

# КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В СПОКОЙНОМ ПЕРЕХОДНОМ СЛОЕ МЕЖДУ КОРОНОЙ И ХРОМОСФЕРОЙ СОЛНЦА

Птицына О.В., Сомов Б.В

ГАИШ МГУ

7 февраля 2012

Применимо ли приближение классической теплопроводности в переходном слое спокойного Солнца?

Применимо ли приближение классической теплопроводности в переходном слое спокойного Солнца?

Да: Шмелева, Сыроватский, 1973

Применимо ли приближение классической теплопроводности в переходном слое спокойного Солнца?

Да: Шмелева, Сыроватский, 1973

Нет: Шуб, 1983

Применимо ли приближение классической теплопроводности в переходном слое спокойного Солнца?

Да: Шмелева, Сыроватский, 1973

Нет: Шуб, 1983

**Основные причины сомнения** в правомочности использования столкновительного приближения:

Применимо ли приближение классической теплопроводности в переходном слое спокойного Солнца?

Да: Шмелева, Сыроватский, 1973

Нет: Шуб, 1983

**Основные причины сомнения** в правомочности использования столкновительного приближения:

- Устаревшие данные по функции лучистого охлаждения плазмы.

Применимо ли приближение классической теплопроводности в переходном слое спокойного Солнца?

Да: Шмелева, Сыроватский, 1973

Нет: Шуб, 1983

**Основные причины сомнения** в правомочности использования столкновительного приближения:

- Устаревшие данные по функции лучистого охлаждения плазмы.
- Наблюдения показывают высокую степень нестационарности хромосферы.

Применимо ли приближение классической теплопроводности в переходном слое спокойного Солнца?

**Да:** Шмелева, Сыроватский, 1973

**Нет:** Шуб, 1983

**Основные причины сомнения** в правомочности использования столкновительного приближения:

- Устаревшие данные по функции лучистого охлаждения плазмы.
- Наблюдения показывают высокую степень нестационарности хромосферы. **Что вообще называть хромосферой?**



## Идея

- Предположим, что приближение классической теплопроводности применимо.
- Используем новые данные по функции лучистого охлаждения плазмы.

## Идея

- Предположим, что приближение классической теплопроводности применимо.
- Используем новые данные по функции лучистого охлаждения плазмы.

Из сравнения полученного результата с наблюдениями проверим вывод о применимости столкновительного приближения в переходном слое.

## Постановка задачи

$$n \frac{d}{d\xi} \left( \kappa n \frac{dT}{d\xi} \right) = L(T) n^2 - P_\infty, \quad (1)$$

$$\xi = \int_0^x n(x) dx$$

\*  $\kappa$  – электронная теплопроводность:

$$\kappa \approx \frac{1.84 \times 10^{-5}}{\ln \Lambda} T^{5/2}, \quad (2)$$

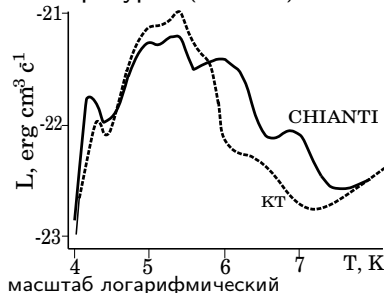
\* Зависимость  $n(T)$ :

(а) быстрый нагрев  $n = const$

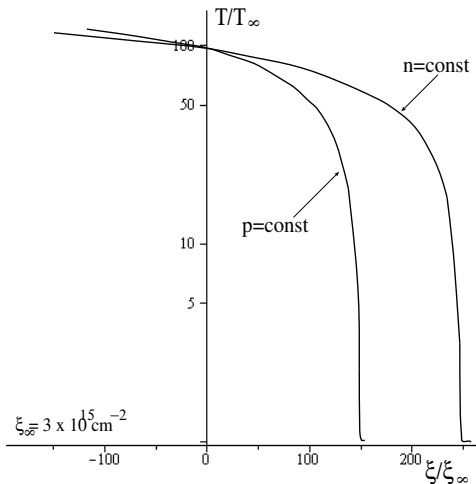
(б) медленный нагрев

$$p = const \Rightarrow n \sim \frac{1}{T}$$

\*  $L = L(T)$  – зависимость потерь энергии на излучение от температуры: (CHIANTI)



# Зависимость температуры от толщи вещества



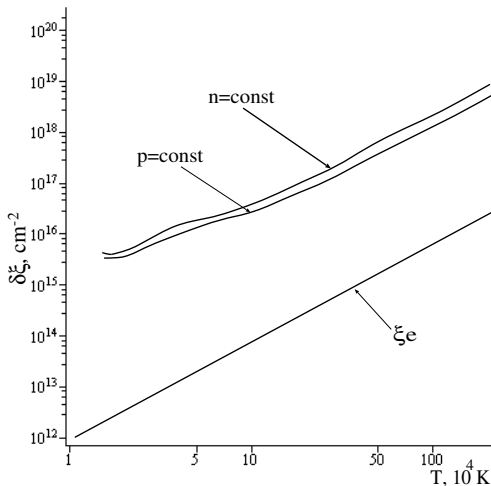
$$\xi = \int_0^x n(x) dx$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F = -\kappa n \frac{dT}{d\xi} \rightarrow \xi(T) \\ F = \left( \int_{T_{\infty}}^T 2(L(T') - L(T_{\infty})) \times \right. \\ \left. \times \kappa n^2 dT' \right)^{1/2} \rightarrow F(T). \end{array} \right.$$

$$T(\xi = 0) = 10^6 \text{ K},$$

$$\frac{dT}{d\xi}(\xi \rightarrow \infty) = 0$$

# Ширина переходного слоя



Столкновительное приближение применимо, если

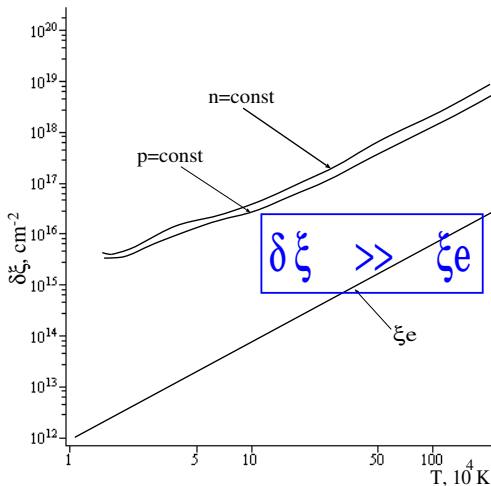
$$\lambda = \frac{T_e}{|\nabla T_e|} \gg \lambda_e,$$

$$\delta \xi = \frac{d\xi(T)}{d \ln(T)} \gg \xi_e = n_e \lambda_e,$$

где

$$\lambda_e = \frac{k_B^2 T^2}{\pi e^4 n_e \ln \Lambda}$$

# Ширина переходного слоя



Столкновительное приближение применимо, если

$$\lambda = \frac{T_e}{|\nabla T_e|} \gg \lambda_e,$$

$$\delta\xi = \frac{d\xi(T)}{d\ln(T)} \gg \xi_e = n_e \lambda_e,$$

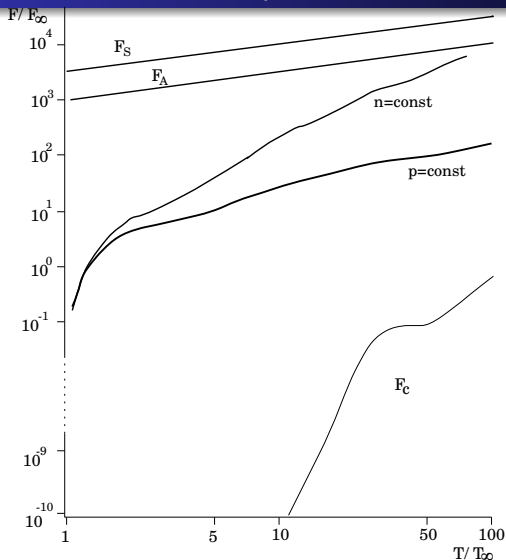
На  $10^5 \text{ K}$  :

$$\delta\xi \approx 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}, 35 \text{ км},$$

$$\xi_e \approx 8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}, 70 \text{ м}$$

$$\lambda/\lambda_e = 35000/70 = 500$$

# Тепловой поток в переходном слое



Здесь

$F_A$  – аномальный  
тепловой поток

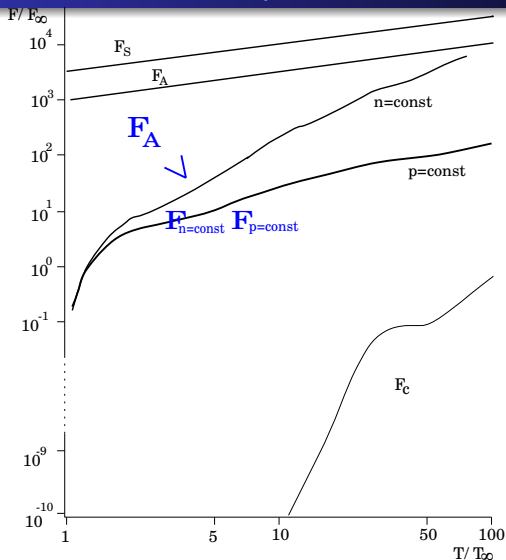
$F_S$  – максимально воз-  
можный поток:

$$F_S = \frac{3}{2} n_e k_B T V,$$

$V$  – тепловая скорость  
электронов

$F_C$  – конвективный по-  
ток быстрых электро-  
нов.

# Тепловой поток в переходном слое



Здесь

$F_A$  – аномальный  
тепловой поток

$F_S$  – максимально воз-  
можный поток:

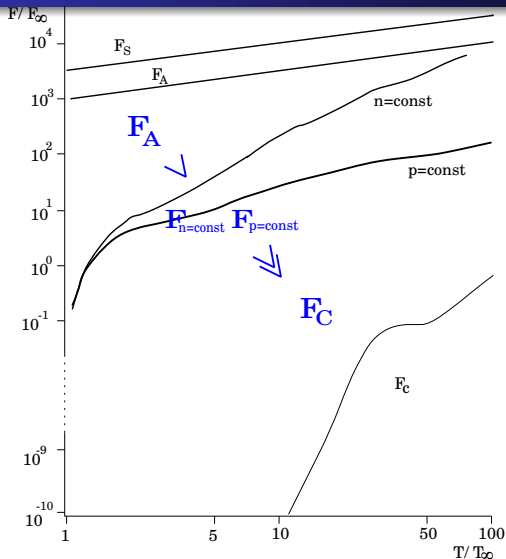
$$F_S = \frac{3}{2} n_e k_B T V,$$

$V$  – тепловая скорость  
электронов

$F_c$  – конвективный по-  
ток быстрых электро-  
нов.



# Тепловой поток в переходном слое



Здесь

$F_A$  – аномальный тепловой поток

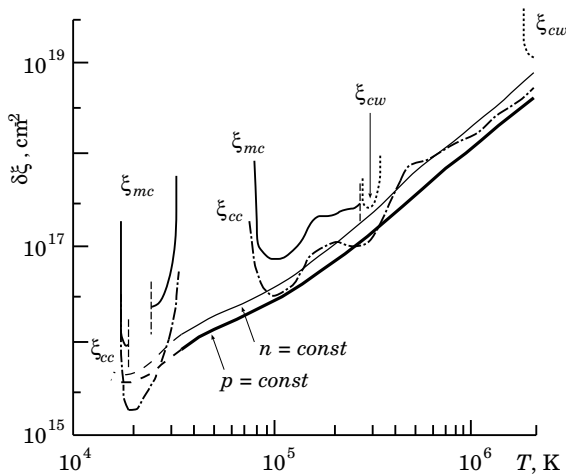
$F_S$  – максимально возможный поток:

$$F_S = \frac{3}{2} n_e k_B T V,$$

$V$  – тепловая скорость электронов

$F_C$  – конвективный поток быстрых электронов.

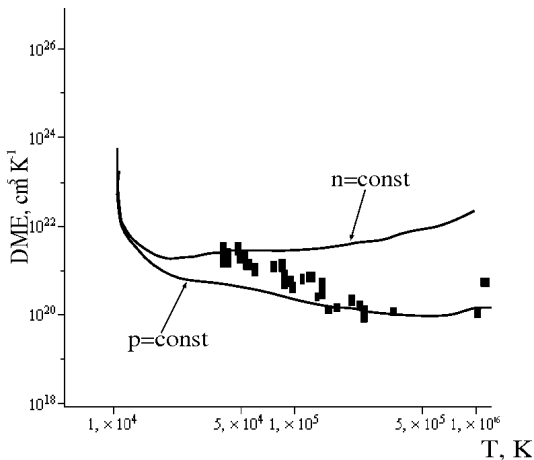
# Устойчивость переходного слоя



$\xi_{cc}, \xi_{cw}$  - нулевая скорость роста возмущений,  
 $\xi_{mc}, \xi_{mw}$  - максимальная скорость роста возмущений.

Оценка оптической толщи говорит о том, что на  $T \lesssim 2 \cdot 10^4$  К не выполняется приближение оптически прозрачной среды.

# Сравнение с наблюдательными данными



Дифференциальная  
 мера эмиссии:

$$DME = \frac{d ME}{d T} =$$

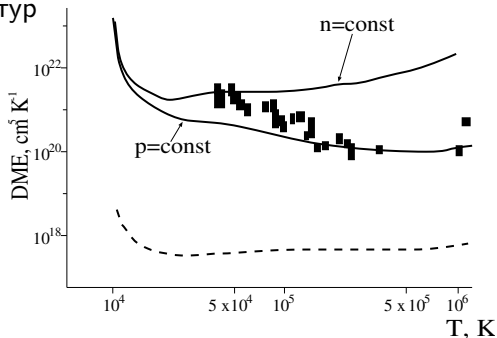
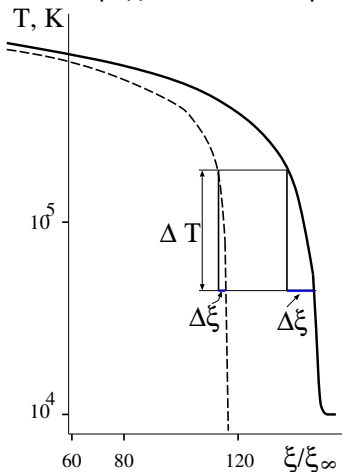
$$|ME = \int_0^x n_e^2 dl| =$$

$$n_e^2 dx / dT = n_e d \xi / d T$$

Данные наблюдений  
 получены на.  
 SUMER/SOHO, 1997.

# Поток быстрых электронов

Поток быстрых электронов играет существенную роль при больших градиентах температур



При таких градиентах температур будет наблюдаться недостаток излучения.

# Результаты

- 1 Получено распределение температуры по толще вещества в переходном слое между короной и хромосферой Солнца в предположении, что нагрев плазмы классическим тепловым потоком уравновешен потерями энергии на излучение.
- 2 Распределение **устойчиво** в рассматриваемом диапазоне температур.
- 3 Распределение **согласуется с наблюдательными данными**.

## Выводы

- 1 Переходная область между короной и хромосферой представляет собой **тонкий слой**, в котором, однако, хорошо **применимо** обычное **столкновительное приближение**.
- 2 В переходном слое спокойного Солнца **режим нагрева ближе к случаю медленного нагрева**, при котором успевает сравняться давление (случай  $p = const$ ).
- 3 Выполненные расчеты позволяют утверждать, что распределение температуры является **устойчивым следствием** тепловой неустойчивости в режиме **конденсационной моды**.

Спасибо за внимание!