

Кислицын А.А. Ядерная и термоядерная энергетика

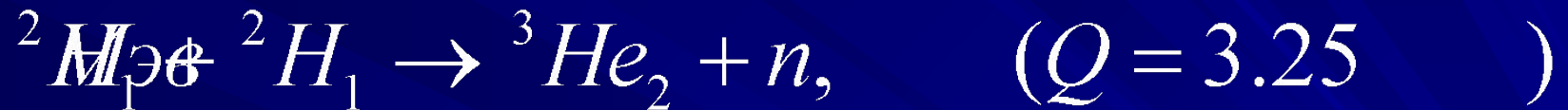
Часть 2. Термоядерная энергетика

Термоядерная энергетика

Водород имеет стабильный изотоп: тяжелый водород (дейтерий) и радиоактивный изотоп : сверхтяжелый водород (тритий). В природной воде в среднем содержится ок. 99.985% обычной ("легкой") воды, и ок. 0.015% тяжелой воды.

При использовании дейтерия, содержащегося в бутылке воды, выделится столько же энергии, сколько при сжигании бочки бензина: калорийность термоядерного топлива в миллион раз выше любого из современных неядерных источников энергии. При этом окружающей среде будет нанесен минимальный вред, а топливо для термоядерной электростанции доступно всем без исключения странам.

Реакции термоядерного синтеза



Кулоновский барьер

Чтобы осуществить реакцию синтеза, необходимо сблизить ядра до расстояния $R \approx 10^{-14}$ м. Но ядра имеют положительный электрический заряд, а одноименные заряды отталкиваются по закону Кулона. Для преодоления кулоновского барьера отталкивания необходима температура T порядка

$$kT \approx e^2/4\pi\epsilon_0 R,$$

откуда

$$T \approx 10^9 \text{ К.}$$

Более точный расчет дает температуру на порядок меньшую: $T \approx 10^8 \text{ К}$, но все равно это очень много. Любое вещество при такой температуре находится в состоянии высокотемпературной плазмы.

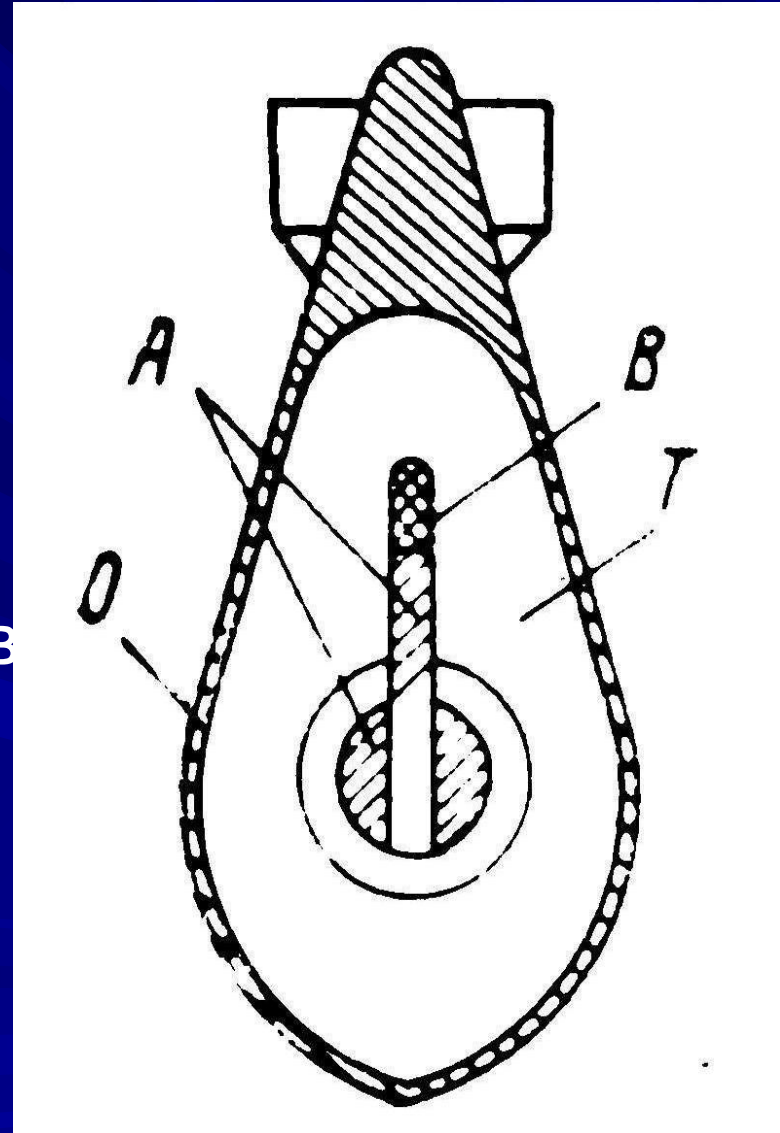
Схема конструкции водородной бомбы

А - атомная бомба, в результате взрыва которой создается температура примерно 10^9K

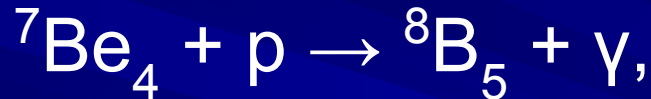
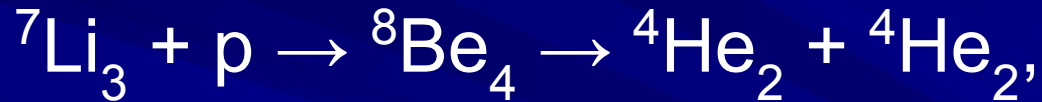
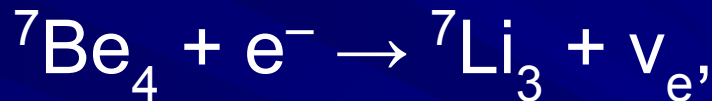
Т - термоядерное горючее (смесь дейтерия и трития)

В - взрывчатое вещество (обычное) для приведения в действие атомной бомбы

О - оболочка для предотвращения преждевременного разбрасывания ядерного горючего



Водородный цикл Солнца



Плазма Солнца, как и других звезд, удерживается гравитационными силами.

По мере истощения запасов водорода происходит накопление гелия и формируется гелиевое ядро. Следующий этап в жизни звезды - горение гелия в реакции:



Продолжительность этого этапа примерно в 10 раз меньше, чем горения водорода. Еще более быстро протекают следующие этапы: горение углерода, неона, кислорода, кремния. Конечным этапом звездного термоядерного синтеза является образование ядер железа, т.к. именно эти ядра имеют наибольшую удельную энергию связи.

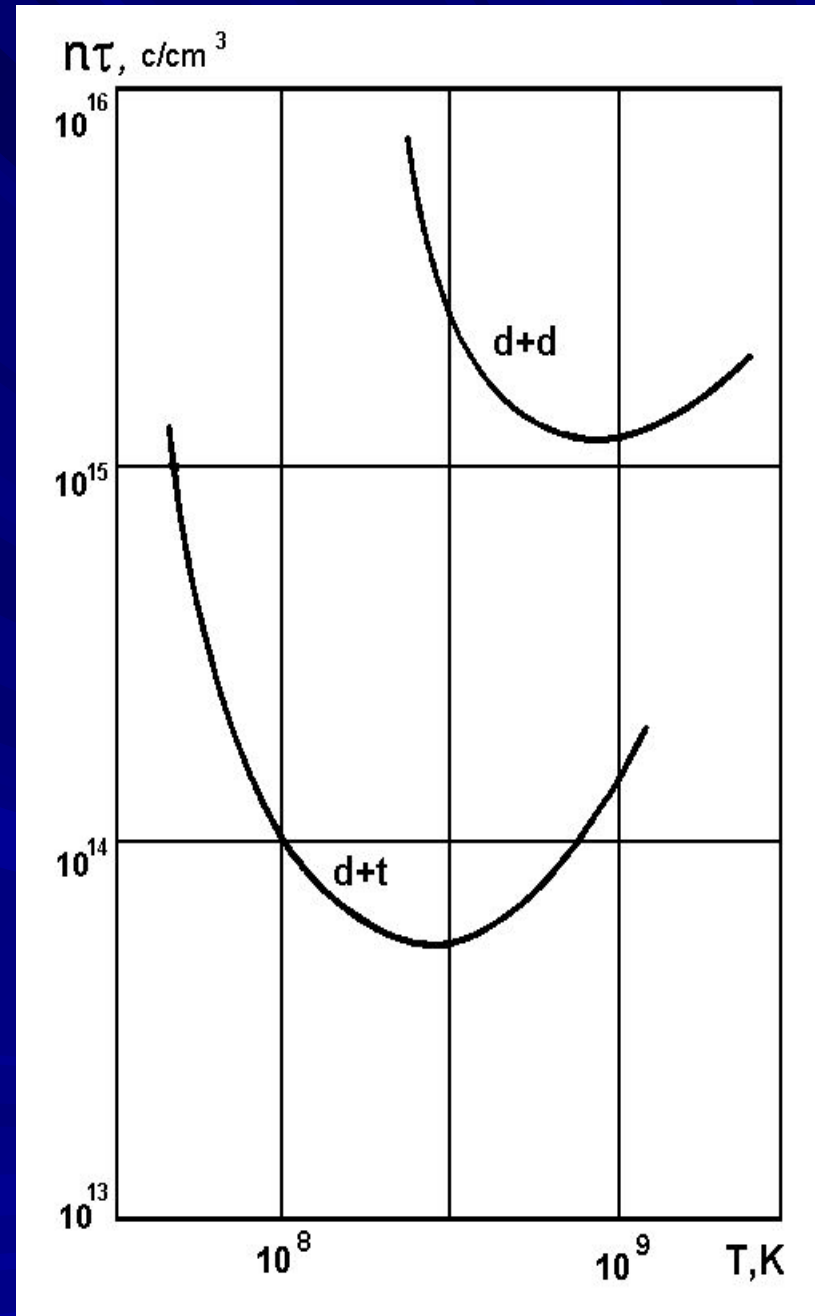
Дальнейшая судьба звезды зависит от ее массы. Если начальная масса звезды меньше некоторого критического значения, равного примерно 8 солнечным массам, то за счет сил гравитационного сжатия звезда уменьшится в размерах и станет "*белым карликом*", который, постепенно остывая, превратится в "*черного карлика*". Если же начальная масса звезды превышает это критическое значение, то давление вырожденного электронного газа не сможет противодействовать силам гравитационного сжатия, электроны будут "*вдавлены*" в протоны, произойдет превращение пары протон-электрон в пару нейтрон-нейтрино, звезда коллапсирует в сильно сжатое состояние с выделением огромной

Проблема управляемого термоядерного синтеза (УТС)

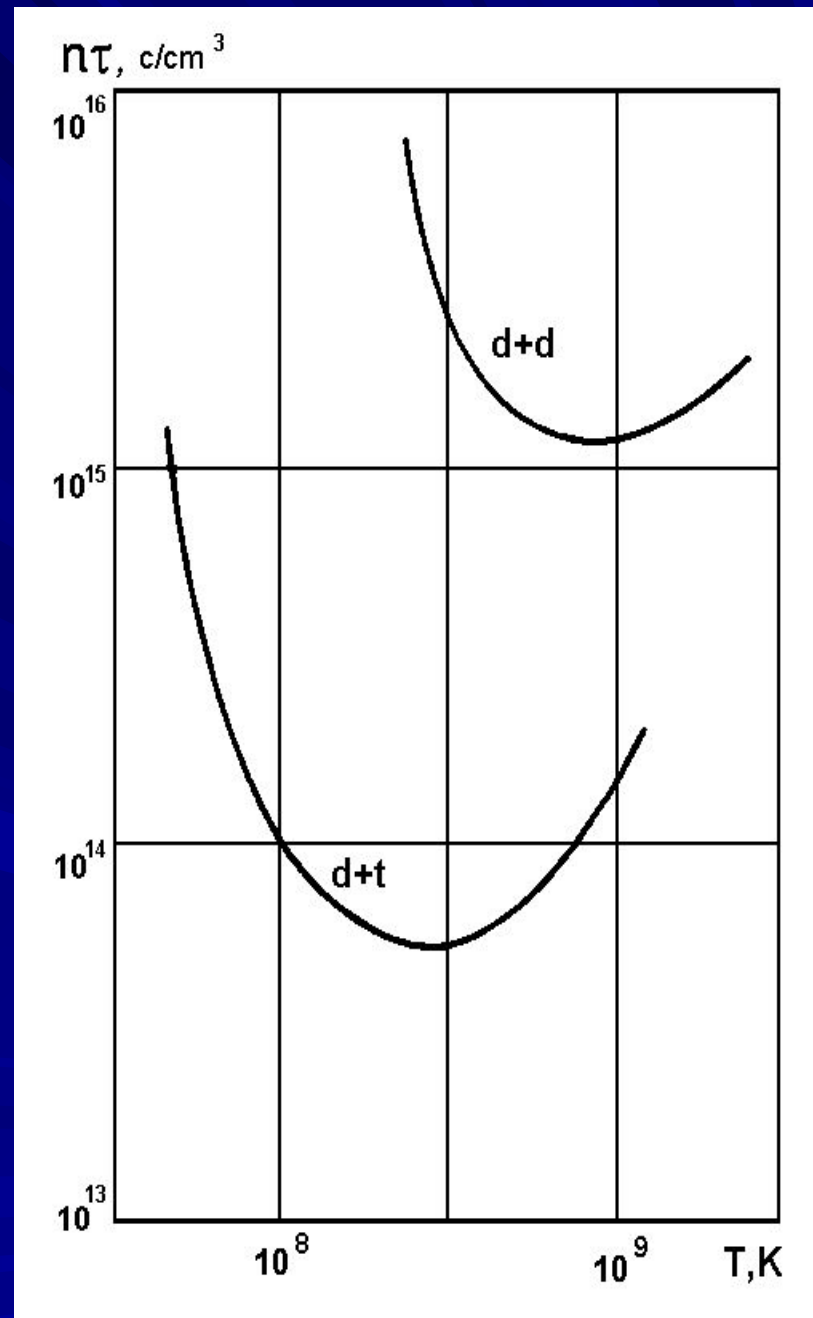
В лабораторных условиях реакции, записанные на предыдущих слайдах, давно осуществлены и хорошо изучены. Проблема состоит в том, чтобы сделать эти реакции самоподдерживающимися и (для начала) энергетически выгодными, а в перспективе и экономически выгодными.

Для этого надо решить технологическую проблему создания долгоживущей высокотемпературной плазмы и удержания ее в вакууме таким образом, чтобы она не соприкасалась со стенками вакуумной камеры.

В 1957 г английский физик Д. Лоусон определил необходимый критерий ("критерий Лоусона") для получения энергетически выгодных реакций УТС. По горизонтальной оси в отложена температура плазмы (в Кельвинах), а по вертикальной - параметр удержания, равный произведению плотности плазмы n (число ядер в 1 см^3) на время удержания плазмы τ (в секундах).



Кривые линии соответствуют равенству энергии, выделенной в результате реакции, и энергии, затраченной на создание и удержание плазмы (нулевой КПД). Нижняя кривая на графике рассчитана для реакции дейтерий + тритий (обозначена d+t), а верхняя - для реакций дейтерий + дейтерий (d+d). Чтобы получить энергетический выигрыш, надо попасть в какую-либо точку выше соответствующей линии.



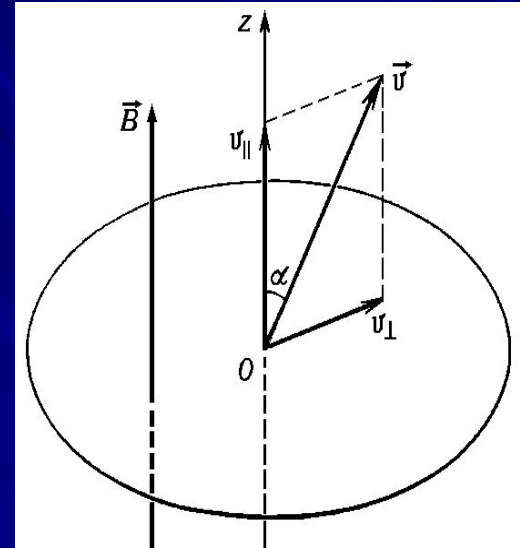
Основные направления работ по УТС

В настоящее время считаются возможными 3 пути решения проблемы УТС:

1. Магнитное удержание плазмы
2. Инерционное удержание плазмы
3. Мюонный катализ

Движение заряженной частицы в постоянном однородном магнитном поле.

Пусть начальная скорость частицы v_0 произвольным образом ориентирована относительно вектора магнитной индукции $\vec{B}$. Разложим вектор v_0 на компоненты $v_{\parallel}$ (параллельный магнитному полю) и $v_{\perp}$ перпендикулярный к нему. Компонент $v_{\parallel} = v_0 \cos \alpha$ в процессе движения остается неизменным, т.к. сила Лоренца, действующая на частицу в магнитном поле, лежит в плоскости, перпендикулярной к магнитному полю. Эта сила равна по модулю $F = q v_{\perp} B$, и в каждый момент времени перпендикулярна к $v_{\perp}$, т.е. непрерывно поворачивает компонент $v_{\perp}$, не меняя его величины.



Движение заряженной частицы в постоянном однородном магнитном поле.

Таким образом, сила Лоренца является центростремительной силой, и происходящее под ее действием движение в плоскости, перпендикулярной к вектору $\mathbf{B}$, представляет собой равномерное движение по окружности со скоростью $v_{\perp} = v_0 \sin \alpha$, и с радиусом R , определяемым из уравнения:

$$\frac{mv_{\perp}^2}{R} = qv_{\perp}B$$

откуда

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB}$$

Ларморовская окружность. Циклотронная частота.

Из предыдущих формул можно найти период движения частицы по окружности:

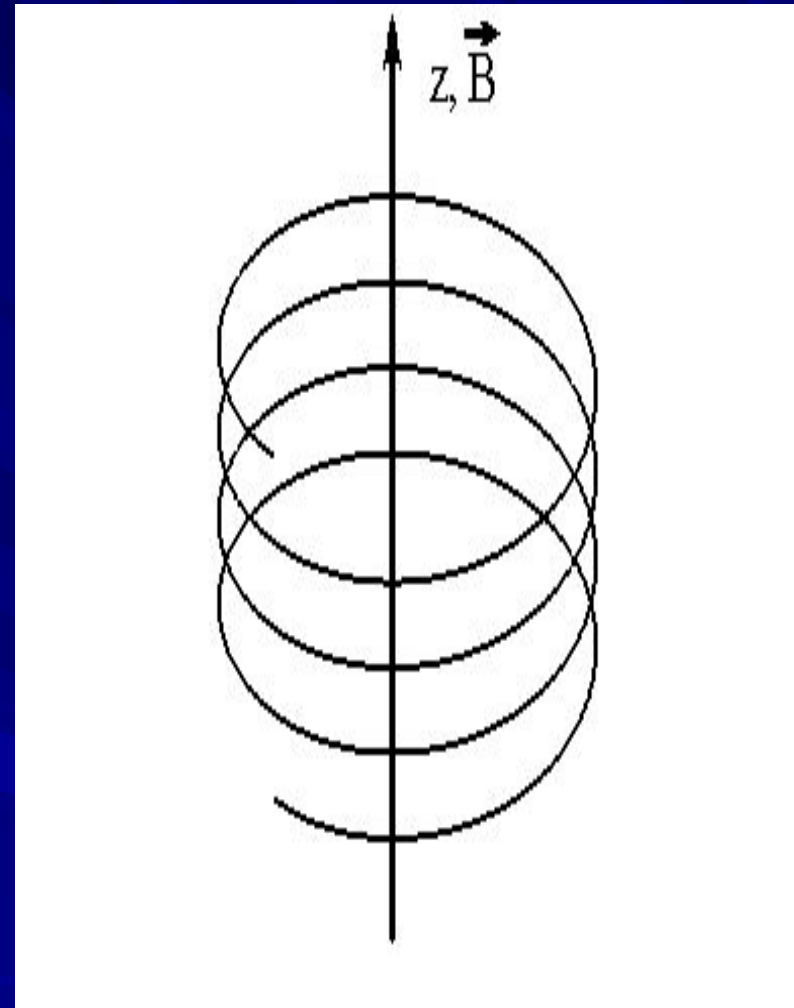
$$\tau = \frac{2\pi m}{qB}$$

и угловую частоту

$$\omega_c = \frac{2\pi}{\tau} = \frac{qB}{m}$$

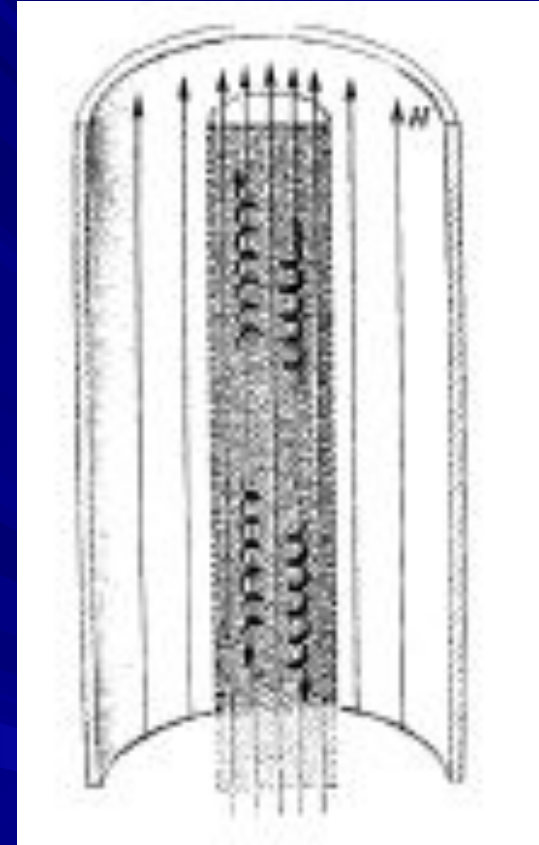
Окружность, по которой частица движется под действием магнитного поля, принято называть *ларморовской окружностью* в честь английского физика Дж.Лармора (J.Larmor), а частоту ω_c - *циклотронной частотой*. Иногда частоту ω_c - называют ларморовской частотой, но это не совсем правильно. Ларморовская частота - частота прецессии орбиты электрона в атоме - вдвое меньше.

Таким образом, движение заряженной частицы в однородном магнитном поле можно представить как сумму двух движений: равномерного перемещения вдоль магнитного поля со скоростью $v_{\parallel}$ и движения по окружности в перпендикулярной плоскости. Результатом такого сложения является движение по винтовой линии, изображенное на рисунке.



Замагниченность плазмы

Рассмотрим плазменный столб, помещенный в постоянное магнитное поле (см. рисунок). Каждая частица в этом плазменном столбе движется по винтовой траектории, ось которой совпадает с силовой линией. Таким образом, в радиальном направлении плазма изолирована от стенок сосуда. Перемещение поперек силовых линий возможно только благодаря столкновениям частиц друг с другом, а также дрейфу.



Магнитное удержание плазмы

Наибольшие успехи данного направления связаны с установками типа "Токамак".

Первая установка с замкнутой тороидальной камерой для разогрева и магнитного удержания плазмы была построена в 1955 году в ИАЭ им. И.В.Курчатова в отделе, которым руководил Л.А.Арцимович. Такие установки получили название "Токамак" (по первым слогам названий основных элементов конструкции установки: **Т**ороидальная **ка**мера, **ма**гнитные **ка**тушки).

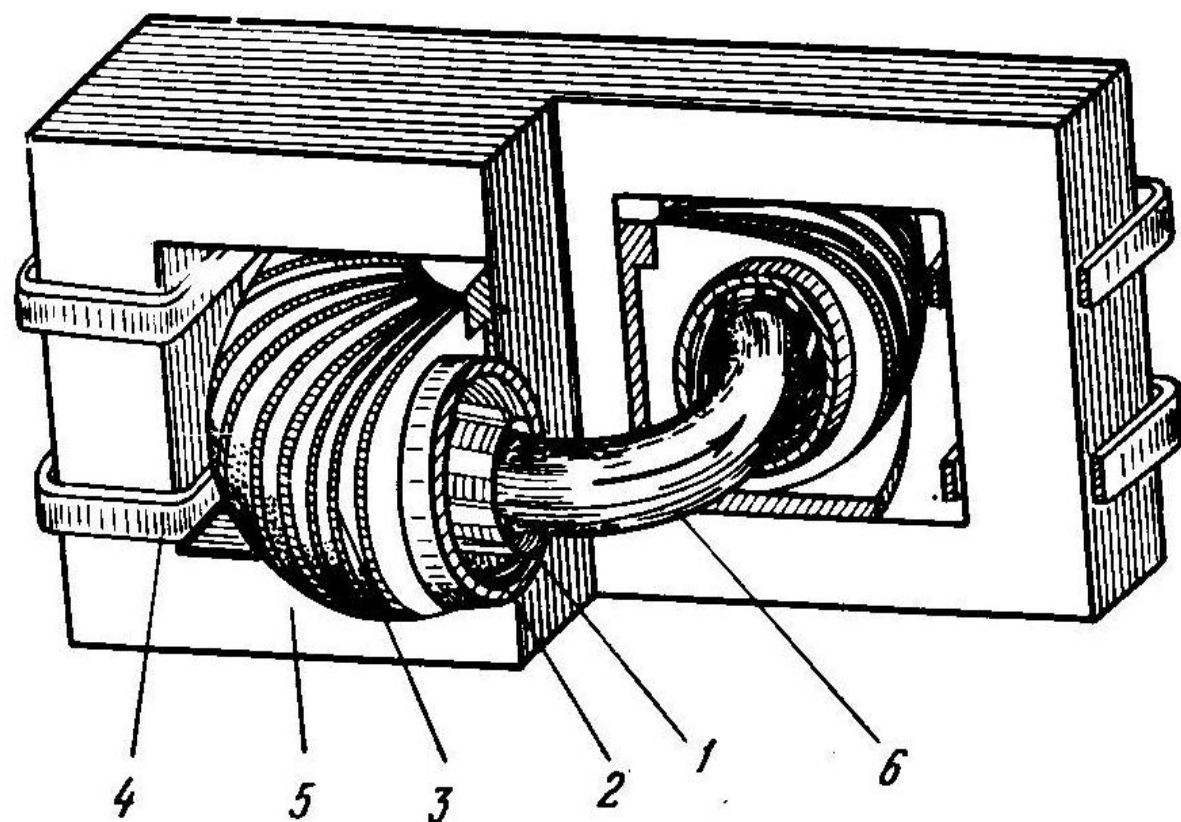


Рис. 11.8. Схема установок «Токамак».

1 — внутренняя камера, 2 — внешняя медная камера, 3 — обмотка, создающая продольное магнитное поле, 4 — первичная обмотка трансформатора, 5 — железный сердечник, 6 — плазменный виток.

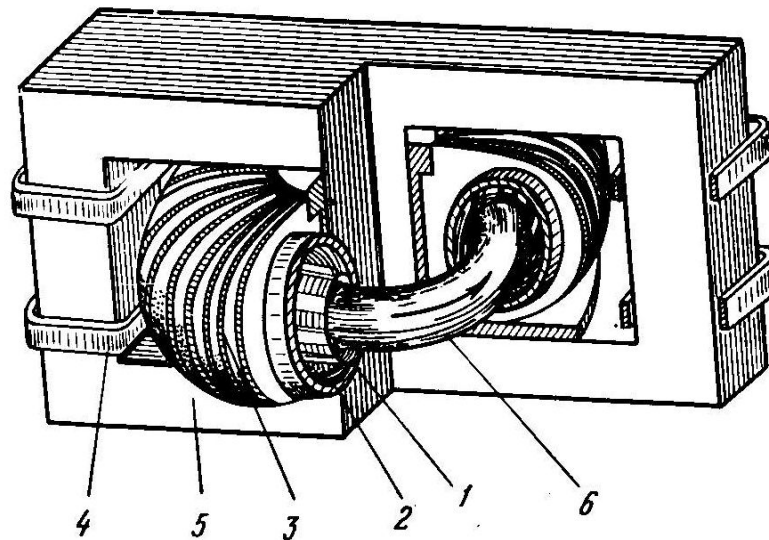


Рис. 11.8. Схема установок «Токамак».

1 — внутренняя камера, 2 — внешняя медная камера, 3 — обмотка, создающая продольное магнитное поле, 4 — первичная обмотка трансформатора, 5 — железный сердечник, 6 — плазменный виток.

Создание и нагрев плазмы в токамаке происходит за счет джоулева тепла при протекании через нее индукционного тока, который возбуждается при разряде батареи конденсаторов через первичную обмотку 4, при этом плазменный виток 6 представляет собой короткозамкнутую вторичную обмотку. Внутренняя камера 1 тороидальной формы изготовлена из нержавеющей стали толщиной несколько мм.

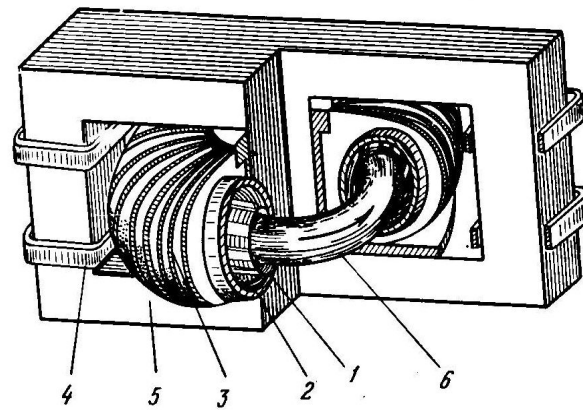
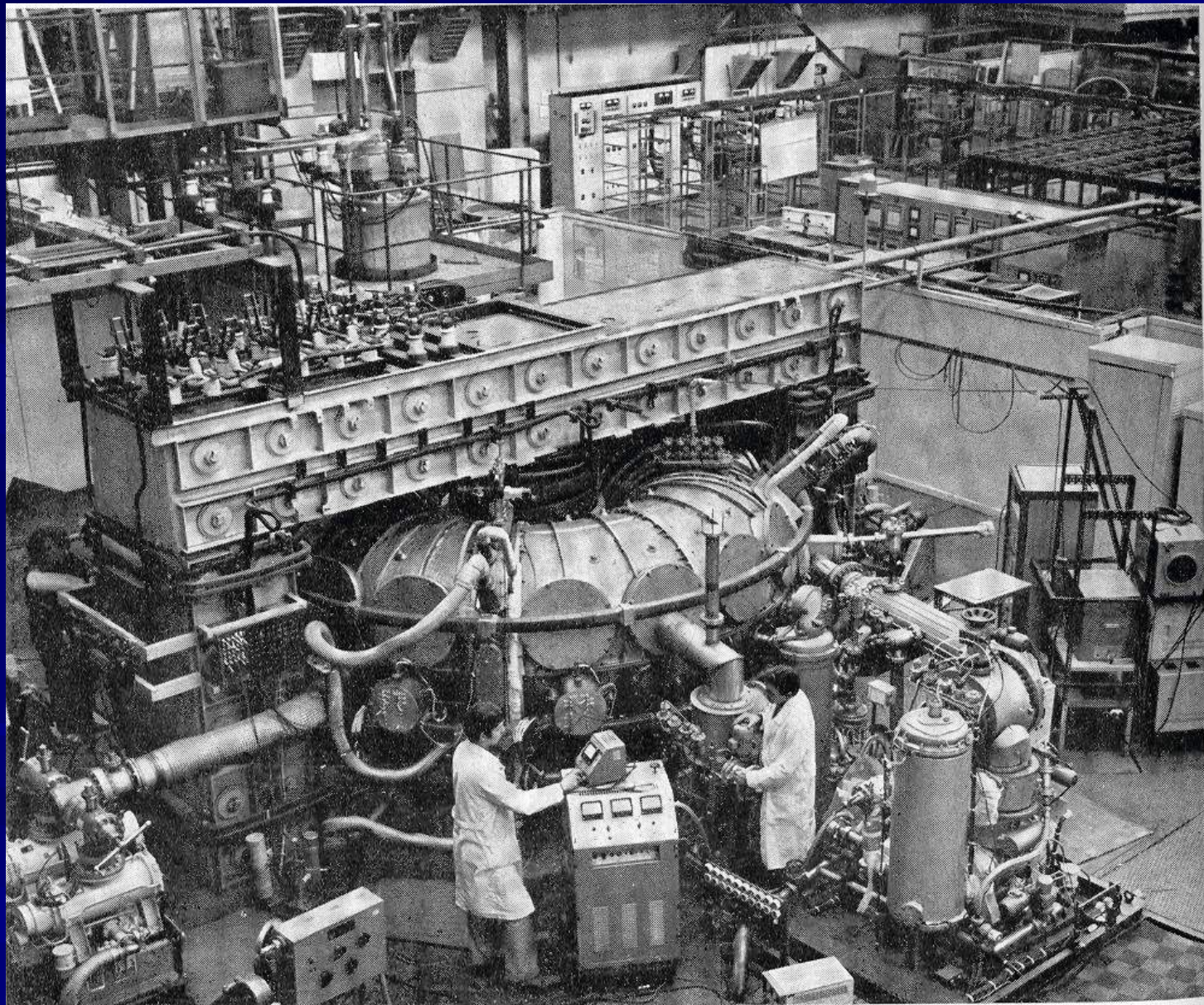


Рис. 11.8. Схема установок «Токамак».

1 — внутренняя камера, 2 — внешняя медная камера, 3 — обмотка, создающая продольное магнитное поле, 4 — первичная обмотка трансформатора, 5 — железный сердечник, 6 — плазменный виток.

Внутренняя камера окружена внешней камерой 2 из толстой меди, которая демпфирует возмущения плазменного шнура: если на каком-то участке шнур изгибается и приближается к стенке камеры, в меди возникают вихревые токи (токи Фуко), которые стабилизируют шнур. С помощью обмотки 3, по которой течет ток в несколько сотен килоампер, создается сильное продольное (тороидальное) магнитное поле с индукцией ~ 5 тесла, а применение сверхпроводников позволяет довести индукцию до ~ 10 Тесла.

Фотография установки "Токамак-7" (ИАЭ им. И.В.Курчатова)



Установки типа токамак были впервые созданы в России (тогда это был СССР). В 1958 году по проблеме УТС был налажен обмен научной информацией между СССР и США. После 1970 года, когда успех токамаков стал очевиден, к программе их исследований подключились США, страны Западной Европы и Япония. Аналогичные установки, построенные в США, имеют некоторые конструкционные отличия и называются "стеллараторами".

Стеллараторы

В 1958 году по проблеме УТС был налажен обмен научной информацией между СССР и США. После 1970 года, когда успех токамаков стал очевиден, к программе их исследований подключились США, страны Западной Европы и Япония. Некоторые установки, построенные в этих странах, имеют конструкционные отличия и называются "стеллараторами". И стелларатор, и токамак, имеют свои достоинства и недостатки.

И в токамаках, и в стеллараторах плазма удерживается магнитным полем. Главное отличие стелларатора от токамака заключается в том, что в стеллараторе полоидальное магнитное поле наводится внешними катушками, а разогрев плазмы осуществляется не разрядом конденсаторов, а высокочастотным электромагнитным полем. Поэтому стелларатор сложнее и дороже, а, главное, форма плазменного шнура далека от идеальной тороидальной формы, что затрудняет борьбу с дрейфом и с неустойчивостями. С другой стороны, токамак может работать только в импульсном режиме, тогда как стелларатор способен в течение длительного времени работать в непрерывном (стационарном) режиме.

В процессе исследований как в России, так и в США некоторые токамаки перестраивались в стеллараторы, и наоборот. Некоторые установки сразу проектировались таким образом, чтобы их можно было исследовать как в режиме токамака, так и в режиме стелларатора.

За 65 лет после запуска первого токамака, во всем мире было построено более 300 токамаков и стеллараторов. Каждая новая установка приводила к улучшению параметров плазмы, но все более дорогой ценой. Если в начале исследований сооружение одного токамака в год было по силам небольшой лаборатории, то стоимость современных токамаков составляет миллиарды долларов, откуда следует необходимость объединения усилий разных стран.

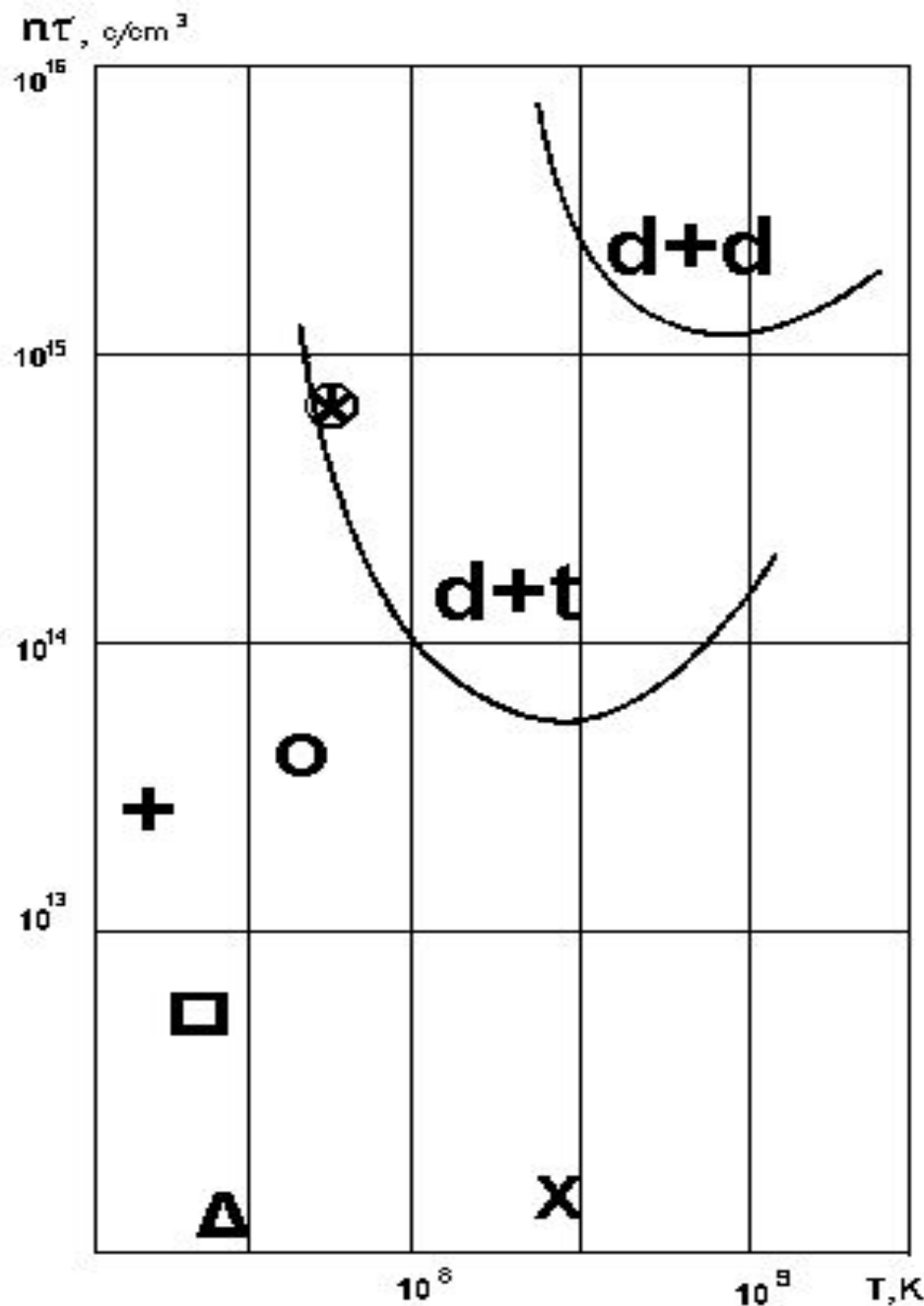
Дело в том, что достичь критерия Лоусона на маленьком ("настольном") токамаке невозможно при тех значениях индукции магнитного поля, которые в настоящее время доступны даже для сверхпроводящих электромагнитов. Время удержания плазмы приблизительно пропорционально квадрату радиуса вакуумной камеры R , и обратно пропорционально эффективному коэффициенту диффузии D , который, в свою очередь, обратно пропорционален индукции магнитного поля B , удерживающего плазму:

$$\tau \sim R^2/D \sim R^2 B.$$

Ресурс увеличения индукции B на сегодняшний день исчерпан (не исключено, что в будущем такая возможность появится, но сейчас ее нет), поэтому приходится увеличивать размеры установки. Увеличивая размер установки, например, вдвое, мы (при прочих равных условиях) увеличиваем время удержания примерно в 4 раза. Конечно, стоимость реактора при этом растет, но с точки зрения физики нет никаких сомнений, что критерий Лоусона на этом пути будет достигнут. Когда - это вопрос не к физике и не к физикам, это вопрос финансирования и организации работ.

Благодаря возможности компенсировать дрейф, удалось довести время удержания до значений, позволяющих приблизиться к критерию Лоусона. Главным препятствием на пути к УТС в настоящее время являются различного вида неустойчивости в плазме: возникшее по каким-либо причинам небольшое искажение плазменного шнура под действием внутренних сил начинает расти, шнур деформируется и разбрасывается на стенки реактора. Такие неустойчивости называются макроскопическими или гидромагнитными (для их описания используются уравнения магнитной гидродинамики).

x – ОГРА- III (Россия)
Δ - Сцилла-IV (США)
• - TFR (Евроатом)
+ - Т-7, Т-10 (Россия)
○ – PLT (США),
⊗ - ИНТОР (ITER -
 International
 Termonuclear
 Experimental
 Reactor:
 строящийся
 реактор)

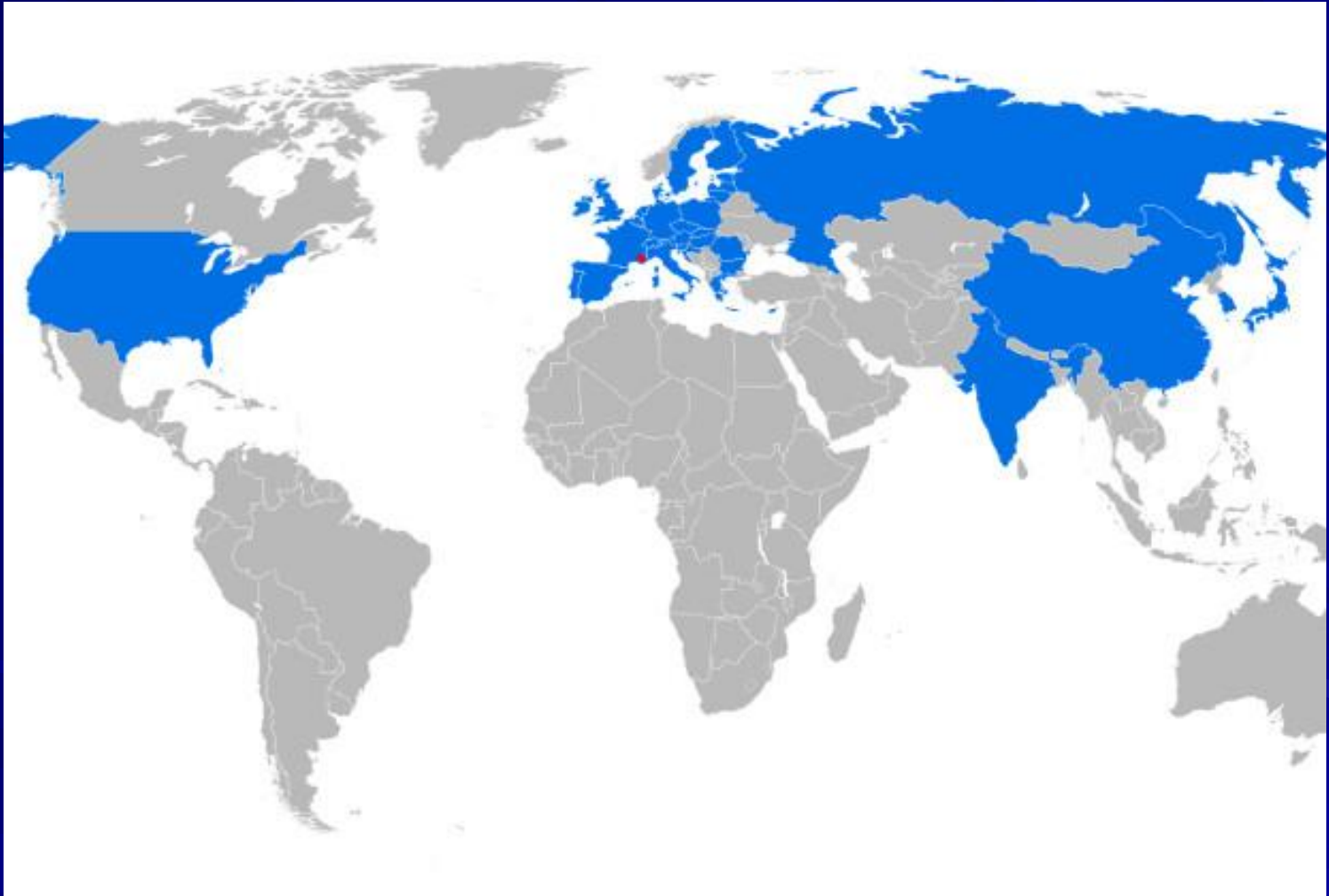


Первый проект ИНТОРа (в английской аббревиатуре "ITER" - International Termonuclear Experimental Reactor) был создан еще в 1980 г, в него вошли СССР, США, страны Европейского союза и Япония. По первоначальным планам реактор должен был быть построен в 1985 году. Однако по ряду финансовых и политических причин строительство даже не было начато.

В 1992 году было подписано новое соглашение между Россией, США, Канадой, Европейским союзом и Японией, срок запуска был назначен на 2005 год. Проект был переработан, созданы и прошли успешное испытание отдельные узлы, но строительство так и не было начато. Не удалось даже определить место строительства (претендовали Канада, Франция, Япония, но к соглашению не пришли).

В 2005 году к проекту подключились Китай, Южная Корея, Индия, но вышла Канада. Таким образом, окончательно определились семь участников проекта: Европейский союз, Индия, Китай, Корея, Россия, США и Япония, а также определено место строительства реактора на юге Франции, в 60 километрах от Марселя в исследовательском центре Карадаш. Первый этап строительства должен был завершиться к 2018 г, первую плазму планировалось получить к концу 2019 г, а в 2027 году начать полномасштабные эксперименты. В 2007 году (через 27 лет после создания первого проекта!) строительство, наконец, началось, но из-за хронического недофинансирования сроки постоянно корректируются; опоздание к настоящему времени оценивается в два-три года.

Синим цветом выделены страны-участницы проекта ITER. Красная точка: место строительства (юг Франции)



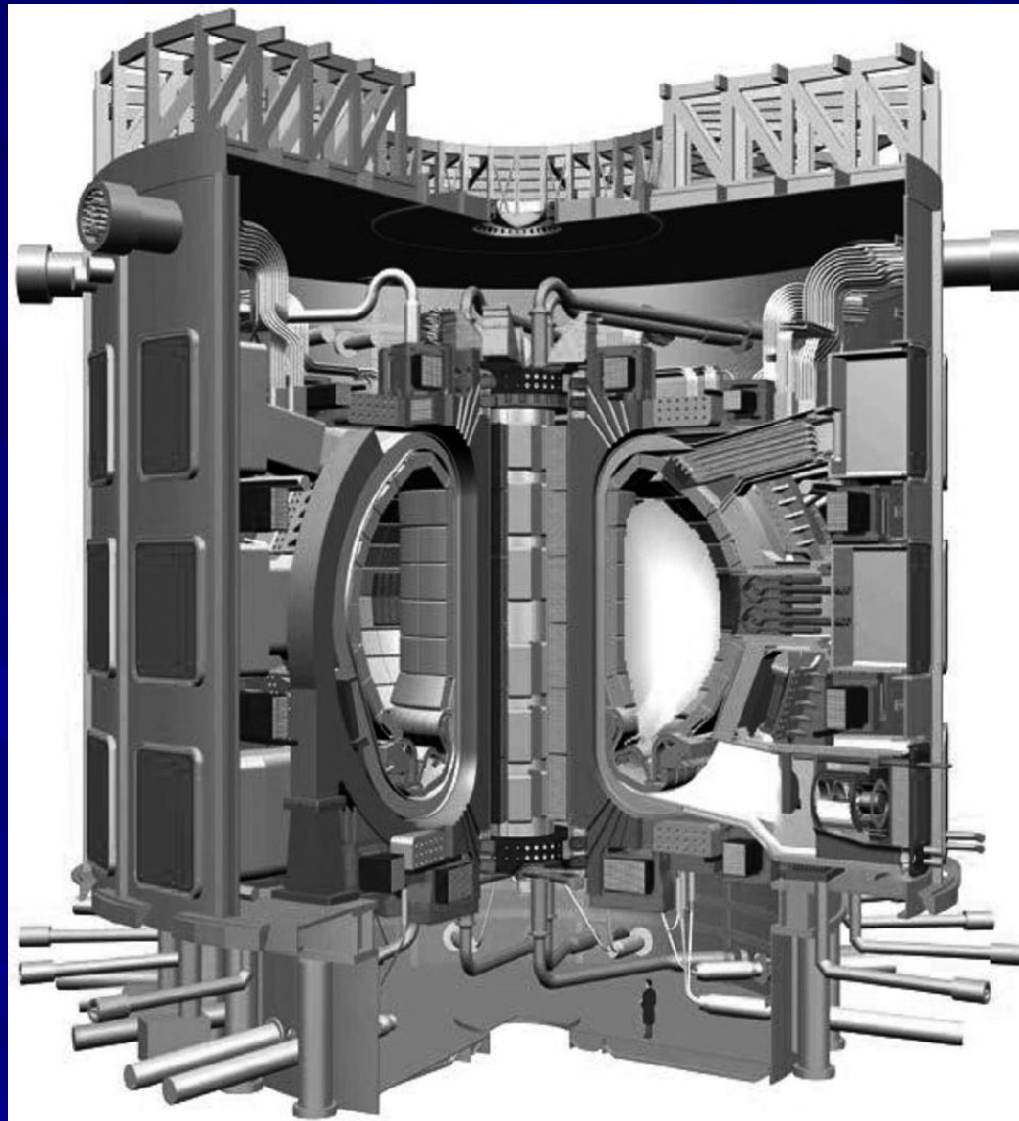
В начале проекта между Японией и Францией шла борьба за размещение ИТЭР на своих территориях. Победила Франция: в 2005 году было принято решение о



строительстве реактора на юге страны, в 60 километрах от Марселя в исследовательском центре Карадаш (отмечен красной точкой).

ИНТОР: Большой
радиус тора 5.2м,
малый 1.2м,
тепловая мощность
620 МВт.

Реактор будет ра-
ботать в цикли-
ческом режиме:
время горения
термоядерной
реакции ок.200с,
очистка камеры
ок.30с.



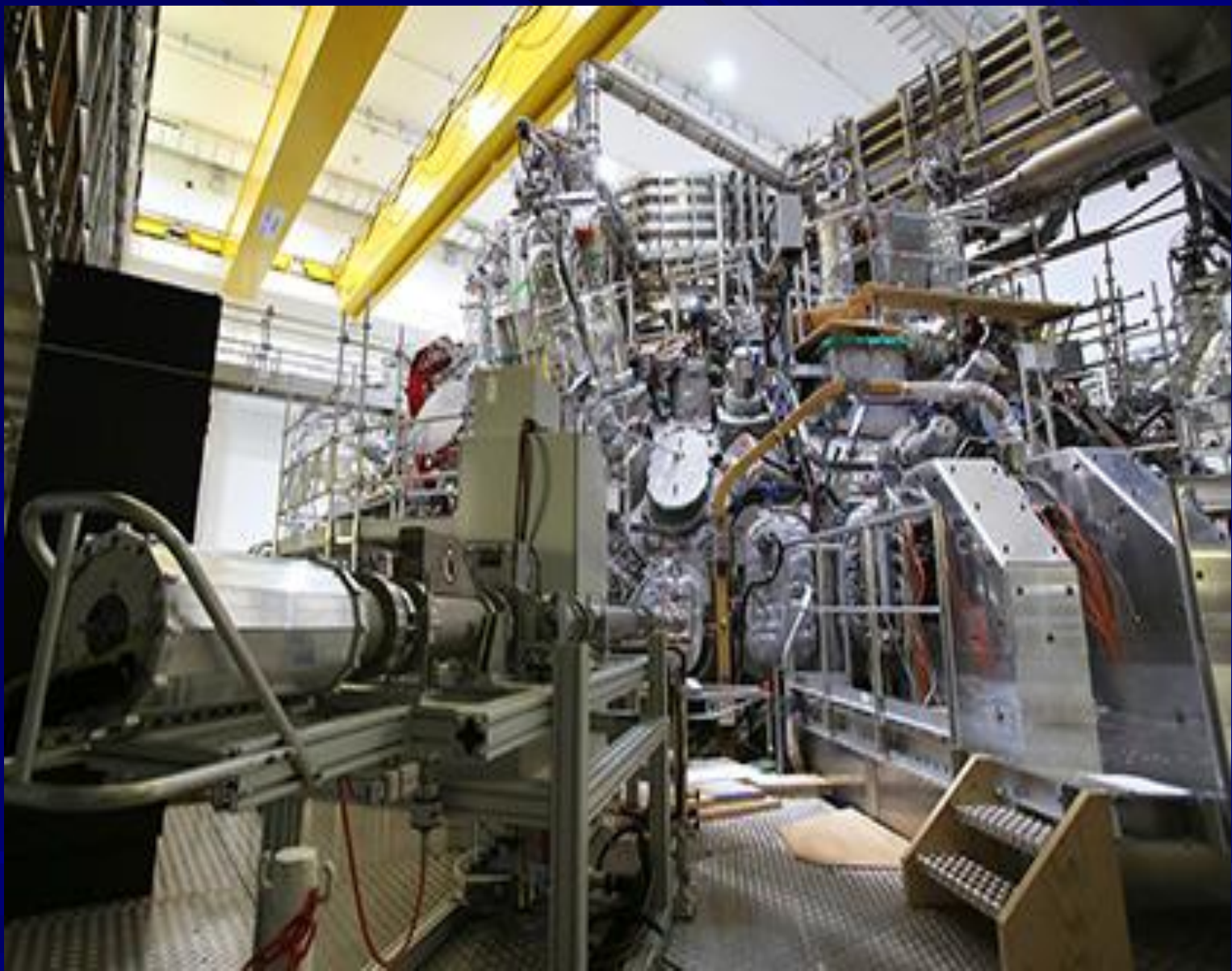
О масштабах проекта можно судить по следующим параметрам. Высота токамака составит 73 метра, из которых 60 метров будут находиться над землей и 13 метров — под ней. Для сравнения, высота Спас-ской башни Московского Кремля равна 71 метру. Основная платформа реактора будет занимать площадь, равную 42 гектарам (60 футбольных полей). Для тороидальных магнитов токамака необходимо 80 тысяч километров сверхпроводящих нитей; их общий вес составит 400 тонн. Сам реактор будет весить около 23 тысяч тонн. Для сравнения: вес Эйфелевой башни в Париже равен всего 7,3 тысячи тонн. Объем плазмы в токамаке будет достигать 840 кубических метров, тогда как в крупнейшем действующем в Великобритании реакторе такого типа - JET - объем равен ста кубическим метрам.

После того, как термоядерный реактор ITER продемонстрирует свою работоспособность и подтвердит стабильное удержание плазмы в магнитном поле, следующим шагом станет создание еще более крупной термоядерной установки DEMO. В результате выполнения этого проекта во второй половине XXI века должно начаться промышленное энергетически выгодное производство электроэнергии путем УТС. Подчеркнем еще раз: речь идет об *энергетически выгодном* производстве электроэнергии. Об *экономически* выгодном производстве вопрос пока даже не стоит; скорее всего, это будет задачей на XXII век.

Параллельные проекты

Из-за слишком медленного строительства ИНТОРа страны-участницы решили, что для оптимального продвижения к промышленному термоядерному реактору целесообразно в каждой из стран-участниц проекта иметь собственный современный токамак как для проведения работ в поддержку программы ИТЭР, так и для самостоятельных исследований в области УТС.

В Германии 10 декабря 2015 года был успешно запущен стелларатор Wendelstein 7-X. Строительство установки началось в 2005 году и завершилось в 2014-м. При помощи микроволнового нагрева мощностью два мегаватта достигнута температура плазмы в 80 миллионов градусов Цельсия. Удерживать образовавшуюся плазму с плотностью $3 \cdot 10^{14} \text{ 1/см}^3$ в равновесном состоянии удалось в течение четверти секунды. Результаты опытов признаны успешными. С нынешней мощностью планируется довести время удержания плазмы до десяти секунд, что будет означать достижение критерия Лоусона. Однако немецкие физики не считают Wendelstein 7-X конкурентом ITER; его роль заключается лишь в отработке перспективных технологий в физике плазмы.



Wendelstein 7-X



Конкурентами могут оказаться корейский и китайский проекты. На термоядерном реакторе KSTAR (Korean Superconducting Tokamak Advanced Research) достигнут один из рекордов удержания плазмы. Разогретую до 50 000 000 °C плазму в этом реакторе удалось удерживать в течение 70 секунд.



Этот рекорд побит на китайской сверхпроводящей установке EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) Института физики плазмы Академии наук КНР: разогретую до 50 миллионов градусов Цельсия плазму удалось удержать в равновесном состоянии в течение 102 секунд.

Недавно Великобритания также объявила, что планирует в течение 20 лет создать свой термоядерный реактор. Проект вполне реальный, учитывая, что в этой стране создана, и успешно работает одна из самых совершенных установок - токамак JET. Удивляет, правда, малый объем финансирования - всего 220 млн фунтов стерлингов (для сравнения: стоимость Wendelstein 7-X превысила миллиард евро), но, вероятно, это только транш на первый год.

Участие России в финансировании ITER в настоящее время составляет около десяти процентов. Это позволяет стране получать доступ ко всем технологиям проекта. Основной задачей, которая стоит перед Россией в рамках проекта, является производство сверхпроводящих магнитов, а также разнообразных диагностических датчиков и анализаторов структуры плазмы. Но, к сожалению, проводимые в России в настоящее время термоядерные исследования на токамаках охватывают только узкую часть спектра ключевых задач ITER. Это связано с отсутствием в России крупной установки с подобной ITER конфигурацией. Для того, чтобы быть на уровне мировых исследований, нам крайне необходима установка с возможностями достижения стационарного горения плазмы.

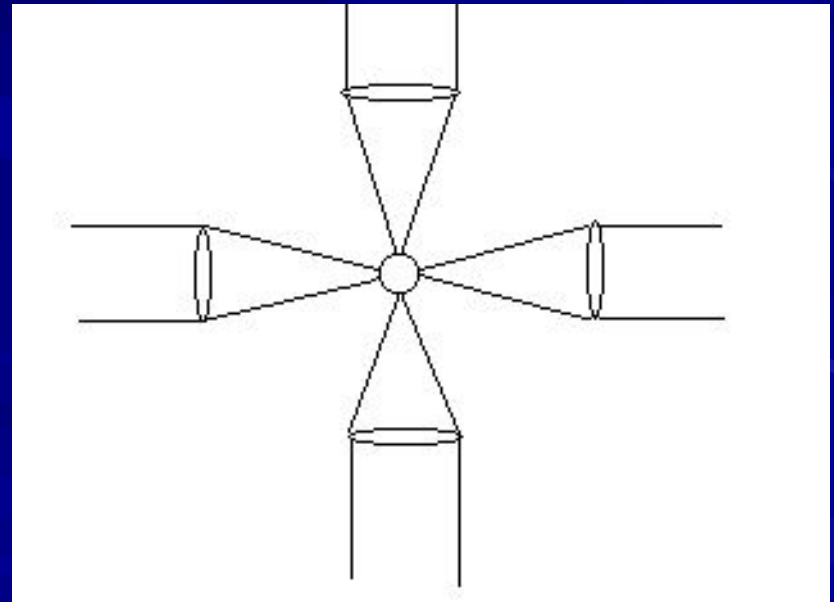
Проект такой установки - Токамак Т-15 - был разработан еще в 2002 году, но по экономическим причинам не был реализован. В 2010 проект был обновлен, и под названием "Т-15МД" включён в Федеральную целевую программу «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010—2015 годов и на перспективу до 2020 года» (ФЦП «ЯЭТНП»). Реализация проекта началась в 2011 г в РНЦ "Курчатовский институт", физический пуск токамака Т-15МД должен быть осуществлён в 2020 году. Т-15МД представляет собой инновационную установку, не имеющую по некоторым параметрам аналогов в мире.

Программа исследований на Т-15МД будет нацелена на решение наиболее актуальных проблем ИТЭР, таких как стационарная генерация неиндукционного тока, нагрев и удержание горячей плазмы, управление процессами на первой стенке, подавление глобальных неустойчивостей и периодических выбросов энергии на стенку и др. Можно ожидать, что благодаря реализации этого проекта Россия в течение ближайших 10-15 лет в значительной степени ликвидирует отставание, и снова выйдет на уровень мировых исследований в области УТС.

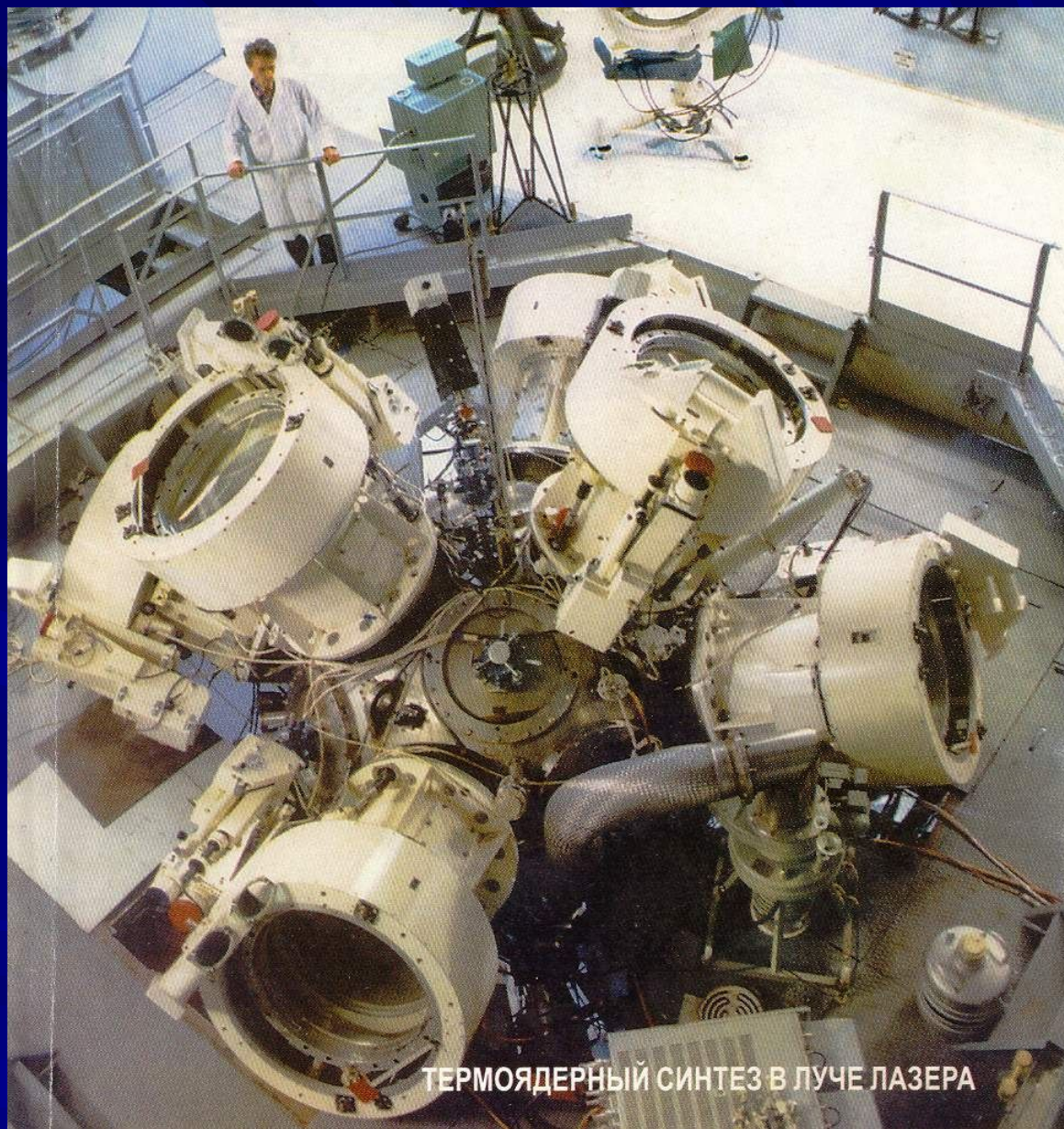
Инерционное удержание плазмы

Второй возможный путь достижения УТС заключается в быстром нагревании малых объемов конденсированного вещества. Согласно критерию Лоусона, при плотности $5 \cdot 10^{22} \text{см}^{-3}$ (плотность замороженной d-t смеси) достаточно удерживать плазму в течение времени $2 \cdot 10^{-9}$ сек, что сравнимо с длительностью импульсов современных лазеров.

Схема лазерного УТС:
одновременное облучение
со всех сторон мишени из
замороженной d-t смеси
мощными лазерными
импульсами.



Установка «Искра-5» (Россия, ВНИИЭФ) имеет 12 лазерных каналов с общей энергией излучения 30 кДж. Мишень: d-t смесь в виде льда при температуре 14K в многослойной оболочке: внутренние слои предохраняют от перегрева, внешние при испарении создают реактивный импульс, сжимающий мишень.



Мюонный катализ

Мюон (мю-мезон) имеет массу покоя, примерно в 200 раз больше, чем масса электрона, и время жизни 2.2 миллисекунды. По остальным свойствам он аналогичен электрону и может заменить его в атомной оболочке, образовав мезоатом. Радиус орбиты мюона примерно в 200 раз меньше радиуса орбиты электрона, т.е. мезоатом примерно в 200 раз меньше, чем обычный атом. Т.к. мезоатом электрически нейтрален, он может приблизиться к ядру обычного атома на расстояние, при котором произойдет реакция синтеза, и для этого нет необходимости нагревать газ до высоких температур.

Если реакция синтеза произойдет до распада мюона, то этот мюон может успеть инициировать 2-ю, 3-ю и т.д. реакции, играя роль катализатора. Проблема в короткой жизни мюона. Т.к. масса мюона примерно 106 Мэв, а в каждой реакции синтеза выделяется примерно 17 Мэв энергии, то для компенсации энергетических затрат на образование мюона за время своей жизни 2.2мс мюон должен инициировать в среднем не менее 7 таких реакций (а с учетом неизбежных потерь энергии - более 10).

Теоретически это возможно, и предварительные эксперименты это подтверждают. Проблема мюонного катализа находится на стадии научного обсуждения.

Конец 2-й части
Спасибо за внимание!