

Термоядерная программа в ИЯФ

П.А. Багрянский

План доклада

Термояд:

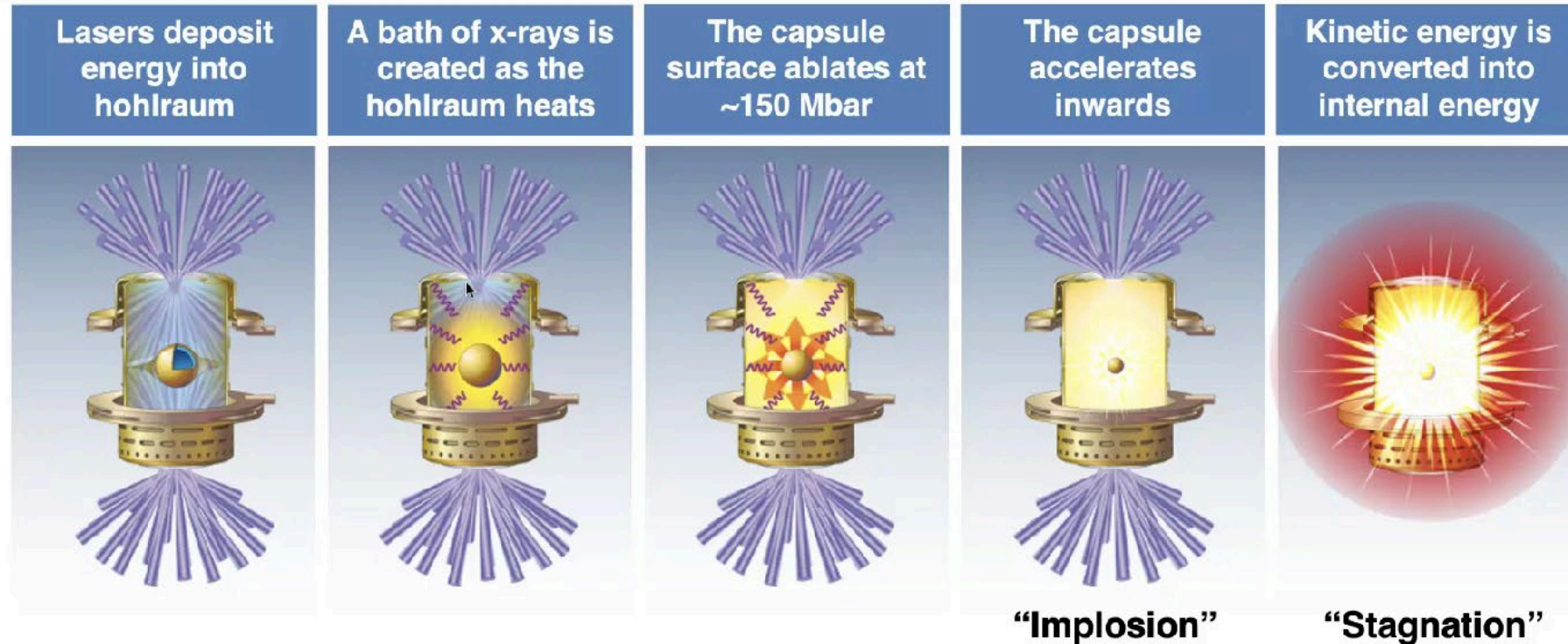
- *в мире,*
- *в России,*
- *в ИЯФе.*

Заключение

Термоядерное направление в мире прогрессирует

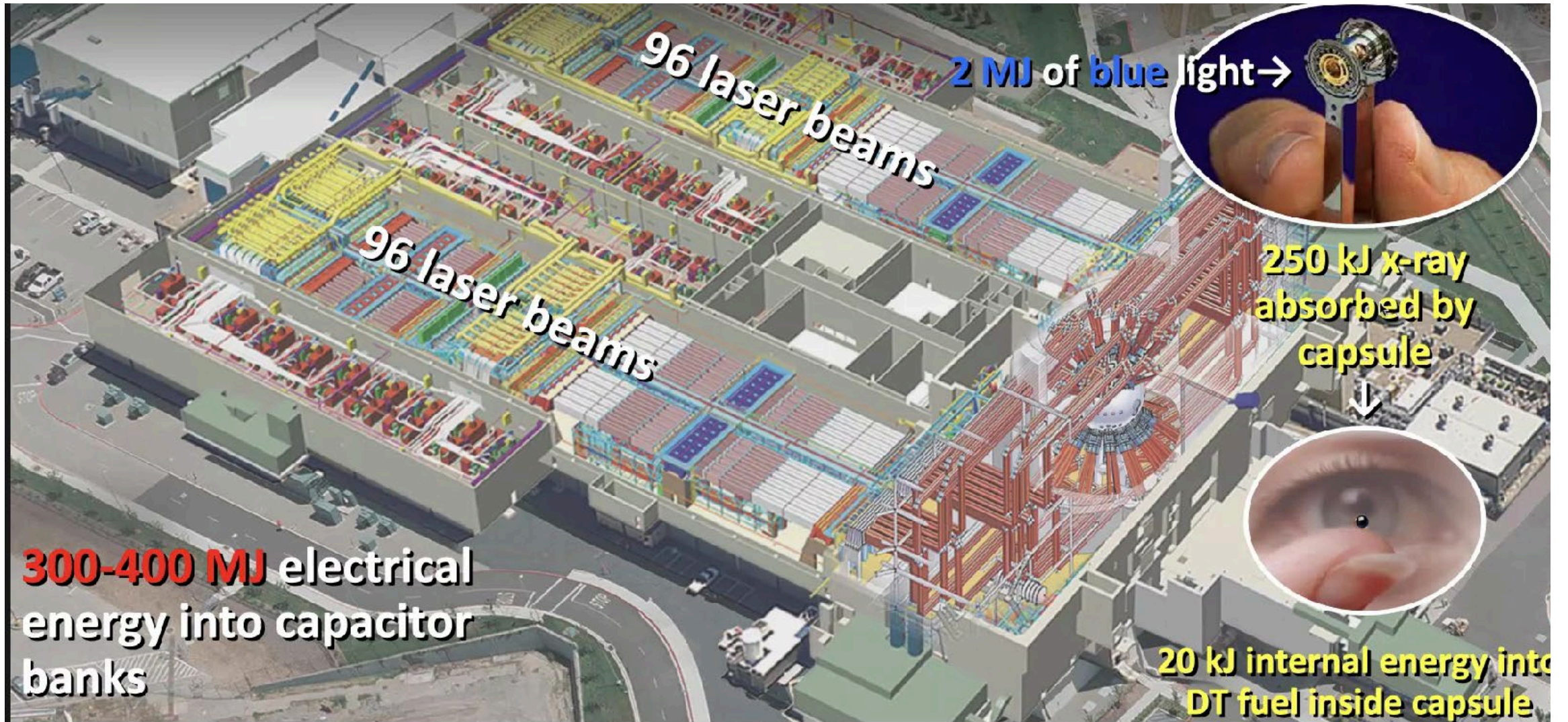
Недавний прорыв в экспериментах на установке NIF (LLNL, USF)

ablate and accelerate a capsule of fusion fuel to extreme velocity



Achieving the conditions for ignition demands precise control of design, laser, and target parameters

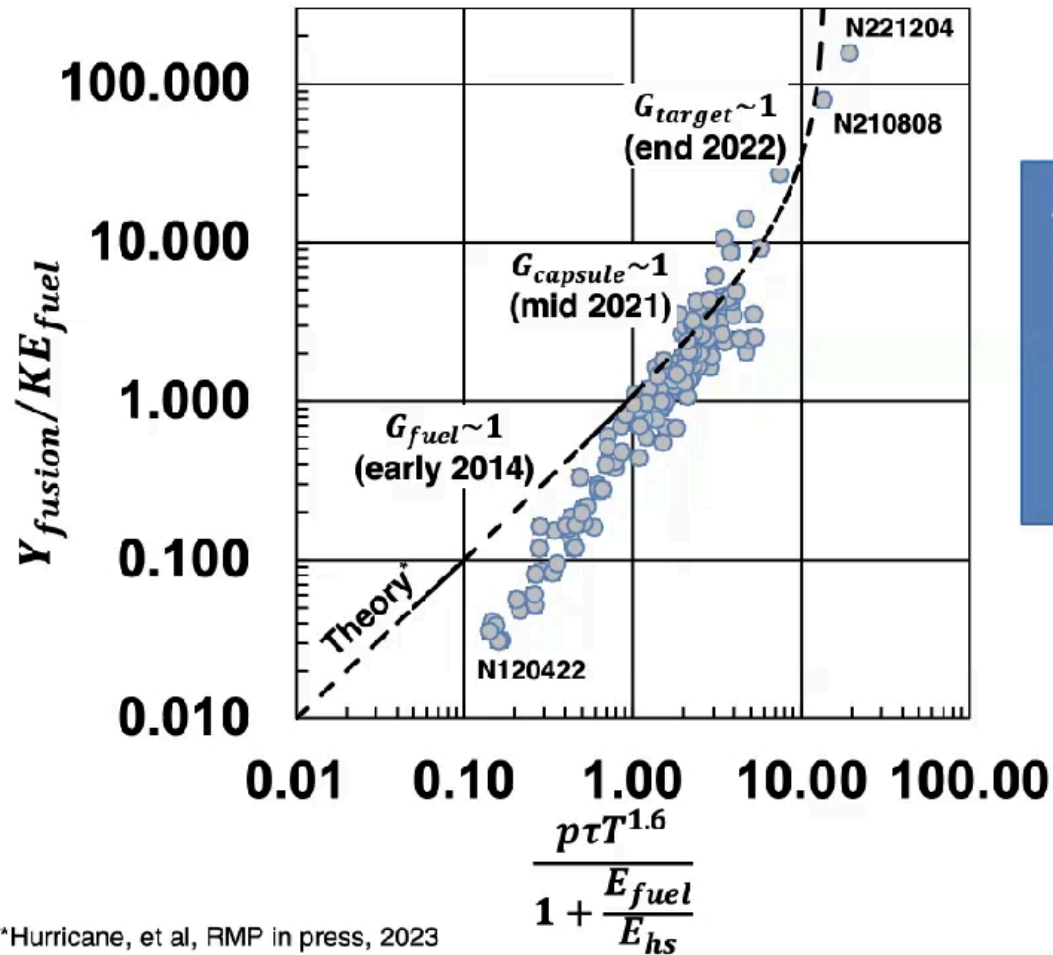
Недавний прорыв в экспериментах на установке NIF (LLNL, USF)



Lawrence Livermore National Laboratory **Most of the initial energy is lost before any gets to the fusion fuel** NNSA 100
CC BY-NC-ND S-836465

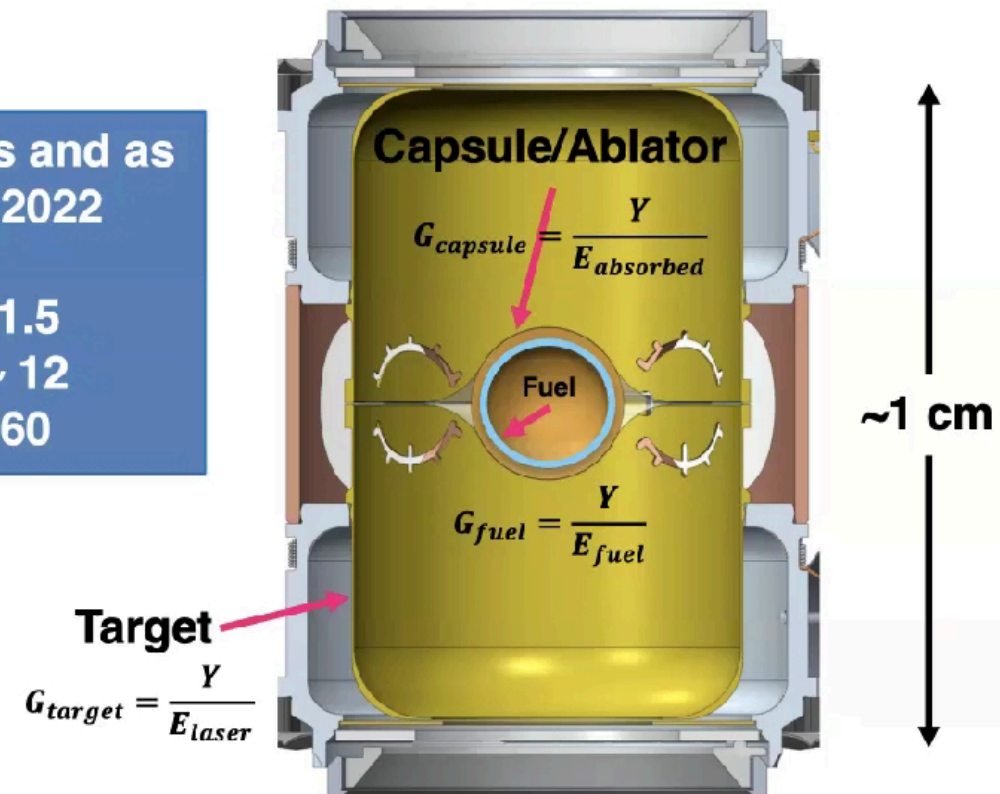
Недавний прорыв в экспериментах на установке NIF (LLNL, USF)

approximately 5000x over the past decade on the NIF



After 10 years and as of Dec. 5, 2022

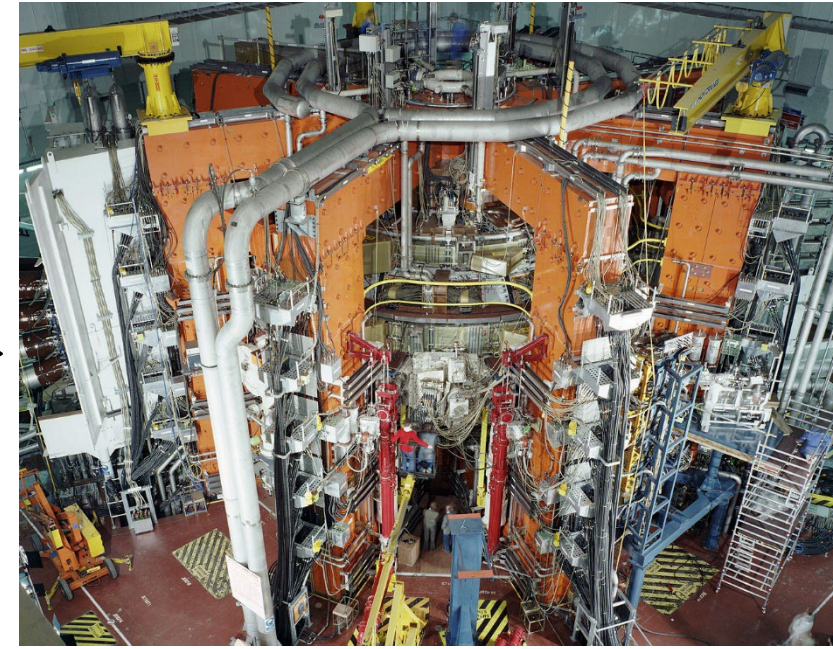
$G_{target} \sim 1.5$
 $G_{capsule} \sim 12$
 $G_{fuel} \sim 160$



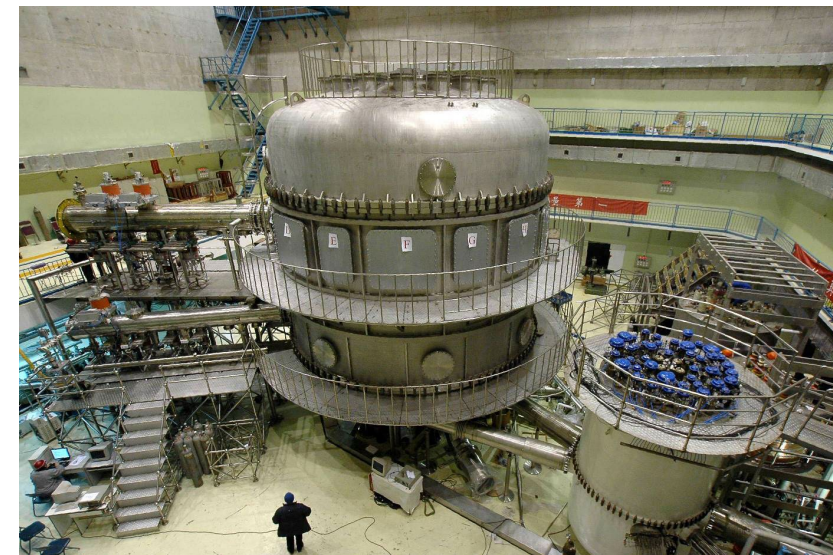
*Hurricane, et al, RMP in press, 2023

В области магнитного удержания термоядерной плазмы:

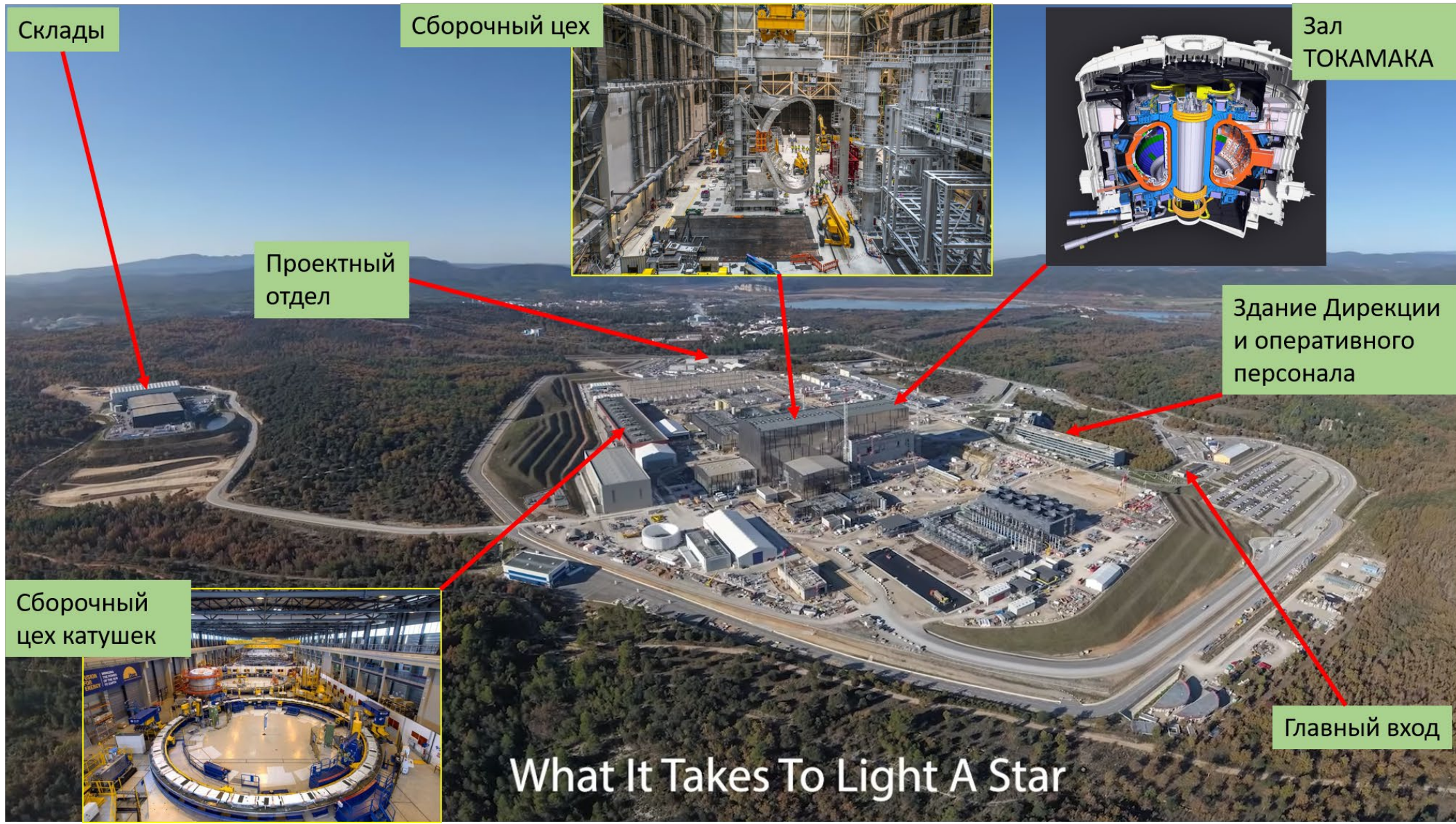
достигнуто усиление мощности $Q \sim 1$ (токамак JET, UK) →



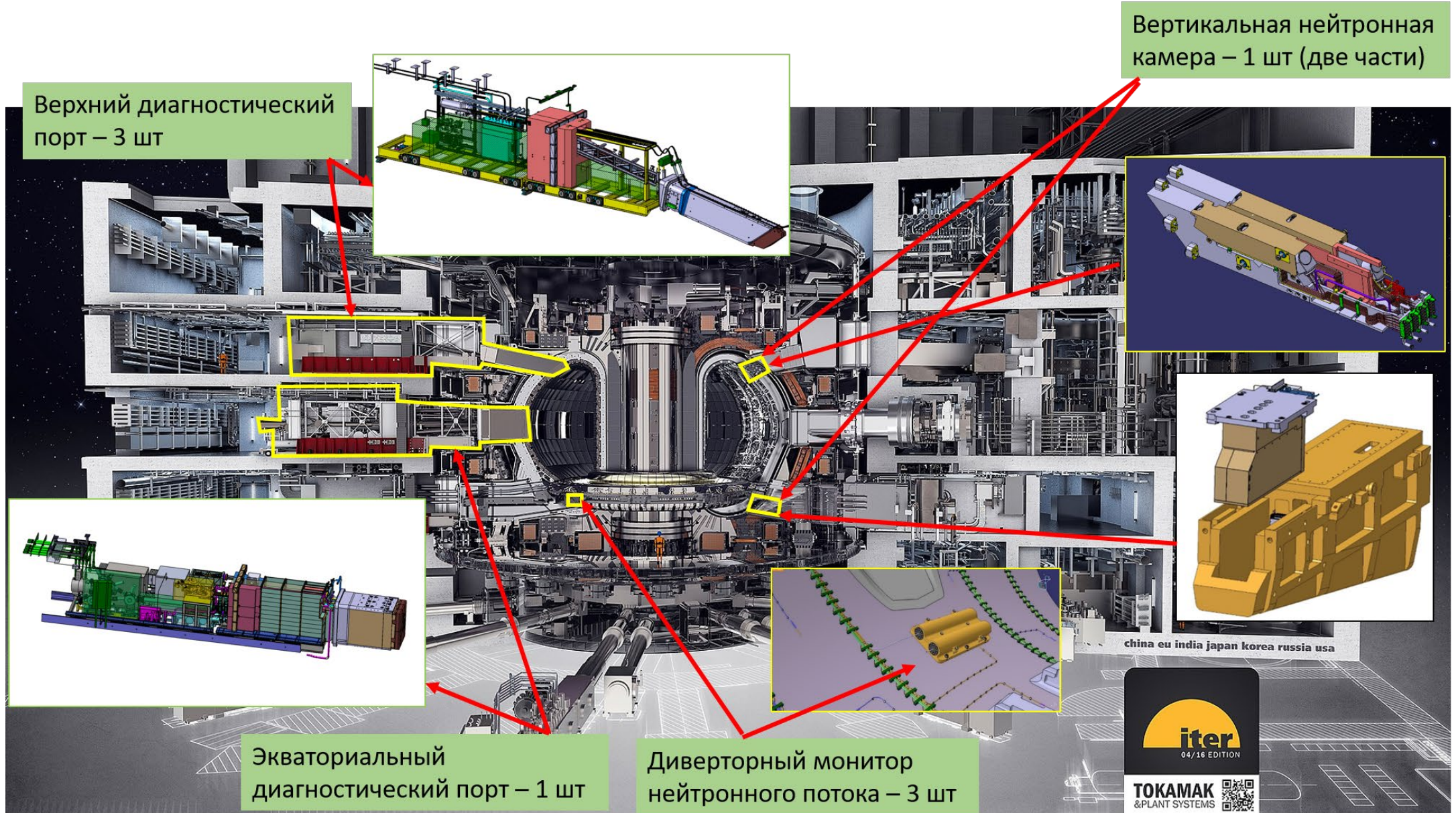
*длительность плазменного разряда превысила 100 секунд
(токамак EAST, China) →*



Реализуется международный проект ИТЭР



ИЯФ активно участвует в проекте ИТЭР



Путь к термоядерной энергетике на основе токамака (взгляд с «Запада»)

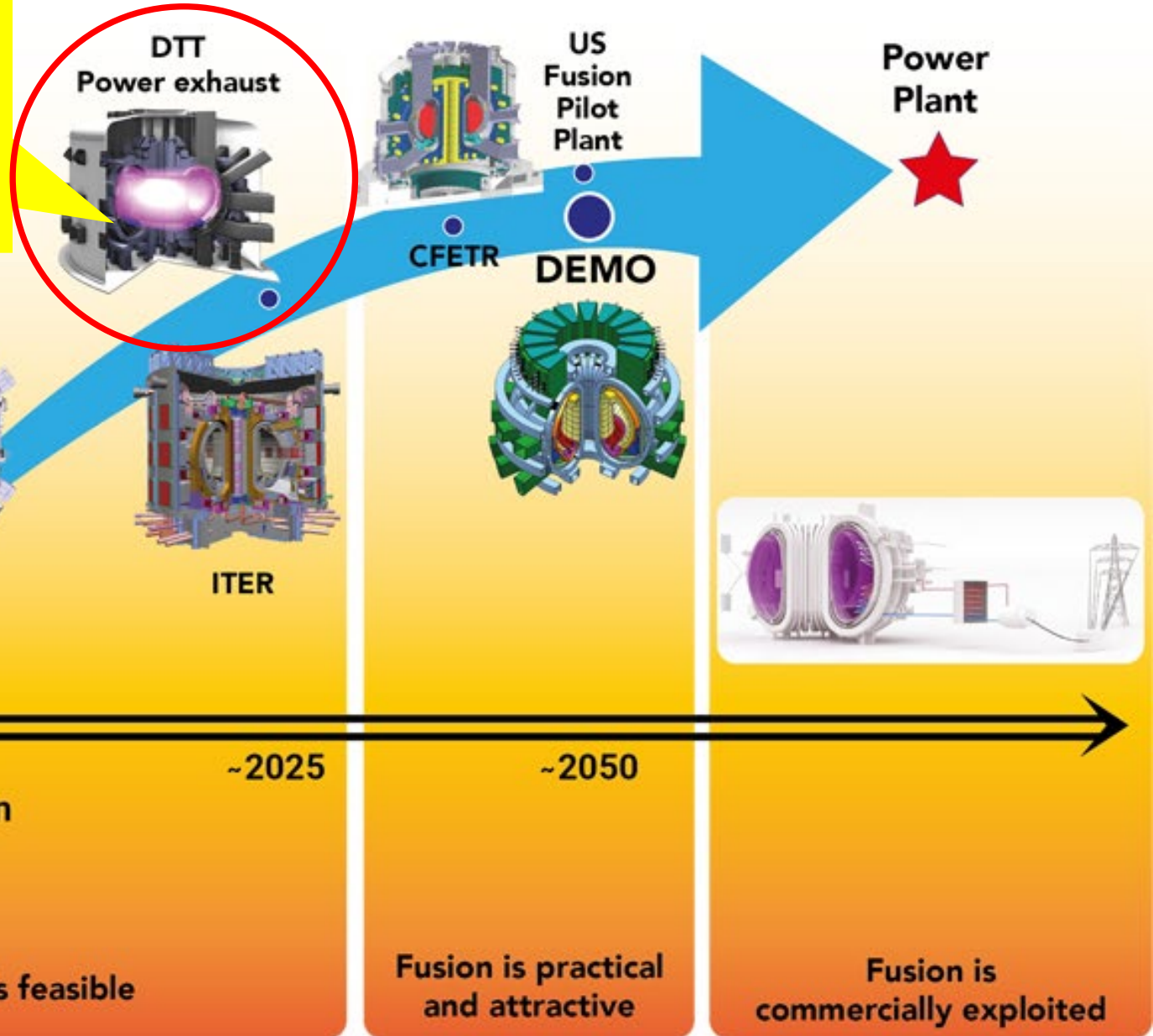
Чем выгодно увеличение B ?

$P_{\text{plasma}} = nT = \beta \cdot B_v^2 / 8\pi$ - условие равновесия

$\beta = 8\pi P_{\text{plasma}} / B_v^2$ - относительное давление

$q \propto n^2 \propto \beta^2 \cdot B_v^4$ - удельная мощность синтеза

Магнитная система на основе ВТСП, $B > 8$ Тл, новые подходы к дизайну первой стенки и дивертора



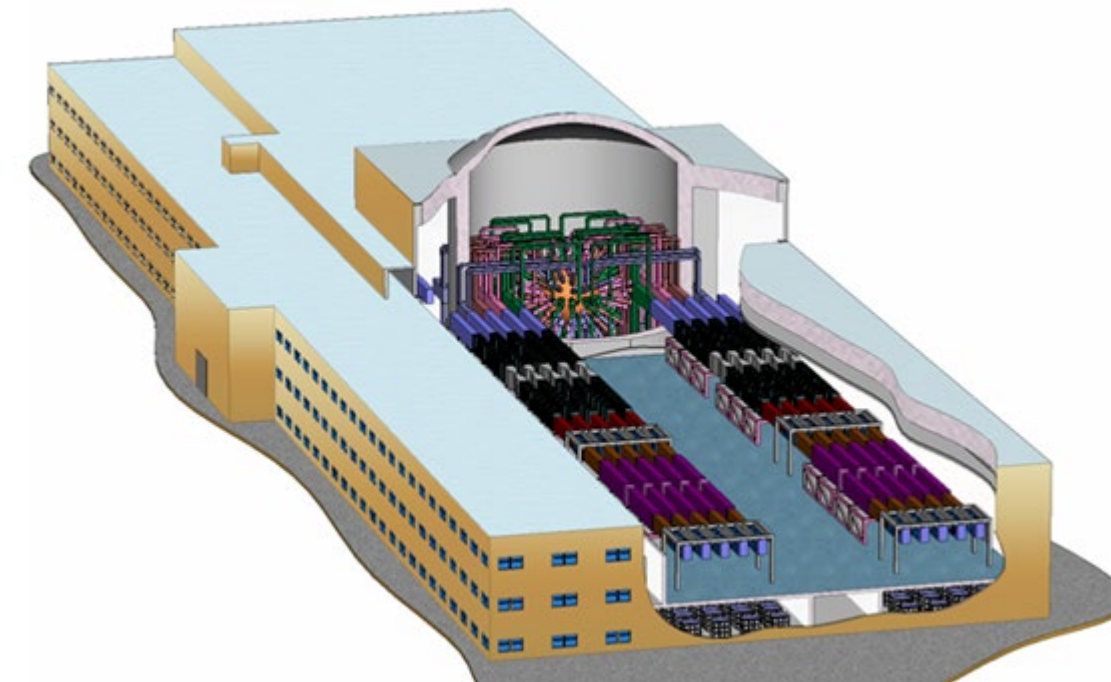
А что Россия?

В 2020 году был утвержден паспорт комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года».

В состав комплексной программы входят следующие федеральные проекты.

1. Разработка технологий двухкомпонентной атомной энергетики с замкнутым ядерным топливным циклом
2. Создание современной экспериментально-стендовой базы для разработки технологий двухкомпонентной атомной энергетики с замкнутым ядерным топливным циклом
- 3. Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий**
4. Разработка новых материалов и технологий для перспективных энергетических систем
5. Проектирование и строительство референтных энергоблоков атомных электростанций, в том числе атомных станций малой мощности

Инерциальный синтез – установка УФЛ-2М (ВНИИЭФ)

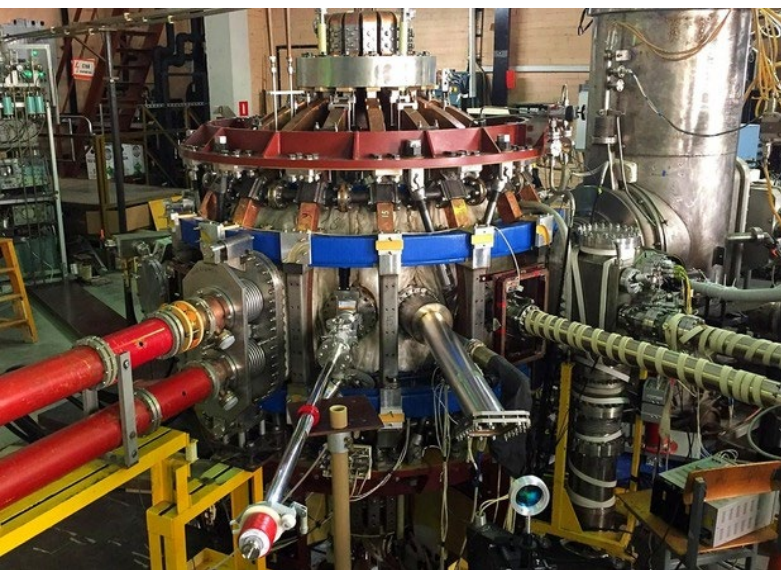


На мишени – 2,8 МДж



Ведутся пусконаладочные работы

Магнитное удержание - токамаки



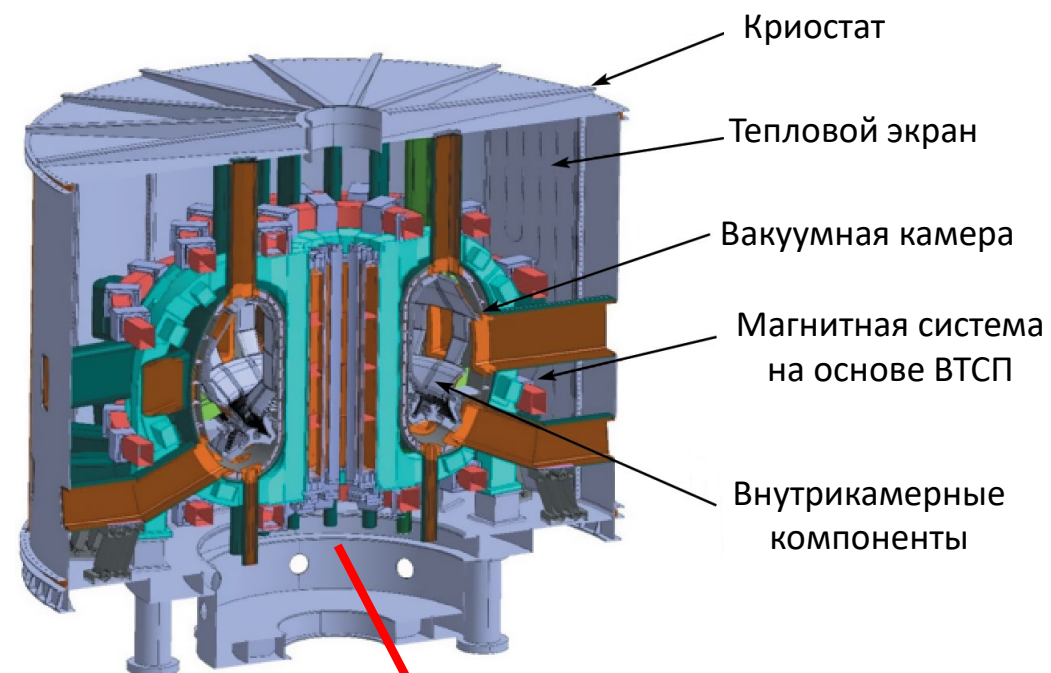
Успешно ведутся исследования по фундаментальным проблемам удержания горячей плазмы в токамаках

Токамак Глобус-2М (ФТИ им. А.Ф.Иоффе)

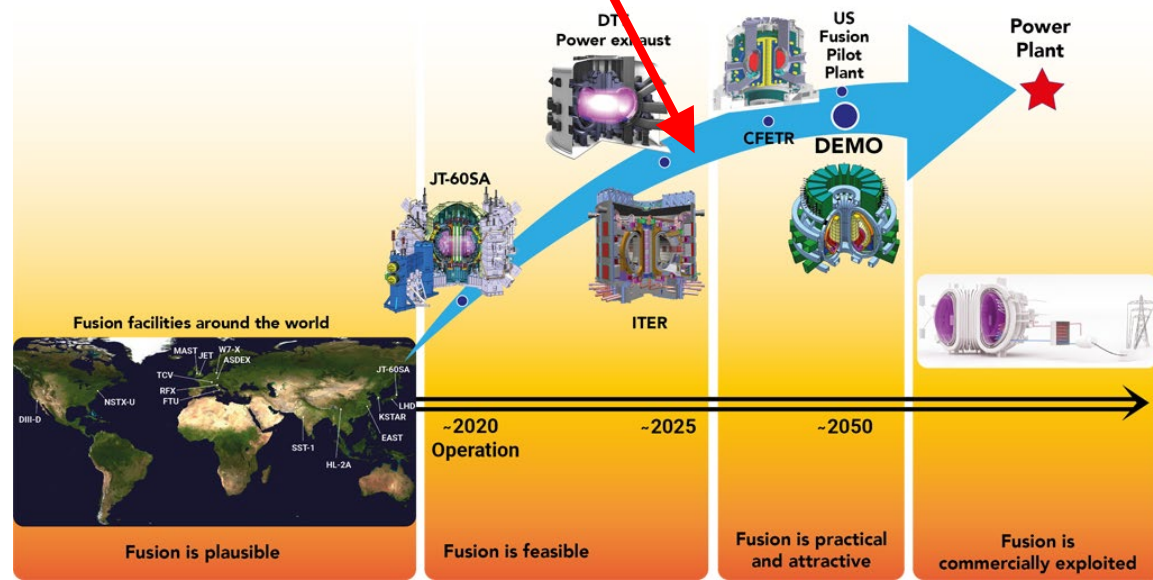


Продолжается монтаж и пусконаладочные работы

Токамак Т-15МД (Курчатовский Институт)



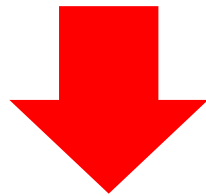
Проект токамака ТРТ (ВТСП, 2020), $R_0 = 2.15$ м, $a = 0.57$ м, $B_{t0} = 8$ Тл, $\Delta t_{pl} = 100$ с, $Y_{nDD} \sim 10^{18}$ н/с.



В рамках ФПЗ «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» в зоне ответственности ИЯФ находятся три мероприятия:

1. экспериментальная верификация эффективных методов удержания плазмы в существующих и перспективных линейных системах;
2. разработка и испытание мощных систем инжекции атомарных пучков для нагрева плазмы и поддержания тока, в том числе стационарных;
3. создание источников атомарных и ионных пучков нового поколения.

1. Экспериментальная верификация эффективных методов удержания плазмы в существующих и перспективных линейных системах



Главная цель - создание проекта установки ГДМЛ

Газодинамическая многопробочная ловушка – новый экспериментальный комплекс для исследования перспективных схем удержания плазмы и моделирования нейтронного источника.

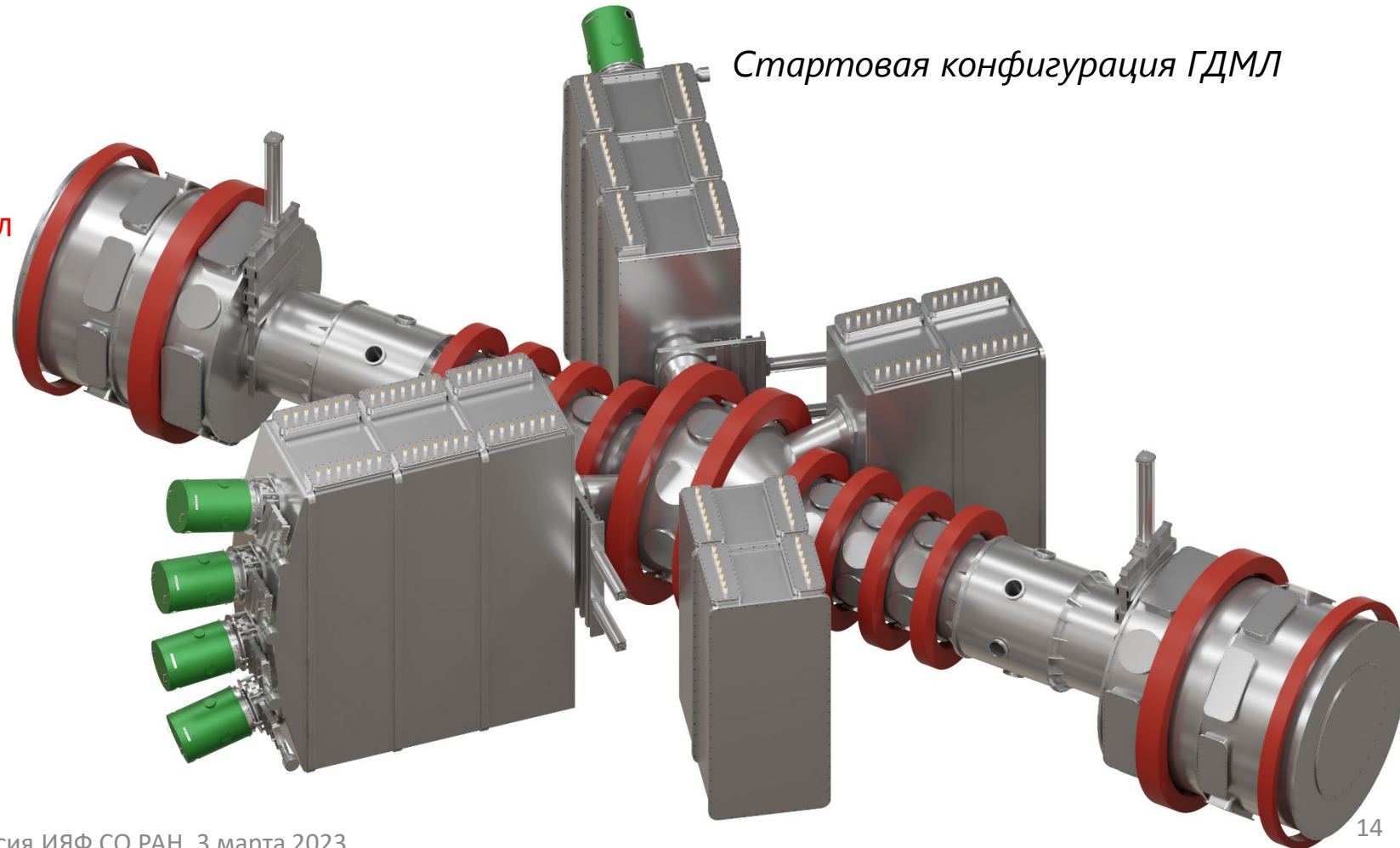
Получено финансирование на эскизное проектирование; ввод в эксплуатацию в 2030 году; стоимость проекта $\sim 10^{10}$ руб.

Особенности комплекса:

- Длительность импульса до 2 с
- Общая длина соленоида до 50 м
- Сверхпроводящие магниты с полем **20 Тл**
на основе ВТСП 2-го поколения
- Нагрев плазмы – 30 МВт

Программа исследований:

- Удержание плазмы с $\beta \sim 1$
- Удержание плазмы в многопробочных (ГОЛ-НВ) / винтовых (СМОЛА) секциях
- Моделирование удержания плазмы в нейтронном источнике



Стартовая конфигурация ГДМЛ

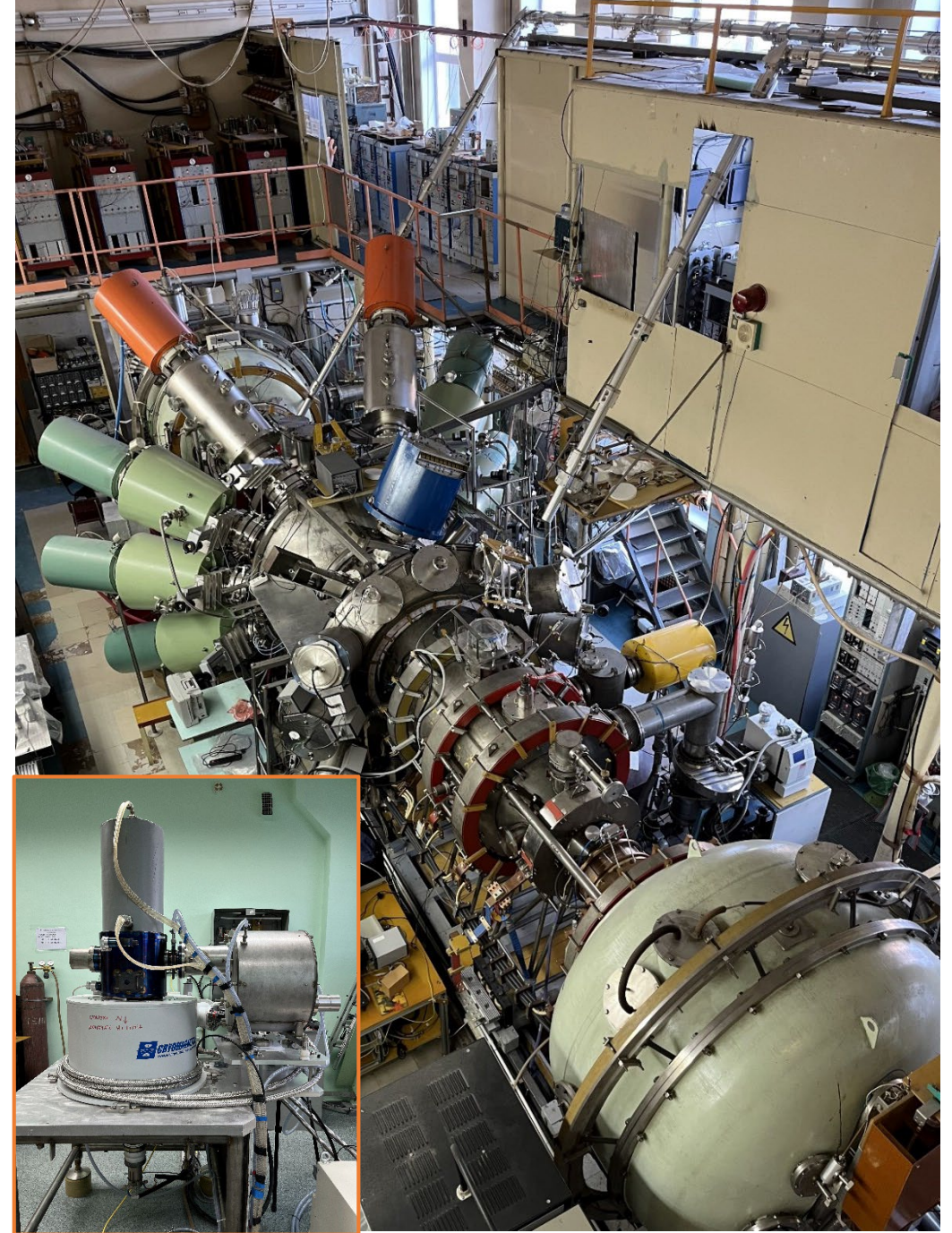
Эксперименты в поддержку проекта: установка ГДЛ (газодинамическая ловушка)

Проведение фундаментальных и прикладных исследований по физике плазмы с целью создания термоядерного реактора на основе осесимметричной магнитной ловушки:

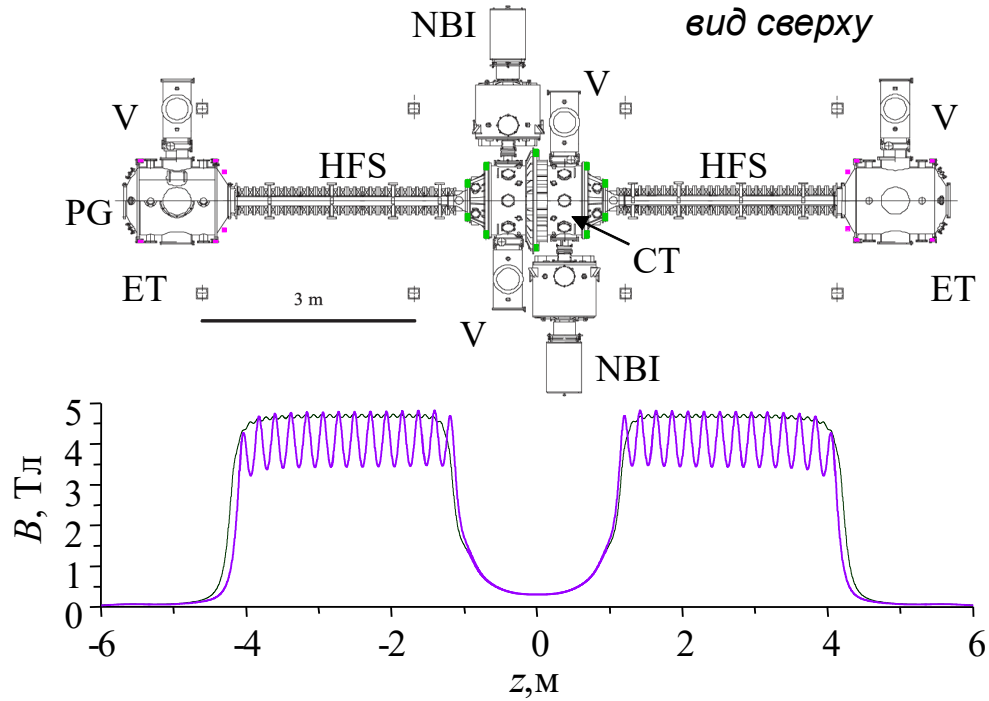
- Устойчивость плазмы с анизотропной ионной компонентой
- Удержание плазмы с высоким относительным давлением (β)
- Методы МГД-стабилизации плазмы в осесимметричном поле
- Физика продольного течения и термоизоляции плазмы
- Разработка новых диагностик плазмы и многое другое...

Особенности и параметры:

- Высокотемпературная плазма со средней энергией быстрых ионов ~ 10 кэВ
- Температура электронной компоненты до 1 кэВ
- Нагрев плазмы пучками ускоренных атомов с мощностью 5 МВт
- Микроволновый нагрев плазмы мощностью 1 МВт на частоте 54.5 ГГц
- Широкий набор диагностик плазмы: Томсоновское рассеяние, динамический эффект Штарка, детекторы термоядерных нейтронов и протонов, спектроскопия и пр.

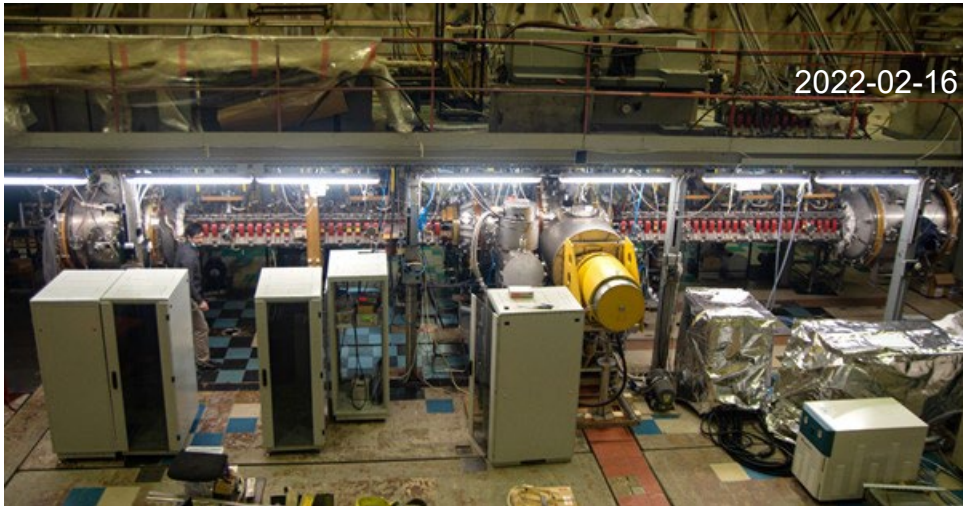
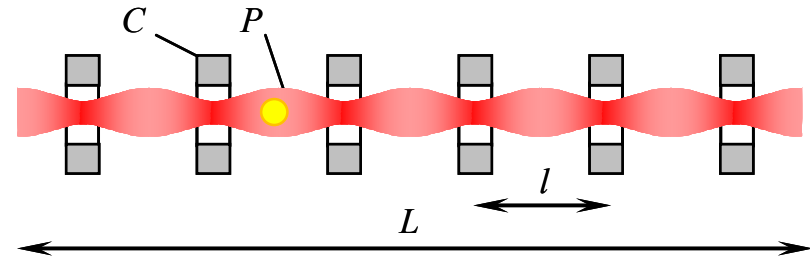


Многопробочная ловушка ГОЛ-NB – импульсный макет ГДМЛ

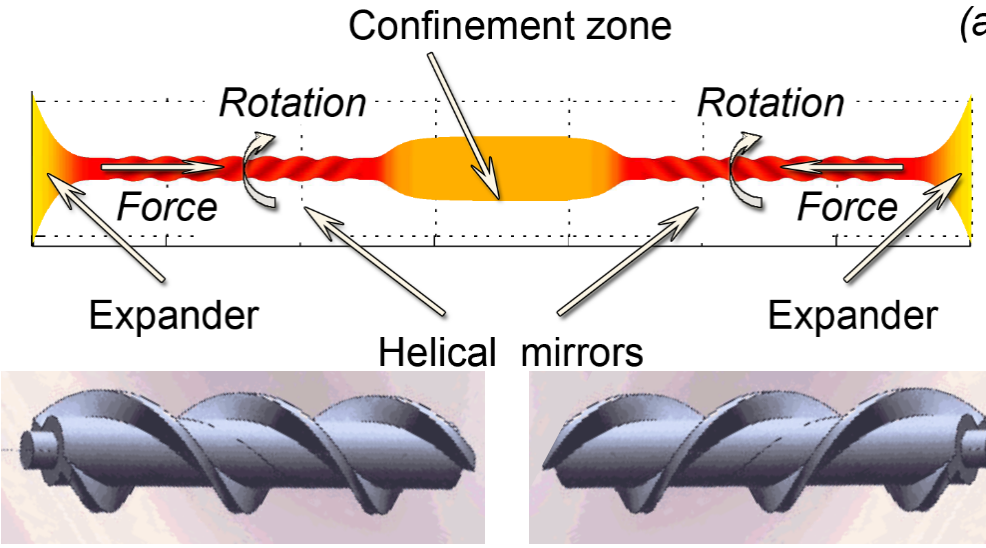


Основная цель - продемонстрировать улучшенное удержание при многопробочной конфигурации секций сильного поля.

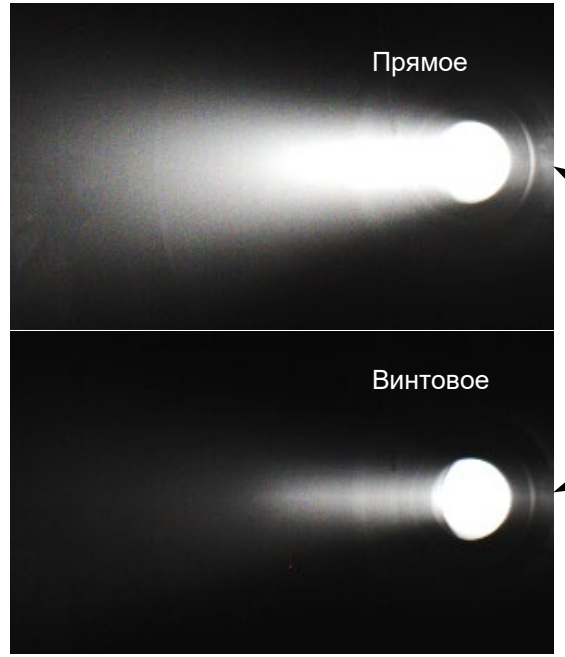
Механизм ограничения продольных потерь



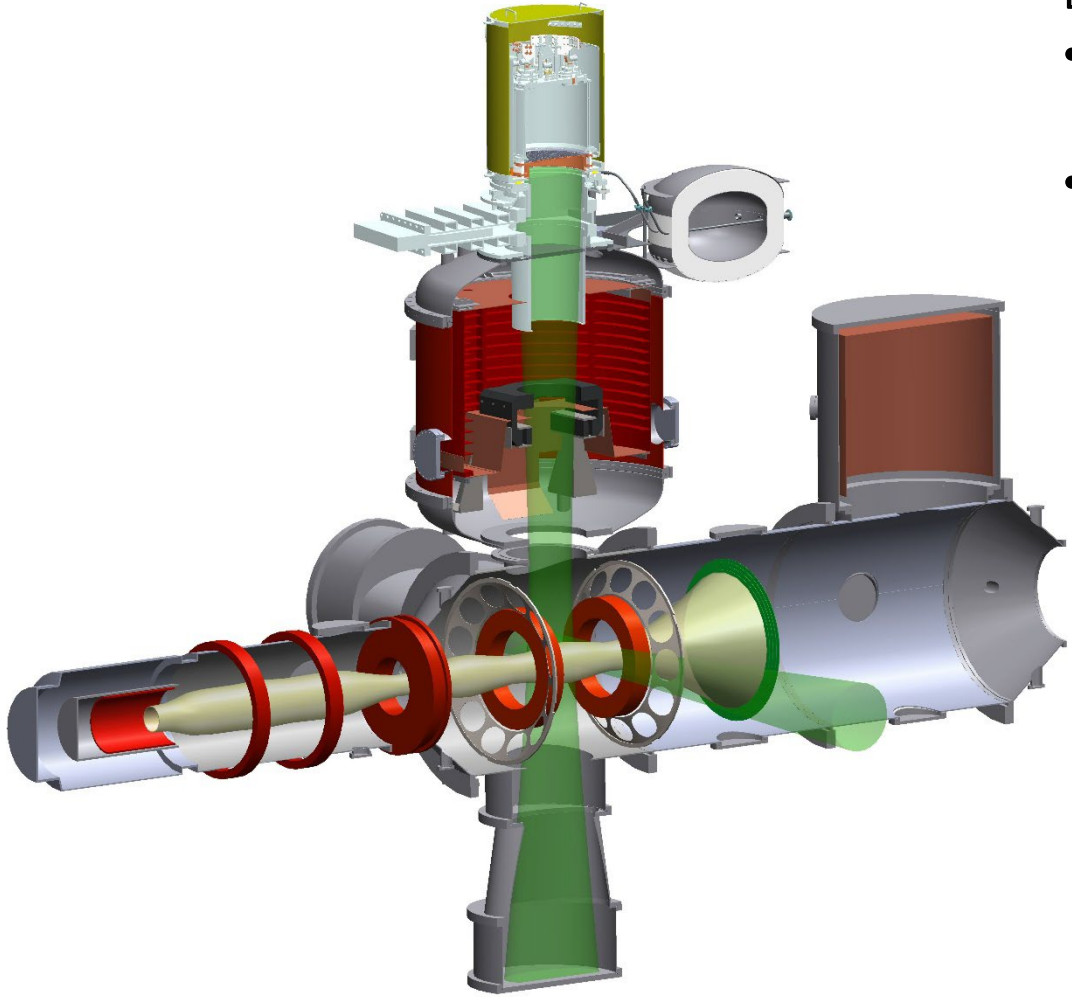
Установка СМОЛА – демонстрация эффективности винтового удержания



- (a)
- Магнитное поле с винтовой симметрией позволяет управлять течением плазмы вдоль системы.
 - Вращение плазмы приводит к её ускорению (как в шнековом насосе).
 - Такая система может как закачивать плазму обратно в ловушку, так и ускорять её (плазменный двигатель).
 - Винтовое удержание доказано в эксперименте.
 - Как сделать его эффективнее — исследуется сейчас.

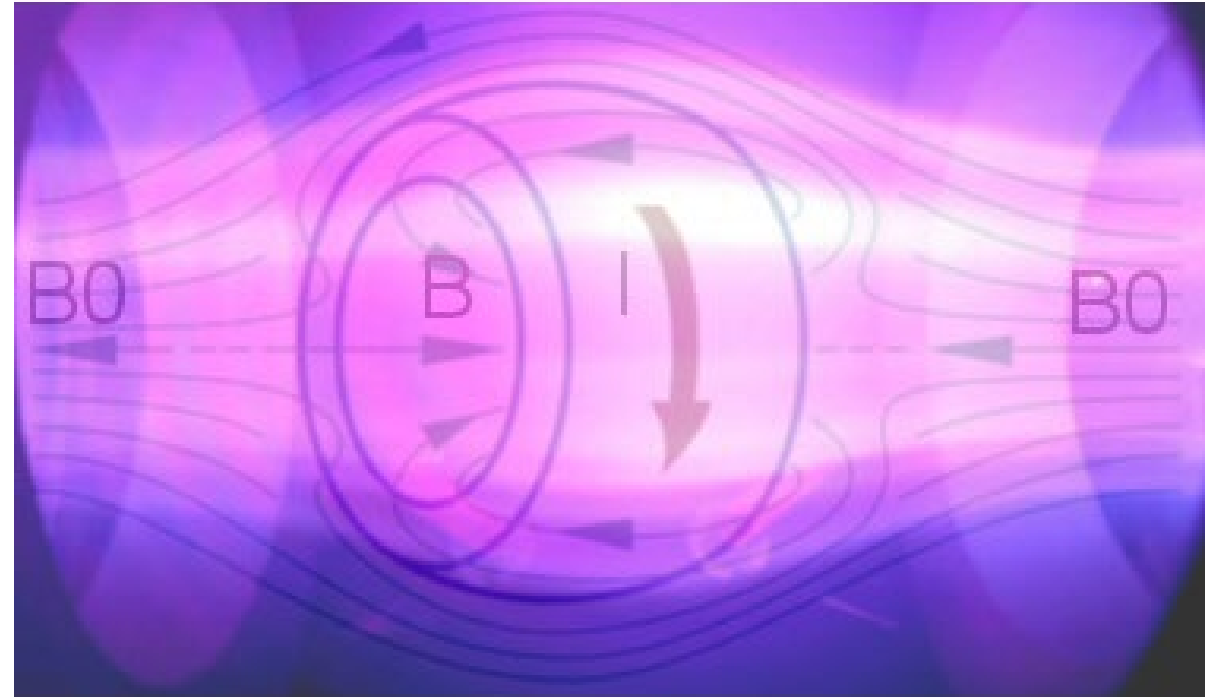


Компактный осесимметричный торойд (КОТ)



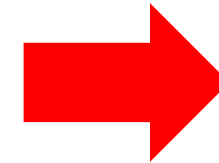
Цели:

- формирование и исследование плазмоида горячих ионов с предельно высоким относительным давлением $\beta \rightarrow 1$;
- формирование конфигурации с обращенным полем.



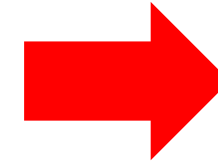
2. Разработка и испытание мощных систем инжекции атомарных пучков для нагрева плазмы и поддержания тока, в том числе стационарных

- Создание экспериментального образца атомарного инжектора на положительных ионах с низкой энергией (15 кэВ), но с рекордным током пучка (не менее 150 А) и длительностью ≥ 30 мс.



ГДМЛ

- Создание источника положительных ионов с энергией 100 кэВ и током пучка 75 А (мощность в ионном пучке 7.5 МВт).



Т-15МД,
источники нейтронов

- Разработка концептуального проекта прототипа атомарного инжектора непрерывного действия на отрицательных ионах с энергией не ниже 500 кэВ, изготовление и испытание ключевых элементов прототипа.



ТРТ

3. Создание источников атомарных и ионных пучков нового поколения.

В начале было Слово, и Слово было у Бога
(Евангелие от Иоанна)

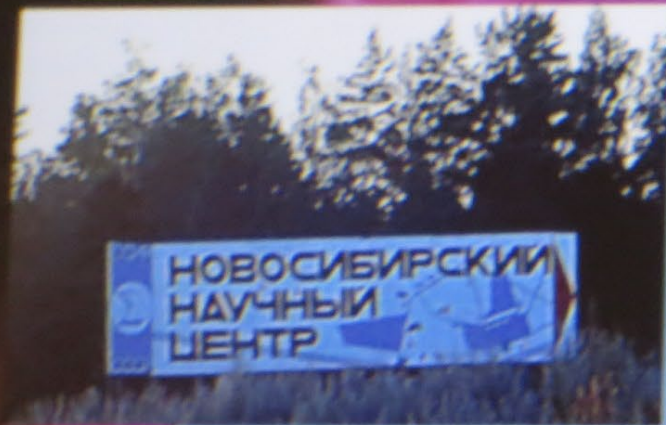
маться не как конструированием, а как наукой, что надо развивать плазменную науку, и мы приступили к работе по изучению физики плазмы, которая длится уже более десяти лет.

Эта работа привлекла к себе новых людей с новым подходом ко всей проблеме в целом. Мне кажется, что успехи, достигнутые за прошедший период физиками в данной области, заставляют нас вернуться к идее создания термоядерного реактора. Физику не обязательно начинать дело только тогда, когда он будет знать все. Чтобы вступить в бой, ему не обязательно ждать, когда будет пришита последняя пуговица к шинели последнего солдата. Физику достаточно лишь очень тщательно изучить то, что принципиально в данном деле, и найти решение по определению неизвестных. Подобной была ситуация и при создании первого атомного (уран-графитового) реактора.

Это не означает, что мы должны приостановить работу по физике плазмы. Наоборот, работы по ядерной физике только тогда получили бурное развитие, когда заработал первый ядерный реактор. Но мне кажется, что количество накопленных знаний о плазме достаточно, чтобы те, кто тесно связан с этой проблемой, переключили свое внимание на создание термоядерного

А.М. Будкер,
заключительное
слово на 3 Межд.
Конф. МАГАТЭ,
Новосибирск, 1968

Novosibirsk, 1968



Budker took us on a boat



Long tables in the forest



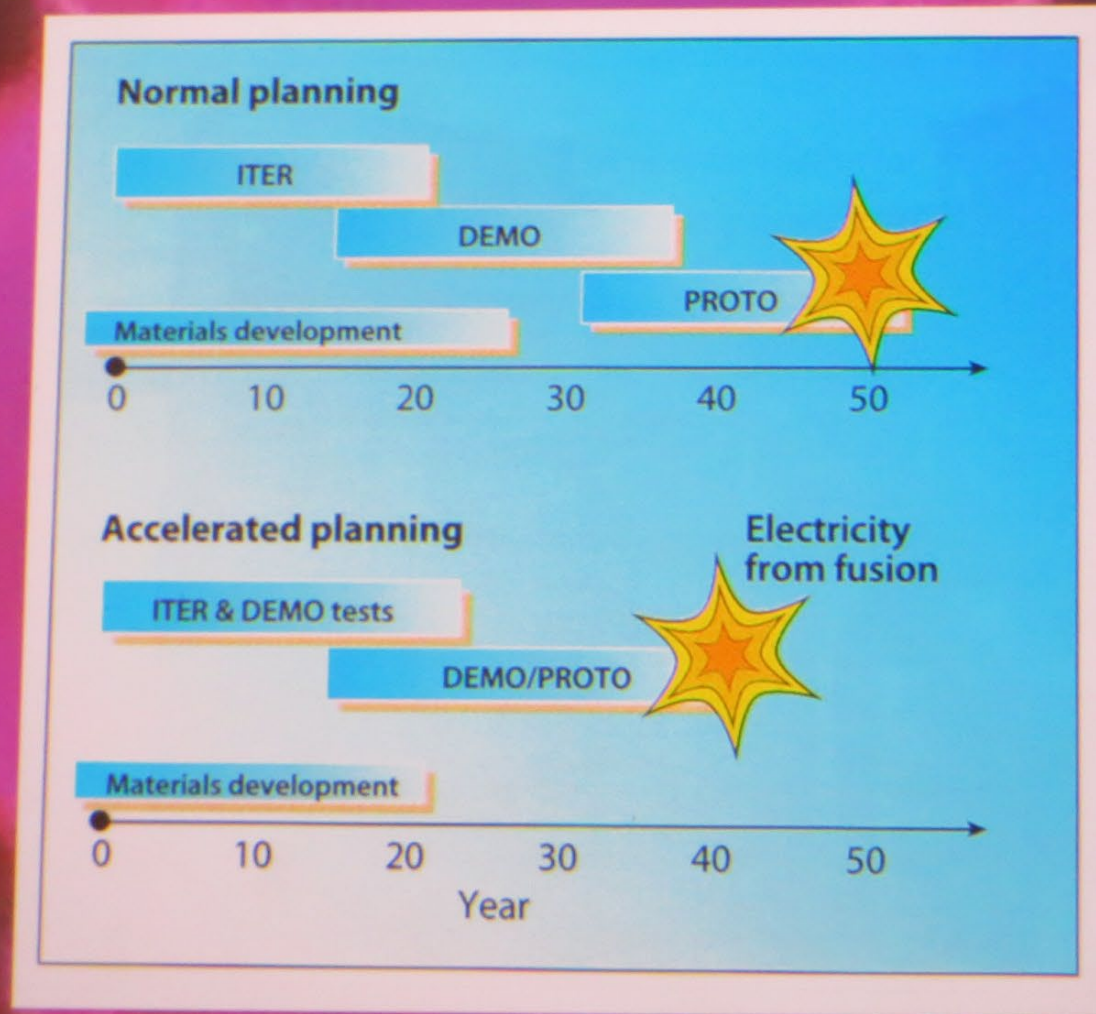
There was food and wine



The Russians showed off in chess



The clock is ticking on fusion



Jo Hermans, Energy Survival Guide, BetaText (2011)

Спасибо за внимание!

