

Эволюционная диффузия химических элементов в недрах Солнца

А.Б.Горшков, В.А.Батурин

ГАИШ МГУ им. М.В.Ломоносова

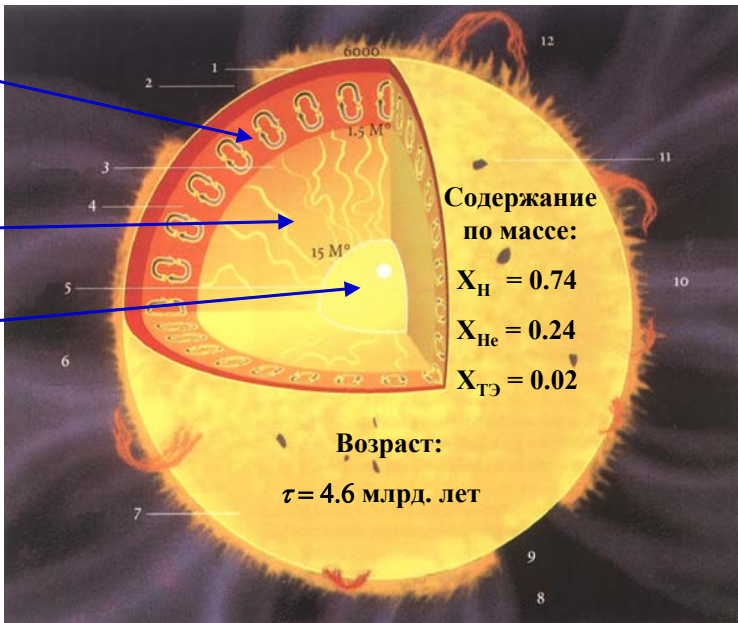


Солнце

Конвективная зона

Лучистая зона

Ядро



Диффузия – стремление на микроскопическом уровне компонент смеси к равновесию

- **Диффузия – механизм изменения химического состава (наряду с ядерными реакциями)**
- Возникает в отсутствие равновесия в системе, стремится привести систему в равновесие
- Обязательно наличие в системе частиц двух (или более) сортов.
- Диффузию вызывают:
$$\nabla T, \nabla p, \nabla N, \dots$$
- Силы трения в среде – противодействуют диффузии

Постановка задачи

- Изучить вклад различных механизмов диффузии
- Решить уравнение диффузии для тяжелых элементов как малой примеси к смеси $\text{H} + \text{He} + e^-$, т.е. найти $X_{T\text{Э}}(r,t)$
 - а) термодинамическая модель задана изначально в виде $T(r,t)$, $p(r,t)$ и т.д. (эволюционный трек) и не меняется в ходе вычислений
 - б) имеется разрыв коэффициента диффузии на границе конвективной зоны (трактует конвективную зону как область бесконечно быстрой диффузии)

Классическое уравнение диффузии

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \nabla J, \quad J = \rho V u$$

u – массовая доля частиц одного сорта в смеси,

ρ – плотность [г/см³],

J – диффузионный поток [г/см²/с],

V – скорость диффузионного потока [см/с]

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \Delta u$$

D – коэффициент диффузии [см² с⁻¹]

Начальное
и граничное
условия

$$u \Big|_{t=0} = u_0(x)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = f(t)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=a} = g(t)$$

Уравнение диффузии

(в формулировке Michaud & Proffitt, 1993)

В случае сферической симметрии для i -го элемента в сопутствующей системе отсчета:

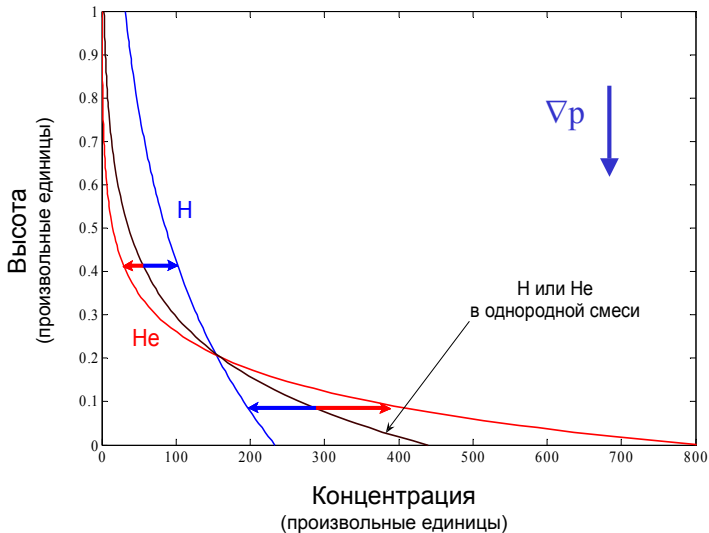
$$\frac{d X_i}{d t} = - \frac{1}{\rho r^2} \frac{d}{d r} (\rho r^2 V_i X_i)$$

для водорода в смеси H+He:

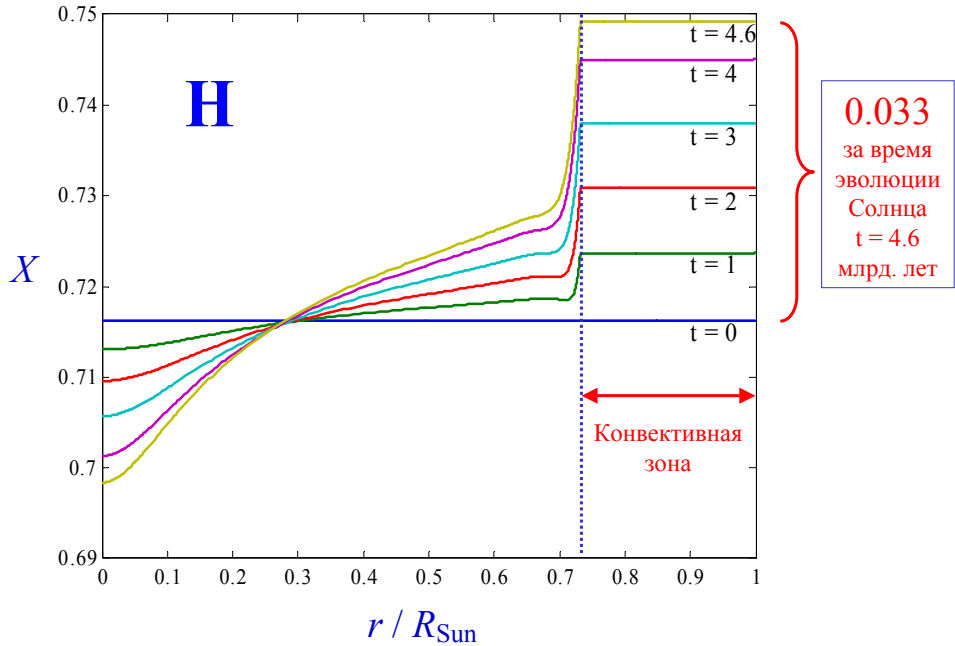
$$V_H = - \frac{B T^{5/2}}{\rho \ln \Lambda (0.7 + 0.3 X)} \left[\left(\frac{5}{4} + \frac{9}{8} \frac{d \ln T}{d \ln p} \right) (1 - X) \frac{d \ln p}{d r} + \frac{(3 + X)}{(1 + X)(3 + 5 X)} \frac{d \ln X}{d r} \right]$$

$$B = \frac{15}{16} \sqrt{\frac{0.4 m_0}{\pi}} \frac{k^{5/2}}{e^4} \quad X \equiv X_H \quad \ln \Lambda = -19.95 - (\ln p + \ln(X+3))/2 - 3 \ln T / 2$$

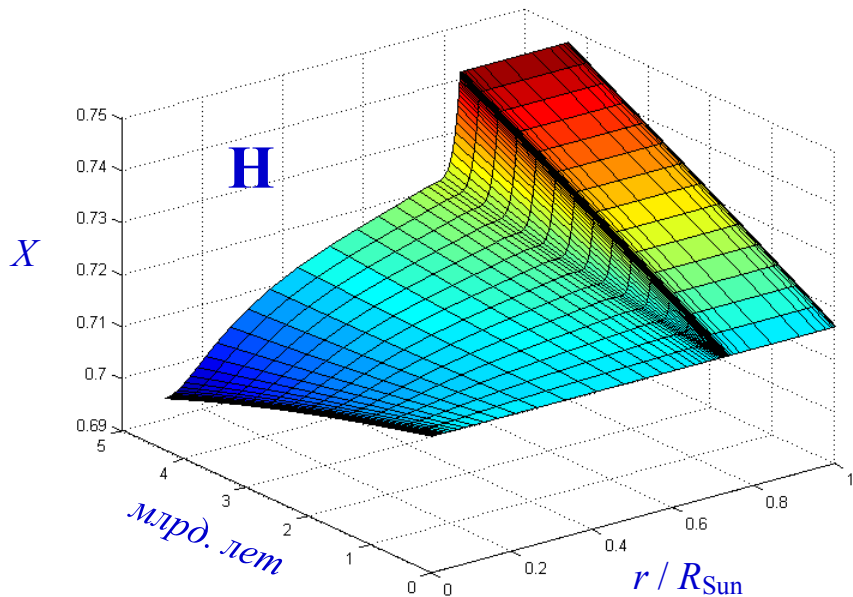
Бародиффузия ($\sim \nabla p$): каждый элемент стремится к «своему» распределению по высоте



Водород диффундирует в конвективную зону



Водород диффундирует в конвективную зону



Тяжелые элементы (ТЭ)

| | O | C | Ne | N | Si | Mg | Fe | S | Ar | Al | Ca |
|-----------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Z_i | 8 | 6 | 10 | 7 | 14 | 12 | 26 | 16 | 18 | 13 | 20 |
| A_i | 16 | 12 | 20 | 14 | 28 | 24 | 56 | 32 | 40 | 27 | 40 |
| $X_i/X,$ 10^{-4} | 7.8 | 3.7 | 1.3 | 0.98 | 0.37 | 0.40 | 0.33 | 0.17 | 0.035 | 0.031 | 0.024 |

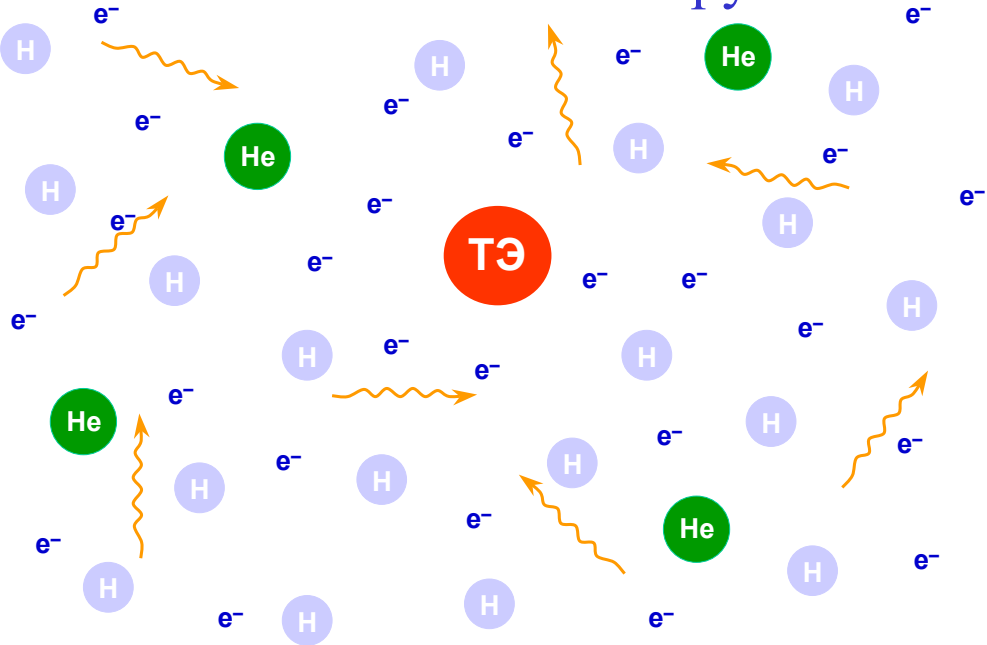
**Расчеты – отдельно для каждого элемента
в предположении, что:**

ТЭ

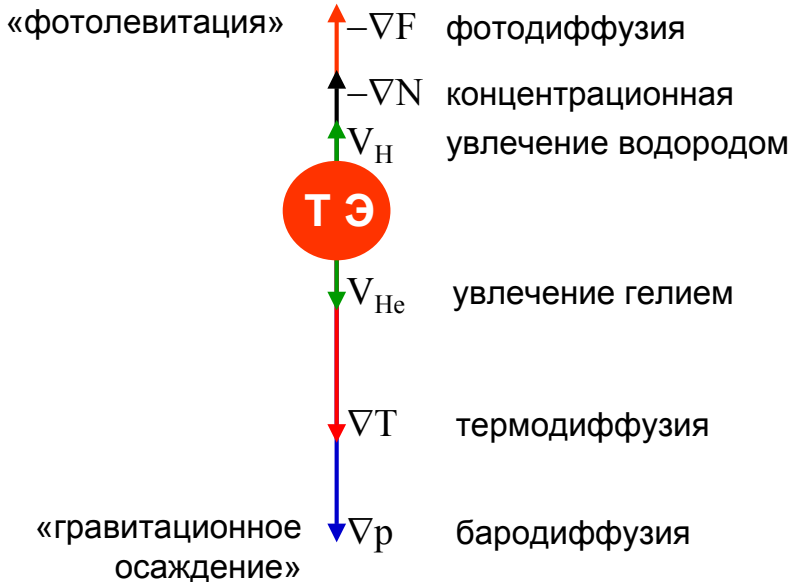
малая примесь к смеси
H + He

начальное содержание
= 0.02 по массе

Тяжелый элемент и его окружение



Механизмы диффузии



Скорость диффузионного движения тяжелых элементов в смеси водород-гелий

$$V_i = -\frac{2BT^{5/2}}{\sqrt{5\rho}Z_i^2} \left[\frac{d}{dr} \left\{ \ln \left[\frac{X_i}{5X+3} \left(\frac{1+X}{5X+3} \right)^{Z_i} \right] \right\} + \left[1 + Z_i - A_i \left(\frac{5X+3}{4} \right) \right] \frac{d \ln p}{dr} \right]$$

$$+ \frac{0.54BT^{5/2}(4.75X + 2.25)}{\rho(\ln \Lambda_{xy} + 5)} \frac{d \ln T}{d \ln r}$$

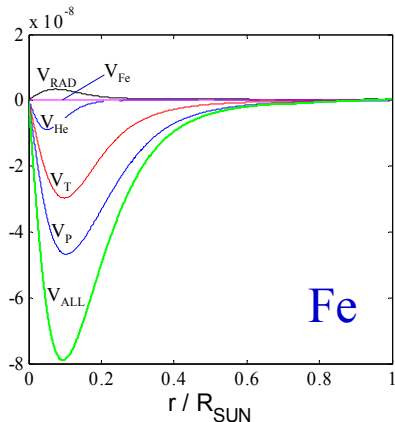
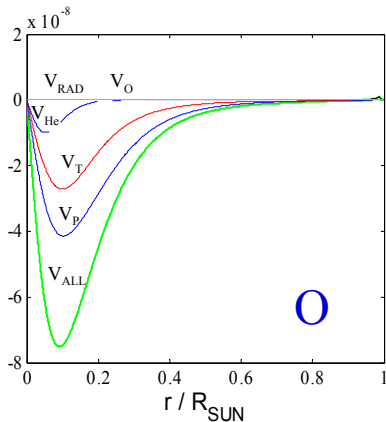
$$+ X V_H \frac{(\sqrt{A_{ix}} C_{ix} + \sqrt{A_{iy}} C_{iy})}{X(\sqrt{A_{ix}} C_{ix} - \sqrt{A_{iy}} C_{iy}) + \sqrt{A_{iy}} C_{iy}}$$

H

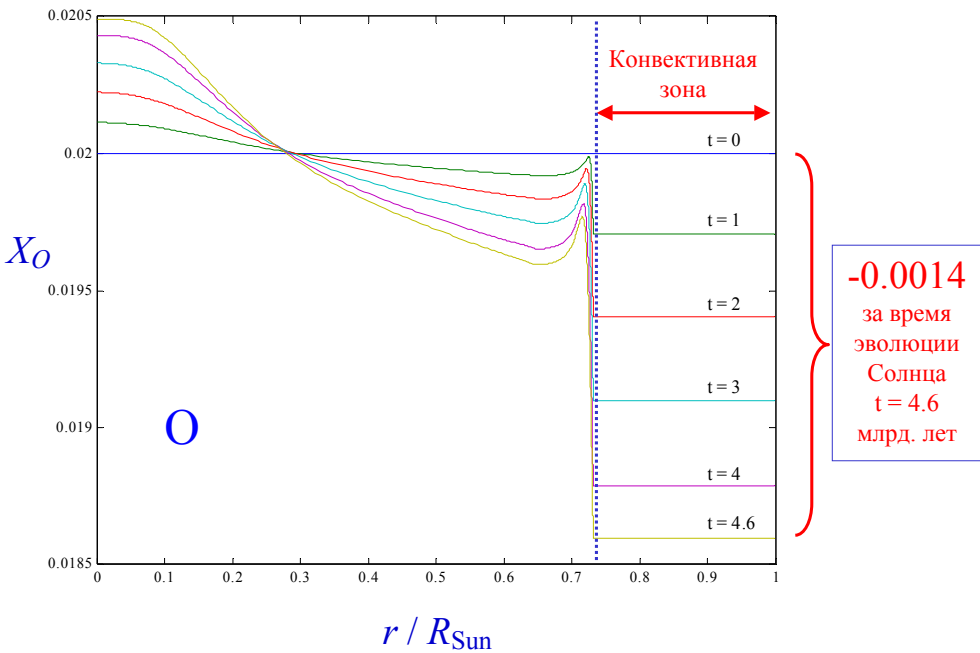
He

Увлечение элемента
диффузионными
потоками водорода
и гелия

Соотношение механизмов диффузии для O и Fe

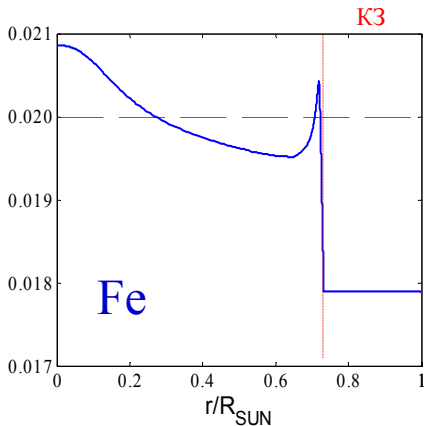
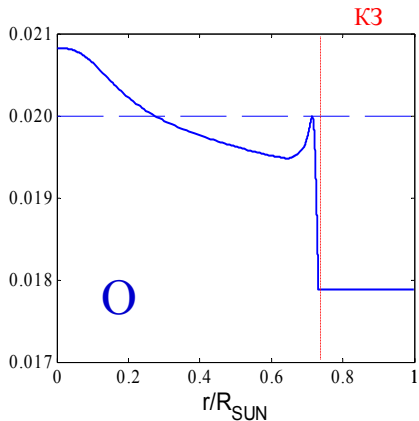


Диффузия кислорода в смеси водород-гелий

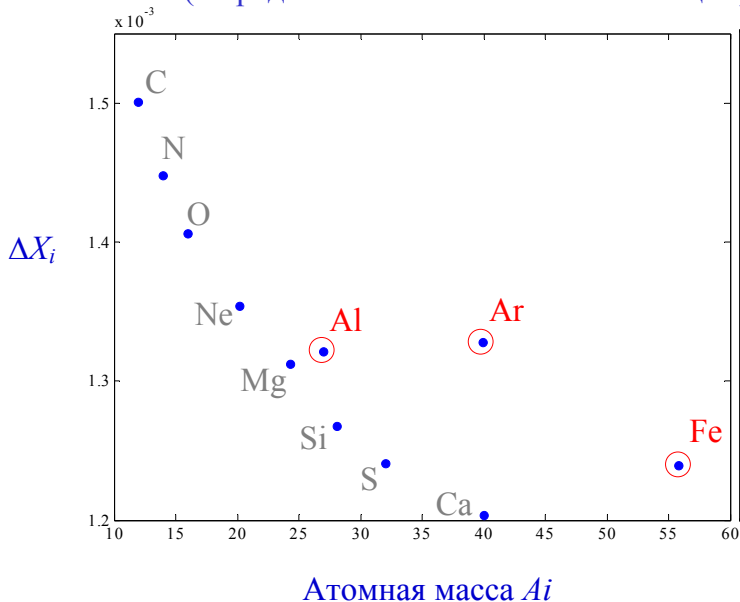


Диффузия за $t = 4.6$ млрд. лет $Z = Z_{\max}$, без фотодиффузии

— $Z = Z_{\max}$

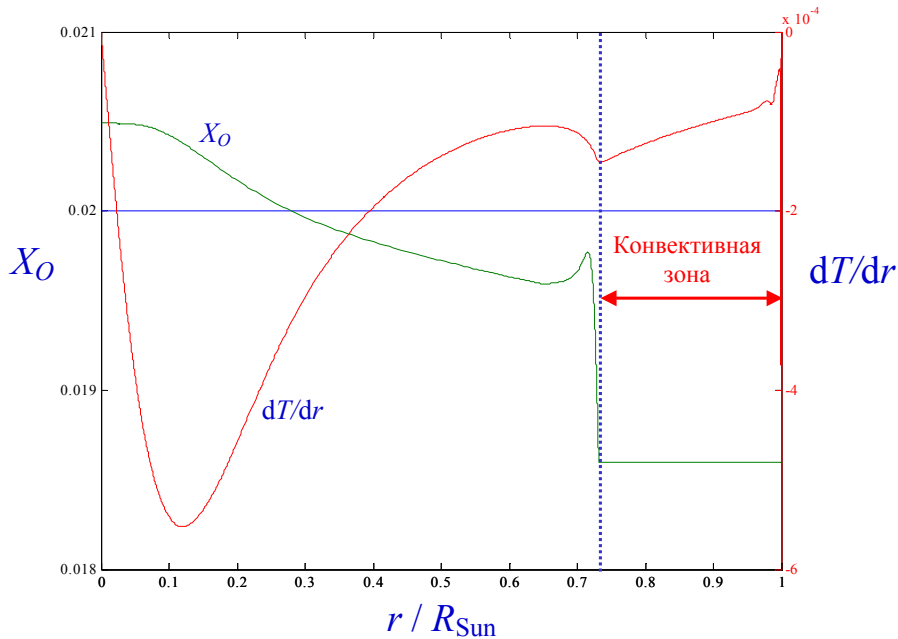


Осаждение элементов из конвективной зоны (в предположении о полной ионизации)

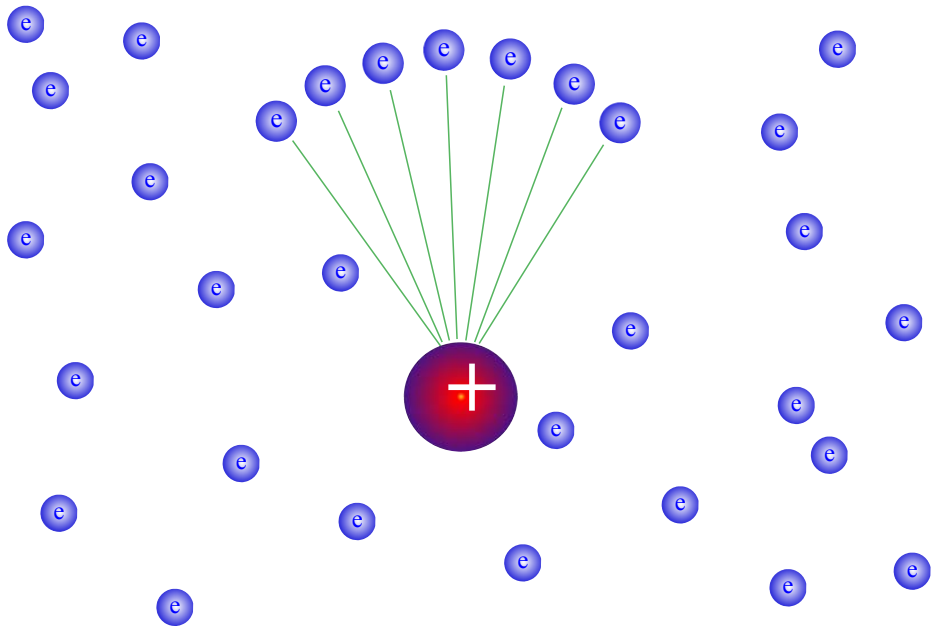


| | Z_i | A_i |
|----|-------|-------|
| C | 6 | 12 |
| N | 7 | 14 |
| O | 8 | 16 |
| Ne | 10 | 20 |
| Mg | 12 | 24 |
| Al | 13 | 27 |
| Si | 14 | 28 |
| S | 16 | 32 |
| Ar | 18 | 40 |
| Ca | 20 | 40 |
| Fe | 26 | 56 |

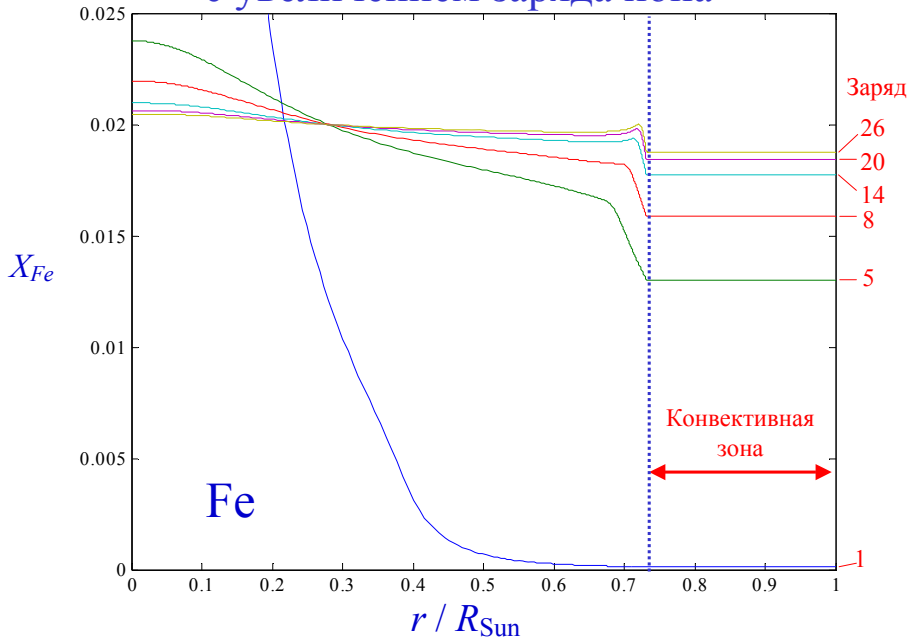
Градиент температуры по радиусу



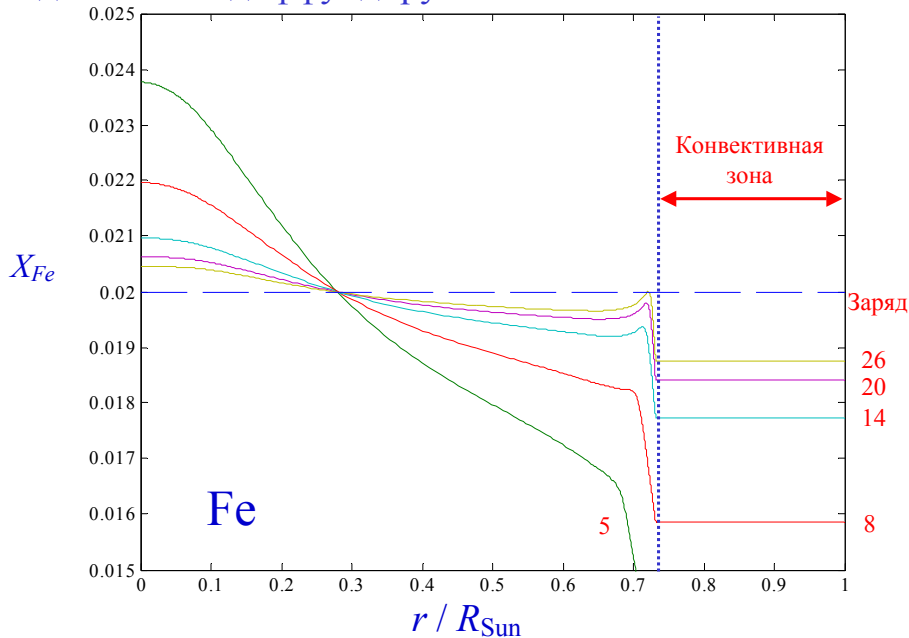
Зависимость скорости диффузии от заряда: электроны в роли тормозного парашюта



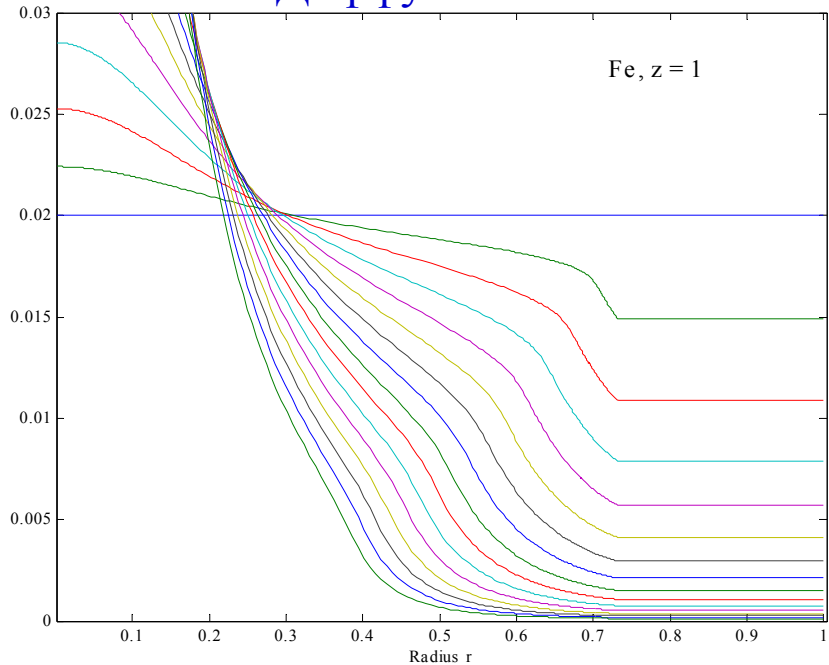
Диффузия замедляется
с увеличением заряда иона



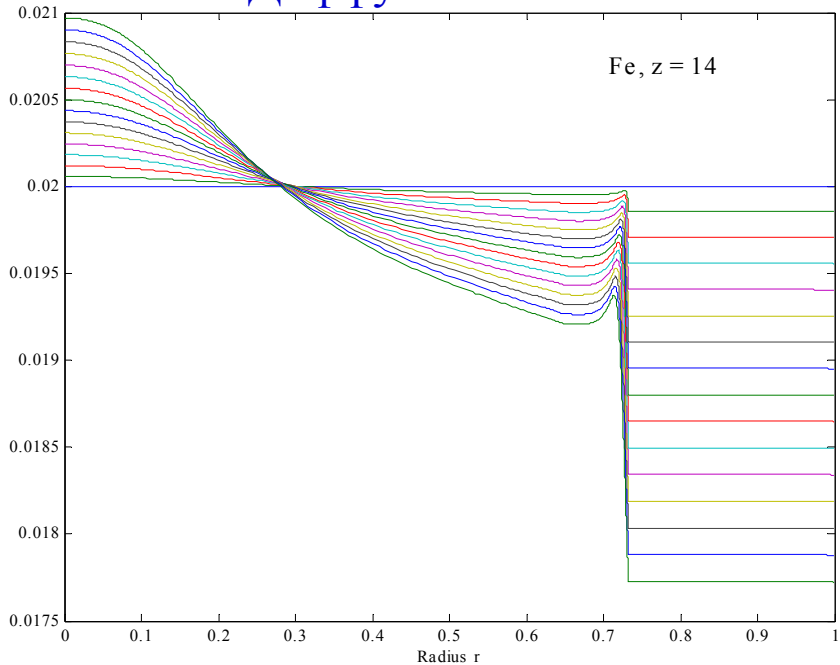
Чем сильнее ионизован тяжелый элемент, тем медленнее он диффундирует



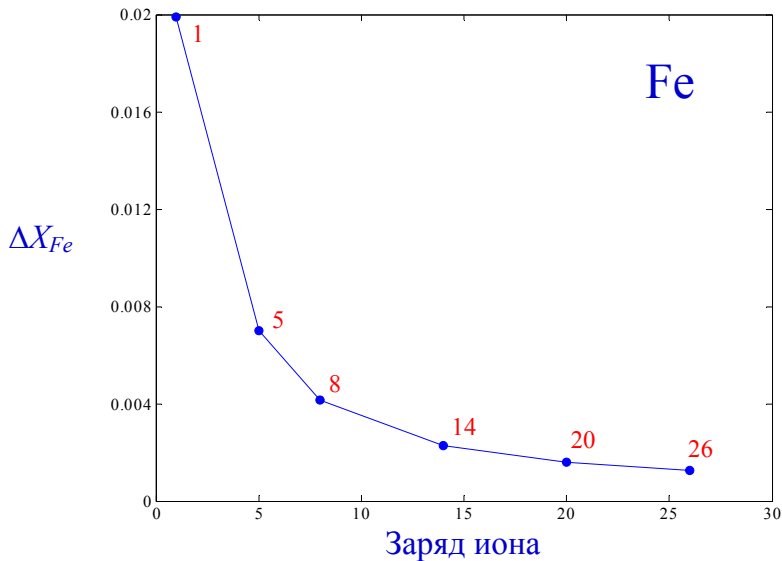
Диффузия FeI



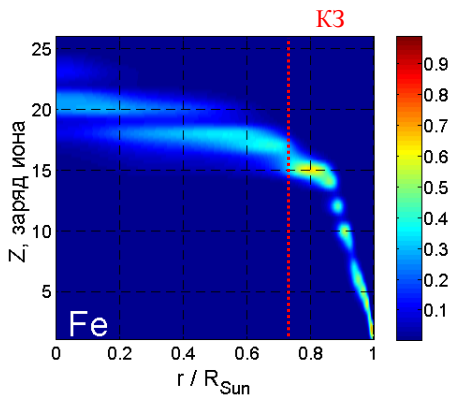
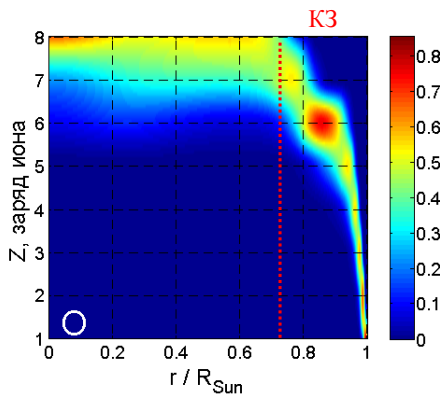
Диффузия FeXIV



Чем сильнее ионизован тяжелый элемент,
тем медленнее он диффундирует (расчеты с $Z(r) = \text{const}$)

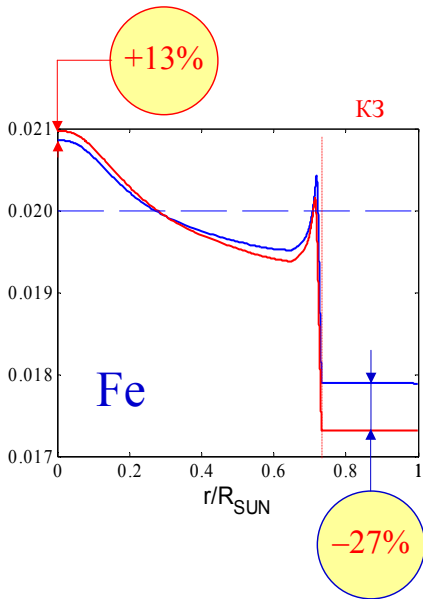
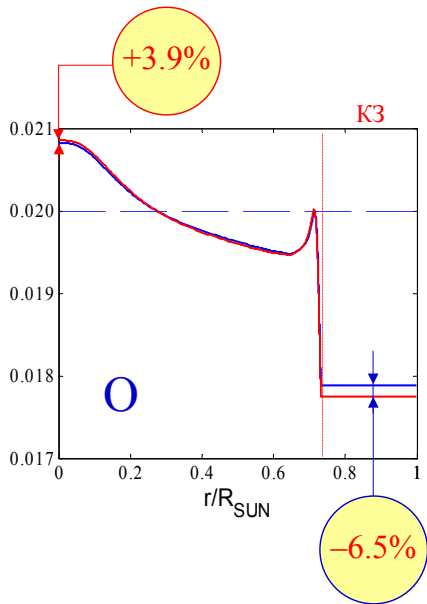


Ионизация элементов в недрах Солнца

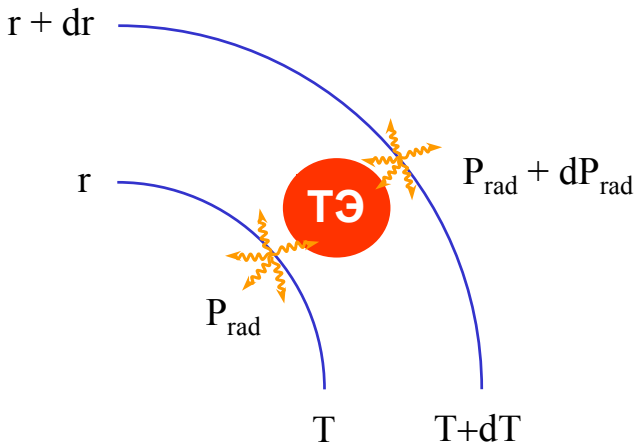


Результат введения в модель $Z(r)$

— $Z = Z_{MAX}$
— $Z = \bar{Z}(r)$



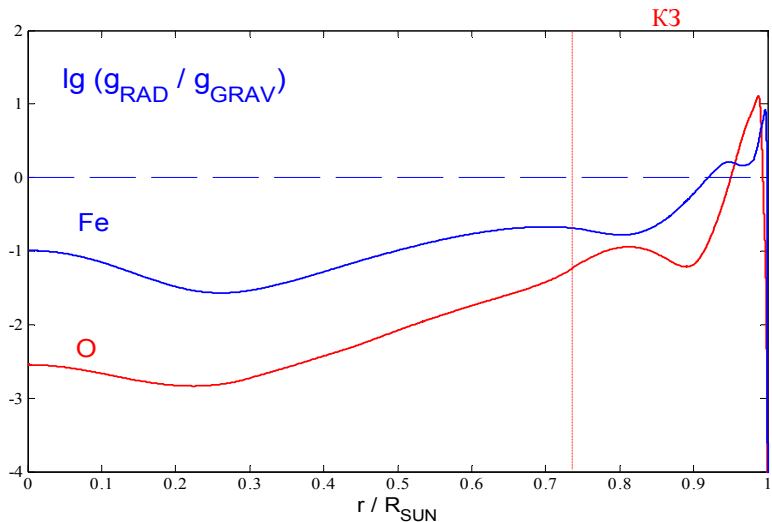
Фотодиффузия: поток фотонов по-разному взаимодействует с элементами плазмы → разделение элементов



$$dT < 0$$

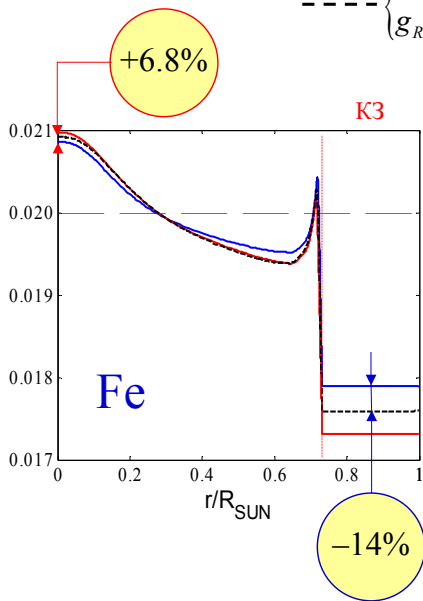
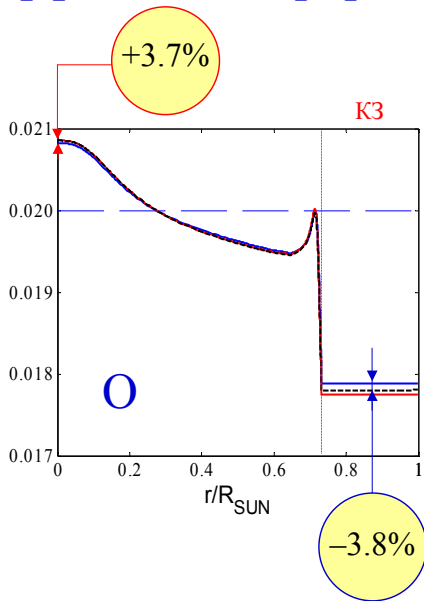
$$dP_{\text{rad}} < 0$$

Радиационное ускорение: до 20 % от гравитационного в областях под конвективной зоной



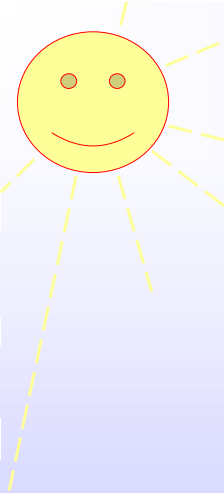
Расчеты с фотодиффузией: эффект есть, прорыва нет

- $Z = Z_{MAX}$
- $Z = \bar{Z}(r)$
- - - $\begin{cases} Z = \bar{Z}(r) \\ g_{RAD} \neq 0 \end{cases}$



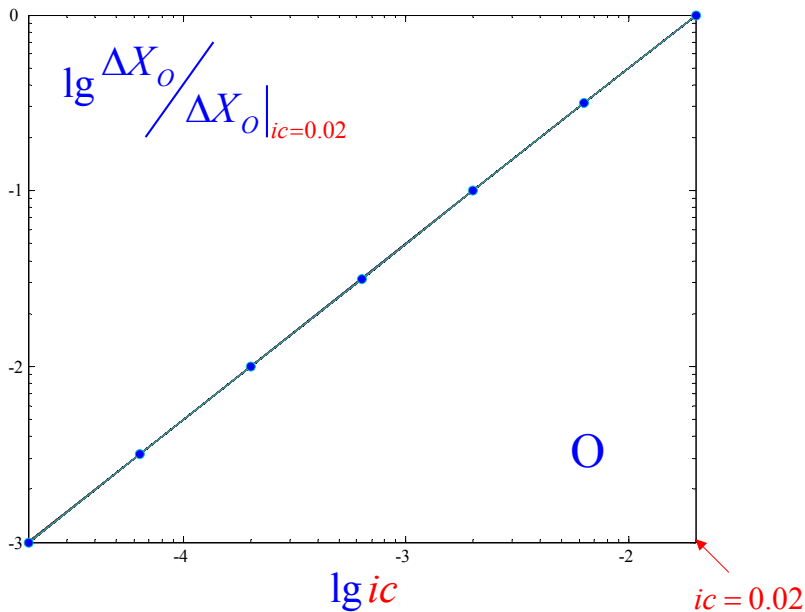
Выводы

- 1) Учет фотодиффузии и изменения по радиусу степени ионизации элементов *не дает существенного прироста скорости диффузии*
- 2) Остается проблема поиска механизма разделения элементов на Солнце.
- 3) Однако, в расчеты такого разделения *необходимо* включать диффузионные процессы.

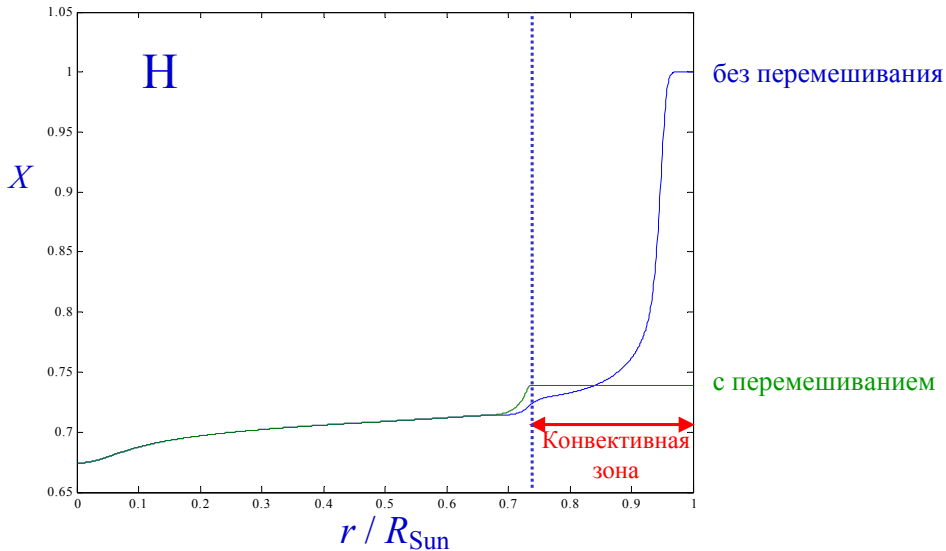


**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ!**

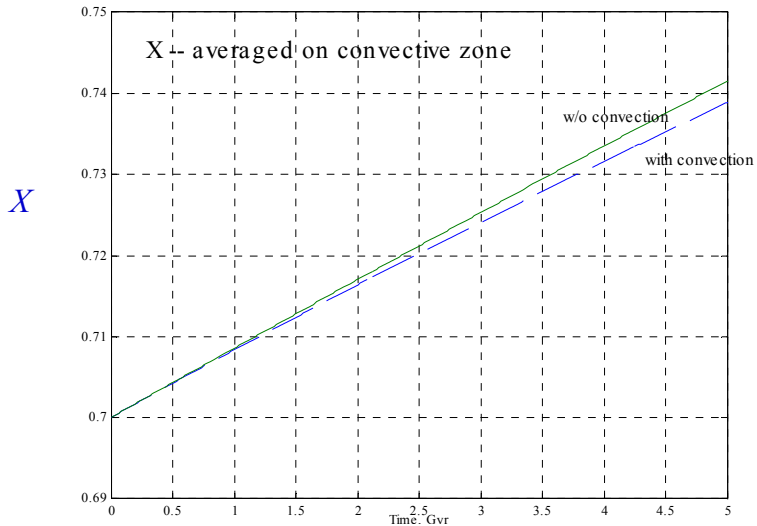
Линейность степени осаждения из конвективной
зоны по начальным условиям ic



Влияние перемешивания в конвективной зоне на X



X averaged on CZ



Выводы

1) В конвективной зоне:

$$\Delta X = +0.0330$$

Содержание гелия уменьшается по сравнению с классической моделью, что лучше согласуется с наблюдениями.

$$\Delta Z(O) = -0.0014$$

| | | |
|---|--------|--------------------------|
| Noerdlinger 1977 | 0.026 | |
| Model S 1996 | 0.0282 | $\Delta Z(O) = -0.00157$ |
| Brun, Turck-Chieze, Morel 1998 | 0.0315 | |
| Gabriel, Carlier 1997 | 0.0252 | |
| Guenther, Kim, Demarque 1996 | 0.0169 | |
| Guzik, Swenson 1997 | 0.0306 | |
| Turcotte, Richard, Michaud et al. 1998 | 0.0286 | |
| Richard, Vauclair, Charbonnel, Dziembowski 1996 | 0.0285 | |
| Bahcall, Pinsonneault 1995 | 0.0306 | |