



ФИЗИКА ЗВЁЗД I: СТРОЕНИЕ

АНТОН БИРЮКОВ. МОДУЛЬ «АСТРОФИЗИКА», ОСЕНЬ 2022. ФАКУЛЬТЕТ ФИЗИКИ ВШЭ.

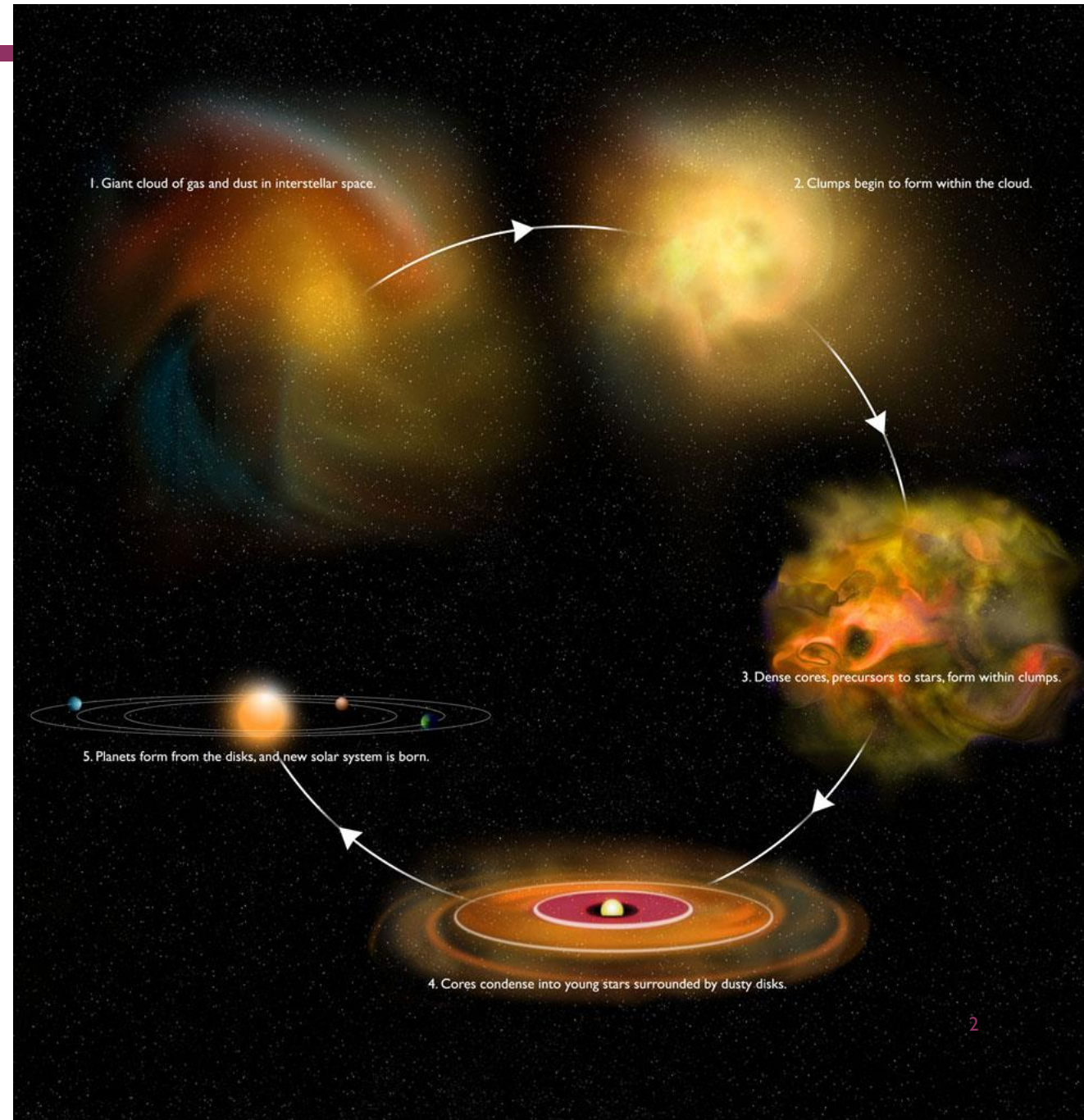


ФОРМИРОВАНИЕ ЗВЕЗДЫ

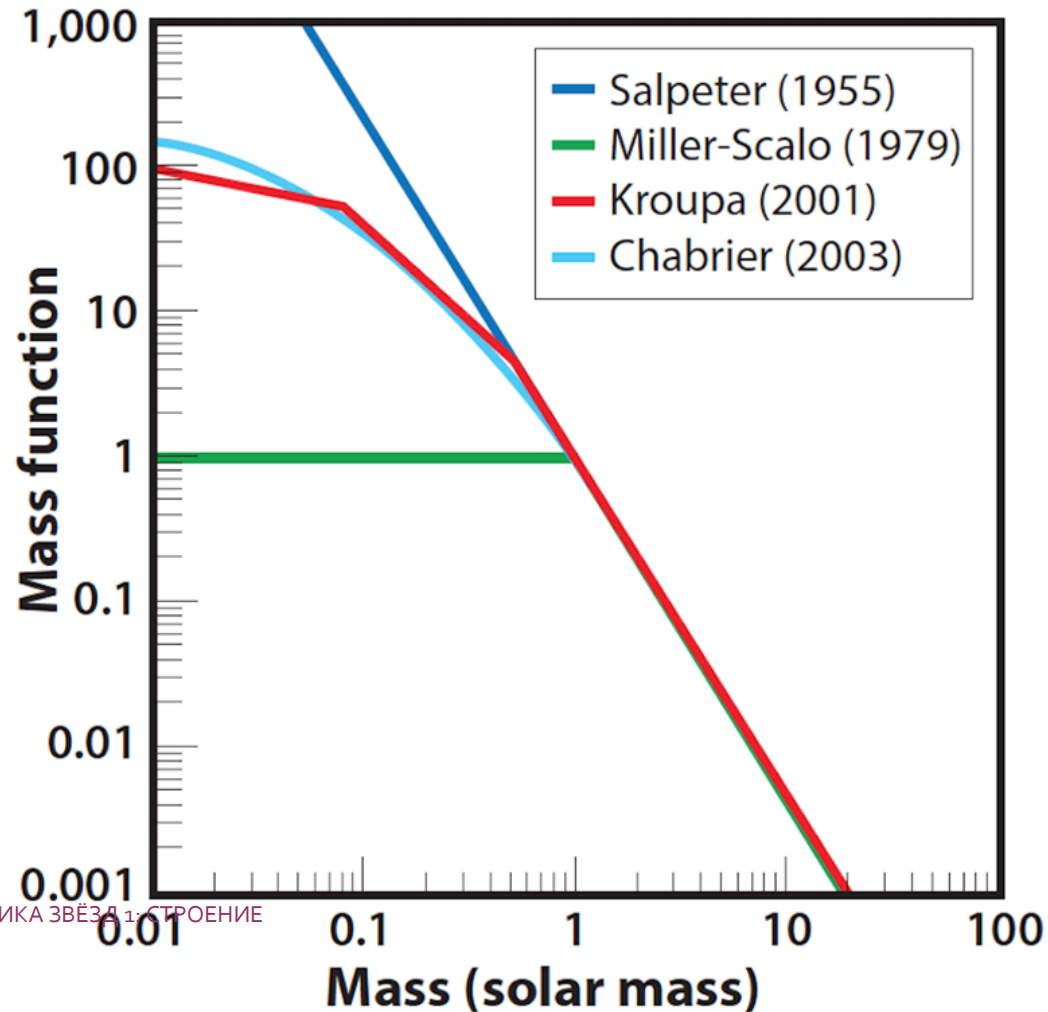
- Звёздообразование запускается при достижении облаком джинсовской массы:

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

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



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗВЁЗД ПО НАЧАЛЬНЫМ МАССАМ



Функция масс Солпитера (Salpeter, 1955):

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

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

ЖИЗНЬ ЗВЕЗДЫ

«Жизнь звезды – это постоянная борьба
силы тяжести и силы газового давления»
(Иосиф Шкловский)



НА ДАЛЕКОЙ ПЛАНЕТЕ ВЕНЕРЕ

На далекой планете Венере
Солнце пламенней и золотистей.
На Венере, ах, на Венере
У деревьев синие листья...

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-

Что же произо- Профессор И. ШКЛОВСКИЙ

шло в науке?
Как хорошо всем известно, Венера
покрыта густым слоем облаков. Пел-
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-

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

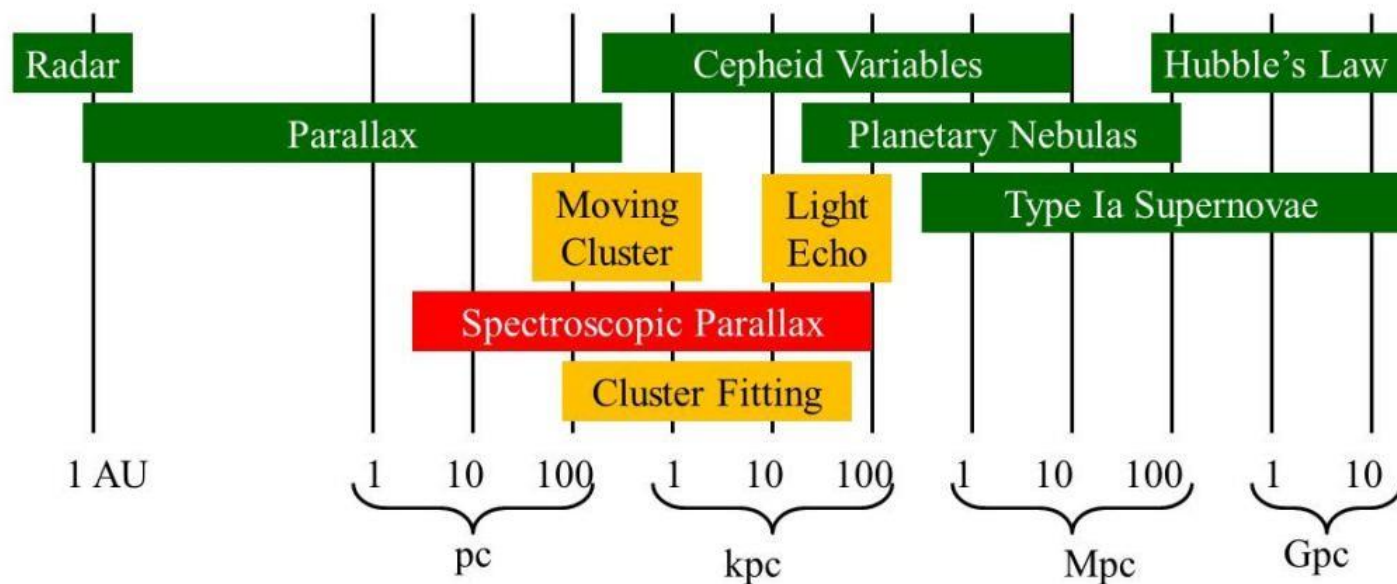
и речи о том, что на поверхности
планеты есть моря.

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.

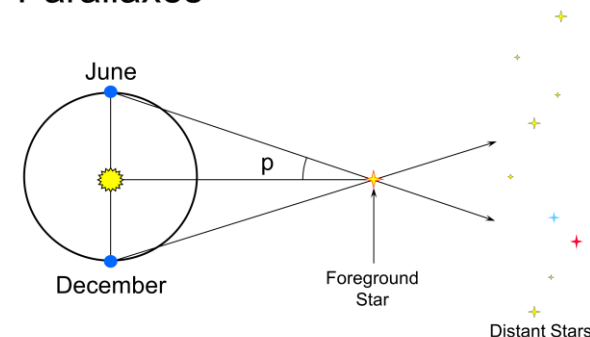
Как непохожи эти две соседние

РАССТОЯНИЯ ДО ЗВЁЗД

The Cosmic Distance Ladder:



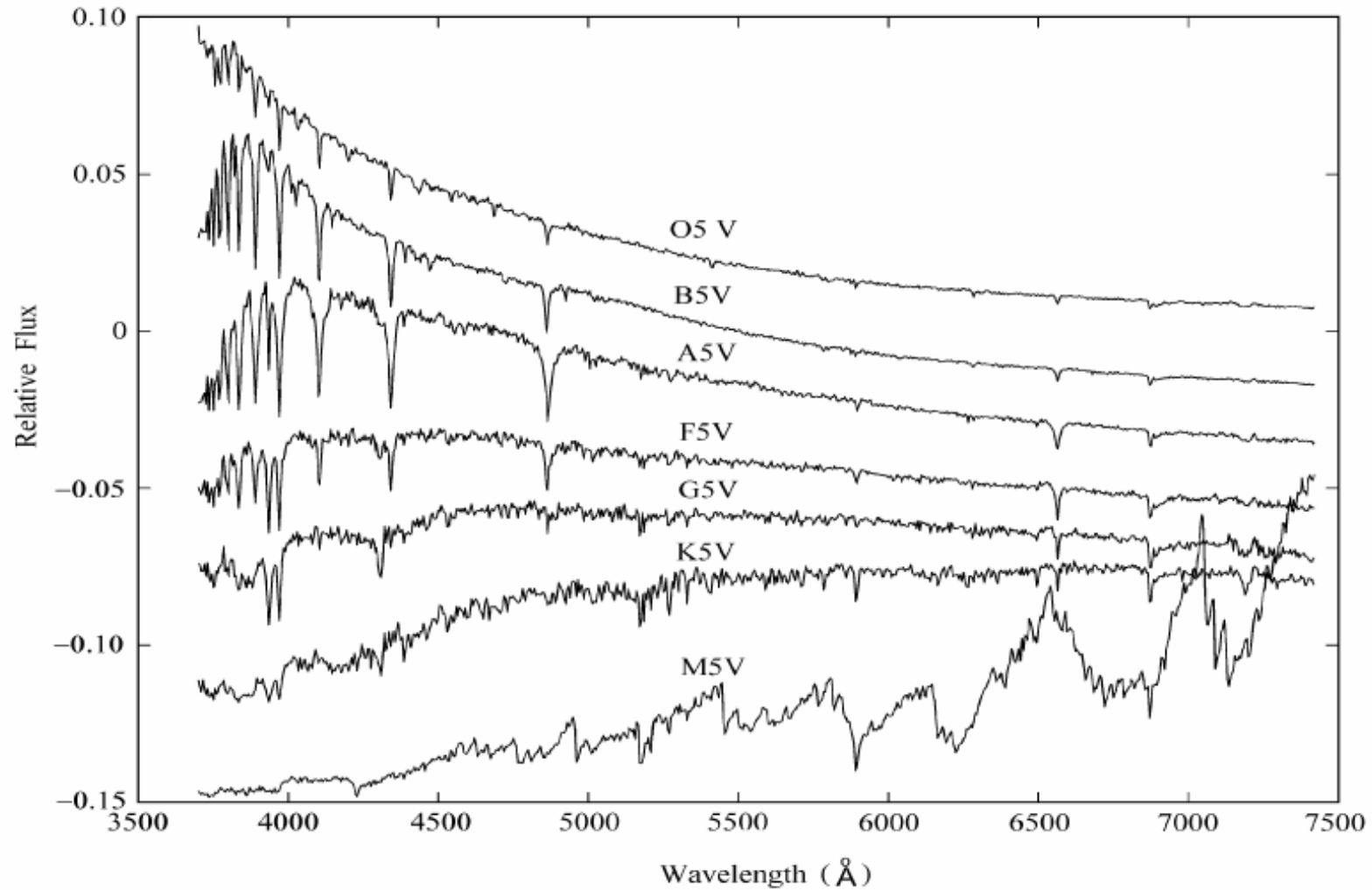
Method of Trigonometric Parallaxes



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

$$p'' = 1/(D [\text{пк}])$$

СПЕКТРЫ ЗВЁЗД



25 000 K

17 000 K

9 000 K

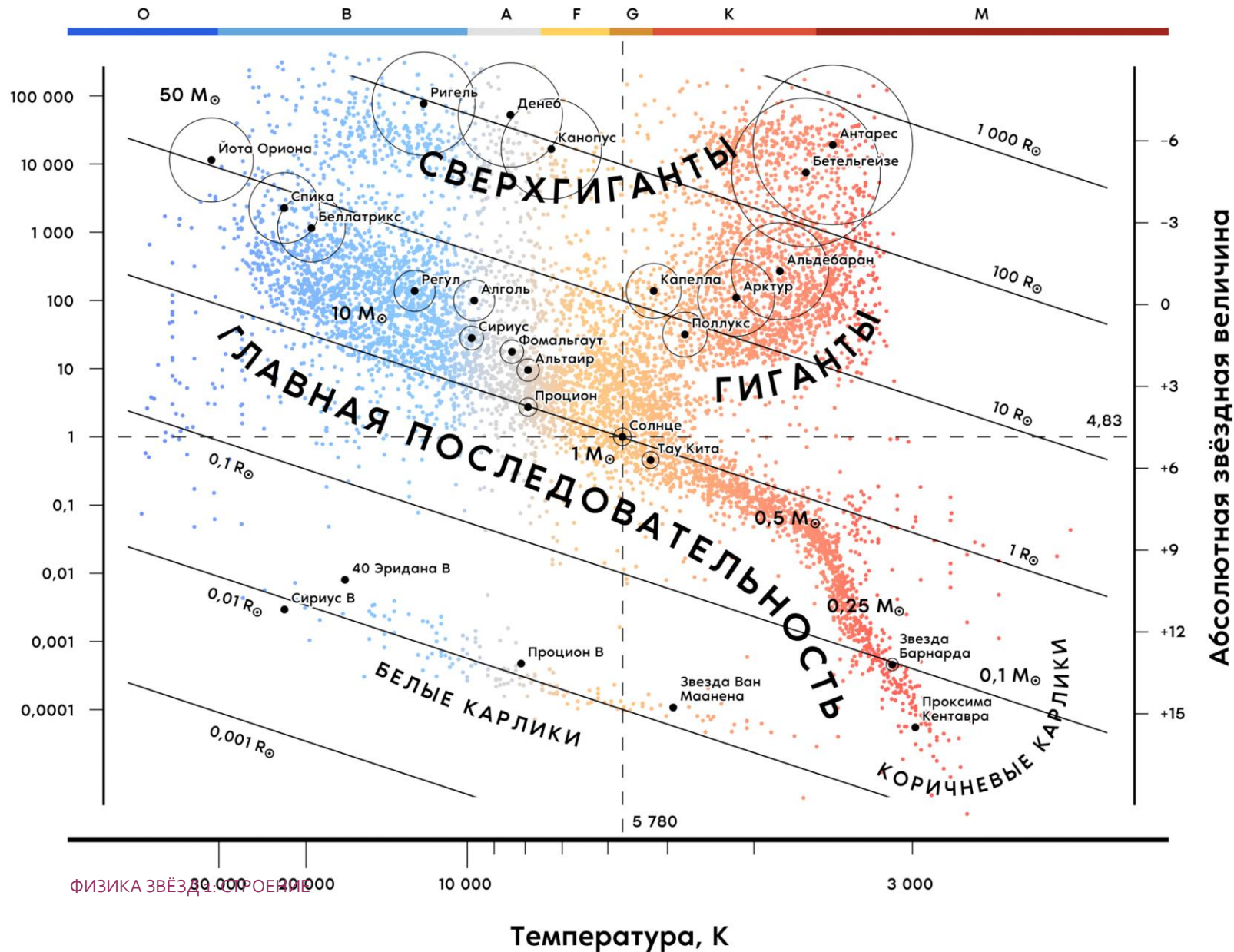
6 500 K

5 000 K

4 000 K

3 000 K

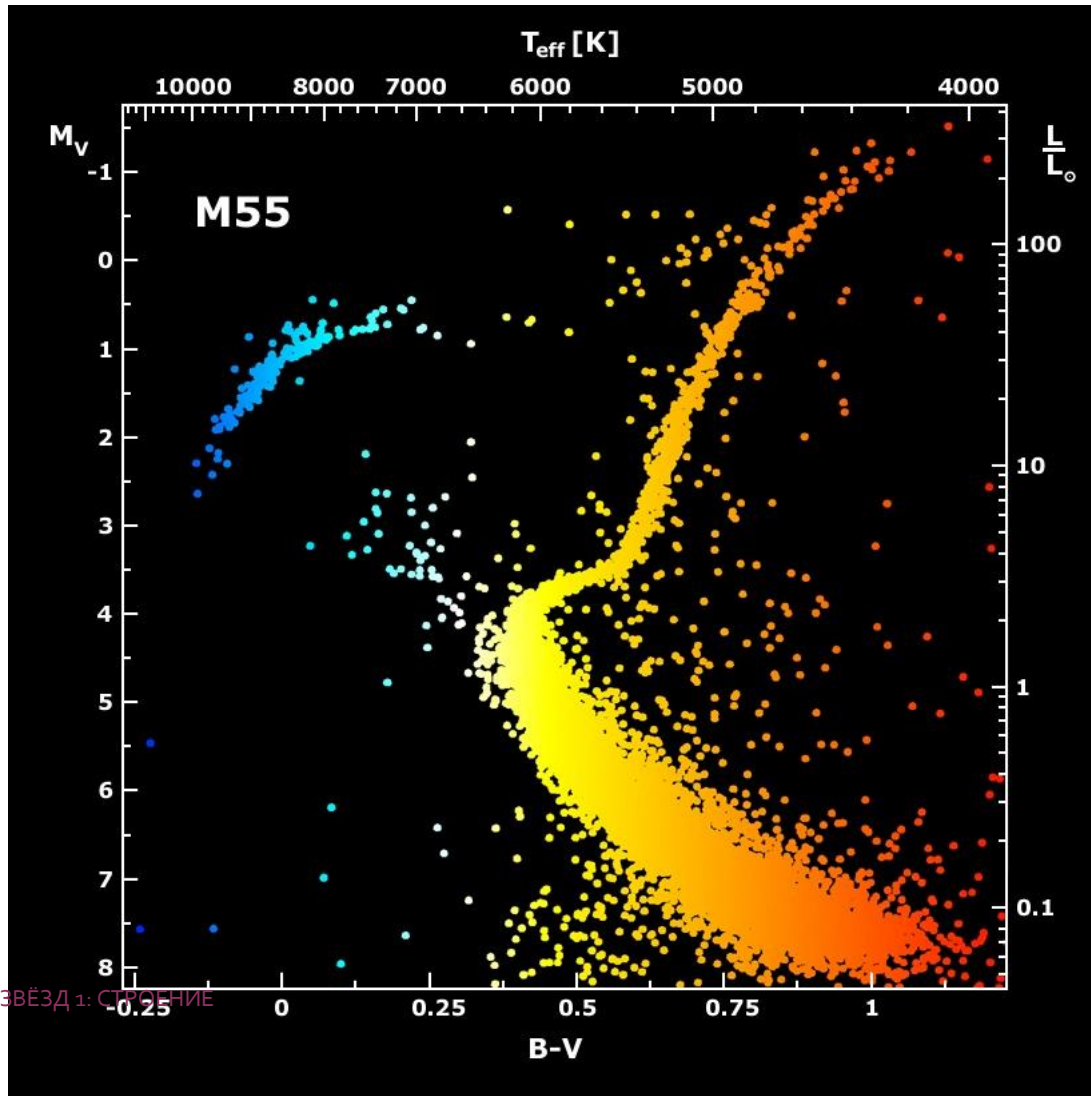
Спектральный класс



ФИЗИКА ЗВЁЗД. СЛОЖИВ

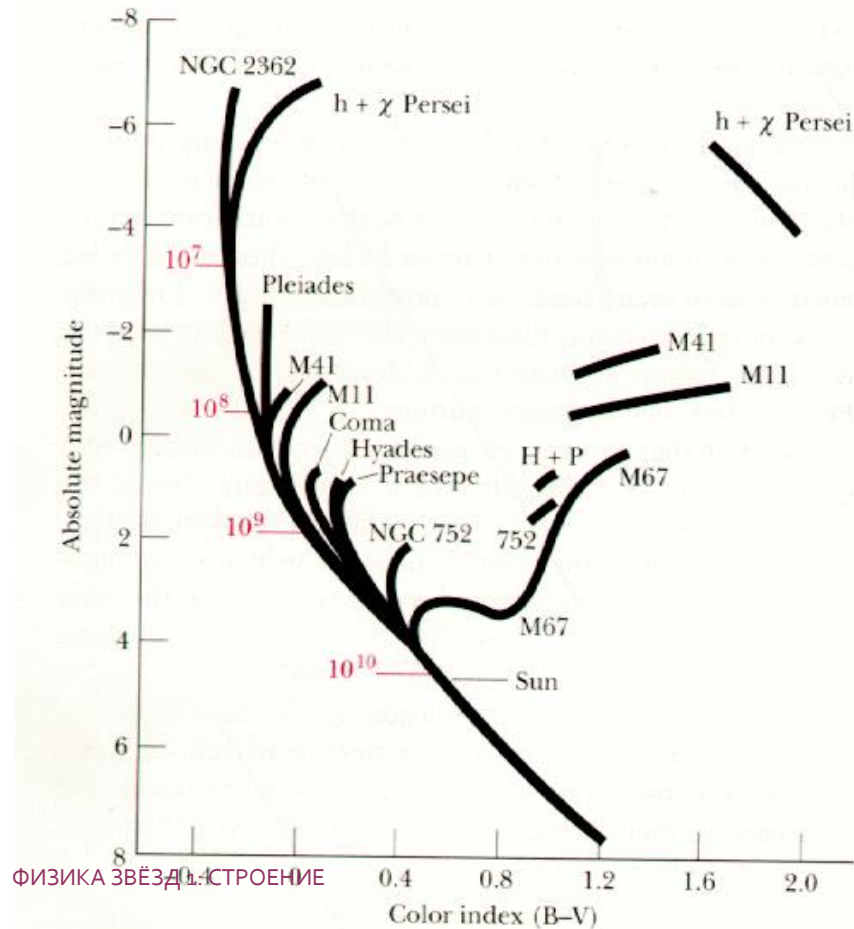
- Температуры определяются по спектрам.
- Для определения светимости необходимо знать расстояние (в идеале – по параллаксу), а также учесть межзвездное поглощение.
- Самые легкие звезды имеют массу 0.08 солнечных.
- Самые тяжелые из образующихся сейчас около 100-200 солнечных.
- С ростом массы резко растет светимость.
- Время жизни тем больше, чем меньше масса звезды.

ДИАГРАММА ГЕРЦШПРУНГА-РАССЕЛА ДЛЯ СКОПЛЕНИЯ

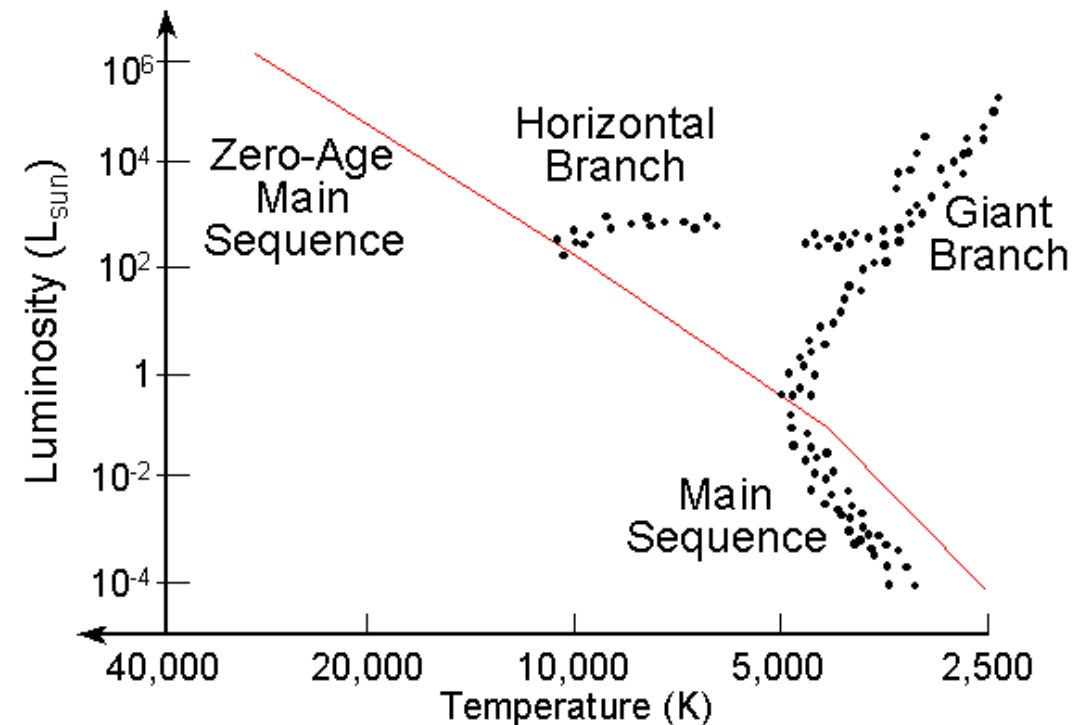


$$L_\odot = 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт} = 4 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}$$

ДИАГРАММА ГЕРЦШПРУНГА-РАССЕЛА ДЛЯ СКОПЛЕНИЯ

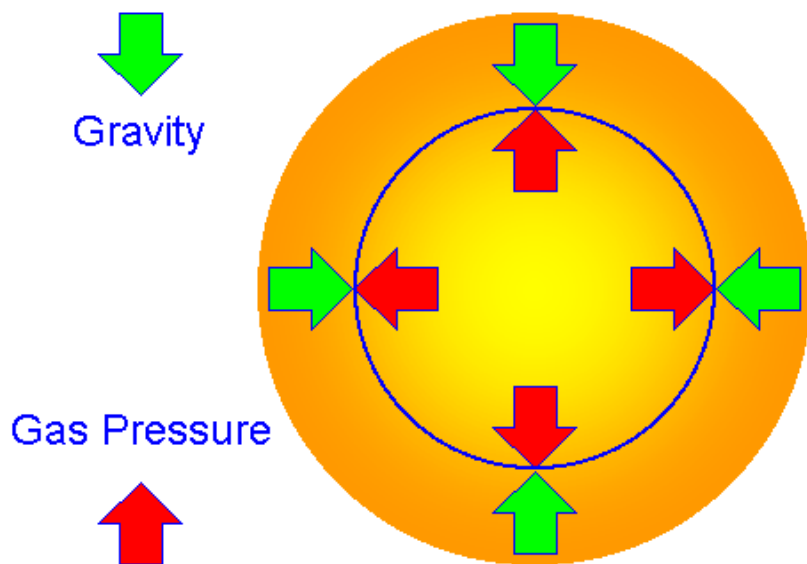


Typical Globular Cluster H-R Diagram



УСТОЙЧИВОСТЬ ЗВЕЗДЫ

Hydrostatic Equilibrium



$$\rho \frac{d^2 r}{dt^2} = -G \frac{M_r \rho}{r^2} - \frac{dP}{dr}$$

Diagram illustrating the forces acting on a spherical shell of a star, leading to the equation of hydrostatic equilibrium:

- ACCELERATION**: $\rho \frac{d^2 r}{dt^2}$
- GRAVITATIONAL CONSTANT**: G
- MASS WITHIN A SPHERE OF RADIUS r** : M_r
- DENSITY**: ρ
- PRESSURE GRADIENT**: $\frac{dP}{dr}$

ПРОСТЕЙШАЯ МОДЕЛЬ

$$\frac{dr}{dm} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$$

- Сохранение массы

$$\frac{dP}{dm} = -\frac{Gm}{4\pi r^4}$$

- Гидростатическое равновесие

$$\frac{dl}{dm} = \epsilon_{\text{nuc}}$$

- Сохранение энергии

$$\frac{dT}{dm} = -\frac{Gm}{4\pi r^4} \frac{T}{P} \nabla$$

- Тепловое равновесие, причём $\nabla = \frac{\partial \ln T}{\partial \ln P}$

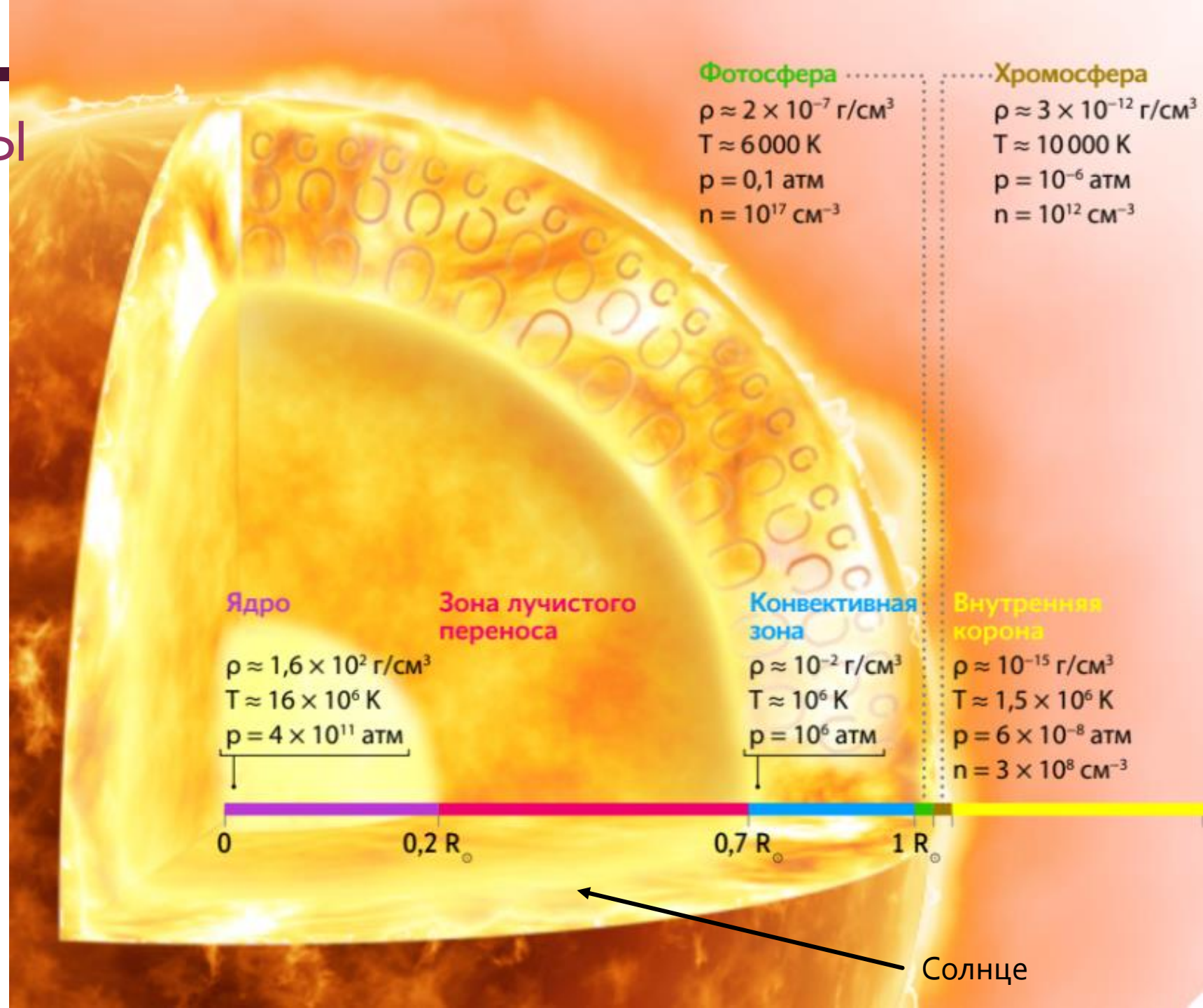
Уравнение состояния: $P = K\rho^{1+\frac{1}{n}}$

n – показатель политропы

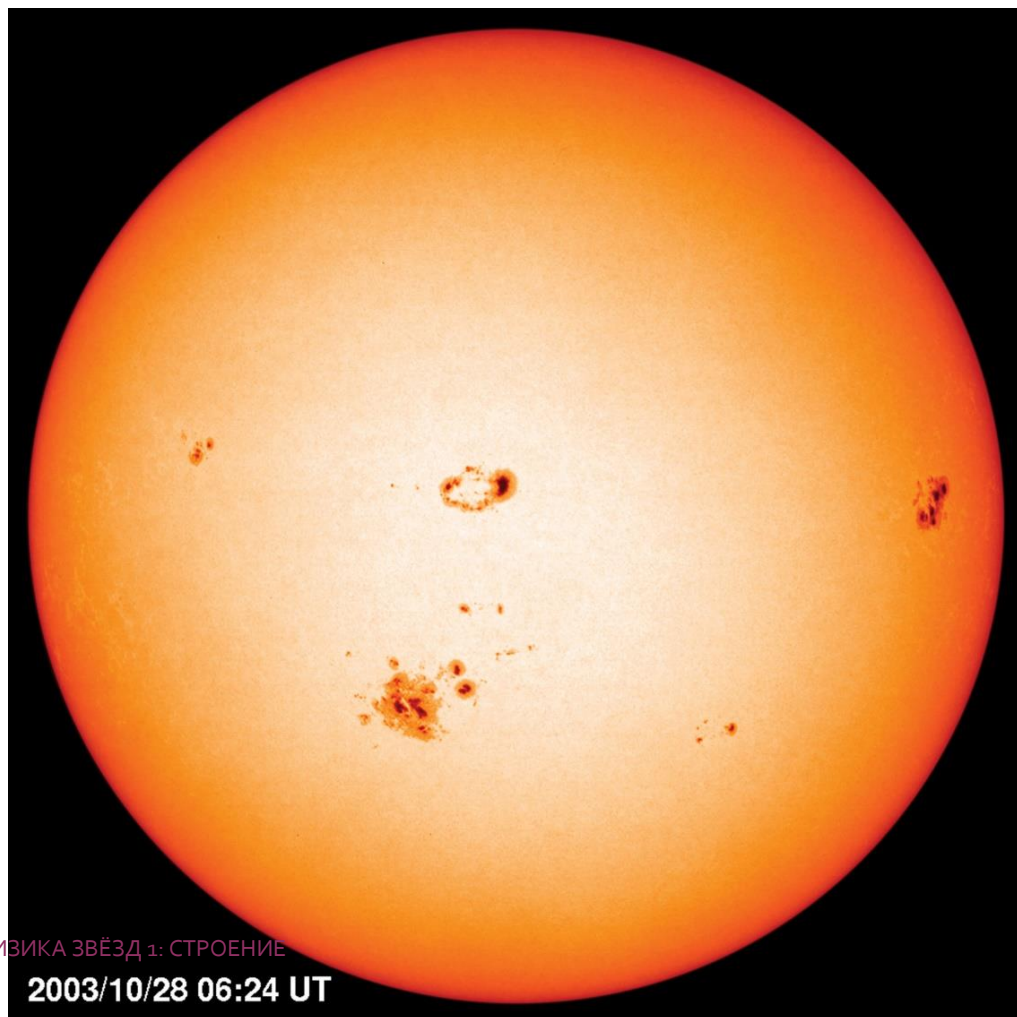
n	Где?
0	Твёрдые планеты
0.5...1	Нейтронные звёзды
1.5	Планеты гиганты и коричневые карлики, конвективные ядра звёзд, нерелятивистские белые карлики, звёзды главной последовательности.
3	Релятивистские белые карлики, звёзды главной последовательности.

СТРУКТУРА ЗВЕЗДЫ

- Зона лучистого переноса
- Конвективная зона
- Зона энерговыведения
(может быть конвективной, а может быть лучистой)

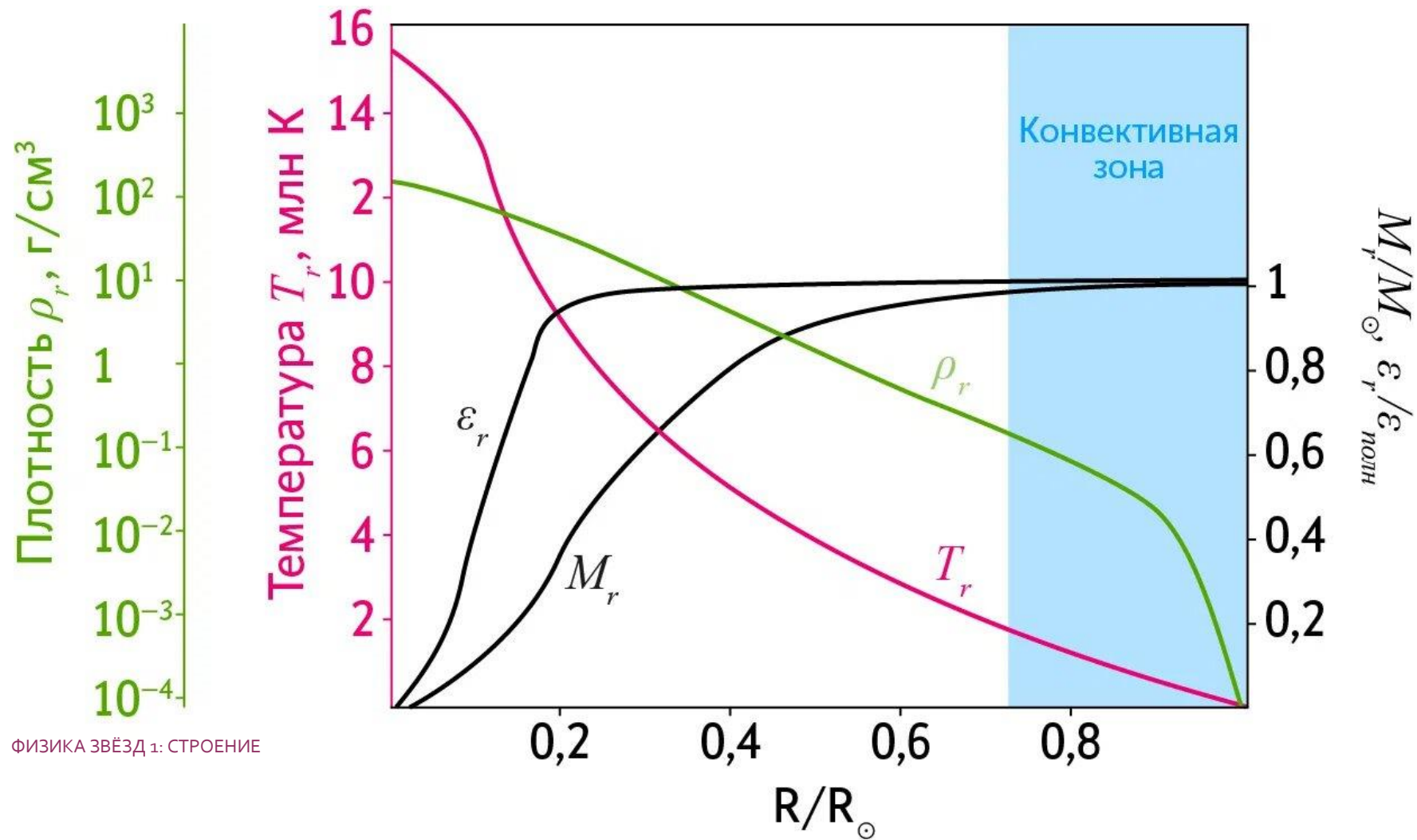


ПАРАМЕТРЫ СОЛНЦА – «ТИПИЧНОЙ» ЗВЕЗДЫ

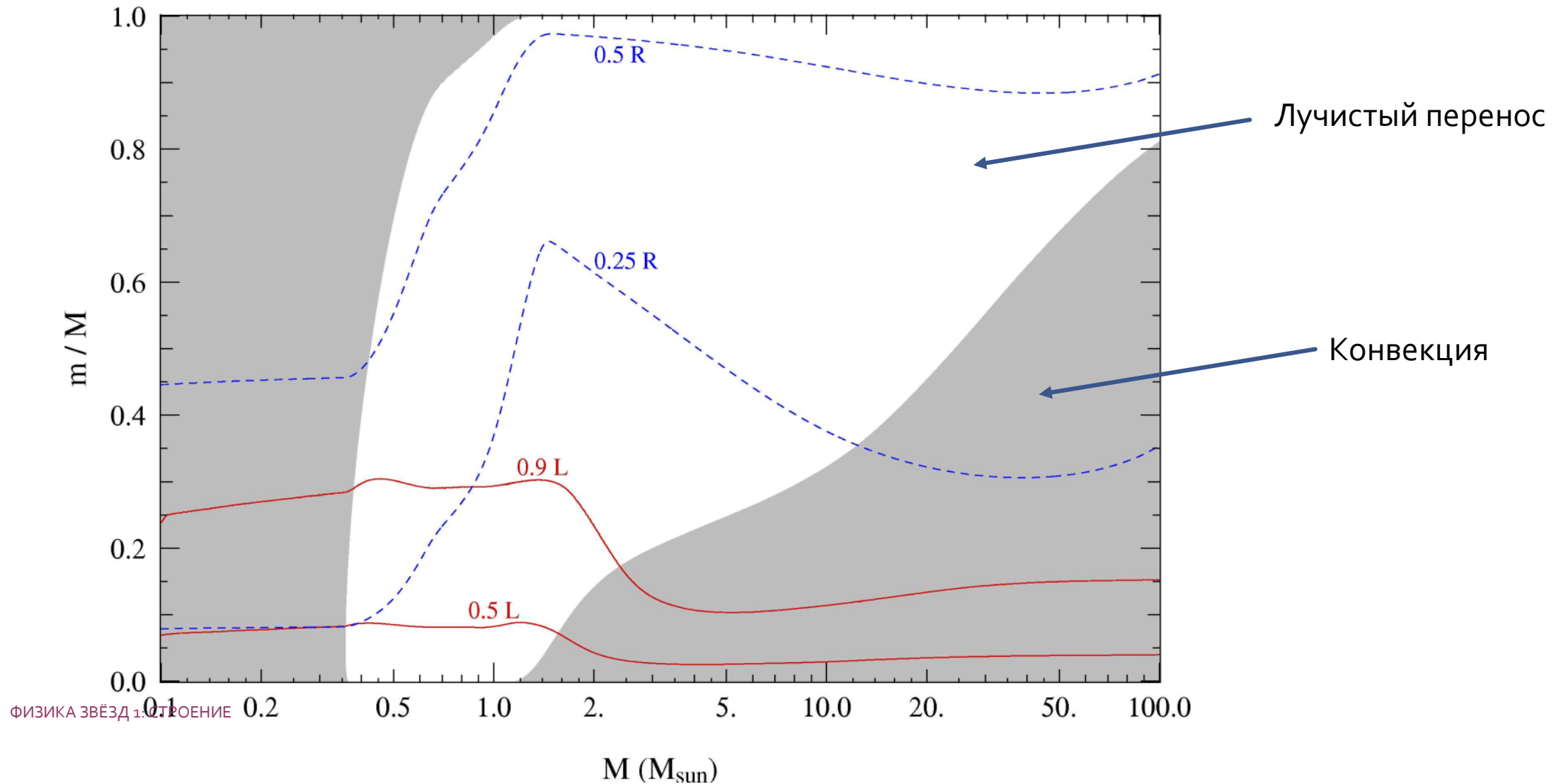


Масса	$1.99 \cdot 10^{33} \text{ г}$
Светимость	$3.86 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}$
Радиус	690000 км
Средняя плотность	1.4 г/см^3
Плотность в центре	$\sim 100 \text{ г/см}^3$
Температура поверхности	6000К
Температура в центре	10^7 К
Период вращения	25-38 дней
Состав	70% водород 28% гелий
Возраст	$5 \cdot 10^9 \text{ лет}$
Время жизни	$\sim 10^{10} \text{ лет}$

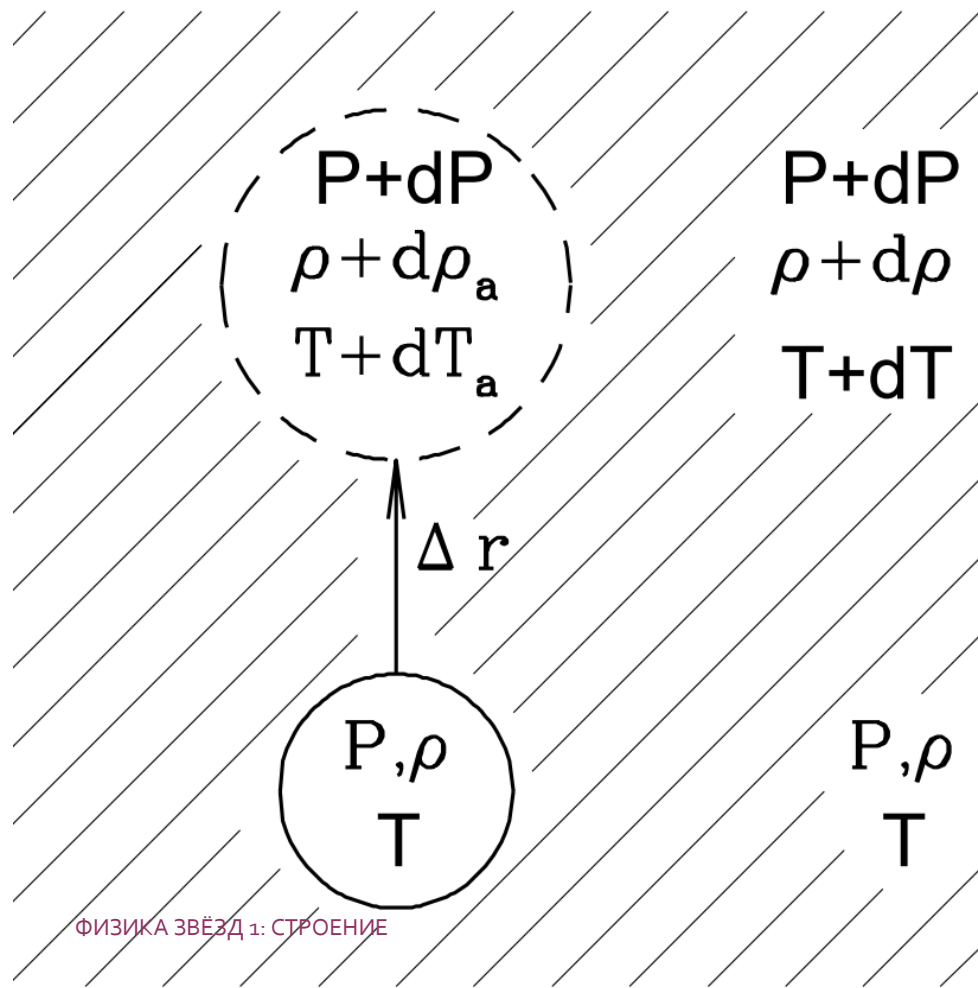
ВНУТРИ СОЛНЦА



ВНУТРИ ЗВЁЗД РАЗНЫХ МАСС



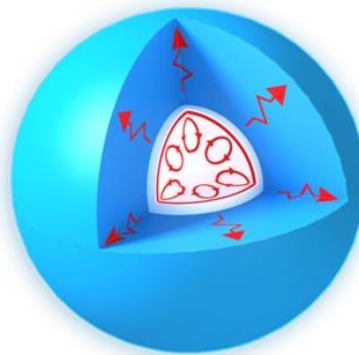
КОНВЕКЦИЯ ИЛИ ЛУЧИСТЫЙ ПЕРЕНОС?



ФИЗИКА ЗВЁЗД 1: СТРОЕНИЕ

Heat Transfer of Stars

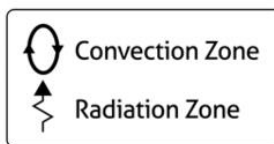
> 1.5 solar masses



0.5 - 1.5 solar masses



< 0.5 solar masses



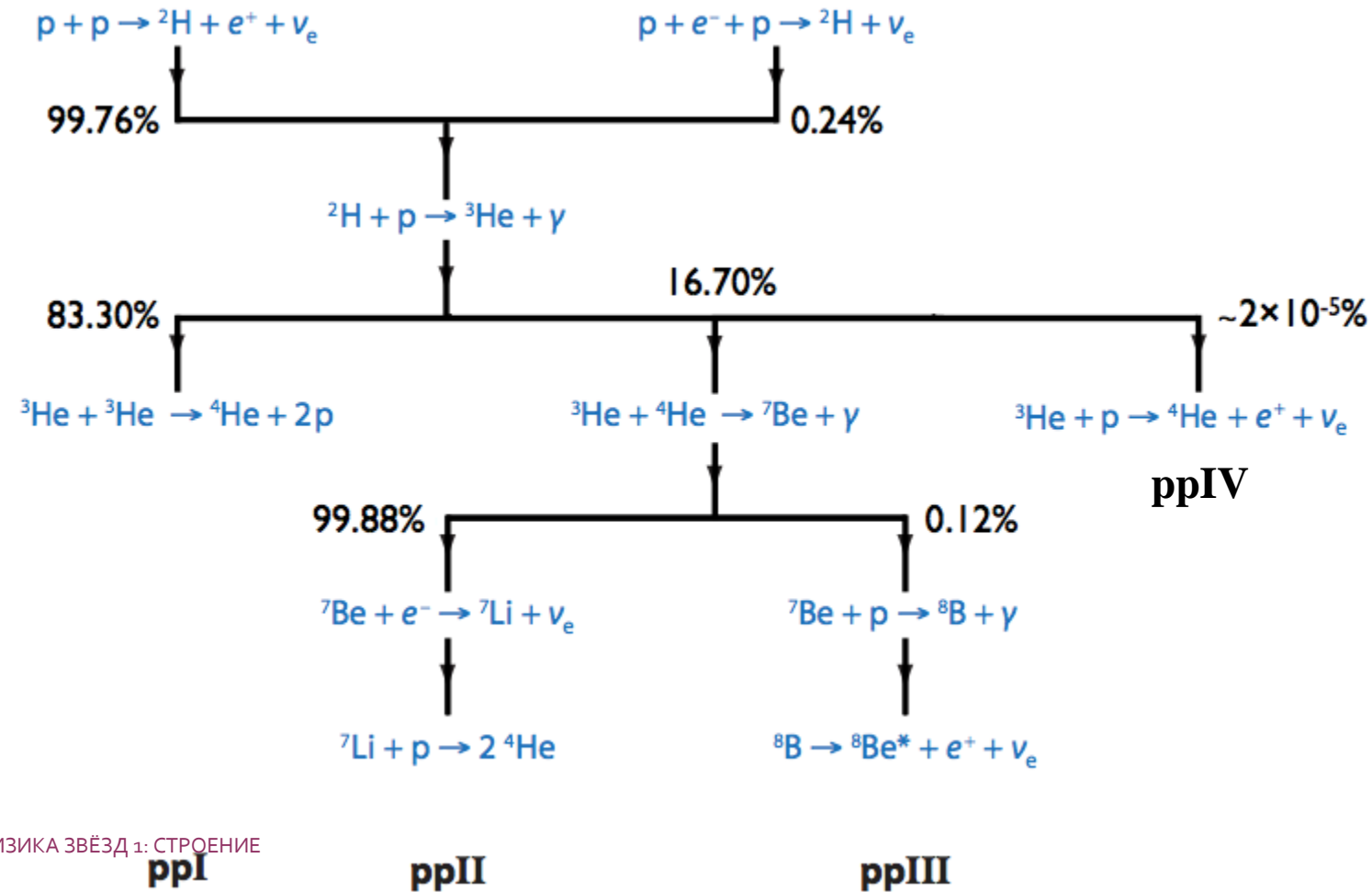
КОНВЕКЦИЯ ИЛИ ЛУЧИСТЫЙ ПЕРЕНОС?

$$\nabla_{ad} = \left(\frac{\partial \ln T}{\partial \ln P} \right)_{ad} < \left(\frac{\partial \ln T}{\partial \ln P} \right)_{rad} = \nabla_{rad}$$

Критерий Шварцшильда начала конвекции для химически-однородной среды

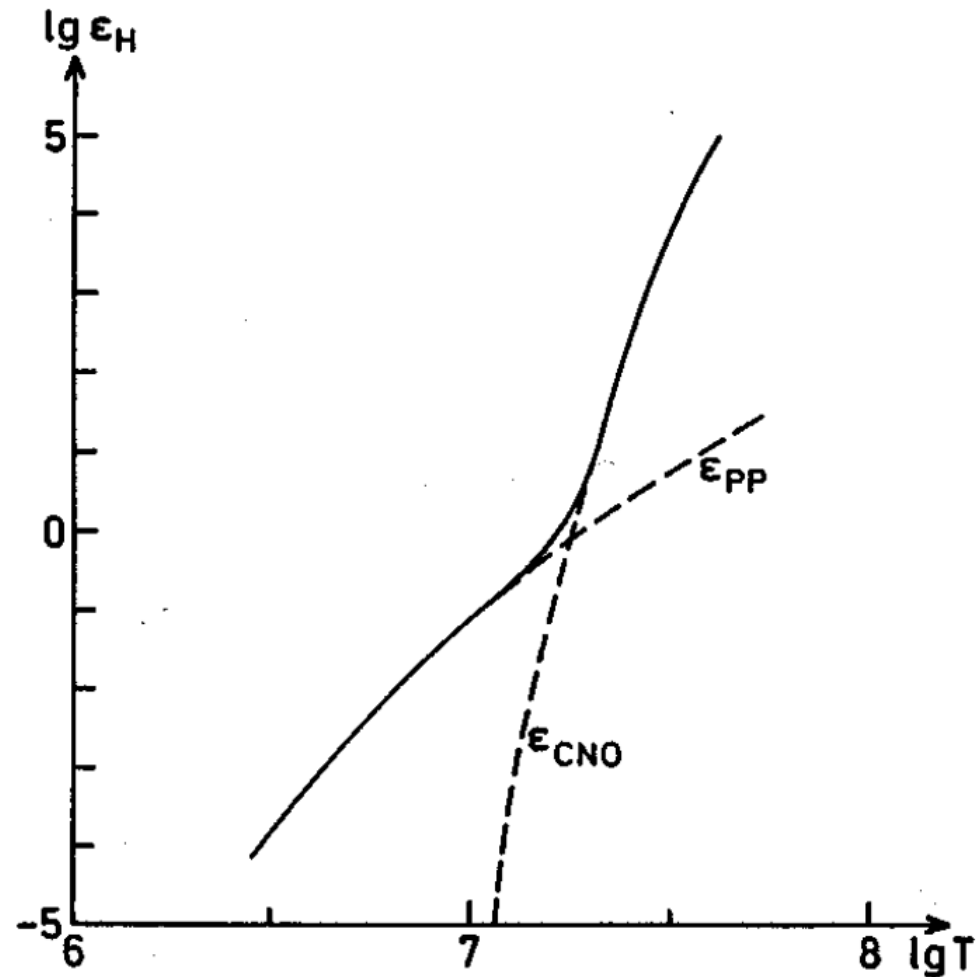
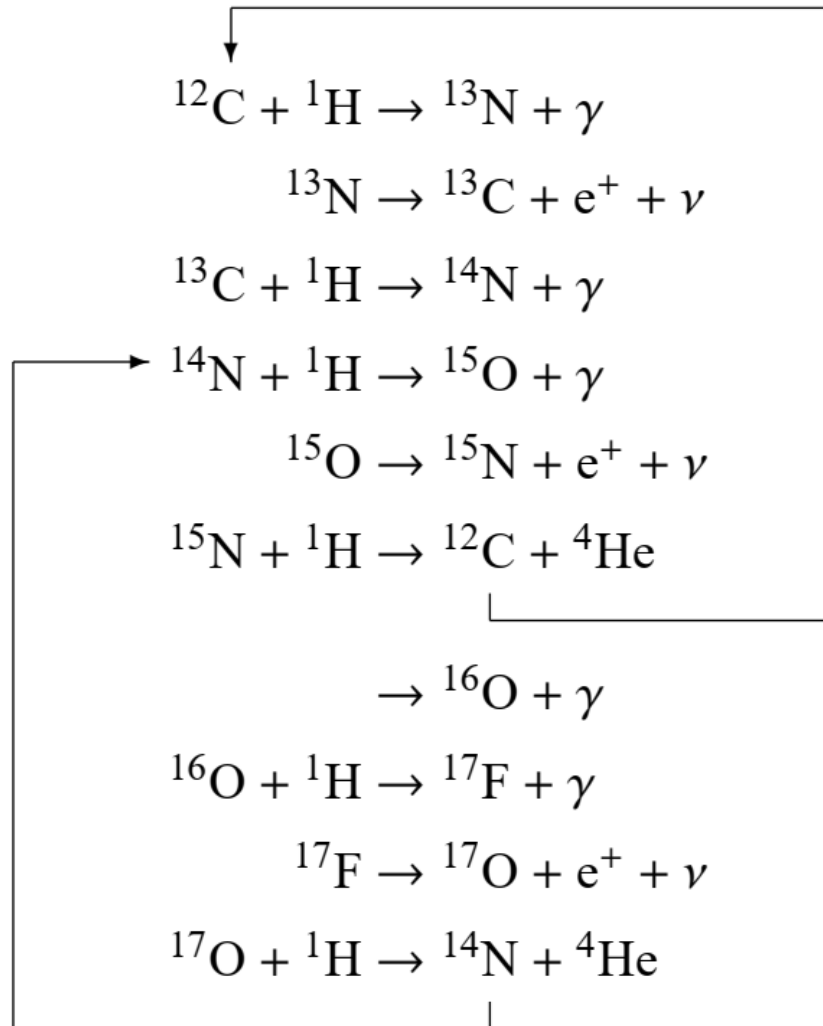
$$\frac{dT}{dm} = -\frac{Gm}{4\pi r^4} \frac{T}{P} \nabla \quad \text{with} \quad \nabla = \begin{cases} \nabla_{rad} = \frac{3\kappa}{16\pi acG} \frac{lP}{mT^4} & \text{if } \nabla_{rad} \leq \nabla_{ad} \\ \nabla_{ad} & \text{if } \nabla_{rad} > \nabla_{ad} \end{cases}$$

ТЕРМОЯДЕРНОЕ ГОРЕНИЕ: PP-ЦИКЛ

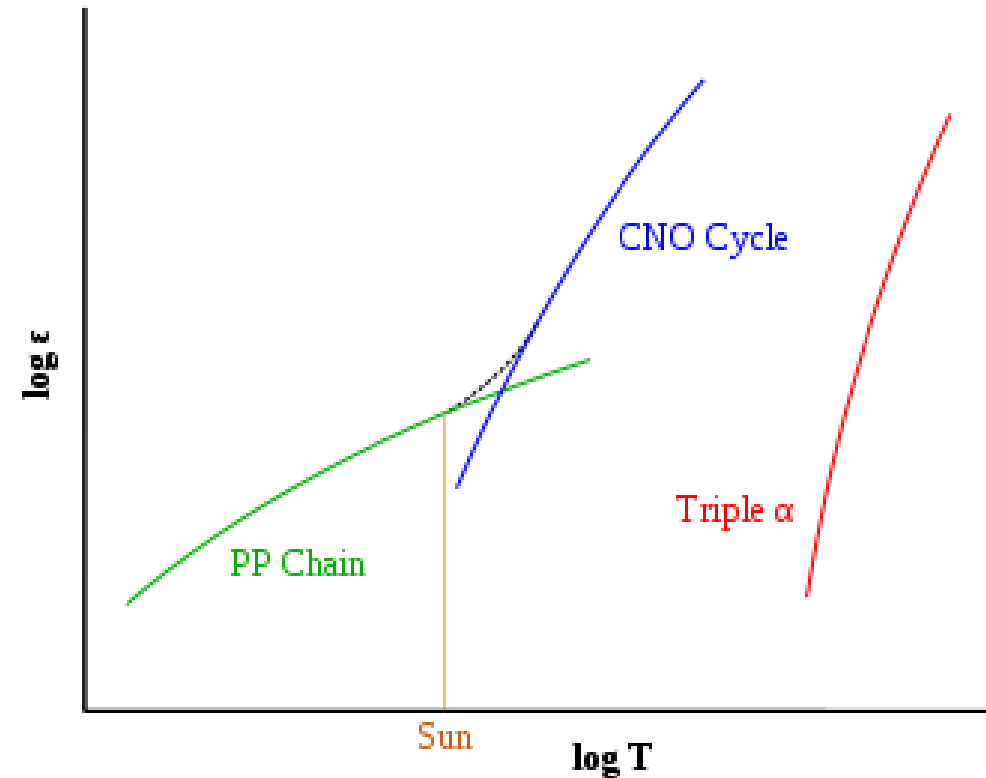
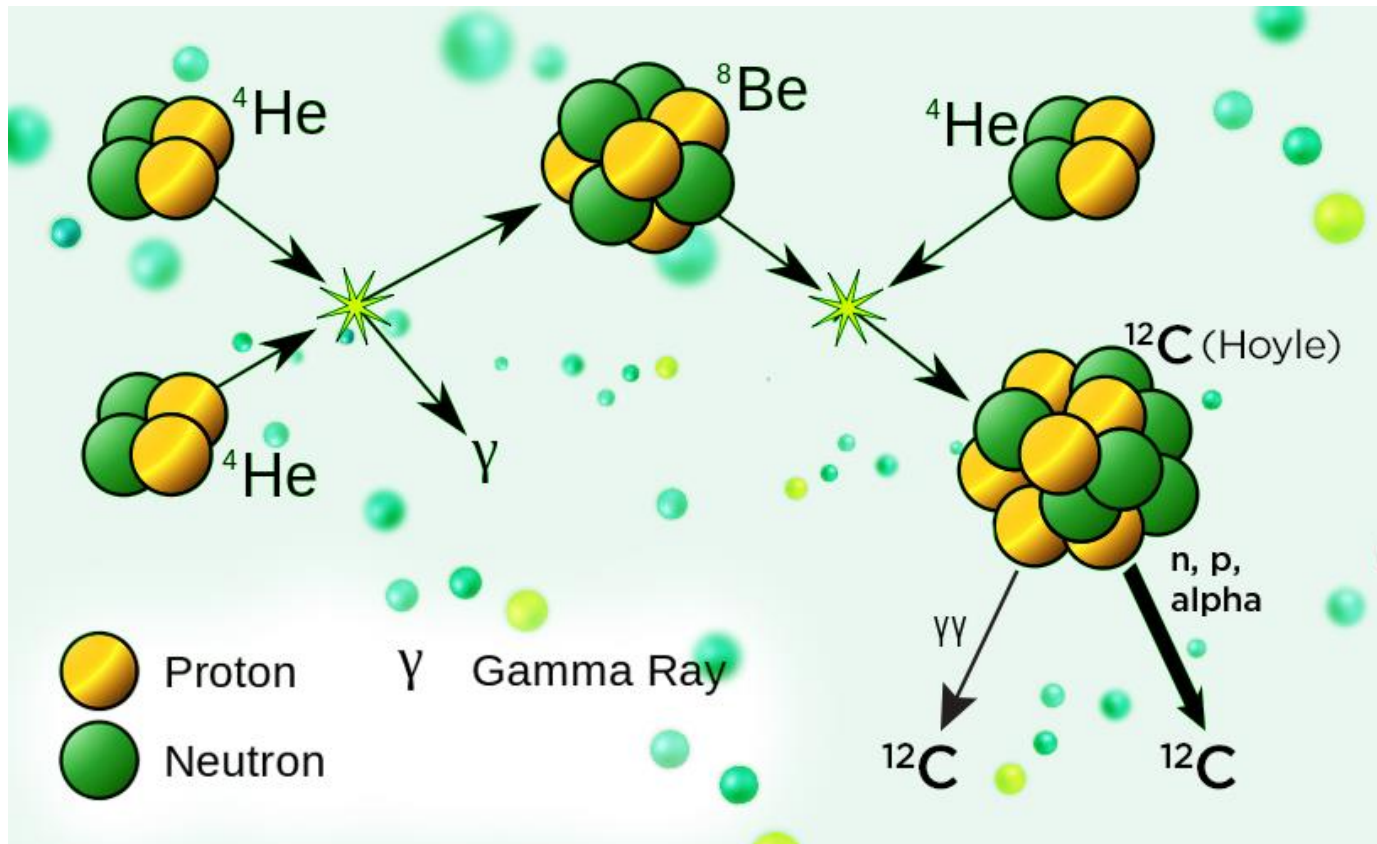


- $M > 0.08M_{\odot}$
- Характерное время реакции $p+p \sim 10^{10}$ лет
- Реакция идёт благодаря квантовому туннелированию
- p-p доминирует при температурах $\sim 10 - 14$ МК
- Удельное энергосодержание $\varepsilon \propto T^{3..4}$
- Эффективность $\sim 0.007Mc^2$

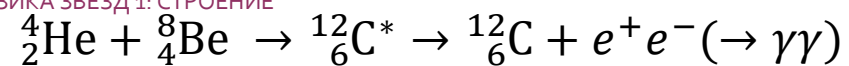
ТЕРМОЯДЕРНОЕ ГОРЕНИЕ: СНО-ЦИКЛ



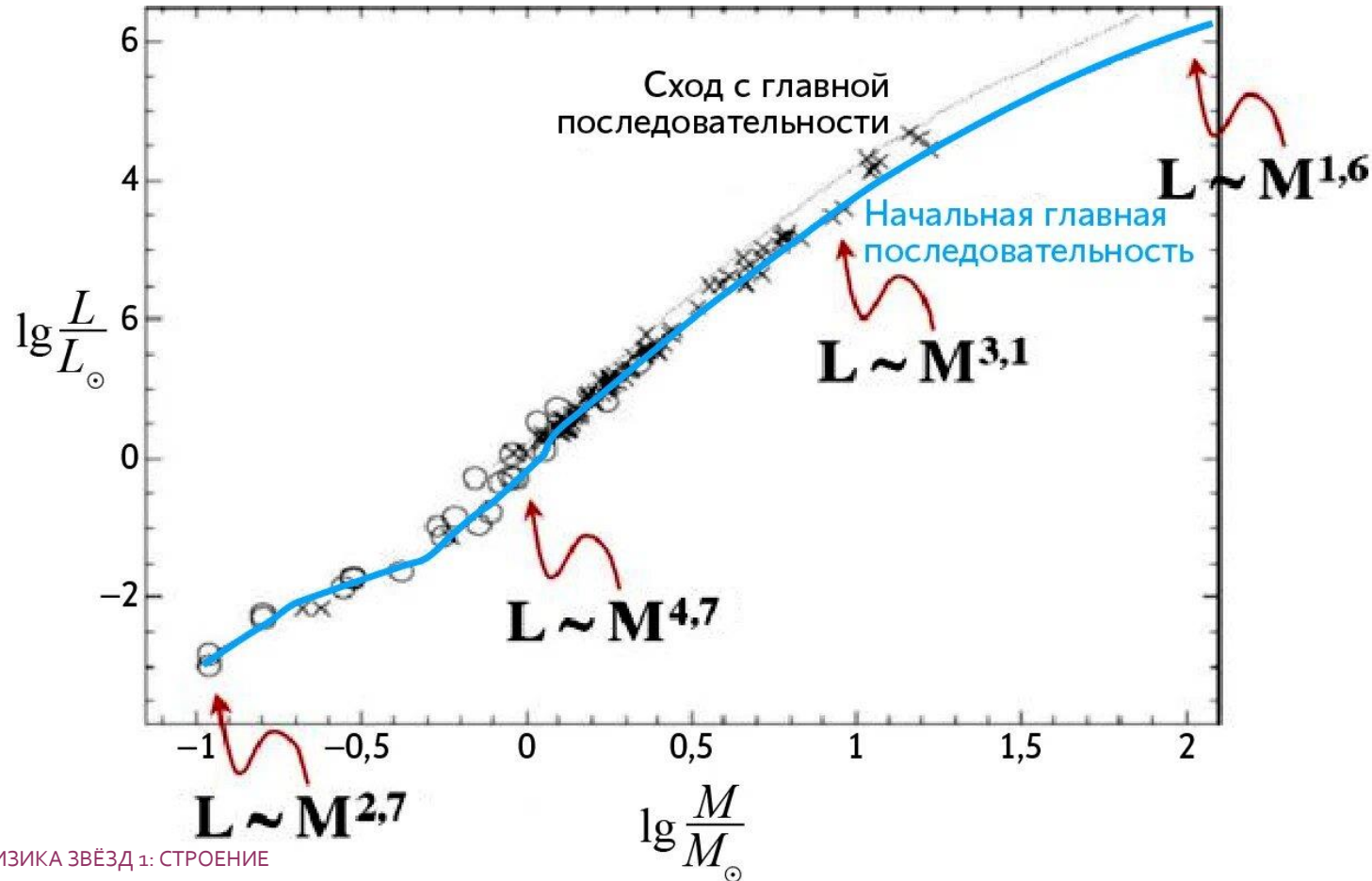
ТРОЙНОЙ АЛЬФА-ПРОЦЕСС



ФИЗИКА ЗВЁЗД 1: СТРОЕНИЕ



СООТНОШЕНИЕ МАССА-СВЕТИМОСТЬ



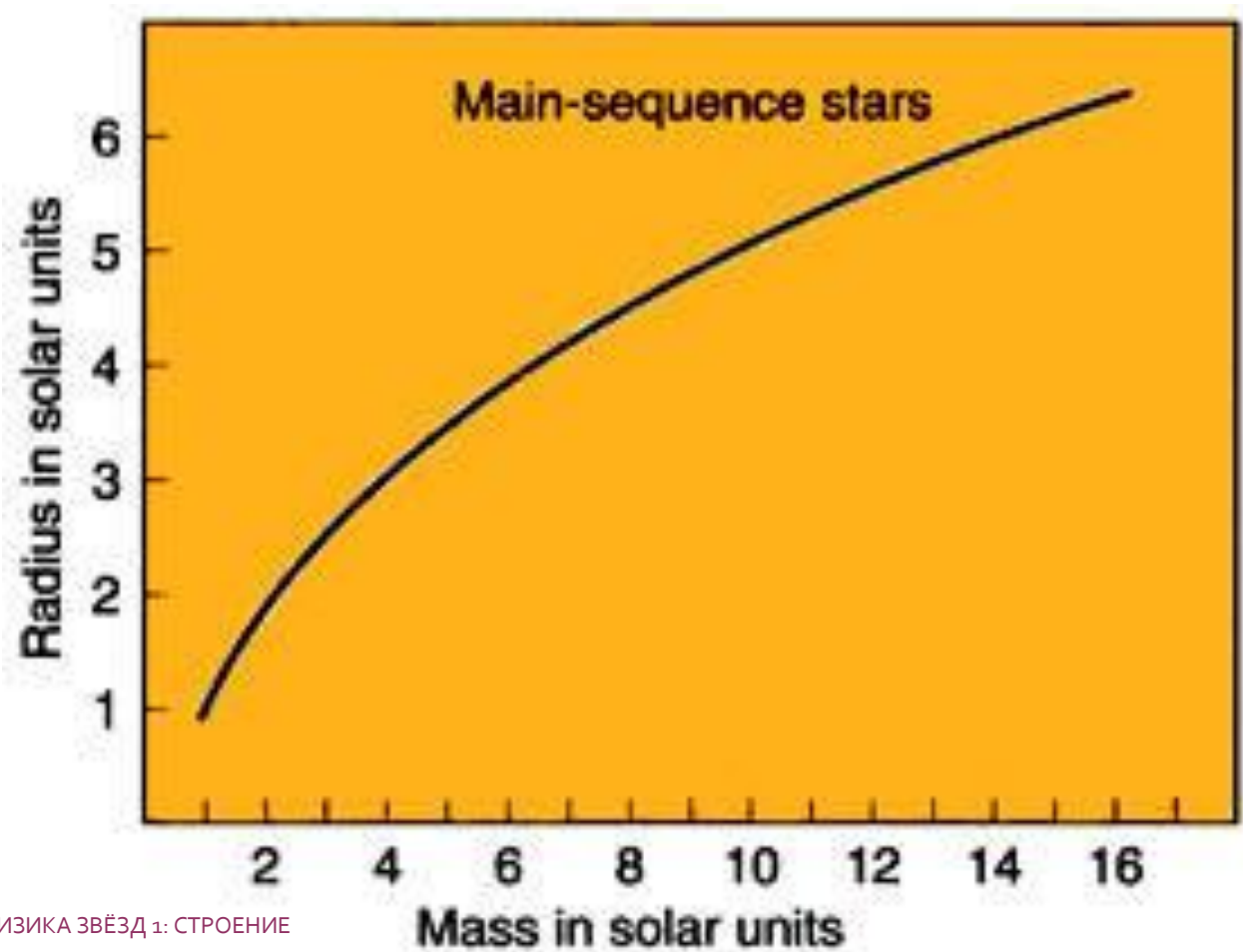
- В маломассивных звёздах преобладает газовое давление и поэтому

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

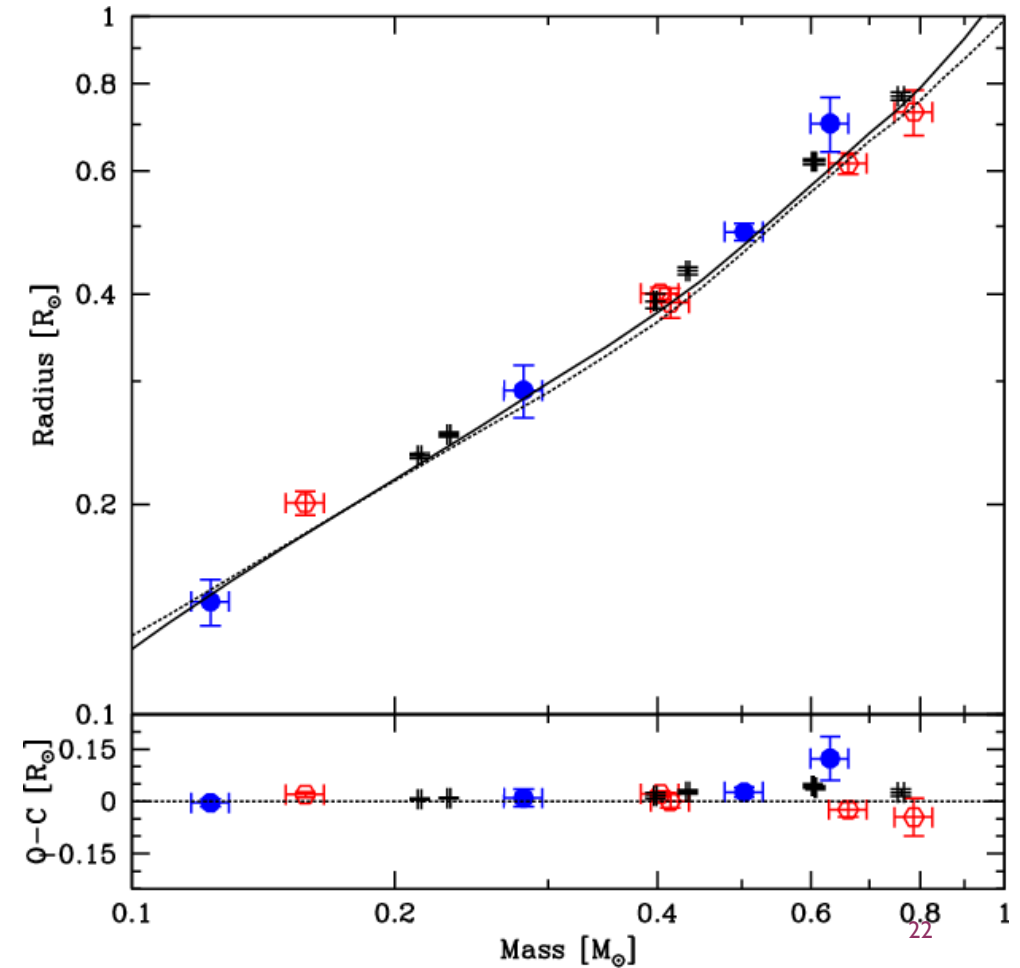
- В массивных звёздах существенно в том числе и давление излучения, поэтому

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

СОТНОШЕНИЕ МАССА-РАДИУС

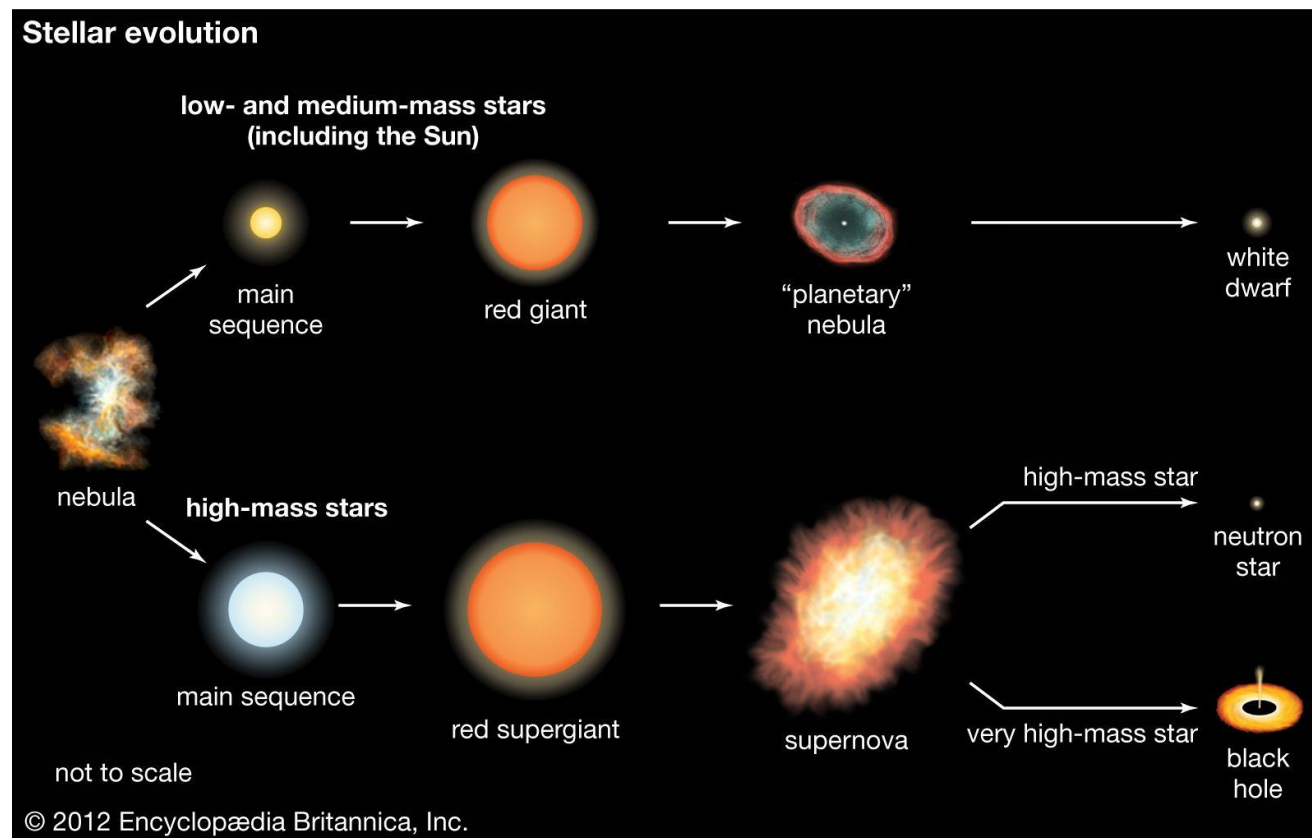


ФИЗИКА ЗВЁЗД 1: СТРОЕНИЕ

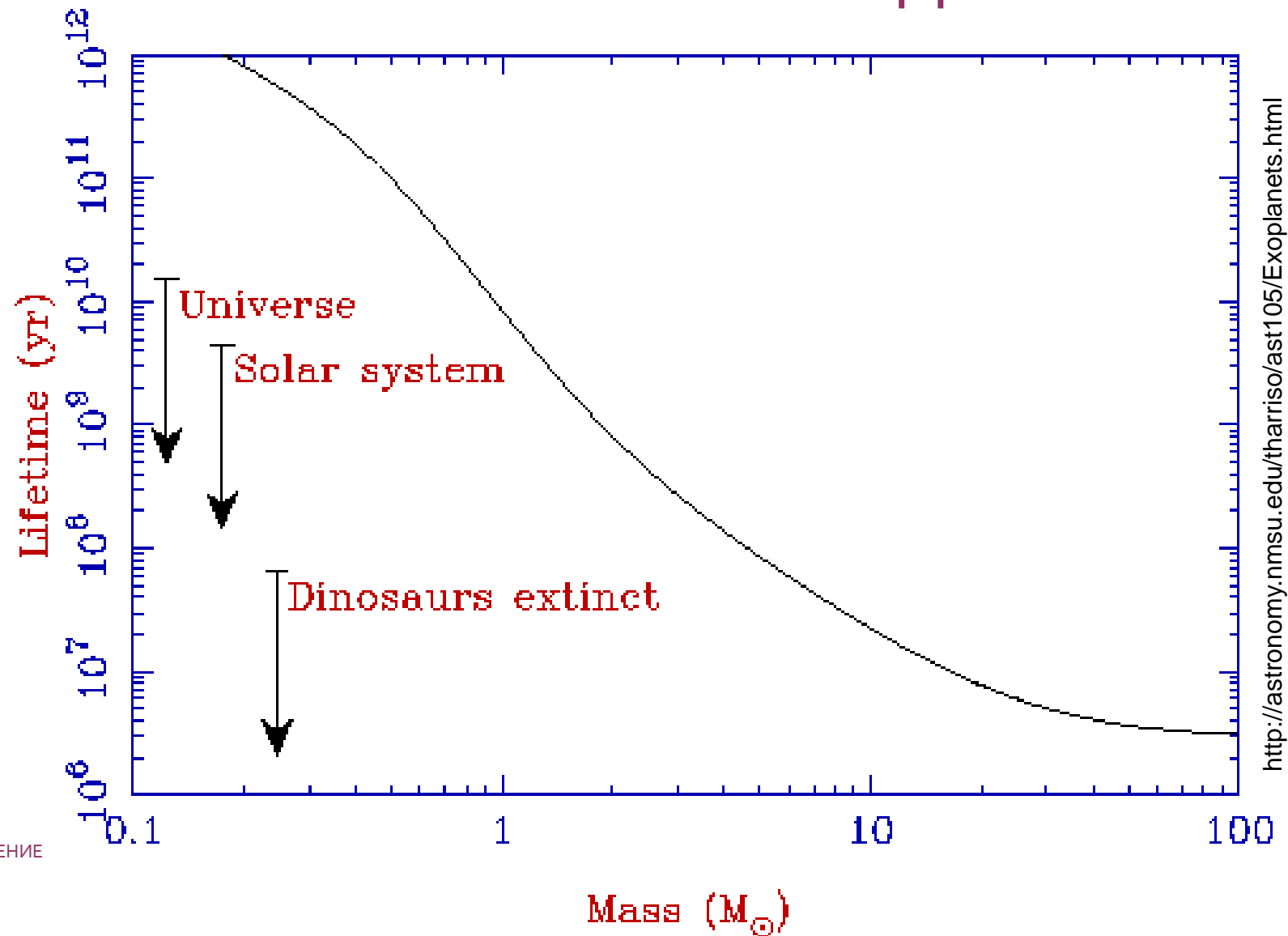


МАССА – ПЕРВЫЙ ГЛАВНЫЙ ПАРАМЕТР

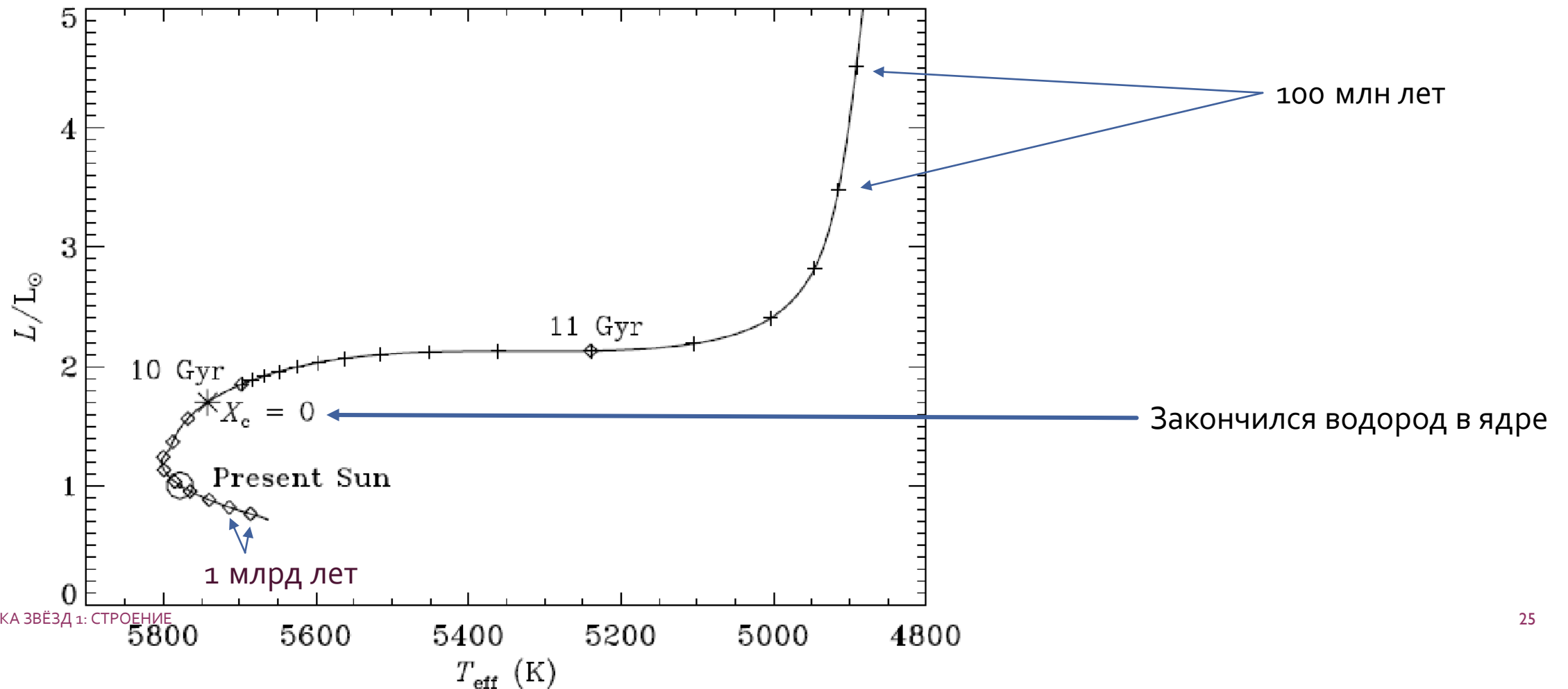
- Чем массивнее звезда – тем больше она излучает и меньше живет.
- Массивные звезды в конце жизни взрываются, а их ядра становятся нейтронными звездами или черными дырами.
- Маломассивные звезды сбрасывают оболочки, и их ядра становятся белыми карликами.



ВРЕМЯ ЖИЗНИ НА ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

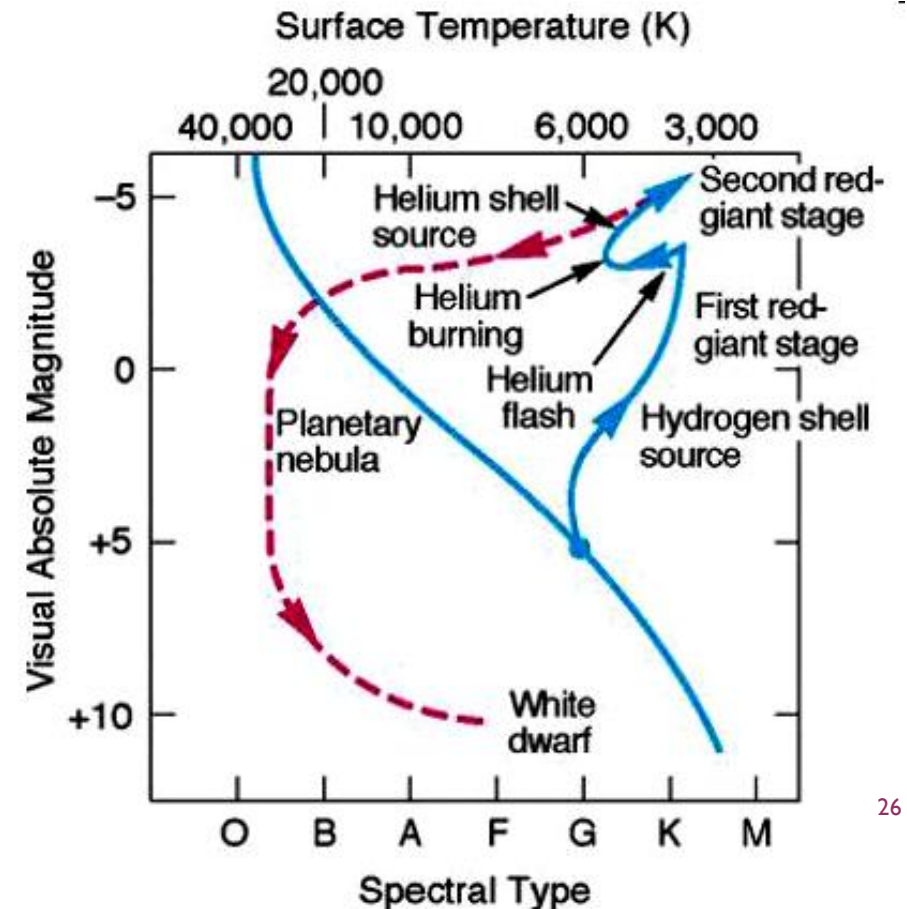
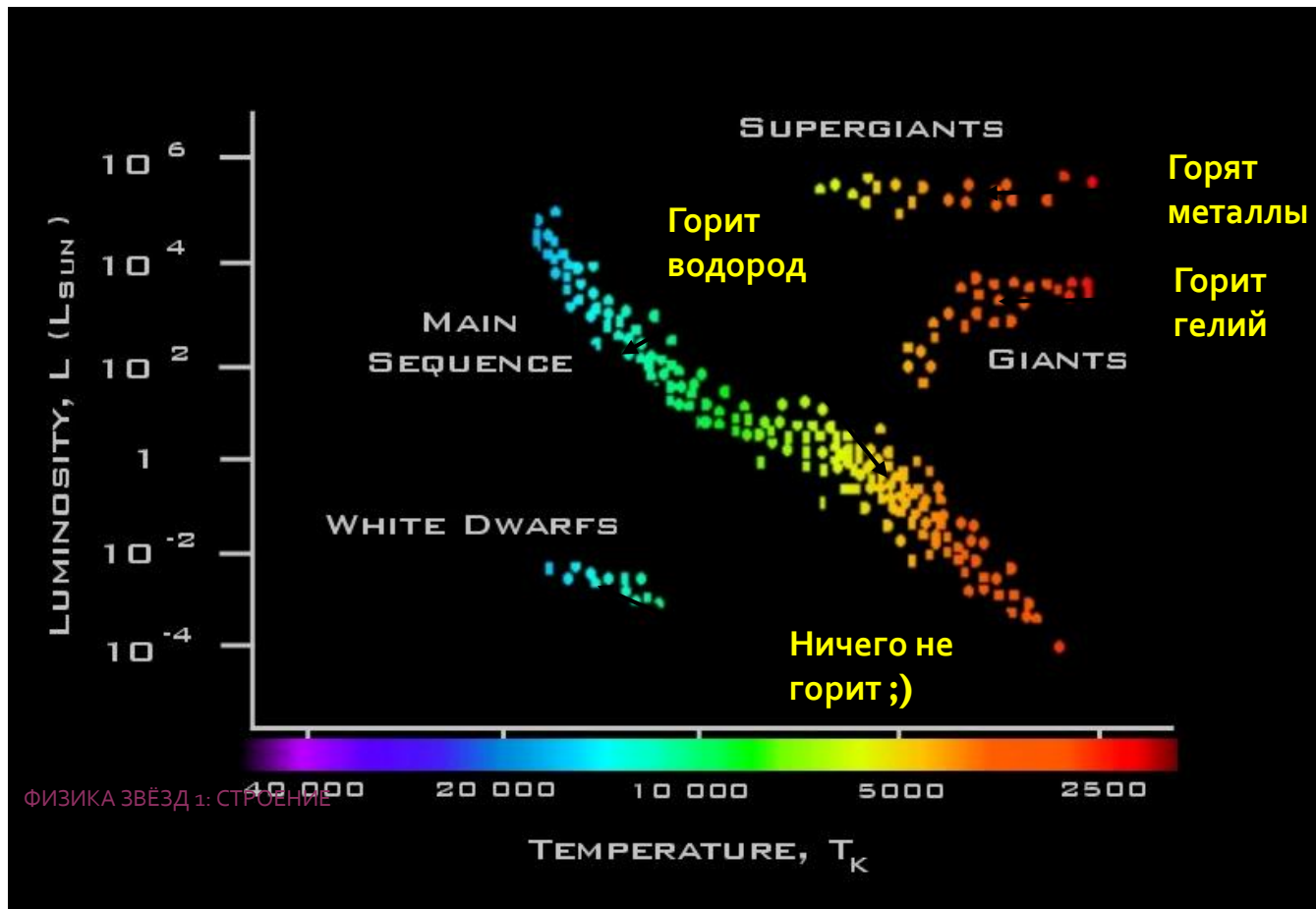


СОЛНЦЕ В БЛИЖАЙШИЕ МИЛЛИАРДЫ ЛЕТ



ЭВОЛЮЦИЯ

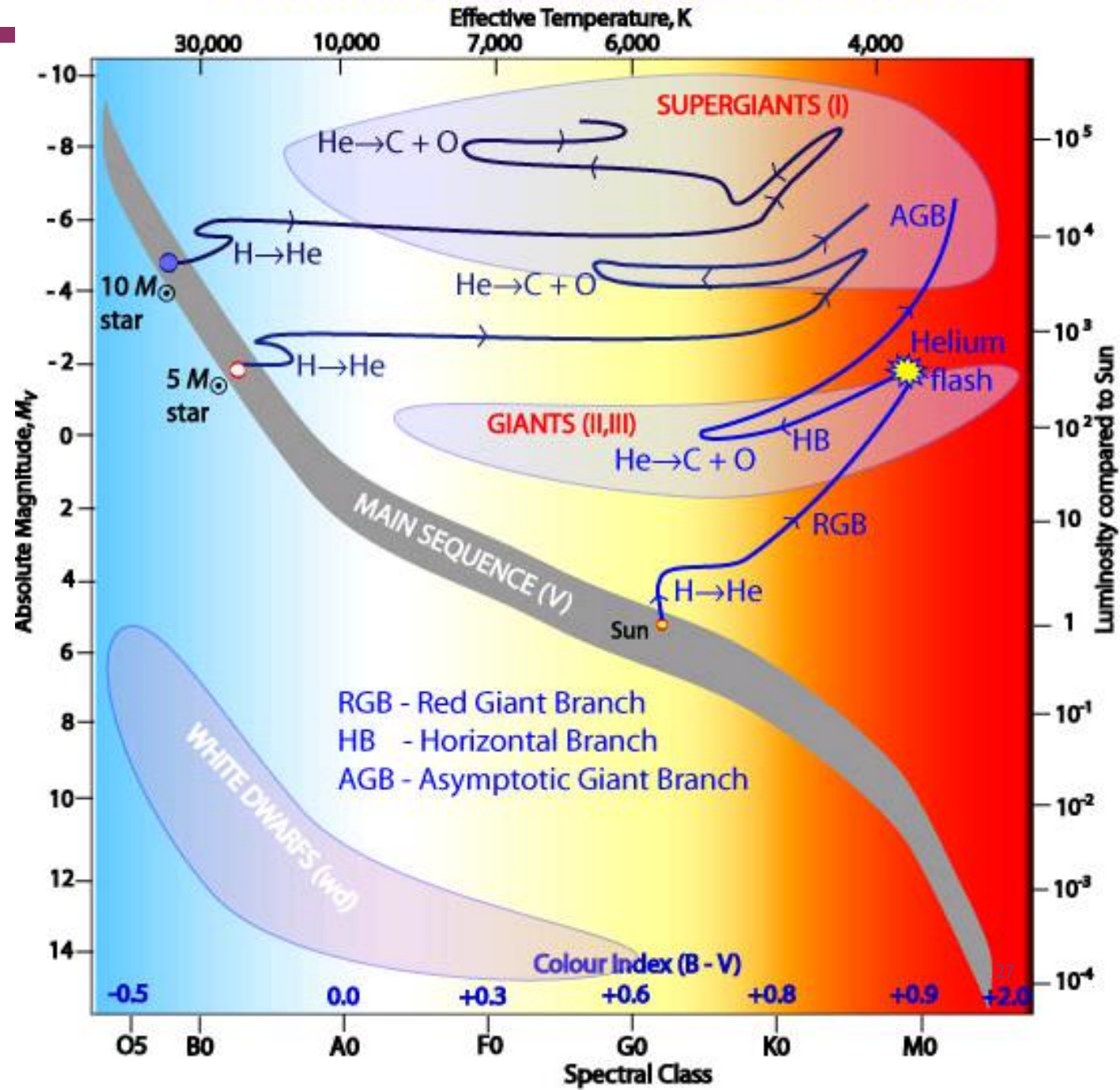
Эволюция звезды – это смена характера термоядерного горения её вещества в центре из-за изменения химического состава.



ЭВОЛЮЦИЯ

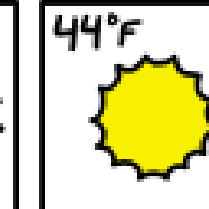
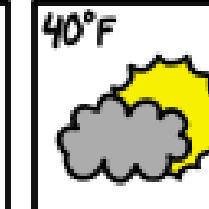
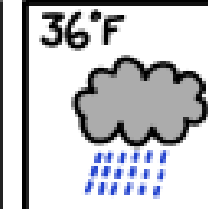
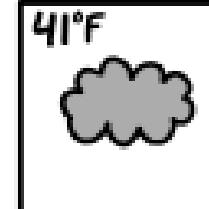
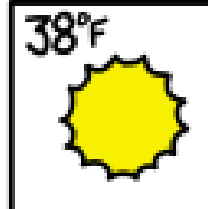
- За свою жизнь звезда переживает несколько эпох «главной последовательности», во время которых в ядре горят разные элементы.
- Чем тяжелее ядра горючего, тем быстрее оно сгорает.
- Горение более тяжелого элемента сопровождается БОЛЬШИМ энерговыделением.

Evolutionary Tracks off the Main Sequence

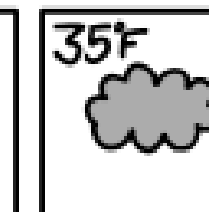
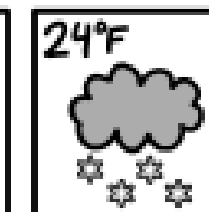
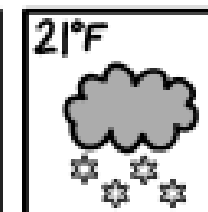
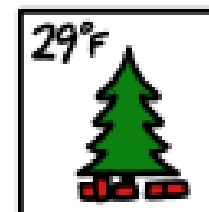
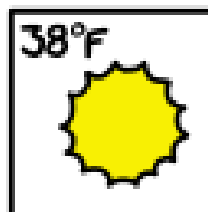


ПРОГНОЗ ПОГОДЫ

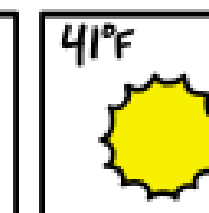
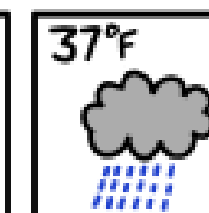
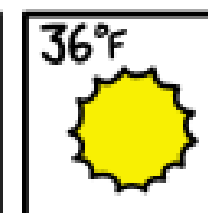
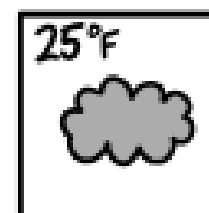
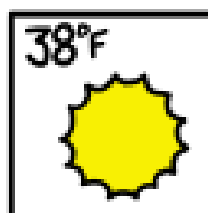
YOUR 5-DAY
FORECAST



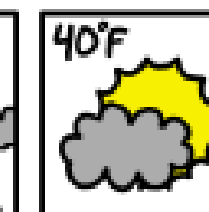
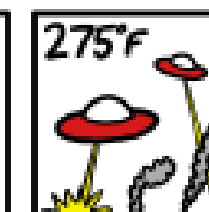
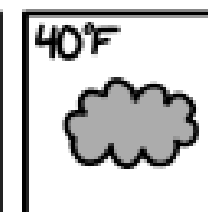
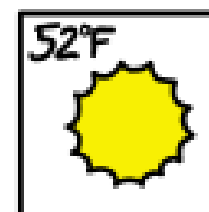
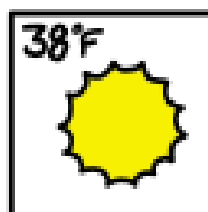
YOUR 5-MONTH
FORECAST



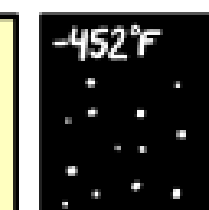
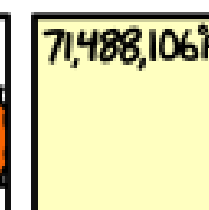
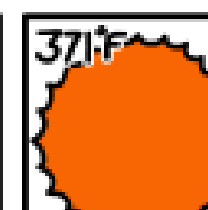
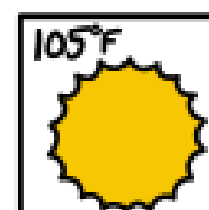
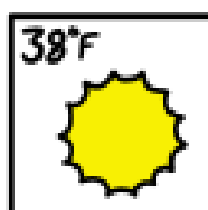
YOUR 5-YEAR
FORECAST



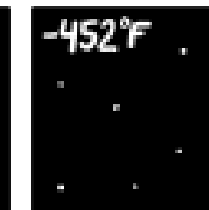
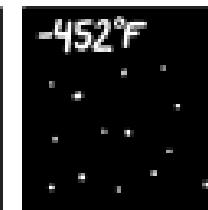
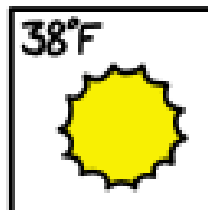
YOUR 5-MILLION-
YEAR FORECAST



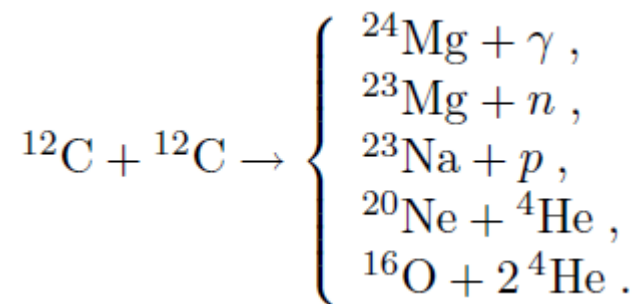
YOUR 5-BILLION-
YEAR FORECAST



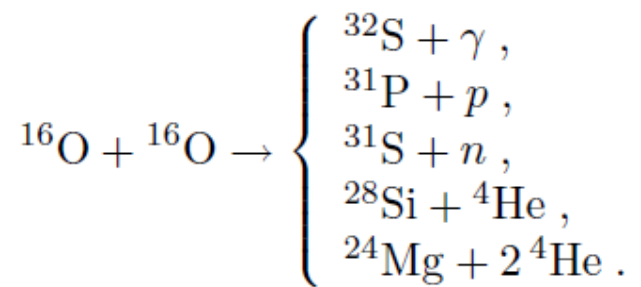
YOUR 5-TRILLION-
YEAR FORECAST



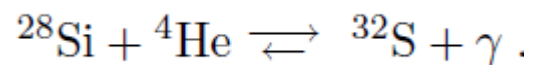
ЭВОЛЮЦИЯ МАССИВНОЙ ЗВЕЗДЫ



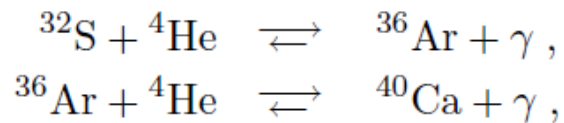
Первая стадия – горение углерода.
Углеродное ядро при $M > 10M_{\odot}$ невырожденное.



При миллиарде градусов начинается горение кислорода.

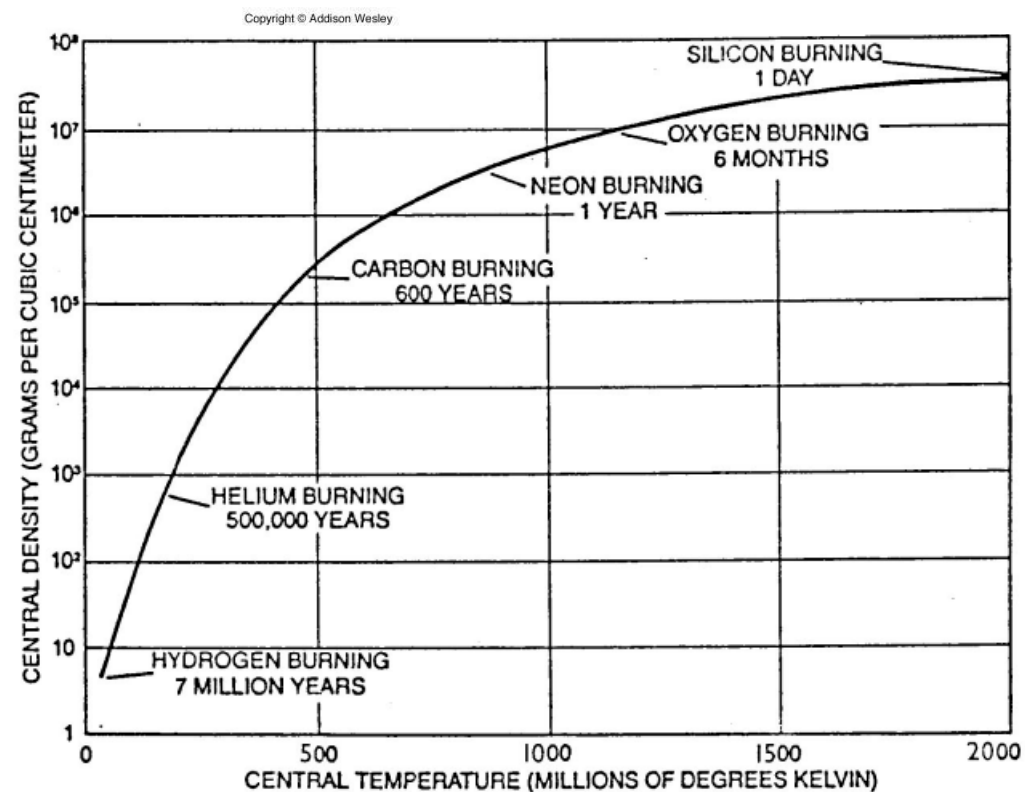
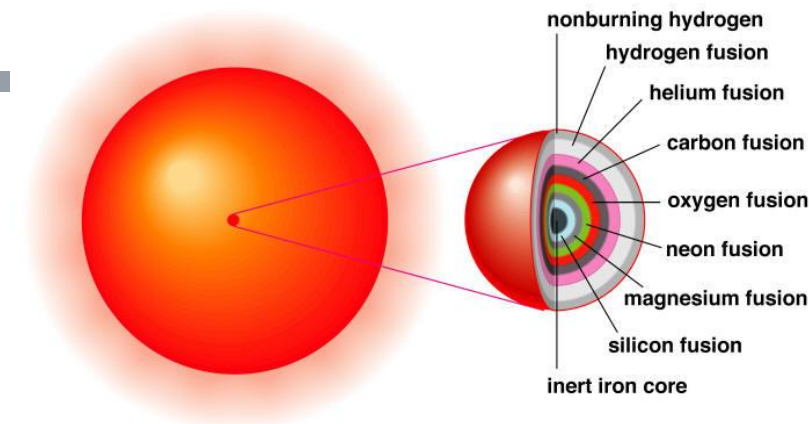
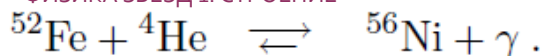


Фотодиссоциация приводит к Появлению альфа-частиц.









Наконец, начинаются реакции, достигающие до элементов группы железа.

ФИЗИКА ЗВЁЗД 1: СТРОЕНИЕ



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																							

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

а) Покажите, что самогравитирующее сферическое облако идеального газа начнёт коллапсировать, если его размер превысит величину джинсовской длины: $R > \lambda_J \propto \left(\frac{T}{\rho}\right)^{1/2}$. Здесь T – температура облака, а ρ – его плотность.

в) Вычислите (приблизительно) значения джинсовской длины λ_J и джинсовской массы $M_J = \rho \lambda_J^3$ для молекулярного водородного облака, температура которого $T = 10$ К, а концентрация $n = 10^4$ см⁻³.

