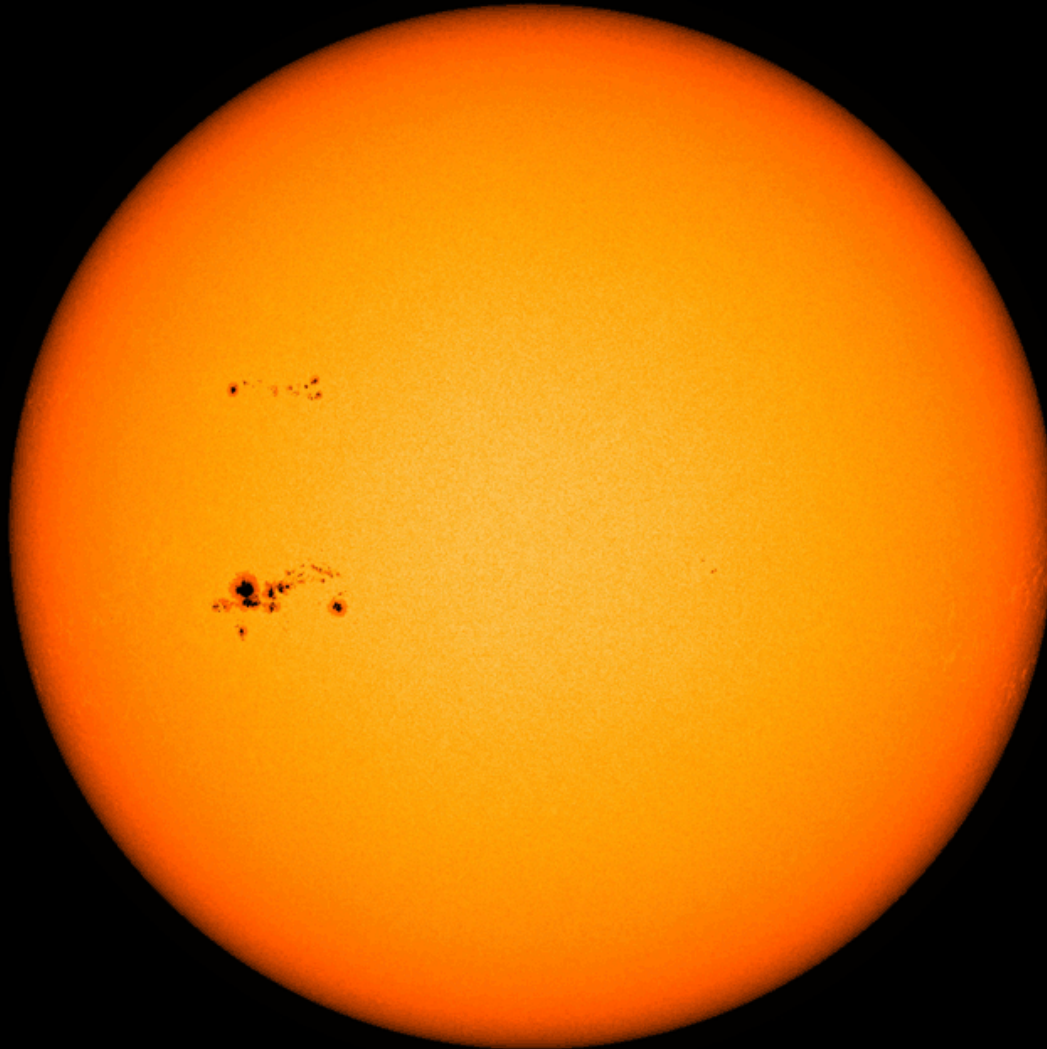
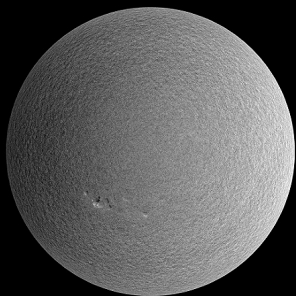


Физика звездных атмосфер

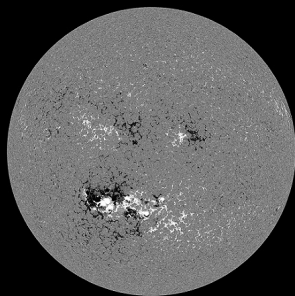


**Атмосфера звезды —
слой, в котором формируется наблюдаемое излучение.**

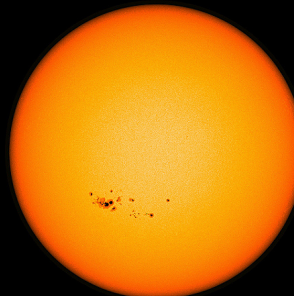




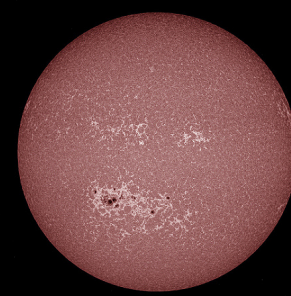
HMI Dopplergram
Surface movement
Photosphere



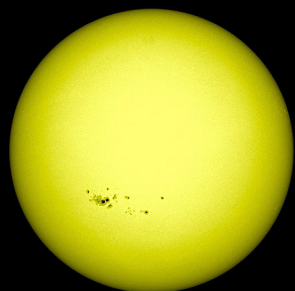
HMI Magnetogram
Magnetic field polarity
Photosphere



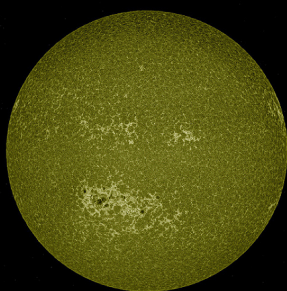
HMI Continuum
Matches visible light
Photosphere



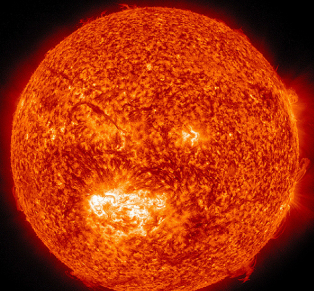
AIA 1700 Å
4500 Kelvin
Photosphere



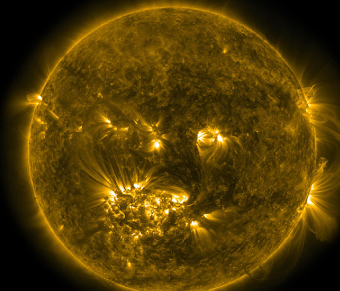
AIA 4500 Å
6000 Kelvin
Photosphere



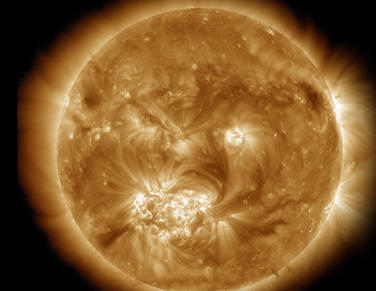
AIA 1600 Å
10,000 Kelvin
Upper photosphere/
Transition region



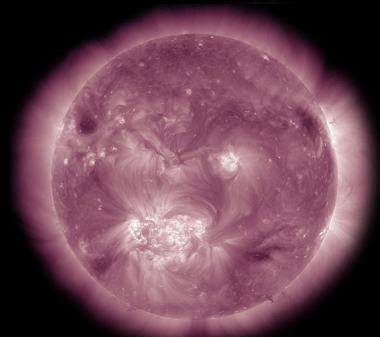
AIA 304 Å
50,000 Kelvin
Transition region/
Chromosphere



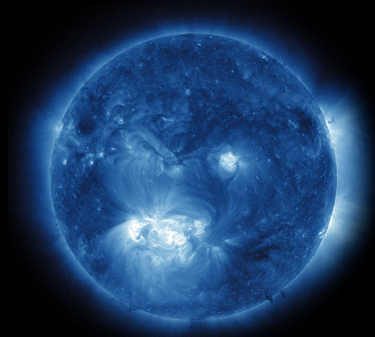
AIA 171 Å
600,000 Kelvin
Upper transition
Region/quiet corona



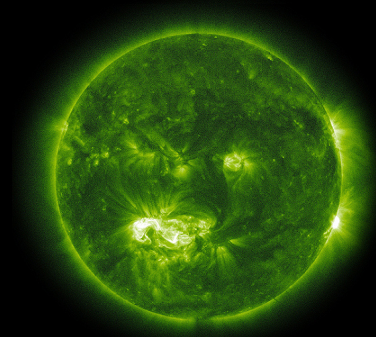
AIA 193 Å
1 million Kelvin
Corona/flare plasma



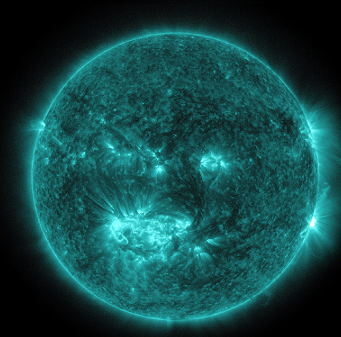
AIA 211 Å
2 million Kelvin
Active regions



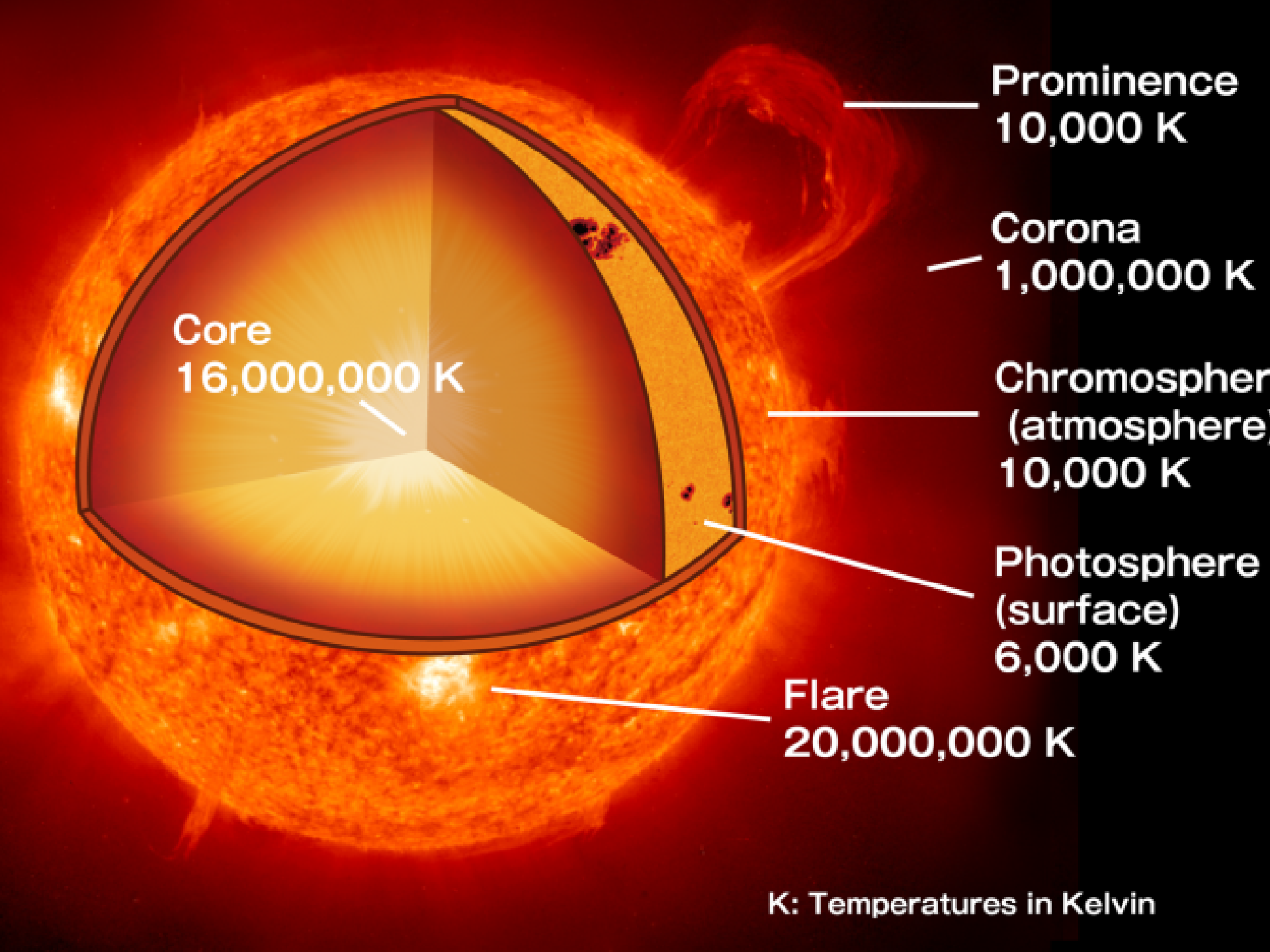
AIA 335 Å
2.5 million Kelvin
Active regions



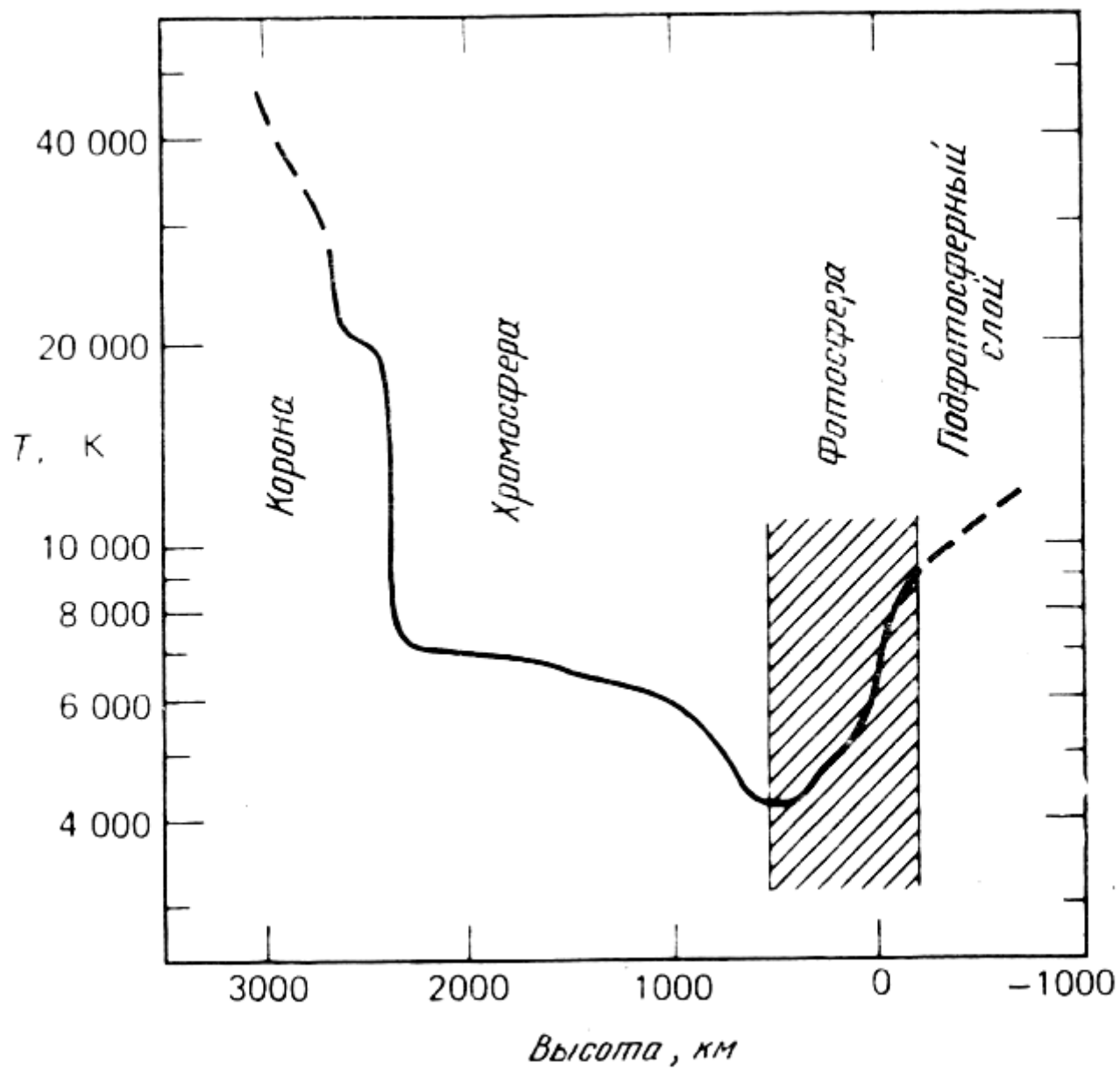
AIA 094 Å
6 million Kelvin
Flaring regions



AIA 131 Å
10 million Kelvin
Flaring regions



K: Temperatures in Kelvin



Солнечная атмосфера

- фотосфера - видимый, и.-к., у.-ф. ($\lambda > 1600 \text{ \AA}$),
протяженность $\sim 200 - 500 \text{ км}$
- хромосфера - у.-ф. ($\lambda < 1600 \text{ \AA}$), ядра резонансных линий
(H, K Ca II), эмиссионные линии (He I 5876 $\text{\AA}$),
протяженность $\sim 1500 \text{ км}$,
- корона — радиоизлучение, эмиссионные линии (Fe XIV 5303 $\text{\AA}$)
протяженность $\sim R_{\text{Sun}}$

Задача

1. Оценка размера фотосферы

- размер h соответствует длине свободного пробега l фотона

$$h \sim l = 1/\chi$$

- коэффициент поглощения $\chi_\lambda = a_\lambda n_i$
- объемный коэффициент поглощения $a_\lambda \sim 10^{-18} \text{ см}^2$
- $n_i = 10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$

Задача

1. Оценка размера фотосферы

- размер h соответствует длине свободного пробега l фотона

$$h \sim l = 1/\chi$$

- коэффициент поглощения $\chi_\lambda = a_\lambda n_i$
- объемный коэффициент поглощения $a_\lambda \sim 10^{-18} \text{ см}^2$
- $n_i = 10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$

$$h = 100 \dots 1000 \sim 500 \text{ км},$$

Задача

2. Оценка высоты однородной атмосферы

$$H = \frac{kT}{mg}$$

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

$$T = 6000 \text{ K}$$

$$m = 1.67 \cdot 10^{-24} \text{ г}$$

$$\log g = 4.44 \text{ [cm/c}^2\text{]}$$

Задача

2. Оценка высоты однородной атмосферы

$$H = \frac{kT}{mg}$$

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

$$T = 6000 \text{ K}$$

$$m = 1.67 \cdot 10^{-24} \text{ г}$$

$$\log g = 4.44 \text{ [cm/c}^2\text{]}$$

$$180 \text{ км}$$

Задача

3. Оценка углового размера
атмосферы при наблюдении с
Земли

$$h = 180 \text{ км}$$

$$r = 150\,000\,000 \text{ км}$$

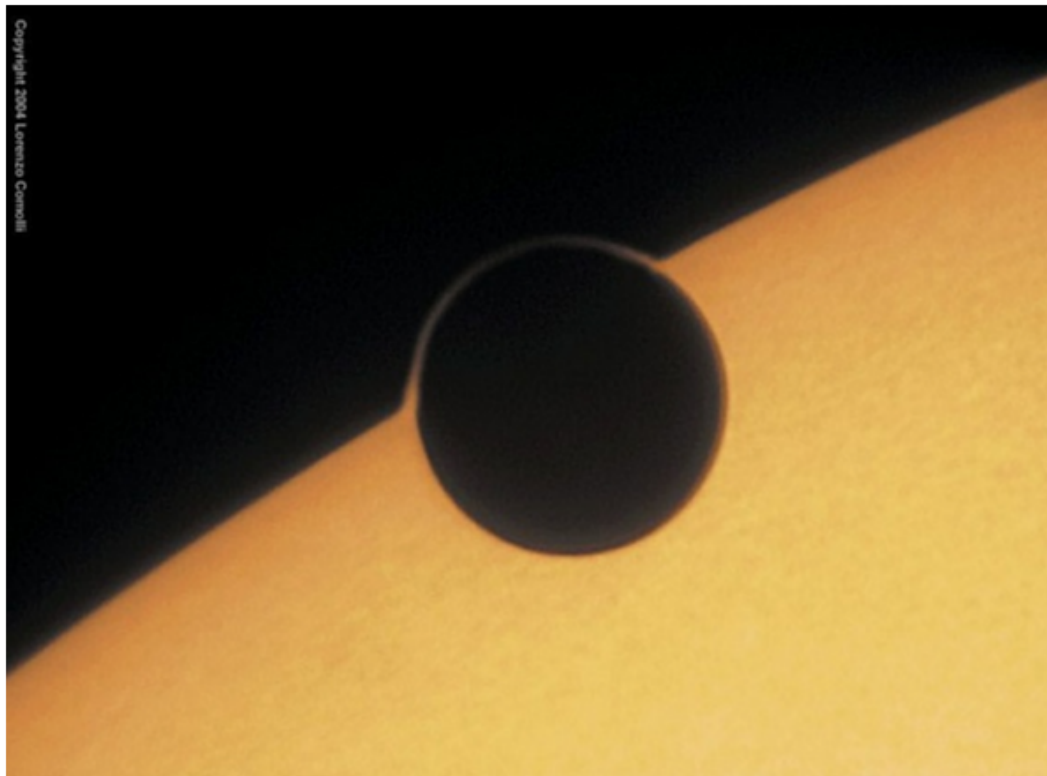
Задача

3. Оценка углового размера
атмосферы при наблюдении с
Земли

$$h = 180 \text{ км}$$

$$r = 150\,000\,000 \text{ км}$$

$$0.25''$$



Звезды асимптотической
ветви гигантов (АВГ):

- пульсации атмосферы,
- ударные волны,
- звездный ветер,
- пылевая оболочка.

В общем виде задача
о моделировании
атмосферы звезды
пока не решена.

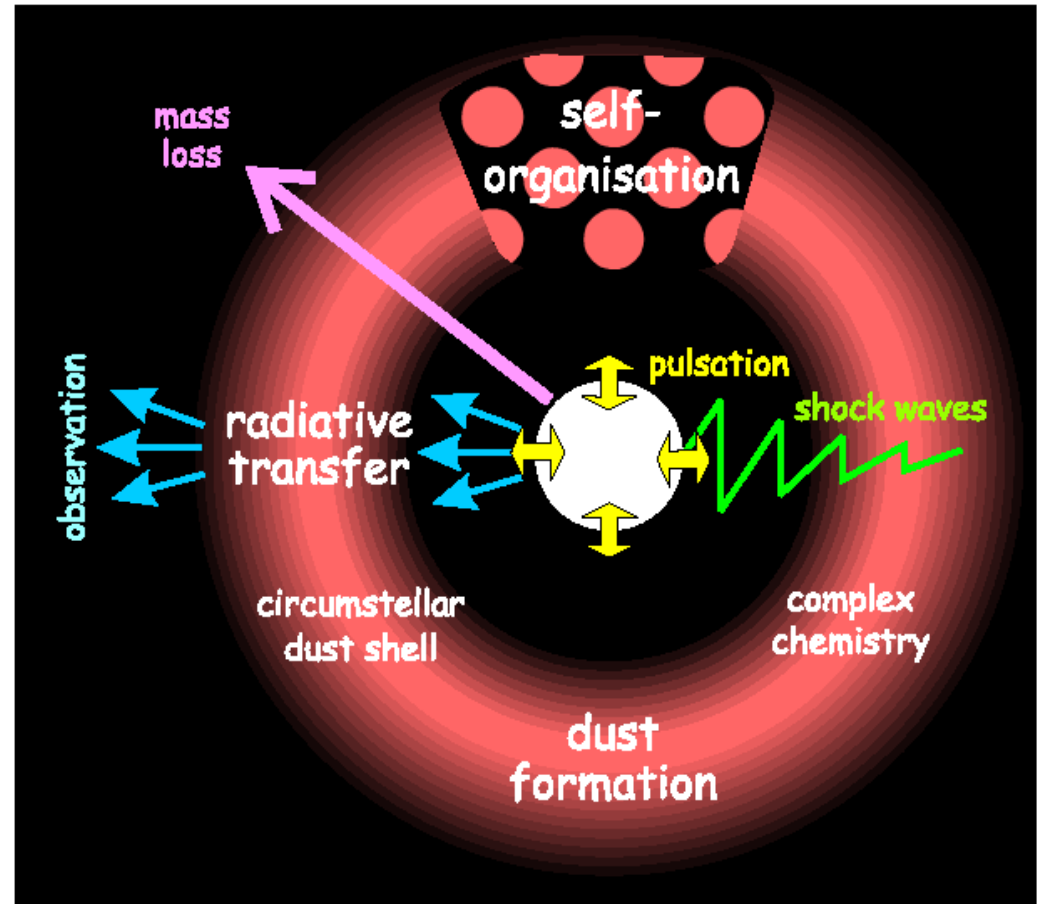
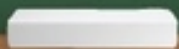


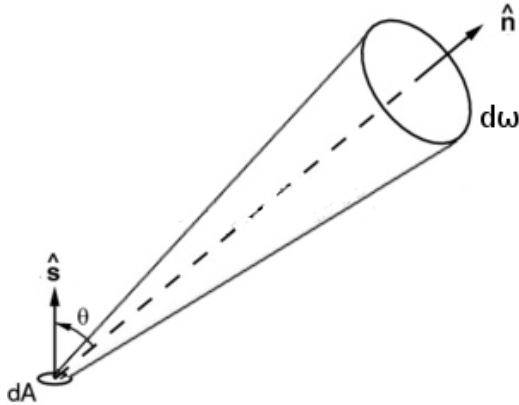
Figure 1. Sketch of the physical processes involved in the mass loss mechanism of AGB stars.

Далее будем понимать под атмосферой звезды слои,
в которых формируется подавляющая часть интегрального потока.

Основные понятия



Интенсивность



$$I_\nu = \frac{dE}{\cos\theta dA d\omega dt d\nu}$$

эрг/(см²· с· Гц· стер)

если нет стоков и источников энергии, то I_ν не зависит от расстояния.

$$dE \sim r^{-2} \quad dA \sim r^{-2}$$

В случае одномерной плоской геометрии I_ν не зависит от азимута

Распределения I_ν и I_λ различны

$$I_\nu d\nu = I_\lambda d\lambda, \quad \frac{d\nu}{d\lambda} = \frac{c}{\lambda^2}, \quad I_\lambda = I_\nu \frac{c}{\lambda^2}$$

Средняя интенсивность
(0-й момент интенсивности)
(характеристика источника излучения)

Ј-интеграл

Векторное определение

$$J_{\nu} = \frac{1}{4\pi} \oint_{4\pi} I_{\nu}(\vec{r}, \vec{n}, t) d\omega$$

В сферических координатах

$$J_{\nu} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_{\nu} \sin\theta \cos\theta d\theta d\phi$$

Плоская геометрия
Независимость от азимута ϕ

$$\mu = \cos\theta$$
$$J_{\nu} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 I_{\nu}(\mu) d\mu$$

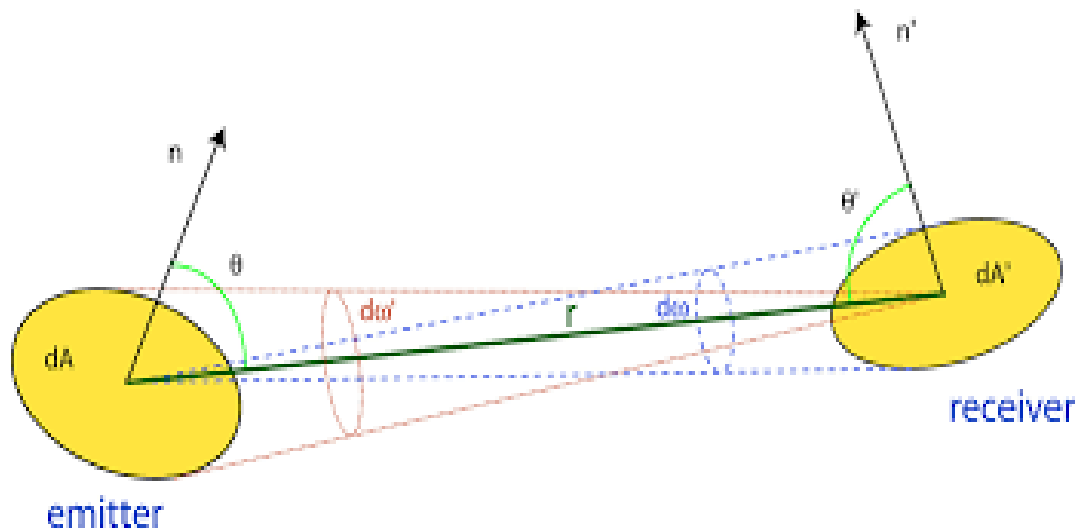
эрг/(см²· с · Гц)

Поток

(1-й момент интенсивности)

Н-интеграл

лучистая энергия, протекающая через площадку dS за единицу времени в единичном интервале частот
(характеристика излучения, дошедшего до наблюдателя)



Поток

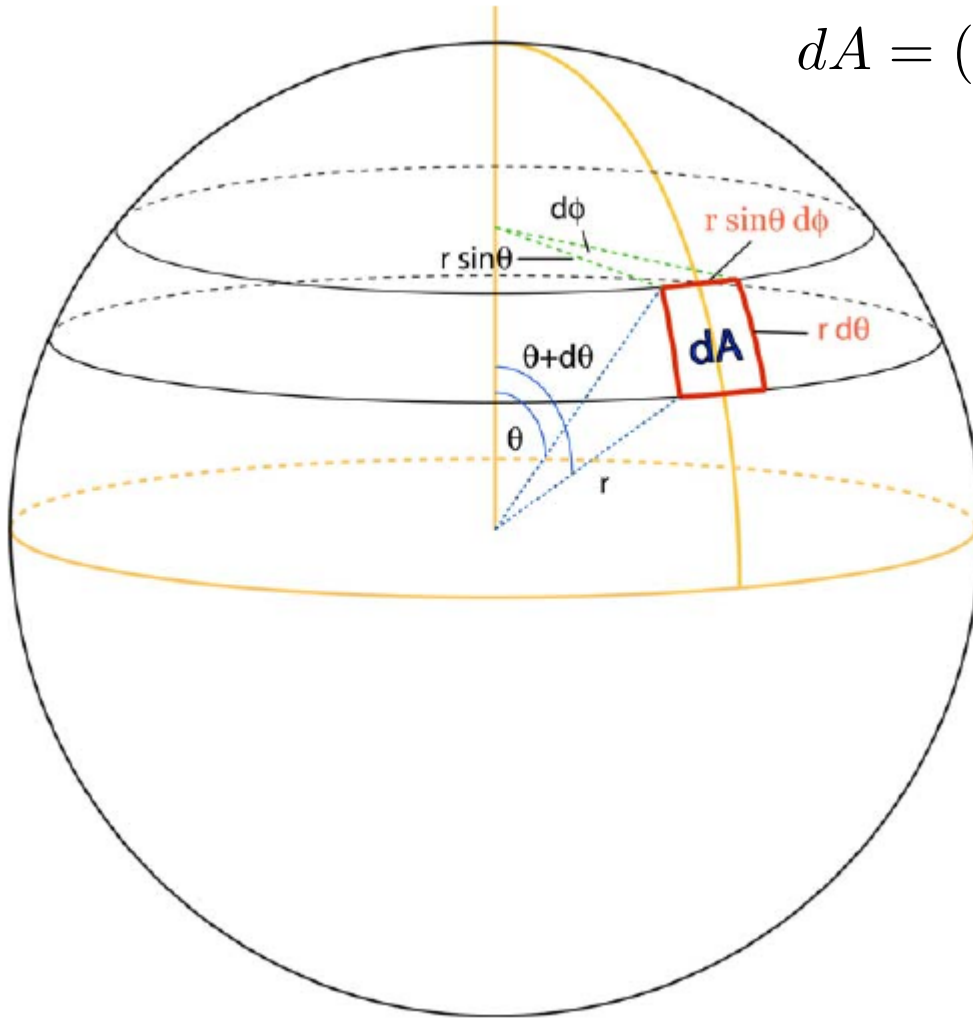
(1-й момент интенсивности)

Н-интеграл

$$\begin{aligned}\mathcal{F}_\nu &= \oint I_\nu(\vec{r}, n, t) \vec{n} d\omega = \oint \boxed{I_\nu \cos\theta} d\omega = \\ &= \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} I_\nu \sin\theta \cos\theta d\theta + \int_0^{2\pi} d\phi \int_{-\pi/2}^0 I_\nu \sin\theta \cos\theta d\theta = \underbrace{\pi F^+ + \pi F^-}_{\text{Ноль в изотропном случае}} \\ F_\nu^+ &= \frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} I_\nu \sin\theta \cos\theta d\theta = \frac{1}{2} \int_0^1 I_\nu \mu d\mu \\ H_\nu &= \mathcal{F}_\nu / 4\pi = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 I_\nu \mu d\mu\end{aligned}$$

Эддингтоновский поток —
средний поток на 1 радиан

Система координат звездной атмосферы



$$dA = (r \sin\theta d\phi)(r d\theta) = r^2 \sin\theta d\theta d\phi$$

$$d\omega = \frac{dA}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi$$

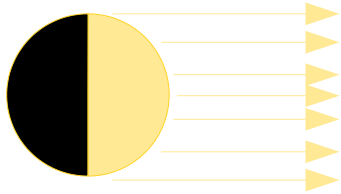
$$\mu = \cos\theta$$

$$d\mu = -\sin\theta d\theta$$

$$d\omega = -d\mu d\phi$$

Астрофизический поток F

Поток излучения с поверхности звезды по направлению к наблюдателю (то есть с половины поверхности, обращенной к наблюдателю)



эрг/см²/с/А

Закон косинуса

$$\mathcal{F}_\nu = \oint I_\nu(\vec{r}, n, t) \vec{n} d\omega = \oint I_\nu \cos\theta d\omega =$$

$$= \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} I_\nu \sin\theta \cos\theta d\theta + \int_0^{2\pi} d\phi \int_{-\pi/2}^0 I_\nu \sin\theta \cos\theta d\theta =$$

$$= 2\pi \int_0^{\pi/2} I_\nu \sin\theta \cos\theta d\theta = 2\pi \int_0^1 I_\nu \mu d\mu = \pi F_\nu$$

Или при интенсивности I, постоянной по поверхности звезды:

$$\mathcal{F}_\nu = 2\pi \int_0^{\pi/2} I_\nu \sin\theta \cos\theta d\theta = 2\pi I_\nu \int_0^{\pi/2} \sin\theta \cos\theta d\theta = 2\pi I_\nu \frac{1}{2} = \pi I_\nu$$

Наблюдаемый поток

Поток излучения с поверхности звезды, регистрируемый наблюдателем

эрг/см²/с/А

Из условия сохранения потока

$$4\pi R_{\star}^2 F_{\nu} = 4\pi d_{\star}^2 f_{\nu}$$

$$f_{\nu} = F_{\nu} \left(\frac{R_{\star}}{d_{\star}} \right)^2 = F_{\nu} \frac{\theta^2}{4}$$

Угловой диаметр звезды

Полный поток:
с 1 см²

$$F = \int_0^{\infty} F_{\nu} = \sigma T_{eff}^4$$

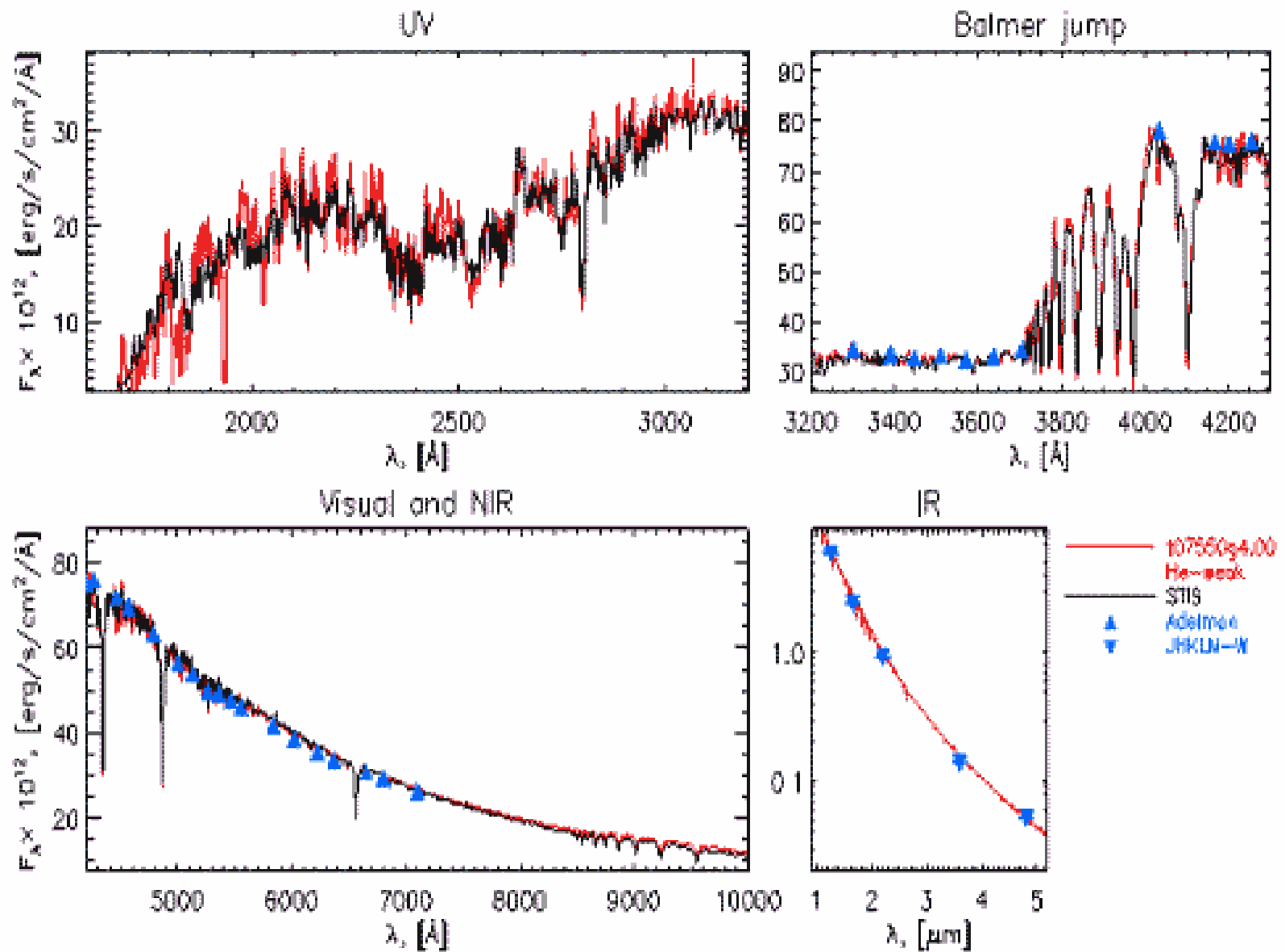
$$f = F \frac{\theta^2}{4} = \sigma T_{eff}^4 \frac{\theta^2}{4}$$

Светимость:

Поток со всей поверхности звезды

$$L = 4\pi R_{\star}^2 F = 4\pi R_{\star}^2 \sigma T_{eff}^4$$

Поток



VizieR Photometry viewer

[? Documentation](#)
[▼ settings](#) [► share](#)

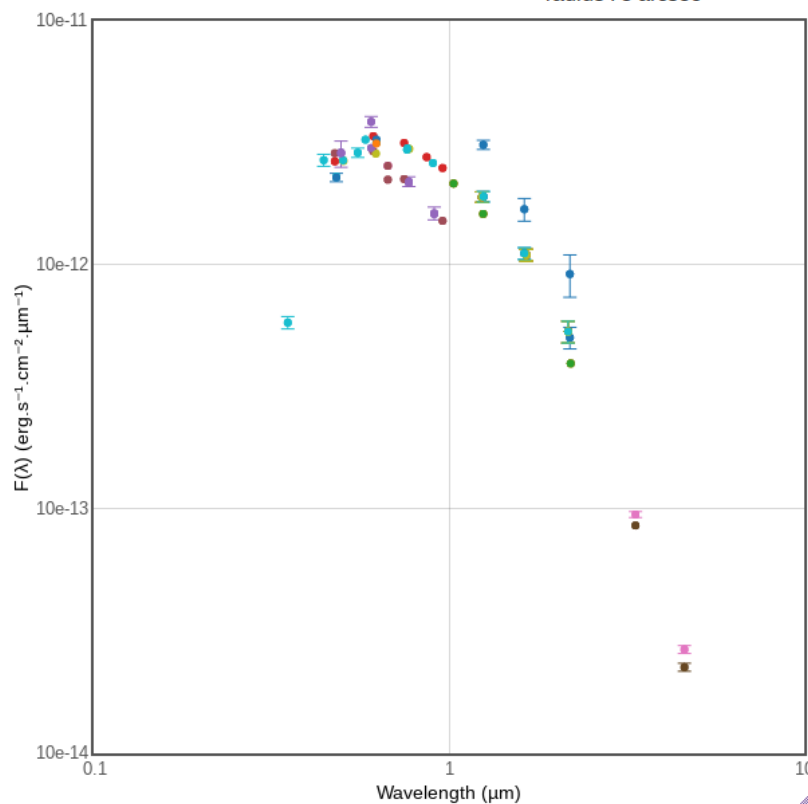
Target

Radius (in arcsec)

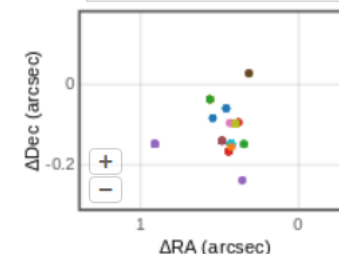
[submit](#)



10:11:26.92 -02:05:41.7 (10 11 26.920-02 05 41.701),
radius : 3 arcsec



Mouse position:
Wavelength :
4.95e-2 μm
Frequency :
6.06e+6 GHz
Energy :
2.51e+1 eV
Flux density or $F(\nu)$:
2.43e-23 Jy
 $\nu F(\nu)$:
1.47e-33 W.m^{-2}
 $F(\lambda)$:
2.98e-12 $\text{erg.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$



Center (R.A.+Dec.):
10 11 26.920-02 05 41.701

[reset zoom](#)

[reset zoom](#) [export view](#) [download data](#) [▼ options](#)

☒ Displays error bars

☒ Enable tooltip

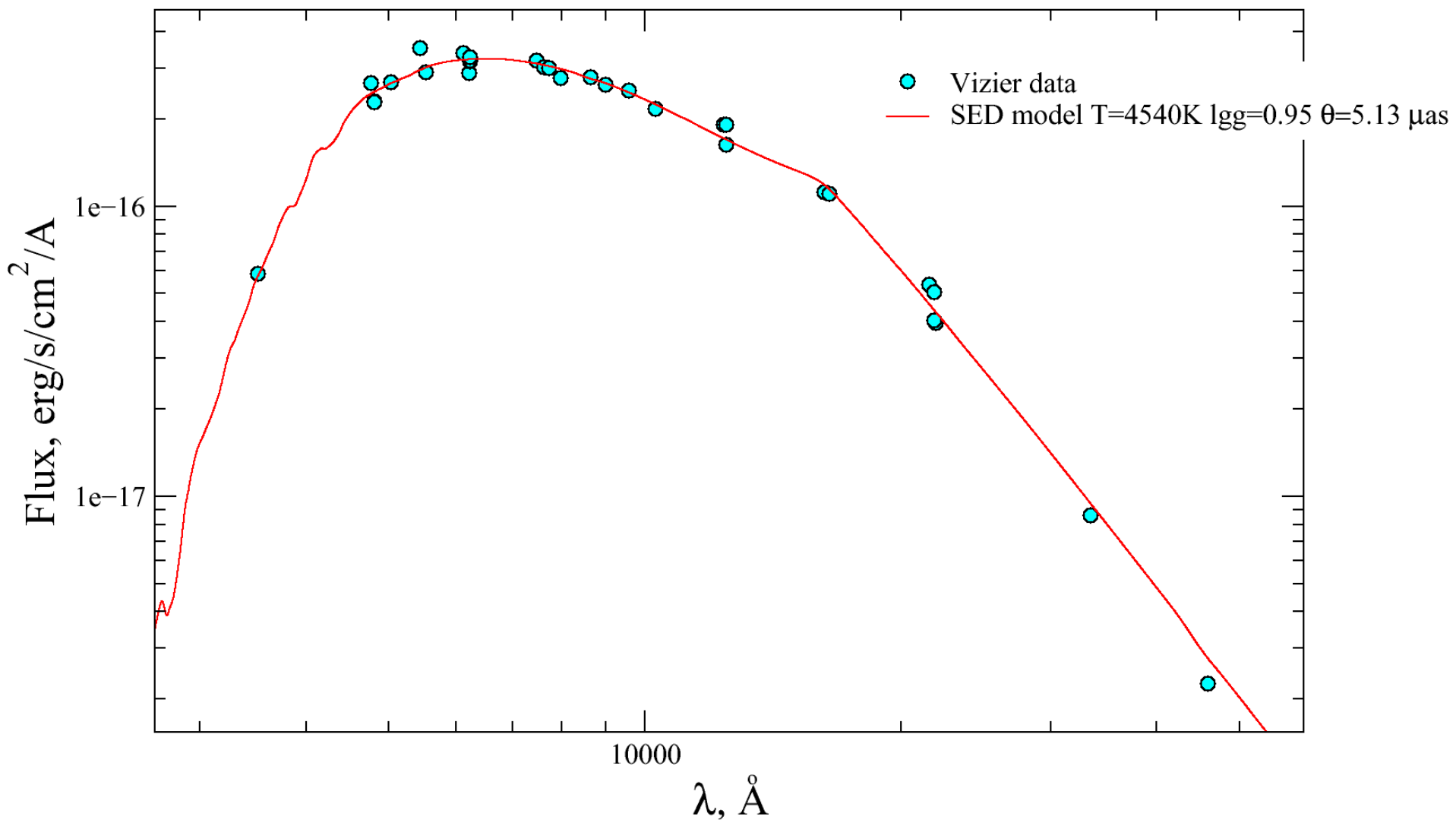
x axis :

☒ logarithmic scale

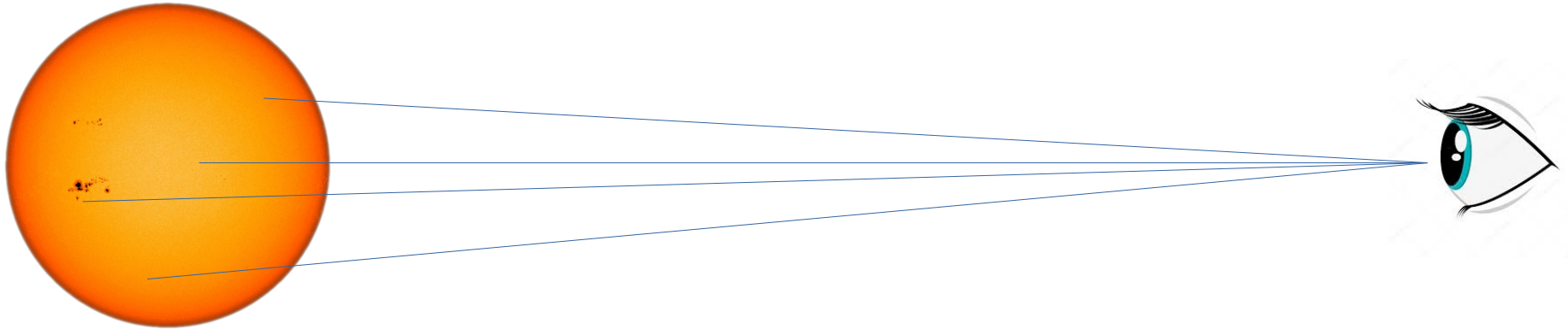
y axis :

☒ logarithmic scale

Описание наблюдаемого потока звезды S1519 из галактики Sextant



Интенсивность



Поток

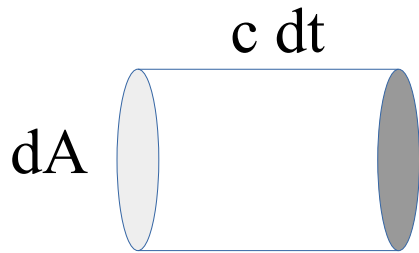


Плотность и давление излучения (2-й момент интенсивности)

К-интеграл

$$K_\nu = \frac{1}{4\pi} \oint I_\nu \cos^2 \theta d\omega = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 I_\nu \mu^2 d\mu$$

Плотность энергии излучения



$$\rho_\nu d\nu d\omega = \frac{I_\nu dt dA}{c dt dA} d\nu d\omega$$

$$\rho_\nu = \frac{1}{c} \oint I_\nu d\omega = \frac{4\pi}{c} J_\nu$$

Давление излучения

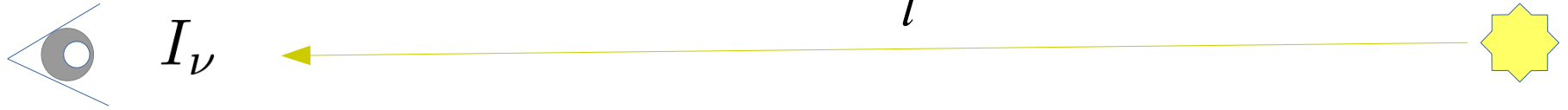
$$P_\nu = \frac{4\pi}{c} K_\nu = \frac{1}{c} \int I_\nu \mu^2 d\mu$$

Важно в горячих звездах

*Взаимодействие
излучения и вещества*

Перенос излучения

Поглощение



$$\delta E = \chi_\nu(\vec{r}, \vec{n}, t) I_\nu(\vec{r}, \vec{n}, t) dt d\nu dl dA d\omega$$

$$dI_\nu = \chi_\nu I_\nu dl \quad \text{Поглощение на участке длиной } dl$$

Коэффициент поглощения

a_ν — на один атом (сечение)

χ_ν — на ед.объем

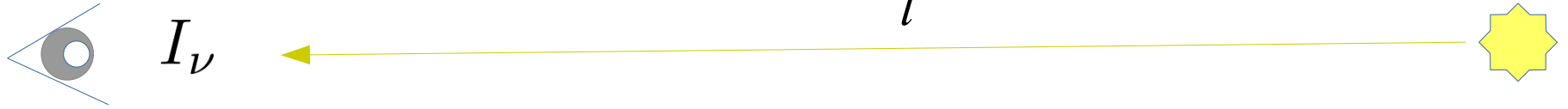
κ_ν — на ед.массу

$$\chi_\nu = \sum \chi_\nu^i$$

$$\chi_\nu^i = a_\nu n_i$$

$$\chi_\nu = \kappa_\nu \rho$$

Поглощение



$$dI_\nu = \chi_\nu I_\nu dl$$

$$I_\nu = I_\nu^0 e^{-\int_0^l \chi_\nu dl}$$

Оптическая толща

$$\tau_\nu = \int_0^l \chi_\nu dl$$

$$I_\nu = I_\nu^0 e^{-\tau_\nu}$$

Излучение

Коэффициент излучения

$$\delta E = \eta_\nu(\vec{r}, \vec{n}, t) dt d\nu dl dA d\omega$$

$$dI_\nu = \eta_\nu dl \quad \text{Излучение на участке длиной } dl$$

Общее изменение интенсивности излучения

$$dI_\nu = \eta_\nu dl - \chi_\nu I_\nu dl = (\eta_\nu - \chi_\nu I_\nu) dl$$

Может быть и положительным (среда преимущественно генерирует излучение) и отрицательным (среда преимущественно поглощает)

*Модели
звездных атмосфер*

Модель — математическая форма описания
физического тела или явления, параметры которой
отражают его характеристики.

ВАКУУМ

ВАКУУМ

ВАКУУМ

ВАКУУМ

ВАКУУМ

ВАКУУМ

ВАКУУМ

ВАКУУМ

ВАКУУМ

ВАКУУМ

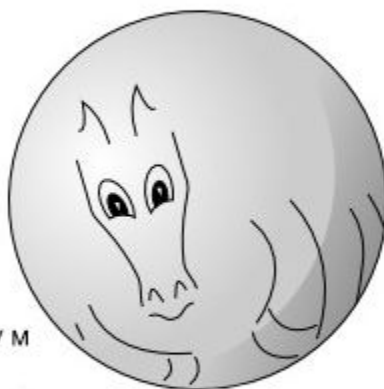
ВАКУУМ

ВАКУУМ

ВАКУУМ

ВАК

ВАКУУМ



Основные уравнения

Уравнение переноса излучения

$$\left(\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial l} \right) I_\nu(\vec{r}, \vec{n}, t) = \chi_\nu(\vec{r}, \vec{n}, t) I_\nu(\vec{r}, \vec{n}, t) + \eta_\nu(\vec{r}, \vec{n}, t)$$

Неравномерность во
времени

Неравномерность в
пространстве

Поглощение в слое

Излучение слоя



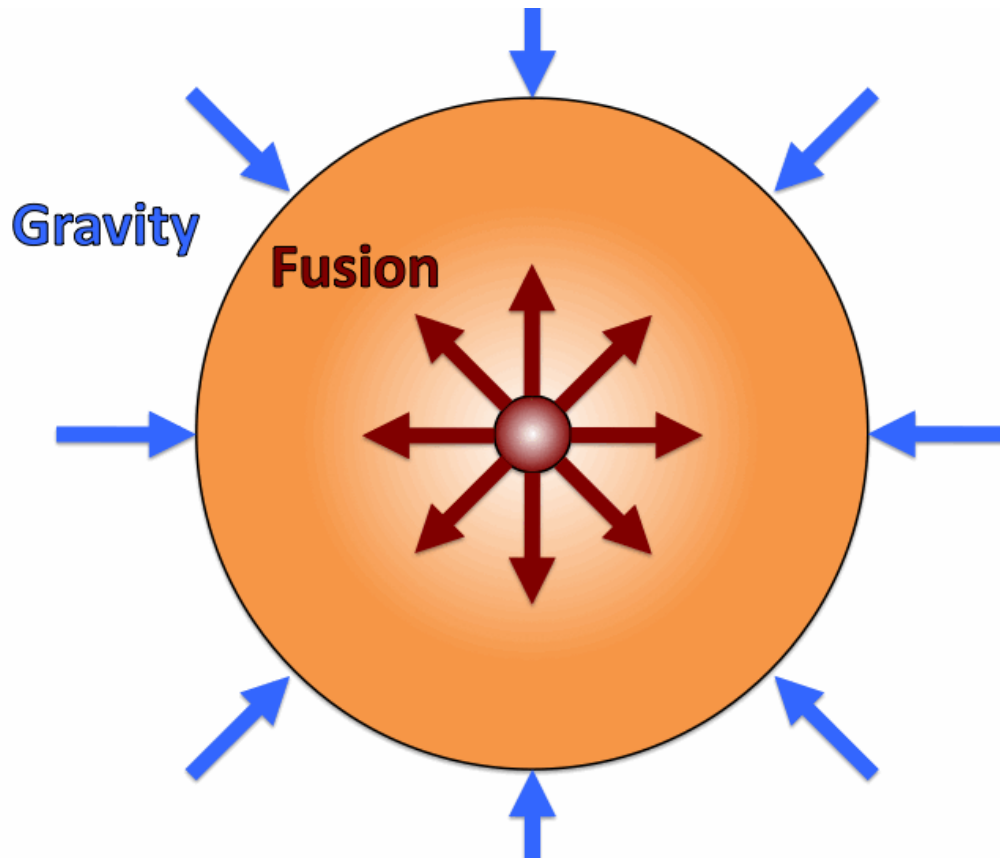
Уравнение гидростатического равновесия

$$\frac{dP_g}{dz} + \frac{dP_R}{dz} = -g\rho$$

Уравнение газодинамики (неразрывности)

В случае стационарной атмосферы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0$$



- Уравнение гидростатического равновесия

$$\frac{dP_g}{dz} + \frac{dP_R}{dz} = -g\rho \quad \text{где} \quad \rho = \sum_{\text{all species}, k} m_k N_k = (N - N_e) m_H \sum_{\text{all species}, k} A_k \alpha_k$$

Уравнения сохранения числа частиц и заряда

$$N = \sum_{\text{all species}, k} N_k + N_e \quad N_e = \sum_{\text{species}, k} \sum_{\text{ions}, r} r N_{k,r}$$

$g = \text{const}$, параметр модели

Type	log g
Main sequence star	4.0 4.5
Sun	4.44
Supergiants	0 1
White dwarfs	~8
Neutron stars	~15
Earth	3.0

Сила давления излучения

$$\frac{dP_R}{dz} = -\frac{4\pi}{c} \rho \int_0^{\infty} \kappa_{\nu} H_{\nu} d\nu$$

$$g_R / g = \kappa_{mean} \sigma T_{eff}^4 R^2 / (c G M),$$

Для Томсоновского рассеяния: $\kappa_{mean} = \sigma_e / m_H$ $\frac{g_R}{g} = 10^{-4.51} \frac{L / L_{Sun}}{M / M_{Sun}}$

Для стабильной атмосферы: $g > g_R$ $\log g > 4 \log T_{eff} - 15.12$

Эддингтоновская светимость -

предельная светимость для звезды со статичной атмосферой.

$$L_{Edd} = 4\pi \frac{GM}{g_R} \sigma T_{eff}^4 = \frac{4\pi GM c m_H}{\sigma_e}$$

$$L_{Edd} / L_{Sun} = 10^{4.51} M / M_{Sun}$$

Уравнение сохранения энергии

- Перенос энергии излучением -
атмосфера в лучистом равновесии.

$$\int_0^{\infty} \eta_{\nu} d\nu = \int_0^{\infty} \chi_{\nu} J_{\nu} d\nu \quad F = \int_0^{\infty} F_{\nu} d\nu = \text{const} = \sigma T_{eff}^4$$

T_{eff} – параметр модели

$$\mu \frac{dI_{\nu}(z)}{dz} = -\chi_{\nu}(z) I_{\nu}(z, \mu) + \eta_{\nu}(z)$$

условие постоянства
потока получается из
уравнения переноса при
лучистом равновесии

Уравнение сохранения энергии

- Перенос энергии излучением и конвективными движениями.

Критерий неустойчивости относительно появления конвекции (*К. Шварцшильд*)

$$\nabla_A < \nabla_r$$

$$\nabla_A = \left(\frac{d \ln T}{d \ln P} \right)_A = \frac{\gamma - 1}{\gamma}$$

$$\nabla_r = \left(\frac{d \ln T}{d \ln P} \right)_r$$

$$\nabla_A = 0.4 - 0.1$$

Вывод критерия Шварцшильда

Сила плавучести поддерживает движение, если

$$(\Delta\rho)_E = \left(\frac{d\rho}{dr}\right)_E \Delta r < (\Delta\rho)_r = \left(\frac{d\rho}{dr}\right)_r \Delta r \quad \left\{ \begin{array}{l} E - \text{возмущенный элемент газа;} \\ r - \text{окружающий газ} \end{array} \right. \\ \text{(в лучистом равновесии)}$$

Предположим:

- 1) элемент – в равновесии с окружающим газом по давлению;
- 2) процесс – адиабатический.

$$\left(\frac{d \ln \rho}{dr}\right)_A = \left(\frac{d \ln \rho}{d \ln P}\right)_A \left(\frac{d \ln P}{dr}\right)_A < \left(\frac{d \ln \rho}{dr}\right)_r = \left(\frac{d \ln \rho}{d \ln P}\right)_r \left(\frac{d \ln P}{dr}\right)_r$$

$$\frac{\gamma - 1}{\gamma} \left(-\frac{d \ln P}{d \ln r}\right)_r < \left(-\frac{d \ln T}{dr}\right)_r$$

$$\nabla_A < \nabla_r$$

Зона ионизации H:

- рост непрозрачности и рост ∇_r

в диффузионном приближении

$$H_V(\tau_V) = \frac{1}{3} \frac{dB_V}{dT} \frac{dT}{d\tau_V} = - \frac{1}{3\chi_V} \frac{dB_V}{dT} \frac{dT}{dz}$$

$$\nabla_r = 3 F \chi_{\text{Ross}} P / 16 \sigma g \rho T^4$$

При $\tau_{5000} > 1$ $\nabla_A < \nabla_r$

Конвекция переносит до 90% общего потока.

Конвективный перенос энергии

важен, если

- есть зона ионизации H;
 - располагается на $\tau \geq 1$.
- В звездах F, G и более поздних.

*Адиабатический и лучистый
градиенты в атмосфере Солнца*

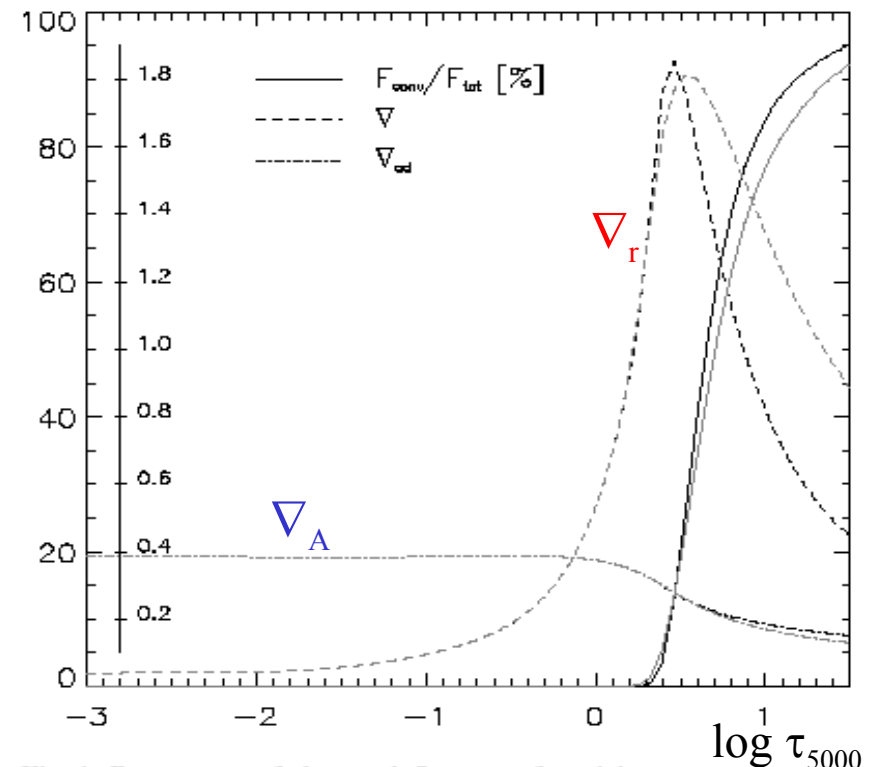


Fig. 4. Percentage of the total flux transferred by convection (full lines), total (dashed lines) and adiabatic (dot-dashed lines) temperature gradient in the MAFAGS-OS model for the two treatments of convection: Canuto & Mazitelli ($\alpha_{\text{cm}} = 0.82$) – plotted in gray, Böhm-Vitense ($\alpha_{\text{bv}} = 0.5$) – plotted in black.

Grupp (2004)

Модели звездных атмосфер

Предположения и ограничения



1. Геометрия.

Одномерные (1D) модели

- Плоскопараллельные однородные слои, если $h_{atm}/R \ll 1$.

Оценим
$$H = \frac{P_g}{g\rho} = \frac{R_{gas} T}{g\mu}$$

Все звезды ГП

Солнце: $H/R = 180/700000 \ll 1$

Белый карлик: $0.25/7000 \ll 1$

НЗ: $0.0000016/10 \ll 1$

- Сферические однородные слои, если $h_{atm}/R < 1$

Mira:

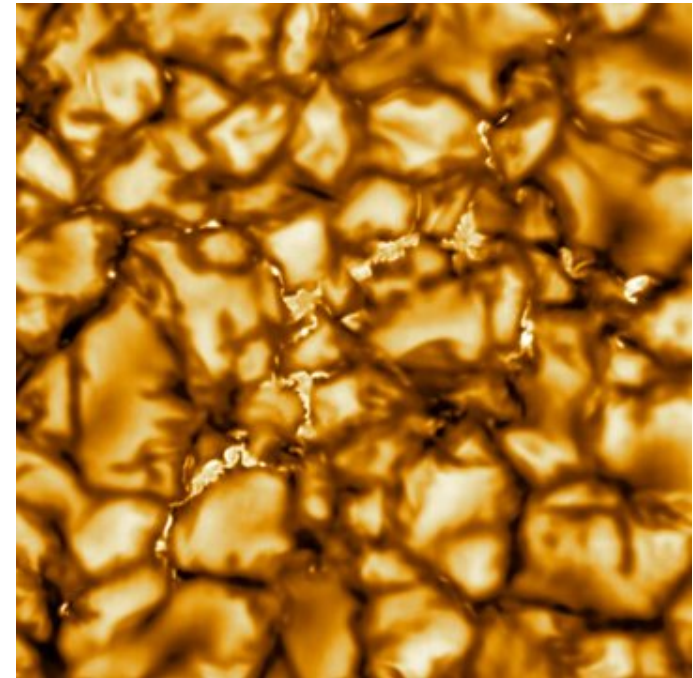
$$h_{atm}/R \sim 0.56$$

Насколько оправдано предположение об однородности?

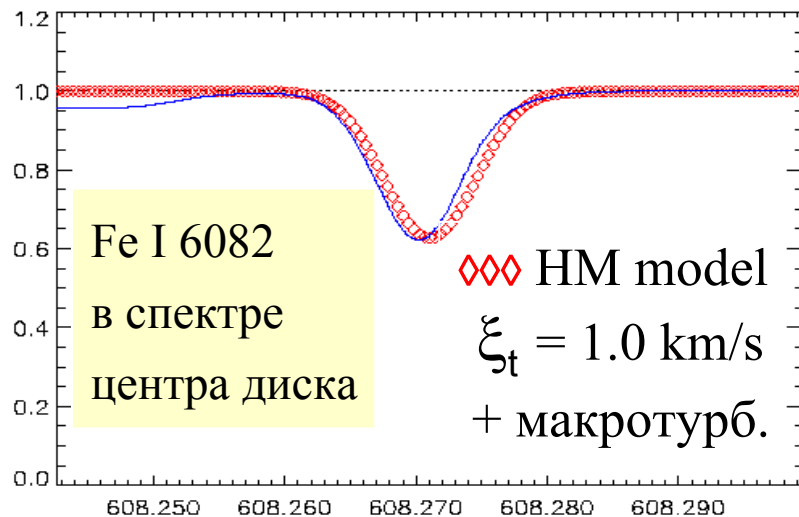


Звезды с конвективной зоной (Солнце)

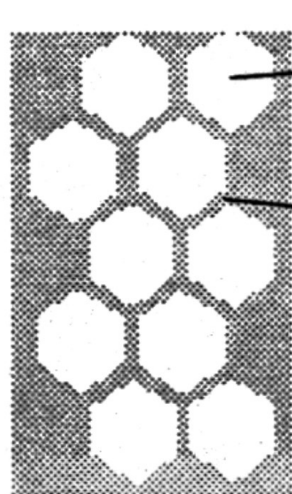
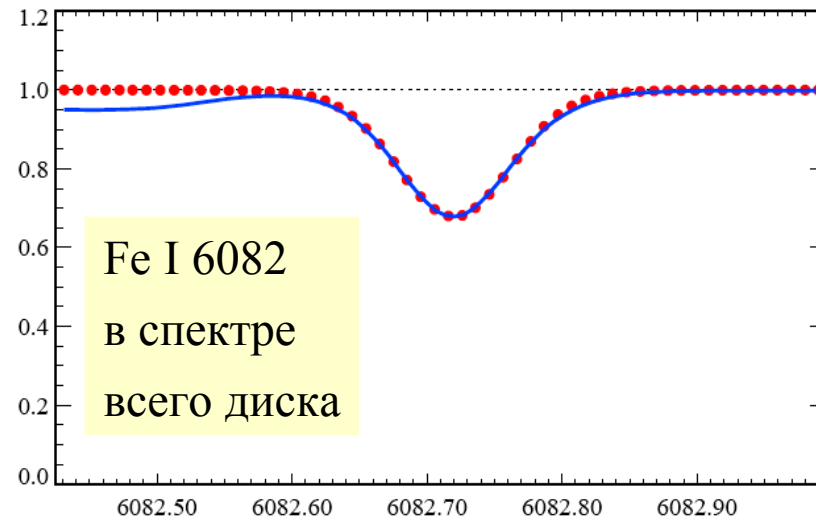
- Солнечная грануляция,
размеры гранул ~ 1000 км
разница температур ~ 300 К,
скорости вертикальных движений ~ 1 км/с,
время жизни ~ 10 мин.



- Асимметрия и сдвиги линий в спектре интенсивности



- Проявления неоднородности малы в спектре Солнца как звезды



granules

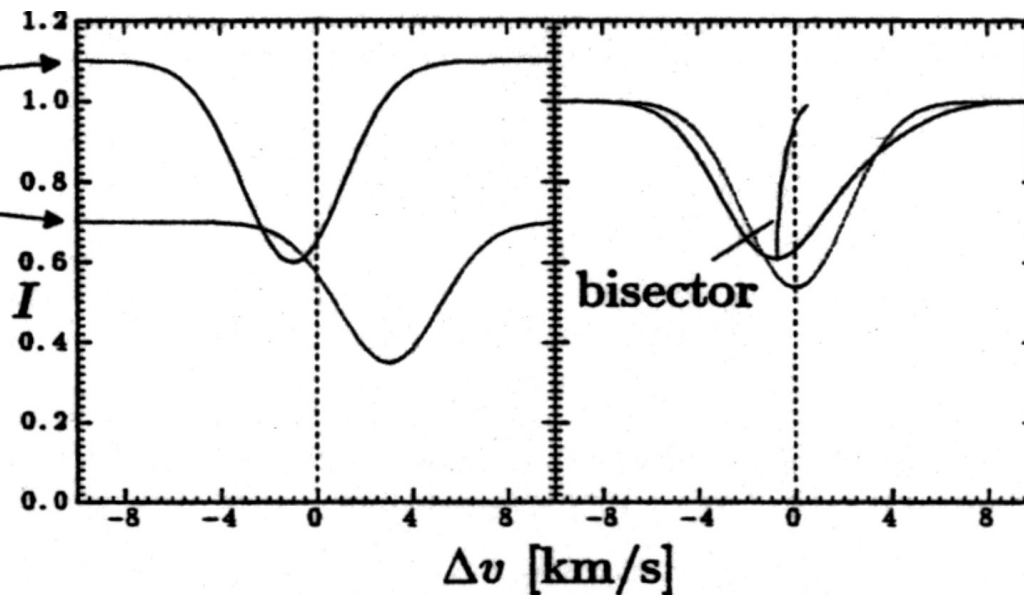


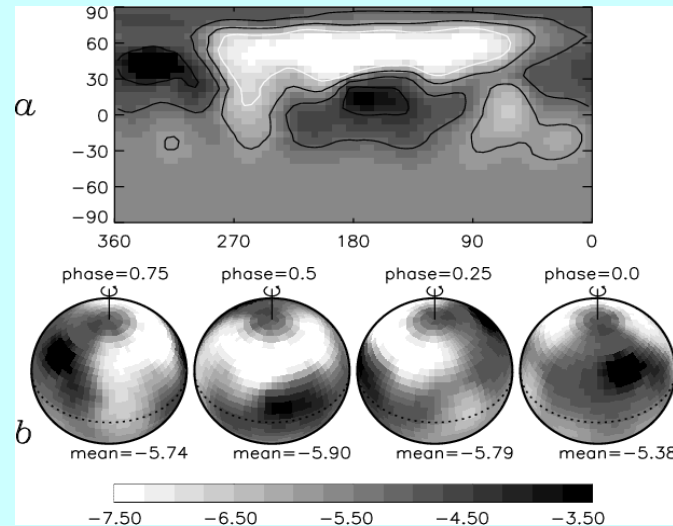
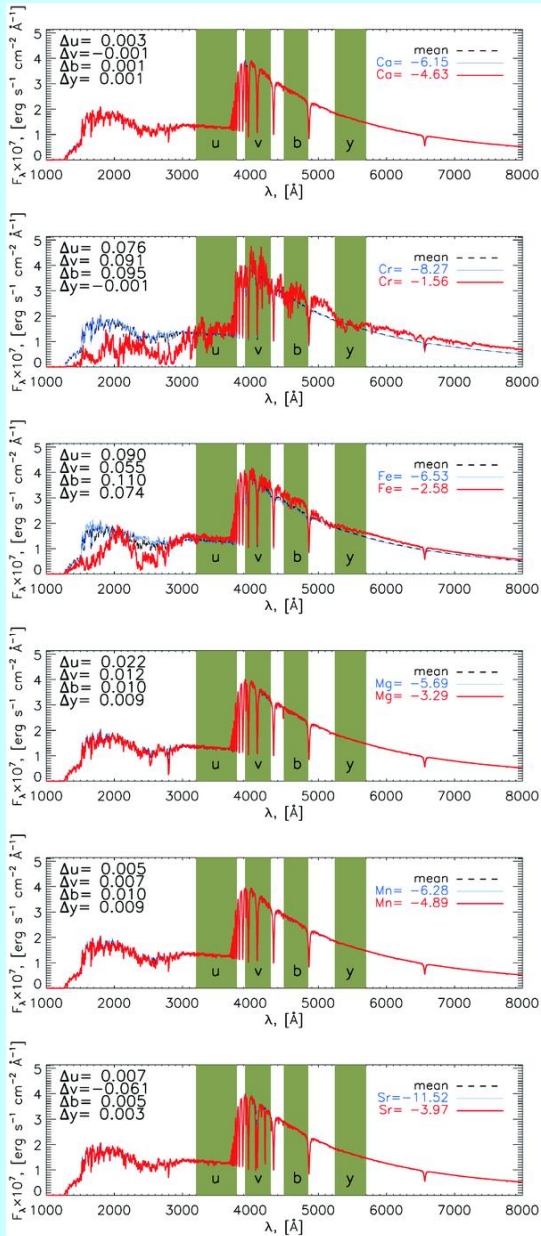
Схема
образования
асимметрии и
сдвига линии в
неоднородной
атмосфере



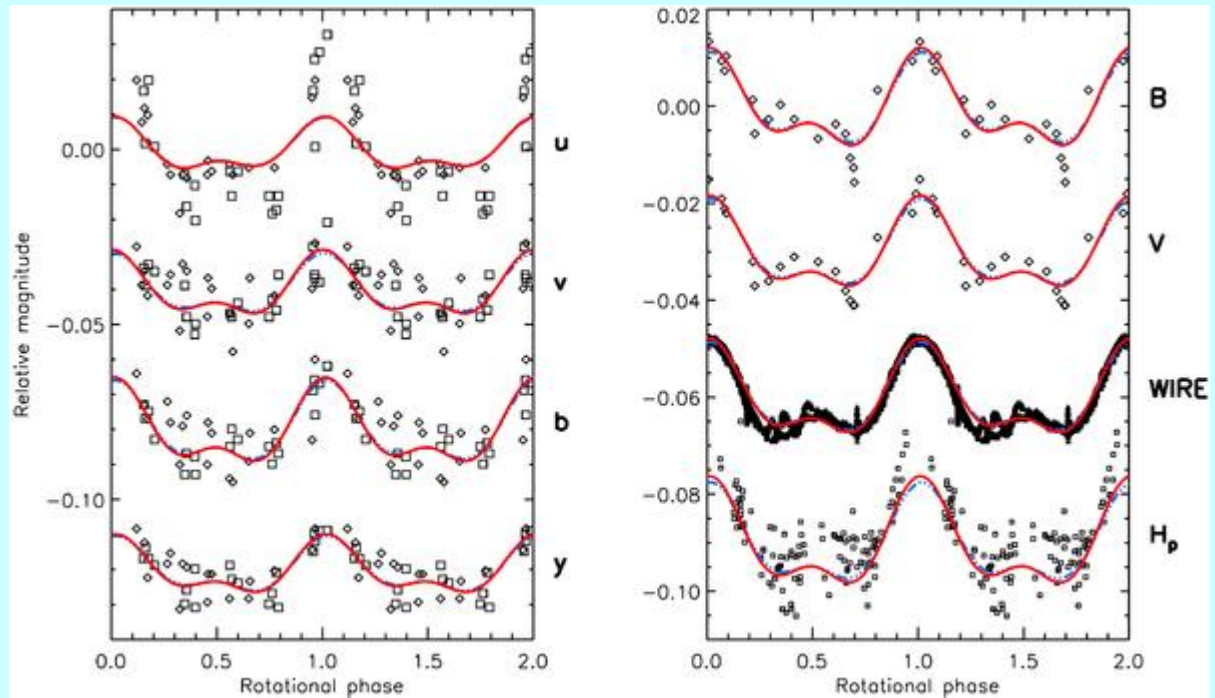
Ар звезды

- *сильная химическая неоднородность поверхности,* обусловленная, вероятно, наличием магнитного поля сложной конфигурации. При наличии карт распределения химических элементов по поверхности можно промоделировать выходящее излучение в зависимости от фазы вращения.

Modelling the light curves in chemically peculiar stars



From Shulyak et al.
A&A 524, A66, 2010
and
Lueftinger et al. A&A
406, 1033, 2003 (maps)

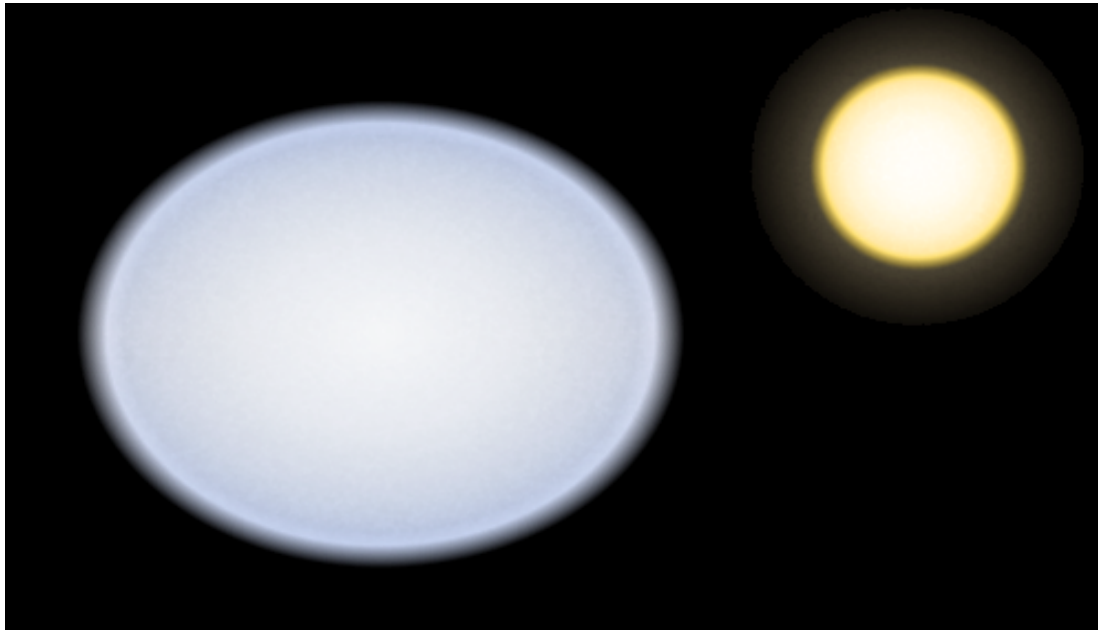




Быстрые ротаторы.

- звезда приобретает форму эллипсоида, разные эффективные температуры и ускорения силы тяжести на полюсе и на экваторе. Типичный пример – Вега. $R_{pol}=2.36 R_{\odot}$, $R_{equ}=2.82 R_{\odot}$

$$T_e^{pol}=10060 \text{ K}, T_e^{equ}=8150 \text{ K}$$



Тесные двойные

отклонение от сферичности + облучение второй звездой.



2. Динамика

- Статичные атмосферы (*все звезды ГП* ~ 90% всех звезд) $\frac{\partial}{\partial t}=0$
- Движущиеся в режиме стационарного истечения,
(*A – O сверхгиганты, звездные ветры*)
- Гидродинамические
атмосферы с конвекцией (*звезды солнечного типа*);
пульсирующие атмосферы (*цефеиды, ...*);
нестационарное расширение, ударные волны (*оболочки SN*)



3. Термодинамика

- Статистическое равновесие (*стационарные атмосферы*)

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = 0 \longrightarrow \sum_{j \neq i} n_j (R_{ji} + C_{ji}) = n_i \sum_{j \neq i} (R_{ij} + C_{ij}) \quad i = 1, \dots, NL$$

Радиативные процессы:

b-f

фотоионизация, фоторекомбинация
автоионизация, диэлектронная
рекомбинация

b-b:

фотовозбуждение,
индуцированные переходы вниз,
спонтанный переход

$$R_{ij}, R_{ji} \sim I_\nu$$

Нелокальные
величины !

Ударные процессы:

(e^- , H, молекулы)

ионизация, рекомбинация
перезарядка

возбуждение, удары
второго рода

$$n_i C_{ij} = N_e n_i \int_{\nu_0}^{\infty} \sigma_{ij}(\nu) f(\nu) \nu d\nu$$

Локальные
величины !



Частный случай:

полное термодинамическое равновесие (ПТР)

- **детальный баланс:** $n_i R_{ij} = n_j R_{ji} \quad n_i C_{ij} = n_j C_{ji}$

Баланс прямых и обратных процессов

- $J_\nu = B_\nu$

- $\eta_\nu = k_\nu B_\nu(T)$ **соотношение Кирхгофа-Планка**

b-b: $\frac{n_j}{n_i} = \frac{g_j}{g_i} e^{-h\nu/kT}$ **формула Больцмана**

b-f: $\frac{n_i}{n_{i+1}} = Ne \frac{g_i}{2 g_{i+1}} \frac{h^3}{(2 \pi m k T)^{3/2}} e^{\chi_i/kT}$ **формула Саха**



- Локальное термодинамическое равновесие (ЛТР)

Концентрации атомов – по формулам Больцмана и Саха
при локальных T_e и N_e

$$T_{ion} = T_{exc} = T_e$$

При каких условиях предположение ЛТР удовлетворительно ?

1) $C_{ij} \gg R_{ij}$ в каждом переходе

$$\sum_{j \neq i} n_j C_{ji} = n_i \sum_{j \neq i} C_{ij} \longrightarrow \frac{n_j}{n_i} = \frac{g_j}{g_i} e^{-h\nu/kT}$$

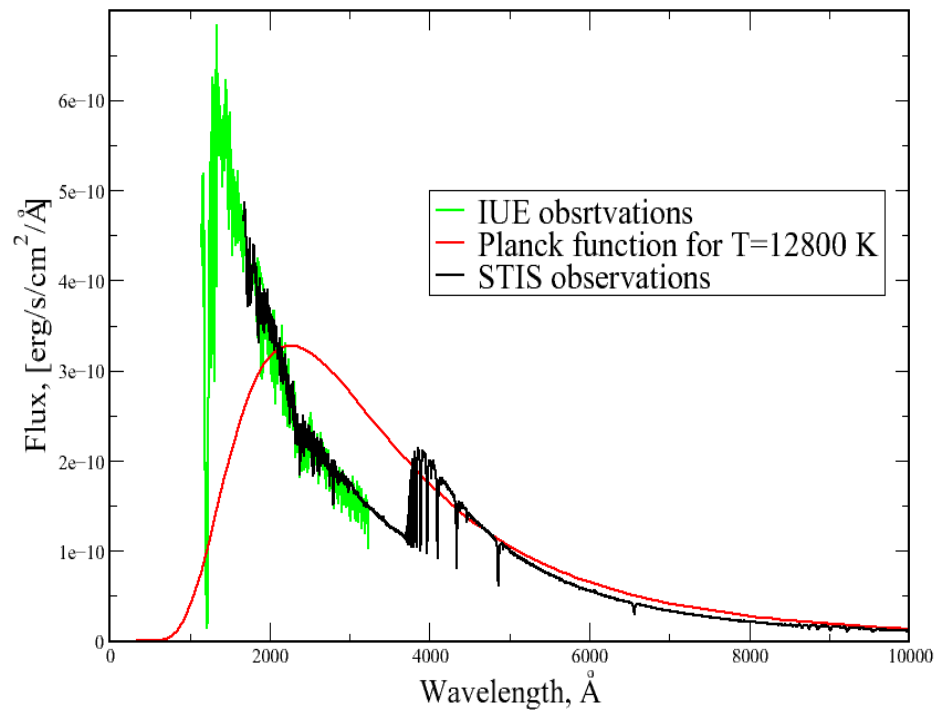
2) $J_\nu = B_\nu(T_e)$ на всех частотах $\rightarrow$ детальный баланс

Условия выполняются в глубоких слоях атмосферы

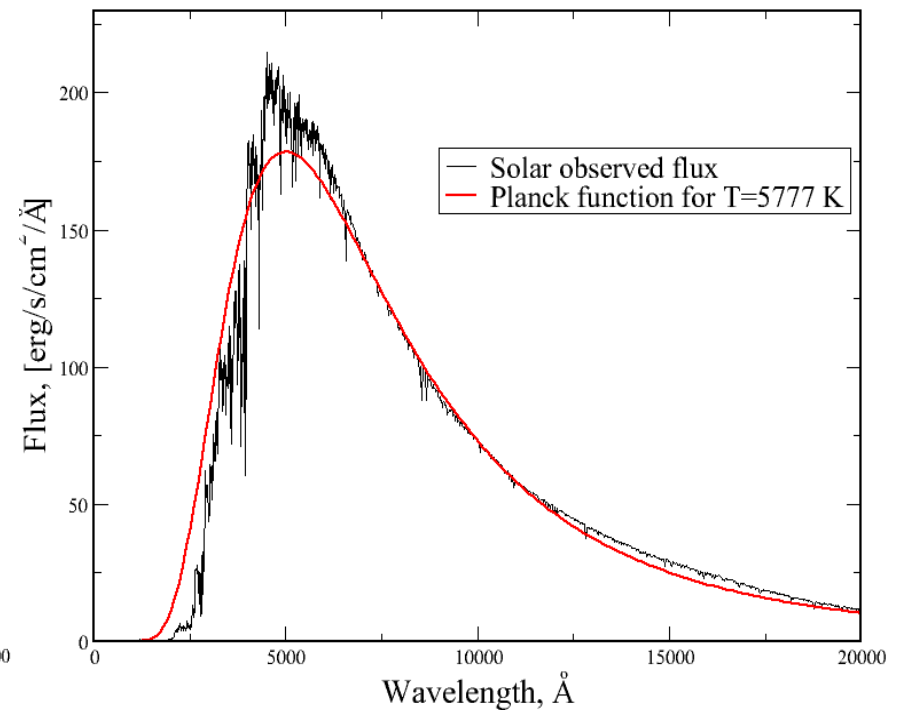
Чернотельное ли излучение звезд?



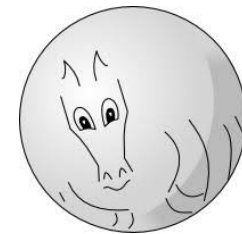
π Ceti ($T_{\text{эфф}} = 12800$ K)



Солнце ($T_{\text{эфф}} = 5777$ K)



*Классические модели
звездных атмосфер*



Классические модели атмосферы:

- плоская геометрия,
- однородные,
- статичные,
- эффекты вращения, магнитного поля пренебрежимо малы.

Область применимости сферических 1D, статических моделей – узкая. Протяженность почти всегда сопровождается динамическими явлениями.

1. Уравнение переноса излучения

$$\mu \frac{dI_\nu(z)}{dz} = -\chi_\nu(z) I_\nu(z, \mu) + \eta_\nu(z) \quad \mu = \cos \theta$$

Поглощение: b - f переходы у всех атомов, ионов, молекул
 f - f переходы, рассеяние, b - b переходы.

Излучение: $\eta_\nu = \chi_\nu^t B_\nu$ для тепловых процессов (b - f , f - f),
 $\eta_\nu = \chi_\nu^s J_\nu$ для изотропного, когерентного
рассеяния,
 $\eta_\nu = \chi_\nu^s \int_0^\infty R(\nu, \nu') J_{\nu'} d\nu'$ для некогерентного рассеяния.
Функция перераспределения
 $R(\nu, \nu')$

Введем следующие обозначения:

$$k_\nu = \chi_\nu^t \quad - \text{коэффициент истинного поглощения}$$

$$\sigma_\nu = \chi_\nu^s \quad - \text{коэффициент рассеяния}$$

тогда $\chi_\nu = k_\nu + \sigma_\nu$

Функция источников: $S_\nu = \eta_\nu / \chi_\nu$

Оптическая толщина: $\tau_\nu = \int \chi_\nu dz,$

$$\mu \frac{dI_\nu(\tau_\nu, \mu)}{d\tau_\nu} = I_\nu(\tau_\nu, \mu) - S_\nu(\tau_\nu)$$

$$S_\nu(\tau) = \frac{k_\nu(\tau) B_\nu(T_e) + \sigma_\nu(\tau) J_\nu(\tau)}{k_\nu(\tau) + \sigma_\nu(\tau)}$$

Интегрально-
дифференциальное
уравнение

τ всюду функция частоты

При $\sigma_\nu=0$ $S_\nu=B_\nu$

Граничные условия

на поверхности: $\tau_v = 0, I_v(0, \mu) = I_v^-(\mu) = 0 \quad -1 \leq \mu \leq 0$
 $= I_v^-(\mu)$ облучаемая атм.

нижняя граница: $\tau_v = \tau_0, I_v(\tau_0, \mu) = I_v^+(\mu) \quad 0 \leq \mu \leq 1$

$\tau_v = \infty, \lim_{\mu} I_v(\tau_v, \mu) \exp(-\frac{\tau_v}{\mu}) = 0$ когда $\tau_v \rightarrow \infty$

Формальное решение:

$$I_\nu(\tau_1, \mu) = I_\nu(\tau_2, \mu) \exp(-\frac{\tau_2 - \tau_1}{\mu}) + \frac{1}{\mu} \int_{\tau_1}^{\tau_2} S_\nu(t) \exp(-\frac{t - \tau_1}{\mu}) dt$$

Интенсивность и поток выходящего излучения:

$$\tau_1 = 0, \tau_2 = \infty.$$

$$I_\nu(0, \mu) = \frac{1}{\mu} \int_0^\infty S_\nu(t) \exp\left(-\frac{t}{\mu}\right) dt$$

взвешенное среднее от
функции источников по лучу
зрения

$$F_\nu(0) = 2\pi \int_0^\infty S_\nu(t) E_2(t) dt$$

$$E_2(t) = \int_0^\infty x^{-2} e^{-tx} dx$$

интегральная показательная
функция 2-го порядка



Вес (вклад) слоя

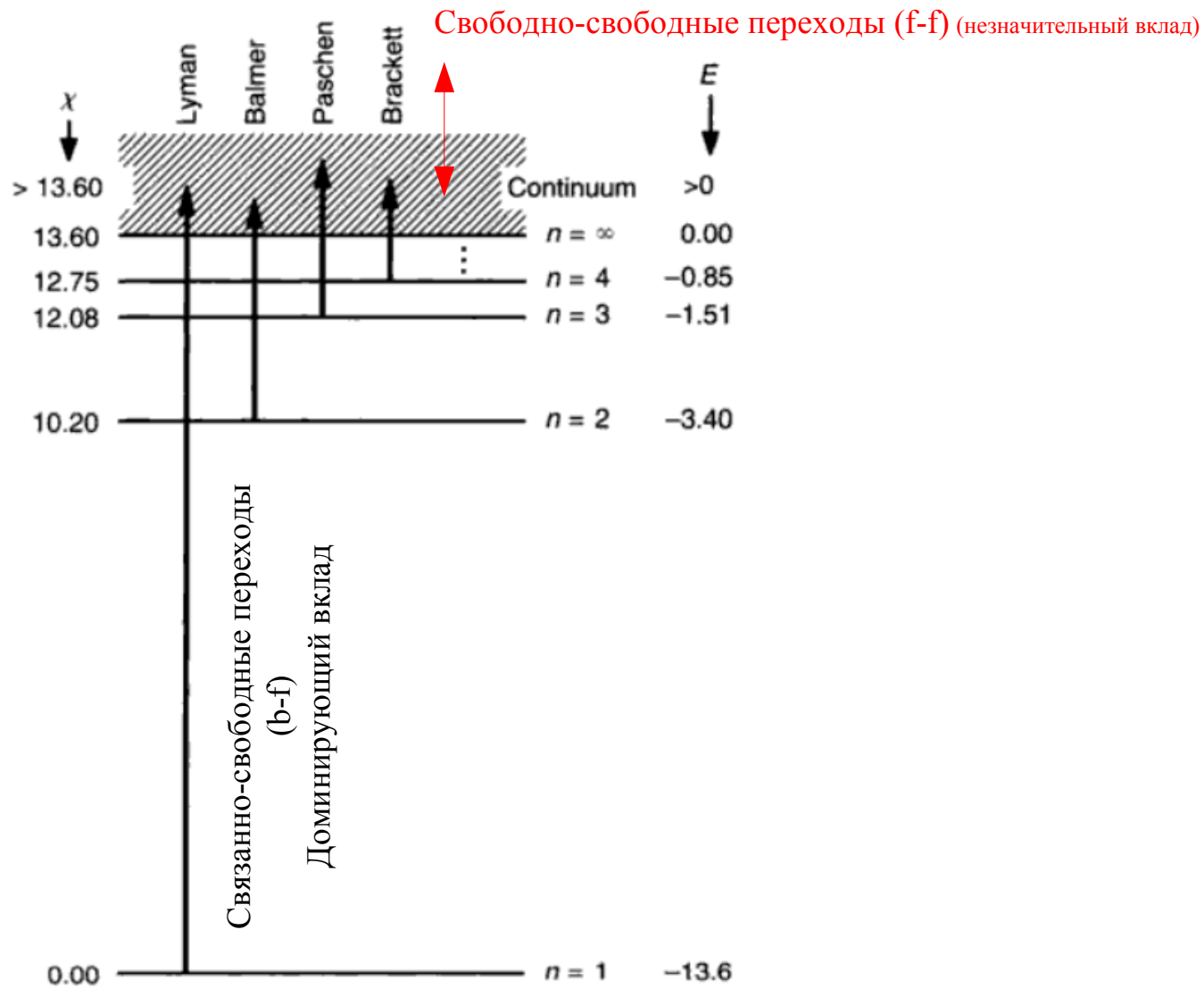
***Источники поглощения в
звездных атмосферах***



Механизмы непрерывного поглощения в атмосферах звезд:

- Связанно-свободное поглощение ($b-f$) или фотоионизация:
 - ▷ H, HeI, HeII, H⁻, H₂⁺, металлов;
- Свободно-свободное ($f-f$) поглощение:
 - ▷ H, He, H⁻, металлов
- Рассеяние:
 - ▷ Томсоновское (на электронах)
 - ▷ Рэлеевское (на атомах и молекулах)
 - ▷ Комптоновское (на электронах)
- Связанно-связанное поглощение ($b-b$) в линиях или радиационные переходы
 - ▷ Атомы нейтральные и ионы
 - ▷ Молекулы

Нейтральный водород



Нейтральный водород

Связанно-свободные переходы (b-f)

$$\alpha_{bf}(H) = 1,0449 \times 10^{-26} g_{bf} \frac{\lambda^3}{n^5} \text{ cm}^2 \text{ на атом H}$$

g — фактор Гаунта

$$\frac{N_n}{N} = \frac{2n^2}{2} e^{-\chi/kT}$$

$$\kappa_{bf}(H) = 1,0449 \times 10^{-26} \sum_1^{\infty} \frac{\lambda^3}{n^3} g_{bf} e^{-\chi/kT}$$

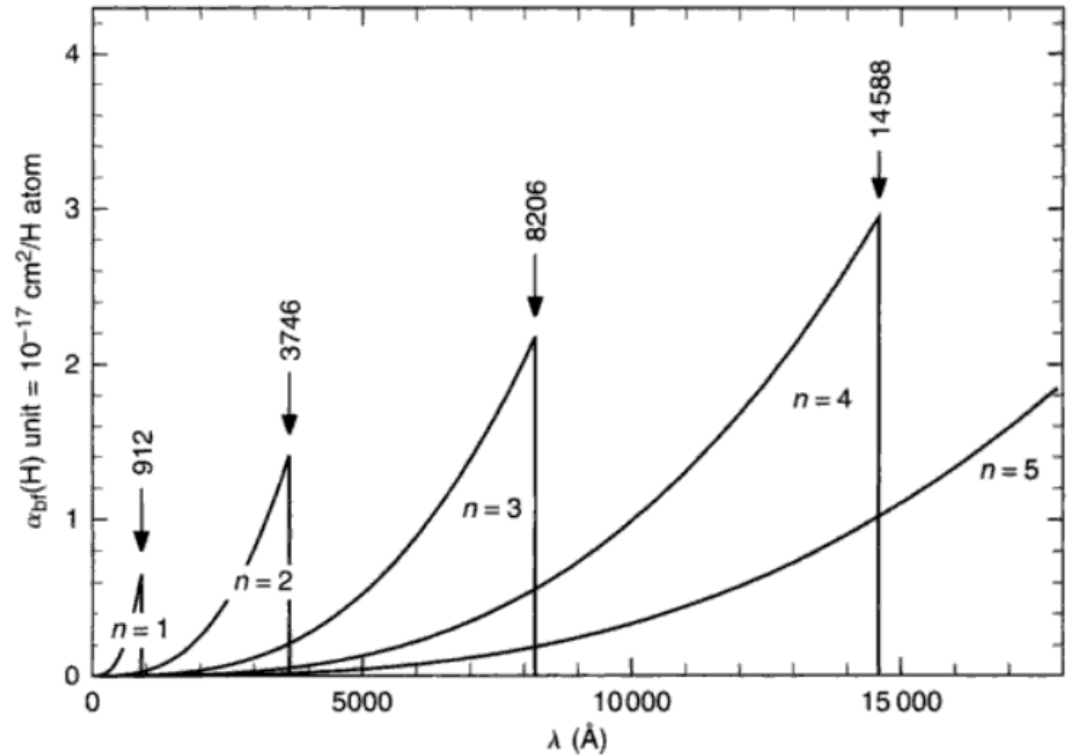
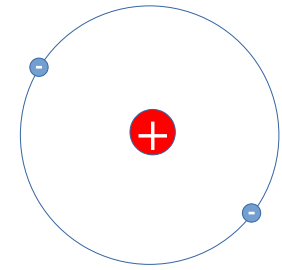


Fig. 8.2. The bound-free absorption coefficient for hydrogen increases with n .

Отрицательный ион водорода

Нужны свободные
электроны



$$\chi = 0.754 \text{ эВ}$$

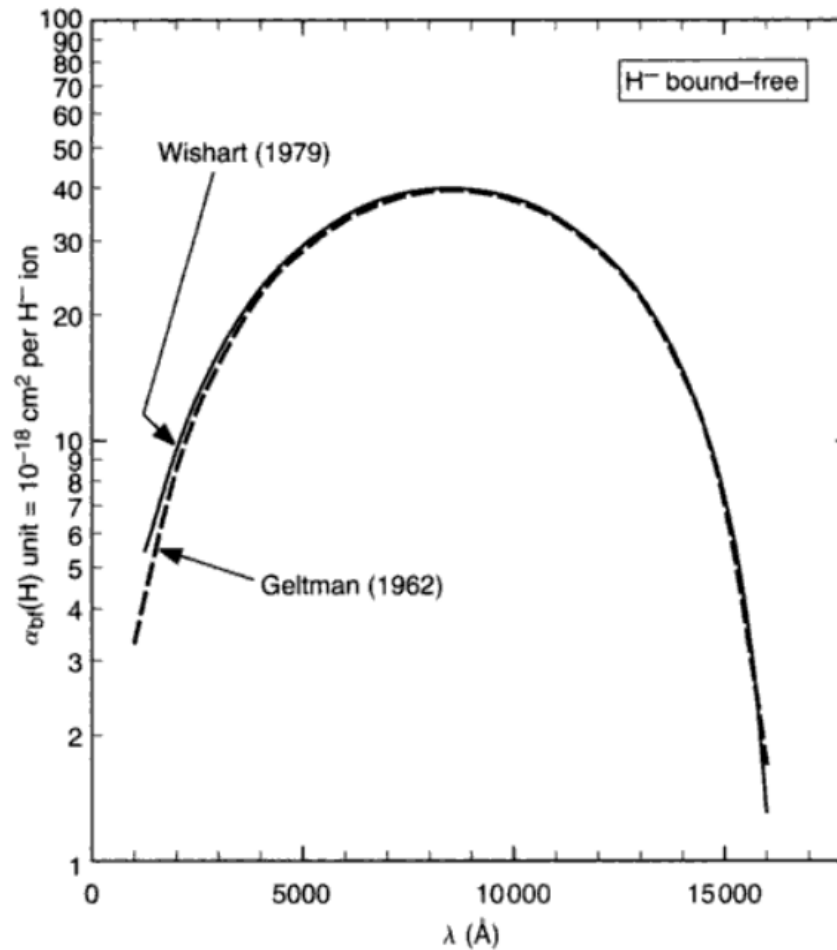
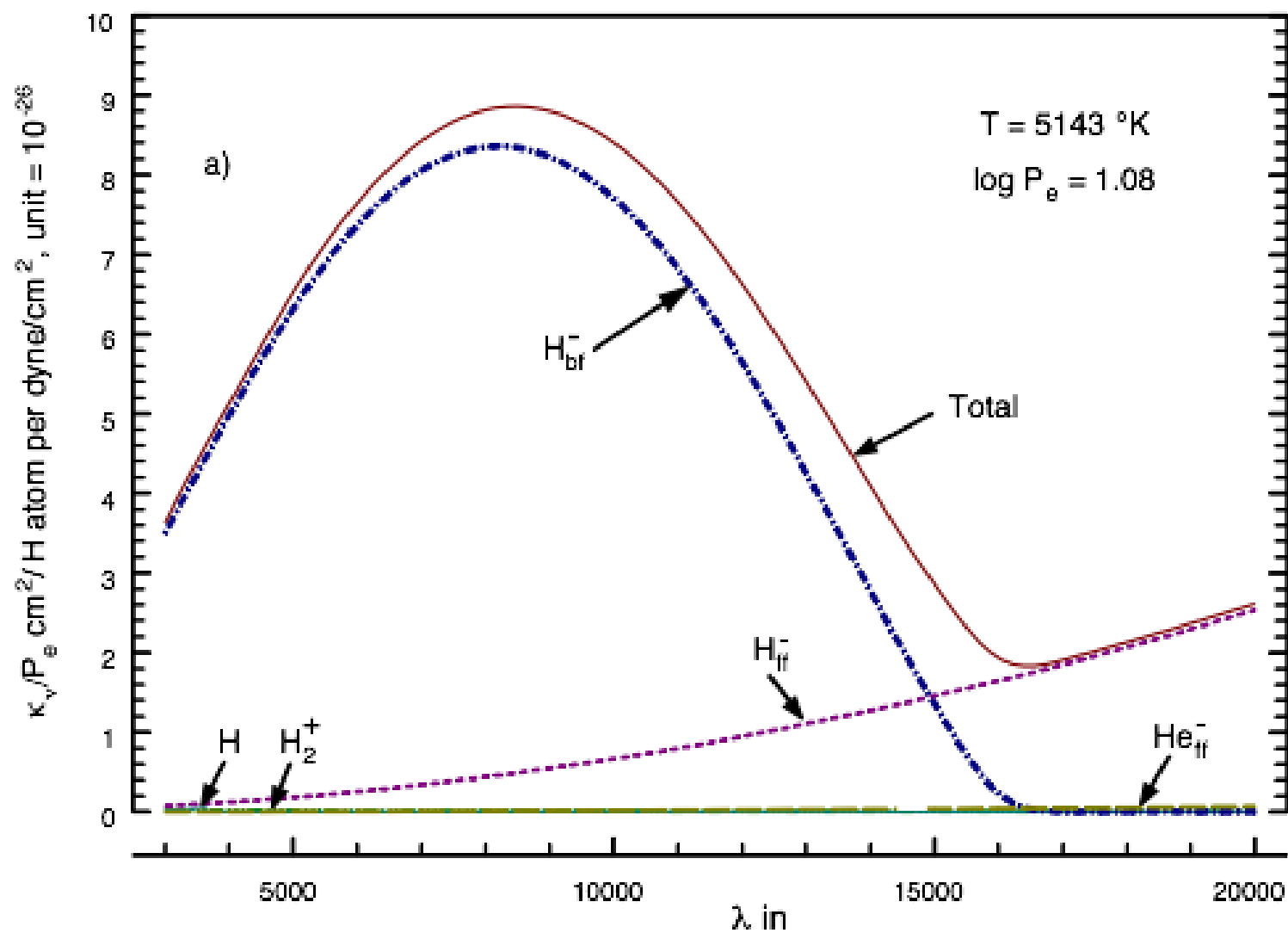
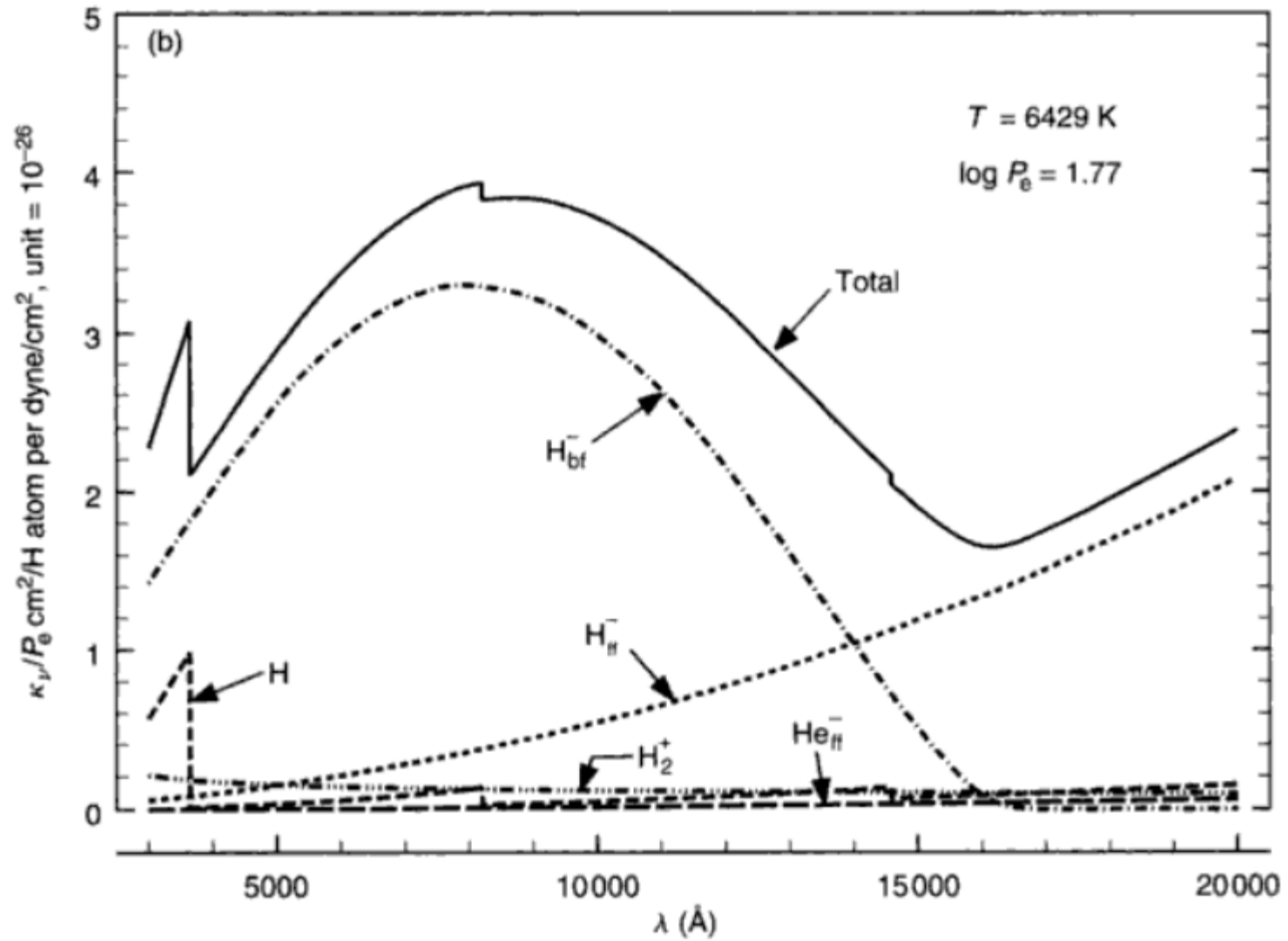


Fig. 8.3. The absorption coefficient of the negative hydrogen ion shows a maximum near 8500 Å. Two calculations are compared.

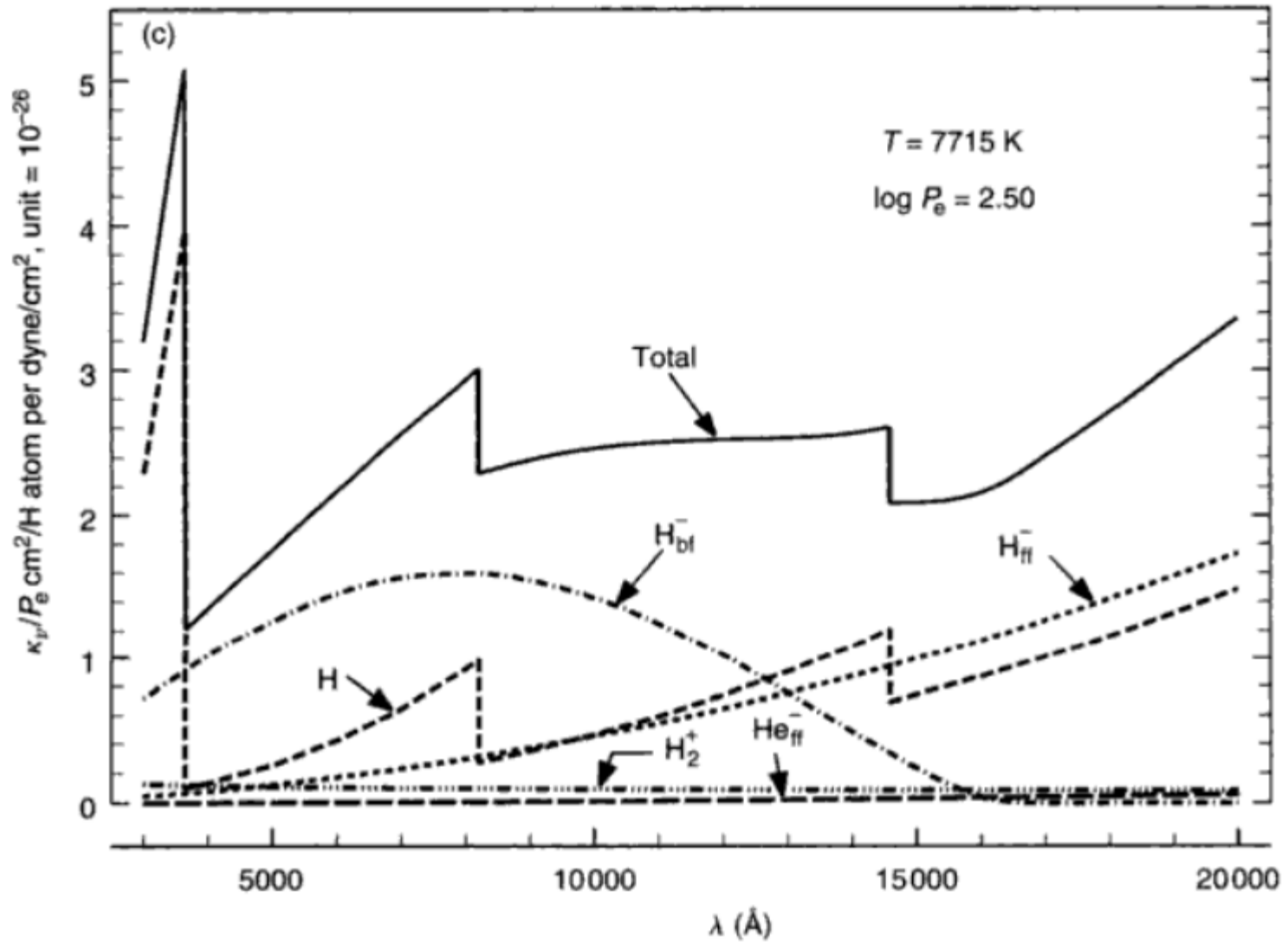
Водород



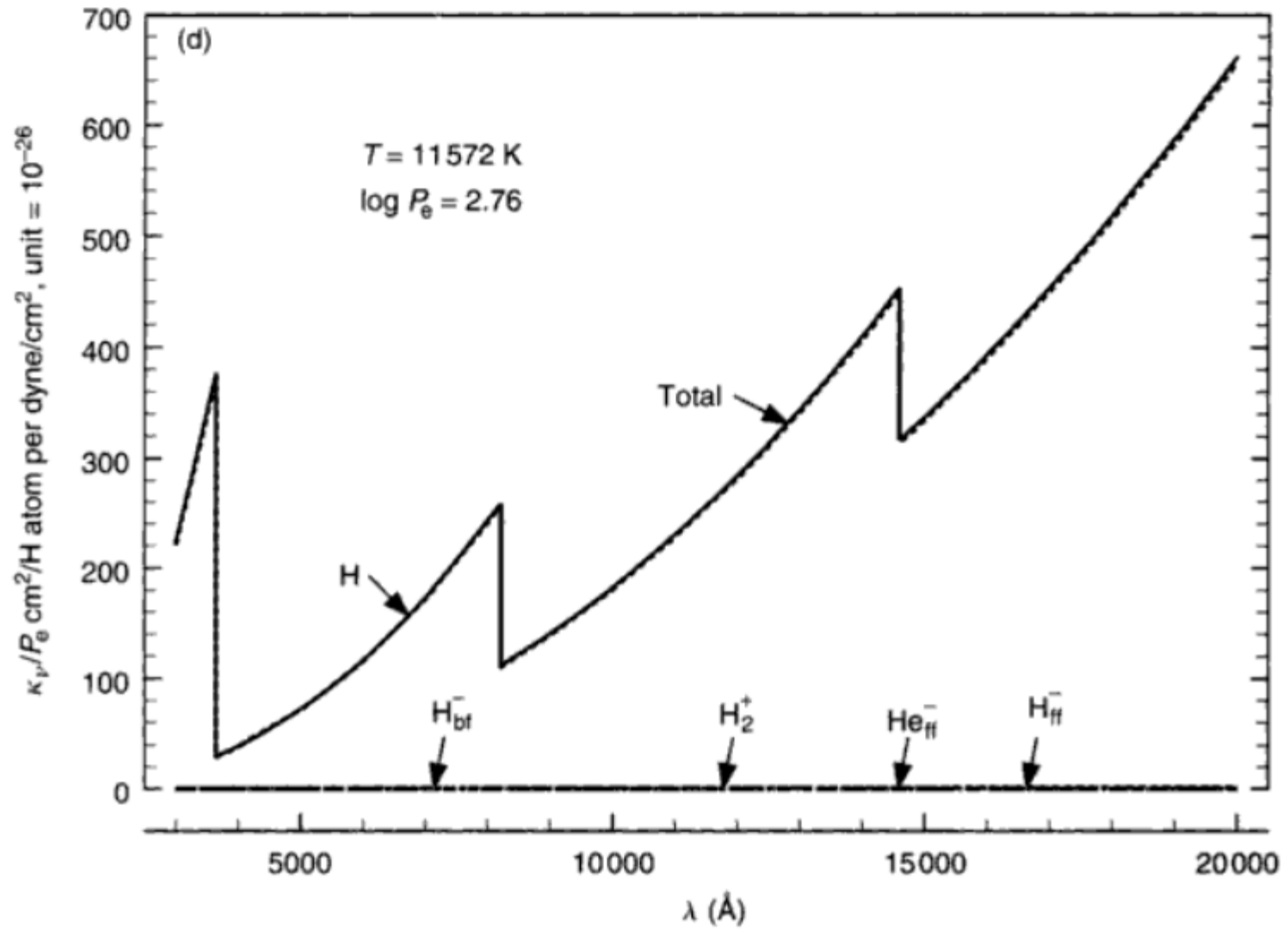
Водород



Водород

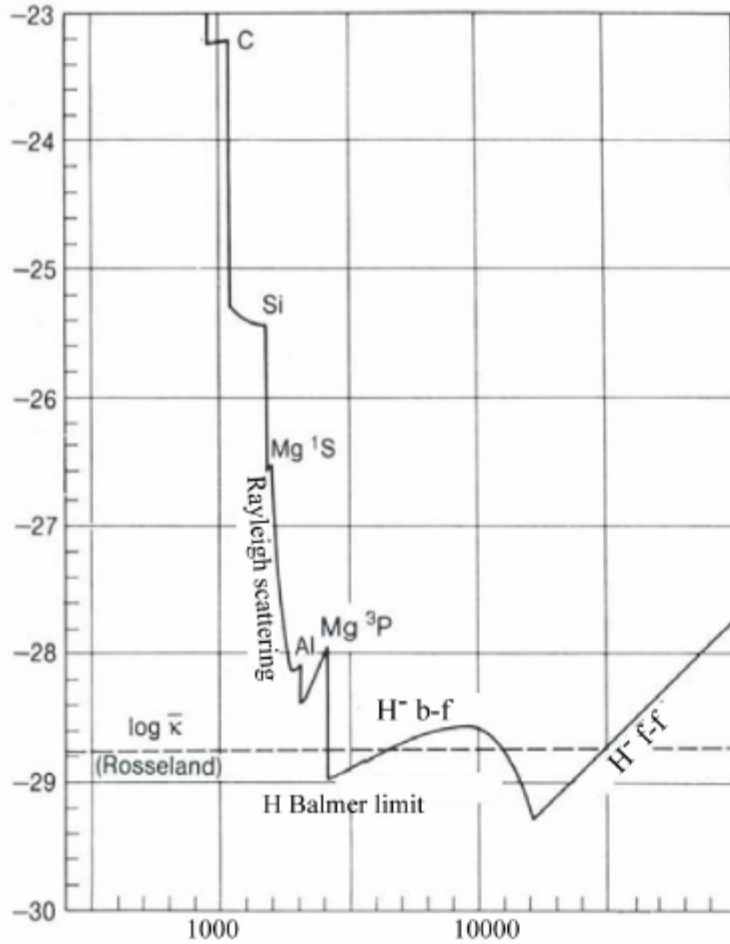


Водород

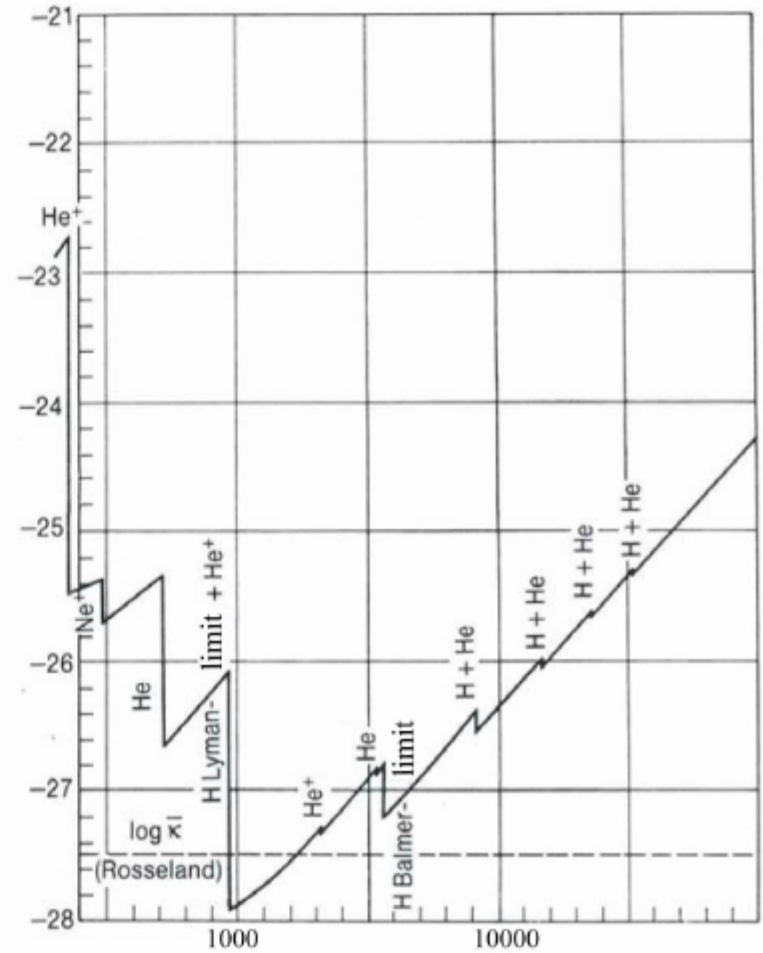


Металлы

Unsoeld, 68



$T_{\text{eff}} = 5040 \text{ K}$



B0: $T_{\text{eff}} = 28,000 \text{ K}$

Томпсоновское рассеяние

Не зависит от длины волны

Неизотропность ликвидируется многократным рассеянием

Важно при большой электронной концентрации

В общем случае:

$$\kappa_{sc} = \sigma_e n_e$$

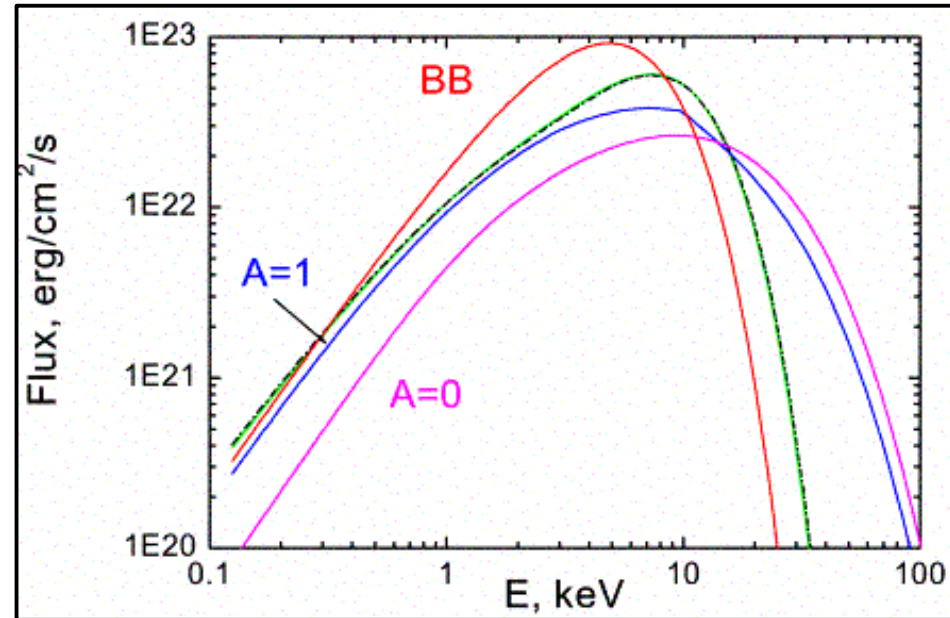
$$\sigma_e = 6,655 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$$

Комптоновское рассеяние в атмосферах нейтронных звезд

$$\lambda' - \lambda = \lambda_k (1 - \cos \theta),$$

$$\lambda_k = \frac{h}{m_e c}$$

Комптоновская длина волны



Рэлеевское рассеяние

Важно в холодных звездах

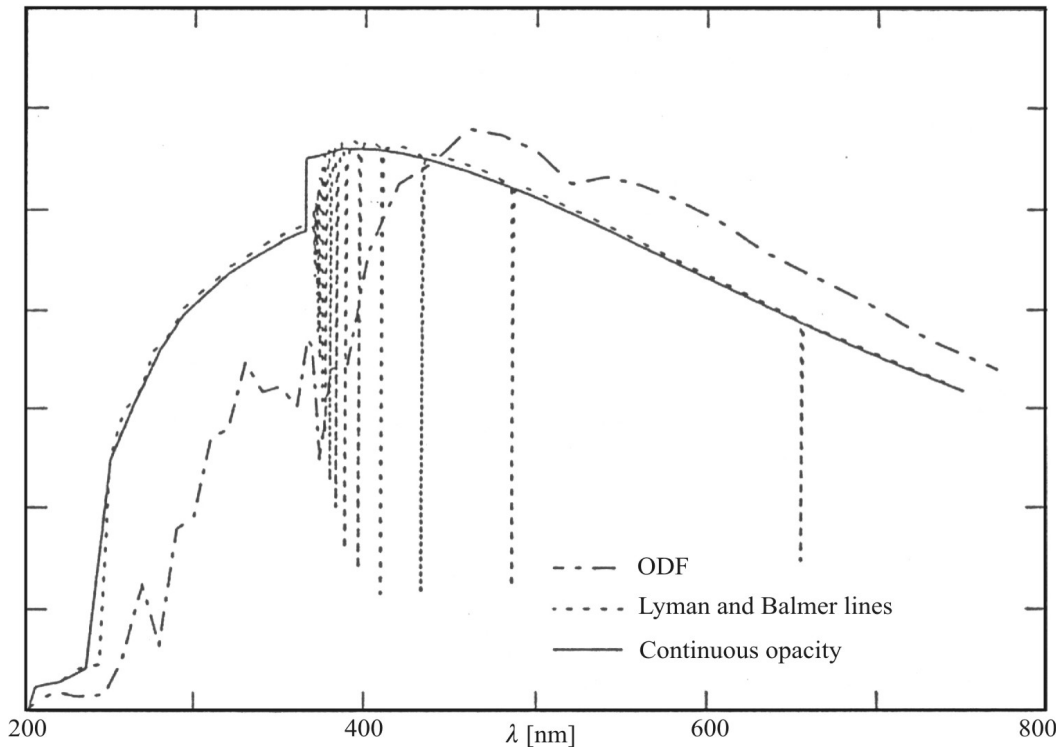
$$\kappa_R = \sigma_R (N_{atom} + N_{mol})$$

$$\sigma_R \sim \lambda^{-4}$$

Поглощение в линиях.

- *Блокировка излучения* в фотометрических полосах ($50 \text{ \AA}$):

с центром	для	$T_{\text{eff}} = 5000 \text{ K}$	8000 K
3646 $\text{\AA}$		44%	15%
4032 $\text{\AA}$		30%	10%
5840 $\text{\AA}$		3%	4%



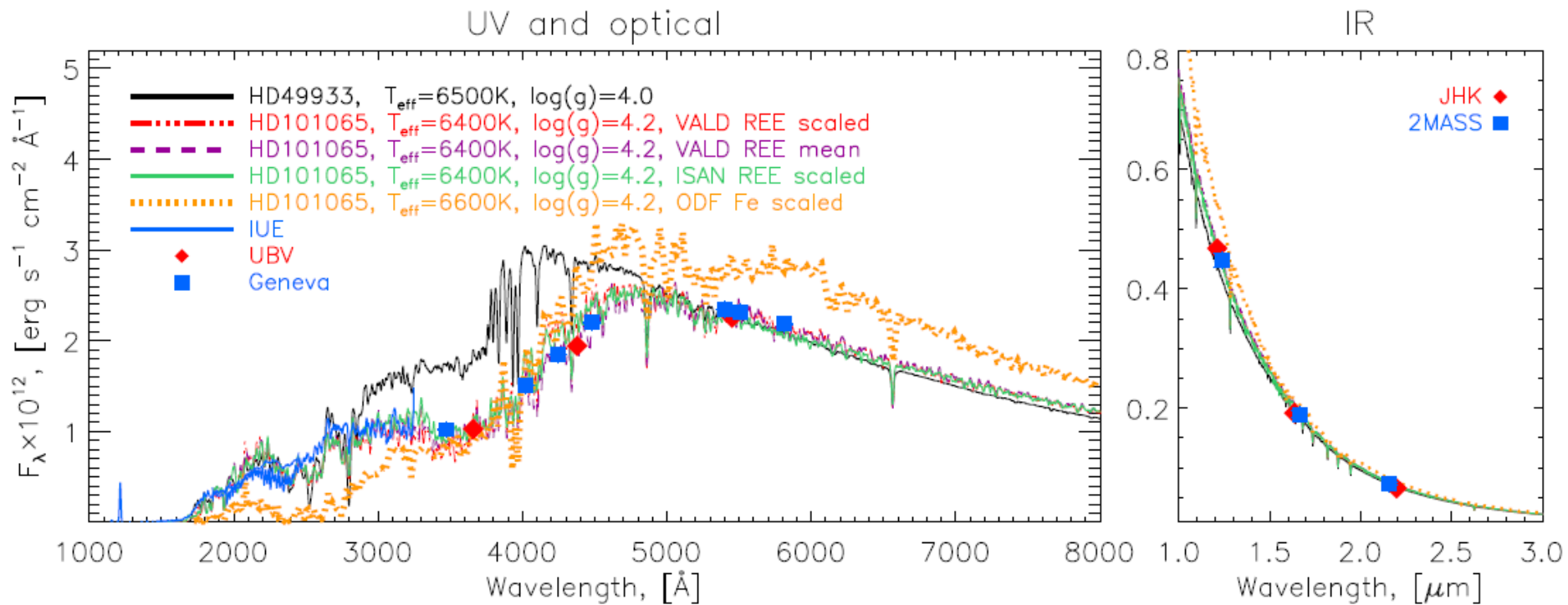
– *Перераспределение излучения* из у-ф в видимый и и-к диапазон

Теоретические спектры Солнца без учета линий (сплошная), с учетом линий H (пунктир), с учетом 57 млн. линий.

Поглощение в линиях.

Modelling atmospheric structure in chemically peculiar stars

HD 101065 – Przybylski' star



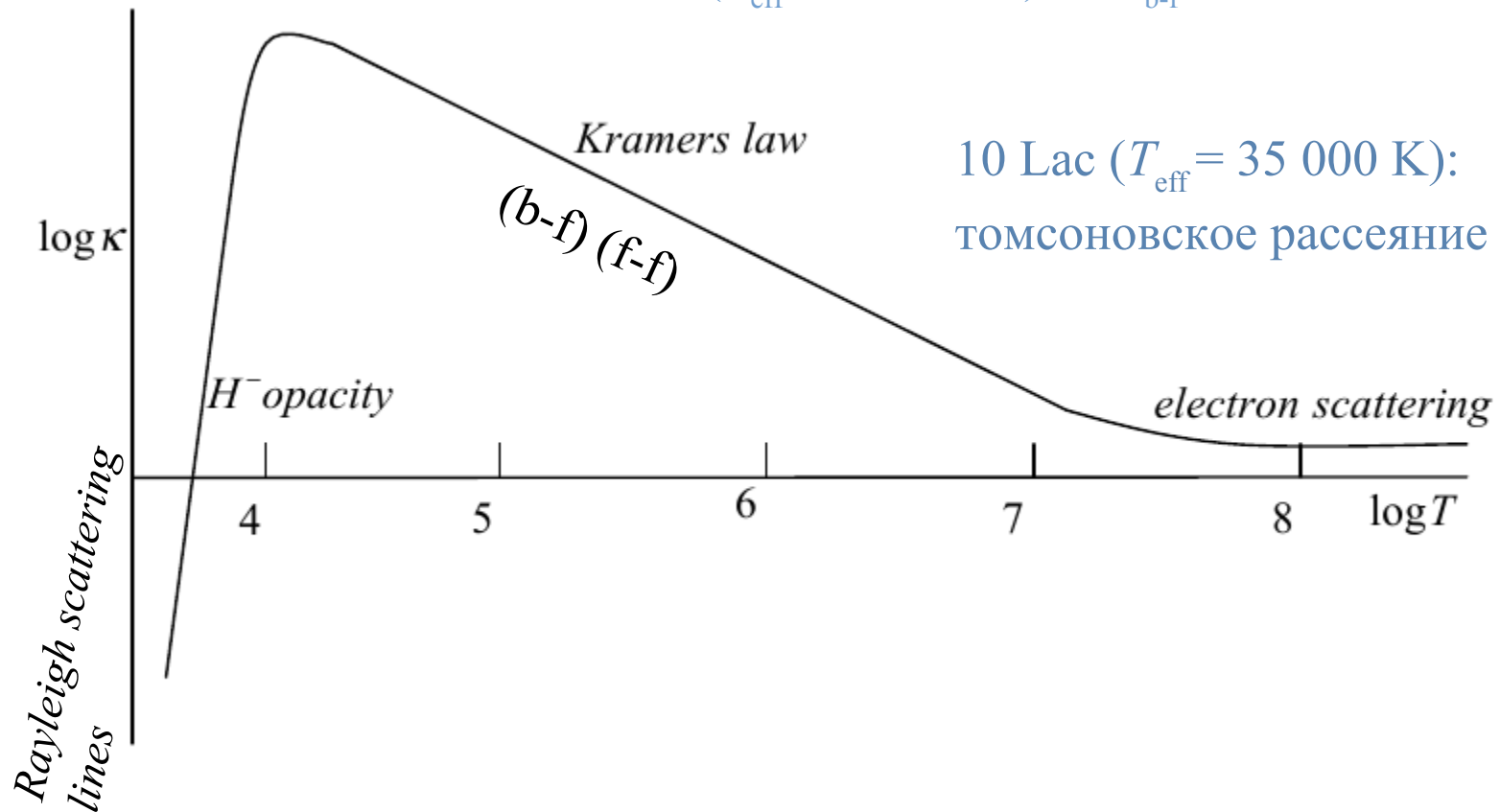
From Shulyak et al. A&A 520, 88, 2010

Доминирующие источники непрозрачности $\lambda = 3000 - 10000 \text{ \AA}$

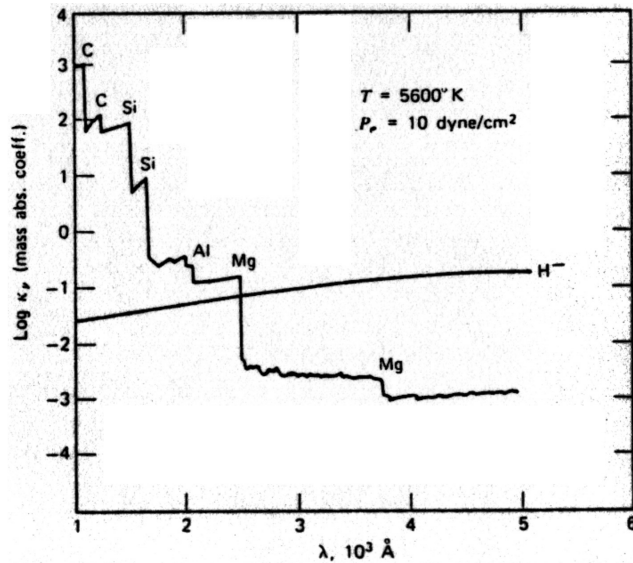
Солнце ($T_{\text{eff}} = 5780 \text{ K}$): H^-

Вега ($T_{\text{eff}} = 10\,000 \text{ K}$): $\text{H}_{\text{b-f}}$

10 Lac ($T_{\text{eff}} = 35\,000 \text{ K}$):
томсоновское рассеяние и $\text{H}_{\text{b-f}}$

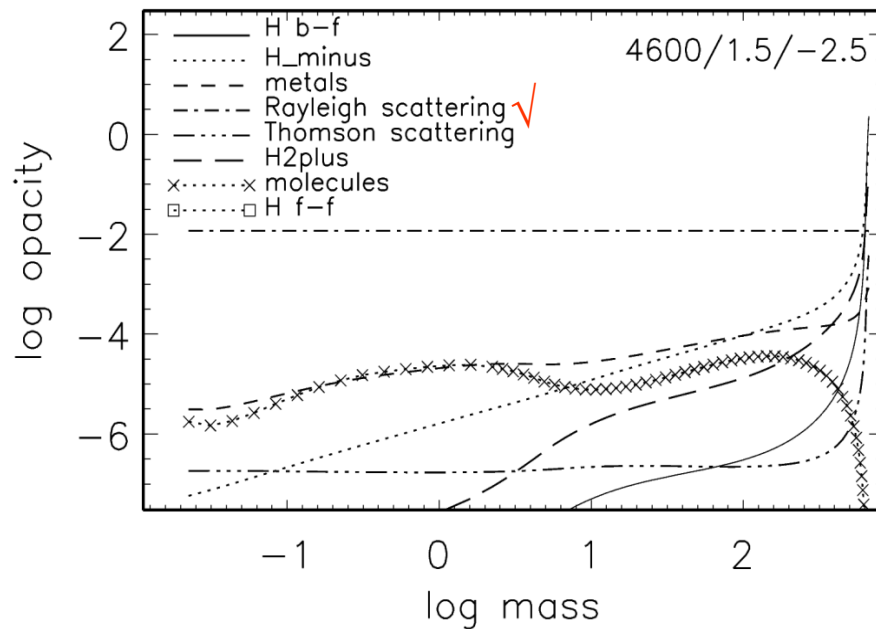


Доминирующие источники непрозрачности $\lambda_{\text{thr}} < 3000 \text{ \AA}$



Солнце:

b-f поглощение металлов



HD122563, $T=4600\text{K}$

$\lg g=1.5$ $[\text{Fe}/\text{H}]=-2.5$

Рэлеевское рассеяние

Серая атмосфера



Серая атмосфера – атмосфера, в которой коэффициент поглощения не зависит от частоты.

$$\chi_\nu = \chi, \quad \tau_\nu = \tau$$

Введем интегральные величины: $I(\tau), J(\tau), H, S(\tau)$

$$I(\tau) = \int_0^\infty I_\nu(\tau) d\nu$$

Уравнение лучистого равновесия:

$$\int_0^\infty \chi J_\nu d\nu = \int_0^\infty \chi S_\nu d\nu \quad \longrightarrow \quad J(\tau) = S(\tau)$$

Уравнение переноса:

$$\mu \frac{dI(\tau, \mu)}{d\tau} = I(\tau, \mu) - S(\tau) = I(\tau, \mu) - J(\tau)$$

$$\begin{array}{l|l} 1\text{-й} & \\ \text{момент} & \frac{d}{d\tau} H(\tau) = J(\tau) - S(\tau) = 0 \end{array}$$

$$H = \text{const} = \frac{\sigma T_{\text{eff}}^4}{4\pi} \quad \text{Сохранение потока}$$

$$\begin{array}{l|l} 2\text{-й} & \\ \text{момент} & \frac{d}{d\tau} K(\tau) = H \end{array}$$

$$K(\bar{\tau}) = H\bar{\tau} + \text{constant}$$

Решение в приближении Эддингтона

Входящее излучение, $\mu < 0$: $I(\tau, \mu) = I_{in}(\tau)$

Выходящее излучение, $\mu \geq 0$: $I(\tau, \mu) = I_{out}(\tau)$

$$J(\tau) = \frac{1}{2} [I_{out}(\tau) + I_{in}(\tau)]; \quad H(\tau) = \frac{1}{4} [I_{out}(\tau) - I_{in}(\tau)];$$

$$K(\tau) = \frac{1}{6} [I_{out}(\tau) + I_{in}(\tau)] \rightarrow K(\tau) = \frac{1}{3} J(\tau)$$

Из 1-ого момента уравнения переноса: $K(\tau) = H\tau + const$

$$\tau = 0: J(0) = \frac{1}{2} I_{out}(0); \quad H(0) = \frac{1}{4} I_{out}(0); \quad K(0) = \frac{1}{6} I_{out}(0)$$

$$const = K(0) = \frac{2}{3} H$$

$$S(\tau) = 3 K(\tau) = 3H(\tau + \frac{2}{3})$$

Точное решение:

$$S(\tau) = 3H(\tau + q(\tau)),$$

$$q(0) = 1/\sqrt{3}, \quad q(\infty) = 0.710.$$

Функция источников —

линейная функция оптической глубины.

Диффузионное приближение – асимптотическое решение уравнения переноса при $\tau \gg 1$.

- $I_v \rightarrow$ изотропное поле,
- $S_v(\tau) \rightarrow B_v(T)$.

$$S_v(t_v) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{d^n B_v}{d\tau_v^n} \frac{(t_v - \tau_v)^n}{n!}$$

$$I_v(\tau_v, \mu) = B_v(\tau_v) + \mu \frac{dB_v}{d\tau_v} + \mu^2 \frac{d^2 B_v}{d\tau_v^2} + \dots$$

$$J_v(\tau_v) = B_v(\tau_v) + \frac{1}{3} \frac{d^2 B_v}{d\tau_v^2} + \dots$$

$$H_v(\tau_v) = \frac{1}{3} \frac{dB_v}{d\tau_v} + \dots$$

$$K_v(\tau_v) = \frac{1}{3} B_v(\tau_v) + \frac{1}{5} \frac{d^2 B_v}{d\tau_v^2} + \dots$$

$$H_v(\tau_v) = \frac{1}{3} \frac{dB_v}{dT} \frac{dT}{d\tau_v} = -\frac{1}{3\chi_v} \frac{dB_v}{dT} \frac{dT}{dz}$$

Величина потока зависит от градиента температуры.

Используем предположение ЛТР: $S_v(\tau) = B_v(T)$,

$$S(\tau) = B(T) = \sigma T^4/\pi,$$

$$\sigma T^4/\pi = 3\sigma T_{eff}^4/4\pi (\tau + 2/3)$$

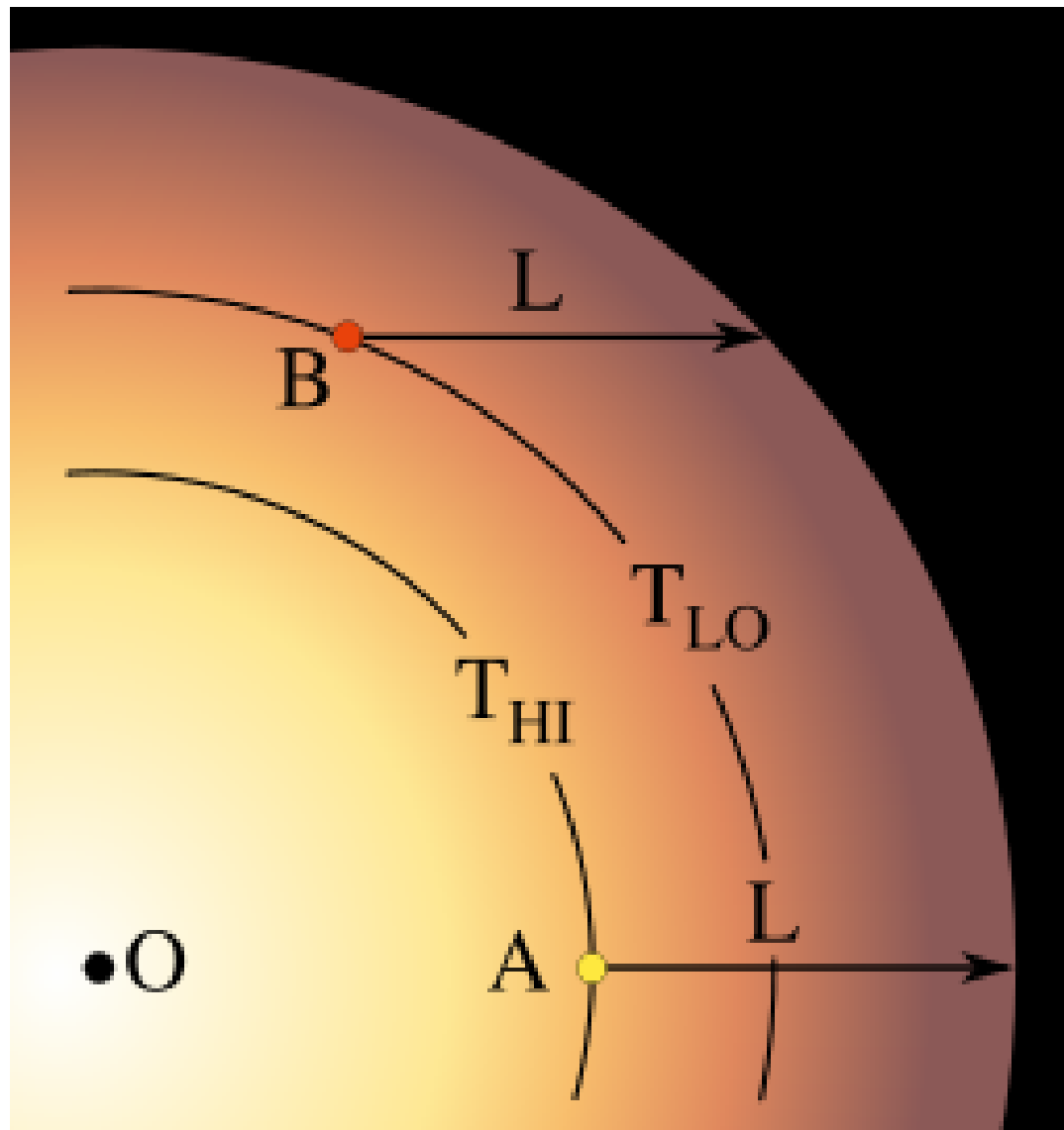
$$T = T_{eff} (3/4 \tau + 1/2)^{1/4}$$

Следствия:

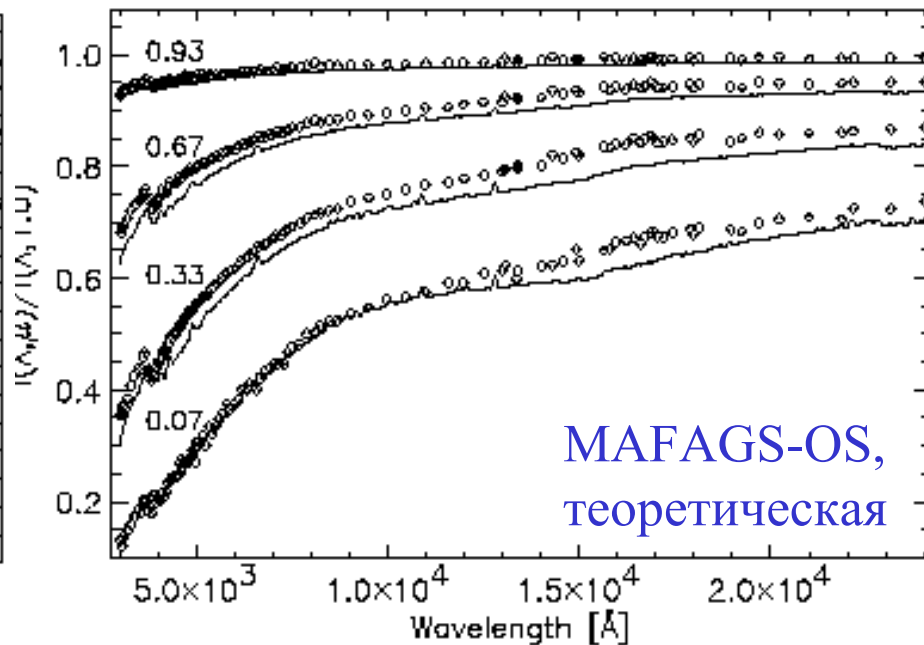
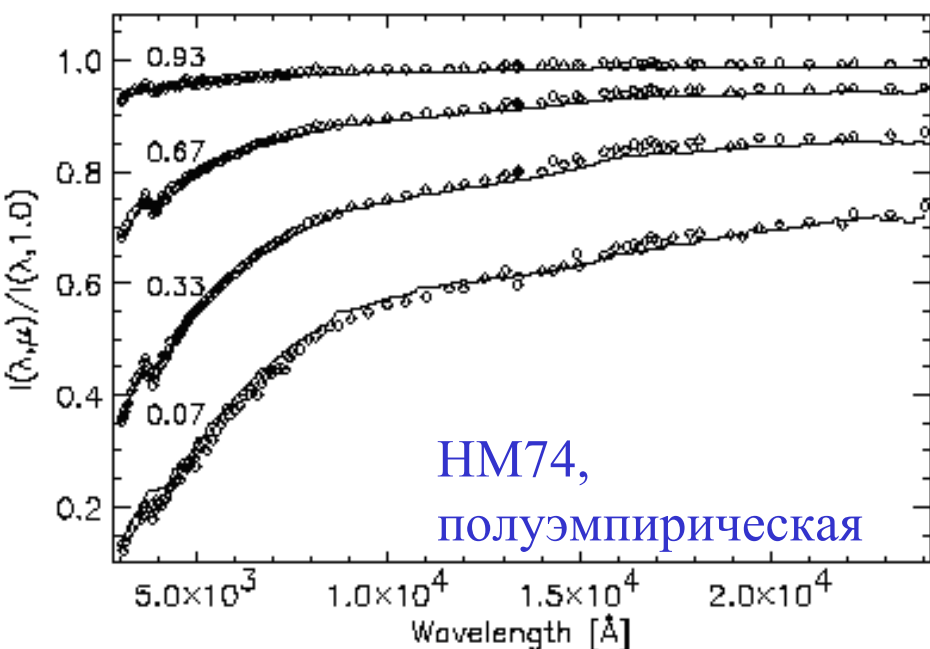
- $T = T_{eff}$ на $\tau = 2/3$,
- $S(\tau = 2/3) = 4 H = F$

Поток определяется функцией источников на глубине $\tau = 2/3$.

Потемнение диска к краю как индикатор
распределения температуры



Солнце: потемнение диска к краю, $I(\lambda, \mu)/I(\lambda, \mu=1)$



Наблюдения: *Pierce & Slaughter (1977); Pierce et al. (1977)*

Расчеты: *Grupp (2004)*

Теоретические 1D модели *не воспроизводят*

- потемнение диска к краю на разных длинах волн;
- профили линий в спектрах интенсивности

Росселандово среднее

Определим средний коэффициент поглощения так, чтобы 1-й момент уравнения переноса имел одинаковую форму для несерой и серой атмосфер.

$$\frac{dK_v}{dz} = -\chi_v H_v$$

$$\frac{dK}{dz} = -\chi H$$

$$-\int_0^{\infty} \frac{1}{\chi_v} \frac{dK_v}{dz} dv = H$$

$$\frac{1}{\bar{\chi}} = \frac{\int_0^{\infty} \frac{1}{\chi_v} \frac{dK_v}{dz} dv}{\int_0^{\infty} \frac{dK_v}{dz} dv}$$

В глубоких слоях,
 $K_v(\tau) \approx B_v(T) / 3$

$$\frac{dK_v}{dz} = \frac{1}{3} \frac{dB_v}{dT} \frac{dT}{dz}$$

$$\frac{1}{\bar{\chi}_{Ross}} = \frac{\int_0^{\infty} \frac{1}{\chi_v} \frac{dB_v}{dT} dv}{\int_0^{\infty} \frac{dB_v}{dT} dv} = \frac{\pi}{4\sigma_R T^3} \int_0^{\infty} \frac{1}{\chi_v} \frac{dB_v}{dT} dv \quad \begin{array}{l} \text{Росселандово} \\ \text{среднее} \end{array}$$

В глубоких слоях $(\bar{\tau}_{Ross} > 1)$

можно использовать решение для серой атмосферы:

$$T^4 = \frac{3}{4} T_{eff}^4 [\bar{\tau}_{Ross} + q(\bar{\tau}_{Ross})]$$

$T_{grey}(\bar{\tau}_{Ross})$

- Используется в качестве начального распределения при расчете несерой атмосферы.
- Используют при моделировании внутреннего строения звезд.

*Расчеты моделей
звездных атмосфер*

Модели атмосфер



Модель, это – распределение T , P , N_e как функции глубины

- геометрической z
- лучевой массовой концентрации m , $dm = -\rho dz$
- оптической толщины τ

Параметры модели:

$T_{\text{эфф}}$, g , химический состав (часто $[M/H]$)

$$[M/H] = \log (M/H) - \log (M/H)_{\text{sun}}$$

Диапазон моделирования:

$$T_{\text{эфф}} = 900 - 500\,000 \text{ K}$$

$$\log g = 0 - 8$$

$$[M/H] = 0.5 - (-5)$$

$$\log g > 4 \log T_{\text{эфф}} - 15.12$$

Для стабильной атмосферы:

$$T_{\text{eff}}, \log g, [\text{Fe}/\text{H}]$$

Уравнения состояния и
гидростатического
равновесия

Серое приближение



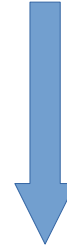
$$P = \frac{\rho k T}{\mu m_H}$$

$$\frac{dP}{dx} = -g\rho(x)$$

$$T(x), P(x), \rho(x), \kappa_\nu(x), B_\nu(T)$$

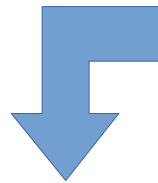
$$\mu \frac{dI_\nu}{dx} = -(\kappa_\nu + \sigma_\nu)(I_\nu - S_\nu)$$

Уравнение переноса



$$J_\nu(x), H_\nu(x)$$

проверка



$$\int_0^\infty \kappa_\nu [J_\nu - B_\nu(T)] d\nu = 0$$

$$4\pi \int_0^\infty H_\nu d\nu = \sigma T_{\text{eff}}^4$$



$$\Delta T(x), \Delta \rho(x), \Delta \kappa(x) \dots$$

no
 $\Delta < \varepsilon$
yes

Game over

Модели атмосфер ATLAS9

<http://wwwuser.oats.inaf.it/castelli/grids.html>

Grids of ATLAS9 model atmospheres and ATLAS9 fluxes

[paper.ps](#) published on CD-ROM in IAU Symp. No 210 , Modelling of stellar atmospheres, poster A20

C125=mixing length parameter $l/H=1.25$

C05=mixing length parameter $l/H=0.5$

[asunc125odfnew.dat](#)=asunodfnew.dat-ATLAS9 solar model
(Grevesse & Sauval (1998) abundances, new ODF's, no overshooting)

[fsunc125odfnew.dat](#)=fsunodfnew.dat-ATLAS9 solar flux from sunc125odfnew.dat

ap05k2c125odfnew	[+0.5],vturb=2.0 km/s	models $l/H=1.25$
fp05k2c125odfnew	[+0.5],vturb=2.0 km/s	fluxes $l/H=1.25$

ap05ak2c125odfnew	[+0.5a],vturb=2.0 km/s	alpha +0.4 enhanced models
fp05ak2c125odfnew	[+0.5a],vturb=2.0 km/s	alpha +0.4 enhanced fluxes

ap05k2c125Yp01odfnew	[+0.5],vturb=2.0 km/s	A few He enhanced models, $DY=+0.1$
fp05k2c125Yp01odfnew	[+0.5],vturb=2.0 km/s	A few He enhanced fluxes, $DY=+0.1$

ap05k2c125Yp02odfnew	[+0.5],vturb=2.0 km/s	A few He enhanced models, $DY=+0.2$
fp05k2c125Yp02odfnew	[+0.5],vturb=2.0 km/s	A few He enhanced fluxes, $DY=+0.2$

ap02k2c125odfnew	[+0.2],vturb=2.0 km/s	models $l/H=1.25$
fp02k2c125odfnew	[+0.2],vturb=2.0 km/s	fluxes $l/H=1.25$

ap02ak2c125odfnew	[+0.2a],vturb=2.0 km/s	alpha +0.4 enhanced models
fp02ak2c125odfnew	[+0.2a],vturb=2.0 km/s	alpha +0.4 enhanced fluxes

TEFF 5777. GRAVITY 4.44000 LTE

TITLE 5777 4.44 p00

OPACITY IFOP 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0

CONVECTION ON 1.25 TURBULENCE OFF 0.00 0.00 0.00 0.00

ABUNDANCE SCALE 1.00000 ABUNDANCE CHANGE 1 0.91100 2 0.08900

ABUNDANCE CHANGE 3 -10.88 4 -10.89 5 -9.44 6 -3.48 7 -3.99 8 -3.11

ABUNDANCE CHANGE 9 -7.48 10 -3.95 11 -5.71 12 -4.46 13 -5.57 14 -4.49

ABUNDANCE CHANGE 15 -6.59 16 -4.83 17 -6.54 18 -5.48 19 -6.92 20 -5.68

ABUNDANCE CHANGE 21 -8.94 22 -7.05 23 -8.04 24 -6.37 25 -6.65 26 -4.37

ABUNDANCE CHANGE 27 -7.12 28 -5.79 29 -7.83 30 -7.44 31 -9.16 32 -8.63

ABUNDANCE CHANGE 33 -9.67 34 -8.69 35 -9.41 36 -8.81 37 -9.44 38 -9.14

ABUNDANCE CHANGE 39 -9.80 40 -9.44 41 -10.62 42 -10.12 43 -20.00 44 -10.20

ABUNDANCE CHANGE 45 -10.92 46 -10.35 47 -11.10 48 -10.18 49 -10.38 50 -10.04

ABUNDANCE CHANGE 51 -11.04 52 -9.80 53 -10.53 54 -9.81 55 -10.92 56 -9.91

ABUNDANCE CHANGE 57 -10.82 58 -10.49 59 -11.33 60 -10.54 61 -20.00 62 -11.04

ABUNDANCE CHANGE 63 -11.53 64 -10.92 65 -12.14 66 -10.94 67 -11.78 68 -11.11

ABUNDANCE CHANGE 69 -12.04 70 -10.96 71 -11.28 72 -11.16 73 -11.91 74 -10.93

ABUNDANCE CHANGE 75 -11.77 76 -10.59 77 -10.69 78 -10.24 79 -11.03 80 -10.95

ABUNDANCE CHANGE 81 -11.14 82 -10.19 83 -11.33 84 -20.00 85 -20.00 86 -20.00

ABUNDANCE CHANGE 87 -20.00 88 -20.00 89 -20.00 90 -11.92 91 -20.00 92 -12.51

ABUNDANCE CHANGE 93 -20.00 94 -20.00 95 -20.00 96 -20.00 97 -20.00 98 -20.00

ABUNDANCE CHANGE 99 -20.00

READ DECK6 72 RHOX,T,P,XNE,ABROSS,ACCRAD,VTURB

5.05106304E-04 3698.3 1.391E+01 2.757E+09 2.640E-04 7.800E-02 2.000E+05

6.61093683E-04 3721.6 1.821E+01 3.549E+09 3.062E-04 8.186E-02 2.000E+05

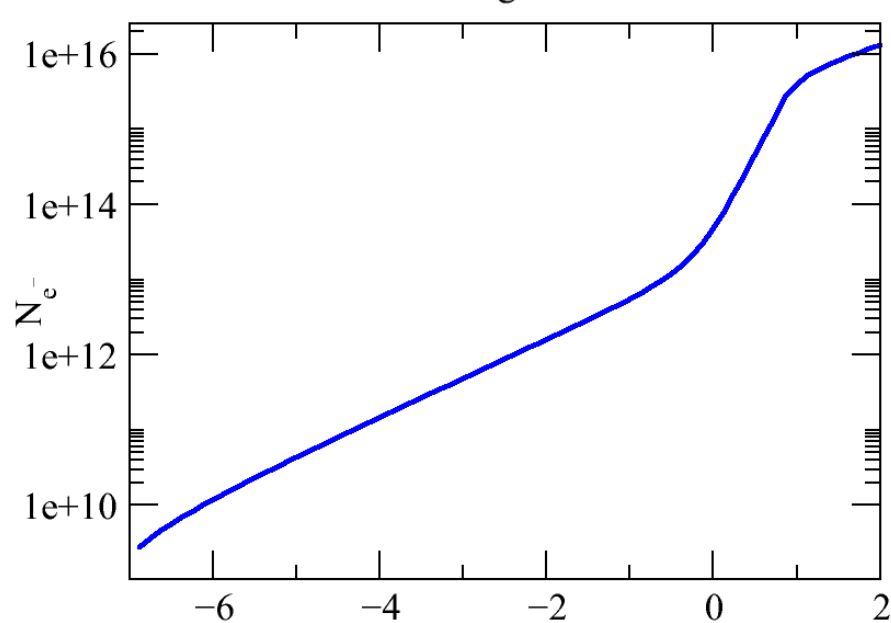
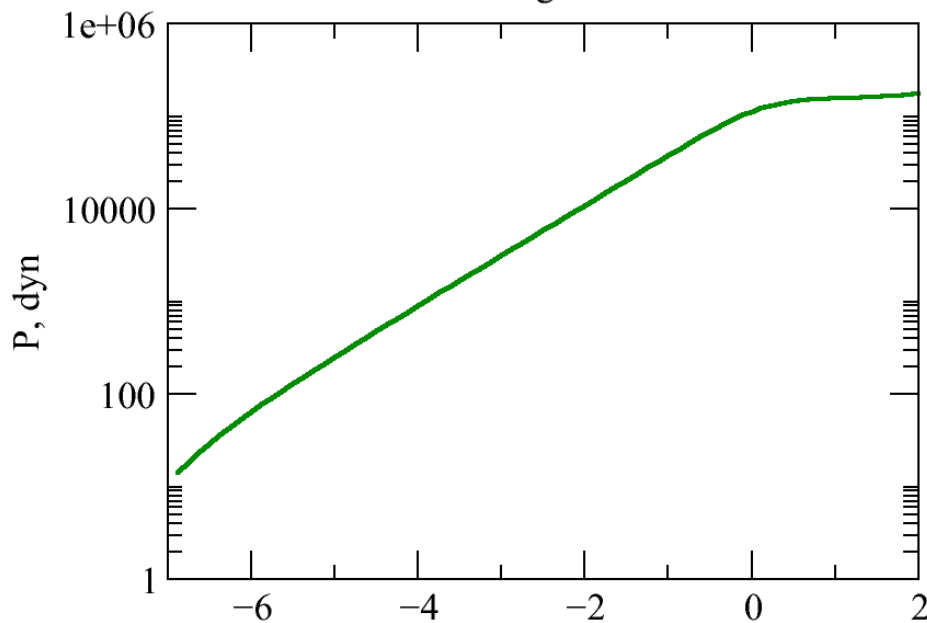
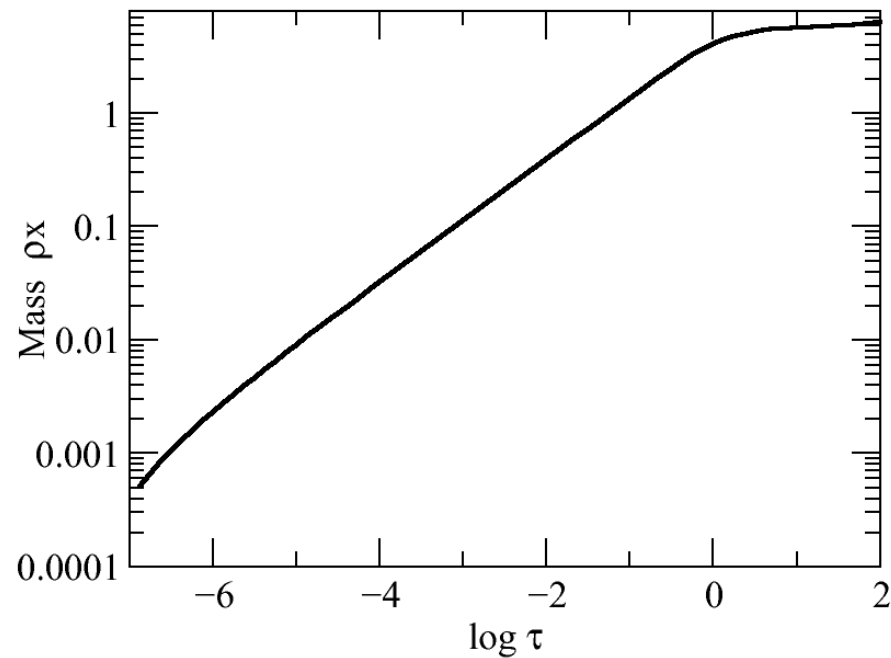
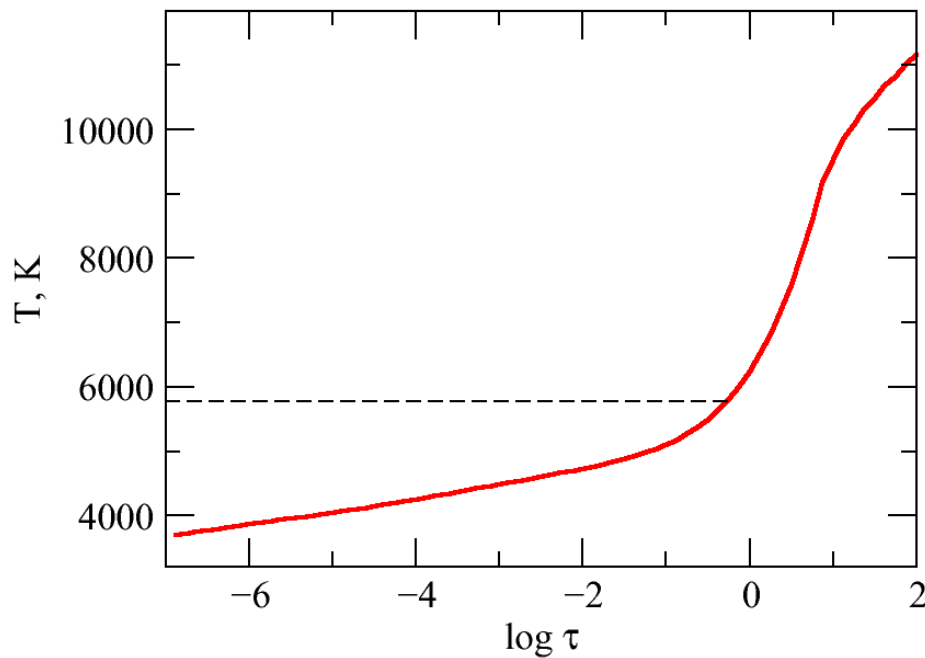
8.40988574E-04 3743.3 2.316E+01 4.449E+09 3.531E-04 8.448E-02 2.000E+05

1.04930367E-03 3766.5 2.890E+01 5.485E+09 4.062E-04 8.599E-02 2.000E+05

1.29115461E-03 3790.4 3.556E+01 6.679E+09 4.655E-04 8.617E-02 2.000E+05

1.57331246E-03 3814.7 4.333E+01 8.063E+09 5.309E-04 8.517E-02 2.000E+05

Модель солнечной атмосферы ATLAS9



Model Atmospheres in Radiative and Convective Scheme

<http://marcs.astro.uu.se/>



Username: ryabchik

Password: ●●●●●●●●

Log in

★ MARCS homepage

Documentation

Software

Create account

Contact us

Welcome to MARCS

This is a grid of one-dimensional, hydrostatic, plane-parallel and spherical LTE model atmospheres. These may be used together with atomic and molecular spectral line data and software for radiative transfer to generate synthetic stellar spectra.

The MARCS site contains about 52,000 stellar atmospheric models of spectral types F, G and K in 3 different formats and also flux sample files indicating rough surface fluxes. The data files are downloadable in limited amounts in the form of tar archives after registration. We ask users to cite the basic reference containing a description of the models:

[Gustafsson B., Edvardsson B., Eriksson K., Jørgensen U.G., Nordlund Å., Plez B. 2008, Astronomy & Astrophysics 486, 951.](#)

MARCS low-resolution sampled fluxes of F and G type models were compared to six observational data bases by [Edvardsson \(2008\)](#). Synthetic Strömgren *uvby-H β* colours of MARCS fluxes were compared to those observed for field- and globular cluster stars by [Önehag et al. \(2009\)](#).

News

June 2012: Four model subgrids added:

"alpha enhanced" models with $[\text{Fe}/\text{H}]=+1.00$.

"alpha enhanced" models with $[\text{Fe}/\text{H}]=+0.75$.

"alpha poor" models with $[\text{Fe}/\text{H}]=-2.50$.

"alpha negative" models with $[\text{Fe}/\text{H}]=+1.00$.

Другие сетки моделей:

LLmodels (Shulyak et al. 2004)

Grid is available at

<https://fys.kuleuven.be/ster/meetings/binary-2015/gssp-software-package>.

(4500-22000 K, $\log g$: 2.5 – 5.0, [M/H]: -0.8 - +0.8)

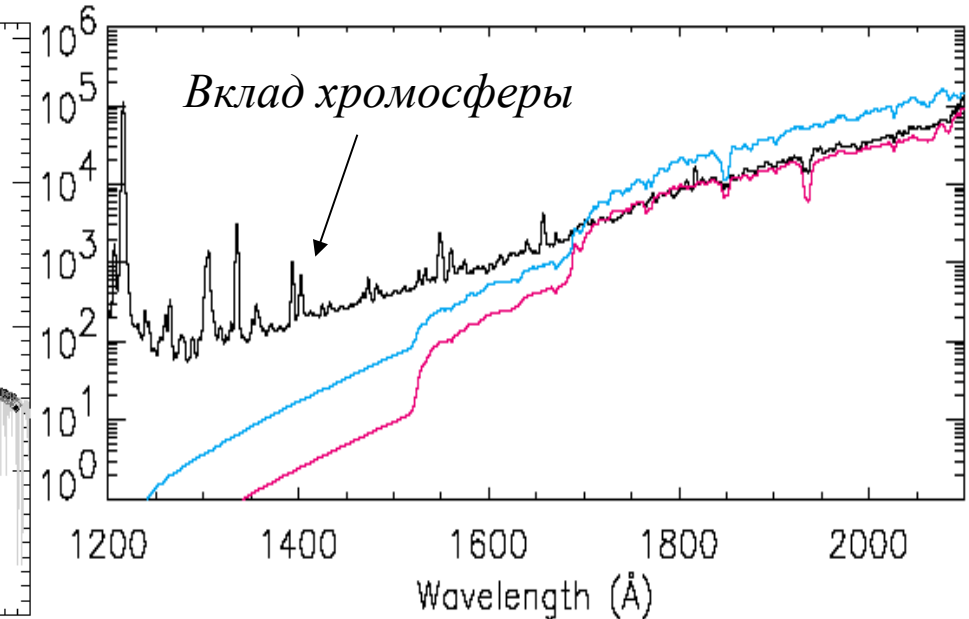
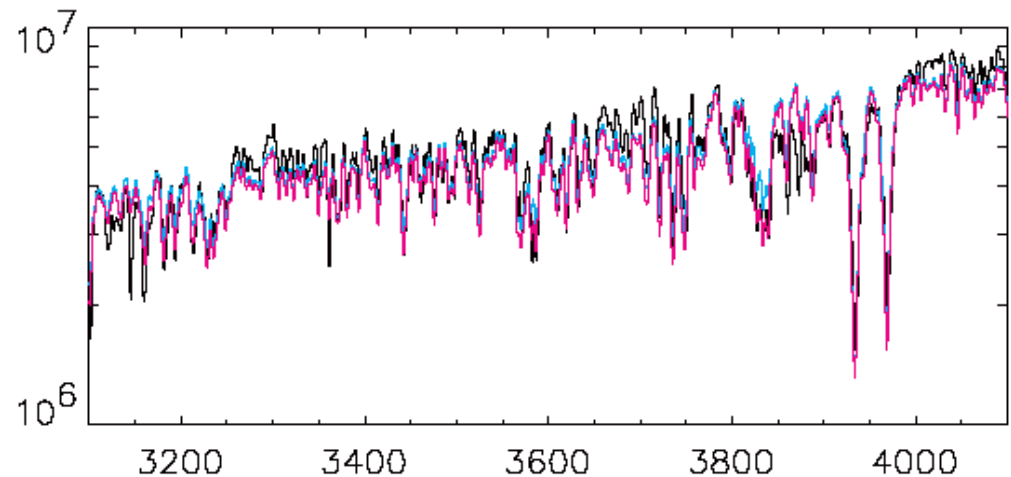
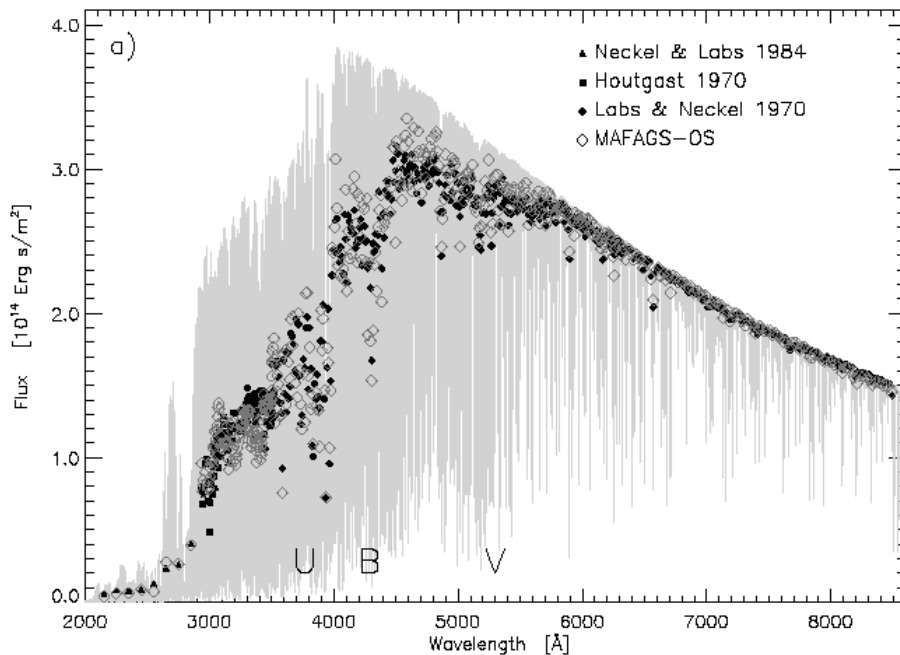
PHOENIX (Hauschildt et al., 1996).

(3000 -10000 K, $\log g$: 3.5 – 5.5, [M/H]: -4.0 - +0.0) для карликов

(3000 – 6800 K, $\log g$: 0.0 – 3.5, [M/H]: -0.7 - +0.0) для гигантов

Точность представления реальных атмосфер

1. Солнечный спектр



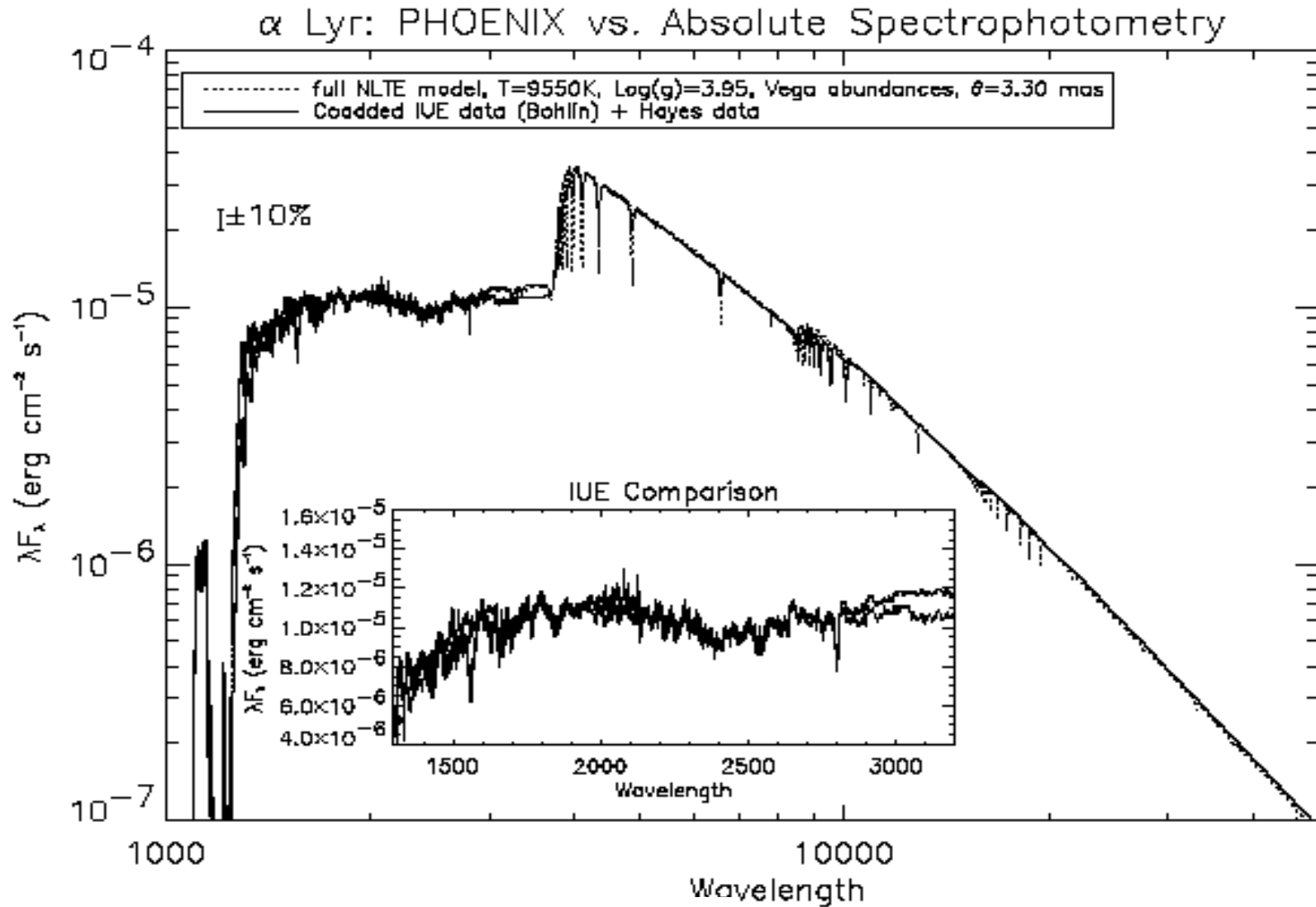
MAFAGS-OS
(Grupp, 2004)

не-ЛТР

ЛТР

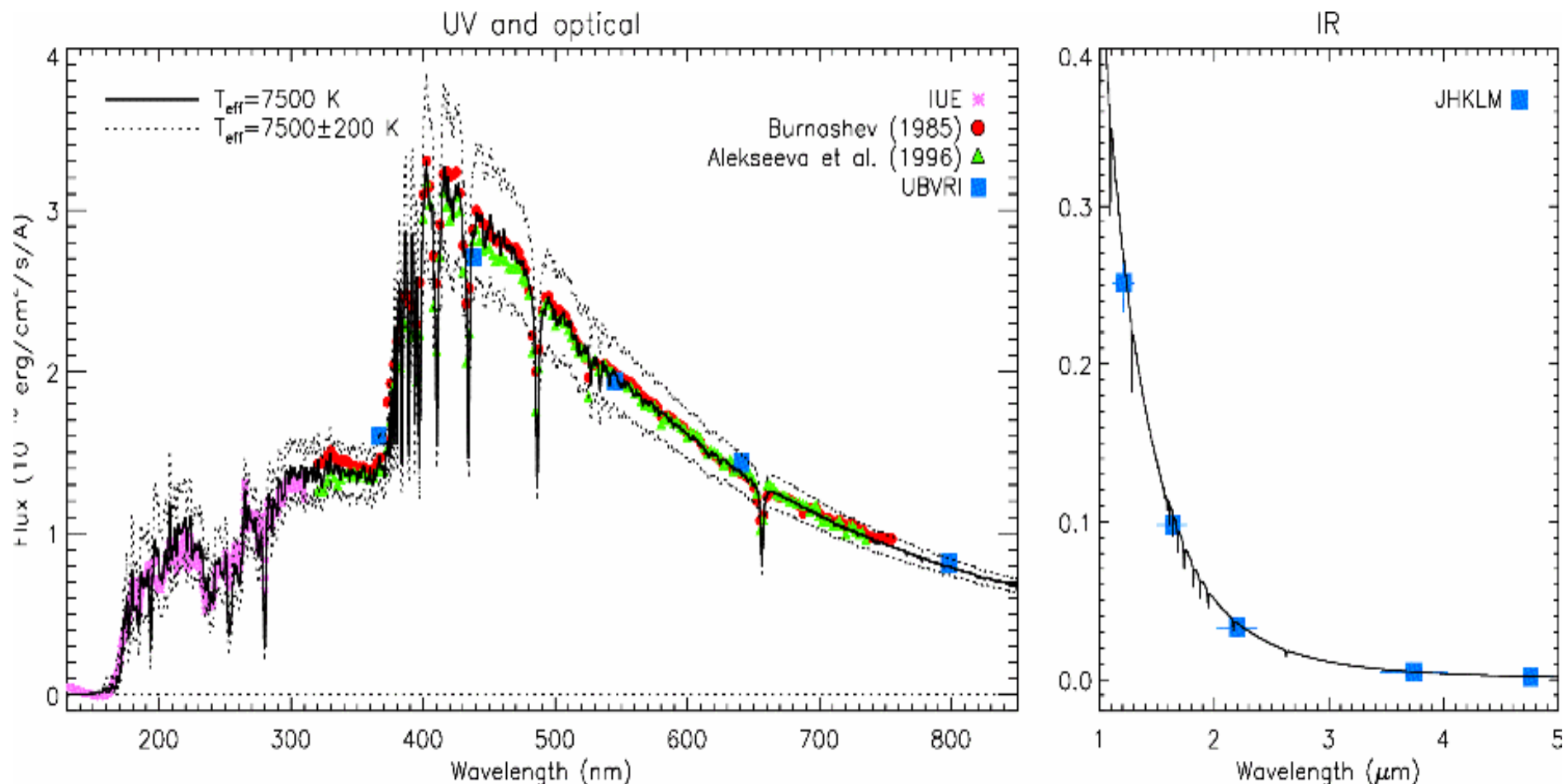
(Allende Prieto et al. 2003)

2. Спектр Веги ($T_{\text{eff}} = 9550\text{K}$, $\log g = 3.95$, $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.5$)



Hauschildt et al. 1999 (PHOENIX)

3. Спектр Ар-звезды α Cir ($T_{\text{эфф}} = 7500\text{K}$, $\log g = 4.1$, стратификация)



Вывод

Одномерные, статичные модели атмосфер дают успешные предсказания непрерывных и линейчатых спектров для большинства объектов.