

$L = L_{\odot}(1 \pm 0.5)$ rozwój życia na Ziemi
przez $\sim 1_{10^9}$ lat

$t_{\odot}$ $4.2_{10^9} \lesssim t_{\odot}$

$t_{\odot} \lesssim 4.7_{10^9}$

U/Pb w starych skałach U

pierwotny/obecny stosunek
 U^{235}/U^{238} w otoku młodo ☺



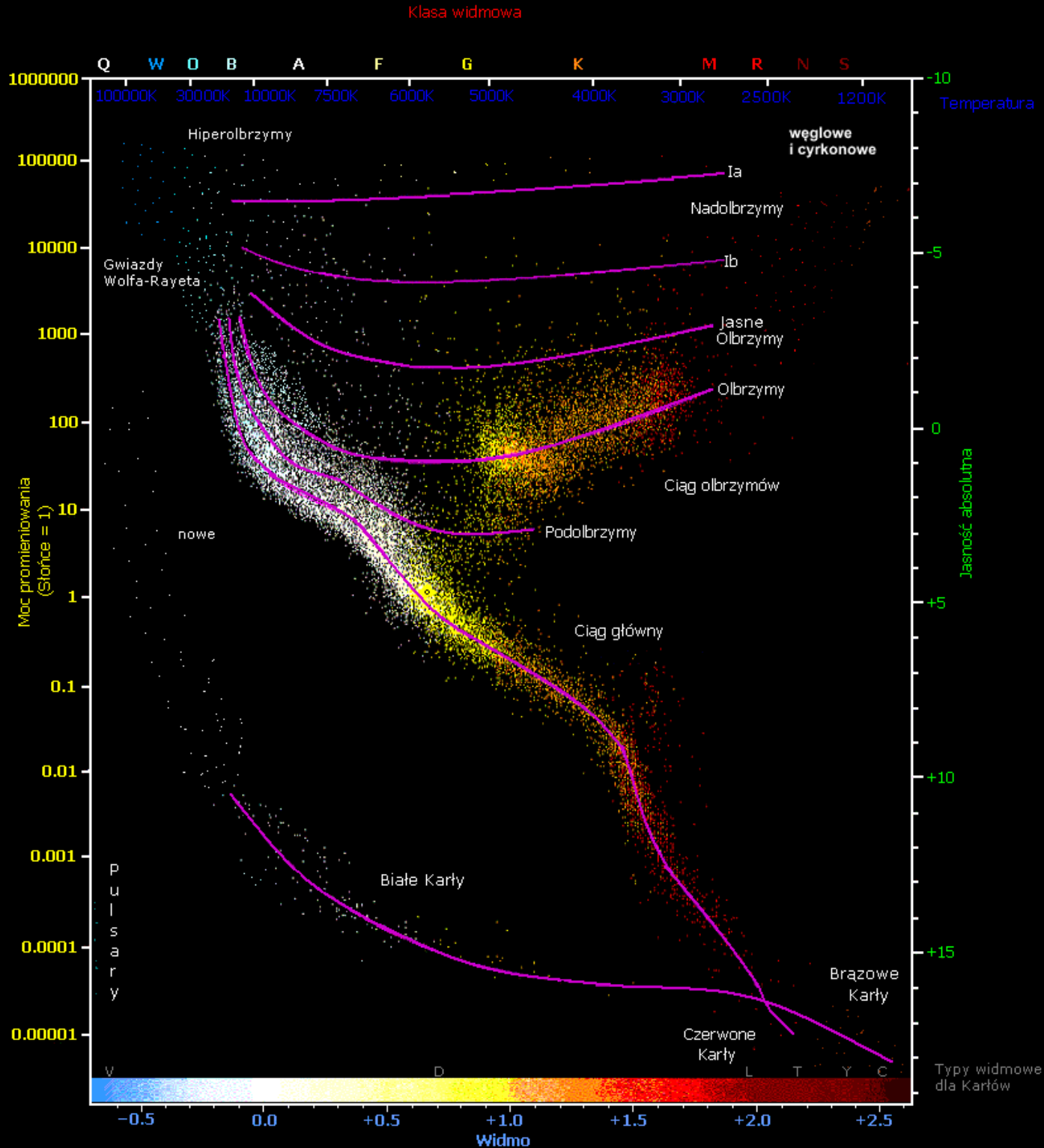


Wskazówki Pośrednie

POŚREDNIE WSKAZÓWKI O BUDOWIE ⊙

Pozycja ⊙ na diagramie H-R / parametry ⊙
pasują do chemicznie jednorodnych modeli *
(* ciągu głównego)

Diagram H-R Jasność- Kolor



Równowaga Hydrostatyczna

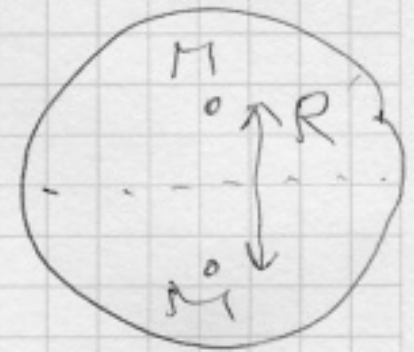
RÓWNOWAGA HYDROSTATYCZNA ①

Sila $F \sim \frac{GM^2}{R^2}$

Ciśnienie hydrostat: $P_h \sim \frac{\text{sila}}{\text{powierzchnia}} \sim \frac{GM^2}{R^2} \cdot \frac{1}{R^2}$

$$P_h \sim \frac{GM^2}{R^4} \sim GM^{2/3} \rho^{4/3}$$

$\rho \sim \frac{M}{R^3}$ gęstość



Ciśnienie gazowe $\sim$ Ciśnienie hydrostatyczne

$$P_g R^3 \sim P_g V \sim nRT \sim \frac{M}{\mu N} RT \sim \frac{M}{\mu} kT \sim P_h R^3 \sim \frac{GM^2}{R}$$

ilość moli

energia kinetyczna cząsteczek $kT \sim \frac{\mu v^2}{2}$

$$P_g \sim \frac{\rho}{\mu} kT$$

$$E_T \sim \frac{GM^2}{R}$$

energia termiczna ②

Skale Czasu Ewolucji

SKALE CZASU Ewolucji ①

Dynamiczne t_D - spadek swobodny
 $F \sim Mg$ $g \sim \frac{GM}{R^2}$ droga! $R \sim g t_D^2$

$$\boxed{t_D \sim \sqrt{\frac{R}{g}} \sim \sqrt{\frac{R^3}{GM}} \sim 1600 \text{ s}}$$

Termiczne / Ciepłota t_T $\Lambda_{\text{rok}} \sim 31_{10} 6 \text{ s}$

$$t_T \sim \frac{E_T}{L} \sim \frac{GM^2}{RL} \sim 1_{10} 15 \text{ s} \sim 32_{10} 6 \text{ lat}$$

Niedawno! Geologia! Oligocen Trecioged
 (w XIX w już wiadomo ④ (Ziemia) starsza)

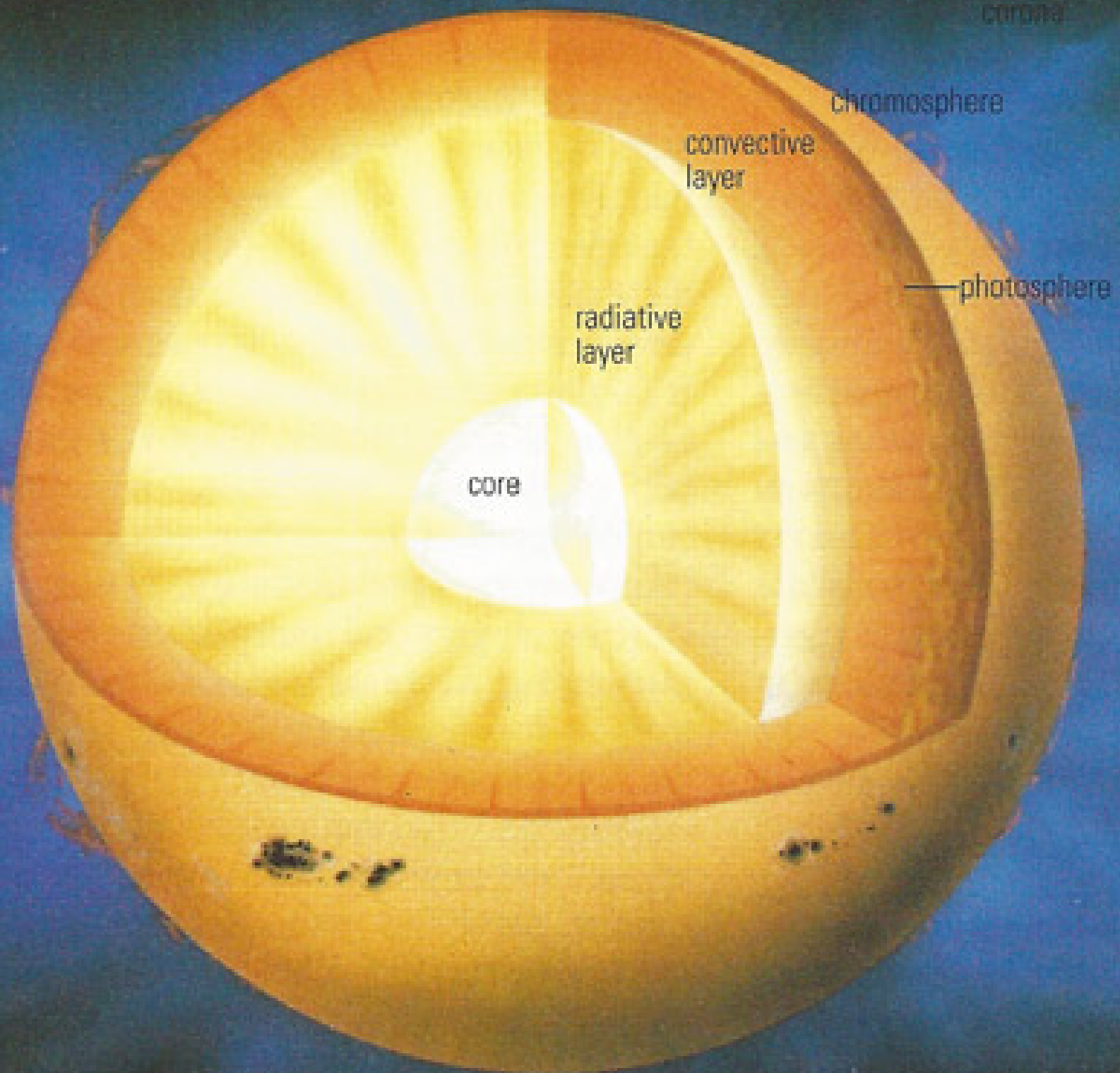
Reakcje jądrowe/nuklearne: $4H^1 \rightarrow He^4 + \text{energia}$

$$t_N \sim \frac{E_N}{L} \sim \frac{0.007 Mc^2}{L}$$

$$\frac{4m_H - m_{He}}{m_{He}} \sim 0.007$$

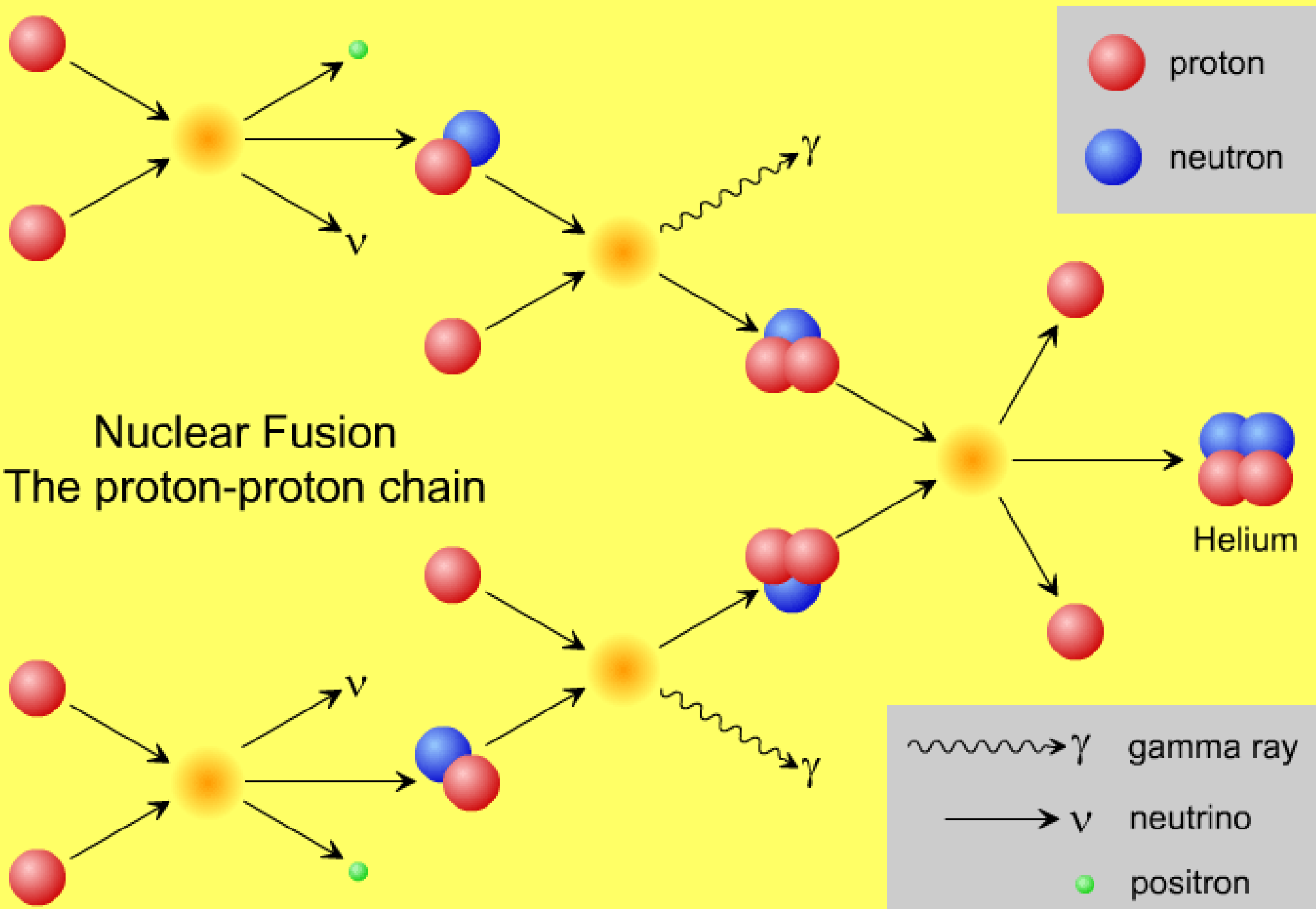
$$t_N \sim 1_{10} 11 \text{ lat}$$

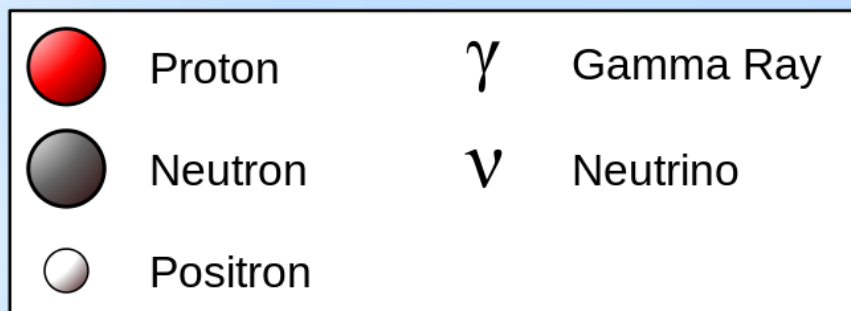
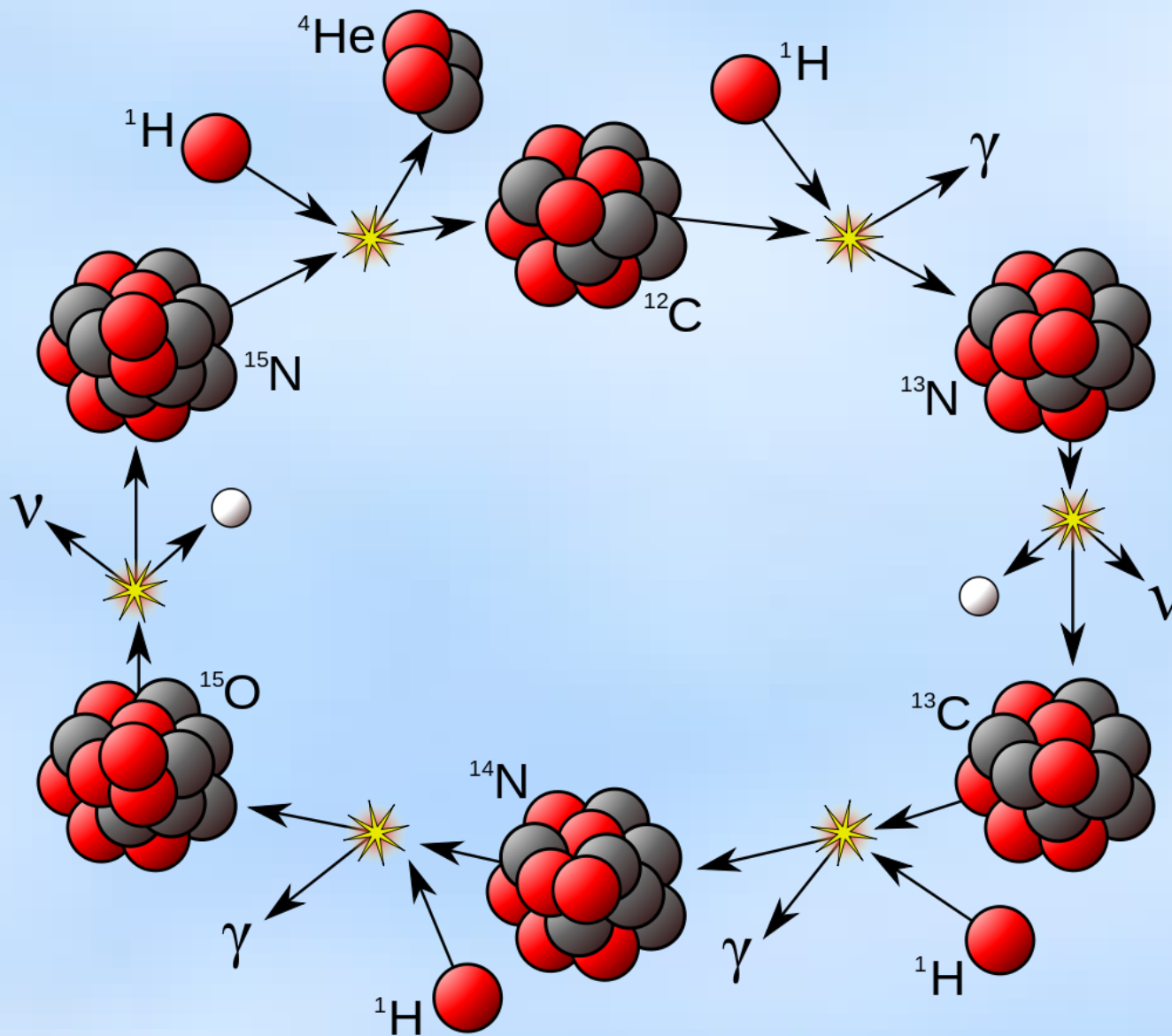
$$E_N \sim 0.007 Mc^2$$



Nuclear Fusion

The proton-proton chain





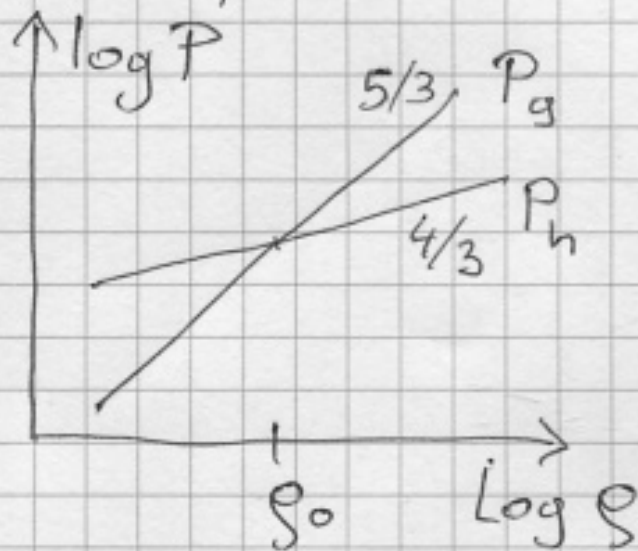
Stabilność Dynamiczna

STABILNOŚĆ DYNAMICZNA (1)

$t_D \ll t_T$ ewolucja dynamiczna przy $E_T = \text{const}$

$P_g \sim K \rho^{5/3}$ ciśnienie adiabatyczne gazu

$$P_h \sim GM^{2/3} \rho^{4/3} \quad P_h \sim P_g \Rightarrow K \sim \frac{GM^{2/3}}{\rho_0^{1/3}}$$



P_h - do równowagi

P_g - na równowagę

ściskanie $\rho \nearrow \Rightarrow P_g > P_h \Rightarrow$ rozprężenie

rozprężenie $\rho \searrow \Rightarrow P_g < P_h \Rightarrow$ ścisnienie

STABILNA RÓWNOWAŻA DYNAM.

Stabilność Termiczna

STABILNOŚĆ TERMICZNA ☺

$$E_{\odot} \sim E_T + E_G \quad \text{całkowita energia}$$
$$E_T \sim \frac{GM^2}{R} \quad \text{e. kinetyczna / ciepłota}$$

$$|F_G| \sim \text{droga} \cdot \text{sila} \sim \frac{GM^2}{R^2} R \sim \propto \frac{GM^2}{R}$$

$$E_G \sim -\alpha \frac{GM^2}{R} < 0 \quad \left. \begin{array}{l} \text{by } R \uparrow \text{ nie zmniejszono energii} \\ \text{(skąd by się rozleciało dynamicznie)} \end{array} \right\}$$

$$E_{\odot} \sim -\beta \frac{GM^2}{R} < 0$$

Stabilność Termiczna c.d.

STABILNOŚĆ TERMICZNA ☉

$$E_{\odot} \sim E_T + E_G \quad \text{całkowita energia}$$

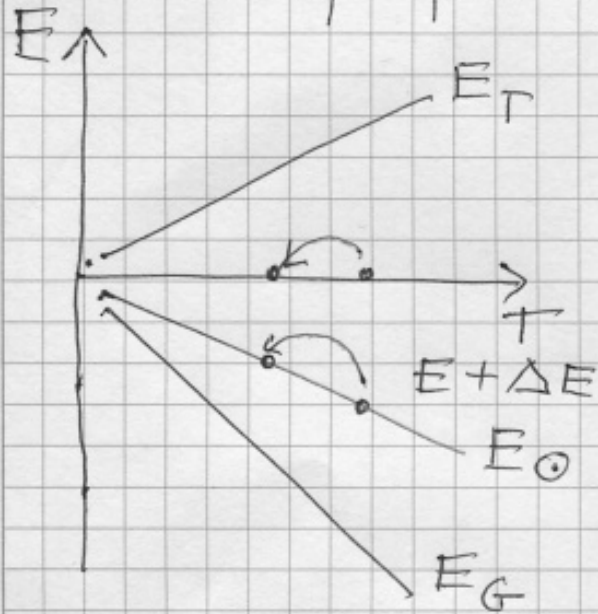
$$E_T \sim \frac{GM^2}{R} \quad \text{e. kinetyczna / ciepła}$$

$$|E_G| \sim \text{droga} \cdot \text{siła} \sim \frac{GM^2}{R^2} R \sim \frac{GM^2}{R}$$

$$E_G \sim -\frac{GM^2}{R} < 0 \quad \left. \begin{array}{l} \text{by } R \uparrow \text{ nie zmniejszono energii} \\ \text{(stałoby się rozleciało dynamicznie)} \end{array} \right\}$$

$$E_{\odot} \sim -\beta \frac{GM^2}{R} < 0$$

Reakcje jądrowe biegną szybciej dla $T \uparrow$



Wzrost $T \uparrow \Rightarrow$ więcej reakcji $\Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta E > 0 \Rightarrow E_{\odot} \uparrow \Rightarrow$

$\Rightarrow T \downarrow$

STABILNOŚĆ REAKCJI ☼

"Ujemne ciepło właściwe"

dodanie ciepła ΔE obniża T

na Ziemi raczej niespotykane

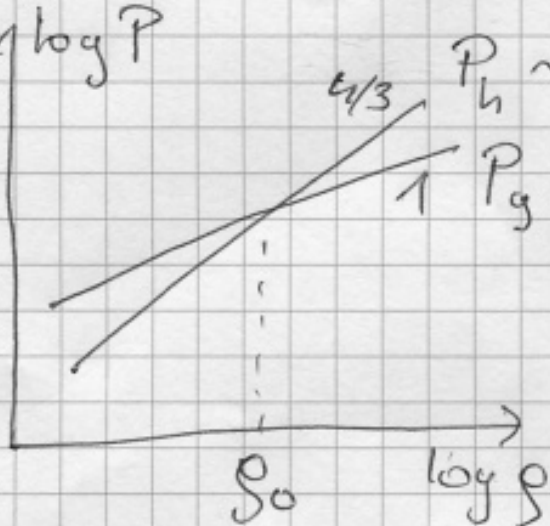
$\Rightarrow$ Trudno budować reaktor termojądrowy

Za 5 Miliardów Lat

Za 5₁₀ 9 LAT (WIEK $\odot \sim 10^{10}$ LAT)

- 1) Wyczerpanie H w centrum $\odot$
(Piec peku popioły "He", palenie na powierzchni)
Palenie H na powierzchni jądra He

- 2) Mniej ciepła z reakcji w jądrze:
Wyrównanie T w jądrze (izotermia) $T = \text{const}$
 $P_g \rightarrow \frac{\rho}{\mu} kT \sim K \rho^1$

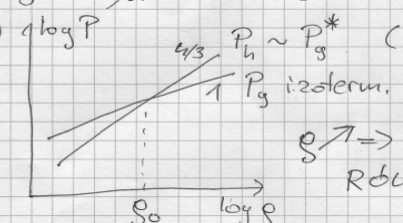
- 3) $\log P$

 $P_h \sim P_g^*$ (nie całkiem $T = \text{const}$)
 P_g izoterm.

$\rho \nearrow \Rightarrow P_h \geq P_g^* \Rightarrow$ dalsze
ściskanie
RÓWNOWAGA ZACHWIANA

Za 5 Miliardów Lat

c.d.

Za 5_{10}^9 LAT (WIEK $\odot \sim 10^{10}$ LAT)

- 1) Wyczerpanie H w centrum $\odot$
(Piec peku popioły "He", palenie na powierzchni)
Palenie H na powierzchni jądra He
- 2) Mniej ciepła z reakcji w jądrze:
Wyrównanie T w jądrze (izoterma) $T = \text{const}$
 $P_g \rightarrow \sum_i kT \sim K g^1$
- 3) $\log P$

 $P_h \sim P_g^*$ (nie catkiem $T = \text{const}$)
 P_g izoterm.
 $g \nearrow \Rightarrow P_h > P_g^* \Rightarrow$ dalsze ściskanie
RÓWNOWAGA ZACHWIANA

4) Ściskanie jądra zatrzymane $R \sim R_{\odot}$
bo "degeneracja" elektronów $g \sim 10^8 \text{ g/cm}^3$
czyli odpychanie kwantowe: Zakaz Pauliego

$$P_{\text{deg}} \sim K g^{5/3} \quad \text{małe jądro STABILNE}$$

5) Rozłucie otoczki $\odot \Rightarrow$ CZERWONY GŁBRZYM

$$R_{\text{co}} \sim 200 R_{\odot} \sim \text{Orbita Ziemi.}$$

$$L_{\text{co}} \gg L_{\odot} \quad \text{"życie błyskotliwe ale krótkie"}$$

$$T_e \ll T_{e\odot} \sim 5800 \text{ K}$$

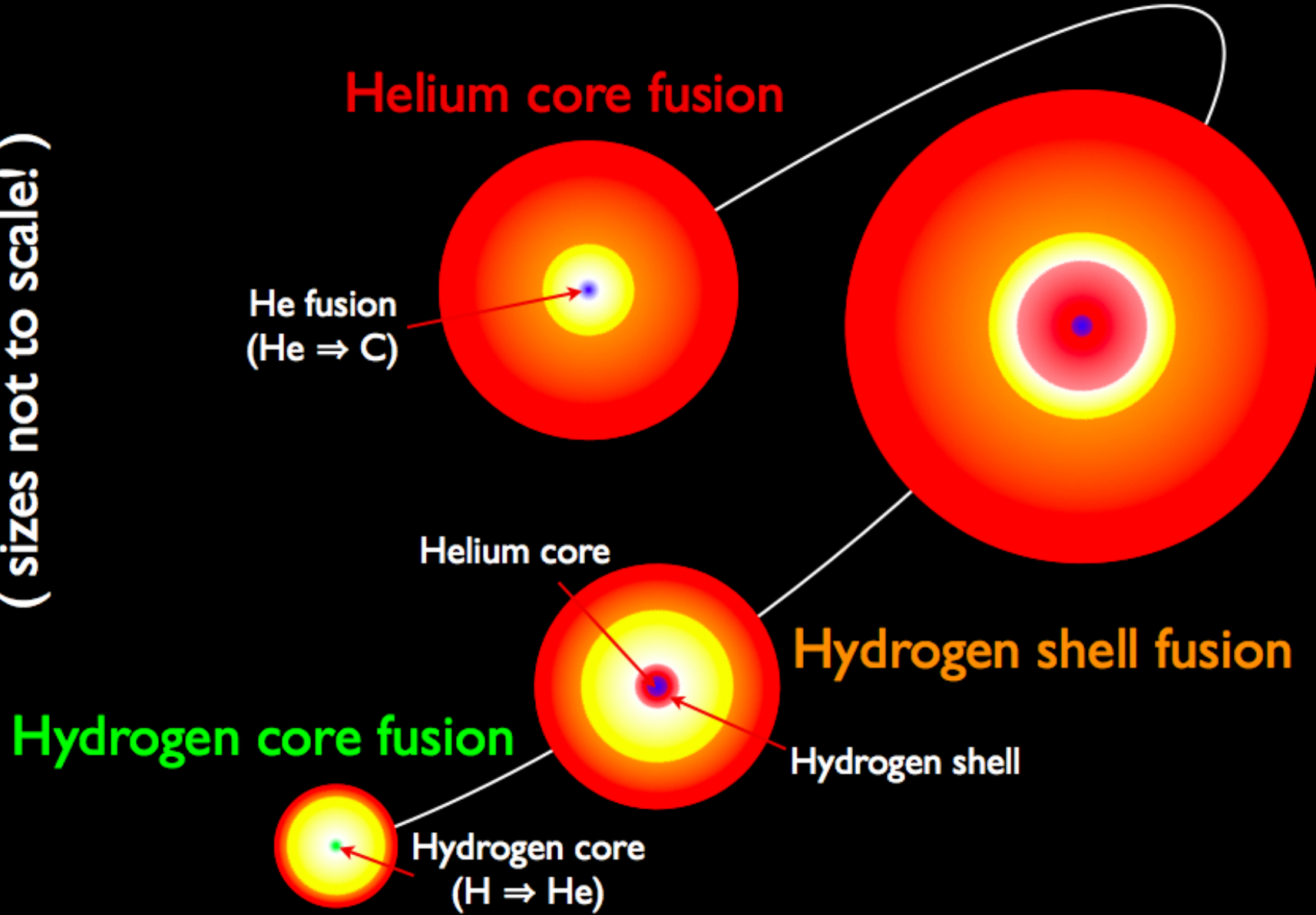
6) Okazyjne zapalenie $3\text{He} \rightarrow \text{C}^{12}$

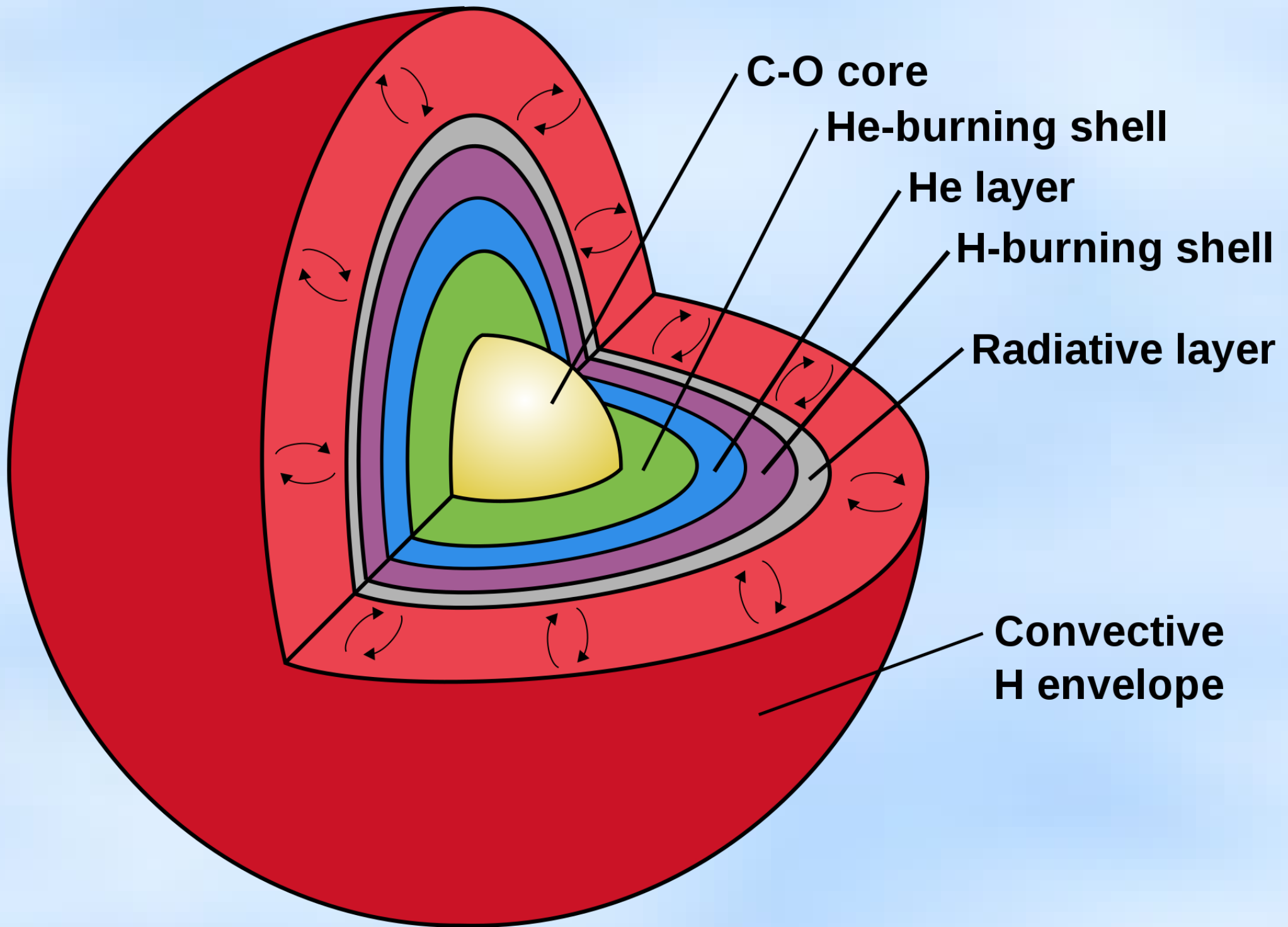
ale $T \nearrow$ a $P_{\text{deg}} = \text{const} \Rightarrow$ "Błyski helowe"

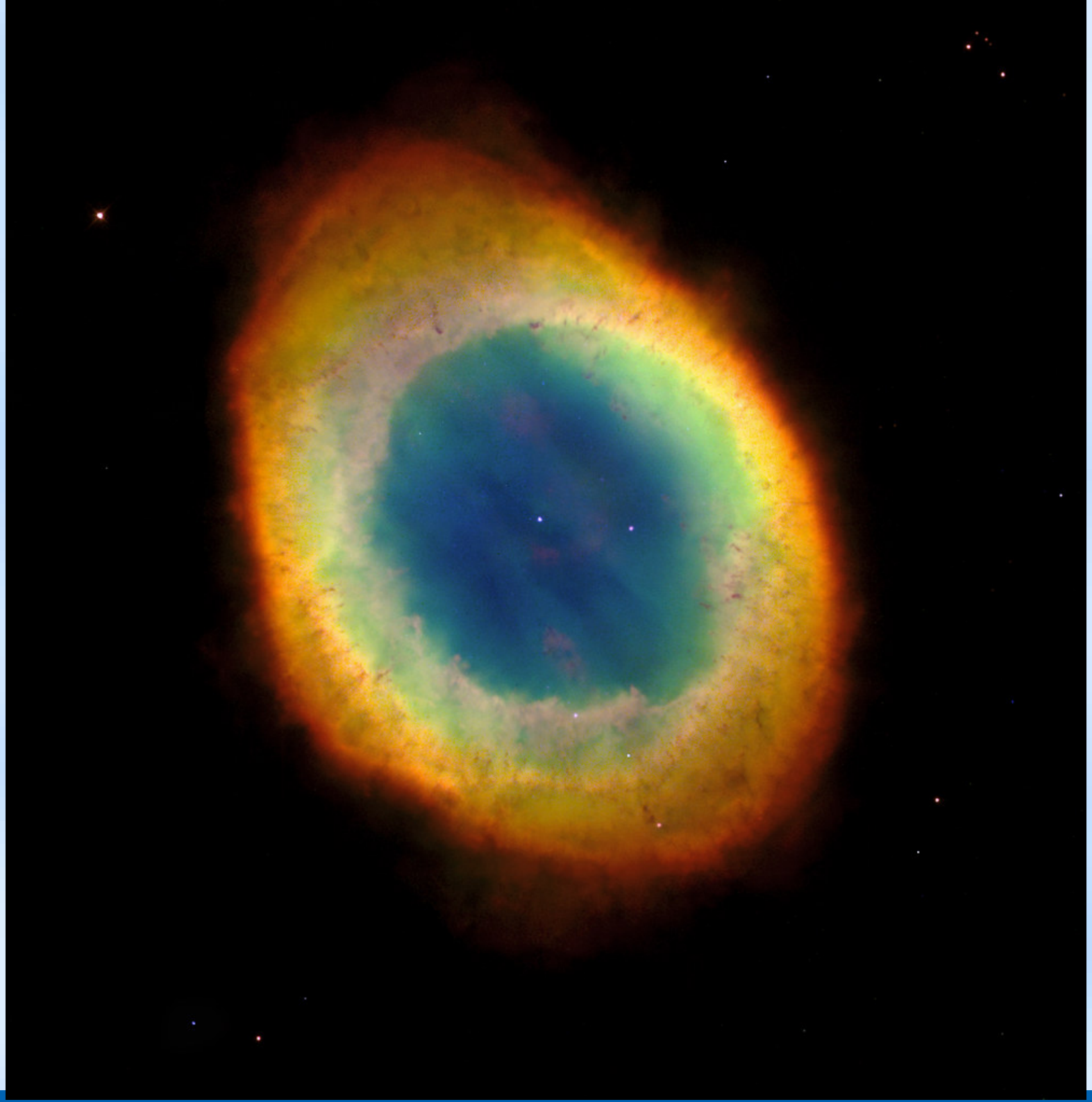
Rozłucie jądra i wygaszenie He

Stellar evolution

(sizes not to scale!)







Koniec Historii

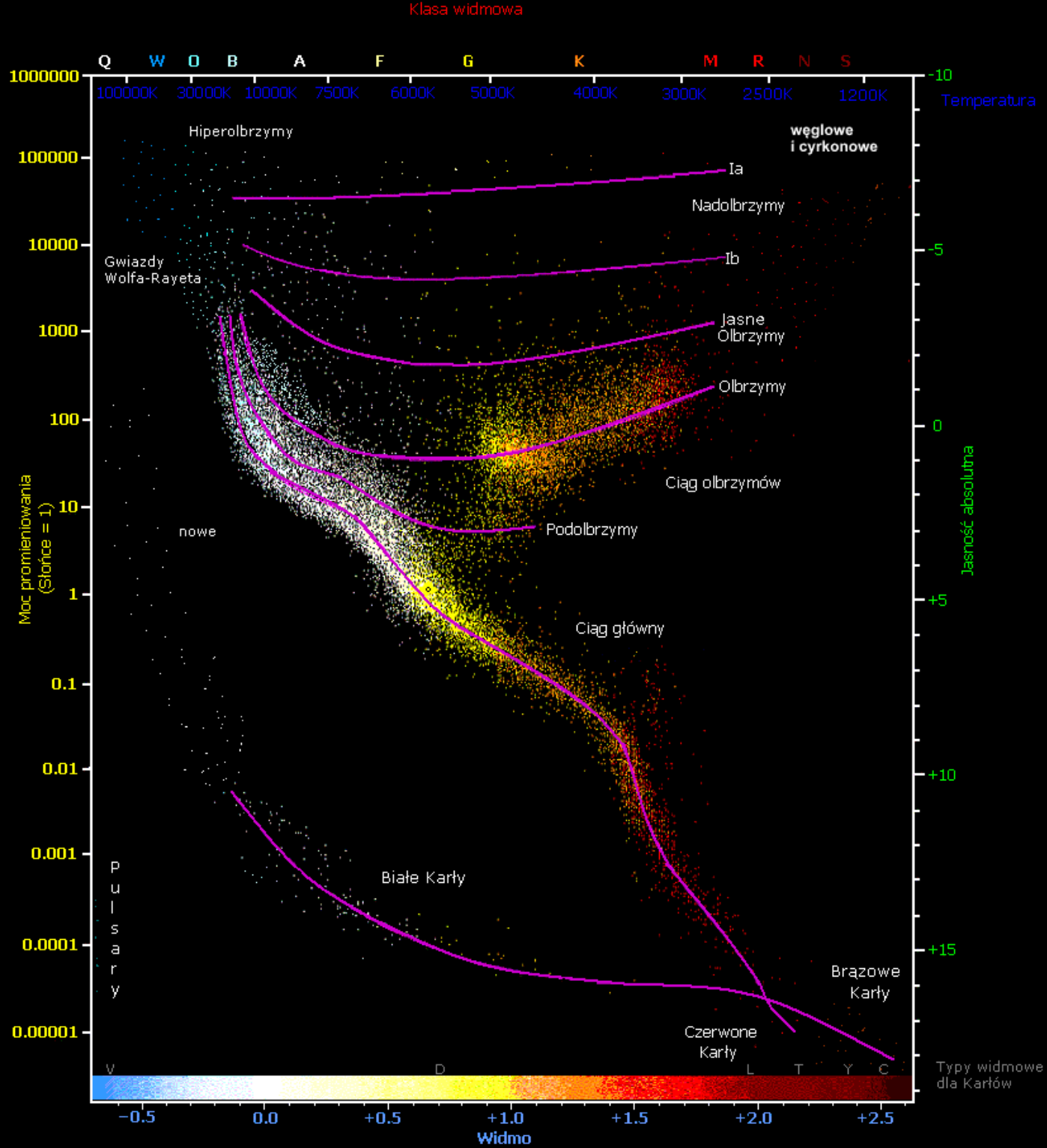
KONIEC HISTORII

- 1) Utrata otoczki ("Bryski", "Pufy" He)
Wiatr *, Mgławica Planetaryjna
 $M \rightarrow 0.6 M_{\odot}$
- 2) Zostaje jądro C+O ("Pestka z buoskwiu")
- 3) Najpierw gorące, stygnie wolno
bo mała powierzchnia

Tako BIAŁY KARZEŁ

$$\left. \begin{array}{l} R \sim R_{\oplus} \\ M \sim 0.6 M_{\odot} \end{array} \right\} \text{Trwają}$$

- 4) I nie więcej się NIE DZIEJE





Odręczne notki dostępne w:

https://users.camk.edu.pl/alex/papers/sun_stab.pdf