

# ЛЕКЦИЯ 5: СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЦА

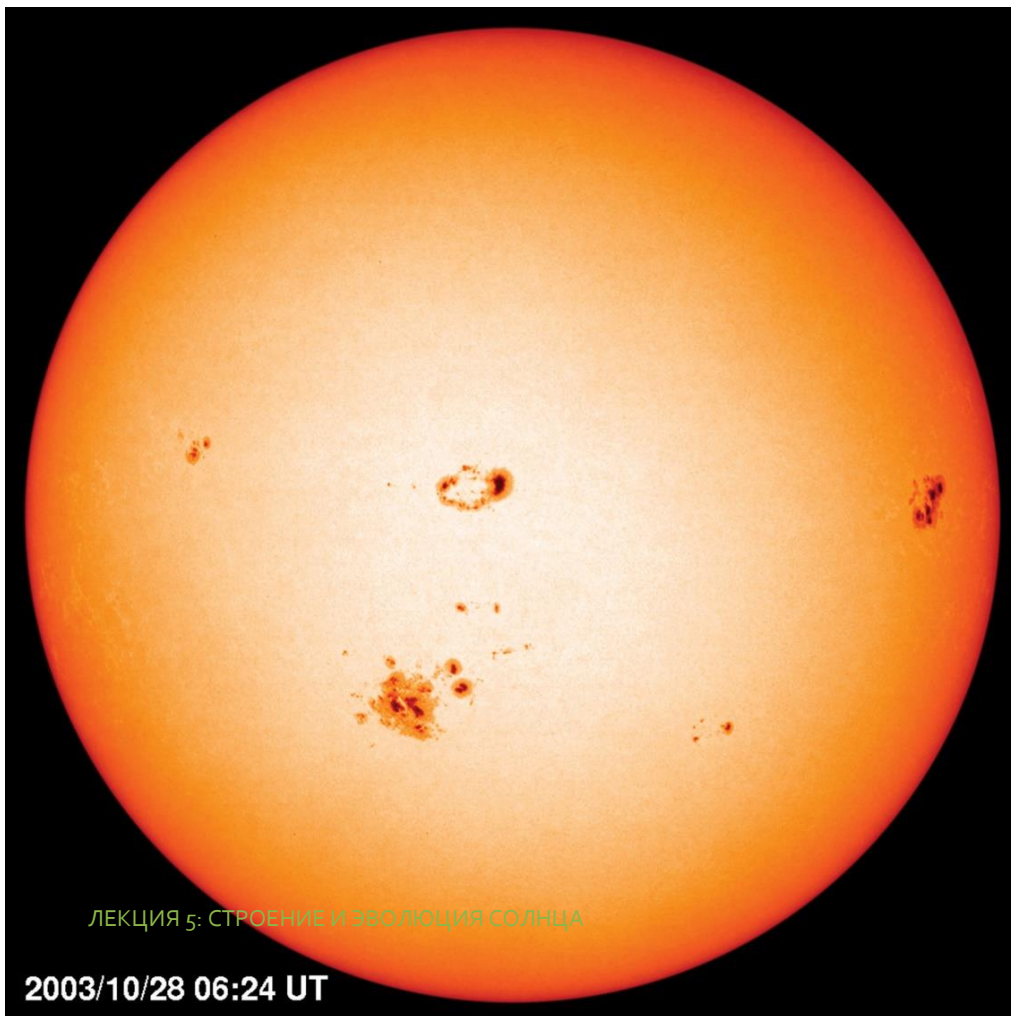
ВВЕДЕНИЕ В АСТРОФИЗИКУ. ВШЭ 2022/2023. БАКАЛАВРЫ, 4-Й МОДУЛЬ.

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

# ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Характеристики Солнца, как звезды
2. Внутреннее строение Солнца
3. Термоядерные реакции – источник энергии Солнца
4. Эволюция Солнца
5. Наблюдения Солнца и солнечная активность

# СОЛНЦЕ – «РЯДОВАЯ» ЗВЕЗДА



Масса	$M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33} \text{ г}$
Радиус	$R_{\odot} = 7 \cdot 10^{10} \text{ с} = 700 \text{ тыс. км.}$
Светимость	$L_{\odot, \text{bol}} = 4 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}$
$T_{\text{eff}}$ фотосферы	5700 К
Температура в центре	$\approx 1.5 \cdot 10^7 \text{ К}$
Плотность в центре	$\approx 160 \text{ г см}^{-3}$
Средняя плотность	$1.4 \text{ г см}^{-3}$
Период вращения	От 25 суток на экваторе до 38 суток на полюсах.
Магнитное поле	1 Гс – глобальное $10^3$ Гс – в пятнах
Хим. состав по массе	70% -- H 28% -- He <2% -- C, O, Ne, Mg, ...
Возраст	$5 \cdot 10^9 \text{ лет}$
Время жизни	$\approx 10^{10} \text{ лет}$

# РАВНОВЕСИЕ

- Солнце находится в квазиравновесии: при медленно-меняющемся балансе сил тяготения и внутреннего давления.
- Давление меняется, потому что меняются свойства термоядерных реакций: темп, энергосвечение, структура области, в которой идут реакции. В конечном итоге это и запускает эволюцию Солнца.
- Уравнение равновесия в каждый момент времени:

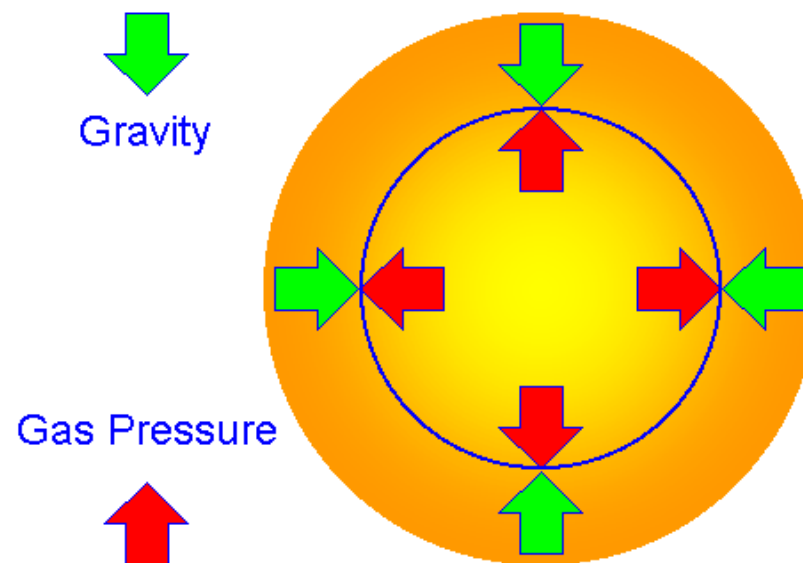
$$\nabla P_{\text{tot}} = -\rho \nabla \varphi_{\text{tot}}$$

- Где компоненты давления и потенциала:

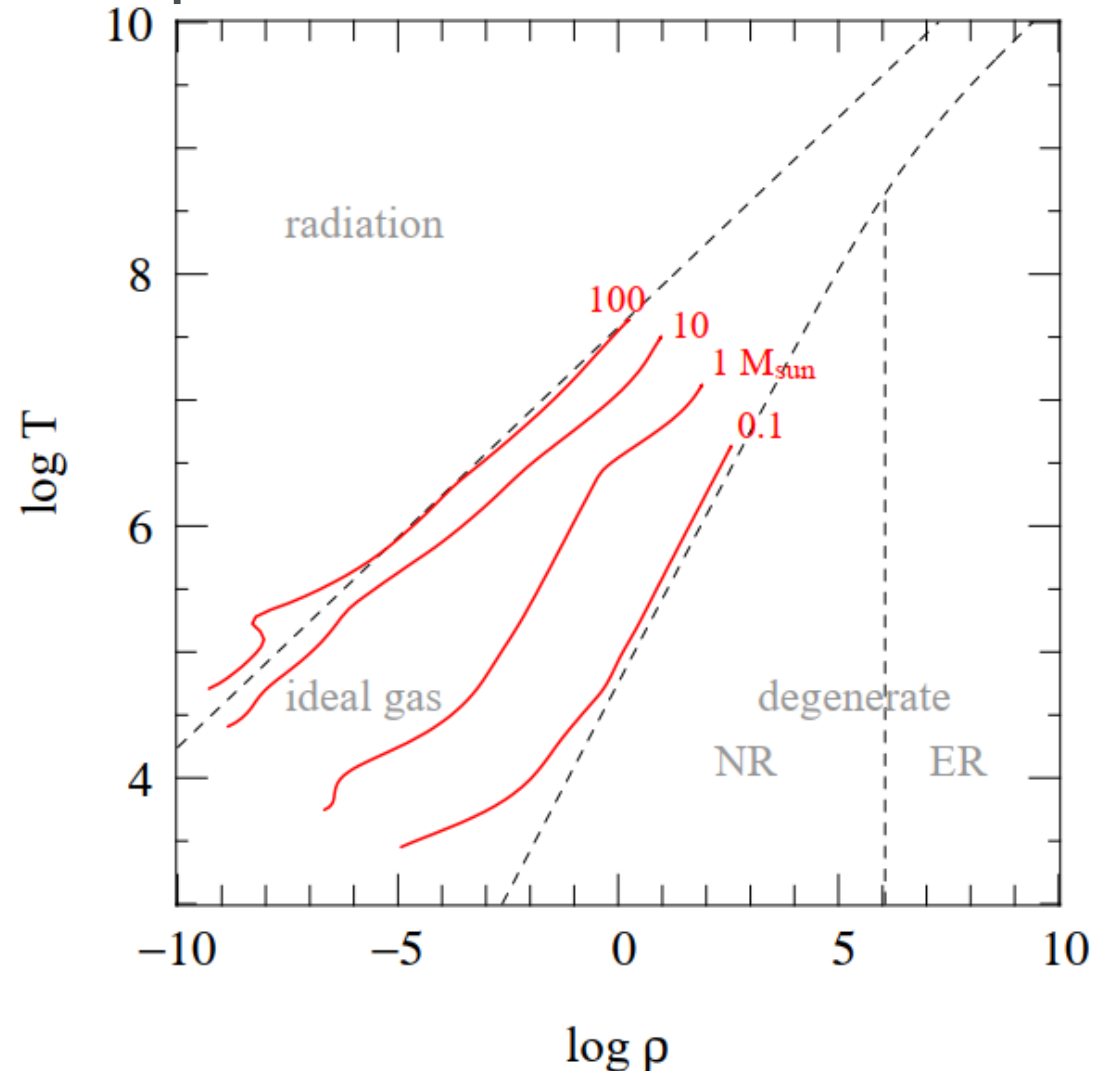
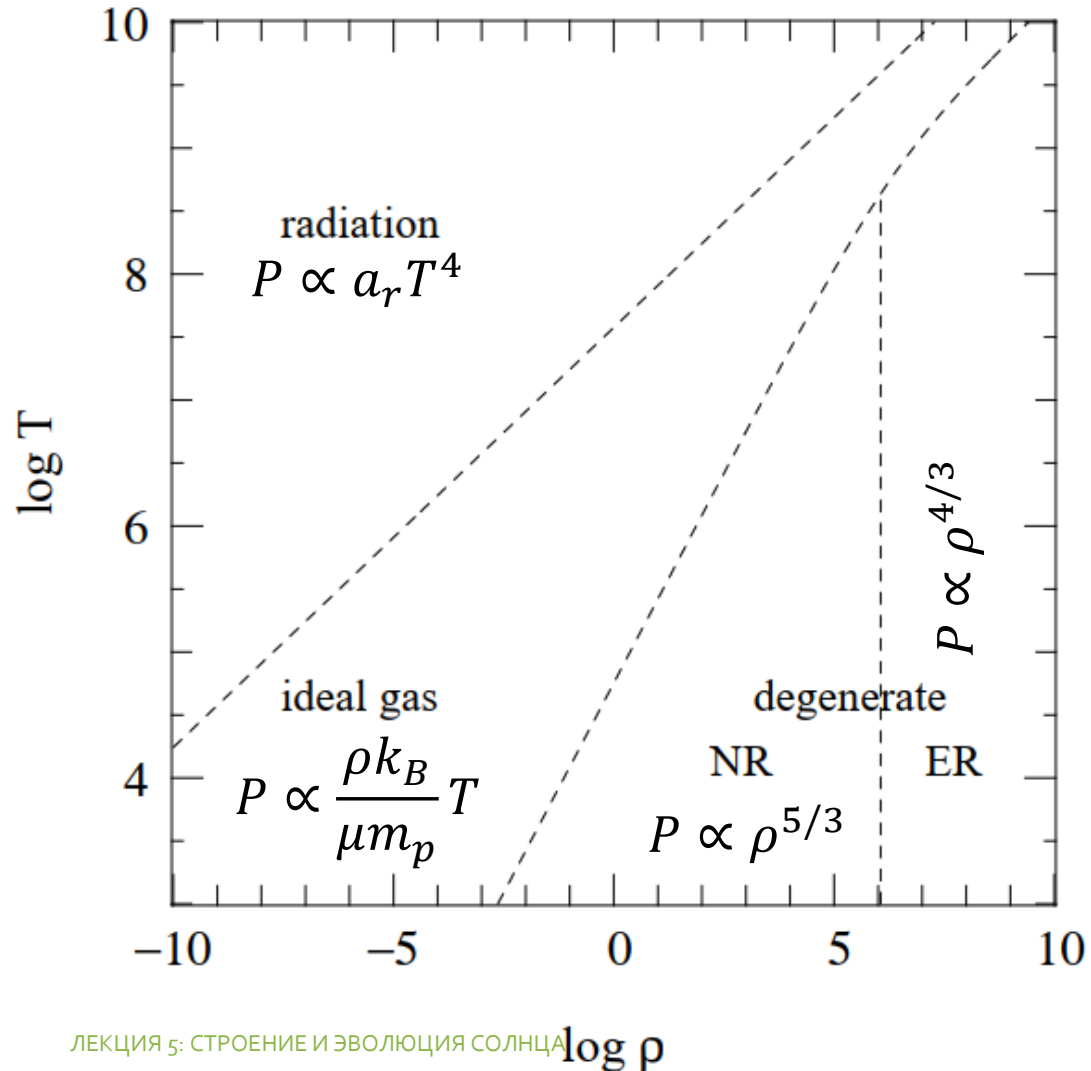
$$P_{\text{tot}} = P_{\text{ion}} + P_{\text{rad}} + P_{\text{e}}$$

$$\varphi_{\text{tot}} = \varphi_{\text{grav}} + \varphi_{\text{rot}}$$

## Hydrostatic Equilibrium



# УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СОЛНЦА



# 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

$$\frac{dT}{dm} = -\frac{Gm}{4\pi r^4} \frac{T}{P} \nabla \quad \left( \nabla = \frac{\partial \ln T}{\partial \ln P} \right)$$

← Тепловое равновесие

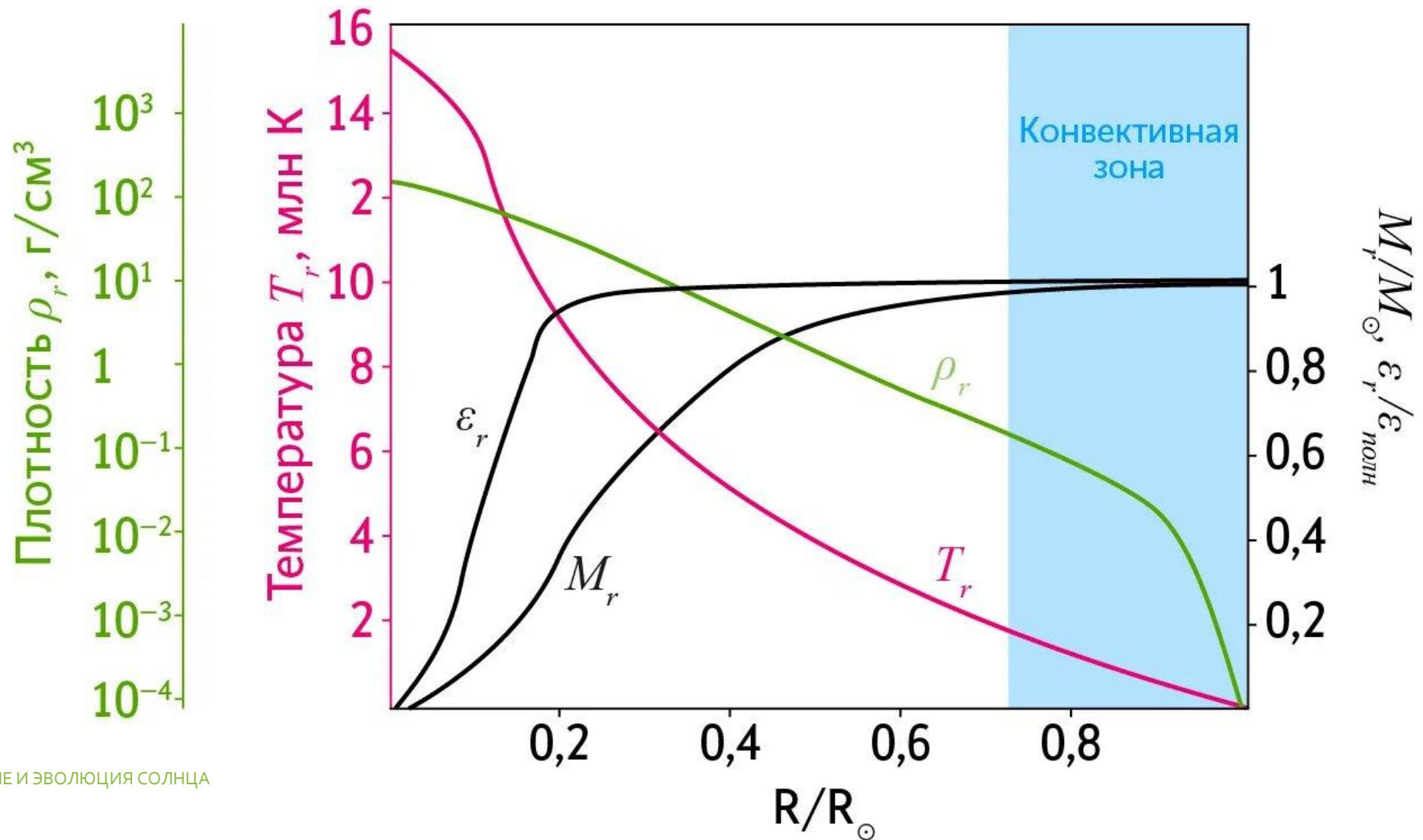
Уравнение состояния:

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

( $n$  – 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, <b>звёзды главной последовательности.</b>
3	Релятивистские белые карлики, звёзды главной последовательности.

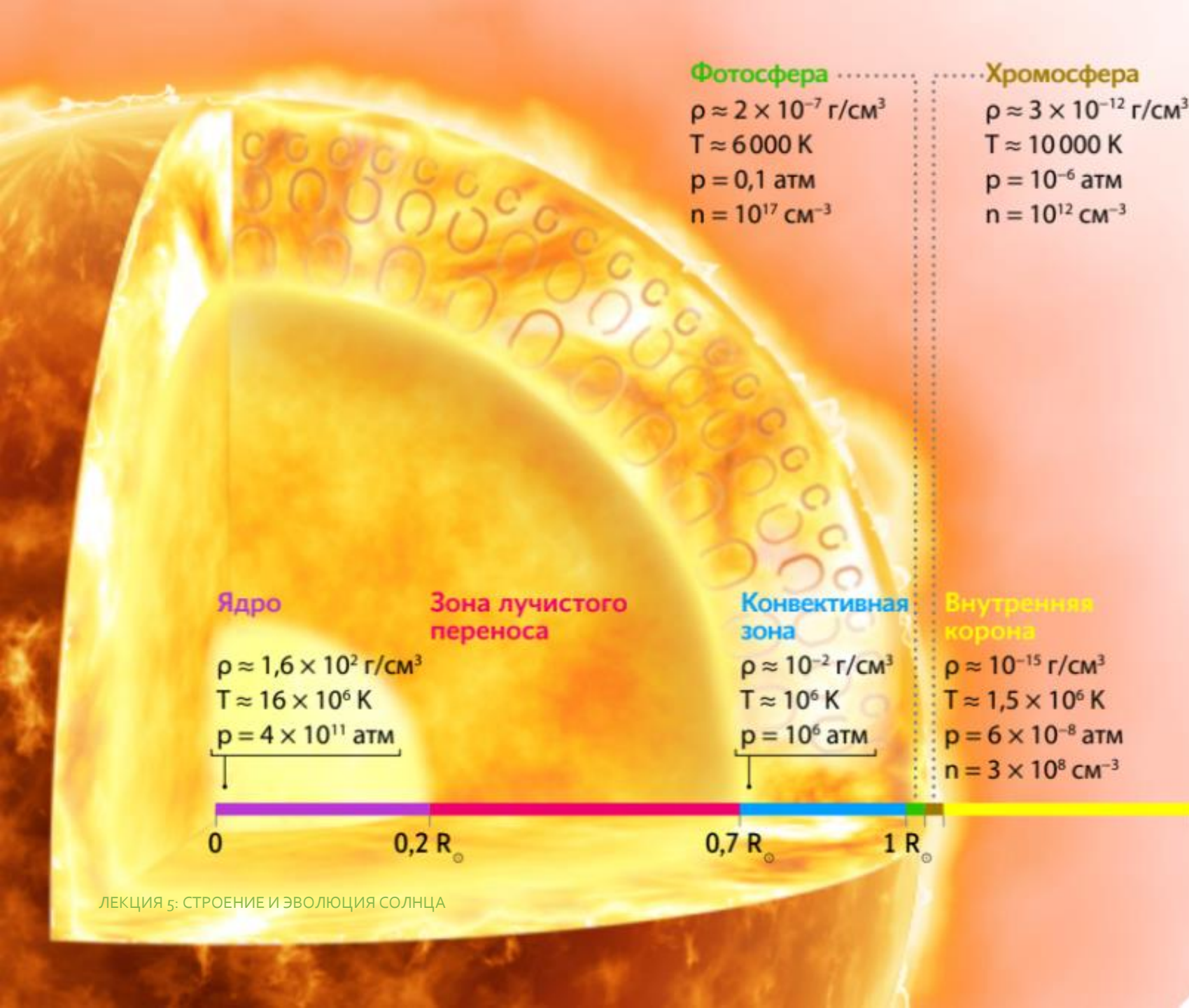
# СТРОЕНИЕ СОЛНЦА





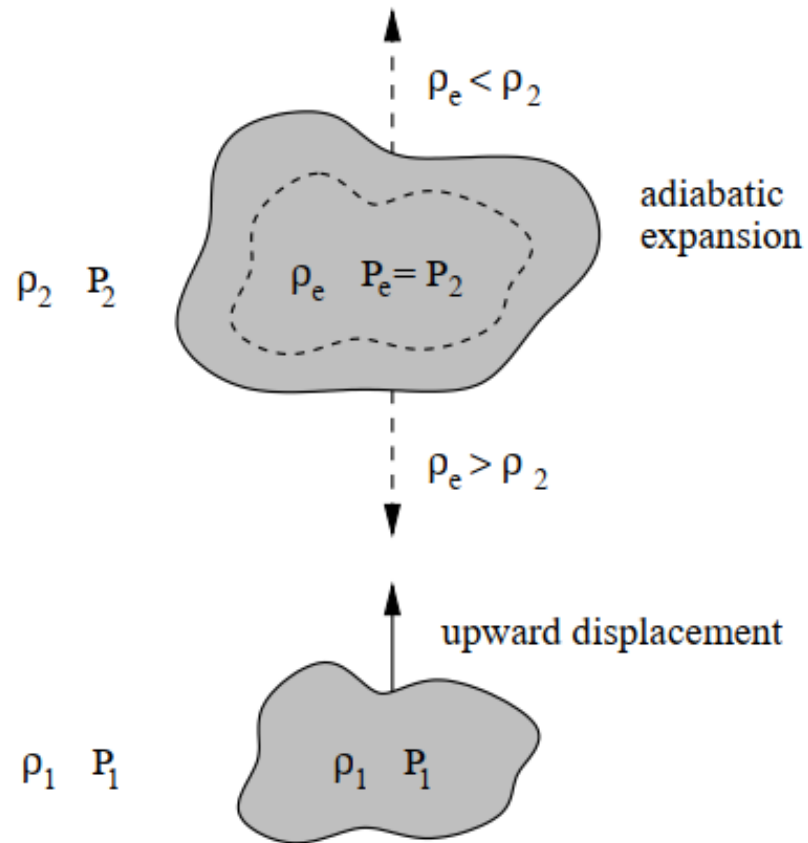
# СТРОЕНИЕ СОЛНЦА

- Солнце плотнее и горячее к центру.
- В центре доминирует газовое давление ( $P_{\text{gas}} \sim 10^3 P_{\text{rad}}$ )
- Источник энергии – термоядерные реакции синтеза.
- Перенос энергии наружу – либо радиативный, либо конвекцией.





# КОНВЕКЦИЯ



- Градиент температуры можно характеризовать безразмерной величиной:

$$\nabla = \frac{\partial \ln T}{\partial \ln P}$$

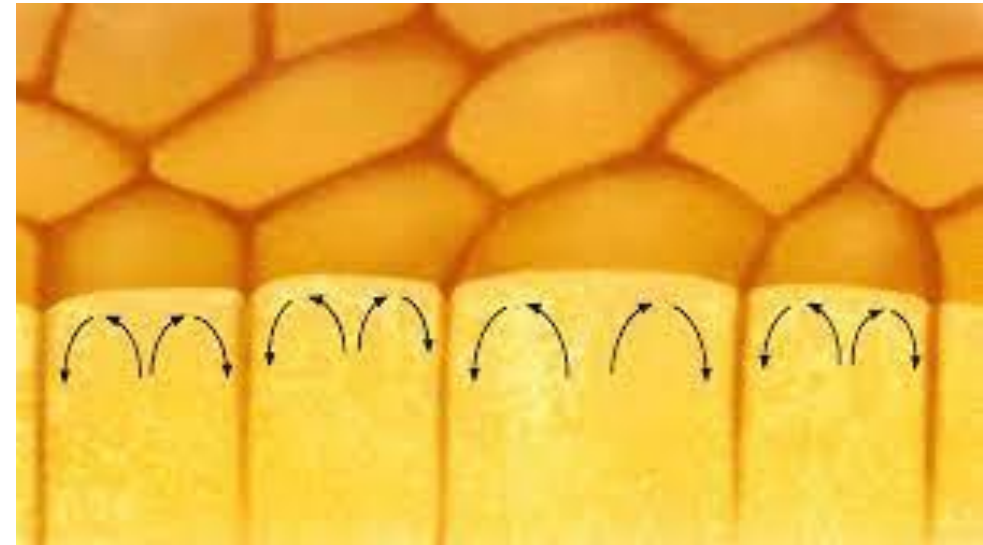
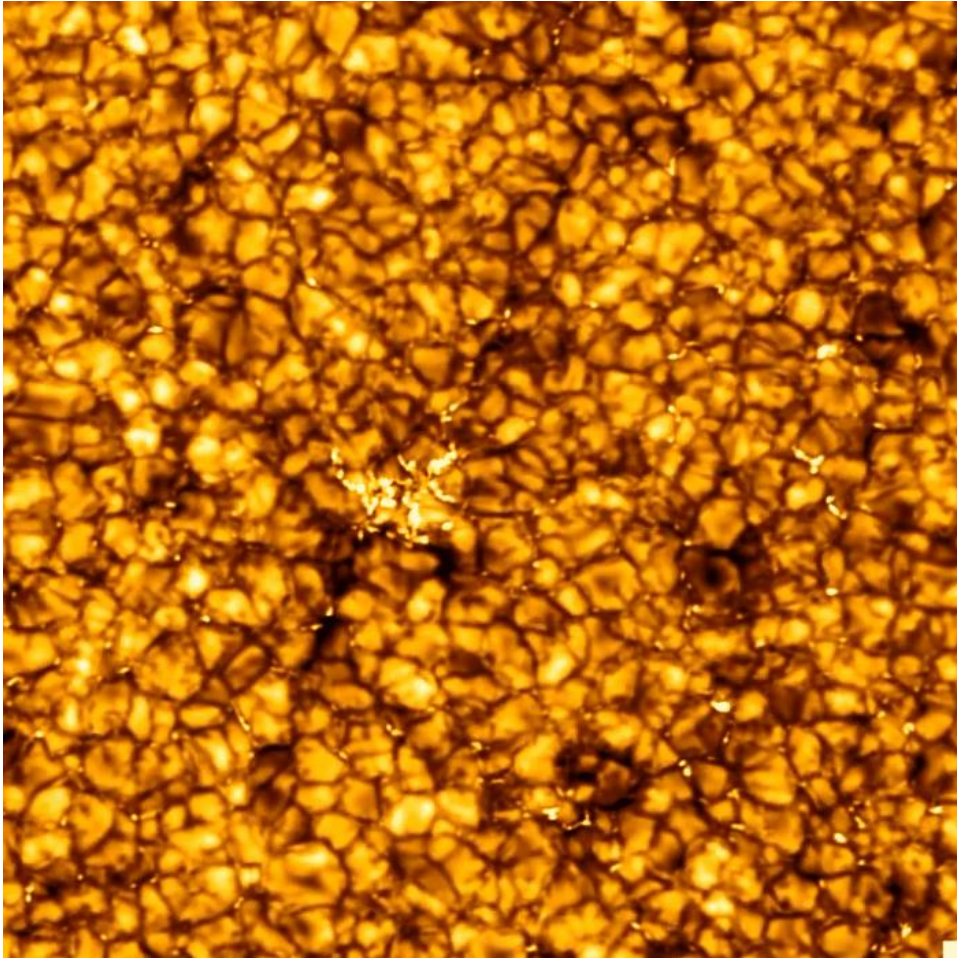
- Её смысл в том, что если, например происходит адиабатическое расширение (или сжатие) газа, то в этом случае температура сгустка меняется как  $T \propto P^{\nabla_{\text{ad}}}$ .

- С другой стороны, радиационный градиент температуры (в равновесном случае):

$$\nabla_{\text{rad}} = \left( \frac{\partial \ln T}{\partial \ln P} \right)_{\text{rad}} \propto \kappa P / T^4$$

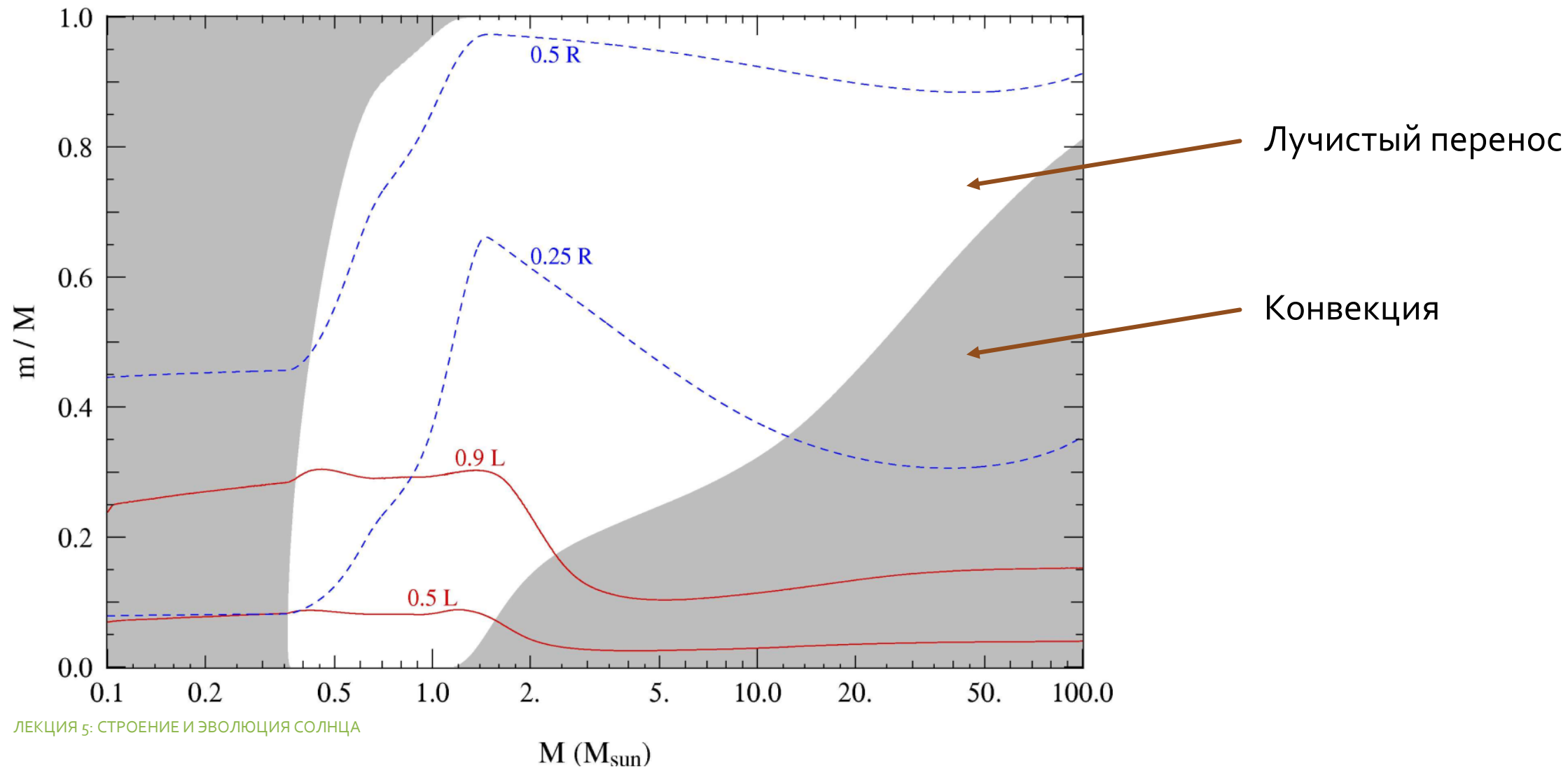
- Конвекция начинается, если  $\nabla_{\text{rad}} > \nabla_{\text{ad}}$  (критерий Шварцшильда).

# КОНВЕКЦИЯ: ГРАНУЛЯЦИЯ

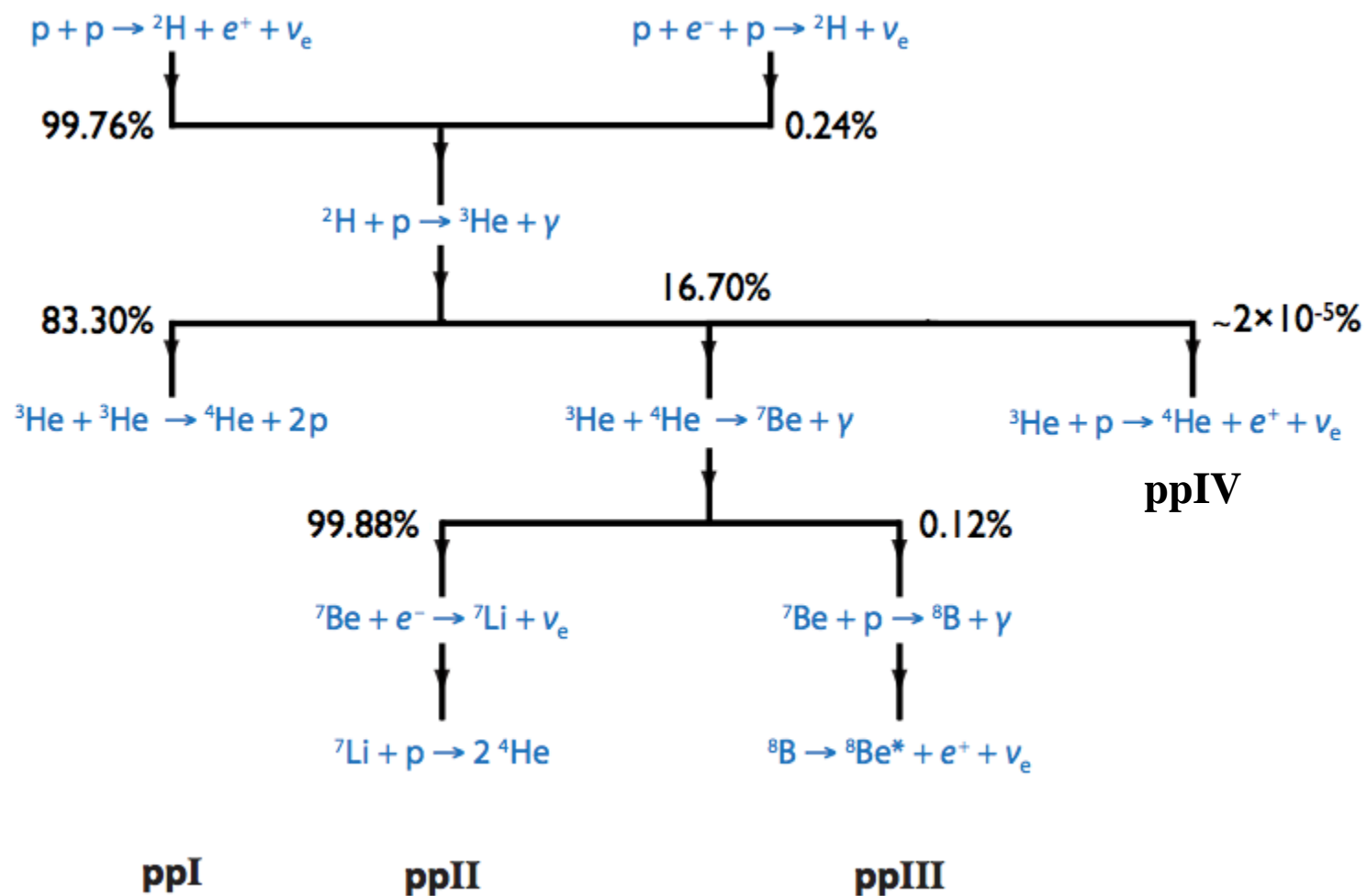


Гранулы имеют размеры порядка 700 км и живут несколько минут.

# СТРУКТУРА ЗВЁЗД РАЗНОЙ МАССЫ



# ЦЕПОЧКИ ПРОТОН-ПРОТОННОГО ЦИКЛА

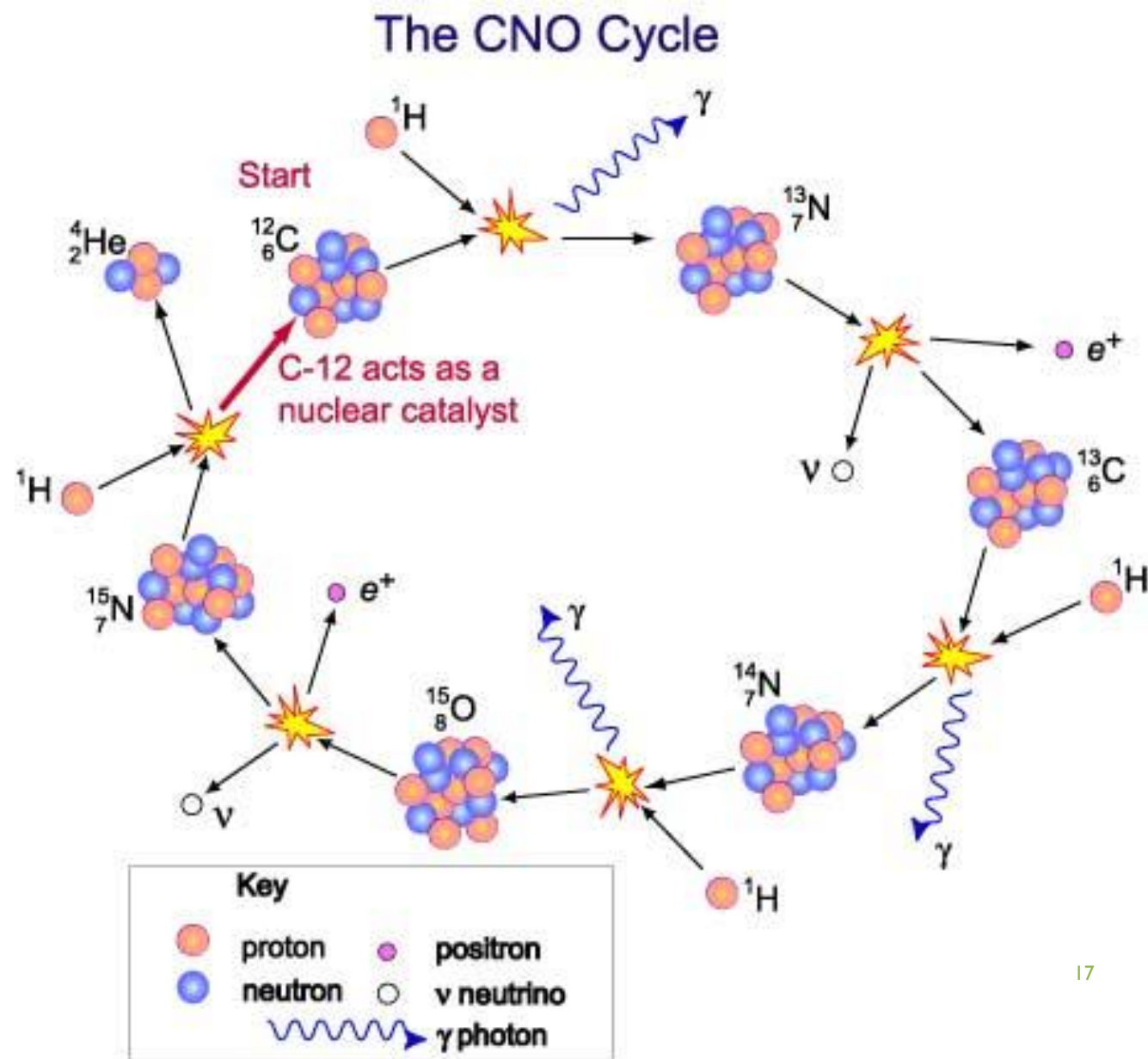


ЛЕКЦИЯ 5: СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЦА

- Запускается в звёздах с  $M > 0.08M_{\odot}$ ;
- Характерное время реакции  $p+p$   
 $t_{p+p} \sim 10^{10}$  лет;
- Реакция идёт благодаря квантовому туннелированию;
- $p$ - $p$  доминирует при температурах  $\sim (10 \dots 14) \cdot 10^7$  К
- Удельное энерговыделение:  
 $\varepsilon \propto T^{3..4}$ ;
- Эффективность:  
 $\eta \sim 0.007mc^2$ .

# CNO-ЦИКЛ

- Минимальная температура  
 $T \sim 15 \cdot 10^6 \text{ K}$
- На Солнце < 1% гелия производится в рамках CNO-цикла.
- Но в звёздах с  $M > 1.3M_{\odot}$  он уже доминирует.
- Удельное энерговыделение:  
 $\varepsilon \propto T^{16...18}$



# ХАРАКТЕРНЫЕ ВРЕМЕНА ДЛЯ СОЛНЦА

- Динамическое время:

$$t_{\text{dyn}} \approx \sqrt{\frac{R^3}{GM}} \approx \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \approx 1600 \text{ s} \left( \frac{R}{R_{\odot}} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

← время восстановления динамического равновесия.

- Тепловое время:

$$t_{\text{KH}} = \frac{U_{\text{int}}}{L} \approx \frac{|W_{\text{gr}}|}{2L} \approx 1.5 \cdot 10^7 \text{ yr} \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)^2 \left( \frac{R}{R_{\odot}} \right)^{-1} \left( \frac{L}{L_{\odot}} \right)^{-1}$$

← время восстановления теплового равновесия.

- Ядерное время:

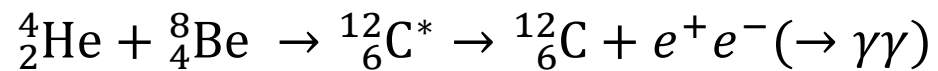
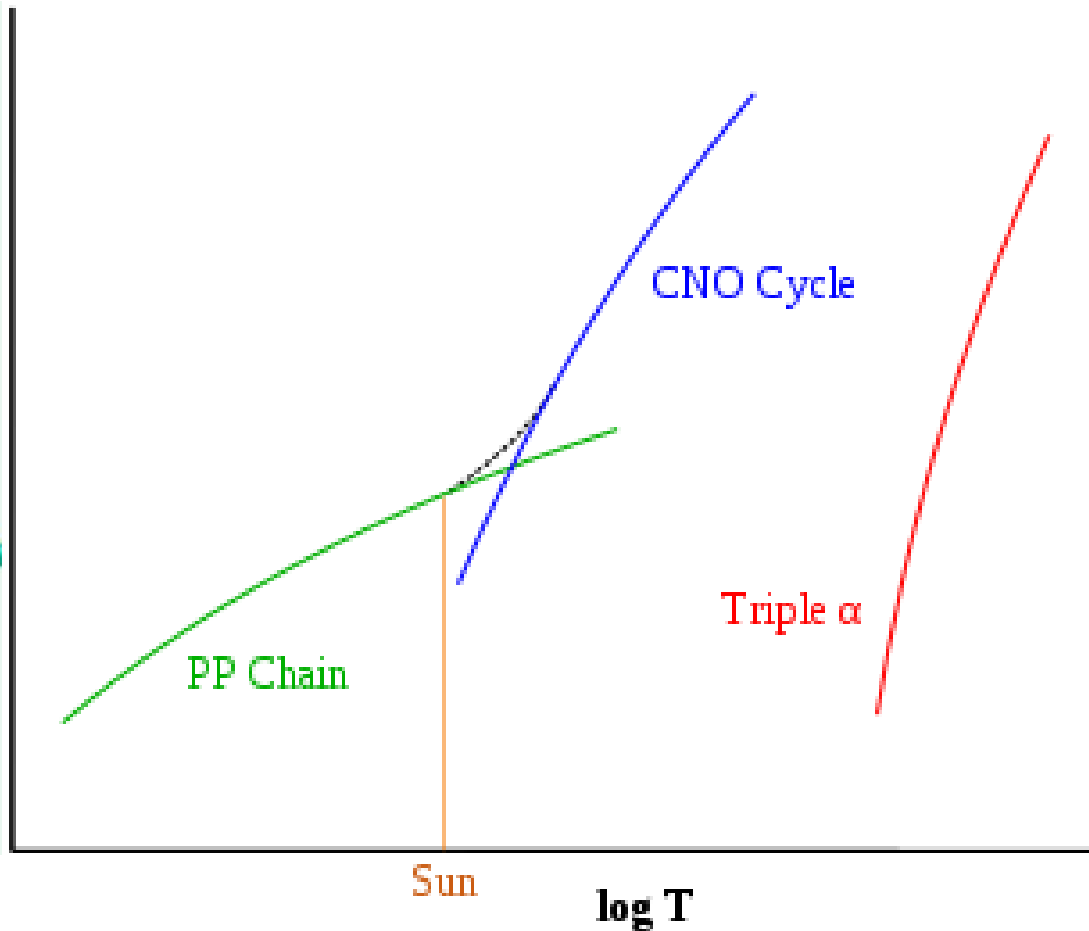
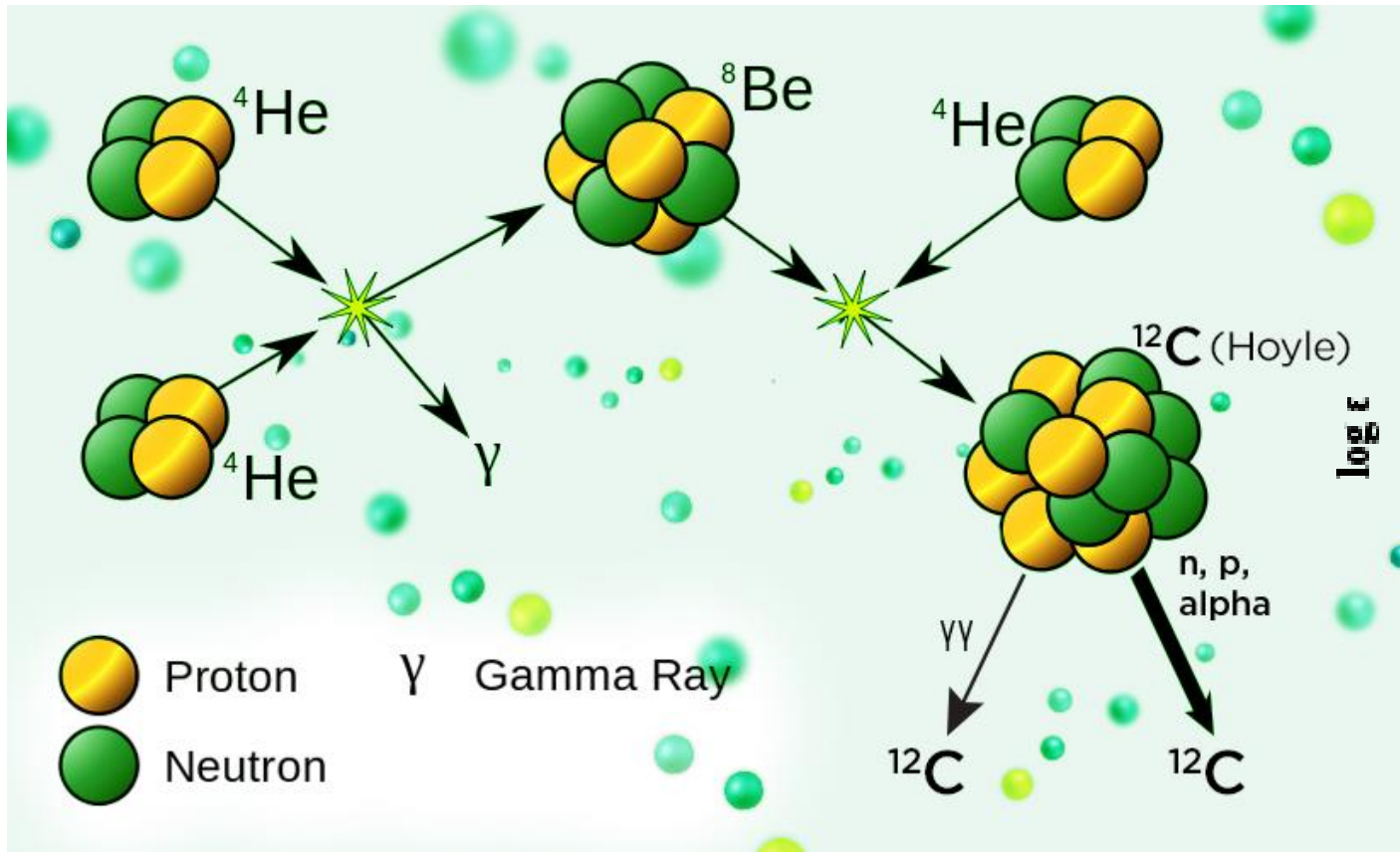
$$t_{\text{nuc}} = \frac{E_{\text{nuc}}}{L} = \eta f_{\text{nuc}} \frac{Mc^2}{L} \approx 10^{10} \text{ yr} \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right) \left( \frac{L}{L_{\odot}} \right)^{-1}$$

← время перестройки источника термоядерной энергии.

$$t_{\text{nuc}} \gg t_{\text{KH}} \gg t_{\text{dyn}}$$

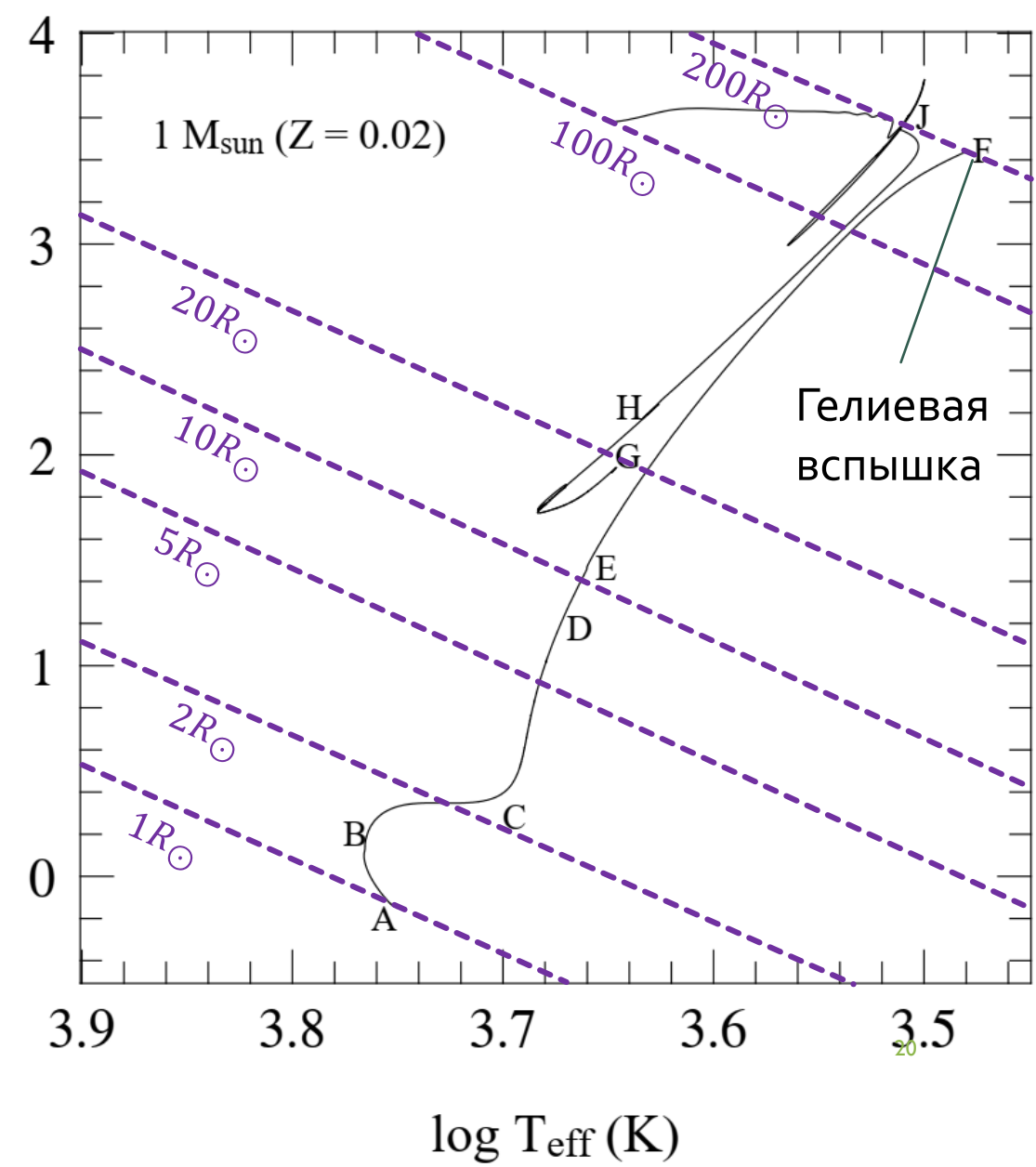
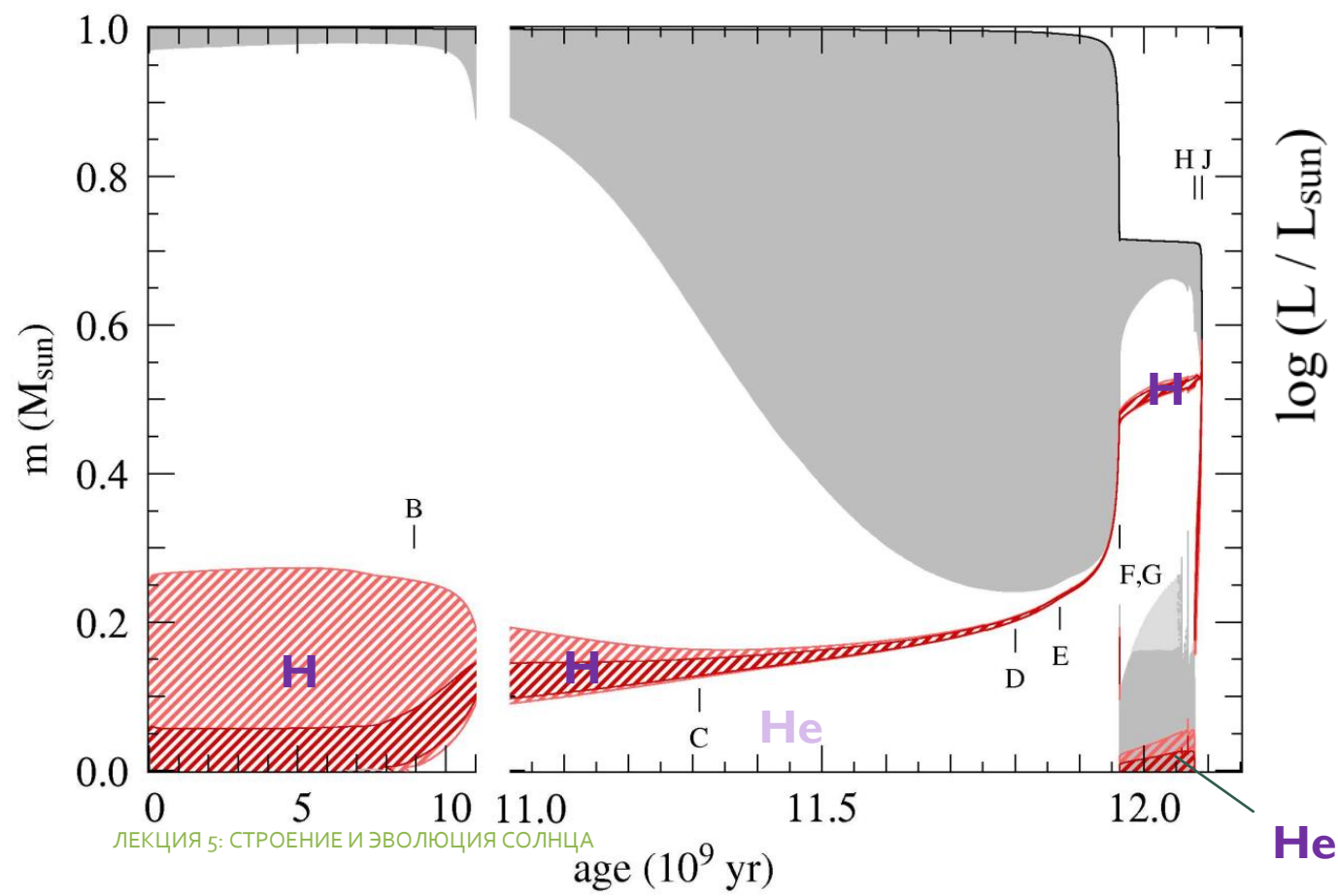


# ГОРЕНИЕ ГЕЛИЯ: ТРОЙНОЙ АЛЬФА-ПРОЦЕСС



# ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЦА

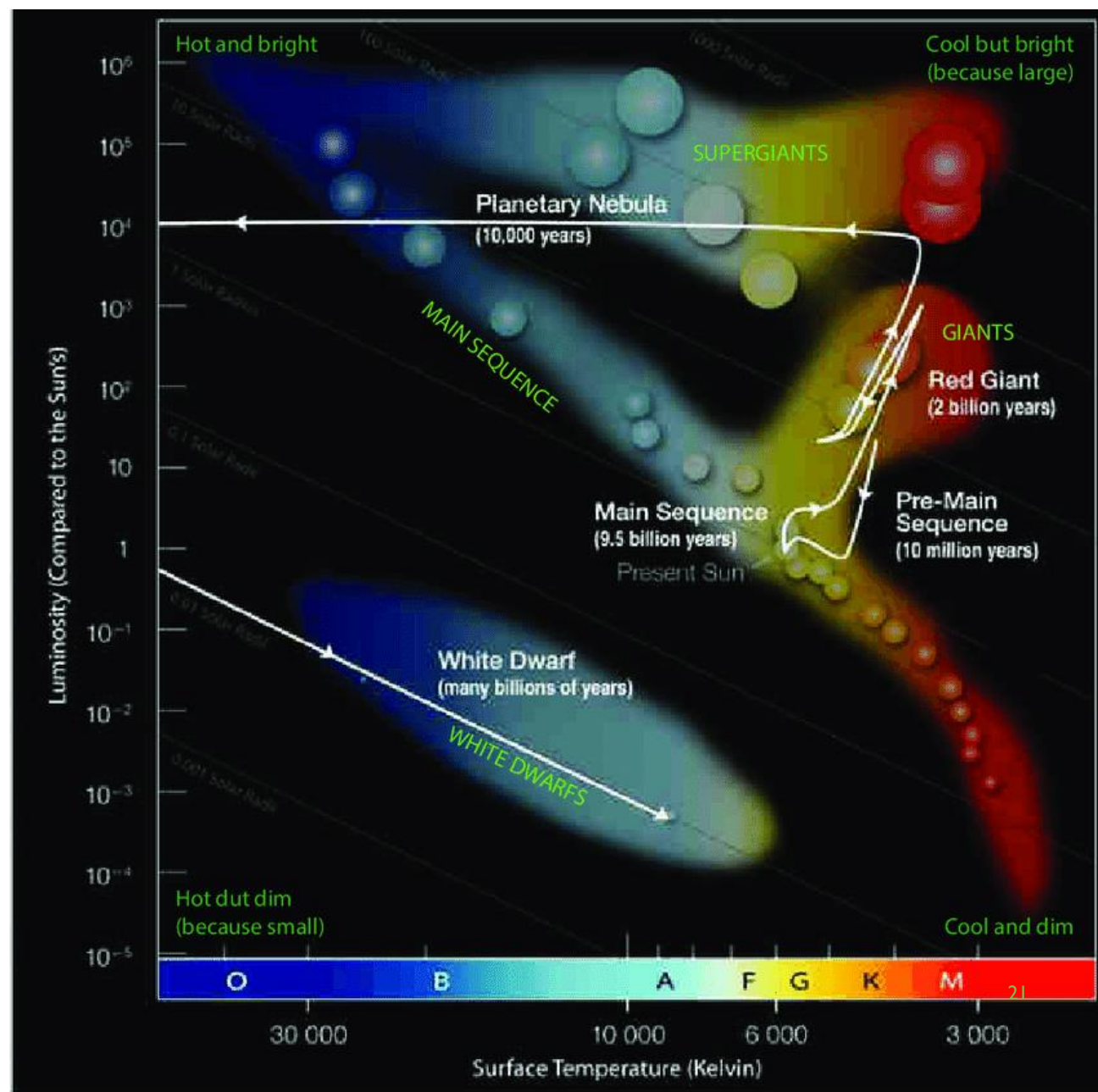
Диаграмма Киппенхайна  
(Kippenhahn diagram)



# ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЦА

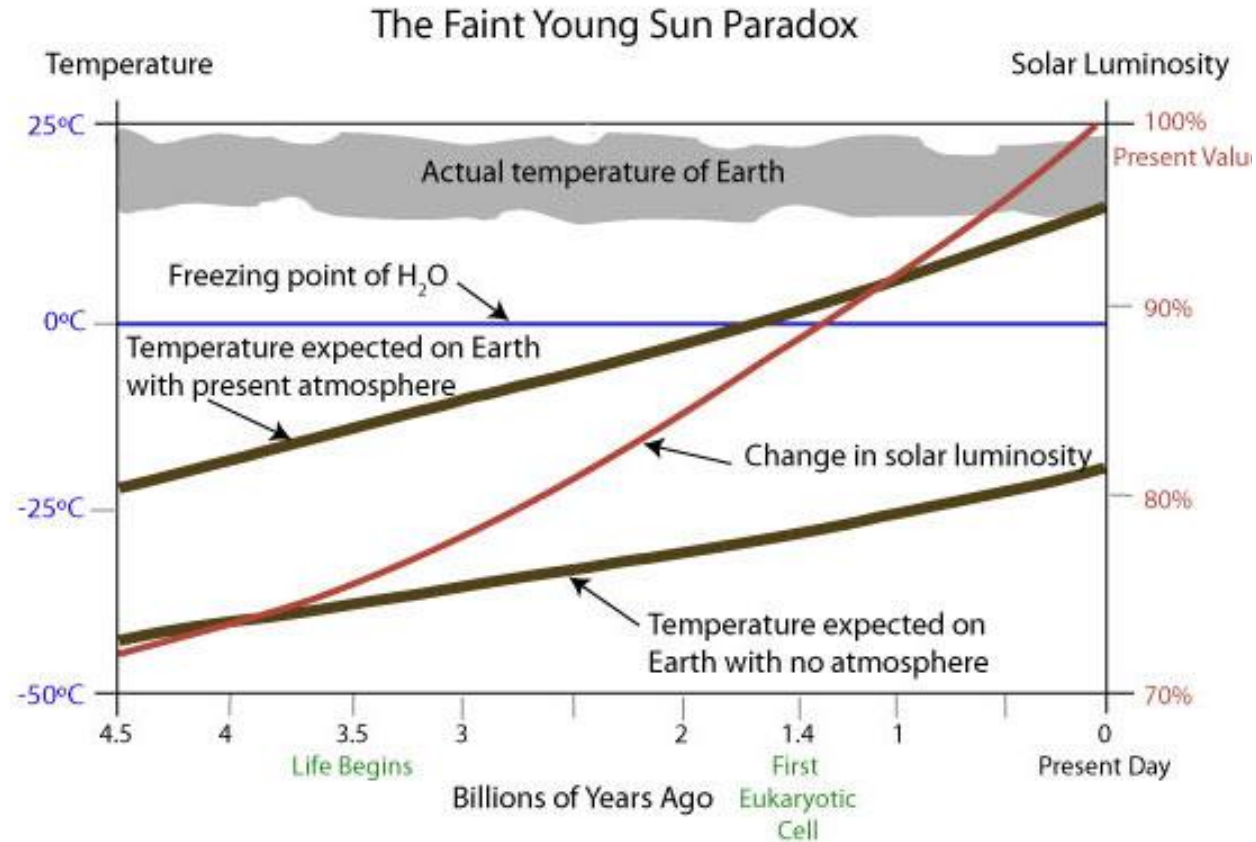


ЛЕКЦИЯ 5: СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЦА

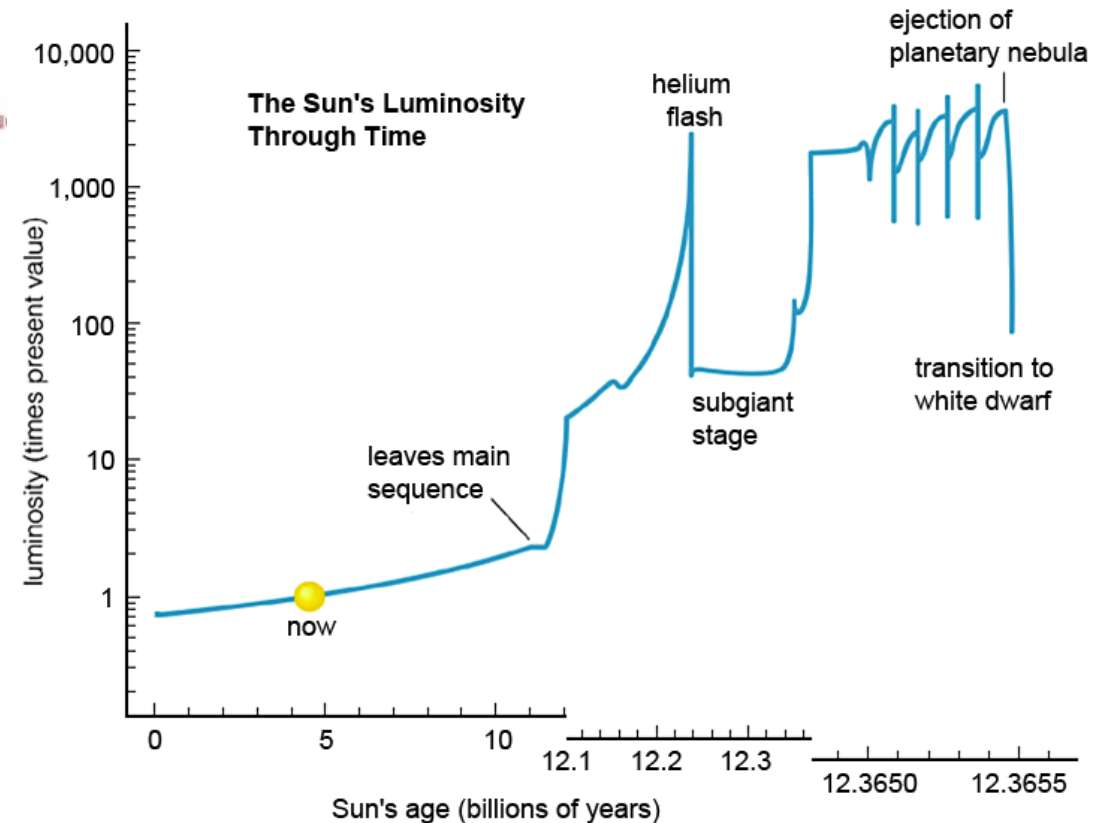




# ПАРАДОКС ТУСКЛОГО МОЛОДОГО СОЛНЦА

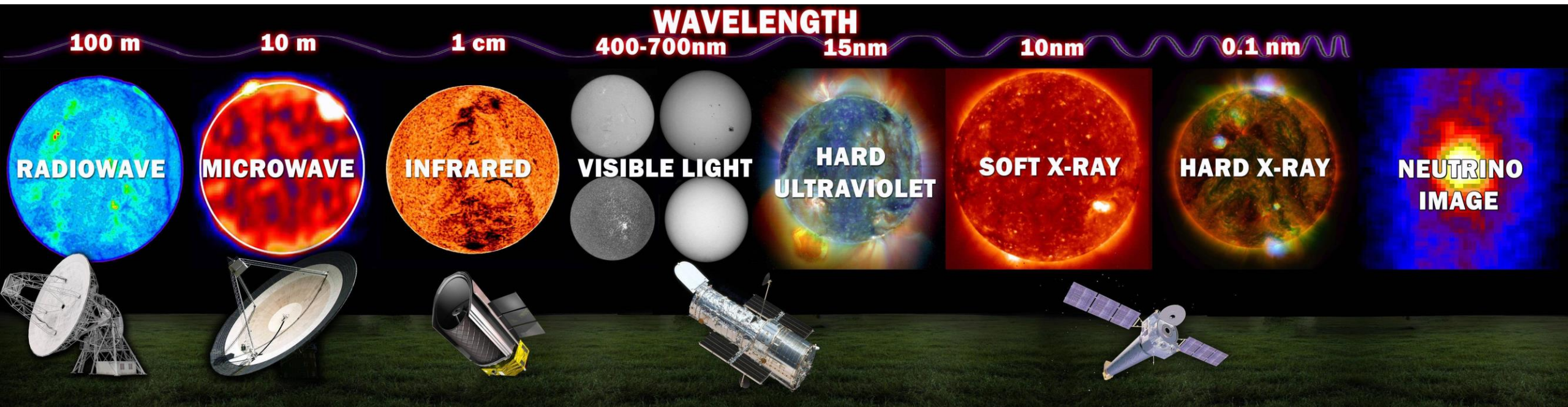


Even though the Sun was about 30% dimmer than it is now, the temperature on Earth has been more or less stable.

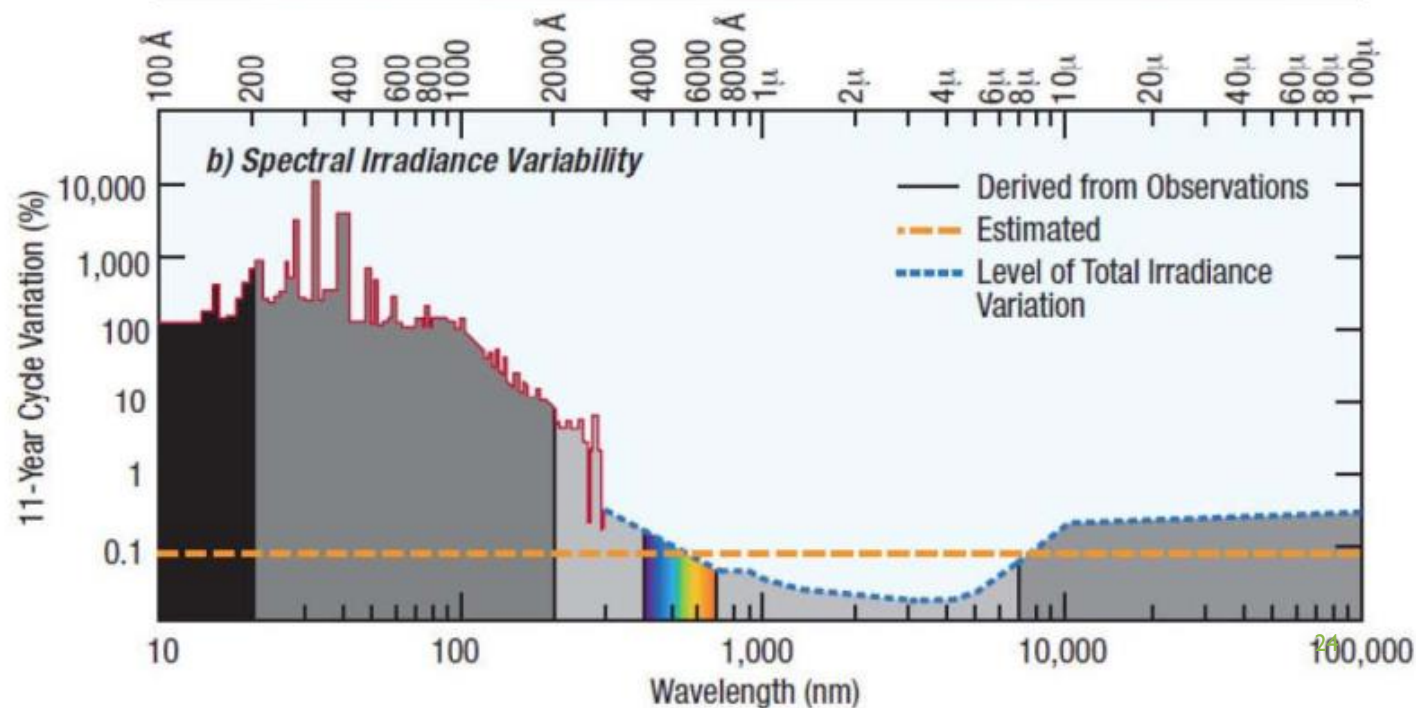
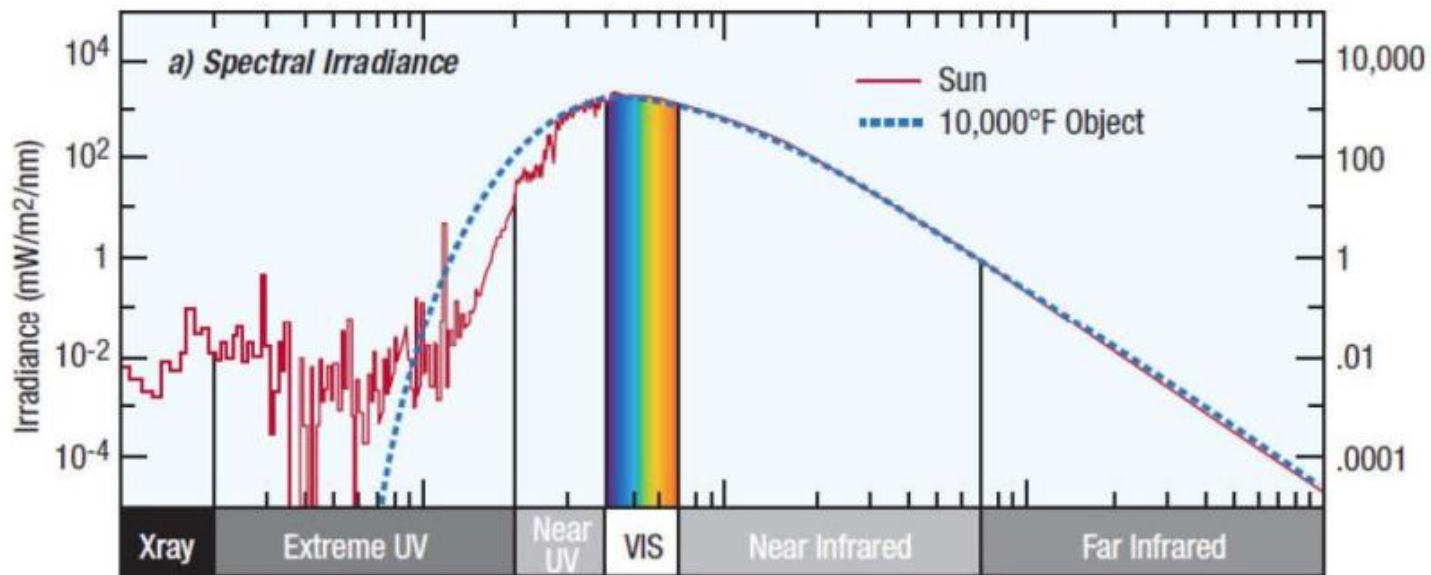
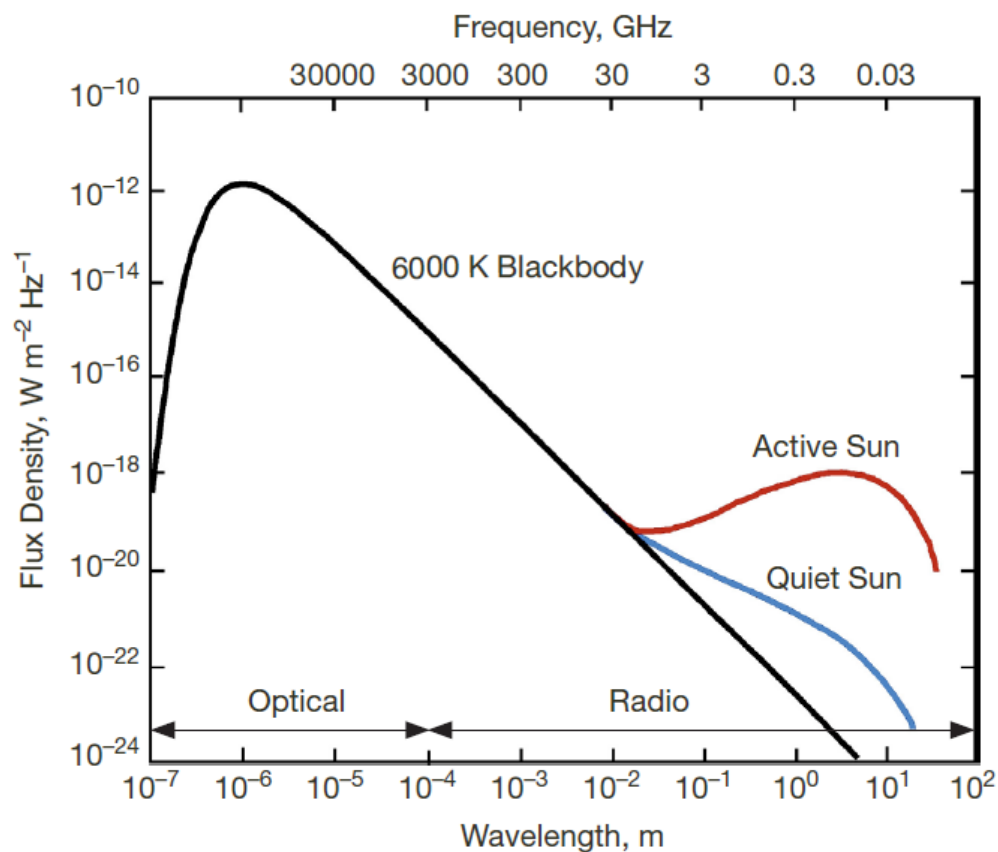


Возможно, парадокс решается большим количеством CO<sub>2</sub> в атмосфере (arXiv:2006.06265).

# СОЛНЦЕ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ



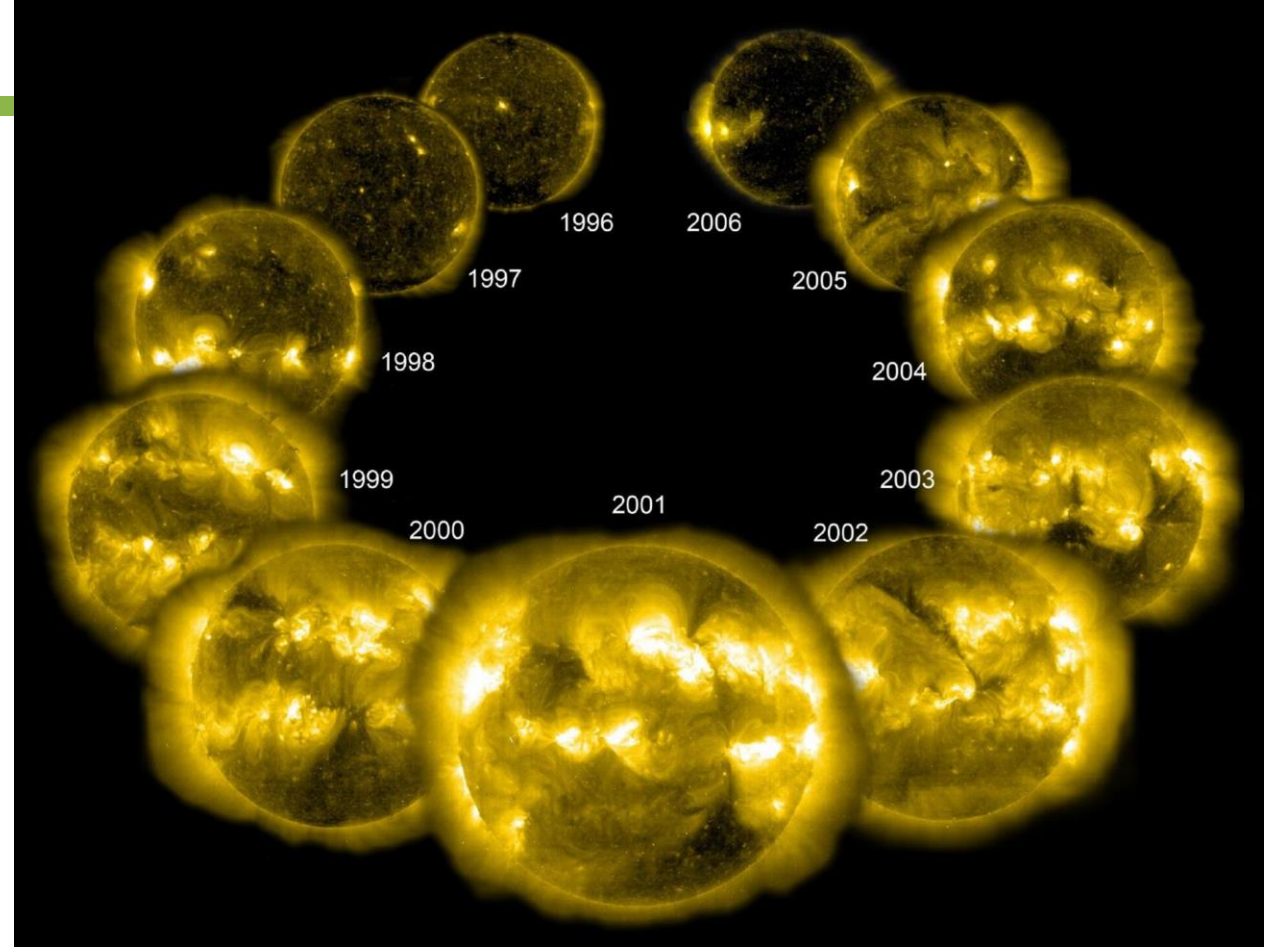
# СПЕКТР СОЛНЦА



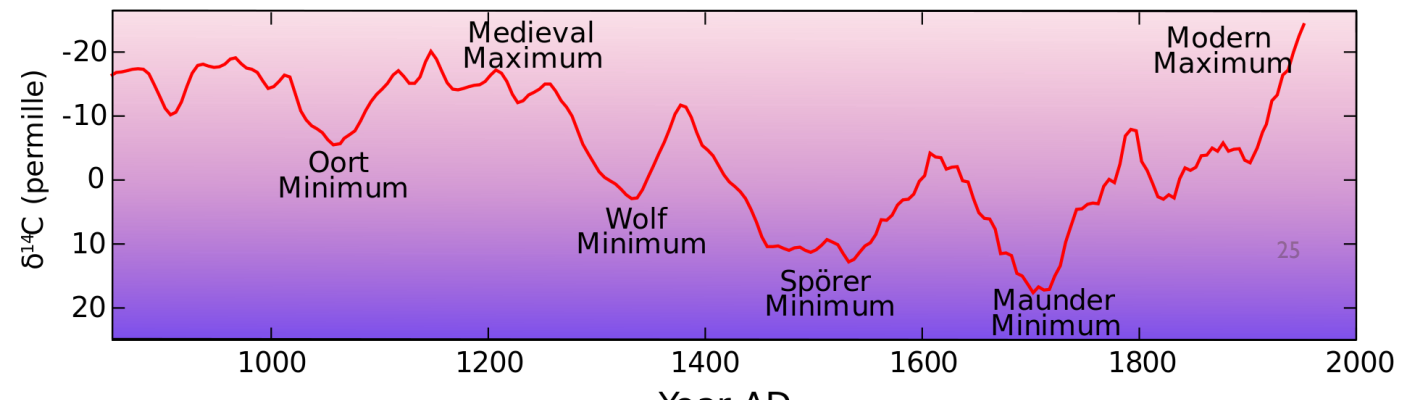


# СОЛНЕЧНЫЙ ЦИКЛ

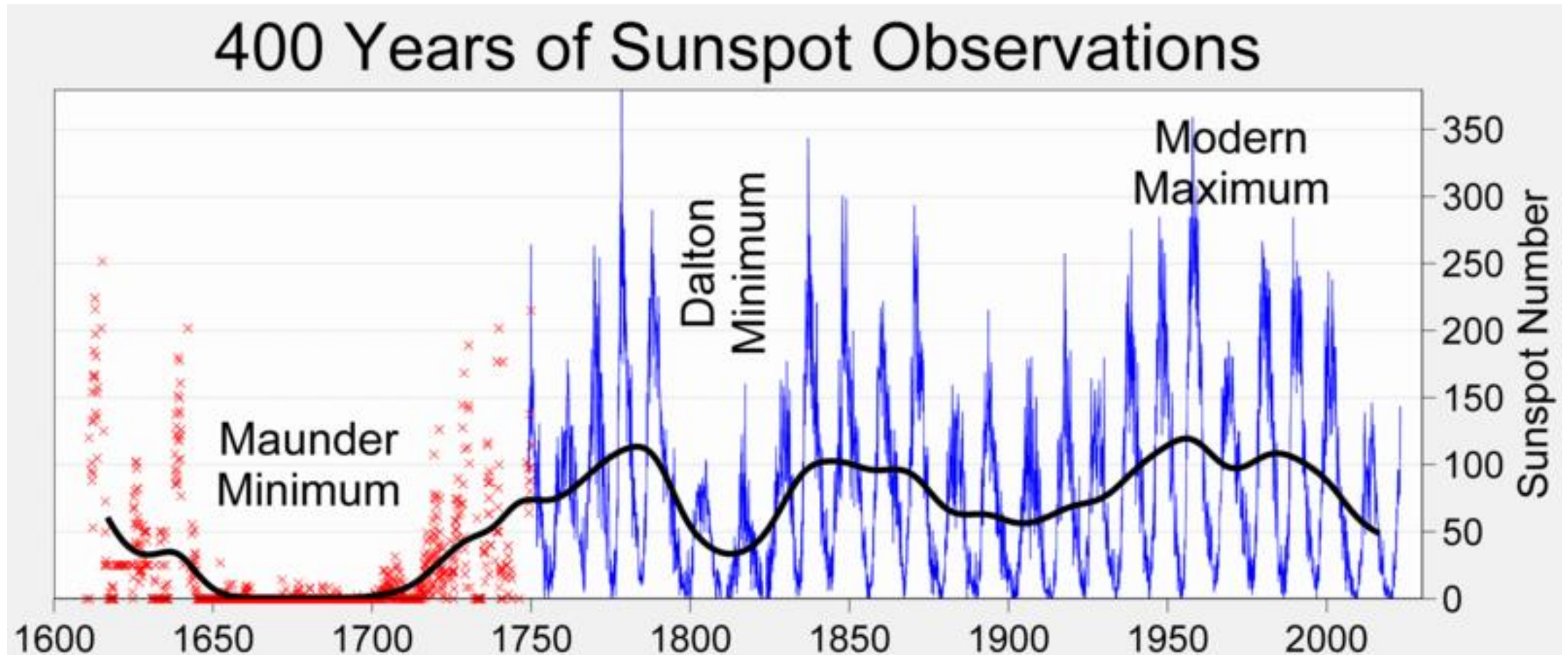
- Период в 11 лет (цикл Швабе) или 22 года (цикл Хейла).
- По содержанию углерода  $^{14}\text{C}$  в ледяных кернах и по годовичным кольцам видят и более длинные циклы: 100, 200, 2000 лет и более.



Solar Activity Events in  $^{14}\text{C}$



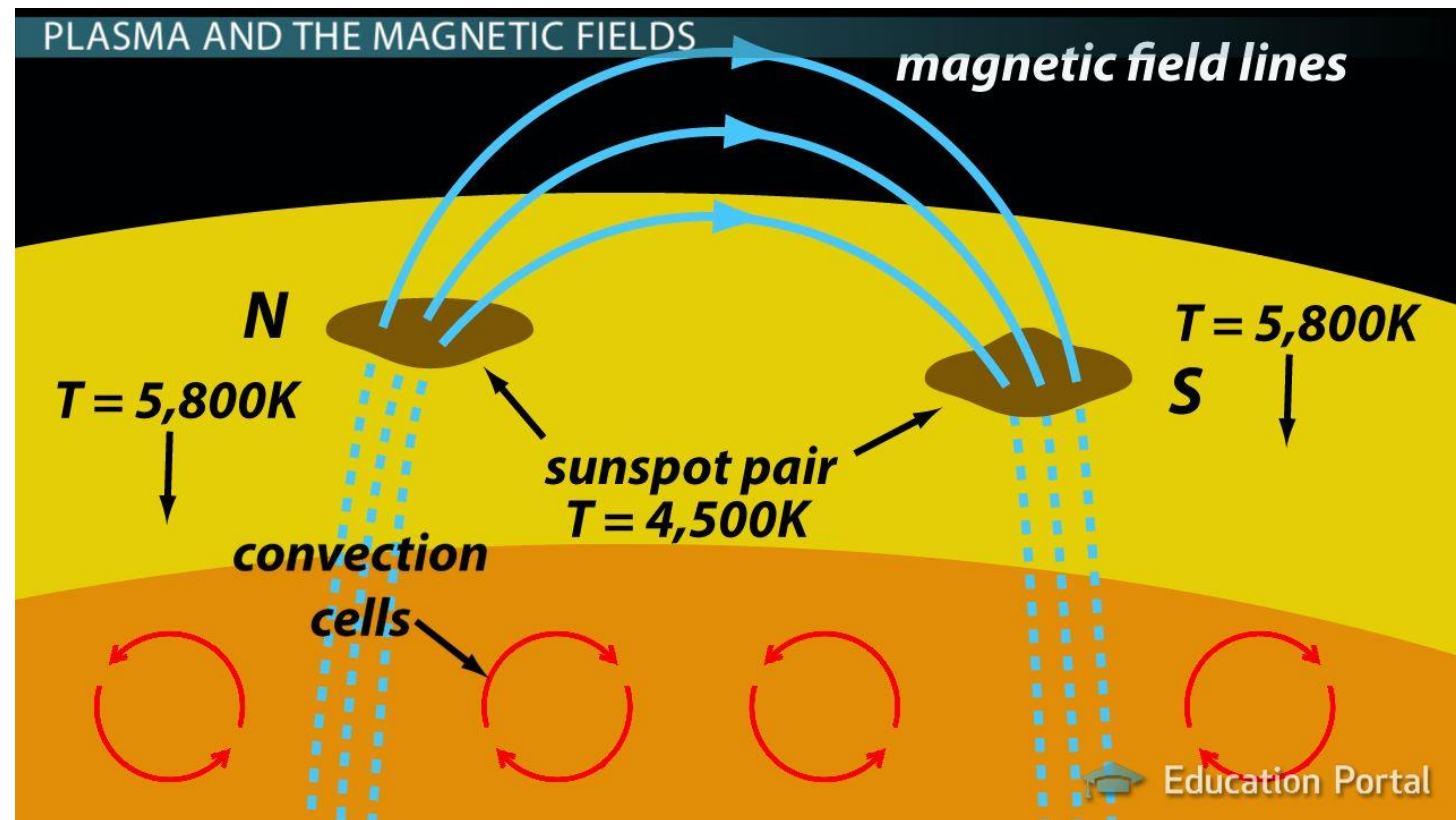
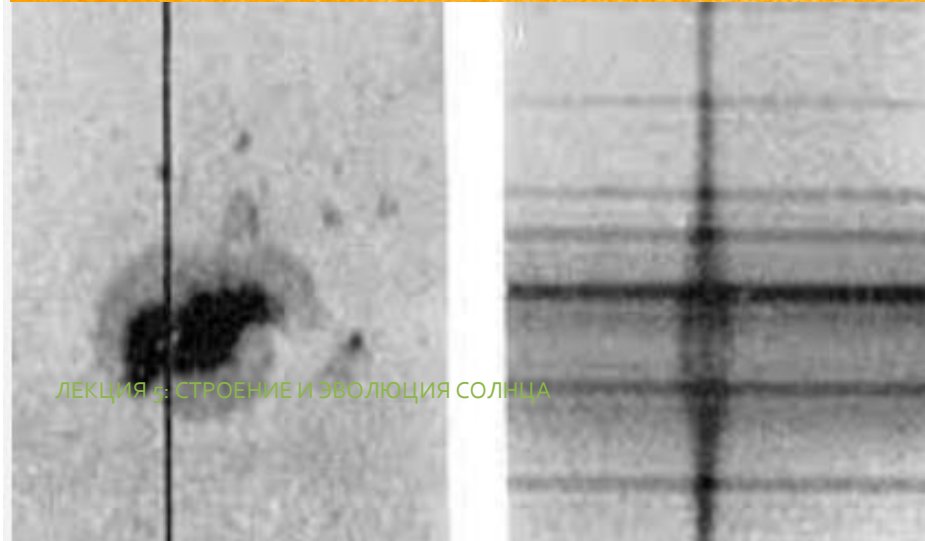
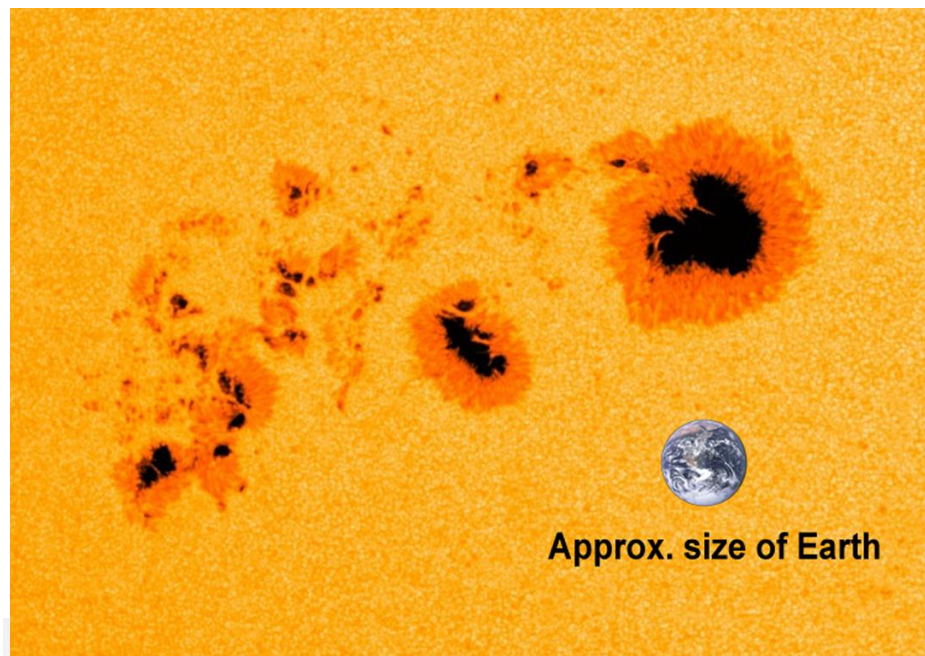
# ИСТОРИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ



$$\text{Число Вольфа: } W = k \cdot (10[\text{groups}] + [\text{spots}])$$

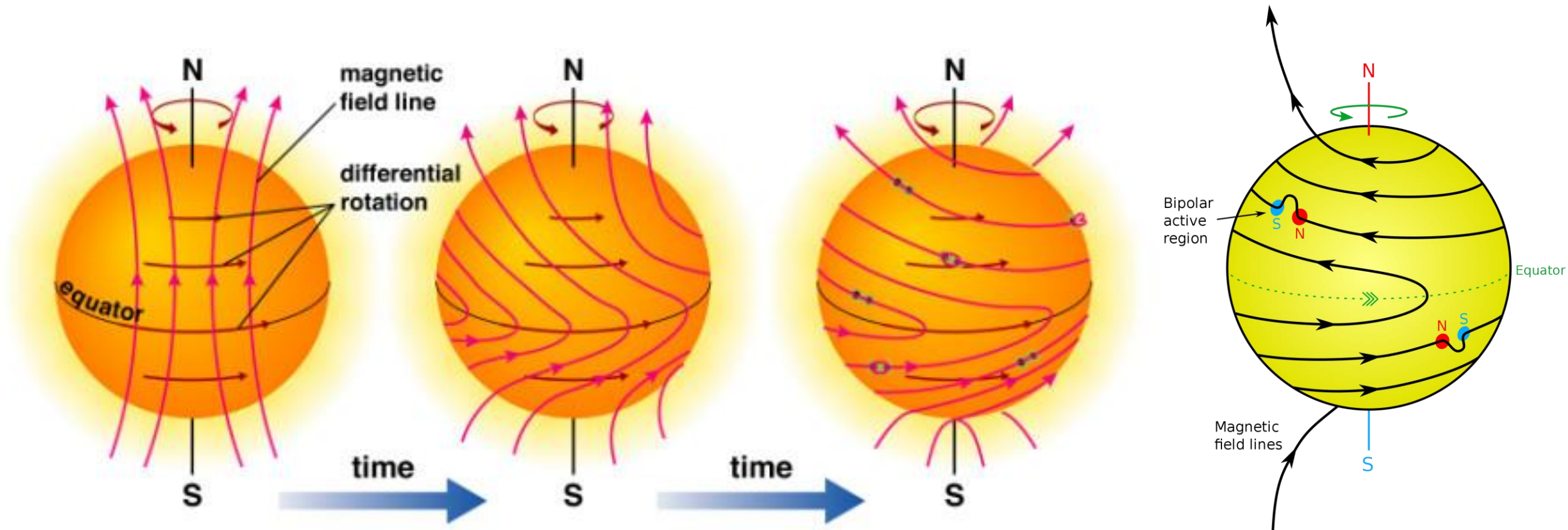


# СОЛНЕЧНЫЕ ПЯТНА

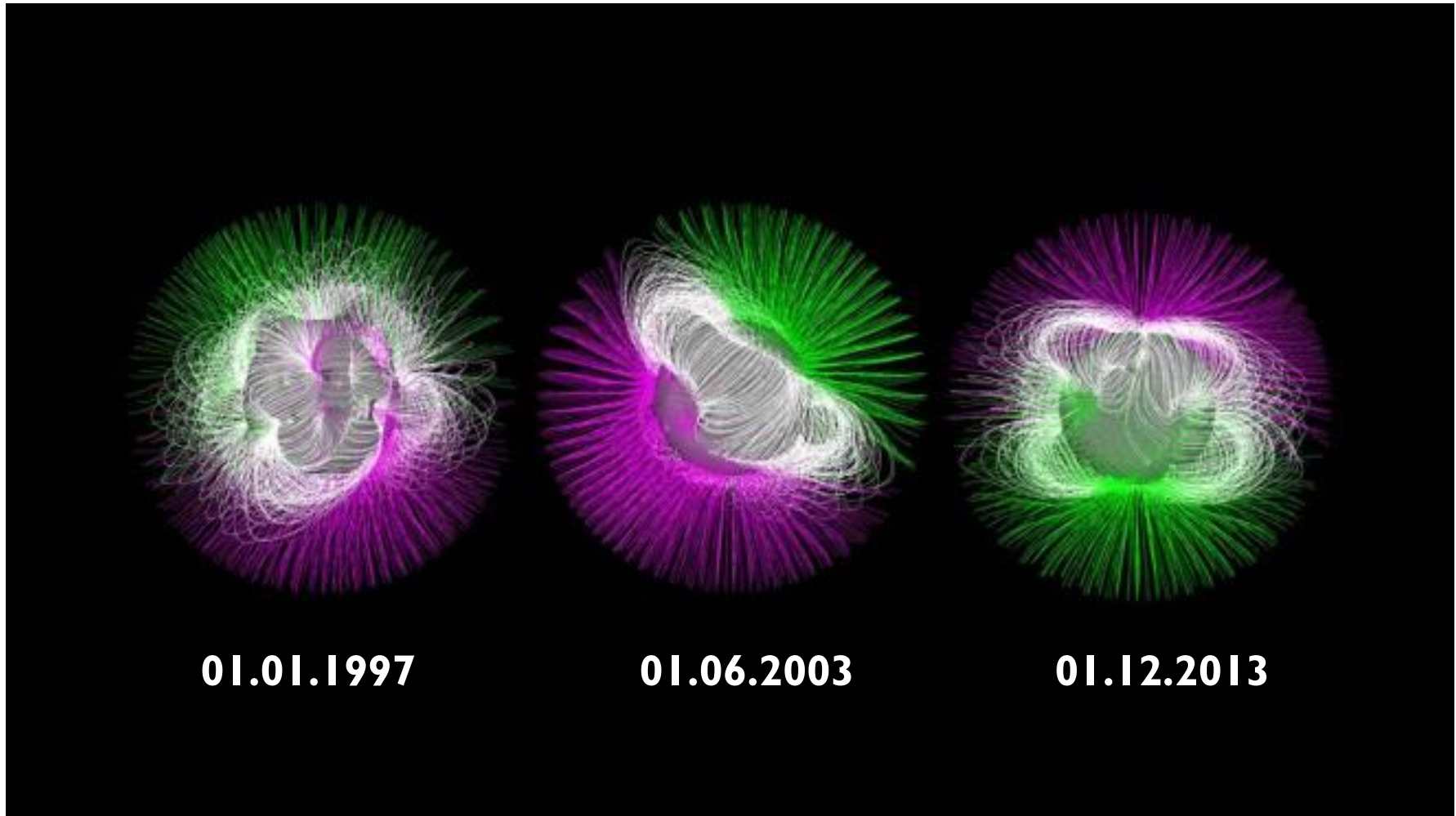


Магнитное поле в пятне  $\sim 1$  кГс  
Температура пятна  $\sim 4500$  К

# ЗАКРУЧИВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ



# ПЕРЕВОРОТ ПОЛЯ





# КОРОНАЛЬНЫЙ ВЫБРОС МАССЫ

- Частота таких событий от 1 раза в несколько дней (во время минимума активности) до нескольких в день во время максимума. Масса выброса  $\sim 10^{15}$  г.
- До Земли вещество может долететь за 1-4 дня.

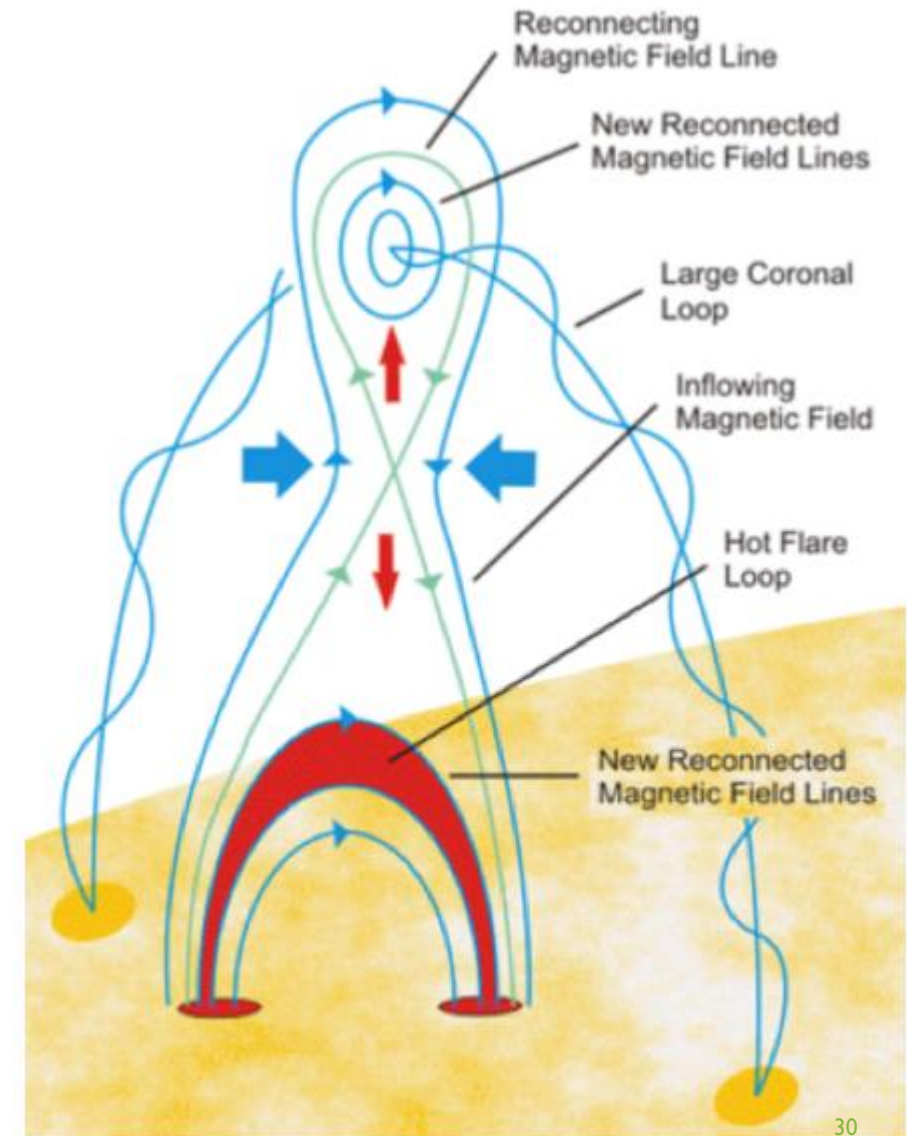


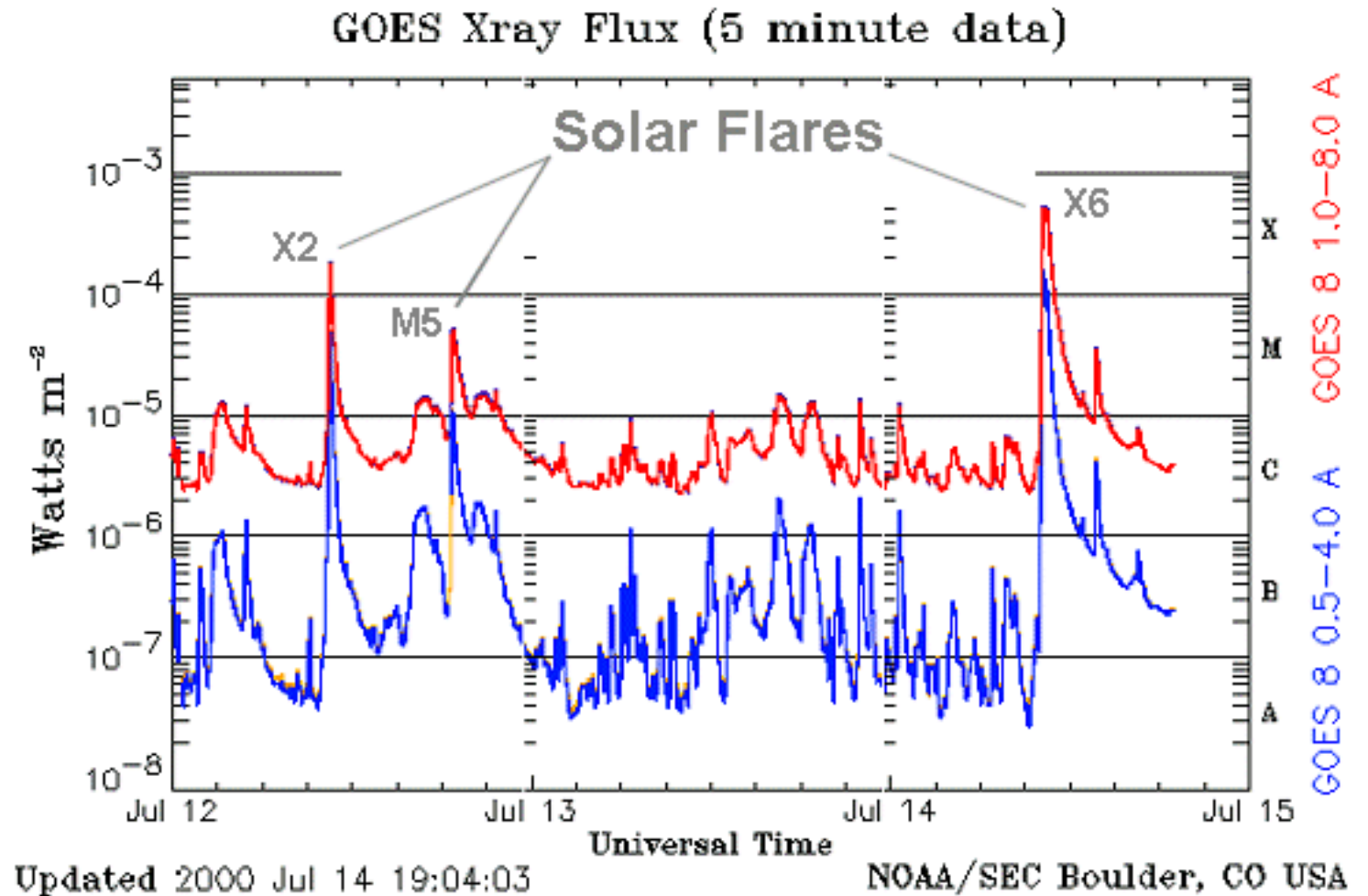
Figure 2: Diagram of a solar flare



# КЛАССИФИКАЦИЯ ВСПЫШЕК

Classes	Flux (peak) 0.1-0.8 nm [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
A	$10^{-8}$ - $10^{-7}$
B	$10^{-7}$ - $10^{-6}$
C	$10^{-6}$ - $10^{-5}$
M	$10^{-5}$ - $10^{-4}$
X	$>10^{-4}$

Событие в марте 1989 года имело класс X15. А событие Кэррингтона (1859 г.) могло достигать до X45.



# ЛИТЕРАТУРА

- Кононович, Мороз, «Общий курс астрономии». Гл. 8. – свойства и наблюдательные проявления Солнца.
- Ламзин, «Физика и эволюция звёзд», Лекции (github).
- Pols, “Stellar structure and evolution”, Lecture Notes (github: pols I I.pdf)
- Гелиосейсмология:
  - <https://arxiv.org/abs/1103.1707> -- обзор с основами физики
  - <https://arxiv.org/abs/1906.08213> -- текущее состояние
- (Научпоп) уроки астрономии для МЭШ:
  - <https://astro.cpm77.ru/lesson/sun>
  - <https://astro.cpm77.ru/lesson/solar-activity>
  - <https://astro.cpm77.ru/lesson/sun-evolution>