

ЛЕКЦИЯ 6: СВОЙСТВА И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД РАЗНОЙ МАССЫ

ВВЕДЕНИЕ В АСТРОФИЗИКУ. ВШЭ 2022/2023. БАКАЛАВРЫ, 4-Й МОДУЛЬ.

АНТОН БИРЮКОВ (АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ МГУ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА И ВШЭ), К.Ф.-М.Н

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Спойлер: что нужно знать об эволюции звёзд?
2. Диаграмма Герцшпрунга-Рассела: зачем это нужно?
3. Свойства звёзд разных масс на главной последовательности ГР-диаграммы.
4. Эволюция звёзд разных масс (и как она выглядит на ГР-диаграмме)

СПОЙЛЕР

- Звёзды имеют разную массу («рабочий диапазон» ~ 0.5 до $20 - 30M_{\odot}$) и разный химсостав (доля элементов тяжелее гелия от $\sim 10^{-3}$ до ~ 5 в солнечных единицах);
- Звёзды с M до $\sim 10M_{\odot}$ -- это «маломассивные» звёзды, а более тяжелые – «массивные».
- Массивные звёзды – яркие и горячие (L до $\sim 10^5 L_{\odot}$, $T \sim 10^4$ К), а маломассивные – тусклые и холодные ($L > 10^{-3} L_{\odot}$, $T \sim 10^3$ К);
- Массивные звёзды живут миллионы лет, а маломассивные – миллиарды;
- Массивные звёзды ($M > 10 - 12M_{\odot}$) скорее закончат свою жизнь как нейтронная звезда или чёрная дыра, а маломассивные – как белый карлик.
- В массивных звёздах образуются элементы до железа, а в маломассивных – до магния.

ИОСИФ ШКЛОВСКИЙ: ЖИЗНЬ ЗВЕЗДЫ

«... история существования любой звезды — это поистине титаническая борьба между силой гравитации, стремящейся ее неограниченно сжать, и силой газового давления, стремящейся ее «распылить»... но в конце концов, как мы увидим дальше, победа будет за гравитацией. Такова драма эволюции любой звезды....»



★ ★ ★

НА ДАЛЕКОЙ ПЛАНЕТЕ ВЕНЕРЕ

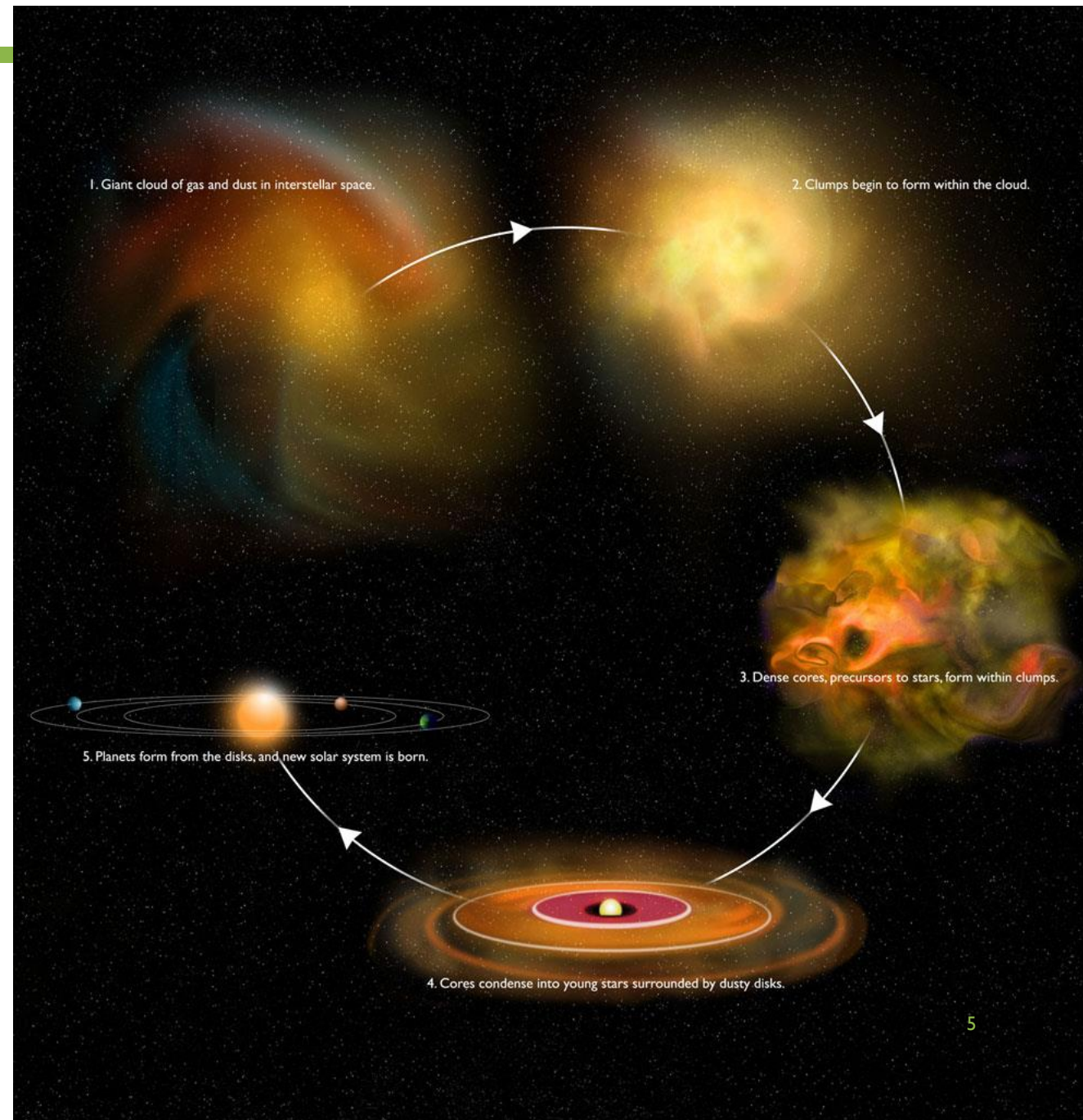
<p>На далекой планете Венере Солнце пламенней и золотистей. На Венере, ах, на Венере У деревьев синие листья...</p> <p>Эти стихи написаны сорок лет назад русским поэтом Гумилевым. Синие листья Гумилева — это поэти- ческая метафора. Он был прекрасным поэтом, но не мог предвидеть появ- ления новой науки — астроботаники. Согласно основоположнику этой нау- ки Г. А. Тихову, «синие листья» долж-</p>	<p>Что же произо- Профессор И. ШКЛОВСКИЙ шло в науке?</p> <p>Как хорошо всем известно, Венера покрыта густым слоем облаков. Пе- лена облаков там настолько плотная, что поверхность планеты совершенно под ней не видна. По этой причине астрономы почти ничего не знали о физических условиях, господствующих на поверхности Венеры. Неиз- вестен и до сих пор даже период ее вращения вокруг сво-</p>	<p>Всякое нагретое тело, как извест- но, излучает широкий спектр элек- тромагнитных волн, в том числе и радиоволны. Поэтому, зная поток ра- диоизлучения от Венеры, а также расстояние до нее и размеры плане- ты, можно по известным простым формулам физики определить темпе- ратуру излучающей поверхности. Ре- зультаты оказались поразительными. По наблюдениям на волнах 3 и 10</p>	<p>и речи о том, что на поверхности планеты есть моря.</p> <p>Какой же мрачный это мир! Рас- каленные скалы, полное отсутствие водоемов, углекислая плотная атмо- сфера и пелена облаков, закрываю- щая все небо. Сквозь нее не видно ни солнца, ни звезд, что и говорить— картина совсем не такая радостная, как она рисовалась поэту, чьими сти- хами мы начали эту статью.</p> <p>Как непохожи эти две соседние</p>
--	--	---	--

ФОРМИРОВАНИЕ ЗВЕЗДЫ

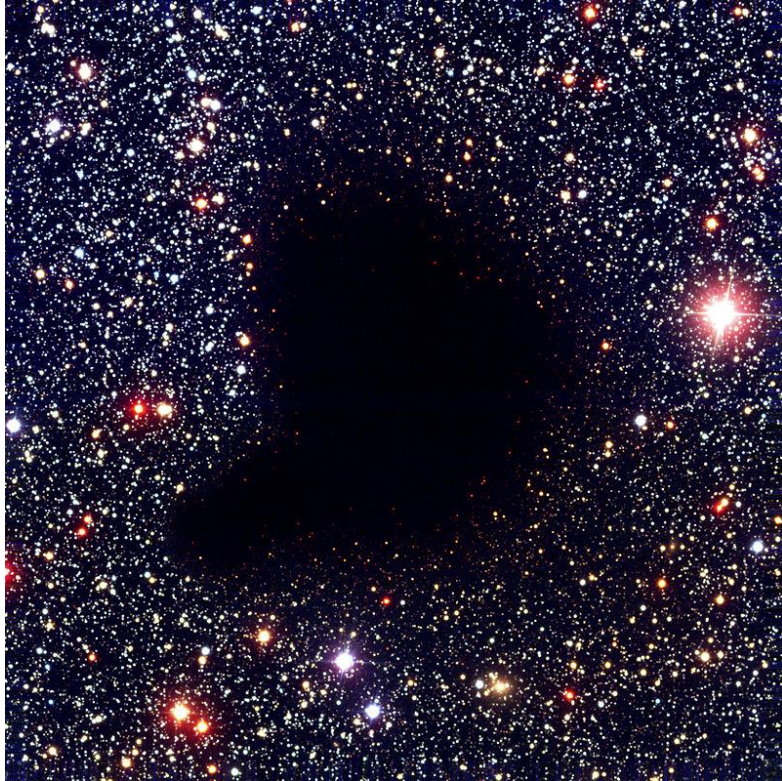
- Звёздообразование запускается при достижении облаком джинсовской массы:

$$M_J \propto T^{3/2} \rho^{-1/2}$$

- По ходу сжатия возможна (и скорее наступает) фрагментация облака из-за повышения плотности.
- Условие возможности фрагментации: показатель адиабаты $\gamma < 4/3$



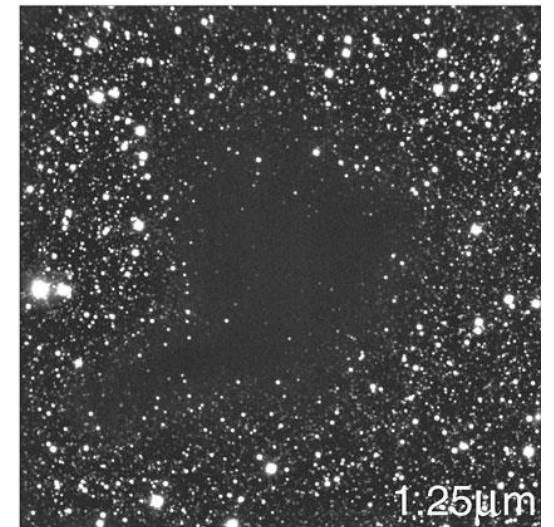
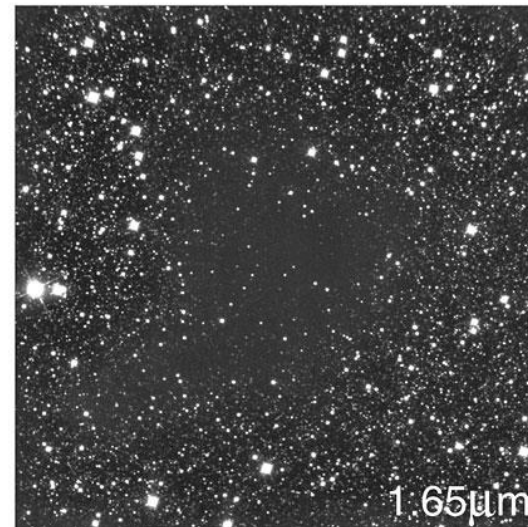
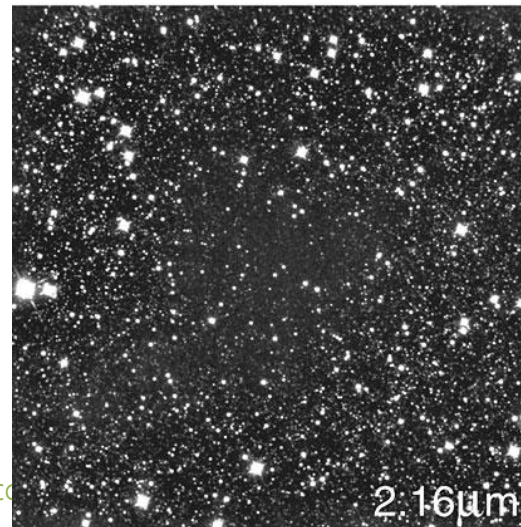
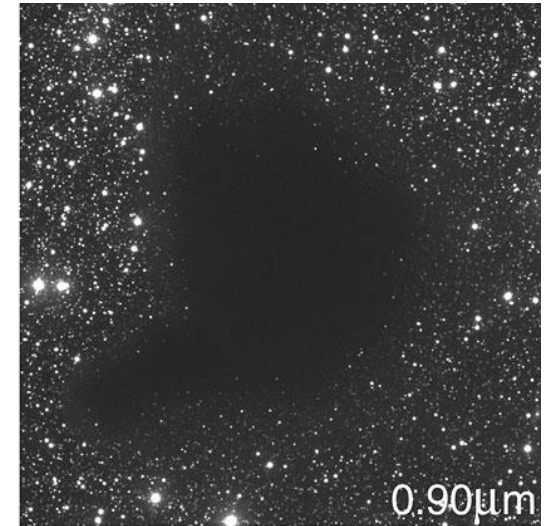
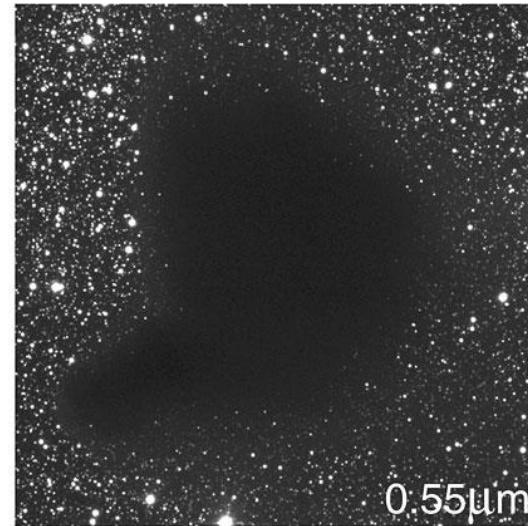
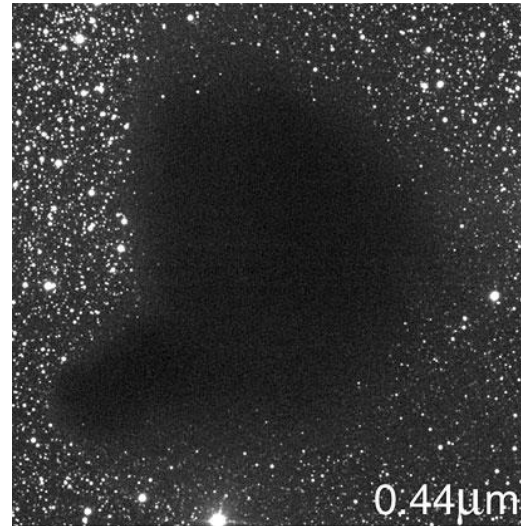
ГЛОБУЛЫ



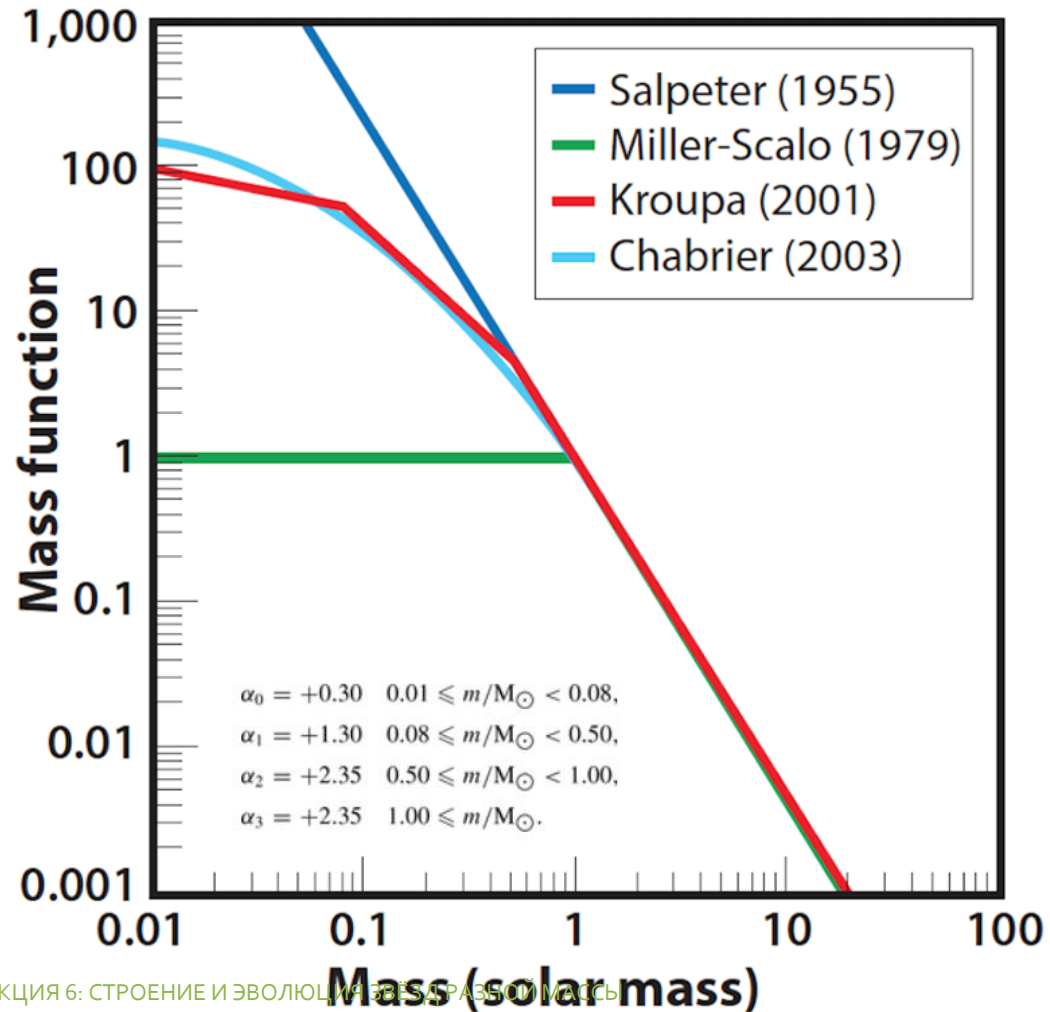
	Globule	Dense Core
Mass	5 - 50 M_{\odot}	0.5 - 5 M_{\odot}
Size	0.2 - 1 pc	0.02 - 0.05 pc
Mean density	10^3 cm^{-3}	10^7 cm^{-3}
Gas temperature	15 K	10 K
Line widths	0.5 - 2 km s^{-1}	0.4 - 0.7 km s^{-1}

БАРНАРД 68 И ПОГЛОЩЕНИЕ

Межзвёздная среда
более прозрачна в
ИК+ диапазоне.



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗВЁЗД ПО НАЧАЛЬНЫМ МАССАМ



Функция масс Солпитера (Salpeter, 1955):

$$\xi(M) = \xi_0 M^{-2.35}$$

$$N(M_1 \dots M_2) = \xi_0 \int_{M_1}^{M_2} M^{-2.35} dM$$

$$M_{\min} \approx 0.08 M_\odot$$

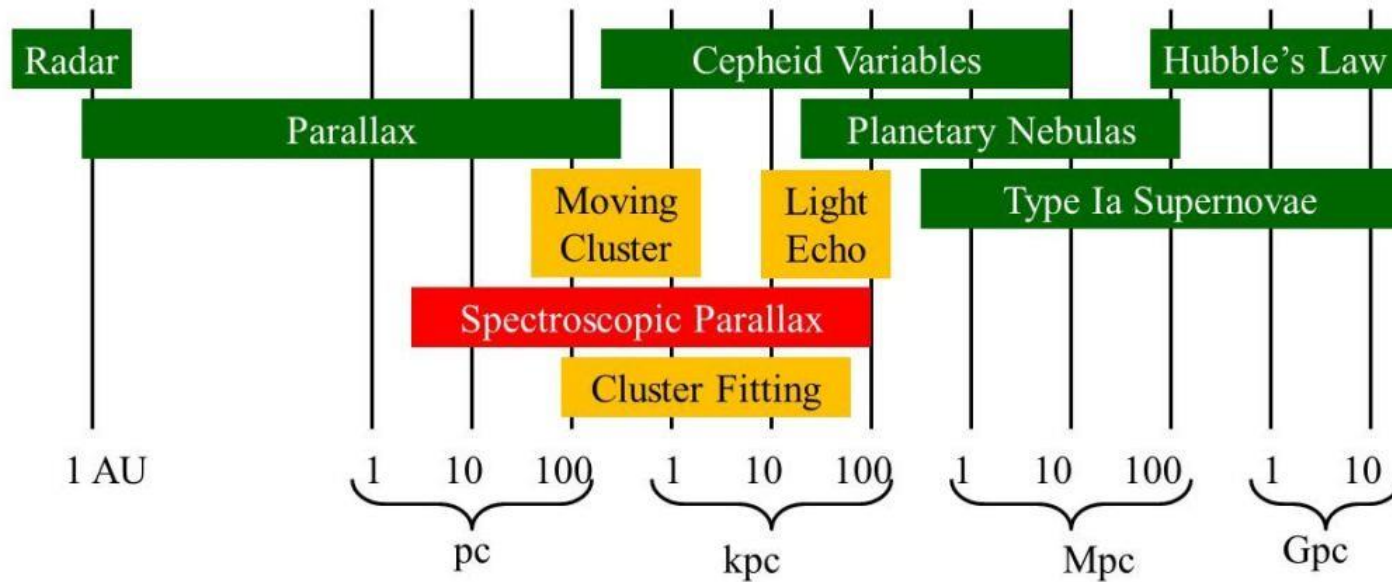
(возможность устойчивого pp-цикла)

$$M_{\max} \approx 150 M_\odot$$

(Эддингтоновский предел в нашу эпоху.
В ранней вселенной вполне могли быть звёзды с
 $M \sim 5 \cdot 10^4 M_\odot$).

РАССТОЯНИЯ ДО ЗВЁЗД

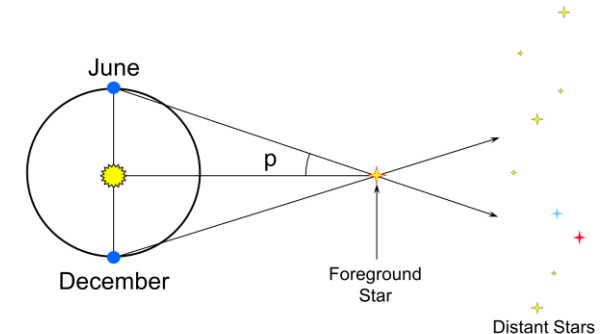
The Cosmic Distance Ladder:



$$L_{\text{iso,bol}} = F_{\text{bol}} \cdot 4\pi D^2 \text{ -- болометрическая светимость звезды.}$$



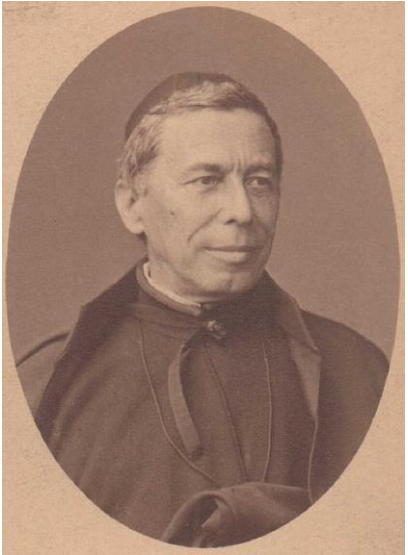
Method of Trigonometric Parallaxes



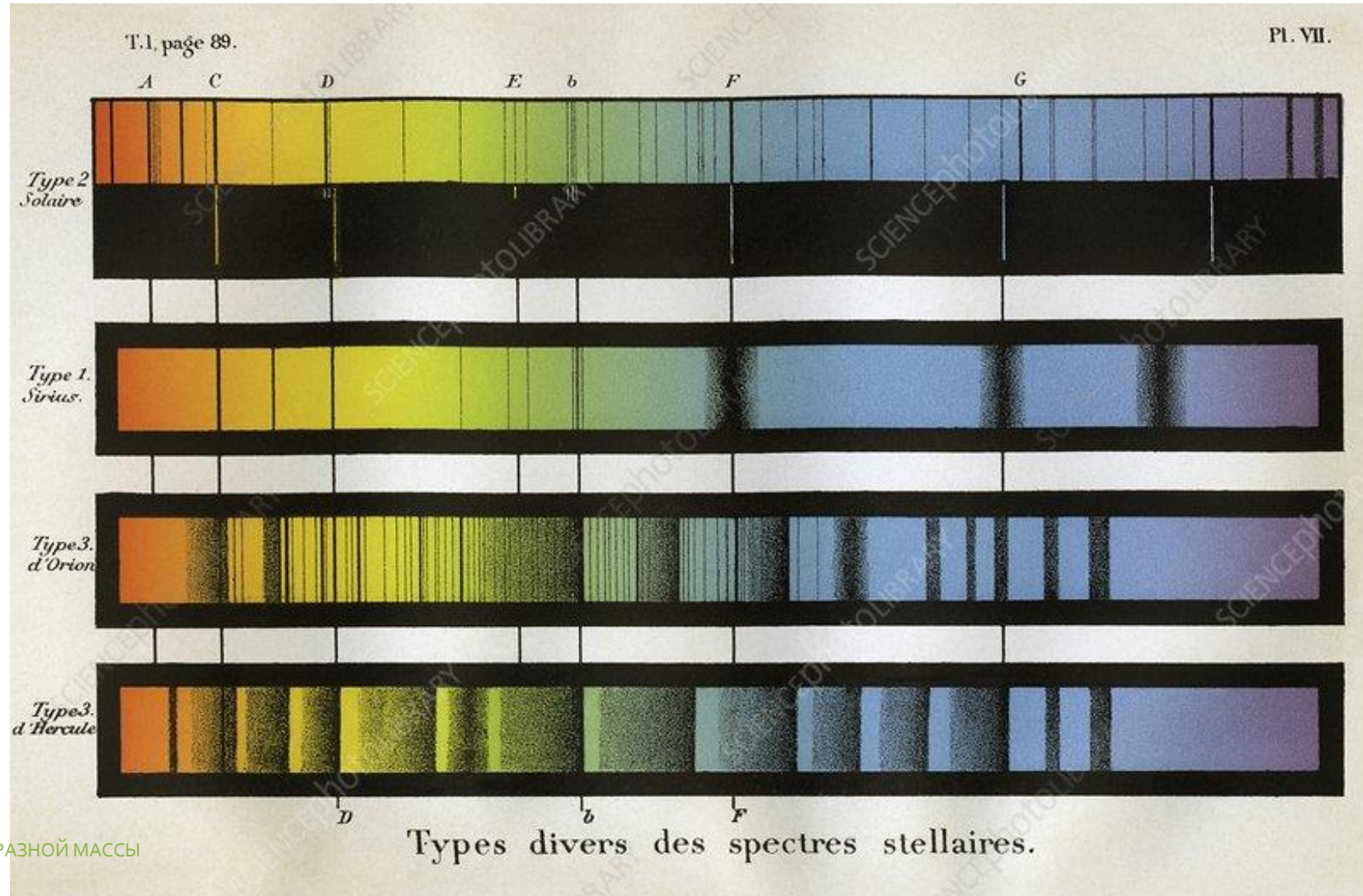
$$1 \text{ пк} \approx 206265 \text{ а. е.} \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ см}$$

$$p'' = 1/(D [\text{пк}])$$

СПЕКТРЫ ЗВЁЗД



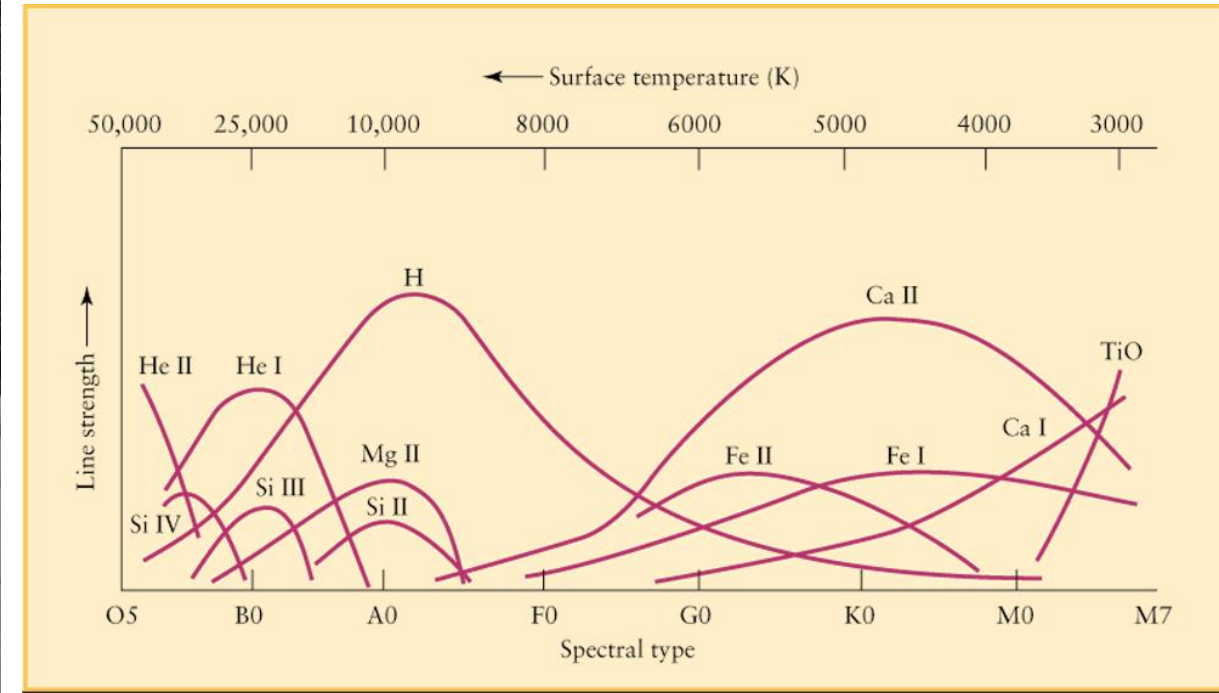
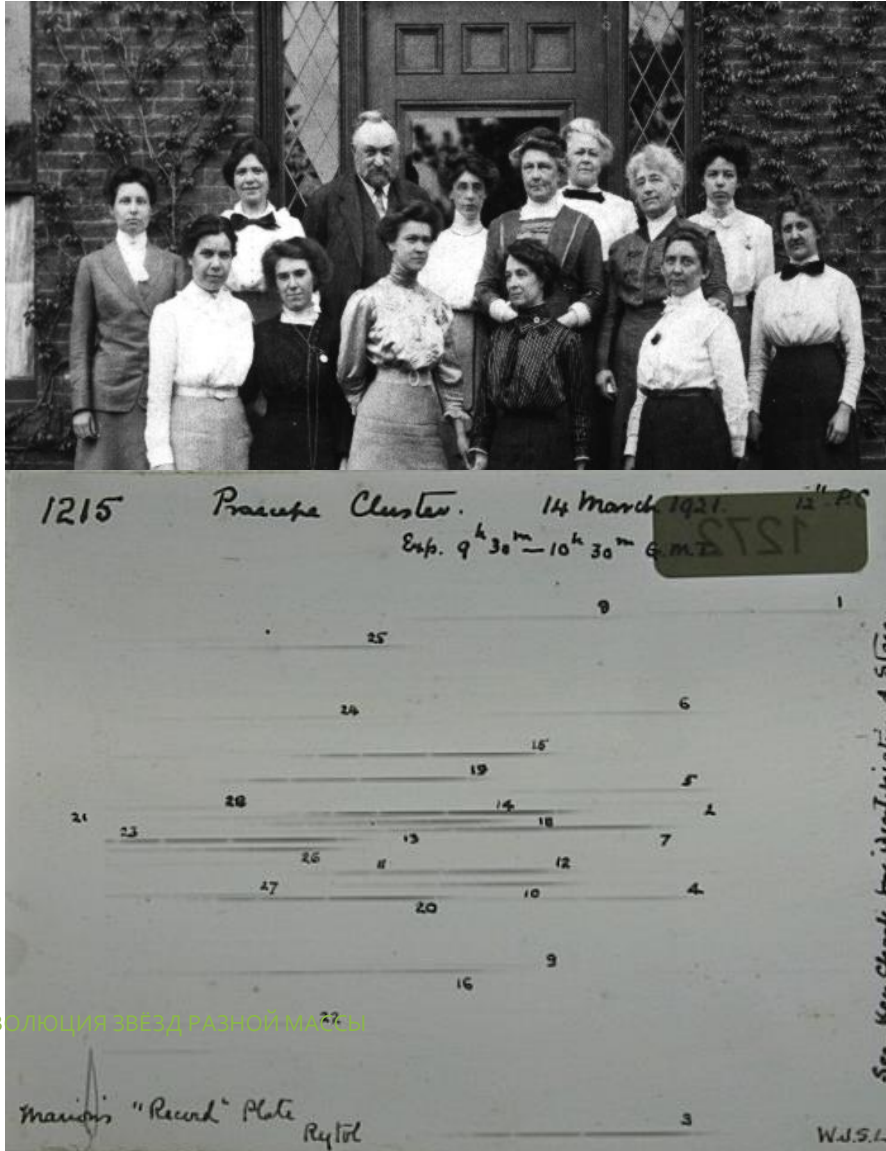
Анджело Секки
(1818 – 1878)



ГАРВАРДСКАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ



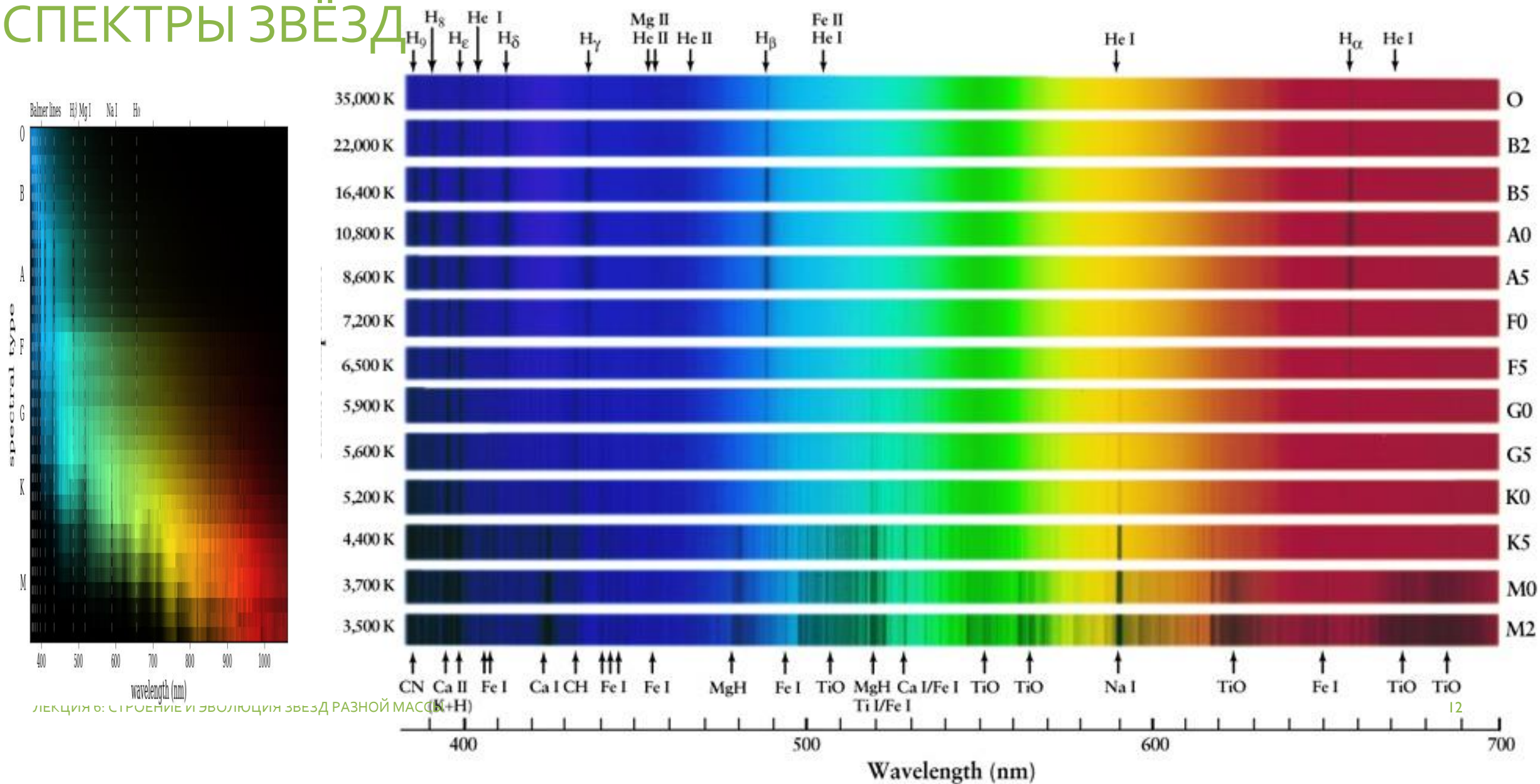
Вильямина
Флеминг
(1857 – 1911)



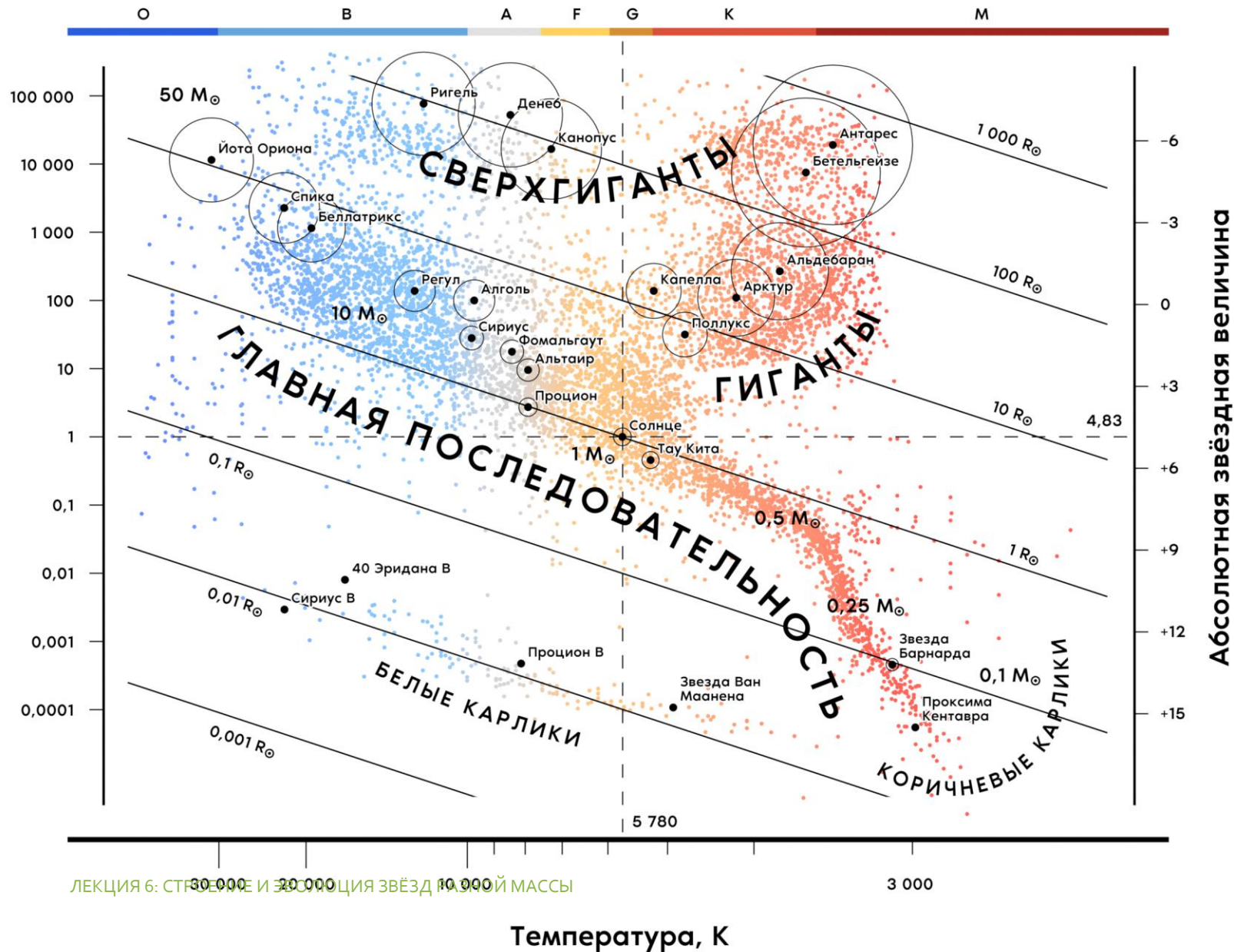
Спектральные классы делятся на подклассы (A0, A1, A2...A9).

Солнце – звезда класса G2V.
V = “5-й класс светимости”

СПЕКТРЫ ЗВЁЗД



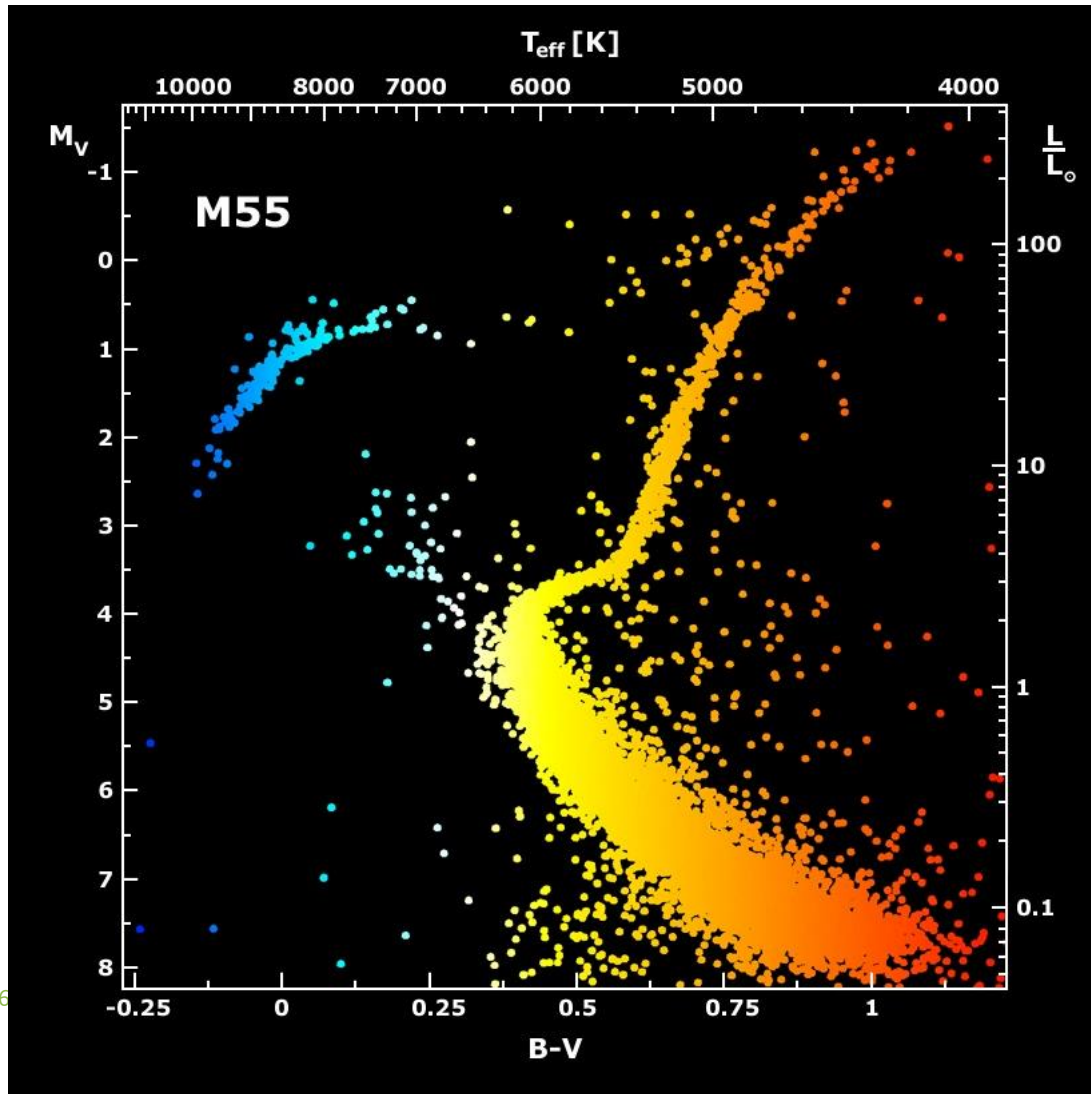
Спектральный класс



ЛЕКЦИЯ 6: СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД РАЗНОЙ МАССЫ

- Температуры определяются по спектрам.
- Для определения светимости необходимо знать расстояние (в идеале – по параллаксу), а также учесть межзвездное поглощение.
- Самые легкие звезды имеют массу 0.08 солнечных.
- Самые тяжелые из образующихся в нашу эпоху: около 100+ солнечных.
- С ростом массы резко растет светимость.
- Время жизни тем больше, чем меньше масса звезды.

ДИАГРАММА ГЕРЦШПРУНГА-РАССЕЛА ДЛЯ СКОПЛЕНИЯ



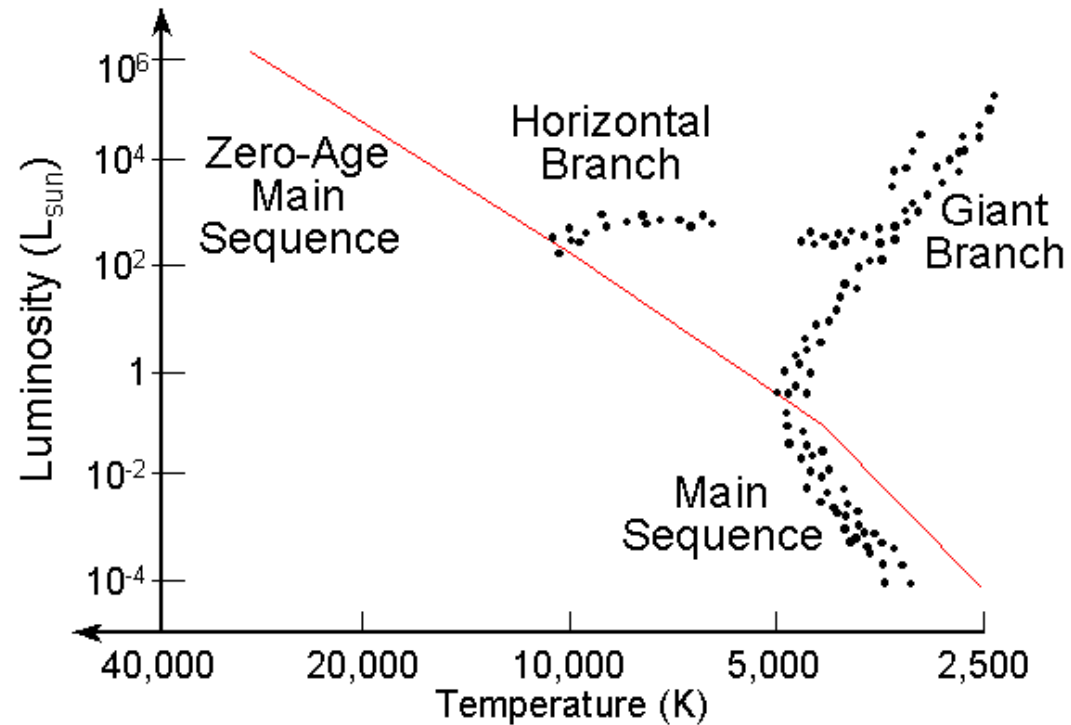
Все звёзды скопления имеют примерно один возраст.



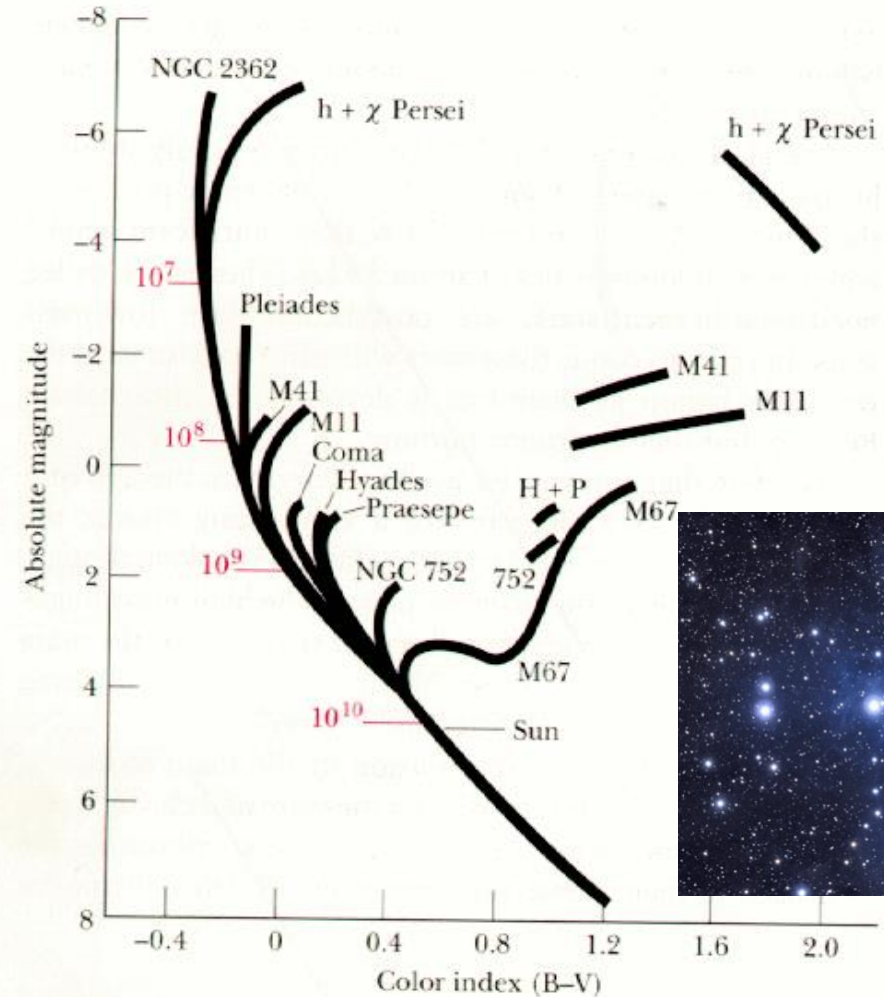
$$L_{\odot} = 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт} = 4 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}$$

ДИАГРАММА ГЕРЦШПРУНГА-РАССЕЛА ДЛЯ СКОПЛЕНИЯ

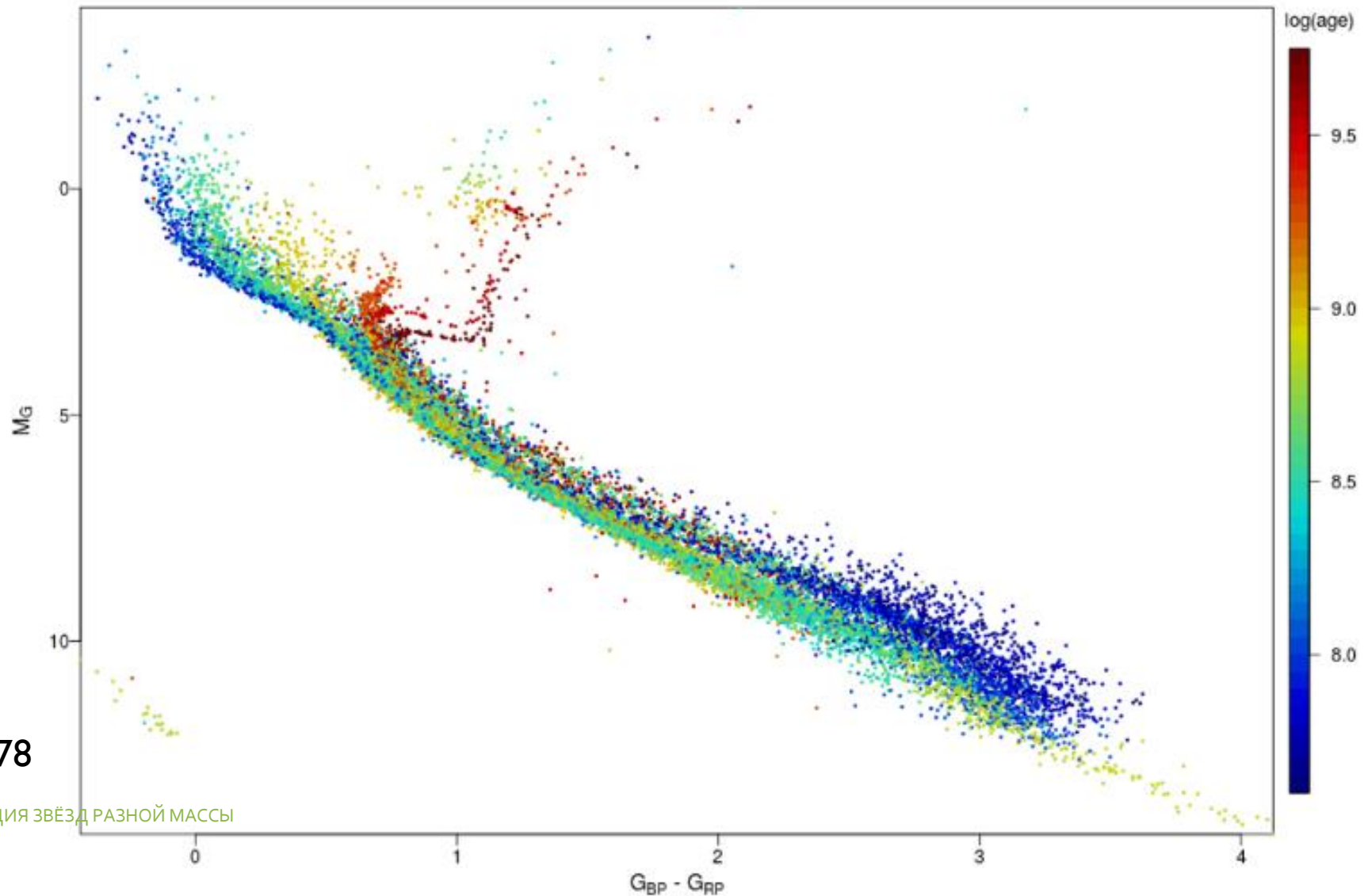
Typical Globular Cluster H-R Diagram



ГР-диаграммы для рассеянных скоплений



GAIA: ГР-ДИАГРАММА ДЛЯ РАССЕЯННЫХ СКОПЛЕНИЙ



arXiv:1804.09378

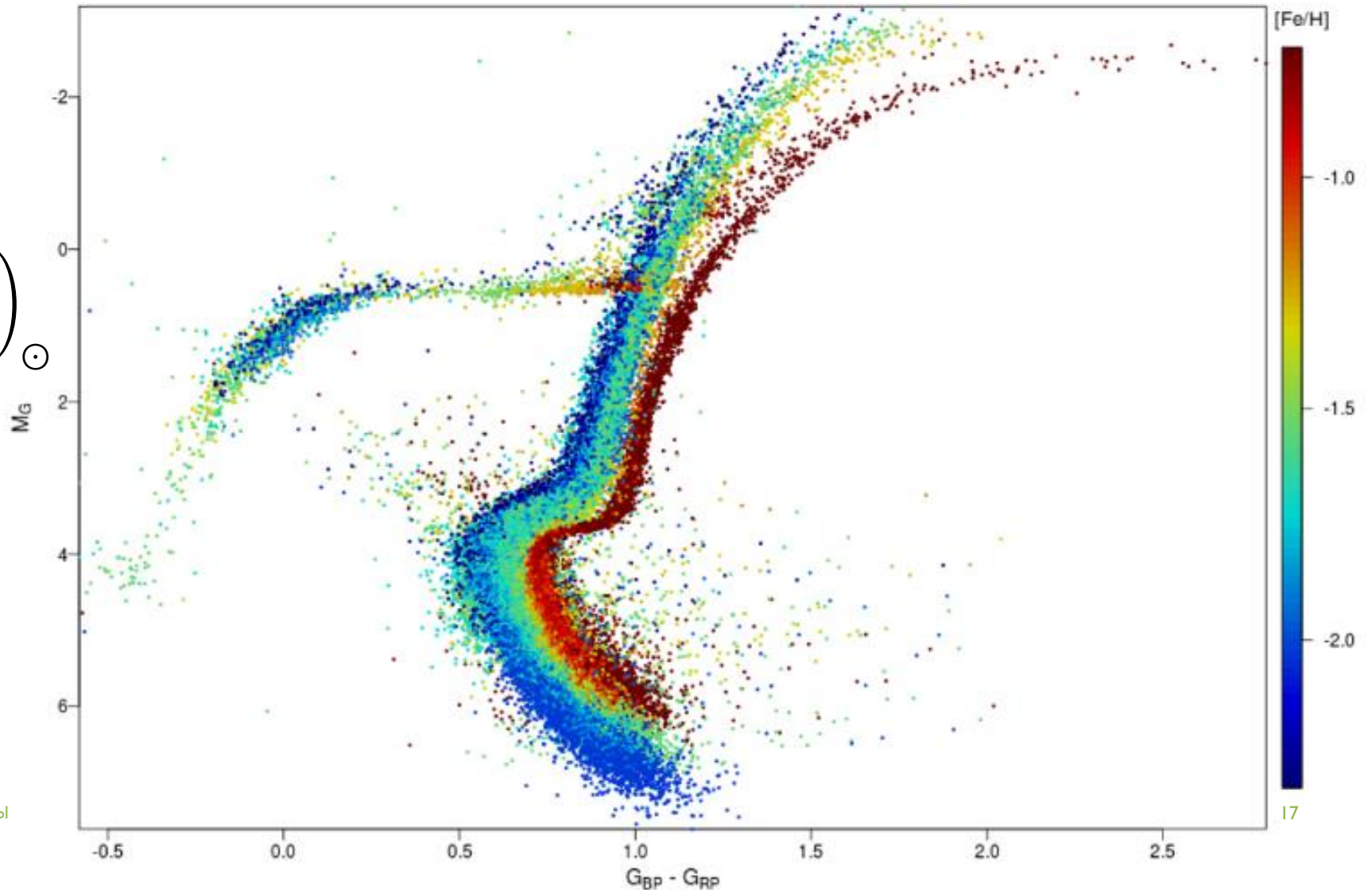
GAIA: ГР-ДИАГРАММА ДЛЯ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ

Металличность:

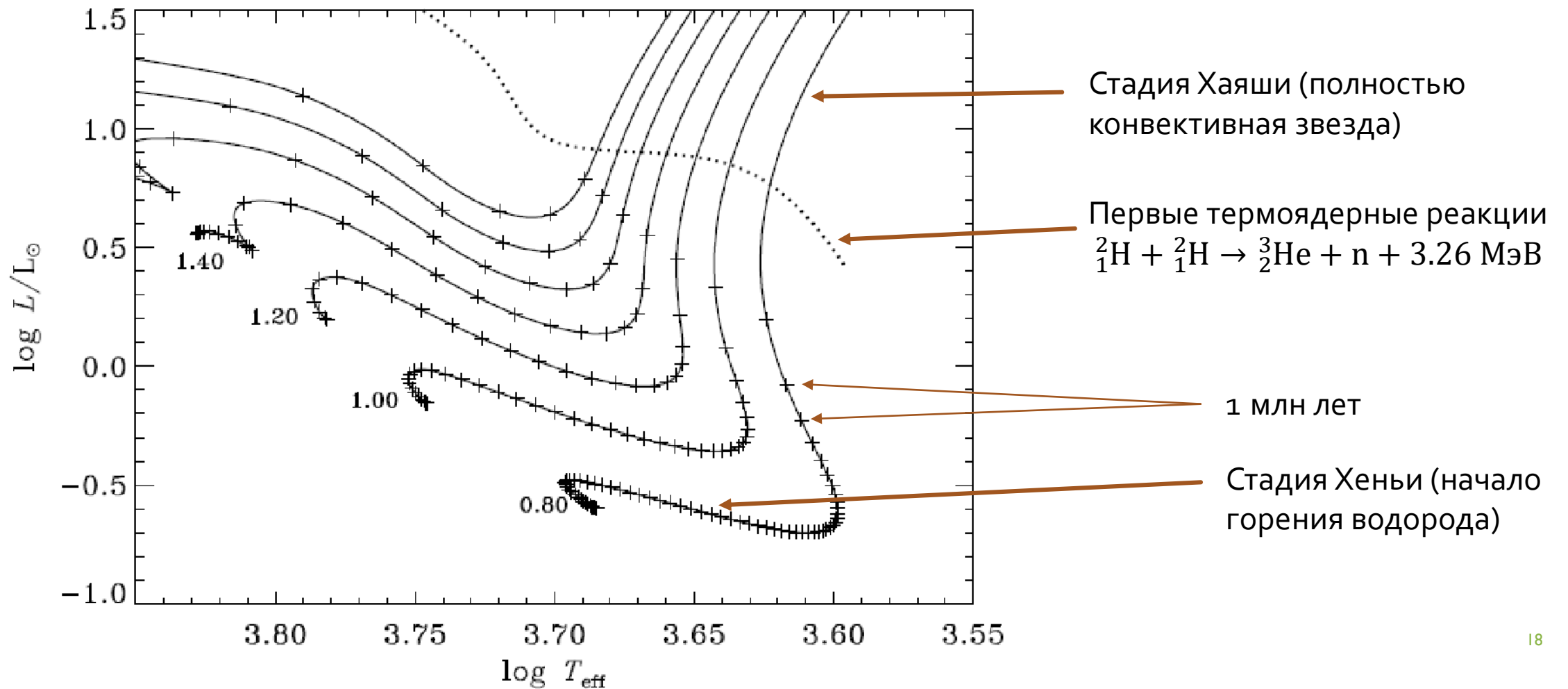
$$\left[\frac{\text{Fe}}{\text{H}}\right] = \log_{10} \left(\frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right) - \log_{10} \left(\frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\odot}$$

arXiv:1804.09378

ЛЕКЦИЯ 6: СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД РАЗНОЙ МАССЫ



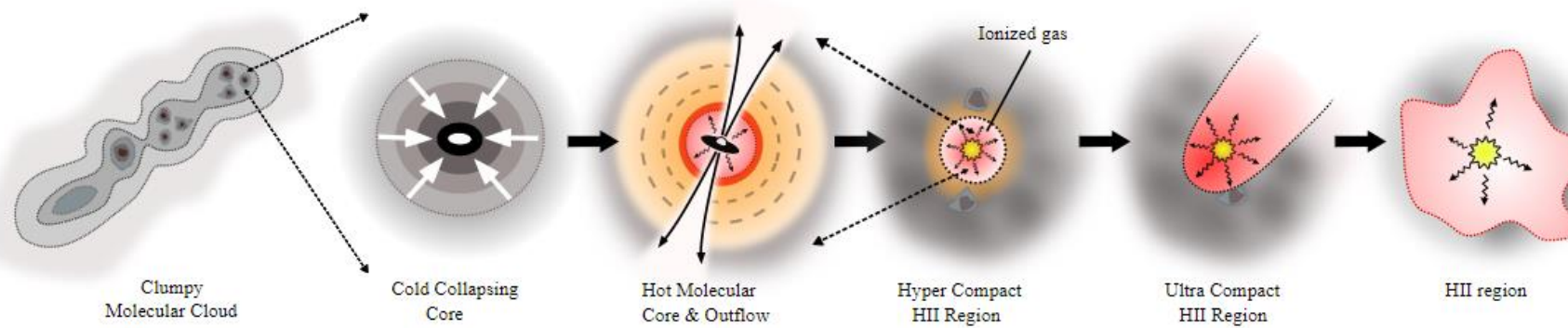
ЭВОЛЮЦИЯ ДО ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ



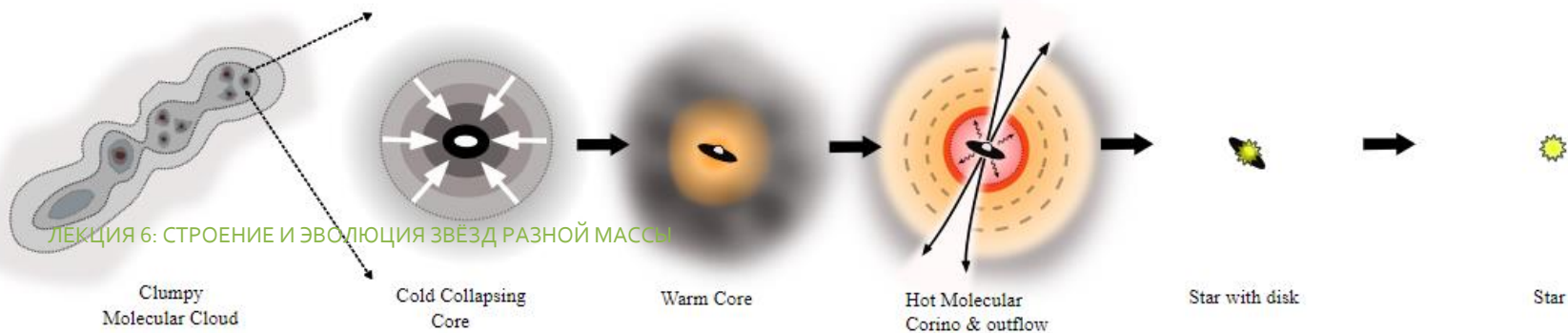
ПРОТОЗВЕЗДА И ЕЁ ОКРЕСТНОСТИ

Main difference: massive stars affect their surroundings

High-mass SF



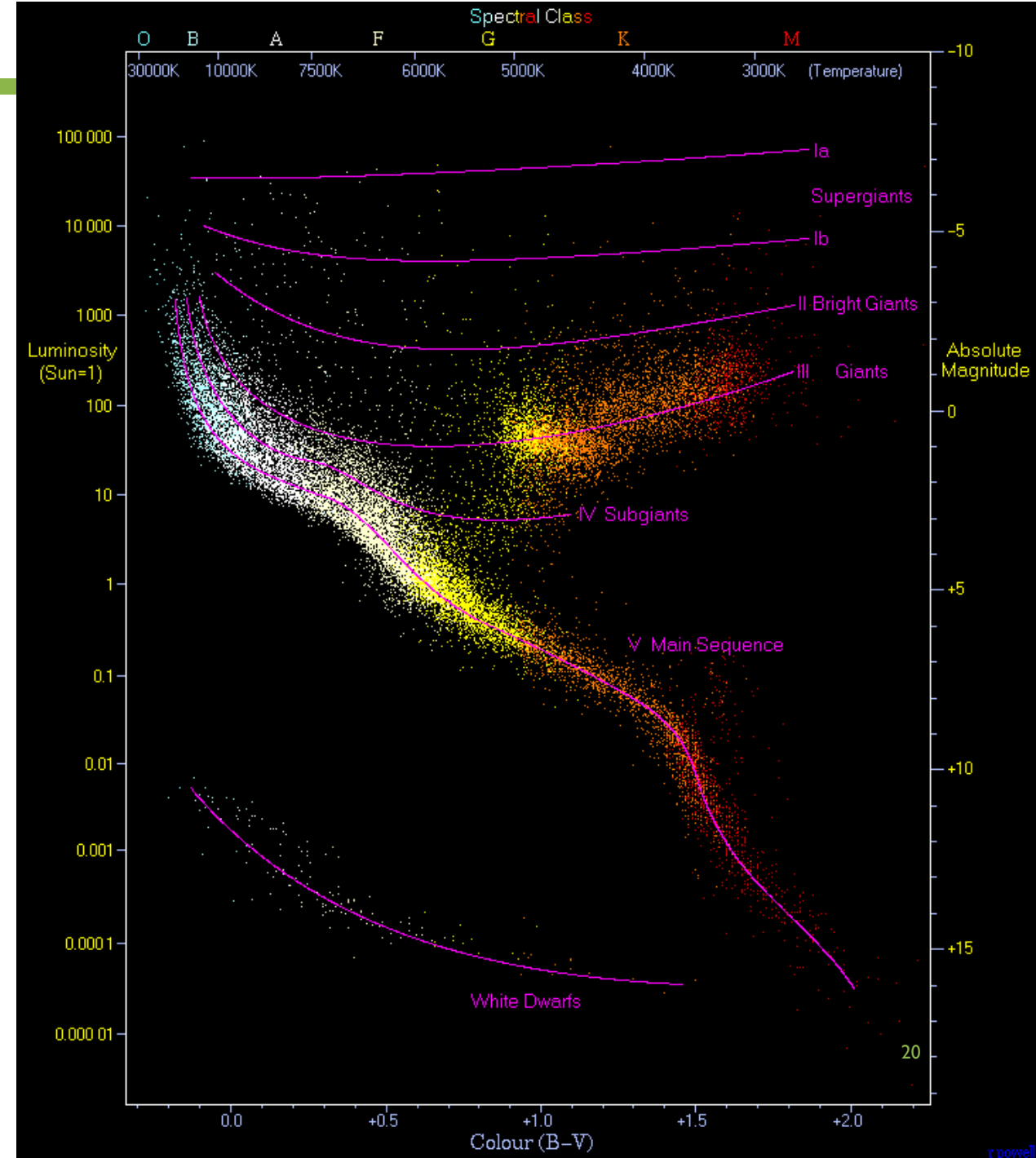
Low-mass SF



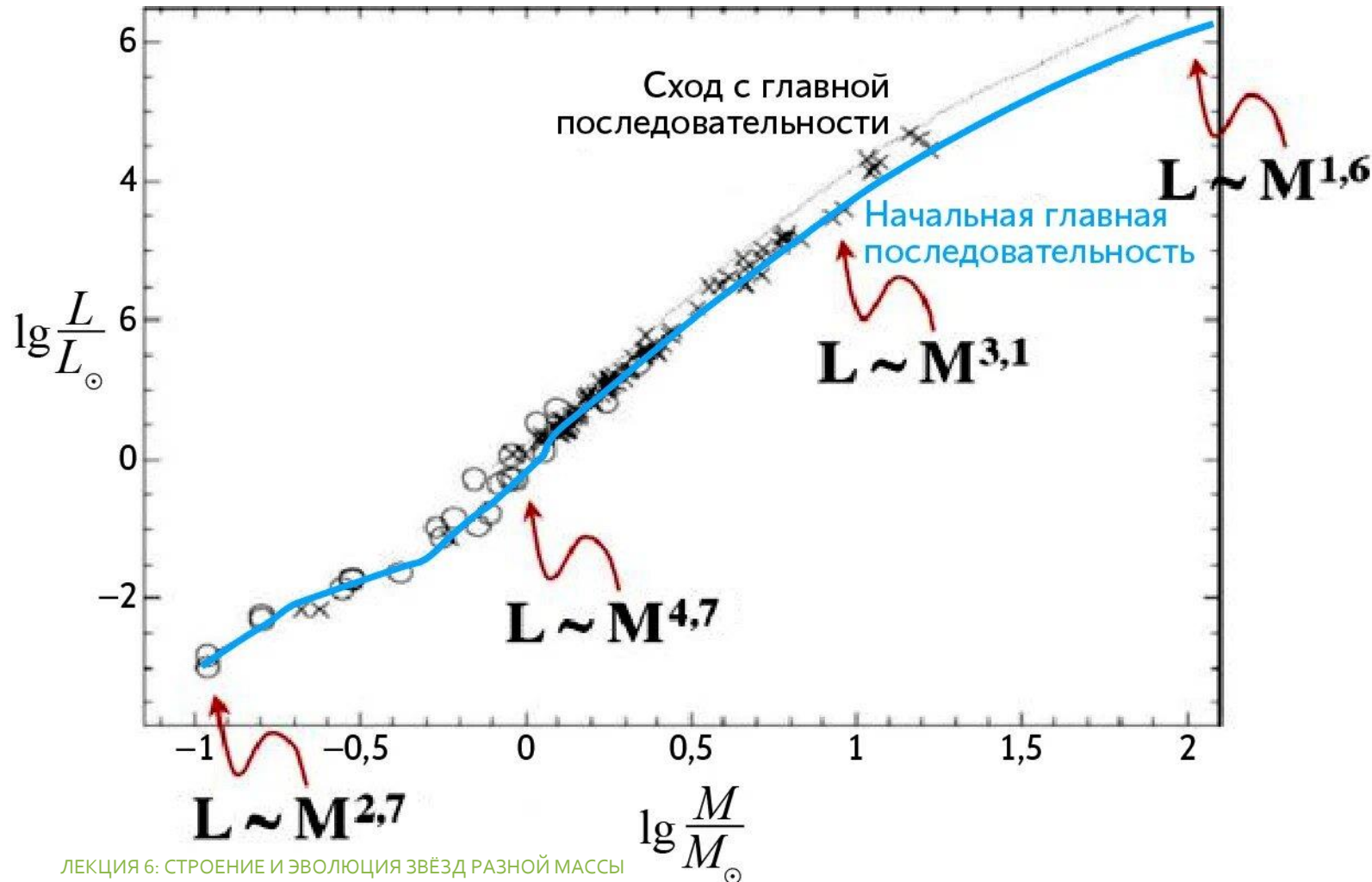
ZAMS

- ZAMS = Zero Age Main Sequence (главная последовательность нулевого возраста)
- На ГР-диаграмме выделяют классы светимости (отдельные последовательности) звёзд:

I(a,b) – сверхгиганты
II – яркие гиганты
III – гиганты
IV – субгиганты
V – карлики (Солнце)
VI – субкарлики
VII – белые карлики



СООТНОШЕНИЕ МАССА-СВЕТИМОСТЬ



- В маломассивных звёздах преобладает газовое давление ($P_g \propto T$) и поэтому

$$L_{\text{low-m}} \propto M^{3...4}$$

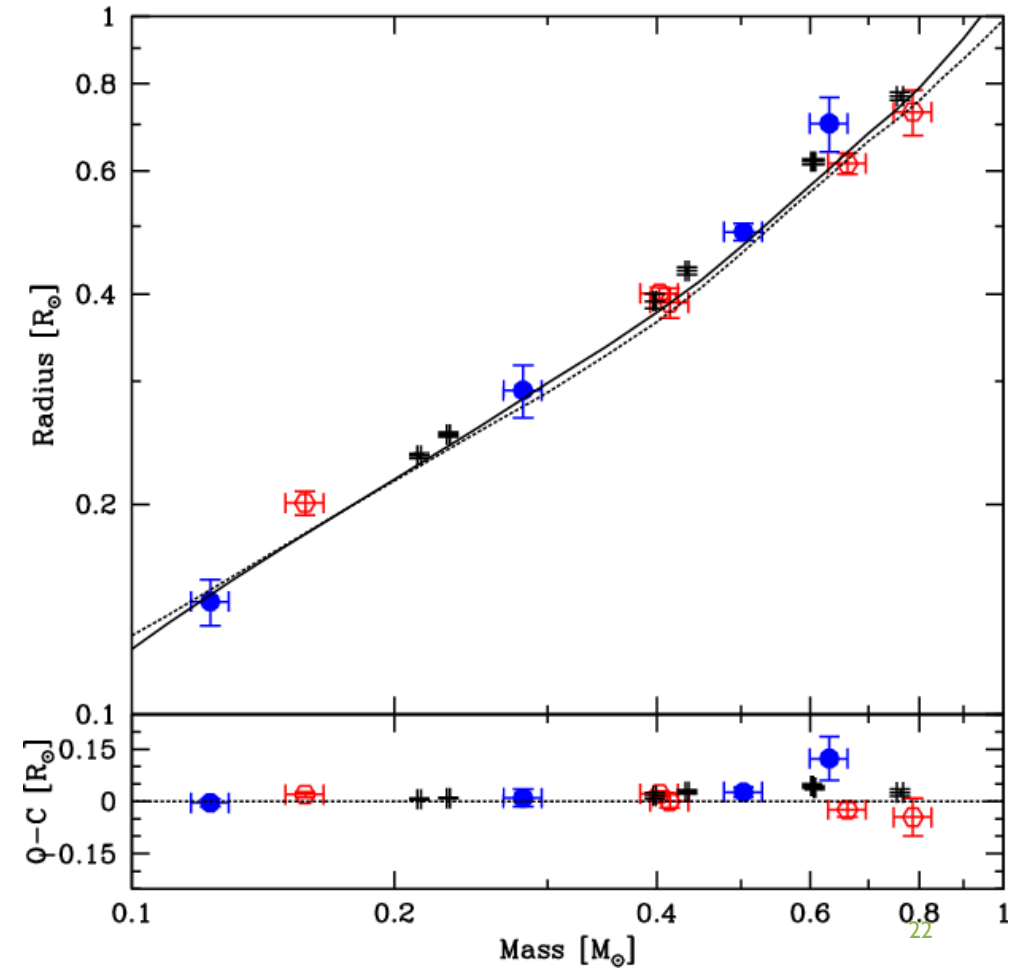
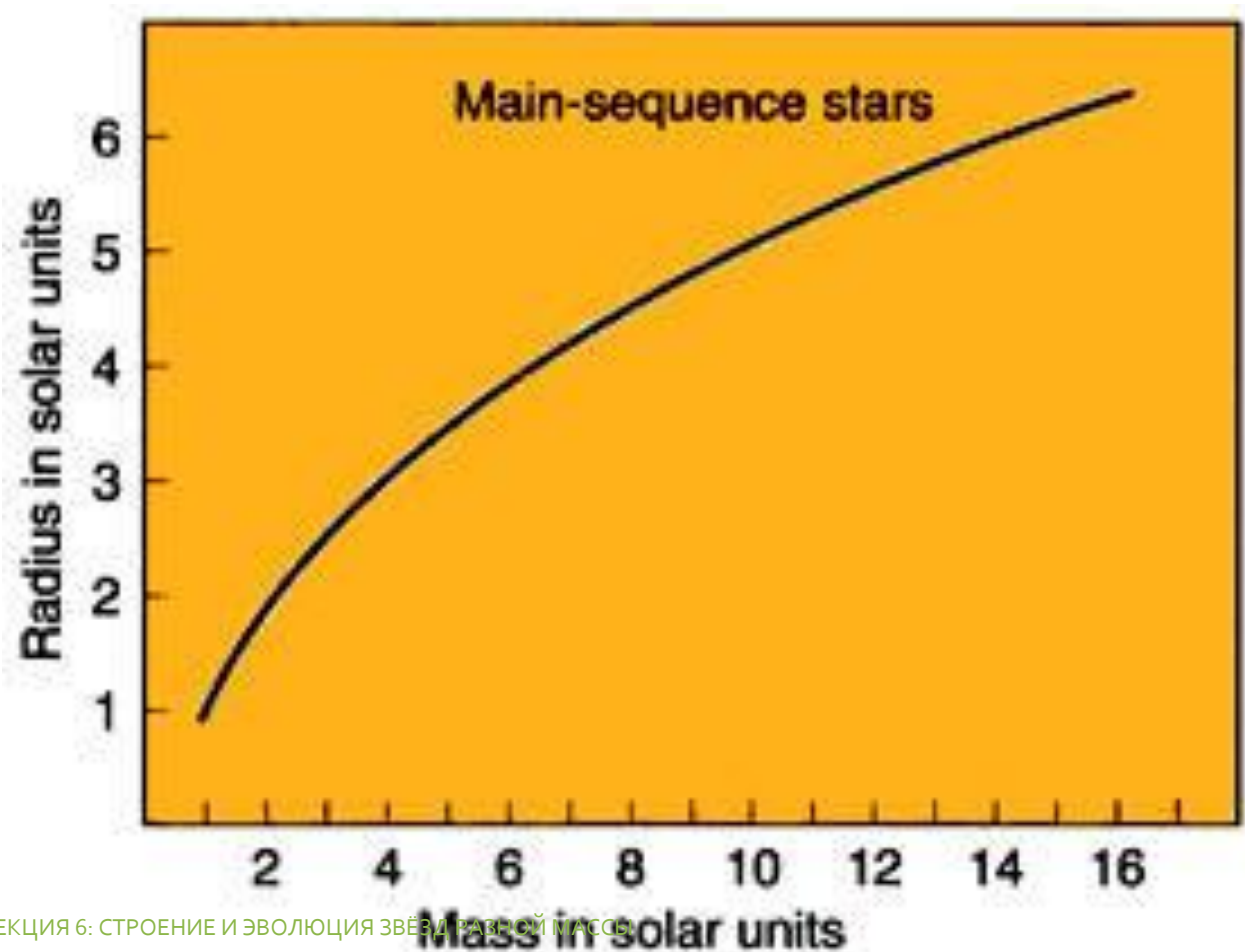
- В массивных звёздах существенно в том числе и давление излучения ($P_r \propto T^4$), поэтому

$$L_{\text{high-m}} \propto M^{1...2}$$

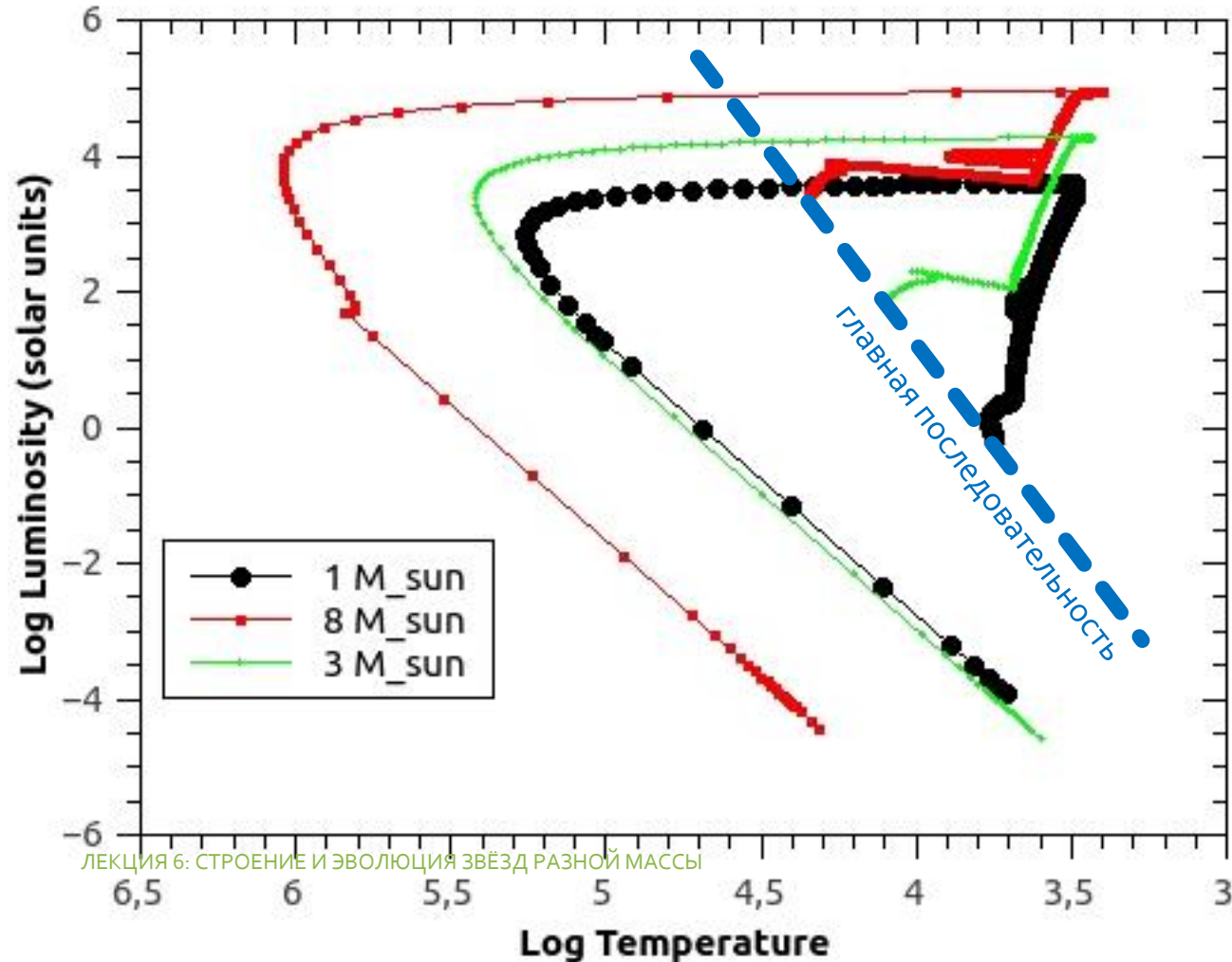
СОТНОШЕНИЕ МАССА-РАДИУС

$$L \propto \varepsilon M \propto \rho T^\alpha M$$

$$M^3 \propto \frac{M}{R^3} \left(\frac{M}{R} \right)^\alpha \Rightarrow R \propto M^{\frac{\alpha-1}{\alpha+3}}$$



ДОЛГАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД МАЛОЙ МАССЫ



- Расчеты проведены с помощью программы SSE (Single Star Evolution).

<http://astronomy.swin.edu.au/~jhurley/stellar.html>

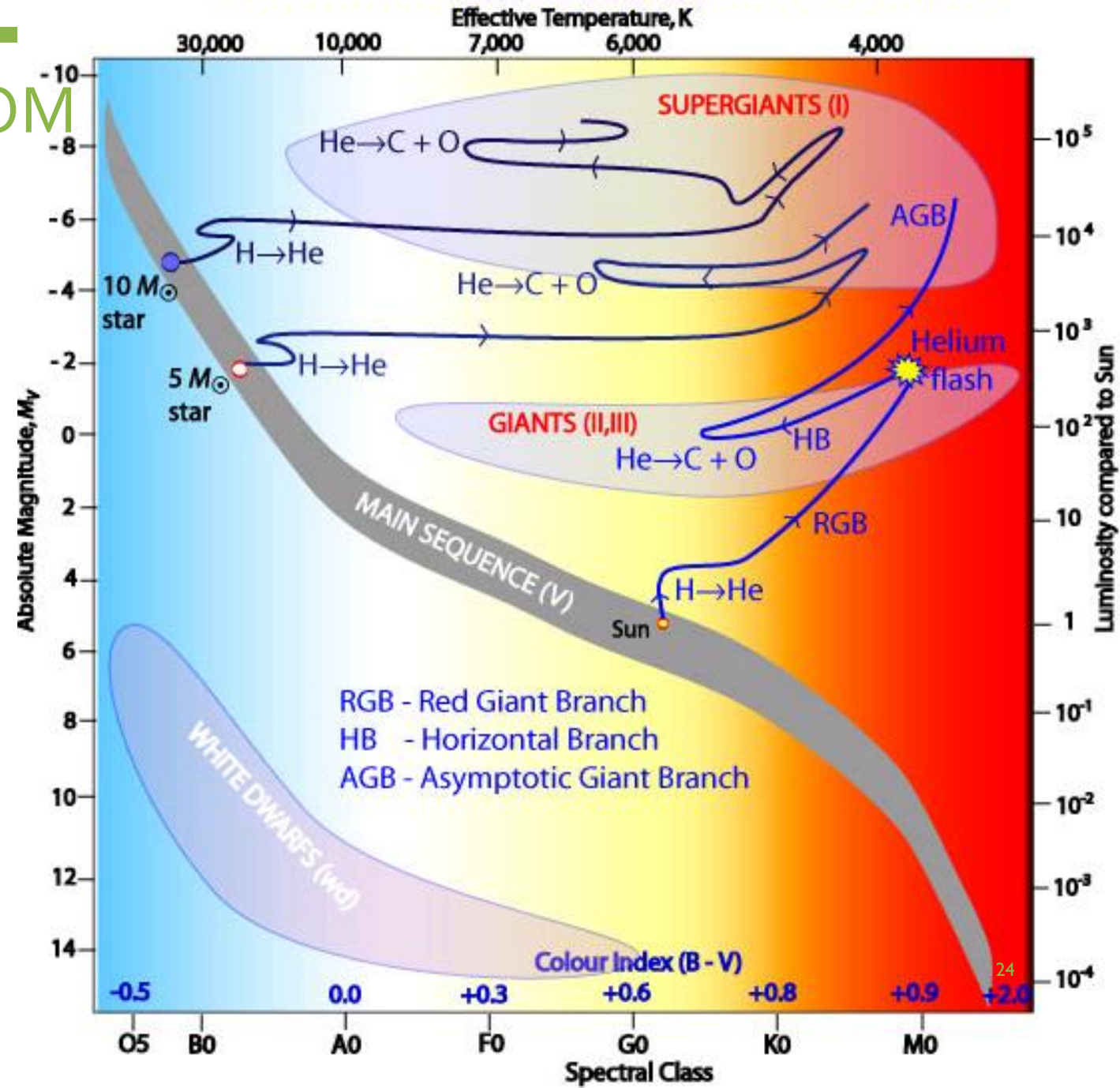
- Наиболее употребимый на сегодня код MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics)

<http://www.astro.wisc.edu/~townsend/static.php?ref=mesa-web>

ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД В ЦЕЛОМ

- За свою жизнь звезда переживает несколько эпох «главной последовательности», во время которых в ядре горят разные элементы.
- Чем тяжелее ядра атомов, тем быстрее такой элемент сгорает.
- Горение более тяжелого элемента сопровождается БОЛЬШИМ энерговыделением.

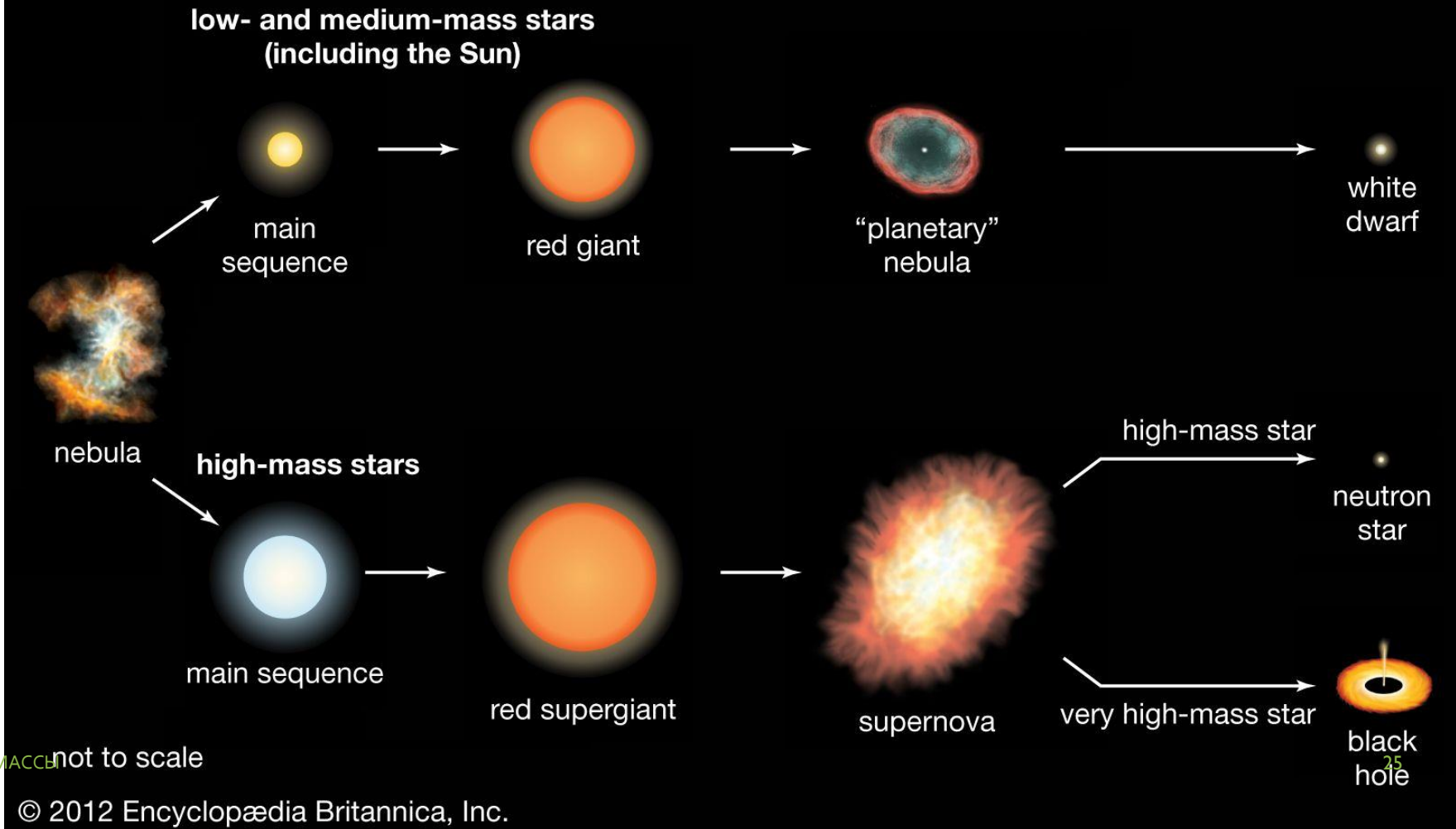
Evolutionary Tracks off the Main Sequence



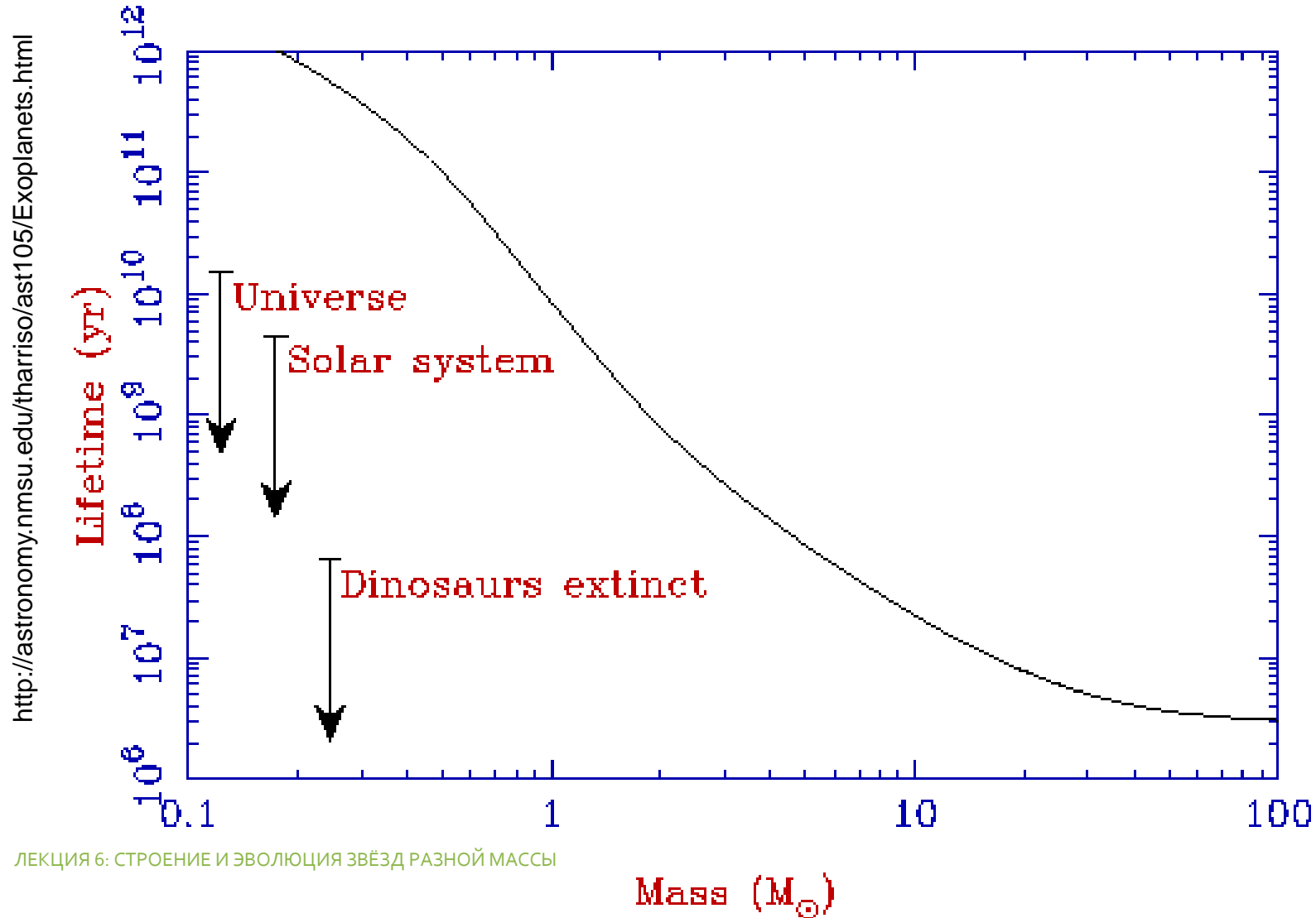
МАССА – ПЕРВЫЙ ГЛАВНЫЙ ПАРАМЕТР

- Чем массивнее звезда – тем больше она излучает и меньше живет.
- Массивные звезды в конце жизни взрываются, а их ядра становятся нейтронными звездами или черными дырами.
- Маломассивные звезды сбрасывают оболочки, и их ядра становятся белыми карликами.

Stellar evolution



ВРЕМЯ ЖИЗНИ ЗВЕЗДЫ НА ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

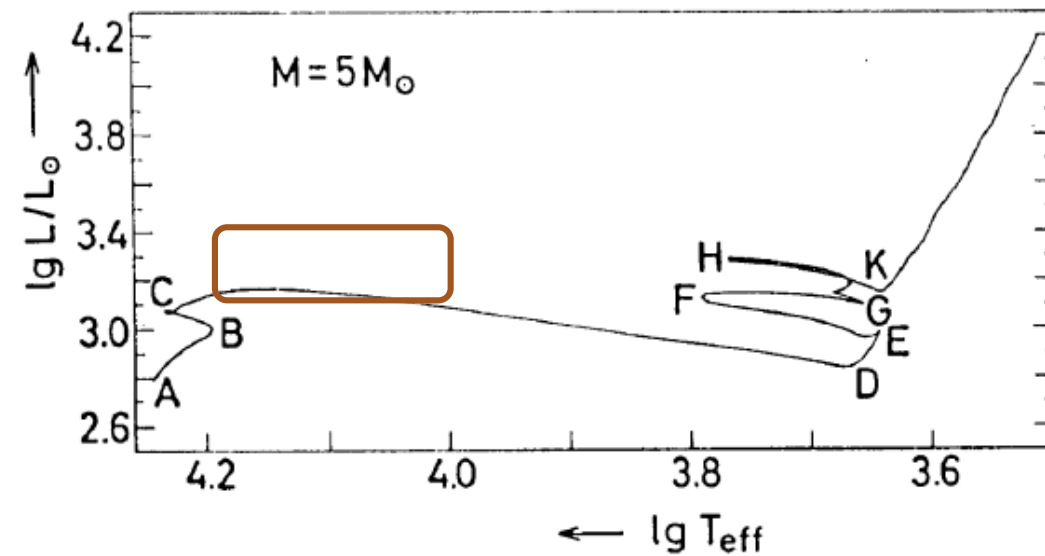
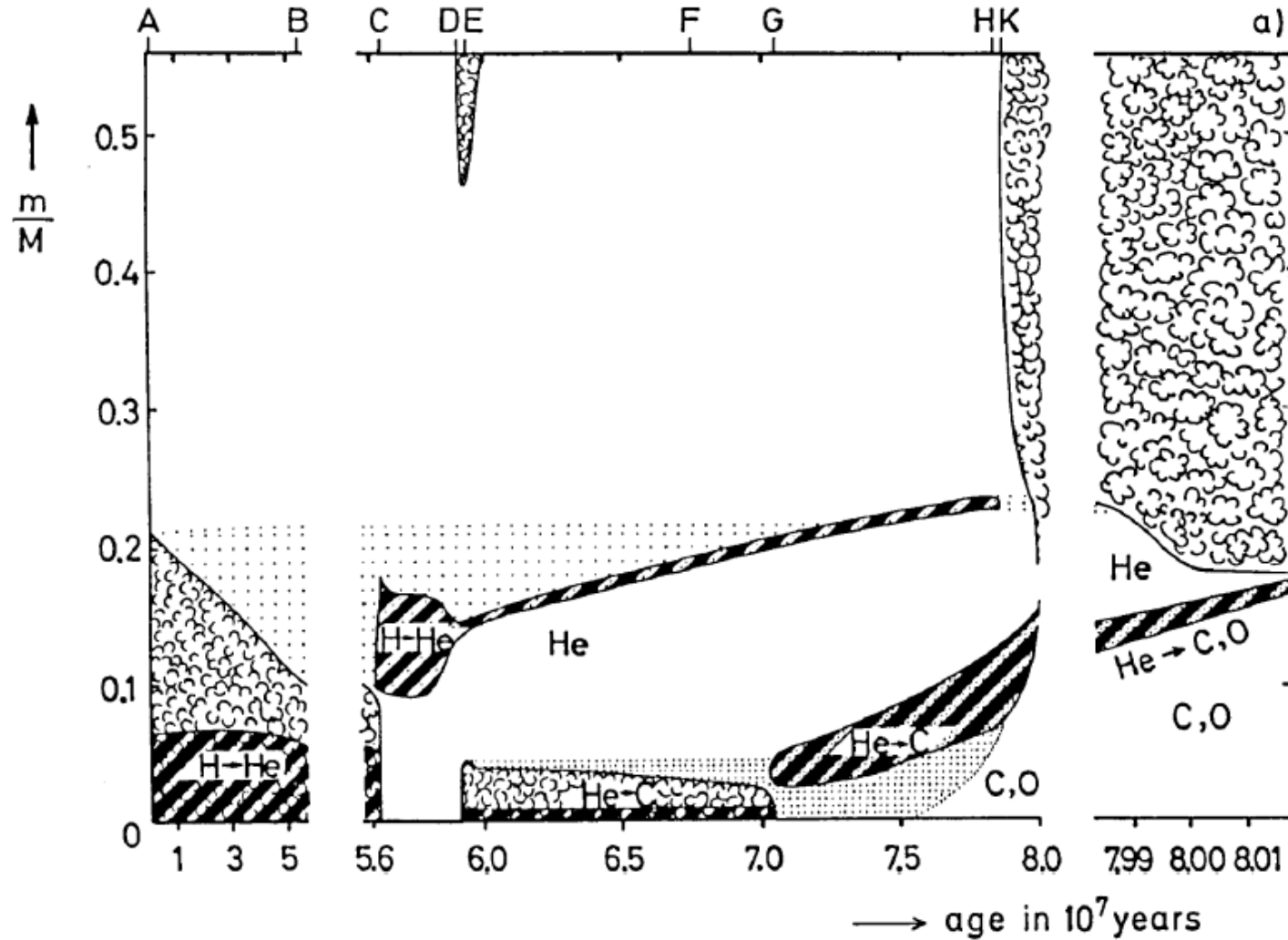


$$t_{MS} \propto \frac{M}{L}$$

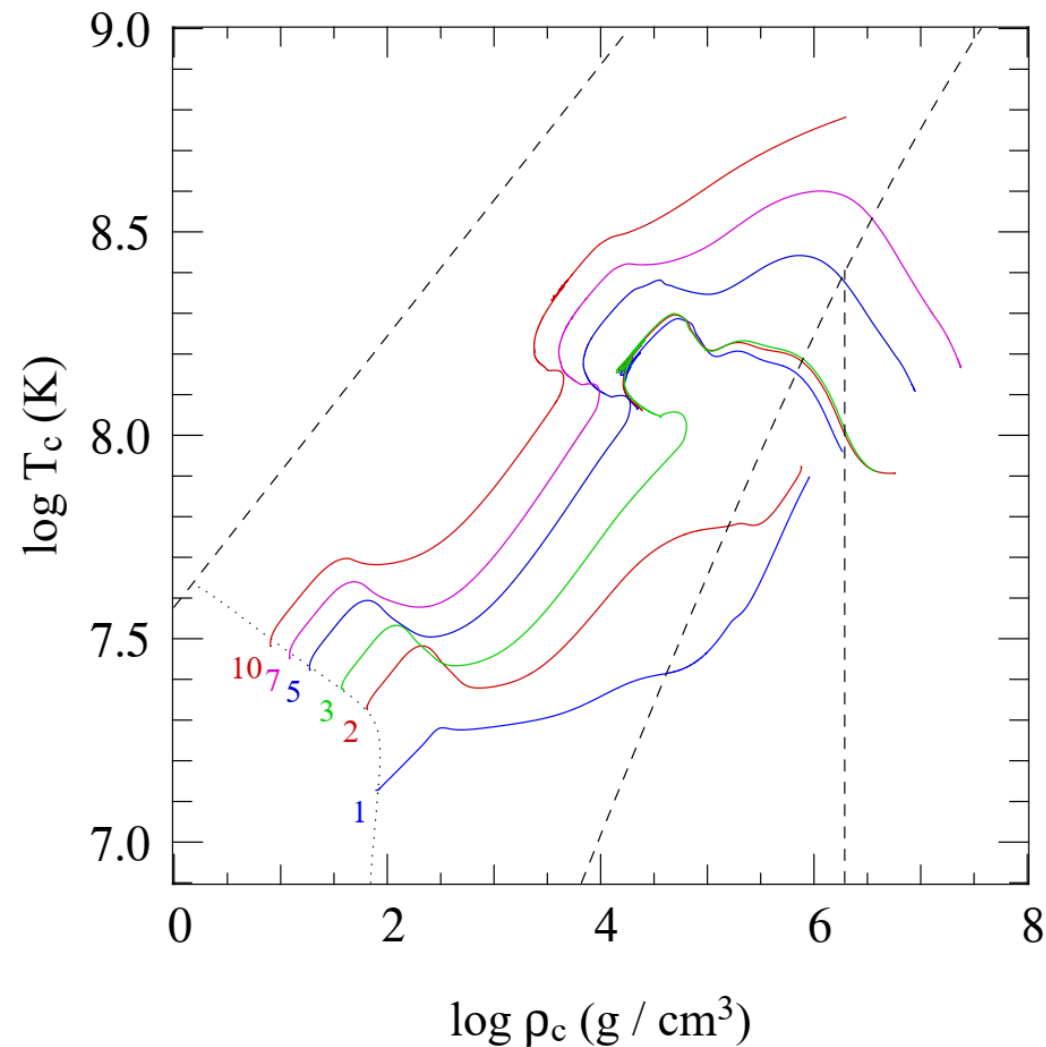
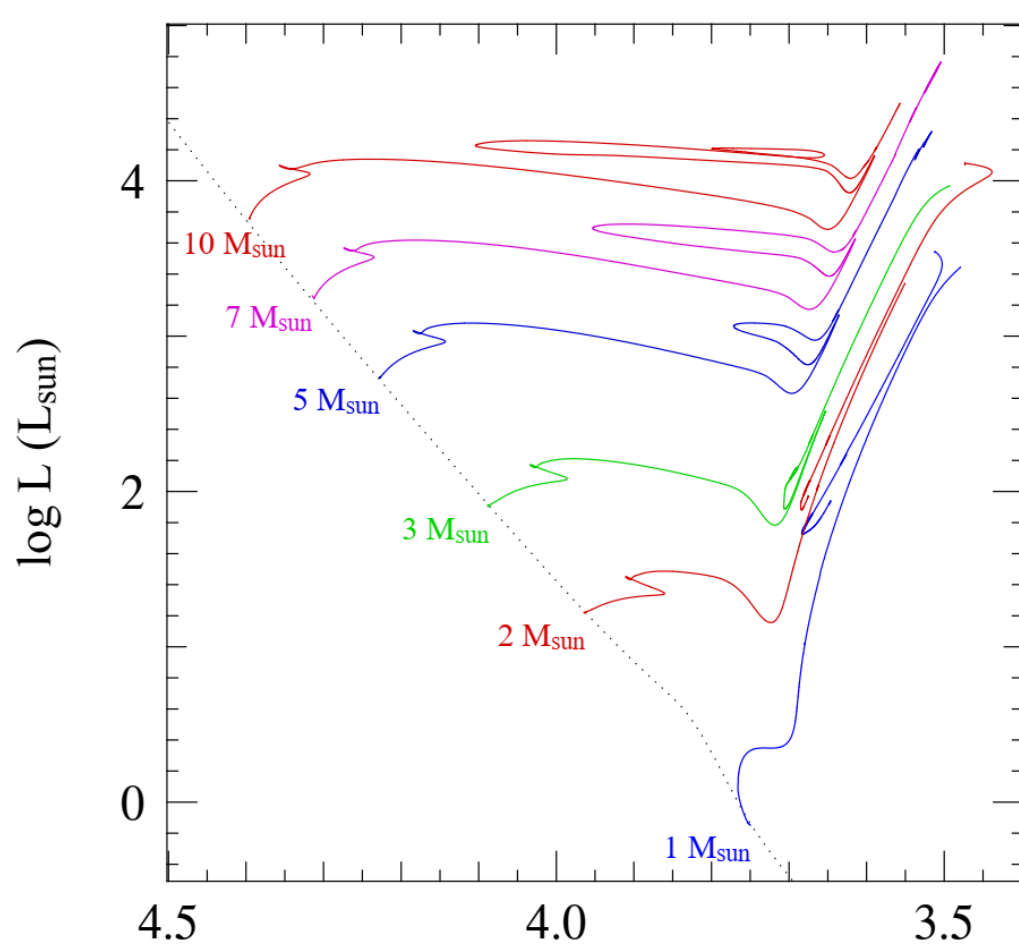
$$L \propto M^{3..4} \Rightarrow t_{MS} \propto \frac{1}{M^{2..3}}$$

$$t_{MS,max} \approx 2 \text{ Myr} = \text{const}$$

ДИАГРАММА КИППЕНХАЙНА ДЛЯ $M = 5M_{\odot}$



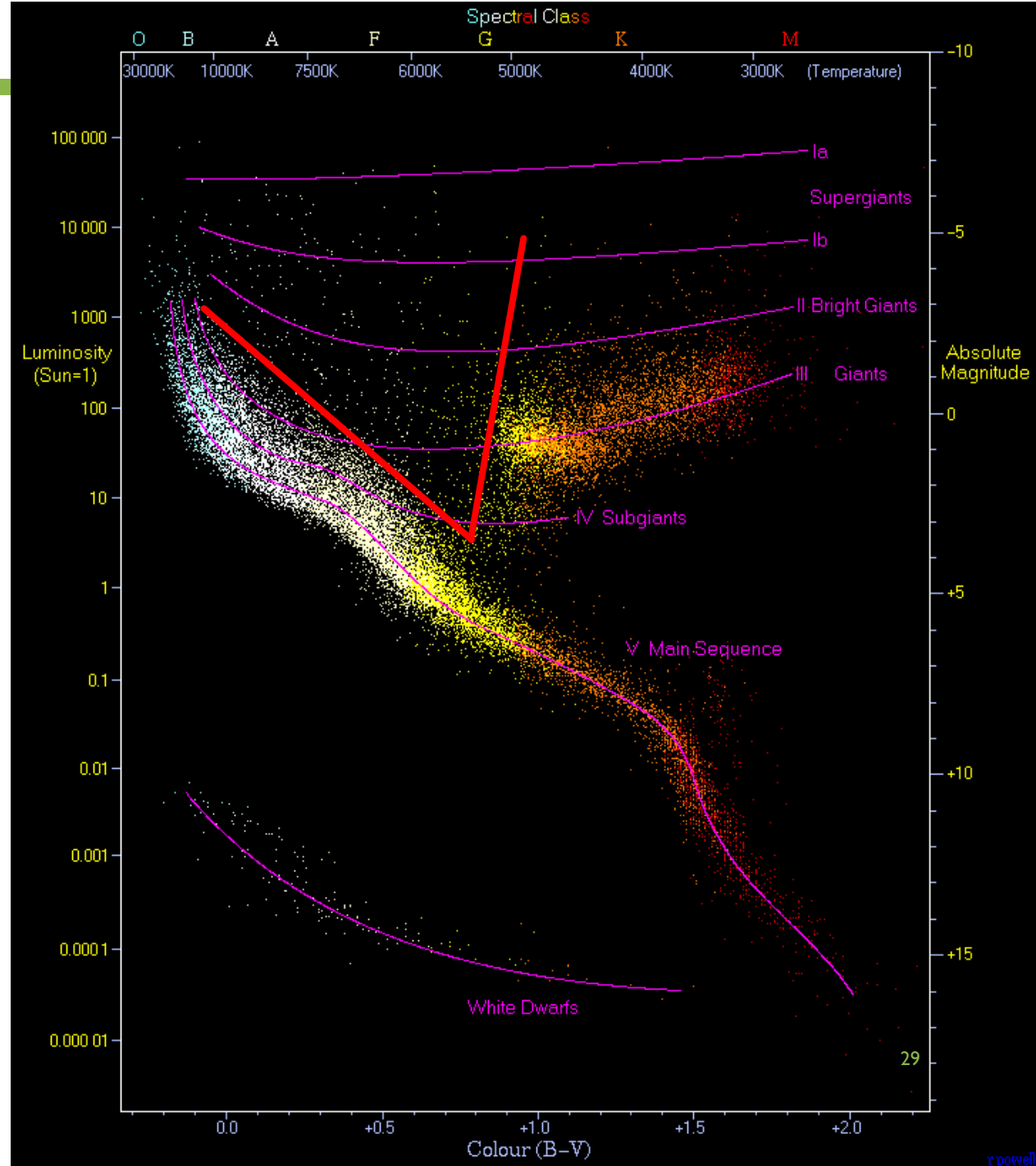
ЭВОЛЮЦИЯ МАЛОМАССИВНЫХ ЗВЁЗД



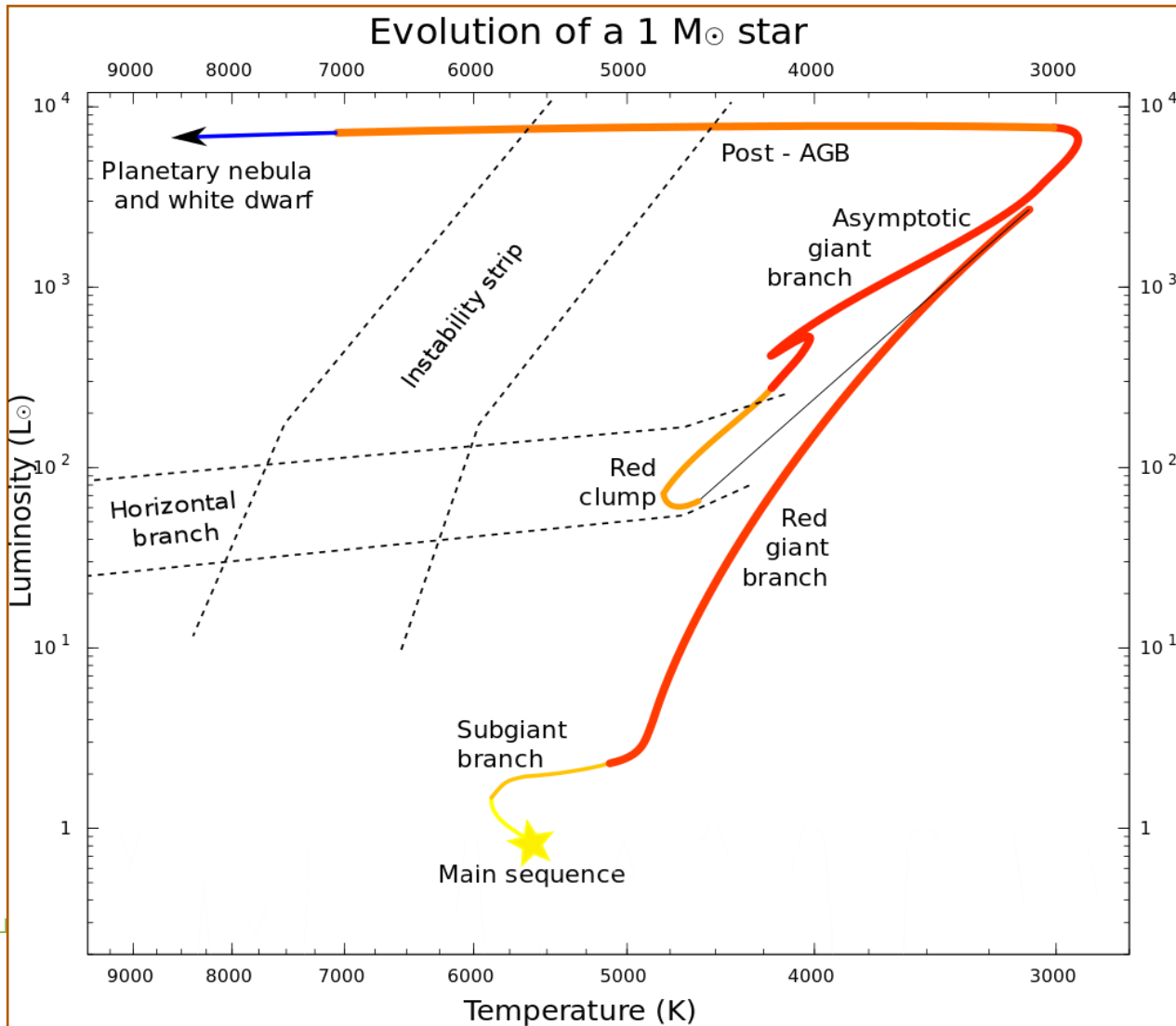
ПРОВАЛ ГЕРЦШПРУНГА

Гелиевое ядро с массой ниже некоторой находится в равновесии и не вырождено. Водород горит в слоевом источнике. Это стадия субгиганта. Растет масса ядра. Это приводит к резкому сжатию – начинается RGB.

При массе >2 солнечных предельная масса (предел Шенберга-Чандрасекара) достигается быстро. Ядро сжимается – начинается стадия гиганта. Т.о., у таких звезд стадия субгиганта короткая. Поэтому возникает «провал Герцшпрунга» - звезды очень быстро пересекают эту часть диаграммы.

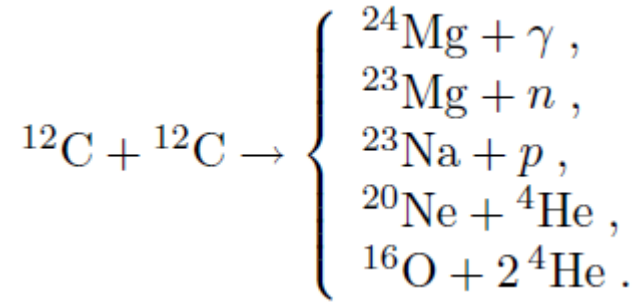


ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ВЕТВЬ И ПОЛОСА НЕСТАБИЛЬНОСТИ

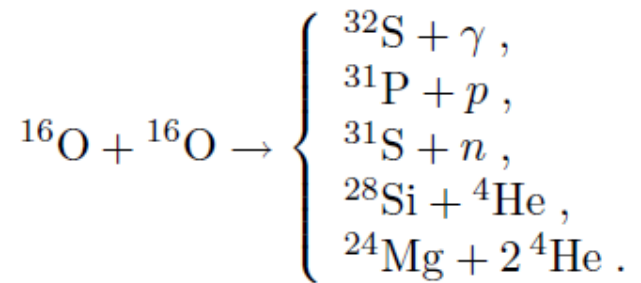


- На горизонтальной ветви идет горение гелия в ядре звезды.
- Массы ядер у разных звезд примерно одинаковы, поэтому светимость отличается слабо.
- А вот температура зависит от массы водородной оболочки. И этот параметр отличается сильно.
- Типичное время жизни на горизонтальной ветви - 100 млн. лет.

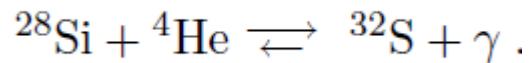
РЕАКЦИИ В МАССИВНЫХ ЗВЕЗДАХ



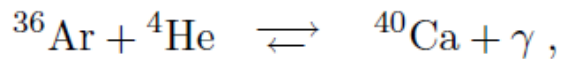
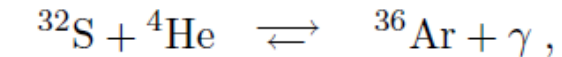
Первая стадия – горение углерода.
Углеродное ядро при $M > 10M_{\odot}$ невырожденное.



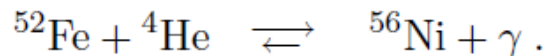
При миллиарде градусов начинается горение кислорода.



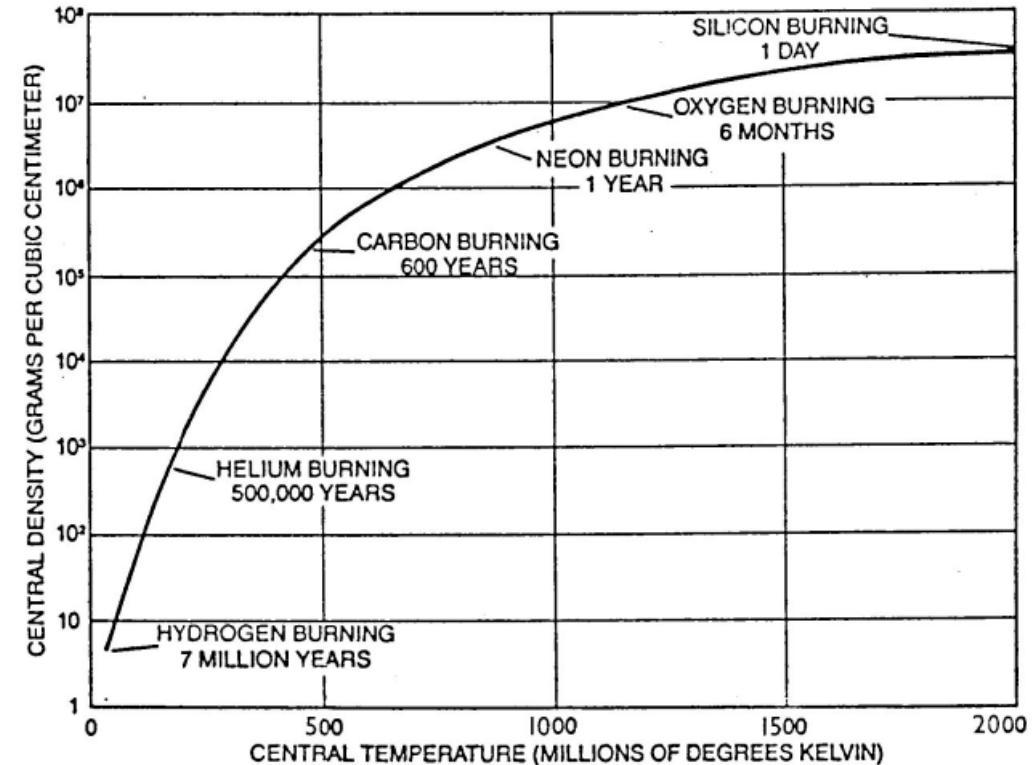
Фотодиссоциация приводит к Появлению альфа-частиц.



⋮

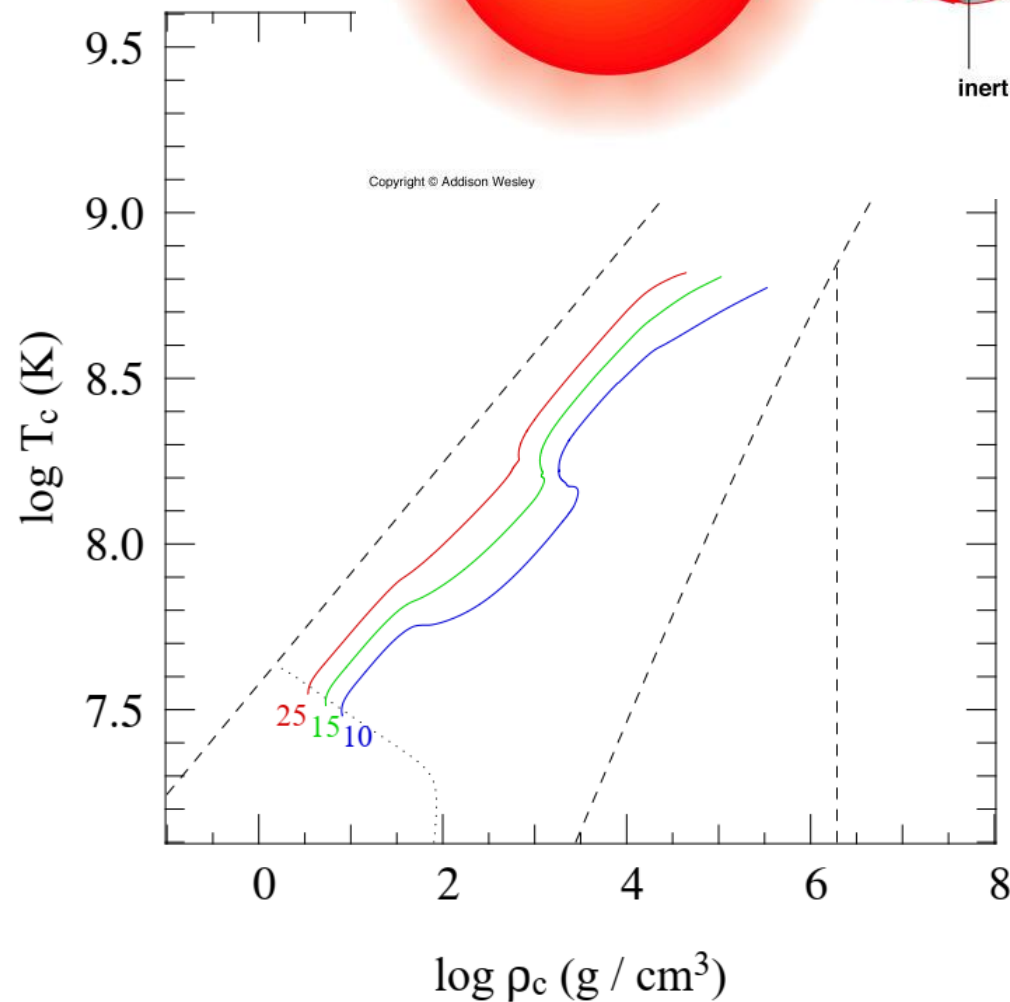
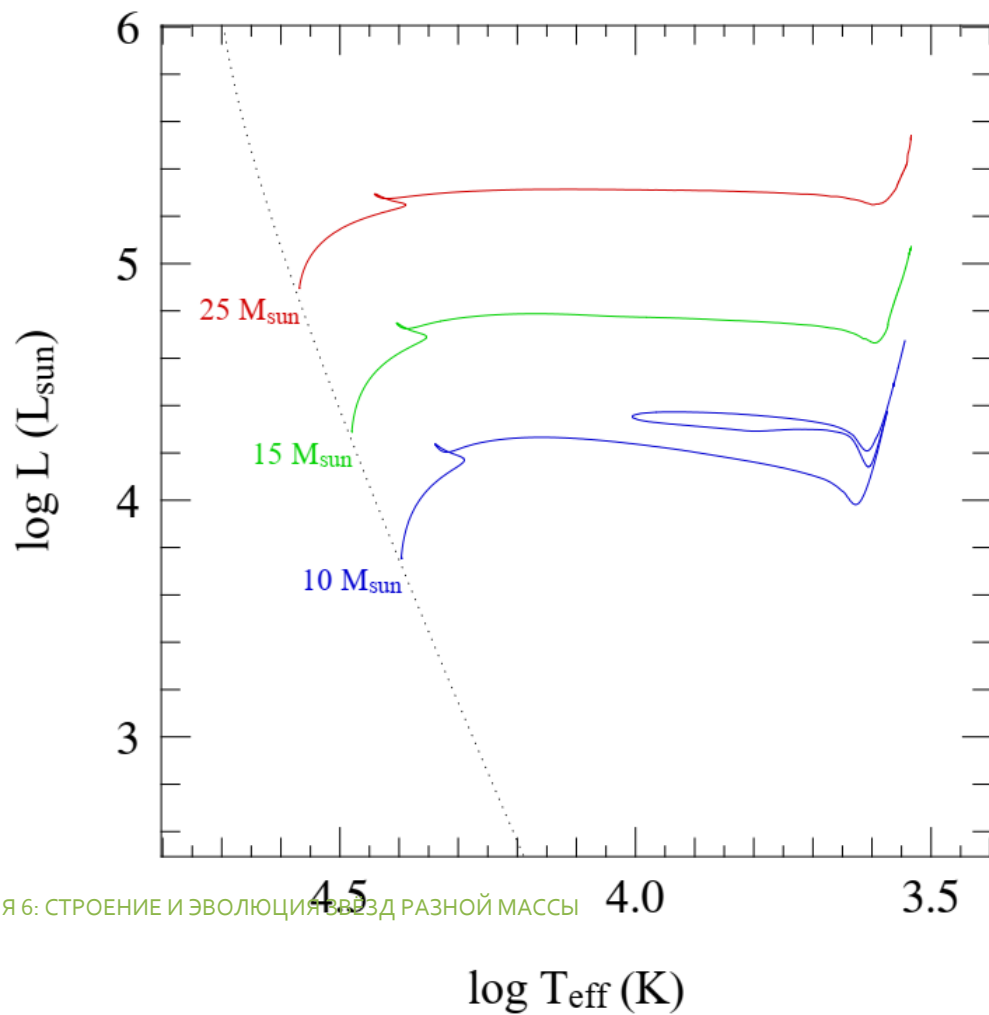
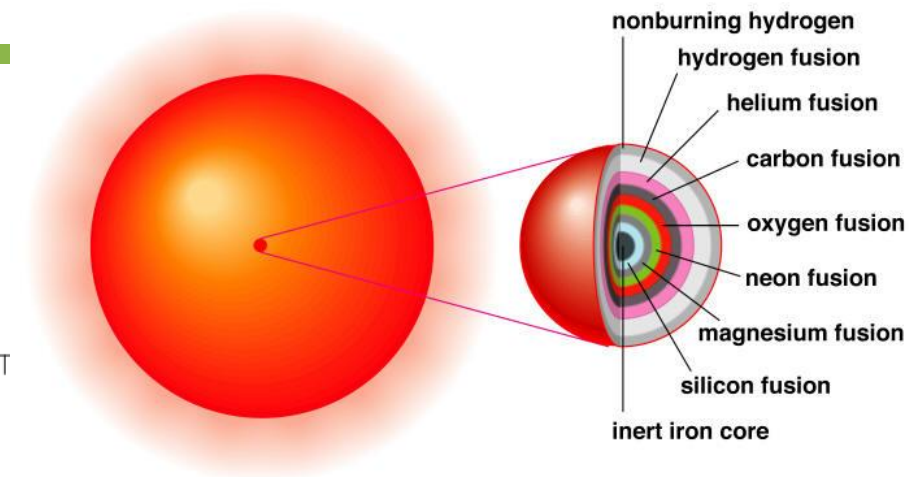


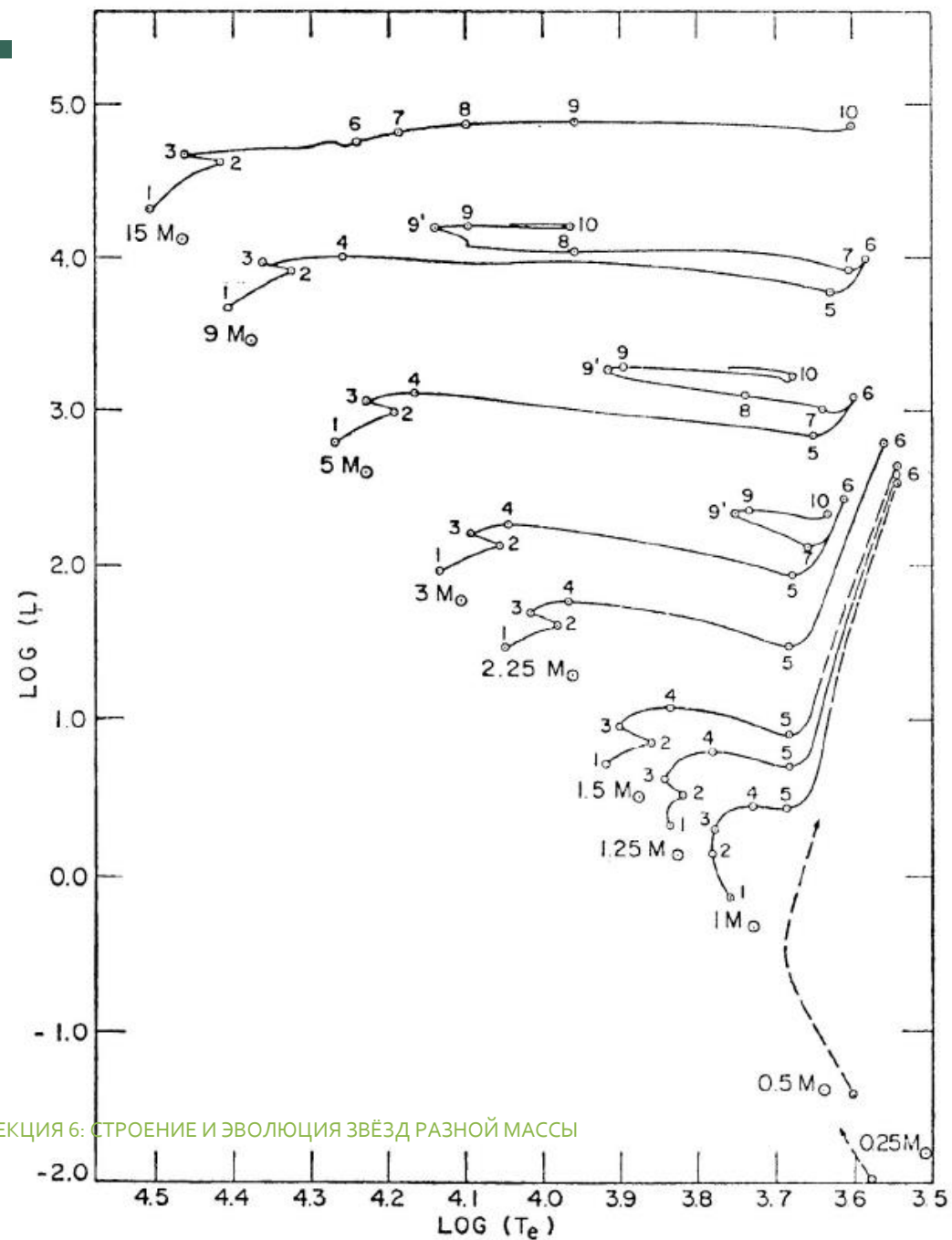
Наконец, начинаются реакции, доходящие до элементов группы железа.



25 масс Солнца

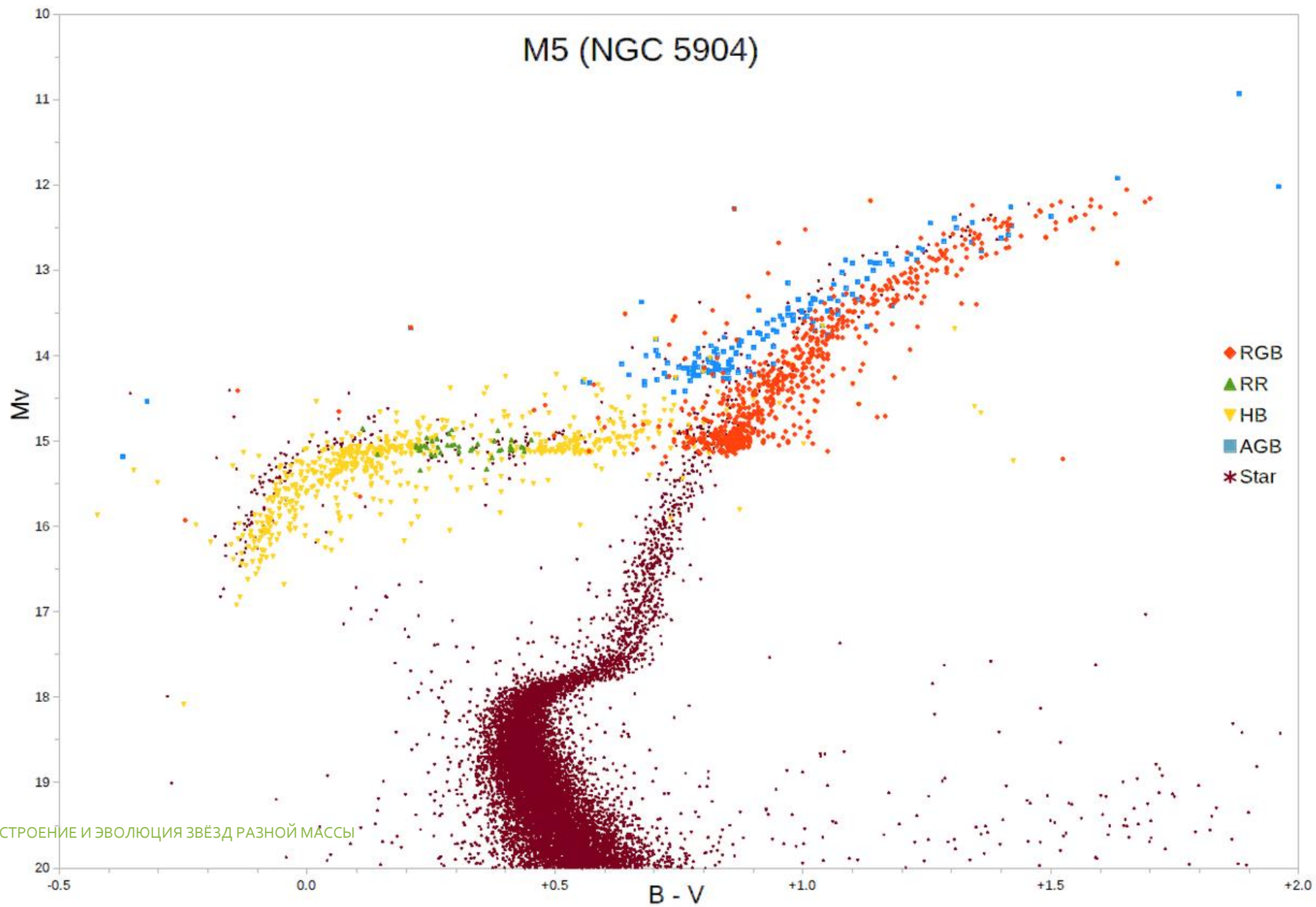
ЭВОЛЮЦИЯ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД



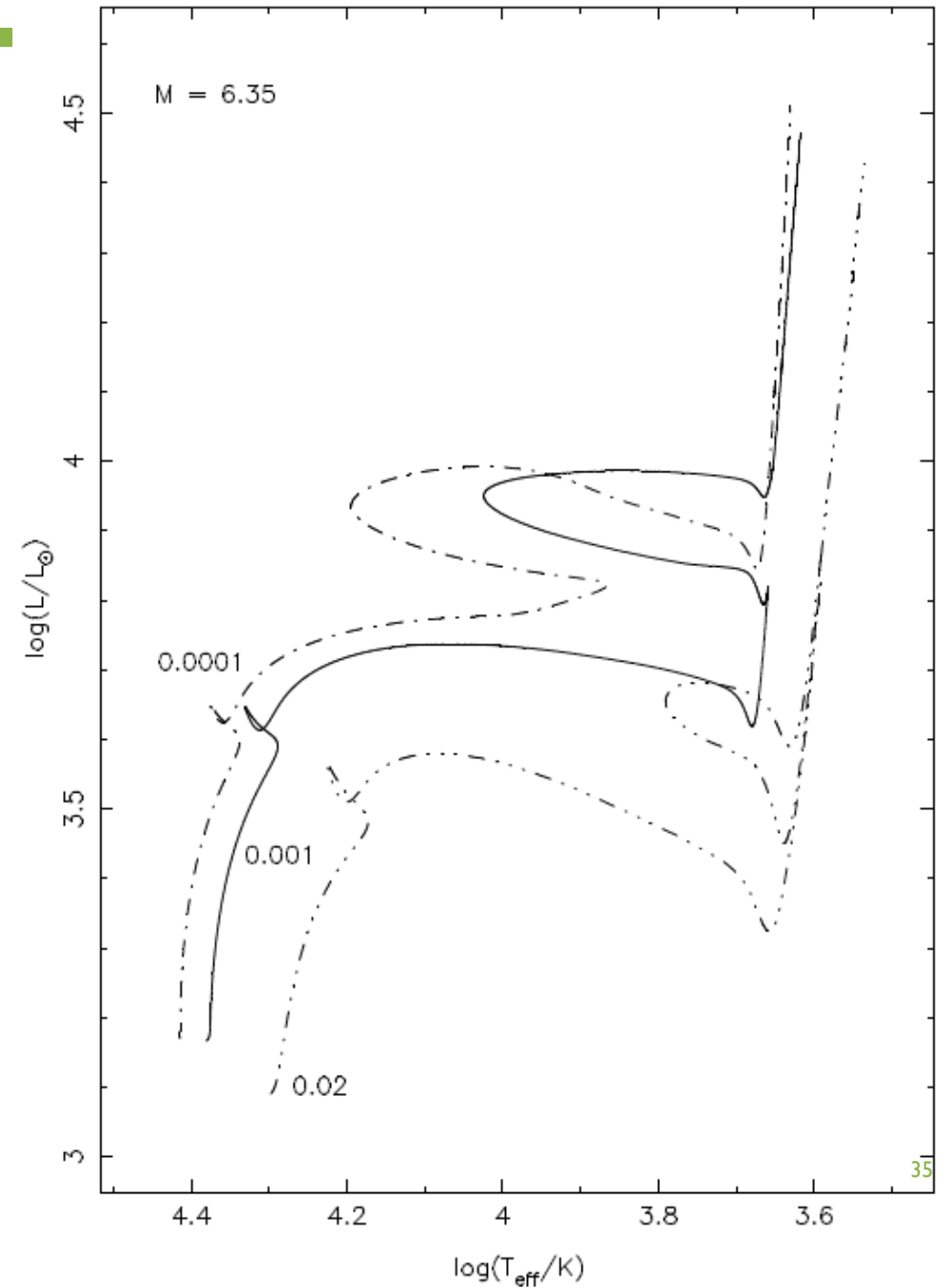
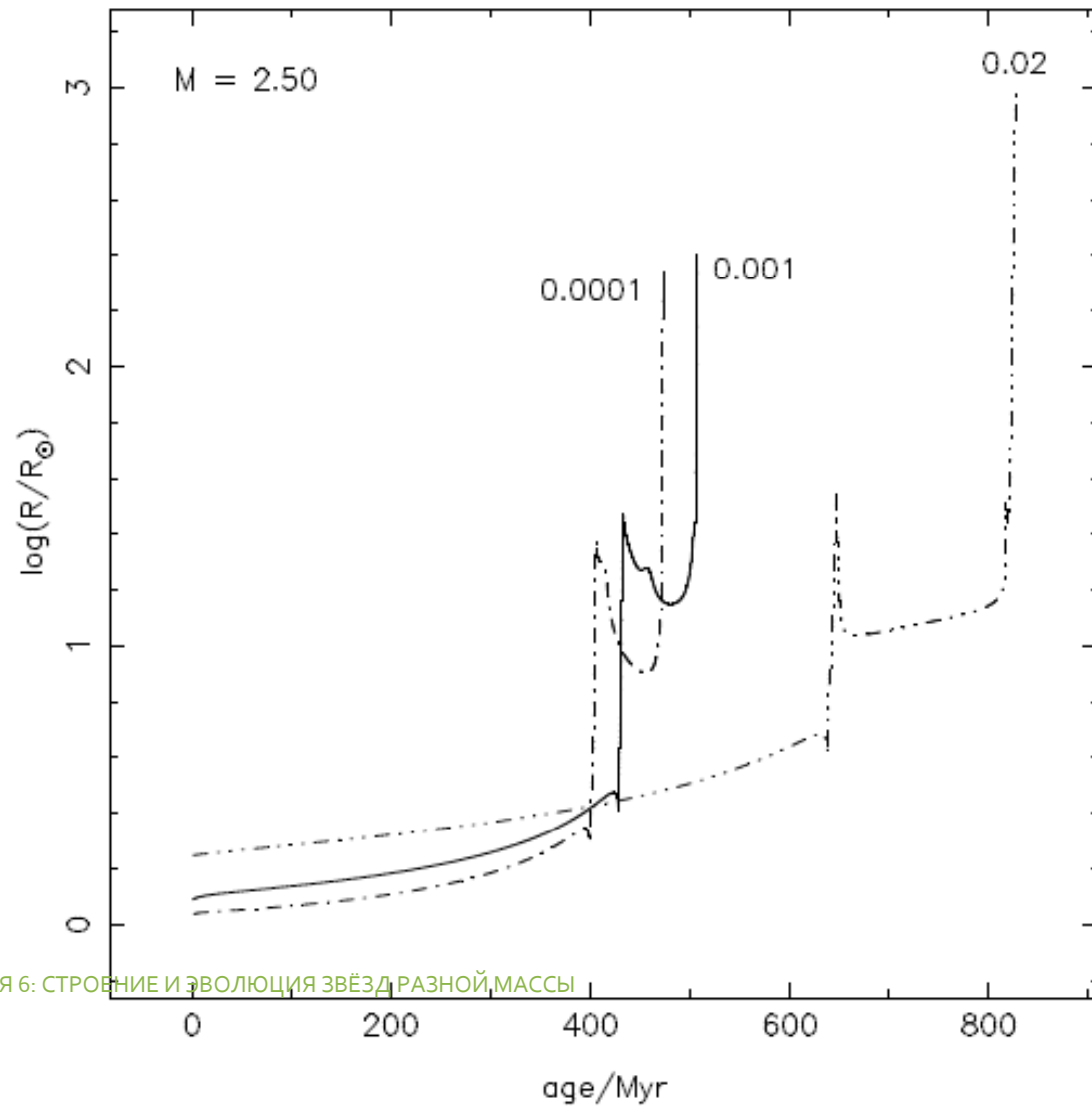


Interval ($i-j$)	(1-2)	(2-3)	(3-4)	(4-5)	(5-6)
Mass (M_{\odot})					
15	1.010 (7)	2.270 (5)		7.55 (4)	
9	2.144 (7)	6.053 (5)	9.113 (4)	1.477 (5)	6.552 (4)
5	6.547 (7)	2.173 (6)	1.372 (6)	7.532 (5)	4.857 (5)
3	2.212 (8)	1.042 (7)	1.033 (7)	4.505 (6)	4.238 (6)
2.25	4.802 (8)	1.647 (7)	3.696 (7)	1.310 (7)	3.829 (7)
1.5	1.553 (9)	8.10 (7)	3.490 (8)	1.049 (8)	≥ 2 (8)
1.25	2.803 (9)	1.824 (8)	1.045 (9)	1.463 (8)	≥ 4 (8)
1.0	7 (9)	2 (9)	1.20 (9)	1.57 (8)	≥ 1 (9)

Interval ($i-j$)	(6-7)	(7-8)	(8-9)	(9-10)
Mass (M_{\odot})				
15	7.17 (5)	6.20 (5)	1.9 (5)	3.5 (4)
9	4.90 (5)	9.50 (4)	3.28 (6)	1.55 (5)
5	6.05 (6)	1.02 (6)	9.00 (6)	9.30 (5)
3	2.51 (7)	4.08 (7)		6.00 (6)









МЕТАЛЛИЧНОСТЬ



ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Большинство химических элементов, с которыми мы сталкиваемся в жизни (и из которых состоим), возникли в звездах в течение их жизни в результате термоядерных реакций, или на последних стадиях жизни массивных звезд – во взрывах сверхновых. До образования звезд обычное вещество в основном существовало в виде водорода (самый распространенный элемент) и гелия.

1 H	big bang fusion 						cosmic ray fission 						2 He											
3 Li	4 Be	merging neutron stars 						exploding massive stars 						5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne					
11 Na	12 Mg	dying low mass stars 						exploding white dwarfs 						13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar					
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr							
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe							
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn						
87 Fr	88 Ra																							

ИЭ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД РАЗНОЙ МАССЫ

ЛИТЕРАТУРА

- А. Засов, К. Постнов «Курс общей астрофизики», Гл. 5 и 6. (github)
- С. Ламзин, «Физика и эволюция звёзд» (github)
- O.R. Polls, «Stellar structure and evolution» (github)
- Я. Зельдович, С. Блинников, Н. Шакура «Физические основы строения и эволюции звёзд», Гл. 6, <http://www.astronet.ru/db/msg/1169513/index.html>
- К. Постнов «Лекции по общей астрофизике для физиков», ч. 6 и 7 <http://www.astronet.ru/db/msg/1176797>

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ 7

1. **(4 балла).** Светимость массивных звёзд главной последовательности определяется эффективностью CNO-цикла. Его удельное энерговыделение примерно равно $\varepsilon = 5$ МэВ/нуклон. Зная это и считая, что непрозрачность ядрах таких звёзд определяется томпсоновским рассеянием на свободных электронах, получите верхнюю оценку минимального времени t_{\max} , которое проведёт массивная звезда на главной последовательности.
2. **(6 баллов).** Воспользовавшись теоремой вириала для политропного шара покажите, что такой шар оказывается неустойчивым при показателе адиабаты $\gamma < 4/3$.