



**Лекция 6**  
**Звезда по имени Солнце**  
**ФФ НГУ, 2024**

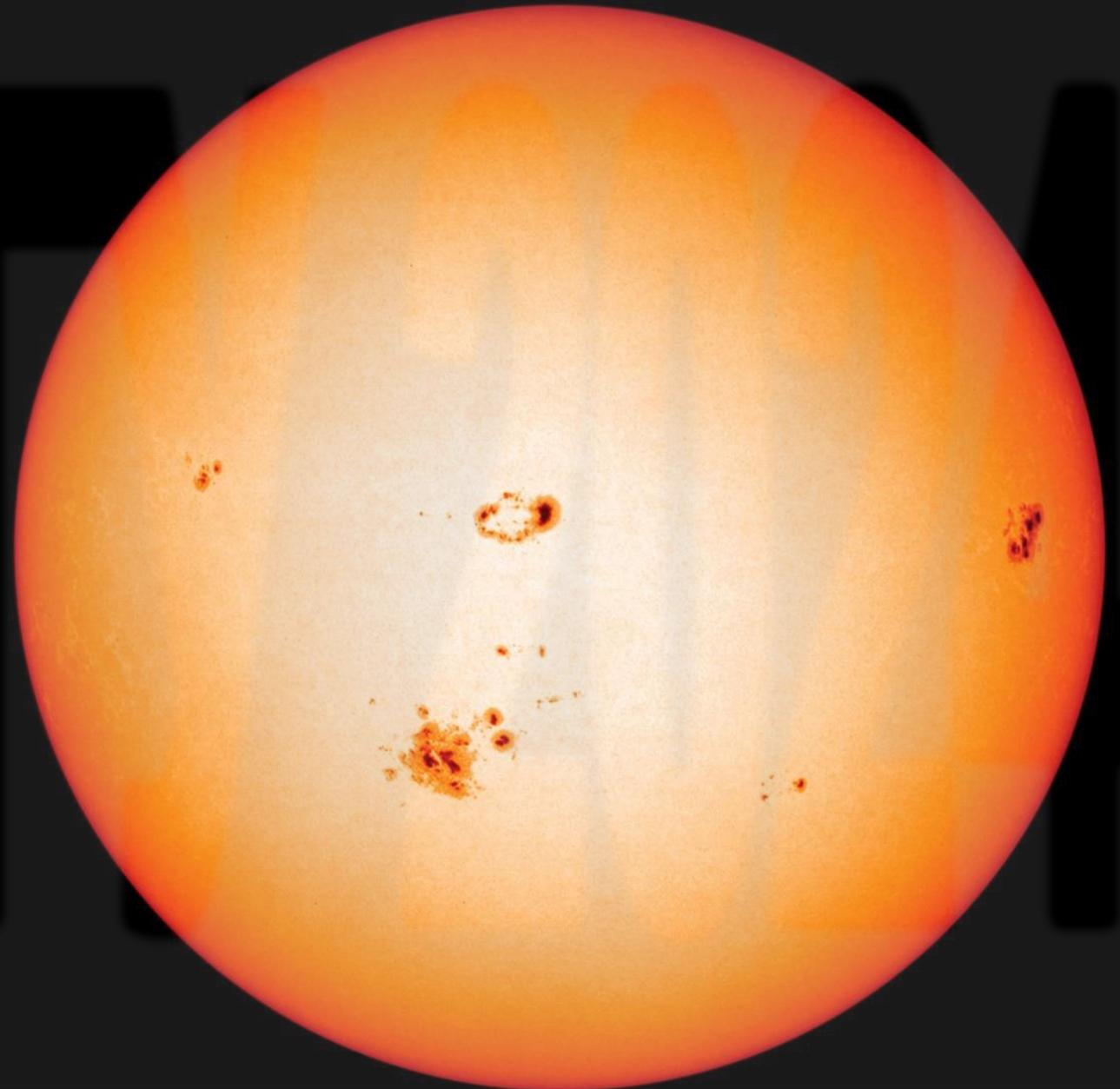
# Звезда –

массивное самосветящееся небесное тело, состоящее из газа и плазмы, удерживаемых за счет собственной гравитации, в котором происходят, происходили или будут происходить **реакции термоядерного синтеза с участием водорода.**

# Основные характеристики Солнца

## Солнце:

Масса:	$1.99 \cdot 10^{30}$ кг
Светимость:	$3.85 \cdot 10^{26}$ Вт
Радиус:	696000 км
Температура:	5800К
Средняя плотность:	$1.4 \text{ г/см}^3$
Период вращения:	25-38 дней
Состав:	
	70% водород
	28% гелий
	1.3% всё остальное



# Уравнение равновесия

Второй закон Ньютона для тонкого слоя  $dr$  с радиусом  $r$ :

$$\rho(r) \frac{dr}{dt^2} = - \frac{GM(r)\rho(r)}{r^2} - \frac{dP}{dr}$$

где

$M(r)$  – масса вещества внутри сферы радиуса  $r$ ;

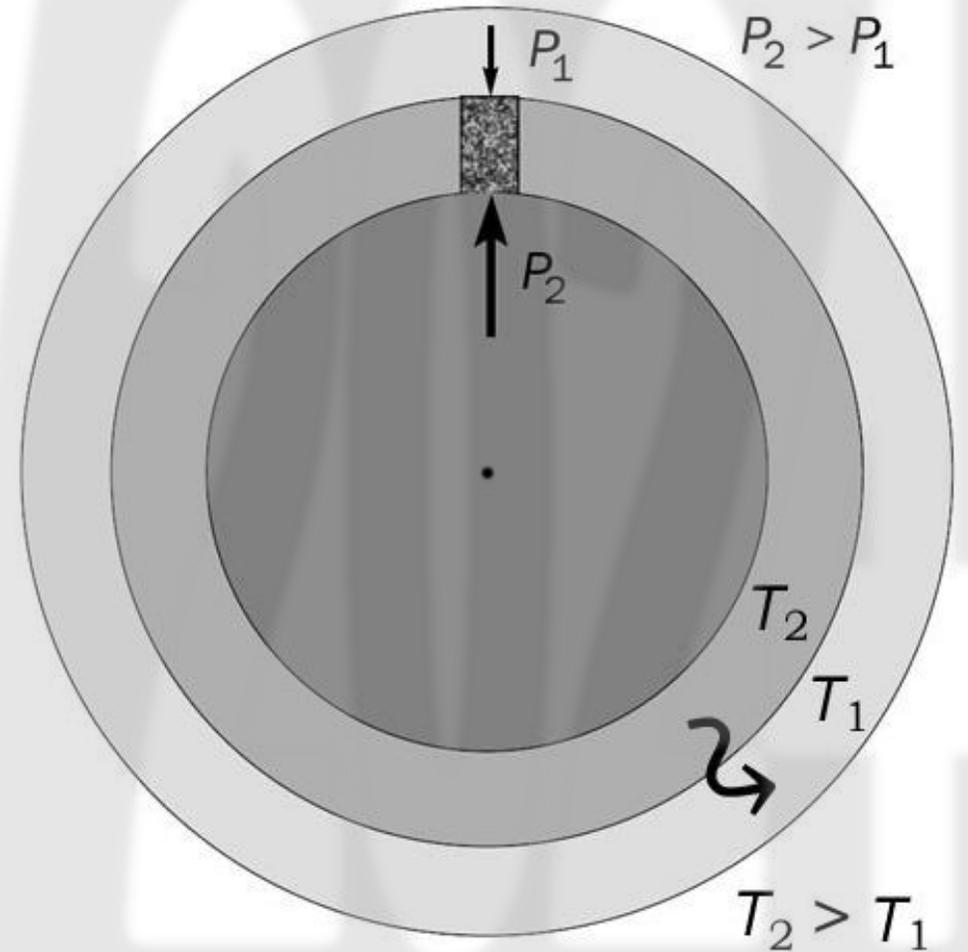
$\rho(r)$  – плотность вещества на радиусе  $r$ ;

$$P = P_{\text{газ}} + P_{\text{изл}}$$

В звездах типа Солнца вклад давления излучения мал.

Для равновесного состояния:

$$\frac{dP}{dr} = - \frac{GM(r)\rho(r)}{r^2}$$



# Расчетная задача

Оцените температуру в центре Солнца.

---

Для грубой оценки воспользуемся уравнением гидростатического равновесия:

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)\rho(r)}{r^2}$$

для средних значений



$$\frac{P_c}{R_\odot} \approx \frac{GM}{R_\odot^2} \rho_c = g_\odot \rho_c$$

Используя уравнение состояния идеального газа в центре

$$P_c = n_c k_B T_c = \frac{\rho_c}{m_p} k_B T_c$$

Отсюда получаем:

$$T_c \approx g_\odot \frac{R_\odot m_p}{k_B} \approx 270 \frac{7 \times 10^8 \times 1.7 \times 10^{-27}}{1.4 \times 10^{-23}} \approx 20 \times 10^6 \text{ К}$$

Более аккуратные расчеты по современным моделям Солнца дают  $T_c = 15.6 \times 10^6 \text{ К}$ .

# Теорема вириала

Для **устойчивой** гравитационно связанной системы выполняется условие (теорема вириала):

$$2\langle E_K \rangle + \langle E_{\Pi} \rangle = 0 \quad \langle E_K \rangle = -\frac{\langle E_{\Pi} \rangle}{2}$$

**Следствия:**

1) При добавлении энергии в систему, полная энергия растет, при этом потенциальная – растет, а кинетическая – уменьшается.

2) Для газового облака  $E_K$  есть тепловая энергия.

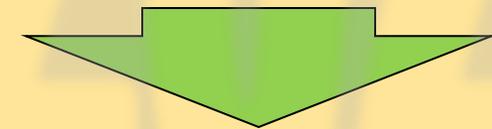
2.1) При медленном сжатии, половина  $E_{\Pi}$  переходит в  $E_K$ , а половина должна излучиться!

2.2) При добавлении энергии облако расширяется и остывает!

**Для круговых орбит:**

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{MV^2}{2} - G \frac{mM}{r+R} = E_K + E_{\Pi} = E_0$$

$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM}{(r+R)^2}; \quad \frac{MV^2}{2} = G \frac{mM}{(r+R)^2}$$



$$E_0 = -G \frac{mM}{2(r+R)} = \frac{E_{\Pi}}{2}$$

# «Отрицательная теплоемкость»

Звезда – устойчивый объект. Как правило, все изменения происходят медленно.

Иногда говорят, что звезда обладает отрицательной теплоемкостью.

Отвод тепловой энергии (например, из-за падения темпа выделения энергии в ядре) приводит к сжатию звезды, что влечет за собой ее нагрев.

Наоборот, подвод избыточной энергии (например, из-за роста энерговыделения в ядре) приводит к расширению и остыванию поверхности. Излучаемая мощность (светимость) при этом растет из-за роста площади поверхности.



# Источник энергии звезд

Со времени открытия закона сохранения энергии (1840-ые) и первого измерения мощности излучения Солнца (1838) была осознана проблема источника солнечной энергии.

Гипотеза пассивного остывания изначально нагретого тела, а также химические реакции как источник энергии были быстро отброшены (слишком малое время «жизни» Солнца, ~1000 лет).

Некоторое время доминировала гипотеза метеоритной бомбардировки Солнца как источник энергии, но и она была исключена из-за очевидных противоречий (приводило к заметному изменению массы и видимого размера Солнца).

К концу XIX века общепризнанной стала теория Гельмгольца – Томсона, что источником энергии Солнца является его постепенное гравитационное сжатие. Тогда время жизни Солнца может быть оценено как

$$t_{\text{КГ}} \simeq \frac{U_{\odot}}{L_{\odot}} \simeq \frac{GM_{\odot}^2}{R_{\odot}L_{\odot}} = \frac{7 \times 10^{-11} (2 \times 10^{30})^2}{7 \times 10^8 \times 4 \times 10^{26}} \frac{1}{3 \times 10^7} \simeq 30 \times 10^6 \text{ лет}$$

Что не противоречило оценкам возраста Земли на то время. Однако в начале XX века, с помощью радиоизотопного анализа было установлено, что возраст Земли составляет миллиарды лет.

# Термоядерный синтез

С развитием квантовой механики в начале XX века стало понятно (А. Эддингтон), что хорошим кандидатом на роль источника энергии является термоядерный синтез – слияние четырех протонов в ядро атома гелия. При этом выделяемая энергия (дефект массы) была бы :

$$\Delta E \simeq (4m_p - m_{He})c^2 \simeq (4 \times 1.6726 - 6.6447) \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 \simeq 4.1 \times 10^{-11} \text{ Дж} \simeq 26.7 \text{ МэВ}$$

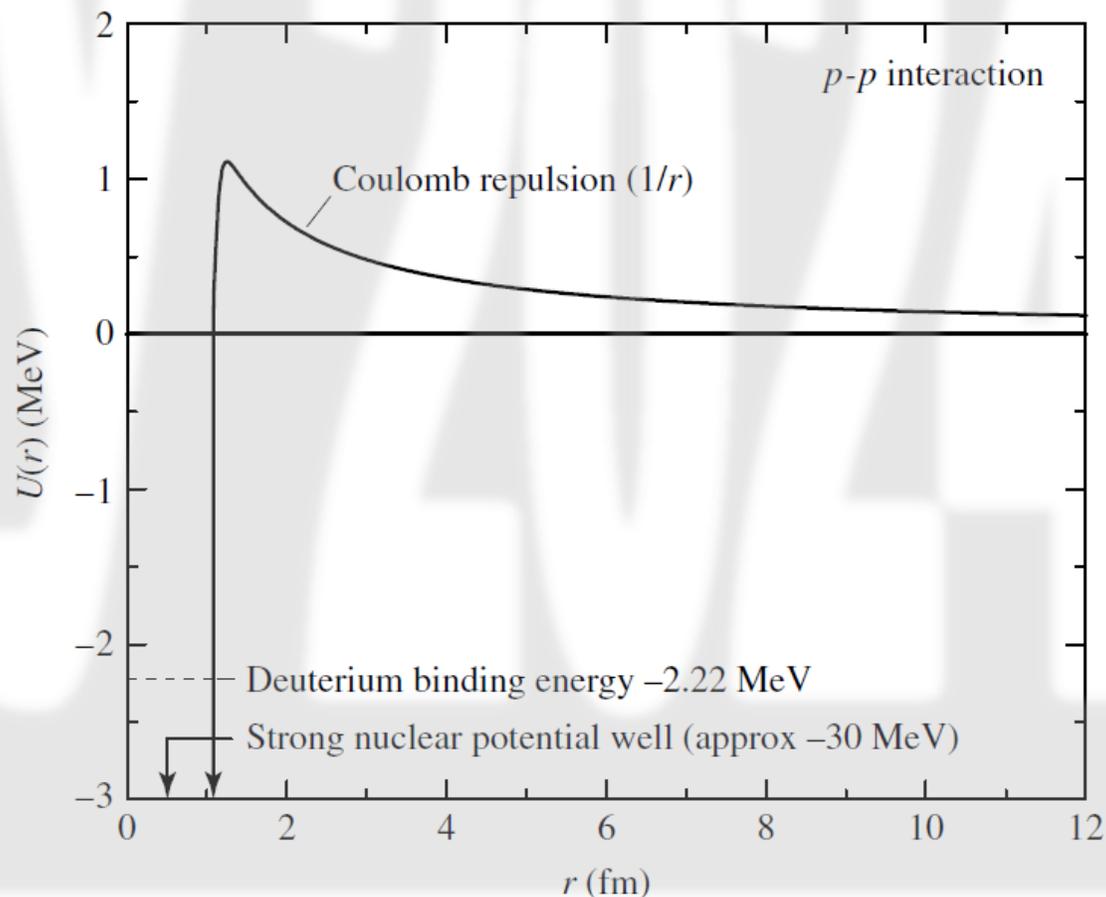
то есть примерно в  $10^6$  раз больше, чем в химических реакциях.

Однако, для того, чтобы «соединить» два протона, необходимо преодолеть кулоновское отталкивание

$$U_{\text{Кул}} \simeq \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \simeq 1 \text{ МэВ}$$

для чего необходима температура

$$T \simeq U_{\text{Кул}}/k_B \simeq 10^{10} \text{ К}$$



# Туннельный переход

Проблему решил Георгий Гамов в 1928 году.

Из соотношения неопределенностей Гейзенберга  $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$ . Кроме того, из уравнение де Бройля  $\lambda = h/p$  и можно считать, что положение протона определено с точностью до его длины волны. Тогда, если протоны сблизятся на расстояние  $\sim \lambda$ , то вероятность, того что они окажутся внутри потенциальной ямы становится существенной.

$$U_{\text{Кул}} \simeq \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\lambda} \simeq 2 \frac{p^2}{2m_p} = E_{\text{кин}} \quad \longrightarrow \quad \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2 p}{h} \simeq \frac{p^2}{m_p} \quad \longrightarrow \quad p = \frac{m_p}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{h}$$

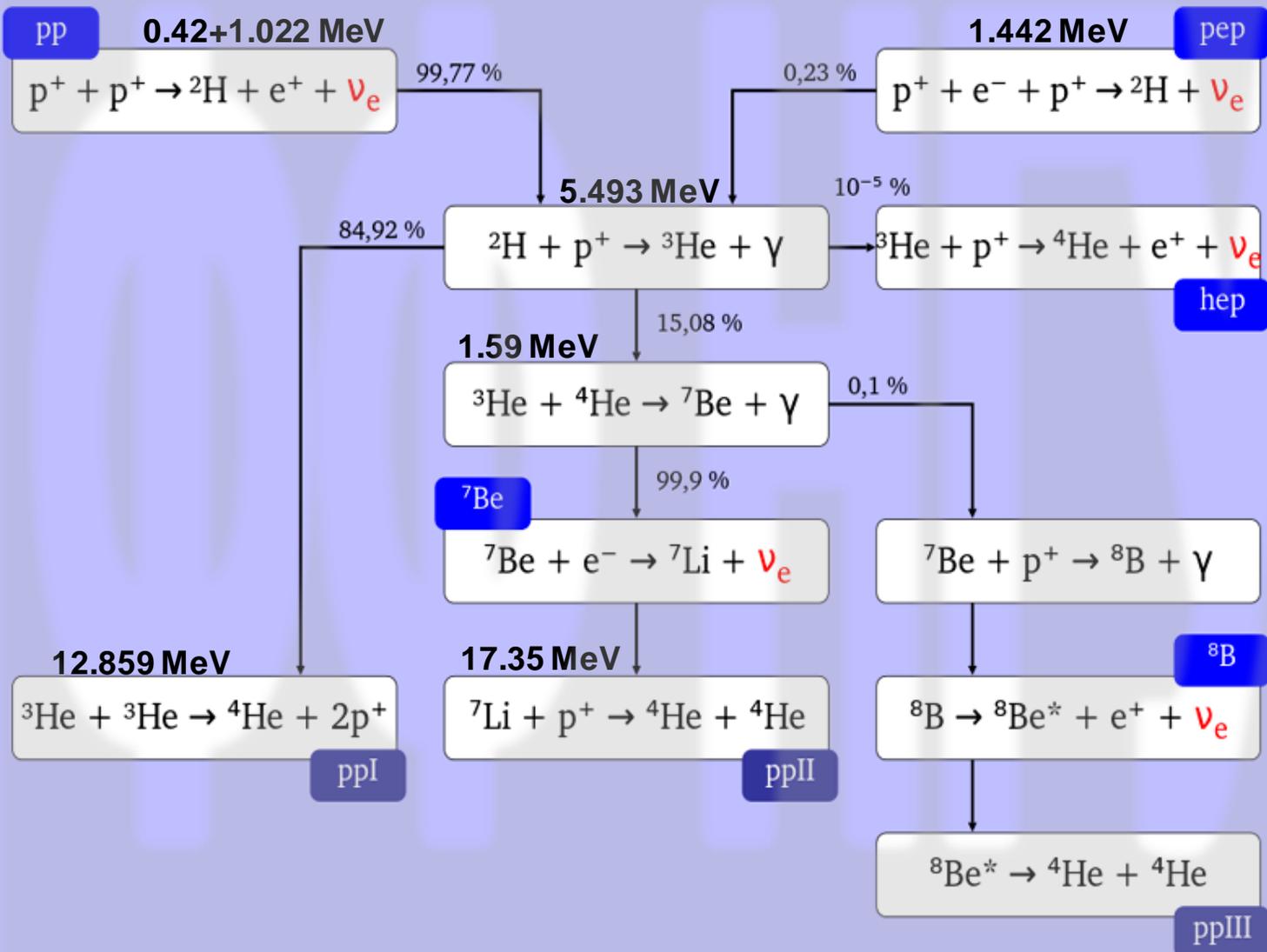
а для этого достаточно иметь температуру

$$\frac{3}{2} k_B T_{\text{КВ}} \simeq \frac{p^2}{2m_p} \quad \longrightarrow \quad T_{\text{КВ}} \simeq \frac{p^2}{3m_p k_B} = \frac{e^4 m_p}{48\pi^2 \epsilon_0^2 h^2 k_B} = \alpha^2 \frac{m_p c^2}{12\pi^2 k_B} \simeq 5 \times 10^6 \text{К}$$

$\alpha \simeq \frac{1}{137}$

Что по порядку величины уже соответствует ожидаемой температуре в центре Солнца.

# Источник энергии звезд: pp цепочка



В результате pp цепочки 4 протона преобразуются в ядро гелия и выделяется  $\epsilon = 26.73$  МэВ энергии.

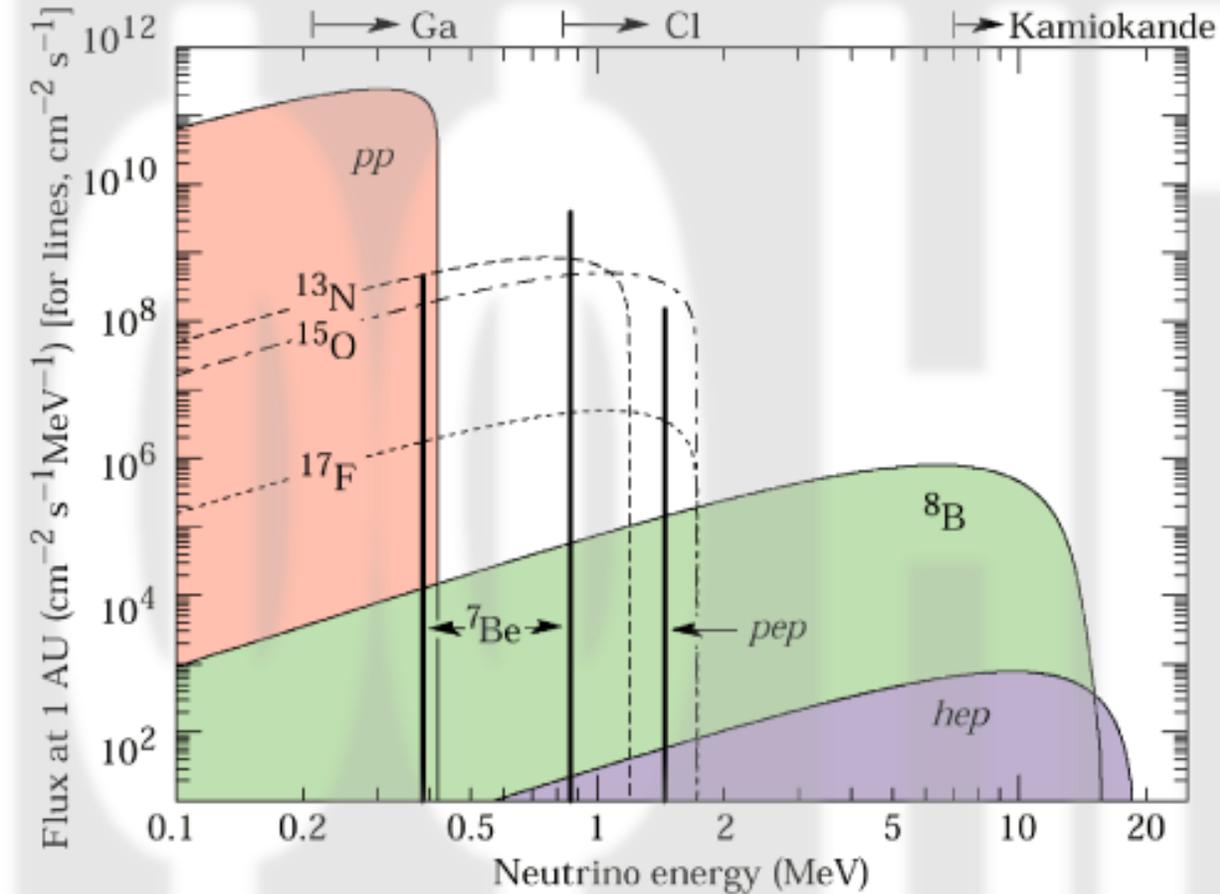
Часть энергии (несколько процентов) уносится нейтрино и напрямую «не видна».

При синтезе одного ядра гелия образуется 2 электронных нейтрино.

Канал ppIII дает малый вклад в полное энергосодержание, но в результате образуются нейтрино большой энергии – до 14 МэВ.

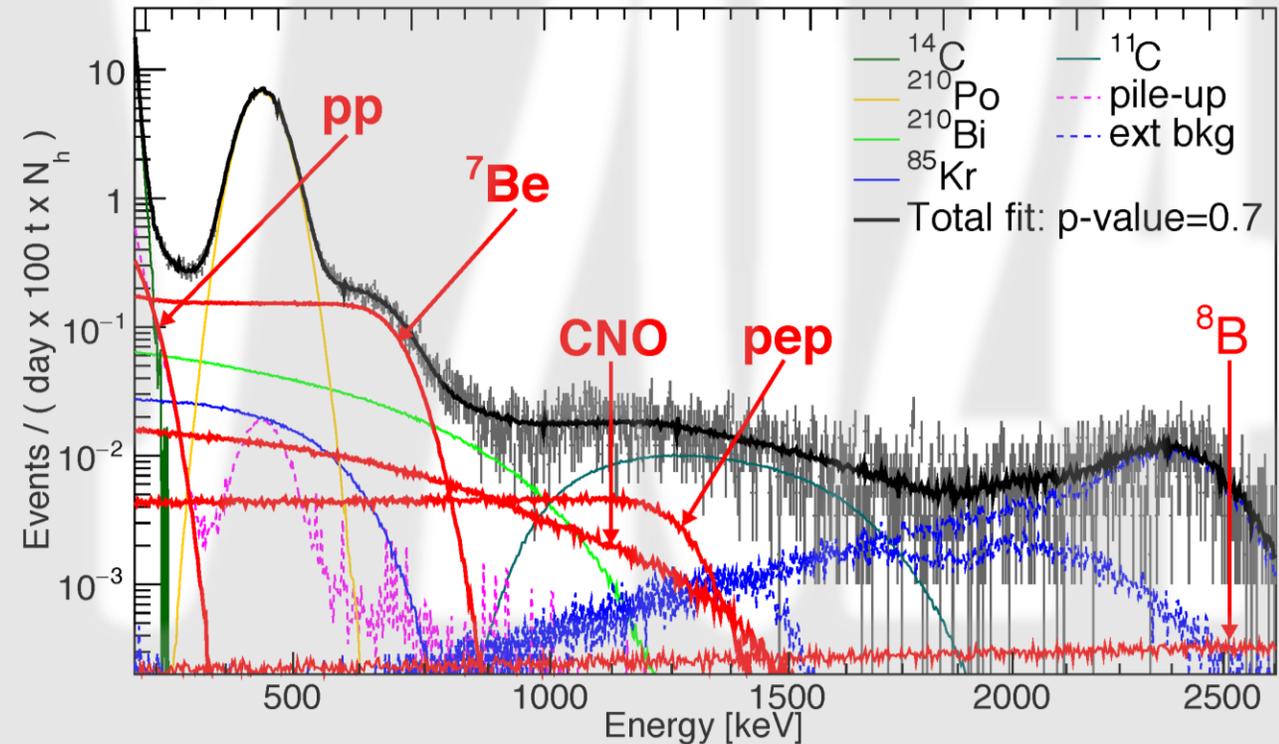
# Источник энергии звезд: pp цепочка

спектр солнечных нейтрино

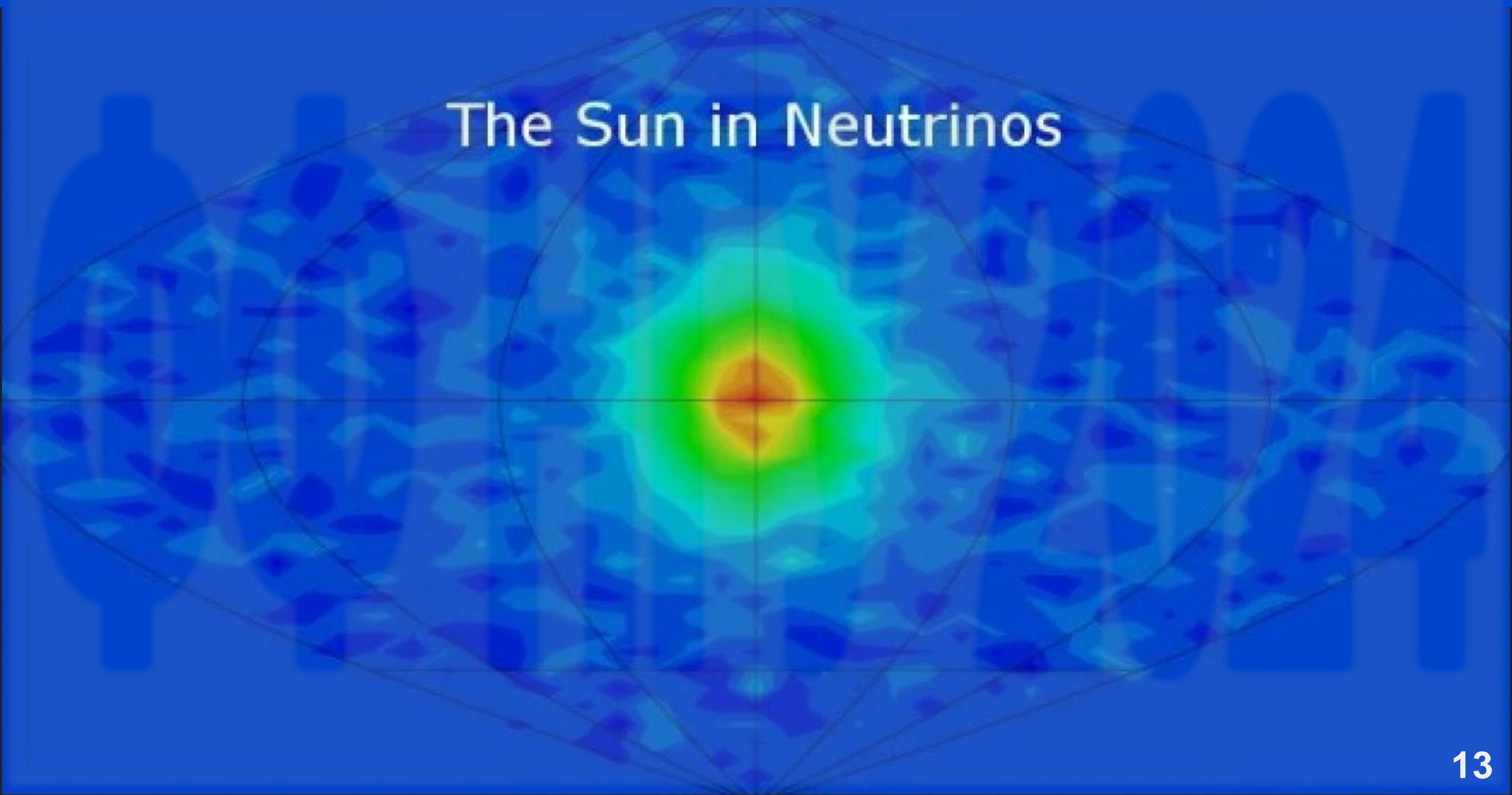


Расчётный спектр солнечных нейтрино.

В эксперименте Borexino наблюдаются все основные компоненты pp цепочки солнечных нейтрино.



# The Sun in Neutrinos



# Расчетная задача

Оцените поток солнечных нейтрино на поверхности Земли.

---

Предполагая, что вся энергия Солнца образуется за счет pp цепочки, и пренебрегая долей энергии, уносимой нейтрино, найдем число нейтрино, образующихся в секунду:

$$N \simeq 2 \frac{L_{\odot}}{\varepsilon} \simeq \frac{2 \times 4 \times 10^{26}}{27 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 2 \times 10^{38} \text{ с}^{-1}$$

Тогда плотность потока на поверхности Земли:

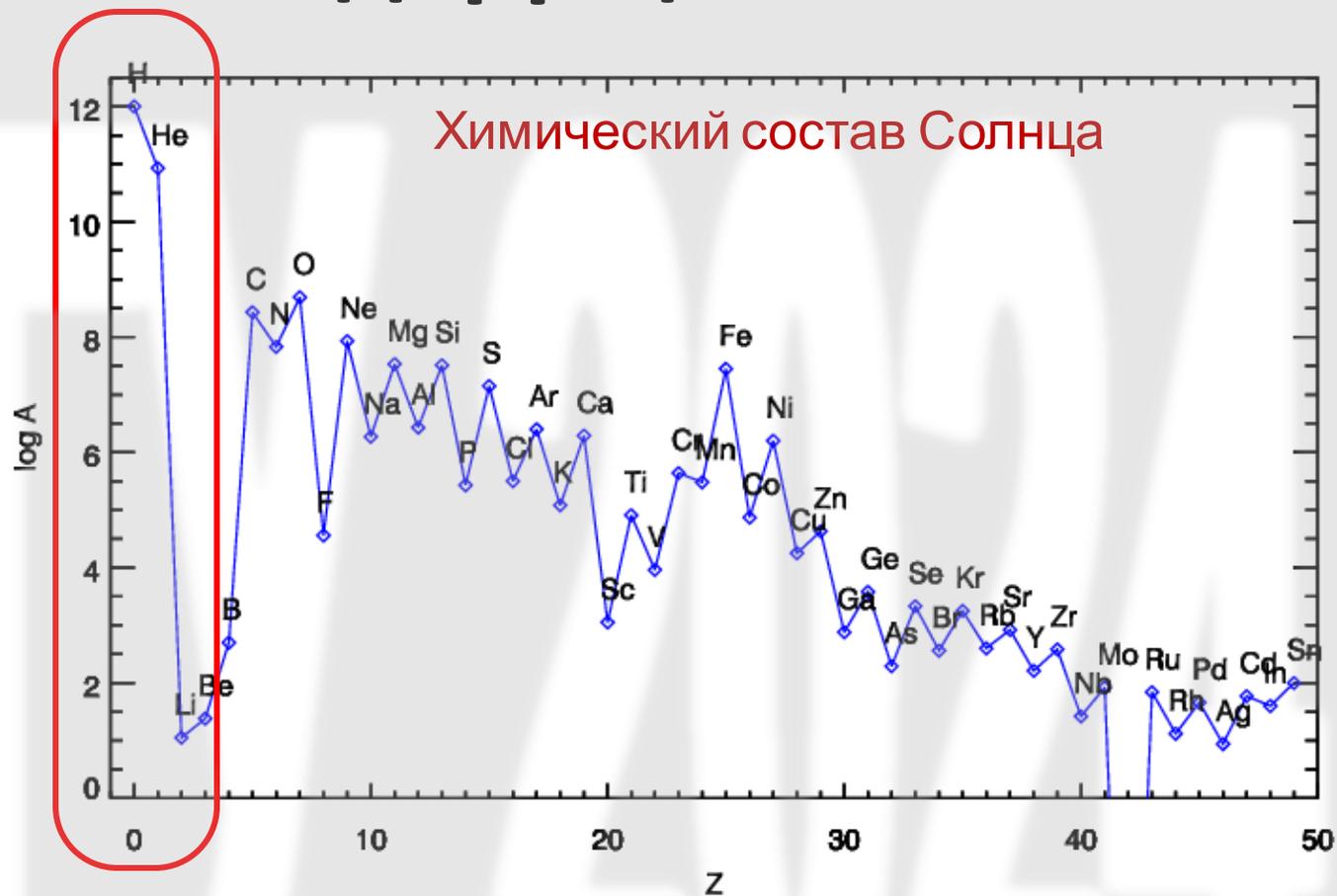
$$f = \frac{N}{4\pi R^2} \simeq \frac{2 \times 10^{38}}{4 \times 3.14 \times (1.5 \times 10^{13})^2} \simeq 70 \times 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$$

# Источник энергии звезд: pp цепочка

Захват протона (или нейтрона) ядром  ${}^4\text{He}$  невозможен, так как нет стабильных элементов с  $A=5$ .

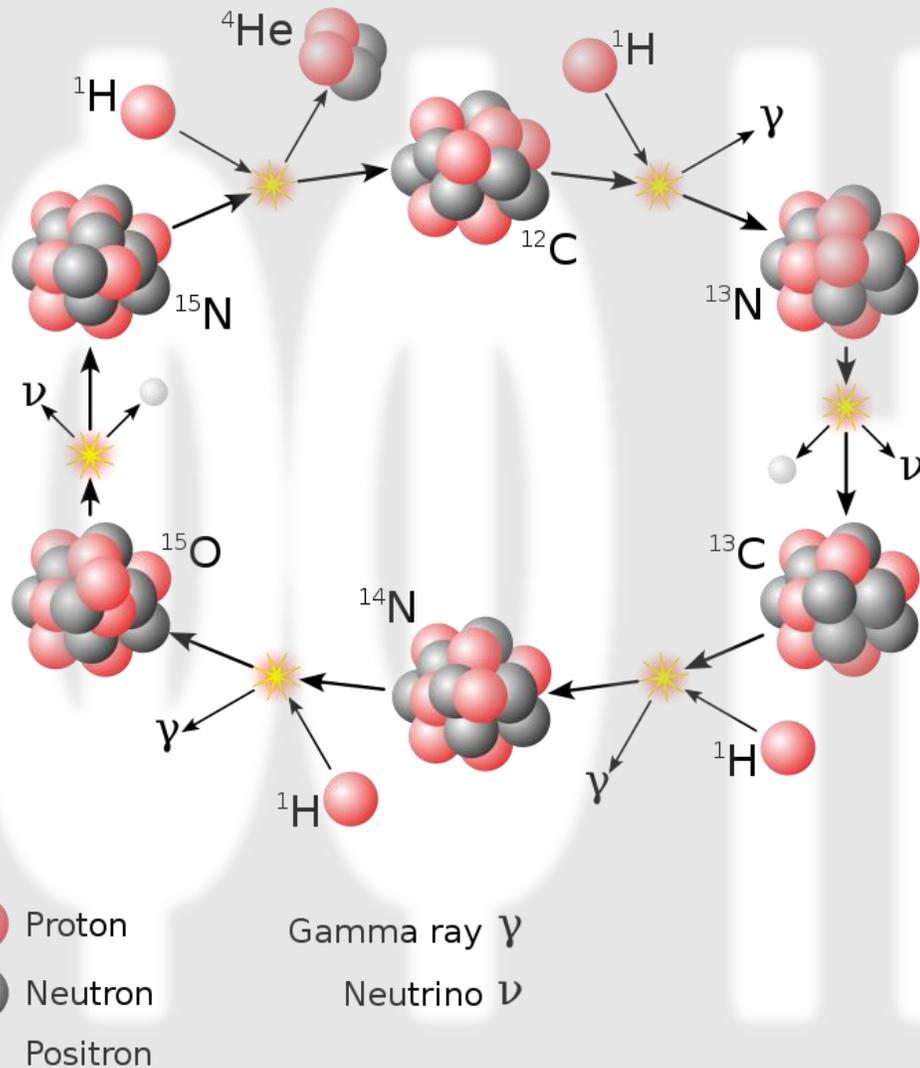
Время жизни  ${}^5\text{Li}$  всего  $\sim 10^{-20}$  с!

cycle	reaction	$\tau$ (years)
PPI (pep reaction)	${}^1\text{H}(p, e^+ \nu) {}^2\text{H}$	$7.9 \times 10^9$
	${}^1\text{H}(pe^-, \nu) {}^2\text{H}$	$3.7 \times 10^{12}$
	${}^2\text{H}(p, \gamma) {}^3\text{He}$	$5.9 \times 10^{-8}$
PPII	${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p) {}^4\text{He}$	$1.4/Y_3$
	${}^3\text{He}(\alpha, \gamma) {}^7\text{Be}$	$1.1 \times 10^6$
	${}^7\text{Be}(e^-, \nu) {}^7\text{Li}$	$2.9 \times 10^{-1}$
	${}^7\text{Li}(p, \alpha) {}^4\text{He}$	$4.3 \times 10^{-5}$
PPIII	${}^7\text{Be}(p, \gamma) {}^8\text{B}$	$1.8 \times 10^2$
	${}^8\text{B}(e^+ \nu) {}^8\text{Be}^* (\alpha) {}^4\text{He}$	$3.5 \times 10^{-8}$
PPIV (Hep reaction)	${}^3\text{He}(p, e^+ \nu) {}^4\text{He}$	$3.7 \times 10^7$



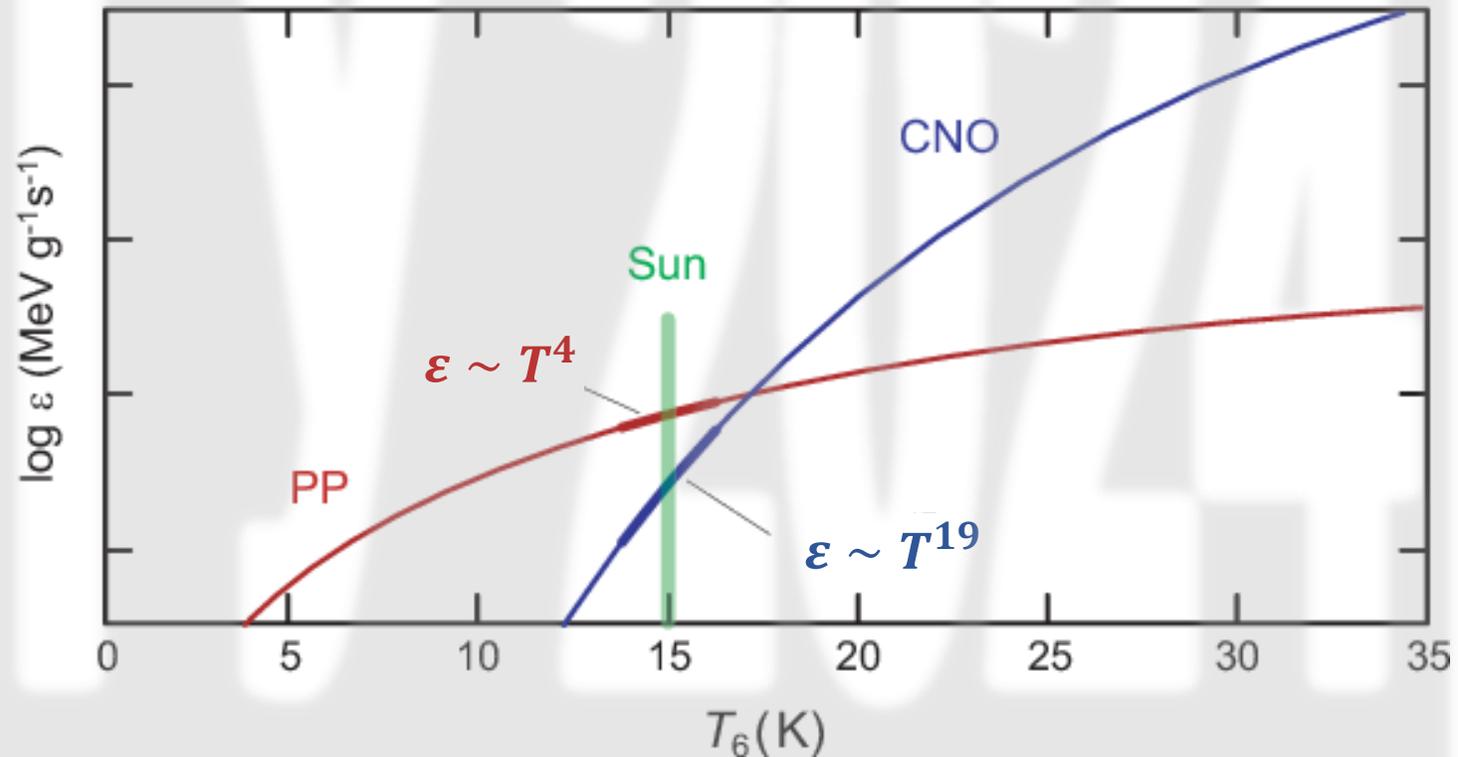
Аналогичная ситуация наблюдается для начального состава Вселенной (первичный нуклеосинтез). Будем обсуждать в заключительной части курса.

# Источник энергии звезд: CNO цикл



В CNO цикле углерод и азот играют лишь роль катализатора и не расходуются!

Интенсивность термоядерного синтеза (pp, CNO...) сильно зависит от температуры!



Для Солнца  $T_{\text{ядра}} \approx 15.7$  МК и лишь  $\sim 1.7\%$  энергии образуется за счет CNO цикла.

# Расчетная задача

Оцените время жизни Солнца.

---

Доля  $\eta$  массы, преобразуемая в энергию при синтезе гелия из водорода равна:

$$\eta = \frac{\varepsilon}{4m_p} \simeq \frac{27}{4000} \simeq 7 \times 10^{-3}$$

Предполагая, что время жизни Солнца ограничено периодом горения водорода, и что в «сгорит» порядка 10% исходного водорода, получаем

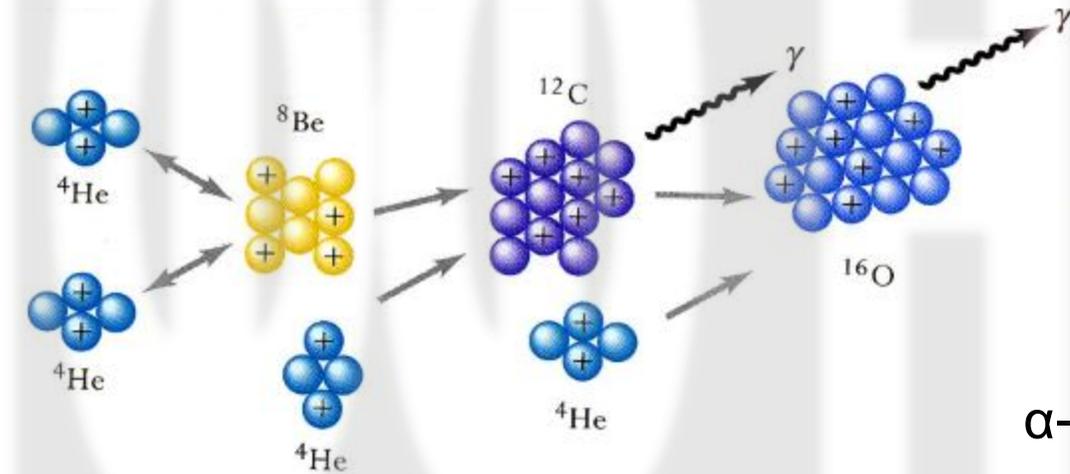
$$T \sim \frac{0.1\eta M_{\odot} c^2}{LT_{\text{год}}} \simeq \frac{0.1 \times 0.007 \times 2 \times 10^{30} \times 9 \times 10^{16}}{3.85 \times 10^{26} \times 3.15 \times 10^7} \simeq 10^{10} \text{ лет}$$

# Источник энергии звезд: «горение» гелия

Захват протона или нейтрона ядром  ${}^4\text{He}$  невозможен, так как нет стабильных элементов с  $A=5$ .



При слиянии двух ядер гелия образуется ядро изотопа  ${}^8\text{Be}$ , которое также очень неустойчиво, и распадается за всего  $10^{-16}$  с снова на два гелия!



Единственный возможный вариант – слияние сразу трех ядер  ${}^4\text{He}$  (**3 $\alpha$  реакция**)  $\Rightarrow$  требуется очень высокая плотность ( $\sim 10^3$  г/см $^3$ ) и температура ( $1-2 \times 10^8$  К).

$$\varepsilon \sim T^{40} \text{ при } T \sim 10^8 \text{ К}$$

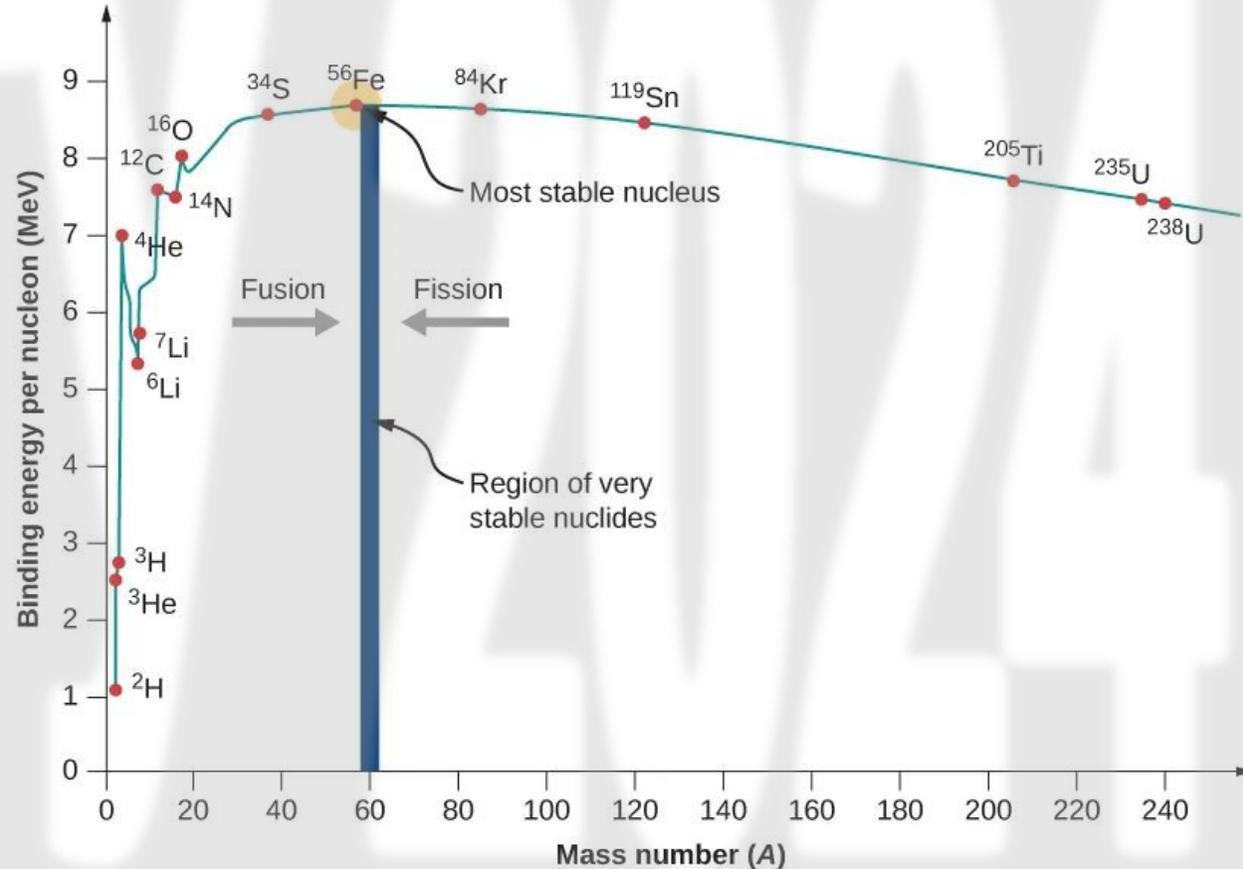
$\alpha$ -захват ядром  ${}^{16}\text{O}$  (с образованием ядра  ${}^{20}\text{Ne}$ ) происходит с очень малой вероятностью. Таким образом, основными продуктами при горении гелия являются  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^{16}\text{O}$ .

Для звезд с массой от  $\sim 0.5M_{\odot}$  до  $\sim 8M_{\odot}$ , синтез заканчивается горением гелия до  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^{16}\text{O}$ , для инициации горения углерода не удастся достигнуть необходимой плотности и температуры.

# Источник энергии массивных звезд

Для массивных звезд ( $\geq 8M_{\odot}$ ), после исчерпания водорода и гелия возможно достижения условий, необходимых для слияния более тяжелых ядер: C, O, Ne, Si.

Процесс	Топливо	Продукты реакции	Примерная температура, К
Горение водорода	Водород	Гелий	$(1-3) \cdot 10^7$
Горение гелия	Гелий	Углерод, кислород	$2 \cdot 10^8$
Горение углерода	Углерод	Кислород, неон, натрий, магний	$8 \cdot 10^8$
Горение неона	Неон	Кислород, магний	$1,5 \cdot 10^9$
Горение кислорода	Кислород	От магния до серы	$2 \cdot 10^9$
Горение кремния	От магния до серы	Элементы, близкие к железу	$3 \cdot 10^9$

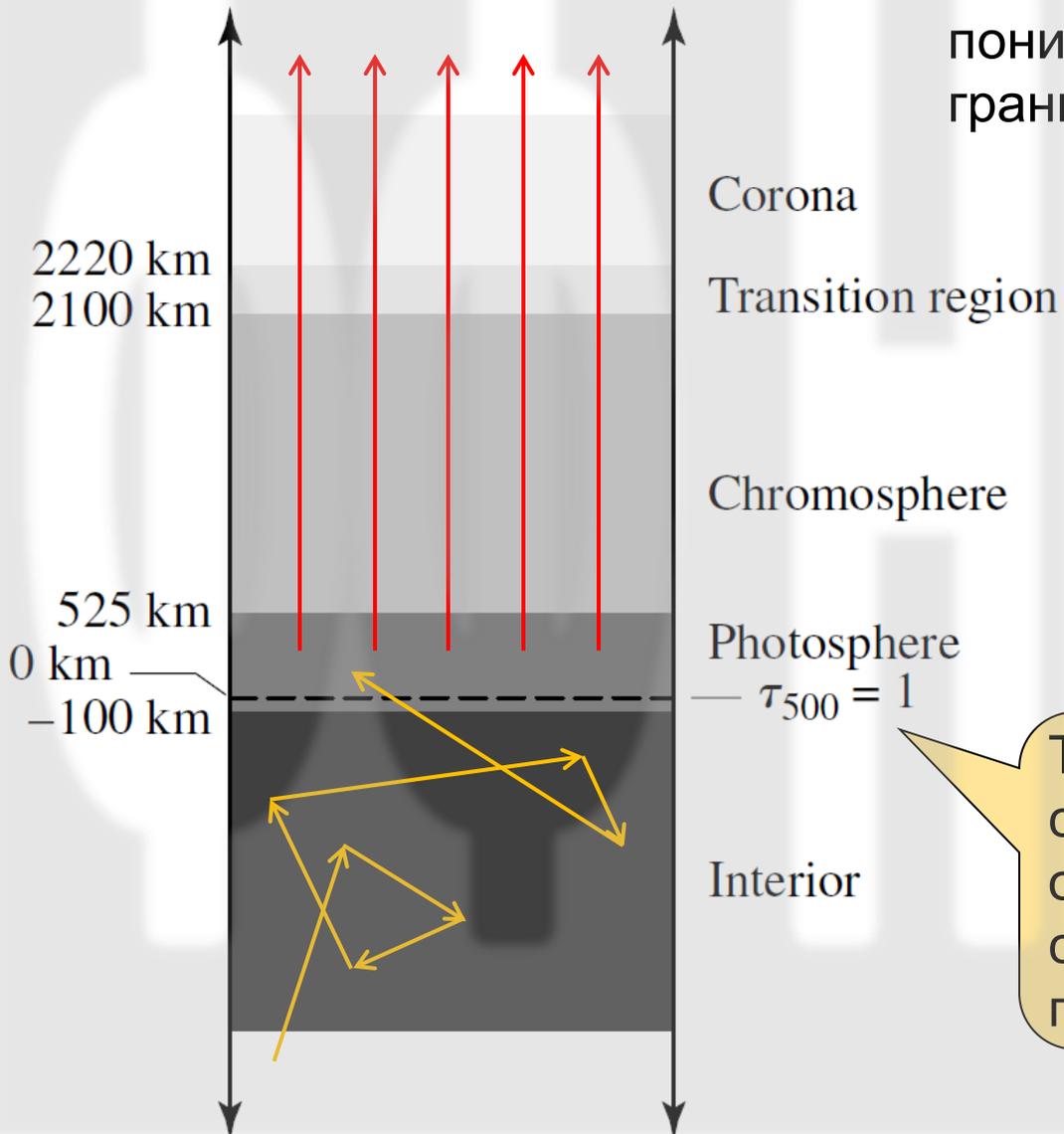


Элементы тяжелее железа в термоядерном синтезе в звездах не образуются, так как реакции становятся эндотермическими (идут с поглощением энергии).

# Внешнее строение Солнца

Солнце – газовый шар и не имеет «поверхности» в обычном понимании. С другой стороны, мы видим вполне резкую границу солнечного диска...

Температура в центре Солнца около 15 МК и постепенно уменьшается к поверхности. При таких температурах водород полностью ионизирован и среда непрозрачна для излучения, т.е. длина свободного пробега фотонов мала, происходит постоянное поглощение и переизлучение фотонов.



Corona

Transition region

Chromosphere

Photosphere

$\tau_{500} = 1$

Interior

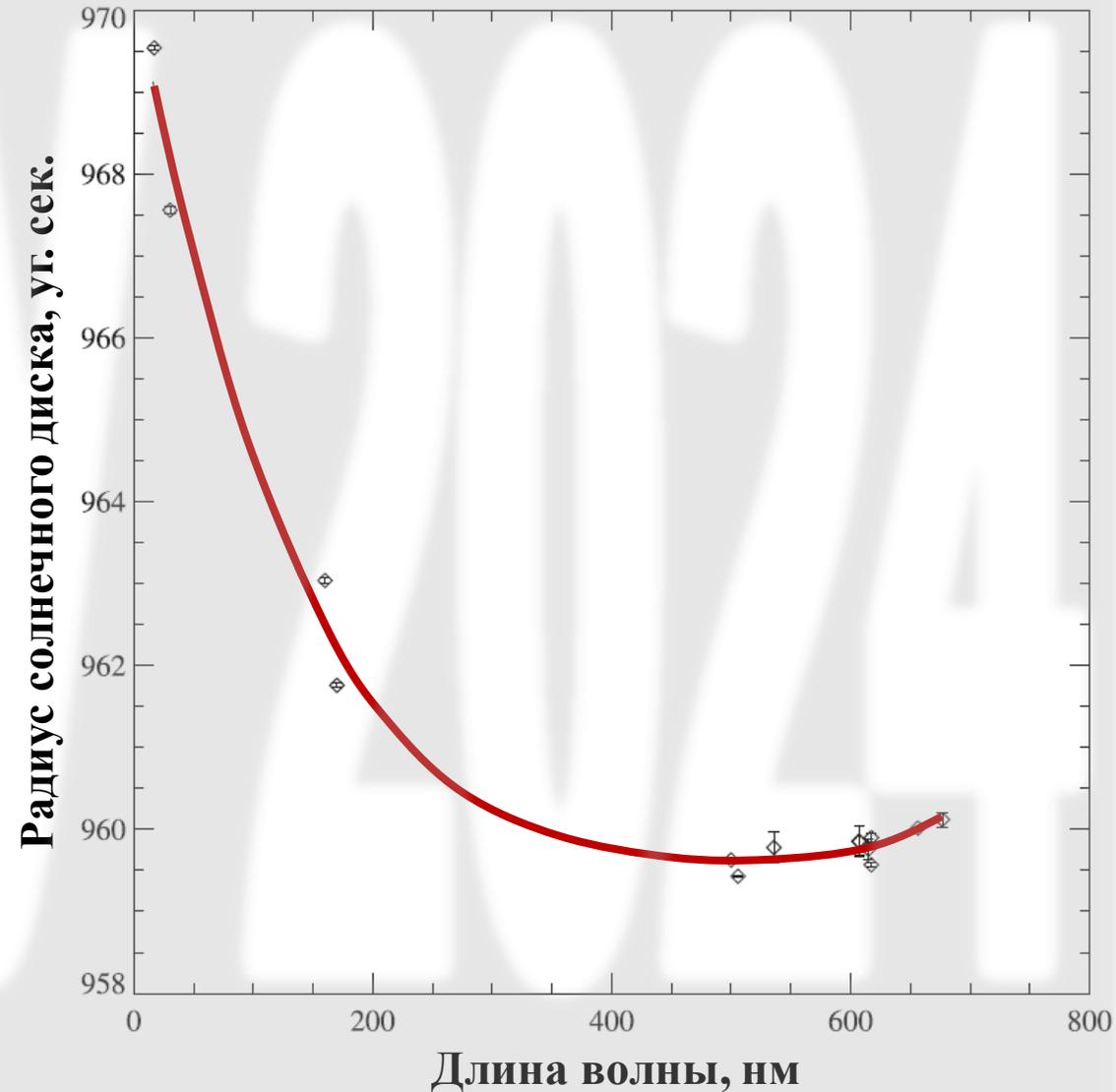
Тот свет, что мы видим, излучен с такой глубины (радиуса), что оптическая толщина внешних слоев недостаточна для его поглощения.

# Внешнее строение Солнца: фотосфера

Длина свободного пробега фотона зависит от его частоты => мы видим разные «поверхности» Солнца в разных длинах волн.

В качестве стандартного определения радиуса используется длина волны света  $\lambda = 500$  нм. Эта область называется **ФОТОСФЕРОЙ**. Глубина фотосферы около 600 км.

Температура фотосферы сравнительно низкая, газ в основном находится в нейтральном (частично ионизированном) состоянии и образуются линии поглощения.

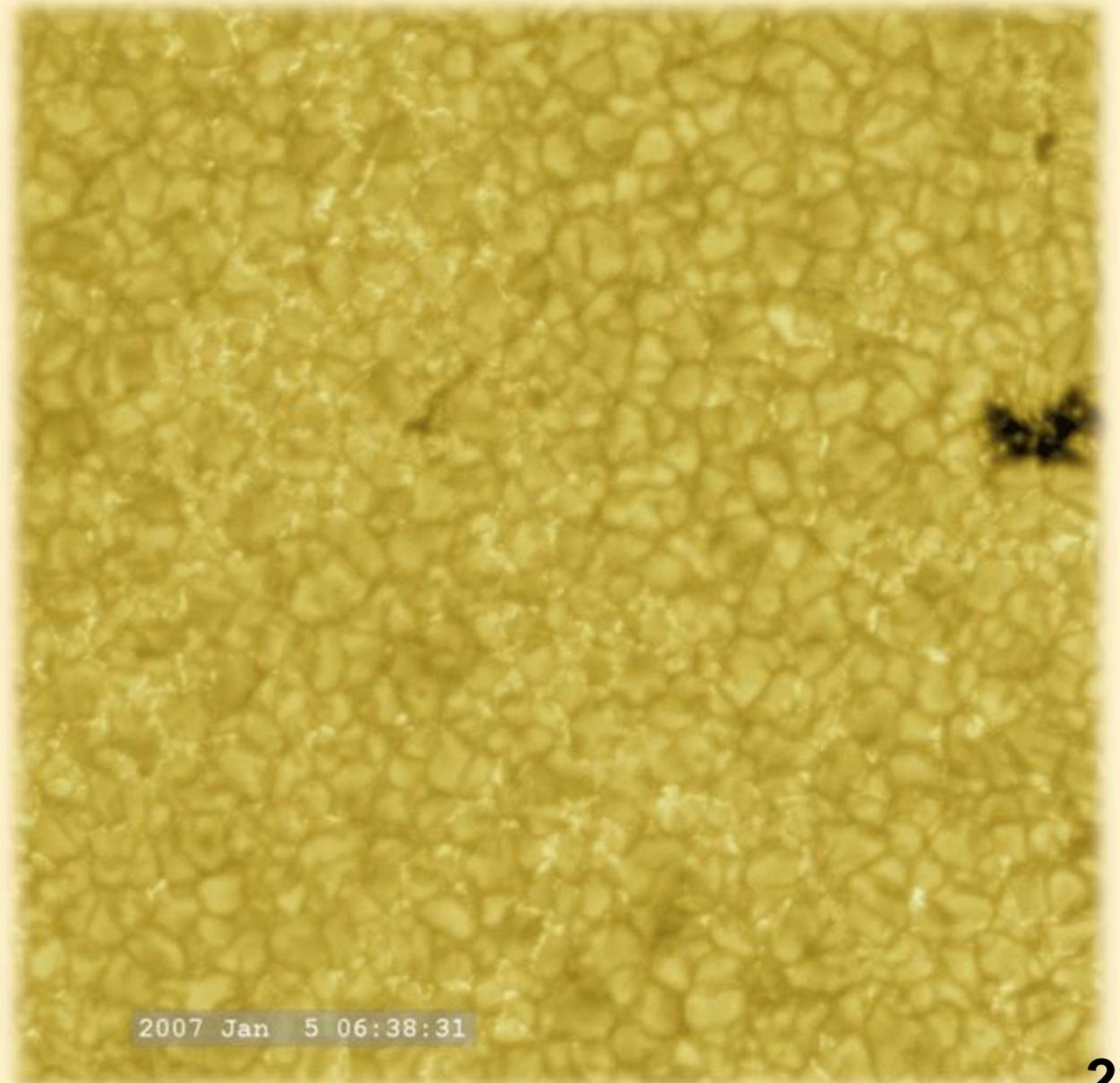


# Грануляция

Грануляция – проявление конвекции во внешнем слое Солнца.

Центральная область гранулы более яркая (горячая) – область восходящего потока, границы между гранулами более темные (холодные) – области нисходящего потока.

Поперечный размер гранул – около 1500 км, время жизни – 10-20 минут.



# Солнечные пятна

Первые упоминания о солнечных пятнах относятся еще к древнему Китаю, где они наблюдались невооруженным глазом.

Систематические наблюдения начались в начале XVII века (1610-1611 гг.): Johann, Galileo Galilei, Christopher Scheiner и Thomas Herriot.

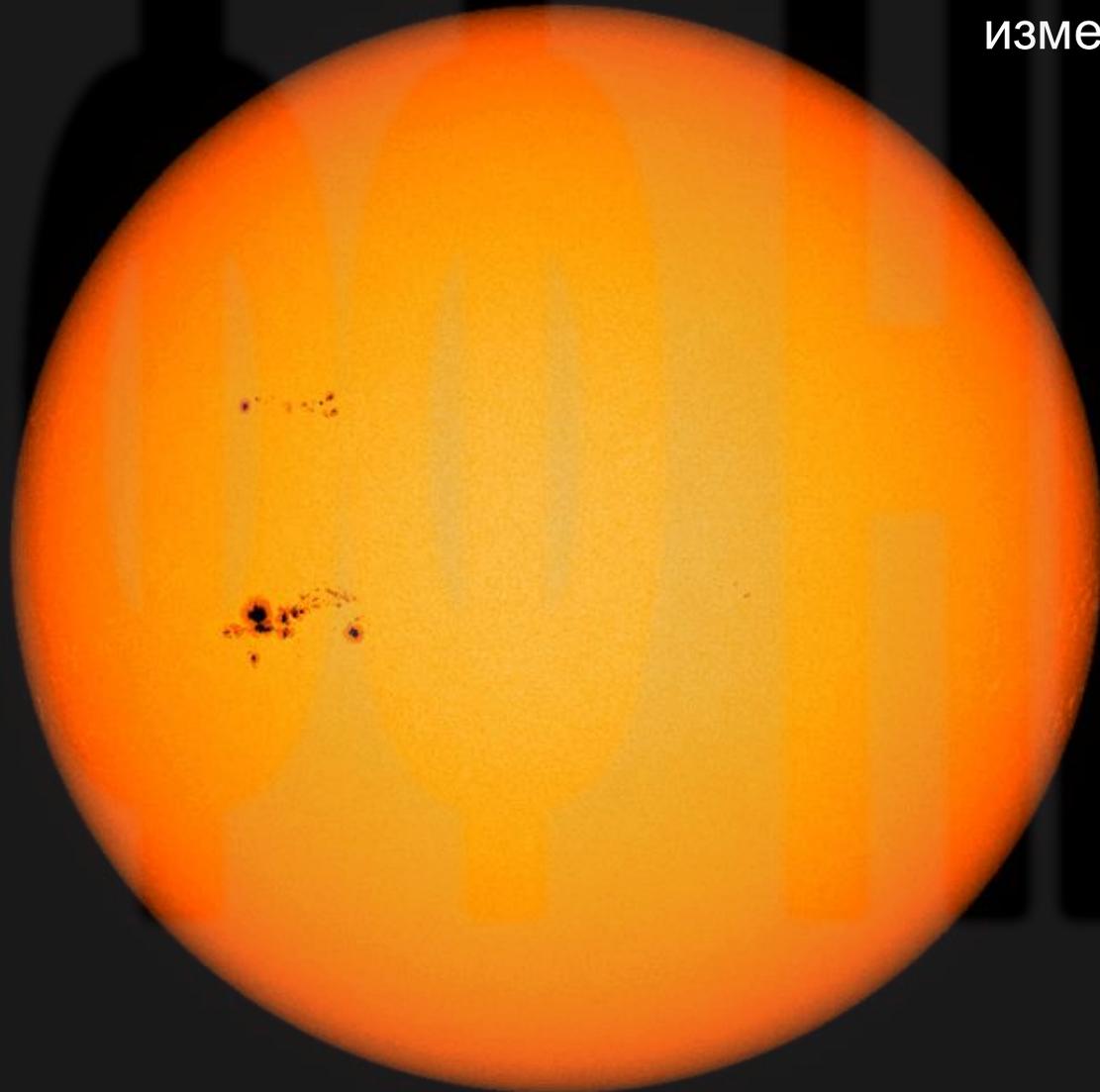
Галилей первым высказал правильную интерпретацию пятен как поверхностных структур на поверхности Солнца.

Приняв, что солнечные пятна являются структурами на поверхности Солнца, их можно использовать как метки для измерения скорости вращения Солнца вокруг своей оси.

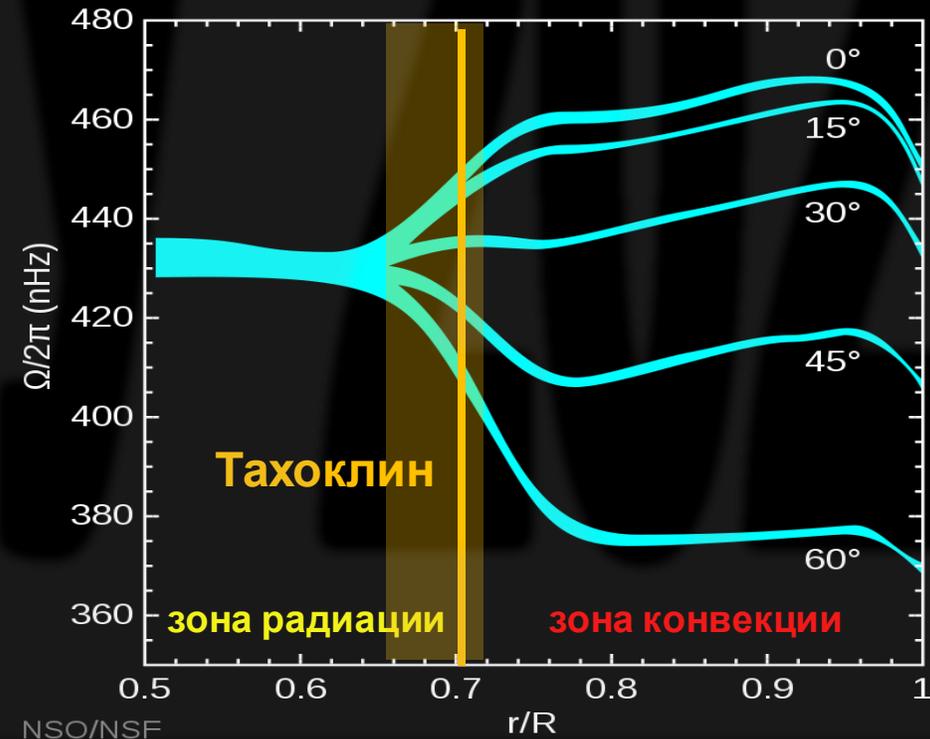


# Солнечные пятна

Приняв, что солнечные пятна являются структурами на поверхности Солнца, их можно использовать как метки для измерения скорости вращения Солнца вокруг своей оси.

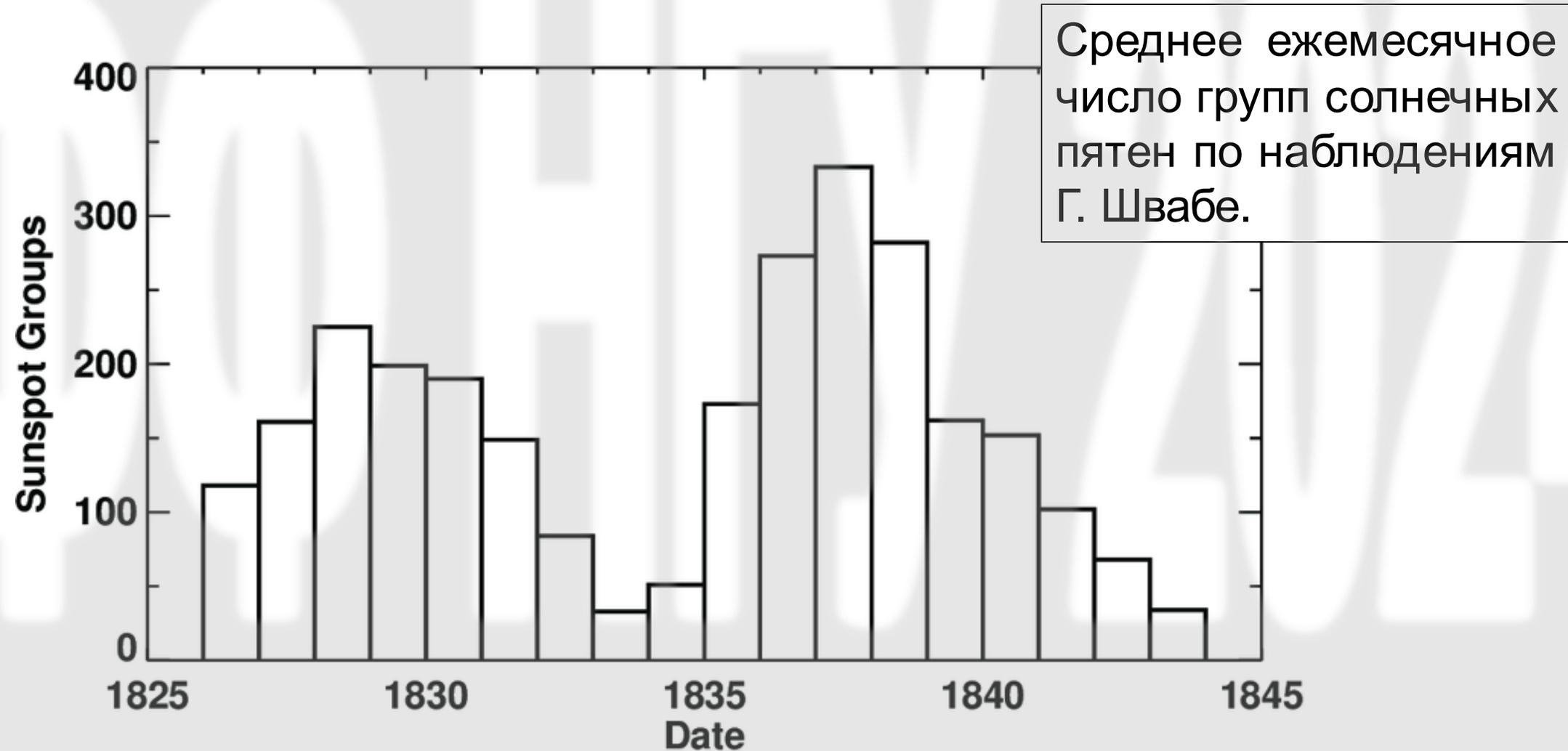


Период вращения поверхностных слоев Солнца зависит от широты, из чего сразу можно сделать вывод о том, что Солнце НЕ твердое тело.



# Солнечная активность: цикл

Цикличность в количестве солнечных пятен была надежно установлена Генрихом Швабе из его систематических наблюдений с 1826 по 1843 годы.



# Солнечная активность: 11-летний цикл



Rudolf Wolf

Вел регулярные наблюдения числа солнечных пятен групп пятен в течение

Собрал исторические данные по числу пятен, начиная с Галилея.

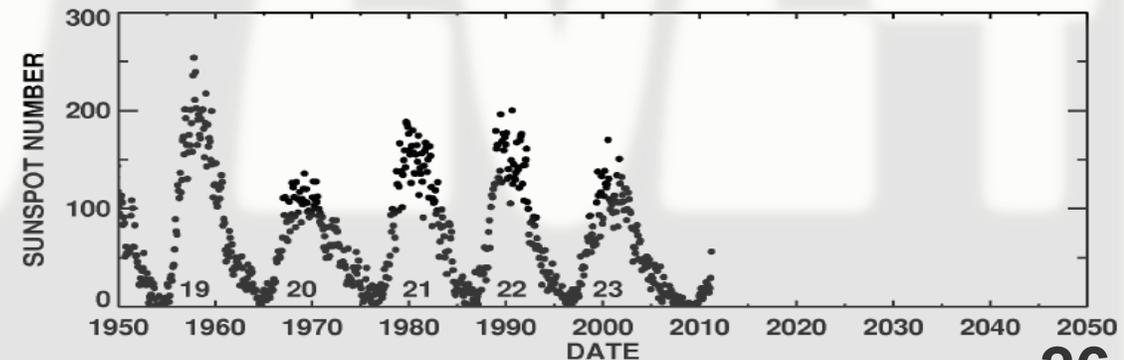
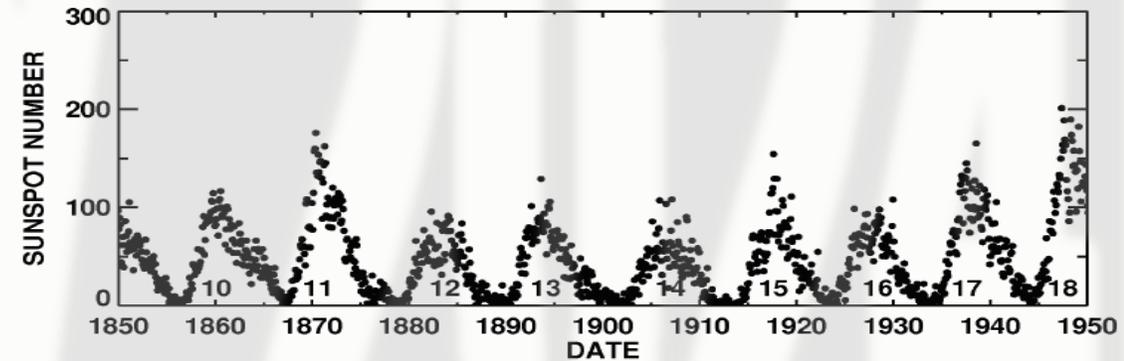
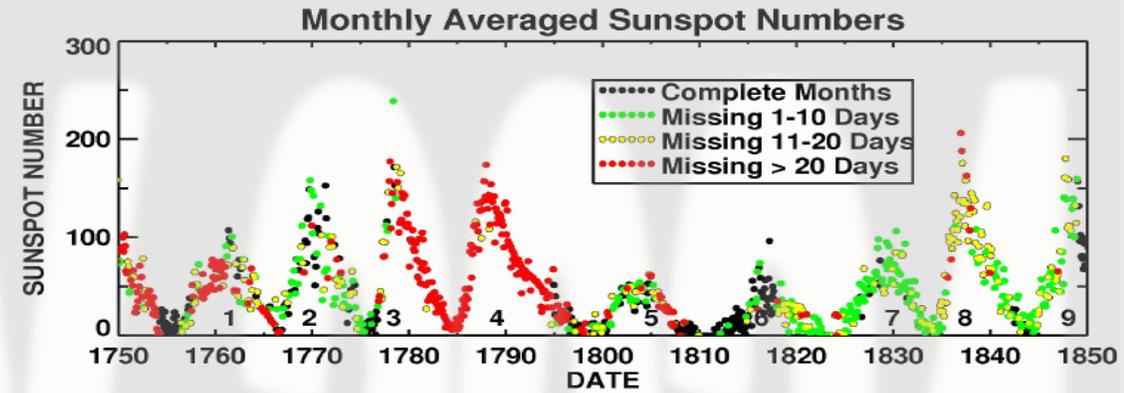
Ввел способ измерения числа солнечных пятен, нумерацию солнечных циклов, начиная с 1755 года.

$$W = k(10g + s) \quad \text{— число Вольфа}$$

$g$  — число групп пятен

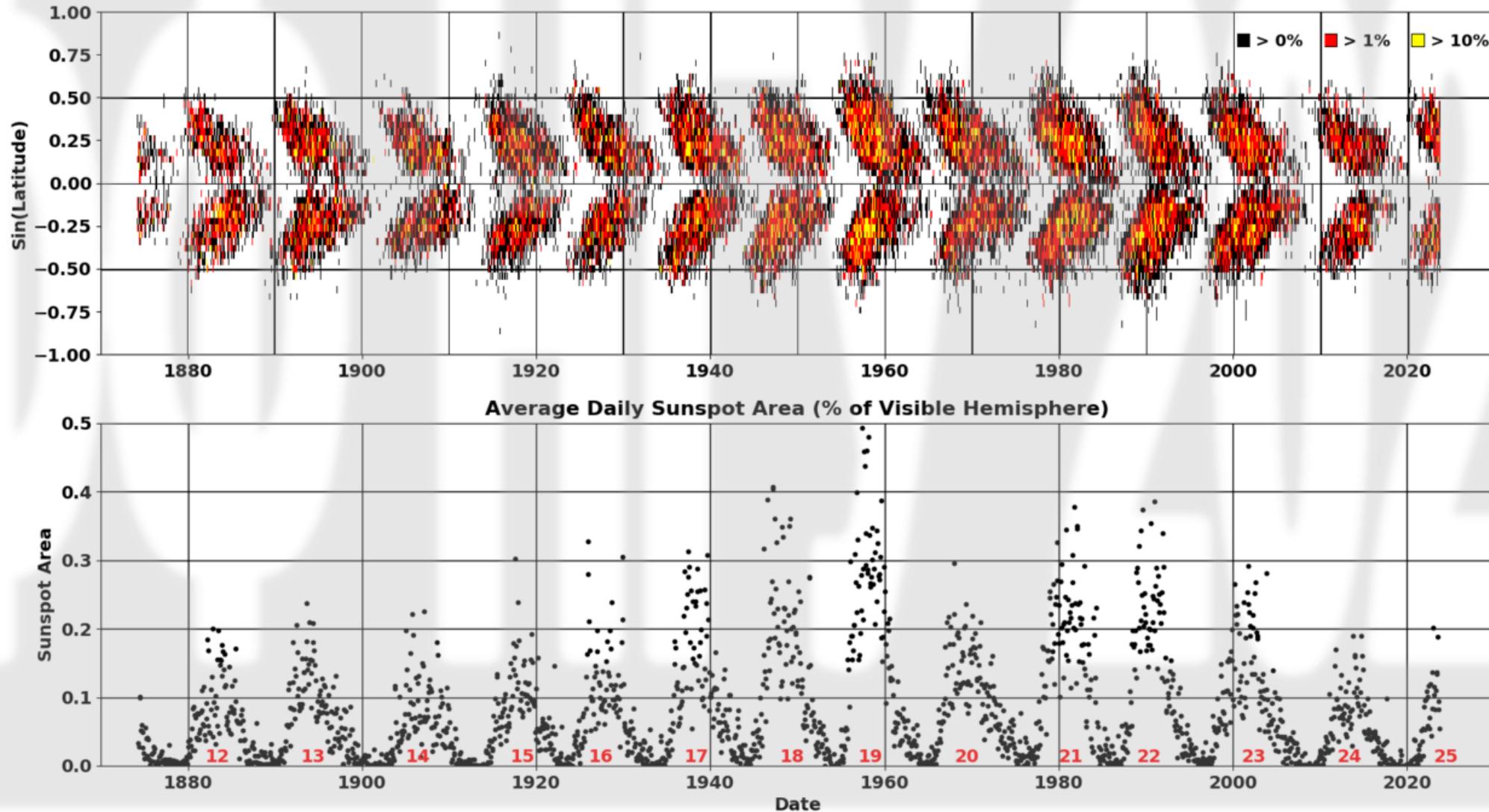
$s$  — число отдельных пятен

$k$  — коэффициент «наблюдателя»



# Солнечные пятна

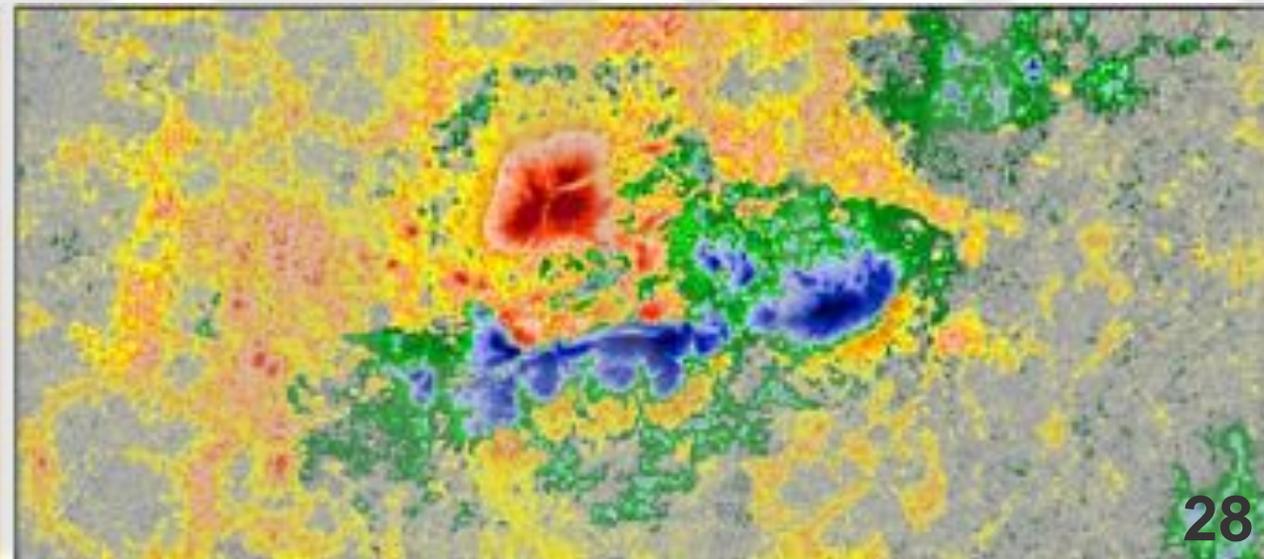
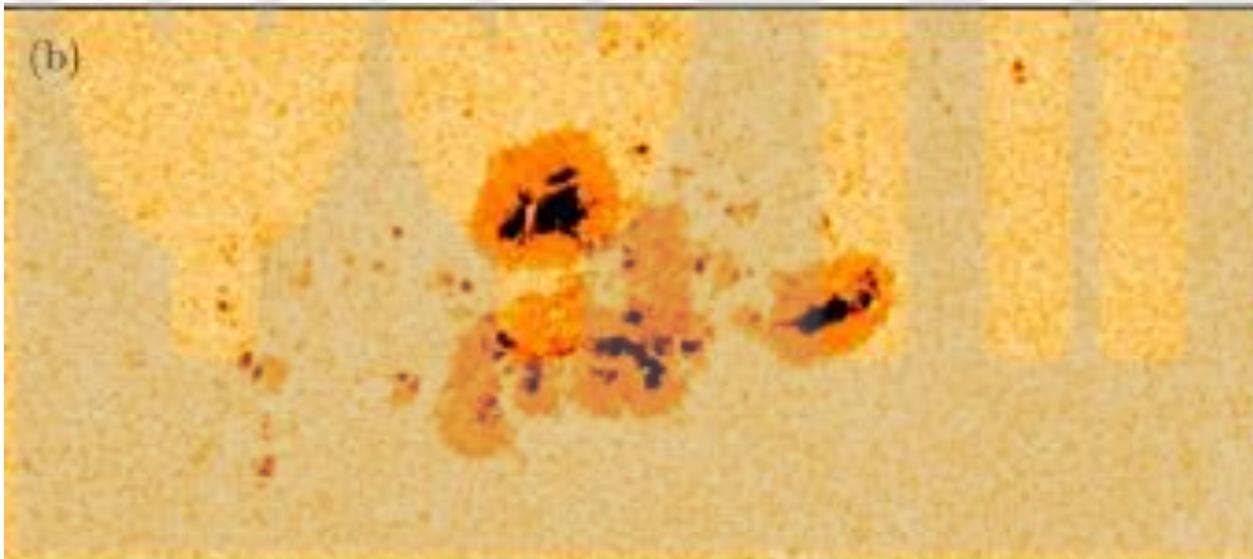
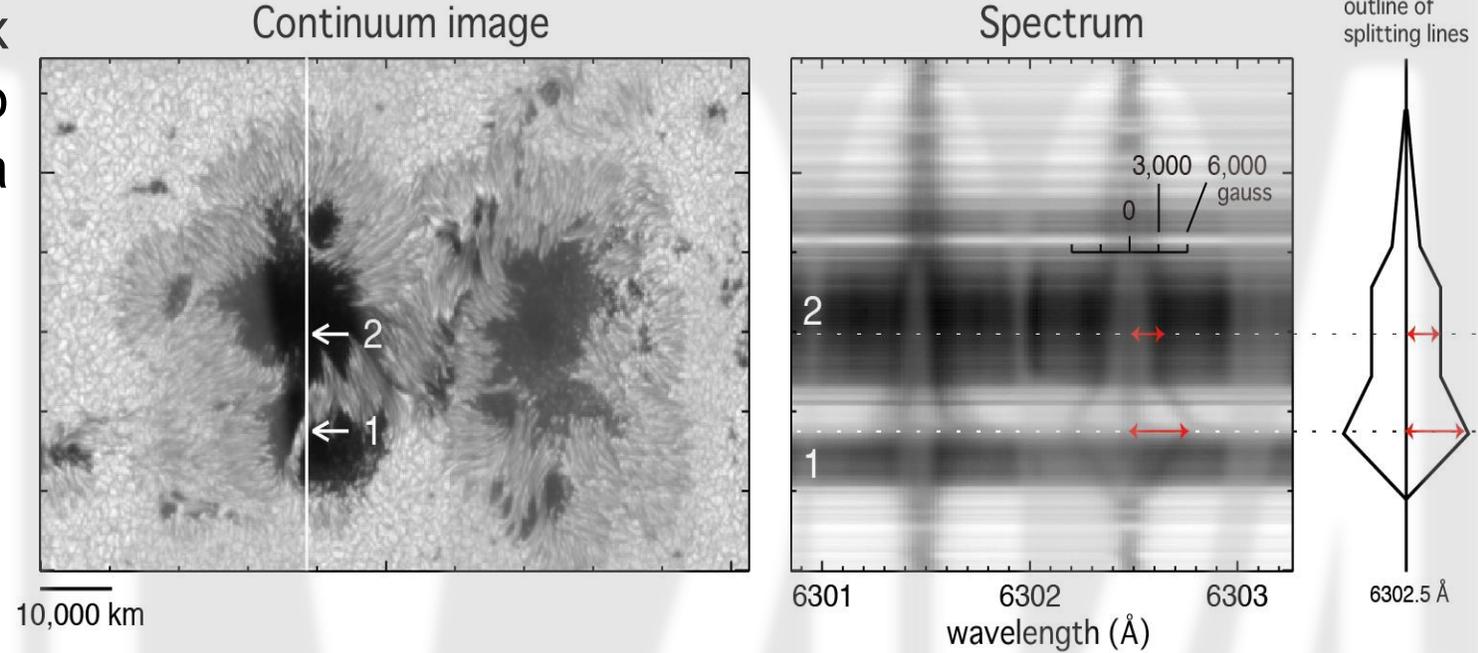
В начале цикла солнечные пятна образуются преимущественно на высоких ( $\sim 40^\circ$ ) широтах. С развитием цикла активность смещается в область экватора.



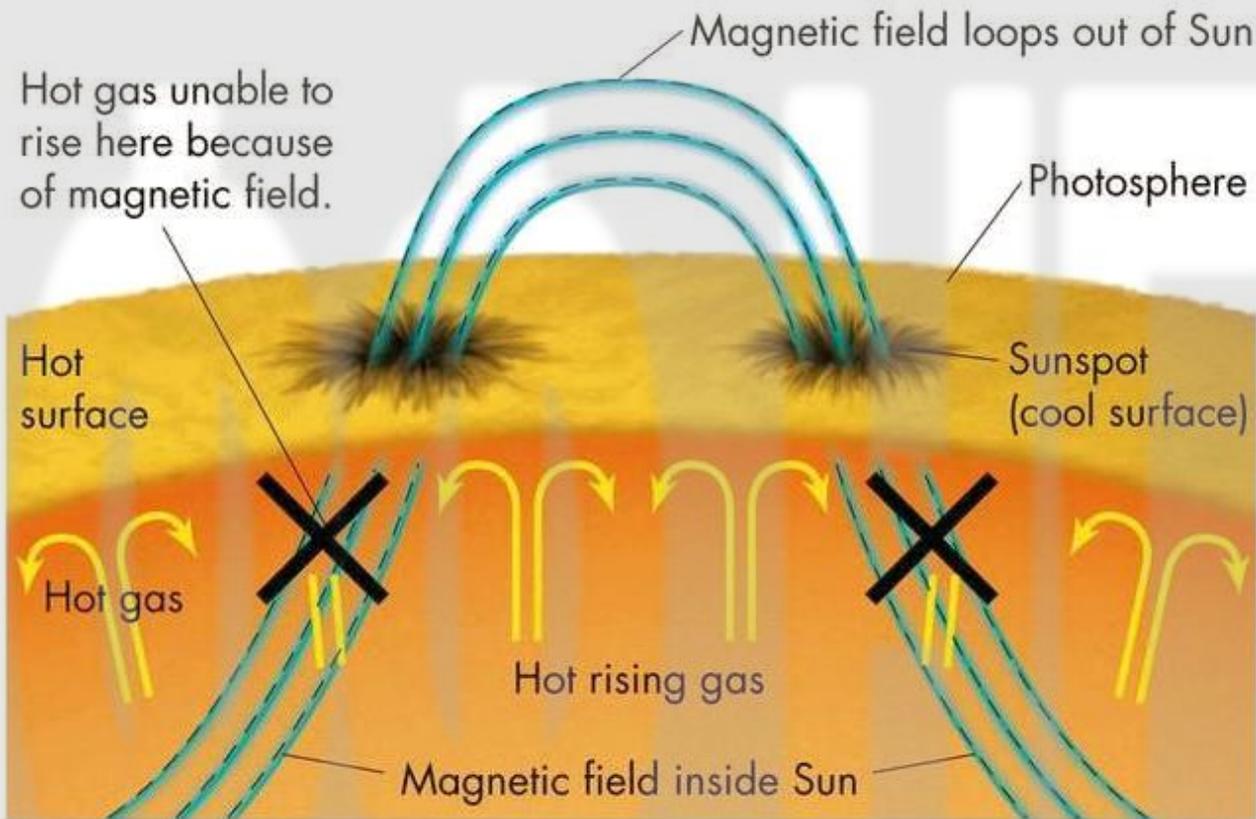
# Солнечные пятна: магнитное поле

Индукцию магнитного поля в разных точках на поверхности Солнца можно измерить с помощью эффекта Зеемана.

Эффект Зеемана – (частичное) снятие вырождения энергетических уровней по проекции магнитного момента.

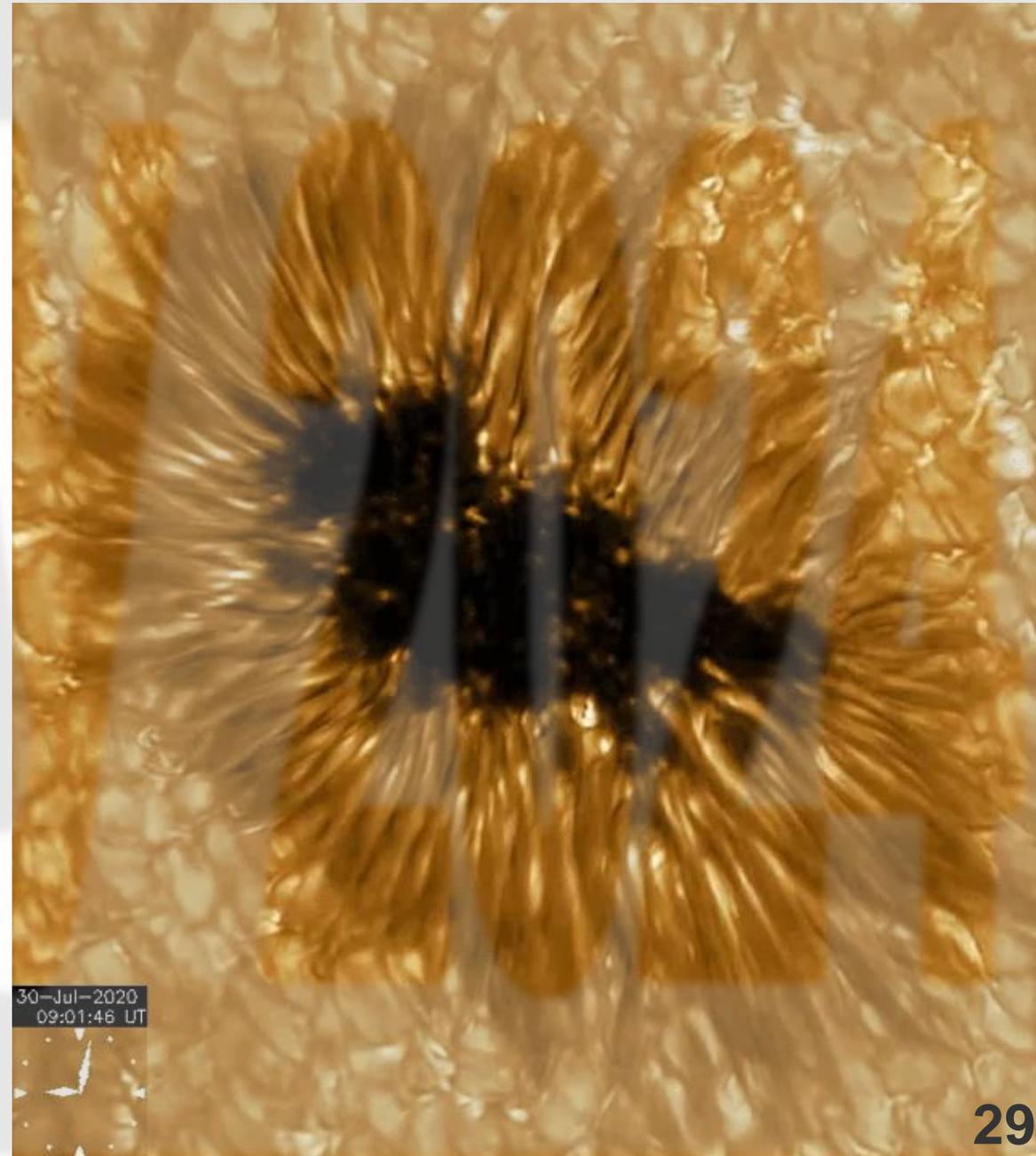


# Солнечные пятна: механизм

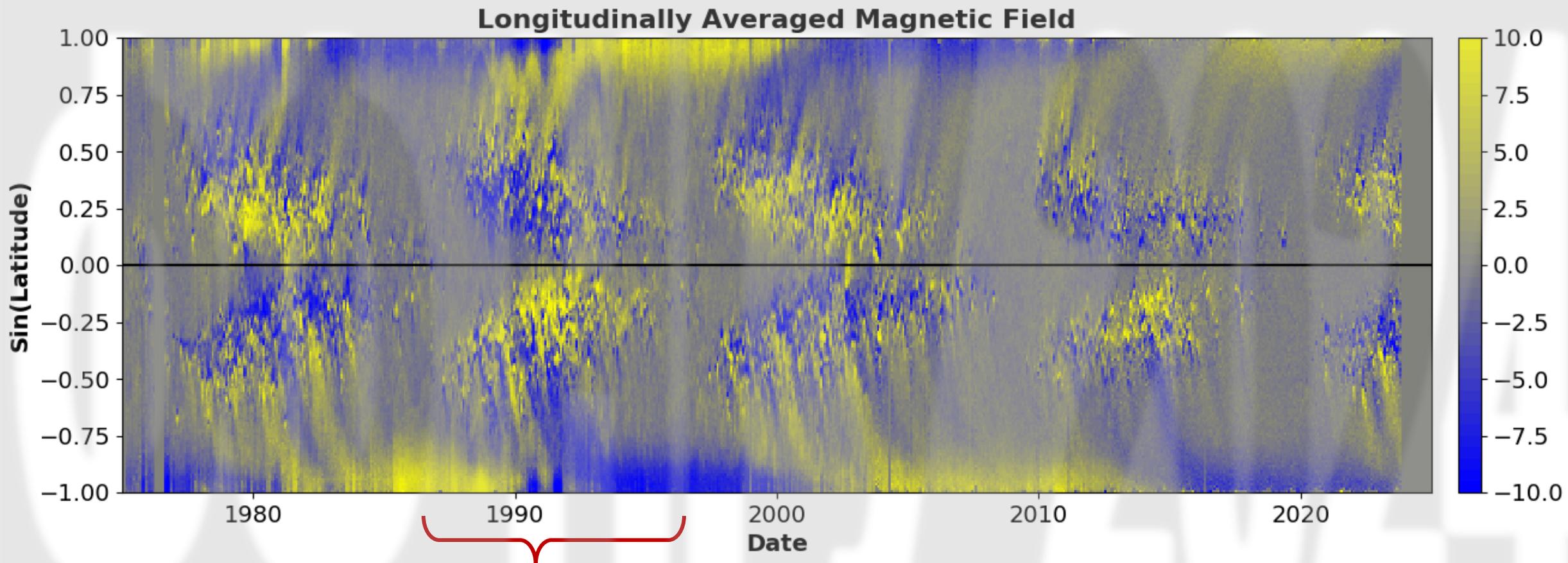


Магнитное поле создает избыточное давление, тем самым блокируя поступление более горячего вещества за счет конвекции.

Температура в области пятен около 4500 К.

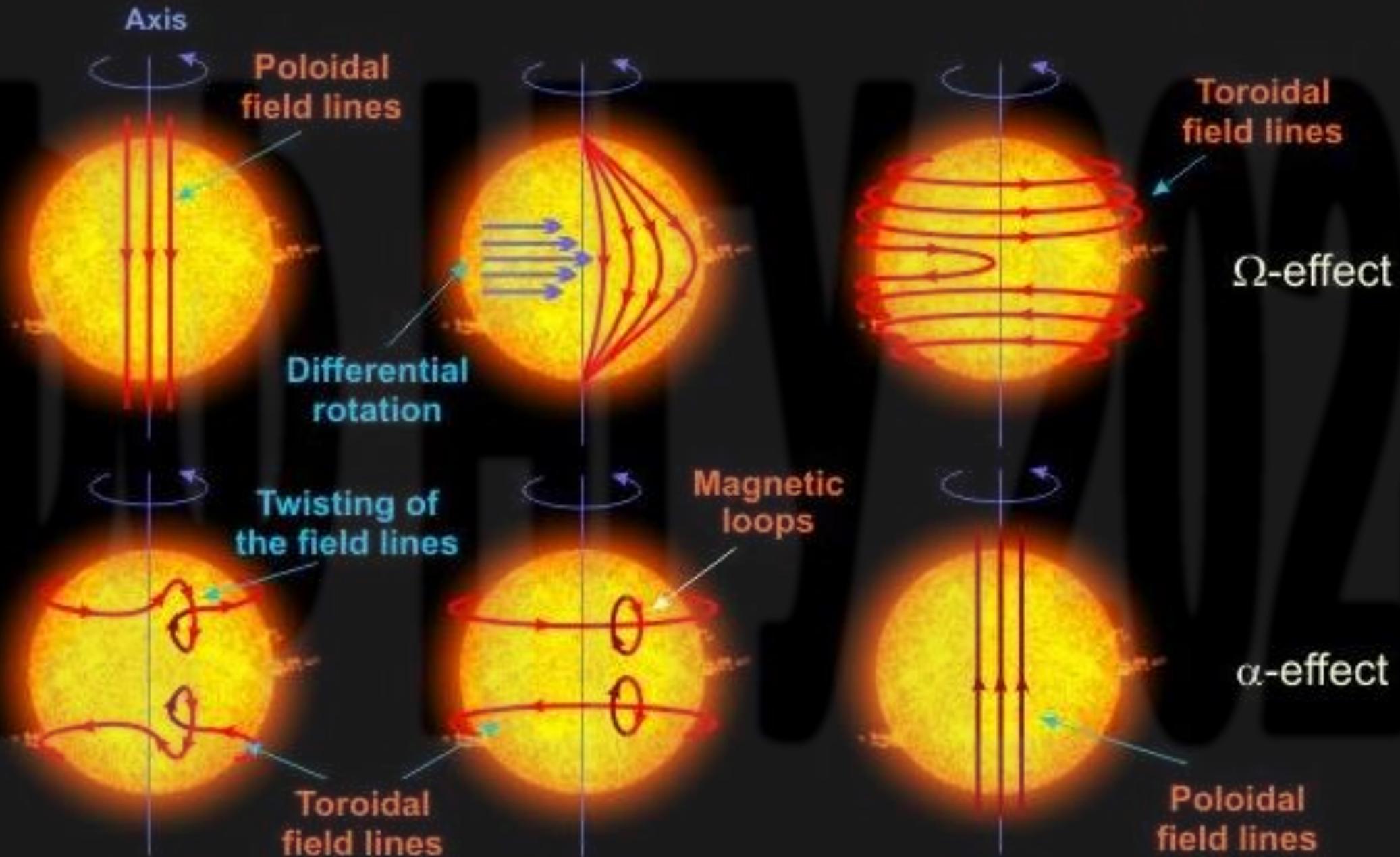


# Магнитное поле Солнца



В максимуме 11-летнего цикла солнечной активности происходит переполюсовка магнитного поля Солнца! Полный цикл составляет 22 года!

# Магнитное поле Солнца

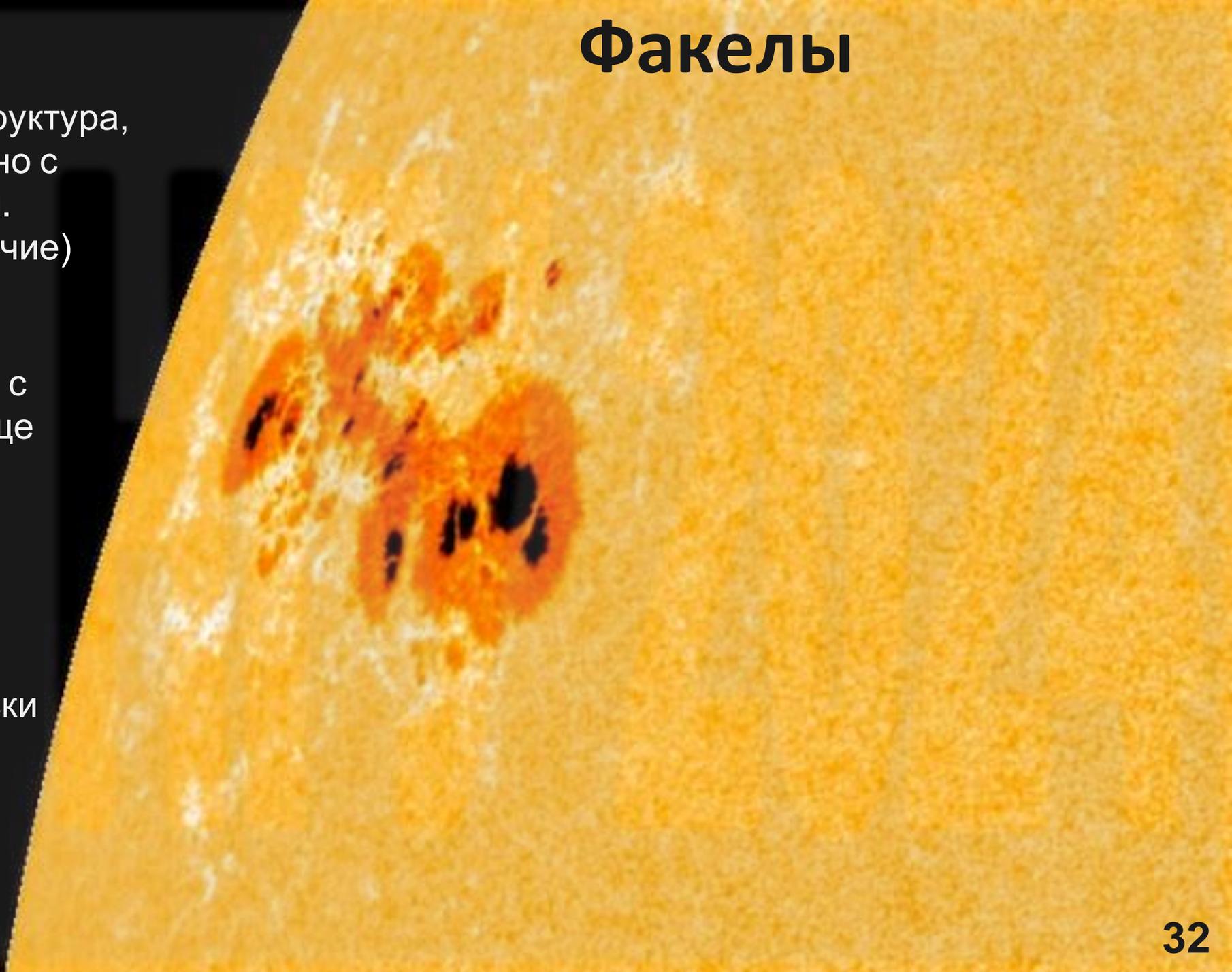


# Факелы

Еще одна динамическая структура, образование которой связано с магнитным полем – факелы. Факелы – более яркие (горячие) области фотосферы.

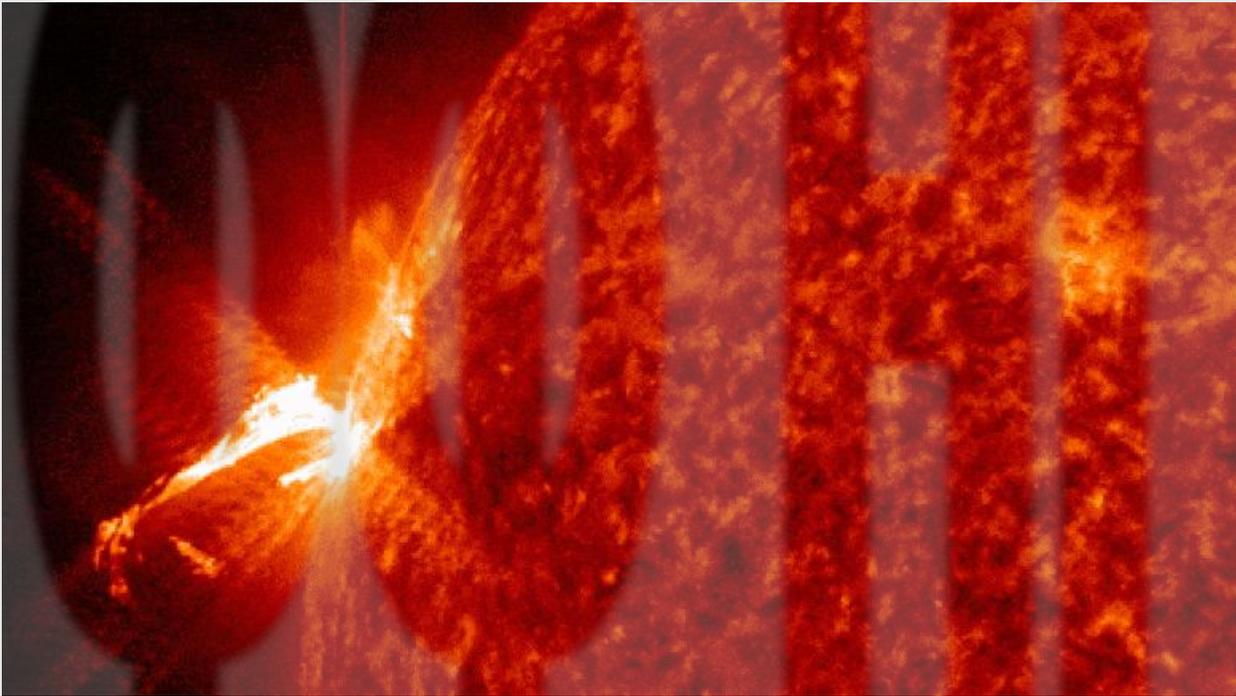
Наблюдаются в ассоциации с пятнами или отдельно, проще всего наблюдать вблизи лимба.

Пониженная температура пятен и повышенная в области факелов практически полностью (~0.1%) компенсируют друг друга – постоянная светимость Солнца.

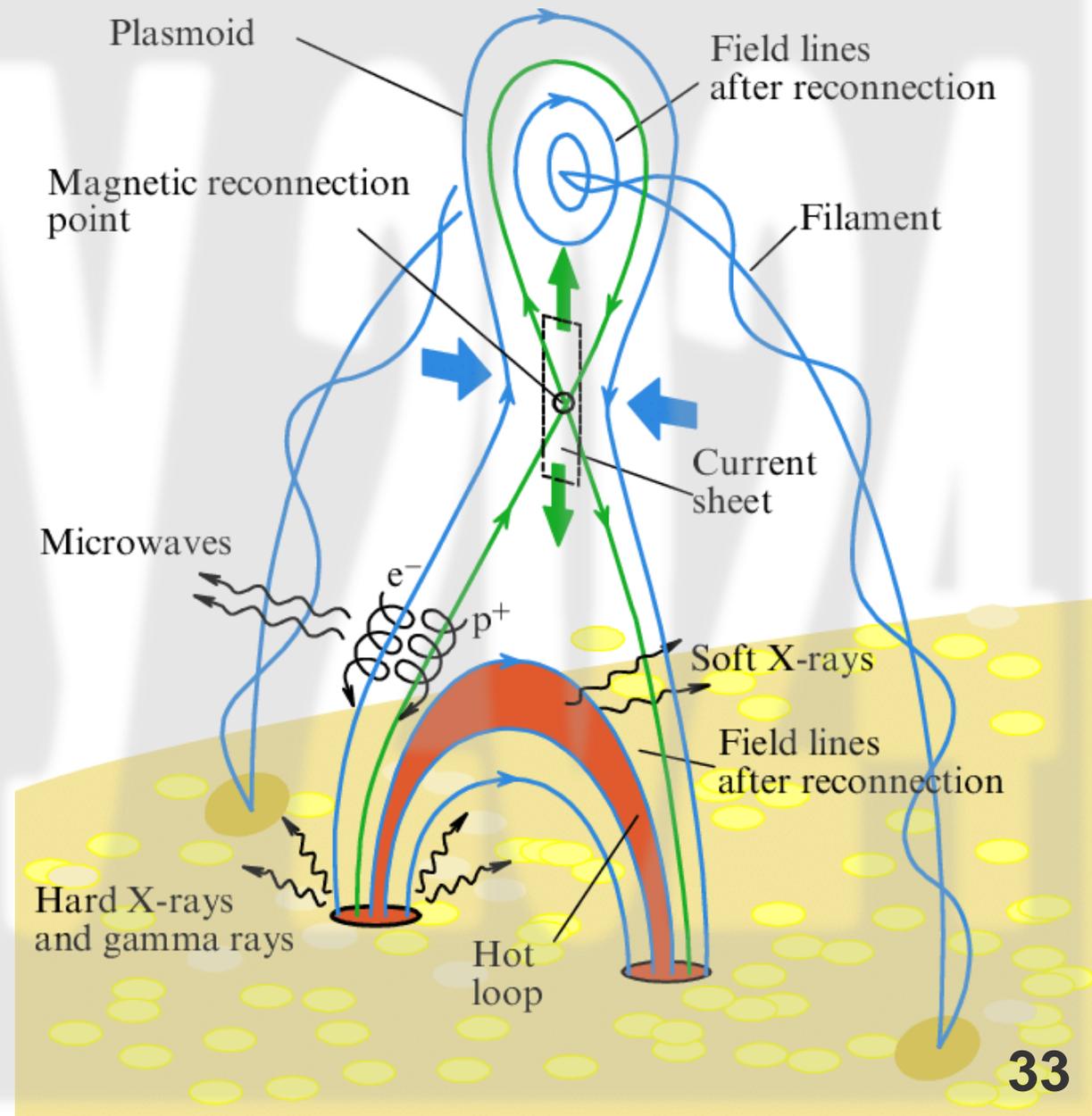


# Вспышки и протуберанцы

Выброс энергии при перестройке магнитного поля в активной области, часто в области солнечных пятен.



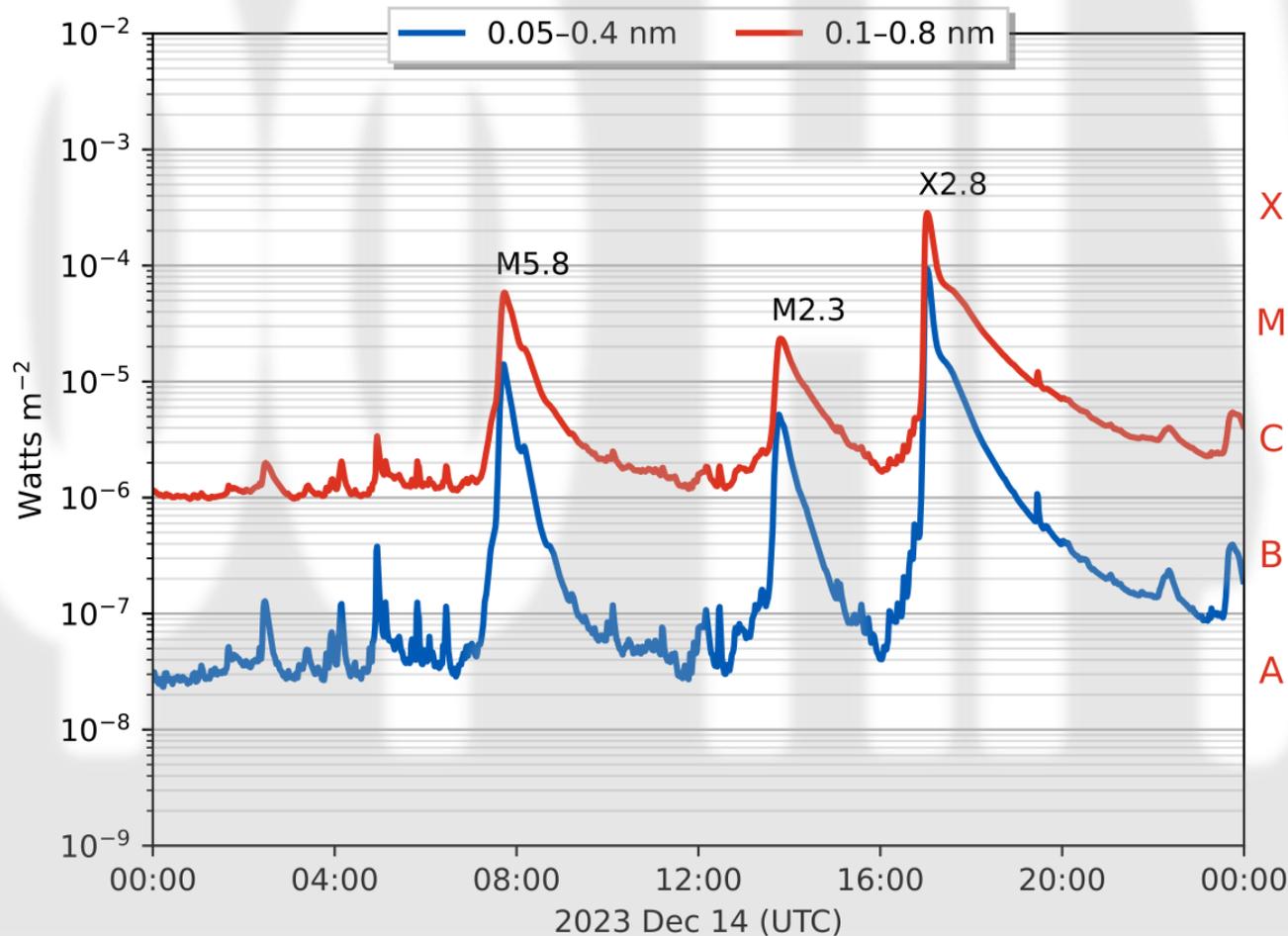
Продолжительность вспышки — от десятков секунд до нескольких часов. В среднем несколько минут.



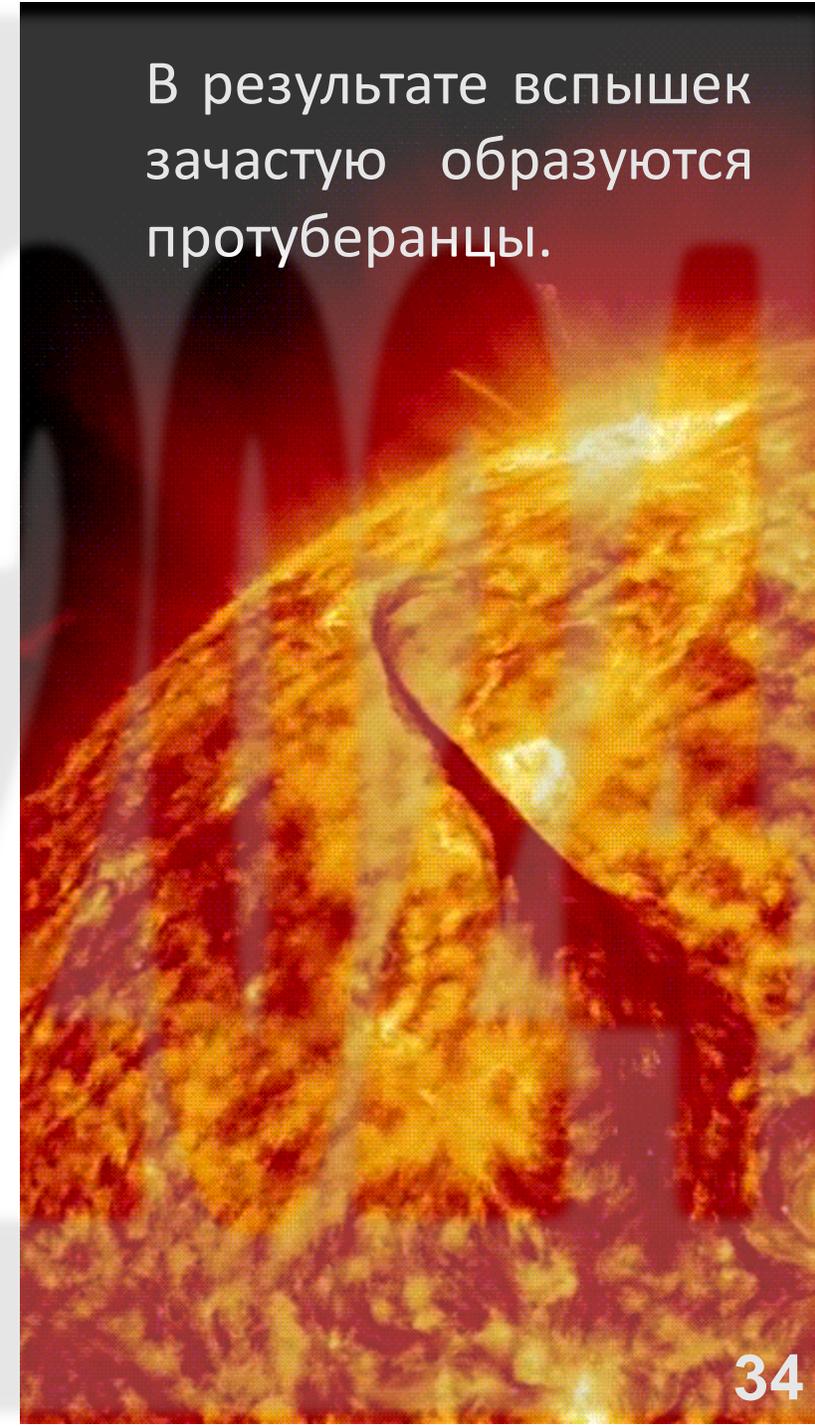
# Вспышки и протуберанцы

Мощность вспышки классифицируется по интенсивности излучения в диапазоне 1 – 8 Å по измерению спутником GOES.

GOES-16 XRS X-Ray Flux (1-minute data)



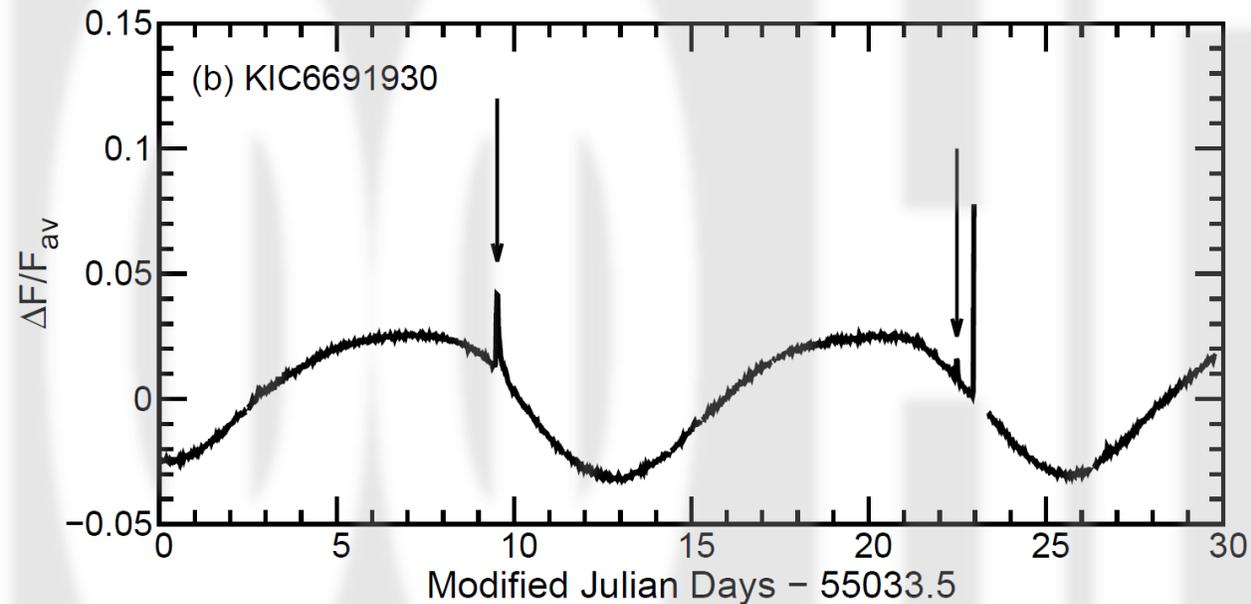
В результате вспышек зачастую образуются протуберанцы.



# Сверхмощные вспышки на звездах

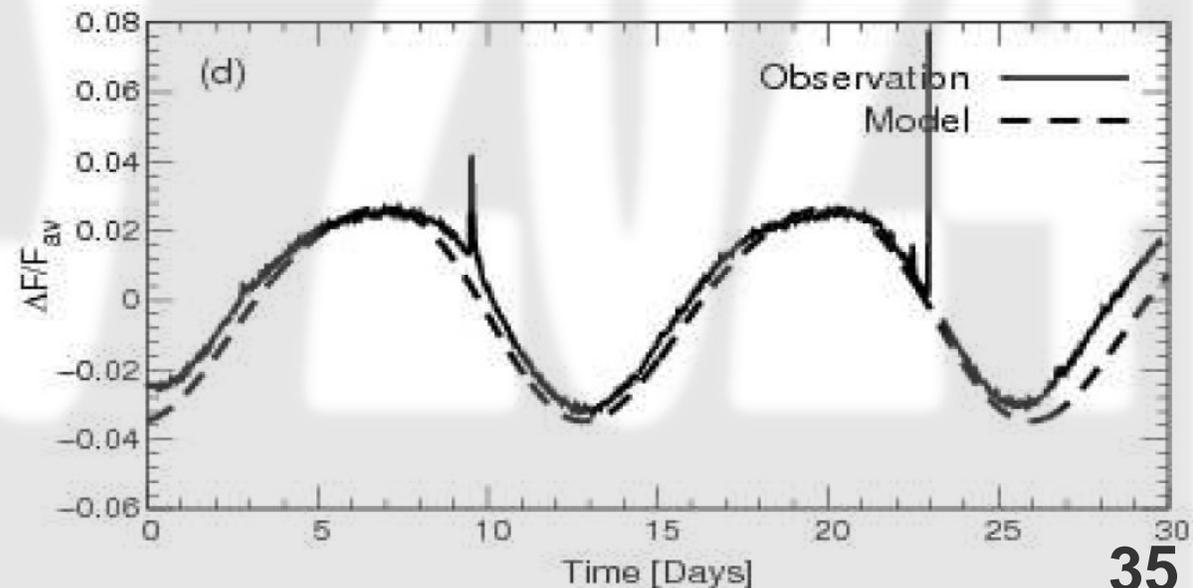
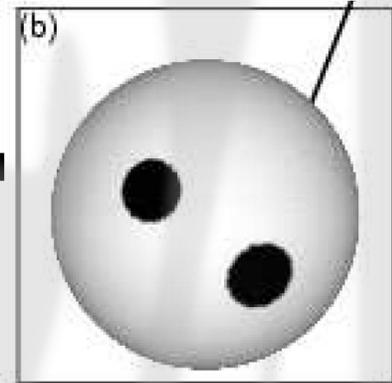
Как правило, чем легче звезда – тем она активнее.

По наблюдаемой «плавной» вариации светимости звезды определяется период ее вращения и площадь поверхности покрытая группой пятен.



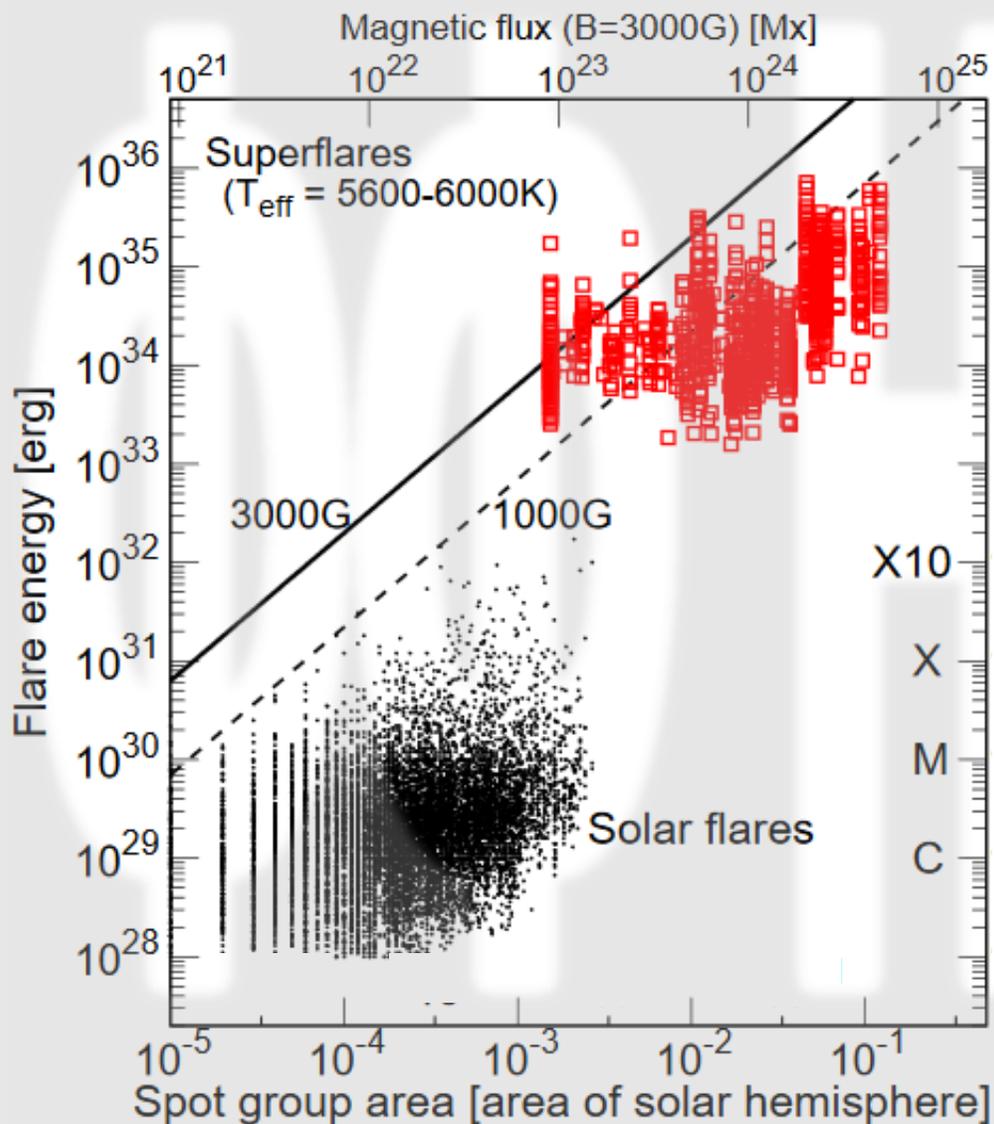
По «острым» всплескам светимости звезды определяется энергия вспышки.

Строится модель распределения пятен на поверхности звезды.



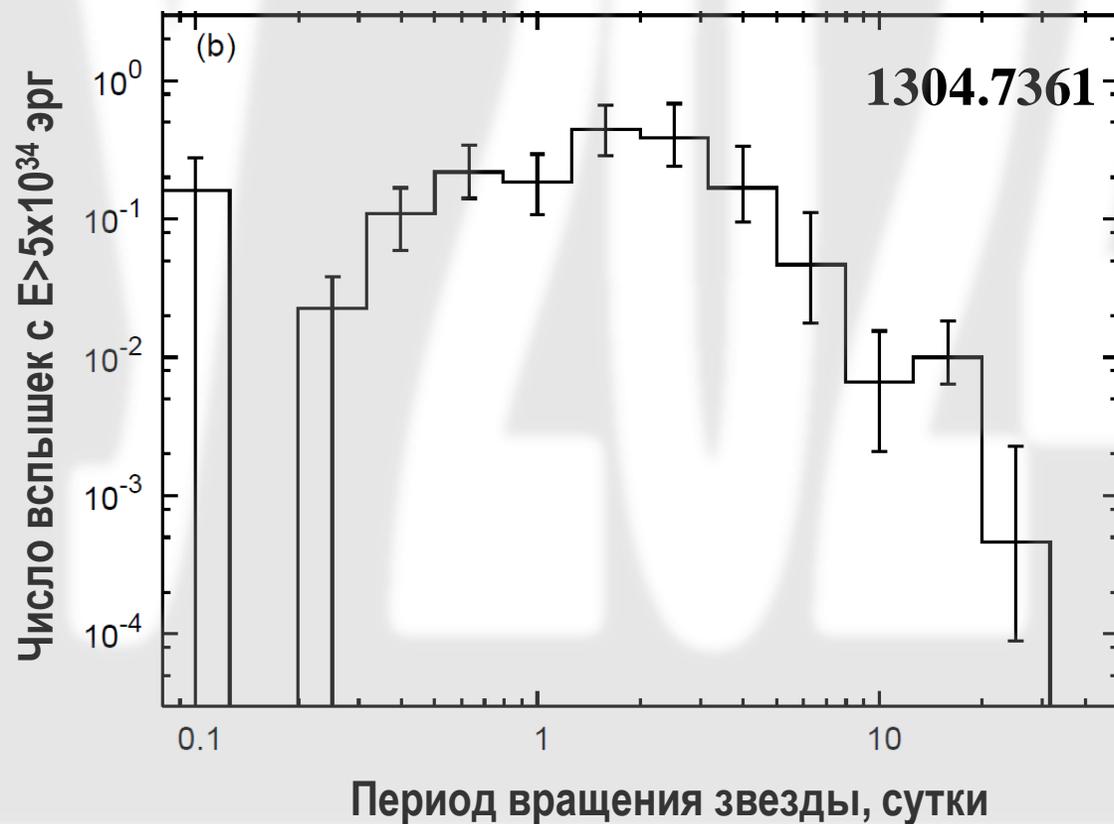
# Частота вспышек

2011.02117

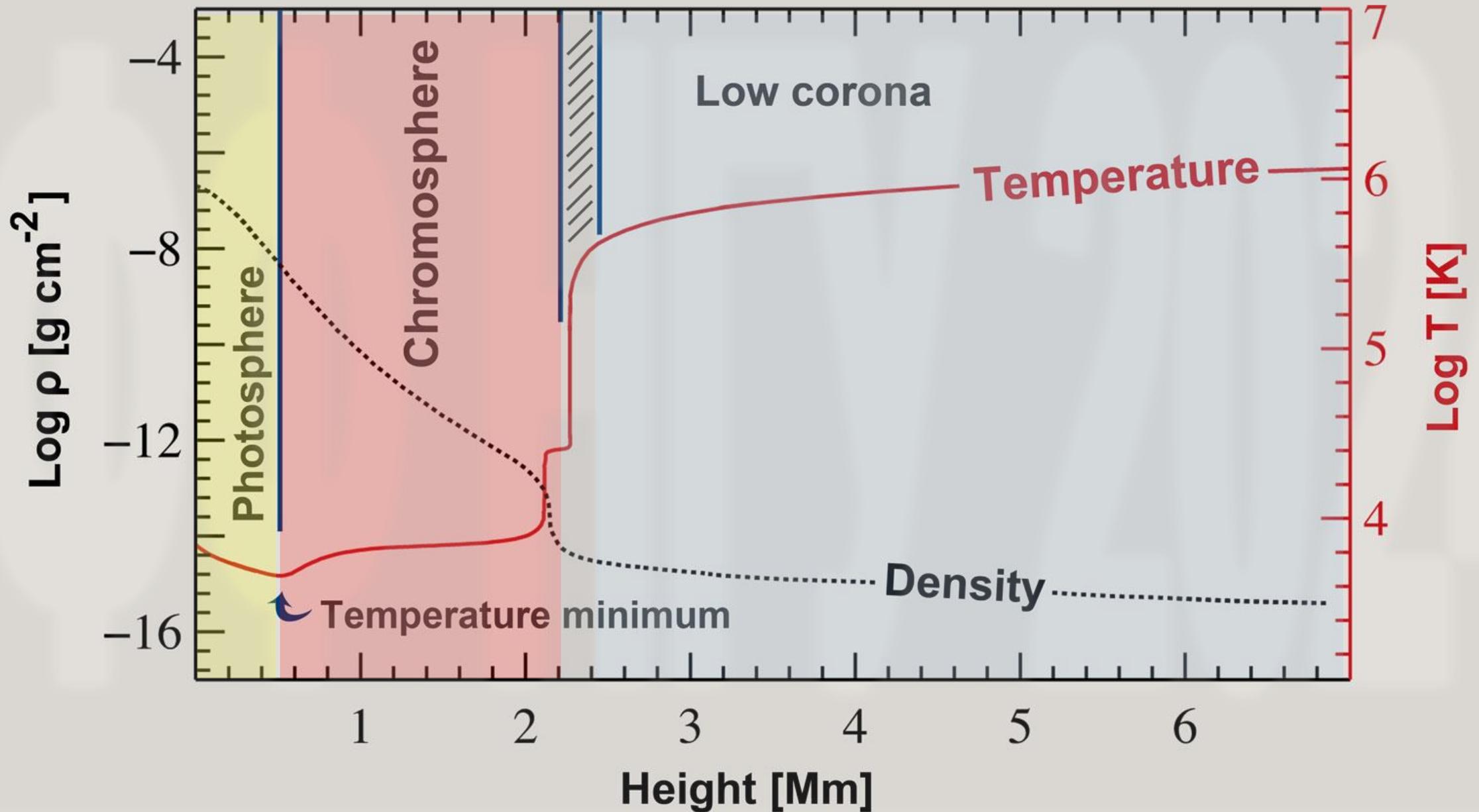


Чтобы «накрутить» поле для достаточно большой группы пятен, Солнцу нужно около 40 лет, что гораздо больше длительности солнечного цикла.

Поэтому вероятно, что очень мощные вспышки не могут происходить на Солнце.



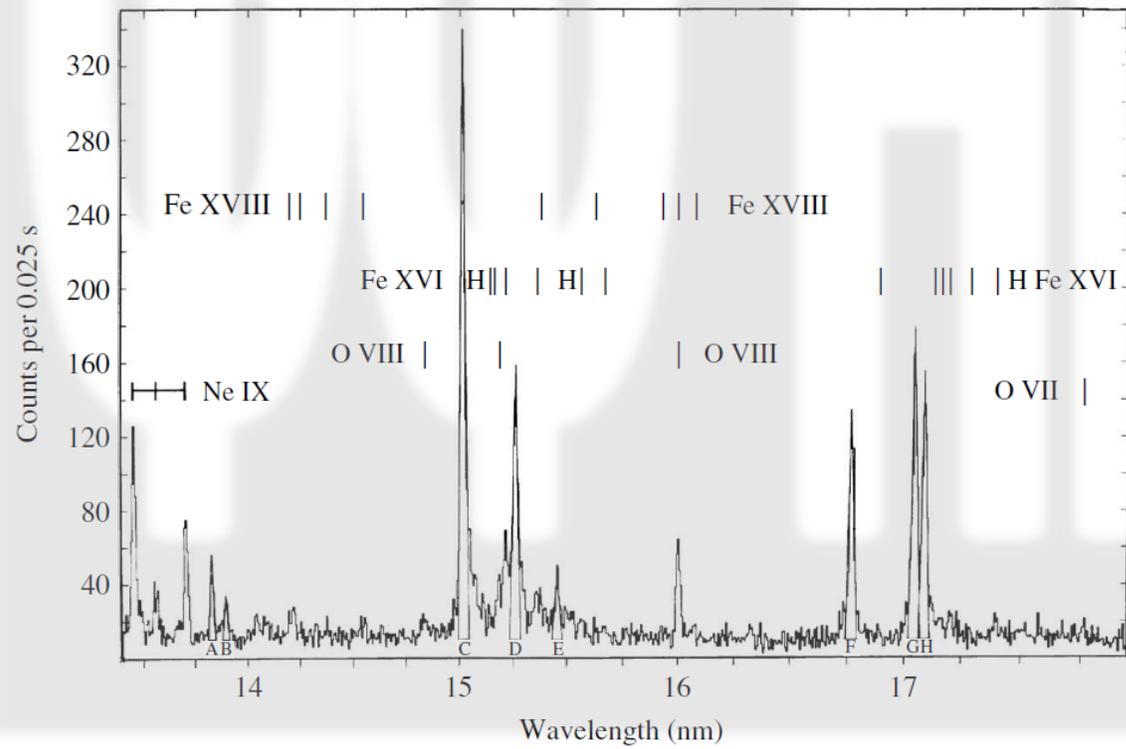
# Внешнее строение Солнца



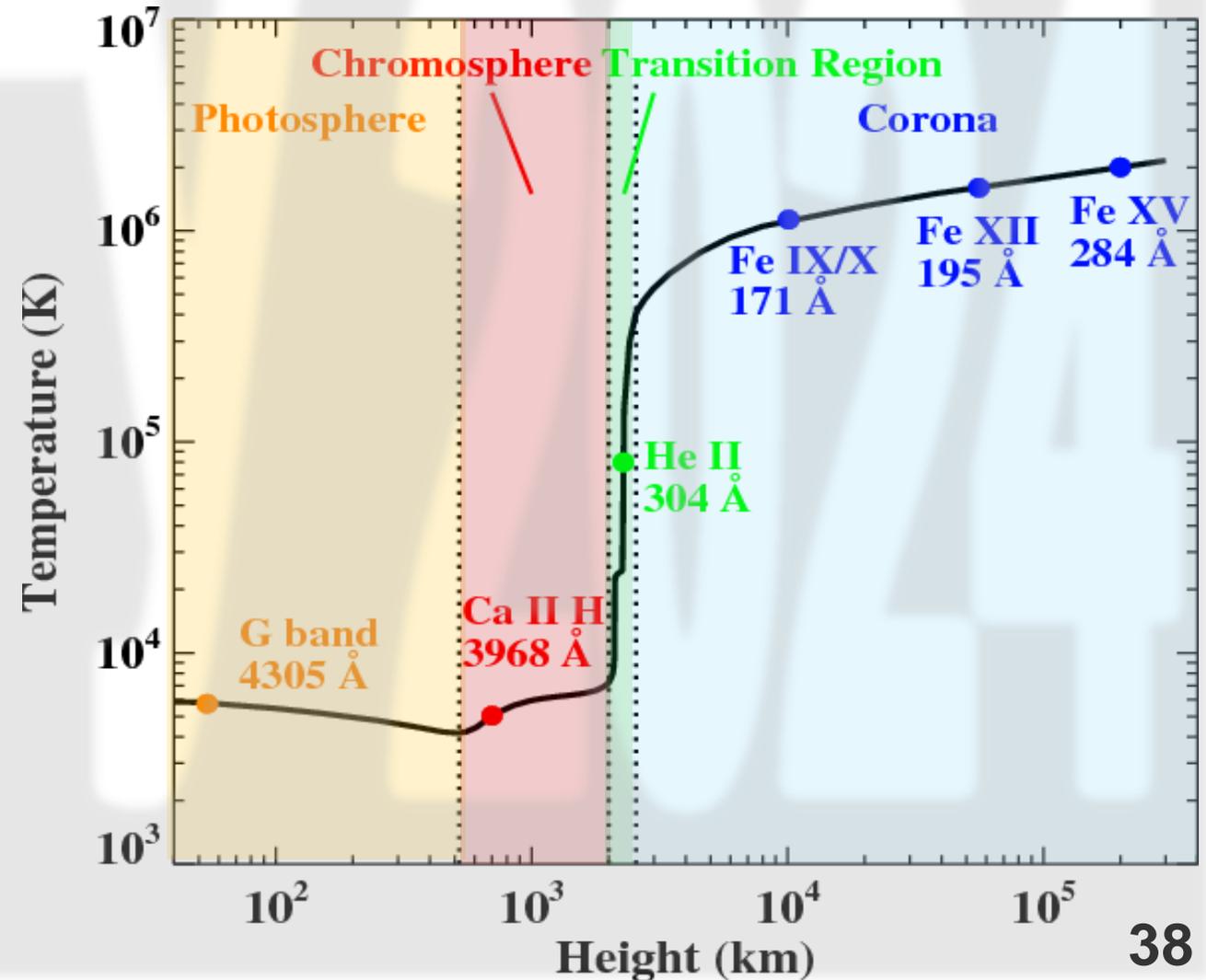
# Внешнее строение Солнца

На высоте около 2000 км над фотосферой происходит резкий разогрев вещества до температуры  $\sim 10^6$  К!

Наличие высокой температуры следует из наблюдения линий высоко ионизированных тяжелых элементов в рентгеновском диапазоне.



Детали механизма разогрева внешних слоев полностью до сих пор не поняты. Основной вклад – взаимодействие с магнитным полем.



# Внешнее строение Солнца: хромосфера

Хромосфера – существенно более разряженная область над фотосферой. Толщина хромосферы Солнца около 2000 км.

Видна во время полных солнечных затмений как слой характерного красного цвета из-за излучения водорода в линии  $H_{\alpha}$ .

Вне солнечных затмений может наблюдаться с помощью светофильтров очень узкого диапазона ( $H_{\alpha}$ ).



# Внешнее строение Солнца: корона

Корона — очень разряженная, горячая ( $\sim 10^6$  К) и протяженная внешняя область Солнца.

Корональные выбросы вещества образуют солнечный (звездный) ветер.

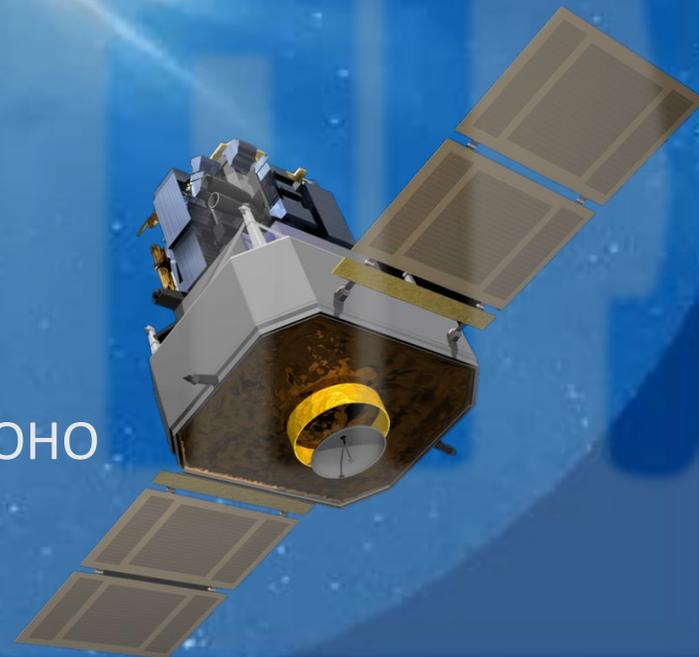
# Корональные выбросы

Мощные выбросы плазмы из области солнечной короны в межпланетное пространство солнечной системы образуют солнечный ветер.

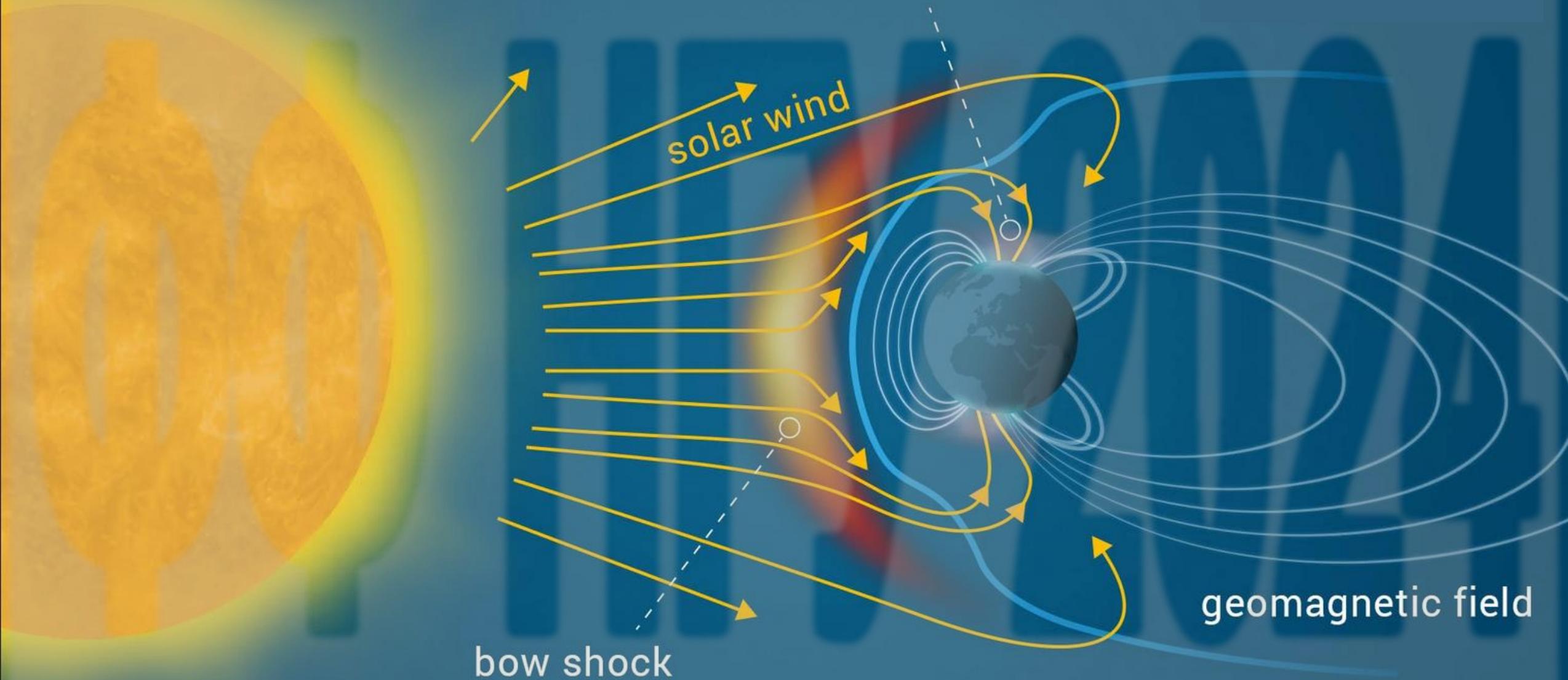
При взаимодействии потока заряженных частиц от Солнца с магнитным полем и атмосферой Земли образуются полярные сияния.

Частота таких событий от нескольких в день во время максимума, до одного в несколько дней во время минимума активности.

SOHO



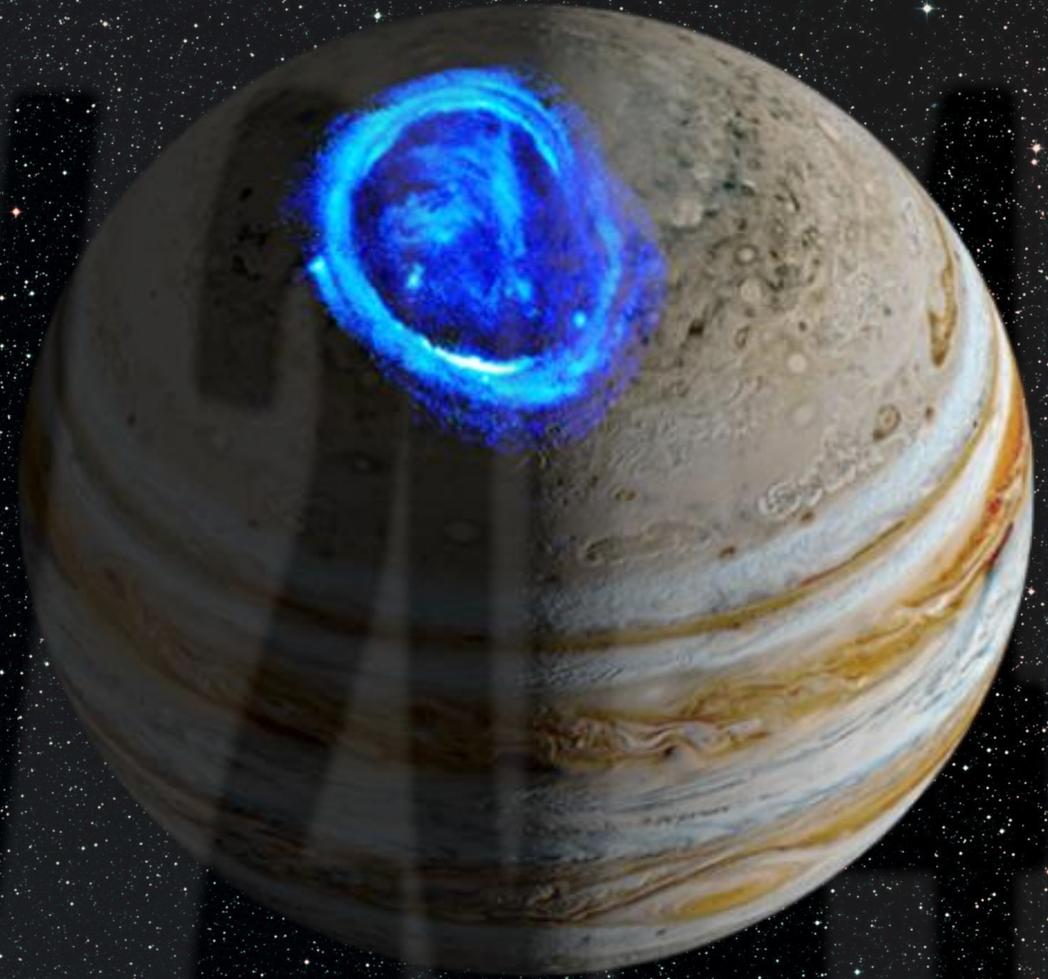
# Солнечный ветер



# Полярные сияния

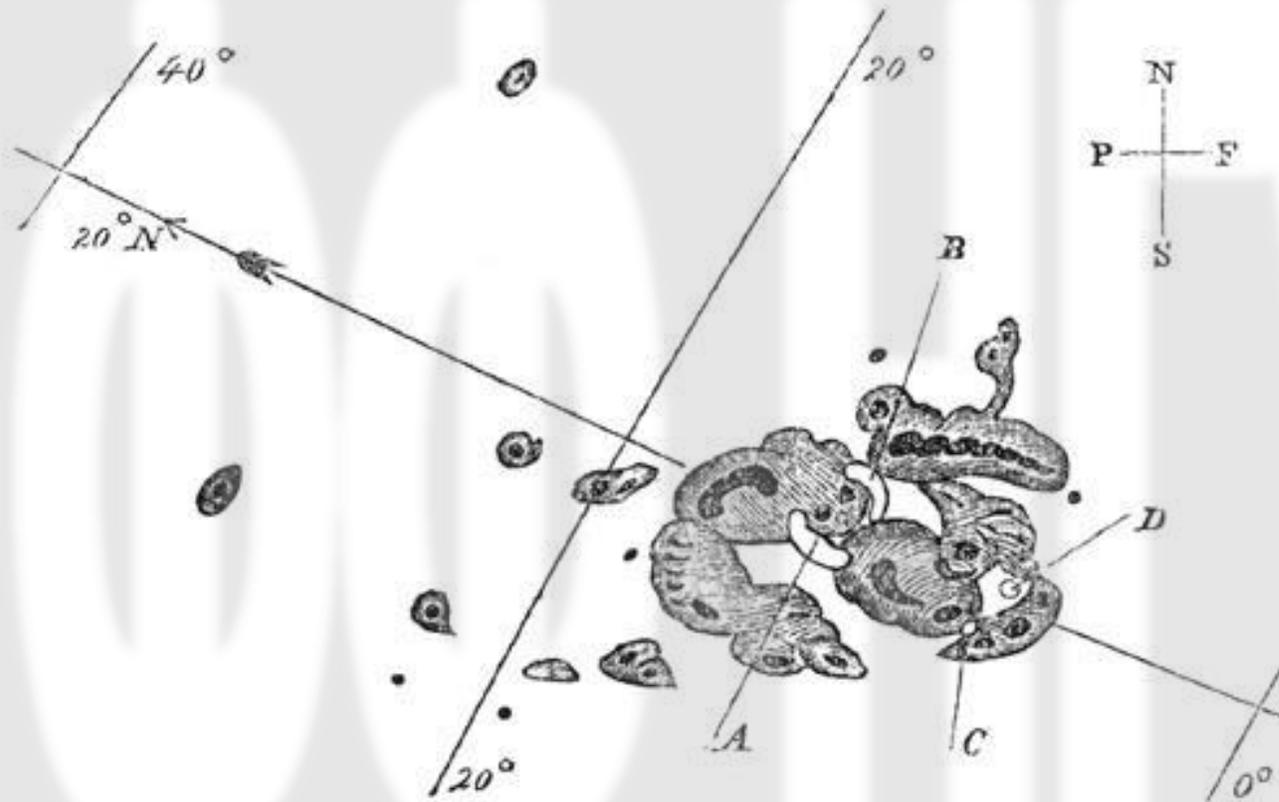


# Полярные сияния

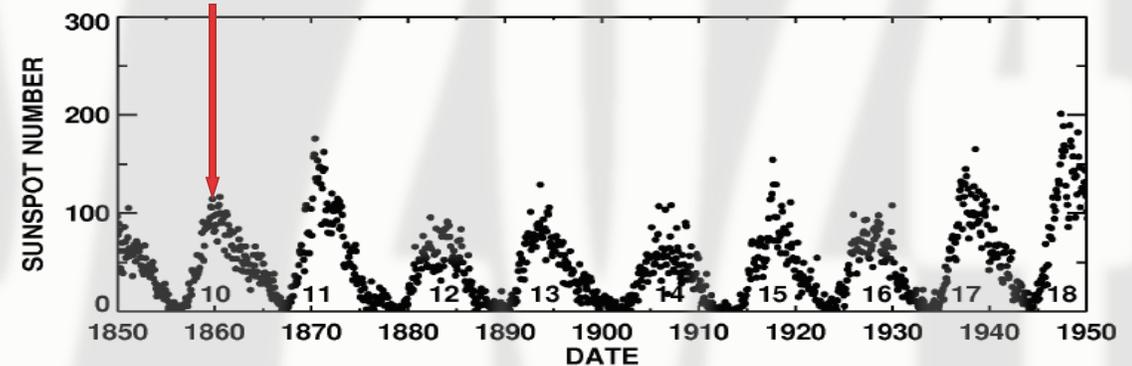


# Событие Каррингтона. 01.09.1859 г.

Зарисовка Каррингтона большой группы пятен на Солнце.



Самая мощная задокументированная солнечная вспышка, оказавшая глобальное влияние на (тогда только зарождающуюся) систему телеграфной связи. Интенсивные полярные сияния наблюдались практически по всей Земле.



Ричард Каррингтон и Ричард Ходжсон наблюдали мощный корональный выброс накануне. Каррингтон предположил связь между корональным выбросом на Солнце и последовавшими на следующий день явлениями на Земле.

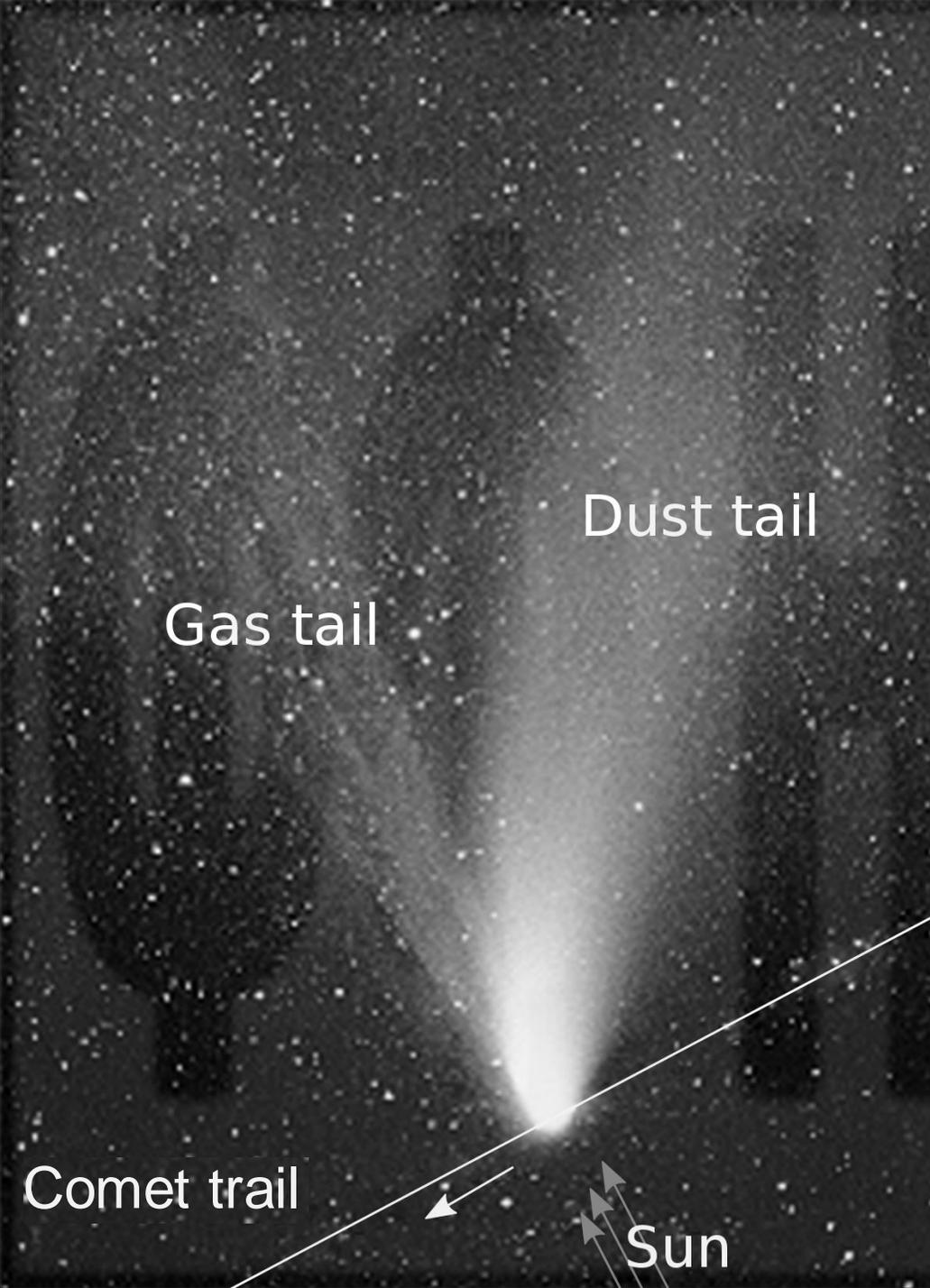
# Солнечный ветер

Солнечный ветер оказывает давление на частицы межпланетной среды, в том числе газ испаряющихся кометных ядер.

В результате газовый кометный «хвост» направлен не по движению кометы, а практически точно от Солнца. Пылевые частицы кометного «хвоста» более тяжелые, их траектория лишь искажается.

Типичная скорость солнечного ветра  $\sim 500$  км/с, плотность в окрестности Земли  $\sim 7 \times 10^6$  протонов/м<sup>3</sup>.

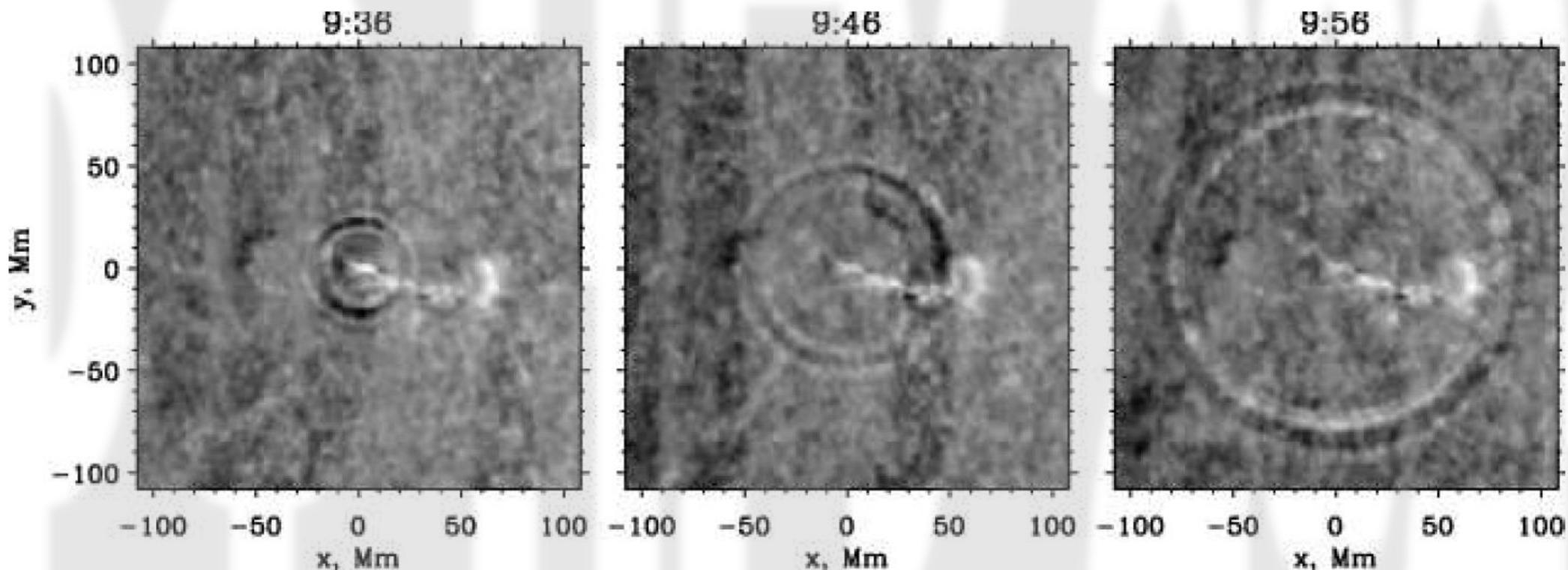
Средняя скорость потери массы:  $\sim 3 \times 10^{-14} M_{\odot}$ /год.



# Гелиосейсмология

– один из основных методов получения информации о внутреннем строении Солнца. Из-за локальных возмущений (конвекция, магнитная активность, и т.д.) на поверхности Солнца могут создаваться волны, которые в дальнейшем распространяются по поверхности и в объеме Солнца.

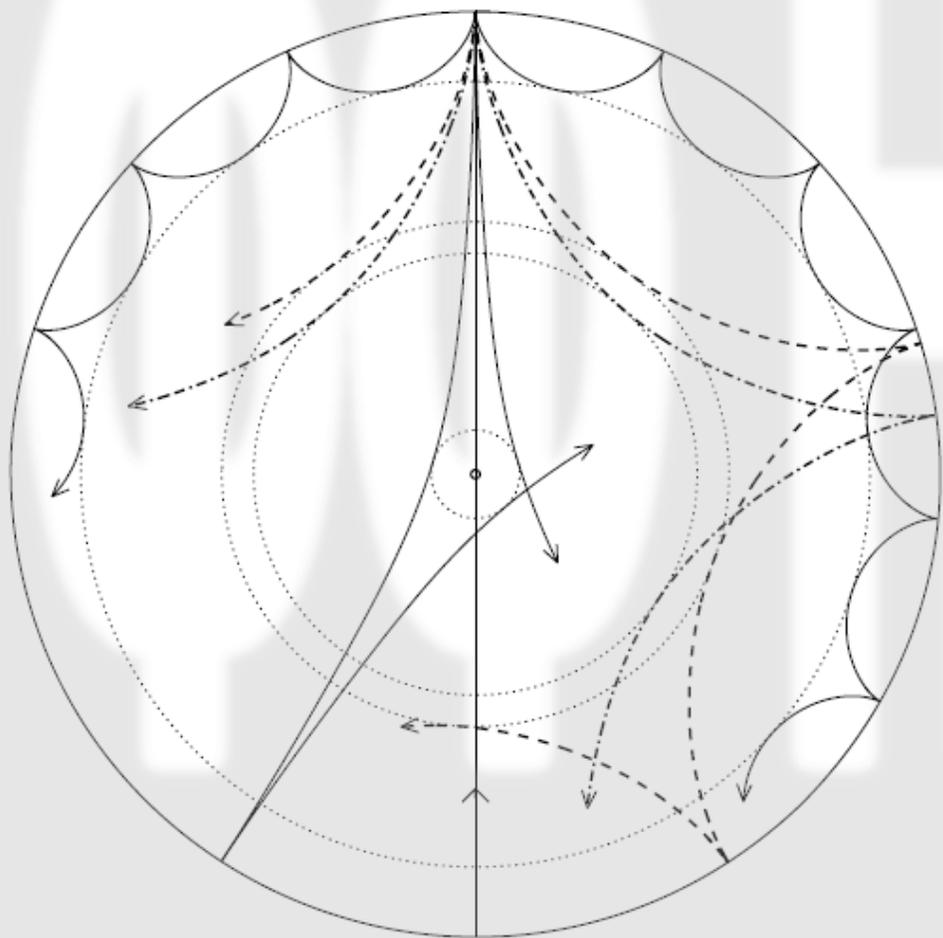
1103.1707



Доплеровские изображения сейсмических волн от солнечной вспышки 9 июля 1996 года, по наблюдениям спутника SOHO.

# Гелиосейсмология

Отражаясь от внутренних более плотных слоев волны выходят обратно на поверхность, и это можно регистрировать с помощью эффекта Доплера, таким образом получать информацию о внутренней структуре Солнца.



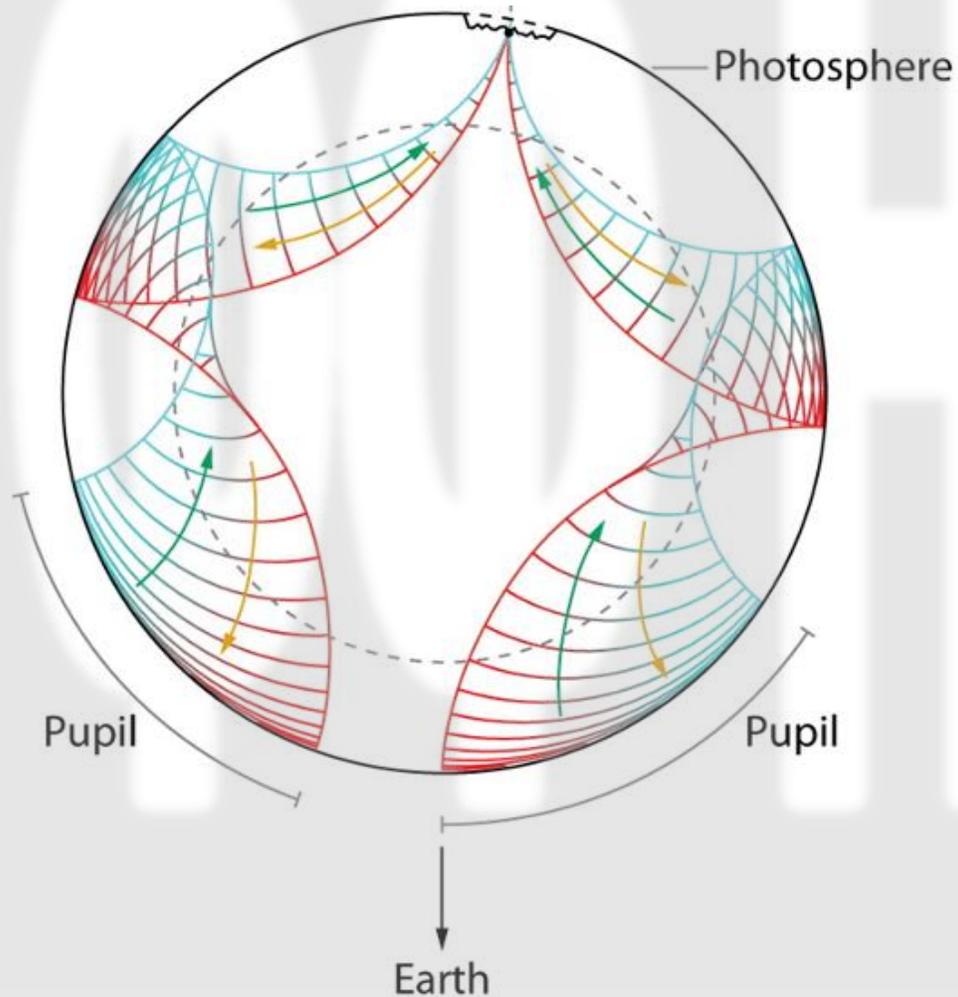
Количество переотражений (порядок  $l$  сферической гармоники) от поверхности зависит от глубины проникновения волн.

Чем более широкий спектр по  $l$  на поверхности звезды мы наблюдаем, тем более детальную информацию о структуре (распределение температуры, давления, ...) можно получить.

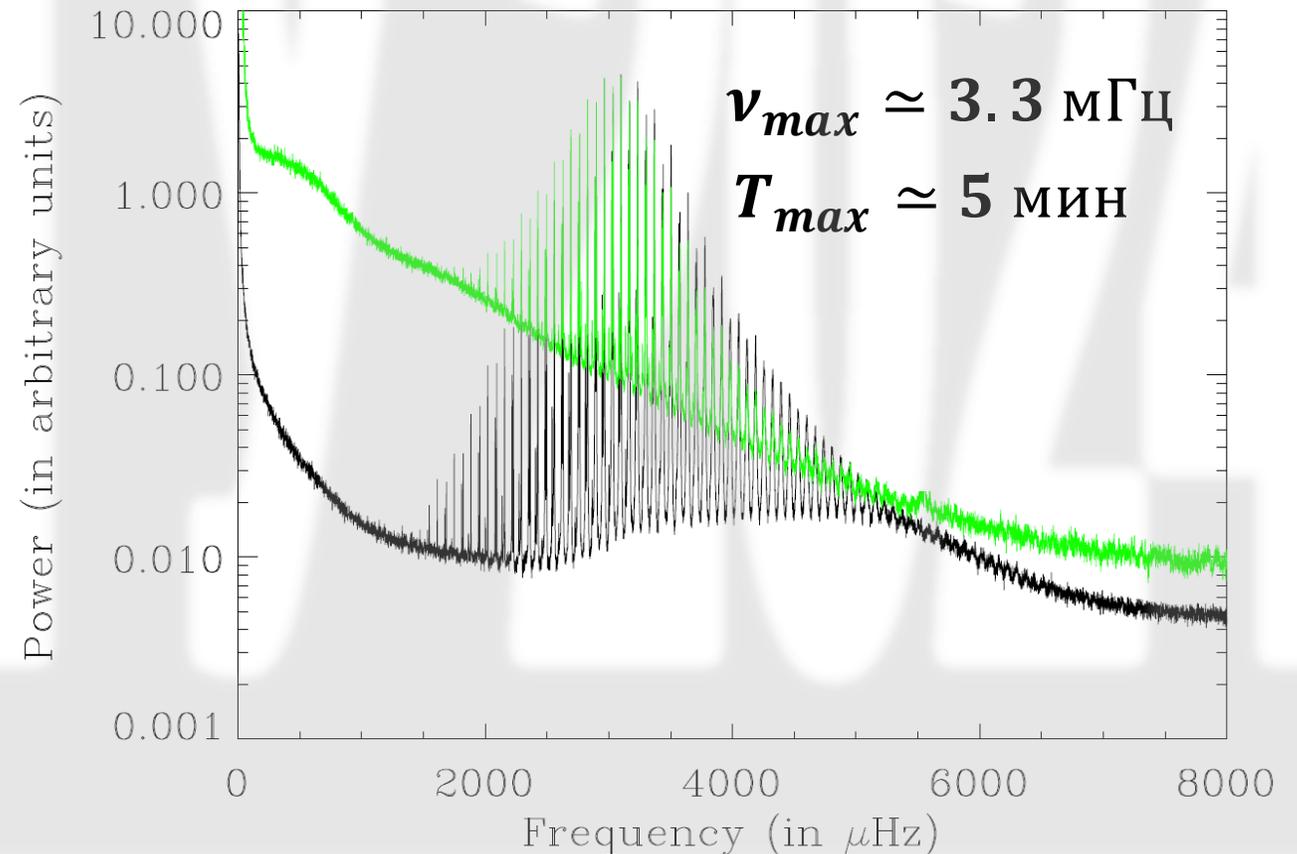
Возможность проводить детальные наблюдения Солнца позволило детально разработать методику астросейсмологии, которая сейчас применяется к исследованию и других звезд.

# Гелиосейсмология

Отражаясь от внутренних более плотных слоев волны выходят обратно на поверхность, и это можно регистрировать с помощью эффекта Доплера, таким образом получать информацию о внутренней структуре Солнца.

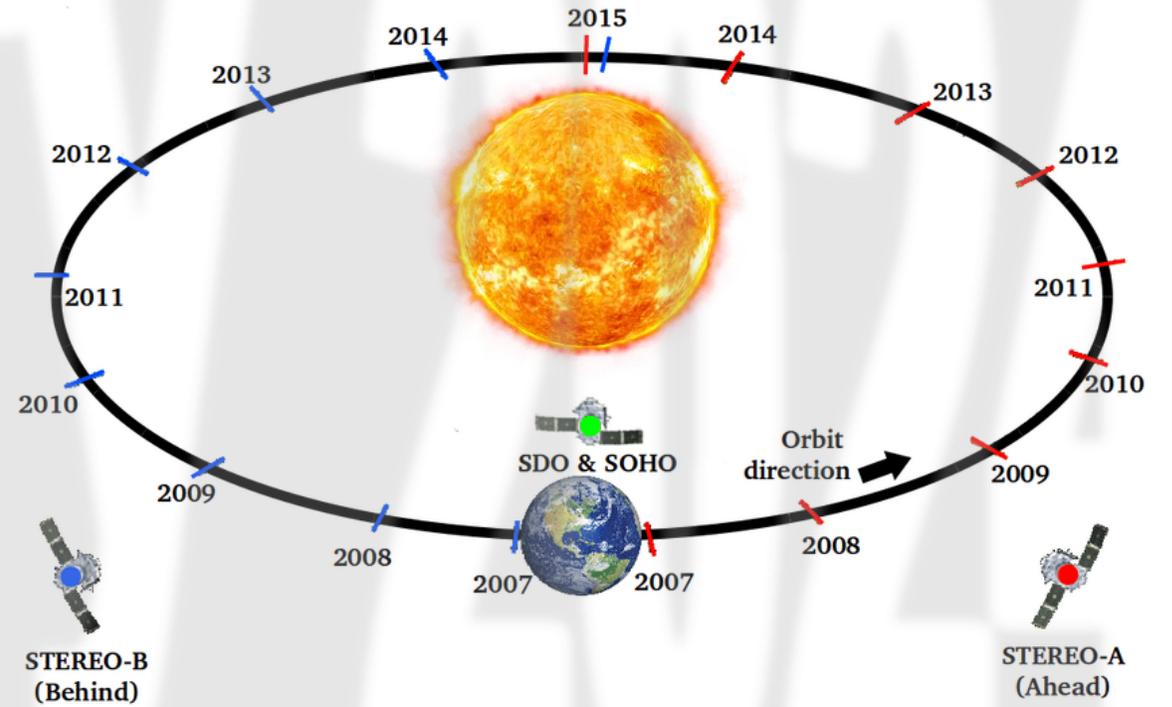
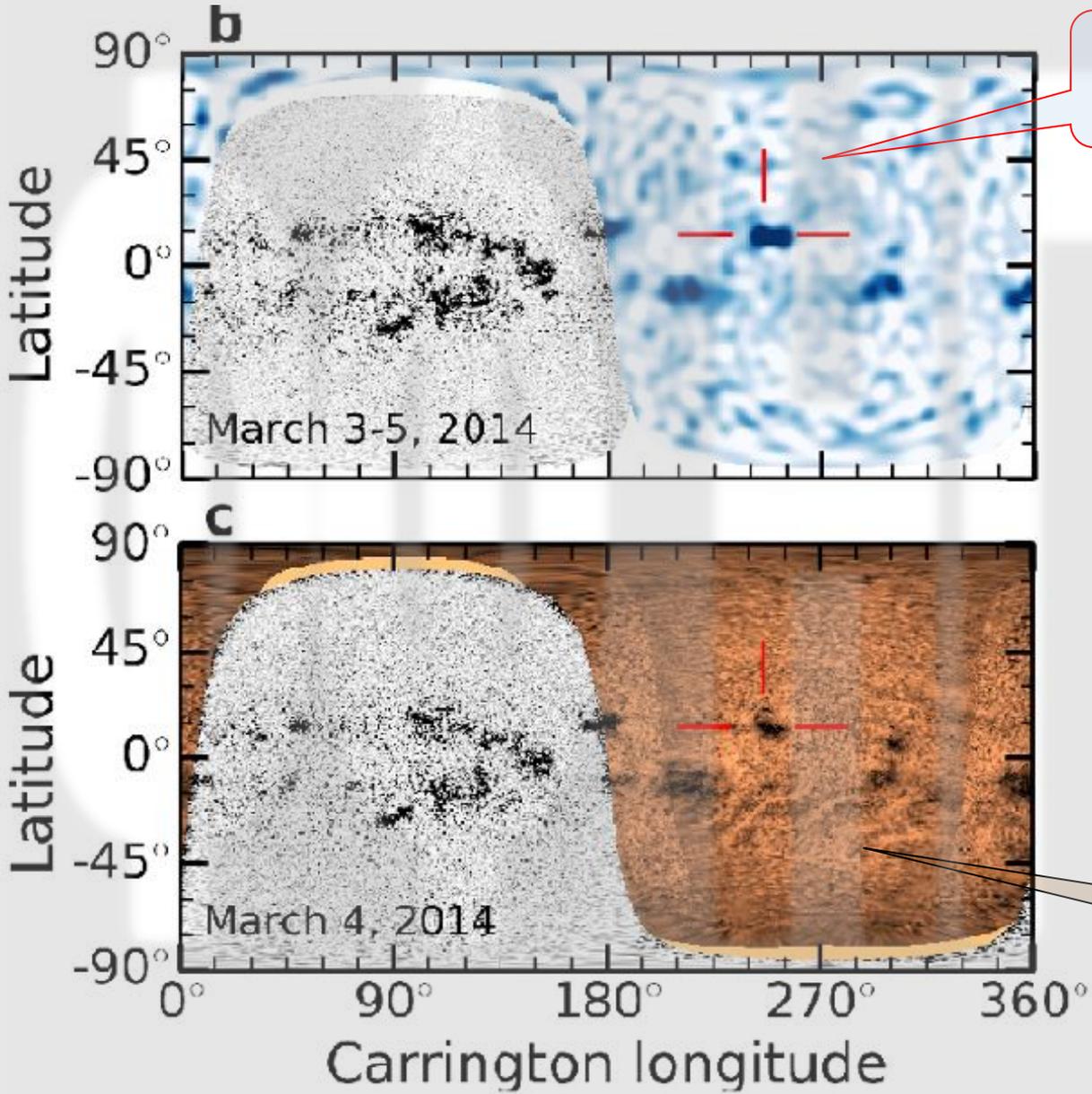


При этом наиболее активно возбуждаются колебания на собственной частоте.



# Гелиосейсмология

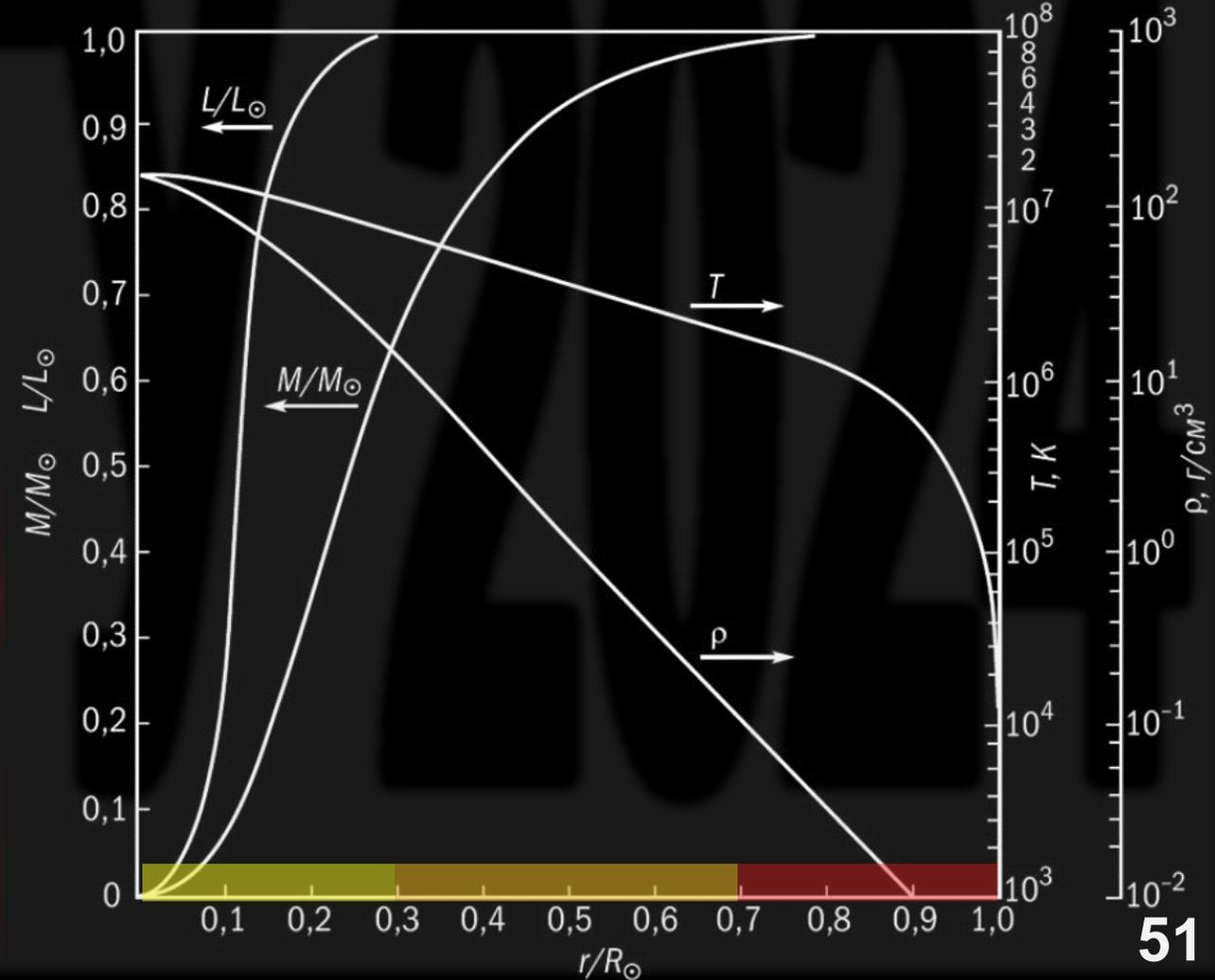
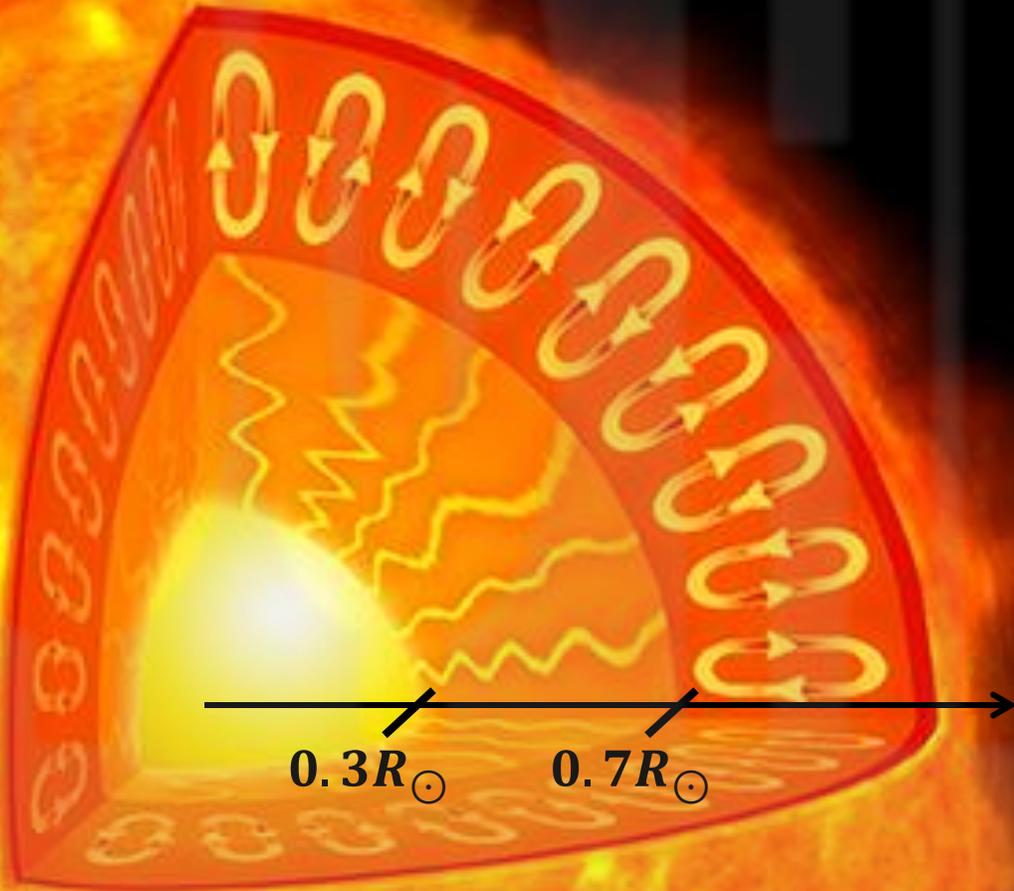
Карта солнечной активности обратной стороны, восстановленная по данным гелиосейсмологии.



Прямое наблюдение обратной стороны спутниками STEREO.

# Внутренняя структура Солнца

Имеющиеся наблюдательные данные позволяют построить достаточно детальную модель внутреннего строения Солнца: стандартная модель Солнца.



# Перенос энергии

Основными механизмами переноса энергии из ядра к поверхности звезды: излучение и конвекция. Какой из двух механизмов доминирует, определяется радиальным градиентом температуры.

$$\left| \frac{dT}{dr} \right|_{\text{act}} > \left| \frac{dT}{dr} \right|_{\text{ad}}$$

где  $\text{ad}$  – градиент, соответствующий адиабатическому «всплыванию» объема газа.

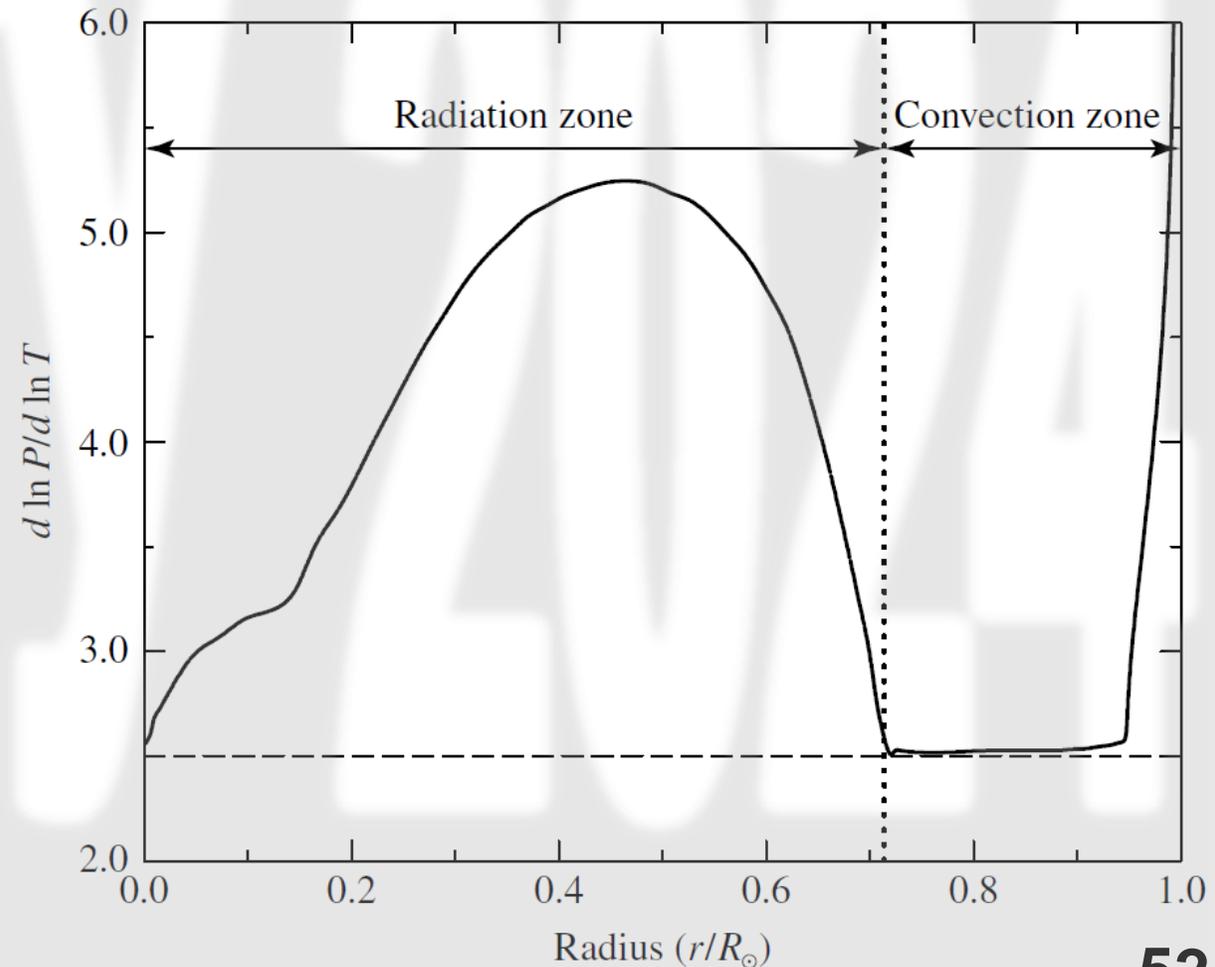
Граничное условие перехода от радиационного переноса к конвективному можно записать как

$$\frac{d \ln P}{d \ln T} < \frac{\gamma}{\gamma - 1}.$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты.

В простой модели одноатомного газа  $\gamma = 5/3$  и

$$\frac{d \ln P}{d \ln T} < 2.5$$

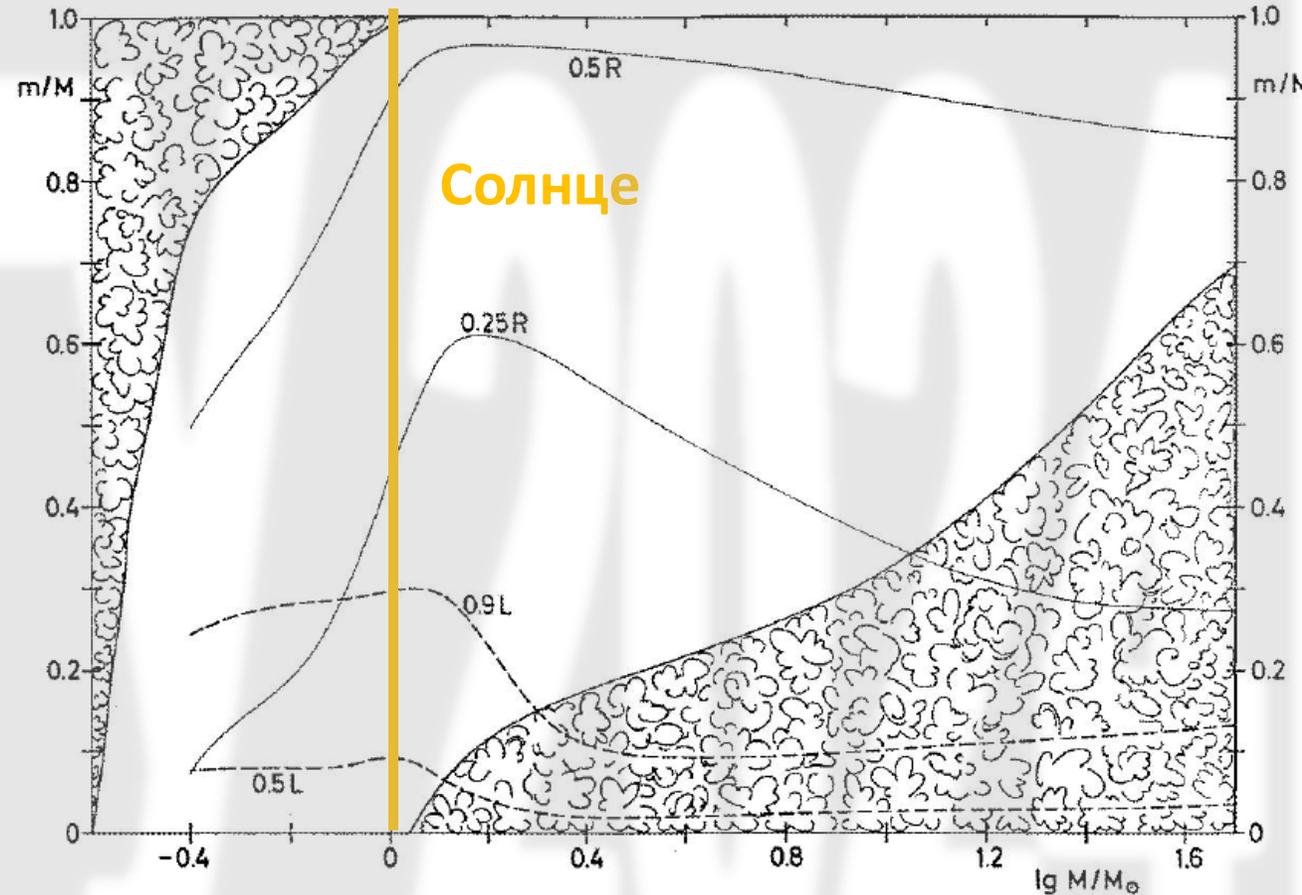


# Внутренняя структура звезд

Перенос энергии в центральной области звезд с массами  $0.3M_{\odot} - 1.2M_{\odot}$  имеет радиационный (лучистый) характер. В более массивных звездах из-за сильной зависимости интенсивности CNO цикла от температуры возникает высокий градиент температуры и перенос энергии меняется на конвективный.

Это приводит к более интенсивному (по всему объему ядра) горению водорода и, как результат, к сокращению времени жизни на ГП.

Звезды малых масс конвективны во всем объеме. Однако из-за более низкой температуры в центре, интенсивность p-p цепочки низкая, поскольку доступный источник водорода – весь объем звезды, время жизни очень велико.



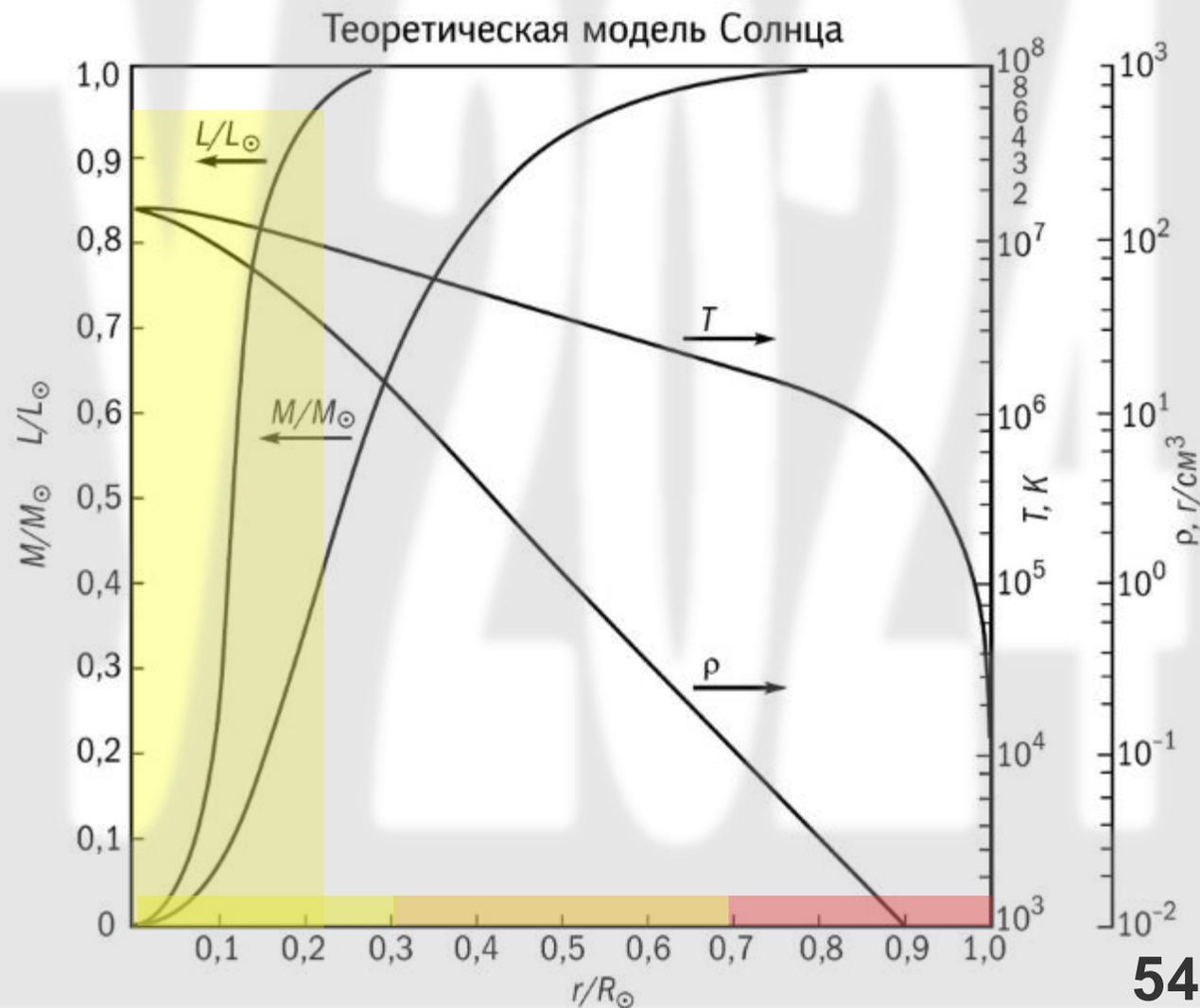
# Внутренняя структура Солнца

Имеющиеся наблюдательные данные позволяют построить достаточно детальную модель внутреннего строения Солнца: стандартная модель Солнца.

~95% светимости Солнца вырабатывается в области  $\sim 0.25R_{\odot}$ , что составляет лишь около  $<2\%$  от полного видимого объема!

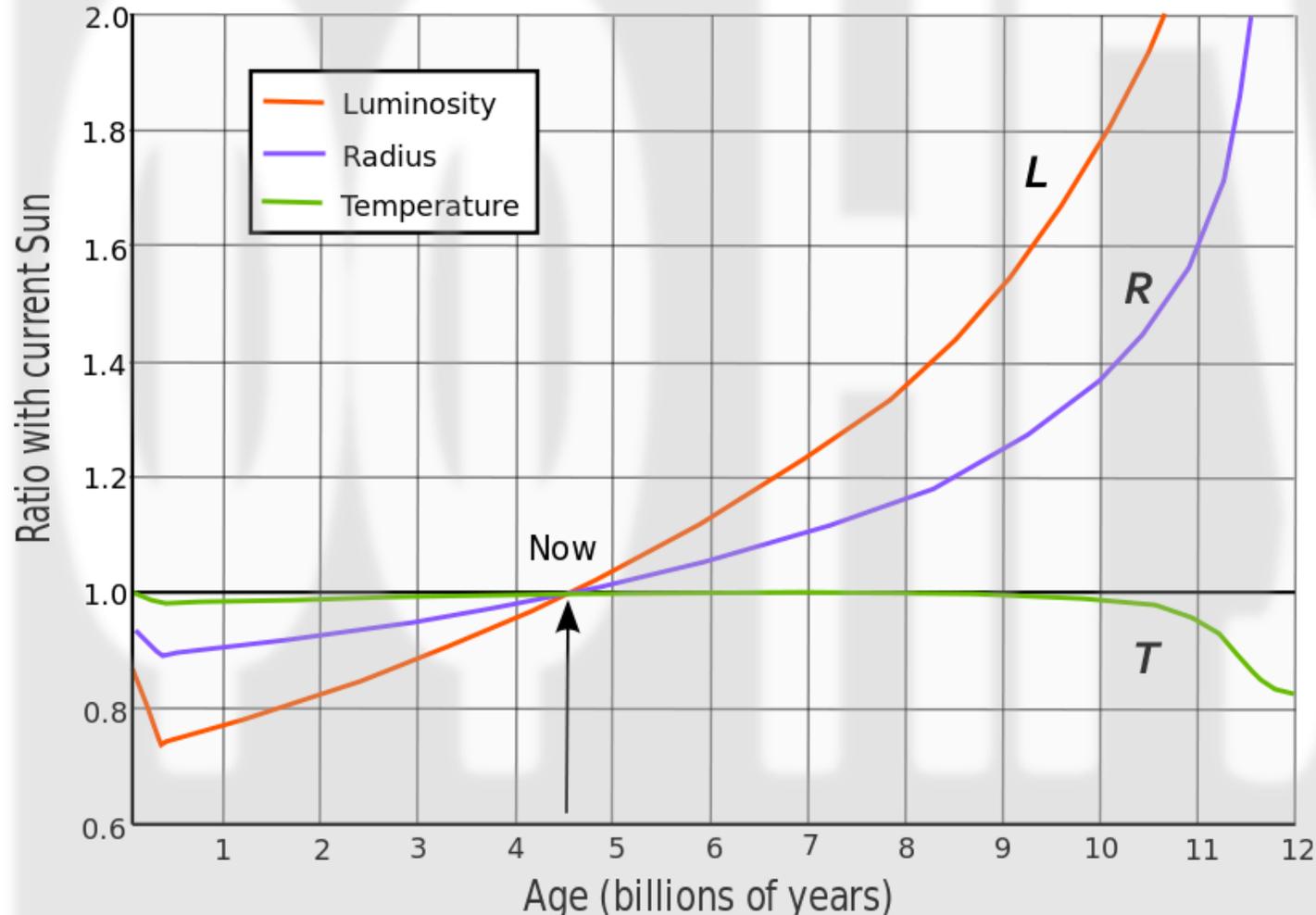
При этом масса активной области около 40% полной массы Солнца.

Около 90% массы Солнца сосредоточены в  $\sim 10\%$  объема.



# Эволюция Солнца

Изменение **внешних** (наблюдаемых) параметров Солнца со временем в процессе исчерпания водорода в его ядре.



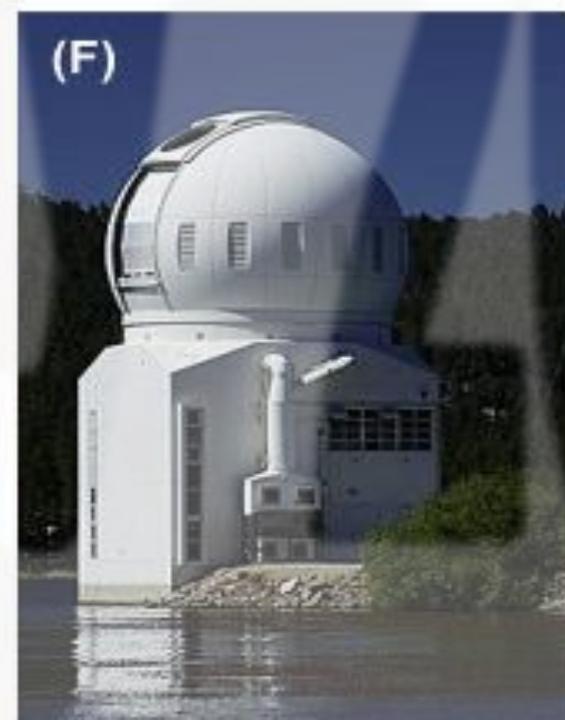
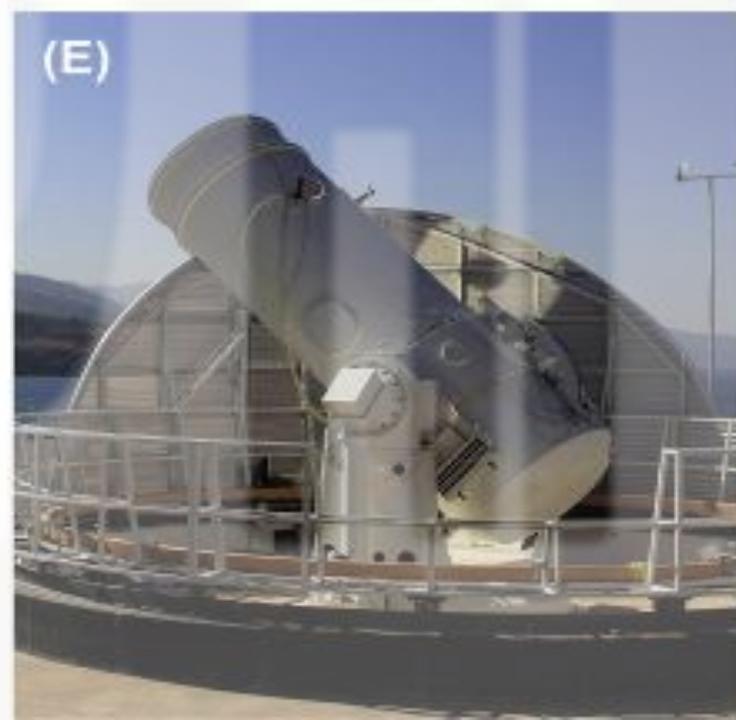
$$P = nk_B T$$

В результате термоядерного синтеза гелия из водорода меняется концентрация частиц!



Давление падает, происходит **сжатие ядра** под действием гравитации => повышается температура ядра.

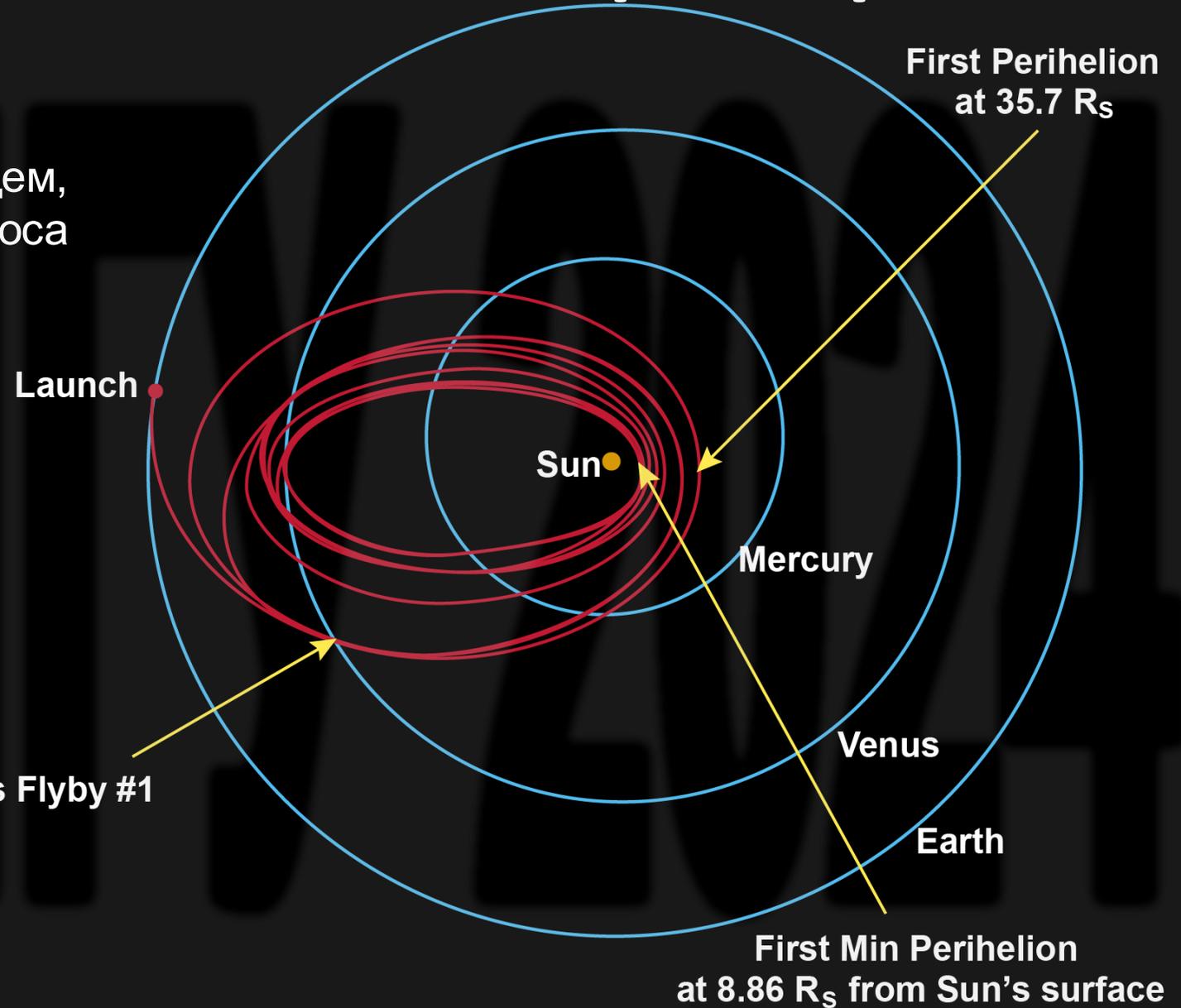
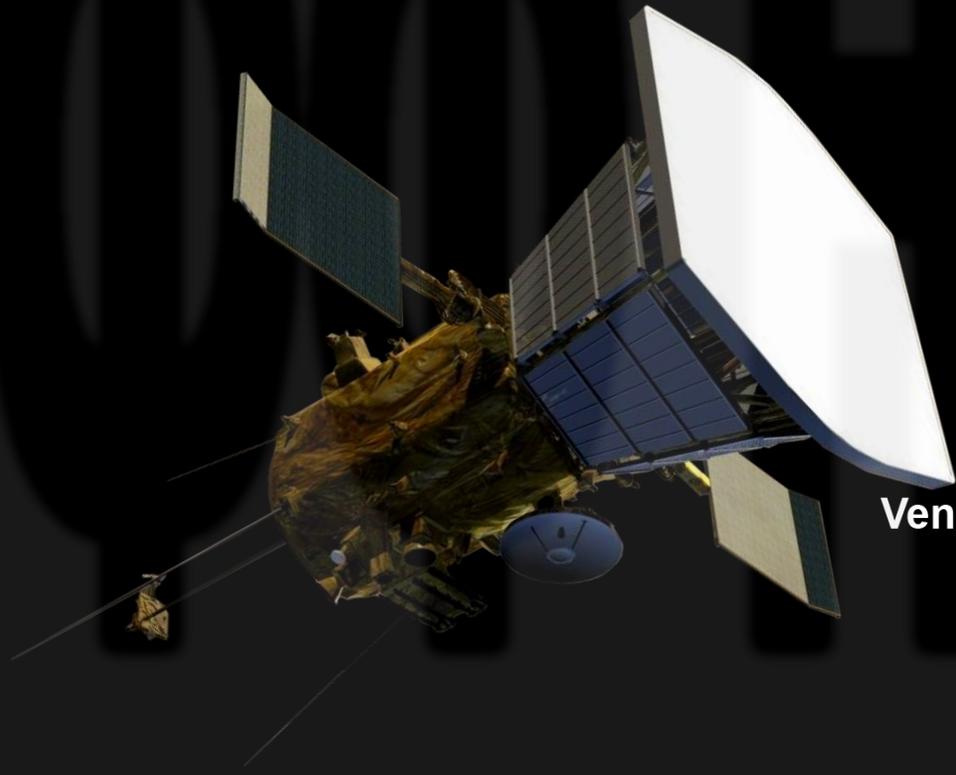
Из-за сильной зависимости скорости синтеза от температуры, повышается светимость, больше энергии поступает во внешние слои => **расширение оболочки.**



# Орбитальные солнечные обсерватории

Запуск: 2018 год

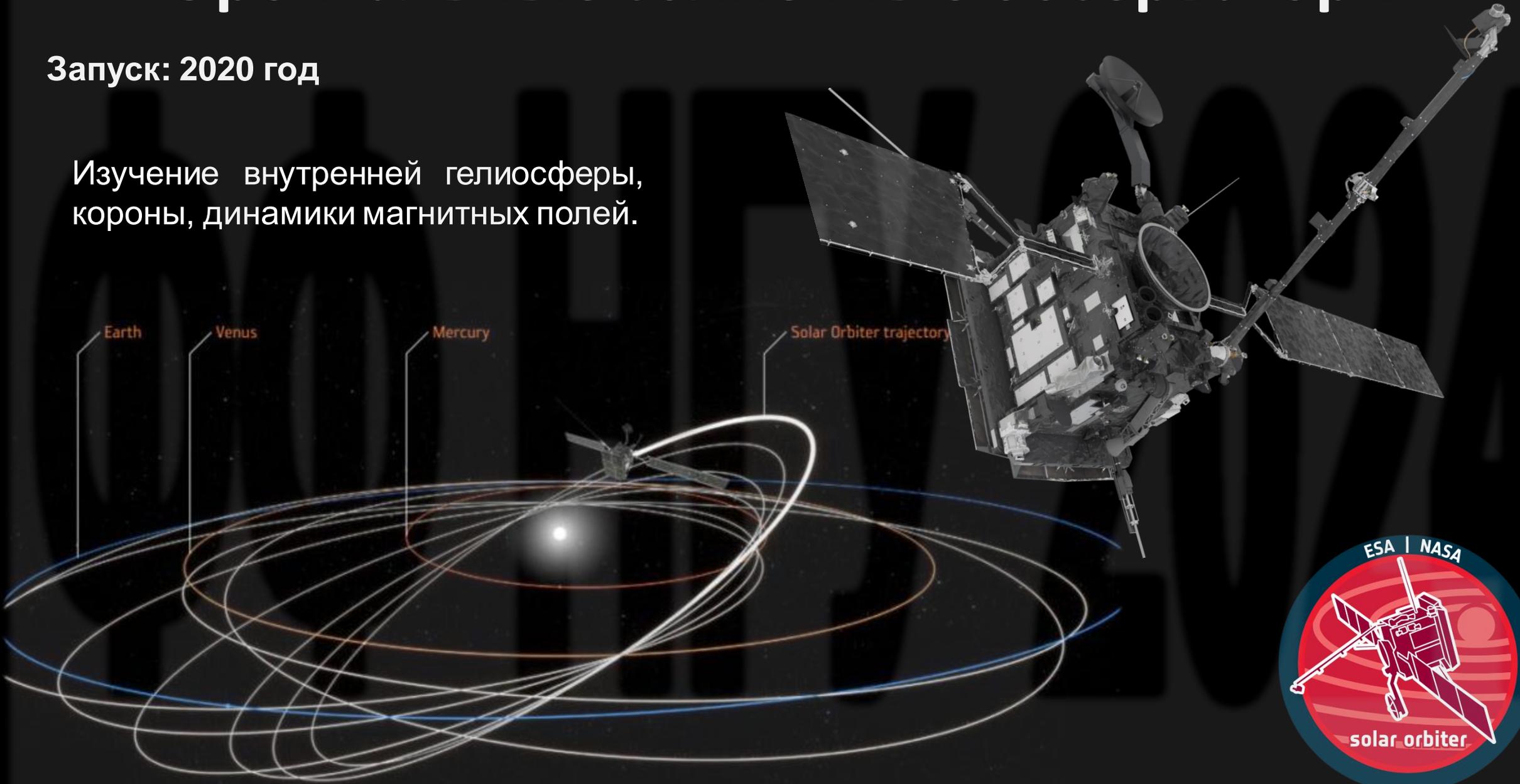
Максимальное сближение с Солнцем, изучение короны, механизмов переноса энергии, динамики магнитных полей.

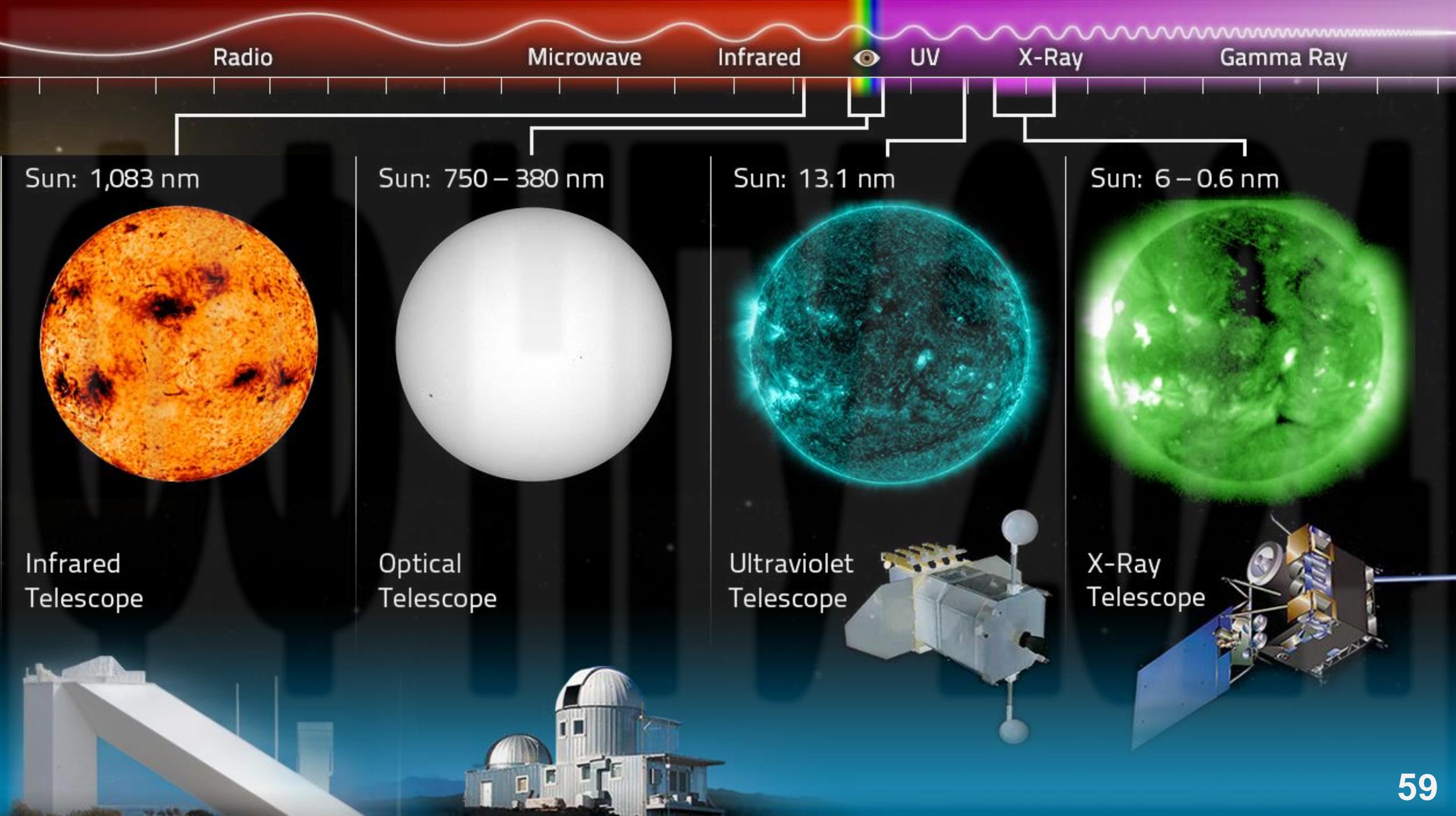


# Орбитальные солнечные обсерватории

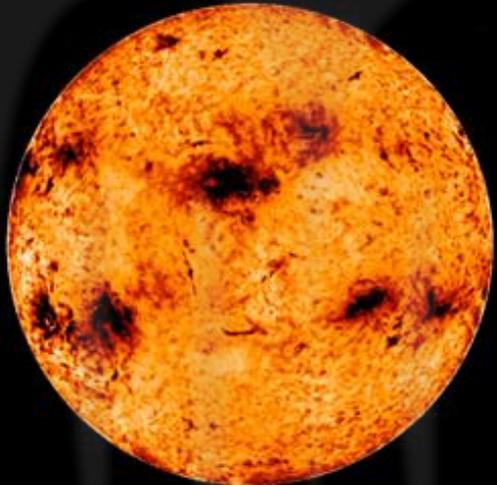
Запуск: 2020 год

Изучение внутренней гелиосферы, короны, динамики магнитных полей.





Sun: 1,083 nm



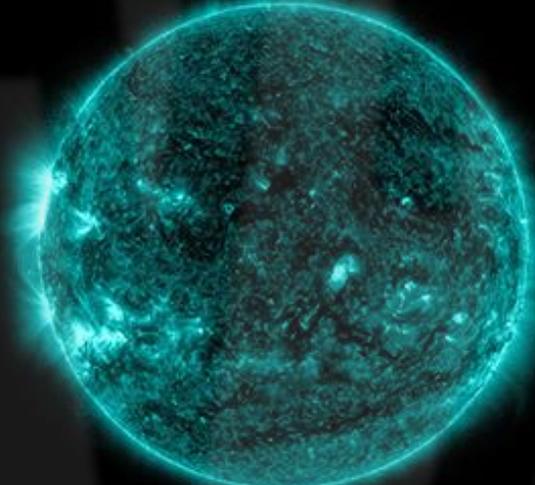
Infrared Telescope

Sun: 750 – 380 nm

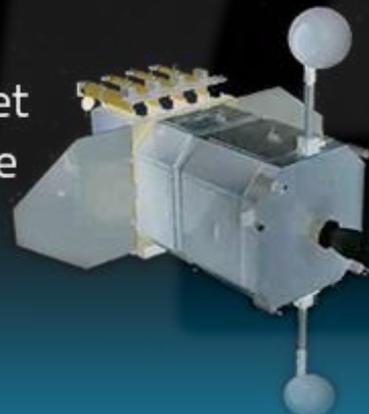


Optical Telescope

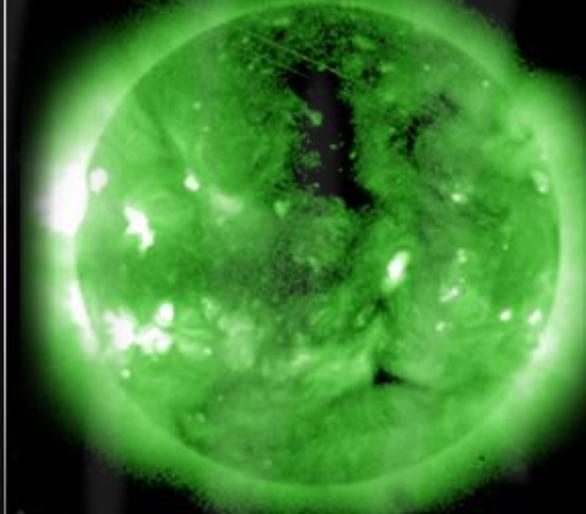
Sun: 13.1 nm



Ultraviolet Telescope



Sun: 6 – 0.6 nm



X-Ray Telescope

