

The basics of spherical tokamaks and progress in European research

V. K. Gusev, F. Alladio and A. W. Morris

Обзор
ПОДГОТОВИЛ

студент группы М19-208 Кудашев Иван

Введение

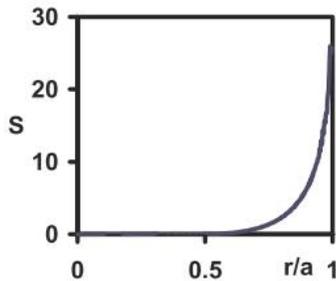
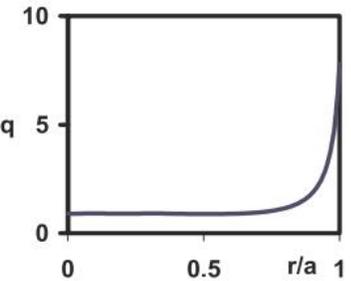
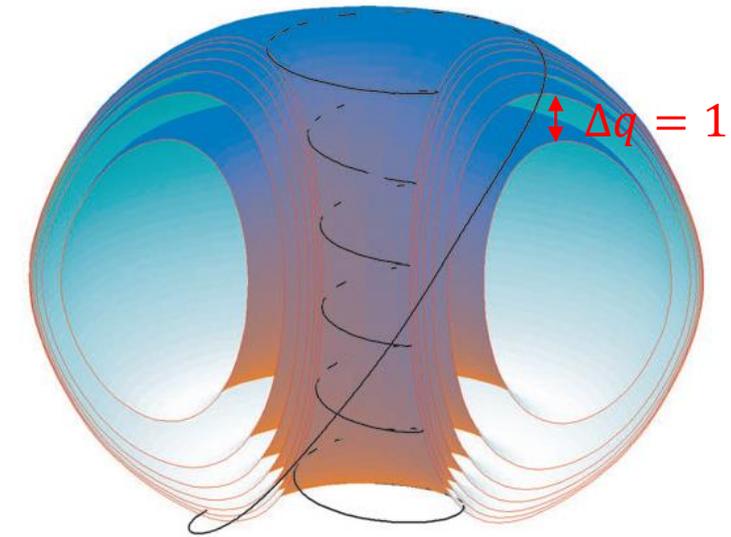
- Сферические токамаки – вариация общепринятых токамаков, полученная уменьшением большого радиуса при сохранении малого ($A=R/a < 2$)
- Идея таких токамаков является естественным следствием упрощения конструкции, уменьшения магнитных полей и размеров
- Эта конфигурация обладает натуральной вытянутостью, треугольностью и рядом других уникальных качеств

Исторический экскурс

- Для достижения термоядерной реакции нужно максимальное значение $\beta_T = \frac{\langle p \rangle}{\frac{B^2}{8\pi}} \sim \frac{1}{Aq_a}$; q – запас устойчивости
- Имеется предел Тройона на максимально достижимое $\beta_T \leq \beta_N I_N$; $I_N = \frac{I_p}{aB_t} \sim \frac{1}{qA}$, $\beta_N \approx 3.5$
- Было показано, что с уменьшением аспектного отношения можно добиться более высоких β_T
- Более того, предполагались и следующие преимущества:
 - Уменьшение магнитного поля без уменьшения тока плазмы
 - Упрощение конструкции токамака
 - Улучшение формы плазмы
 - Улучшение МГД-стабильности

Основные черты сферических токамаков

Тороидалность, запас устойчивости, магнитный шир



- При $A < 2$ запас устойчивости значительно больше цилиндрического приближения

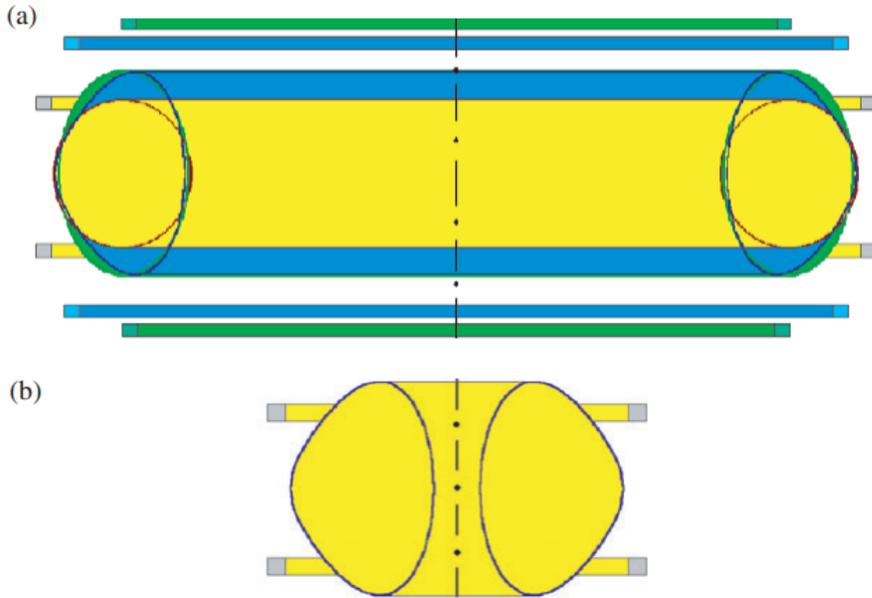
- Для обычных $q_a \approx q_{cyl} = \frac{5a^2 B_T}{R I_p}$

- Для сферических $q_a \approx q_{cyl} S(\kappa, \delta) f(A)$

- $S(\kappa, \delta) = \frac{[1 + \kappa^2(1 + 2\delta^2 - 1.2\delta^3)]}{2}$; $f(A) = \frac{1}{(1 - \frac{1}{A^2})^{\frac{3}{2}}}$

- Также линия магнитного поля большую часть пути проходит по внутренней части тора
- Высокая тороидалность приводит к росту магнитного шира на границе (в обычных токамаках $s < 2$)

Естественная вытянутость и треугольность



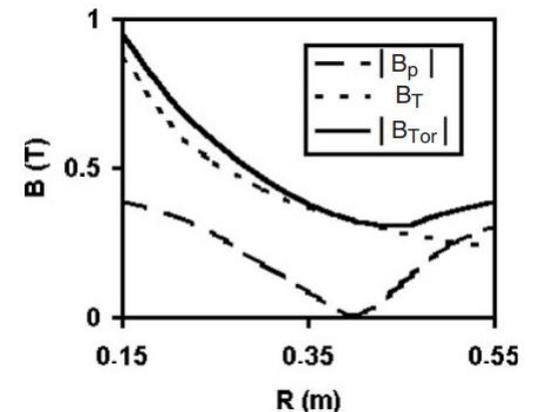
- В классических токамаках для создания вытянутости и треугольности используют квадрупольную и октупольную конфигурацию полоидальных катушек
- Из-за более близкого расположения токов в противоположные стороны сферического токамака плазменный шнур вытягивается и становится треугольным (D-форма) естественным образом
- Однако, более важным и сложным элементом становится центральный индуктор

Другие геометрические следствия

- Выводы для неоклассического переноса зависят от обратного аспектного соотношения
- Во-первых, проводимость плазмы меньше из-за большего количества запертых частиц из-за большего пробочного соотношения $\left(\frac{A+1}{A-1}\right)$
- Это приводит к лучшему омическому нагреву, лучшему проникновению тока к центру при зажигании

Другие геометрические следствия

- Во-вторых, диффузия ($\sim \rho_i^2 q_a^2$) также выше в СТ
- Из-за малой инертности плазменного шнура возможны более высокие скорости вращения плазменного шнура с помощью NBI, что может привести к подавлению длинноволновых неустойчивостей
- Вычисления показывают, что в СТ возможна 100% генерация бутстреп-тока
- Большое изменение магнитного поля по большому радиусу может приводить к конфигурациям с вогнутым магнитным полем
- Описанные эффекты приводят к улучшению стабильности шнура



Устойчивость к идеальным МГД-модам

- Сильная тороидальность приводит к стабилизации кинк-мод (значение нормализованного тока может превышать 8)
- Уширение профиля давления, увеличение ширины по сравнению с обычными токамаками приводит к стабилизации баллонных мод

Неидеальный предел по плотности

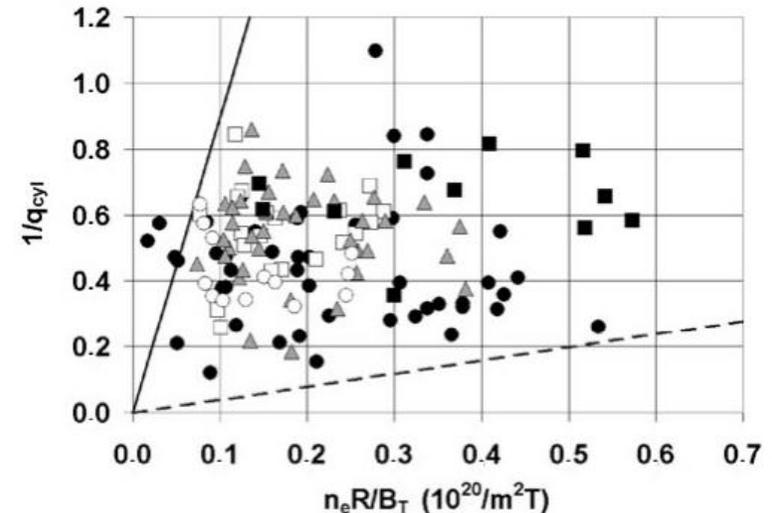
- Тиринг моды снижают максимально допустимые значения бета
- Для подавления самых сильных ($m/n=3/2, 2/1$) мод, необходимо увеличение q_0 в центре шнура
- В СТ возможно достижение режимов с $q_0 > 2$, что положительно сказывается на устойчивости
- Магнитный шир также способствует устойчивости неидеальных мод

Нелинейные и другие МГД

- Срывы плазмы в СТ происходят несколько иначе
- Из-за сильного тороидального и полоидального взаимодействия мод перезамыкание магнитных поверхностей может происходить и при $q_a > 3$
- Однако, при этом, плазменный шнур не всегда теряет всю тепловую энергию при срыве
- К этому может приводить большой шир, низкая индуктивность, и, возможно, отсутствие резонанса внутри колонны

Поведение плотности

- Как показывают эксперименты, предел Гринвальда по плотности достигается и даже превышает в СТ
- Исследования предела плотности в такой геометрии может помочь для понимания физики
- В H-mode профили токамака MAST плоские или даже вогнутые
- При низких плотностях только 10-20% электронов становятся убегающими, причиной этого до конца не ясны
- Область операционных пределов для СТ значительно шире, чем для обычных токамаков

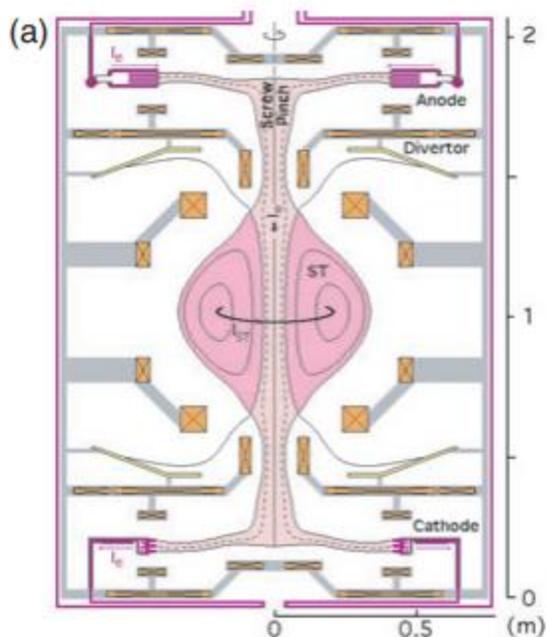


Экспериментальный прогресс

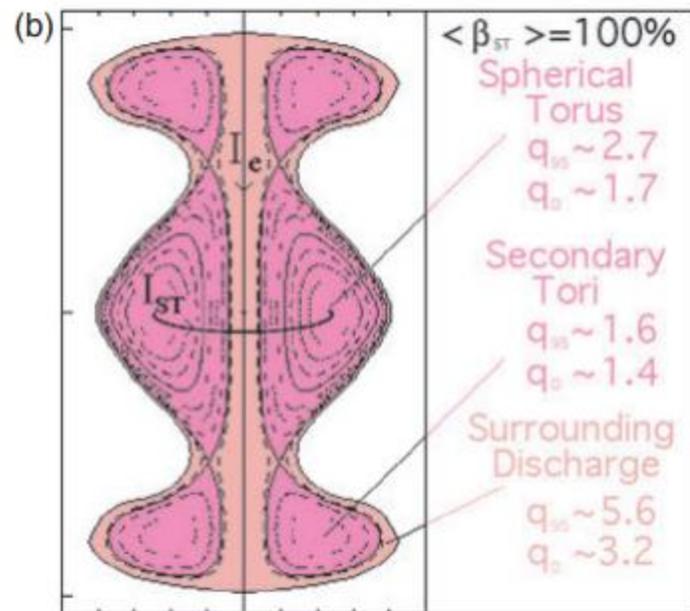
Масштабы исследований

- На момент написания статьи европейские СТ находились в
 - Институте Иоффе (Глобус-М)
 - Калхэме (MAST)
- Дизайн итальянского СТ Proto-Sphera был завершен
- В нем вместо индуктора используется пинч для:
 - Увеличения аспектного отношения
 - Увеличения тороидалдльное магнитное поля
 - Упростить конструкцию из-за отсутствия индуктора

СТ-конфигурации без индуктора



Proto-Sphera



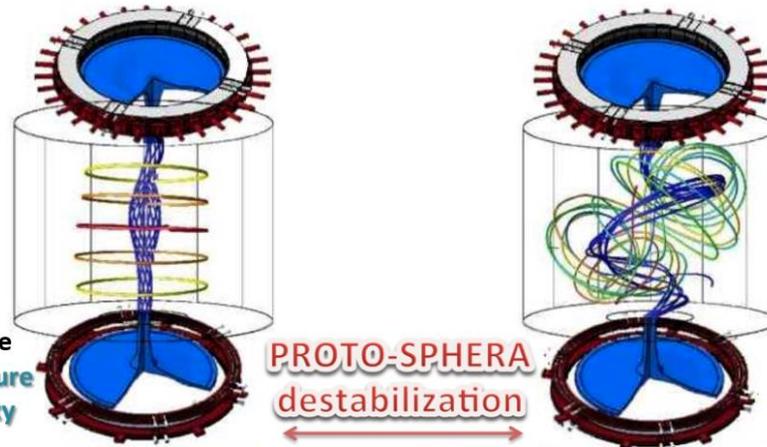
Chandrasekhar-Kendall-Furth (СКФ) equilibrium

- Проблемы Proto-Sphera
 - Равновесие и устойчивость без центральных катушек
 - Зажигание и поддержка тока
 - Восстановление магнитной конфигурации
- СКФ конфигурация поможет достигнуть $\langle \beta \rangle_{Vol} = 100\%$
- Утверждается, что он устойчив для всех МГД-мод $n = 0, 1, 2, 3$

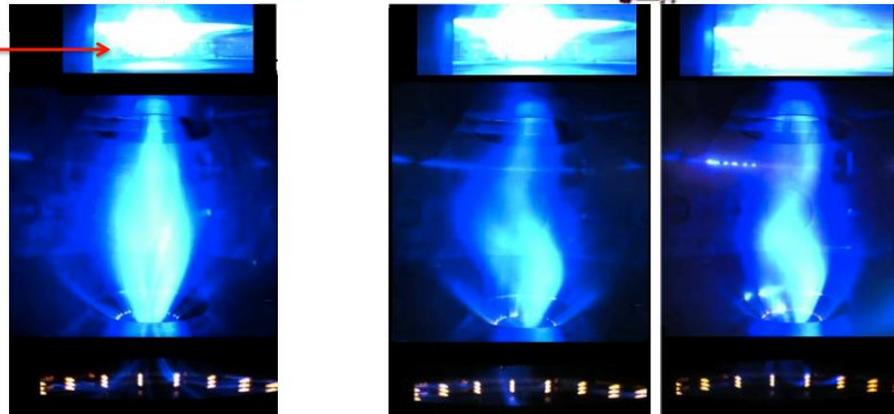
Proto-Sphera (к настоящему времени)

Physics Design
1997-2008

Langmuir probe measurements give
 10 ± 3 eV temperature
 $2 \pm 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ density
at edge of anodic plasma mushroom



Experiment
2017



СТ как часть исследований для ИТЭР

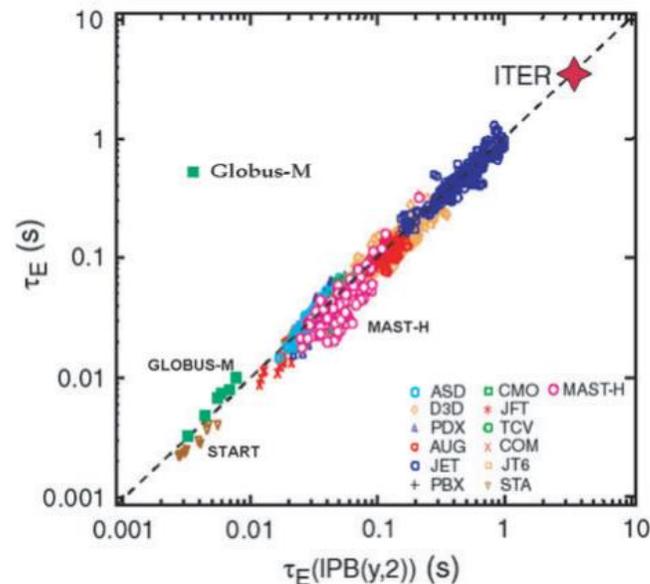
- Скейлинги ИТЭР были построены для обычных токамаков и исследования для новых значений аспектного отношения помогут уточнить и расширить имеющиеся данные

Устойчивость

- Тиринг-неустойчивости часто провоцируются пилообразными колебаниями, что подтвердилось в экспериментах на MAST и для СТ
- Однако в экспериментах на Глобус-М отмечалась активация тиринг мод без пилообразных колебаний
- При исследовании идеальной МГД-устойчивости на MAST достигались $\beta_N = 5.3$
- Ожидается, что исследования на СТ помогут преодолеть существующие МГД-пределы

Процессы переноса, сравнение со скейлингами

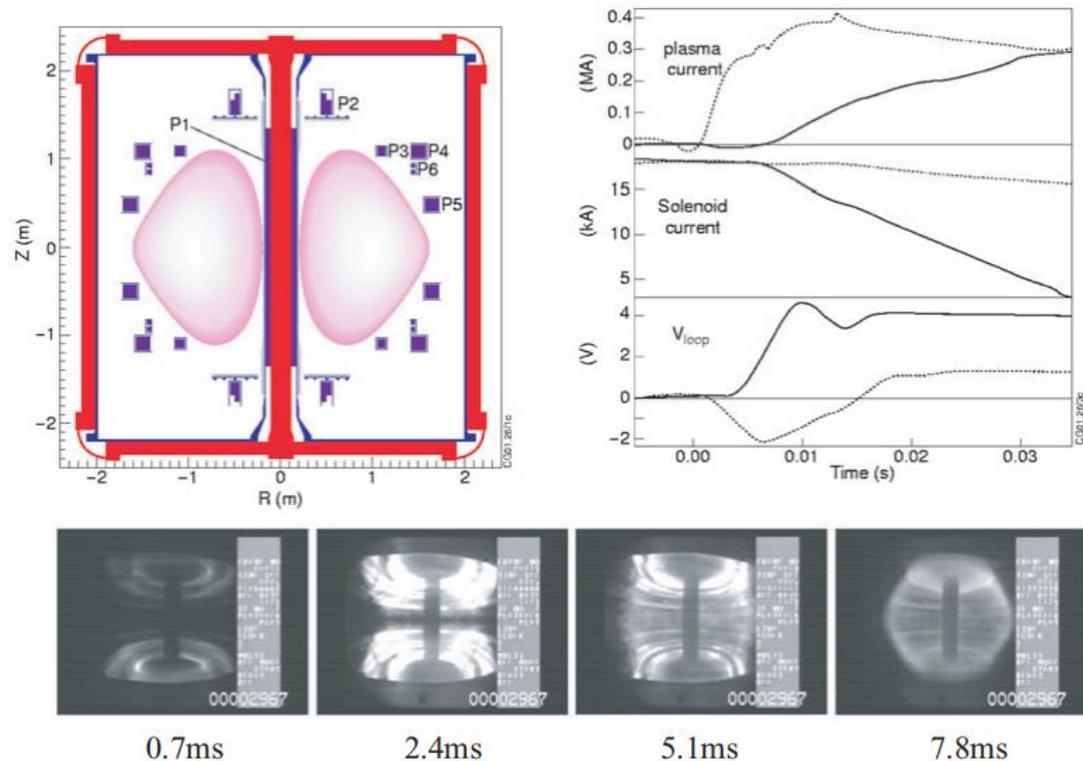
- Порог перехода в H-моду для сферических токамаков примерно в 2 раза превышает ИТЭР-скейлинги
- Однако, при этом время удержание удовлетворяет скейлингам



- Тем не менее, исследования переноса были далеки от завершения
- Из-за зависимости процессов переноса от аспектного отношения эксперименты на СТ могут пролить свет на физику этих процессов

Повышение и поддержание тока

- Из-за отсутствия места в центре токамака необходимы методы поджига и поддержания токамака без центрального индуктора
- Одним из путей в этом направлении является использование внешних полоидальных катушек
- Токамаки MAST и START использовали метод индукционного сжатия, требующий дополнительных полоидальных катушек в вакуумной камере

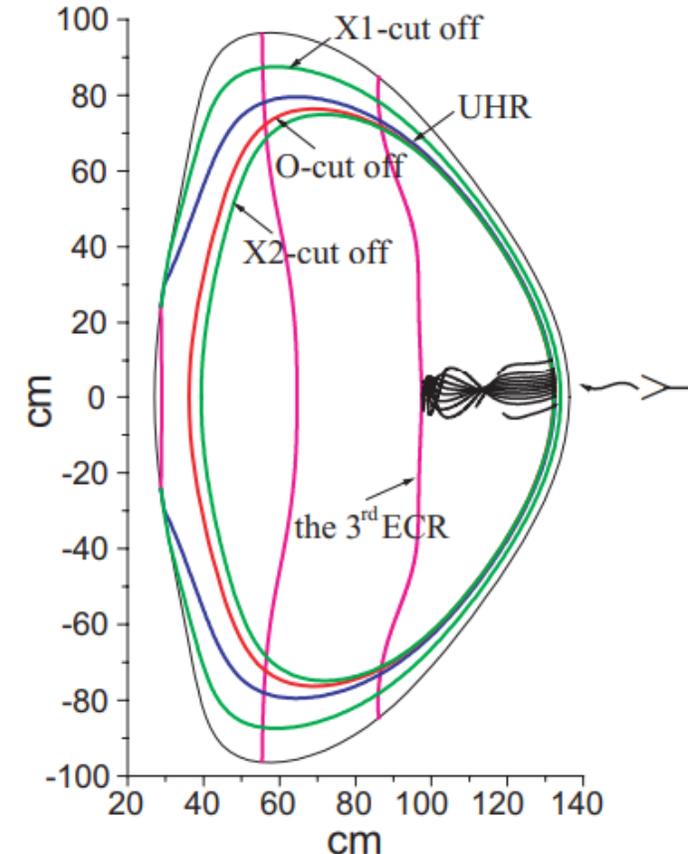


Неиндукционное поддержание тока

- Доля бутстреп-тока с использованием внешнего нагрева может достигать 50%
- NBI-нагрев позволяет увеличить неиндуктивный ток вследствие прямой генерации, а также нагрева плазмы, ведущего к увеличению бутстреп-тока
- Проблемы приложения ВЧ-методов:
 - Более низкое поле, более высокие плотности по сравнению с обычными токамаками приводят к тому, что ЭЦР, НГ области резонанса практически недостижимы со внешней границы плазмы
 - Для ИЦР длины волн начинают превышать размеры установки

Неиндукционное поддержание тока

- В то же время изменение пространственного расположения областей отсечки и преобразований дает возможность обойти эти препятствия для эффективного ввода мощности в плазму
- Также были разработаны методы введения НГ-волн и подтверждены моделированием
- Для ИЦР-нагрева возможен ввод мощностей через более высокие гармоники

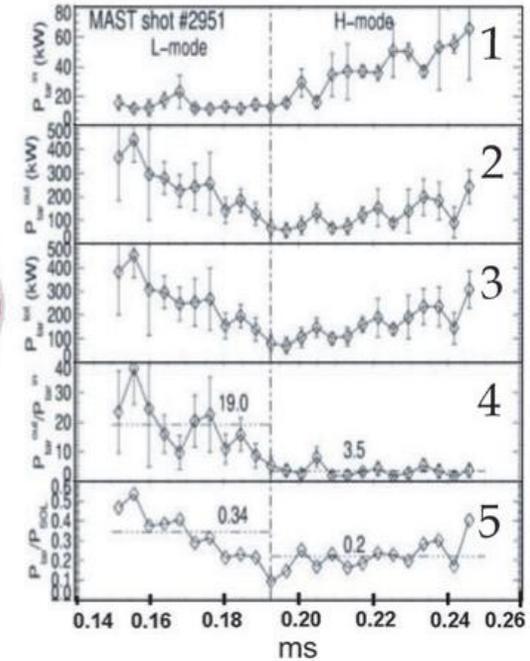
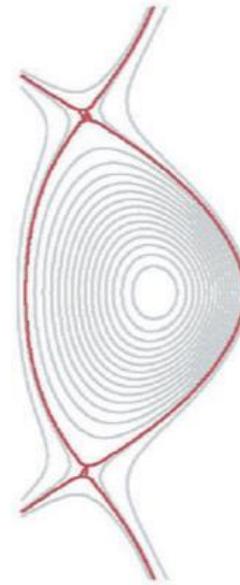
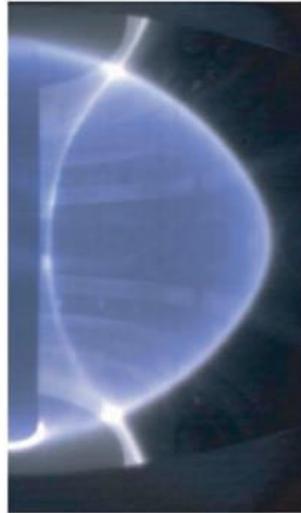


SOL и дивертор

- Размеры SOL не сильно меняются с изменением масштабов токамака
- Выход энергии для более компактных СТ оказывается больше в SOL по сравнению с обычными токамаками
- Более того из-за большой разницы в площадях внутренних и внешних пластин СТ необходимо, чтобы большая часть выделялась на внешнем обходе
- Тем не менее, именно такое выгодное распределение и наблюдается, в том числе и из-за больше площади SOL на внешнем обходе

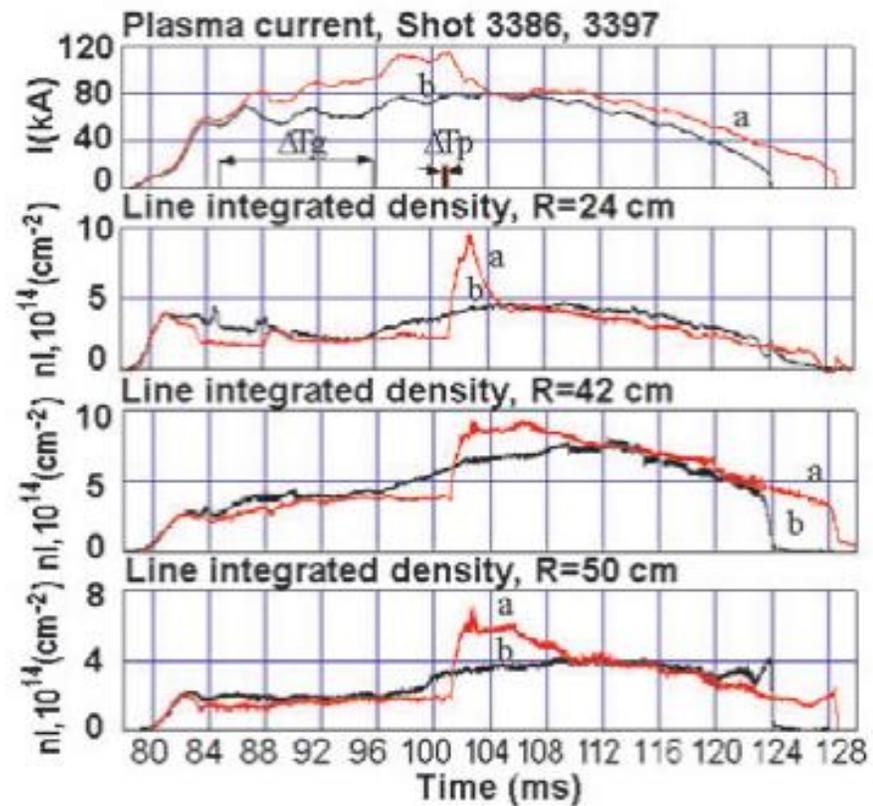
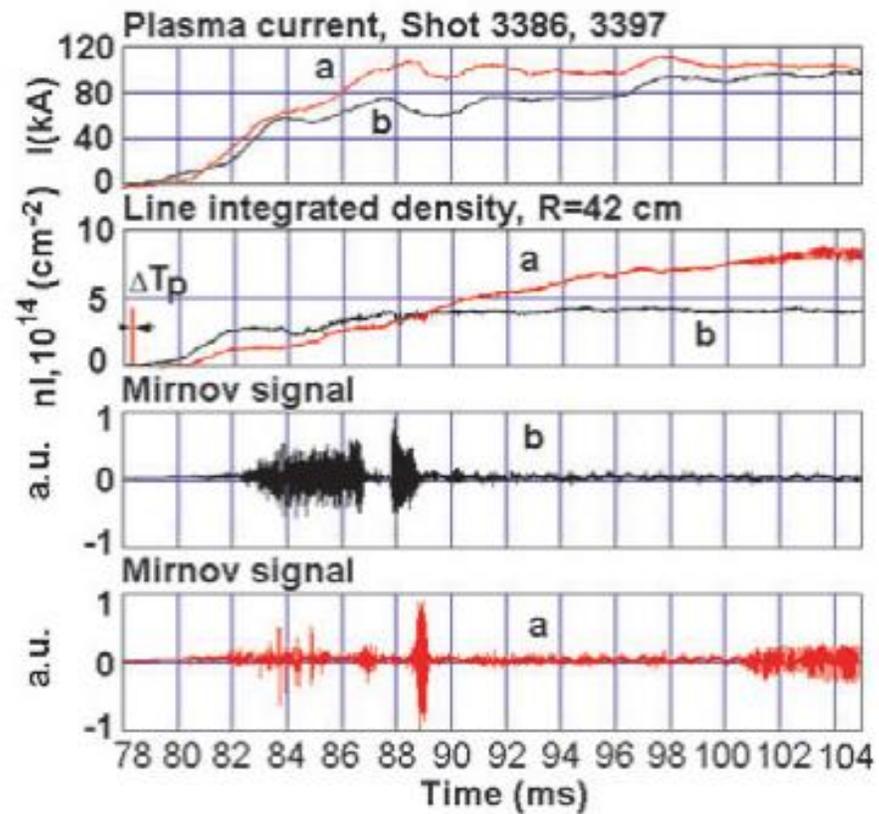
SOL и дивертор

- На экспериментах MAST показано, что из-за большого пробочного соотношения число запертых частиц в SOL велико
- Параллельные потоки имеют большую скорость и меньшую температуру, чем в обычных токамаках
- Детачмент возникает при меньших плотностях



Введение топлива

- Традиционные схемы с накачкой со стороны слабого поля неэффективны в случае высоких плотностей
- Альтернативные методы предложены:
 - Накачка со стороны сильного поля
 - Использование нейтральных пучков
 - Использование пеллет
 - Использование сверхзвуковых молекулярных пучков
- В Глобус-М использовался нагрев с помощью джетов
- Несмотря на то, что скорость пучка была (30 км/с) мала для преодоления магнитного поля токамака, увеличение плотности все равно наблюдалось



Заключение

- СТ являются активно развивающейся областью исследований
- Эта конфигурация позволяет получать выгодные формы и режимы плазмы
- Были получены рекордные для поля в 0,5 Т величины
$$I_p = 1.4 \text{ MA}, \quad q_{\text{cyl}} \approx 0.8, \quad q_{95} \approx 2, \quad \langle n \rangle \approx 1.4 n_{\text{Green}} (0.8 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}),$$
$$\beta_T \approx 45\%, \quad \beta_N > 5, \quad H > 1.2, \quad \tau_E \approx 100 \text{ ms}$$
- Многие положительные предположения, особенно неоклассические, получили свое экспериментальное подтверждение
- Напротив, некоторые опасения, такие как высокие нагрузки на дивертор и слабое удержание не были подтверждены

Заключение

- Совместное влияние специфических черт СТ, таких как высокий градиент и кривизна поля, малая величина поля, высокая плотность и бета приводит к лучшему пониманию процессов магнитного удержания
- Теория устойчивости и переноса получила новые уникальные данные из экспериментов СТ
- Несмотря на сложности со сферическими токамаками, эта область является интересной и физически плодотворной для термоядерных реакторов

Спасибо за внимание!