

# Общая астрофизика

## Раздел 2. Звезды

2.5. Солнце как звезда. Фотосфера.  
Хромосфера. Корона. Солнечный ветер.  
Внутреннее строение. Представление о  
гелиосейсмологии.

# Солнце как звезда

Все основные параметры определены «прямыми» методами.

- Масса – из 3-го закона Кеплера: 
$$\frac{M_{sun} T^2}{a^3} = \frac{4 \pi^2}{G}$$
 $T$  – период обращения Земли,  
 $a$  – большая полуось орбиты: 3-й з-н Кеплера для планет + суточный параллакс для любой план.
- Светимость – измерение солнечной постоянной и  $a$ .
- Радиус – измерение углового радиуса и  $a$ .
- Возраст – по метеоритам, радиоизотопным методом.
- Химсостав – по метеоритам, кроме летучих (С, N, О, Ne...)
- Вращение – по движению пятен на поверхности.

---

$$M_{sun} = 2 \cdot 10^{33} \text{ г} \quad L_{sun} = 4 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с} \quad R_{sun} = 7 \cdot 10^{10} \text{ см}$$

$$t_{sun} = 4.567 \text{ Gyr, вращение дифференциальное, } V_{\text{ЭКВ}} = 2 \text{ км/с}$$

## ◆ Магнитное поле

1) По зеемановскому расщеплению спектральных линий

- в солнечных пятнах (*G. Hale*, 1908),  $H \sim 3000-4000$  Э

- дипольное поле, ориентированное вдоль оси вращения,

$H \sim 1$  Э (*Babcock H.W., Babcock H.D.*, 1953)

- азимутальное поле с противоположным направлением в северном и южном полушариях,  $H \sim 1$  Э

2) Спектрополяриметрия в параметрах Стокса  $I, V, Q, U$

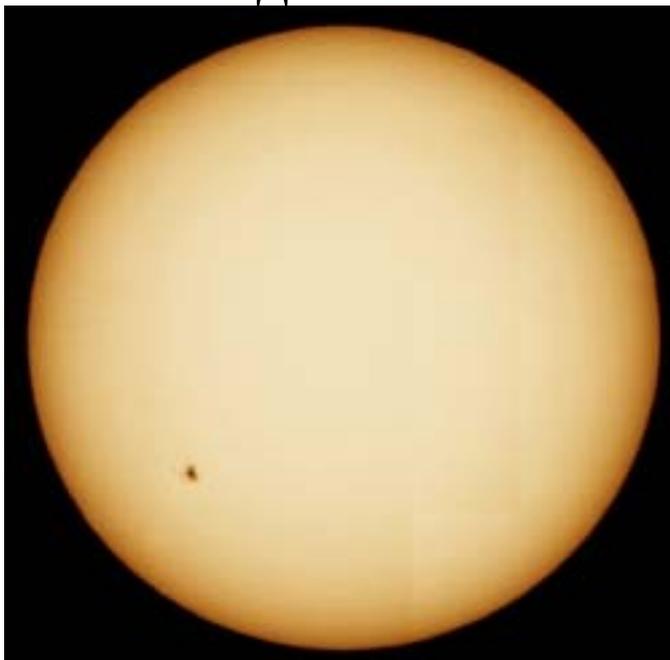
$I$  – интенсивность,

$V$  – круговая поляризация,

$Q, U$  – линейная поляризация.

# Солнце

В ВИДИМЫХ



рентгеновских лучах



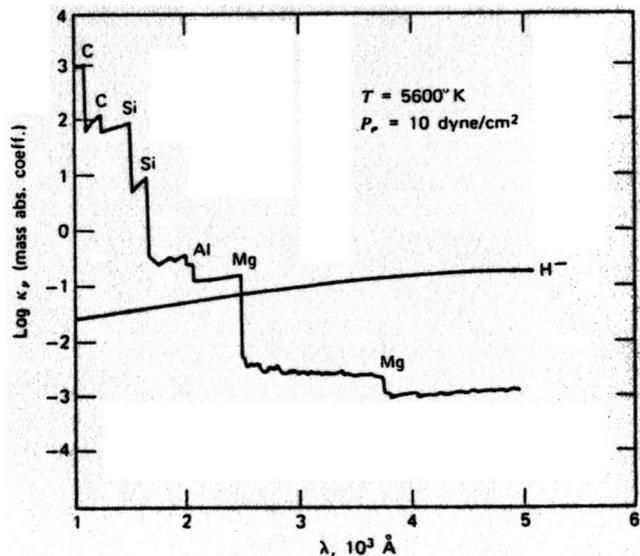
Масштаб снимков - разный

**Атмосфера** — слой, откуда приходит набл. излучение.

- **фотосфера**: подавляющая часть интегрального потока  
- видимый диапазон, ИК, УФ ( $\lambda > 1600 \text{ \AA}$ ), линии поглощения;
- **хромосфера**: УФ ( $\lambda < 1600 \text{ \AA}$ ), рентген, ядра линий H, K Ca II;
- **корона** : радио, рентген, эмисс.линии Fe XIV, Si VIII, Ni XV ...

# Фотосфера (атмосфера) звезды

- Нет источников и стоков энергии.  
Перенос энергии излучением и конвекцией.
  - Механизмы и источники непрозрачности:
    - ✓ фотоионизация H, He, металлов, отрицат. ионов  $\text{H}^-$
    - поглощение в полосе  $\lambda \leq \lambda_{\text{thr}} (E_{\text{ion}} = hc/\lambda_{\text{thr}})$
- H:  $i=1, \lambda \leq 912 \text{ \AA}$  – Лаймановский континуум,  
 $i=2, \lambda \leq 3646 \text{ \AA}$  – Бальмеровский  
 $i=3, \lambda \leq 8200 \text{ \AA}$  – Пашеновский



- вклад источников зависит от физических условий и спектр. диапазона

Фотосфера Солнца

H ( $i=3$ ) – мало атомов

$\text{H}^- (E_{\text{ion}} = 0.75 \text{ эВ})$  доминирует в вид. области

Mg I, Al I, Si I – в УФ

- Механизмы и источники непрозрачности (продолжение)
- ✓ свободно-свободное поглощение (f-f):  $\text{H}^+$ ,  $\text{He}^+$ ,  $\text{He}^{++}$ 
  - весь диапазон  $\lambda$ ,
  - $\chi(\text{f-f}) / \chi(\text{b-f}) \sim 0.1$  в вид. области
- ✓ рассеяние: Томсоновское (нужны свободные электроны);  
Рэлеевское (на атомах Н и He, молекулах):  $\sim \lambda^{-4}$
- ✓ связанно-связанные переходы (b-b) у разных атомов
  - узкий интервал  $\lambda$  для отдельной линии,
  - наложение (блендирование) многих линий.

## Фотосфера (продолжение)

Коэффициент поглощения на 1 ед. пути:  $\chi_\lambda = \sum a_\lambda n_i$ ,

- Оптическая толщина:  $\tau_\nu = \int_{z_0}^R \chi_\nu dz$   $\tau_\nu = 0$  на поверхности

Поглощающий слой толщиной  $\tau$ ;  $I_0$  на нижней границе;

изменение  $dI/dz = -\chi I$ , интенсивность на выходе:  $I = I_0 e^{-\tau}$

$\tau_\nu > 1$  оптически толстая среда — атмосферы звёзд

$\tau_\nu < 1$  оптически тонкая среда

- Геометрическая толщина мала

~ средняя длина свободного пробега фотона  $h \sim l = 1/\chi$

*Солнце*, непрозрачность: b-f ( $\text{H}^-$ ),  $\chi_\lambda = a_\lambda n(\text{H}^-)$ ,

$a_\lambda \sim 10^{-18} \text{ см}^2$ ,  $N \sim 10^{14}-10^{17}$ ,  $n(\text{H}^-) \sim n_{\text{H}} n_e \sim 10^{10}-10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,

$h \sim 500 \text{ км}$ .

# Теория звёздных атмосфер

дает методы моделирования фотосферы (атмосферы) и поля излучения

- Искомые функции:  $T(\tau_\nu)$ ,  $P(\tau_\nu)$ ,  $I_\nu(\tau_\nu, \mu)$

## Основные уравнения статичной, плоско-параллельной фотосферы

$$\frac{P_g}{dz} + \frac{P_R}{dz} = -g\rho(z)$$

$$F_{tot} = F + \Phi_{conv} = \sigma \cdot (T_{эфф})^4$$

$$\mu \frac{dI_\nu(z, \mu)}{dz} = -\chi_\nu(z) I_\nu(z, \mu) + \eta_\nu(z)$$

- гидростат. равновесия,
- лучистого и конвективного равновесия,
- переноса излучения

$$n_i, N_{ion}$$

или

предположение ЛТР:  
по формулам Больцмана-Саха  
при локальных  $T_e$  и  $N_e$

решение ур-ий статистического  
равновесия:

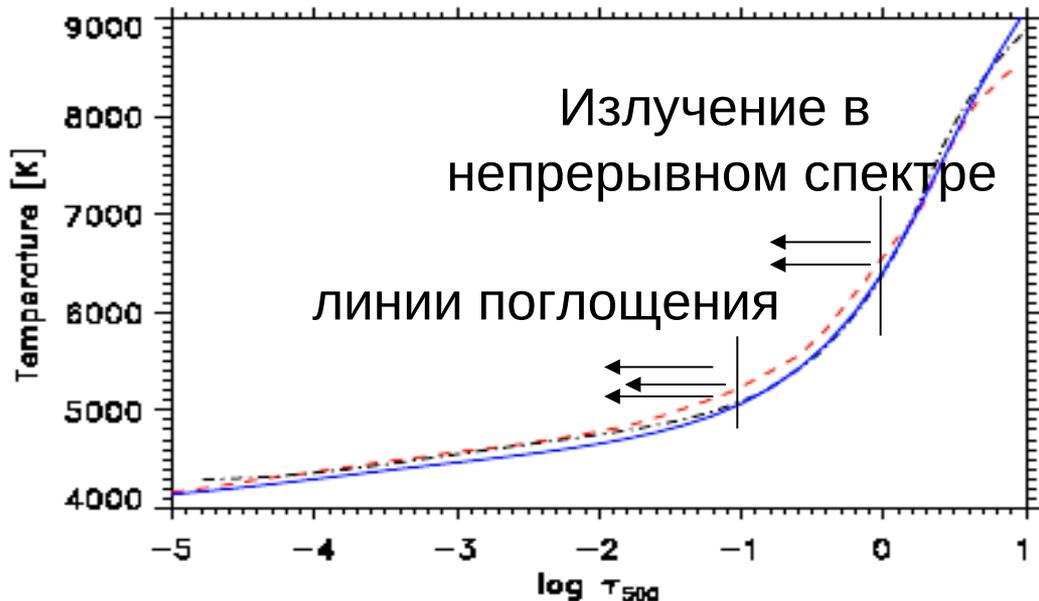
$$\sum_{j \neq i} n_j (R_{ji} + C_{ji}) = n_i \sum_{j \neq i} (R_{ij} + C_{ij})$$
$$i = 1, \dots, NL$$

- Параметры модели атмосферы:  $T_{эфф}$ ,  $\log g$ , химсостав

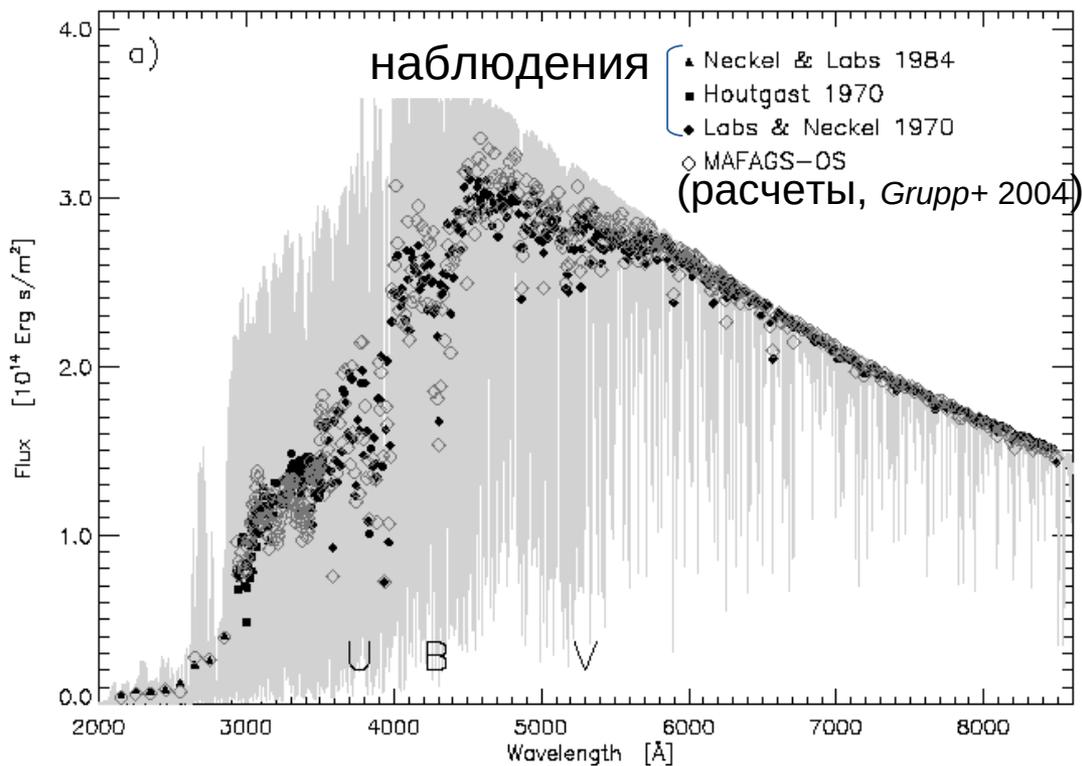
# Солнце

$$T_{\text{эфф}} = 5780 \text{ К}, \log g = 4.44$$

Функция  $T(\tau_{500})$  в модели  
солнечной атмосферы



Излучение на частоте  $\nu$   
выходит с глубины  $\tau_{\nu} \sim 1$



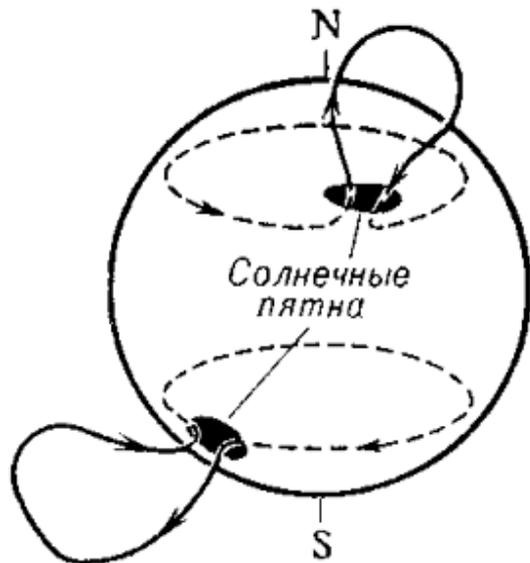
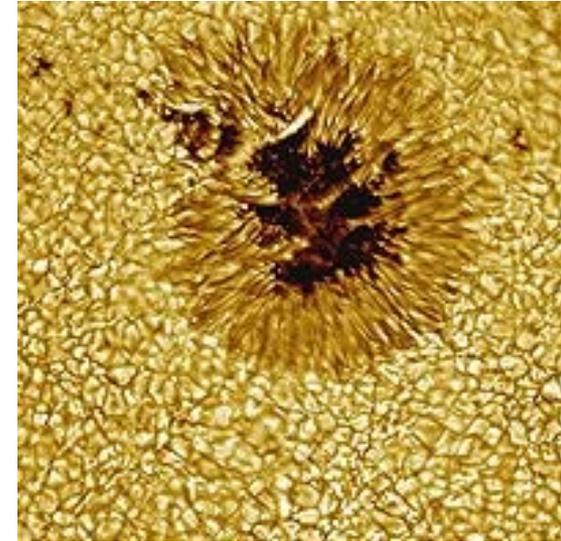
Распределение энергии,  
видимый диапазон и УФ

## Фотосфера – поверхностные структуры

- ✓ **Солнечная грануляция** - выход конвективных потоков

Гранулы:  $\sim 1000$  км, горячее,  $\sim 300$  К,  
движение в-ва вверх,  $\sim 1$  км/с,  
время жизни  $\sim 10$  мин.

- ✓ **Пятна:**  $\sim 40000$  км, тень и полутень,  
 $T \approx 4000-4500$  К,  
время жизни — от неск. дней до месяцев.



Выход магнитных силовых линий  
азимутального поля,  
 $B \sim 3000-4000$  Гс

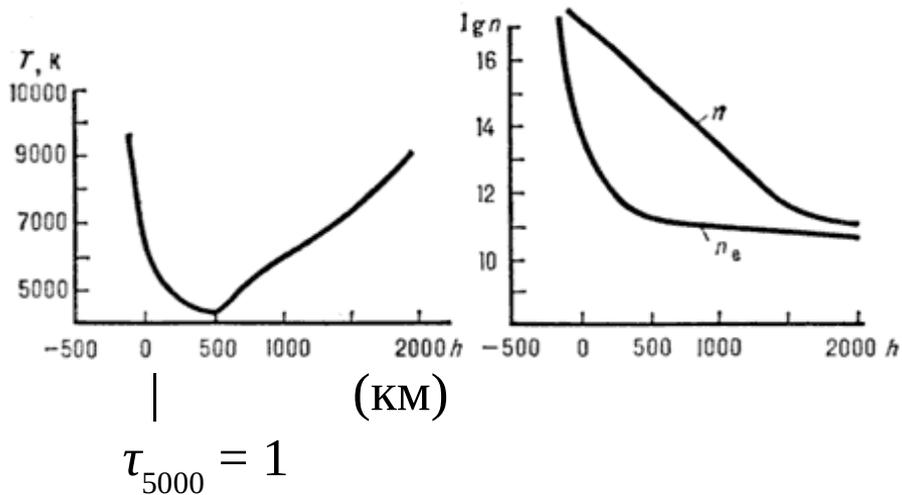
- ✓ **Фотосферные факелы:** области повышенной яркости и магн. поля, корреляция с пятнами.

# Хромосфера

Не видна в визуальных лучах (!)  
из-за низкой плотности.

Наблюдают во время затмений  
или на внезатменном коронографе.

✓ Размеры ~ до 2000 км.



Распределение  $T$ ,  
полной концентрации частиц ( $n$ )  
и электронов ( $n_e$ )

✓ Температурный подъем  
до 10000 К.



Нагрев звуковыми волнами,  
идущими из конвект. зоны.

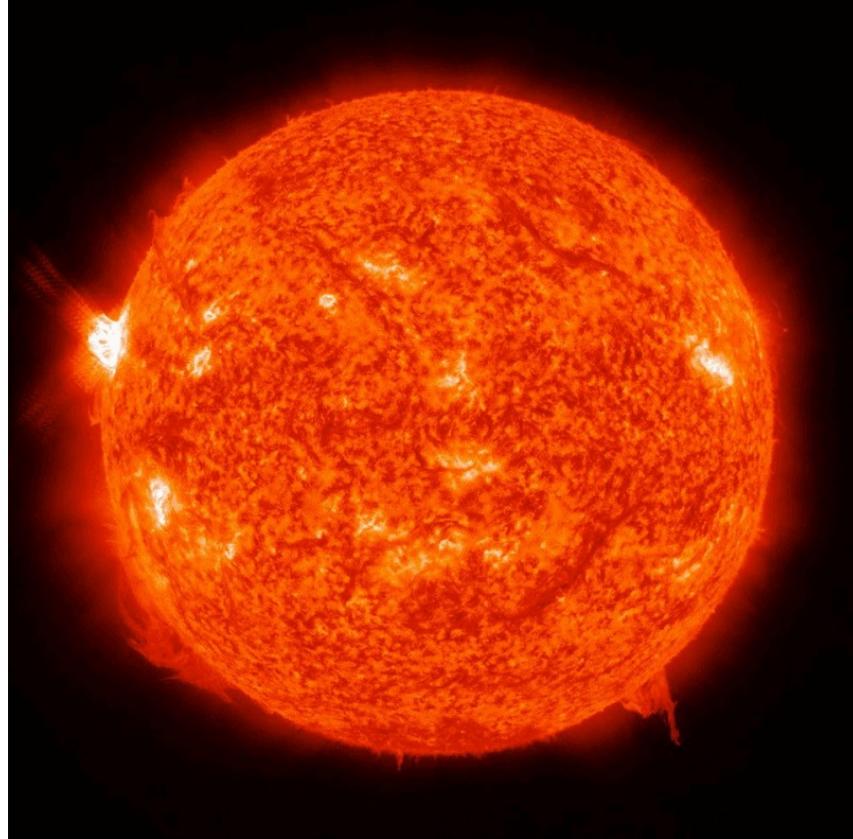


## Хромосферные вспышки

Энергия ~ до  $10^{32}$  эрг

- излучение во всех диапазонах,
- нагрев плазмы:  $T = 10^7 - 10^8$  К,
- ускорение частиц ( $10^8 - 10^9$  эВ),
- кинет. энергия коронального выброса ( $10^{16}$  г,  $V \sim 400$  км/с).

Продолжительность ~ неск.мин.

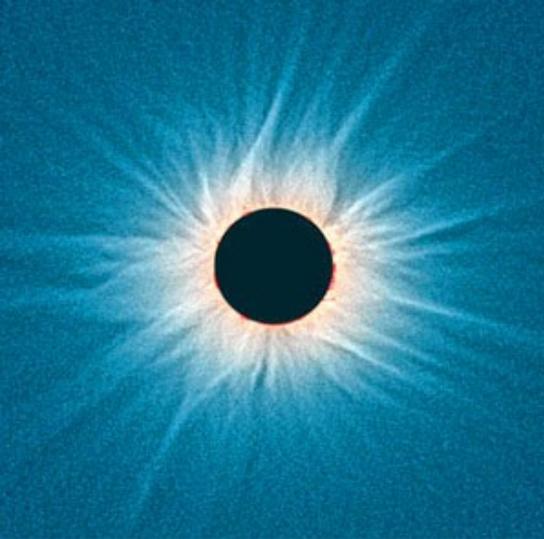


Появление связано с резким изменением *магнитного поля* в хромосфере – всплытие магнитных петель, крутые градиенты, ...  
Остается нерешенной проблемой.

Другие явления в хромосфере.

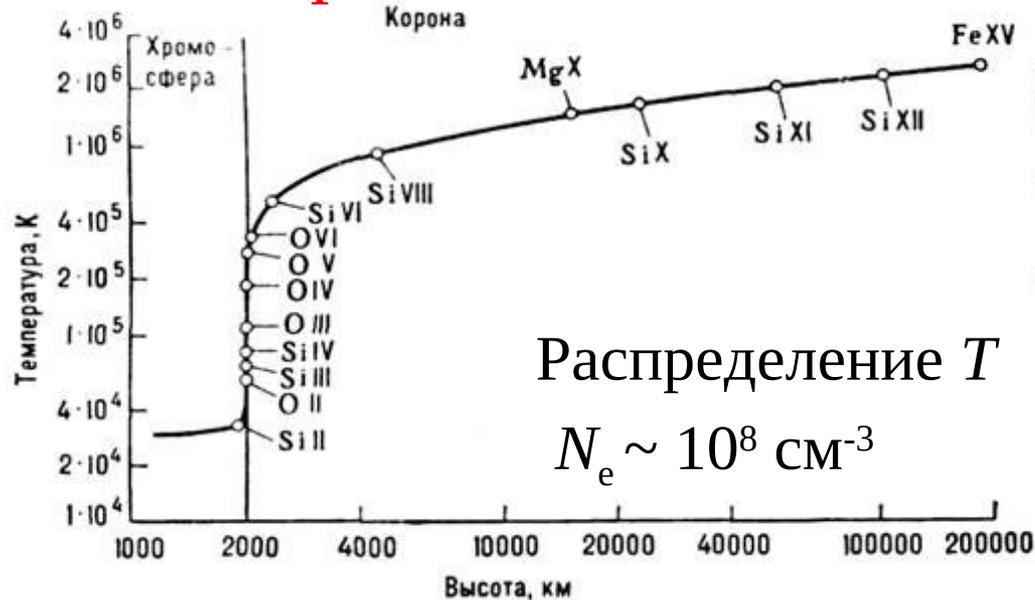
**Флоккулы** – обл. повышенной яркости, часто вокруг пятен.

**Спикулы** – нагретые струи газа.



Полное солнечное затмение 11.08.1999.  
Фото В. Хондырева

## Корона



Источники свечения короны в **видимой** обл. (затмение):

- Рассеянный на  $e^-$  свет фотосферы, поляризация  $\sim 50\%$   
**К-корона**, до  $3 R_{\text{sun}}$  от лимба
- Эмиссионные линии [Fe XIV] 5303 Å, ... - **L-корона**, до  $1 R_{\text{sun}}$
- Дифракция солн. излучения на м/п пыли - **F-корона**, до  $4 R_{\text{sun}}$

**Радио** (дм, м) – тепловое излучение: f-f переходы H, He.

**Рентген** – непрерывное тепл. изл. + линии,  $L_X = 10^{-6} L_{\text{sun}}$

Нагрев короны – диссипация энергии магнитогидродинамических (Альвеновских) волн, возникающих в конвективной зоне Солнца.

## Корональные явления

### Протуберанцы:

$T_e \sim 20000 \text{ К}$ ,  $n_e \sim 10^{10}-10^{11} \text{ см}^{-3}$

высота  $\sim 40000 \text{ км}$ , ширина  $\sim 200\,000 \text{ км}$ ,  
движение вниз, скорости — до  $100 \text{ км/с}$ ,  
время жизни — от неск.нед. до неск.мес.

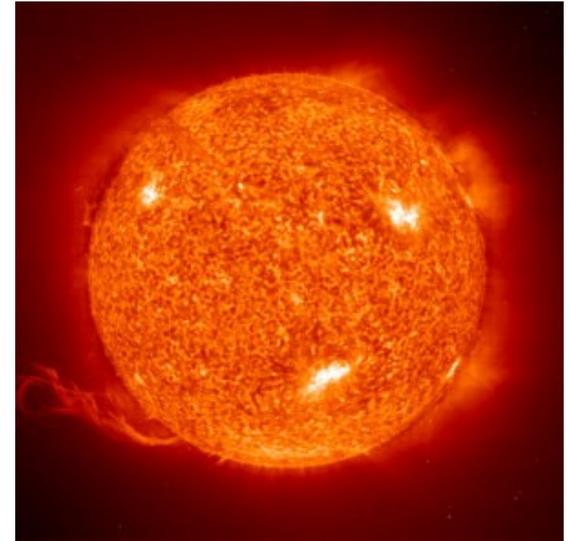
### Корональные дыры:

области пониженной яркости в рентгене.

Связаны с областями открытых линий магнитного поля.

### Корональные выбросы массы

Масса  $\sim 10^{16} \text{ г}$ , скорость  $\sim 400 \text{ км/с}$ , форма петли



## Солнечный ветер

Непрерывный поток плазмы из короны:

p и e (доминируют),  $\alpha$ -частицы ( $\sim 4\%$ ), ионы металлов.

♦ *E. Parker* (1957):

корона не может быть в гидростатическом равновесии,  
должно быть сверхзвуковое истечение  
в межпланетное пространство.

♦ Регистрация: «Луна-1, 2, 3» в 1959; «Маринер-2» в 1962.

Средние характеристики на  $d = 1$  а.е.

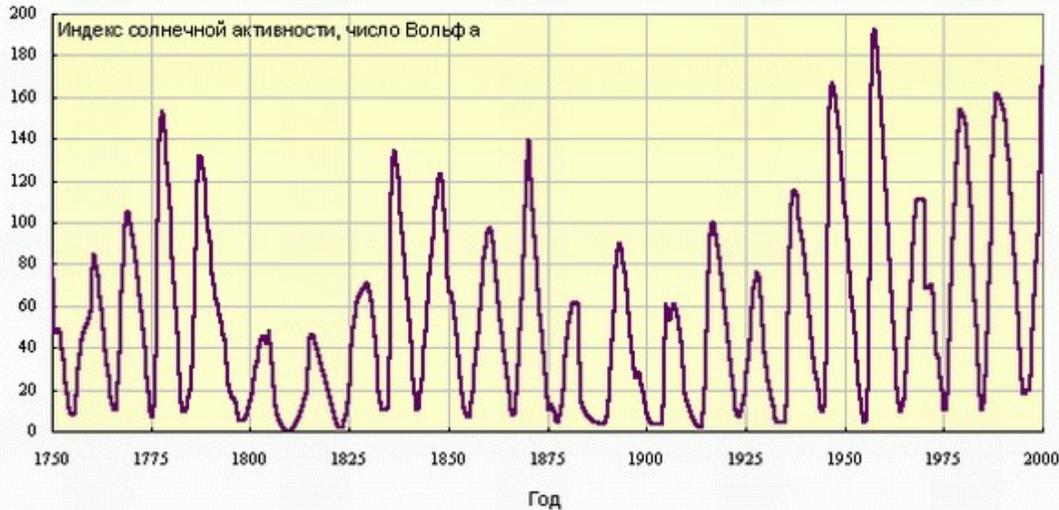
Протоны:  $n = 6 \text{ см}^{-3}$ ,  $T = 50000 \text{ К}$ ,  $V = 400 \text{ км/с}$

Потеря массы:  $2\text{-}3 \cdot 10^{-14} M_{\text{sun}} / \text{год}$

На стационарный процесс истечения накладываются  
корональные выбросы массы!

# Солнечная активность

*H. Schwabe* (1843): кол-во пятен на Солнце меняется с  $P \sim 10$  лет.



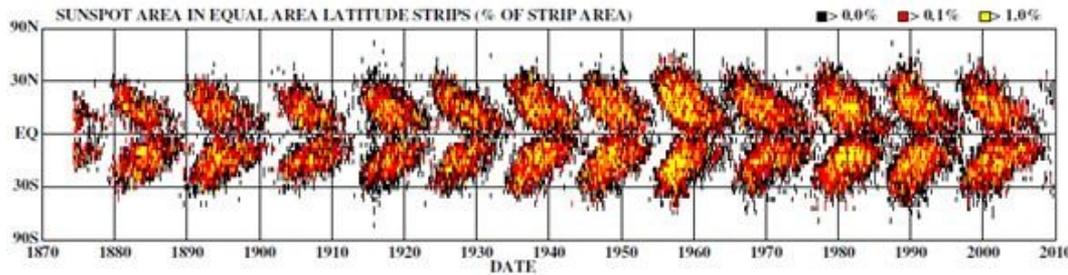
Число *Вольфа*:

$$W = 10g + f$$

$g$  — число групп пятен

$f$  — полное число пятен

*R. Wolf*: цикл с  $P \approx 11$  лет



Закон *Шнёрера* (*G. Spörer*):

в начале 11-летнего цикла

пятна на  $\varphi \sim \pm 30^\circ$ , затем

смещение  $\varphi$  к экватору

(1860-е)

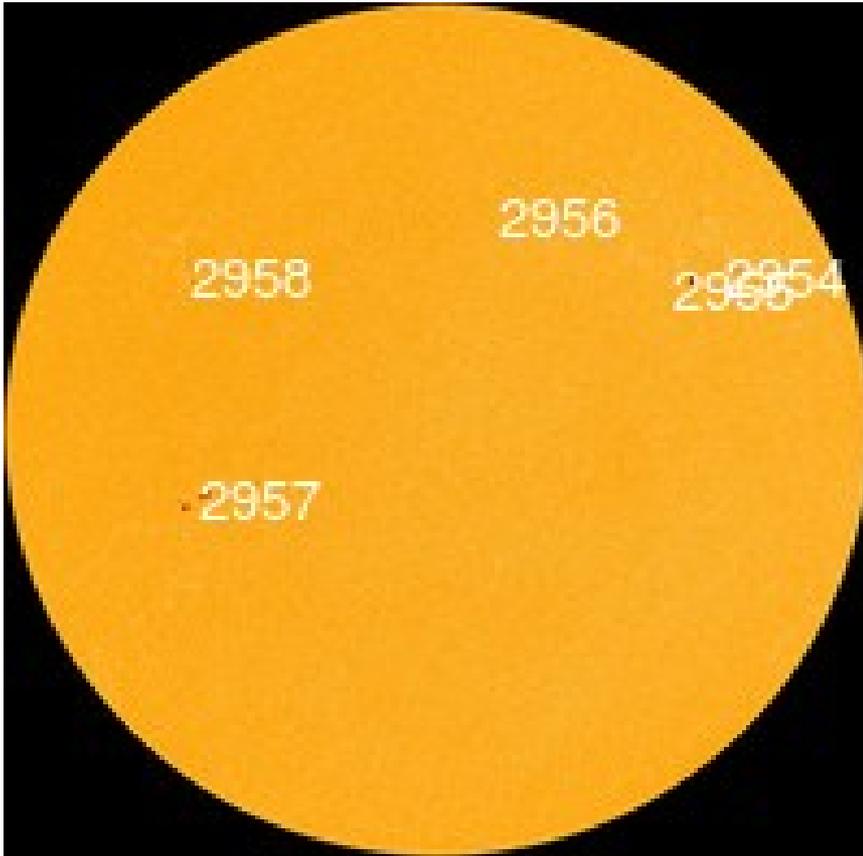
«Бабочки» *Маундера* (*E. Maunder*):

тот же вывод (1904).

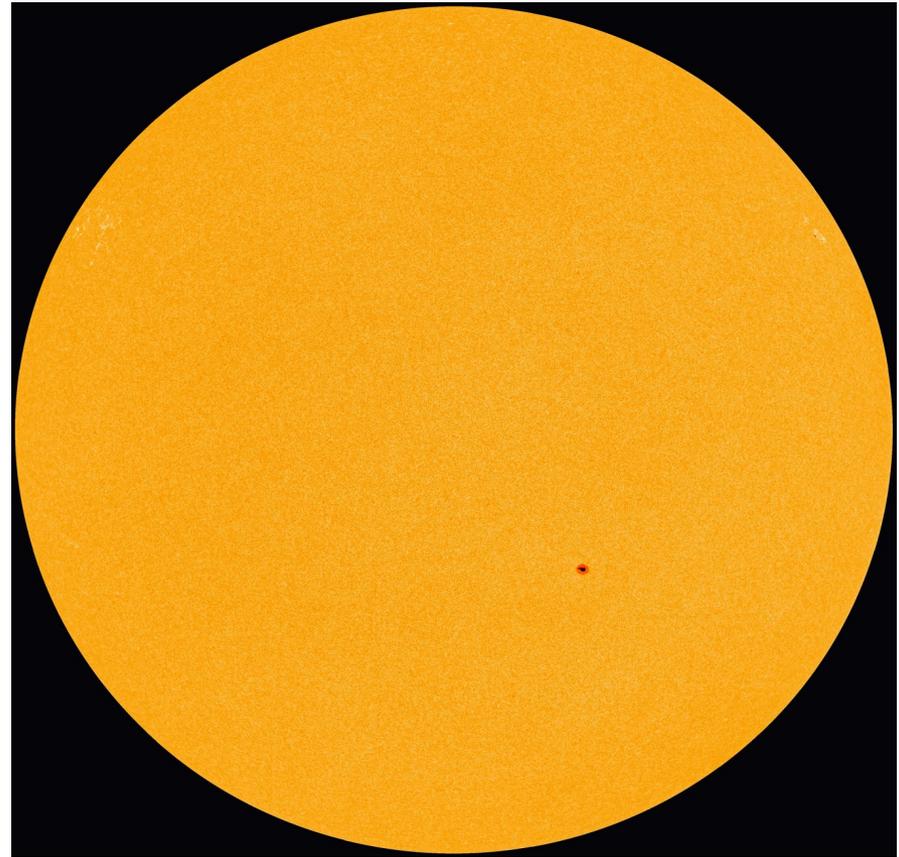
В начале цикла направление магнитного поля меняется

на противоположное → **22-летний цикл образования пятен.**

2018-2019 — минимум пятенной активности.  
Максимум — 2012-2013 годы.



2 марта 2022,  
число Вольфа - 62.  
<http://www.spaceweather.com/>



21 октября 2020  
Число Вольфа - 11.

## Солнечная активность и солнечный цикл

- ✓ Магнитное поле: каждый 11-лет. цикл - смена направления дипольной составляющей и азимутального поля.

Максимум пятен = максимум активности

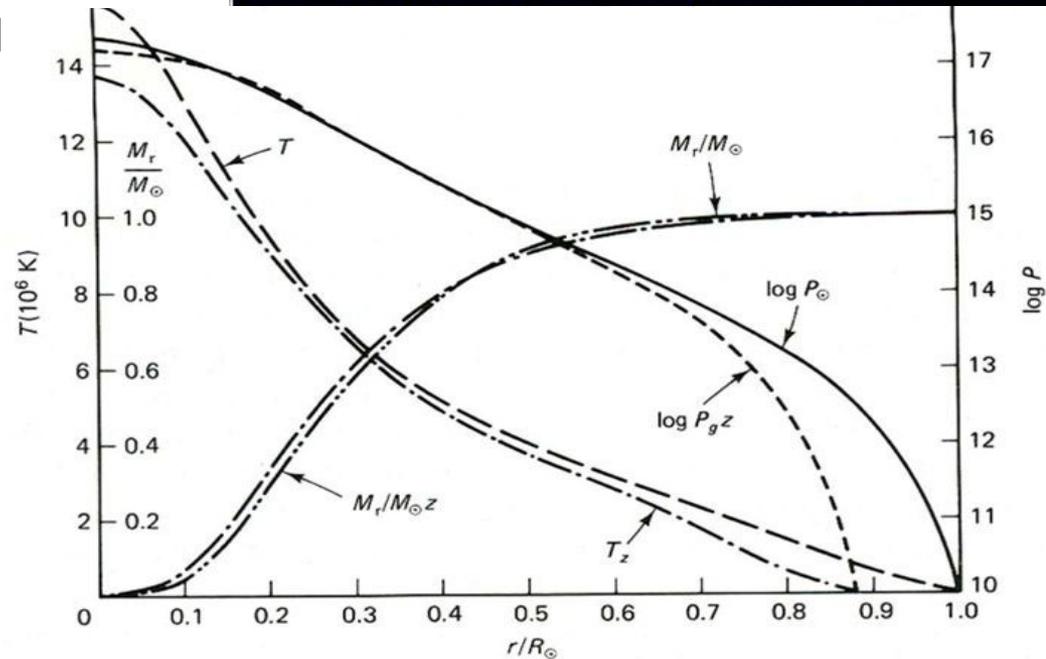
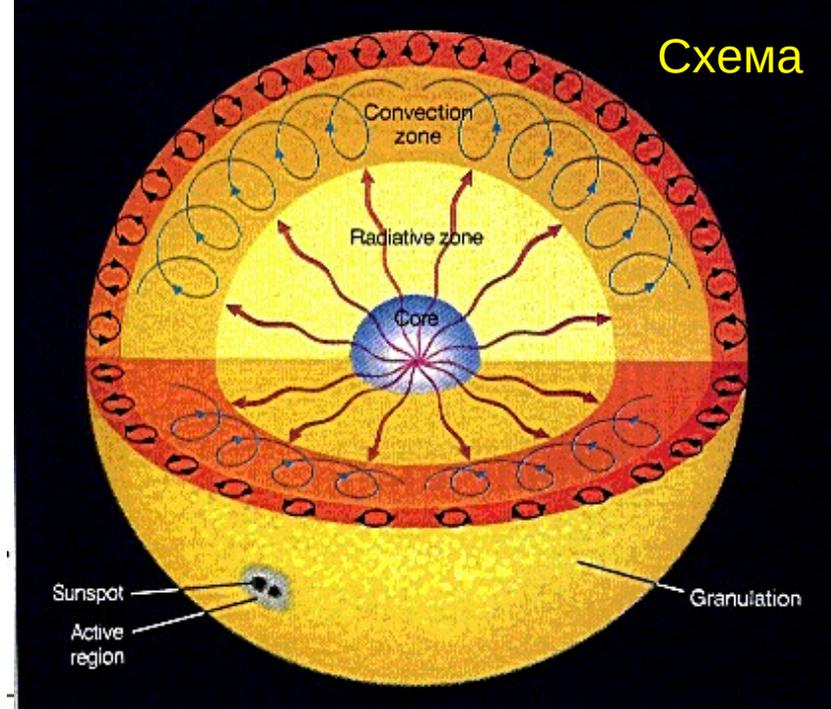
- ✓ Фотосферные факелы, корреляция с пятнами.
- ✓ Увеличение светимости Солнца (пятна + факелы): до 0.1%
- ✓ Вспышки: рост числа и мощности.
- ✓ Протуберанцы: рост числа.
- ✓ Корона: изменение размеров, асимметрия.
- ✓ Увеличение потока в радио и рентген. диапазонах.

# Строение Солнца

- Ядро,  $R \sim 0.3 R_{\text{sun}}$  :  
p-p цикл,  $T_c = 15.7$  млн. К
- Лучистая зона, до  $0.7 R_{\text{sun}}$  :  
поглощение - ионы O, C, Ne, N, ..
- Конвективная зона

- Магнитное поле мало и не влияет на структуру Солнца.

Распределение  $T$ ,  $P$  и массы вдоль радиуса молодого ( $z$ ) и современного Солнца.



# Наблюдательная проверка: солнечные нейтрино

**Теория**, p-p цикл:  $4 p \rightarrow {}^4\text{He} + 2 e^+ + 2 \nu_e$  ← Основной источник, другие на порядок слабее

## Наблюдения на нейтринных телескопах

- *Davis*+ 1968: ~ 1/3 от потока  $\nu_e$  в модели;

### Почему ?

*Б. Понтекорво* (1957): идея нейтринных осцилляций.

*Михеев, Смирнов* (1985): переход  $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$  и  $\nu_\mu$

в солнечном и межпланетном веществе.

- 1998, Super-Kamiokande (Япония),

2001, Sudbury (Канада):

$(\nu_e + \nu_\tau + \nu_\mu)$  – согласие с моделью;

*T. Kajita, A.B. McDonald* – Нобелевская премия 2015 г.  
за открытие нейтринных осцилляций.

- *Bergstrom et al.* (2016)
- *Borexino collaboration* (2018, 2020)

поток нейтрино, теория / наблюдения =  $0.99 \pm 0.02$ .

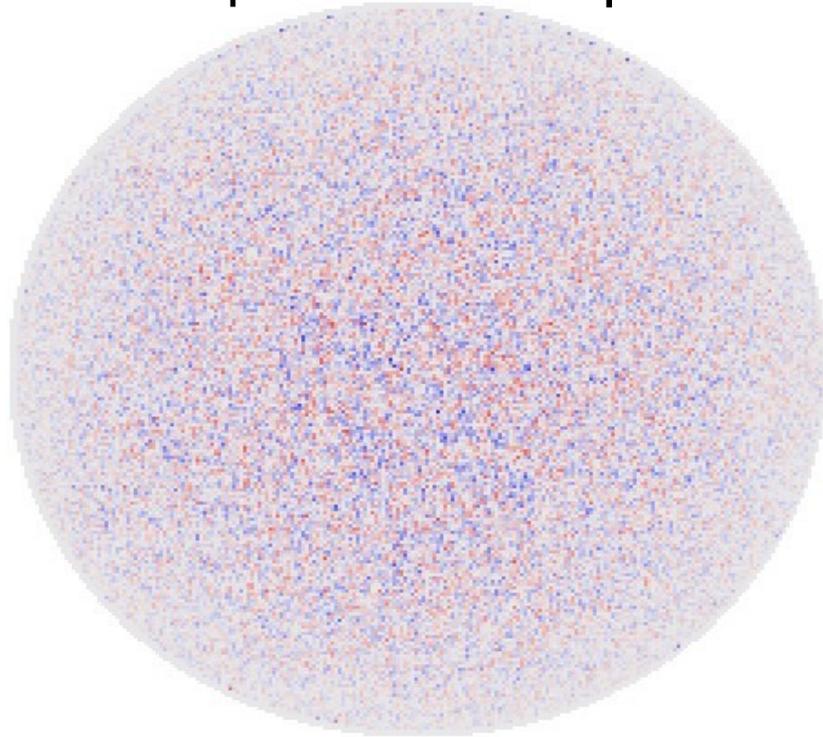
Поток нейтрино чувствителен к  $T_c$ :  
изменение  $T_c$  на 3 % изменяет поток нейтрино в 2 раза.



Модель ядра Солнца рассчитана правильно!

## Наблюдательная проверка: гелиосейсмология

*Leighton*+1962: Солнце, 5-мин. колебания – по доплер. смещениям спектр. линий,  $\Delta \sim 100\text{-}200$  м/с.



Измерения скорости 5-мин.  
колебаний

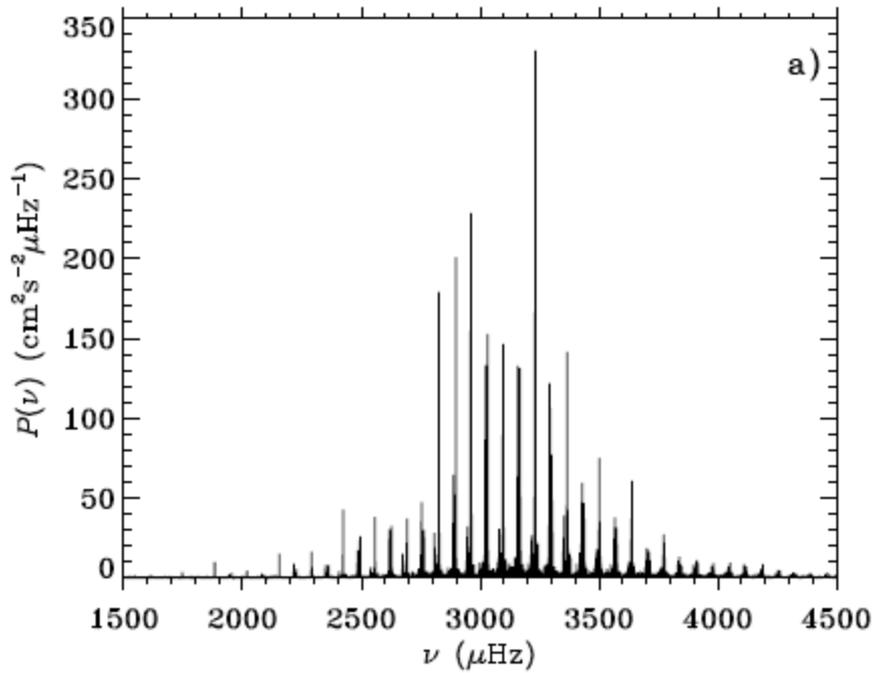
Красный цвет – движение  
от наблюдателя,  
синий – к наблюдателю.

Колебания вызываются  
звуковыми волнами,  
возникающими в конвективной  
зоне Солнца в результате  
флуктуаций газового давления  
– p-моды.

Отражаются от пов-ти, уходят  
вглубь и в зав-ти от частоты  
отражаются на разных глубинах.  
Взаимодействие идущих вверх  
и отраженных волн →

СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ.

Наблюдательные данные: доплер. смещения линий,  
колебания яркости на диске.



Спектр мощности колебаний  
(по спектр.наблюдениям).  
(*Elsworth+1995*)

Анализ частот дает  
наблюдаемое распределение  
плотности и скорости звука  
(температуры)  
вдоль радиуса (профили).

Теоретические распределения  
 $T(r)$ ,  $\rho(r)$  зависят от содерж. O!

O:  $\sim 60\%$  всех атомов с  $Z \geq 3$

*Grevesse, Sauval* (1998, GS98):

$$\log \varepsilon(\text{O}) = 8.83$$

*Asplund+* (2009, AGSS09):

$$\log \varepsilon(\text{O}) = 8.69$$

# Теория – наблюдения

## Профиль скорости звука (с)

Модели Солнца с разным химсоставом ( $Z$ )

- GS98 (*Grevesse, Sauval* 1998):  
 $X = 0.740$ ,  $Y = 0.243$ ,  $Z = 0.017$   
согласие с наблюдениями  
в пределах  $1-2 \sigma$ !

- AGSS09met (*Asplund+* 2009):  
 $Z = 0.0134$

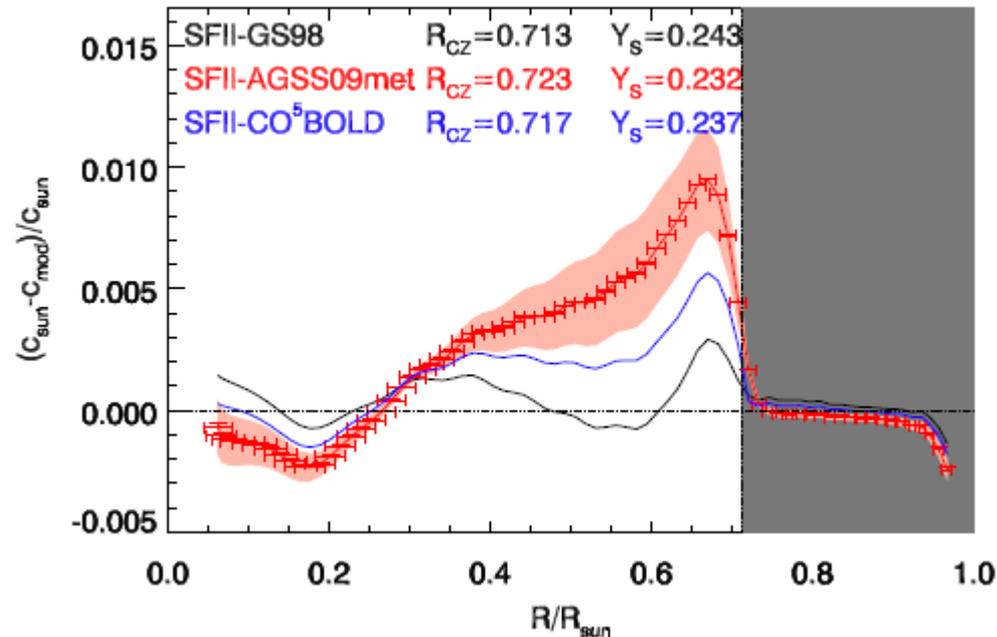
расхождение с набл.  $> 5 \sigma$ .

- CO<sup>5</sup>BOLD (*Caffau+* 2011):  
 $Z = 0.0153$

расхождение с набл.  $\sim 3 \sigma$ .

? Уточнение содержания O

? Уточнение сечений ф.-ион.



*Serenelli*, 2016, *Eur.Phys.J A*52, 78

По данным гелиосейсмологии:

$R_{CZ} = 0.713 \pm 0.001$  (*Basu+* 1997)

$Y_s = 0.2485 \pm 0.0034$  (*Basu+* 2004)

Измерения сечений фотоионизации ионов Fe.

Лаборатория Sandia (США)

- $T$  и  $N_e$  – близки к условиям на нижней границе конвективной зоны Солнца.
- Сечения больше, чем ОР, OPAL на 60-65 %.  
(*Nagayama et al.* 2014)
- Общая непрозрачность выросла на 7 %.  
Можно согласовать теорию и наблюдения,  
если содержание элементов из *Caffau+* (2011).  
(*Serenelli*, 2016)

# Дифференциальное вращение по наблюдениям колебаний Солнца: MDI/SOHO и др.

- Конвективная зона: сохраняется дифференциальное вращение.

- Зона лучистого переноса: ~ твердотельное вращение.

