

# Инжекция вещества для управления плазмой токамаков и ее диагностики

В.Ю. Сергеев

НИЛ УТС

Физико-механический институт

СПбПУ

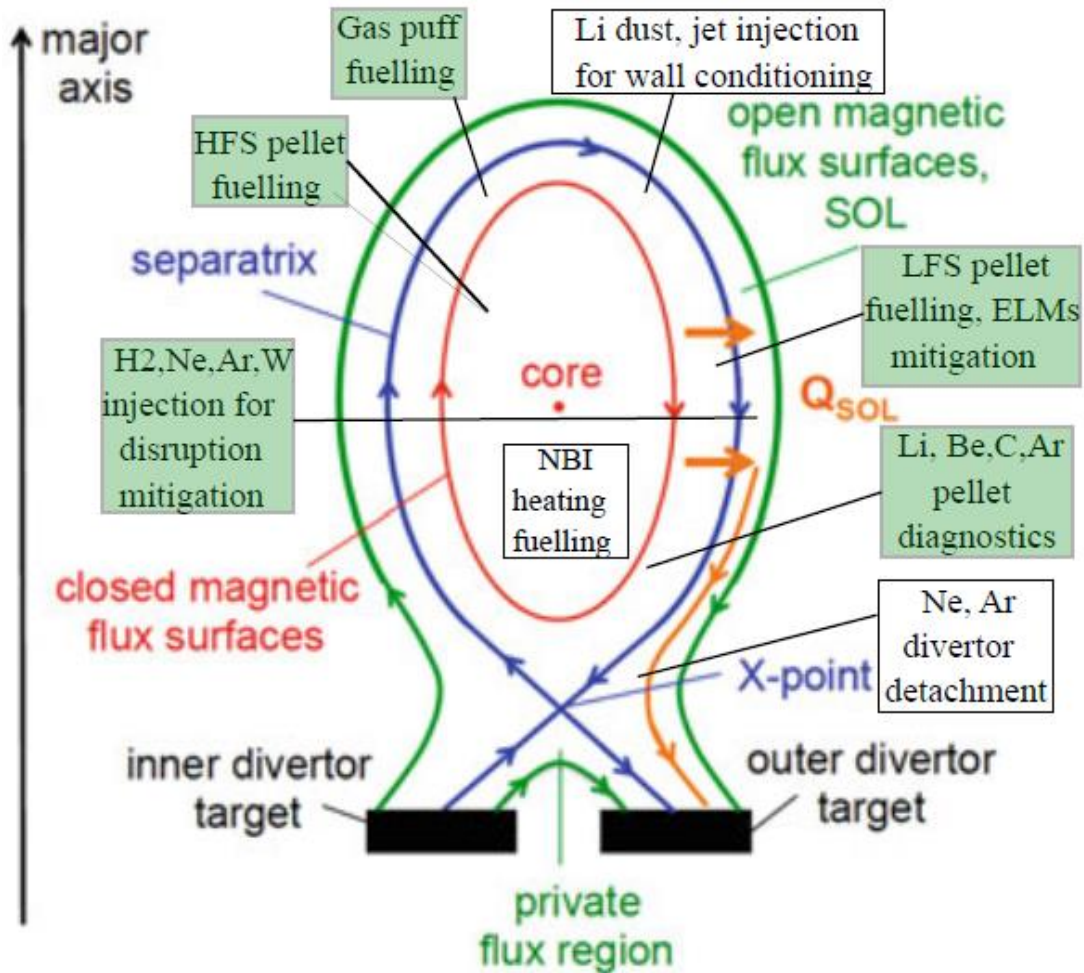
# План доклада

- Введение
- Инжекция криогенных макрочастиц
- Смягчение последствий срыва
- Диагностические приложения инъекции макрочастиц
- Результаты работ 2022-2024 гг.
- Планы работ 2025-2030 гг.
- Выводы

# План доклада

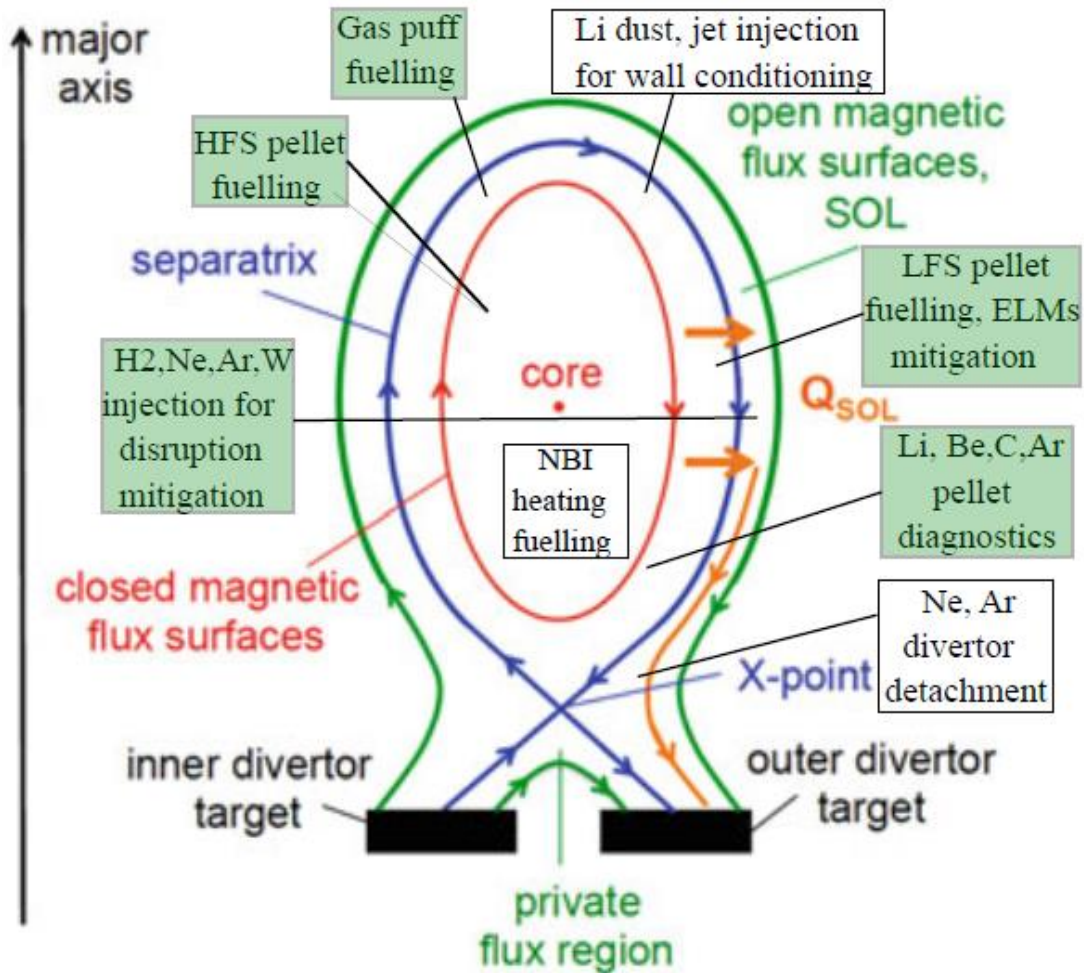
- **Введение**
- Инжекция криогенных макрочастиц
- Смягчение последствий срыва
- Диагностические приложения инъекции макрочастиц
- Результаты работ 2022-2024 гг.
- Планы работ 2025-2030 гг.
- Выводы

# Инжекция вещества в токамаки



Что инжектируется	Для чего инжектируется	
	Управление параметрами	Диагностика параметров
Твердое тело (криогенные изотопы водорода, примесные, многослойные макрочастицы, разрушенные макрочастицы, порошки)	<p><b>Ввод топлива;</b>                      Выключение разряда;  <b>Управление частотой периферийных локализованных мод (ELMs);</b>                      «Кондиционирование» разряда;                      Управление излучательными потерями из плазмы.</p>	<p><b>Перенос тепла, частиц и примесей;</b>                      Направление магнитного поля;                      Плотность тока плазмы;  <b>Функция распределения быстрых ионов по скоростям;</b>                      Эффективный заряд плазмы.</p>
Жидкость (капли, струи)	<p>Ввод топлива;                      Выключение разряда;                      «Кондиционирование» разряда;                      Управление излучательными потерями из плазмы;</p>	<p>Диагностические приложения отсутствуют</p>

# Инжекция вещества в токамаки (1)



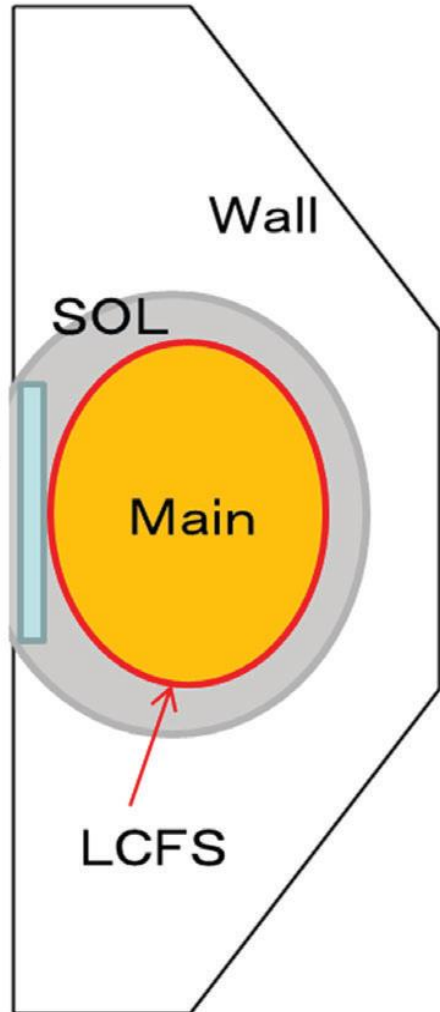
Что инжектируется	Для чего инжектируется	
	Управление параметрами	Диагностика параметров
Газ (изотопы водорода, примесь, атомные и молекулярные пучки)	<p><b>Ввод топлива;</b>  <b>Выключение разряда;</b>                      Нагрев электронов и ионов;                      Управление потерями из плазмы (режим отрыва в диверторе).</p>	<p><b>Перенос тепла, частиц и примесей методом возмущений;</b>                      Функция распределения быстрых ионов по скоростям;                      Скорость вращения плазмы;                      Температура ионов примеси;                      Плотность и температура электронов;                      Визуализация филаментов.</p>
Плазма (сгустки изотопов водорода)	<p>ввод топлива                      управление частотой ELMs</p>	<p>Диагностические приложения отсутствуют</p>

# План доклада

- Введение
- **Инжекция криогенных макрочастиц**
- Смягчение последствий срыва
- Диагностические приложения инъекции макрочастиц
- Результаты работ 2022-2024 гг.
- Планы работ 2025-2030 гг.
- Выводы

# Простейший баланс частиц при пеллет инжекции

[Okamoto CPP 2018]



$$\frac{d\Delta N_e}{dt} = K_{FE} \cdot \Gamma_s - \frac{\Delta N_e}{\tau_p} \xrightarrow[\text{state}]{\text{steady}} \Delta n_{e0} = \frac{K_{FE} \cdot \Gamma_s \cdot \tau_p}{Vol_s}$$

$\Delta N_e$  - увеличение полного числа электронов внутри сепаратрисы;

$Vol_s$  - объем плазмы внутри сепаратрисы;

$\Gamma_s$  - полный поток электронов внутрь сепаратрисы при инжекции;

$\tau_p$  - время удержания частиц в основном объеме;

$N_e/\tau_p$  - поток выходящий из основного объема;

$K_{FE}$  - коэффициент эффективности ввода топлива (*Fueling Efficiency*)

➤ В больших машинах с горячей и плотной SOL плазмой, экранирующей газовые потоки через SOL внутрь сепаратрисы эффективным вводом топлива является инжекция макрочастиц!

# Оценки сверху инжекции $D_2$ для ввода топлива

$$\Delta n_{e0} = \frac{K_{FE} \cdot \Gamma_s \cdot \tau_p}{Vol_s} \quad \Leftarrow \quad K_{FE} = 0.5, \quad \tau_p = 2 \cdot \tau_{E98(y,2)}$$

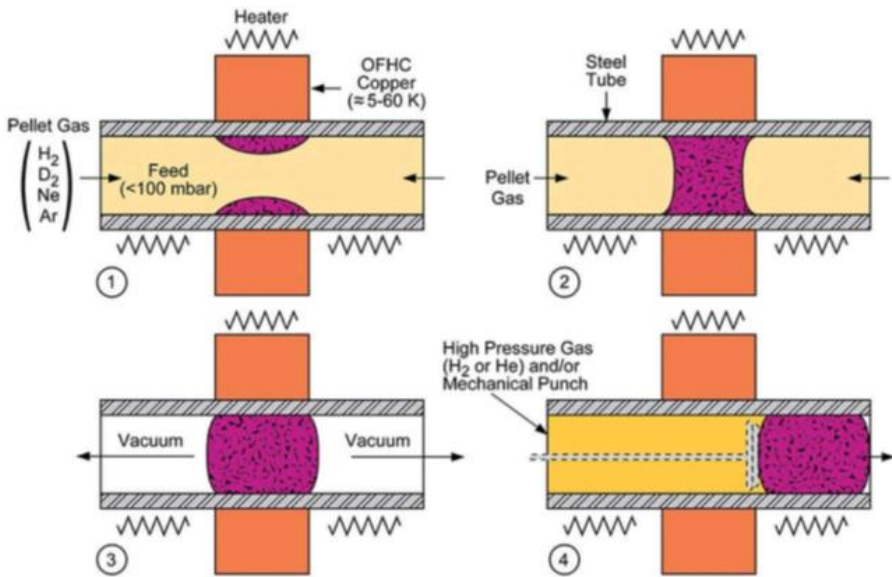
Токамак (проект)	$\Delta n_{e0}$ ( $10^{20} \text{ м}^{-3}$ )	$a/R/k$ (м/м/о.е.)	$Vol_s$ ( $\text{м}^3$ )	$\tau_p$ (сек)	$\Gamma_s$ ( $10^{21} \text{ с}^{-1}$ )	$\widetilde{\Delta n}_e / \Delta n_e$ (о.е.)	$d_p$ (мм)	$f_{fuel}$ (Гц)
ТИН-СТ	1	0,3/0,5/2,0	1,8	0,047	3,8	0,2	1,4	56,4
T-15МД	1	0,67/1,48/1,8	24	0,33	7,2	0,1	2,7	15,7
ТРТ	1	0,57/2,15/1,8	25	0,6	4,1	0,1	2,7	8,6
ДЕМО-ТИН	1	1,0/3,2/1,7	108	1,3	8,3	0,1	4,5	4,0
ИТЭР	1	2,0/6,2/1,7	832	7,0	11,9	0,03	6,0	2.4

- Рост  $\tau_p$  с размерами  $\Rightarrow$  при  $Vol_{SITER}/Vol_{СТИН-СТ} \cong 460$  всего  $\Gamma_{SITER}/\Gamma_{СТИН-СТ} \cong 3$
- Для компактных токамаков даже для  $\widetilde{\Delta n}_e / \Delta n_e = 0.2 \Rightarrow d_p = 1 \text{ мм}$  и  $f_{fuel} \cong 60 \text{ Гц}$
- С ростом размера установки для  $\widetilde{\Delta n}_e / \Delta n_e = 0.1-0.03 \Rightarrow d_p = 2-6 \text{ мм}$  и  $f_{fuel} \cong 16-2 \text{ Гц}$



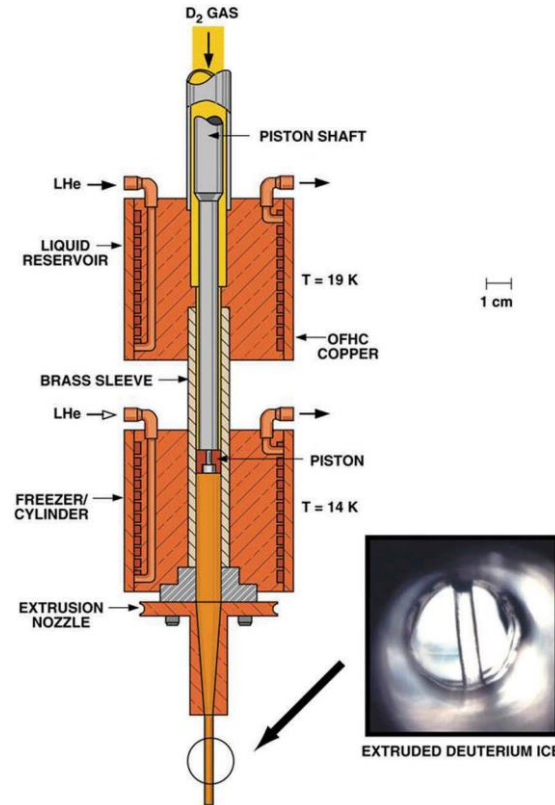
# Формирователи криогенных макрочастиц

in-situ (на месте)

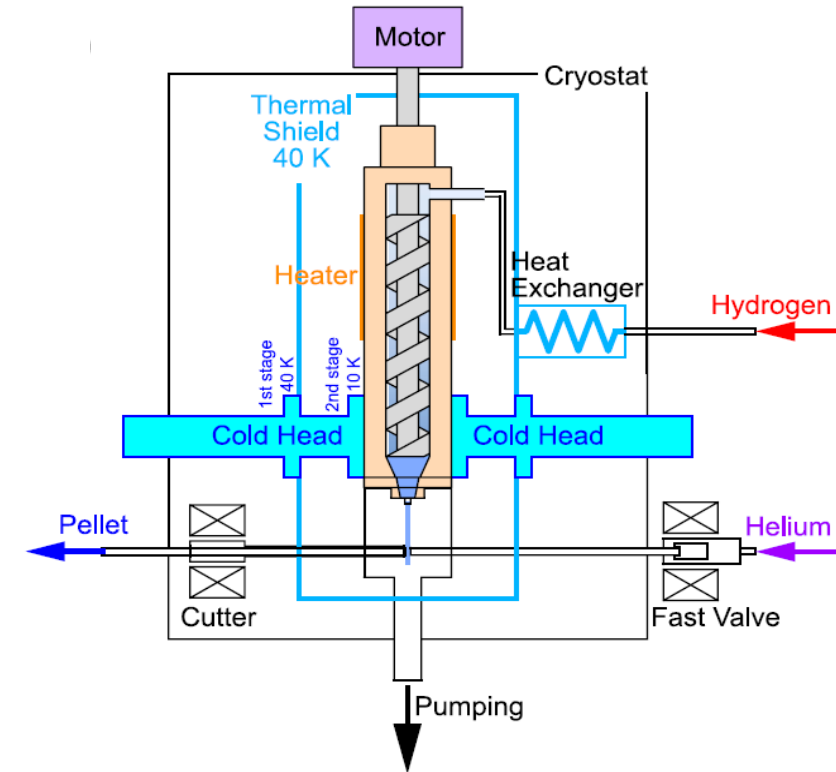


[Combs FST 2018]

поршневой экструдер



винтовой экструдер



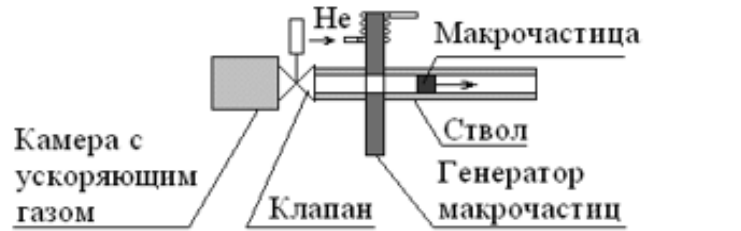
- Наиболее распространённый для физических исследований – **in-situ**
- Для **длительной** инъекции – **поршневой** и/или **винтовой** экструдеры

# Ускорители криогенных макрочастиц

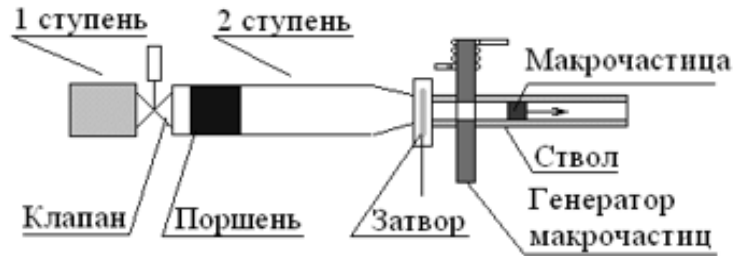
легкогазовые пушки (1, 2 ступени)

центрифуга

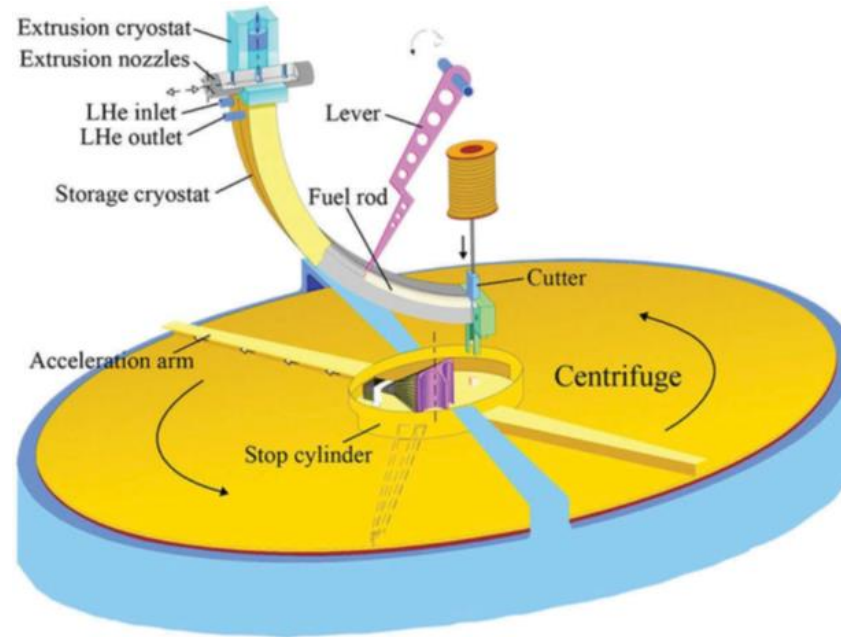
[Foster RSI 1977] струйный



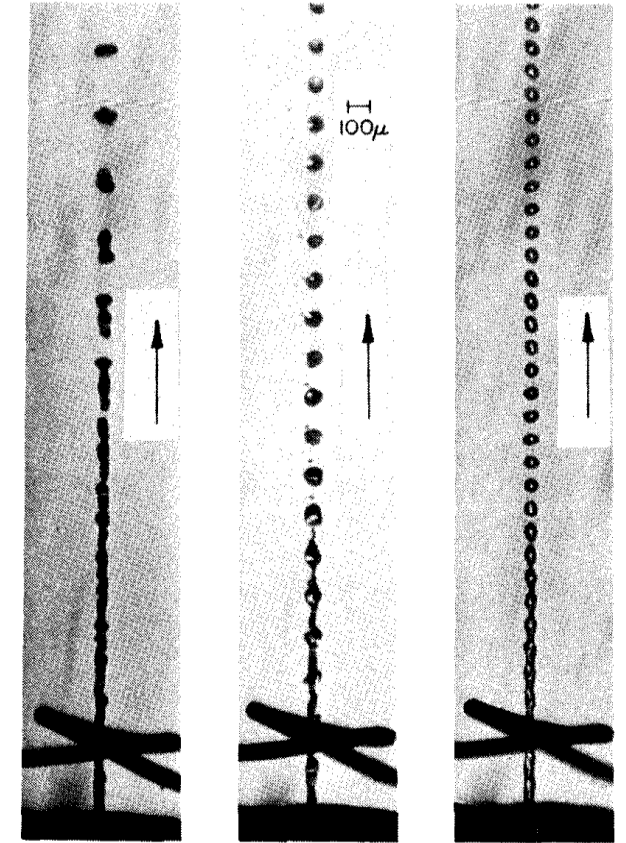
(a)



(b)



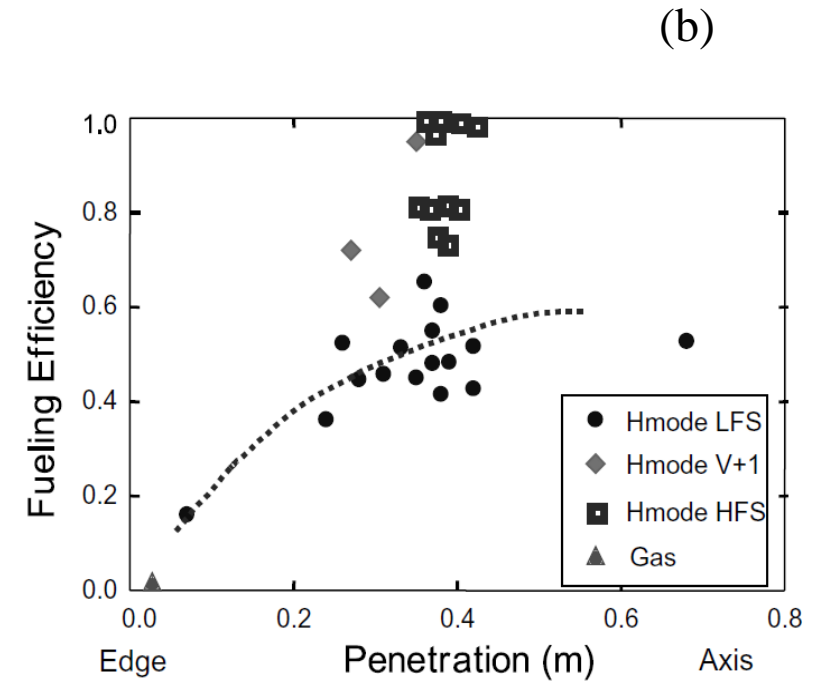
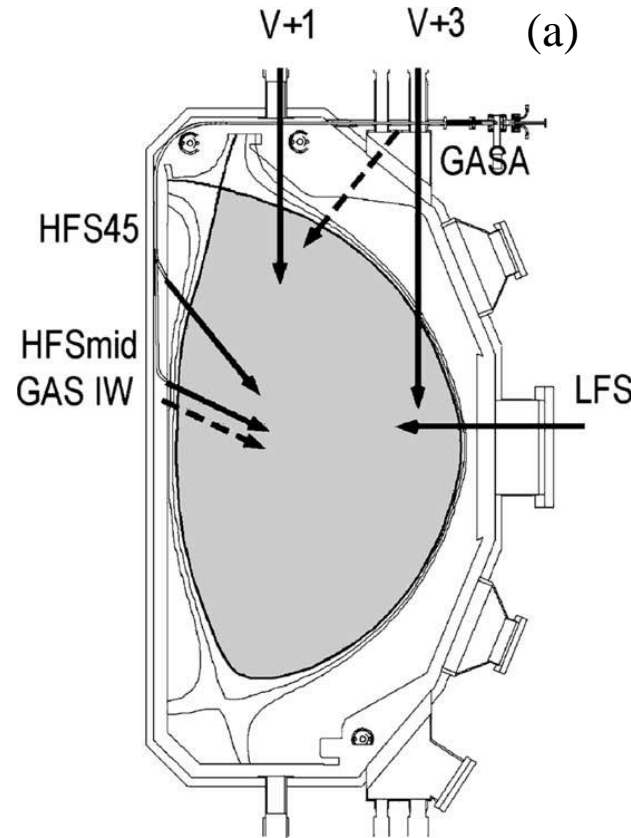
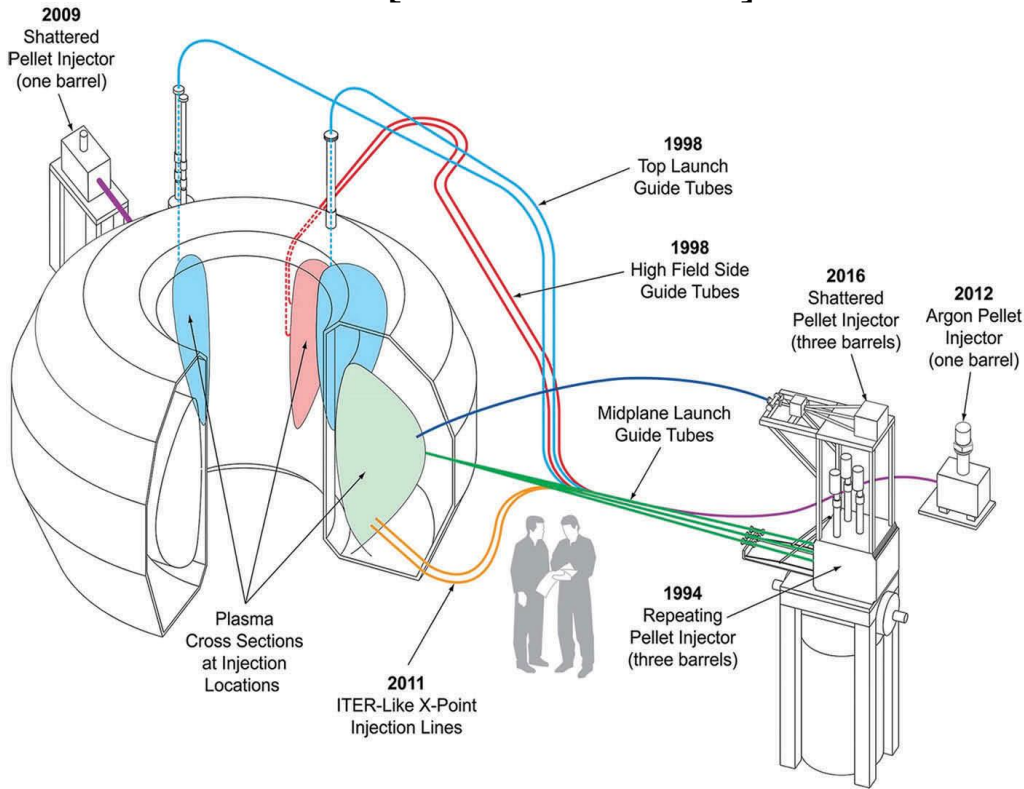
[Combs FST 2018]



- Наиболее распространены **легкогазовые пушки**
- Для **большой частоты** инъекции – **центрифуги** и **струйные** ускорители

# Эффективность ввода топлива (на примере DIII-D)

[Combs FST 2018]



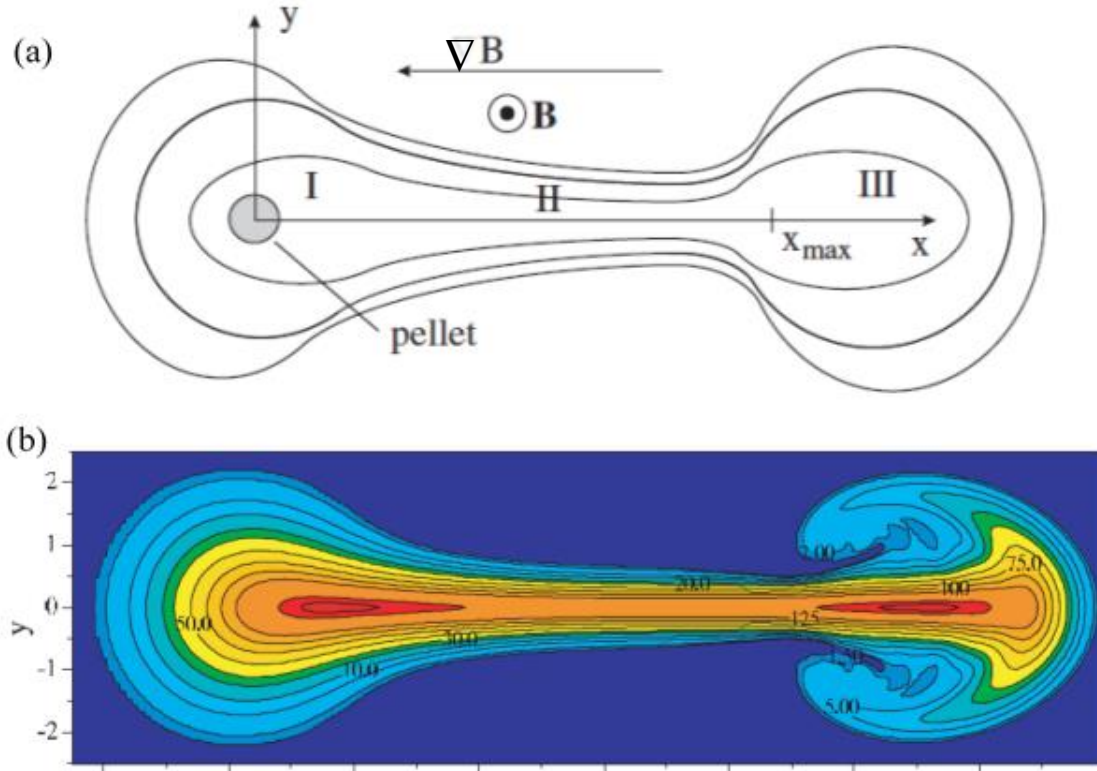
[Baylor JNM 2003]

➤ Пример комплексных исследований, использующих инъекцию в токамак DIII-D макрочастиц из разных материалов с различных направлений

➤ Направления инъекции (a) и эффективность ввода топлива (b) путем инъекции газа и топливных макрочастиц с различных направлений в экспериментах на токамаке DIII-D

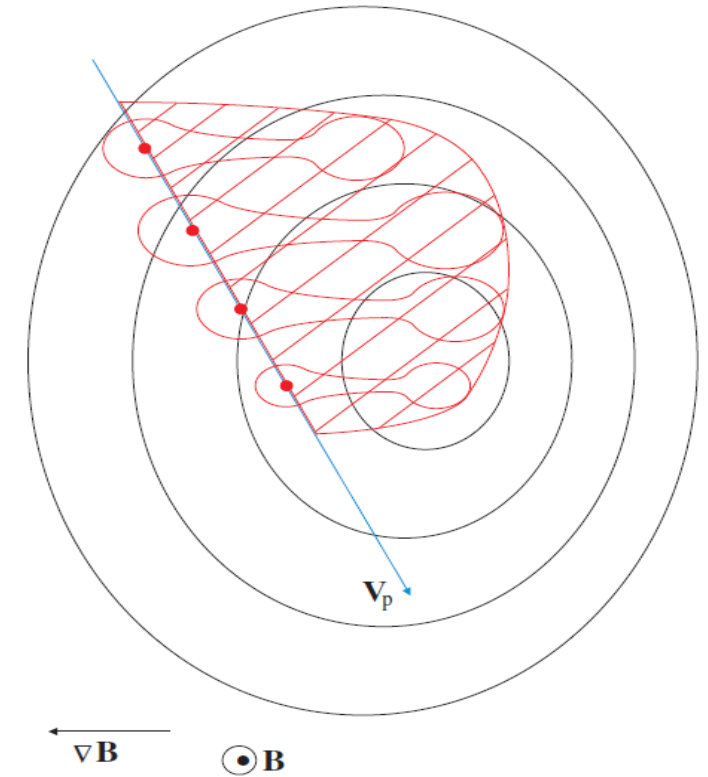
# Ввод топлива со стороны сильного поля в токамаке

[Rozhansky PPCF 2004]



- Схема расплывания проинтегрированной вдоль силовой линии магнитного поля плотности плазменного пеллетного облака (a) и пример численного расчета (b) такой плотности

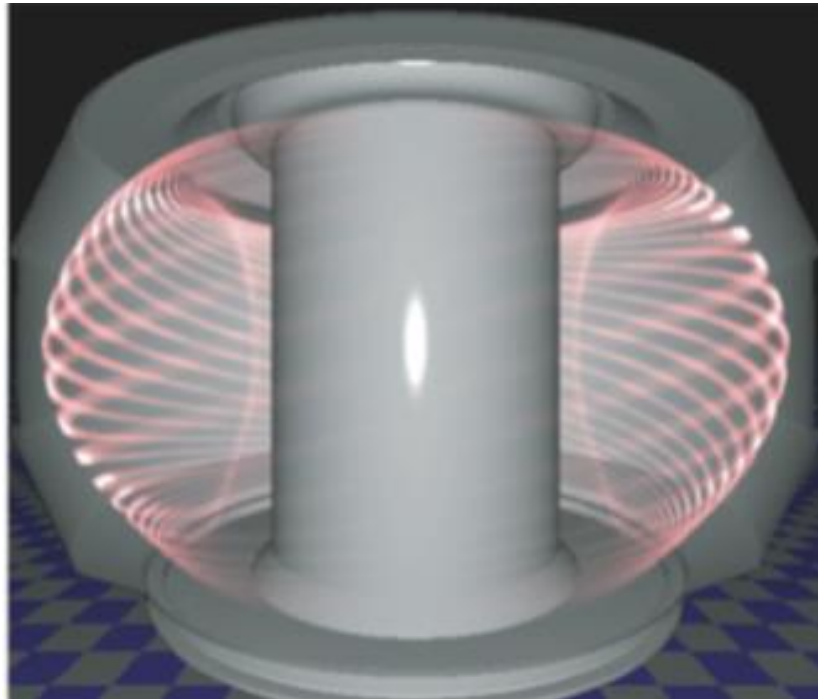
[Senichenkov JNM 2005]



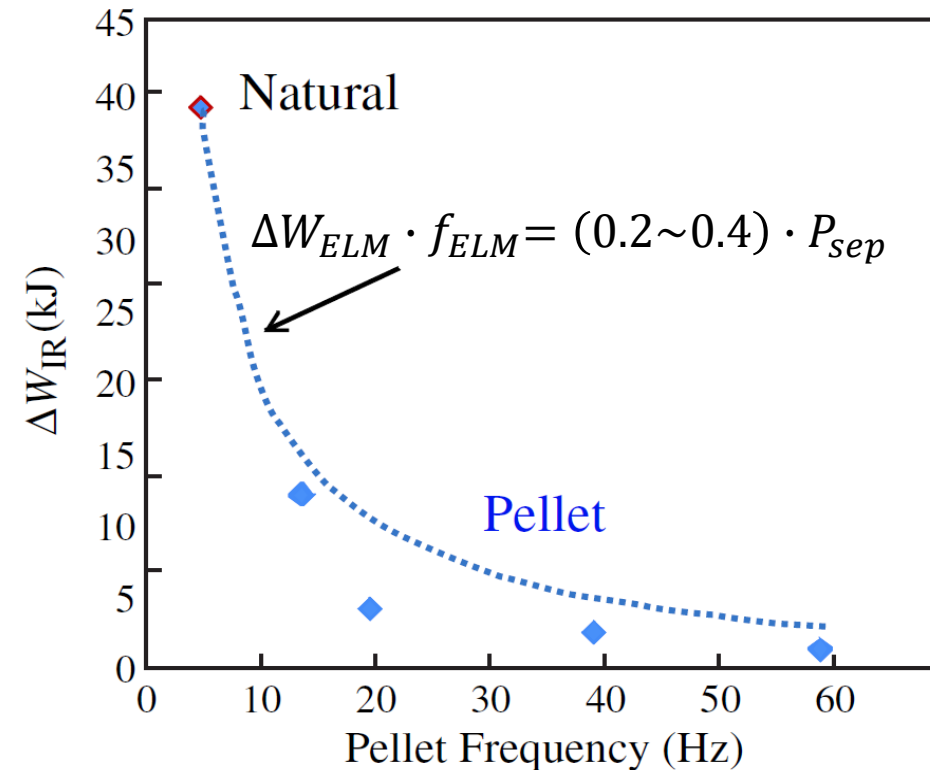
- Позиция макрочастиц (точки) на траектории (прямая линия) и область депозиции (штриховая). Контурами показаны грибообразные области плотности испарившегося вещества

# Инициирование ELMs инъекцией макрочастиц

[Snyder NF 2009]



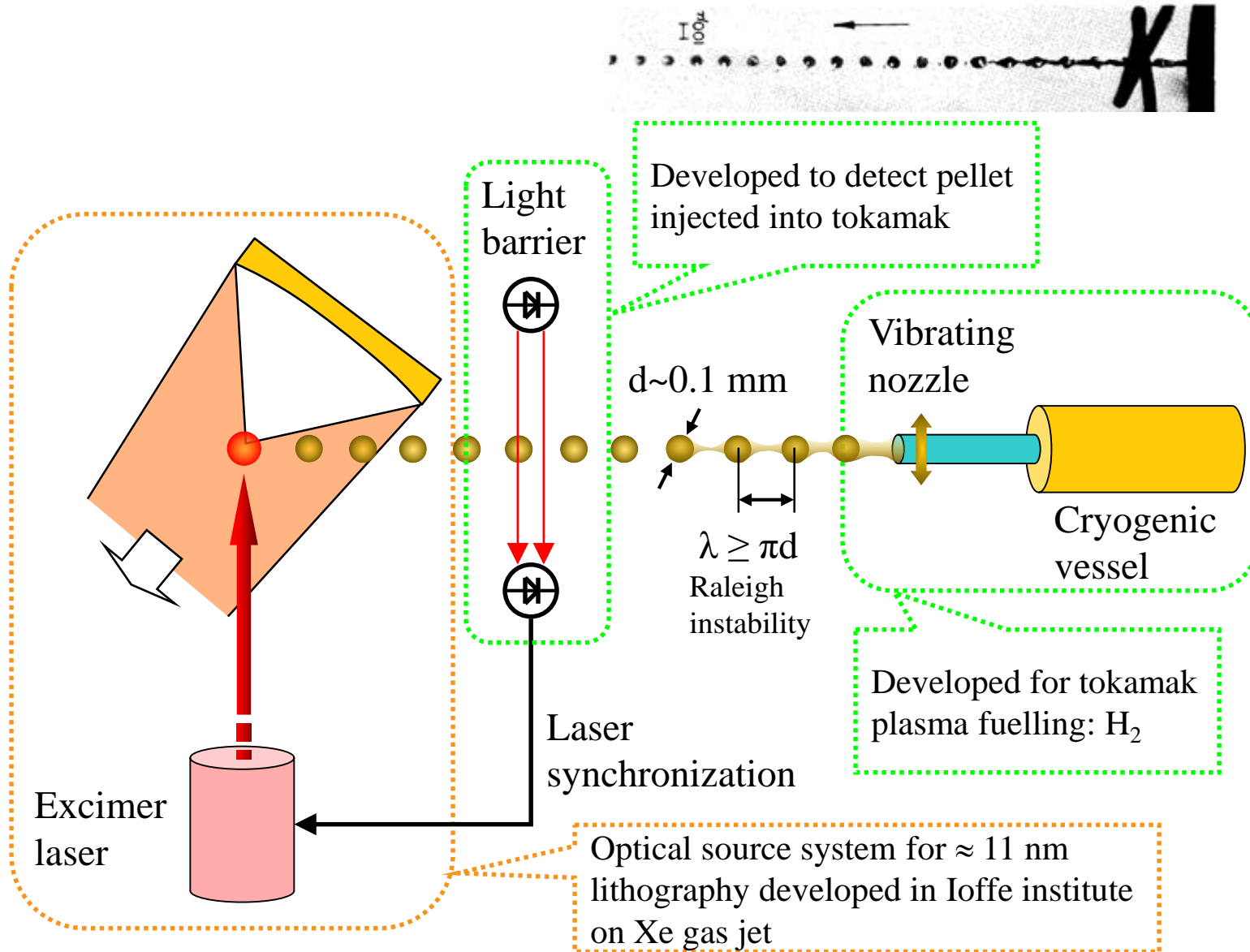
[Baylor PRL 2013]



- Пример рассчитанной 3D структуры пилинг-баллонных мод для тороидального числа  $n = 18$ , которые развиваются при достижении критических значений градиента давления для заданного уровня тока пьедестала.

- Пример **снижения амплитуды** импульса тепловой нагрузки дивертора в режимах **ELMs Type I** и **ELMs**, иницируемых частотной инъекцией водородных макрочастиц в токамак DIII-D.
- Подходят **центрифуга** и **струйный** инжектор

# Струйная инжeksiи Xe для EUV нанолитографии



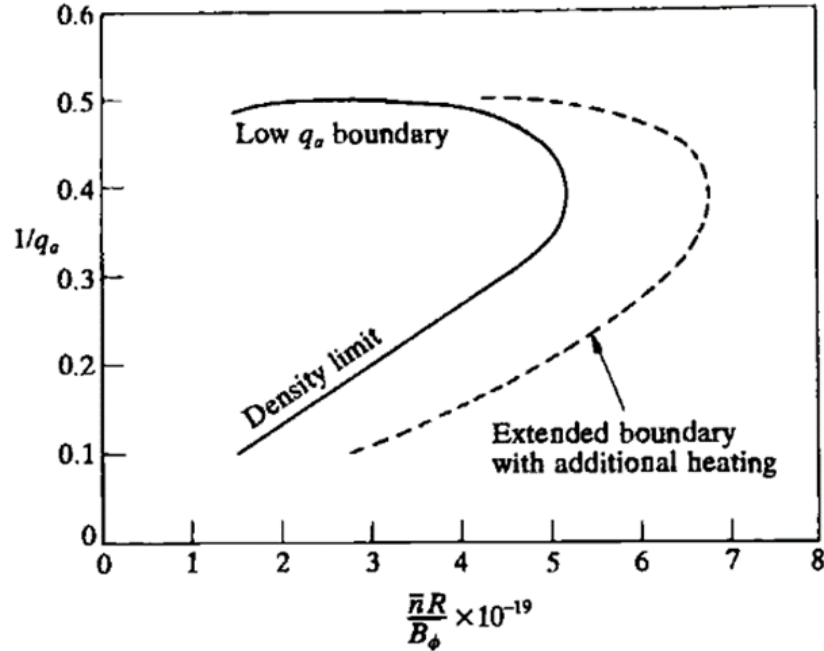
- Современные ASML EUV 13.5 нм (зеркала Mo-Si) используют Sn мишени  $\Rightarrow$  проблемы 1 зеркала.
- Современные зеркала (Be) работают при 11 нм, где максимум излучения Xe плазмы
- Схема с соплом Xe газа имеет проблемы обеспечения интенсивности при сохранении целостности сопла
- В 2023 г. получен патент на полезную модель «Устройство для управляемого формирования и подачи эшелона ксеноновых мишеней в камеру источника жесткого ультрафиолетового излучения»
- Подается заявка на аванпроект в проектный офис ГК «Росатом»

# План доклада

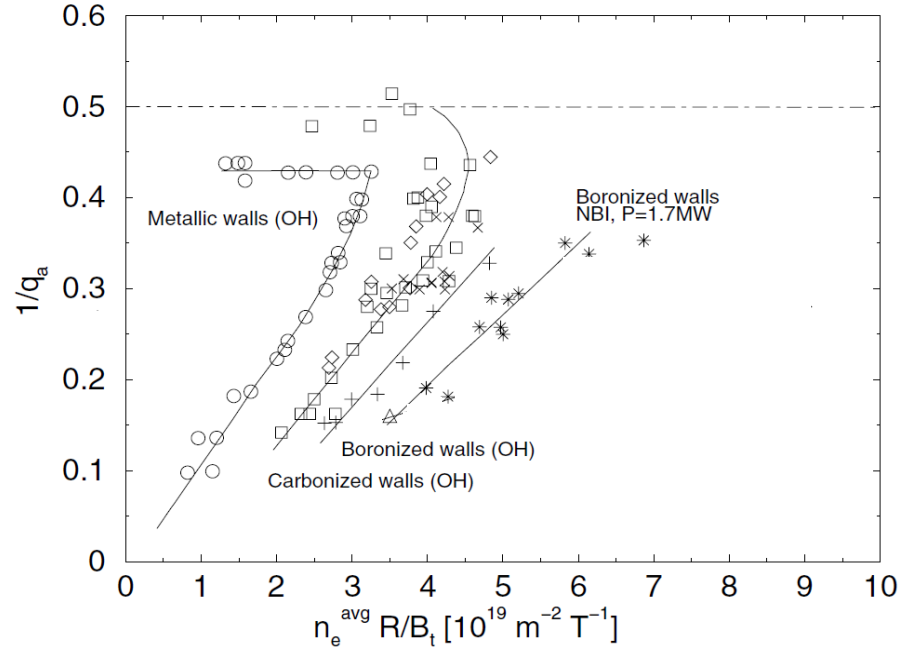
- Введение
- Инжекция криогенных макрочастиц
- **Смягчение последствий срыва**
- Диагностические приложения инъекции макрочастиц
- Результаты работ 2022-2024 гг.
- Планы работ 2025-2030 гг.
- Выводы

# Операционные пределы и срывы в токамаке

[Wesson J. 2004 *Tokamaks* 3/e]



[Koslowski H.R. FS&T 2012]



[Hender NF 2007]

➤ Стабильная устойчивая (без срывов) работа токамака ограничена тремя основными операционными пределами:

- Предел по току: минимум  $q_{95} \leq 3$
- Предел по плотности Гринвальда:  $n_{GW}(10^{20} \text{ м}^{-3}) = I(\text{МА})/\pi a^2(\text{м}^2)$
- Предел по давлению Тройона:  $\beta_N = \beta\%/[I(\text{МА})/a(\text{м})B(\text{Т})] \approx 3.5\% \text{ МА м}^{-1} \text{ Т}^{-1}$

- **Невынужденные срывы** тока разряда не побеждены. Провоцируемые срывы для исследований возможностей смягчения их последствий называют **вынужденными**.
- Проблемы диссипации энергии плазмы и магнитного поля растут по мере роста тепловой, магнитной энергии и размера установки.
- **В ИТЭР допустимы срывы (до 10%), но только с системой смягчения срыва - Disruption Mitigation System (DMS) – ее апробация в первые 10 лет работы ИТЭР.**



# Типичный сценарий невынужденного срыва

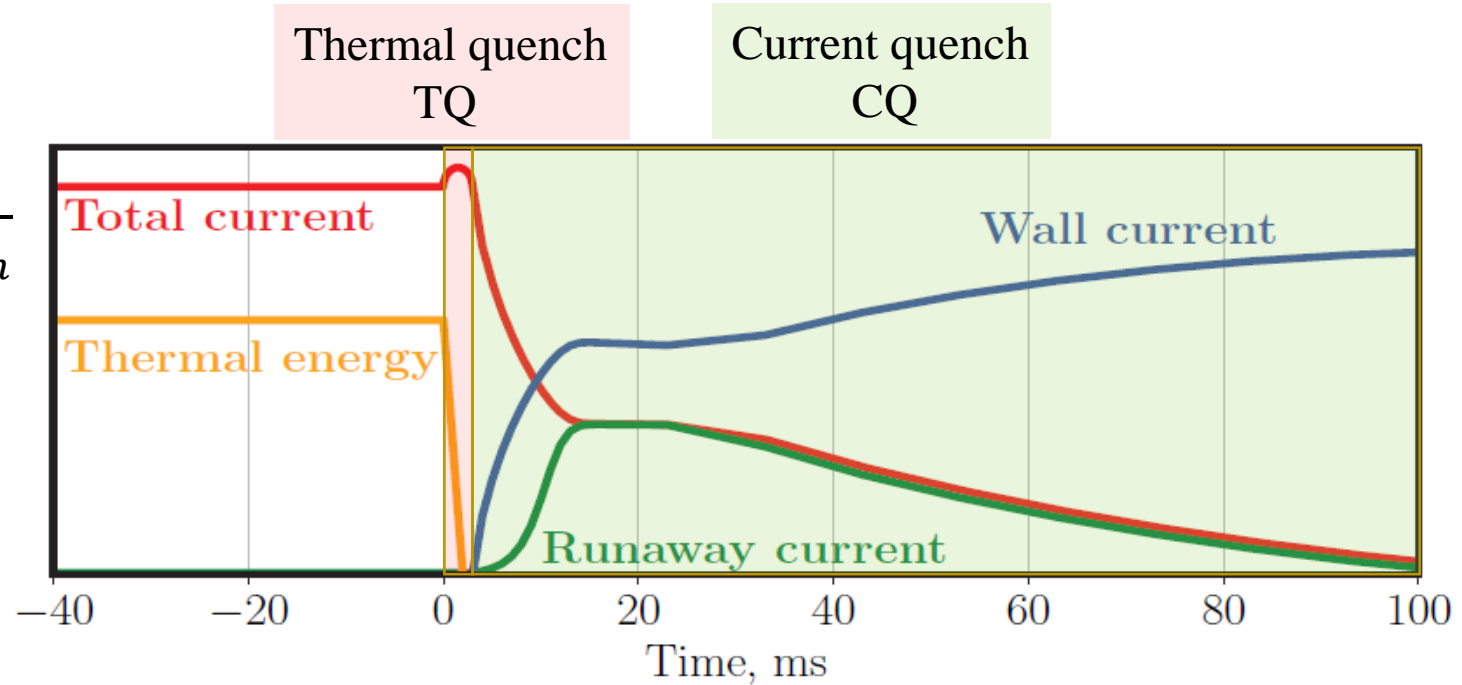
[Kuteev NF 1995]

➤ В отсутствии генерации RE

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(3N_e T_e) = \frac{j^2 V_p}{\sigma} - N_e n_Z R(T) - \frac{3N_e T_e}{\tau_{E, stokh}} \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2} L I_p^2\right) = -\frac{j^2 V_p}{\sigma} \end{cases}$$

Здесь,  $j = I_p / (\pi a^2 k_{elong})$  – плотность тока,  $\sigma$  – проводимость,  $L$  – индуктивность плазмы,  $V_p$  – объем плазмы,  $N_e$  полное число частиц с температурой  $T_e$

[Breizman B.N NF 2019]



- Стадия TQ:  $\tau_E \Rightarrow \tau_{E, stokh} \downarrow \Rightarrow W_t \downarrow \Rightarrow T_{wall} \uparrow \Rightarrow n_e \uparrow, n_Z \uparrow \Rightarrow P_{rad} \uparrow \Rightarrow$  (быстрое перезамыкание)
- Стадия CQ:  $T_e \downarrow \Rightarrow R_p \propto \sigma^{-1} \uparrow \Rightarrow (\tau_{res} = L/R_p \downarrow) \Rightarrow I_p \downarrow$  ( $W_m \downarrow$  за счет переизлучения)
- ЭМ силы:  $(L dI_p/dt \downarrow \Rightarrow \text{eddy } I_w \uparrow) + (\text{VDE} \Rightarrow \text{halo } I_w \uparrow) \Rightarrow I_w \times B \uparrow$
- Ток  $I_{RE}$  (лавина за счет близких столкновений -  $I_{RA}$ )  $\Rightarrow T_e \downarrow \Rightarrow E_{\parallel} \propto T_e^{-3/2} \uparrow$

# Тепловые нагрузки при невынужденном срыве

- Для ИТЭР в базовом режиме ( $Q_{DT} = 10$ ,  $I_p = 15$  МА,  $B = 5.3$  Т)
  - $W_{exh} = W_t \cong 350$  МДж;  $A_{wet} = 5 \cdot A_{div} \cong 20$  м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{TQ} \cong 3 \cdot t_0 = 3$  мс.
- Во время TQ в районе точки удара на внешней диверторной пластине

$$\varepsilon(W_{exh}, A_{wet}, \Delta t) = \frac{350 \text{ МДж}}{20 \text{ м}^2 (3 \text{ мс})^{\frac{1}{2}}} \cong 320 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1/2}$$

- Превышает более чем в 6 раз параметр разрушения  $W \varepsilon_W = 48$  МДж·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1/2</sup> !
- $W_{exh}/A_{wet} \cong 10$  МДж·м<sup>-2</sup>;  $\Delta t_{TQ} \cong 3$  мс. Во время TQ в районе верхней X-точки

$$\varepsilon(W_{exh}, A_{wet}, \Delta t) = \frac{10 \text{ МДж}}{1 \text{ м}^2 (3 \text{ мс})^{\frac{1}{2}}} \cong 180 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1/2}$$

- Превышает более чем в 6 раз параметр разрушения  $W_e \varepsilon_{W_e} = 28$  МДж·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1/2</sup> !
- Необходимо снижение тепловой энергии до срыва  $W_{exh}$  на порядок величины!

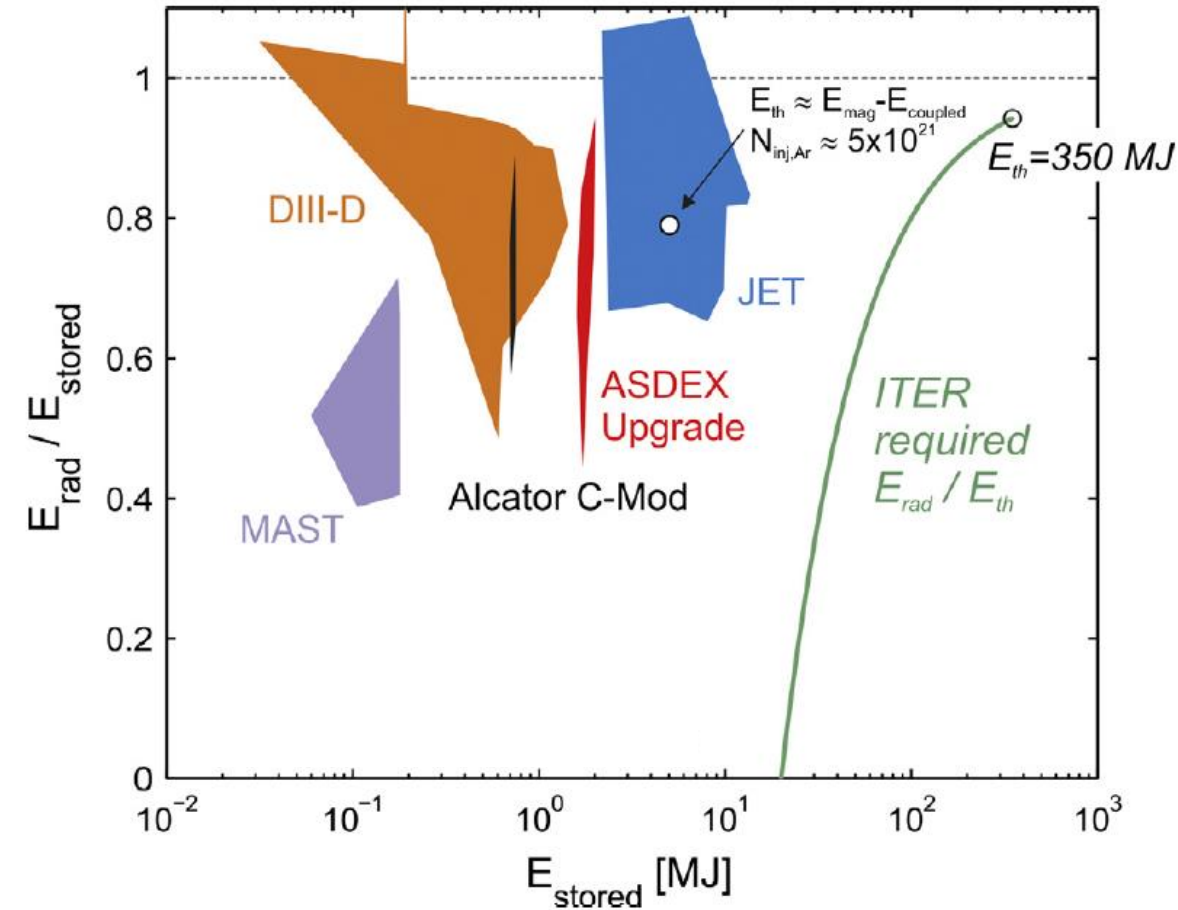
[Pitts R.A JNM 2011]  
[Putvinski FEC23 2010]



# Проблемы вывода тепловой энергии при срыве тока

[Lehnen M. JNM 2015]

[Putvinski S. FEC23 2010]

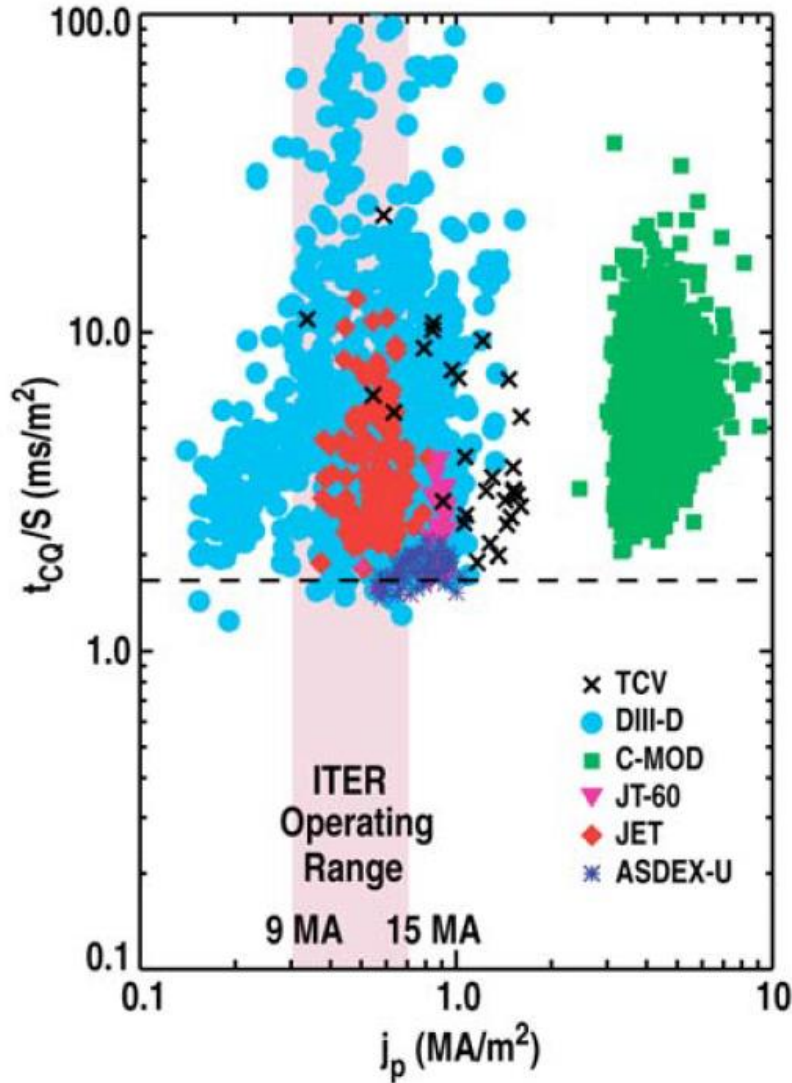


- Путем массивной инжекции примеси в плазму ИТЭР до невынужденного срыва необходимо переизлучить **в  $4\pi$  до 90%** тепловой энергии плазмы для предотвращения проблем с обращенными к плазме материалами
- В экспериментах с массивной газовой инжекцией примеси излучается  $E_{rad} / E_{stored} \approx 0.4-1$ . Потом происходит ТQ при котором оставшаяся часть тепловой  $E_{stored} - E_{rad}$  **идет на поверхность первой стенки и дивертора.**
- 90-100% реализуются при большом количестве примеси, быстром охлаждении и нарастании тока убегающих электронов

➤ **Ведется поиск оптимального сценария для смягчения всех последствий срыва**

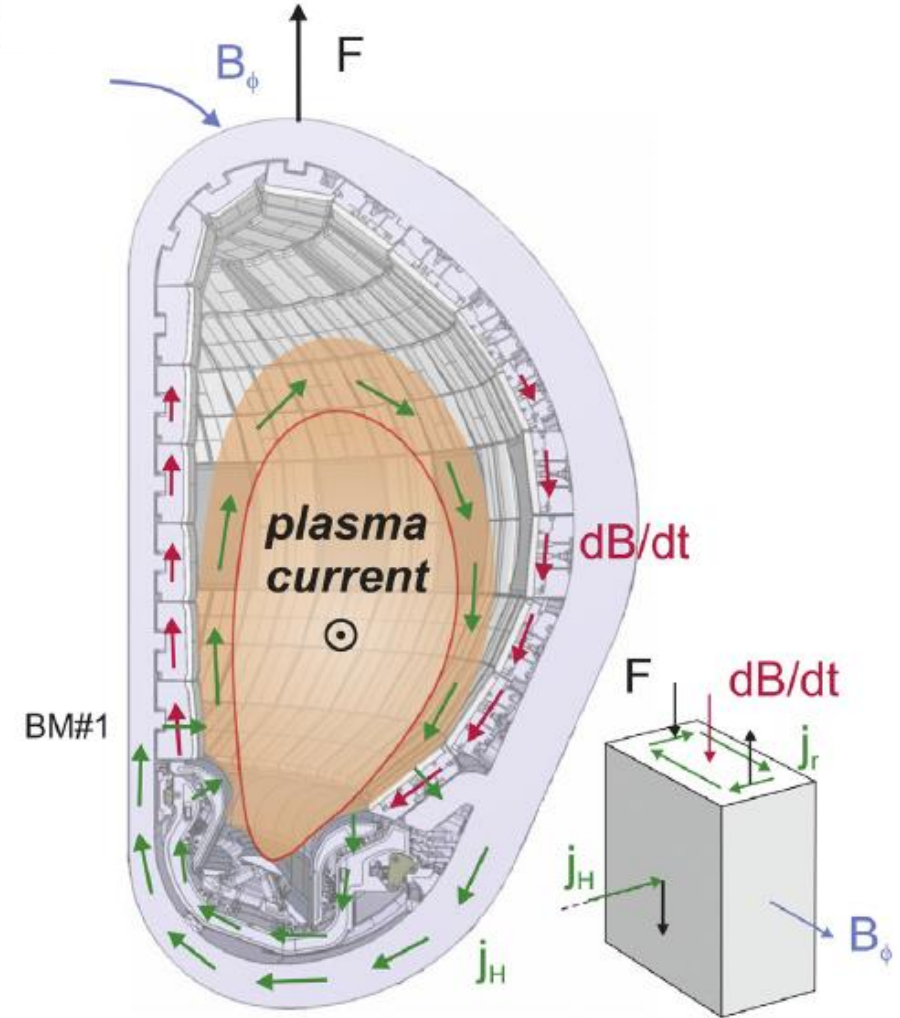
# Проблема электромеханических нагрузок при CQ

[Wesley J.C FEC23 2010]

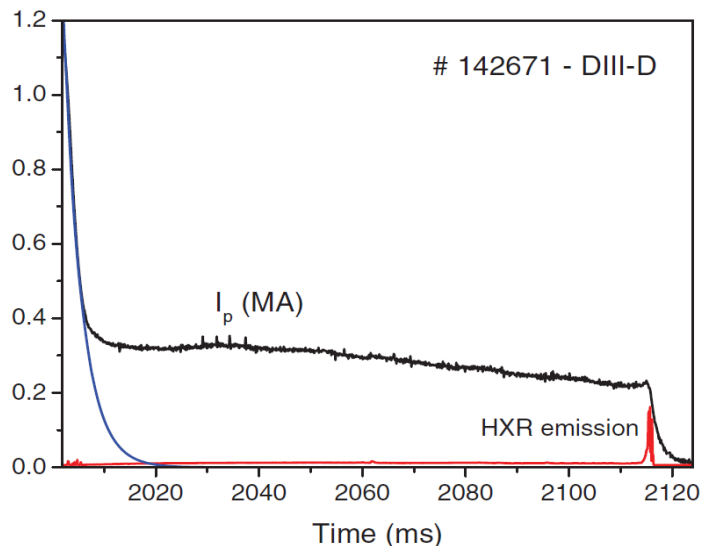


- Нижний предел по времени  $\tau_{res} = \tau_{CQ} \approx 22-36$  мс для  $S_{ITER} \cong 22$  м<sup>2</sup> задается максимальной силой вихревых токов (*eddy current*) в ВВ.
- Верхний предел порядка  $\tau_{CQ} \approx 50-66$  мс задает оценка гало-токов (*halo current*) при VDE (запирание излучения [Lukash NF 2007])
- Требуется управление величиной  $\tau_{CQ}$  ( $\tau_{res}$ )!

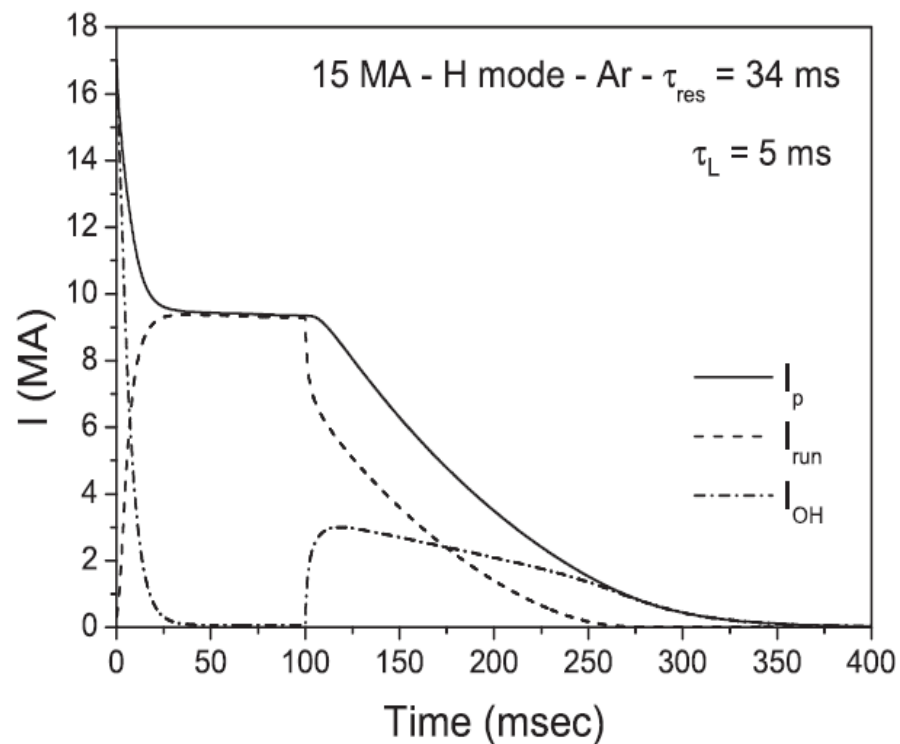
[Lehnen M. JNM 2015]



# Проблема убегающих электронов при выводе тока

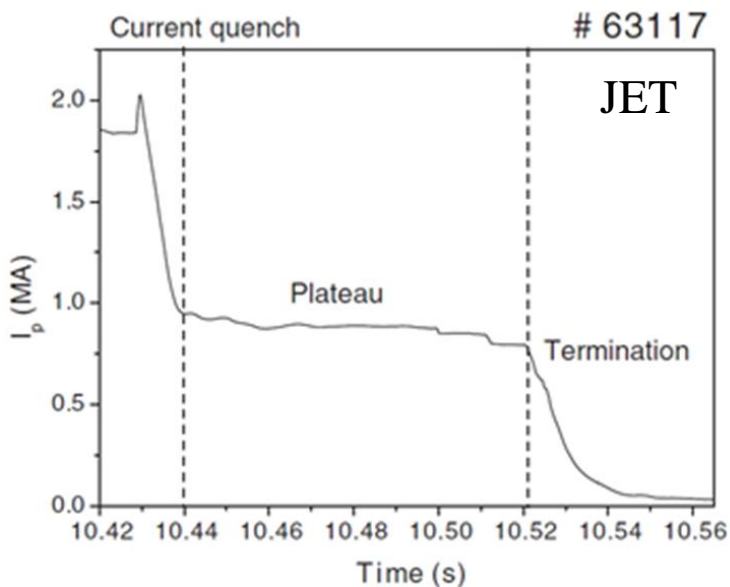


[Martín-Solís NF 2017]



[Smith PoP 2008]

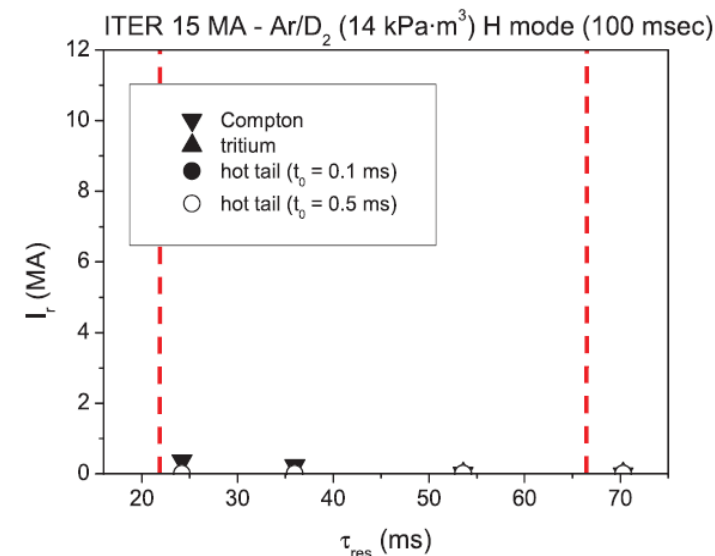
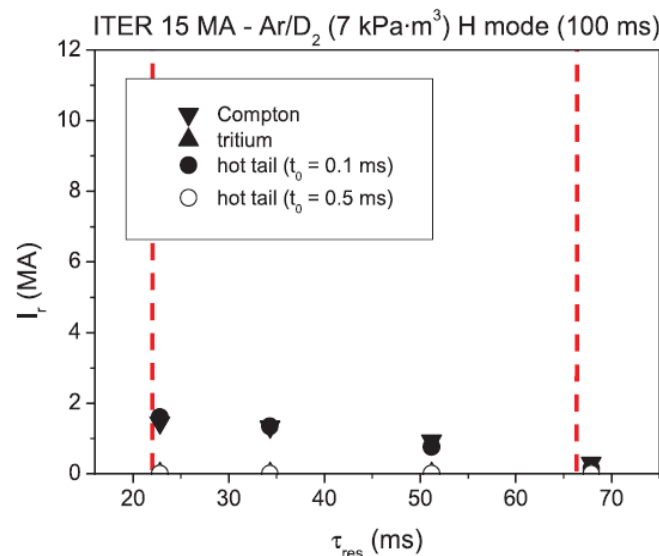
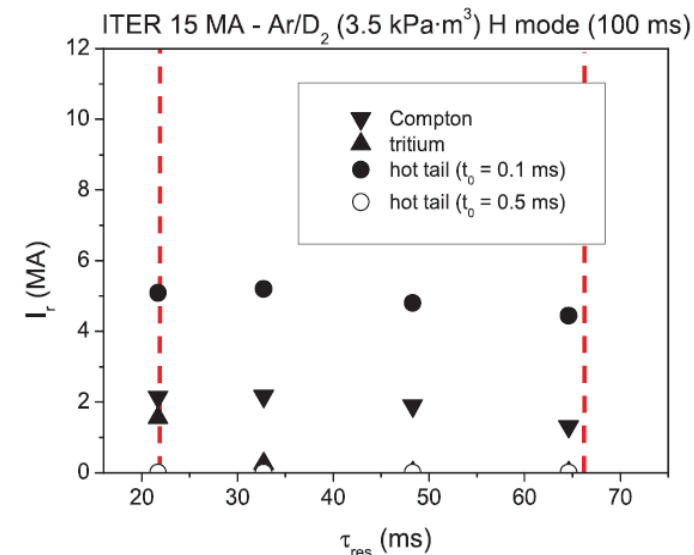
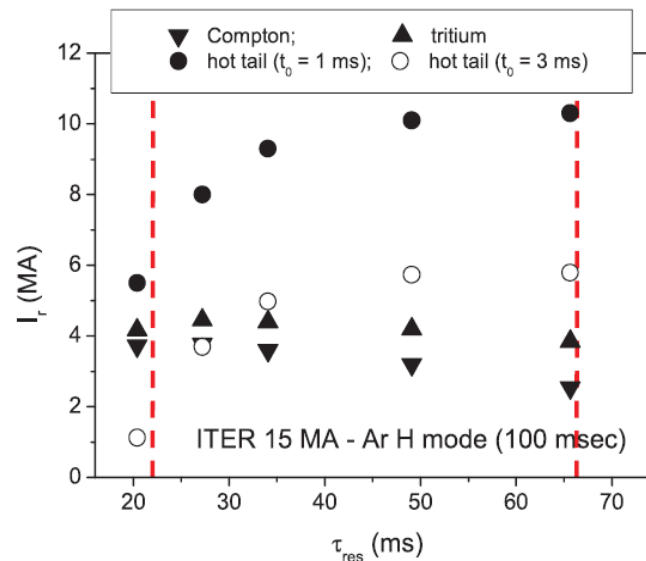
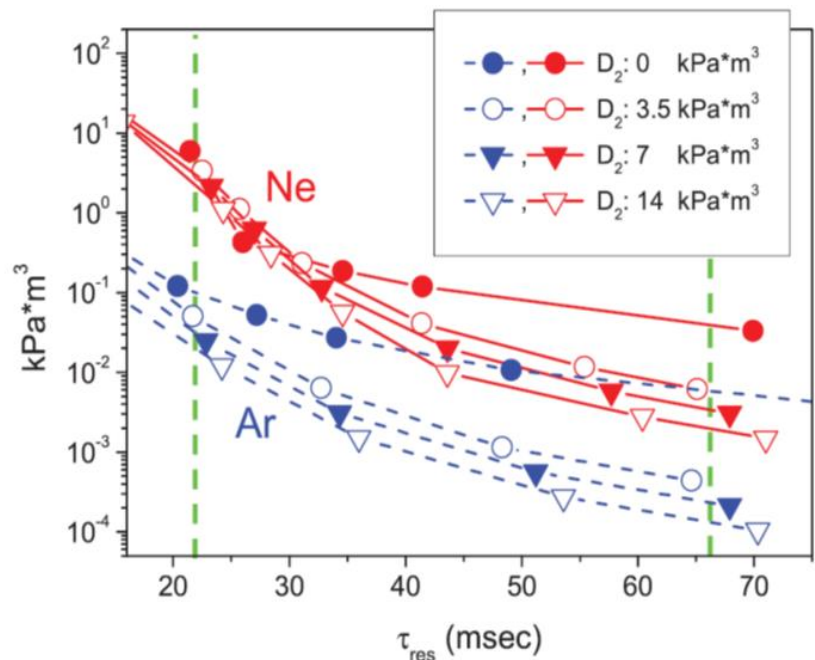
- Основной механизм – генерация тока лавины убегающих электронов из **hot-tail зародышей**, образующихся при быстром снижении  $T_e$  во время TQ
- Моделирование эволюции тока ИТЭР во время CQ с инъекцией только Ar, чтобы обеспечить  $\tau_{res} = 34$  мс приводит к недопустимым токам лавины  $I_{RA} \approx 9$  МА!



- В DMS ИТЭР предлагается **подавлять ток лавины** за счет столкновительного механизма путем напуска огромного количества  $D_2$  в **50 раз больше** числа частиц до срыва.

# Инжекция Ar, Ne в ИТЭР

[Martín-Solís NF 2017]



- Для  $\tau_{res} \approx 22-66$  мс требуется  $10^{-1}-10^{-3}$  кПа·м³ (Ar +  $D_2$ ) заметно меньше  $0.3$  кПа·м³ частиц до инжекции!
- Для подавления  $I_{RA} \cong 8-10$  МА без  $D_2$  требуется  $3, 7, 14$  кПа·м³  $D_2$  для снижения  $I_{RA}$  до значений  $5, 1.5, 0.5$  МА!
- Увеличения частиц до  $14/0.3 \leq 50$  раз!

Ток  $I_{RA}$  в ИТЭР на 100 мс после инжекции Ar+ $D_2$

# Система DMS ITER

- Для **снижения тепловых нагрузок и электромеханических нагрузок** (регулирование времени вывода тока) используется **инжекция небольшого количества примесей** (Ar) заметно меньшего по сравнению с количеством рабочего газа до срыва.
- В DMS ITER планируется 16-32 SPI разрушенных аргоновых пеллет. **Мы предлагаем более технически простой и надежный подвижный клапан МГИ!**
- Увеличение плотности дейтерия **до 50 раз** путем его **массивной инъекции** в виде газовых струй и/или пеллет подавляет лавину RE столкновительным механизмом. **Такая инъекция создает проблему для систем откачки, очистки, нагрева и др.!**
- **Вместо инъекции большого количества водорода** нами предлагается [Sergeev NF 2021] **инъекция мишени** в плазму сразу после теплового срыва TQ, которая собирает зародыши лавины, снижая ток  $I_{RA}$ . **При этом плотность плазмы не увеличивается!**

# План доклада

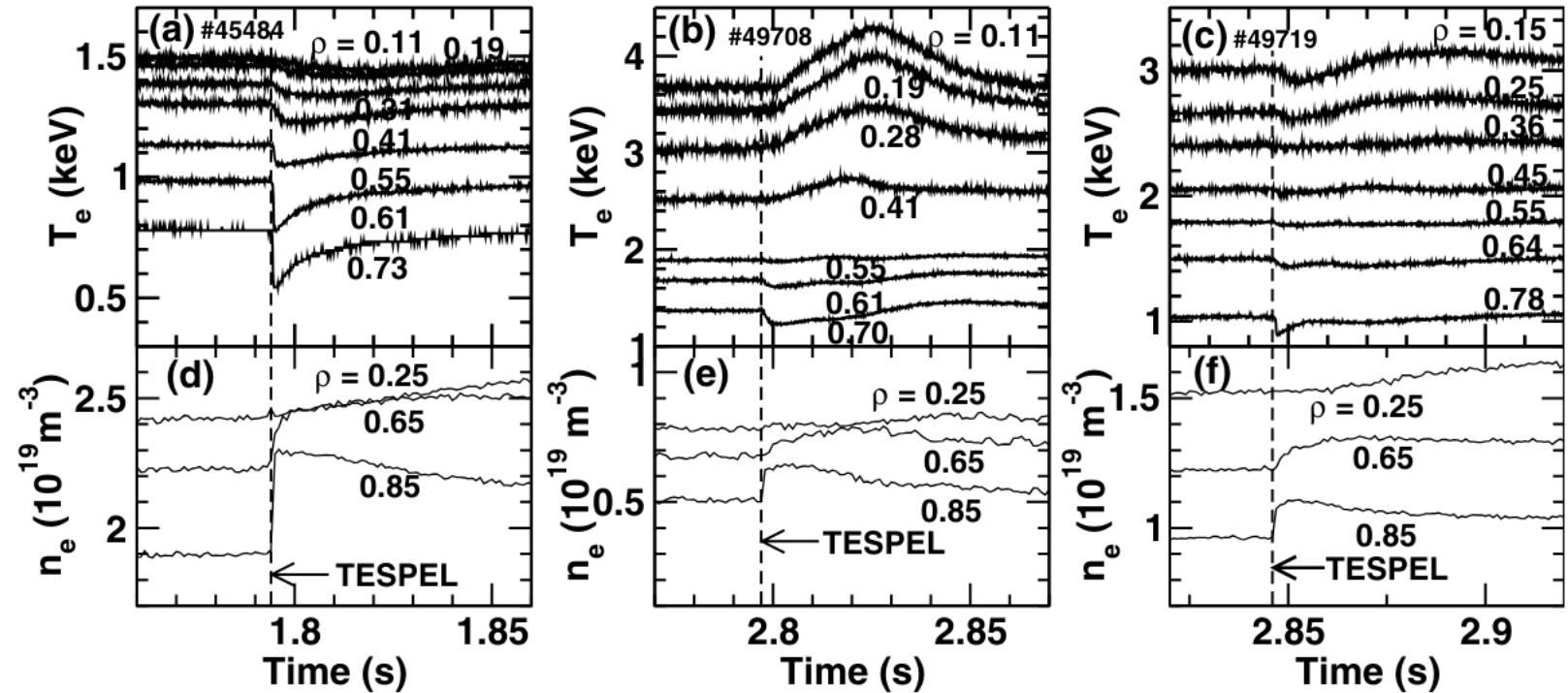
- Введение
- Инжекция криогенных макрочастиц
- Смягчение последствий срыва
- **Диагностические приложения инъекции макрочастиц**
- Результаты работ 2022-2024 гг.
- Планы работ 2025-2030 гг.
- Выводы



# Явление нелокального переноса тепла при использовании метода возмущений

[Inagaki, PPCF, 2010]

- Явление нелокального переноса **NLT (Non-Local Transport)** тепла - наблюдаемое явление, при котором **охлаждение периферии** приводит к **нагреву центра** плазмы
- При росте среднечордовой плотности от  $1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  до  $3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  эффект **NLT** заметно **ослабевает**.

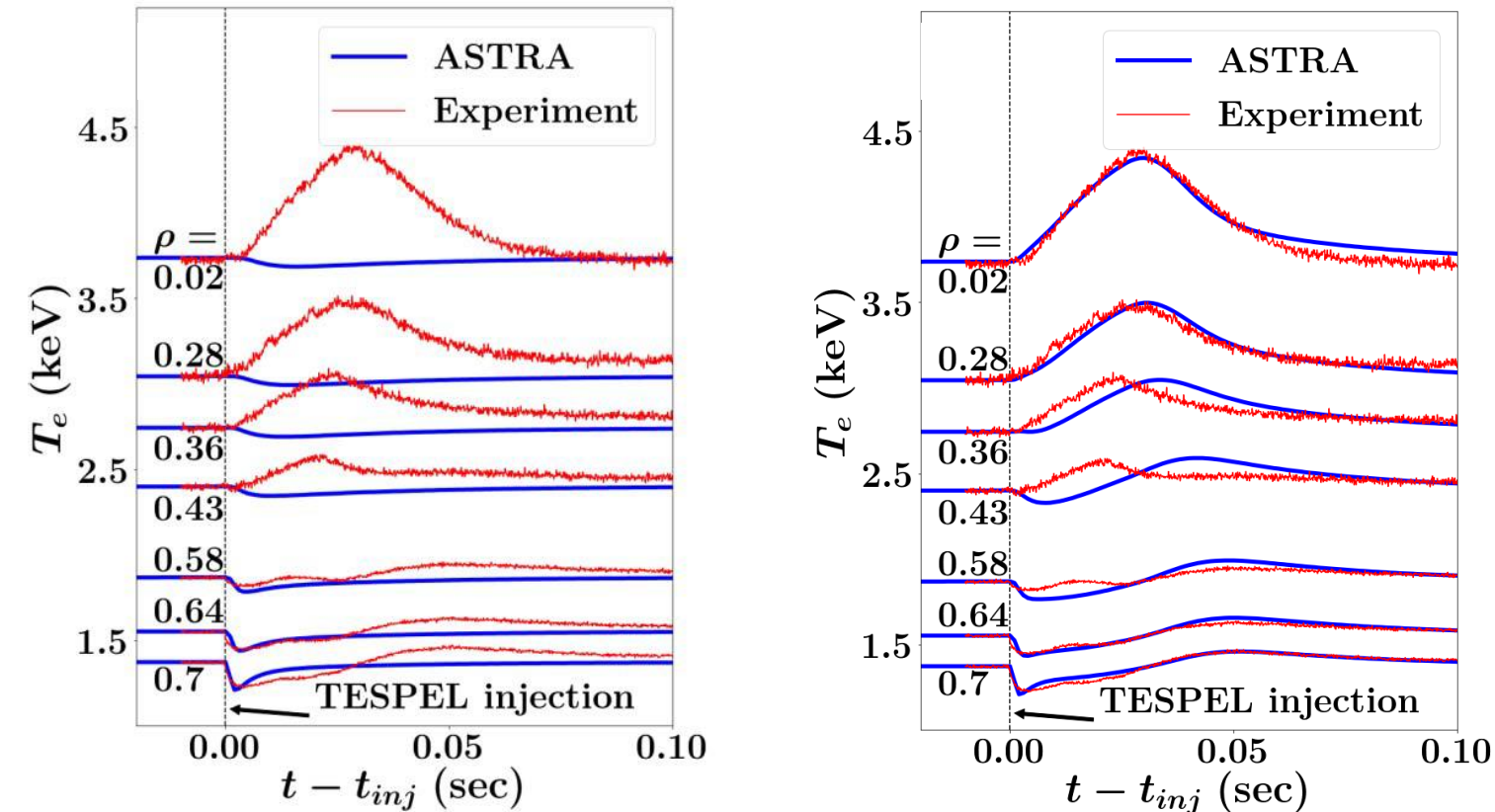


- Диффузионная модель неподвижной плазмы с локальным  $\chi_e^{PB}(r)$  стационарного энергодобавки не в состоянии описать  $T_e(r,t)$ !
- Обсуждаются для объяснения нелокальной эволюции  $\chi_e(r,t)$ 
  - «бифуркационный» перенос при нелинейном взаимодействии турбулентных мод [Iwasaki JPSJ 1999, Dhar Frontier in Physics 2019]
  - зональные потоки и стриммеры [Yamada Nature Physics 2008]

$$\frac{3}{2} \frac{\partial (T_e n_e)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( -\chi_e n_e r \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) = Q_e$$

# Диагностика переноса тепла методом возмущений

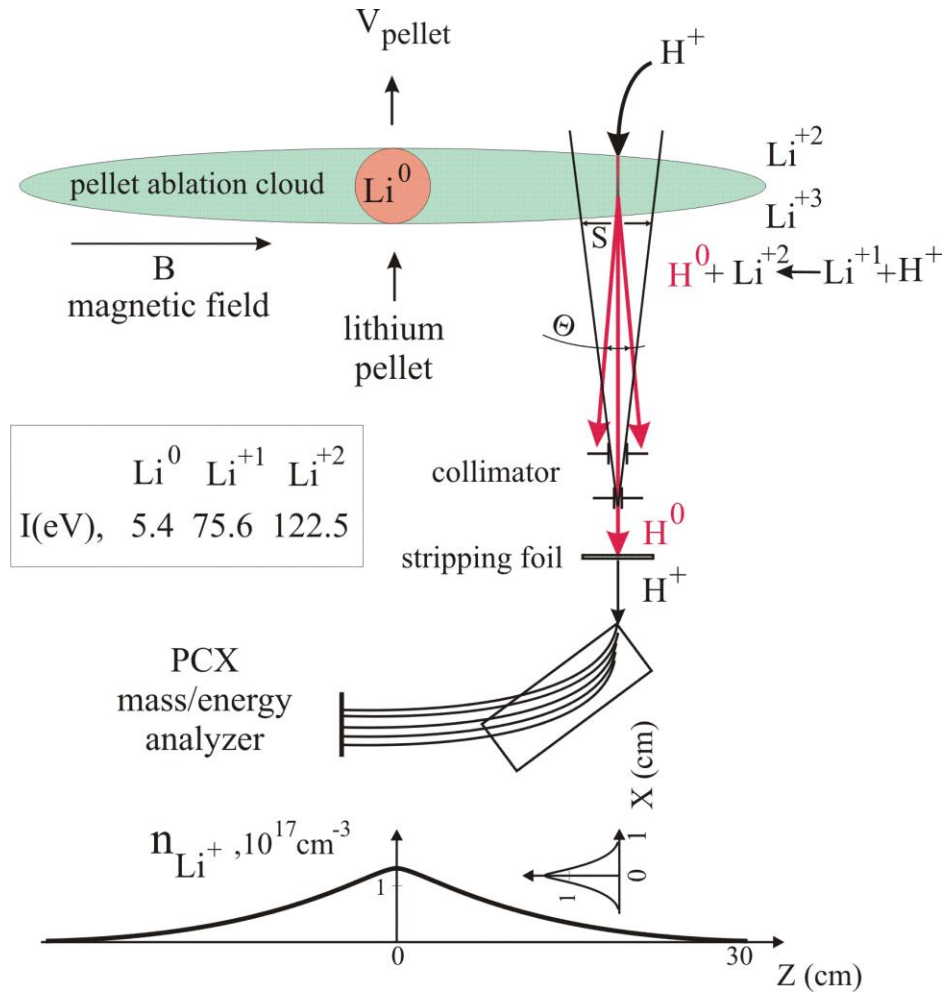
[Pustovitov PPCF 2012], [Sergeev PFR 2019]



- Учет движения плазмы (*ad-hoc*) из-за нарушения равновесия приводит к передаче небольшой части магнитной энергии в тепловую (рисунок справа - синие кривые)
- Диффузионная модель с  $\chi_e^{PB}(r)$  для неподвижной плазмы не в состоянии описать  $T_e(r,t)$  (рисунок слева - синие кривые)

Эволюция электронной температуры в разряде 49708 LHD (среднехордовая плотность  $10^{19} \text{ м}^{-3}$ ) после инъекции полистироловой макрочастицы (красные кривые - эксперимент).

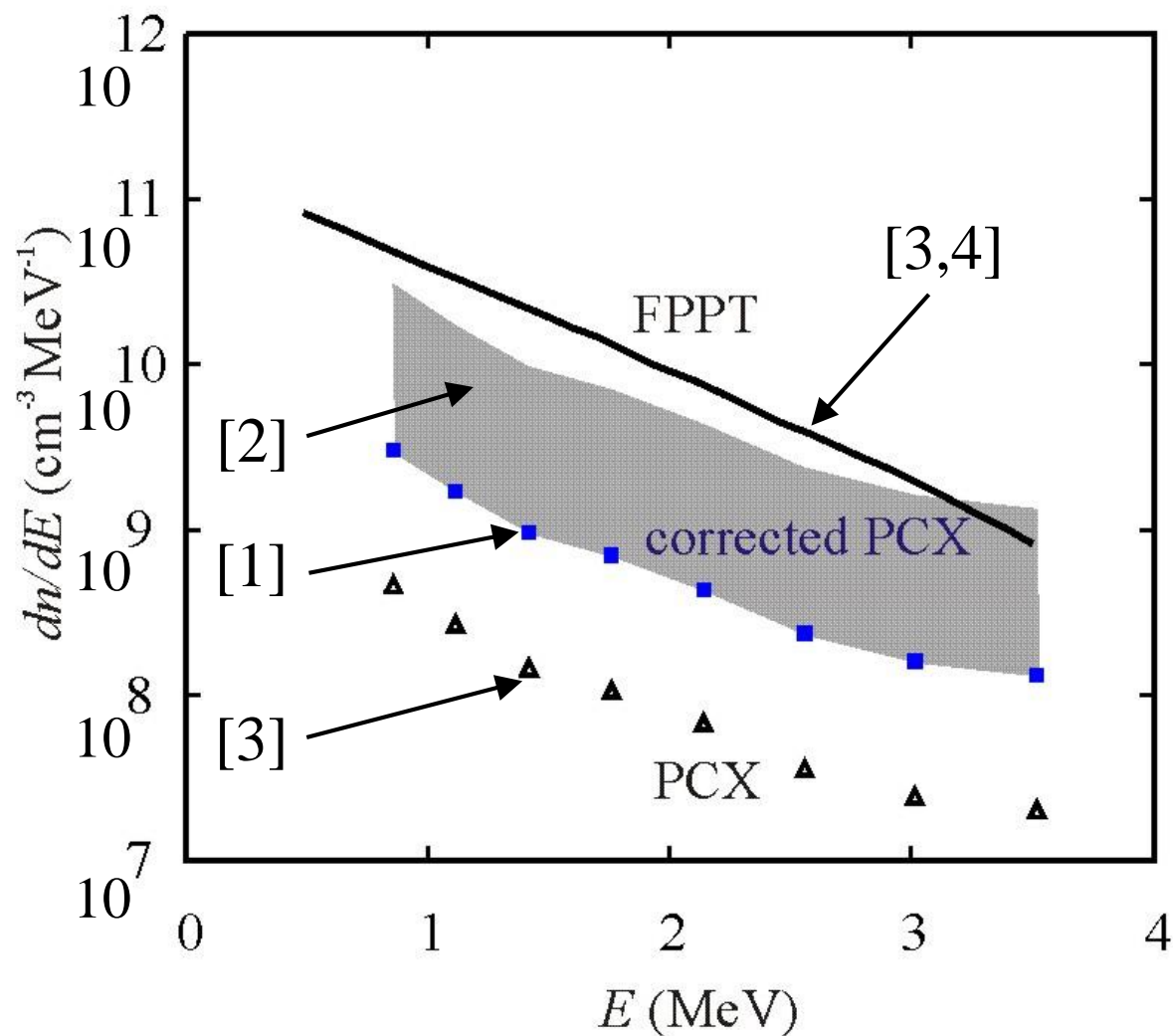
# Диагностика быстрых ионов при их перезарядке на пеллетном облаке РСХ (Pellet Charge eXchange)



[McChesney PoP 1997; Goncharov RSI 1998]

- При пересечении быстрой частицей (протоном, альфа-частицей) пеллетного облака в результате перезарядки из него выходят потоки нейтральных частиц, поступающие на вход NRA
- Потоки содержат информацию о функции распределения по энергиям быстрых частиц в месте нахождения испаряющейся макрочастицы

# Уточненные расчеты РСХ сигналов $\alpha$ -частиц в TFTR



➤ Уточнение деталей структуры пеллетных облаков [1] и нейтрализации быстрых частиц в них [2], позволяют **по порядку величины согласовать абсолютные значения энергетического спектра альфа-частиц**, измеренного с помощью **РСХ** диагностики в **DT** экспериментах на токамаке **TFTR** [3] с результатами расчетов по коду **FPPT** [3], верифицированных по данным измеренного **нейтронного потока** [4].

1. [Бахарева Письма в ЖЭТФ 2023]
2. [Бахарева Письма в ЖЭТФ 2024]
3. [Medley NF 1998]
4. [Krasilnikov RSI 1997]

# План доклада

- Введение
- Инжекция криогенных макрочастиц
- Смягчение последствий срыва
- Диагностические приложения инъекции макрочастиц
- **Результаты работ 2022-2024 гг.**
- Планы работ 2025-2030 гг.
- Выводы

# Итоги работ 2022-2024 гг. по ФПЗ КП РТТН

## 1. Организована НИЛ УТС в СПбПУ

- В среднем около 15 штатных сотрудников и совместителей из числа преподавателей, научных сотрудников, аспирантов и студентов университета
- Занимает площадь примерно 200 м<sup>2</sup> офисных и лабораторных помещений

## 2. Разработаны и завершается создание

- Экспериментальный образец инжектора массивной газовой струи
- Экспериментальный образец системы топливной пеллет инжекции
- Стенд для испытаний экспериментальных образцов инжекторов газа и макрочастиц

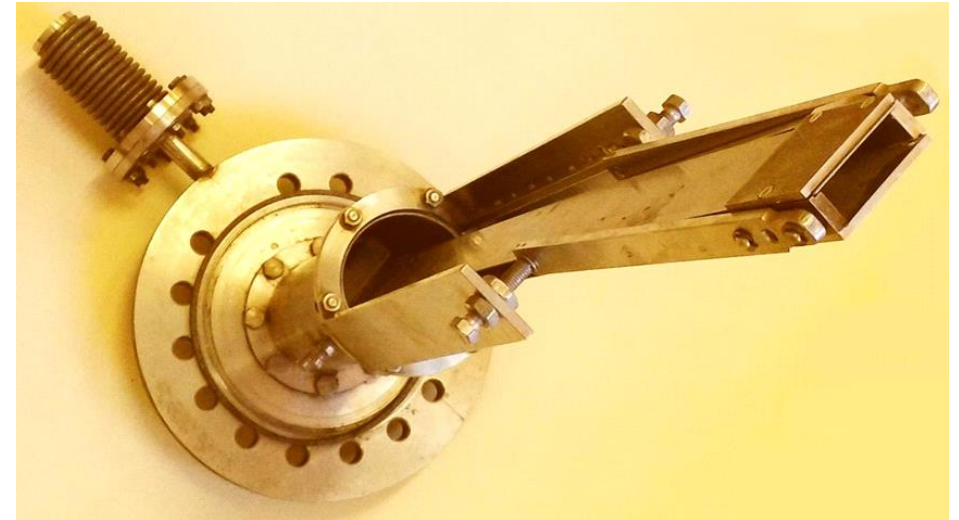
## 3. РИД

- Получены свидетельства на 9 программ для ЭВМ
- Получены свидетельства на 2 патента
- Представлено 10 докладов на российских и международных конференциях
- Опубликовано 6 статей в высокорейтинговых рецензируемых журналах
- Завершается подготовка диссертации кандидата физико-математических наук

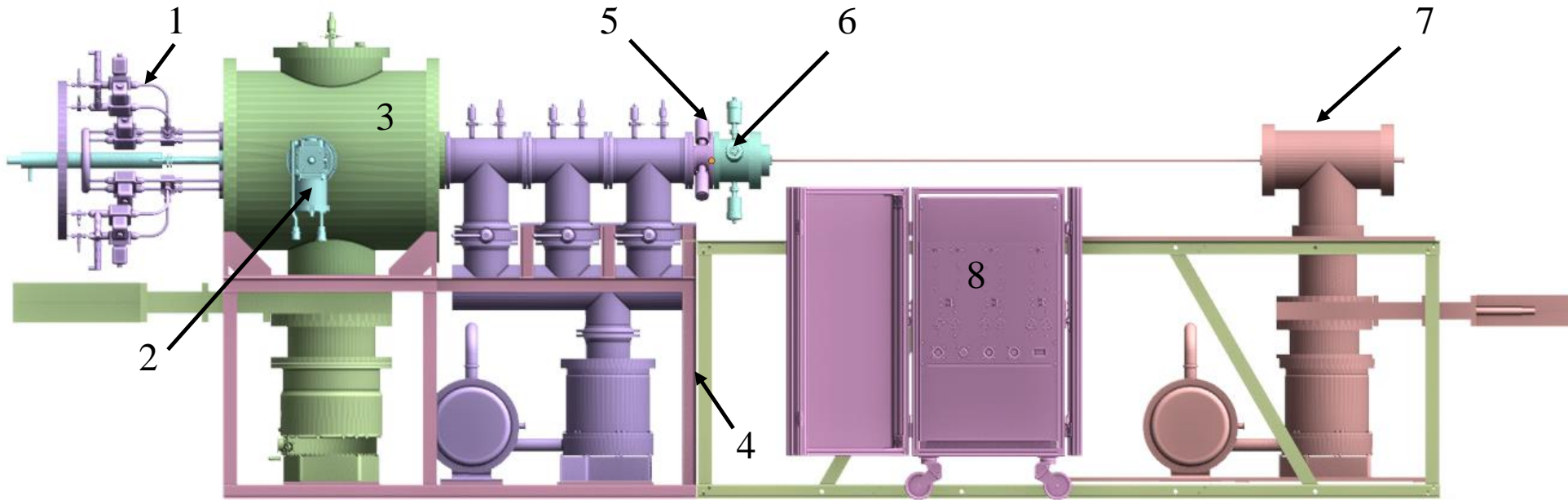
# Примеры макетов разработанной аппаратуры



- Подвижный импульсный газовый клапан. Основной элемент струйного газового инжектора:  $\geq 5 \cdot 10^{23}$  ат. с потоком  $10^{23}$  ат./с за  $\leq 1$  мс с расстояния  $\leq 10$  см от LCMS
- Микроволновые весы для бесконтактного взвешивания криогенных макрочастиц
- Оригинальное устройство отклонения тверводородных макрочастиц для их инъекции с разных направлений



# Стенды испытаний и экспериментального образца системы топливной пеллет инъекции



- 6 независимых (in-situ) в 6 стволах криогенных  $H_2$ ,  $D_2$  макрочастиц:
  - $D_p = L_p = 2-4$  мм,
  - $V_p = 200-400$  м/с

1 – клапаны подачи газа

3 – камера криостата

5 – быстрый клапан

7 – камера стенда ресурсных испытаний

2 – криогенератор и система охладителя

4 – рама основания

6 – пеллетный коммутатор

8 – стойка управления



# Фото стендов испытаний и экспериментального образца системы топливной пеллет инжекции



1 – клапаны подачи газа

3 – камера криостата

5 – быстрый клапан

7 – камера стенда ресурсных испытаний

2 – криогенератор и система охладителя

4 – рама основания

6 – пеллетный коммутатор

8 – стойка управления

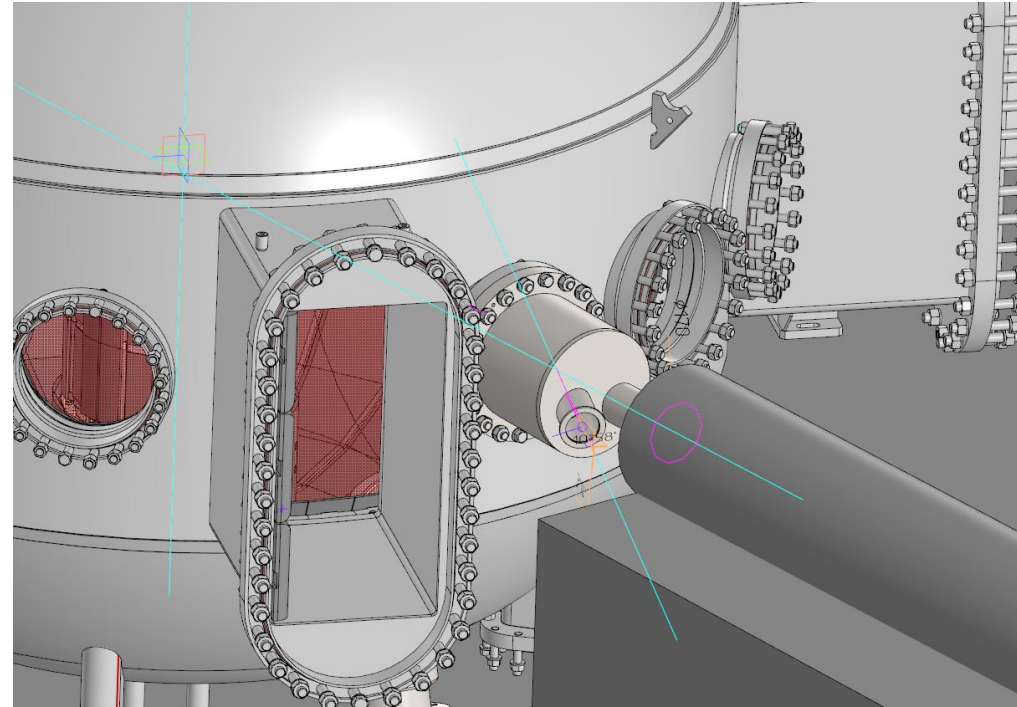
# План доклада

- Введение
- Инъекция криогенных макрочастиц
- Смягчение последствий срыва
- Диагностические приложения инъекции макрочастиц
- Результаты работ 2022-2024 гг.
- **Планы работ 2025-2030 гг.**
- Выводы

# Базовое финансирование по ФПЗ КП РТТН на 2025-2030гг.

- Базовое финансирование по ФПЗ КП РТТН на 2025-2030 гг. по теме «Разработка принципов систем управления и диагностики плазмы токамаков с помощью инжекции вещества».
- Цель - **применение разработанной аппаратуры** для проведения исследований на действующих установках ФПЗ КП РТТН (**T-15МД, Глобус-М2**) по тематике проекта:
  - Инжекция криогенных макрочастиц для ввода топлива и инициирования ELMs;
  - Инжекция газовых струй для смягчения последствий срыва тока в токамаке;
  - Исследования поперечного переноса методом возмущений.

# Подготовка экспериментов на Т-15МД и Глобус-М2



- Направления совместных исследований 2025-2030 гг. согласованы с командами установок Т-15МД и Глобус-М2.
- Показаны фото и 3D модель порта Глобуса-М2 для струйного инжектора МГИ и инжектора твердодородных макрочастиц

# Работы в поддержку проекта ТРТ

- **Напуск Рабочего Газа с периферии (НРГ)** (водород, дейтерий, пьезоклапаны и расходомеры)
  - Поддержание плотности согласно заданному сценарию плазменного разряда;
  - Управление изотопным составом.
- **Водородный инжектор – Инжекция Водородных Макрочастиц (ИВМ)** (водород, дейтерий):
  - Ввод топлива (в том числе HFS инжекция);
  - Инициирование, управление ELMs;
  - Диагностика поперечного переноса методом возмущений.
- **Подвижный газовый клапан - Массивная Газовая Инжекция (МГИ)**– доработка, адаптация для ТРТ.
  - Воздействие на динамику развития неустойчивости срыва (управление скоростью спада тока плазмы, подавление убегающих электронов, инициация срыва);
  - Импульсный напуск рабочего газа и примесей в разряд;
  - Диагностика поперечного переноса методом возмущений;
- **Система перехвата зародышей тока лавины убегающих электронов** (для обсуждения)
- **Диагностики Инжектируемого Вещества (ДИВ)** в токамаке (обычные и быстрые камеры, фотодиоды, интерференционные фильтры, световоды)

# Оценки параметров ИВМ для ТРТ

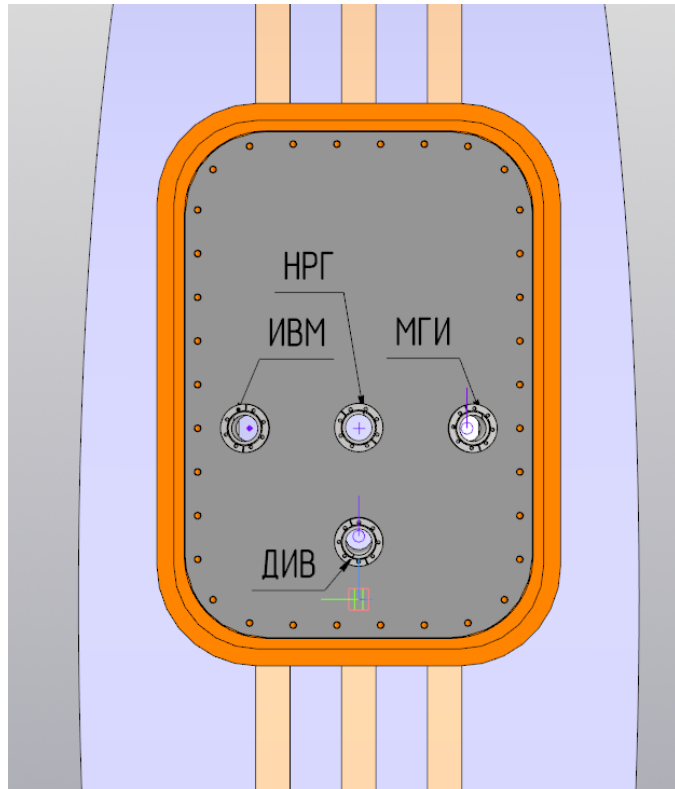
$$\Delta n_{e0} = 10^{20} \text{ м}^{-3}$$

$$\Gamma_s = 10^{21} \text{ с}^{-1}$$

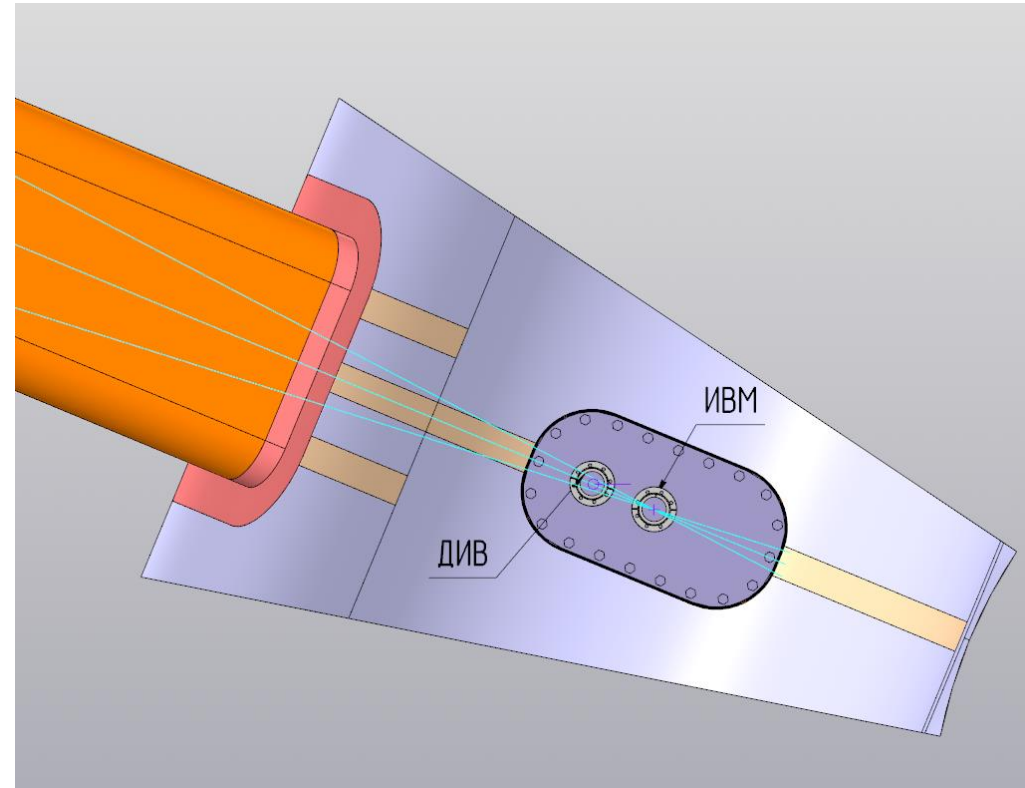
$K_{FE}$	$\widetilde{\Delta n_e} / \Delta n_e$ (о.е.)	$d_p$ (мм)	$f_{fuel}$ (Гц)
0,9 (HFS)	0,1	2,4	8,6
0,9 (HFS)	0,2	2,9	4,4
0,7 (Vertical)	0,1	2,6	8,6
0,7 (Vertical)	0,2	3,2	4,4
0,4 (LFS)	0,1	3,1	8,6
0,4 (LFS)	0,2	3,9	4,4

- Параметры системы частотной квазинепрерывной инжекции топливных криогенных макрочастиц для ТРТ: диаметр и длина 2.5-4 мм, скорость 200-300 м/с, частота инжекции макрочастиц 4-10 Гц, с применением коммутатора и с длительностью инжекции не менее 100 сек.

# Расположение патрубков систем инжекции на портах ТРТ



Горизонтальный порт ТРТ:  
ИВМ – инжектор твердодородных  
макрочастиц; НРГ – напуск рабочего газа;  
МГИ – массивная газовая инжекция  
(струйный инжектор); ДИВ – диагностики



Верхний вертикальный порт ТРТ:  
ИВМ – инжектор твердодородных  
макрочастиц (инжекция со стороны  
сильного поля); ДИВ – диагностики.

# План доклада

- Введение
- Инжекция криогенных макрочастиц
- Смягчение последствий срыва
- Диагностические приложения инъекции макрочастиц
- Результаты работ 2022-2024 гг.
- Планы работ 2025-2030 гг.
- **Выводы**



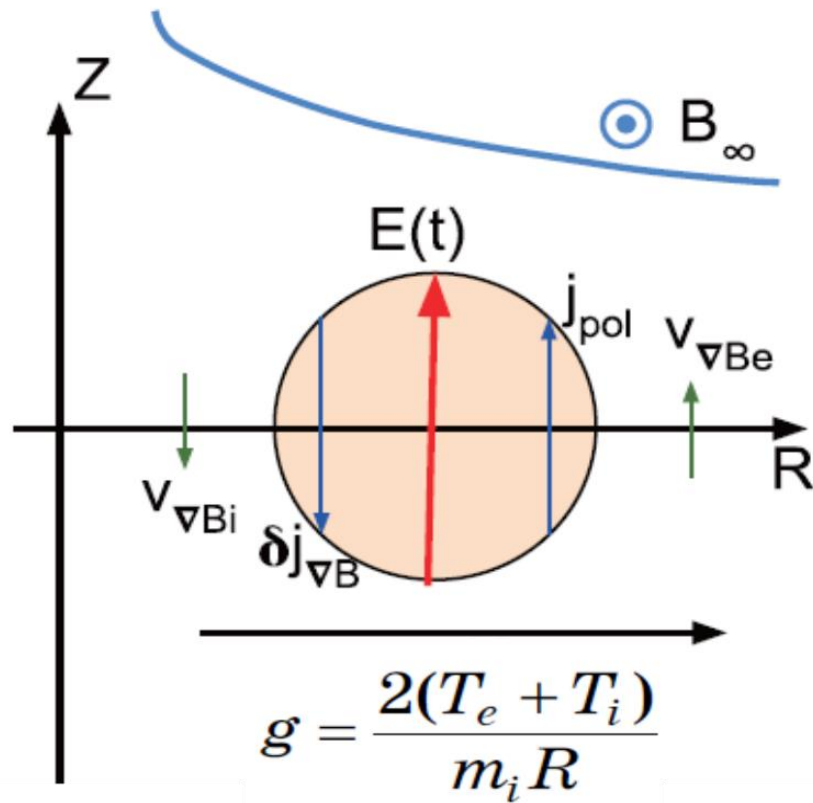
# Выводы

- Инжекция вещества в токамаки имеет много приложений для управления параметрами плазмы и ее диагностики.
- В СПбПУ в 2022-2024 гг. разработаны и завершается создание экспериментальных образцов инъекции массивной газовой струи и топливных криогенных макрочастиц.
- В рамках базового финансирования по ФПЗ КП РТТН на 2025-2030 гг. запланировано согласованное с командами установок Т-15МД и Глобус-М2 проведение исследований с использованием разработанной аппаратуры по следующим направлениям: ввод топлива, смягчение последствий ELMs и срыва тока, исследование поперечного переноса методом возмущений.
- Сформулировано предложение по созданию криогенного твердотельного ксенонового источника для EUV нанолитографии (требуется финансовая поддержка инновации)
- Сформулировано предложение по созданию аппаратуры для управления параметрами плазмы и ее диагностики в токамаке ТРТ с помощью инъекции вещества (требуется дополнительное финансирование).

СПАСИБО  
ЗА  
ВНИМАНИЕ

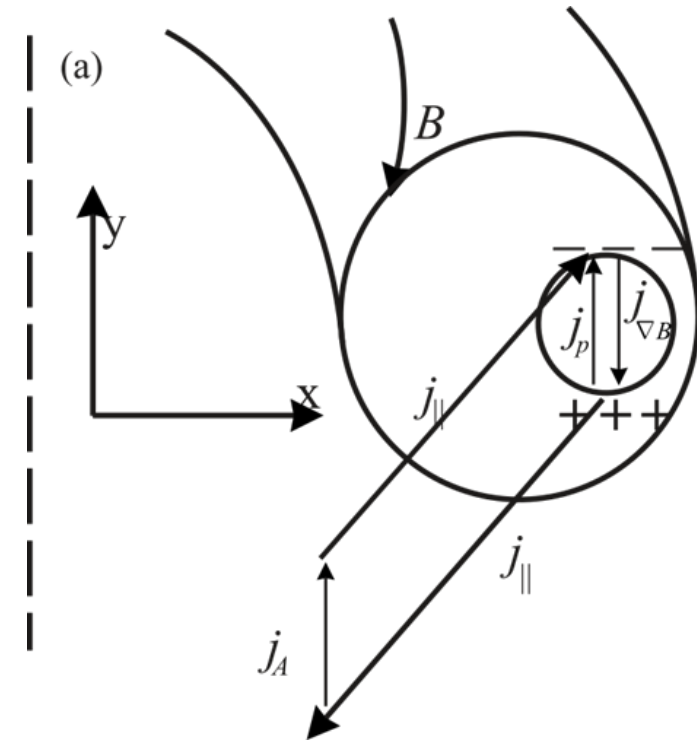
# Дрейфы инжектированного вещества

[Geulin PFR 2022]



- Схема дрейфа в неоднородном магнитном поле токамака

[Rozhansky PPCF 2004]



- Схема замыкания токов между пеллетным облаком и окружающей плазмой по механизму замыкания распространяющейся вдоль магнитного поля Альфвеновской волны

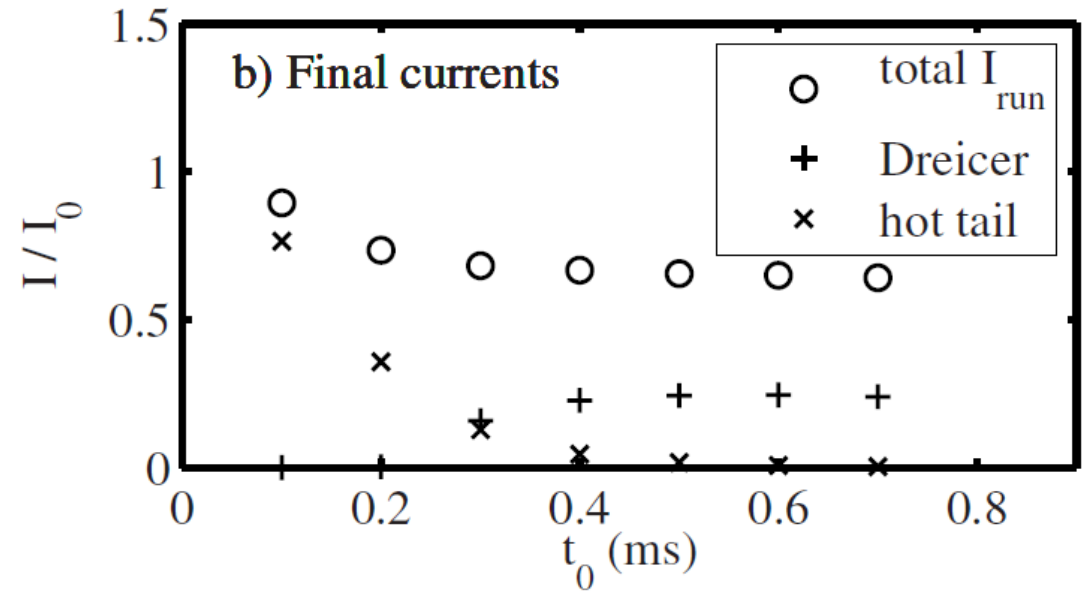
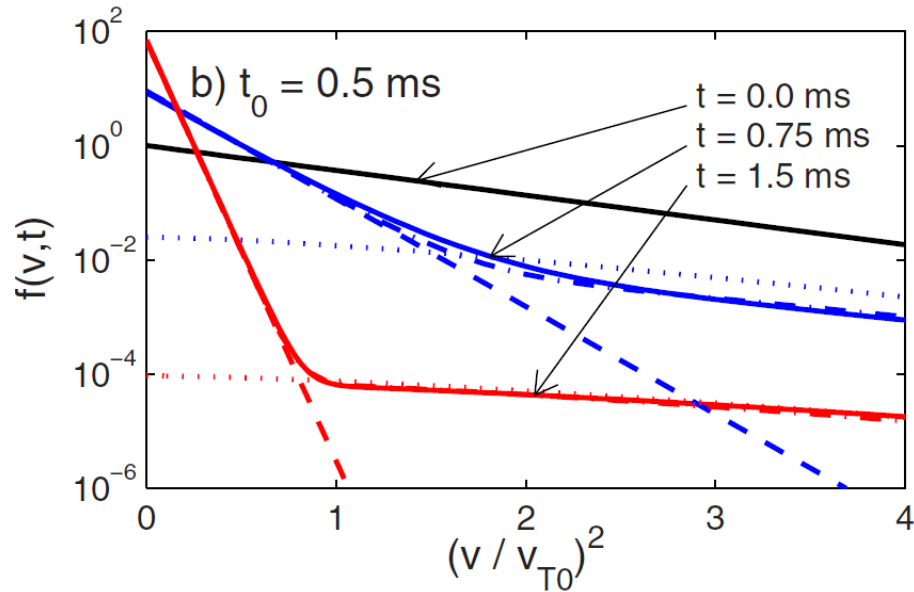
# Проблема зародышей лавины

- Основные источники зародышей: hot-tail («горячий хвост»), механизм Драйсера; эффект Комптона и распад трития;  $\gamma$ -излучение активированных стенок и  $\beta$ -распад трития; быстрое магнитное перезамыкание и др.

[Smith PoP 2008]

JET,  $I_p = 1.9$  MA,  $T_{e0} = 3.1$  кэВ  $\Rightarrow 10$  эВ

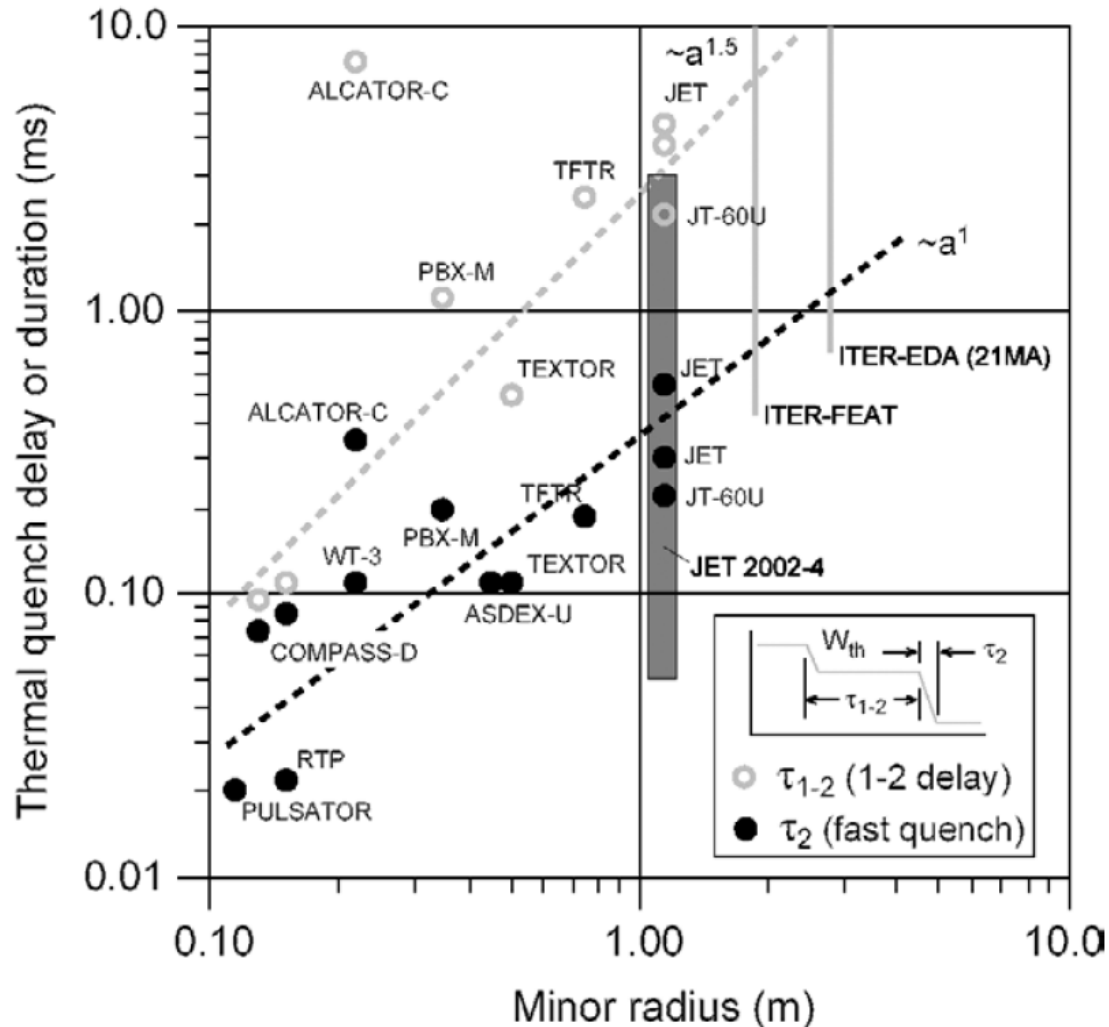
$$T_e \cong T_{e0} \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right)$$



- Hot-tail («горячий хвост») - из-за быстрого падения  $T_e$  ( $t_0 < \tau \propto T_e^{3/2} / n_e$ )
- Для JET с  $I_p = 1.9$  MA hot-tail механизм доминирует при  $t_0 < 0.3$  мс.
- В ИТЭР - основной hot-tail механизм действует в течении  $(2-3)t_0 \cong 2-3$  мс

# Проблема быстрого охлаждения при TQ ( $t_0$ )

[Riccardo NF 2005]



➤ Время быстрого TQ  $\tau_2 \equiv t_0$  (*fast reconnection*) растет примерно линейно с малым радиусом  $a$ .

➤ При больших  $E_{TQ}$  есть только быстрая стадия.

➤ Для JET  $a = 1 \text{ м} \Rightarrow t_0 \cong 0.3-0.5 \text{ мс}$ .

➤ Для ИТЭР  $a = 2 \text{ м} \Rightarrow t_0 \cong 0.8-1.0 \text{ мс}$ .

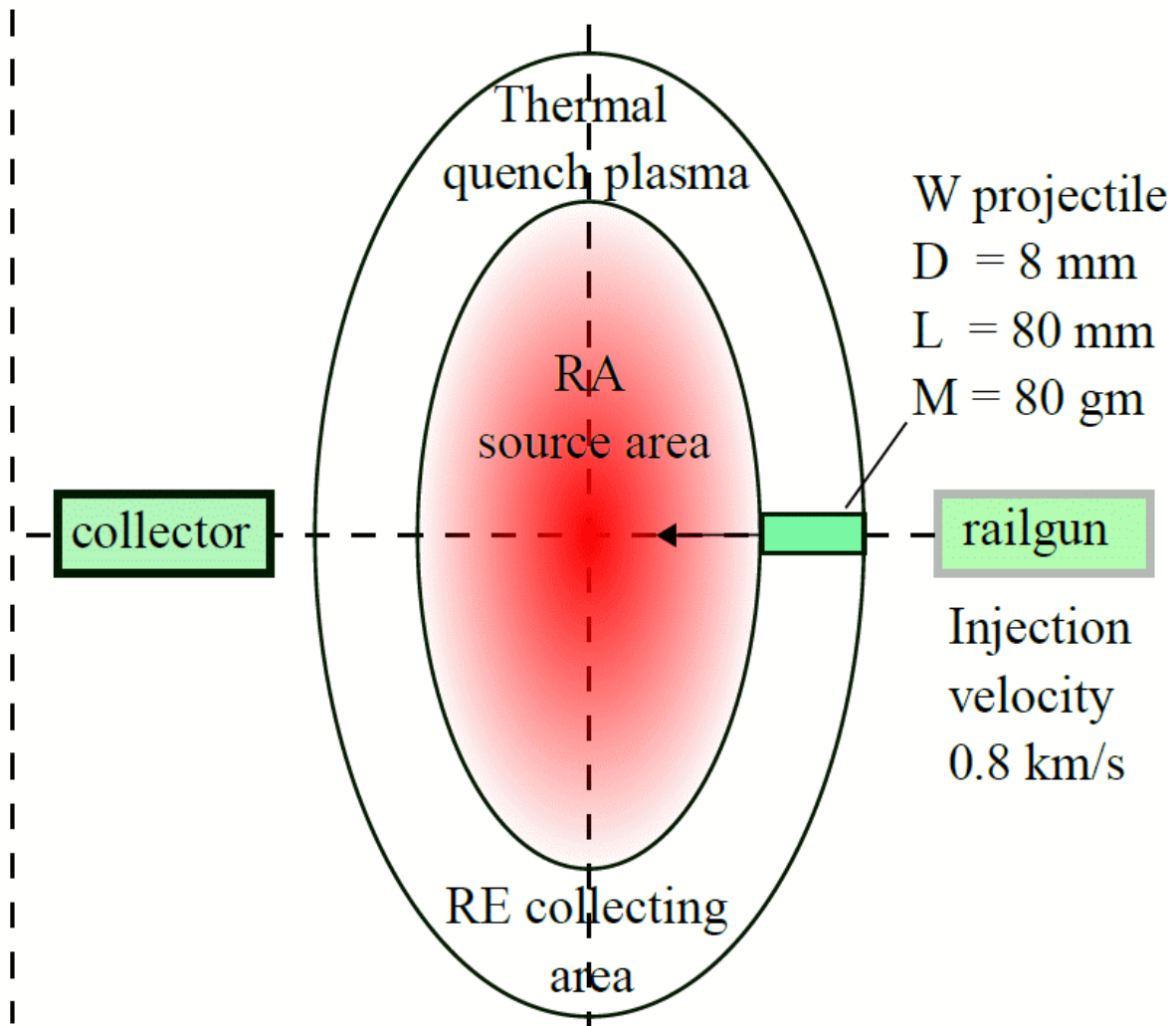
➤ Скорость перемешивания **2-3 км/с!?**

Модели нет – обсуждаются:

- Перестановочные МГД моды [Кадоццев ЖЭТФ 1974]
- Сохранение спиральности (*helicity*) [Boozer PoP 2018]
- Вторичные тиринг-неустойчивости [Bhattacharjee PoP 2008]

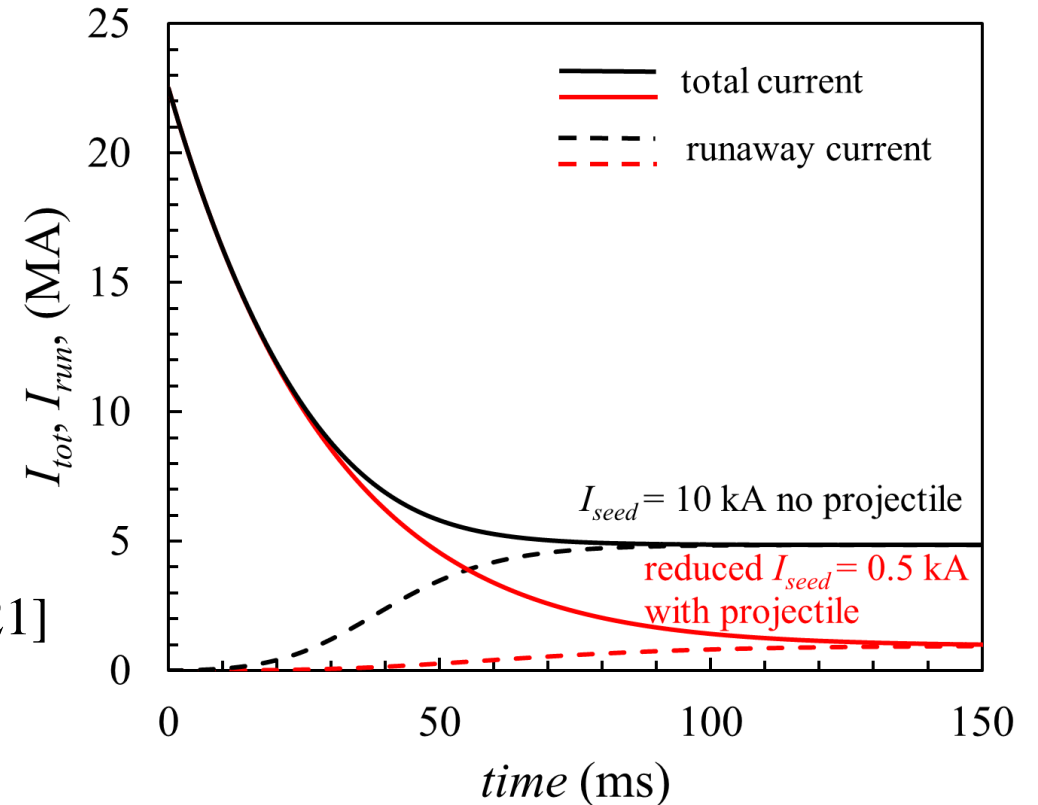
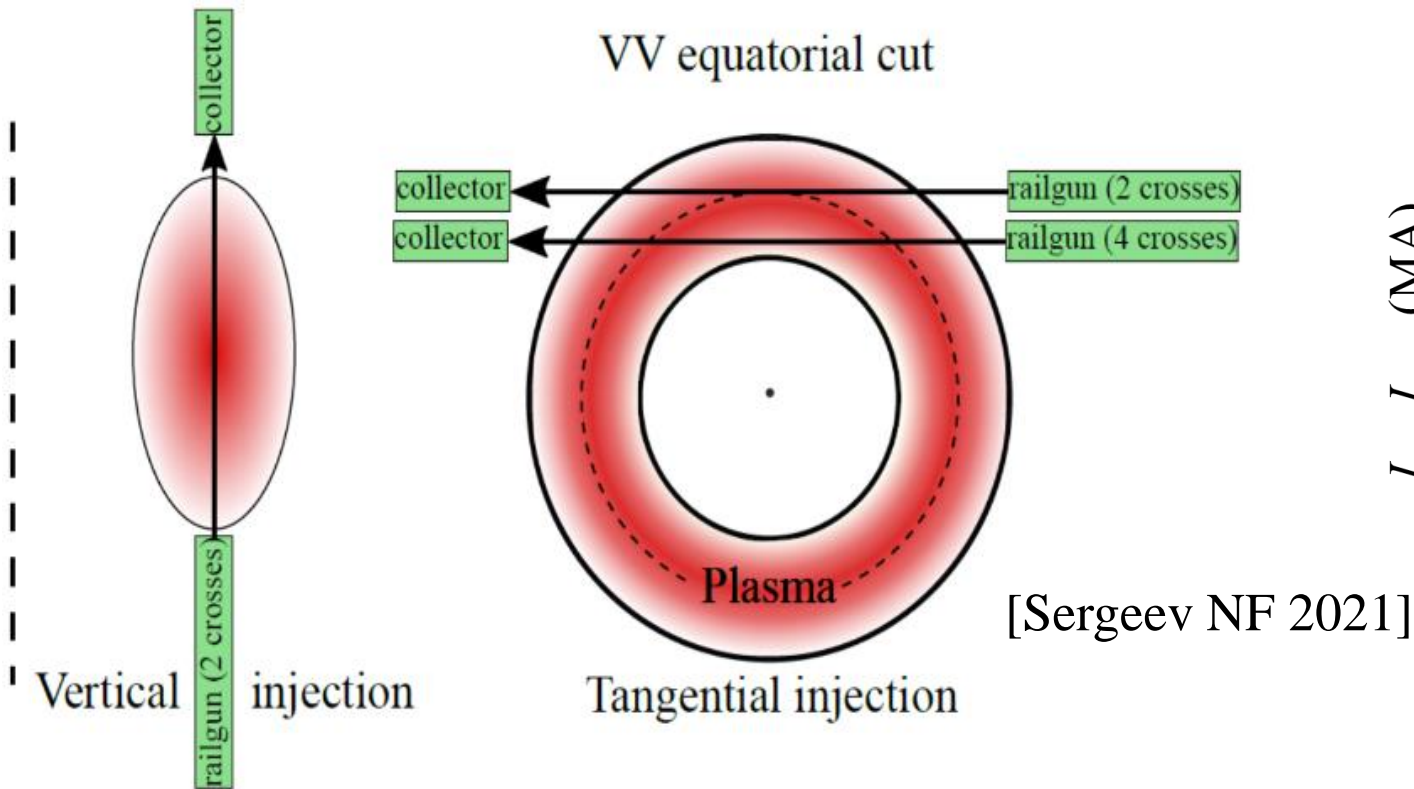
# Инжекция мишени для сбора зародышей в ИТЭР

[Sergeev NF 2021]



- Мишень инжектируется сразу после ТQ и пересекает плазменный шнур в экваториальной плоскости (4 м в ИТЭР) за время  $\approx 5 \text{ мс}$
- Она собирает убегающие электроны, существующие в плазме после ТQ
- Такая очистка позволяет удлинить время развития лавины и снизить величину тока убегающих электронов без значительного увеличения плотности рабочего газа до срыва!

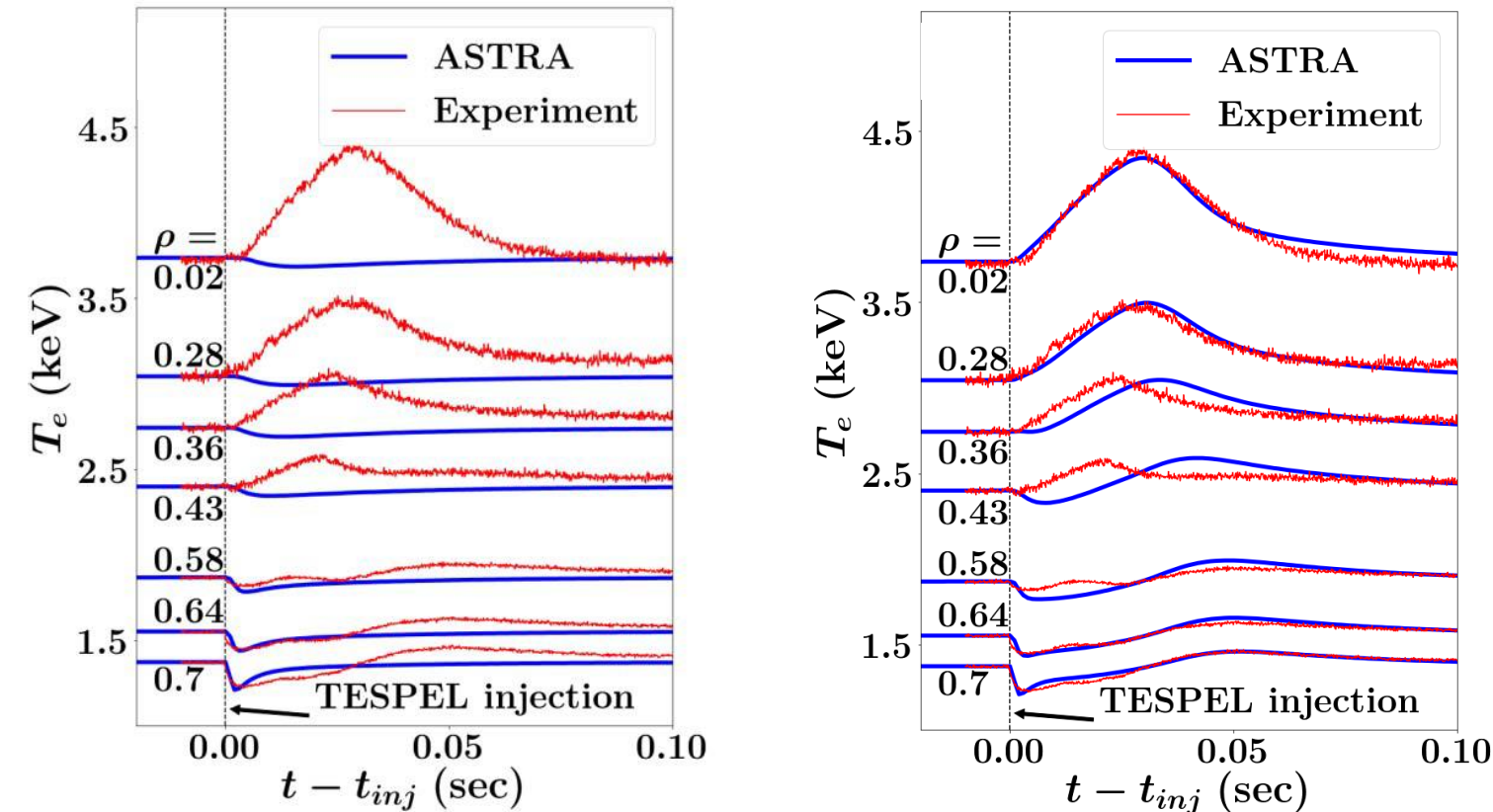
# Снижение тока зародышей и РА в ИТЭР



- Снижение  $I_{seed}$  в 20 раз (4 прохода малого радиуса) снижает  $I_{RA}$  до приемлемых значений  $\cong 0.9$  MA.
- МГИ примеси с помощью подвижного клапана (вместо более сложной SPI) и снижение  $I_{RA}$  посредством сбора зародышей инжектируемой мишенью предлагаются для Т-15МД и ТРТ

# Диагностика переноса тепла методом возмущений

[Pustovitov PPCF 2012], [Sergeev PFR 2019]



Эволюция электронной температуры в разряде 49708 LHD после инъекции полистироловой макрочастицы (красные кривые).

$$\frac{3}{2} \frac{\partial(T_e n_e)}{\partial t} + \nabla \left( -\chi_e n_e \nabla T_e + \frac{5}{2} n_e T_e \mathbf{v} \right) = \mathbf{v} \nabla p + Q_e$$

➤ Уравнение баланса сил

$$m n \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

$$\nabla p = \mathbf{j} \times \mathbf{B} \quad \text{быстро с Альфвеновскими временами} \ll \tau_E$$

➤ Закон Ома с учетом движения

$$\mathbf{E} = \eta \mathbf{j} \Rightarrow \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{j}$$

➤ Теорема Пойнтинга  $\Rightarrow$  доп. источник

$$\mathbf{j} \mathbf{E} = \eta \mathbf{j}^2 + \mathbf{v} \nabla p$$

➤ В стеллараторах  $\mathbf{j} \cdot \mathbf{E} \cong 0$

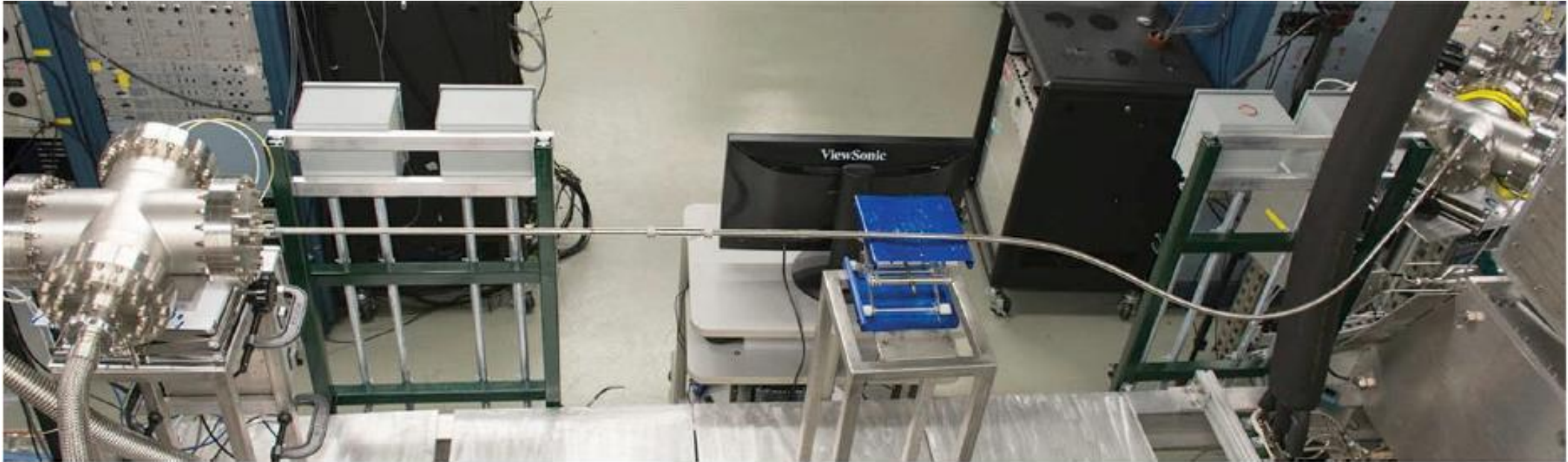
➤ Специально подобранная эволюция движения плазмы  $\mathbf{v}_{ad hoc}(r, t)$  позволяют описать NLT на качественном уровне (синие кривые на рисунке справа)

➤ Диффузионная модель неподвижной плазмы с  $\chi_e^{PB}(r)$  (синие кривые на рисунке слева) не описывает  $T_e(r, t)$ !



# Пример стенда в ORNL

[Combs FST 2018]



- ORNL mock-up of the ITER upper HFS guide tube (pellets first pass through the upstream microwave cavity on the left before entering the test tube and then pass through the downstream cavity upon exiting the test tube)