

ELEMENT DIFFUSION DURING EVOLUTION OF THE SUN

Gorshkov A.B., Baturin V.A.

MSU, SAI, Moscow, Russia



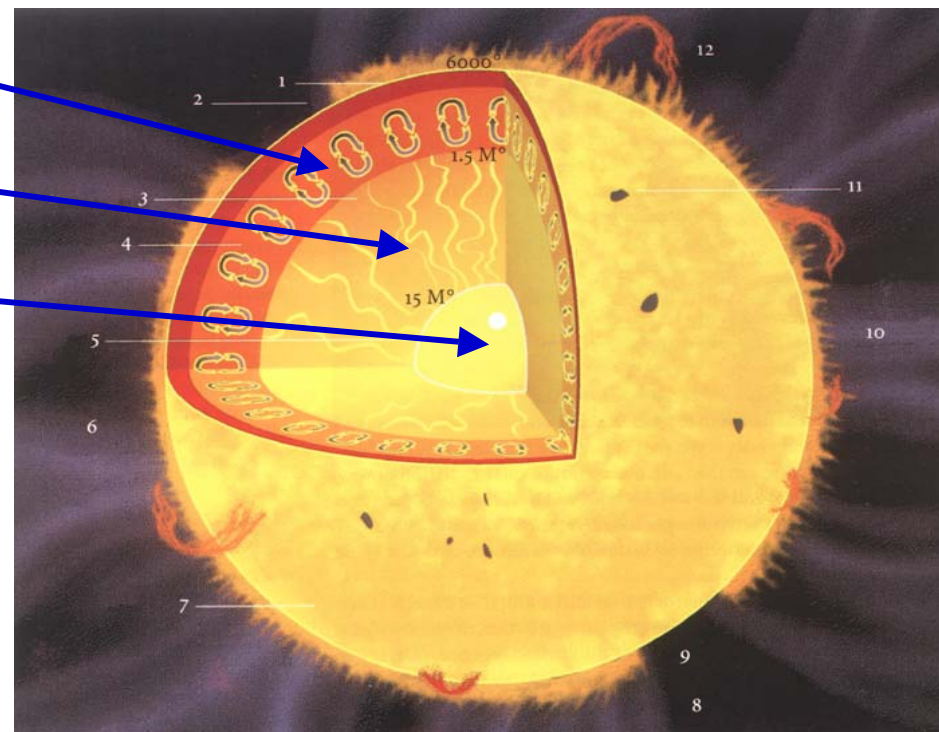
Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ № 3755
“Физико-химическая эволюция неидеальной плазмы Солнца по современным гелиосейсмическим данным”

Солнце

Конвективная зона

Лучистая зона

Ядро

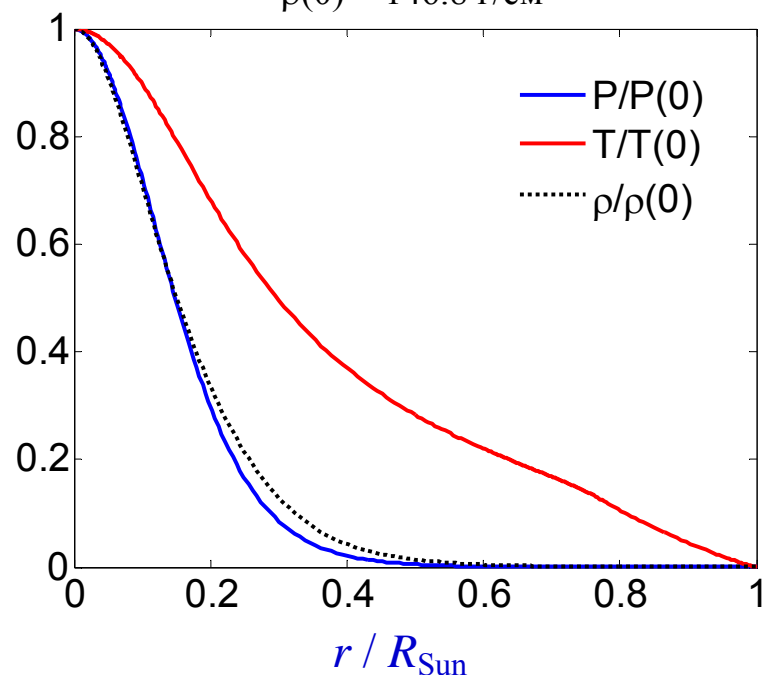


Профили давления,
температуры и плотности в
современном Солнце

$$P(0) = 2.27e+17 \text{ бар}$$

$$T(0) = 1.54e+7 \text{ К}$$

$$\rho(0) = 146.8 \text{ г/см}^3$$



**Содержание (по массе) водорода, гелия
и остальных (т.н. «тяжелых») элементов**

во внешних слоях:

$$X_{\text{H}} = 0.74$$

$$X_{\text{He}} = 0.24$$

$$X_{\text{ТЭ}} = 0.02$$

Возраст: $\tau = 4.6$ млрд. лет

$$\text{Масса: } M_{\text{Sun}} = 2 \cdot 10^{33} \text{ г}$$

Радиус (современный): $R_{\text{Sun}} = 696\,000$ км

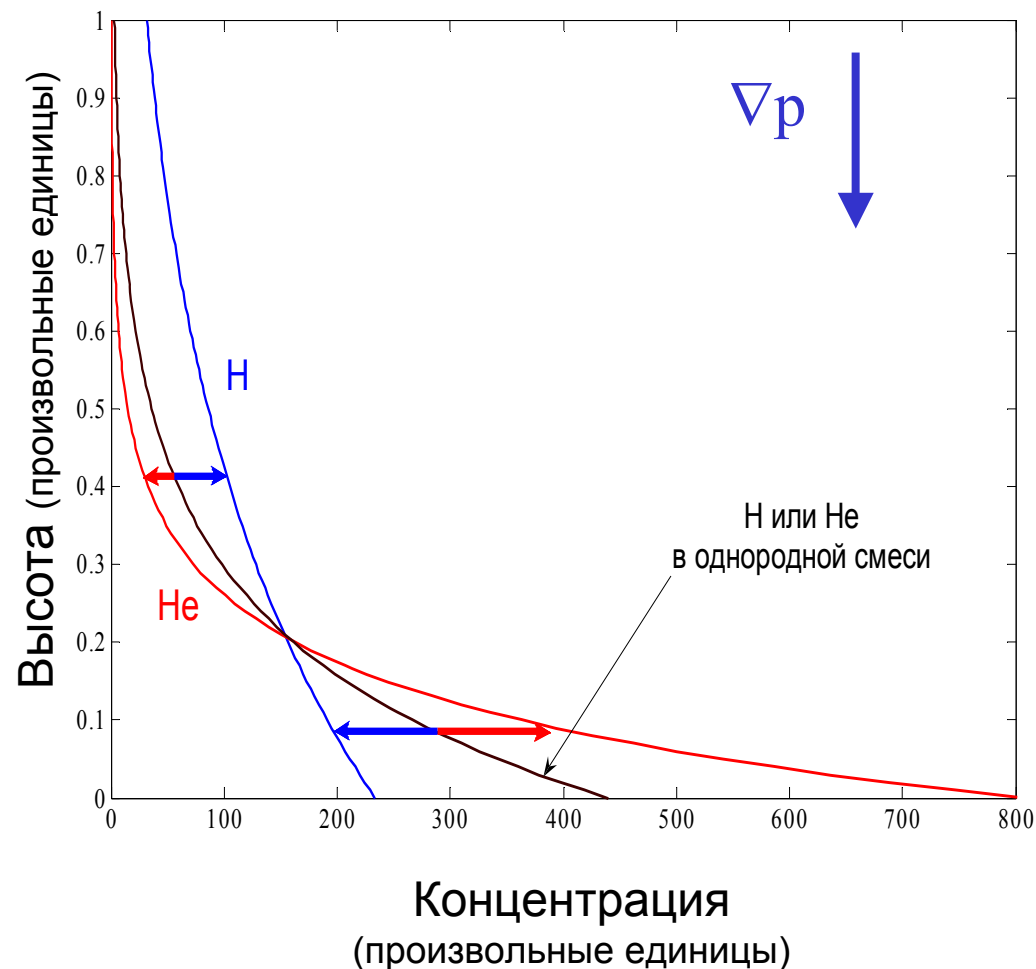
Диффузия – стремление на микрокопическом уровне компонент смеси к равновесию

- 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: ∇T , ∇p , ∇N , ...
- Силы трения в среде (соударения с ионами и электронами) – противодействуют диффузии

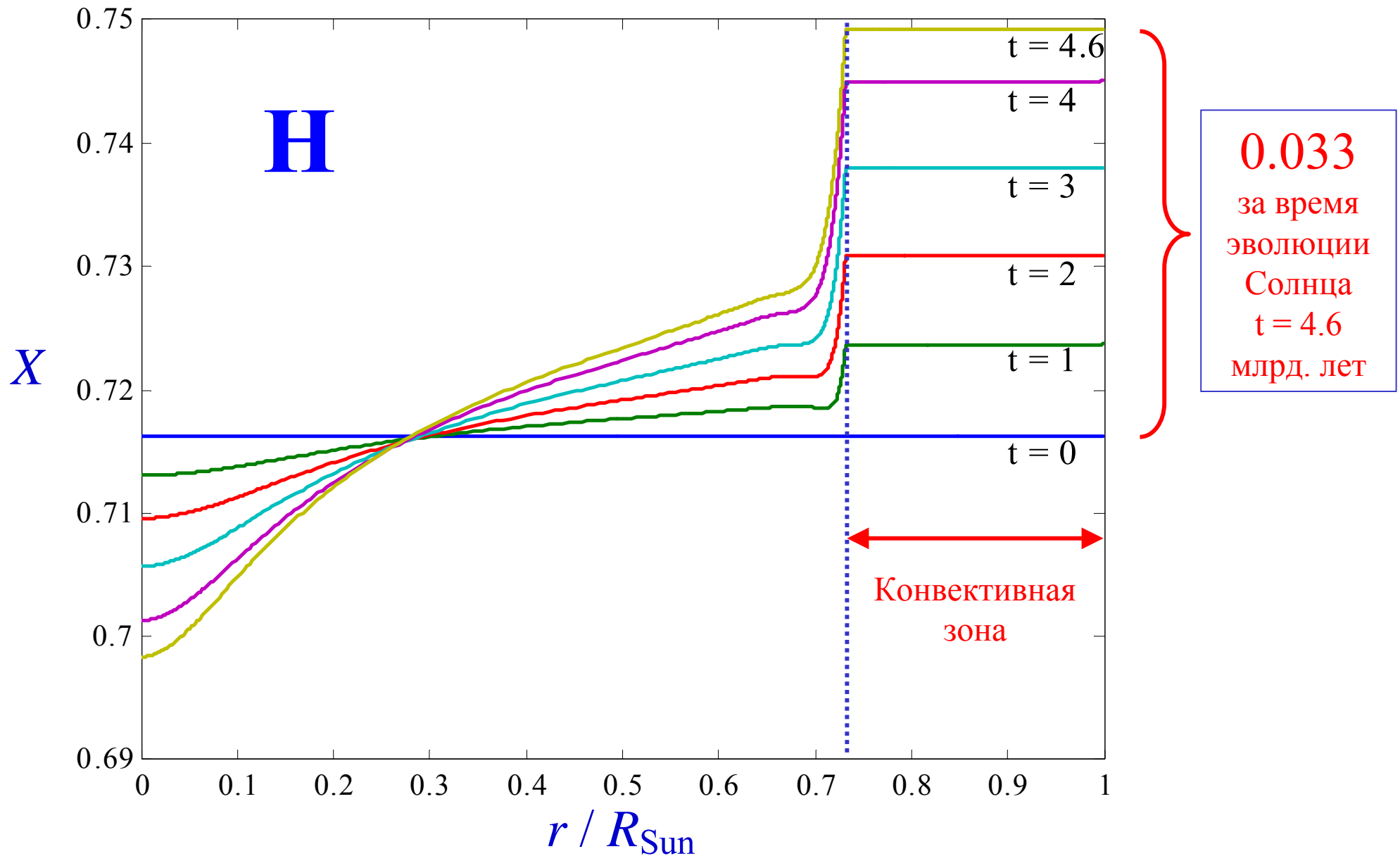
Постановка задачи

- Изучить вклад различных механизмов диффузии
- Решить уравнение диффузии для смеси $H + He + e^-$, т.е. найти $X_H(r,t)$, и для тяжелых элементов как малой примеси к смеси $H + He + e^-$, т.е. найти $X_{T\alpha}(r,t)$:
 - 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 (тракуем конвективную зону как область бесконечно быстрой диффузии)

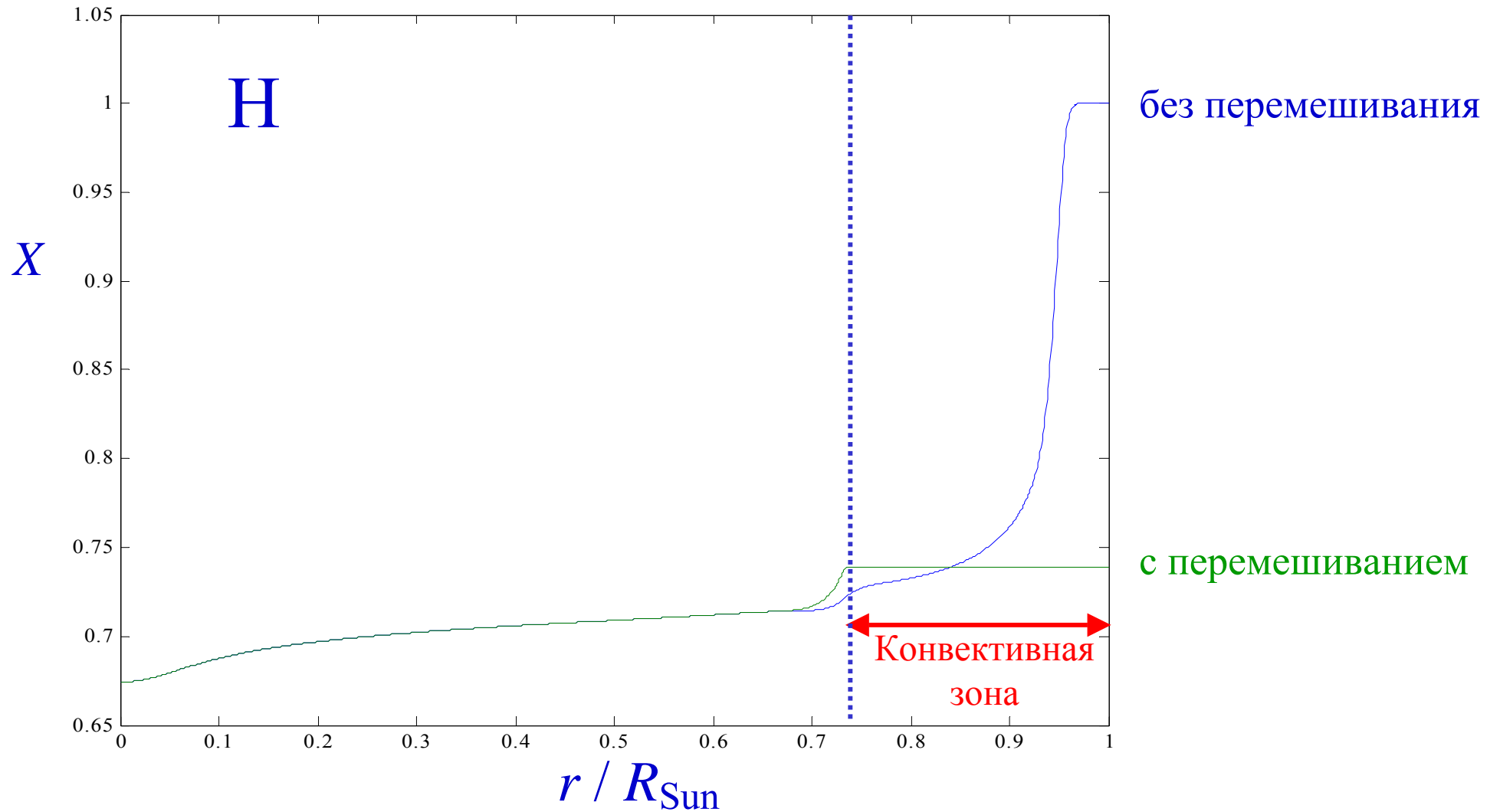
Основной механизм диффузии
на Солнце – бародиффузия
($\sim \nabla p$): элементы разных масс
стремятся к «своему»
распределению по высоте



Водород диффундирует в конвективную зону

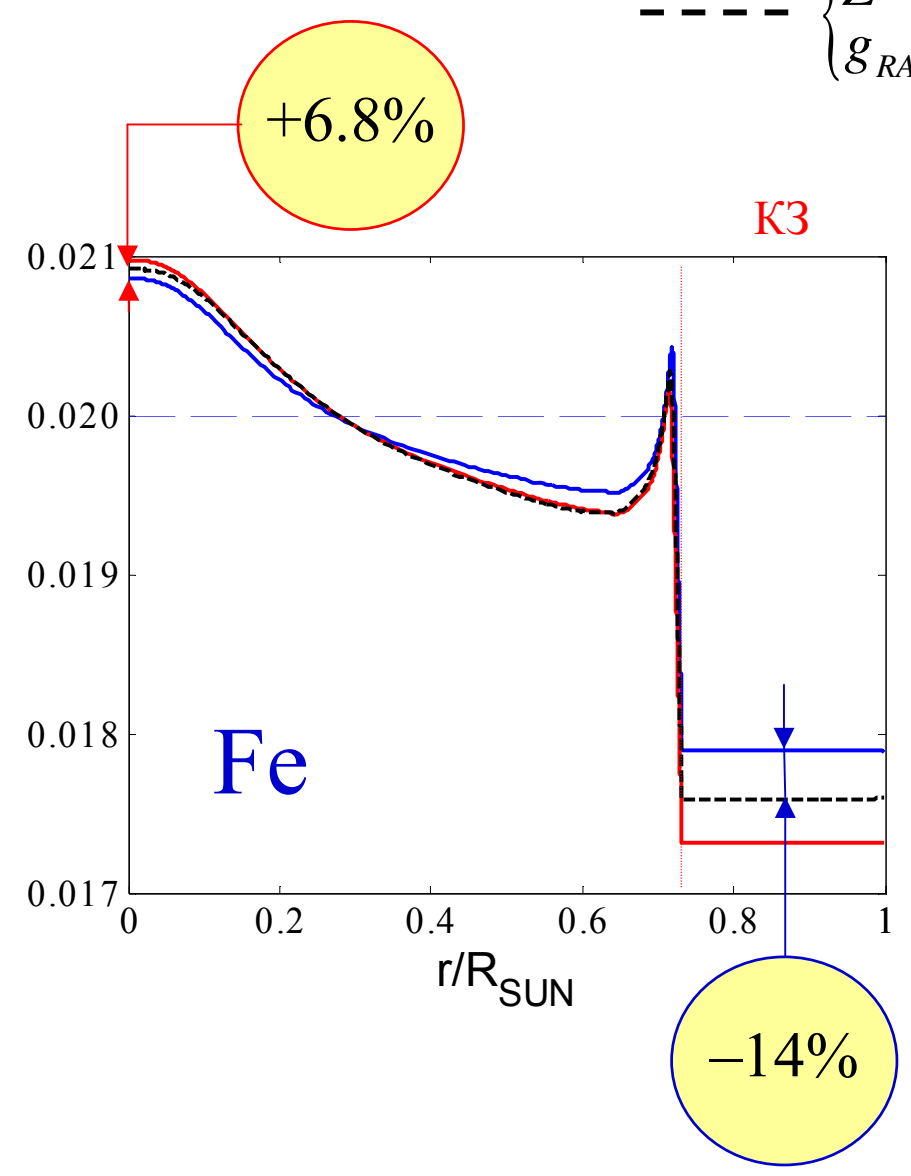
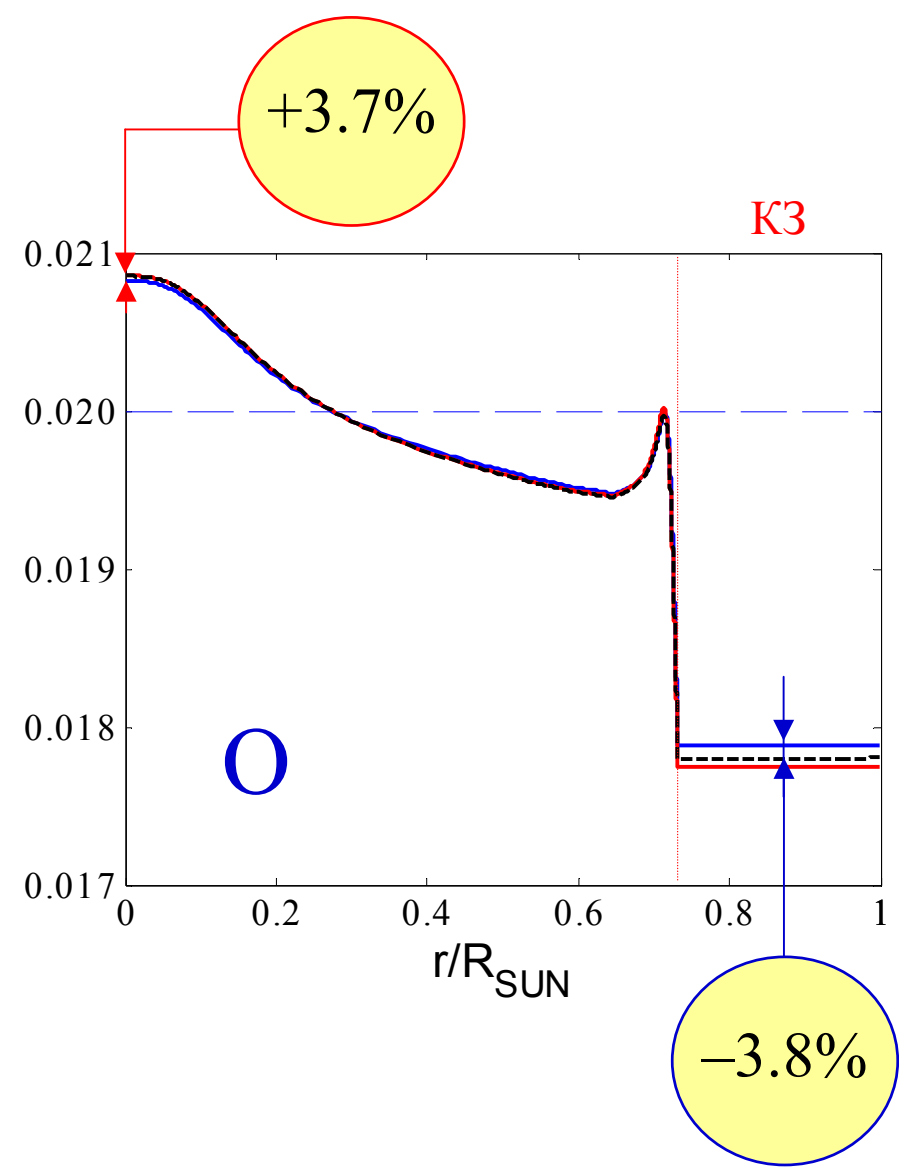


Влияние перемешивания в конвективной зоне на X

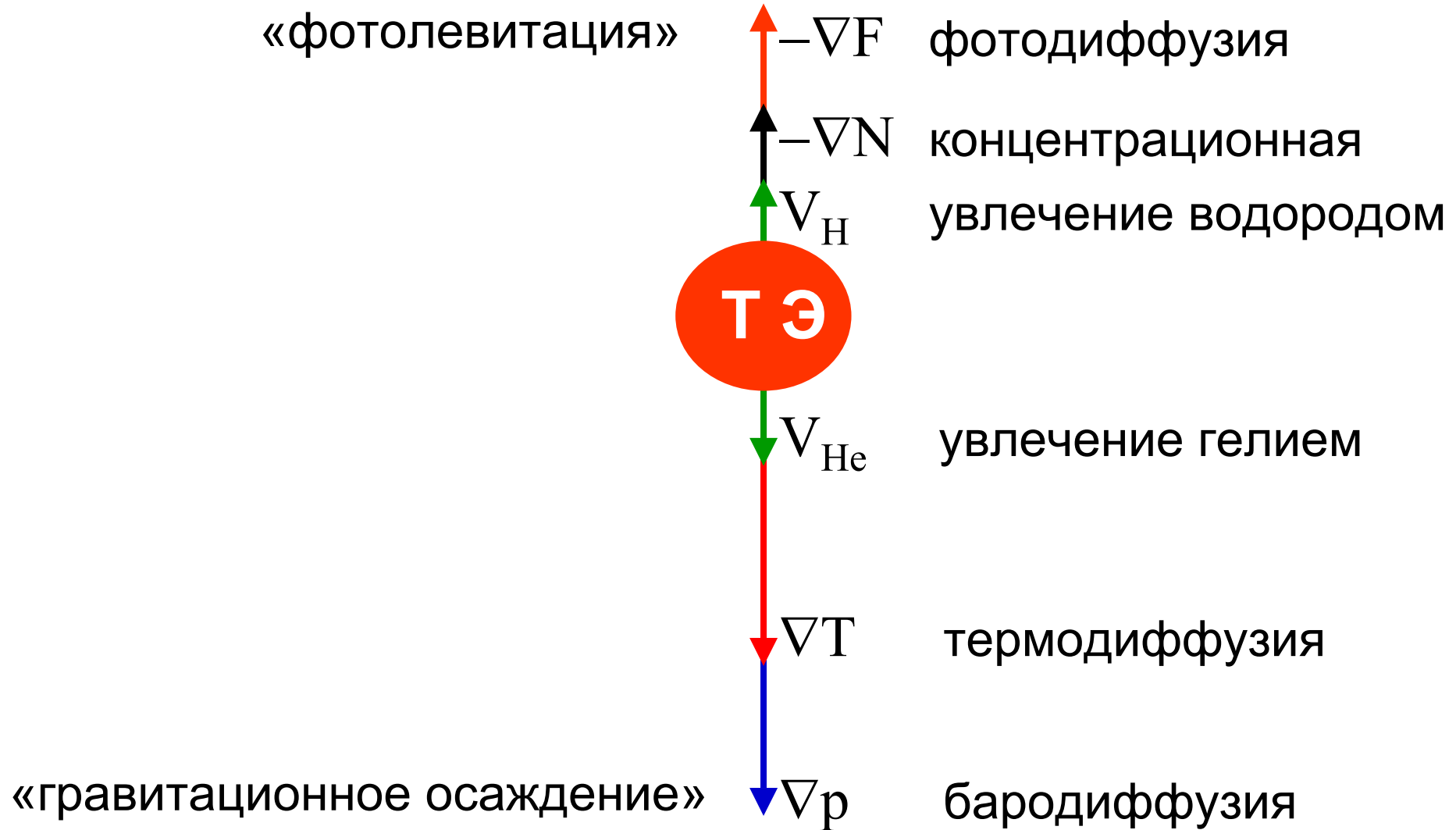


Сравнение диффузии кислорода и железа

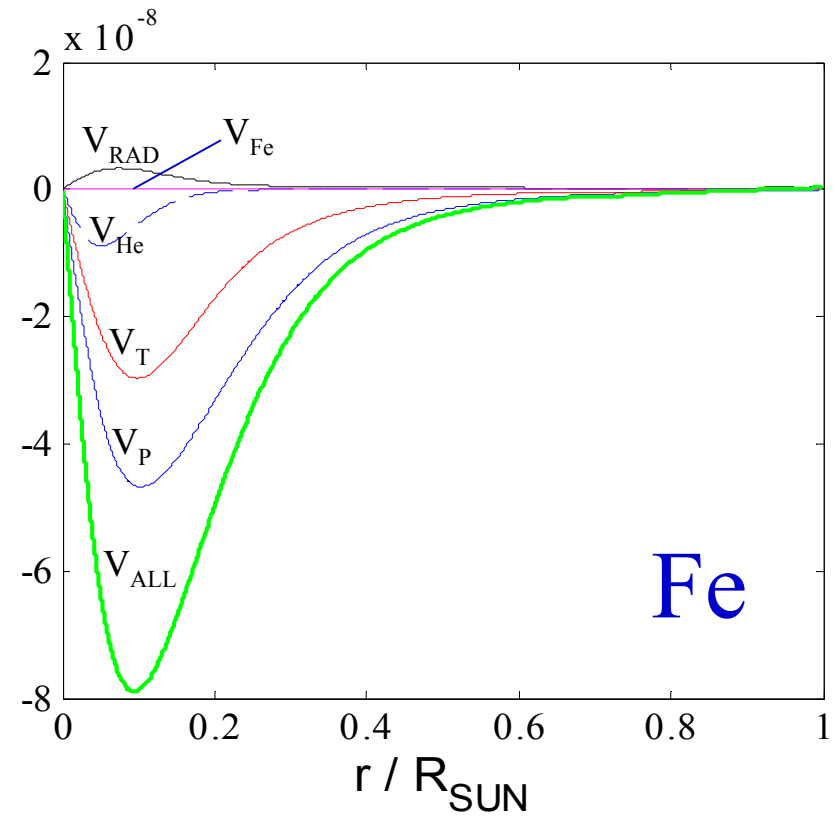
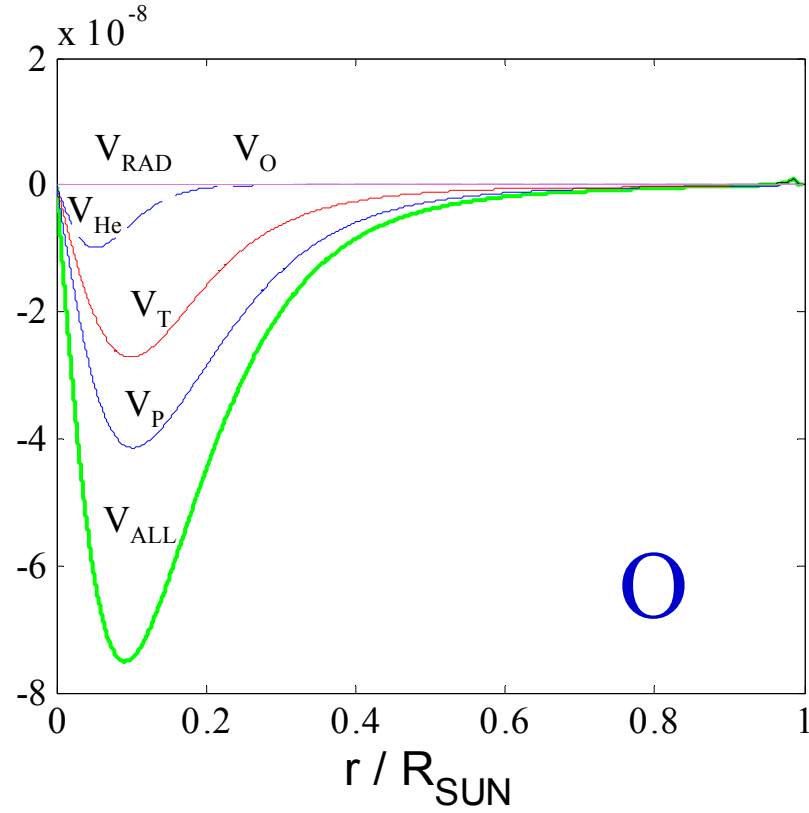
- $Z = Z_{MAX}$
- $Z = \bar{Z}(r)$
- - - $\left\{ \begin{array}{l} Z = \bar{Z}(r) \\ g_{RAD} \neq 0 \end{array} \right.$



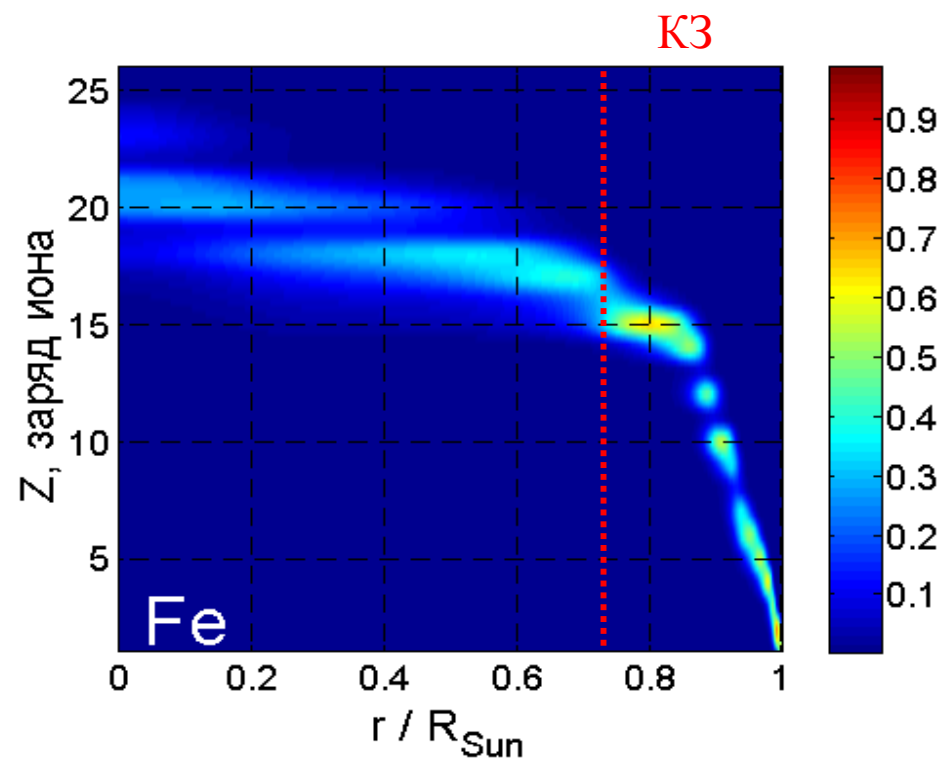
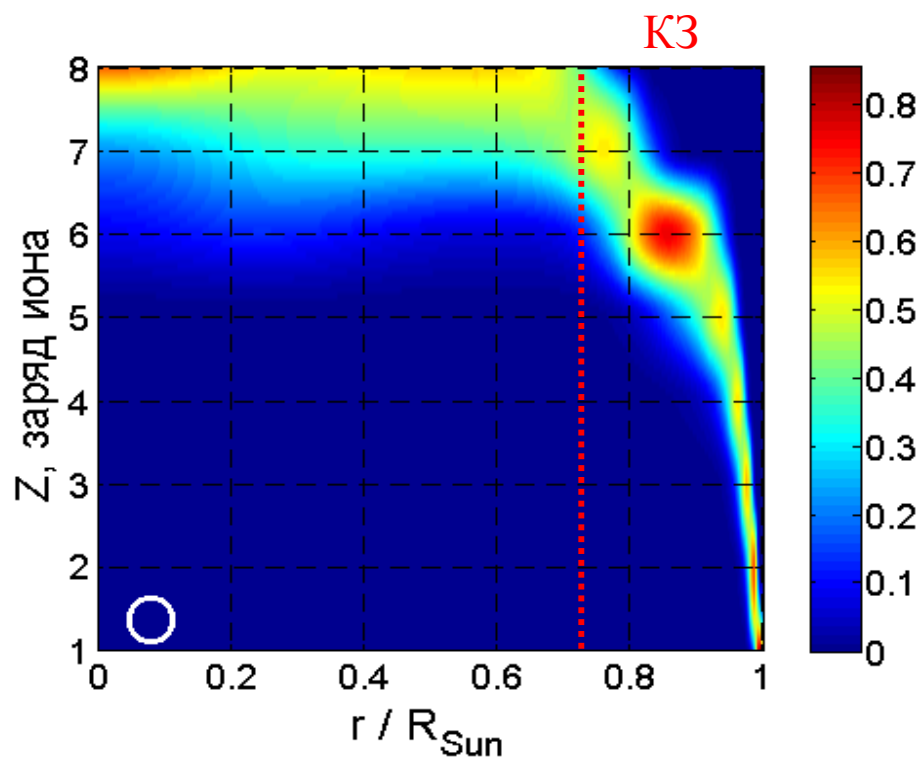
Механизмы диффузии



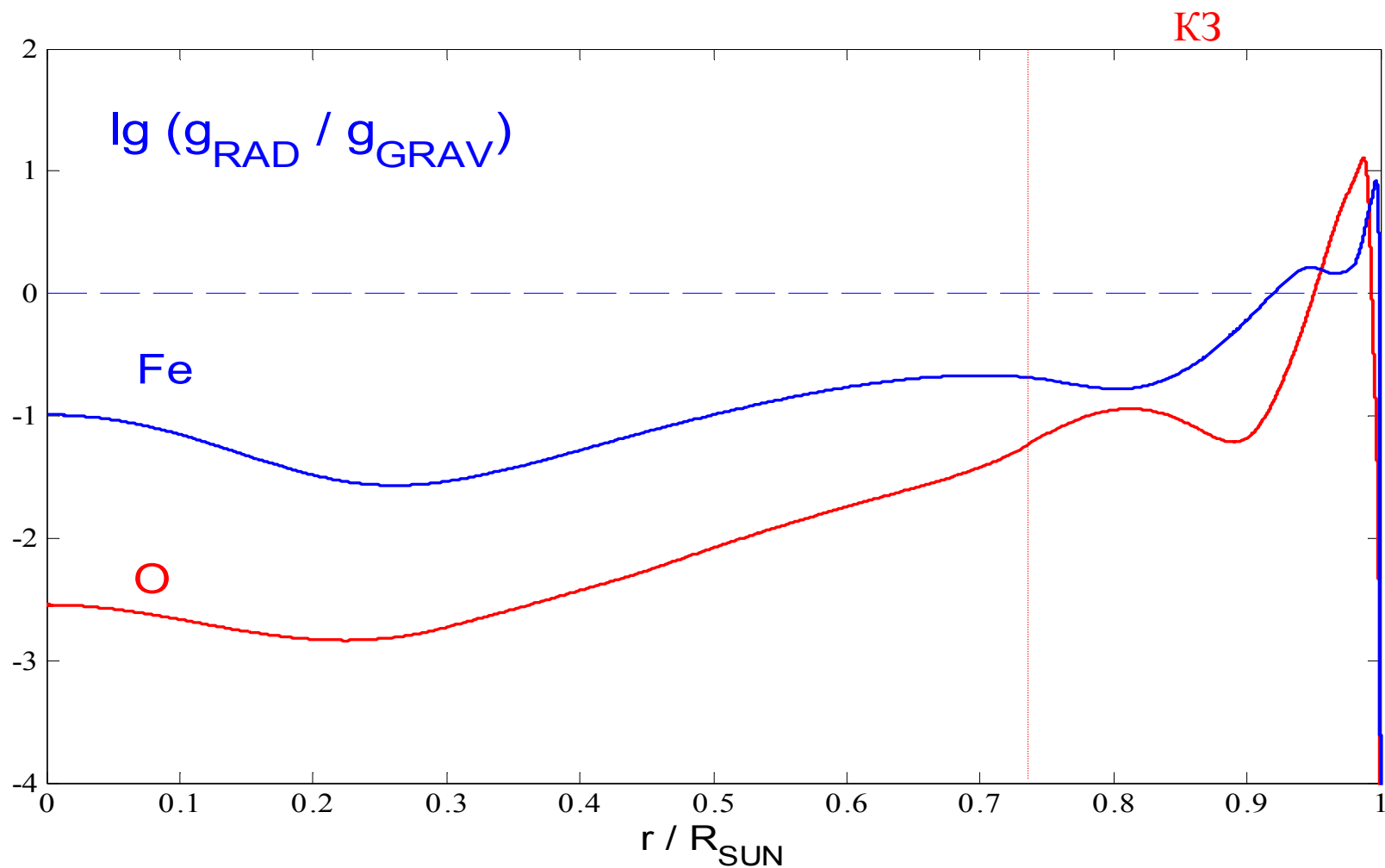
Соотношение механизмов диффузии для O и Fe



Ионизация элементов в недрах Солнца



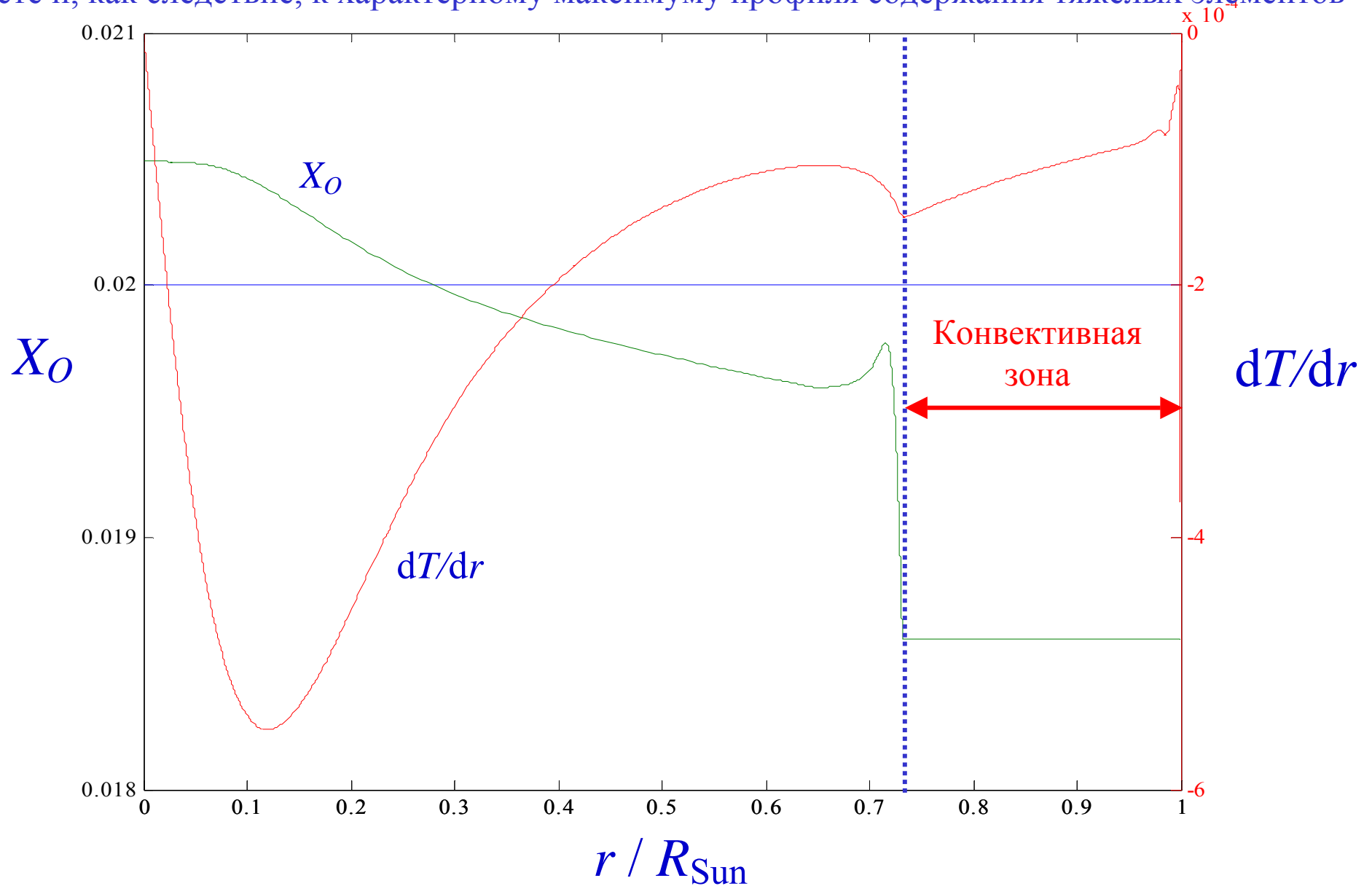
Радиационное ускорение: до 20 % от гравитационного в областях ПОД КОНВЕКТИВНОЙ ЗОНОЙ



g_{rad} рассчитаны по данным Opacity Project: Seaton M.J. et al. 1994, MNRAS 266, 805

Градиент температуры по радиусу

Область понижения dT/dr под конвективной зоной приводит к ослаблению термодиффузии в этом месте и, как следствие, к характерному максимуму профиля содержания тяжелых элементов



Выводы

- 1) Основными механизмами диффузии на Солнце являются баро- и термодиффузия.
- 2) Диффузионное осаждение (баро и термо-диффузия) гелия к ядру значимо и является важной составляющей эволюции Солнца
- 3) Учет фотодиффузии и изменения по радиусу степени ионизации элементов не дает существенного изменения скорости диффузии и осаждения тяжелых элементов (за исключением железа).

Проблемы и перспективы

- 1) Взаимодействие диффузии и области конвективного перемешивания,
- 2) Диффузия в «частично ионизованной» смеси,
- 3) Влияние диффузионных процессов на уравнение состояния,
- 4) Диффузия в особых условиях (атмосферные слои – низкая плотность, радиационно-доминированная плазма, наличие магнитного поля, диффузия в нерадиальных направлениях).