

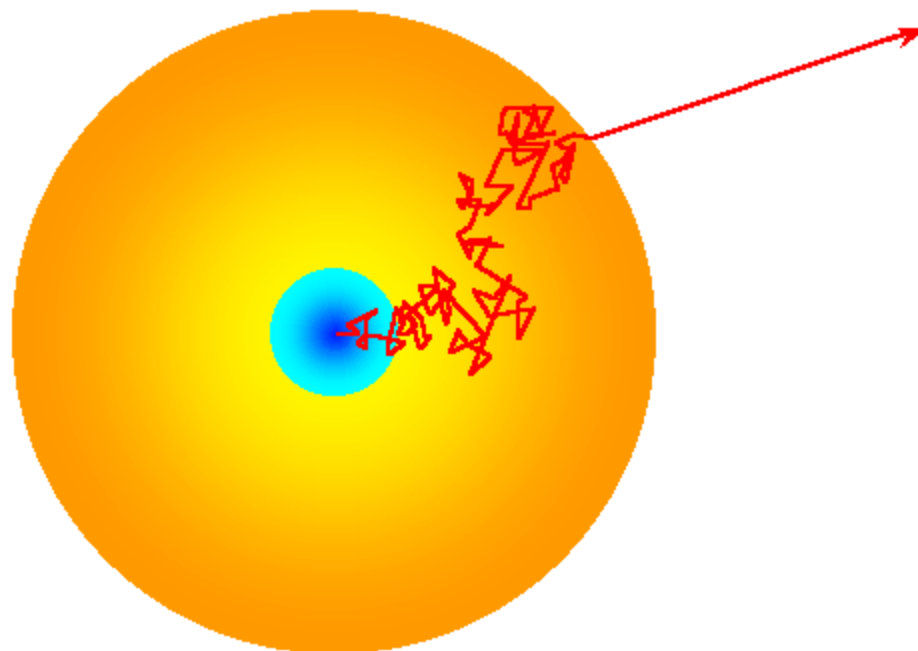
Transport energii

Promieniowanie → **Fotony**

Przewodnictwo → **atomy, elektrony**

Konwekcja → **bąble materii**

PROMIENIOWANIE



PROMIENIOWANIE

$$\ell_{\text{ph}} = 1 / \kappa \rho$$

$$\kappa = 0.2(1+X) \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$$

$$\ell_{\text{ph}} \approx 2 \text{ cm} \ll R_{\odot}$$

materia jest b. nieprzez. dla promieniowania

$$\Delta T \approx \frac{dT}{dr} \ell_{\text{ph}} \approx \frac{T_c}{R} \ell_{\text{ph}} \approx \frac{10^7}{10^{11}} \approx 10^{-4} \text{ K}$$



WARUNKI ZBLIŻONE DO TE

jeśli TE \rightarrow przez gwiazdę nie płynąłby strumień

$u=aT^4$ - gęstość en. promieniowania

$$\Delta u/u=4\Delta T/T$$

dla Słońca $\Delta T/T \sim 10^{-11}$

Ta mała anizotropia jest nośnikiem całego strumienia en. !

Przybliżenie dyfuzyjne

$$\ell_{\text{ph}}/R_{\odot} \sim 10^{-11}$$

$$\text{Dyfuzja: } F_{\text{dyf}} = -D\nabla N$$

$$D = v\ell/3$$

$$\text{Promieniowanie: } N = u = aT^4, \ell = \ell_{\text{ph}}$$

$$F_{\text{rad}} = -\frac{4}{3} \frac{acT^3}{\kappa\rho} \nabla T$$

Transport promienisty

$$\mathbf{F}_{\text{rad}} = -\frac{4}{3} \frac{acT^3}{\kappa\rho} \nabla T.$$

Gradient promienisty

$$\nabla_{\text{rad}} = \left(\frac{d \log T}{d \log P} \right)_{\text{rad}} = \frac{3}{16\pi acG} \frac{\kappa l P}{m T^4}$$

PRZEWODNICTWO

$$\ell_{\text{particle}} \ll \ell_{\text{ph}}$$
$$v \sim \text{kilka \% } c$$

Gaz elektronowy zdegenerowany

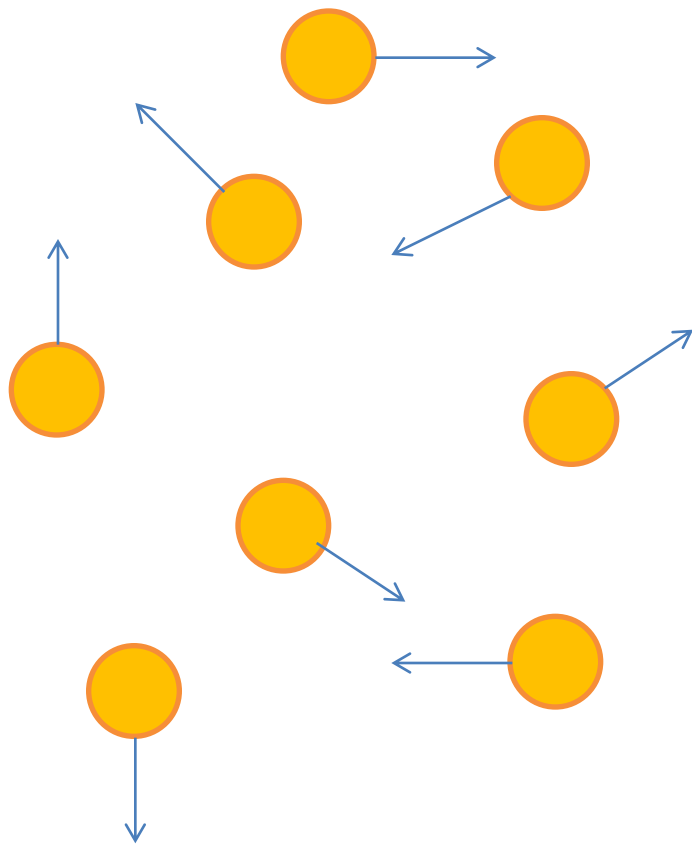
$$v \uparrow \text{ oraz } \ell_e \gg \ell_{\text{ph}}$$

$$D \uparrow$$

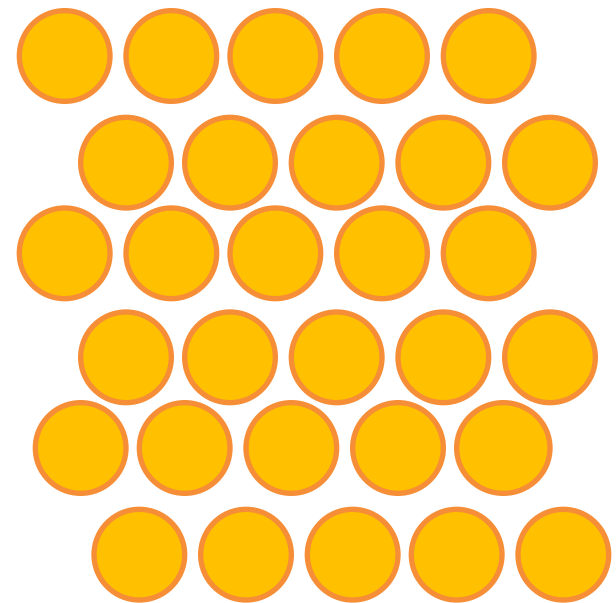
np. w białych karłach, gw. neutronowych

$$F_{\text{cd}} = -K_{\text{cd}} \nabla T$$

Gaz „normalny”



Gaz zdegenerowany



KONWEKCJA

**unoszenie materii gorętszej
w chłodniejszym otoczeniu**

KONWEKCJA

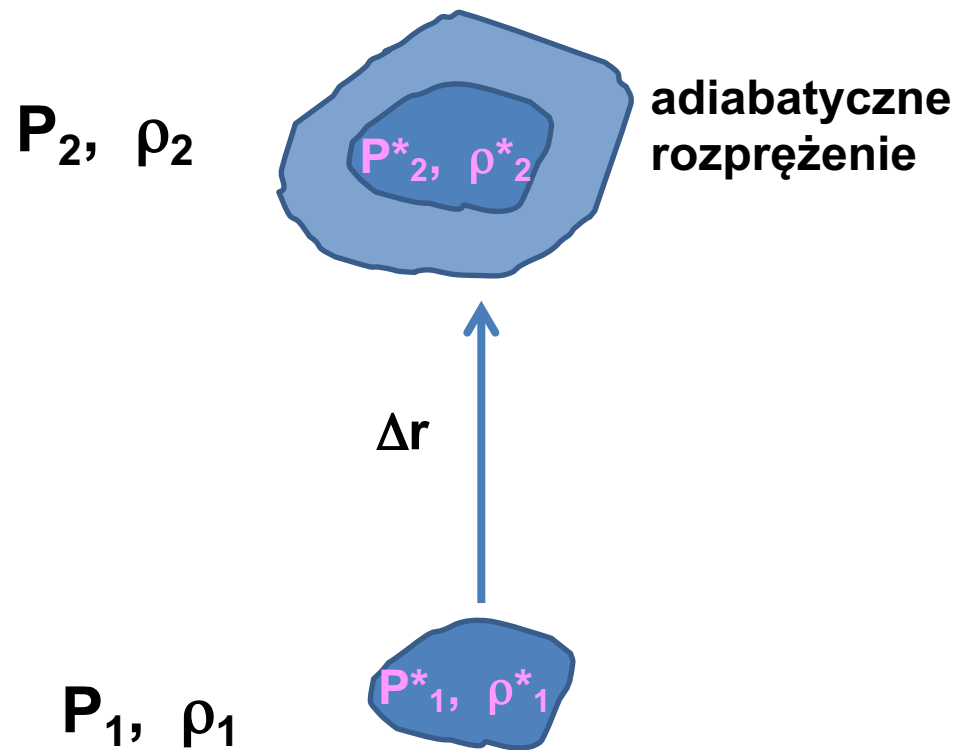
- wraz z materią unoszona jest energia a dT/dr zostaje zmodyfikowany
 - mieszanie

Wnętrze: $\nabla = \nabla_{ad}$

zewewnętrzne obszary: np. opis MLT

Założenia:

- 1) Element jest w równowadze ciśnieniowej z otoczeniem**
- 2) Ruch jest adiabatyczny**



Ruch elementu konwekcyjnego z położenia 1 do położenia 2

$\rho_e < \rho_s \rightarrow$ siła wyporu jest skierowana na zewnątrz

Warunek na niestabilność konwekcyjną:

$$(d \rho/dr)_e < (d \rho/dr)_s$$

niepraktyczny

NIESTABILNOŚĆ KONWEKTYWNA

$\nabla > \nabla_{ad}$ - kryterium Schwarzschilda

$\nabla > \nabla_{ad} + \nabla_{\mu}$ - kryterium Ledoux

dla $\nabla_{\mu}=0$ kryteria te są równoważne

$\nabla_{\mu} \uparrow \rightarrow$ stabilizacja

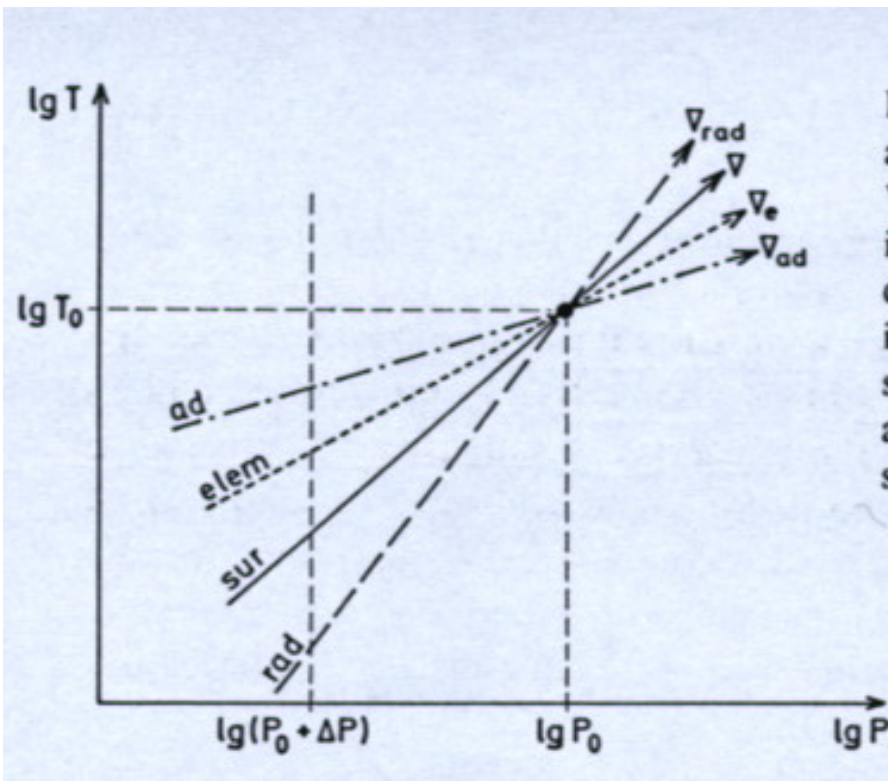


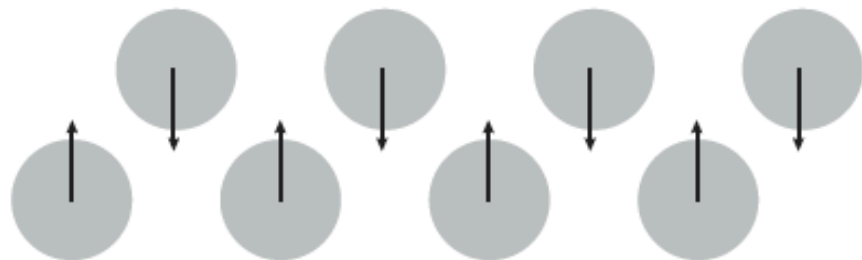
Fig. 6.2. Temperature–pressure diagram with a schematic sketch of the different gradients $\nabla (\equiv \partial \ln T / \partial \ln P)$ in a convective layer. Starting at a common point with P_0 and T_0 , the different types of changes (adiabatic, in a rising element, in the surroundings, for radiative stratification) lead to different temperatures at a slightly higher point with $P_0 + \Delta P (< P_0$, since P decreases outwards)

W warstwie konwekcyjnej

$$\nabla_{\text{rad}} > \nabla > \nabla_e > \nabla_{\text{ad}}$$

stabilna sytuacja

Rozwiązanie oscylacyjne



time

niestabilna sytuacja

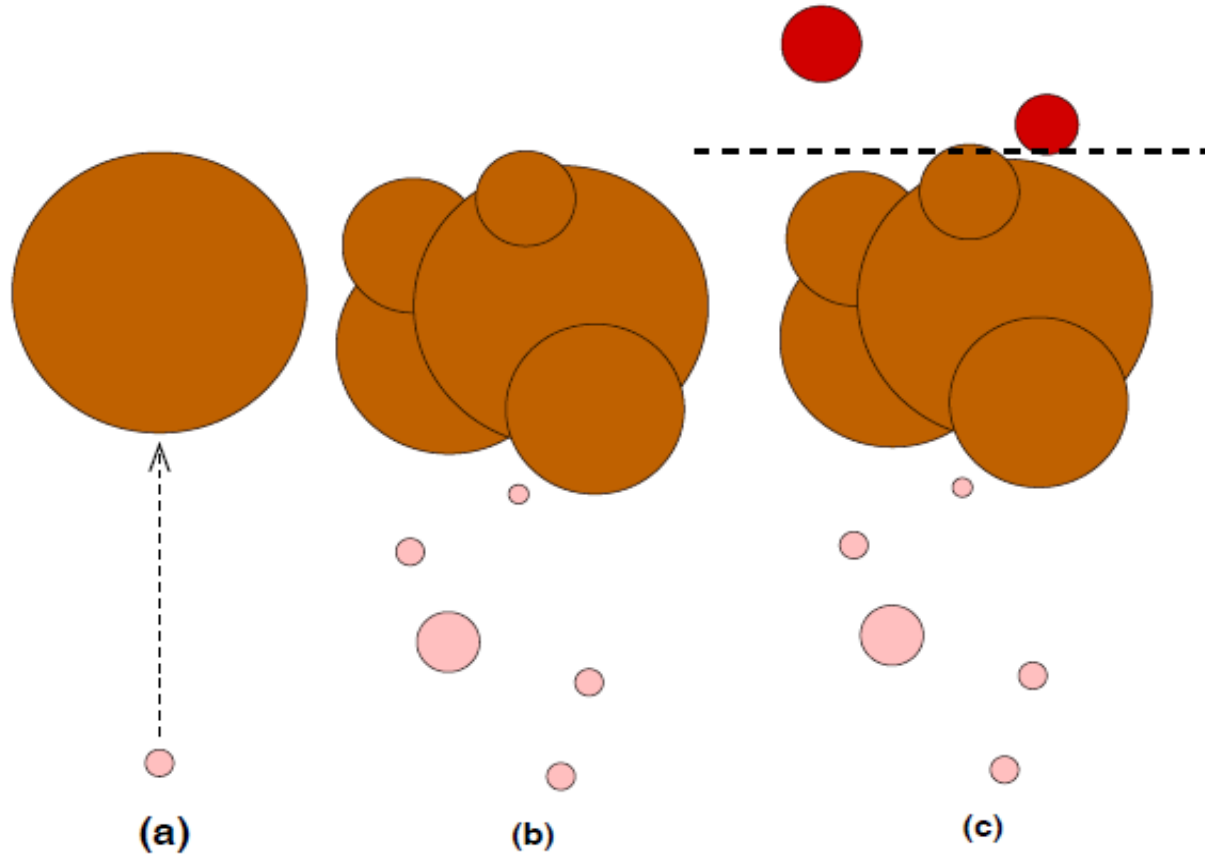
Rozwiązanie
eksponencjalne



time

Różne podejścia do opisu konwekcji

- a) MLT b) turbulenta konwekcja (bąble o różnych rozmiarach) , c) przestrzeliwanie konwekcyjne



Gdzie występuje konwekcja

$$\nabla_{\text{rad}} = \left(\frac{d \log T}{d \log P} \right)_{\text{rad}} = \frac{3}{16\pi acG} \frac{\kappa l P}{m T^4}$$

$$l \equiv L_r$$

$$P = \rho R_g T / \mu$$

1) L_r/m duże

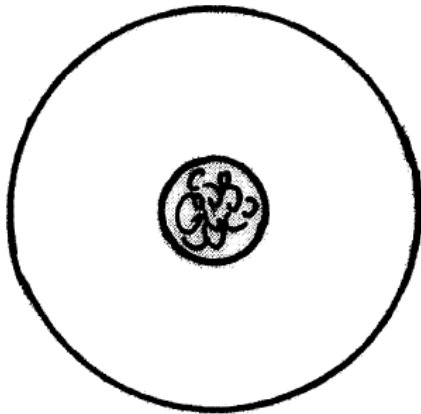
2) κ duże

3) ρ/T^3 duże

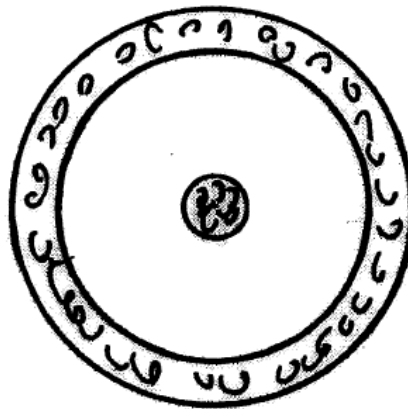
4) małe wartości ∇_{ad}

Obszary konwekcyjne w gwiazdach ciągu głównego

$$M \geq 2M_{\odot}$$



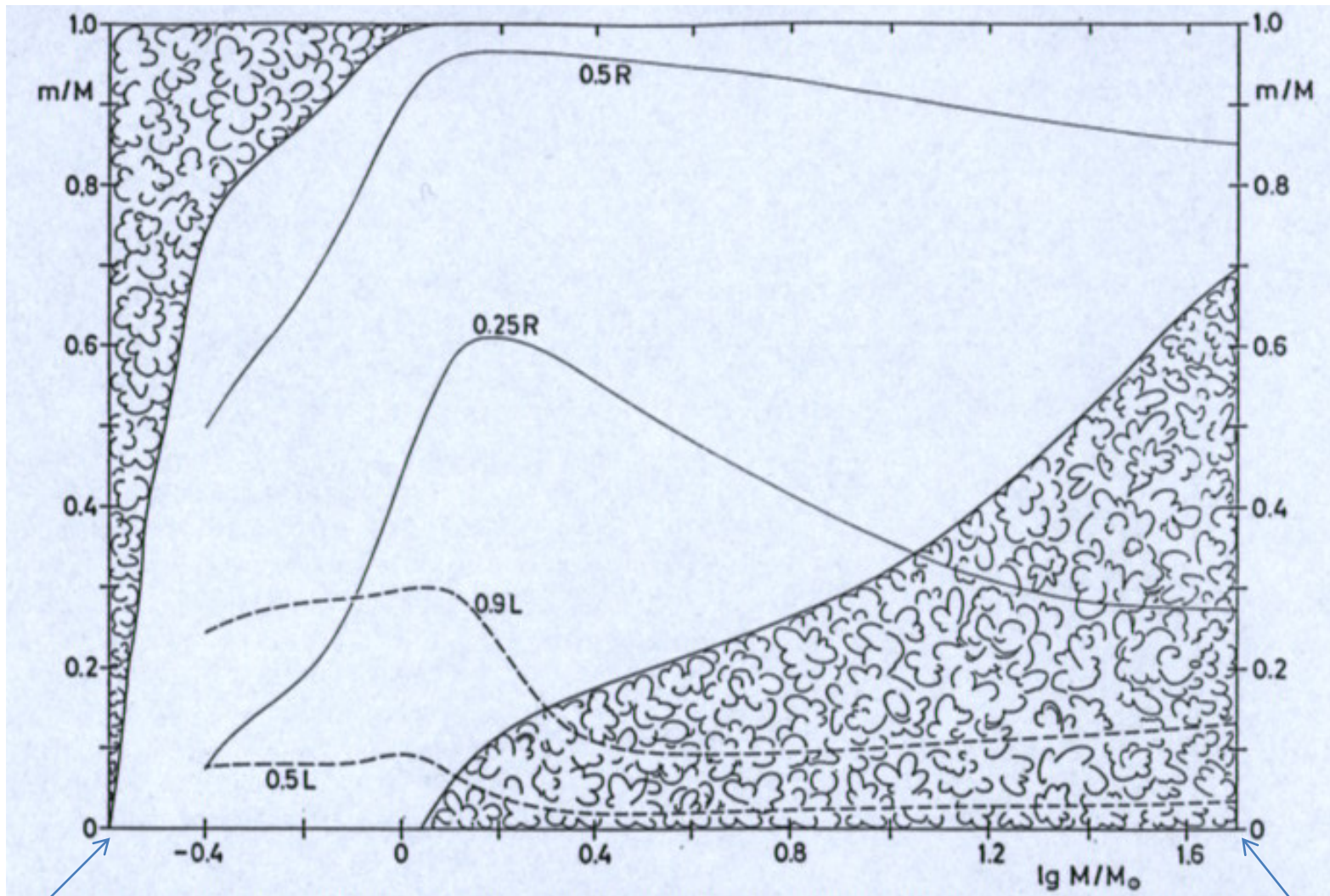
$$1M_{\odot} < M < 2M_{\odot}$$



$$M \leq 1M_{\odot}$$



Budowa wewnętrzna dla modeli ZAMS



$0.25 M_{\odot}$

$50 M_{\odot}$

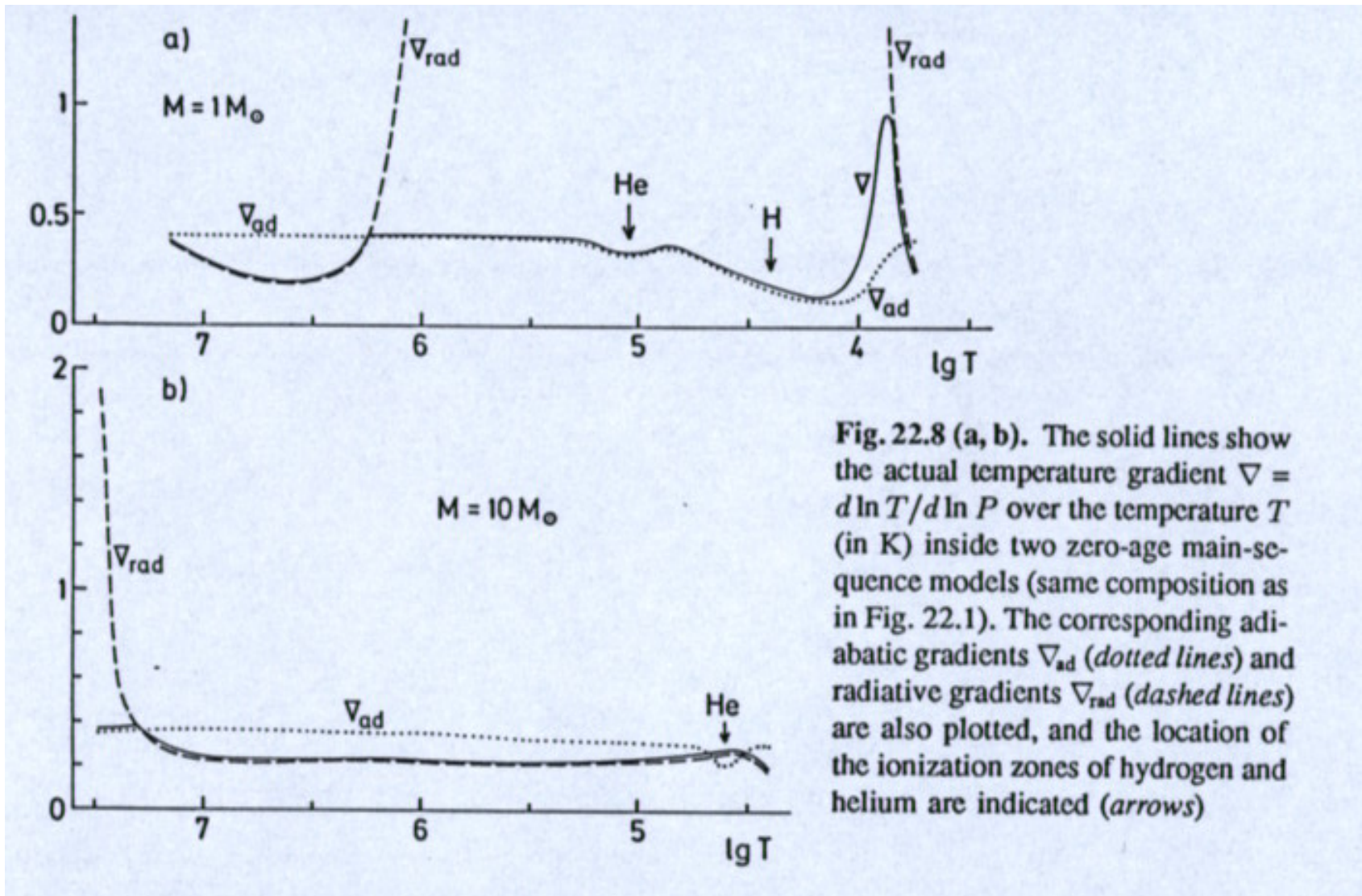
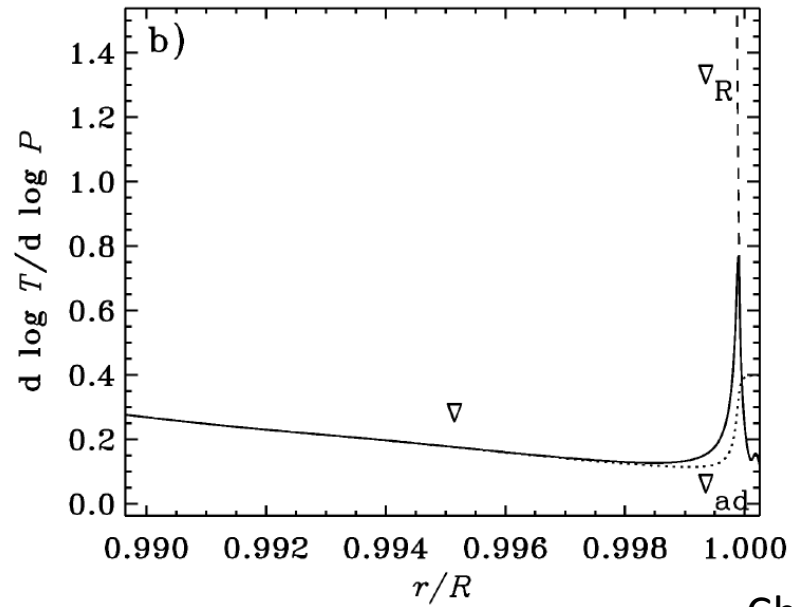
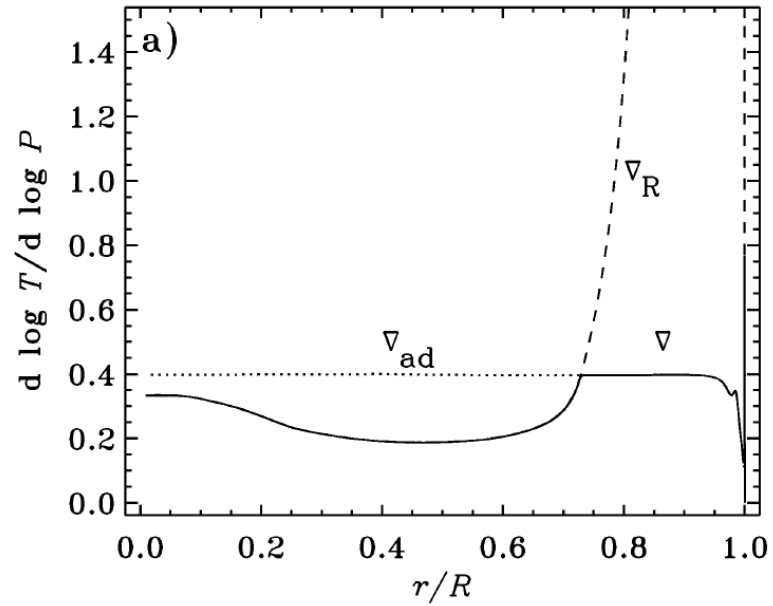
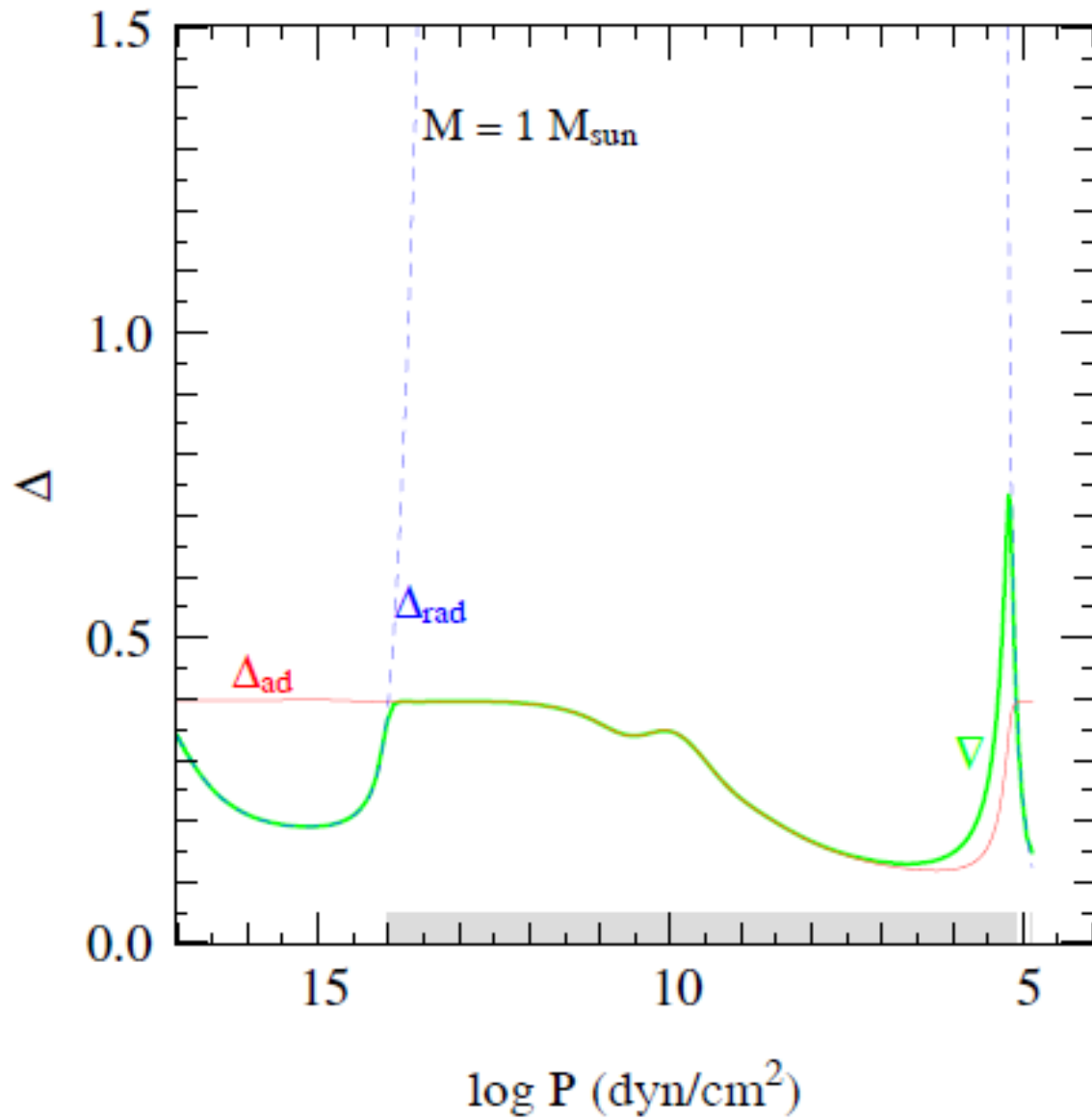


Fig. 22.8 (a, b). The solid lines show the actual temperature gradient $\nabla = d \ln T / d \ln P$ over the temperature T (in K) inside two zero-age main-sequence models (same composition as in Fig. 22.1). The corresponding adiabatic gradients ∇_{ad} (dotted lines) and radiative gradients ∇_{rad} (dashed lines) are also plotted, and the location of the ionization zones of hydrogen and helium are indicated (arrows)

Dla Słońca





Równanie transportu energii

$$\frac{dT}{dm} = -\frac{GmT}{4\pi r^4 P} \nabla,$$

$$\nabla = \frac{\partial \ln T}{\partial \ln P}$$

$$\nabla = \nabla_{\text{rad}} = \frac{3}{16\pi\sigma G} \frac{\kappa L_r P}{mT^4}$$

transport promienisty

jeśli

$$\nabla_{\text{rad}} > \nabla_{\text{ad}}$$

transport konwektywny

Równania budowy wewnętrznej i ewolucji

$$\frac{\partial r}{\partial m} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$$

$$\frac{\partial P}{\partial m} = -\frac{Gm}{4\pi r^4} - \frac{1}{4\pi r^2} \frac{\partial^2 r}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial l}{\partial m} = \epsilon_{\text{nuc}} - \epsilon_{\nu} - T \frac{\partial s}{\partial t}$$

$$\frac{\partial T}{\partial m} = -\frac{Gm}{4\pi r^4} \frac{T}{P} \nabla \quad \text{with} \quad \nabla = \begin{cases} \nabla_{\text{rad}} = \frac{3\kappa}{16\pi acG} \frac{lP}{mT^4} & \text{if } \nabla_{\text{rad}} \leq \nabla_{\text{ad}} \\ \nabla_{\text{ad}} + \Delta\nabla & \text{if } \nabla_{\text{rad}} > \nabla_{\text{ad}} \end{cases}$$

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = \frac{A_i m_u}{\rho} \left(-\sum_{j,k} r_{ij,k} + \sum_{k,l} r_{kl,i} \right) \quad [+ \text{ mixing terms}] \quad i = 1 \dots N$$