

Integrated plasma physics modelling for the Culham
steady state spherical tokamak fusion
power plant
H.R. Wilson et al.

Доклад подготовил
студент группы М19-208
Дрозд Алексей

- Расчет стационарного режима работы сферического токамака для производства электроэнергии – сложная самосогласованная задача;
- Цели данной работы:
 1. Показать, что данное решение существует;
 2. Получить новые данные о возможности работы установки в данном режиме;
 3. Оценить перспективы развития установок с малым аспектным соотношением.
- Для исследования использованы данные, полученные посредством моделирования, а также экспериментальная информация со сферического токамака MAST.

- Параметры, приведенные в таблице, получены итеративным методом при исследовании результатов моделирования, аналитических вычислений, предварительных физических оценок и инженерной части;
- Невозможен плавный переход в устройстве токамака от сферического к токамаку со стандартным аспектным отношением.

Малое аспектное отношение

Плюс: Уменьшение стоимости установки

Минус: Отсутствие места с внутренней стороны тора

Parameter	Value
Major radius/minor radius (m)	3.42/2.44
Elongation	3.2
Triangularity	0.55
Plasma current (MA)	31
Centre rod current (MA)	30.2
Safety factor on axis, at edge	3, 15
Line-average, central density ($\times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)	10.8, 12.6
Greenwald density ($\times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)	16.6
Average temperature (keV)	22
β (%), β_N	59, 8.2
Internal inductance, $l_i(2)$	0.21
Z_{eff}	1.6
Fusion power (GW)	3.1
Current drive power (MW)	50–60
Auxiliary current drive (MA)	2.3
Pressure driven current (MA)	28.7
Confinement factor, $H_{\text{IPB98}(y, 2)}$	1.6
Relative He confinement, $\tau_{\text{He}}^*/\tau_E$	4
Average neutron wall loading (MW m^{-2})	3.5
Peak neutron wall loading (MW m^{-2})	4.6

- Минимальное аспектное отношение: $A \sim 1,4$. Существует широкий минимум в стоимости электричества в районе $A = 1,5$.
- Оценки проведены для мощности термоядерного выхода $P = 3 \text{ ГВт}$, что соответствует $\sim 1 \text{ ГВт}$ электрической мощности станции.

- Размер установки выбирался исходя из нагрузки на стенку, которая ограничена значением $3,5 \text{ МВт/м}^2$;

- Низкое аспектное отношение и полый профиль тока позволяют работать при значении вытянутости $\kappa = 3,2$;

- Главный радиус $R = 3,42 \text{ м}$;

- Стремление максимизировать долю бутстреп-тока: $I_{bs} \propto \beta_N I_{rod} h(\kappa)$.

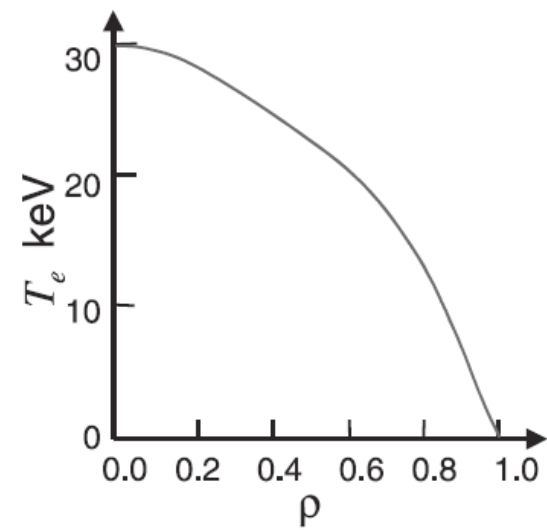
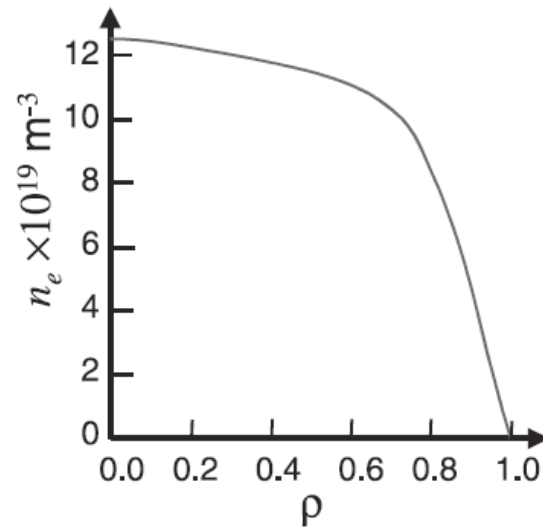
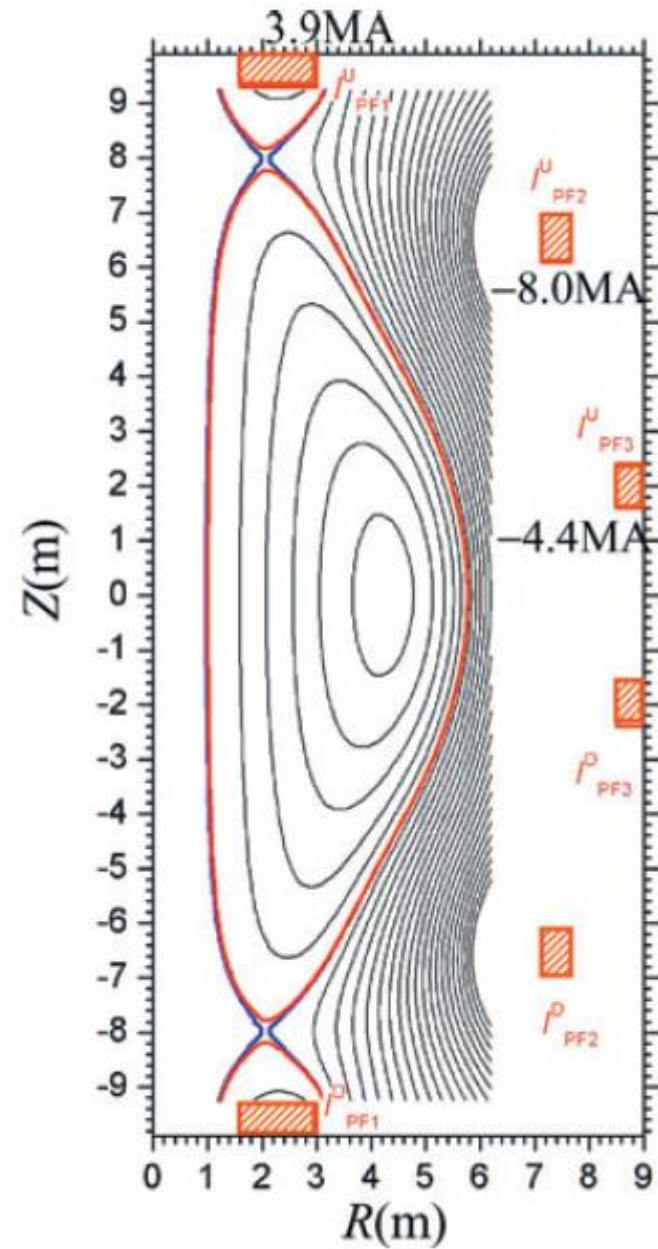
При $\beta_N = 8,2$ и $I_{rod}/I_p = 1$ возможно достичь 90% доли неиндукционного тока;

- Требования к мощности выхода дают значения тока 30-31 МА;

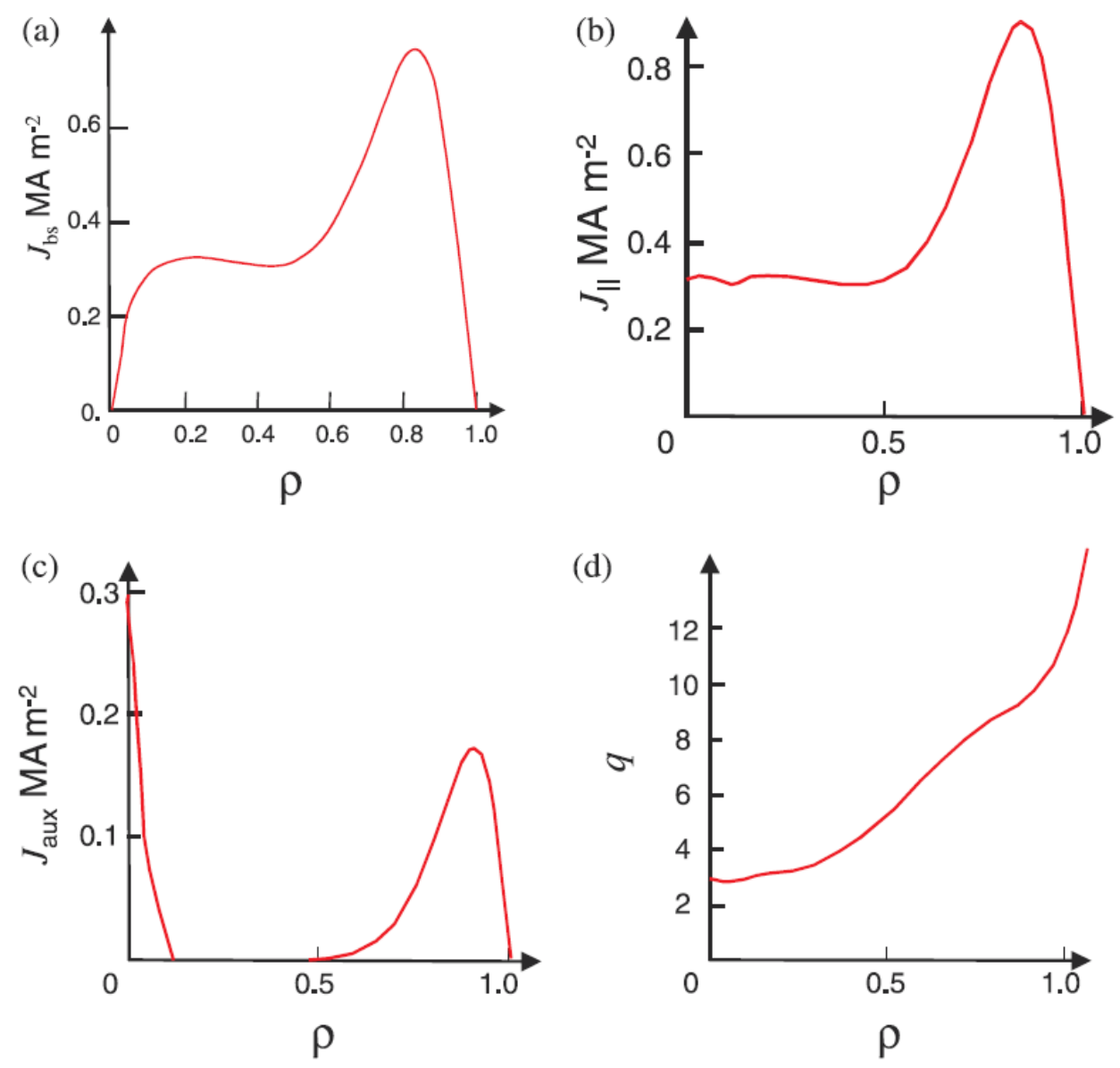
- Выбрана средняя плотность в 0,65 плотности Гринвальда ($1,08 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$) для упрощения создания необходимой генерации тока средствами донагрева;

- Требуется превышение параметра удержания $IPV98(y,2)$ в $\sim 1,6$ раз.

Equilibrium properties



Ток, связанный с давлением составляет 92%, из которого 82% - бутстреп ток.



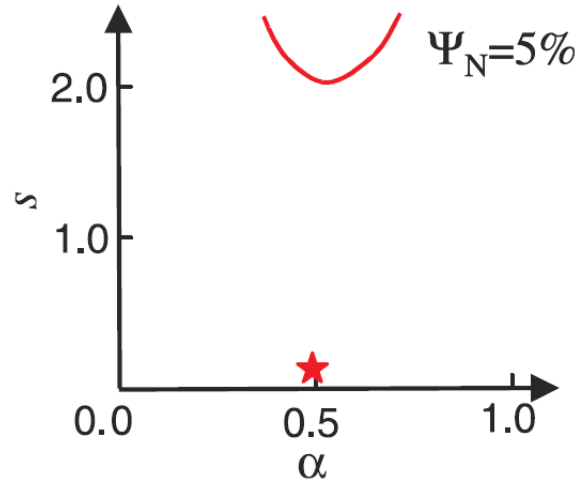
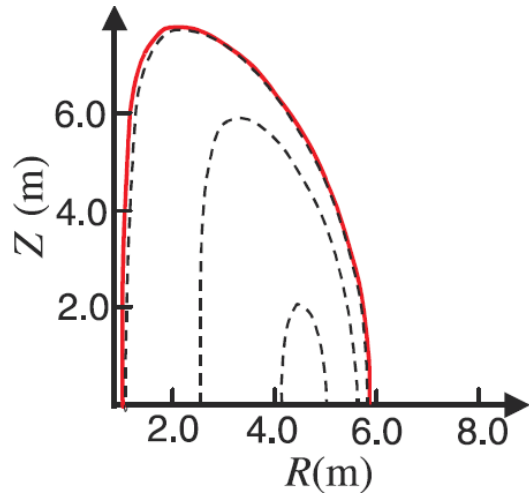
$$l_i^{(2)} = \frac{L^2}{2\pi \mu_0^2 I_p^2 V} \oint B_\theta^2 dV = 0.21$$

$$l_i^{(3)} = \frac{4\pi}{\mu_0^2 I_p^2 R_g} \oint B_\theta^2 dV = 0.12$$

- Вертикальная устойчивость оценена при помощи RASE filament code;
- Система находится вблизи границы устойчивости (без системы обратной связи);
- Скорость нарастания неустойчивости 10 мс;
- Индекс вертикальной стабильности $f_s = 3,5$.

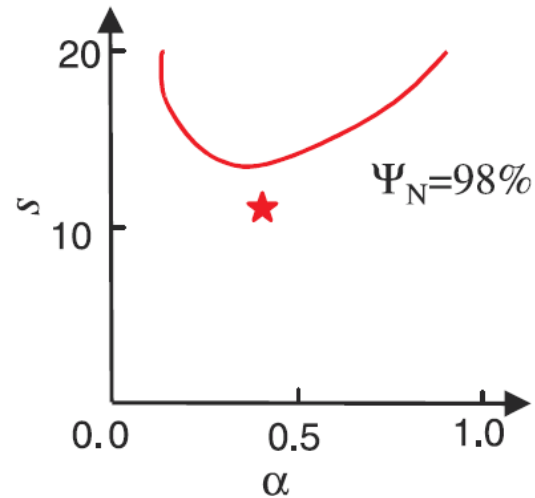
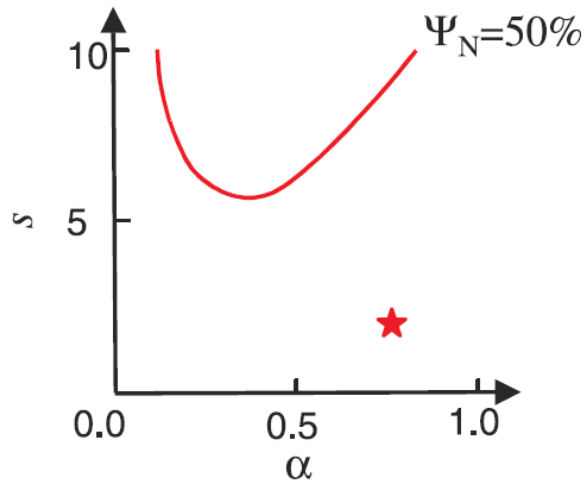
MHD stability

Баллонные моды



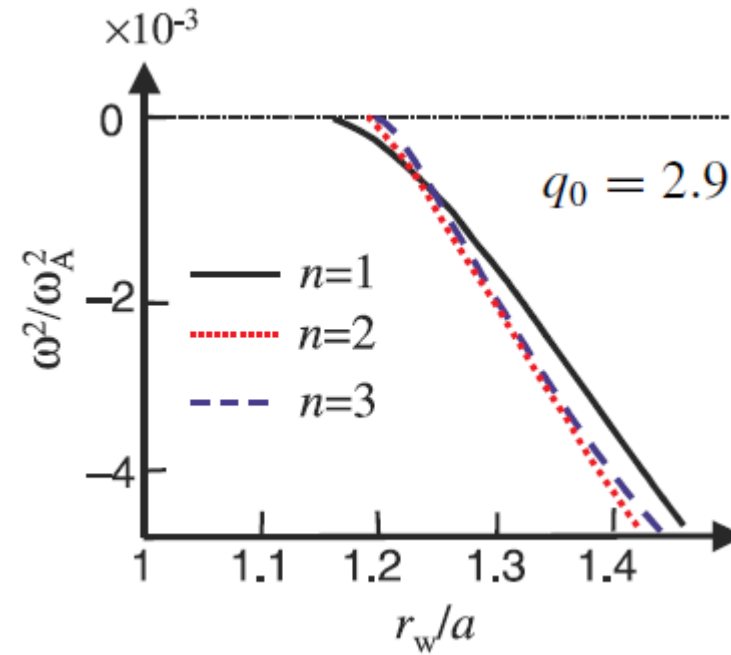
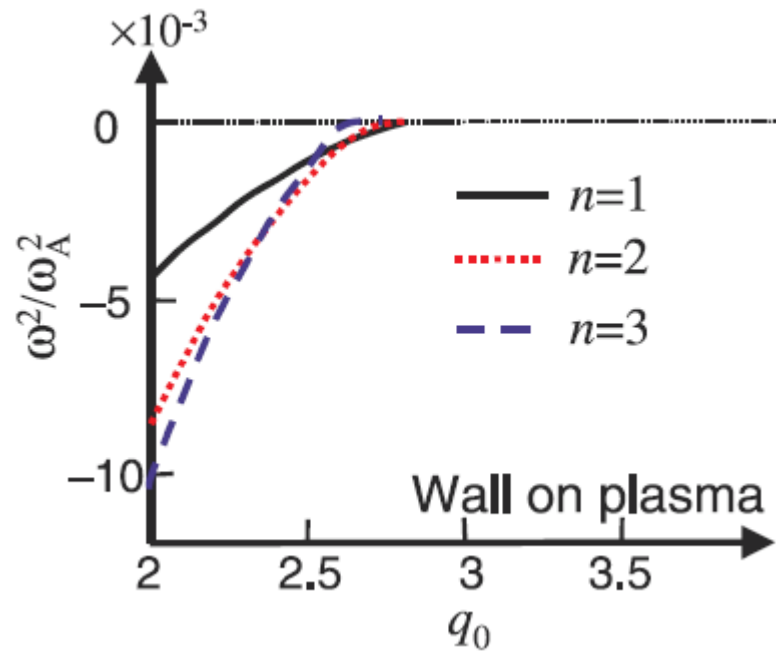
$$s = (R_2 - R_0) \frac{R_0 B_\theta}{q} \frac{dq}{d\psi}$$

$$\alpha = -2\mu_0 \frac{(R_2 - R_0)^2}{B_\theta} \frac{dp}{d\psi}$$



Кинк-моды

$$q_0 < q_c \quad q_c \approx 3$$



- Остается проблема с resistive wall mode, которая не рассматривается в данной статье

Неоклассические тиринг-моды

$$\frac{\tau_r}{r^2} \frac{dw}{dt} = \Delta' + \frac{D_{bs}}{w} + \frac{D_G}{w}$$

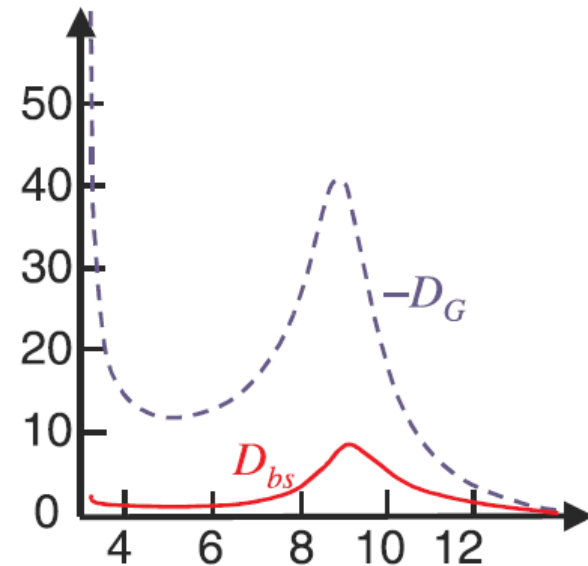
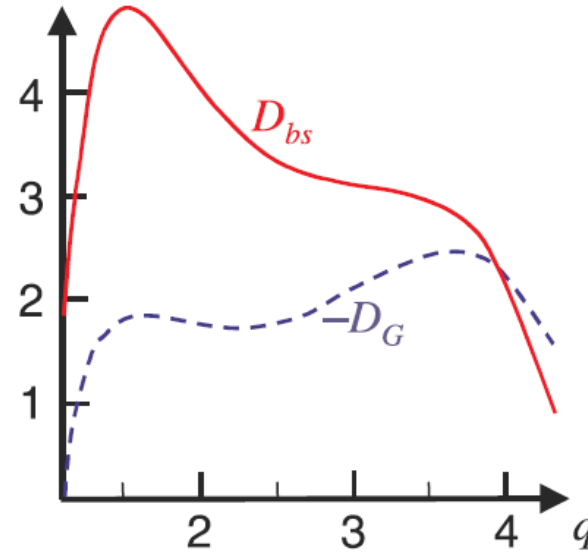
$$\Delta' < 0 \text{ and } D_{bs} > 0$$

$$D_{bs} = 3.2 \frac{\langle \mathbf{J}_{bs} \cdot \mathbf{B} \rangle q}{q' f p} \beta_\theta$$

$$f = RB_\phi$$

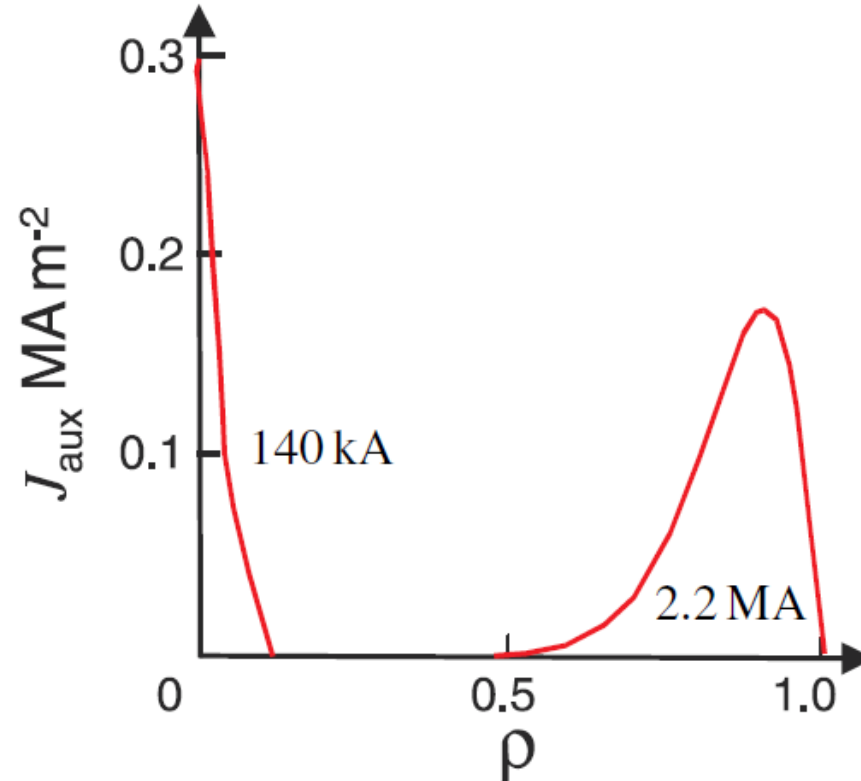
$$\alpha_s = 0.5 + (0.25 - D_M)^{1/2}$$

$$D_M = D_R + H(1 - H)$$



Current drive

- Около 8% тока (2,3 MA) должно создаваться методами дополнительной генерации

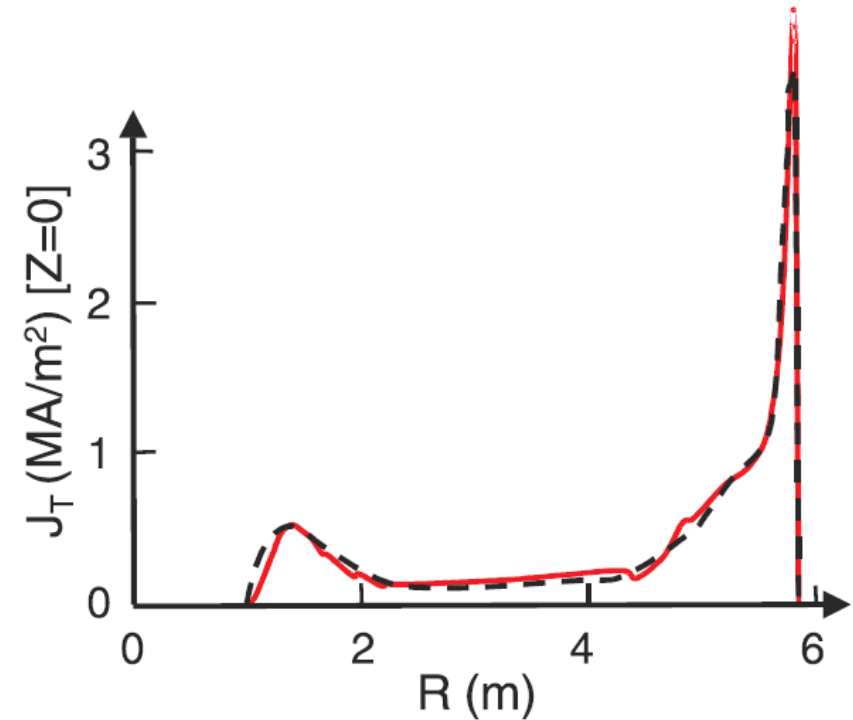


Инжекция нейтралов

- LOCUST (Larmor Orbit Code for Use in Spherical Tokamaks);

Два пучка:

1. 20 МВ_Т, 0,5 МэВ, (-), R = 4.0 м;
 2. 40 МВ_Т, 80 кэВ, (+), R = 5.65 м
- Инжекция под углом 60° к горизонтали



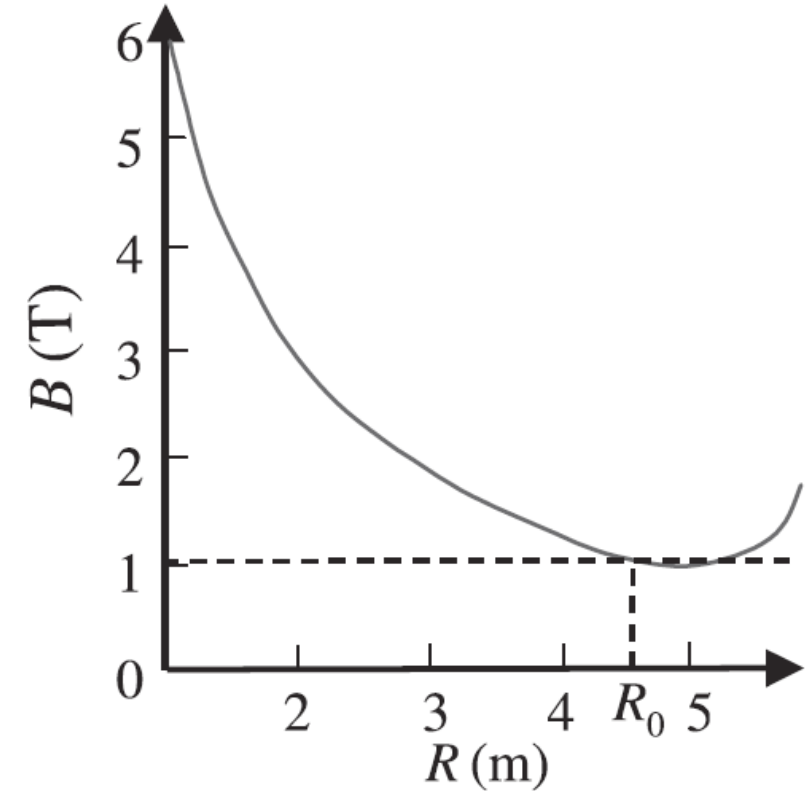
- Может обеспечить необходимый профиль и значение тока;
- Требуется много места для портов и оборудования.

Электромагнитная генерация

$$\omega = \frac{eB}{mc}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{4\pi ne^2}{m}}$$

- 130 ГГц, 4-я гармоника у магнитной оси;
- 15 МВт для 140 кА на оси;



- Не подходит для генерации тока во внешней части шнура, так как увеличивает скорость, перпендикулярную магнитному полю.

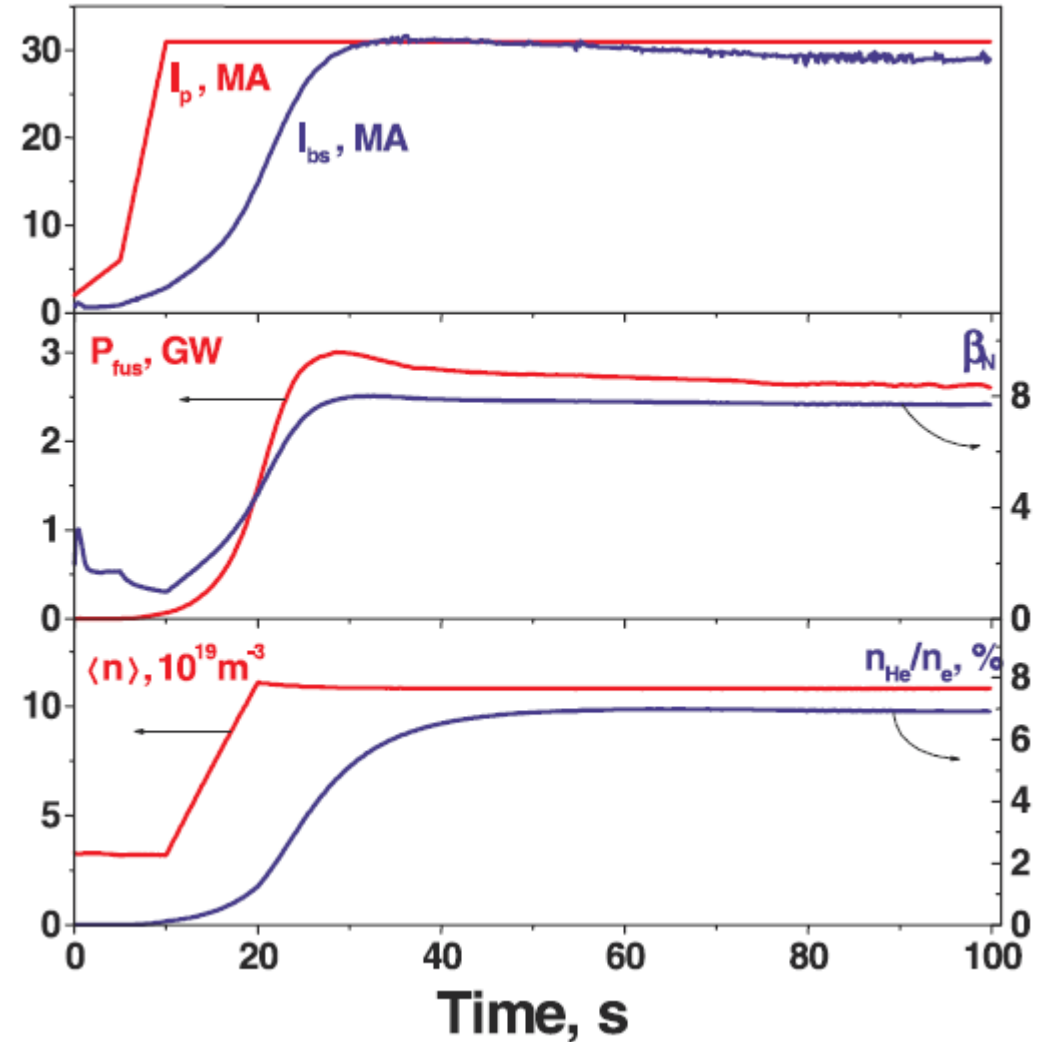
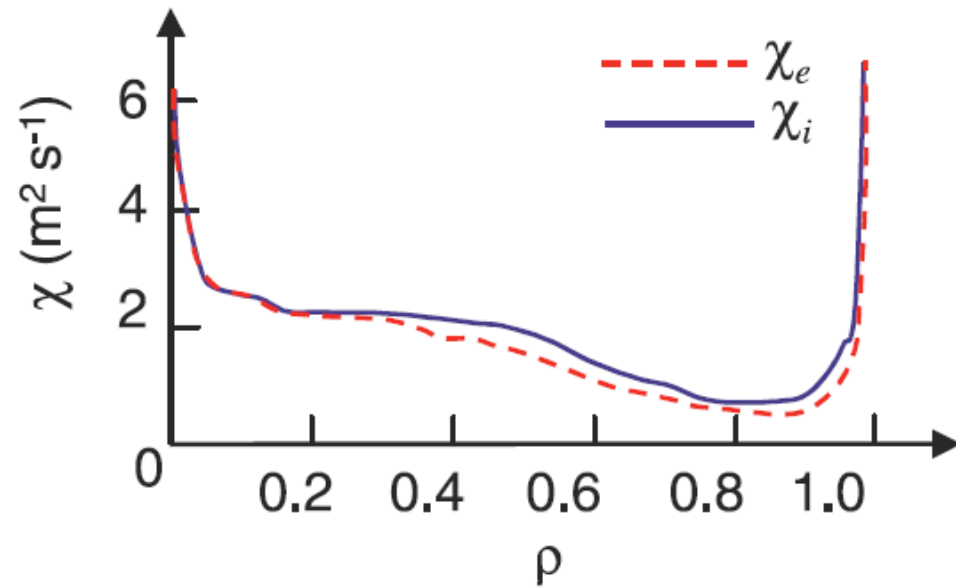
Электронные Бернштейновские волны

- Не распространяются в вакууме;
 - Не имеет низкой частоты отсечки;
 - Идея генерации через О-Х-В конвертацию;
 - Затухает на электронах, имеющих большую составляющую параллельной компоненты скорости;
 - Большое затухание вне оси усложняет генерацию тока в центре шнура данным методом.
-
- Достаточно большая эффективность генерации тока по краям плазмы (0,1 – 0,15 А/Вт);
 - Данные оценки должны быть сравнены с вычислениями по модели Фоккера-Планка с учетом эффектов захвата

Confinement

- Требуется превышение параметра удержания $IPB98(y,2)$ в $\sim 1,6$ раз;
- Возможно достижение Н-моды, оценочное значение мощности 50 МВт;
- Вычислены те значения теплопроводности, которые обеспечивают профили, представленные ранее;

Моделирование в ASTRA с учетом α -частиц:
 Нагрев достаточно равномерно распределен между
 электронами и ионами

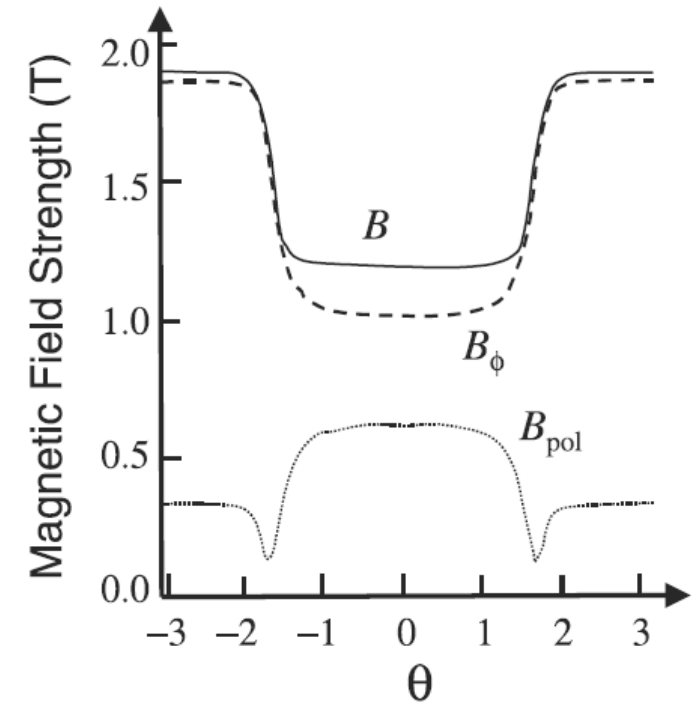
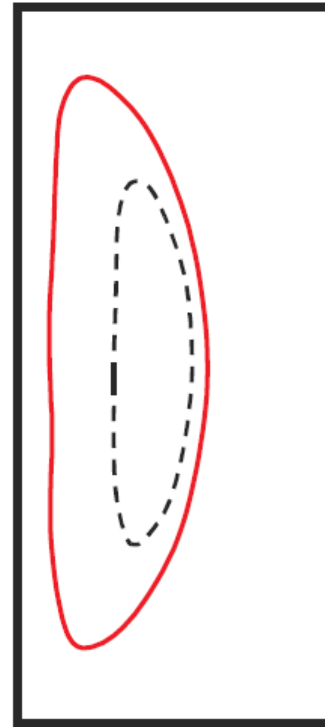


Микронеустойчивости

Исследование при помощи кода GS2

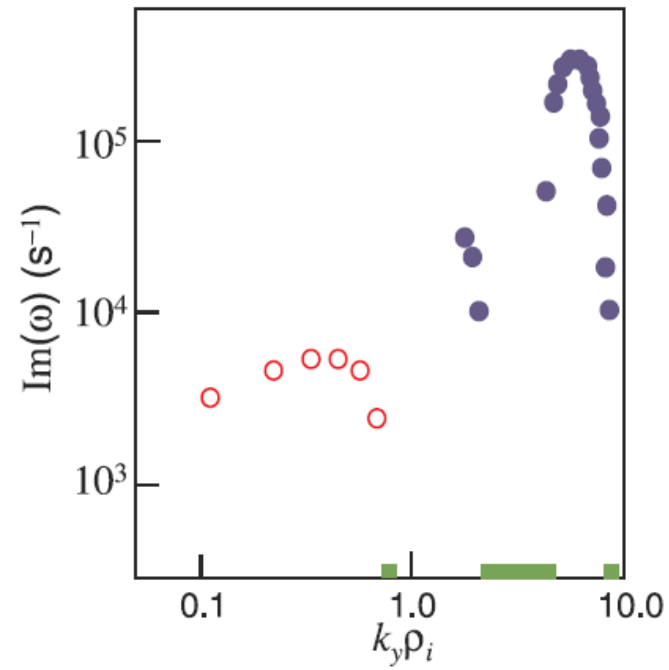
При рассмотрении электростатических мод неустойчивостей не обнаружено;

При наличии электромагнитных эффектов предсказано наличие тиринг микронеустойчивостей



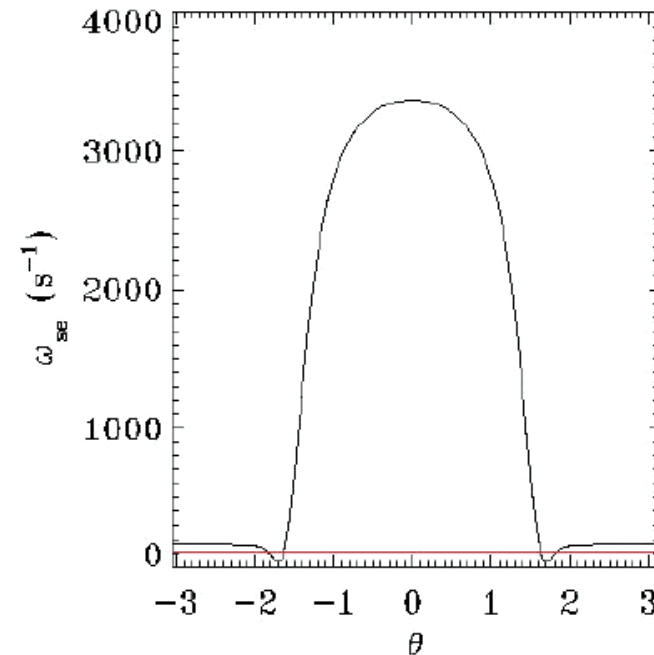
$k_y \rho_i < 1.0$ ITG, моды сильно вытянуты вдоль линий поля

$k_y \rho_i > 1.0$ ETG, моды менее вытянуты вдоль линий поля



$$\omega_{se} = \frac{R^2 B_\theta^2}{B_\phi} \frac{\Delta r}{r \Delta \theta} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \Psi^2}$$

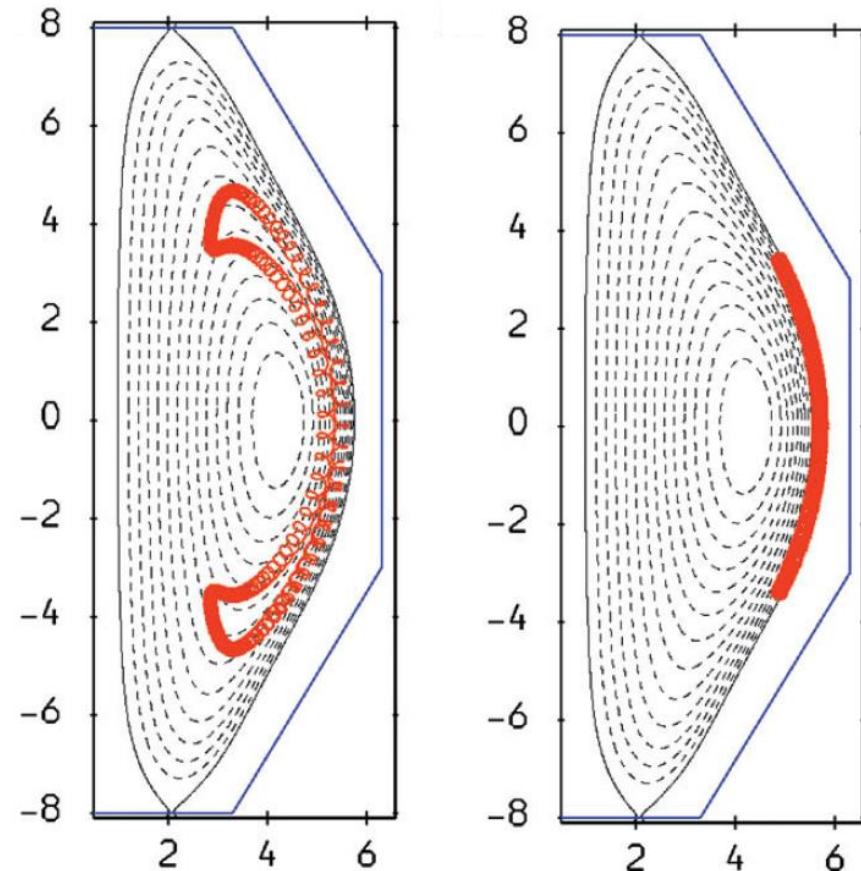
Даже без учета стабилизации ExV широм, расчеты дают значение теплопроводности $\chi \sim 4 \text{ м}^2/\text{с}$, что близко к показанному ранее профилю



Удержание α -частиц

- Расчет потерь с помощью кода CUEBIT;
- Гофрировка тороидального магнитного поля составляет 1%;
- Немонотонное распределение магнитного поля приводит к пинчеванию орбит запертых частиц;

Согласно расчетам, скорость потери частиц составляют 1%



Fuelling

$$\frac{dN}{dt} + \frac{N}{\tau_p} = \Phi_G + \Phi_{NB}$$

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau_p} + (1 - e^{-t/\tau_p}) \tau_p \Phi_{NB} + e^{-t/\tau_p} \int_0^t \Phi_G(t') e^{t'/\tau_p} dt'$$

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau_p} + \tau_p (\Phi_{NB} + \Phi_G) (1 - e^{-t/\tau_p})$$

$$\Phi_{NB} = 3.4 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$$

- Поступление частиц путем нейтральной инжекции оказывается недостаточным (необходимо $\tau_p = 37\text{с} = 20\tau_E$);
- При более разумных значениях $\tau_p = 8\text{с} = 4\tau_E$, необходимый поток газа $\Phi_G = 1.25 \times 10^{22} \text{ s}^{-1}$
- Инжекция пеллет более перспективный метод (более эффективный и позволяет влиять на профиль плотности)

Инжекция пеллет

$$\frac{\lambda}{a} = 0.79 T_e^{-5/9} n_e^{-1/9} N_{\text{pel}}^{5/27} v_{\text{pel}}^{1/3}$$

$$T_e = 30 \text{ and } n_e = 1.08$$

$$\frac{\lambda}{a} = 0.29 \frac{v_{\text{pel}}^{1/3}}{v^{5/27}}$$

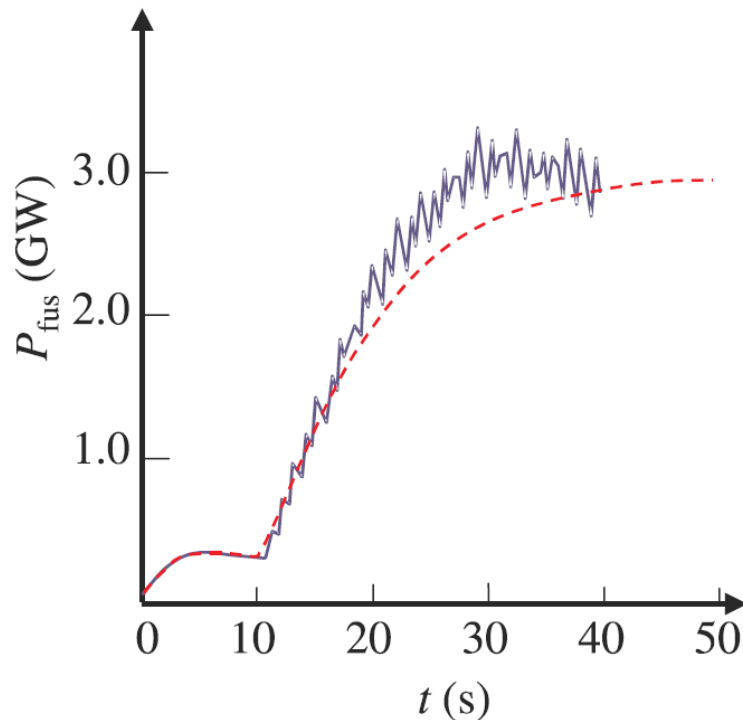
$$v \tau_p \gg 1$$

$$v = 1 \text{ s}^{-1}$$

$$v_{\text{pel}} = 5.1 \text{ km s}^{-1}$$

$$N_{\text{pel}} = 125$$

$$\text{pellet radius} \sim 6\text{--}7 \text{ mm}$$



Сферические токамаки могут иметь большую эффективность
инжекции пеллет со стороны слабого поля

Exhaust

- Большая часть потока тепла (~95%) будет высаждаться на стенку и пластины дивертора со стороны слабого поля:
 1. Большая поверхность SOL;
 2. Турбулентный outboard-ballooning транспорт;
 3. Шафрановский сдвиг.

Model [44]	Δ_h scaling
E1-II	$\Delta_h \propto n^{14/15} R_g^{9/16} B^{-14/15} L_c^{16/15} P_{\text{surf}}^{-2/5}$
E2-II	$\Delta_h \propto n^{14/15} R_g^{9/16} B^{-14/15} L_c^{16/15} P_{\text{surf}}^{-2/5}$
H-II	$\Delta_h \propto n^{7/9} B^{-7/12} L_c^{5/6} P_{\text{surf}}^{-13/36}$
N-II	$\Delta_h \propto n^{7/11} B^{-7/11} L_c^{8/11} P_{\text{surf}}^{-3/11}$
E2-III	$\Delta_h \propto n^{35/26} R_g^{17/31} B^{-14/13} L_c^{31/26} P_{\text{surf}}^{-8/13}$
K2-II	$\Delta_h \propto n^{49/78} B^{-28/39} L_c^{51/78} P_{\text{surf}}^{-10/39}$
F-III	$\Delta_h \propto n^{5/8} B^{-3/4} L_c^{5/8} P_{\text{surf}}^{-1/4}$
Q-II	$\Delta_h \propto n^{7/9} L_c^{4/9} P_{\text{surf}}^{-5/9}$

- Расположение пластин под углом 10°
- Поток на внешнюю мишень $17.8 \pm 8.5 \text{ MW m}^{-2}$
- Поток на внутреннюю мишень $4.4 \pm 2.5 \text{ MW m}^{-2}$
- Худший сценарий 29.3 MW m^{-2} 13.2 MW m^{-2}

Models	E1/E2-II	H-II	N-II	E2-III	K2-II	F-III	Q-II	Average
Δ_h^{outer} (mm)	44.2	22.3	19.3	40.4	16.3	15.2	18.0	25 ± 12
Δ_h^{inner} (mm)	57.3	36.8	23.0	66.2	15.5	13.3	65.8	40 ± 23

Заклучение

Equilibrium properties +

MHD stability ?

Current drive ??

Confinement ??

Fuelling ?

Exhaust ???

Спасибо за внимание