

Практические вопросы звездной спектроскопии

Пахомов Ю.В. (к.ф.м.н.)
pakhomov@inasan.ru

*Отдел нестационарных звезд и звездной спектроскопии
Институт астрономии РАН*



Институт Астрономии РАН
ул.Пятницкая, 48



Предмет изучения

<http://spectrum.inasan.ru/SAI>

– Спектры звезд

- Инструментарий
- Физика
- Информатика

Цель курса

Дать представление о

- звездных спектрах
- их получении
- обработке
- моделировании
- интерпретации

Содержание

Введение.

Спектральная классификация звезд. Диаграмма Герцшпрунга-Рассела.

Инструментарий

Спектральные приборы и их характеристики

Приемники излучения

Получение спектров

Обработка спектров

Физика

Звездные атмосферы (реальные и модели)

Формирование спектральных линий в звездной атмосфере, хромосфере, в расширяющихся оболочках, в межзвездной среде

Стратификация редкоземельных элементов в атмосферах звезд;

Химическая эволюция звезд и Галактики

Информатика

Синтетический спектр

Базы атомных и молекулярных параметров спектральных линий

Определение физических параметров звезд

Определение химического состава звездных атмосфер

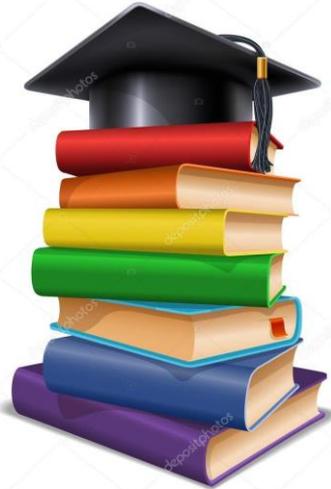
Практические занятия

Рекомендуемая литература



1. Засов А.В., Постнов К.А. «Общая астрофизика» Фрязино, 2006
2. Соболев В.В. «Курс теоретической астрофизики» М.:Наука, 1975
3. Мустель Э.Р. «Звездные атмосферы» Москва 1960
4. Михалас Д. «Звездные атмосферы» т.1, 2. М.: Мир, 1982.
5. Грей Д. «Наблюдения и анализ звездных фотосфер» М.: Мир, 1980.
6. Сахибуллин Н.А. «Методы моделирования в астрофизике»
 1. Звездные атмосферы. Казань: Фэн, 1997
 2. Определение параметров звезд. Казань: Фэн, 2003
7. Любимков Л.С. «Химический состав звезд: метод и результаты анализа» НПФ «Астропринт», 1995
8. Stellar Atmosphere Modeling. Proceedings of an International Workshop in Tuebingen, Germany, 8-12 April 2002. ASP Conference Ser., vol. 288, 2003
9. Modelling of Stellar Atmospheres. Proceedings of the 210th IAU Symp. held at Uppsala University, Uppsala, Sweden 17-21 June 2002. Eds. N. Piskunov, W.W. Weiss, D.F. Gray. ASP, 2003

Что нужно для успешного прохождения курса?



- Общая астрофизика
- Теор. астрофизика
- Атомная физика
- Молекулярная физика
- Оптика
- ...





**2.5-метровый телескоп ГАИШ
Кисловодская горная обсерватория**

Более 99% излучения в
видимом диапазоне
приходит от звездных
объектов: звезд, их
скоплений и галактик





$T=4780\text{K}$

$\lg g=2.5$

$[\text{Fe}/\text{H}]=+0.1$

$V_{\text{rad}} = -23 \text{ km/c}$

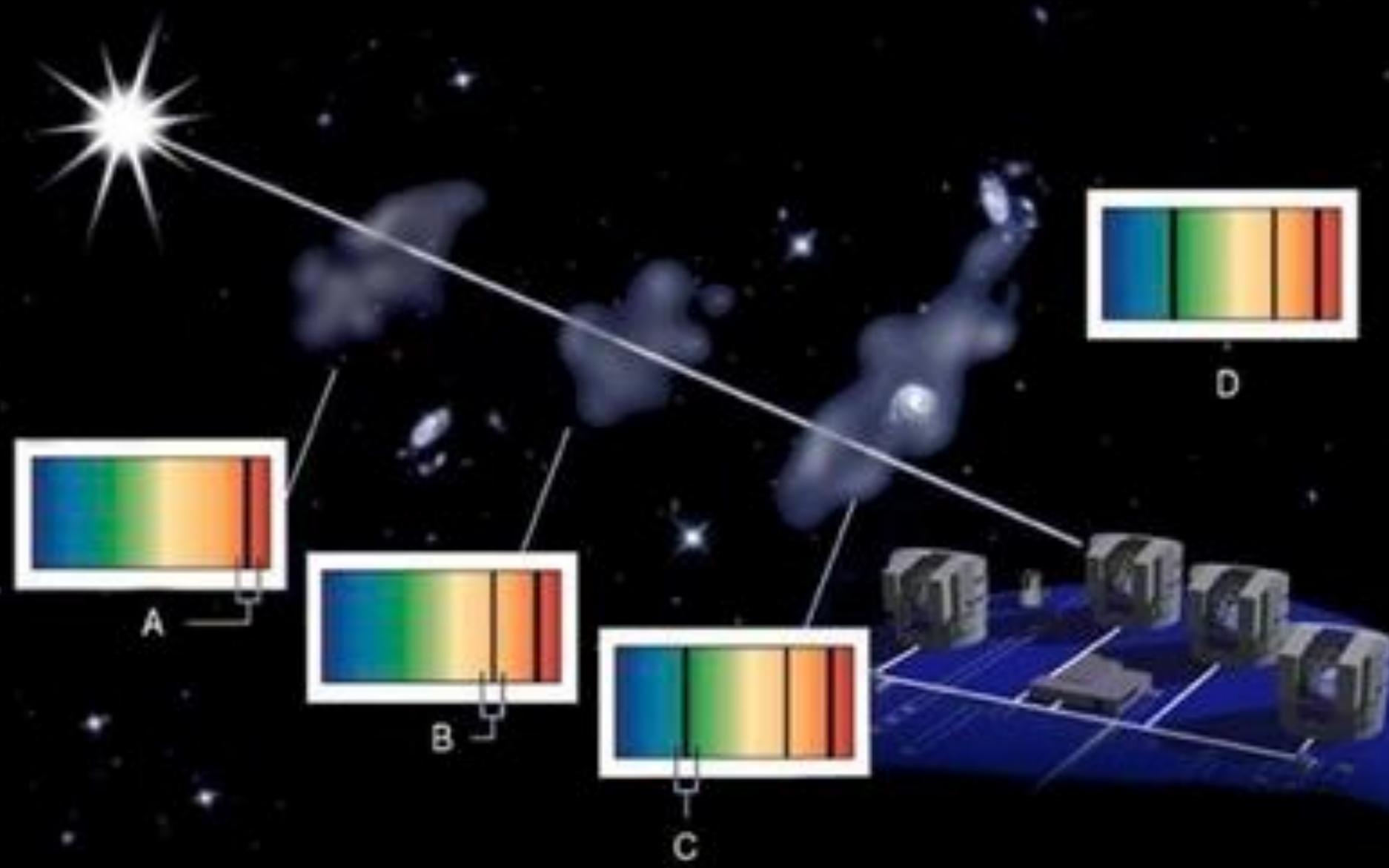
$V \sin i = 7 \text{ km/c}$

$V_{\text{macro}} = 5 \text{ km/c}$

$M=1.5M_{\odot}$

$r = 300 \text{ pk}$

$R=8R_{\odot}$



Каждый

Охотник

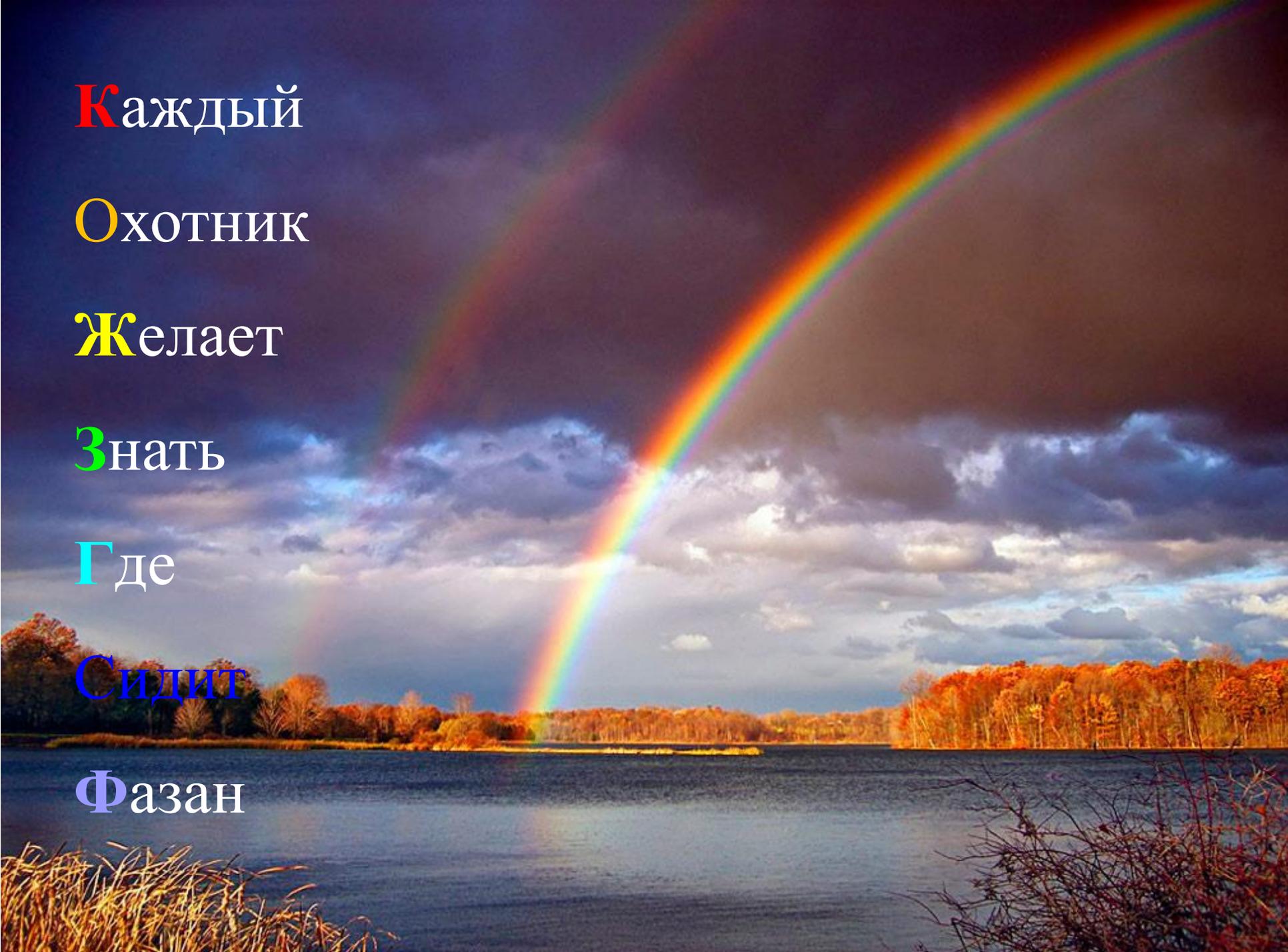
Желаает

Знать

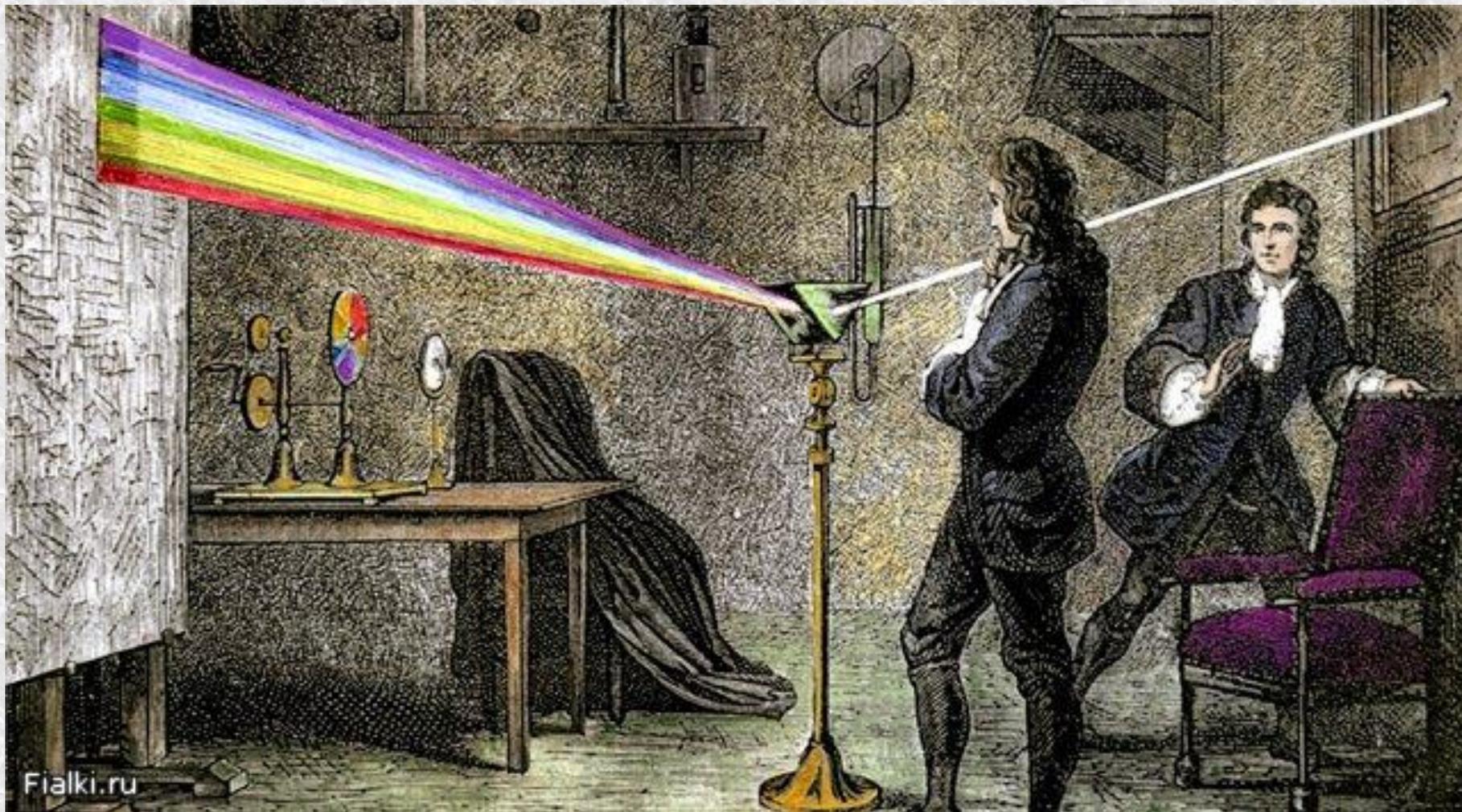
Где

Сидит

Фазан

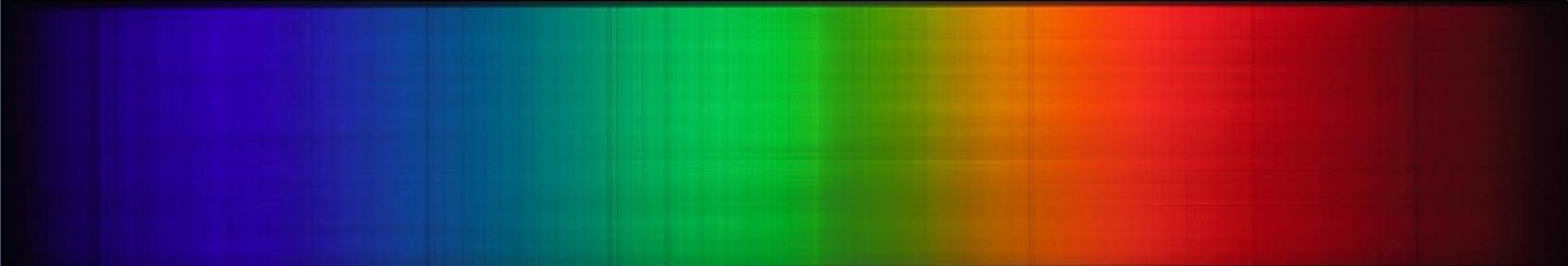


1666, *И. Ньютон* — первое изображение солнечного спектра,



1802, У.Х. Волластон

впервые обнаружил темные линии в солнечном спектре,





Die Fraunhofer'schen Linien sind die charakteristischen Absorptionsspektren der Sonne und der Sterne. Sie sind nach dem deutschen Physiker Joseph Fraunhofer benannt, der sie im Jahr 1814 entdeckte. Diese Linien sind heute ein wichtiges Werkzeug zur Identifizierung chemischer Elemente und zur Untersuchung der physikalischen Bedingungen in Sternen und Galaxien.

APPROXIMAVIT
SIDERA
ERHAT UNS DIE
STERNE NAHER
GEBRACHT

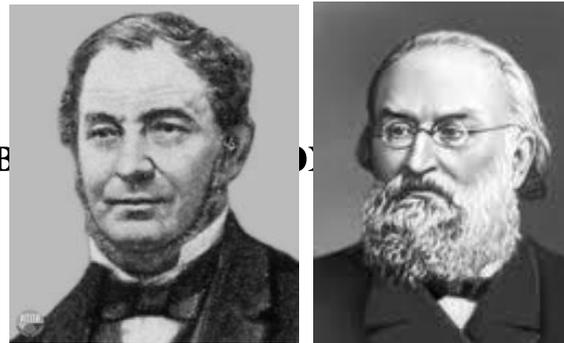
Fraunhofer'sches Prisma
Dieses Prisma wurde von Joseph Fraunhofer im Jahr 1814 entwickelt. Es besteht aus einem Quarzprisma, das so geformt ist, dass es Licht in seine spektralen Komponenten zerlegt. Die Fraunhofer'schen Linien sind die charakteristischen Absorptionsspektren der Sonne und der Sterne. Sie sind nach dem deutschen Physiker Joseph Fraunhofer benannt, der sie im Jahr 1814 entdeckte.

Fraunhofer'sches Gitter
Dieses Gitter wurde von Joseph Fraunhofer im Jahr 1814 entwickelt. Es besteht aus einem Quarzprisma, das so geformt ist, dass es Licht in seine spektralen Komponenten zerlegt. Die Fraunhofer'schen Linien sind die charakteristischen Absorptionsspektren der Sonne und der Sterne. Sie sind nach dem deutschen Physiker Joseph Fraunhofer benannt, der sie im Jahr 1814 entdeckte.



1815-1826, Й. Фраунгофер - измерил положение 574 линий

**50-е XIX в., Р.В. Бунзен, Г.Р. Кирхгоф —
изучение спектров газов, открытие новых элементов
спектроскопии**

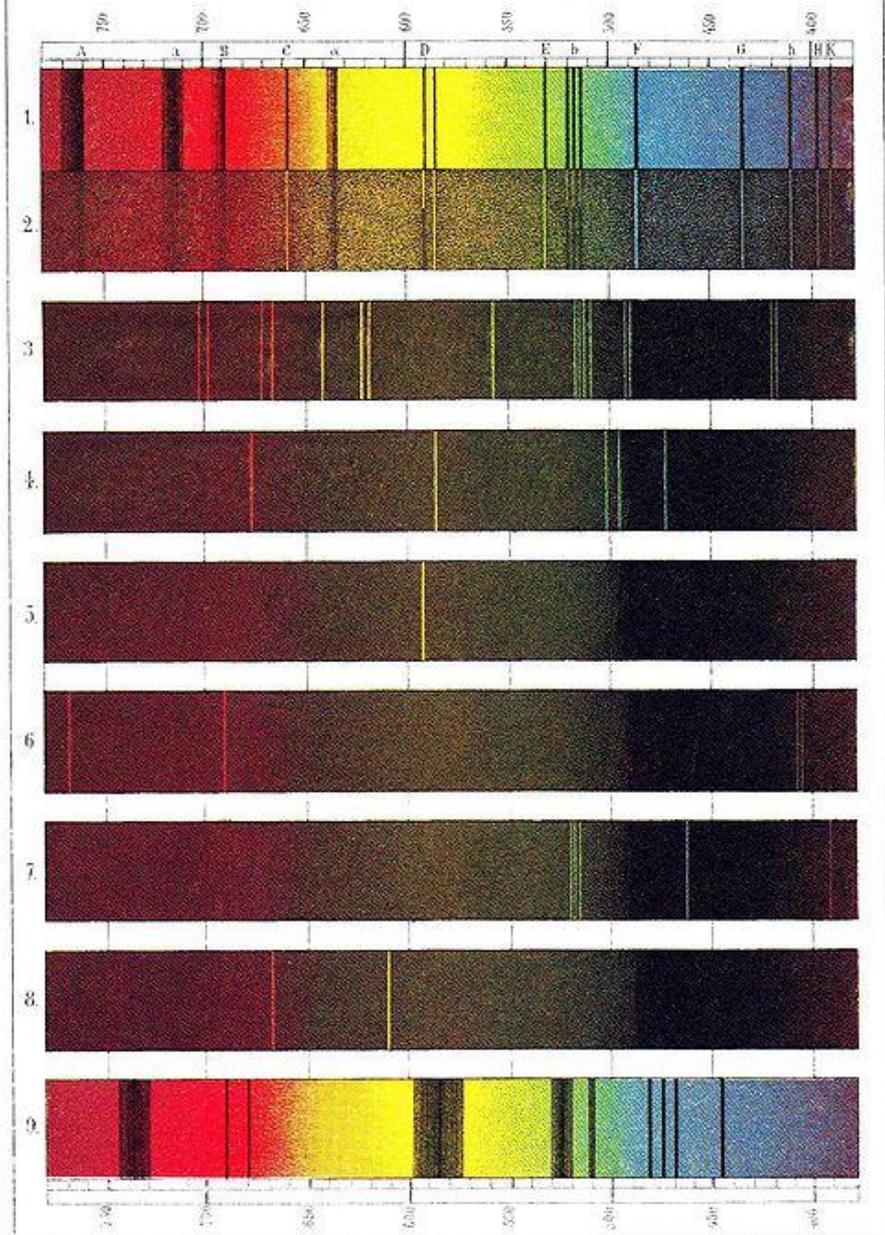


Три закона Кирхгофа спектрального анализа.

- Накаленное твердое тело или сильно нагретая жидкость излучают непрерывный спектр. $I_{\nu} = j_{\nu}/\kappa_{\nu} = B_{\nu}$
- Нагретый газ при низком давлении излучает спектр, состоящий из отдельных ярких линий излучений.
- Газ, помещенный перед более горячим источником непрерывного излучения, создает в спектре источника темные линии (линии поглощения), которые приходятся на те же длины волн, что и линии излучения этого газа.

Спектры лучиспускания и поглощения.

(шкала по длине световых волн)

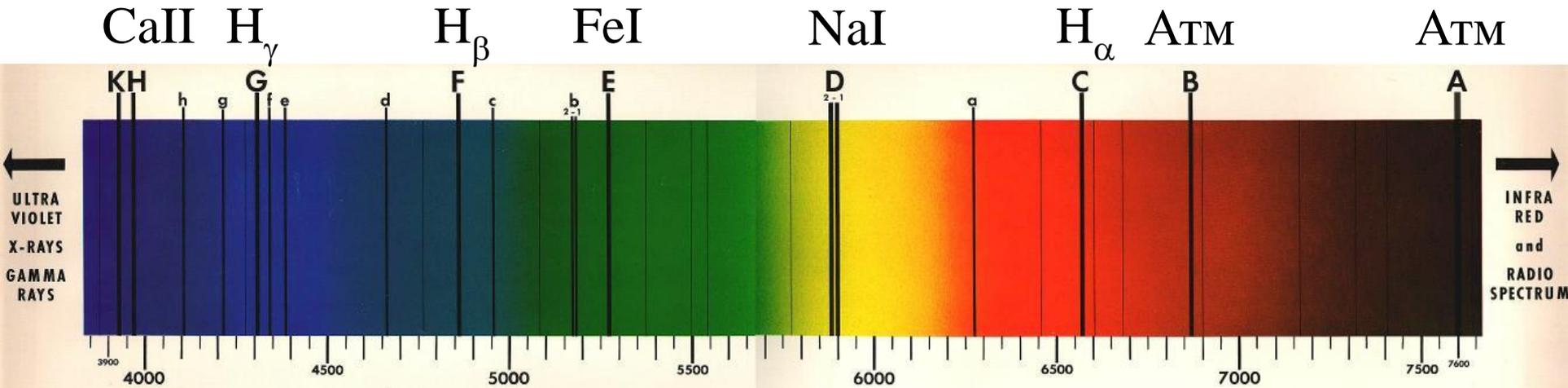


Спектр звезды как удостоверение личности

Солнце и звезды — это раскаленные тела, окруженные более холодными газовыми атмосферами.

Бунзен, Кирхгоф, Хеггинс, Локьер, Ангстрем:

темные линии - это линии поглощения, образованные известными на Земле химическими элементами

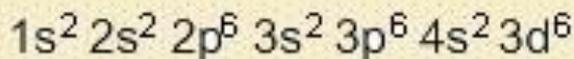
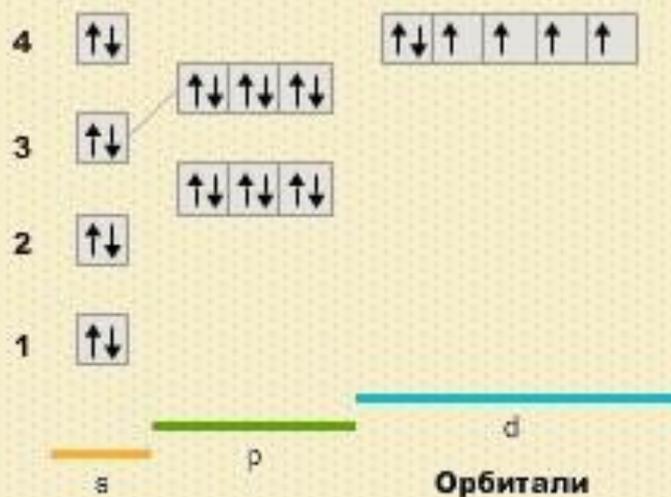
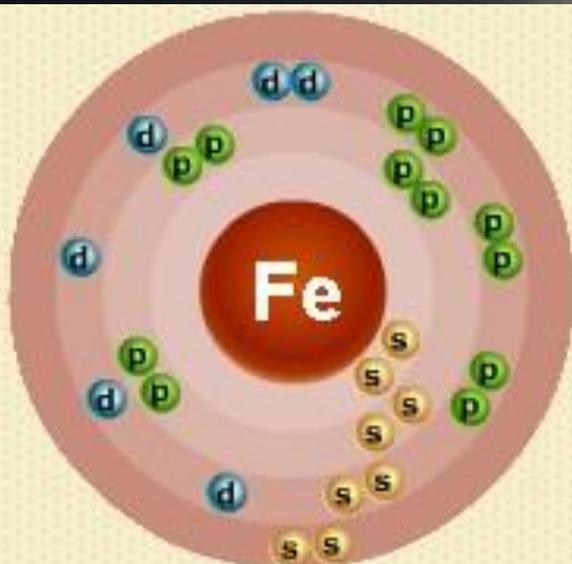
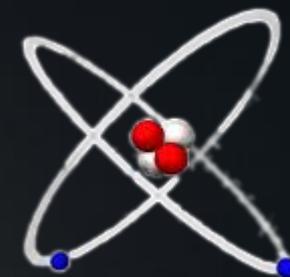


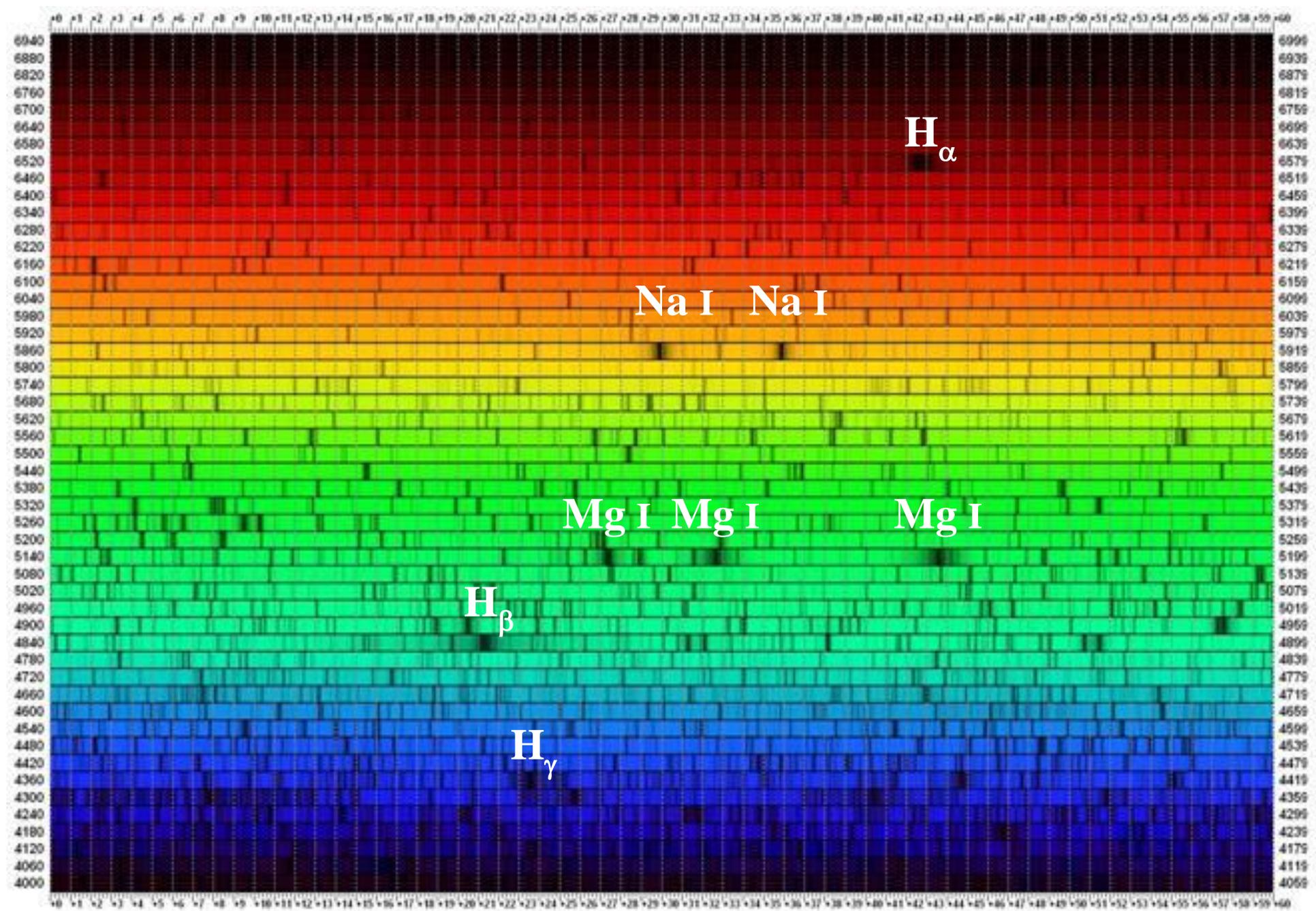
Фраунгоферов спектр Солнца

Открытия, сделанные с помощью спектрального анализа

18 августа 1868 г — желтая линия, близкая к линиям $D_{1,2}$ — гелий (1895 г открыт на Земле) - D_3

7 августа 1869 г. - зеленая линия в короне — «короний» Fe XIII (1939 г)





Wavelengths in Angstrom

Solar Spectrum Image Credit: R.A. Sharp, NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/ARHSF from: http://www.noao.edu/image_gallery.html#s000.html
National Optical Astronomy Observatory/Association of Universities for Research in Astronomy/National Science Foundation
Calibrated axes by: Larry McNish <http://members.shaw.ca/lmcnish/>

Спектральная классификация звезд.

Гарвардская классификация, 1886, *Э. Ч. Пикеринг*.

Метод: Объективная призма
+ фотопластинка.

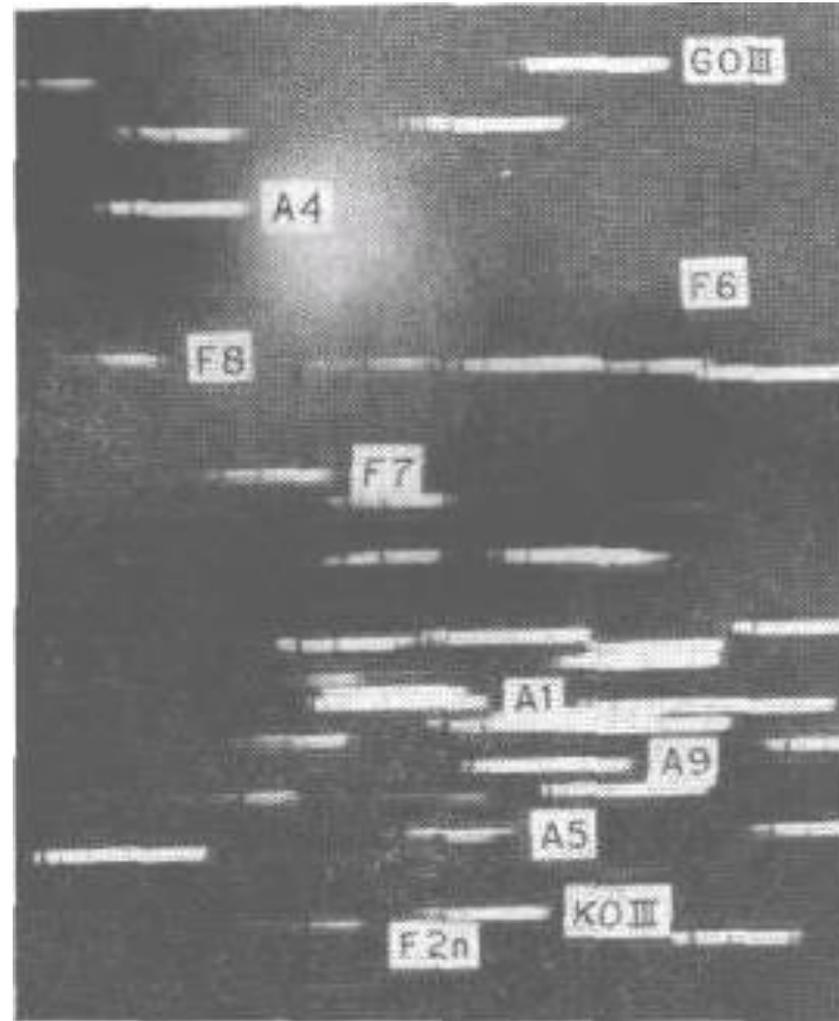
Критерии:

- интенсивность линий H,
- плавное изменение спектральных особенностей.

Сп. классы **A — Q**.

Исполнители:

Э. Кэннон, А. Мори, В. Флеминг,
359 082 звезды,
1918-24 гг. и до 1949 г.

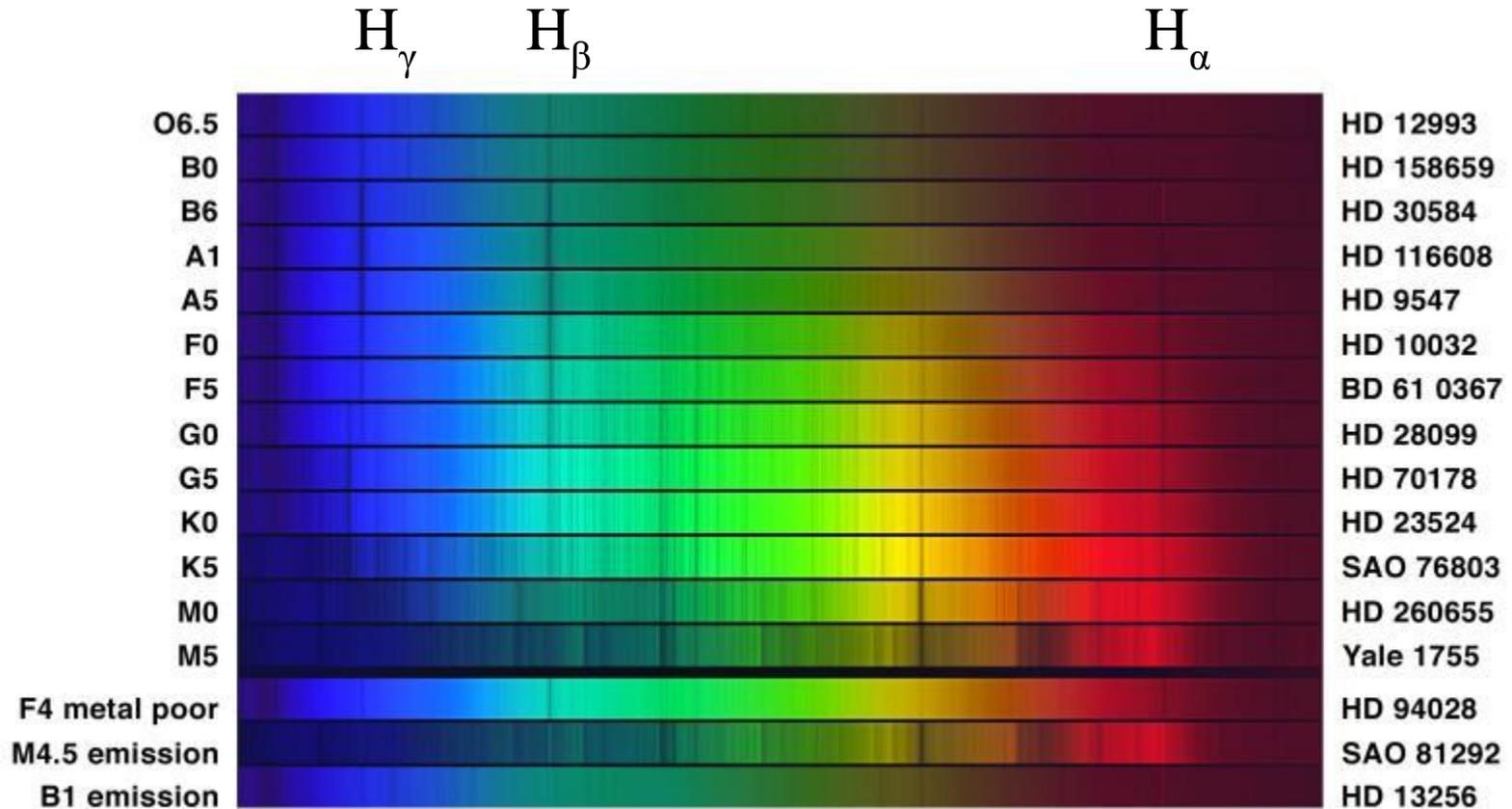


Арктур

Вега



Спектральная классификация звезд.



Современная:

O - B - A - F - G - K - M - L - T

Каждый класс делится
на 10 подклассов.

Солнце: G2.

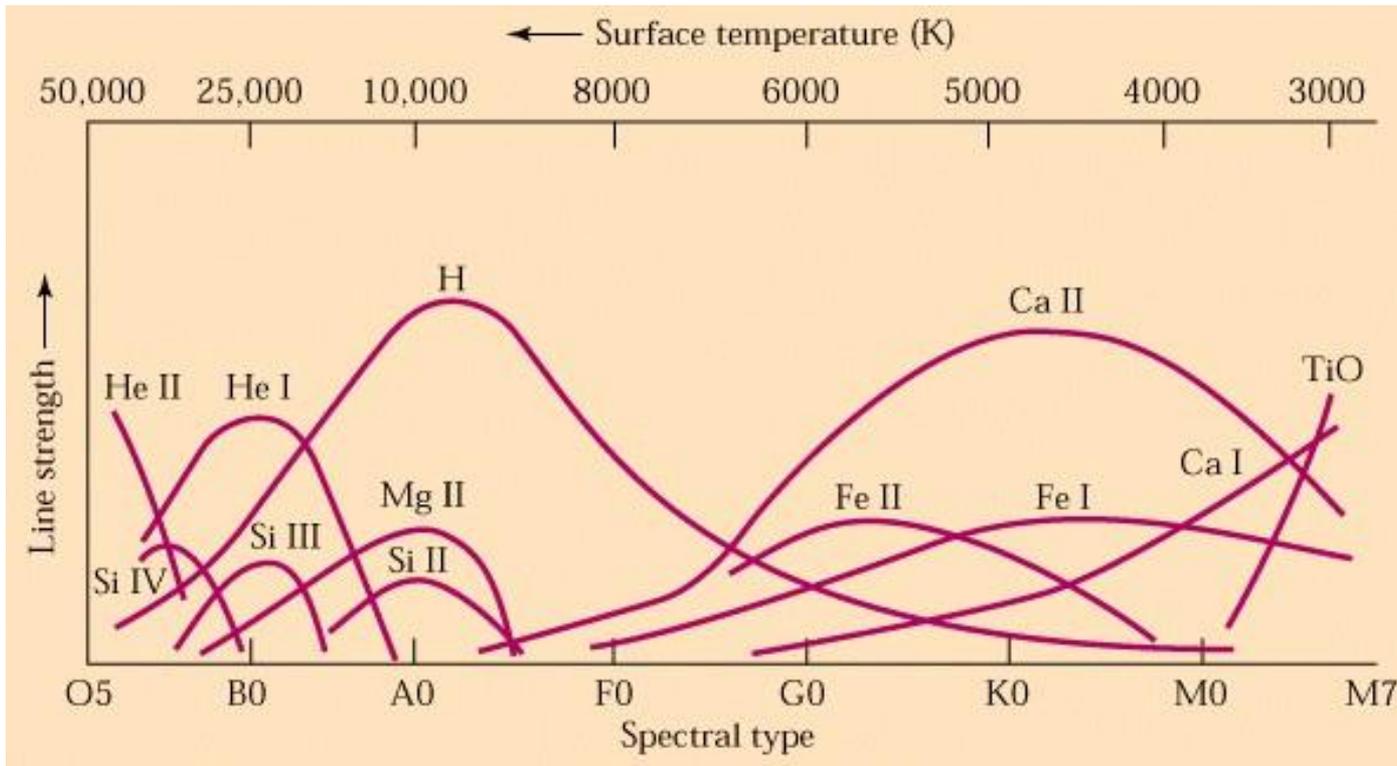
N S R

Для отдельных групп звезд:
WR – звезды Вольфа-Райе;
D – белые карлики и т.д.

Интерпретация спектральной последовательности

1913, *Н. Бор*, квантовая теория атома,
1920-21, *М. Саха*, теория ионизации газов.

$$\frac{n_i}{n_{i+1}} = N_e \frac{g_i}{2g_{i+1}} \frac{h^3}{(2\pi m k T)^{3/2}} e^{\chi_i/kT}$$



χ , eV	
HI	13,6
HeI	24,6
HeII	54,4
MgI	7,6
MgII	15,0
SiI	8,2
SiII	16,3
SiIII	33,5
CaI	6,1
CaII	11,9
FeI	7,9
FeII	16,2

Последовательность М → О отражает **рост температуры** поверхности звезды.

Спектральная классификация

Класс	Температура, К	Истинный цвет	Видимый цвет ^{[8][9]}	Масса, M_{\odot}	Радиус, R_{\odot}	Светимость, L_{\odot}	Линии водорода	Доля* в глав. послед., % ^[10]	Доля*на ветв. бел.к., % ^[10]	Доля* гигантских, % ^[10]
O	30 000—60 000	голубой	голубой	60	15	1 400 000	слабые	~0,00003034	-	-
B	10 000—30 000	бело-голубой	бело-голубой и белый	18	7	20 000	средние	0,1214	21,8750	-
A	7500—10 000	белый	белый	3,1	2,1	80	сильные	0,6068	34,7222	-
F	6000—7500	жёлто-белый	белый	1,7	1,3	6	средние	3,03398	17,3611	7,8740
G	5000—6000	жёлтый	жёлтый	1,1	1,1	1,2	слабые	7,6456	17,3611	25,1969
K	3500—5000	оранжевый	желтовато-оранжевый	0,8	0,9	0,4	очень слабые	12,1359	8,6806	62,9921
M	2000—3500	красный	оранжево-красный	0,3	0,4	0,04	очень слабые	76,4563	-	3,9370

Классы светимости

Классификация МКК

(У. Морган, Ф. Кинан и Э. Келман)

При равных T_{eff} , чем больше R (L), тем меньше g (P_g).

Степень ионизации выше при меньшем давлении.

I - сверхгиганты,

II - промежуточные сверхгиганты или яркие гиганты

III - гиганты,

IV - субгиганты,

V - нормальные карлики, Солнце – G2V,

VI - субкарлики,

VII - белые карлики.

Классы пекулярности

c — глубокие узкие линии

comp — составной спектр

con — отсутствуют видимые линии поглощения

e — эмиссия (эмиссия водорода в O-звездах)

em — эмиссия в линиях металлов

ep — пекулярная эмиссия (линии, по своему характеру отличные от нормально соответствующих классу)

er — явно обращённые эмиссионные линии

eq — эмиссия с поглощением на более коротких волнах

ev — переменность относится только к эмиссионным линиям

ew — эмиссии, типичные для звёзд класса W

f, (f), ((f)) — эмиссия гелия и неона в O-звездах

h — звёзды класса WR с эмиссионными линиями водорода

ha — звёзды класса WR с эмиссионными линиями водорода как поглощения, так и излучения

k — межзвёздные линии

m — сильные линии металлов

n — диффузные линии (широкие и размытые), обусловленные быстрым вращением

neb — добавочный спектр туманности

nn — очень размытые диффузные линии

p — пекулярный спектр (имеются неправильности)

pq — особенности напоминают спектр новой звезды

s — резкие и узкие линии

sh — наличие оболочки

ss — очень узкие линии

v или **var** — изменения в спектре (не обусловленные орбитальным движением и пульсацией)

w или **wk** или **wl** — слабые линии

Параметры звезд и соотношения

Эффективная температура: $F = \sigma T_{\text{eff}}^4$, 1500 – 55000 К

Светимость: $L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$, $10^{-3} - 10^6 L_{\text{Sun}}$

Звездные величины

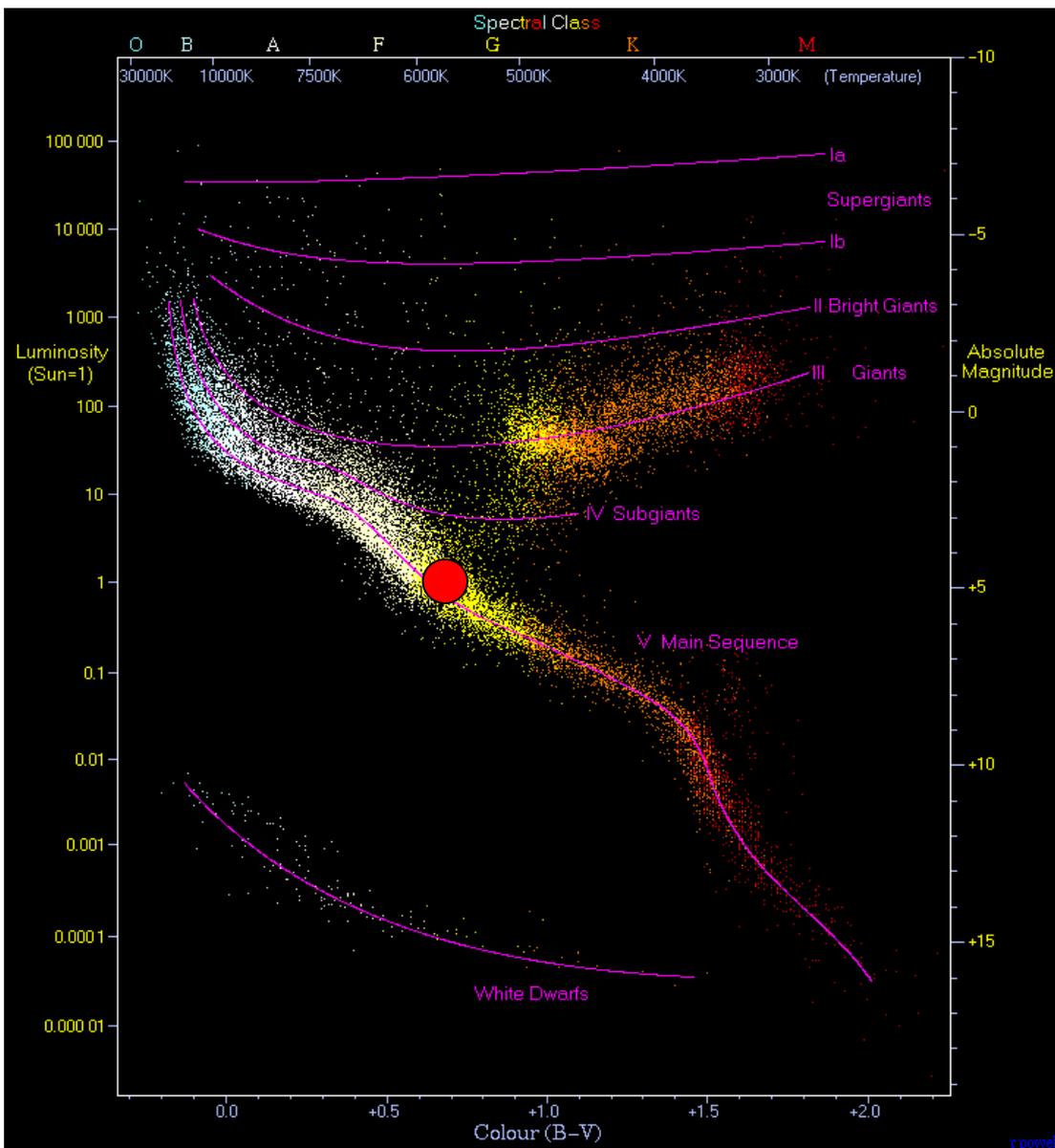
видимая: $m_1 - m_2 = -2.5 \log E_1/E_2$,

абсолютная: $M - m = 5 - 5 \log d$,

абсолютная болометрическая: $M_{\text{bol}} - M_{\text{Sun}} = -2.5 \log L/L_{\text{Sun}}$

Соотношение масса-светимость: $L/L_{\text{Sun}} = (M/M_{\text{Sun}})^{3.8}$
для $M > 0.2 M_{\text{Sun}}$

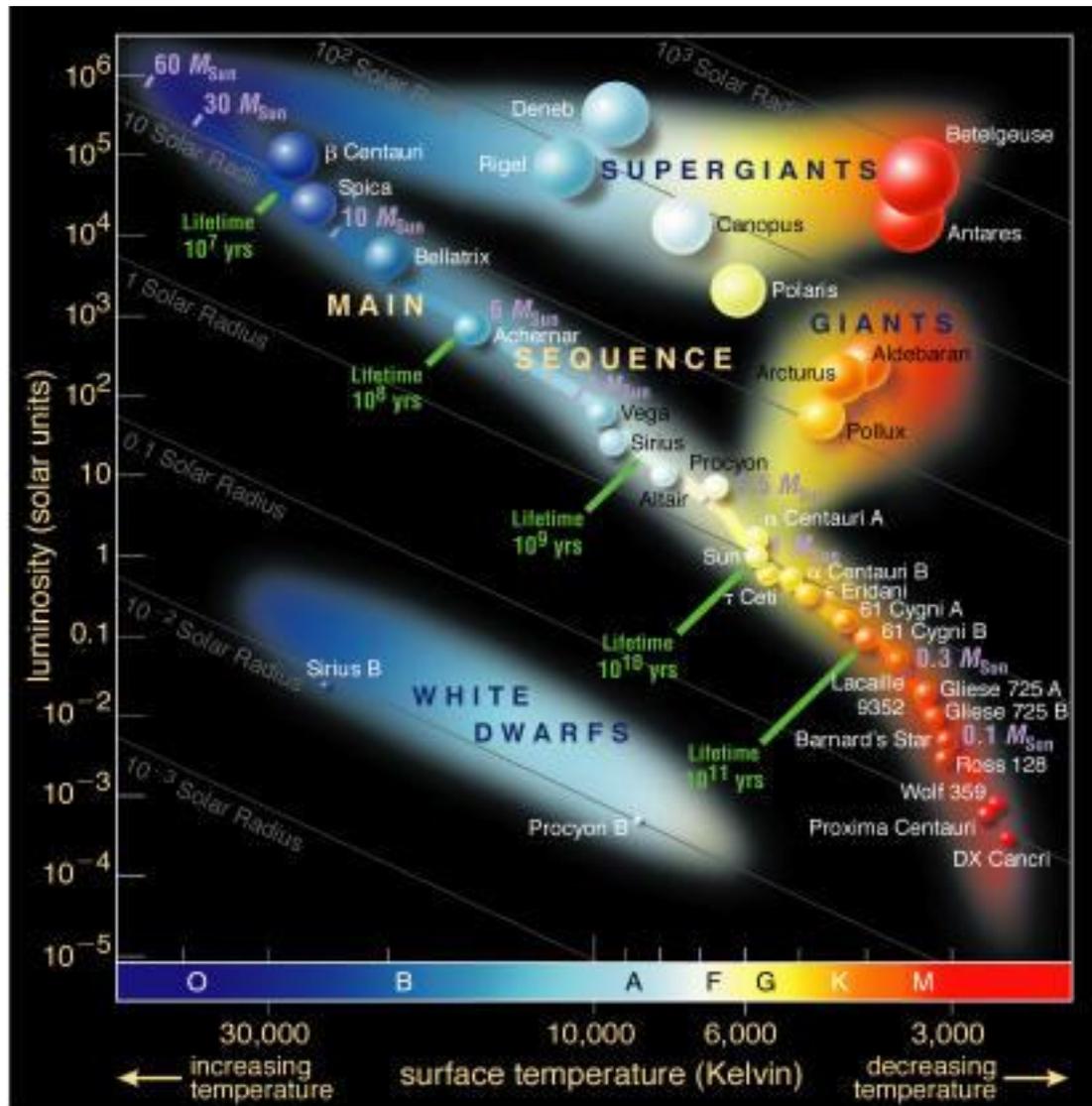
Диаграмма Герцшпрунга-Рассела или спектр-светимость



23 000 звезд
в окрестностях Солнца
(по данным каталогов
Hipparcos и Gliese).

Класс светимости V =
Главная
Последовательность.

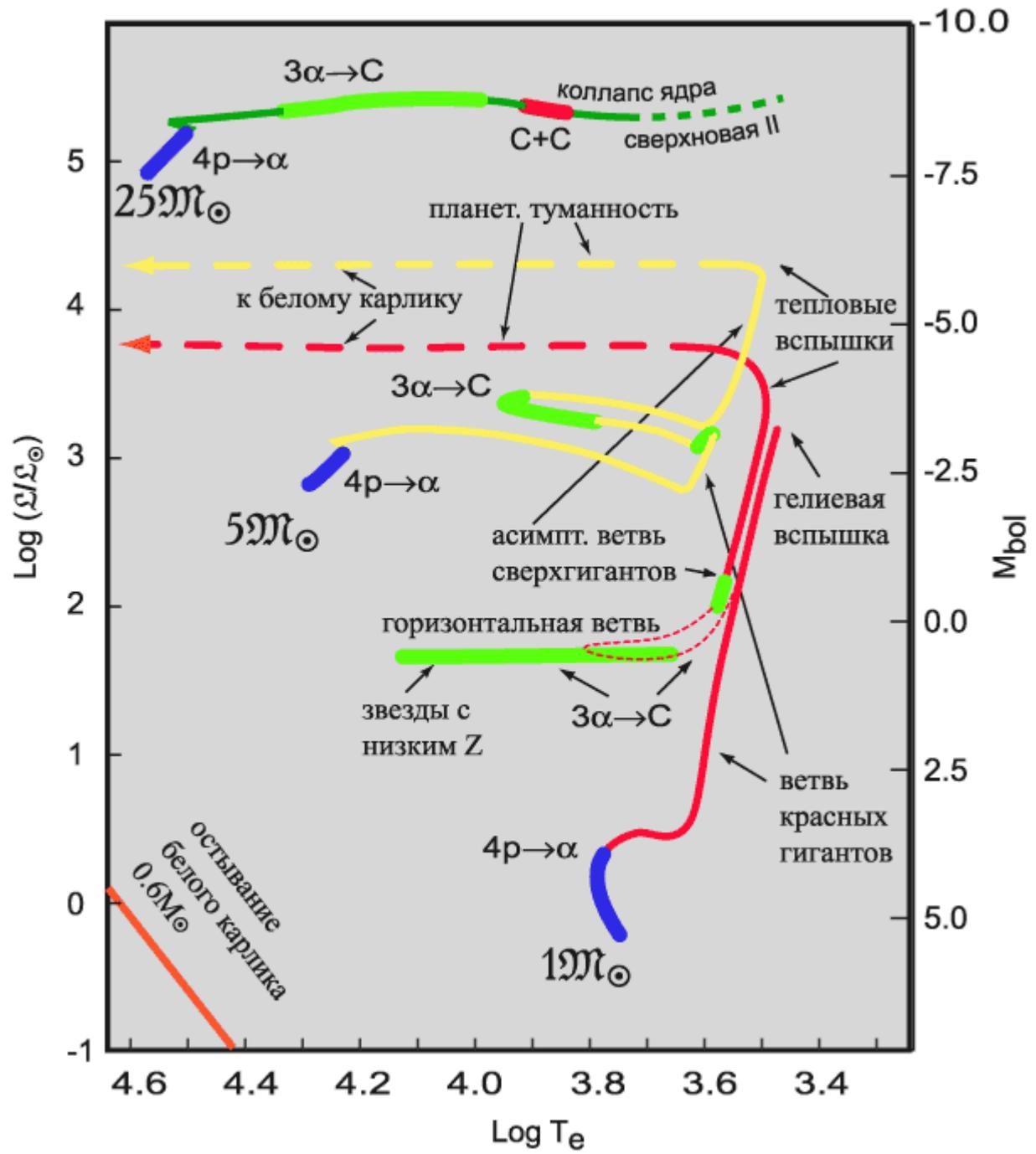
Роль диаграммы Г-Р в понимании эволюции звезд

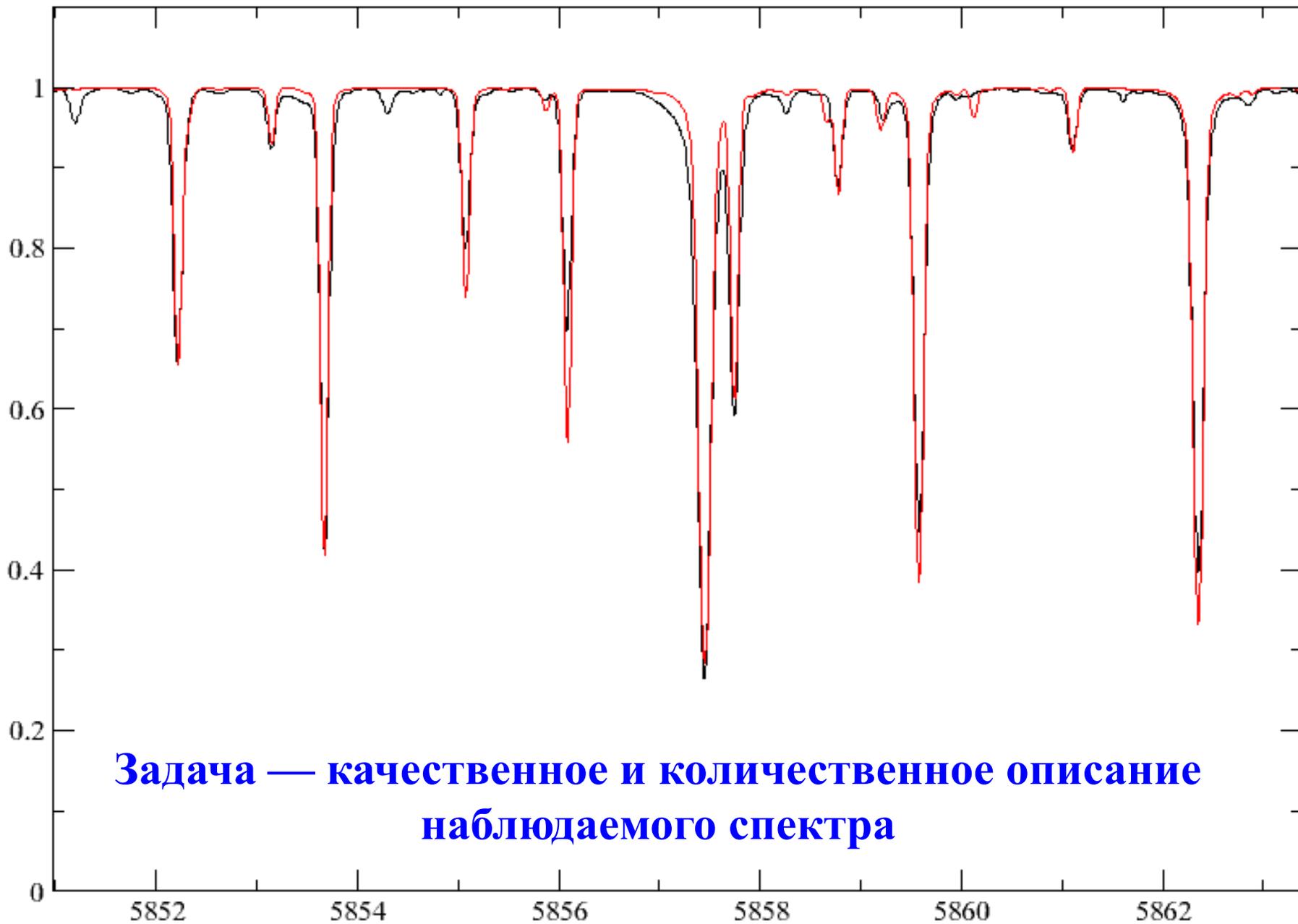


ГП – звезды на стадии горения H в ядре (90% времени жизни).

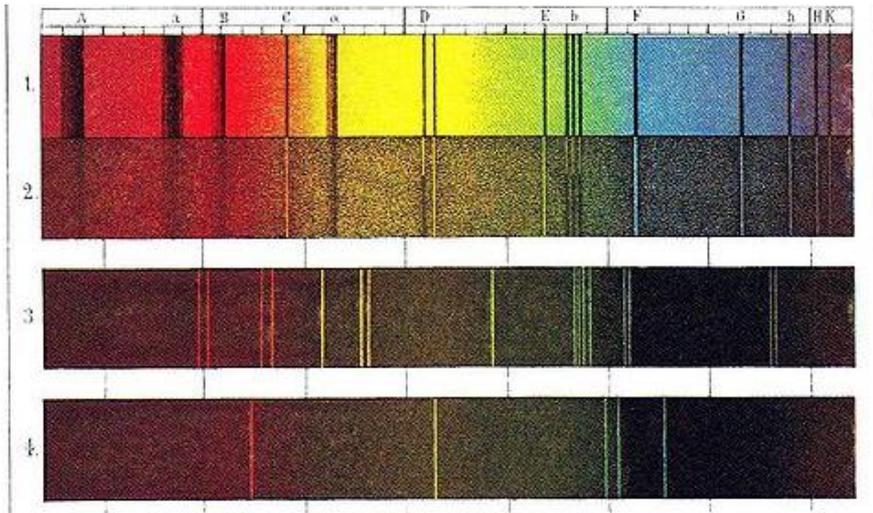
Масса определяет положение звезды на ГП.

Масса определяет ход эволюции звезды и время ее жизни.





Качественное описание спектра — идентификация спектральных линий



Проблема:

В спектре Солнца в районе 5000Å плотность спектральных линий около 150 Å^{-1} , принадлежащих более чем 200 ионам и двухатомным молекулам.



Какому элементу, иону или молекуле принадлежит наблюдаемая линия в спектре?

Количественное описание спектра —

определение интенсивности спектральных линий



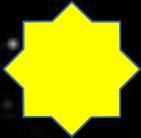
- Определение содержаний химических элементов
- Определение физических условий среды



Прямое изображение Антареса

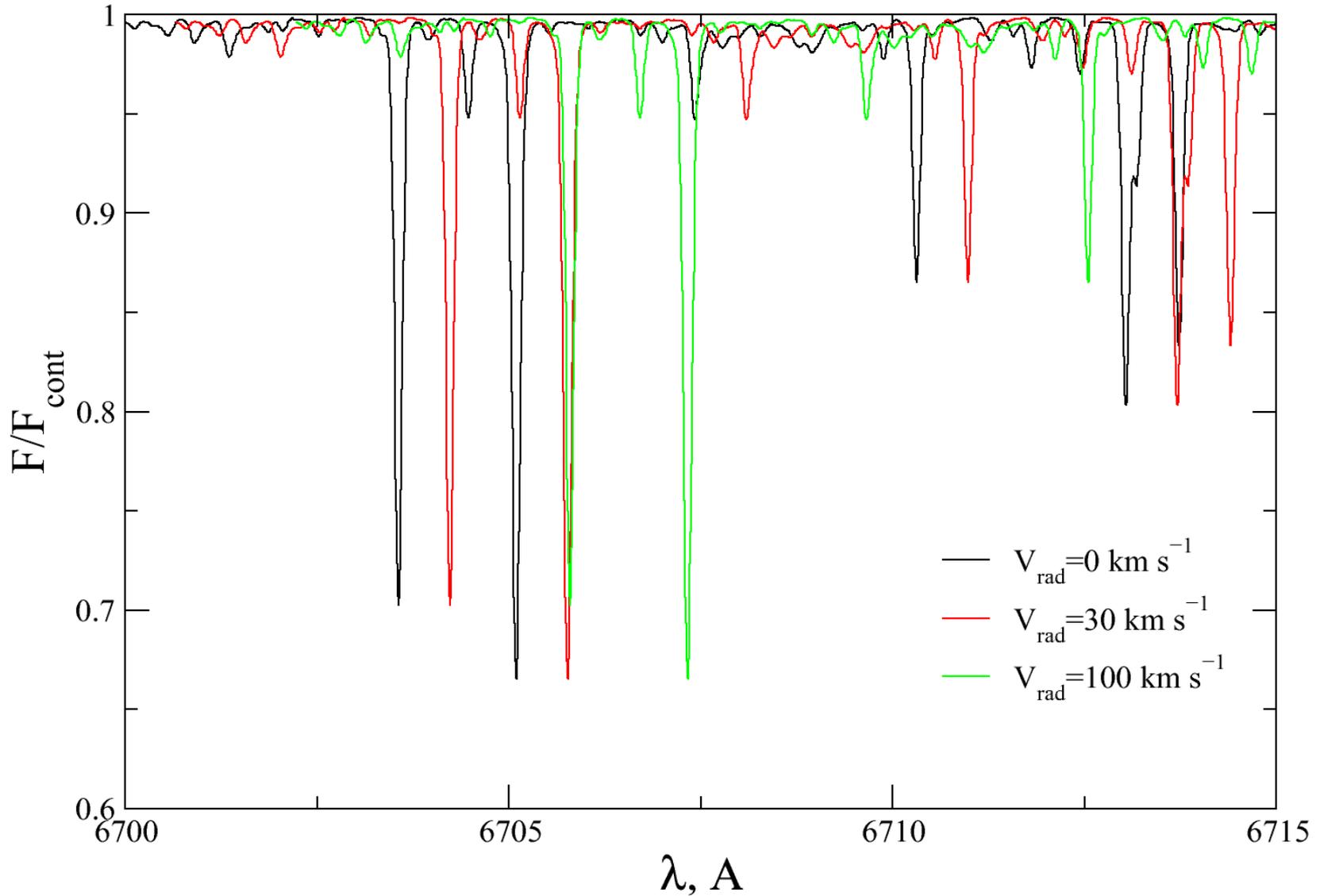


Какую информацию несет спектр?



Возможности современной
звездной спектроскопии

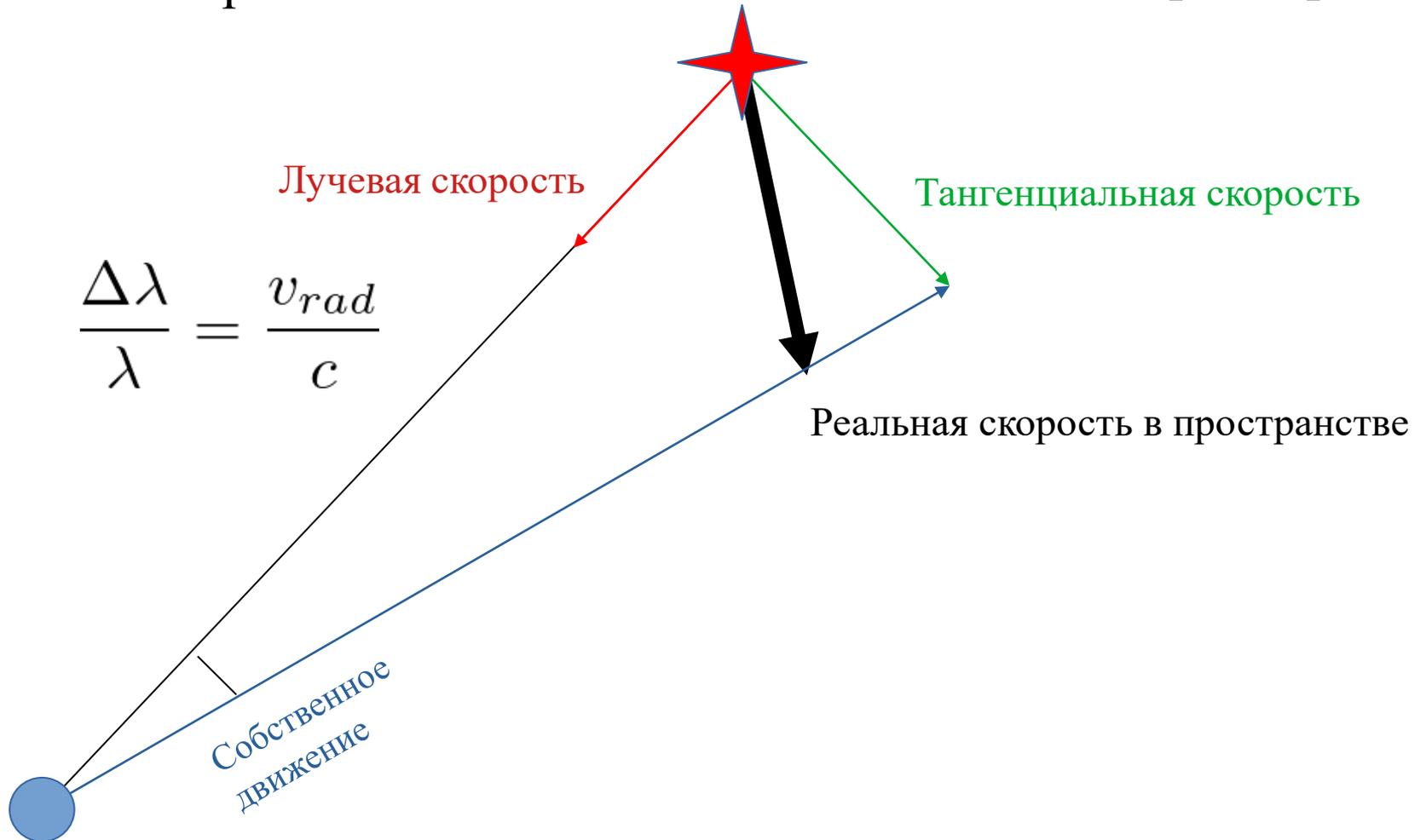
Лучевая или радиальная скорость



Лучевая или радиальная скорость

Спектроскопия

Астрометрия

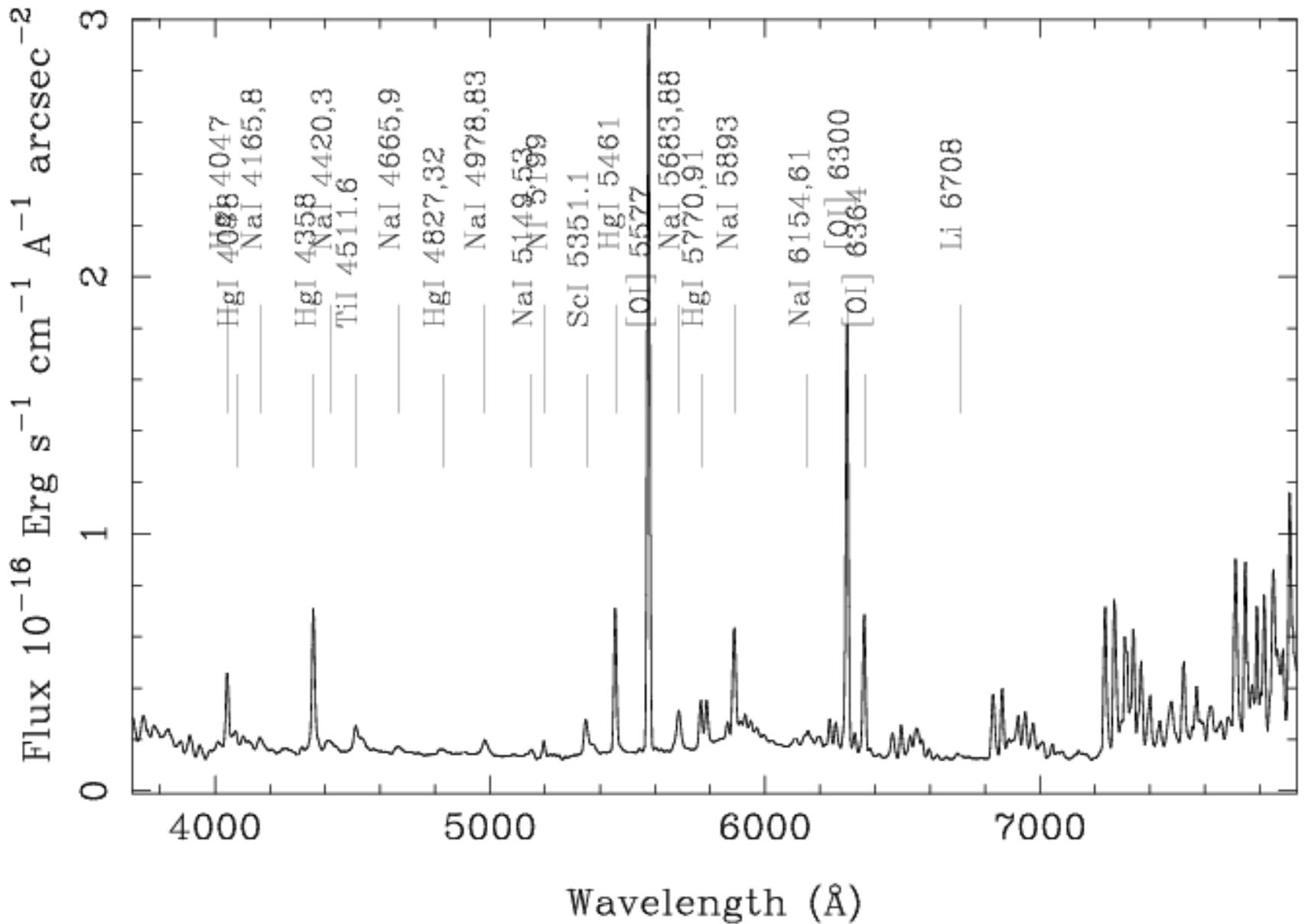


Точность измерения лучевой скорости

Зависит от :

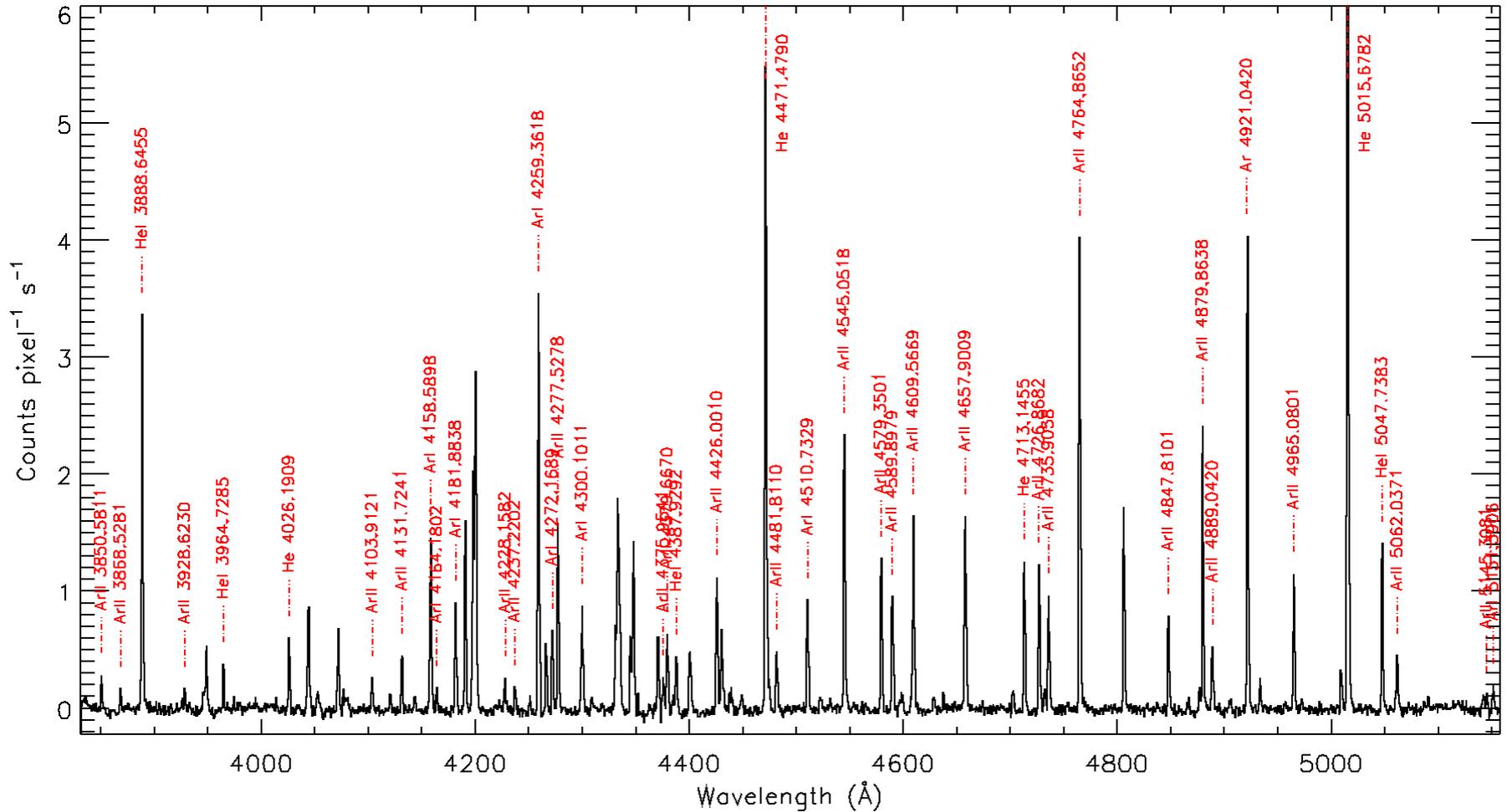
- Точности калибровки по длинам волн
- Источника калибровки (небо, лампа, йодистая ячейка, лазерная гребенка)
 - Количества реперных спектральных линий
 - Их распределения по длинам волн
- Спектрального разрешения $\delta\lambda \approx 0.1 \frac{\lambda}{R}$
- Оптических aberrаций и тождественности оптического хода
- Отношения сигнала к шуму
- Стабильности аппаратуры

Спектр ночного неба

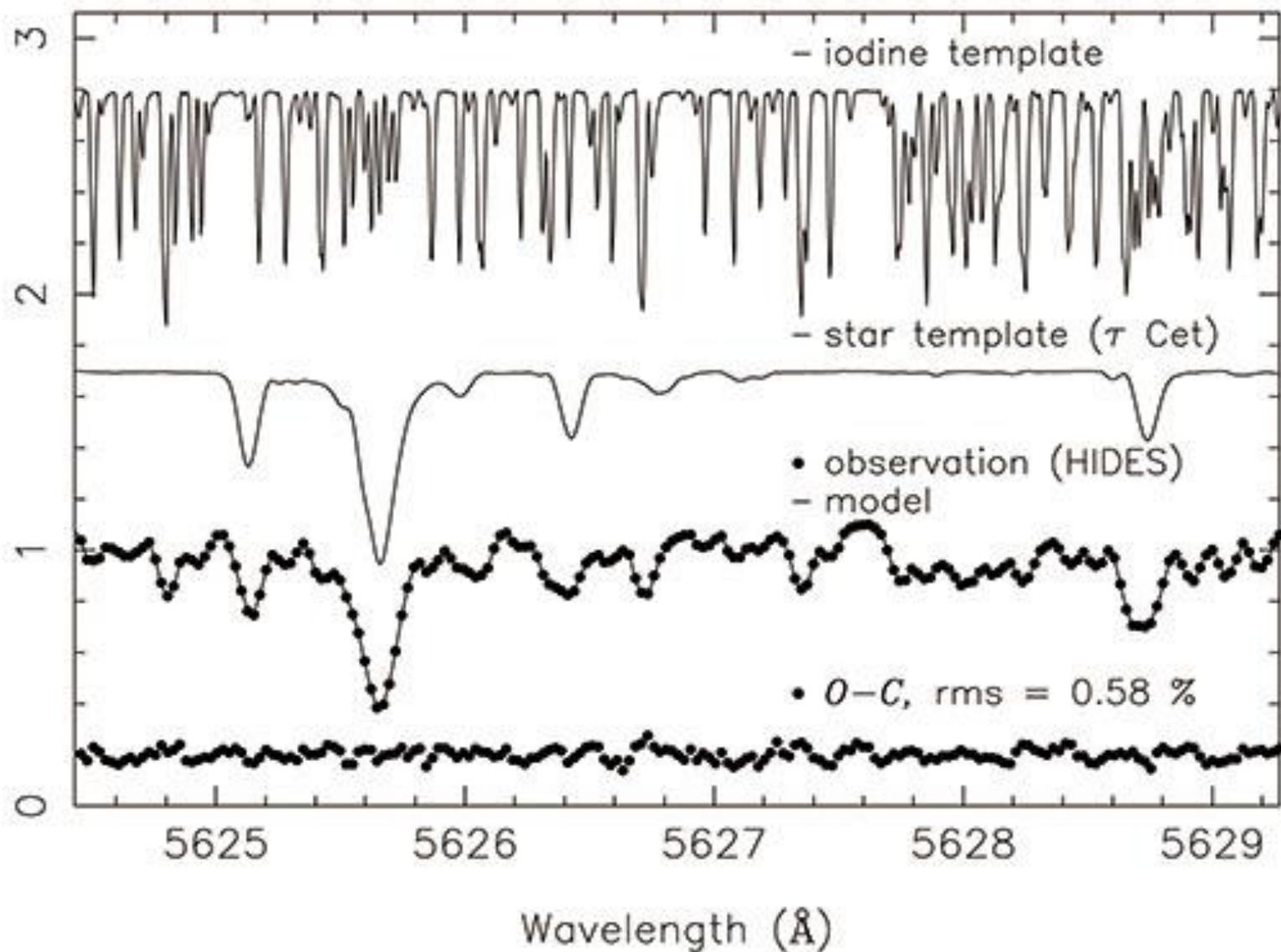


Спектр He Ar лампы

Blue Channel 1200GPM Binning : 1x1 Clear/Clear Filter (2012-03-28)

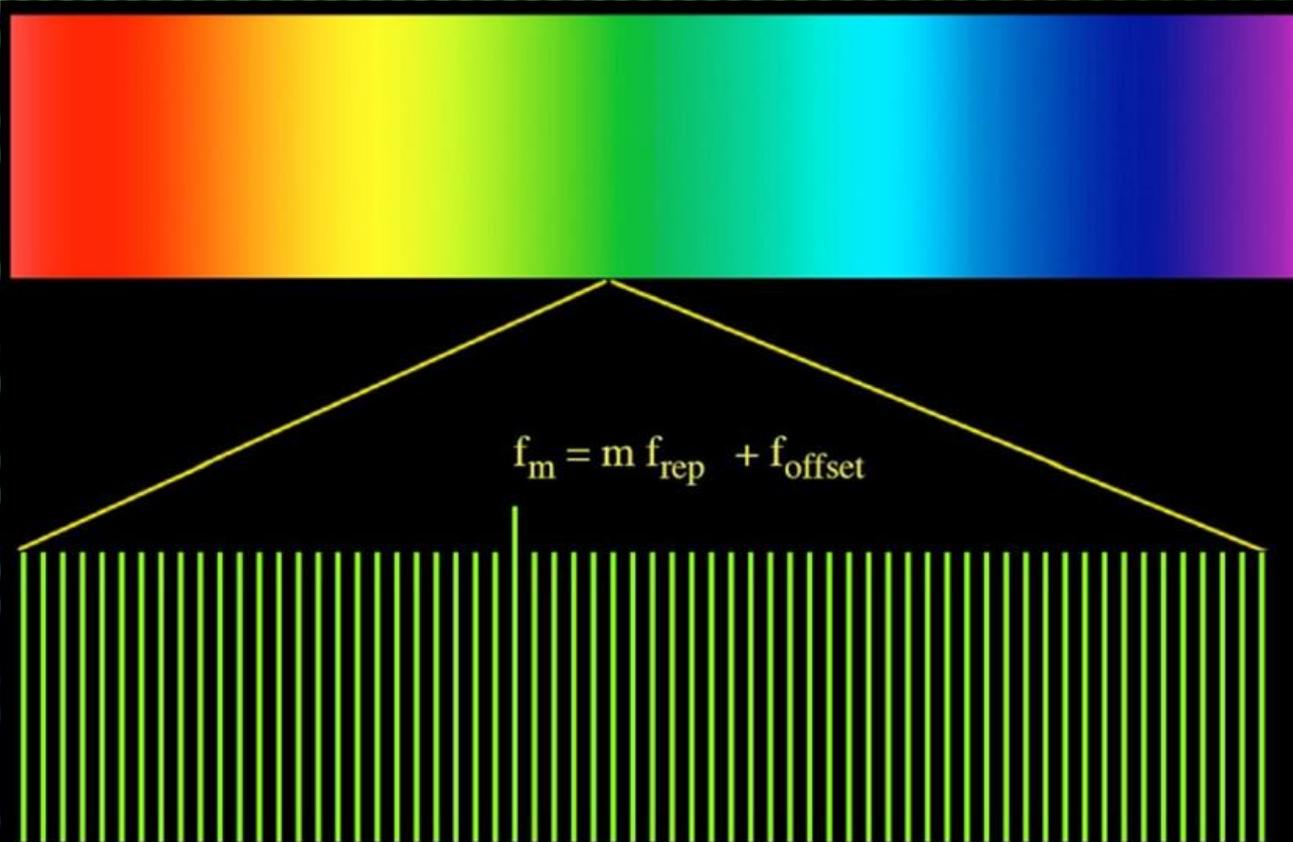


~ 0.5 км/с по единичным линиям (при R=50000),
~ 100 м/с по набору линий



Точность измерения лучевой скорости

Лазерная гребенка



Зависимость от точности вычисления скорости наблюдателя относительно объекта наблюдения

Средняя скорость по орбите

29.785 км/с

- зависимость от положения
- зависимость от влияния Луны и планет

Скорость на экваторе

0.464 км/с

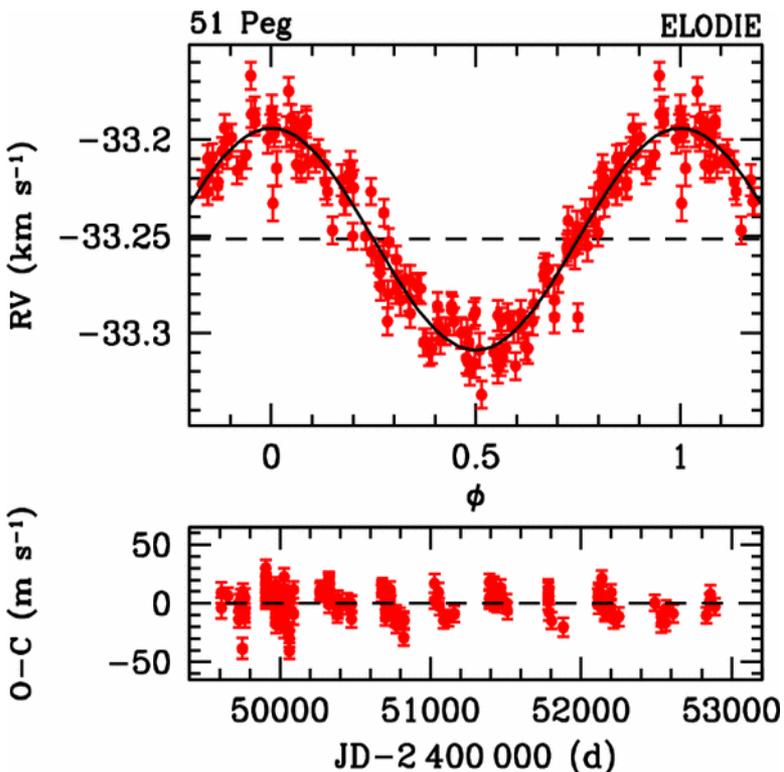
- зависит от положения
- от высоты



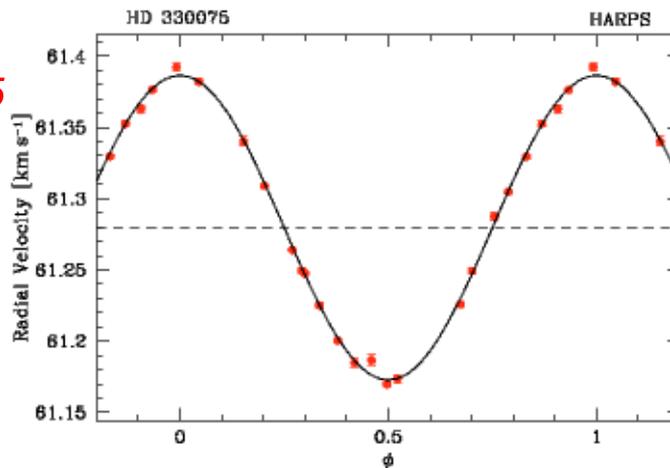
Позиционные спектральные измерения: Поиск и обнаружение планетных систем у звезд

Первая открытая планета

Mayor & Queloz, 1995, Nature, 378, 355



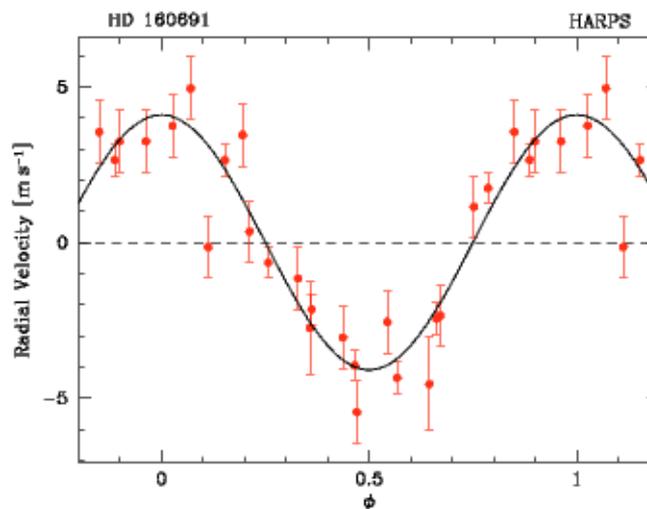
$M \sim 0.5 M_J$, $K = 59$ м/с, $P = 4.23$ дня
точность ± 15 м/с



'Hot Jupiter'

$M \sim 0.62 M_J$,
 $K = 107$ м/с,
 $P = 3.39$ дня
 $a = 0.039$ AU
точность ± 2 м/с

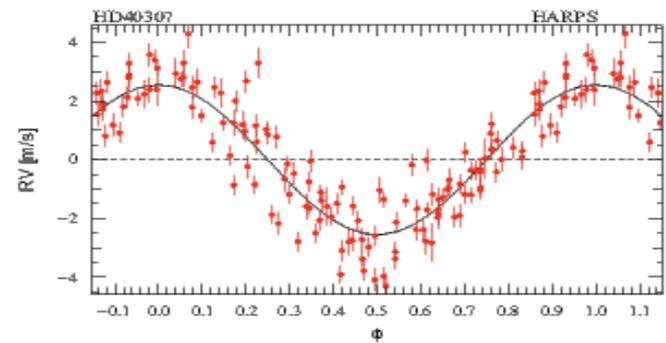
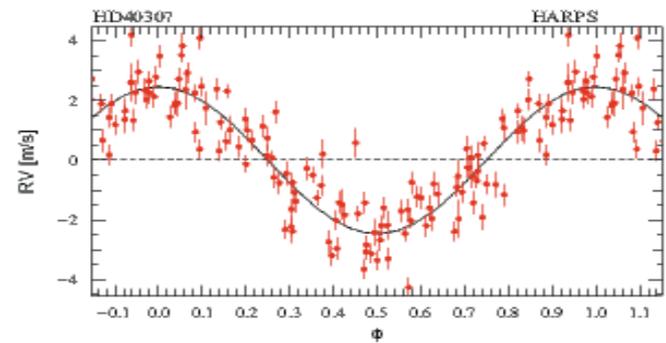
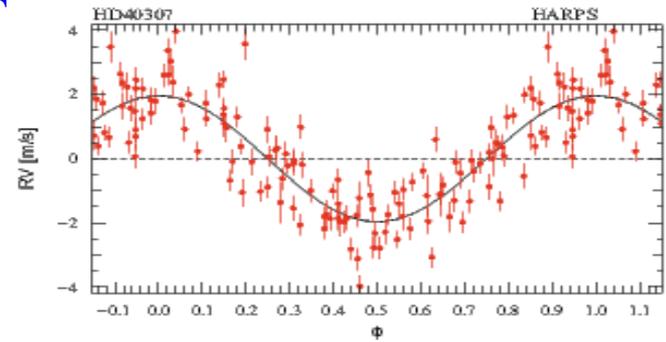
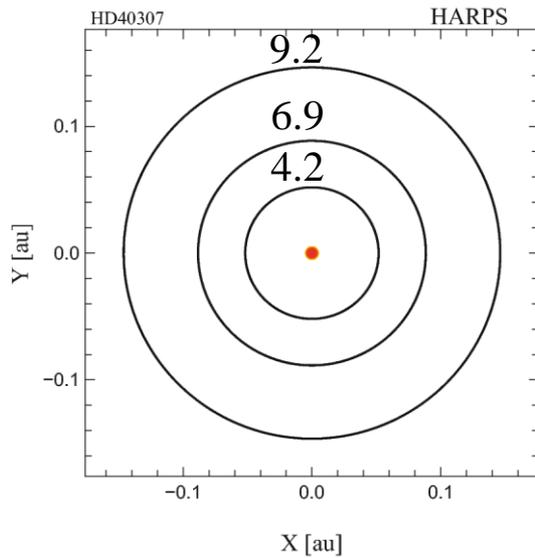
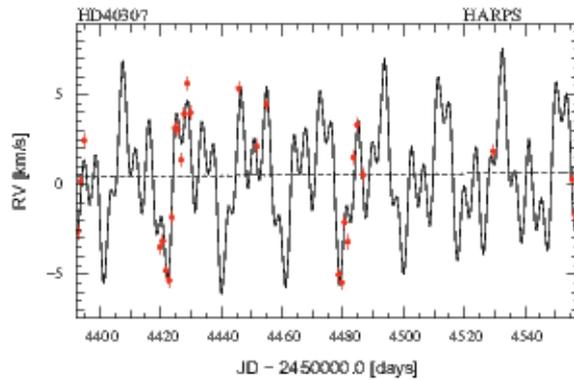
*Pepe et al. 2004, A&A
423, 385*



$M \sim 14 M_{\text{Earth}}$
 $K = 4.1$ м/с,
 $P = 9.5$ дня
 $a = 0.09$ AU
точность ± 0.9 м/с

*Santos et al. 2004,
A&A 426, L19*

Позиционные спектральные измерения: Поиск и обнаружение планетных систем у звезд



Mayor et al. 2009, A&A 493, 639

Barycentric Corrections at 1 cm s^{-1} for Precise Doppler Velocities

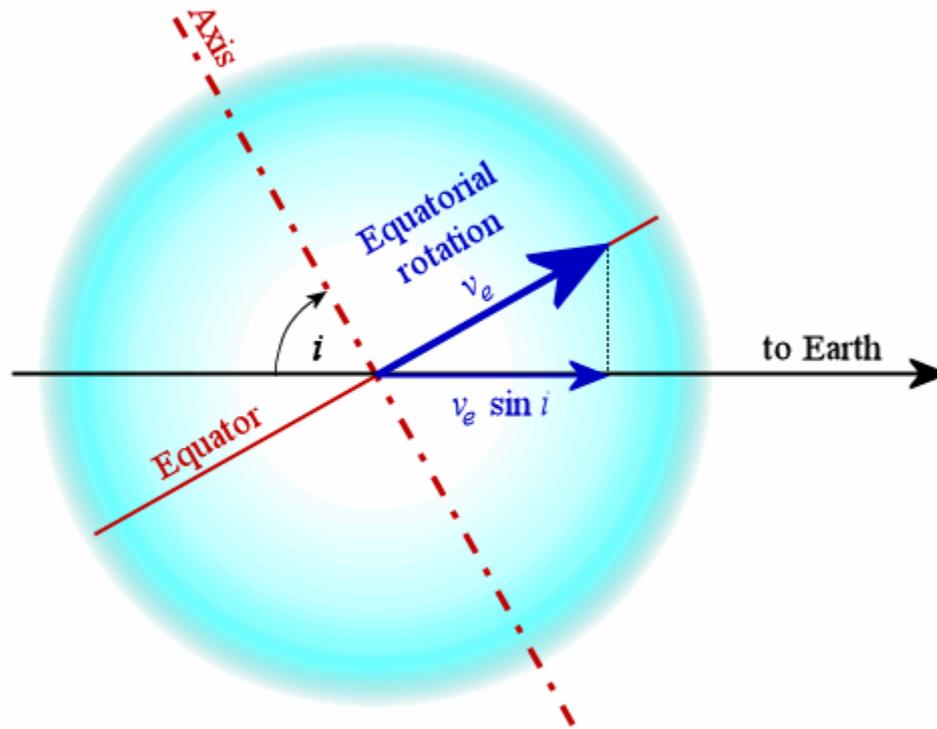
J. T. WRIGHT^{1,2} AND J. D. EASTMAN^{3,4}

Received 2014 July 23; accepted 2014 August 19; published 2014 September 24

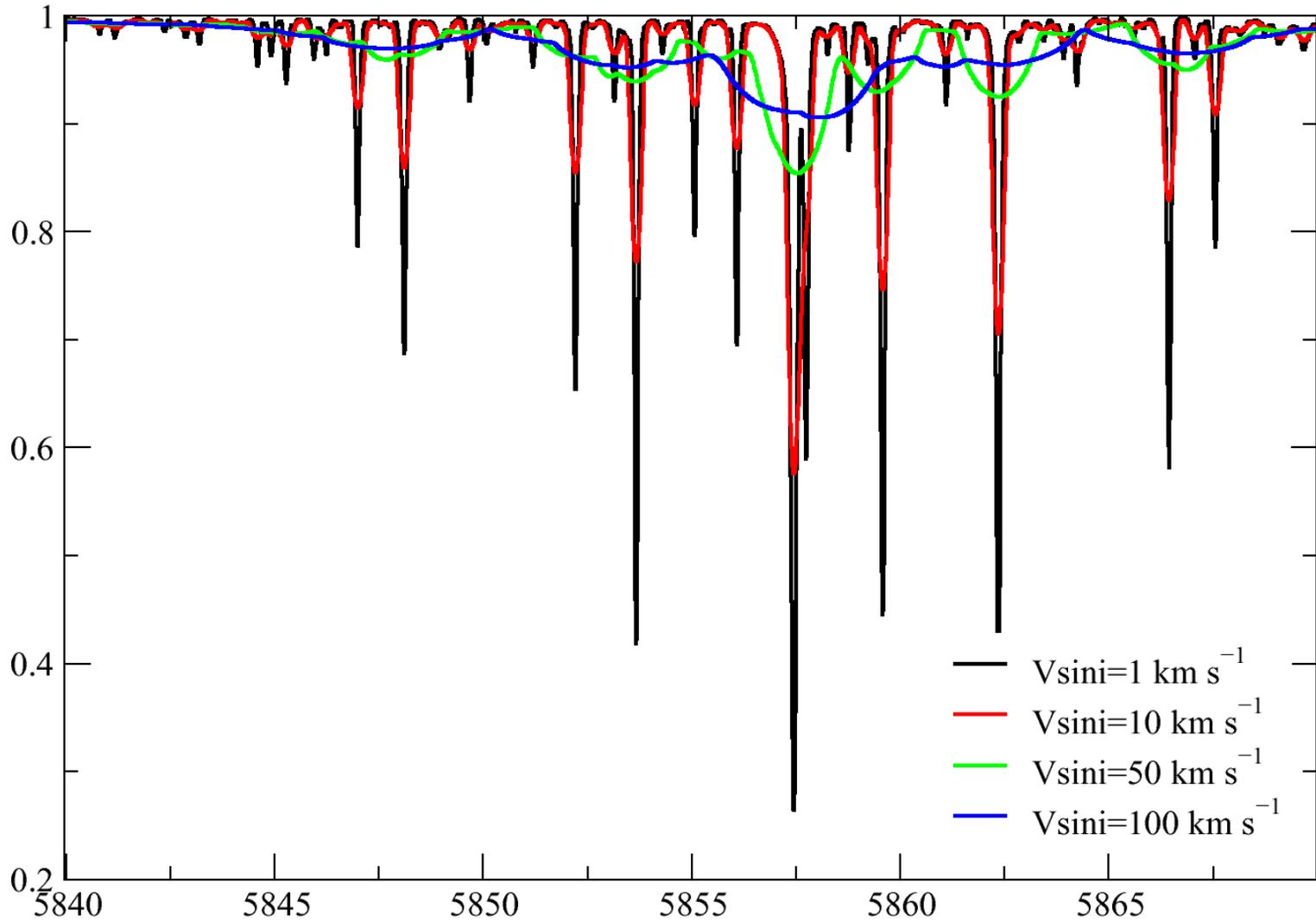
ABSTRACT. The goal of this paper is to establish the requirements of a barycentric correction with an rms of $\lesssim 1 \text{ cm s}^{-1}$, which is an order of magnitude better than necessary for the Doppler detection of true Earth analogs ($\sim 9 \text{ cm s}^{-1}$). We describe the theory and implementation of accounting for the effects on precise Doppler measurements of motion of the telescope through space, primarily from rotational and orbital motion of the Earth, and the motion of the solar system with respect to target star (i.e., the “barycentric correction”). We describe the minimal algorithm necessary to accomplish this and how it differs from a naïve subtraction of velocities (i.e., a Galilean transformation). We demonstrate the validity of code we have developed from the California Planet Survey code via comparison with the pulsar timing package, TEMPO2. We estimate the magnitude of various terms and effects, including relativistic effects, and the errors associated with incomplete knowledge of telescope position, timing, and stellar position and motion. We note that chromatic aberration will create uncertainties in the time of observation, which will complicate efforts to detect true Earth analogs. Our code is available for public use and validation.

Online material: color figures, machine-readable table

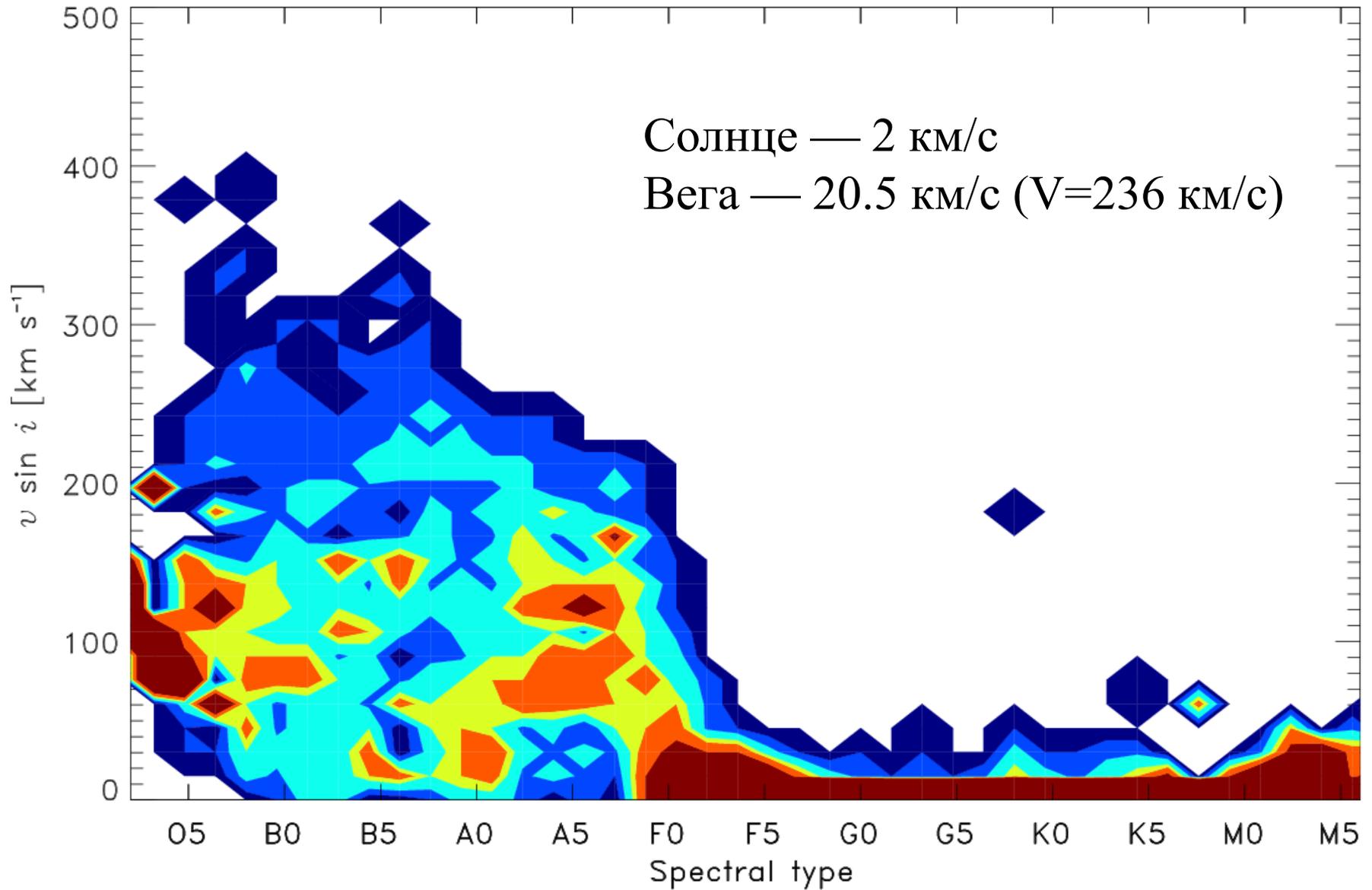
Проекция скорости вращения на картинную плоскость



Проекция скорости вращения на картинную плоскость



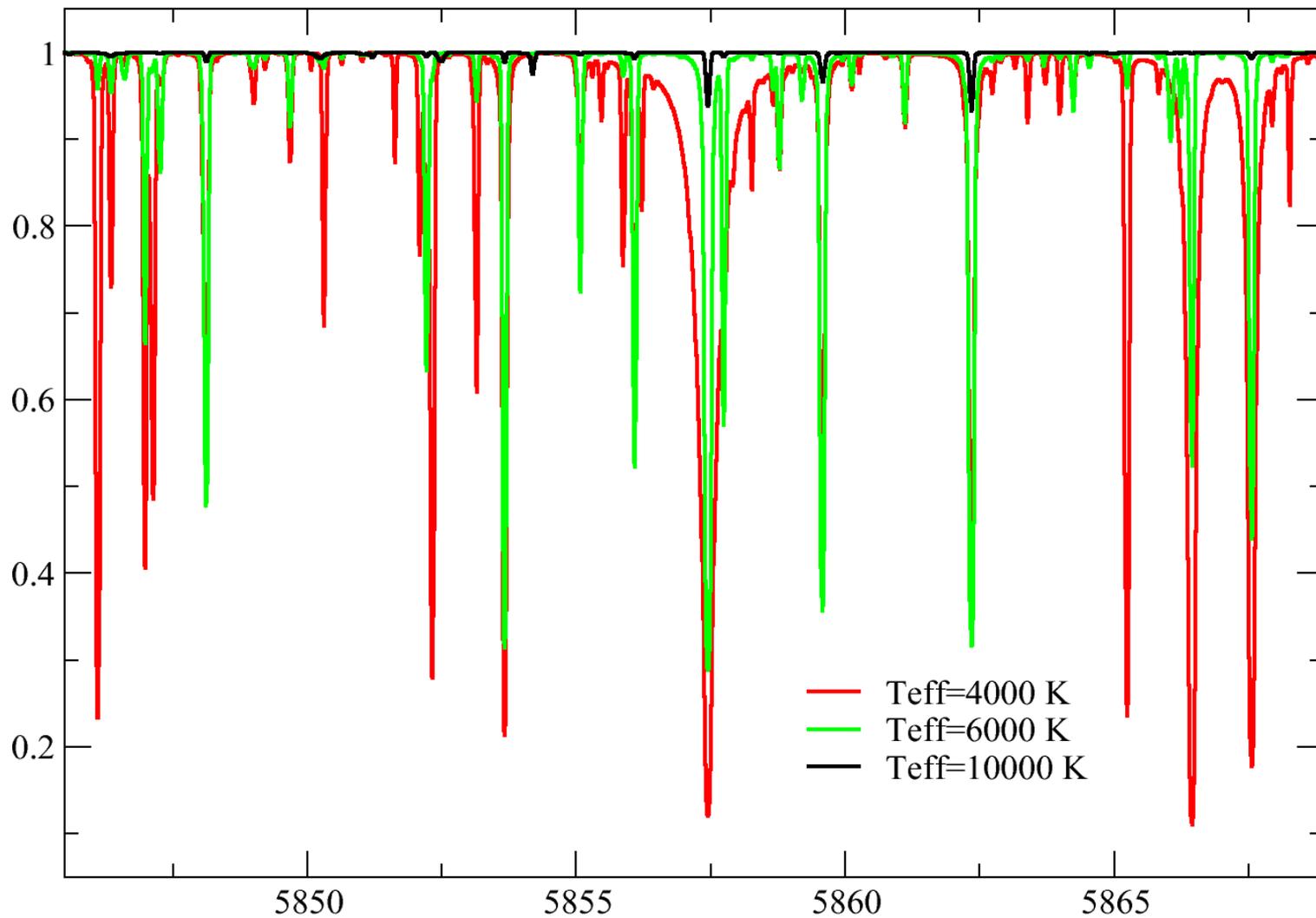
Распределение скоростей вращения $V \sin i$



Для больших скоростей ($V \sin i > 10$ км/с) точность измерения $< 10\%$, но при меньших существует проблема разделения профиля скорости вращения от профилей:

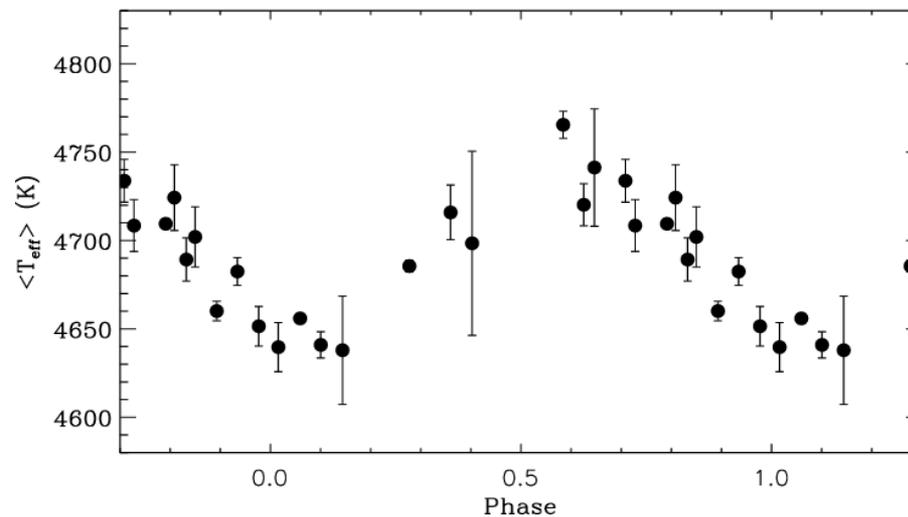
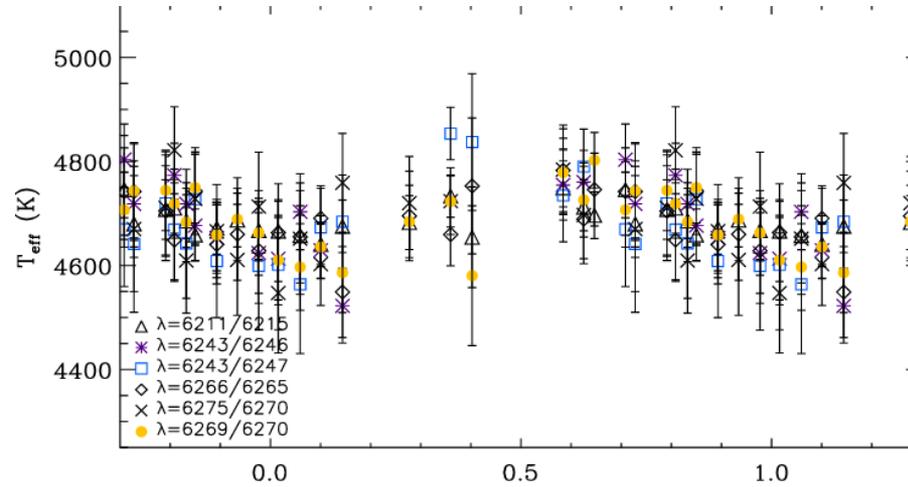
- Инструментального (ширина профиля в шкале скоростей $dV = c/R$, при $R = 50000$, $dV = 6$ км/с)
- Скорости макротурбуленции (типичное значение 3-8 км/с)

Температура

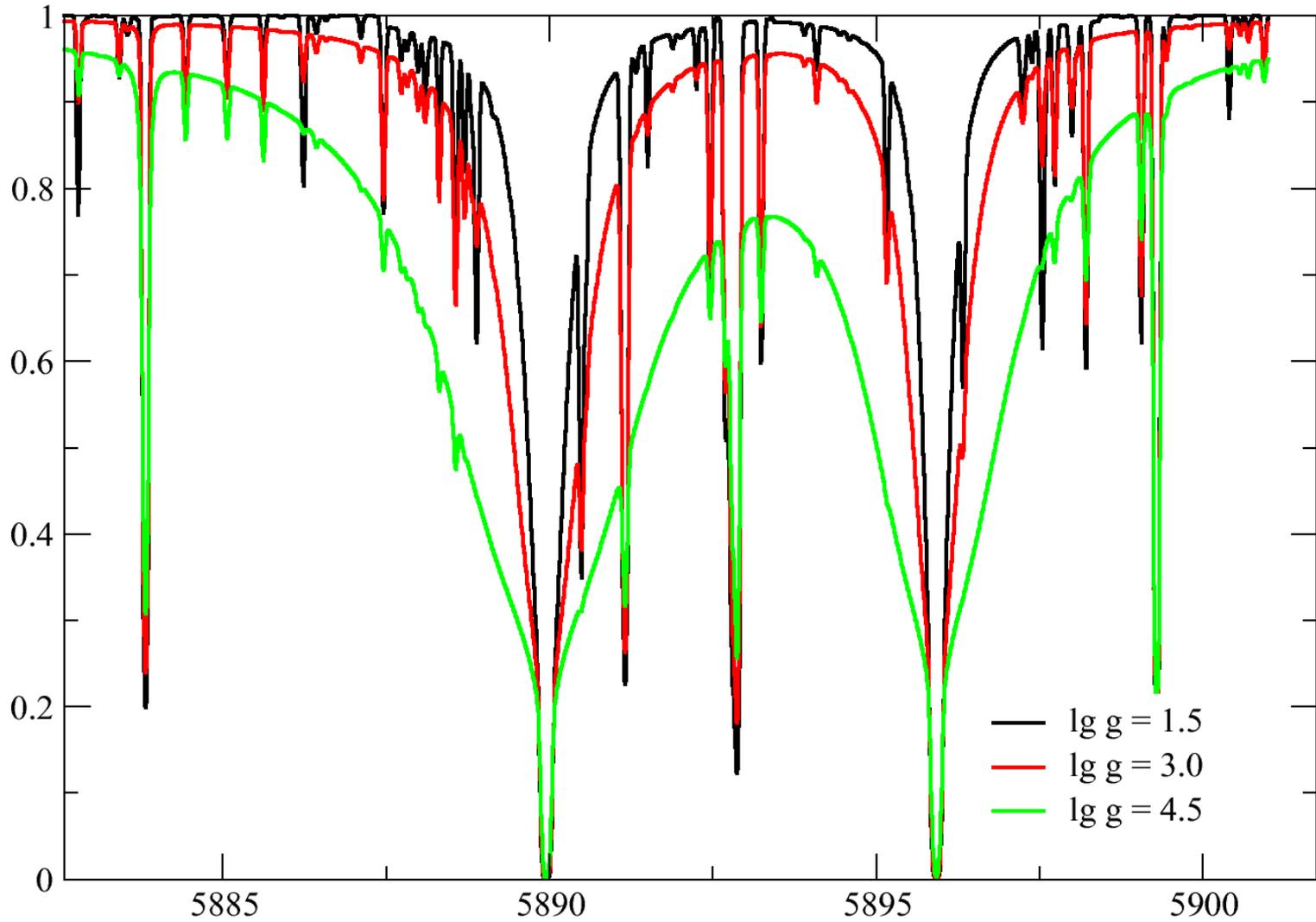


Ca I

Температура, определенная методом отношения глубин спектральных линий

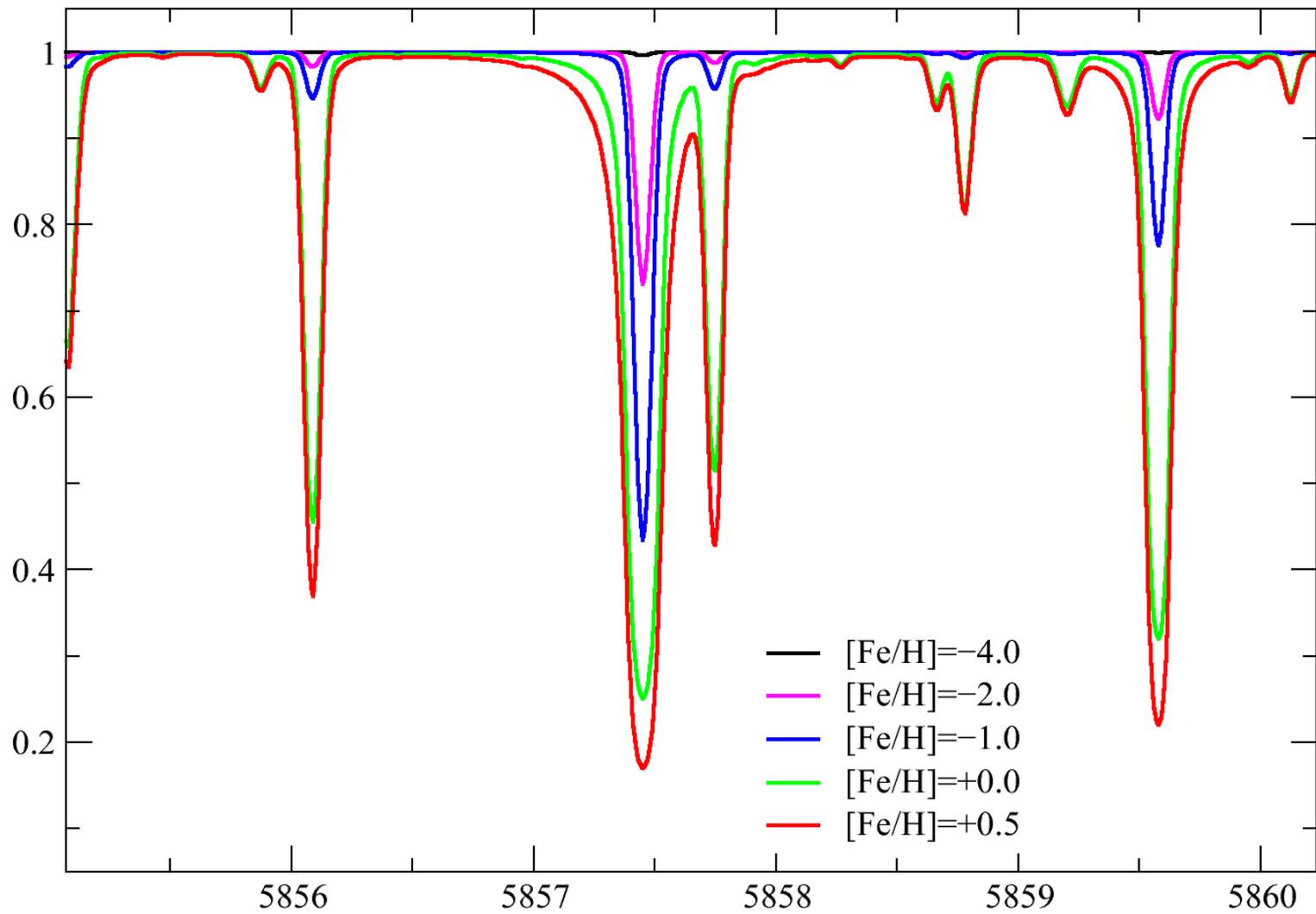


Поверхностное ускорение силы тяжести

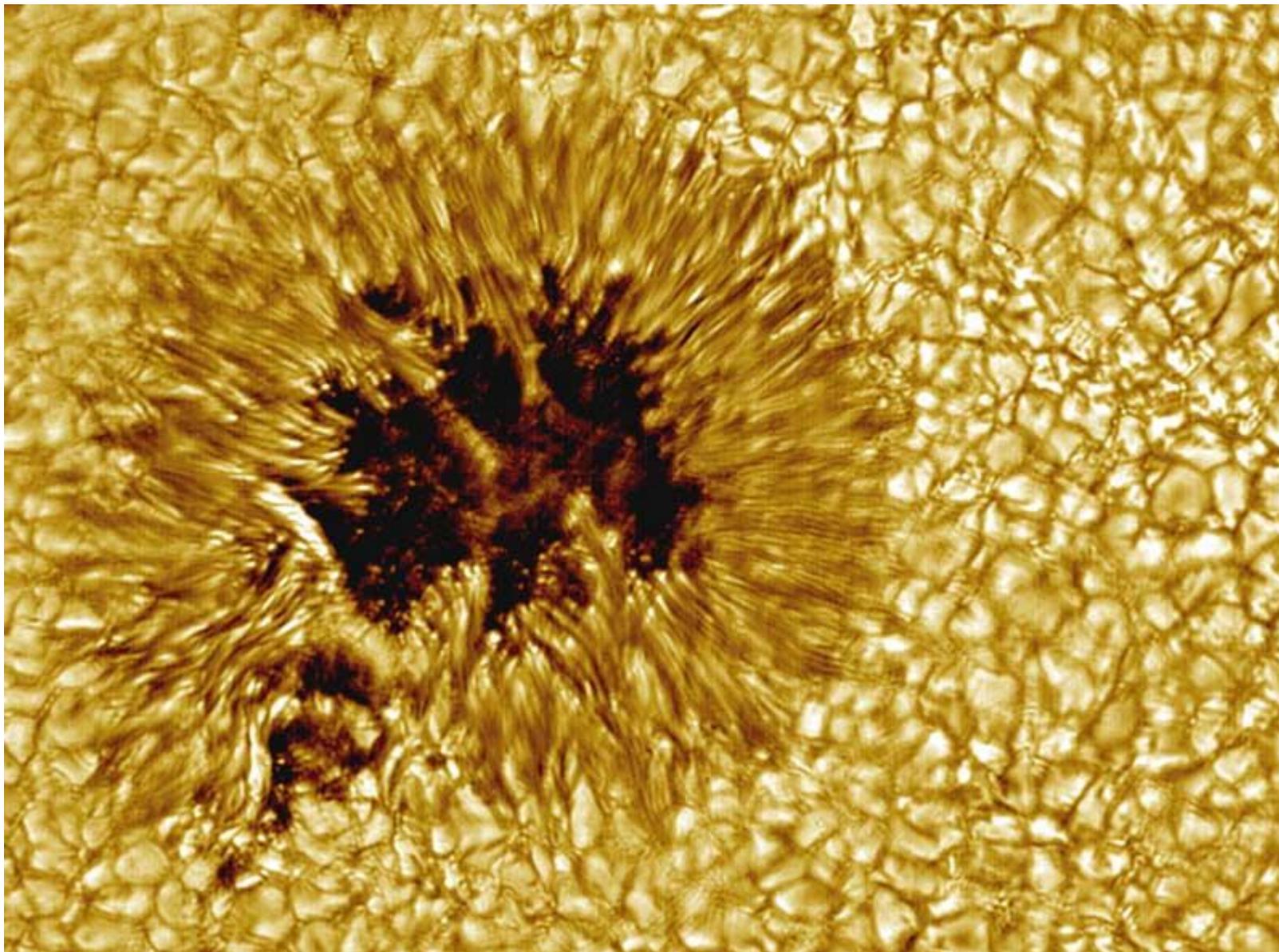


Na I

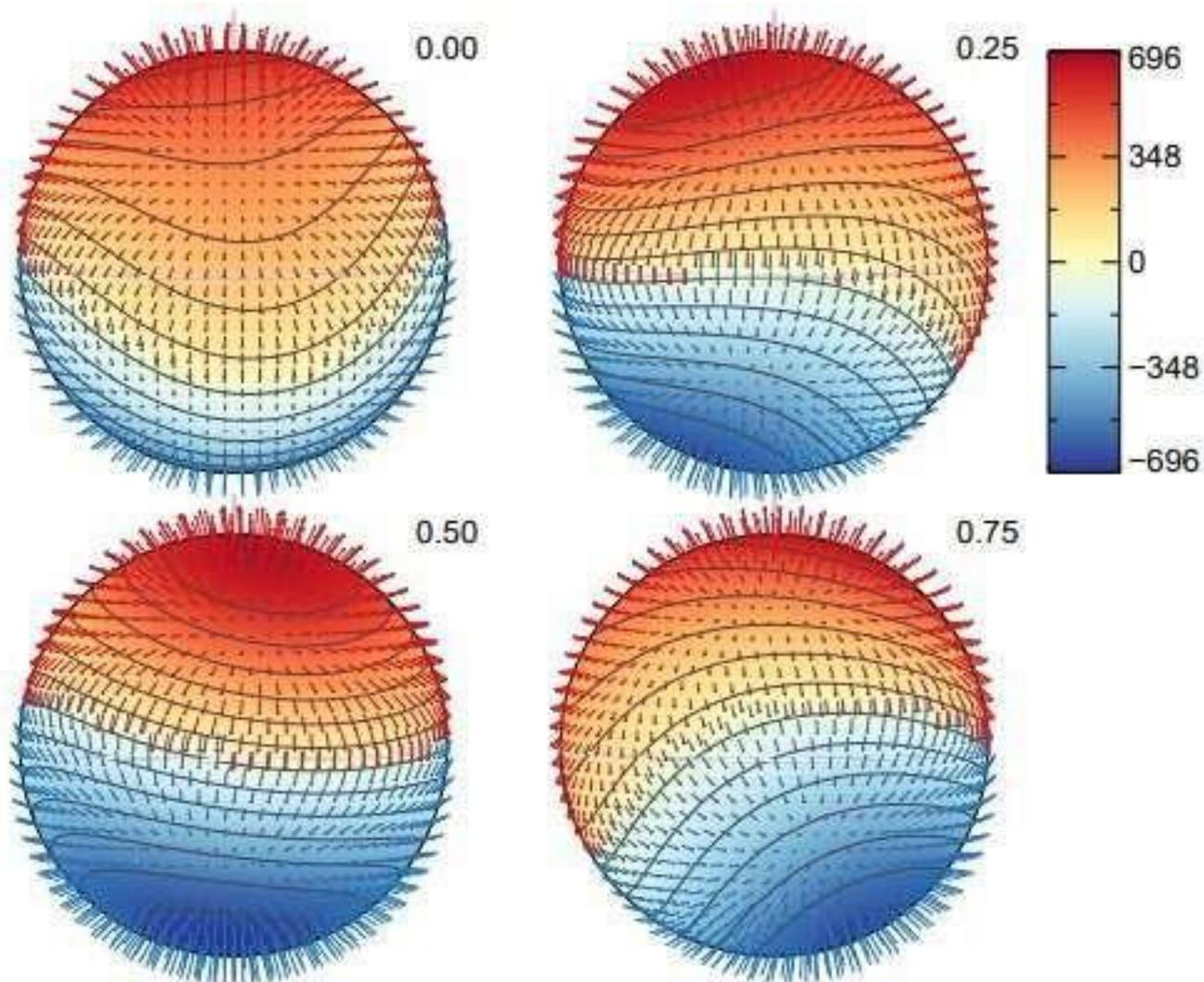
Металличность и содержание элементов



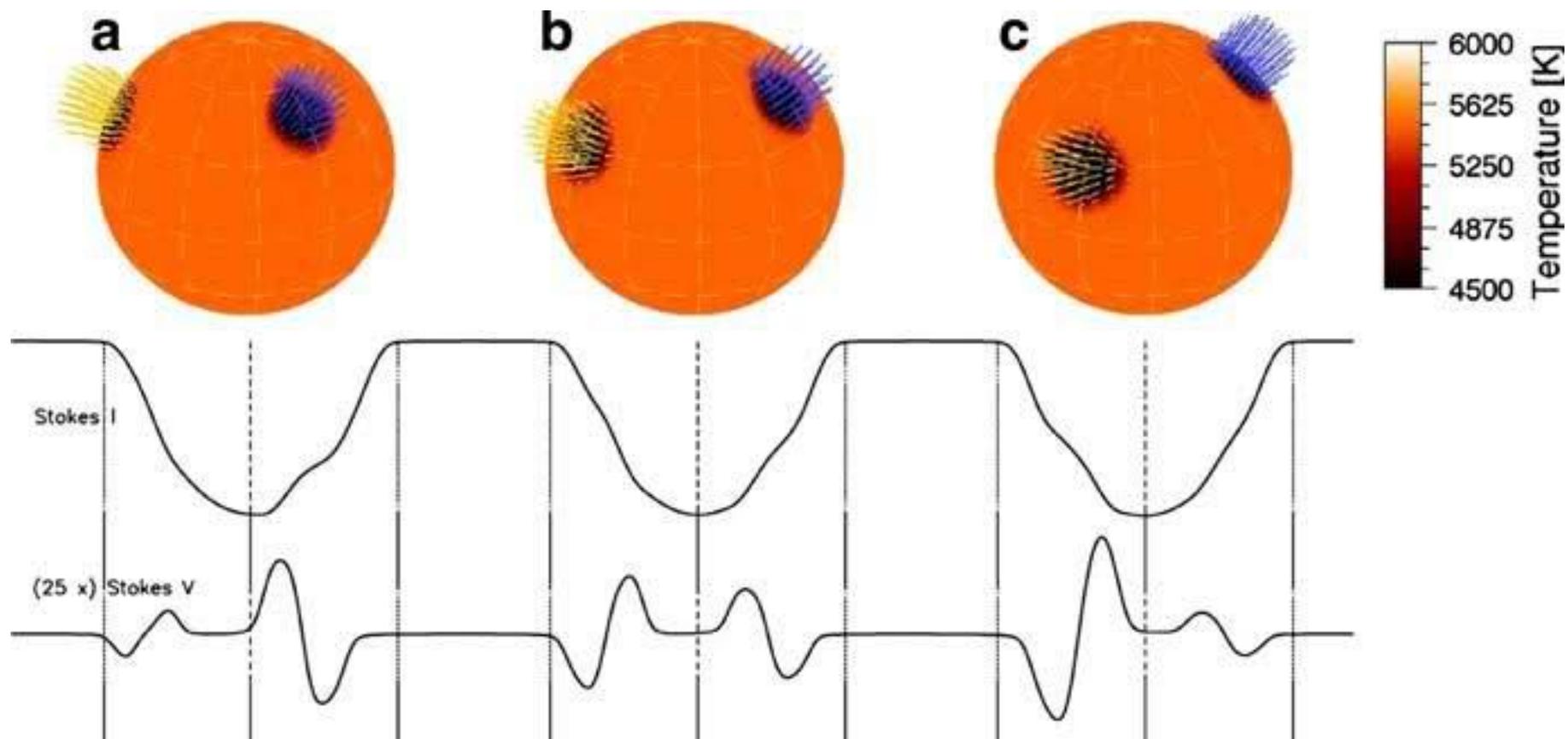
Турбулентность (макро- и микро-)



Напряженность магнитного поля



Распределение температурных пятен





Accuracy of atmospheric parameters of FGK dwarfs determined by spectrum fitting

T. Ryabchikova,^{1★} N. Piskunov,^{2★} Yu. Pakhomov,^{1★} V. Tsymbal,³ A. Titarenko,^{1,4}
T. Sitnova,^{1,4} S. Alexeeva,¹ L. Fossati⁵ and L. Mashonkina¹

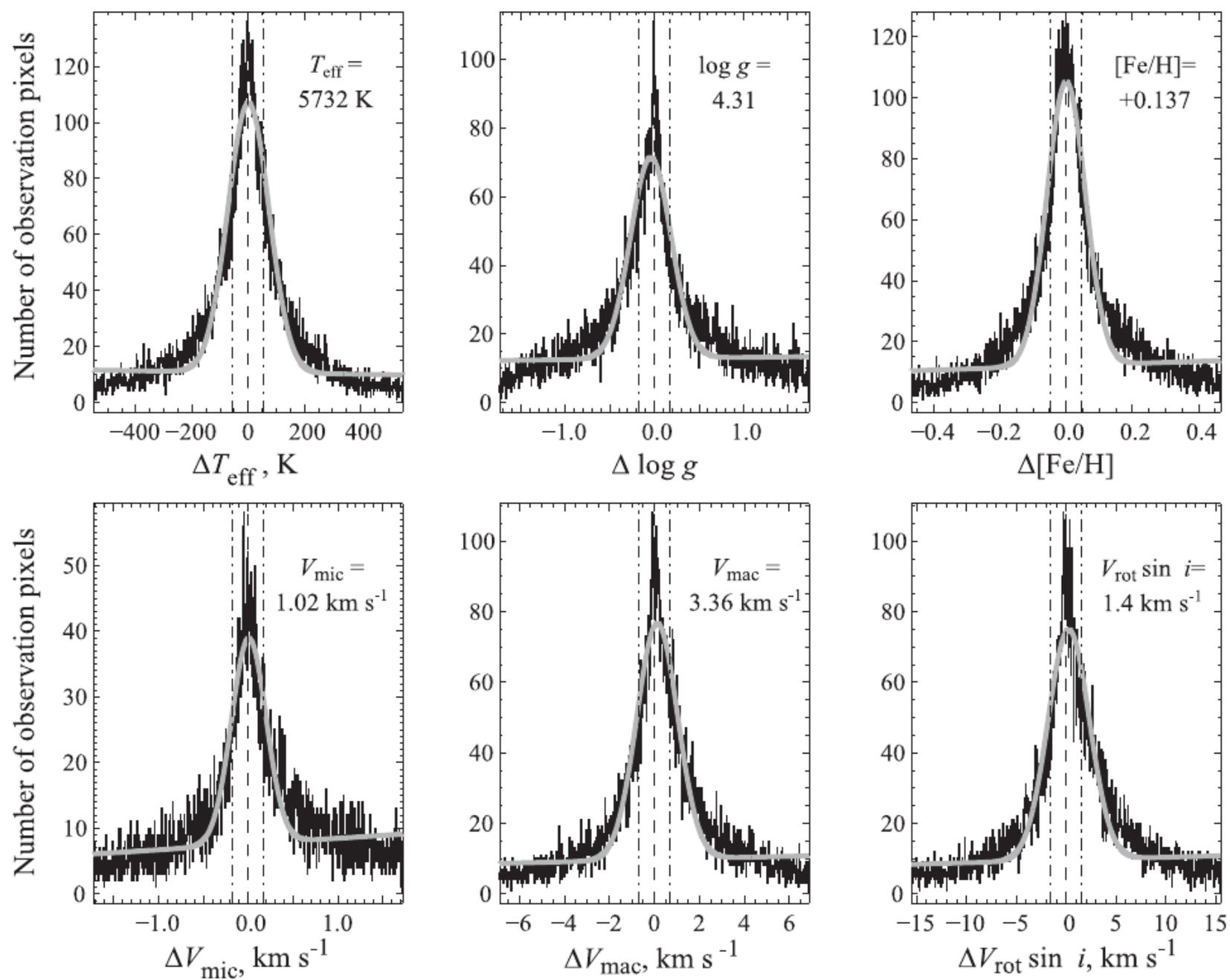


Figure 2. Example of density distributions for the same parameters as in Fig. 1. Best-fitting Gaussians of the central peaks are shown by grey colour. Dashed and dash-dotted lines indicate the median and the $\pm\sigma$ range estimated from the cumulative distributions.

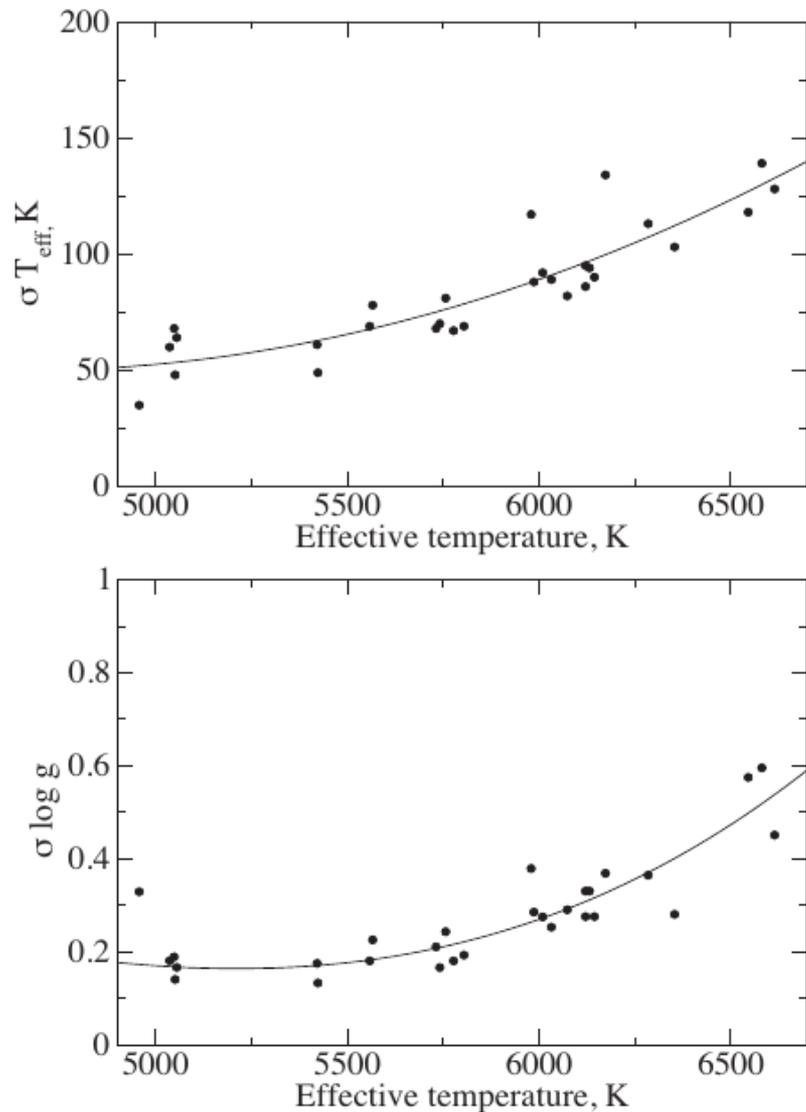


Figure 3. Uncertainty in the effective temperature (top) and surface gravity (bottom) as a function of the effective temperature. The solid line shows the quadratic polynomial fit to the data.

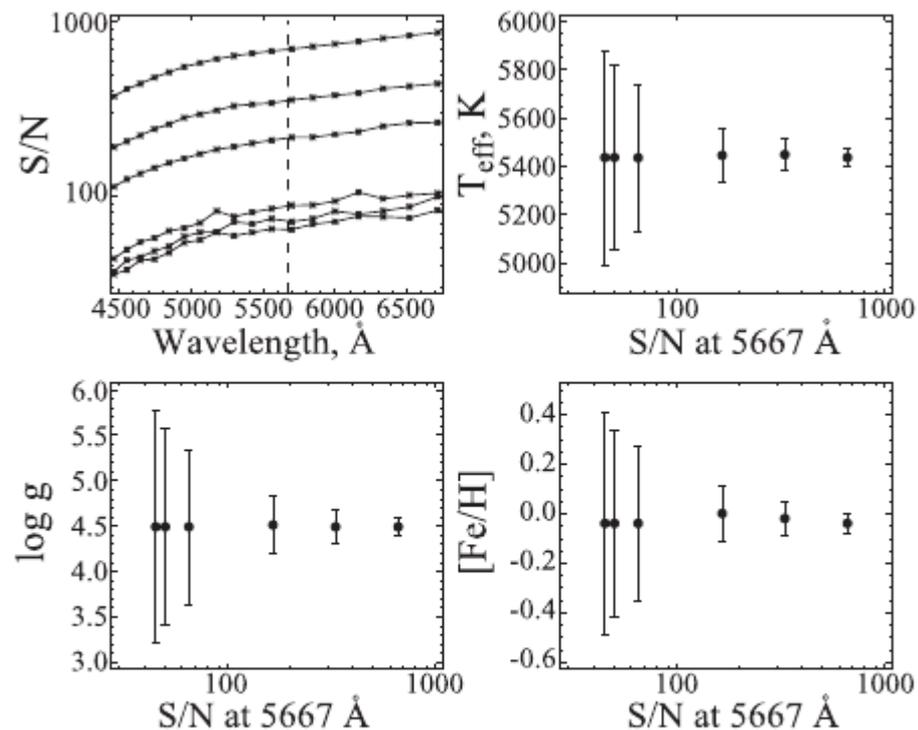


Figure 4. Dependence of the inferred atmospheric parameters (T_{eff} , $\log g$, and $[\text{M}/\text{H}]$) and their uncertainties on the S/N of the observed spectra. The top-left panel gives the S/N in logarithmic scale as a function of wavelength.

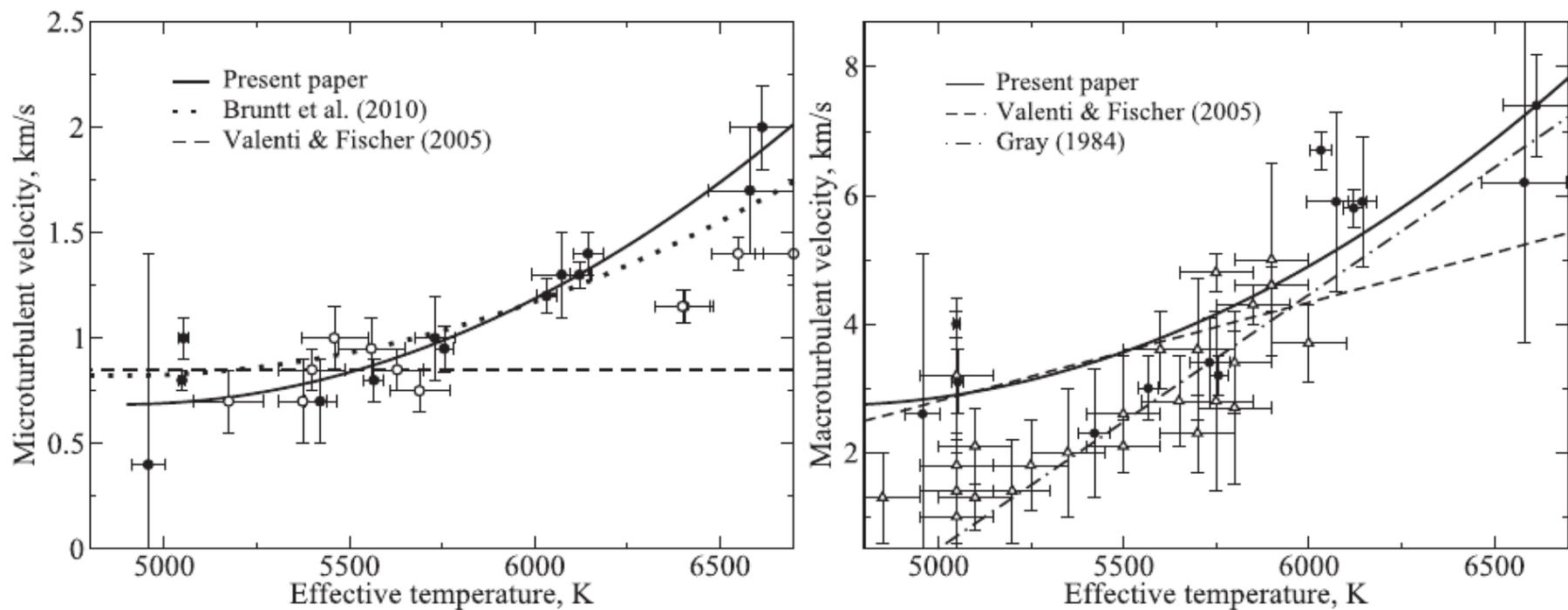


Figure 7. Dependence of V_{mic} (left-hand panel) and V_{mac} (right-hand panel) on the effective temperature. The results of this paper are shown by filled circles. The quadratic polynomial fits of our results are shown by solid lines in both panels. Open circles show the V_{mic} values from Doyle et al. (2013), while open triangles show the V_{mac} data from Saar & Osten (1997). The sources for analytical approximations are quoted in each panel.

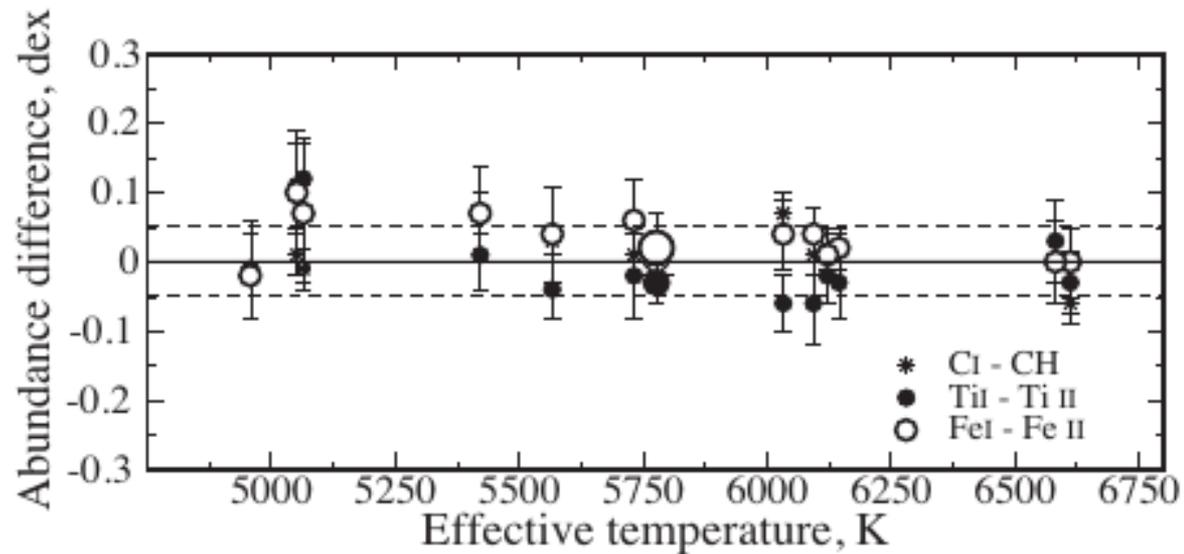
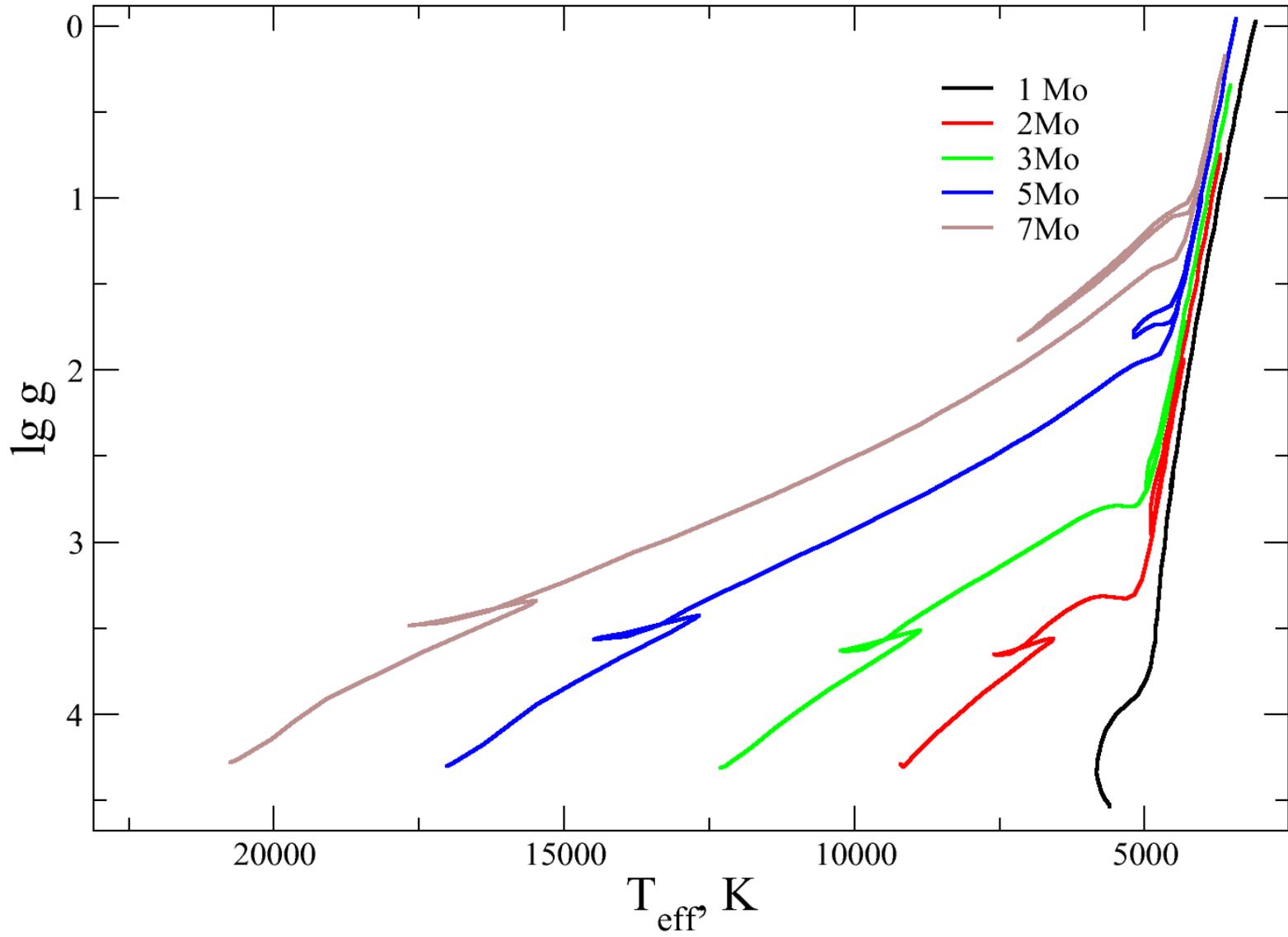


Figure 8. Abundance differences between the atomic C I and molecular CH lines (stars), between lines of Ti I and Ti II (filled circles), and between lines of Fe I and Fe II (open circles). The solar values are shown by larger size symbols. The solid line shows the perfect ionization balance, while the dashed lines indicate the $\sigma = \pm 0.05$ dex level.

Масса звезды



Расстояние

Метод спектрального параллакса

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad g = G \frac{M}{R^2}$$

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

(L в светимостях Солнца, M в массах Солнца)

T , $\lg g$ — из наблюдений, M из эволюционных треков

$$M_V = 4,74 - 2.5 \lg L - BC \quad r = \frac{1}{\pi}$$
$$\pi = 10^{(M_V - m_V - 5 + A_V) * 0.2}$$

$$A_V = 3.1E(B - V) = 3.1[(B - V) - (B - V)_0]$$

$$(B - V)_0 = f(T_{eff}, \lg g, [Fe/H])$$

Зависимость от моделей эволюционных треков !!!

Метод чувствительный к оценке межзвездного поглощения и звездных параметров, особенно T_{eff} !

На каком расстоянии нам доступны звездные спектры высокого разрешения?



На каком расстоянии нам доступны звездные спектры высокого разрешения?

Известно, что на современном спектрографе, установленном на 2-м телескопе при спектральном разрешении $R=50\,000$ можно за 1 час получить спектр звезды 9^m с $S/N=100$.

На каком расстоянии располагается звезда, спектр которой будет получен на 10-м телескопе за 5 часов экспозиции при $S/N=20$?

На каком расстоянии нам доступны звездные спектры высокого разрешения?

$$K = (10/2)^2 * (100/20)^2 * (5/1) = 25 * 25 * 5 = 3125$$

$$dm = 2.5 \log(3125) = 8.7^m$$

$$m_v = 17.7^m$$

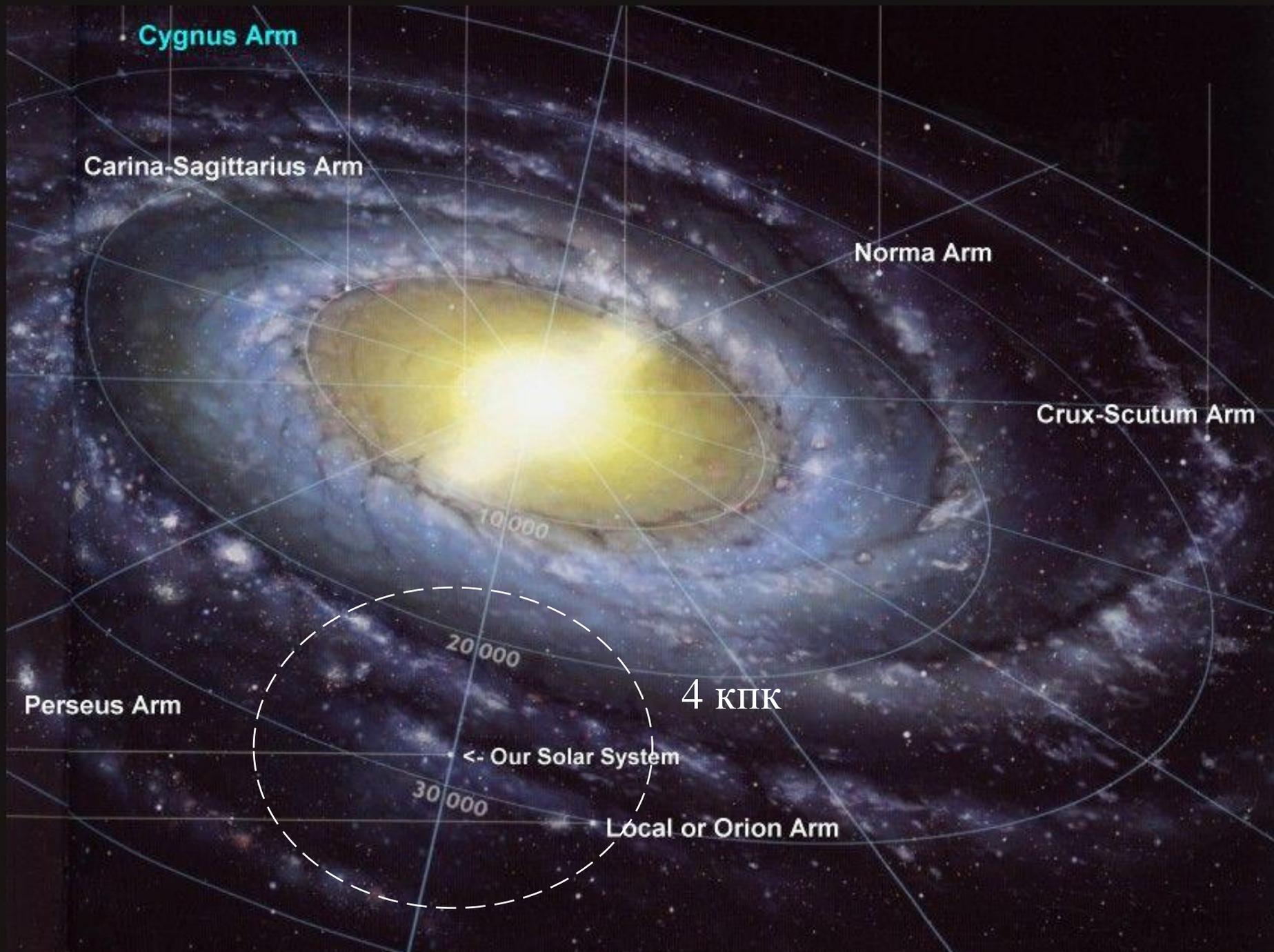
$$d = 10^{(m+5-M)/5}$$

Белый карлик: $M_v = 11^m$, $d = 220$ пк

Карлик, типа Солнца: $M_v = 4.7^m$, $d = 4$ кпк

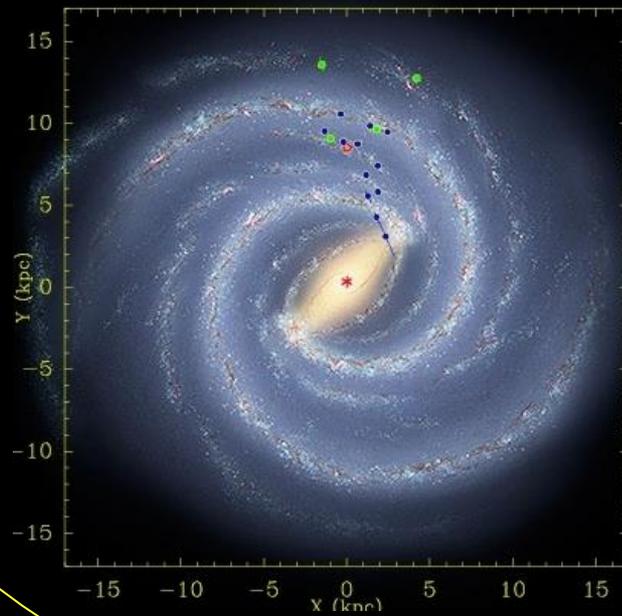
Гигант: $M_v = 0^m$, $d = 35$ кпк

Сверхгигант: $M_v = -5^m$, $d = 350$ кпк

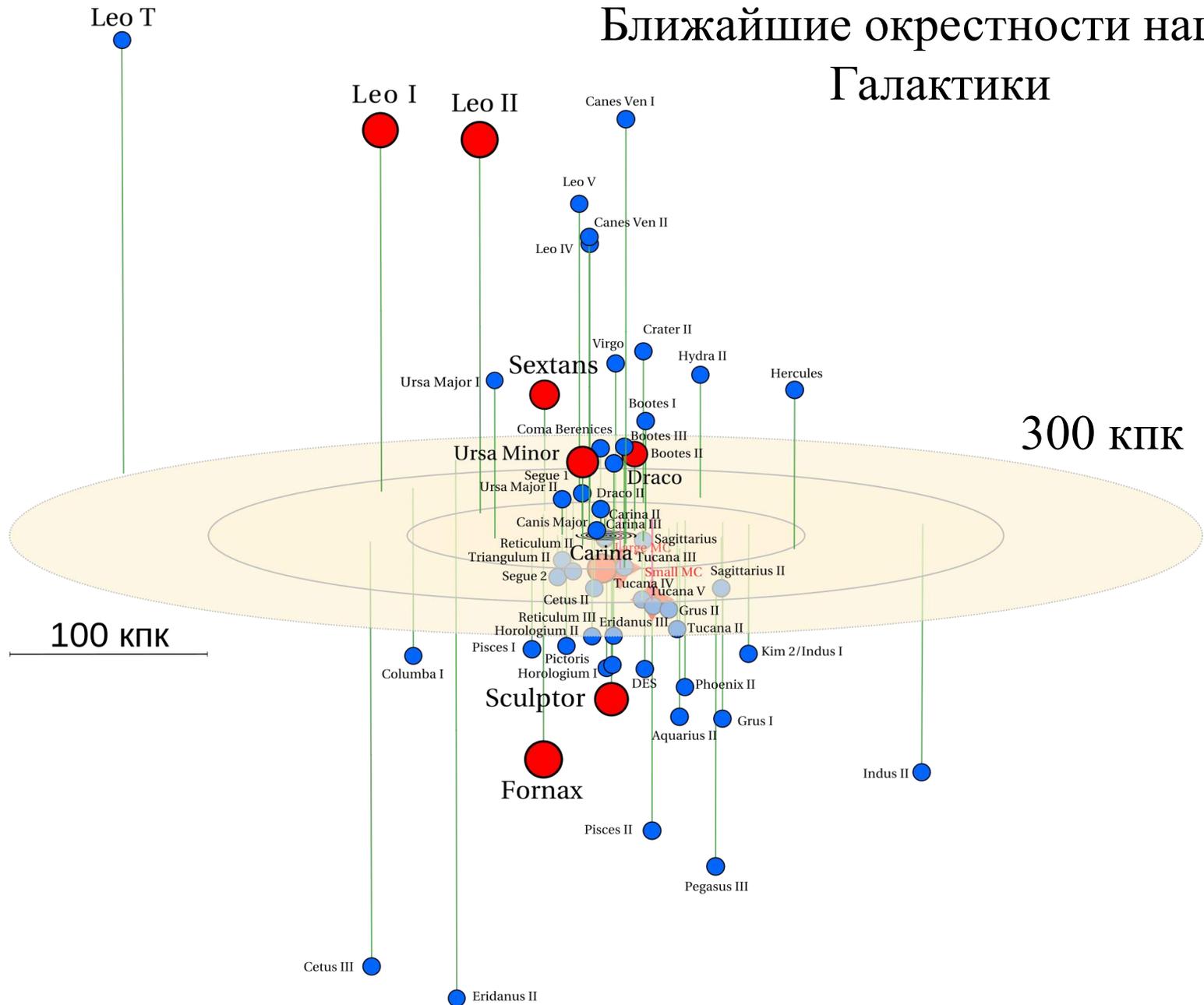


35 κΠΚ

LMC 50 κΠΚ



Ближайшие окрестности нашей Галактики



Приемники излучения



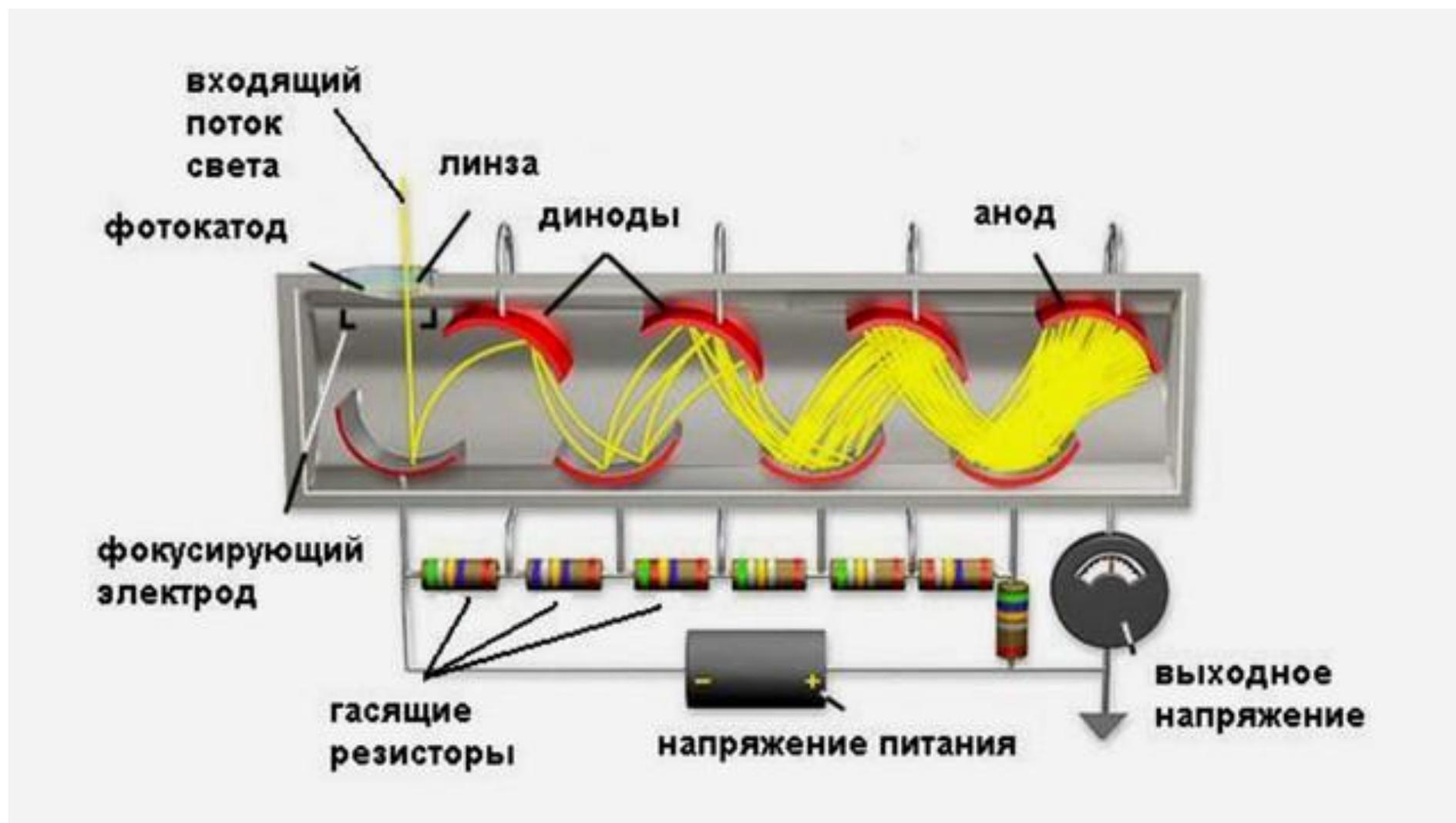
Типы детекторов

Интегрирующие детекторы	Детекторы счета фотонов (PCD)
Накапливают приходящее излучение со временем	Реагируют почти на каждый приходящий фотон
<u>Пример:</u> фотографическая пластинка, ПЗС	<u>Пример:</u> фотоумножитель МСП

Общие свойства детекторов

- Квантовая эффективность
- Частотная характеристика
- Постоянная времени (инерционность)
- Линейность
- Усиление
- Динамический диапазон
- Пороговая чувствительность
- Уровень насыщения
- Чувствительность к космическим лучам
- Функция считывания
- Строение чувствительного слоя
- Однородность чувствительности
- Память
- Размер элемента
- Эффективная фоточувствительная площадь
- Рабочая температура чувствительного слоя
- Шум
- Дробовой шум
- Шум считывания
- Темновой ток
- Фон
-

Фотоумножитель



Применение в спектроскопии: сканирующие спектрографы

Фотоумножитель



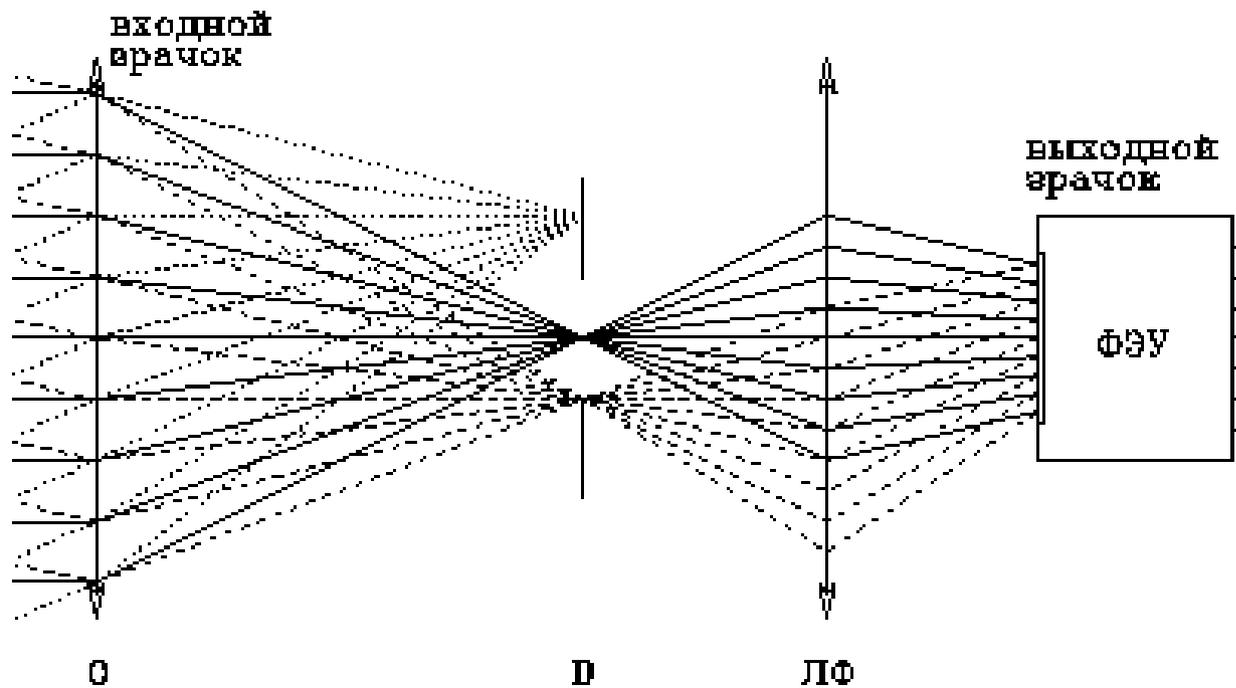
Параметры

- Спектральный квантовый выход или спектральная чувствительность фотокатода — эффективность преобразования энергии фотона в поток фотоэлектронов
 - Режим счета фотонов
 - Красная граница фотоэффекта
- Коэффициент усиления
- Темновой ток
- Неравномерность чувствительности фотокатода

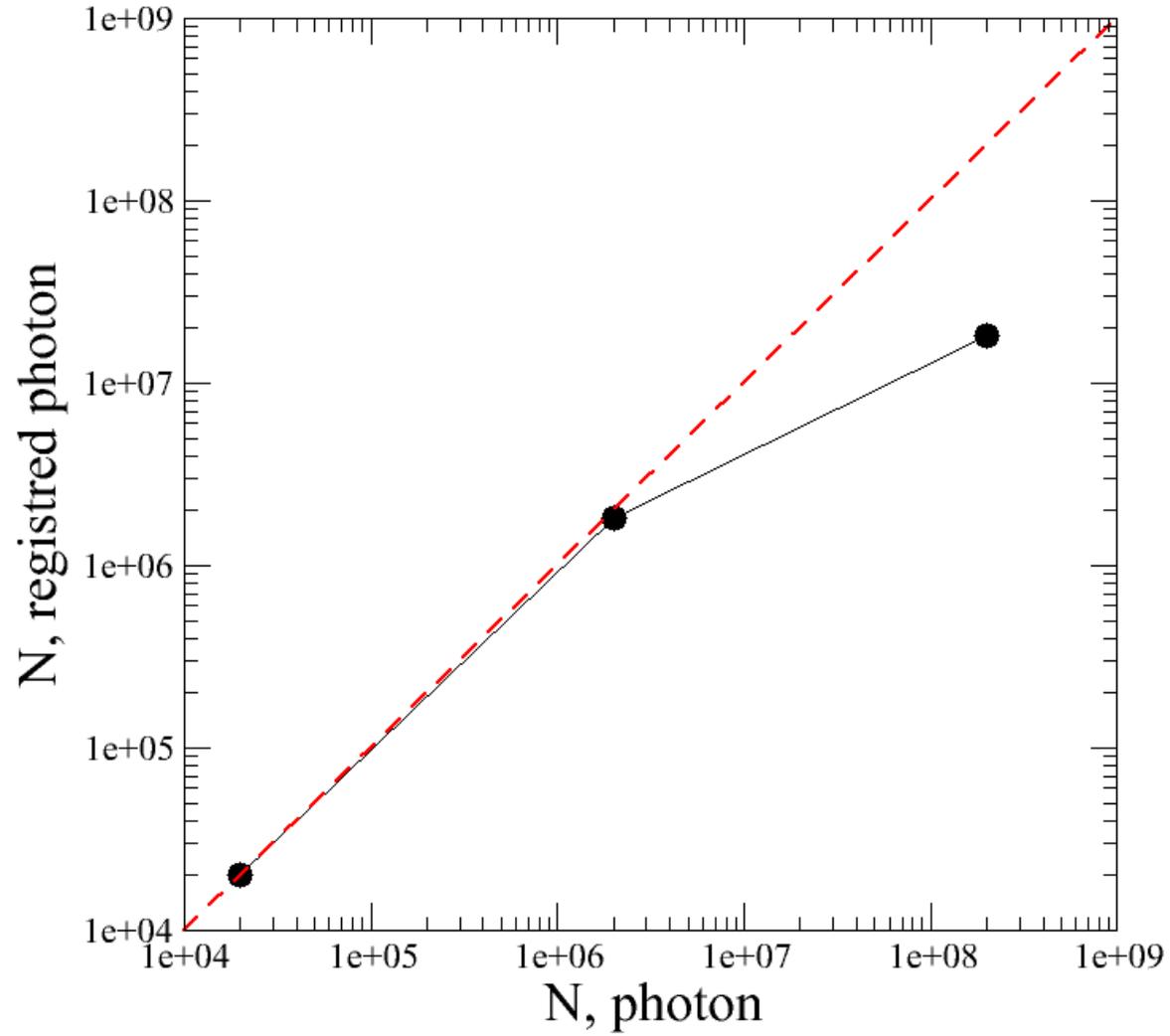
Необходимость равномерной и полной засветки фотокатода - применение линзы Фабри.

Линза Фабри

Равномерная и полная засветка окна фотокатода,
Компенсация сдвига звезды во выходном зрачке

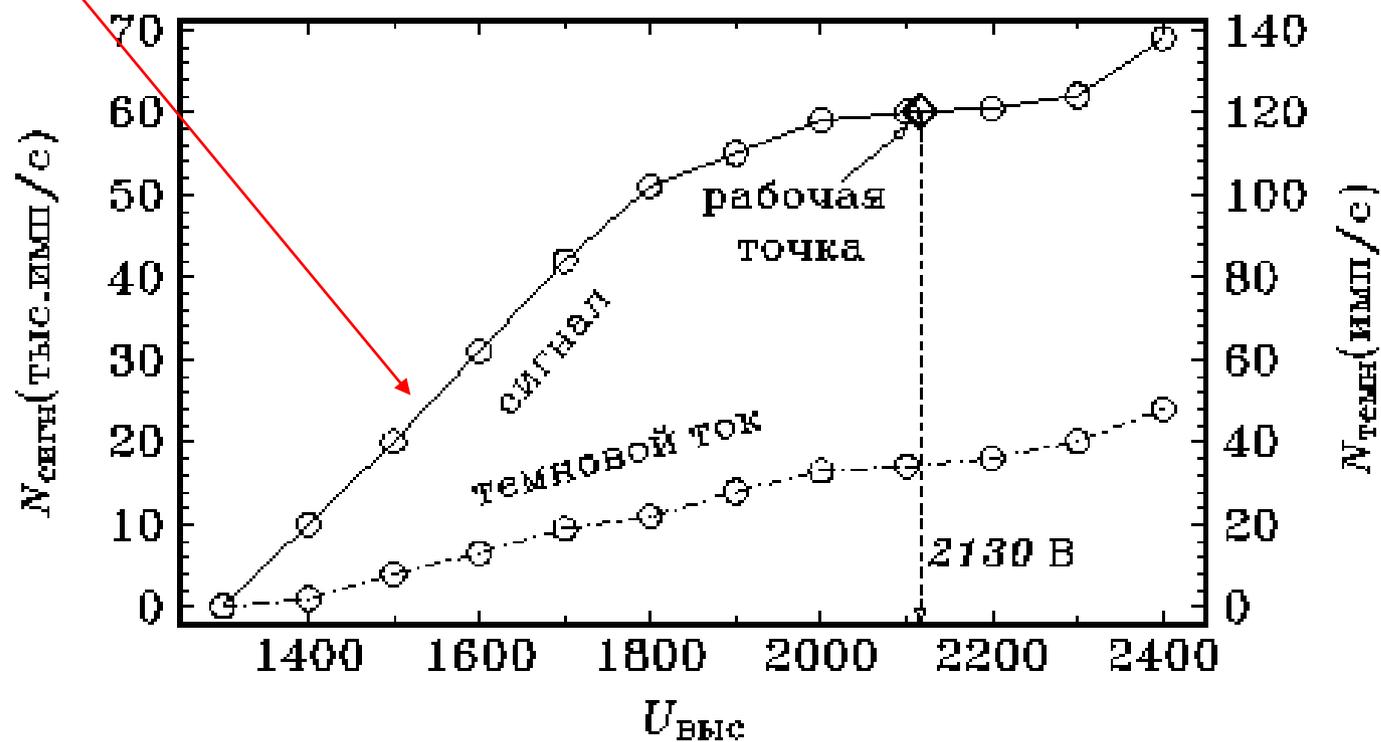


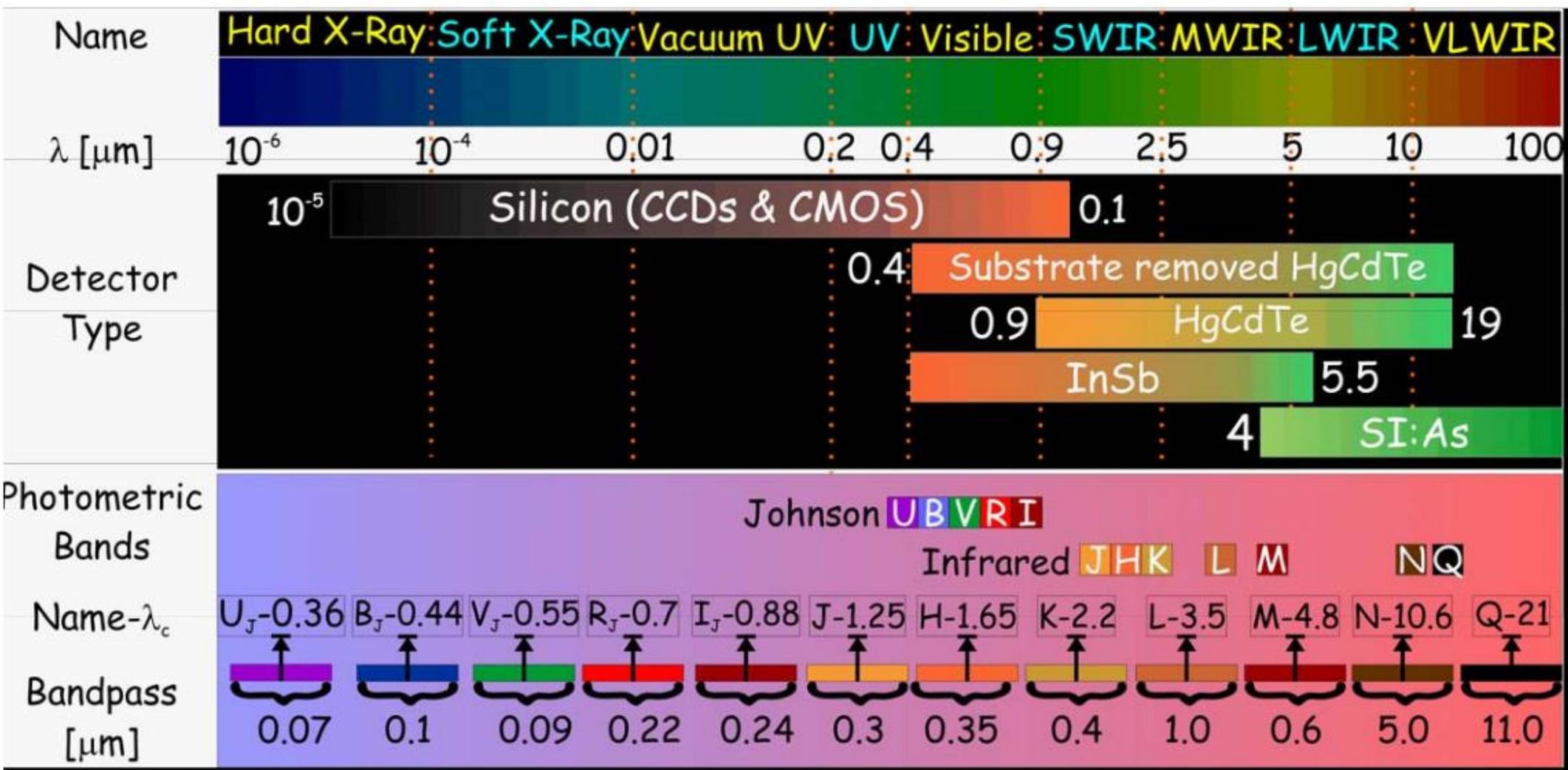
Нелинейность фотоумножителя



Счетная характеристика фотоумножителя

Регистрируются не все фотоэлектроны

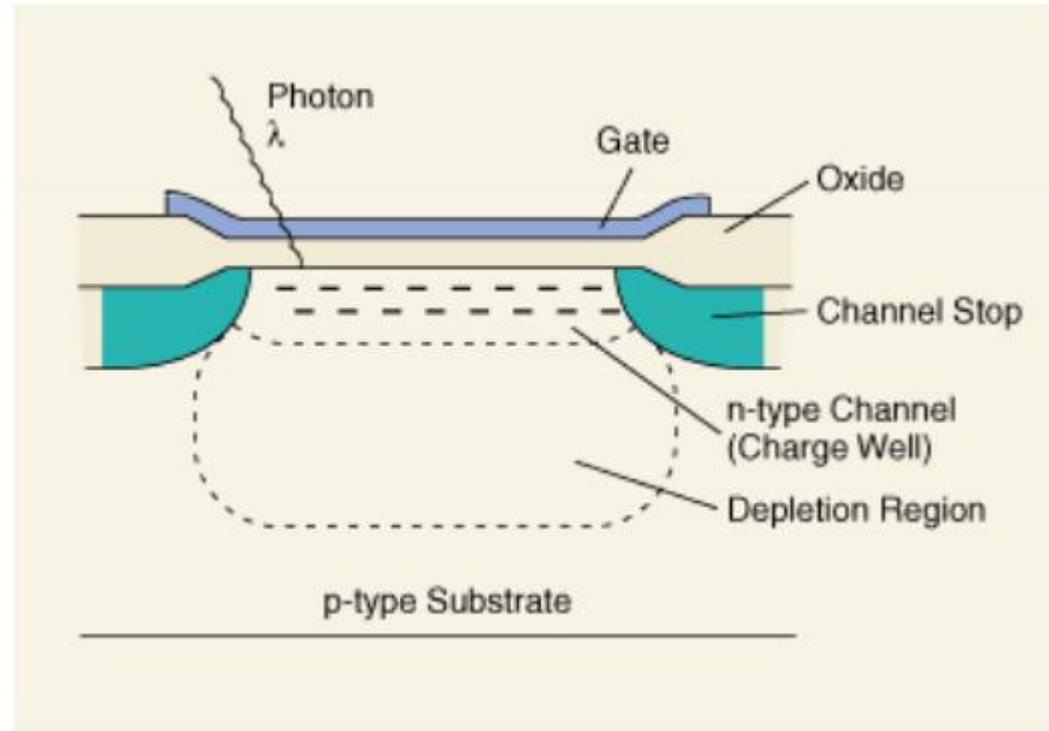


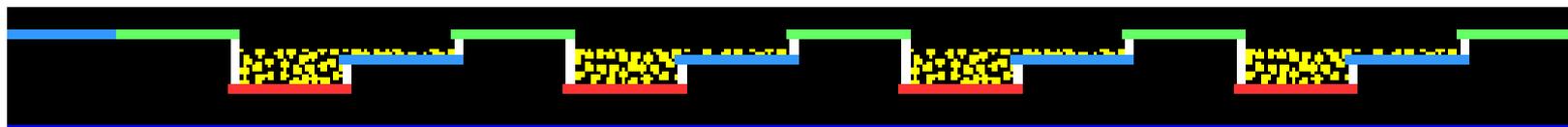
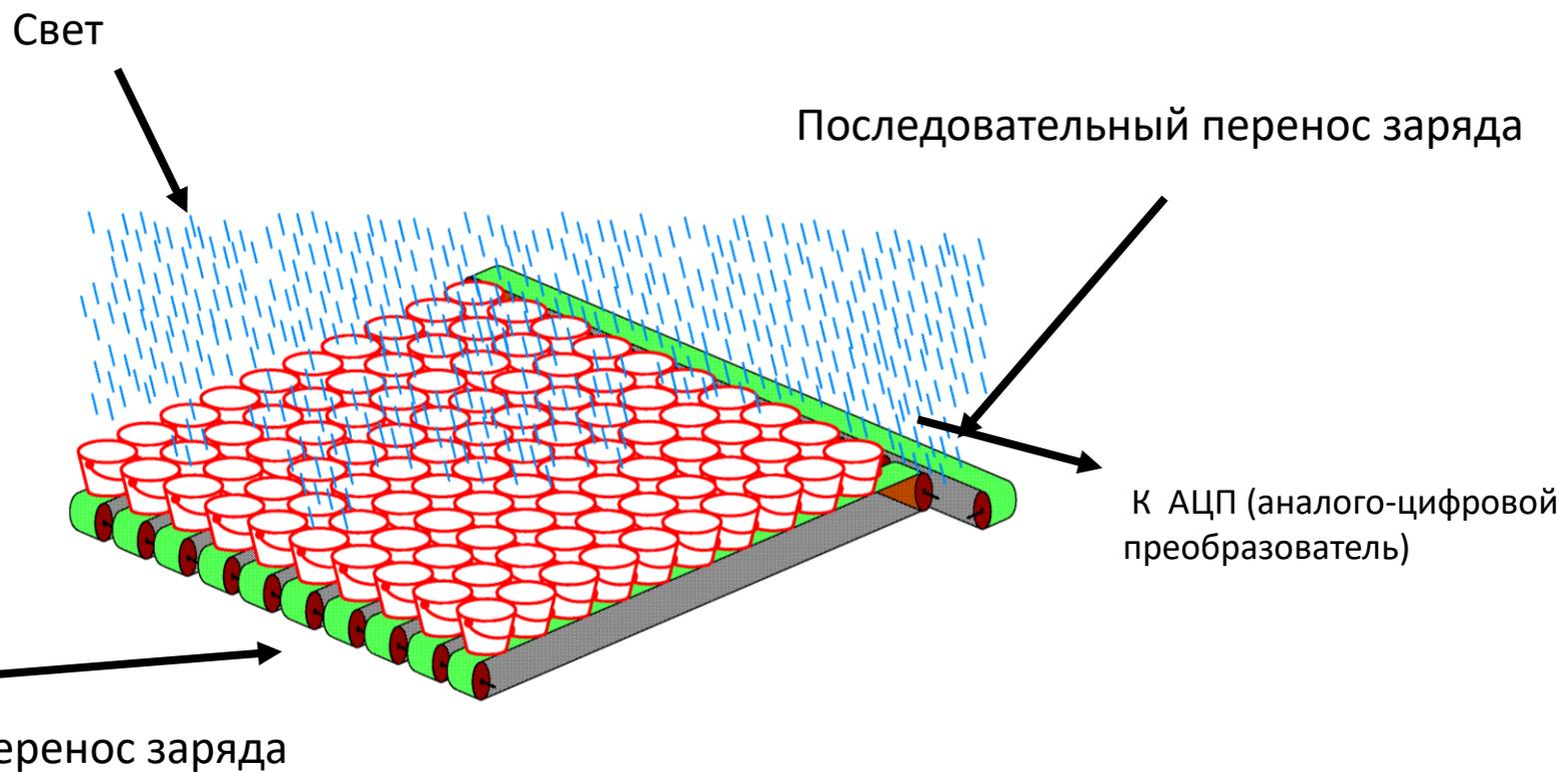


ПЗС-матрица

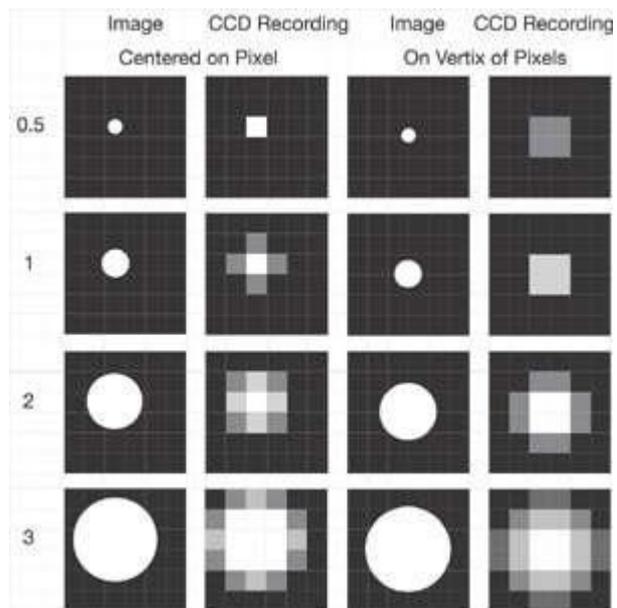
(Уф, оптический диапазон)

- МОП (металл-оксид-полупроводник) или МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) структура
- Напряжение на электроде создает потенциальную яму в кремневой пластине
- Фотон выбивает в металле электрон (фотоэффект)
- Электрон захватывается в потенциальную яму
- Электроны накапливаются
- Управляющие сигналы переправляют электроны на выход
- Оцифровка сигнала





Размеры пикселей



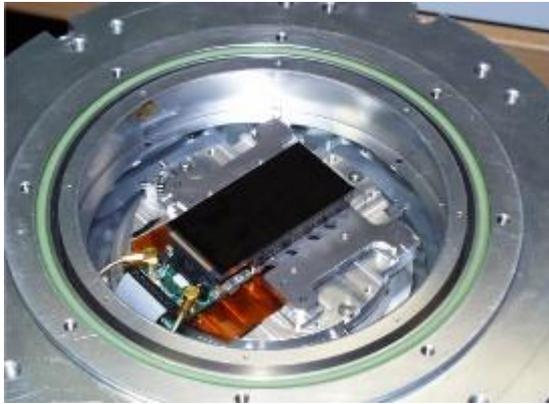
10 ... 30 микрон

Размеры ПЗС

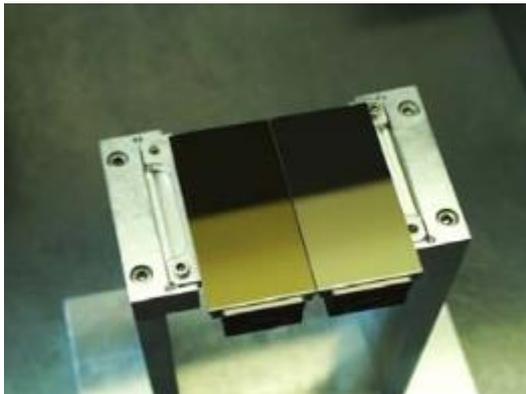
512x512 pix ... 4k x 4k

0.5 ... ~6 см

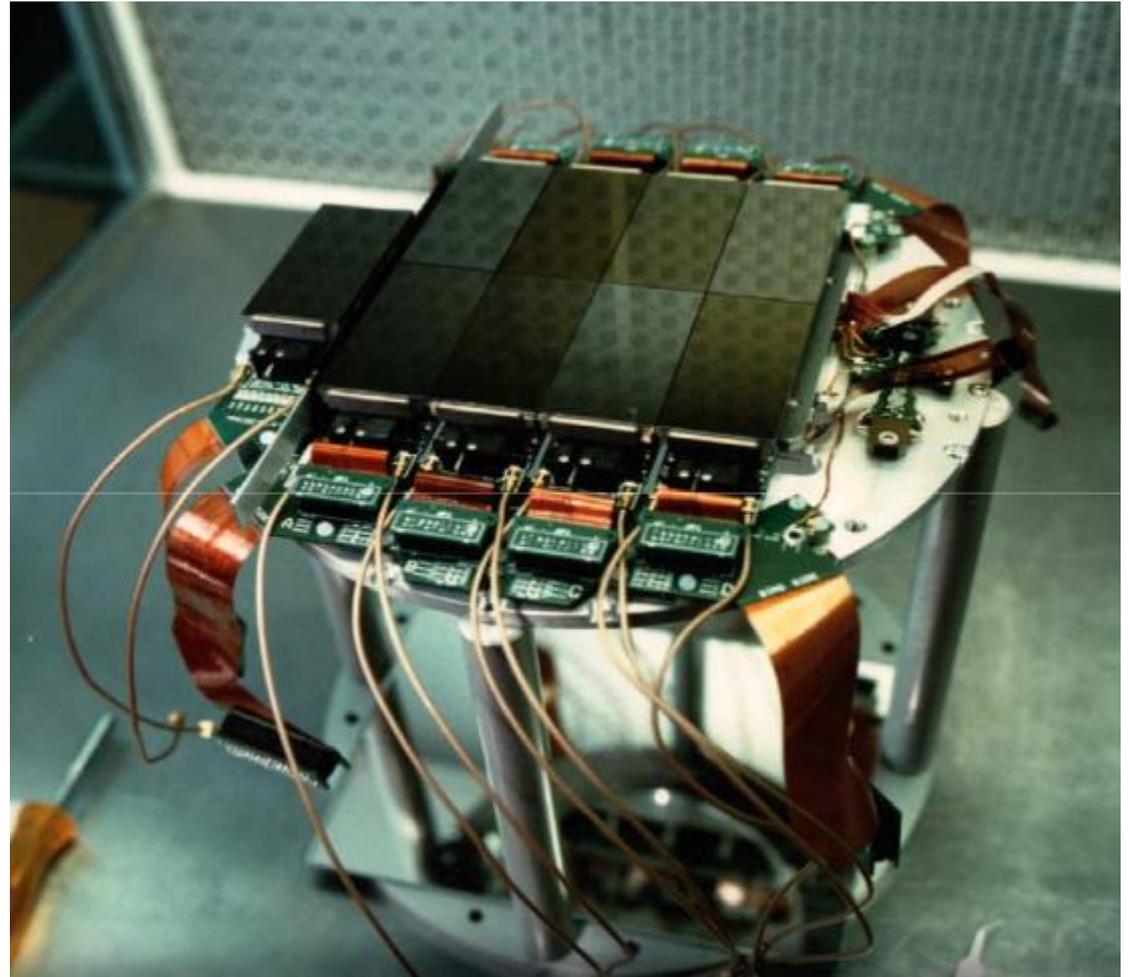
ПЗС матрица 4к x 2к

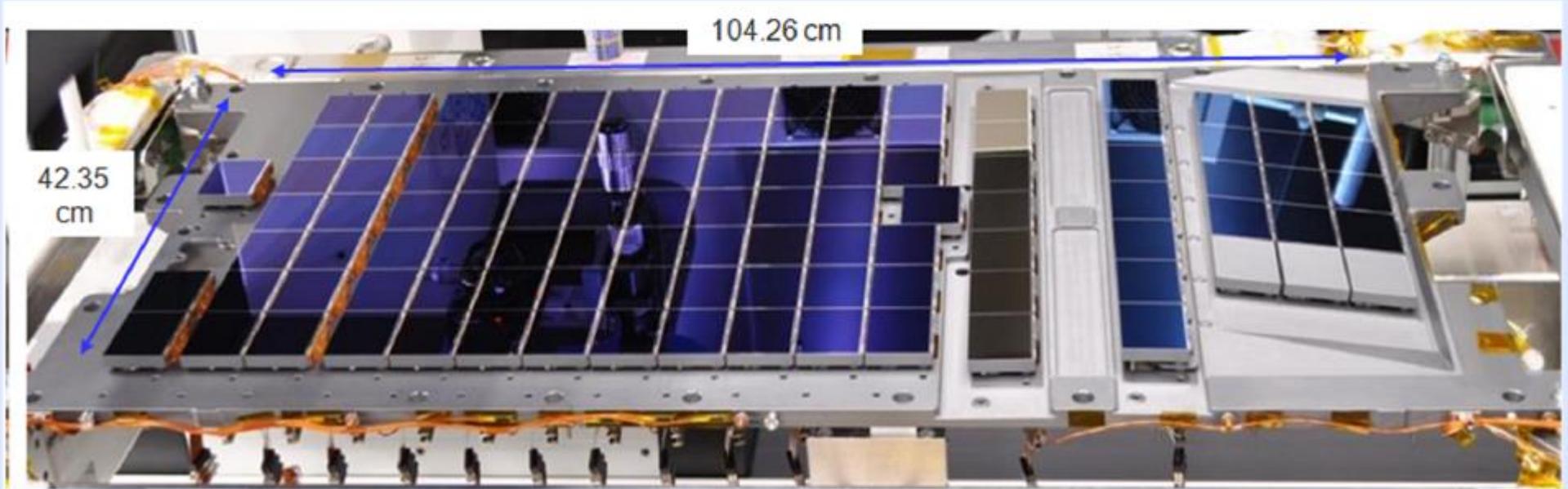
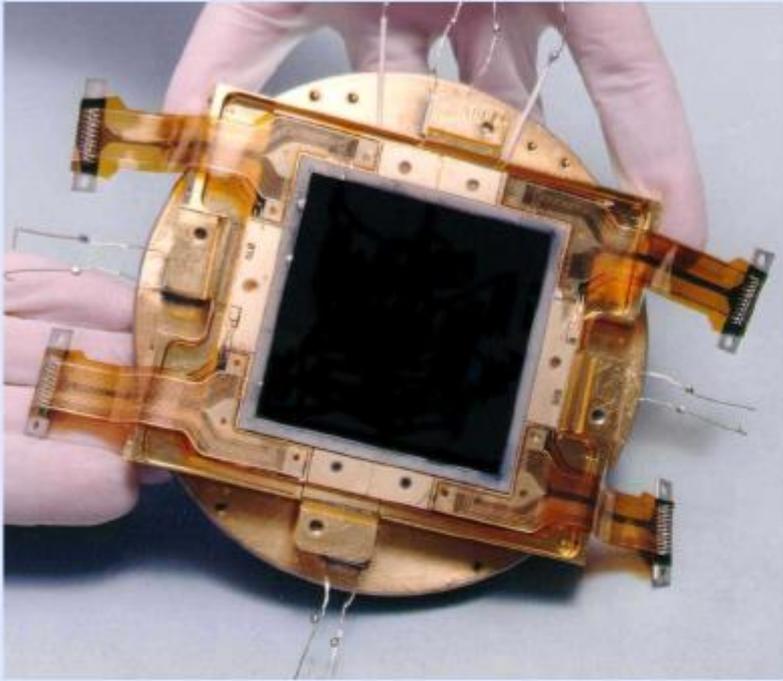


Мозайка из двух ПЗС матриц 4к x 2к



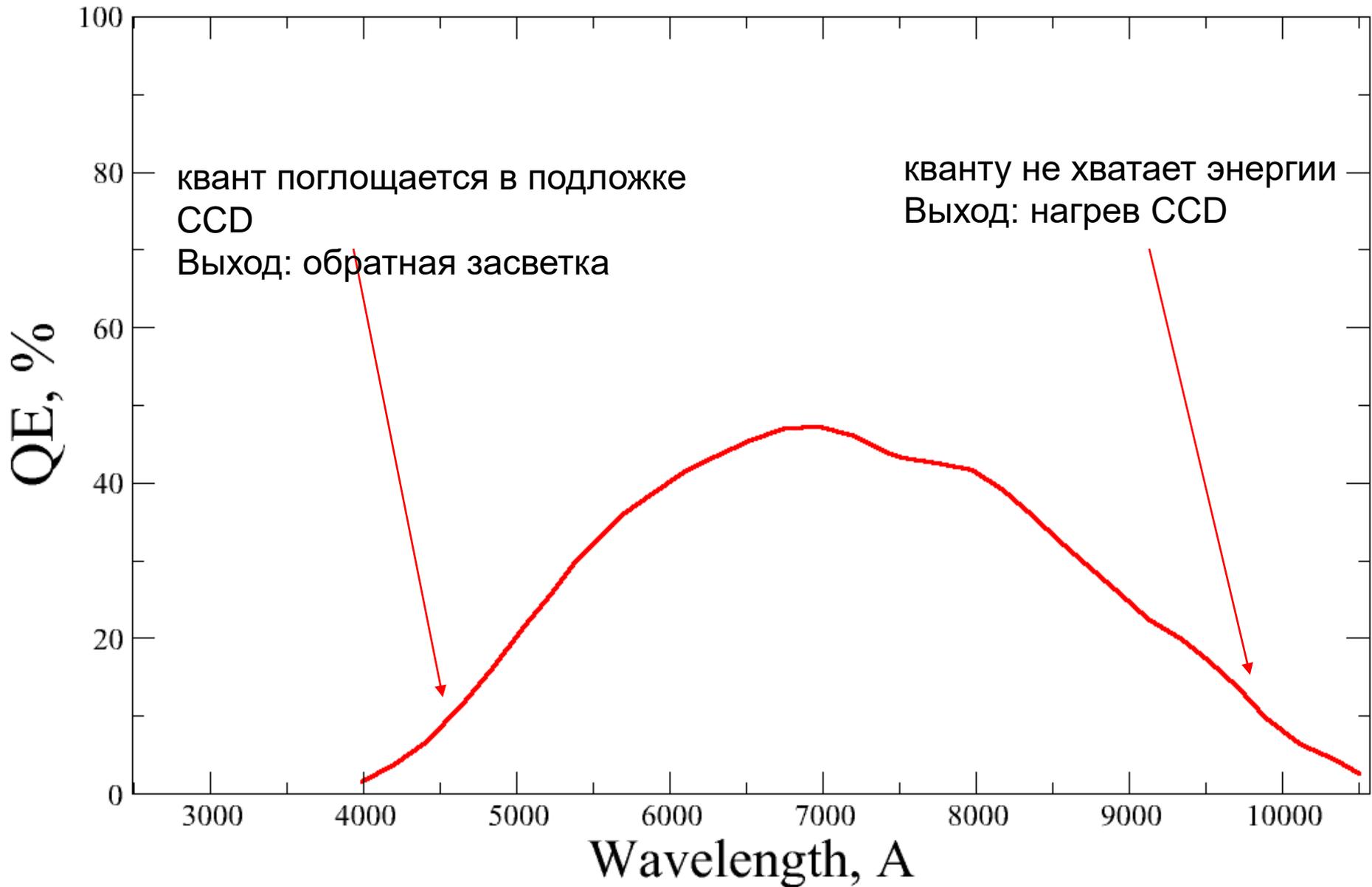
Мозайка из восьми ПЗС матриц 4к x 2к
ESO NTT телескоп, камера WFI
(Wide Field Imager)



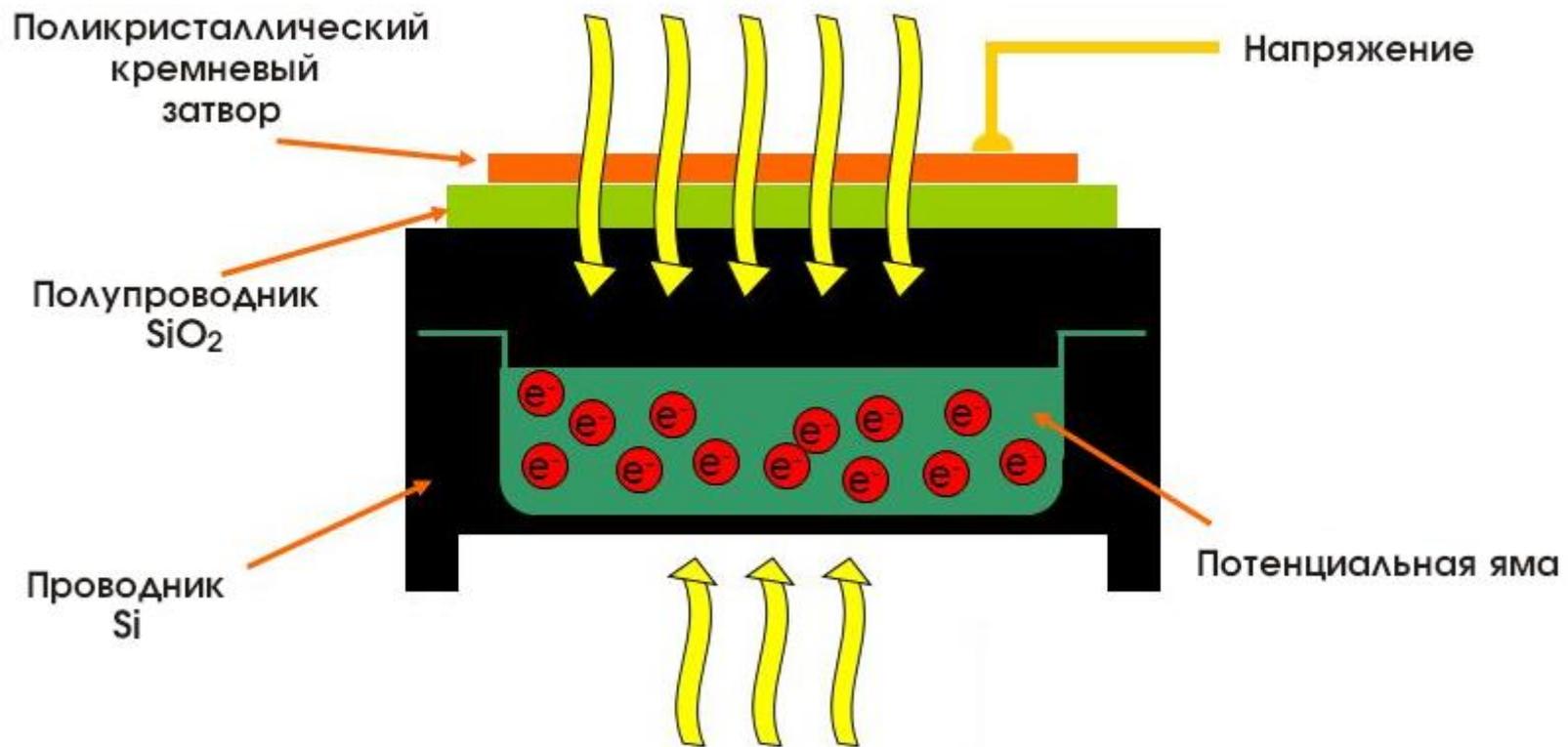


Квантовая эффективность

(световая чувствительность)

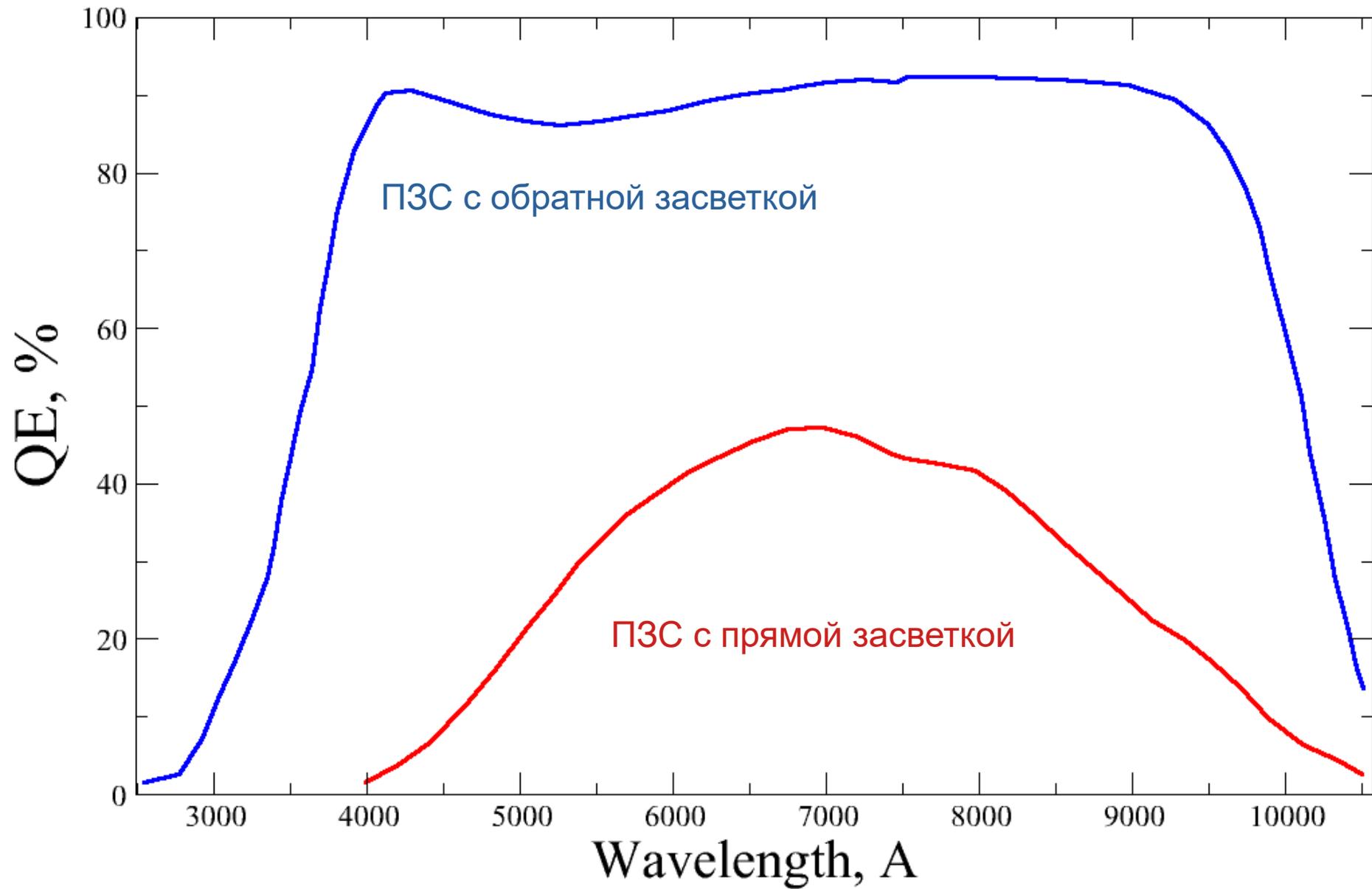


Прямая засветка



Обратная засветка

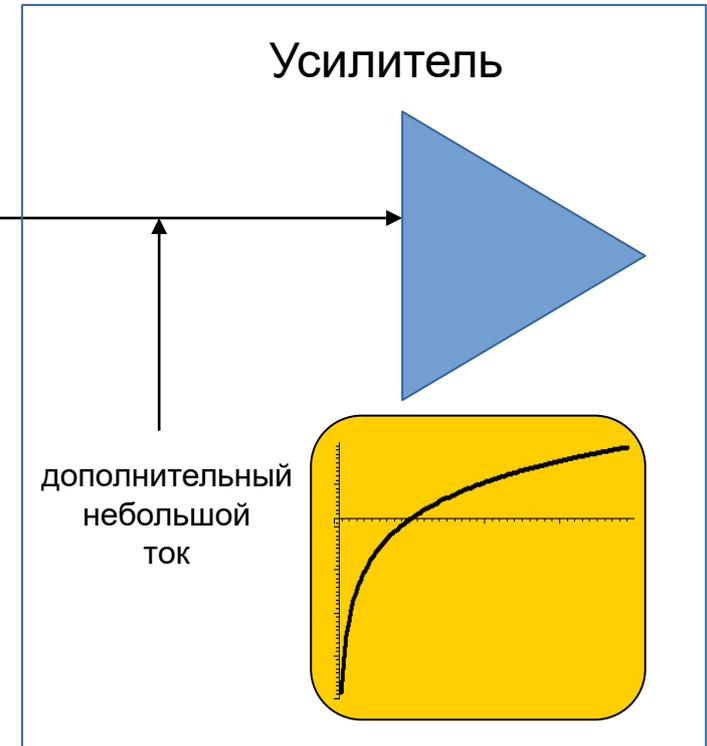
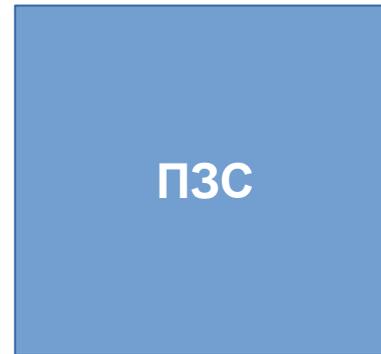
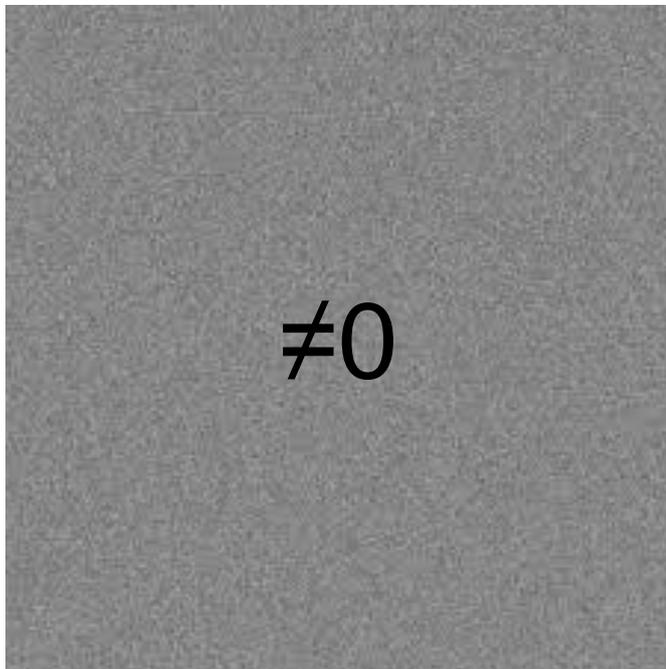
Квантовая эффективность



Усиление сигнала

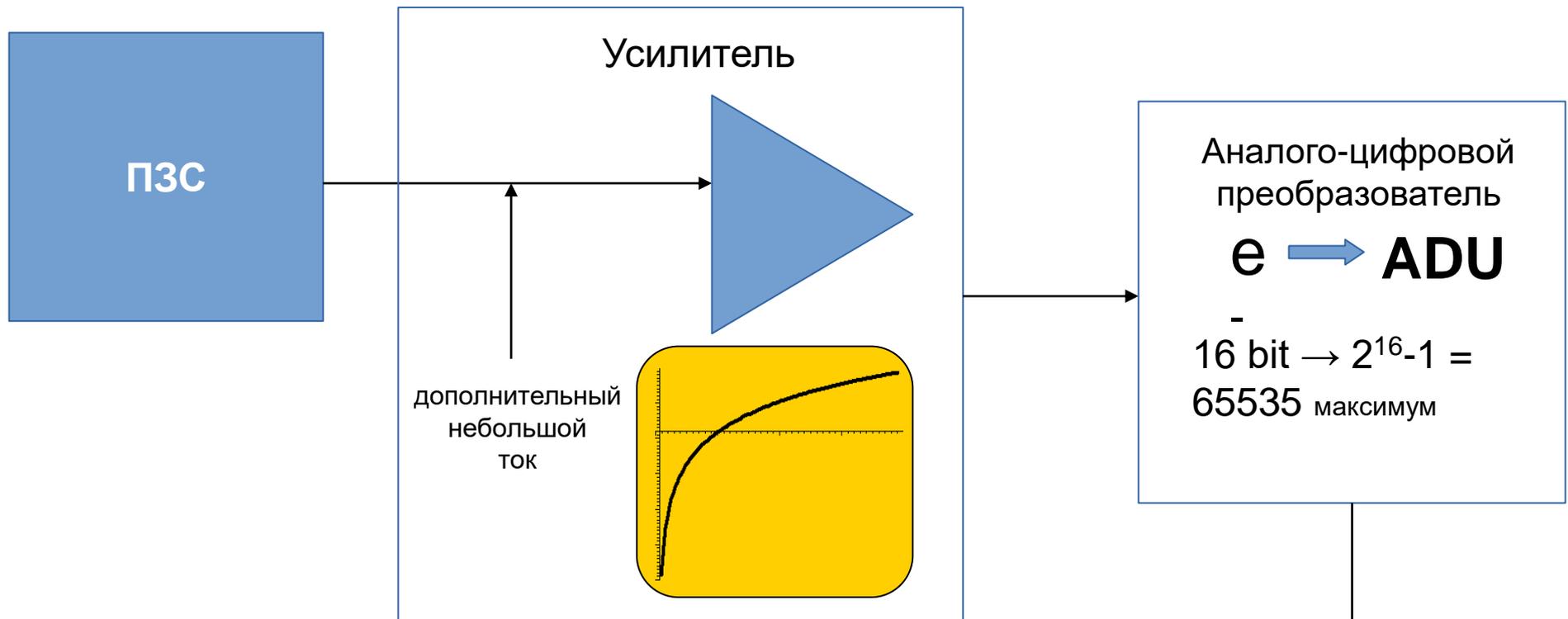
BIAS (сдвиг)

Присутствует на всех кадрах



Усиление сигнала

GAIN



$$[\text{GAIN}] = \text{ADU}/e^-$$

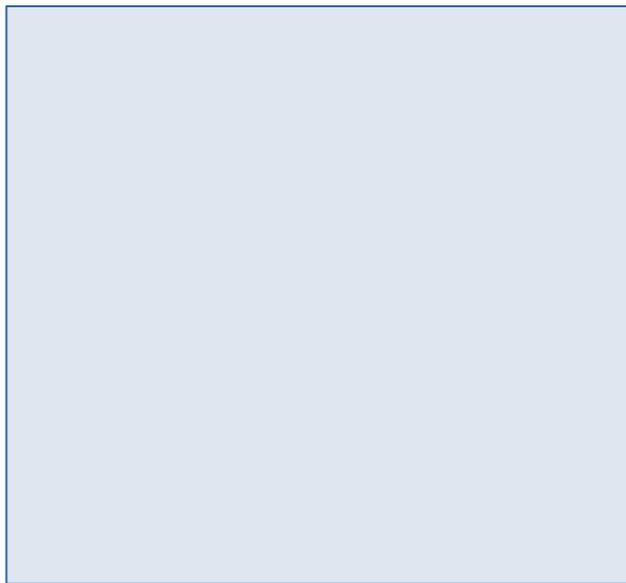
Analog-to-digital unit

$$\text{Inverse GAIN} = 1/\text{GAIN} \rightarrow e^-/\text{ADU}$$



Binning (виртуальные пиксели)

1000 пикселей



1000 пикселей

1k x 1k



Изображение 1000x1000
pix

При слабом сигнале и при использовании небольшого разрешения есть возможность виртуальные пиксели

Binning Options	Combined pixels on the CCD Chip
None	
2 x 2 (4 pixels = 1)	
3 x 3 (9 pixels = 1)	
4 x 4 (16 pixels = 1)	



Изображение 500x500
pix

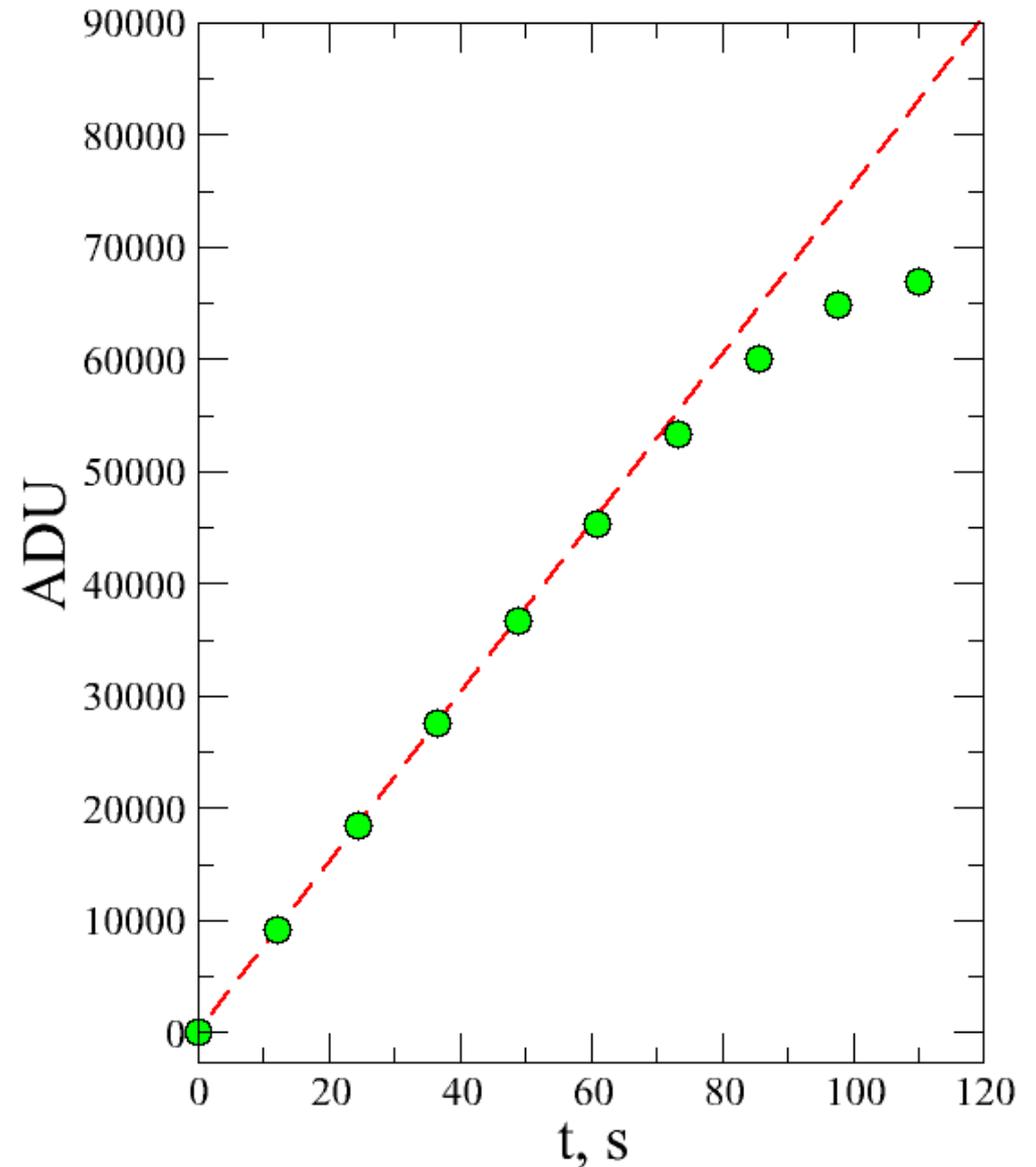
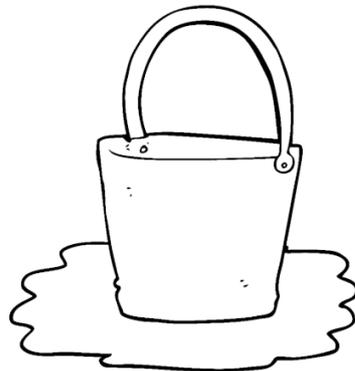


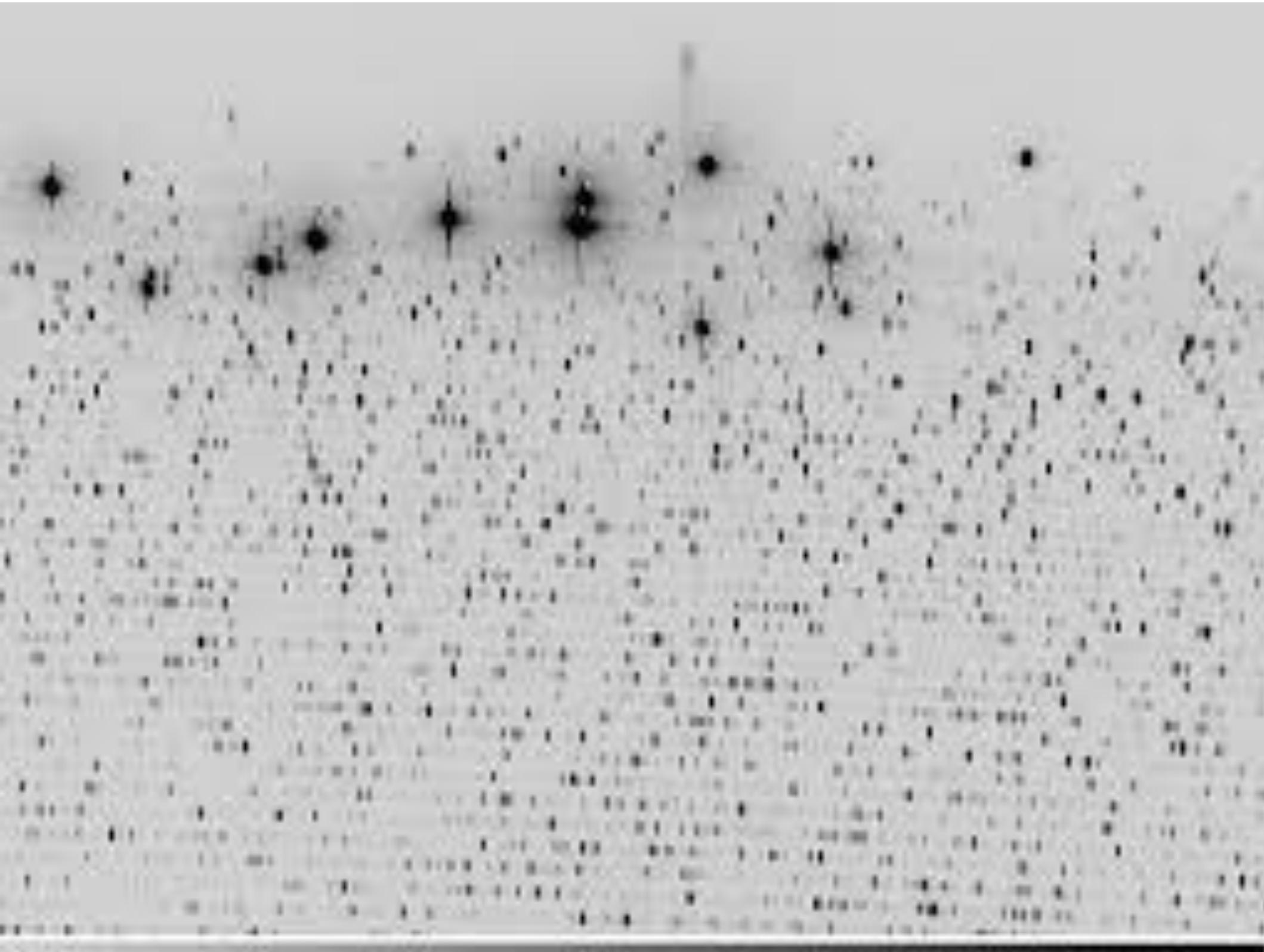
Изображение 250x250
pix

Линейность

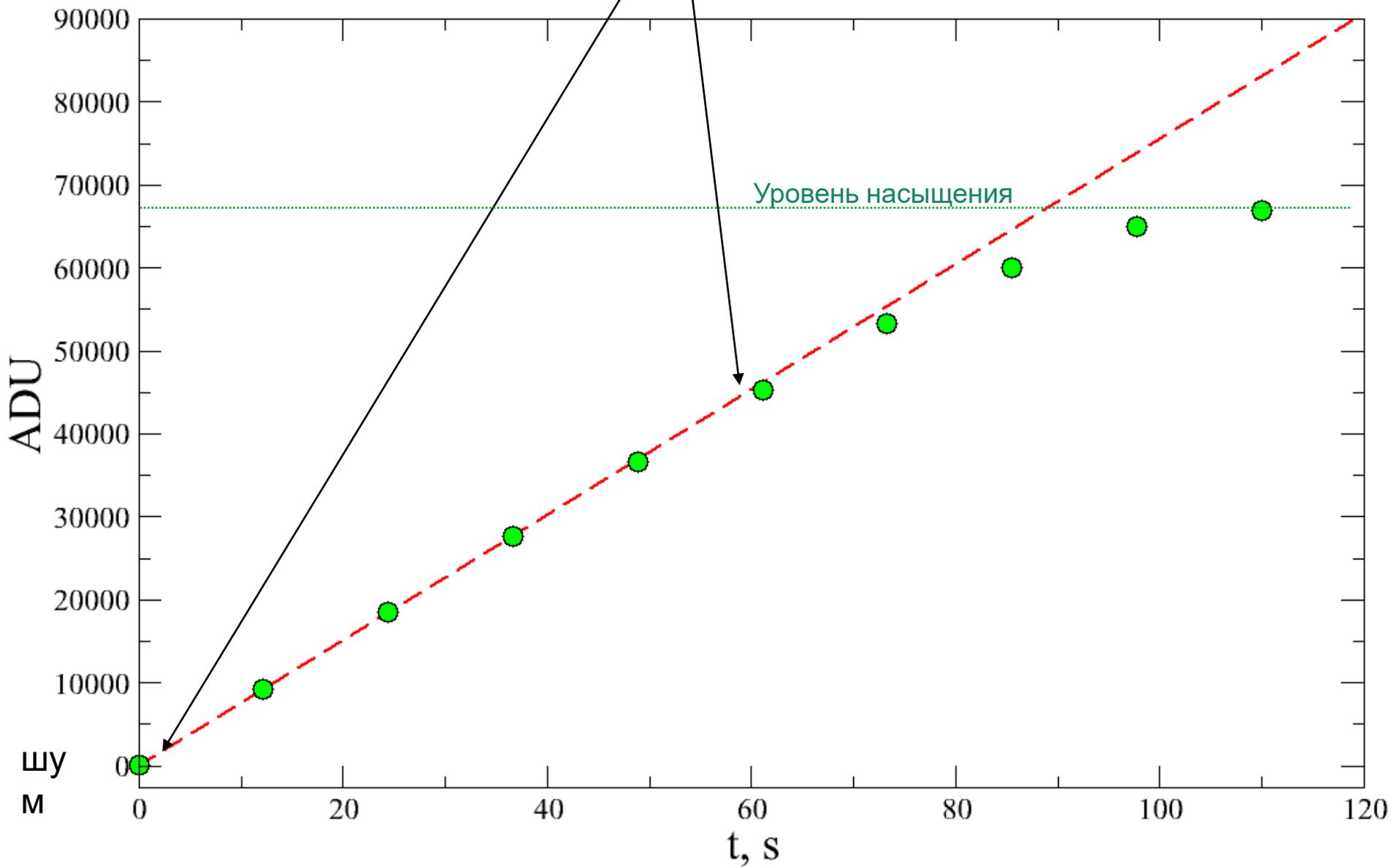
Заполненная ПЗС-матрица - это число электронов, которые могут быть записаны на 1 пиксель (высота энергетического барьера между пикселями).

Типичные величины между $30000e^-$ и $1000000e^-$. Эти значения определяют начало нелинейности ПЗС.



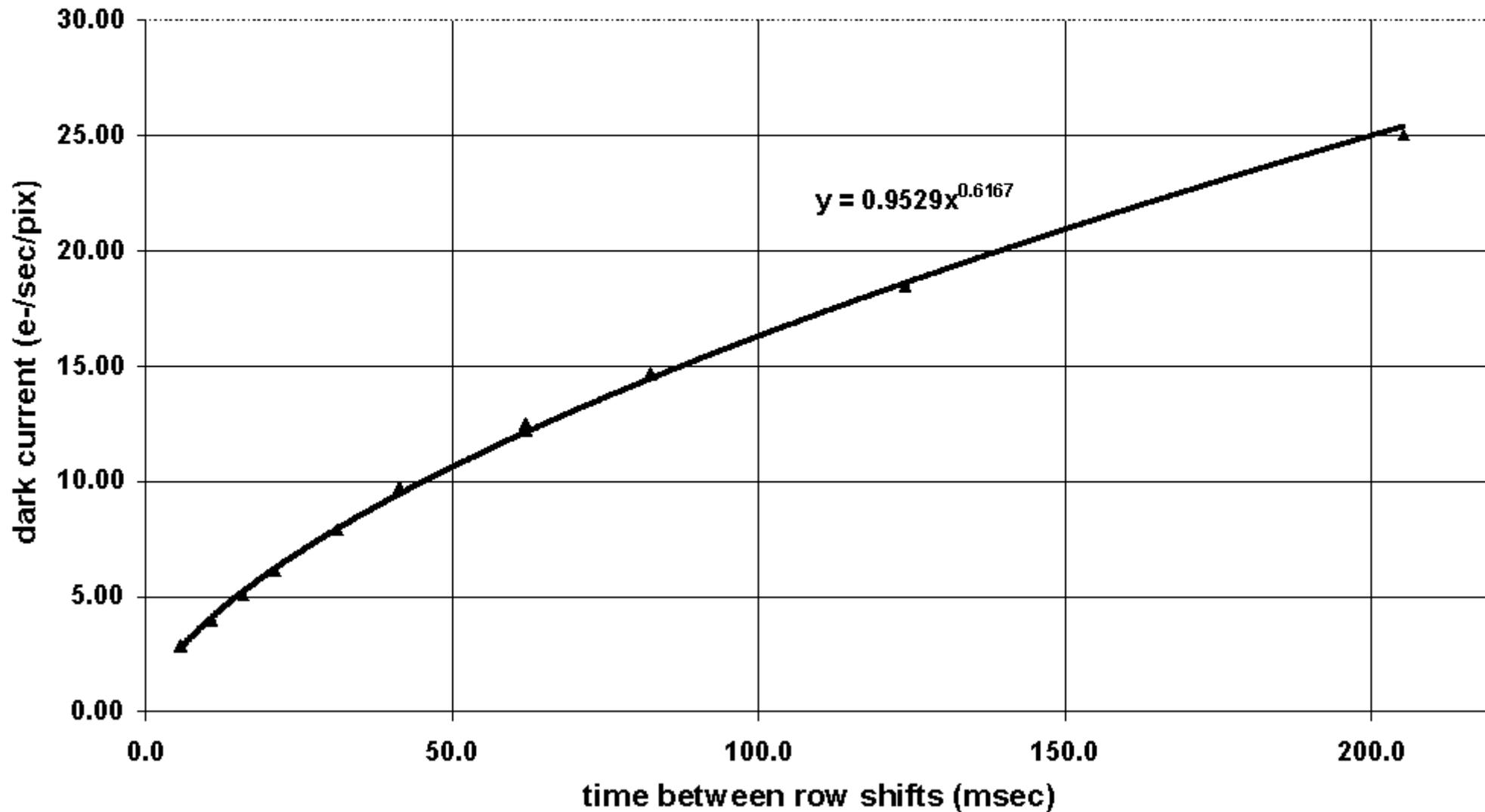


Динамический диапазон



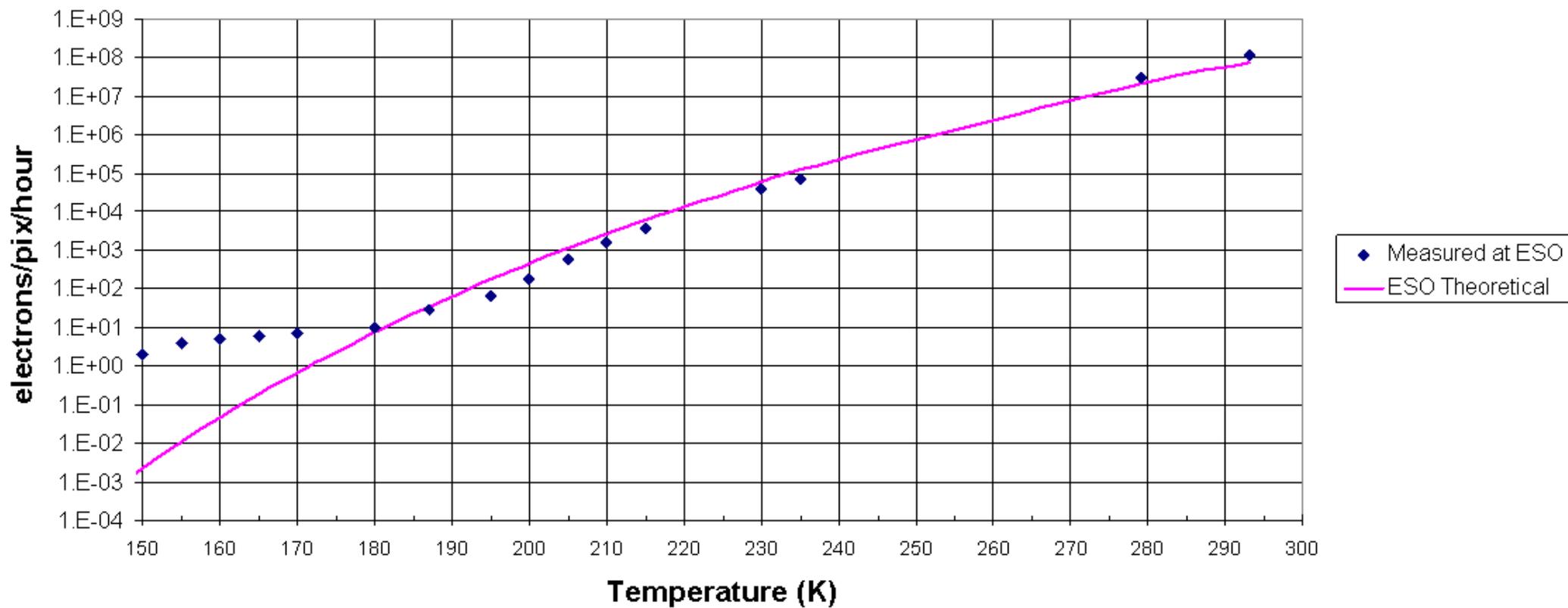
Темновой ток vs время

CCD42-20 NIMO
TDI dark current @-30C



Темновой ток vs температура

Dark Current vs Temp



Учет темнового тока

1. Время экспозиции =
времени съемки

2. **большая трата времени**

3. Совсем не учитывать
из-за малой величины

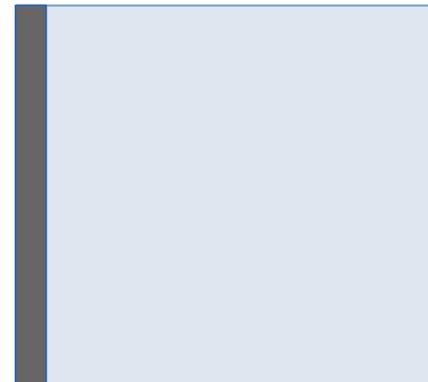
4. **нельзя для слабых
объектов**

2. Время экспозиции \ll
времени съемки

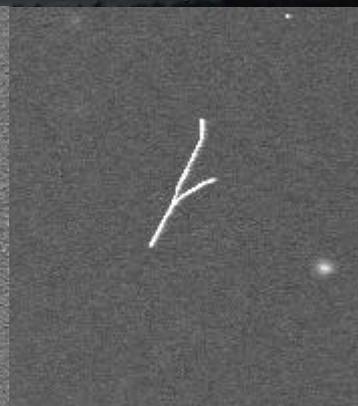
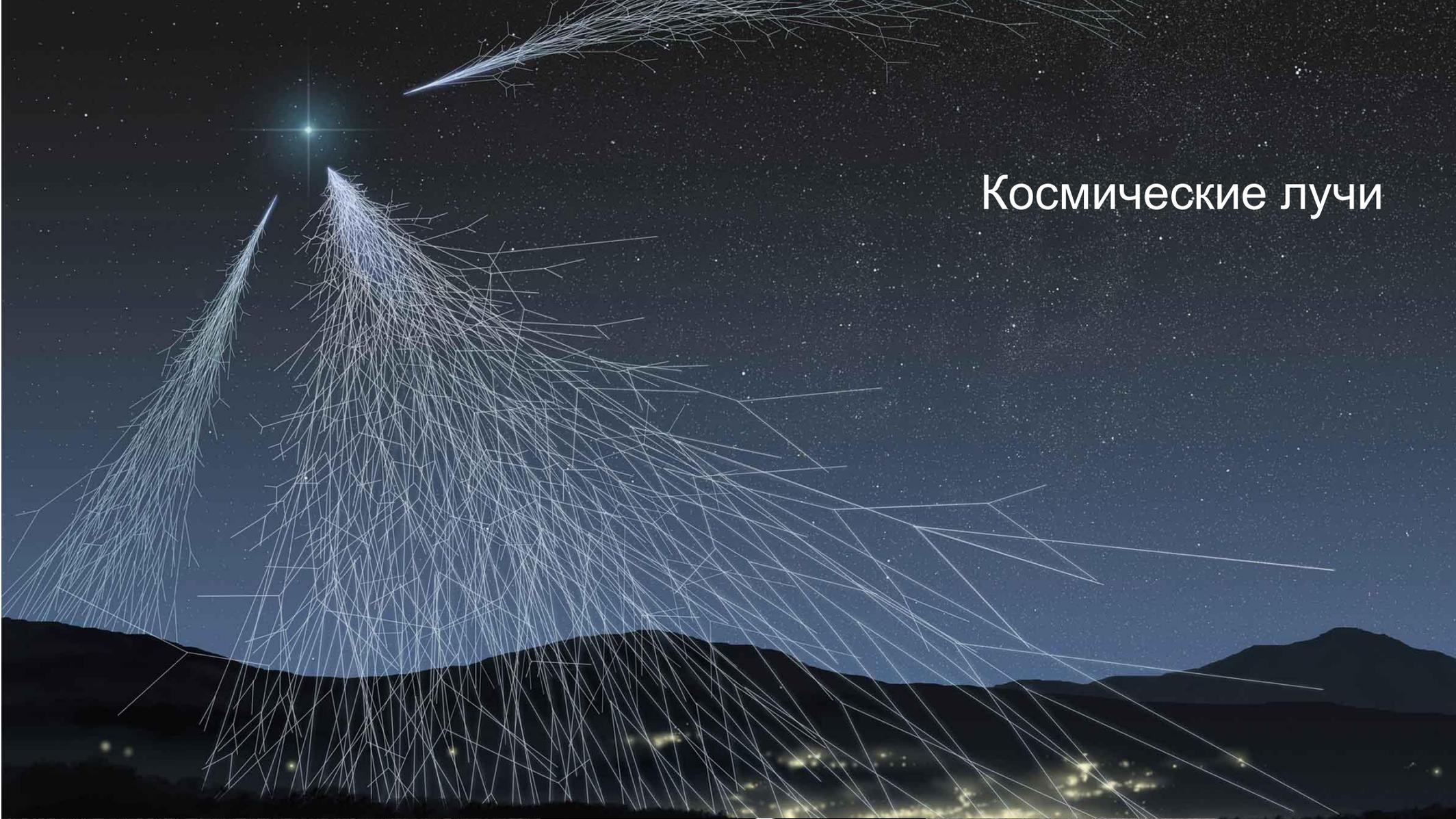
1. **ошибки учета**

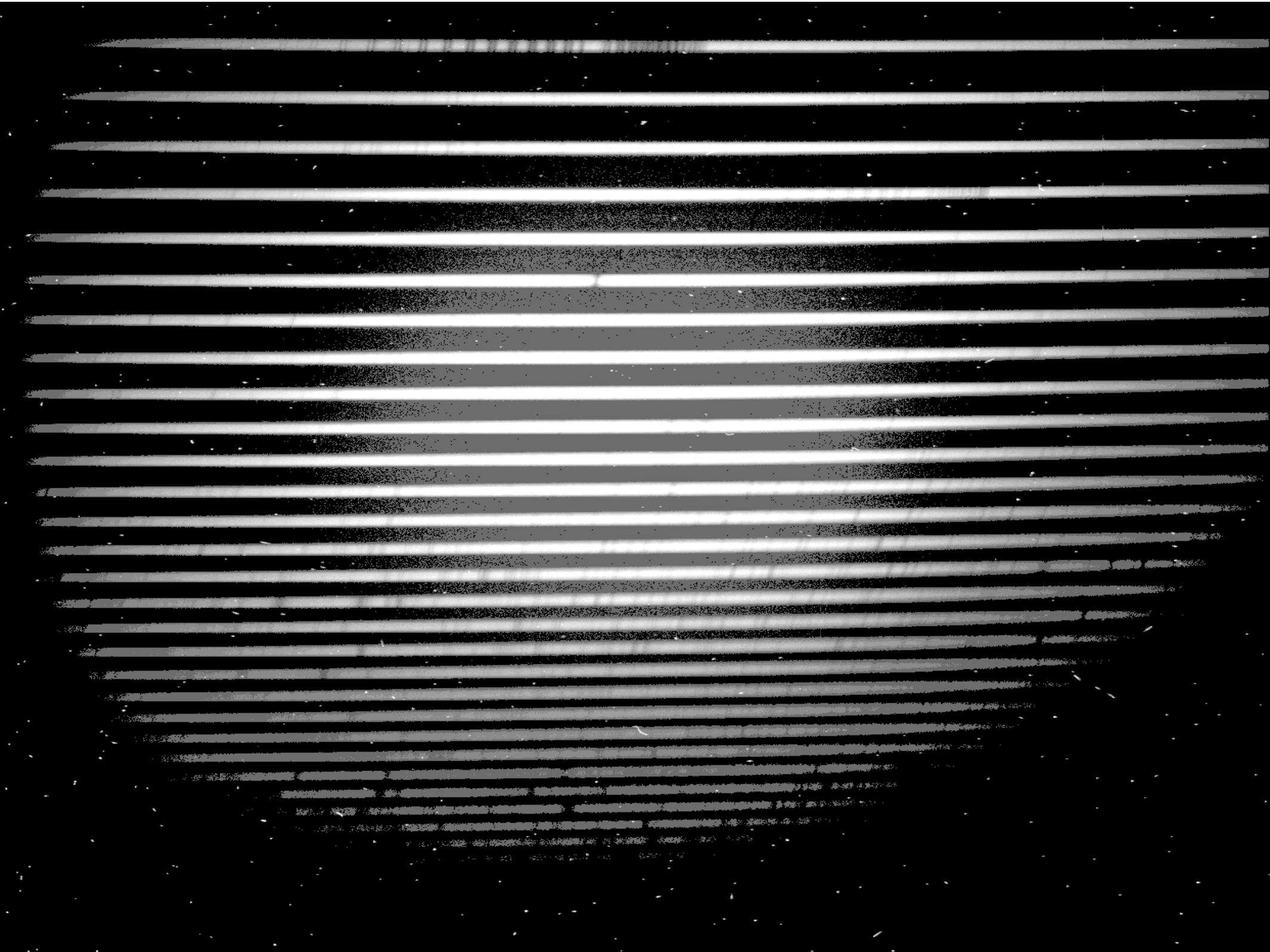
4. Одновременная съемка
объекта и регистрация
уровня темнового тока

5. **зависит от однородности
ПЗС**



Космические лучи





Плоское поле

неоднородность чувствительности ПЗС

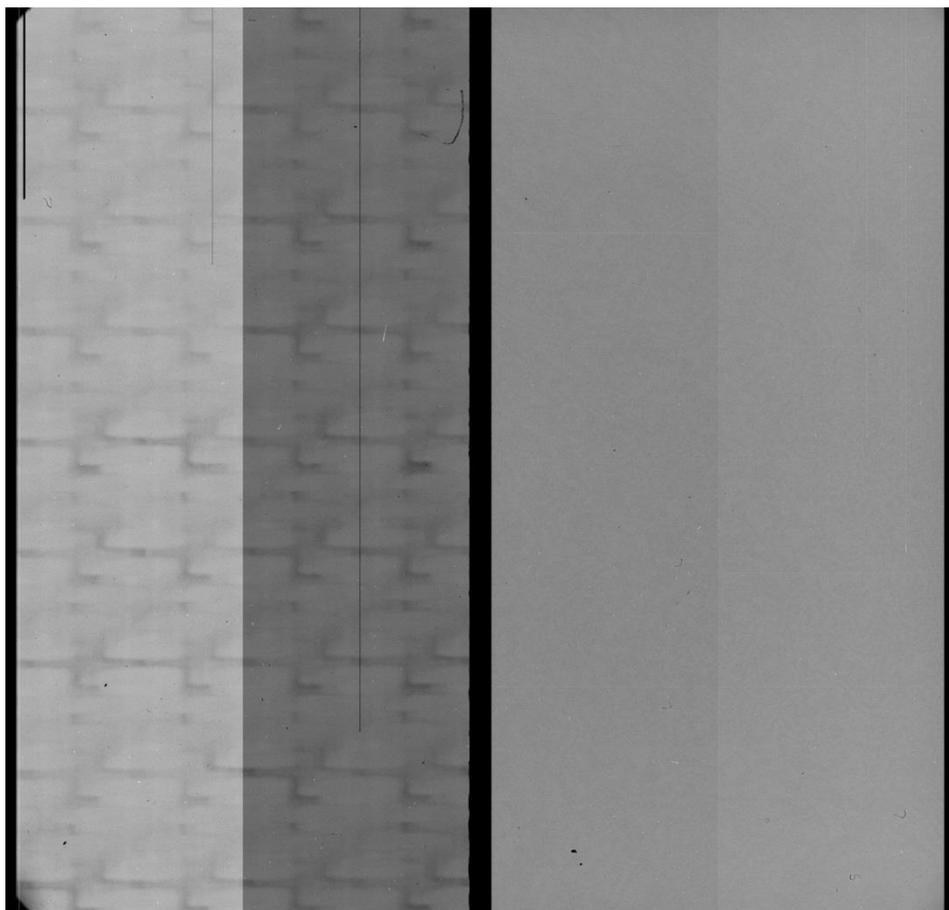
- 1) крупномасштабная
- 2) пиксельная
 - горячие и холодные пиксели

Спектральная неоднородность чувствительности

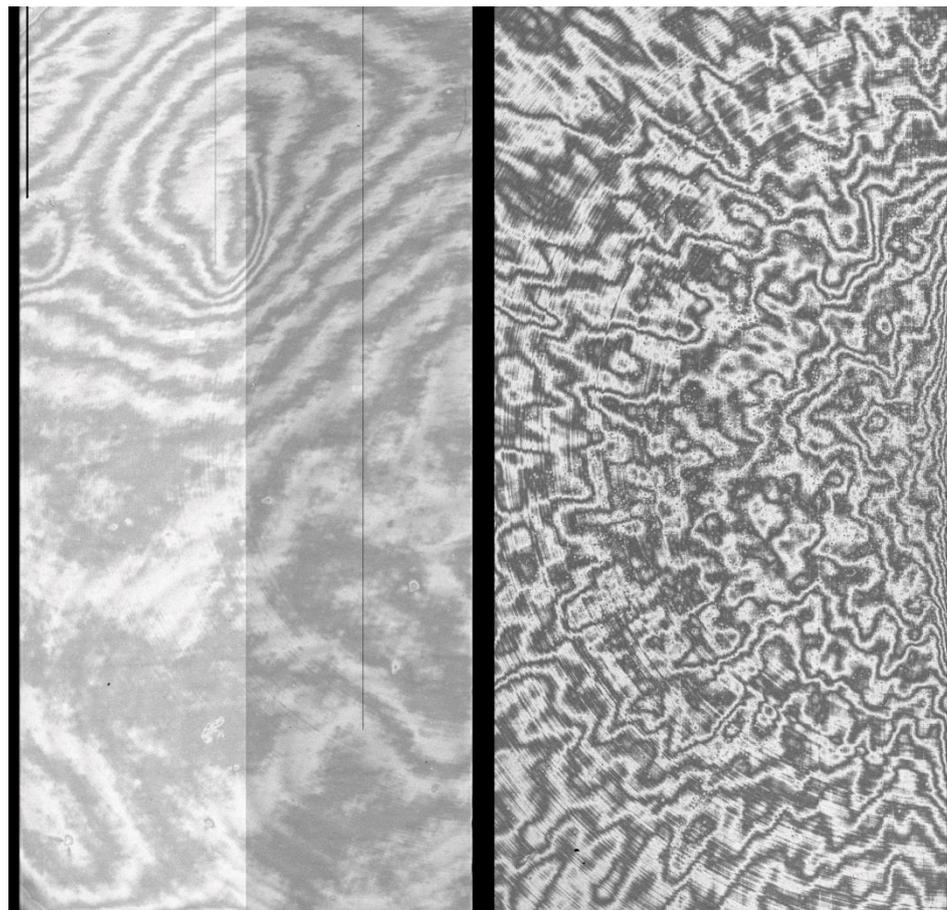
- 1) в белом свете
- 2) монохромная

Интерференционные полосы

$\lambda=650$ nm

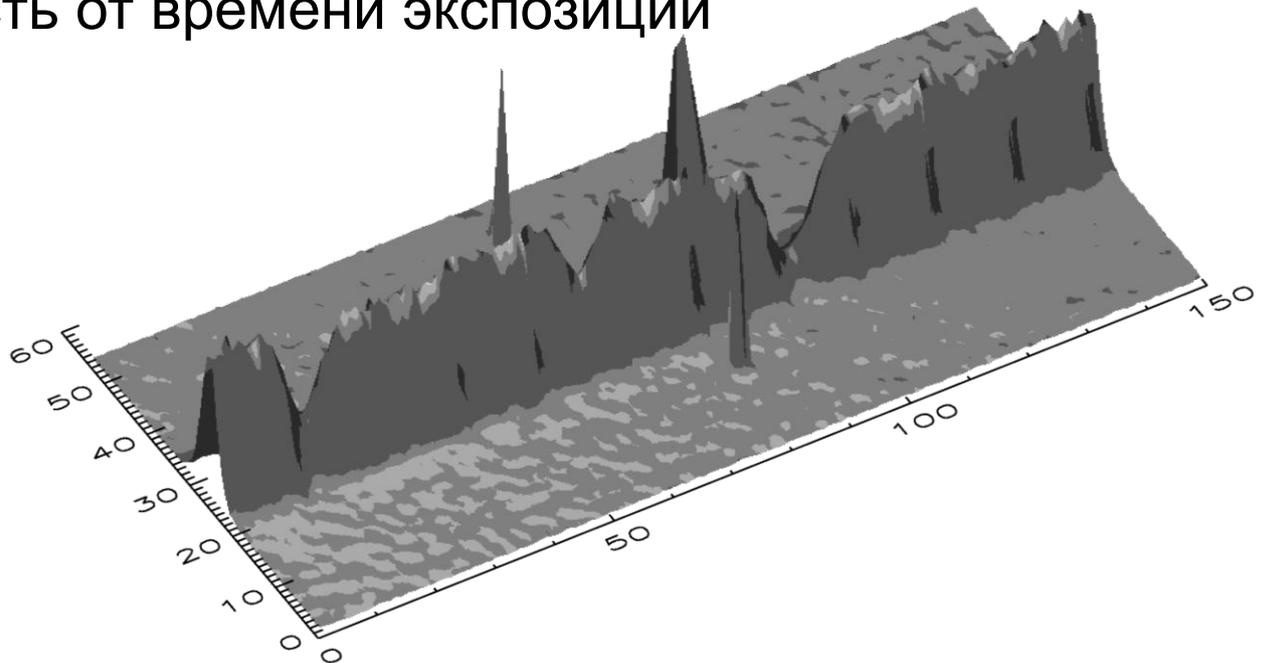


$\lambda=900$ nm

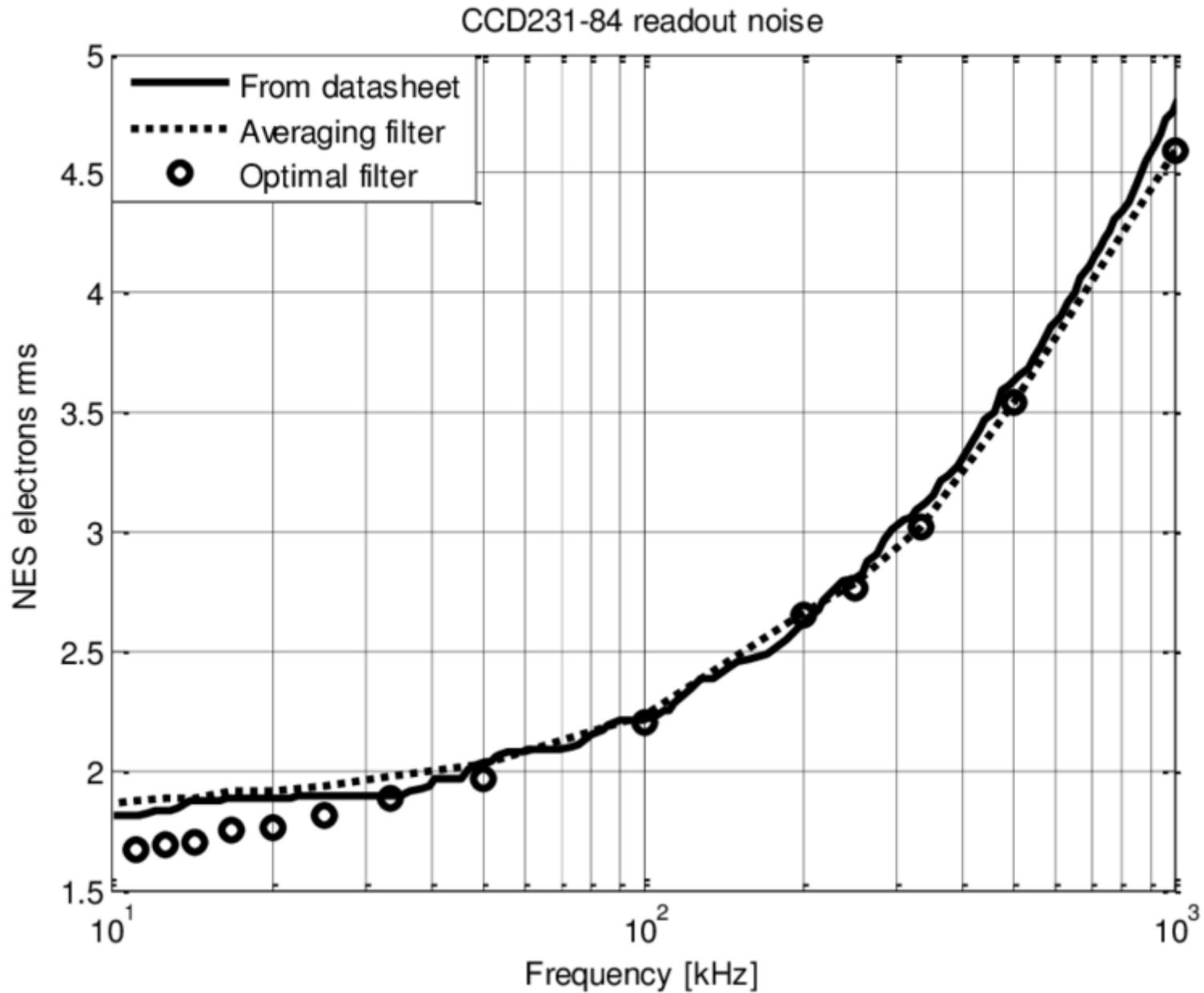


Шум

- Статистический шум (Распределение Пуассона $\sigma \approx \sqrt{N}$)
- Шум темнового тока пропорционален времени, зависит от температуры
- Шум считывания (RON - readout noise) зависит от температуры, скорости (частоты) считывания и используемого усилителя
- Космические лучи разрушают содержимое нескольких пикселей, зависимость от времени экспозиции



Частота считывания



TYPICAL PERFORMANCE

(Low noise mode)

Maximum readout frequency	3 MHz
Output amplifier responsivity	4.5 $\mu\text{V}/\text{e}^-$
Peak signal	100 ke^-/pixel
Dynamic range @ 20 kHz	33,333:1
Spectral range	200 – 1060 nm
Readout noise @ 20 kHz	3 e^- rms

GENERAL DATA

Format

Image area	27.6 x 27.6 mm
Active pixels	2048 (H) x 2048+4 (V)
Pixel size	13.5 x 13.5 μm
Number of output amplifiers	2
Number of underscan (serial) pixels	50
Fill factor	100%

Package

Package size	37.0 x 51.7 mm
Number of pins	24
Inter-pin spacing	2.54 mm
Inter-row spacing	45.72 mm
Window material	Removable glass
Package type	Ceramic DIL array

PERFORMANCE

		Min	Typical	Max	Units	Note
Peak charge storage		80,000	100,000		e^-/pixel	1
Peak output voltage (unbinned)			450		mV	
Dark signal at 293 K			250	500	$\text{e}^-/\text{pixel}/\text{s}$	2, 3
Dynamic range			33,333:1			4
Charge transfer efficiency	Parallel	99.999	99.9999	-	%	5
	Serial	99.999	99.9993	-	%	
Output amplifier responsivity	Low noise mode	3	4.5	6	$\mu\text{V}/\text{e}^-$	3
	High signal mode		1.5			
Readout noise at 253 K	Low noise mode		3.0	4.5	rms e^-/pixel	3, 6
	High signal mode		6.0		rms e^-/pixel	
Maximum readout frequency			20	3000	kHz	7
Dark signal non-uniformity at 293 K (std. deviation)			60	125	$\text{e}^-/\text{pixel}/\text{s}$	3, 8
Output node capacity			1,000,000		e^-	9

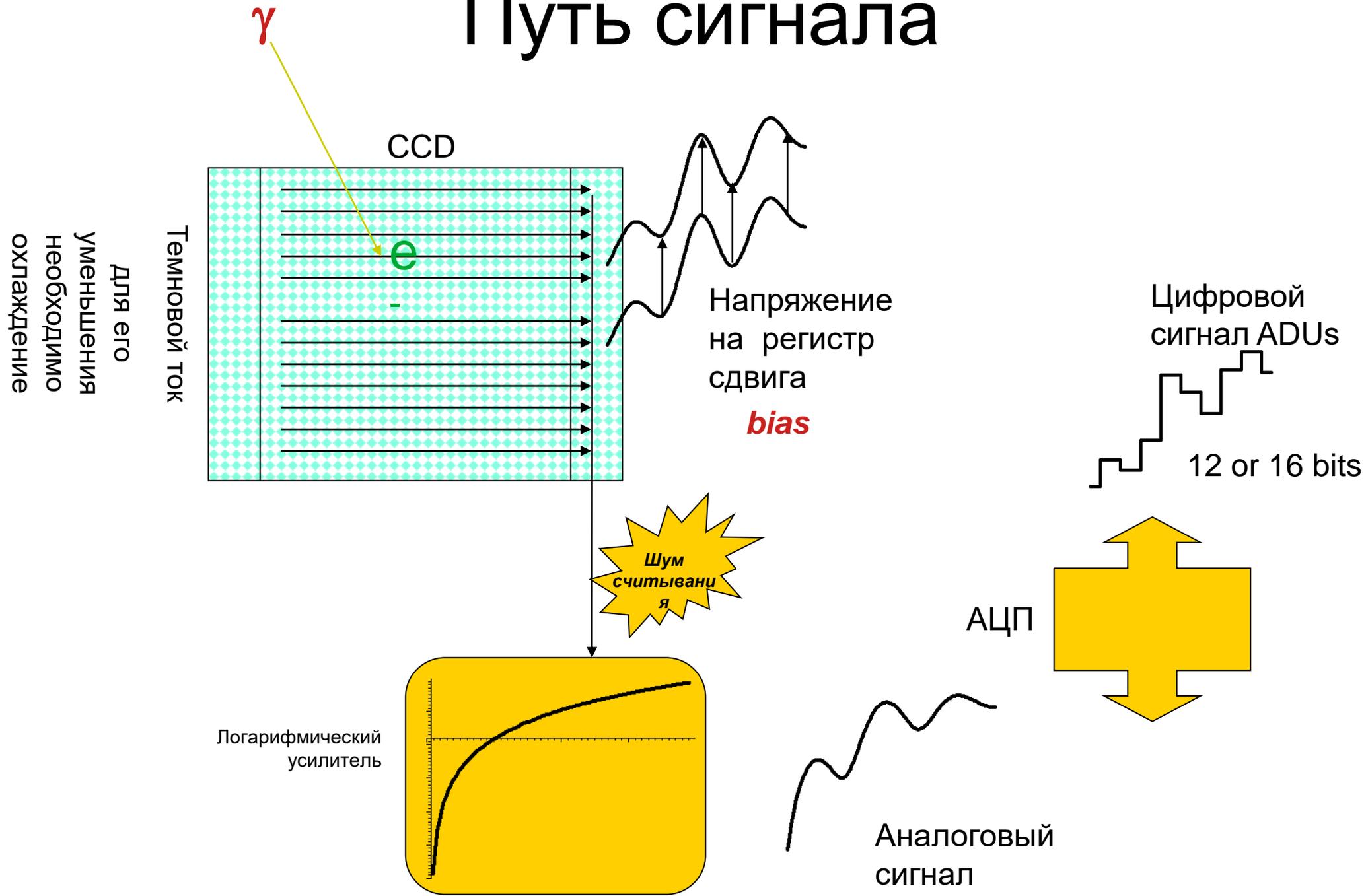
TEMPERATURE LIMITS

	Min	Typical	Max	
Storage.....	153	-	373	K
Operating.....	153	253	323	K

Operation or storage in humid conditions may give rise to ice on the sensor surface on cooling, causing irreversible damage.

Maximum device heating/cooling5 K/min

Путь сигнала



Отношение сигнала к шуму S/N (SNR)

Простейшее приближение ($S \gg N$)

$$N = \sqrt{S}$$

$$\frac{S}{N} = \frac{S}{\sqrt{S}} = \sqrt{S}$$

$$S = (S_{reg} - bias) \times gain$$

$$\frac{S}{N} = \sqrt{(S_{reg} - bias) \times gain}$$

Для суммы N пикселей

$$\frac{S}{N} = \sqrt{(S_{reg} - bias) \times gain \times N}$$

Отношение сигнала к шуму S/N (SNR)

Общий случай

$$N = \sqrt{(S_{reg} - bias) \times gain + N_{dark} + N_{readout}}$$
$$\frac{S}{N} = \frac{(S_{reg} - bias) \times gain}{\sqrt{(S_{reg} - bias) \times gain + N_{dark} + N_{readout}}}$$

Для времени накопления t и потоке $S'=dS/dt$

$$\frac{S}{N} = \frac{(S'_{reg} - bias) \times gain \times t}{\sqrt{(S'_{reg} - bias) \times gain \times t + N_{dark} \times t + N_{readout}}}$$

Наблюдаемый сигнал

Нестабильность положения разбиение на несколько экспозиций

Нелинейные эффекты разбиение на несколько экспозиций

BIAS и шум съемка bias кадров — с 0ой экспозицией

Шум считывания (RON - readout noise)

Статистический шум увеличение времени экспозиции

Космические лучи (cosmic rays) разбиение на несколько экспозиций

Интерференционные полосы (frings) не ходить туда или flat field

Неоднородность спектральной чувствительности QE съемка flat

Неоднородность чувствительности ПЗС (flat field) съемка flat field

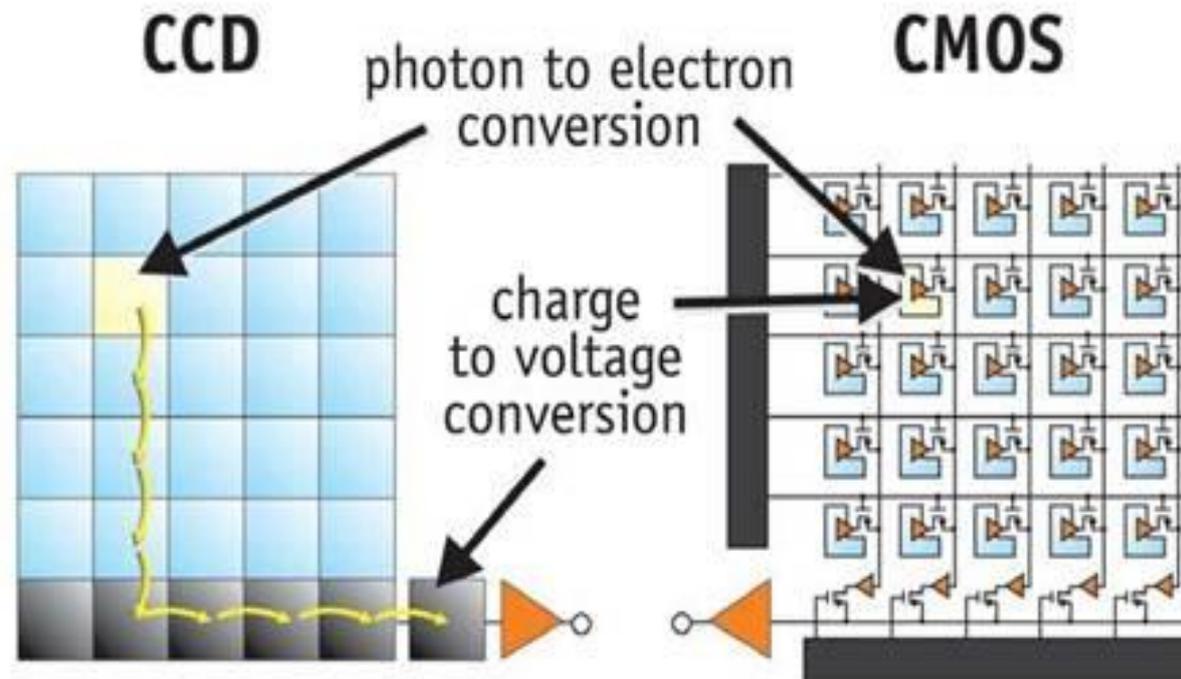
Темновой шум ПЗС (dark) охлаждение
равномерно
засвеченной
области

Посторонний и рассеянный сигнал изменение конструкции

Полезный сигнал

CMOS или КМОП матрица

комплементарная структура металл-оксид-полупроводник





CMO
S



CC
D



- Компактность
- Встроенная функциональность
- Радиационная устойчивость (применение в космосе)
- Встроенный электронный затвор
- Отсутствие переноса заряда и проблем
- Возможность работы в ИК
- Высокая скорость считывания (использование для видео)

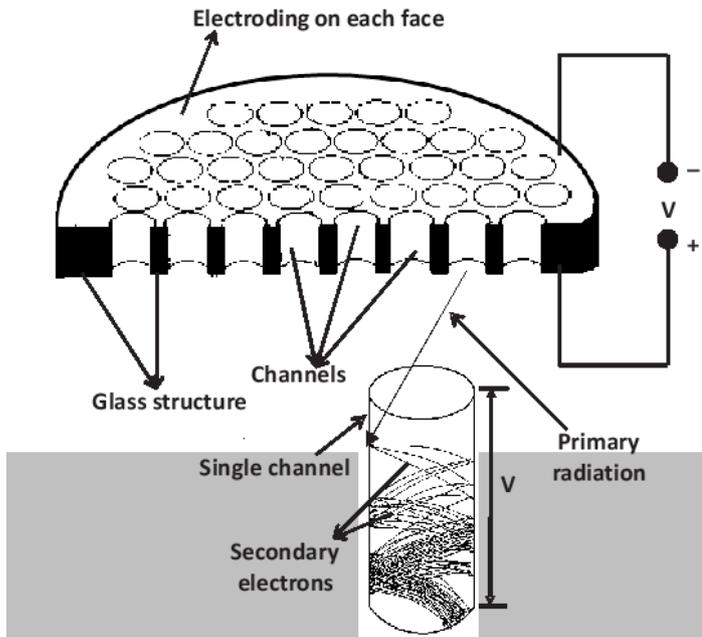
- Емкость накопления сигнала
- Динамический диапазон
- Высокая линейность
- Высокая точность
- Работа при низких температурах
- Высокая квантовая эффективность при обратной засветке



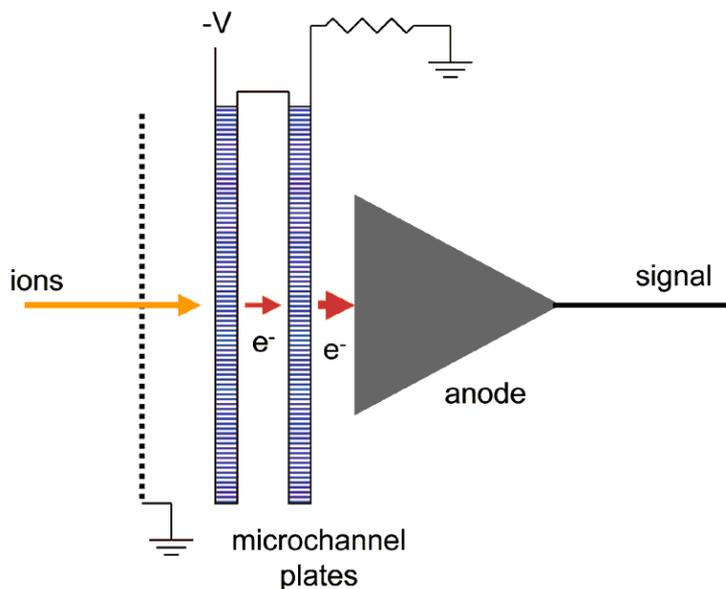
Использование в астрономии

Ультрафиолетовый приемник

Микроканальная пластина



- Фотон выбивает электрон или жесткий фотон ионизирует чувствительный слой
- Электрон или ион сталкивается с первой поверхностью и выбивает вторичные электроны
- Электроны разгоняются в электрическом поле и выбивают еще электроны → принцип фотоумножителя
- Усиленный сигнал регистрируется как событие на конкретной ячейке
- Координатное представление изображения



(x,y)
(10,12)
(23,156)
(78,34)
(56,23)

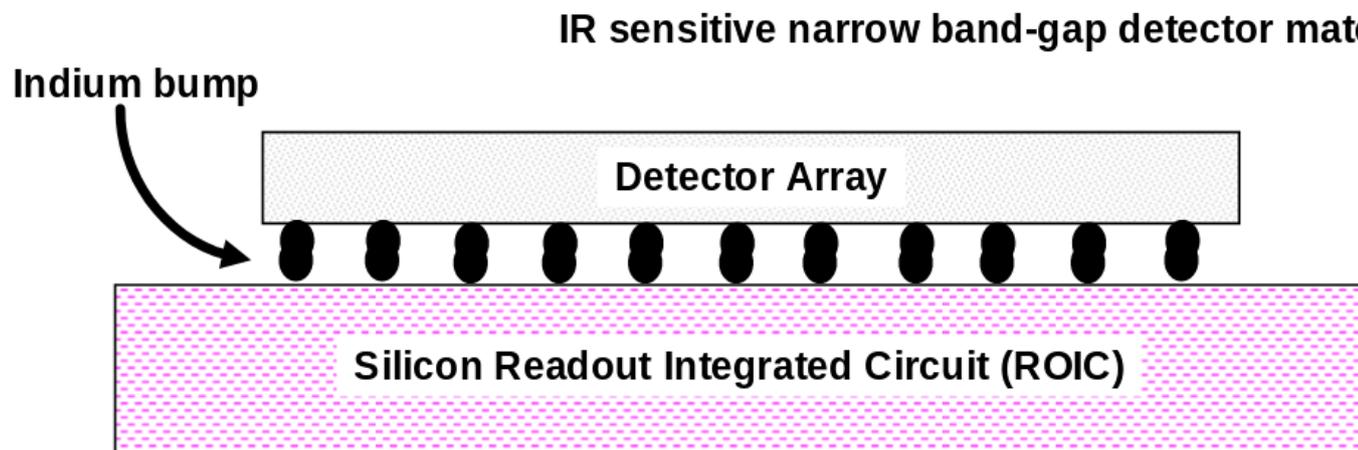
Микроканальная пластина



Инфракрасные приемники

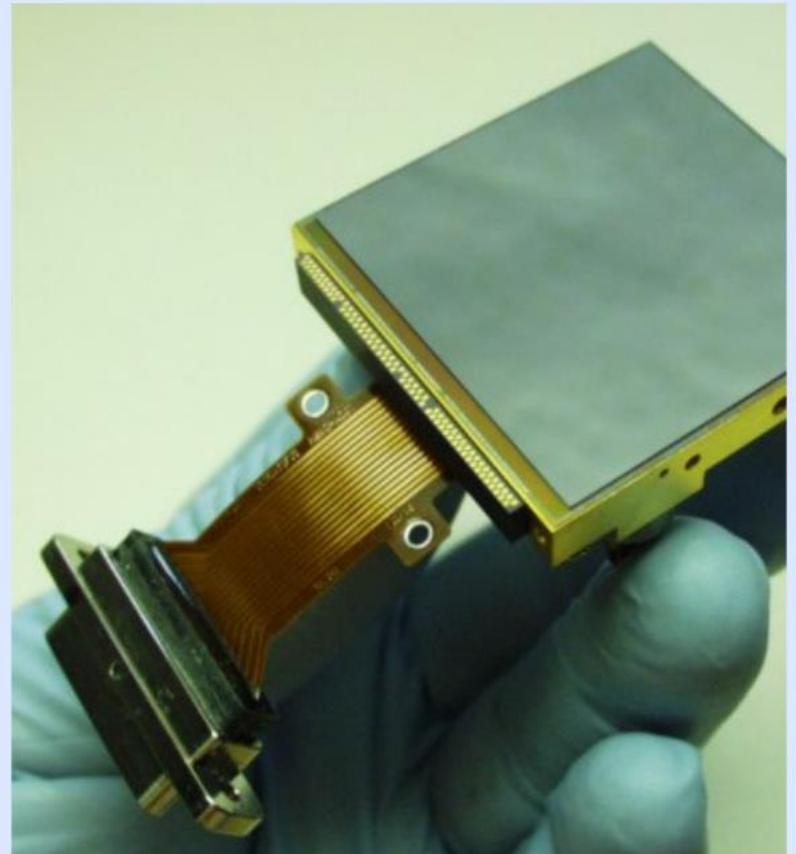
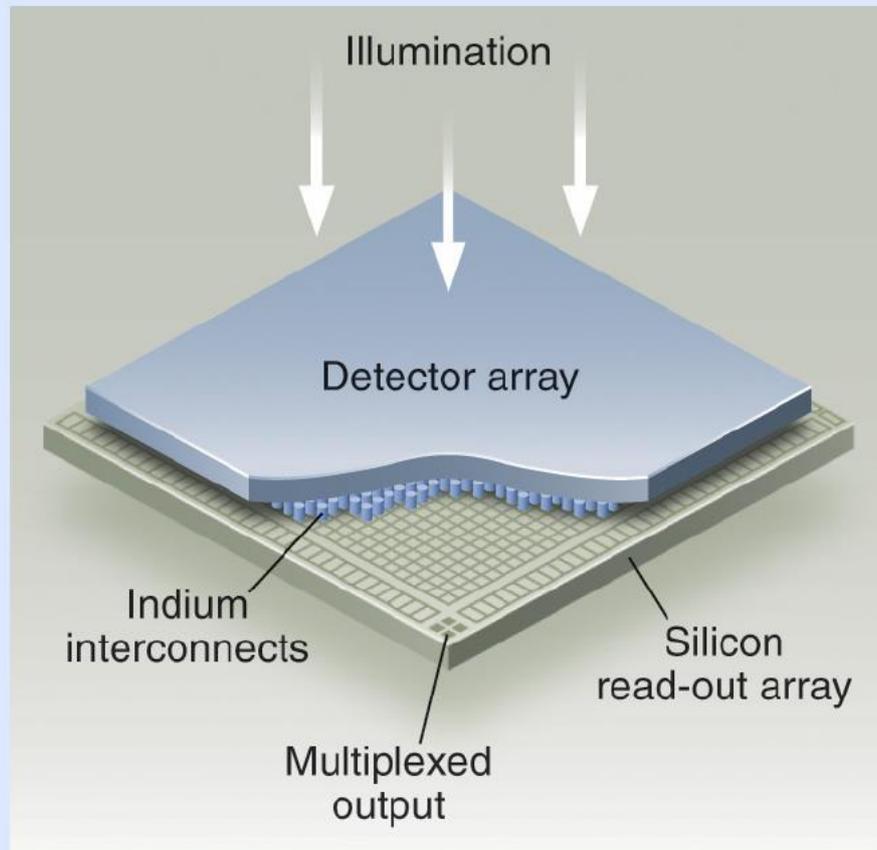
Из-за красной границы фотоэффекта ПЗС на основе кремневой пластины не могут работать в ИК на длинах волн $> 1\text{ мкм}$ (10000 \AA)

→ замена на более светочувствительные соединения InSb , HgCdTe , Si:As , ...

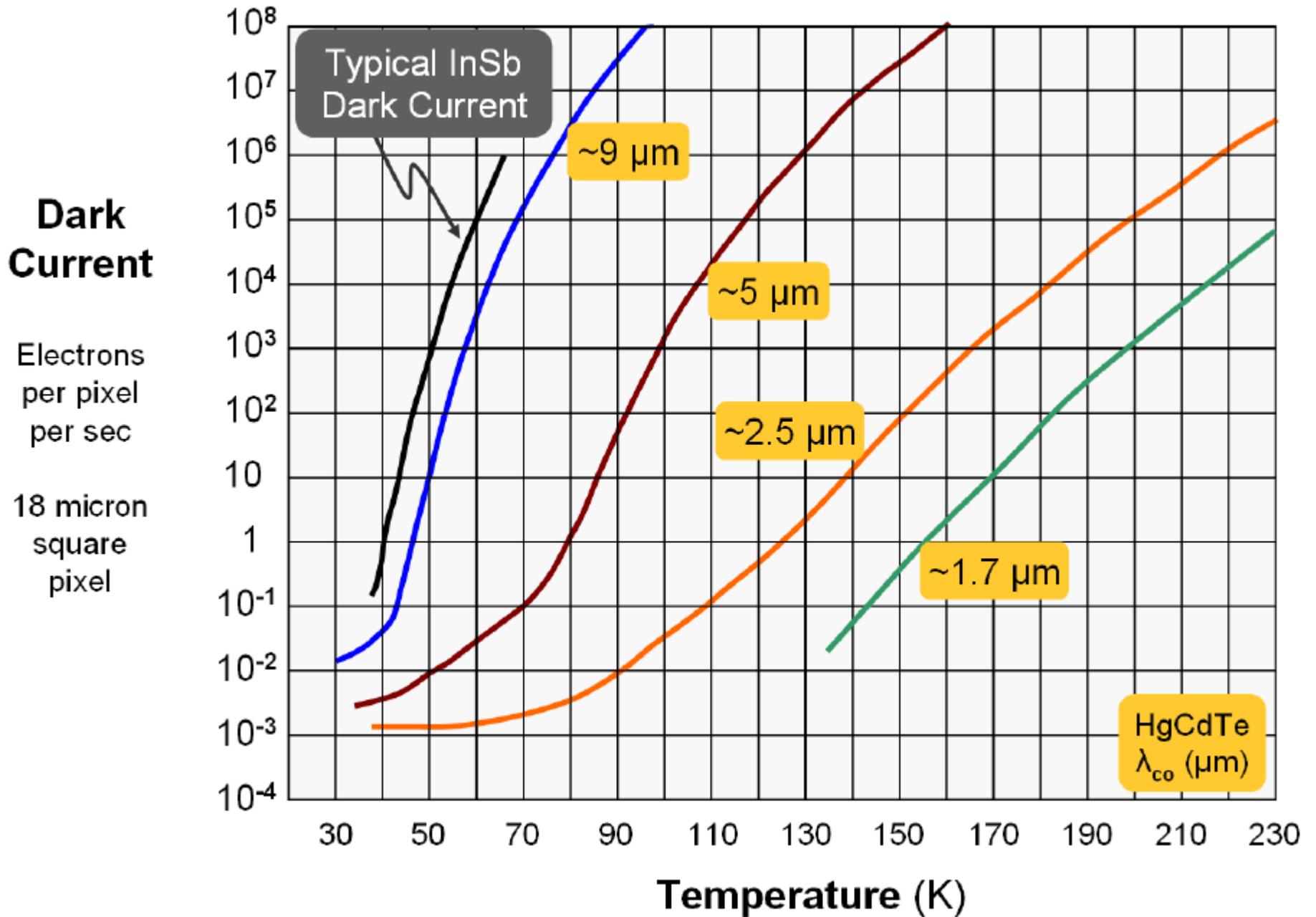


- CMOS КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) структура
- Фотон выбивает в чувствительном слое электрон (фотоэффект)
- Электрон переходит в кремниевую пластину
- Электроны накапливаются
- Управляющие сигналы переправляют электроны на выход
- Оцифровка сигнала

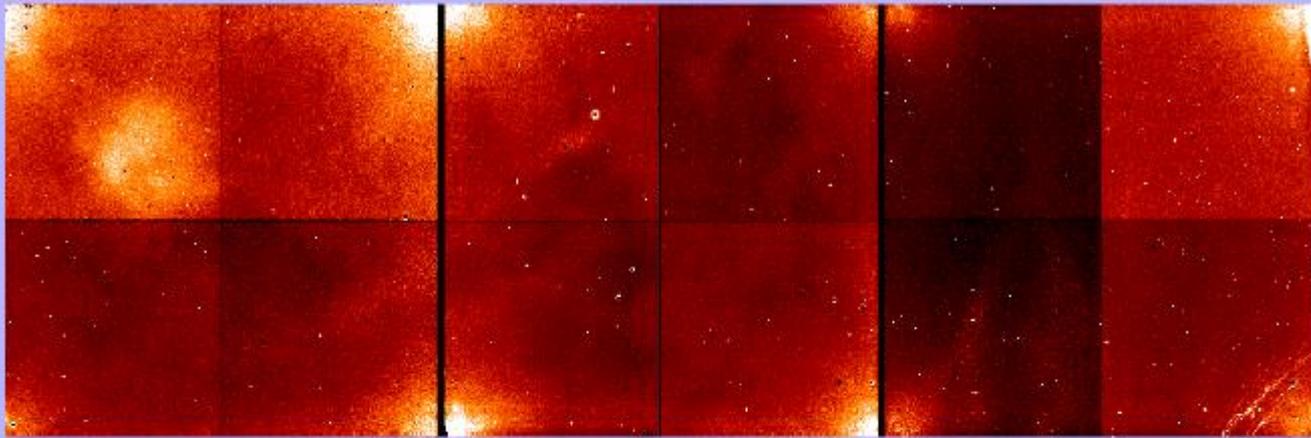
HgCdTe IR детектор



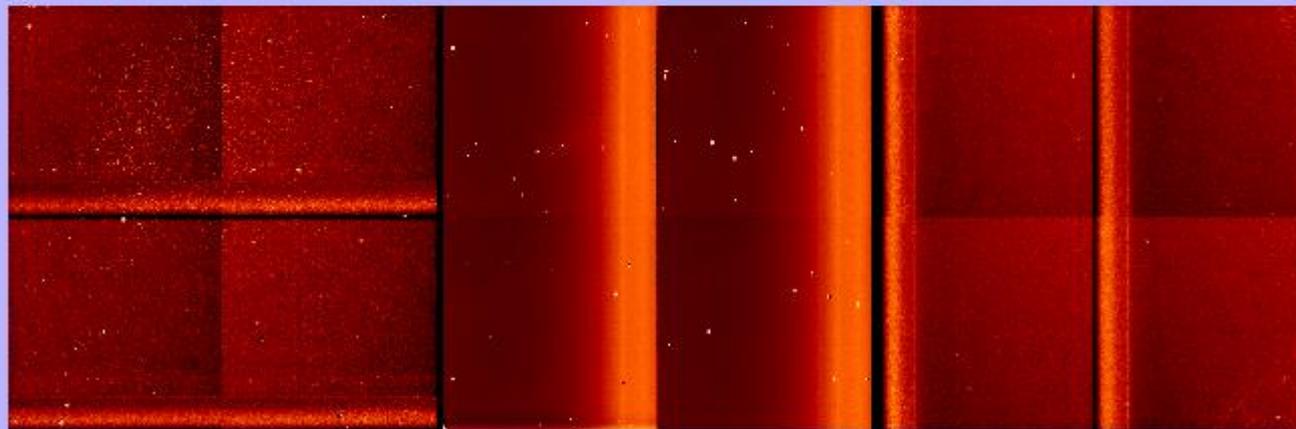
Темновой ток



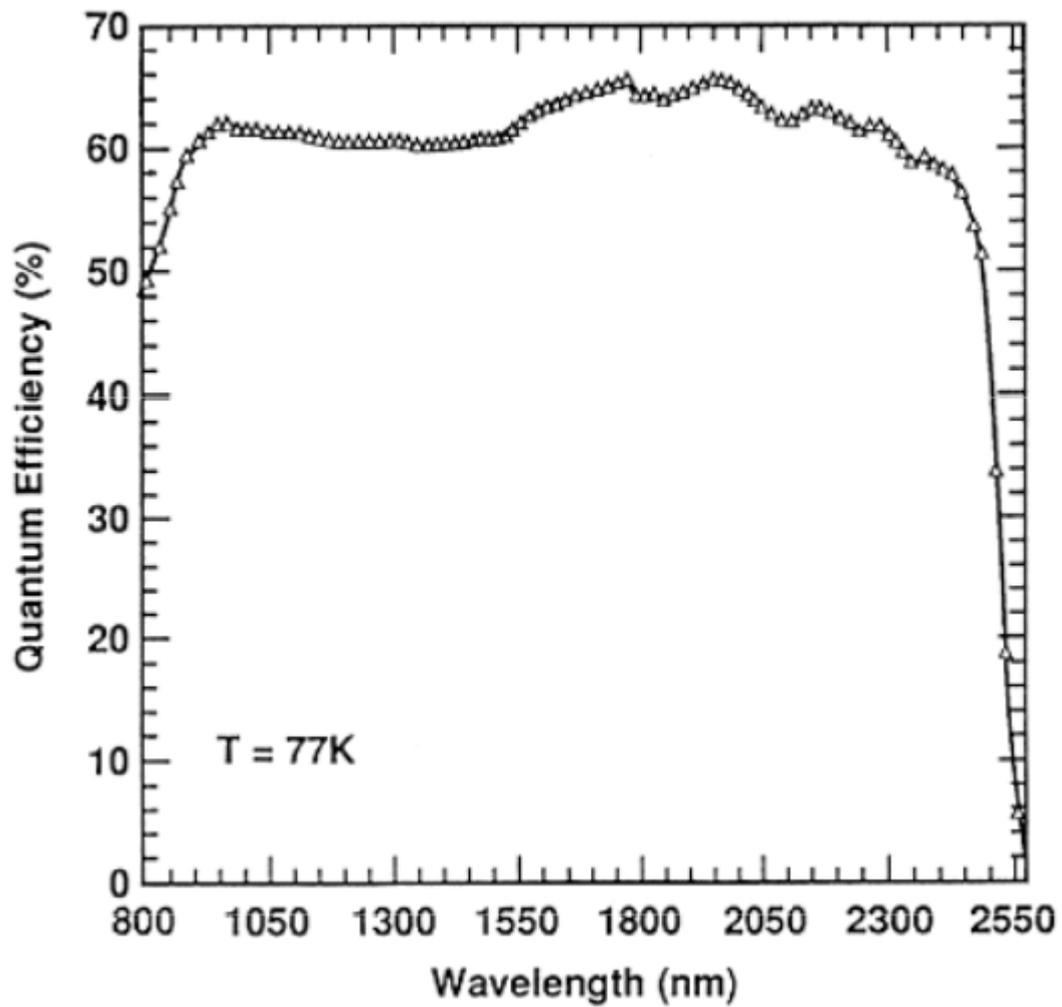
Темновой ток



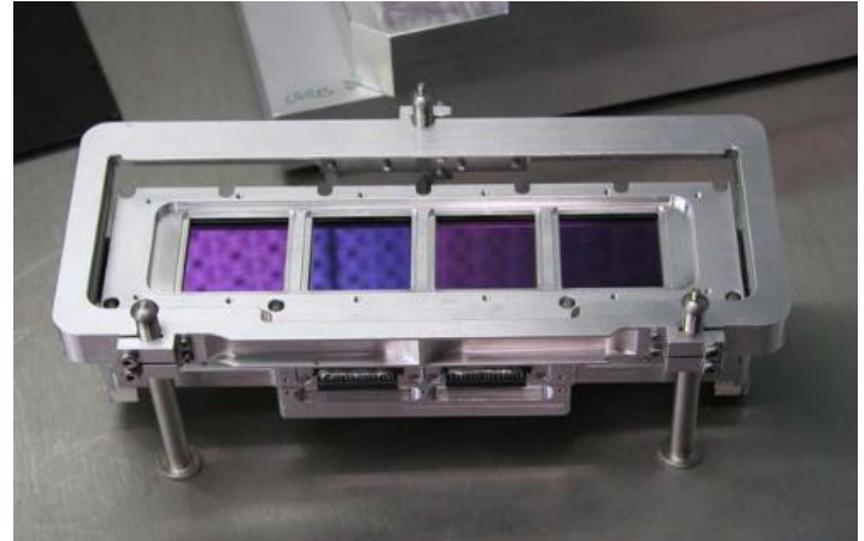
Dark Current



Spatially-dependent bias (“shading”)

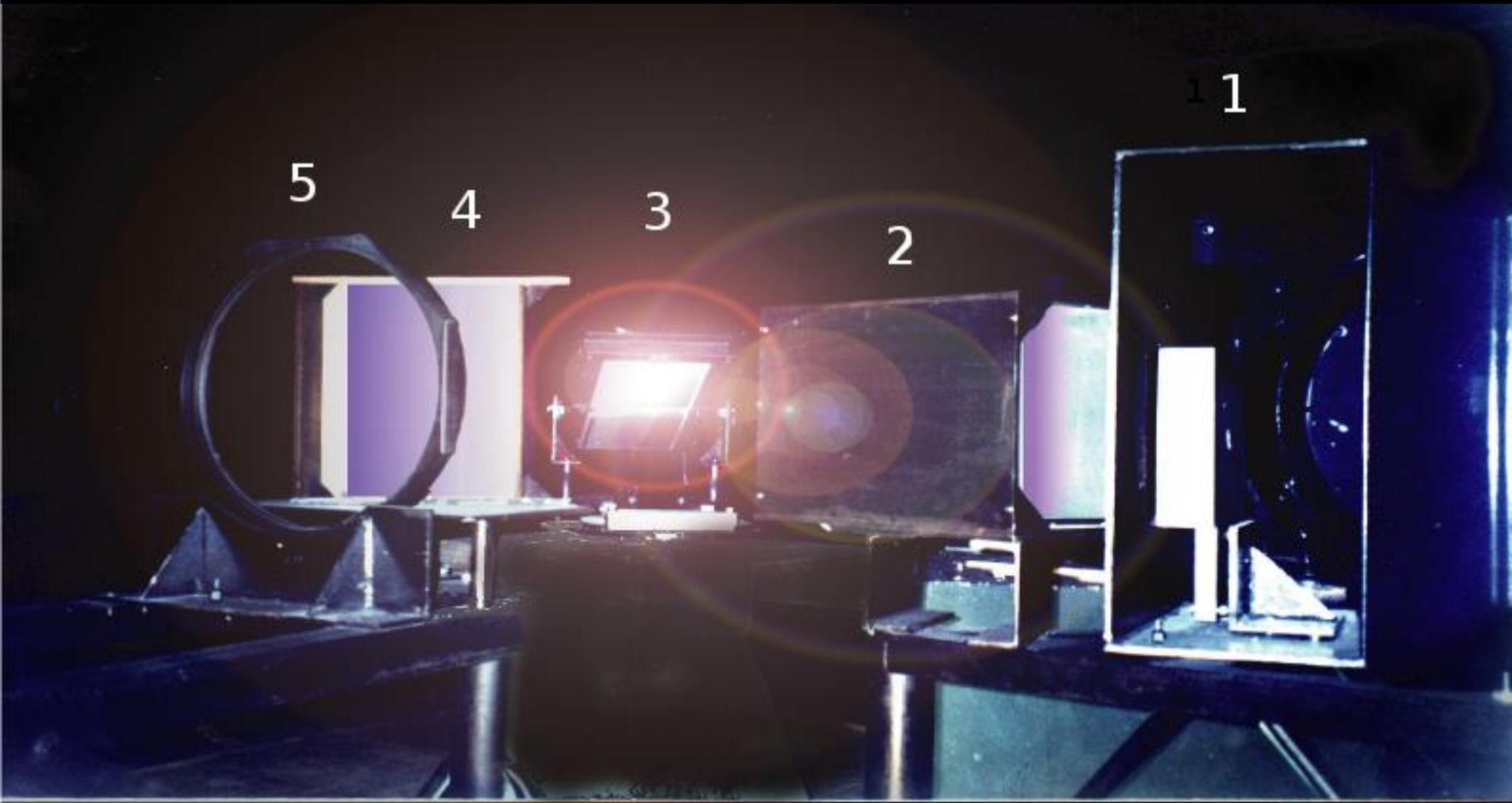


Мозайка из 4 1k x 1k InSb матриц
Спектрограф CRIRES ESO



ИК приемники требуют сильного охлаждения!!!

Спектральные приборы и приемники излучения



Основа спектрографа — элемент дисперсии

$$f(x) \rightarrow f(\lambda)$$

Дисперсия

Призма - зависимость коэффициента преломления от длины волны. Спектрографы низкого разрешения.

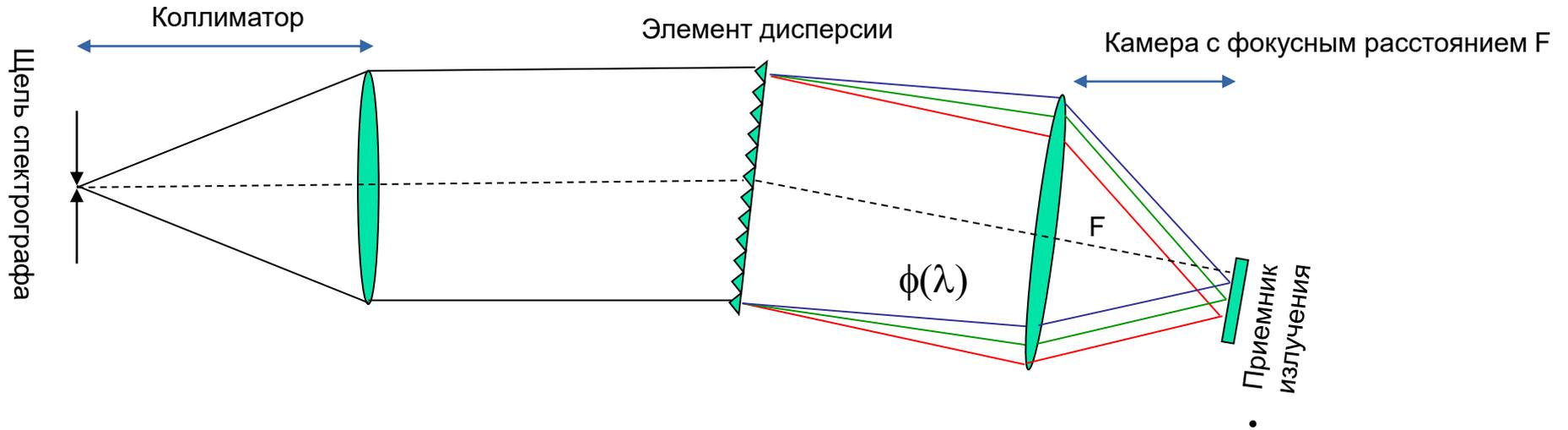
Дифракция

Дифракционная решетка и ее модификации — зависимость угла отклонения луча от длины волны. Либо спектрографы низкого разрешения, либо небольшой участок спектра высокого разрешения. Составные спектрографы высокого разрешения.

Интерференция

Эталон Фабри-Перо — зависимость положений максимумов интерференционных полос от длины волны. Спектрографы «изображений» высокого разрешения небольшого участка спектра.

Принципиальная схема спектрографа

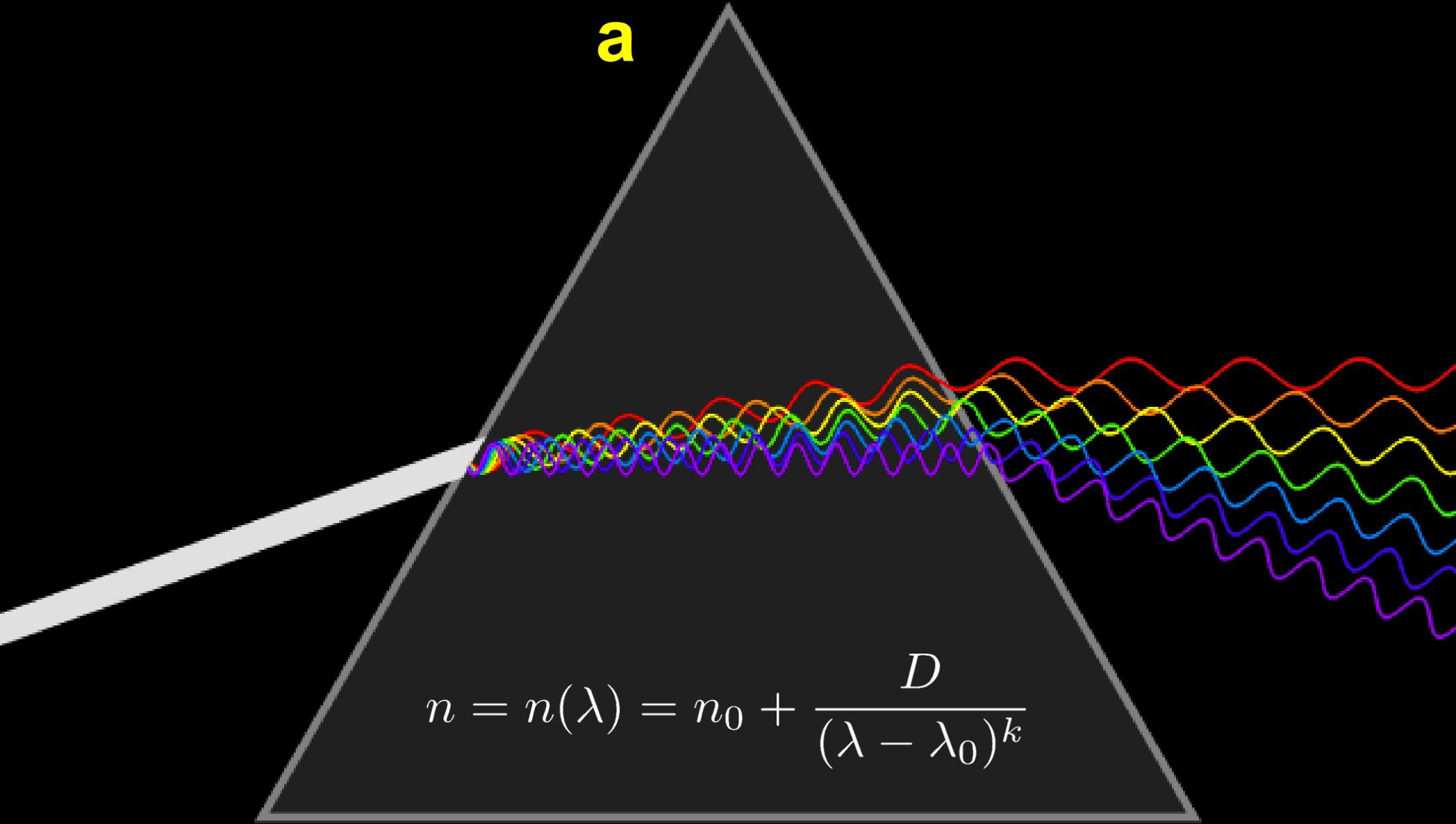


Основные характеристики спектрографа

1. Дисперсия угловая $\phi(\lambda)$ \square зависимость угла отклонения от длины волны
2. Спектральное разрешение $R=\lambda/\delta\lambda$ \square показывает насколько близкие две линии могут быть разрешены как отдельные линий

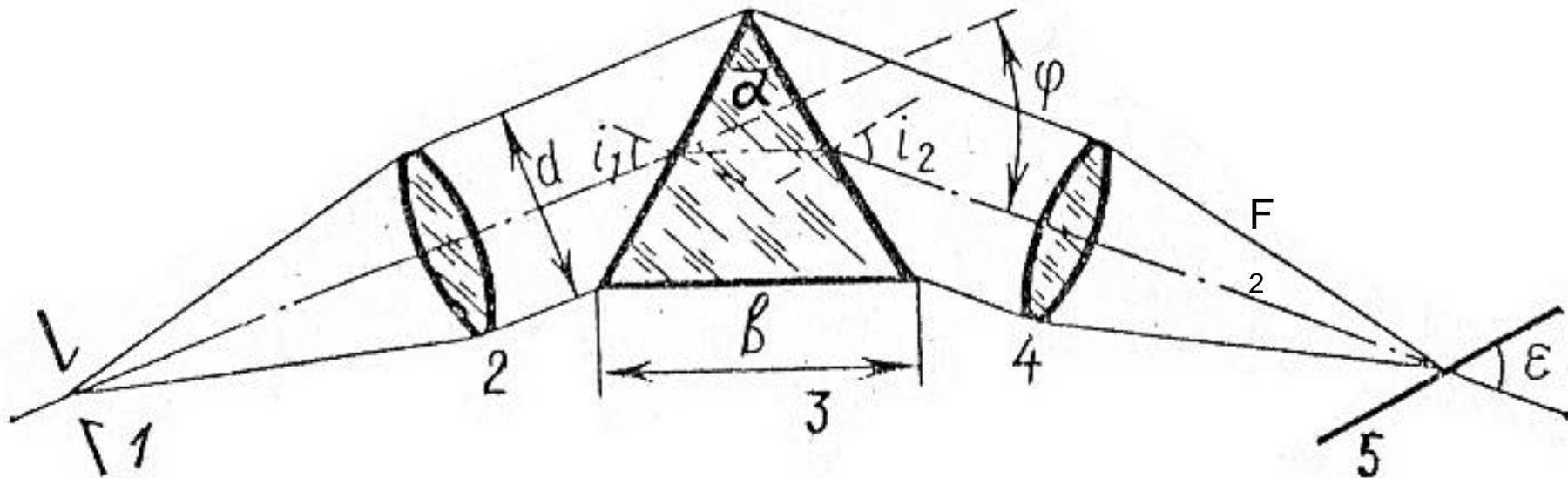
Призм

а



$$n = n(\lambda) = n_0 + \frac{D}{(\lambda - \lambda_0)^k}$$

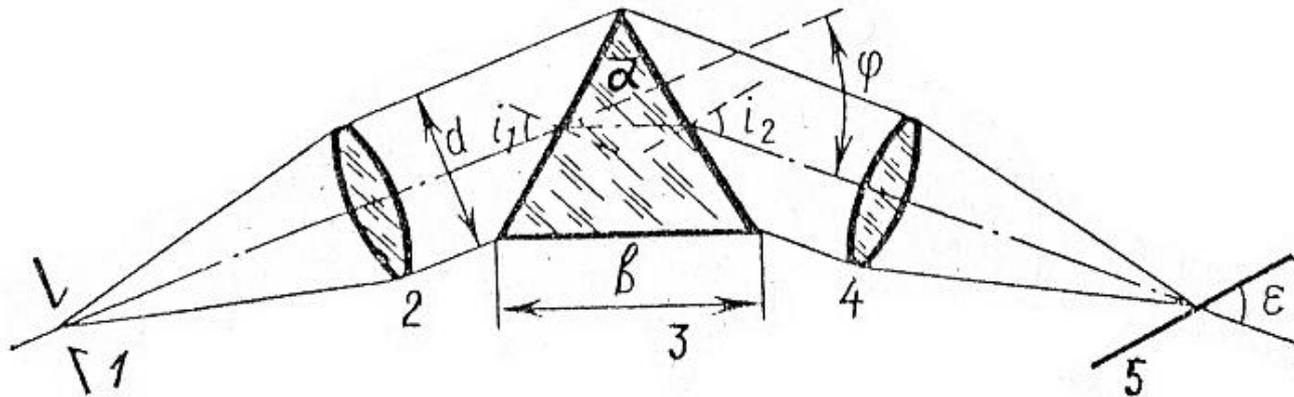




$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{2\sin\frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - n^2\sin^2\frac{\alpha}{2}}} \frac{dn}{d\lambda}$$

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{d\phi}{d\lambda} \frac{F_2}{\sin\epsilon}$$

$$\frac{dn}{d\lambda} = -\frac{D}{(\lambda - \lambda_0)^{2k}} k(\lambda - \lambda_0)^{k-1}$$



$$I = I_0 \frac{\sin^2 u}{u^2}$$

$$u = \pi d \frac{\sin \varphi}{\lambda}$$

Угловое расстояние между главным максимумом ($u=0$) и первым минимумом ($u=\pi$)

$$\delta \varphi \approx \sin(\delta \varphi) = \frac{\lambda}{d}$$

Угловое расстояние между главными максимумами для λ и $\lambda + \delta \lambda$

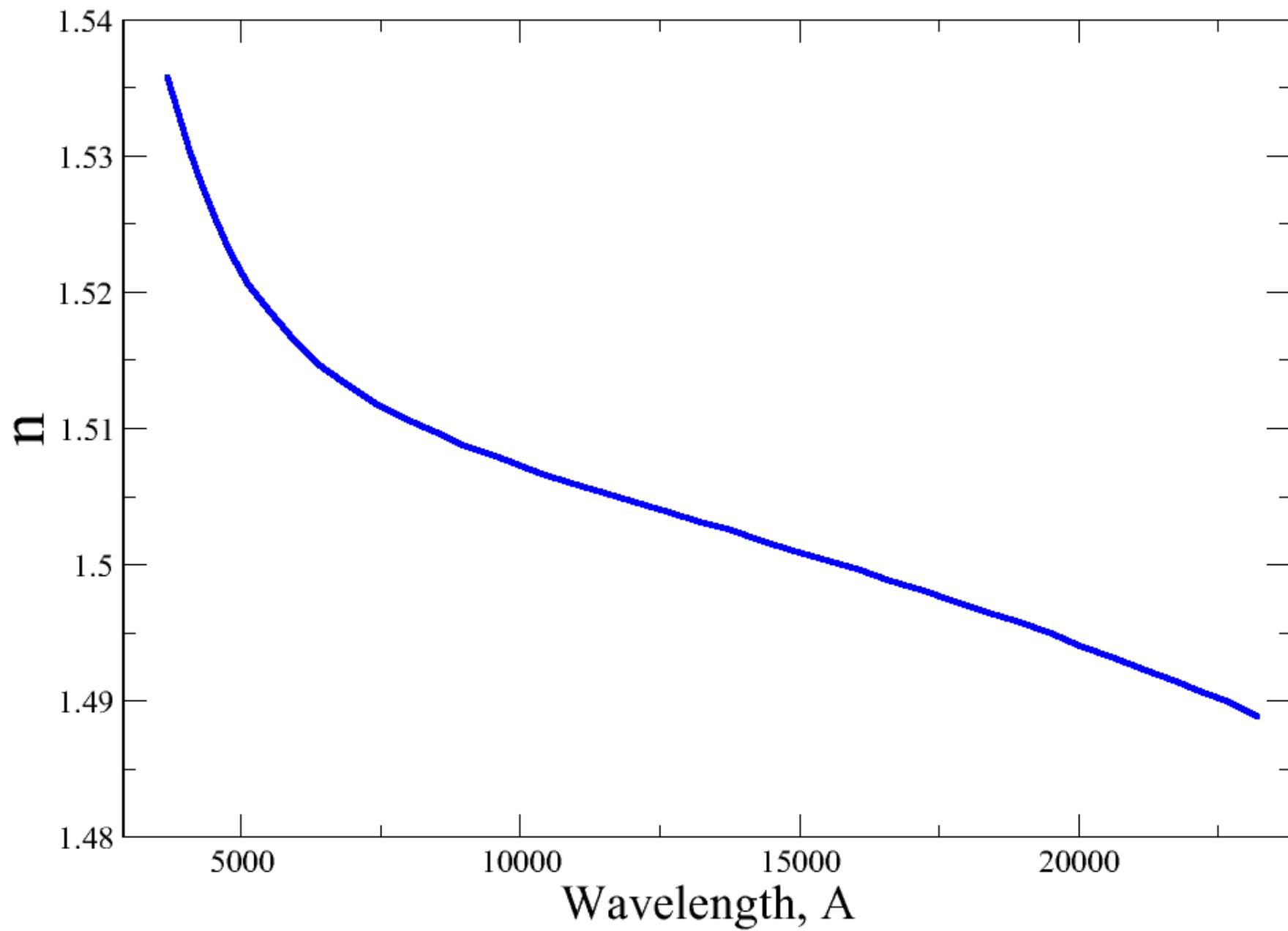
$$\delta \varphi = \delta \lambda \frac{d\varphi}{d\lambda}$$

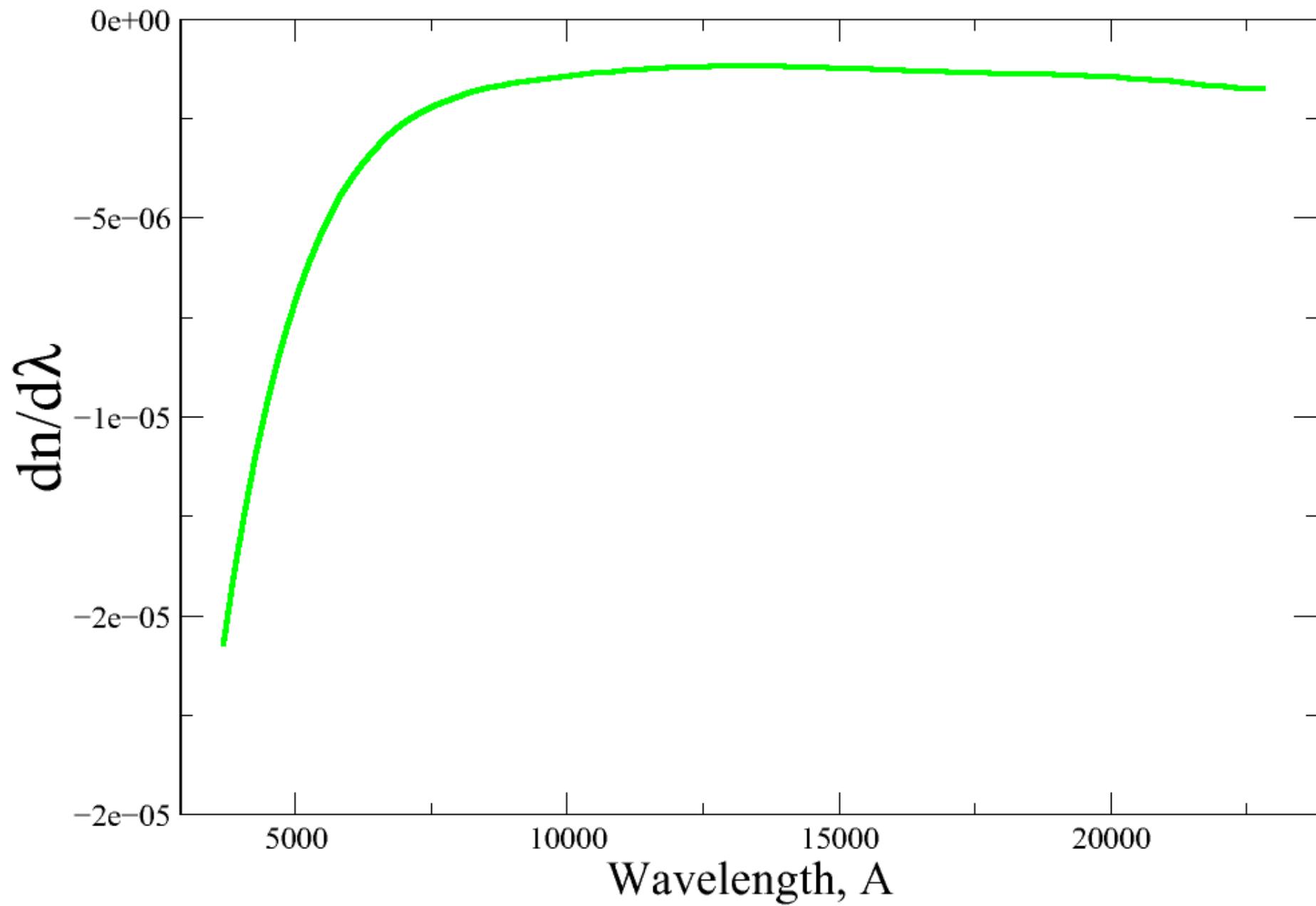
$$R = \frac{\lambda}{\delta \lambda} = d \frac{d\varphi}{d\lambda}$$

А при условии симметричного отклонения

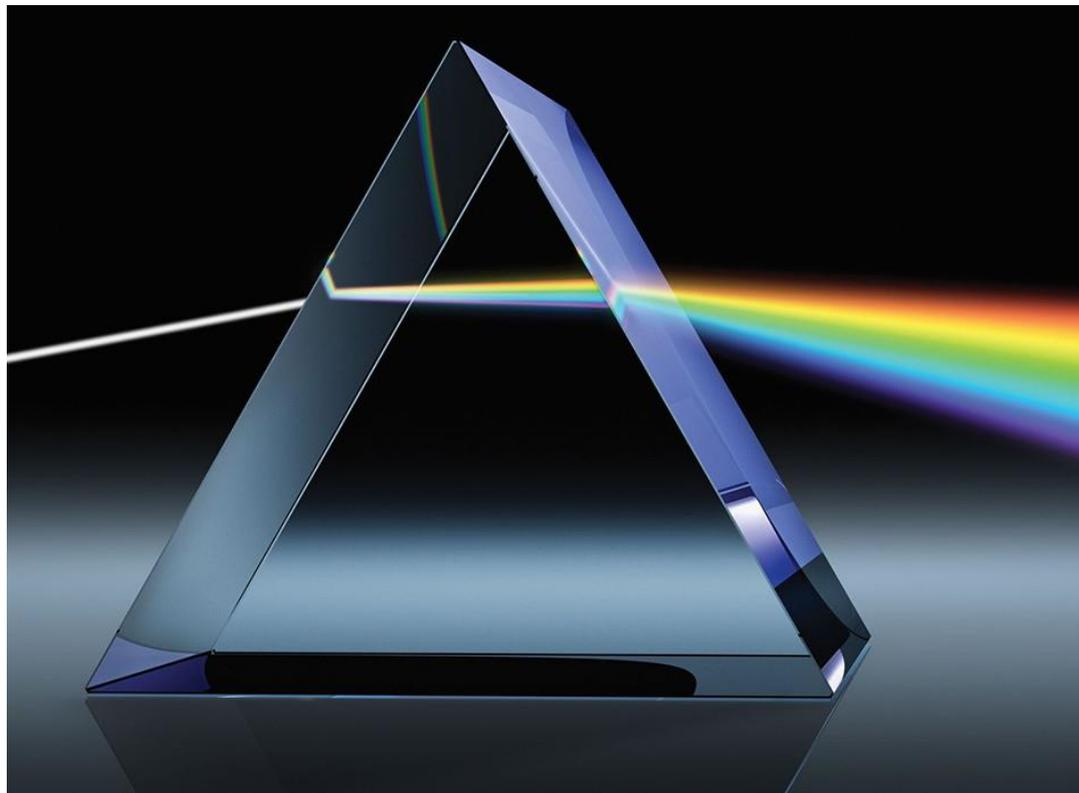
$$R = b \frac{dn}{d\lambda}$$

Спектральное разрешение призмы не постоянно, зависит от ее размеров и сорта стекла





Призма

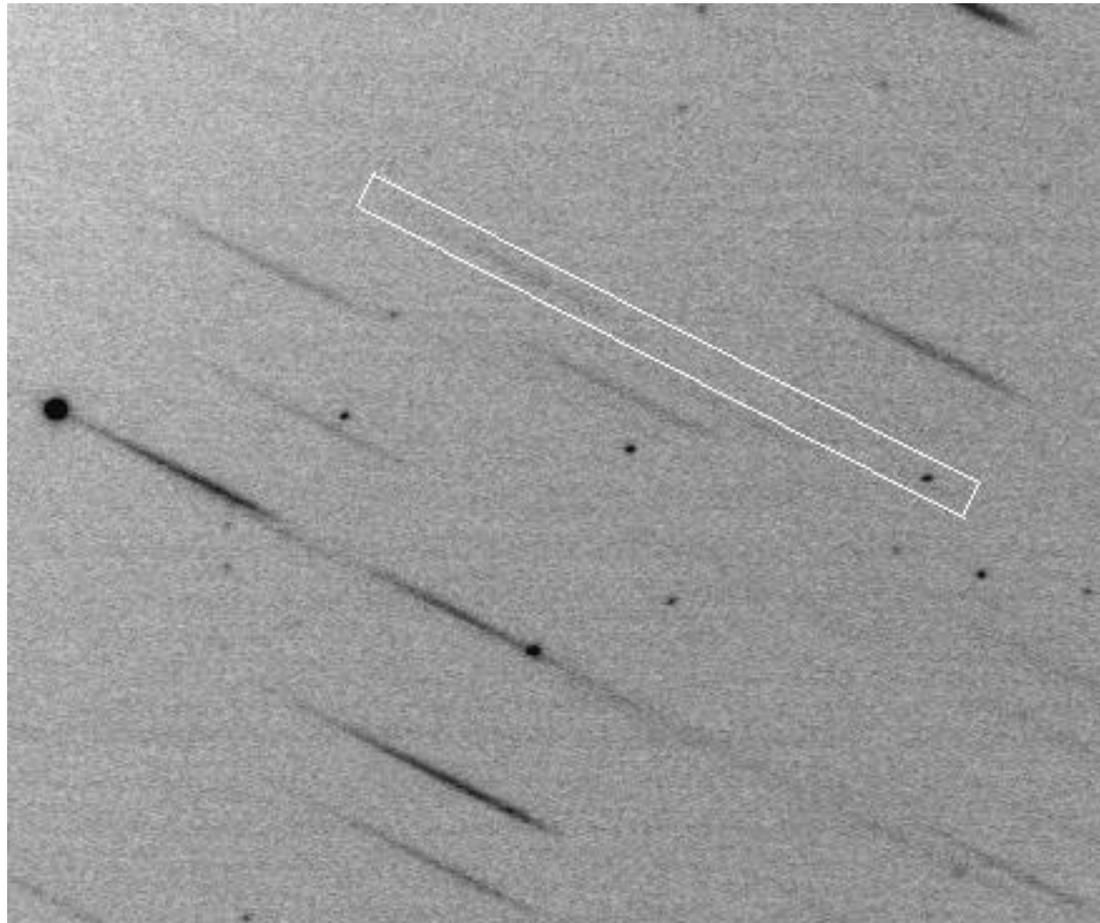


- +++ спектры среднего разрешения
- переменное разрешение
- уменьшение разрешения в красной области
- нелинейная шкала длин волн

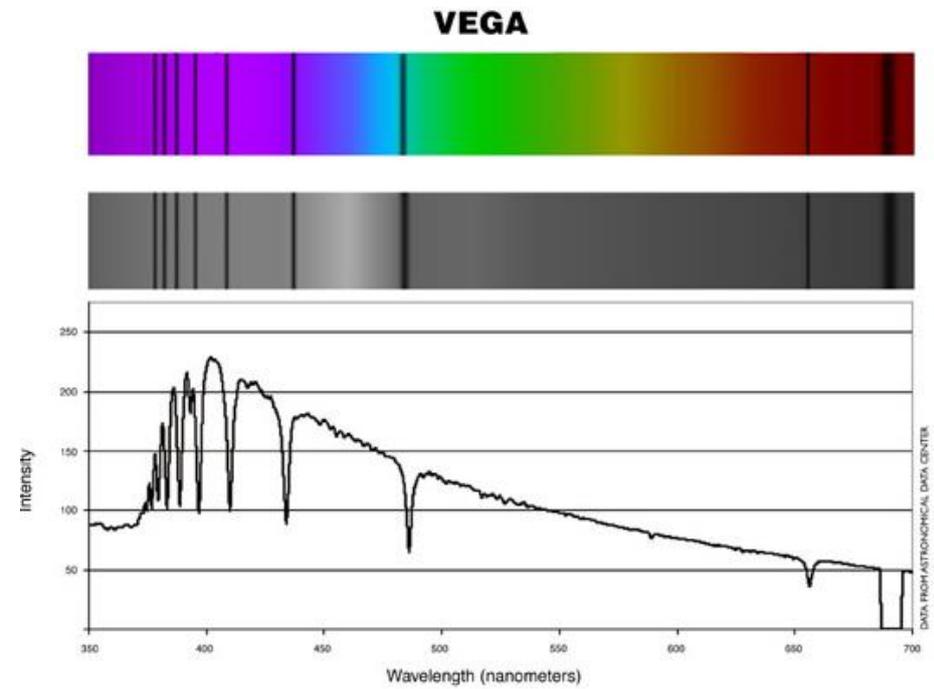
Объективная призма



- +++ спектры всех объектов в поле зрения
- спектры низкого разрешения
- спектры соседних объектов сливаются
- нелинейная шкала длин волн
- сложность калибровки по длинам волн



- Снимок с использованием объективной призмы

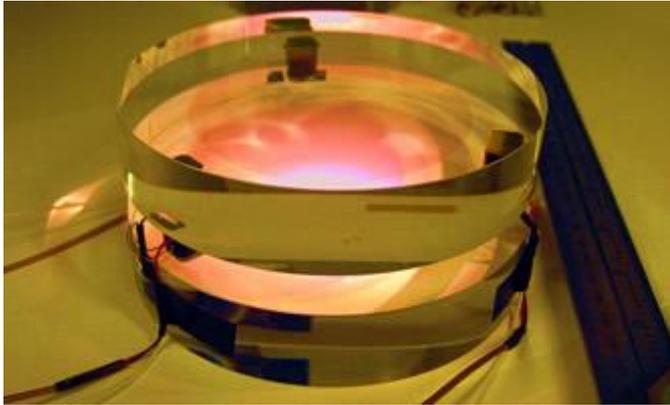


Спектр Веги

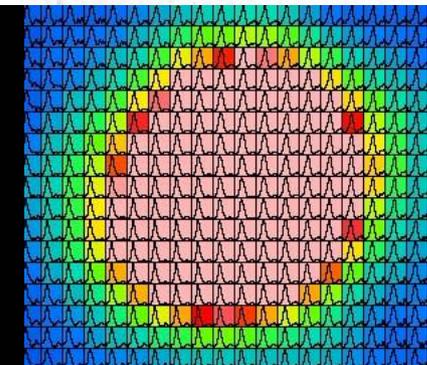
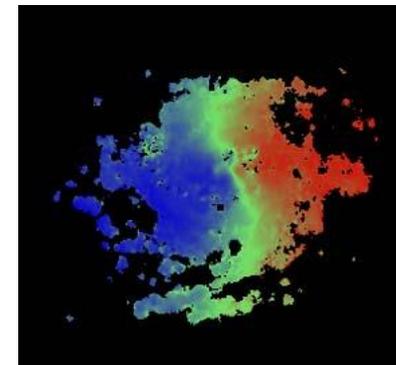
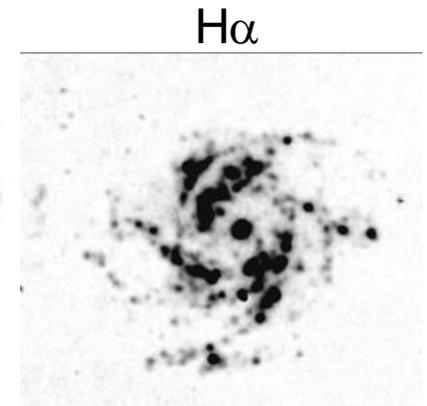
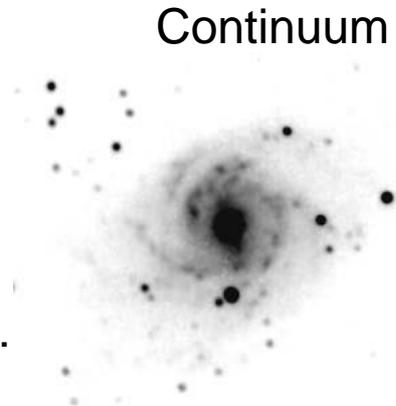
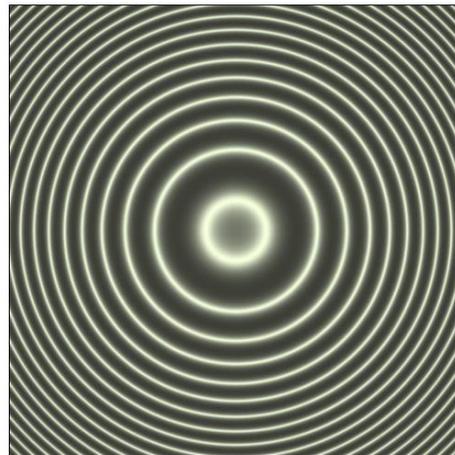
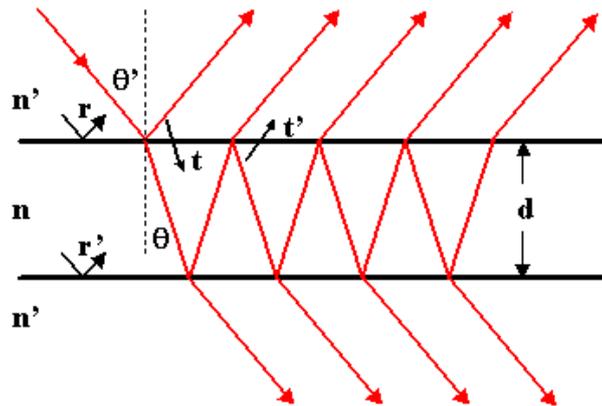
АЗТ-5 Южная станция МГУ



Эталон Фабри-Перо



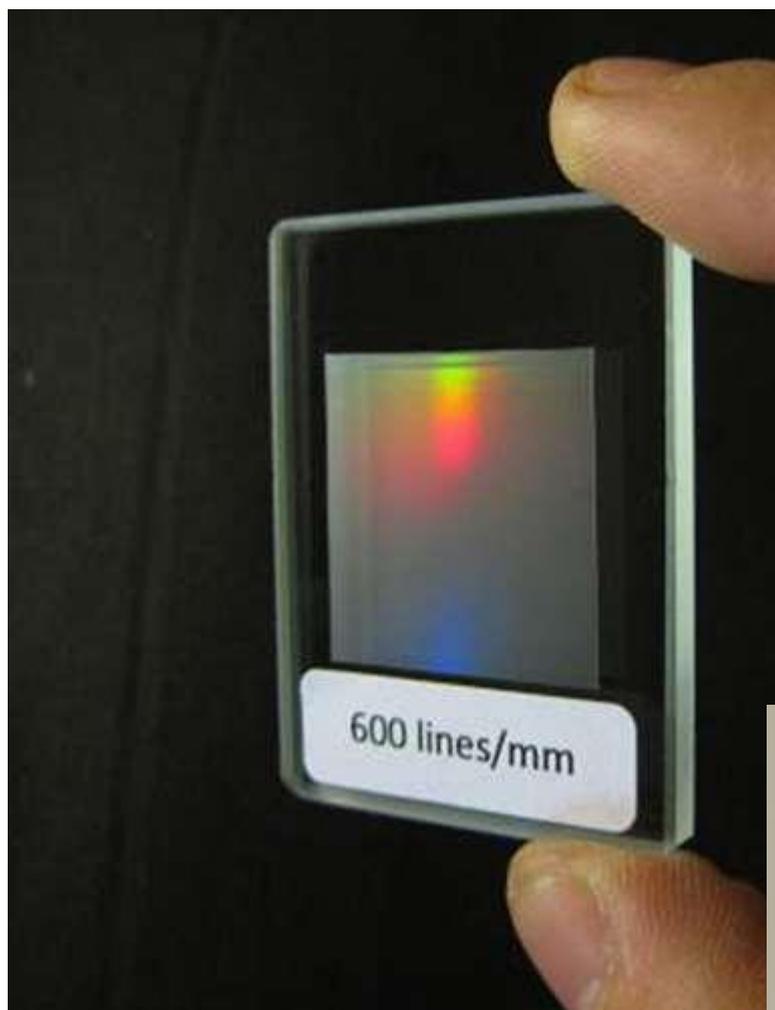
- Каждое кольцо соответствует одной длине волны. Положение колец зависит от расстояния d .



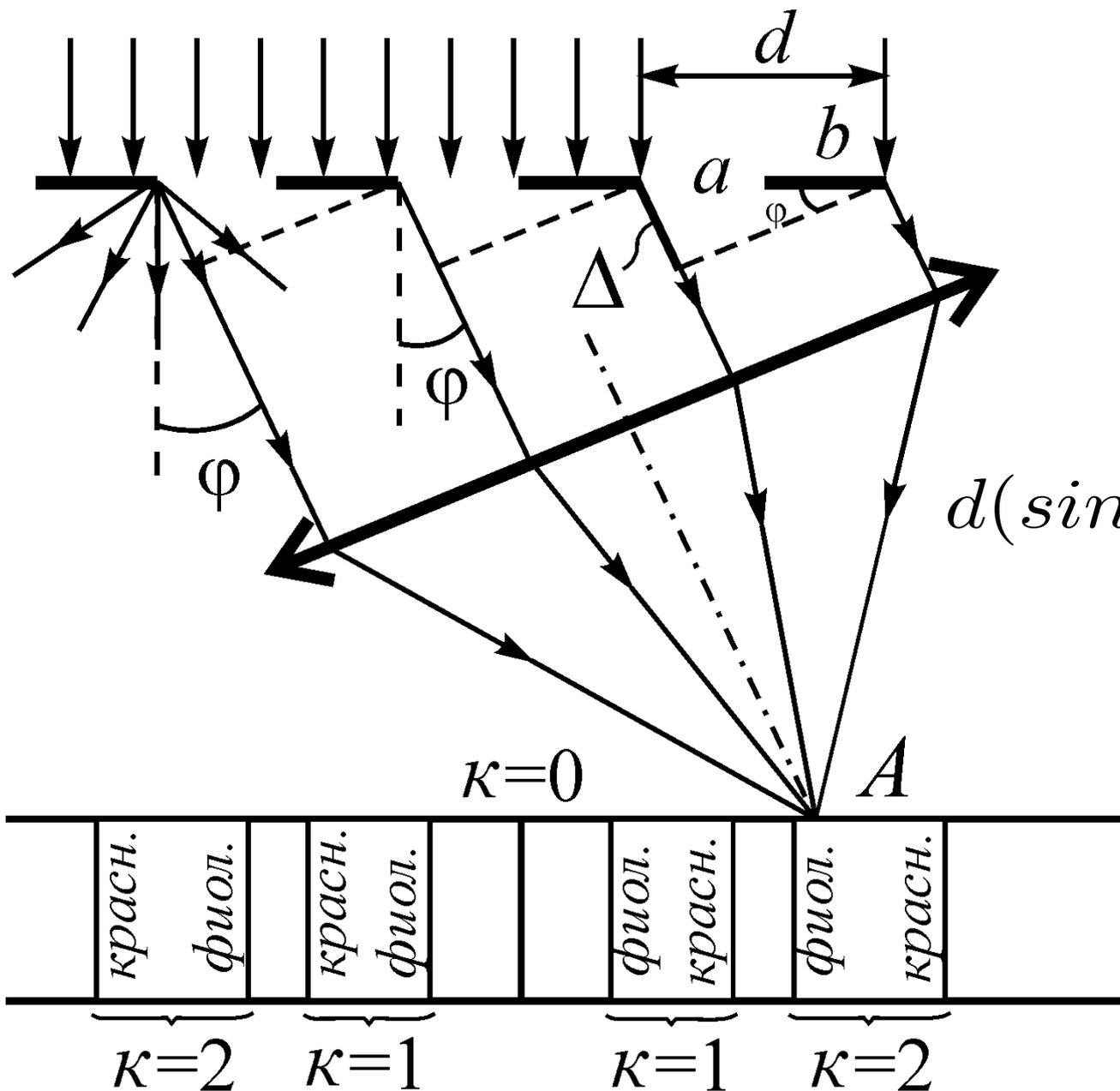
Поле скоростей

H α

Дифракционная решетка



Дифракционная решетка



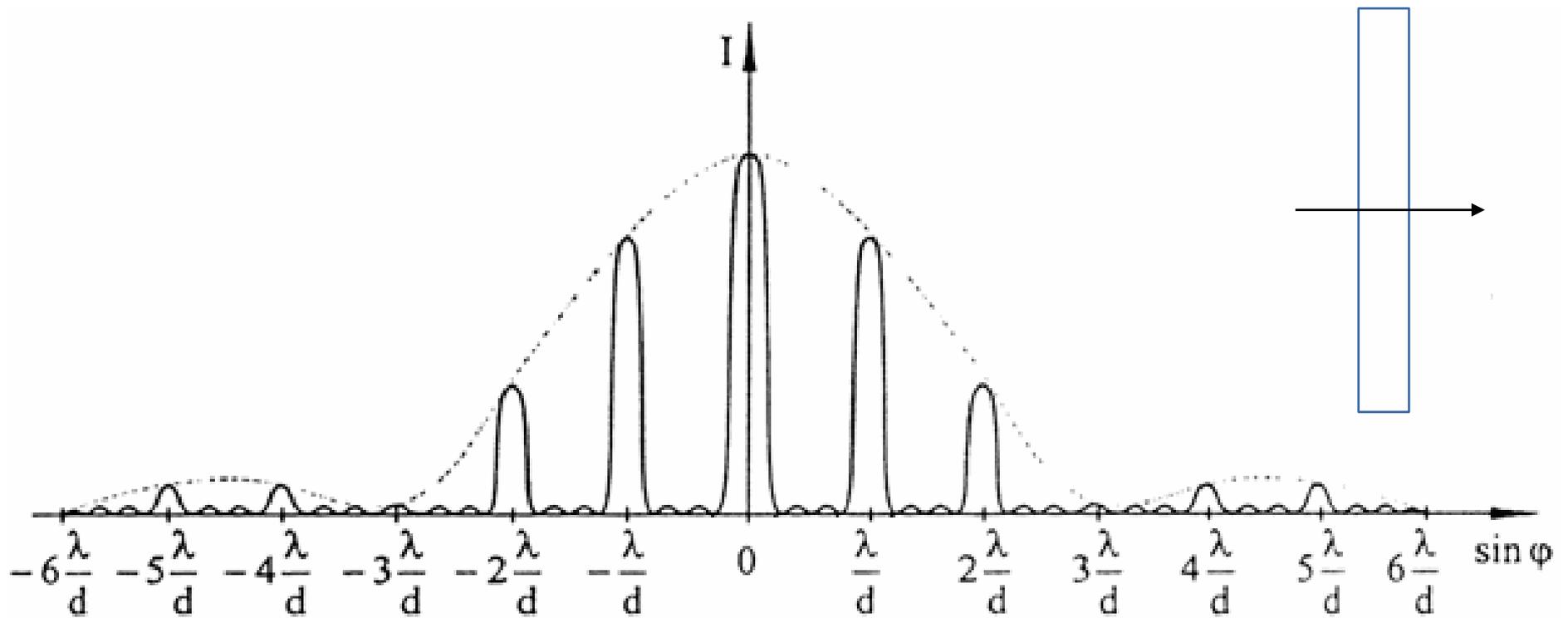
$$d = \frac{L}{N}$$

$$d \sin \phi = k \lambda$$

$$d(\sin \phi + \sin \psi) = k \lambda$$

- L — длина решетки
- N — количество штрихов
- d — постоянная решетки
- ϕ — угол дисперсии
- ψ — угол падения
- k — порядок спектра

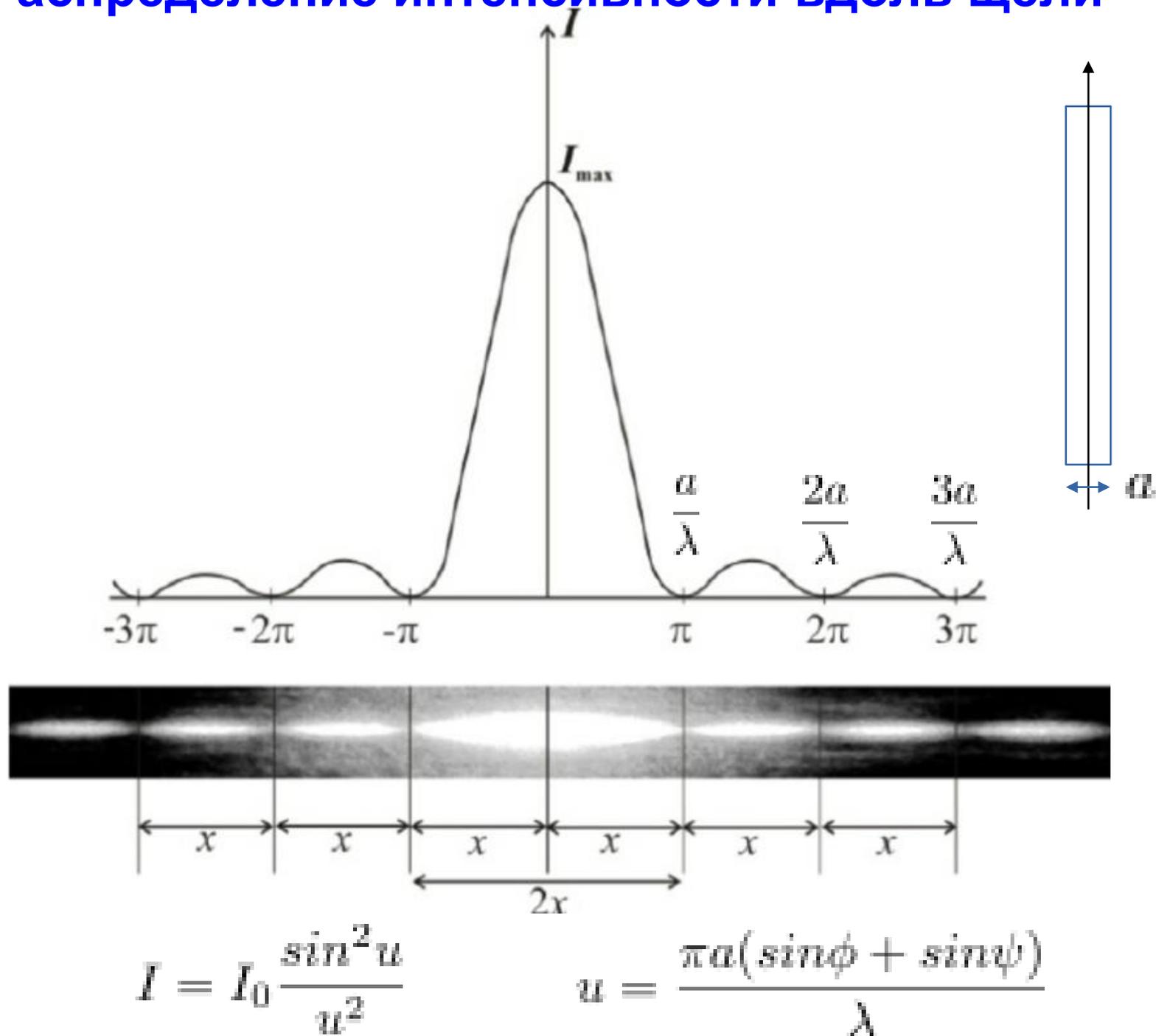
Распределение интенсивности поперек щели



$$u = \frac{\pi a(\sin\phi + \sin\psi)}{\lambda}, v = \frac{\pi d(\sin\phi + \sin\psi)}{\lambda}$$

$$I = \frac{I_0}{N^2} \frac{\sin^2 u}{u^2} \frac{\sin^2 Nv}{\sin^2 v}$$

Распределение интенсивности вдоль щели



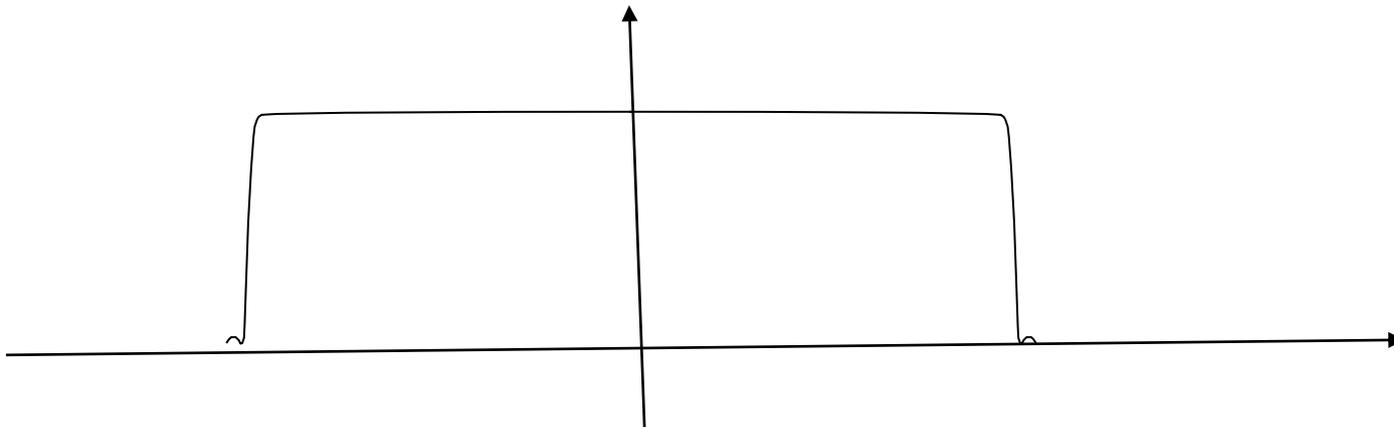
Распределение интенсивности вдоль щели не совпадает с распределением реальной интенсивности объекта

$$I_{obs} = I_{obj} \otimes I_{slit}$$



Длинная щель: высота $b \gg$ ширина a

- Дифракция краях
- Распределение интенсивности \approx реальному распределению



Угловая дисперсия:

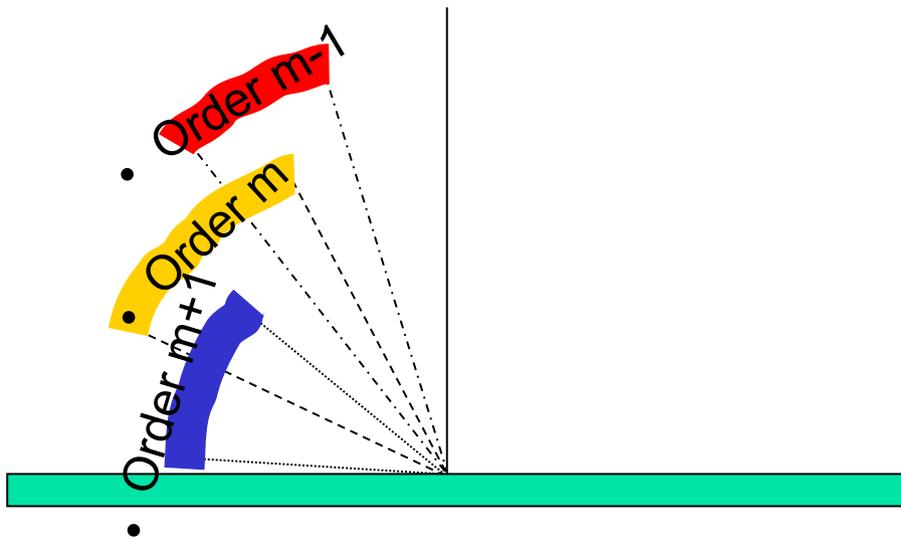
$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{k}{d\cos\phi} = \frac{kN}{L\cos\phi} \approx \text{const}$$

Дисперсия увеличивается с увеличением порядка и количества штрихов решетки

Дисперсия в одном порядке почти постоянна

Линейная дисперсия: $\frac{dx}{d\lambda} = \frac{d\phi}{d\lambda} F$

Свободный спектральный интервал между соседними порядками (ϕ ψ постоянны):



$$d \sin \phi = k_1 \lambda_1 = k_2 \lambda_2$$

$$\lambda \Delta k = k \Delta \lambda$$

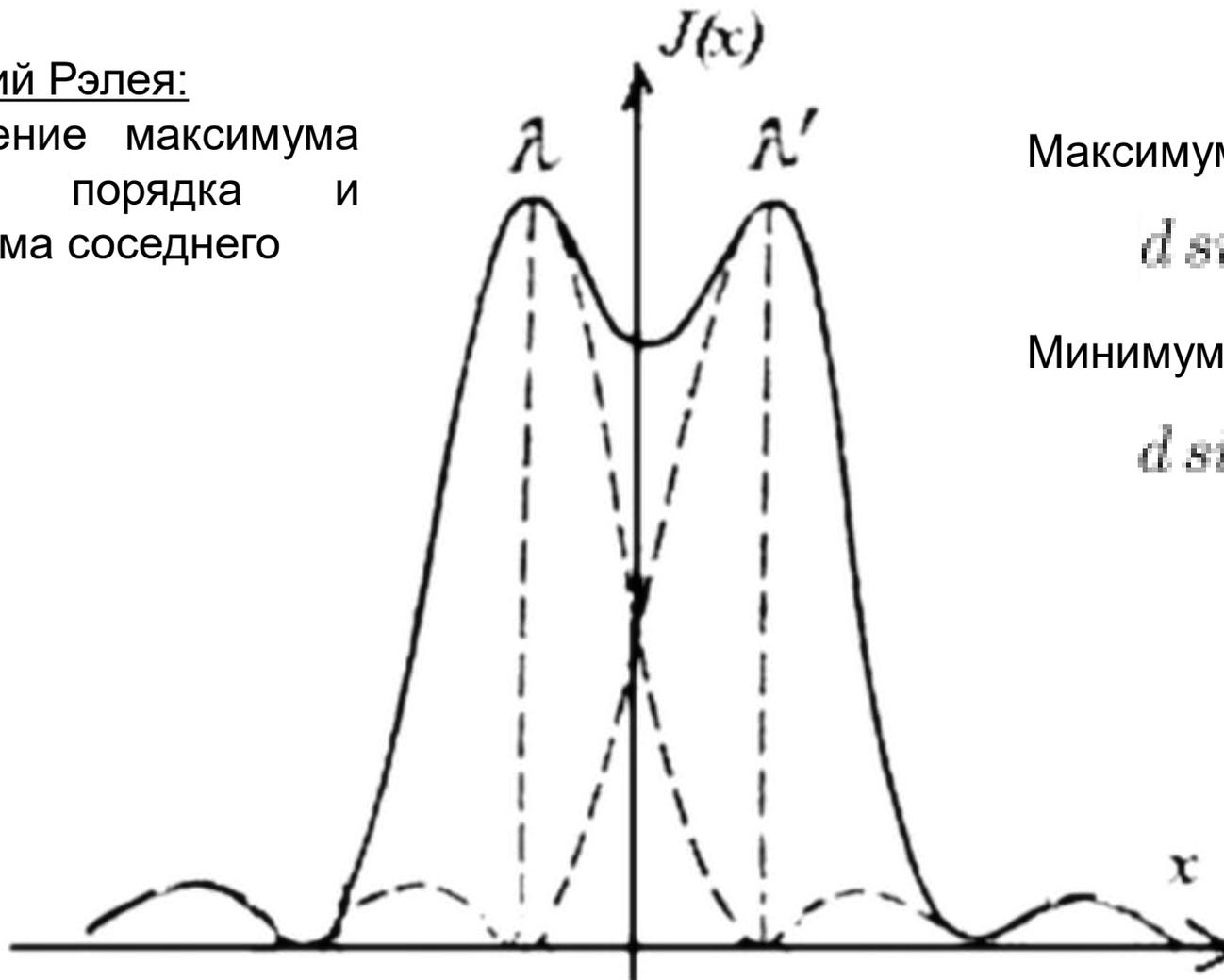
$$\Delta \lambda = \frac{\lambda}{k}$$

Разрешающая способность

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

Критерий Рэлея:

совпадение максимума одного порядка и минимума соседнего



Максимум

$$d \sin\varphi = k(\lambda + \delta\lambda)$$

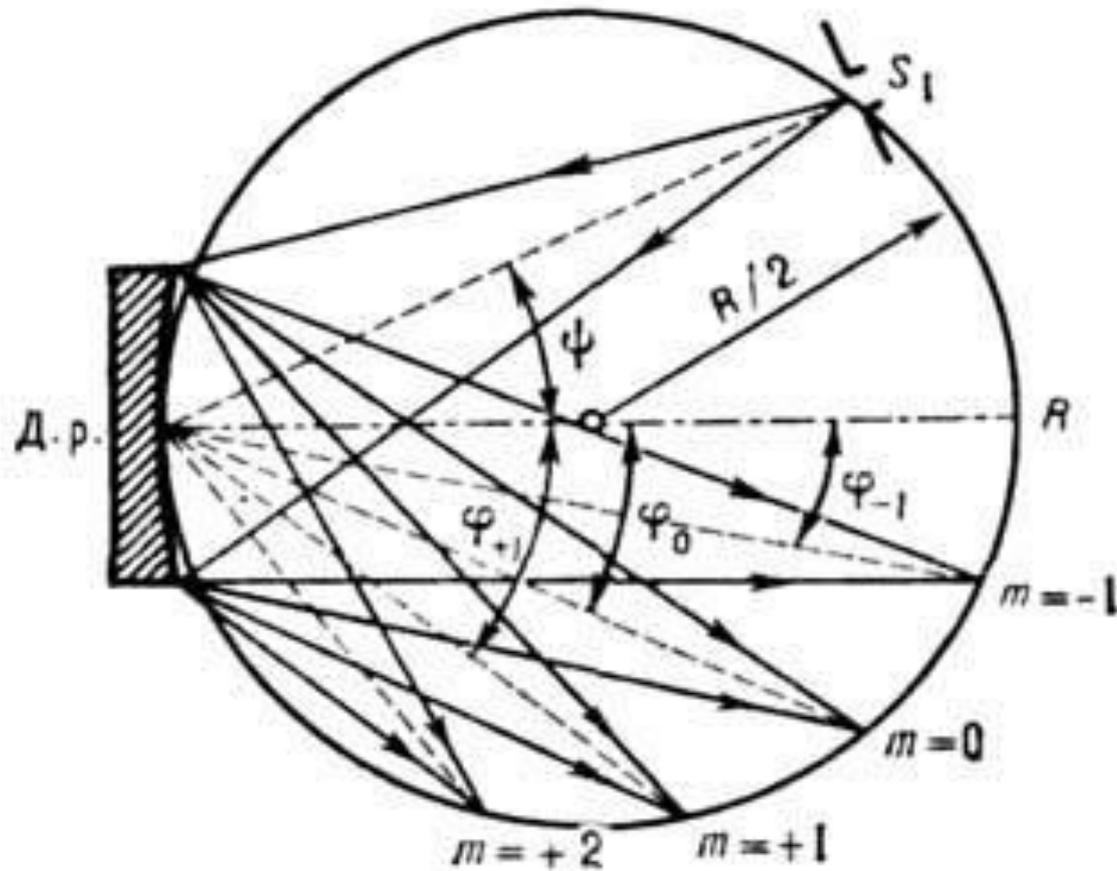
Минимум

$$d \sin\varphi = \left(k + \frac{1}{N}\right)\lambda$$

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

Разрешающая способность зависит от количества штрихов или размере решетки и порядка спектра

Вогнутая дифракционная решетка на круге Роуланда



Дифракционная решетка

+++ линейность шкалы длин волн

+++ достижимость высокого разрешения путем увеличения количества штрихов

+++ достижимость высокого разрешения путем увеличения порядка k

--- большая часть света идет в 0-ой порядок и малое количество в порядки $k > 1$

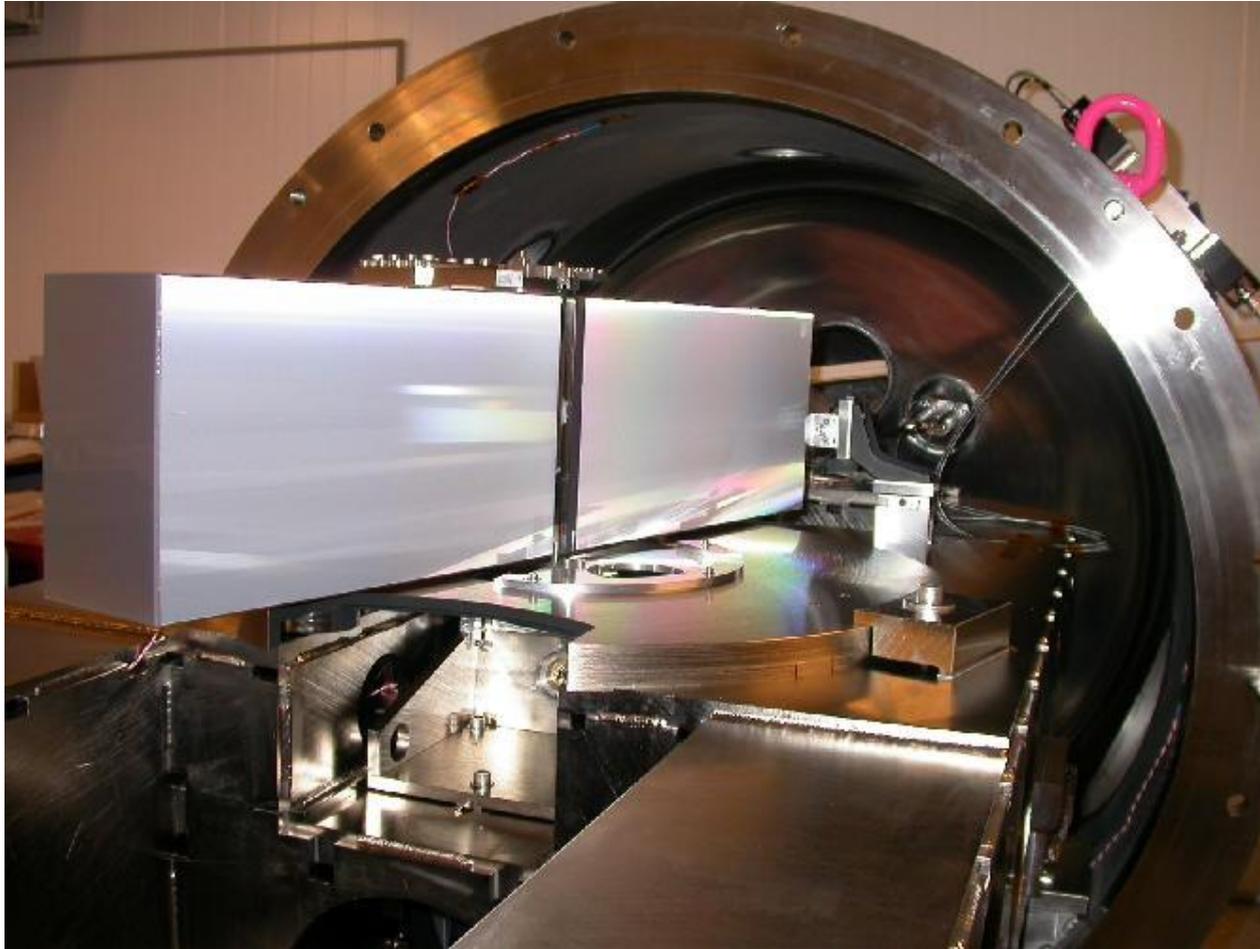
--- существование предельного порядка k

Задача:

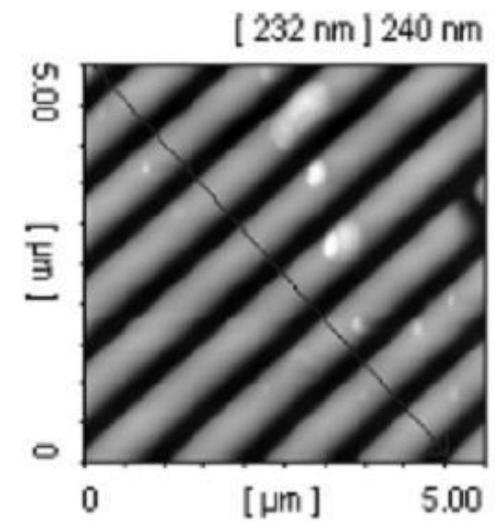
пустить максимальное количество света в высокие порядки

Решение:

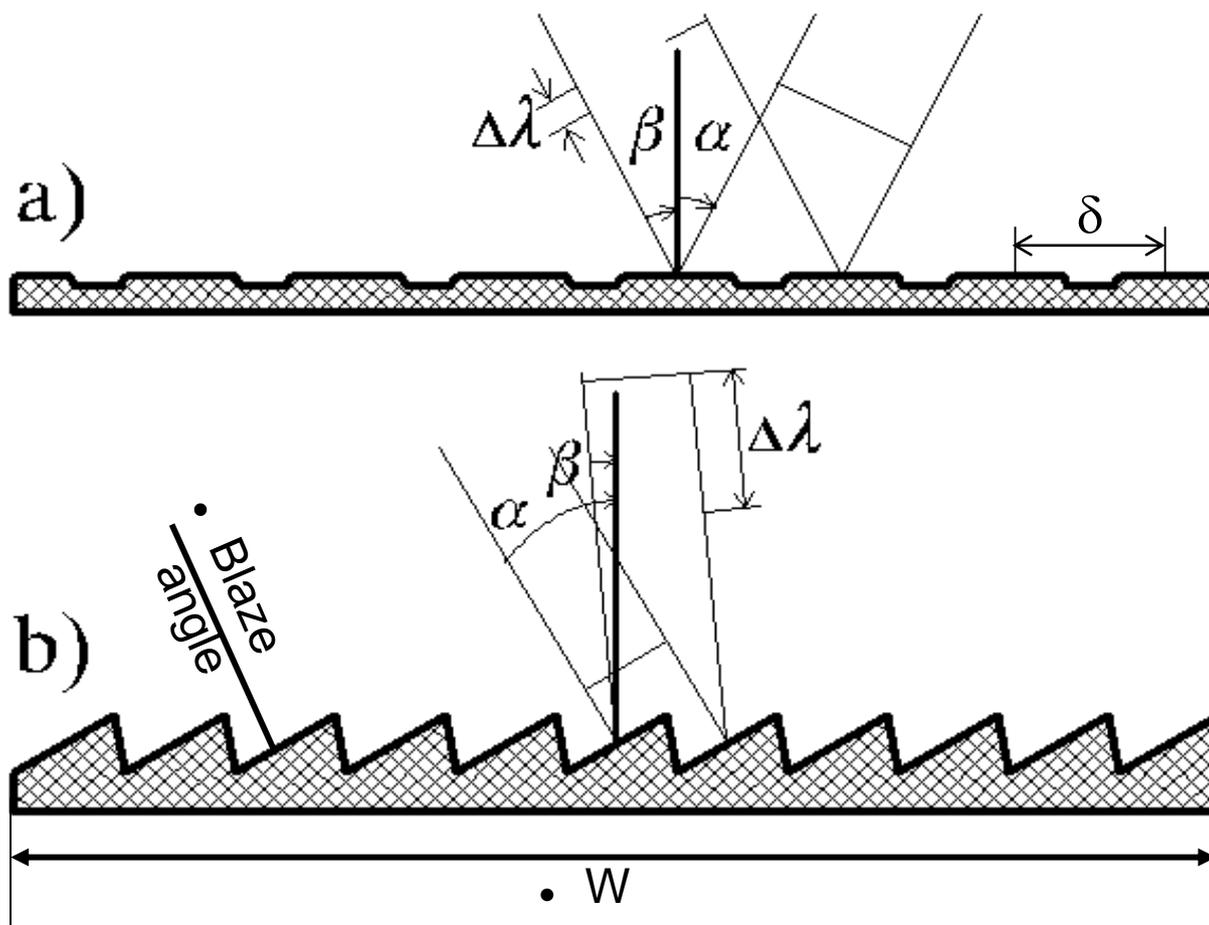
ввести дополнительную разность хода - использование отражательной дифракционной решетки с наклонным штрихом — эшелле или ступенчатая решетка



- ESO HARPS спектрограф использует две эшелле-решетки, выравненные с точностью нескольких нанометров



Отражательные решетки



Угол блеска — угол, в котором решетка обеспечивает максимальную интенсивность спектра

Схема типичного дифракционного спектрографа

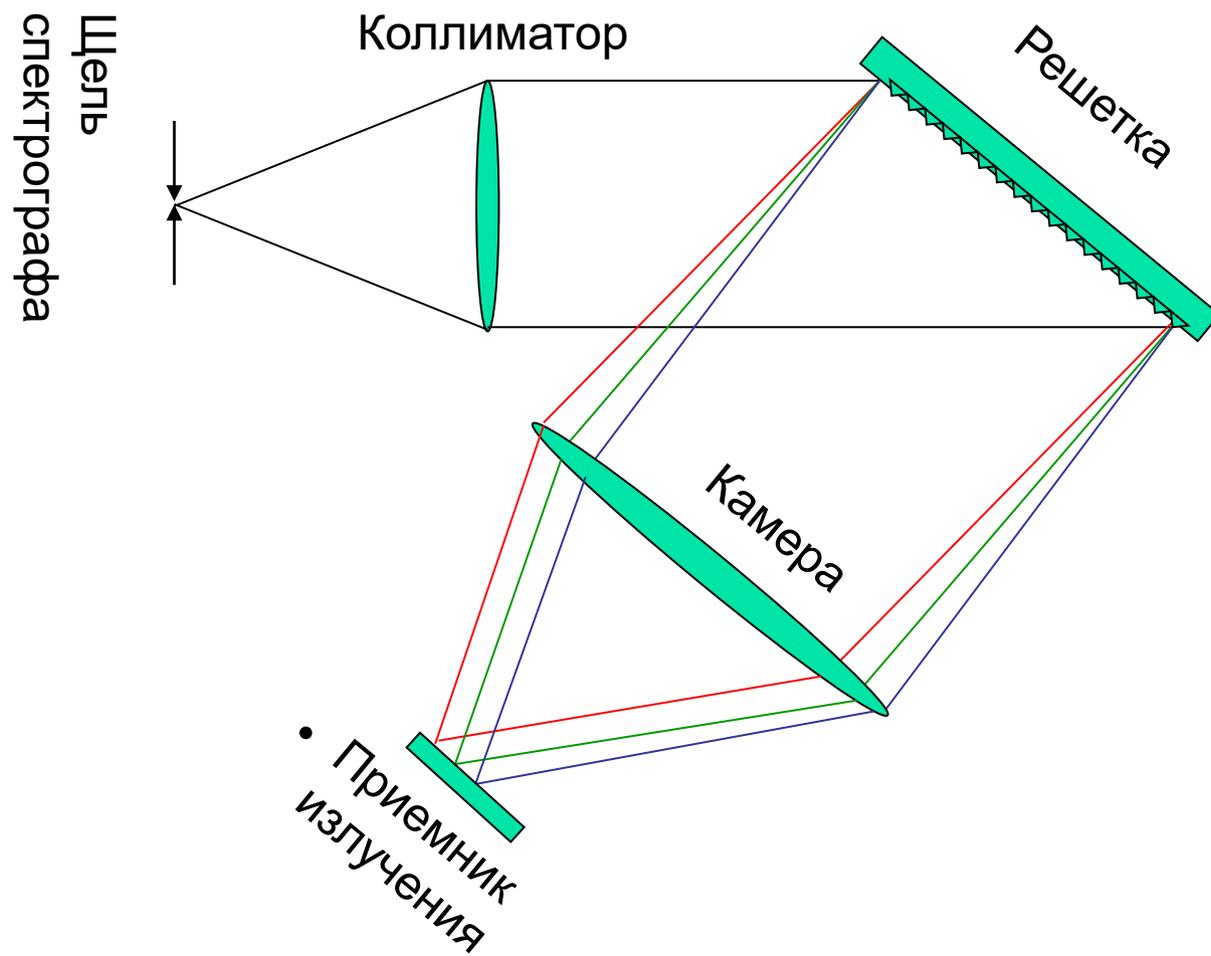
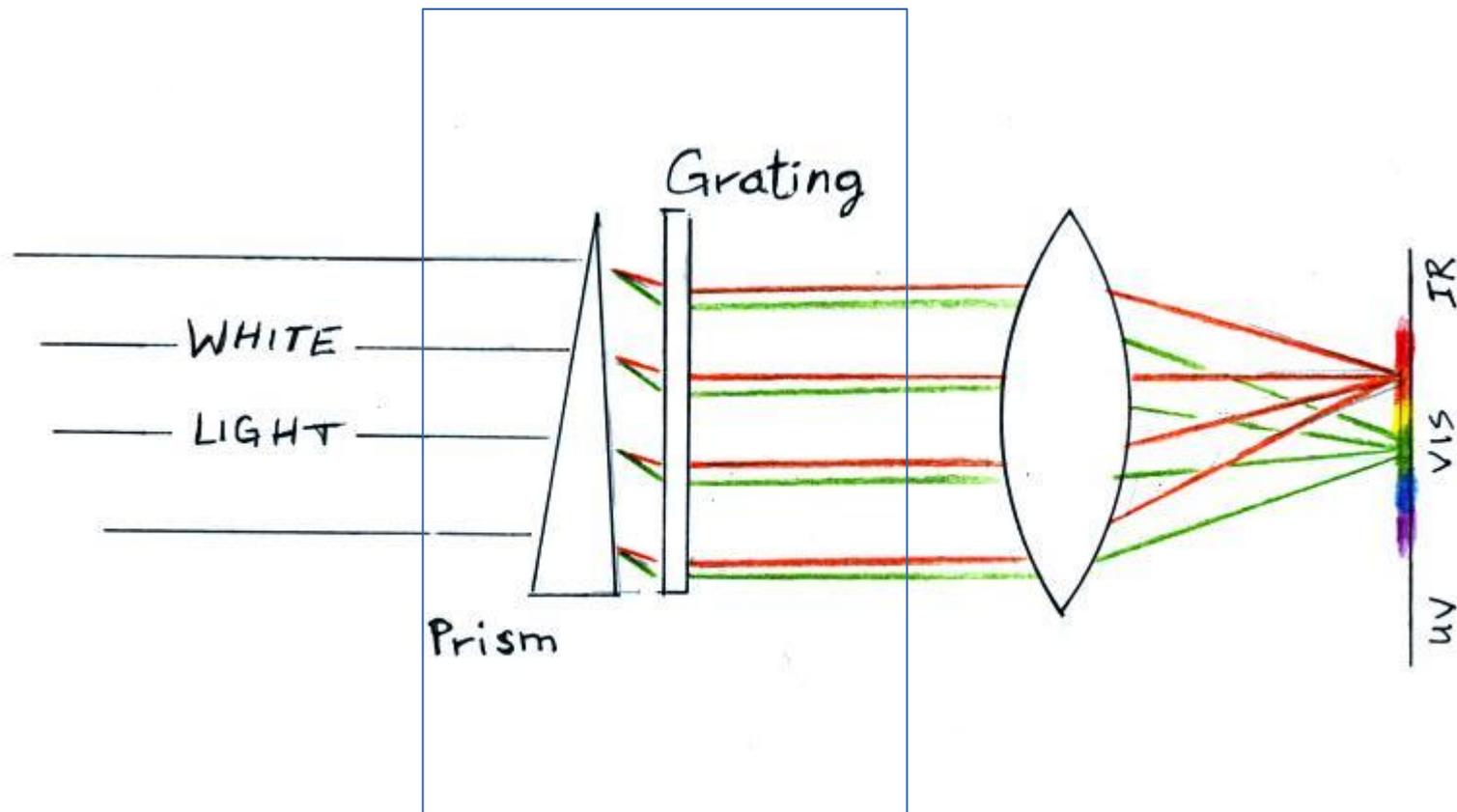


Схема прямого дифракционного спектрографа на основе гризмы



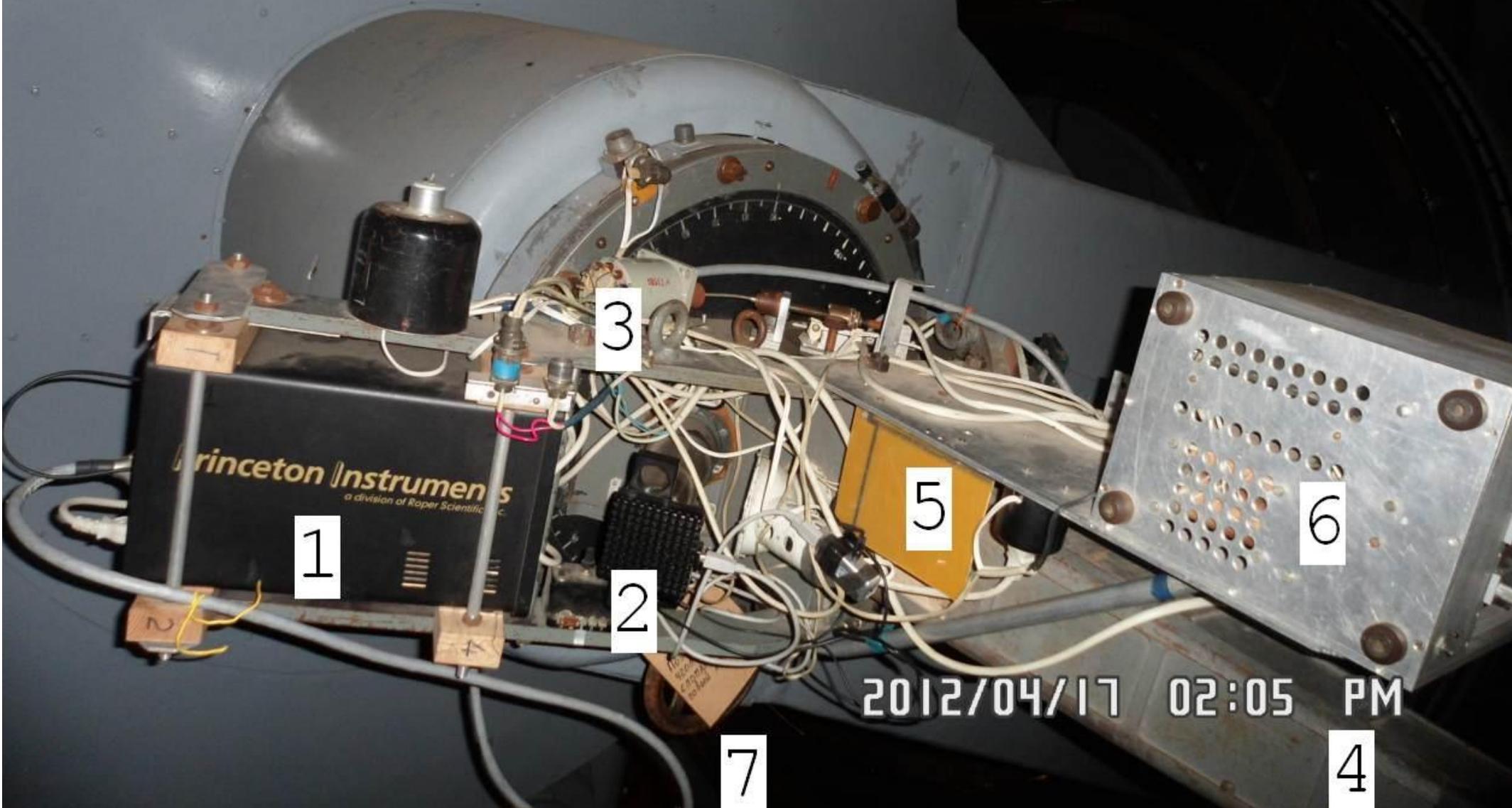
Grism = гризма



Спектрограф
1) АСП-14
2) SREM



"SPEM" spectrograph mounted in the Nasmyth focus of the 2.6-m Shajn Telescope. Digits denote: 1 - Controller of the SPEC-10 CCD camera; 2 - Meade CCD camera to view and to track targets; 3 - Unit to set title of the grating dispersion unit by stepper engine; 4 - Collimator; 5 - 12V Power supply; 6 - Unit to control the spectrograph; 7 - Wheel to change a position angle;



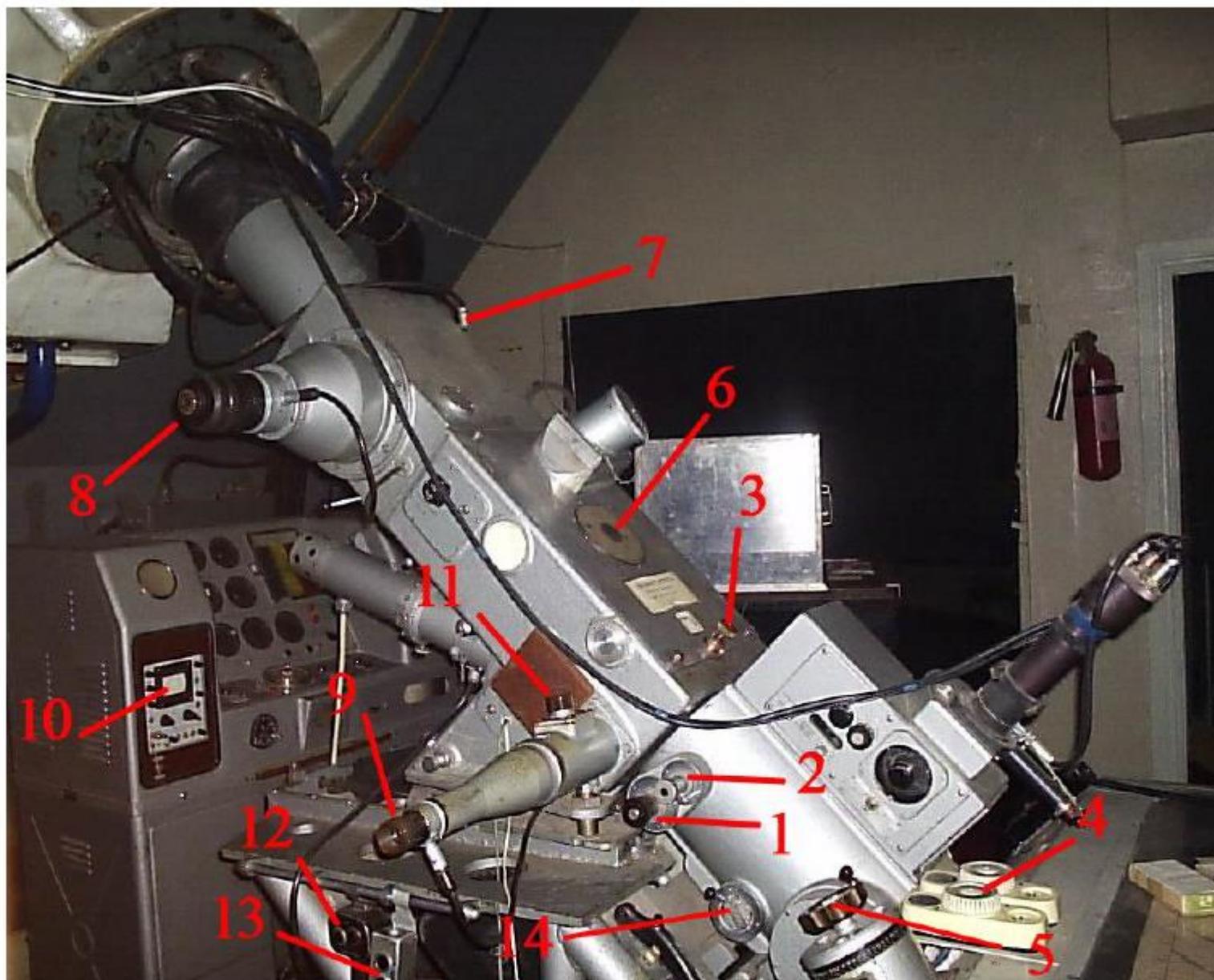
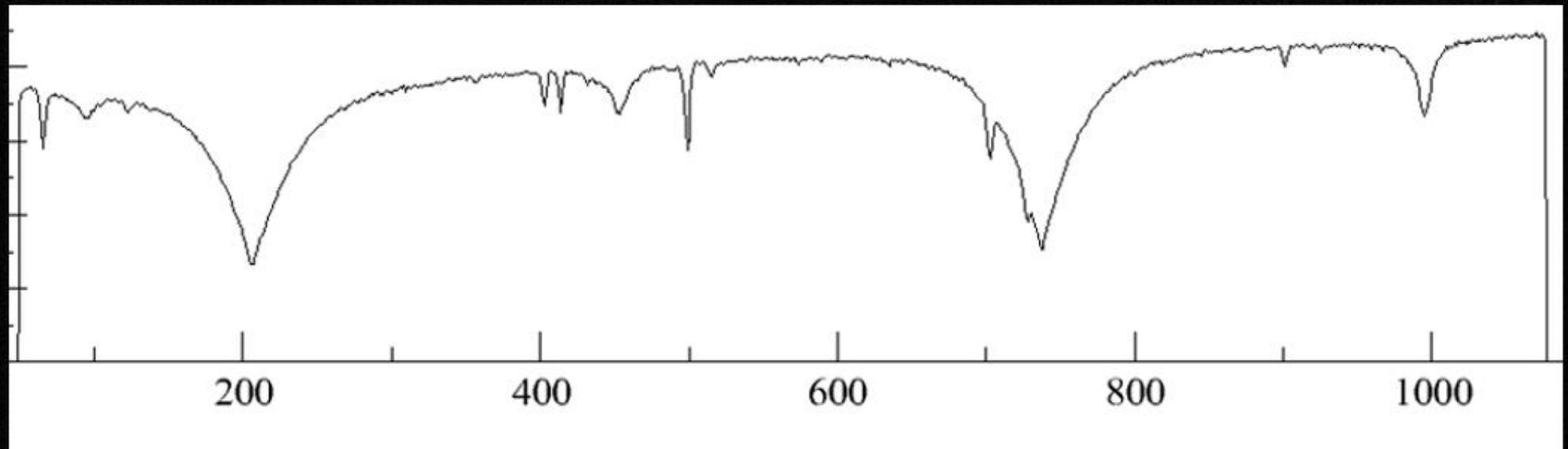
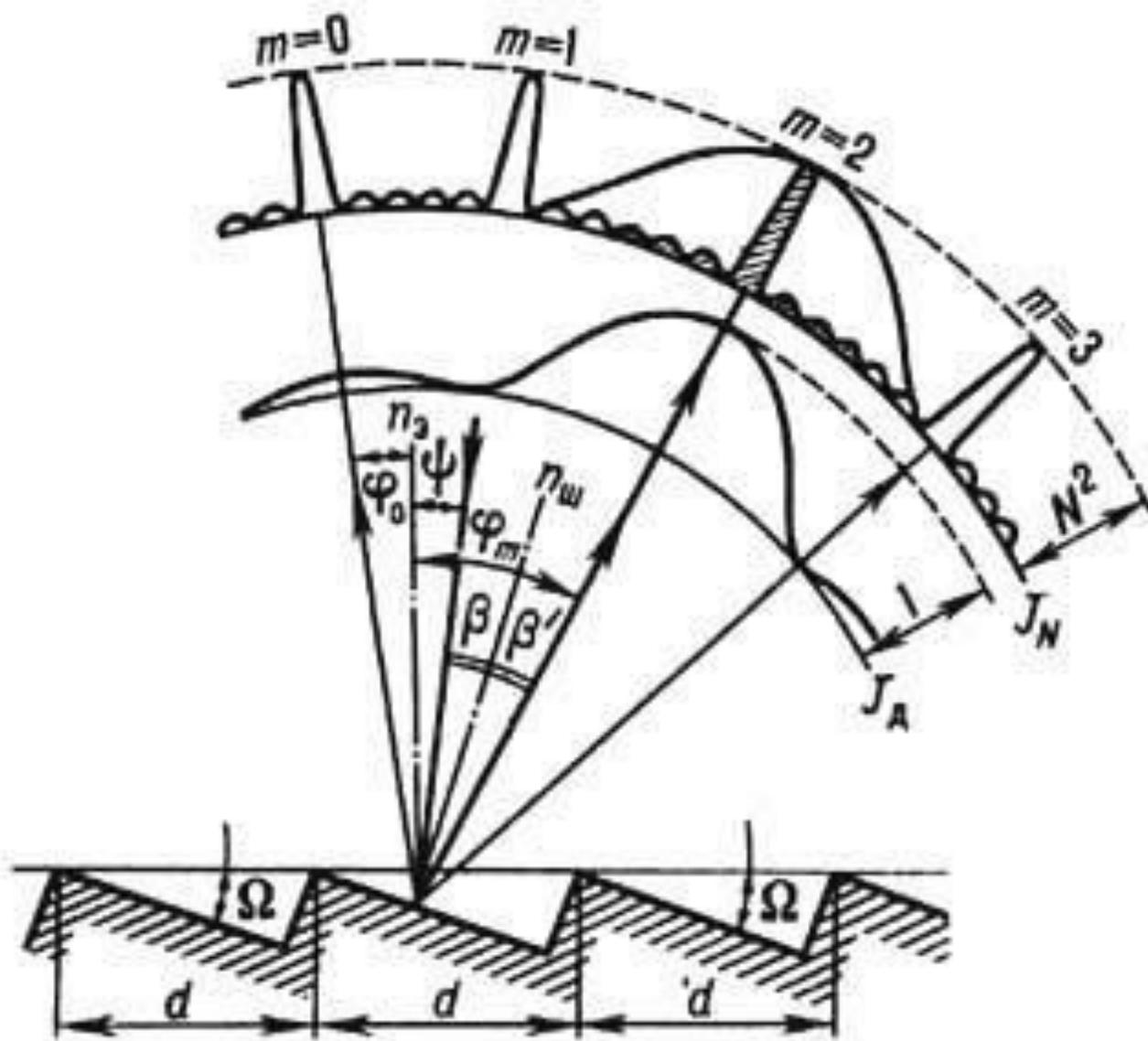


Рис. 8. 1 – ограничители спектра сравнения; 2 – щель; 3 – для снятия плоского поля необходимо повернуть ручку стрелкой на себя, стрелка вниз – звезда; 4 – включаем лампу спектра сравнения; 5 – установка угла наклона решетки; 6 – отверстие для установки стоксметра; 7 – провод связи стоксметра с блоком управления; 8 – гид; 9 – подсмотр; 10 – датчик работы фотогида; 11 – переключатель подсмотр-фотогид; 12 – пульт фокусировки; 13 – пульт управления и фокусировки; 14 – фильтры (ручка оттягивается и аккуратно переводится в нужное положение).

NTT
EMMI
spectrograph
BLMD mode



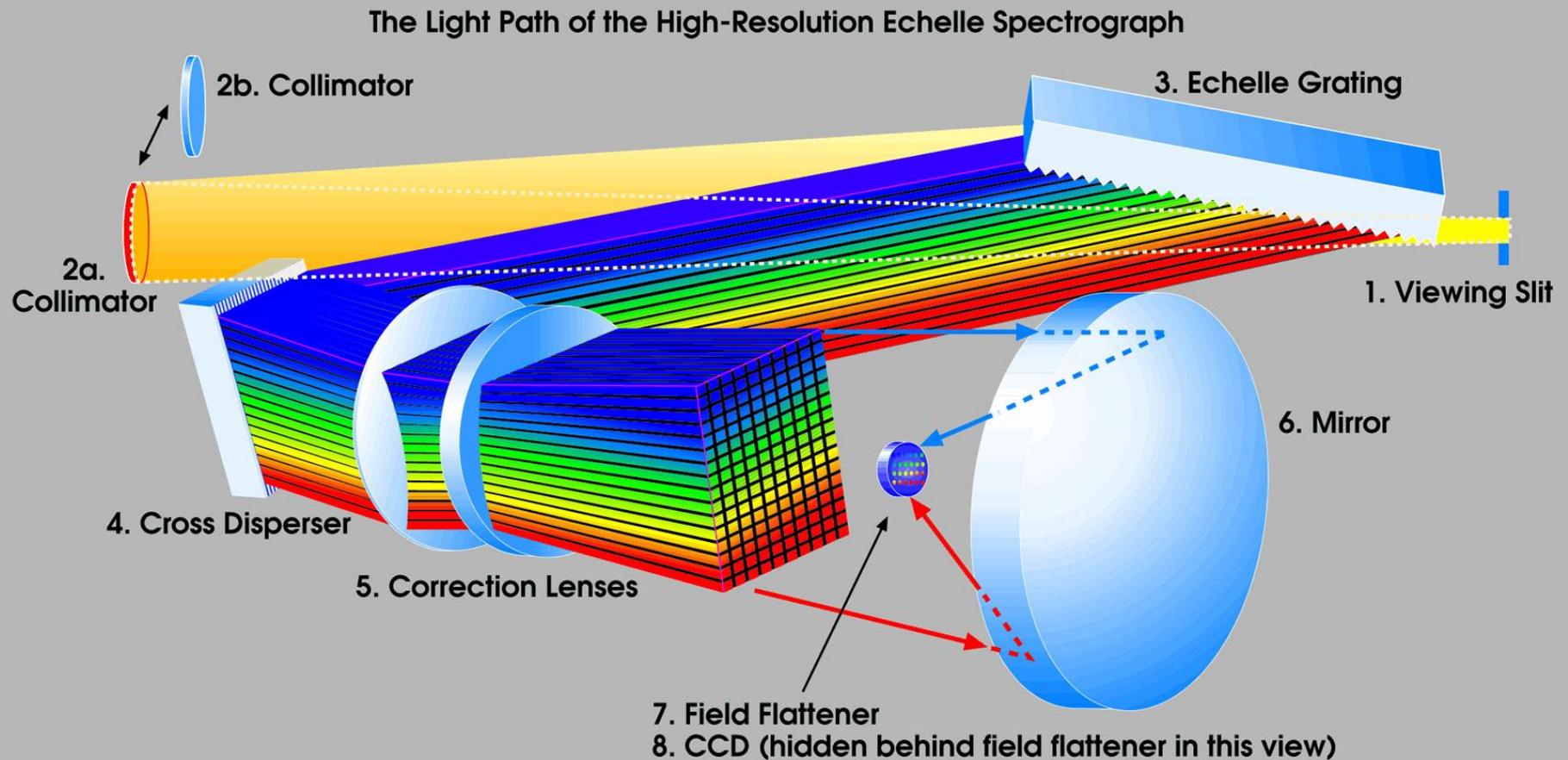


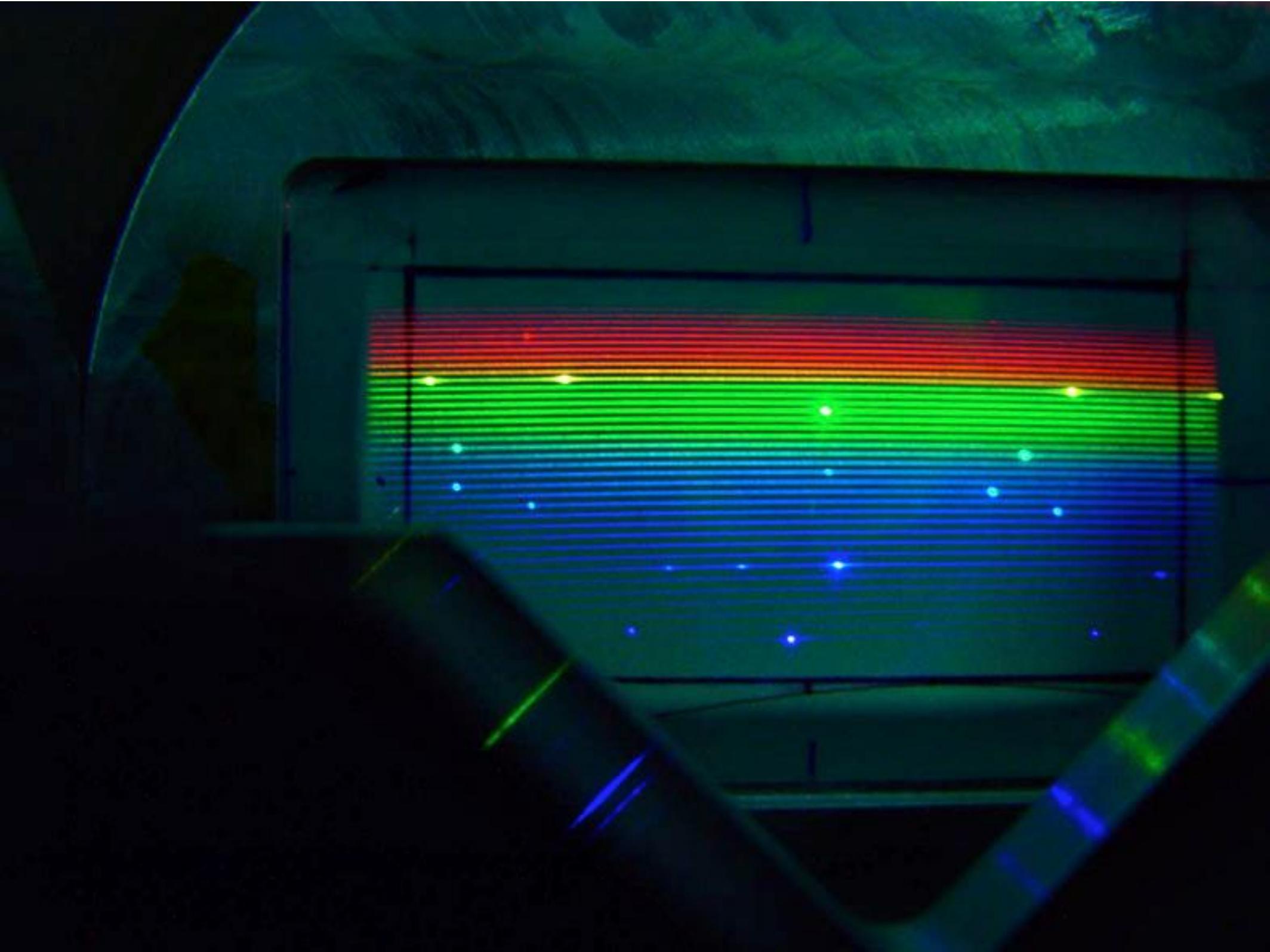
+++ использование высоких порядков = высокое разрешение

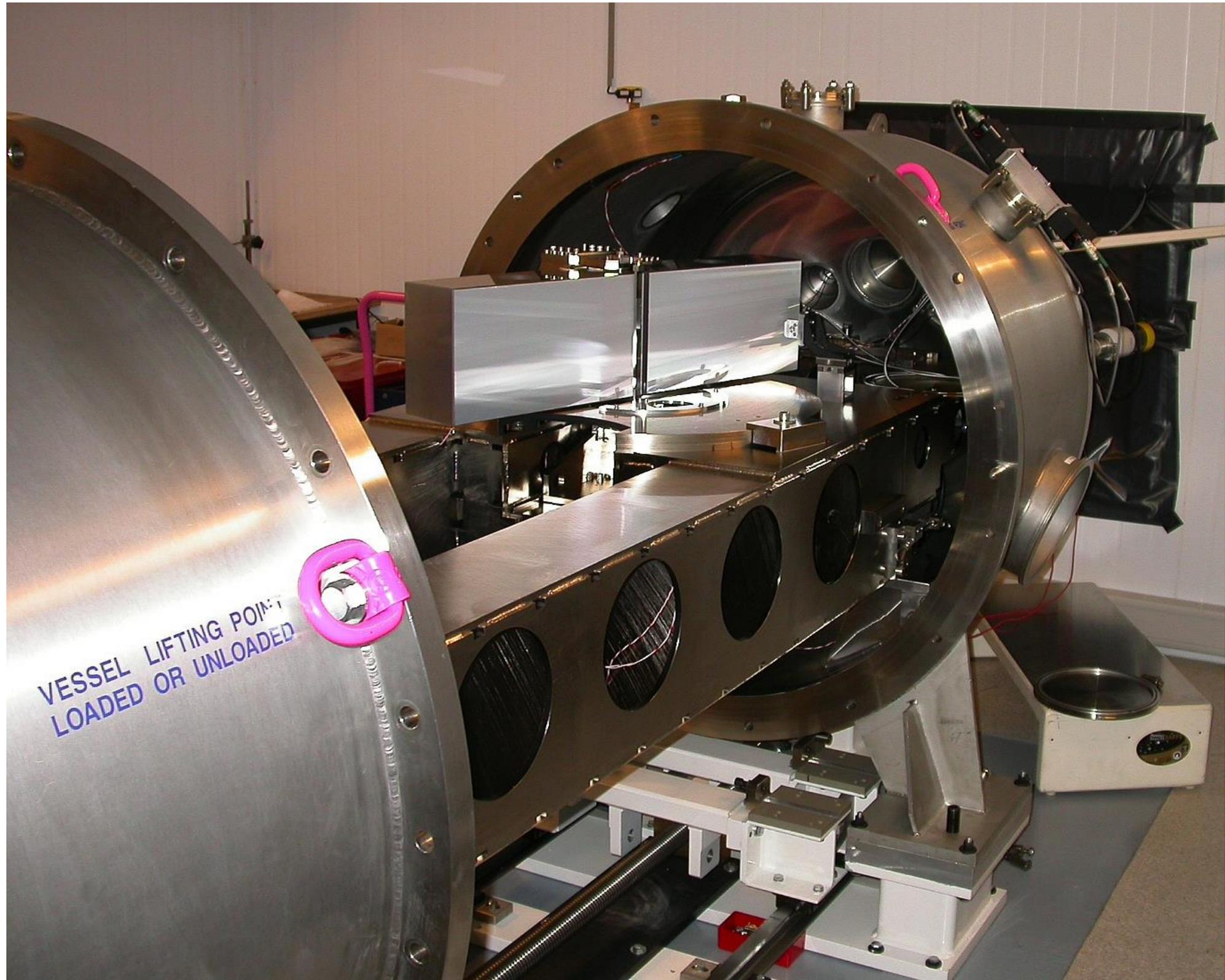
--- с повышением порядка увеличивается угол блеска и уменьшается эффективная рабочая длина решетки $L'=L\cos\Omega$ □ необходимы более длинные решетки — сложность изготовления

--- на высоких порядках уменьшается свободный спектральный интервал и соседние порядки начинают накладываться друг на друга

Системы со скрещенной дисперсией

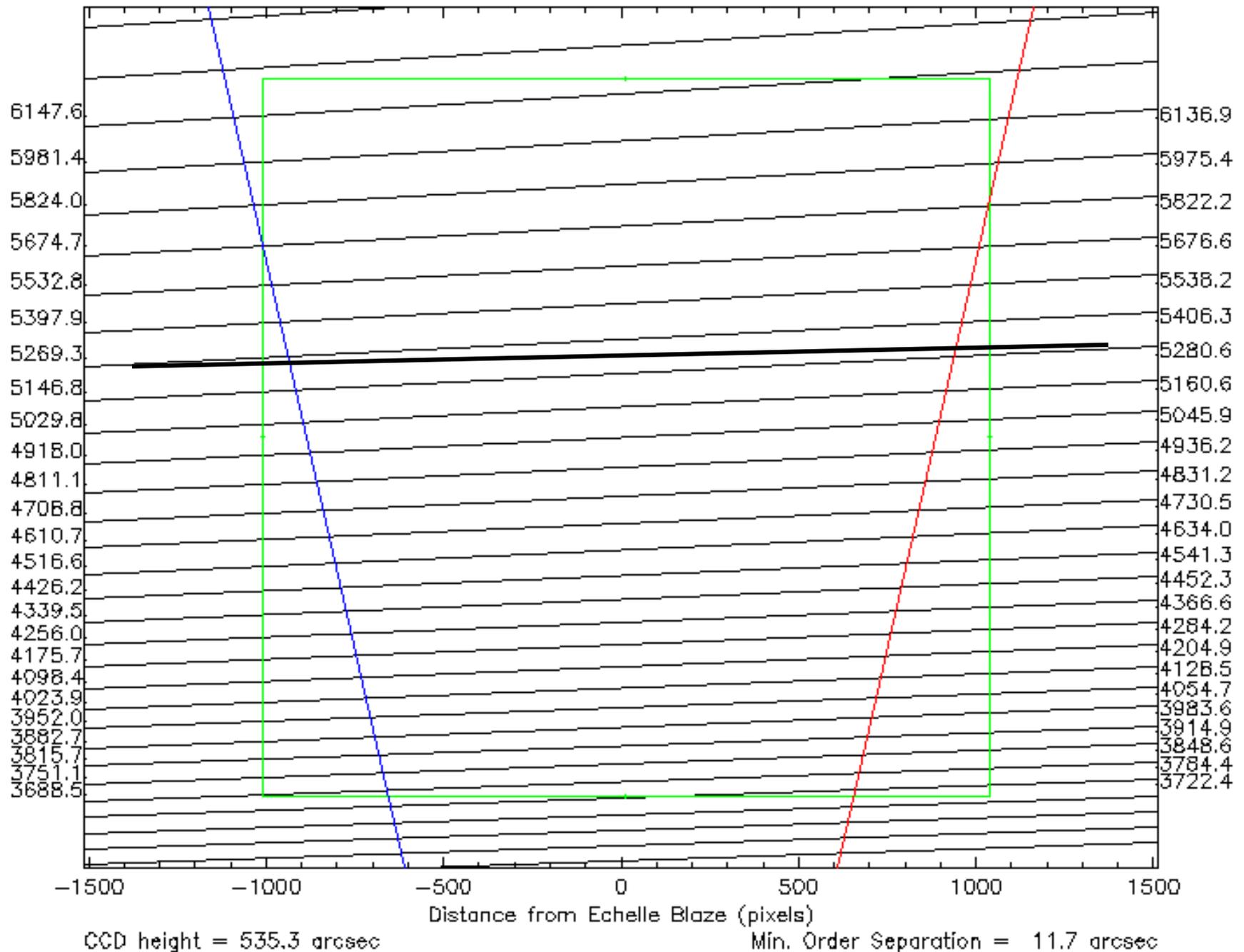






VESSEL LIFTING POINT
LOADED OR UNLOADED

LONG CAMERA, LEFT PORT, CCD format: 2048. 2048. 0.024 0.024
X-DISP: 316 l/mm, order 1 central λ =4982.0, tilt= 808.7
ECHELLE: 79.0 l/mm, central λ =4982.0 (ord 45), tilt= 565.6



Основные уравнения эшелле-спектрографа

$$d(\sin\phi + \sin\psi) = k\lambda$$

1. Для центров всех порядков $\lambda = \lambda_{\text{centre}}$, углы ϕ ψ — постоянны (в автоколлимационной решетке они равны между собой и равны углу блеска)

$$k\lambda_{\text{center}} = 2d\sin\theta_{\text{blaze}} = \text{const} = \text{постоянная эшелле}$$

2. Угловая и линейная дисперсия вдоль одного порядка практически постоянна

$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{k}{d\cos\phi} = \frac{kN}{L\cos\phi} \approx \text{const}$$

3. Отношение дисперсий двух порядков равно отношению их порядков

$$\frac{\frac{d\phi_i}{d\lambda}}{\frac{d\phi_j}{d\lambda}} = \frac{k_i}{k_j}$$

Определение номера порядка на эшелле-кадре

$$\frac{6562,7}{9} \quad k\lambda_{center} = 2d\sin\theta_{blaze}$$

$$k_1\lambda_1 = k_2\lambda_2$$

$$\frac{5889,9}{5}$$

$$\frac{5895,9}{2}$$

$$k_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \Delta k$$

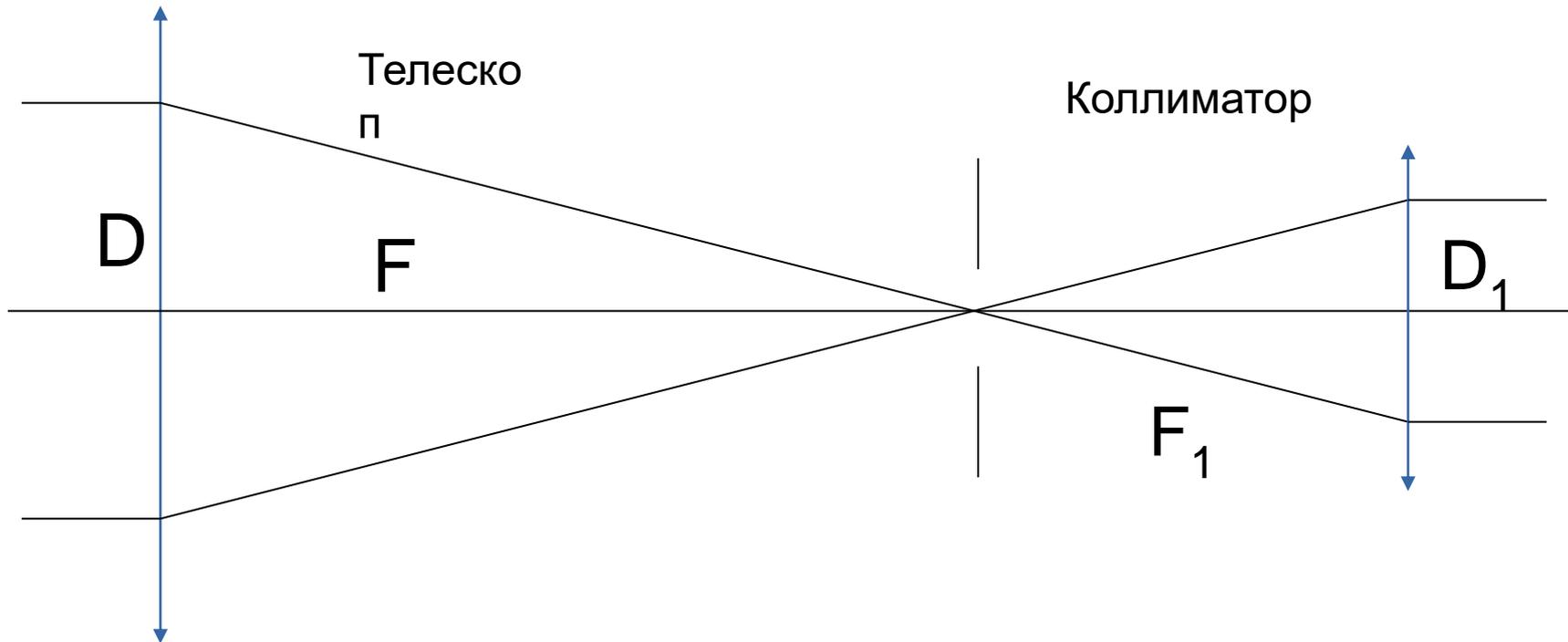
$$\lambda_2 = 6558,3 \quad \lambda_1 = 5903,0$$

$$\Delta k = 4$$

$$k_2 = 36 \quad k_1 = 40$$

$$k\lambda = 236100$$

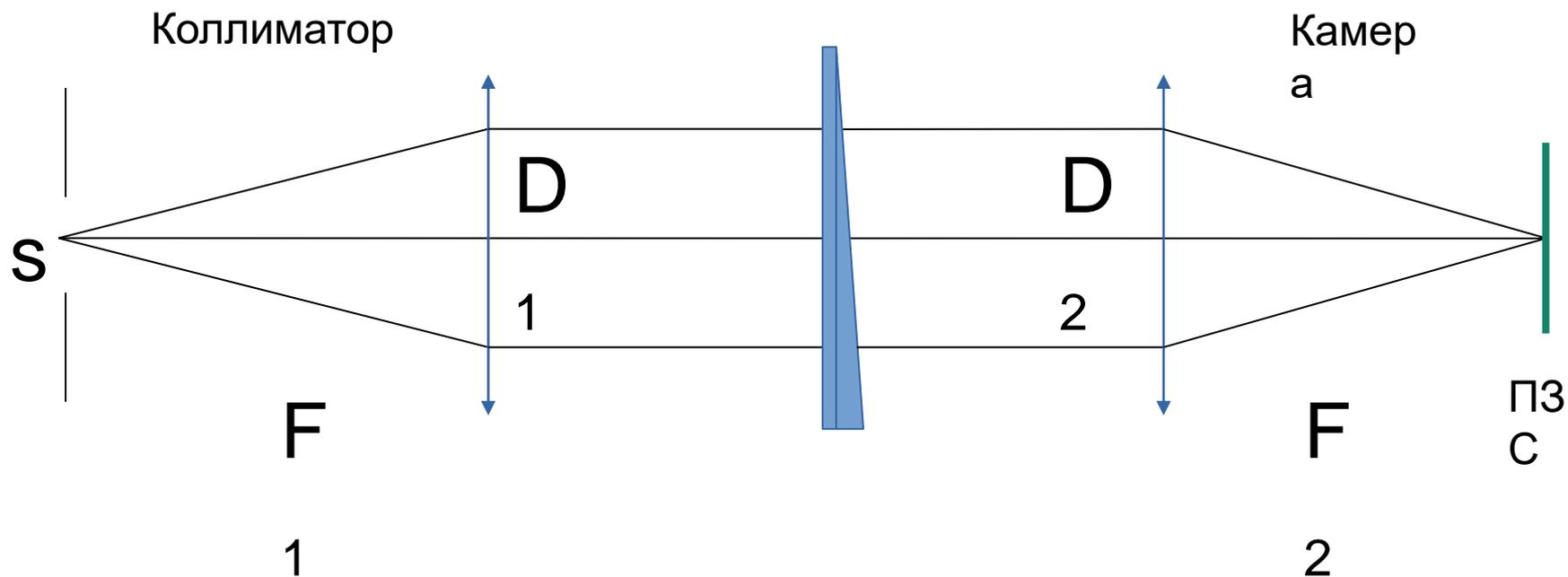
Согласование оптики телескопа и коллиматора



$$\frac{F}{D} = \frac{F_1}{D_1}$$

В коллиматор попадает весь свет от телескопа и отсекается рассеянный

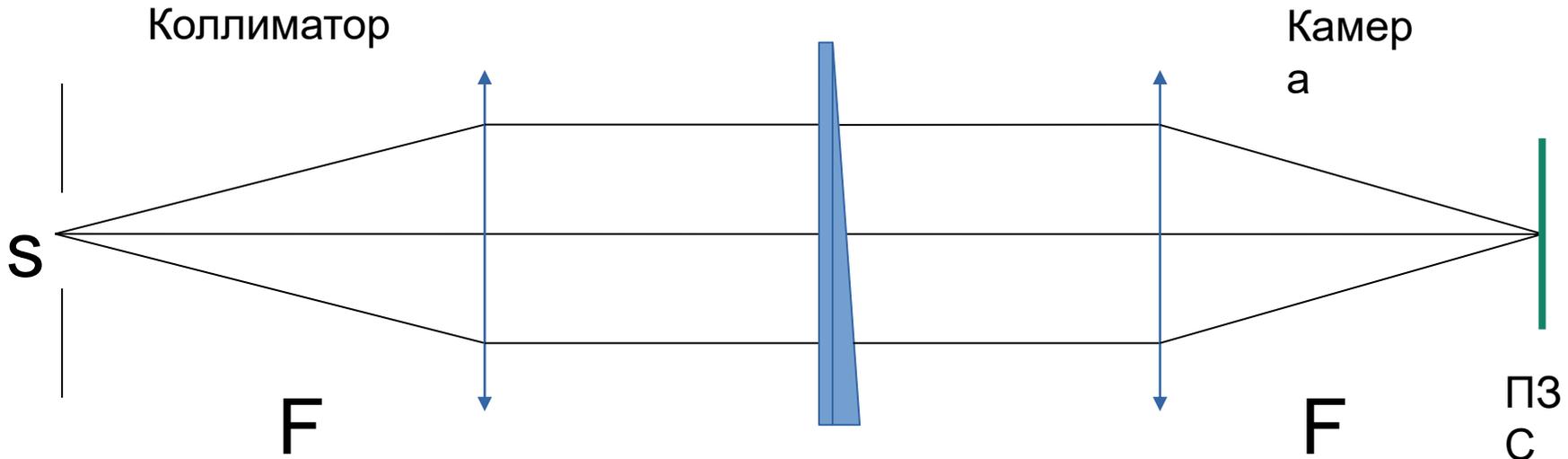
Согласование коллиматора и камеры



Апертура (диаметр светового пучка) сохраняется

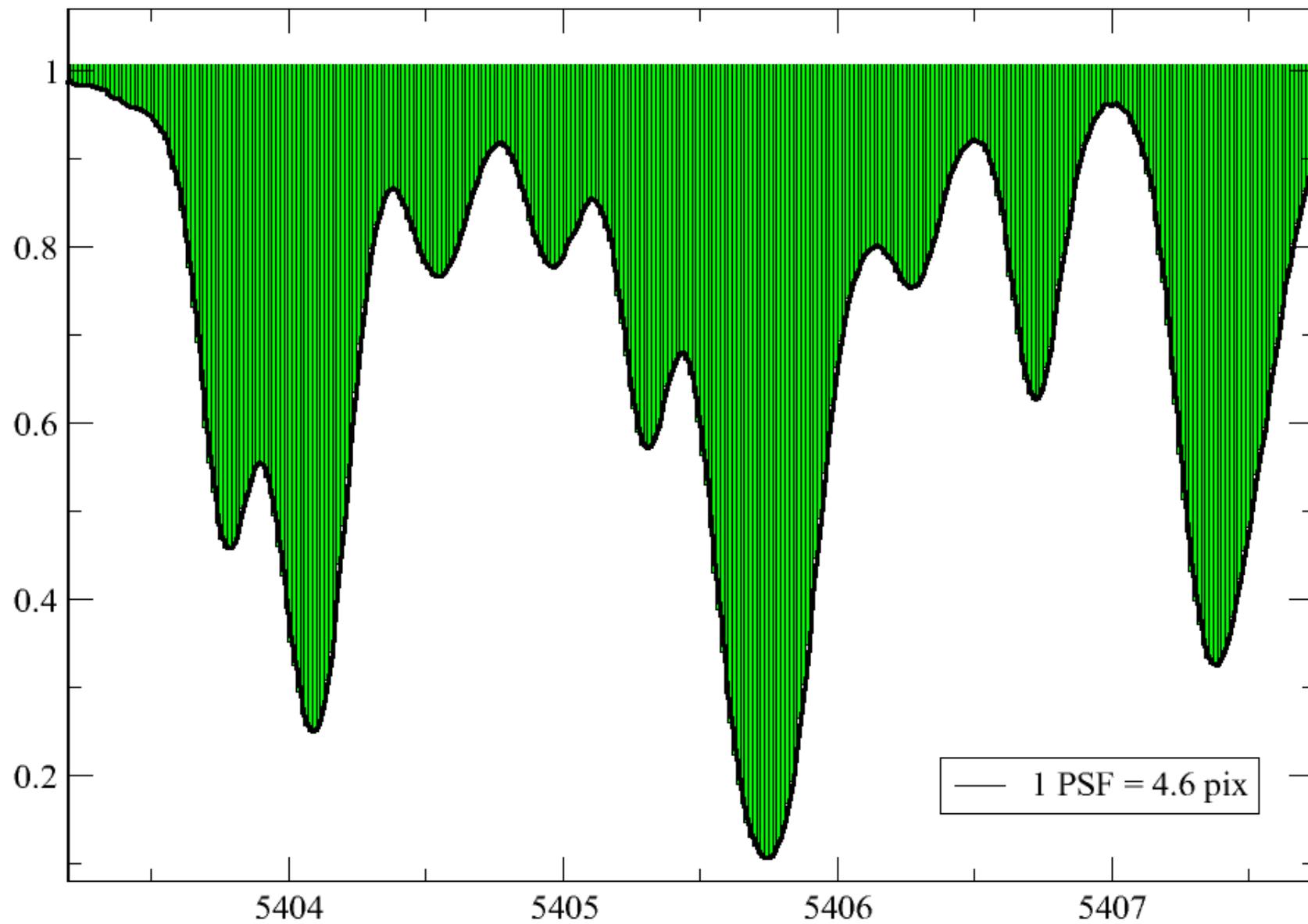
$$D_1 = D_2$$

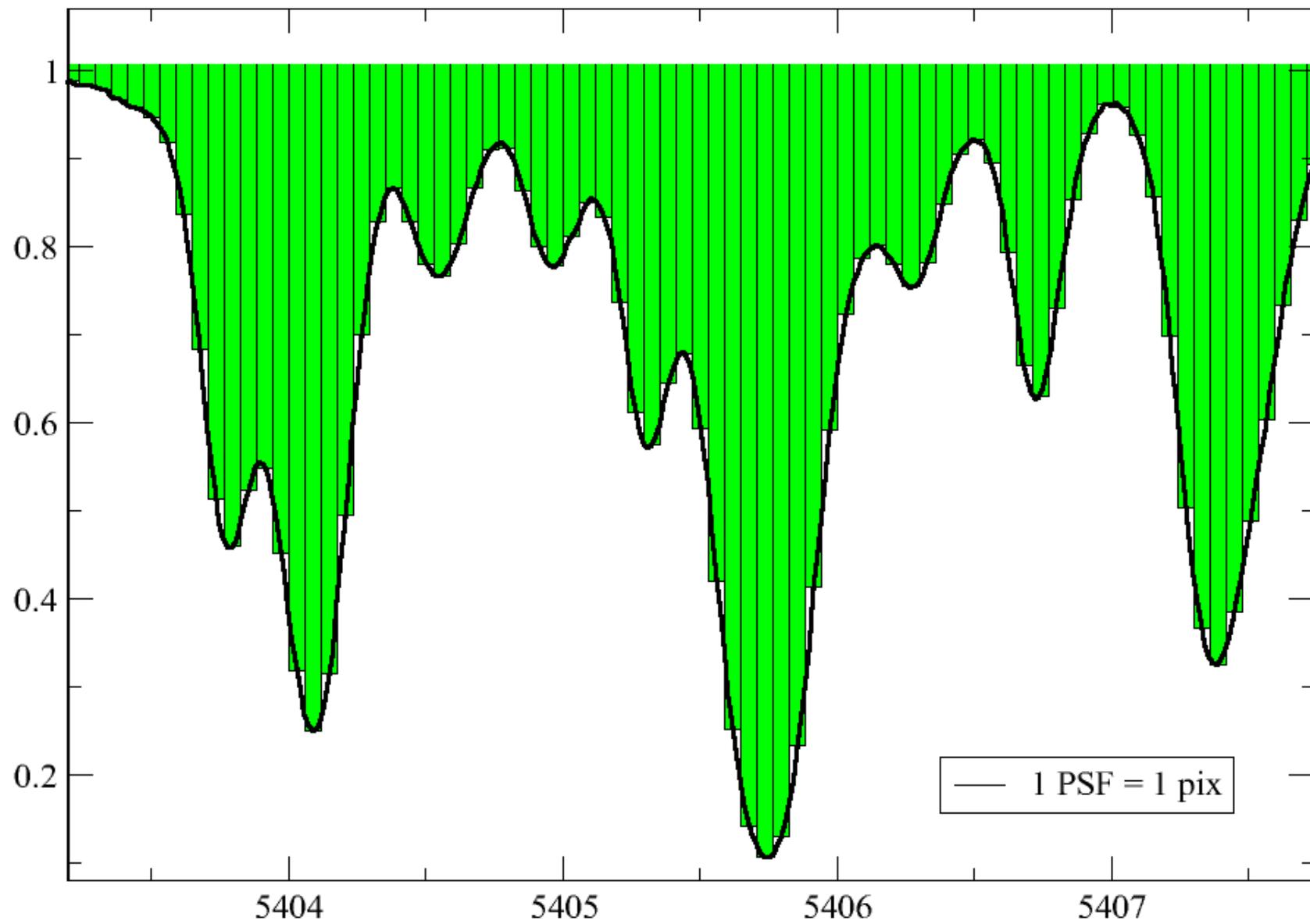
Согласование камеры спектрографа и ПЗС

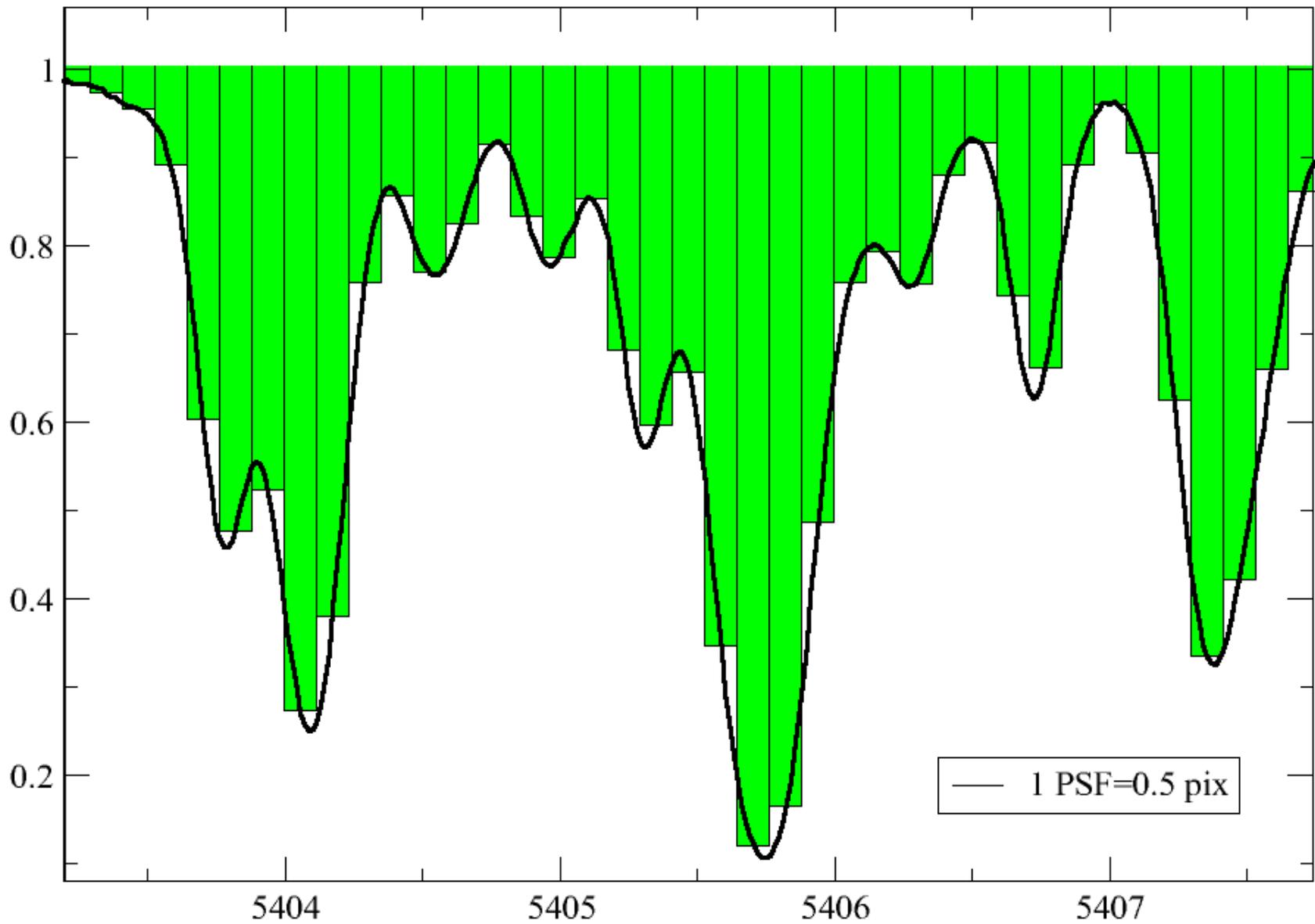


Линейный размер¹ щели в фокусе приемника должен² превосходить размеры пикселя ПЗС

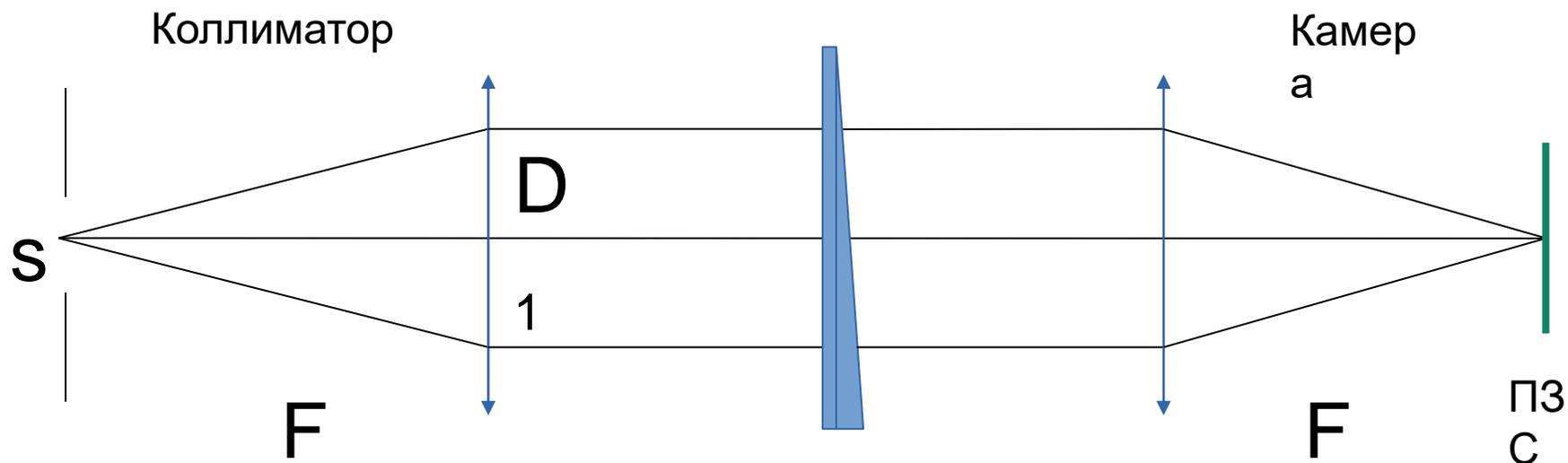
$$s' = \frac{s}{F_1} F_2 \geq 3 \text{ pixel}$$







Согласование размера щели и разрешающей способности



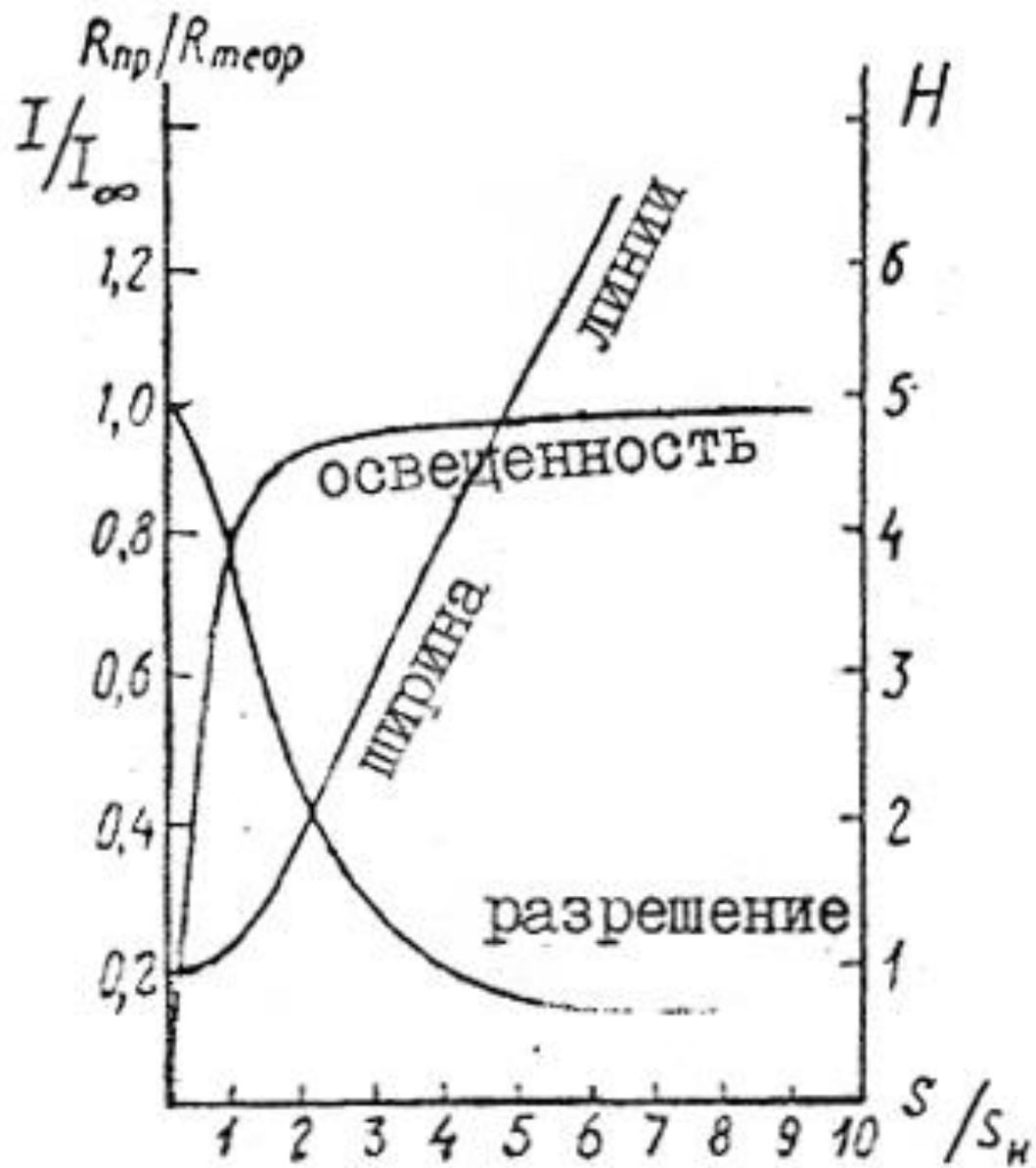
1
Размер нормальной щели не должен быть меньше дифракционного изображения

$$s \geq \frac{\lambda}{D_1} F_1$$

Угловой размер щели должен соответствовать ширине дифракционного максимума

$$\frac{s}{F_1} = \Delta\phi = \frac{\lambda}{N d \cos\phi}$$

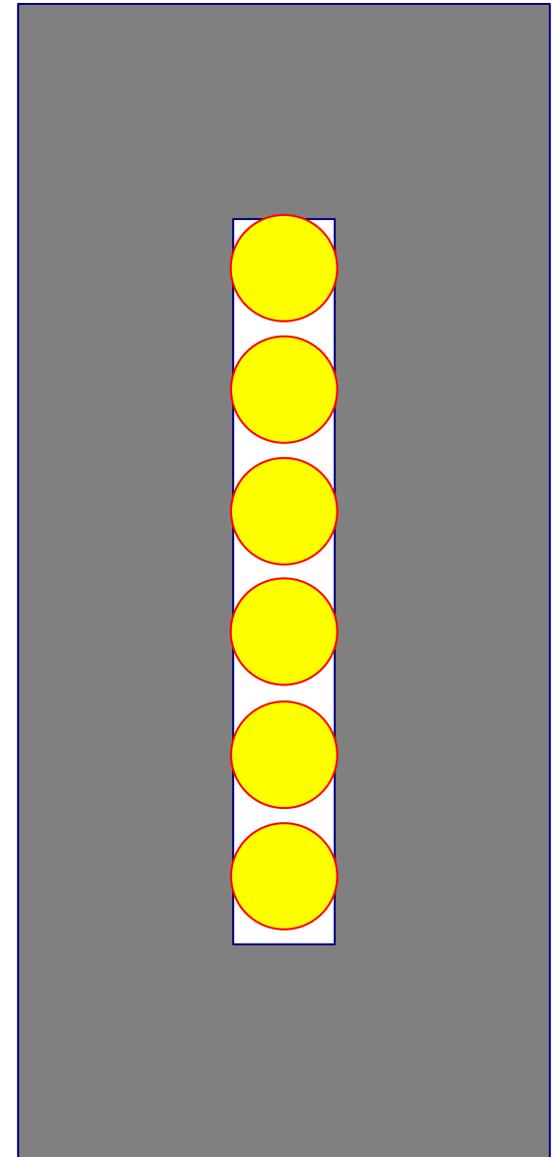
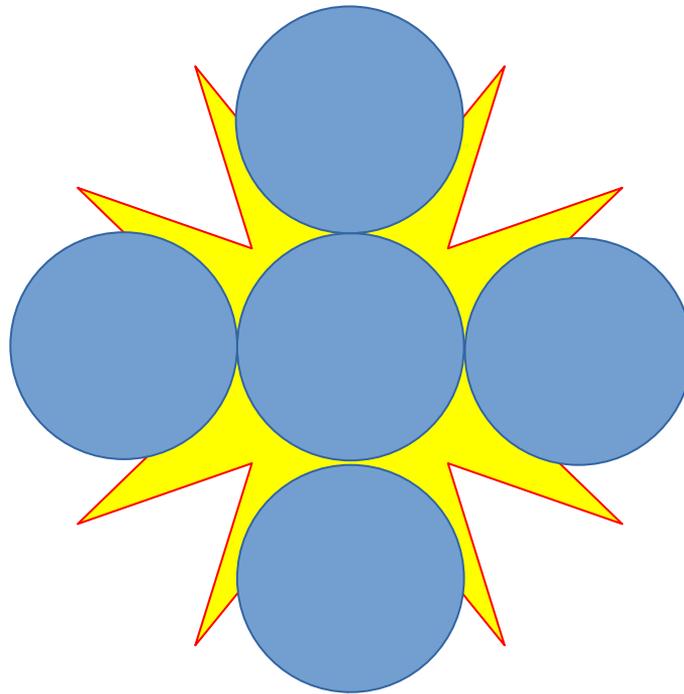
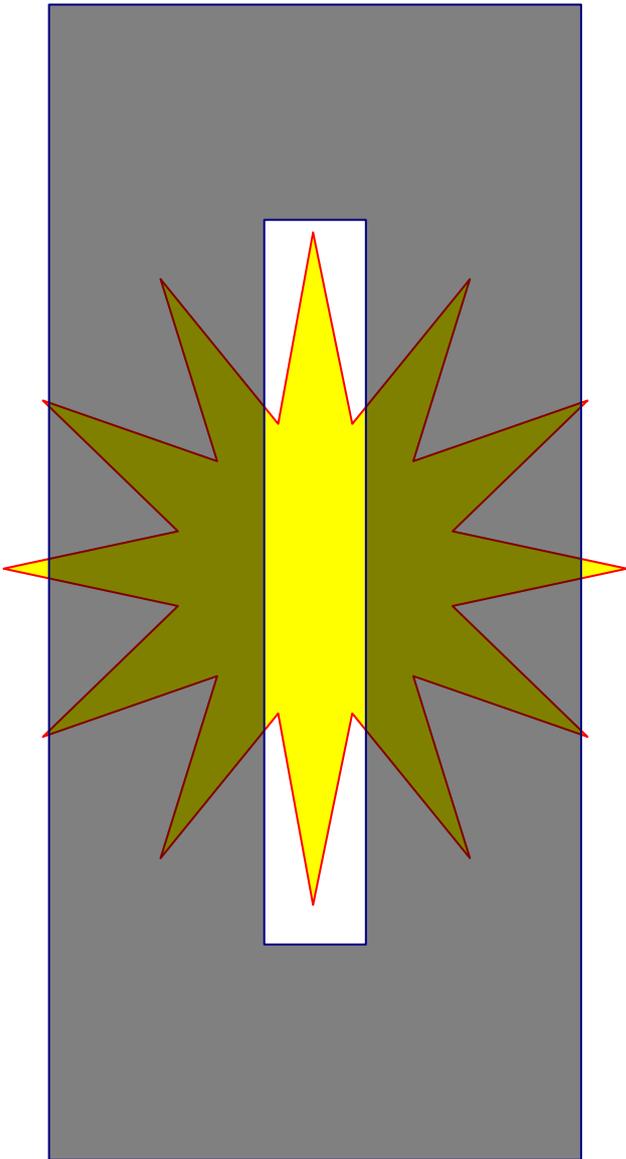
Нормальная ширина щели



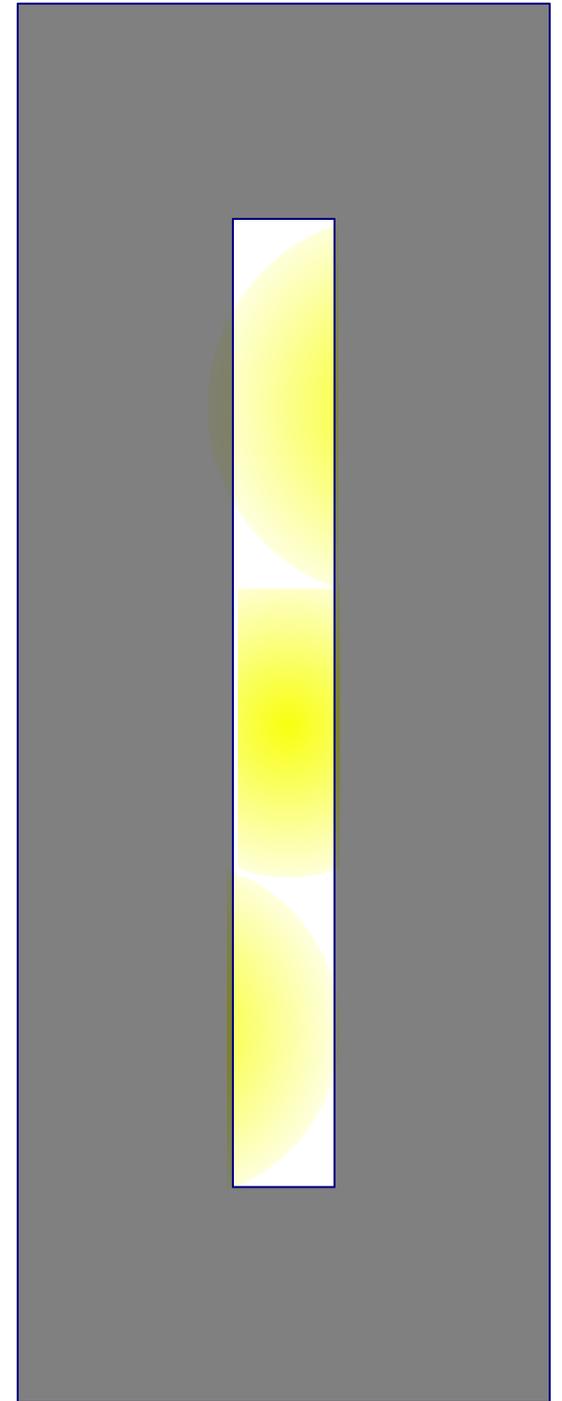
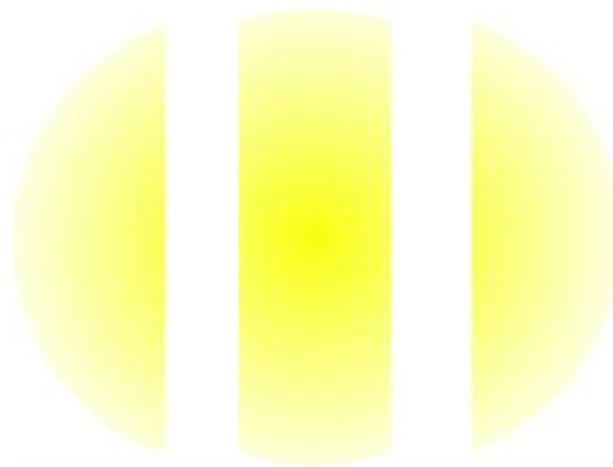
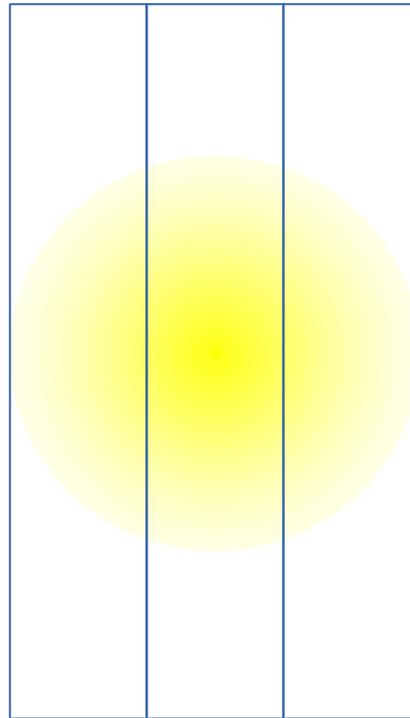
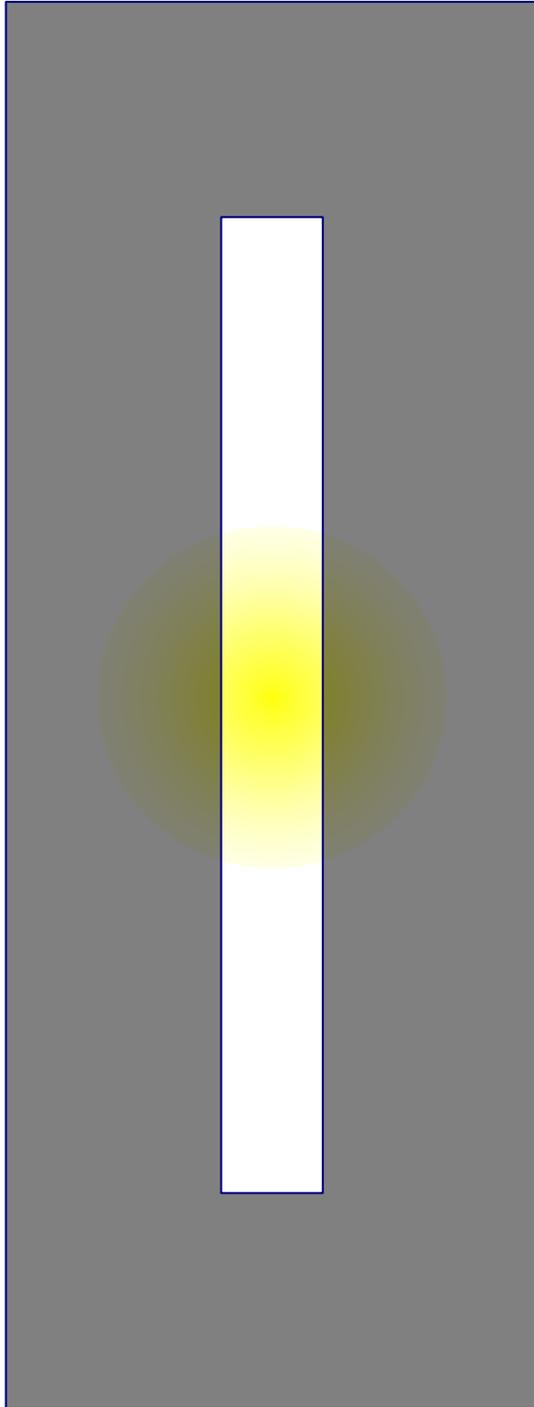
+++ высокое разрешение

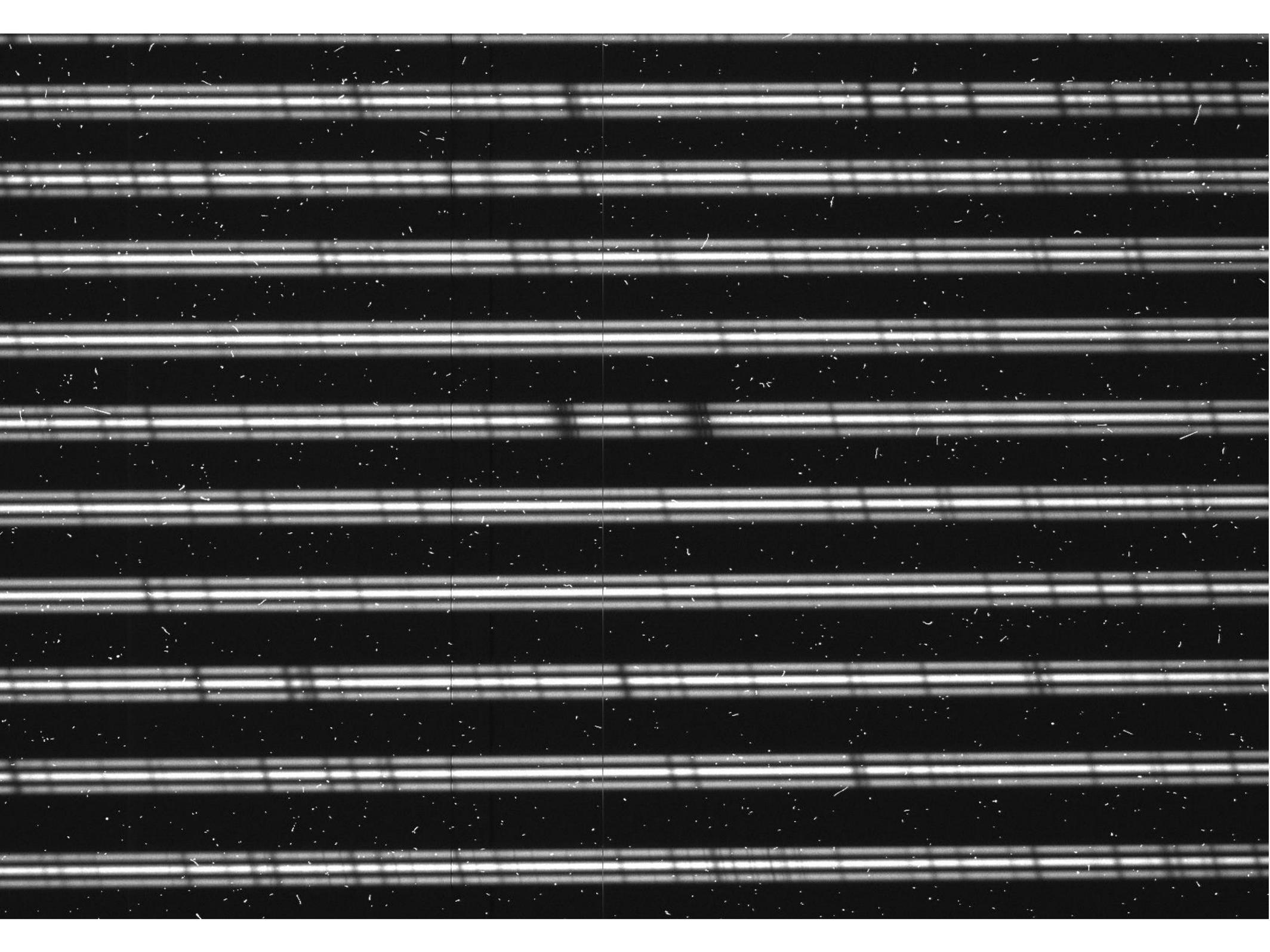
+++ большой участок спектра

--- в щель спектрографа может попадать не все изображение звезды, невозможно использовать нормальную щель



Резатель изображения





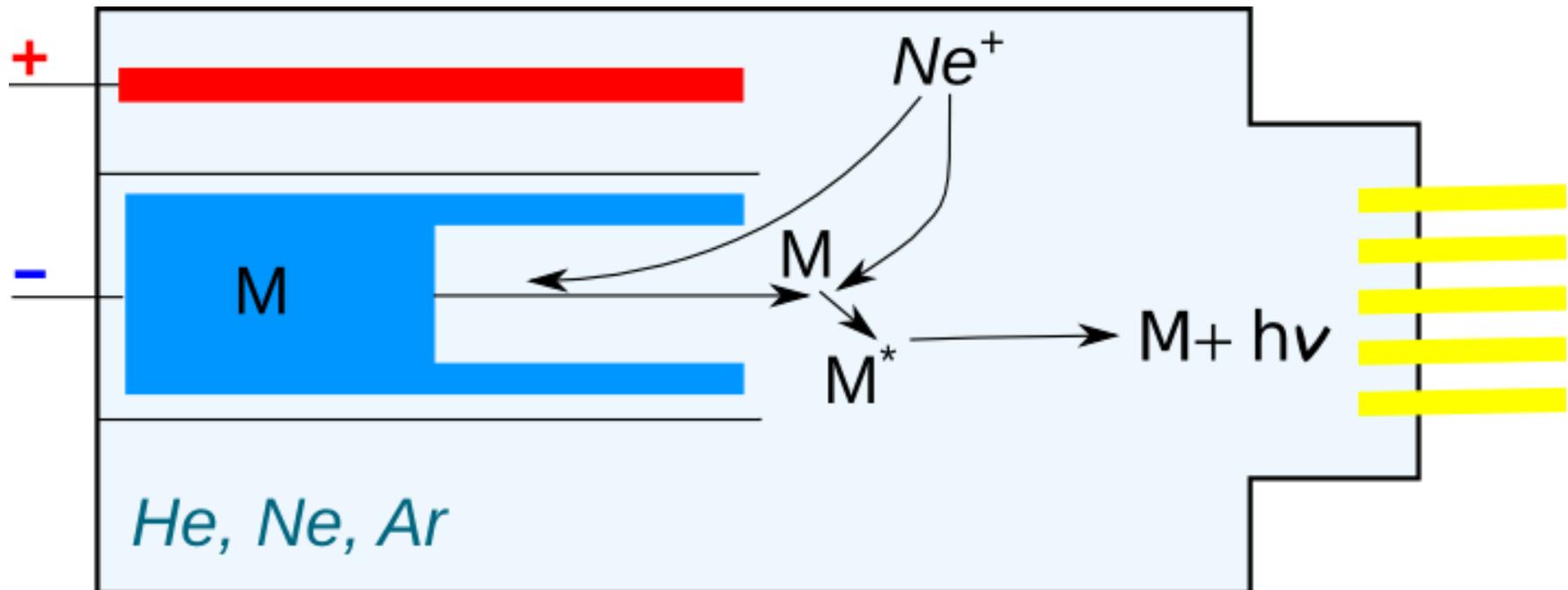
Калибровка по длинам волн

Необходим калибровочный стандартный спектр

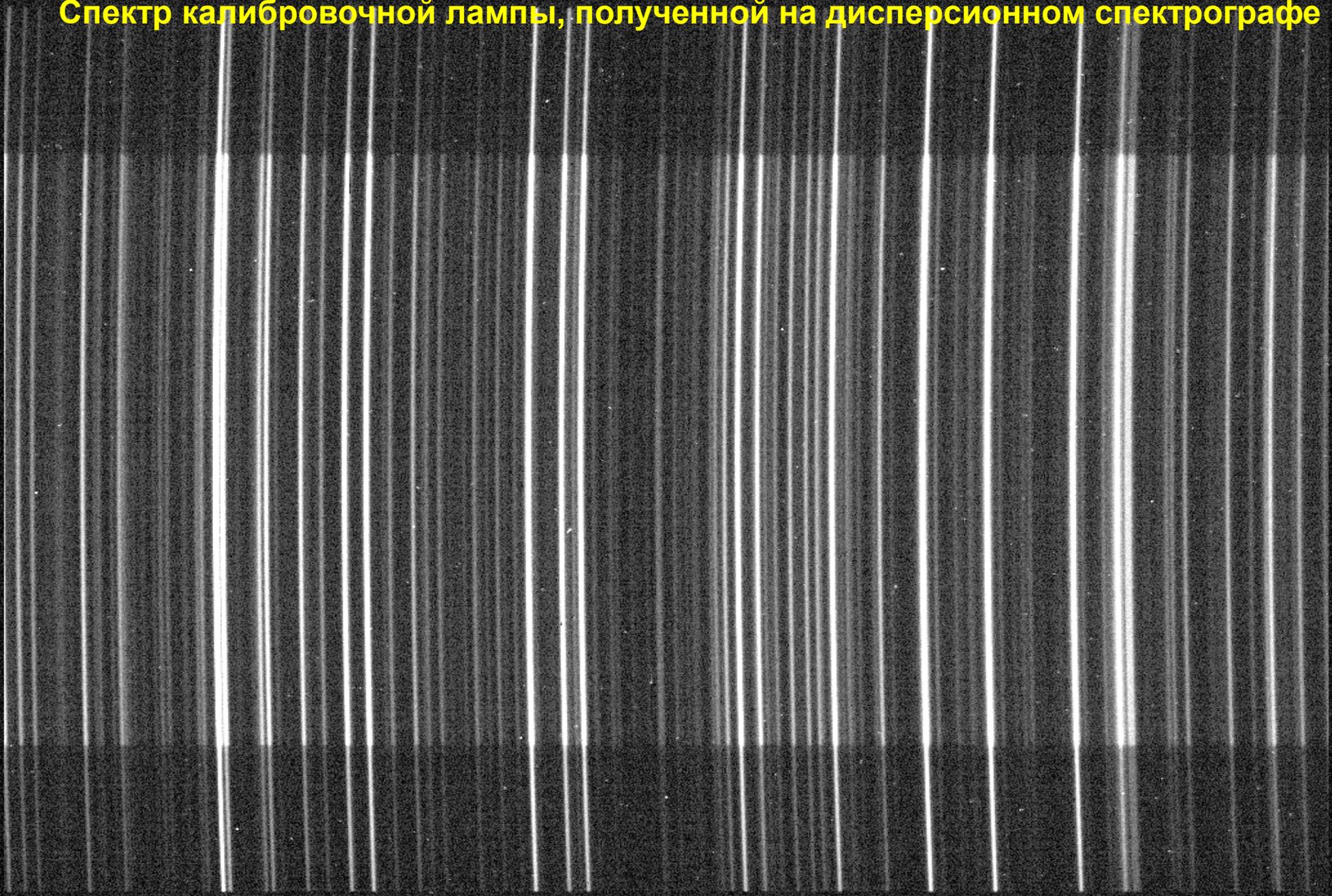
Лампы с полым катодом

- катод из металла, атомы которого дают обильное количество эмиссионных линий в видимой части спектра (Fe, Th)

- лампы заполнены инертным газом (He, Ne, Ar)



Спектр калибровочной лампы, полученной на дисперсионном спектрографе



Эшелле-спектр ThAr лампы

ThAr01

Для качественной калибровки необходимо:

- знать длины волн спектральных линий с точностью не менее $0.1\Delta\lambda=0.1\lambda/R$
- иметь не менее 4-5 линий в каждом порядке
- правильно идентифицировать спектральные линии на кадре

Сравнительные характеристики типичных звездных спектрографов

	Призмennyй	Дифракционный	Эшелле
Поле зрения	1) соответствует полю зрения телескопа 2) щель	щель	щель
Одновременно регистрируемый диапазон длин волн	1) тысячи Ангстрем 2) сотни и тысячи Ангстрем	1) десятки Ангстрем 2) сотни Ангстрем 3) тысячи Ангстрем	тысячи Ангстрем
Разрешение	1) 100 2) 1 000-10 000	1) 50 000 2) 5 000 3) 1 000	1 000 — 1 000 000
Пример телескопа ГАИШ	АЗТ-6, АЗТ-5	АЗТ-2, ЗТЭ, Цейсс-2	Кисловодская станция

- Возможности спектроскопии высокого разрешения

• СПЕКТРОГРАФ	• СПЕКТРАЛЬНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ	• ТЕЛЕСКОП, • обсерватория	• ДИАМЕТР ЗЕРКАЛА ТЕЛЕСКОПА
• HIRES (3000 - 10000A)	• 25 000-85 000	• Keck	• 2x9.8 m
• HRS (3900 -11000A)	• 15 000-120000	• Hobby-Eberly (HET)	• 9.2 m (eff)
• CRILES (10000 - 50000A)	• 100 000	• ESO VLT (UT1)	• 8.2 m
• UVES (3000 - 5000A, 4200 -11000A)	• до 110 000	• ESO VLT (UT2)	• 8.2 m
• HDS (3000 - 10000A)	• до 160 000	• Subaru	• 8.2 m
• NES (3000 – 8000 A, • 1500A одновременно)	• 45 000	• БТА	• 6 m
• HARPS (3780-5300A, 5330-6910A)	• 115 000	• ESO	• 3.6 m
• SARG (3700 -10000A)	• <144 000 (slicers)	• TNG	• 3.6 m
• ESPaDOnS (спектрополяриметр, 3690 - 10480A)	• 68 000-81 000	• CFHT	• 3.6 m
• FIES (3700 - 7300A одновременно)	• < 67 000	• NOT	• 2.5 m
• NARVAL (4500 -6600A)	• 65 000	• Pic du Midi Observatory	• 2 m
• MAESTRO (3500-10 000A)	• 45 000 – 190 000	• Терскол	• 2 m
• SOPHIE (3870 - 6490A)	• <70 000	• Haute Provence	• 1.9 m

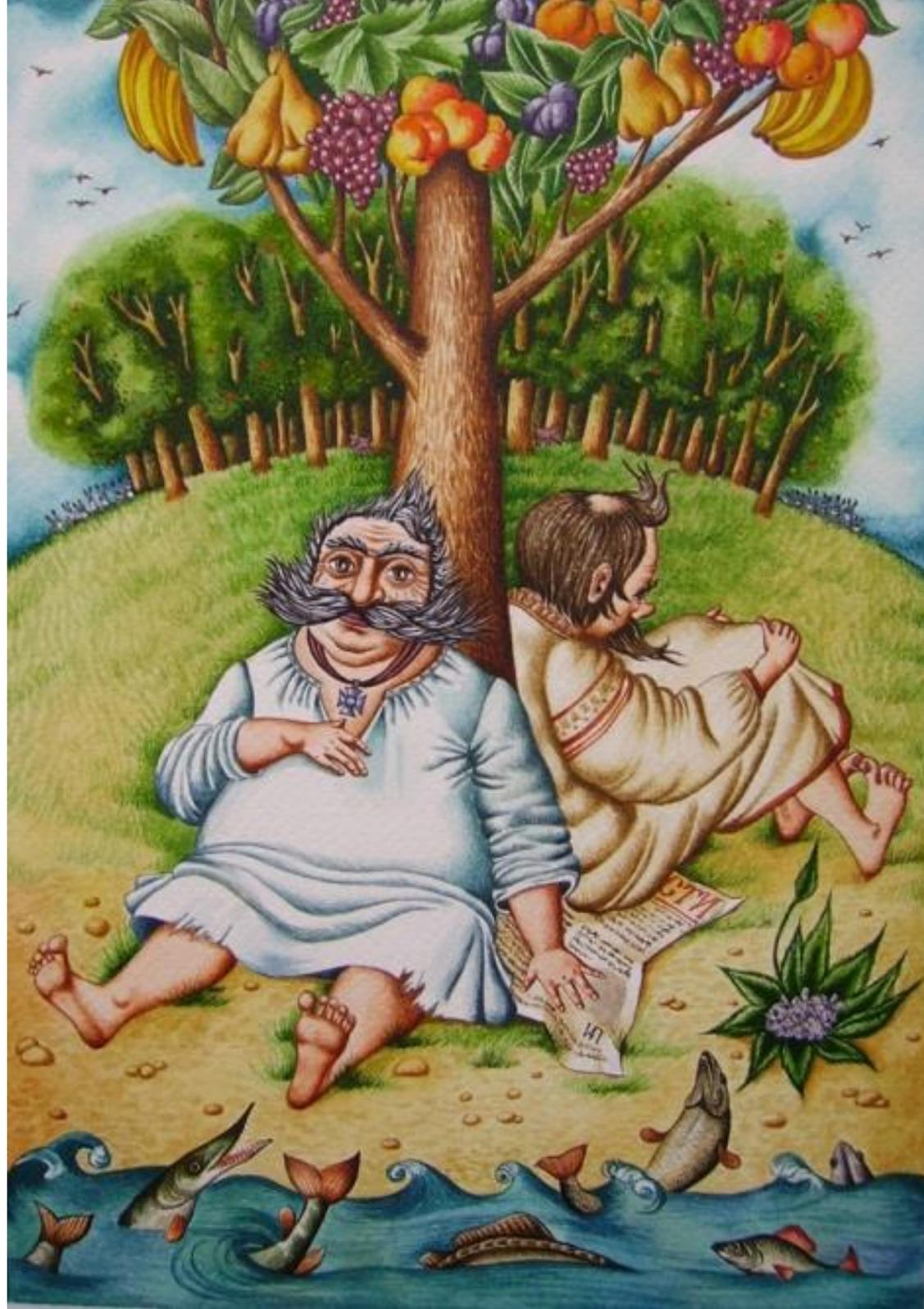
Спектр звезды Boo-911
UFD галактика Bootes I
 $m_v=17.5$ mag
Телескоп Subaru 8-m
Спектрограф HDS R=40000

Следующее занятие:

- получение спектров, составление заявки на наблюдения
- обработка спектров

**Архивы спектральных наблюдений.
Организация наблюдений на
современных телескопах.**







Легкий путь

Взять готовый обработанный спектр из архивов обсерваторий



Основные обсерватории и центры, предоставляющие открытый доступ к архивам спектральных наблюдений

- **European South Observatory (ESO)** (куча телескопов и инструментов)
- **Canadian Astronomy Data Centre** (куча телескопов и инструментов)
- **Subaru Mitaka Okayama Kiso Archive system (SMOKA)** (куча телескопов и инструментов)
- **Keck Observatory Archive (KOA)** (куча телескопов и инструментов)
- **L'Observatoire de Haute-Provence** (телескоп и пара инструментов)
- **Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST)** (куча космических телескопов и инструментов)
- **Специальная Астрофизическая Обсерватория (САО)** (пара телескопов и несколько инструментов)



Science Archive Facility

- Data Portal
- ESO Data
- Hubble Space Telescope Data
- Virtual Observatory Tools
- Catalogues, Plates and DSS
- Tools and Documentation
- Related External Services
- ESO & HST Image Galleries
- News and Updates
- FAQ
- ESO Data Access Policy

Warning!!

Work is in progress to solve a database issue underneath the Tabular Access Protocol serving observational data (tap_obs). The query results might not provide the up-to-date view of the archive data holdings.

Sorry for the inconvenience.

Welcome to the ESO Science Archive Facility

The ESO Science Archive Facility contains data from ESO telescopes at La Silla Paranal Observatory, including the APEX submillimeter telescope on Llano de Chajnantor. In addition, the raw UKIDSS/WFCAM data obtained at the UK Infrared Telescope facility in Hawaii are available.

The Principal Investigators of successful proposals for time on ESO telescopes have exclusive access to their scientific data for the duration of a proprietary period, normally of one year, after which the data becomes available to the community at large. Please read the [ESO Data Access Policy](#) statement for more information, along with the [relevant FAQs](#).

Browsing the archive does not require authentication. Please [acknowledge the use of archive data](#) in any publication.

There are three main ways to access the archive, varying for content and presentation/interface: the usual Raw Data query form, the innovative Science Portal to browse and access the processed data, and the novel Programmatic and Tools access which permits direct database access to both raw and processed data, and to the ambient condition measurements, also in a scriptable and VO manner. Other query forms are available in the table at the bottom of this page.

Raw Data

Science Portal

Processed Data

Programmatic

Raw, Processed, Ambient Data

Latest News and Updates



- Stacked observing-block level 1D spectra are now added to the FLAMES/GIRAFFE stream (12 Feb 2019)
- First data release of the VVVX Public Survey (12 Feb 2019)
- First release of pipeline-processed APEX data: the Boomerang nebula (18 Jan 2019)

[More news ...](#)

To browse the archive

Currently, **raw data** and various types of **data products** can be reached via different interfaces:

Category	Access Point	Data collection	Data Type	Instruments
LPO Raw Data	Raw data query form (all instruments) Instrument specific query forms Direct retrieval of raw data by file name	All ESO raw data	Various	Many La Silla Paranal instruments
LPO Processed Data	Science Portal (Processed Data) Type specific query forms (generic, spectral, imaging, VISTA)	Processed Data (ESO public surveys; ESO pipeline-reduced products; Large programs: GOODS, zCOSMOS, etc.)	Imaging, Spectroscopy, Catalogs, etc.	Various



If you would like to query the Archive for instrument specific parameters, please use the [dedicated query forms](#).
To search for **reduced Data Products**, please have a look at the [ESO Data Products](#) page and the [Advanced Data Products](#) query form.
To search through the science data products generated by the observers, please refer to the [Phase 3 query form](#).

The checkboxes on the right of the parameters define whether or not they will be displayed on the query result page.

Output preferences: Return max rows.

Target, Program and Scheduling Information

Target Name <input checked="" type="checkbox"/> <input type="text"/> RA <input type="text"/> DEC <input type="text"/> J2000 Search Box <input type="text" value="00 10 00"/> Input RA(h) DEC(deg) <input type="text"/> Output <input checked="" type="checkbox"/> Sexagesimal (h, deg) <input type="text"/> List of Targets <input type="button" value="Обзор..."/> Файл не выбран.	Resolved by SIMBAD <input type="text"/> Night <input type="checkbox"/> <input type="text"/> (YYYY MM(M) DD) Otherwise give a query range using the following start/end dates: Start <input type="text"/> 12 hrs [UT] <input type="text"/> End <input type="text"/> 12 hrs [UT] <input type="text"/> Program ID <input checked="" type="checkbox"/> <input type="text"/> PI Col <input type="checkbox"/> <input type="text"/> Title <input type="checkbox"/> <input type="text"/> Program Type <input type="checkbox"/> Any <input type="text"/> SV <input type="checkbox"/> Any <input type="text"/>
---	---

Observing Information

<table border="1"><tr><td>Imaging <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> EFOSC2/LaSilla <input type="checkbox"/> EMMI/LaSilla <input type="checkbox"/> FORS1/VLT <input type="checkbox"/> FORS2/VLT <input type="checkbox"/> HAWK/VLT <input type="checkbox"/> GROND/LaSilla <input type="checkbox"/> ISAAC/VLT <input type="checkbox"/> NACO/VLT <input type="checkbox"/> OMEGACAM/VST <input type="checkbox"/> SOFI/LaSilla <input type="checkbox"/> SUSI2/LaSilla <input type="checkbox"/> TIMMI2/LaSilla <input type="checkbox"/> VIMOS/VLT <input type="checkbox"/> VIRCAM/VISTA <input type="checkbox"/> VISIR/VLT <input type="checkbox"/> WFI/LaSilla</td><td>Spectroscopy <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> CES/LaSilla <input type="checkbox"/> CRIRES/VLT <input type="checkbox"/> EFOSC2/LaSilla <input type="checkbox"/> EMMI/LaSilla <input type="checkbox"/> FEROS/LaSilla <input type="checkbox"/> FORS1/VLT <input type="checkbox"/> FORS2/VLT <input type="checkbox"/> GIRAFFE/VLT <input type="checkbox"/> HARPS/LaSilla <input type="checkbox"/> ISAAC/VLT <input type="checkbox"/> KMOS/VLT <input type="checkbox"/> NACO/VLT <input type="checkbox"/> SINFONI/VLT <input type="checkbox"/> SOFI/LaSilla <input type="checkbox"/> TIMMI2/LaSilla <input type="checkbox"/> UVES/VLT <input type="checkbox"/> VIMOS/VLT <input type="checkbox"/> VISIR/VLT <input type="checkbox"/> XSHOOTER/VLT</td><td>Interferometry <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> AMBER/VLTI <input type="checkbox"/> MIDI/VLTI <input type="checkbox"/> PIONIER/VLTI <input type="checkbox"/> VINCI/VLTI Polarimetry <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> EFOSC2/LaSilla <input type="checkbox"/> FORS1/VLT <input type="checkbox"/> FORS2/VLT <input type="checkbox"/> ISAAC/VLT <input type="checkbox"/> NACO/VLT <input type="checkbox"/> SOFI/LaSilla Coronagraphy <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> NACO/VLT</td><td>Other <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> BOL/APEX <input type="checkbox"/> HET/APEX <input type="checkbox"/> LGSE <input type="checkbox"/> MAD <input type="checkbox"/> MASCOT <input type="checkbox"/> WFCAM/UKIRT</td></tr></table>	Imaging <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> EFOSC2/LaSilla <input type="checkbox"/> EMMI/LaSilla <input type="checkbox"/> FORS1/VLT <input type="checkbox"/> FORS2/VLT <input type="checkbox"/> HAWK/VLT <input type="checkbox"/> GROND/LaSilla <input type="checkbox"/> ISAAC/VLT <input type="checkbox"/> NACO/VLT <input type="checkbox"/> OMEGACAM/VST <input type="checkbox"/> SOFI/LaSilla <input type="checkbox"/> SUSI2/LaSilla <input type="checkbox"/> TIMMI2/LaSilla <input type="checkbox"/> VIMOS/VLT <input type="checkbox"/> VIRCAM/VISTA <input type="checkbox"/> VISIR/VLT <input type="checkbox"/> WFI/LaSilla	Spectroscopy <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> CES/LaSilla <input type="checkbox"/> CRIRES/VLT <input type="checkbox"/> EFOSC2/LaSilla <input type="checkbox"/> EMMI/LaSilla <input type="checkbox"/> FEROS/LaSilla <input type="checkbox"/> FORS1/VLT <input type="checkbox"/> FORS2/VLT <input type="checkbox"/> GIRAFFE/VLT <input type="checkbox"/> HARPS/LaSilla <input type="checkbox"/> ISAAC/VLT <input type="checkbox"/> KMOS/VLT <input type="checkbox"/> NACO/VLT <input type="checkbox"/> SINFONI/VLT <input type="checkbox"/> SOFI/LaSilla <input type="checkbox"/> TIMMI2/LaSilla <input type="checkbox"/> UVES/VLT <input type="checkbox"/> VIMOS/VLT <input type="checkbox"/> VISIR/VLT <input type="checkbox"/> XSHOOTER/VLT	Interferometry <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> AMBER/VLTI <input type="checkbox"/> MIDI/VLTI <input type="checkbox"/> PIONIER/VLTI <input type="checkbox"/> VINCI/VLTI Polarimetry <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> EFOSC2/LaSilla <input type="checkbox"/> FORS1/VLT <input type="checkbox"/> FORS2/VLT <input type="checkbox"/> ISAAC/VLT <input type="checkbox"/> NACO/VLT <input type="checkbox"/> SOFI/LaSilla Coronagraphy <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> NACO/VLT	Other <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> BOL/APEX <input type="checkbox"/> HET/APEX <input type="checkbox"/> LGSE <input type="checkbox"/> MAD <input type="checkbox"/> MASCOT <input type="checkbox"/> WFCAM/UKIRT	Category <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> SCIENCE <input type="checkbox"/> CALIB <input type="checkbox"/> ACQUISITION	Data Product Info Type <input checked="" type="checkbox"/> Any <input type="text"/> User defined input: <input type="text"/> Mode <input checked="" type="checkbox"/> Any <input type="text"/> User defined input: <input type="text"/> Dataset ID <input checked="" type="checkbox"/> <input type="text"/> Orig Name <input type="checkbox"/> <input type="text"/> Release Date <input checked="" type="checkbox"/> <input type="text"/> OB Name <input type="checkbox"/> <input type="text"/> OB ID <input type="checkbox"/> <input type="text"/> Instrumental Setup Exptime <input checked="" type="checkbox"/> <input type="text"/> Filter <input checked="" type="checkbox"/> <input type="text"/> Grism <input type="checkbox"/> <input type="text"/> Grating <input type="checkbox"/> <input type="text"/> Slit <input type="checkbox"/> <input type="text"/>
Imaging <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> EFOSC2/LaSilla <input type="checkbox"/> EMMI/LaSilla <input type="checkbox"/> FORS1/VLT <input type="checkbox"/> FORS2/VLT <input type="checkbox"/> HAWK/VLT <input type="checkbox"/> GROND/LaSilla <input type="checkbox"/> ISAAC/VLT <input type="checkbox"/> NACO/VLT <input type="checkbox"/> OMEGACAM/VST <input type="checkbox"/> SOFI/LaSilla <input type="checkbox"/> SUSI2/LaSilla <input type="checkbox"/> TIMMI2/LaSilla <input type="checkbox"/> VIMOS/VLT <input type="checkbox"/> VIRCAM/VISTA <input type="checkbox"/> VISIR/VLT <input type="checkbox"/> WFI/LaSilla	Spectroscopy <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> CES/LaSilla <input type="checkbox"/> CRIRES/VLT <input type="checkbox"/> EFOSC2/LaSilla <input type="checkbox"/> EMMI/LaSilla <input type="checkbox"/> FEROS/LaSilla <input type="checkbox"/> FORS1/VLT <input type="checkbox"/> FORS2/VLT <input type="checkbox"/> GIRAFFE/VLT <input type="checkbox"/> HARPS/LaSilla <input type="checkbox"/> ISAAC/VLT <input type="checkbox"/> KMOS/VLT <input type="checkbox"/> NACO/VLT <input type="checkbox"/> SINFONI/VLT <input type="checkbox"/> SOFI/LaSilla <input type="checkbox"/> TIMMI2/LaSilla <input type="checkbox"/> UVES/VLT <input type="checkbox"/> VIMOS/VLT <input type="checkbox"/> VISIR/VLT <input type="checkbox"/> XSHOOTER/VLT	Interferometry <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> AMBER/VLTI <input type="checkbox"/> MIDI/VLTI <input type="checkbox"/> PIONIER/VLTI <input type="checkbox"/> VINCI/VLTI Polarimetry <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> EFOSC2/LaSilla <input type="checkbox"/> FORS1/VLT <input type="checkbox"/> FORS2/VLT <input type="checkbox"/> ISAAC/VLT <input type="checkbox"/> NACO/VLT <input type="checkbox"/> SOFI/LaSilla Coronagraphy <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> NACO/VLT	Other <input type="button" value="ALL"/> <input type="button" value="NONE"/> <input type="checkbox"/> BOL/APEX <input type="checkbox"/> HET/APEX <input type="checkbox"/> LGSE <input type="checkbox"/> MAD <input type="checkbox"/> MASCOT <input type="checkbox"/> WFCAM/UKIRT			

Instrument & Mode



ESO Archive Query Results

To request data please select the datasets in the results table by marking the checkbox in the left-most column, then press the the **Request marked datasets** button. (You will be prompted for your ESO User Portal username and password. If you do not yet have an ESO User Portal account, please fill out the [registration form](#).) Datasets for which the proprietary period is over are highlighted in **green** and are publicly available. Datasets that are still under the proprietary period are highlighted in **red** and can only be downloaded by the corresponding PI. Datasets that are not yet available in the Archive are marked with a "N/A".

SIMBAD coordinates for hr1614 : 05 00 48.9, -05 45 13.2.

Request marked datasets

Reset

MarkAll

MarkPublic

MarkProprietary

New query

Programmatic

Your Requests



M	More	HDR	PRV	OBJECT	Target Ra, Dec	Program_ID	Instrument	Category	Type	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>		Header	-	OBJECT	05:00:49.13 -05:45:21.4	085.D-0979(A)	CRIRES	ACQUISITION	OBJECT	IMAGE
<input checked="" type="checkbox"/>		Header	-	HD32147	05:00:49.28 -05:45:20.2	085.D-0979(A)	CRIRES	SCIENCE	OBJECT	SPECTRUM,NODDING,JITTER
<input checked="" type="checkbox"/>		Header	-	HD32147	05:00:48.98 -05:45:22.6	085.D-0979(A)	CRIRES	SCIENCE	OBJECT	SPECTRUM,NODDING,JITTER
<input checked="" type="checkbox"/>		Header	-	HD32147	05:00:48.98 -05:45:22.6	085.D-0979(A)	CRIRES	SCIENCE	OBJECT	SPECTRUM,NODDING,JITTER
<input checked="" type="checkbox"/>		Header	-	HD32147	05:00:49.33 -05:45:19.8	085.D-0979(A)	CRIRES	SCIENCE	OBJECT	SPECTRUM,NODDING,JITTER
<input checked="" type="checkbox"/>		Header	-	HD32147	05:00:49.33 -05:45:19.8	085.D-0979(A)	CRIRES	SCIENCE	OBJECT	SPECTRUM,NODDING,JITTER
<input checked="" type="checkbox"/>		Header	-	HD32147	05:00:49.01 -05:45:22.4	085.D-0979(A)	CRIRES	SCIENCE	OBJECT	SPECTRUM,NODDING,JITTER
<input checked="" type="checkbox"/>		Header	-	HD32147	05:00:49.01 -05:45:22.4	085.D-0979(A)	CRIRES	SCIENCE	OBJECT	SPECTRUM,NODDING,JITTER
<input checked="" type="checkbox"/>		Header	-	HD32147	05:00:49.25 -05:45:20.5	085.D-0979(A)	CRIRES	SCIENCE	OBJECT	SPECTRUM,NODDING,JITTER
<input checked="" type="checkbox"/>		Header	-	HD32147	05:00:47.73 -05:45:29.1	072.A-9006(A)	FEROS	SCIENCE	OBJECT,SKY	ECHELLE

Canadian Astronomy Data Centre



Telescope Data Products ▾

Advanced Data Products ▾

Services ▾

Documentation

Advanced Search

Login

CADC Home

Search for data by target

Search

[Advanced Search](#)

Telescope Data Products



[Gemini](#)



[CFHT](#)



[JCMT](#)



[HST](#)



[BLAST](#)



[MOST](#)



[DAO](#)



[MACHO](#)



[OMM](#)



[FUSE](#)



[UKIRT](#)

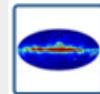
Advanced Data Products



[MegaPipe](#)



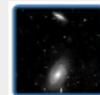
[HLA](#)



[IRIS](#)



[CGPS](#)



[CFHTLS](#)

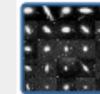


[WIRwolf](#)

Services



[Meetings](#)



[Community](#)



[SSOIS](#)



[CANFAR](#)



[DSS](#)

Date modified: 2019-02-20

[Terms and conditions](#)

[Transparency](#)

About us

[Our mandate](#)

[Acknowledgements](#)

News



Contact us

[Email](#)

[Address](#)





Archive Search

Search Results Error ADQL Help

Search Reset

Click on ? for explanations

Observation Constraints

- Observation ID ?
- P.I. Name ?
- Proposal ID ?
- Proposal Title ?
- Proposal Keywords ?
- Data Release Date ?

Science and Calibration data ▾

Spatial Constraints

- Target ?
- Pixel Scale ?
- Do Spatial Cutout

Temporal Constraints

- Observation Date ?
- Integration Time ?
- Time Span ?

Spectral Constraints

- Spectral Coverage ?
- Spectral Sampling ?
- Resolving Power ?
- Bandpass Width ?
- Rest-frame Energy ?
- Do Spectral Cutout

Additional Constraints

Band	Collection	Instrument	Filter	Cal. Lev.	Data Type	Obs. Type
All (6) Infrared Millimeter Optical Radio UV Unknown	All (21) CFHT CFHTEGAPIPE CFHTTERAPIX CFHTWIRWOLF HST HSTHLA GEMINI JCMT JCMTLS DAO DAOPLATES	All (115) ACS Apogee USB/Net COS CPAPIR Cassegrain Spectrograph Cassegrain Spectropolarimeter Direct image ESPaDONs F2 FTS2-SCUBA-2 Fabry image	All (2230) 0.35MB 0.35um 0.45MB 0.45um 0.75um 0.85um 1.083 um 1.210 um 1.282 um 1.3um 1.4um	All (5) (3) Product (2) Calibrated (1) Raw Standard (0) Raw Instrumental Unknown	All (6) catalog cube image Other spectrum timeseries	All (57) ACQUIRE ALIGN ARC ASTAR BIAS CAL CALIB COMPARISON DARK DIM DOME_FLAT

Search Reset

Archive Search

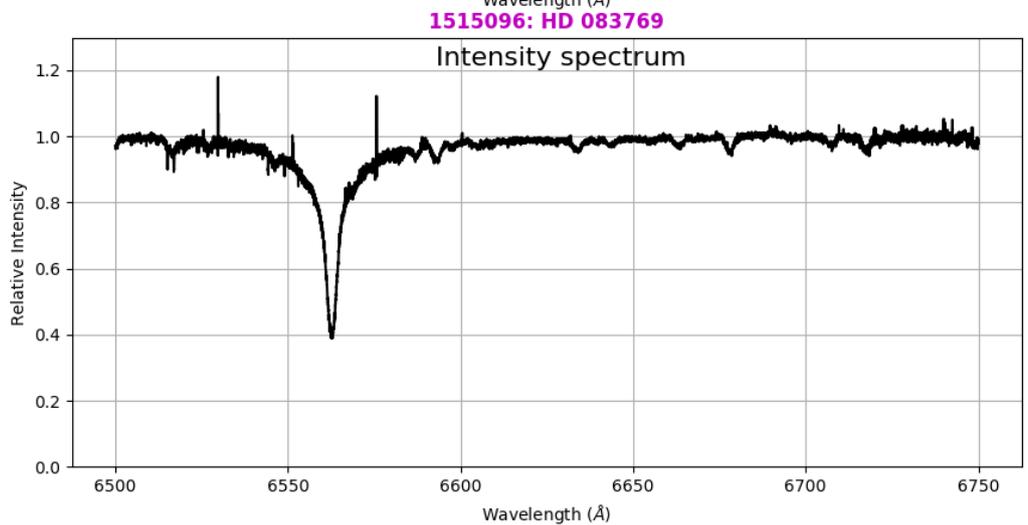
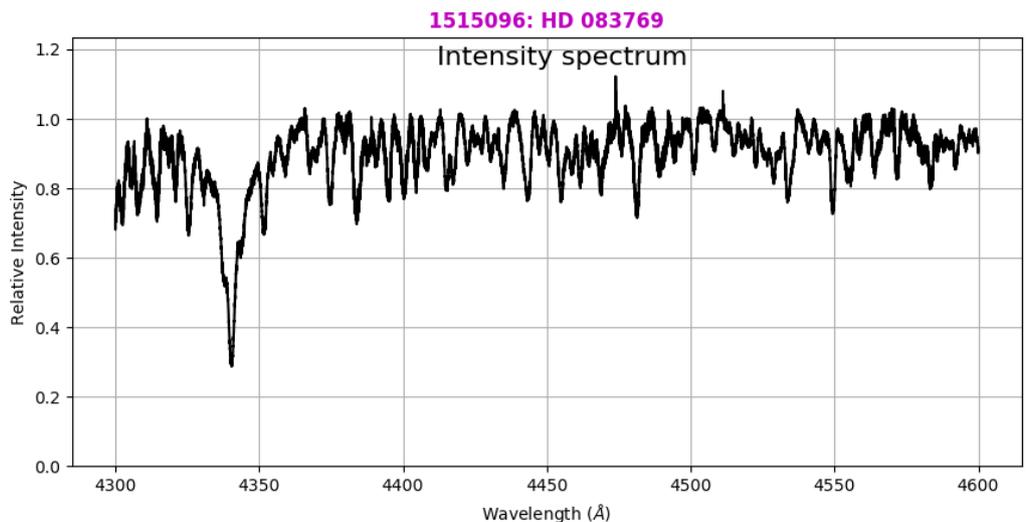
Search Results Error ADQL Help

Download complete query results: [VOTable](#) [CSV](#) [TSV](#)

[Bookmark URL](#)

<input type="button" value="Download"/> Showing 2 rows (2 before filtering). <input type="button" value="Change Columns"/> <input type="button" value="View in sky"/>																
Mark	Preview	Collection	Sequence Numl	Product ID	RA (J2000.0)	Dec. (J2000.0)	Target Name	Start Date ▾	Int. Time	Instrument	Filter	Cal. Lev.	Obs. Type	Proposal ID	P.I. Name	Data Release
<input type="checkbox"/>	Preview	CFHT	1515096	1515096o	09:40:45.79	+01:01:29.0	HD 083769	2012-01-10 14:43:37	2400.000	ESPaDOnS		1	OBJECT	11BS05	Yu Qin Chen	2013-02-28
<input type="checkbox"/>	Preview	CFHT	1515096	1515096i	09:40:45.79	+01:01:29.0	HD 083769	2012-01-10 14:43:37	2400.000	ESPaDOnS		2	OBJECT	11BS05	Yu Qin Chen	2013-02-28

collection: CFHT
ObservationID: 1515096
productID: 1515096o



[New Feature]

- [DRM \(Data Request via eMail query system\)](#) supports the data compress and collect option (Nov. 30, 2018).
- [CHARIS](#) data of Subaru Telescope are released. Please see also [the notice about CHARIS public data](#) (Sep. 18, 2018).
- [MuSCAT](#) data of the OAO are now released (Sep. 13, 2018).
- [List of User Selected Keywords](#) is available (Jan. 09, 2018).

SMOKA provides public science data obtained at Subaru Telescope, 188cm telescope at Okayama Astrophysical Observatory, 105cm Schmidt telescope at Kiso Observatory (University of Hiroshima), and KANATA Telescope at Higashi-Hiroshima Observatory. It is intended mainly for astronomical researchers.

SMOKA has been developed and maintained by Astronomical Data Archives Center (ADAC), Astronomy Data Center (ADC), National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ).

Resources

[SMOKA Web Index](#)

[SMOKA Overview](#) and [How To Search and Request Data](#)

[Online Help](#)

How to use SMOKA for a detail, and descriptions of reduction method.

[User Registration](#)

You need to register if you wish to retrieve FITS data.

[Data Search](#)

Abbreviations for search available data of telescope or observatory are as follows: [Subaru](#) (Subaru), [OAO](#) (Okayama), [Kiso](#) (Kiso), [MITSuME](#) (MITSuME), and [HHO](#) (Higashi-Hiroshima).

[Simple Search](#) ([Subaru](#), [OAO](#), [Kiso](#), [MITSuME](#), [HHO](#)) : search data from a list of object names

[Advanced Search](#) ([Subaru](#), [OAO](#), [Kiso](#), [MITSuME](#), [HHO](#)) : search data from various search constraints (SHOT mode of the output format for SUP, HSC, and KWF ONLY)

[SUP Search](#) (SUP) : search raw data and astrometric calibrated data

[Pin-point Search](#) ([KCD](#), [KCC](#), [MITSuME](#)) : search frames whose fields contain the search coordinates

SMOKA Archive Advanced Search

[Click here for SUP Search \(Suprime-Cam data Search\).](#)

[Click here to know how to search.](#)

Search Conditions

Object Name (for name resolve)
 Resolver
 SIMBAD NED
 Don't Resolve

Coordinate System
 Equatorial
 Circular
 Equinox J2000
 center (RA) Center Coordinate From To Radius(arcmin) 10.0
 center (DEC) Center Coordinate From To

Field of View (arcmin)
 auto Rectangle
 From (RA) To (RA) Corner Coordinate Opposite Corner Coordinate
 From (DEC) To (DEC) Corner Coordinate Opposite Corner Coordinate

Observation Date Exp Time (sec) Observer

Frame ID Exposure ID

Output Format
 TABLE (max 5,000 rows, HTML) ASCII (max 20,000 rows, text)
Frame or Shot mode
 FRAME SHOT (SUP, HSC, and KWF ONLY)

[Help...](#)

Instruments/Filters

Instruments Observation Mode Data Type Observation Category
 1 selected 3 selected 1 selected 1 selected

Observation Band Filter lists / Wavelength

Output Options

Output columns All None Reset
 FRAMEID DATE_OBS FITS_SIZE OBS_MODE DATA_TYPE OBJECT

Order by: 1. reverse

Maximum number of hits: 100
Output Equinox J2000
 [Show SQL Query](#)

[Toppage](#) | [Web Index](#) | [Overview](#) | [How to search data](#) | [Online-help](#)
[Simple Search](#) | [Advanced Search](#) | [SUP Search](#) | [Calendar Search](#)

Copyright (C) 2001-2017 [ADAC](#), [ADC](#), [NAOJ](#). All Rights Reserved.
 Feel free to contact [helpdesk](#) if you have any questions.
 Last-modified: Tue Sep 19 13:54:28 JST 2017
 SMOKA3



Results

13:59:48.81, 14:19:42.9, J2000

[Click here to know how to look search results.](#)

20 frames are found. The results are summarized below:

Instrument	Number of frames
HDS	20

Thumbnail images.

Shot images. [available for Suprime-Cam (SUP), Hyper Suprime-Cam (HSC), and KWFC only]

To retrieve data, mark checkboxes at the "Raw Data" column of rows which correspond to the frames which you'd like to retrieve.

Then push "Datarequest" button located before/after the table.

If you want to retrieve astrometric calibrated data, and/or flat fielded data of Suprime-Cam (SUP) data,

please use [SUP Search](#).

A link of "No." column will lead you to the detailed information of corresponding frame.

You can see the quicklook image, the header information, and the ASCII table extension, if exist.

To view other page of the query results, select the range of numbers from the list box located at the bottom of the table,

then push "Go" button next to it.

No.	<input type="checkbox"/>	Raw Data	FRAMEID	DATE_OBS	FITS_SIZE	OBS_MODE	DATA_TYPE	OBJECT	FILTER	WVLEN	DISPERSER	RA2000	DEC2000	UT_START	EXPTIME	OBSERVER	EXP_ID	More
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065571	2010-05-15 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		547.9-- 673.1	echelle	13:59:49.274	+14:19:35.80	09:57:38.203	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065572	2010-05-15 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		408.1-- 530.2	echelle	13:59:49.274	+14:19:35.80	09:57:38.203	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065573	2010-05-15 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		547.9-- 673.1	echelle	13:59:49.241	+14:19:34.15	10:28:29.661	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065574	2010-05-15 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		408.1-- 530.2	echelle	13:59:49.241	+14:19:34.15	10:28:29.661	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065575	2010-05-15 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		547.9-- 673.1	echelle	13:59:49.157	+14:19:33.28	10:59:22.351	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065576	2010-05-15 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		408.1-- 530.2	echelle	13:59:49.157	+14:19:33.28	10:59:22.351	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065577	2010-05-15 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		547.9-- 673.1	echelle	13:59:49.074	+14:19:32.55	11:30:14.489	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065578	2010-05-15 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		408.1-- 530.2	echelle	13:59:49.074	+14:19:32.55	11:30:14.489	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065579	2010-05-15 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		547.9-- 673.1	echelle	13:59:48.970	+14:19:32.47	12:01:06.472	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065580	2010-05-15 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		408.1-- 530.2	echelle	13:59:48.970	+14:19:32.47	12:01:06.472	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
11	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065581	2010-05-15 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		547.9-- 673.1	echelle	13:59:48.935	+14:19:31.49	12:31:58.091	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
12	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065582	2010-05-15 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		408.1-- 530.2	echelle	13:59:48.935	+14:19:31.49	12:31:58.091	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065719	2010-05-16 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		547.9-- 673.1	echelle	13:59:49.101	+14:19:57.47	05:41:28.043	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
14	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065720	2010-05-16 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		408.1-- 530.2	echelle	13:59:49.101	+14:19:57.47	05:41:28.043	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065721	2010-05-16 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		547.9-- 673.1	echelle	13:59:48.977	+14:19:57.16	06:12:19.649	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
16	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065722	2010-05-16 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		408.1-- 530.2	echelle	13:59:48.977	+14:19:57.16	06:12:19.649	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
17	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065741	2010-05-16 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		547.9-- 673.1	echelle	13:59:49.104	+14:19:33.09	11:30:32.499	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED
18	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HDSA00065742	2010-05-16 weather	4	SPEC	OBJECT	BOO06		408.1-- 530.2	echelle	13:59:49.104	+14:19:33.09	11:30:32.499	1800.00	Okamoto, Arimoto, Z	UNKNOWN	SIMBAD NED

FrameID: HDSA00065571 information

[Click here to know how to look information page.](#)

- [Quicklook image \(QLI\)](#)
- [Header information /Original \(HDI\)](#)
- [Header information /Modified \(HDId\)](#)
- [Ascii Table Extension \(ATE\)](#)
- [Observation Log \(only for HIDES\)](#)
- [Frame Memo](#)
- [FITS Errors](#)

Quicklook image (QLI)

[Click here](#) to invoke QLIS server for raw QLI.

Original FITS Header (HDI)

```
SIMPLE = T / Standard FITS format
BITPIX = 16 / Number of bits for each pixel
NAXIS = 2 / Number of axes in frame
NAXIS1 = 1124 / Number of pixels per row
NAXIS2 = 2050 / Number of rows
EXTEND = T / There is a standard extension 1 (ASCII table)
BSCALE = 1.00000 / Real = (fits pixel value)*BSCALE+BZERO
BZERO = 3.276700E+04 / Real = (fits pixel value)*BSCALE+BZERO
BUNIT = 'ADU' / Unit of original pixel value
BLANK = -32768 / Value used for NULL pixels
DISPAXIS = 2 / Main dispersion axis in frame
CTYPE1 = 'pixel' / Pixel coordinate system
CTYPE2 = 'pixel' / Pixel coordinate system
CUNIT1 = 'pixel' / Units used in both CRVAL1 and CDELT1
CUNIT2 = 'pixel' / Units used in both CRVAL2 and CDELT2
CRPIX1 = 1 / Reference pixel in axis1
CRVAL1 = 1 / Physical value of the reference pixel
CDELT1 = 1 / Size projected into a detector pixel in axis1
CRPIX2 = 1 / Reference pixel in axis2
CRVAL2 = 1 / Physical value of the reference pixel
CDELT2 = 1 / Size projected into a detector pixel in axis2
PROJ1P = 0.0 / Projection type of the first axis
PROJ2P = 0.0 / Projection type of the second axis
PC001001 = 1.00000000 / Pixel coordinate translation matrix
PC001002 = 0.00000000 / Pixel coordinate translation matrix
PC002001 = 0.00000000 / Pixel coordinate translation matrix
PC002002 = 1.00000000 / Pixel coordinate translation matrix
BIN-FCT1 = 2 / Binning factor in axis1
BIN-FCT2 = 2 / Binning factor in axis2
N2XIS = 2 / Number of axes for the slit projection
N2XIS1 = 1124 / Number of pixels per row for slit spectroscopy
N2XIS2 = 2050 / Number of scan lines for slit projection
C2YPE1 = 'DEC-TAN' / Type of projection used for #1 axis in 2nd WCS
C2PIX1 = 512 / Reference pixel in X
C2VAL1 = 0.00 / Physical value of ref pix X for WCS
C2ELT1 = 0.00000 / Size projected into a detector pixel X
C2NIT1 = 'degree' / for C2VAL1 and C2ELT1
C2YPE2 = 'WAVELENGTH' / Type of projection used for #2 axis in 2nd WCS
C2PIX2 = 1025 / Reference pixel in Y
C2VAL2 = 613.82 / Physical value of ref pix Y for WCS
C2ELT2 = 0.00185 / Size projected into a detector pixel Y
C2NIT2 = 'nm' / for C2VAL2 and C2ELT2
P2QJP1 = 0.0 / Projection type of the first axis
P2QJP2 = 0.0 / Projection type of the second axis
```



- + Getting Started
- + KOA Search Form
- + KI Search Form
- + Publicly Available Data
- + Contributed Datasets
- + KOA User Guide
- + Program Interface
- + Reducing Keck Data
- + FAQ
- + KOA Helpdesk
- + KOA News
- + KOA Bibliography
- + Related Archives
- + Login / Logout

KOA Data Access Service - v12.2

Currently not logged in. [Log in]

The W. M. [Keck Observatory Archive \(KOA\)](#) ingests and curates data from all active and decommissioned Keck instruments. The policy for public access to data for all current and future instruments is described in [User Access and Proprietary Periods](#). KOA serves [Contributed Datasets](#) derived from Keck data and submitted by the community.



ASCII tables of all public observations (updated weekly) are now available for downloading. These tables are useful for offline, multi-object queries. In addition, [documentation](#) has been added to help new users familiarize themselves with the services and data provided by KOA. KOA invites Keck observers to contribute their reduced data sets to the Keck Observatory Archive. See the [Contributed Data Policy](#).

Tables of public observations for all instruments are available for [download](#).

Search Reset Form

Basic Search More Search Options Moving Object Search Released Programs

1. Choose Instrument (all modes):

- | | | | |
|--|--|---|---|
| Visible Band (0.3-1.0 Micron) <input checked="" type="checkbox"/> | | Near-Infrared (1-5 Micron) <input checked="" type="checkbox"/> | |
| <input checked="" type="checkbox"/> DEIMOS | <input checked="" type="checkbox"/> ESI | <input checked="" type="checkbox"/> LWS | <input checked="" type="checkbox"/> MOSFIRE |
| <input checked="" type="checkbox"/> HIRES | <input checked="" type="checkbox"/> KCWI | <input checked="" type="checkbox"/> NIRC | <input checked="" type="checkbox"/> NIRC2 |
| <input checked="" type="checkbox"/> LRIS | | <input checked="" type="checkbox"/> NIRES | <input checked="" type="checkbox"/> NIRSPEC |
| | | <input checked="" type="checkbox"/> OSIRIS | |

+ KOA Bibliography

+ Related Archives

+ Login / Logout

Basic Search

More Search Options

Moving Object Search

Released Programs

1. Choose Instrument (all modes): ?

Visible Band (0.3-1.0 Micron) ✓

DEIMOS

HIRES

LRIS

ESI

KCWI

Near-Infrared (1-5 Micron) ✓

LWS

NIRC

NIRES

OSIRIS

MOSFIRE

NIRC2

NIRSPEC

Check All

Clear All

(To retrieve public Keck Interferometer data, use the dedicated KI Search Form)

2. Search for Data by Night or Location: ?

UT Observation Date(s):

mm/dd/yyyy or yyyyymmdd

Object Name or Location:

Coordinates or object name, to be resolved by NED first then SIMBAD.

Examples: "DQ Tau", "04h46m53.05s +17d00m00.2s Equ J2000", "182.24771 -17.86600 ga"

Radius: (0.1 arcsec - 6 deg)

Use substring matching of TARGNAME. It is most useful for moving object searches. See [help](#) for limitations on use.

3. Return Results As: ?

List of Files *(Allows you to select which files to download)*

Download Package Containing all Results

E-mail:

(You will be notified via email when the download package is ready)

Search

Reset Form

+ Getting Started

Search Results Not logged in. [Log in]

+ KOA Search Form

Your Search Parameters | [ASCII Tables](#) | [Weather Search Form](#)

+ KI Search Form

1. Enter your email address:

(used only to notify you when your files are ready)

+ Publicly Available Data

2. Choose File Packaging Method: [\(Help\)](#)

Automatic Manual

+ KOA User Guide

3. Choose whether to include extracted/calibrated data (if available):

Raw data only Include extracted/calibrated data [\(Help\)](#)

+ Program Interface

+ Reducing Keck Data

4. Choose file naming scheme [\(Help\)](#)

Unique filename, assigned by KOA

(ex., N2.20080908.19283.fits, HI.20100120.20384.fits)

+ FAQ

+ KOA Helpdesk

Non-unique filename, assigned at the telescope

(ex., n0210.fits, hires2103.fits)

+ KOA News

+ KOA Bibliography

+ Related Archives

5. Select files to download [\(Help\)](#)

[Interactive Table Usage Help](#)

20 Science Files

251 Calibration Files

Row ID	KOAID	Instrument	Target Name	Associated Calibration Files	Frame Number	Quicklook Previews	RA (J2000)	Dec (J2000)	Observation Date (UT)	Observation Time (UT)	Exposure Time (sec)	Program ID	Program Institution	Program PI	Program Title
<input checked="" type="checkbox"/>	DE.20090329.25710.fits	DEIMOS	Combi1	DE.20090329.25710.caliblist	85	[Hdr] [Raw]	12:26:57.1	+23:53:48.8	2009-03-29	07:08:30.25	20.000	U070D	UCSC	Faber	The DEEP3 LMA
<input checked="" type="checkbox"/>	DE.20090329.25813.fits	DEIMOS	Combi1	DE.20090329.25813.caliblist	86	[Hdr] [Raw]	12:26:57.1	+23:53:48.2	2009-03-29	07:10:13.65	20.000	U070D	UCSC	Faber	The DEEP3 LMA
<input checked="" type="checkbox"/>	DE.20090329.26072.fits	DEIMOS	Combi1	DE.20090329.26072.caliblist	87	[Hdr] [Raw]	12:26:57.1	+23:53:48.1	2009-03-29	07:14:32.21	45.000	U070D	UCSC	Faber	The DEEP3 LMA
<input checked="" type="checkbox"/>	DE.20090329.26288.fits	DEIMOS	Combi1	DE.20090329.26288.caliblist	88	[Hdr] [Raw]	12:26:57.1	+23:53:48.1	2009-03-29	07:18:08.46	1200.000	U070D	UCSC	Faber	The DEEP3 LMA
<input checked="" type="checkbox"/>	DE.20090329.27560.fits	DEIMOS	Combi1	DE.20090329.27560.caliblist	89	[Hdr] [Raw]	12:26:57.1	+23:53:48.1	2009-03-29	07:39:20.53	20.000	U070D	UCSC	Faber	The DEEP3 LMA
<input checked="" type="checkbox"/>	DE.20090329.27669.fits	DEIMOS	Combi1	DE.20090329.27669.caliblist	90	[Hdr] [Raw]	12:26:57.1	+23:53:48.2	2009-03-29	07:41:09.88	1200.000	U070D	UCSC	Faber	The DEEP3 LMA
<input checked="" type="checkbox"/>	DE.20090329.28947.fits	DEIMOS	Combi1	DE.20090329.28947.caliblist	91	[Hdr] [Raw]	12:26:57.1	+23:53:48.2	2009-03-29	08:02:27.50	452.000	U070D	UCSC	Faber	The DEEP3 LMA
<input checked="" type="checkbox"/>	DE.20090330.25512.fits	DEIMOS	Combi1	DE.20090330.25512.caliblist	89	[Hdr] [Raw]	12:26:57.2	+23:53:47.8	2009-03-30	07:05:12.43	20.000	U070D	UCSC	Faber	The DEEP3 LMA
<input checked="" type="checkbox"/>	DE.20090330.25612.fits	DEIMOS	Combi1	DE.20090330.25612.caliblist	90	[Hdr] [Raw]	12:26:57.2	+23:53:47.6	2009-03-30	07:06:52.03	20.000	U070D	UCSC	Faber	The DEEP3 LMA
<input checked="" type="checkbox"/>	DE.20090330.25820.fits	DEIMOS	Combi1	DE.20090330.25820.caliblist	91	[Hdr] [Raw]	12:26:57.2	+23:53:47.6	2009-03-30	07:10:20.23	1200.000	U070D	UCSC	Faber	The DEEP3 LMA
<input checked="" type="checkbox"/>	DE.20090330.27090.fits	DEIMOS	Combi1	DE.20090330.27090.caliblist	92	[Hdr] [Raw]	12:26:57.2	+23:53:47.6	2009-03-30	07:31:30.15	20.000	U070D	UCSC	Faber	The DEEP3 LMA
<input checked="" type="checkbox"/>	DE.20090330.27203.fits	DEIMOS	Combi1	DE.20090330.27203.caliblist	93	[Hdr] [Raw]	12:26:57.2	+23:53:47.6	2009-03-30	07:33:23.15	1200.000	U070D	UCSC	Faber	The DEEP3 LMA
<input checked="" type="checkbox"/>	DE.20090330.28475.fits	DEIMOS	Combi1	DE.20090330.28475.caliblist	94	[Hdr] [Raw]	12:26:57.2	+23:53:47.6	2009-03-30	07:54:35.97	1200.000	U070D	UCSC	Faber	The DEEP3 LMA



The ELODIE archive

An on-line database
of high-resolution stellar spectra



[Introduction](#) | [Help](#)

[Archive News](#) | [Publications using ELODIE Archive](#)

Enter a designation or coordinates

Examples:

[HIP117998](#), [J04 14 57 15 32 10](#), [simbad:procyon](#), [HD190007](#), [HD190073](#), [GJ%1](#)

a. For identifiers

you can choose to query :

b. For coordinate and around object queries, define a radius :

 [arcmin]

Query a sample of objects in a region of the sky

a. Define a region of the sky (B1950 or J2000):

Right ascension from to

examples: [14 00 00](#) to [18 00 00](#) (B1950)
[J14 00 00](#) to [J18 00 00](#) (J2000)

Declination from to

example: [-02 00 00](#) to [02 00 00](#)

Advanced search

a. Set multiple constraints:

Select observations in a range of S/N, exposure time, date of observation...

b. List of objects:

Upload a list of objects and find the corresponding observations.
The file must contain one designation per line ([example](#))

 Файл не выбран.

The ELODIE archive contains 35535 spectra.

External links: [Pollux database](#) · [Spectrophotometry in Hyperleda](#) · [UVES Paranal Observatory Project](#) · [ELODIE: The Stellar Library](#) ·
Cross-link: [SOPHIE Archive](#)

The ELODIE archive © [OHP](#) / [INSU-CNRS](#) / [Institut Pytheas](#) / [AMU](#)

Contact: [Database team](#)

Last revised: 10/01/2017 12:13:22

Spectra: hr1614

objname	RA (J2000) Dec	S	O	dataset	imanum	imatyp	exptime	sn	view_spec	view_head	get_spec	get_e2ds	customize	search_ccf
HD032147	J050048.0-054503	S	O	19981030	0018	OBJOd	181.8	22	view_spec	view_head	get_spec	get_e2ds	customize	
HD032147	J050048.0-054503	S	O	19981030	0019	OBJOd	360.8	42	view_spec	view_head	get_spec	get_e2ds	customize	
HD032147	J050049.0-054512	S	O	19970925	0014	OBJOd	600.7	132	view_spec	view_head	get_spec	get_e2ds	customize	search_ccf

[Display this selection as plain text](#)
[Search the CCF for the same objects](#)
[Apply the same selection to the Sophie archive](#)
[Get the wget commands to download all the selected 1D spectra](#) [Explanations](#)
[Get the wget commands to download all the selected 2D spectra](#) [Explanations](#)

Sky search ?

Object name or list

Constrain any fields, choose the fields to display, and order the records ?

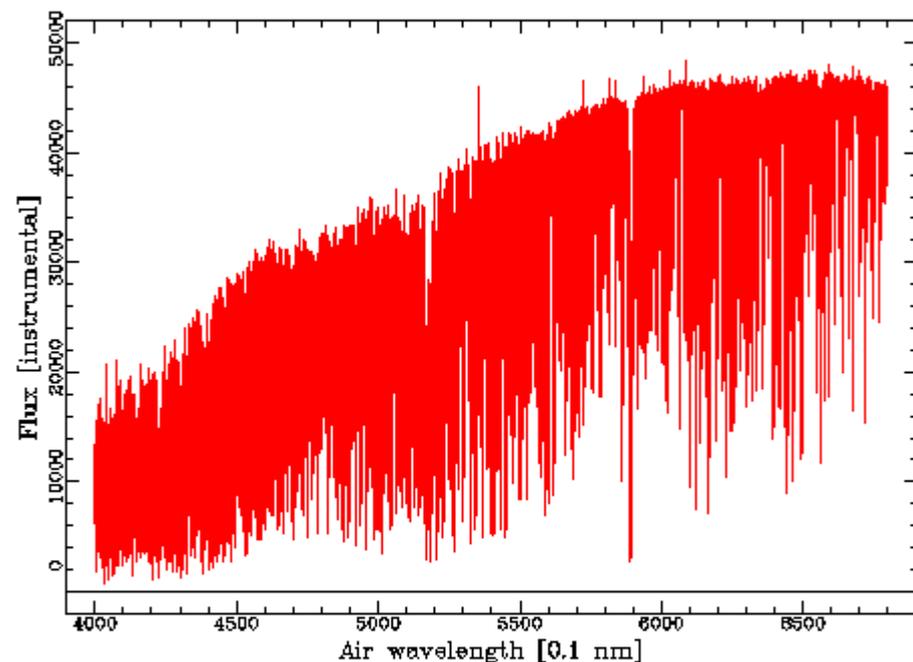
Output as

Spectra: FITS Pipeline processing

Display the spectrum

File identification and executed pipeline: elodie:19970925/0014&z=s1d|vs

Coord=6075; 51595



Replot

in wavelength range

to

[0.1 nm]

View Header

Download the 1D spectrum as FITS file

The [ELODIE Archive](#) © [OHP / INSU-CNRS / OSU Pytheas](#)

Contact: [Database team](#)



The SOPHIE archive

A new on-line database
of high-resolution stellar spectra



[Introduction](#) | [Help](#)

- [Archive News](#) | [Publication List](#)

Enter a designation or coordinates

Examples:

[HIP021088](#), [Vega](#), [HD190007](#), [HD400](#), [GJ%](#)

a. For identifiers

you can choose to query :

b. For coordinate and around object queries, define a radius :

 [arcmin]

c. Choose a sample in the list:

Query a sample of objects in a region of the sky

a. Define a region of the sky (B1950 or J2000):

Right ascension from to

examples:

[14 00 00](#)

to [18 00 00](#) (B1950)

[J14 00 00](#)

to [J18 00 00](#) (J2000)

Declination from

to

example:

[-02 00 00](#)

to [02 00 00](#)

b. Choose a sample in the list:

Advanced search

a. [Set multiple constraints](#):

Select observations in a range of S/N, exposure time, date of observation...

b. List of objects:

Upload a list of objects and find the corresponding observations.
The file must contain one designation per line ([example](#))

Файл не выбран.



The SOPHIE archive



Spectra

objname	coordinatesJ2000	S	E	seq	date	fiber	dprtype	exptime	sn26	view_spec	view_head	get_spec	get_e2ds	customize	search_ccf
HD032147	J050049.0-054512	S	E	1091590	2011-01-14	HR	STAR,DARK,K3V	600.0	173	view_spec	view_head	get_spec	get_e2ds	customize	search_CCF

[Display this selection as plain text](#)

[Search the CCF for the same objects](#)

[Apply the same selection to the Elodie archive](#)

[Get the wget commands to download all the selected 1D spectra](#)

[Get the wget commands to download all the selected E2D spectra](#)

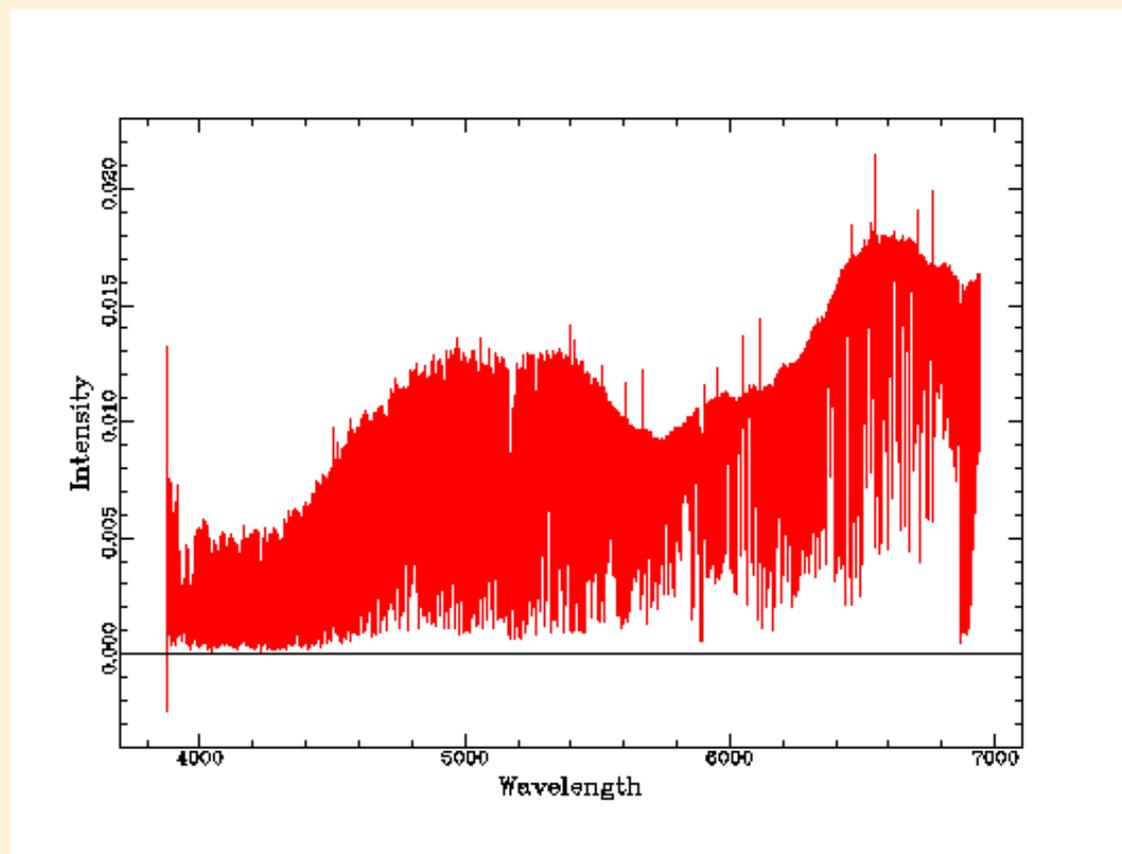
[Home](#)



The SOPHIE archive

Display the spectrum

File identification and executed pipeline: sophie:[s1d,1091590]&z=vs



[Replot](#) in wavelength range min [0.1 nm] max [0.1 nm]

[View Header](#)

[Download the 1D spectrum as FITS file](#)



FAQ

High-Level Science Products ▶

Software ▶

FITS ▶

Related Sites

NASA Datacenters ▶

MAST Services

MAST and the VO ▶

Newsletters & Reports ▶

Data Use Policy

Dataset Identifiers

Acknowledgments



STScI's Internet connections will be UNAVAILABLE Saturday, 28 October 2017 from 7:00 AM - 1:00 PM. STScI web servers, SSH and similar services will be unreachable from the Internet.

The Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST) is a NASA funded project to support and provide to the astronomical community a [variety of astronomical data archives](#), with the primary focus on scientifically related data sets in the optical, ultraviolet, and near-infrared parts of the spectrum. MAST is located at the Space Telescope Science Institute (STScI).

NEW Search Using the MAST Data Discovery Portal

- MAST Cross-Mission Search
- Integrated 3D All-Sky Viewer
- Access to Data from other Archives
- [User's Guide](#)

Enter [Target Name \(or Coordinates\)](#):

Search



Google Search

WWW MAST

Note: STScI may provide links to Web pages that are not part of the STScI, AURA, NASA, or ESA domain. These sites are managed by organizations, companies or individuals not under our control, and neither STScI, AURA, NASA, nor ESA are responsible for the information or links you may find there. We provide these links as a convenience and the presence of these links is not an endorsement of the site.

<https://archive.stsci.edu/>

News

September 21, 2017:

New HLSP: Illustris

September 20, 2017:

New HLSP: TESS-HERMES

September 19, 2017:

HLSP Update: New K2SFF detrended light curves

September 13, 2017:

New HLSP: K2GAP

September 12, 2017:

New HLSP Update: WFCJ



Missions

Hubble

Hubble Legacy Archive

Hubble Spectral Legacy Archive

Hubble Source Catalog

DSS

JWST

K2

KEPLER

PanSTARRS

SwiftUVOT

TESS

XMM-OM

BEFS (ORFEUS)

Copernicus

EPOCH

EUVE

FUSE

GALEX

GSC

HPOL

HUT

IMAPS (ORFEUS)

IUE

TUES (ORFEUS)

UIT

VLA-FIRST

WUPPE



Select a collection...

MAST Observations by Object Name or RA

and enter target:

PZ Mon

[About Collections...](#)

[Show Examples...](#) [Random Search](#) [Advanced Search](#)

Upload Target List

My Download Basket: 0 files

[User Manual/Help](#) | [Leave Feedback](#) | [About This Site](#)

anonymous

[Login...](#)

[Account Info...](#)

24 Total Rows of Observations

V* PZ Mon, radius: 0.20000°

Footprints: All

Filters Clear Filters Edit Filters... Help...

Keyword/Text Filter
Filter All Columns

Product Type
Name Quantity
 image (22 of 22)
 spectrum (2 of 2)

Mission
Name Quantity
 PS1 (20 of 20)
 GALEX (2 of 2)
 IUE (2 of 2)

Instrument
Name Quantity
 GPC1 (20 of 20)
 GALEX (2 of 2)
 SWP (1 of 1)
 LWP (1 of 1)

Project
Name Quantity
 3PI (20 of 20)
 AIS (2 of 2)

Filters
Name Quantity
 z (4 of 4)
 y (4 of 4)
 r (4 of 4)
 i (4 of 4)
 g (4 of 4)
 NUV (2 of 2)
 LOW DISP (2 of 2)

List View Album View

	Actions	Mission	Instrument	Project	Filters	Waveband	Target Name	Target Classification	Observation ID
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	g	OPTICAL	1347.070	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	i	OPTICAL	1347.070	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	r	OPTICAL	1347.070	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	y	OPTICAL, I...	1347.070	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	z	OPTICAL	1347.070	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	g	OPTICAL	1348.079	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	i	OPTICAL	1348.079	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	r	OPTICAL	1348.079	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	y	OPTICAL, I...	1348.079	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	z	OPTICAL	1348.079	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	g	OPTICAL	1347.060	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	i	OPTICAL	1347.060	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	r	OPTICAL	1347.060	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	y	OPTICAL, I...	1347.060	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	z	OPTICAL	1347.060	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	g	OPTICAL	1347.080	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	i	OPTICAL	1347.080	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	r	OPTICAL	1347.080	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	y	OPTICAL, I...	1347.080	field	rings.v3.skycell.1...
<input type="checkbox"/>		PS1	GPC1	3PI	z	OPTICAL	1347.080	field	rings.v3.skycell.1...

AstroView

06:48:21.066 +01:13:08.30
06:48:21.066 +01:13:08.30

RA DEC
hhmmss/deg



Select a collection...

MAST Observations by Object Name or RA

and enter target:

PZ Mon

anonymous

[Login...](#)

[Account Info...](#)

[About Collections...](#)

[Show Examples...](#) [Random Search](#) [Advanced Search](#)

Spectral Viewer

Configuration

Range

Wavelength

Flux

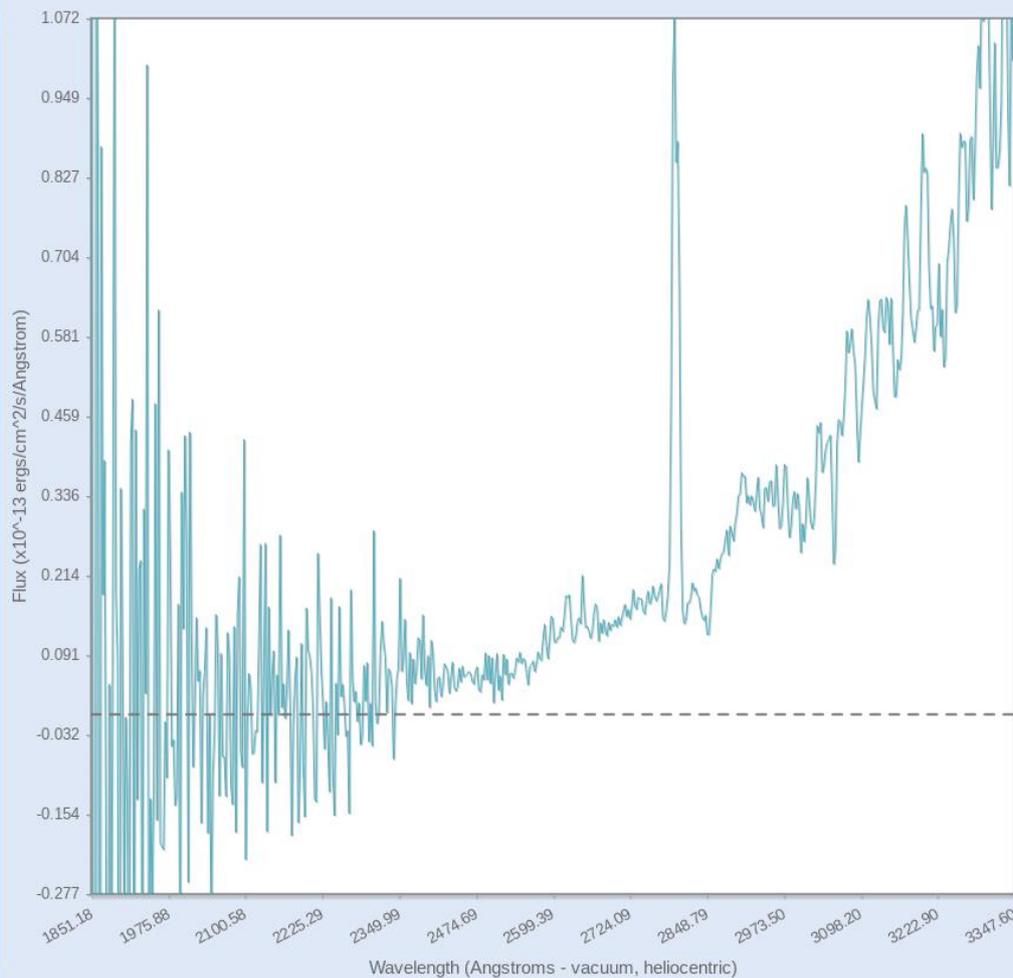
Options

Indicators

Line Lists

Fitting

Doppler Shift



Legend

Select All Select None

IUE_lwp14570 DISP:LOW
APER:LARGE

3:08:30 RA DEC
3:08:30 h:mm:ss/deg



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

**Специальная
астрофизическая обсерватория
Российской академии наук**

<https://www.sao.ru/Doc-k8/Telescopes/>



[О нас](#) [Подразделения](#) [Телескопы](#) [Наука](#) [ЦКП/УНУ](#) [Издания](#) [Образование](#) [Сервис](#) [Контакты](#)

6-м телескоп

[Краткое описание](#)
[Текущее состояние БТА](#)
[Приборы и методы](#)
[Расписание наблюдений:](#)

- [I полугодие 2017](#)
- [II полугодие 2017](#) NEW
- [Архив расписаний](#)

[Журналы и отчеты наблюдений](#)
(внутр.доступ)

[Отчеты директора
о работе телескопа](#)

[Национальный комитет по тематике российских телескопов](#) NEW

[Подача заявок](#)

[Общий архив наблюдательных данных САО РАН](#)

По организационным вопросам приезда на наблюдения обращаться к [Филипповой Екатерине Эдуардовне](#).

Радиотелескоп

[Краткое описание](#)
[Приборы и методы](#)
[Расписание наблюдений:](#)

- [I полугодие 2017](#)
- [II полугодие 2017](#) NEW
- [Архив расписаний](#)

[Отчеты о работе
радиотелескопа](#)

Малые телескопы

[Краткое описание](#)
Цейсс-1000:

- [приборы и методы](#)
- [Расписание наблюдений:](#)
 - [I полугодие 2017](#)
 - [II полугодие 2017](#) NEW
 - [Архив расписаний](#)
- [Форма заявки:](#)
 - [текст](#)
 - [интерактивная версия](#)

Цейсс-2000:

- [приборы и методы](#)
- [расписание наблюдений:](#)
 - [I полугодие 2017](#)
 - [II полугодие 2017](#) NEW

Вопросы и замечания к [вебмастеру](#)
Последнее обновление: 12/07/2017

Общий архив наблюдательных данных

[Положение об архиве](#)

[Текущее состояние](#)

[Расписания \(БТА / Цейсс-1000\)](#)

Локальные архивы БТА

<input type="radio"/> CCD	1996-02-13 - 2000-04-30
<input type="radio"/> IFP	1997-05-14 - 2000-03-02
<input type="radio"/> LYNX	1996-02-28 - 2002-05-28
<input type="radio"/> MOFS	1997-03-07 - 2001-08-18
<input type="radio"/> MPFS	1996-08-18 - 2009-10-27
<input type="radio"/> MSS	1996-05-26 - 2014-05-17
<input type="radio"/> NES	1998-03-10 - 2014-08-14
<input type="radio"/> PFES	1996-08-06 - 2001-01-07
<input type="radio"/> SCORPIO	2000-09-21 - 2017-02-26
<input type="radio"/> SP124	1996-02-18 - 2000-12-09
<input type="radio"/> UAGS	1994-11-08 - 2005-10-20

Малые телескопы

<input type="radio"/> CEGS	1997-03-24 - 2010-10-26
<input type="radio"/> Z600	1996-01-12 - 2001-06-06
<input type="radio"/> ZMCCD	1996-12-31 - 2017-02-17
<input type="radio"/> ZMUAGS	1998-04-30 - 2016-11-06

Радиотелескоп

<input type="radio"/> RATAN	1996-06-01 - 1999-01-25
-----------------------------	-------------------------

Архивы с WCS-привязкой

<input type="radio"/> SCORPIO_C	2000-09-21 - 2017-02-26
<input type="radio"/> ZMCCD_C	2013-08-27 - 2017-02-17
<input type="radio"/> ZMUAGS_C	2005-08-11 - 2016-11-06

Начальная дата:

1994 ▾ 01 ▾ 01 ▾

Конечная дата:

1994 ▾ 01 ▾ 01 ▾

или

выбрать дату по [ключу программы наблюдений](#)

R.A.(J2000)

Decl.(J2000)

(ra=hh mm ss.s; dec=[-]dd mm ss.s или в градусной мере)

или имя объекта:

Радиус поиска: 5 (arcmin)

Тип данных:

obs ▾

Режим наблюдений:

any ▾

[Фильтр:](#)

any

[Автор программы:](#)

[Справка](#)

Поиск

Очистить

Локальный архив: NES (2000-09-18)

Тип данных: **obs**

Автор: **Piskunov**

NN	Файл	Заголовок	Просмотр	Тип данных	Режим набл.	R.A.2000	Dec.2000
1	CD057/20000918/0918_01o_.mt.bz2		 	object	echelle	213.9133350	19.1823853
2	CD057/20000918/0918_02o_.mt.bz2		 	object	echelle	255.3857433	14.9475236
3	CD057/20000918/0918_03o_.mt.bz2		 	object	echelle	255.3853267	14.9478847
4	CD057/20000918/0918_04o_.mt.bz2		 	object	echelle	255.3849933	14.9486069
5	CD057/20000918/0918_05o_.mt.bz2		 	object	echelle	317.5847200	10.1277958
6	CD057/20000918/0918_06o_.mt.bz2		 	object	echelle	12.5825979	45.0017867
7	CD057/20000918/0918_07o_.mt.bz2		 	object	echelle	12.5823058	45.0025922
8	CD057/20000918/0918_08o_.mt.bz2		 	object	echelle	44.3222171	31.9343036
9	CD057/20000918/0918_09o_.mt.bz2		 	object	echelle	44.3268008	31.9321372
10	CD057/20000918/0918_10o_.mt.bz2		 	object	echelle	78.4661850	38.5995131
11	CD057/20000918/0918_11o_.mt.bz2		 	object	echelle	78.4661850	38.5995131

Найдено файлов: **11** (общий объем: 10.8 MB)



+++ Не нужно связываться с наблюдениями, все готовое

+++ Не нужно ждать наблюдений, экономия времени

--- Спектра объекта может не быть в базе

--- Спектр может иметь диапазон, отличный от интересующего

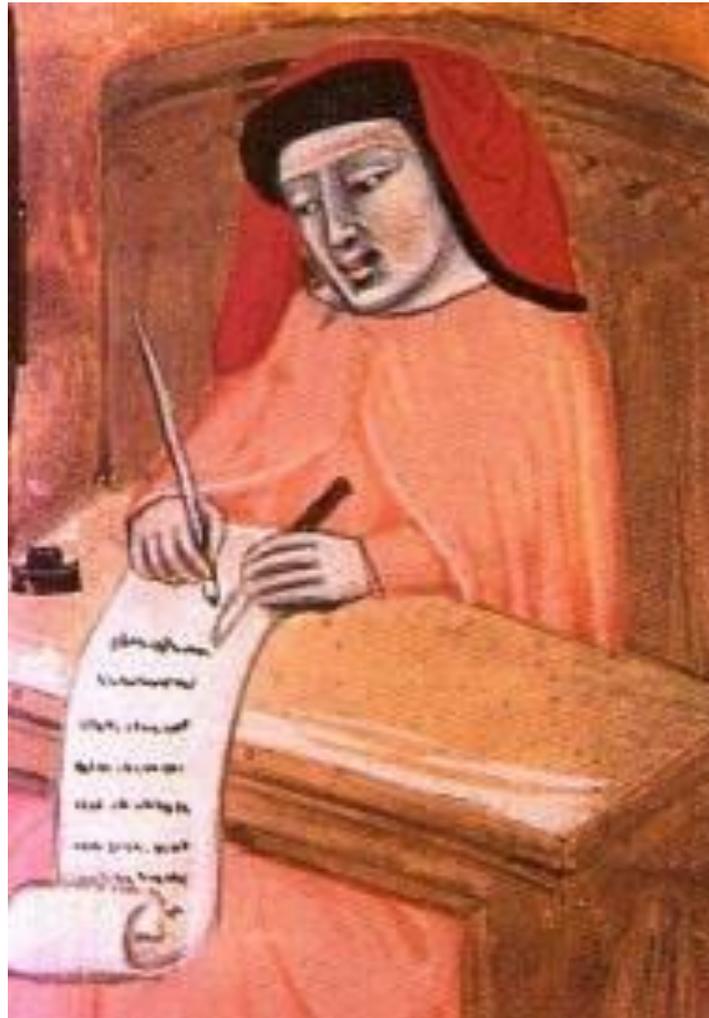
--- Спектр привязан к определенной дате, невозможно отследить изменения

--- В спектре могут присутствовать «артефакты» автоматической обработки

--- Чаще всего спектр «сырой», необработанный

Более сложный путь

Составление заявки на наблюдения



ESO User Portal Services

ESO recommends changing your password for better security.



Phase 1

- Download the proposal form
- Submit an observing proposal
- Check the time allocation information



Phase 2

- Download P2PP
- Submit a target or set-up change request
- Check the status of your observing runs
- Delegate Phase 2 tasks



Phase 3

- Download the Science Data Products Standard
- Submit data
- Check your Phase 3 submission status
- Delegate Phase 3 tasks



Archive Services

- Query the Archive for
 - La Silla Paranal raw data
 - La Silla Paranal reduced data
 - APEX reduced data
 - Phase 3 Catalogs
- Delegate proprietary data access rights

- Check your Archive requests
- Access other Archive services
- Access ALMA data 



Help

- Ask for help
- Find User Portal Information and FAQ
- Check the Data Reduction Forum
- Check the data reduction FAQ

Фаза 1

Подготовка заявки

- Выбор инструмента и режима наблюдений
- Выбор предпочтительного и обязательного времени наблюдений
- Выбор объектов наблюдений
- Описание требуемых методов наблюдений
- Научное обоснование заявки



Конкурс на возможность
наблюдать и на время
наблюдений



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук



[О нас](#) [Подразделения](#) [Телескопы](#) [Наука](#) [Издания](#) [Образование](#) [Сервис](#) [Контакты](#)

Найти

6-м телескоп

[Краткое описание](#)

[Текущее состояние БТА](#)

[Приборы и методы](#)

[Расписание наблюдений:](#)

- [II полугодие 2013](#)
- [I полугодие 2014](#) **NEW**

• [Архив расписаний](#)

[Форма заявки БТА:](#)

- [правила подачи заявок](#) **NEW**
- [интерактивная версия](#)

[Журналы и отчеты наблюдений](#)

(внутр. доступ)

[Отчеты директора](#)

[о работе телескопа](#) (ppt)

[Программный комитет по тематике больших телескопов РАН](#)

[Общий архив наблюдательных данных САО РАН](#)

По организационным вопросам приезда на наблюдения обращаться к [Кучаевой Екатерине Юрьевне](#) или [Филипповой Екатерине Эдуардовне](#) (для иностранных граждан).

Радиотелескоп

[Краткое описание](#)

[Приборы и методы](#)

[Расписание наблюдений:](#)

- [II полугодие 2013](#)
- [I полугодие 2014](#) **NEW**

• [Архив расписаний](#)

[Форма заявки](#)

[Отчеты о работе](#)

[радиотелескопа](#) (ppt)

Малые телескопы

[Краткое описание](#)

Цейсс-1000:

• [приборы и методы](#)

• [Расписание наблюдений:](#)

- [II полугодие 2013](#)
- [I полугодие 2014](#) **NEW**
- [Архив расписаний](#)

• [Форма заявки:](#)

- [текст](#)
- [интерактивная версия](#)

Цейсс-2000:

• [приборы и методы](#)

• [расписание наблюдений:](#)

- [II полугодие 2013](#)
- [I полугодие 2014](#) **NEW**

• [форма заявки](#)

(интерактивная версия)



On-line заявка на наблюдательное время 6-метрового телескопа САО РАН

Вход для зарегистрированных пользователей

логическое имя

пароль

[Зарегистрироваться](#)

С I полугодия 2014 года прием заявок на прибор **SCORPIO-2**.
Статус прибора - авторский.

*Работа поддержана грантом РФФИ 00-07-90014 и
МНТП "Научное приборостроение", контракт N 22/4*

Вопросы и предложения присылайте vam@sao.ru



КОМИТЕТ ПО ТЕМАТИКЕ 6-МЕТРОВОГО ТЕЛЕСКОПА РАН
369167, Россия, Карачаево-Черкессия,
Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз, САО РАН

ЗАЯВКА НА НАБЛЮДАТЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ НА 6-М ТЕЛЕСКОПЕ

сроки подачи:

1 полугодие (1 января - 30 июня)	2 полугодие(1 июля - 31 декабря)
до 10 сентября	до 1 марта

Заявка на 2 полугодие 2014 года.

1. Название программы:

2. Краткое содержание программы:

3. Основной заявитель:
(1 человек)

Пахомов Юрий Васильевич

4. Со-заявители:

5. Статус заявки:

долговременная или

6. Количество ночей
 часов

фазы Луны:

светлые
темные
серые
любые

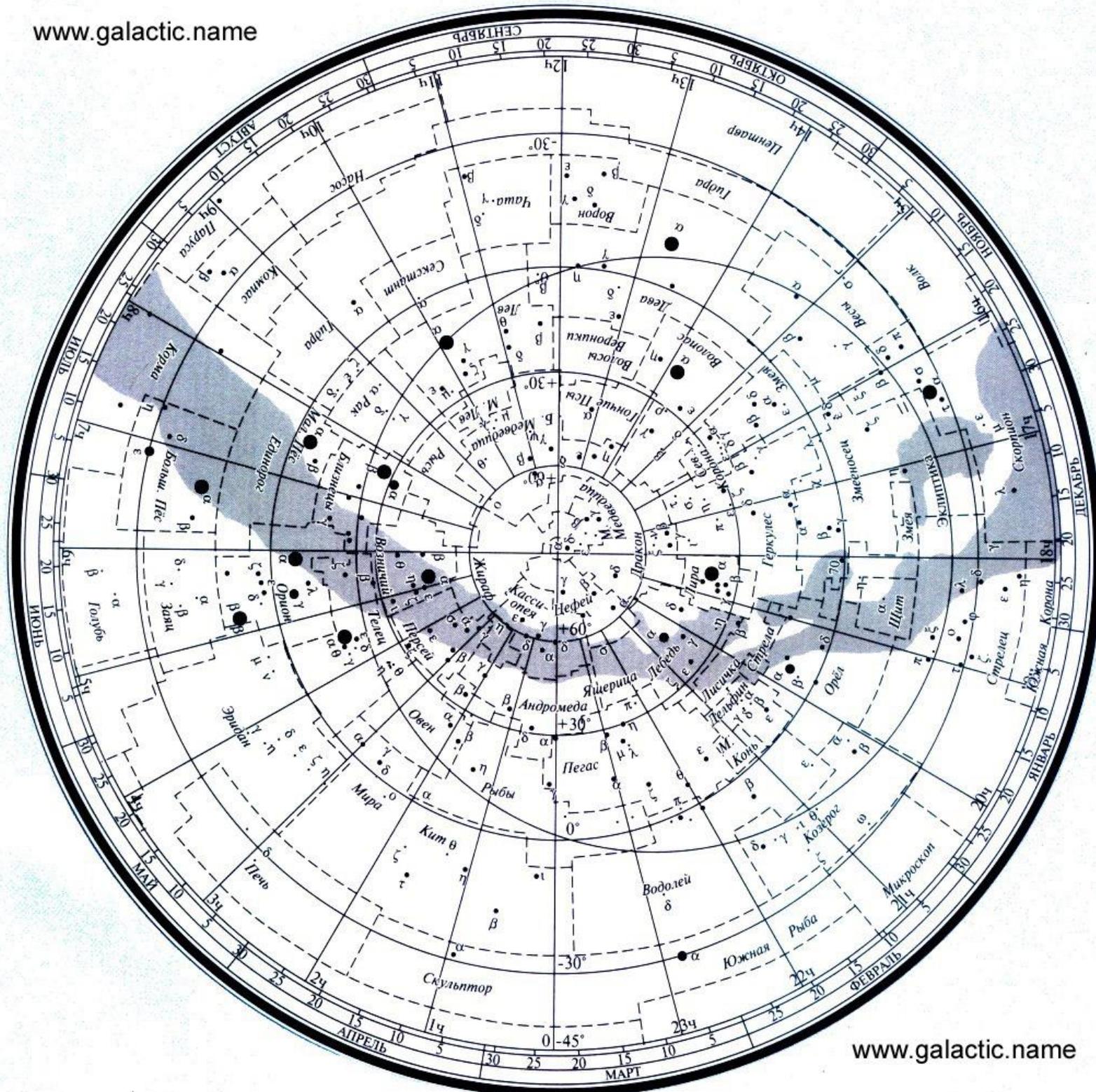
тип программы: основная

Оптимальный период
наблюдений

Допустимый период
наблюдений

готово

далее



7. Вариант наблюдений:

фокус: N2 ~ _

оптическое оборудование: NES ~ _

спектральный диапазон: 5000-7000 ~ _

спектральное разрешение: 50000 ~ _

требуемое отношение с/ш: 100 ~ _

экспозиция: ~ _

светоприемник: CCD ~ _

система регистрации: ~ _

дополнительная информация:

8. Научное обоснование предлагаемой заявки:

PZ Mon - активная звезда позднего спектрального класса ($m_v=9m$). Ее активность ассоциируется с пятнами на поверхности звезды (типа BY Dra), а также хромосферными вспышками. Является источником рентгеновского излучения. В оптическом диапазоне амплитуда изменения блеска составляет около 0.2m с периодом 6-7 лет. Существует также и долгопериодическая составляющая (~60 лет) с амплитудой около 0.6m. Одной из острых проблем в изучении этой звезды является ее классификация по светимости. Чаще всего PZ Mon классифицируется как K2Ve и рассматривается как активный красный карлик, который проявляет свойства переменных типа BY Dra. Общая площадь запятненности поверхности звезды составляет 20-30% (Алексеев И.Ю. и др, Изв.КраО). Расстояние до звезды, определяемое по параллаксу, имеет большую ошибку ($r=1400\pm 2300$ пк), поэтому оценивается лишь косвенными методами, и приводят значения около 15 пк (Gershberg R.E. et al, 1999, A&AS, 139, 555; Cristaldi et al, 1970, A&AS, 2, 233). Однако в 1998 году вышла работа (Saar S.H, 1998, IBVS, 4580, 1), в которой данная звезда представлена как красный гигант. Данный вывод основан на сравнении малого участка спектра звезды со спектрами карлика и гиганта, полученными на солнечном телескопе с высоким разрешением ($R=120.000$). Отличие спектра PZ Mon от спектра карлика было значительным, в то время как со спектром гиганта было сходство. В 2007 году были пересмотрены данные проекта Hipparcos (van Leeuwen F., 2007, A&A, 474, 653), и для PZ Mon расстояние оказалось около 630 ± 410 пк. При таких значениях PZ Mon должна являться гигантом (ускорение силы тяжести $lgg=2.16\pm 0.56$). Таким образом существует неопределенность в эволюционном статусе звезды PZ Mon. С одной стороны ее фотометрические характеристики и степень активности свидетельствуют о принадлежности к типу BY Dra, к которому относятся карлики. Но это не согласуется со сравнительным анализом единственного спектра и расстоянием, определенным по параллаксу. С другой стороны для красных гигантов не характерна подобная активность. Решить эту неопределенность возможно посредством подробного анализа спектра звезды PZ Mon в широком диапазоне, который даст возможность определить параметры звездной атмосферы (эффективную температуру, ускорение силы тяжести, микротурбулентную скорость) и содержания химических элементов.

9. Обоснование использования 6-м телескопа и метода наблюдений:

Звезда PZ Mon (HD289114) обладает относительно слабым блеском ($m_v=9m$), и для решения поставленной задачи требуется высокое разрешение ($R>40.000$). В таких условиях необходимо использование телескопа с большой апертурой. Спектрограф НЭС2 по своим характеристикам удовлетворяет требованиям для спектральных наблюдений PZ Mon с целью выяснения ее эволюционного статуса.

10. Наблюдаемые объекты программы:

Name	R.A.	Dec.	Epoch	Mag
PZ Mon	06 48 21.066	+01 13 08.30	2000	9.1

11. Принималась ли заявка ранее? Краткая аннотация результатов:

Данная заявка подается впервые

12. Результаты наблюдений авторов на 6-м телескопе по другим программам за последние 3 года (отчет, публикации):

Фаза 2

Наблюдения

Режимы наблюдений (Observing mode)

Visitor mode

Наблюдатель
присутствует на
наблюдениях

Service mode

Наблюдения
проводятся в
автоматическом
режиме

Приоритеты наблюдений

Высший (A)

Гарантированное
выделение времени

DDT — directors
dedicated time —
директорское время

Важные
исследования

Нормальный (B)

Большая
вероятность
наблюдений

Низкий (C)

Если погода
позволит и
останется
время после
выполнения
заявок A и B

Фаза 3

Получение наблюдательных данных

Политика

Заявитель

Получает сразу данные и имеет возможность «снять сливки»

Посторонний

Если обсерватория открывает данные в архиве, то можно получить данные через некоторое время (обычно 1 год)

Архив

Типы данных

Сырые данные
RAW data
(FITS файлы)

Необходима обработка

Обработанные данные
Reduced data
(FITS файлы)

Автоматическая обработка PIPELINE

Из чего состоят файлы наблюдений?

Файлы предварительной обработки

- **BIAS** (masterbias) — порядка 10 файлов нулевой экспозиции ($S/N > S/N_{\text{объект}}$)

Файлы с калибровочными спектрами

- **Flat field** (masterflat) — «плоское поле» ($S/N > S/N_{\text{объект}}$) - неоднородность чувствительности CCD

Файлы со изображениями изучаемых объектов

- **Obj** — один или несколько файлов с экспозицией не более получаса

Из чего состоят файлы спектральных наблюдений?

Файлы предварительной обработки

- **BIAS** (masterbias) — порядка 10 файлов нулевой экспозиции ($S/N > S/N_{\text{объект}}$)

Файлы с калибровочными спектрами

- **Flat field** (masterflat) — «плоское поле» ($S/N > S/N_{\text{объект}}$) - неоднородность чувствительности CCD
- **Arc** (masterarc) - спектр лампы (ThAr, FeAr) для калибровки по длинам волн

Файлы с дополнительными калибровочными спектрами

- **Std** (Standard star) — спектр калибровочной звезды с хорошо известным распределением энергии
- **Div** (divider) — спектр звезды с быстрым вращением для учета теллурических линий

Файлы со спектрами изучаемых объектов

- **Obj** — один или несколько файлов с экспозицией не более получаса

Что мы видим в кадре?

Signal = BIAS + masterflat + SKY + scattered_light + **ОБЪЕКТ**

Noise = BIAS_noise + dark_noise + RON(read of noise) + stat_noise(Signal)

Задача:

достать ОБЪЕКТ из Signal

в одном пикселе

$$\frac{S}{N} = \frac{Flux \times t}{\sqrt{Flux \times t + Flux_{bg} \times t + Flux_{dark} \times t + RON}} \sqrt{gain}$$

в группе пикселей

$$\frac{S}{N} \approx \sqrt{(\sum F - \sum F_{bg}) \times gain}$$

FITS формат



File Bn20121104_019.fts

Object Flat

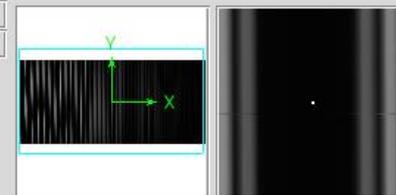
Value 1834

WCS x y

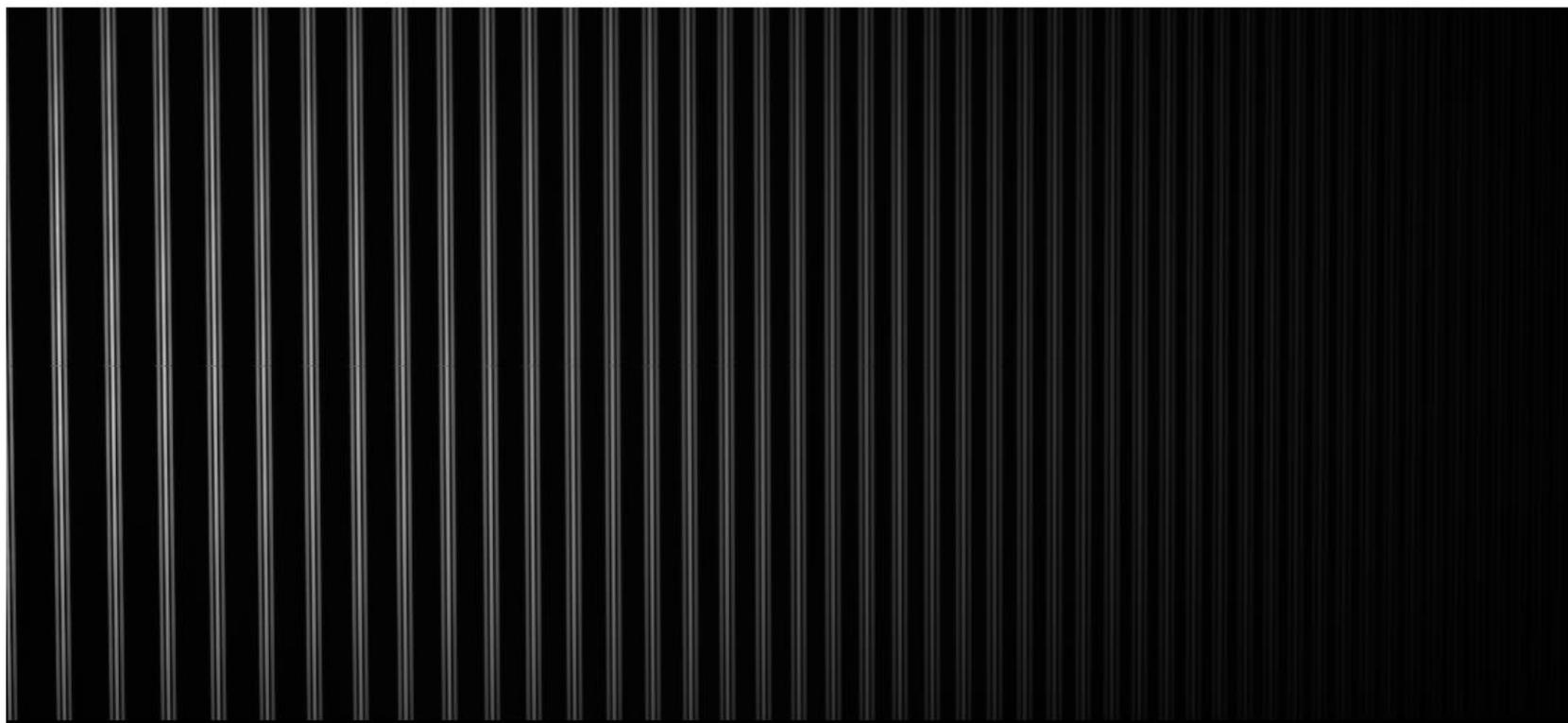
Physical X 1733.000 Y 1047.000

Image X 1733.000 Y 1047.000

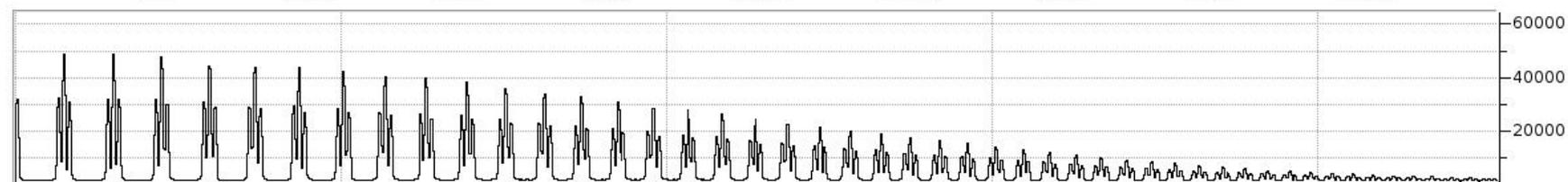
Frame 1 x 0.250 0.000 °



file	edit	view	frame	bin	zoom	scale	color	region	wcs	analysis	help
information		panner		magnifier		buttons		colorbar		graph horz	



600000000000



FITS формат

Flexible Image Transport System
гибкая система передачи изображений

Формат файлов, используемый в науке для

- 1) хранения
- 2) передачи
- 3) анализа

- 1) изображений (1D, 2D, 3D)
- 2) наборов данных (nD)
- 3) таблиц (текстовых и бинарных)
- 4) метаданных (описание)

Расширяемый формат — есть возможность подогнать под любые данные

<https://fits.gsfc.nasa.gov/>

https://fits.gsfc.nasa.gov/fits_standard.html

FITS формат

- 1) Читаемый формат, как машинами, так и человеком
- 2) Самодокументированный формат
- 3) Расширяемый формат — есть возможность подогнать под любые данные

<https://fits.gsfc.nasa.gov/>

https://fits.gsfc.nasa.gov/fits_standard.html

**HEA
D**

**DAT
A**

HEA
D

HEAD1

DATA1

HEAD2

DATA2

HEAD3

DATA3

HEAD — 2880 bytes

Keyword1 = value1 // comment

Keyword2 = value2

Keyword3 = „text value3“

...

...

...

...

...

KeywordN = valueN

END

HEAD

SIMPLE = T или F (соответствие стандарту)

BITPIX = -64, -32, 8, 16, 32 / DATA PRECISION

8	Character or unsigned binary integer
16	16-bit twos-complement binary integer
32	32-bit twos-complement binary integer
-32	IEEE single precision floating point
-64	IEEE double precision floating point

NAXIS = 2 / NUMBER OF IMAGE DIMENSIONS
NAXIS1 = 4065 / NUMBER OF COLUMNS
NAXIS2 = 3521 / NUMBER OF ROWS

END

$$\begin{aligned} \text{Nbits} &= |\text{BITPIX}| \times (\text{NAXIS1} \times \text{NAXIS2} \times \dots \times \text{NAXISm}) = \\ &= 32 \times (4065 \times 3521) = 458011680 \text{ bits} = 57251460 \text{ bytes} \\ &= \\ &= 54.6 \text{ MB} \end{aligned}$$

HEAD

EXTEND = T

возможно присутствие расширенного представления данных

XTENSION = IMAGE | BINTABLE

BITPIX = -32

NAXIS = 2

NAXIS1 = 1024

NAXIS2 = 1024

HEAD1

DATA1

HEAD1

XTENSION = TABLE | BINTABLE

NAXIS = 2 / Table is a matrix

NAXIS1 = 61160 / Table width in bytes

NAXIS2 = 77 / Number of echelle orders

TFIELDS = 10 // количество колонок

TFORM1 = '1911E '

TTYPE1 = 'FLUX '

TUNIT1 = '[1] '

TFORM2 = '1911D '

TTYPE2 = 'WAVELENGTH'

TUNIT2 = '[A] '

TFORM3 = '1911E '

TTYPE3 = 'FLUX_ERROR'

TUNIT3 = '[1] '

TFORM4 = '1911E '

TTYPE4 = 'TH_AR_COMPARISON'

TUNIT4 = '[1] '

TFORM5 = '1911E '

TTYPE5 = 'FLATFIELD'

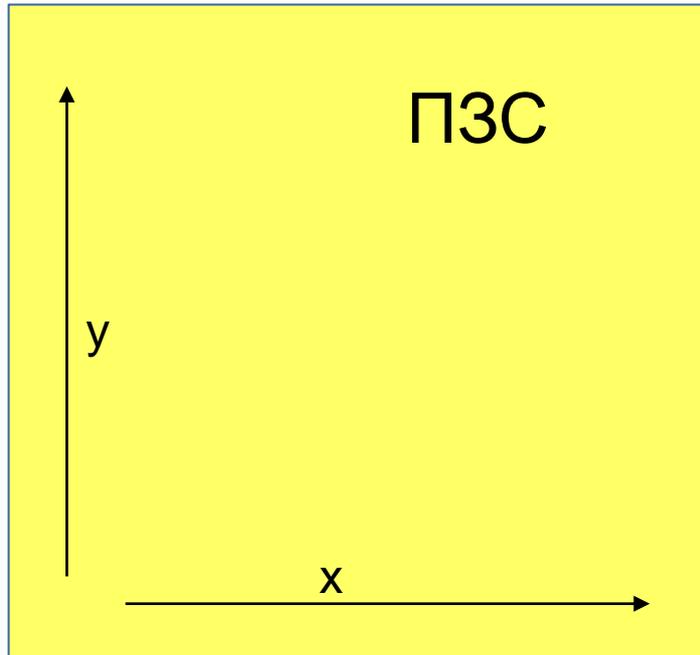
TUNIT5 = '[1] '

Стандартный набор ключевых слов FITS

(blank)	CROTAn	EQUINOX	NAXISn	TBCOLn	TUNITn
AUTHOR	CRPIXn	EXTEND	OBJECT	TDIMn	TZEROn
BITPIX	CRVALn	EXTLEVEL	OBSERVER	TDISPn	XTENSION
BLANK	CTYPEn	EXTNAME	ORIGIN	TELESCOP	
BLOCKED	DATAMAX	EXTVER	PCOUNT	TFIELDS	
BSCALE	DATAMIN	GCOUNT	PSCALn	TFORMn	
BUNIT	DATE	GROUPS	PTYPEn	THEAP	
BZERO	DATE-OBS	HISTORY	PZEROn	TNULLn	
CDELTn	END	INSTRUME	REFERENC	TSCALn	
COMMENT	EPOCH	NAXIS	SIMPLE	TTYPEn	

Системы координат в FITS

World coordinate system



DATA value = $f(\text{DATA}(x,y))$

Physical coordinate = $f(x,y)$

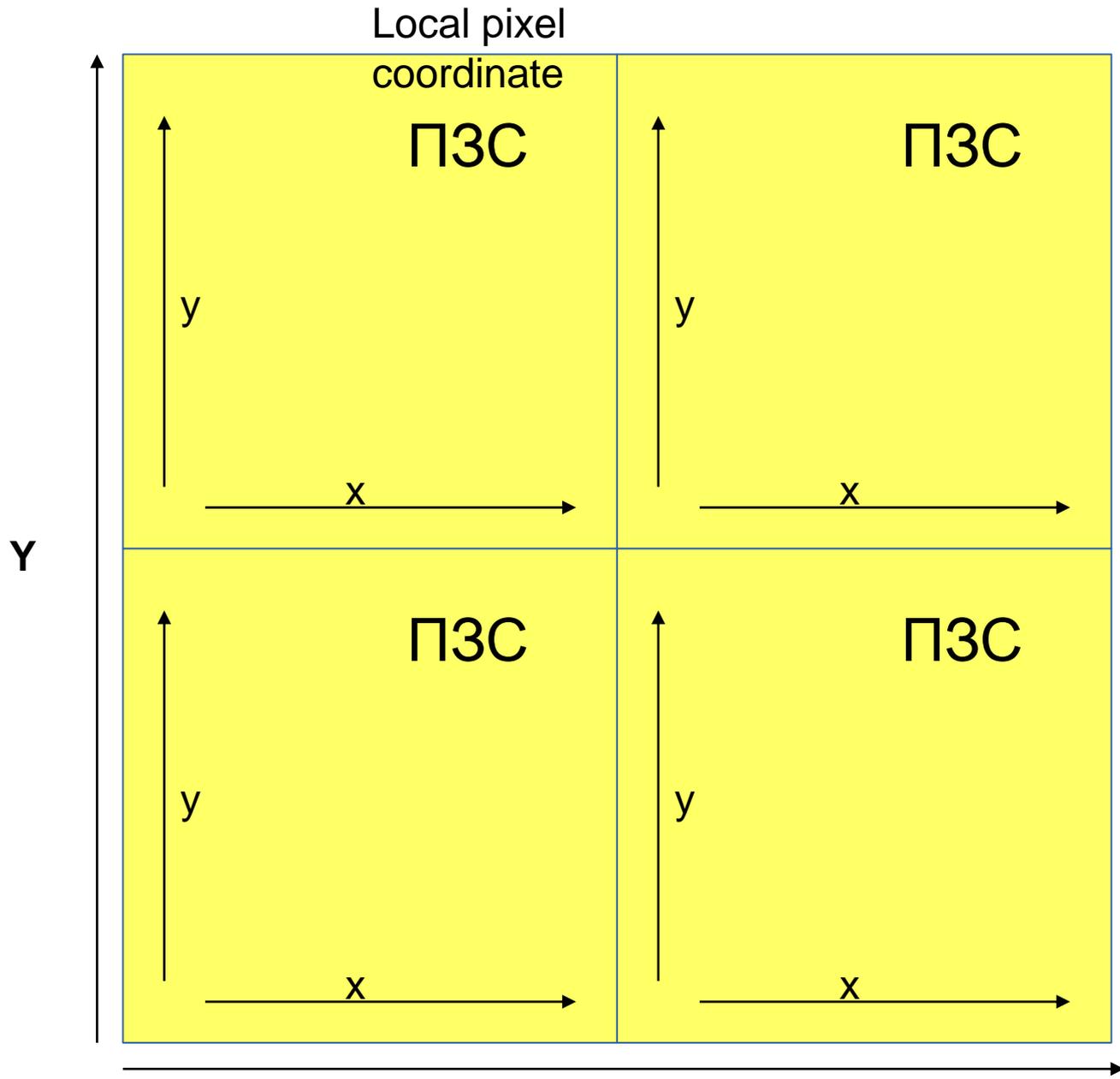
Pixel
coordinate

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2002A&A...395.1061G>

Greisen, E. W.; Calabretta, M. R. «Representations of world coordinates in FITS»

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2006A&A...446..747G>

Greisen, E. W.; Calabretta, M. R.; Valdes, F. G.; Allen, S. L. «Representations of spectral coordinates in FITS»

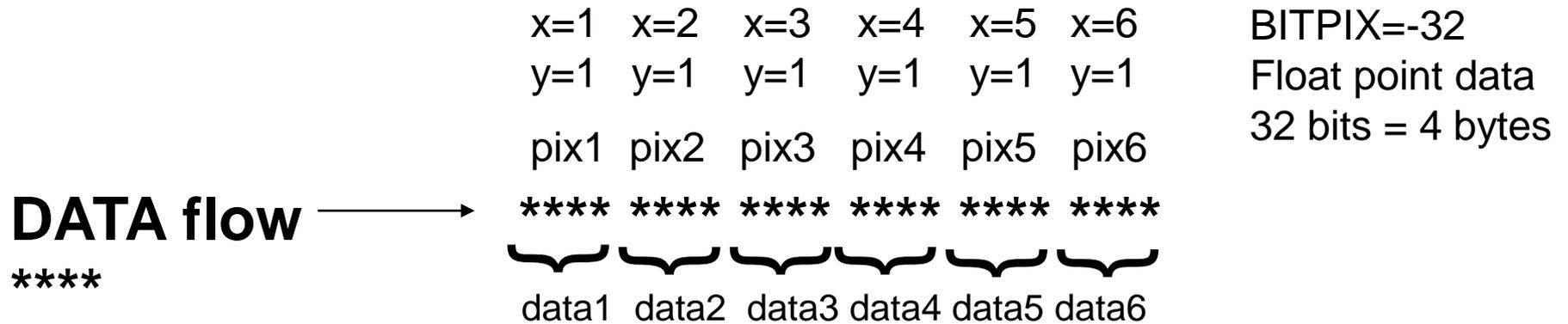


Global pixel coordinate

X

Системы координат в FITS

World coordinate system



$$\text{Phys1} = \text{CRVAL1} + \text{CDELTA1}(\text{X} - \text{CRPIX1})$$

При тождественности систем координат $\text{CRVAL1}=1$ $\text{CDELTA1}=1$ $\text{CRPIX1}=1$

В спектроскопии для описания спектров с постоянным шагом, например:

$\text{CRVAL1}=4500$
 $\text{CDELTA1}=0.1$
 $\text{CRPIX1}=1$

Типы координат СТУРЕН

Code	Name	Symbol	Associate variable	Default units
FREQ	Frequency	ν	ν	Hz
ENER	Energy	E	ν	J
WAVN	Wavenumber	κ	ν	m^{-1}
VRAD	Radio velocity	V	ν	m s^{-1}
WAVE	Vacuum wavelength	λ	λ	m
VOPT	Optical velocity	Z	λ	m s^{-1}
ZOPT	Redshift	z	λ	–
AWAV	Air wavelength	λ_a	λ_a	m
VELO	Apparent radial velocity	v	v	m s^{-1}
BETA	Beta factor (v/c)	β	v	–

Типы преобразований координат

Code	Regularly sampled in	Expressed as
F2W	Frequency	Wavelength
F2V	Frequency	Apparent radial velocity
F2A	Frequency	Air wavelength
W2F	Wavelength	Frequency
W2V	Wavelength	Apparent radial velocity
W2A	Wavelength	Air wavelength
V2F	Apparent radial velocity	Frequency
V2W	Apparent radial velocity	Wavelength
V2A	Apparent radial velocity	Air wavelength
A2F	Air wavelength	Frequency
A2W	Air wavelength	Wavelength
A2V	Air wavelength	Apparent radial velocity
LOG	logarithm	Any 4-letter coordinate type
GRI	detector	Any from Table 1
GRA	detector	Any from Table 1
TAB	not regular	Any 4-letter coordinate type

WAVE-LOG

Данные и их конвертация в реальные значения

Для изображений:

$$\text{physical value} = \text{BZERO} + \text{BSCALE} \times \text{array value}$$

Для таблиц:

$$\text{physical value} = \text{TZEROn} + \text{TSCALn} \times \text{field value}$$

SIMPLE = T / Standard FITS file
BITPIX = 16 / No. of bits per pixel
NAXIS = 3 / No. of axes in matrix
NAXIS1 = 4632 / No. of pixels in X
NAXIS2 = 2068 / No. of pixels in Y
NAXIS3 = 1 / No. of images
CRVAL1 = 0 / Offset in X
CRVAL2 = 0 / Offset in Y
ORIGIN = 'CCDServer v2.1' / ACQUISITION SYSTEM
DATE-OBS= '2012-11-04T20:46:32' / Date and time of TM_START
TELESCOP= 'BTA' / 6m Russian telescope
INSTRUME= 'NES' / Nasmyth echelle spectrometer
OBSERVER= ' ' / OBSERVERS
OBJECT = 'ThAr' / NAME OF IMAGE
BSCALE = 1.00 / REAL = TAPE*BSCALE + BZERO
BZERO = 32768.0 /
DATAMAX = 64183.0 / MAX PIXEL VALUE
DATAMIN = 857.0 / MIN PIXEL VALUE
FILE = 'Bn20121104_008.fits' / original name of input file
IMAGETYP= 'eta' / object, flat, dark, bias
OBSERVAT= 'SAO RAS' / Observatory
START = '00:46:32.95' / measurement start time (local) (hh:mm:ss.ss)
EXPTIME = 300.0 / actual integration time (sec)

CAMTEMP = -130.845 / camera temperature (C)
DETECTOR= 'E2V CCD42-90 blue' / detector
RATE = 100.0 / readout rate (KPix/sec)
GAIN = 1.9 / gain, electrons per adu
NODE = 'B' / output node (A, B, AB)
BINNING = '1x1' / binning
PXSIZE = '13.5 x 13.5' / pixel size (mkm x mkm)
UT = '20:46:32.95' / universal time (hh:mm:ss.ss)
ST = ' ' / sidereal time (hh:mm:ss.ss)
RA = 0.0 / Right ascension J2000.
DEC = 0.0 / Declination J2000.
EPOCH = 2000.0 / Epoch of RA and DEC
Z = / zenith distance
A = / azimuth
PARANGLE= / parallactic angle
ROTANGLE= / field rotation angle

SEEING = 1.5 / seeing
FILTER = ' / filter
FOCUS = / focus of telescope (mm)
IMSCALE = ' / image scale ("/Pix x "/Pix)
DOMETEMP= / dome temperature (C)
WIND = / wind (m/s)
CLOUDS = / clouds (%)
PRESSURE= / pressure
DATE = '2012-11-04'
TM_START= '74792 ' / UT start time 20.7758194444
TM_END = '75092 ' / UT end time 20.8591527778
RDNOISE = 3.7 / Read noise in electrons
HISTORY
COMMENT
HISTORY Fixed from DINA II format by fixfiles.py
END

fv

New File...

Open File...

SkyView...

Catalogs...

VizieR...

Connect to Hera...

Display Device

Hide All Windows

File Summary

Header

Table

Image Table

Vector Table

Preference

Clipboard

Help

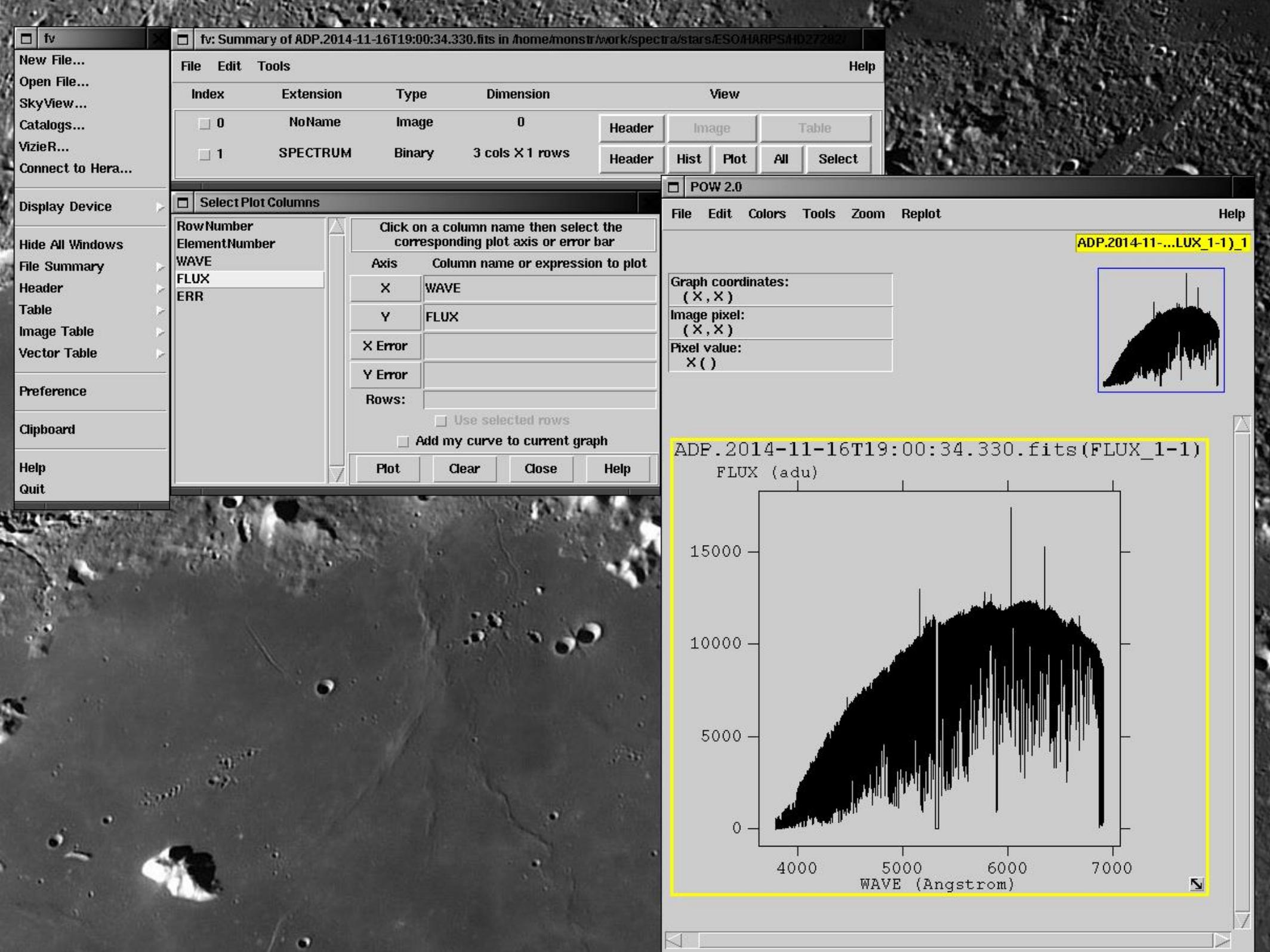
Quit

fv: Summary of ADP.2014-11-16T19:00:34.330.fits in /home/monstr/work/spectra/stars/ESO/HARPS/HD27282/

File	Edit	Tools	Help		
Index	Extension	Type	Dimension	View	
<input type="checkbox"/> 0	Primary	Image	0	Header	Image Table
<input type="checkbox"/> 1	SPECTRUM	Binary	3 cols X 1 rows	Header	Hist Plot All Select

fv:...014-11-16T19:00:34.330.fits[0] in /home/monstr/work/spectra/stars/ESO/HARPS/HD27282/

File	Edit	Tools	Help	
Search for:		<input type="text"/>	Find	Case sensitive? No
<pre> SIMPLE = T / file does conform to FITS standard BITPIX = 8 / number of bits per data pixel NAXIS = 0 / number of data axes EXTEND = T / FITS dataset may contain extensions COMMENT FITS (Flexible Image Transport System) format is defined in 'Astronomy COMMENT and Astrophysics', volume 376, page 359; bibcode: 2001A&A...376..359H DATE = '2014-11-16T04:56:53.905' / UT date when this file was written INSTRUME= 'HARPS' / Instrument used. RA = 64.781865 / 04:19:07.6 RA (J2000) pointing (deg) DEC = 17.52109 / 17:31:15.9 DEC (J2000) pointing (deg) EQUINOX = 2000. / Standard FK5 (years) RADECSYS= 'FK5' / Coordinate reference frame EXPTIME = 1200.0017 / Total integration time MJD-OBS = 56977.19225997 / MJD start (2014-11-16T04:36:51.261) DATE-OBS= '2014-11-16T04:36:51.261' / Date of observation UTC = 16606.000 / 04:36:46.000 UTC at start (sec) LST = 12872.603 / 03:34:32.603 LST at start (sec) PI-COI = 'PASQUINI' / PI-COI name. ORIGIN = 'ESO' / European Southern Observatory TELESCOP= 'ESO-3.6' / ESO Telescope Name M EPOCH = F / T if resulting from multiple epochs SINGLEXP= T / T if resulting from single exposure PRODLVL = 2 / Product level: 1-raw 2-science grade 3-advanced DISPELEM= 'HARPS Echelle' / Dispersive element name </pre>				



- New File...
- Open File...
- SkyView...
- Catalogs...
- VizieR...
- Connect to Hera...
- Display Device
- Hide All Windows
- File Summary
- Header
- Table
- Image Table
- Vector Table
- Preference
- Clipboard
- Help
- Quit

fv: Summary of ADP.2014-11-16T19:00:34.330.fits in /home/monstr/work/spectra/stars/ESO/HARPSAID27292

Index	Extension	Type	Dimension	View
<input type="checkbox"/> 0	NoName	Image	0	Header Image Table
<input type="checkbox"/> 1	SPECTRUM	Binary	3 cols X 1 rows	Header Hist Plot All Select

Select Plot Columns

Click on a column name then select the corresponding plot axis or error bar

Axis	Column name or expression to plot
X	WAVE
Y	FLUX
X Error	
Y Error	

Rows: Use selected rows
 Add my curve to current graph

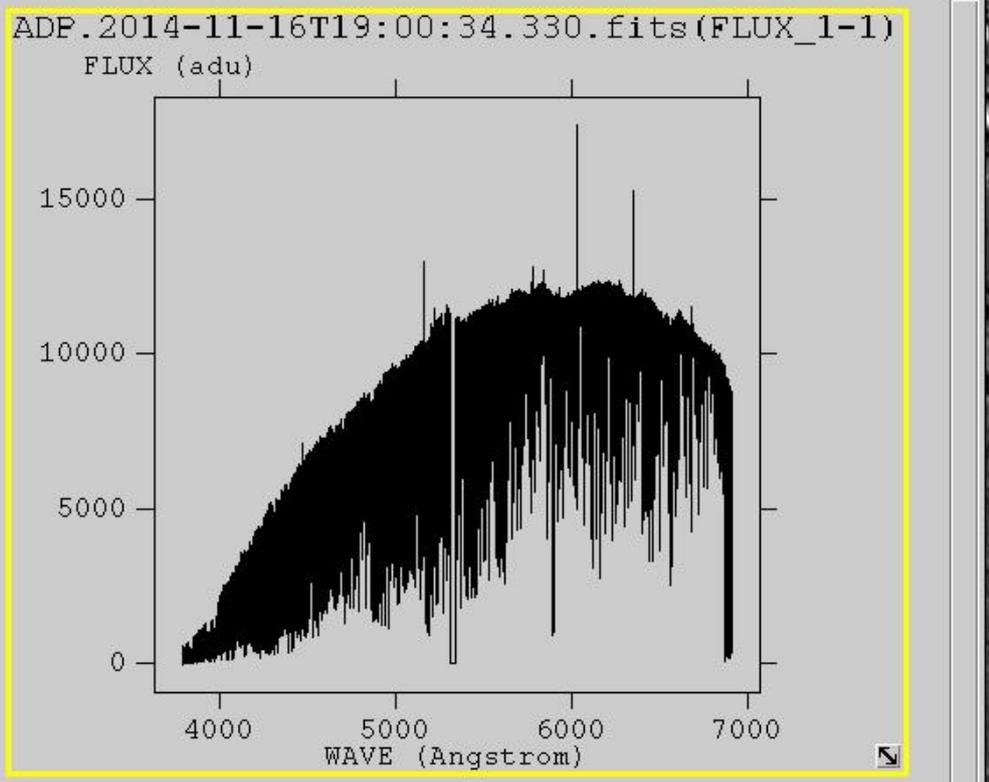
Plot Clear Close Help

POW 2.0

File Edit Colors Tools Zoom Replot Help

ADP.2014-11-...LUX_1-1_1

Graph coordinates: (X, X)
 Image pixel: (X, X)
 Pixel value: X()



Обработка наблюдений



SUPER
COOL
PICS.COM
HD

Инструмент

Midas — **M**unich **I**mage **D**ata **A**nalys **S**ystem

Разработчик: ESO

Лицензия: GNU General Public License (GPL)

WWW: <http://www.eso.org/sci/software/esomidass/>

FTP: <ftp://ftp.eso.org/pub/midaspub/13SEP>

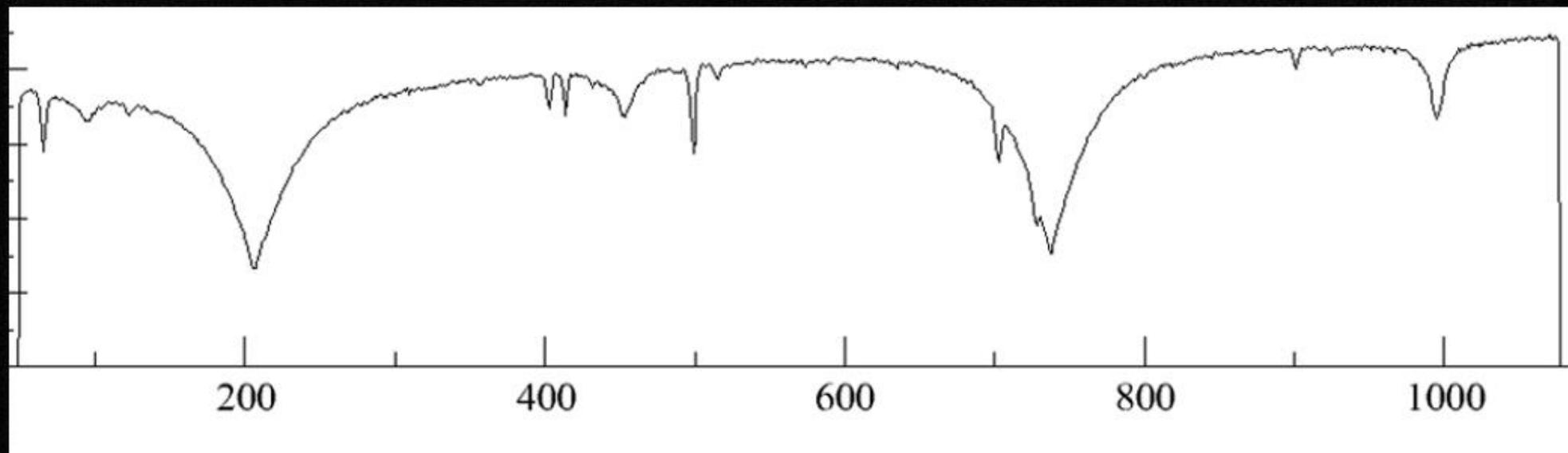
Операционная система: Unix-подобные (Linux, FreeBSD, ...)

Предварительная обработка

Сюда входит весь комплекс первоначальных действий над кадрами CCD, необходимый перед любыми исследованиями (прямые изображения или спектры):

- учет BIAS и темнового тока (в случае необходимости)
- очистка от следов космических лучей
- изменение ориентации кадра (вращение, отражение, сдвиг)

Обработка дифракционных спектров



\$ inmidas

вход в Midas

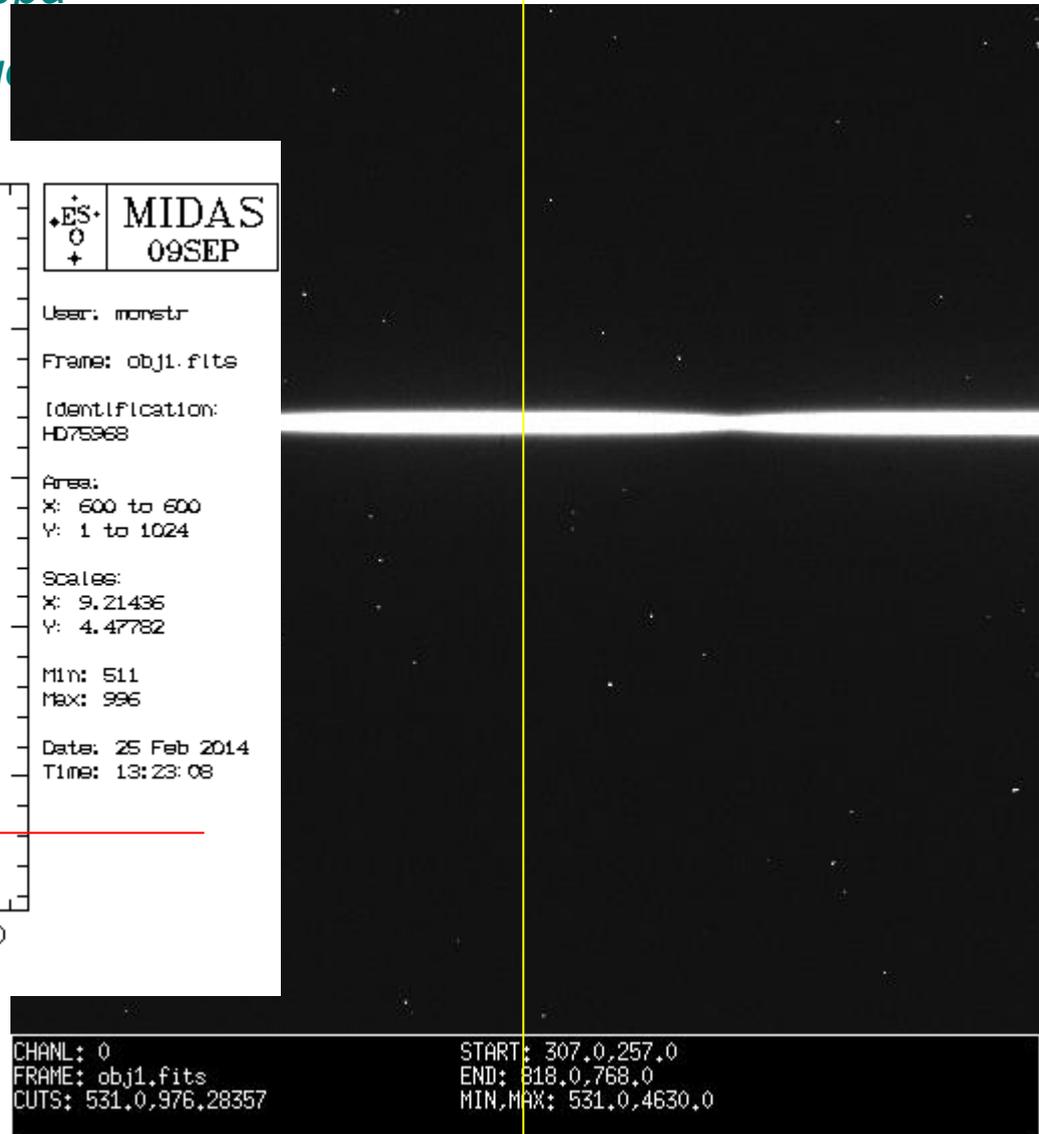
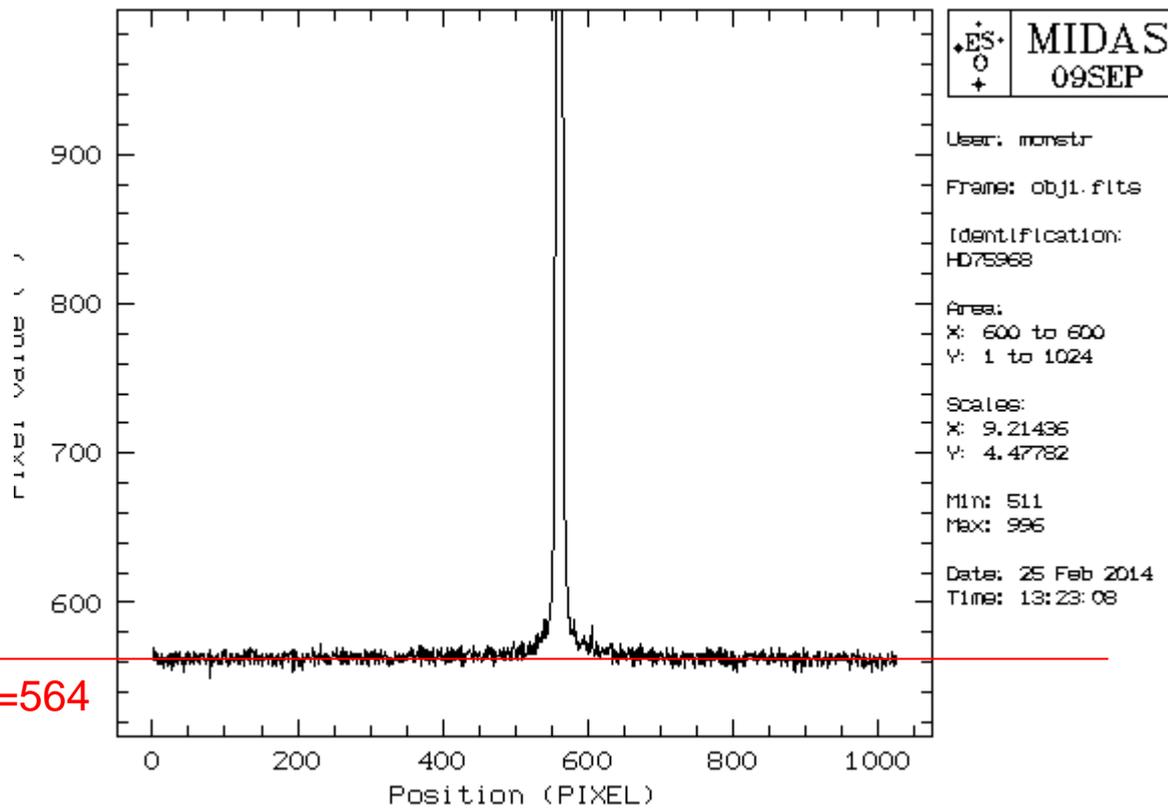
\$ set/con long

загрузка процедур для работы с длинной

целью

\$ loa/ima obj.fits *просмотр кадра*

\$ indisk/fits obj.fits obj.bdf *конс*



Учет BIAS (первый способ)

\$ comp/ima obj_bb = obj —564 *вычитание из каждого пикселя 564*

+++ не вносит шума

--- требуется постоянство электроники

Учет BIAS (второй способ)

\$ cre/icat bias.cat = bias*.fits *создание каталога изображений BIAS*

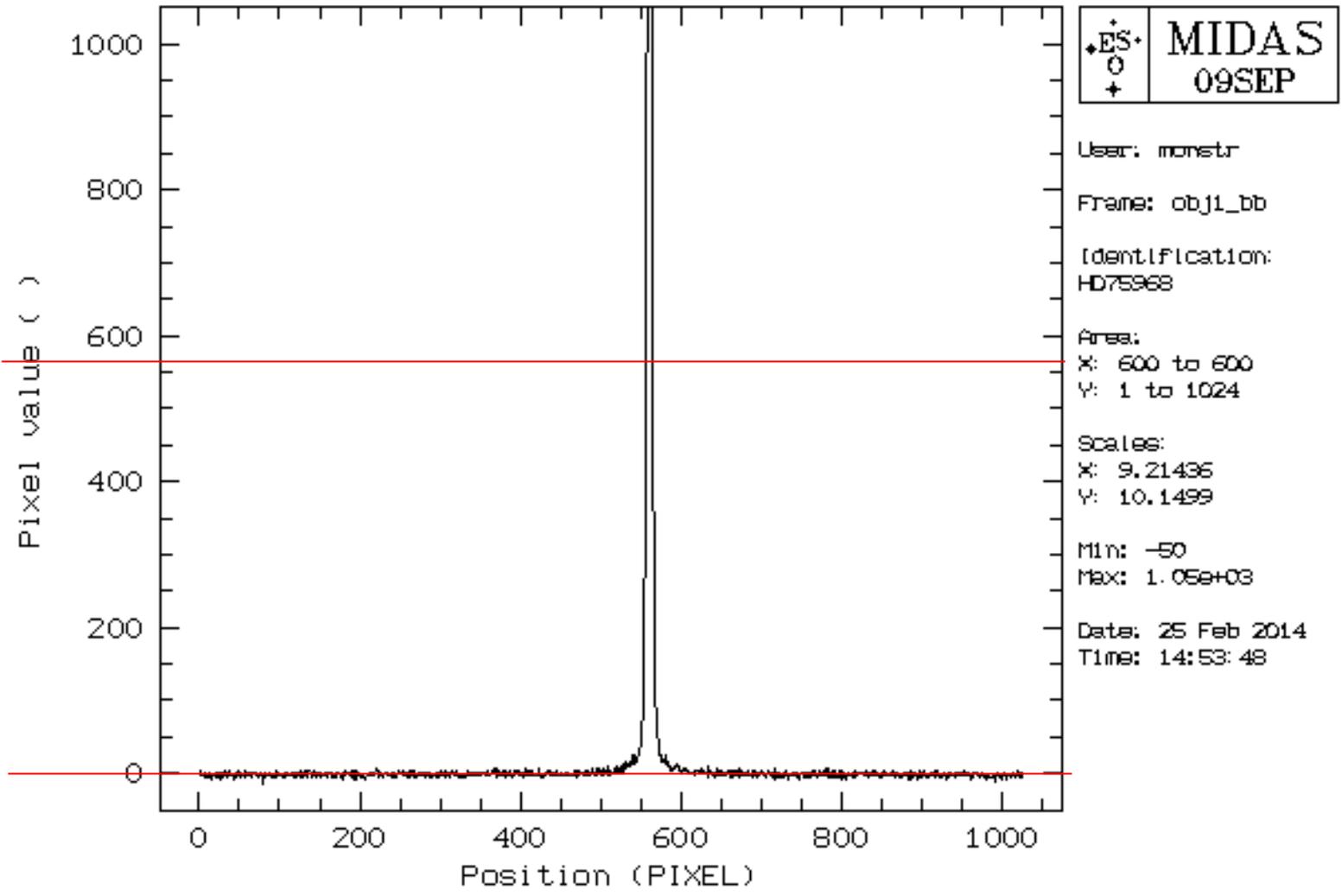
\$ average/ima masterbias = bias.cat ?? median
*усреднение методом медианной
фильтрации*

\$ comp/ima obj_bb = obj — masterbias *вычитание из каждого пикселя*

+++ учитывается нулевая неоднородность CCD

+++ учитываются нюансы работы электроники

BIAS=564



Чистка космических лучей

Способ 1

\$ cre/icat obj_bb.cat = obj_bb*.bdf *создание каталога*

\$ aver/ima obj_cos = obj_bb.cat ? ? median *медианная фильтрация*

+++ усредняет как нормальные, так и дефектные участки

--- требует эквивалентности всех кадров

Способ 2

\$ FILTER/COSM obj_bb obj_cos 0,2.86,0.68

[1], [2], [3]

1. уровень неба (ADU)

2. обратный gain (e-/ADU)

3. RON — шум чтения (ADU)

+++ МОЖНО ИСПОЛЬЗОВАТЬ НА ЕДИНИЧНЫХ КАДРАХ

--- трудно вычистить слабые «космики»

Учет плоского поля

```
$ cre/icat ff = ff*.fits
```

```
$ aver/ima masterflat = ff.cat ? ? median
```

или

```
$ aver/ima masterflat = ff.cat ? ? average
```

```
$ comp/ima obj_ff = obj_cos/masterflat
```

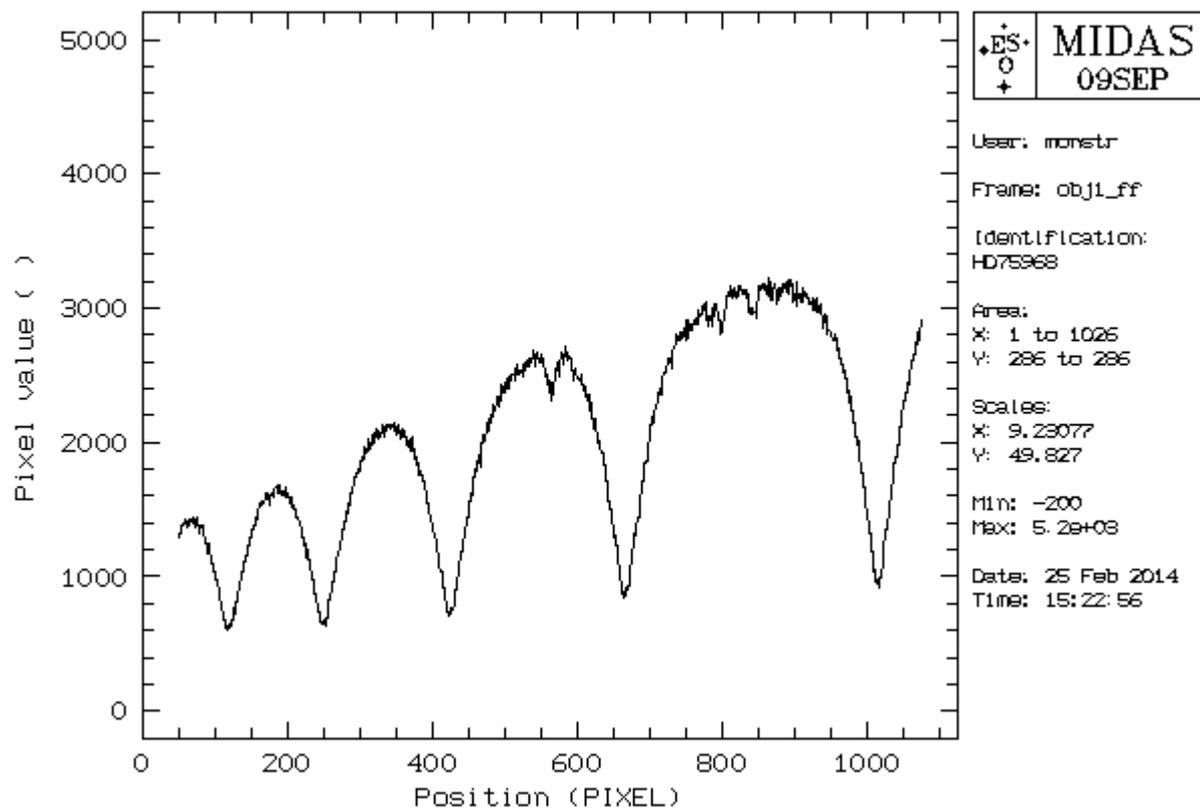
Но лучше использовать нормализованный Flat field
(мы остаемся в той же самой системе отчетов сигнала CCD)

```
$ FILTER/MEDI masterflat ff1 111,0
```

```
$ comp/ima normff = masterflat/ff1
```

```
$ get/cur
```

```
$ plo/row obj_ff @286
```



START: 307,0,257,0
END: 818,0,768,0
MIN,MAX: 0,0,0,0

Учет рассеянного света неба

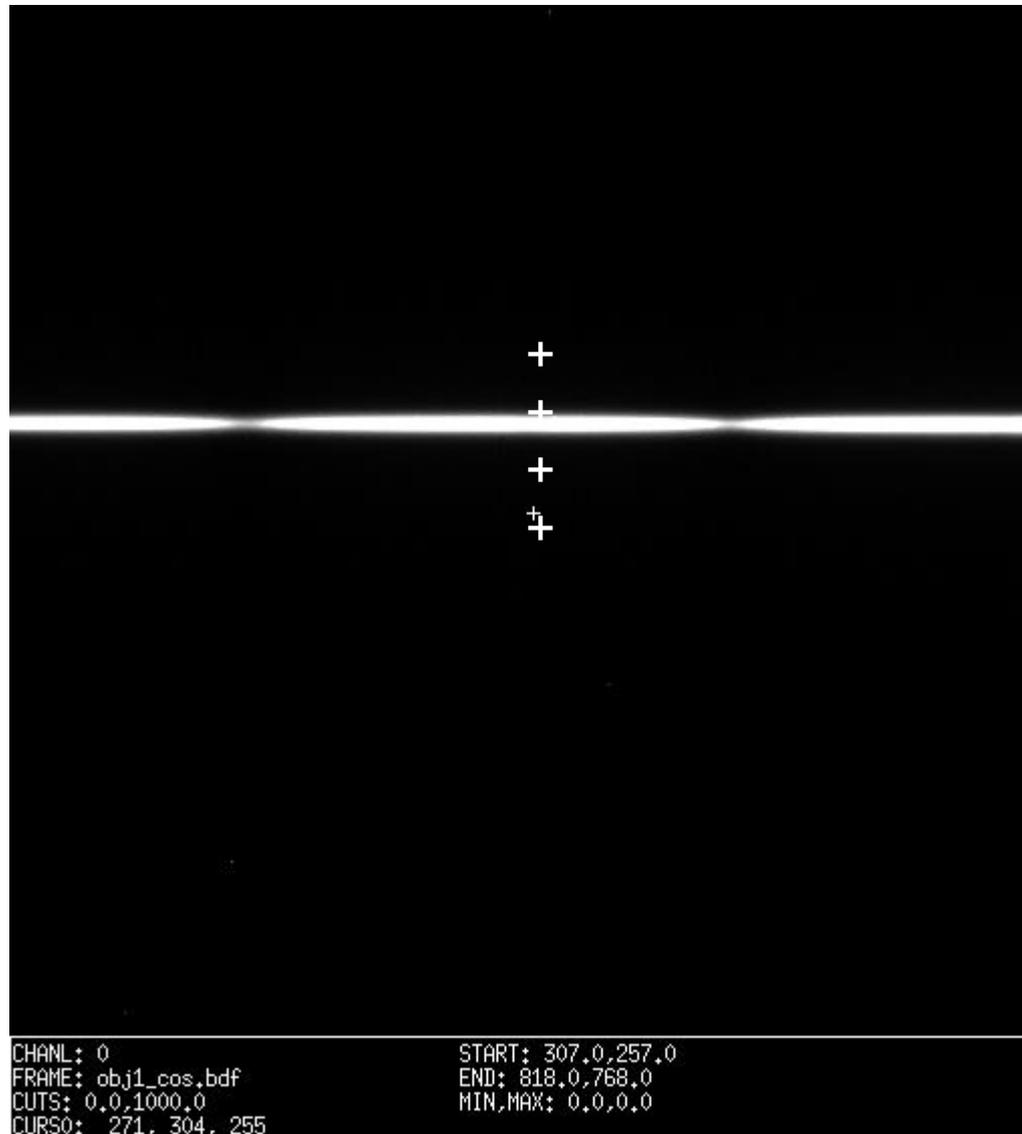
\$ loa/ima obj_ff *загружаем спектр в окно просмотра*

\$ get/cur *отмечаем область спектра неба снизу спектра звезды y1,y2*

\$ set/long lowsky=**y1,y2**

\$ get/cur *отмечаем область спектра неба сверху спектра звезды y1,y2*

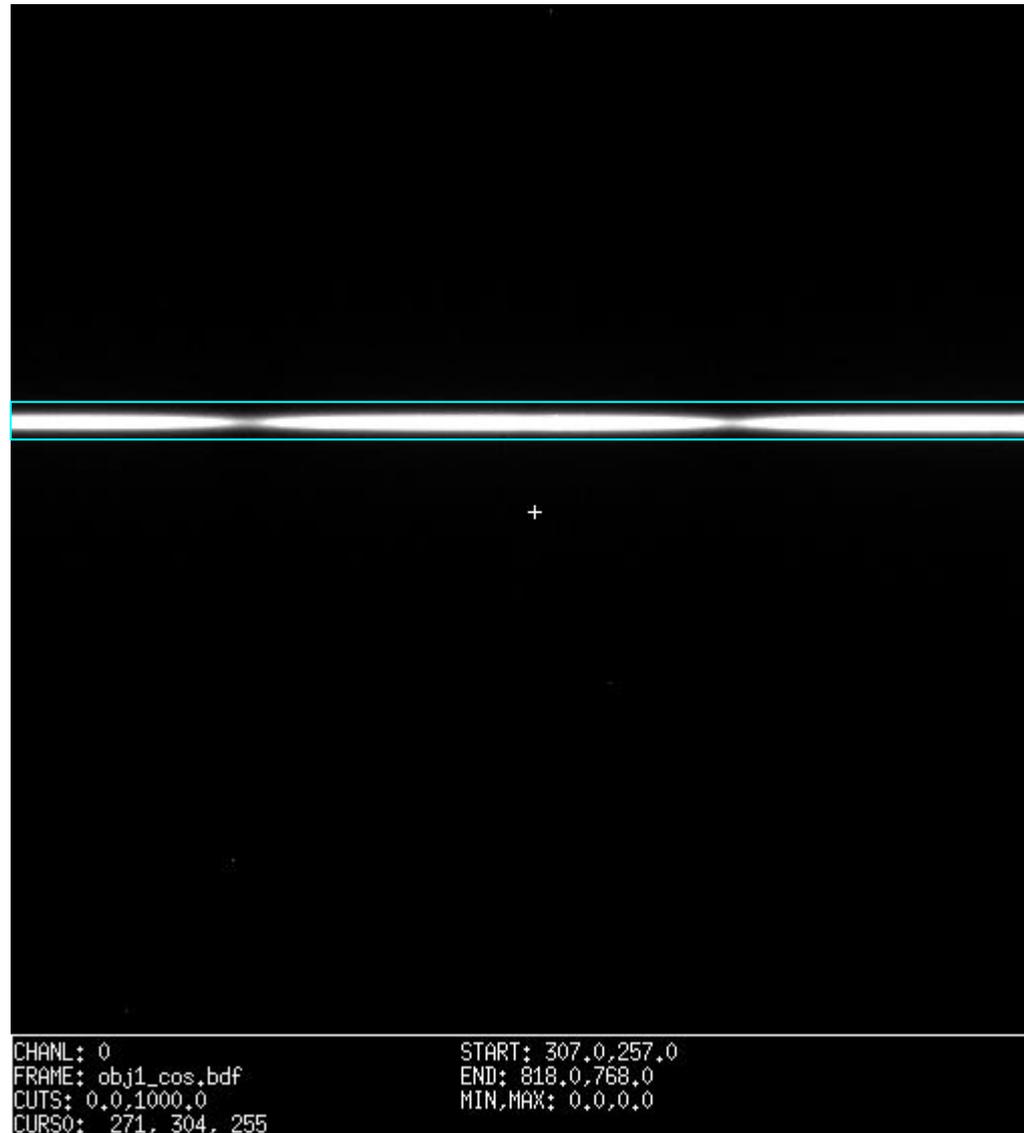
\$ set/long uppsky=**y1,y2**



\$ skyfit/long obj_ff sky *процедура определения уровня неба*
\$ comp/ima obj_sky = obj_ff-sky *вычитаем уровень неба*

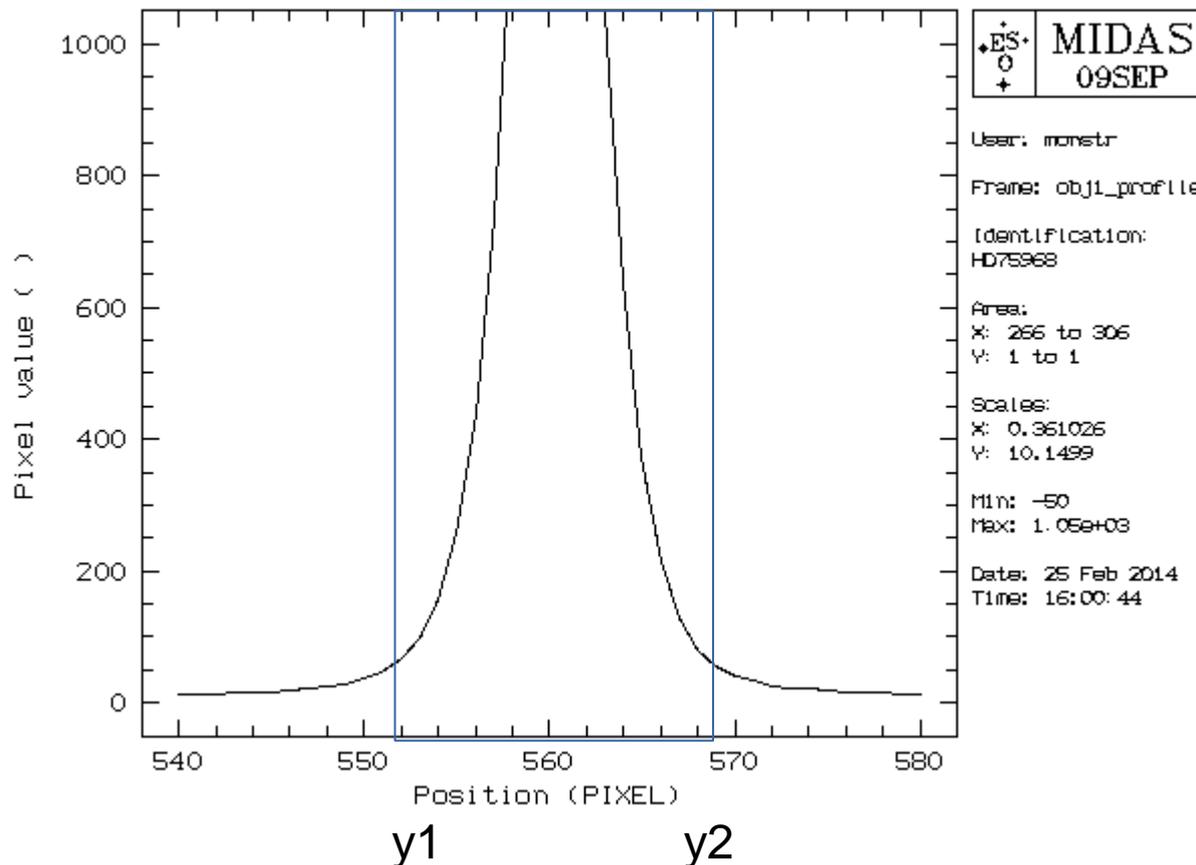
Выделение области спектра

```
$ extr/ima obj_ext = obj_sky[@50,@275:@1075,@827]
```

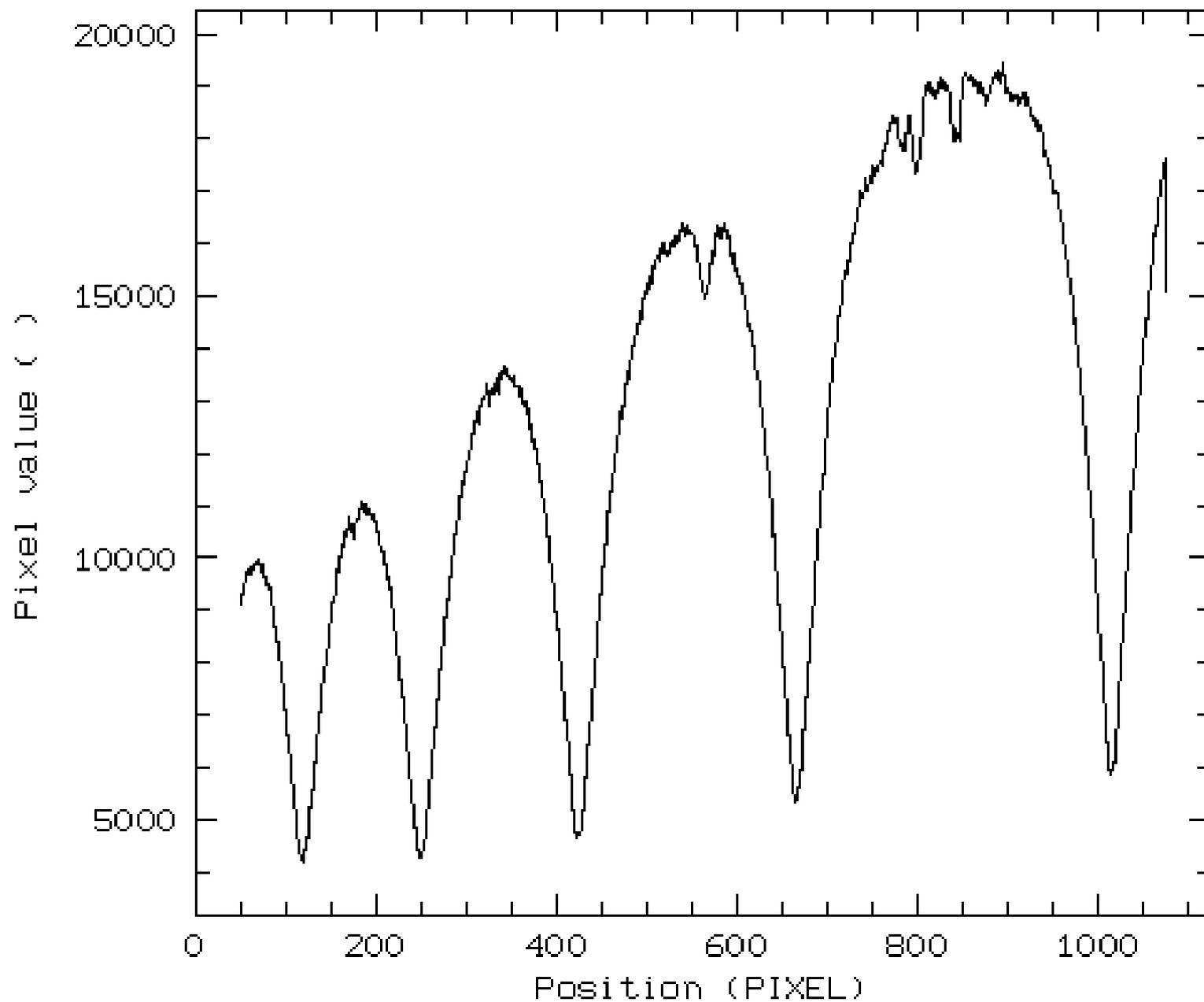


Создание одномерного спектра

\$ ave/colu obj_profile = obj_ext *суммирование всех столбцов*



\$ ave/row obj_1D = obj_ext y1,y2 SUM



ES+
O
+

MIDAS
09SEP

User: monstr

Frame: obj1_1D

Identification:
HD75368

Area:

Min: 3.2e+03

Max: 2.04e+04

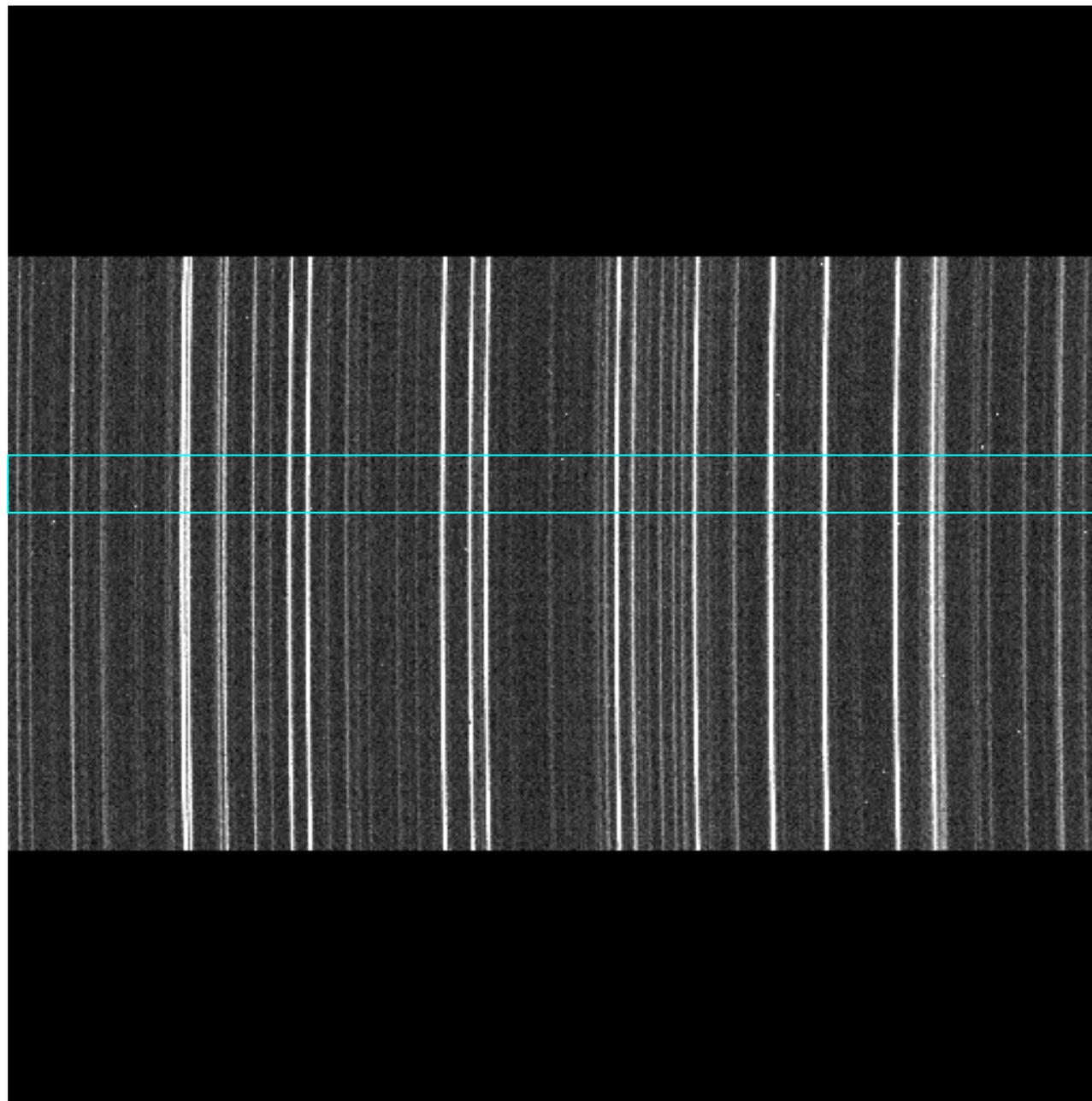
Date: 25 Feb 2014

Time: 16:05:55

Калибровка по длинам волн

!!! Над спектром лампы должны быть проделаны те же самые геометрические действия, что и над спектром объекта, в том числе:

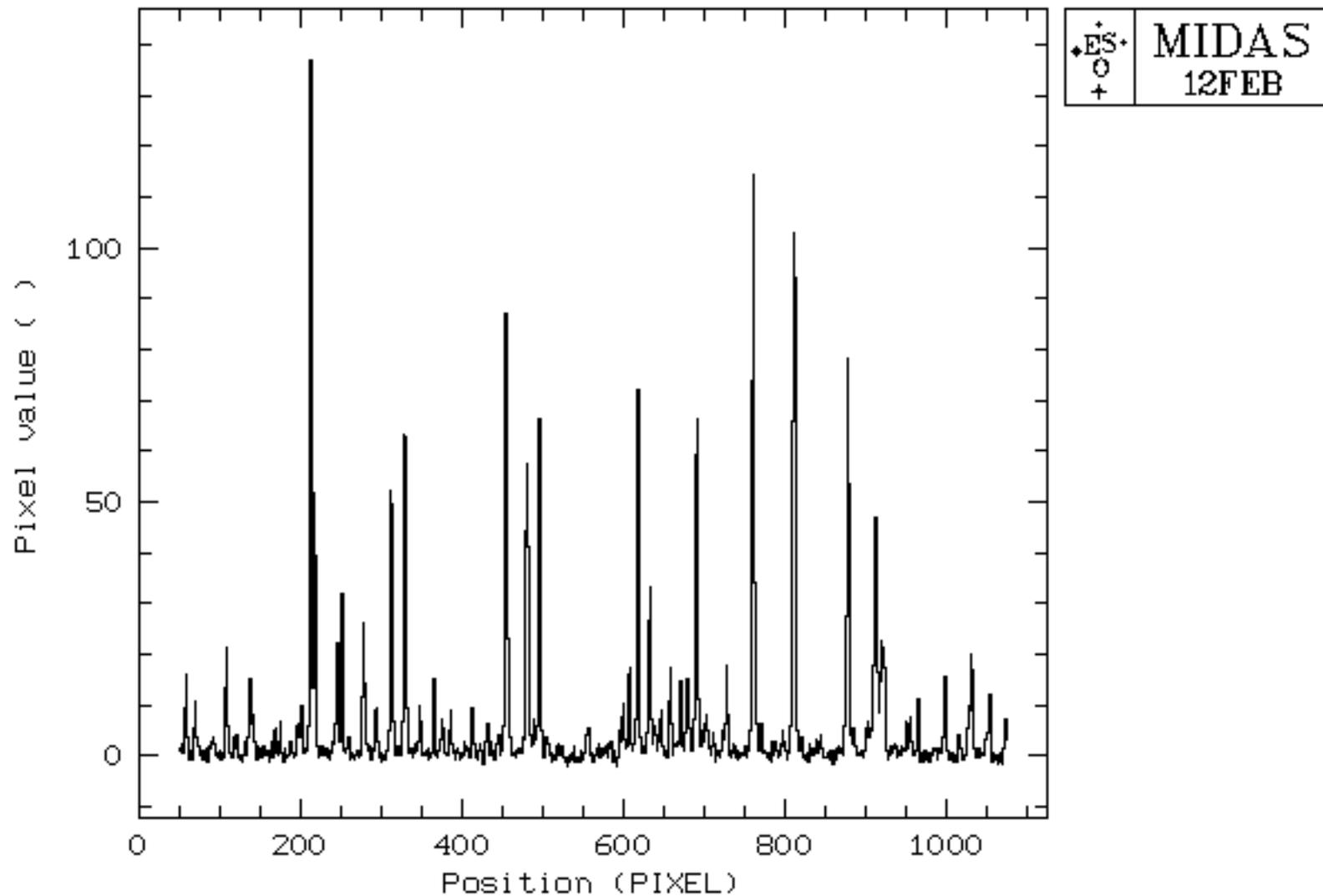
1. Сложение спектров
2. Вычитание BIAS
3. Вырезание той же области спектра
4. Сложение вдоль щели



CHANL: 0
FRAME: obj5_extr.bdf
CUTS: -10.0,40.0

START: 51.0,275.0
END: 1073.0,827.0
MIN,MAX: -14.0,1024.0

Калибровка по длинам волн

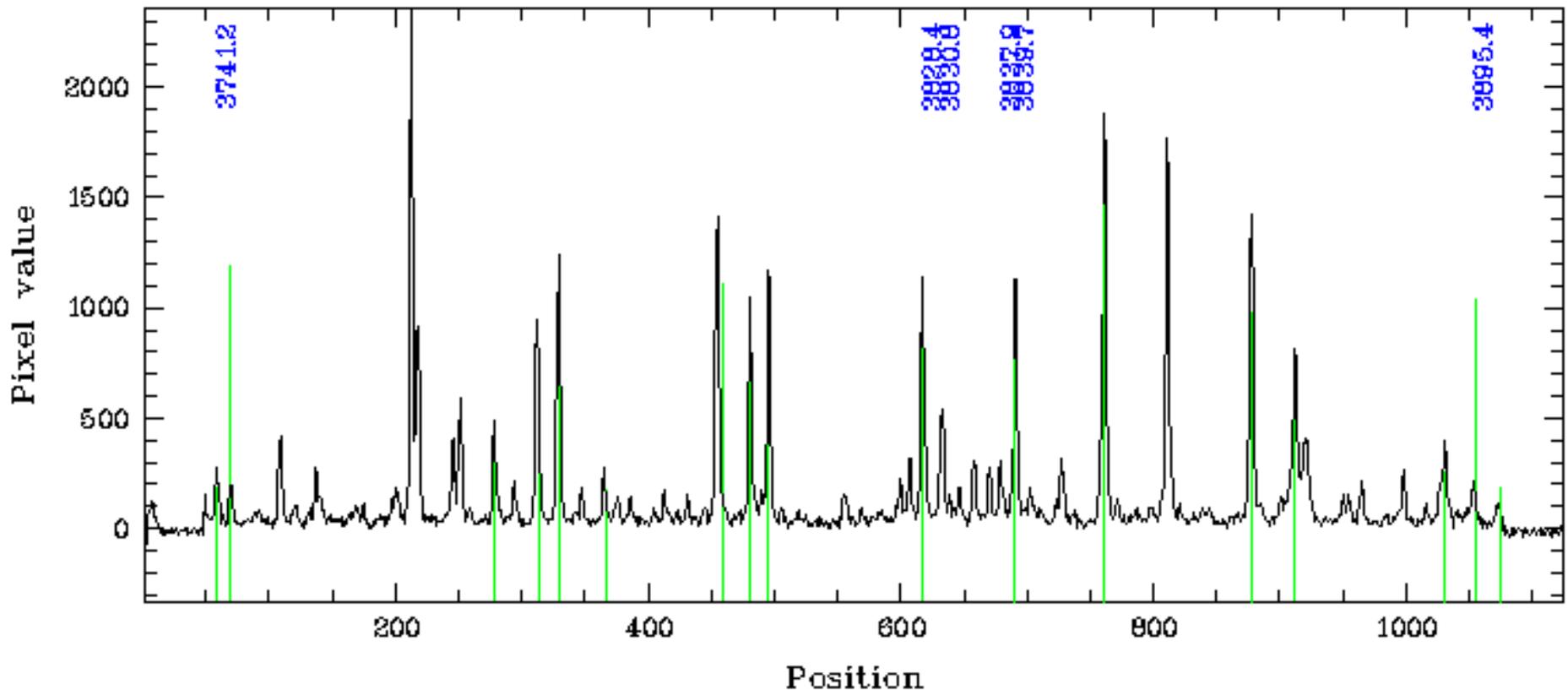


\$ search/long arc_1D 5,20 — *мин. интенсивность линии, ее средняя толщина*
создает таблицу line.tbl

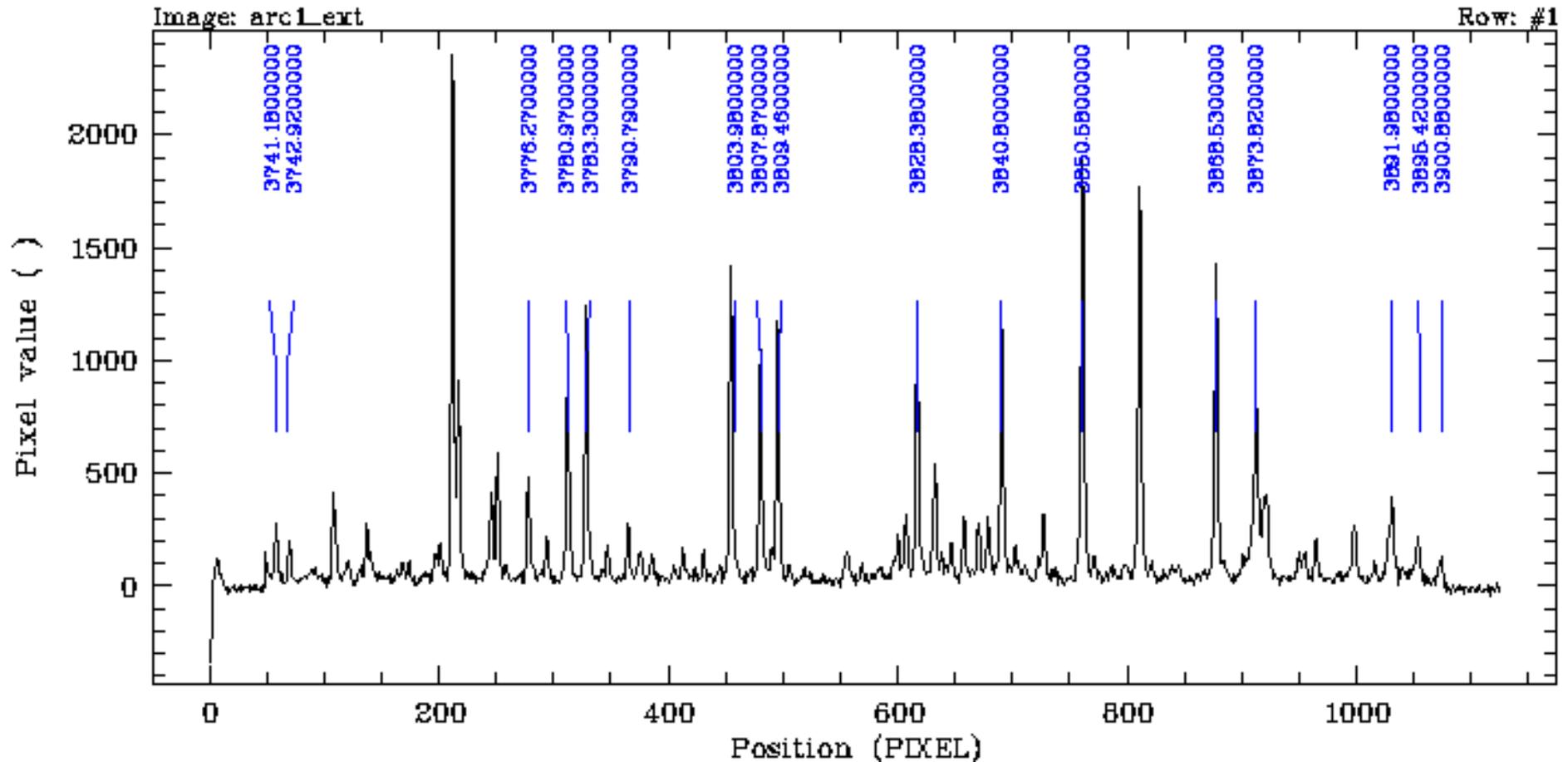
Калибровка по длинам волн

\$ set/long LINCAT = MID_ARC:thar25.tbl *установка списка линий лампы*
\$ IDEN/LONG obj_1D 1 line.tbl 4 *файл, Y, таблица линий, «окно» поиска*

File: arc1_ext Line: 1 Image: LAMPWAVE



Калибровка по длинам волн



\$ save/long my

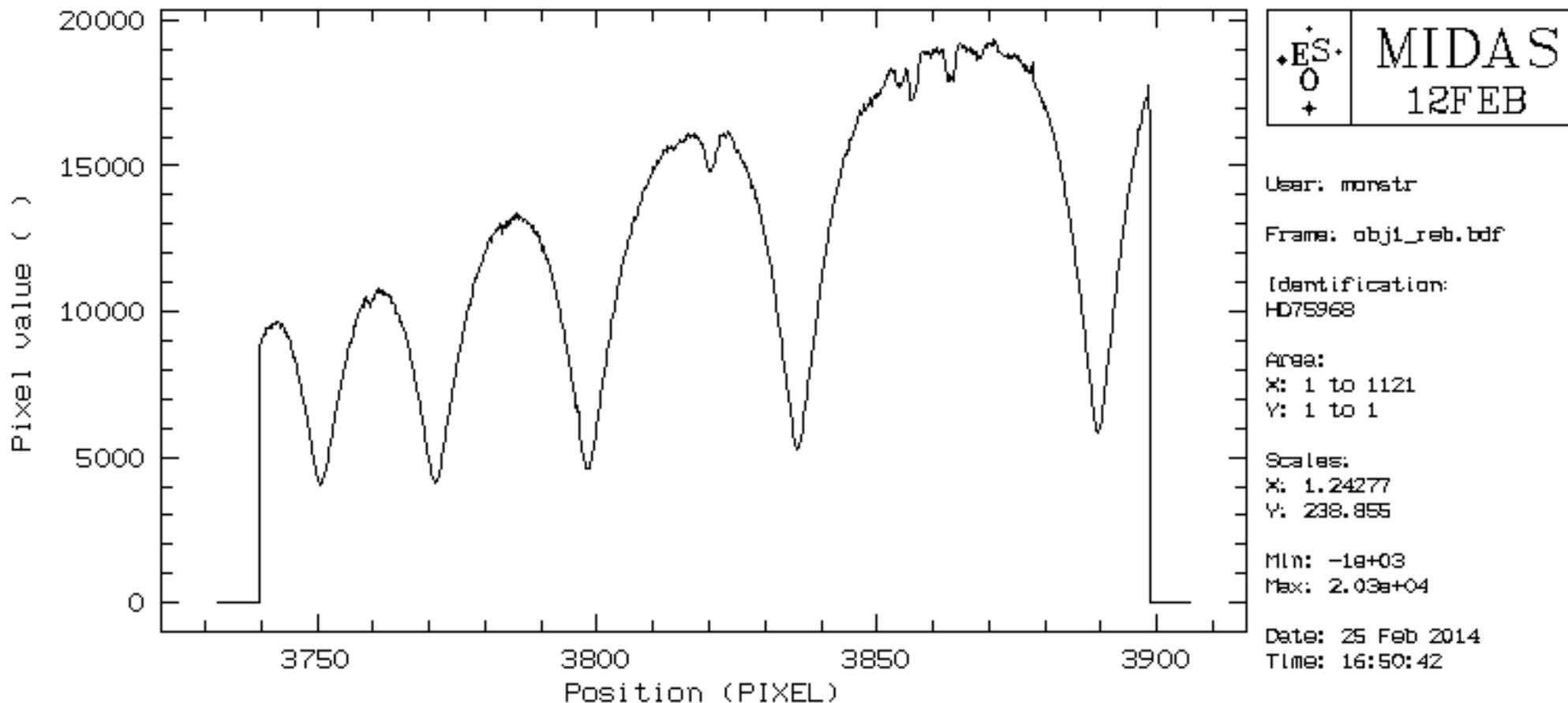
сохранить настройки текущей сессии под именем «my»

Калибровка по длинам волн

\$ init/long my *восстановление всех настроек сессии «ту»*

\$ rebin/long obj_1D obj_reb *преобразование к шкале длин волн*

\$ outdis/fits obi reb obi reb.fits *сохранение спектра в FITS формате*



Учет поглощения



Учет поглощения

$$S_{\lambda} = S_{0\lambda} e^{-\tau_{\lambda} m},$$

$$\tau_{\lambda} = \int_0^{\infty} \alpha_{\lambda}(L) dL.$$

$$m = \sec z.$$

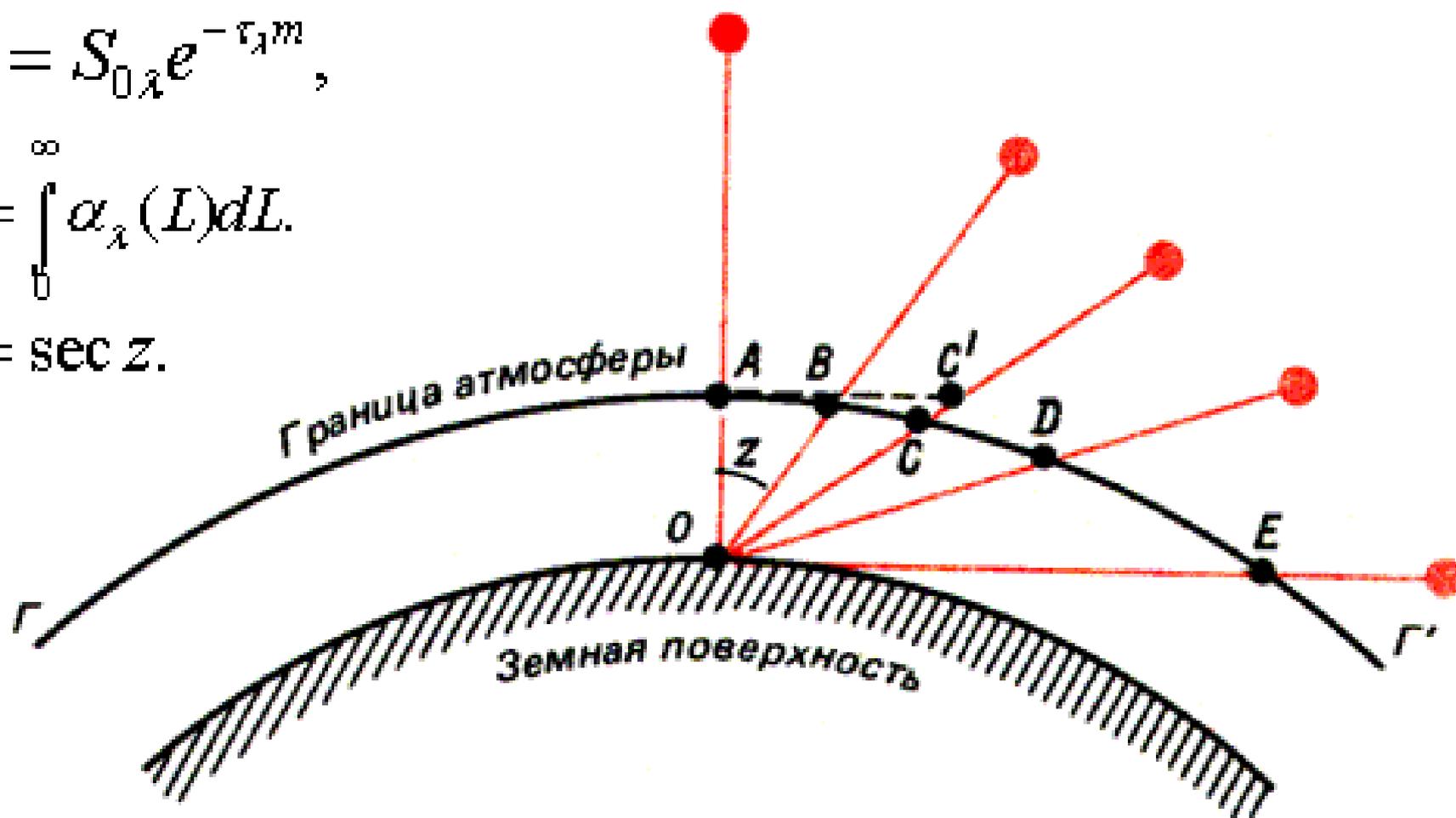
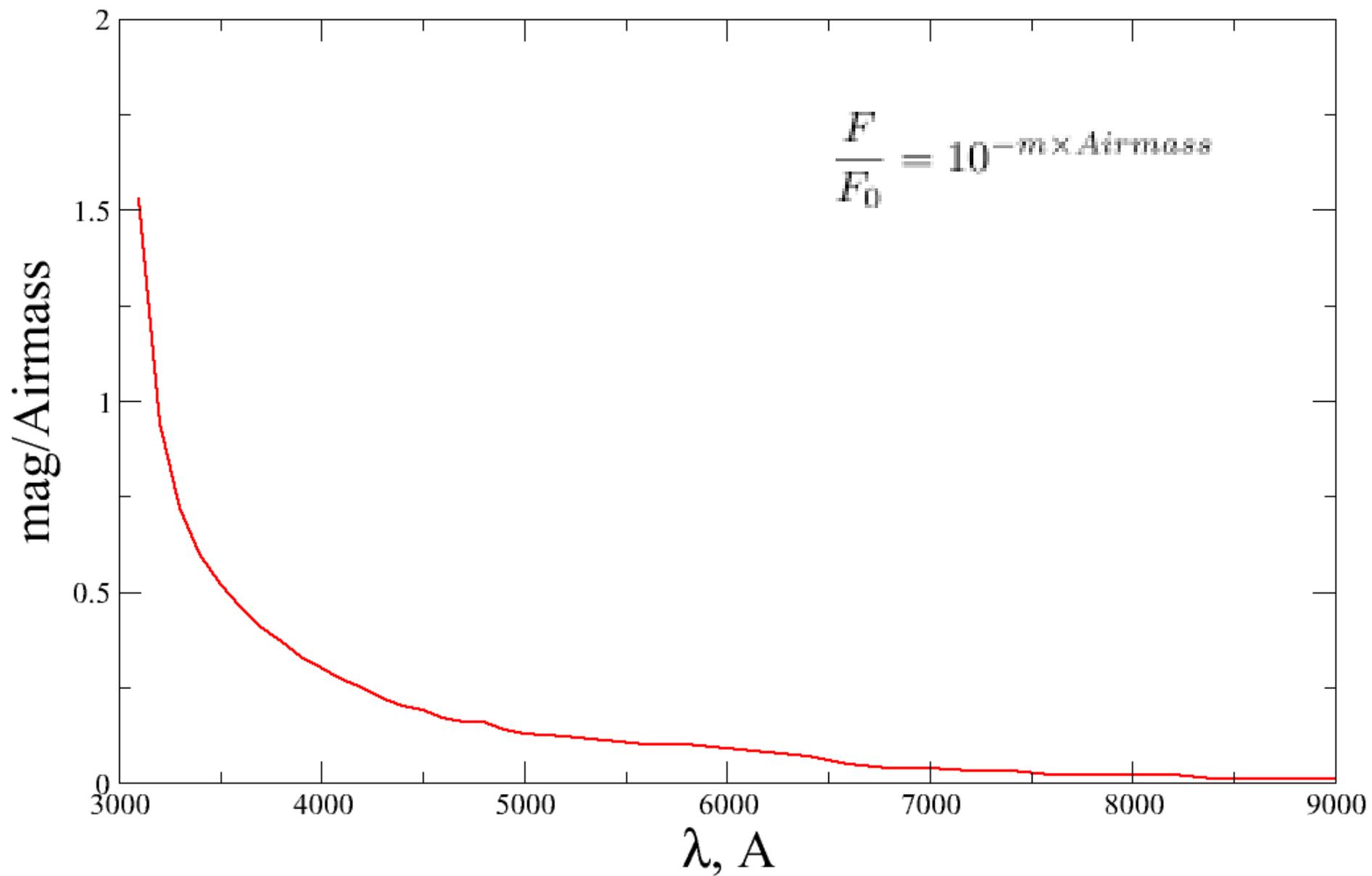


Рис. 1.1. Длина пути, проходимого солнечными лучами в атмосфере, при разных зенитных расстояниях Солнца.

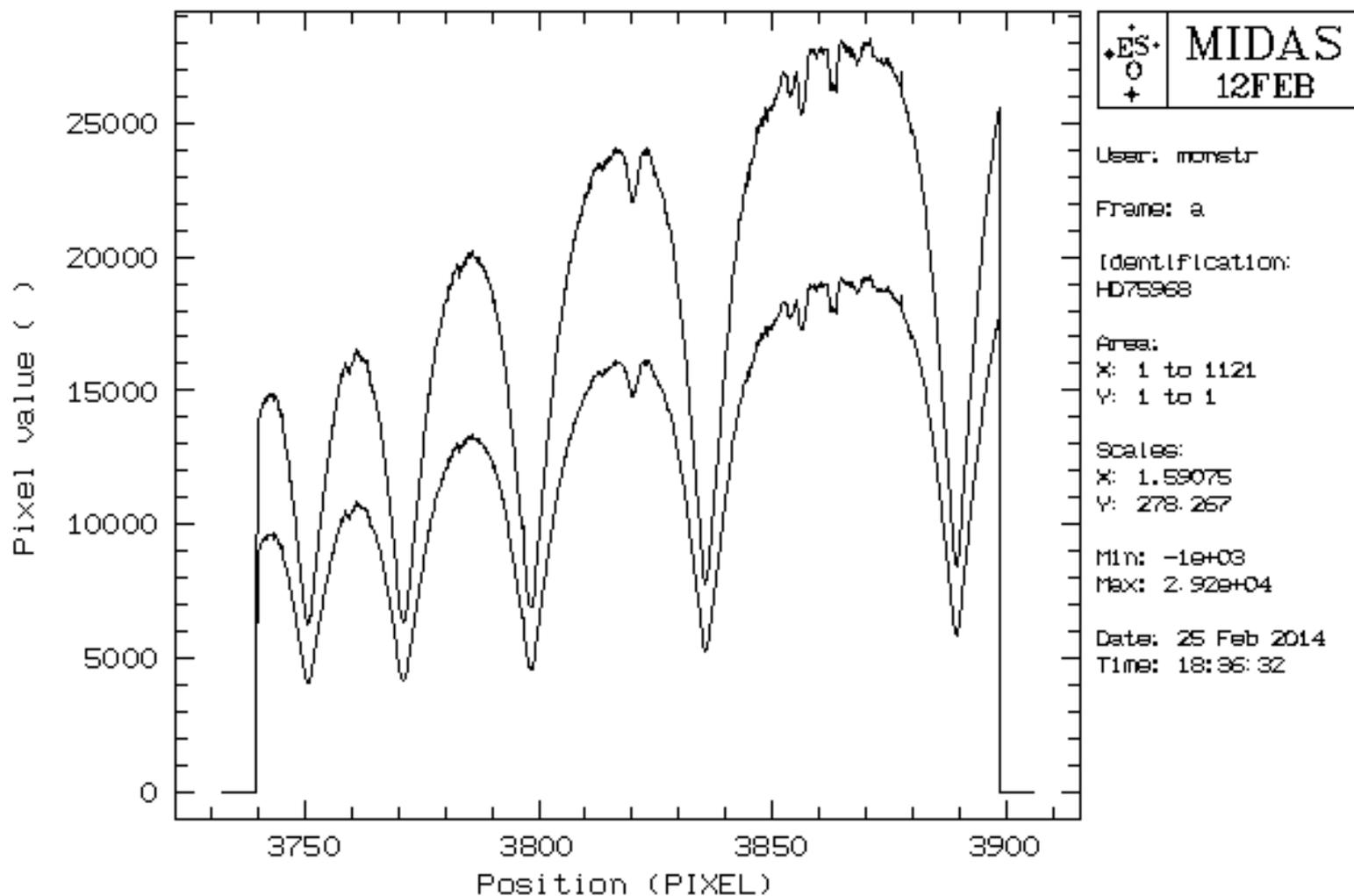
Учет поглощения



Учет поглощения

```
$ set/long EXTAB=MID_EXTINCTION:atmoexan
```

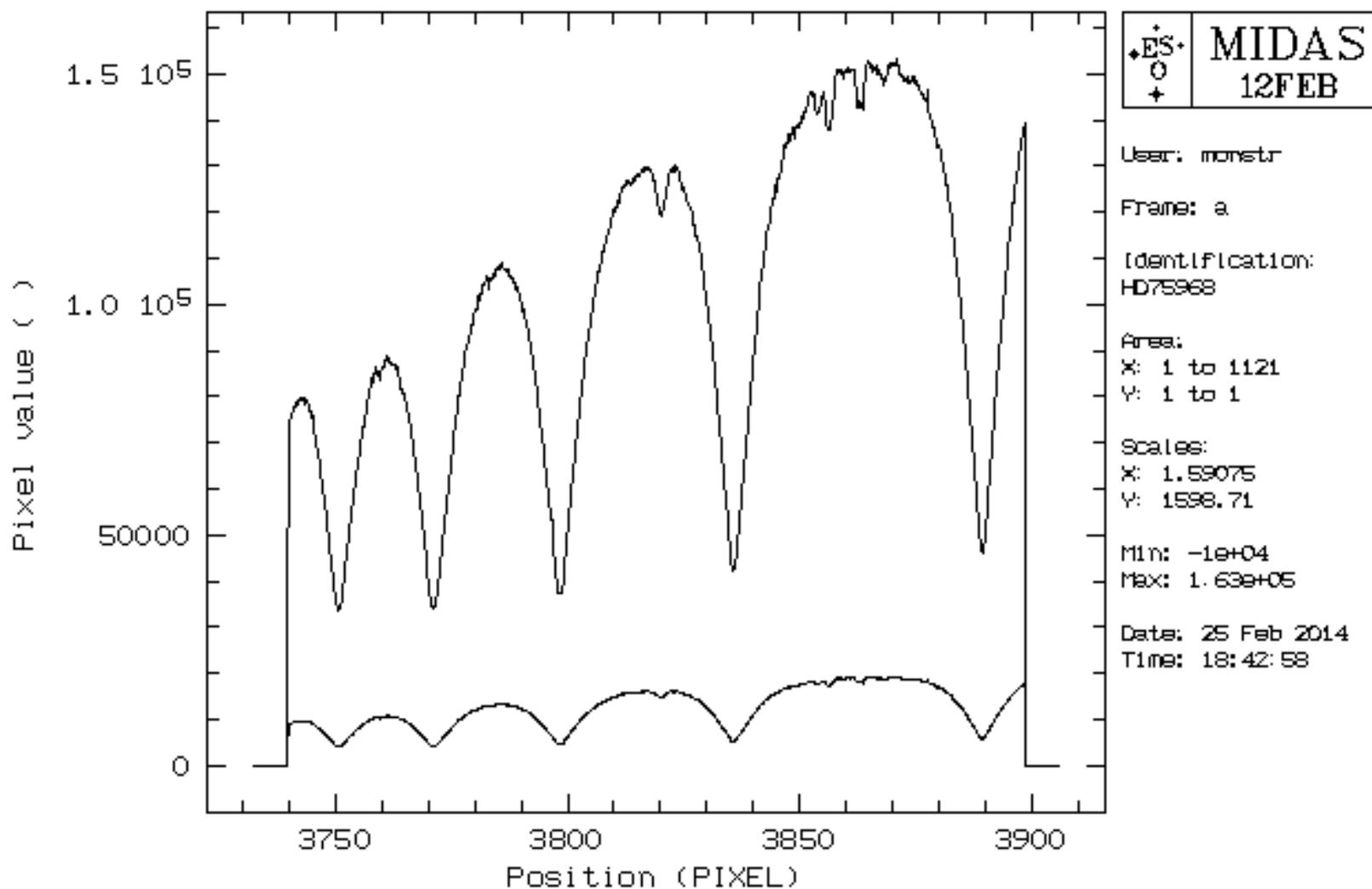
```
$ EXTINC/LONG obj_reb obj_air 1.2 учет экстинции в земной атмосфере при воздушной массе 1.2
```



Учет межзвездного поглощения

```
$ set/long EXTAB=MID_EXTINCTION:instexan
```

```
$ EXTINC/LONG obj_air obj_red 0.5 учет покраснения при  $E(B-V)=0.5^m$   
 $A_v=3.1E(B-V)=1.5^m$ 
```



Учет теллурических линий

Съемка спектра яркой звезды в ту же ночь и на том же зенитном расстоянии

Интенсивность теллурических линий зависит от

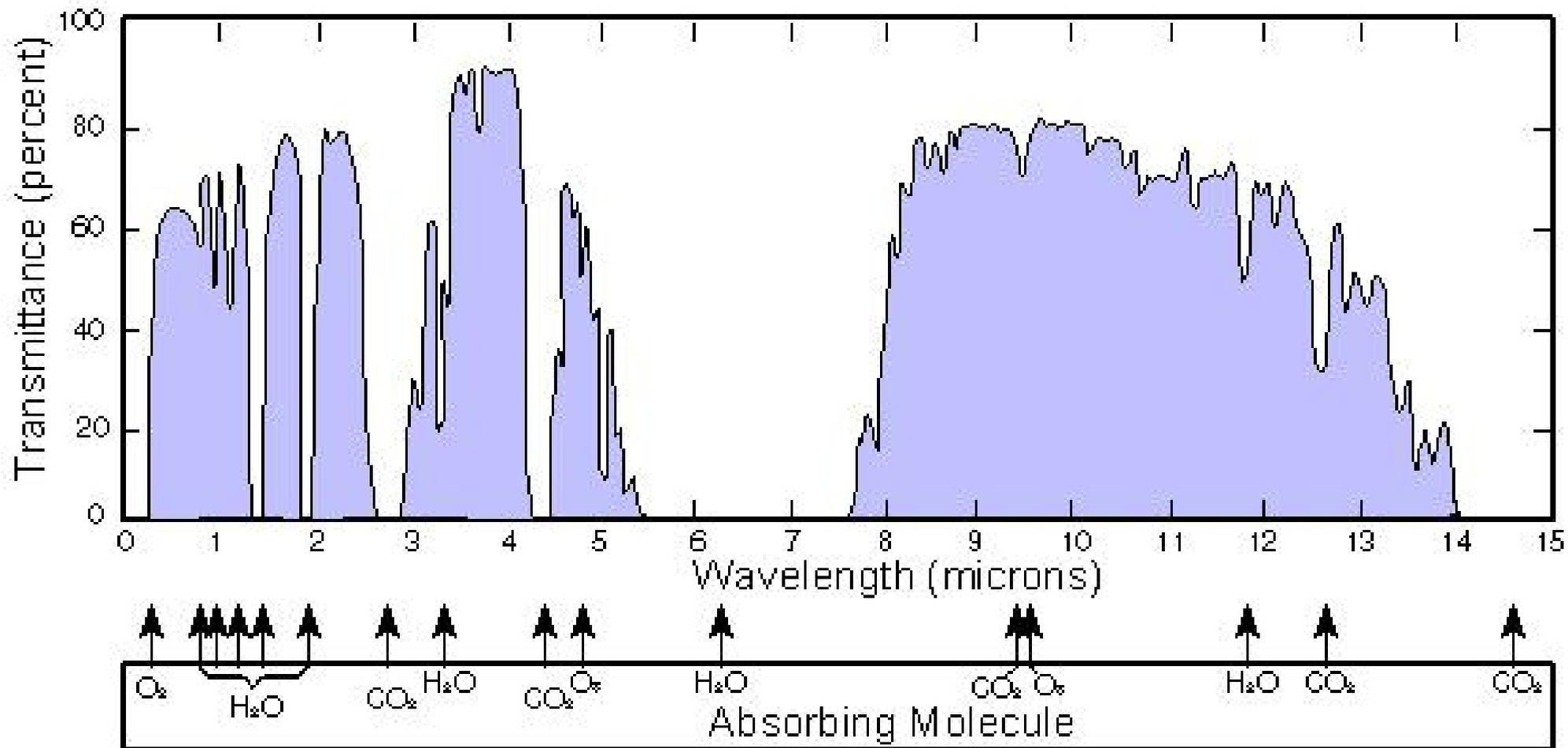
- состояния атмосферы (распределение температуры, давления)
- насыщенности водяных паров, наличие облачности
- высоты обсерватории над уровнем моря
- зенитного расстояния объекта наблюдения

Существуют не только линии поглощения, но и излучения:

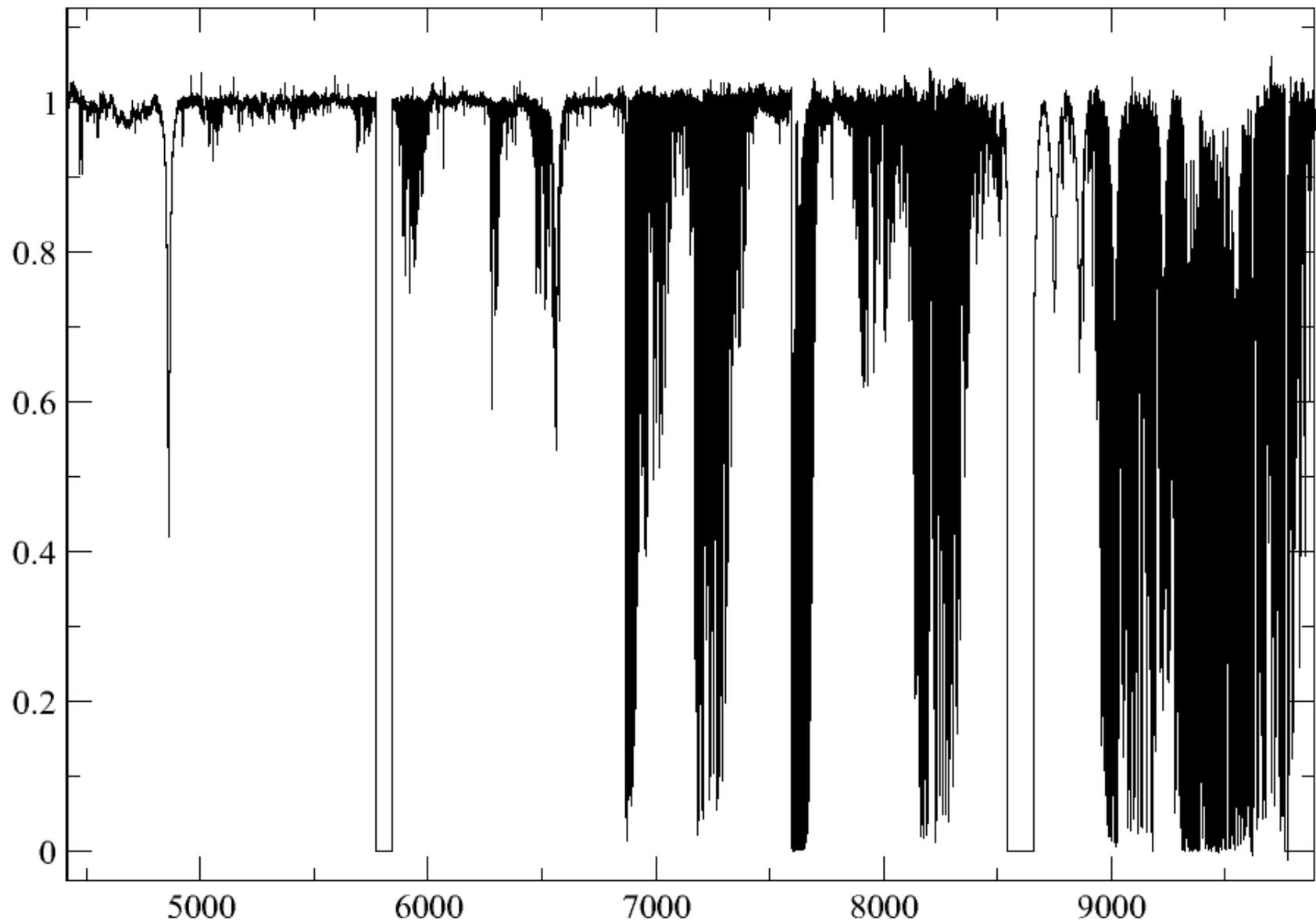
OI — 5577А

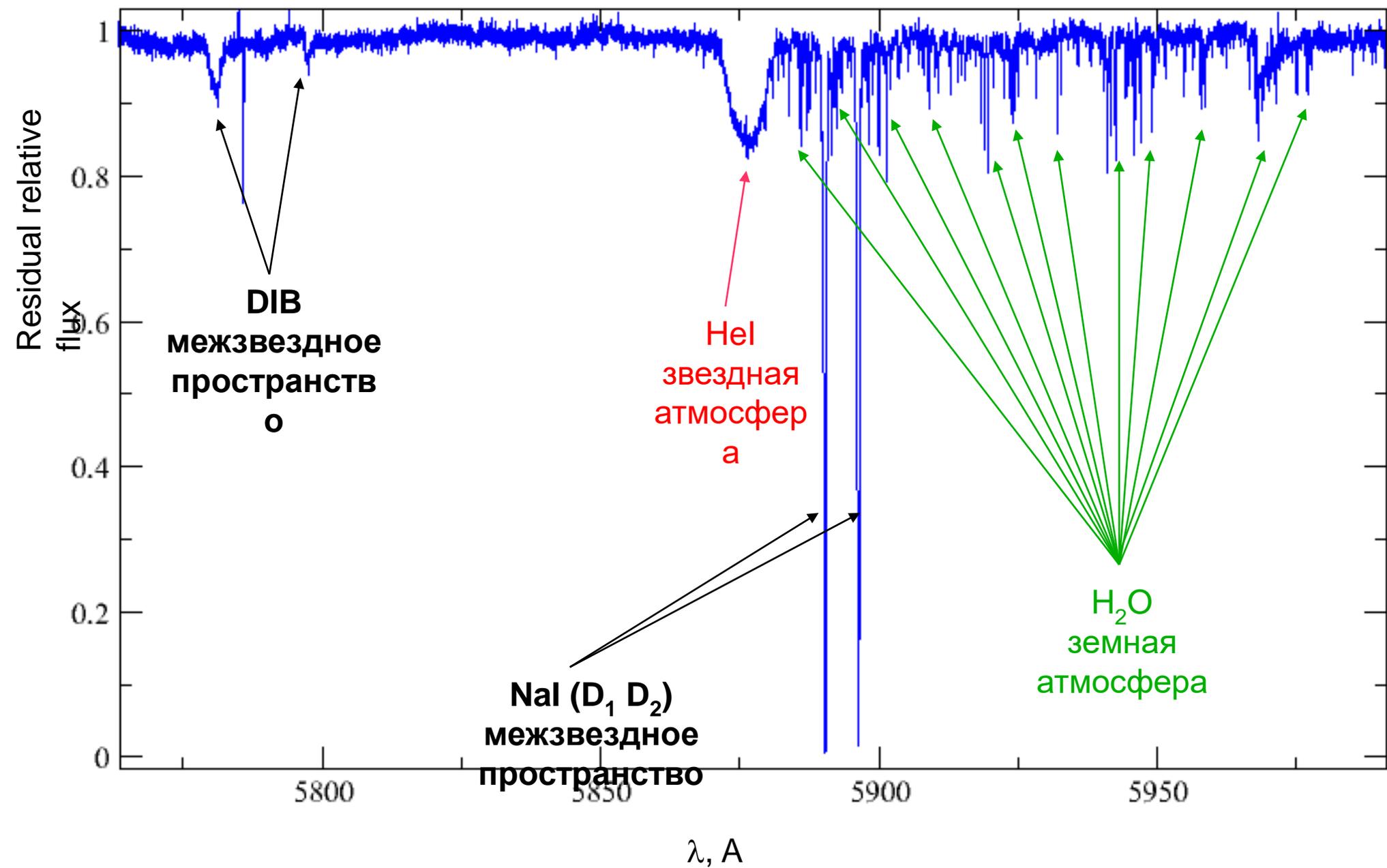
NaI — 5590А (натриевая вспышка)

Учет теллурических линий

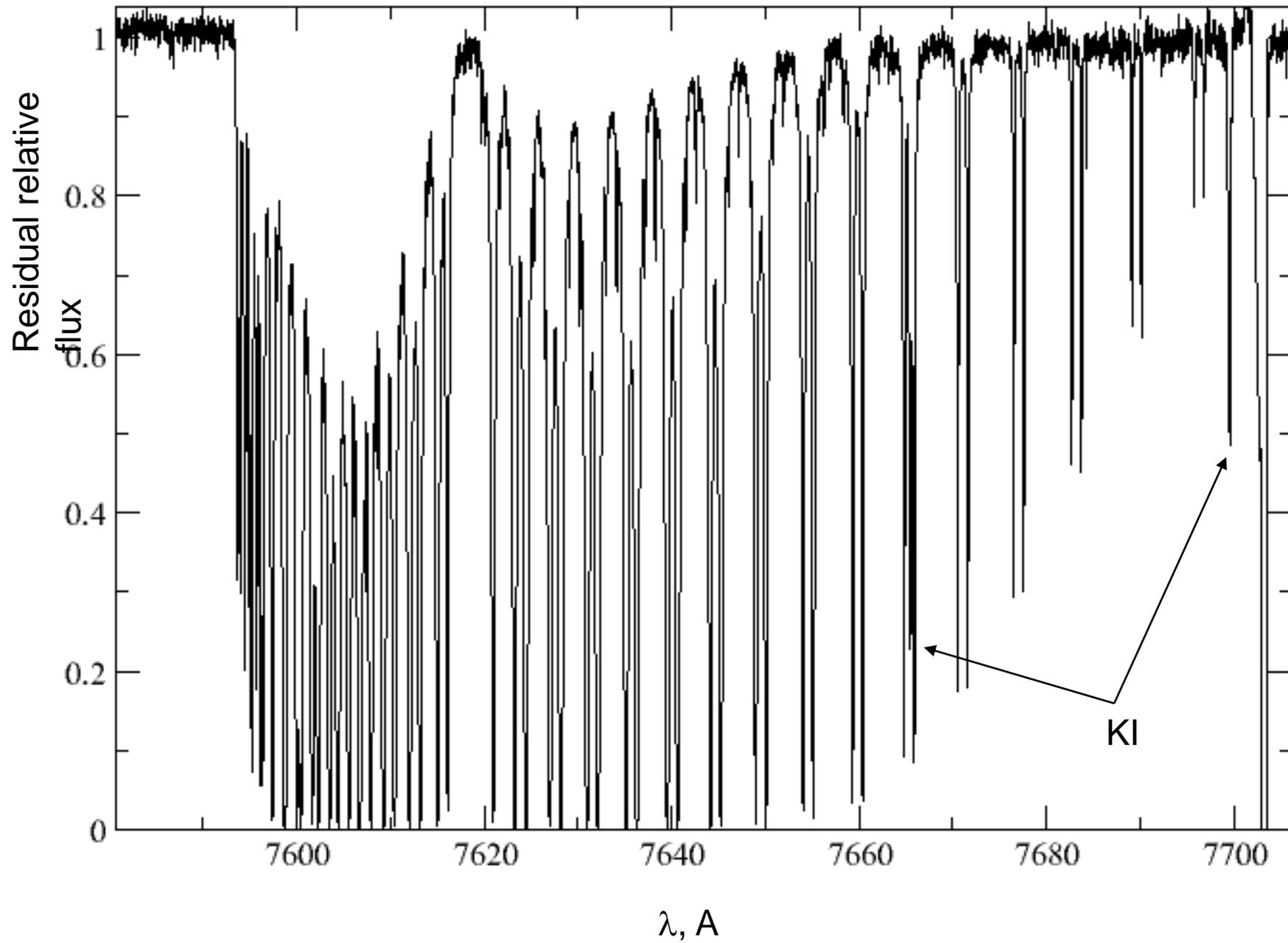


Спектр теллурических линий

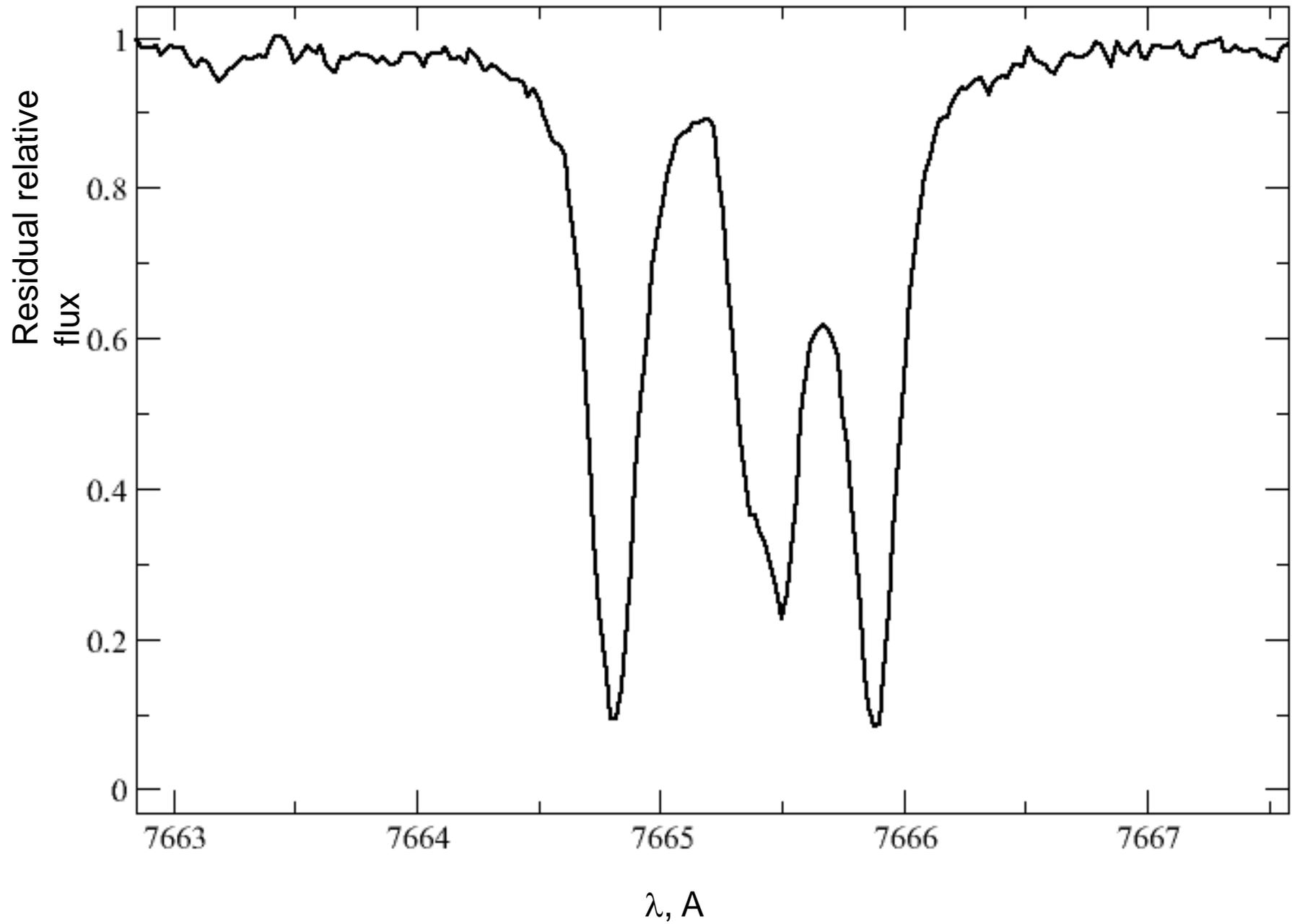




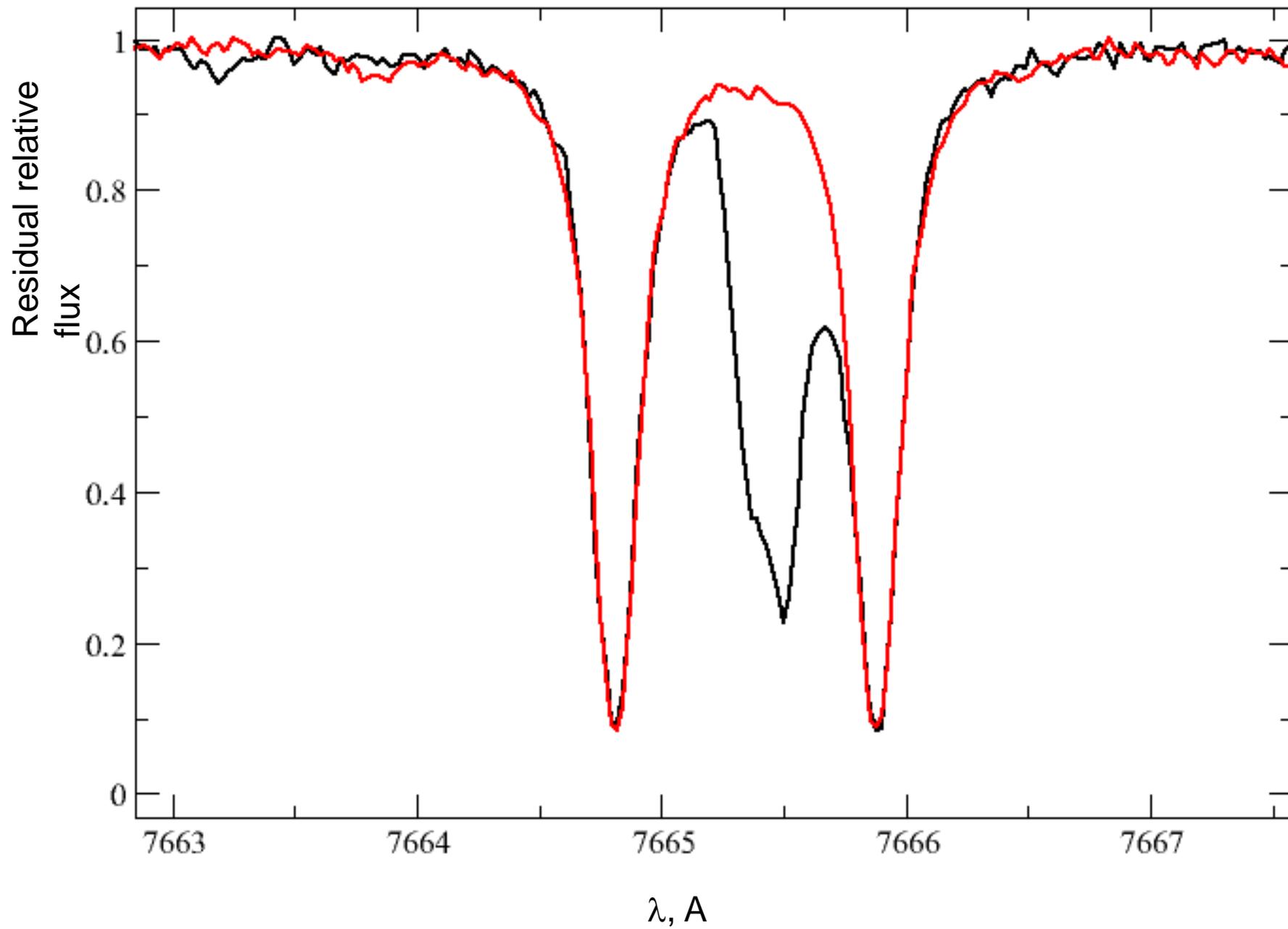
HD75873



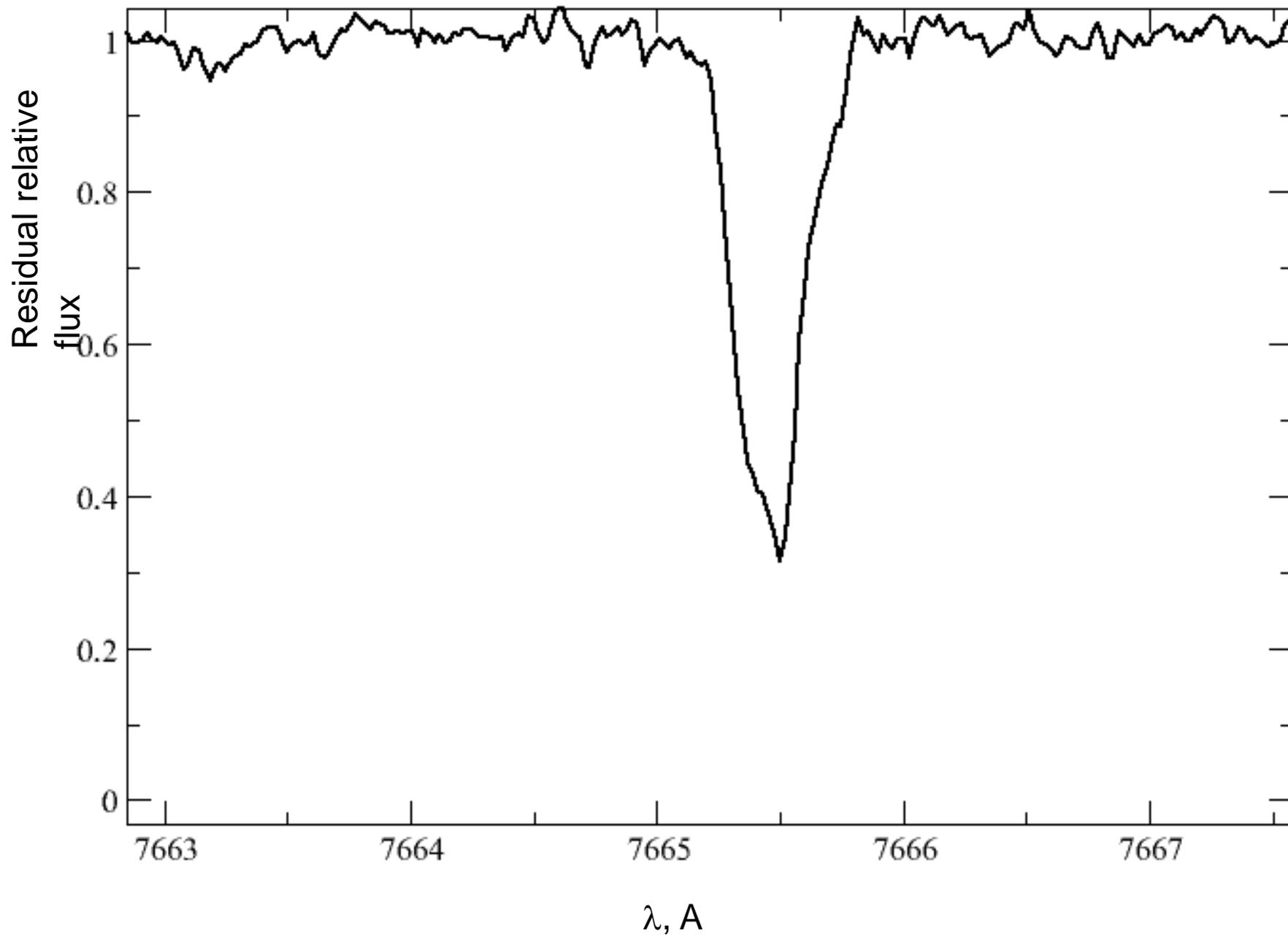
HD75873



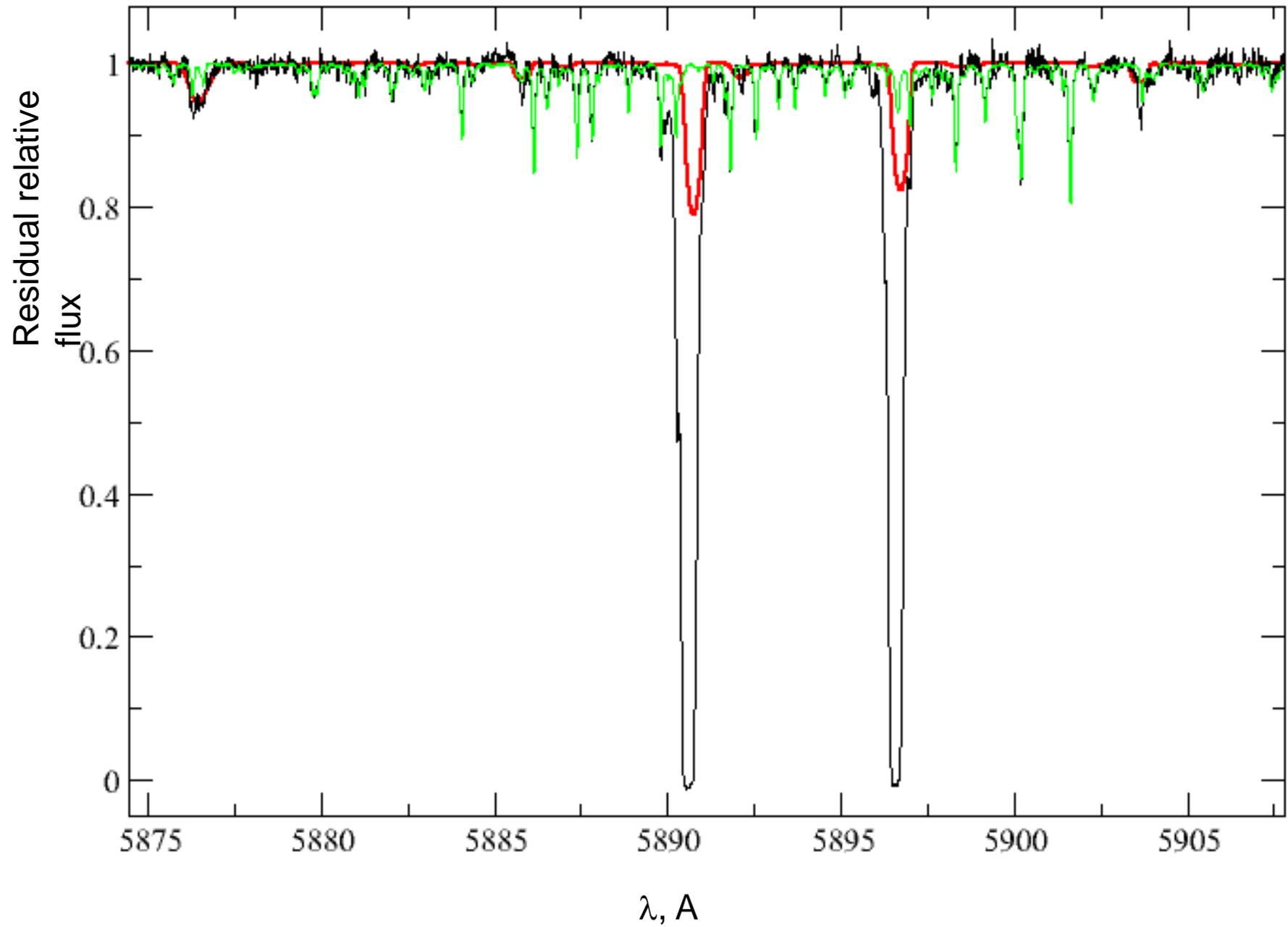
HD75873



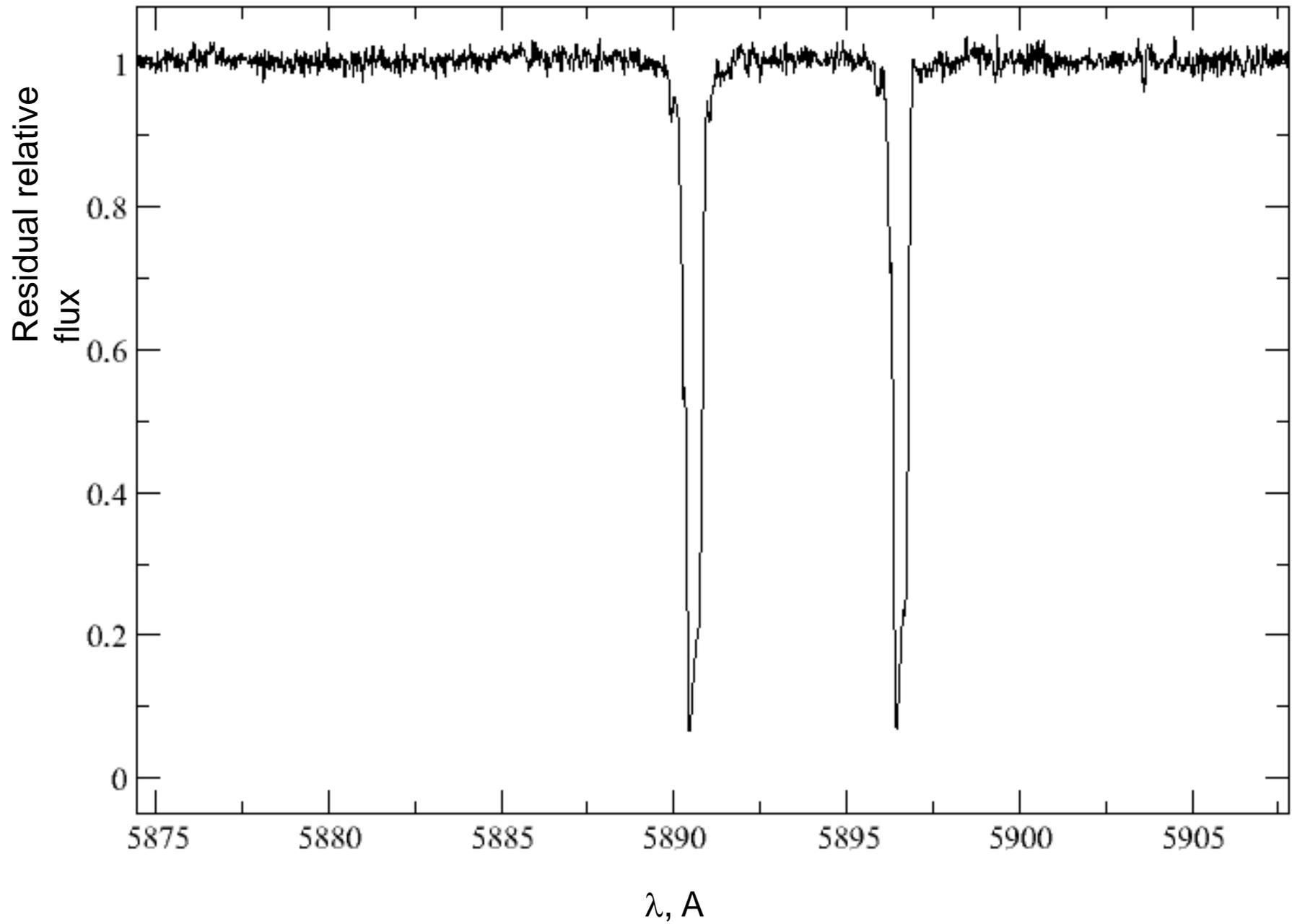
HD75873



HD75873



HD75873

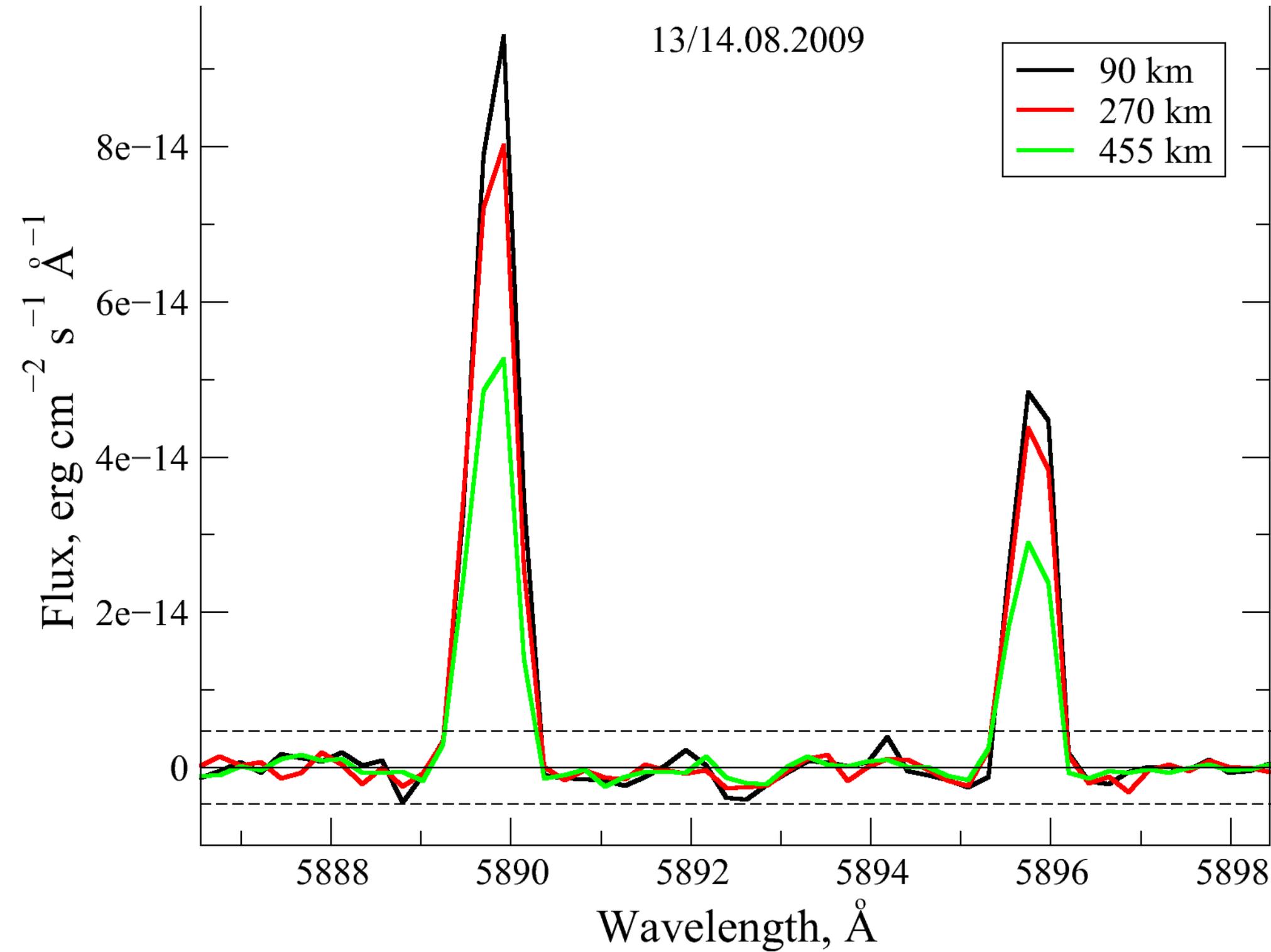


Абсолютная калибровка по потокам

Использование спектрофотометрических стандартов

Simbad catalog	Название	Авторы, год	Кол-во звезд	Интервал длин волн
III/202	Spectrophotometric Catalogue of Stars	Kharitonov+, 1988	1147	3225-7575
III/208	Spectrophotometric Catalog of Stars of SAI	Glushneva+ 1998	866	3225-7625
III/126	Stellar Spectrophotometric Catalogue	Burnashev 1985	1588	3200-7350
III/209	Spectrophotometric Standards of 7-8 mag	Biryukov+ 1998	82	3400-7500
III/48B	Spectrophotometric Scans	Breger 1976	937	3200-12000
II/179	Southern Spectrophotometric Standards. I + II	Hamuy+ 1992,94	32	3300-7550
III/124	Spectrophotometry of bright F, G, K and M-type stars. 60 Southern and Equatorial stars	Kiehling, 1987	60	3200-8600

13/14.08.2009



Обработка наблюдений

2. Echelle



Предварительная обработка

Сюда входит весь комплекс первоначальных действий над кадрами CCD, необходимый перед любыми исследованиями (прямые изображения или спектры):

- учет BIAS и темнового тока (в случае необходимости)
- очистка от следов космических лучей
- изменение ориентации кадра (вращение, отражение, сдвиг)

ВСЕ ТОЖЕ САМОЕ

Некоторые программы, включая MIDAS, требуют ориентировать кадр так, чтобы было увеличение длины волны:

- снизу вверх
- слева направо

Это требуется для перевернутой ПЗС или ПЗС с обратной засветкой

\$ inmidas

вход в Midas

\$ set/con echelle

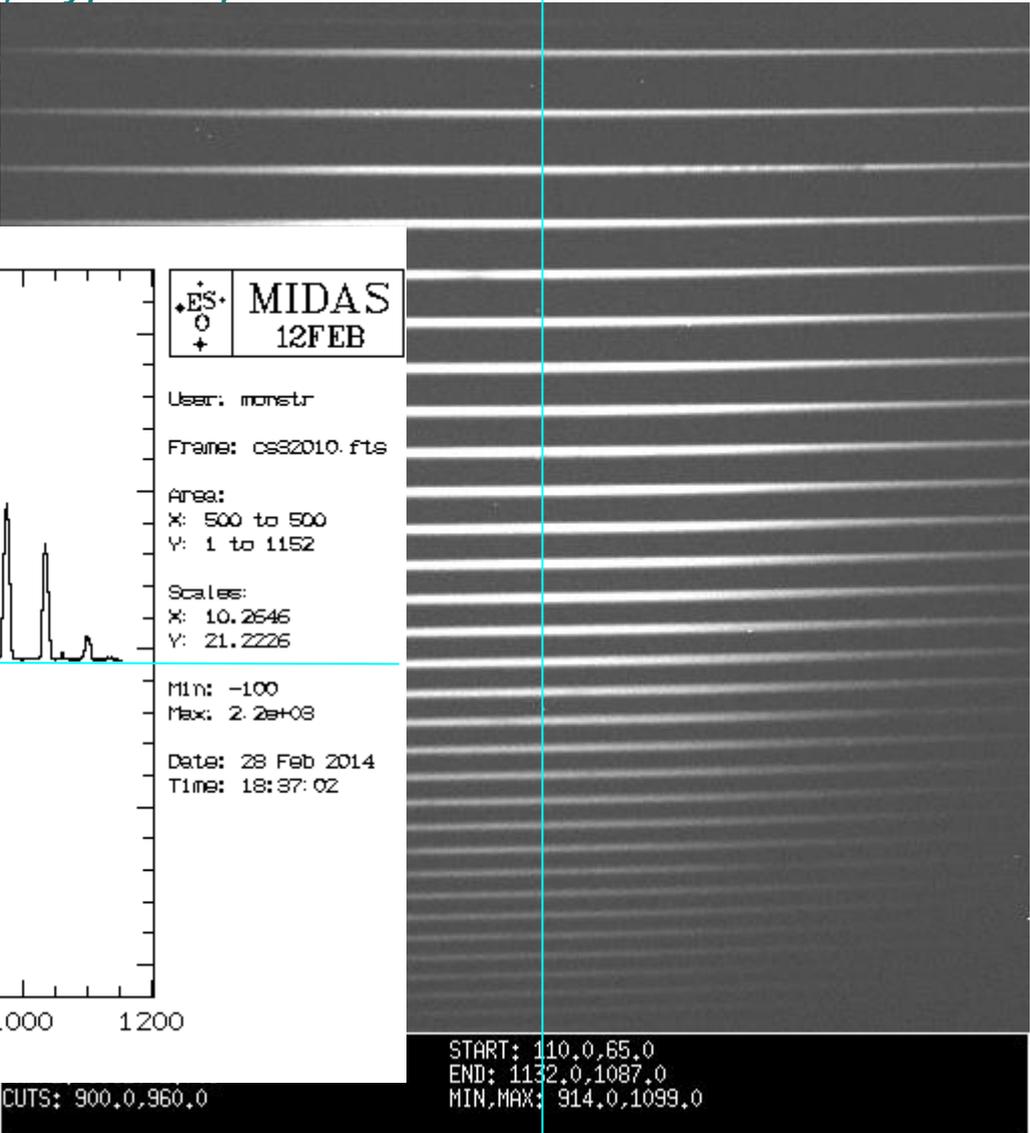
загрузка процедур для работы с эшелле

\$ loa/ima obj.fits

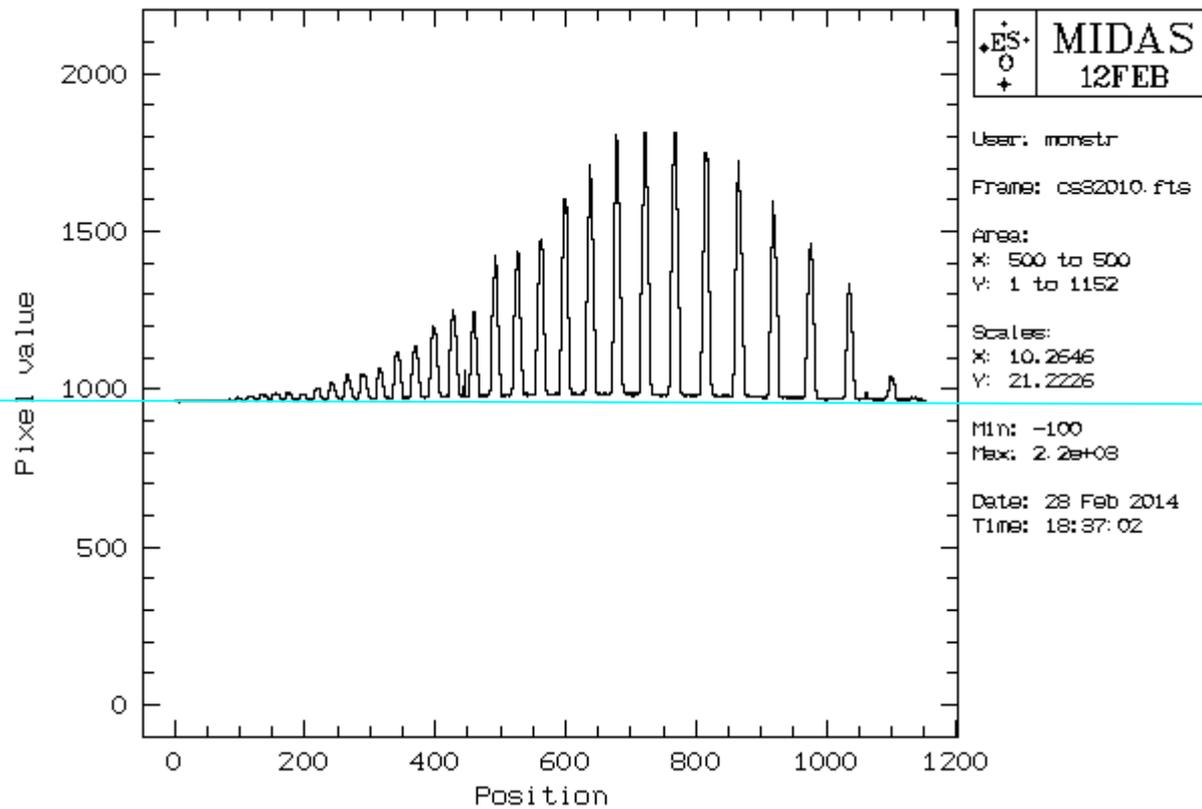
просмотр ка

\$ indisk/fits obj.fits obj.bdf

кон



BIAS

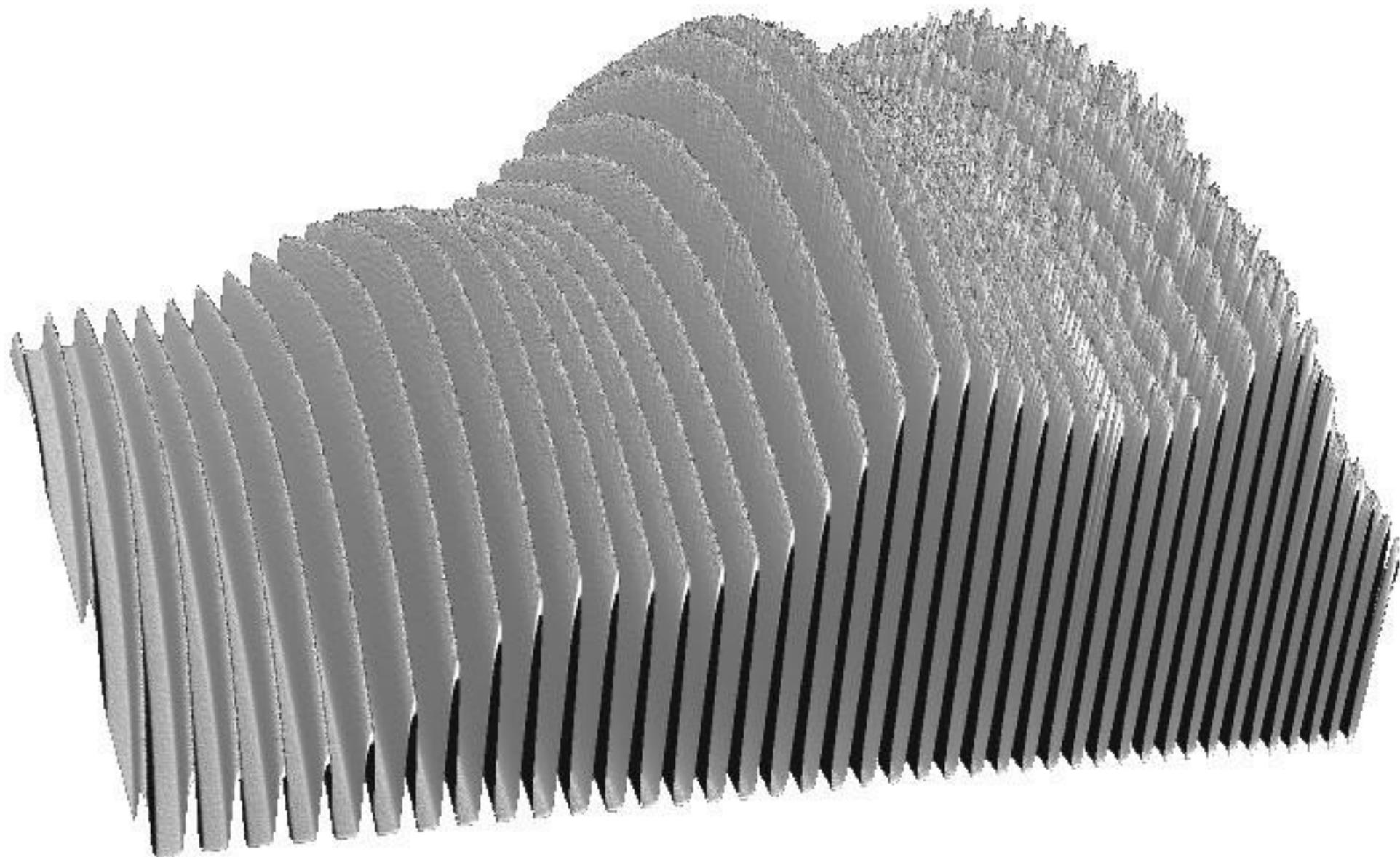


\$ PLO/COL obj.fits 600

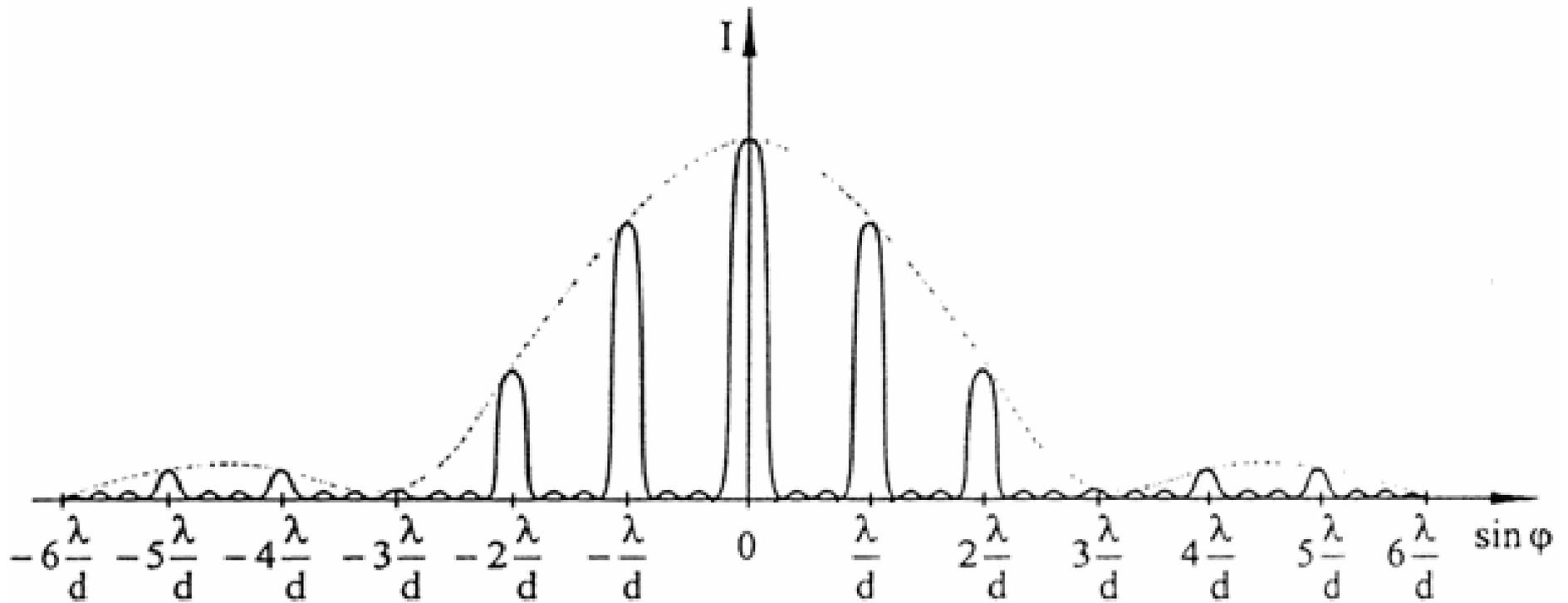
CUTS: 900.0,960.0

START: 110.0,65.0
END: 1132.0,1087.0
MIN,MAX: 914.0,1099.0

Распределение интенсивности в эшелле-спектре



Распределение интенсивности



$$u = \frac{\pi a(\sin\phi + \sin\psi)}{\lambda}, v = \frac{\pi d(\sin\phi + \sin\psi)}{\lambda}$$

$$I = \frac{I_0}{N^2} \frac{\sin^2 u}{u^2} \frac{\sin^2 Nv}{\sin^2 v}$$

Распределение интенсивности в одном порядке

$$I \sim \frac{\sin^2 u}{u^2} \quad \text{Идеальная функция блеска}$$

$$u = \pi \alpha m \left(1 - \frac{\lambda_c(m)}{\lambda} \right)$$

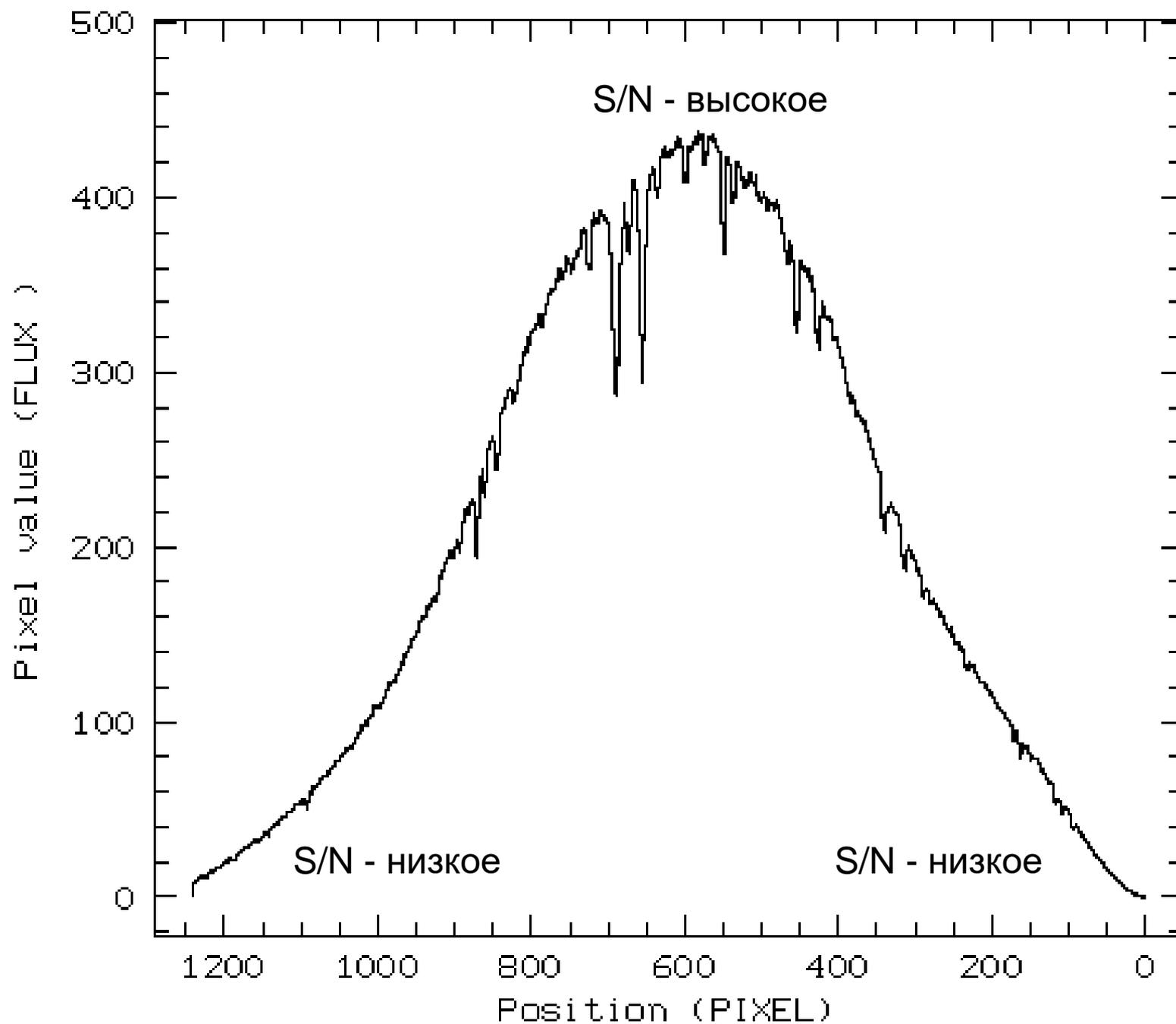
$\alpha = (0..1)$ «постоянная» решетки
 m — номер порядка
 λ_c — длина волны центра порядка

$$k = m \lambda_c(m)$$

$$u = \pi \alpha m \left(1 - \frac{k}{m \lambda} \right) = f(\lambda, m, \alpha, k)$$

постоянная
я
для одного
порядка

постоянные
для всей
решетки

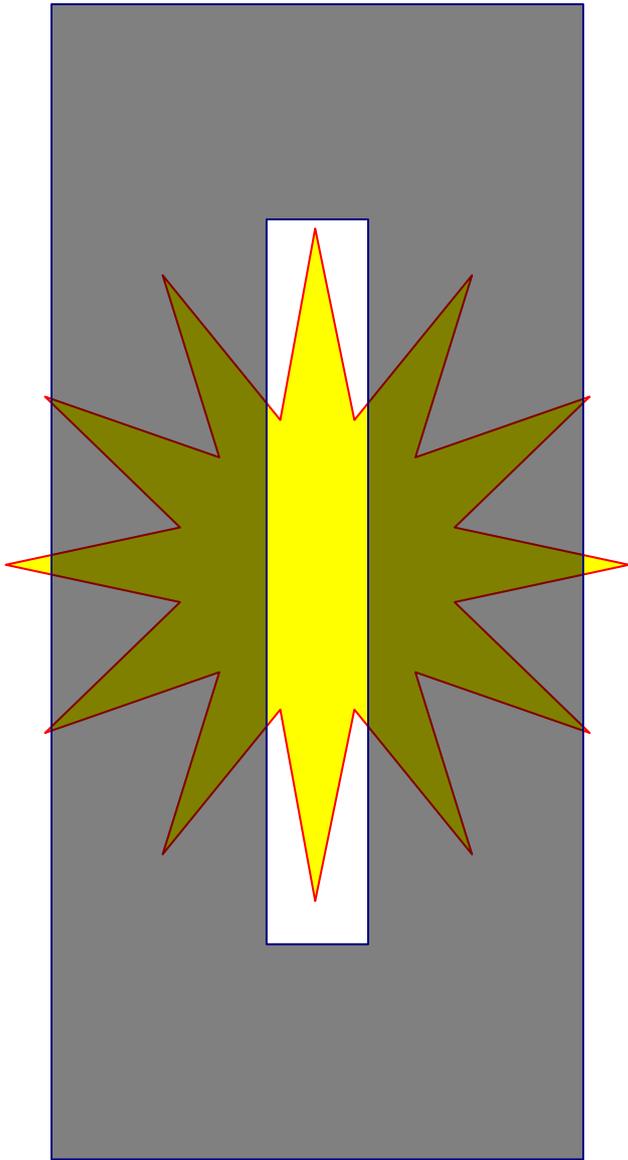


ES+
0
+

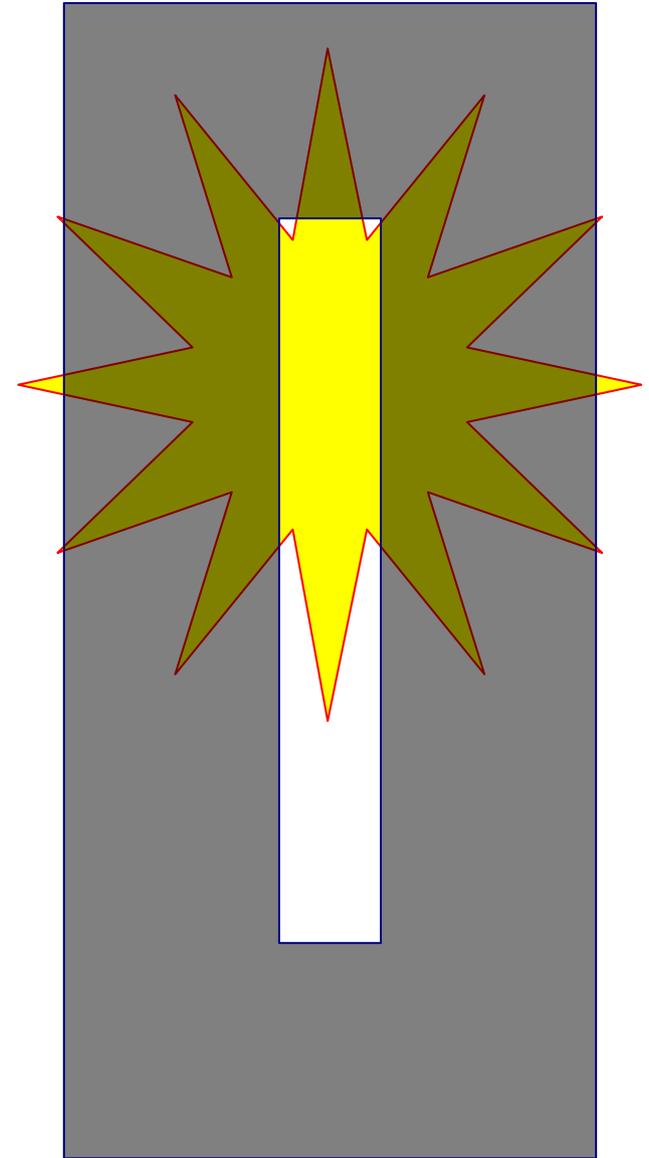
MIDAS
12FEB

User: monstr
Frame: moon_ext
Identification:
average frame
Area:
X: 1 to 1242
Y: 23 to 23
Scales:
X: 11.0031
Y: 4.82761
Min: -22
Max: 501
Date: 03 Mar 2014
Time: 15:02:33

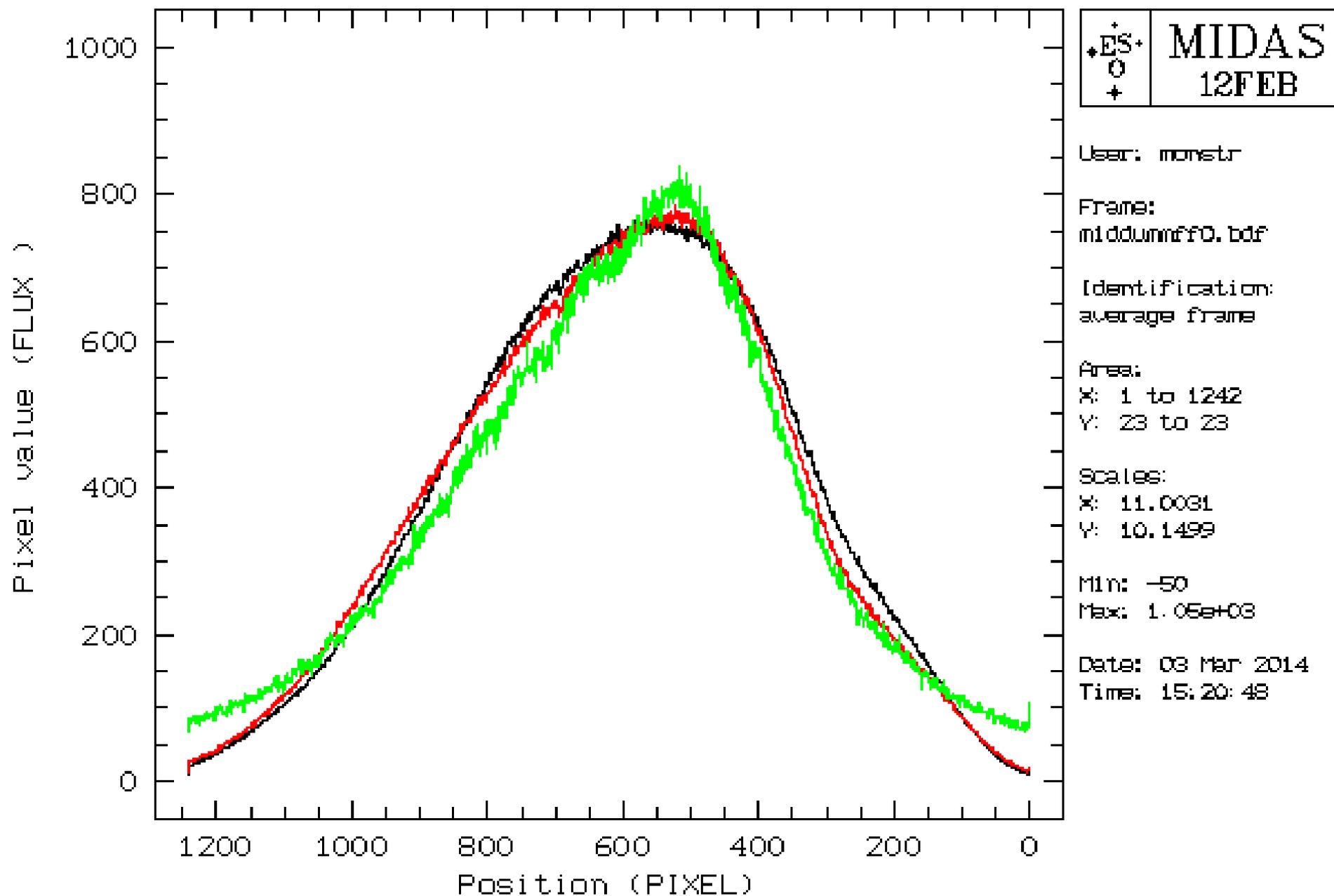
Функция блеска щели



Разное
распределение
интенсивности
для разных
положений
звезды на щели



Функция блеска разных положений звезды на щели



Этапы обработки эшелле-спектра

- Определение положений отдельных порядков
- Калибровка по длинам волн
- Выделение спектральных порядков
- Учет рассеянного света от соседних порядков
- Учет рассеянного света неба
- Калибровка по потокам
- Сшивка отдельных спектров

Определение положений отдельных порядков

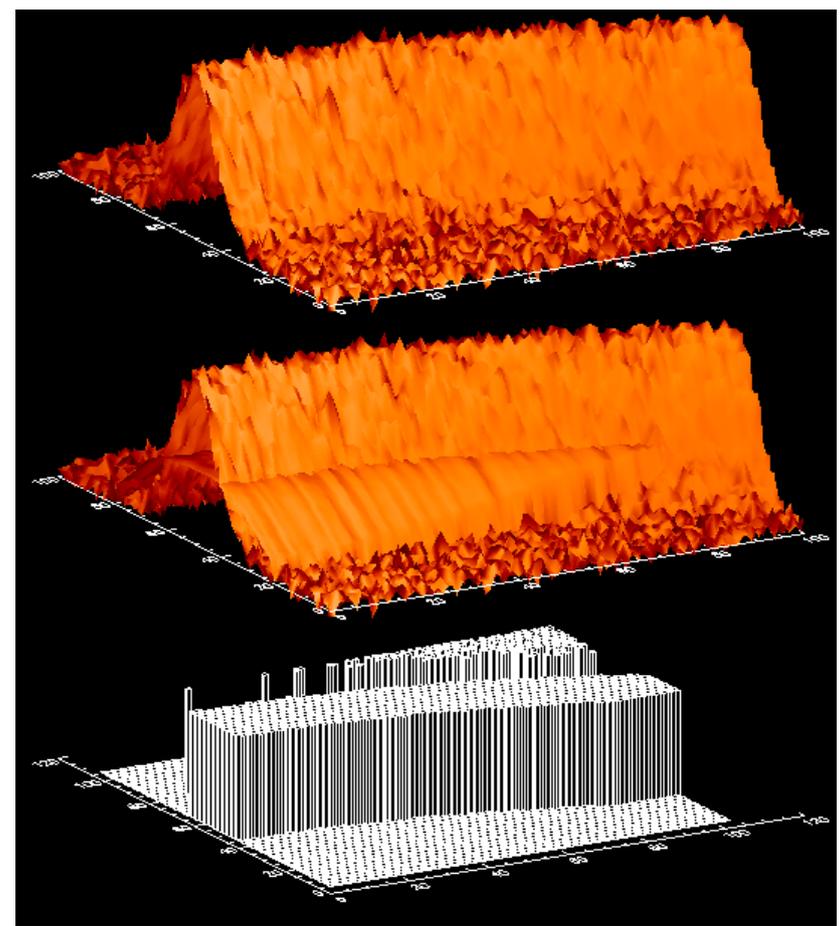
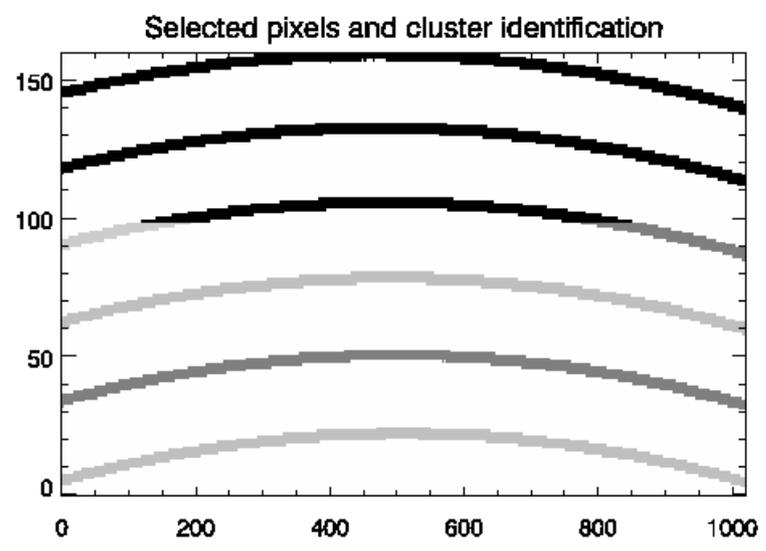
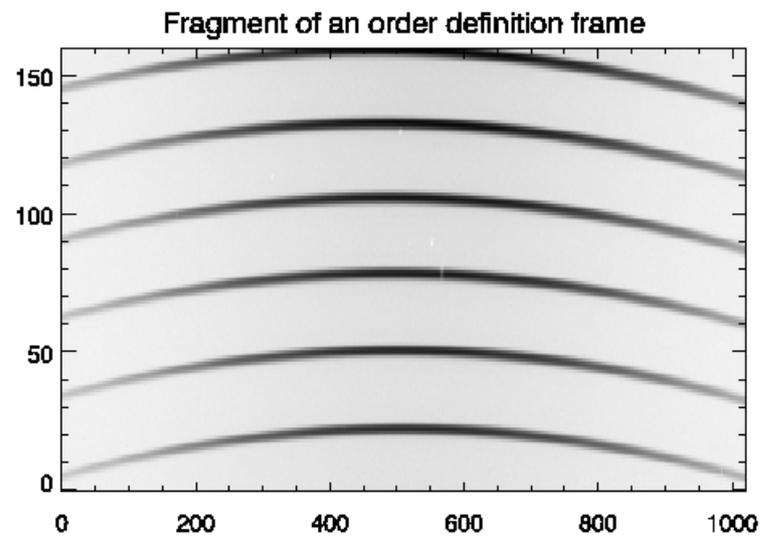
\$ DEFINE/HOUG obj_b 0 0 DENSE

1. obj_b — эшелле-кадр
2. количество порядков (0 — автоматическое определение)
3. ширина порядка (0 — автоматическое определение)
4. метод поиска порядков
CENTER — по центру порядков
DENSE — по 50 равномерно распределенным колонкам
ALL — по всем колонкам

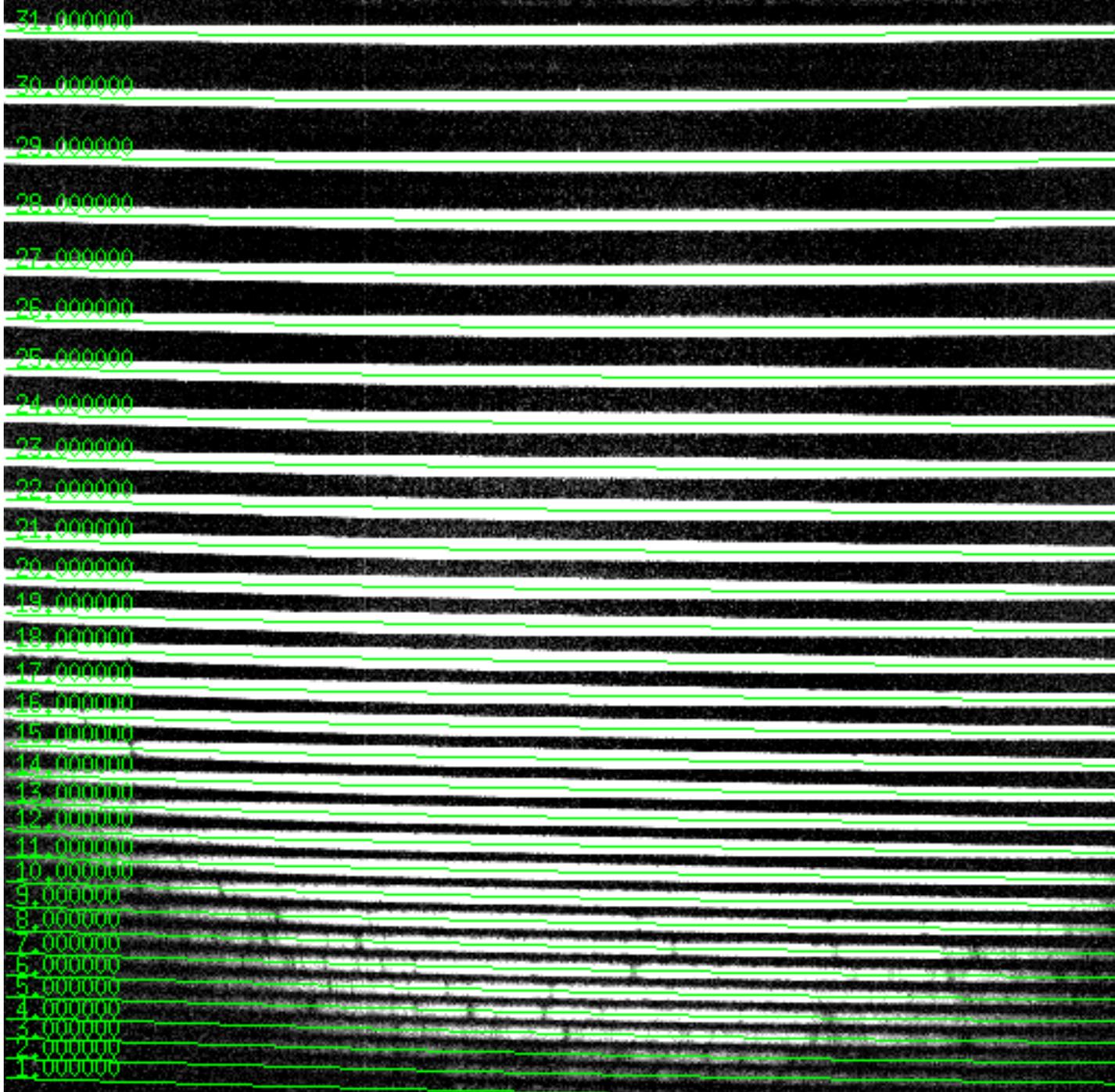
- 1) поиск точек, принадлежащих одному порядку
Преобразование Хафа (Hough Transform)
- 2) решение уравнения

$$y = f(x, m) = \sum_{j=0}^J \sum_{i=0}^I a_{ij} x^i m^j$$

I, J — степени полинома аппроксимации порядка m
Обычно I, J < 4



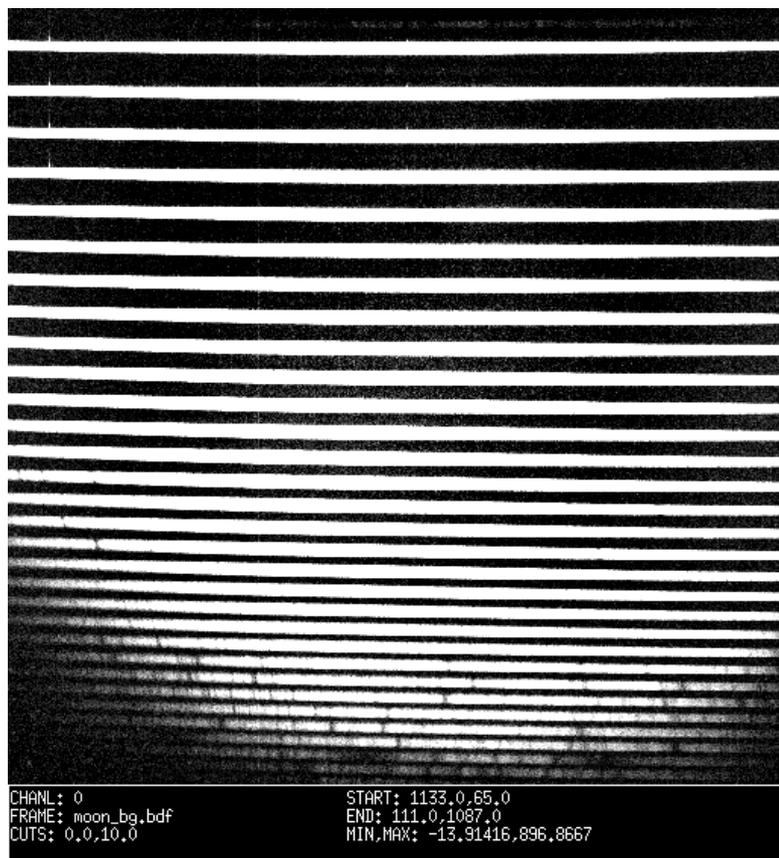
LOA/EC
H



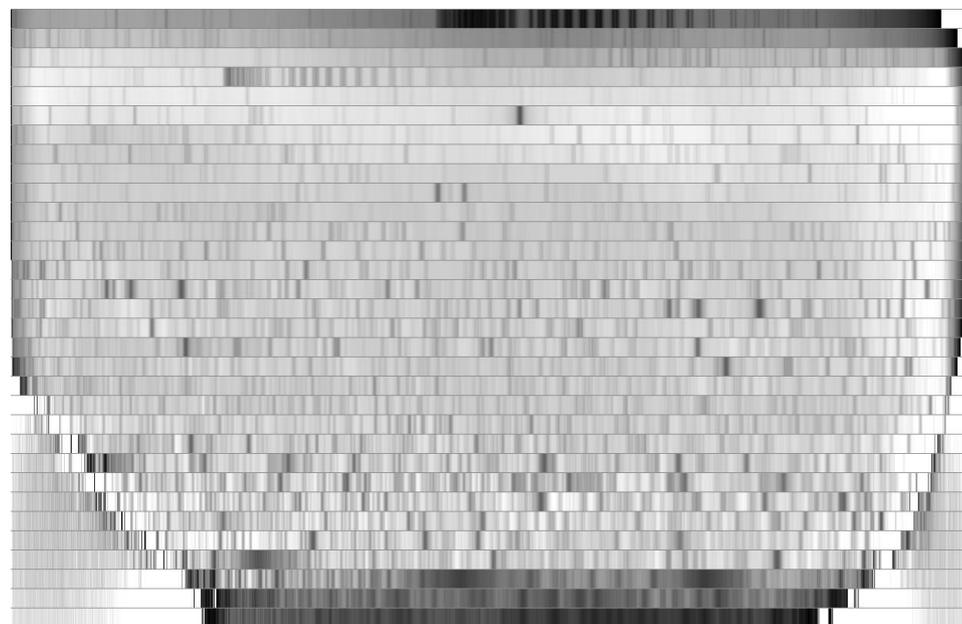
CHANL: 0 START: 1133.0,65.0
FRAME: moon_bg.bdf END: 111.0,1087.0
CUTS: 0,0,10,0 MIN,MAX: -13.91416,896.8667

Выделение эшелле-порядков

\$ extr/ech input.bdf output.bdf slit_size,offset



Xsize x Ysize



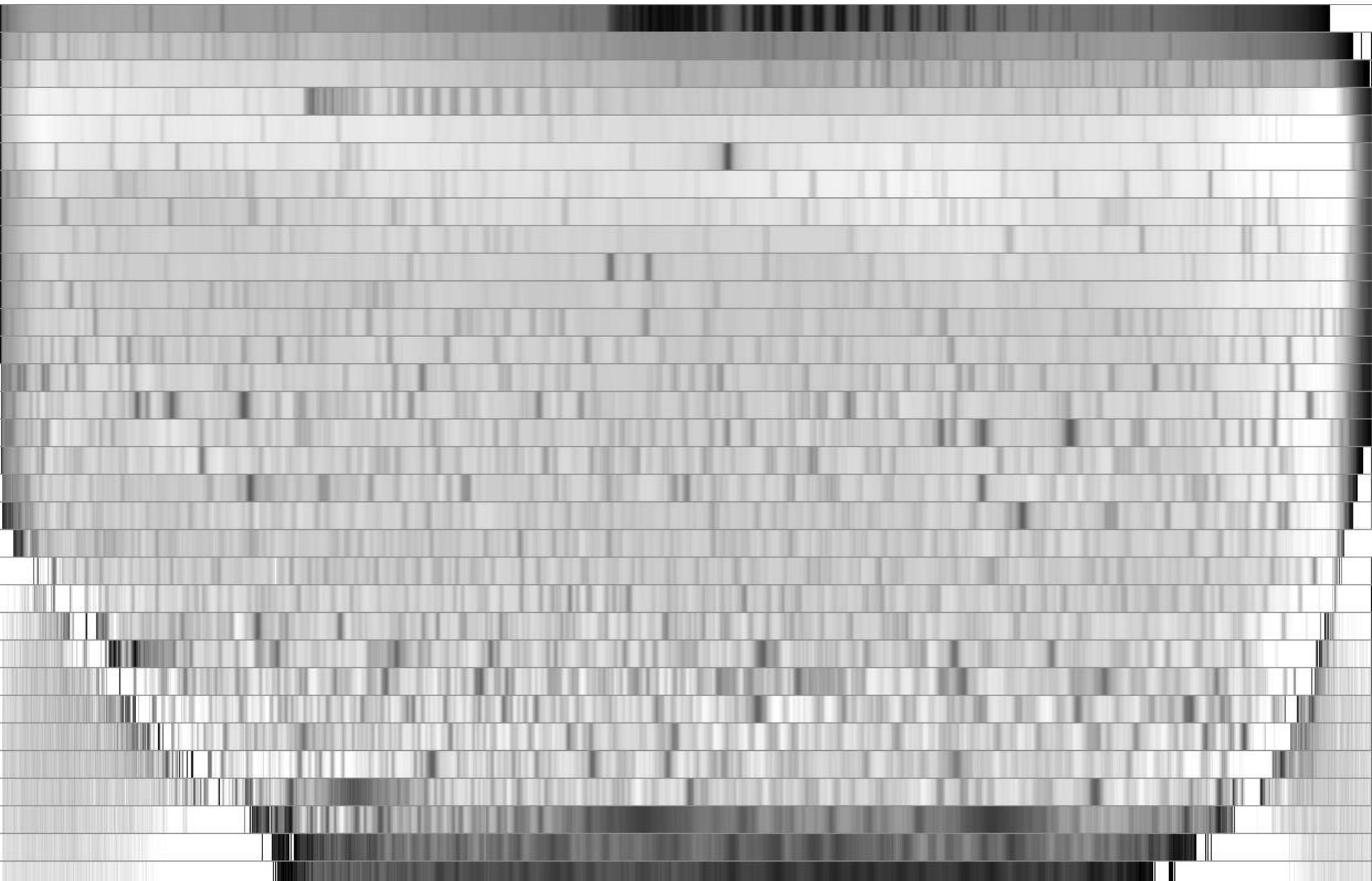
Xsize x N_{orders}

Калибровка по длинам волн

1. Поиск всех эмиссионных линий в спектре калибровочной лампы
2. Идентификация нескольких линий в спектре лампы
3. Автоматическая процедура идентификации с заданной точностью максимально возможного количества линий

```
$ extr/ech thar_b thar_ext 10 выделение порядков шириной 10 пиксел  
$ search/line thar_ext 10,7 поиск спектральных линий с  
интенсивностью больше 7 методом  
медианной фильтрации с окном 10  
Создается таблица найденных линий  
line.tbl (x,y,m)
```

Идентификация линий в спектре лампы



Идентификация линий в спектре лампы

$$\frac{6562,7}{9} \quad k\lambda_{center} = 2d\sin\theta_{blaze}$$

$$k_1\lambda_1 = k_2\lambda_2$$

$$\frac{5889,9}{5}$$

$$\frac{5895,9}{2}$$

$$k_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \Delta k$$

$$\lambda_2 = 6558,3 \quad \lambda_1 = 5903,0$$

$$\Delta k = 4$$

$$k_2 = 36 \quad k_1 = 40$$

$$k\lambda = 236100$$

Калибровка по длинам волн

Метод 1

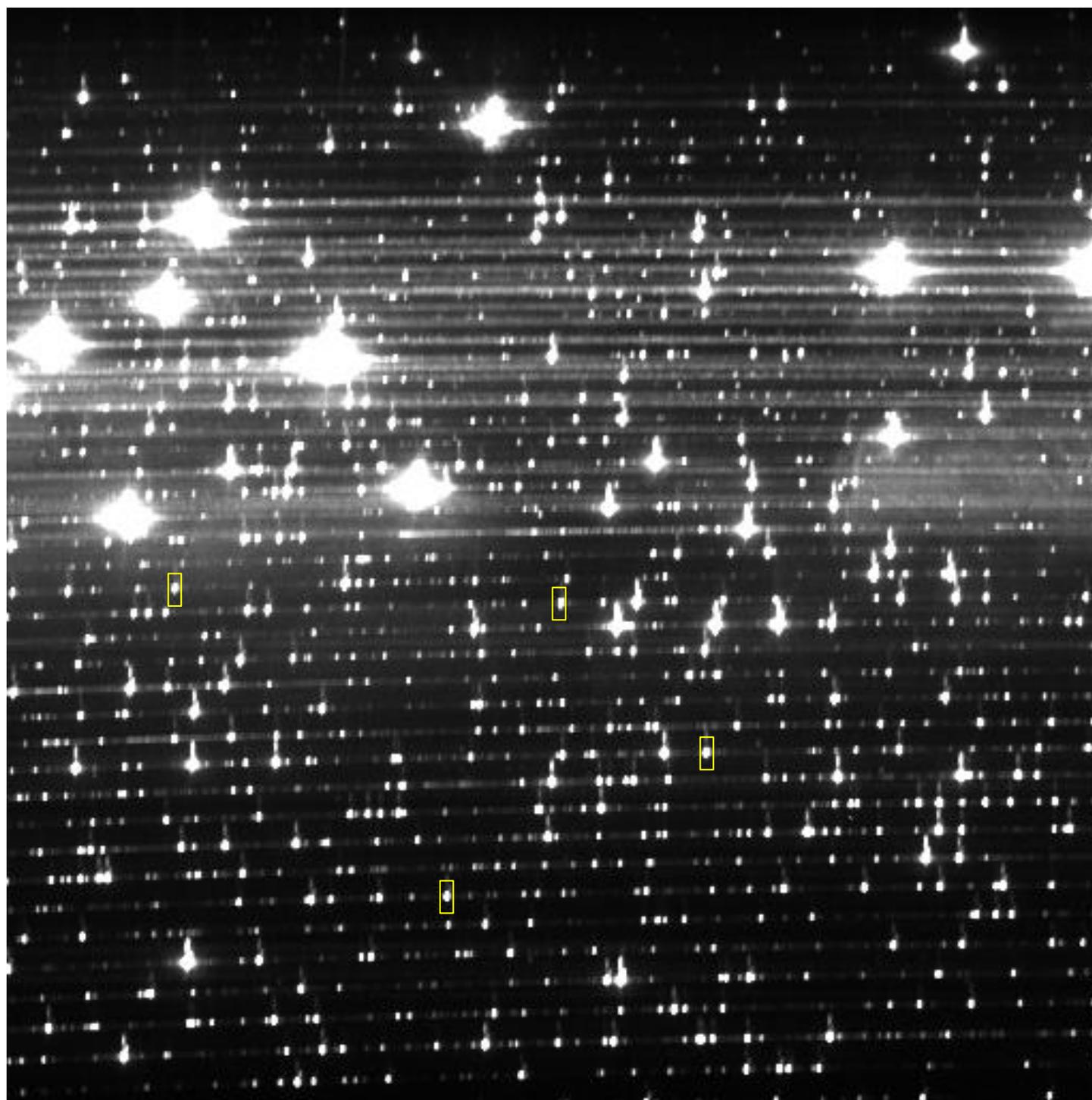
Необходимо отметить на кадре со спектром лампы не менее 4 линий с известными длинами волн

$$\lambda(x, m) = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^I a_{im} x^i$$

\$ iden/ech thar MID_ARC:thar50 3 -0.01 -0.1 ANGLE

1. изображение спектра лампы
2. таблица со списком длин волн линии
3. степень полинома
4. итоговая точность калибровки («+» в пикселях, «-» в ангстремах)
5. начальная точность калибровки («+» в пикселях, «-» в ангстремах)
6. метод

Интерактивность: нужно отметить линии, указать номер порядка и длину волны



CHANL: 0
FRAME: thar.bdf
CUTS: 0,0,1000,0

START: 514,0,2,0
END: 1536,0,1024,0
MIN,MAX: -1,5,65444,0

Калибровка по длинам волн

Метод 2

Необходимо отметить на кадре со спектром лампы две пары линий в перекрывающихся порядках

$$\alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad x_r = x \cos \alpha + y \sin \alpha, \quad m\lambda = \sum_{i=0}^N a_i x_r^i$$

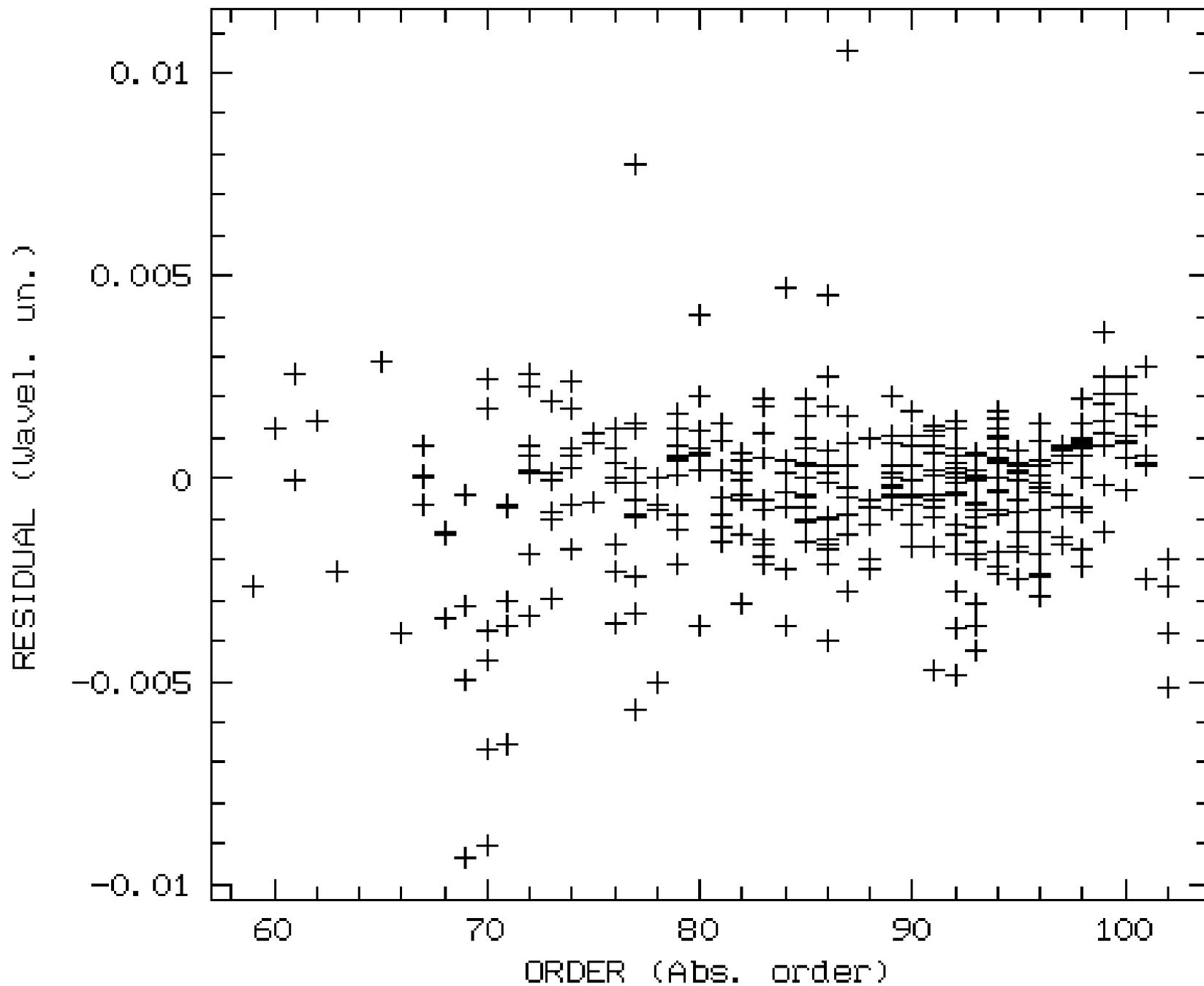
Минимизация x_r

\$ iden/ech thar MID_ARC:thar50 3 -0.01 -0.1 PAIR

1. изображение спектра лампы
2. таблица со списком длин волн линии
3. степень полинома
4. итоговая точность калибровки («+» в пикселях, «-» в ангстремах)
5. начальная точность калибровки («+» в пикселях, «-» в ангстремах)
6. метод

Интерактивность: нужно отметить линии, указать номер порядка и длину волны





•ES• 0 +	MIDAS 12FEB
----------------	-----------------------

User: monstr

Table: line.tbl

Columns:
X: :ORDER
Y: :RESIDUAL

Scales:
X: 0.385641
Y: 0.000202283

Selection:
(:select.no.0)

Date: 03 Mar 2014
Time: 19:34:42

\$ SAVE/ECH my *Сохранение всех параметров в сессии «ту»*

\$ INIT/ECH my *Восстановление всех параметров в сессии «ту»*

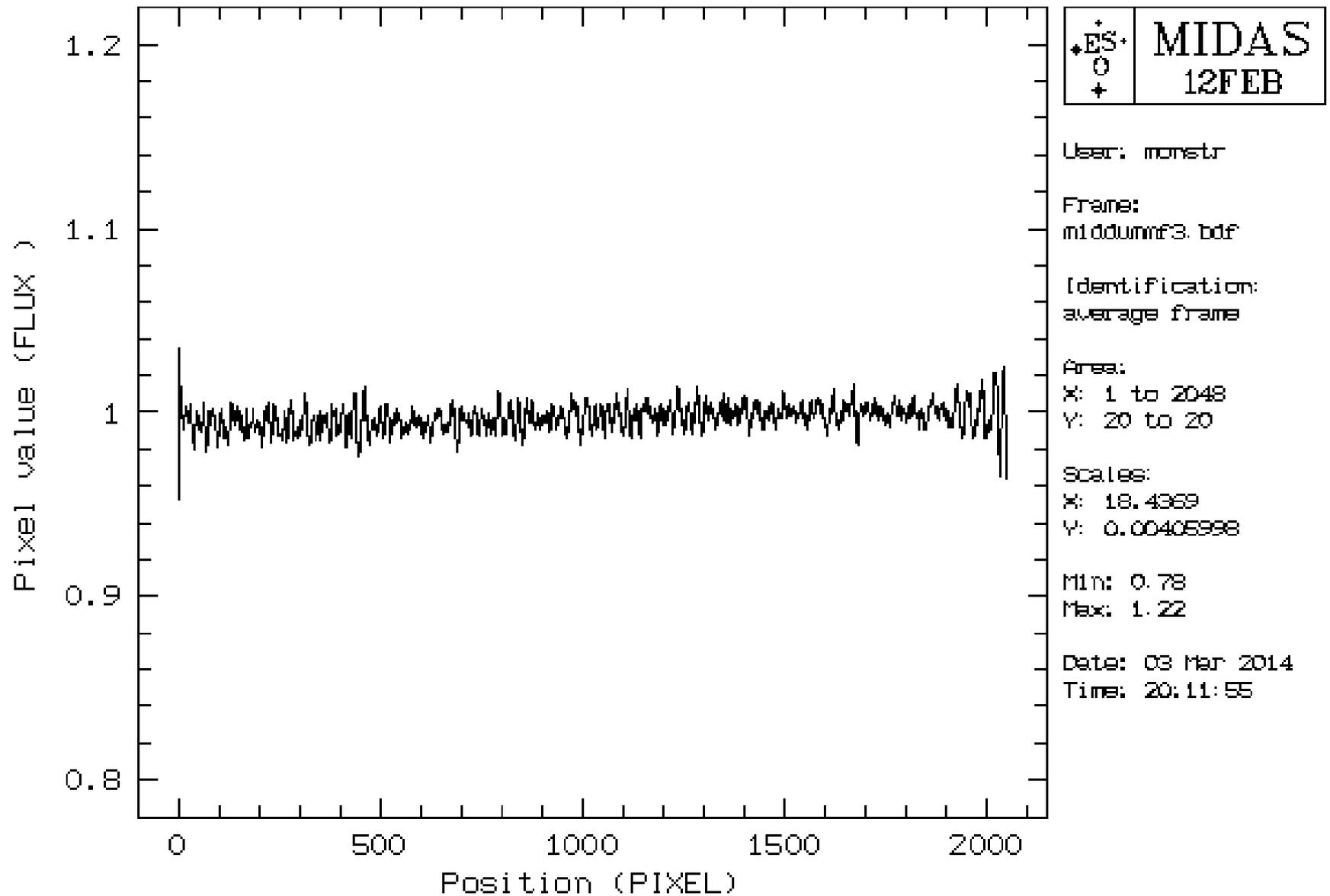
Учет плоского поля

Очень не простая процедура для эшельных спектров, требующая очень корректного подхода, поэтому многие ее избегают. В плоском поле главное — учесть мелкомасштабные неоднородности

```
$ FILTER/SMOO ff_b ff_smooth 33,1
```

```
$ COMP/IMA ff_norm = ff_b/ff_smooth
```

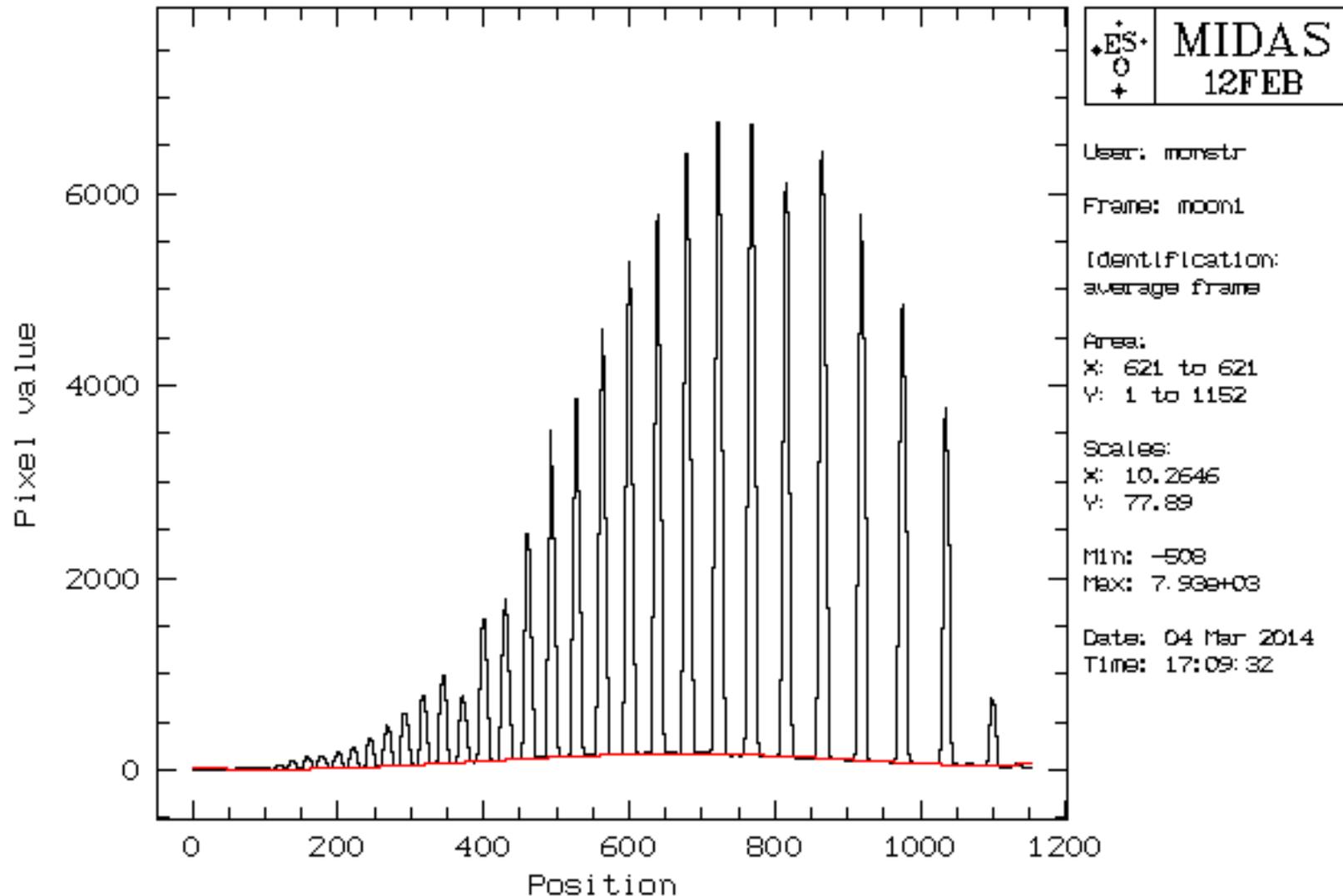
Учет плоского поля



Учет рассеянного света

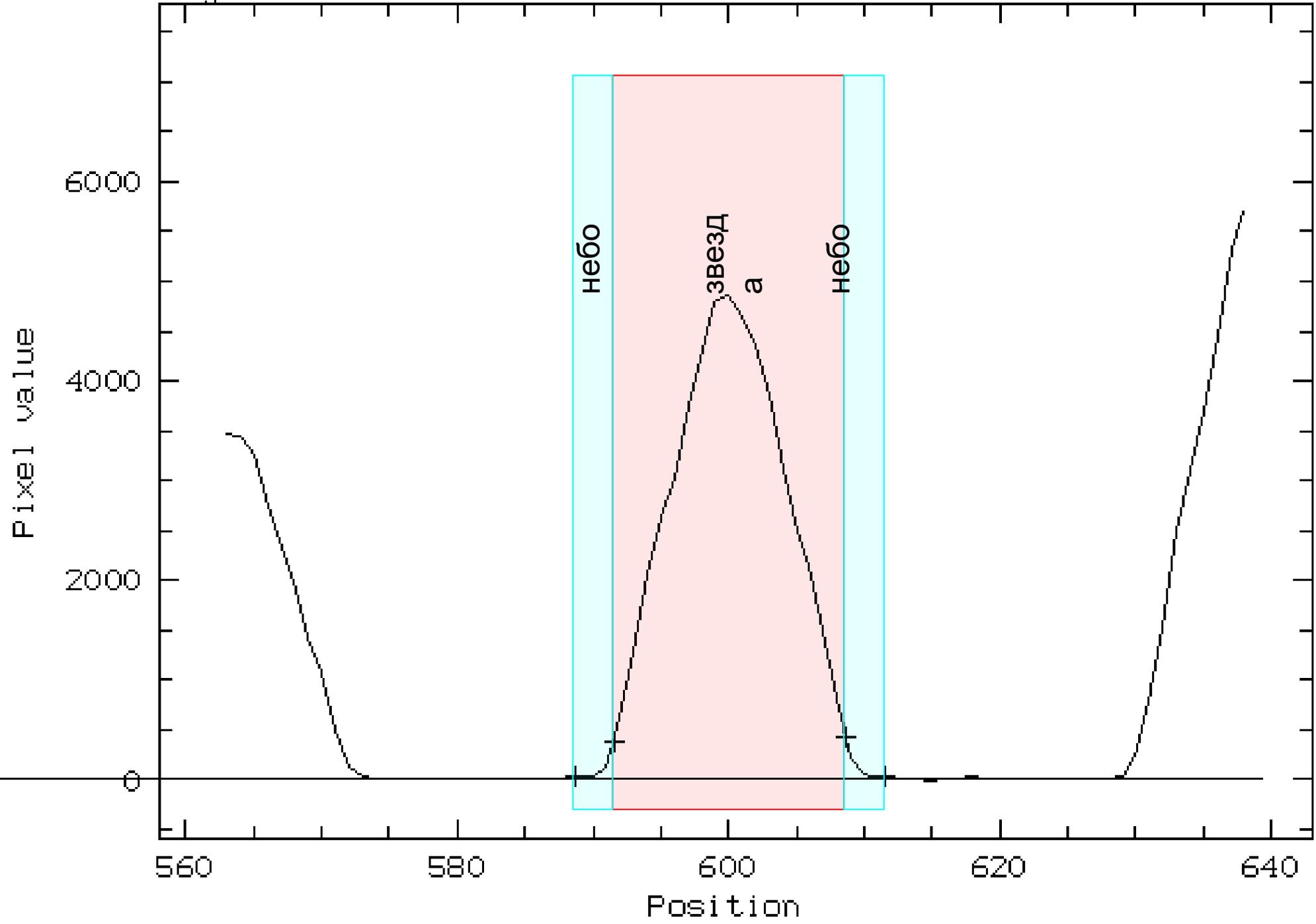
\$ set/ech VKGMTD=POLY VKGPOL=3,4 *установка параметров*

\$ SUBTRA/BACK obj_b bq obj_bq *определение и вычитание фона*



Учет рассеянного света неба

\$ define/sky obj_bg 2 cursor *интерактивная процедура определения границ неба*
\$ extract/sky obj_bg sky filter *выделение спектра неба*
\$ set/ech EXTMTD=average *установка метода экстракции спектра*
\$ extract/ech obj_bg obj_ext 10 *выделение спектра звезды с шириной щели 10*
\$ comp/ima obj_sky = obj_ext - sky *вычитание спектра неба*



Калибровка по потокам

Для этого используется спектр звезды с известным распределением энергии и определяется функция блеска (blaze function) для каждого порядка. Для этого со спектром звезды сравнения делают все те же операции обработки, что и со спектром исследуемого объекта

$$\text{\$ comp/ima blaze} = \text{std_sky}/t_{\text{STD}}/\text{std_flux}$$

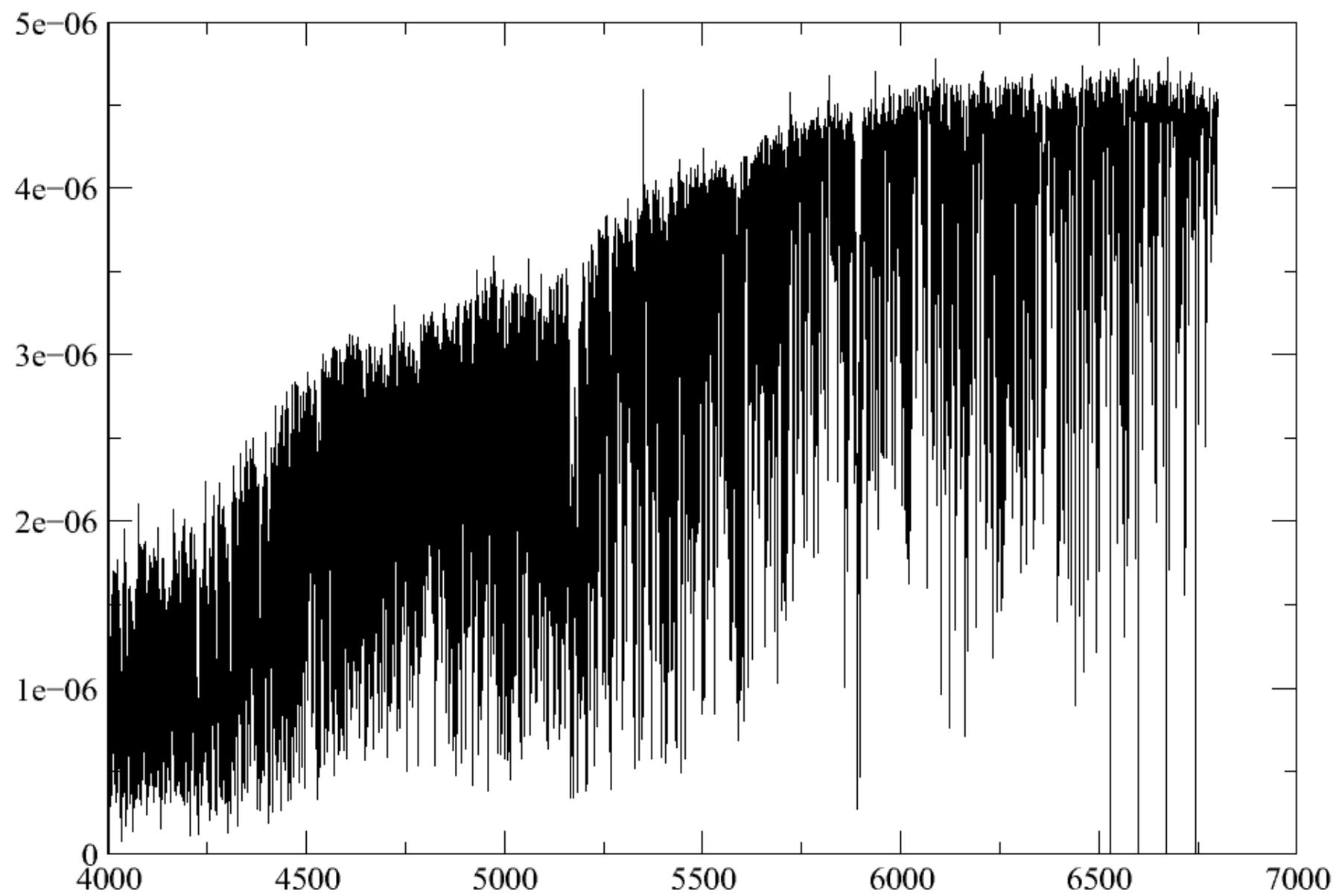
$$\text{\$ comp/ima obj_flux} = \text{obj_sky}/t_{\text{OBJ}}/\text{blaze}$$

t_{STD} — время экспозиции
звезды сравнения

t_{OBJ} — время экспозиции
объекта

Объединение спектров отдельных порядков

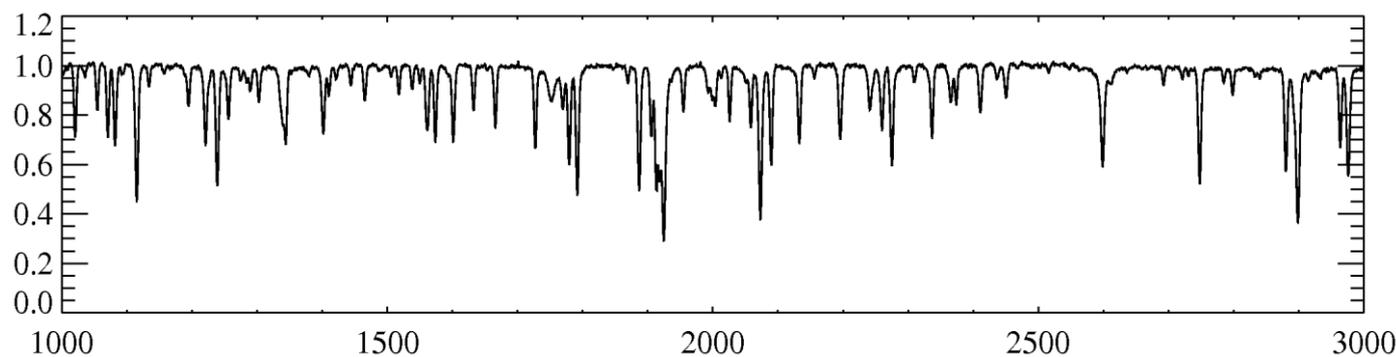
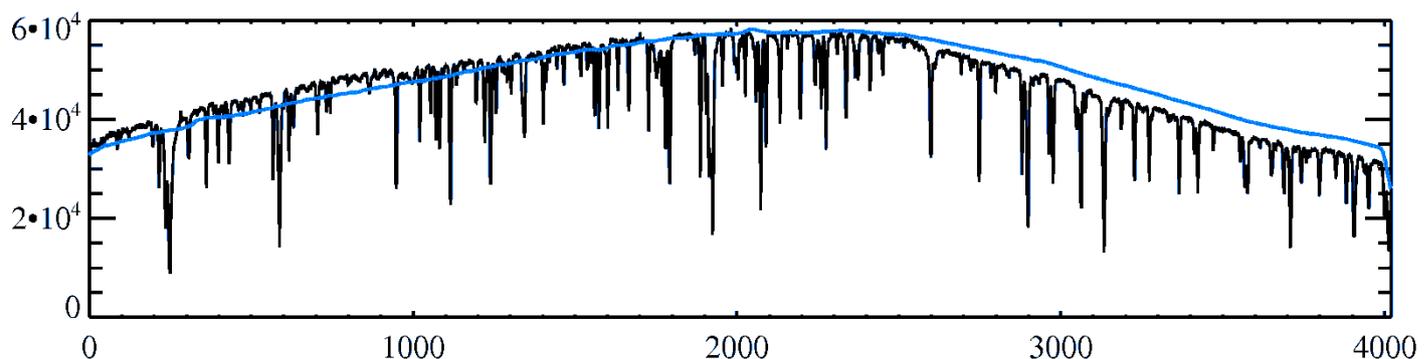
\$ rebin/ech obj_flux obj_reb *установка шкалы длин волн*
\$ merge/ech obj_reb obj_1D *сложение спектров*
\$ outdis/fits obj_1D obj_1D.fits *запись в FITS файл*



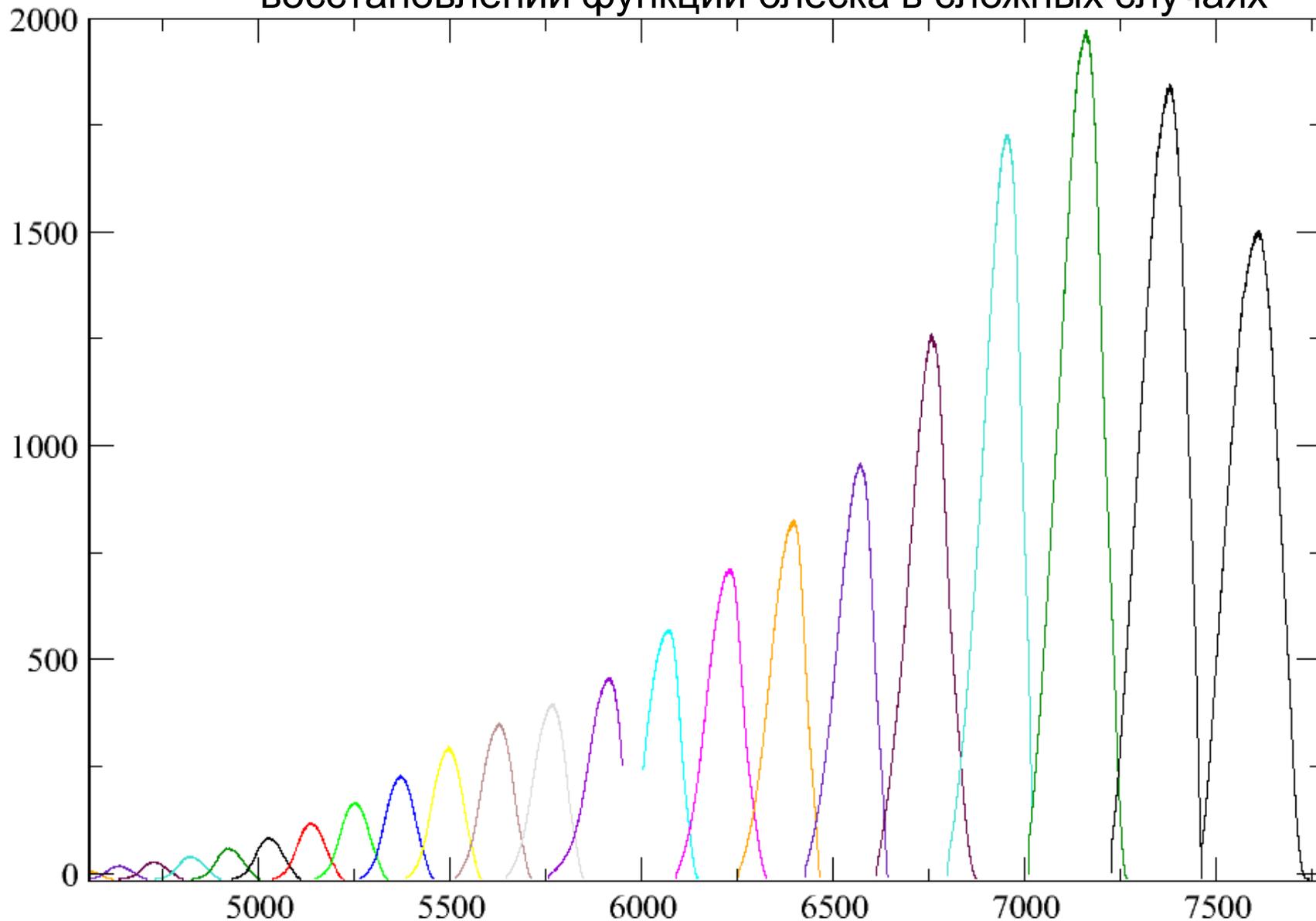
Нормализация спектра на уровень континуума

Необходимо правильно описать поведение континуума в каждом порядке — задача очень трудная

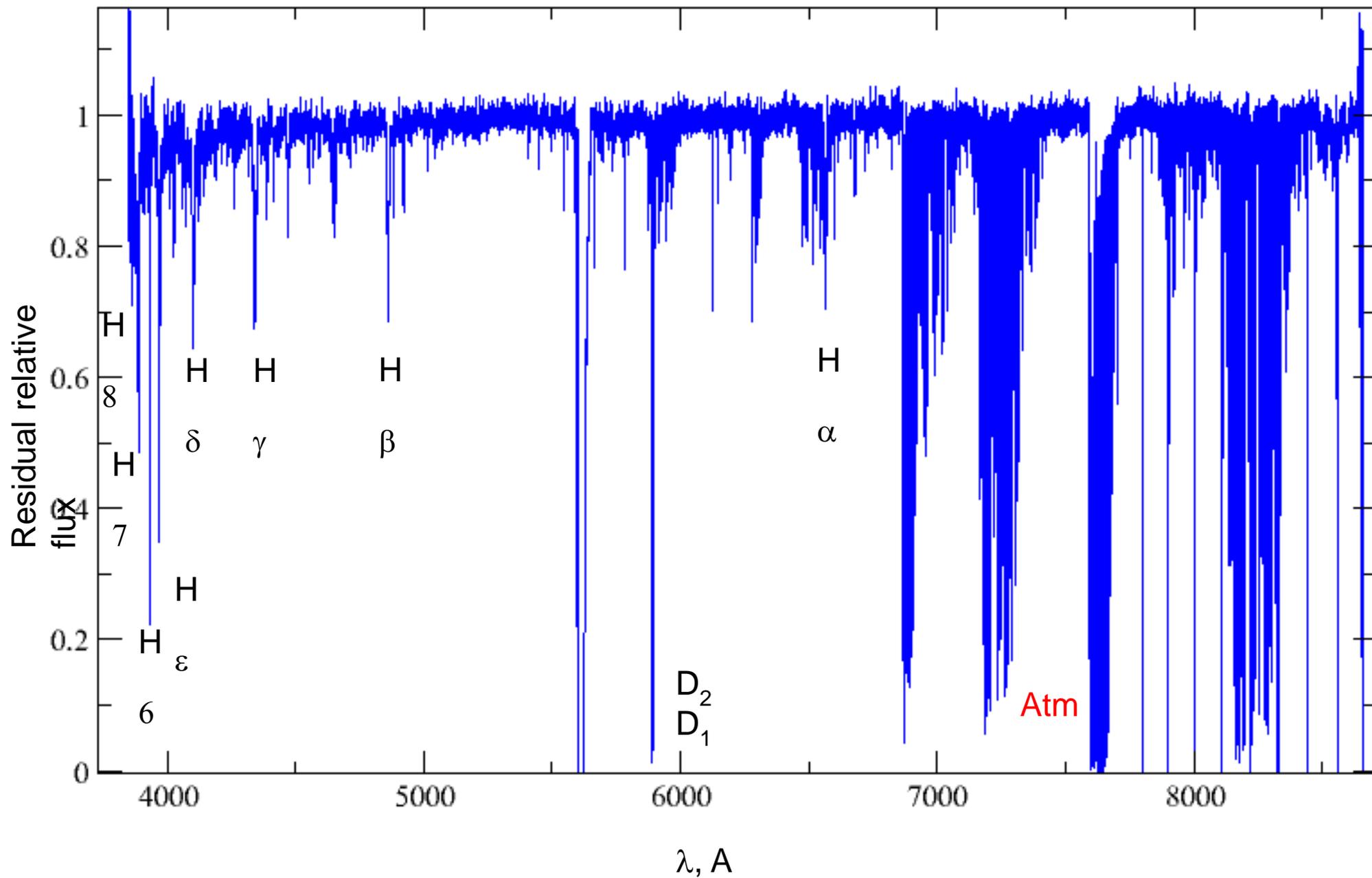
Облегчение — разделить на функцию блеска, определенную по стандартной звезде или плоскому полю.

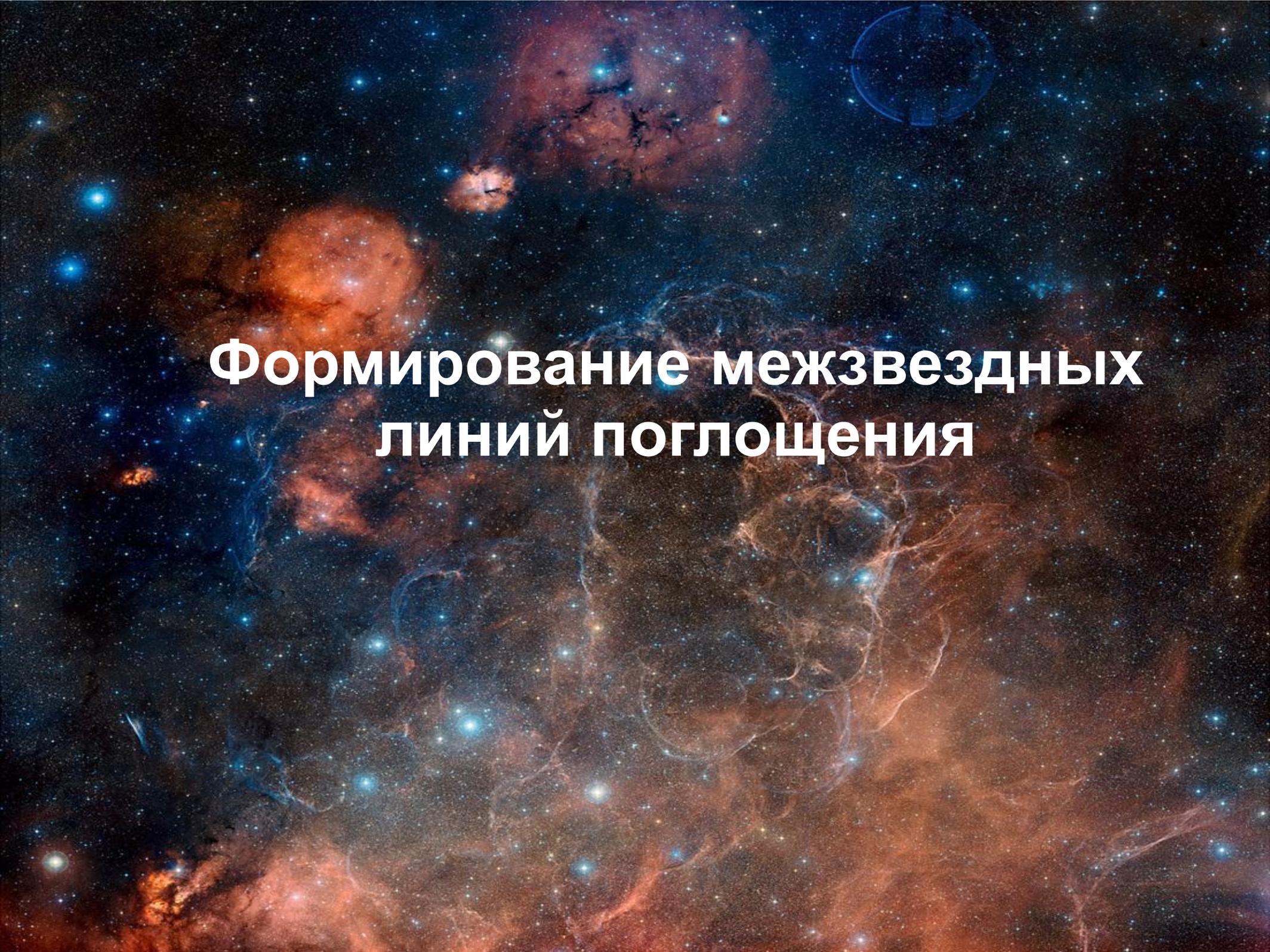


Функция блеска меняется плавно от одного порядка к другому
Это свойство можно использовать для интерполяции при
восстановлении функции блеска в сложных случаях



Спектр звезды
HD75309





**Формирование межзвездных
линий поглощения**

Hot Source
(Star)

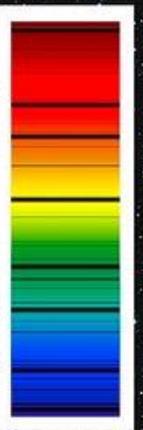
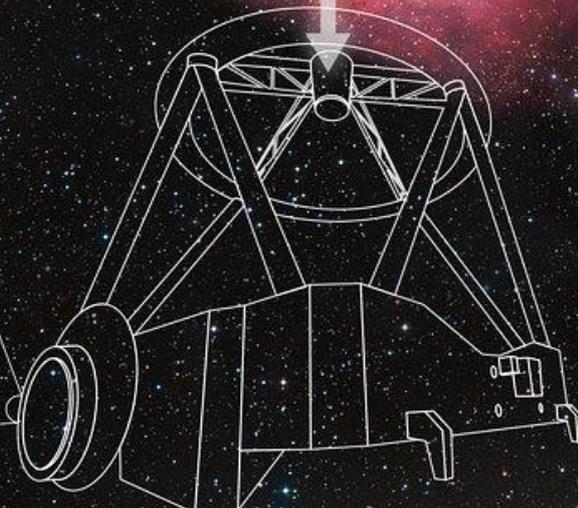
Continuous Spectrum

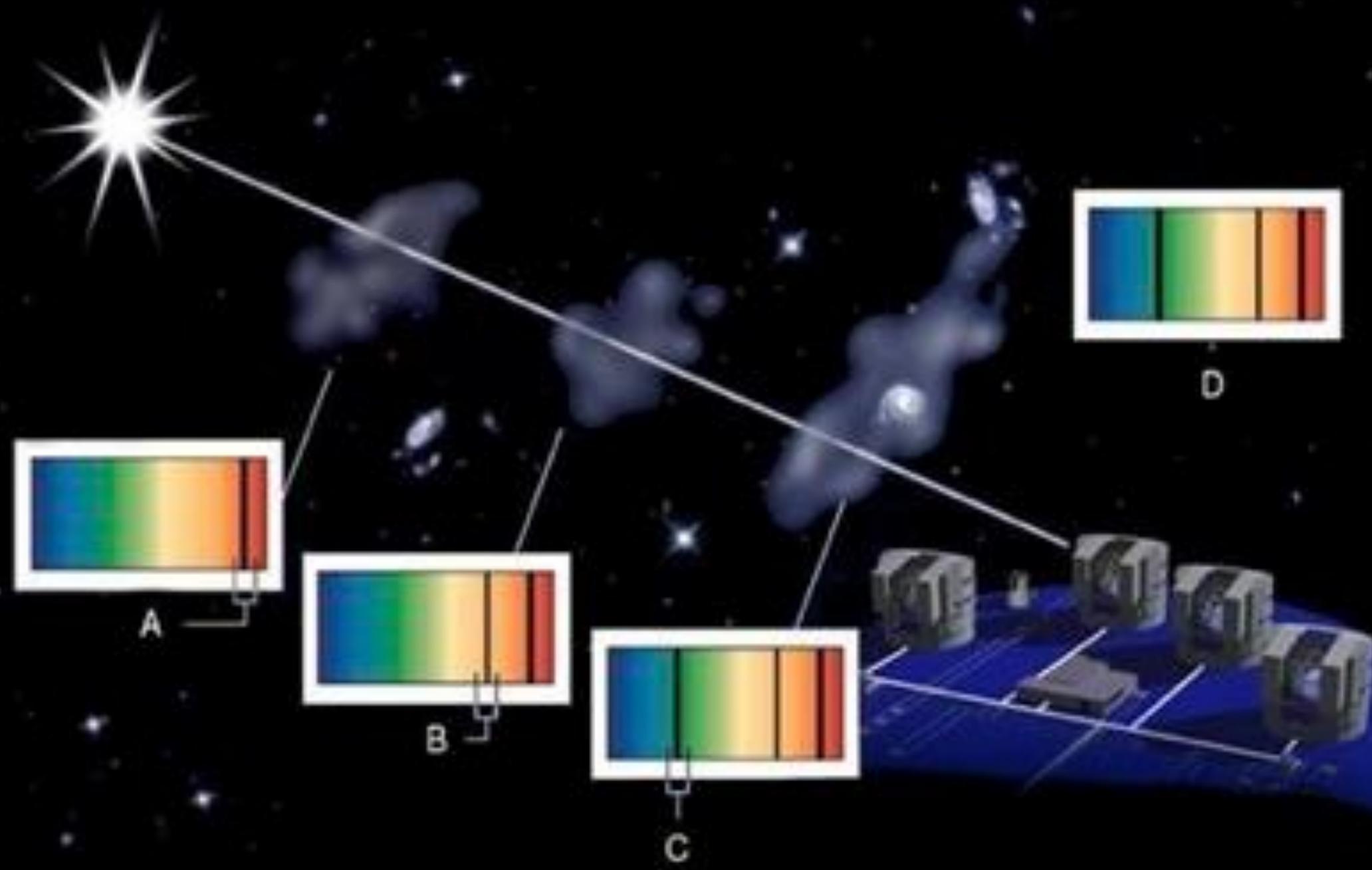


Gas
(Nebula)

Emission Spectrum

Absorption Spectrum

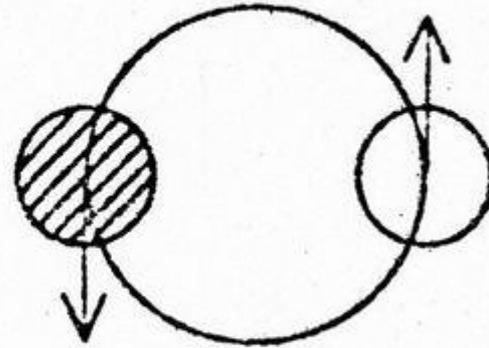
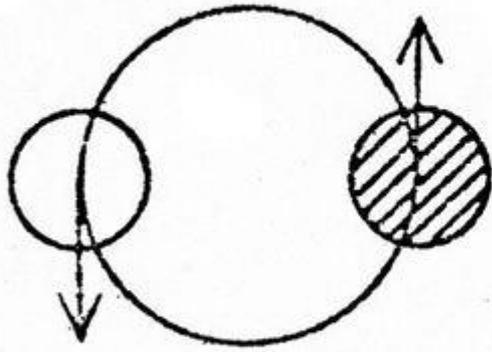




A

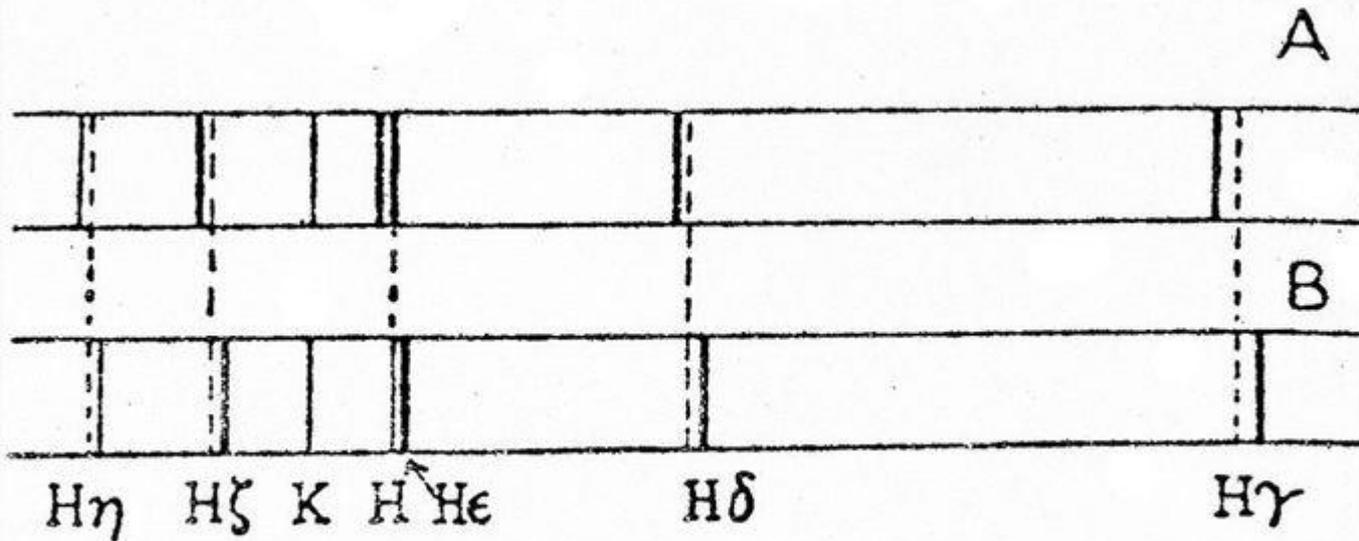
Hartmann, 1904

B



Blue Shifted

Red Shifted



Условия холодной межзвездной среды

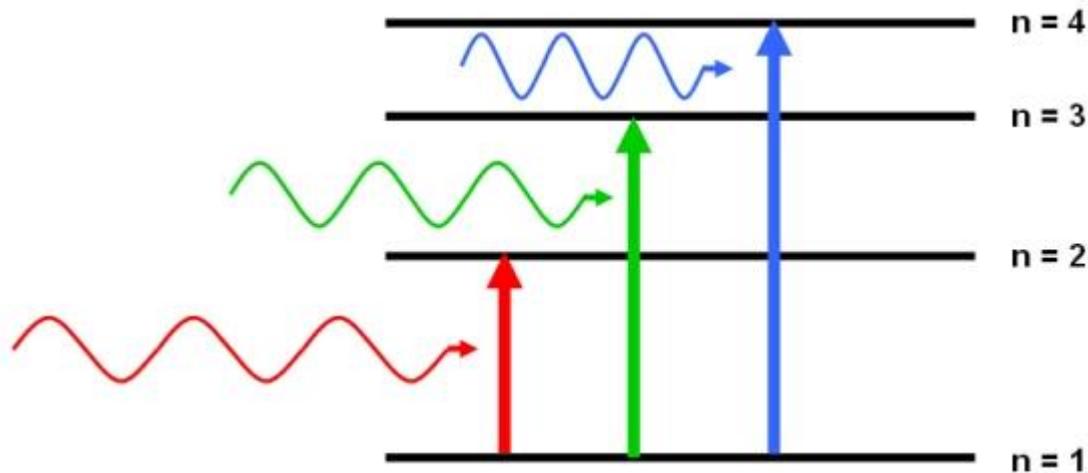
$$T \sim 10 \dots 100 \text{ K}$$

$$kT = 1.38 \cdot 10^{-16} \cdot 100 = 1.38 \cdot 10^{-14} \text{ erg} = 1.38 \cdot 10^{-14} / 1.602 \cdot 10^{-12} = 8.61 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$$

$$kT \ll E_0$$

*температура много меньше энергии возбуждения
основного уровня большинства атомов*

В итоге почти все электроны в атоме находятся на основном уровне



Поэтому в холодном межзвездном газе атомы будут поглощать те фотоны, энергия которых соответствует энергии перехода с основного уровня на ближайший вероятный — резонансные линии.

Основные линии холодной межзвездной среды в оптическом диапазоне

CaII 3934Å, 3963Å

CaI 4227Å

NaI 5890Å, 5896Å

KI 7664Å, 7699Å

CH 4300Å

CH⁺ 4232Å

Основные линии холодной межзвездной среды в оптическом диапазоне

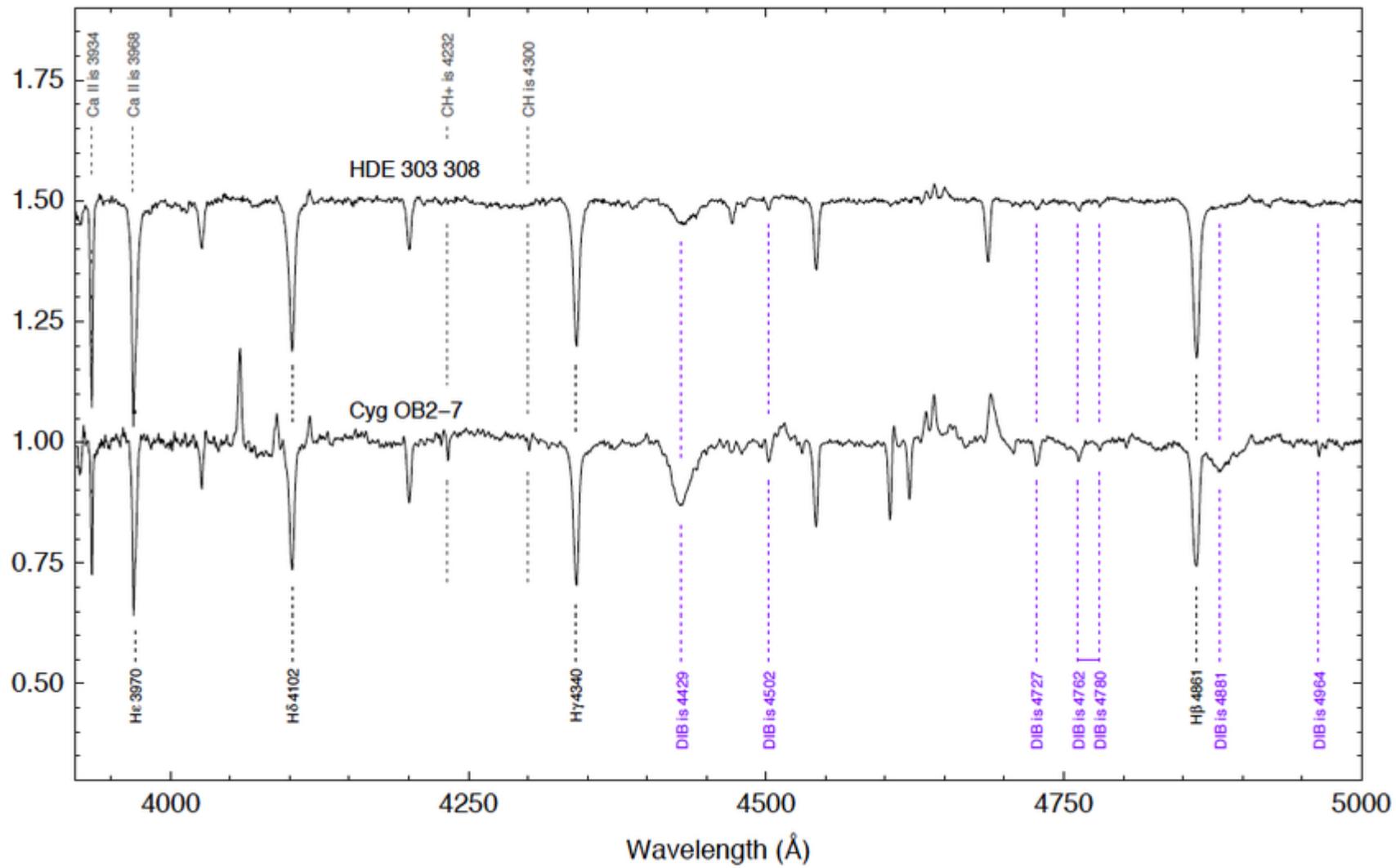
Diffuse Interstellar Bands (DIB)

4430Å

5780Å 5797Å 5850Å

6196Å 6203Å 6270Å 6284Å 6376Å 6614Å 6660Å

7224Å



Условия холодной межзвездной среды

$$kT \ll E_0$$

*температура много меньше энергии возбуждения
основного уровня большинства атомов*

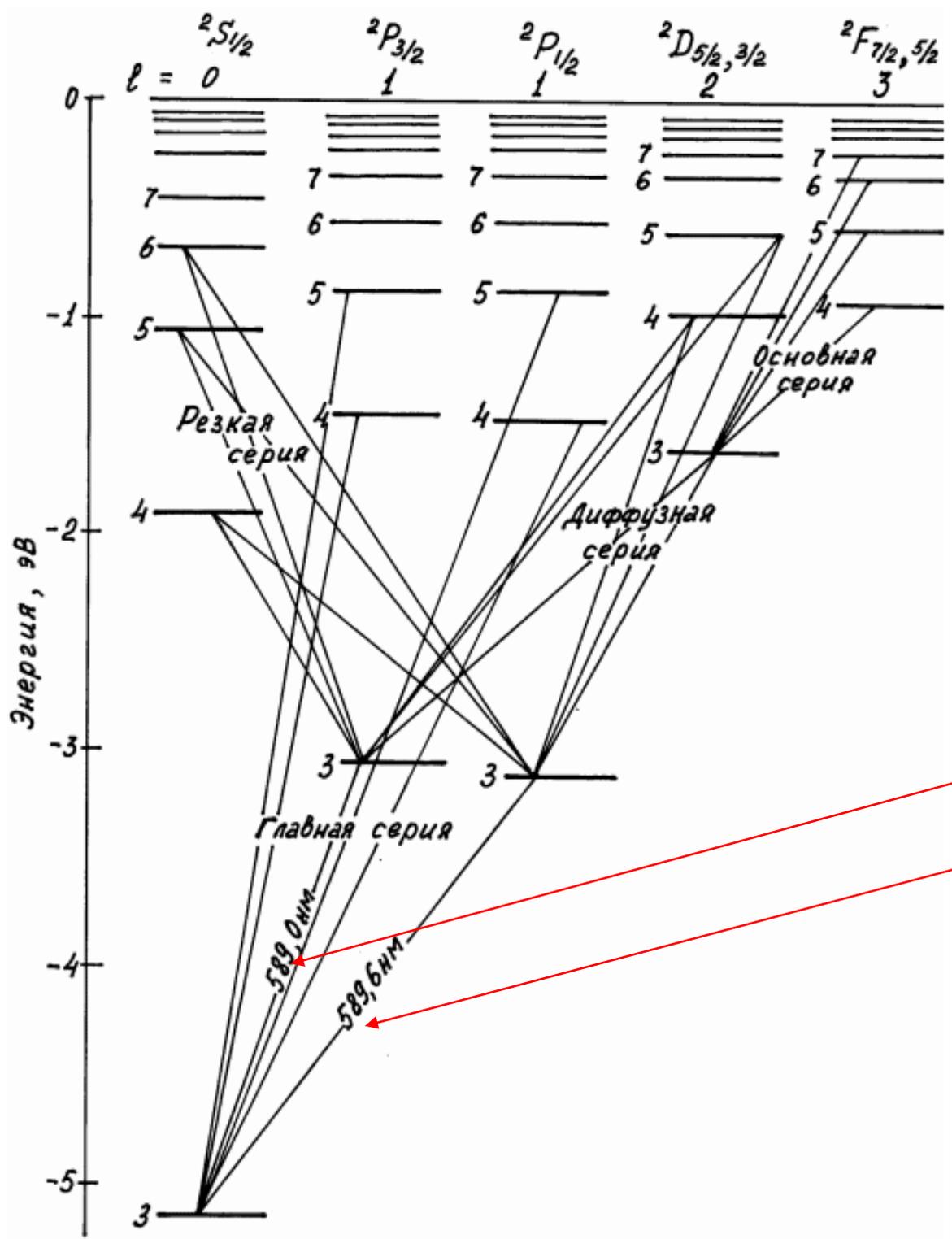
$$N_i = N \frac{g_i}{u(T)} e^{-\frac{E}{kT}}$$

$$g = 2J + 1$$

$$u(T) = \sum_i g_i e^{-E/kT} = g_0$$

$$N_0 = N$$

Na I



Самые
сильные
линии

Рис. 5.1

Образование межзвездных линий



Уравнение переноса

$$I(\nu) = I_0(\nu)e^{-\tau_\nu}$$

при $I_0(\nu) = 1$

$$I(\nu) = e^{-\tau_\nu} \quad (0 \dots 1]$$

Доля поглощенного
света

Оптическая толщина $\tau_\nu = \kappa_\nu \int \rho dl = \kappa_\nu N$

Кoeffициент поглощения в линии

Коэффициент поглощения в линии

$$\kappa_\nu = \frac{c^2}{8\pi^2\nu_{ik}^2} \frac{g_k}{g_i} A_{ki} \alpha_\nu$$

$$A_{ki} = \frac{8\pi e^2 \nu^2}{m_e c^3} \frac{g_i}{g_k} f_{ik}$$

Коэффициент Энштейна
спонтанного перехода

$$\alpha_\nu = \frac{\Delta\nu}{(\nu - \nu_0)^2 + \Delta\nu^2}$$

Профиль линии с естественной
шириной, вследствие затухания

Коэффициент поглощения в линии в среде с ненулевой температурой

$$\sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv$$

Доля атомов с скоростями $v \dots v+dv$
Для каждого значения v свой профиль α_v

$$\Delta\nu = \nu \frac{v}{c}$$

$$\alpha_v = \frac{1}{\sqrt{\pi}b} e^{-\frac{v^2}{b^2}}$$

Доплеровский тепловой профиль
в шкале скоростей

$$b^2 = \frac{2kT}{m}$$

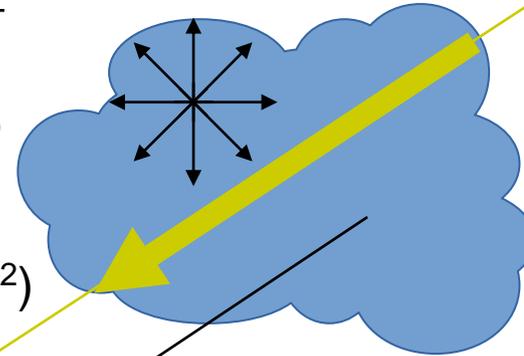
$$\kappa_\lambda = \frac{\pi e^2}{m_e c} \lambda f \alpha_v = \sigma_0 f \lambda \alpha_v = 0.02654 f \lambda \alpha_v$$

Образование межзвездных линий

тепловые и турбулентные движения **b** (км/с)

$$b = \sqrt{\frac{2kT}{\mu} + V_{turb}^2}$$

Лучевая концентрация **N** (см⁻²)



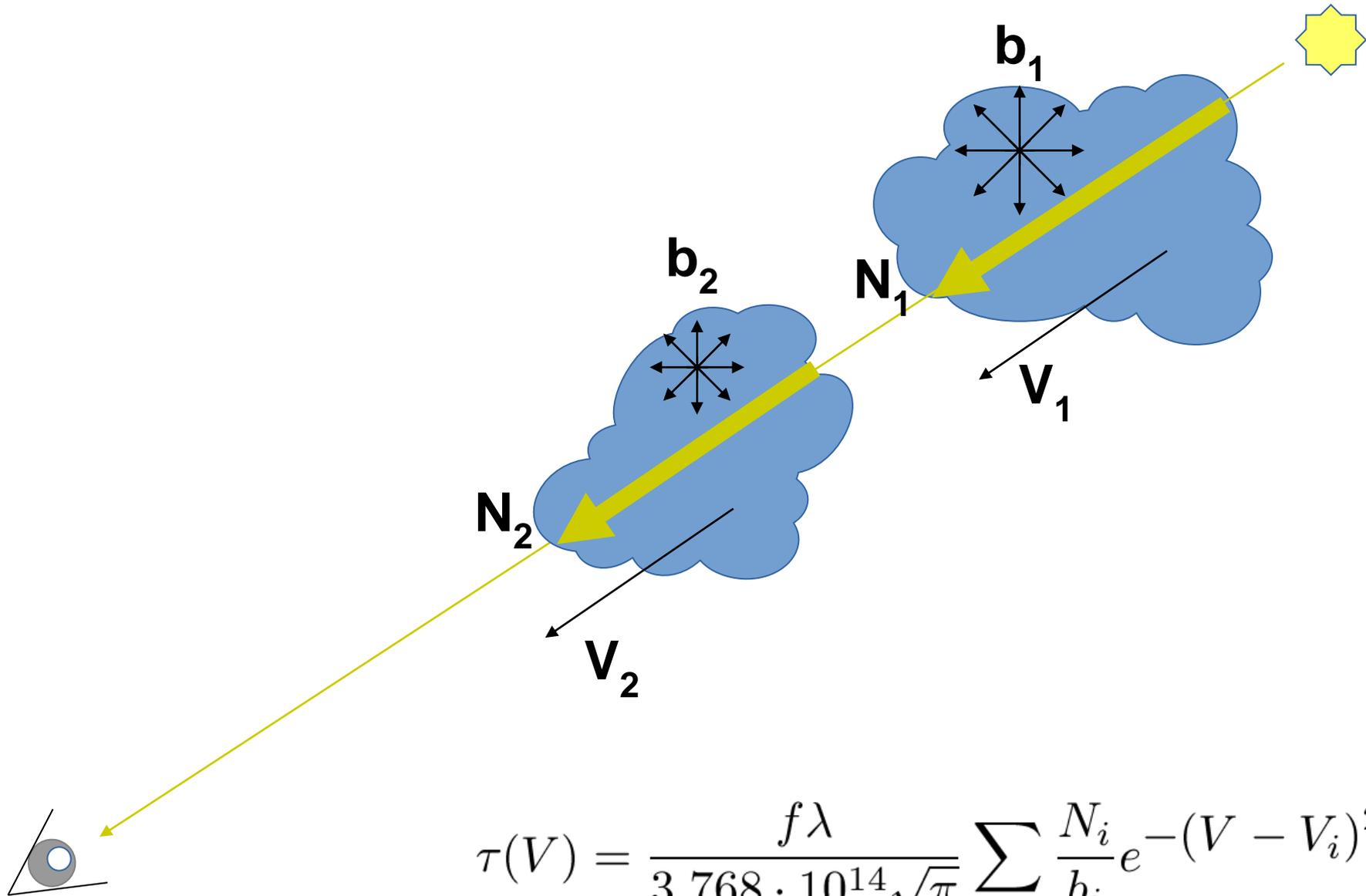
$$V_0 = V_{LSR} + \Delta V_{Earth} + \Delta V_{Sun}$$

$$\tau(V) = \frac{Nf\lambda}{3.768 \cdot 10^{14} \sqrt{\pi} b} e^{-(V - V_0)^2 / b^2}$$

$$F_{res}(V) = e^{-\tau(V)} * \psi$$

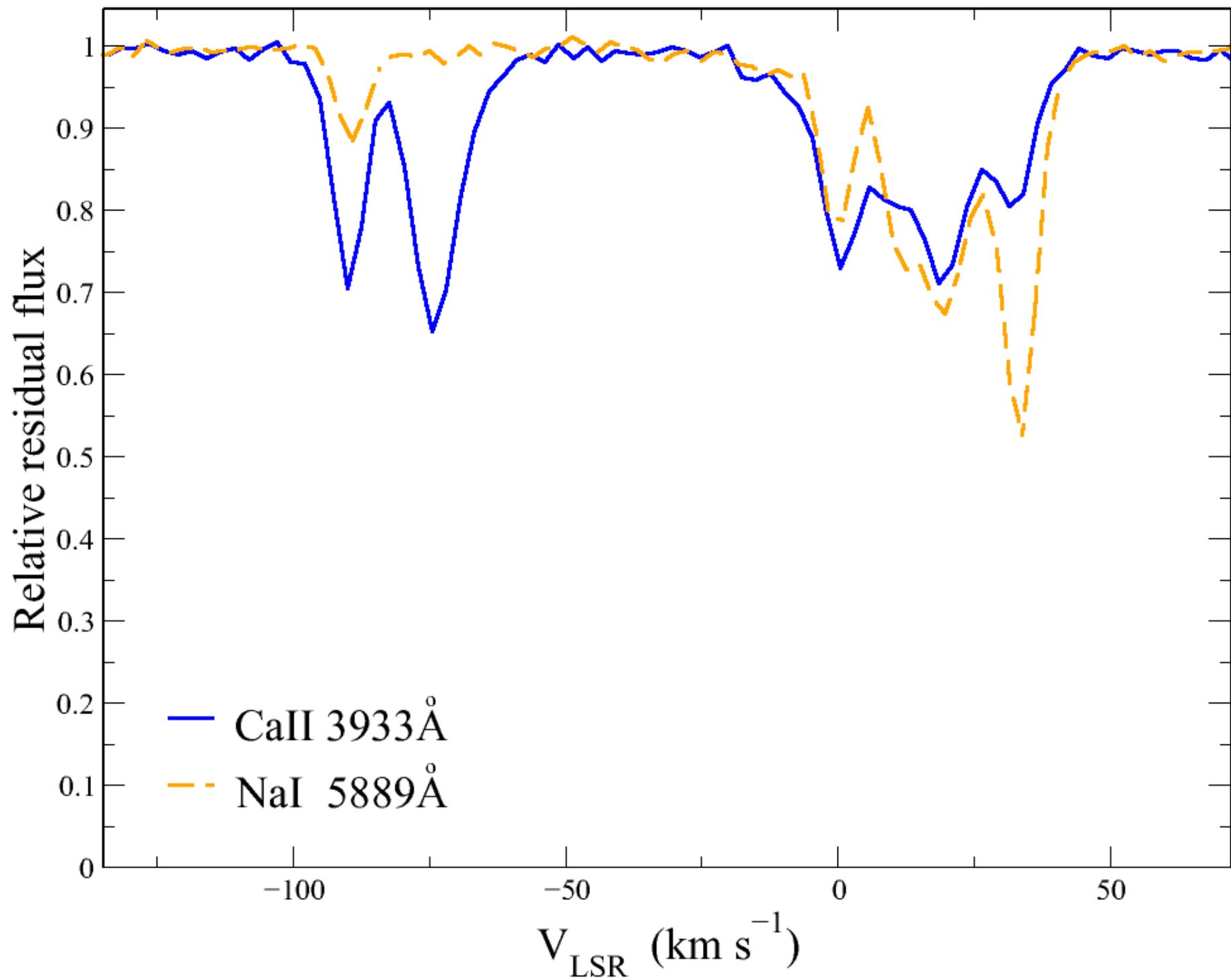
Инструментальный
профиль

Образование межзвездных линий

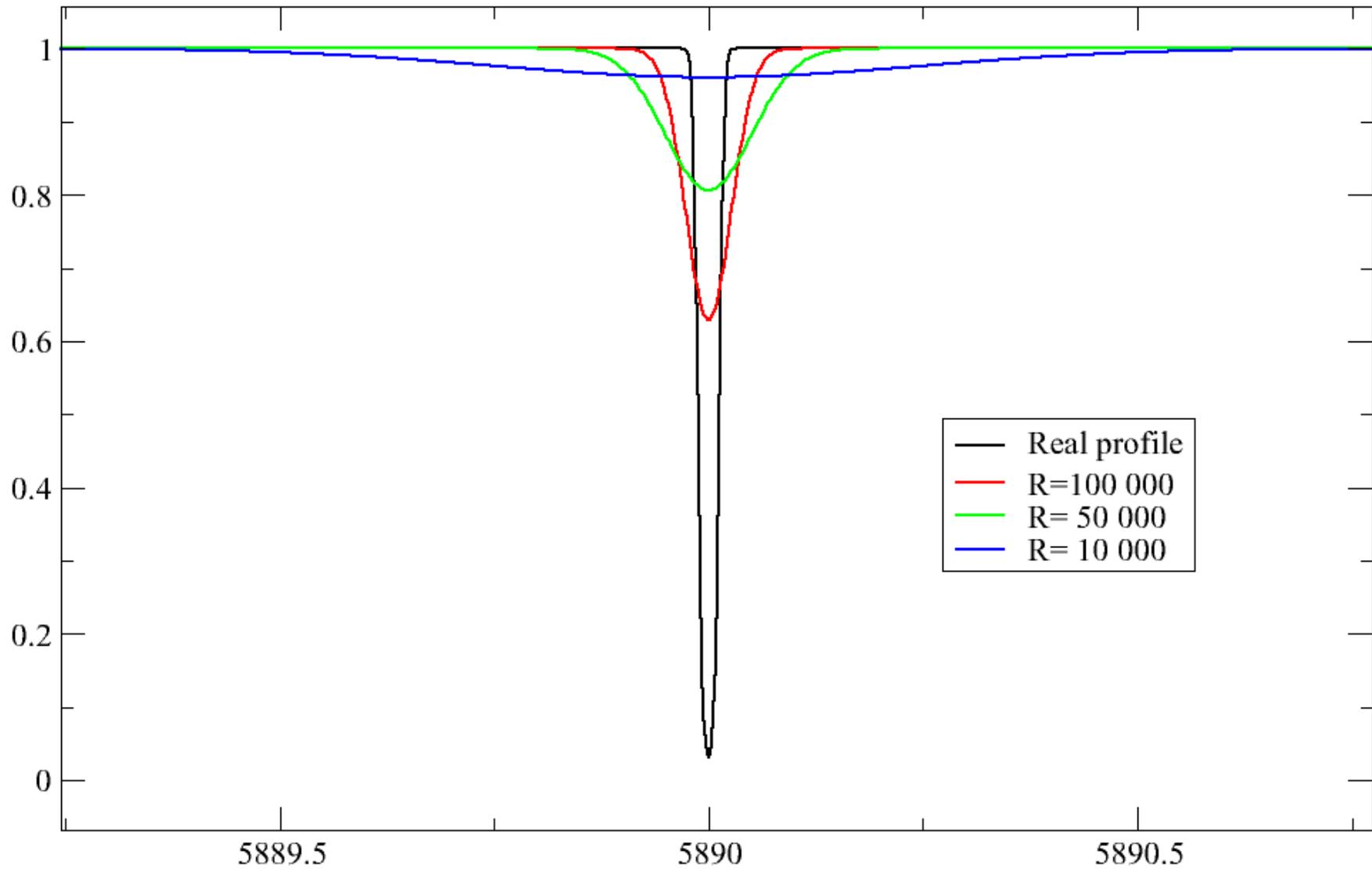


$$\tau(V) = \frac{f\lambda}{3.768 \cdot 10^{14} \sqrt{\pi}} \sum \frac{N_i}{b_i} e^{-(V - V_i)^2 / b_i^2}$$

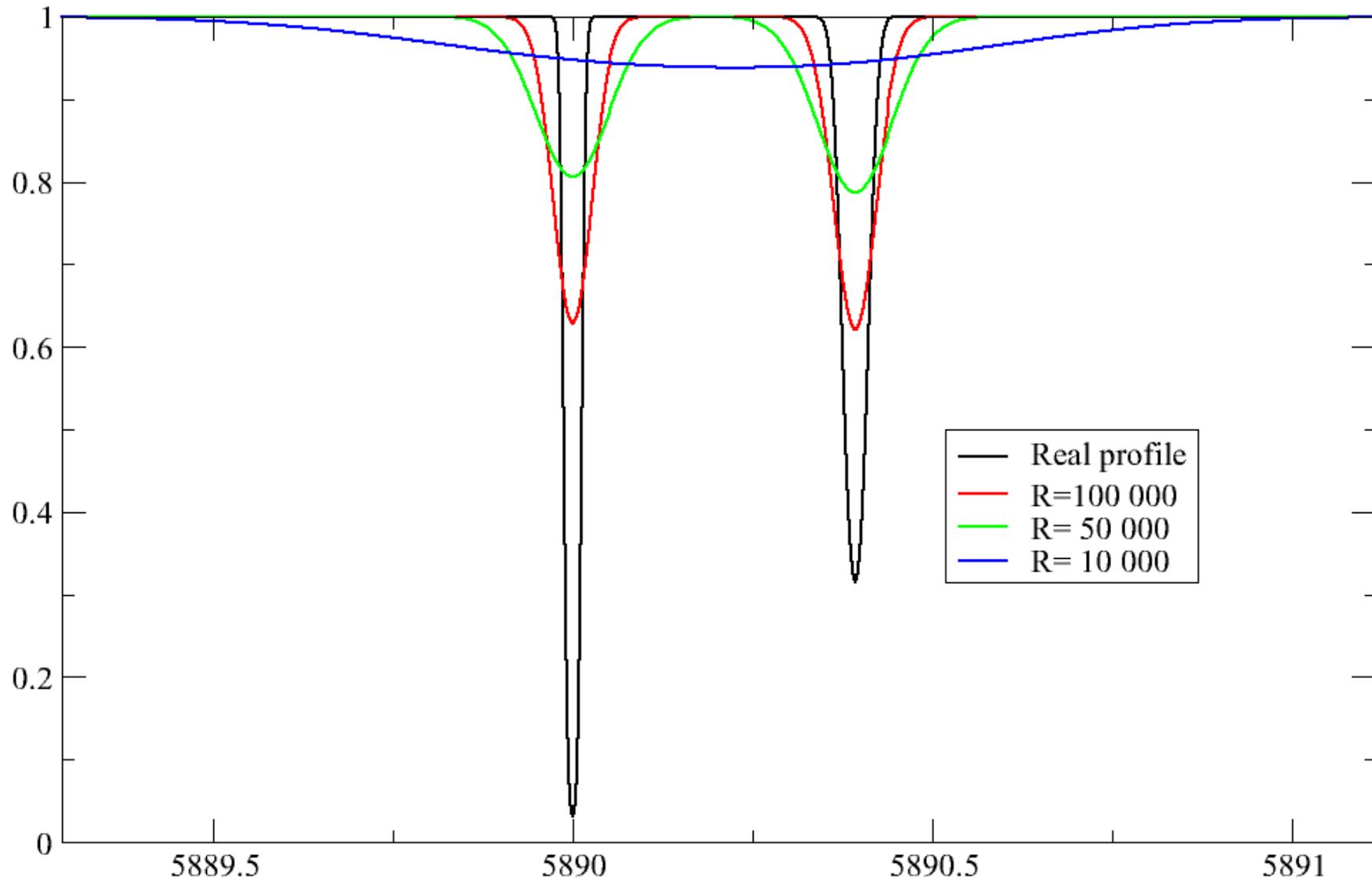
$$F_{res}(V) = e^{-\tau(V)} * \psi$$



Влияние инструментального профиля на профиль
спектральной линии
 $N=3e11 \text{ cm}^{-2}$ $b=0.5 \text{ км/с}$



Влияние инструментального профиля на профиль
спектральной линии
 $N=3e11 \text{ cm}^{-2}$ и $2e11 \text{ cm}^{-2}$
 $b=0.5 \text{ км/с}$ и 1 км/с



Определение параметров межзвездных облаков

$$\tau(V) = \frac{f\lambda}{3.768 \cdot 10^{14} \sqrt{\pi}} \sum \frac{N_i}{b_i} e^{-(V - V_i)^2 / b_i^2}$$

$$F_{res}(V) = e^{-\tau(V)} * \psi$$



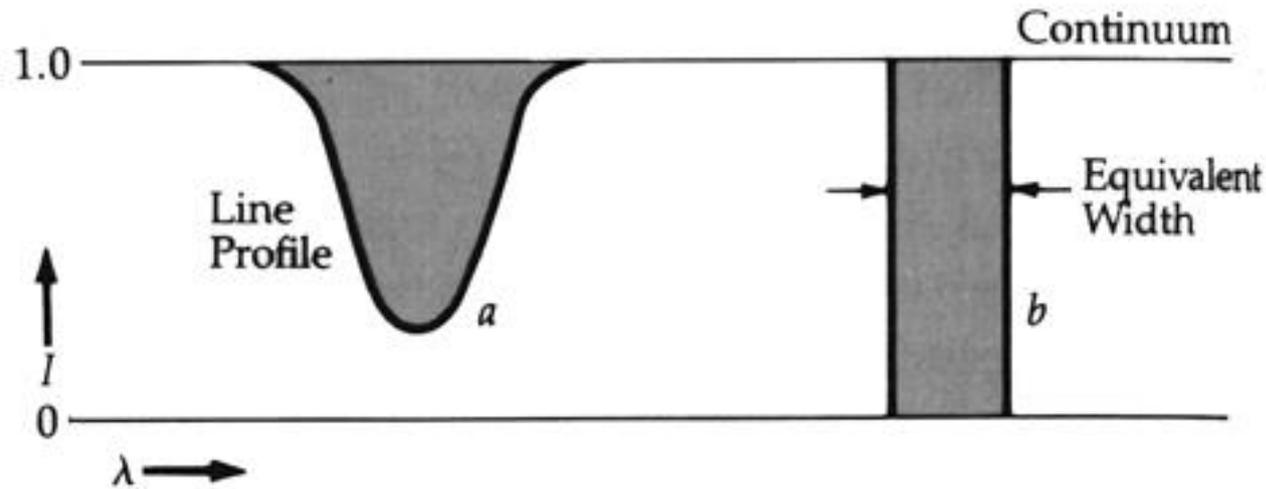
Инструментальный профиль уширяет линию (например для $R=50000$ $dV=6$ км/с)

2003ApJS..147...61W Welty et al. $b \approx 0.3 \dots 6$ км/с $b \approx 1..2$ км/с

Наблюдаемые профили линий не совпадают с реальными → нет возможности восстановить истинный профиль линии поглощения $\tau(V)$ и определить **N** и **b** из аппроксимации гауссианой.

Определение параметров межзвездных облаков

Интегральный подход



$$W = \int (1 - F_{res}(V)) dV,$$

Эквивалентная ширина не зависит от инструментального профиля

$$W = \frac{Nf\lambda}{3.768 \cdot 10^{14}},$$

$$\tau \rightarrow 0$$

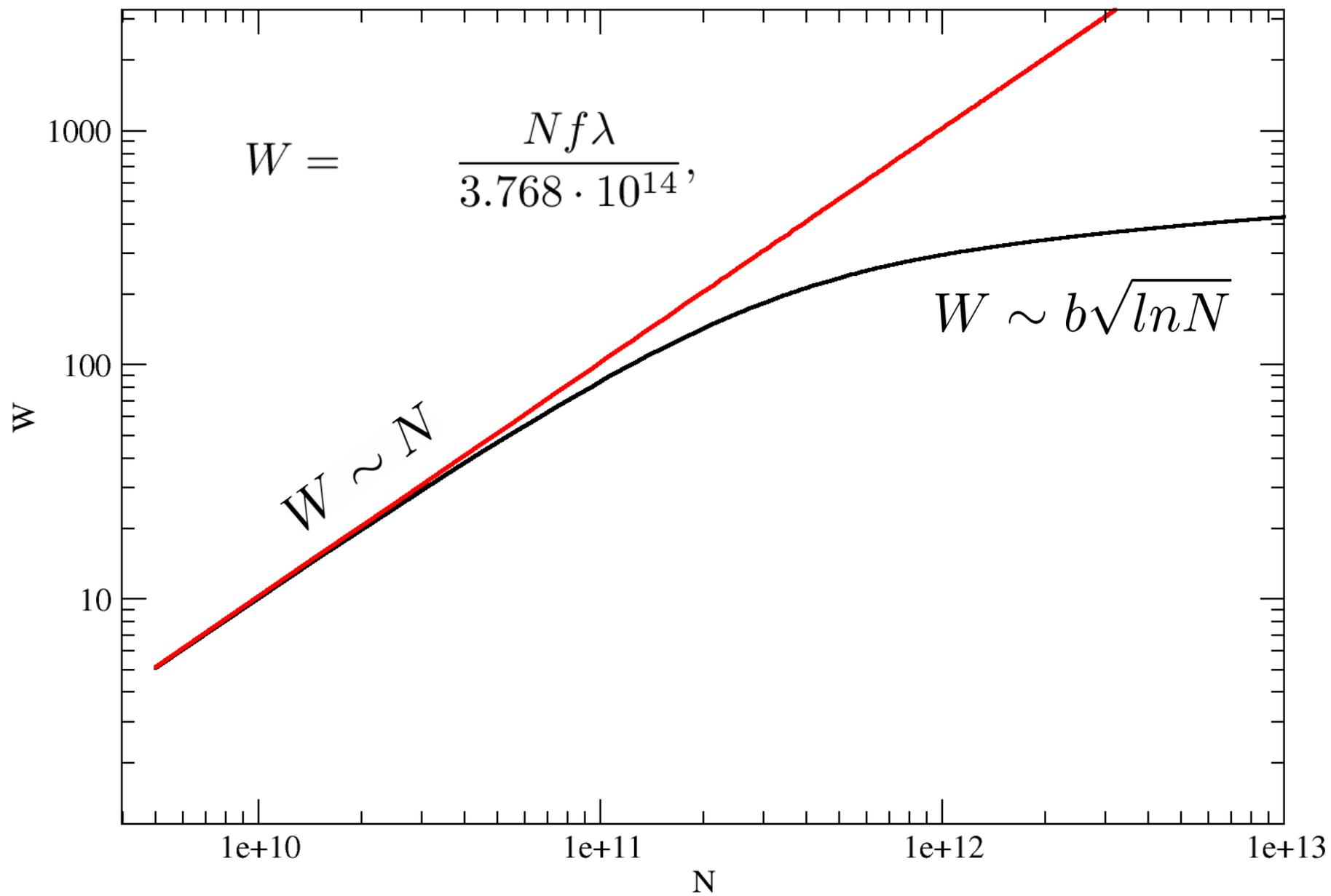
Определяется только **N**

$$W = W(N, b),$$

$$\tau \gg 1$$

Нет однозначного определения **N** и **b**

Кривая роста



Метод дублетов

- Используются спектральные линии, образованные переходами на резонансные уровни с тонким расщеплением:
 - CaII (3933A, 3968A) — K H
 - NaI (5889A, 5895A) — D₂ D₁
 - KI (7664A, 7698A)
- Отношение сил осцилляторов $f_1/f_2 = 2$

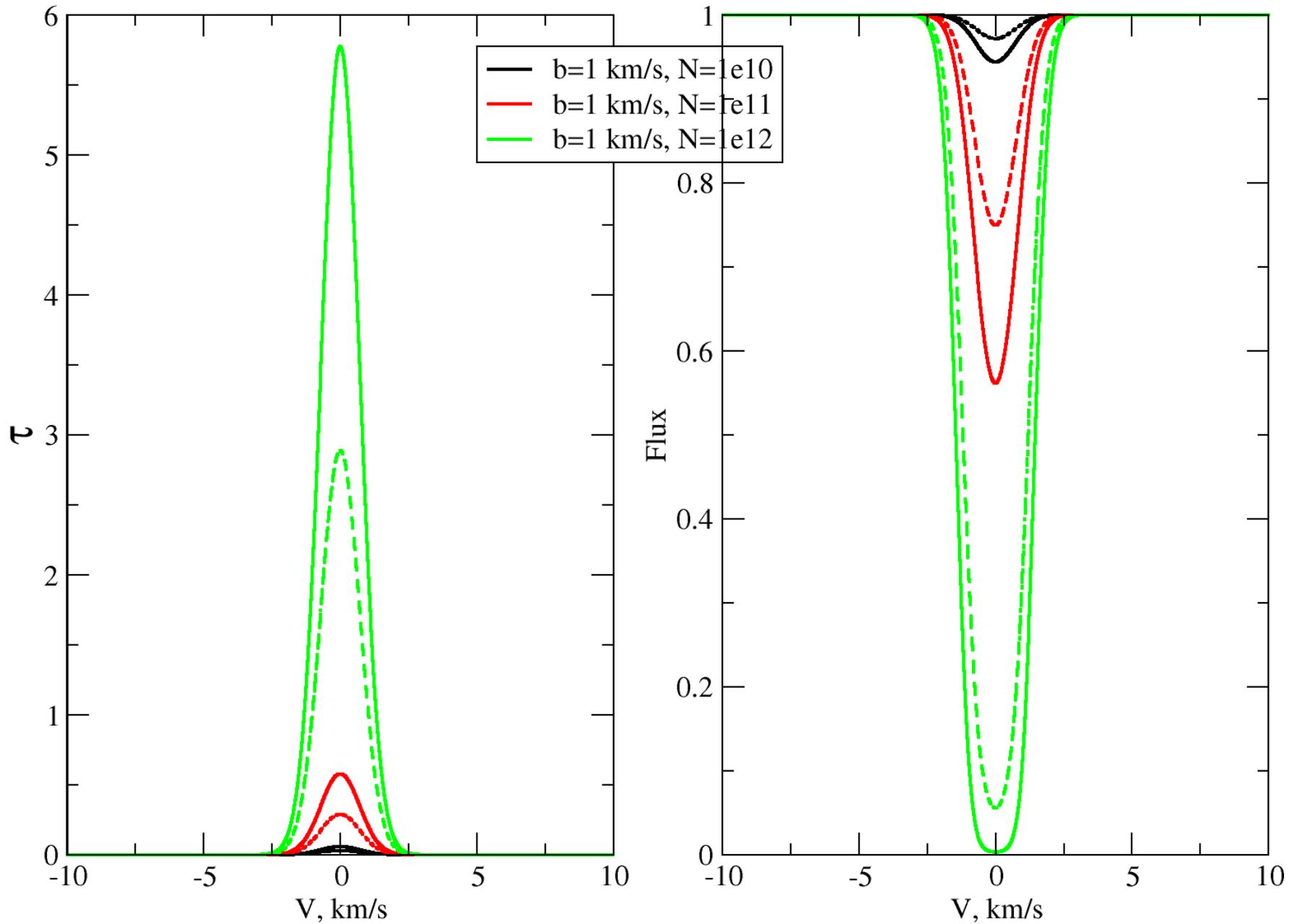
$$\frac{\tau_{blue}}{\tau_{red}} = 2$$

$$W_{blue,red} = W_{blue,red}(N, b)$$

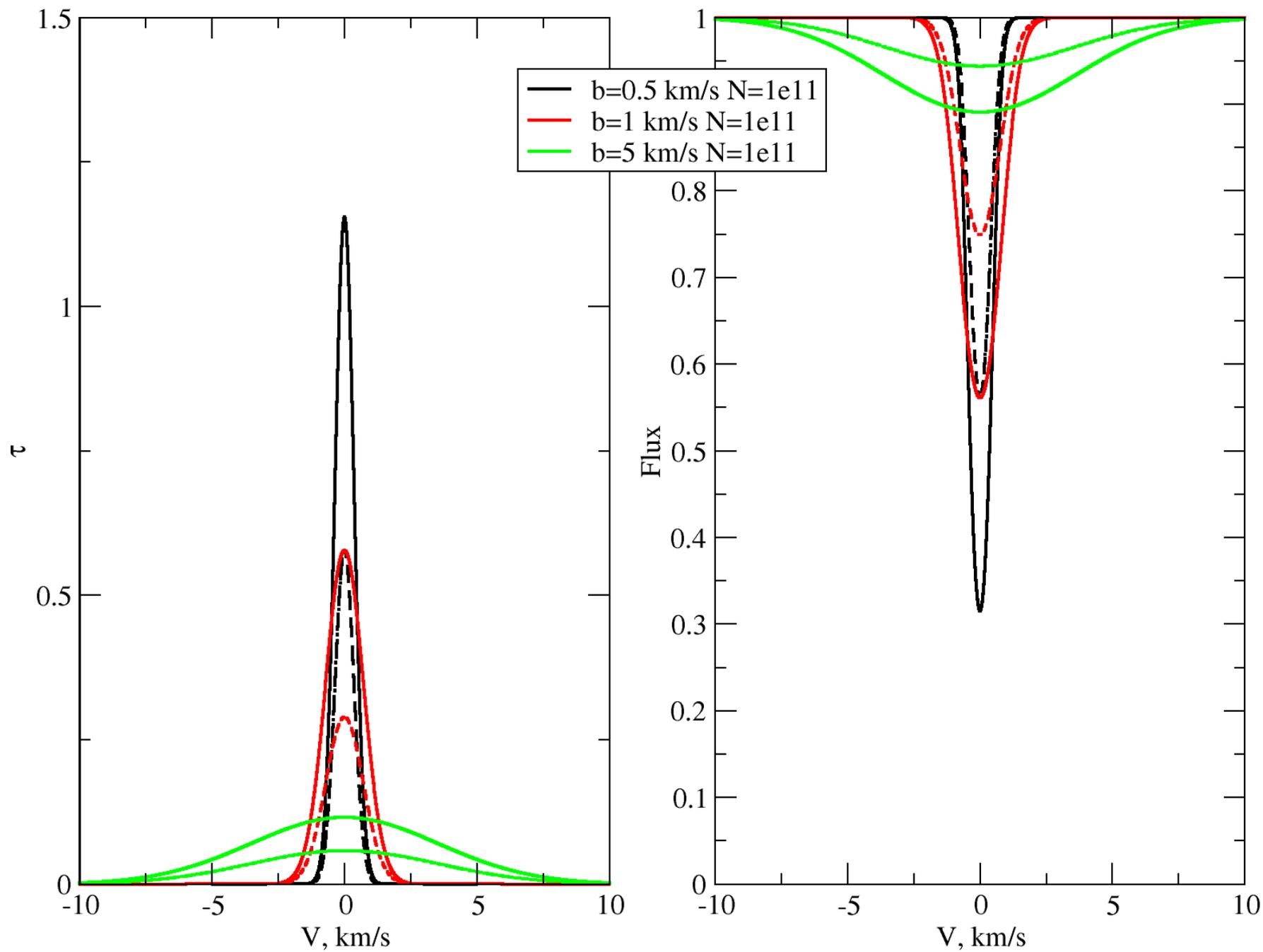
$$\frac{W_{blue}}{W_{red}} = f(N, b) \in (2..1)$$

Есть возможность однозначно определить реальные значения **N** и **b** даже с использованием спектров низкого разрешения

Профиль дуплета линии натрия в зависимости от концентрации поглощающих атомов

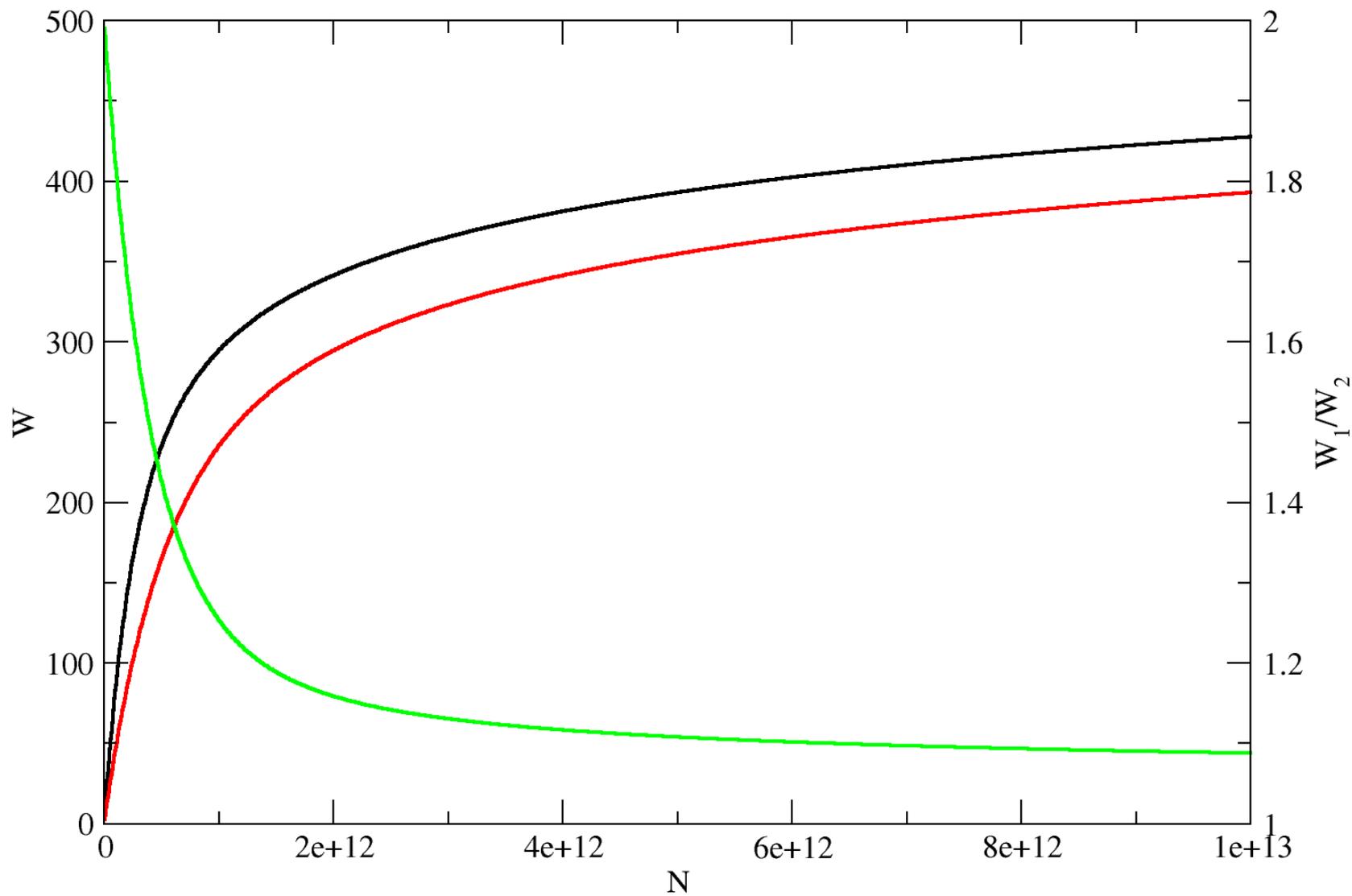


Профиль дуплета линии натрия в зависимости от турбулентной скорости



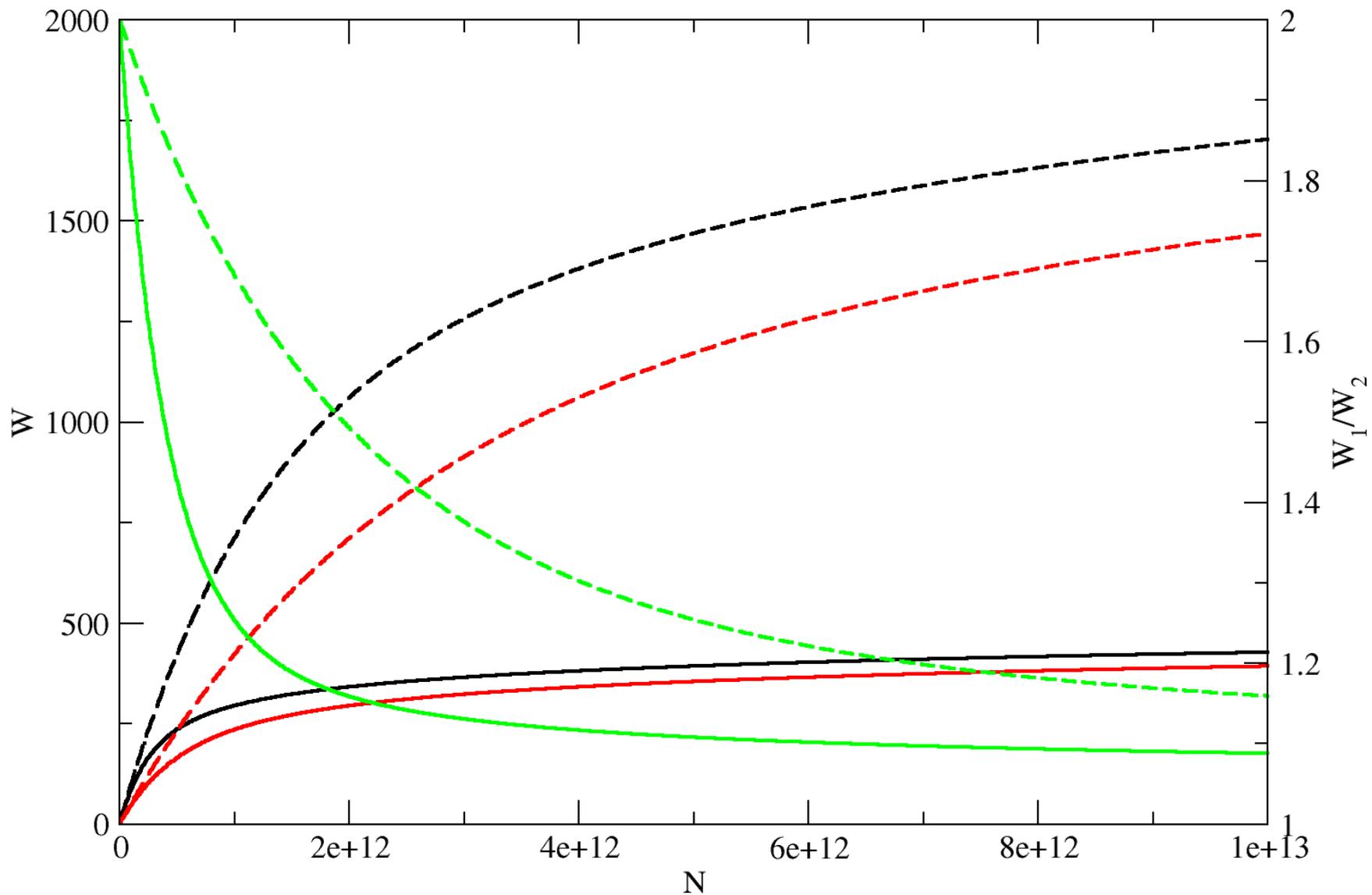
Зависимость эквивалентных ширины линий дуплета натрия и их отношения от концентрации атомов

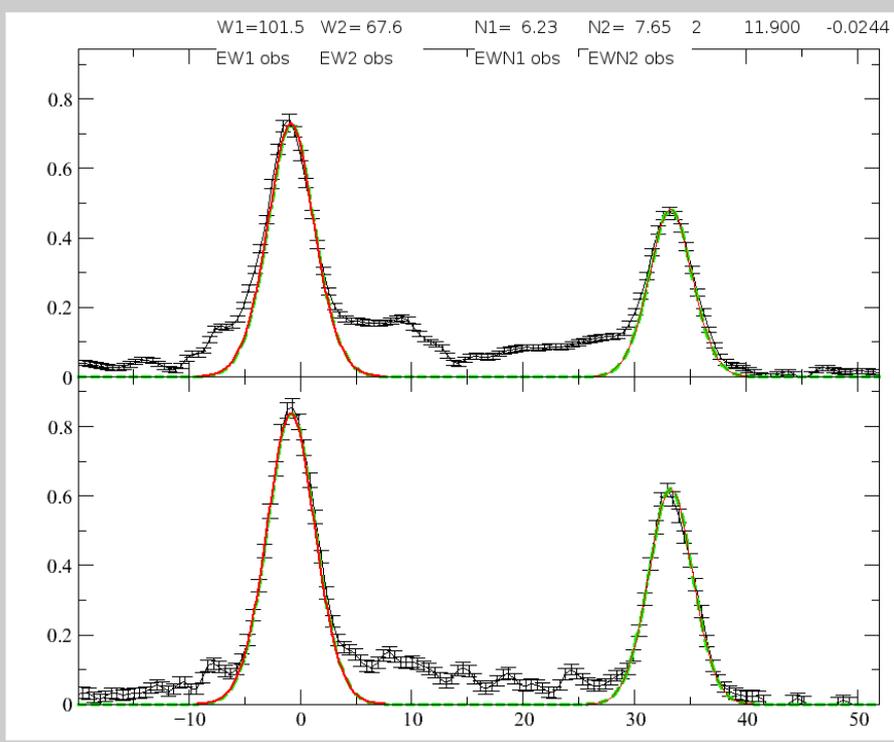
$b=1$ км/с



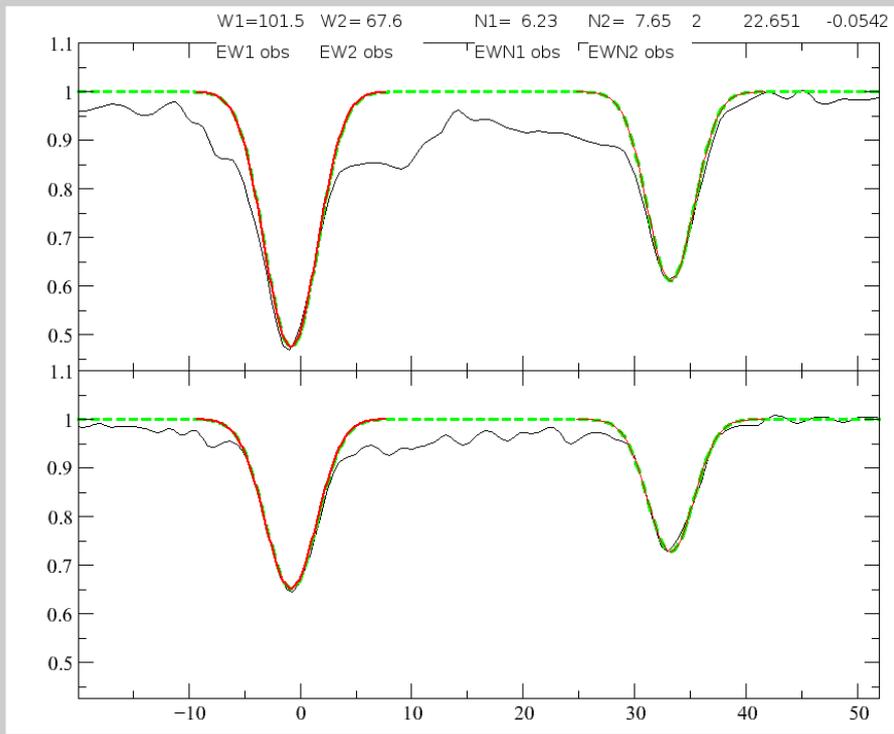
Зависимость эквивалентных ширины линий дуплета натрия и их отношения от концентрации атомов

$b=1$ км/с и 5 км/с

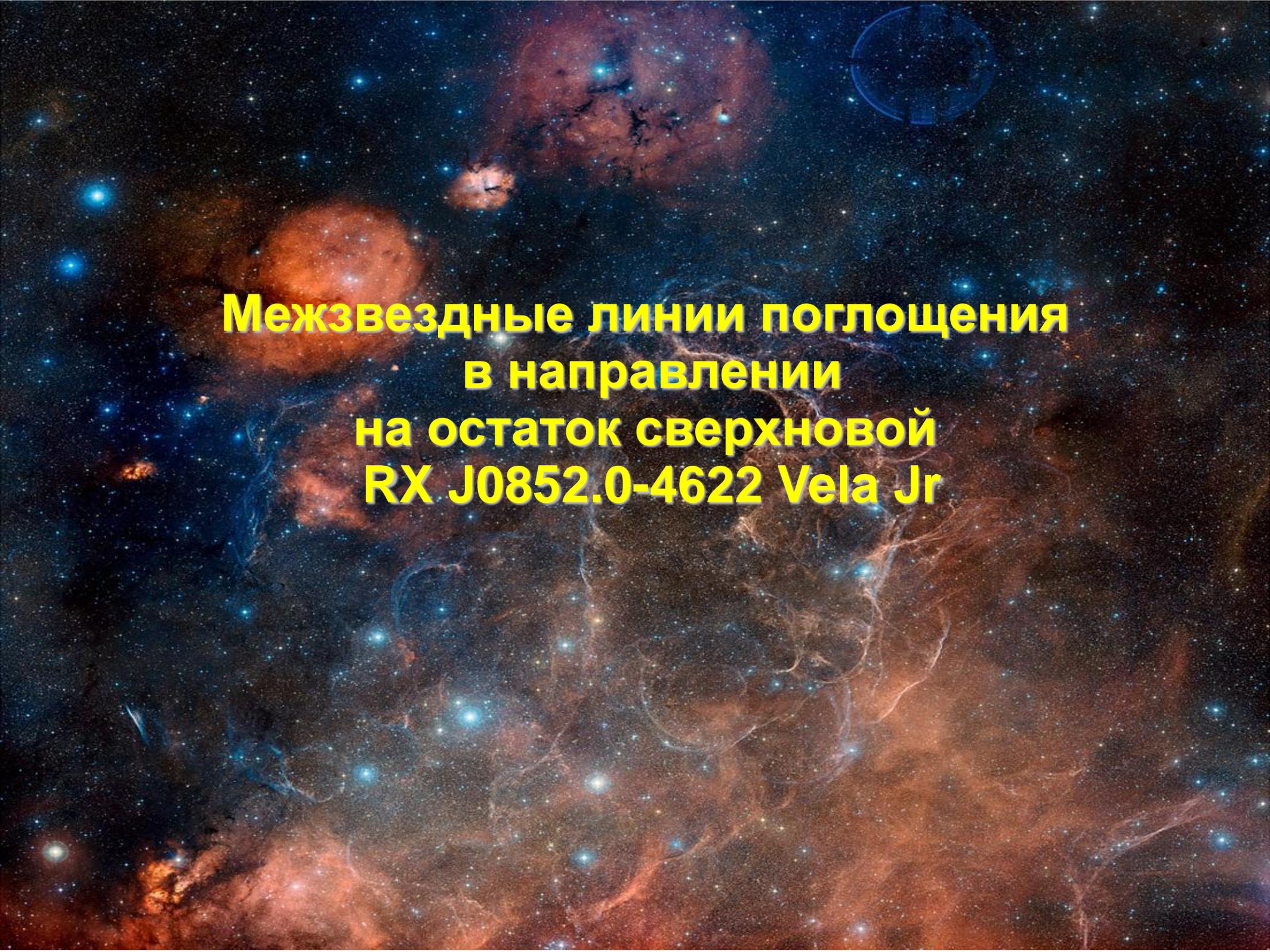




V	km/s/b	km/s/N	max	N (cm-2)
-0.8	1.6	1.91	5.4	
33.2	0.9	2.66	4.2	



V	km/s/b	km/s/N	max	N (cm-2)
-0.8	1.6	1.91	5.4	
33.2	0.9	2.66	4.2	

The image shows a complex interstellar environment with various nebulae and star clusters. The background is a dense field of stars, with several prominent blue stars. The foreground features a large, diffuse nebula with a mix of red and blue colors, indicating the presence of interstellar dust and gas. The text is overlaid on the central part of the image, providing context for the absorption lines being discussed.

**Межзвездные линии поглощения
в направлении
на остаток сверхновой
RX J0852.0-4622 Vela Jr**

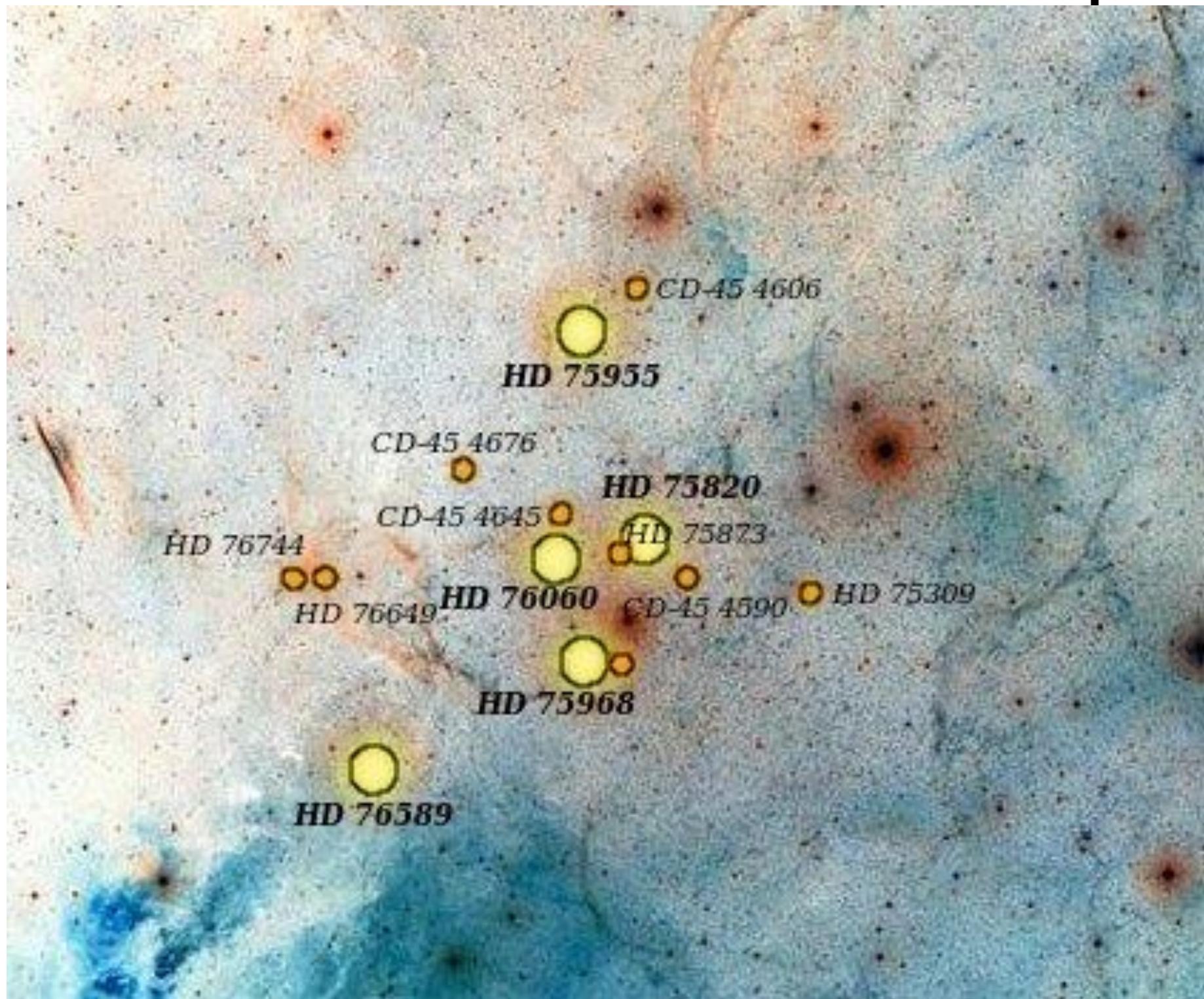


Наблюдения

- ESO La Silla
- NTT (New Technology Telescope) 3.58-m
- EMMI (ESO Multi-Mode Instrument)
 - REMD mode (high resolution echelle)
 - $R=88600$
 - CCD мозайка $2 \times 2076 \times 4110$
 - $\lambda=3850-8620\text{\AA}$
 - 89 порядков
- Стандартная звезда HD60753 ($T=16200\text{K}$, $I_{\text{gg}}=3.56$)

Список звезд

Star	RA	Decl	m_v (mag)	SpType (mag)	(B-V)	A_V (mag)	dist pc	S/N			
	(2000.0)							avr	CaII	NaI	KI
HD75309	08 47 28.0	-46 27 04	7.84	B2Ib/II	0.01	0.8	1900±300	113	38	146	114
HD75820	08 50 26.0	-46 14 53	8.64	B9V	-0.02	0.2	470±100	79	30	101	78
HD75873	08 50 48.8	-46 18 36	8.10	A3II/III	0.38	1.2	1400±200	67	18	88	82
HD75955	08 51 26.0	-45 37 23	7.73	B9V	-0.01	0.2	320± 70	65	20	83	61
HD75968	08 51 32.8	-46 36 36	8.14	B9III/IV	-0.12	0.0	570±140	45	14	61	57
HD76060	08 52 02.4	-46 17 20	7.88	B8IV/V	-0.09	0.1	390± 90	101	34	130	97
HD76589	08 55 23.0	-46 53 28	8.34	B9IV	-0.05	0.1	390± 90	67	17	87	66
HD76649	08 55 50.4	-46 20 30	8.33	B7II/III	0.14	0.8	640±110	57	14	74	65
HD76744	08 56 18.2	-46 19 57	8.69	A0V	0.08	0.5	270± 50	61	18	78	59
CD-454590	08 49 35.5	-46 23 18	9.58	B5	0.20	1.3	2400±300	41	11	53	43
CD-454606	08 50 15.0	-45 31 22	8.96	B0.5V	0.38	2.0	1670±160	63	18	82	72
CD-454645	08 51 34.9	-46 09 54	10.32	A0	0.20	0.4	330± 70	38	11	49	41
CD-454676	08 53 22.0	-46 02 09	8.93	B0.5III	0.77	3.2	1080±150	38	13	52	54
CD-464666	08 50 44.3	-46 38 11	9.81	A0II	0.60	2.1	5700±500	37	12	50	51



CD-45 4606

HD 75955

CD-45 4676

HD 75820

CD-45 4645

HD 75873

HD 76744

HD 76649

HD 76060

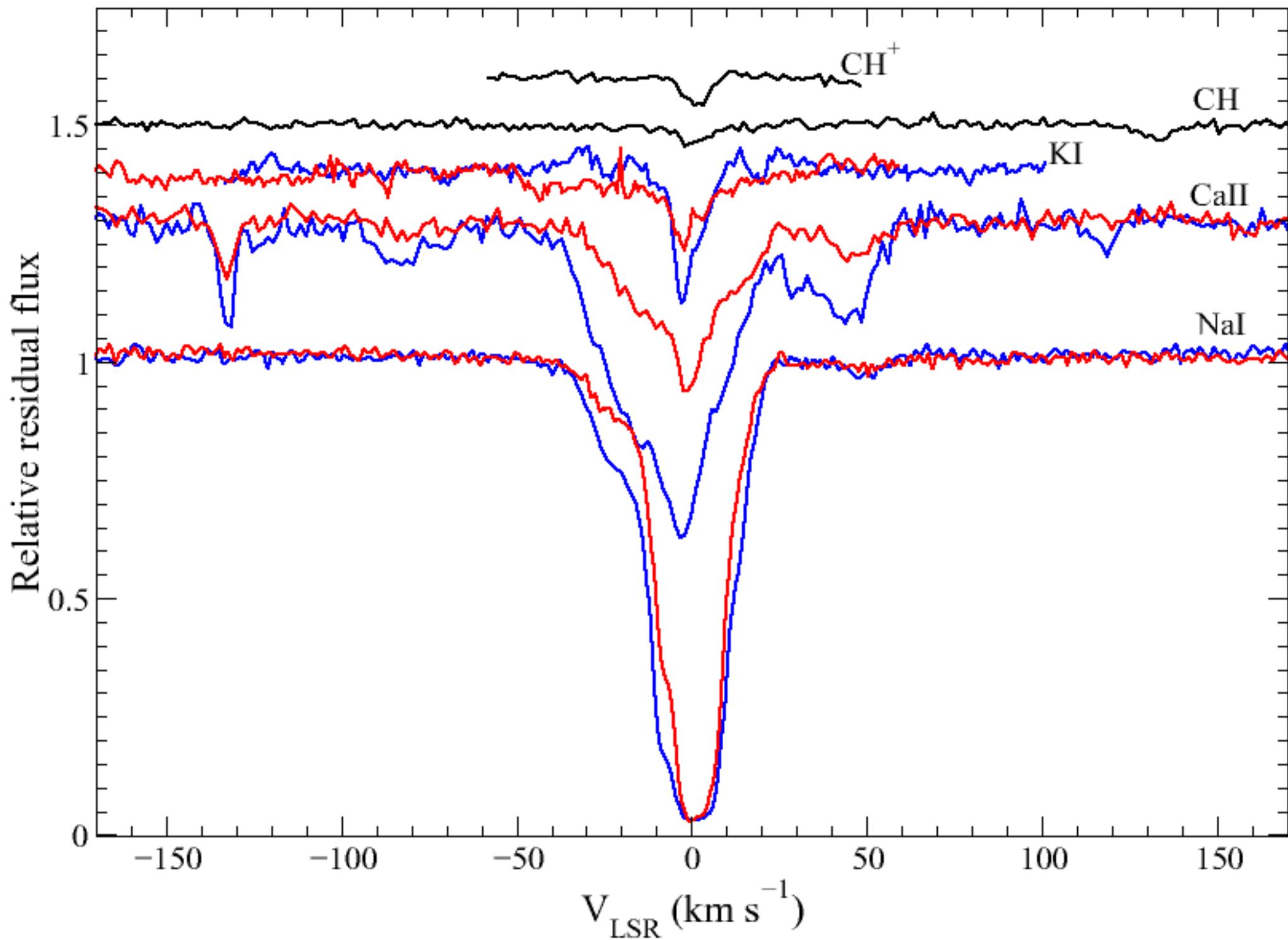
CD-45 4590

HD 75309

HD 75968

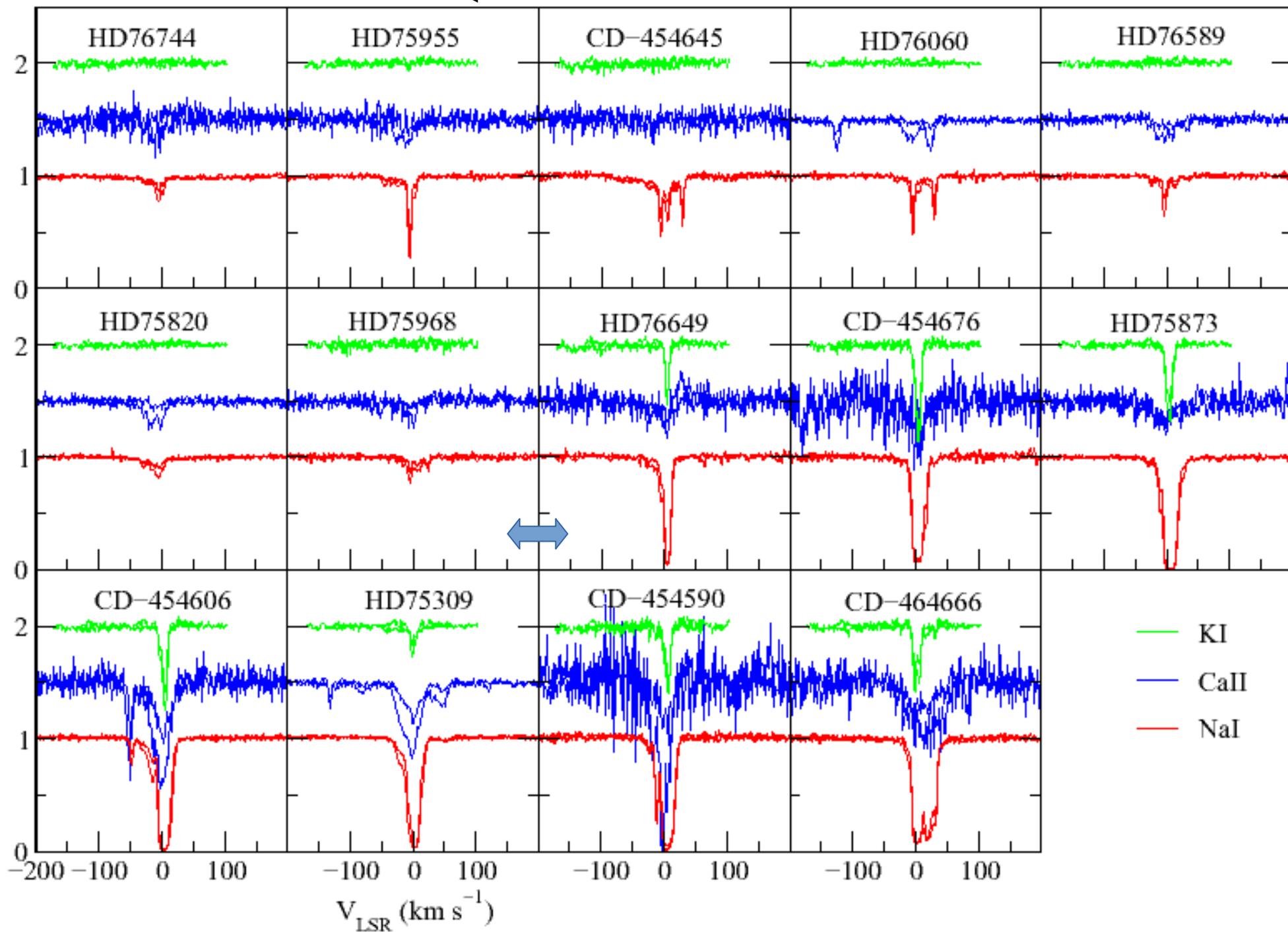
HD 76589

Межзвездные линии в спектре звезды HD75309



Vela 250-280 μK

Residual relative flux



— KI
— CaII
— NaI

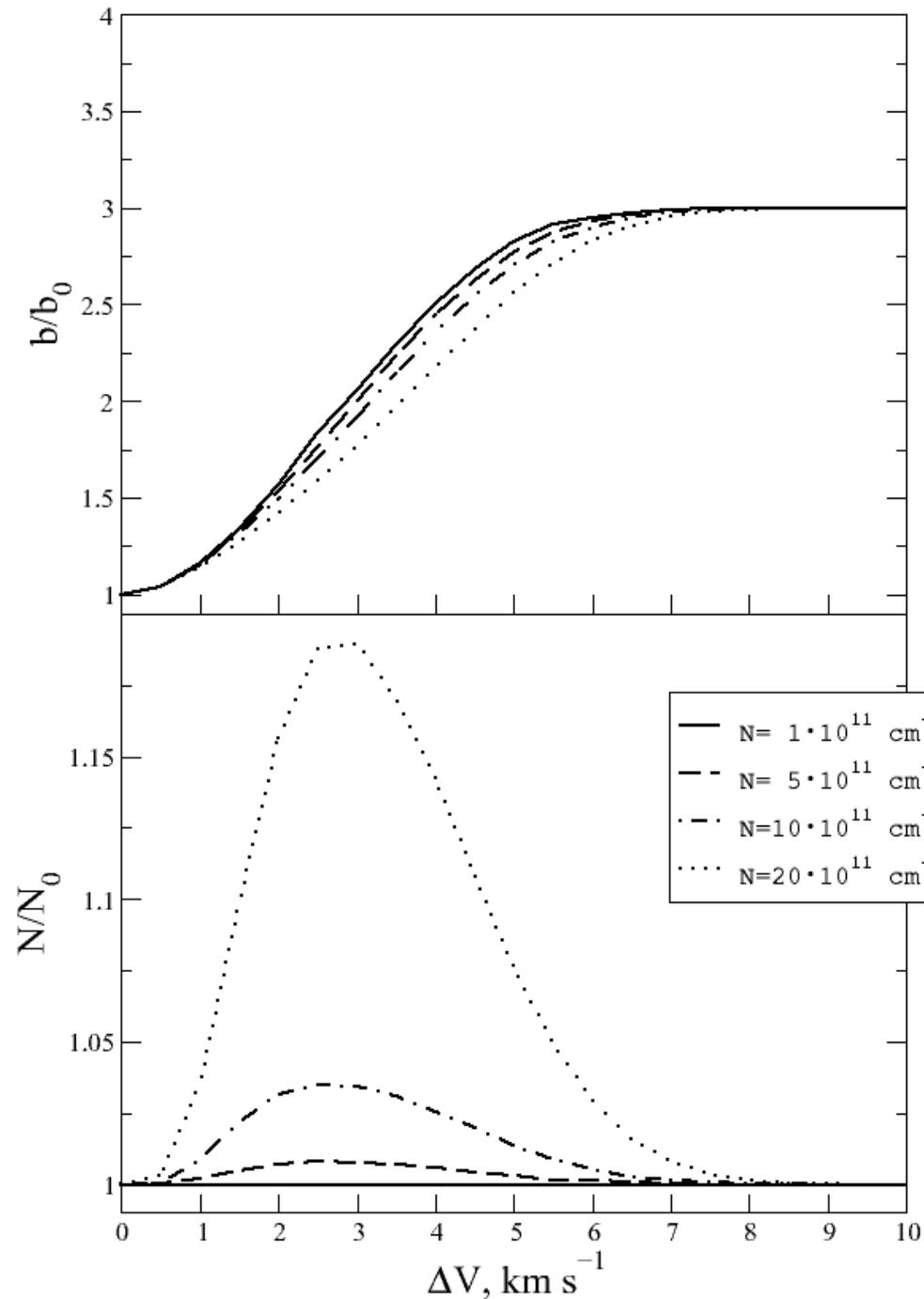
Определение параметров в случае неразрешаемых компонентов

3 компонента

$b=1 \text{ км/с}$

$N=1, 5, 10, 20 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$

$\Delta V=0..10 \text{ км/с}$

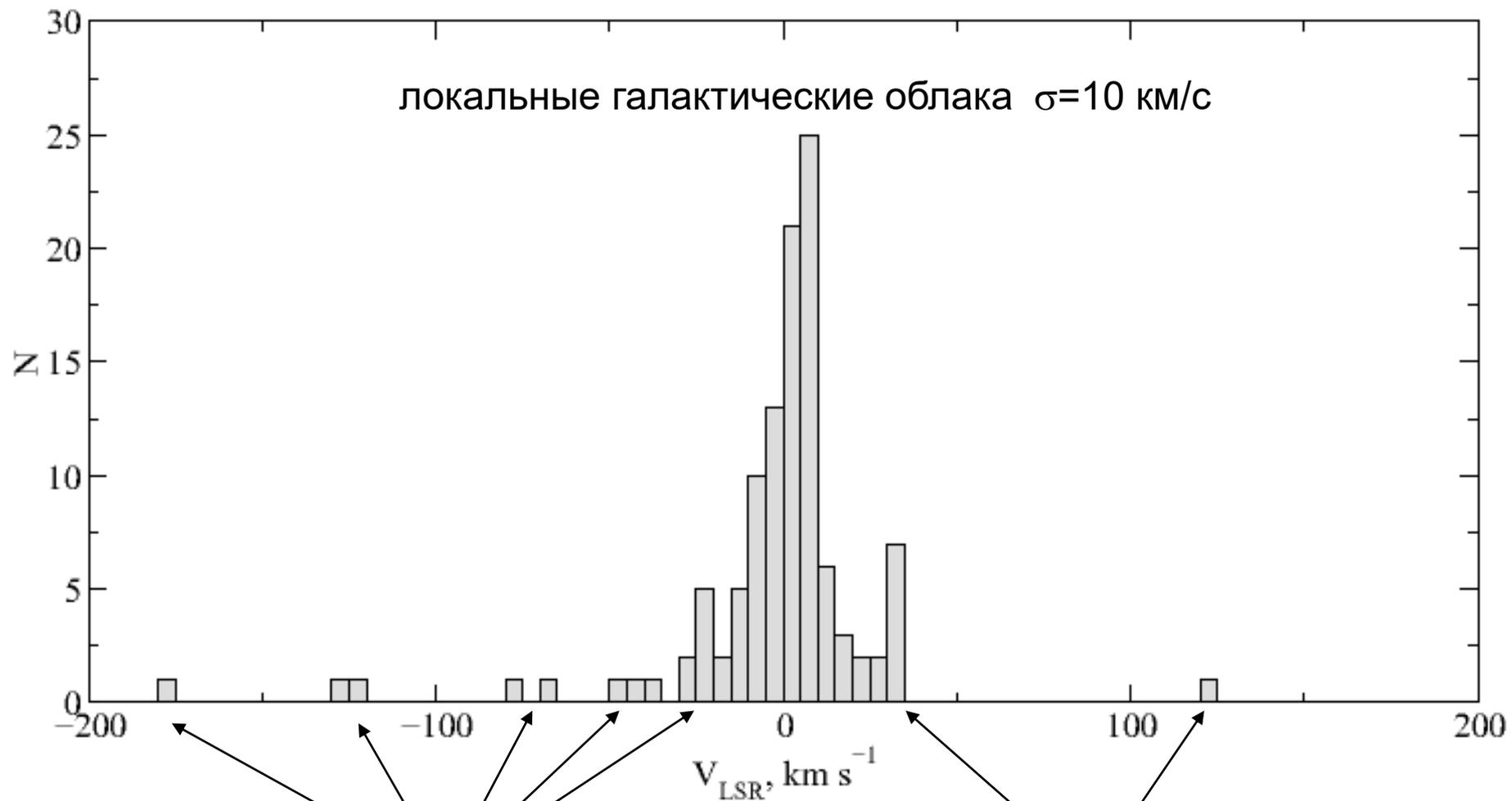


$$b_{\text{obs}} = b \cdot n b$$

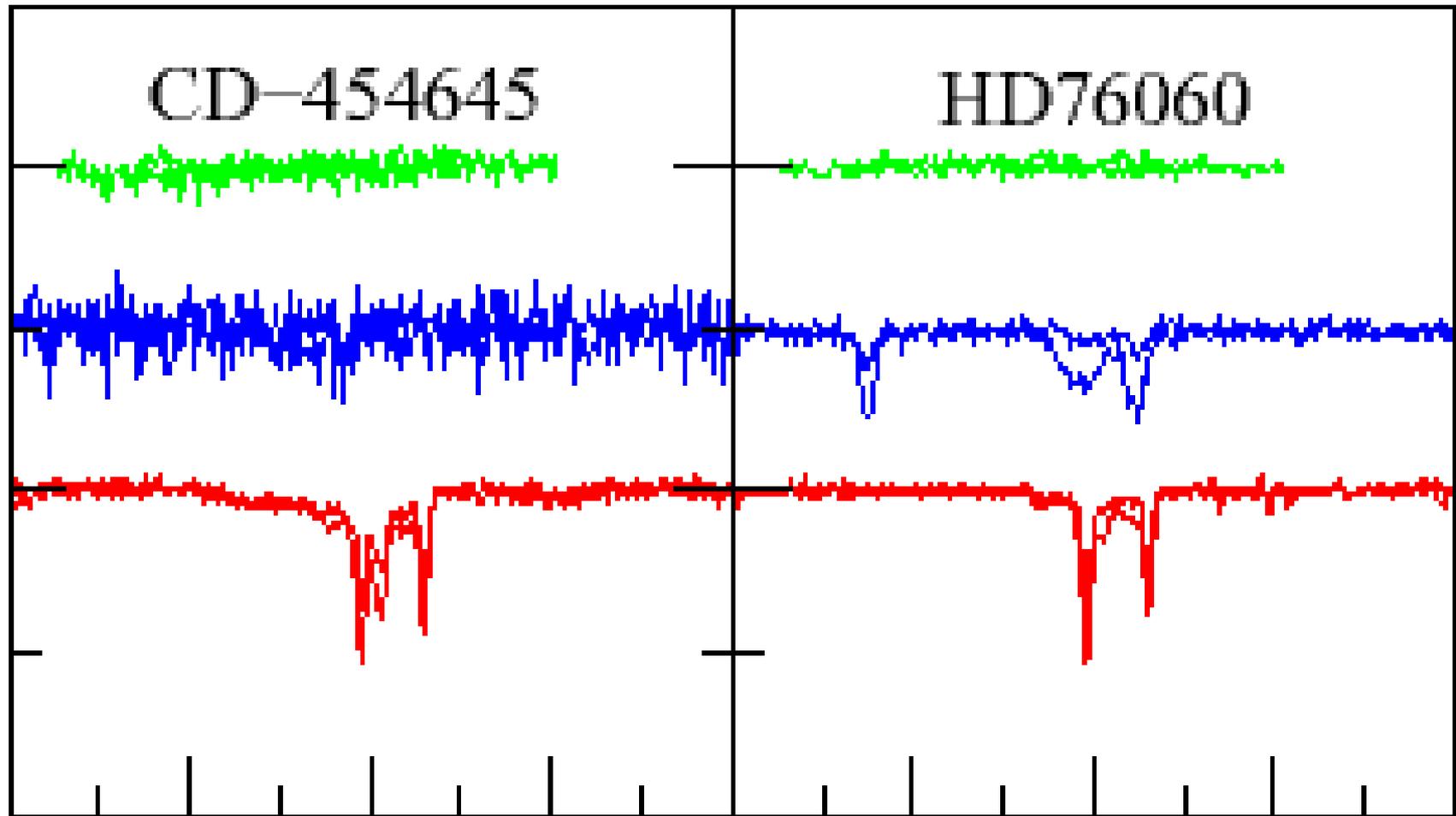
$$N_{\text{obs}} \approx N$$

Star	Elem λ Å	N	V_{LSR} km s ⁻¹	b km s ⁻¹	N 10 ¹¹ cm ⁻²
hd75309	CaII	1	-127.1	1.6	2.0
		2	-77:	2:	1:
		3	-65:	1.5:	0.5:
		4	-28..25 (-22: -9: 2.5: 12.5:)		
		5	33..55		
		6	123.9	1.5:	0.6
	NaI	1	-17:		
		2	-2.6		
		3	2..11 (5.0: 8.8:)		
		4	20:	3:	3:
	KI	1	2.7	1.5	1.5
		2	8.6	2.0	0.6
	CH	1	5.0:		75:
	CH+	1	6.6		96

Распределение компонентов по скоростям



Возмущенные облака в районе остатка сверхновой Vela



CD-454645

HD76060

$r=330\pm 70$ пс
(спектр.)

$r=335\pm 60$ пс
(Hipparcos)

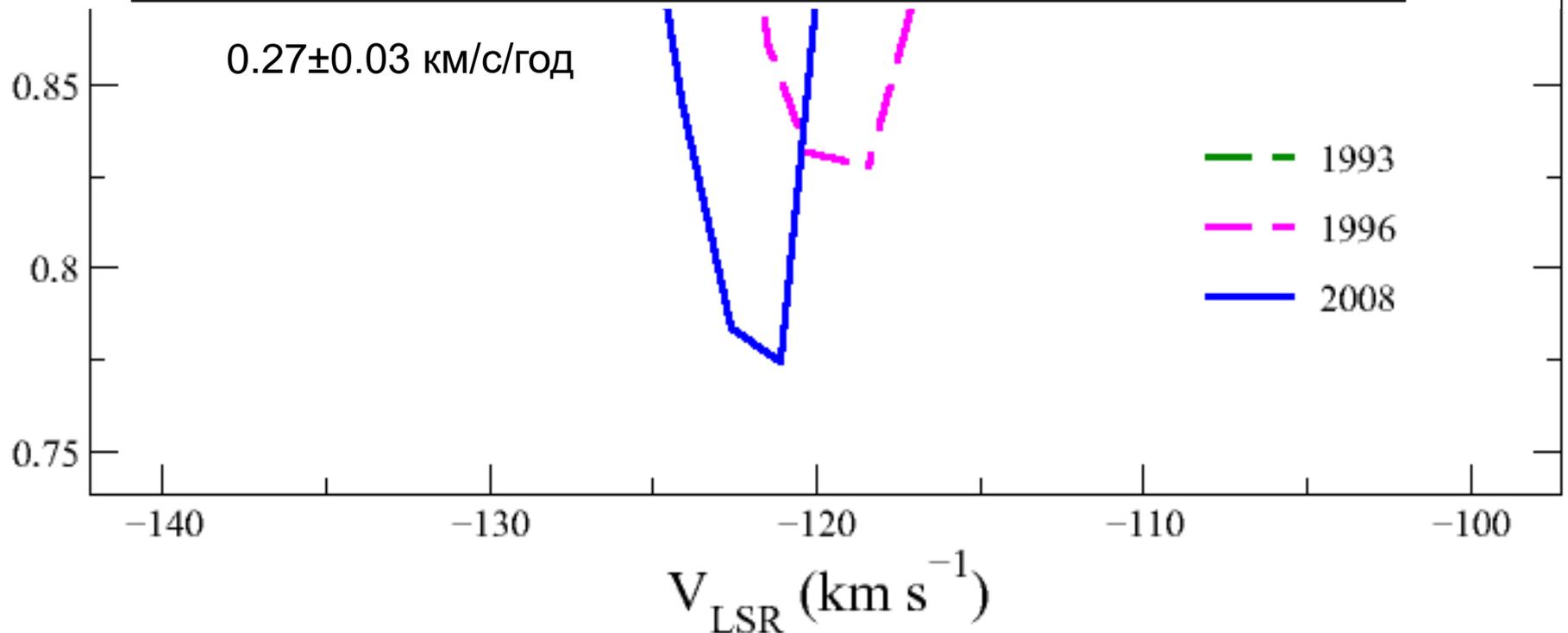
$D=9' \rightarrow 0.77$ пк

Ускорение высокоскоростного компонента в спектре звезды HD75309

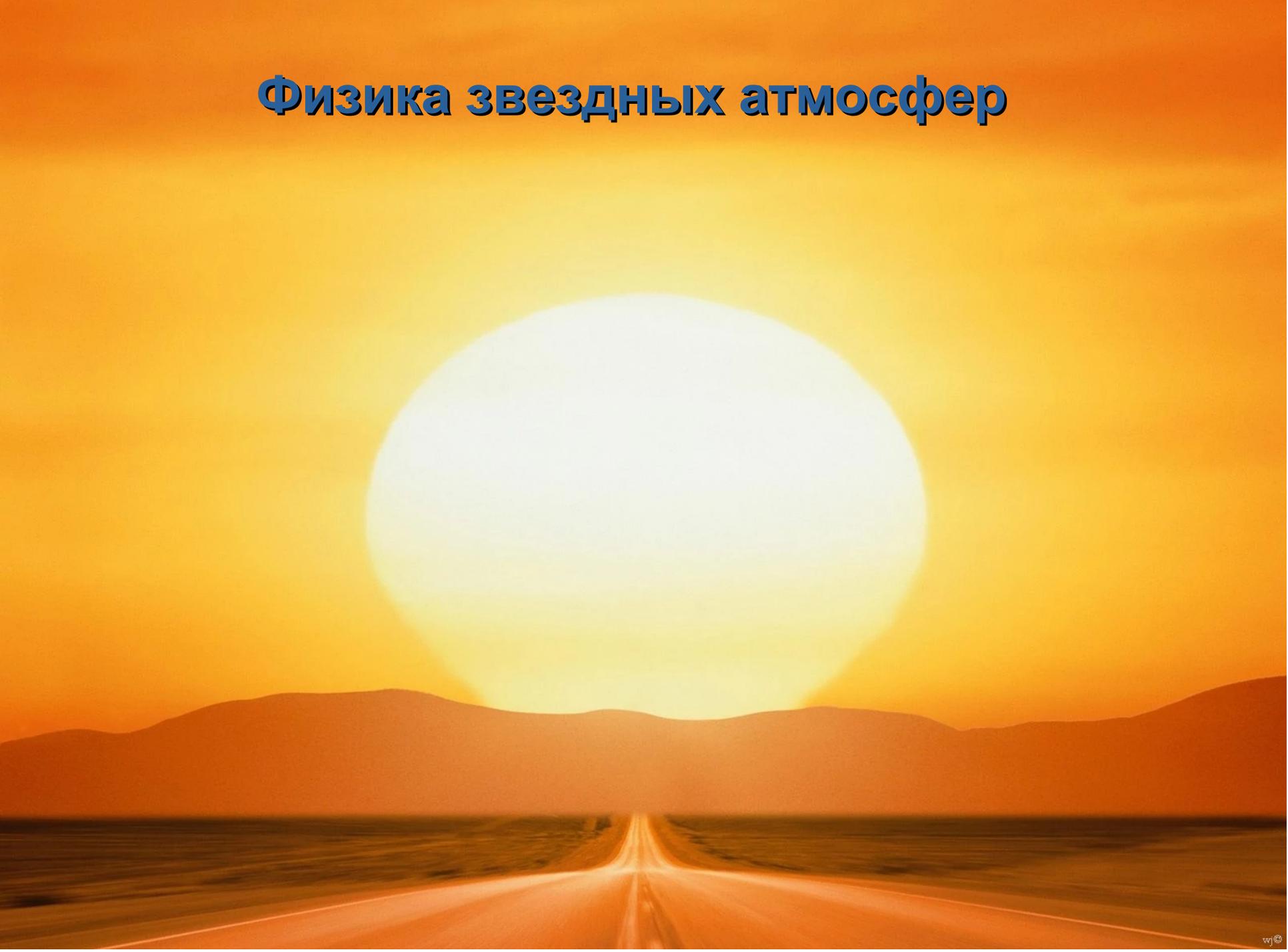
Table 5. Evolution of the high velocity component in spectra of star HD75309

Year	V_{LSR} km s^{-1}	b' km s^{-1}	W $\text{m}\text{\AA}$	N' 10^{11}cm^{-2}
1993	-117.9 ± 0.3	6.0 ± 0.3	12 ± 1	1.4 ± 0.1
1996	-119.2 ± 0.1	3.4 ± 0.2	16 ± 1	1.8 ± 0.1
2008	-122.2 ± 0.1	2.8 ± 0.2	16 ± 1	1.8 ± 0.1

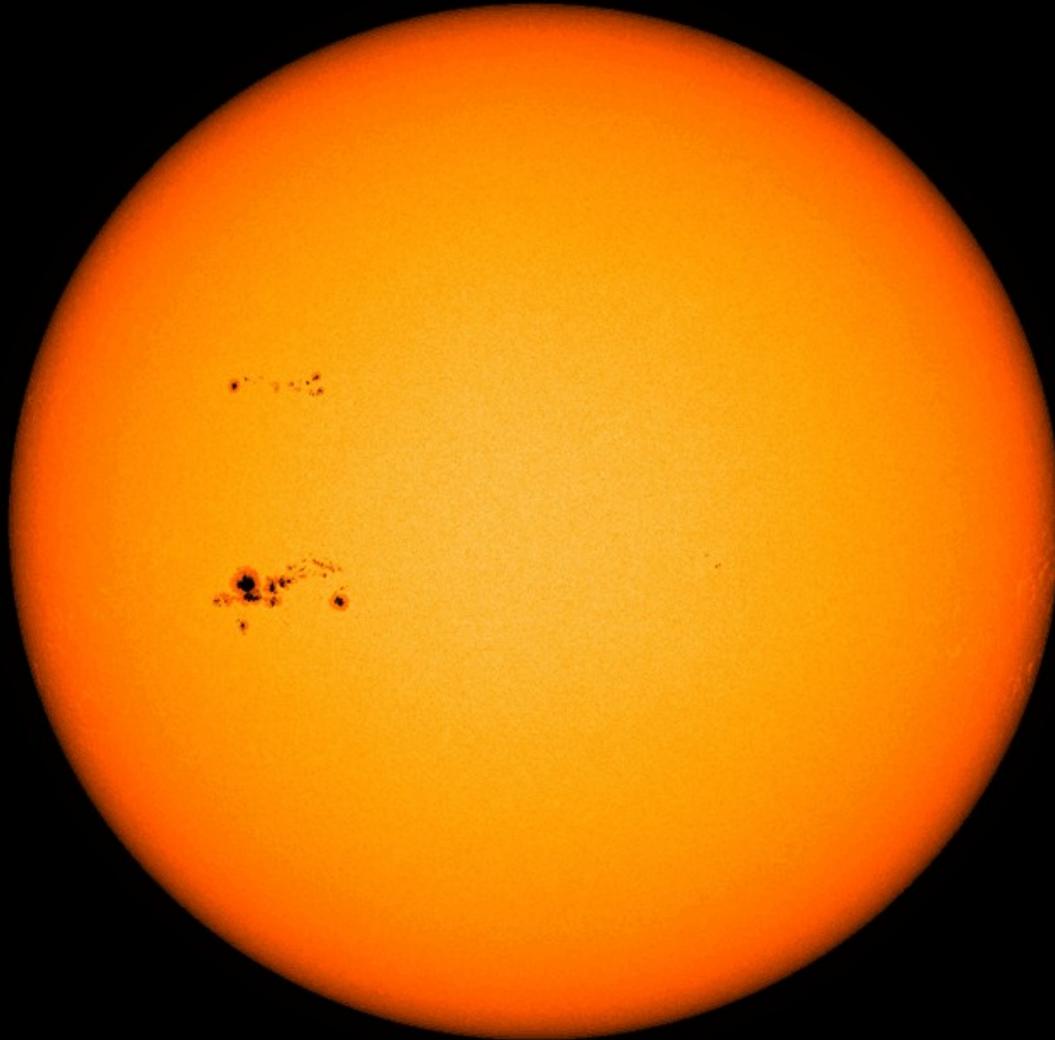
Residual relative flux

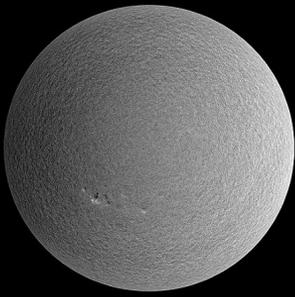


Физика звездных атмосфер

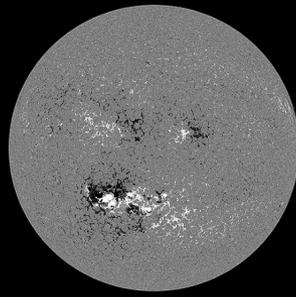


**Атмосфера звезды —
слой, в котором формируется наблюдаемое излучение.**

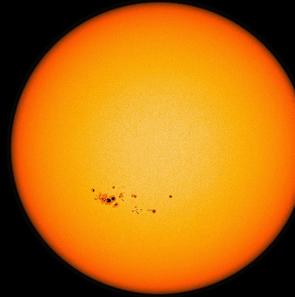




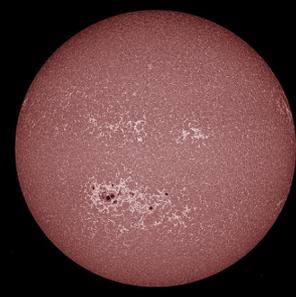
HMI Dopplergram
Surface movement
Photosphere



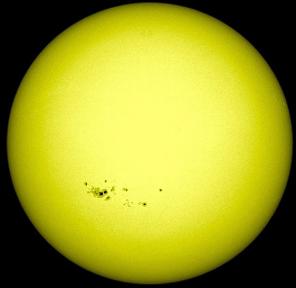
HMI Magnetogram
Magnetic field polarity
Photosphere



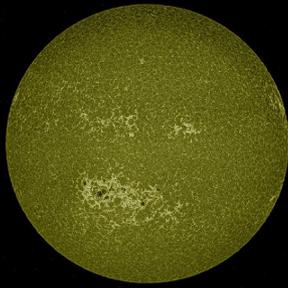
HMI Continuum
Matches visible light
Photosphere



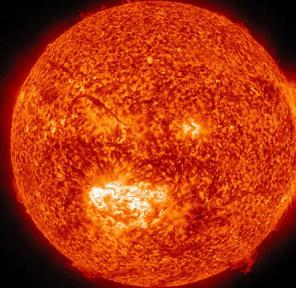
AIA 1700 Å
4500 Kelvin
Photosphere



AIA 4500 Å
6000 Kelvin
Photosphere



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



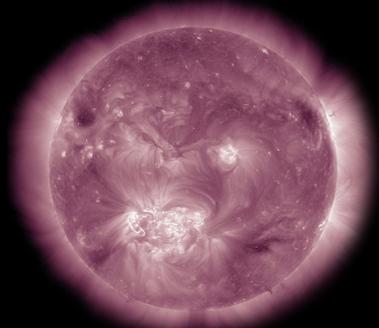
AIA 304 Å
50,000 Kelvin
Transition region/
Chromosphere



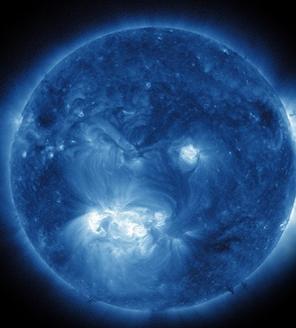
AIA 171 Å
600,000 Kelvin
Upper transition
Region/quiet corona



AIA 193 Å
1 million Kelvin
Corona/flare plasma



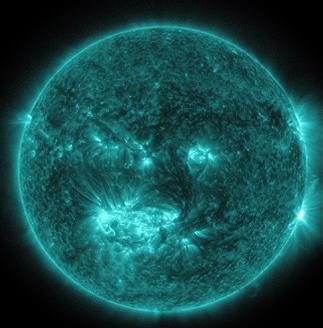
AIA 211 Å
2 million Kelvin
Active regions



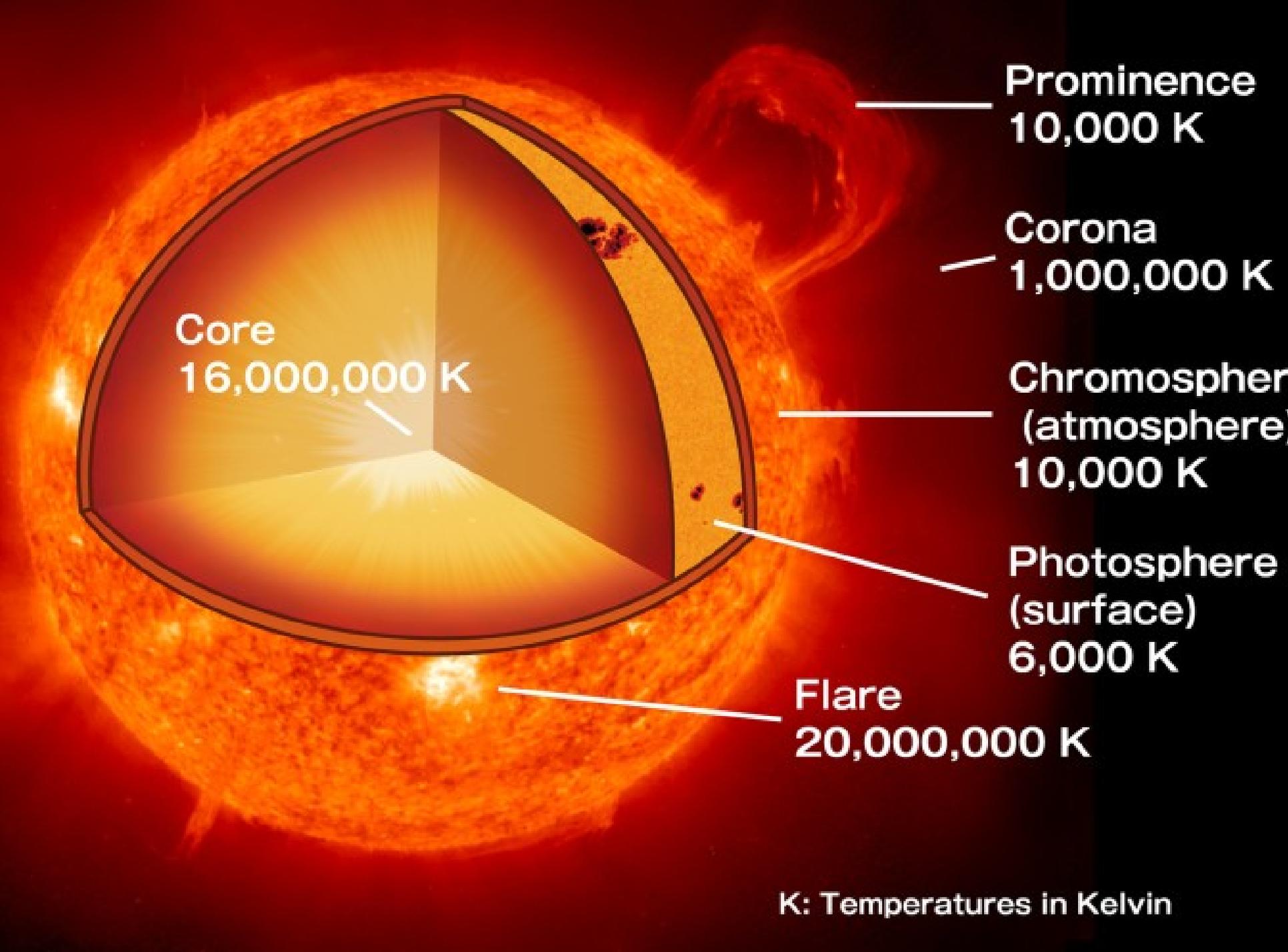
AIA 335 Å
2.5 million Kelvin
Active regions



AIA 094 Å
6 million Kelvin
Flaring regions



AIA 131 Å
10 million Kelvin
Flaring regions



Core
16,000,000 K

Prominence
10,000 K

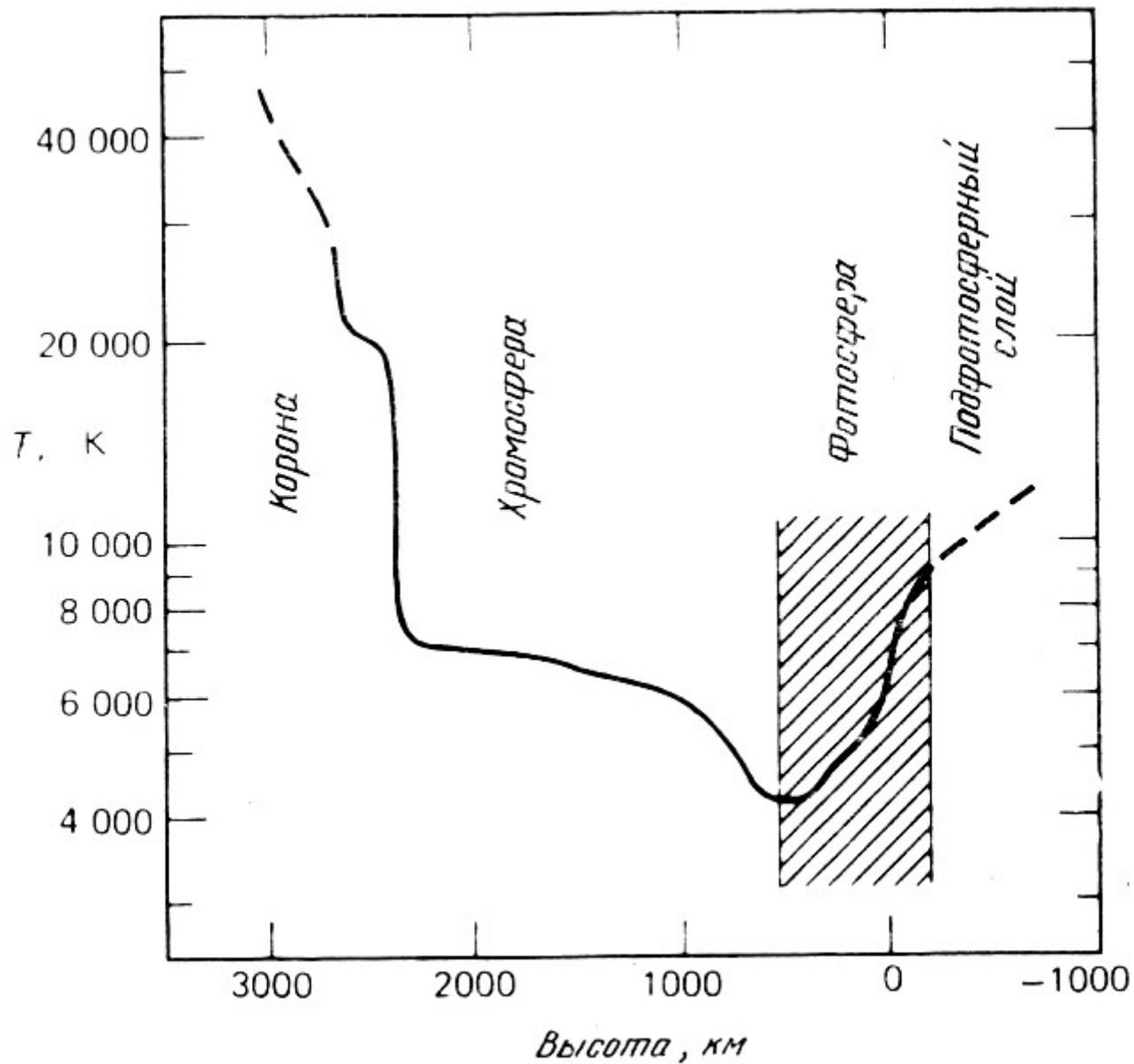
Corona
1,000,000 K

Chromosphere
(atmosphere)
10,000 K

Photosphere
(surface)
6,000 K

Flare
20,000,000 K

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 \AA),
протяженность $\sim 1500 \text{ км}$,
- корона – радиоизлучение, эмиссионные линии (Fe XIV 5303 \AA)
протяженность $\sim R_{Sun}$

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 км

Задача

3. Оценка углового размера
атмосферы при наблюдении с
Земли

$$h = 180 \text{ км}$$

$$r = 150\,000\,000 \text{ км}$$

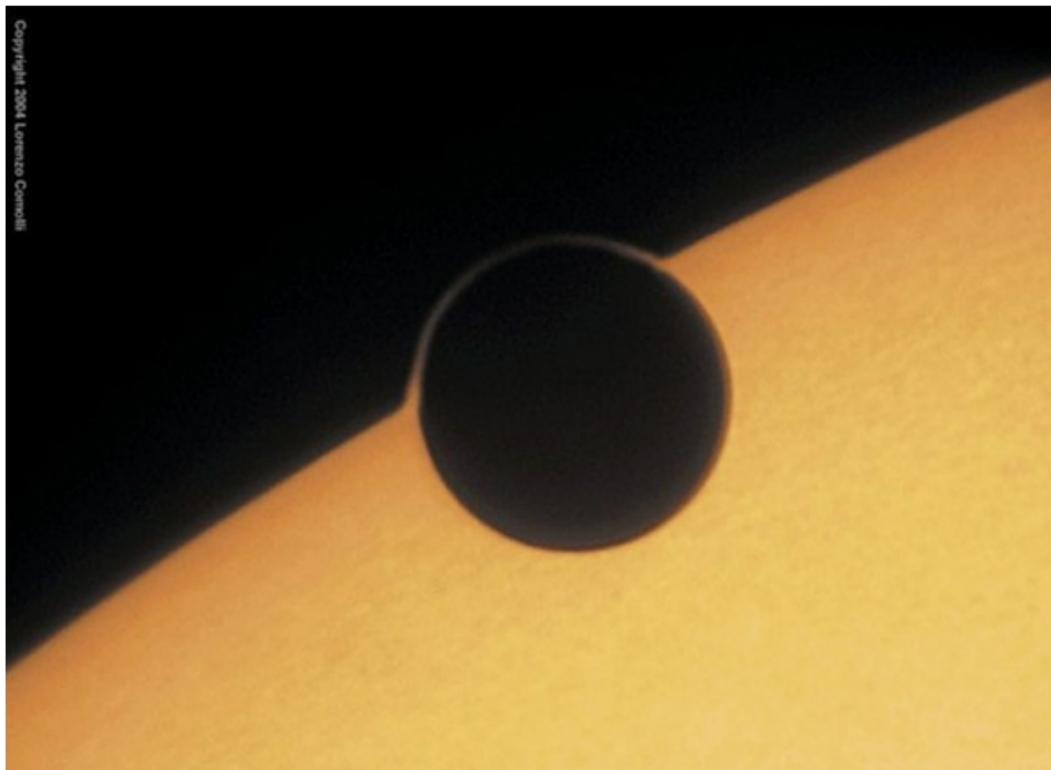
Задача

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.

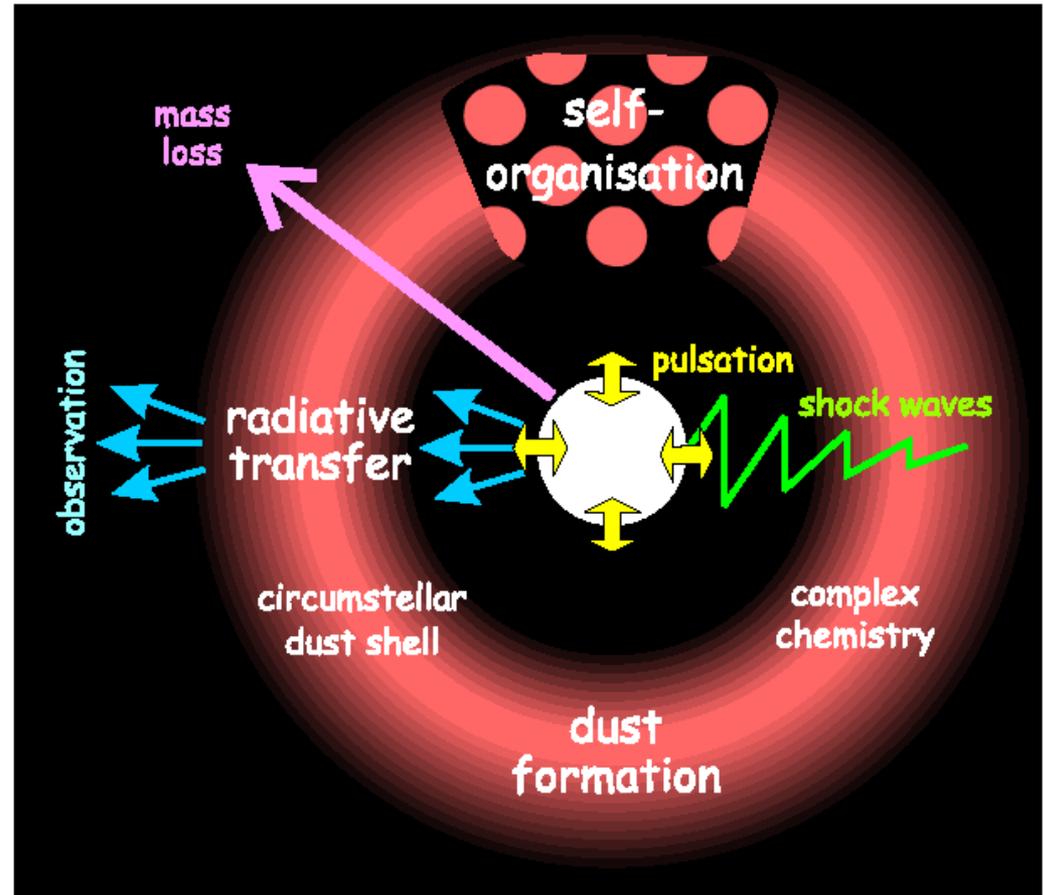
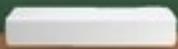


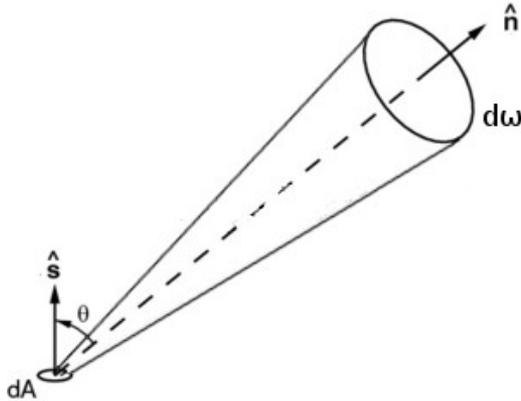
Figure 1. Sketch of the physical processes involved in the mass loss mechanism of AGB stars.

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

Основные понятия



Интенсивность



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

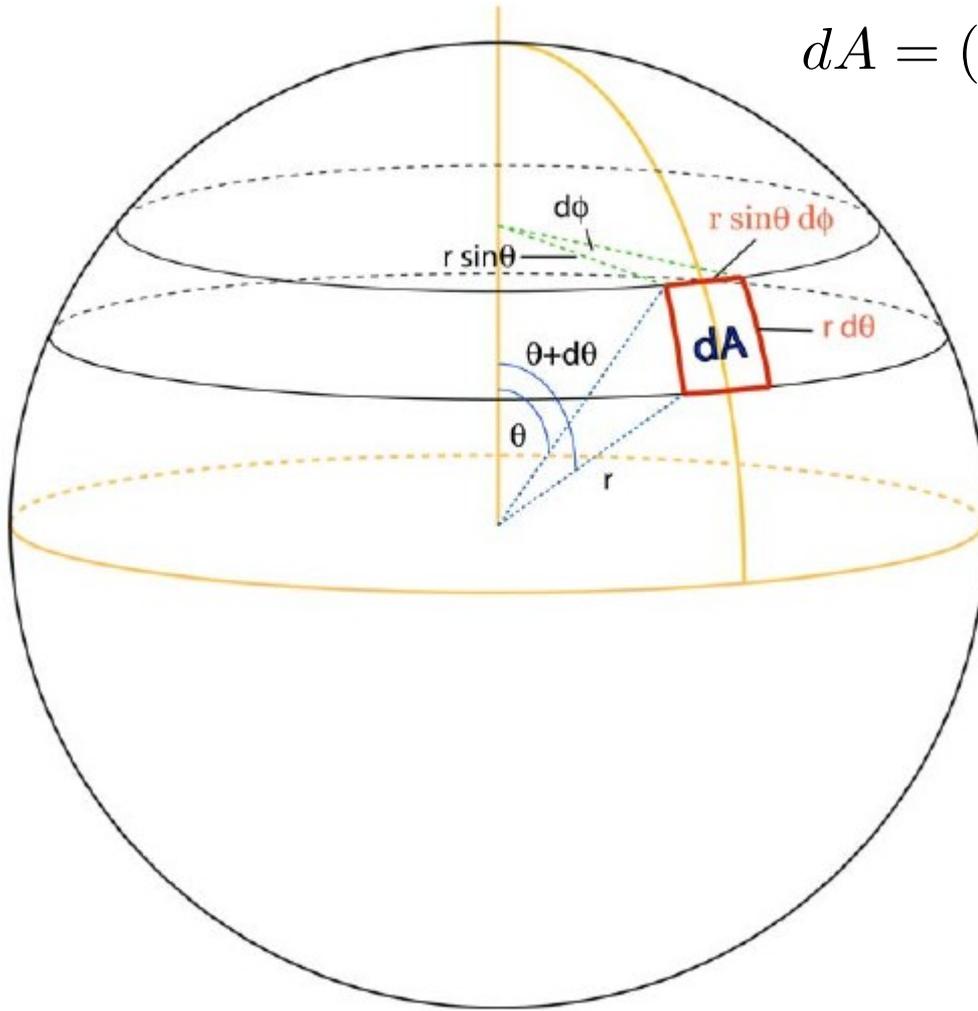
эрг/(см²· с· Гц· стер)

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

В случае одномерной плоской геометрии I_ν не зависит от азимута

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

Система координат звездной атмосферы



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

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

$$\mu = \cos\theta$$

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

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

Средняя интенсивность (0-й момент интенсивности)

J-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)

N-интеграл

лучистая энергия, протекающая через площадку dS за единицу времени в единичном интервале частот

Закон косинуса

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

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

Ноль в изотропном случае

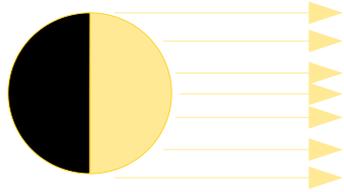
$$F_\nu^+ = \frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} I_\nu \sin\theta \cos\theta d\theta = \frac{1}{2} \int_0^1 I_\nu \mu d\mu$$

$$H_\nu = \mathcal{F}_\nu / 4\pi = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 I_\nu \mu d\mu$$

Эддингтоновский поток —
поток на 1 радиан

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

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

Или при интенсивности I, постоянной по поверхности звезды:

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

$$F_\nu = I_\nu$$

Наблюдаемый поток

Поток излучения с поверхности звезды, регистрируемый наблюдателем

эрг/см²/с/А

Из условия сохранения потока

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

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

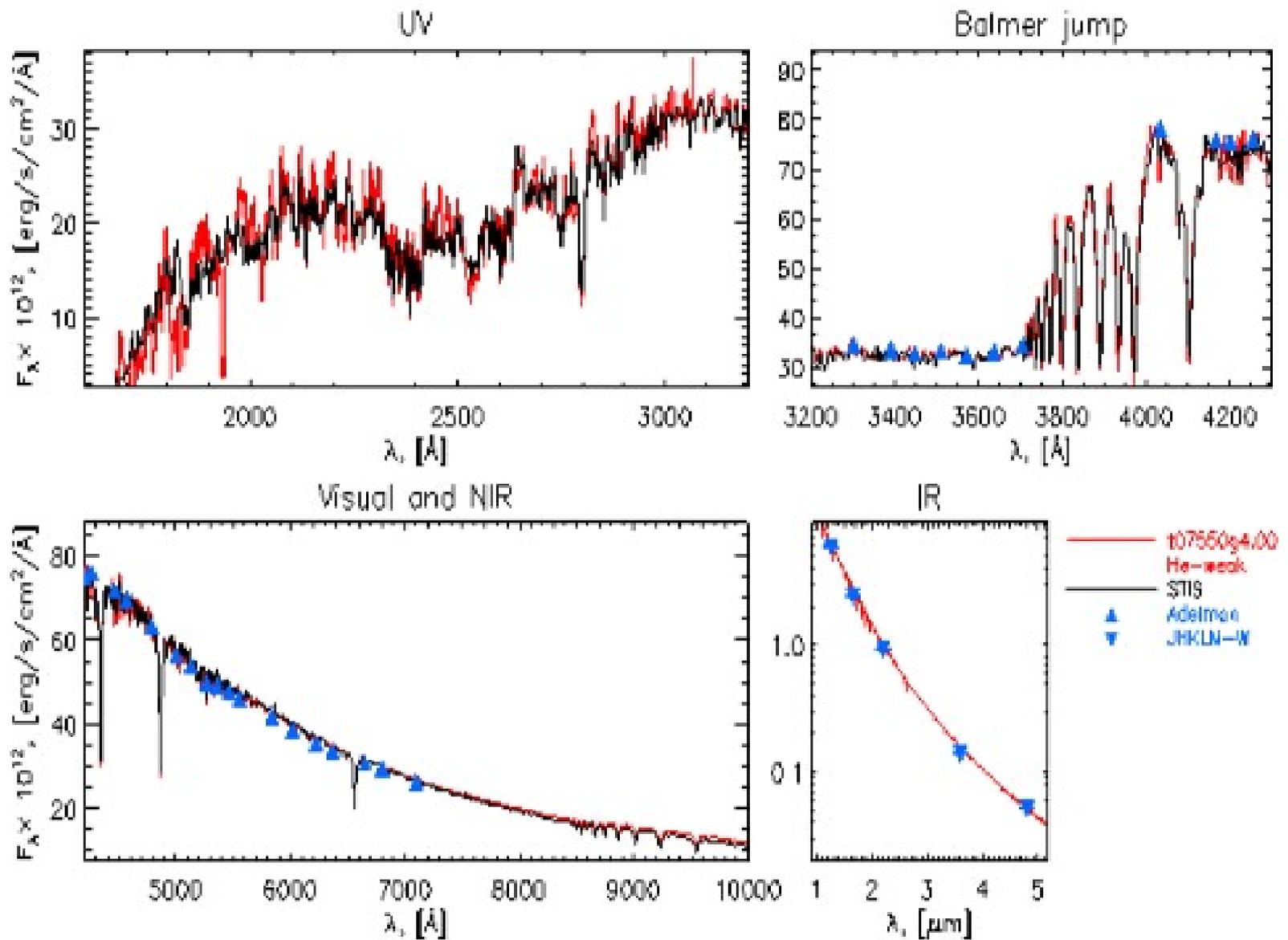
Угловой диаметр звезды

Полный поток: $F = \sigma T_{eff}^4$

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

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

Поток

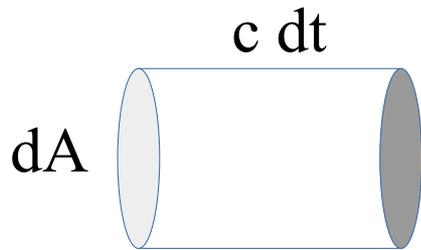


Плотность излучения (2-й момент интенсивности)

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 излучения



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

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

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

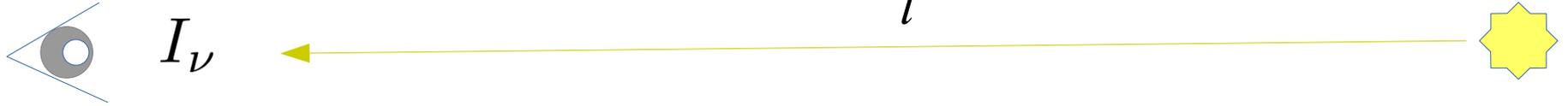
κ_ν – на ед.массу

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

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

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

Поглощение



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

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

Оптическая толщина

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

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

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

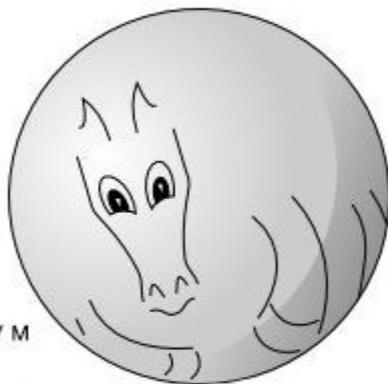
ВАКУУМ

ВАКУУМ

ВАКУУМ

ВАКУУМ

ВАКУУМ



В

ВАКУУМ

ВАКУУМ

ВАКУУМ

В

ВАКУУМ

ВАК

ВАКУУМ

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



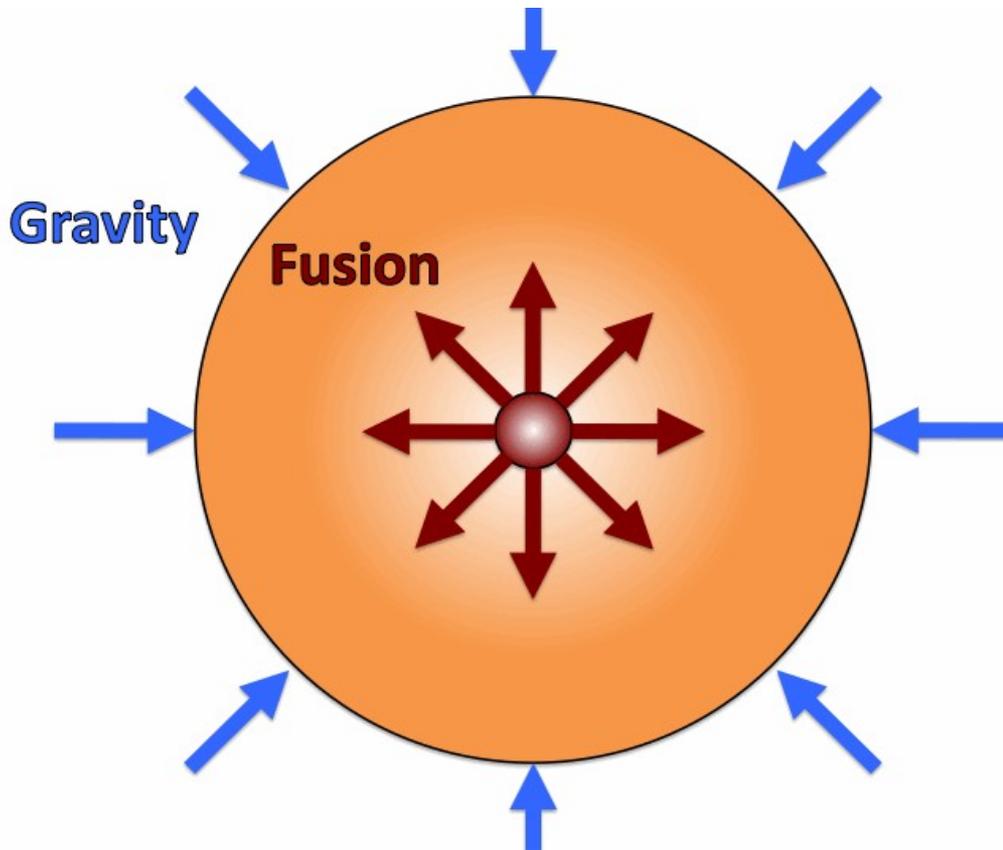
Уравнение гидростатического равновесия

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

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.

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

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

$$H\nu(\tau\nu) = \frac{1}{3} \frac{dB\nu}{dT} \frac{dT}{d\tau\nu} = - \frac{1}{3\chi\nu} \frac{dB\nu}{dT} \frac{dT}{dz}$$

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

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

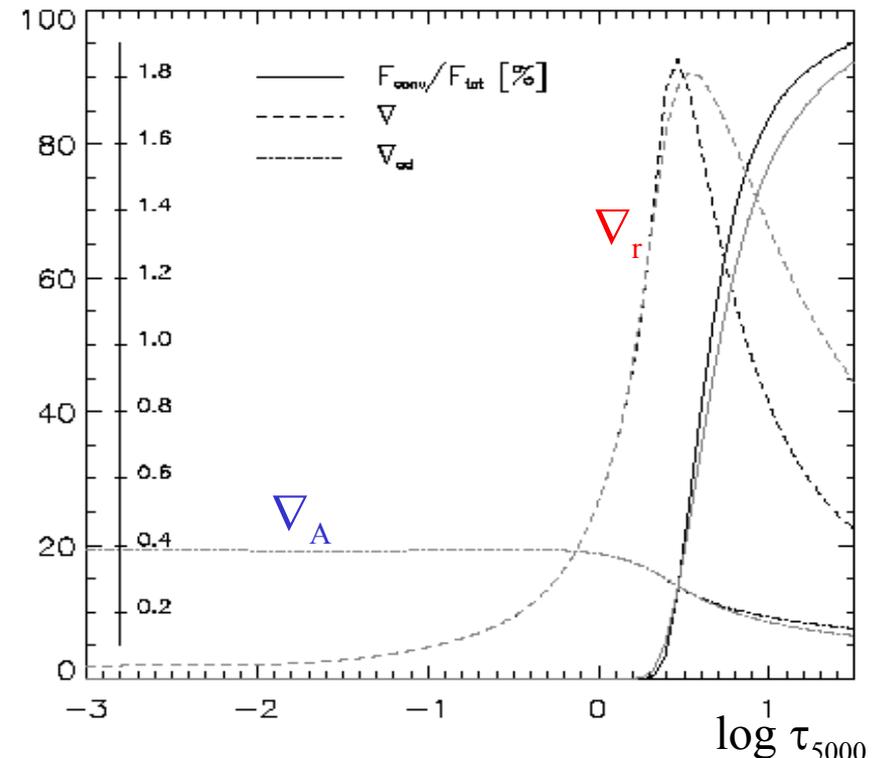


Fig. 4. Percentage of the total flux transferred by convection (full lines), total (dashed lines) and adiabatic (dot-dashed lines) temperature gradient in the MAFAGS-OS model for the two treatments of convection: Canuto & Mazitelli ($\alpha_{cm} = 0.82$) – plotted in gray, Böhm-Vitense ($\alpha_{bv}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

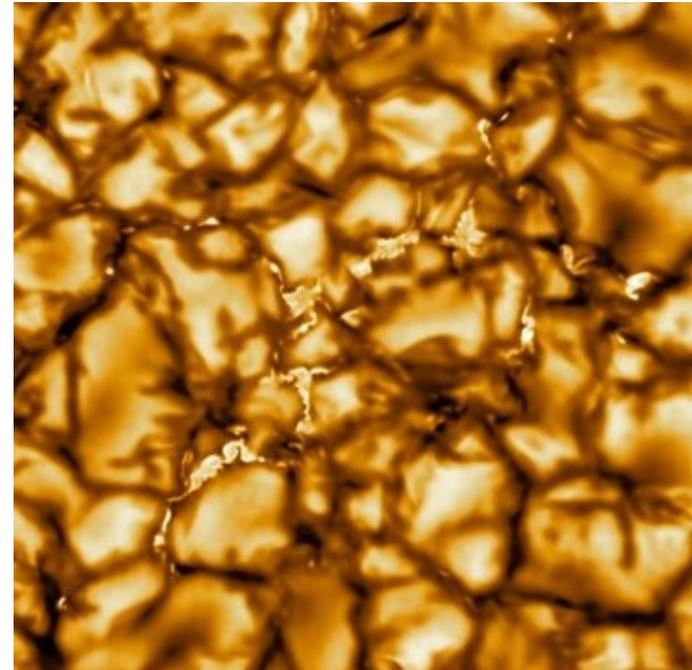
$$h_{atm}/R \sim 0.56$$

Насколько оправдано предположение об однородности?

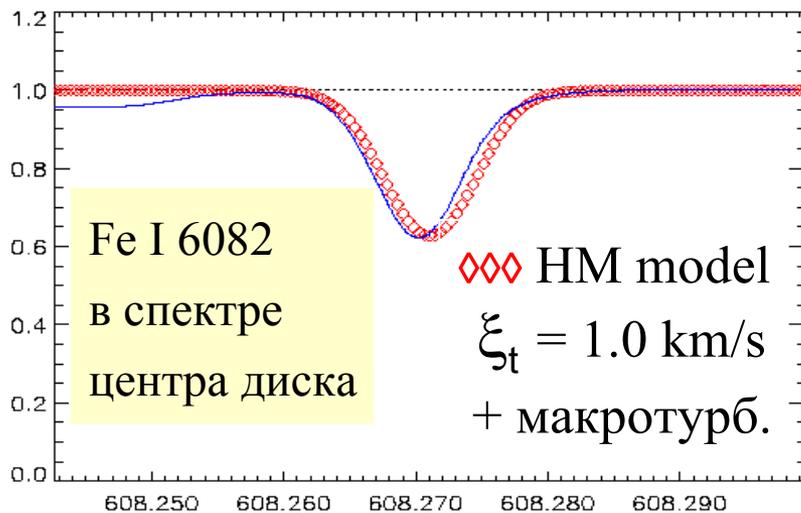


Звезды с конвективной зоной (Солнце)

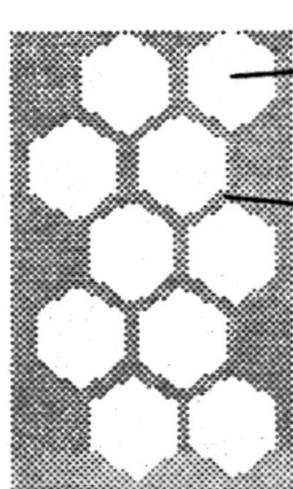
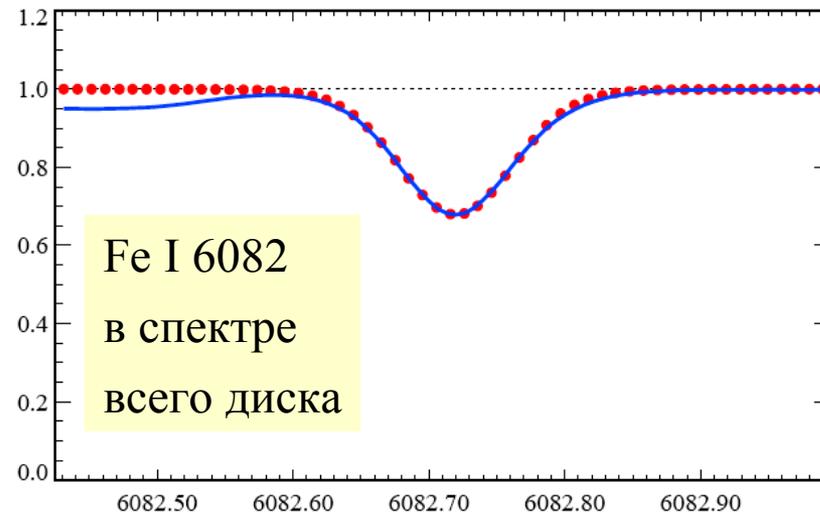
- Солнечная грануляция,
размеры гранул ~ 1000 км
разница температур ~ 300 К,
скорости вертикальных движений ~ 1 км/с,
время жизни ~ 10 мин.



- Асимметрия и сдвиги линий в спектре интенсивности



- Проявления неоднородности малы в спектре Солнца как звезды



granules

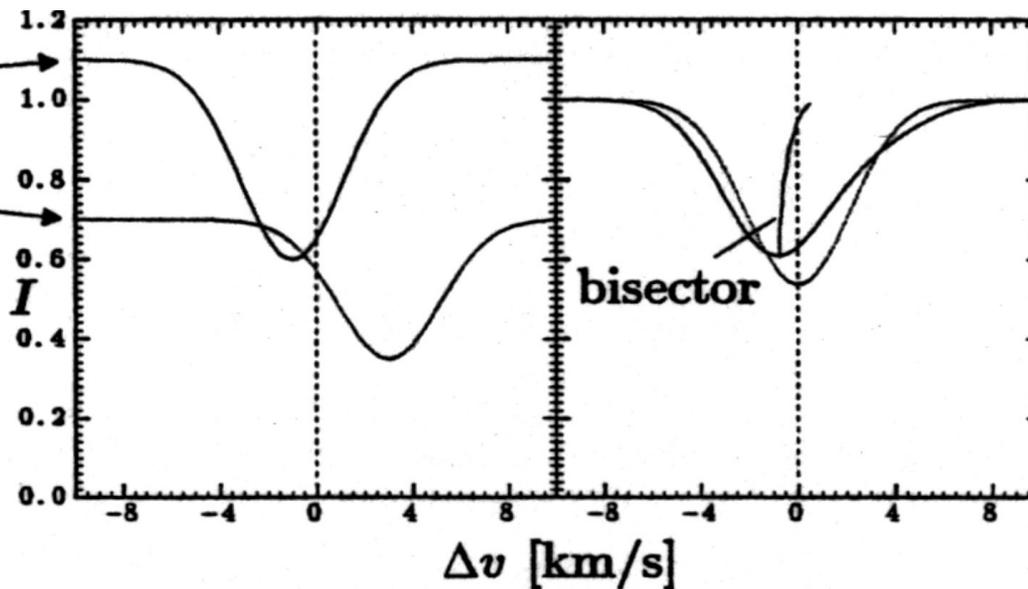


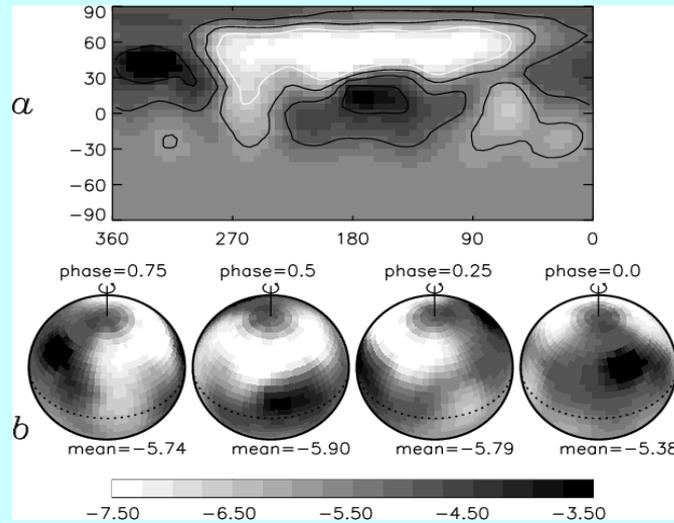
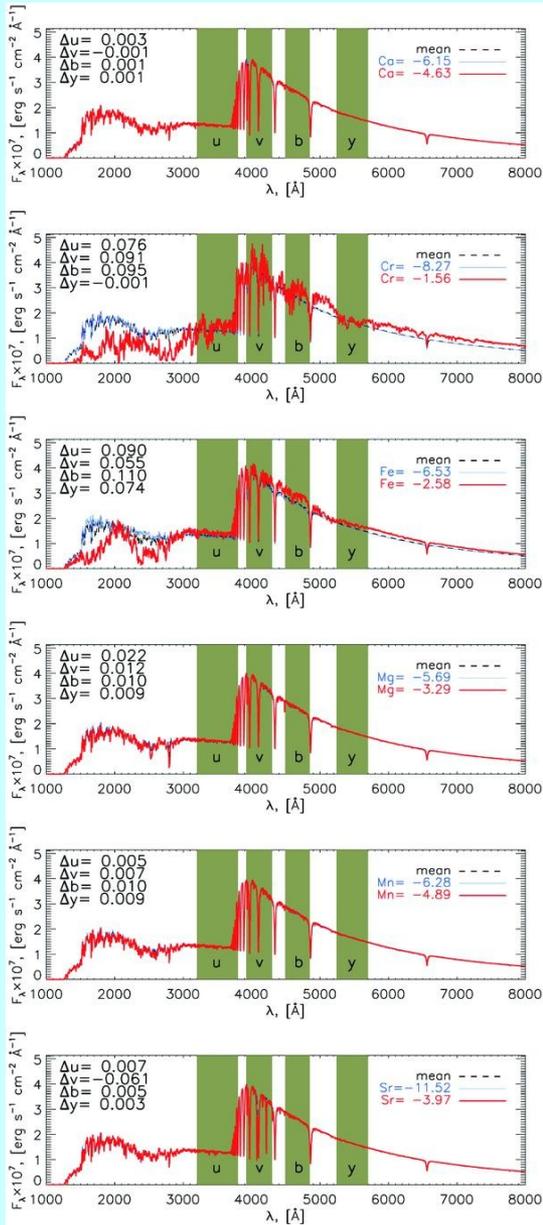
Схема
образования
асимметрии и
сдвига линии в
неоднородной
атмосфере



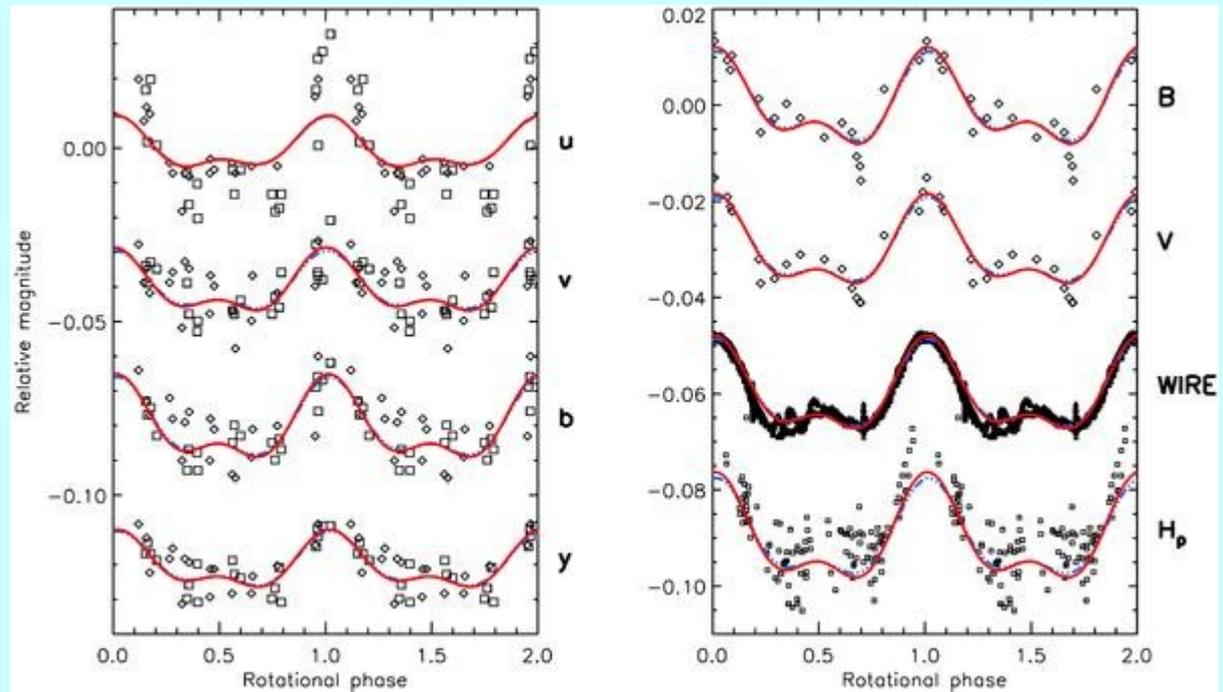
Ар звезды

- *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)

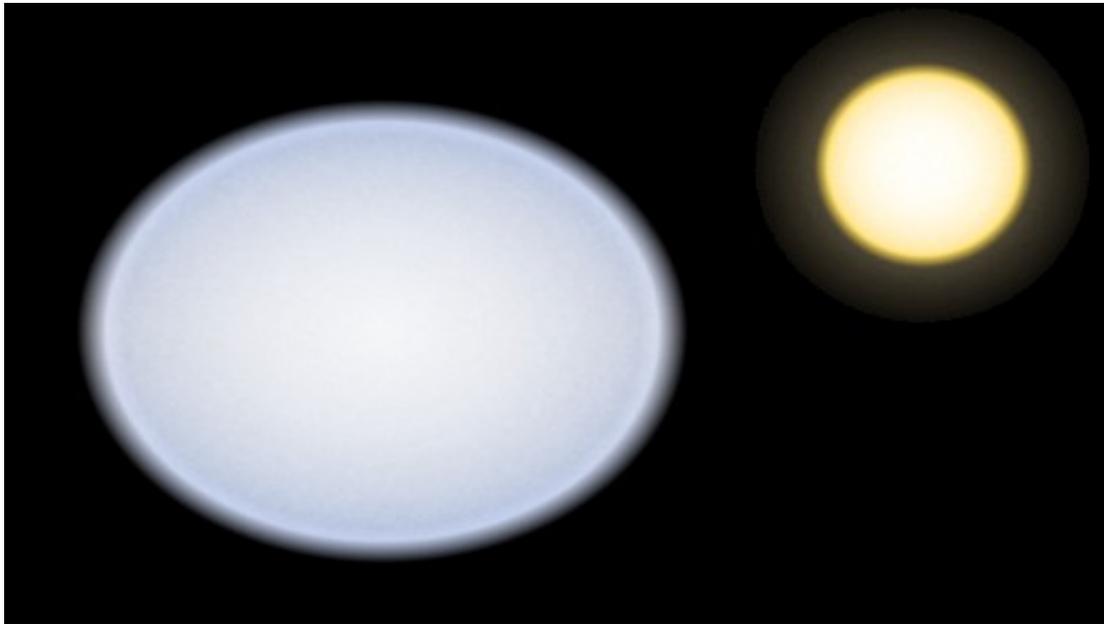




Быстрые ротаторы.

- 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*

$$n_i C_{ij} = N_e n_i \int_{v_0}^{\infty} \sigma_{ij}(v) f(v) v dv$$

Локальные
величины !



Частный случай:

полное термодинамическое равновесие (ПТР)

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

Баланс прямых и обратных процессов

- $J_\nu = B_\nu$

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

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

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

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

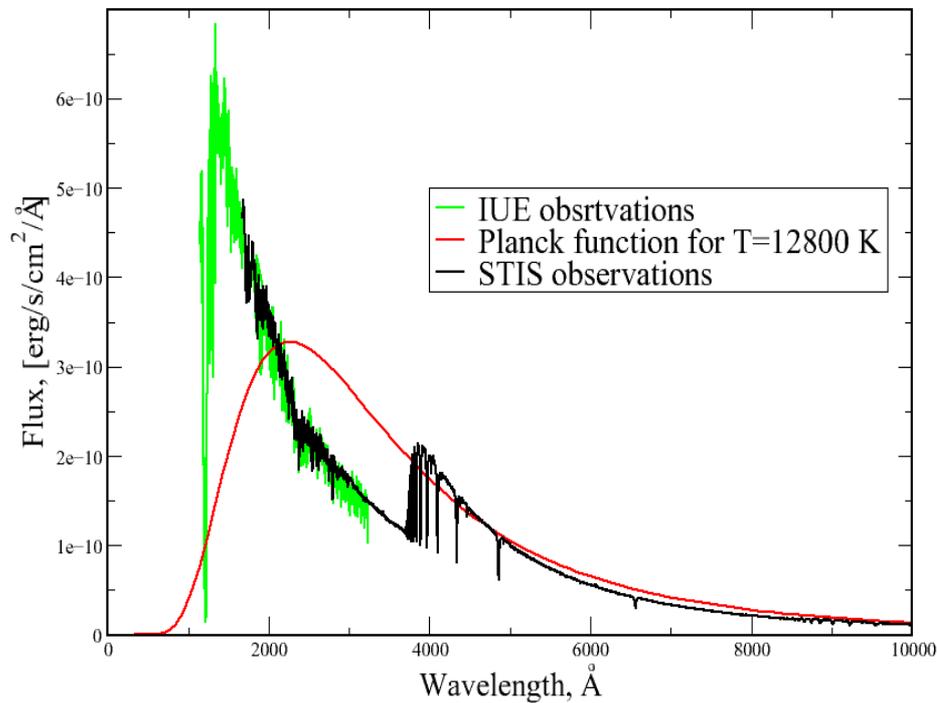
2) $J_\nu = B_\nu(T_e)$ на всех частотах \rightarrow детальный баланс

Условия выполняются в глубоких слоях атмосферы

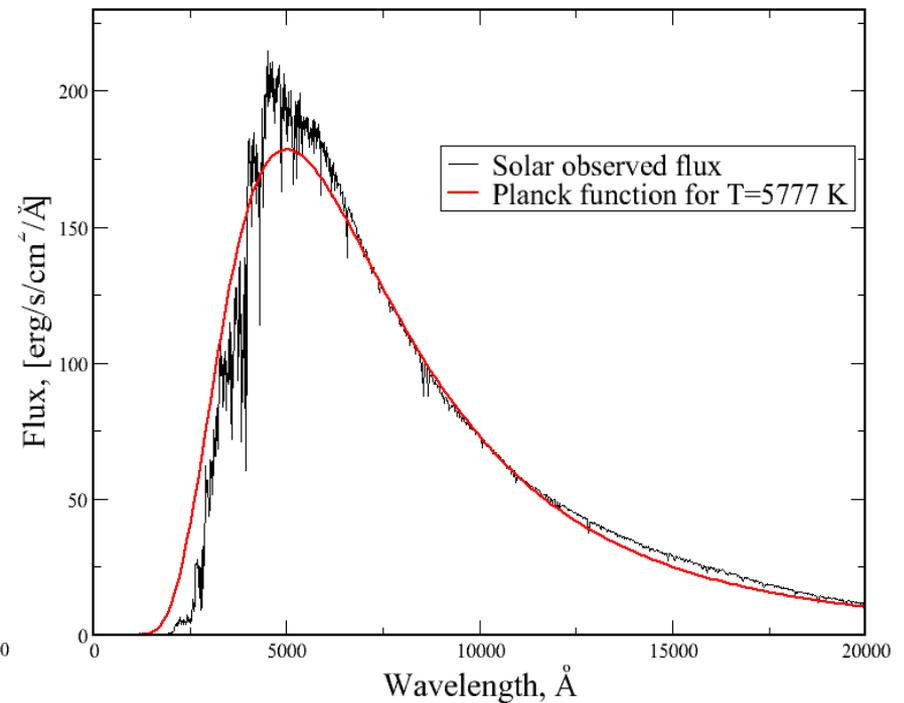
Чернотельное ли излучение звезд?



π Cet ($T_{\text{эфф}} = 12800$ 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: $\tau_\nu = \int \chi_\nu dz,$

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

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

При $\sigma_\nu=0$ $S_\nu=B_\nu$

Интегрально-
дифференциальное
уравнение

τ всюду функция частоты

Граничные условия

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

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

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

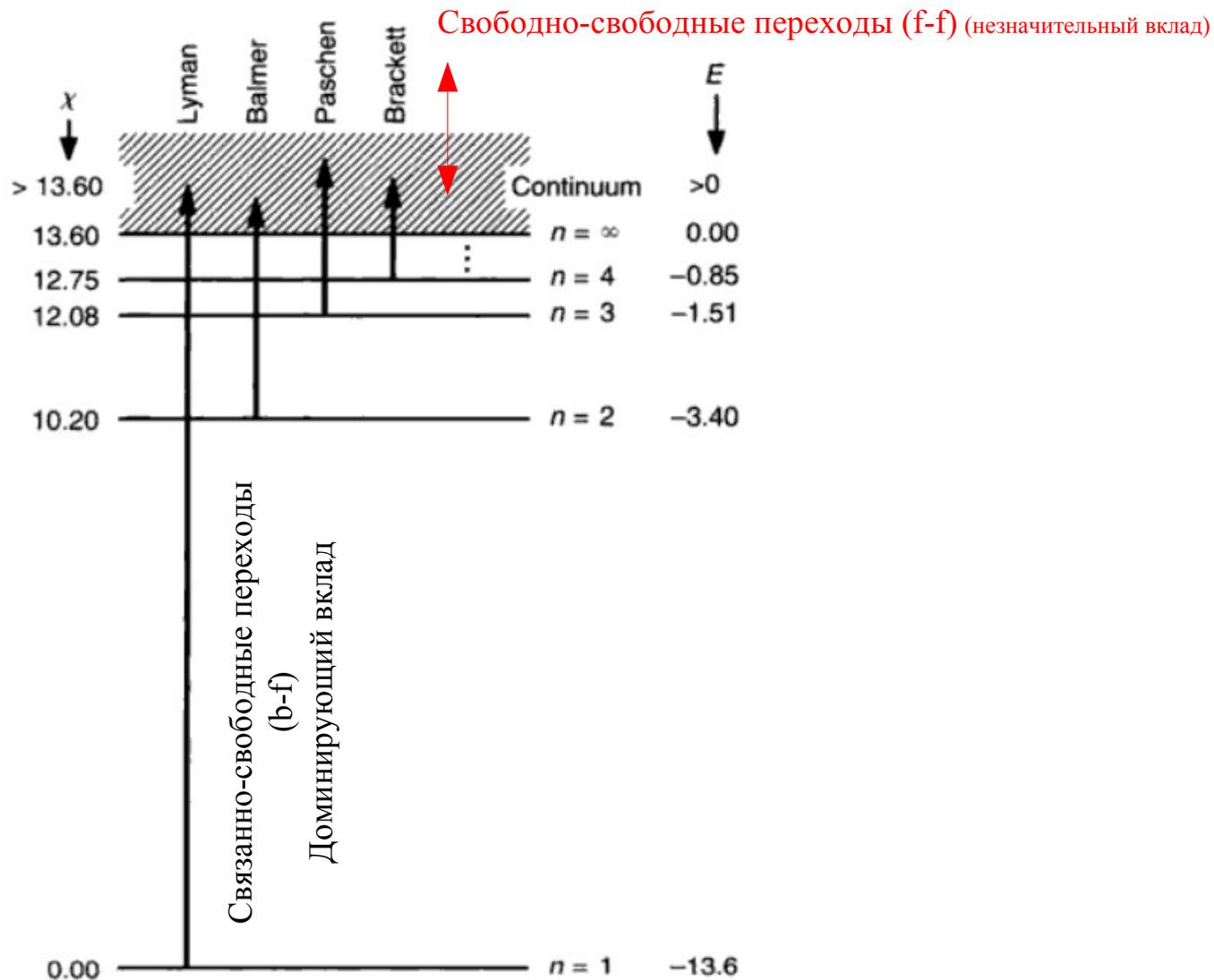
*Источники поглощения в
звездных атмосферах*



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

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

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

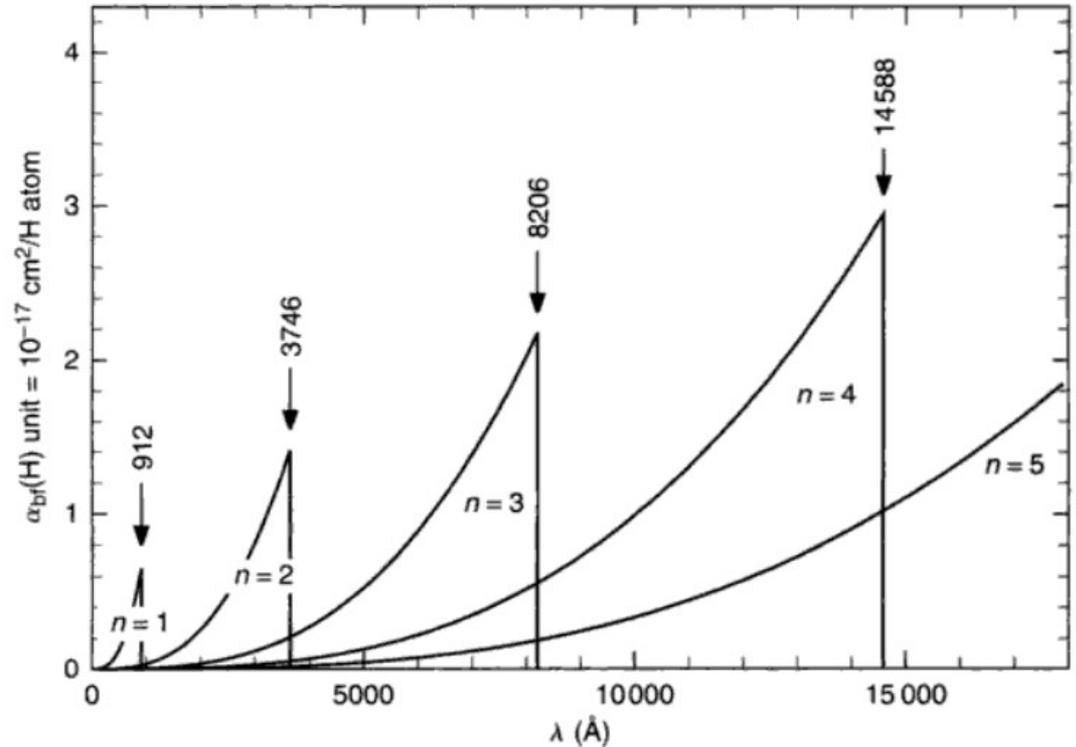
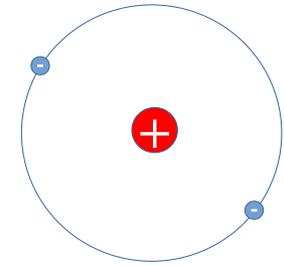


Fig. 8.2. The bound-free absorption coefficient for hydrogen increases with n .

Отрицательный ион водорода

Нужны свободные
электроны



$$\chi = 0.754 \text{ эВ}$$

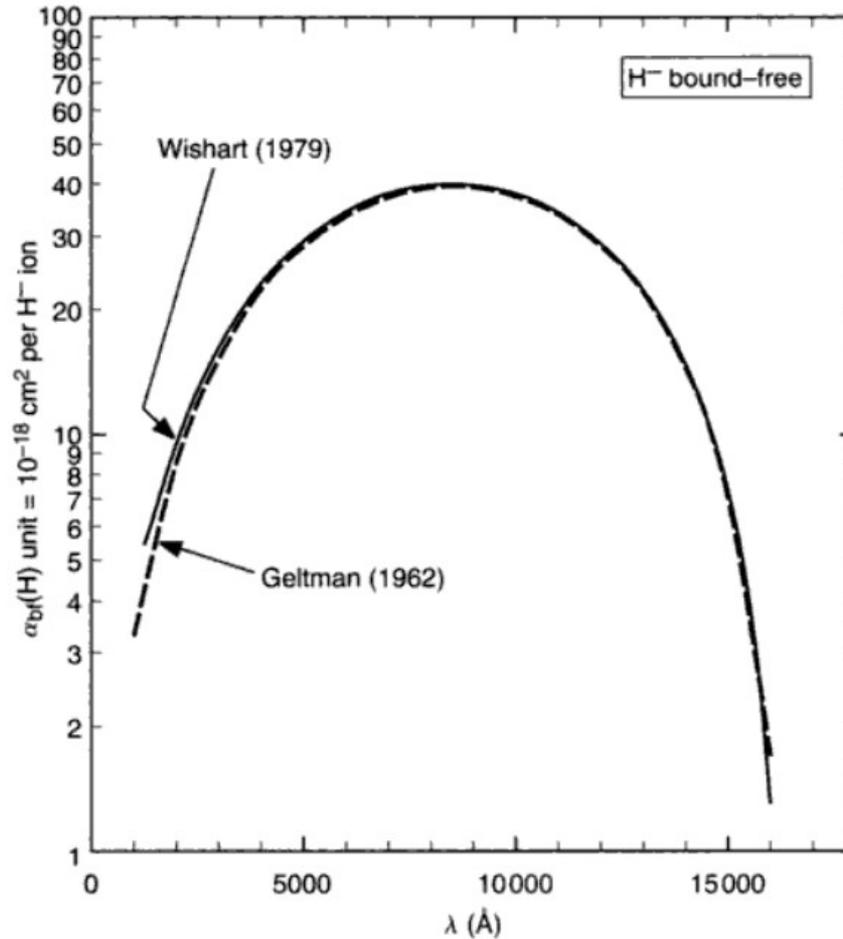
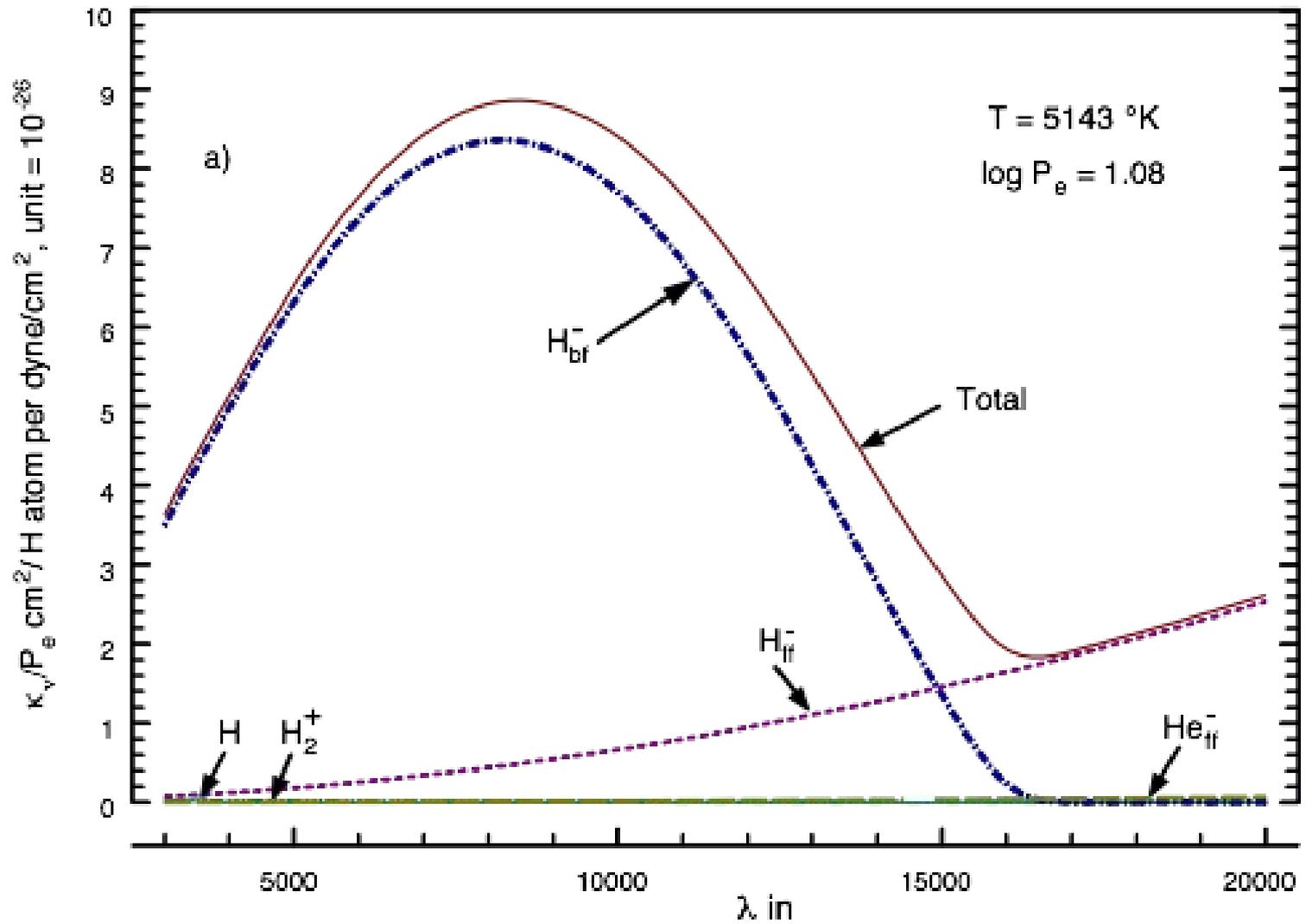
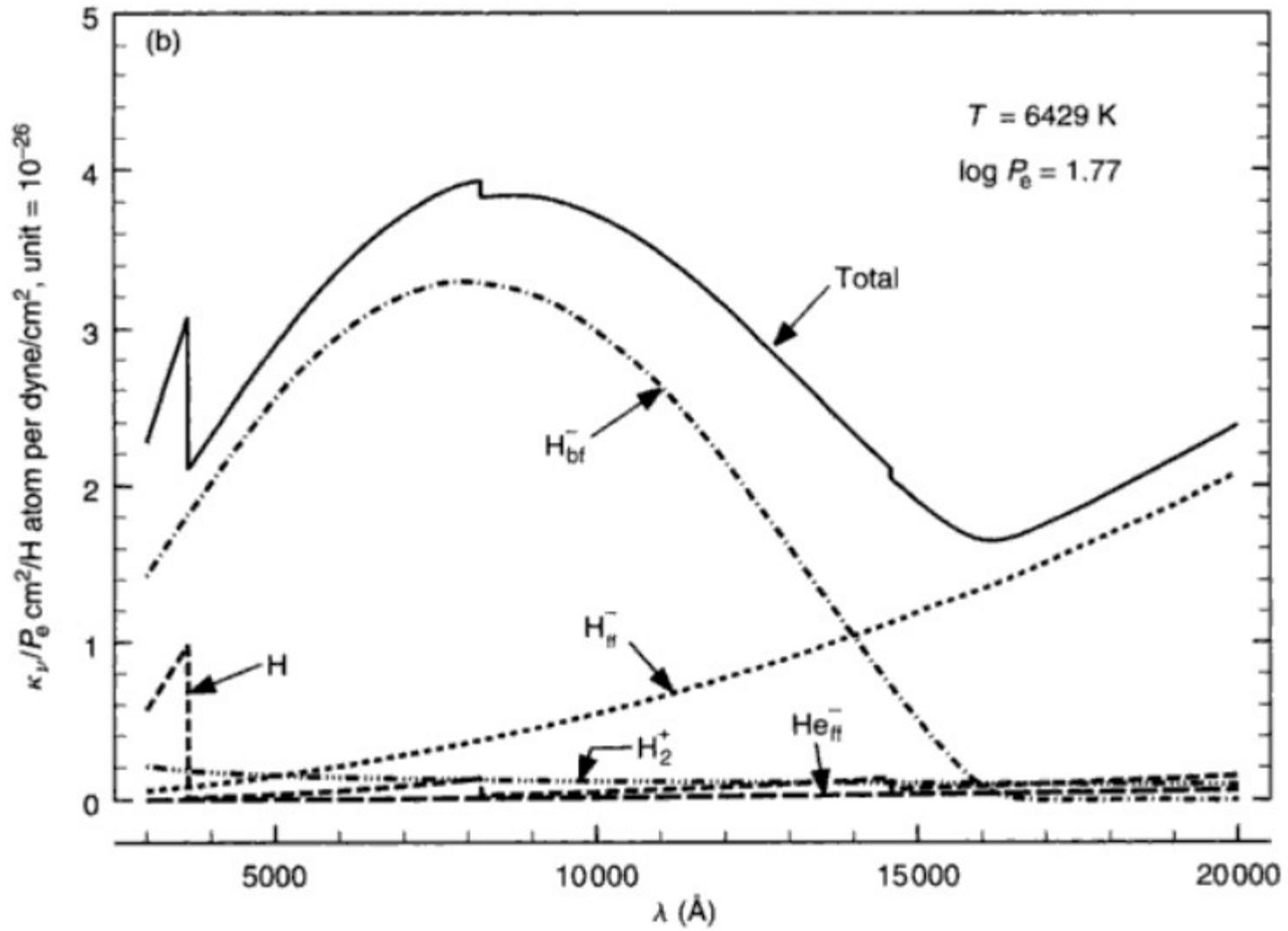


Fig. 8.3. The absorption coefficient of the negative hydrogen ion shows a maximum near 8500 Å. Two calculations are compared.

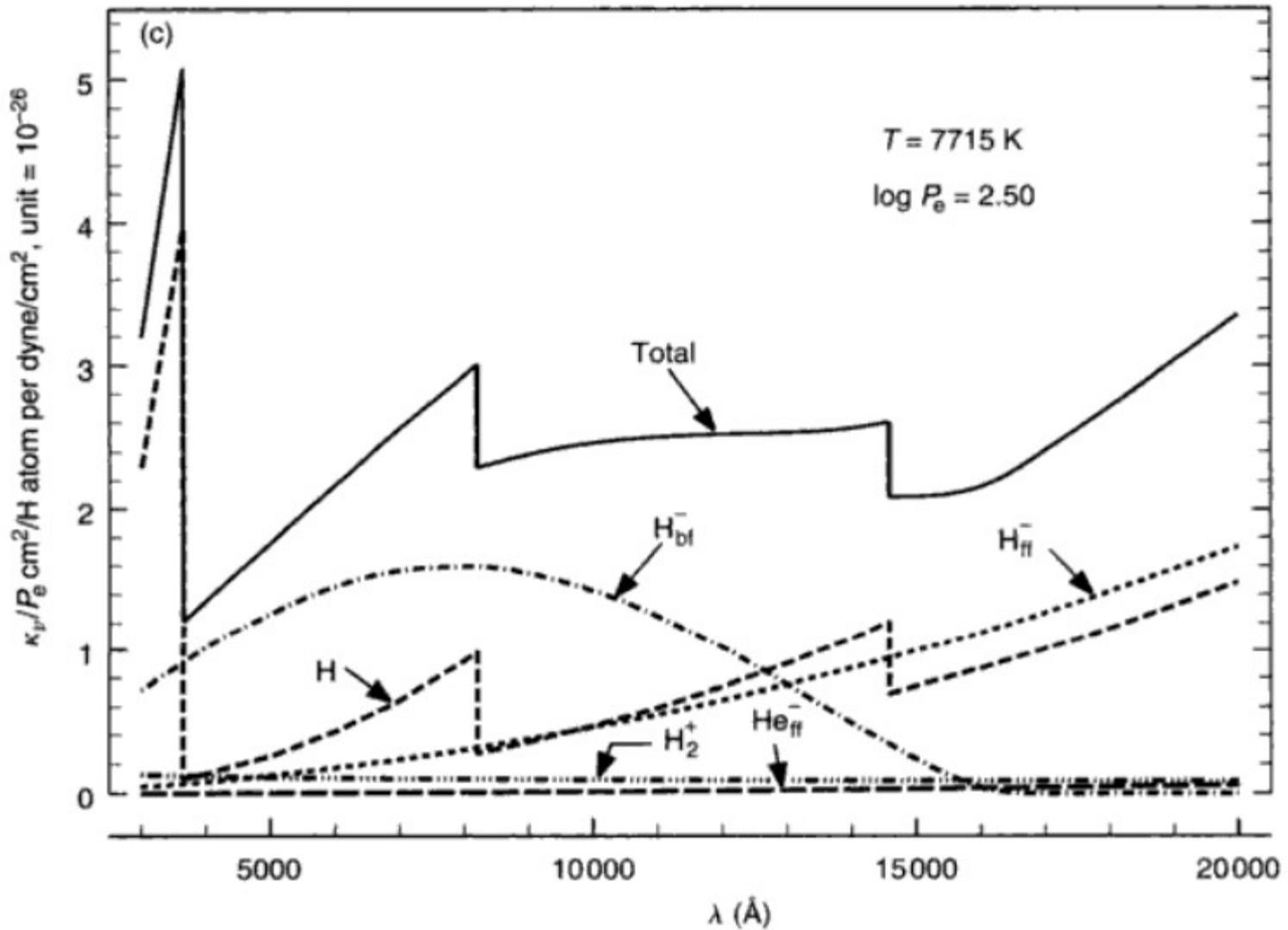
Водород



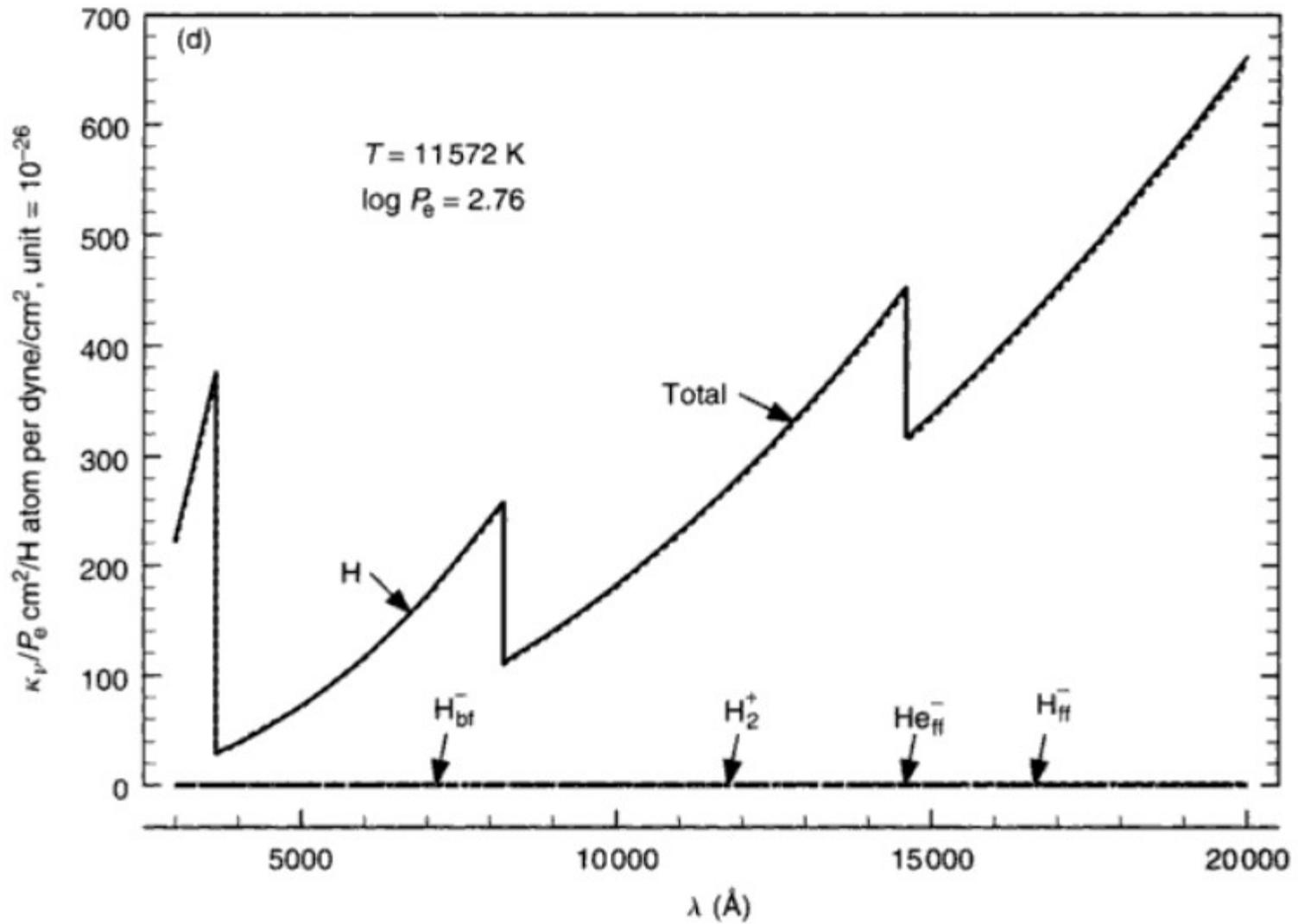
Водород



Водород

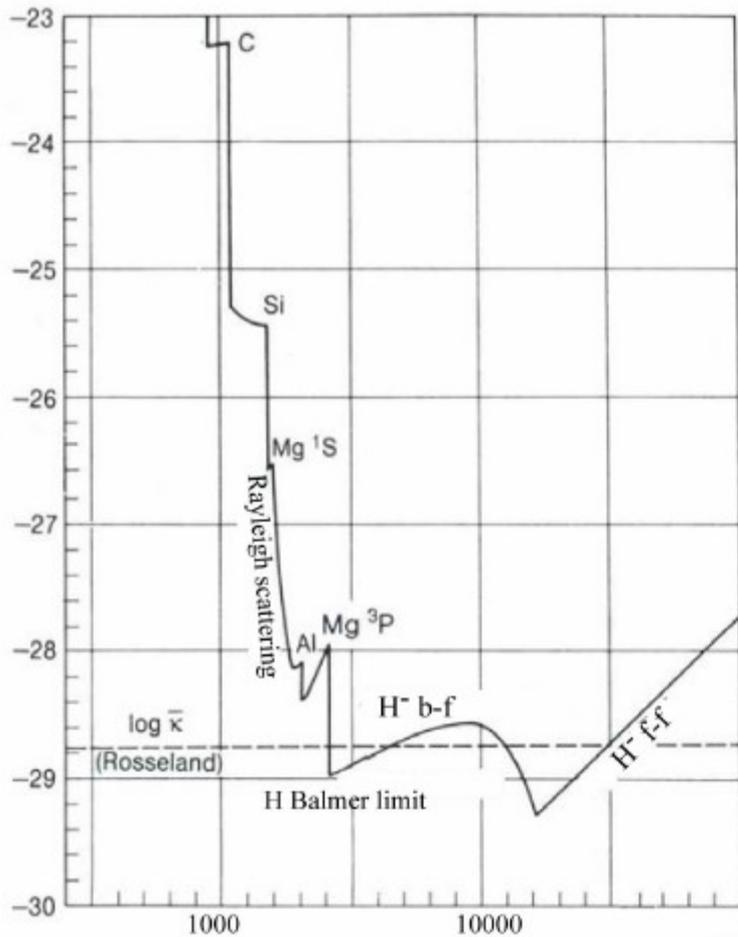


Водород

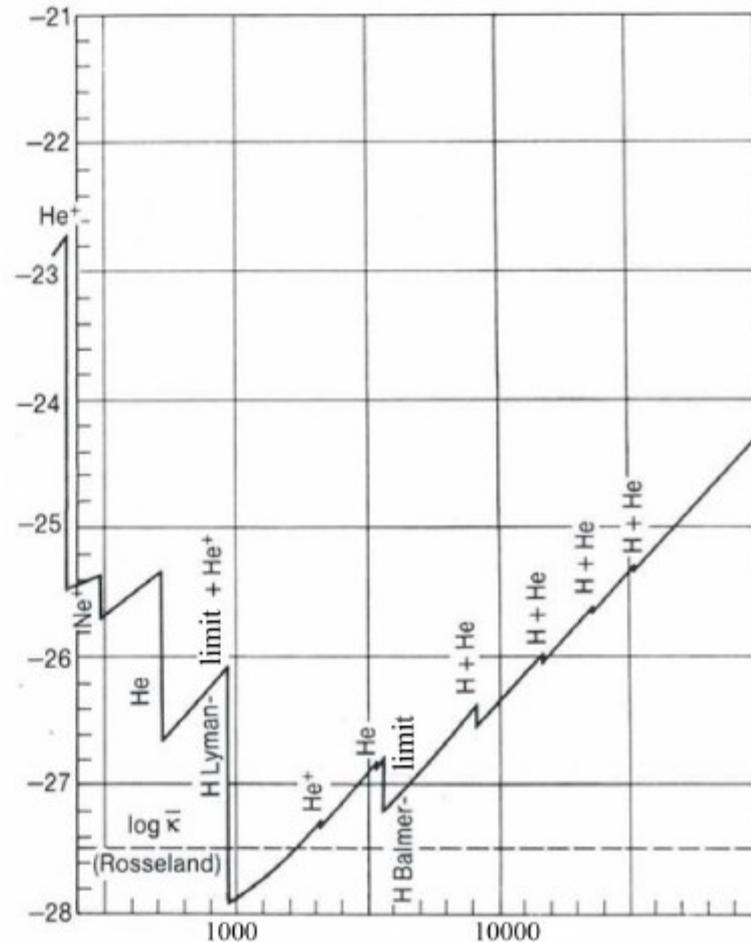


Металлы

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:

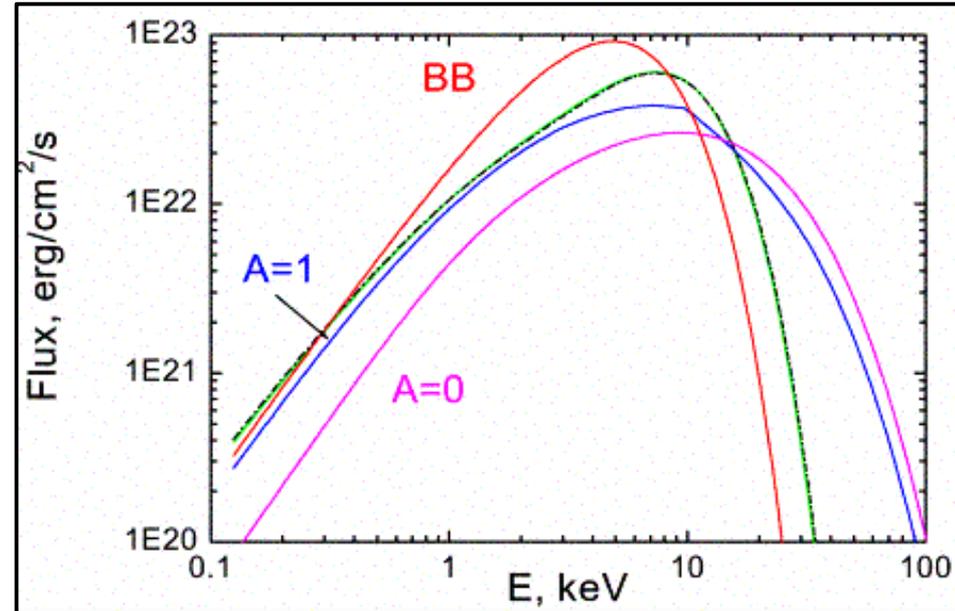
$$\kappa_{sc} = \sigma_e n_e$$
$$\sigma_e = 6,655 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$$

Комptonовское 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

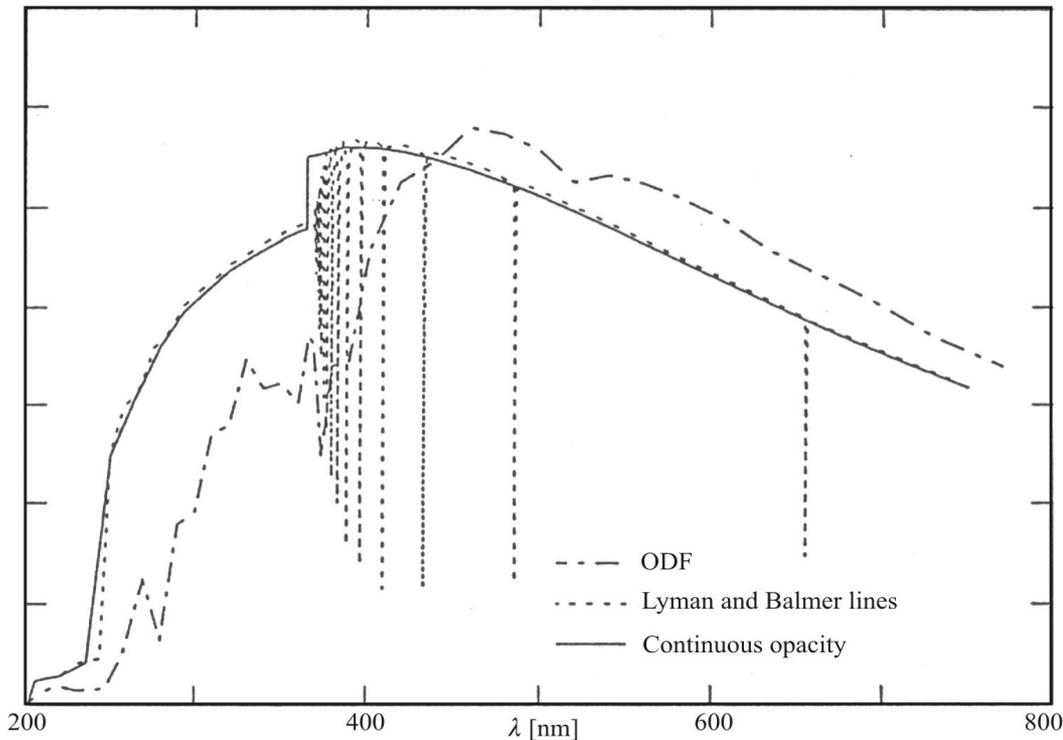
$$\kappa_R = \sigma_R (N_{atom} + N_{mol})$$

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

Поглощение в линиях.

- *Блокировка излучения* в фотометрических полосах (50 \AA):

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



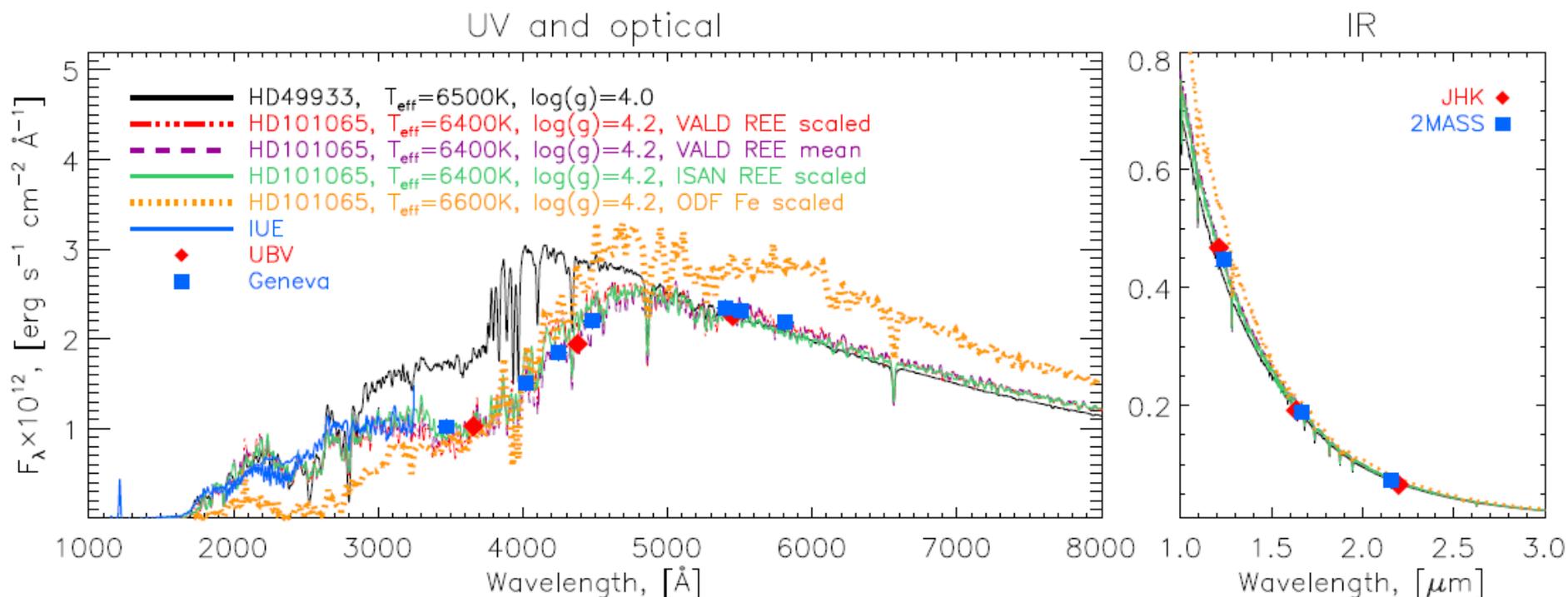
- *Перераспределение излучения* из у-ф в ВИДИМЫЙ И И-К ДИАПАЗОН

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

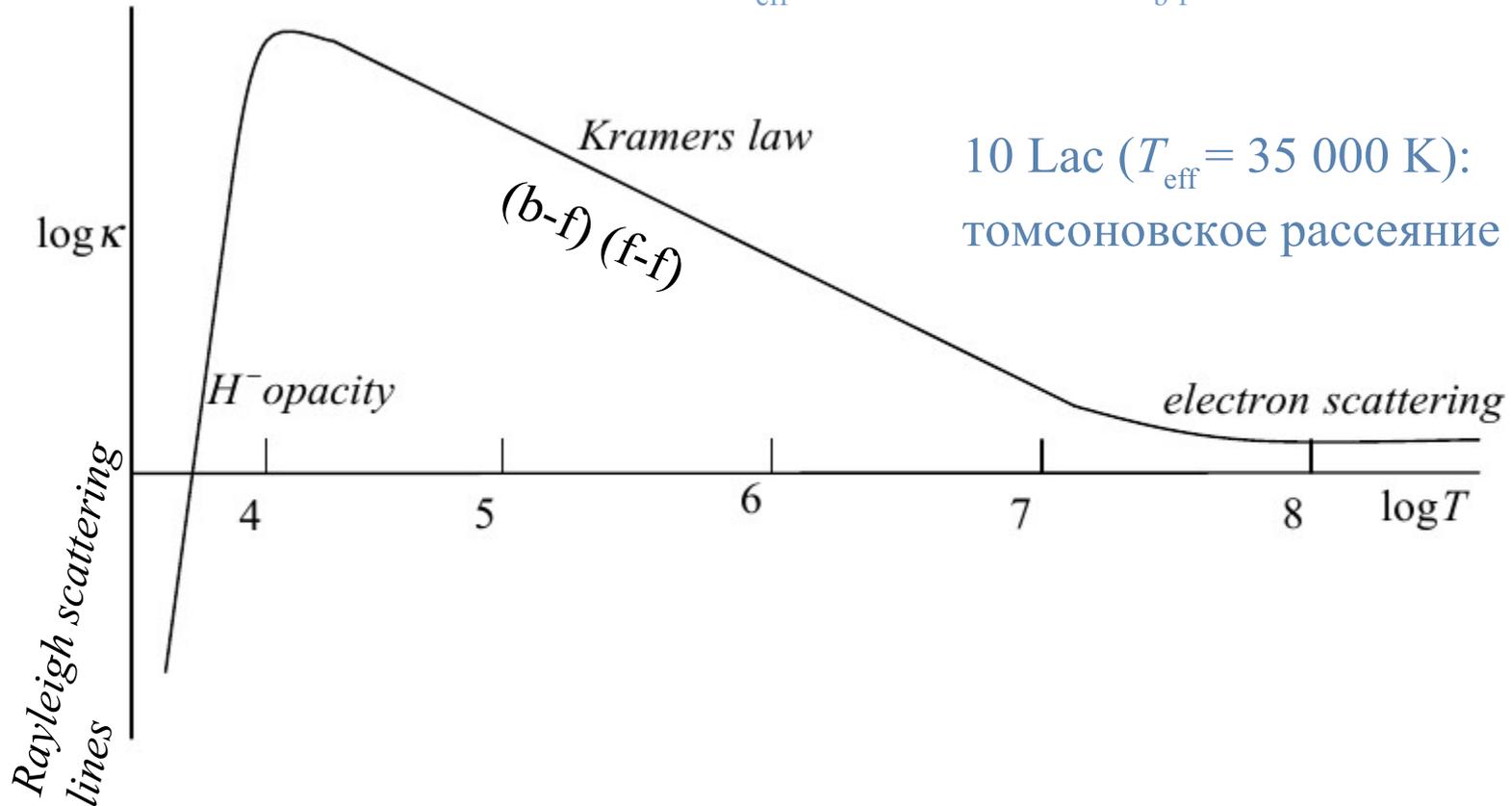
Доминирующие источники непрозрачности $\lambda = 3000 - 10000 \text{ \AA}$

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

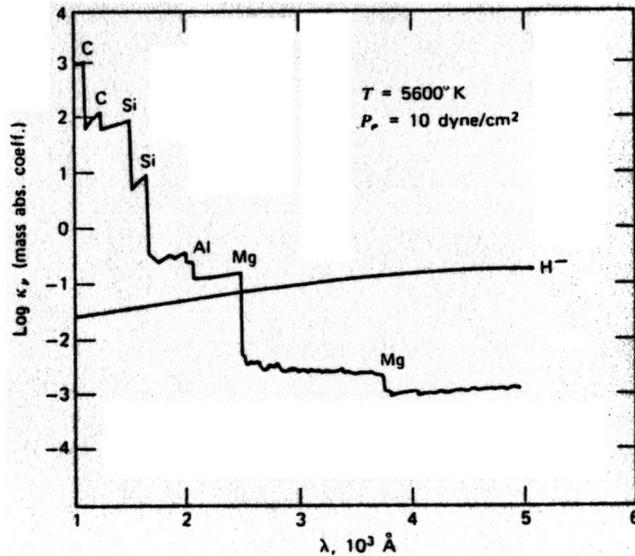
Вега ($T_{\text{eff}} = 10\,000 \text{ K}$): $\text{H}_{\text{b-f}}$

10 Lac ($T_{\text{eff}} = 35\,000 \text{ K}$):

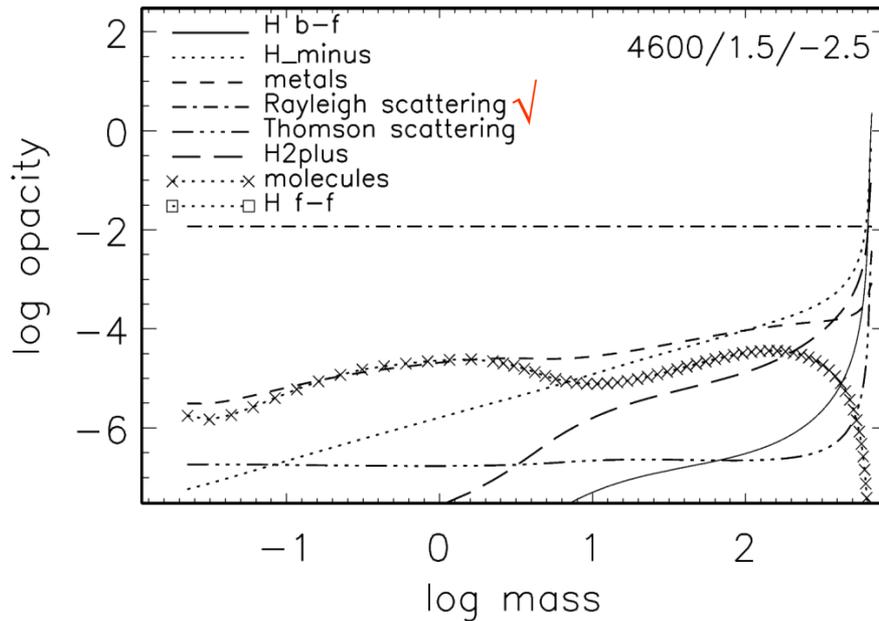
томсоновское рассеяние и $\text{H}_{\text{b-f}}$



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

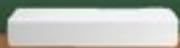


Солнце:
b-f поглощение металлов



HD122563, 4600 / 1.5 / -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:

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

1-й
момент

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

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

2-й
момент

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Величина потока зависит от градиента температуры.

Используем предположение ЛТР: $S_\nu(\tau) = B_\nu(T)$,

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

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

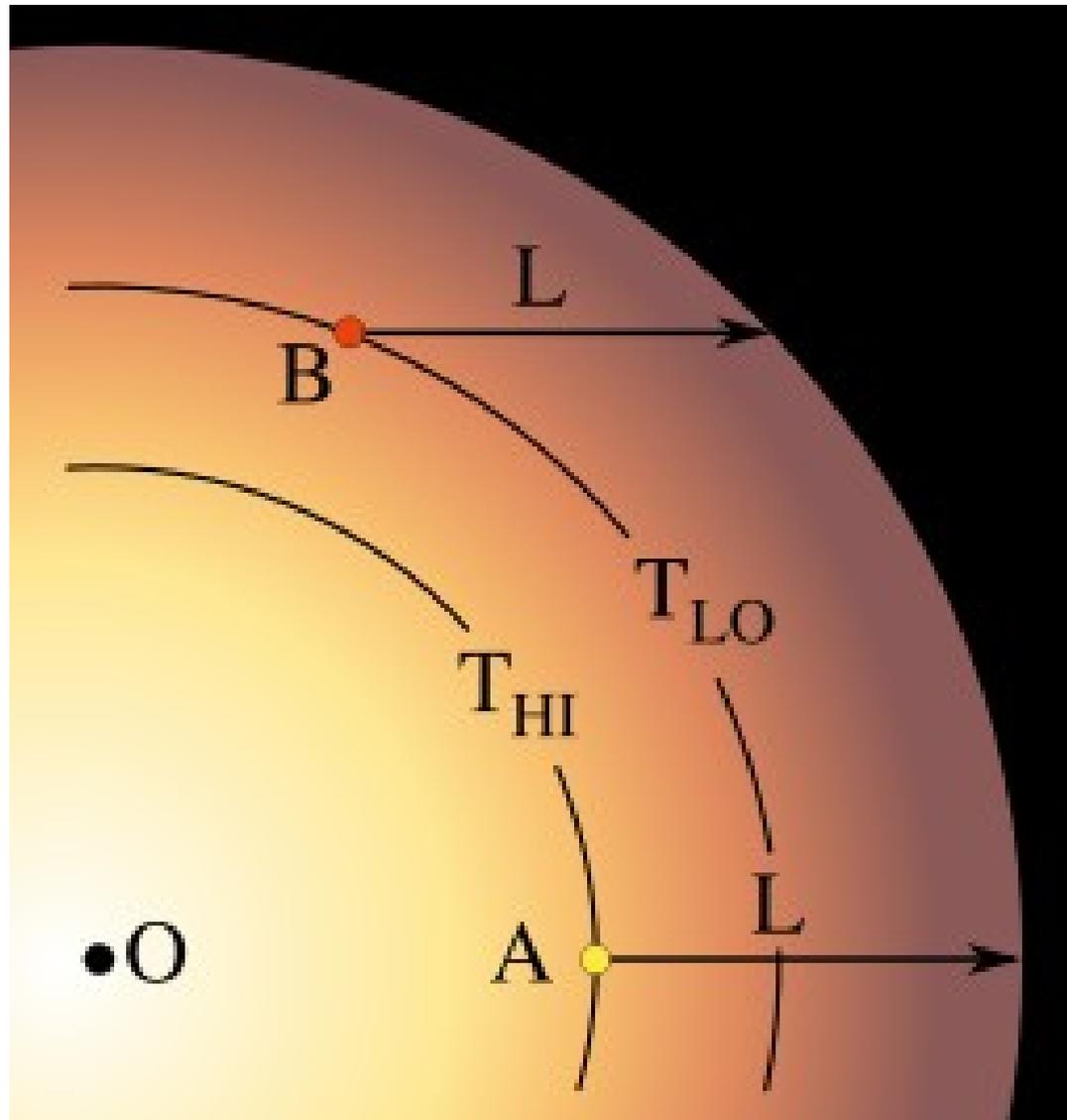
$$T = T_{eff} (3/4 \tau + 1/2)^{1/4}$$

Следствия:

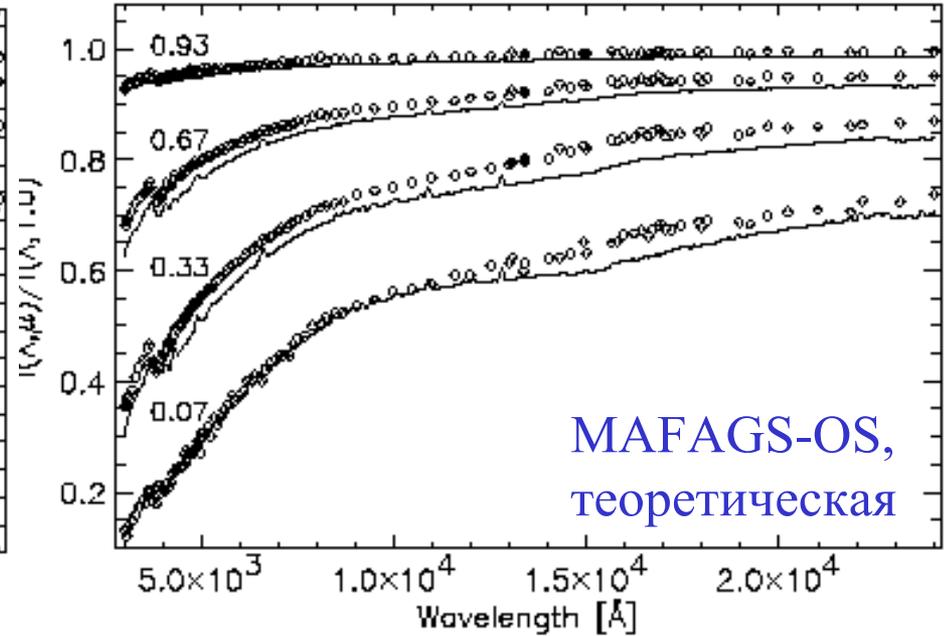
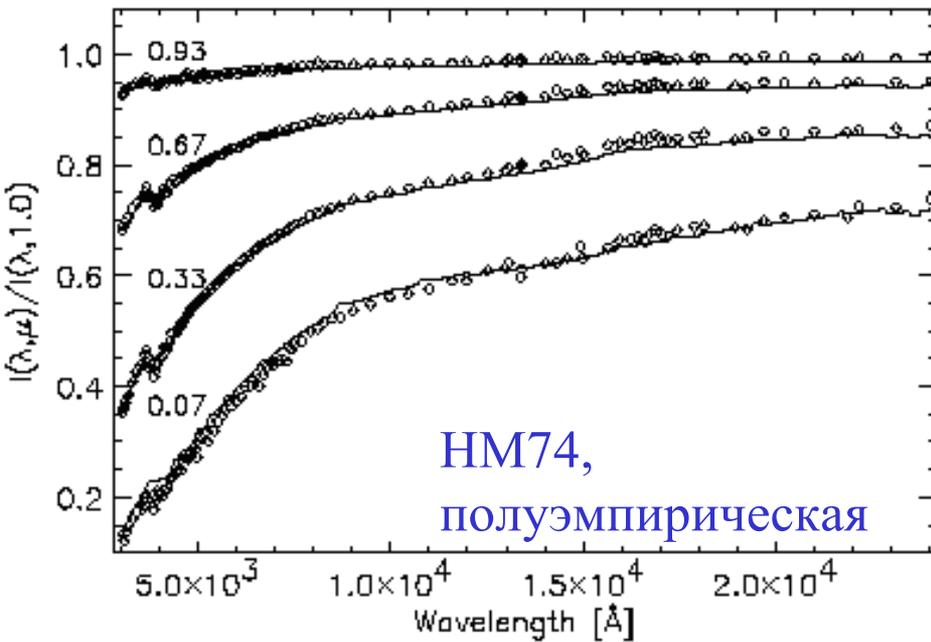
- $T = T_{eff}$ на $\tau = 2/3$,
- $S(\tau = 2/3) = 4 H = F$

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

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

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

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

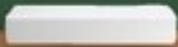
можно использовать решение для серой атмосферы:

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

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

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

*Расчеты моделей
звездных атмосфер*



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

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

проверка

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

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

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

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

no

$\Delta < \epsilon$

yes

Game over

Модели атмосфер



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

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

Параметры модели:

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

$$[M/H] =$$

$$\log (M/H) - \log (M/H)_{sun}$$

Диапазон моделирования:

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

$$\log g = 0 - 8$$

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

$$\log g > 4 \log T_{эфф} - 15.12$$

Для стабильной атмосферы:

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

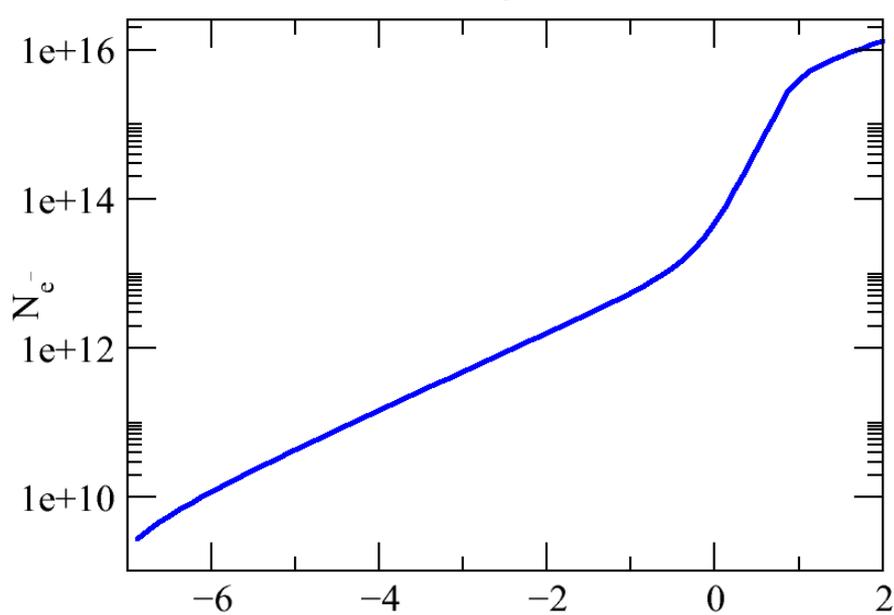
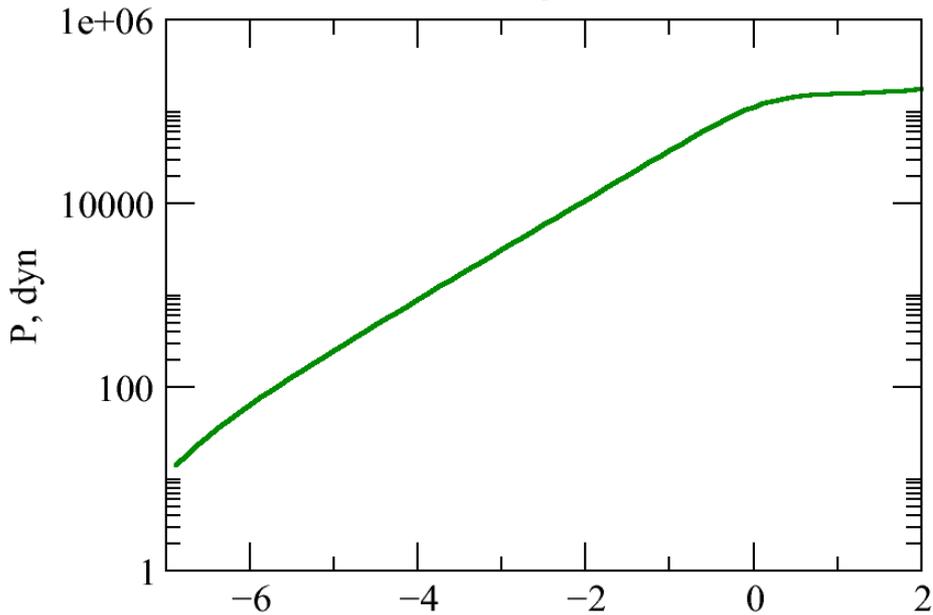
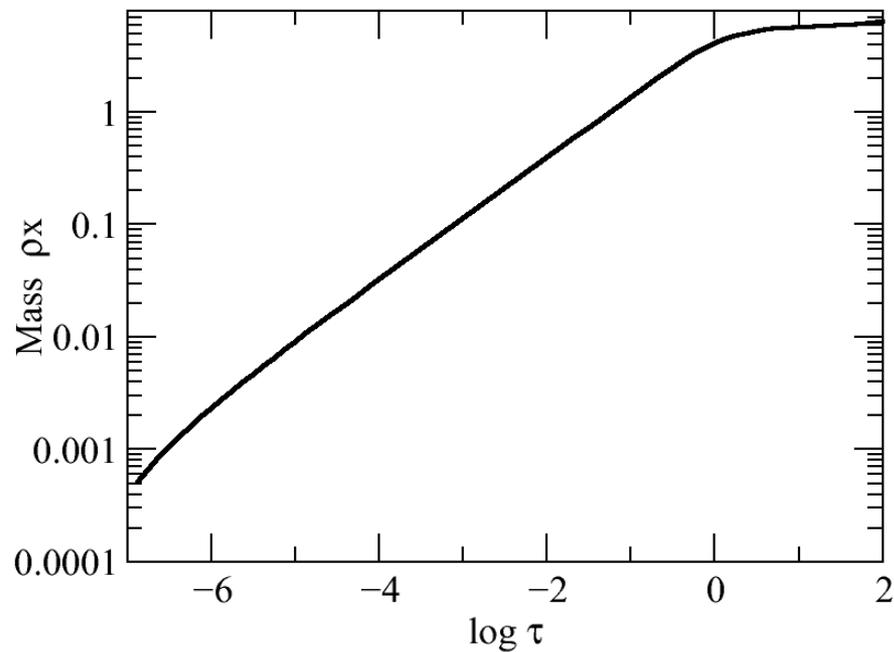
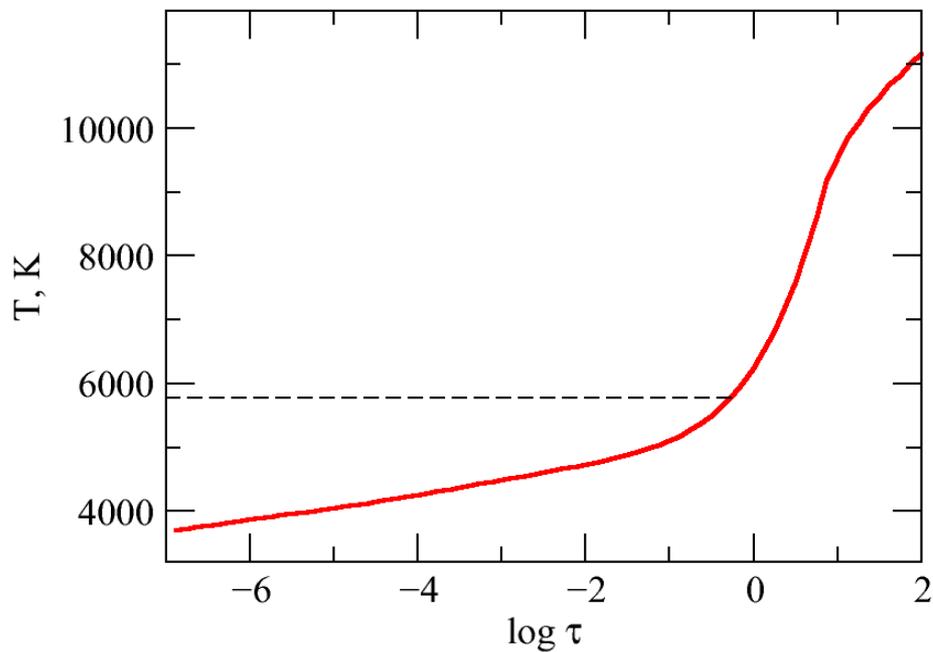
8.40988574E-04 3743.3 2.316E+01 4.449E+09 3.531E-04 8.448E-02 2.000E+05

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:
Password:

★ [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 $[Fe/H]=+1.00$.
"alpha enhanced" models with $[Fe/H]=+0.75$.
"alpha poor" models with $[Fe/H]=-2.50$.
"alpha negative" models with $[Fe/H]=+1.00$.

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)

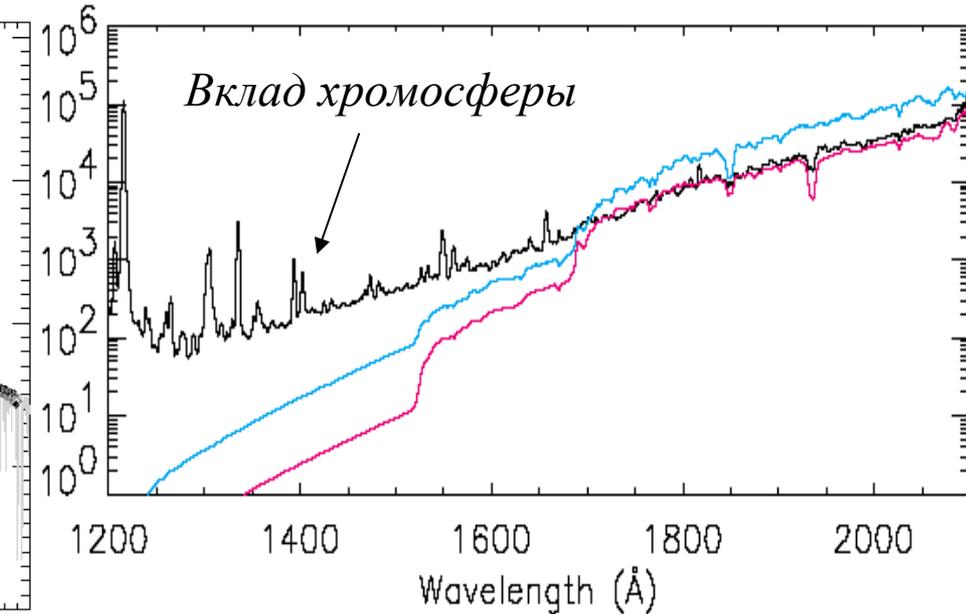
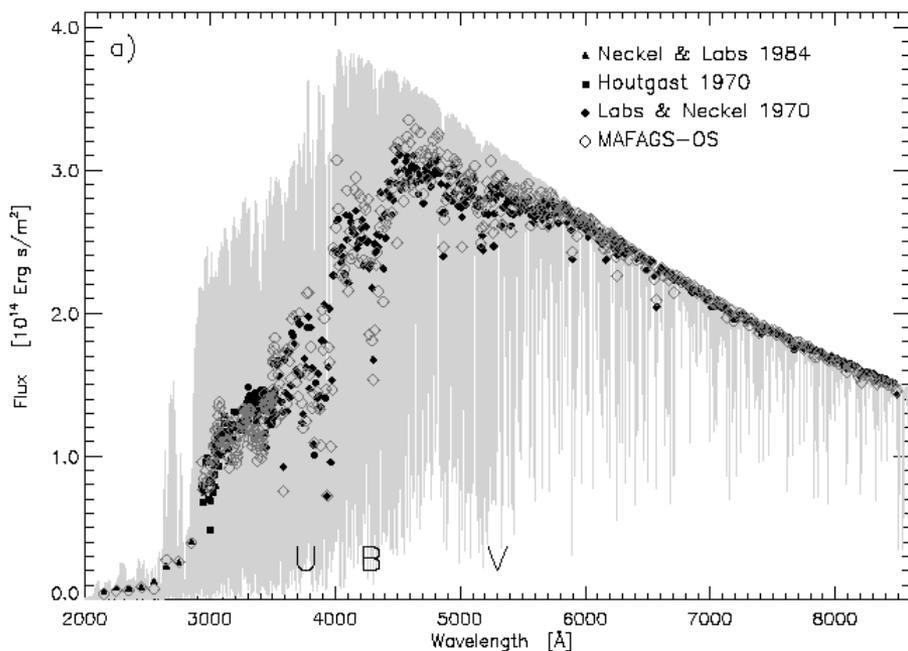
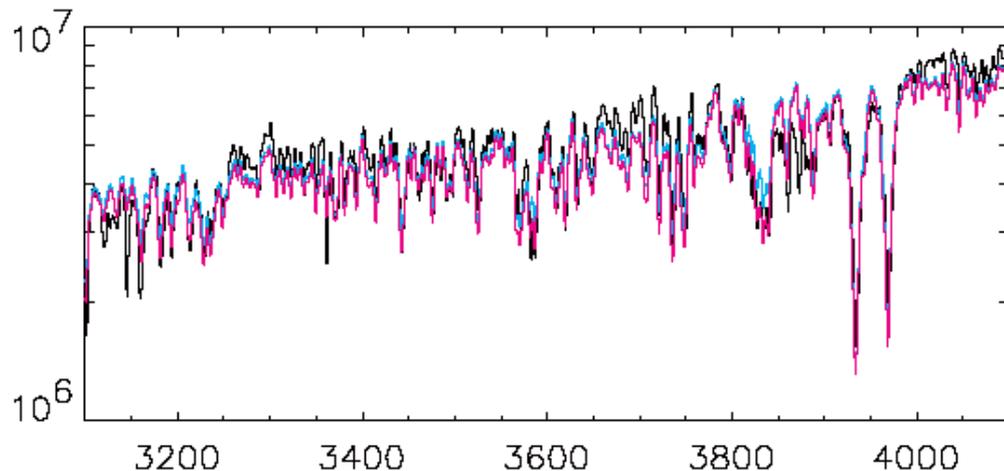
PHOENIX (Hauschildt et al., 1996).

(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

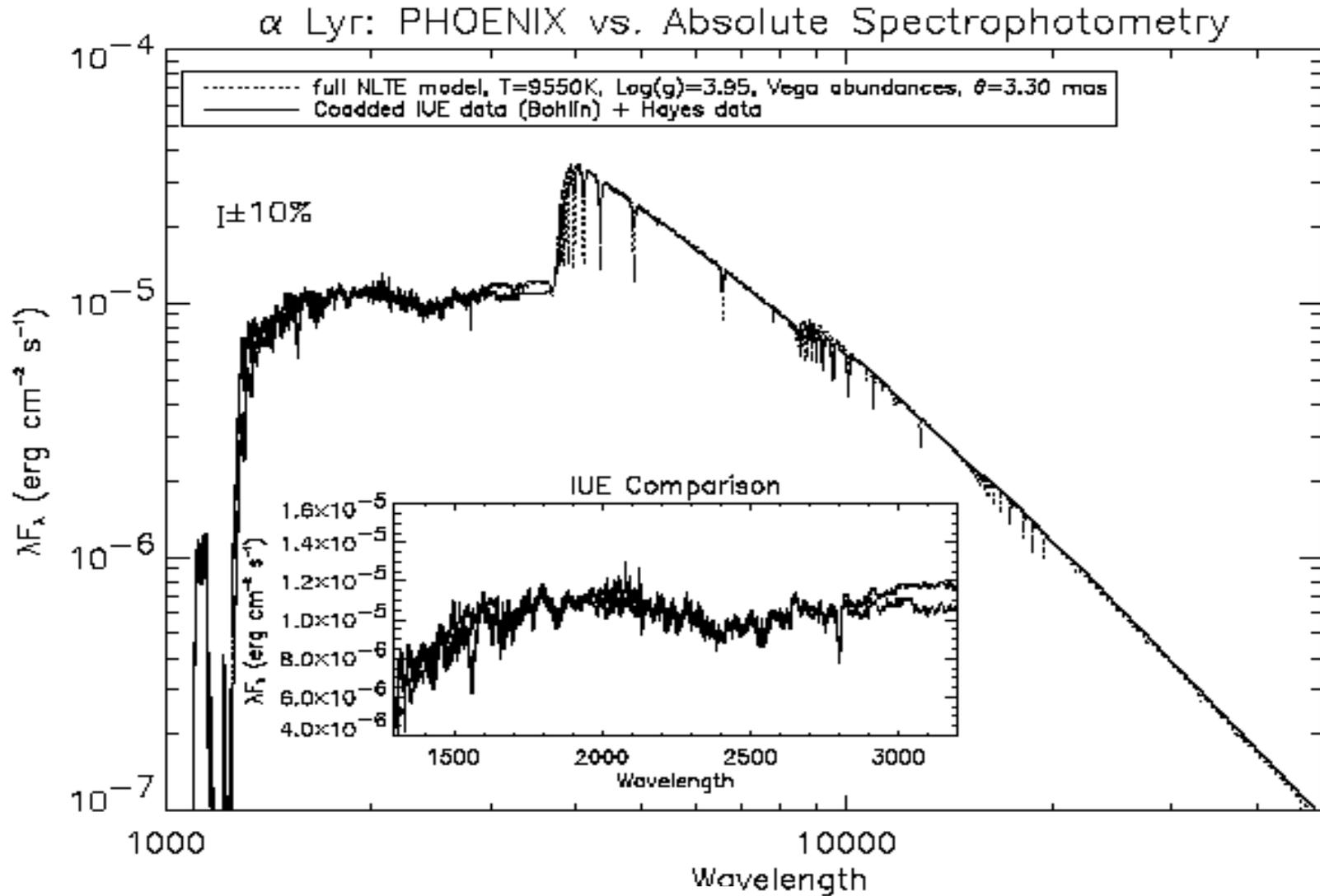
1. Солнечный спектр



MAFAGS-OS
(Grupp, 2004)

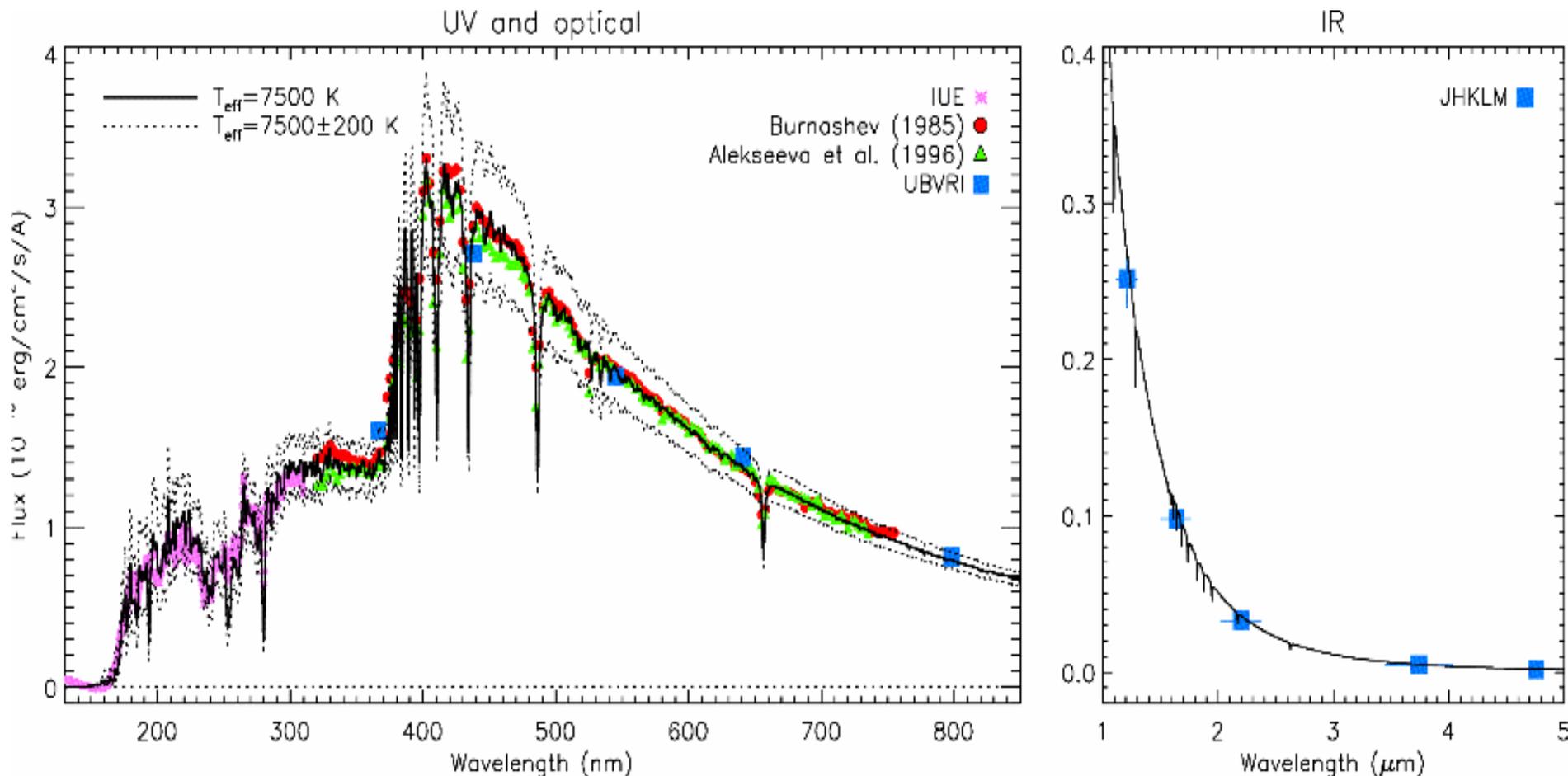
— не-ЛТР
— ЛТР
(Allende Prieto et al. 2003)

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



Hauschildt et al. 1999 (PHOENIX)

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

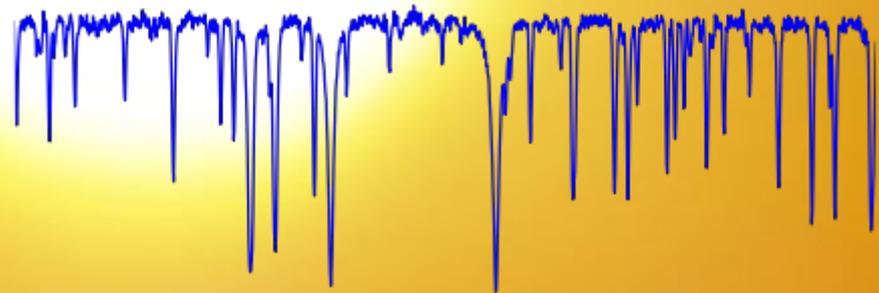


Вывод

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

Формирование спектральных линий в звездных атмосферах

Часть I: Профиль спектральной линии



Звездная атмосфера (Повторение)

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

Гидростатическое
равновесие

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

Уравнение переноса

$$S_\nu = \frac{\eta_\nu}{\chi_\nu} = \frac{\kappa_\nu B_\nu(T_{eff}) + \sigma_\nu J_\nu}{\kappa_\nu + \sigma_\nu}$$

Функция источника

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

Выходящий поток

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

Средняя
интенсивность

Звездная атмосфера (Повторение)

Модель

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

Модель ATLAS9 (R.L.Kurucz)

$$\log \tau = -6.875 \dots 2$$

$$\tau = 1.3 \times 10^{-7} \dots 100$$

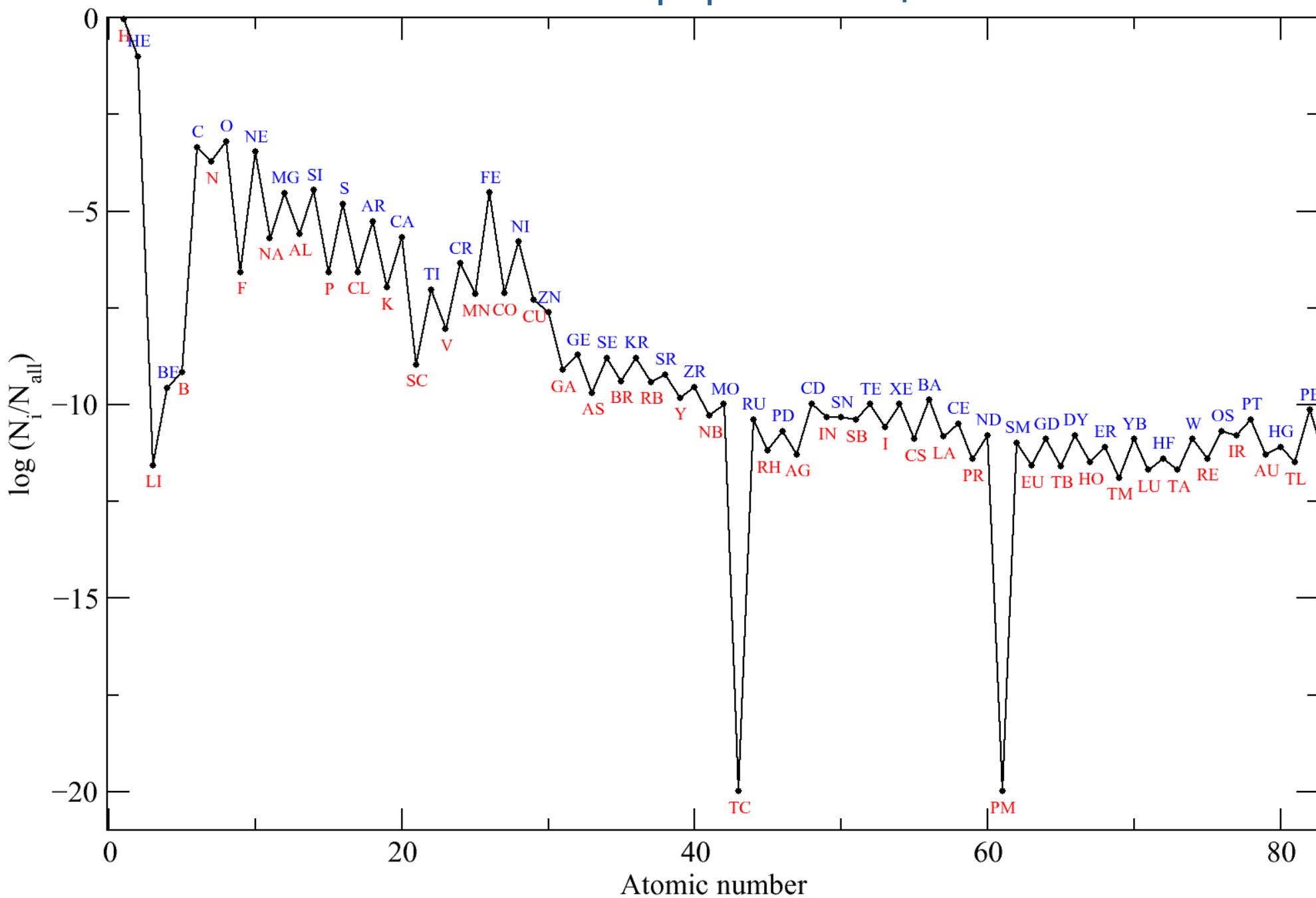
Проходит доля света:

$$I/I_0 = e^{-\tau} = 0.99999987 \dots 3.72 \times 10^{-44}$$

Параметры модели:

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

Содержание химических элементов в атмосфере Солнца



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

Спектр потока



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

$lg\tau_0$ Удобная шкала высот звездной атмосферы – однозначная функция геометрической глубины

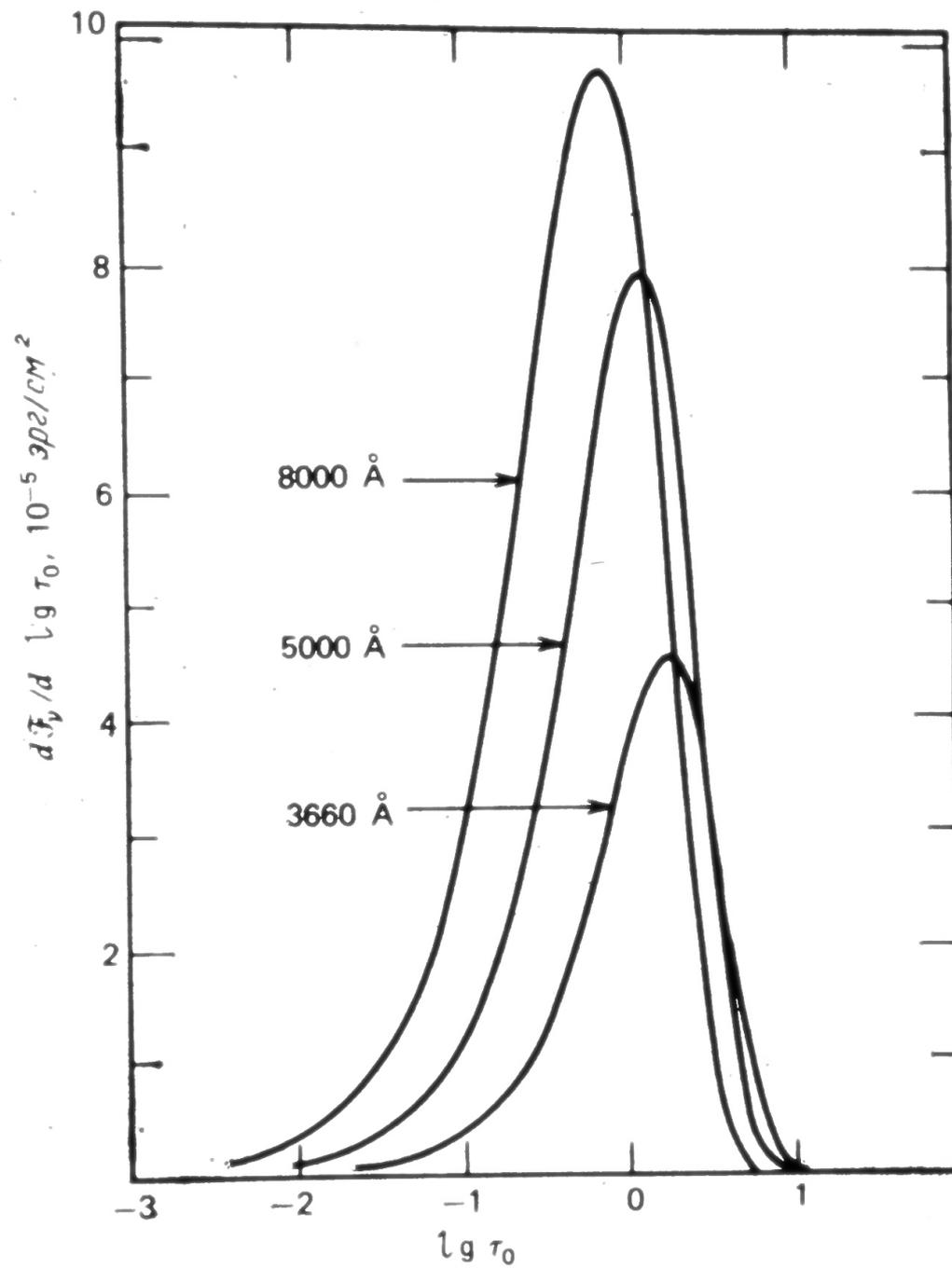
$$F_{\nu} = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} S_{\nu}(\tau_0) E_2(\tau_0) \frac{\kappa_{\nu}(\tau_0)}{\kappa_0} \frac{1}{lge} dl g \tau_0$$

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

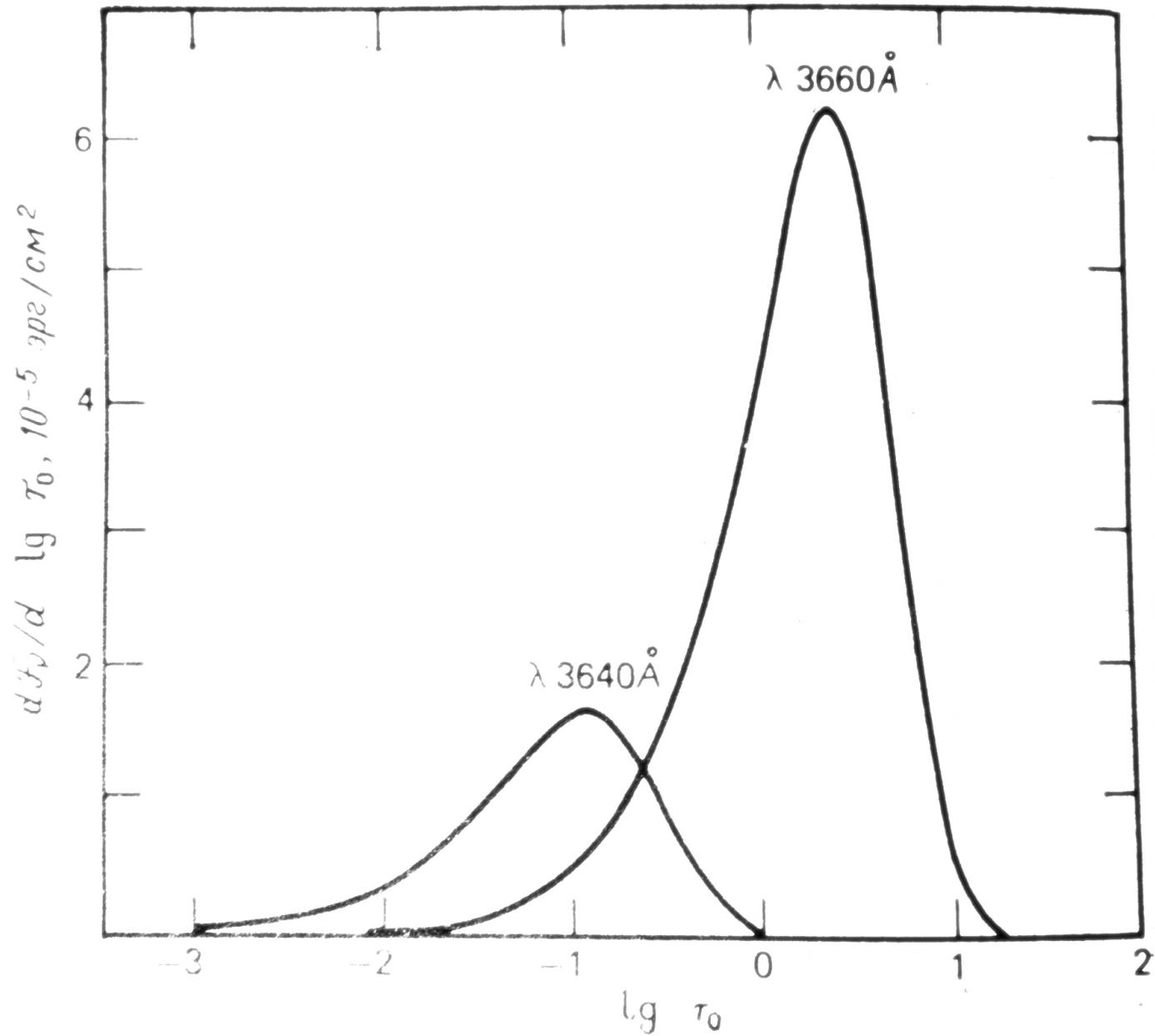
Функция вклада

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

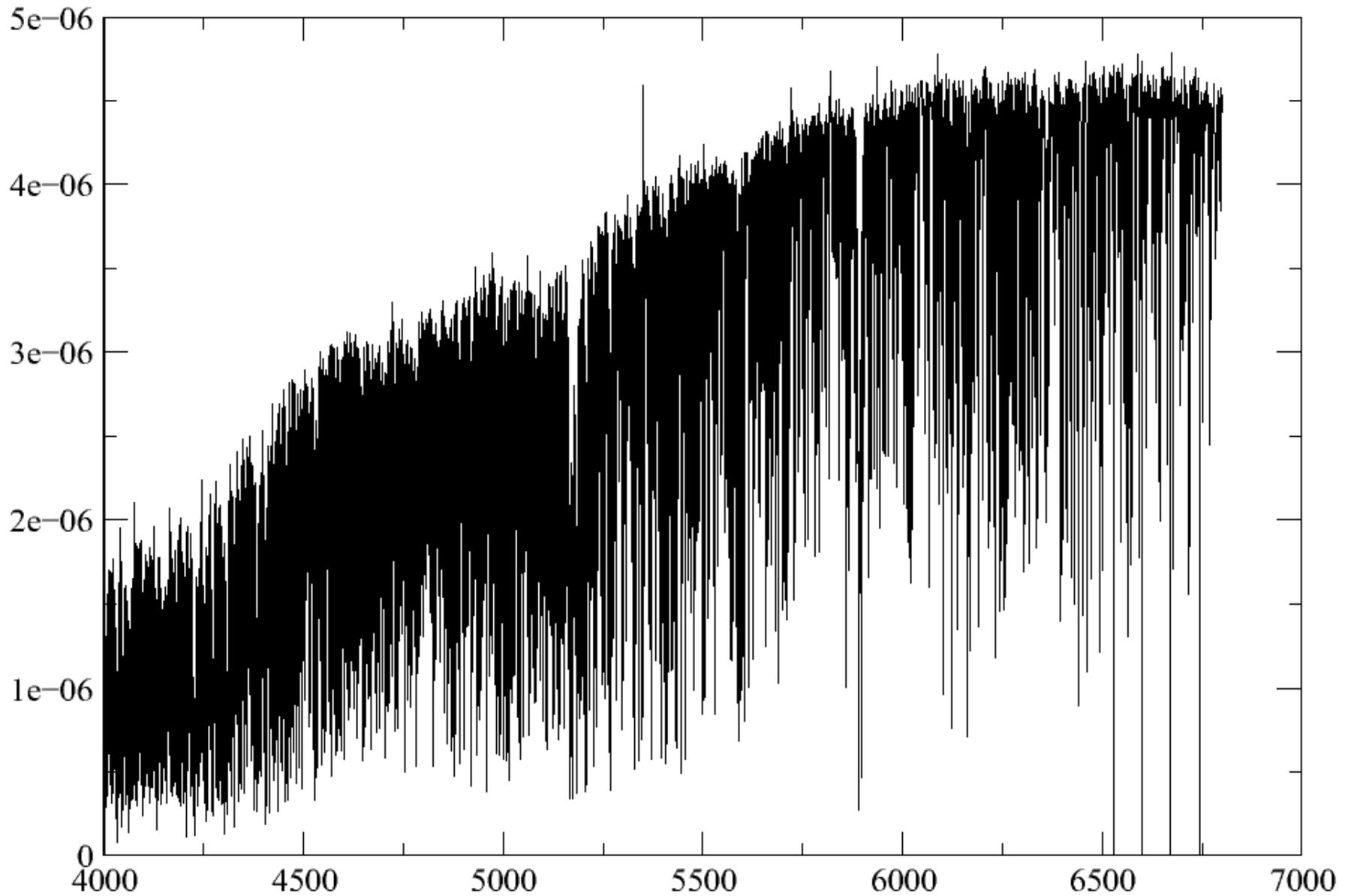
Функции вклада в солнечной атмосфере



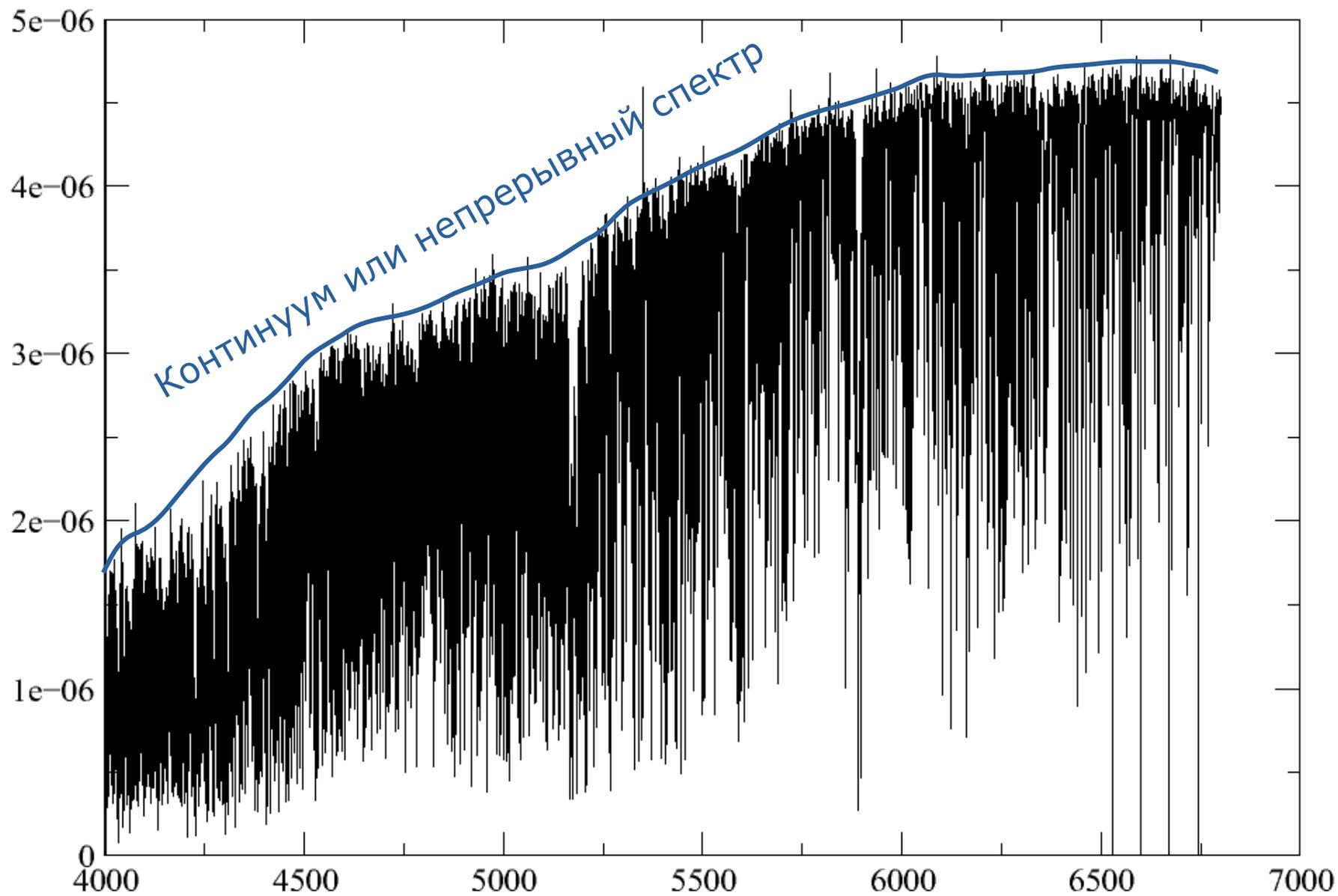
Функции вклада в по обе стороны
бальмеровского скачка



Что мы обычно получаем из наблюдений



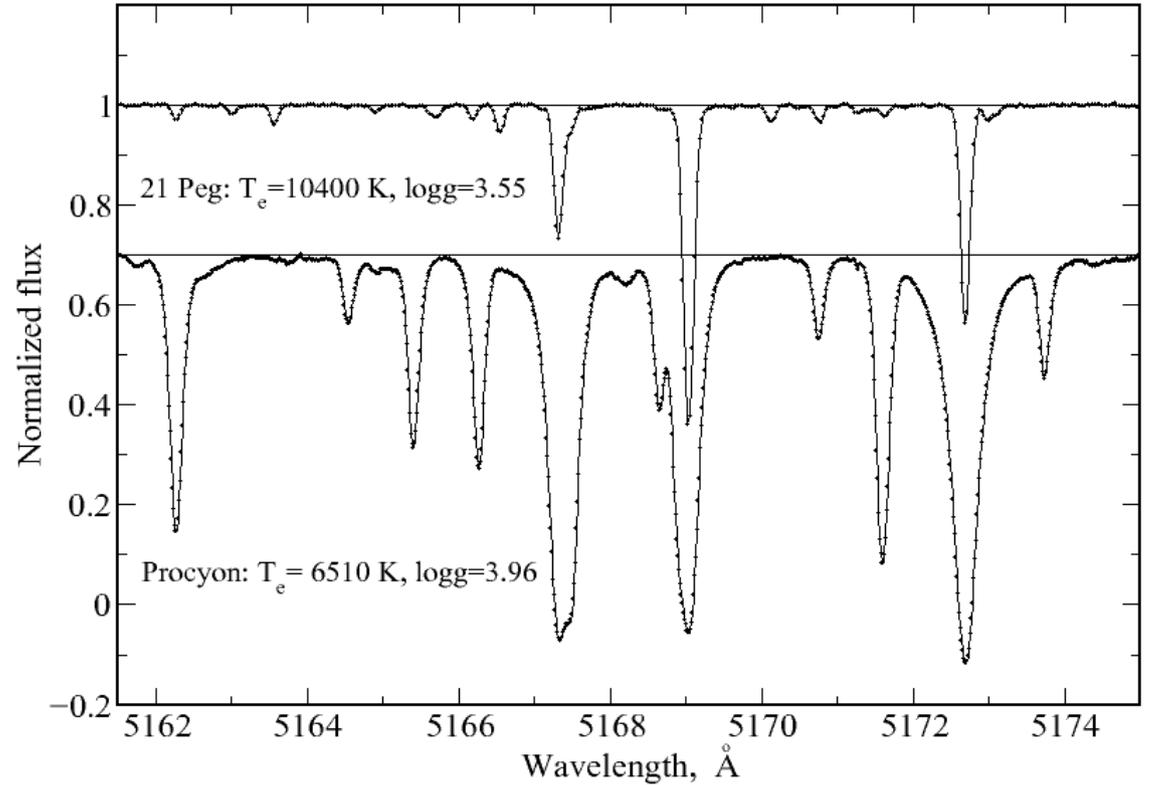
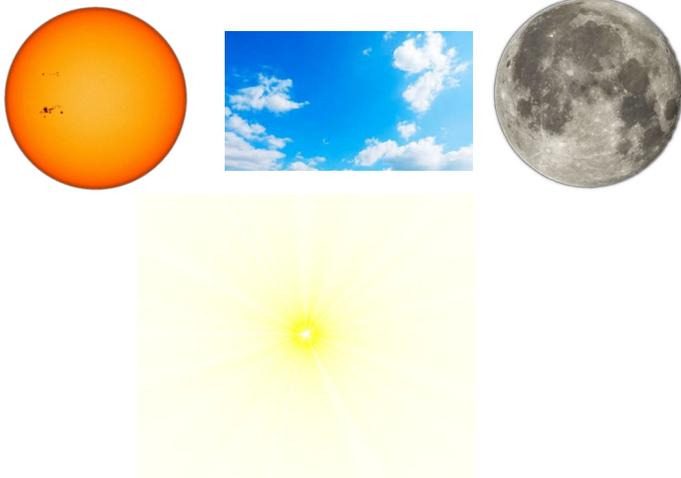
Что мы обычно получаем из наблюдений



Что мы обычно получаем из наблюдений

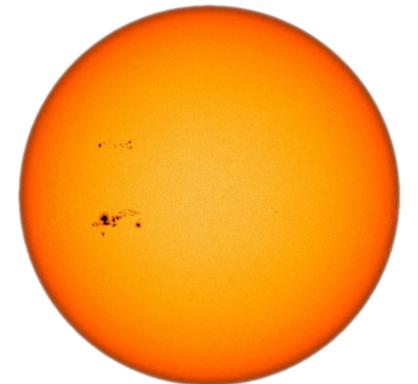
Спектр (профили линий) в относительных потоках

$$r_{\lambda} = F_{\lambda} / F_c$$

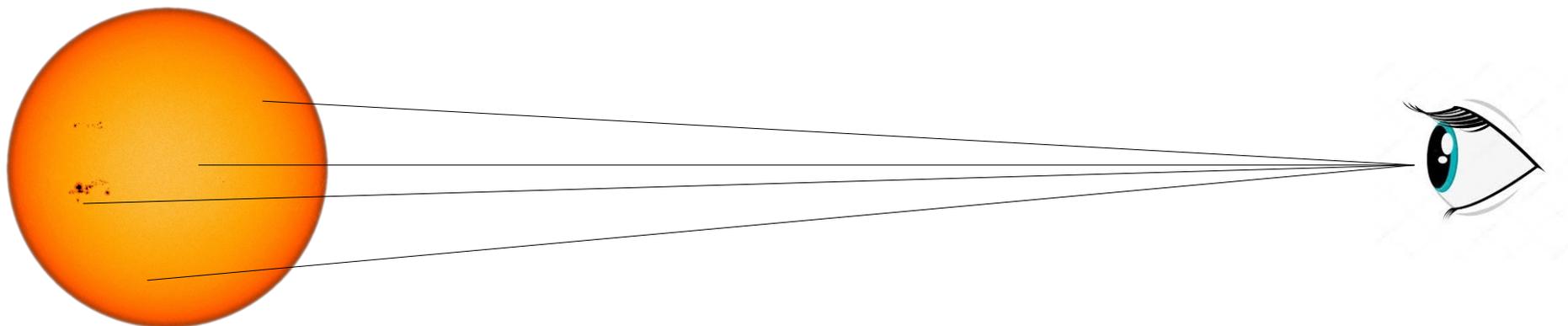


Спектр (профили линий) в относительных интенсивностях (только Солнце)

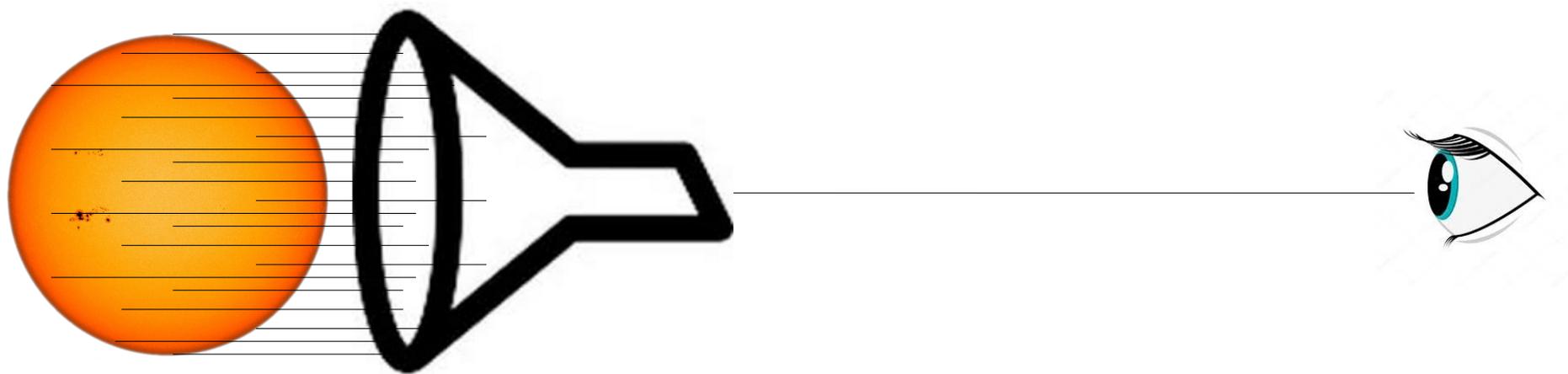
$$r_{\lambda}(\mu) = I_{\lambda}(\mu) / I_c(\mu)$$



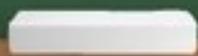
Интенсивность



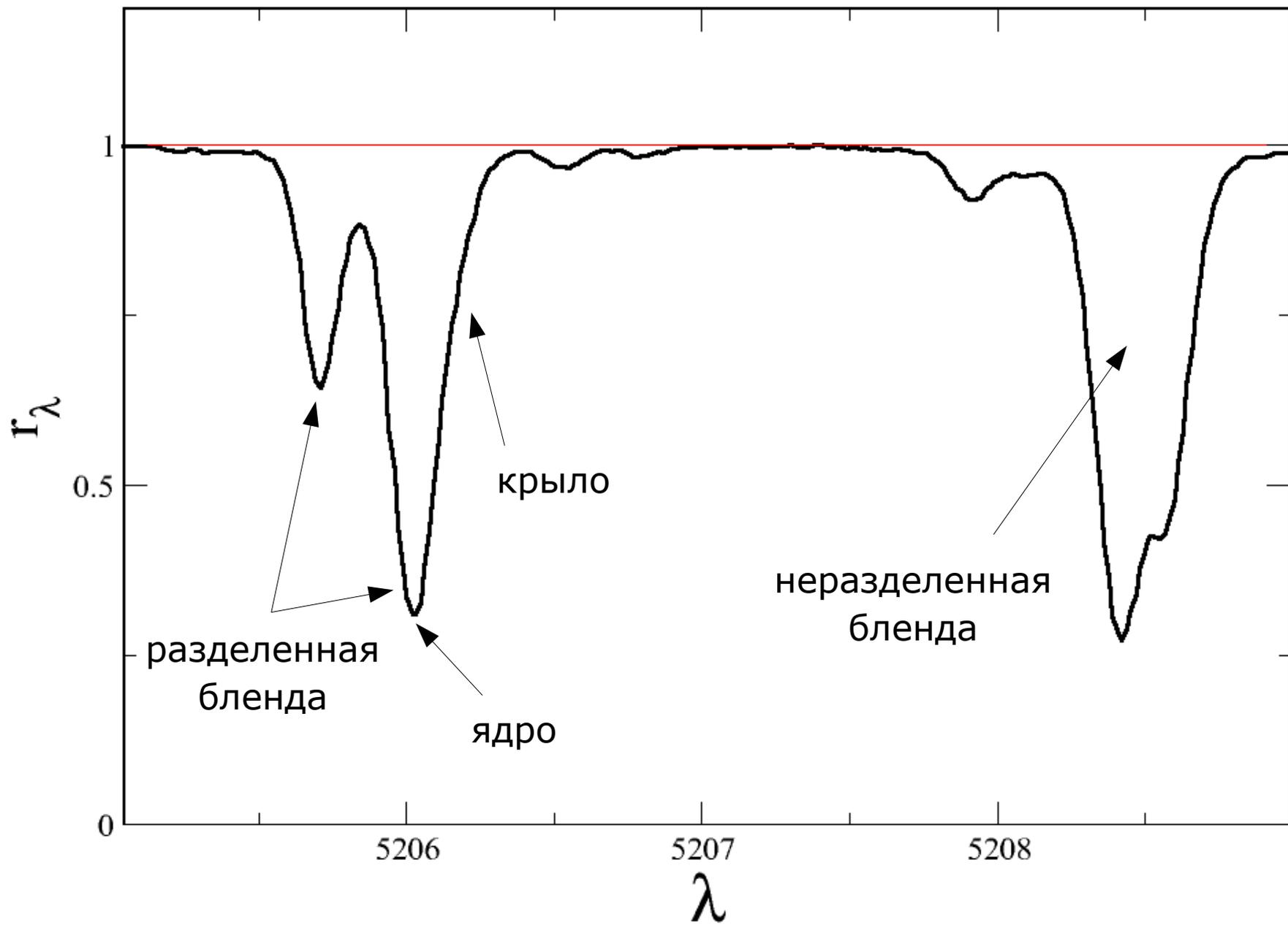
Поток



Основные понятия



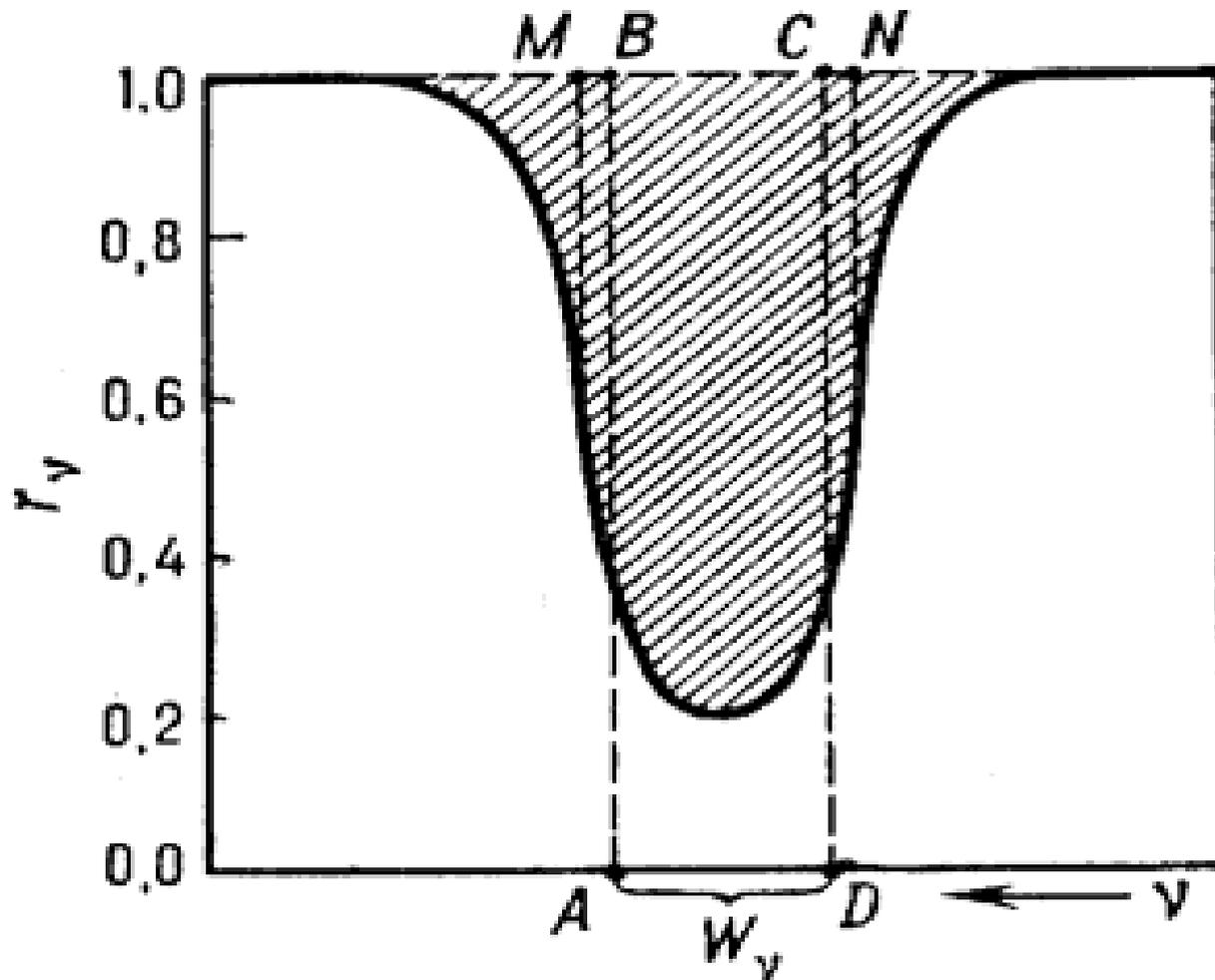
Спектральная линия



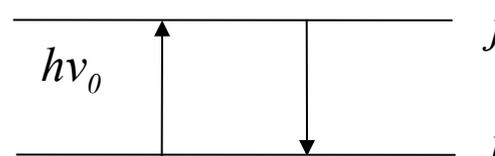
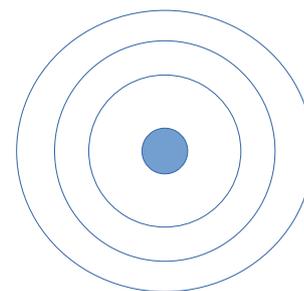
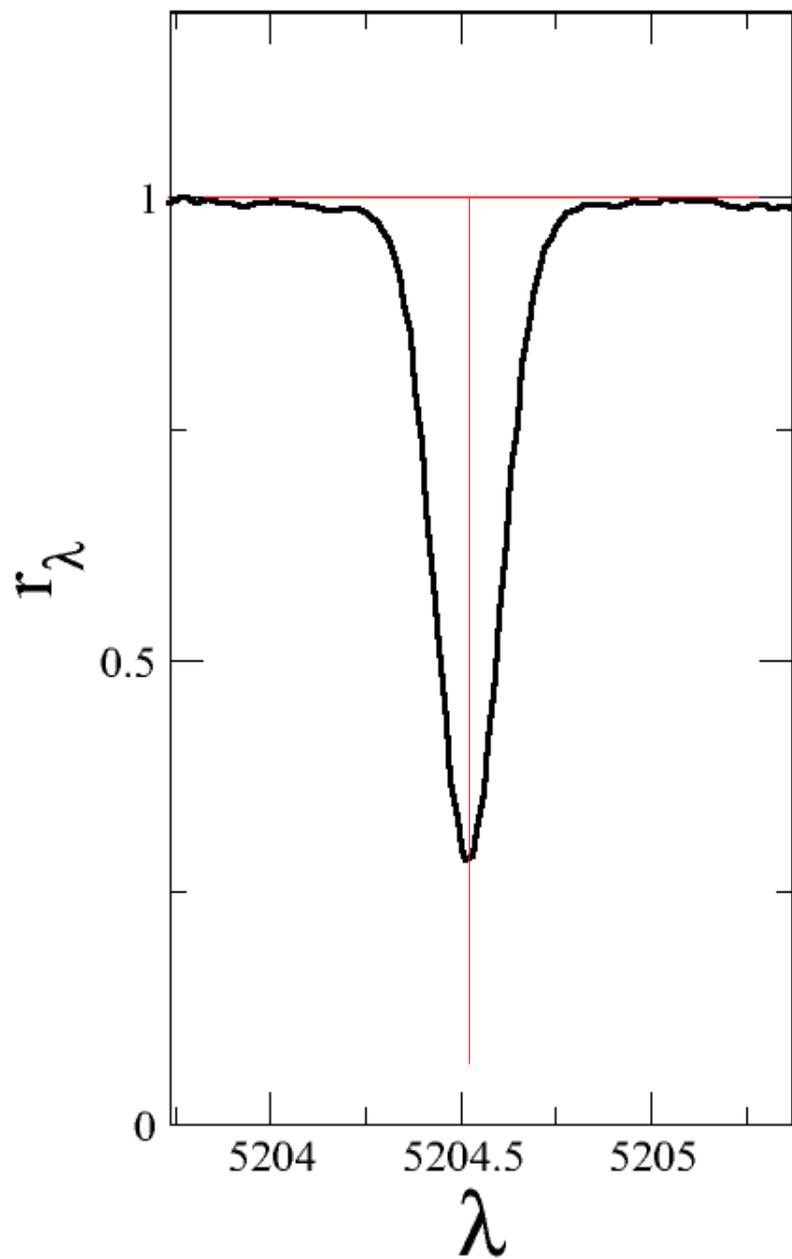
Эквивалентная ширина

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

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



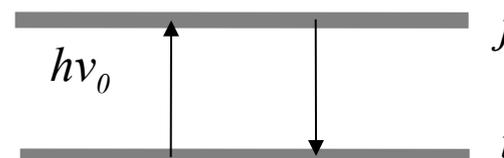
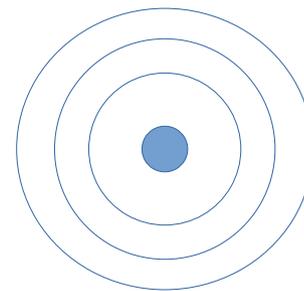
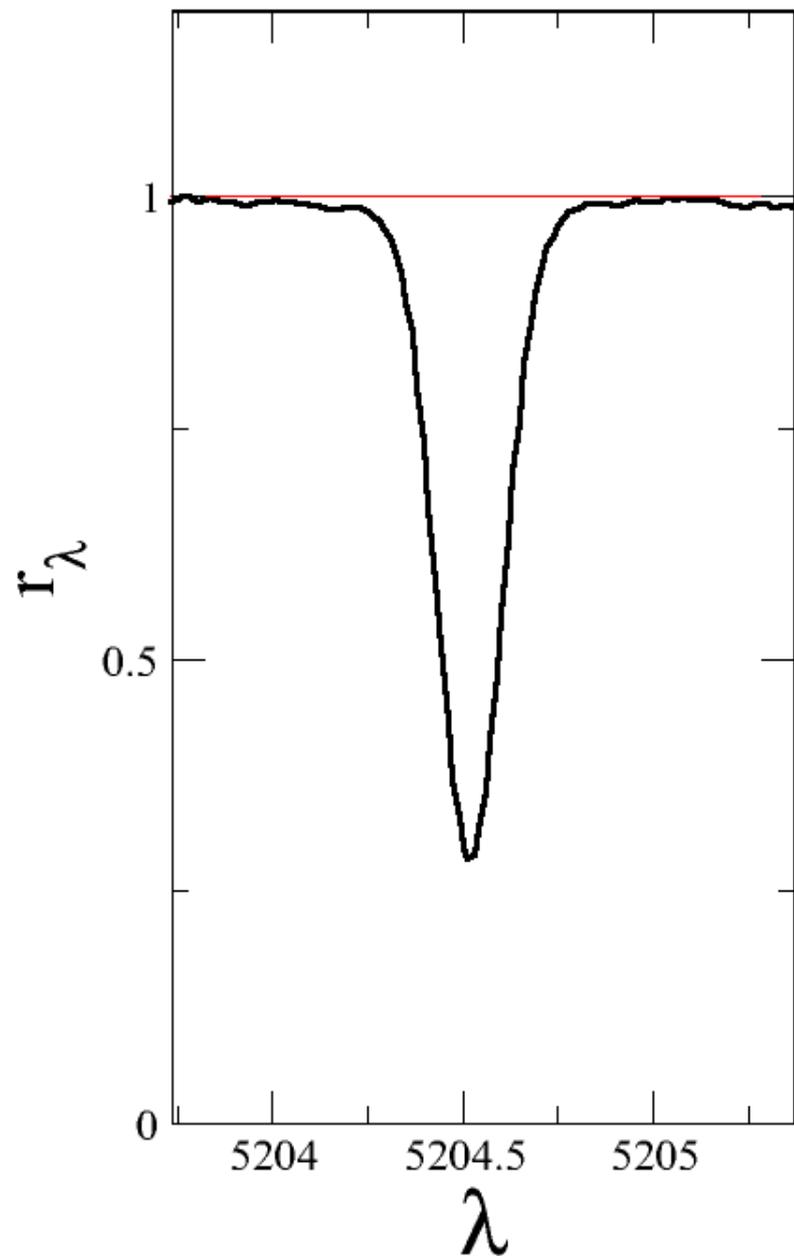
Спектральная линия идеал



$$h\nu_0 = E_i - E_j$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Спектральная линия



$$h\nu = E'_i - E'_j$$

$$E' = E_p$$

$$\nu = \nu_0 + p(\Delta\nu)$$

Ширина
профиля

Функция
вероятности

Коэффициент поглощения в линии

Гармонический осциллятор

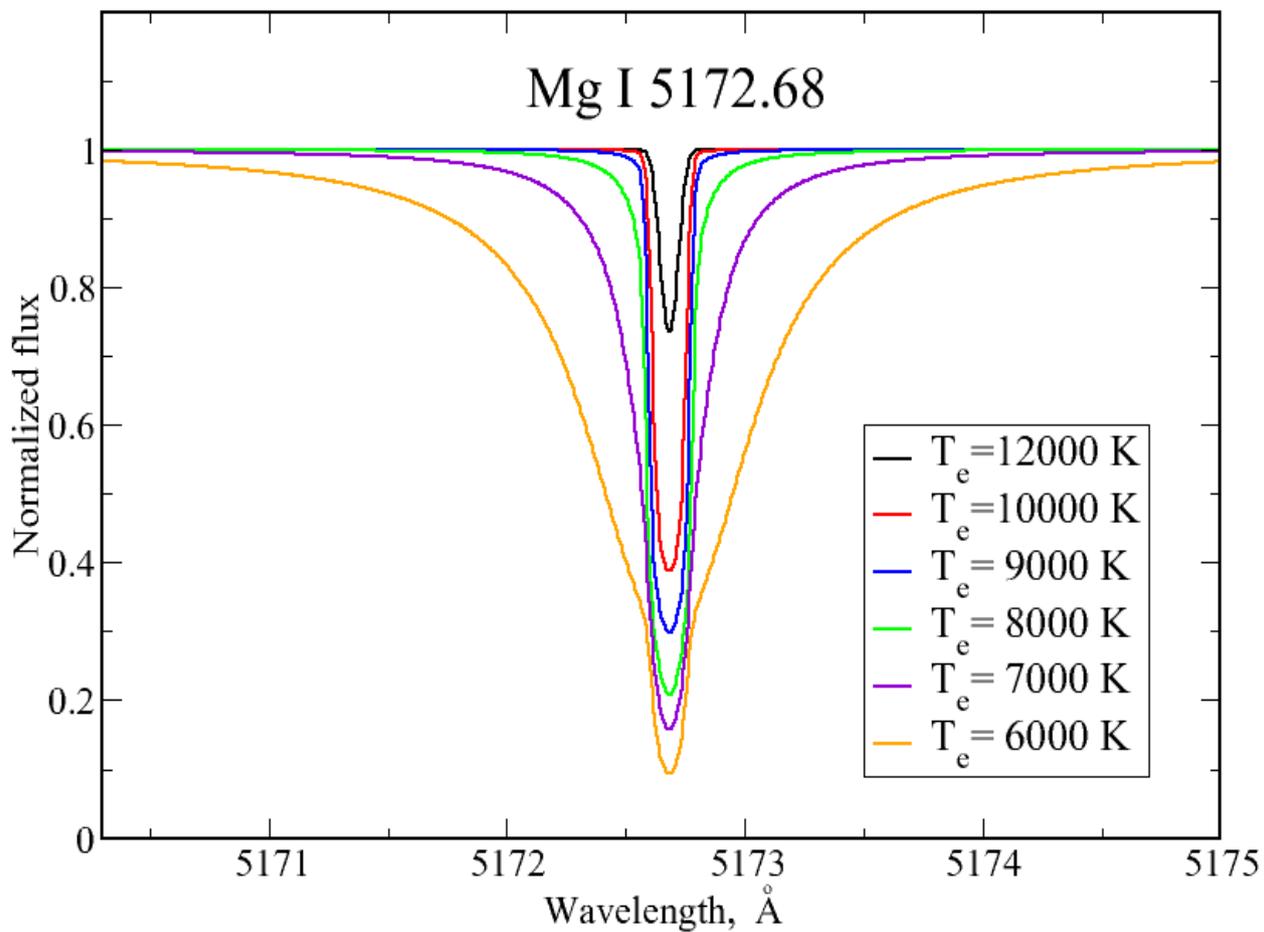
Для гармонического затухающего осциллятора:

$$E = E_0 e^{-\gamma_0 t} \quad \gamma_0 = \frac{8\pi^2 e^2 \nu_0^2}{3m_e c^3}$$

$$\sigma_\nu = \frac{\pi e^2}{m_e c} \frac{\gamma_0}{4\pi^2} \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\gamma_0}{4\pi}\right)^2} \quad \text{профиль}$$

$$\sigma_{tot} = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_\nu d\nu = \frac{\pi e^2}{m_e c}$$

Это дано на один осциллятор.



$$\kappa_{\nu}^l = n_i a_{ij}^{tot} \phi_{\nu}$$

n_i - населенность уровня

a_{ij}^{tot} - сечение поглощения по
профилю линии

$$a_{ij}^{tot} = \int_0^{\infty} a_{ij} d\nu$$

ϕ_{ν} - профиль поглощения

$$\int_0^{\infty} \phi_{\nu} d\nu = 1$$

Сила осциллятора

Для перехода от числа осцилляторов к числу атомов вводится *сила осциллятора* f_{ij}

$$a_{ij}^{tot} = \frac{\pi e^2}{mc} f_{ij} \quad \text{Вероятность поглощения одного фотона}$$

$$\kappa_{\nu}^l = n_i \frac{\pi e^2}{mc} f_{ij} \phi_{\nu}$$

B_{ij} – Эйнштейновский коэффициент вероятности вынужденного поглощения

$$a_{ij}^{tot} = B_{ij} h\nu$$

$$f = \frac{mc}{\pi e^2} B_{ij} h\nu$$

Связь между атомными параметрами перехода:

$$\frac{g_i B_{ij}}{g_j B_{ji}} = 1$$

$$\frac{A_{ji}}{B_{ji}} = \frac{2h\nu_{ij}^3}{c^2}$$

$$f_{ij} = \frac{mc^3}{8\pi^2 e^2} \frac{A_{ji}}{\nu_{ij}^2} \frac{g_j}{g_i} = 1.5 \times 10^{-16} A_{ji} \frac{\lambda^2 g_j}{g_i}$$

- Коэффициент излучения, профиль излучения ψ_ν

$$\eta_\nu^{spont} = n_j A_{ji} \psi_\nu h\nu_{ij} / 4\pi$$

Излучение при спонтанных переходах – изотропное,

$$\eta_\nu^{stim} = n_j B_{ji} I_\nu \psi_\nu h\nu_{ij} / 4\pi$$

при вынужденных имеет угловое распределение I_ν

- отрицательное поглощение

- Коэффициент поглощения в линии

$$\kappa_\nu^l = n_i f_{ij} \frac{\pi e^2}{mc} \phi_\nu \left(1 - \frac{g_i n_j \psi_\nu}{g_j n_i \phi_\nu} \right)$$

Поправка за отрицательное поглощение (вынужденное излучение)

- **Функция источников в линии**

$$S_{\nu}^l = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\frac{n_i g_j \phi_{\nu}}{n_j g_i \psi_{\nu}} - 1}$$

Полное перераспределение по профилю линии –
основная гипотеза при моделировании формирования линий

$$\phi_{\nu} = \psi_{\nu}$$

$$S_{\nu}^l = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\frac{n_i g_j}{n_j g_i} - 1}$$

Функция источников в линии –
постоянна по профилю!

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

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

где $u_n(T) = \sum_j g_j e^{-\frac{E_j}{kT}}$ - сумма по состояниям,

N_n – число атомов в состоянии ионизации n , N_e – электронная плотность

$N = \sum N_i$ Концентрация элемента (Fe/H = N(Fe)/N(H))

E_i – энергия возбуждения уровня,

χ_n – потенциал ионизации,

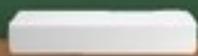
$g_i = 2J_i + 1$ – статистический вес уровня; J_i – полный угловой момент

$g_i f_{ij} = 1.499 \cdot 10^{-16} g_j A_{ji} \lambda^2$

A_{ji} - коэффициент Эйнштейна (вероятность спонтанного перехода) в s^{-1}

λ - длина волны в Å

*Профиль коэффициента
поглощения в линии*



Естественное затухание

$$\phi_\nu = \frac{\gamma/4\pi}{(\nu - \nu_0)^2 + (\gamma/4\pi)^2}$$

Профиль Лоренца

$$\phi_\lambda = \frac{\lambda^2}{c} \frac{\gamma\lambda^2/4\pi c}{(\lambda - \lambda_0)^2 + (\gamma\lambda^2/4\pi c)^2}$$

Постоянная естественного затухания:

$$\gamma = \sum_{j < i} A_{ij}$$

$$\gamma = \frac{2e^2(2\pi\nu)^2}{3mc^3} = \frac{0.22}{\lambda^2}$$

Ширина профиля очень мала $\sim 10^{-4}$ А

Доплеровское уширение

При максвелловском распределении атомов по скоростям:

Профиль Гаусса

$$\phi_\nu = \frac{1}{\Delta\nu_D \sqrt{\pi}} e^{-\frac{(\nu - \nu_0)^2}{\Delta\nu_D}}$$

$$\Delta\nu_D = \nu_0 \frac{v}{c} - \text{доплеровская ширина}$$

Полная скорость

$$v^2 = v_{ther}^2 + \xi_t^2 = \frac{2kT}{m} + \xi_t^2$$

Тепловая скорость

эмпирический параметр,
микротурбулентная скорость,
от 0.5 до 15 km/s

Уширение эффектами давления

$$\Delta\nu = \frac{C_n}{r^n}$$

n =	name	interaction of
2	linear Stark effect	hydrogen-like ions + p, e
3	resonance broadening	neutral atoms with each other, H+H ions + e, p metals + H
4	quadratic Stark effect	
6	van der Waals broadening	

описываются в ударном приближении → профиль **лоренцевский**

$$\varphi_\nu = \frac{\gamma_n / 4\pi^2}{(\nu_0 - \nu)^2 + (\gamma_n / 4\pi)^2}$$

$$\gamma_n = 2/\tau;$$

$$\tau = 1/\pi\rho_0^2 v N$$

Среднее время между
столкновениями

$$\gamma_n = 2\pi Nv \left(2\pi C_n \Psi_n / v\eta_0 \right)^{2/(n-1)}$$

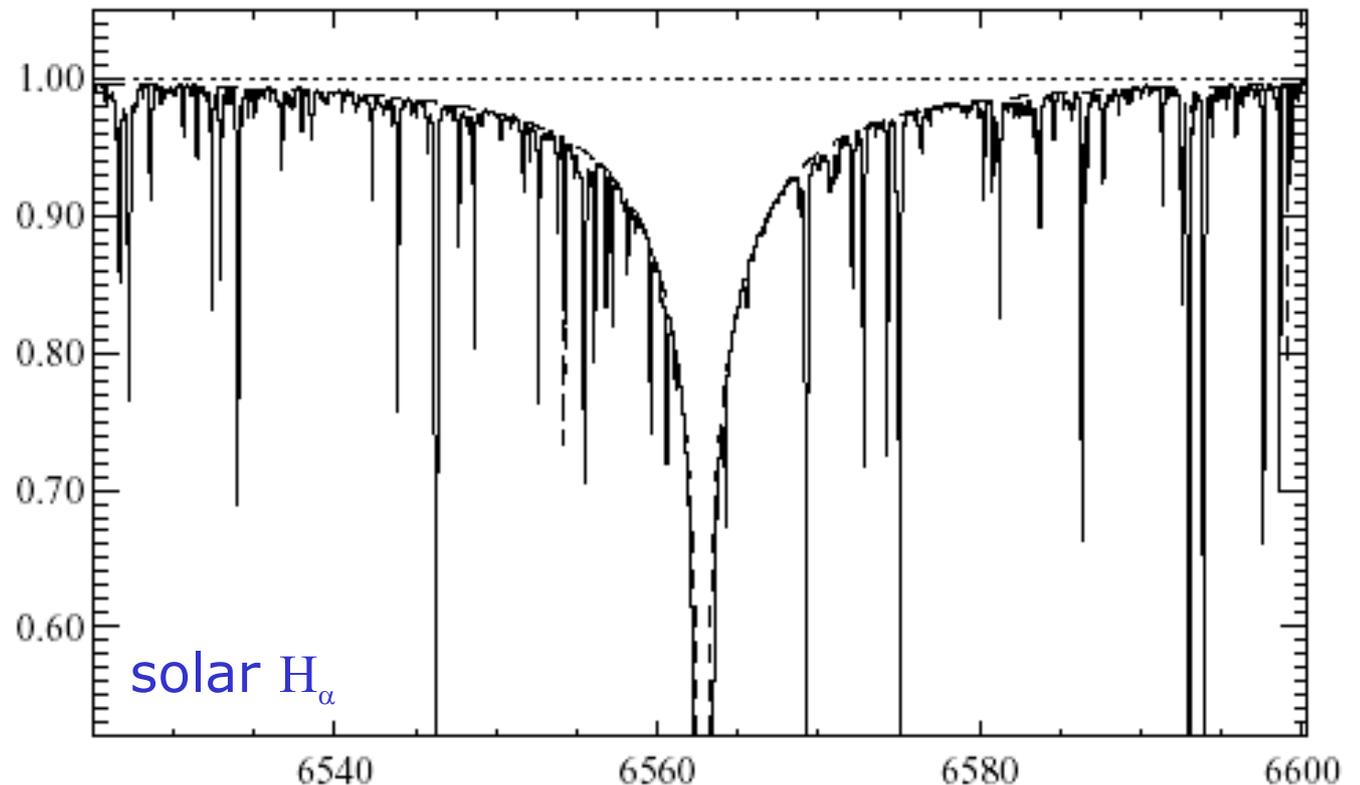
Определение констант взаимодействия C_n - ?

Линейный эффект Штарка

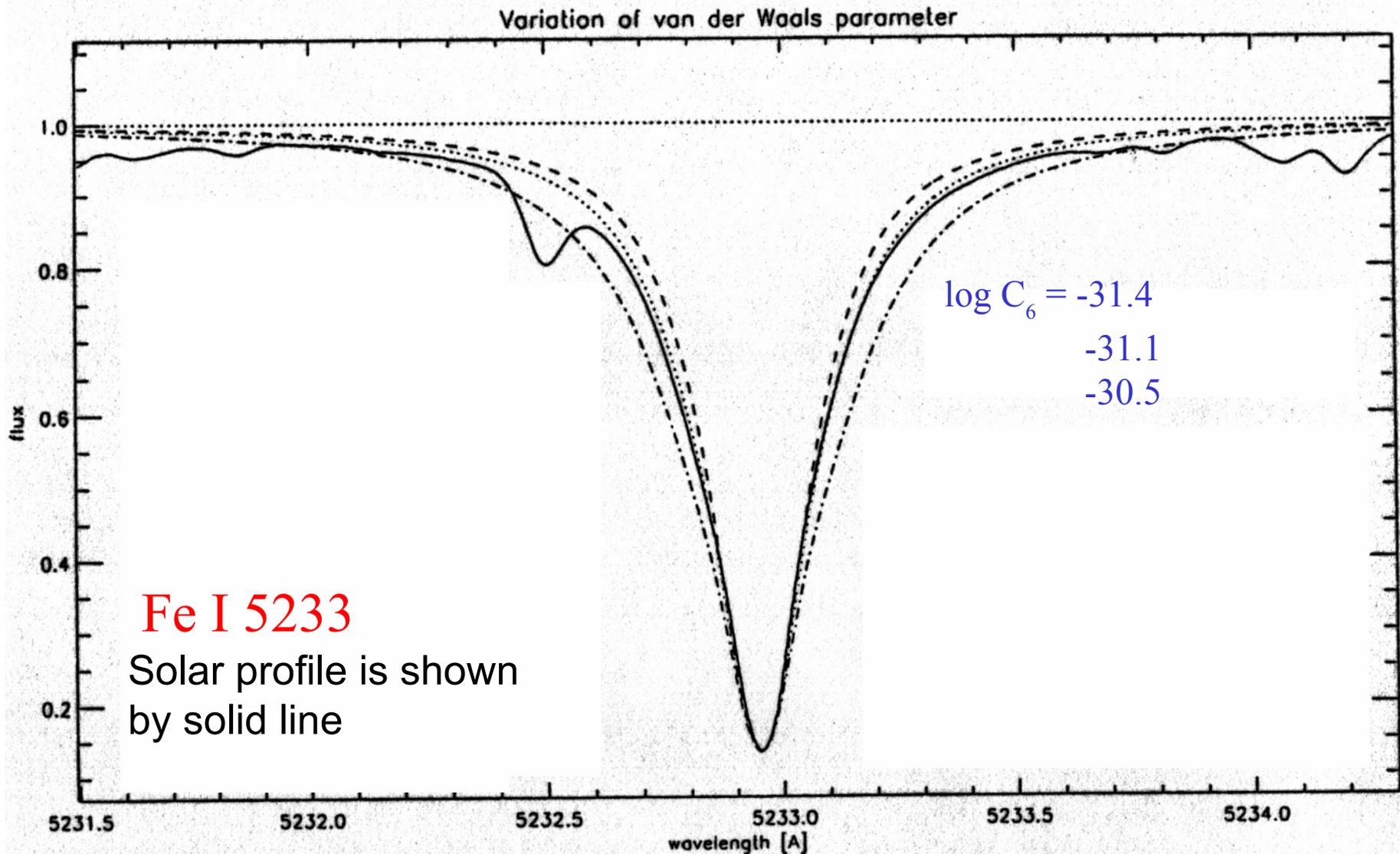
$\text{H I} + p$ квазистатическое приближение;
 $\text{H I} + e$ ударное приближение - в ядре и
квазистатическое - в крыльях

Vidal, Cooper & Smith (1973): таблицы штарковских профилей (VCS).

Сравнение
наблюдений
(сплошная линия)
и теории VCS
(штриховая линия)



Эффект уширения ван-дер-Ваальса на линии в солнечном спектре



В отличие от γ_R , γ_4 и γ_6 не являются константами, они зависят от температуры и давления, т.е. от оптической глубины в атмосфере звезды.

Лабораторных измерений γ_4 и γ_6 очень мало.

Штарковские и VdW константы обычно берут из квантово-механических расчетов (например, расчеты Kurucz' для γ_4 и γ_6 или *Barklem et al. 2000, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 142, 467* для γ_6) или из полуэмпирических (*Griem, 1968. Phys. Rev. 165, 258*) или полу-классических (*Sahal-Bréchet, 1969, A&A 1, 91; A&A 2, 322*) расчетов, как в случае γ_4 .

Очень часто на практике γ_4 и γ_6 представлены в виде:

$$\gamma_4 = \gamma_0^{St} (T/10000)^{1/6} \cdot N_e \quad \text{и} \quad \gamma_6 = \gamma_0^{VdW} (T/10000)^{0.3} \cdot (N_H + 0.42N_{He}), \text{ где}$$

γ_0^{St} и γ_0^{VdW} рассчитаны для $T=10000$ К и на одну возмущающую частицу. N_e , N_H , N_{He} - концентрации электронов, атомов нейтрального водорода, гелия.

Если расчетов или измерений нет, можно использовать аппроксимационные формулы *Griem'a*, модифицированные для ионов *Cowley (1971, Observatory 91, 139 - γ_4)*, или формулу *Ünsold'a (1955, p.333 - γ_6)*.

Полный профиль коэффициента поглощения

есть результат свертки Допплеровского и Лоренцевского профилей

$$a^{\text{tot}} = a(\text{естест.}) * a(\text{Штарк}) * a(\text{ван дер Ваальс}) * a(\text{тепл.+турб.})$$

←
←
←
Профиль Лоренца

Профиль
Доплера или
Гаусса

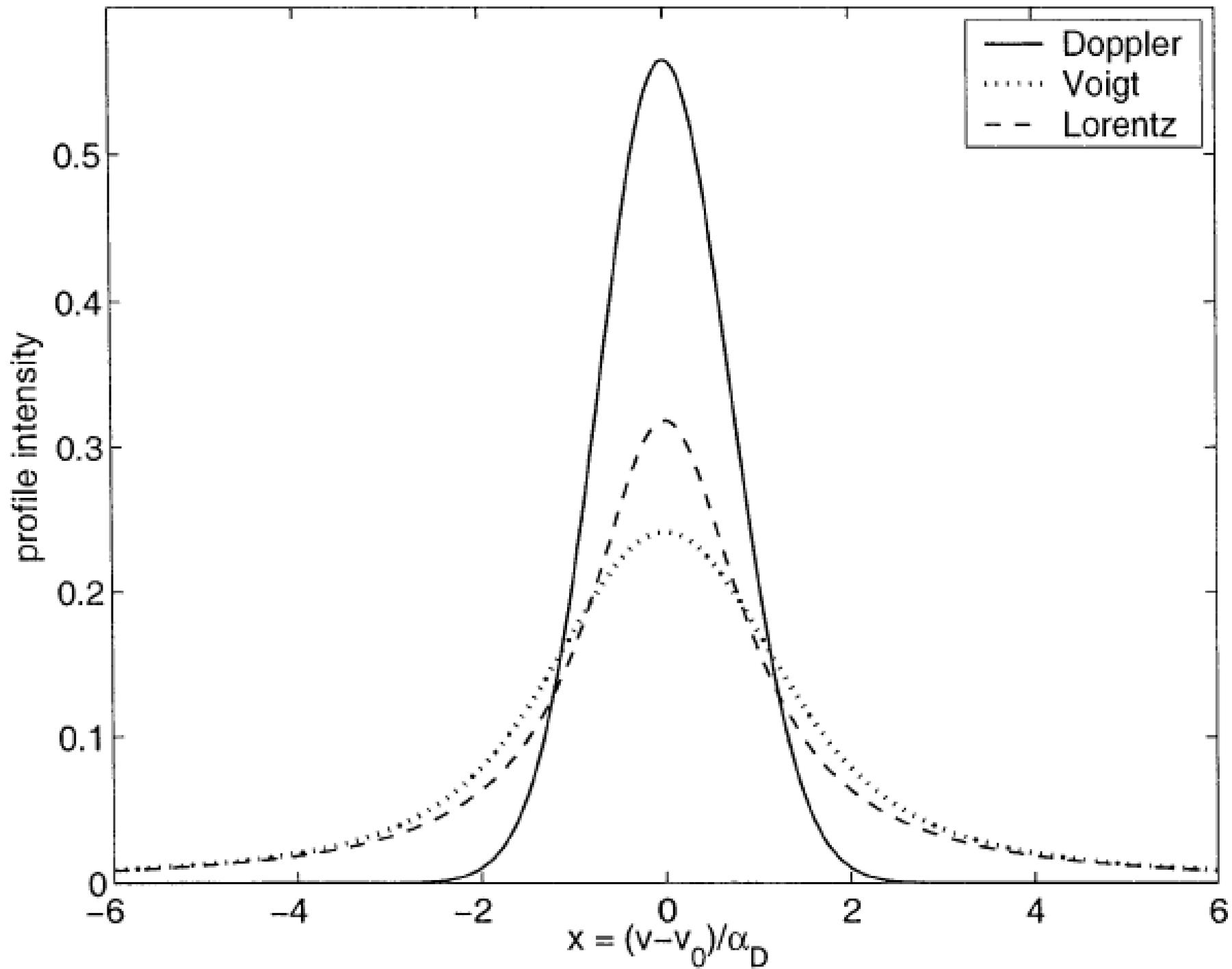
В общем случае для линий металлов профиль поглощения ϕ_ν выражается функцией Нierting $H(u, a)$:

$$\phi_\nu = \frac{H(u, a)}{\sqrt{\pi} \Delta\nu_D} = \frac{1}{\sqrt{\pi} \Delta\nu_D} \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-y^2}}{(u-y)^2 + a^2} dy$$

→ Voigt function $V(u, a)$

$$u = (\nu - \nu_0) / \Delta\nu_D$$
$$a = \gamma / (4\pi \Delta\nu_D)$$

$$\gamma = \gamma_R + \gamma_4 + \gamma_6$$

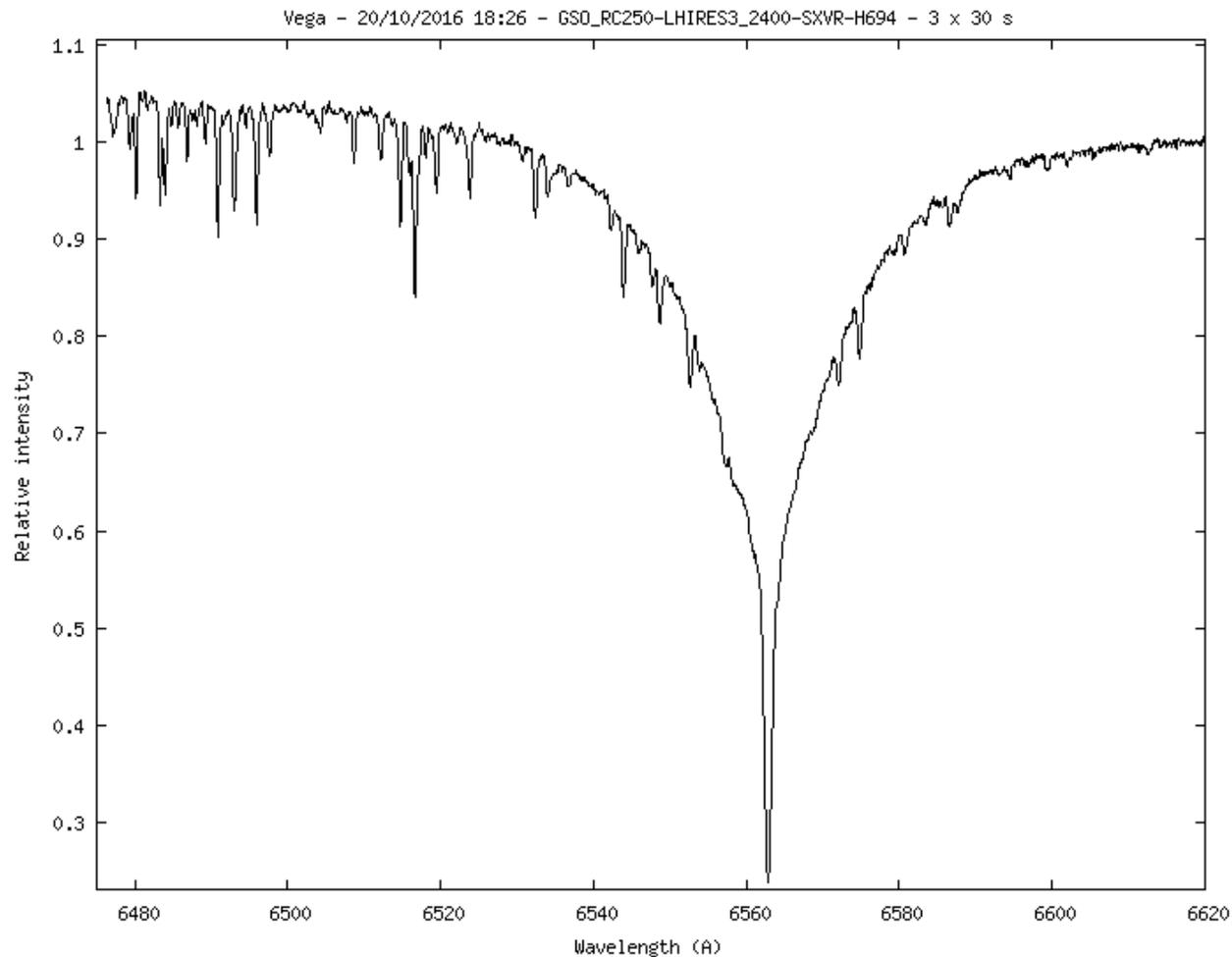


Линии водорода: свертка фойгтовского профиля

(естественное затухание, резонансное уширение, доплеровское уширение)

со штарковским γ_2

Во всех рассмотренных выше случаях профиль спектральной линии остается симметричным $(\nu - \nu_0)^2$ или $(\lambda - \lambda_0)^2$.



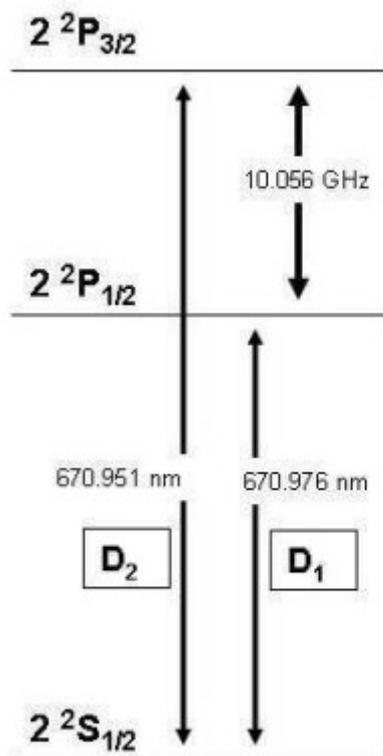
*Другие эффекты, определяющие
профиль спектральной линии:*

Изотопное расщепление

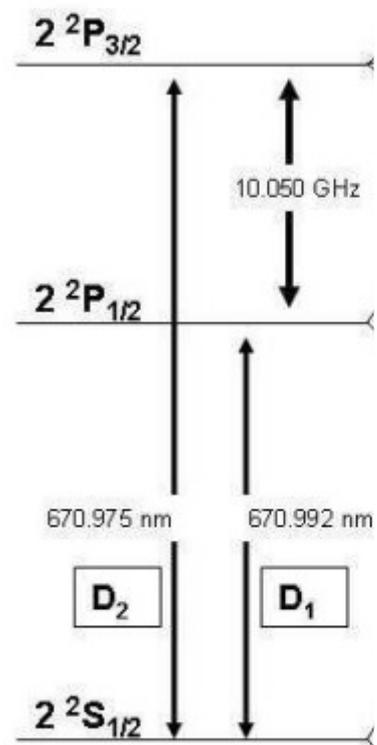
$$E = f(R_{\text{ядра}} \text{ или } M_{\text{ядра}})$$

$$\Delta E = f'(M_{\text{ядра}})$$

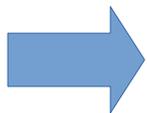
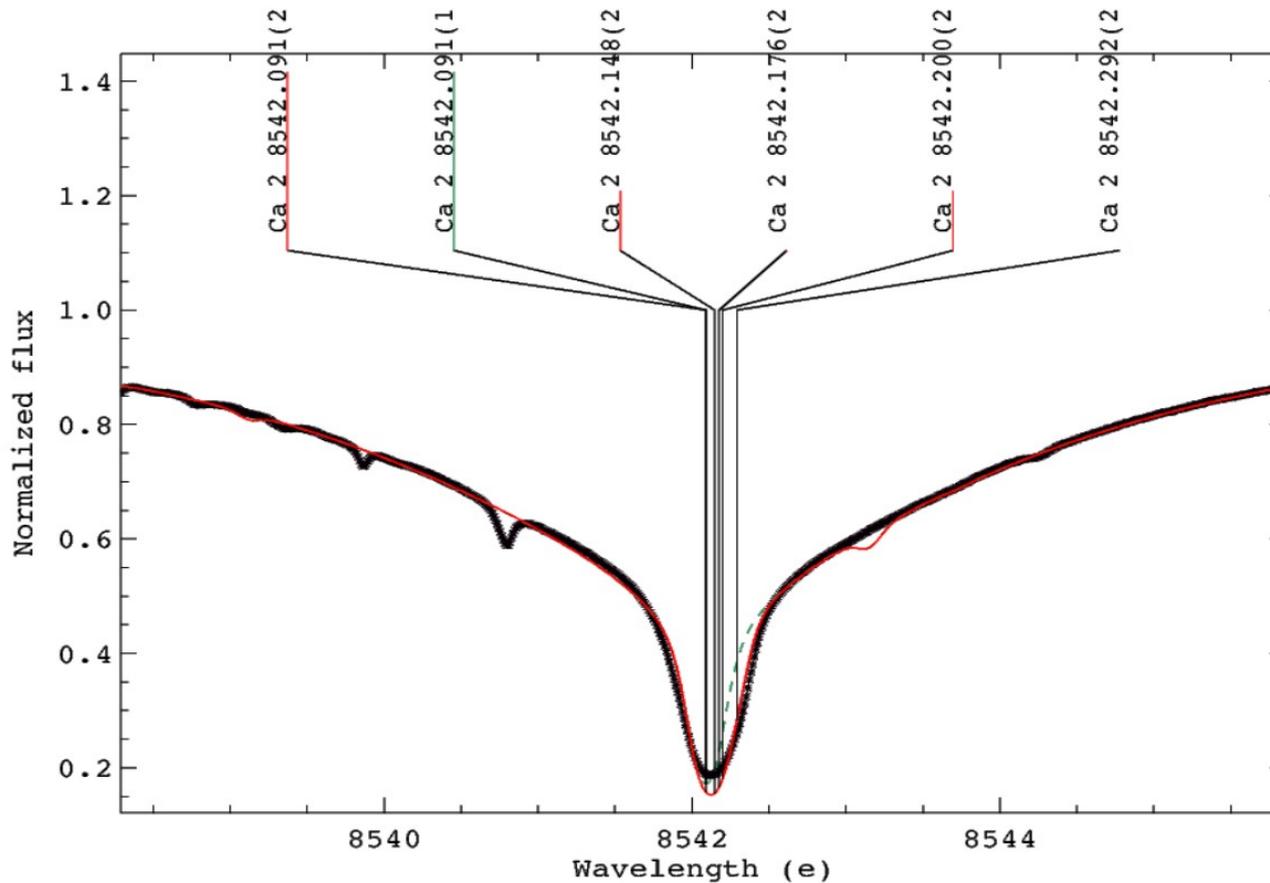
Li^7 92.5%



Li^6 7.5%



Изотопное расщепление



Суперпозиция нескольких отдельных линий (бленда), с одинаковыми по форме профилями, но сдвинутыми по длине волны и масштабироваными согласно доли изотопа

$$g_1 f_1 : g_2 f_2 : g_3 f_3 : g_4 f_4 : g_5 f_5 : g_6 f_6 = N_1 : N_2 : N_3 : N_4 : N_5 : N_6$$

Эффект сверхтонкого расщепления Hyperfine splitting (HFS)

Изотоп с нечетным массовым числом (например, Sc, V, Mn, Co) имеет отличный от нуля момент ядра I , и его уровни расщепляются из-за мультипольного взаимодействия магнитного момента ядра и электронной оболочки. В этом случае угловой момент уровня есть $F = |I - J| \dots |J + I|$.

каждый уровень расщепляется на $2I + 1$ ($J > I$) или $2J + 1$ ($J < I$) подуровней.

Правила отбора:

$\Delta F = 0, \pm 1$	$F_i + F_j > 0$	диполь
$\Delta F = 0, \pm 1, \pm 2$	$F_i + F_j > 1$	квадруполь

Эффект сверхтонкого расщепления Hyperfine splitting (HFS)

Задача.

Сколько компонент сверхтонкого расщепления у радиационного перехода (спектральной линии) ${}^7\text{LiI } 6707\text{\AA}$?

$$I = 3/2$$

$$J_i = 1/2 \rightarrow J_j = 3/2$$

$$F = |I - J| \dots |J + I|$$

$$\Delta F = 0, \pm 1$$

$$F_i + F_j > 0$$

Эффект сверхтонкого расщепления Hyperfine splitting (HFS)

Энергия уровня изменяется

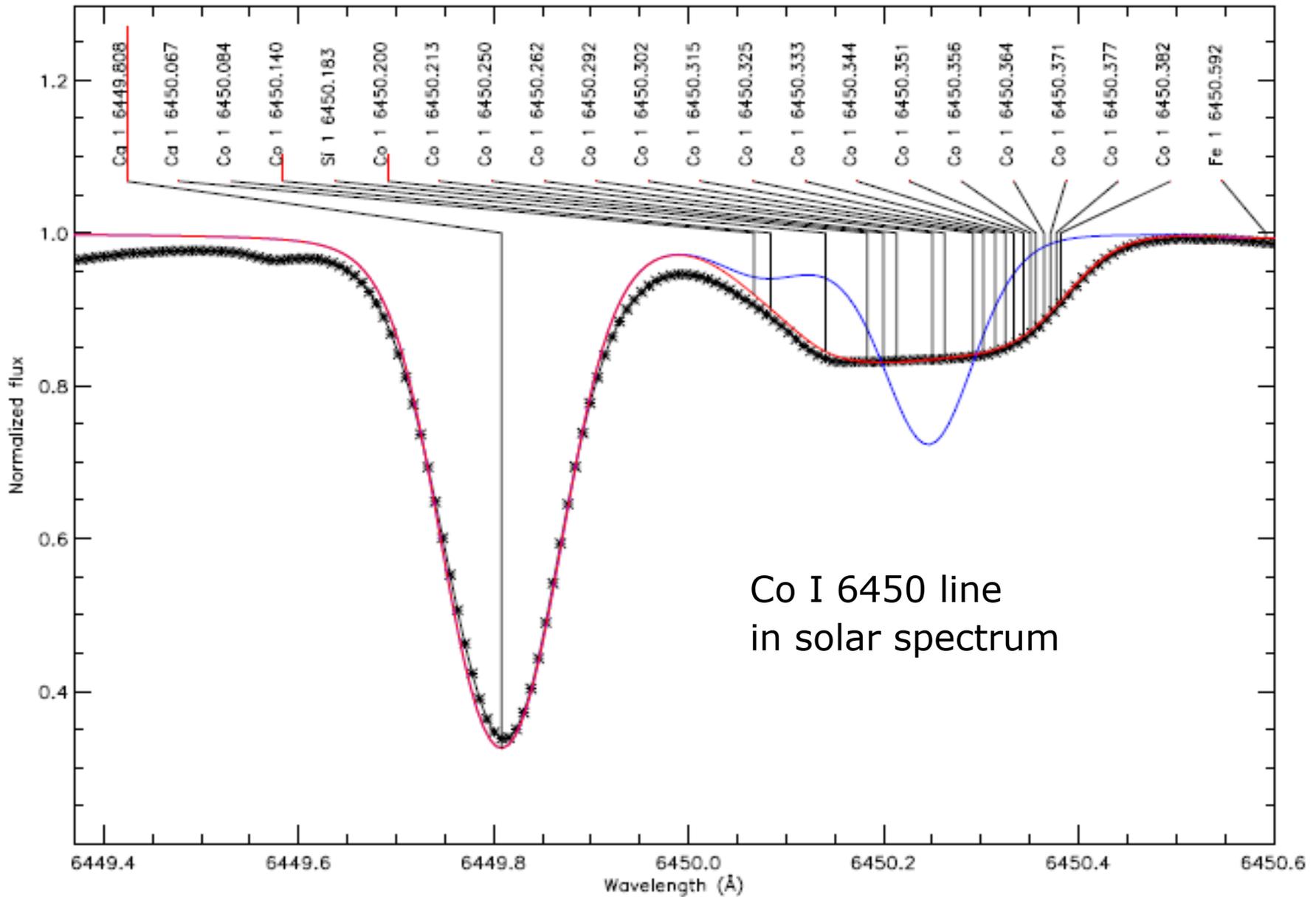
$$\Delta E = \frac{1}{2}AK + B \frac{(3/4)K(K + 1) - J(J + 1)I(I + 1)}{2I(2I - 1)J(2J - 1)}$$
$$K = F(F + 1) - J(J + 1) - I(I + 1)$$

А и В – константы сверхтонкого расщепления, разные для разных уровней

Интенсивности перераспределяются согласно квантовым числам $I J F$

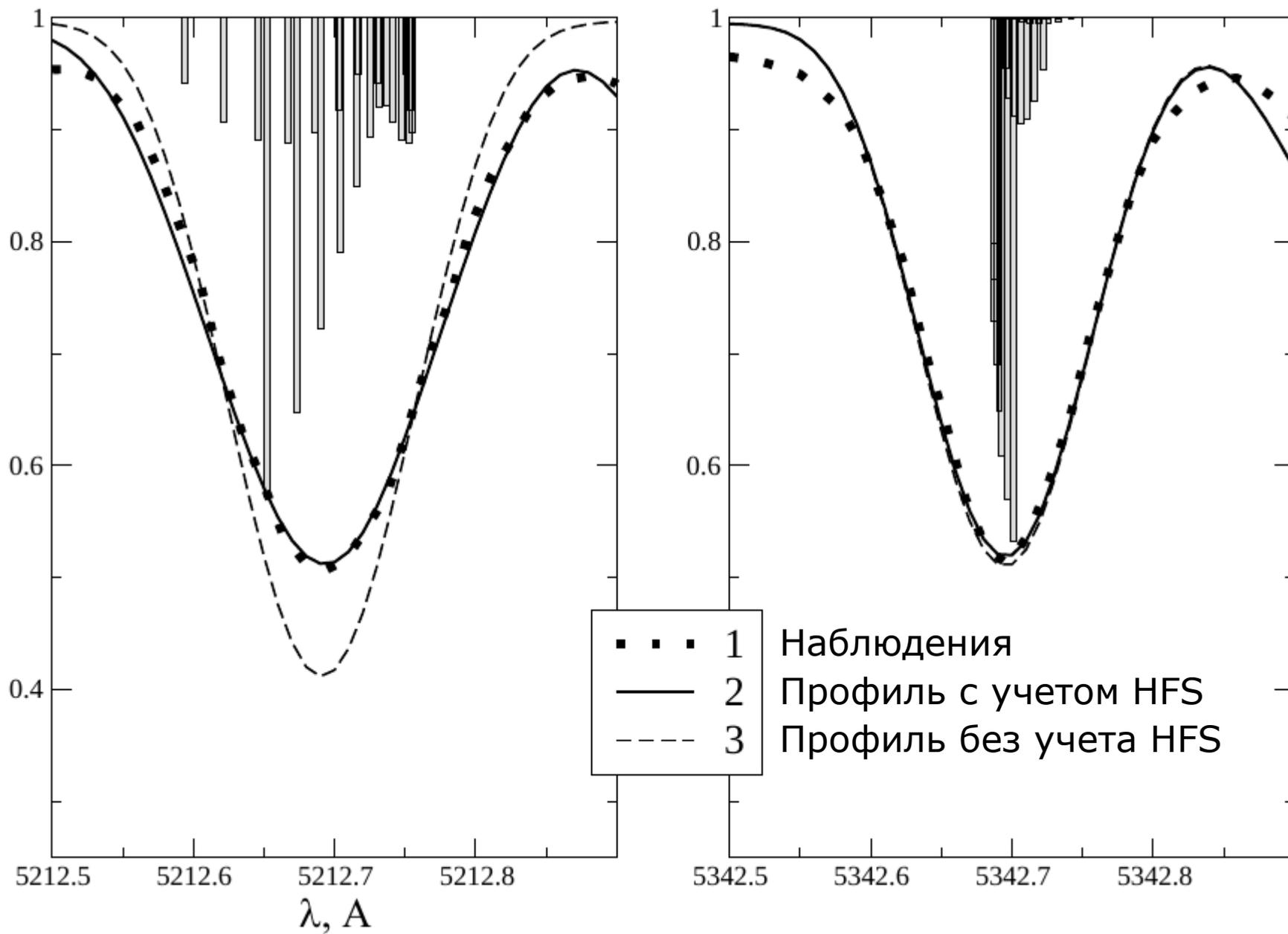
$$I(F_u \rightarrow F_l) = \frac{(2F_u + 1)(2F_l + 1)}{2I + 1} \left\{ \begin{array}{ccc} J_u & F_u & I \\ F_l & J_l & 1 \end{array} \right\}^2$$
$$\log gf_i = \log gf_0 + \log(I_i) - \log(\sum I_i)$$

Эффект сверхтонкого расщепления Hyperfine splitting (HFS)

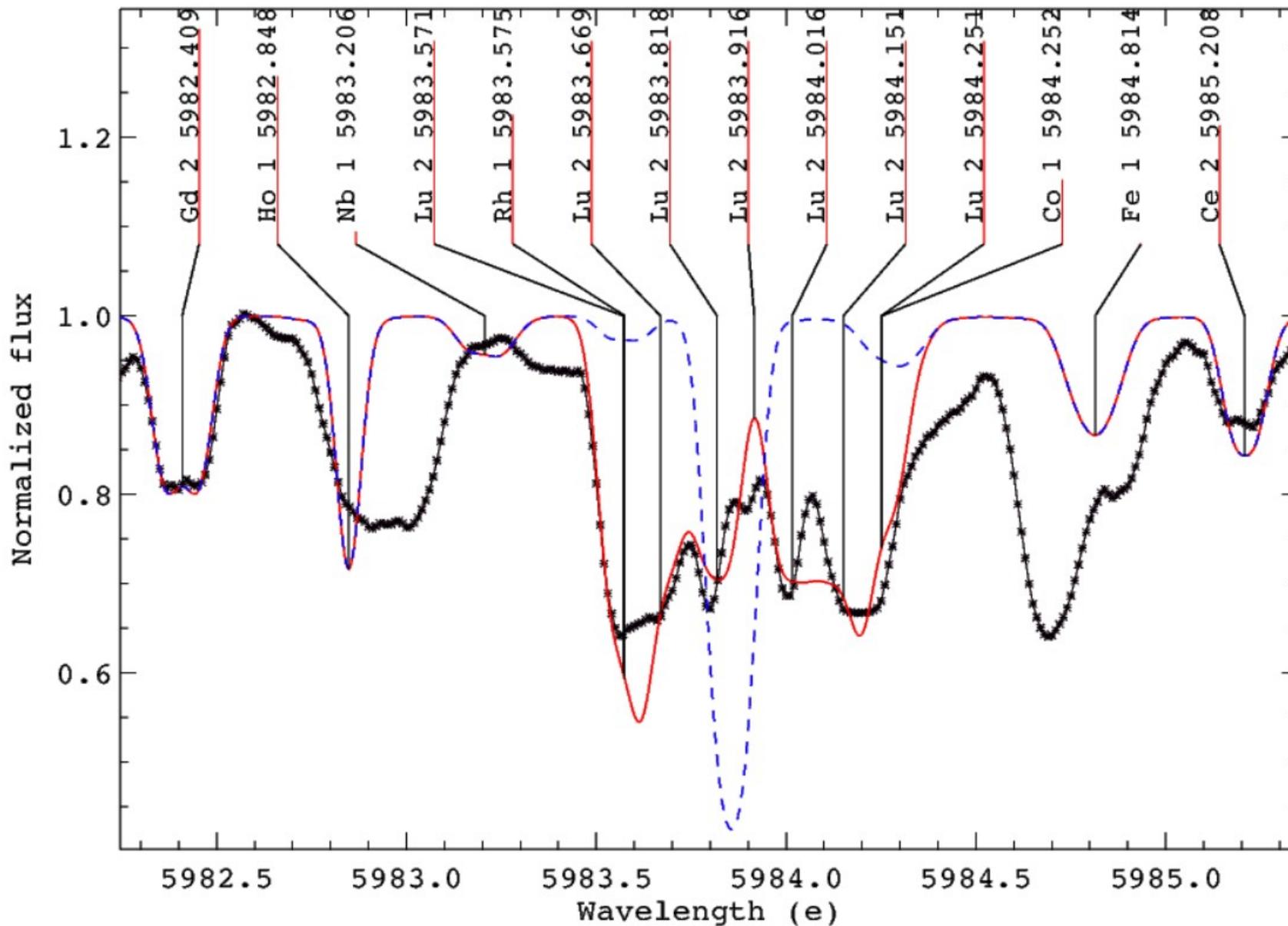


Влияние распределения компонентов на профиль бленды

CoI



Сверхтонкое расщепление Lu II 5984 в спектре звезды Пшибыльского



Изотопное + сверхтонкое расщепление лития

Li⁶ 7.5%

Li⁷ 92.5%

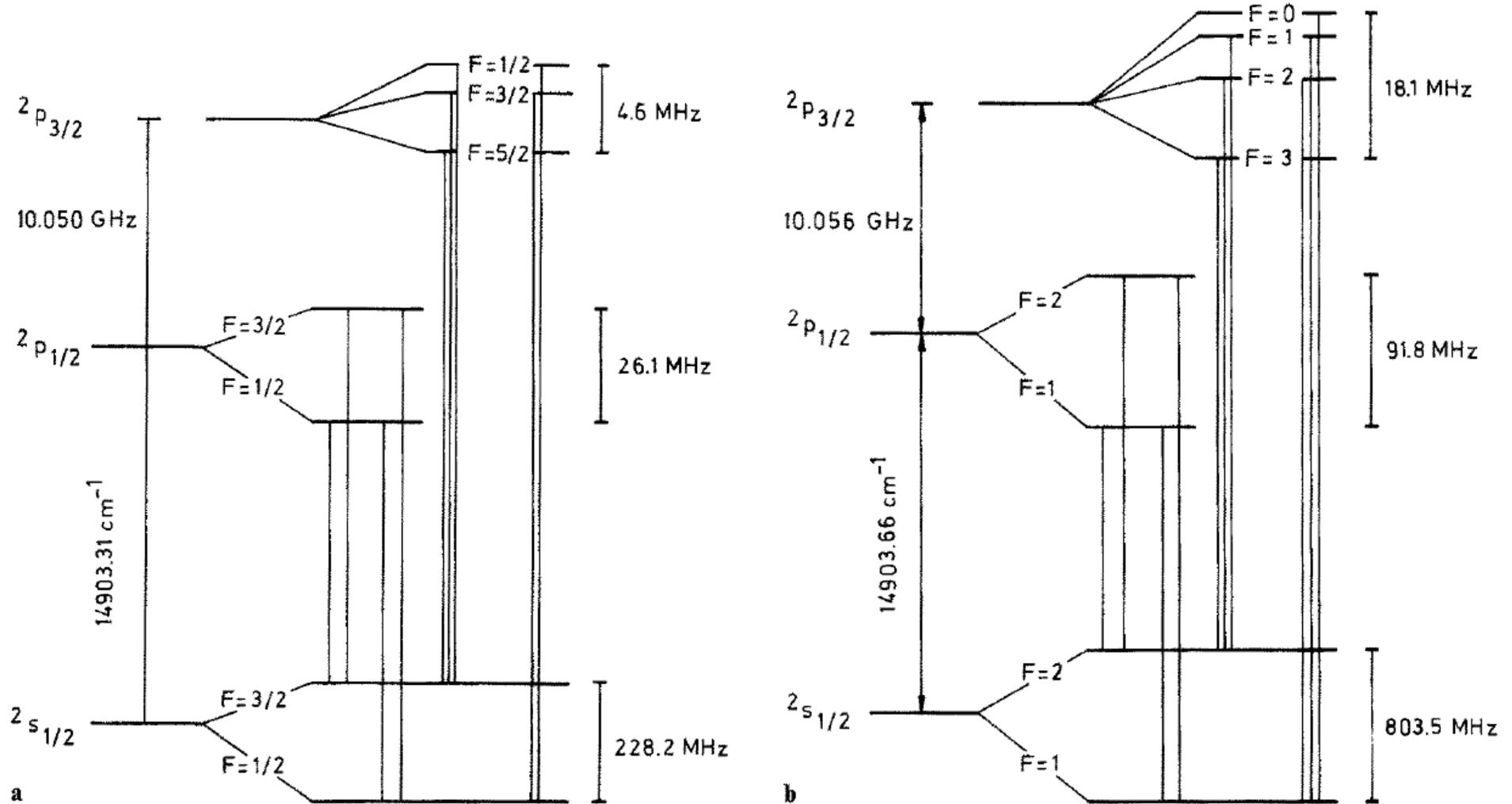


Fig. 1a, b. Hyperfine splitting of the $2^2S_{1/2}$ and the 2^2P levels of lithium (schematic). a ^6Li : $I=1$; b ^7Li : $I=3/2$

Эффект Зеемана

В магнитном поле с напряженностью B уровень с моментом J расщепляется на $(2J + 1)$ Зеемановских подуровней с $M = -J, \dots, +J$ и $\Delta E \sim B g$;

Фактор Ланде g (LS-связь):

$$g = \frac{3}{2} + \frac{S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

Зеемановские компоненты:

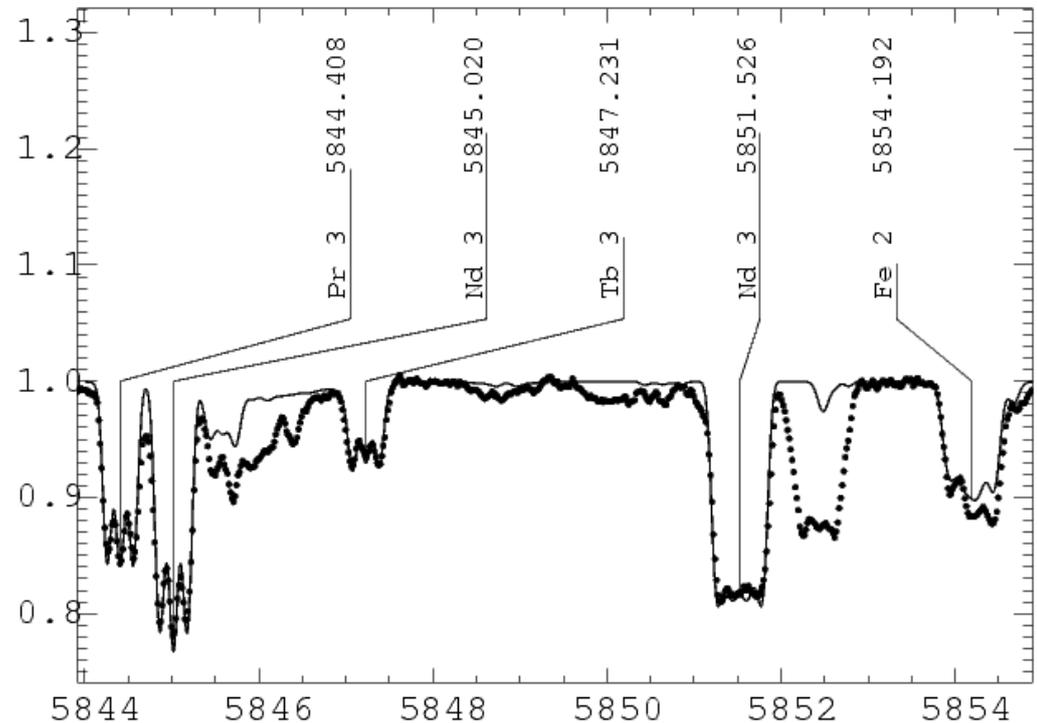
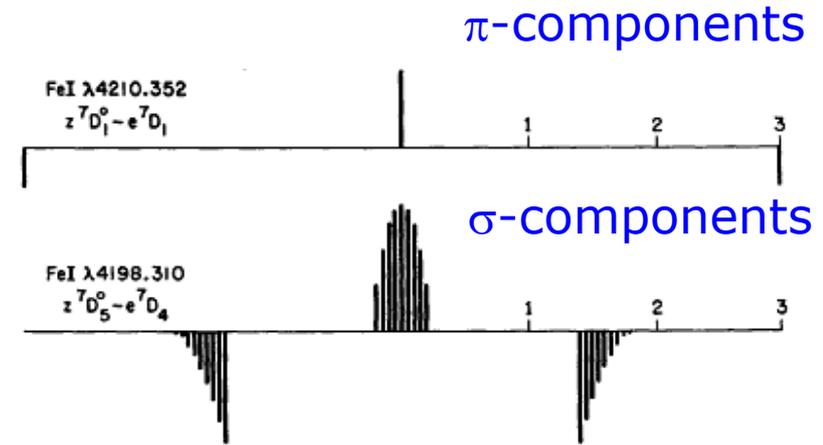
- π -компоненты:
 \perp вектору магнитного поля;
 $\Delta M = 0$;
- σ -компоненты:
 \parallel вектору магнитного поля;
 $\Delta M = \pm 1$

Магнитное расщепление :

$$\Delta\lambda = 4.67 * 10^{-13} \lambda^2 B g'$$

, где

$$g' = M_u g_u - M_l g_l$$

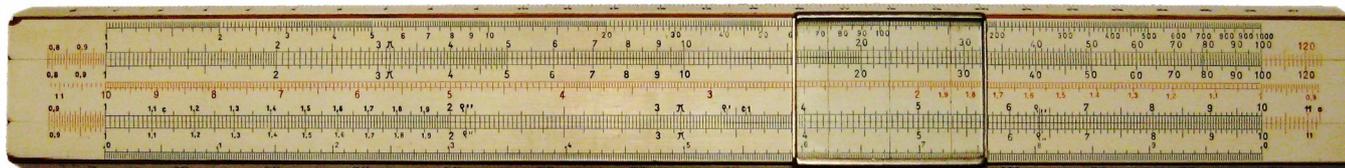
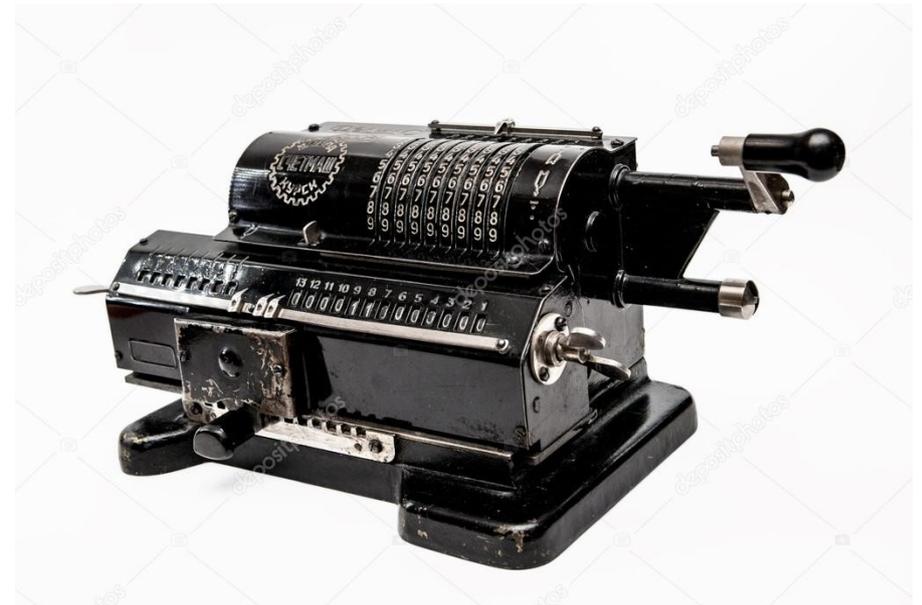
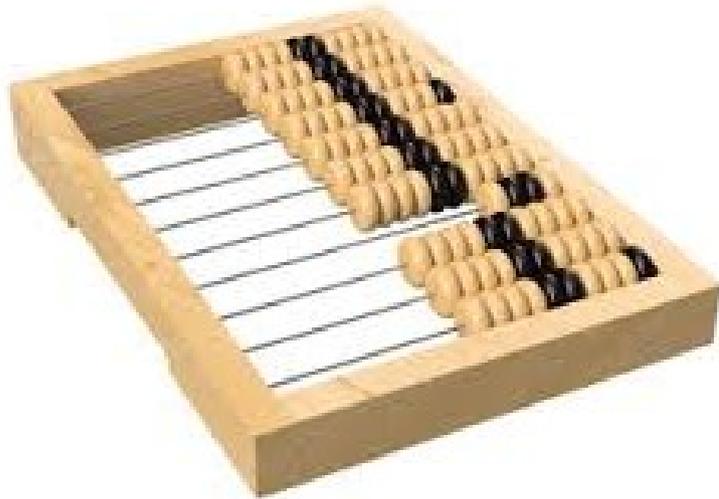


Зеемановское расщепление линий в неполяризованном свете:
 Спектр магнитной Ар звезды HD 144497, $B=8.8$ kG
 из работы *Ryabchikova et al. (2006, A&A 456, 329)*

Атомные параметры, необходимые для описания спектральной линии

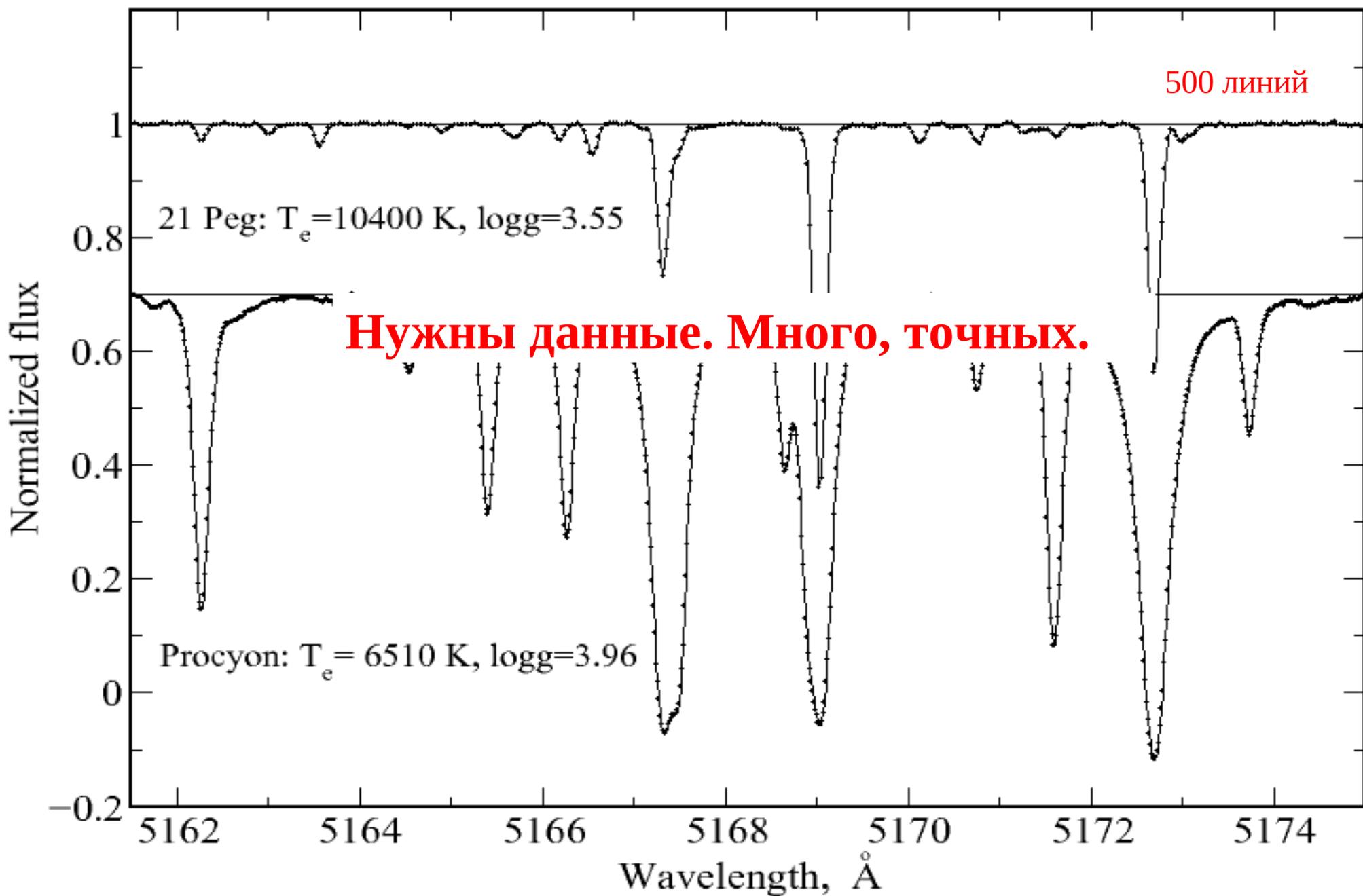
- центральная длина волны λ
- энергии возбуждения нижнего и верхнего уровней E_i и E_j
- потенциал ионизации χ
- полные угловые моменты обоих уровней J_i и J_j
- вероятности переходов f_{ij} или A_{ji}
- константы затухания $\gamma_R, \gamma_A, \gamma_B$
- изотопное расщепление и изотопный состав
- постоянные сверхтонкого расщепления A и B для обоих уровней
- магнитный момент ядра I
- факторы Ланде g_i и g_j

Какие величины нужны для описания спектральной линии



Чтобы описать форму и интенсивность спектральной линии необходимо знать следующие атомные параметры:

- центральную длину волны λ
- энергии возбуждения нижнего и верхнего уровней, E_i и E_j
- потенциалы ионизации χ_n
- полные угловые моменты обоих уровней, J_i и J_j
- вероятности переходов f_{ij} или A_{ji}
- константы затухания $\gamma_R, \gamma_A, \gamma_B$
- hfs-constants A и B для обоих уровней
- магнитный момент ядра I
- факторы Ланде g_i и g_j
- изотопное расщепление и изотопный состав





**Где можно найти эти
данные ?**

Как их достать ?

*Некоторые базы данных параметров
спектральных линий*

R.Kurucz database:

<http://kurucz.harvard.edu/>

Kurucz DB содержит практически все данные, необходимые для спектрального анализа:

a. расчет поглощения в линиях для моделей атмосфер

b. спектральный синтез для анализа химического состава

Нет специальных программ выборки

Completed Ions

	config		levels		E1 lines					
	even	odd	even	odd	good	wl	total			
Fe I	61	50	18655	18850	126290	7501218	789176	25	FEB	2018
Fe II	46	39	19771	19652	124654	7834553	1264969	8	DEC	2013
Fe III	49	41	19720	19820	37093	10799751	1604934	25	JUN	2015
Fe IV	61	54	13767	14211	8408	14617228	1776984	24	AUG	2006
Fe V	61	61	6560	7526	11417	7785320	1008385	21	AUG	2006
Fe VI	73	73	2094	2496	3534	9072714	475750	16	AUG	2010
Fe VII	85	86	7132	7032	2326	2816992	90250	9	JUL	2010
Fe VIII	52	52	1365	1244	233	220166	14561	20	JUL	2010
Fe IX	32	33	245	252	281	123563	39346	11	AUG	2015
Fe X	56	52	1555	1281	346	749848	0	6	APR	2016

[NIST Atomic Spectra database:](https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database)

<https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>

Atomic Spectra Database

NIST Standard Reference Database 78

Version 5.6

Last Update to Data Content: October 2018 | [Version History & Citation Information](#) | [Disclaimer](#) |

DOI: <https://dx.doi.org/10.18434/T4W30F> 

Welcome to the NIST Atomic Spectra Database, NIST Standard Reference Database #78. The spectroscopic data may be selected and displayed according to wavelengths or energy levels by choosing one of the following options:

LINES

Spectral lines and associated energy levels displayed in wavelength order with all selected spectra intermixed or in multiplet order. Transition probabilities for the lines are also displayed where available.

LEVELS

Energy levels of a particular atom or ion displayed in order of energy above the ground state.

**GROUND STATES &
IONIZATION ENERGIES**

Ground states and ionization energies of atoms and atomic ions.

LIBS

ASD Interface for Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)

[NIST Atomic Spectra database:](https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database)

<https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>

ASD DATA _____ INFORMATION _____
LINES LEVELS List of SPECTRA GROUND STATES & IONIZATION ENERGIES Bibliography Help



NIST Atomic Spectra Database Lines Form

Best viewed with the latest versions of Web browsers and JavaScript enabled

Main Parameters Spectrum e.g., Fe I or Na;Mg; Al or mg i-iii or 198Hg I

Limits for Wavelengths ▾ Lower:
Upper:

Wavelength Units: nm ▾

Reset input Retrieve Data Show Graphical Options Show Advanced Settings

Can you please provide some [feedback](#) to improve our database?

NIST Atomic Spectra database:

<https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>

Wavelength range: 5000 - 5010 Å

Wavelength in: vacuum below 2000 Å, air between 2000 and 20000 Å, vacuum above 20000 Å

Highest relative intensity: 41700

Some data for neutral and singly-charged ions are available in the [Handbook of Basic Atomic Spectroscopic Data](#)

Primary data sources							Query NIST Bibliographic Databases for Fe I (new window)					
Energy Levels:	Nave et al. 1994	The wavenumber measurements in Nave et al 1994 were calibrated with respect to Ar II lines measured by Norén 1973 , which were re-measured later by Whaling et al. 1995 and found to be systematically too small. To account for this calibration error, the original measured wavenumbers and energy level values from Nave et al. 1994 have been increased here by 6.7 parts in 10 ⁸ . The ionization energy is from Schoenfeld et al. 1995 , adjusted by the same scaling factor.					Fe I Energy Levels					
Lines:	Nave et al. 1994	Observed wavenumbers have been increased by 6.7 parts in 10 ⁸ , similar to the energy levels.					Fe I Line Wavelengths and Classification					
Transition Probabilities:	Fuhr and Wiese 2006						Fe I Transition Probabilities					

Observed Wavelength Air (Å)	Unc. (Å)	Ritz Wavelength Air (Å)	Unc. (Å)	Rel. Int. (?)	A_{ki} (s ⁻¹)	Acc.	E_i (cm ⁻¹)	E_k (cm ⁻¹)	Lower Level Conf., Term, J	Upper Level Conf., Term, J	Type	TP Ref.	Line Ref.
5 000.210	0.004	5 000.2109	0.0006	65			37 409.555 - 57 403.134		3d ⁶ (⁵ D)4s4p(¹ P°) y ⁵ P° 1	3d ⁶ 4s(⁶ D)5d ⁵ P 2			L11631
5 001.8633	0.0008	5 001.8631	0.0004	20900	3.7e+07	D+	31 307.245 - 51 294.220		3d ⁶ (⁵ D)4s4p(³ P°) z ³ F° 4	3d ⁶ (⁵ D)4s (⁴ D)5s e ³ D 3		T2491n	L11631
5 002.581	0.005	5 002.5829	0.0006	79bl*			33 765.306 - 53 749.405		3d ⁸ c ³ F 2	3d ⁶ (³ G)4s4p(³ P°) x ³ F° 2			L11631
5 002.581	0.005	5 002.5860	0.0006	79bl*			38 995.736 - 58 979.823		3d ⁷ (⁴ F)4p y ³ D° 1	3d ⁶ 4s(⁴ D)4d ³ D 2			L11631
5 002.7924	0.0008	5 002.7920	0.0004	2570	8.8e+05	D	27 394.691 - 47 377.955		3d ⁶ (⁵ D)4s4p(³ P°) z ⁵ F° 3	3d ⁷ (⁴ F)5s e ⁵ F 4		T2578n	L11631
5 004.0440	0.0008	5 004.0433	0.0004	468	3.7e+06	E	33 946.933 - 53 925.200		3d ⁶ (⁵ D)4s4p(³ P°) z ³ P° 2	3d ⁷ (⁴ F)4d f ⁵ P 1		T2578n	L11631
5 004.341	0.004	5 004.3399	0.0004	105			26 623.735 - 46 600.818		3d ⁷ (² D2)4s a ³ D 2	3d ⁶ (³ P2)4s4p(³ P°) z ³ S° 1			L11631
5 005.7120	0.0008	5 005.7120	0.0004	15800			31 322.613 - 51 294.220		3d ⁶ (⁵ D)4s4p(³ P°) z ³ D° 3	3d ⁶ (⁵ D)4s (⁴ D)5s e ³ D 3			L11631
5 006.1188	0.0008	5 006.1184	0.0004	41700	5.87e+06	B+	22 845.869 - 42 815.855		3d ⁶ (⁵ D)4s4p(³ P°) z ⁷ F° 5	3d ⁶ (⁵ D)4s (⁶ D)5s e ⁷ D 5		T5720	L11631

NIST Atomic Spectra database:

<https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>

Данные: по линиям, по уровням, энергиям ионизации, ...

Достоинства:

Проверенные данные, наличие формы запроса

Недостатки:

- Относительно небольшое количество данных. Fe II: 1136 линий vs 124654 в Kurucz DB.
- Мало данных для тяжелых элементов
- Не для всех линий даны коэффициенты A
- Мало функций формы запроса

VALD – Vienna Atomic Line database

<http://vald.astro.uu.se/~vald/php/vald.php>

<http://vald.inasan.ru/~vald3/php/vald.php>

Selected and retrieved **9** abstracts. Total citations: **2575**

#	Bibcode Authors	Cites Title	Date	List of Links Access Control Help
1	<input type="checkbox"/> 1999A&AS..138..119K Kupka, F.; Piskunov, N.; Ryabchikova, T. A.; Stempels, H. C.; Weiss, W. W.	1235.000 VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base	07/1999	A E F
2	<input type="checkbox"/> 1995A&AS..112..525P Piskunov, N. E.; Kupka, F.; Ryabchikova, T. A.; Weiss, W. W.; Jeffery, C. S.	761.000 VALD: The Vienna Atomic Line Data Base.	09/1995	A F G
3	<input type="checkbox"/> 2000BaltA...9..590K Kupka, F. G.; Ryabchikova, T. A.; Piskunov, N. E.; Stempels, H. C.; Weiss, W. W.	345.000 VALD-2 -- The New Vienna Atomic Line Database	00/2000	A F G
4	<input type="checkbox"/> 2015PhyS...90e4005R Ryabchikova, T.; Piskunov, N.; Kurucz, R. L.; Stempels, H. C.; Heiter, U.; Pakhomov, Yu; Barklem, P. S.	176.000 A major upgrade of the VALD database	05/2015	A E

1991 – в Вене (Австрия) группа астрофизиков из Австрии, России и Швеции приступила к созданию открытой базы данных атомных параметров VALD

Основа VALD – компиляция данных из разных источников, включая NIST и списки Kurucz.

1994 - VALD-1 содержала данные для около 1 миллионов линий

1999 – VALD-2 более 2 миллионов линий наблюдаемых и более 40 миллионов рассчитанных

2012 – VALD-3 около 250 миллионов линий атомов и около 1.5 миллиардов линий некоторых двухатомных молекул (TiO, CN, CH, C₂, O₂, SiH, FeH, MgH и др.) и воды.

!!! База данных создана теми, кто использует эти данные

VALD

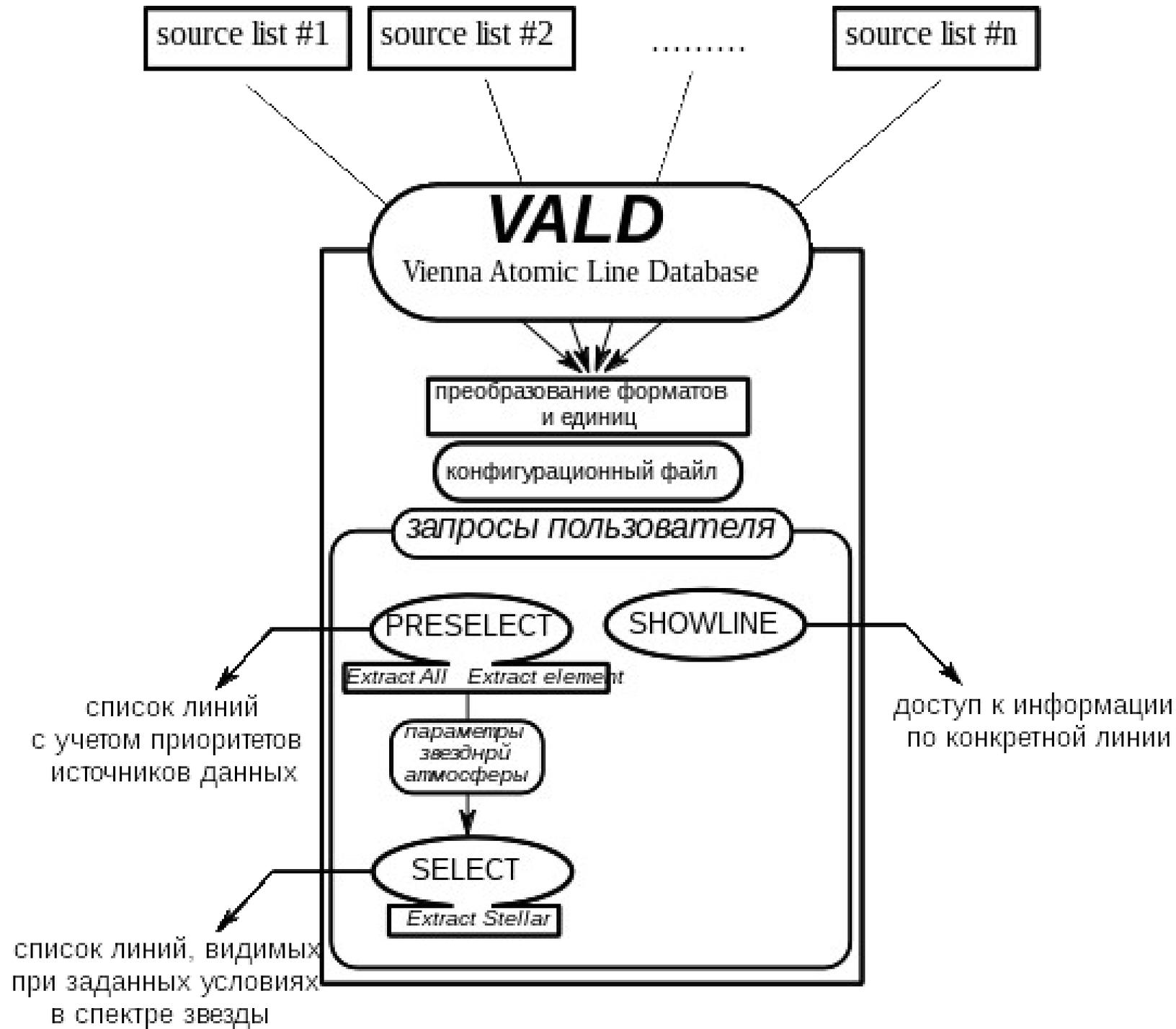
1. Написана с нуля на языках FORTRAN, C
2. Реляционная (табличная)
3. Основана на файлах (каждый файл соответствует конкретной работе, статье, ...)
4. Индексация данных
5. Использует сжатие, бинарный внутренний формат

Отличия от стандартных СУБД SQL

1. Уникальным считается объект — спектральная линия и ее параметры, которые могут содержаться в нескольких записях и, поэтому различаться.
2. Имеет механизм идентификации спектральной линии
3. Имеет систему приоритетов для используемых файлов данных
4. Значительный выигрыш в скорости выполнения запросов и потребляемым ресурсам: память и процессор
5. Выдает данные только по тем спектральным линиям, которые могут наблюдаться

1	IA																				18	VIIIA		
1	1																					2	He	
2	3	4											13	14	15	16	17	18						
	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne						
	LITHIUM	BERYLLIUM											BORON	CARBON	NITROGEN	OXYGEN	FLUORINE	NEON						
3	11	12											13	14	15	16	17	18						
	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar						
	SODIUM	MAGNESIUM											ALUMINIUM	SILICON	PHOSPHORUS	SULFUR	CHLORINE	ARGON						
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34								
	K	Ca	<i>Sc</i>	Ti	<i>V</i>	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>	<i>Ni</i>	Cu	<i>Zn</i>	Ga	Ge	As	Se								
	POTASSIUM	CALCIUM	SCANDIUM	TITANIUM	VANADIUM	CHROMIUM	MANGANESE	IRON	COBALT	NICKEL	COPPER	ZINC	GALLIUM	GERMANIUM	ARSENIC	SELENIUM								
5	37	38	39	40	41	42		44	45	46	47	48	49	50	51	52								
	Rb	Sr	<i>Y</i>	Zr	Nb	Mo		Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te								
	RUBIDIUM	STRONTIUM	YTRIUM	ZIRCONIUM	NIObIUM	MOLYBDENUM		RUTHENIUM	RHODIUM	PALLADIUM	SILVER	CADMIUM	INDIUM	TIN	ANTIMONY	TELLURIUM								
6	55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83									
	Cs	Ba	Lanthanides	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi									
	CESIUM	BARIUM		HAFNIUM	TANTALUM	TUNGSTEN	RHENIUM	OSMIUM	IRIDIUM	PLATINUM	GOLD	MERCURY	THALLIUM	LEAD	BISMUTH									
7	89-103		LANTHANIDES																					
	Actinides		57	58	59	60		62	63	64	65	66	67	68	69	70	71							
			La	Ce	Pr	Nd		Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu							
			LANTHANUM	CERIUM	PRASEODYMIUM	NEODYMIUM		SAMARIUM	EUROPIUM	GADOLINIUM	TERBIUM	DYSPROSIUM	HOLMIUM	ERBIUM	THULIUM	YtterBIUM	LUTETIUM							
			ACTINIDES																					
			90											92										
			Th											U										
			THORIUM											URANIUM										

Figure 1. The elements which spectral lines parameters are presented in VALD. Elements with available data on isotopic shifts are marked by bold face, and with data on hyperfine splitting by italic face.



Showline

Пример работы для линии FeI 5162.27A

These are the spectral lines found (VALD ranking is shown in parentheses below each entry):

Database reference for the line	Wavelength [A]	Element Ion	log gf	E_{low} [cm^{-1}]	J_{low}	E_{up} [cm^{-1}]	J_{up}	Lande eff	Lande low	Lande up	γ Rad	γ Stark	γ VdW	Lower level coupling electronic configuration Term designation	Upper level coupling electronic configuration Term designation	Source Accuracy Comment
Kurucz obs. energy level: Fe 1	5162.1448 (3)	Fe 1	-4.148 (3)	40871.4120 (3)	2.0	60237.8100 (3)	2.0	1.478 (3)	1.48	1.48	7.550 (3)	-3.900 (3)	-7.060 (3)	LS 3d8 3P	LS 3d6.(5D).4s.(6D).7p 5D*	Kurucz Fe I 2014 (3) Fe
Fe: NBS data	5162.2700 (2)	Fe 1	0.020 (4)	33695.0000 (2)	5.0	53061.0000 (2)	5.0	99.000 (2)	99.00	99.00	0.000 (2)	0.000 (2)	0.000 (2)	LS - y5F*	LS - g5F	ND Fe: NBS data. (3) Fe
Kurucz obs. energy level: Fe 1	5162.2720 (3)	Fe 1	0.362 (3)	33695.3970 (3)	5.0	53061.3180 (3)	5.0	1.394 (3)	1.42	1.37	8.380 (3)	-3.960 (3)	-7.520 (3)	LS 3d7.(4F).4p y5F*	LS 3d7.(4F).4d g5F	Kurucz Fe I 2014 (3) Fe
Fe 1: exp. data	5162.2729 (3)	Fe 1	0.020 (6)	33695.3950 (2)	5.0	53061.3140 (2)	5.0	99.000 (2)	1.42	99.00	0.000 (2)	0.000 (2)	0.000 (2)	LS 3p6.3d7.(a4F).4p y5F*	LS 3p6.3d7.(a4F).4d g5F	N D Fe 1 exp. (2) Fe
Van der Waals data	5162.2920 (0)	Fe 1	0.000 (1)	33697.4920 (1)	5.0	53062.6610 (1)	5.0	99.000 (1)	99.00	99.00	0.000 (1)	0.000 (1)	798.279 (9)			Van der Waals da (1) Fe
Kurucz obs. energy level: Fe 1	5162.3759 (3)	Fe 1	-4.601 (3)	21038.9870 (3)	2.0	40404.5180 (3)	1.0	0.246 (3)	0.66	1.50	8.650 (3)	-5.890 (3)	-7.710 (3)	LS 3d6.4s2 b3F2	LS 3d6.(5D).4s.4p.(1P*) x5D*	Kurucz Fe I 2014 (3) Fe
Kurucz obs. energy level: Fe 1	5162.3927 (3)	Fe 1	-6.640 (3)	39969.8530 (3)	3.0	59335.3210 (3)	2.0	1.676 (3)	1.50	1.33	8.650 (3)	-3.640 (3)	-7.180 (3)	LS 3d6.(5D).4s.4p.(1P*) x5D*	JK 3d6.4s.(6D<9/2>).5g 2[5/2]	Kurucz Fe I 2014 (3) Fe
Kurucz obs. energy level: Fe 1	5162.3930 (3)	Fe 1	-8.955 (3)	39969.8530 (3)	3.0	59335.3200 (3)	3.0	1.512 (3)	1.50	1.52	8.650 (3)	-3.640 (3)	-7.180 (3)	LS 3d6.(5D).4s.4p.(1P*) x5D*	JK 3d6.4s.(6D<9/2>).5g 2[5/2]	Kurucz Fe I 2014 (3) Fe

The data above should be combined to the following set of lines (The output in long format skipping Lande factors is displayed).
Numbers in front of the source keys refer to the line list names below.

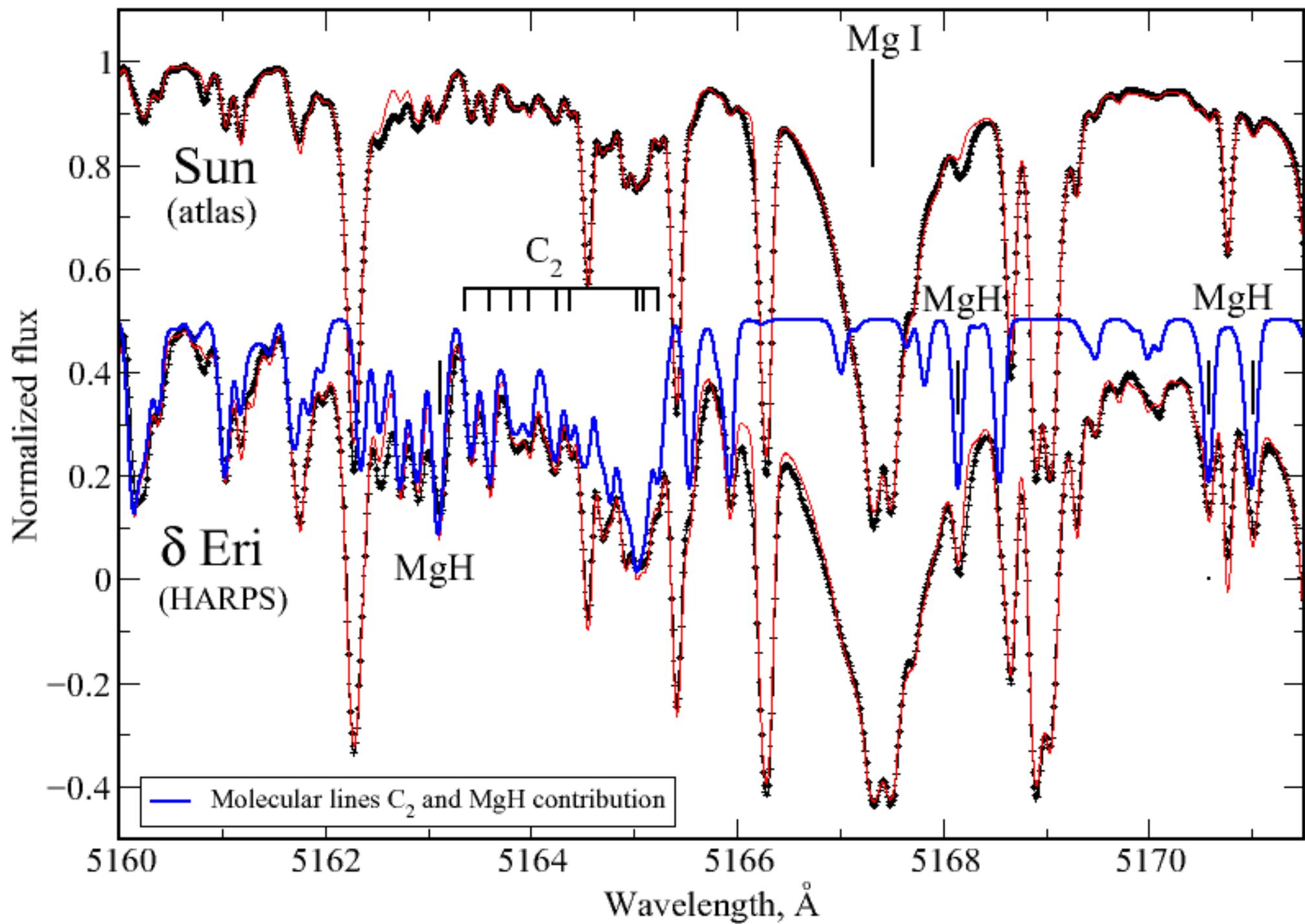
Wavelength [A, air]	Element Ion	log gf	E_{low} [cm^{-1}]	J_{low}	E_{up} [cm^{-1}]	J_{up}	Lande	γ Rad	γ Stark	γ VdW	Lower level coupling electronic configuration Term designation	Upper level coupling electronic configuration Term designation	Reference for wavelength
5162.2720 1 wt:K14	Fe 1	0.020 2 gf:FMW	33695.3970 1 K14	5.0	53061.3180 1 K14	5.0	1.39 1 K14	8.380 1 K14	-3.960 1 K14	798.279 3 BPM	LS 3d7.(4F).4p y5F* 1 K14	LS 3d7.(4F).4d g5F 1 K14	N D Kurucz Fe I 2014 Fe

Key to references:

1 Kurucz obs. energy level: Fe 1

2 Fe 1: exp. data

3 Van der Waals data



Welcome to VALD3

Please enter your registered email address :

Documentation

[About VALD](#)

[Documentation](#)

[News](#)

VALD3 Mirror Servers

[VALD3 Mirror Uppsala](#)

[VALD3 Mirror Vienna](#)

[VALD3 Mirror Moscow](#)

Contact / Registration

[Contact form](#)

About VALD

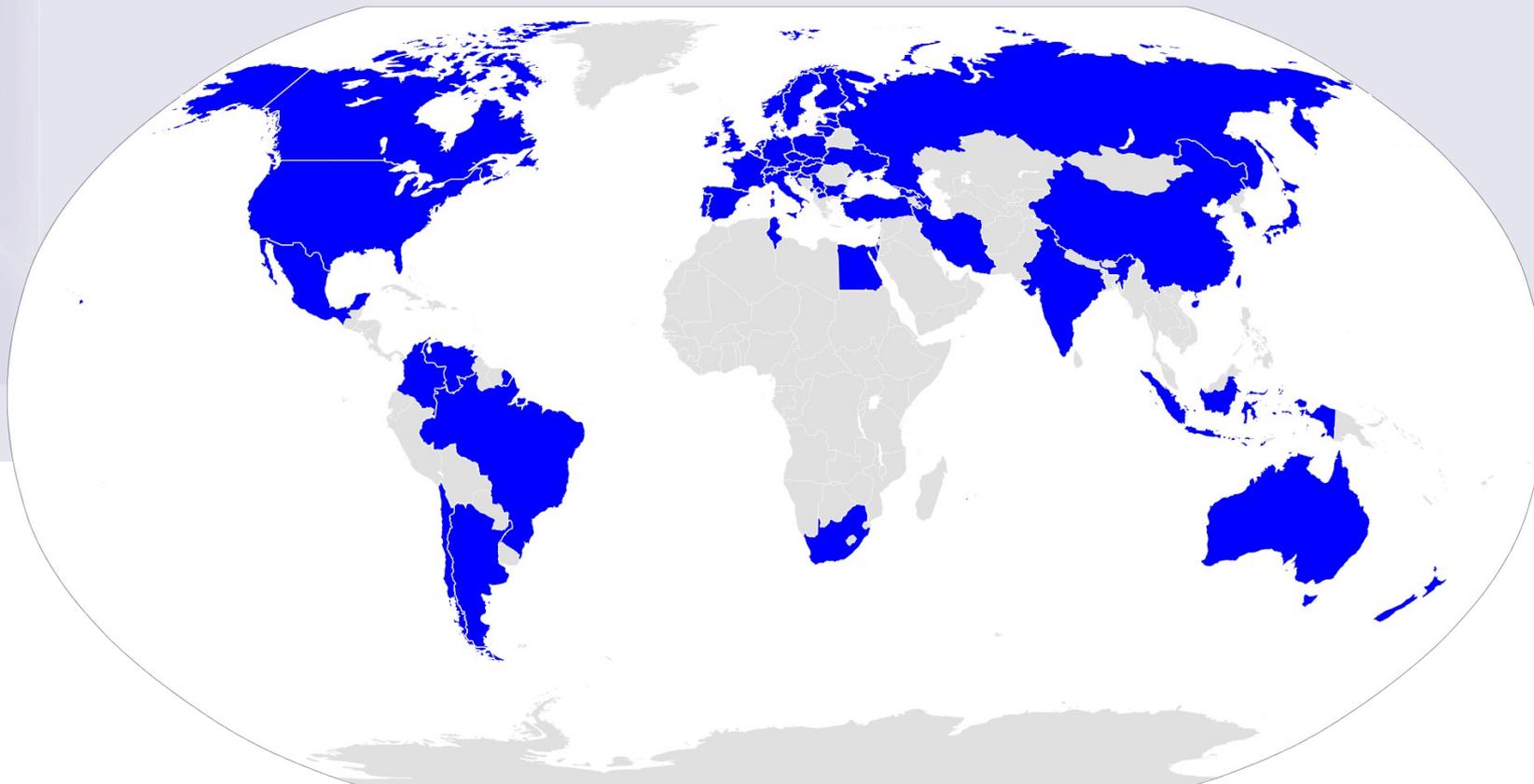
The Vienna Atomic Line Database (VALD) is a collection of atomic and molecular transition parameters of astronomical interest. VALD offers tools for selecting subsets of lines for typical astrophysical applications: line identification, preparing for spectroscopic observations, chemical composition and radial velocity measurements, model atmosphere calculations etc.

The VALD Electronic Mail Service (VALD-EMS) is the main data transfer protocol for small data sets. For larger data extraction VALD users are advised to use the 'via ftp' option. This web portal is the main user interface to VALD VALD-EMS. It offers full functionality of the extraction tools and flexibility of data access. An alternative user interface and data transfer protocol are offered via the Virtual Atomic and Molecular Data Center (**VAMDC**). This option allows direct computer access to VALD and many other databases but it lacks some of the functionality that is present in the VALD extraction tools.

Below are the main ideas behind VALD concept that may help you using it in the most efficient way:

- VALD extraction tools are constructed for intelligent selection of data relevant for specific astronomical problem.
- Bulk data transfer via remote access is highly inefficient. For massive extraction (e.g. for computing opacity tables) you should consider hosting a mirror site. Contact VALD administrator <- link if you are interested.
- VALD is regularly updated with critically evaluated data sets. The VALD project team experts investigate the statistical properties of the data, extensively compare the results obtained with different data sources, and establish the quality rating for each new source which is a basis for data selection. This portal offers you a possibility to create and save an alternative ranking table that would also ensures reproducibility of the extraction.
- VALD data access is free but requires registration. Registration helps us rejecting spam, collecting statistics and informing you about updates. We do not share your registration information with anyone.

If you have any comments about VALD, or would like to register as a client, please contact us through our [contact pages](#).



VALD в настоящее время

1. Пять зеркал:

1. Uppsala Universitet (Швеция)
2. Институт Астрономии РАН (Москва)
3. Wien Universitat (Австрия)
4. Goettingen University (Германия)
5. NASA (США)

2. Сотни зарегистрированных пользователей из 52 стран мира

3. Около 50 запросов в месяц

4. Более 2500 ссылок на статьи по VALD в высокорейтинговых международных журналах

1. 1006 на VALD-1 (42 ссылки в год или 3.5 в месяц)
2. 1235 на VALD-2 (65 ссылок в год или >1 в неделю)
3. 176 на VALD-3a (~ 1 ссылка в неделю)

Короткий формат VALD

- Ион
- Длина волны (Å)
- Энергия нижнего уровня E_{low} (cm⁻¹)
- Квантовое число J_{low}
- Сила осциллятора **log gf**
- Ланде фактор эффективный **g**
- константы уширения
- Ссылки

Длинный формат VALD

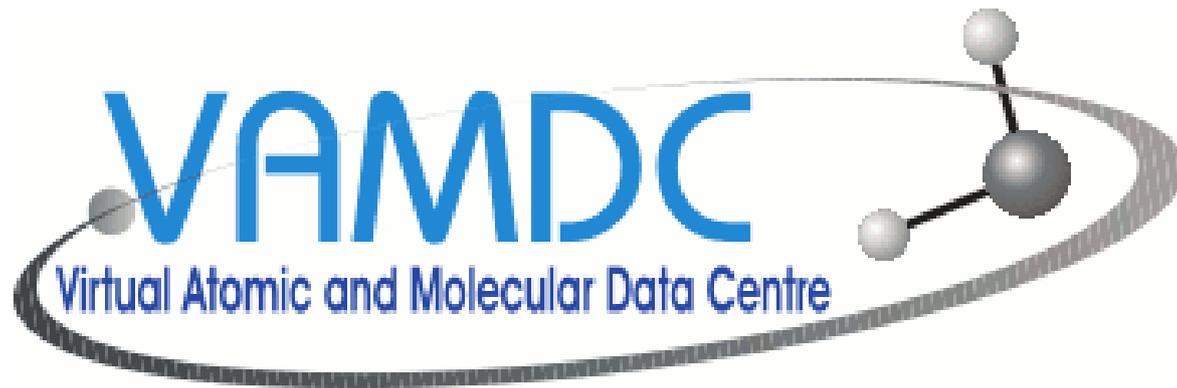
- Ион
- Длина волны (Å, вакуум)
- Длина волны (Å, атм)
- Энергия нижнего уровня E_{low} (cm⁻¹)
- Квантовое число J_{low}
- Энергия верхнего уровня E_{up} (cm⁻¹)
- Квантовое число J_{up}
- Сила осциллятора **log gf**
- Ланде фактор эффективный **g**
- Ланде фактор нижнего уровня g_{low}
- Ланде фактор верхнего уровня g_{up}
- константы уширения
- электронная конфигурация, терм нижнего уровня
- электронная конфигурация, терм верхнего уровня
- Ссылки

VALD output

```

5098.0000, 5300.0000, 312, 4875, 0.5, Wavelength region, lines selected, lines processed, Vmicro
Damping parameters Lande Central
Elm Ion WL(A) Excit(eV) Vmic log(gf) Rad. Stark Waals factor depth Reference
'Fe 2', 5160.8390, 5.5690, 0.5, -2.559, 8.490, -6.520, -7.890, 1.140, 0.146, ' 1 1 2 1 1 1 6'
'Fe 2', 5161.1840, 2.8560, 0.5, -4.573, 8.560, -6.530, -7.893, 0.720, 0.051, ' 1 1 2 1 1 1 6'
'Fe 1', 5162.2729, 4.1780, 0.5, 0.020, 8.380, -3.960, -7.239, 1.390, 0.072, ' 7 7 7 1 1 1 6'
'Fe 1', 5165.4100, 4.2200, 0.5, -0.003, 8.380, -4.710, -7.510, 1.300, 0.067, ' 1 1 1 1 1 1 1'
'Fe 2', 5166.5550, 10.4550, 0.5, -0.045, 8.950, -5.170, -7.570, 0.730, 0.136, ' 1 1 2 1 1 1 1'
'Mg 1', 5167.3210, 2.7090, 0.5, -1.030, 7.990, 0.000, -7.267, 99.000, 0.330, ' 19 19 19 6 19 19 6'
'Fe 1', 5167.4885, 1.4850, 0.5, -1.118, 6.750, -6.150, -7.687, 1.150, 0.149, ' 7 7 7 1 1 1 6'
'Fe 2', 5167.5310, 10.4800, 0.5, -0.766, 8.950, -5.190, -7.570, 1.190, 0.038, ' 1 1 2 1 1 1 1'
'Fe 2', 5169.0330, 2.8910, 0.5, -1.250, 8.510, -6.500, -7.887, 1.330, 0.713, ' 7 7 7 1 1 1 6'
'Fe 2', 5169.8080, 10.5000, 0.5, -1.198, 8.920, -5.110, -7.570, 1.500, 0.012, ' 1 1 2 1 1 1 1'
'Fe 2', 5170.7770, 10.4550, 0.5, -0.330, 8.960, -5.210, -7.570, 1.460, 0.082, ' 1 1 2 1 1 1 1'
'LL_10400g355.krz',
'H : 0.91', 'He: -1.05',
'Li: -10.90', 'Be: -10.60', 'B : -9.34', 'C : -3.65', 'N : -4.05', 'O : -3.45',
'F : -7.48', 'Ne: -3.90', 'Na: -5.62', 'Mg: -4.35', 'Al: -5.89', 'Si: -4.90',
'P : -6.44', 'S : -4.95', 'Cl: -6.54', 'Ar: -5.86', 'K : -6.96', 'Ca: -5.85',
'Sc: -9.38', 'Ti: -7.21', 'V : -8.00', 'Cr: -6.27', 'Mn: -6.53', 'Fe: -4.62',
'Co: -6.85', 'Ni: -5.71', 'Cu: -7.83', 'Zn: -6.95', 'Ga: -9.16', 'Ge: -8.46',
, 'END'
References:
1. GFIRON obs. energy level: Fe_2007
2. Raassen & Uyling: Fe 2
3. VALD 2: Ni
4. GFIRON obs. energy level: Ni
5. NBS: Nickel
6. VALD 2: VanderWaals_new_corCr
7. VALD 2: Fe
.....
19. NLTE lines: Mg
20. NLTE lines: Si

```



Виртуальный центр атомных и молекулярных данных

демонстрация работы с порталом пользователя.

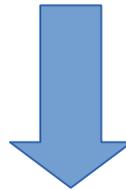




Разные лаборатории, предоставляющие данные, публикуют их

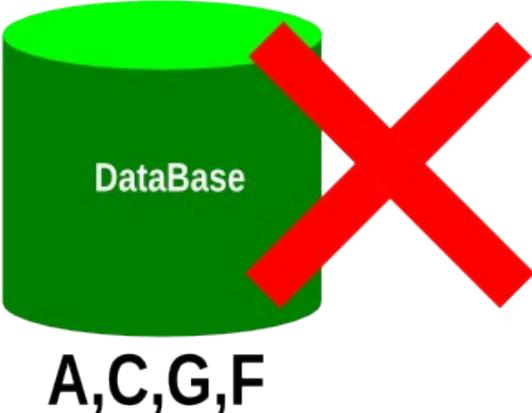
В разных форматах

В разных единицах измерения

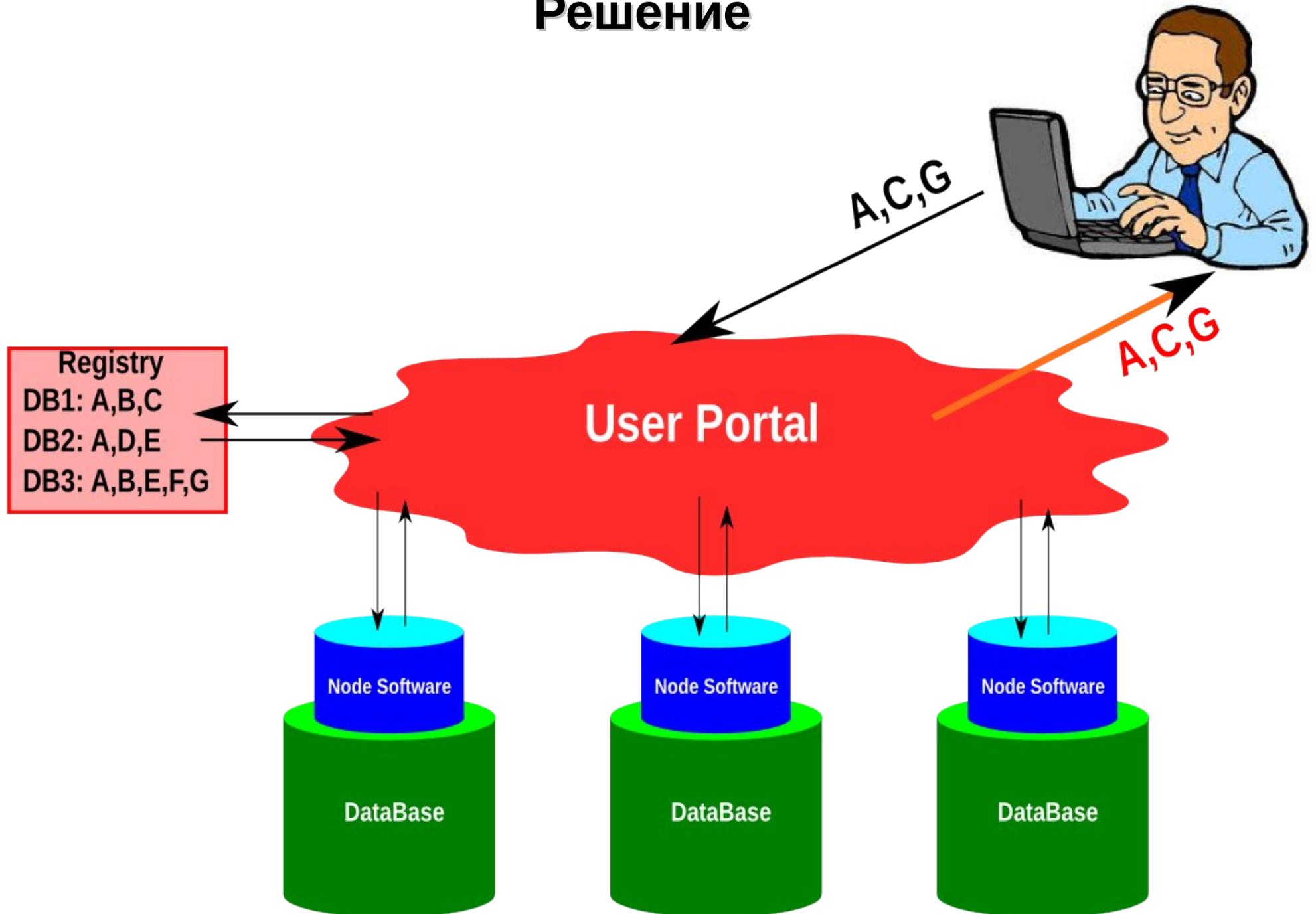


Данные надо собрать и привести в один формат

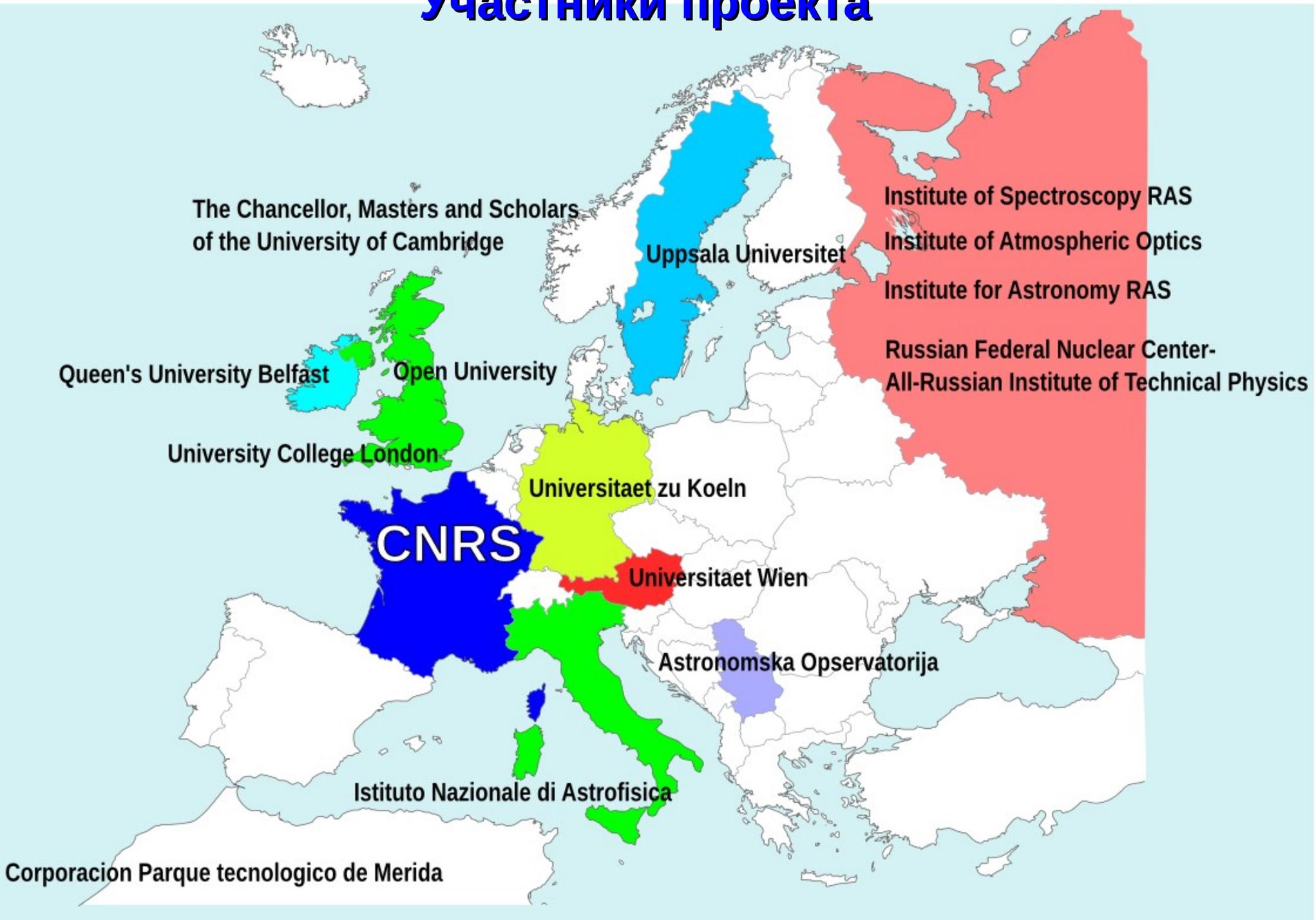
Проблема



Решение



Участники проекта



The Chancellor, Masters and Scholars
of the University of Cambridge

Uppsala Universitet

Institute of Spectroscopy RAS
Institute of Atmospheric Optics
Institute for Astronomy RAS

Russian Federal Nuclear Center-
All-Russian Institute of Technical Physics

Queen's University Belfast

Open University

University College London

Universitaet zu Koeln

CNRS

Universitaet Wien

Astronomska Opsevatorija

Istituto Nazionale di Astrofisica

Corporacion Parque tecnologico de Merida

Базы данных

База Данных	Содержание	Применение
CDMS Cologne Database for Molecular Spectroscopy	Atoms molecules	interstellar or circumstellar medium or in planetary atmospheres.
ICB Dijon Methane	$^{12}\text{CH}_4$ $^{13}\text{CH}_4$ $^{12}\text{CH}_3\text{D}$	
VALD Vienna Atomic Line Database	atoms	Spectroscopy
CDSD Carbon Dioxide Spectroscopic Databank	carbon dioxide molecule	Earth's atmosphere
BASECOL	molecules	Collision with atoms, ions, molecules or electrons
TOPbase	astrophysically abundant ions (Z=1,14; Z=16; Z=18; Z=20; Z=26)	Opacity Project

База Данных	Содержание	Применение
The Cagliari/Toulouse PAH	polycyclic aromatic hydrocarbons	Astrochemistry
Chianti	atomic data	astrophysical plasma
TIPbase	Fe isonuclear sequence	Iron Project
GSMA Reims S&MPO	$^{16}\text{O}_3, ^{16}\text{O}^{18}\text{O}^{16}\text{O}, ^{18}\text{O}_3$	Atmosphere
GSMA Reims Ethylene	$^{12}\text{C}_2\text{H}_4$	
GhoSST database	grains	Planetology Solid Spectroscopy
Lund laboratory spectroscopy database	atoms	Experimental data for transitions and lifetimes

База Данных	Содержание	Применение
Stark-b	atoms and ions	Broadening in the impact approximation
Spectr-W3	atoms and ions	spectral properties of multicharged ions
Water	$H_2^{16}O$, HDO, D_2O , $H_2^{17}O$, $H_2^{18}O$	Atmosphere
HITRAN	molecular absorption	Physics of Atmosphere
KIDA	Interstellar and planetary atoms and molecules	astrochemical
...		
...		

- Query by...
- Species
 - Processes
 - Environment
 - Advanced

Atoms Clear Remove

Atom symbol

Mass number to

Nuclear charge to

Ion charge to

InChIKey

State energy to 1/cm

Equivalent to to 1/cm

Radiative Clear Remove

Wavelength ▼ to A ▼

Equivalent Wavelength 5000.0 to 5001.0A

Upper state energy to 1/cm

Equivalent to to 1/cm

Lower state energy to 1/cm

Equivalent to to 1/cm

Probability, A to 1/s

Find data Save query

Legend

available, can answer
available, don't support query
unsupported keyword

- ☞ Cologne Database for Molecular Spectroscopy: VAMDC-TAP service
- ☞ ICB Dijon Methane
- ☞ VALD (atoms)
- ☞ Carbon Dioxide Spectroscopic Databank (VAMDC-TAP)
- ☞ BASECOL: VAMDC-TAP interface
- ☞ TOPbase : VAMDC-TAP interface
- ☞ Theoretical spectral database of polycyclic aromatic hydrocarbons
- ☞ Chianti
- ☞ TIPbase : VAMDC-TAP interface
- ☞ GSMA Reims S&MPO
- ☞ GSMA Reims Ethylene
- ☞ TAP-XSAMS for GhoSST database
- ☞ Lund laboratory spectroscopy database
- ☞ Stark-b
- ☞ Spectr-W3
- ☞ Water internet Accessible Distributed Information System
- ☞ HITRAN-UCL resource
- ☞ VALD sub-set in Moscow (obs)
- ☞ KIDA: VAMDC-TAP interface

Done

Modify query

Stop waiting

Save query

select * where (RadTransWavelength >= 5000.0 AND RadTransWavelength <= 5001.0) AND ((AtomSymbol = 'Fe')

Comments

XSAMS processors

- BibTeX from XSAMS
- Table views of XSAMS
- Xsams2SME

Process

Name	Response	Download	Species	States	Processes	Radiative	Collisions	Non Radiative
<input type="checkbox"/> VALD (atoms)	OK	XSAMS	7	2265	1331	1331	0	0
<input type="checkbox"/> VALD sub-set in Moscow (obs)	OK	XSAMS	4	24	12	12	0	0
<input type="checkbox"/> Chianti	OK	XSAMS	1	6	3	3	0	0
<input type="checkbox"/> TOPbase : VAMDC-TAP interface	OK	XSAMS	1	2	1	1	0	0
<input type="checkbox"/> Lund laboratory spectroscopy database	OK	XSAMS	0	0	0	0	0	0
Spectr-W3	EMPTY		0	0	0	0	0	0
Stark-b	EMPTY		0	0	0	0	0	0



TAP — Transport Access Protocol

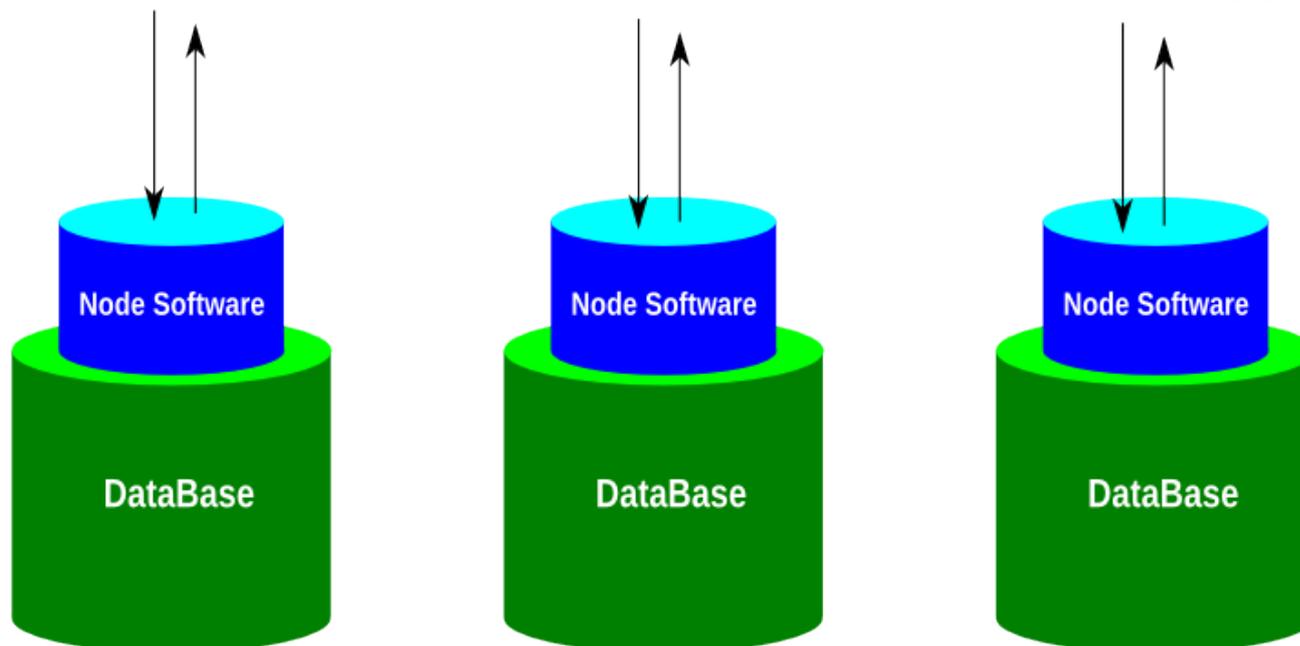
```
select * where (RadTransWavelength >= 5000.0 AND  
RadTransWavelength <= 5001.0) AND ((AtomSymbol = 'Fe'))
```

X
S
A
M
S

User Portal

XSAMS

XML
Schema for
Atoms,
Molecules and
Solids



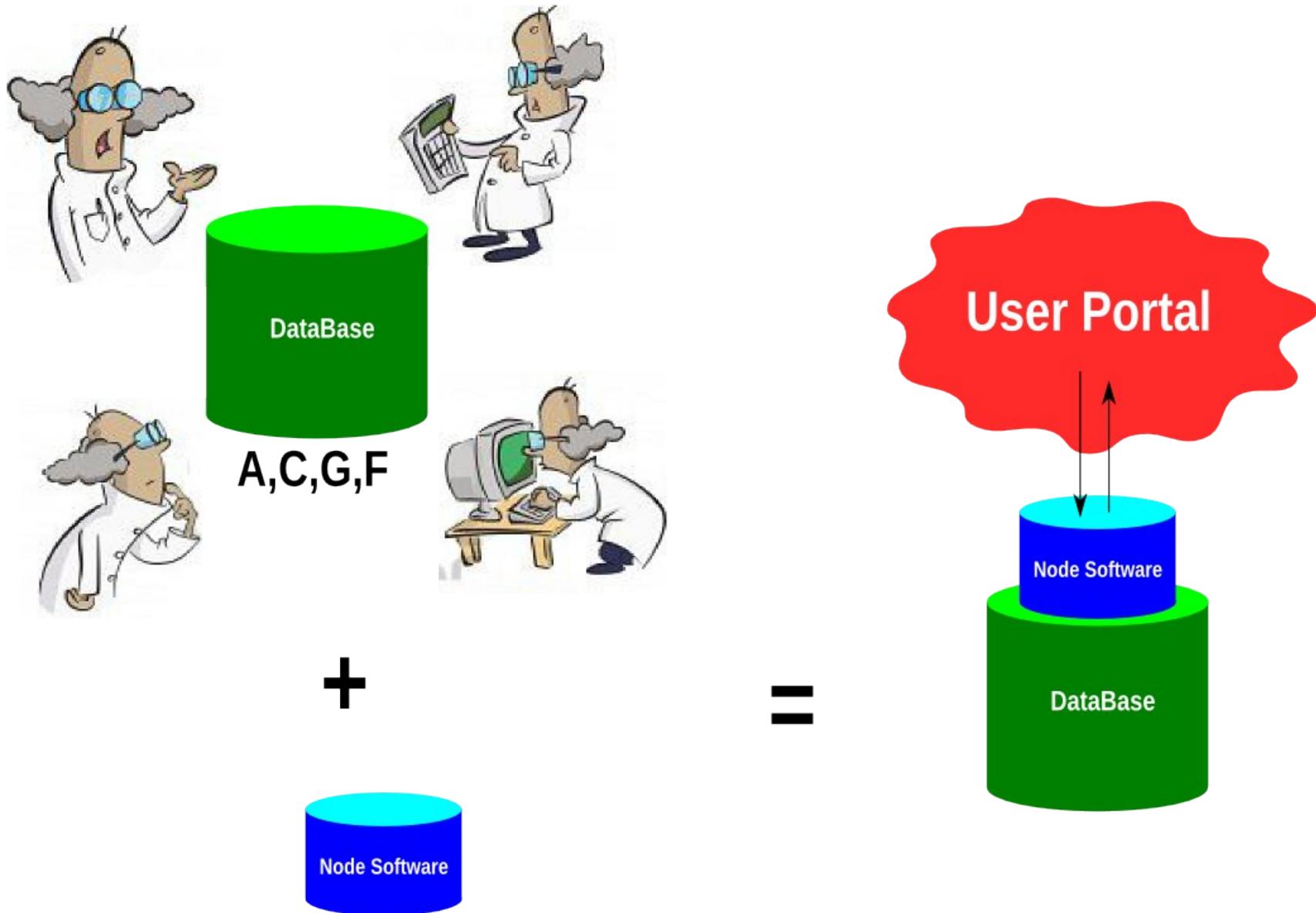
Структура XSAMS

```
<XSAMSData
xsi:schemaLocation="http://vamdc.org/xml/xsams/1.0 http://vamdc.org/xml/xsams/1.0">
  <Sources>Библиография</Sources>
  <Methods>Описание методов</Methods>
  <Environments>Параметры внешней
среды</Environments>
  <Species>Данные по частицам, атомам, ионам
и молекулам</Species>
  <Processes>Данные по процессам (переходы,
СТОЛКНОВЕНИЯ, ...)</Processes>
</XSAMSData>
```

Спектральная линия

- Атом
 - Название, обозначение, заряд ядра
 - Изотоп
 - Масса
- Радиативный переход
 - Длина волны
 - А, см, nm, cm^{-1} , Hz, eV
 - Вакуум, воздух
 - Экспериментальная, расчетная, Ritz
 - Вероятность перехода
 - Сила осциллятора
 - Время жизни
 - Коэффициенты Эйнштейна
 - Уширяющие параметры
- Уровень энергии 1 и 2
 - Энергия
 - Квантовые числа
 - Тип связи
 - Терм
 - Конфигурация
- Свойства среды
 - T, P, n

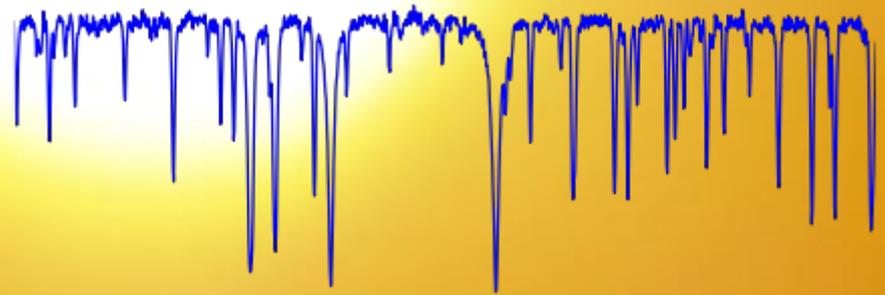
VAMDC производителям данных



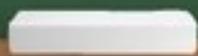
Формирование спектральных линий в звездных атмосферах

Часть II

Поведение спектральных линий



Спектральная линия



ПОТОК ТОЛЬКО В ЛИНИИ

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

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

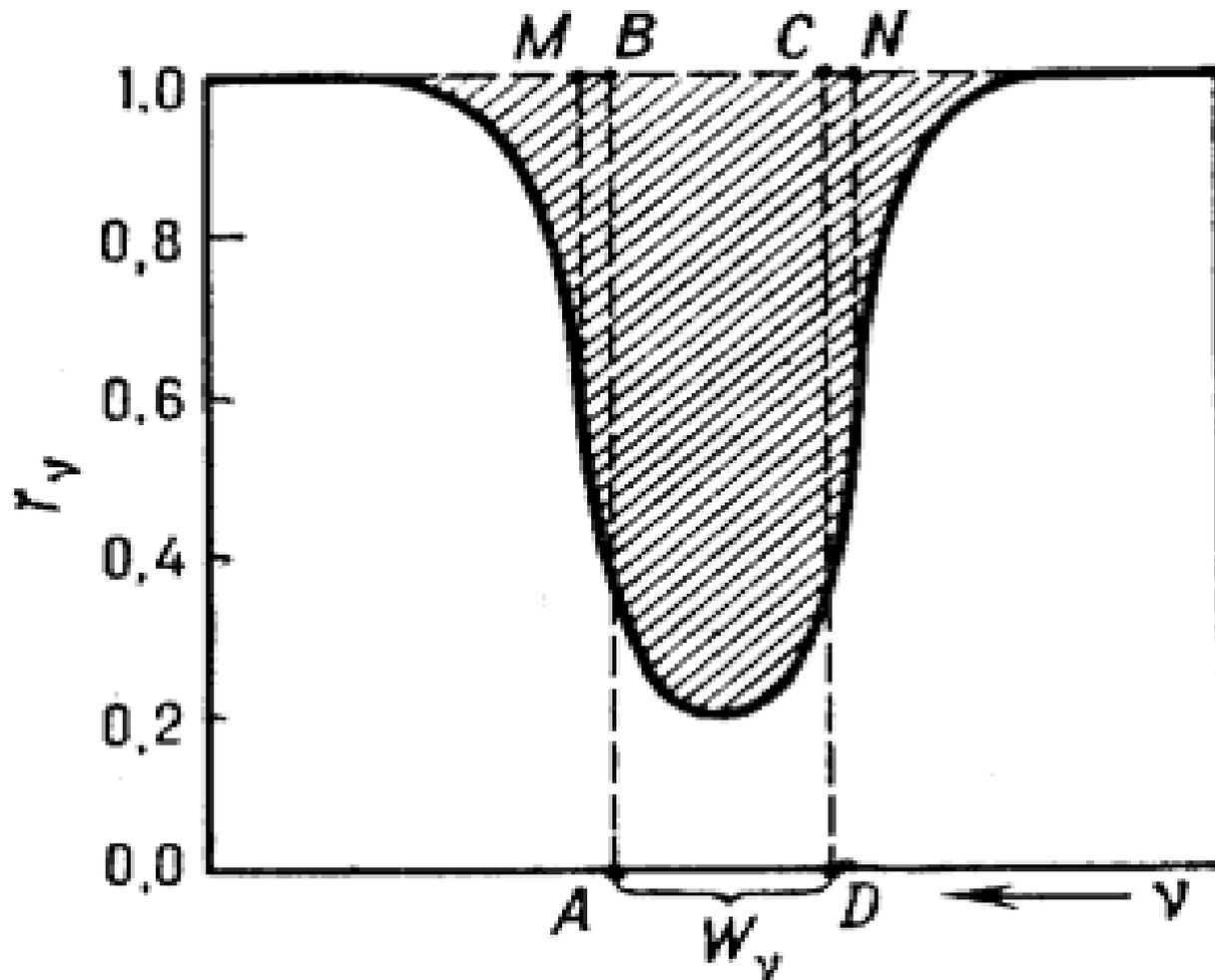
$$F_{\nu} = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} S_{\nu}(\tau_0) E_2(\tau_{\nu}) \frac{\kappa_{\nu}^{cont}(\tau_0) + \kappa_{\nu}(\tau_0)}{\kappa_0} \tau_0 \frac{1}{lge} dl g \tau_0$$

*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

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

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

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

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

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

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

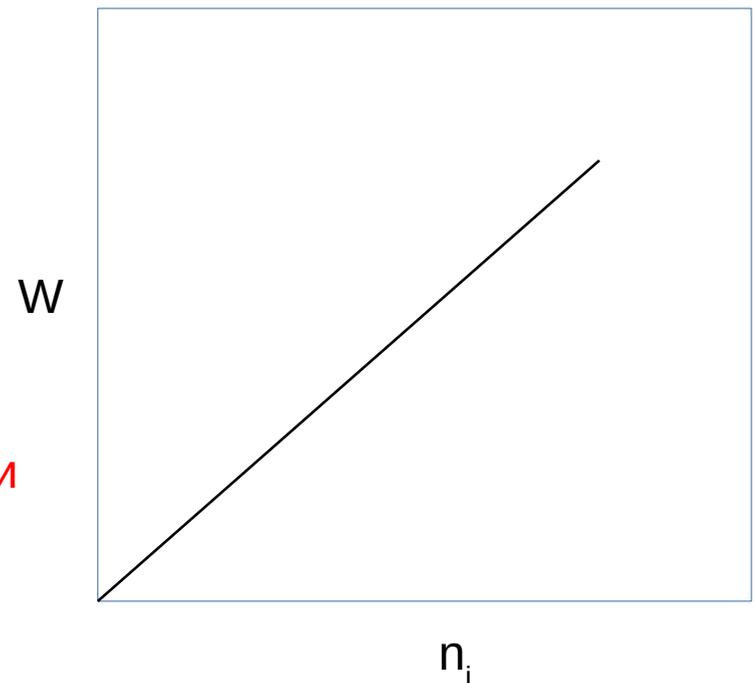
$$\tau_0 \ll 1, \beta_0 < 1 \quad \beta_0 \sim \kappa_0 \sim n_i f_{ij} \frac{1}{\Delta\nu_D}$$

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

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

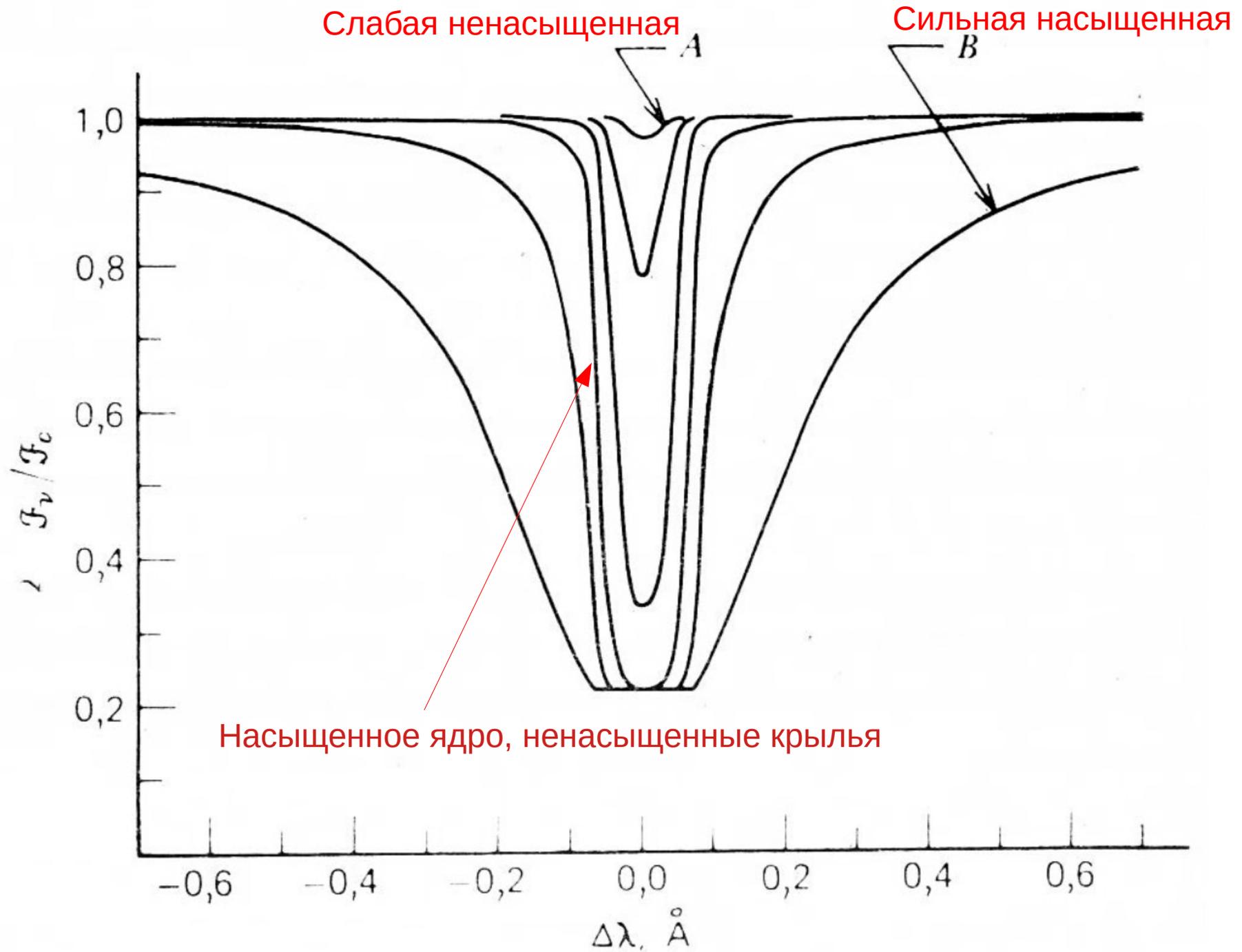
Профиль Фойгта с доплеровским ядром и сильными лоренцевскими крыльями

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

**Участок
затухания**

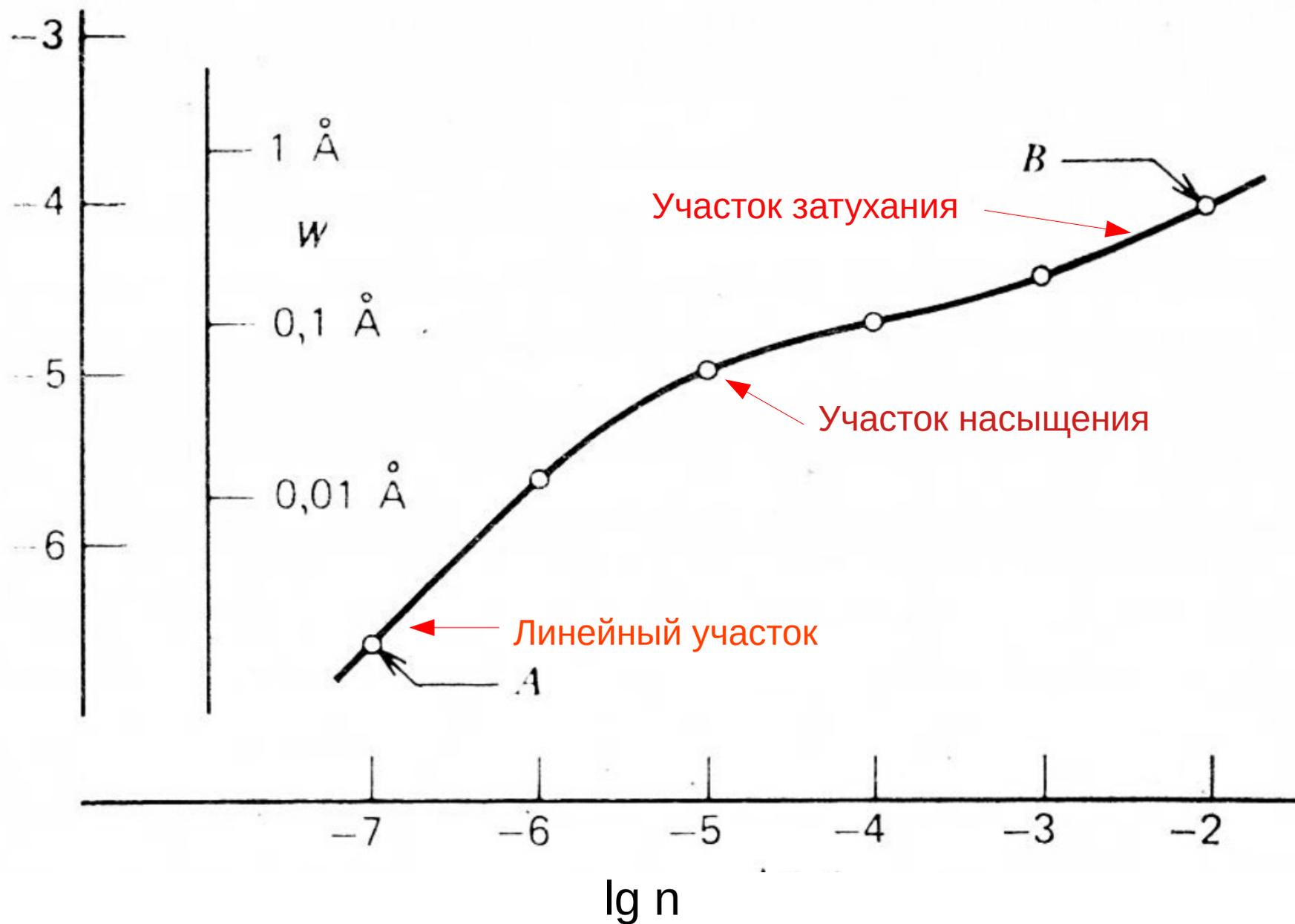
Рост W обеспечивается растущими далекими участками крыльев линии

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

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

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

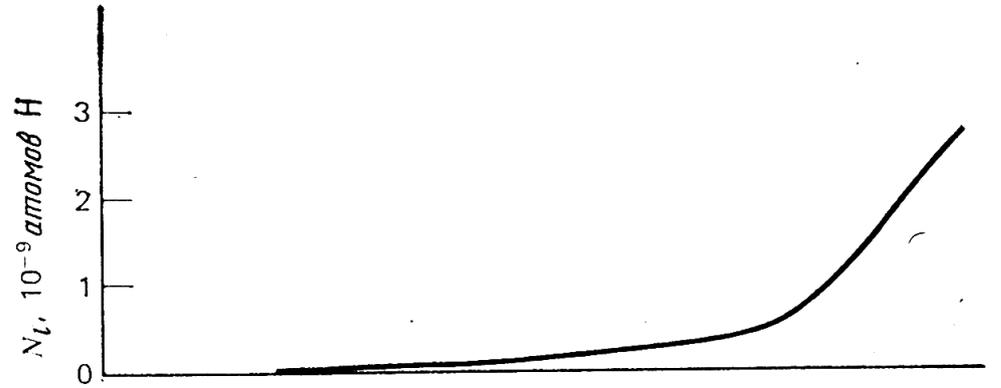
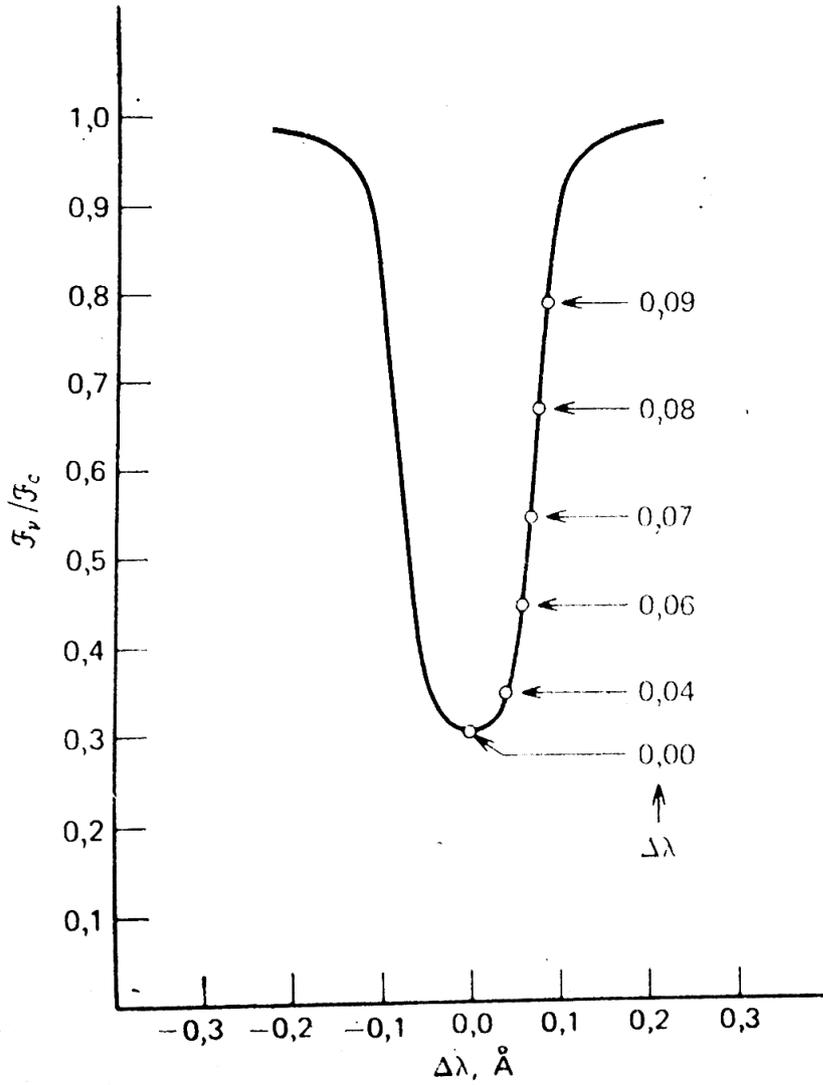
Функция вклада

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

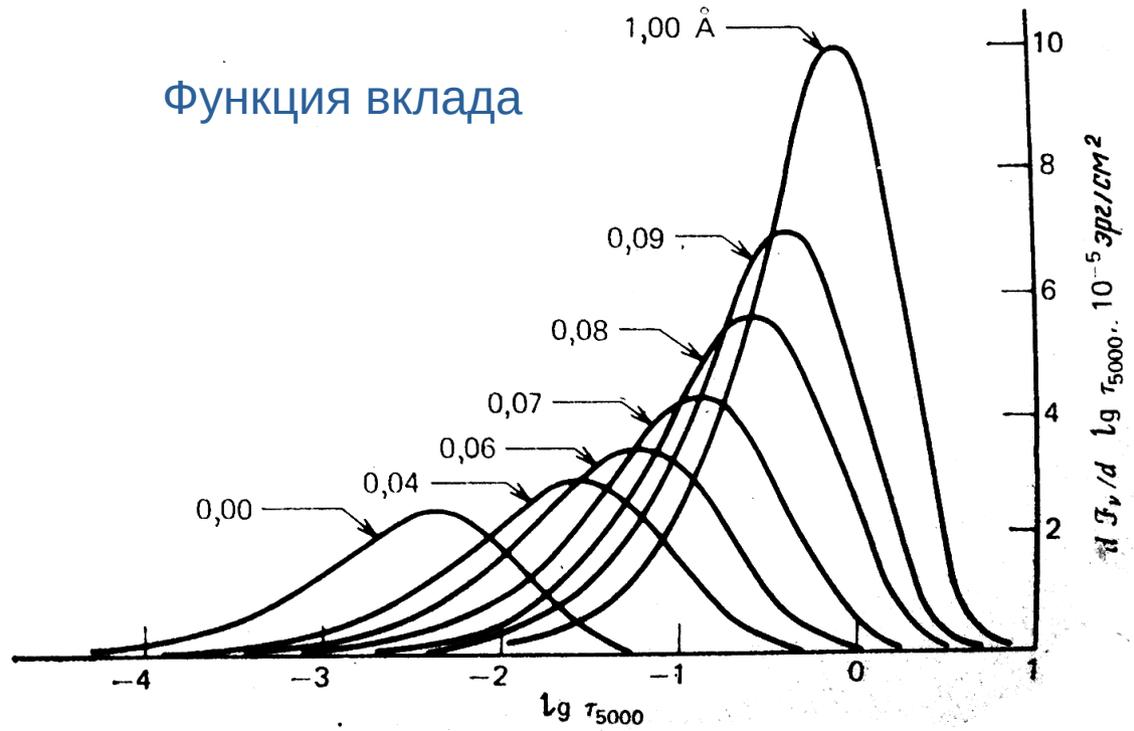
FeI 6065A E=5 eV

Концентрация (Больцман+Саха)

Профиль линии



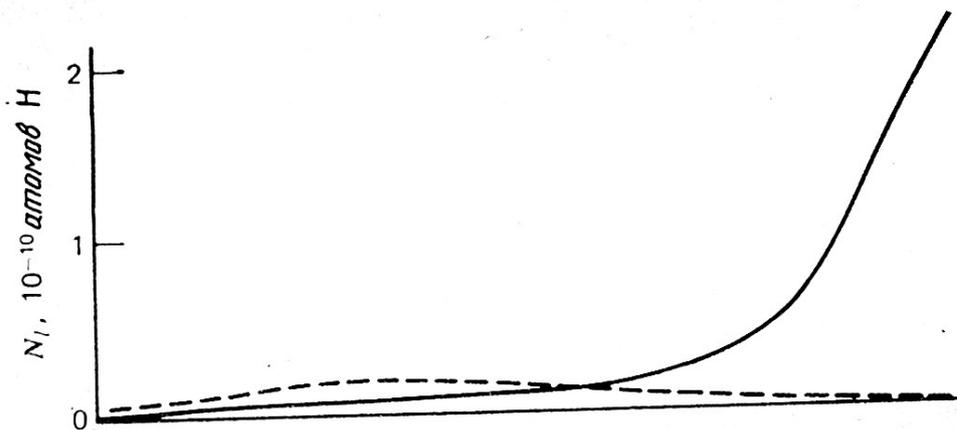
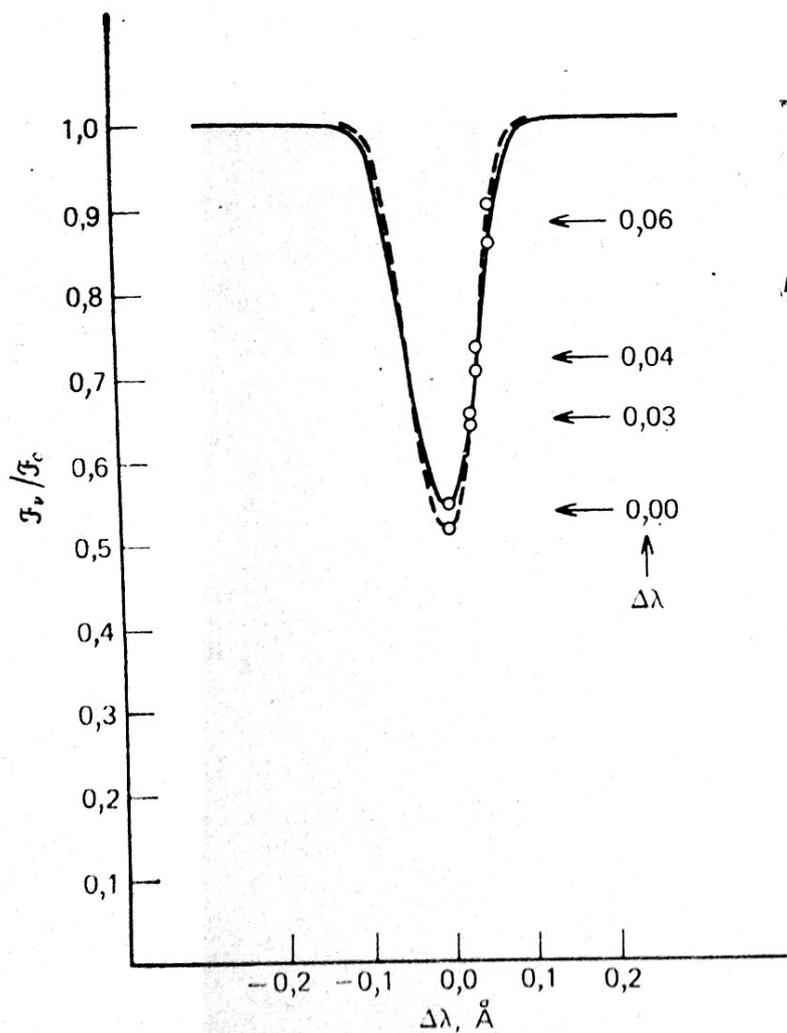
Функция вклада



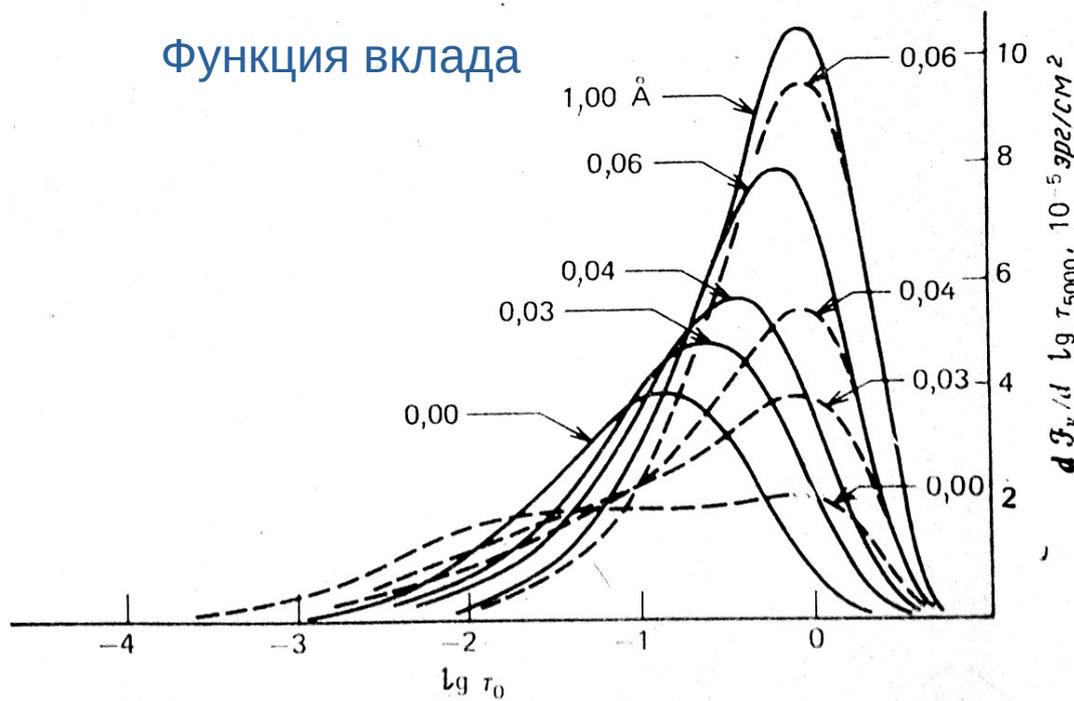
FeII E=5 eV (сплошная), 0 eV (штрих)

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

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

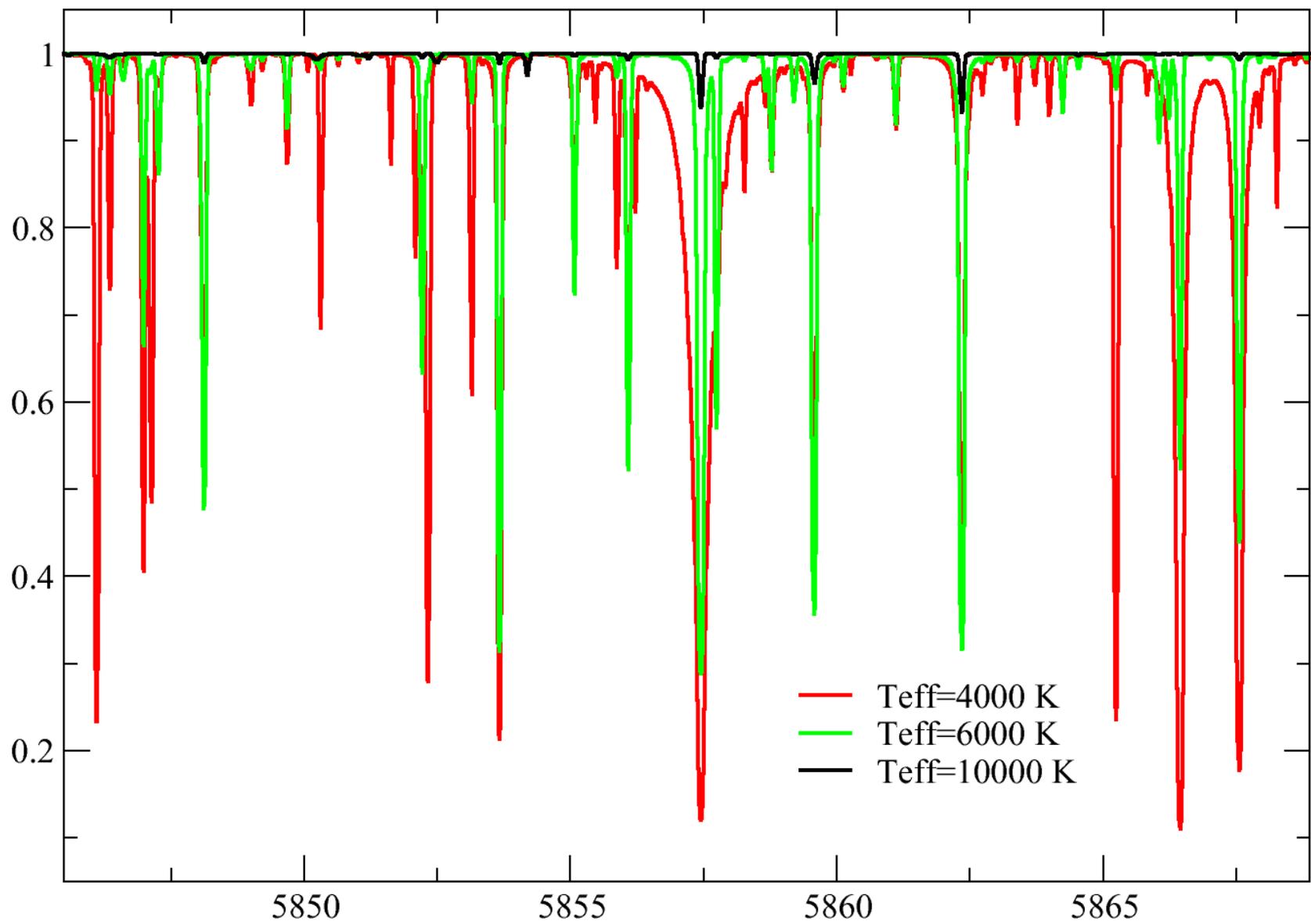


 $f(T)$

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

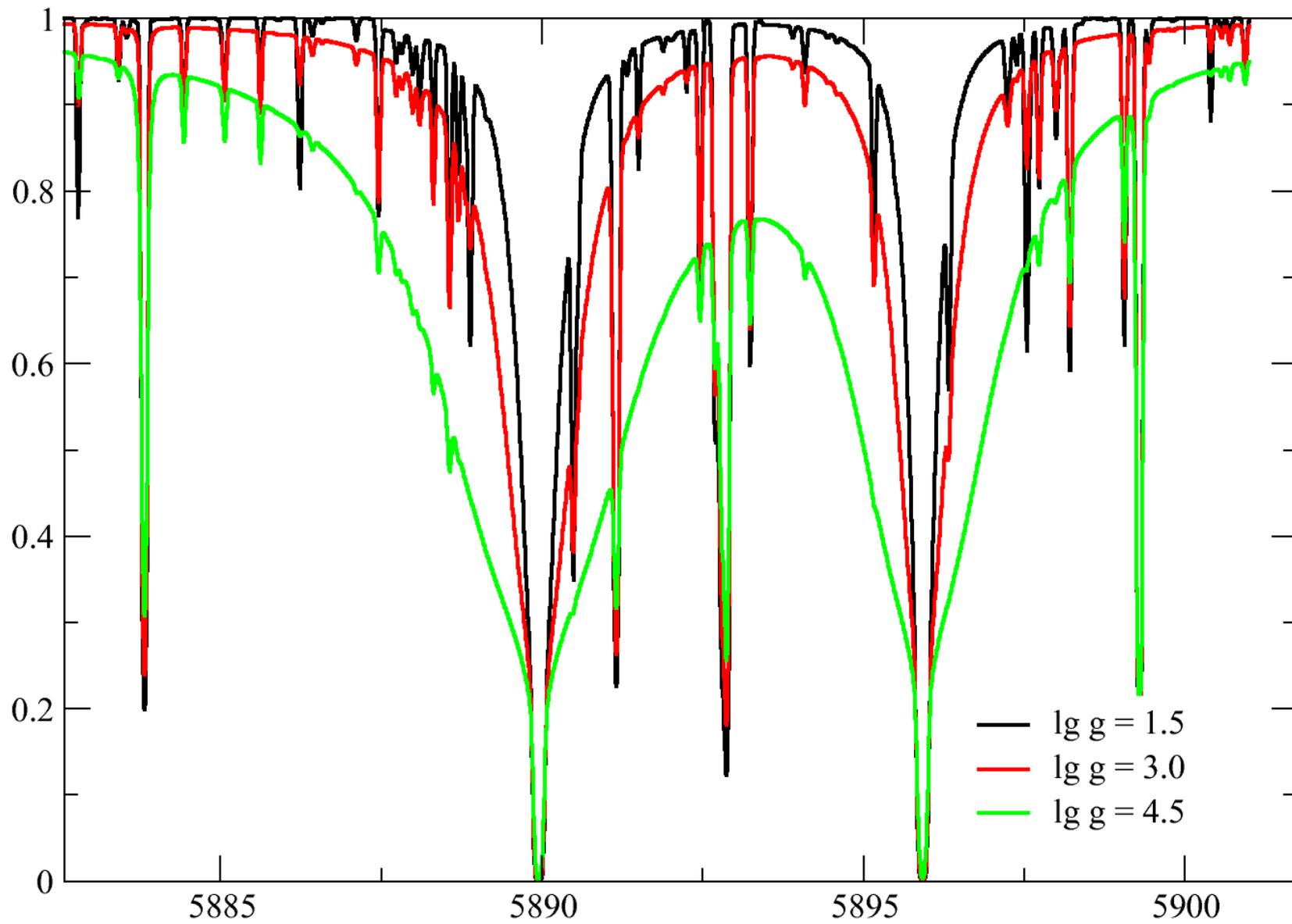
$$\frac{N_{n+1}}{N_n} = \frac{1}{N_e} \frac{2u_{n+1}}{u_n} \left[\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right]^{3/2} e^{-\frac{\chi_n}{kT}}$$

$P = nkT$
↓

Больцман
населенности

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

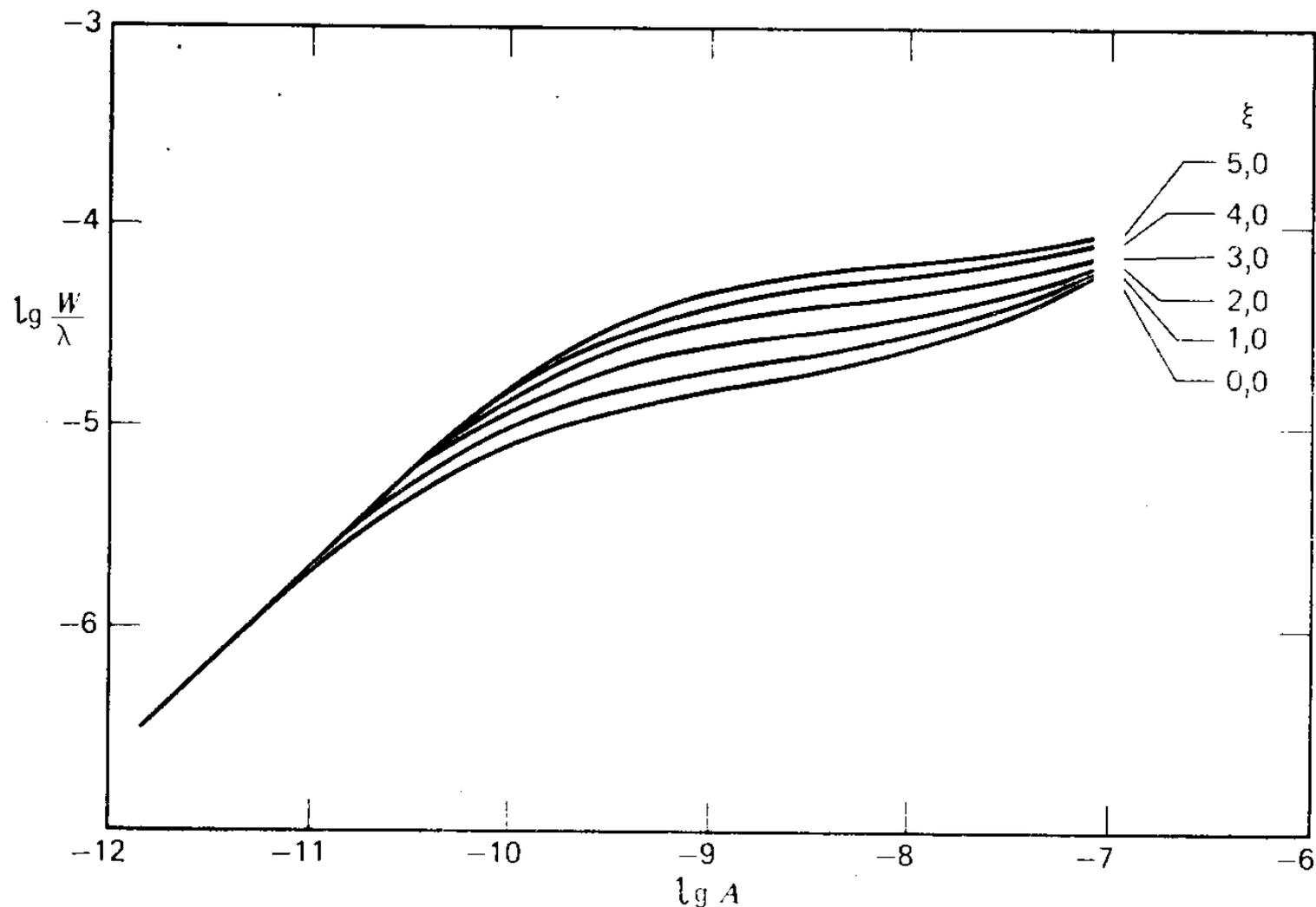
1. Поглощение в линии $\kappa_\nu \sim n_i = f(\lg g)$
2. Профиль линии, через γ $\phi_\nu = f(\lg g)$



*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

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

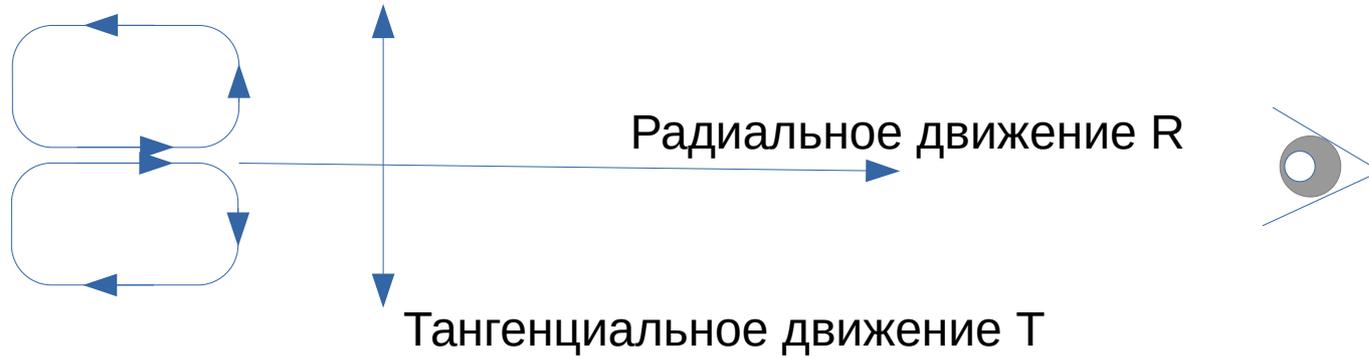
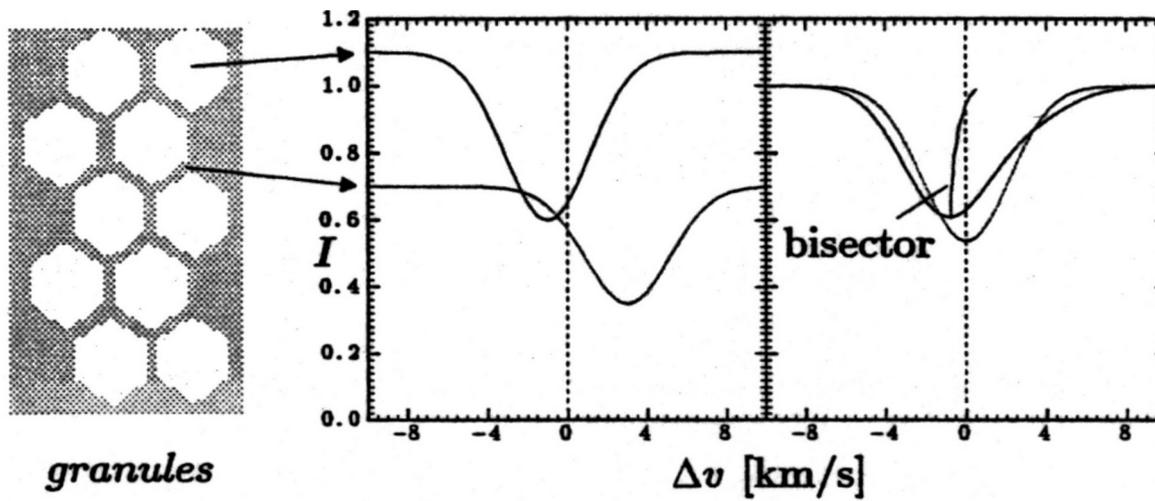
$$I_\nu = I_\nu * \Theta(\Delta\lambda)$$

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

Макротурбуленция в отличии 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

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

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

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

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

При изотропии I $\pi/2$

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

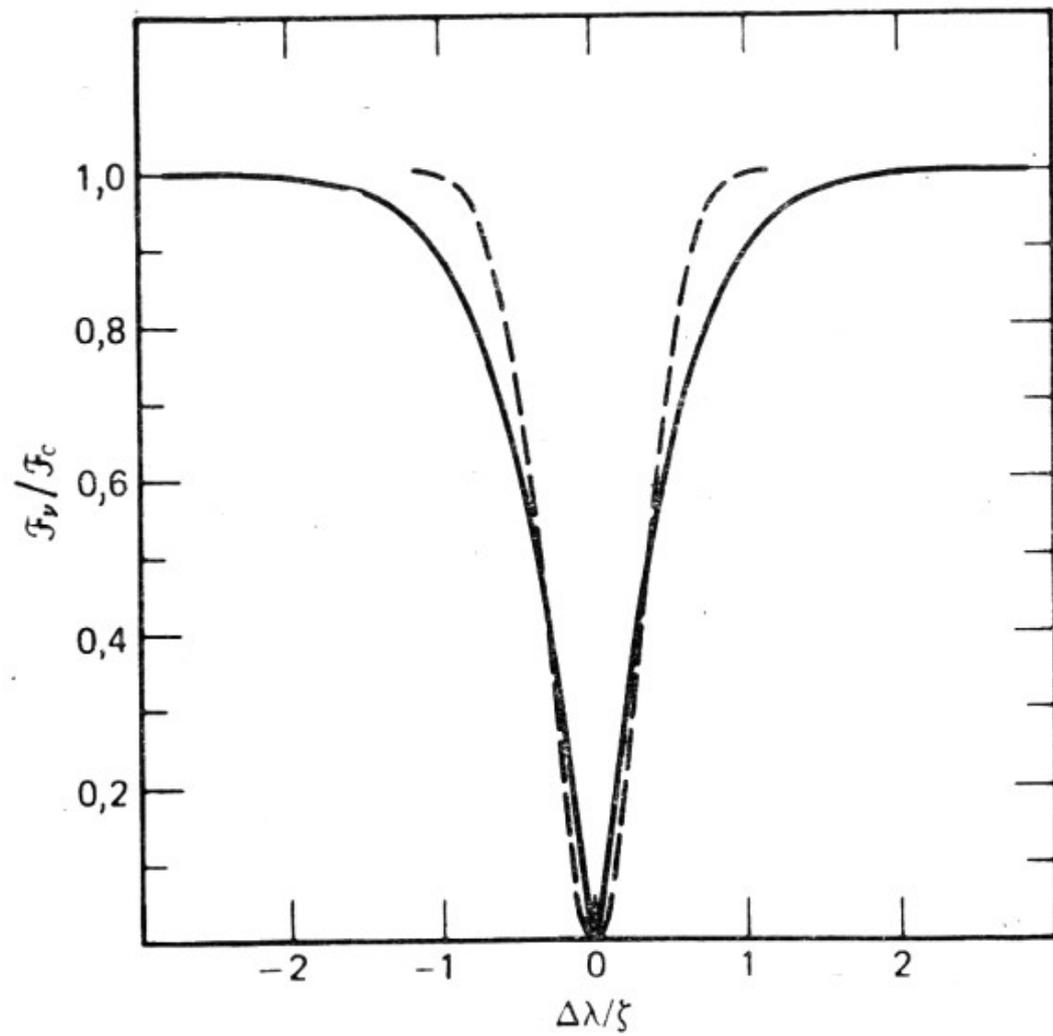
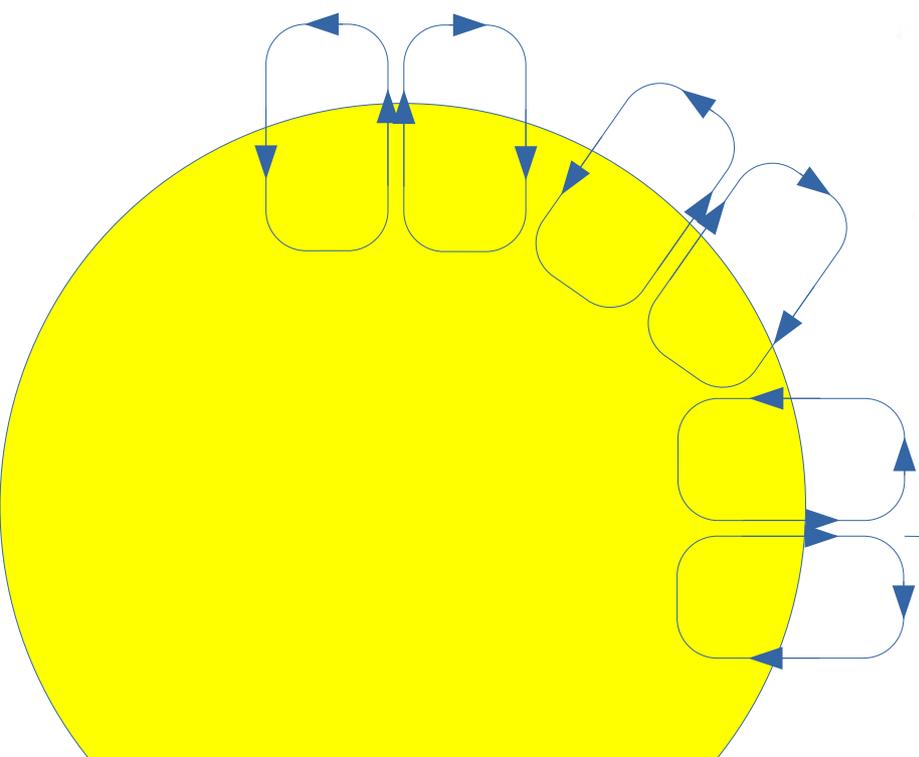
Подставляя Θ и заменяя переменные

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

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

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

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



Радиальное движение

Тангенциальное движение

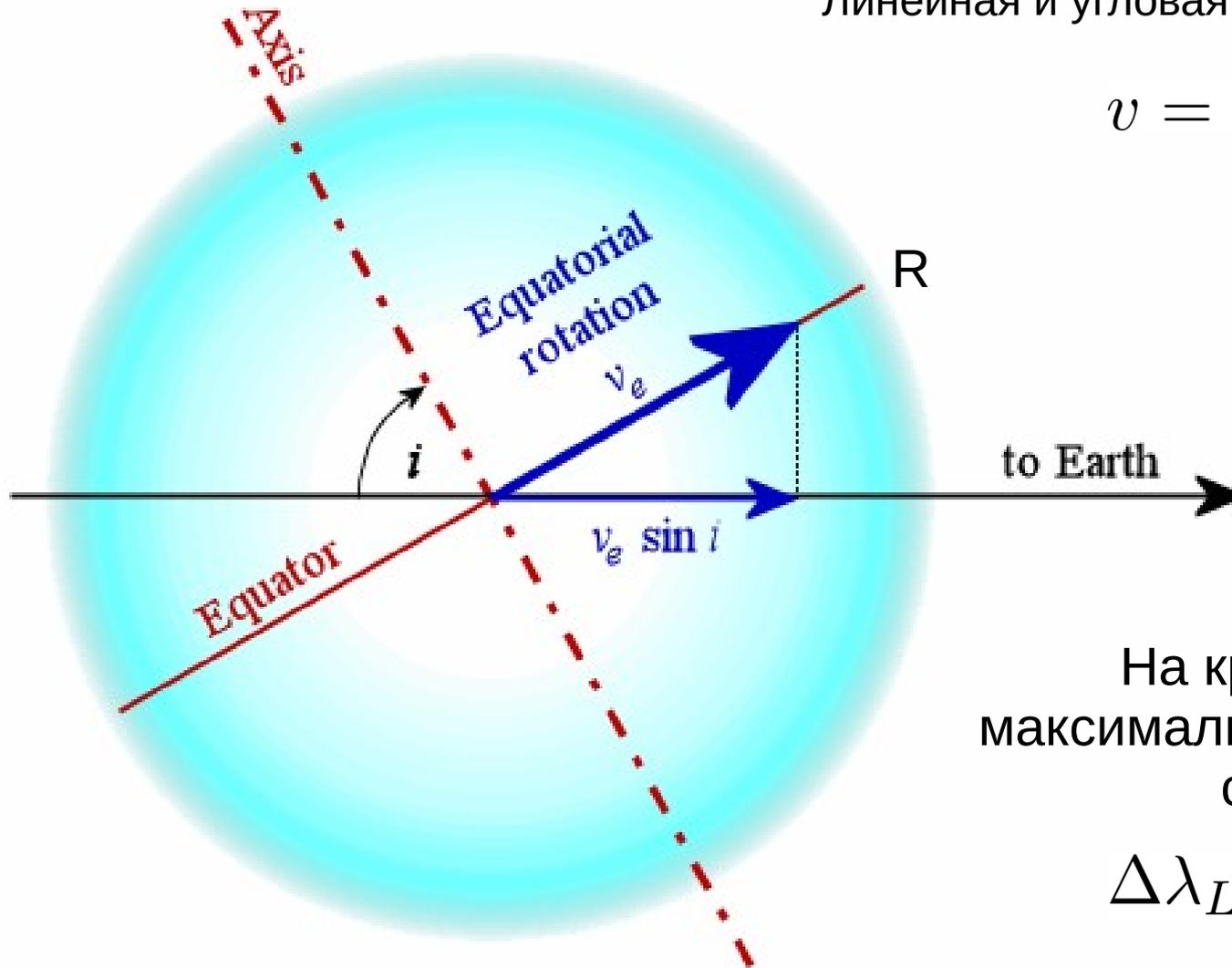
***Зависимость от скорости
вращения***



Проекция скорости вращения на картинную плоскость

Линейная и угловая скорость вращения

$$v = \Omega \times R$$



На краях диска
максимальное смещение в
спектре

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

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

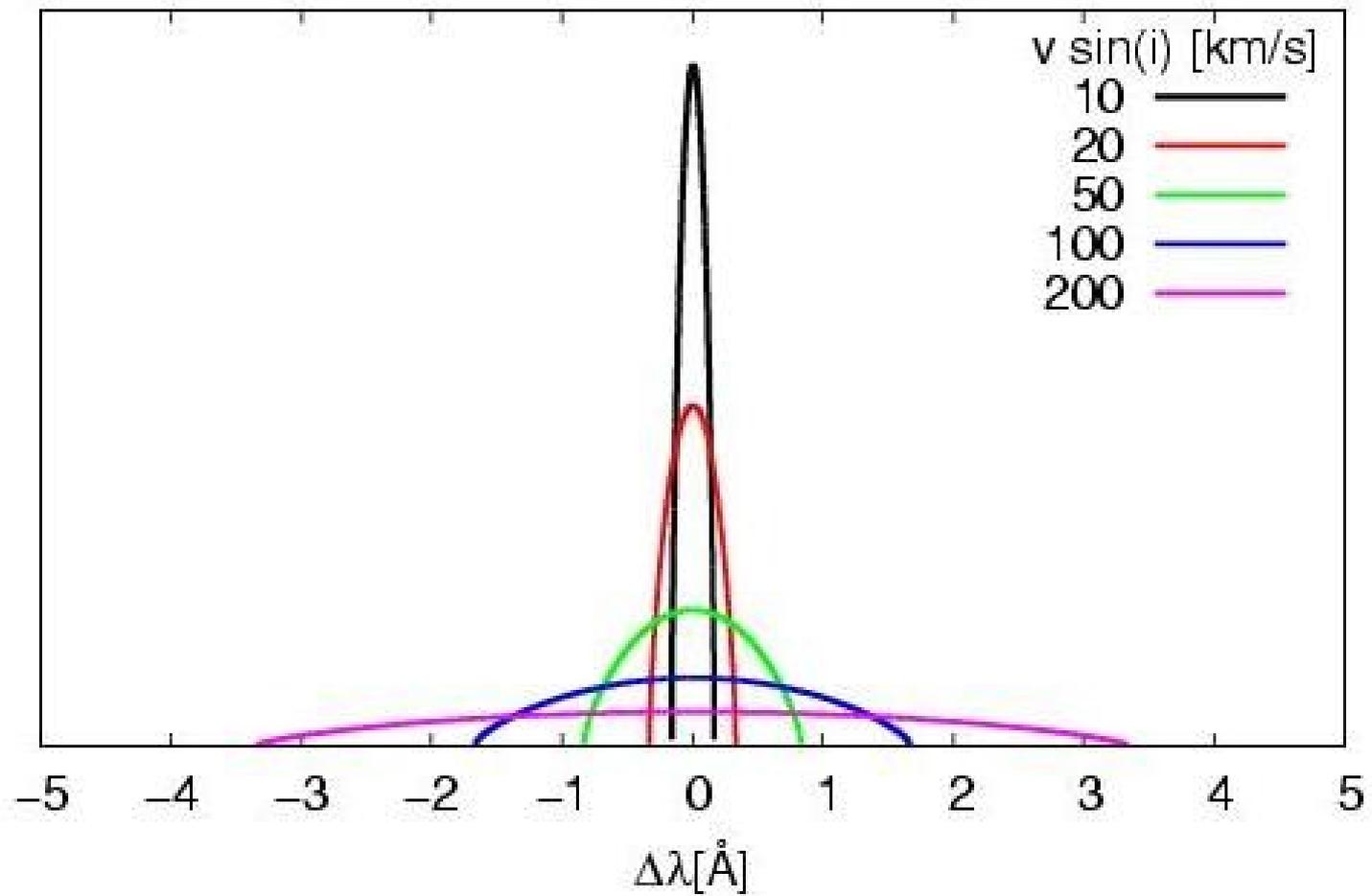
Профиль вращения

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

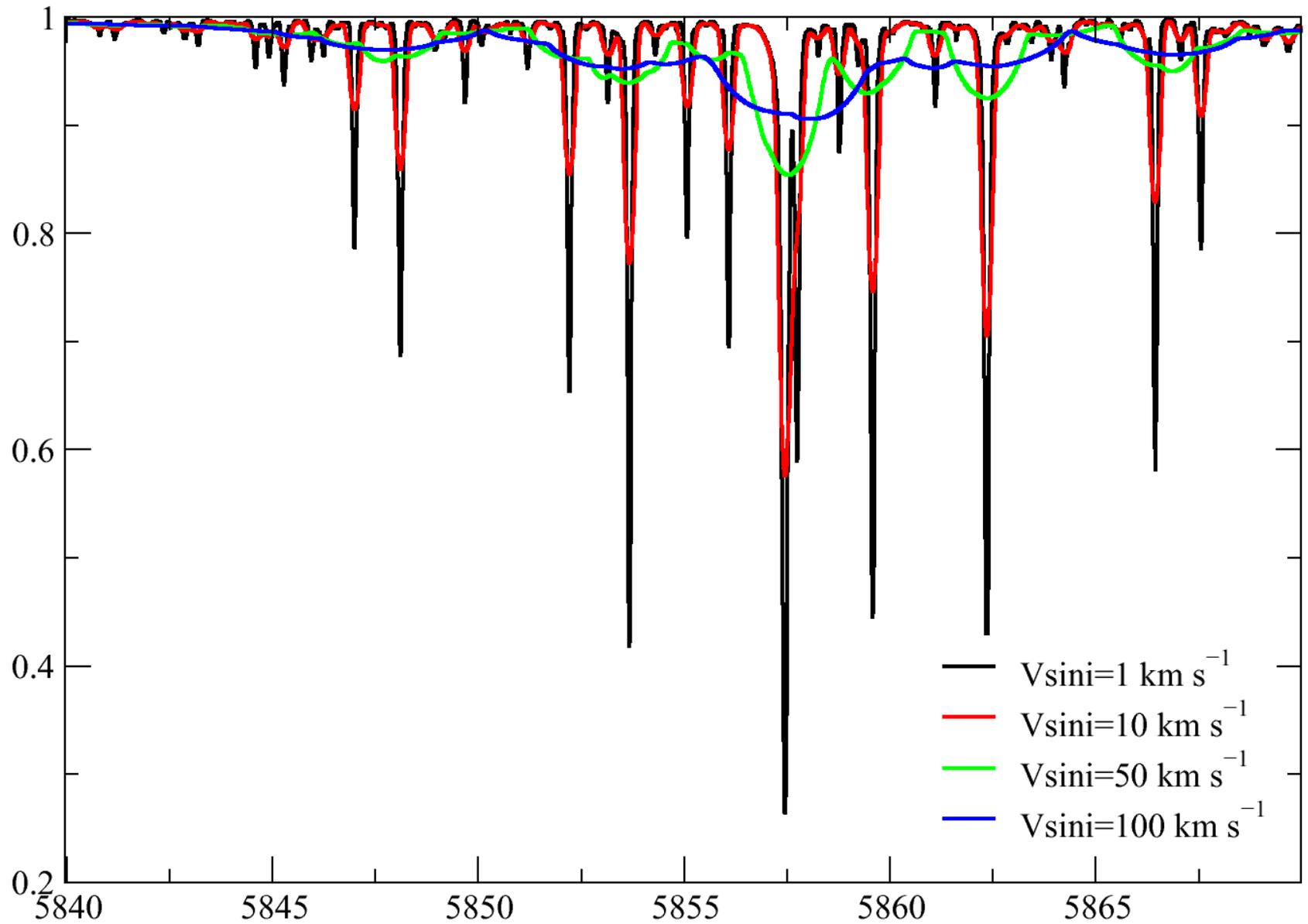
$$r_\lambda = \frac{F_\lambda}{F_{cont}} \quad r_\lambda^{obs} = r_\lambda * G(\Delta\lambda)$$

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

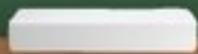
Rotational profile



Проекция скорости вращения на картинную плоскость



Инструментальный профиль



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

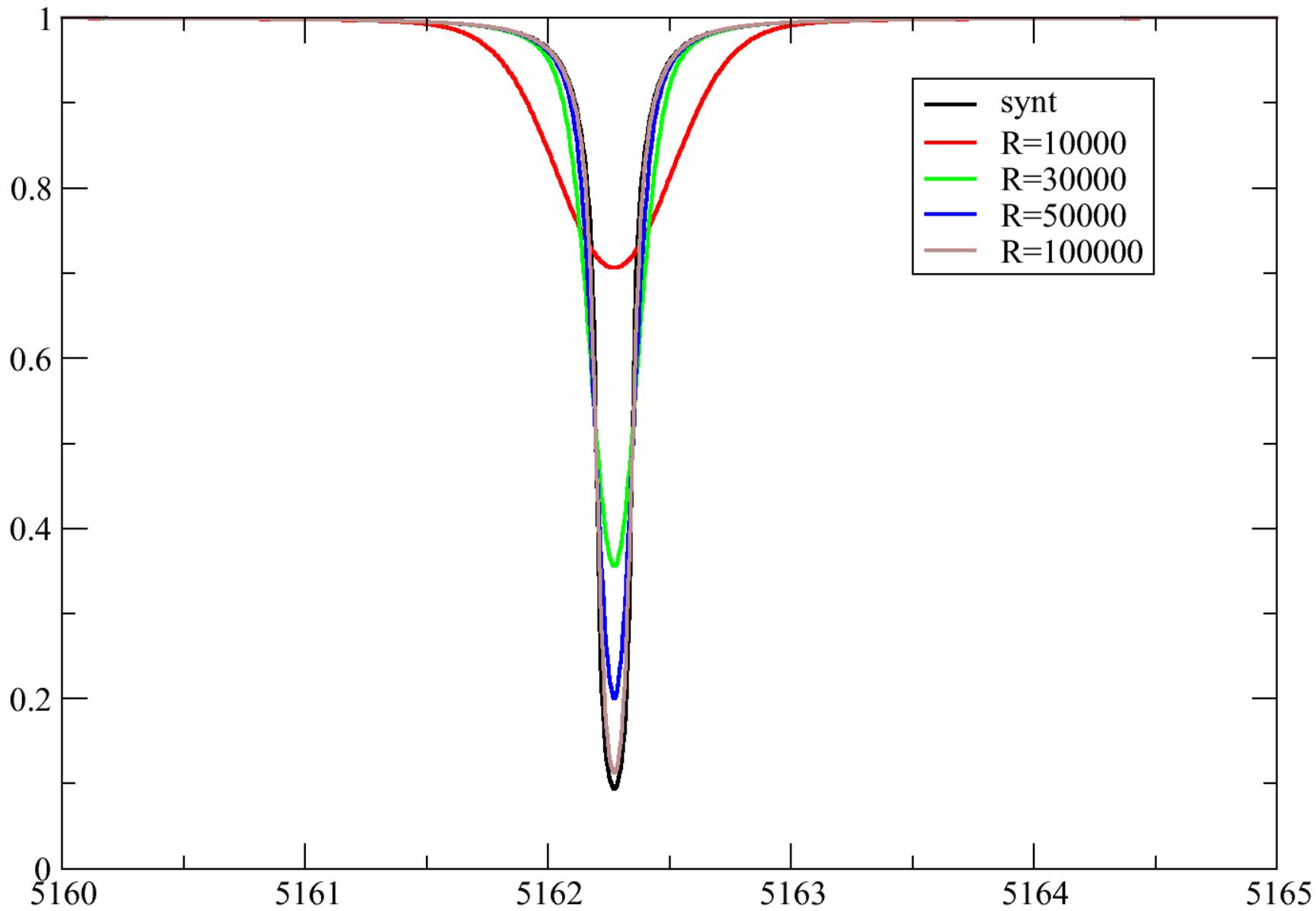
Спектральное разрешение

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

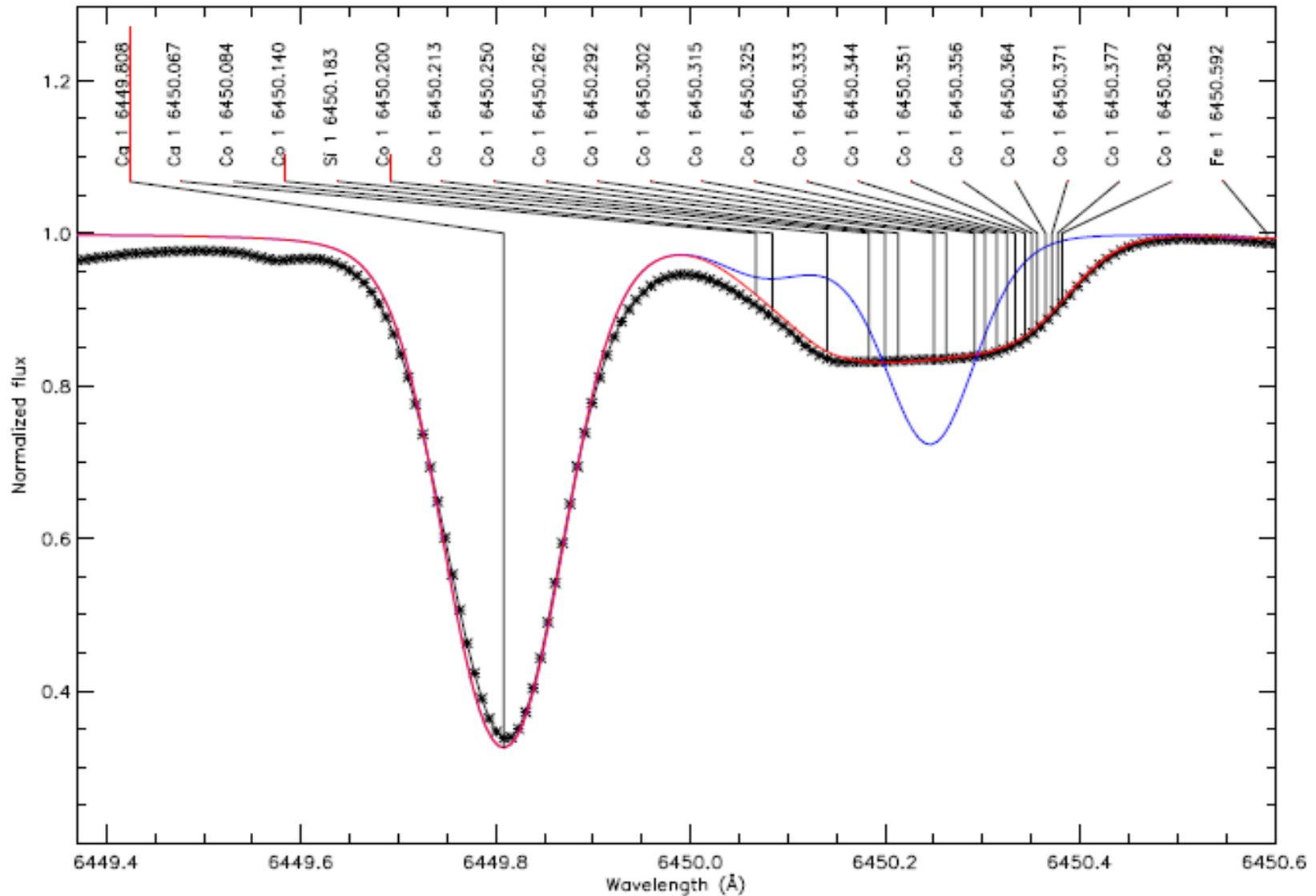


Синтетический спектр звезды



Синтетический спектр звезды

Теоретический вычисленный спектр, пригодный для сравнения с наблюдениями



Наблюдаемый поток

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

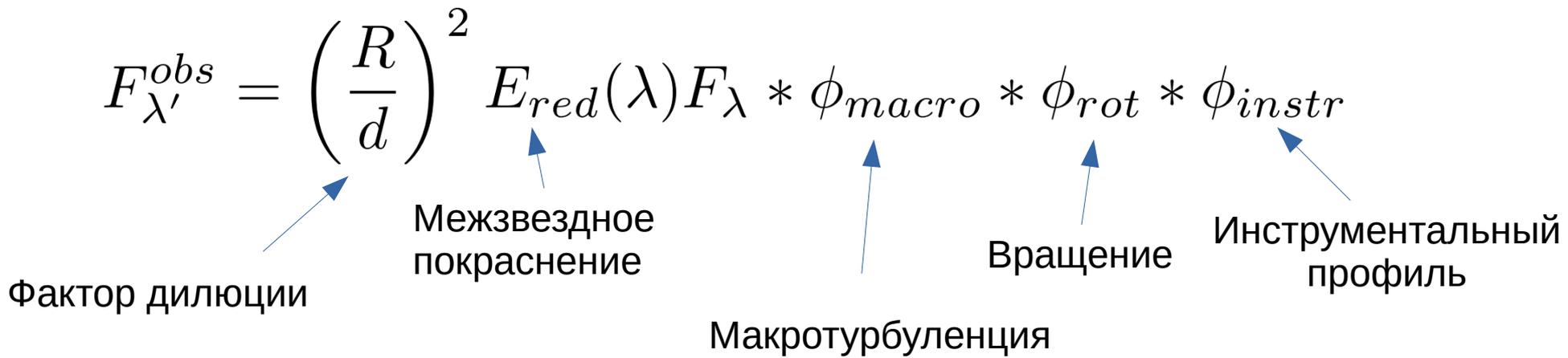
Фактор диллюции

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_{vdWaals} , 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

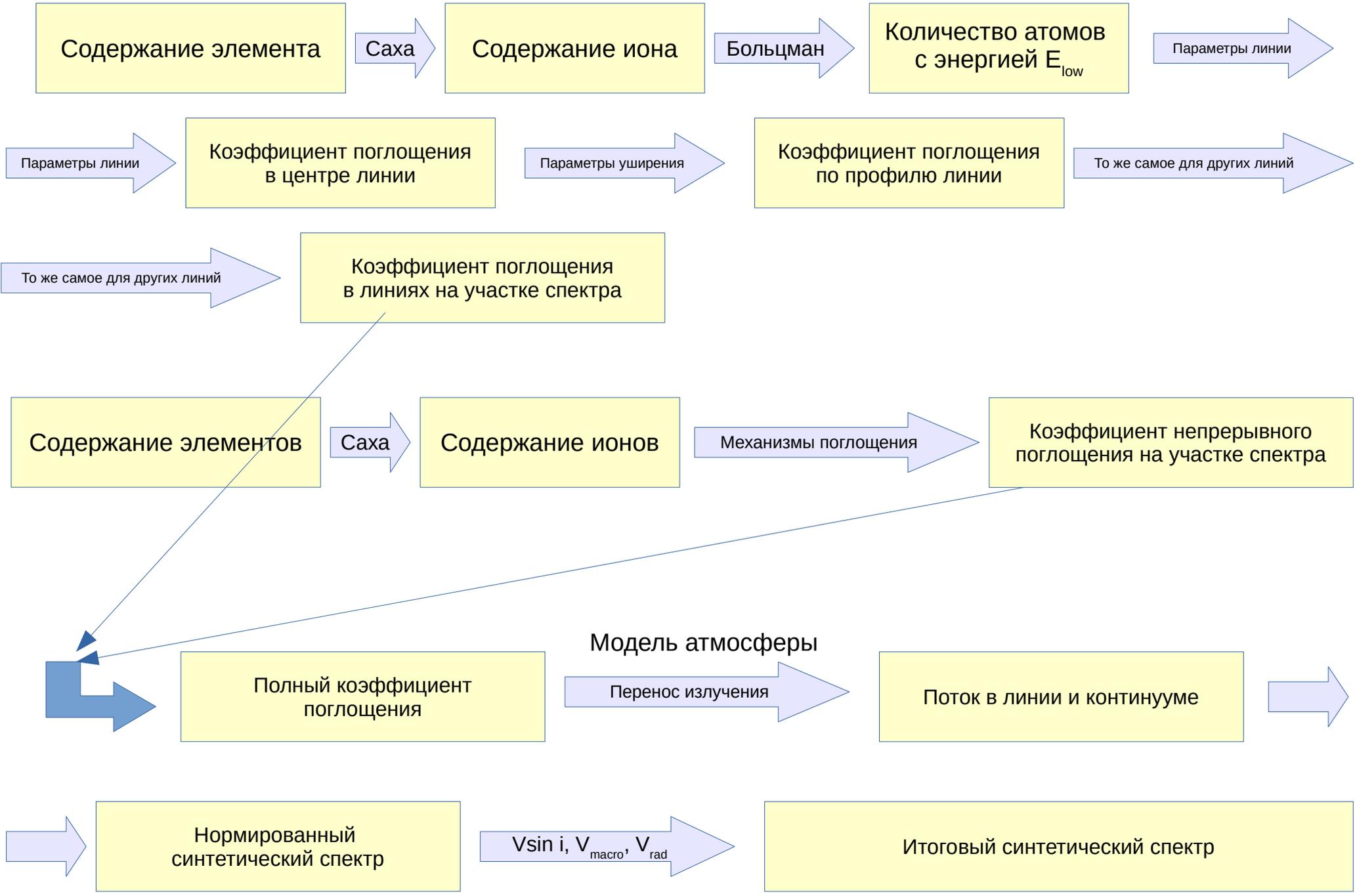
$V \sin i, V_{\text{macro}}, V_{\text{rad}}$

Синтетический спектр звезды как объекта

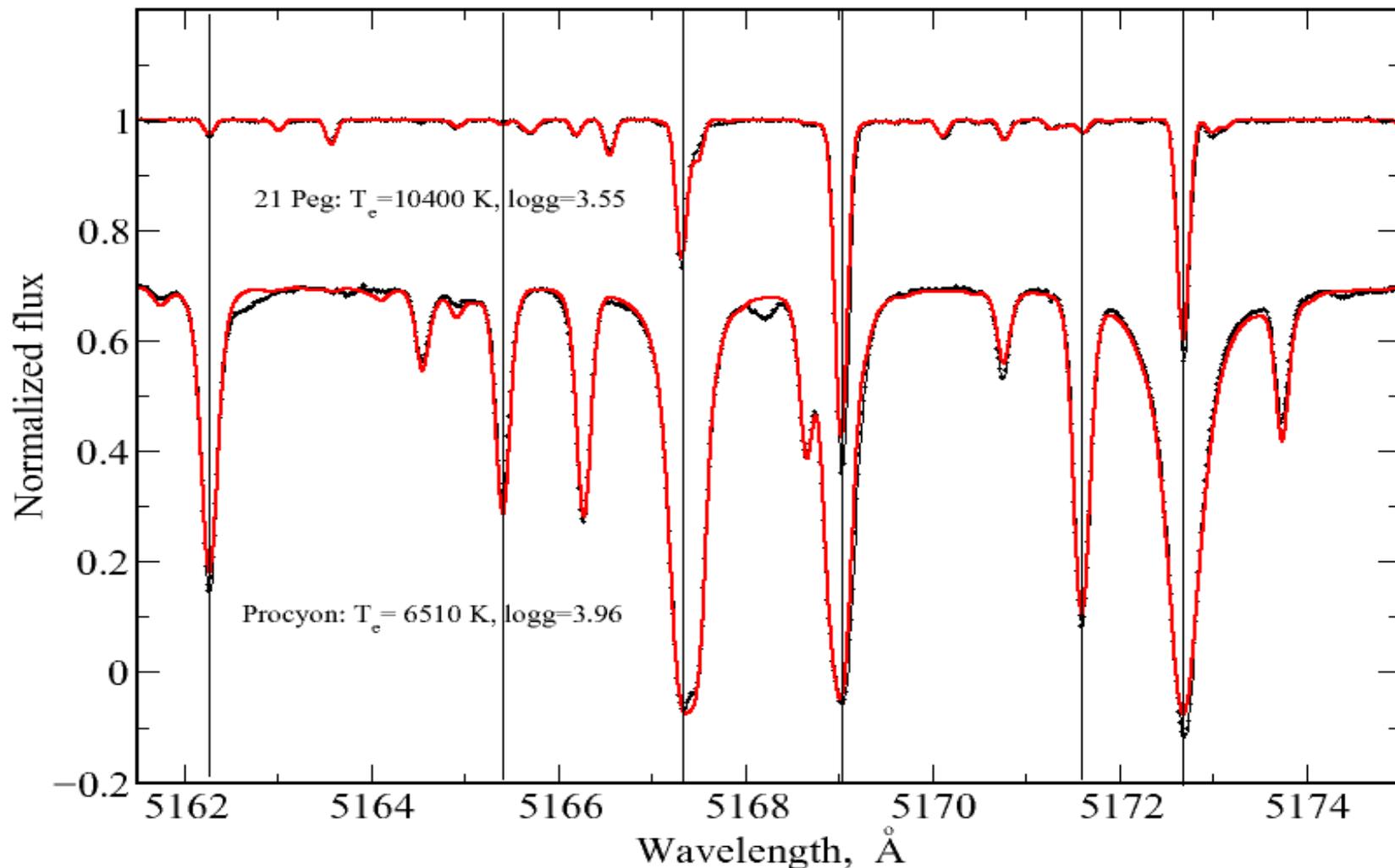
Характеристики наблюдений

R спек.разр, V скор Земли, θ угл.диам

Синтетический наблюдаемый спектр звезды

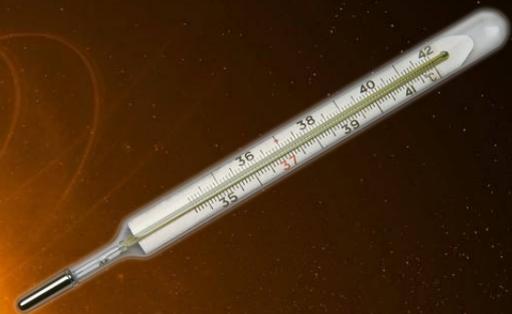


Примеры описания наблюдаемых спектров теоретическими синтетическими спектрами



Наблюдения – черные точки, красная линия – теоретический спектр

Определение параметров звездных атмосфер



Методы определения параметров звездных атмосфер



Модельно
независимые

T_{eff} , $\log g$

Наблюдения

Модельно
зависимые

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

V_t , $V \sin i$

Наблюдения +
моделирование

Фотометрические методы

Спектроскопические методы

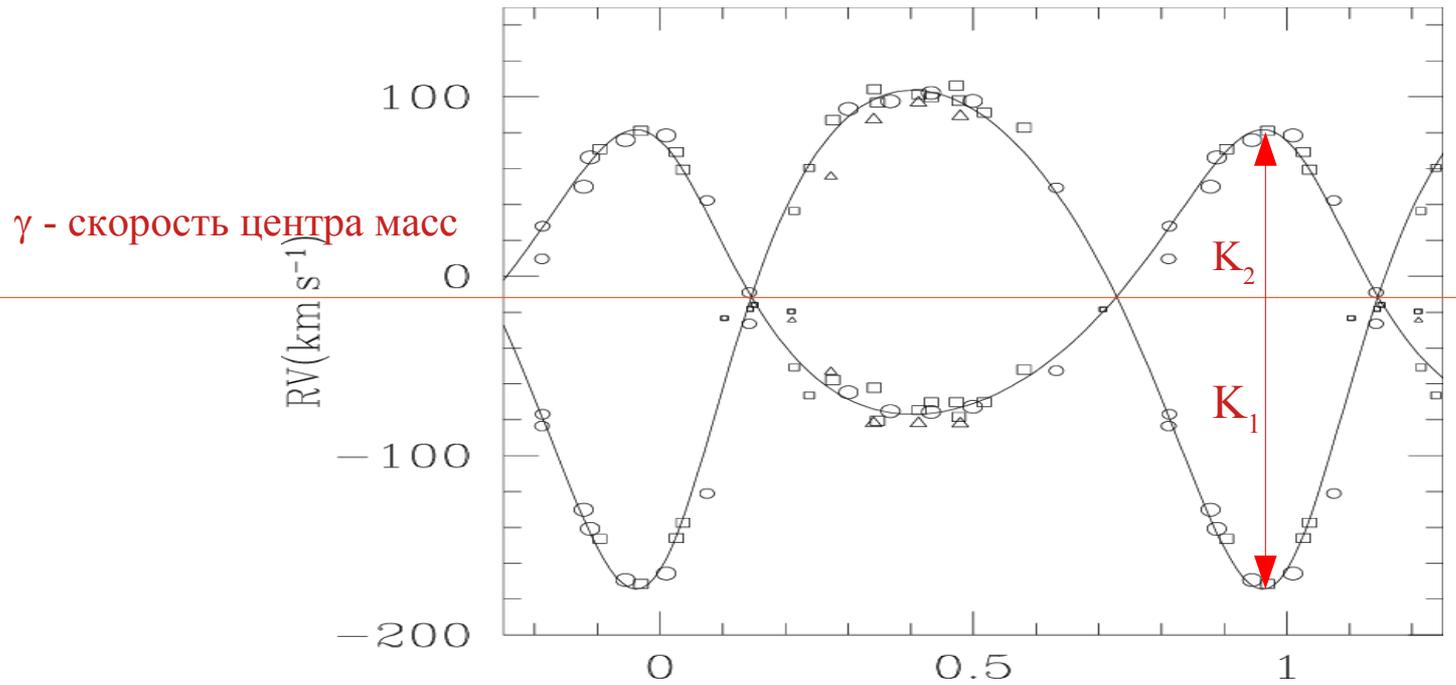
Модельно-независимые методы

*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



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

$V_{1rad} = \gamma + K_1 [\cos(\theta + \omega) + e \cos \omega]$ Кривые лучевых скоростей
 $V_{2rad} = \gamma - K_2 [\cos(\theta + \omega) + e \cos \omega]$ через элементы орбиты

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

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

$$f(M_2) = \frac{M_2^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{M_1^3 q^3 \sin^3 i}{M_1 (1 + q)^2} = (1 - e^2)^{3/2} \frac{PK_1}{2\pi G}$$

Модельно-независимые методы

Эффективная температура

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

$$F = \int_0^{\infty} F_{\nu} d\nu = \sigma T_{eff}^4 \quad \theta = \frac{2R}{d}$$

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

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 (nm)	Diameter (arcsec)	Notes	Effective 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 ± 0.007	(3)	3876 ⁺⁶⁵⁸ ₋₄₃₆
C	Gezari <i>et al.</i> (1972)	500	0.022 ± 0.030	(4)	4213 ⁺³²¹ ₋₂₆₀
C	Worden (1976)	420	0.027 ± 0.010	(5)	3803 ⁺⁹⁹⁰ ₋₅₅₄
C	Worden (1976)		0.019 ± 0.006	(4)	4534 ⁺⁹⁷⁴ ₋₅₈₂

Arcturus, K2 II, d = 11 pc

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

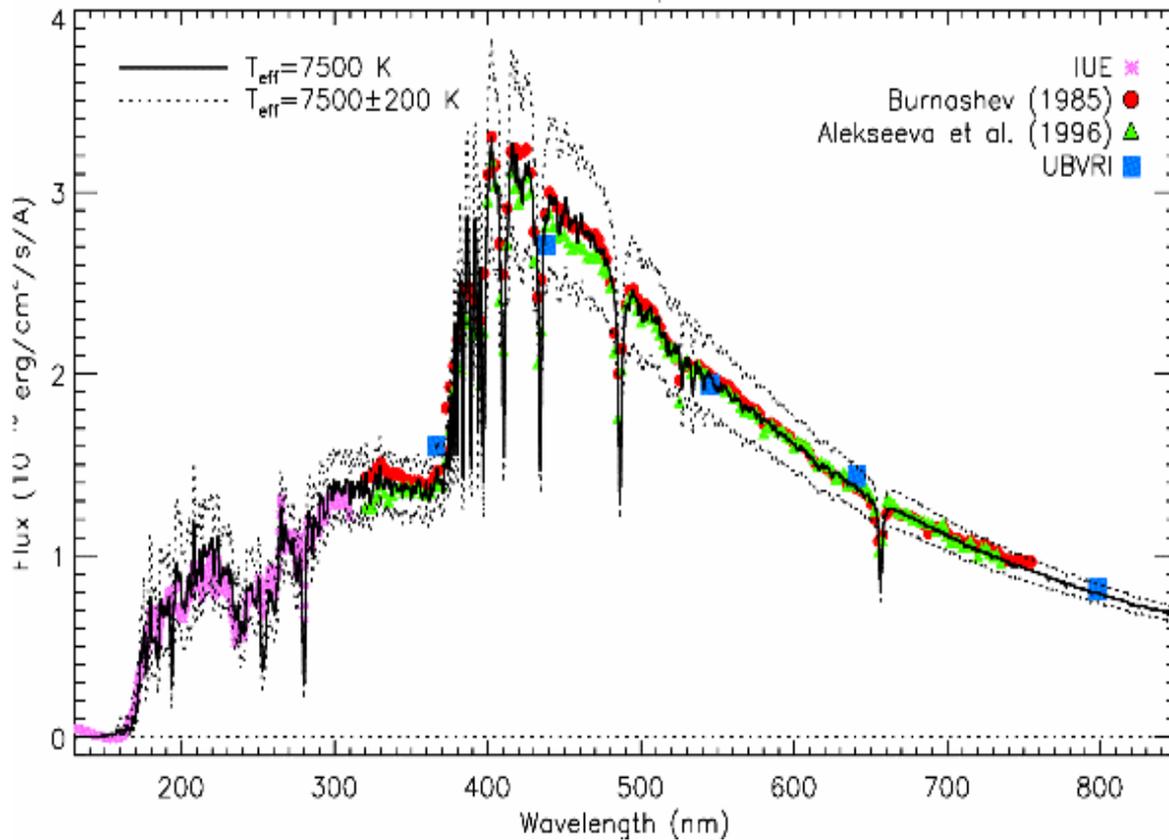
mean diameter = 0.023 ± 0.003 arcsec

Notes:

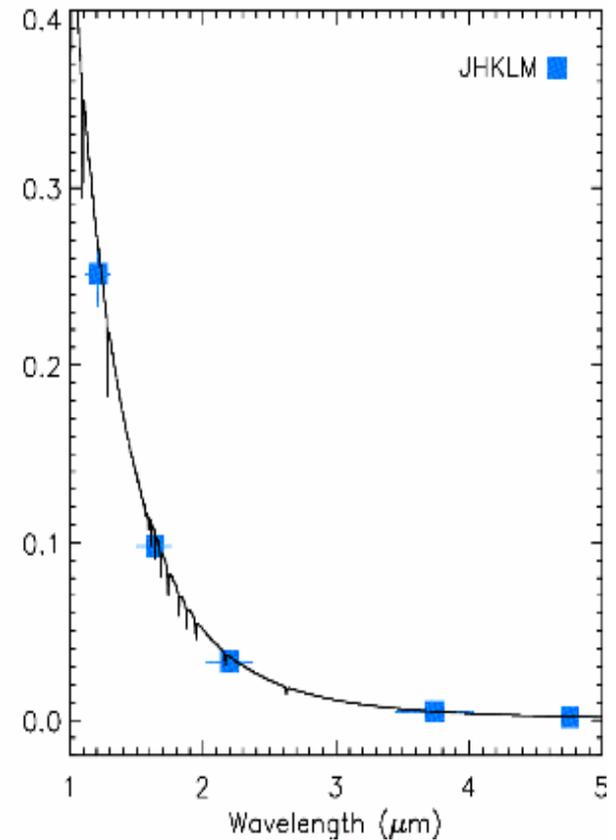
- (1) Probably uniform disk value.
- (2) Corrected for limb darkening by present authors (Section 4).
- (3) Total uncertainty.
- (4) For uniform disk (UD).
- (5) For limb darkened disk (LD).

from Blackwell &
 Shallis 1977

UV and optical



IR



Источники неопределенности в измерениях абсолютного потока:

- полное поглощение межзвездным газом излучения за Лутан'овским пределом;
- значительное покраснение на λ 912 – 3000 Å для звезд с $d > 100$ pc;
- неопределенность в калибровке абсолютного потока.

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

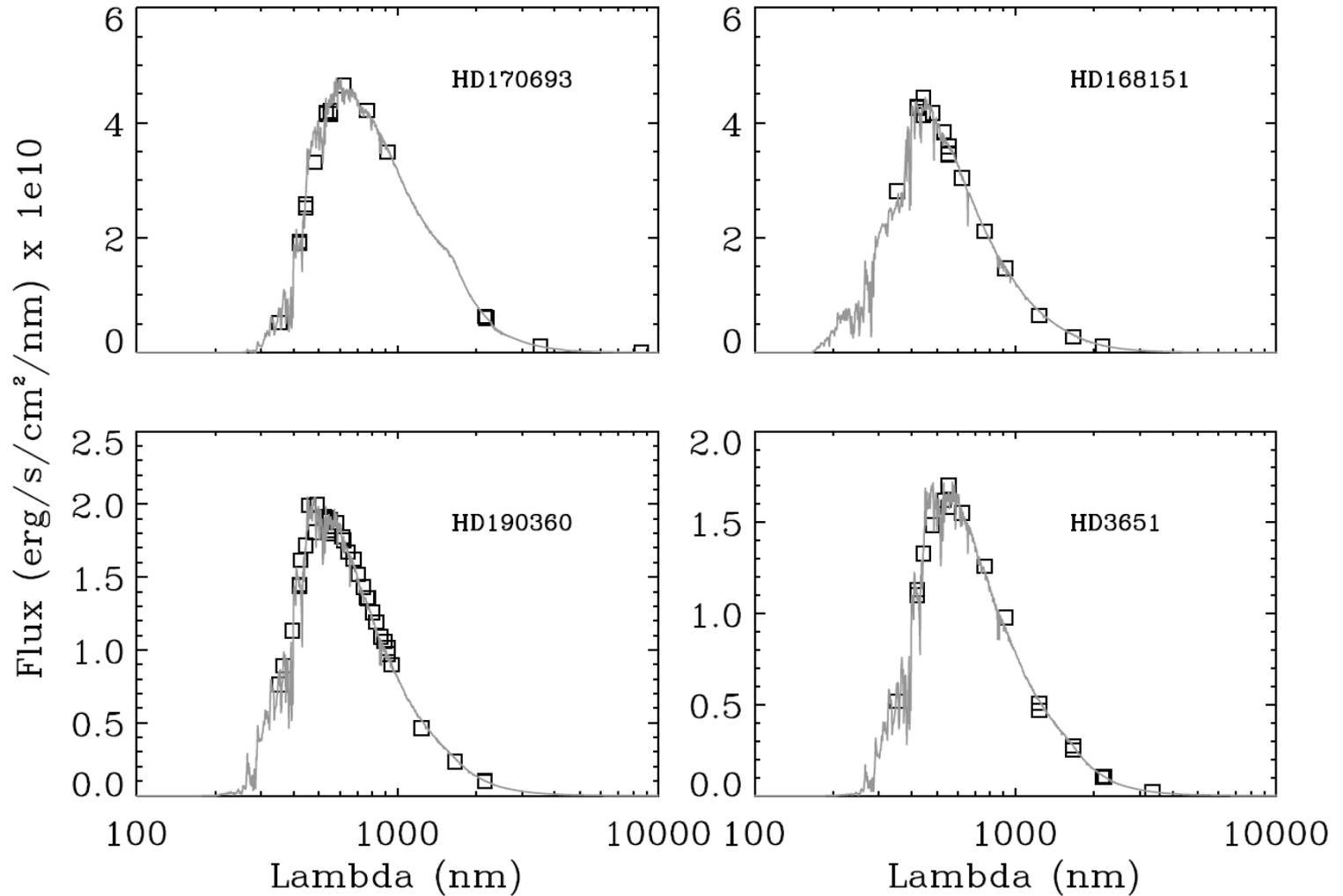


Fig. 1: Photometric energy distribution of four stars of the sample. Squares represent the photometric points and the gray curve represents the fitted spectrum (see Sect. 3.1).

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

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4 \quad L_{\odot} = 3.846 \cdot 10^{33} \text{ erg/s}$$

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

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

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_ν

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

функция $\phi(T_{\text{эфф}}, g, \lambda)$ в приближении 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 θ 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 θ определяется из наблюдений для ряда инфракрасных монохроматических потоков f_{ν}

Действительный поток F с поверхности звезды вычисляется из модели.

T_{eff} и θ вычисляются итеративно:

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

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

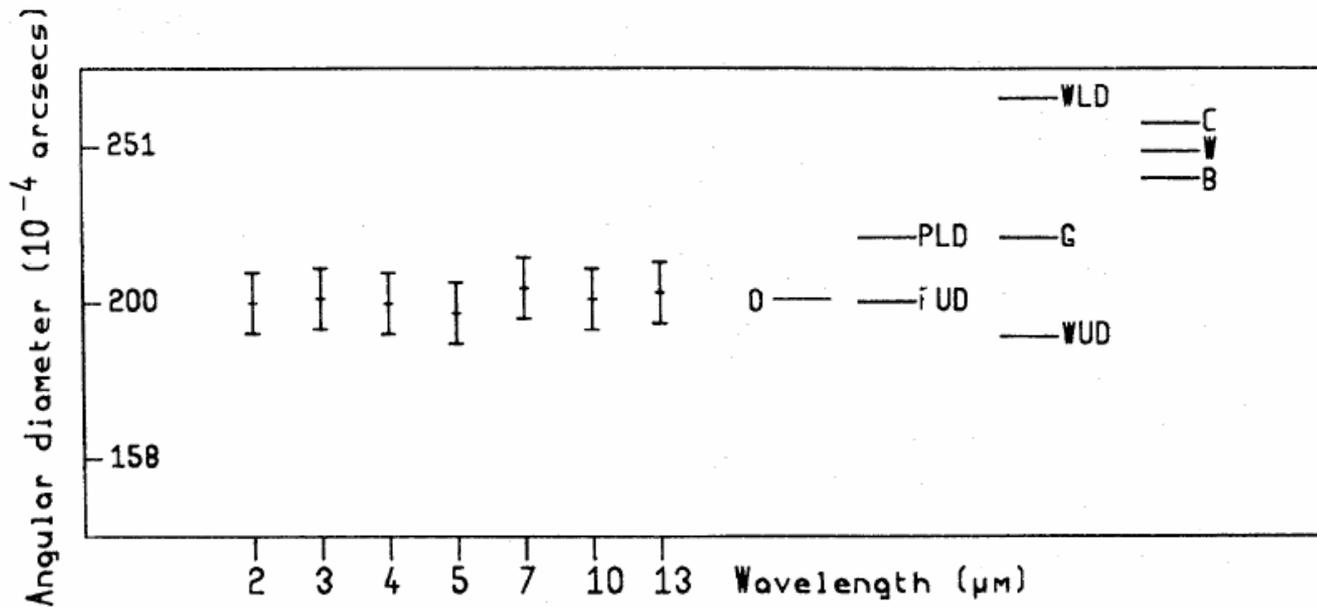


Figure 1. Deduction of angular diameter of Arcturus at a set of infrared wavelengths from measured fluxes. Other measurements of angular diameter are marked on the diagram: PUD, PDL, Pease (1931), uncorrected and corrected for limb darkening; W. Wesselink *et al.* (1972); WUD, WLD, Worden (1976); G,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

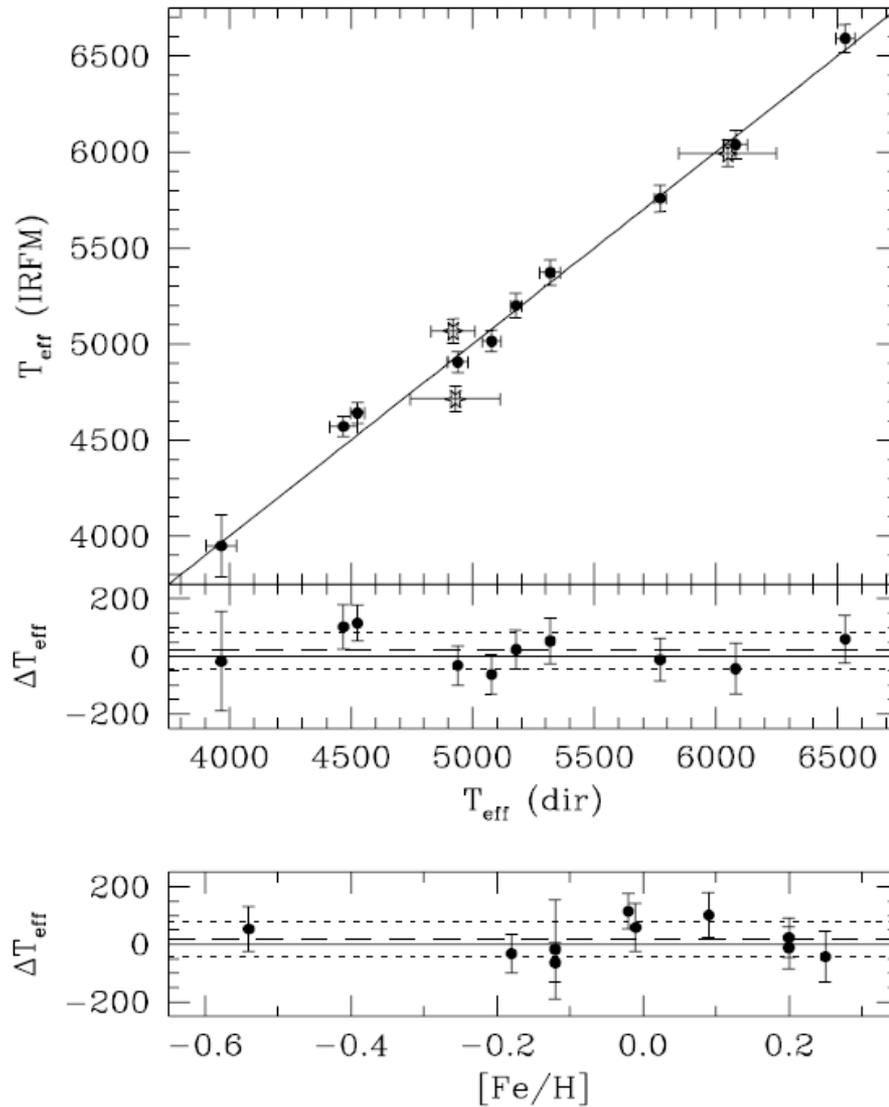


FIG. 16.—Comparison between the IRFM temperatures and the direct ones (in K) for the 13 dwarf (11) and subgiant (2) stars in Table 4. The three open symbols are HD 16160, HD 26965, and HD 209458; they are not plotted in the residuals. The differences between the IRFM temperatures and the direct ones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

I. Фотометрические методы.

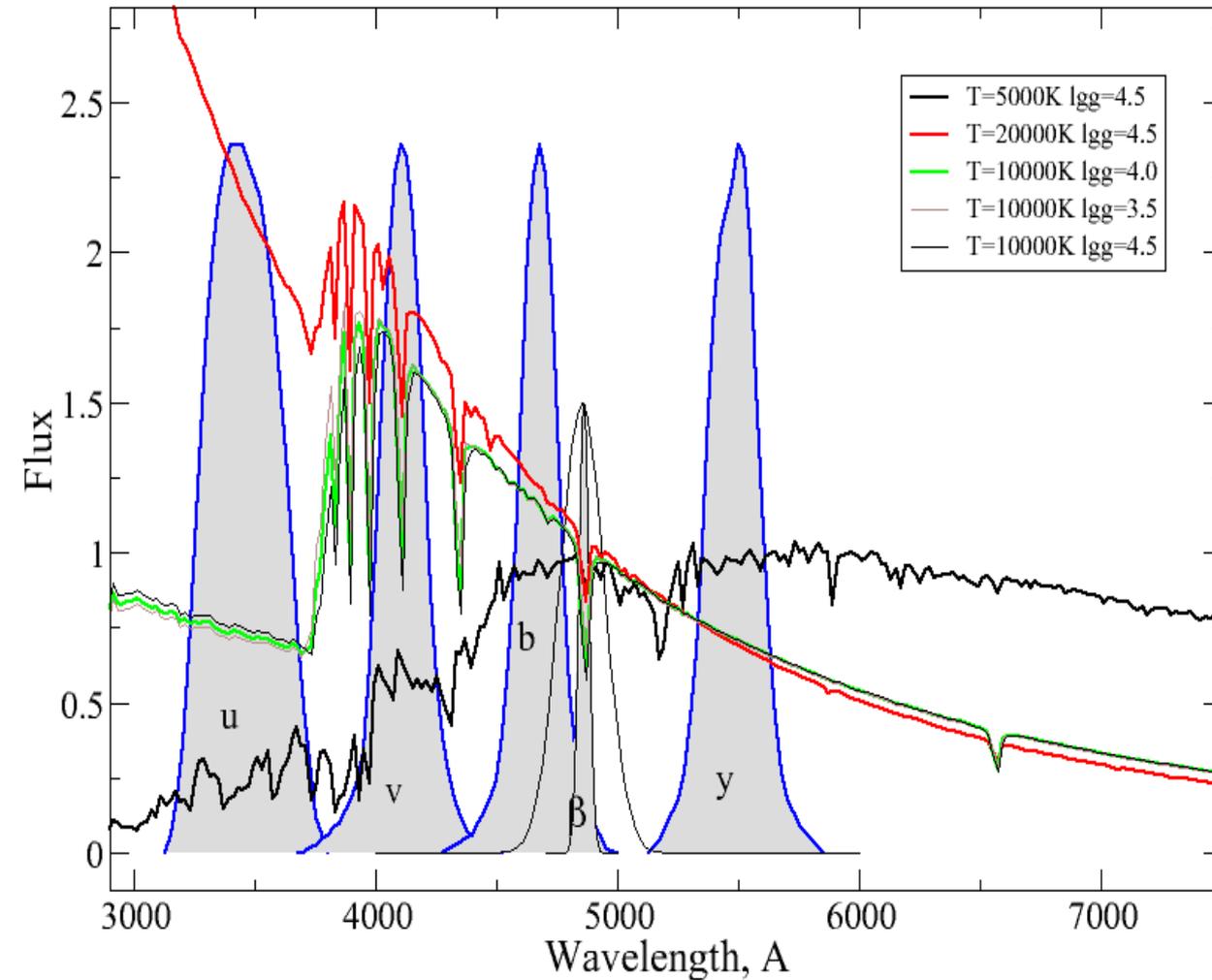
Основаны на зависимости распределения энергии в спектре от параметров

Чувствительность к T_{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, β

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

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

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

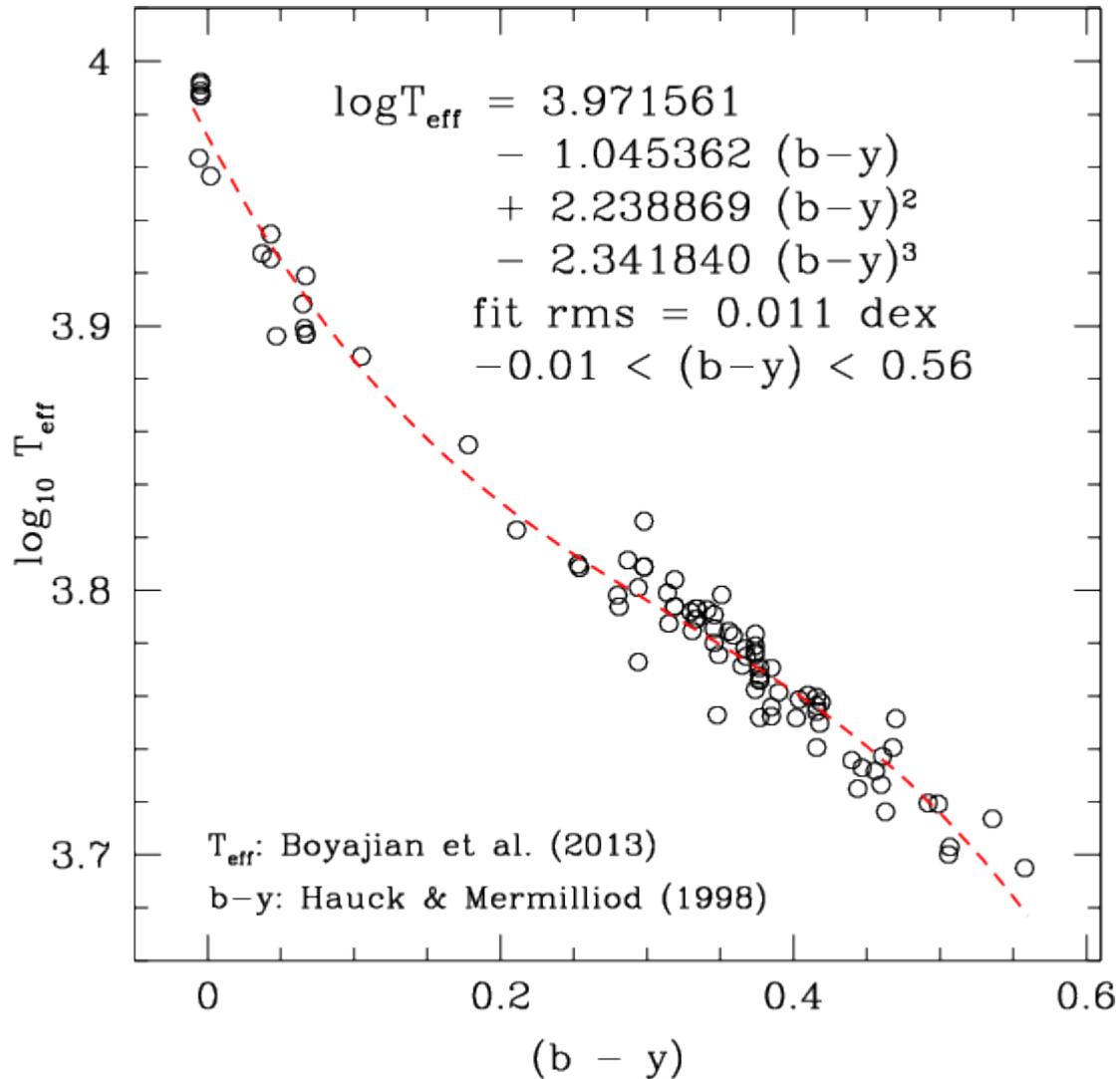
(b-y) чувствителен к T

c1 чувствителен к log g
(величина бальмеровского скачка)

m1 чувствителен к
металличности (мера
поглощения в линиях).

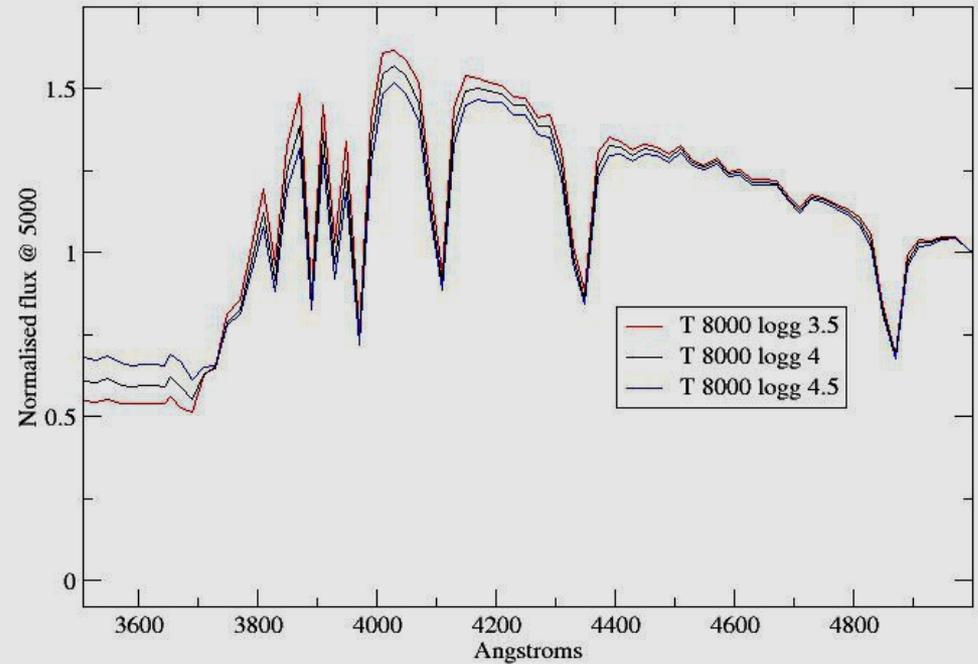
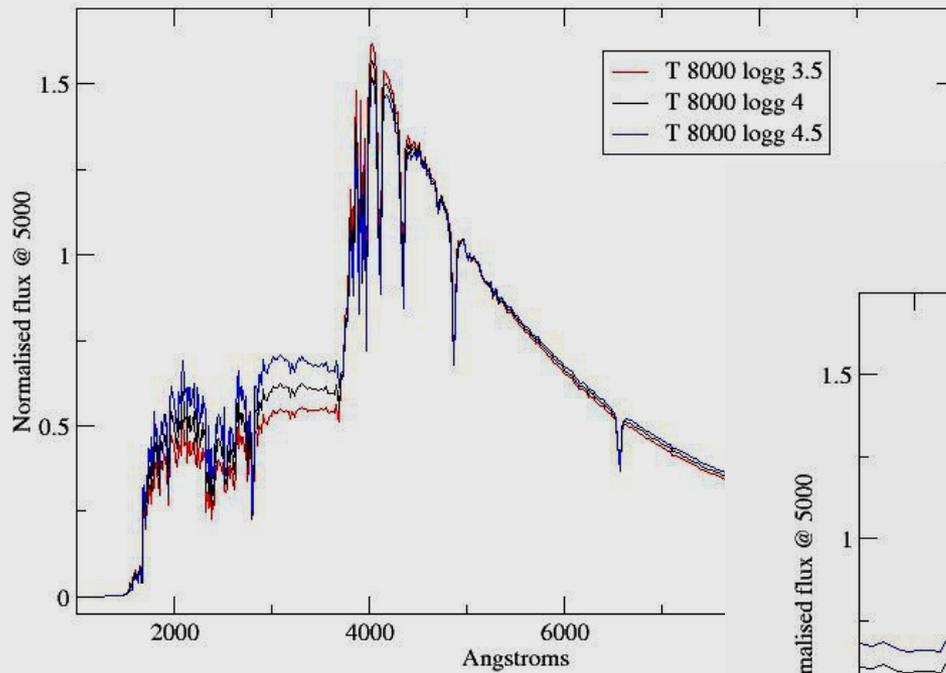
Калибровка температуры по (b-y) (Eric Mamajek)

125 звезд с температурами по интерферометрии

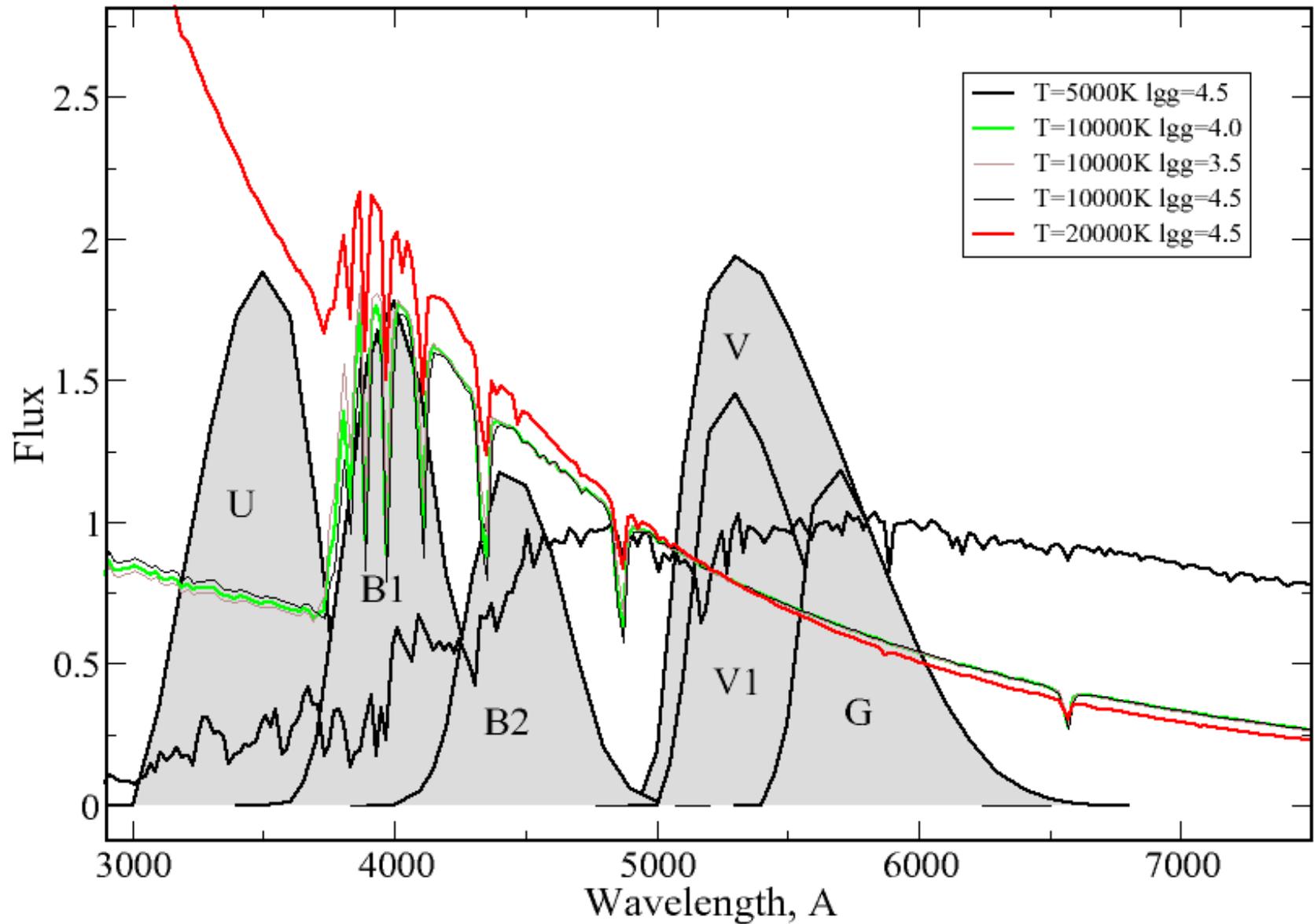


Определение ускорения силы тяжести по фотометрии

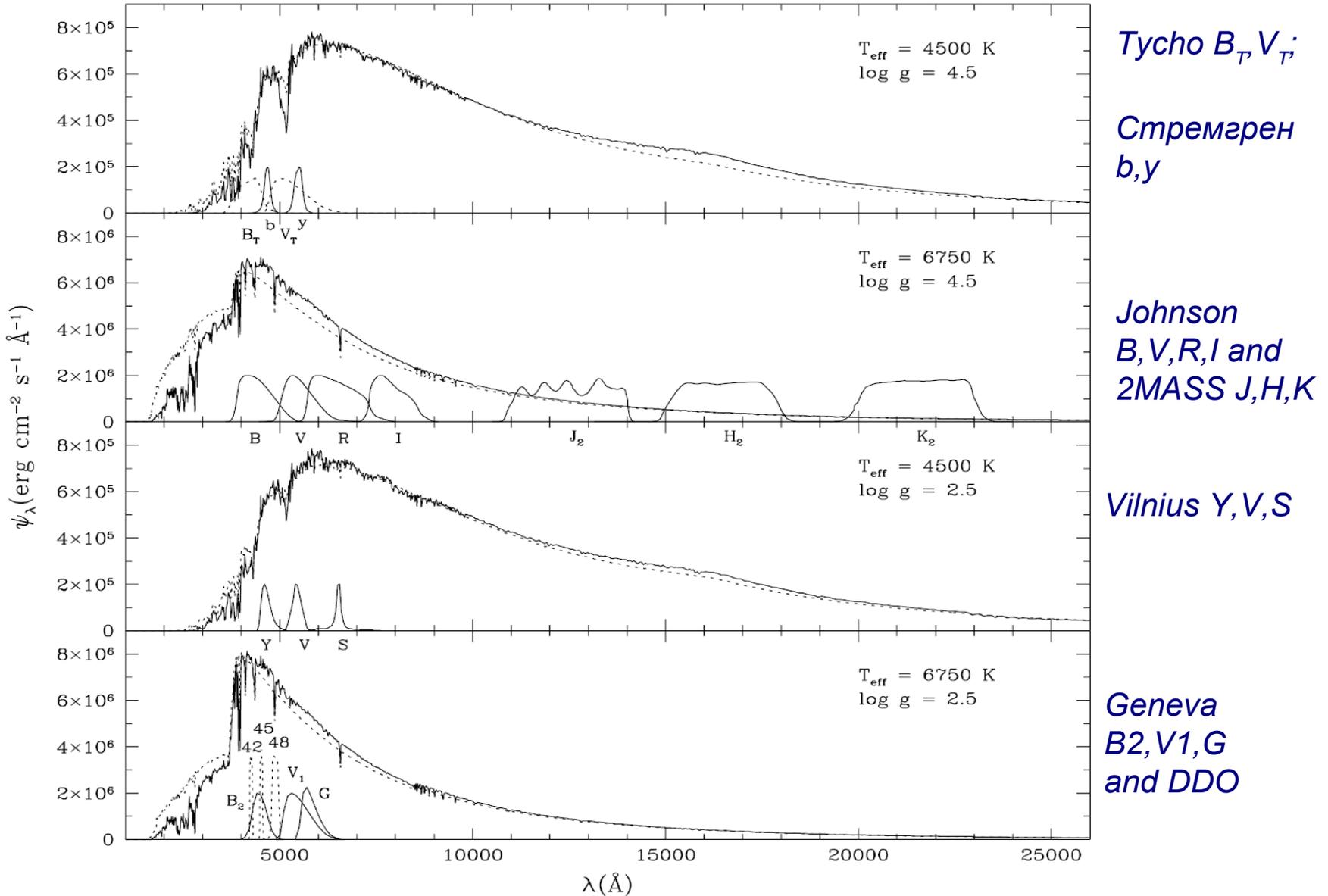
Величина Бальмеровского скачка изменяется с изменением $\log g$



Женевская фотометрическая система

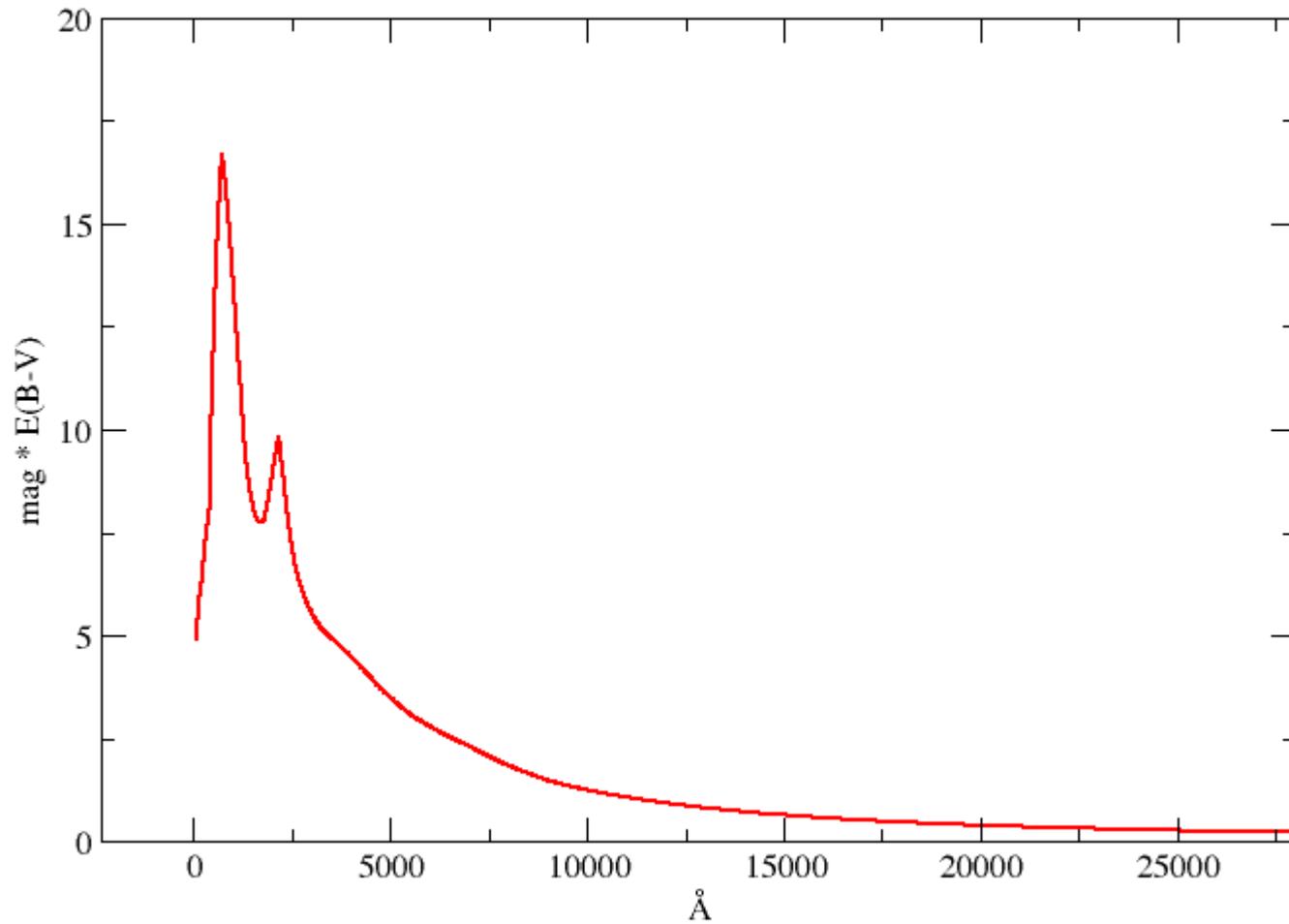


Примеры фотометрических систем, используемых при калибровках FGK-звезд
 солнечная металличность $[Fe/H]=0$ – сплошная линия; $[Fe/H]=-2.5$ – штриховая линия



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)

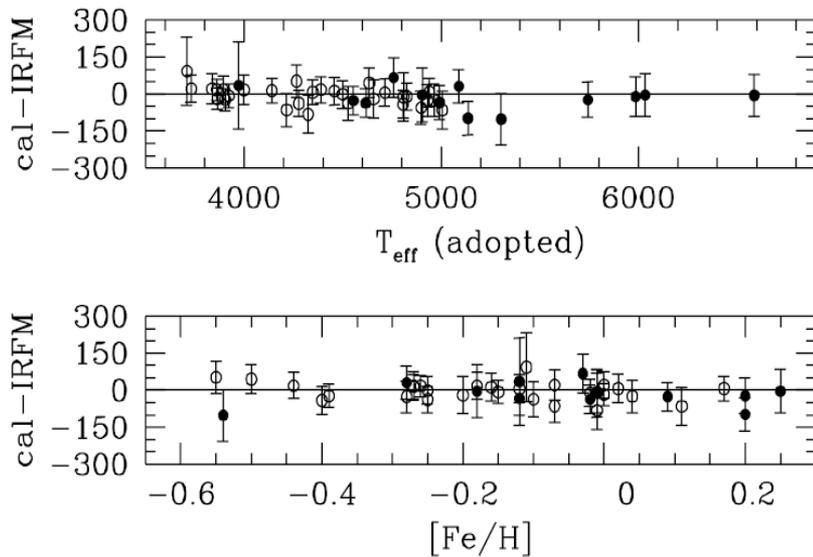


FIG. 5.—Difference between the temperatures from the color calibrations and the IRFM temperatures as a function of the adopted temperatures and metallicities of dwarfs (*filled circles*) and giants (*open circles*).

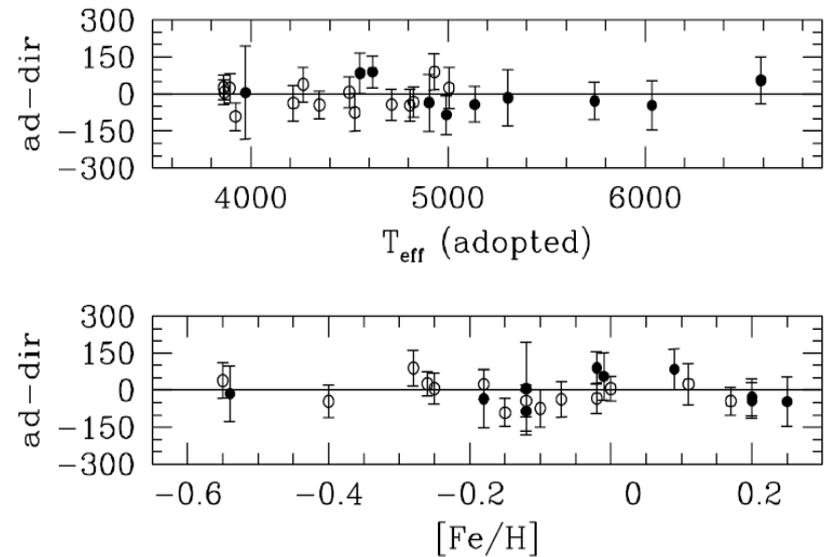


FIG. 6.—Difference between the adopted temperatures and direct temperatures as a function of the adopted temperatures and metallicities of dwarfs (*filled circles*) and giants (*open circles*).

Источники фотометрических данных

- *Оригинальные Статьи*
- *Каталоги*
- *Электронные базы данных*
 - *Sinbad*
 - *Vizier*
 - *Другие*
 - *Фотометрические данные для Стремгреновской и Женевской фотометрических систем можно взять из on-line каталога: 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

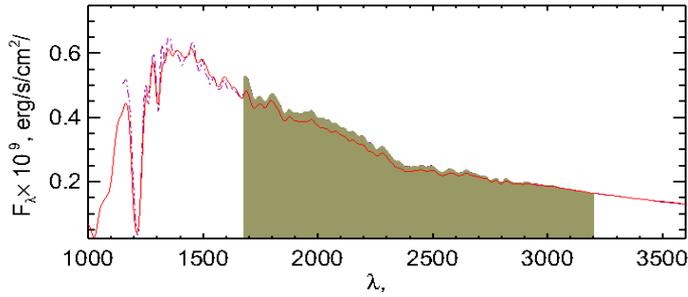
Примеры:

π Cet
 $\pi=8.3$ mas
 $d=120$ pc

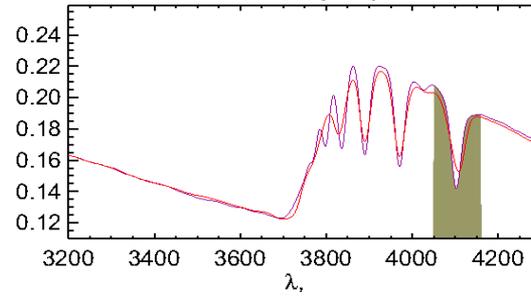
$R=4.57 R_{\odot}$

$R=4.62 R_{\odot}$

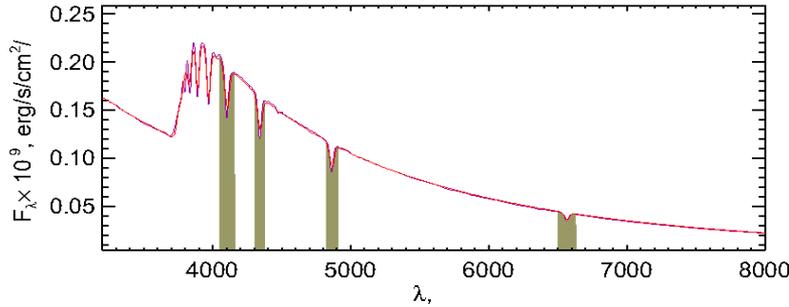
UV



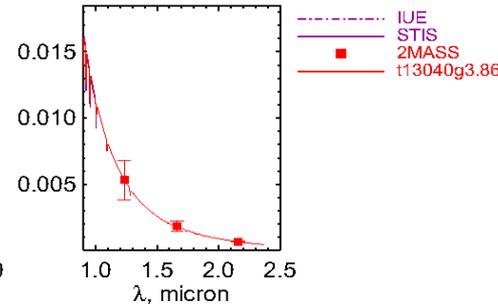
Balmer jump



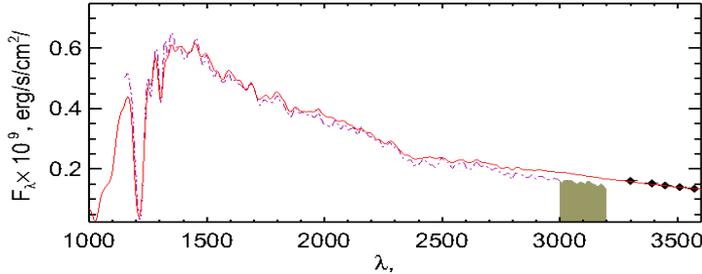
Visual



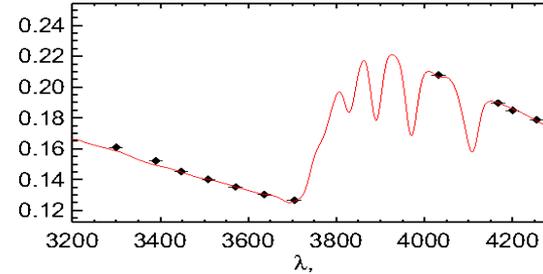
NIR



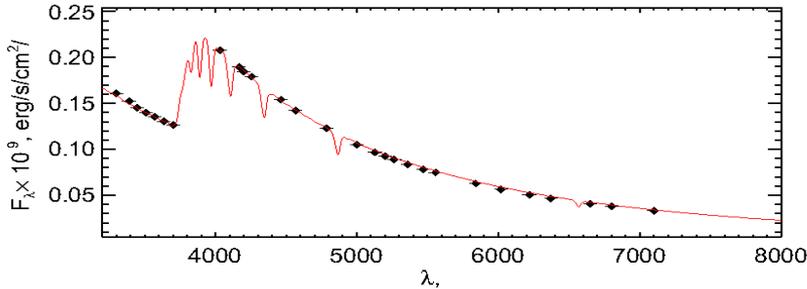
UV



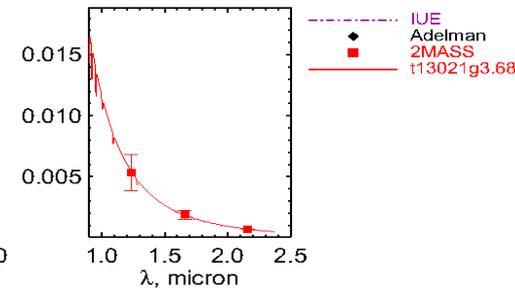
Balmer jump

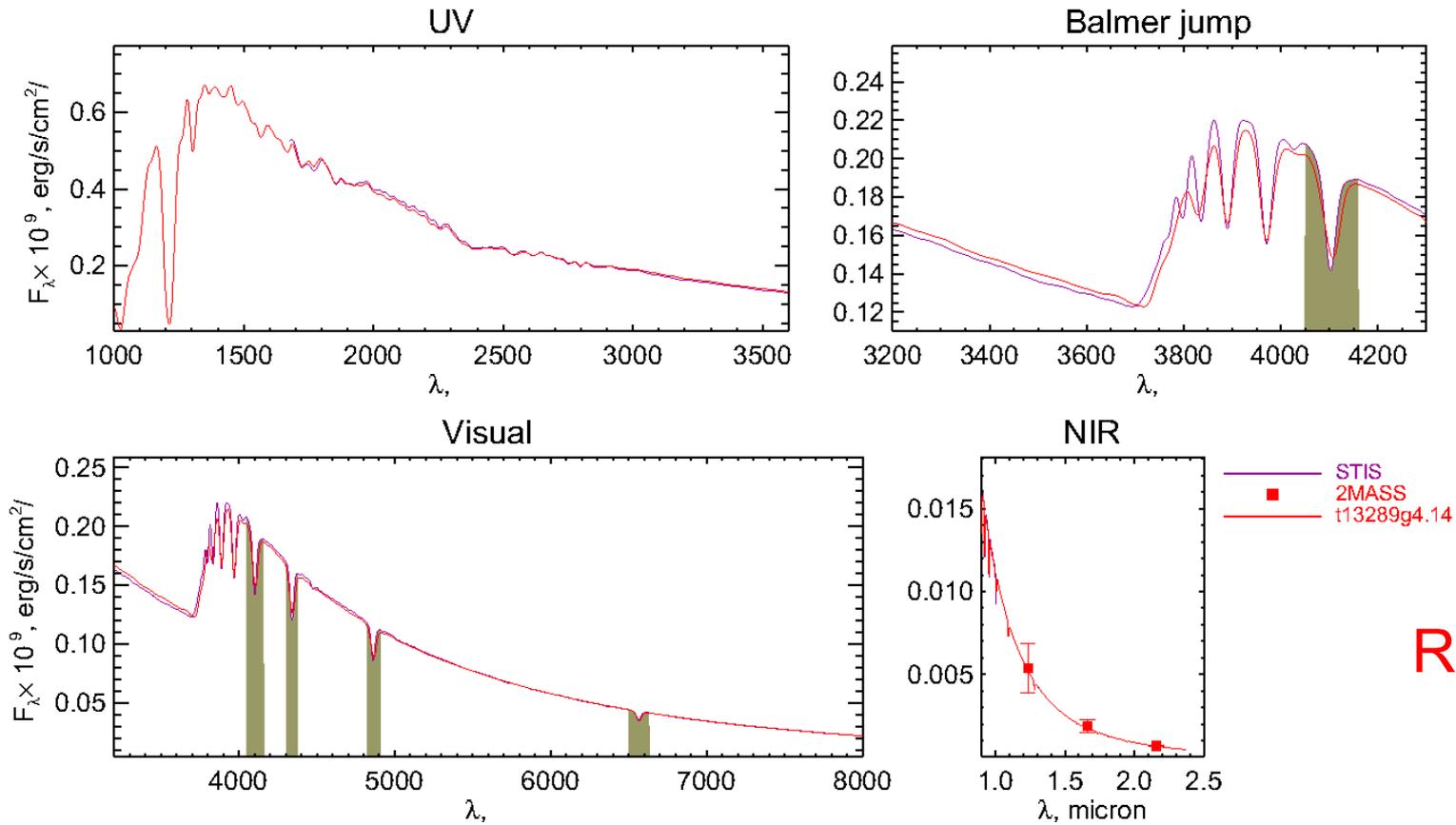


Visual



NIR





$R=4.48 R_\odot$

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)

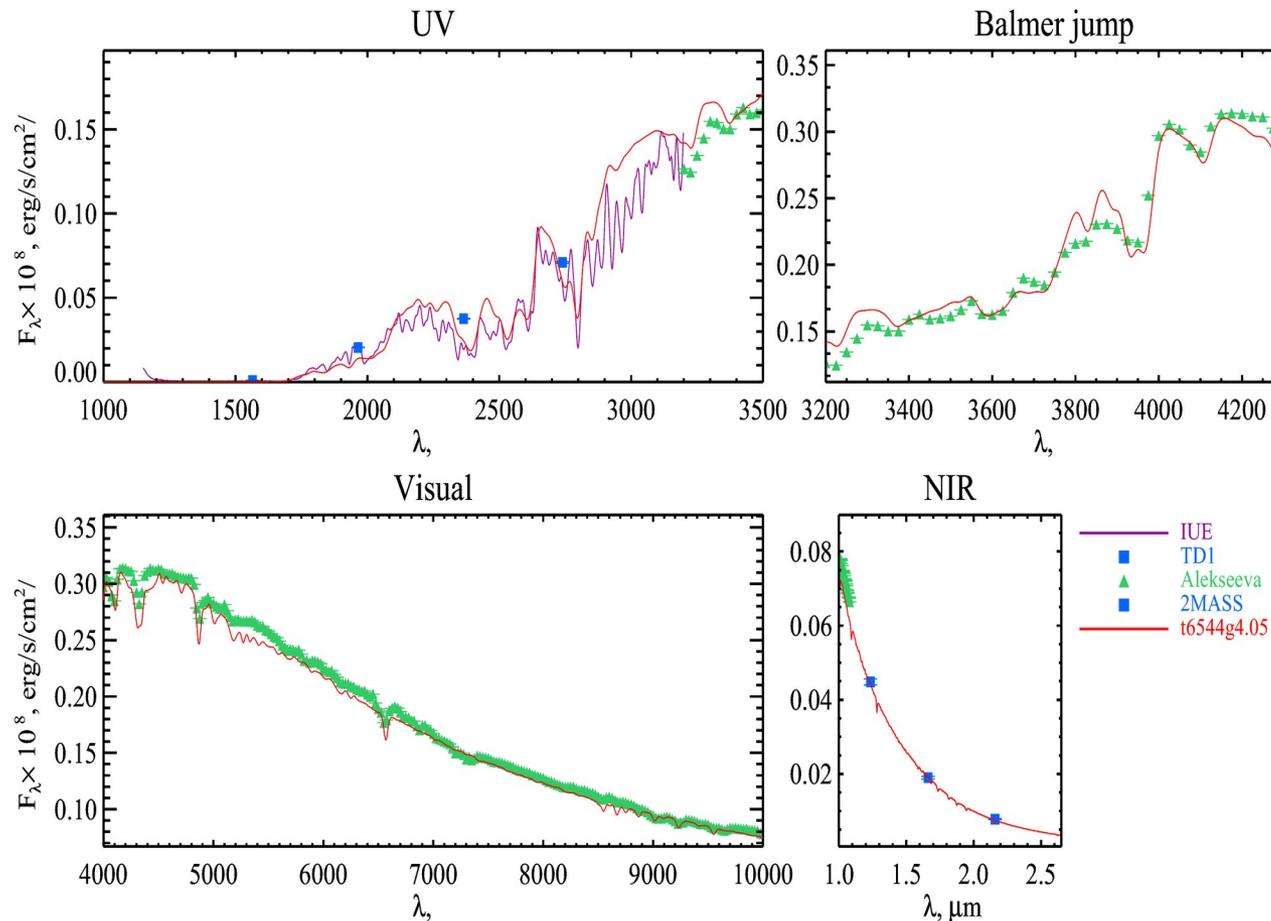
$T_{\text{eff}} = 13100 \pm 300 \text{ K}$, $\log g = 3.93 \pm 0.06$ (SME)

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 $m=0.03^m$

Table A2. Effective wavelengths (for an A0 star), absolute fluxes (corresponding to zero magnitude) and zeropoint magnitudes for the UBVRI-JHKL Cousins-Glass-Johnson system

	U	B	V	R	I	J	H	K	Kp	L	L*
λ_{eff}	0.366	0.438	0.545	0.641	0.798	1.22	1.63	2.19	2.12	3.45	3.80
f_ν	1.790	4.063	3.636	3.064	2.416	1.589	1.021	0.640	0.676	0.285	0.238
f_λ	417.5	632	363.1	217.7	112.6	31.47	11.38	3.961	4.479	0.708	0.489
zp(f_λ)	0.770	-0.120	0.000	0.186	0.444	0.899	1.379	1.886	1.826	2.765	2.961
zp(f_ν)	-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_{eff} , I_{gg} , X/H , V_{micro} , V_{macro} , V_{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 ξ_t

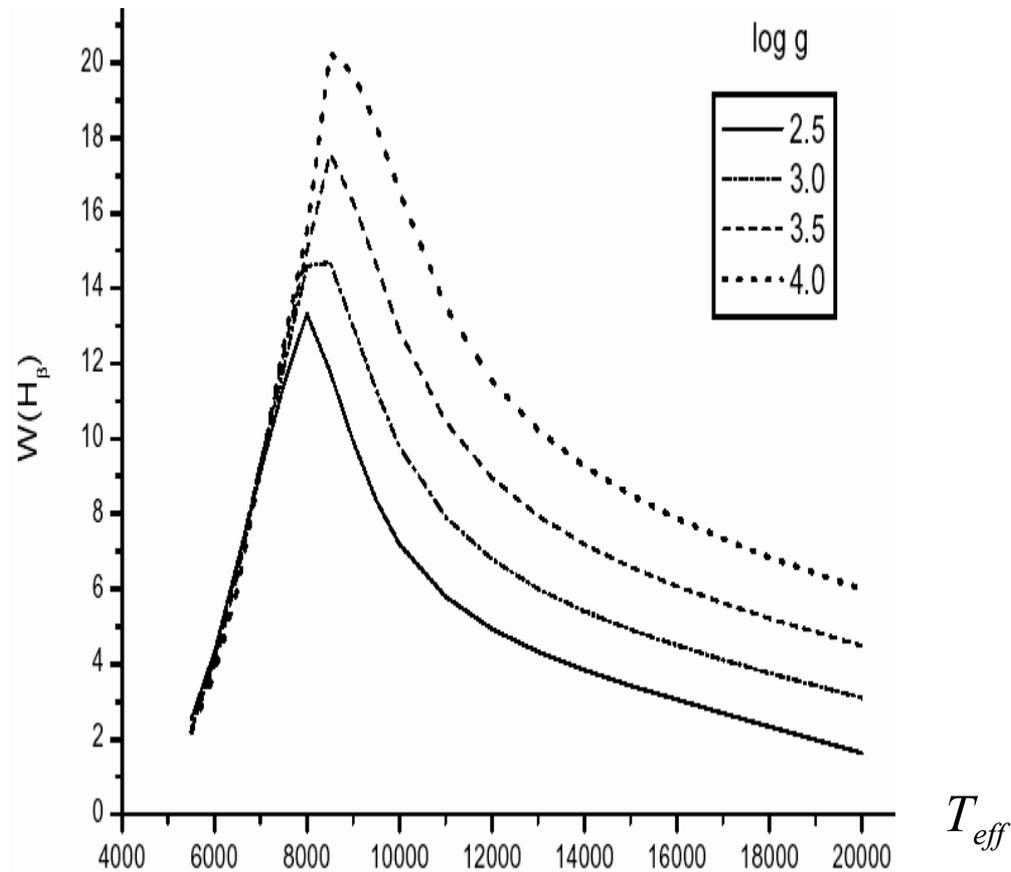
В отличие от континуума, излучение в линиях формируется в широком диапазоне оптических глубин, крылья линий – в глубоких слоях атмосферы, тогда как ядра формируются в более высоких слоях атмосферы звезды.

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

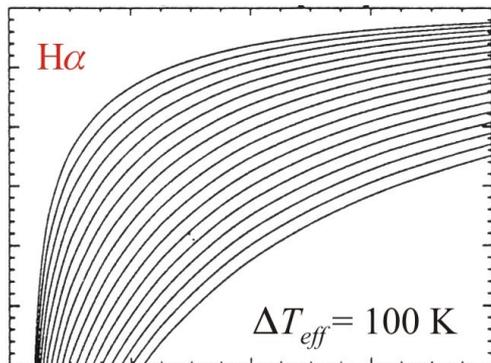


Чувствительность профилей линий Бальмера к различным параметрам атмосфер звезд

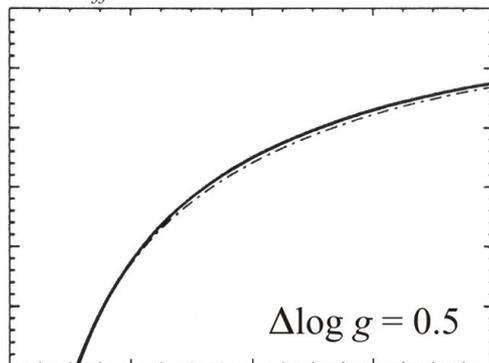
(H_α and H_β и их изменение с изменением параметров атмосферы)

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

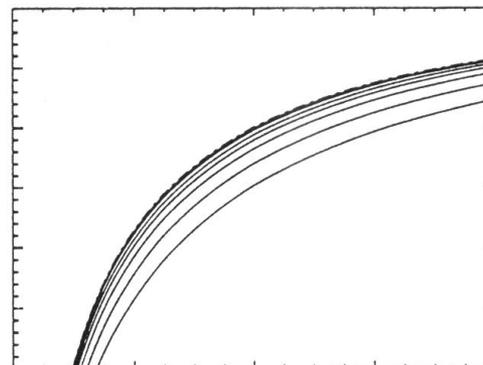
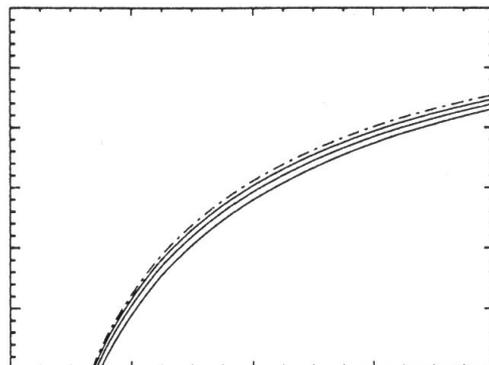
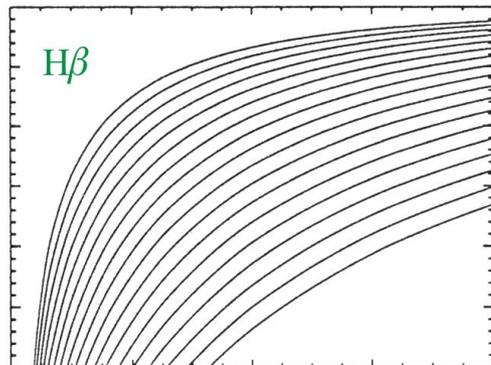
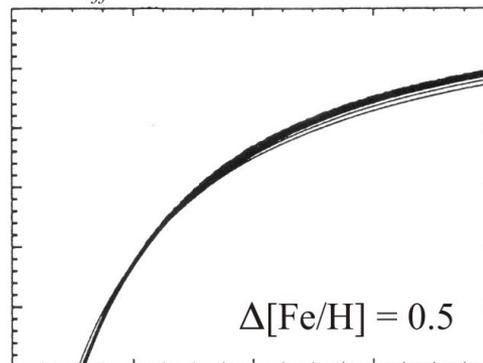
(a) $\log g = 4.0$, $[Fe/H] = 0$



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

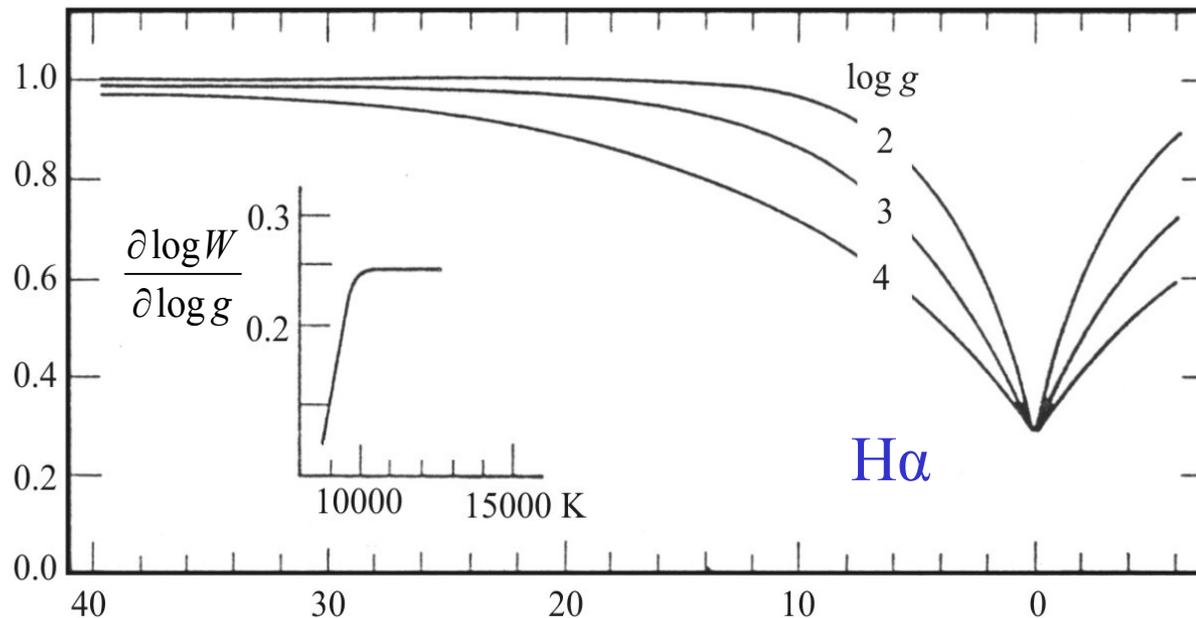


(c) $T_{eff} = 6000 \text{ K}$, $\log g = 4.0$



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.

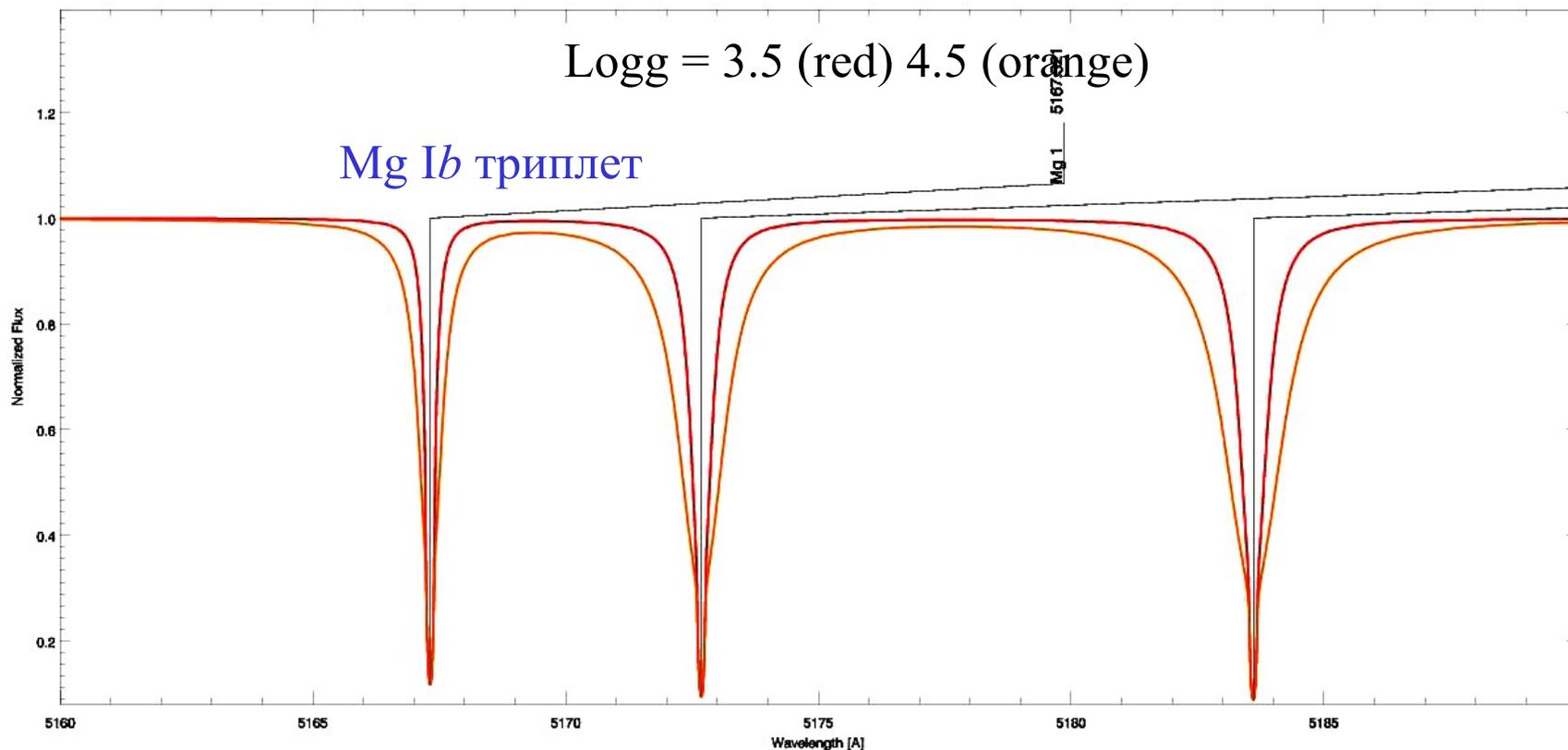


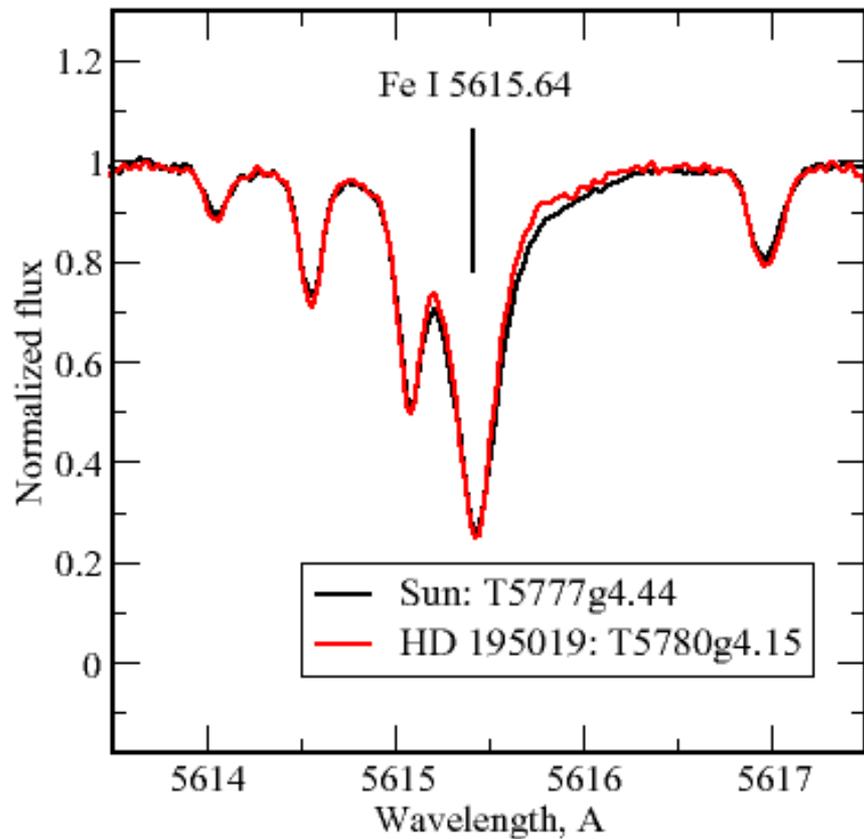
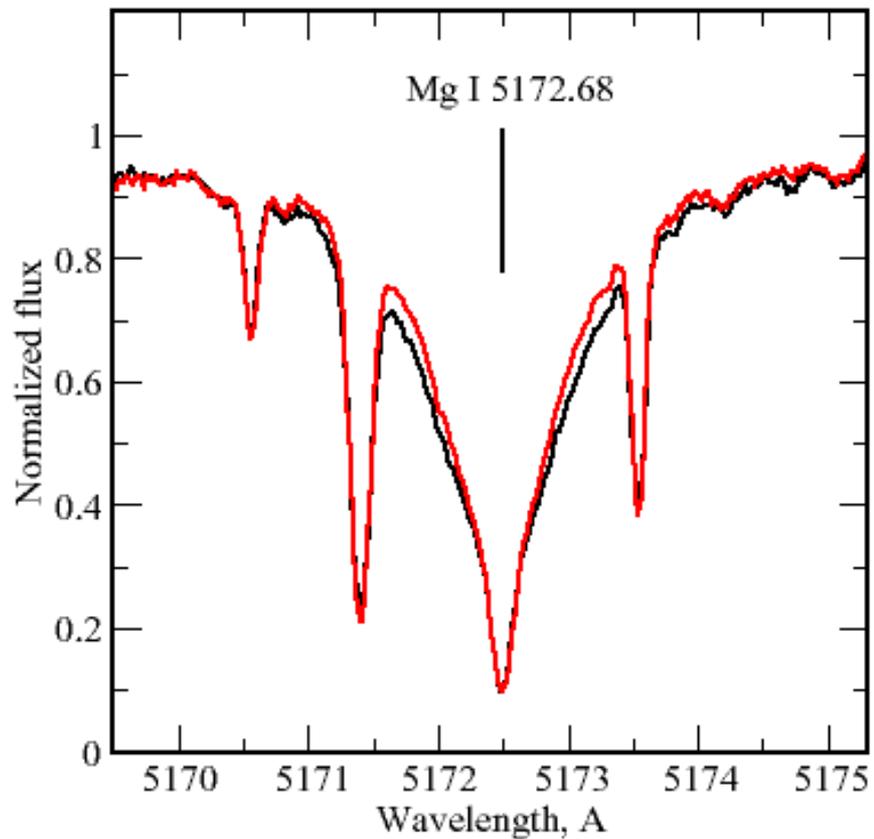
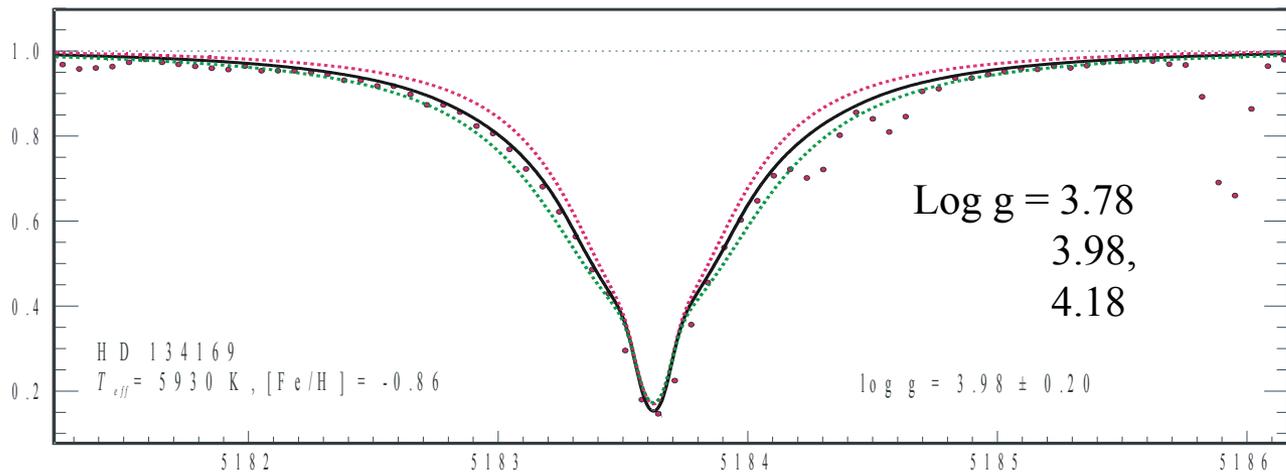
$H\alpha$

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

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

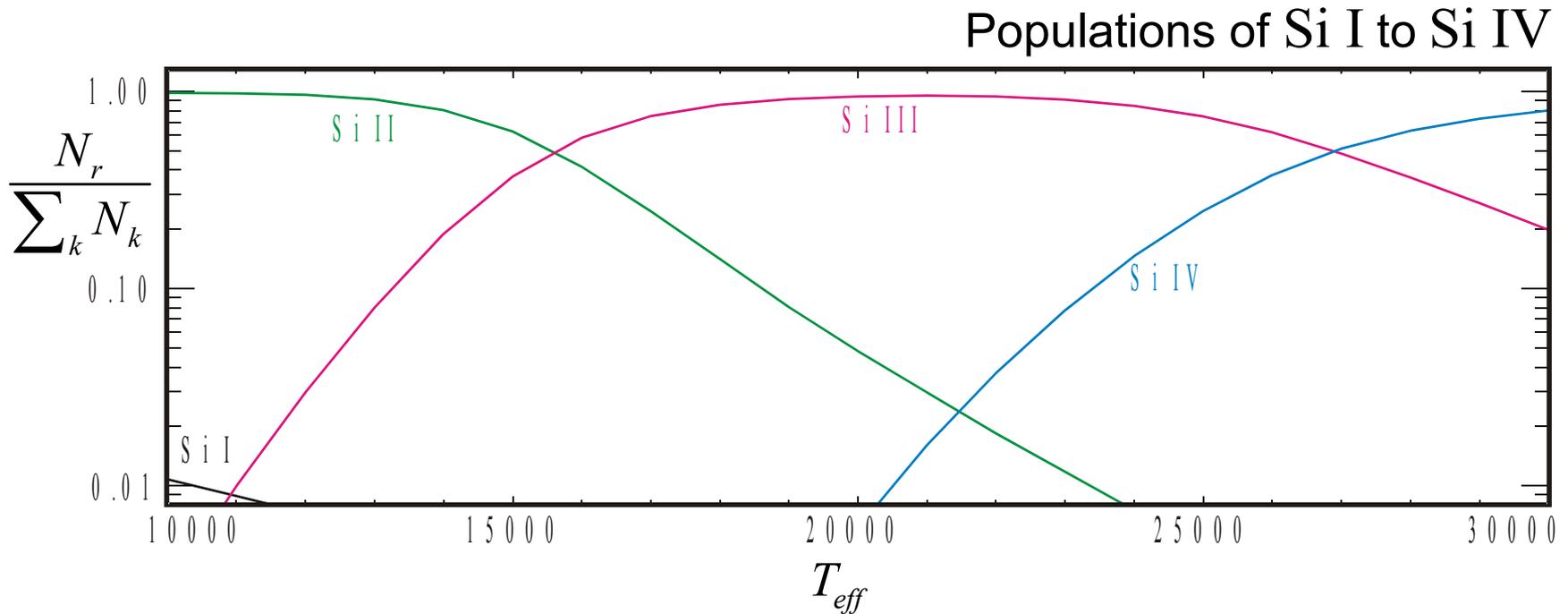
Крылья сильных линий примесных металлов (**minority species**) зависят от $\log g$. Если параметры затухания (Van der Waals) хорошо известны, то ускорение силы тяжести можно определить по подгонке профиля линий, варьируя $\log g$. Метод работает для звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] > -2$.





Ионизационное равновесие

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



Пример:

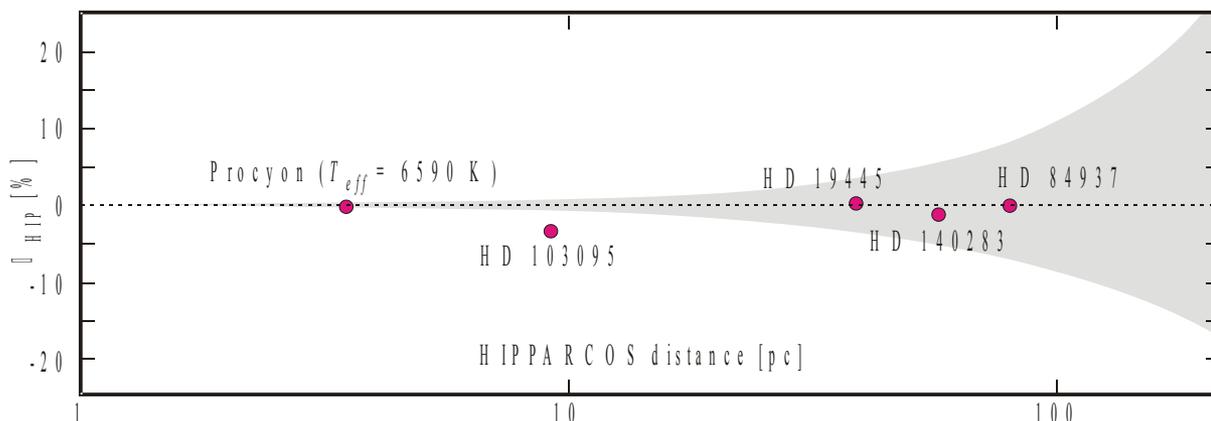
Отношение интенсивности линий Si III / Si II является хорошим индикатором температуры для В-звезд, а Si IV / Si III - для ранних В и О-звезд.

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

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_{eff}

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

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

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

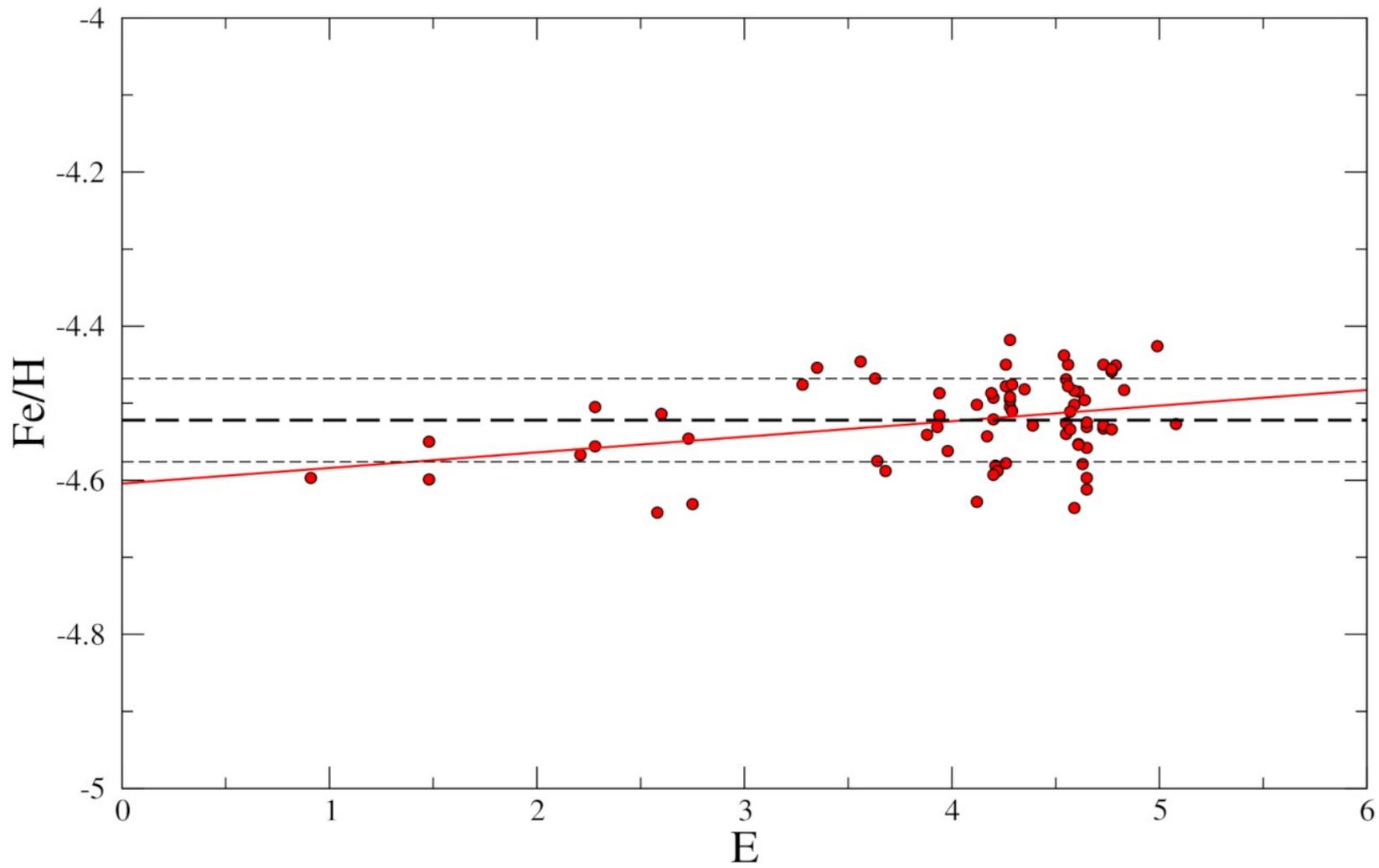
$$N = \text{const}, T_{\text{eff}} = \text{const}, W = f(E_i)$$

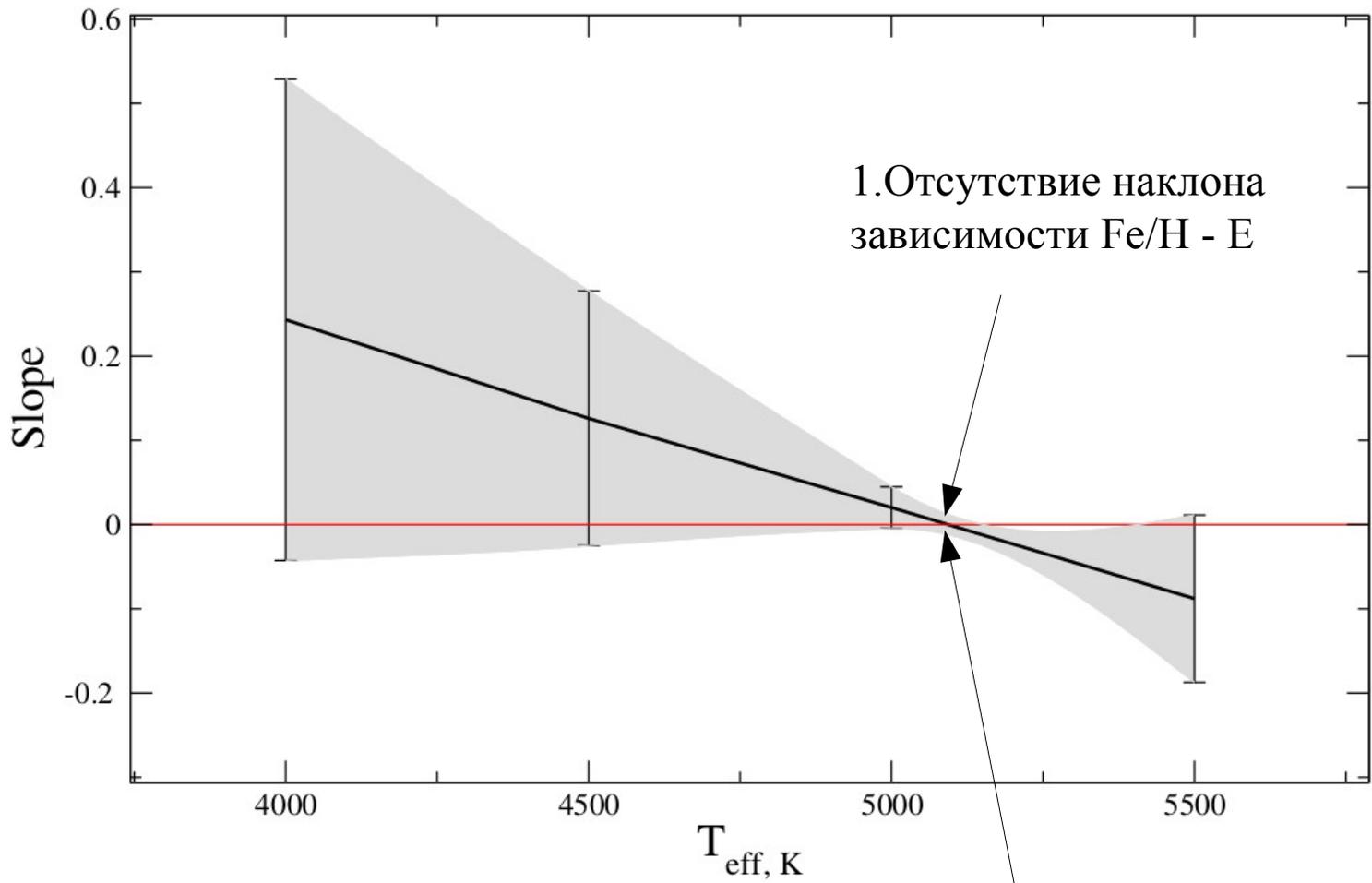
Кривая роста $W = f(N)$ в силу монотонности $N = f(W) = f'(E_i)$

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 Fe/H - E

2. Минимум ошибки наклона зависимости Fe/H и минимум ошибки Fe/H

Микротурбулентная скорость ξ

Кривая роста $W = f(N, \xi)$

в силу монотонности $N = f(W, \xi)$

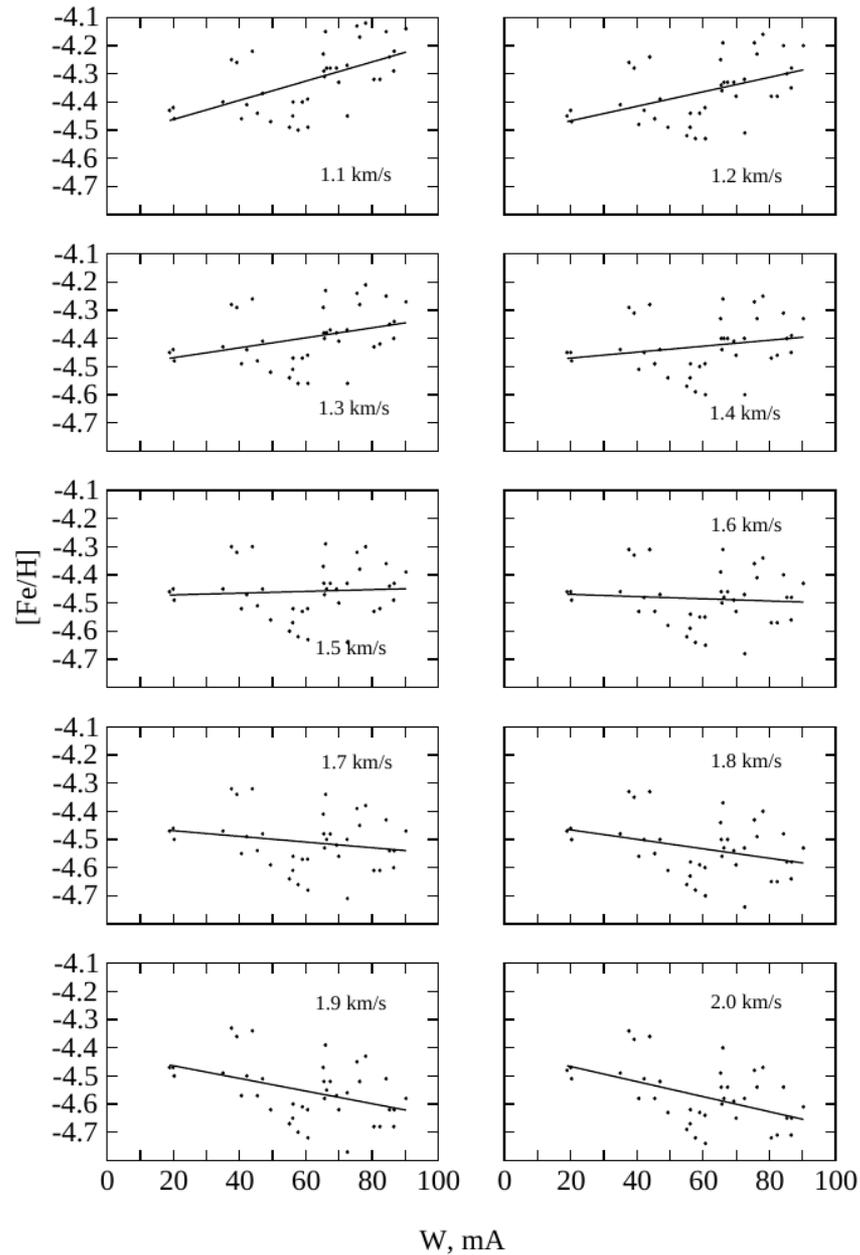
$$N = \text{const}$$

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

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

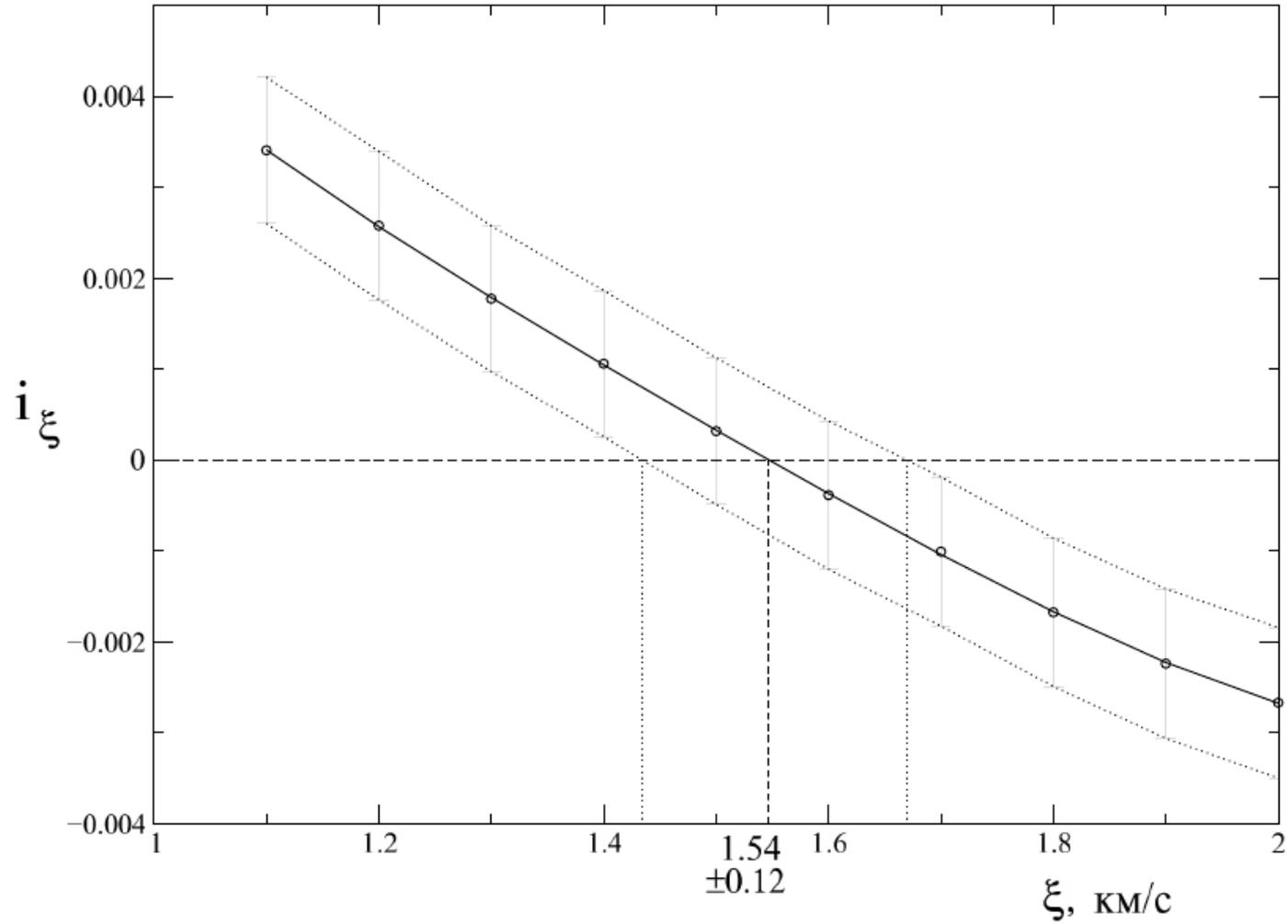
Требование выполнения условия независимости содержания элемента от эквивалентной ширины

Микротурбулентная скорость

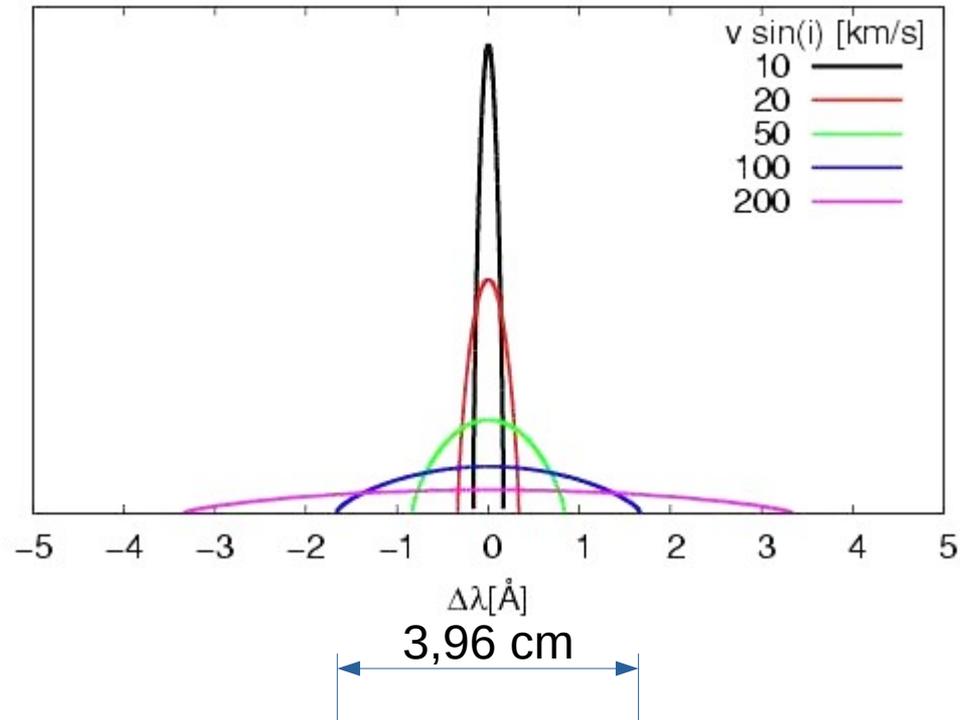


Требование
выполнения
условия
независимости
содержания
элемента от
эквивалентной
ширины

Микротурбулентная скорость

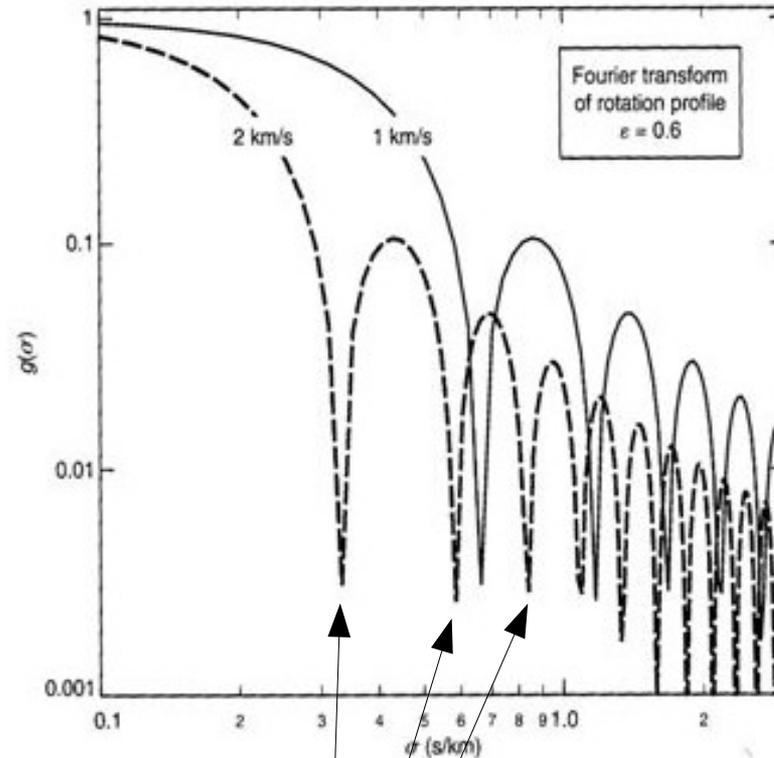


Скорость вращения



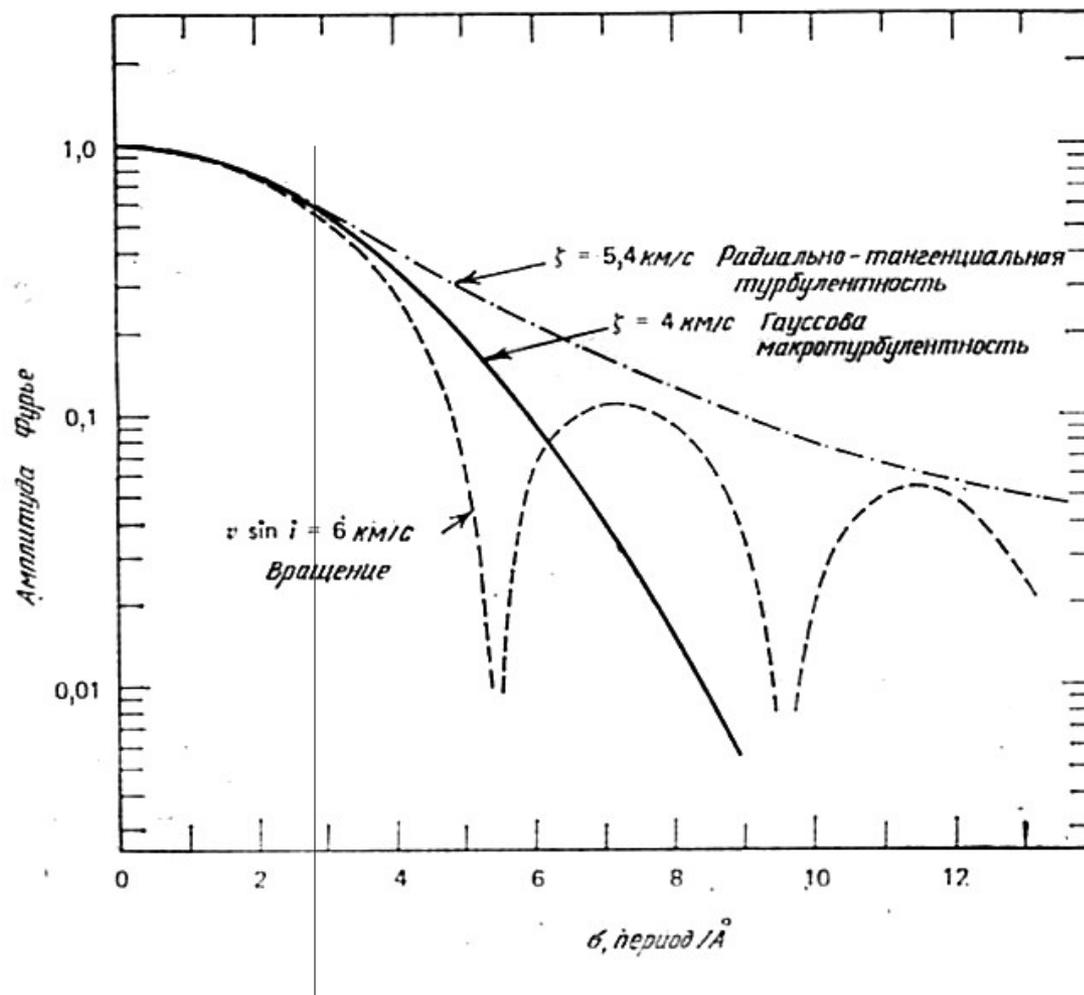
$$\Delta\lambda = 2\lambda \frac{v \sin i}{c}$$

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_{eff} , *logg*, *metallicity*, *Vsini*, V_{micro} , V_{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, H₂⁺, H⁻, He, He⁺, He⁻, Si, Si⁺, Mg, Mg⁺, Al, C, Fe, Ca⁺, N, O, Ne, S,

List of scatterers: H, H₂, He, e⁻

RTINT

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

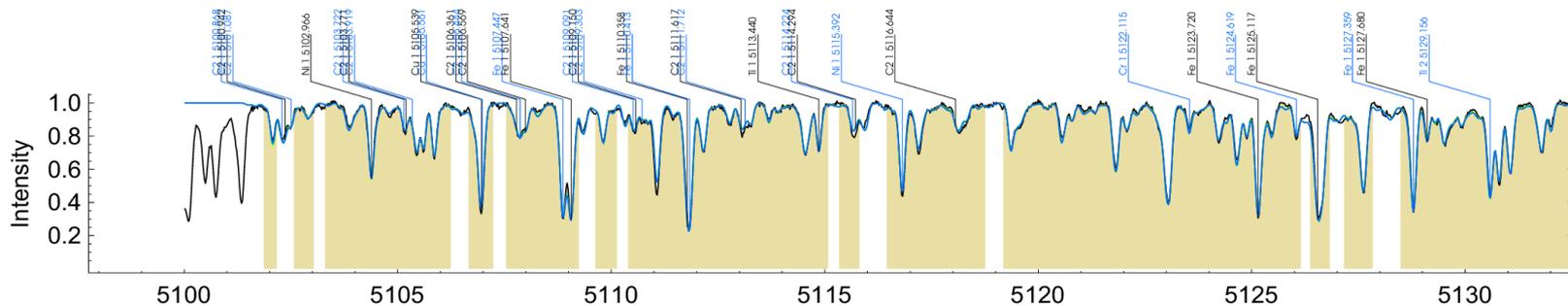
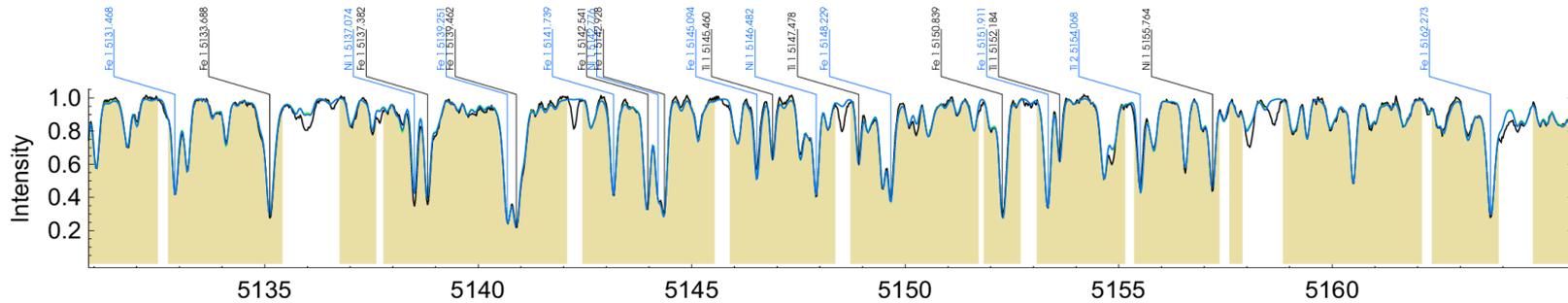
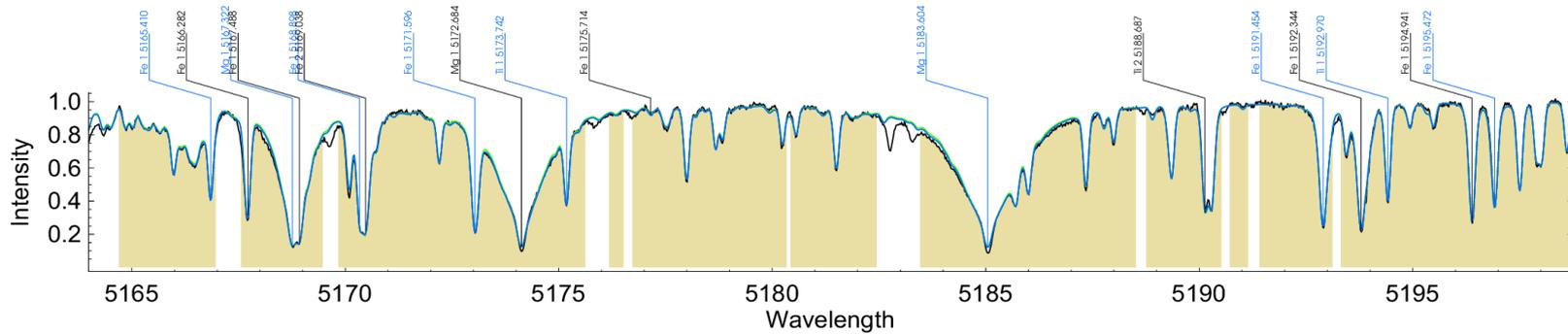
Attenuation operator with quadratic Bezier spline approximation to the source function

Bezier spline prevents overshooting

F-G-K stars

5100-5200 Å, Mg I triplet, C₂ Swan bands

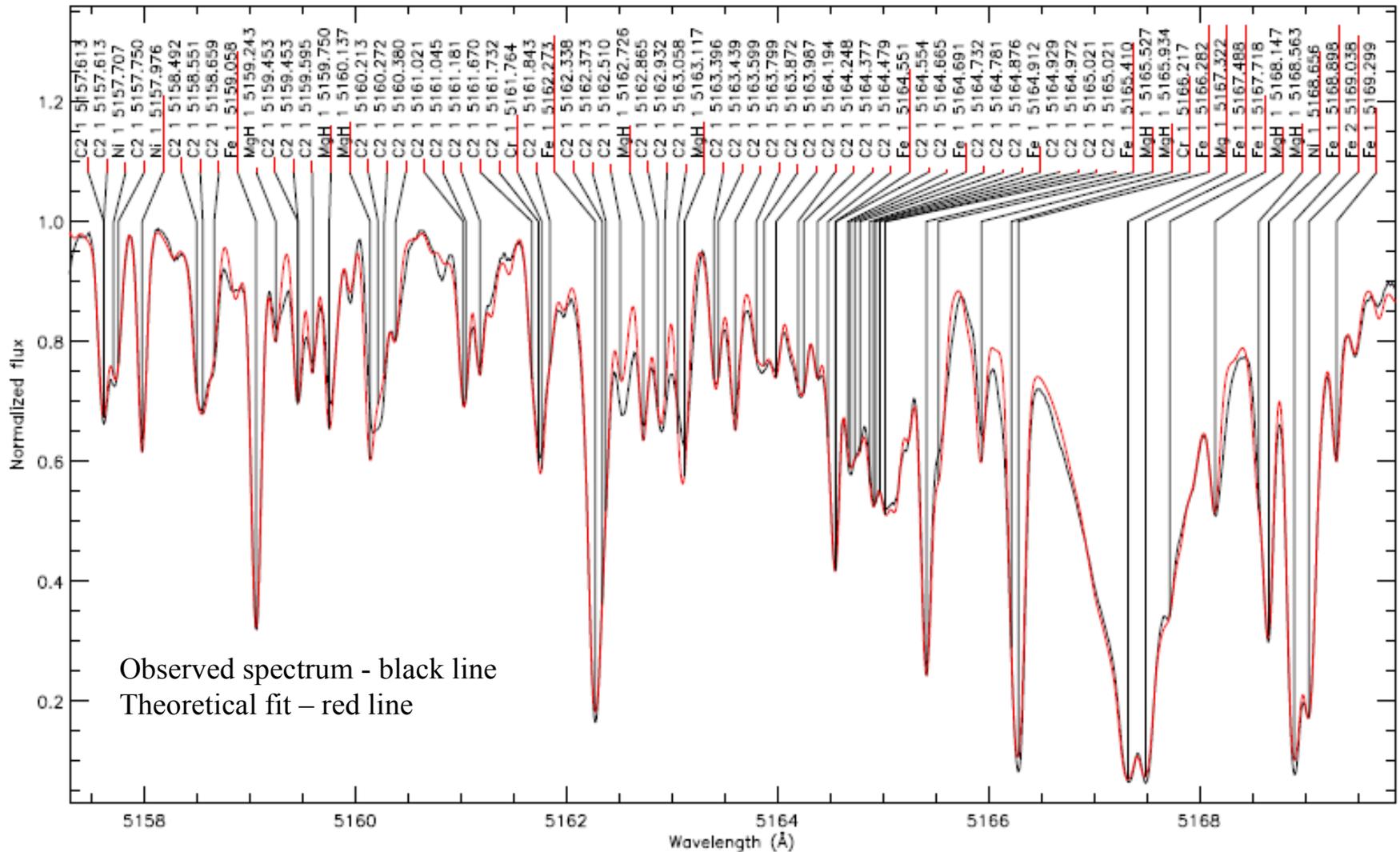
job3_marcs-4_fixg



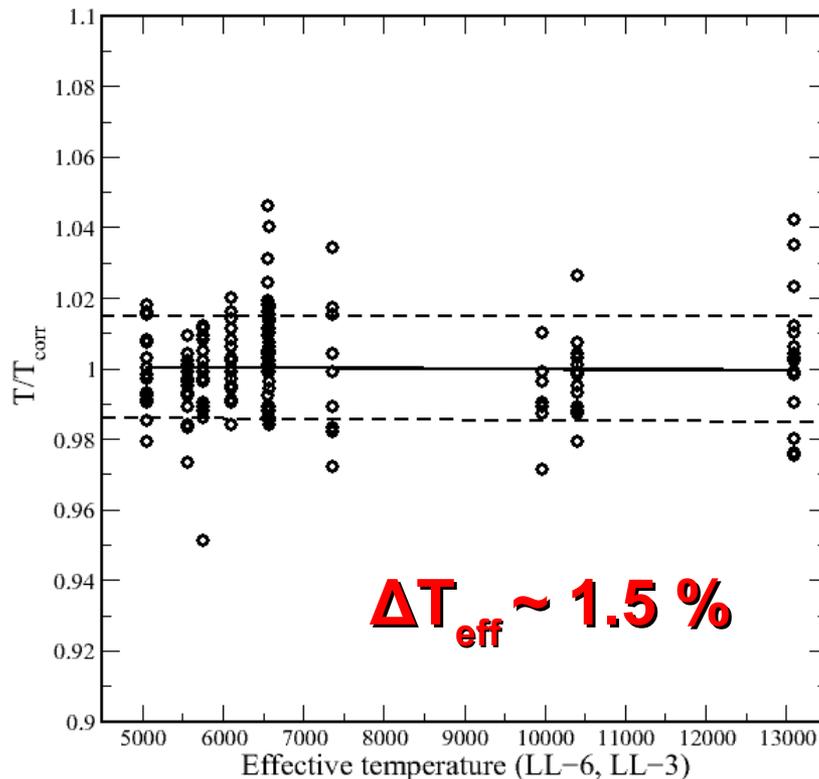
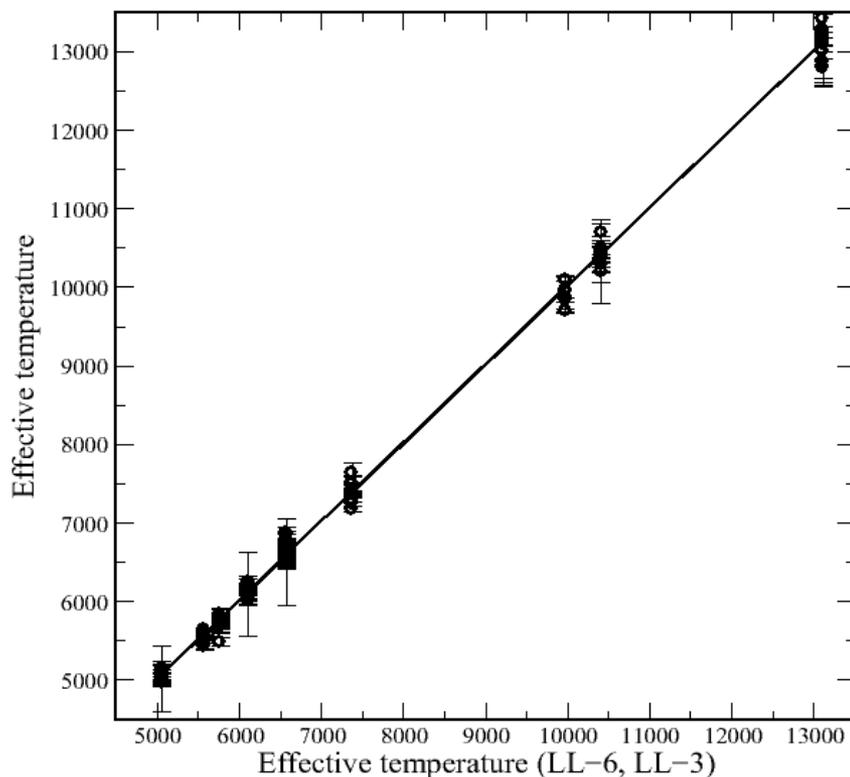
SME results: δ Eri:

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.



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

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

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

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

$$J=3.05 \times 10^{-10} \text{ (12000 A)}$$

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

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

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

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

Формирование спектральных линий в неравновесных условиях





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

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



Локальное термодинамическое равновесие (ЛТР)

При каких условиях предположение ЛТР удовлетворительно ?

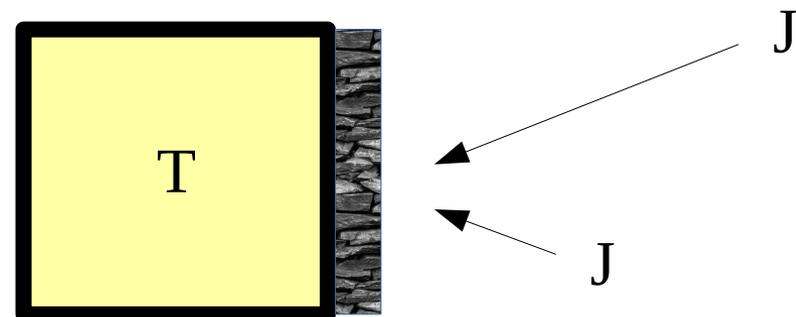
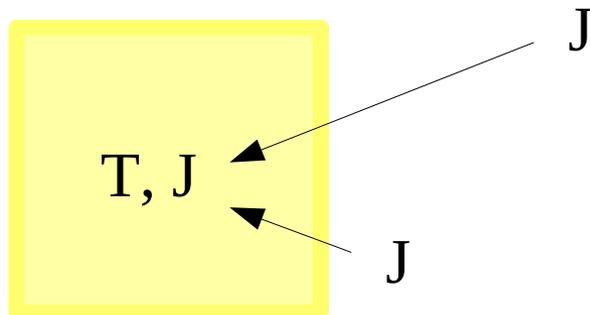
2) $J_\nu = B_\nu(T_e)$ на всех частотах \rightarrow детальный баланс
или $\tau_\nu > 1$ на всех важных для исследуемого атома частотах

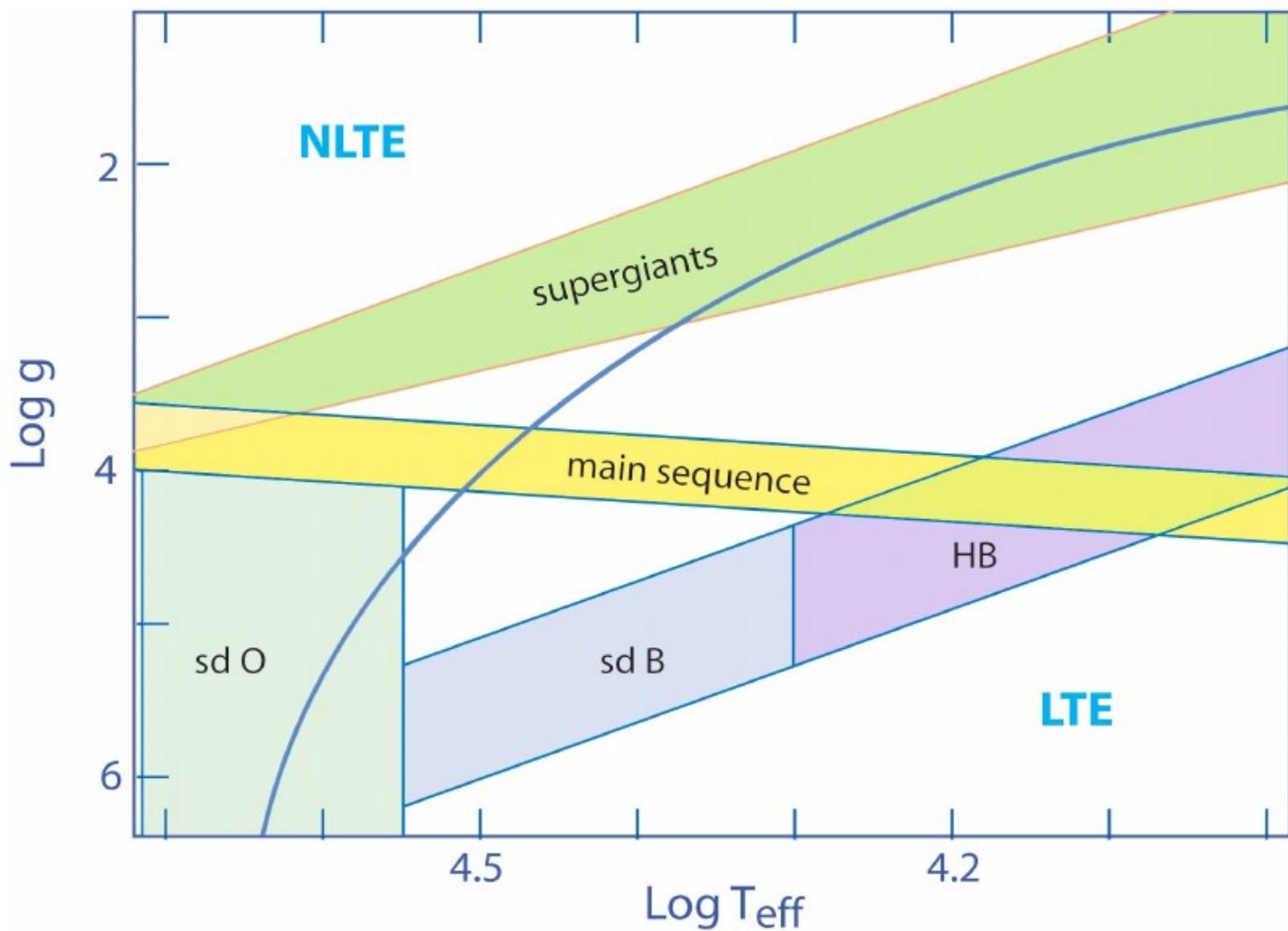
Функция источников:

$$S_\nu = \frac{\eta_\nu}{\kappa_\nu} = \frac{\kappa_\nu^t B_\nu + \kappa_\nu^s J_\nu}{\kappa_\nu^t + \kappa_\nu^s} = B_\nu$$

Во внешних слоях, а также при высоких температурах велико влияние не локальных условий

Условия выполняются в глубоких слоях атмосферы





Kudritzki 1978

	ПТР	ЛТР	не – ЛТР
Температура	Постоянная	переменная	Переменная
Поле излучения	постоянное $V(T)$	переменное	Переменное
Возбуждение атомов	формула Больцмана	формула Больцмана	??????
Ионизация атомов	формула Саха	формула Саха	??????
Скорости частиц	Распределение Максвелла	Распределение Максвелла	Распределение Максвелла (?)

Отклонение поля излучения в солнечной атмосфере от равновесного

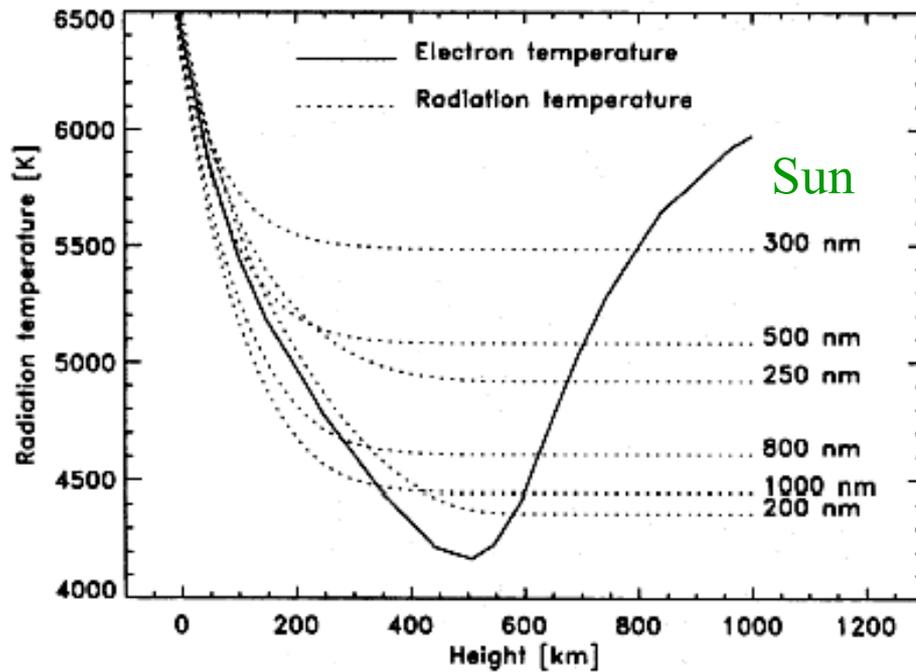


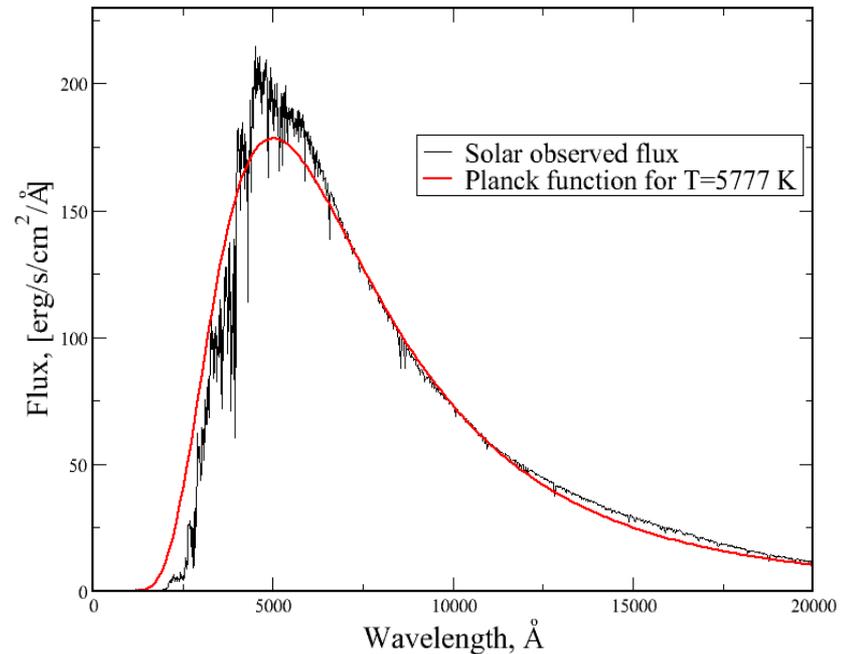
Fig. 3. Dotted: Equivalent black body radiation temperatures at different wavelengths. Solid: VAL3-C electron temperature

- $h < 0: J_\nu = B_\nu(T)$

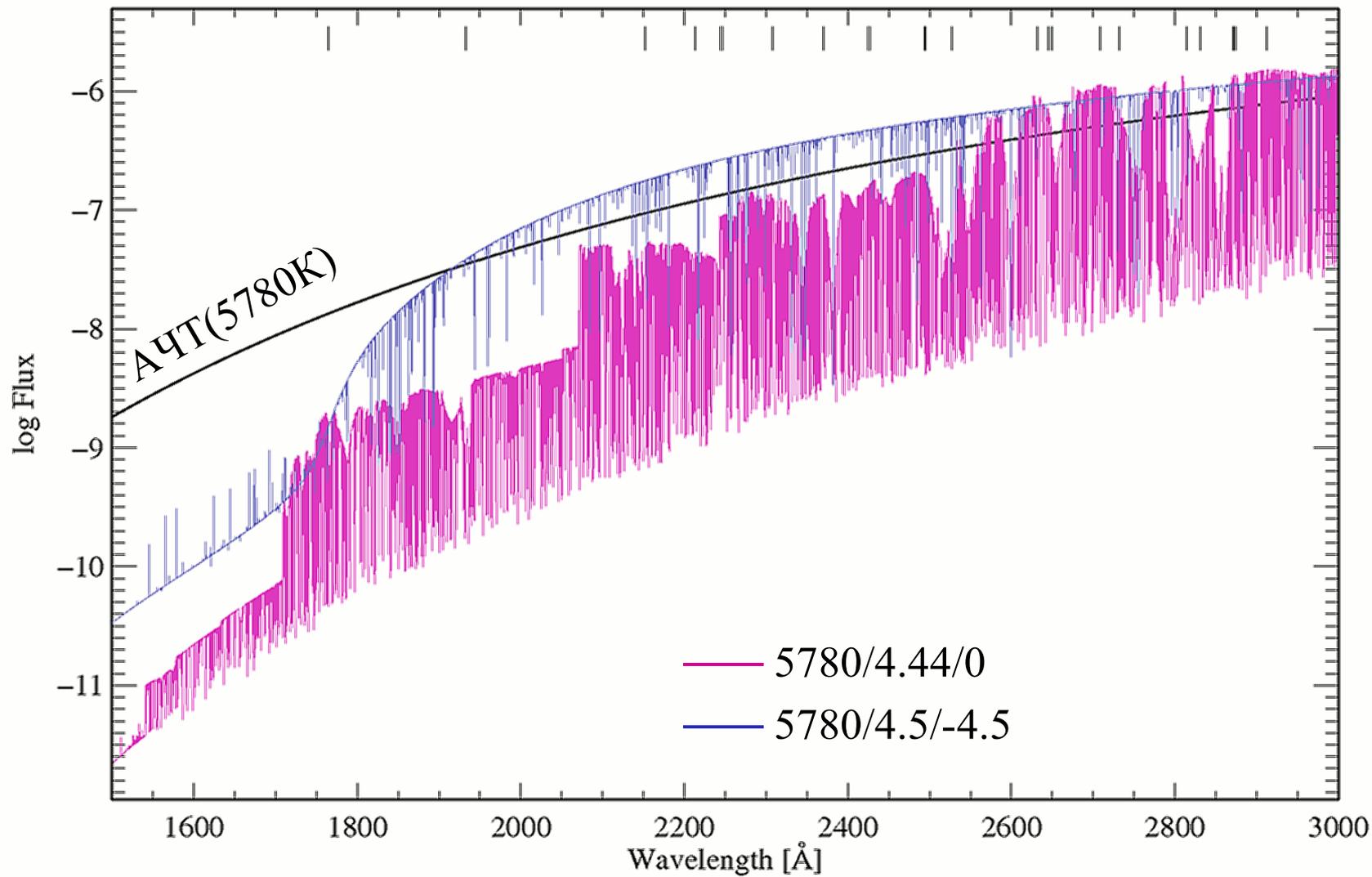
- $h = 0 - 300 \text{ km}$

$J_\nu > B_\nu(T)$ для $\lambda \leq 5000 \text{ \AA}$

$J_\nu < B_\nu(T)$ для $\lambda \geq 8000 \text{ \AA}$



Отклонение поля УФ излучения в солнечной атмосфере от равновесного



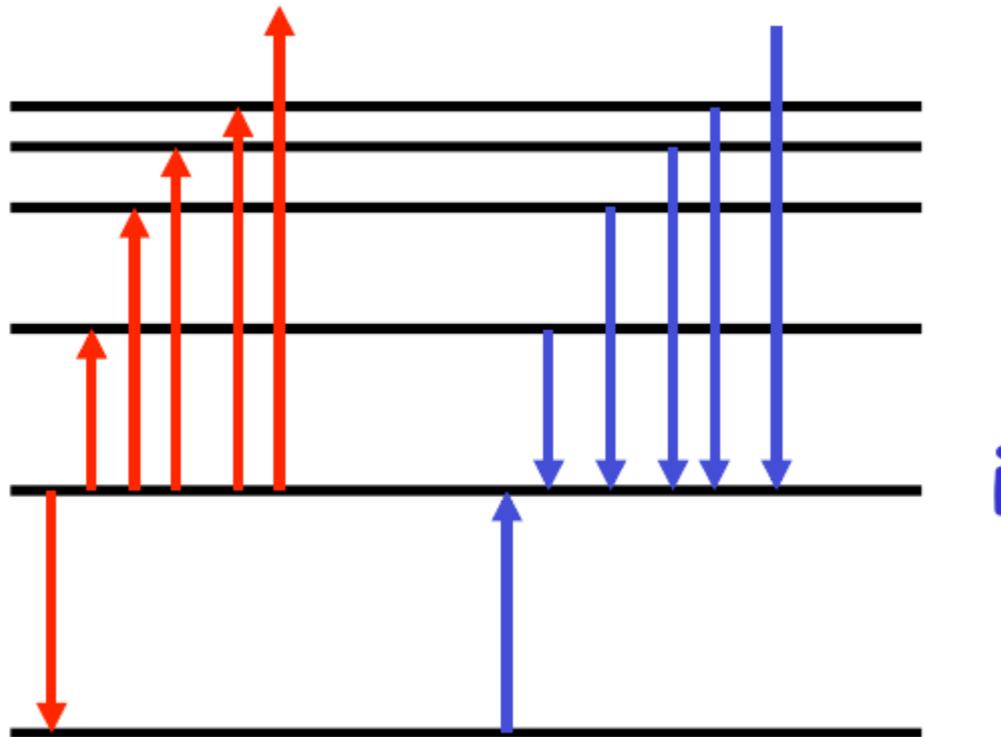
Элементарные процессы в атомах

- Статистическое равновесие (*стационарные атмосферы*)

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

Опустошение уровня

Заселение уровня



Элементарные процессы в атомах

- 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

Нелокальные
 величины !

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

Ударные процессы:

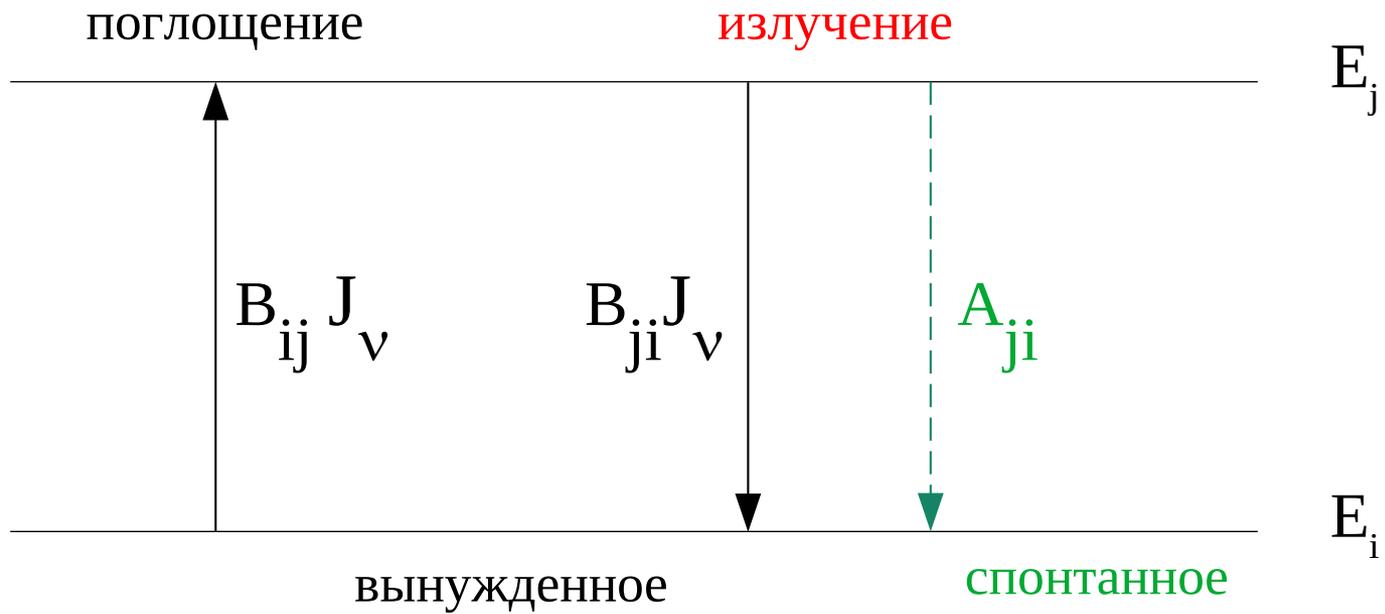
(e^- , H, молекулы)

ионизация, рекомбинация,
 перезарядка

возбуждение, удары
 второго рода

Локальные
 величины !

Радиативные процессы (b-b)



Радиативные скорости

b - b переходы

поглощение

$$n_i R_{ij} = 4\pi n_i \int \frac{\sigma_{ij} J_\nu}{h\nu} d\nu = n_i B_{ij} \int \phi_\nu J_\nu d\nu = n_i B_{ij} J_\nu$$

Атомный коэффициент поглощения, $\sigma_{ij}(\nu) = \phi_\nu \sigma_{ij}^{tot}$

$$\sigma_{ij}^{tot} = B_{ij} \frac{h\nu}{4\pi}$$

↑
профиль коэффициента
поглощения

излучение

$$n_j R_{ji} = n_j B_{ji} J_\nu$$

вынужденное

$$n_j R_{ji} = n_j A_{ji}$$

спонтанное

$$n_j R_{ji} = n_j (A_{ji} + B_{ji} J_\nu)$$

полное

Радиативные скорости

b-f переходы

поглощение

$$n_i R_{ij} = 4\pi n_i \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{\sigma_{ij}(\nu) J_\nu}{h\nu} d\nu$$

излучение

$$n_j R_{ji} = n_j \left(\frac{n_i}{n_j} \right) 4\pi \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{\sigma_{ij}(\nu)}{h\nu} \left(\frac{2h\nu^3}{c^2} + J_\nu \right) e^{-h\nu/kT} d\nu$$

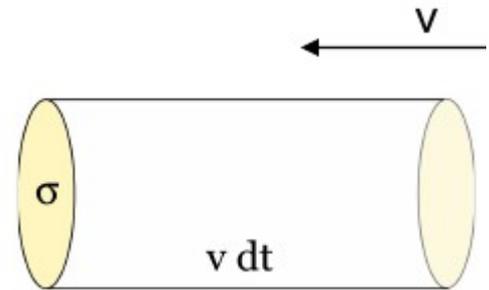
равновесное (Больцман)

спонтанное

вынужденное

Ударные скорости

Количество столкновений в ед.времени \sim
вероятности (сечение взаимодействия) σ , $v dt$



b-b

$$C_{ij} = n_{coll} \int_0^{\infty} \sigma_{ij}^{coll}(v) v f(v) dv$$

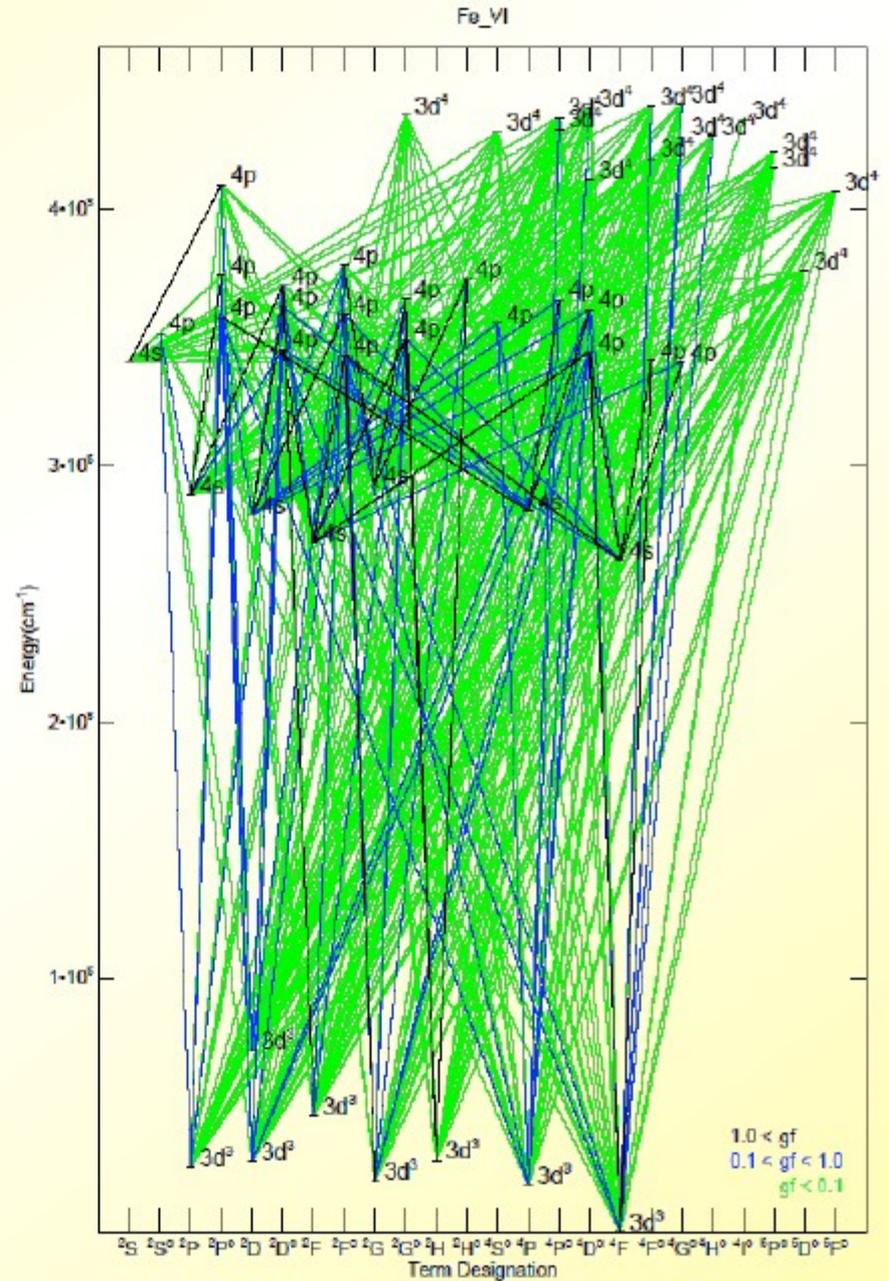
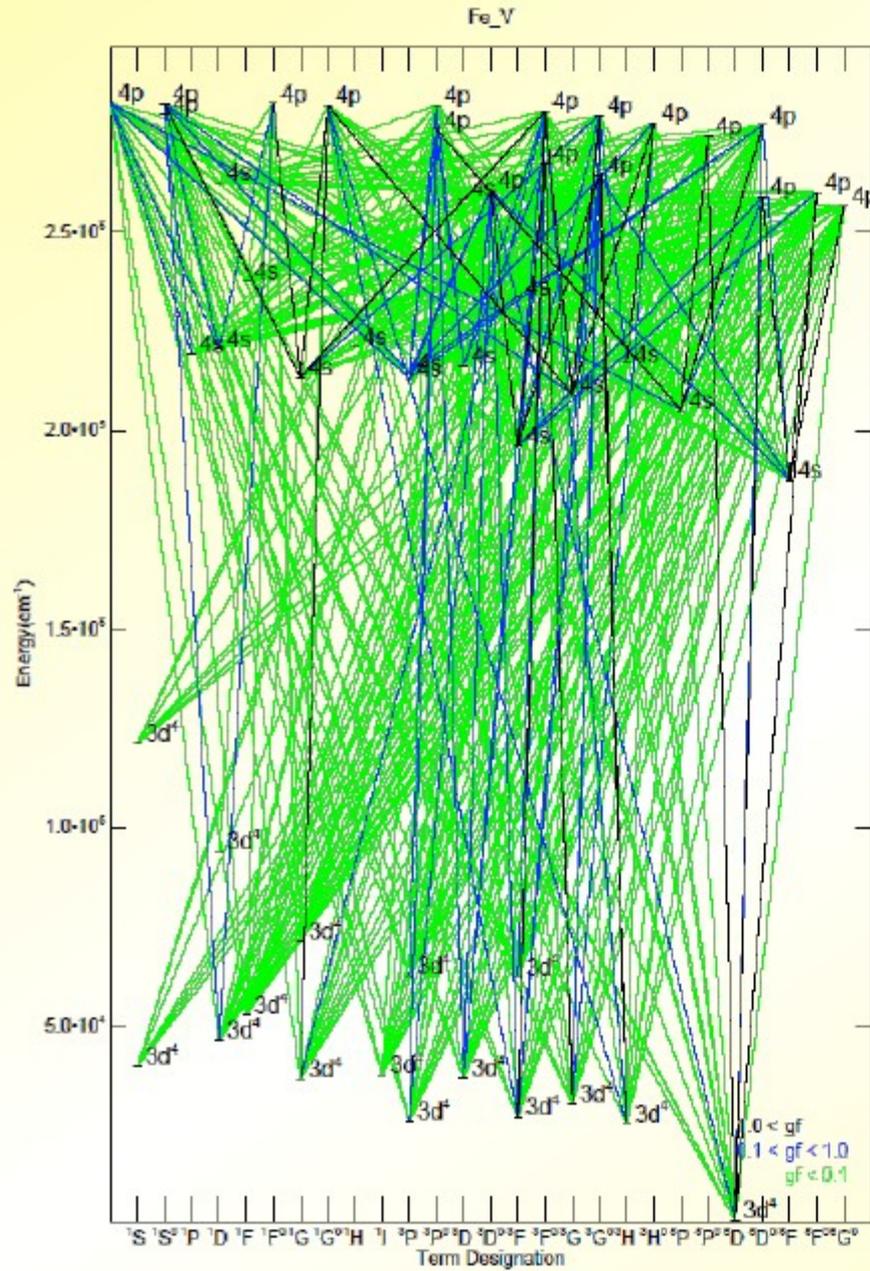
$$C_{ji} = g_i / g_j e^{E_{ji}/kT} C_{ij}$$

b-f

$$C_{ki} = C_{ik} n_e \frac{g_i}{g_1^+} \frac{1}{2} \left(\frac{h^2}{2\pi m k T} \right)^{3/2} e^{E_i/kT}$$

collisional ionization (important
at high T)

complex atomic models for O-stars (Pauldrach et al., 2001)



Частный случай:

полное термодинамическое равновесие (ПТР)

• детальный баланс: $n_i R_{ij} = n_j R_{ji}$

• $J_\nu = B_\nu$

$$\text{b-b: } n_i B_{ij} B_\nu = n_j (A_{ji} + B_{ji} B_\nu) \longrightarrow \frac{n_j}{n_i} = \frac{g_j}{g_i} e^{-h\nu/kT} = \left(\frac{n_j}{n_i} \right)$$

формула Больцмана

$$\text{b-f: } n_i 4\pi \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{\sigma_{ij}(\nu)}{h\nu} B_\nu d\nu = n_j \left(\frac{n_i}{n_j} \right) 4\pi \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{\sigma_{ij}(\nu)}{h\nu} \left(\frac{2h\nu^3}{c^2} + B_\nu \right) e^{-h\nu/kT} d\nu$$

$$\frac{n_i}{n_j} = N e \frac{g_i}{2g_j} \frac{h^3}{(2\pi mkT)^{3/2}} e^{\chi_i/kT} = \left(\frac{n_i}{n_j} \right)$$

формула Саха

Не-ЛТР:

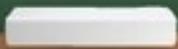
Населённости атомных уровней из системы уравнений статистического равновесия (СР) с учётом всех процессов, в которых участвуют атомы

Совместное решение уравнения переноса и СР:

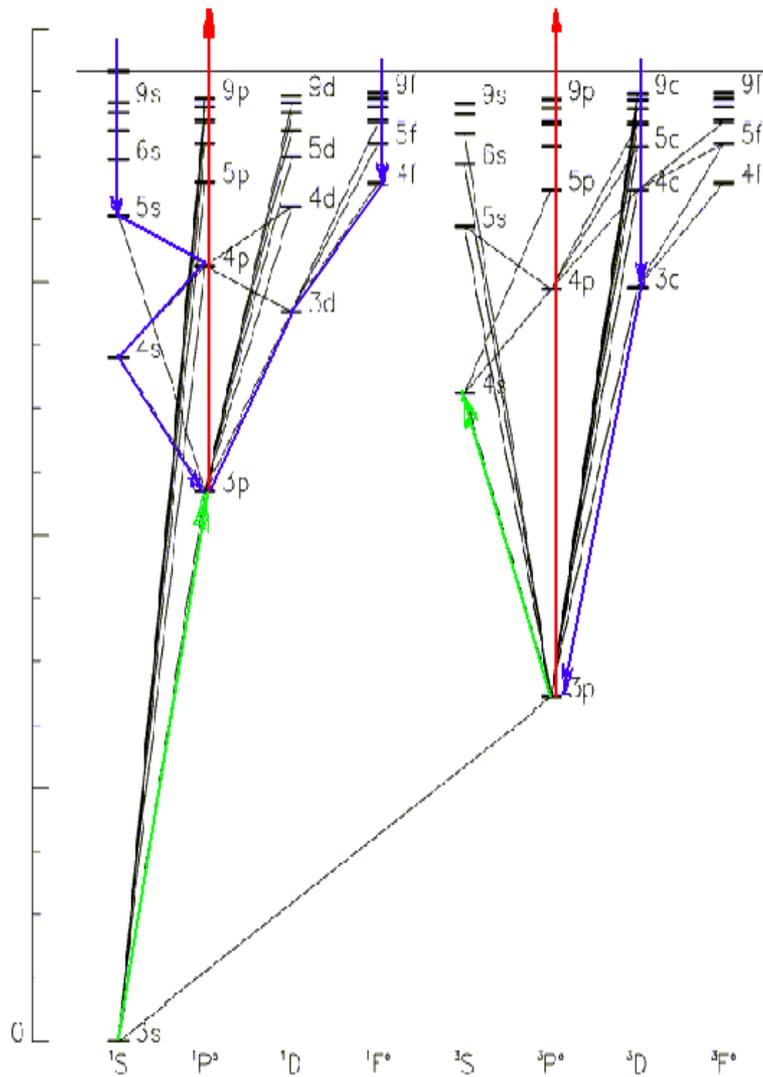
$$\left\{ \begin{array}{l} n_i \sum (R_{ij} + C_{ij}) = \sum n_j (R_{ji} + C_{ji}) \\ \frac{\mu dI_v(z, \mu)}{dz} = -\chi_v(z) I_v(z, \mu) + \eta_v(z) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} i = 1, \dots, NL \\ NL - \text{число уровней} \\ \text{в модели атома} \end{array}$$

- Трудоёмкие по сравнению с ЛТР расчёты
- Требуется большое количество атомных данных
- + Физически реалистичное приближение

*Механизмы отклонений
от ЛТР*



Механизмы отклонений от ЛТР



b-f переходы

1. Сверхионизация уровней

при $J_v > B_v$ за порогом
ионизации

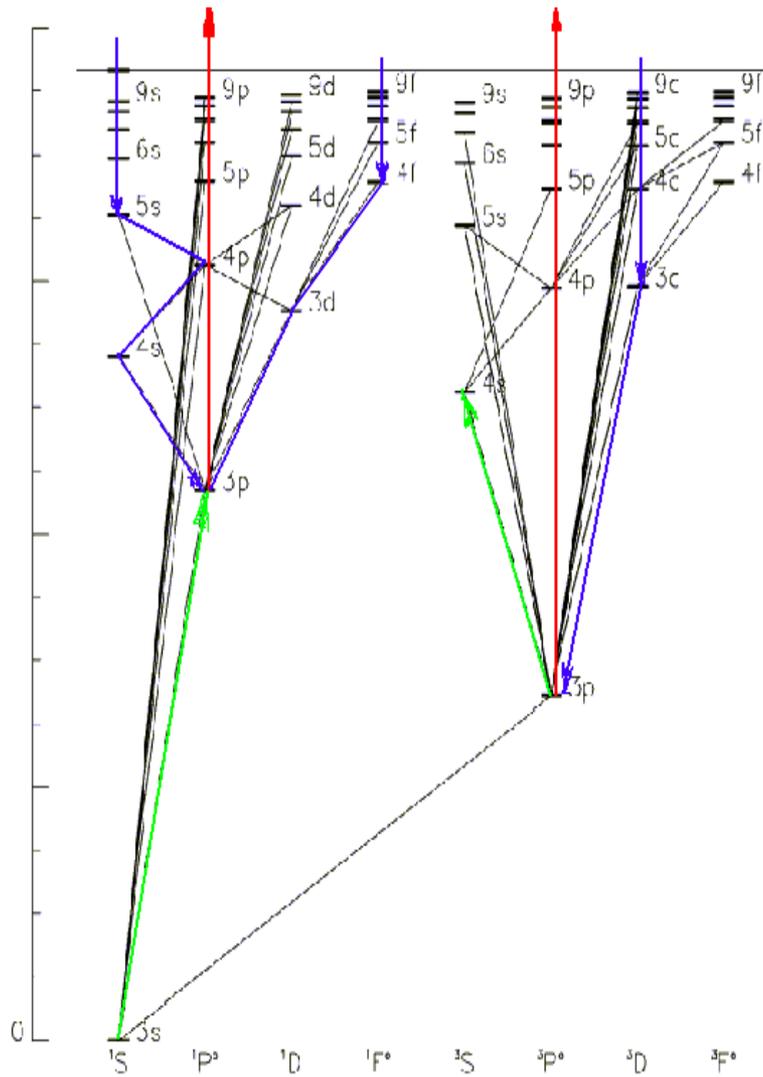
в слоях с $\tau_{thr} < 1$

2. Сверхрекомбинация уровней

при $J_v < B_v$ за порогом
ионизации

в слоях с $\tau_{thr} < 1$

Механизмы отклонений от ЛТР



b - b переходы

$$b_i = \frac{n_i}{n_i^{LTE}}$$

3. Радиативная накачка

возбужденных состояний ($j > i$)

в слоях с $\tau_{core} > 1$, $\tau_{wing} < 1$.

$$b_j > b_i$$

4. Опустошение верхнего уровня спонтанными переходами

в слоях с $\tau_{core} < 1$

$$b_j < b_i$$

Механизмы отклонений от ЛТР

Атомы с $N_r \ll N_{el}$ наиболее подвержены отклонениям от равновесного заселения уровней:

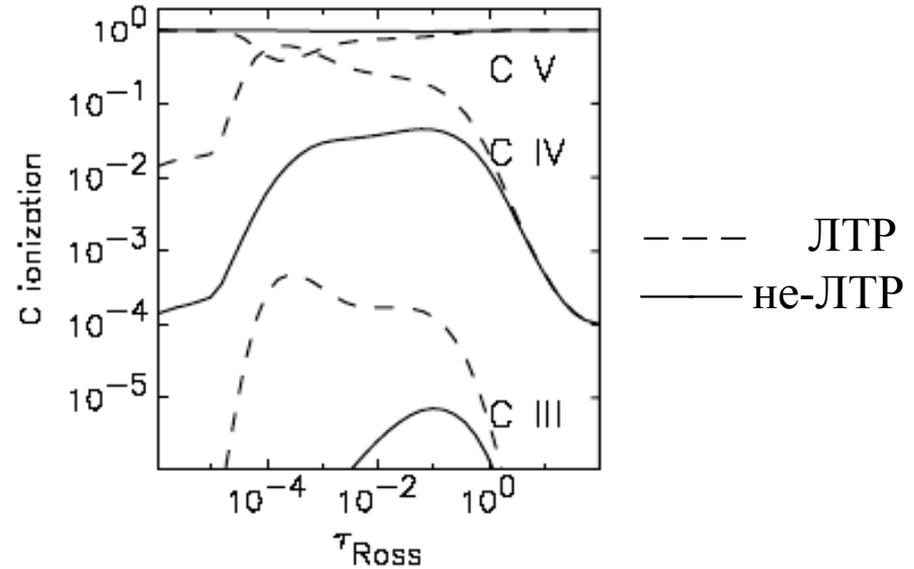
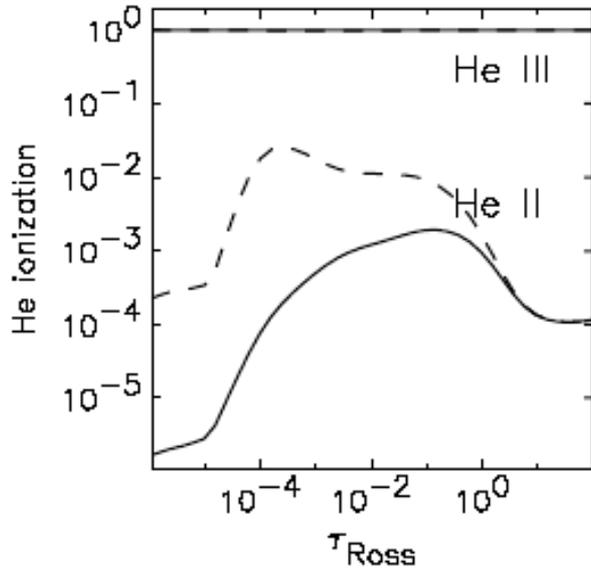
- **сверхионизация** низковозбужденных уровней (λ_{thr} в у.-ф.)
при $\tau_{thr} < 1$;
- **сверхрекомбинация** высоковозбужденных уровней (λ_{thr} в и.-к.)
+ **опустошение верхних уровней** при спонтанных переходах

Атомы с $N_r \cong N_{el}$: полная концентрация, N_r – равновесная, но населенности возбужденных уровней могут быть неравновесными в области формирования линий:

- **радиативная накачка** возбужденных состояний;
- **опустошение верхних уровней** при спонтанных переходах.

Ионизационное равновесие He и C в атмосфере звезды 50000/4.0/0

Lanz & Hubeny 2003

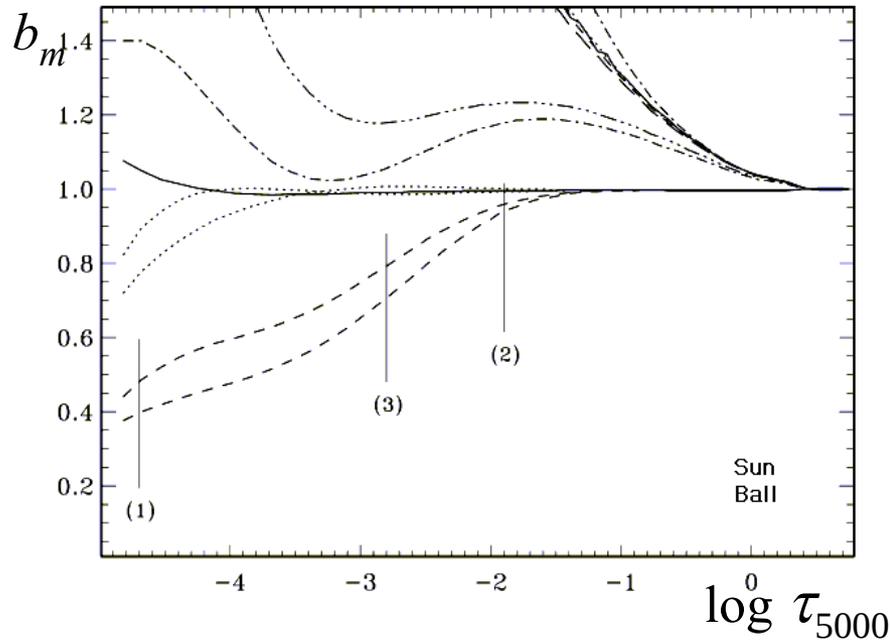


He III и C V доминирующие стадии ионизации для своих элементов

Сверхионизация всех более низких стадий ионизации

Статистическое равновесие атомов: зависимость от звездных параметров

Mashonkina et al. 1999

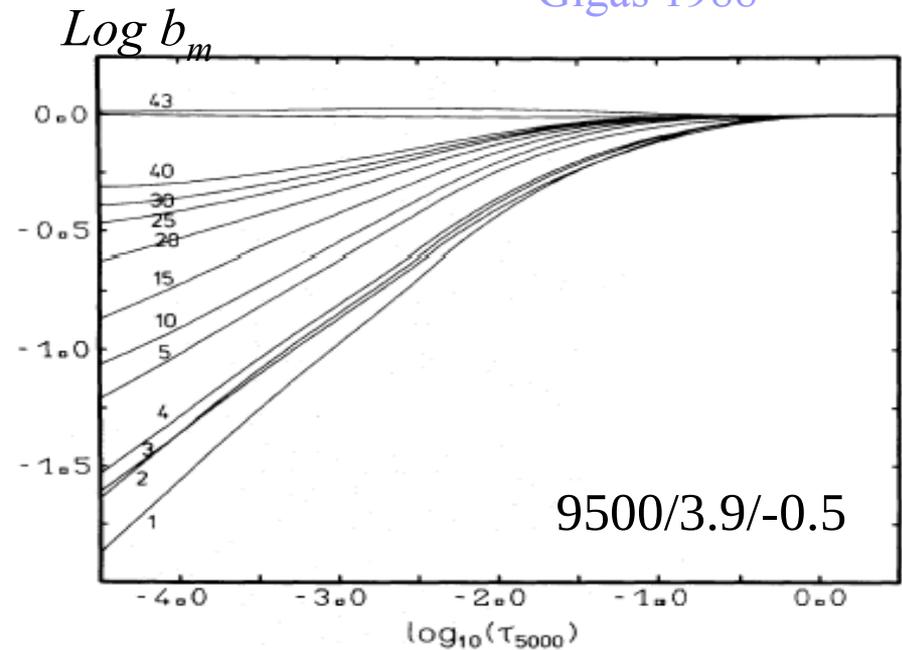


BaII: Sun

$$N_{\text{NLTE}}(\text{BaII}) = N_{\text{LTE}}(\text{BaII})$$

но $b_i \neq 1$

Gigas 1988



BaII: Vega

$$b_i < 1$$

$$N_{\text{NLTE}}(\text{BaII}) < N_{\text{LTE}}(\text{BaII})$$

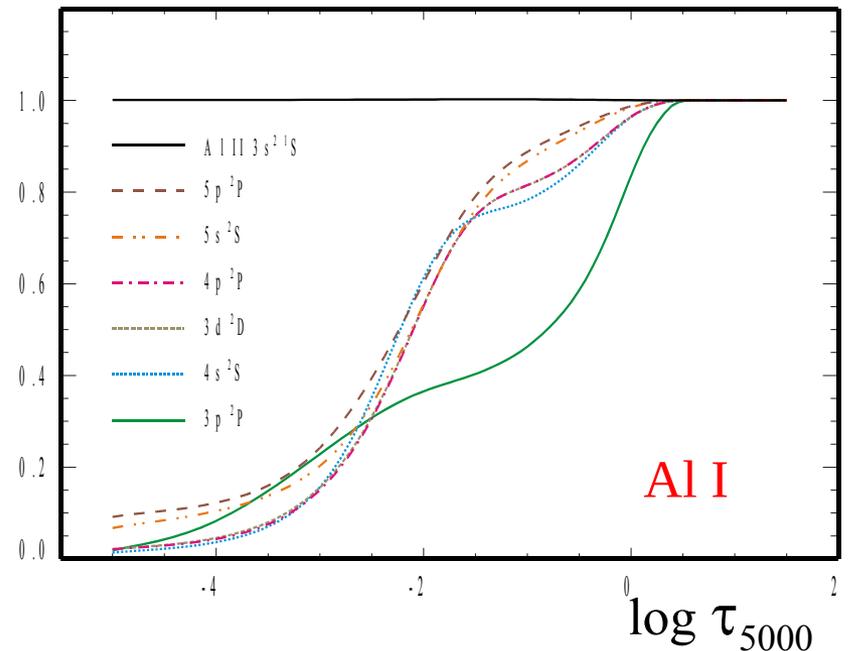
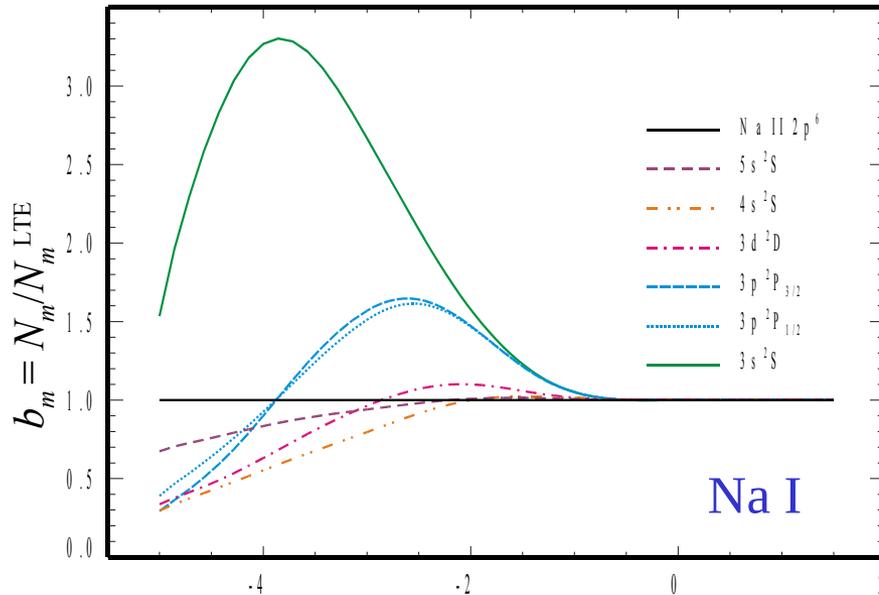
сверхионизация

Результаты: статистическое равновесие атомов

$$b_m = n_m (\text{NLTE}) / n_m (\text{LTE})$$

отдельных уровней Na I и Al I в солнечной атмосфере

Gehren et al. 2004



Na I: $b_{1,2} > 1$, $N_{\text{NLTE}}(\text{Na I}) > N_{\text{LTE}}(\text{Na I})$ **сверхрекомбинация**

Al I: $b_i < 1$, $N_{\text{NLTE}}(\text{Al I}) < N_{\text{LTE}}(\text{Al I})$ **сверхионизация**

$E_{\text{ion}}(\text{Na I}) = 5.1$ эВ,

$E_{\text{ion}}(\text{Al I}) = 6.0$ эВ.

Почему эффекты противоположны?

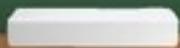
Не только величина, но и знак не-ЛТР эффектов зависят от атомной структуры и атомных параметров

Ionization edges and threshold photoionization cross-sections:

Ion	Level	λ_0 [nm]	a_0 [MBarn]
H I	$n = 2$	364.7	15.84
Mg I	$3s \ ^1S$	162.1	1.18
	$3p \ ^3P^o$	251.4	20.00
	$3p \ ^1P^o$	375.7	11.95
Al I	$3p \ ^2P^o$	207.1	65.00
Si I	$3p \ ^3P$	152.1	39.16
	$3d \ ^1D^o$	168.2	34.49
	$4s \ ^1S^o$	198.6	33.56
Fe I	a^5D	156.9	4.06
Na I	$3s \ ^1S$	241.5	0.09
K I	$4s \ ^1S$	286.0	0.01

Fe I has a large number of additional *bf* absorption edges between 200 and 300 nm

***Отклонение от ЛТР в
спектральных линиях***



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

$$\kappa_\nu^l = n_i f_{ij} \frac{\pi e^2}{mc} \phi_\nu \left(1 - \frac{g_i n_j \psi_\nu}{g_j n_i \phi_\nu} \right) \quad b_i = \frac{n_i}{n_i^{LTE}}$$

$$1) \quad \kappa_\nu^l \sim n_i \left(1 - \frac{g_i n_j}{g_j n_i} \right) \sim b_i \left(1 - \frac{b_j}{b_i} e^{-h\nu/kT} \right)$$

• для $h\nu/kT > 1$ $\kappa_\nu^l \sim b_i$ $\lambda[\text{\AA}] < 144000/T[10^3 K]$

$b_i < 1$ ослабление по сравнению с ЛТР

$b_i > 1$ усиление по сравнению с ЛТР

• если $h\nu/kT \ll 1$ $\kappa_\nu^l \sim b_i \left(1 - \frac{b_j}{b_i} \right)$
 ослабление может перейти в эмиссию, если $b_j > b_i$!

$$2) \quad S_\nu^l = \frac{2h\nu_{ij}^3}{c^2} \frac{1}{\frac{n_i g_j}{n_j g_i} - 1} = \frac{2h\nu_{ij}^3}{c^2} \frac{1}{\frac{b_i}{b_j} \left(e^{-h\nu/kT} - \frac{b_j}{b_i} \right)}$$

Оптический диапазон

• для $h\nu/kT > 1$ $S_\nu^l \sim B_\nu(T) \frac{b_j}{b_i}$

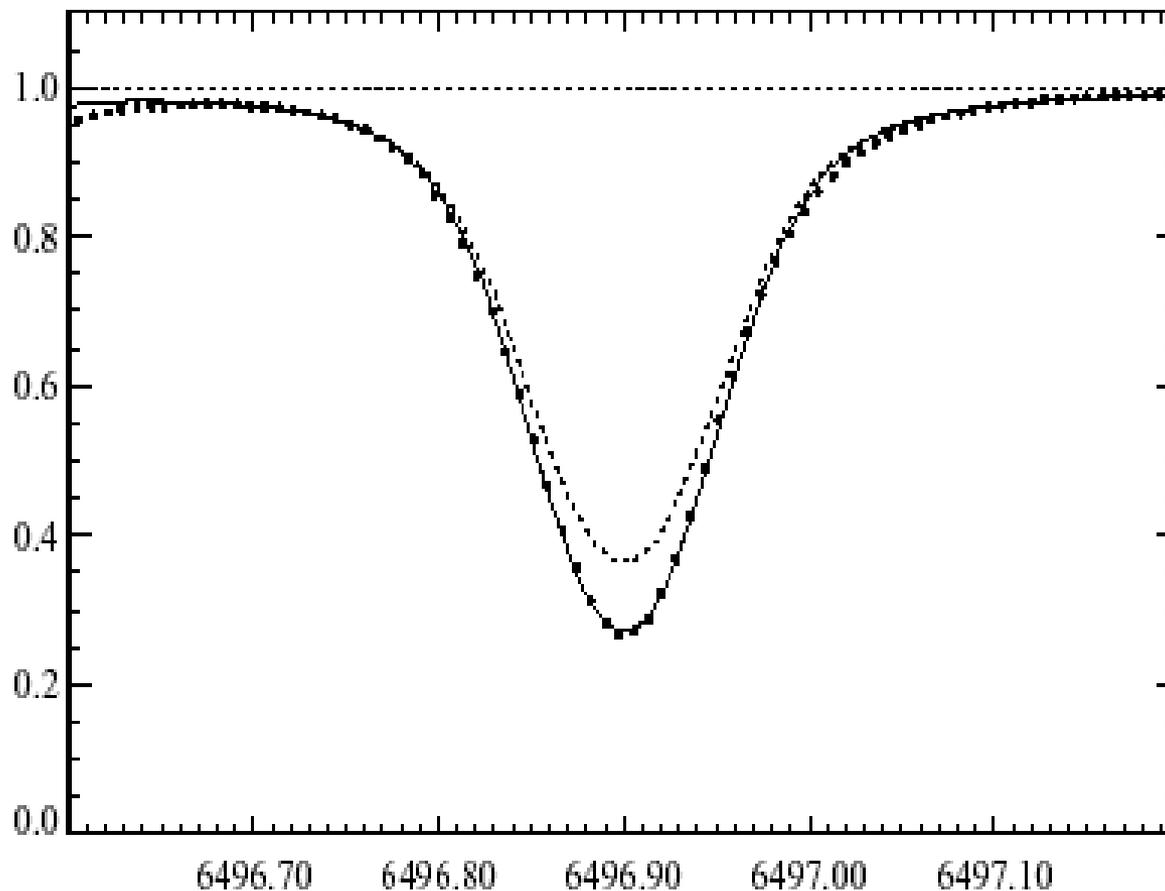
$b_j > b_i \rightarrow S_\nu^l > B_\nu(T) \rightarrow$ ослабление по сравнению с ЛТР

$b_j < b_i \rightarrow S_\nu^l < B_\nu(T) \rightarrow$ усиление по сравнению с ЛТР

$b_j = b_i \rightarrow S_\nu^l \approx B_\nu(T) \rightarrow$ одинаково по сравнению с ЛТР

*Примеры неЛТР профилей
спектральных линий*

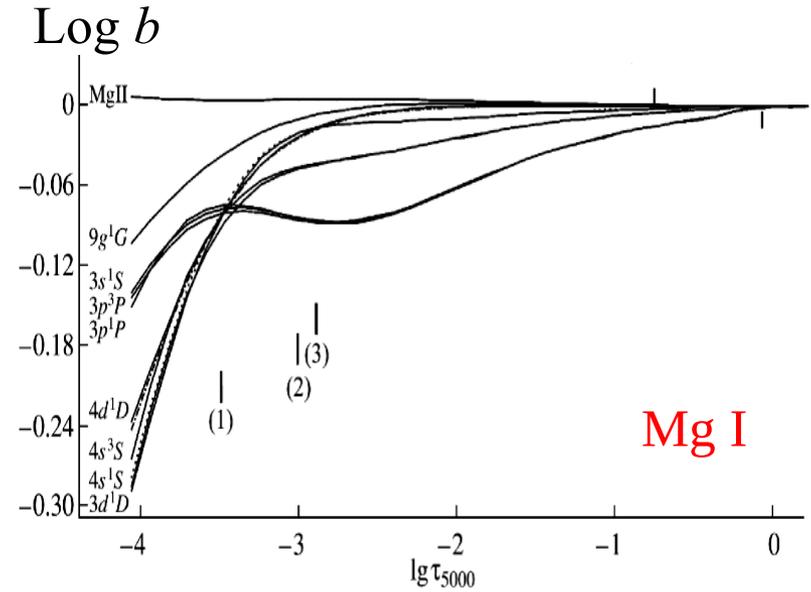
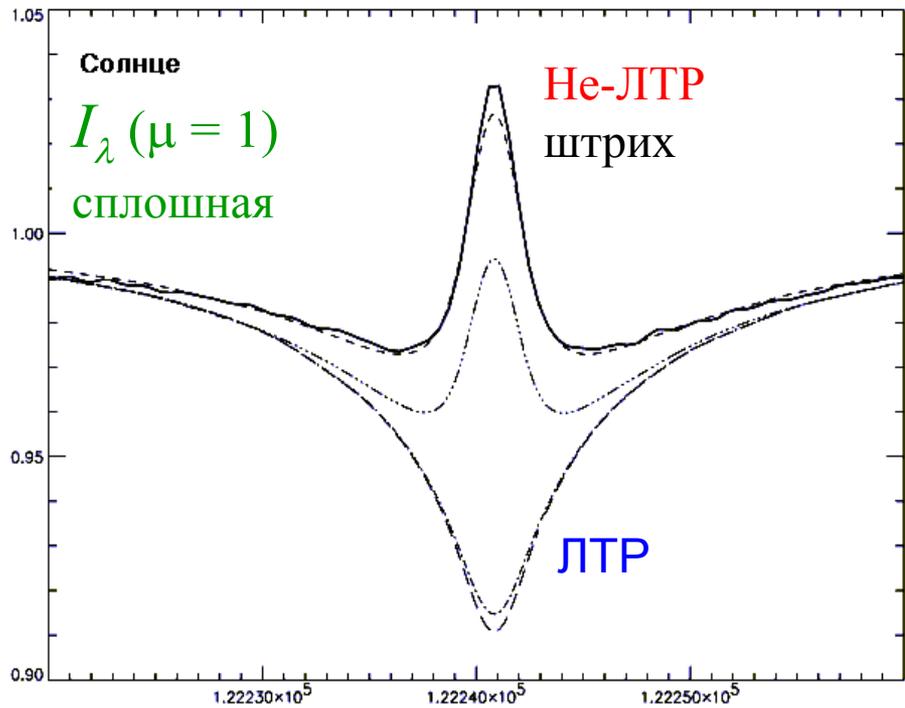
Ва II 6496 в солнечном спектре (точки),
He-ЛТР – сплошная кривая, ЛТР – пунктир.
(*Mashonkina&Gehren 2000*)



$b_j < b_i \rightarrow$ усиление по сравнению с ЛТР

Mg I 12 μm (6g - 7h) у Солнца – с эмиссионным ядром.

В рамках ЛТР теоретический профиль линии – абсорбционный !



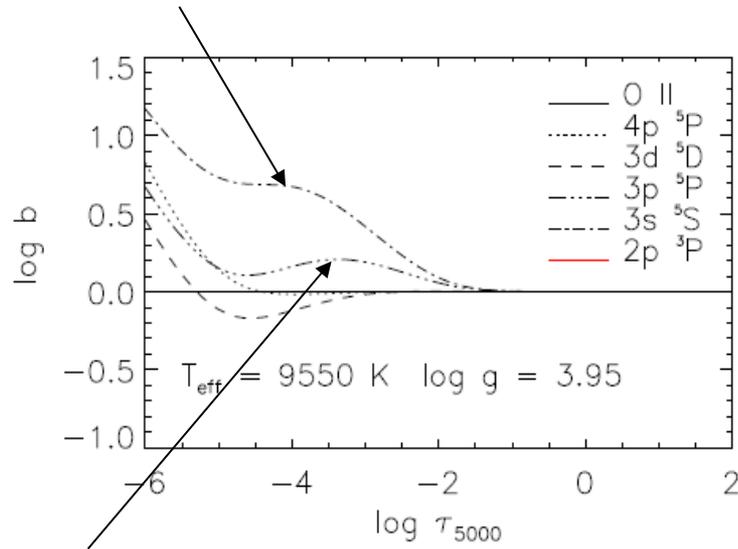
сверхионизация:
 $b_i < 1; \quad b_i < b_j$

Carlsson et al. 1992; Zhao et al. (1998)

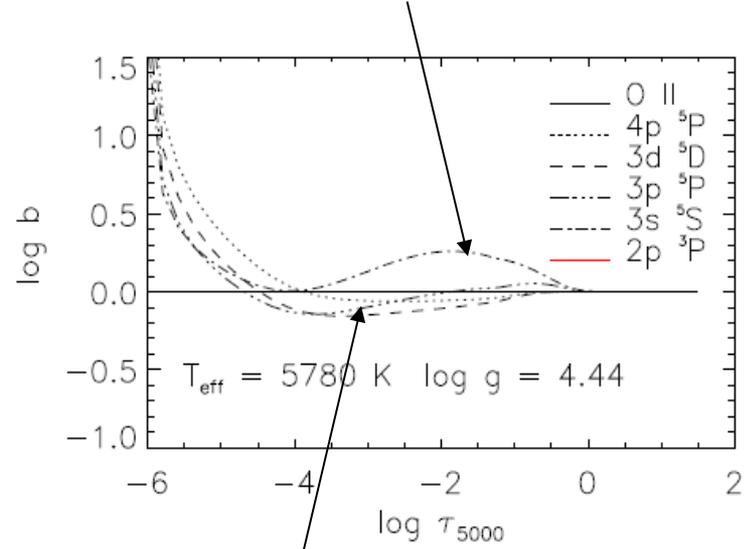
- не-ЛТР: $b(7h) > b(6g) \rightarrow$ ЭМИССИЯ в ядре

Отклонения от ЛТР для уровней O I

Нижний уровень 7771-5 Å



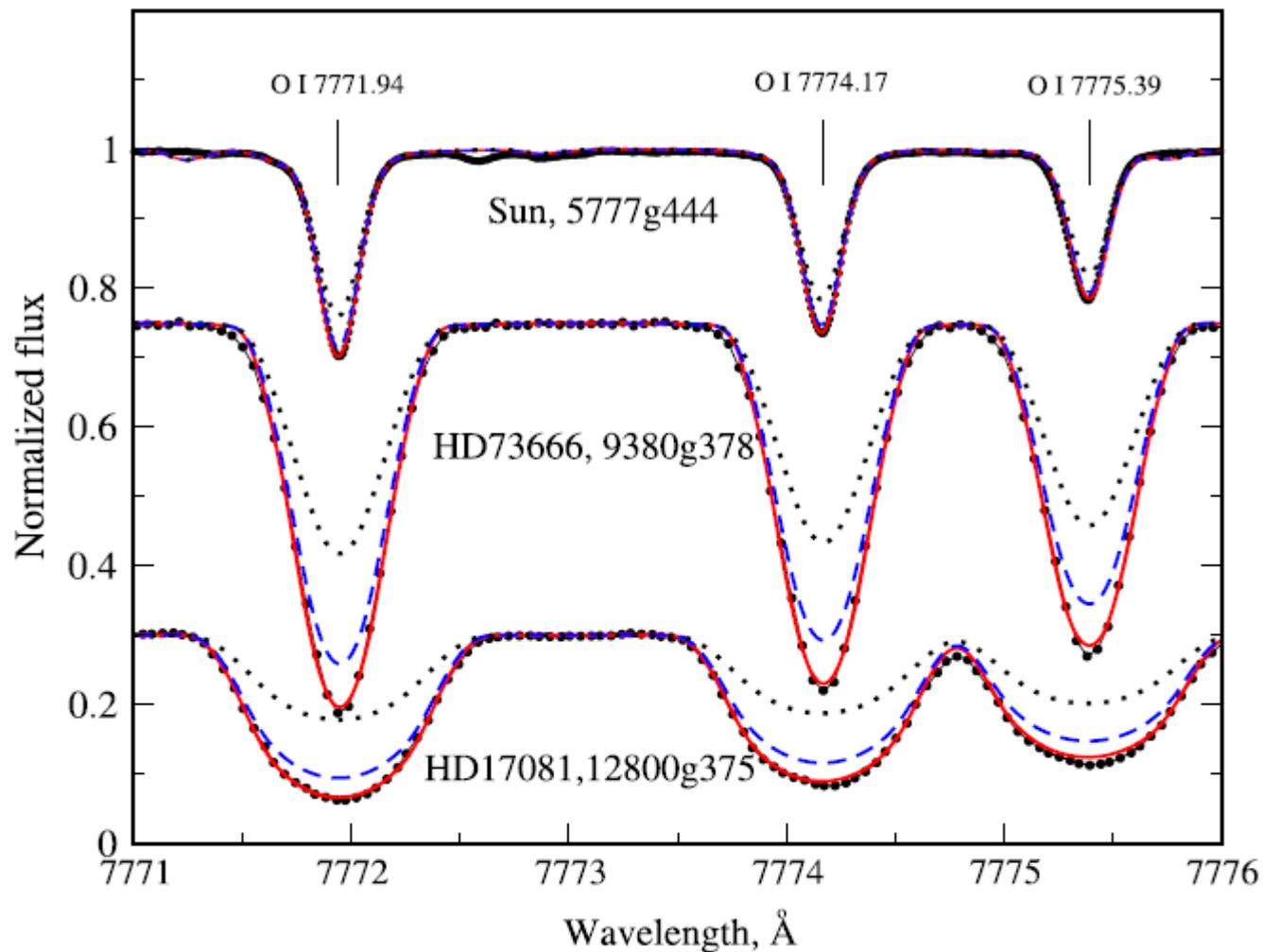
Нижний уровень 7771-5 Å



Верхний уровень 7771-5 Å

Верхний уровень 7771-5 Å

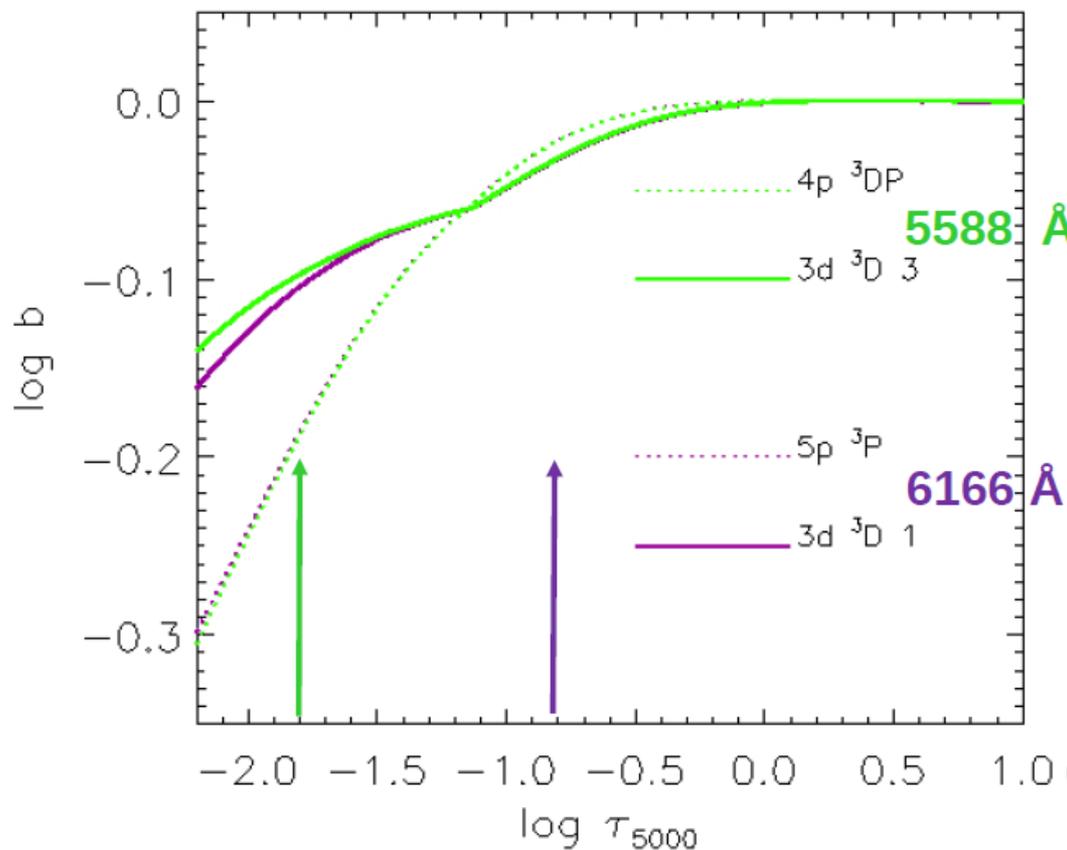
Figure 2: b-factors for oxygen levels in the atmospheres of Vega (left) and the Sun (right).



Ryabchikova &
Mashonkina, 2014,
Phys.Scripta, 89, k4007

Figure 3. The theoretical and observed (full circles) profiles of the O I IR-triplet lines in the Sun (5777/4.44), HD 73 666 (9380/3.78), and HD 17 081 (12800/3.75). The dotted, dashed blue and full red curves correspond to the theoretical LTE, NLTE with [25], and NLTE with [26] electron impact cross-sections, respectively.

Отклонения от ЛТР для Ca I, Ca II



$$b_i = n_{\text{non-LTE } i} / n_{\text{LTE } i}$$

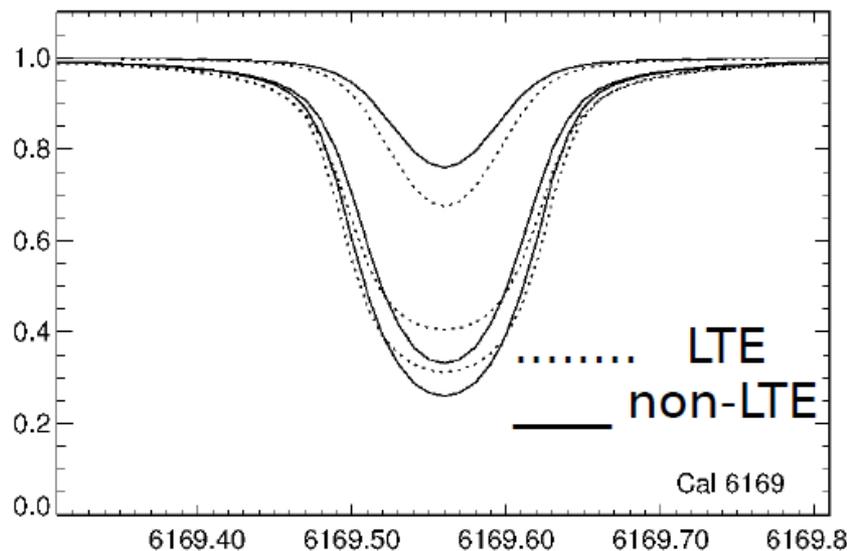
HD 32115

$T_{\text{eff}} = 7250 \text{ K}$, $\log g = 4.20$

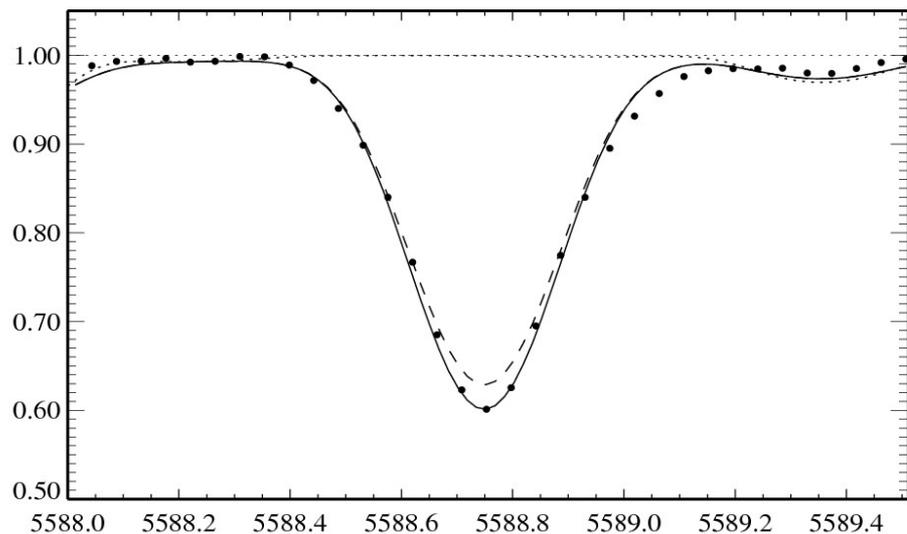
$$S_v \sim B_v b_u / b_l$$

$$\chi_v \sim b_l$$

При не-ЛТР возможно как усиление, так и ослабление линий

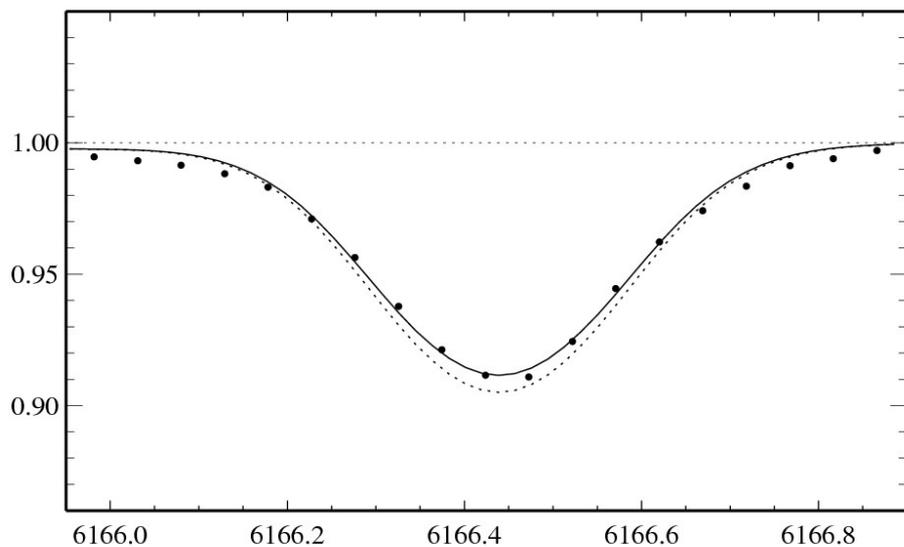


Примеры не-ЛТР поправок разных знаков для линий Ca I



— non-LTE
- - - LTE
••• observations

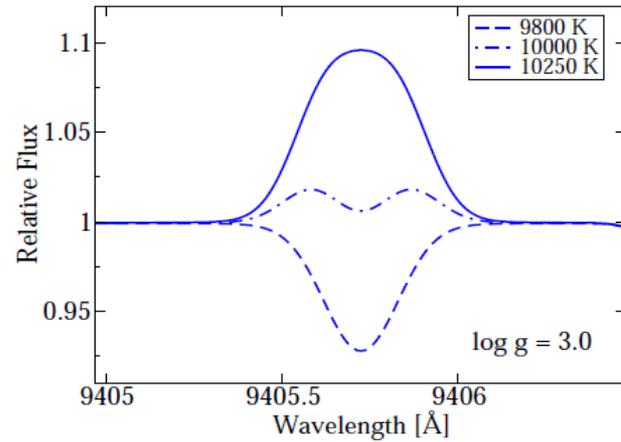
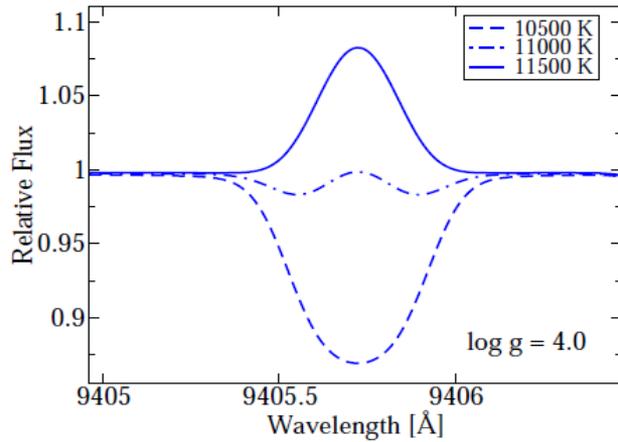
$$\Delta_{\text{non-LTE}} < 0$$



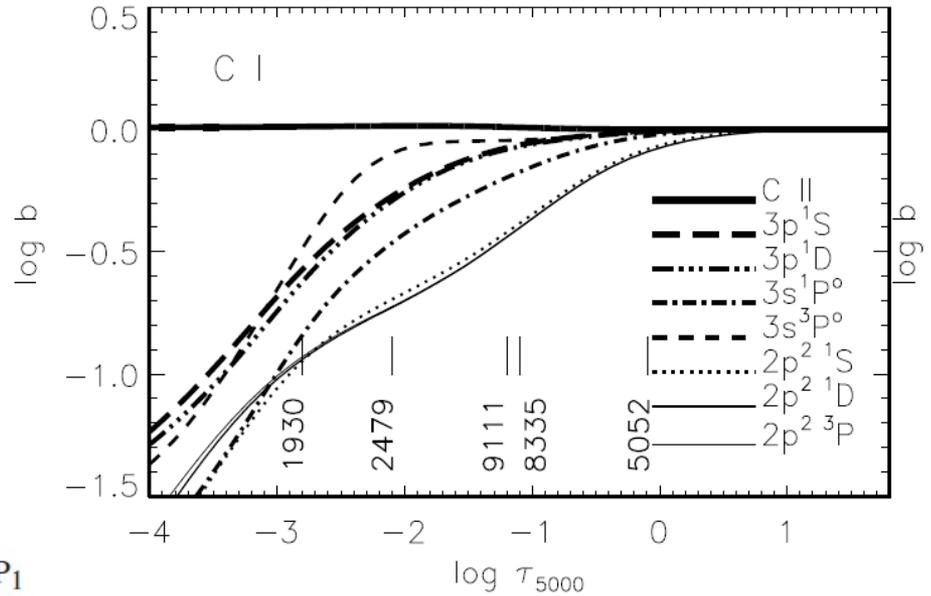
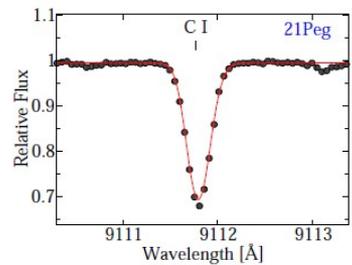
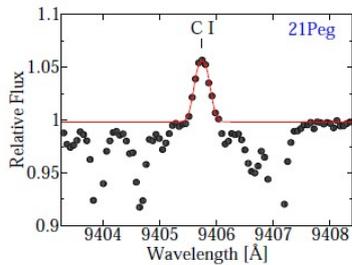
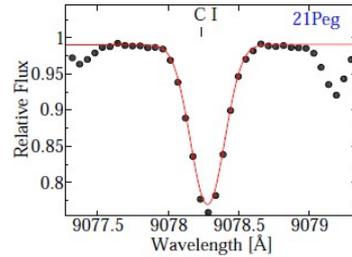
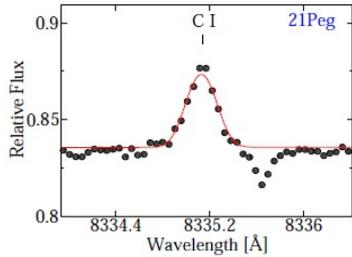
$$\Delta_{\text{non-LTE}} > 0$$

HD 32115
T = 7250 K, log(g) = 4.20

The interpretation of C I emission lines



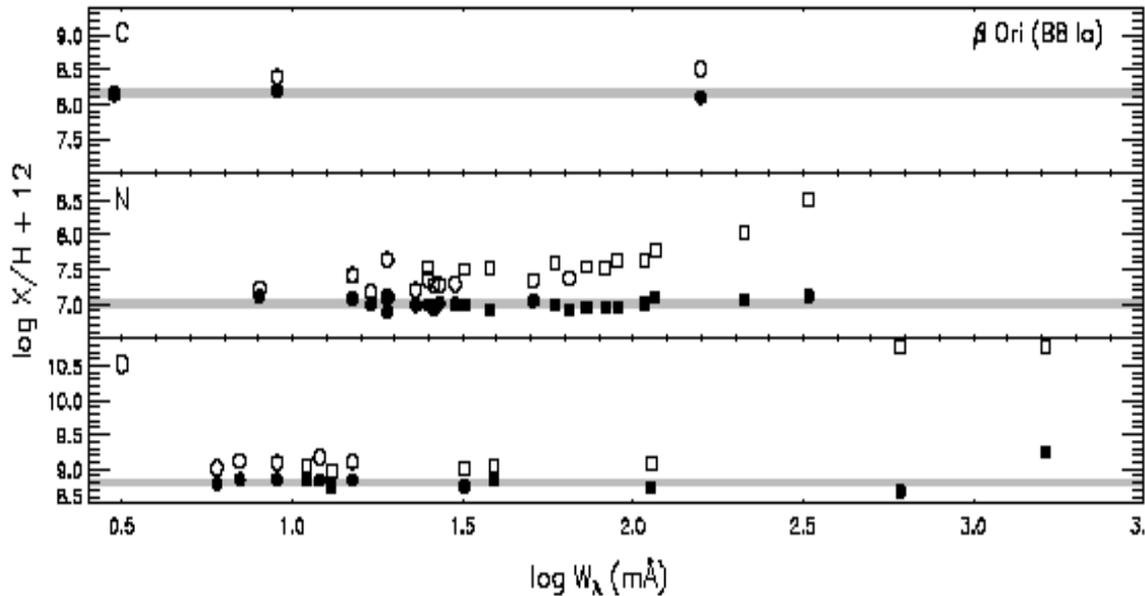
S. A. Alexeeva, T. A. Ryabchikova and L. I. Mashonkina



8335.14	$3s\ ^1P_1^o - 3p\ ^1S_0$	9078.28	$3s\ ^3P_1^o - 3p\ ^3P_1$
9405.73	$3s\ ^1P_1^o - 3p\ ^1D_2$	9111.80	$3s\ ^3P_2^o - 3p\ ^3P_1$

*Влияние неЛТР на
содержания химических
элементов
и на модель атмосферы*

Влияние отклонений от ЛТР на определение содержания химических элементов



Содержания C, N, O
у β Ori:

$T_{\text{eff}} = 12000 \text{ K}$;

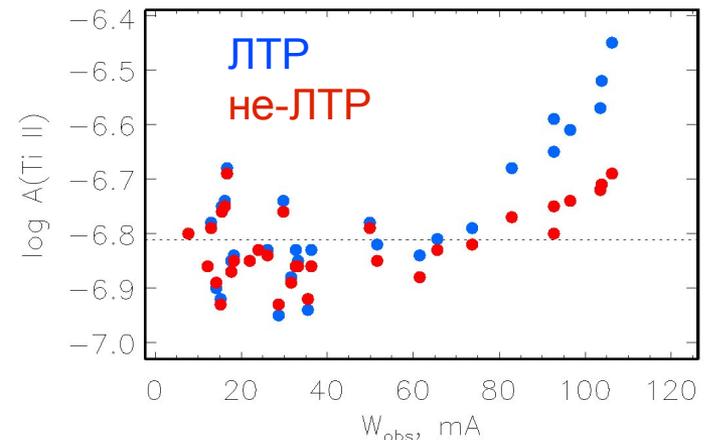
$\log g = 1.75$;

$[\text{Fe}/\text{H}] = 0$.

Przybilla et al. 2003

ЛТР – светлые символы,
 Не-ЛТР – черные символы,
 Серая полоса – среднее значение и ошибка
 N I и O I линии: $\Delta_{\text{NLTE}} > 1.5 \text{ dex}$

HD145788 $T_{\text{eff}} = 9750 \text{ K}$



Влияние атомных параметров: C I

electron-impact excitation rates

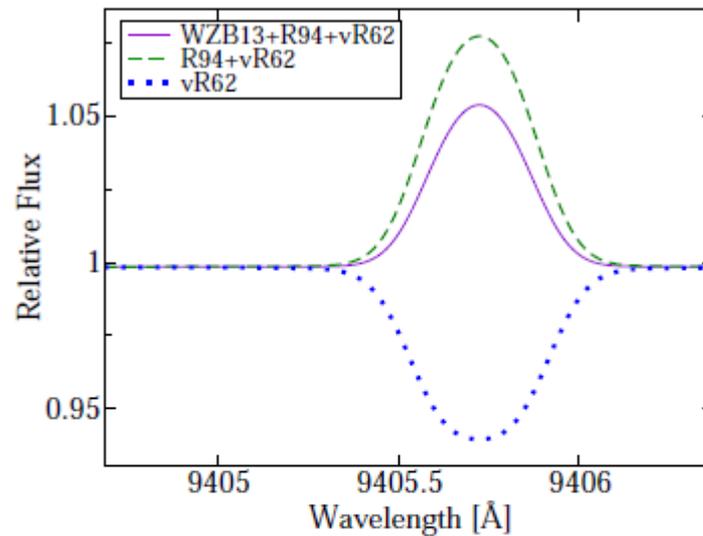
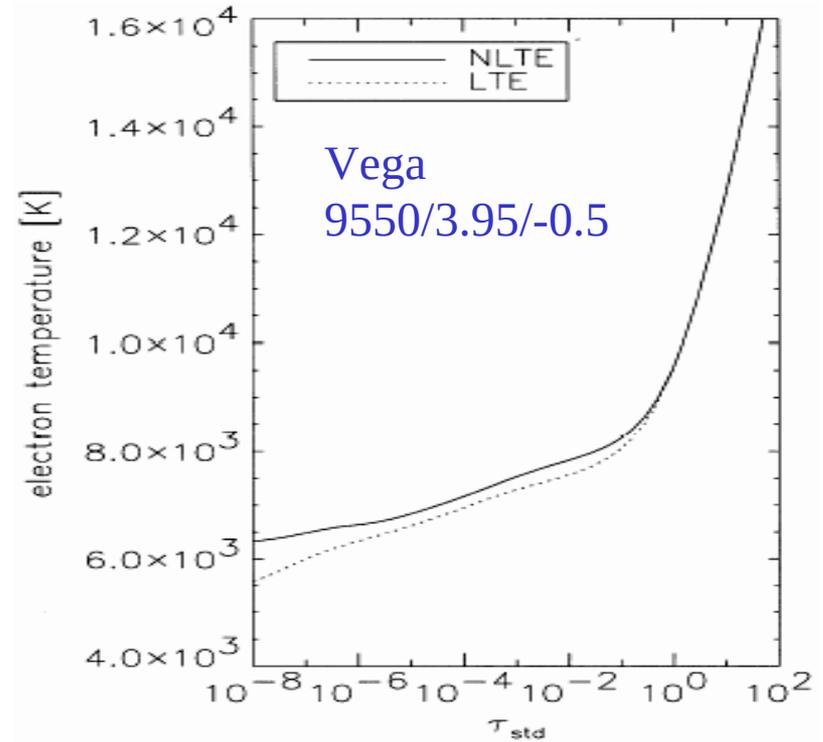
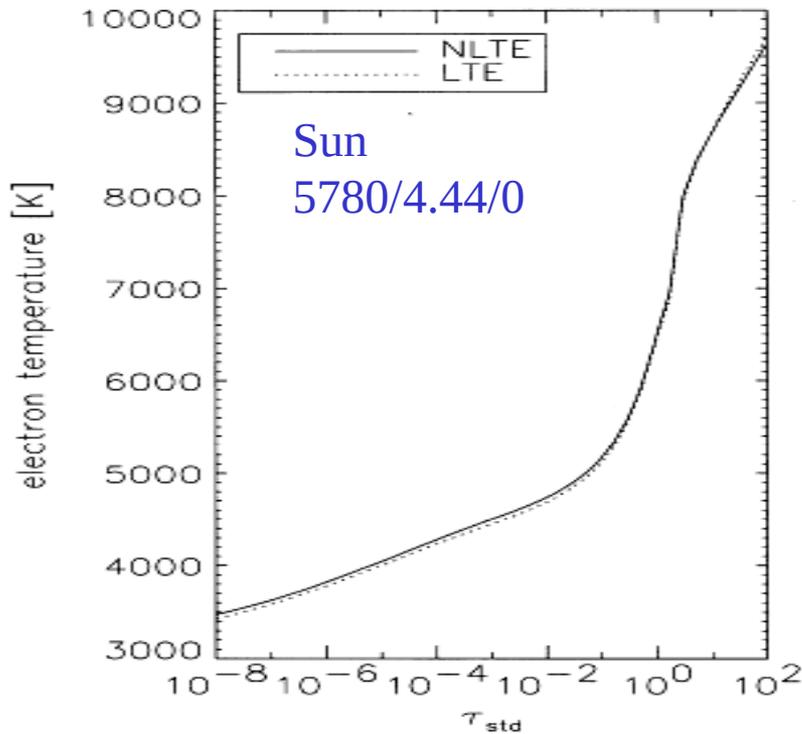


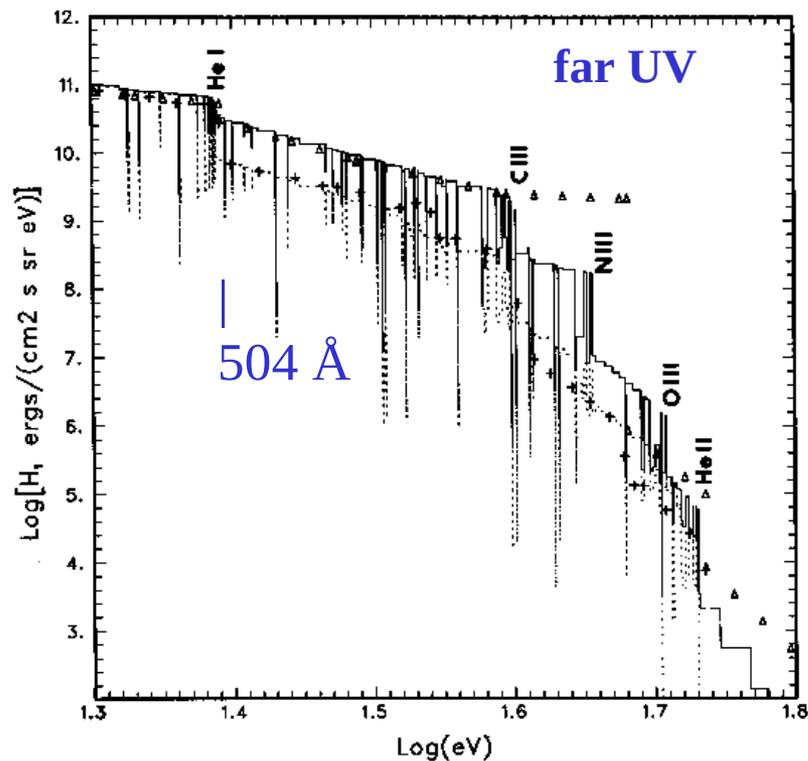
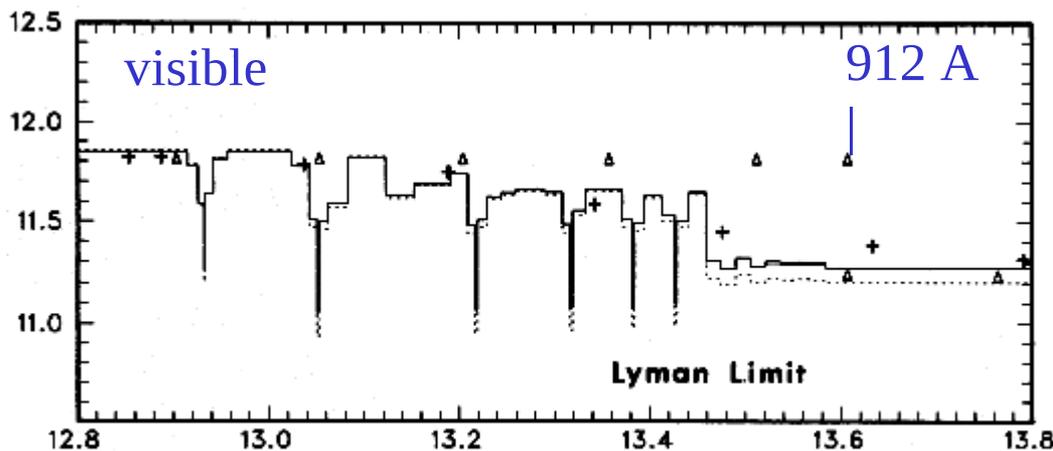
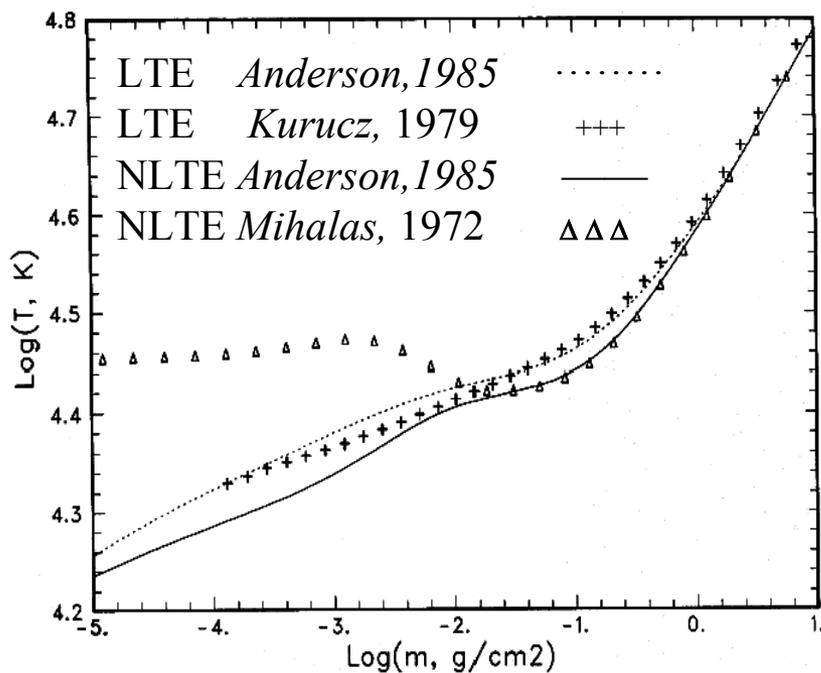
Figure 8. NLTE line profiles of C I 9405 Å in the model 10400/3.5/0 from calculations with collisional data of Wang et al. (2013) where available, Reid (1994), and van Regemorter (1962) (continuous curve, WZB13+R94+vR62), collisional data from Reid (1994) for 537 transitions and formula of van Regemorter (1962) for the remaining ones (dashed curve, R94+vR62), and using formula of van Regemorter (1962) only (dotted curve, vR62). Everywhere, $\log \epsilon_C = 8.43$. The theoretical spectra are convolved with an instrumental profile of $R = 65\,000$.

He-LTP модели атмосфер



- Отклонения от ЛТР малы для солнечной атмосферы, поскольку доминирующий источник непрозрачности – H^- .
- Эффект растет с ростом температуры.

He-LTP ↔ LTP: 35000/4.0



- Непрерывный спектр: практически нет не-ЛТР эффектов при $\lambda > 912 \text{ \AA}$. Важно учитывать для далекого УФ, где непрозрачность обусловлена He и металлами

Polarized radiative transfer

Light + matter + magnetic field

Nikolai Piskunov

Uppsala University

What happens to absorption in magnetic field?

- Projection of electron orbital momentum on magnetic field is quantised $M = -J, 0, +J$
- Classical analogy: electron oscillates along field direction ($M=0$) or circles around it ($M = -1, +1$).
- Allowed transitions can change M by 0 or 1.
- Photon can carry angular momentum in form of circular polarization

Equations of radiative transfer

- Now we are going to treat separately photons that carry angular momentum (circularly polarised light) and that do not (linearly polarised light)
- For each of these we can write a separate RT equation:

$$\frac{dI^p}{dx} = - \left\{ K_{\parallel}^p, K_{\perp}^p, K_{\odot}^p, K_{\ominus}^p \right\} \cdot \left\{ \begin{array}{c} I_{\parallel} \\ I_{\perp} \\ I_{\odot} \\ I_{\ominus} \end{array} \right\} + J^p$$

Stokes parameters and RT equation

- The previous equation was written for one particular coordinate system with x pointing to the propagation of light and y, z selected arbitrarily in the perpendicular plane
- It turns out that we can reduce this uncertainty by adding and subtracting the equations for circular polarization and for linear polarisation $I = I^\perp + I^\parallel + I^\odot + I^\ominus$
- In this case we will only need two angles in y, z -plane
- Addition gives us total intensity
- Subtraction will give us circular ($I^\odot - I^\ominus \equiv V$) and two linear ($I^\parallel - I^\perp \equiv Q$ and U) polarisations

Canonical polarized RTE

- The form of RT equation for Stokes parameters looks like this:

$$\frac{d\vec{I}}{dx} = -\mathbb{K} \cdot \vec{I} + \vec{J}$$

- Where: $\vec{I} = \{I, Q, U, V\}$ are the Stokes parameters

$$\mathbb{K} = \begin{pmatrix} \eta_I & \eta_Q & \eta_U & \eta_V \\ \eta_Q & \eta_I & \rho_V & -\rho_U \\ \eta_U & -\rho_V & \eta_I & \rho_Q \\ \eta_V & \rho_U & -\rho_Q & \eta_I \end{pmatrix}$$

Final touches

- We can make a simple trick at the diagonal of the "absorption matrix":

$$\tilde{\mathbb{K}} = \frac{\mathbb{K}}{\eta_I} - 1$$

- The new matrix has zeros on main diagonal
- The source function in unstructured medium is defined as: $\vec{S} = \vec{J}/\eta_I$

Final-final touches

- Now the next final form of the RT equation:

$$\frac{d\vec{I}}{dx} = -\eta_I \tilde{\mathbb{K}} \cdot \vec{I} - \eta_I \vec{I} + \eta_I \vec{S}$$

- We can also introduce a modified source function: $\vec{\mathcal{G}} = \vec{S} - \tilde{\mathbb{K}}\vec{I}$

- ... and get the final form of RTE:

$$\frac{d\vec{I}}{\eta_I dx} \equiv \frac{d\vec{I}}{d\tau} = -\vec{I} + \vec{\mathcal{G}}$$

Under the hood

Opacity matrix components:

$$\eta_I = 1/2[\phi_p \sin^2 \gamma + 1/2(\phi_r + \phi_b)(1 + \cos^2 \gamma)]$$

$$\eta_Q = 1/2[\phi_p - 1/2(\phi_r + \phi_b) \sin^2 \gamma \cos 2\chi]$$

$$\eta_U = 1/2[\phi_p - 1/2(\phi_r + \phi_b) \sin^2 \gamma \sin 2\chi]$$

$$\eta_V = 1/2(\phi_r - \phi_b) \cos \gamma$$

$$\rho_Q = 1/2[\psi_p - 1/2(\psi_r + \psi_b) \sin^2 \gamma \cos 2\chi]$$

$$\rho_U = 1/2[\psi_p - 1/2(\psi_r + \psi_b) \sin^2 \gamma \sin 2\chi]$$

$$\rho_V = 1/2(\psi_r - \psi_b) \cos \gamma$$

Opacity profiles

- Adding all sigma and all pi component profiles:

$$\phi_b = \sum_b A_b H(a, \nu - \Delta\lambda_b / \Delta\lambda_{Dop})$$

$$\phi_p = \sum_p A_p H(a, \nu - \Delta\lambda_p / \Delta\lambda_{Dop})$$

$$\phi_r = \sum_r A_r H(a, \nu - \Delta\lambda_r / \Delta\lambda_{Dop})$$

$$\psi_b = 2 \sum_b A_b F(a, \nu - \Delta\lambda_b / \Delta\lambda_{Dop})$$

$$\psi_p = 2 \sum_p A_p F(a, \nu - \Delta\lambda_p / \Delta\lambda_{Dop})$$

$$\psi_r = 2 \sum_r A_r F(a, \nu - \Delta\lambda_r / \Delta\lambda_{Dop})$$

- The Voigt and Faraday-Voigt functions:

$$H(a, \nu) = \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-y^2}}{(v-y)^2 + a^2} dy$$

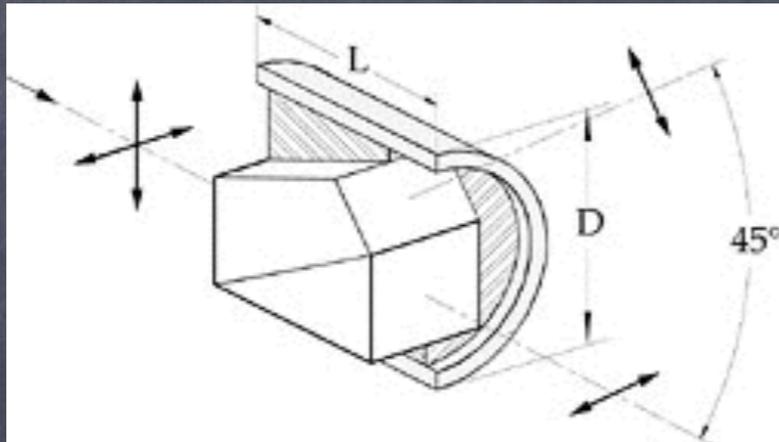
$$F(a, \nu) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(v-y)e^{-y^2}}{(v-y)^2 + a^2} dy$$

Numerical solvers for polarised RTE

- Runge-Kutta, high-order, precision control on every step but slow
- Feautrier: 2nd order finite difference scheme, helps when mean intensity is needed, fast but need to cover the whole domain (long characteristics)
- Attenuation operator: fastest, 2nd order, short characteristics (one step at a time), overshooting can be handled by Bezier spline fit for the source function

Measuring Stokes parameters

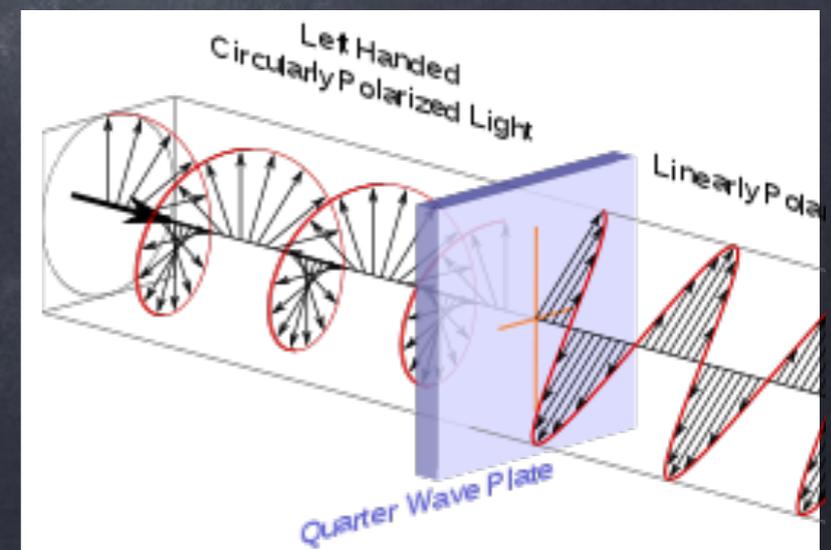
- Polarizing beam-splitter



Linearly-polarized light is split in two beams

- Circular polarisation needs to be converted to linear first

A quarter-wavelength retarder plate does the trick



Примеры спектрополяриметрических наблюдений в 4-х параметрах Стокса I, V, Q, U и их анализа.

(Наблюдения проводятся для набора фаз вращения звезды)

Доплер-Зеемановское картирование магнитного поля и содержания химических элементов на поверхности звезды по наблюдениям в 4-х параметрах Стокса.

Магнитная химически-пекулярная звезда HD 24712

(Rusomarov et al. 2015, A&A 573, A123)

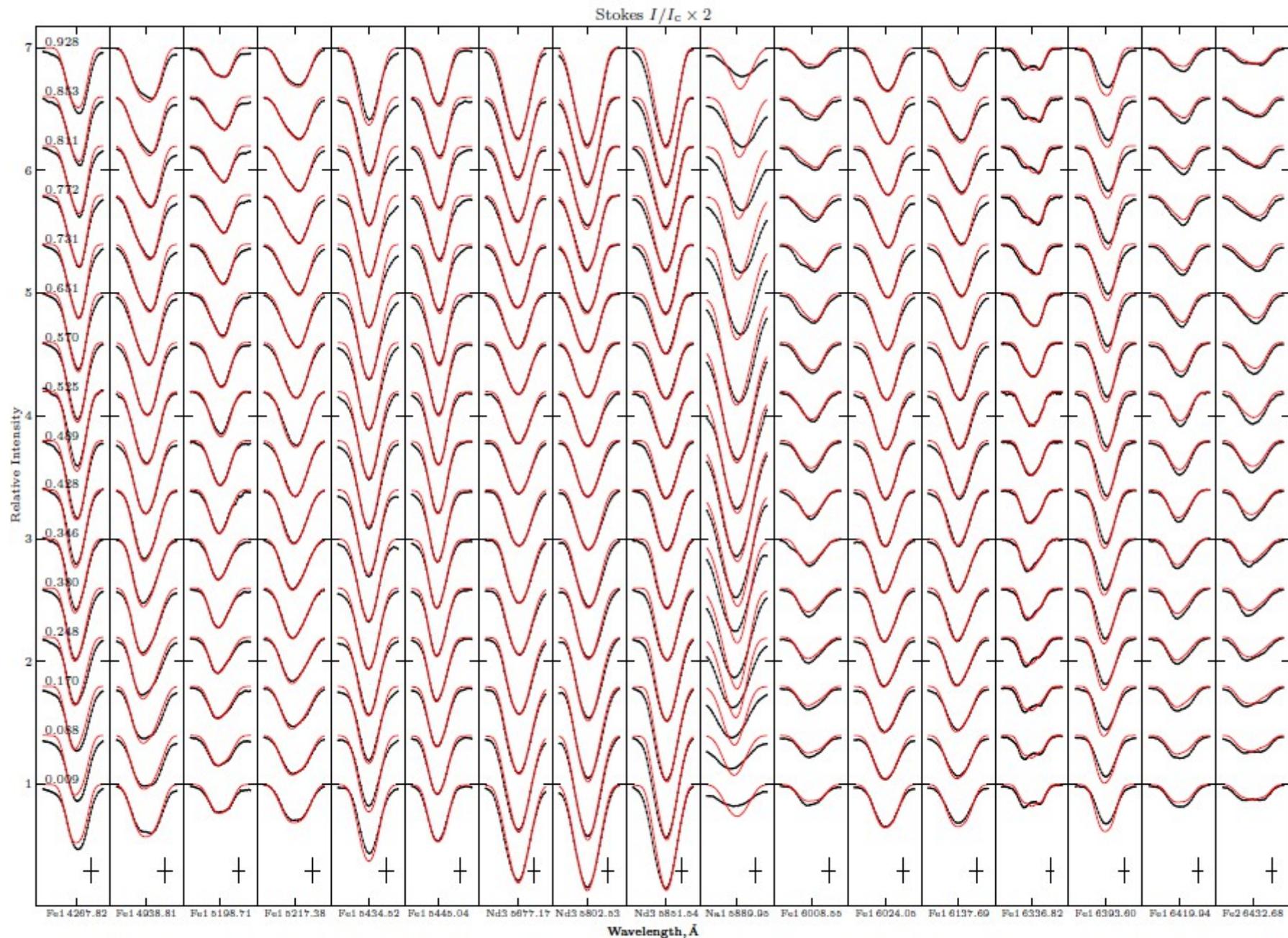


Fig. 8. Comparison of the observed (*dots*) and synthetic (*lines*) Stokes I profiles calculated for the final magnetic field and abundance maps (Fig. 7 and 6) for all lines (Table 1) used in the MDI inversion. The profiles have been expanded by factor 2 for clarity. The bars at the lower right of each panel show the vertical (10%) and horizontal (0.1 Å) scale. Rotational phases are indicated in the leftmost panel of the figure.

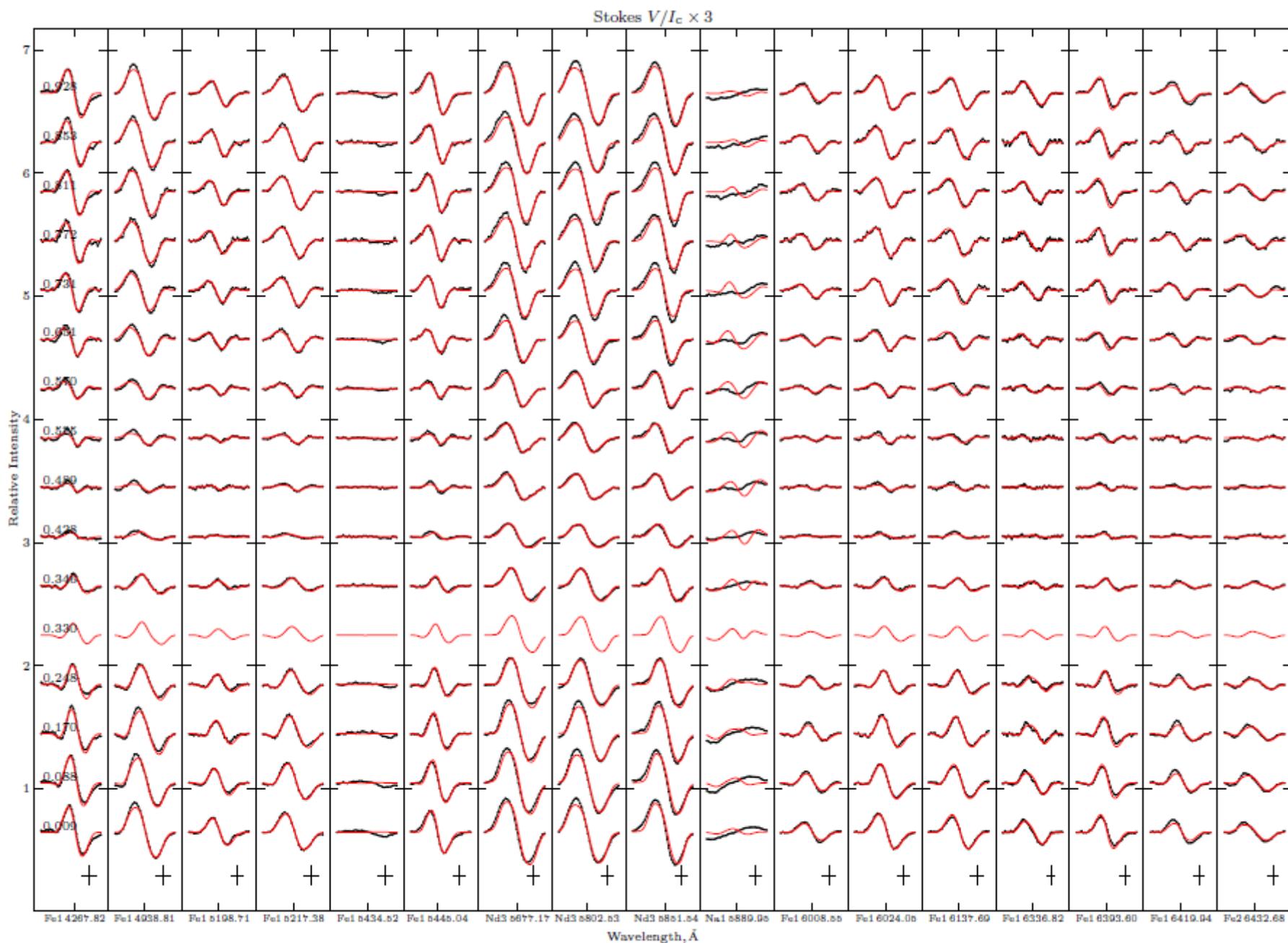


Fig. 11. Same as Fig. 8 for the Stokes V profiles. The bars at the lower right of each panel show the vertical (5%) and horizontal (0.1 Å) scale. Profiles have been rescaled by factor 3 for clarity.

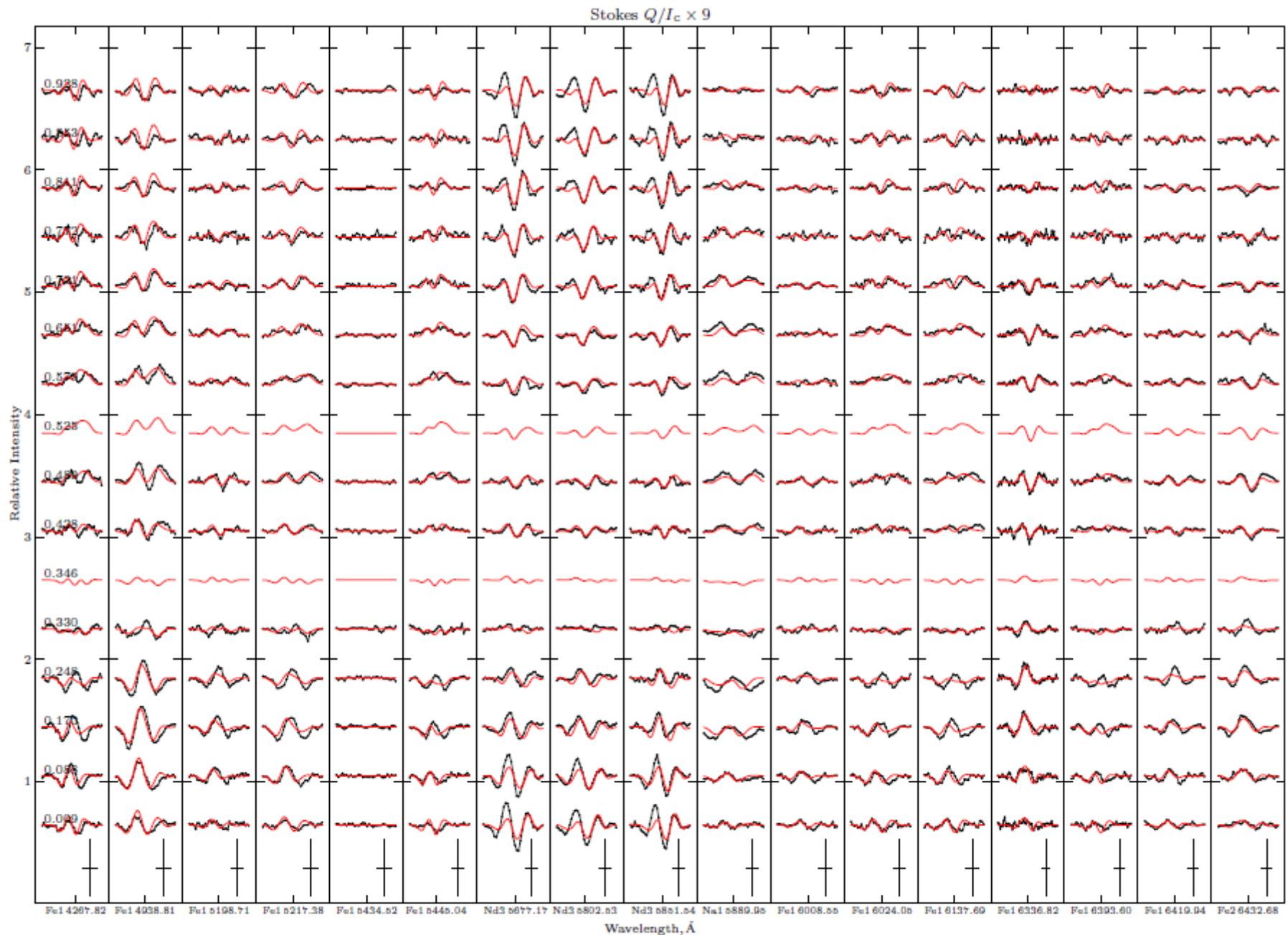


Fig. 9. Same as Fig. 8 for the Stokes Q profiles. The bars at the lower right of each panel show the vertical (5%) and horizontal (0.1 Å) scale. Profiles have been rescaled by factor 9 for clarity.

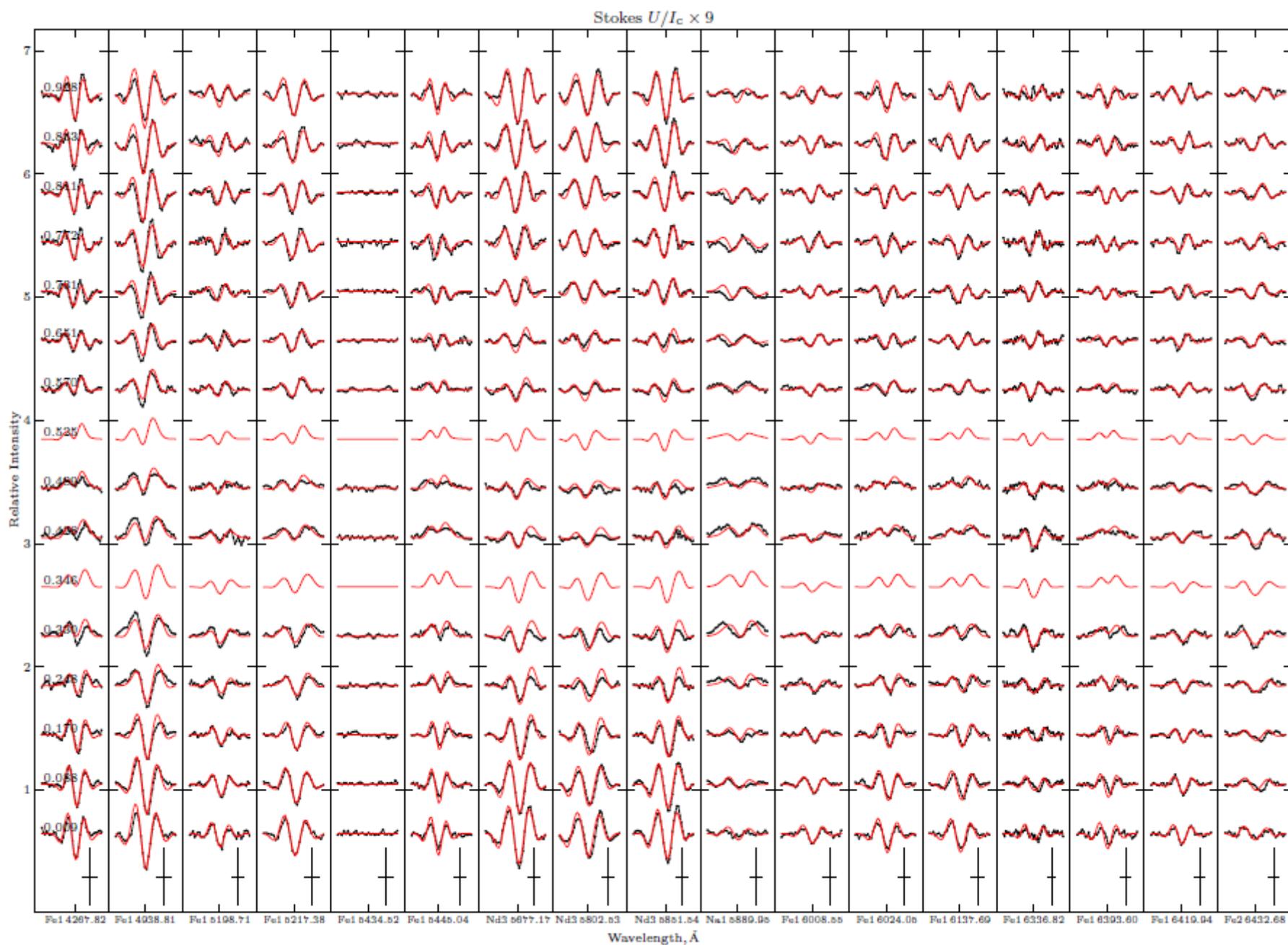


Fig. 10. Same as Fig. 8 for the Stokes U profiles. The bars at the lower right of each panel show the vertical (5%) and horizontal (0.1 \AA) scale. Profiles have been rescaled by factor 9 for clarity.

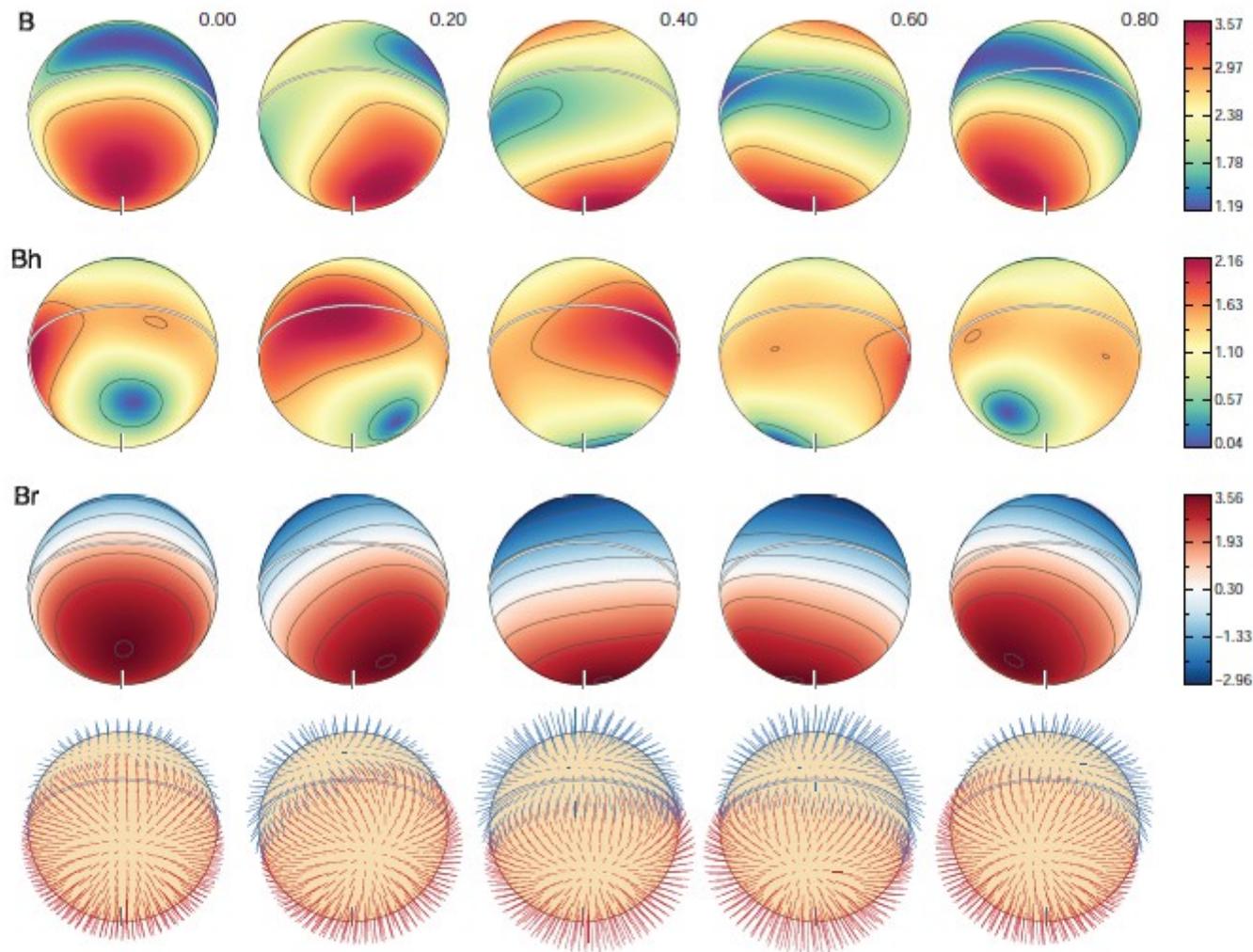


Fig. 6. Distribution of the magnetic field on the surface of HD 24712 derived from simultaneous MDI analysis of Fe, Nd III, and Na. The plots show the distribution of magnetic field modulus (*first row*), horizontal field (*second row*), radial field (*third row*), and field orientation (*fourth row*) on the surface of HD 24712. The bars on the far right represent field strength measured in kG. The contours show 1 kG changes of the according quantity. The arrow length is proportional to the field strength. The star is shown at five rotational phases, indicated above the spherical plots.

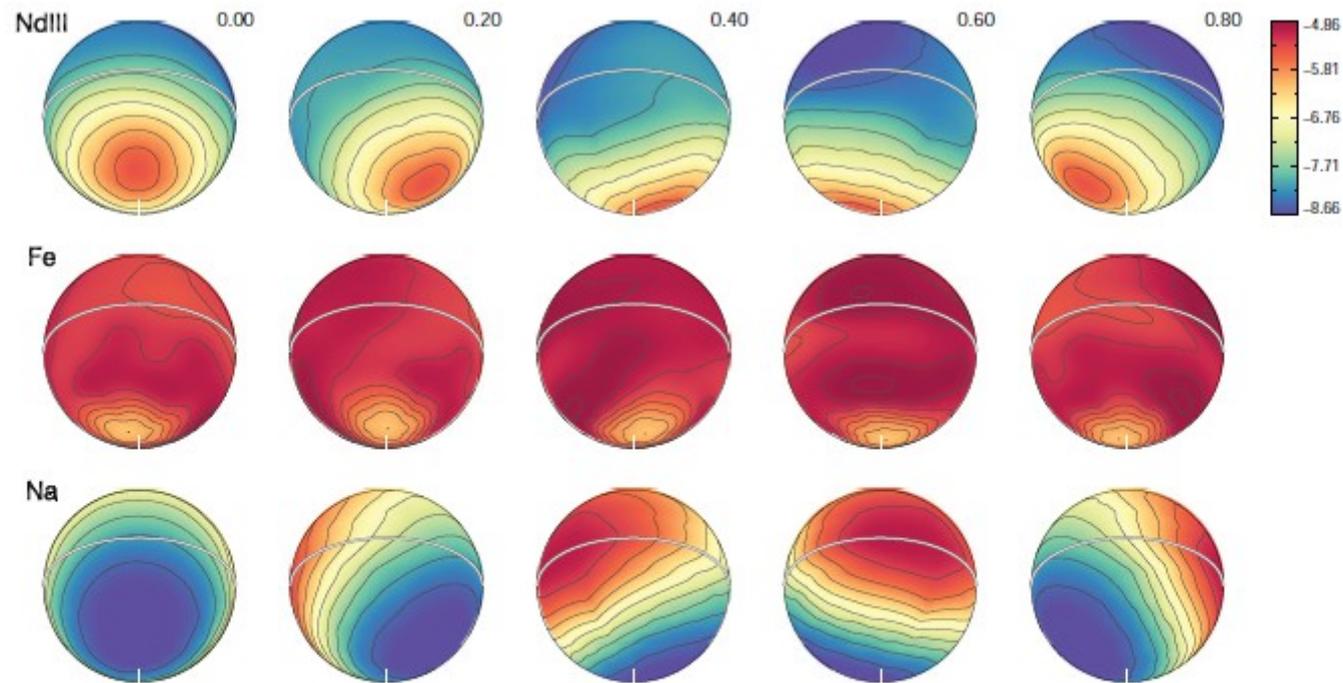
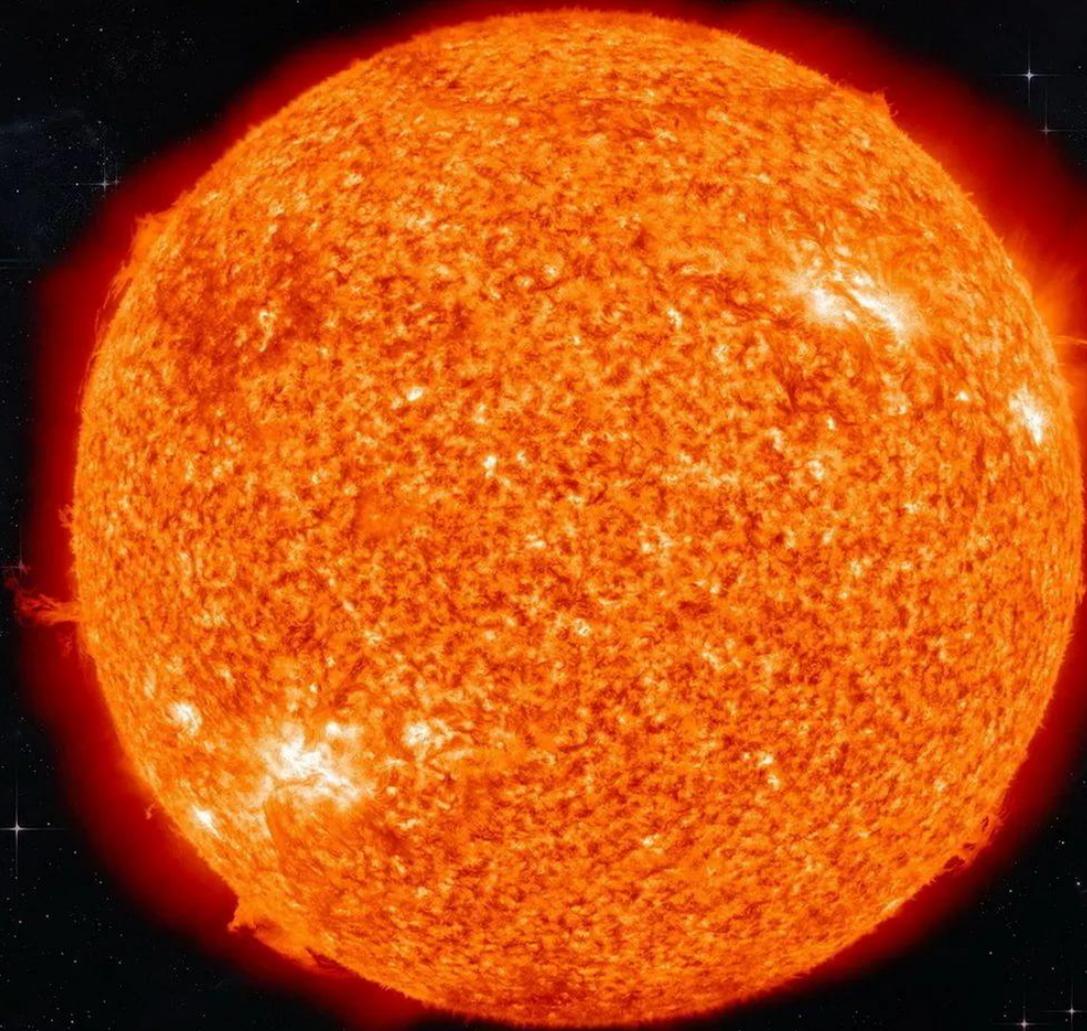


Fig. 7. Abundance distribution of Nd III, Fe, and Na on the surface of HD 24712. The *first* row shows the surface map of the Nd III, the *second* and *third* rows illustrate the surface abundance maps of Fe and Na respectively. These maps were derived from the *simultaneous* mapping of the three elements. The bars on the far right next to each panel denote the abundance in $\log(N_X/N_{\text{tot}})$ units of element X . The contours for Nd III and Na are plotted with a step of 0.4 dex, and 0.2 dex for Fe. The vertical bar on each projection indicates the rotation axis.

Звездные хромосферы



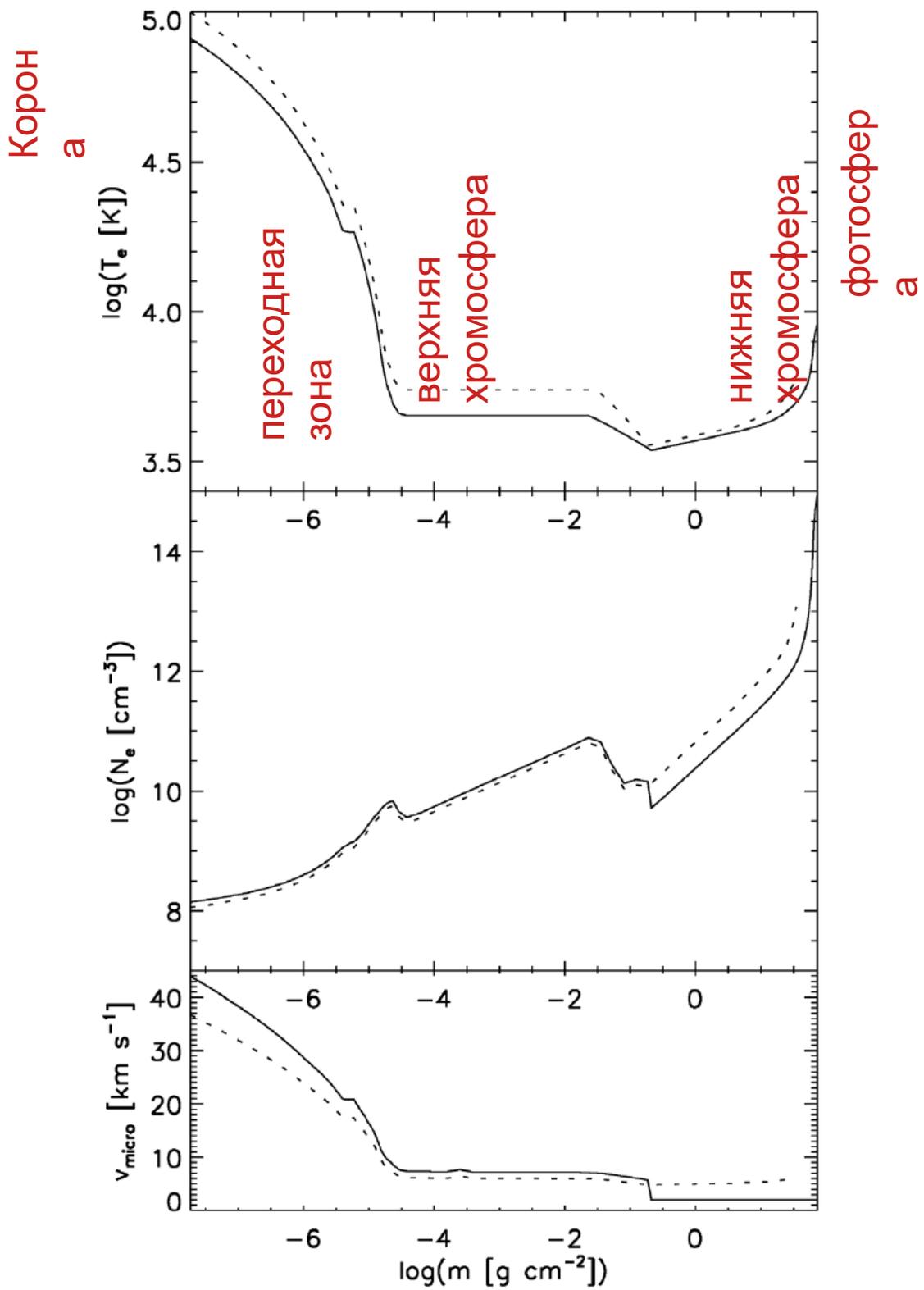
Хромосфера — слой звездной атмосферы между фотосферой и короной.

Характеризуется существенным понижением плотности (экспоненциальное падение) и давления вещества по сравнению с фотосферой. Поэтому интенсивность излучения хромосферы крайне слабая, и она бывает видна только во время солнечных затмений или с помощью коронографов или в узких фильтрах.

Цвет хромосферы красный, то есть видны холодные более плотные слои.

Хромосфера делится на нижнюю холодную с температурным минимумом, более горячую верхнюю, которая примыкает к переходной зоне (ближе к короне) с резким повышением температуры.

Увеличение турбулентных скоростей с высотой, особенно в переходной зоне. Истечение вещества.



Оптическая толщина в хромосфере $\log \tau_{\text{ros}} < -$

6

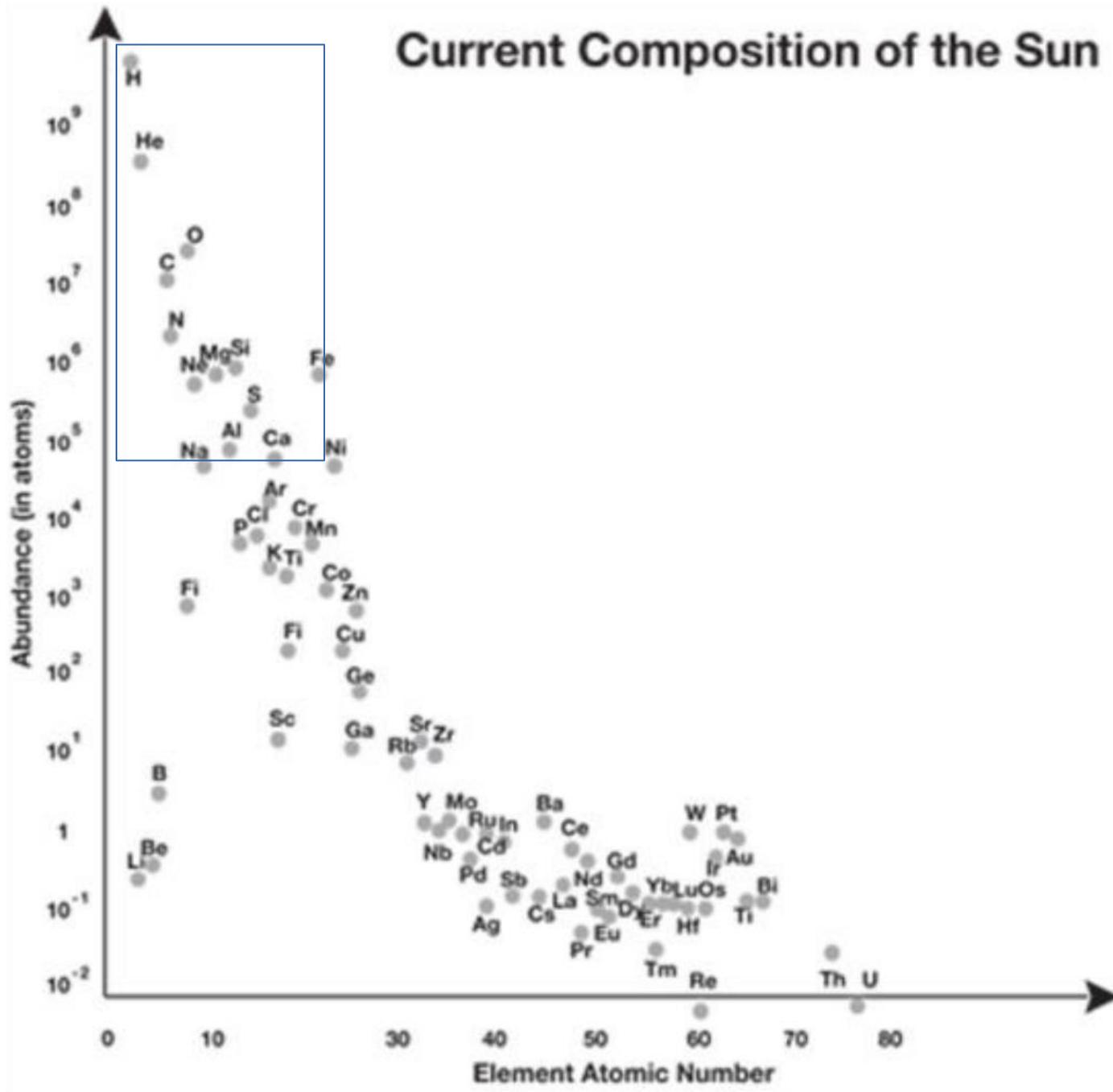
$$I = I_0 e^{-\tau}$$

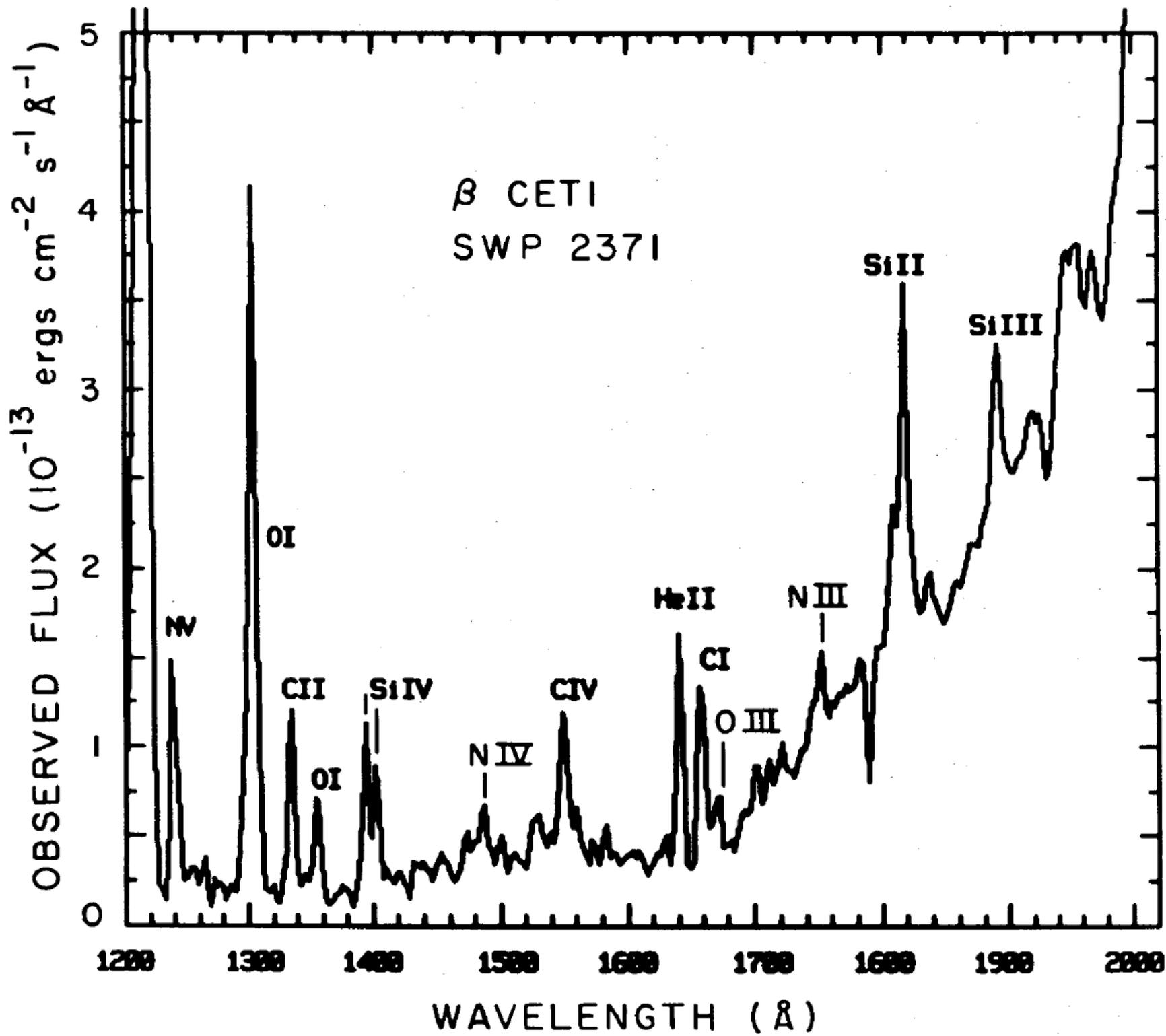
$$\frac{I}{I_0} \approx 1 - \tau > 1 - 10^{-6} = 0.999999$$

Поглощение почти отсутствует, за исключением резонансных и сильных линий элементов с большим содержанием (H, He, ...)

Поэтому в спектре хромосферы доминируют линии излучения (b-b переходы) элементов с относительно большим содержанием (H, He, C, N, O, Si, Mg, ...), большинство из которых расположено в ультрафиолетовом диапазоне.

Current Composition of the Sun





Коэффициент излучения, профиль излучения ψ_ν

$$\eta_\nu^{spont} = n_j A_{ji} \psi_\nu h\nu_{ij} / 4\pi \quad \text{Излучение при спонтанных переходах – изотропное,}$$

$$\eta_\nu^{stim} = n_j B_{ji} I_\nu \psi_\nu h\nu_{ij} / 4\pi \quad \text{при вынужденных имеет угловое распределение } I_\nu$$

$$\frac{A_{ji}}{B_{ji}} = \frac{2h\nu_{ij}^3}{c^2} \quad f_{ij} = \frac{mc^3}{8\pi^2 e^2} \frac{A_{ji}}{\nu_{ij}^2} \frac{g_j}{g_i}$$

$$\eta_\nu^{spont} \sim n_j A_{ji} \nu_{ij} \sim n_j f_{ij} \nu^3$$

$$\eta_\nu^{stim} \sim n_j A_{ji} I_\nu \nu_{ij}^{-2} \sim n_j f_{ij} I_\nu$$

$$\frac{n_j}{n(\text{ion})} \sim T$$

Из уравнения Больцмана

$$\frac{n(\text{ion})}{N(\text{elem})} \sim T, P, N_{e^-}$$

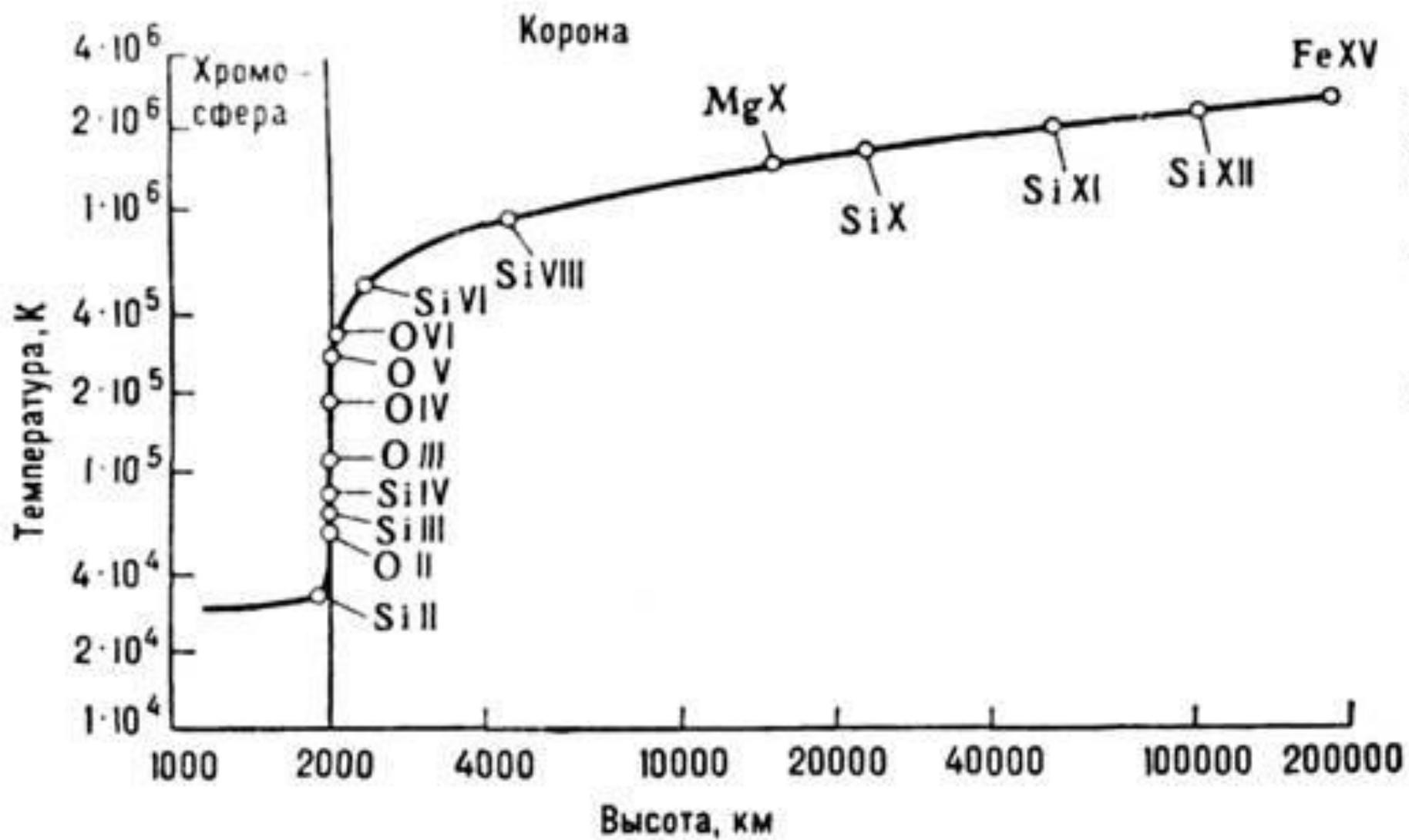
Из уравнения Саха

Интенсивность, а также поток в линии определяется распределением величин:

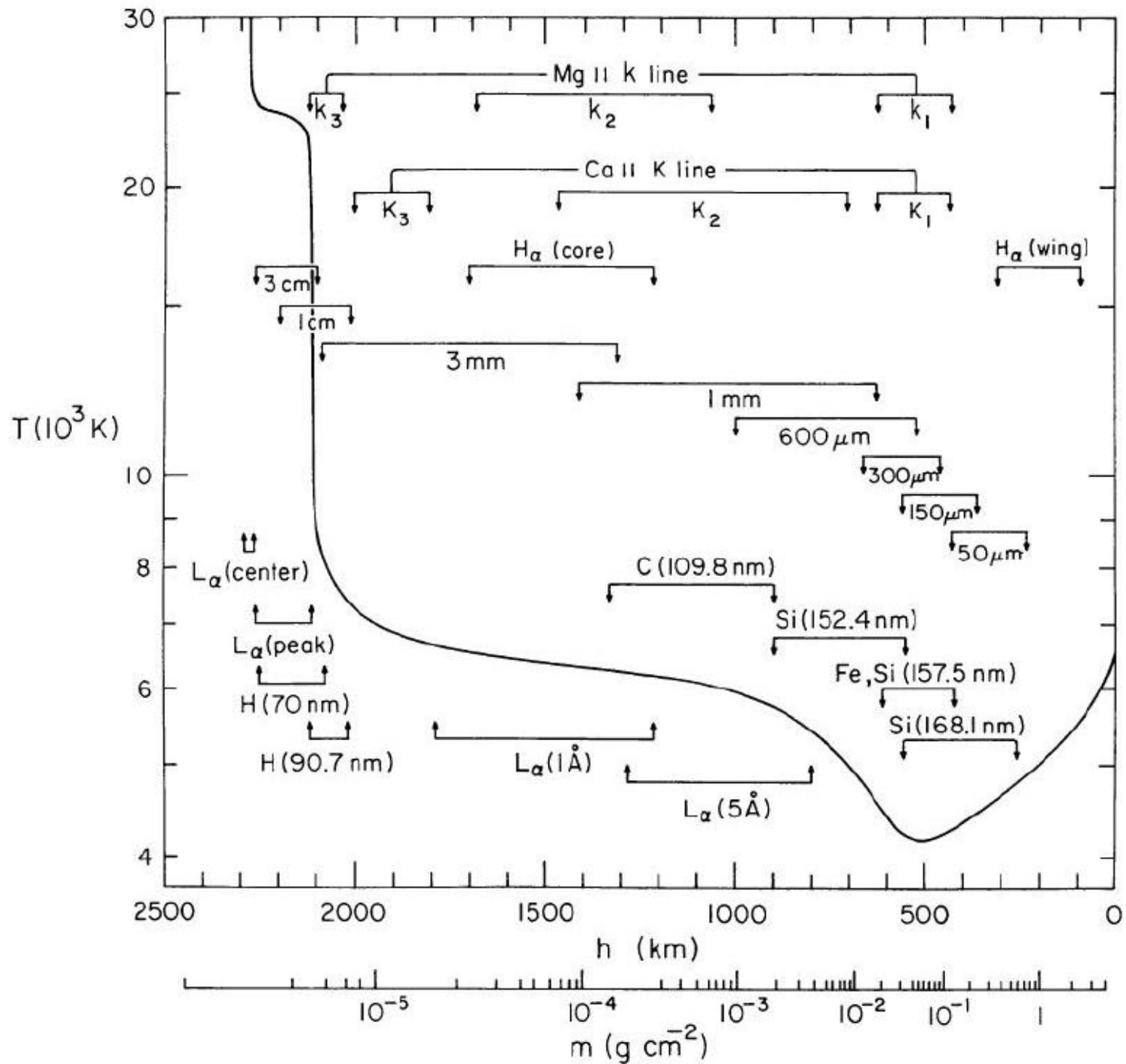
$$I \sim N(\text{elem}), T, P(\text{or } N), N_{e^-}$$

Но поскольку эти величины сильно изменяются в хромосфере, то область формирования линий излучения может быть сильно ограниченной, и первом приближении можно говорить о локальных величинах T, P, N_e

Проблема: нам плохо известны распределения T, P, N_e в звездных хромосферах



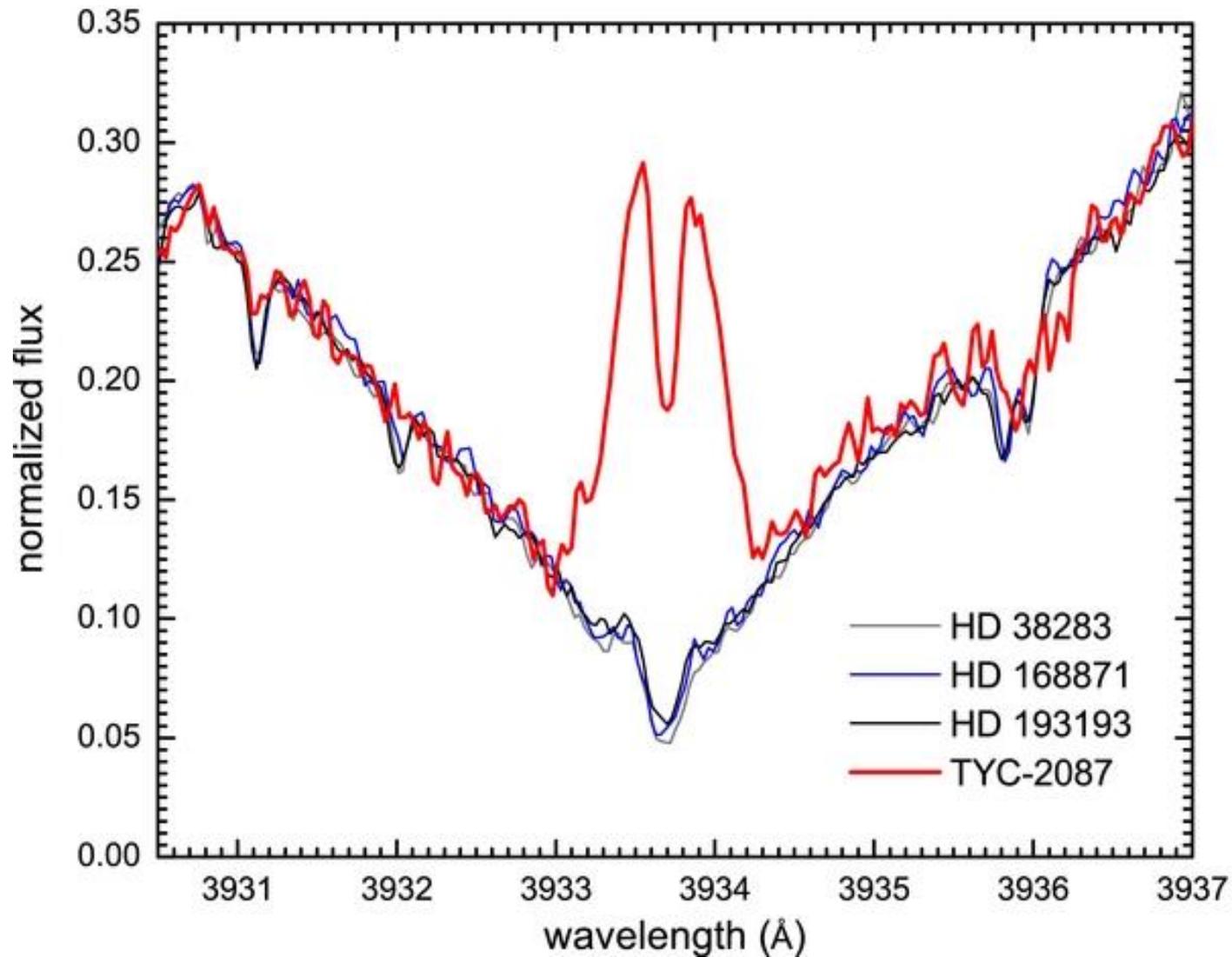
Поток в Н и К Салл, отн.ед.



Vernazza J.E., Avrett E.H., and Loeser R. The Solar Chromosphere. III. Models of the EUV Brightness Components of the Quiet Sun. The Astrophysical Journal Supplement Series, 45:635-725, 1981 April.

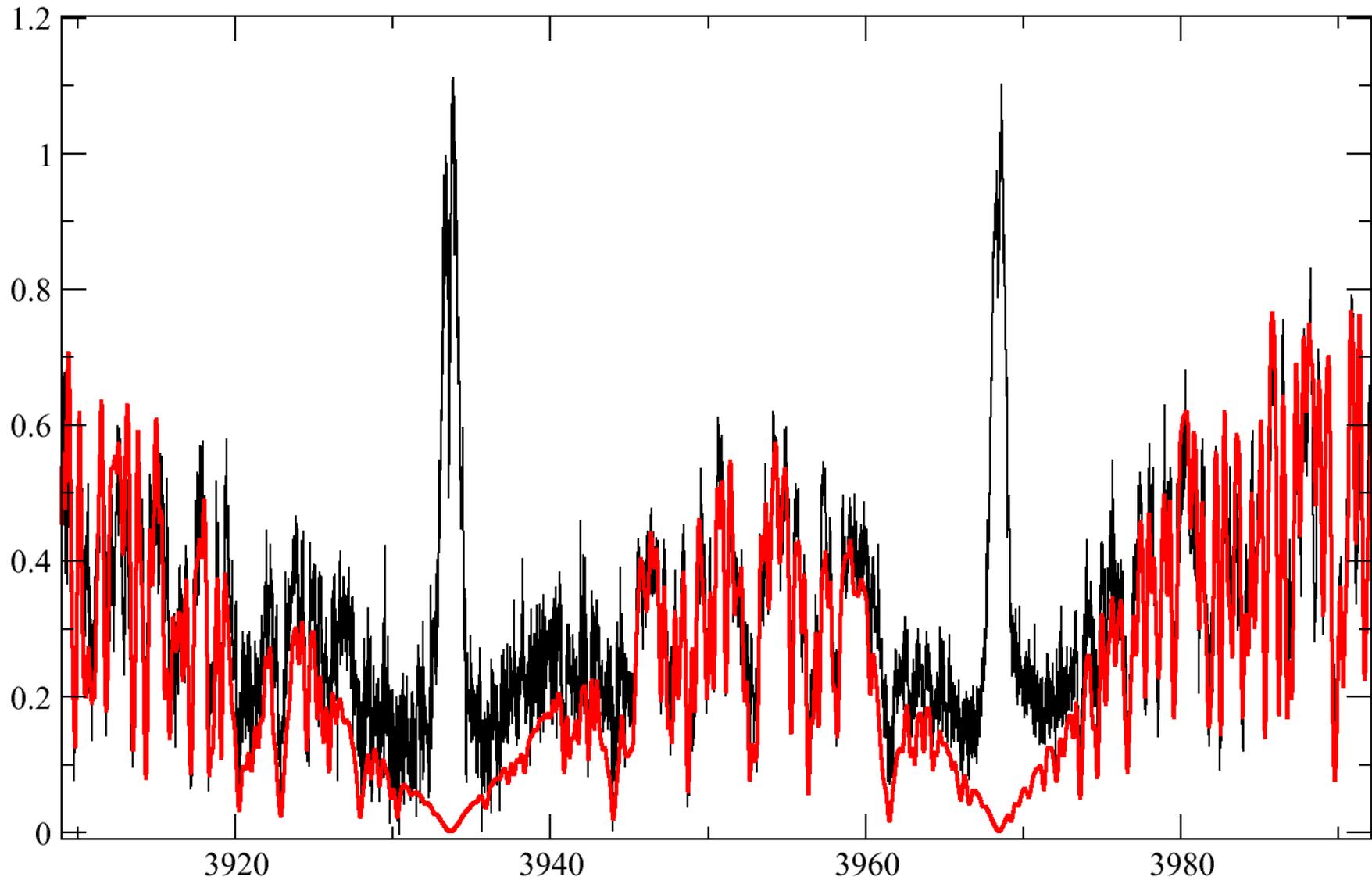
Самые встречающиеся индикаторы звездных хромосфер

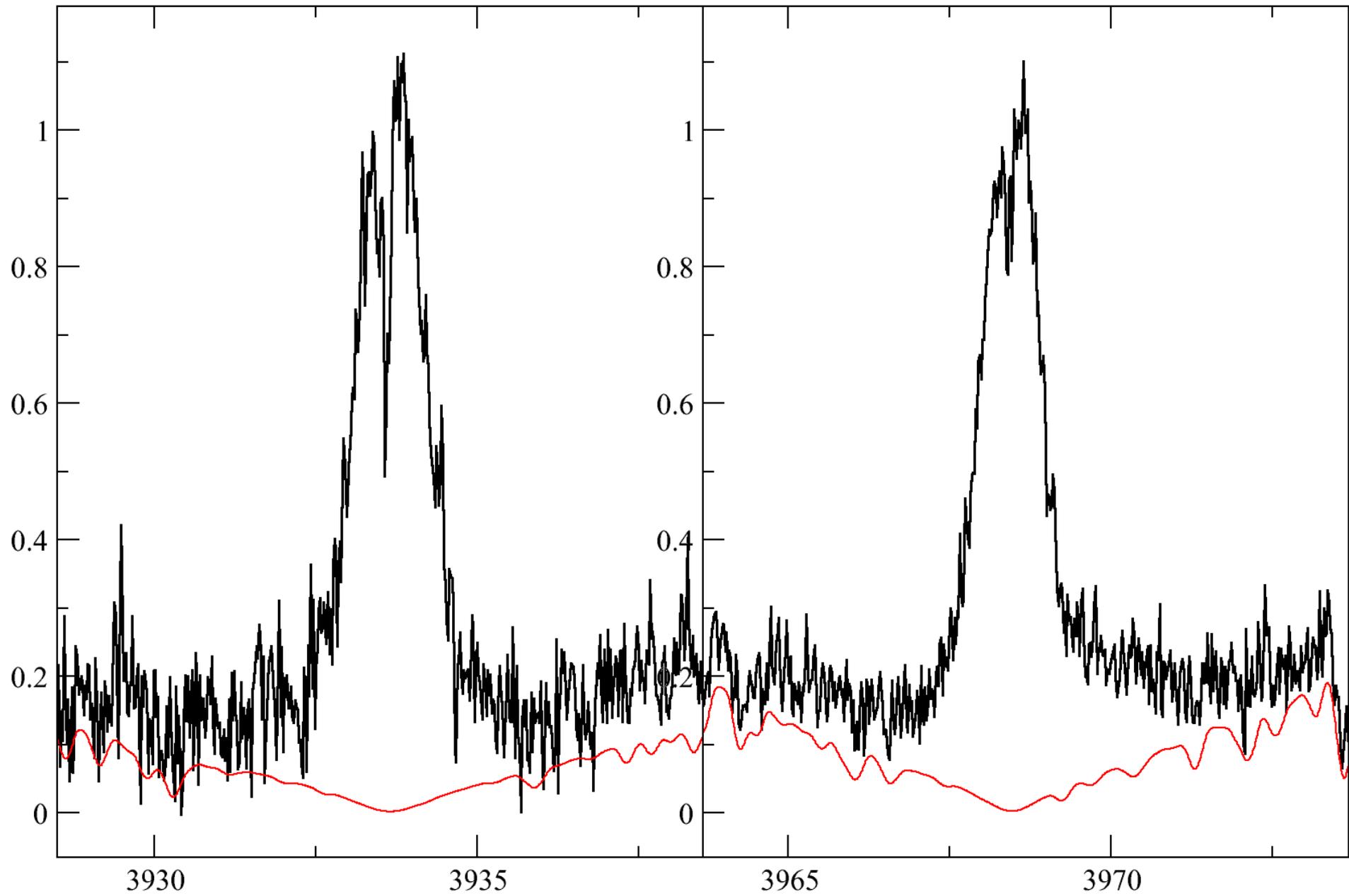
Эмиссионные ядра линий H и K CaII



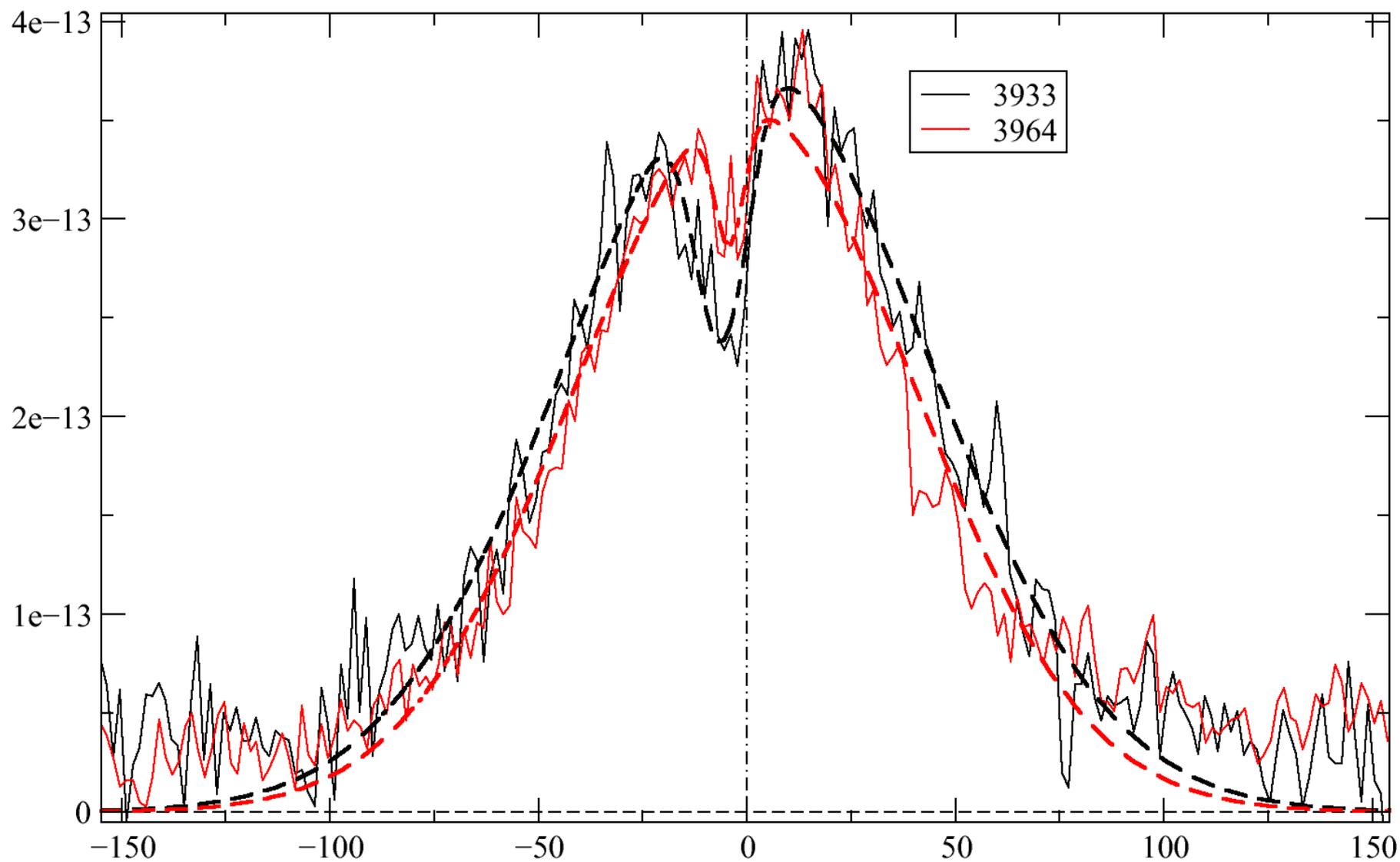
Самые встречающиеся индикаторы звездных хромосфер

Эмиссионные ядра линий H и K CaII



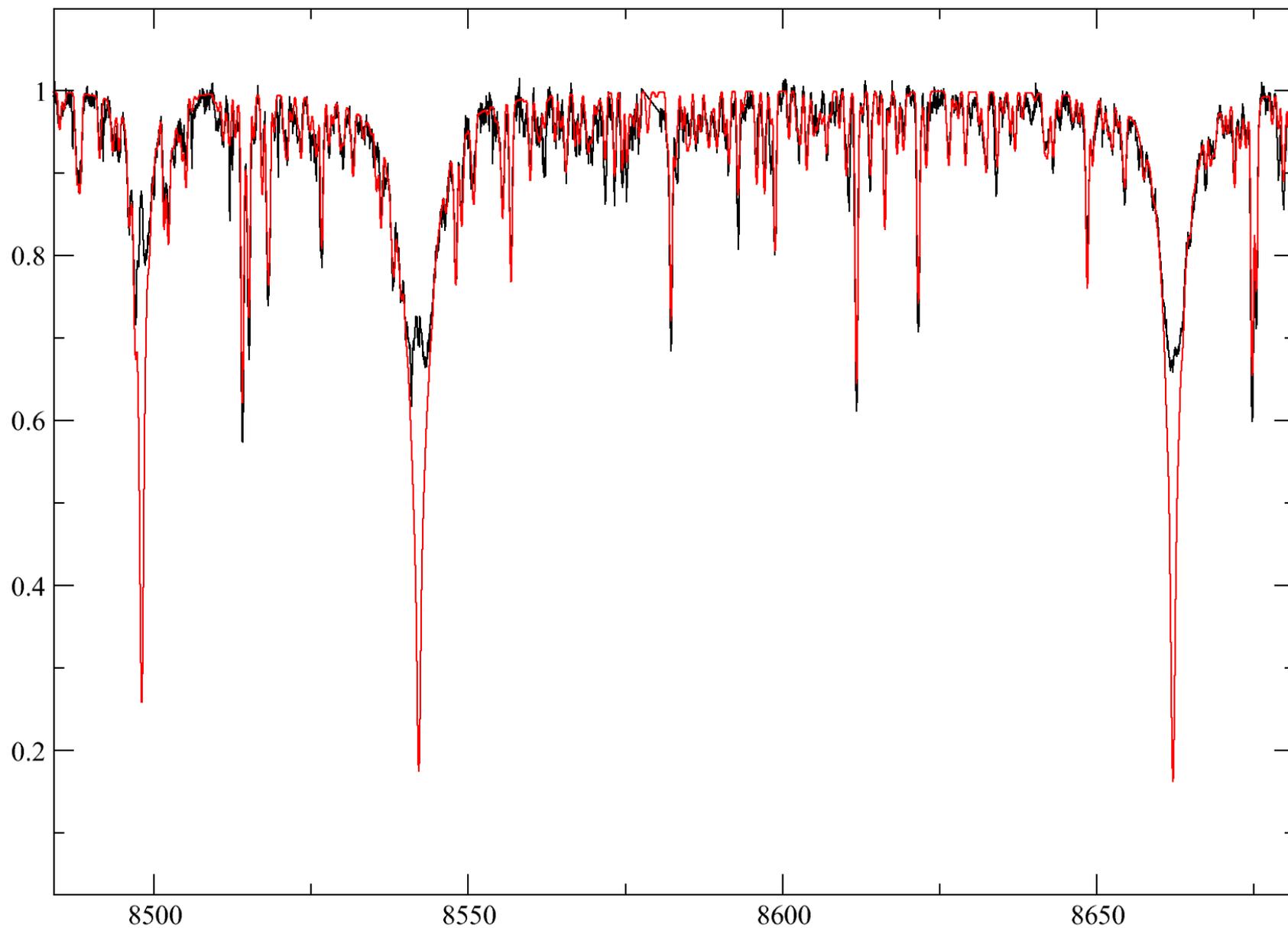


Профили линий НК CaII в шкале скоростей с вычтенным звездным спектром

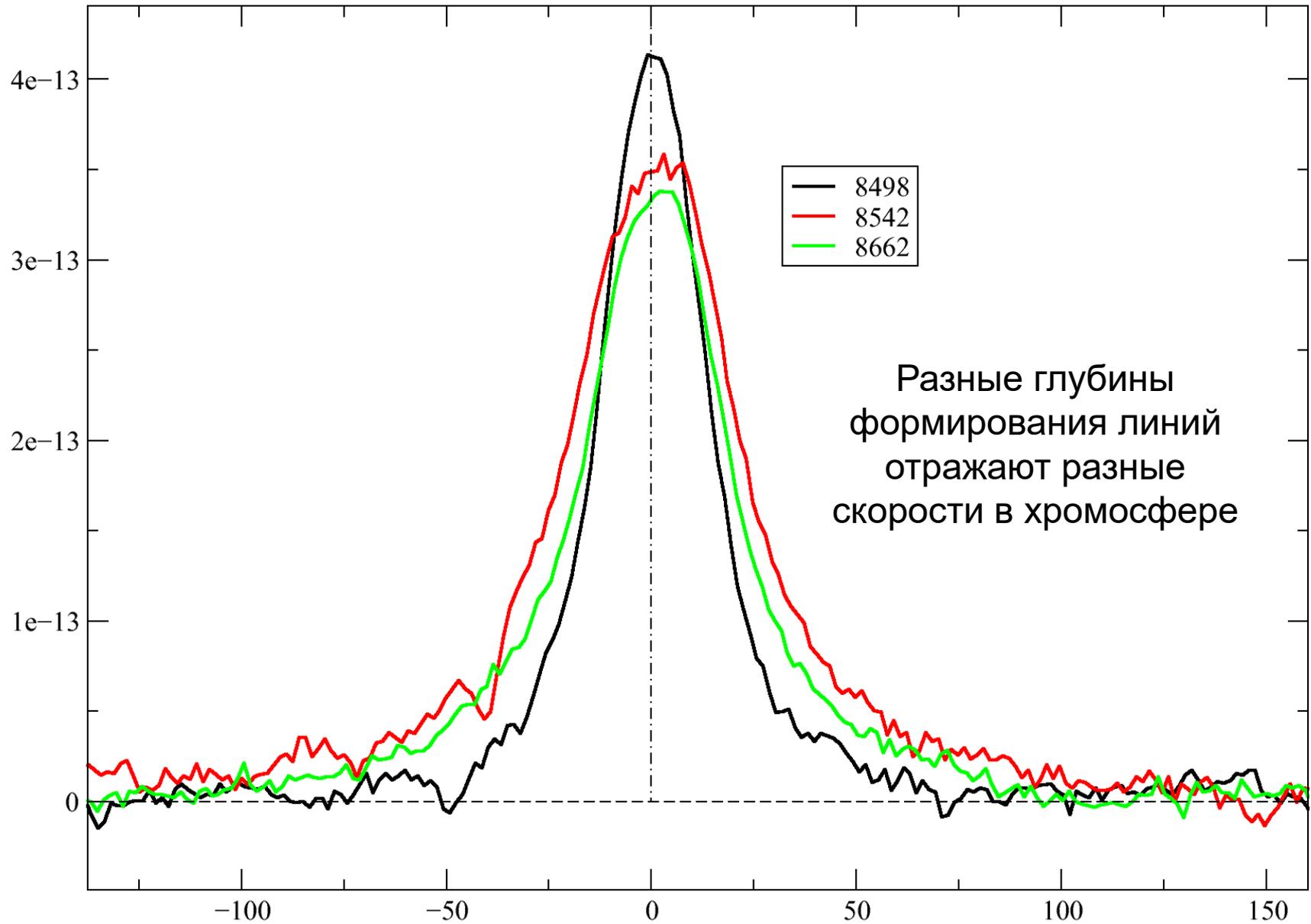


Самые встречающиеся индикаторы звездных хромосфер

Присутствие эмиссии в ядрах инфракрасных линий CaII



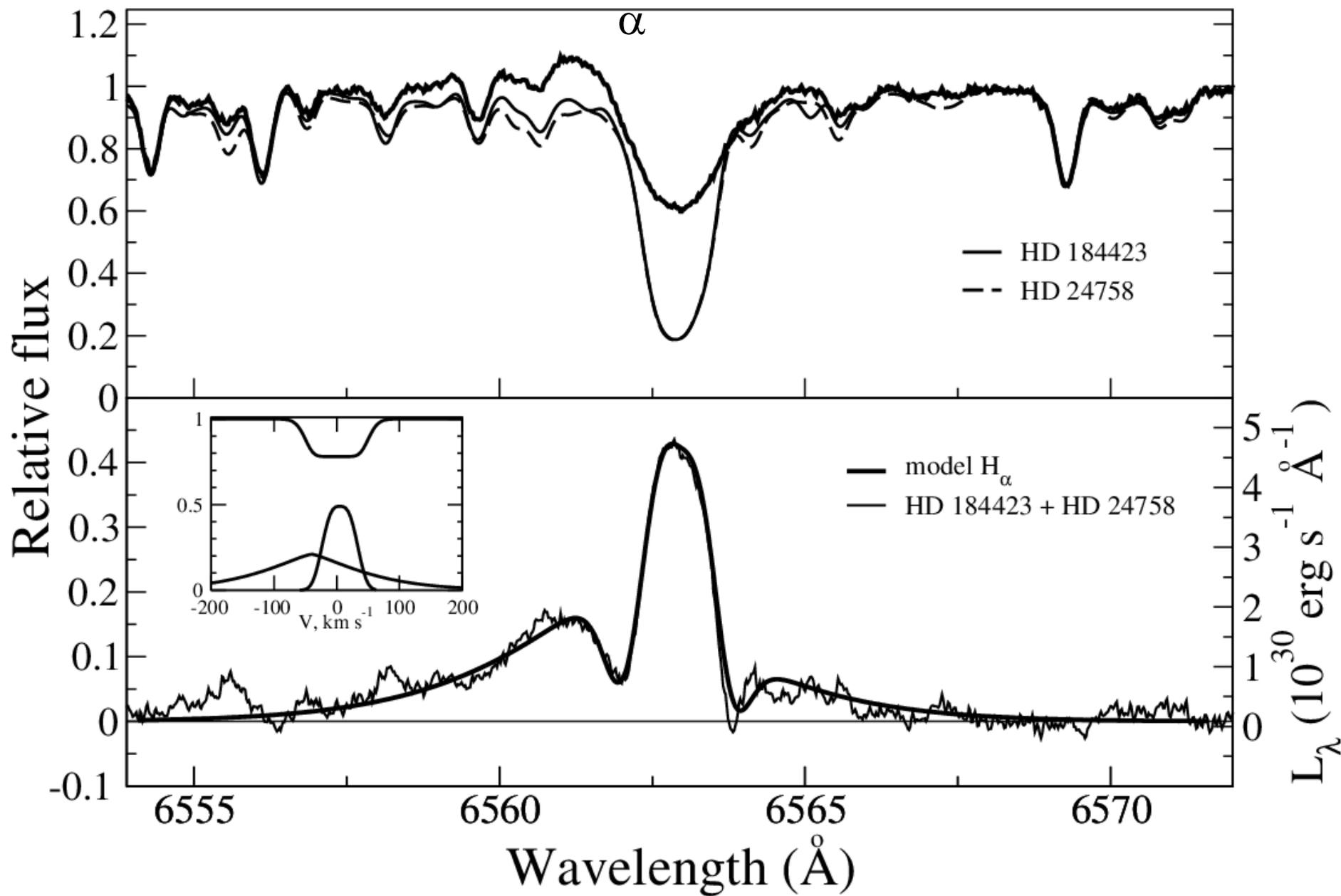
Профили линий CaII в шкале скоростей с вычтенным звездным спектром



Самые встречающиеся индикаторы звездных хромосфер

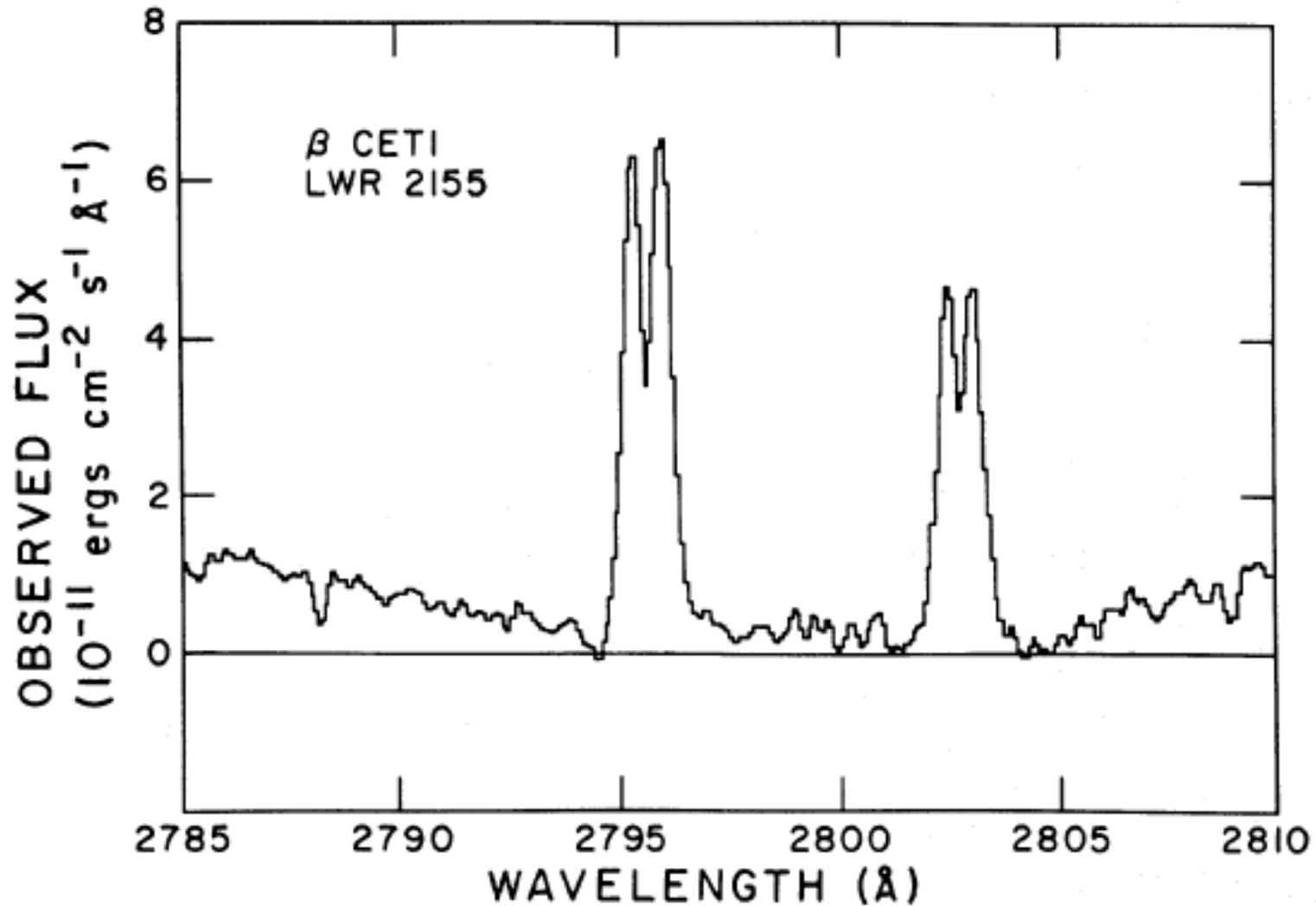
H

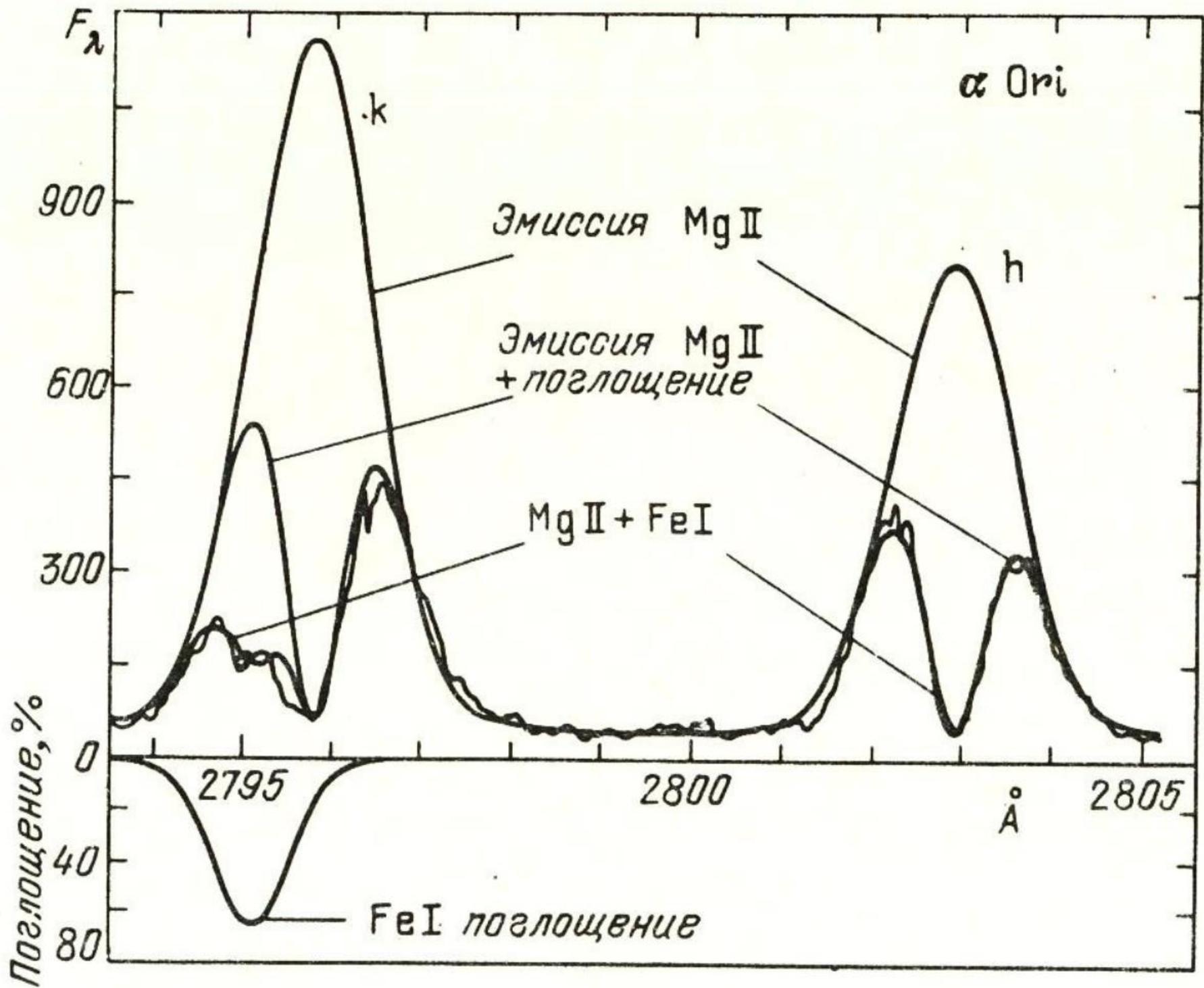
α



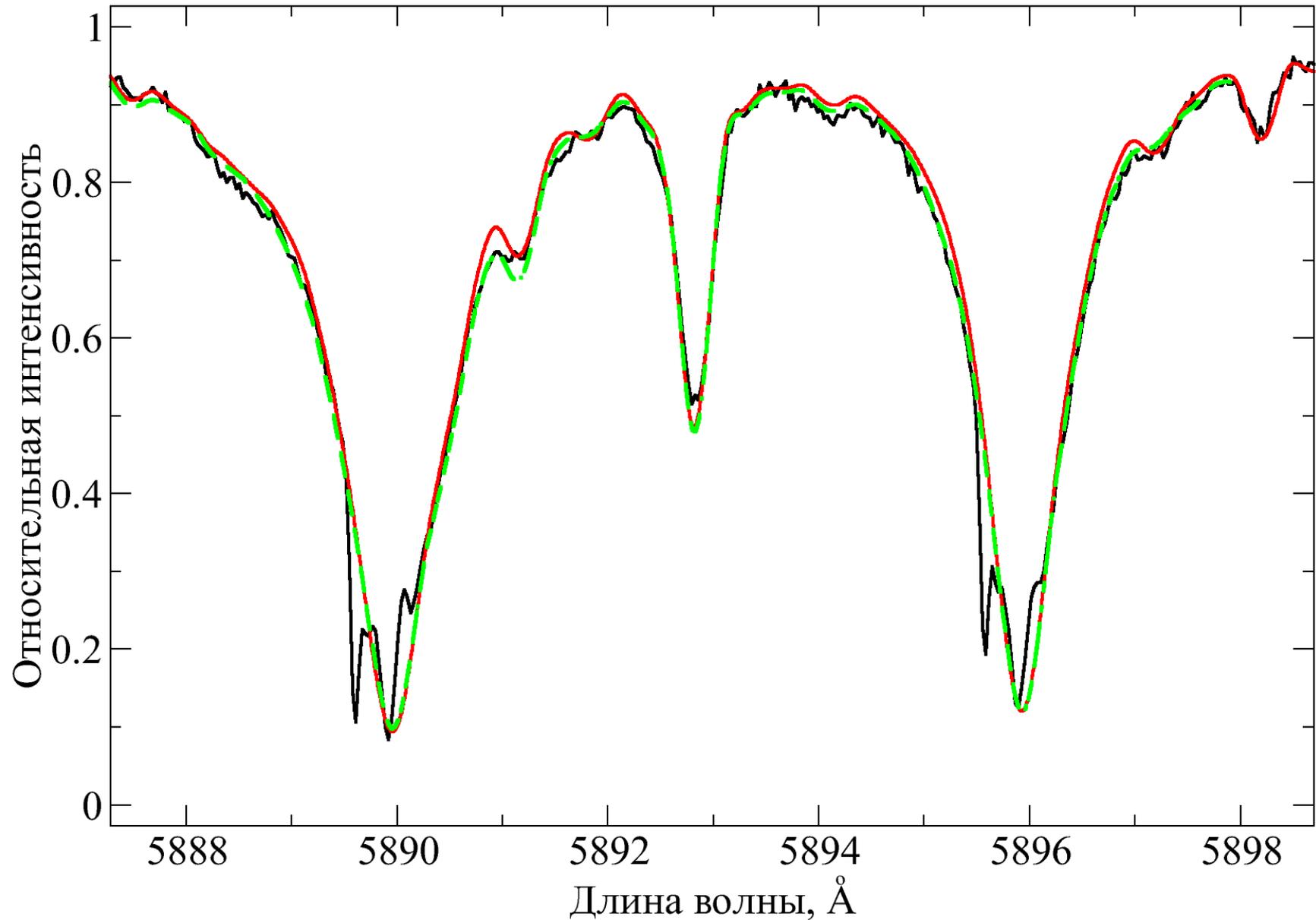
Самые встречающиеся индикаторы
звездных хромосфер

MgII
2800A

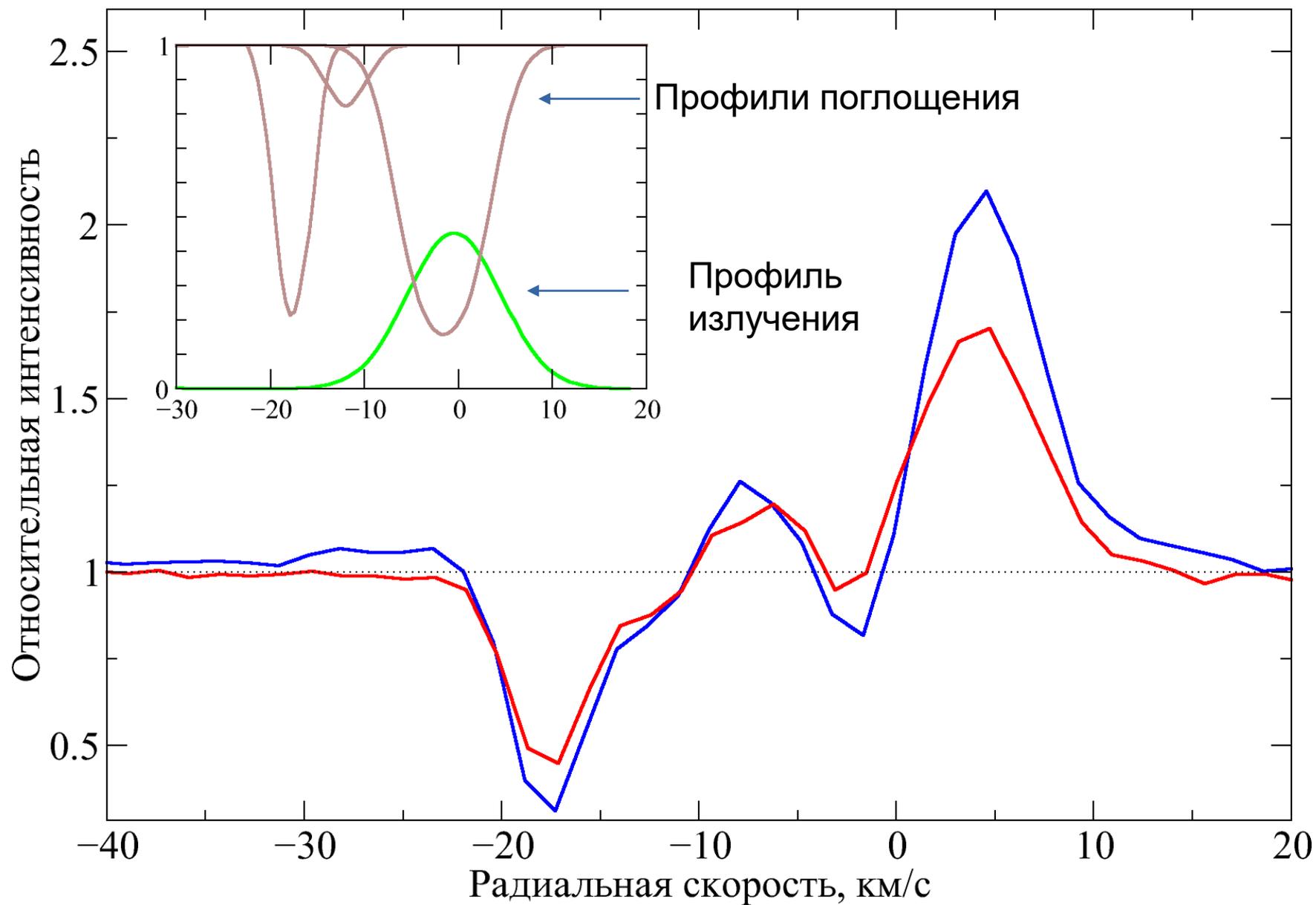




Моделирование сложных профилей
резонансного дуплета $\text{NaI } D_{12\text{B}}$ спектре
активного гиганта PZ Mon



Профили линий NaI в шкале скоростей с вычтенным звездным спектром



Наблюдаемый профиль

$$y = (y_{\star} + y_{em}) \times y_{ab1} \times y_{ab2} \times y_{ab3}$$

ЭМИССИОННЫЙ
КОМПОНЕНТ

$$y_{em} = y_0 \times e^{-\frac{(v - v_0)^2}{b^2}}$$

Абсорбционные компоненты

$$y_{ab} = e^{-\frac{N f \lambda}{3768 \sqrt{\pi} b}} \times e^{-\frac{(v - v_0)^2}{b^2}}$$

Параметры, полученные при аппроксимации наблюдаемых профилей модельными

Тип	v , км с ⁻¹	y_0	$N \times 10^{11}$, см ⁻²	b , км с ⁻¹
Изл	-0.5 ± 0.3	0.45 ± 0.10	–	7.0 ± 0.4
Погл	-1.6 ± 0.2	–	15 ± 2	4.8 ± 0.3
Погл	-17.6 ± 0.1	–	5.8 ± 0.3	2.2 ± 0.1
Погл	-12.0 ± 0.3	–	1.0 ± 0.3	3 ± 1

