

Compact magnetic confinement fusion: Spherical torus and Compact torus

Z. Gao 2016 *Matter Radiat Extrem* **1** 153

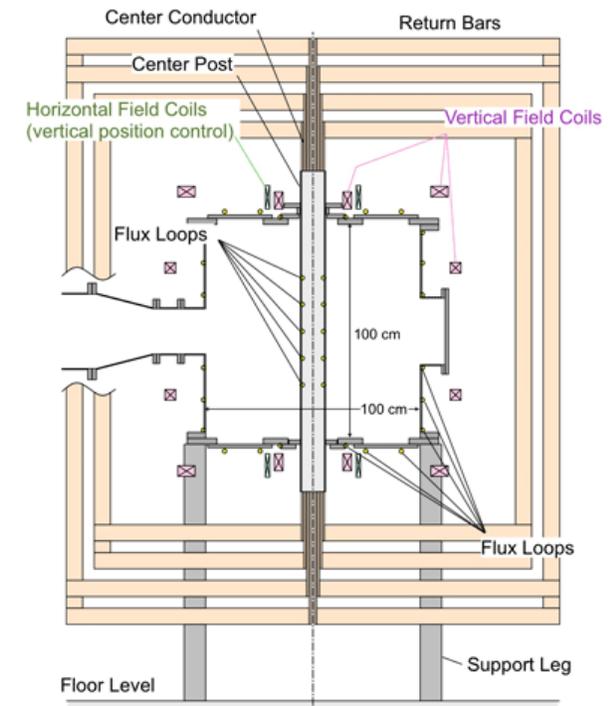
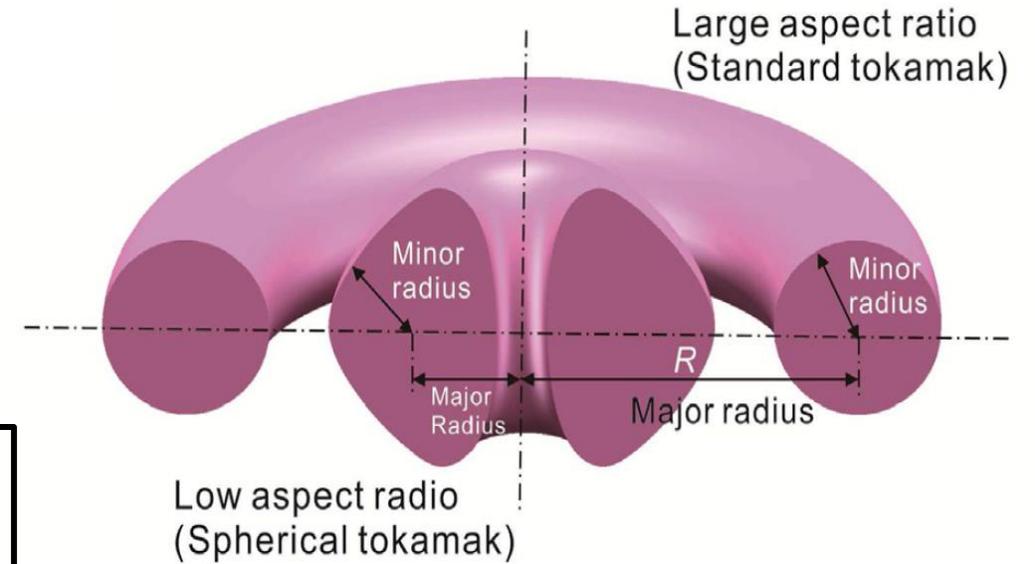
Автор доклада: Кулагин В.В

Magnetic confinement fusion (MFC)

- Tokamak -> ITER, DEMO
- Stellarator
- Spherical torus (a.k.a. spherical tokamak, ST)
 - Reversed field pinch (RFP)
 - Compact stellarator (NCSX)
- Compact torus (CT) (*тороидальная геометрия, в которой отверстие тора не пронизывается проводниками или вакуумной камерой*)
 - Spheromak
 - Field reversed configuration (FRC)
- Additional
 - Merging ST
 - Screw-Pinch ST
 - Magnetised target fusion (MTF)

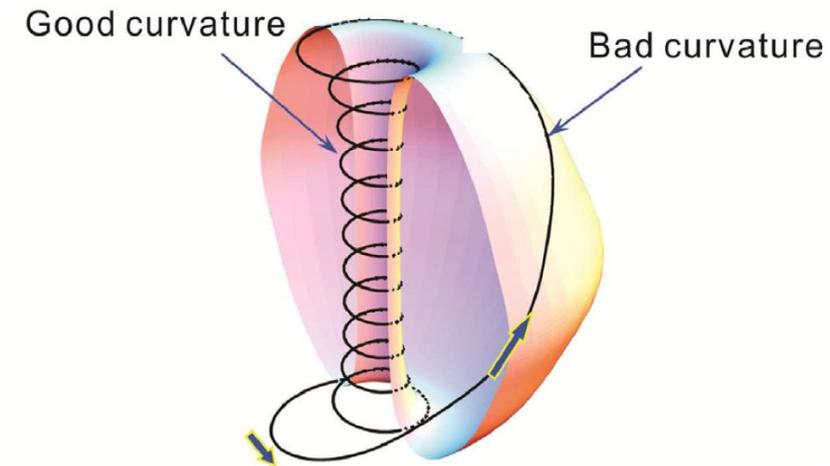
Spherical tokamak *toroidal confinement*

- Разновидность токамака с малым аспектным отношением ($A < 2$) \Rightarrow вытянутое сечение плазмы
- Отличие от СТ: токамак LATE – убран центральный соленоид, но вакуумная камера оставлена
- Магнитные поля (полоидальное и тороидальное) сравнимы по величине



Spherical tokamak. Отличия от стандартного токамака

1. Значение q на границе
2. $\beta = \beta_N I_p / (a B_t) = 5 \beta_N (1 + \kappa^2) / 2 A q^*$
3. $I_p / I_{TF} = (1 + \kappa^2) / 2 A^2 q^* \sim 1$ для ST
4. Но поле в центре все же мало
5.
$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Z^2} = -\mu_0 R j_\phi = -\mu_0 R^2 \frac{\partial p(\psi)}{\partial \psi} - \frac{\partial I^2(\psi)}{2 \partial \psi}; \psi -$$
полоидальный поток магнитного поля, p – давление, I/R – тороидальное поле
6. Плазма менее подвержена МГД-неустойчивостям, но легко возбудимы TAE, EPM: $V_A = B / \sqrt{\mu_0 \rho} = v_{ti} / \sqrt{\beta}$
(JET: $V_A \sim 7 \cdot 10^6$ м/с; STs: $V_A \sim 1 - 3 \cdot 10^6$ м/с;
MAST: $E_{NBI} = 40 - 45$ кэВ $\Rightarrow V_{NBI} > V_A$)

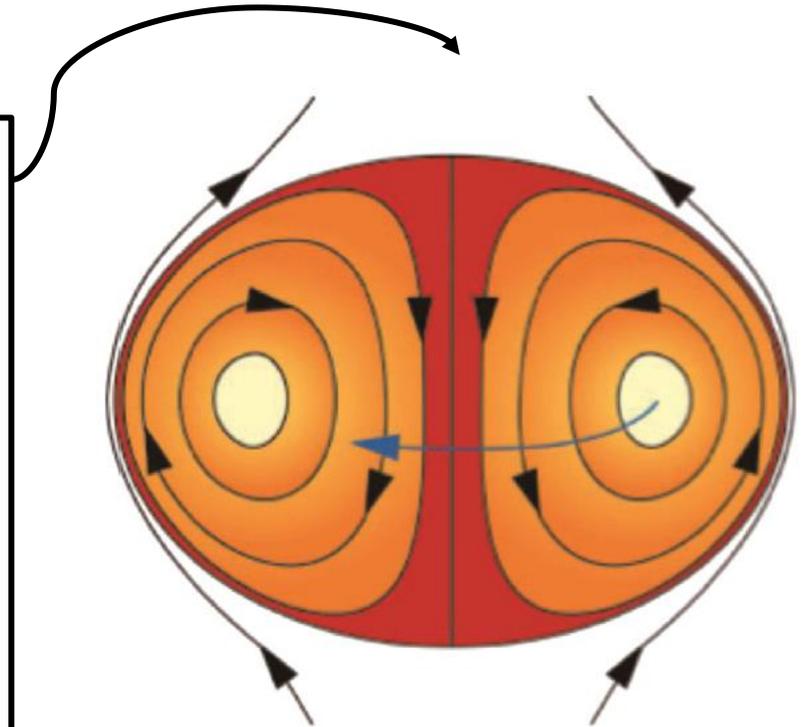


Spherical tokamak. Исследования

1. Неиндукционное создание тока (мало места для соленоида)
 - Compression and merging (START, MAST, ST-40)
 - Helicity injection (NSTX)
 - RF assistance (TST-2)
 - NBI: малая альфвеновская скорость
 - ЕС: большая плазменная частота
 - LWCD, EBWCD, HHFWCD
2. Процессы переноса
 - Преимущественно перенос за счет электронов (шир ExB)
 - Поле слабее (клас. Ток.) \Rightarrow турбулентный перенос более явно выражен
3. MAST-U, NSTX-U, Globus-2M, QUEST, Pegasus, LTX, HIT-II, TST-2, LATE, ...
4. ST-40: $A = 1.6 - 1.8$, $B_t = 1.5$ Т, $\tau = 200$ мс, $I_p = 400$ кА

Spheromak *toroidal confinement*

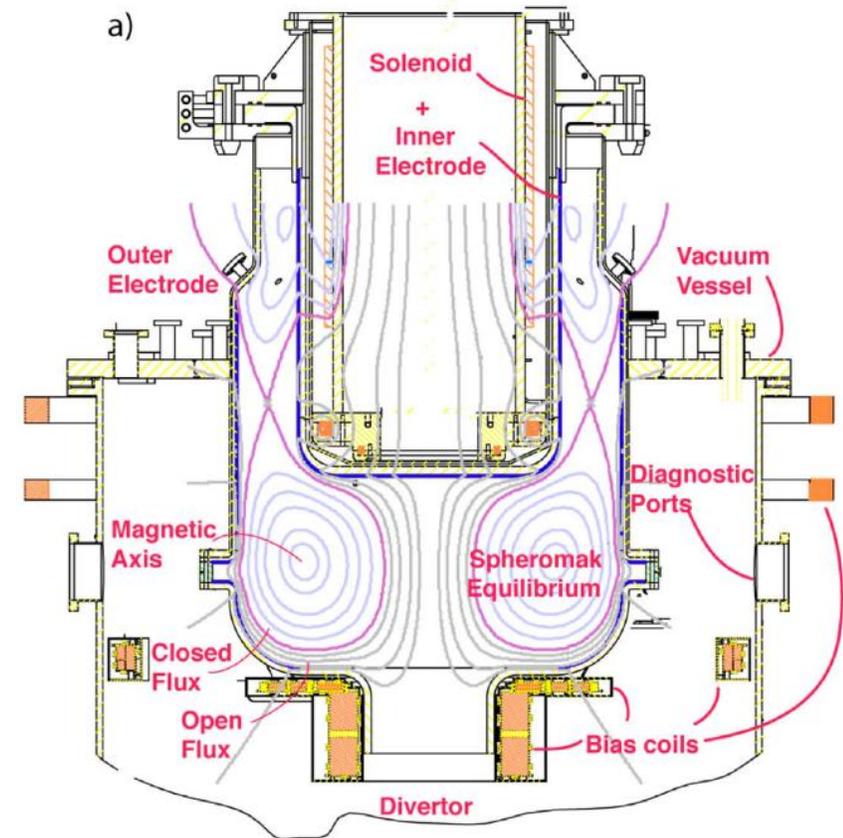
- Отсутствуют тороидальные катушки и элементы вакуумной камеры внутри тора
- Аспектное отношение $A \sim 1$, но центральная зона не применяется для удержания плазмы
- Нет катушек тороидального поля, оно создается током плазмы (но могут использоваться внешние магниты)
- Ток полностью тороидален в центре, полностью полоидален на периферии
- $\nabla p = j \times B = 0$



Конфигурация сферомака

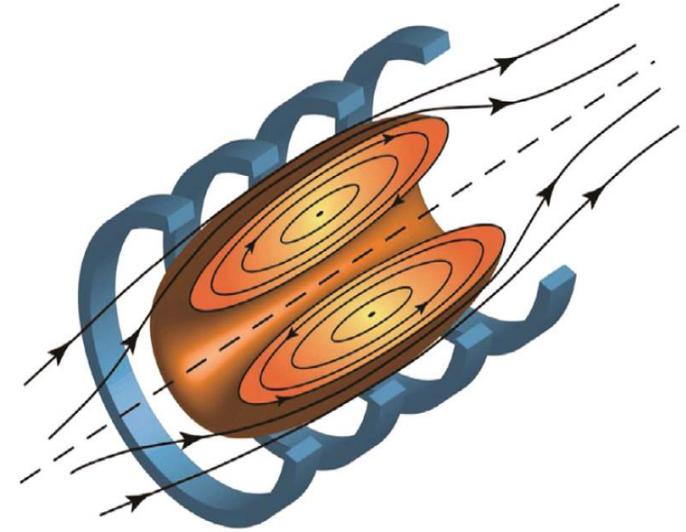
Spheromak

- $p = \frac{\partial p}{\partial \psi} \nabla \psi = 0 \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial \psi} = 0 \Rightarrow \Gamma - \text{Ш} \Rightarrow \frac{\partial I}{\partial \psi} = \frac{J}{B} = \text{const} \Rightarrow$ с учетом г.у. можно получить аналитическое решение
- Ток получается путем введения связанных полоидальных и тороидальных магнитных потоков
(магнитная спиральность $K = \int \mathbf{A} \mathbf{B} dV = \text{const}$)
- SSPX: $T_e > 500$ эВ, $B_t \sim 1$ Т, $I_t \sim 1$ МА, $t \sim 8$ ms
- SPHEX, BCTX, SSX, CTIX, HIT-S ...

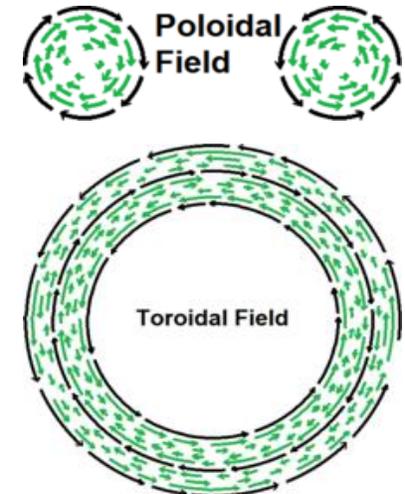


Field reversed configuration (FRC) *poloidal magnetic field only*

- Магнитные поля преимущественно создаются током плазмы
- Объемные токи – диамагнитные \Rightarrow большое β
- Уравнение Г-Ш не описывает устойчивость \Rightarrow кинетическая теория или др.
- “Плохая кривизна” \Rightarrow FRC не устойчив к большинству идеальных мод
- Создание FRC:
 - θ – pinch
 - Spheromaks x2
 - Reversed field pinch (RFP)
- TCSU, PFRC, FRX, SSX, PHD, MRX, ...



Field-reversed config.



Fusion

	ST	Spheromak	FRC
Scientific advantages	<ul style="list-style-type: none">• High beta• Good MHD stability• Good confinement	<ul style="list-style-type: none">• Force free	<ul style="list-style-type: none">• High beta (~ 1)
Scientific disadvantages	<ul style="list-style-type: none">• Difficulty in non-inductive startup and current drive	<ul style="list-style-type: none">• Relative low plasma performance• Difficulty in the coexistence between good confinement and effective current drive	<ul style="list-style-type: none">• Relative low plasma performance• Difficulty in realizing long life time for high pressure plasma• Unclear physics in equilibrium, stability and transport
Technological advantages	<ul style="list-style-type: none">• Compact• High effective TF coils	<ul style="list-style-type: none">• Compact• Simply-connected vacuum vessel and no TF coils	<ul style="list-style-type: none">• Compact• Simply-connected vacuum vessel and no TF coils• Natural linear divertor
Technological disadvantages	<ul style="list-style-type: none">• Relative low magnetic field at axis• Narrow center post• Intense wall loading		

Fusion development

- Concept exploration
- Proof-of-principle
- Proof of performance and optimisation
- Fusion energy development
- Fusion demonstration power plant

CT

ST

tokamak

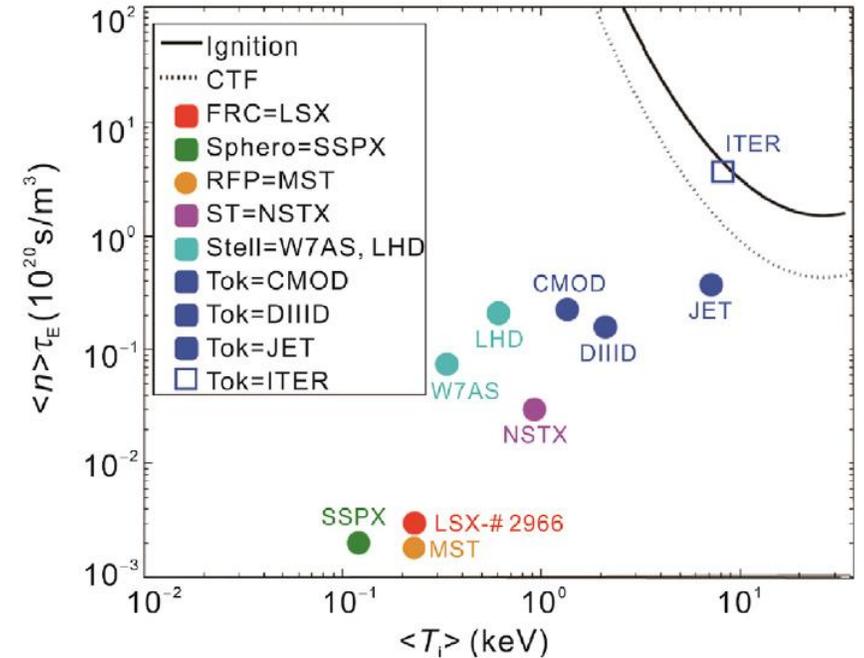


Fig. 4. Plasma performance achievements of various concepts (Reprint from Figs. 2–6 of Ref. [50]).

Fusion energy advisory committee (FESAC)

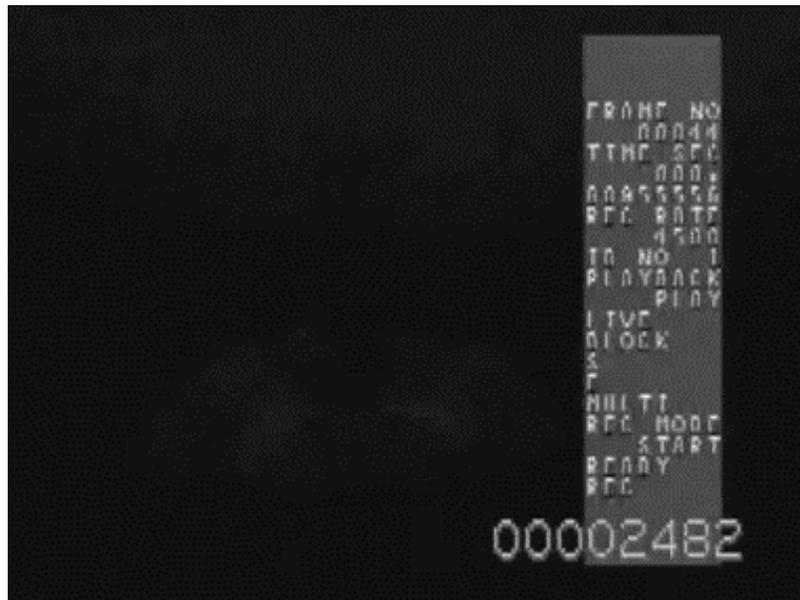
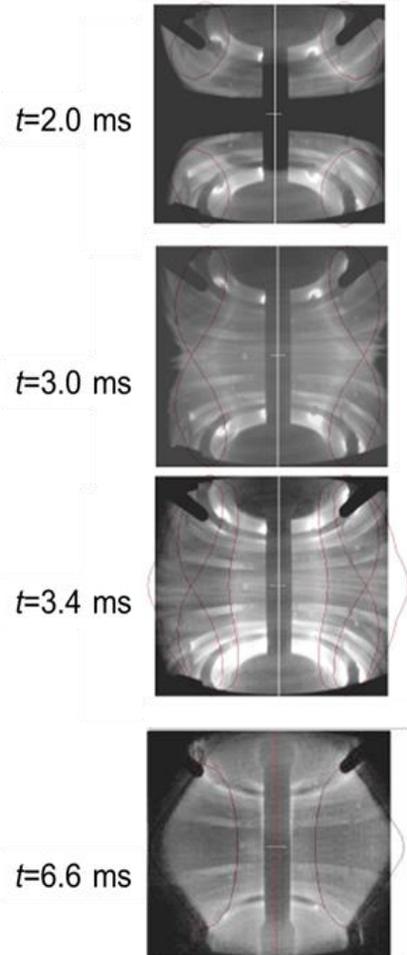
ST: to establish the ST knowledge base to be ready to construct a low aspect-ratio fusion component testing facility that provides high heat flux, neutron flux, and duty factor needed to inform the design of a demonstration fusion power plant

CT: to demonstrate that a compact toroid with simply connected vessel can achieve stable, long pulse plasmas at kilovolt temperatures, with favorable confinement scaling to proceed to a pre-burning CT plasma experiment

Merging & compression

3 stages:

- plasma around coils
- merging (reconnection)
- compression



MAST

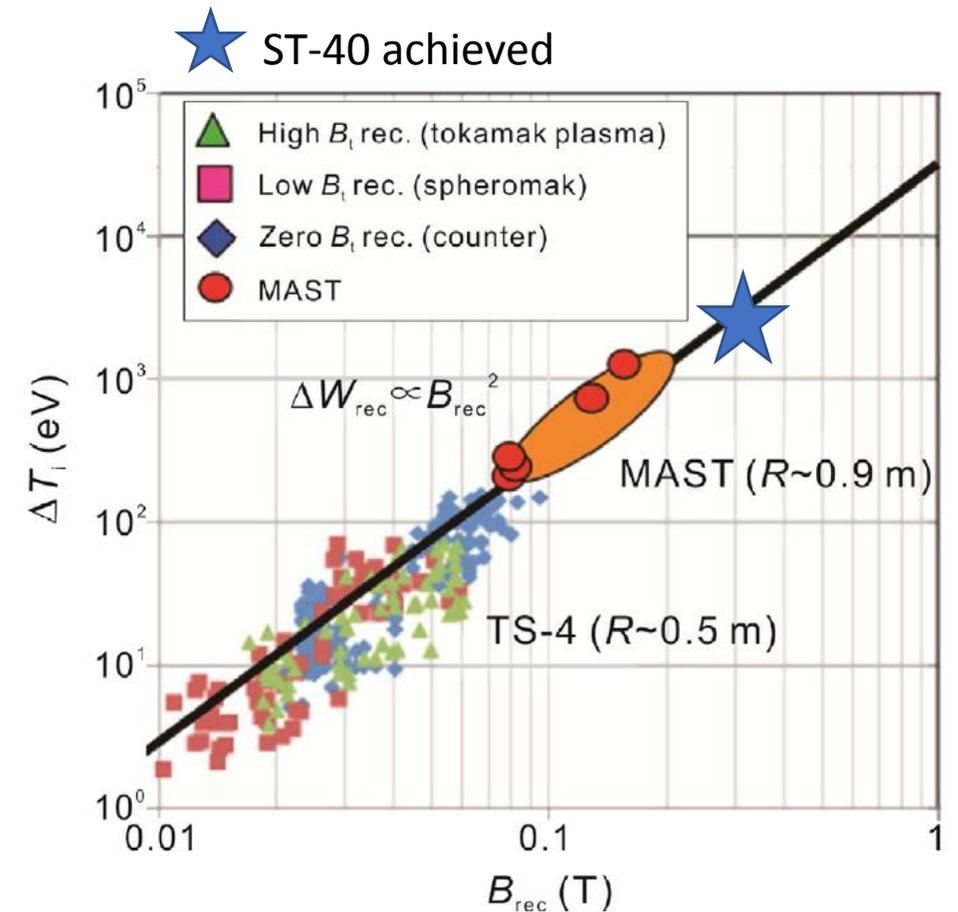
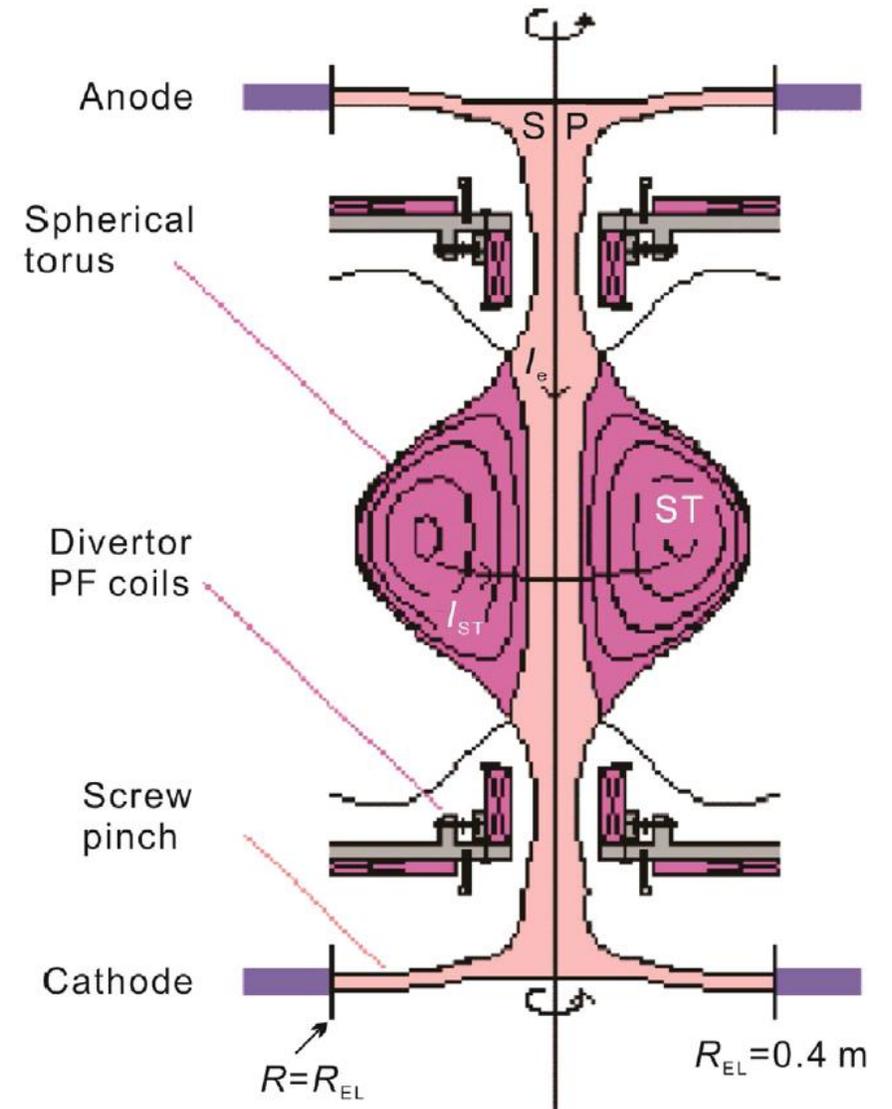
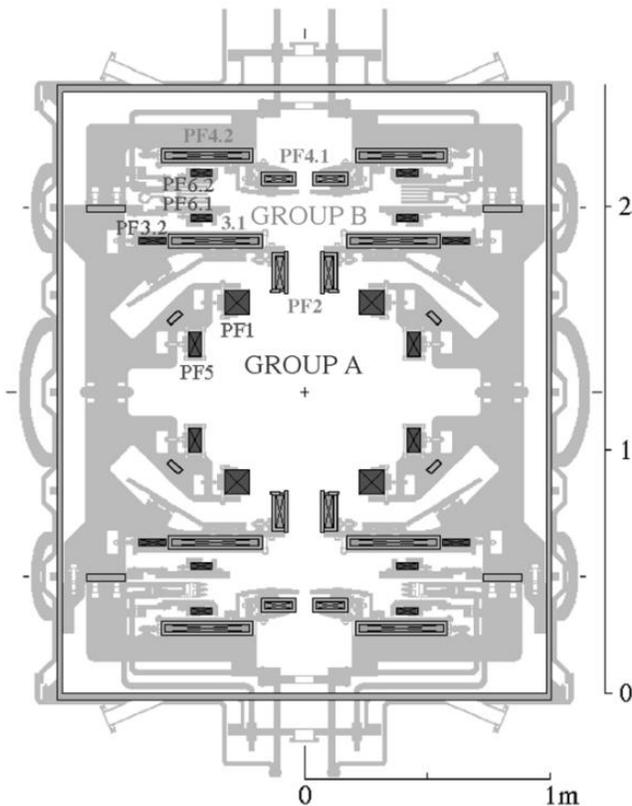


Fig. 5. The scaling law of ion temperature increments versus the reconnecting field in the merging tokamak experiments (Reprint from Fig. 14 of Ref. [95]. Copyright 2015 America Institute of Physics).

Screw-pinch ST

- Односвязная магнитная конфигурация
- Структура алогична ST
- В качестве центральной плазмы используется винтовой пинч



Magnetised target fusion (MTF)

- MCF: Увеличение давления -> увеличение времени удержания/увеличение размеров установки
- ICF: сжатие и нагрев мишени (NIF)

MTF:

Target plasma: 50 эВ, 10^{23} м^{-3} , 5 Т

1. Создание плазмы
2. Сжатие плазмы

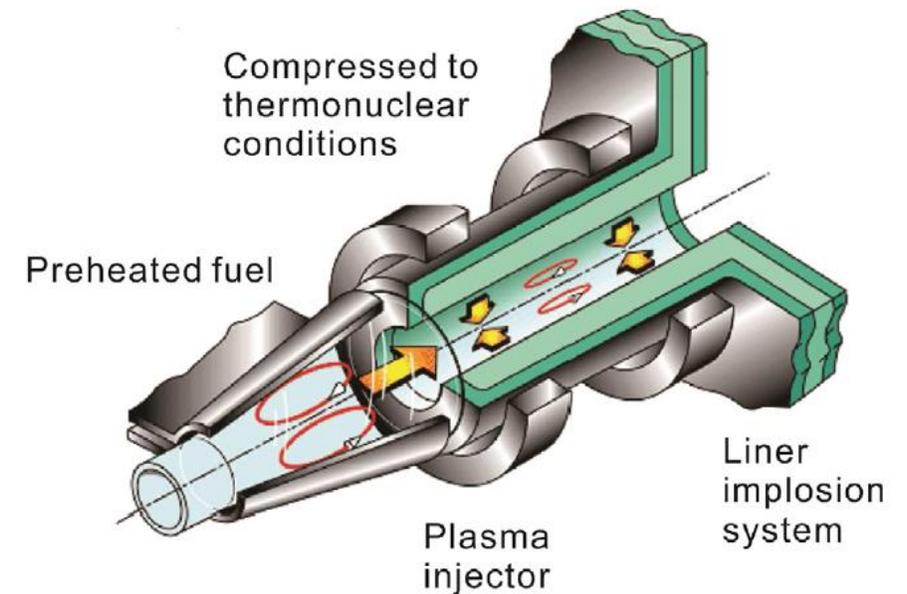


Fig. 7. Schematic of MTF concept. (Courtesy of G. A. Wurden, Los Alamos National Laboratory).

Заключение

ST и СТ – многообещающие альтернативные конфигурации:

- Сниженная стоимость создания
- Уникальные области физических параметров
- Изучение специфических физических процессов
- Использование наработок в иных типах установок
- Интегрирование различных конфигураций