

Поперечный электронный перенос в турбулентном режиме ГОЛ-З

А.Д. Беклемишев

ИЯФ СО РАН

11 декабря 2007г.

Постановка задачи

Э.П.Кругляков, май 2007г.:

- Экспериментально обнаружено уменьшение проводимости и продольной электронной теплопроводности в ГОЛ-З в $\sim 10^3$ раз в режиме с инъекцией электронного пучка;
- Это результат уменьшения эффективной длины свободного пробега, \Rightarrow должен вырасти поперечный перенос; Как его оценить?

Коэффициенты поперечного переноса определяют, насколько тонкой можно сделать трубу и минимальную мощность установки.

План

- Модель с отражениями от “каверн”
- Поперечная и продольная теплопроводность
- Оптимизация теплового потока
- Надбарьерные электроны
- Резонансная модель
- Выводы
- Контрольные эксперименты

Адиабатическая модель

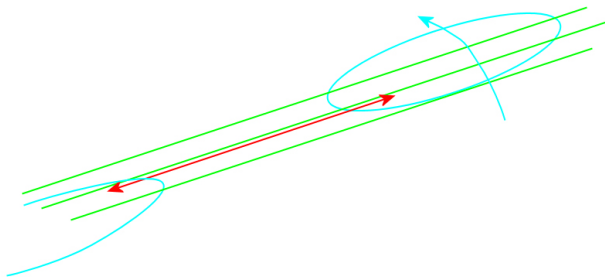
Пучок возбуждает плазменные колебания с $\omega_p/k = c$, т.е., не резонансные с тепловыми электронами. Поэтому считаем, что

- тепловые электроны взаимодействуют не непосредственно с плазменными колебаниями, а через низкочастотного посредника - потенциалы Миллера, каверны, волновые пакеты...; далее - “каверны”;
- взаимодействие адиабатическое и по циклотронной частоте, меняется только продольная скорость;
- Характерные размеры “каверн”- $\lambda_{\perp} \sim 0.1\text{mm} \sim \rho_i$,
 $\lambda_{\parallel} \sim 1\text{mm} \sim 10(c/\omega_p)$ [А.В.Бурдаков];
- Время жизни “каверны” больше времени её пролёта,
 $\tau_{\varphi} > \lambda_{\parallel}/v_{\parallel}$.

Модель - “каверна” с отражением

- В плазме существуют “каверны” большой амплитуды (но редко появляющиеся в окне диагностики); взаимодействие сильное, в виде смены знака продольной скорости;
- амплитуда велика по сравнению с температурой, $e\hat{\phi} > T_e$;
- следовательно, доля объёма под “кавернами” в каждый момент времени мала, но растёт с уровнем турбулентности, $N \ll 1$, $N \propto W/nT$.

Мгновенная ловушка



Длина свободного пробега до отражения (при $m_e v_{\parallel}^2 < 2e\hat{\phi}$)

$$l_{\varphi} \sim \frac{1}{\pi \lambda_{\perp}^2 n_{\varphi}} = \frac{\lambda_{\parallel}}{N}.$$

Подавление продольной теплопроводности

Если каверны не исчезают за время пролёта между ними ($\tau_\varphi \gg l_\varphi/v_{\parallel}$) то

$$D_{\parallel}^0 = \frac{l_\varphi^2}{\tau_\varphi} = \frac{1}{\pi^2 \lambda_{\perp}^4 n_\varphi^2 \tau_\varphi} = \frac{\lambda_{\parallel}^2}{N^2 \tau_\varphi}.$$

А если время их жизни мало, то

$$D_{\parallel}^1 = l_\varphi v_T = \frac{\lambda_{\parallel} v_{Te}}{N}.$$

Однако есть ещё и дрейф самих электронов...

Поперечный дрейф

Время взаимодействия (отражения) можно оценить как

$$t_e = \frac{m_e v_{\parallel}}{e \hat{\phi}} \lambda_{\parallel}, \quad t_e \ll \tau_{\varphi},$$

Скорость дрейфа в поле каверны

$$v_E = c \frac{\hat{\phi}}{\lambda_{\perp} B},$$

тогда смещение за одно столкновение составит

$$\delta \sim v_E t_e = c \frac{\hat{\phi}}{\lambda_{\perp} B} \frac{m_e v_{\parallel}}{e \hat{\phi}} \lambda_{\parallel} = \frac{v_{\parallel} \lambda_{\parallel}}{\omega_{ce} \lambda_{\perp}} \sim \rho_e \frac{\lambda_{\parallel}}{\lambda_{\perp}}.$$

Поперечное смещение

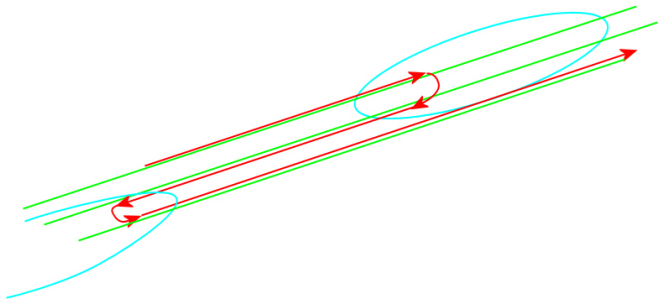
Само по себе поперечное смещение не может вывести электрон из взаимодействия с данной рассеивающей каверной, поскольку происходит оно строго поперёк градиента потенциала. Однако дрейф электрона в поле каверны на другом конце мгновенной ловушки будет в ином случайном направлении...

$$\delta \rightarrow \delta_{\text{eff}} = \delta \left(1 + \frac{\delta}{\lambda_{\perp}} \right)^{-1} = \frac{\delta}{1 + \eta} \leq \lambda_{\perp},$$

$$\eta \equiv \frac{\rho_e \lambda_{\parallel}}{\lambda_{\perp}^2} \sim \frac{\delta}{\lambda_{\perp}}.$$

В ГОЛ-3 $\delta \sim 10\rho_e$, а $\eta \sim 1$...

Поперечная диффузия



Роль времени случайного шага играет время между последовательными столкновениями:

$$D_{\perp} = \frac{\delta_{\text{eff}}^2}{l_{\varphi}/v_{\parallel}} = N\rho_e^2 \frac{\lambda_{\parallel} v_{Te}}{\lambda_{\perp}^2 (1 + \eta)^2}.$$

Подавление продольной теплопроводности

Поперечное время удержания электрона между двумя кавернами можно оценить как

$$\tau_{\delta} = \lambda_{\perp}^2 \frac{l_{\varphi}/v_{\parallel}}{\delta_{\text{eff}}^2} = \frac{\lambda_{\parallel}(1+\eta)^2}{Nv_{\parallel}\eta^2}.$$

По принципу срабатывания меньшего времени имеем

$$D_{\parallel} = \frac{\lambda_{\parallel}v_{\text{Te}}}{N} \left[1 + \left(\frac{\lambda_{\parallel}}{Nv_{\text{Te}}\tau_{\varphi}} + \left(\frac{\eta}{1+\eta} \right)^2 \right)^{-1} \right]^{-1} \sim \frac{\lambda_{\parallel}v_{\text{Te}}}{N}.$$

Экспериментальные данные о характере флуктуаций вероятно соответствуют тому, что выражение в квадратных скобках равно единице.

Соотношения между коэффициентами

Поперечная диффузия растёт с числом заполнения N тогда как продольная - падает,

$$D_0 = \sqrt{D_{\perp} D_{\parallel}} \approx \rho_e v_{Te} \frac{\lambda_{\parallel}}{\lambda_{\perp} (1 + \eta)}.$$

Отношение коэффициентов диффузии

$$\frac{D_{\perp}}{D_{\parallel}} \approx \frac{N^2 \rho_e^2}{\lambda_{\perp}^2 (1 + \eta)^2}$$

остаётся много меньше единицы, $D_{\perp}/D_{\parallel} \sim 10^{-3} N^2 \sim 10^{-6}$, если для грубой оценки $N \sim 0.03$ использовать данные по коэффициенту подавления продольной теплопроводности (в 1000 раз).

Ограничение длины ловушки

Относительная малость поперечного коэффициента диффузии ещё не значит, что поперечными потерями можно пренебречь. В цилиндре длиной L и радиуса a

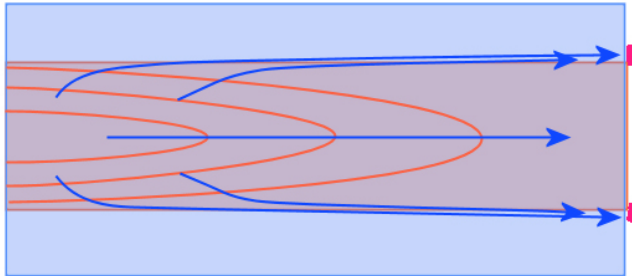
$$\frac{F_a}{F_L} \sim \frac{2\pi a L D_{\perp} |\nabla_{\perp} T|}{\pi a^2 D_{\parallel} |\nabla_{\parallel} T|} \sim \frac{L^2 D_{\perp}}{a^2 D_{\parallel}} = \left(\frac{N \rho_e L}{a \lambda_{\perp} (1 + \eta)} \right)^2.$$

С учётом очень маленького радиуса плазмы в ГОЛ-3 при большой длине, получим $F_a/F_L \sim 1$. Дальше увеличивать уровень турбулентности, N , или относительную длину ловушки нельзя. Минимальное значение a/L (при котором поперечные потери меньше продольных):

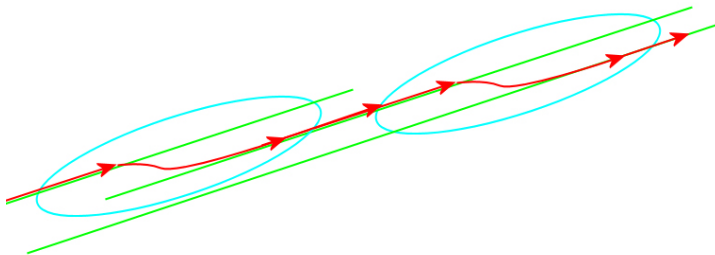
$$\left(\frac{a}{L} \right)_{\min} = \left(\frac{D_{\perp}}{D_{\parallel}} \right)^{1/2} \approx \frac{N \rho_e}{\lambda_{\perp} (1 + \eta)} \sim 10^{-3}.$$

Тепловой поток на стенку

Если поперечные потери в тени пучка сравнимы с продольными, а в “шкурке” турбулентности нет, то “радиальный” тепловой поток попадает на торец в виде узкого кольца вокруг внешней границы пучка. Измерить радиальный профиль теплового потока на торец было бы очень полезно...



Пролётные частицы



За время взаимодействия с каверной, $\tau_k = \lambda_{\parallel}/v_{\parallel}$, меняются поперечное смещение и продольная скорость,

$$\delta r = c \frac{E_{\perp}}{B} \tau_k, \quad \delta v_{\parallel} = \alpha \frac{e\hat{\phi}}{mv_{\parallel}}.$$

Здесь $\alpha = \delta\varepsilon_k/e\hat{\phi}$ - степень неадиабатичности взаимодействия, для силы Миллера $\alpha \sim v/c \ll 1$.

Переносы на пролётных частицах

Таким образом,

$$D_{\perp} = \frac{N\delta r^2}{\tau_k} = N \frac{\lambda_{\parallel}}{v_{Te}} \left(\frac{c\hat{\phi}}{\lambda_{\perp}B} \right)^2,$$

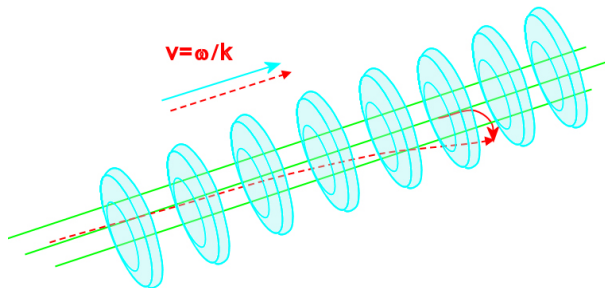
$$D_v = N\alpha^2 \frac{v_{\parallel}}{\lambda_{\parallel}} \left(\frac{e\hat{\phi}}{mv_{\parallel}} \right)^2,$$

$$D_{\parallel} = \frac{v_{\parallel}^4}{D_v} = \frac{\lambda_{\parallel} v_{Te}^3}{N\alpha^2} \left(\frac{e\hat{\phi}}{mv_{Te}} \right)^{-2},$$

$$D_0 \equiv \sqrt{D_{\parallel}D_{\perp}} = \rho_e v_{Te} \frac{\lambda_{\parallel}}{\alpha \lambda_{\perp}}.$$

Поперечный перенос оказывается относительно очень большим!

Модель с резонансным рассеянием



Поперечное

поле возникает из-за конечной поперечной длины когерентности, $E_{\perp} \sim E_{\parallel} \lambda_{\parallel} / \lambda_{\perp}$. Следовательно, на длине δl происходит не только изменение продольной скорости, но и поперечный дрейф, причём они пропорциональны друг другу:

$$\delta v_{\parallel} = \frac{eE_{\parallel}}{mv_{\parallel}} \delta l, \quad \delta r = c \frac{E_{\perp}}{B} \frac{\delta l}{v_{\parallel}},$$

Диффузия по скорости

$$\delta r = \frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}} \frac{\delta v_{\parallel}}{\omega_{ce}} = \frac{\lambda_{\parallel} \rho_e}{\lambda_{\perp}} \frac{\delta v_{\parallel}}{v_{\parallel}} = \eta \lambda_{\perp} \frac{\delta v_{\parallel}}{v_{\parallel}}.$$

Декорреляция частицы с волной должна влиять одновременно на продольное ускорение и средний поперечный дрейф (независимо от причины декорреляции), поэтому связаны и коэффициенты диффузии

$$D_{\perp} = \frac{\delta r^2}{\tau_c} = \left(\frac{\eta \lambda_{\perp}}{v_{\parallel}} \right)^2 D_v.$$

Диффузия по продольной скорости приводит к изменению знака скорости за время $\tau \sim v_{\parallel}^2 / D_v$.

Продольный перенос

Эффективная длина свободного пробега равна

$l_{\parallel} = \tau v_{\parallel} = v_{\parallel}^3 / D_v$, и, значит,

$$D_{\parallel} = \frac{v_{\parallel}^4}{D_v} = \frac{(\eta \lambda_{\perp} v_{\parallel})^2}{D_{\perp}}.$$

Как и в первой модели:

$$D_0 = \sqrt{D_{\parallel} D_{\perp}} \approx \rho_e v_{Te} \frac{\lambda_{\parallel}}{\lambda_{\perp}}.$$

Разница заключается в ином определении λ_{\parallel} (в резонансном случае это - просто длина волны $\sim r_d!$), так что D_0 может оказаться на один-два порядка меньше, чем в случае рассеяния на “кавернах”.

Сравнение

- Адиабатическое взаимодействие с отражением (при $\varepsilon < e\hat{\varphi}$) даёт

$$D_0 = \sqrt{D_{\perp} D_{\parallel}} \approx \rho_e v_{Te} \frac{\lambda_{\parallel}}{\lambda_{\perp} (1 + \eta)}.$$

- Надбарьерные частицы рассеиваются по v_{\parallel} только в меру неадиабатичности, поэтому

$$D'_0 = D_0 / \alpha \gg D_0.$$

- Резонансные частицы взаимодействуют с более плоскими возмущениями, так что $\lambda_{\parallel} / \lambda_{\perp} \sim r_d / \lambda_{\perp} \ll 1$,

$$D''_0 \approx \rho_e v_{Te} \frac{\lambda_{\parallel}}{\lambda_{\perp}} \ll D_0.$$

Выводы

- Получены оценки поперечного переноса по электронному каналу в режиме с развитой турбулентностью;
- Оказалось, что произведение продольного и поперечного коэффициентов электронной теплопроводности слабо зависит от уровня турбулентности и сильно - от типа флуктуаций;
- При подавлении продольного переноса в 1000раз в ГОЛ-3 поперечный перенос может быть порядка Бомовского;
- При заданном уровне турбулентности существует оптимальное отношение длины ловушки и радиуса пучка ($\sim 10^3$ для ГОЛ-3).

Вопросы

- Какой именно механизм отвечает за рассеяние по продольной скорости?
- Можно ли считать поперечные смещения дрейфовыми?
- Насколько рассеяние адиабатично? (Вероятно, неадиабатичность можно связать с темпом нагрева.)

Контрольные эксперименты

- Измерить радиальный профиль теплового потока на торец -> оценка отношения продольного и поперечного переносов;
- Найти продольную теплопроводность (по абсолютной величине теплового потока и градиенту?);
- 1) +2) -> коэффициент поперечного переноса и $D_0 = \sqrt{D_{\parallel} D_{\perp}}$.

Величина D_0 и функциональные зависимости D_{\parallel}, D_{\perp} позволят сравнить разные модели.

- Ну и, конечно, измерение спектров турбулентности в коротковолновой области по волновым числам и в области низких частот :);