

The background is a deep blue gradient with faint, stylized celestial elements. On the left, there are concentric circular arcs and a semi-circular scale with numerical markings from 140 to 260. Scattered across the background are various circular patterns, some solid and some dashed, with small arrows indicating a clockwise direction of rotation. The overall aesthetic is scientific and cosmic.

ЗВЁЗДЫ И ИХ ЭВОЛЮЦИЯ

(ЛЕКЦИЯ 5. МОДУЛЬ «АСТРОФИЗИКА». ВЕСНА 2022. ВШЭ)

АНТОН БИРЮКОВ, К.Ф.-М.Н.

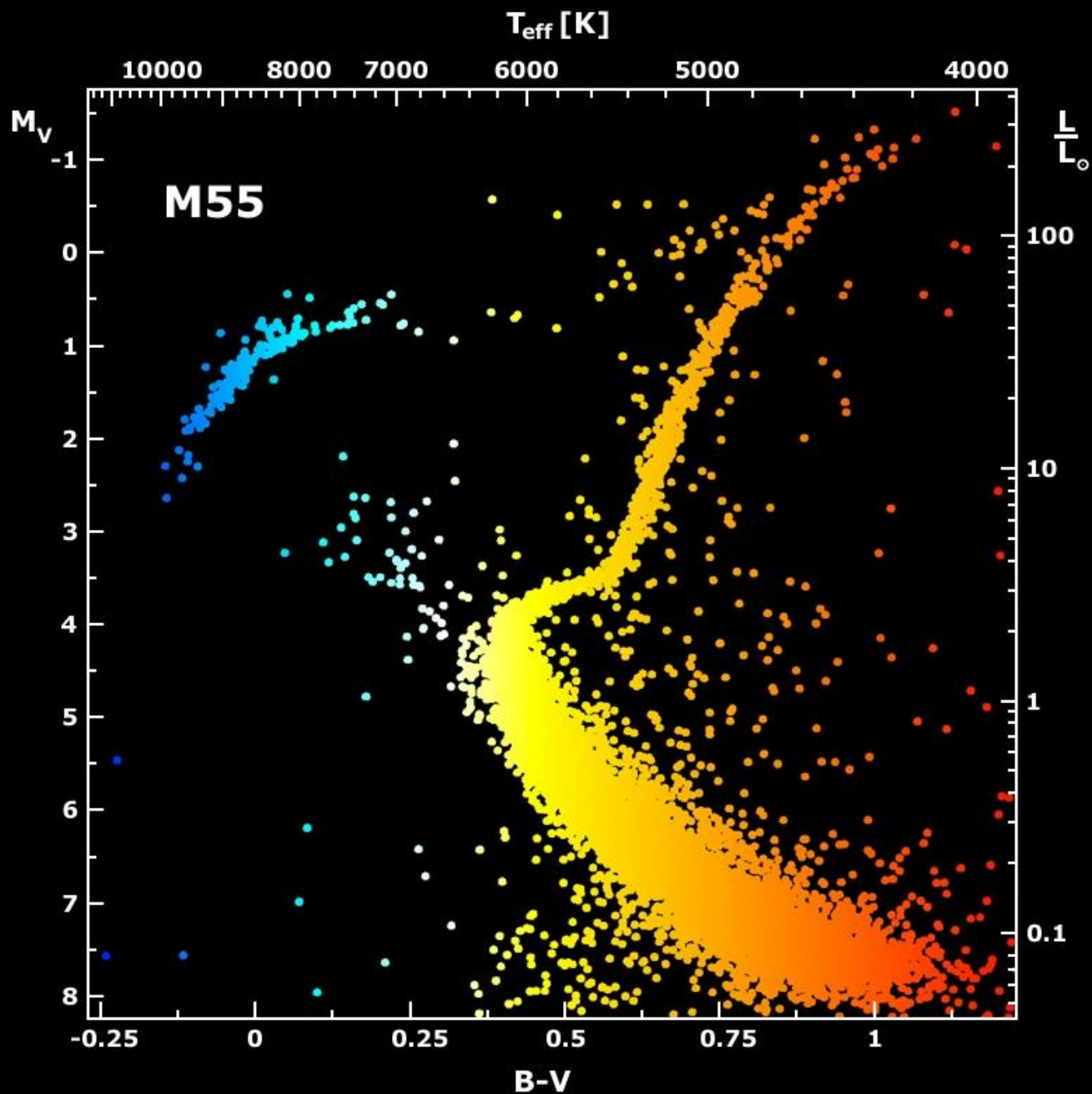
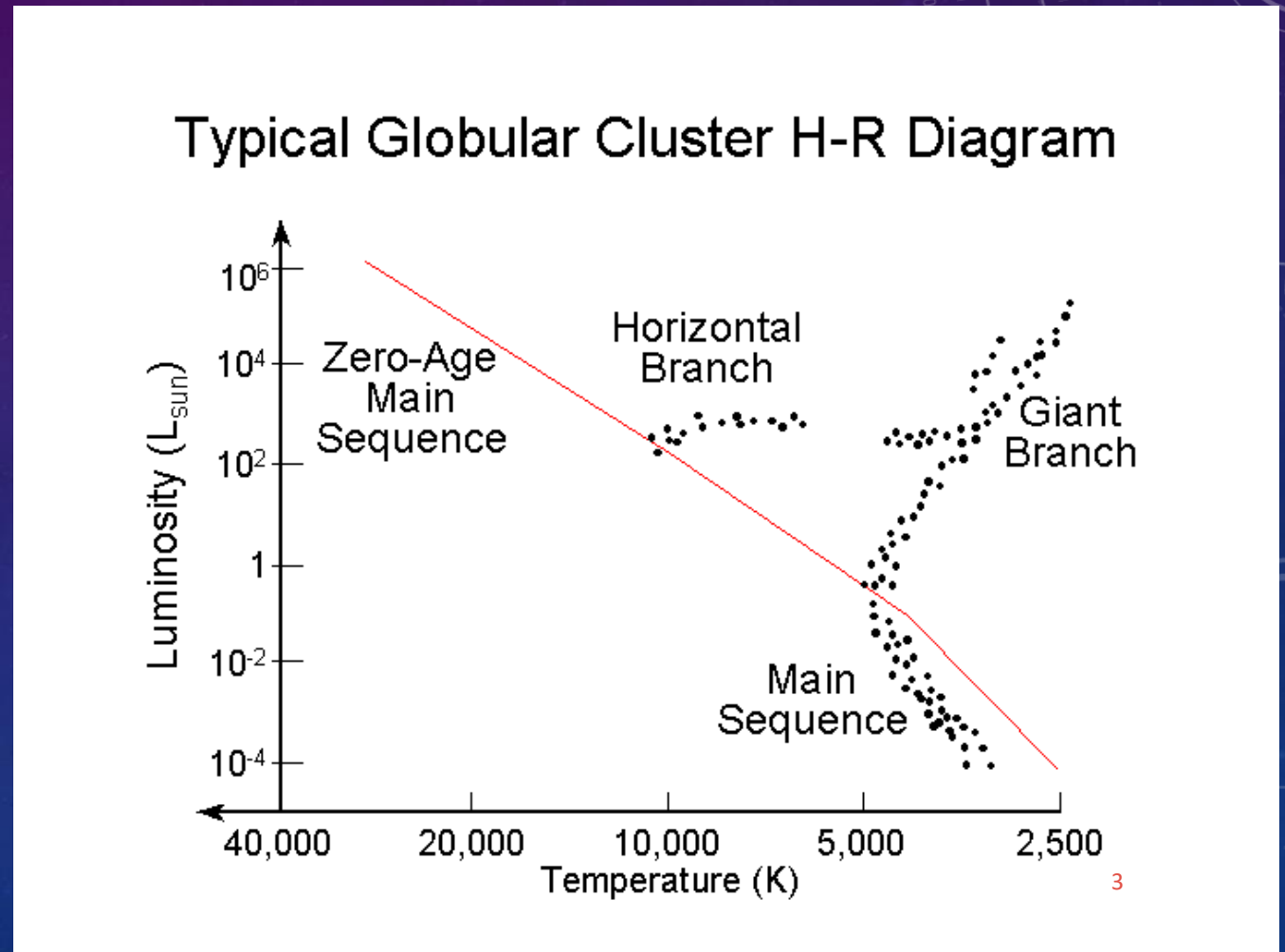
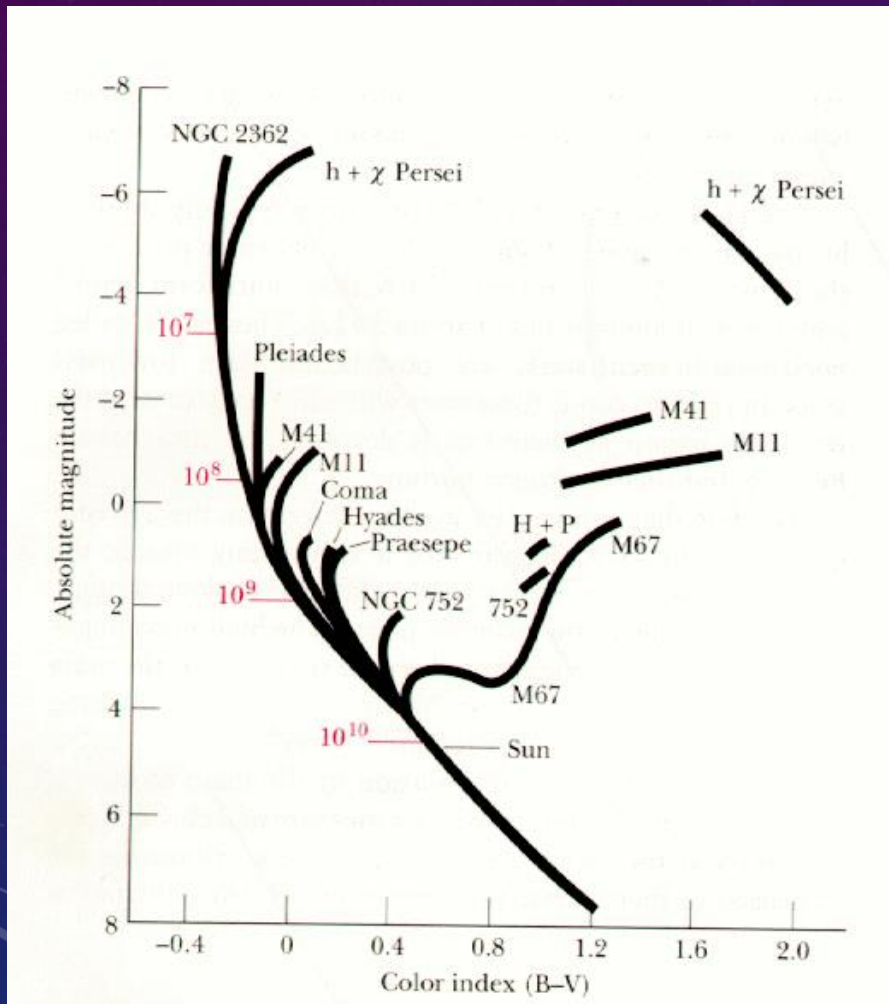
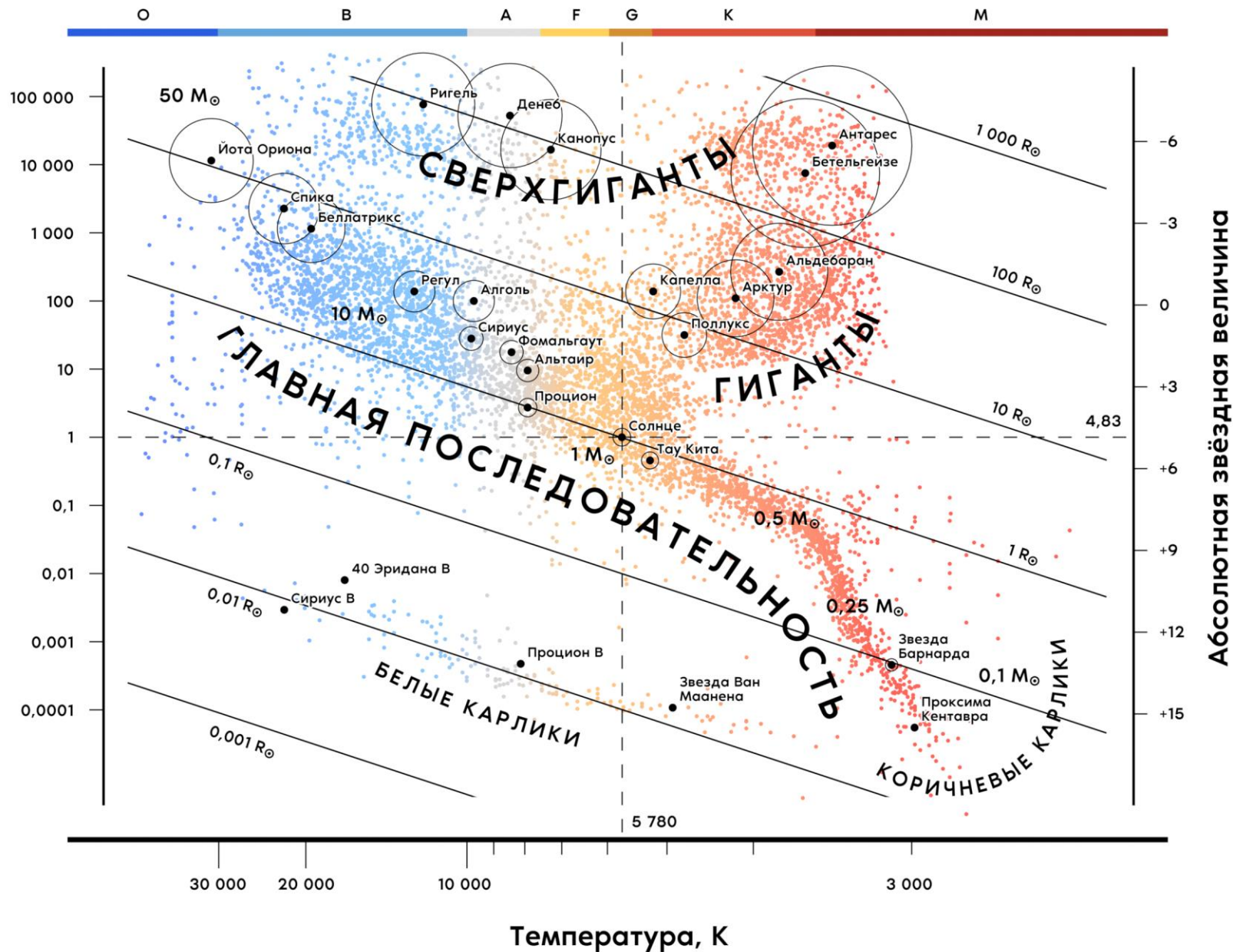


ДИАГРАММА
ЦВЕТ – ВЕЛИЧИНА
(ГЕРЦШПРУНГА-РАССЕЛА)



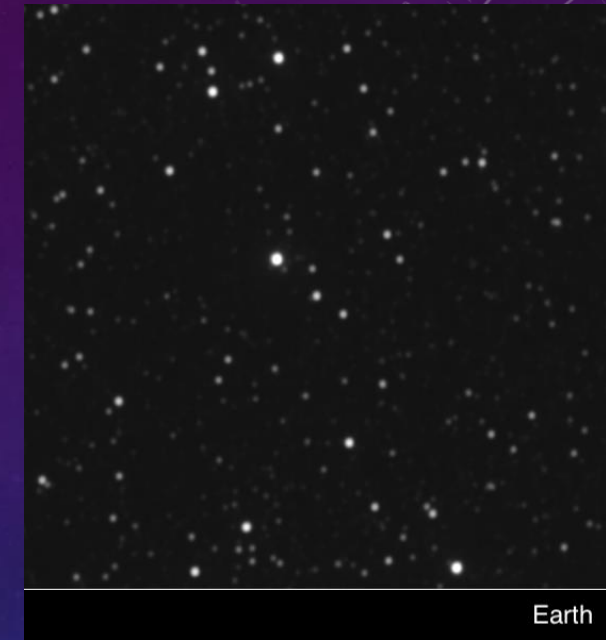
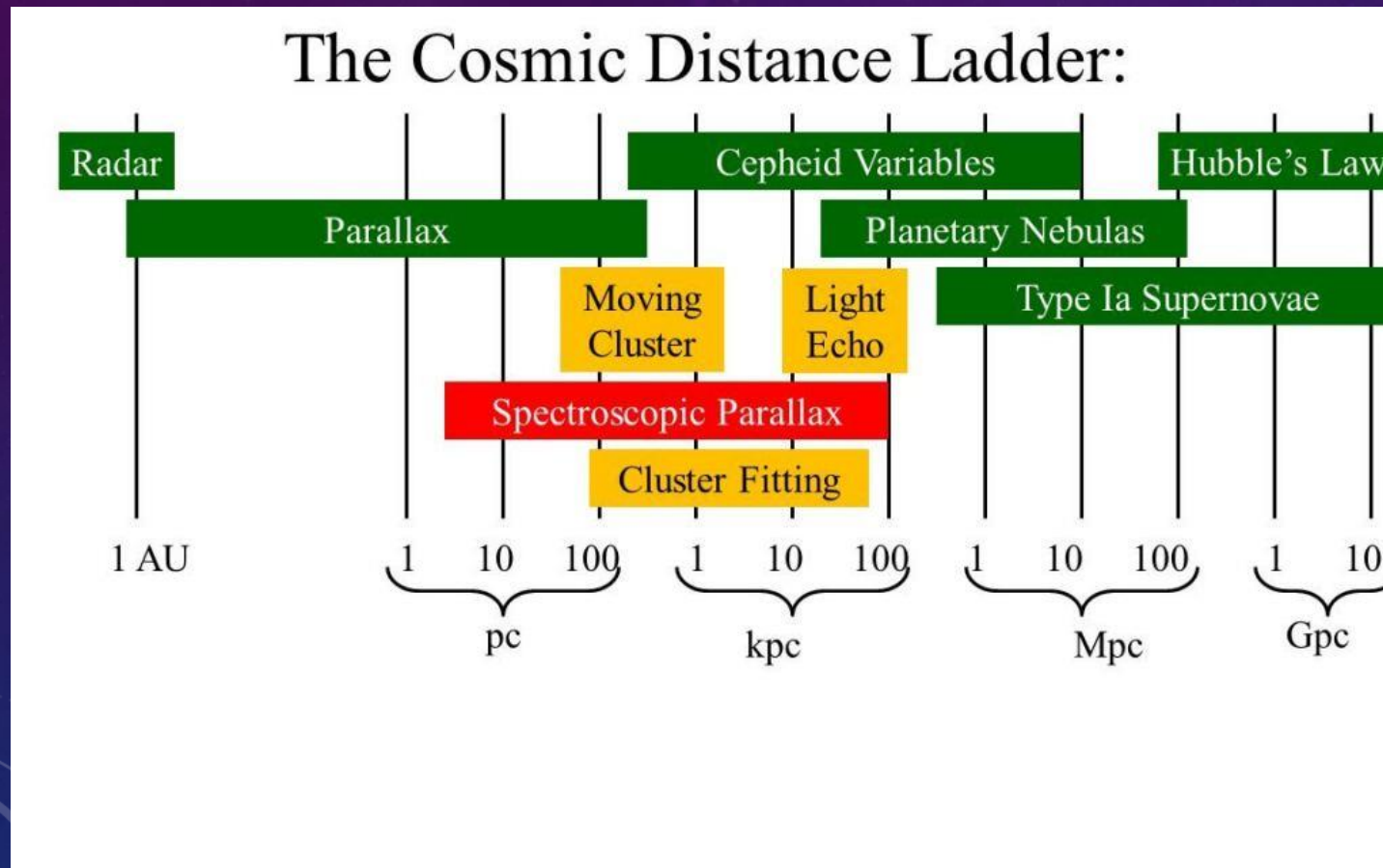
ГР-ДИАГРАММА ДЛЯ РАССЕЯННЫХ СКОПЛЕНИЙ



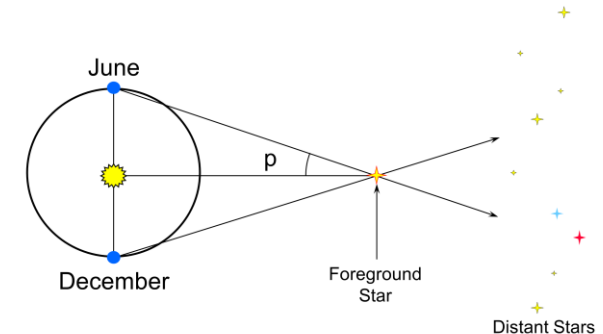


- Температуры определяются по спектрам.
- Для определения светимости необходимо знать расстояние (в идеале – по параллаксу), а также учесть межзвездное поглощение.
- Самые легкие звезды имеют массу 0.08 солнечных.
- Самые тяжелые из образующихся сейчас около 100-200.
- С ростом массы резко растет светимость.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

РАССТОЯНИЯ ДО ЗВЁЗД



Method of Trigonometric Parallaxes



5

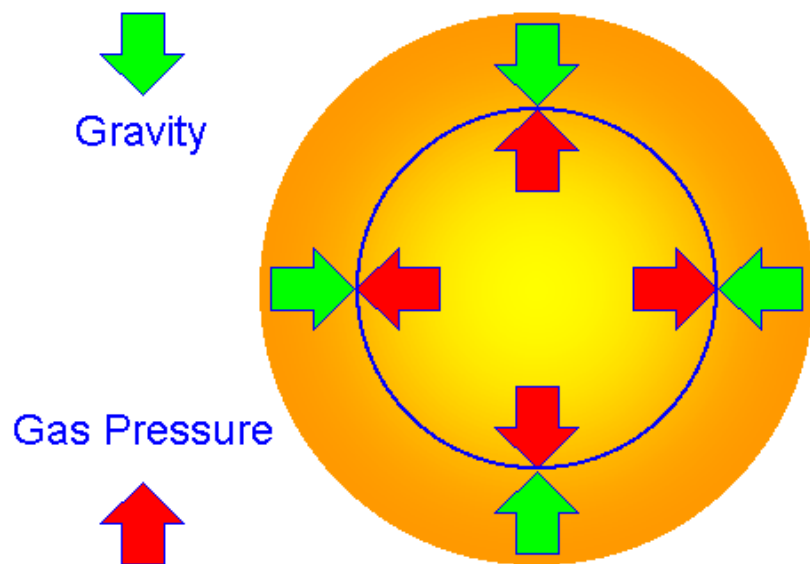
$$1 \text{ пк} \approx 206265 \text{ а. е.} \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ см}$$

$$p'' = 1/(D [\text{пк}])$$

УСТОЙЧИВОСТЬ ЗВЕЗДЫ

«Жизнь звезды — это постоянная борьба силы тяжести и силы газового давления» (с) кажется, Шкловский

Hydrostatic Equilibrium



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

Diagram illustrating the forces in a star's interior, with handwritten annotations:

- DENSITY** (circled in pink) points to ρ .
- ACCELERATION** (boxed in orange) points to $\frac{d^2 r}{dt^2}$.
- MASS WITHIN A SPHERE OF RADIUS r** (boxed in green) points to M_r .
- GRAVITATIONAL CONSTANT** (boxed in black) points to G .
- PRESSURE GRADIENT** (boxed in blue) points to $\frac{dP}{dr}$.

МОДЕЛЬ ЗВЕЗДЫ

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

- Сохранение массы

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

- Гидростатическое равновесие

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

- Сохранение энергии

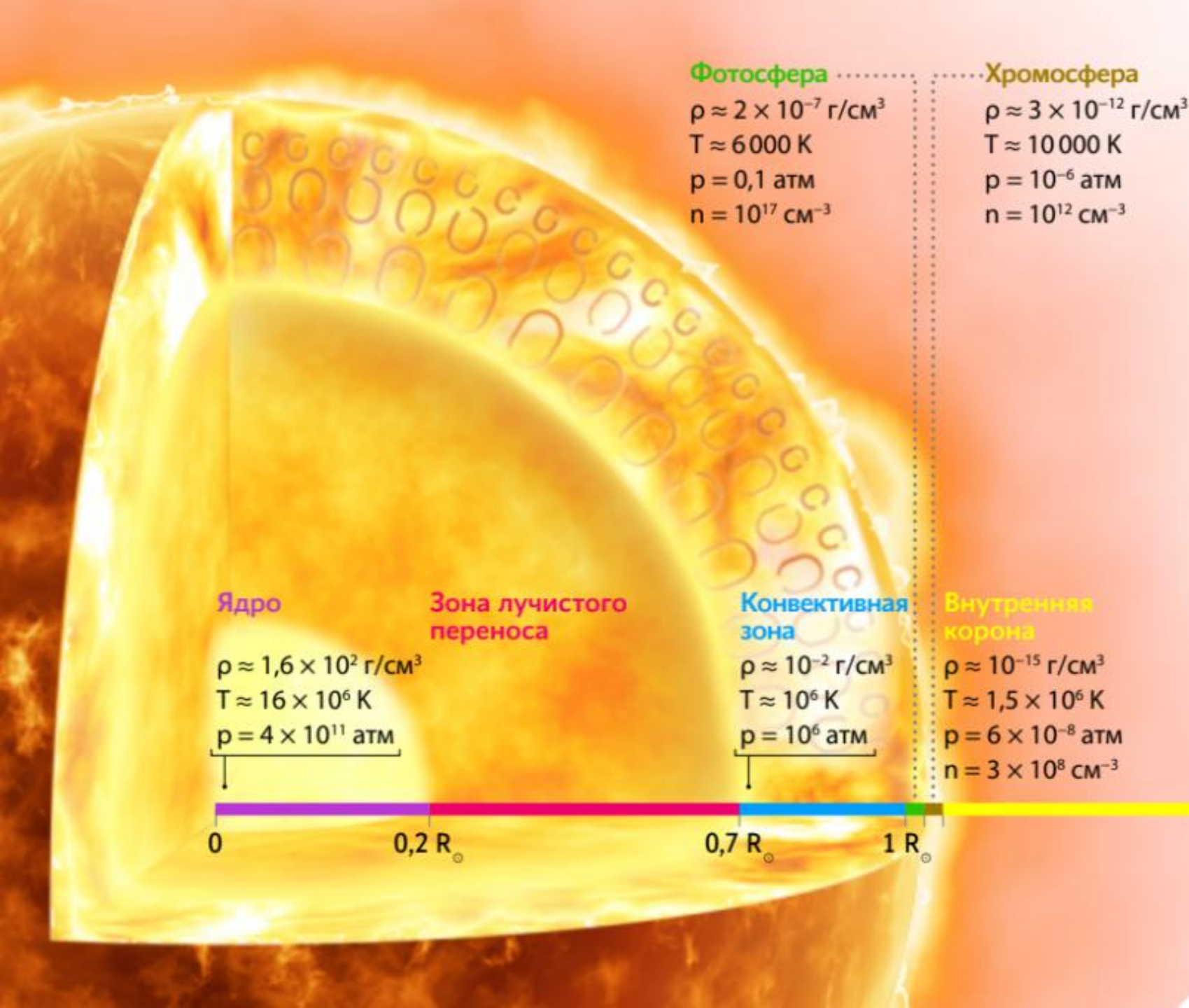
$$\frac{dT}{dm} = -\frac{Gm}{4\pi r^4} \frac{T}{P} \nabla$$

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

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

n – показатель политропы

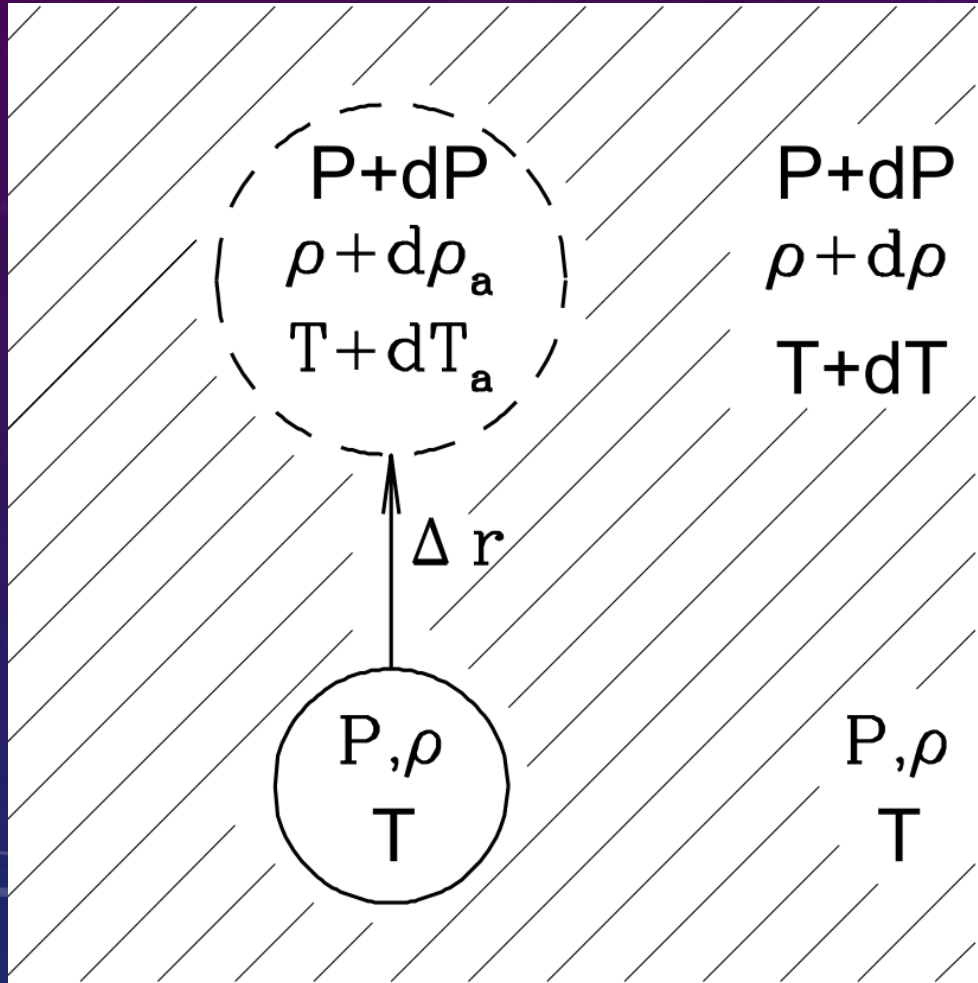
n	Где?
0	Твёрдые планеты
0.5...1	Нейтронные звёзды
1.5	Планеты гиганты и коричневые карлики, конвективные ядра звёзд, нерелятивистские белые карлики, звёзды главной последовательности.
3	Релятивистские белые карлики, звёзды главной последовательности.



СТРУКТУРА ЗВЕЗДЫ

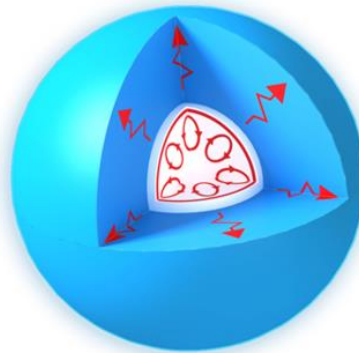
- Зона лучистого переноса
- Конвективная зона
- Зона энерговыведения (может быть конвективной, а может быть лучистой)

КОНВЕКЦИЯ ИЛИ ЛУЧИСТЫЙ ПЕРЕНОС



Heat Transfer of Stars

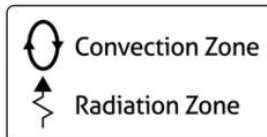
> 1.5 solar masses



0.5 - 1.5 solar masses



< 0.5 solar masses



Для возникновения конвекции необходимы или высокое энерговыделение или высокая непрозрачность.

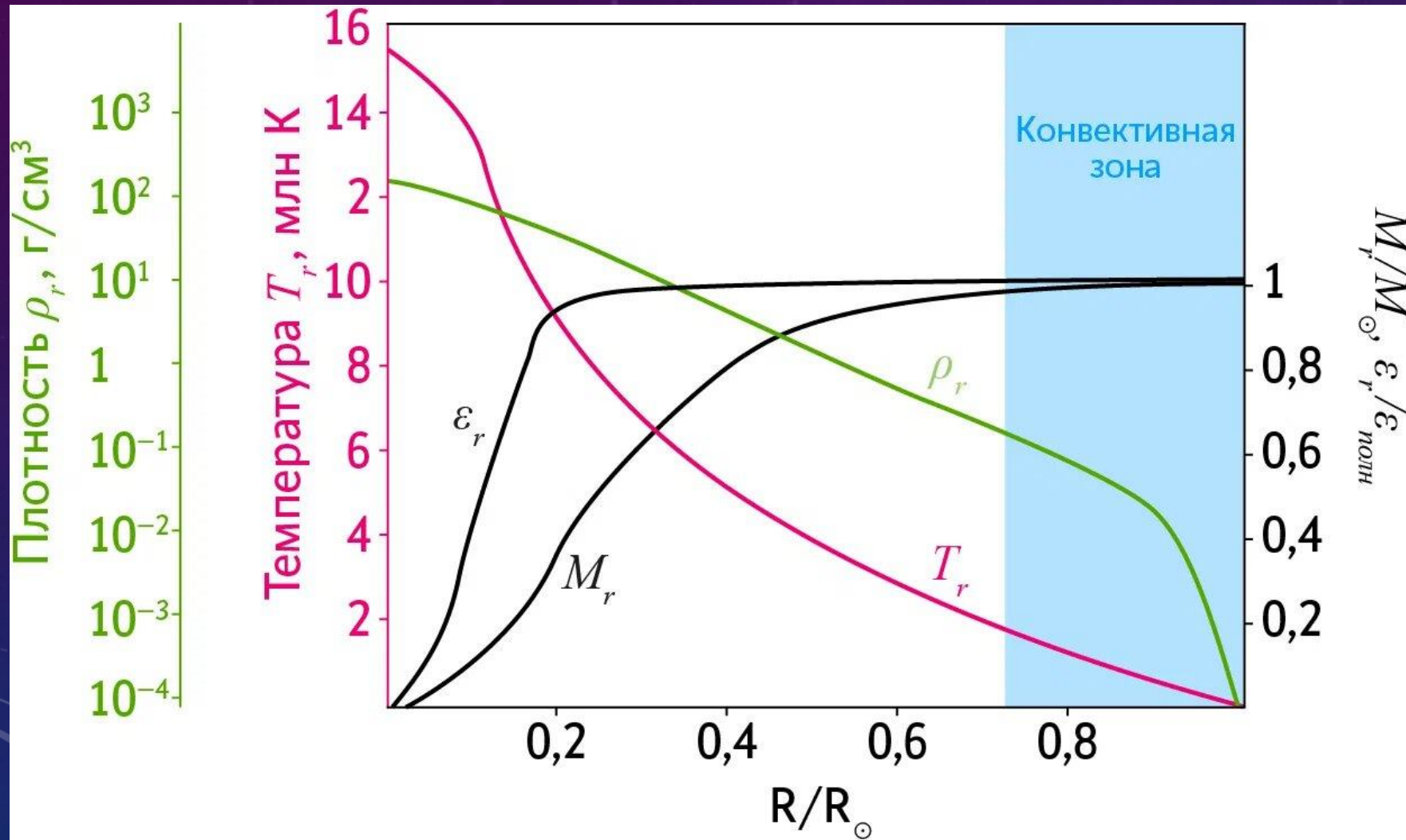
КОНВЕКЦИЯ ИЛИ ЛУЧИСТЫЙ ПЕРЕНОС

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

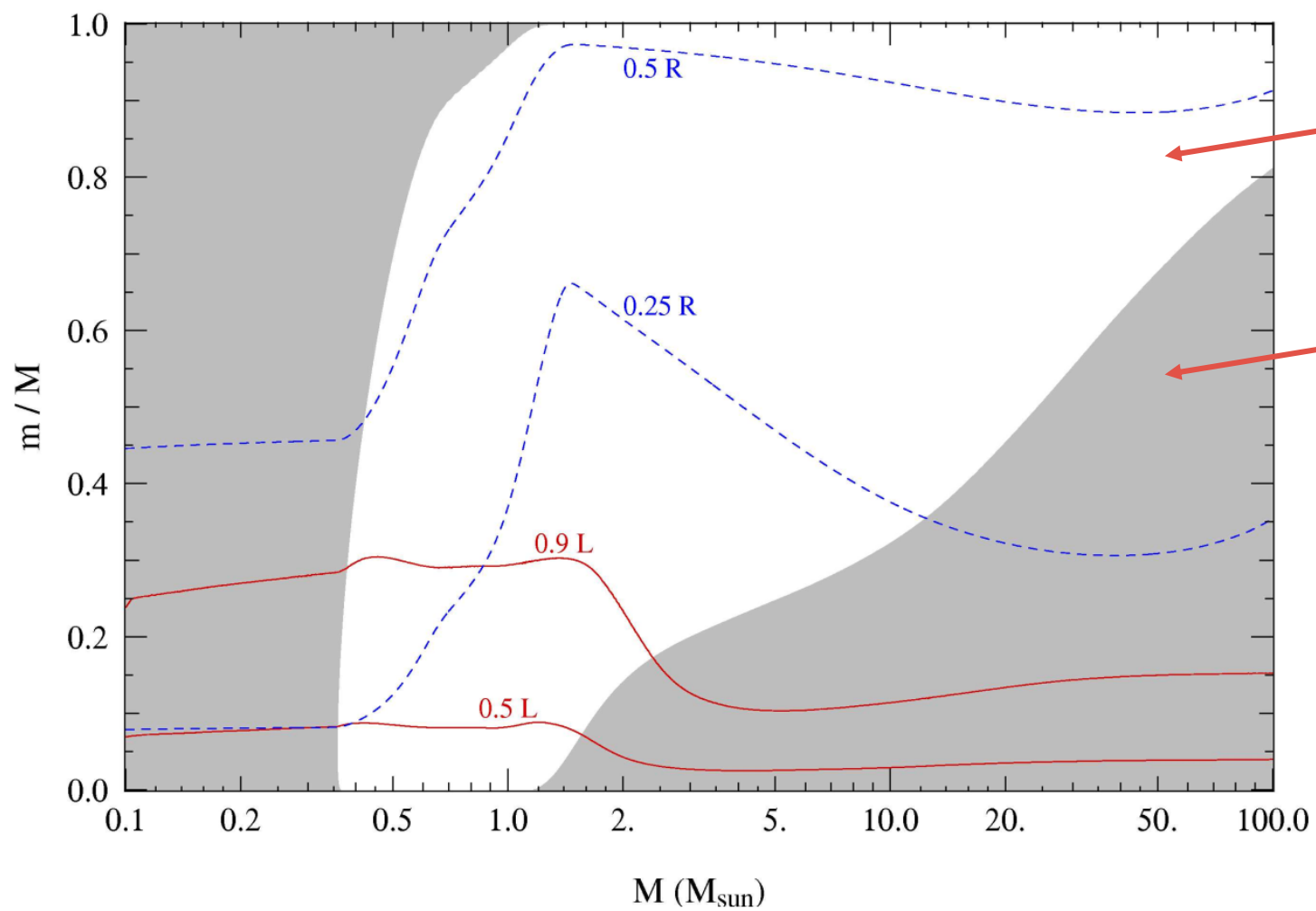
Критерий Шварцшильда начала конвекции для химически-однородной среды

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

ВНУТРИ СОЛНЦА



СТРУКТУРА ЗВЕЗДЫ

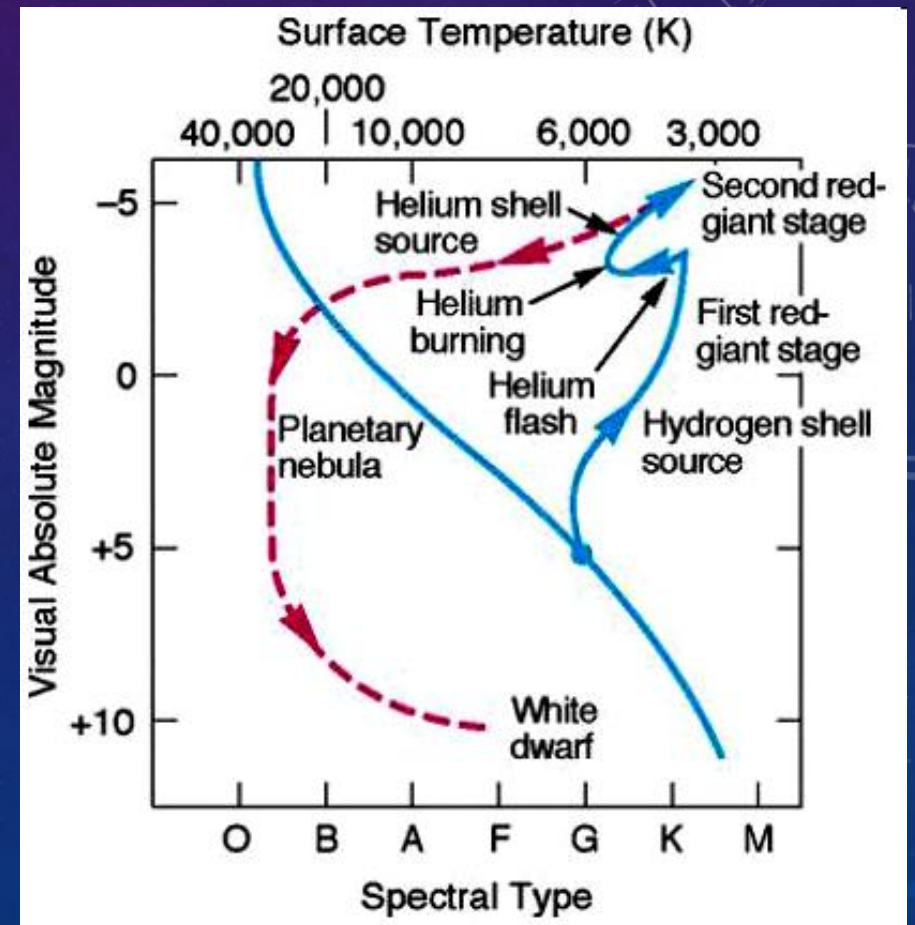
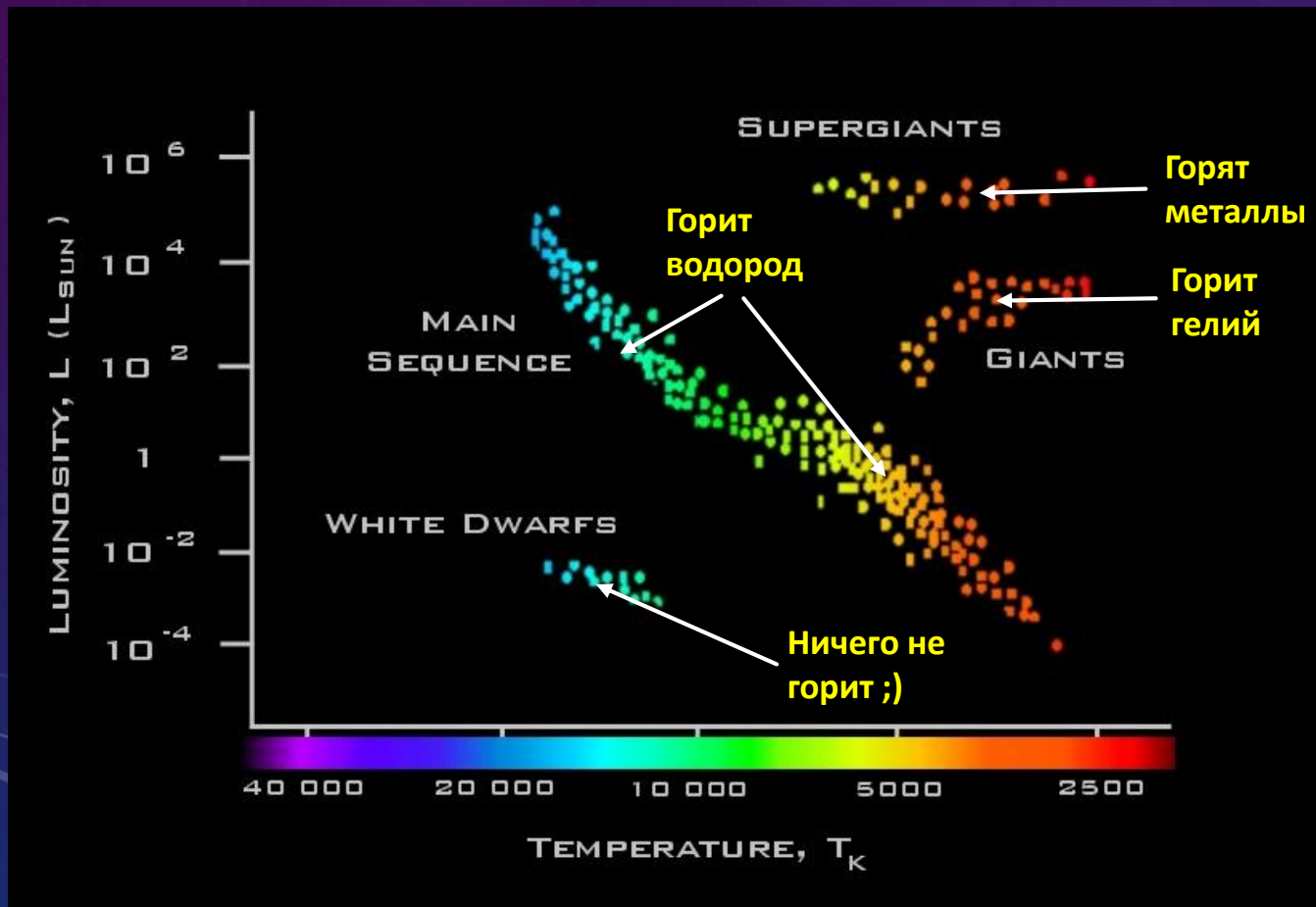


Лучистый перенос

Конвекция

ЭВОЛЮЦИЯ ОДИНОЧНОЙ ЗВЕЗДЫ

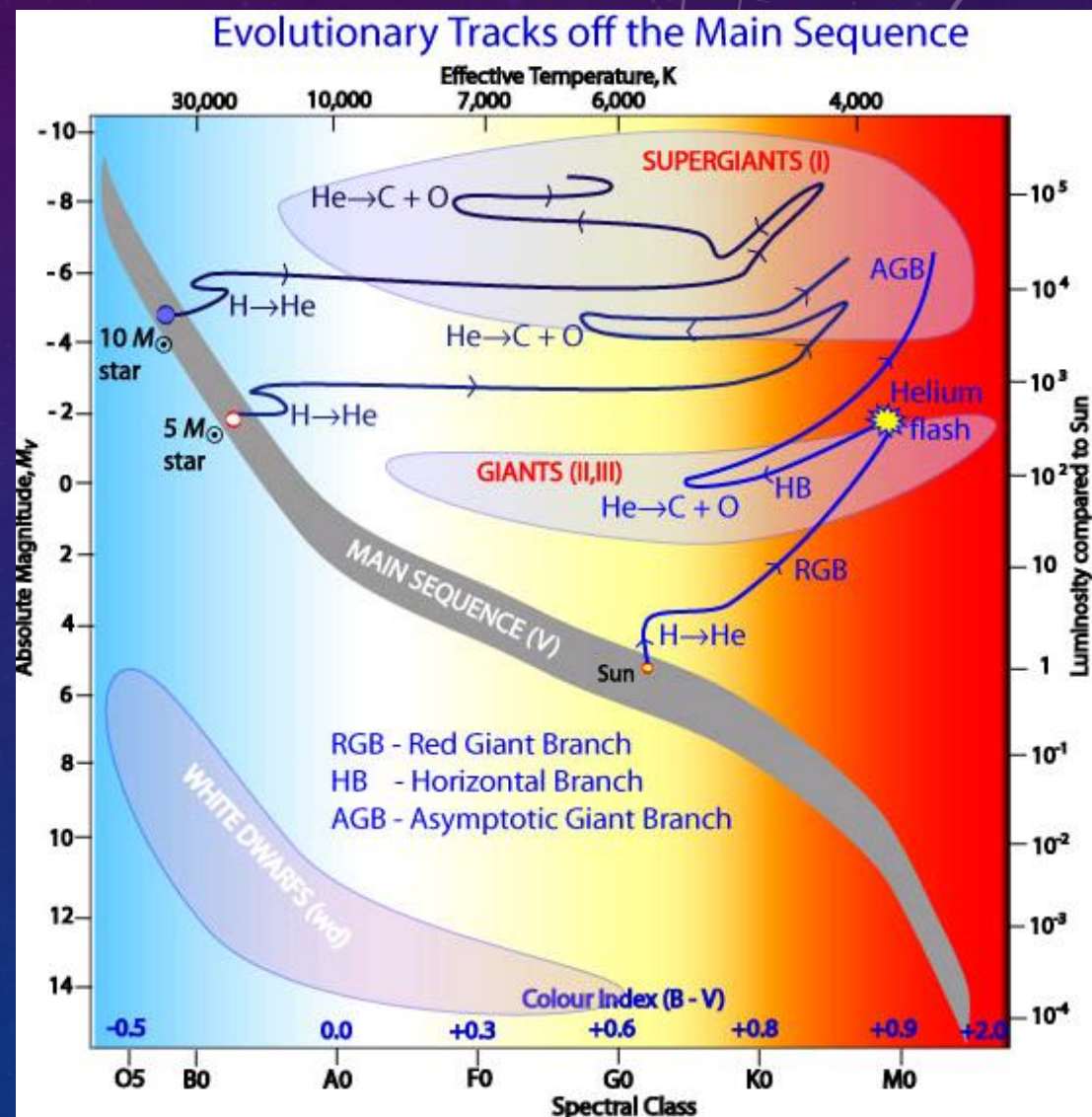
Эволюция звезды – это смена характера термоядерного горения её вещества в центре из-за изменения химического состава.



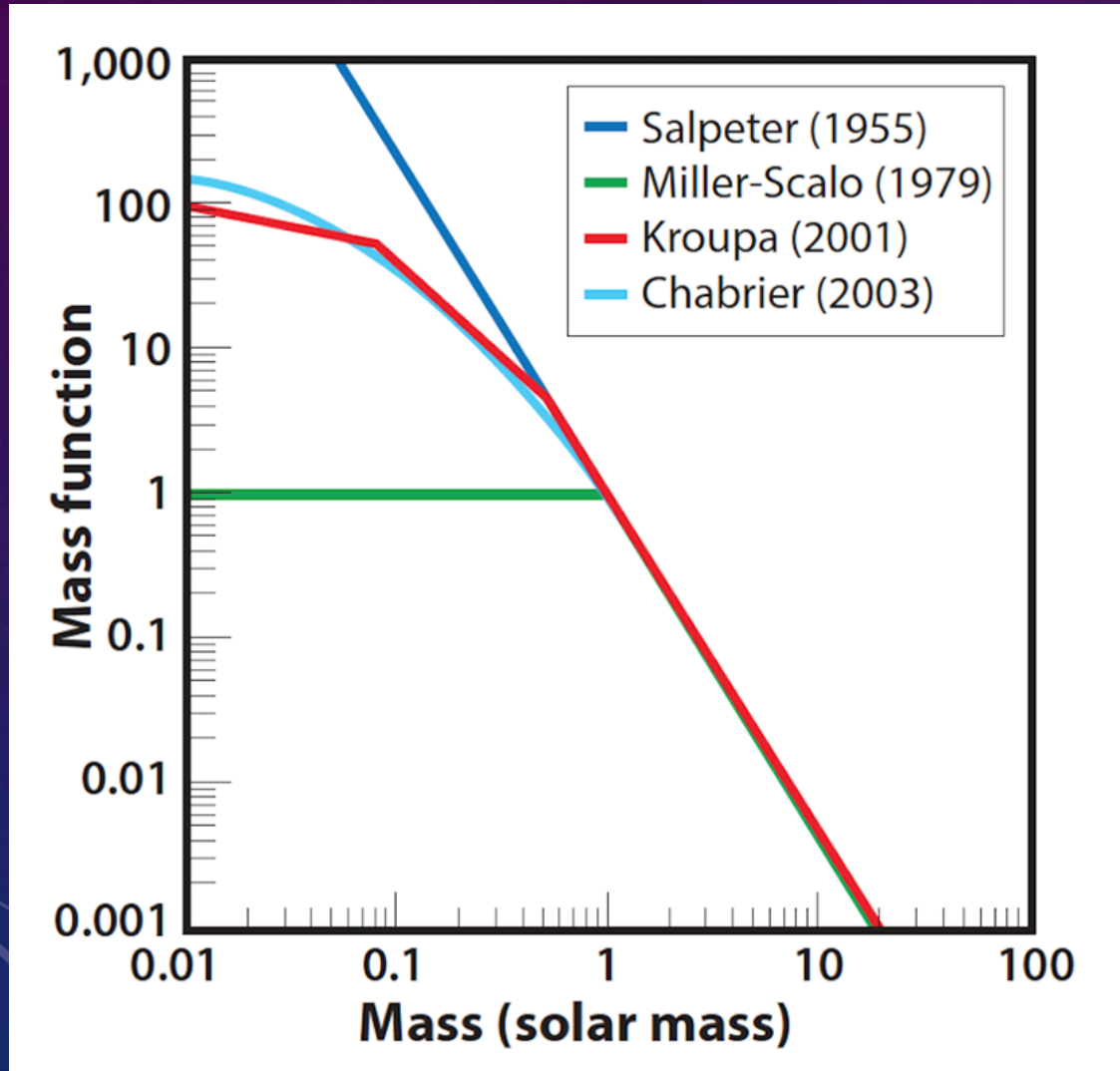
МАССА – ГЛАВНЫЙ ПАРАМЕТР

Судьба звезды зависит в первую очередь от ее массы.

- 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.



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗВЕЗД ПО (НАЧАЛЬНЫМ) МАССАМ

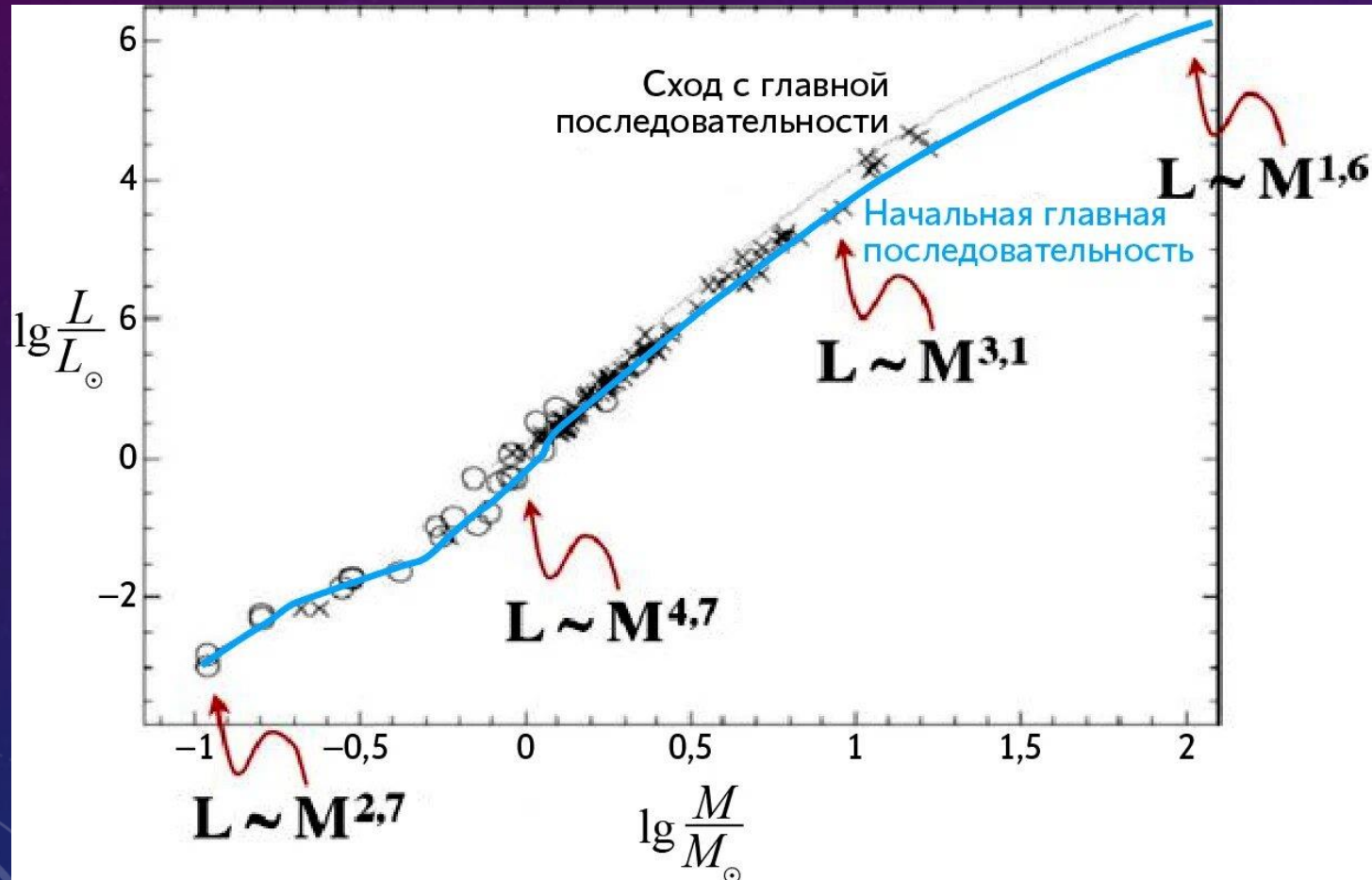


Функция масс Солпитера (Salpeter, 1955):

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

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

СООТНОШЕНИЕ МАССА-СВЕТИМОСТЬ



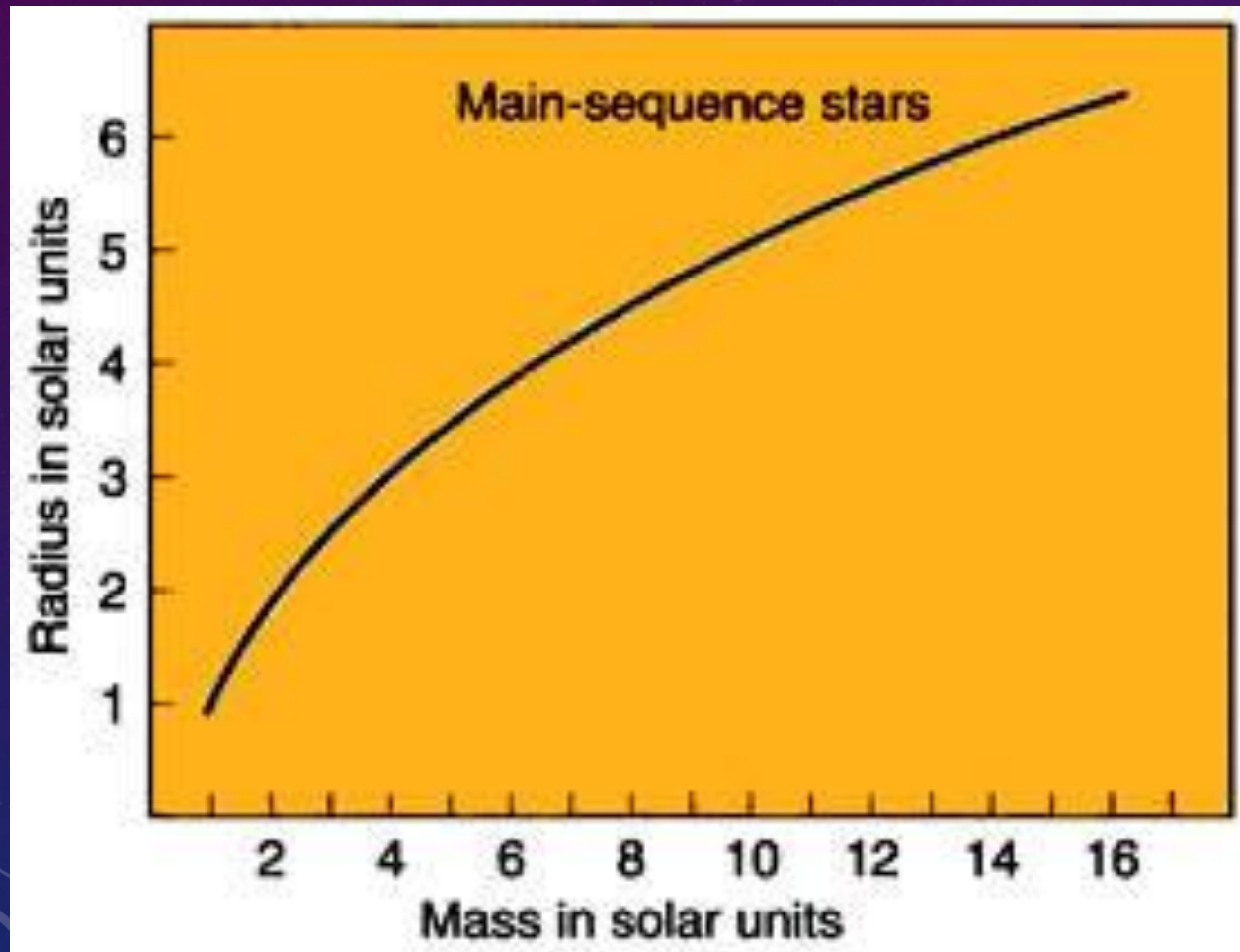
- В маломассивных звёздах преобладает газовое давление и поэтому

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

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

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

СООТНОШЕНИЕ МАССА-РАДИУС



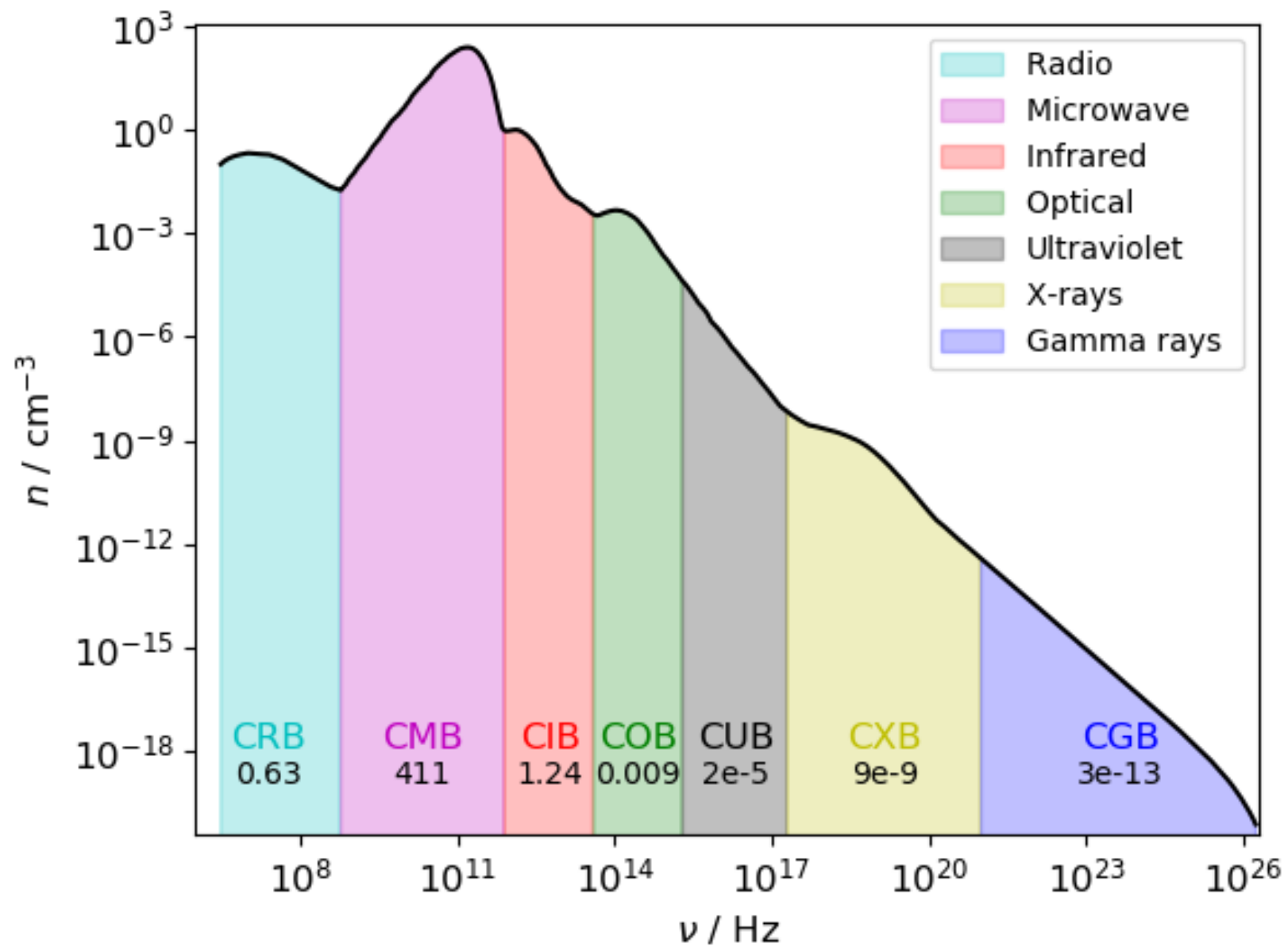
ЛИТЕРАТУРА К ЛЕКЦИИ

- А.В. Засов, К.А. Постнов, «Общая астрофизика», Гл. 5-6
- С.А. Ламзин, «Физика и эволюция звёзд»
- O.R. Pols «Stellar structure and evolution»,
<https://www.ucolick.org/~woosley/ay112-14/texts/pols11.pdf>

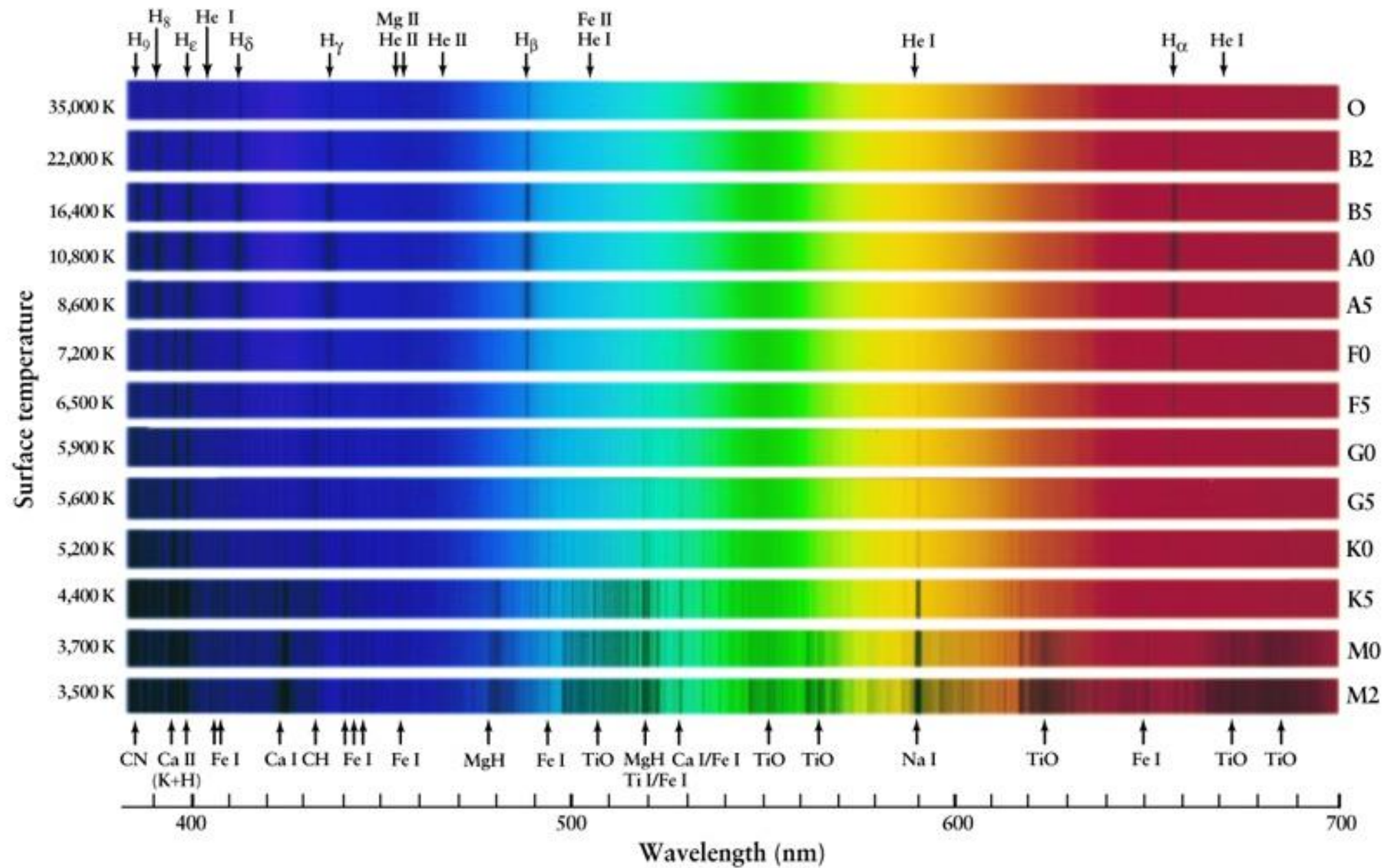
The background is a gradient from dark purple at the top to dark blue at the bottom, speckled with white dots resembling a starry sky. On the left side, there are several overlapping circular and semi-circular patterns. Some are solid white lines, while others are dashed. A prominent circular scale with tick marks and numbers (40, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250, 260) is visible, along with various arrows indicating directions.

СЕМИНАР

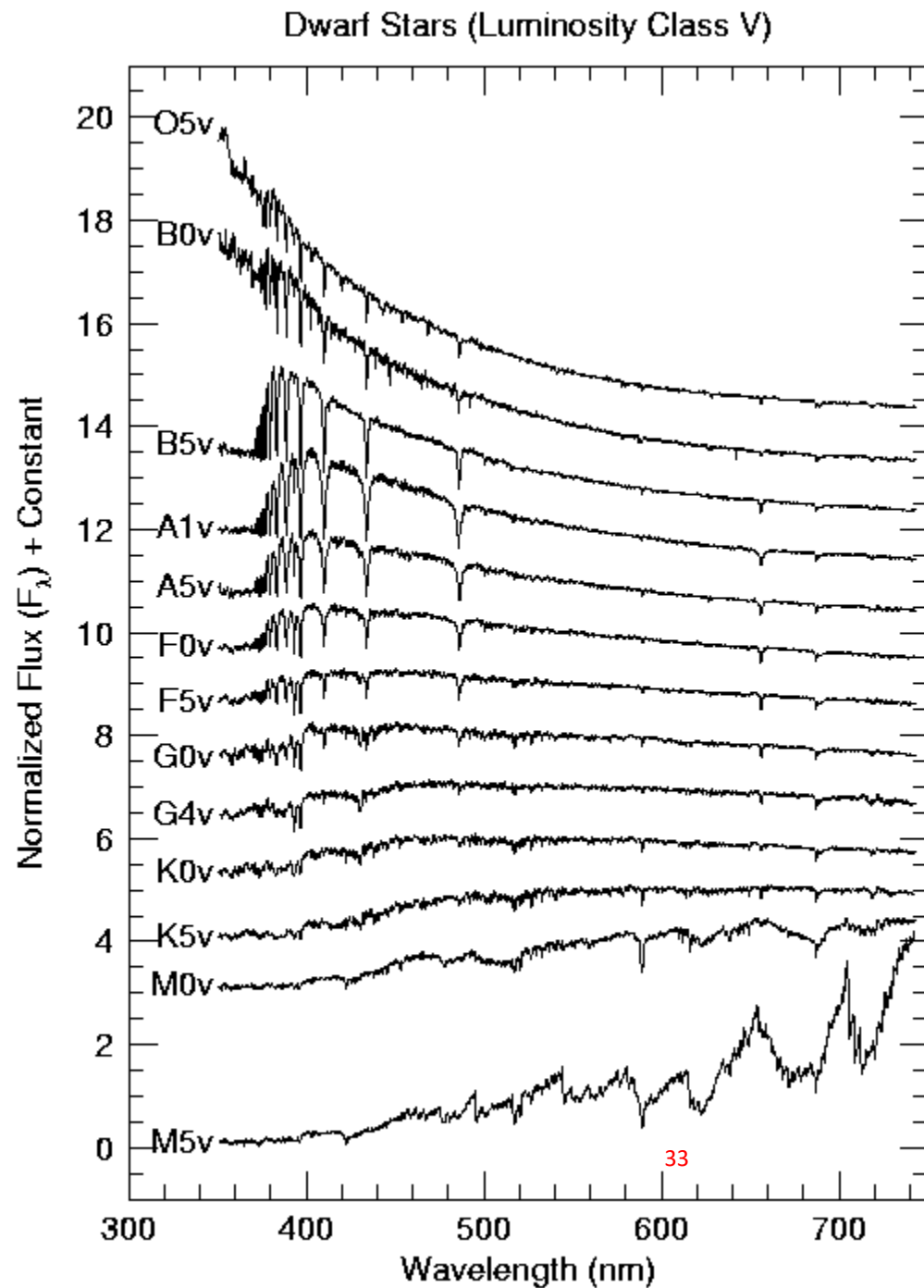
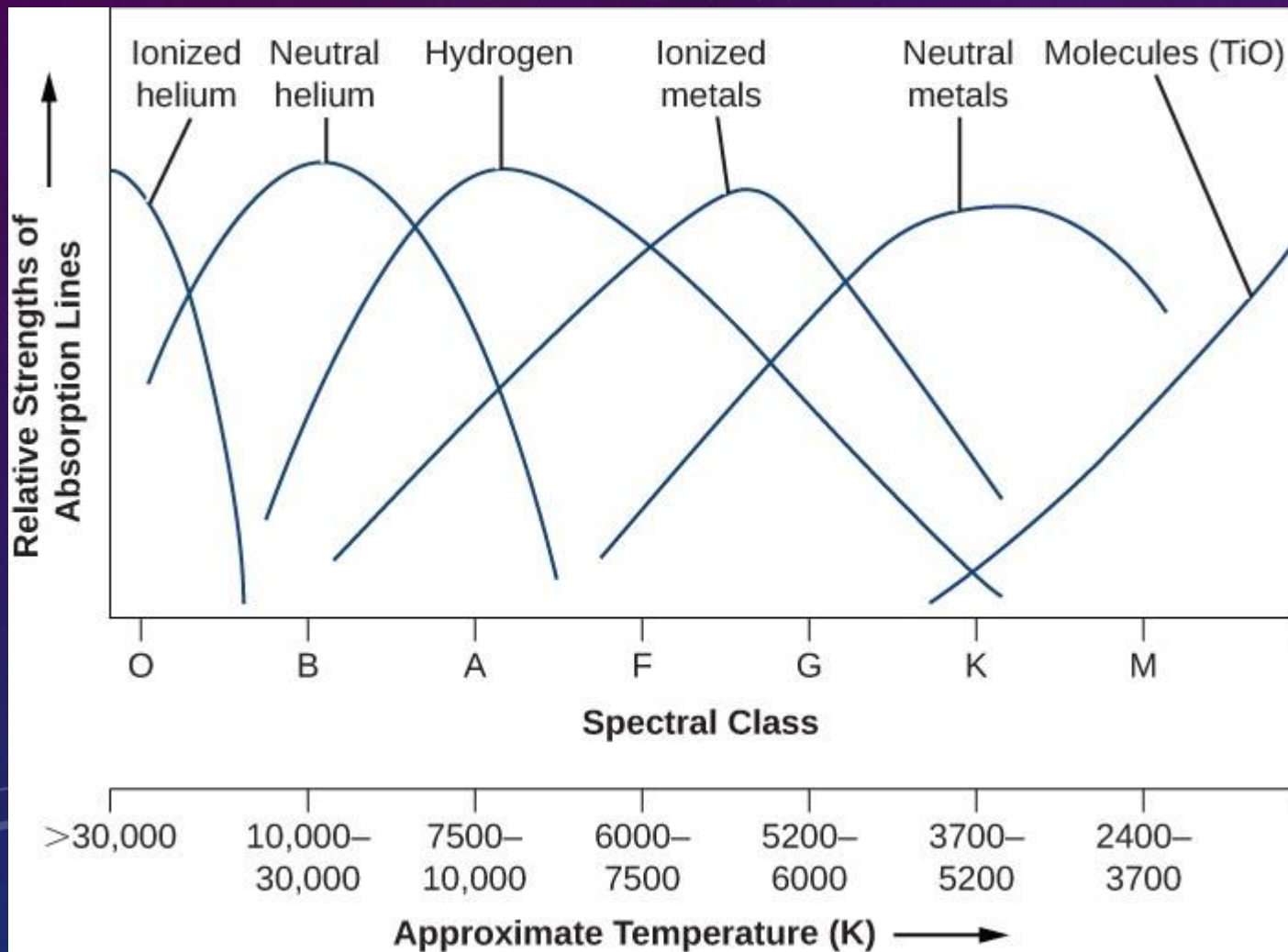
(ДОПОЛНЕНИЯ К ЗАДАЧАМ ПО ПРЕДЫДУЩИМ ЛЕКЦИЯМ)

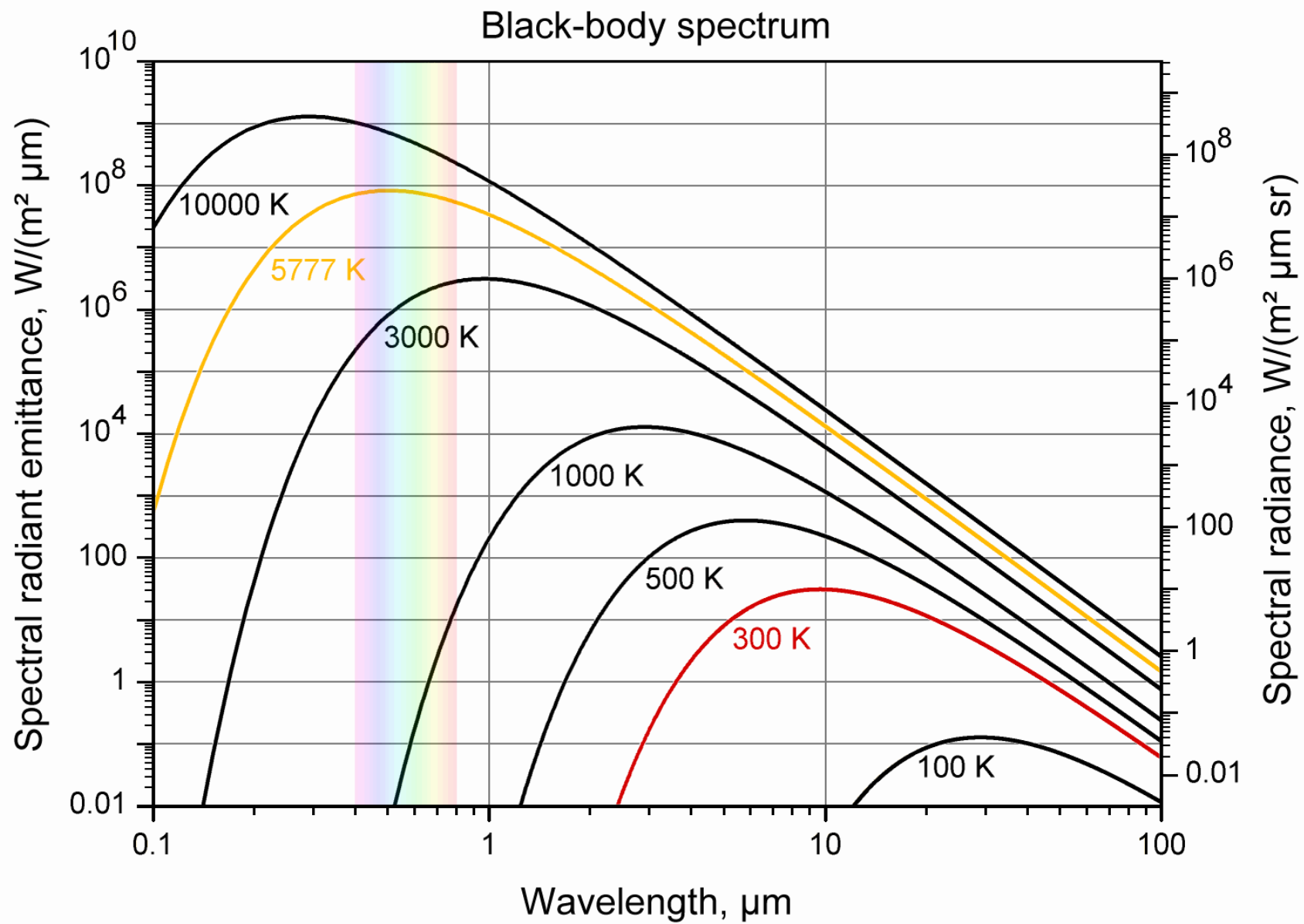


ПЛОТНОСТЬ
ФОТОНОВ



СПЕКТРЫ





ПЛАНКОВСКИЙ
СПЕКТР

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu + S_\nu$$

УРАВНЕНИЕ ПЕРЕНОСА

Пусть $S_\nu = \text{const}$, тогда

$$I_\nu(\tau_\nu) = I_\nu(0)e^{-\tau_\nu} + S_\nu(1 - e^{-\tau_\nu}) = S_\nu + e^{-\tau_\nu}[I_\nu(0) - S_\nu]$$

Оптически толстая среда: $\tau_\nu \gg 1$

$$I_\nu(\tau_\nu) \rightarrow S_\nu$$

Если излучение тепловое ($S_\nu = B_\nu$), тогда в пределе больших оптических толщин мы всегда будем видеть планковский спектр!

Оптически тонкая среда: $\tau_\nu \ll 1$

$$I_\nu(\tau_\nu) = I_\nu(0) - \tau_\nu[I_\nu(0) - S_\nu]$$

Если $I_\nu(0) > S_\nu$, то интенсивность уменьшается вдоль луча;

Если $I_\nu(0) < S_\nu$, то интенсивность увеличивается вдоль луча;

$$\Delta m = -2.5 \log \frac{I_0 e^{-\tau}}{I_0} \approx 1.086 \tau$$

МЕЖЗВЁЗДНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ

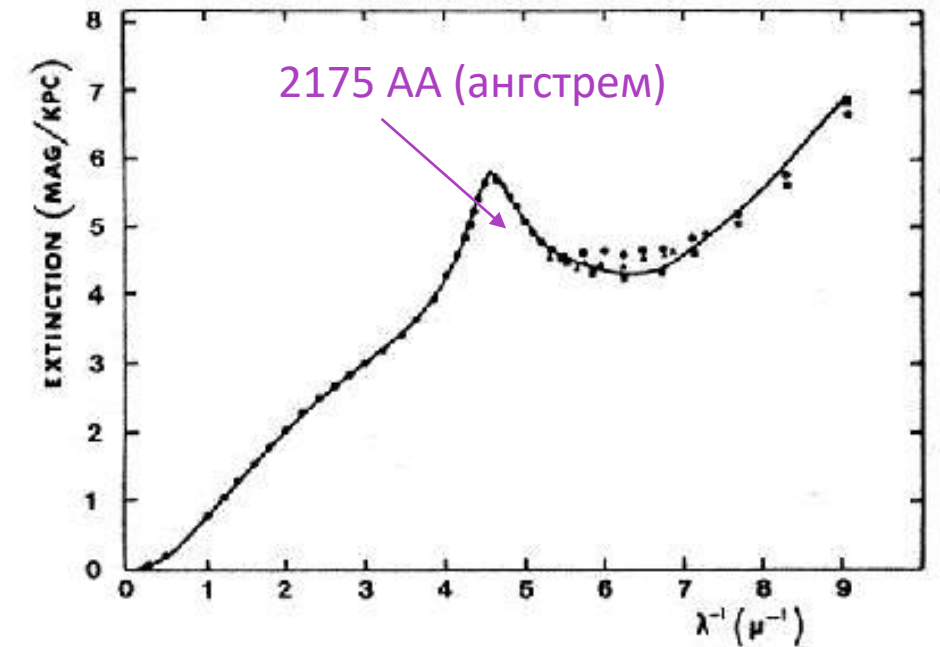
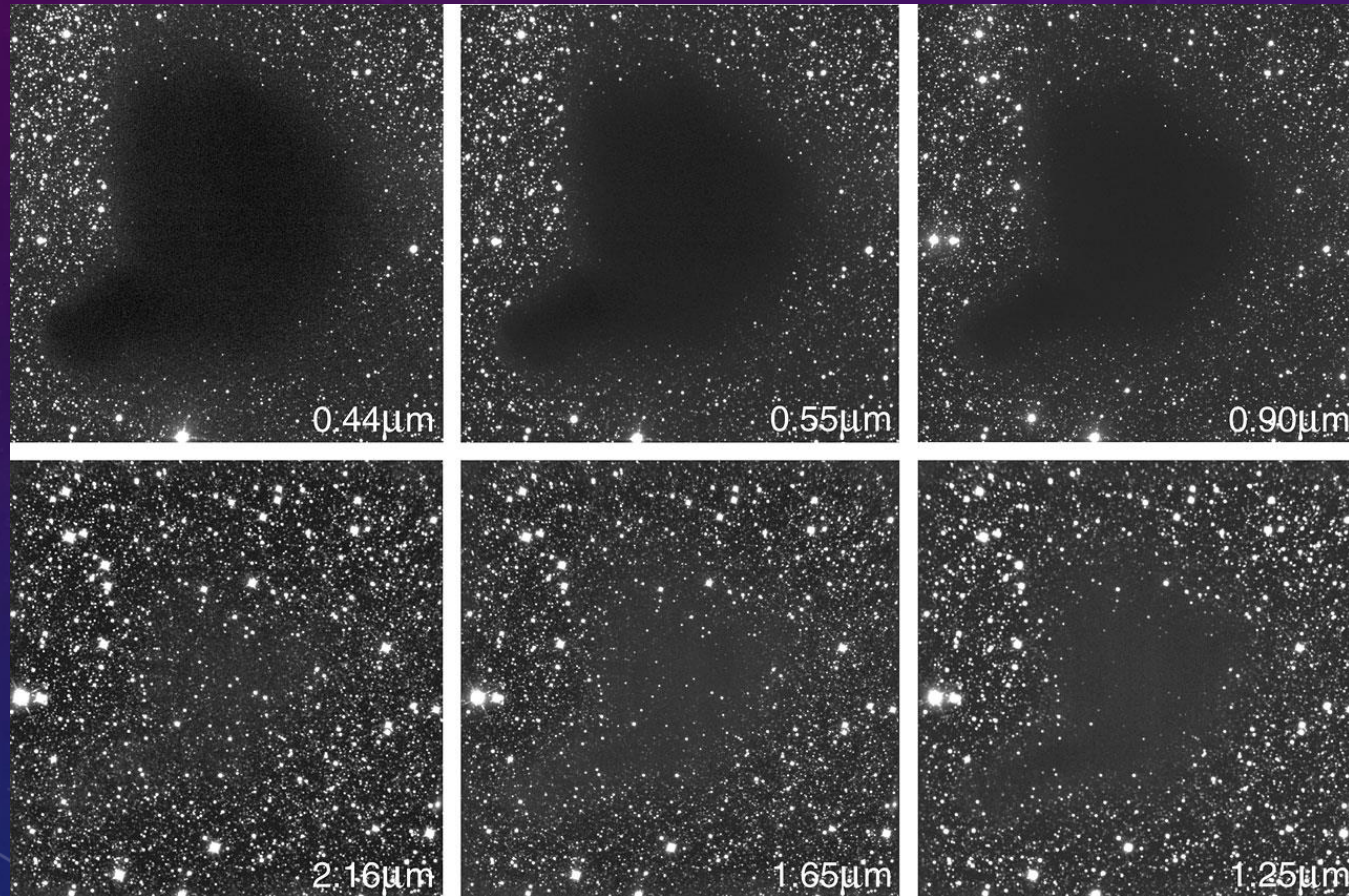


Fig. 1. Wavelength dependence of interstellar extinction normalised to 1.8 mag/kpc at $\lambda^{-1} = 1.8 \mu^{-1}$. Points are astronomical observations; solid curve is for the grain model proposed here. (●) average extinction data compiled from many sources by Sapar and Kuusik (1979). (▲) ESA data from Jamar *et al.* (1976). (■) OAO II data from Bless and Savage (1972).