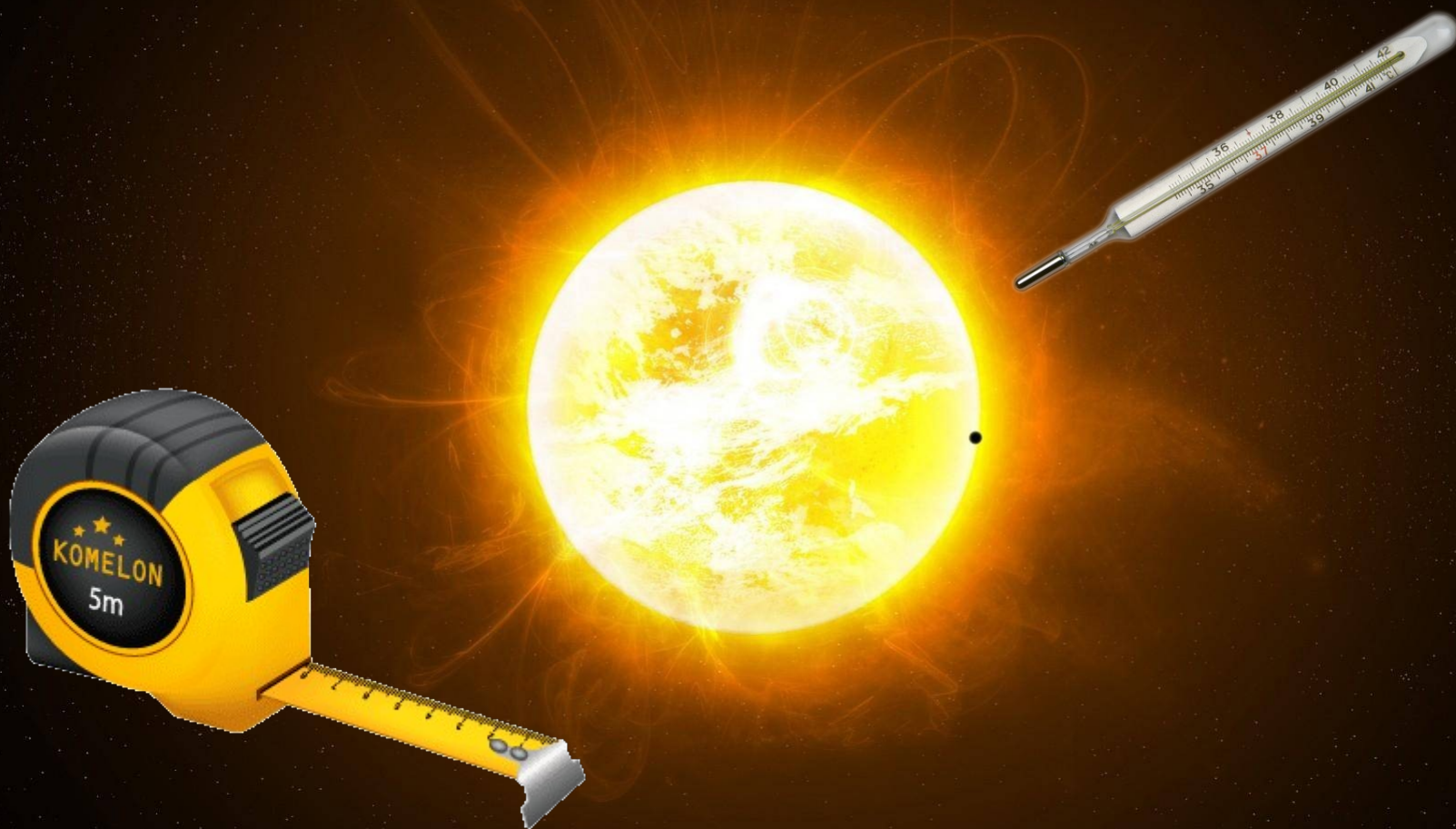


# Определение параметров звездных атмосфер



# Методы определения параметров звездных атмосфер

```
graph TD; A[Методы определения параметров звездных атмосфер] --> B[Модельно независимые]; A --> C[Модельно зависимые];
```

Модельно  
независимые

$T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$

Наблюдения

Модельно  
зависимые

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

$V_t$ ,  $V \sin i$

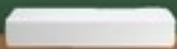
Наблюдения +  
моделирование

Фотометрические методы

Спектроскопические методы

# *Модельно-независимые методы*

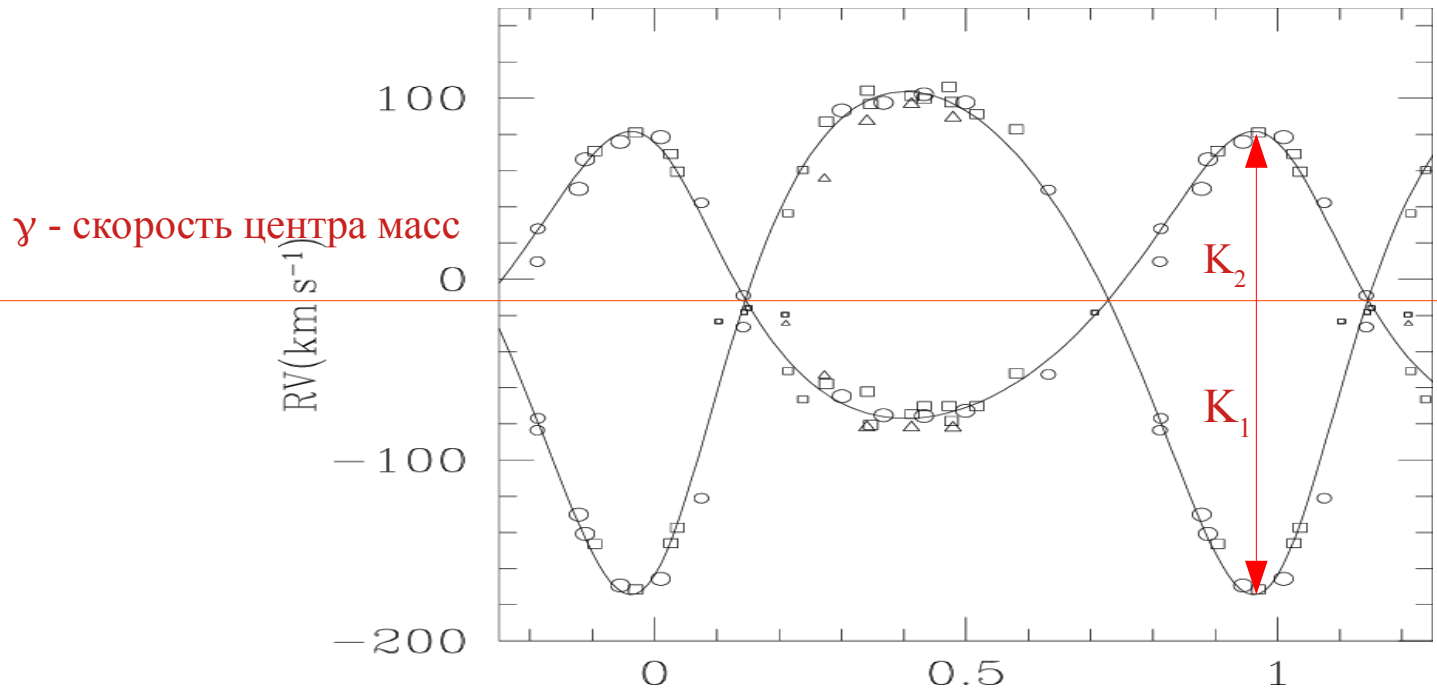
*Ускорение силы тяжести для спектральных  
и затменных двойных*



$$g = \frac{GM}{R^2}$$

Масса  $M$  определяется из анализа кривой лучевых скоростей

Радиус  $R$  – из анализа кривых блеска, интерферометрии или фотометрии



$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{K_1}{K_2} = q$$

$$V_{1rad} = \gamma + K_1 [\cos(\theta + \omega) + e \cos \omega]$$

$$V_{2rad} = \gamma - K_2 [\cos(\theta + \omega) + e \cos \omega]$$

Кривые лучевых скоростей  
через элементы орбиты

$$a_1 = K_1 P / (2\pi \sin i)$$

$$a_2^3 = G(M_1 + M_2) P^2 / (4\pi^2)$$

$$f(M_2) = \frac{M_2^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{M_1^3 q^3 \sin^3 i}{M_1 (1 + q)^2} = (1 - e^2)^{3/2} \frac{P K_1}{2\pi G}$$

***Модельно-независимые методы***

***Эффективная температура***

Единственный метод независимого определения  $T_{eff}$  без моделирования – наблюдения абсолютного потока  $f$  и углового диаметра  $\theta$

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

$$\theta = \frac{2R}{d}$$

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

$R$  – радиус  
 $d$  - расстояние

### **Задача.**

Каков угловой диаметр Солнца при наблюдениях с ближайшей звезды — Проксима Центавра?

$$R_{\text{sun}} = 700\,000 \text{ км}$$

$$d = 1.3 \text{ пк}$$

$$\theta = ?$$

### **Задача.**

Каков угловой диаметр Солнца при наблюдениях с ближайшей звезды — Проксима Центавра?

$$R_{\text{sun}} = 700\,000 \text{ км}$$

$$d = 1.3 \text{ пк}$$

$$\theta = 7.2 \text{ mas} = 0.0072''$$

Угловой радиус измерен только для наиболее ярких ближайших звезд с известными параллаксами по:

- интерферометрии;
- спекл-фотометрии;
- кривым блеска затменно-двойных;
- покрытие звезд Луной.

Для ~150 stars радиусы по интерферометрии определяются с точностью ~ 10%.

Table 3. Measures of the angular diameter of Arcturus with the corresponding effective temperatures.

| Technique | Author                        | Wavelength<br>(nm) | Diameter<br>(arcsec) | Notes | Effective<br>temperature (K) |
|-----------|-------------------------------|--------------------|----------------------|-------|------------------------------|
| A         | Pease (1931)                  | 575                | 0.020                | (1)   | 4419                         |
| A         | Pease (1931)                  |                    | 0.022                | (2)   | 4213                         |
| A         | Beavers (1965)                |                    | 0.024                |       | 4034                         |
| B         | Currie, Knapp & Liewer (1974) | 500                | $0.026 \pm 0.007$    | (3)   | $3876^{+658}_{-436}$         |
| C         | Gezari <i>et al.</i> (1972)   | 500                | $0.022 \pm 0.030$    | (4)   | $4213^{+321}_{-269}$         |
| C         | Worden (1976)                 | 420                | $0.027 \pm 0.010$    | (5)   | $3803^{+990}_{-554}$         |
| C         | Worden (1976)                 |                    | $0.019 \pm 0.006$    | (4)   | $4534^{+974}_{-582}$         |

Arcturus, K2 II, d = 11 pc

Technique A Michelson interferometer.  
B Amplitude interferometry.  
C Speckle interferometry.

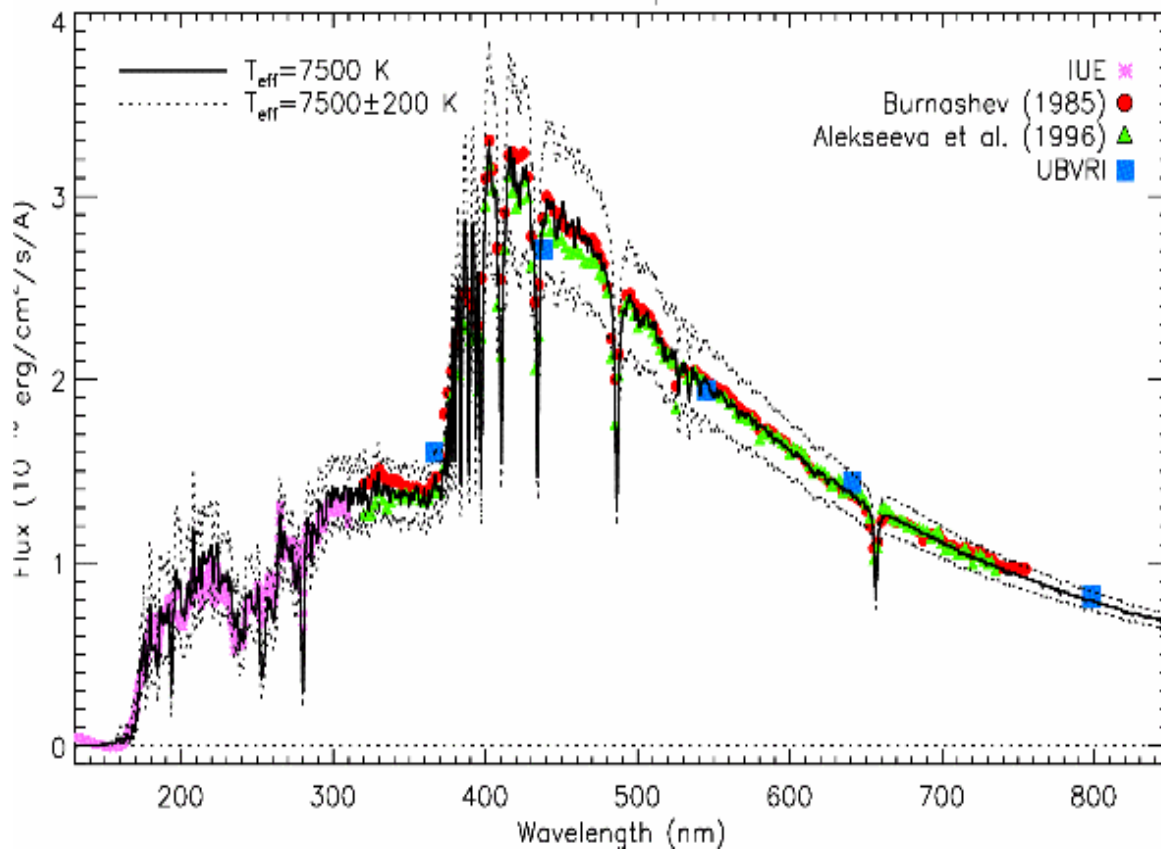
mean diameter =  $0.023 \pm 0.003$  arcsec

Notes:

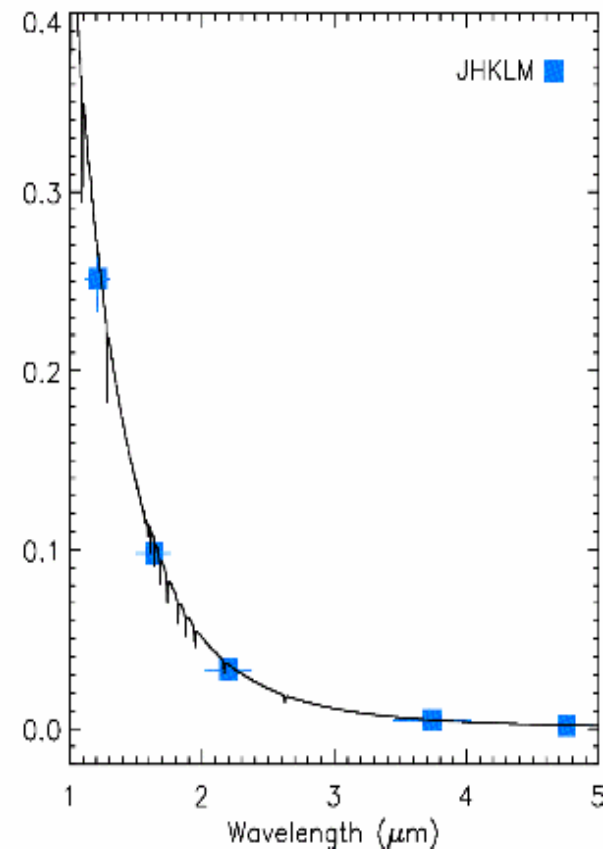
- (1) Probably uniform disk value.  
(2) Corrected for limb darkening by present authors (Section 4).  
(3) Total uncertainty.  
(4) For uniform disk (UD).  
(5) For limb darkened disk (LD).

from Blackwell &  
Shallis 1977

UV and optical



IR



Источники неопределенности в измерениях абсолютного потока:

- полное поглощение межзвездным газом излучения за Lyman'овским пределом;
- значительное покраснение на  $\lambda$  912 – 3000  $\text{\AA}$  для звезд с  $d > 100 \text{ pc}$ ;
- неопределенность в калибровке абсолютного потока.

Ligi et al., A&A 586, A94, 2016

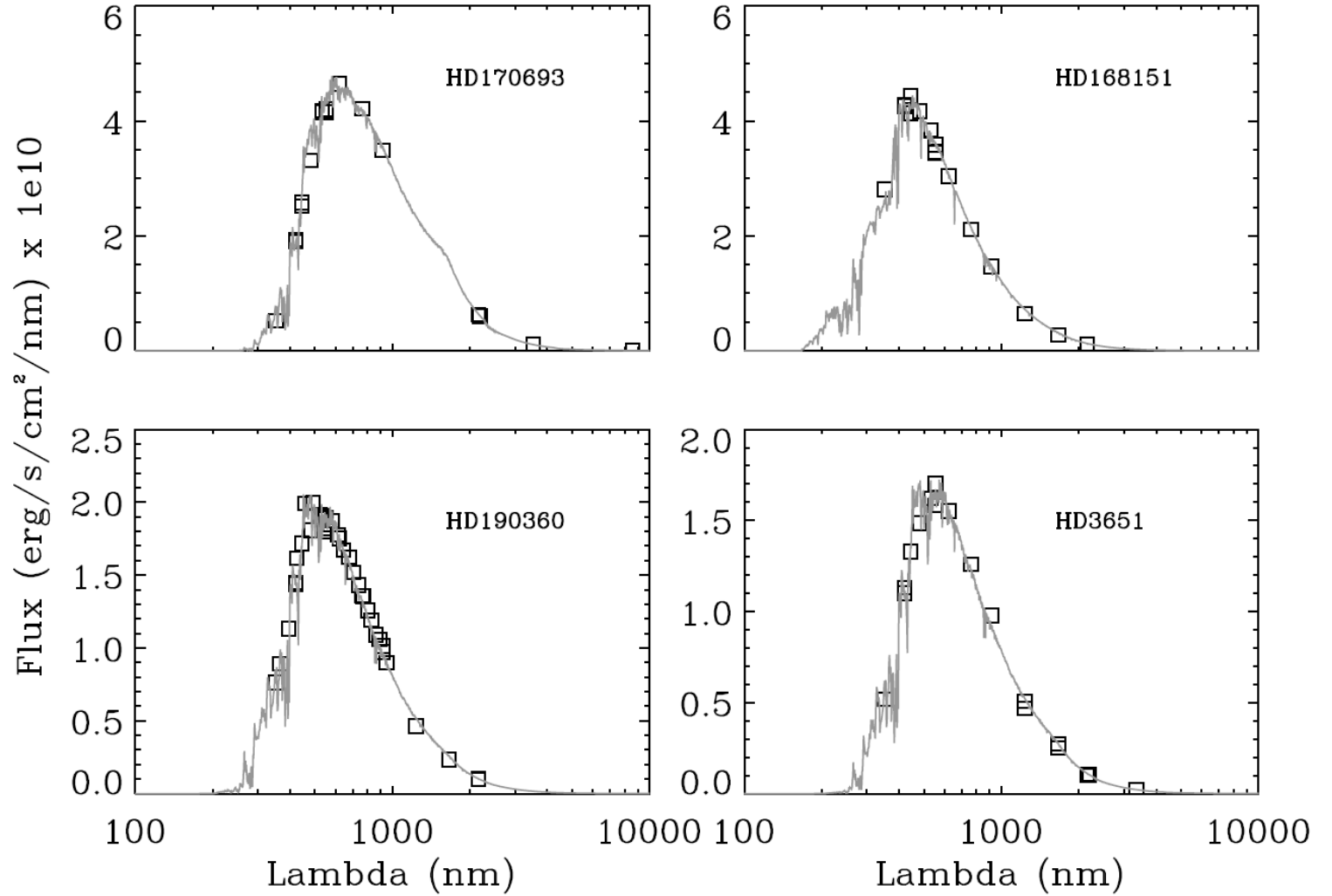


Fig. 1: Photometric energy distribution of four stars of the sample. Squares represent the photometric points and the gray curve represents the fitted spectrum (see Sect. 3.1).

Светимость можно также измерять по визуальной звездной величине, если знаем расстояние

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4$$

$$L_{\odot} = 3.846 \cdot 10^{33} \text{ erg/s}$$

$$\log \frac{L}{L_{\odot}} = 0.4(M_{bol\odot} - M_{bol}) = 0.4(4.74 - M_{bol})$$

$$M_{bol} = M_V - BC = m_V + 5 - 5\log d - A_V - BC$$

BC – болометрическая поправка, учитывающая поток в UV и вычисляемая по *моделям атмосфер*;

$m_V$  – видимая звездная величина;

$M_V$  – абсолютная визуальная звездная величина

$M_{bol}$  – болометрическая звездная величина

$A_V$  – межзвездное поглощение в полосе V

*Модельно-зависимые методы*

*Метод инфракрасных потоков*

## Метод инфракрасных потоков (IRFM)

- ◆ Метод применим к звездам, у которых нет измерений параллаксов.
- ◆ Может зависеть от типа модели атмосферы
- ◆ Сильно зависит от межзвездного покраснения.

Alonso et al. (начиная с 1995) определили  $T_{eff}$ (IRFM) для более чем 1000 звезд.

Работы были продолжены Ramirez & Melendez

Строго говоря, IRFM не является полностью модельно-независимым методом

**IRFM** метод основан на измерении интегрального потока  $\mathcal{F}$  и монохроматического потока в ИК-области  $F_\nu$

$$\begin{cases} \mathcal{F} &= \frac{\theta^2}{4} \sigma T_{\text{эфф}}^4 \\ F_\nu &= \frac{\theta^2}{4} \phi(T_{\text{эфф}}, g, \lambda) \end{cases}$$

функция  $\phi(T_{\text{эфф}}, g, \lambda)$  в прближении абсолютно черного тела определяется законом Планка или в ИК-области законом Рэлея-Джинса:

$$\frac{2c}{\lambda^4} k T_{\text{эфф}}$$

В этом случае отношение потоков зависит только от температуры:

$$\frac{\mathcal{F}}{F_\nu} = \frac{\sigma T_{\text{эфф}}^4}{\phi(T_{\text{эфф}}, g, \lambda)} = \frac{\lambda^4 \sigma T_{\text{эфф}}^3}{2ck}$$

## The Infrared Flux Method (Blackwell & Shallis 1977)

$$\theta^2 = f / F = f_{\nu} / F_{\nu}$$

Соотношение справедливо для  
любой частоты

- ИК поток зависит главным образом от температуры
- Относительная ошибка  $\theta$  в 2 раза меньше ошибки в  $T_{eff}$
- в ИК диапазоне мало спектральных линий – меньше влияние
- в ИК диапазоне хорошо известны источники непрозрачности
- Межзвездное поглощение минимально в ИК

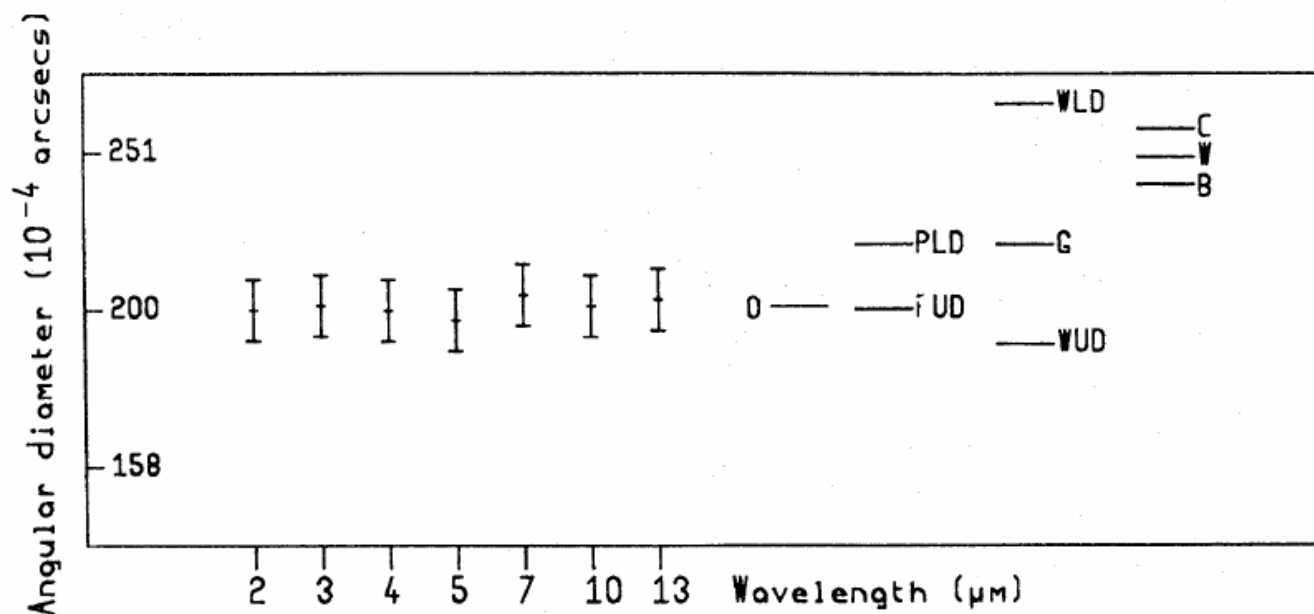
Угловой радиус  $\theta$  определяется из наблюдений для ряда инфракрасных монохроматических потоков  $f_{\nu}$

Действительный поток  $F$  с поверхности звезды вычисляется из модели.

$T_{eff}$  и  $\theta$  вычисляются итеративно:

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

$$T_{eff}(0) \rightarrow F_{\nu}, F \rightarrow \theta \rightarrow T_{eff}(1) \rightarrow \dots$$



**Figure 1.** Deduction of angular diameter of Arcturus at a set of infrared wavelengths from measured fluxes. Other measurements of angular diameter are marked on the diagram: PUD, PDL, Pease (1931), uncorrected and corrected for limb darkening; W. Wesselink *et al.* (1972); WUD, WLD, Worden (1976); G, Gezari, Labeyrie & Stachnik (1972); C, Currie *et al.* (1974); Beavers (1965). The angular diameter scale is logarithmic.

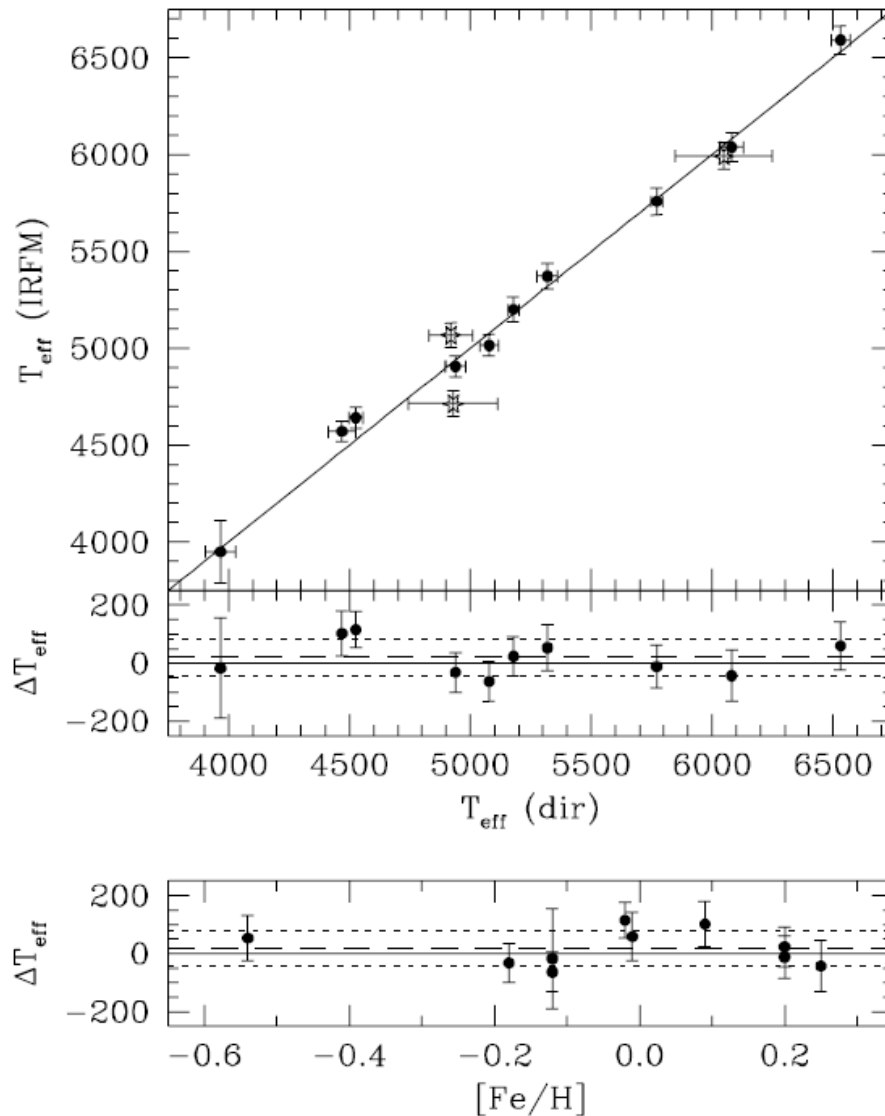


FIG. 16.—Comparison between the IRFM temperatures and the direct ones (in K) for the 13 dwarf (11) and subgiant (2) stars in Table 4. The three open symbols are HD 16160, HD 26965, and HD 209458; they are not plotted in the residuals. The differences between the IRFM temperatures and the direct ones as a function of  $T_{\text{eff}}$  and  $[\text{Fe}/\text{H}]$  are also shown with error bars containing the uncertainties in both  $T_{\text{eff}}$  (IRFM) and  $T_{\text{eff}}$  (dir). The dashed line is at  $\Delta T_{\text{eff}} = 18$  K and the dotted lines at  $\Delta T_{\text{eff}} = 18 \pm 62$  K.

## Ускорение силы тяжести из тригонометрического параллакса

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4 \qquad g = \frac{GM}{R^2} \quad g_{\odot} = \frac{GM_{\odot}}{R_{\odot}^2}$$

$$\log g = -10.607 + \log M + 4\log T_{eff} - \log L$$

$$\log \frac{L}{L_{\odot}} = 0.4(M_{bol\odot} - M_{bol})$$

$$M_{bol} = M_V + BC = m_V + 5 - 5\log d - A_V + BC$$

$T_{eff}$  уже как-то определили,  $d = 1000/\pi$  (mas);

Масса  $M$  из **эволюционных расчетов (модельная зависимость)**;

Этот метод дает хорошие результаты для звезд с надежными параллаксами ( $d < 200$  pc). А также позволяет определять расстояние до звезды, зная ее параметры.

*Модельно-зависимые методы*

*Фотометрия (  $T_{\text{eff}}$  )*

# I. Фотометрические методы.

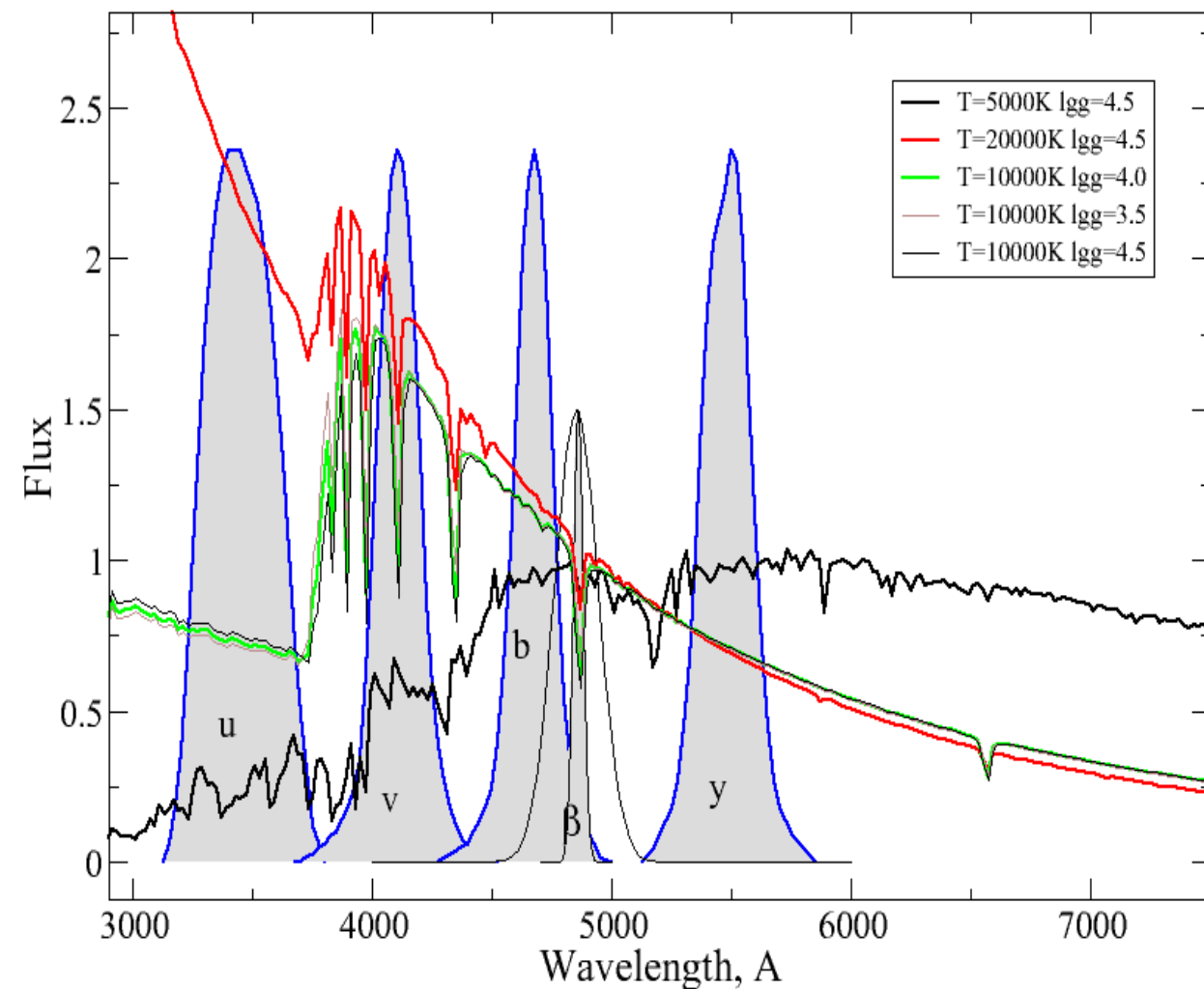
Основаны на зависимости распределения энергии в спектре от параметров

Чувствительность к  $T_{\text{eff}}$ :

- Наклон Пешеновского континуума  $F_{4000}/F_{7000}$
- $c_1 = (u - v) - (v - b)$  (или свободный от покраснения  $[c_1]$ ) для горячих звезд  $(F_{3500}/F_{4100}) / (F_{4100}/F_{4700})$
- b-y  $(F_{4700}/F_{5550})$ , B-V  $(F_{4400}/F_{5500})$ , V-J  $(F_{5500}/F_{1.2\mu\text{m}})$ , V-H  $(F_{5500}/F_{1.6\mu\text{m}})$ , V-K  $(F_{5500}/F_{2.2\mu\text{m}})$  для холодных звезд (K, G, F)

Зависимость показатель цвета — температура из моделей или из выборки звезд с хорошо известными параметрами

# Система Стремгрена



**Индексы системы  
Стремгрена:**

**b-y, m1, c1,  $\beta$**

$$m1 = (v - b) - (b - y)$$

$$c1 = (u - v) - (v - b)$$

$$\beta = \beta_{\text{narrow}} - \beta_{\text{wide}}$$

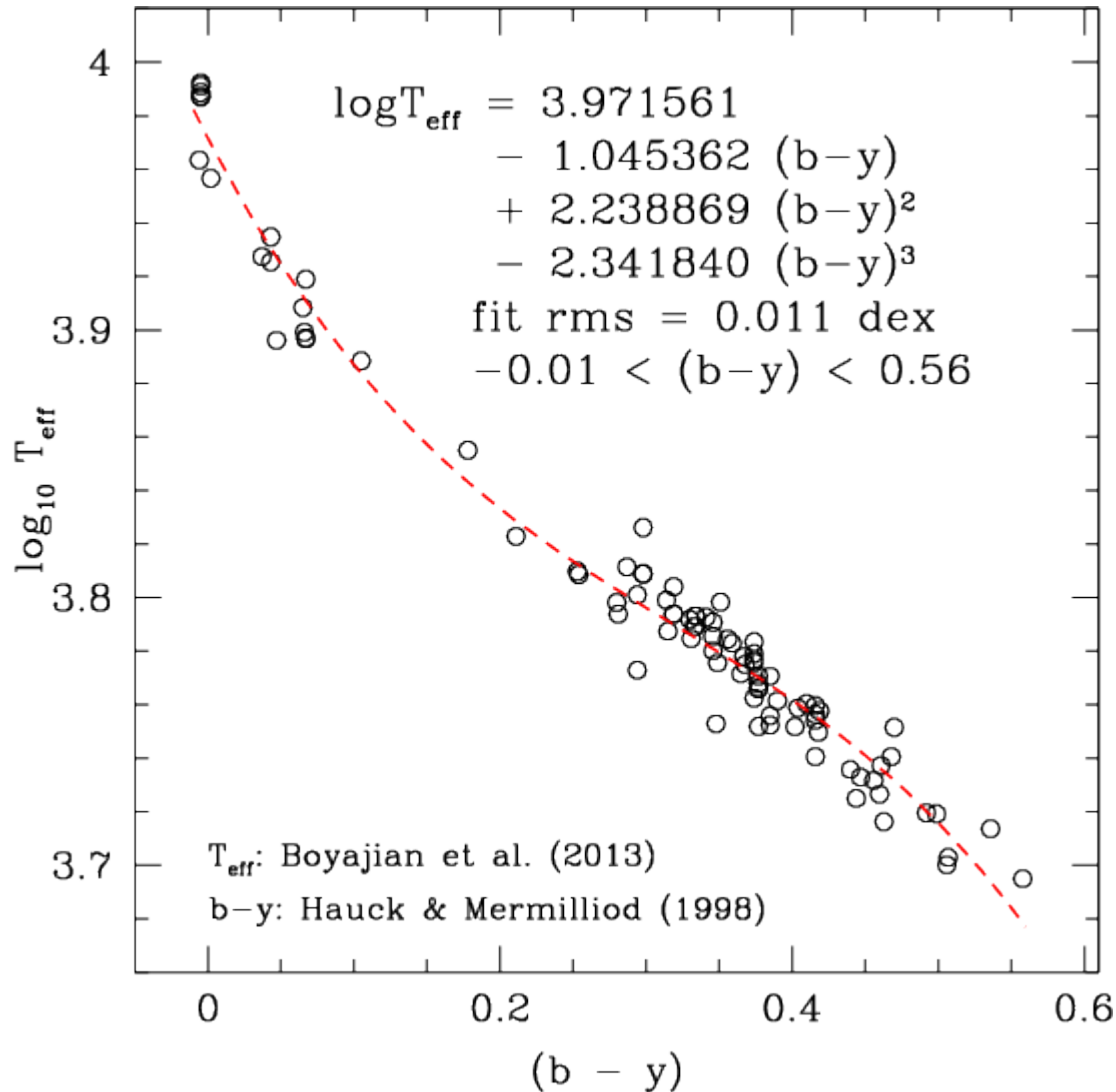
**(b-y)** чувствителен к T

**c1** чувствителен к log g  
(величина бальмеровского  
скачка )

**m1** чувствителен к  
металличности (мера  
поглощения в линиях).

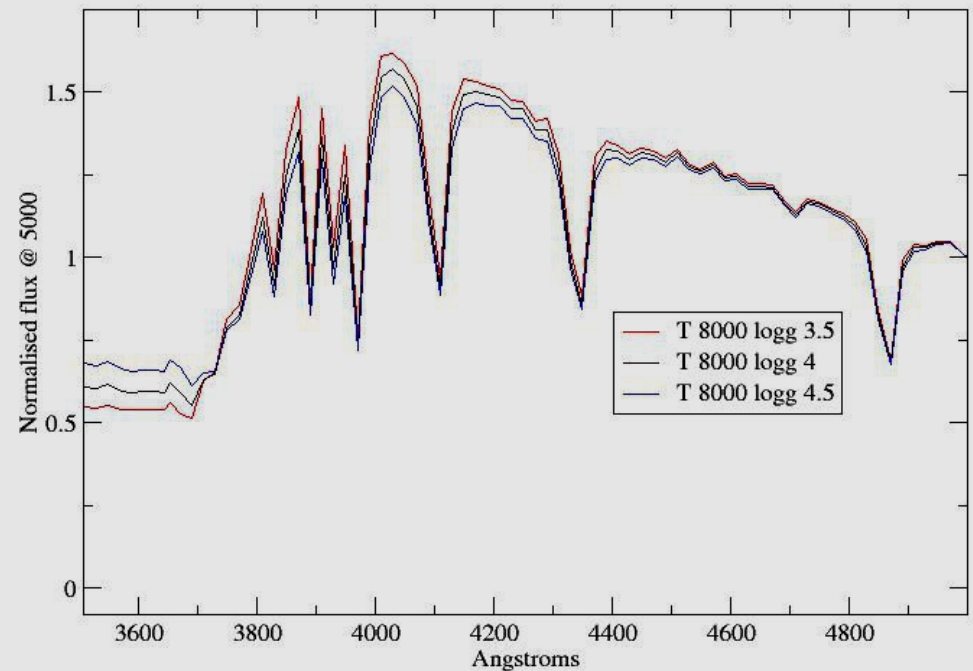
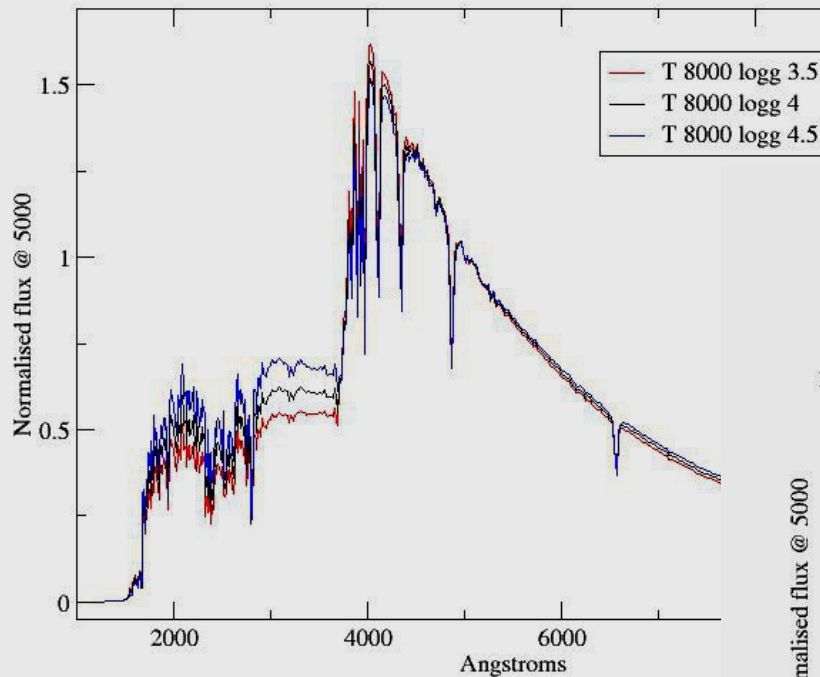
# Калибровка температуры по (b-y) (Eric Mamajek)

125 звезд с температурами по интерферометрии

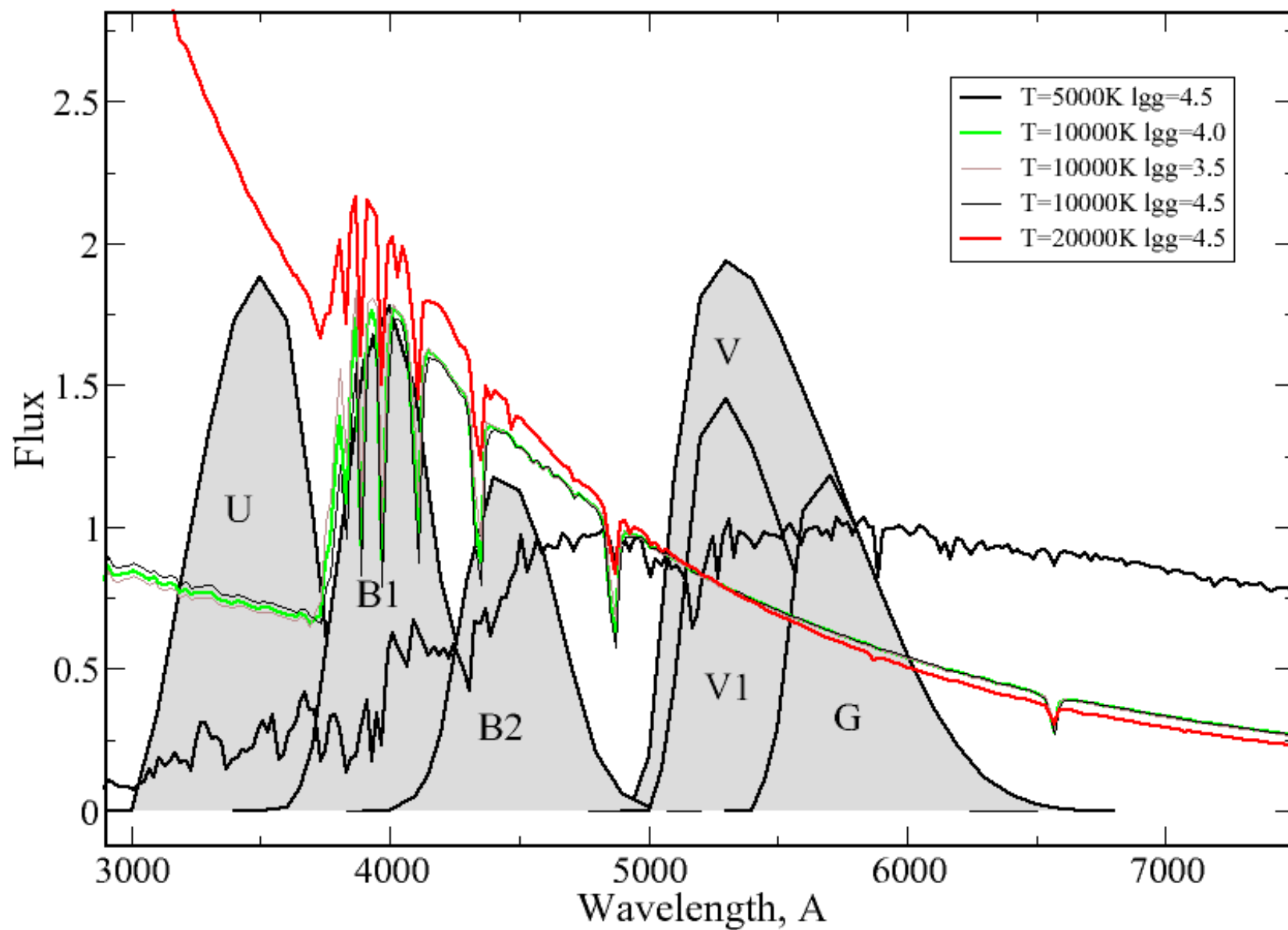


# Определение ускорения силы тяжести по фотометрии

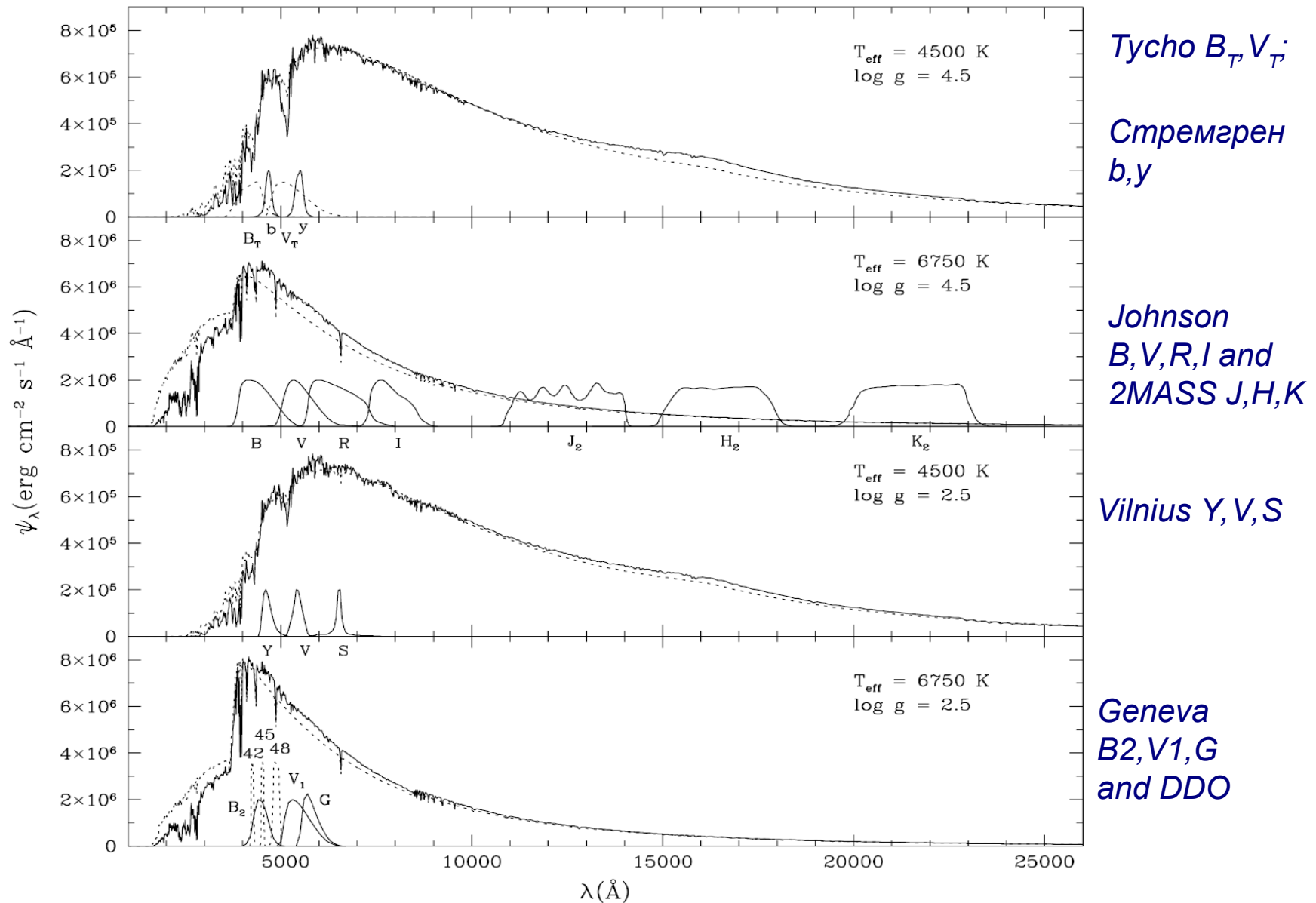
Величина Бальмеровского скачка изменяется с изменением  $\log g$



## Женевская фотометрическая система

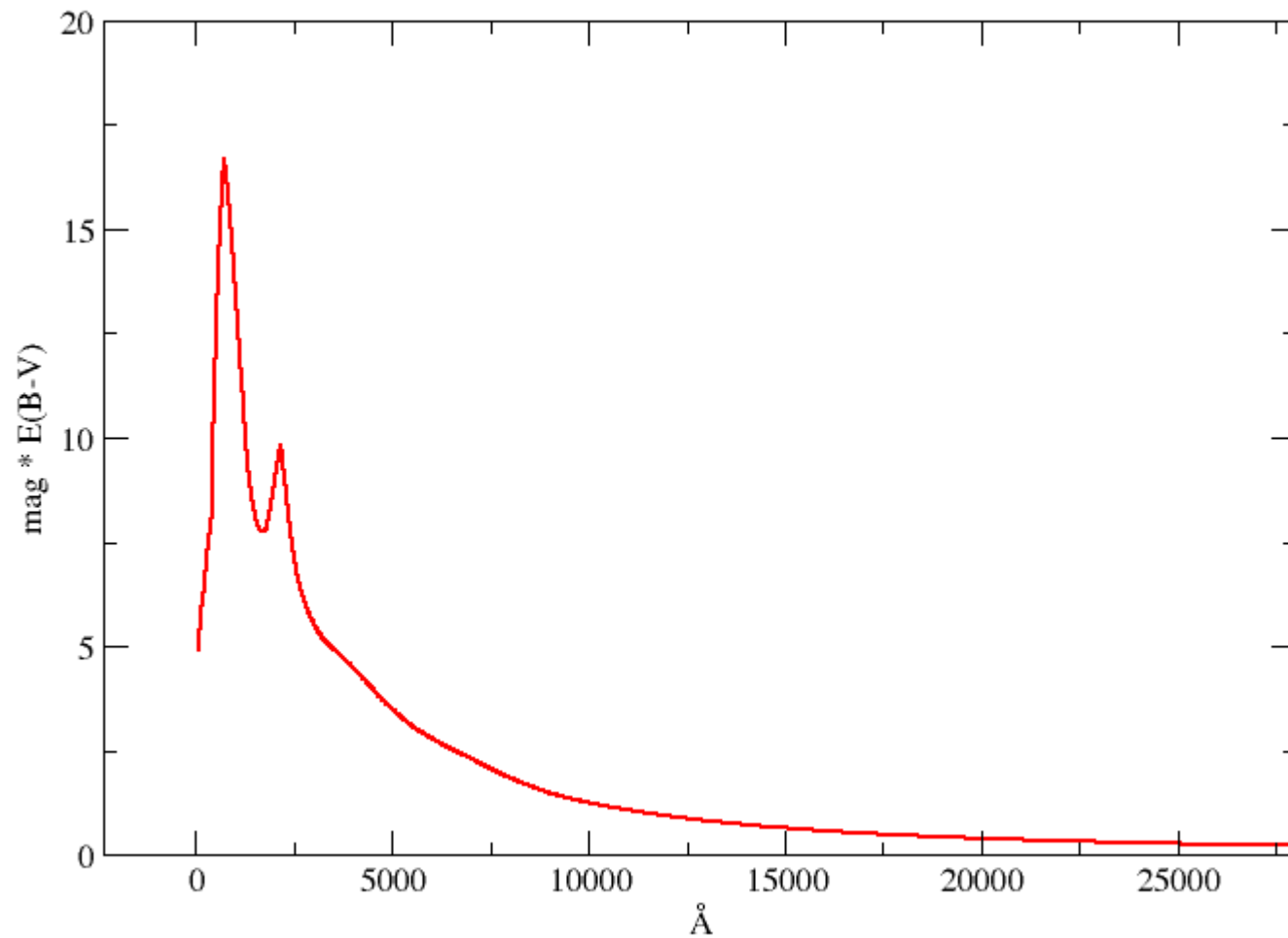


Примеры фотометрических систем, используемых при калибровках FGK-звезд  
солнечная металличность  $[Fe/H]=0$  – сплошная линия;  $[Fe/H]=-2.5$  – штриховая линия



# Влияние межзвездного покраснения

$E(B-V)$  – избыток цвета



Сравнение эффективных температур для 44 F0-K5 звезд  
( $7000 < T_{\text{eff}} < 4000$  K), полученных по калибровкам фотометрических  
индексов и по интерферометрии  
(Ramirez & Melendez, 2005, ApJ 626, 465)

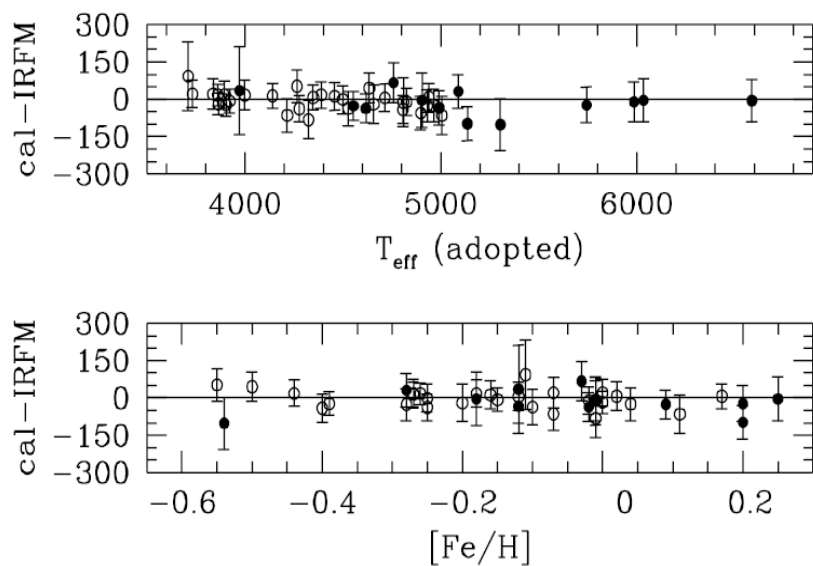


FIG. 5.—Difference between the temperatures from the color calibrations and the IRFM temperatures as a function of the adopted temperatures and metallicities of dwarfs (*filled circles*) and giants (*open circles*).

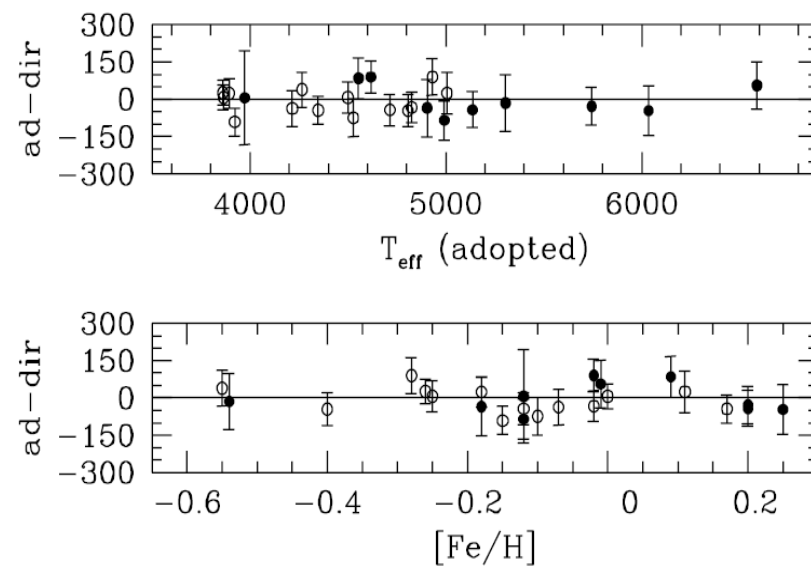


FIG. 6.—Difference between the adopted temperatures and direct temperatures as a function of the adopted temperatures and metallicities of dwarfs (*filled circles*) and giants (*open circles*).

# Источники фотометрических данных

- Оригинальные Статьи
- Каталоги
- Электронные базы данных
  - Sinbad
  - VizieR
  - Другие
    - Фотометрические данные для Стремгеновской и Женевской фотометрических систем можно взять из on-line каталога: [obswww.unige.ch/gcpd/ph13.html](http://obswww.unige.ch/gcpd/ph13.html)

Программа TempLogg определения параметров атмосфер по фотометрическим индексам

## Определение параметров путем подгонки теоретического распределения потока к наблюдаемому.

Необходимо иметь:

а. наблюдаемое распределение потока в абсолютных единицах,  
исправленное за межзвездное поглощение

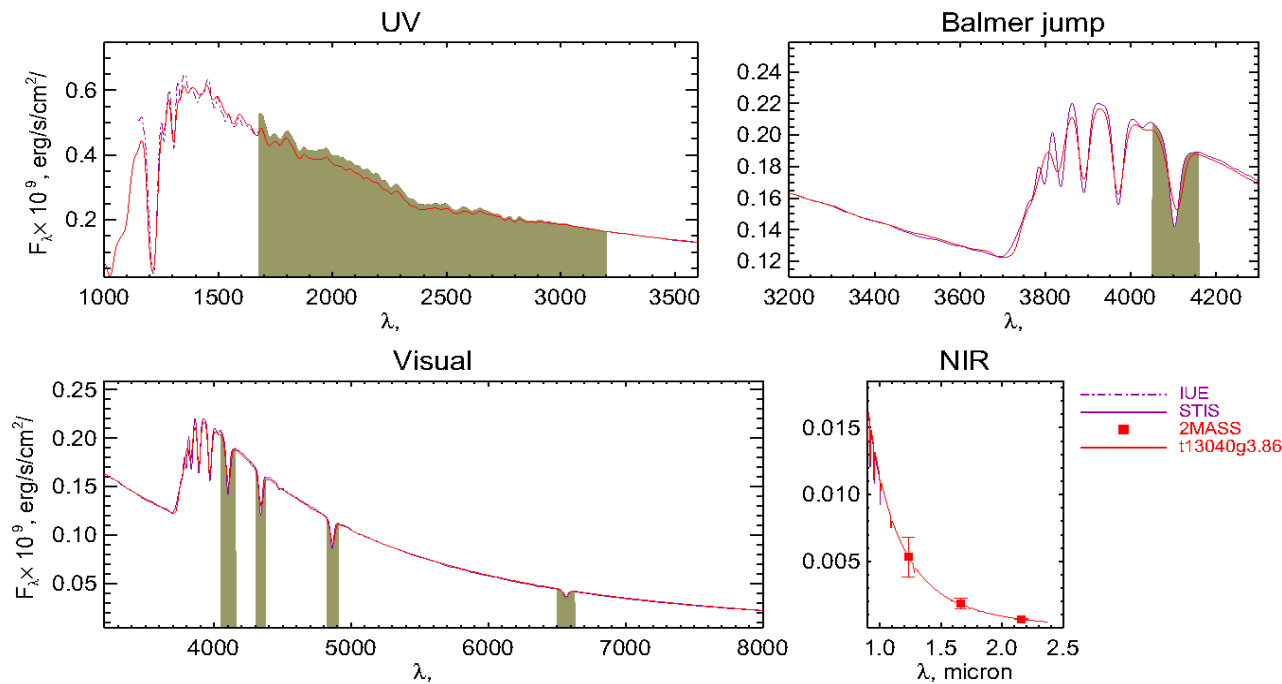
б. параллакс

Одновременно можно оценить радиус звезды

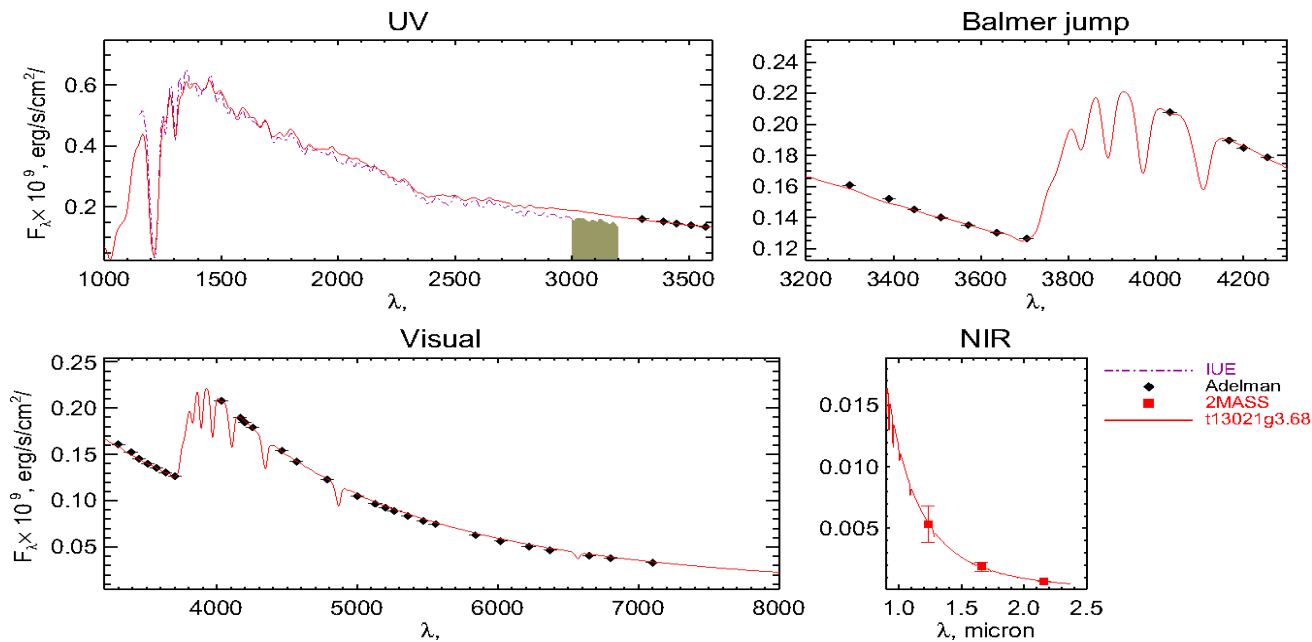
Примеры:

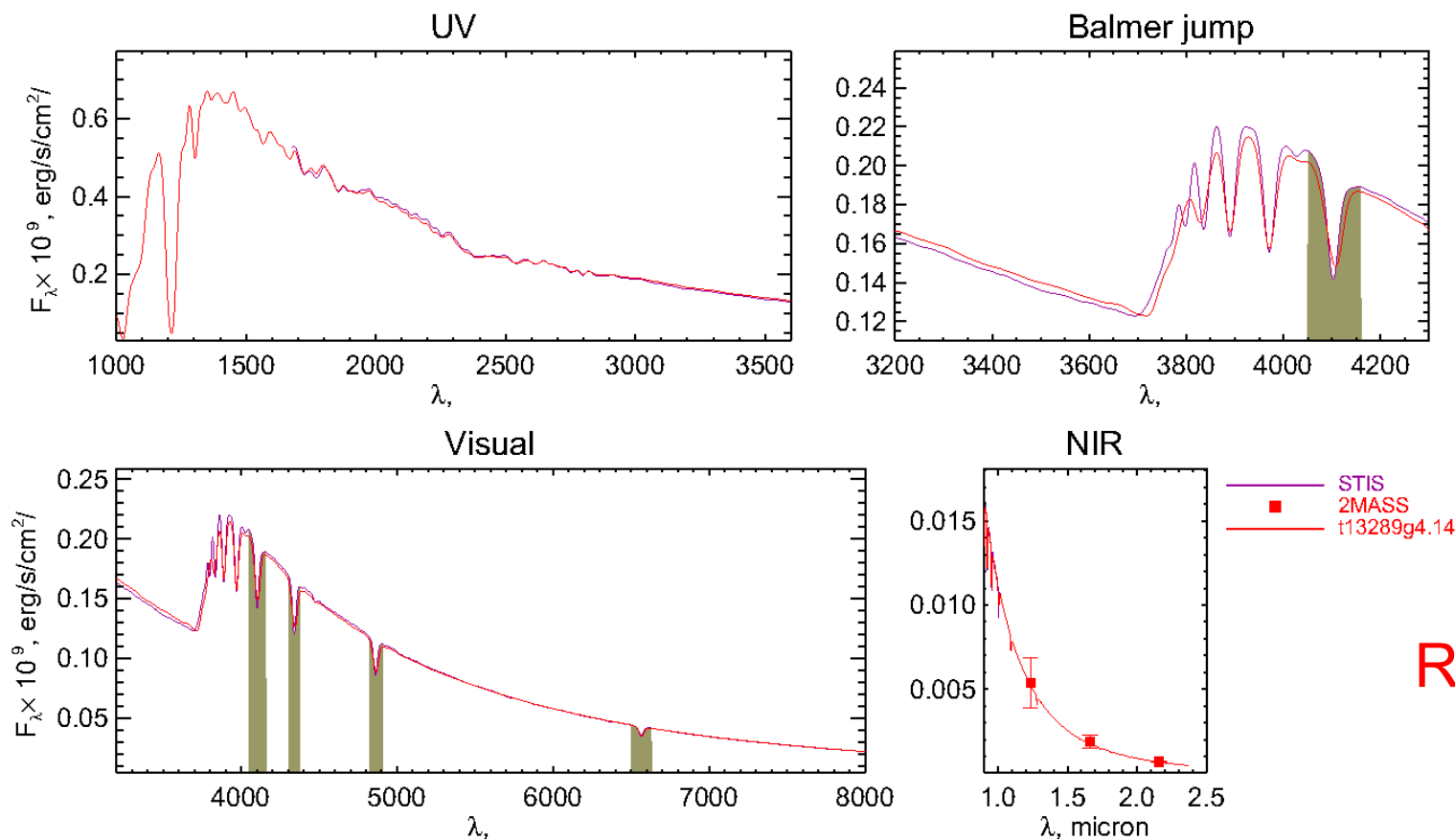
$\pi$  Cet  
 $\pi=8.3$  mas  
 $d=120$  pc

$R=4.57 R_{\odot}$



$R=4.62 R_{\odot}$





$$R = 4.48 R_{\odot}$$

Данные любезно предоставлены Д. Шуляком (Германия)

Параметры по спектроскопии:

$T_{\text{eff}} = 12800 \pm 200 \text{ K}$ ,  $\log g = 3.75 \pm 0.10$  (Fossati et al. 2009)

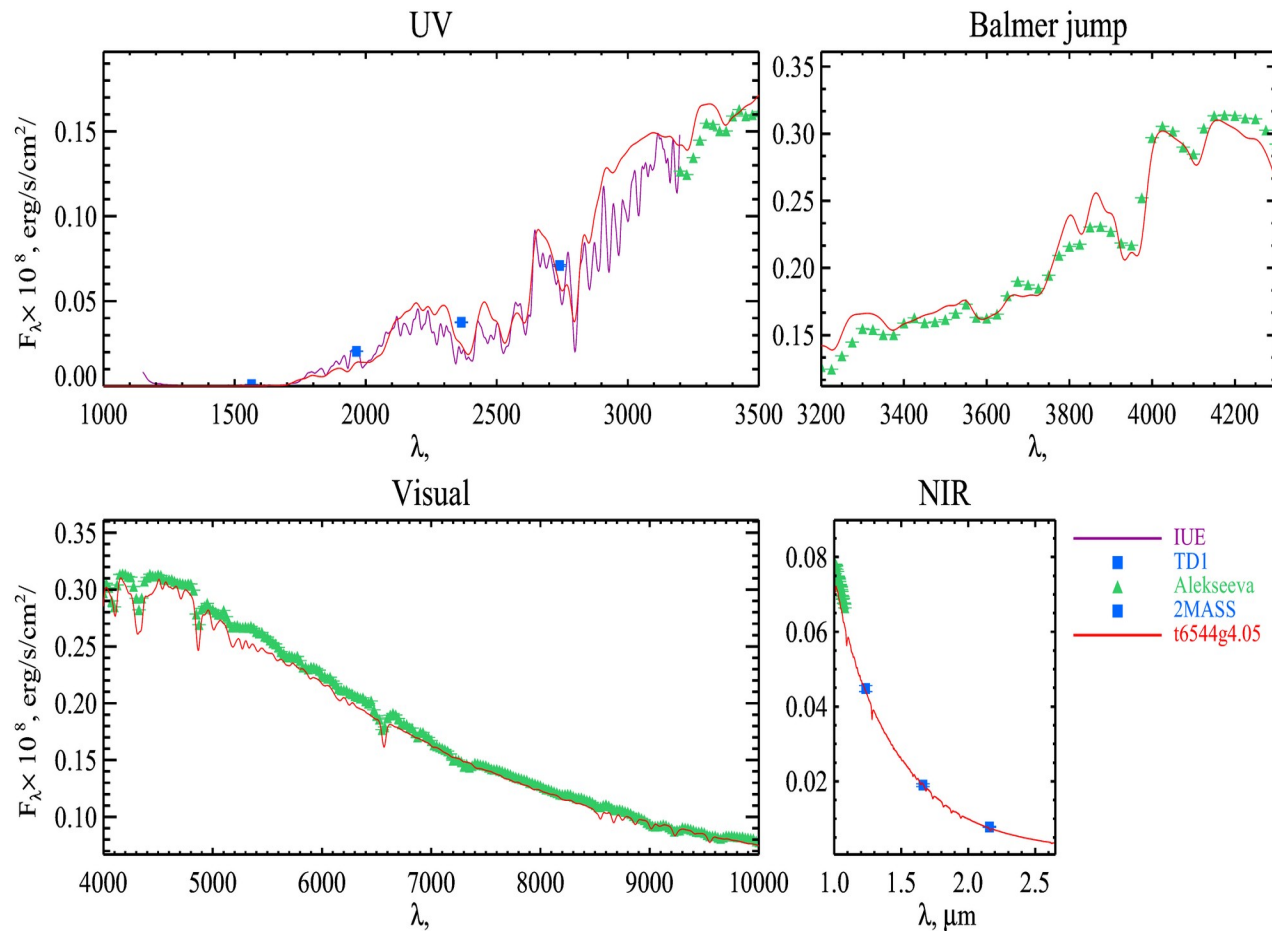
$T_{\text{eff}} = 13100 \pm 300 \text{ K}$ ,  $\log g = 3.93 \pm 0.06$  (SME)

# Определение параметров атмосферы по наблюдаемой спектрофотометрии: Procyon ( $R_{interf}=2.036R_{\odot}$ )

**Alekseeva (Pulkovo):**  $T=6544\pm 6$ ,  $\log g=4.05\pm 0.02$ ,  $R=1.974R_{\odot}$

**Breger:**  $T=6705\pm 8$ ,  $\log g=3.98\pm 0.01$ ,  $R=1.942R_{\odot}$

**Glushneva (Moscow):**  $T=6771\pm 8$ ,  $\log g=4.04\pm 0.02$ ,  $R=1.920R_{\odot}$



## Вместо абсолютных потоков можно использовать звездные величины в разных фильтрах

$$m_X = -2.5 \lg \frac{\int F_\lambda R_\lambda d\lambda}{\int R_\lambda d\lambda} + 21.100 + ZP_\lambda$$

$$m_X = -2.5 \lg \frac{\int F_\nu R_\nu d\nu}{\int R_\nu d\nu} + 48.60 + ZP_\nu$$

ZP → zero point — точка отсчета для определенного фильтра X

ZP задается из критерия: звезда A0V во всех фотометрических полосах m=0

Или: Вега во всех полосах m=0.03<sup>m</sup>

**Table A2.** Effective wavelengths (for an A0 star), absolute fluxes (corresponding to zero magnitude) and zeropoint magnitudes for the UBVRI-JHK<sub>L</sub> Cousins-Glass-Johnson system

|                   | U      | B      | V     | R     | I     | J     | H     | K     | K <sub>p</sub> | L     | L*    |
|-------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| $\lambda_{eff}$   | 0.366  | 0.438  | 0.545 | 0.641 | 0.798 | 1.22  | 1.63  | 2.19  | 2.12           | 3.45  | 3.80  |
| $f_\nu$           | 1.790  | 4.063  | 3.636 | 3.064 | 2.416 | 1.589 | 1.021 | 0.640 | 0.676          | 0.285 | 0.238 |
| $f_\lambda$       | 417.5  | 632    | 363.1 | 217.7 | 112.6 | 31.47 | 11.38 | 3.961 | 4.479          | 0.708 | 0.489 |
| zp( $f_\lambda$ ) | 0.770  | -0.120 | 0.000 | 0.186 | 0.444 | 0.899 | 1.379 | 1.886 | 1.826          | 2.765 | 2.961 |
| zp( $f_\nu$ )     | -0.152 | -0.602 | 0.000 | 0.555 | 1.271 | 2.655 | 3.760 | 4.906 | 4.780          | 6.775 | 7.177 |

## Фотометрические методы: +++ и - - -

- + Могут применяться для звезд на любых расстояниях.
- Межзвездное поглощение (**reddening**) чаще всего известно весьма приблизительно
- Почти все фотометрические индексы не являются однозначными функциями только одного параметра.
- Проблемы калибровки в абсолютные потоки

# ***Модельно-зависимые методы***

***Спектроскопия  
( $T_{\text{eff}}$ ,  $I_{\text{gg}}$ ,  $X/H$ ,  $V_{\text{micro}}$ ,  $V_{\text{macro}}$ ,  $V_{\text{sini}}$ )***

# Спектроскопические методы определения параметров атмосферы

базируются на чувствительности спектральных линий к изменению параметров атмосфер звезд,  $T_{eff}$ ,  $\log g$ , содержания химических элементов, микротурбулентной скорости  $\xi_t$

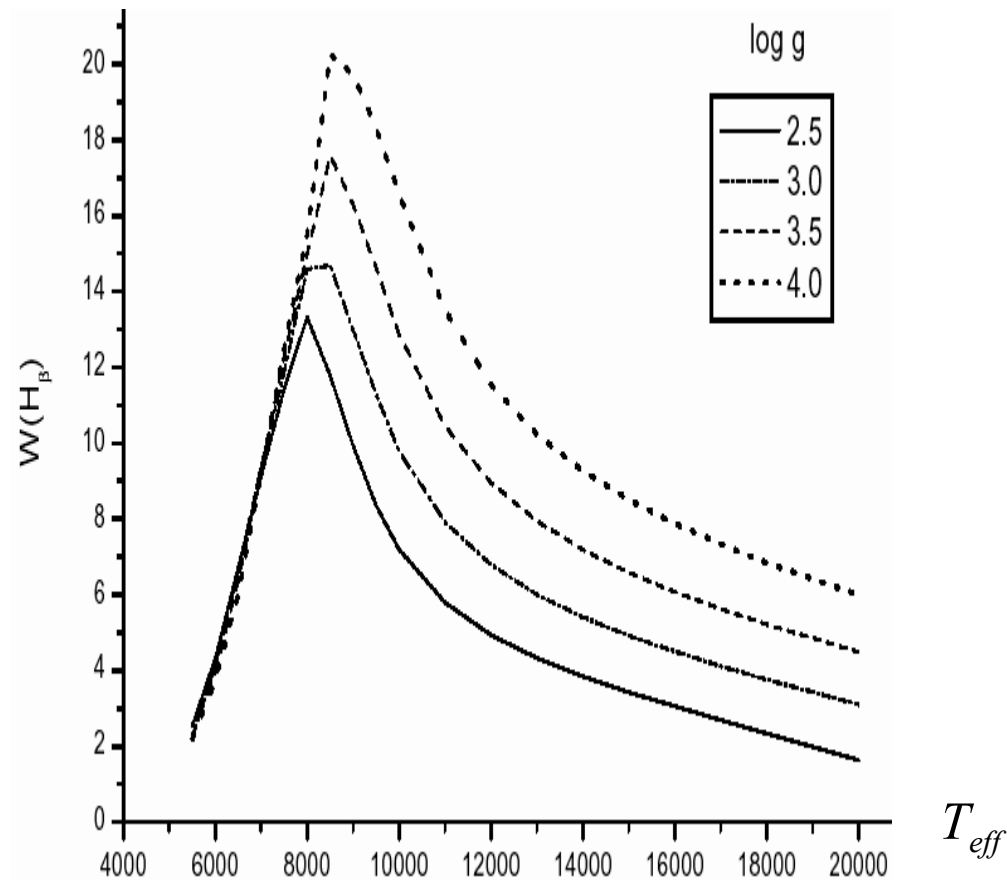
В отличии от континуума, излучение в линиях формируется в широком диапазоне оптических глубин, крылья линий – в глубоких слоях атмосферы, тогда как ядра формируются в более высоких слоях атмосферы звезды.

Для определения параметров необходимо иметь

- ◆ спектры высокой разрешающей силы ( $R = \lambda / \Delta\lambda > 30000$ ) ;
- ◆ списки линий с надежными атомными параметрами;
- ◆ соответствующие программы количественного анализа спектральных линий.

# Бальмеровские линии водорода

Линии серии Бальмерв чувствительны к температуре для звезд A5 и холоднее, и являются индикаторами ускорения силы тяжести для O – B звезд

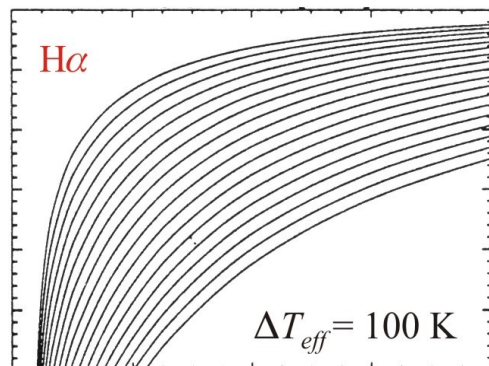


# Чувствительность профилей линий Бальмера к различным параметрам атмосфер звезд

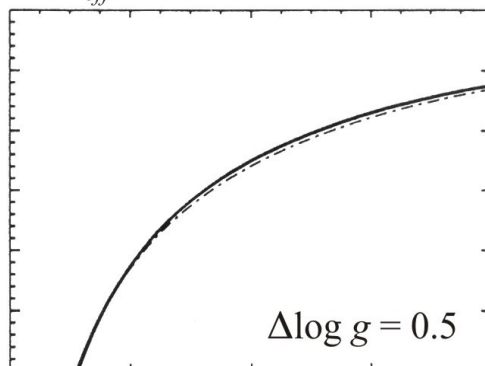
( $H_\alpha$  and  $H_\beta$  и их изменение с изменением параметров атмосферы)

$T_{eff}$  (левая колонка, 5000 – 6500 K),  $\log g$  (средняя, 3.0 – 4.5) и  $[M/H]$  (правая колонка, 0.5 – (-3.0))

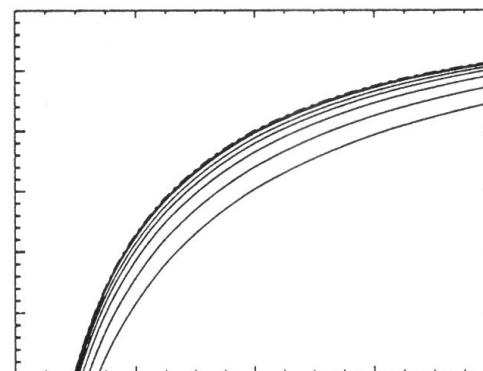
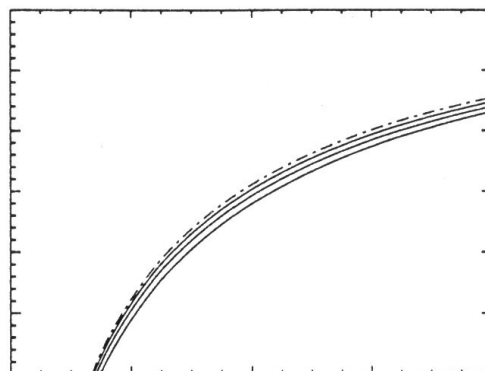
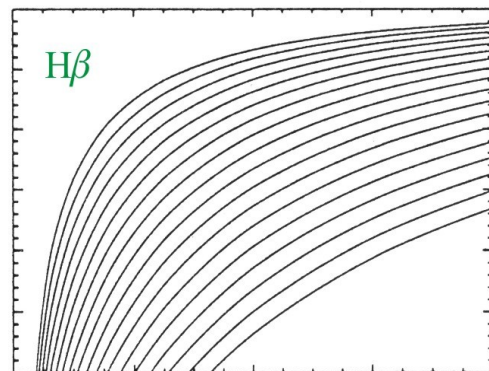
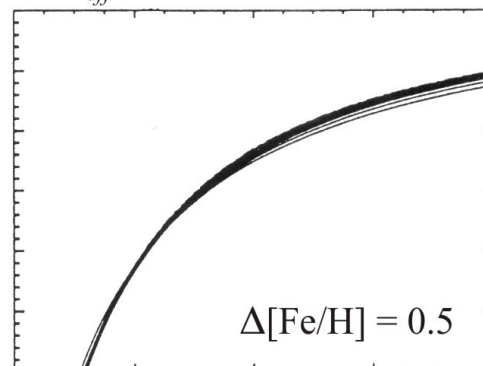
(a)  $\log g = 4.0$ ,  $[Fe/H] = 0$



(b)  $T_{eff} = 6000$  K,  $[Fe/H] = 0$

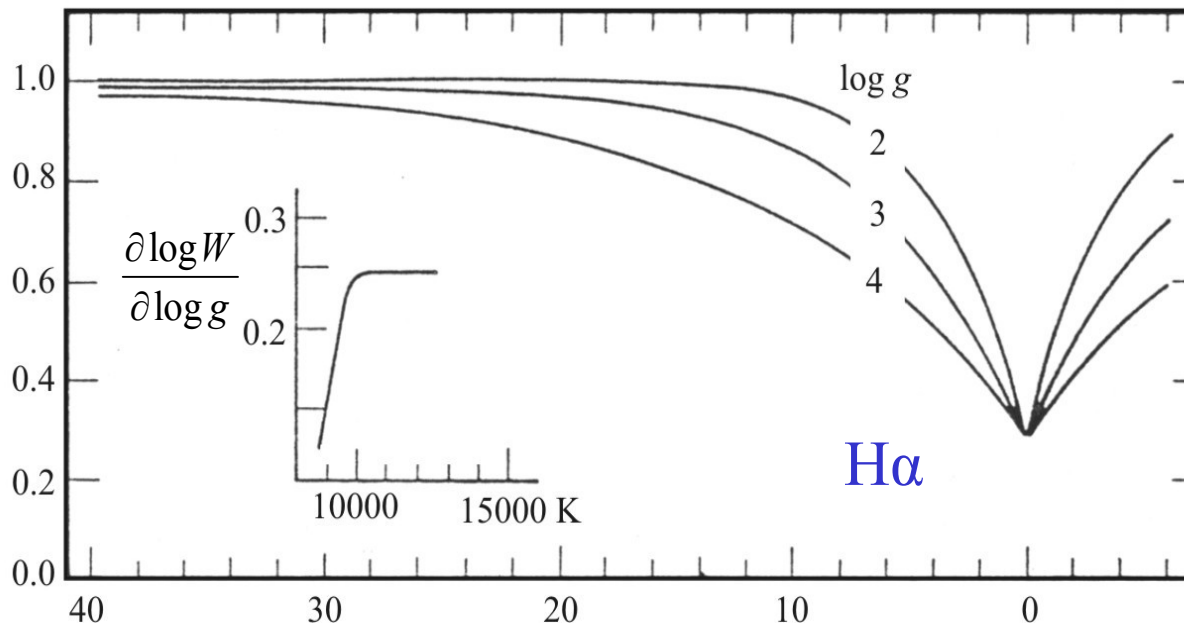


(c)  $T_{eff} = 6000$  K,  $\log g = 4.0$



# Линии Бальмера в горячих звездах: определение $\log g$

Профили линий Бальмера меняются в зависимости от величины  $\log g$  в горячих звездах с температурой выше  $T_{eff} \sim 10000$  К из-за вариации Штарковского уширения. Чем выше ускорение силы тяжести, тем шире крылья линий.

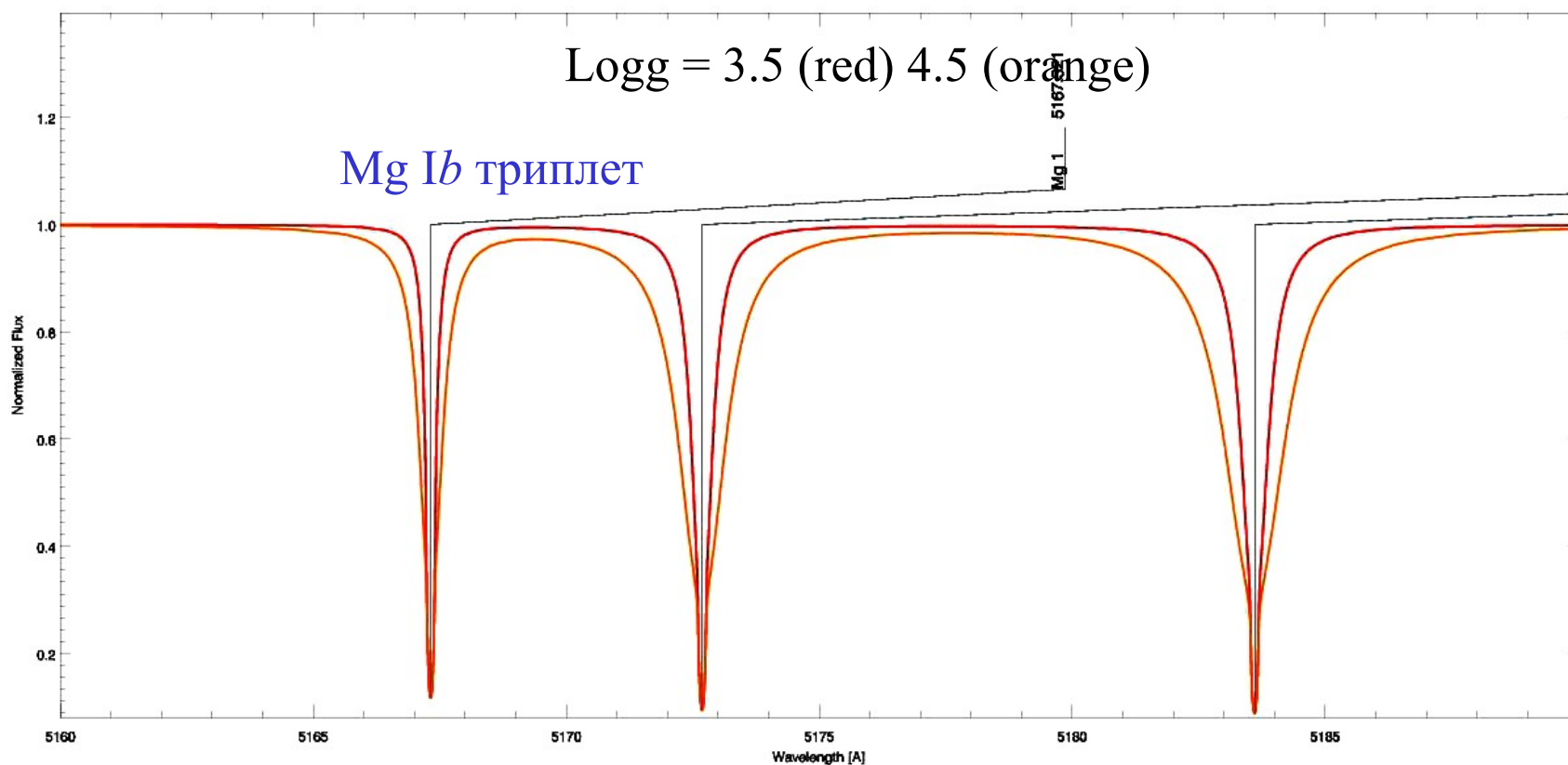


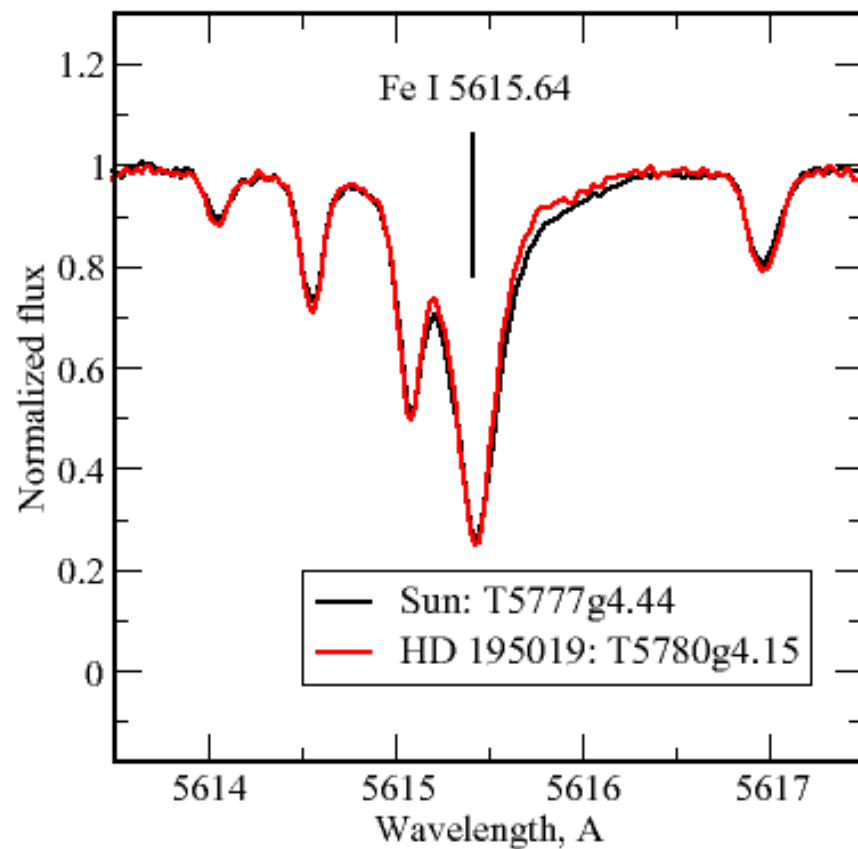
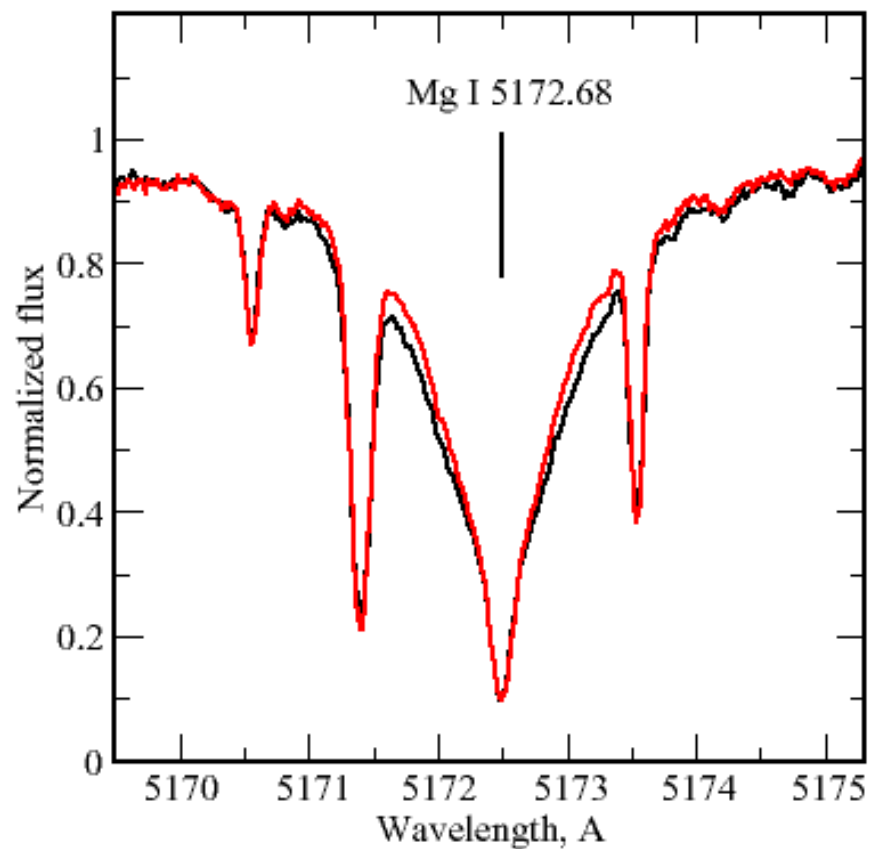
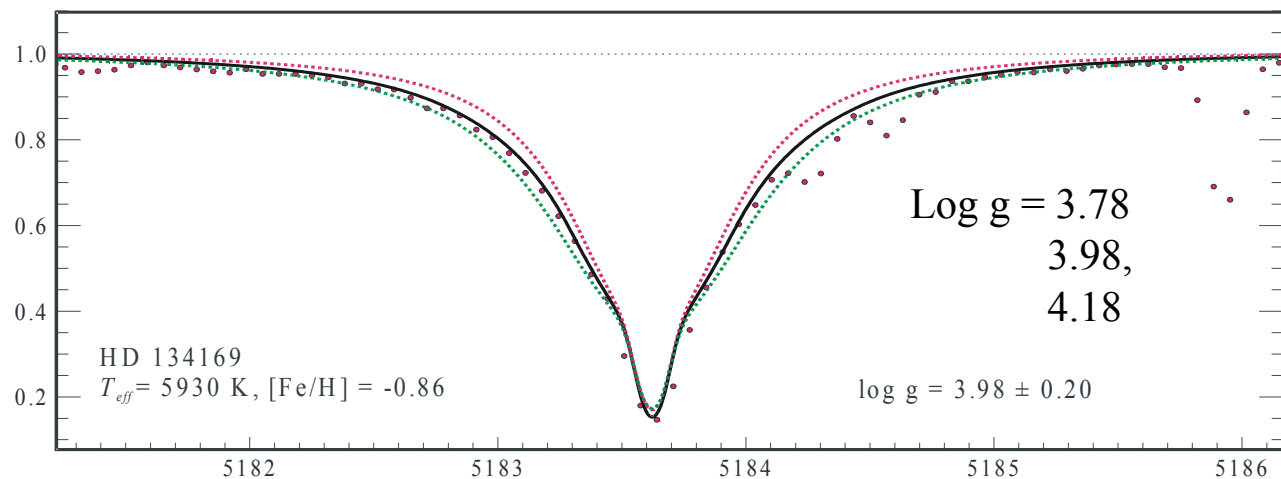
$H\alpha$

в звездах класса В  
в зависимости от  
 $\log g$

# Определение $\log g$ по крыльям сильных линий металлов в ХОЛОДНЫХ ЗВЕЗДАХ

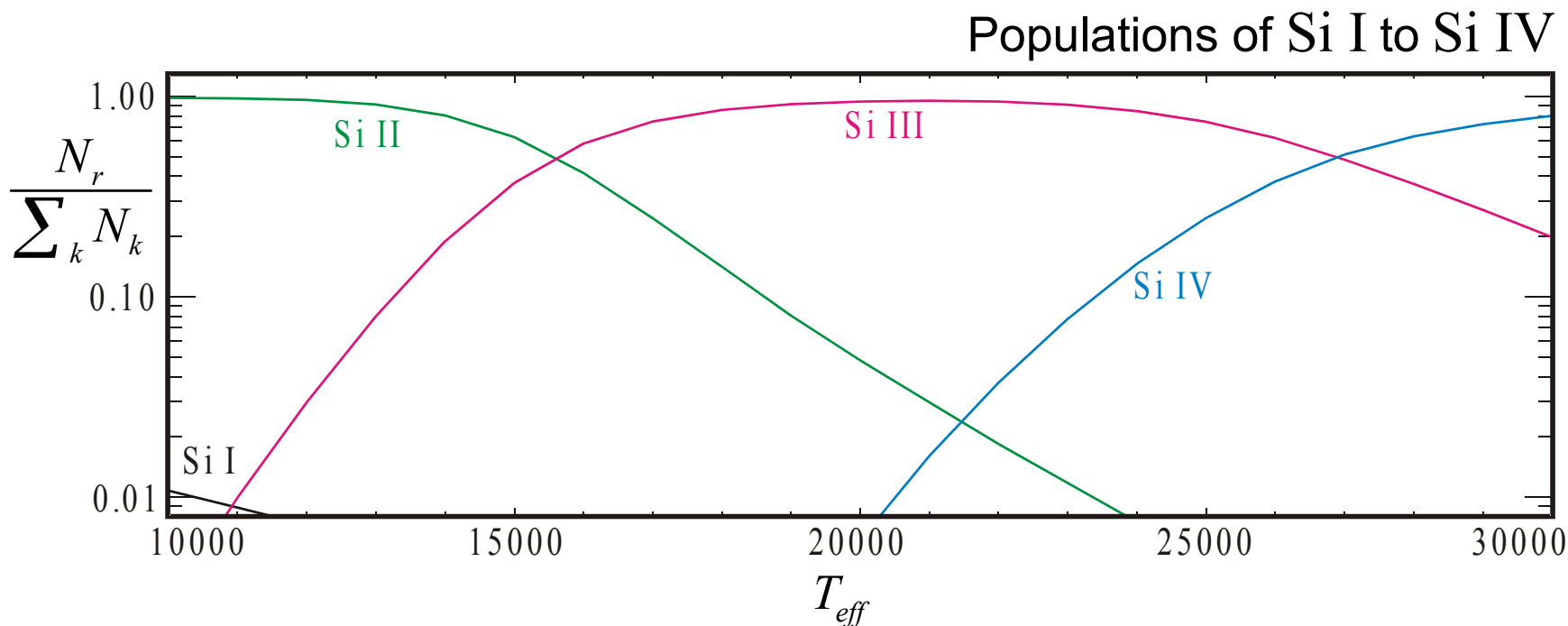
Крылья сильных линий примесных металлов (**minority species**) зависят от  $\log g$ . Если параметры затухания (Van der Waals) хорошо известны, то ускорение силы тяжести можно определить по подгонке профиля линий, варьируя  $\log g$ . Метод работает для звезд с  $[\text{Fe}/\text{H}] > -2$ .





# Ионизационное равновесие

Отношение интенсивности линий в последовательных стадиях ионизации зависит от  $T_{eff}$



Пример:

Отношение интенсивности линий Si III / Si II является хорошим индикатором температуры для В-звезд, а Si IV / Si III - для ранних В и О-звезд.

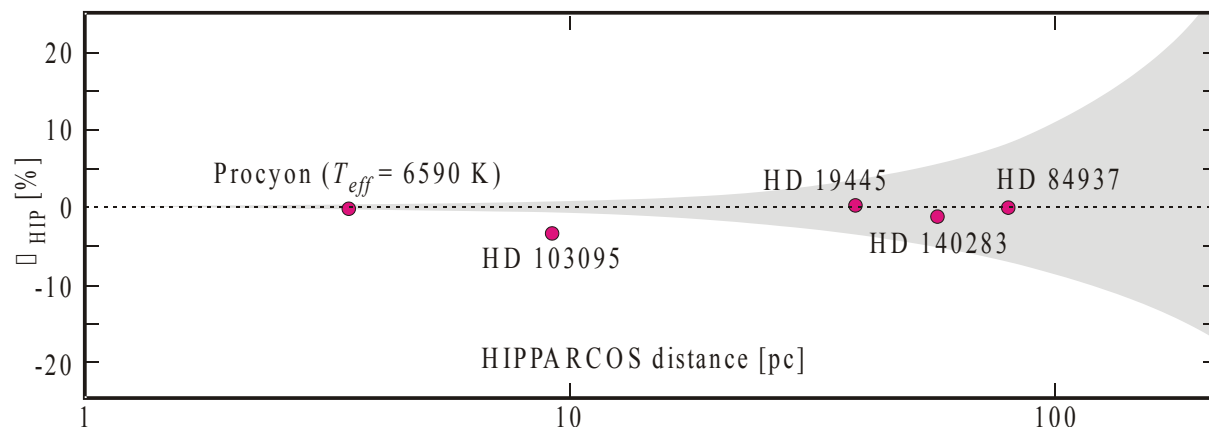
## В холодных FGK-звездах ионизационное равновесие используют для определения $\log g$

В холодных звездах отношение интенсивностей линий металлов в последовательных стадиях ионизации зависит от  $1/P_e$ :

чем выше ускорение силы тяжести, тем меньше отношение интенсивностей линий

$\text{Fe II/Fe I, Cr II/Cr I, Ti II/Ti I, Ca II/Ca I.}$

$\Delta \log g(\%)$



Comparison of HIP and spectroscopic gravities for reference stars from FeI/FeII ionization equilibria

Korn 2002 based on NLTE calculations

## Использование уравнения Больцмана для определения $T_{\text{eff}}$

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

Для конкретного элемента  $u = \text{const}$

$$W \sim n_i = f(n_i, E_i, T_{\text{eff}}) = f(N, E_i, T_{\text{eff}})$$

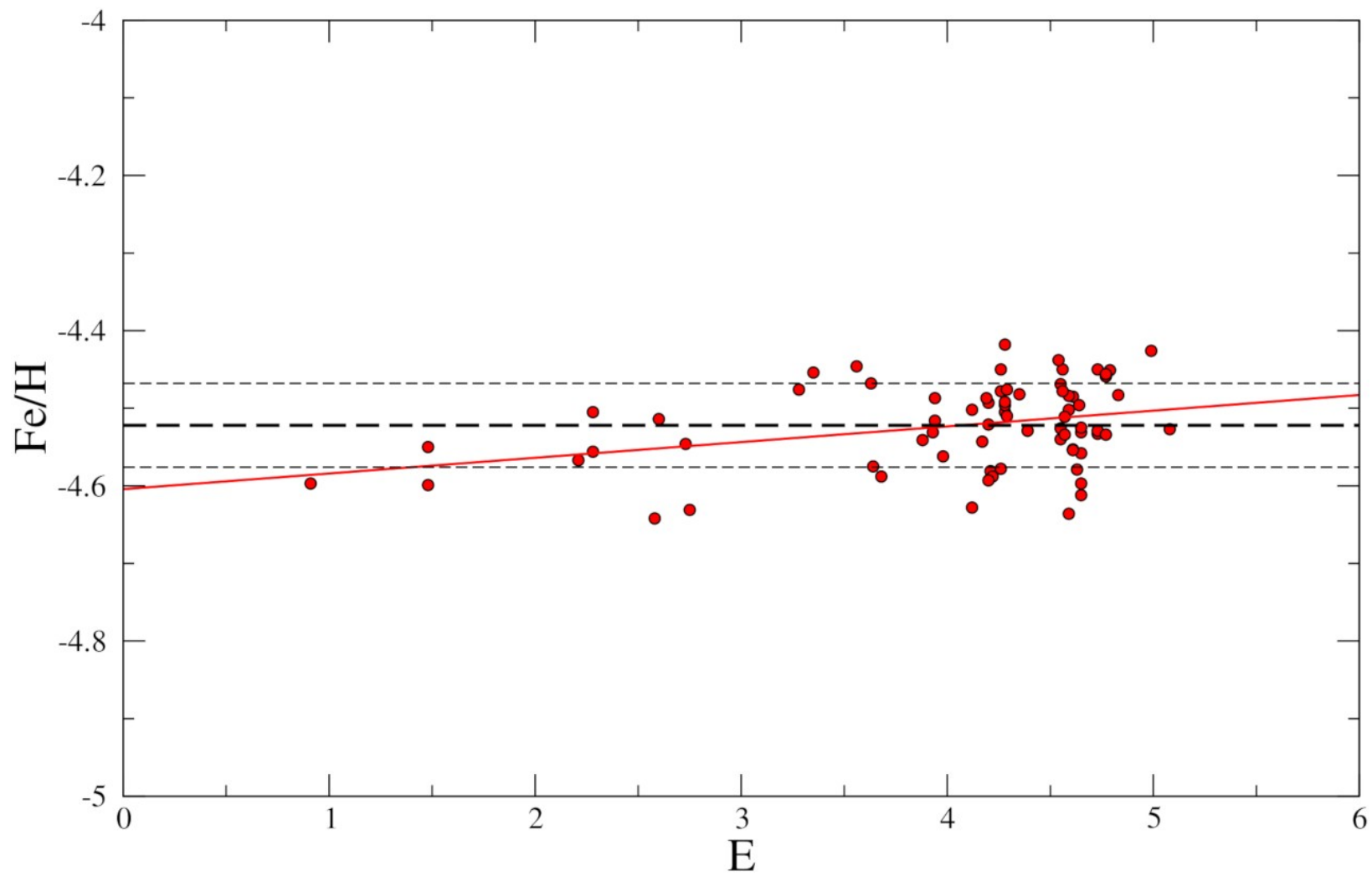
$$N = \text{const}, T_{\text{eff}} = \text{const}, W = f(E_i)$$

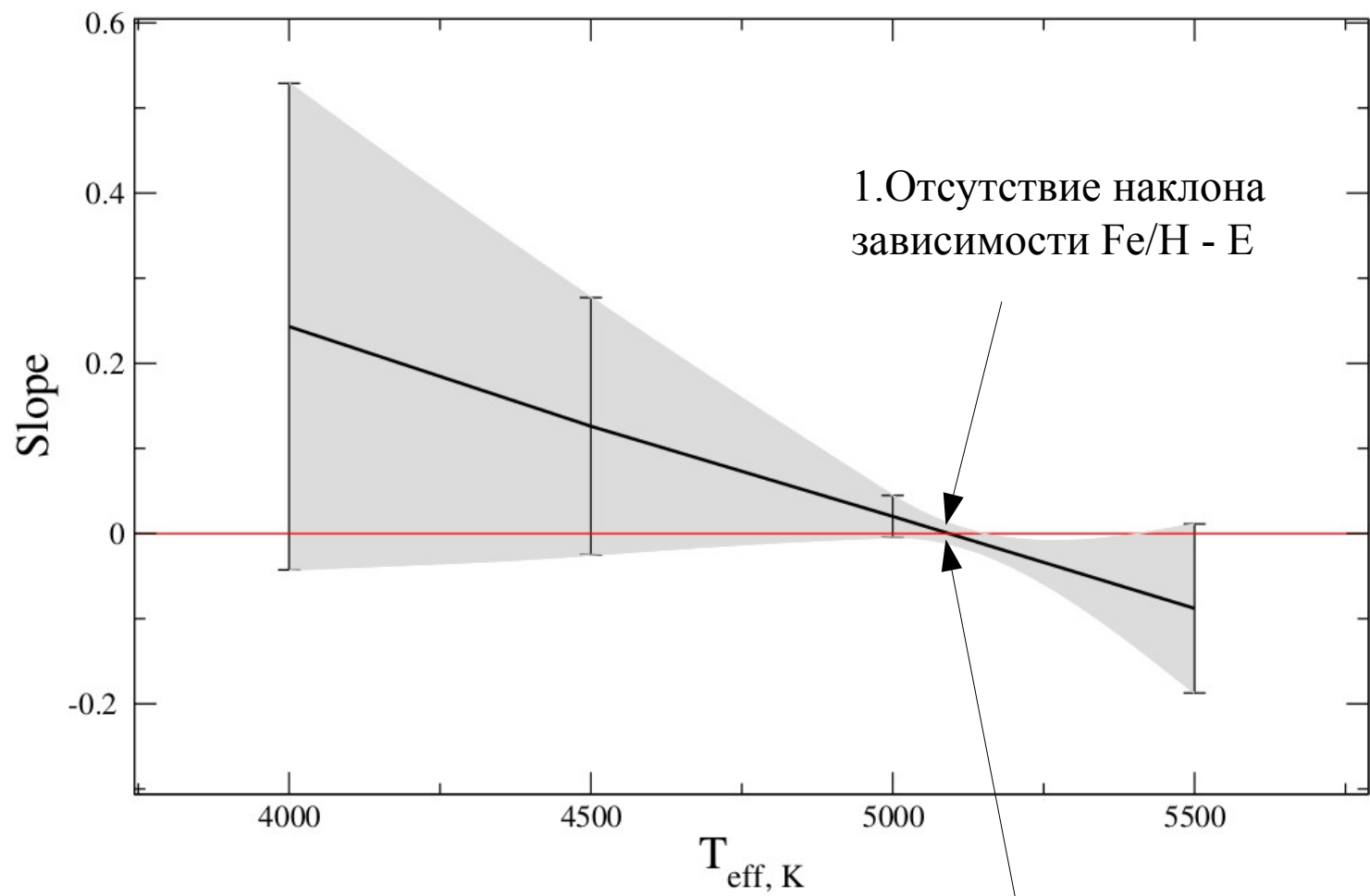
Кривая роста  $W = f(N)$  в силу монотонности  $N = f(W) = f'(E_i)$

Содержание элемента, определенное по линии  
с  $E = E_i$  с эквивалентной шириной  $W$

$$N = \text{const}, f'(E_i) = \text{const}$$

Требование условия независимости содержания, определенного по разным линиям, от потенциала возбуждения нижнего уровня  $E$





1. Отсутствие наклона  
зависимости  $\text{Fe}/\text{H} - E$

2. Минимум ошибки наклона  
зависимости  $\text{Fe}/\text{H}$  и минимум  
ошибки  $\text{Fe}/\text{H}$

## Микротурбулентная скорость $\xi$

Кривая роста  $W = f(N, \xi)$

в силу монотонности  $N = f(W, \xi)$

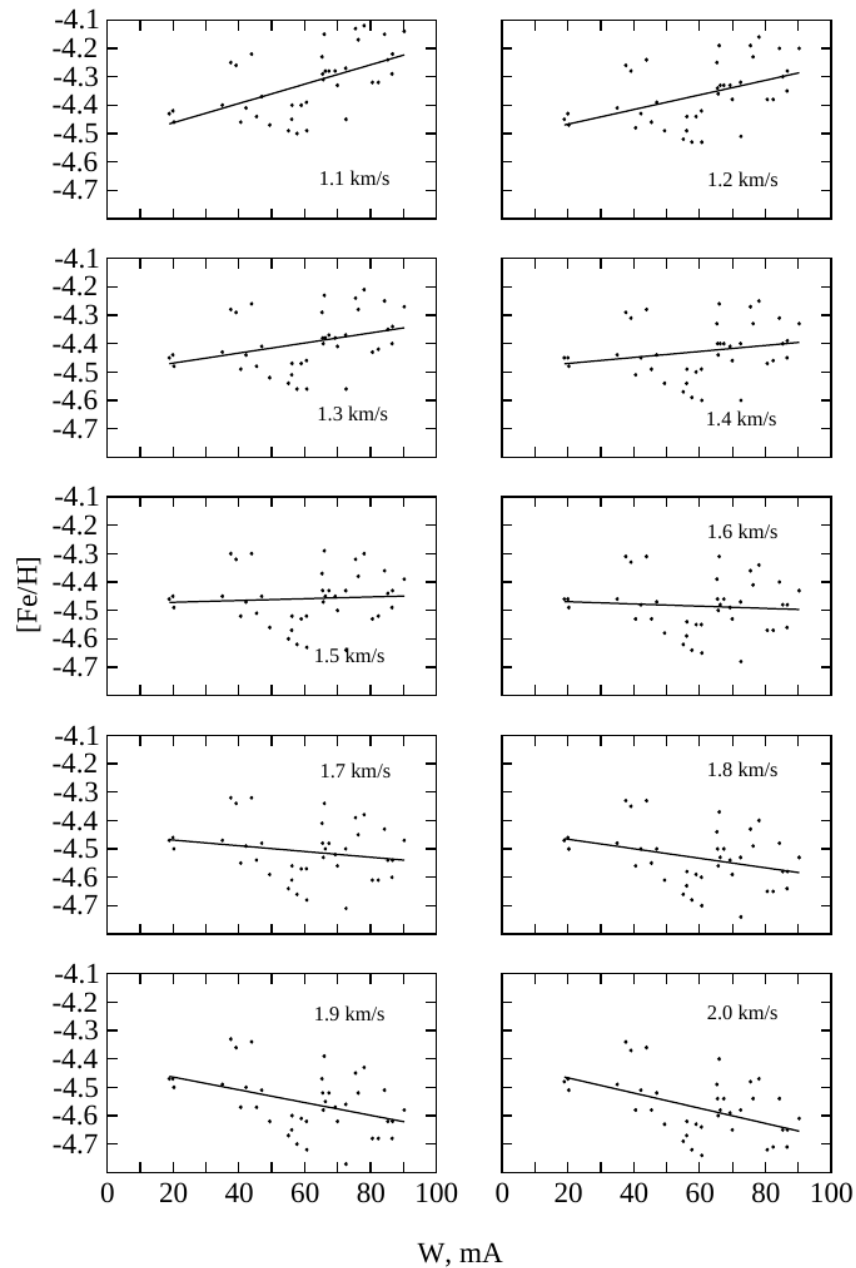
$$N = \text{const}$$

$$N = N_i = f(W_i, \xi)$$

$$\delta = \sum (N_i - N)^2 \longrightarrow \min$$

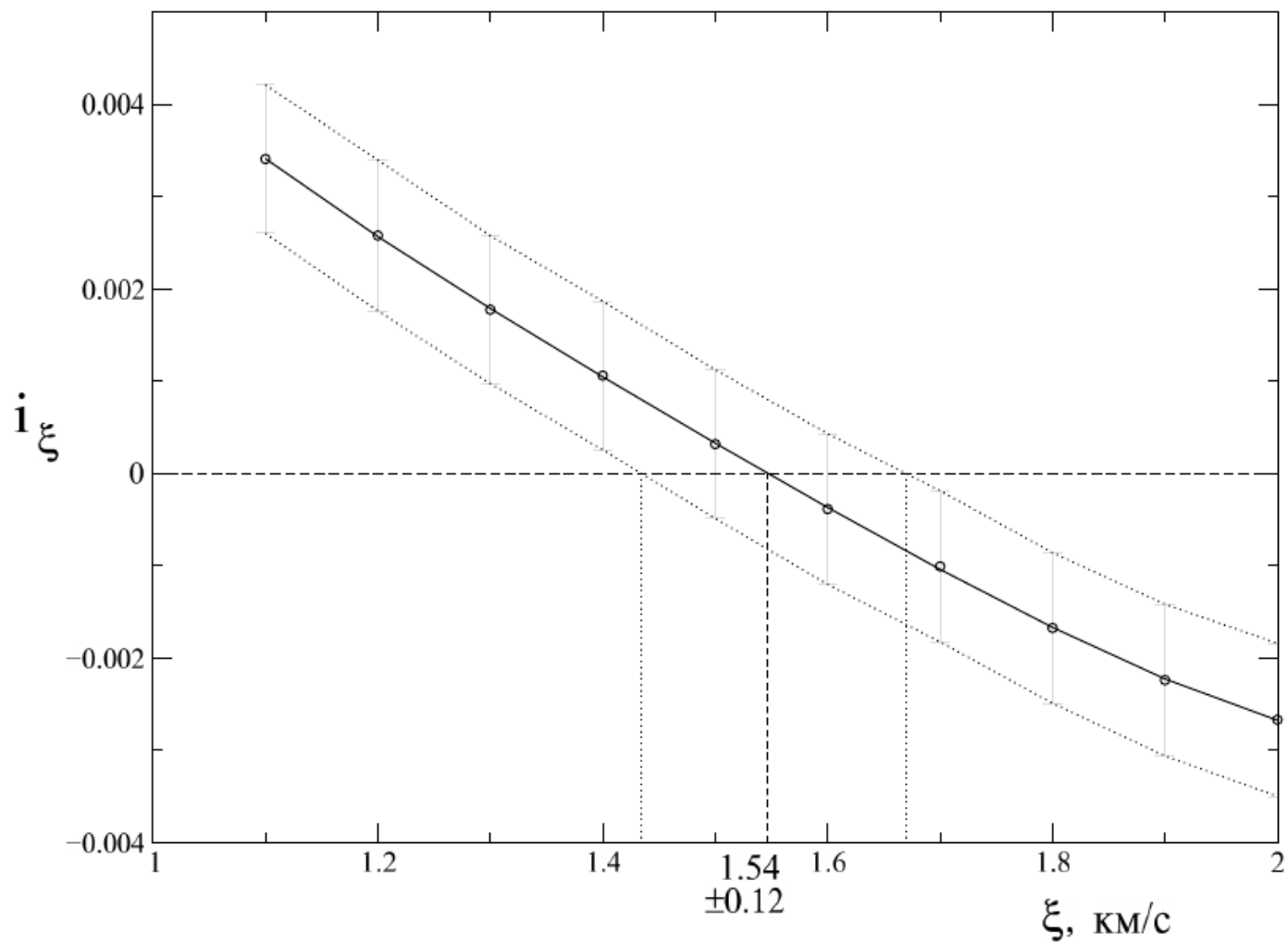
Требование выполнения условия независимости содержания элемента от эквивалентной ширины

# Микротурбулентная скорость

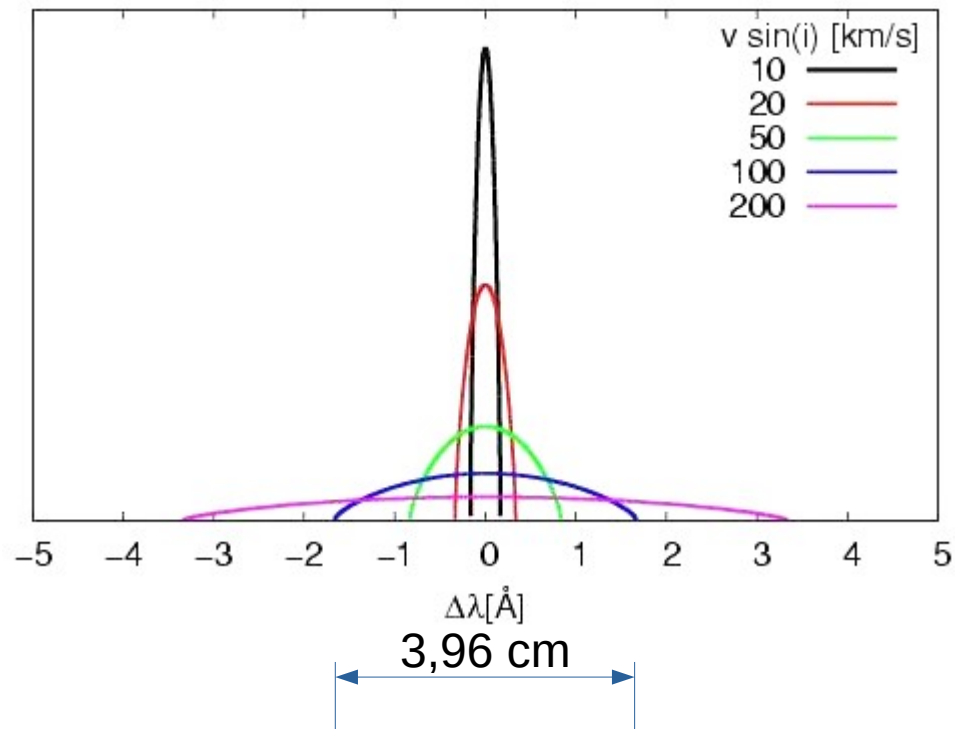


Требование  
выполнения  
условия  
независимости  
содержания  
элемента от  
эквивалентной  
ширины

# Микротурбулентная скорость

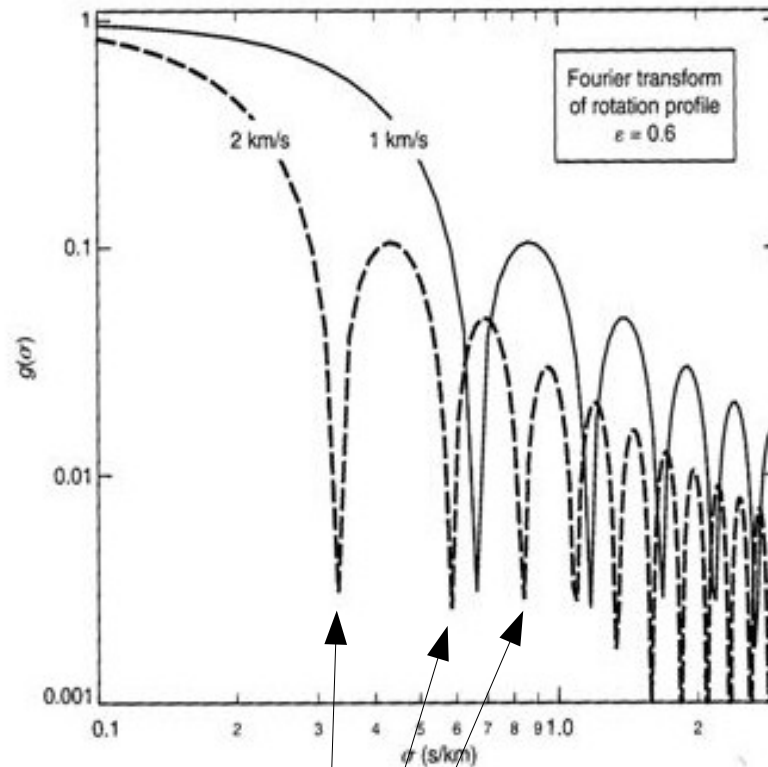


# Скорость вращения



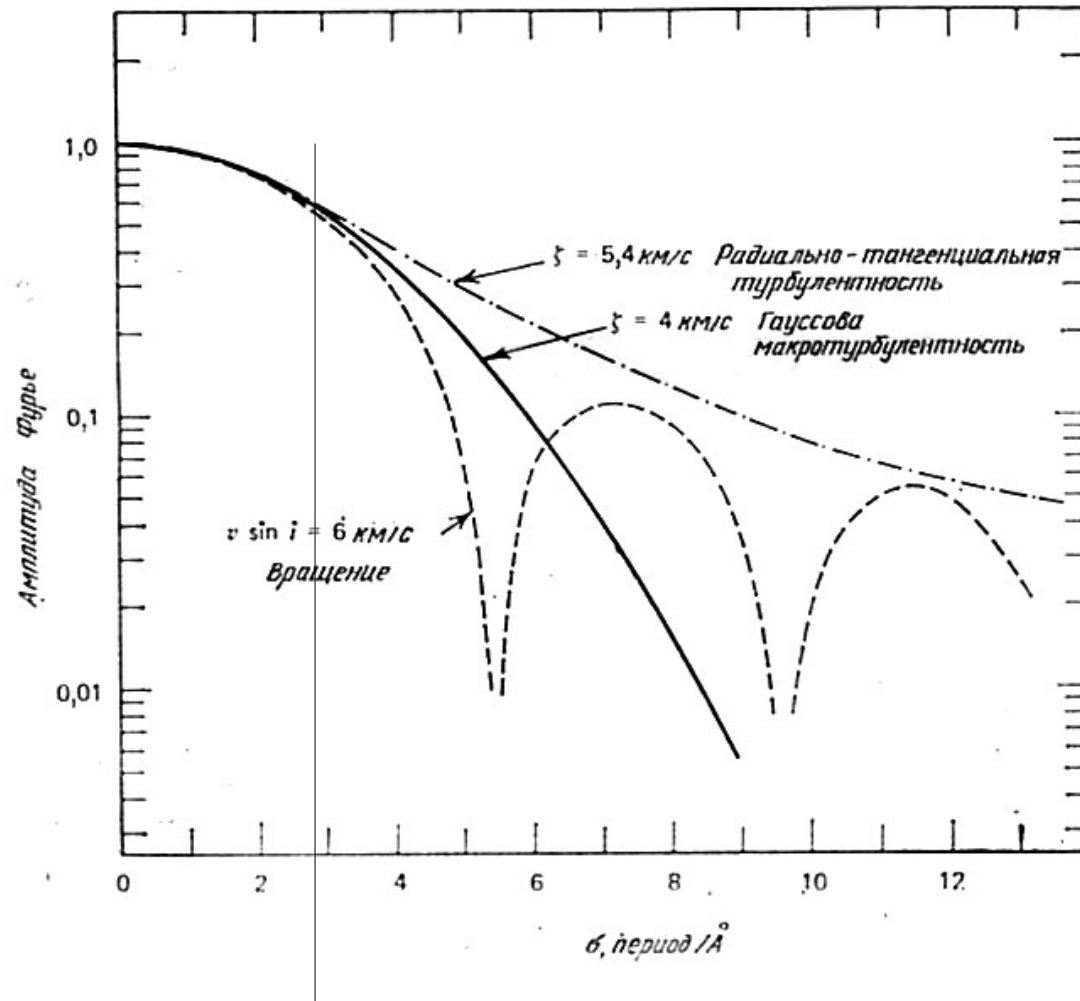
$$\Delta\lambda = 2\lambda \frac{v \sin i}{c}$$

# Скорость вращения



В пространстве фурье частот профиль вращения имеет лепестки на высоких частотах, минимумы которых определяются значением  $v \sin i$

## Скорость макротурбуленции



В пространстве фурье частот профиль макротурбуленции отличается от профиля вращения на высоких частотах

*Модельно-зависимые методы*

*Автоматическое определение*

# **SME**

## **(Spectroscopy Made Easy)**

*J. Valenti & N. Piskunov. 1996, A&AS 118, 595*

**SME** computes synthetic spectra and adjusts free parameters ( $T_{\text{eff}}$ , *logg*, *metallicity*, *Vsini*,  $V_{\text{micro}}$ ,  $V_{\text{macro}}$ ) based on comparison with observations.

**SME** solver consists of the IDL routines for preparing spectral synthesis and performing optimization, and external library for synthetic spectrum calculations. The external library (synth code) is written in C++ and Fortran

**SME** spectral synthesis consists of molecular and ionization equilibrium solver **EOS**, continuous opacity package **CONTOP**, line opacity package **LINEOP** and RT solver **RTINT**

Another part of **SME** is Graphical User Interface (**GUI**), written in IDL (sme.pro). The **GUI** is used to read line data and observations, set model parameters, define fitting masks, create **SME** input and output files when the job is done. **SME** output files are standard IDL save files containing an **SME** output structure.

**SME** output structure is the **SME** input structure, with additional fields containing the results of job execution.

Additional IDL codes (for example, port\_mask.pro) allows to copy line mask from one star to another for stars with the similar atmospheric parameters.

**SME** is working with the observations in (asc) or (fits) formats. The format of input linelist is the output format of VALD 'Extract Stellar' request.

**SME** has model libraries of Kurucz' (1993) models and latest version of MARCS models.

## Ionization equilibrium solver EOS

**EOS** has partition functions for up to 6 ionization stages of the first 99 atoms in the periodic table and for 257 molecules (up to four atoms) fitted over the range from 10K to 8000K

Input consists of  $T$ ,  $P$  and abundances.  $P_e$  can be also imposed

**EOS** is using rather unique solving strategy

## CONTOP

Continuous opacities are from ATLAS12

Modifications: partial pressures of absorbers and their partition functions are taken from **EOS**

List of absorbers: H, H<sub>2</sub><sup>+</sup>, H<sup>-</sup>, He, He<sup>+</sup>, He<sup>-</sup>, Si, Si<sup>+</sup>, Mg, Mg<sup>+</sup>, Al, C, Fe, Ca<sup>+</sup>, N, O, Ne, S,

List of scatterers: H, H<sub>2</sub>, He, e<sup>-</sup>

## RTINT

Single pass short-characteristics algorithm developed for 3D radiative transfer code: fast and robust even on a sparse grid.

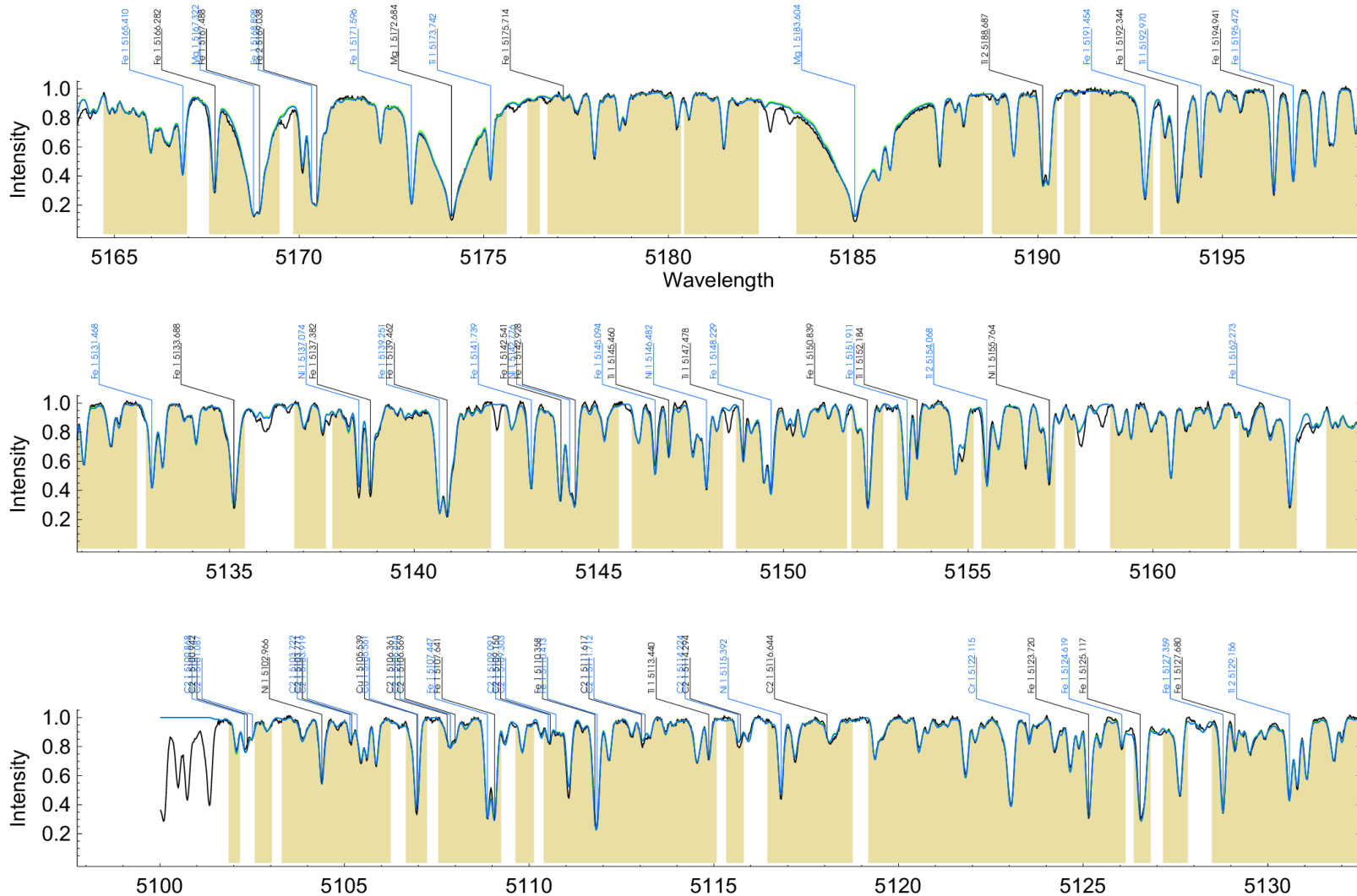
Attenuation operator with quadratic Bezier spline approximation to the source function

Bezier spline prevents overshooting

# F-G-K stars

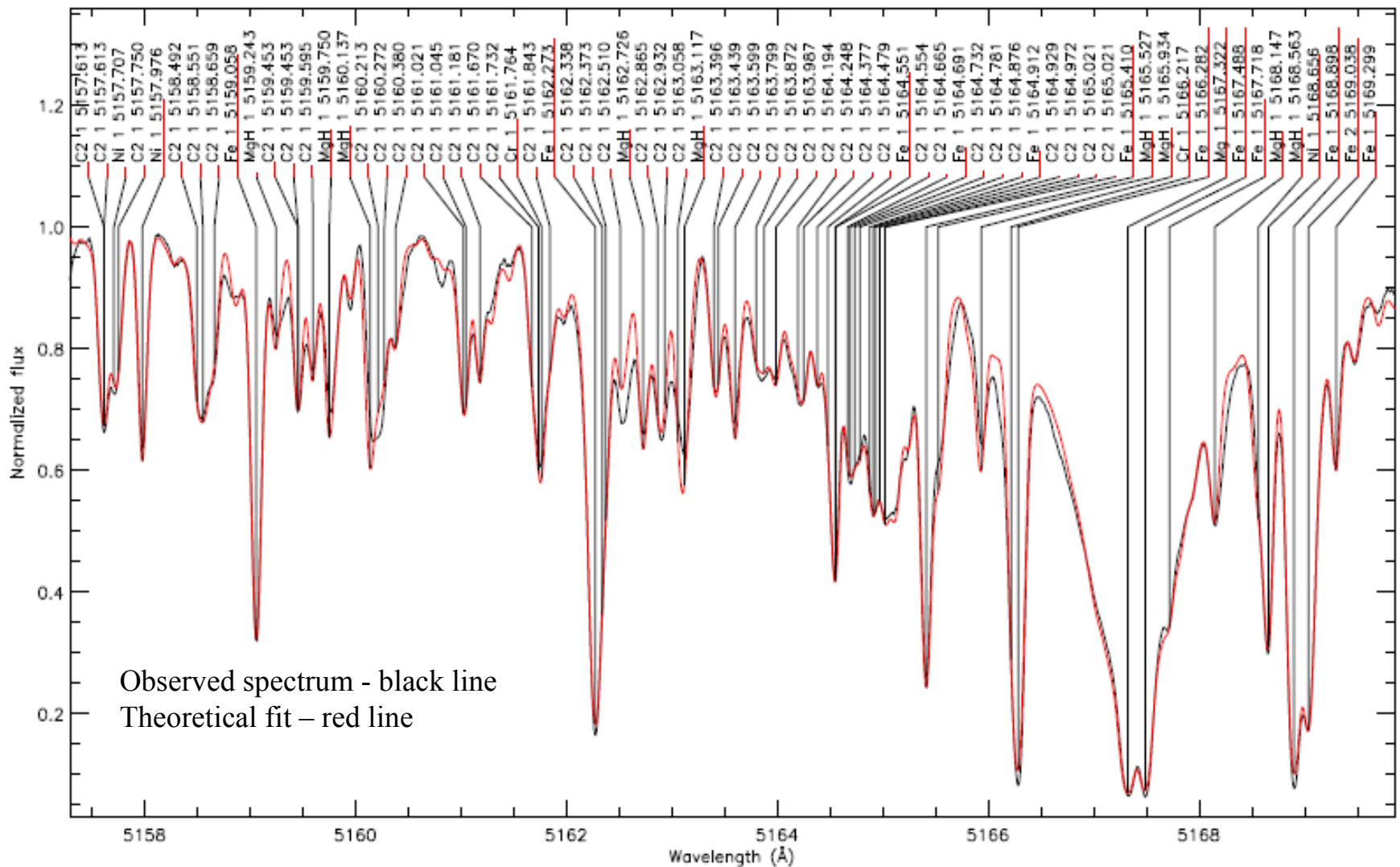
## 5100-5200 Å, Mg I triplet, C<sub>2</sub> Swan bands

job3\_marcs-4\_fixg

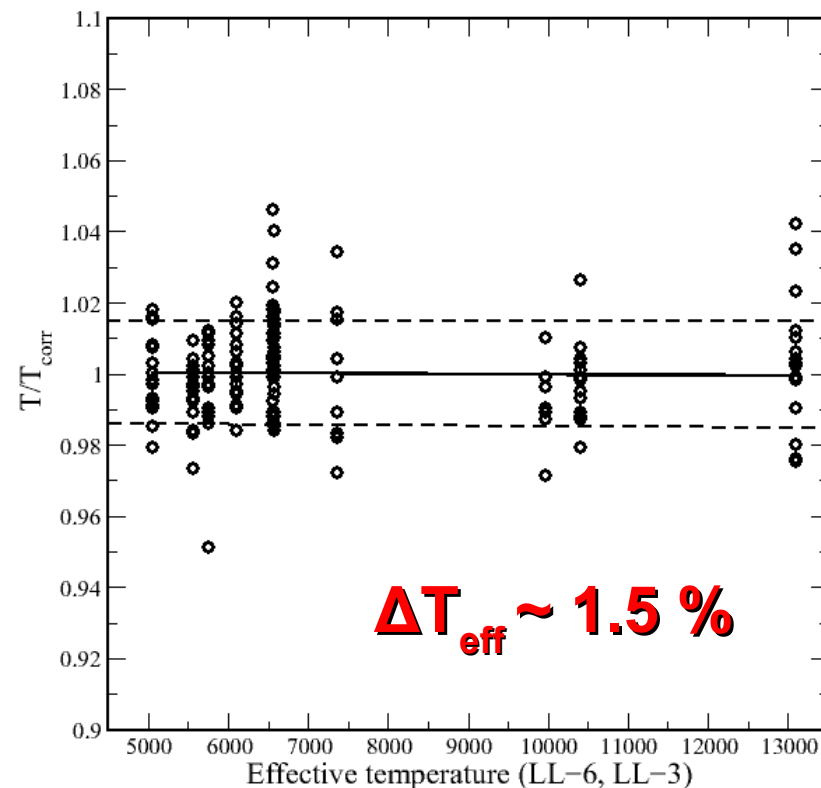
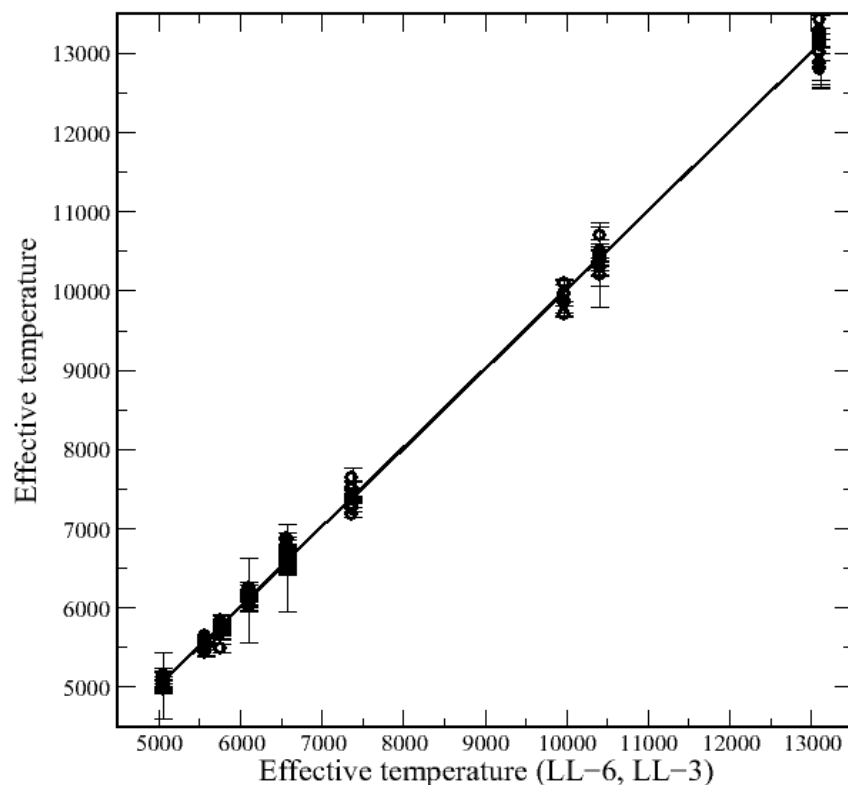


# SME results: $\delta$ Eri:

Previous (interf., asteroseism):  $T_{\text{eff}}=4986(57)$ ,  $\log g=3.827(018)$ ,  $M=+0.15$   
SME:  $T_{\text{eff}}=5037(21)$ ,  $\log g=3.73(06)$ ,  $M=+0.05$



# Сравнение параметров, полученных по SME, с параметрами, полученными другими методами, включая интерферометрию.



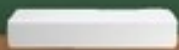
$\Delta T_{\text{eff}} \sim \pm 70-100 \text{ K}, \quad (\text{FGK})$

$\Delta T_{\text{eff}} \sim \pm 150-200 \text{ K}, \quad (\text{AB})$

# Основные этапы практической спектроскопии:

1. Получение спектра (объект, плоское поле, bias, спектр лампы)
2. Обработка спектра ([MIDAS](#))
3. Проведение континуума и деление на него
4. Первичная оценка  $T$ ,  $\log g$ 
  - 1) По калбровкам фотометрических индексов
5. Получить список линий из базы данных VALD
6. Счет модели атмосферы ([ATLAS9](#))
7. Счет синтетического спектра ([synth](#))
8. Анализ наблюдаемого спектра ([binmag](#))
  - 1) Измерение эквивалентных ширин и расчет содержания химических элементов по программе ([WIDTH](#))
  - 2) определение содержания по отдельным линиям путем подгонки синтетического спектра к наблюдаемому ([binmag](#), [synth](#))

# *Практические занятия*



## Задача 1

Определить эффективную температуру Солнца по солнечной постоянной и угловому диаметру

$$f_{sun} = 1367 \text{ Вт/м}^2$$

$$\theta = 31'59''$$

## Задача 2

Определить эффективную температуру и угловой диаметр Веги по интегральному и ИК потокам

*Полный поток*

$$F=3.0 \times 10^{-5} \text{ egr/s/cm}^2$$

*ИК поток на 12000 Å (полоса J)*

$$f=3.05 \times 10^{-10} \text{ egr/s/cm}^2/\text{Å}$$

| T     | $f_{12000}$ | $f/F$     |
|-------|-------------|-----------|
| 5000  | 1.541e+06   | 4.349e-05 |
| 6000  | 2.424e+06   | 3.298e-05 |
| 7000  | 3.347e+06   | 2.459e-05 |
| 8000  | 4.294e+06   | 1.849e-05 |
| 9000  | 5.133e+06   | 1.380e-05 |
| 10000 | 5.859e+06   | 1.033e-05 |
| 11000 | 6.569e+06   | 7.913e-06 |
| 12000 | 7.313e+06   | 6.220e-06 |
| 13000 | 8.073e+06   | 4.985e-06 |
| 14000 | 8.820e+06   | 4.049e-06 |
| 15000 | 9.549e+06   | 3.327e-06 |

### Задача 3

Определить эффективную температуру звезды по фотометрическим индексам b-y, B-V, V-J, V-H, V-K и ускорение силы тяжести по тригонометрическому параллаксу

$$\log g = -10.607 + \log M^1 + 4\log T_{eff} - \log L$$

$$\log \frac{L}{L_{\odot}} = 0.4(M_{bol\odot}^{4.74} - M_{bol})$$

$$M_{bol} = M_V - BC = m_V + 5 - 5\log d - A_V^0 - BC$$