

**Общая астрофизика**  
**Раздел 2. Звезды**

*Машонкина Людмила Ивановна*

2.2. Спектральная классификация звезд,  
ее физическая интерпретация

Звезда излучает во всём диапазоне энергий фотонов.

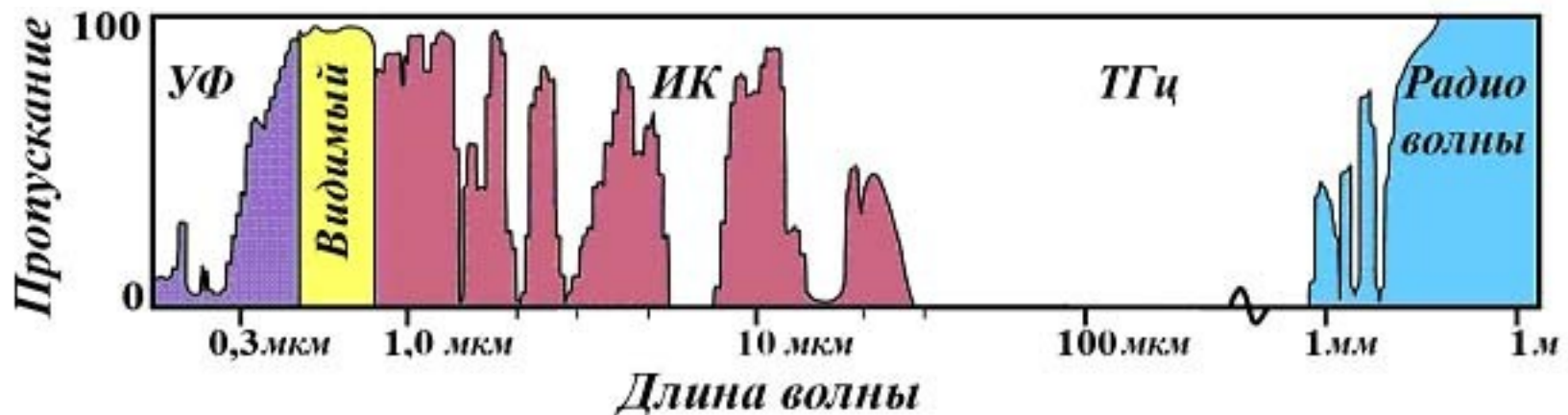
**Спектр звезды** – разложение излучения по  $\lambda$ ,  $\nu$ .

**Спектральные диапазоны**

**Единицы измерения  
длин волн:**

$< 0.1 \text{ \AA}$ :	гамма-диапазон,
$0.1-100 \text{ \AA}$ :	рентгеновский,
$100-3900 \text{ \AA}$ :	ультрафиолетовый,
$3900-7600 \text{ \AA}$ :	видимый,
$0.76-100 \text{ мкм}$ :	инфракрасный,
$> 100 \text{ мкм}$ :	радиодиапазон.

- метр
- $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$
- $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$
- $1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ нм}$



**Кривая пропускания земной атмосферы**

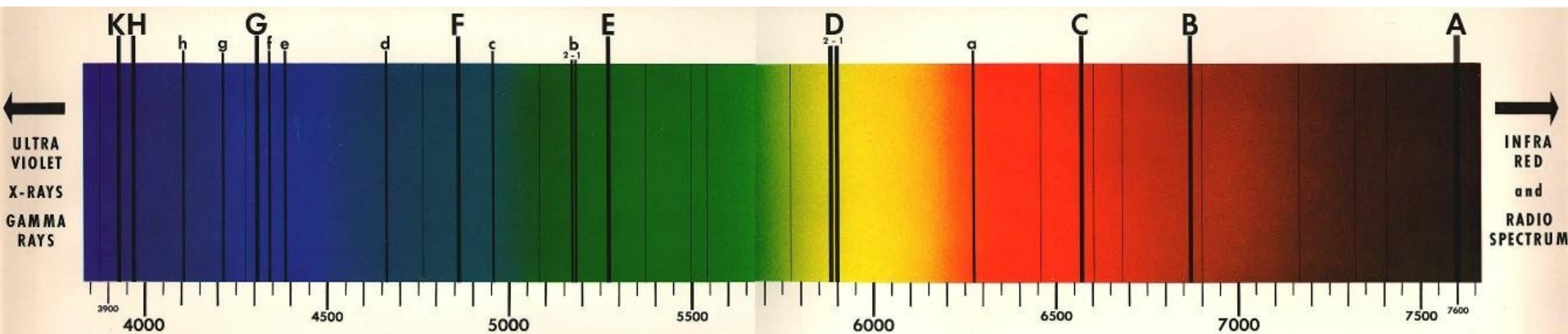
1666, *И. Ньютон*: непрерывный солнечный спектр,

1802, *У.Х. Волластон*: 4 темных линии в спектре,

1815-1826, *Й. Фраунгофер*: начало звёздной спектроскопии

✓ Солнце: 574 темные линии.

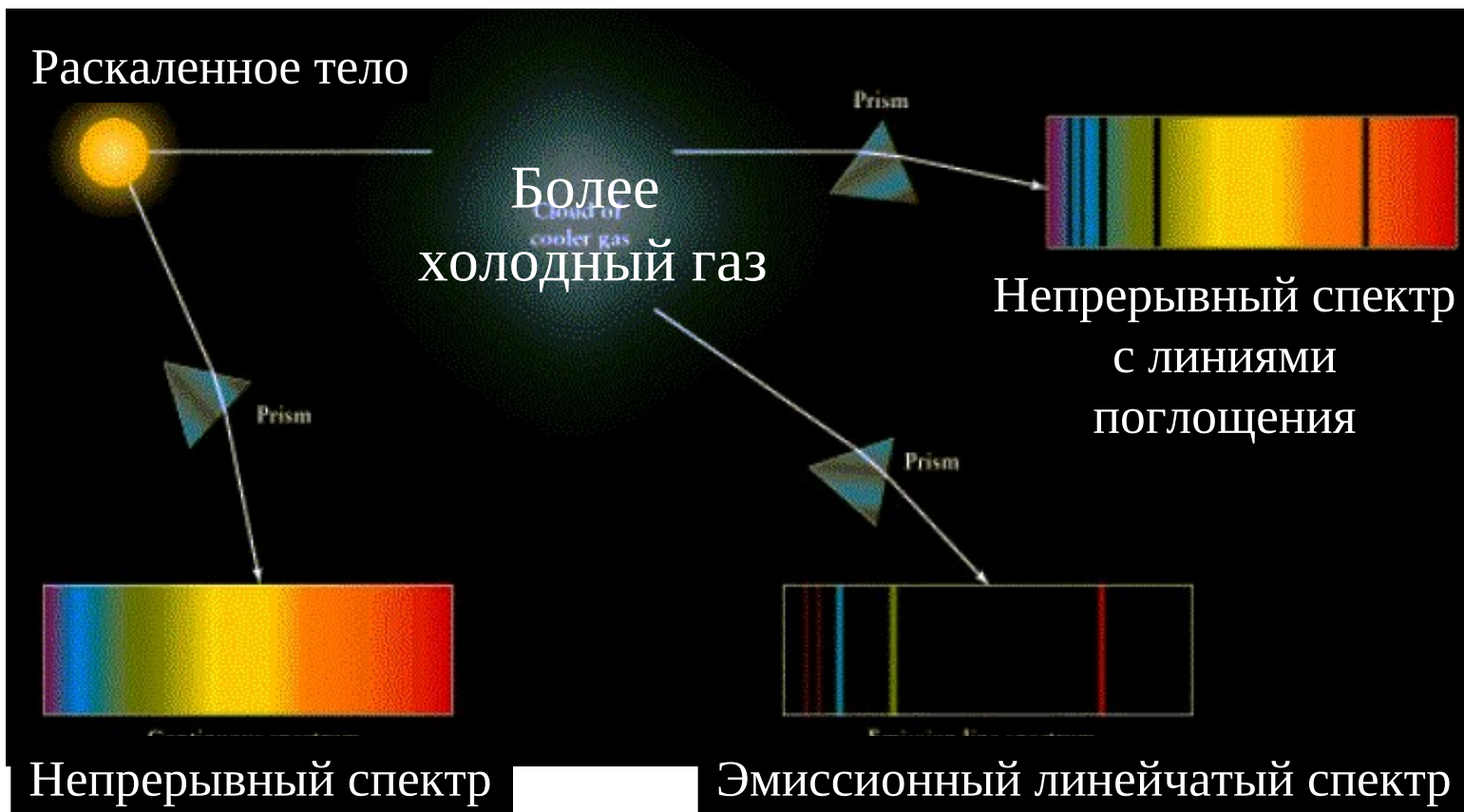
✓ Спектры звёзд различаются, но положение общих линий совпадает.



Фраунгоферов спектр Солнца от 3900 до 7500 Å.

# Законы спектрального анализа

Р.В. Бунзен, Г.Р. Кирхгоф, 1859

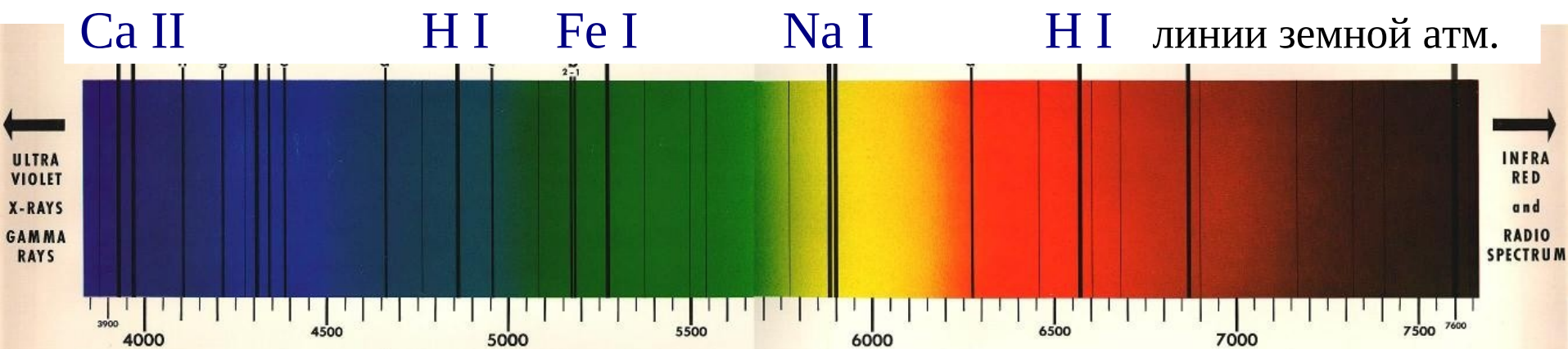


Спектры звезд — абсорбционные.  
Звезда - раскаленное тело, окружённое  
более холодной газовой атмосферой.

# Отождествление линий в звездных спектрах

Бунзен, Кирхгоф, Хеггинс, Локьер, Ангстрем (1860-80 гг.),  
сравнение с лабораторными образцами:

К, Н – линии Ca II ( $\text{Ca}^+$ ), D - Na I ( $\text{Na}^0$ ), другие - H I, Fe I



Звездные линии поглощения образованы известными на  
Земле химическими элементами.

Гелий - единственный элемент, открытый сначала в космосе  
(Солнце, 1868, П. Жансен, Дж. Локьер, линия He I 5876 Å).

В земных породах: Л. Пальмери (1881), У. Рамзай (1895)

# Спектральная классификация звезд.

Гарвардская классификация, 1886, Э.Ч. Пикеринг.

**Метод:** Объективная призма  
+ фотопластинка.

**Критерии:**

- поглощение в линиях H  
в порядке его уменьшения ,
- плавное изменение других  
спектральных особенностей.

Спектр. классы (*Sp*) от A до Q.

**Исполнители:**

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

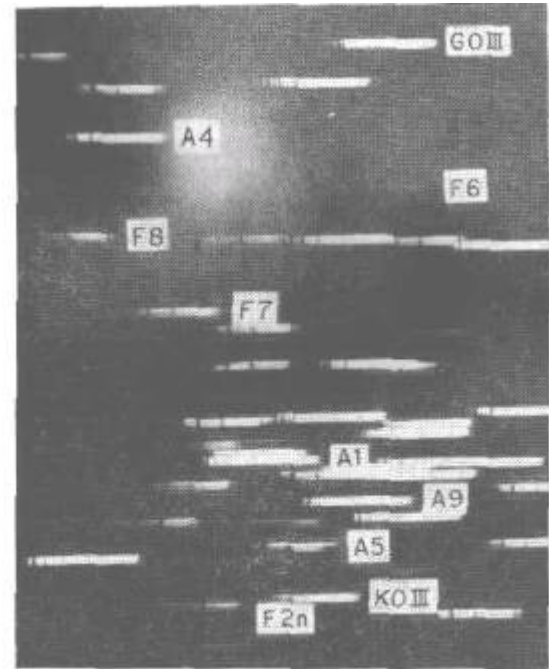
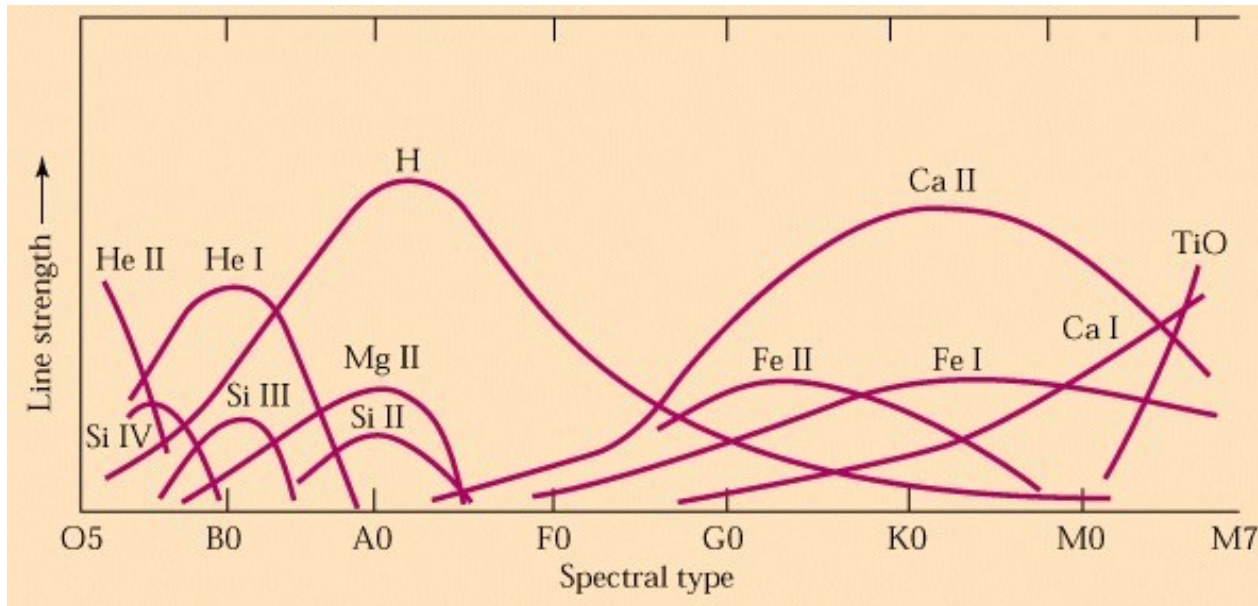


Рис. 118. Фотография звездных спектров, полученная с объективной призмой  
Для некоторых звезд указан спектральный класс.

# Изменение величины поглощения в линиях вдоль спектральной последовательности



Линии H I наблюдаются во всех сп. классах

**O** – линии He I-II, C III, N III

**B** – линии He I, усиление H I

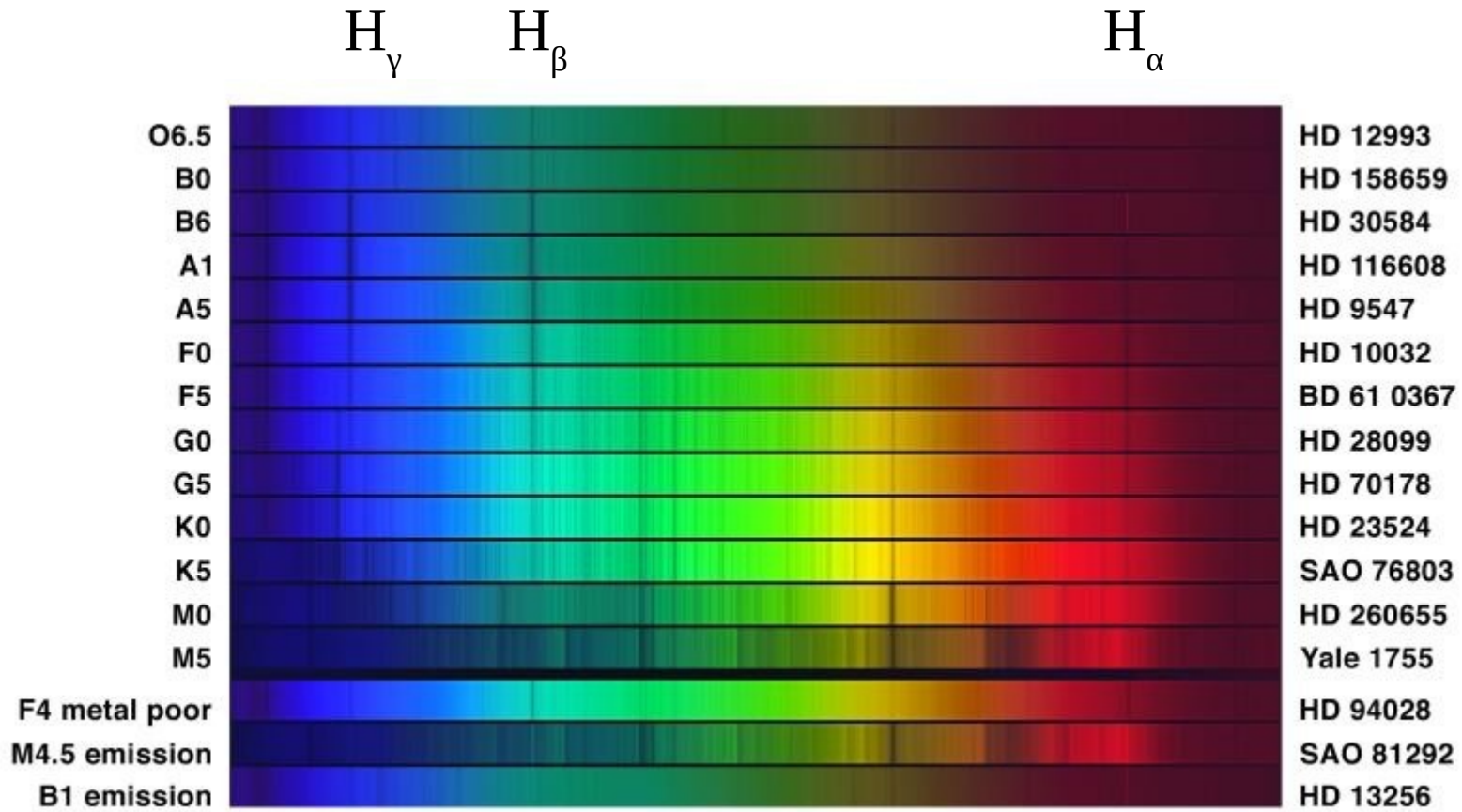
**A** – макс.поглощение в H I, появляются Mg II, Ca II

**F** – появляются линии Mg I, Ca I, Fe I

**G** – сильные линии нейтр. металлов, полоса G (линии CH)

**K** – макс.поглощ. H и K Ca II, нейтр. металлы, полоса G

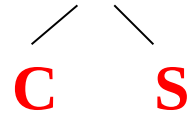
**M** - линии TiO



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

Каждый класс делится  
на 10 подклассов.

**Солнце: G2.**



Коричневые  
карлики

**C = N, R** – углеродные (CN, CH)

**S** - линии Zr I-II



## Физическая интерпретация спектр. последовательности

- Атом = ядро (р, n) + электронная оболочка

(1911, Э. Резерфорд)

*Заряд ядра  $Z$  определяет индивидуальность хим.элемента.*

- Электроны в атоме двигаются по дискретным орбитам.

Каждая имеет свою энергию  $E_i$ .

Переход с уровня  $i$  на уровень  $j$  путем захвата (поглощения) или излучения кванта с энергией

$$h\nu_{ij} = E_j - E_i$$

(1913, Н. Бор, квантовая теория атома)

- Каждый атом имеет свой, присущий только ему набор уровней и свою систему спектральных линий.



Уровни энергии в атоме водорода и кислорода O I  
и разрешенные переходы

Линии Бальмеровской серии: 2 – 3 ( $H_\alpha$ ), 4( $H_\beta$ ), 5( $H_\gamma$ ), ...

$$\lambda(H_n) = 3647 \text{ нм}^2 / (n^2 - 2^2) \text{ (Å)}$$

$H_\alpha$  6562.8 Å;  $H_\beta$  4861.3 Å;  $H_\gamma$  4340.5 Å,  $\lambda_n \rightarrow 3647 \text{ Å}$

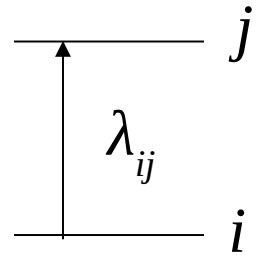
## Количество квантов, поглощенных в линии,

~ вероятности перехода ( $B_{ij}$  или  $f_{ij}$ ),

$B_{ij}$  – коэф-т Эйнштейна,  $f_{ij}$  – сила осциллятора

~ концентрации атомов на нижнем уровне  $n_i$ ,

~ интенсивности излучения  $I_\lambda$



$$\lambda = c/\nu$$

длина волны

## Доля атомов (ионов) в состоянии $i$

зависит от энергии возбуждения  $E_{exc}$  и температуры.

$$\frac{n_i}{n_1} = \frac{g_i}{g_1} e^{-E_{exc}/kT}$$

формула *Больцмана*

$g_i$  статистический вес

$N^{ion} = \sum n_i$  - концентрация атомов в стадии ионизации *ion*.

Спектральная линия не является бесконечно тонкой

Тепловые  
движения  
+ микротурб.

- доплеровское уширение:  $\nu = \nu_0 - \nu_0 v_x / c$       $v_x^2 = v_t^2 + \xi_t^2$
- естественное затухание:  $\Delta E \cdot \tau = \hbar$       $\tau$  - время жизни уровня
- уширение эффектами давления:  $\Delta E = \frac{a}{r^n}$       $n = 2, 3, 4, 6$  для разного типа взаимодействующих частиц

Сечение поглощения:  $a_{ij}(\nu) = a_{ij}^{tot} \varphi_\nu$

$\varphi_\nu$  - профиль поглощения

Полное сечение поглощения:  $a_{ij}^{tot} = \int_0^\infty a_{ij} d\nu$       $\int_0^\infty \varphi_\nu d\nu = 1$

Энергия, поглощённая в линии на частоте  $\nu$ :

$$n_i \int a_{ij} I_\nu d\omega = n_i B_{ij} J_\nu \varphi_\nu h\nu_{ij} \longrightarrow a_\nu = B_{ij} \frac{h\nu_{ij}}{4\pi} \varphi_\nu$$

## ◆ Профиль Доплеровского уширения

Для звёзд - максвелловское распределение частиц по скоростям:

$$\varphi_v = \frac{1}{\Delta v_D \sqrt{\pi}} e^{-[(v-v_0)/\Delta v_D]^2} \quad \Delta v_D = v_0 v/c \quad \text{доплеровская ширина}$$
$$v^2 = \frac{2kT}{M} + \xi_t^2 \quad \xi_t - \text{микротурбулентная скорость, от 0.5 до 15 km/s}$$

FWHM = Full width at half maximum:  $\Delta v_{FWHM} = 2\sqrt{\ln 2} \Delta v_D$

Примеры:  $\lambda_0 = 5000\text{\AA}$

- $T = 6000 \text{ K}, A = 56 \text{ (Fe): } \Delta\lambda_D = 0.02\text{\AA}$
- $T = 50000 \text{ K}, A = 1 \text{ (H): } \Delta\lambda_D = 0.5\text{\AA}$

◆ Профиль естественного затухания

$$\varphi_v = \frac{\gamma_R / 4\pi^2}{(v_0 - v)^2 + (\gamma_R / 4\pi)^2}$$

лоренцевский профиль

Постоянная естественного затухания: 
$$\gamma_R = \sum_{k < j} A_{jk} + \sum_{l < i} A_{il}$$

$A_{ji}$  – Эйнштейновский коэффициент спонтанного перехода j-i

Естественная полу-полуширина: 
$$\Delta v_E = \Delta v_R = \frac{\gamma_R}{4\pi} \quad (\Delta \lambda_R \sim 10^{-4} \text{ \AA})$$

$$\varphi(\Delta v_R) = \frac{1}{2} \varphi(\Delta v = 0)$$

## ◆ Уширение эффектами давления

n =	название эффекта	мишень и возмущающая частица
2	линейный эффект Штарка	H-подобные ионы + p, e
3	резонансное уширение	атомы с себе подобными, H+H
4	квадратичный эф-кт Штарка	ионы + e, p
6	уширение ван дер Ваальса	атомы металлов + H

Резонансное уширение,

Квадратичный эффект Штарка,

Ван дер Ваальсово уширение

лоренцевский профиль

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

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

$$\tau = 1/\pi r_0^2 \nu N$$

$\tau$  - среднее время  
между  
столкновениями

Линейный эффект Штарка – профили в табличном виде

*Vidal, Cooper & Smith (1973, VCS),*

*Stehle & Hutcheon (1999, A&AS, 140, 93)*

# Совместное действие всех уширяющих механизмов

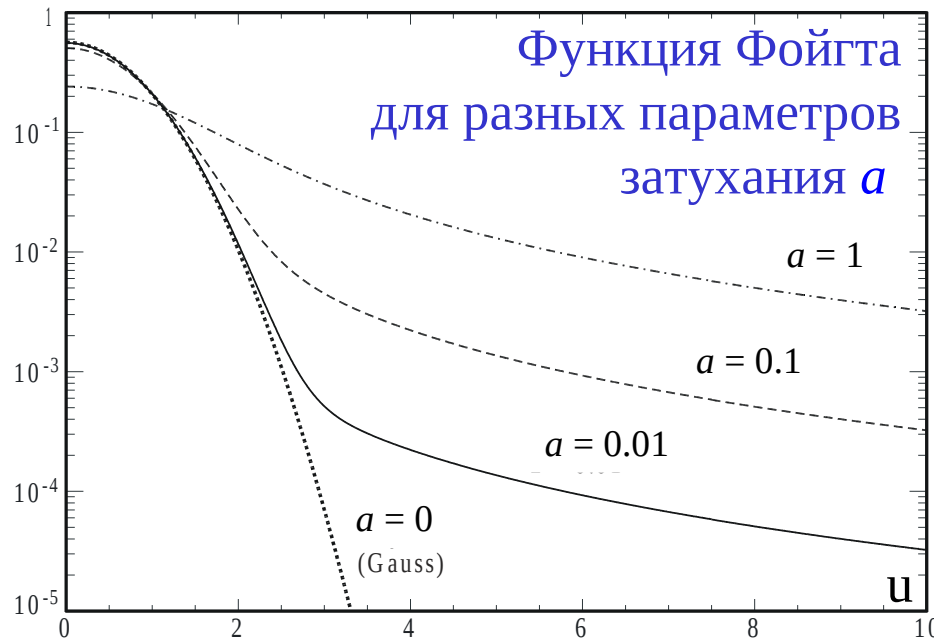
Свёртка профилей → **Фойгтовский** профиль поглощения

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

$$u = (\nu - \nu_0) / \Delta \nu_D$$

$$a = \gamma / 4\pi / \Delta \nu_D$$

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



**Крылья линии:**

естественное затухание,  
эффекты давления.

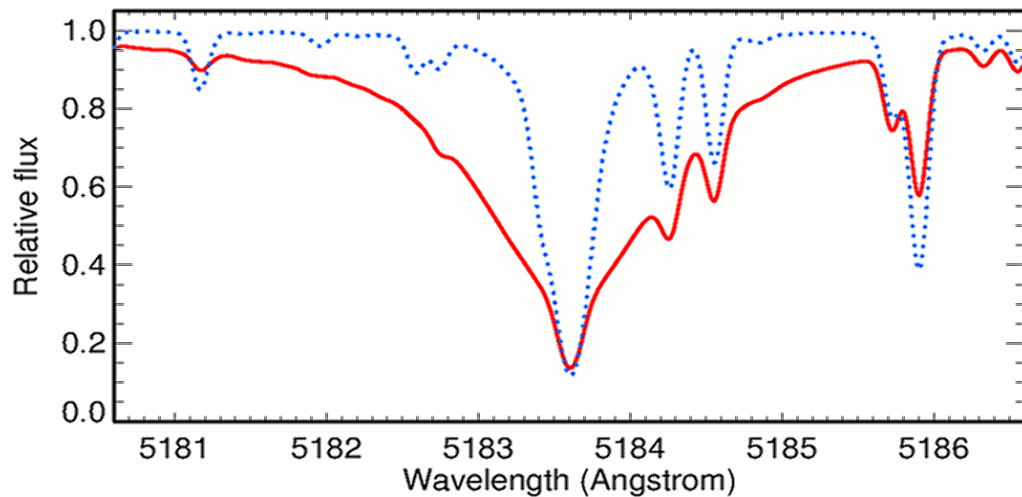
**Ядро линии:**

доминирует Доплеровское уширение



# Примеры спектральных линий

$F_{\lambda}^l$  (ПОТОК В ЛИНИИ) /  $F_{\lambda}^c$  (ПОТОК В КОНТИНУУМЕ)

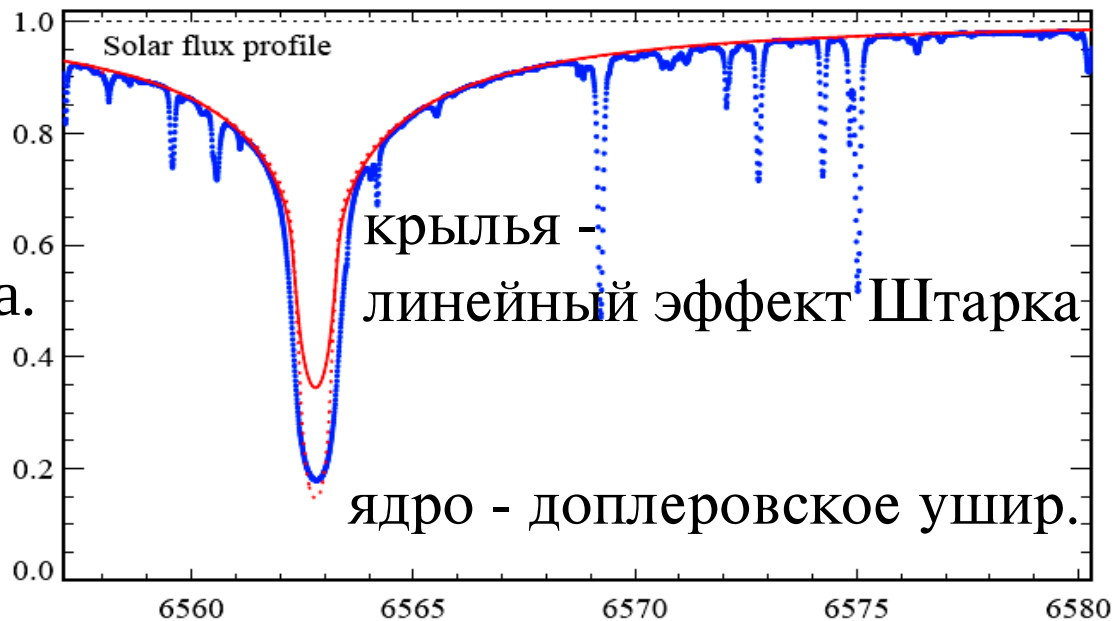


Mg I 5183 Å,  $T_{\text{эфф}} = 6000$  К.

- ◆ низкое давление → только доплеровское ядро;
- ◆ рост давления → ван дер Ваальсовские крылья

Линия в  $H_{\alpha}$  спектре Солнца.

— ··· расчёты



- Состояние ионизации зависит от  $T$  и  $P$  газа.

$$\frac{N^+}{N^0} N_e = \frac{2g^+}{g^0} \frac{(2\pi mkT)^{3/2}}{h^3} e^{-E_{ion}/kT}$$

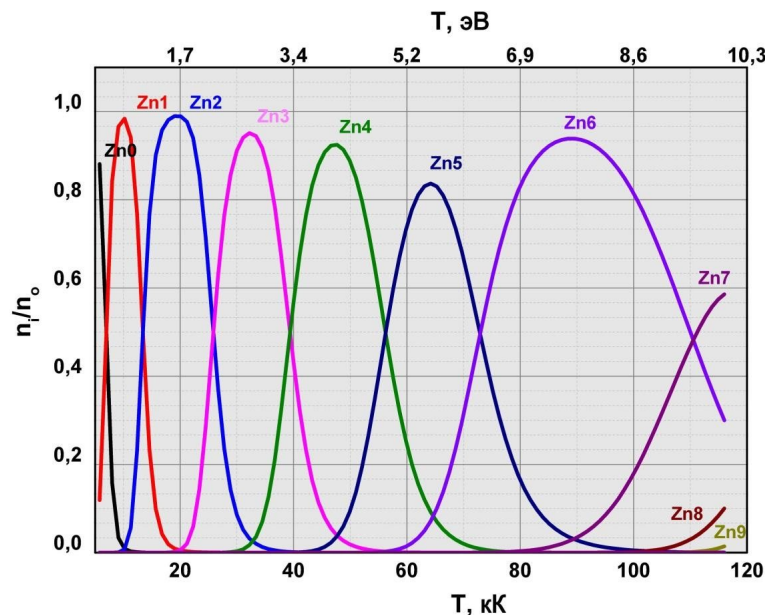
Формула Саха

$E_{ion}$  – энергия ионизации

$N^0, N^+$  - концентрация атомов в основном состоянии  
в двух последовательных стадиях ионизации.

Всего атомов элемента:  $N_{атом} = \sum N^{ion} = N_H X_{атом}$

Доля атомов Zn  
в разных стадиях  
ионизации при  
разных  $T$



Zn I:  $E_{ion} = 9.4$  (эВ)

Zn II: 18

Zn III: 39.7

Zn IV: 59.4

Zn V: 82.6

Zn VI: 108

Zn VII: 136

## Энергия ионизации

Водород	H I:	13.6 эв,		
Гелий,	He I:	24.6 эв,	He II:	54.4 эв
Кальций,	Ca I:	6.1 эв,	Ca II:	11.9 эв
Железо,	Fe I:	7.8 эв,	Fe II:	16.2 эв

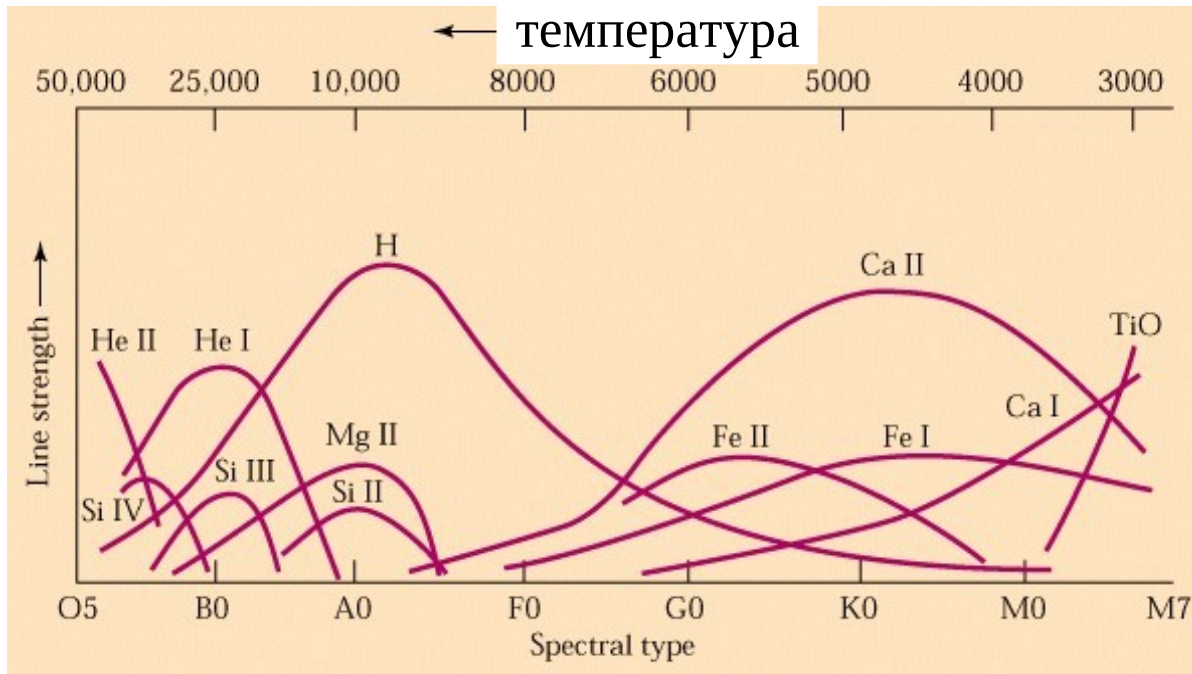
$T = 3000 \text{ K}$ : все атомы - нейтральные,

$T = 6000 \text{ K}$ : H, He – нейтральные,  
доминируют Ca II, Fe II

$T = 15000 \text{ K}$ : He – нейтральный,  
доминируют H II, Ca III, Fe III

$T = 30000 \text{ K}$ : H II, He I и He II, Ca IV, Fe V

# Изменение величины поглощения в линиях, используемых при спектр. классификации



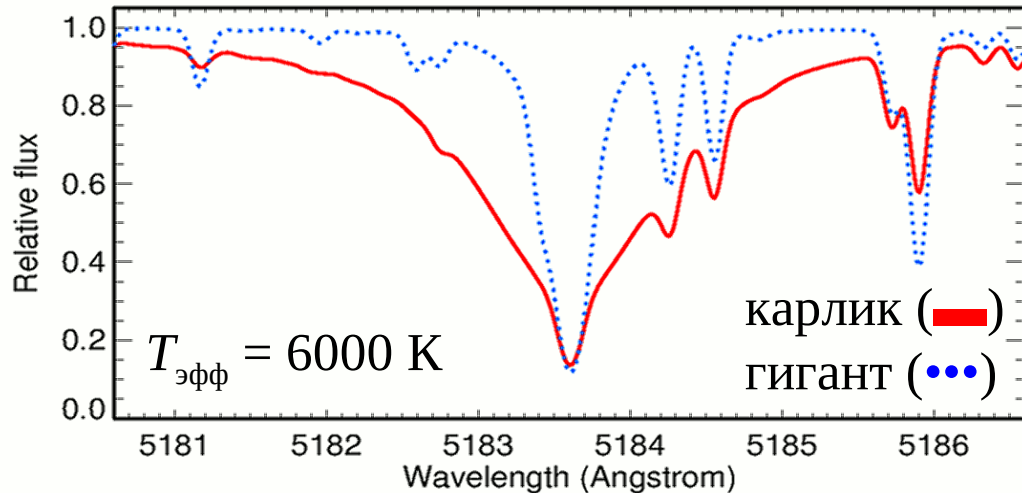
- ✓ H: Бальмер. линии,  $E_{\text{exc}} = 10.2$  эв.
- Слабы при низкой  $T$  из-за низкой степени возбуждения.
- Увеличение  $n_2$  с ростом  $T$  до 10000 К.
- Далее уменьшение  $n_2$  из-за ионизации.

- ✓ TiO: молекулы не разрушаются только при низких  $T$
- ✓ Ca I: ионизуется при низких  $T \rightarrow$  Ca I падает, Ca II растет
- ✓ He I: линии с  $E_{\text{exc}} > 19$  эв,  $n_i$  мало вплоть  $T \sim 20000$  К.

Спектральный класс характеризует температуру в атмосфере

## Классификация по светимости

В группе звёзд с одинаковой степенью ионизации металлов эквивалент. ширина линии может быть различной у разных звезд.



Эквивалентная ширина линии – ширина участка непрерывного спектра, в котором содержится энергия, равная поглощ. в спектральной линии.

*Эмпирически:* звезды с узкими линиями имеют меньшие собственные движения → более далекие → больше светимость → больше радиус → гиганты (g):

меньше эффекты давления (уширение ван дер Ваальса, квадрат. эф-т Штарка) → слабее крылья линии

## Класс светимости характеризует давление в атмосфере

Ia+ или 0 — гипергиганты  
I, Ia, Iab, Ib — сверхгиганты  
II, IIa, IIb — яркие гиганты  
III — гиганты (g)  
IV — субгиганты  
V — карлики (d)  
VI — субкарлики  
VII — белые карлики

Карлики, V

$R = 0.3$  (M5) до  $15$  (O3)  $R_{\text{sun}}$

$\log g = 4 - 5$

Гиганты, III

$R = 40$  (M0) до  $15$  (B0)  $R_{\text{sun}}$

$\log g = 1.3 - 3.3$

Двумерная = Йеркская = Моргана-Кинана (МК) классификация =

Sr (Гарвард.класс) + класс светимости

Солнце – G2 V

Сириус – A1 Vm

Арктур - K1.5 IIIr

Бетельгейзе – M2 Iab

m: усилены линии группы Fe

r: пекулярности в спектре

## Двумерная классификация, заметки

$$\frac{N^+}{N^0} N_e = \frac{2g^+}{g^0} \frac{(2\pi m k T)^{3/2}}{h^3} e^{-E_{ion}/kT} \quad \text{Зависимость от } T \text{ и } N_e \text{ (давления)}$$

- ✓ Одинаковый  $S_p \sim$  одинаковая степень ионизации, Fe II/Fe I.
- ✓  $N_e, P_g, \rho$  (гигант)  $<$   $N_e, P_g, \rho$  (карлик) при одной массе.
- ✓ Одинаковая  $T$ : у гиганта степень ионизации выше (рекомбинации реже), чем у карлика  $\rightarrow$   $S_p$  (гигант) более ранний.
- ✓  $S_p$  (гигант) =  $S_p$  (карлик)  $\rightarrow T$  (гигант)  $<$   $T$  (карлик).

# Шкала эффективных температур ( $T_{\text{эфф}}$ )

Allen's Astrophysical Quantities, 2000, Springer

	V	III	I
M5	3170	<u>3380</u>	2880 K
K5	4410	4050	3990 K
G5	5560	5050	4930 K
F5	6650		6370 K
A0	9790		<u>9980</u> K
B5	15200		13600 K
O9	34000		32000 K

O2 52000 K (*Walborn+2002*)



**L, T, Y** — коричневые карлики (1995 год),

**L**: линии Na I, K I, TiO, VO, FeH, CrH, MgH, CaH

$$T_{\text{эфф}} = 1500\text{—}2000 \text{ K}$$

**T**: линии Na I, K I, CH<sub>4</sub> (метан),

$$T_{\text{эфф}} = 700\text{—}1500 \text{ K},$$

**Y**: аммиак ? Только в ИК диапазоне, Spitzer

$$T_{\text{эфф}} \sim 300\text{-}350 \text{ K}.$$

✓  $M = 0.012 - 0.0767 M_{\text{sun}}$  или  $12.57 - 80.35 M_J$  .

✓ Источник энергии

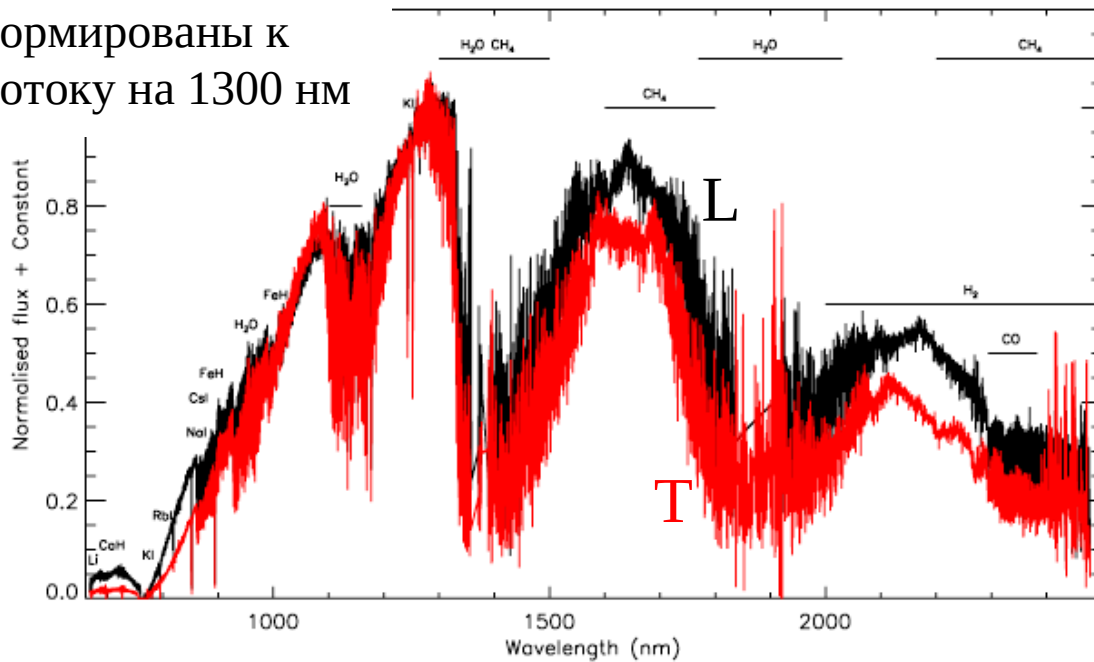
$M \approx 20\text{-}70 M_J$  (классы L, T): «горение» D, Li (~10 млн.лет)

$M > 70 M_J$  (класс L): «горение» H (1 Gyr?), D, Li (~10 млн.лет)

$M < 20 M_J$  (класс Y): не может быть ядерных реакций

Большую часть жизни – остывают.

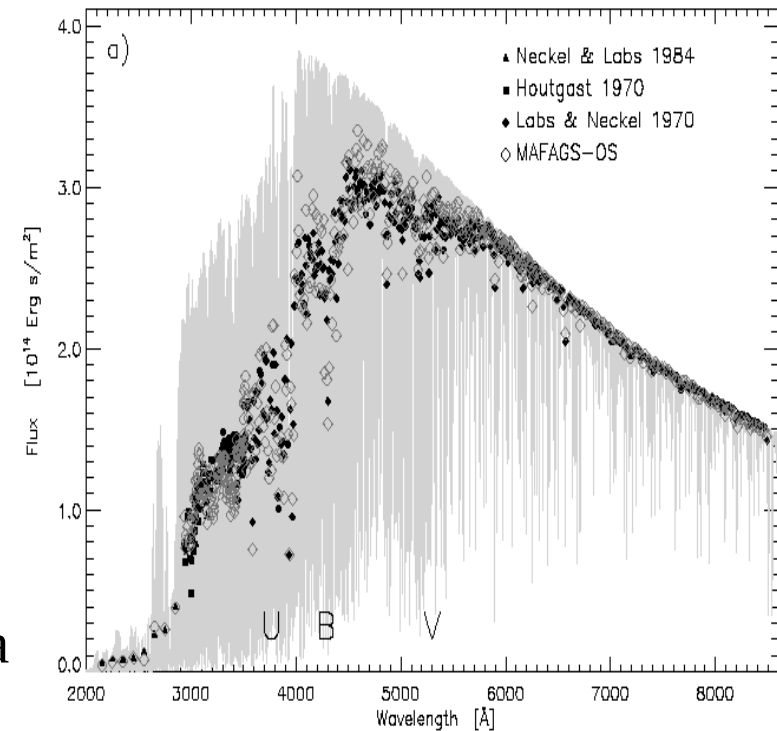
нормированы к  
потоку на 1300 нм



# Спектры коричневых карликов классов L и T в двойной системе Luhman 16AB

(Lodieu et al. 2015, A&A, 581, A73)

Спектр Солнца



## Дополнительные классы

**W** — звёзды Вольфа-Райе (1867 год):

широкие эмиссионные линии H I или He I, He II,  
NIII – NV или CIII – CIV, OIII – OV

- ✓  $T_{\text{эфф}} \sim 70000 \text{ K}$ , высокая светимость ( $M \sim -6.8^m$ )
- ✓ Расширяющаяся плотная оболочка,  $V \sim 1000\text{-}2000 \text{ км/с}$ ,  
потеря вещества  $\sim 10^{-4} - 10^{-6} M_{\text{sun}} / \text{год}$ .
- ✓ Эволюционный статус – гелиевые остатки массивных звёзд.

## Дополнительные классы

**D** — белые карлики

Широкие линии поглощения H I (**DA**), He I (**DB**),  
в видимом диапазоне нет линий металлов.

✓ Sp F-A-B,  $T_{\text{эфф}} = 5000 - 200000 \text{ K}$ ,

✓ низкая светимость:  $\sim 10^{-4} L_{\text{sun}}$ ,  $R \sim 10^{-2} R_{\text{sun}}$

Пример: Сириус В – компонент в двойной системе  
(Ф. Бессель, 1844; Э. Кларк, 1862)

✓  $M = 0.6-1.4 M_{\text{sun}}$ , плотность  $\sim 10^6 \text{ г/см}^3$  (Солнце:  $1.4 \text{ г/см}^3$ )

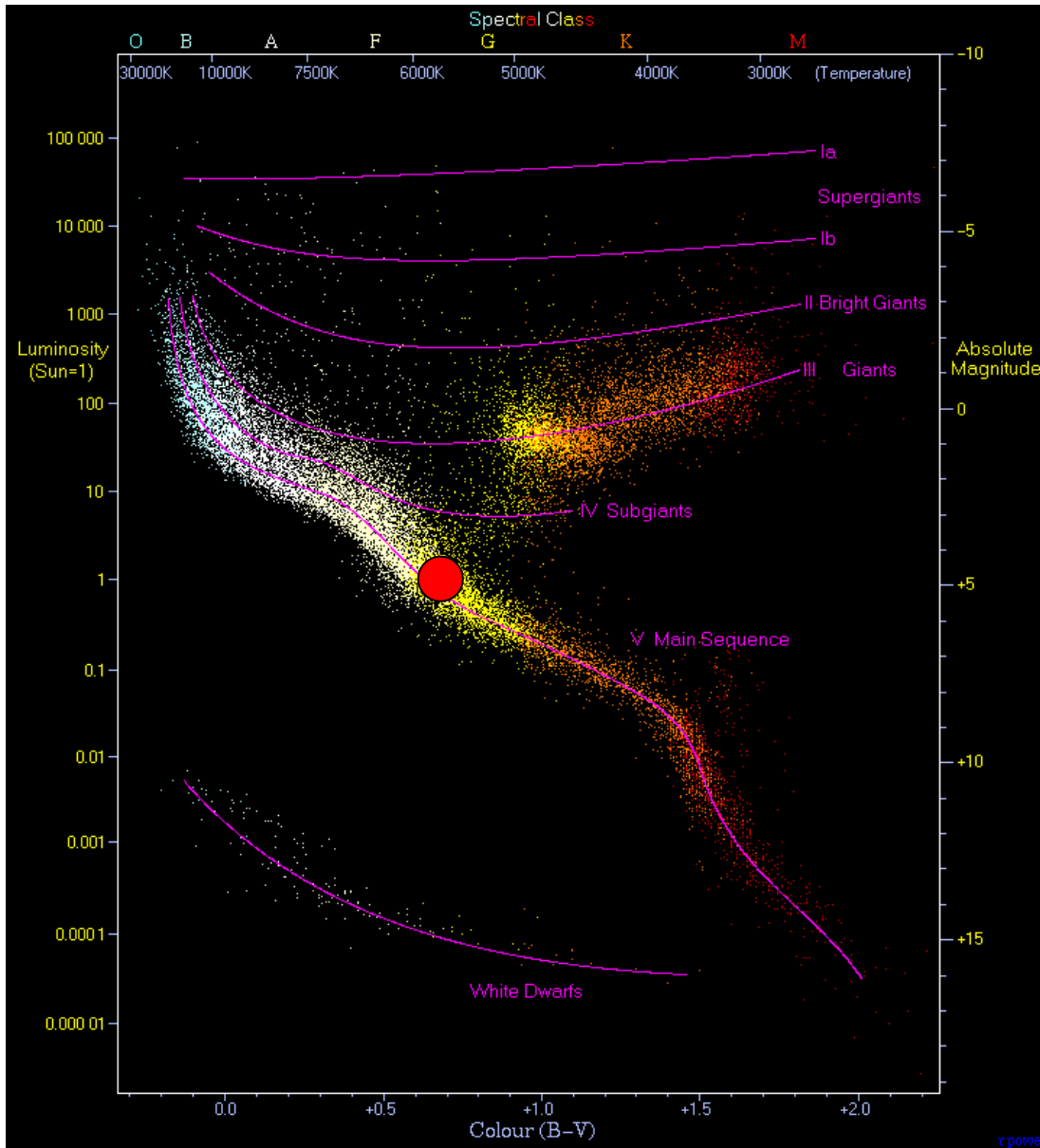
✓ Плотность и давление определяются свойствами  
вырожденного электронного газа (Фаулер, 1926)

✓ Конечная стадия эволюции звёзд с  $M < 10 M_{\text{sun}}$

## Раздел 2. Звезды

### 2.3. Диаграмма Герцшпрунга-Рассела или спектр-светимость

# Диаграмма Герцшпрунга-Рассела



Е. Hertzsprung, H.N. Russell  
обнаружили связь между  
Sp и светимостью (1910-12)

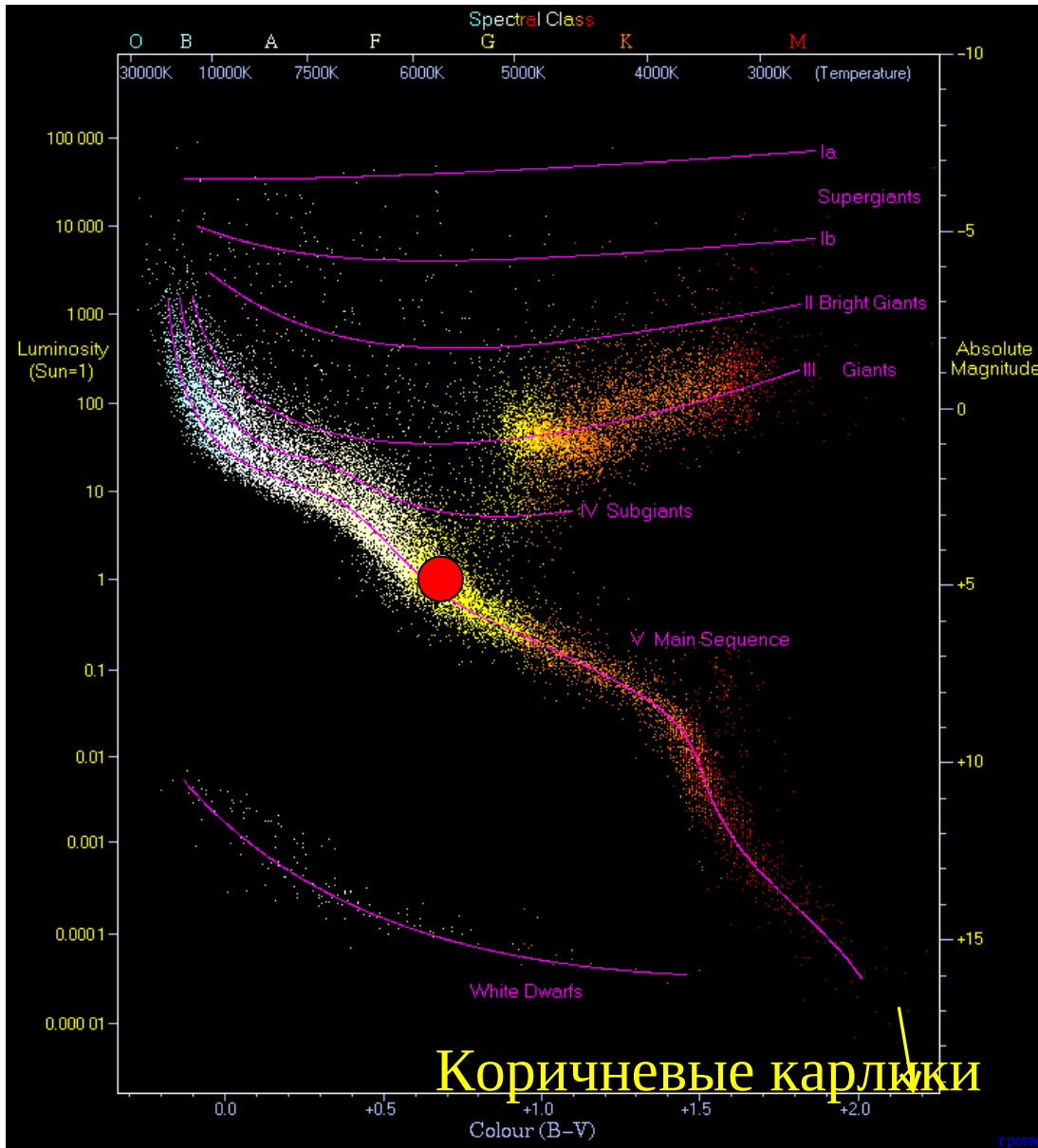
$$Sp \sim T_{\text{eff}} \sim (B-V)$$

$$L \sim M_{\text{bol}}$$

Диаграмма Г-Р для  
22 000 близких звезд  
(каталоги Hipparcos и  
Gliese).

Главная Последовательность (ГП)  
заселена карликами (V)  
~ 90% всех звёзд.

# Диаграмма Герцшпрунга-Рассела



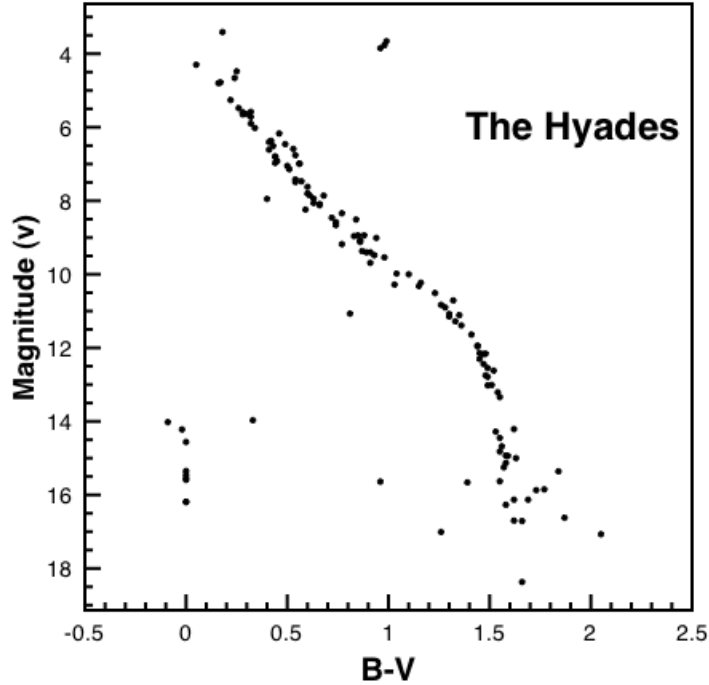
- Каждая звезда на ГП
- проводит 90% жизни,
- параметры  $\sim$  const,
- положение зависит от массы.

В зависимости от массы  
и возраста

- ветвь красных гигантов
- белые карлики,
- сверхгиганты

Вернемся к диаграмме  
Г-Р после эволюции звёзд.

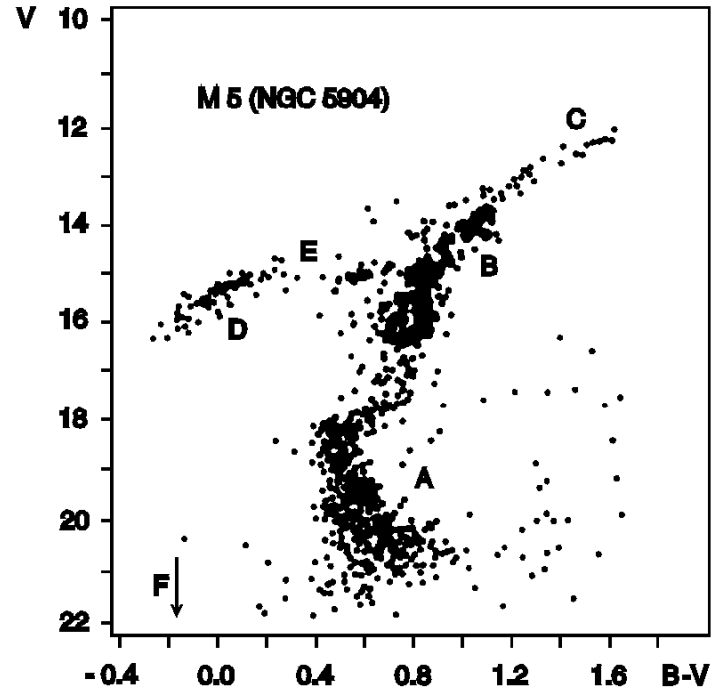
## Диаграммы цвет – зв.величина для скоплений



Рассеянное скопление Гиады  
 $M = 400 M_{\text{sun}}$ ,  $t = 625$  млн.лет

ГП, белые карлики

Причина различий –  
возраст зв.системы



Шаровое скопление М5  
 $M = 8.6 \cdot 10^5 M_{\text{sun}}$ ,  $t = 10.6$  Gyr

ГП, красные гиганты,  
горизонтальная ветвь гигантов,  
белые карлики