

# **Светимость Солнца на Главной последовательности**

**Стандартная модель и возможные вариации**

С.В.Аюков, В.А.Батурин, А.Б.Горшков, А.В.Орешина

ГАИШ МГУ

# Современная светимость Солнца и ее измерение

Метод измерений:

болометры на космических аппаратах

Сложности:

- калибровка болометров, в т.ч. между экспериментами
- изменение светимости с солнечным циклом и долгосрочное

Космические измерения:

HF on NIMBUS 7 (с 1978), ACRIM I on SMM, ACRIM II on UARS,  
VIRGO on SOHO, ACRIM III on ACRIMSat, TIM on SORCE (с 2003)

$$L = 3.844 (1 \pm 0.004) \cdot 10^{33} \text{ эрг/сек}$$

(Bahcall, Pinsonneault, Wasserburg 1995)

# Возраст Солнца

Метеоритные определения возраста:

$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} + ^{235}\text{U}/^{238}\text{U} + \text{initial Pb} \rightarrow \text{возраст}$

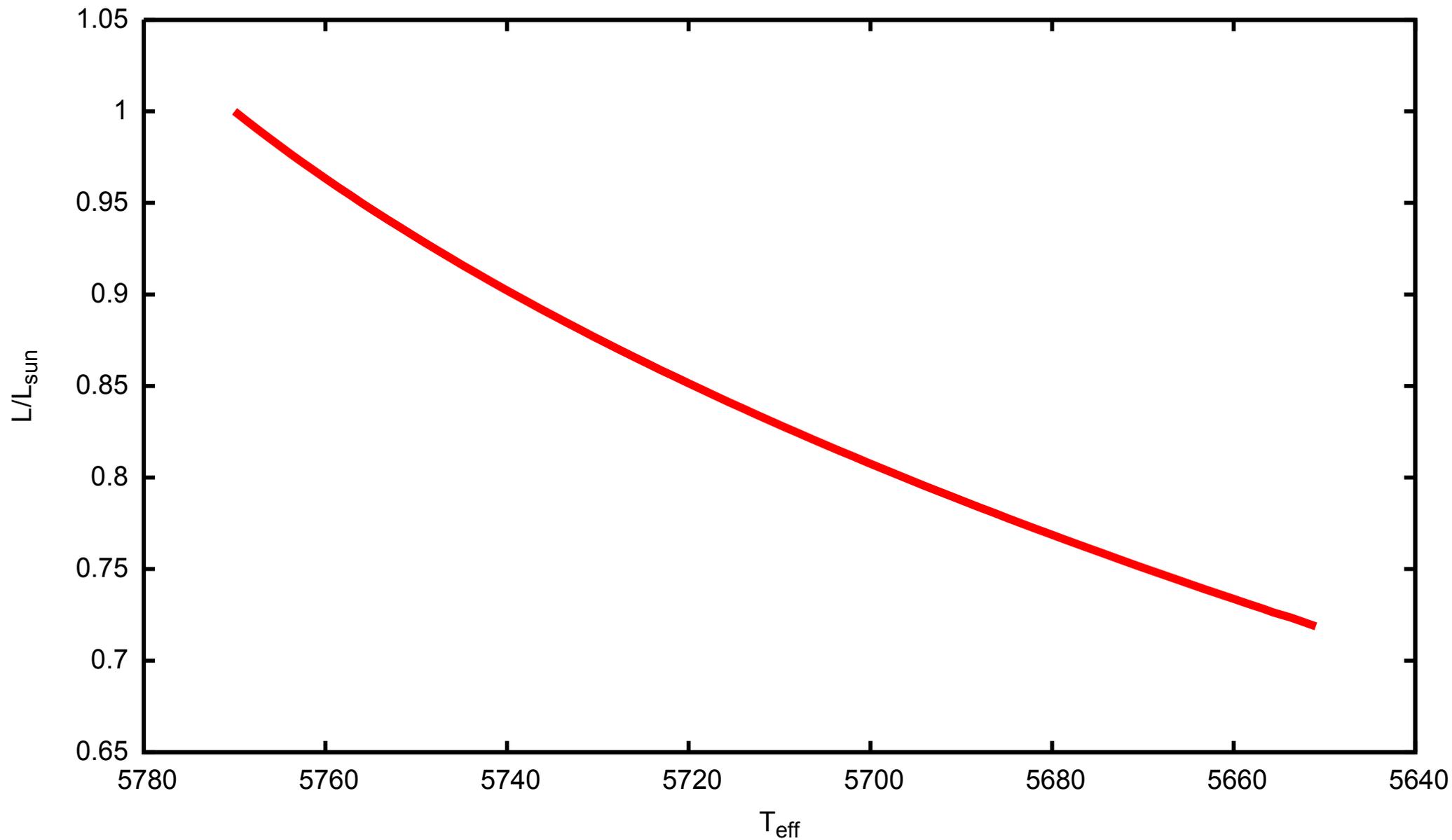
**4.57±0.02 млрд. лет**

Эволюция до Главной последовательности:

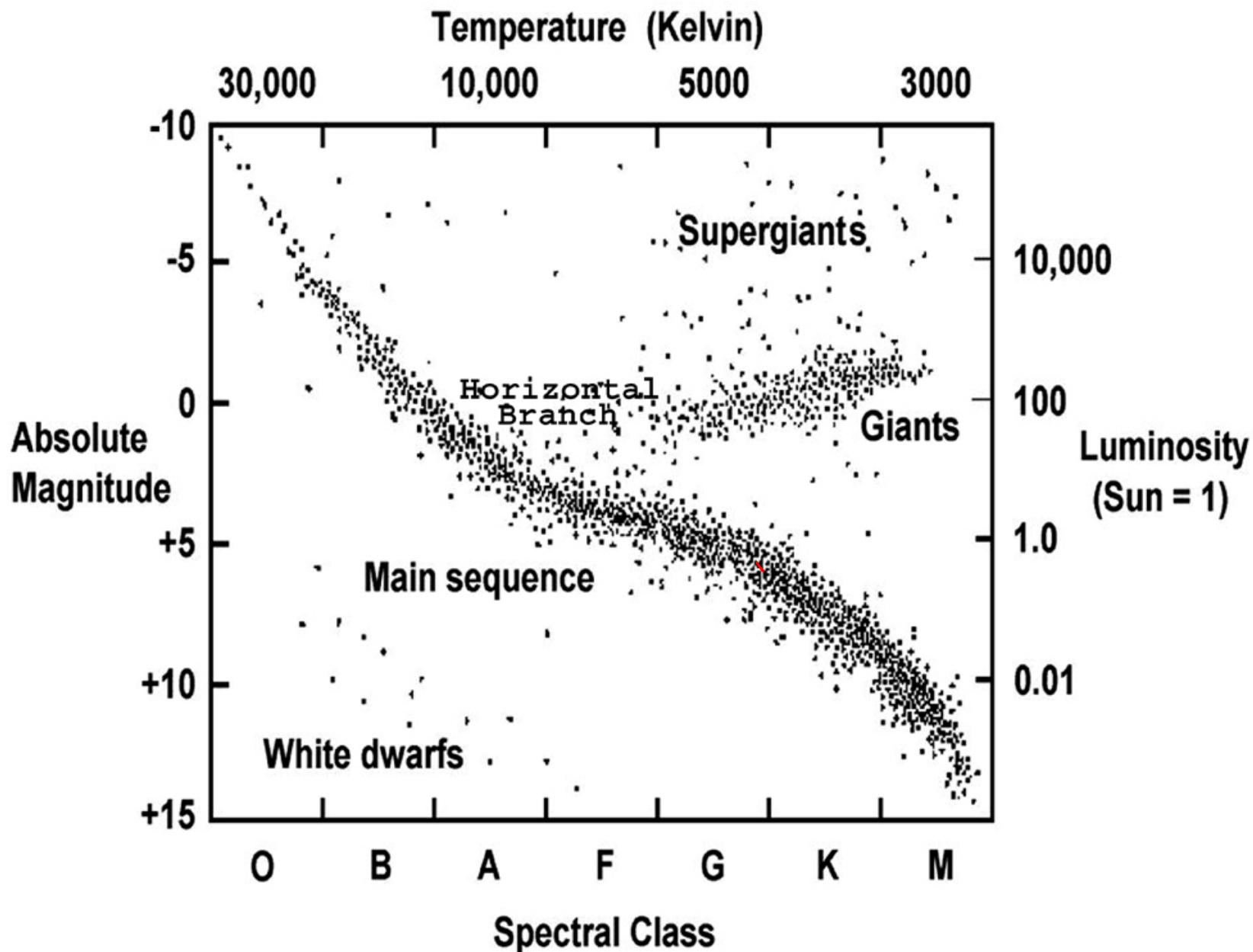
еще **0.03 млрд. лет**

Итого **4.6 млрд. лет**

# Эволюционный трек Солнца на ГП



# Диаграмма Герцшпрунга-Ресселла



# Faint Young Sun Paradox

*C.Sagan, G.Mullen, July 1972*

“Earth and Mars: Evolution of Atmospheres and Surface Temperatures”

Баланс теплообмена для планеты:

$$1/4 S \cdot (1-A) = e \sigma T^4$$

$A$  — альбеда,  $e$  — излучательная способность в ИК,  $S$  — солнечная постоянная,  $T$  — температура поверхности Земли.

Если

- 1)  $A$ ,  $e$  постоянны в течение времени жизни Земли
- 2)  $S$  меняется в соответствии со светимостью

то

**2.3 млрд. лет назад океаны должны были замерзнуть**

# Возможные пути решения парадокса

## 1) Солнечная постоянная

- эволюция шла по-другому;
- значительная потеря массы 7% (+ Земля была ближе к Солнцу)

## 2) Земля

- излучательная способность Земли раньше была меньше (другие парниковые газы?)

## 3) Что-то еще

- гравитационная постоянная менялась со временем...

# Почему растет светимость?

1. Водород превращается в гелий  $\rightarrow$  увеличивается молекулярный вес  $\mu$
2. Уменьшение  $\mu \rightarrow$  уменьшение давления
3. Уменьшение давления  $\rightarrow$  сжатие звезды
4. Сжатие  $\rightarrow$  рост давления вследствие повышения концентрации массы
4. Рост давления  $\rightarrow$  рост температуры  $T$  и плотности  $\rho$  для поддержания гидростатического равновесия
5. Рост  $T$  и  $\rho \rightarrow$  увеличение скорости ядерных реакций (несмотря на уменьшение количества топлива)
6. Увеличение скорости ядерных реакций  $\rightarrow$  увеличение энерговыделения

# Нестандартные модели Солнца

Все модели массой  $1M_{\odot}$ ,  $R=R_{\odot}$ ,  $L=L_{\odot}$ , возраст 4.6 млрд. лет

1. Полное перемешивание:

равномерное распределение гелия по звезде, уравнивание молекулярного веса

2. Увеличенное/уменьшенное сечение реакции  $p+p$

изменение ключевой величины в ядерных реакциях

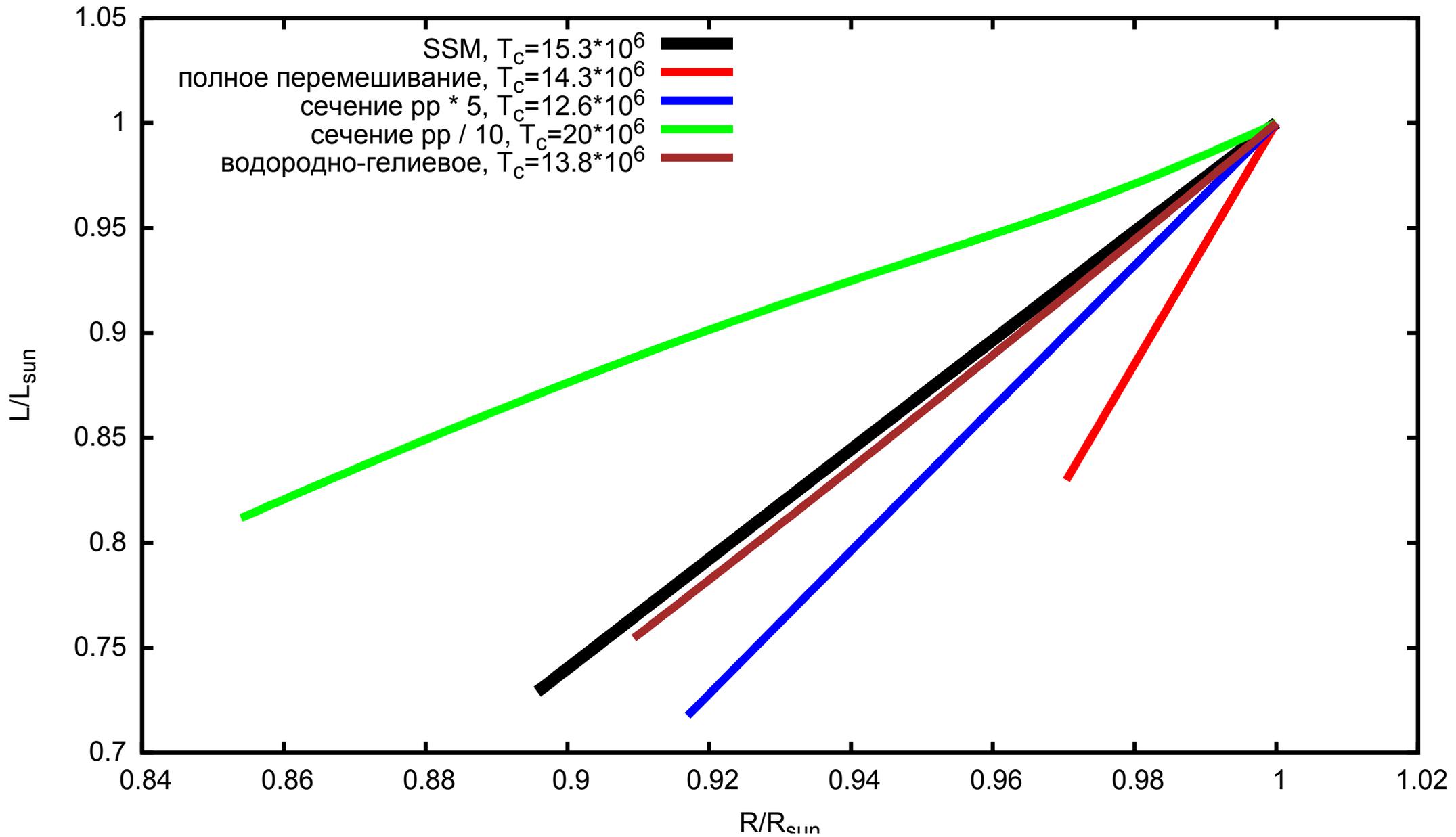
3. Солнце без тяжелых элементов (водород + гелий)

что будет?

Простая проверка моделей: *центральная температура*

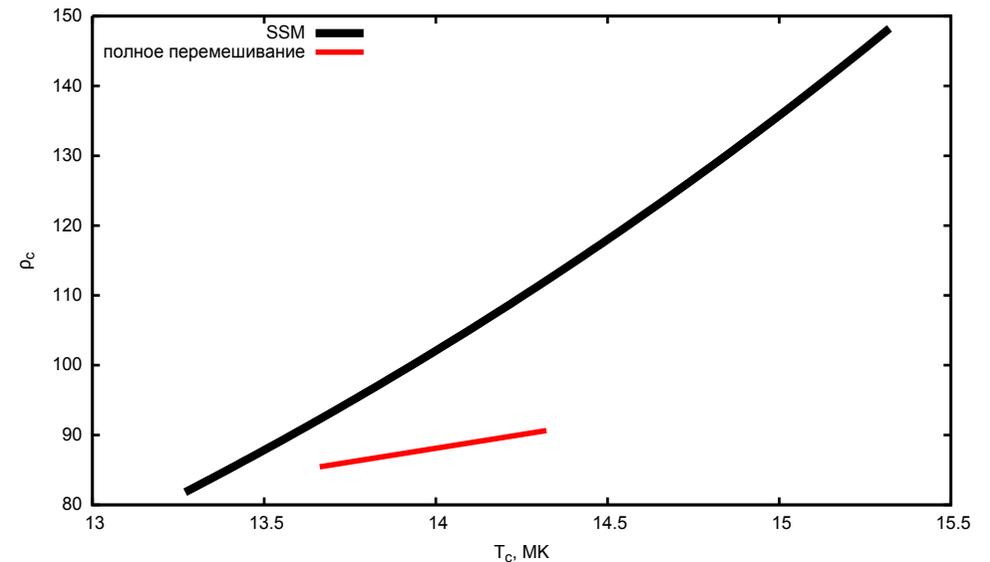
(поток нейтрино от реакции распада бора-8)

# Нестандартные модели Солнца



# Модель Солнца с полным перемешиванием

- замедленное изменение всех параметров;
- низкая центральная температура и низкий поток борных нейтрино (в 8 раз меньше наблюдаемого);
- в начале стадии ГП светимость составляла 83% от современной, что достаточно для того, чтобы океаны не замерзали;
- наблюдательным данным о внутреннем строении **не соответствует!**



# Заключение

- у всех звезд (включая Солнце) растет светимость во время пребывания на Главной последовательности из-за увеличения молекулярного веса вещества в ядре
- светимость Солнца в начале стадии Главной последовательности была 70% от современной
- проблема “тусклого Солнца” пока не решена!