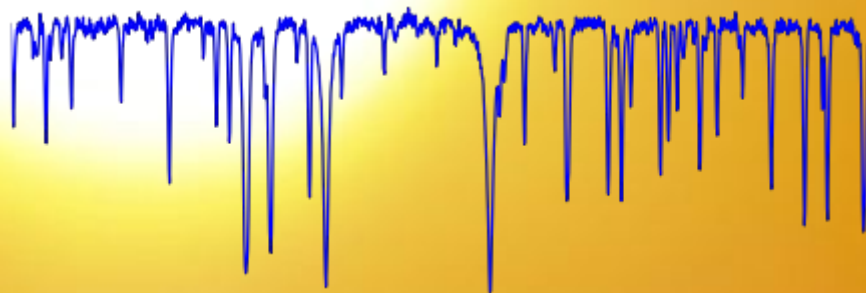


Формирование спектральных линий в звездных атмосферах

Часть II

Поведение спектральных линий



Спектральная линия

ПОТОК ТОЛЬКО В ЛИНИИ

$$F_{\nu} = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} S_{\nu}(\tau_0) E_2(\tau_{\nu}) \frac{\kappa_{\nu}(\tau_0)}{\kappa_0} \tau_0 \frac{1}{l_{ge}} dl g \tau_0$$

Но поглощение образуется не только в связанно-связанных (b-b) переходах, но и в свободно-связанных (f-b) и свободно-свободных (f-f), поэтому нужно учесть и непрерывное поглощение.

ПОЛНЫЙ ПОТОК В ЛИНИИ

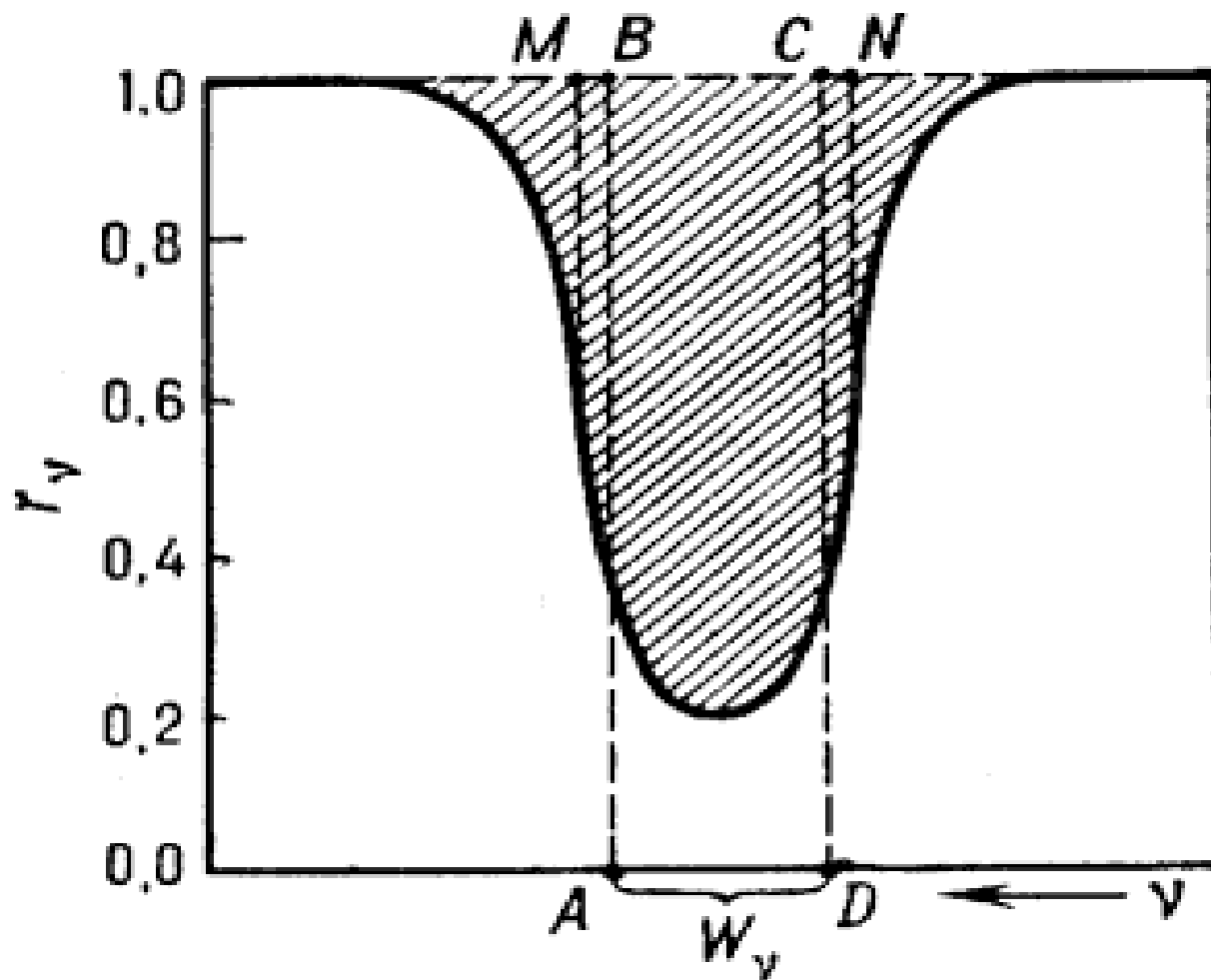
$$F_{\nu} = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} S_{\nu}(\tau_0) E_2(\tau_{\nu}) \frac{\kappa_{\nu}^{cont}(\tau_0) + \kappa_{\nu}(\tau_0)}{\kappa_0} \tau_0 \frac{1}{l_{ge}} dl g \tau_0$$

*Зависимость эквивалентной
ширины от содержания
элемента – Кривая роста*

Эквивалентная ширина

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} \left(1 - \frac{F_{\lambda}}{F_{cont}}\right) d\lambda = \int_{-\infty}^{\infty} (1 - r_{\lambda}) d\lambda$$

ширина участка непрерывного спектра, в котором содержится энергия, равная поглощенной в спектральной линии.



$$\kappa_\nu = n_i f_{ij} \frac{\pi e^2}{mc} \frac{H(u, a)}{\sqrt{\pi} \Delta \nu_D} (1 - e^{-h\nu_{ij}/kT}) = \kappa_0 H(u, a)$$

В центре линии

$$\beta_\nu = \frac{\kappa_\nu}{\kappa_\nu^{cont}} = \frac{\kappa_0}{\kappa_\nu^{cont}} H(u, a) = \beta_0 H(u, a)$$

$$\frac{\kappa_\nu^{cont} + \kappa_\nu}{\kappa_\nu^{cont}} = 1 + \beta_\nu$$

$$S_\nu(\tau) = B_\nu(\tau), dt = (1 + \beta_\nu) d\tau$$

$$F_\nu = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} B_\nu(T(\tau_0)) E_2 \left(\int_0^{\infty} (1 + \beta_\nu) dt \right) (1 + \beta_\nu) \tau_0 \frac{1}{l g e} dl g \tau_0$$

Приближенно: модель Милна-Эддингтона.

$$B_\nu(T) = B_0 + B_1 \tau \quad - \text{серая атмосфера,}$$
$$\beta_\nu \quad - \text{постоянно по глубине,}$$

Выходящий поток

$$F_\nu = \pi \left(B_0 + \frac{2}{3} \frac{B_1}{1 + \beta_\nu} \right) \quad F_\nu^{cont} = \pi \left(B_0 + \frac{2}{3} B_1 \right)$$

Глубина линии относительно континуума

$$A_\nu = 1 - F_\nu / F_c = A_0 \beta_\nu / (1 + \beta_\nu)$$

где $A_0 = (1 + 1.5 B_0 / B_1)^{-1}$ глубина в центре линии

Эквивалентная ширина

$$u = \frac{(\nu - \nu_0)}{\Delta \nu_D}$$

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} \left(1 - \frac{F_\nu}{F_{cont}} \right) d\nu = 2 \Delta \nu_D A_0 \int_0^{\infty} \frac{\beta(u)}{1 + \beta(u)} du$$

1. Слабая ненасыщенная линия

n_i мало

поглощение в доплеровском ядре

$$\beta(u) = \beta_0 e^{-u^2} \quad u = \frac{(\nu - \nu_0)}{\Delta\nu_D}$$

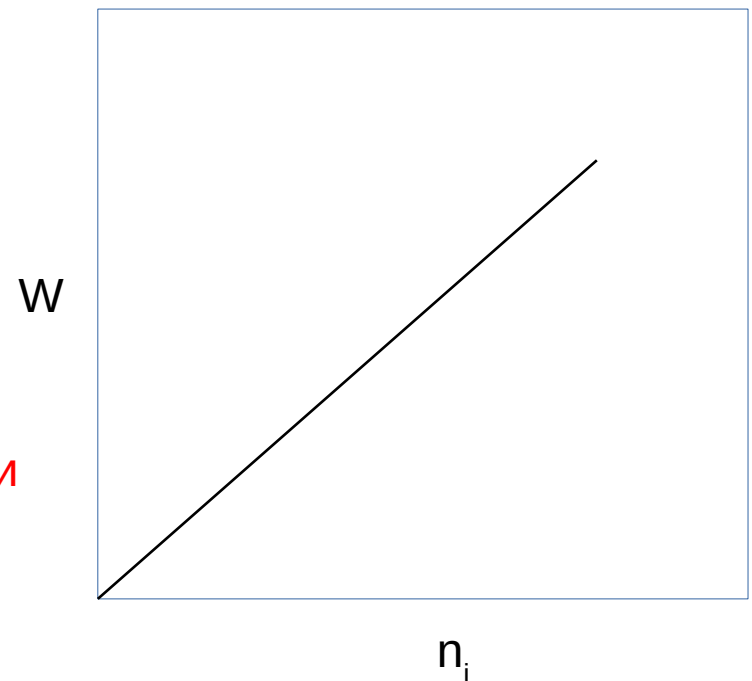
$$\tau_0 \ll 1, \beta_0 < 1 \quad \beta_0 \sim \kappa_0 \sim n_i f_{ij} \frac{1}{\Delta\nu_D}$$

Профиль Фойгта с ярко выраженным доплеровским ядром и очень слабыми лоренцевскими крыльями

$$W = 2\Delta\nu_D A_0 \int_0^\infty \frac{\beta(u)}{1 + \beta(u)} du \sim n_i$$

**Прямой участок
кривой роста**

Рост W обеспечивается углубляющимся ядром линии



2. Линия, насыщенная в ядре

n_i так велико, что поглощаются *все* фотоны в доплеровском ядре,

$$\tau_0 \gg 1, \quad \beta_0 > 1$$

но мало для заметного поглощения в крыльях

$$\tau \ll 1, \quad \beta < 1$$

Профиль Фойгта с выраженным доплеровским ядром и лоренцевскими крыльями

$$W = 2\Delta\nu_D A_0 \int_0^\infty \frac{\beta(u)}{1 + \beta(u)} du \approx 2\Delta\nu_D A_0 \sqrt{\ln \beta_0} \left[1 - \frac{\pi^2}{24} (\ln \beta_0)^2 - \frac{7\pi^4}{384} (\ln \beta_0)^4 - \dots \right]$$

$$W \sim \Delta\nu_D \sqrt{\ln n_i}$$

**Участок
насыщения**

Рост W обеспечивается растущими крыльями линии

3. Сильная насыщенная линия

n_i так велико, что поглощаются *все* фотоны в доплеровском ядре,

$$\tau_0 \gg 1, \quad \beta_0 > 1$$

и в крыльях

$$\tau \gg 1, \quad \beta > 1$$

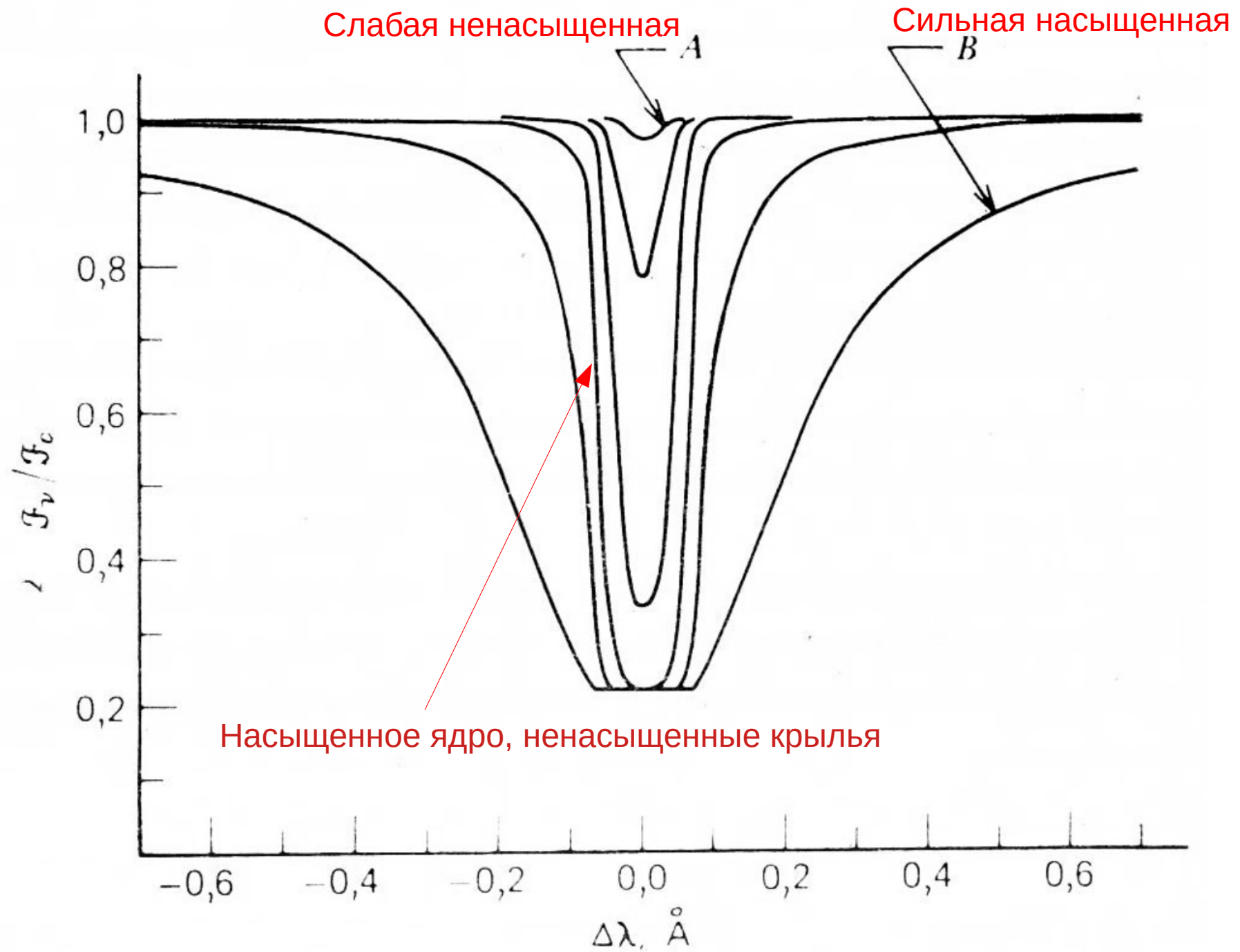
Профиль Фойгта с доплеровским ядром и сильными лоренцевскими крыльями

$$W \sim \sqrt{n_i \frac{\gamma}{\Delta\nu_D}}$$

**Участок
затухания**

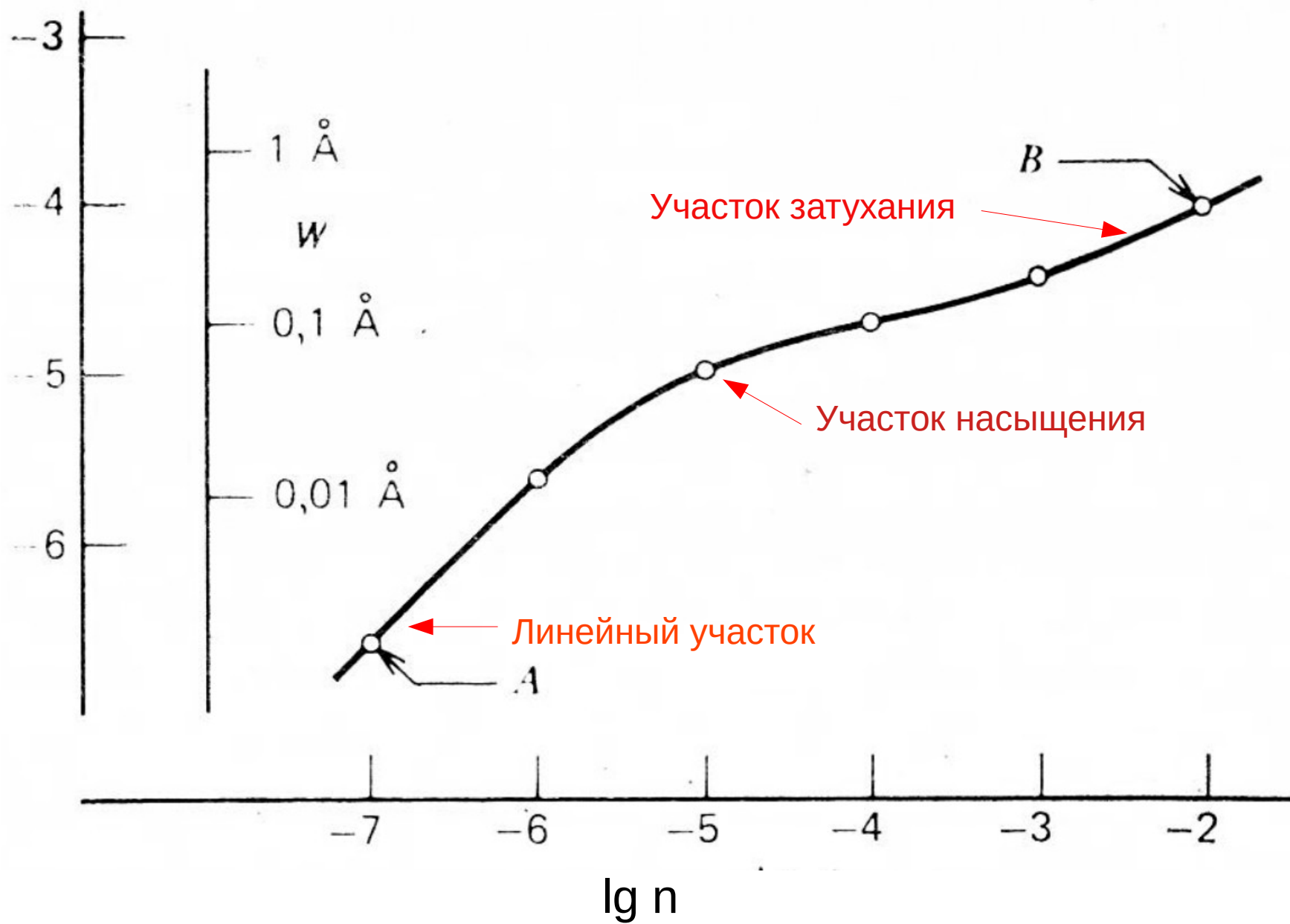
Рост W обеспечивается растущими далекими участками крыльев линии

Изменение профиля линии



Кривая роста

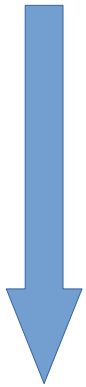
$\lg W/\lambda$



*Глубина образования линии.
Функция вклада.*

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

Спектр потока



τ_0 Оптическая глубина на определенной частоте (длине волны). Обычно на 5000Å

$lg\tau_0$ Удобная шкала высот звездной атмосферы

$$F_{\nu} = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} S_{\nu}(\tau_0) E_2(\tau_{\nu}) \frac{\kappa_{\nu}(\tau_0)}{\kappa_0} \frac{1}{lge} dl g \tau_0$$

$$\frac{dF_{\nu}}{dl g \tau_0} = 2\pi S_{\nu}(\tau_0) E_2(\tau_{\nu}) \frac{\kappa_{\nu}(\tau_0)}{\kappa_0} \frac{1}{lge}$$

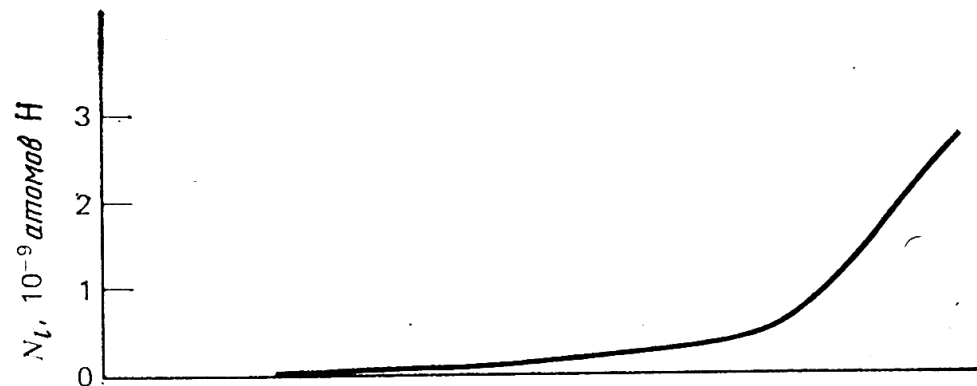
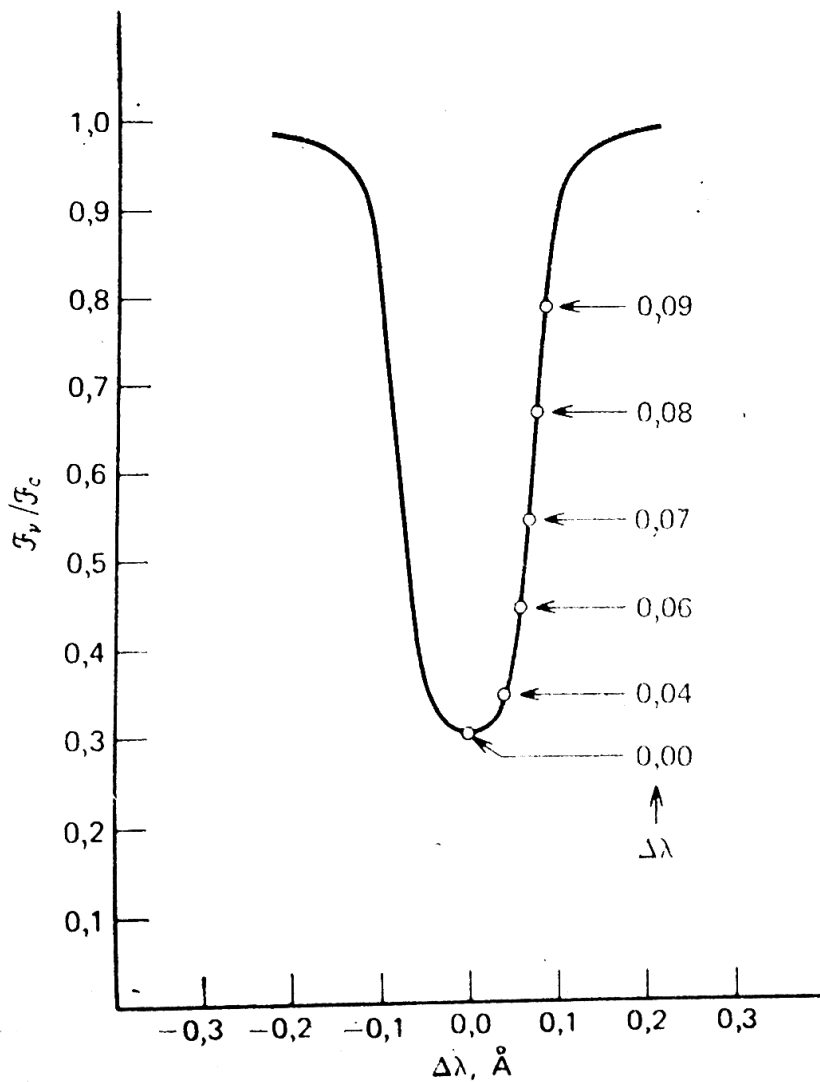
Функция вклада

Показывает степень вклада излучения, образующегося на некоторой оптической глубине $lg \tau_0$, в выходящий поток

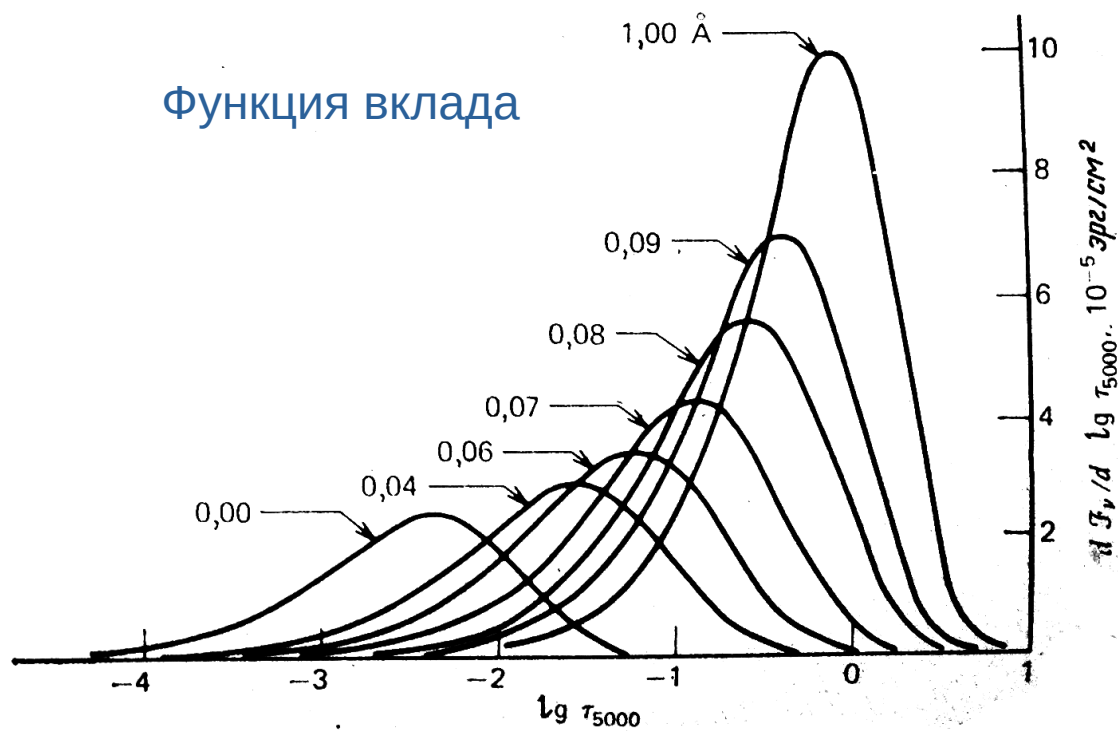
FeI 6065A E=5 eV

Концентрация (Больцман+Саха)

Профиль линии



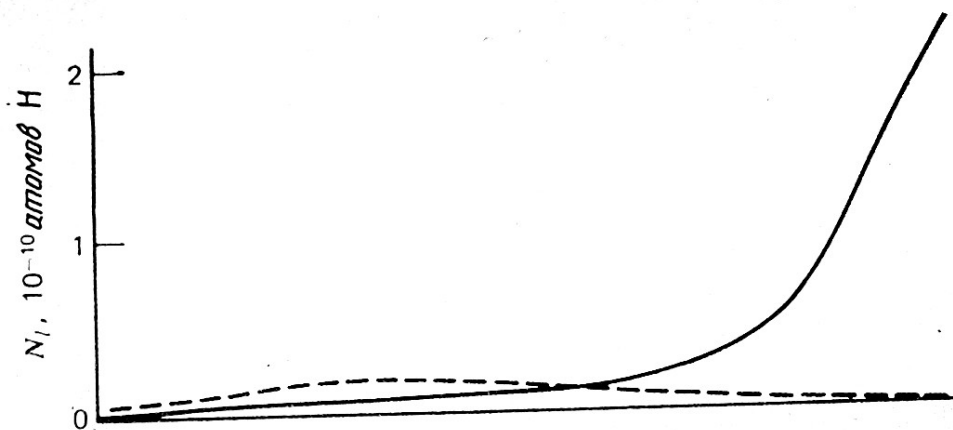
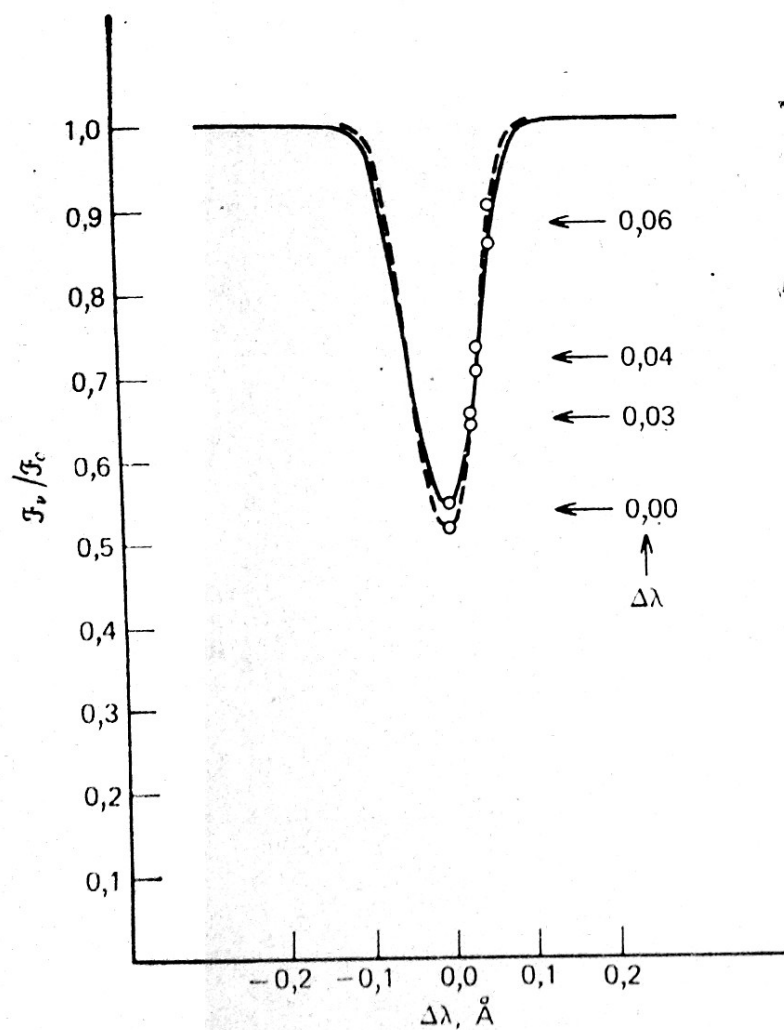
Функция вклада



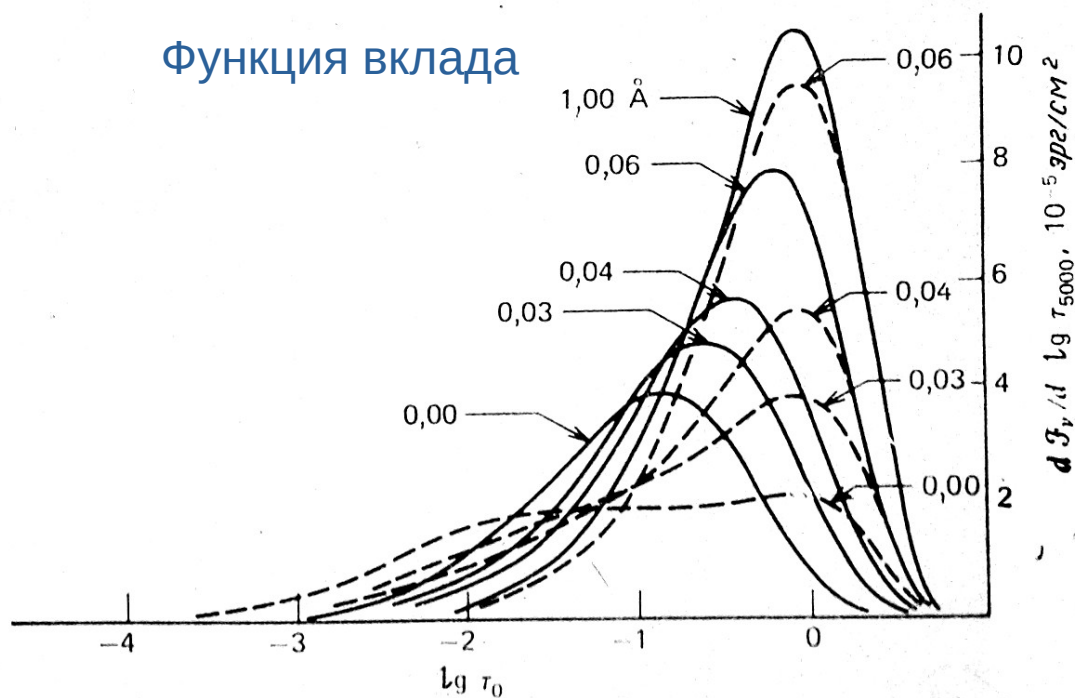
FeII E=5 eV (сплошная), 0 eV (штрих)

Концентрация (Больцман+Саха)

Профиль линии



Функция вклада



Зависимость от температуры

$$n_i = f(T)$$

Больцман
населенности

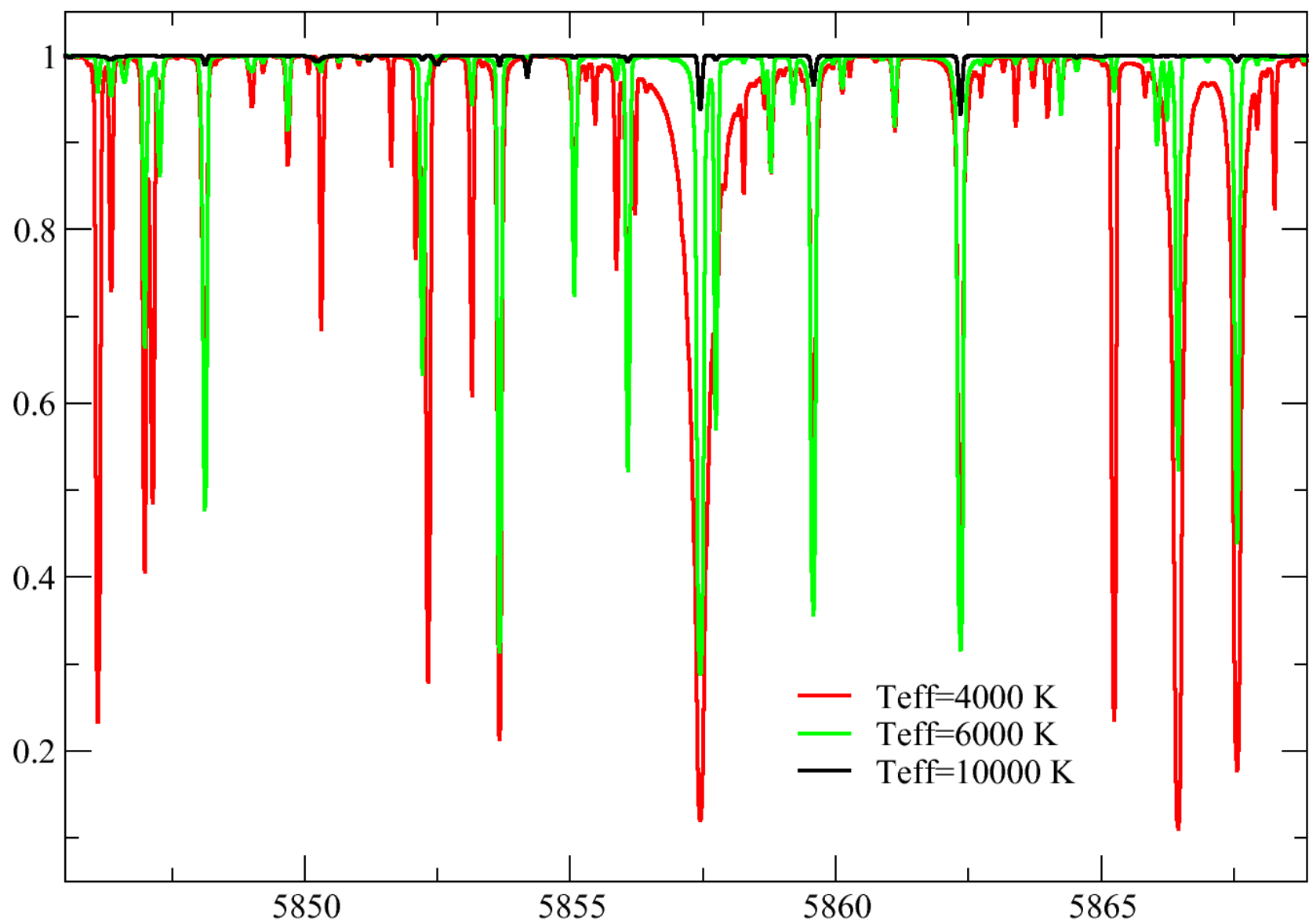
$$\frac{n_i}{N_n} = \frac{g_i}{u_n(T)} e^{-\frac{E_i}{kT}}$$

Саха
ионизация

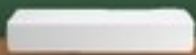
$$\frac{N_{n+1}}{N_n} = \frac{1}{N_e} \frac{2u_{n+1}}{u_n} \left[\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right]^{3/2} e^{-\frac{\chi_n}{kT}}$$


 $f(T)$

1. Поглощение в линии $\kappa_\nu \sim n_i = f(T)$
2. Профиль линии, через γ $\phi_\nu = f(T)$
3. Поглощение в континууме $\kappa_\nu^{cont} = f(T)$



***Зависимость от ускорения
силы тяжести***



$$n_i = f(\lg g)$$

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

Саха
ионизация

$$\frac{N_{n+1}}{N_n} = \frac{1}{N_e} \frac{2u_{n+1}}{u_n} \left[\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right]^{3/2} e^{-\frac{\chi_n}{kT}}$$

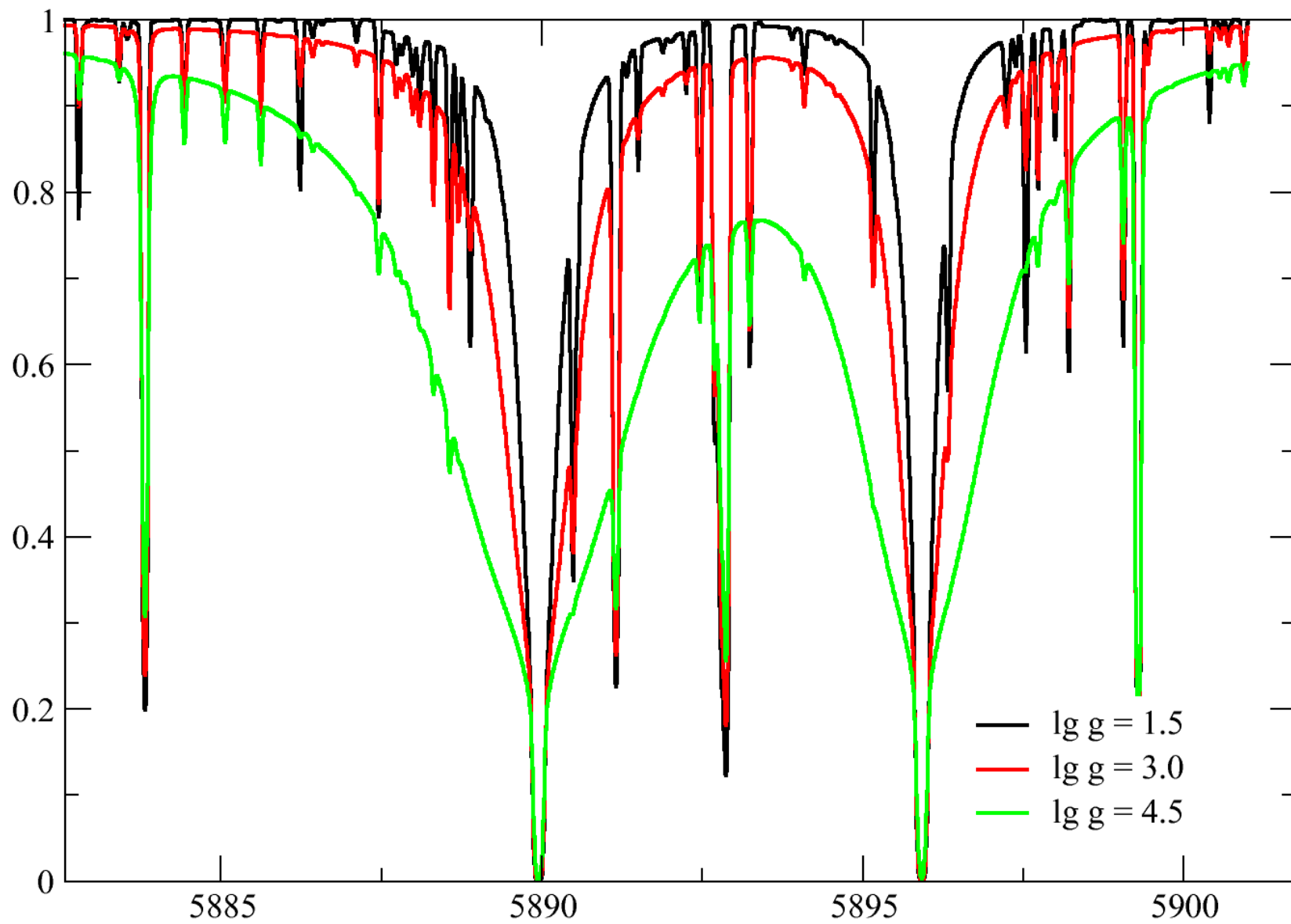
$P = nkT$
↓

Больцман
населенности

$$\frac{n_i}{N_n} = \frac{g_i}{u_n(T)} e^{-\frac{E_i}{kT}}$$

1. Поглощение в линии $\kappa_\nu \sim n_i = f(\lg g)$

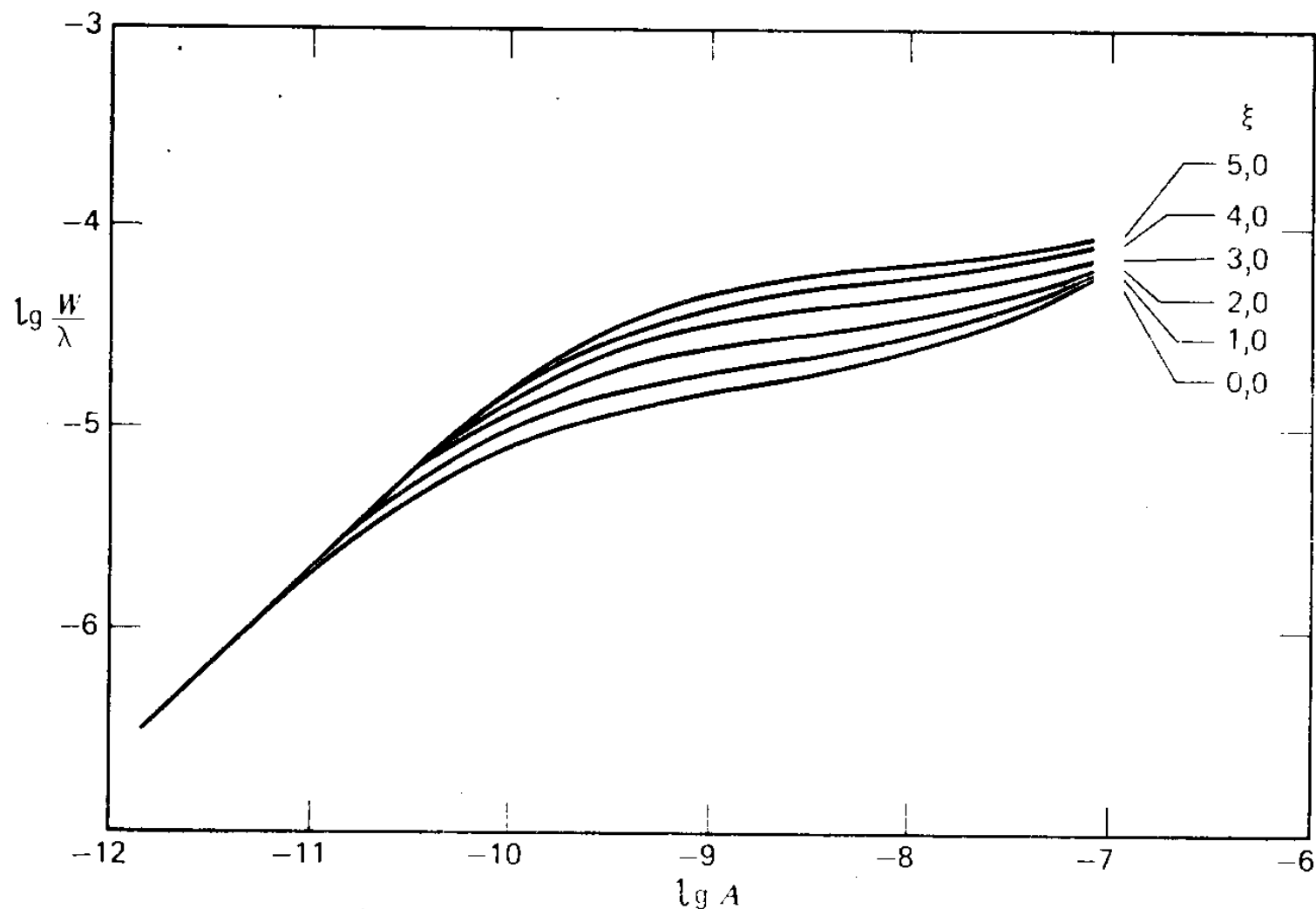
2. Профиль линии, через γ $\phi_\nu = f(\lg g)$



*Зависимость от
микротурбулентной скорости*

Профиль линии $\phi_\nu = f(\Delta\nu_D) = f(V)$

$$V^2 = \frac{2kT}{M} + \xi_t^2$$



Микротурбуленция замедляет скорость насыщения линии из-за доплеровского перераспределения по скоростям, и W долго остается на линейном участке, превосходя случай без ее учета.

*Зависимость от
макротурбулентной скорости*

Гауссово распределение по скоростям

$$\Theta(v) \Rightarrow \Theta(\Delta\lambda)$$

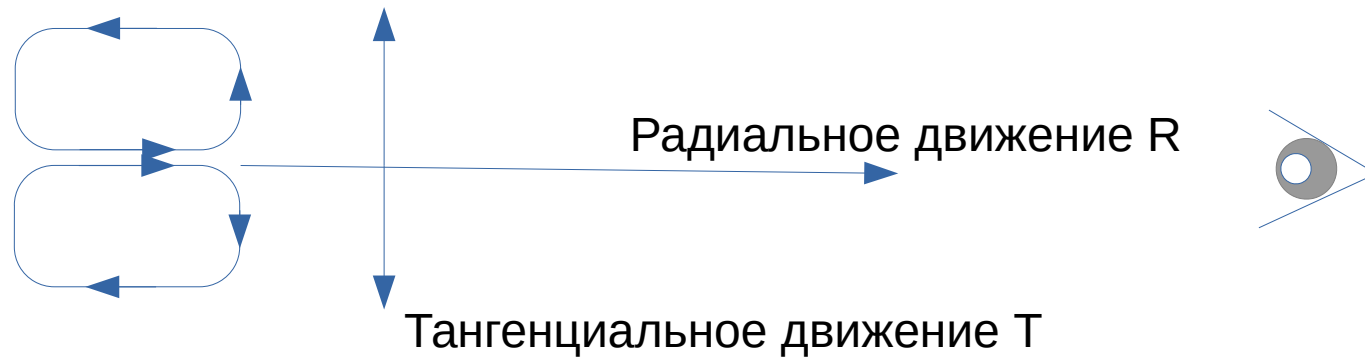
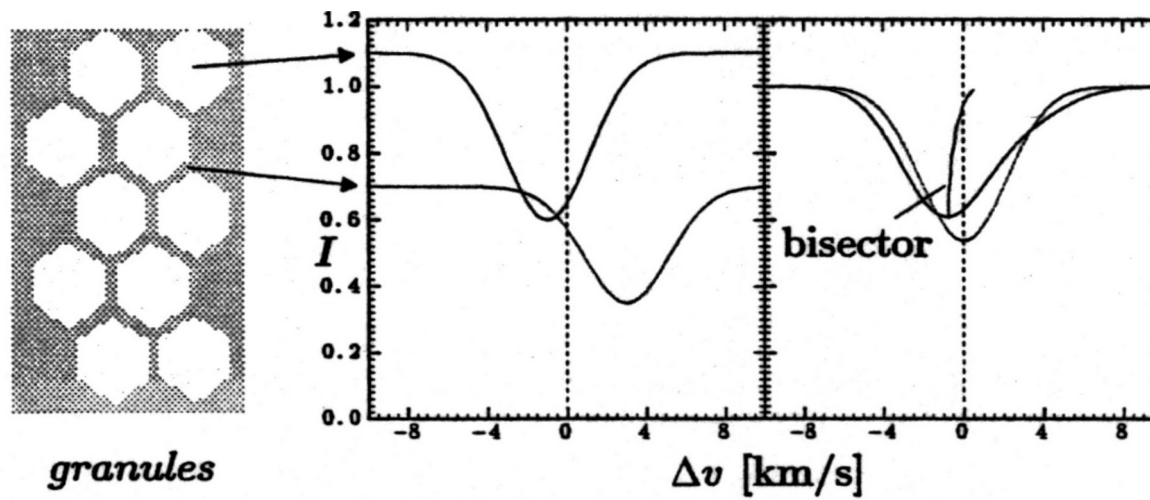
$$I_\nu = I_\nu * \Theta(\Delta\lambda)$$

$$F_\nu = \oint I_\nu * \Theta(\Delta\lambda) \cos \theta d\omega = \overset{\text{изотропно}}{\Theta(\Delta\lambda)} * \oint I_\nu \cos \theta d\omega$$

Макротурбуленция в отличие от микротурбуленции является внешним фактором по отношению к излучению звезды.

По свойствам свертки макротурбуленция не меняет интеграл по частотам, то есть не меняет эквивалентную ширину.

$$\Theta(\Delta\lambda) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \Delta\lambda_D \cos \theta} e^{-(\Delta\lambda/\Delta\lambda_D)^2}$$



$$\Theta(\Delta\lambda) = A_T \Theta_T(\Delta\lambda) + A_R \Theta_R(\Delta\lambda)$$

Доли общей площади, охваченные движением

$$\Theta(\Delta\lambda) = \frac{A_T}{\sqrt{\pi}\Delta\lambda_{DT}\sin\theta}e^{-(\Delta\lambda/\Delta\lambda_{DT}\sin\theta)^2} +$$

$$+ \frac{A_R}{\sqrt{\pi}\Delta\lambda_{DR}\cos\theta}e^{-(\Delta\lambda/\Delta\lambda_{DR}\cos\theta)^2}$$

$$F_\nu = 2\pi A_T \int\limits_0^{\pi/2} \Theta_T * I_\nu \sin\theta \cos\theta d\theta +$$

$$+ 2\pi A_R \int\limits_0^{\pi/2} \Theta_R * I_\nu \sin\theta \cos\theta d\theta$$

При изотропии I

$$F_{\nu} = 2\pi A_T I_{\nu} * \int_0^{\pi/2} \Theta_T \sin \theta \cos \theta d\theta + \\ + 2\pi A_R I_{\nu} * \int_0^{\pi/2} \Theta_R * \sin \theta \cos \theta d\theta$$

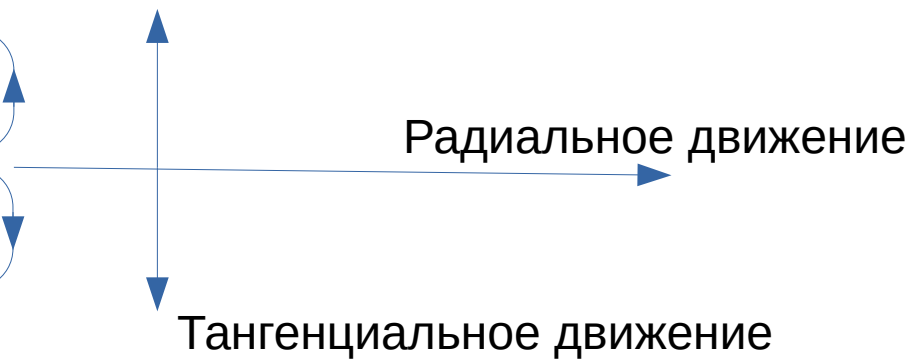
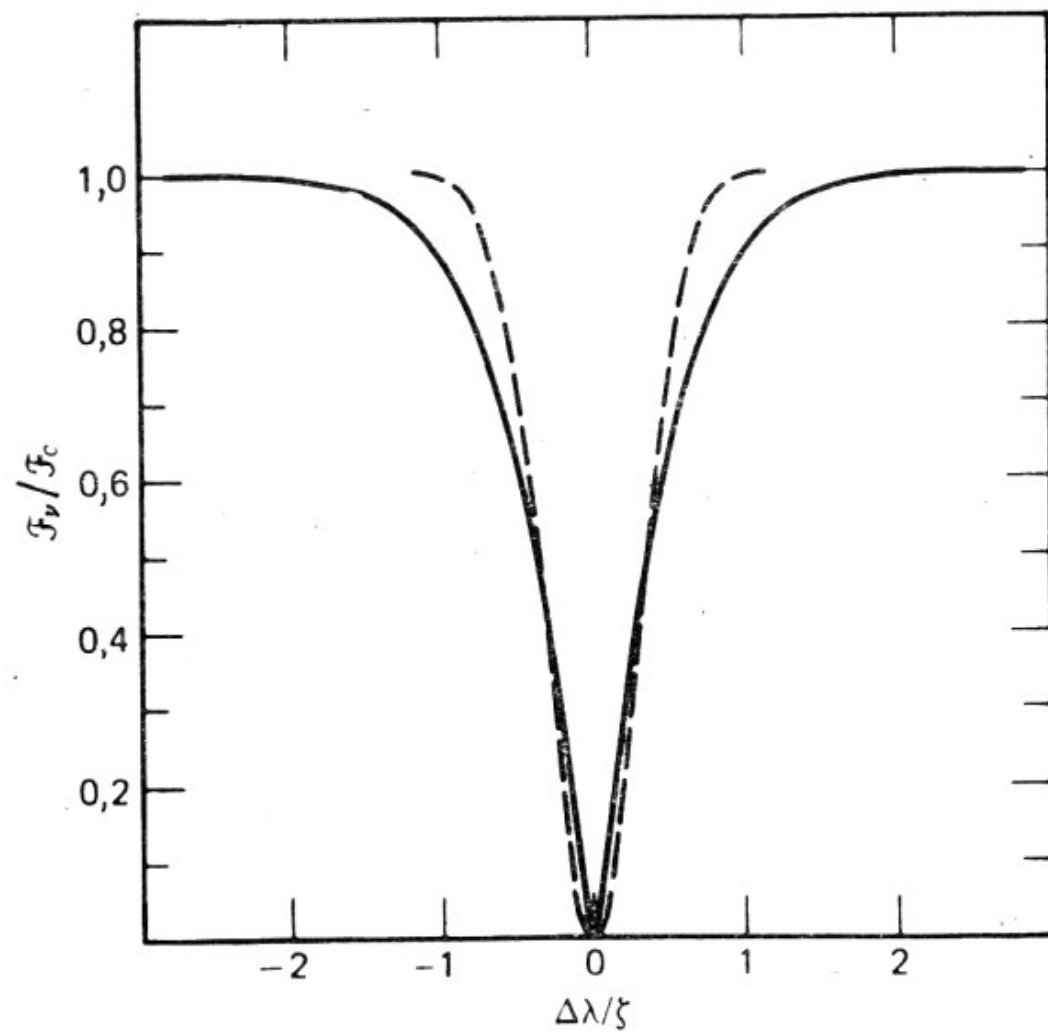
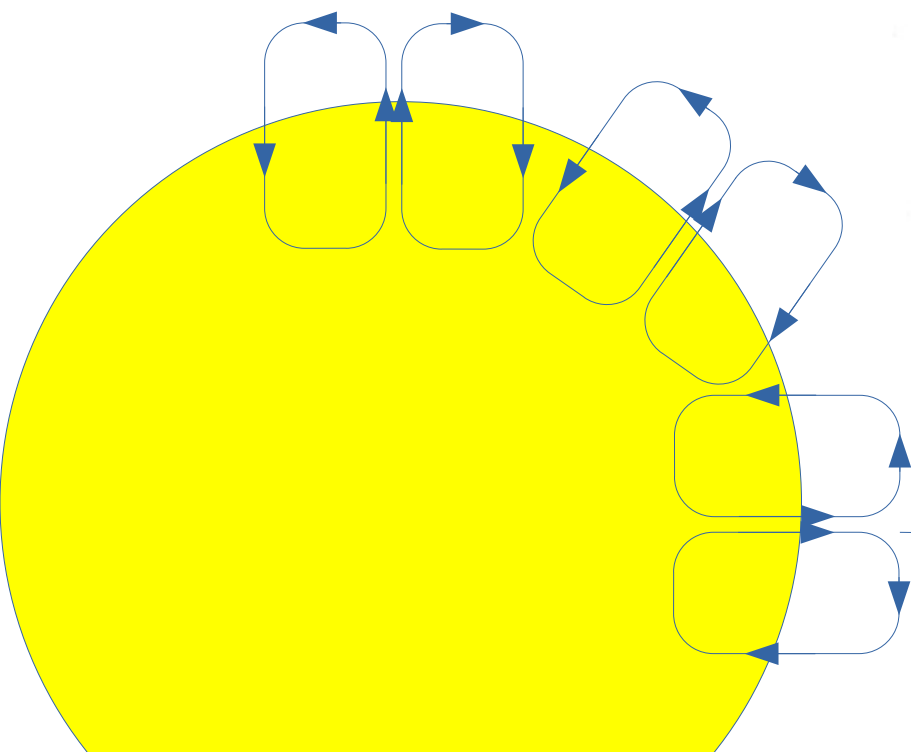
Подставляя Θ и заменяя переменные

$$u = (\Delta\lambda_{DT} \sin \theta) / \Delta\lambda$$

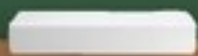
$$u = (\Delta\lambda_{DR} \cos \theta) / \Delta\lambda$$

$$F_{\nu} = 2\pi A_T I_{\nu} * \frac{\Delta\lambda}{\sqrt{\pi} \Delta\lambda_{DT}^2} \int_0^{\Delta\lambda_{DT}/\Delta\lambda} e^{-1/u^2} du + \\ + 2\pi A_R I_{\nu} * \frac{\Delta\lambda}{\sqrt{\pi} \Delta\lambda_{DR}^2} \int_0^{\Delta\lambda_{DR}/\Delta\lambda} e^{-1/u^2} du$$

Радиальная и тангенциальная компоненты ведут себя одинаковым образом! → симметричный профиль



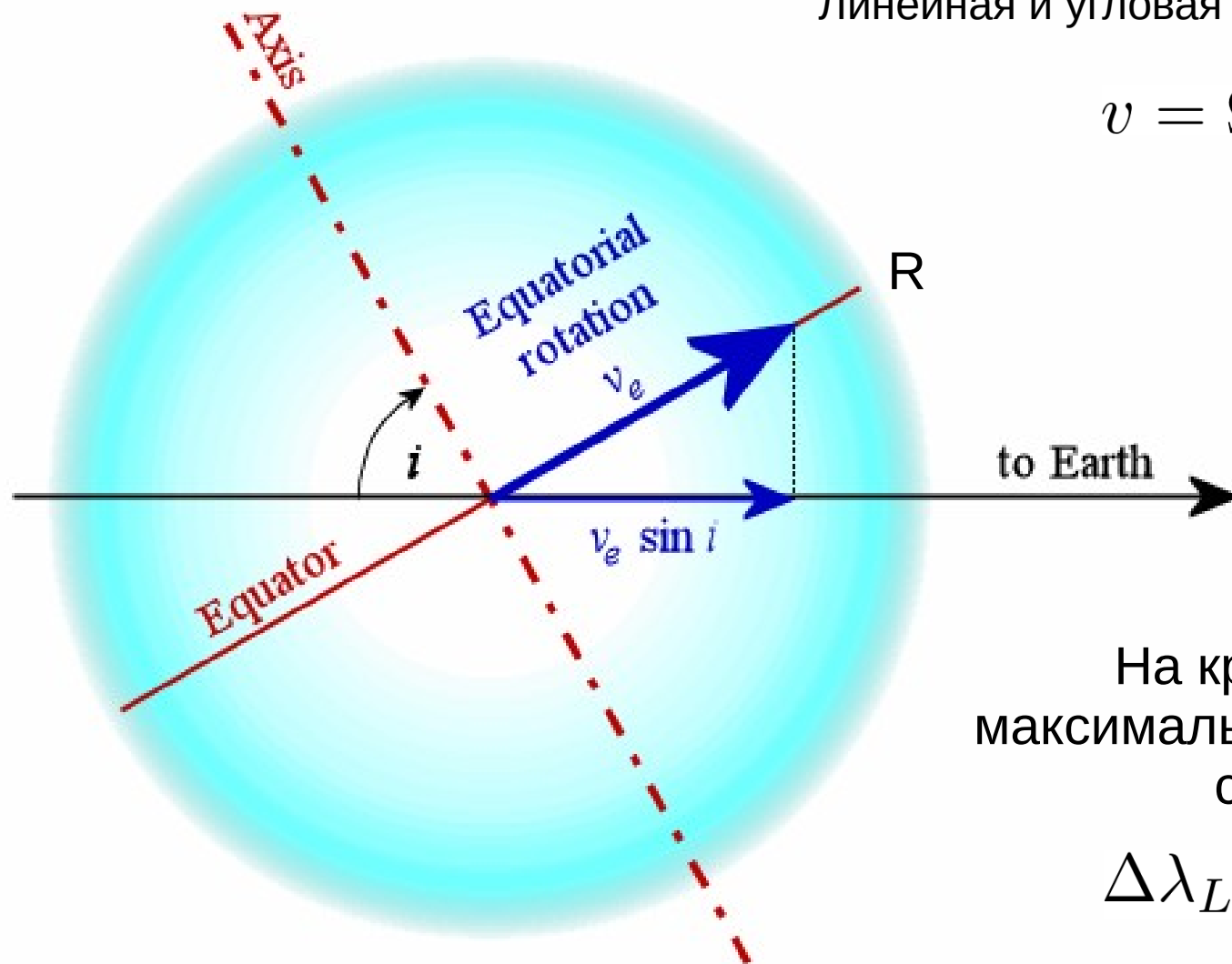
***Зависимость от скорости
вращения***



Проекция скорости вращения на картинную плоскость

Линейная и угловая скорость вращения

$$v = \Omega \times R$$



На краях диска
максимальное смещение в
спектре

$$\Delta\lambda_L = \lambda v \sin i / c$$

$$y_1 = R \left[1 - \left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_L} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Профиль вращения

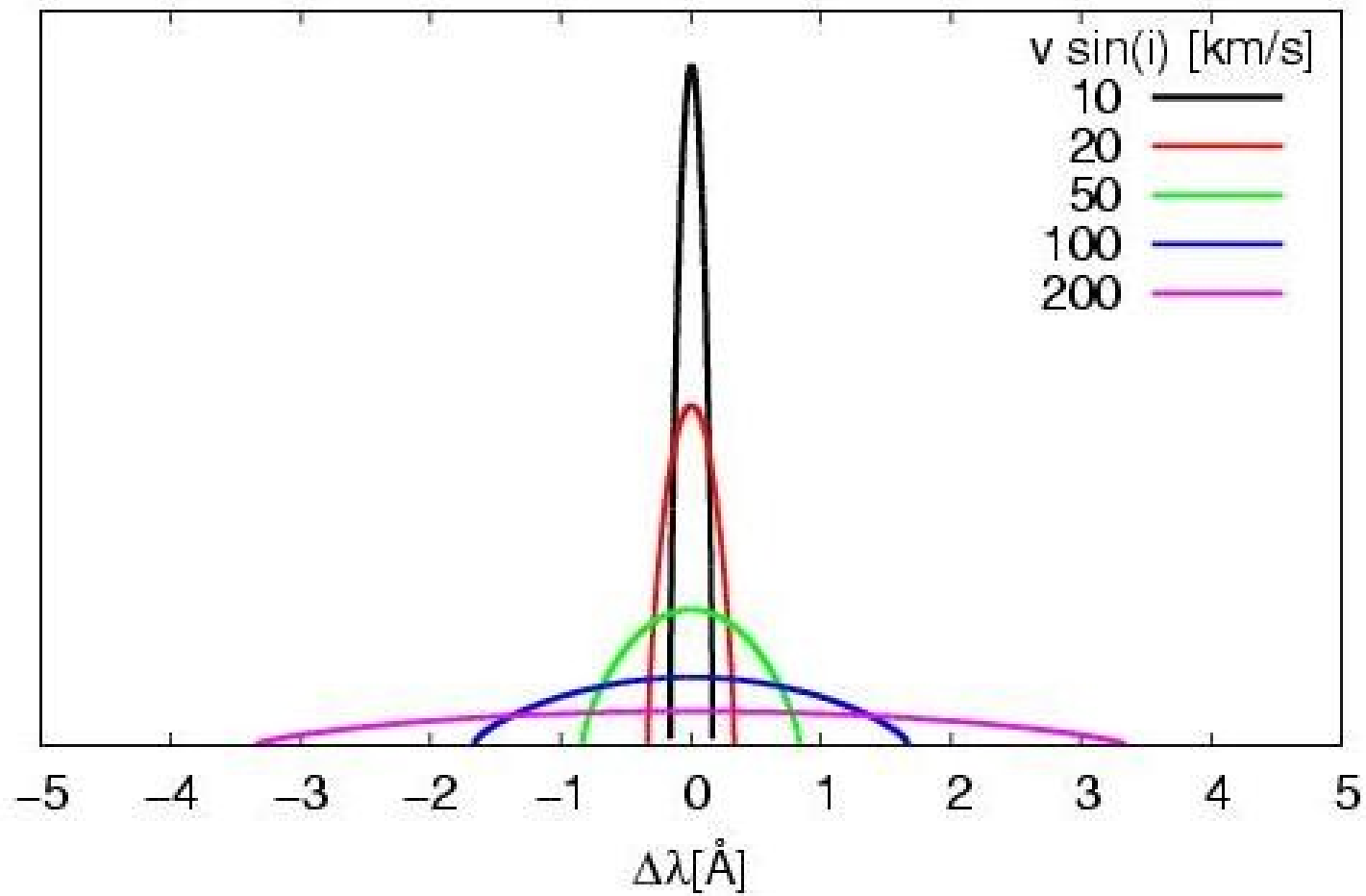
$$G(\Delta\lambda) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta\lambda_L} \frac{\int_{-y_1}^{y_1} I_{cont} dy / R}{\int I_{cont} \cos\theta d\omega} & |\Delta\lambda| \leq \Delta\lambda_L, \\ 0 & |\Delta\lambda| > \Delta\lambda_L \end{cases}$$

$$r_\lambda = \frac{F_\lambda}{F_{cont}}$$

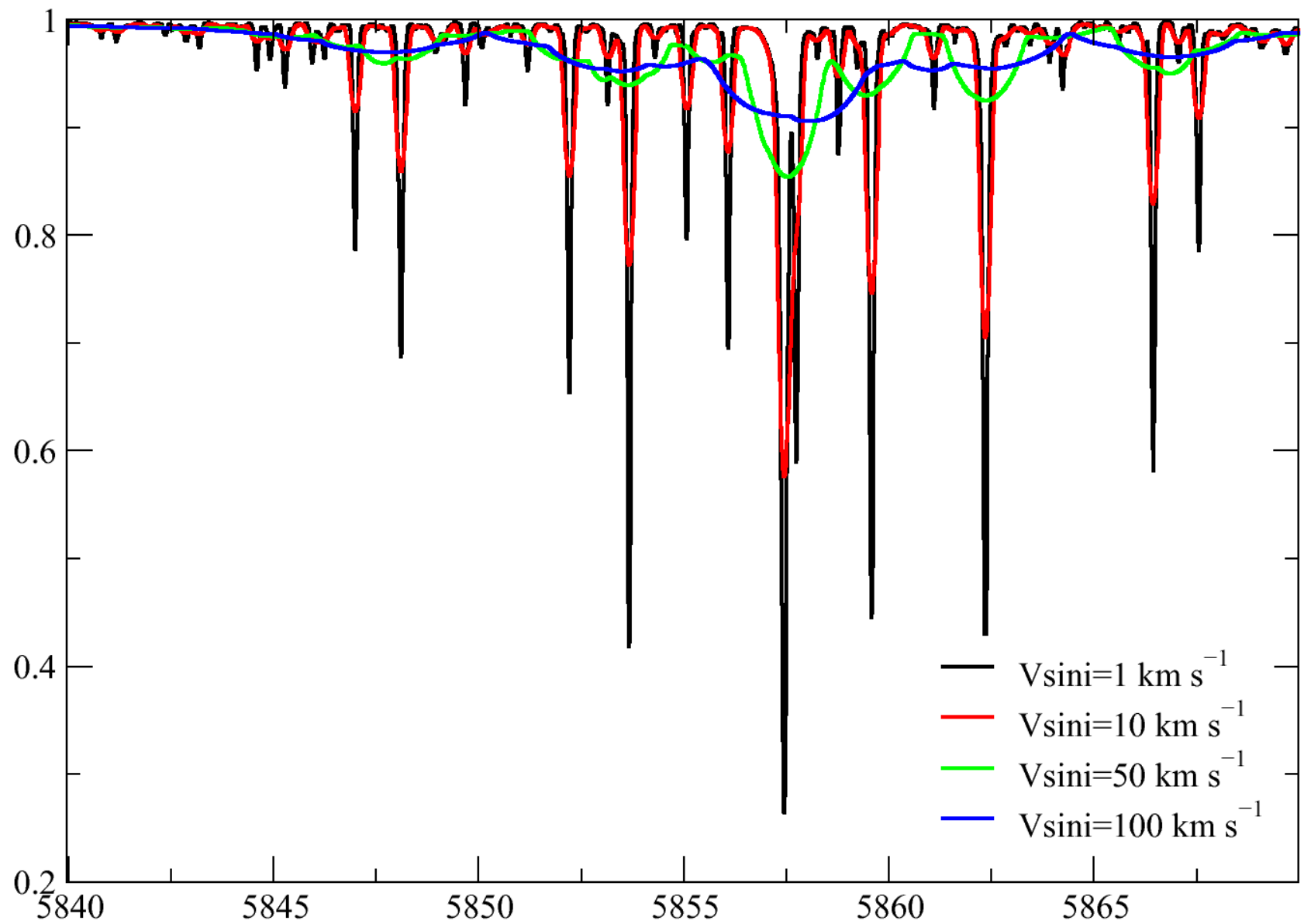
$$r_\lambda^{obs} = r_\lambda * G(\Delta\lambda)$$

Профиль вращения ограничен $\Delta\lambda_L$ и не меняет эквивалентной ширины

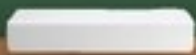
Rotational profile



Проекция скорости вращения на картинную плоскость



Инструментальный профиль



$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$$

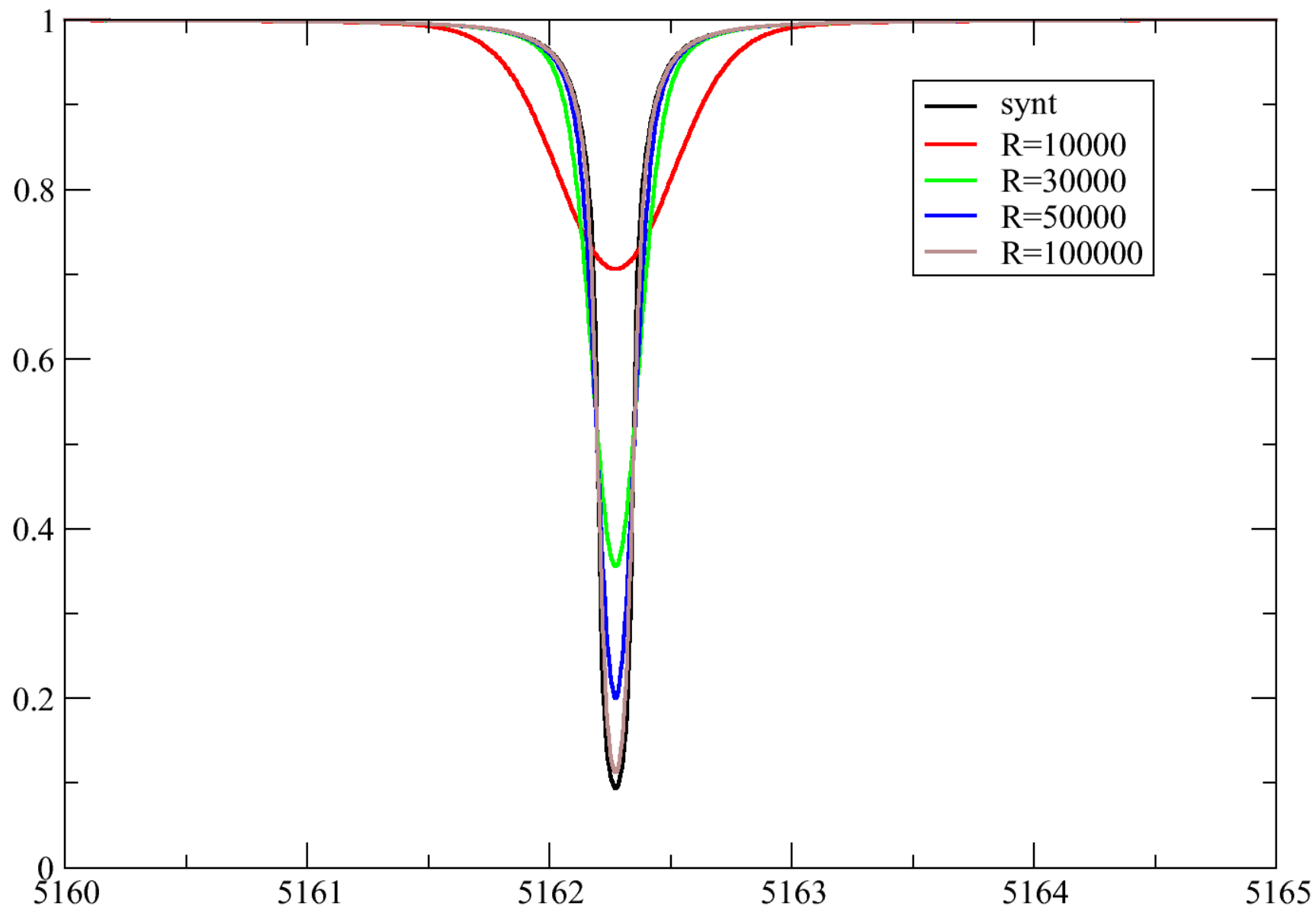
Спектральное разрешение

Профиль Гаусса

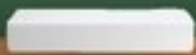
$$\phi(\Delta\lambda) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\delta\lambda} e^{-(\Delta\lambda/\delta\lambda)^2}$$

$$F_{\lambda}^{obs} = F_{\lambda} * \phi(\Delta\lambda)$$

Инструментальный профиль не меняет эквивалентной ширины

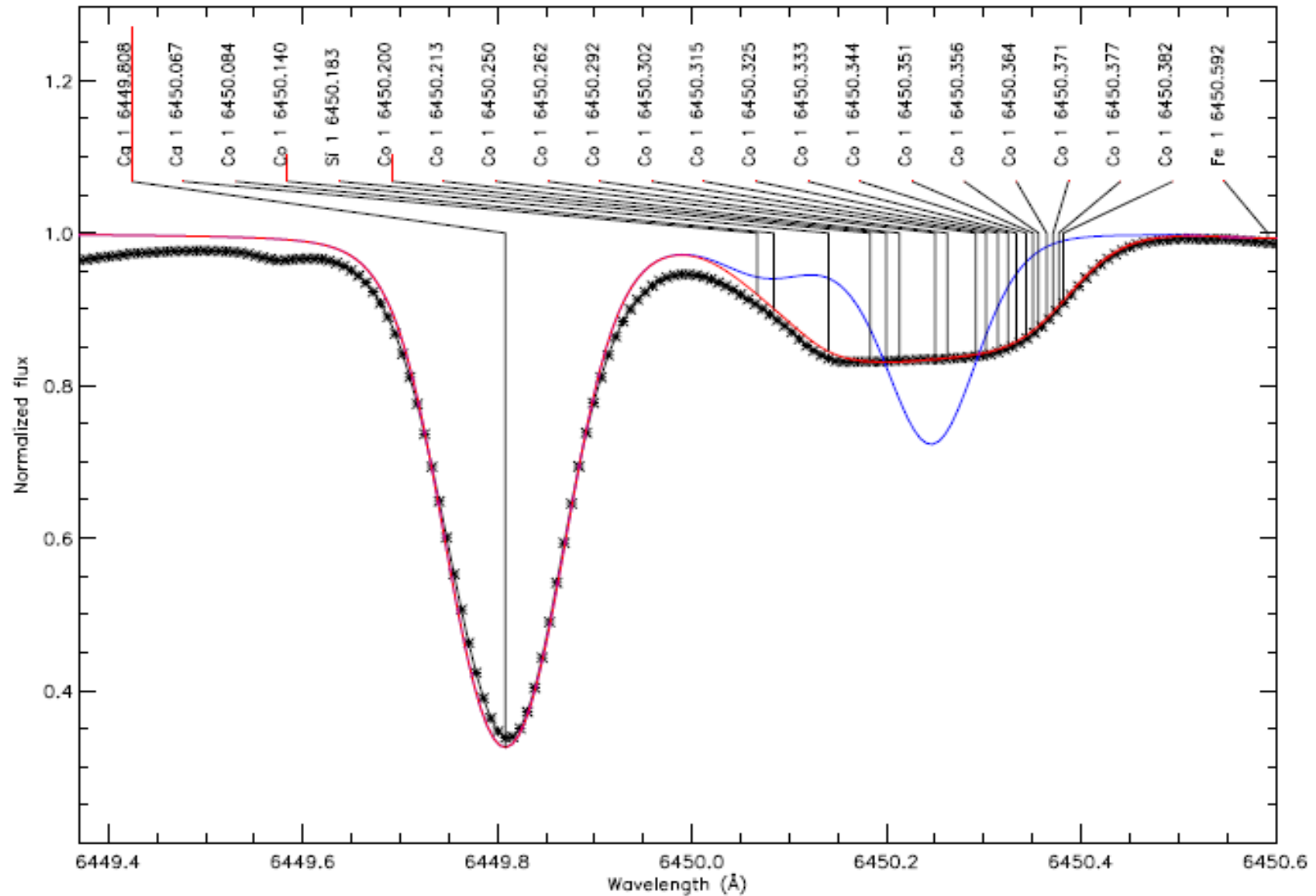


Синтетический спектр звезды



Синтетический спектр звезды

Теоретический вычисленный спектр, пригодный для
сравнения с наблюдениями



Наблюдаемый поток

$$F_{\lambda'}^{obs} = \left(\frac{R}{d}\right)^2 E_{red}(\lambda) F_{\lambda} * \phi_{macro} * \phi_{rot} * \phi_{instr}$$

Фактор диллюции

Межзвездное покраснение

Макротурбуленция

Вращение

Инструментальный профиль

$$\lambda' = \lambda (1 + v_{rad}/c) \quad \text{Эффект Доплера}$$

Наблюдаемый поток относительно континуума

$$F_{\lambda'}^{obs} = F_{\lambda} * \phi_{macro} * \phi_{rot} * \phi_{instr}$$

Модель атмосферы

$(\chi, \tau, \rho \chi), T, (N, P), N_e, \rho$

Список линий и их параметров

Element, Ion, λ , Elow, $\log(gf)$,
 G_{Rad} , G_{Stark} , G_{wdWaals} , g_{lande} , A, B

Содержания элементов

Внутренние характеристики звезды

$V_{\text{micro}}, B, (\varepsilon \text{ потем.край})$

Синтетический спектр единичной площадки
В интенсивностях или потоках

Внешние характеристики звезды

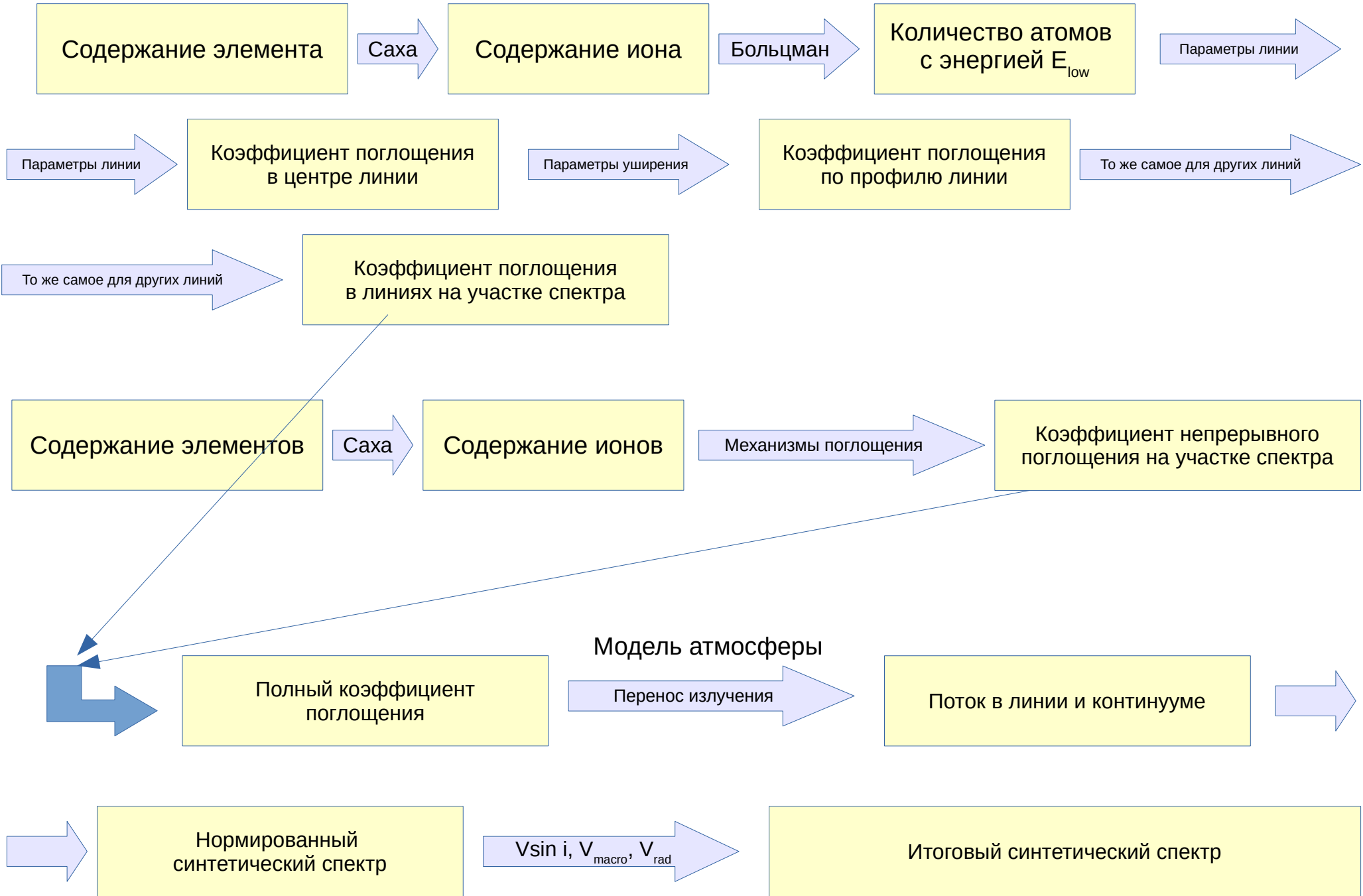
$V \sin i, V_{\text{macro}}, V_{\text{rad}}$

Синтетический спектр звезды как объекта

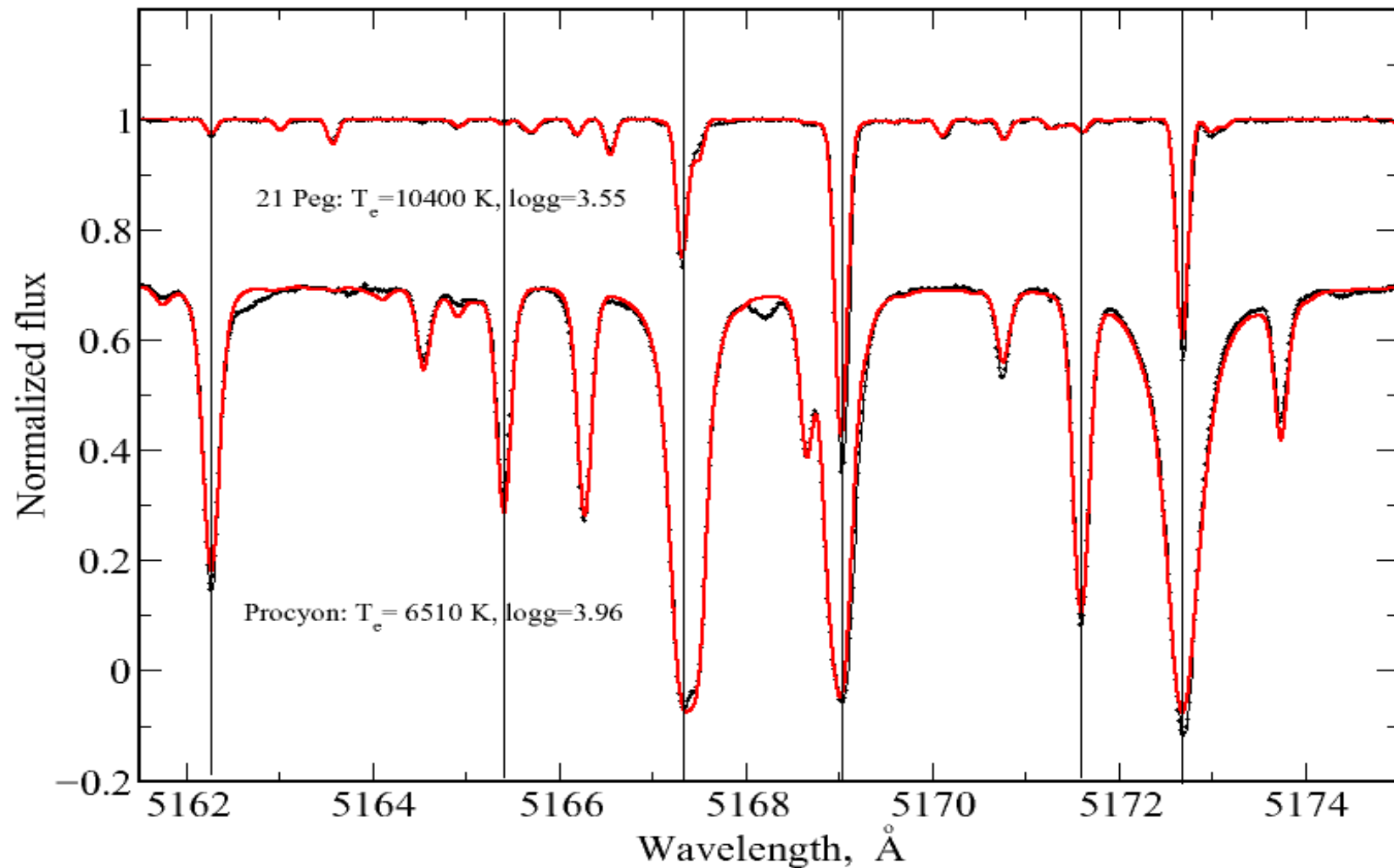
Характеристики наблюдений

$R \text{ спек.разр}, V \text{ скор Земли}, \theta \text{ угл.диам}$

Синтетический наблюдаемый спектр звезды



Примеры описания наблюдаемых спектров теоретическими синтетическими спектрами



Наблюдения – черные точки, красная линия – теоретический спектр