

Учреждение образования
«Международный государственный экологический университет им.
А.Д. Сахарова»

Факультет мониторинга окружающей среды

ФИЗИКА ЯДРА И ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

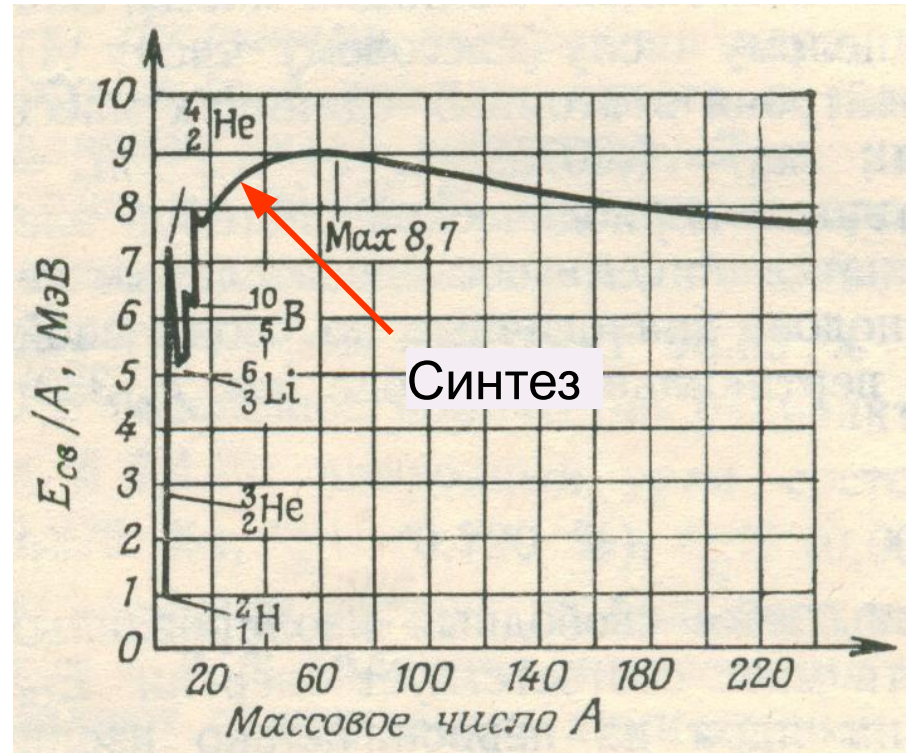
Термоядерные реакции

**1-31 04 05 Медицинская физика 4
2020 -2021**

Синтез ядер

Синтез легких ядер

- Из зависимости удельной энергии связи от массового числа следует, что синтез энергетически выгоден для ядер вплоть до $A = 56$.



Примеры реакций синтеза

- ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^1\text{H} + 4,033 \text{ МэВ}$
- $\rightarrow {}^3\text{He} + n + 3,270 \text{ МэВ},$
- ${}^3\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma + 19,814 \text{ МэВ}$
- ${}^3\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17,590 \text{ МэВ}$
- $\rightarrow {}^5\text{He} + \gamma + 16,632 \text{ МэВ}, {}^5\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + n + 0,958 \text{ МэВ}$
- ${}^3\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + 18,354 \text{ МэВ}$
- $\rightarrow {}^5\text{Li} + \gamma + 16,388 \text{ МэВ}, {}^5\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + 1,965 \text{ МэВ}$
- ${}^6\text{Li} + {}^3\text{H} \rightarrow 2{}^4\text{He} + n + 16,117 \text{ МэВ}$
- $\rightarrow {}^5\text{He} + {}^4\text{He} + 15,160 \text{ МэВ}$
- $\rightarrow {}^7\text{Li} + {}^2\text{H} + 0,995 \text{ МэВ}$
- $\rightarrow {}^8\text{Li} + {}^1\text{H} + 0,803 \text{ МэВ}$
- $\rightarrow {}^8\text{Be} + n + 16,023 \text{ МэВ}, {}^8\text{Be} \rightarrow 2{}^4\text{He} + 0,094 \text{ МэВ}$

Кулоновский барьер

- Кулоновское отталкивание частиц, вступающих в реакцию, препятствует их сближению на расстояния порядка 10^{-13} м, на которых, как оказывается, ширина кулоновского барьера отталкивания становится достаточно малой для того, чтобы, благодаря туннельному эффекту, сталкивающиеся частицы могли оказаться в потенциальной яме с преобладанием сильных взаимодействий и соединиться в новое ядро

Кулоновский барьер

- Суммарная кинетическая энергия E_t в системе отсчета, связанной с центром инерции, которая требуется для сближения легких ядер на столь малые расстояния

$$E_t = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2}{r} \approx 14,4 Z_1 Z_2 \text{ кЭВ}$$

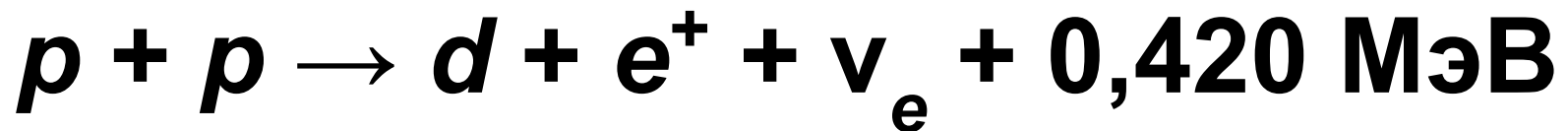
Температура

- Это соответствует определяемой из условия $E_t = 3kT/2$ температуре водородного газа порядка 10^8 К!
- Поэтому реакции синтеза часто называют термоядерными реакциями

$$T_0 \approx 10^8 Z_1 Z_2 \text{ К}$$

Водородная плазма

- Наименьший порядок имеет значение температуры T_0 для водородной плазмы.
- Однако, сечение реакций синтеза протонов на 22-23 порядка меньше сечения синтеза ядер дейтерия и трития, так как она сопровождается превращением протона в нейтрон



Роль плотности

- Для того, чтобы реакция синтеза была заметной в 1 моле вещества, необходимо, чтобы столкновения частиц плазмы с энергией свыше $14,4Z_1 Z_2$ кэВ были достаточно частыми
- Это может быть достигнуто за счет увеличения концентрации n_0 ядер

Время удержания

- На это нужно некоторое *время удержания* t , в течение которого плазма будет удерживаться в некотором объеме с неизменной концентрацией частиц в ней.
- При этом внутренняя энергия плазмы в этом объеме должна быть достаточной для разогрева поступившей более холодной плазмы, чтобы некоторая заметная доля ядер смогла вступить в реакцию синтеза.

Параметр удержания

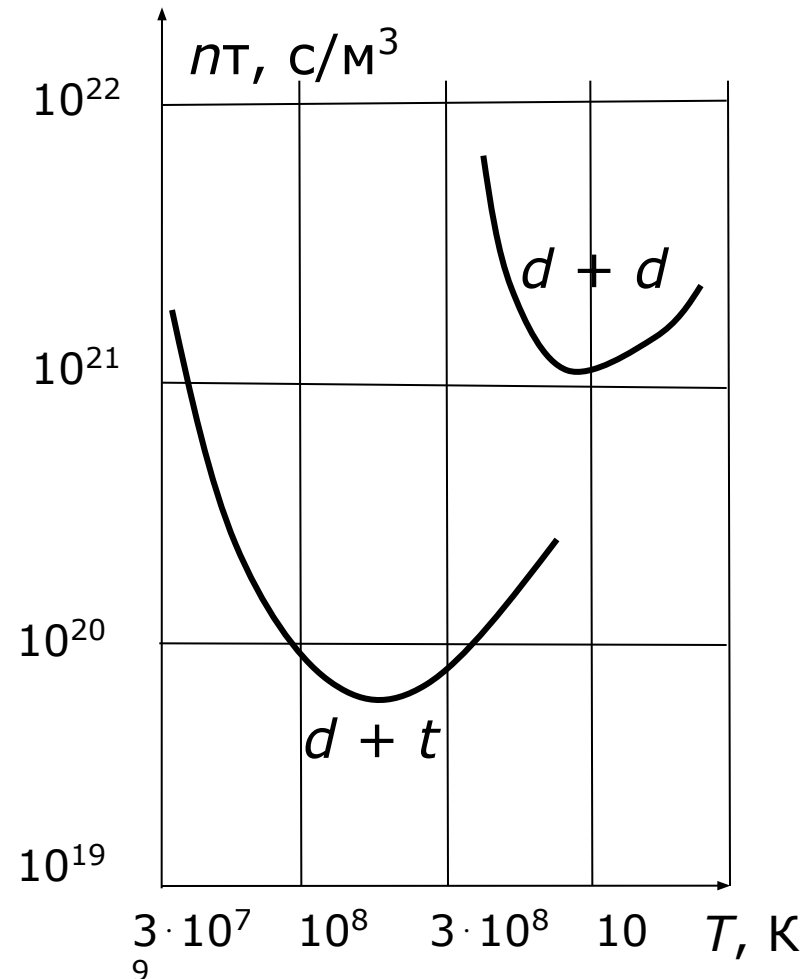
- Из условия баланса мощности и требования стационарности вытекает уравнение

$$n\tau = f(T)$$

- где $f(T)$ – некоторая функция, характеризующая интенсивность процессов, протекающих в плазме.
- Величина $n\tau$ называется *параметром удержания плазмы*.

Теоретические оценки $n\tau$

- Термоядерная реакция должна заметно идти при $n\tau \geq f(T)$.



Критерий Лоусона

- Минимальное значение функции $f(T)$ (и, соответственно, $n\tau$) вместе с соответствующим значением температуры T , при которых может быть осуществлена термоядерная реакция, называется *критерием Лоусона*.

Примеры критерия Лоусона

- Дейтерий-тритиевая плазма

$$d + t: n\tau = 0,5 \cdot 10^{20} \text{ с/м}^3, T = 2 \cdot 10^8 \text{ К} \\ (\approx 17 \text{ кэВ}).$$

- Дейтериевая плазма

$$d + d: n\tau = 10^{21} \text{ с/м}^3, T = 10^9 \text{ К}$$

Термоядерные реакторы

Два основных направления исследований

- разработка квазистационарной системы с временем удержания плазмы порядка нескольких секунд
- проекты с реакторами, работающими в режиме предельно возможного быстроедействия с инерционным удержанием плазмы

Первые идеи

- Начало 1950-х годов:
- И.Е. Тамм и др, СССР – *токамак*;
- L. Spitzer, США – *стелларатор*
- В основу их положен т.н. пинч-эффект – самосжатие плазмы при прохождении через нее электрического тока (по закону Ампера токи, текущие в одинаковых направлениях, притягиваются).
- Удержание и термоизоляции плазмы предлагается осуществить с помощью магнитных полей, так как при указанных выше плотностях и температурах диффузионные потоки частиц и количества теплоты будут настолько большими, что не могут быть сдержаны стенками из какого-либо материала.

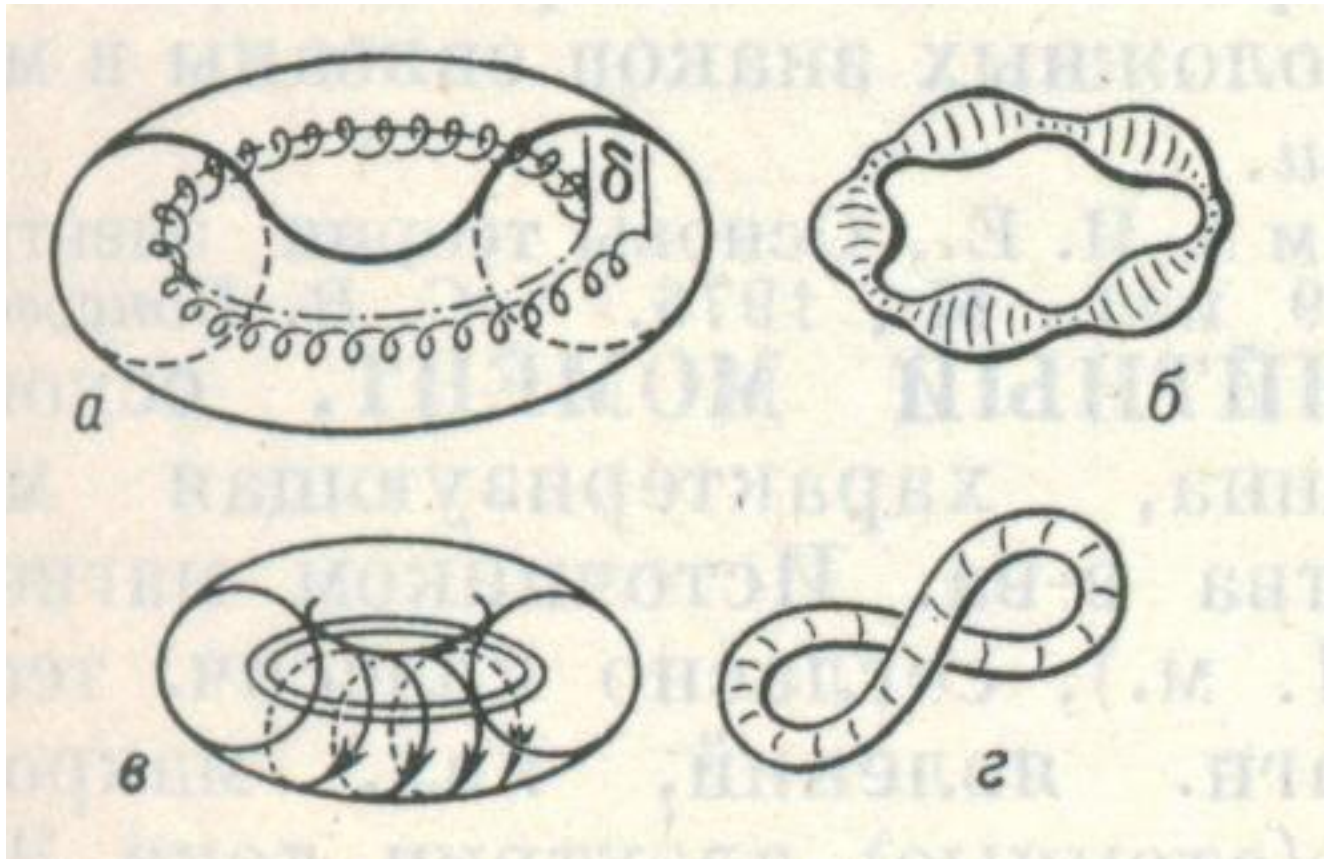
Основные направления исследований по УТС с магнитной термоизоляцией

- открытые (или зеркальные) магнитные ловушки;
- замкнутые магнитные системы;
- установки импульсного действия.

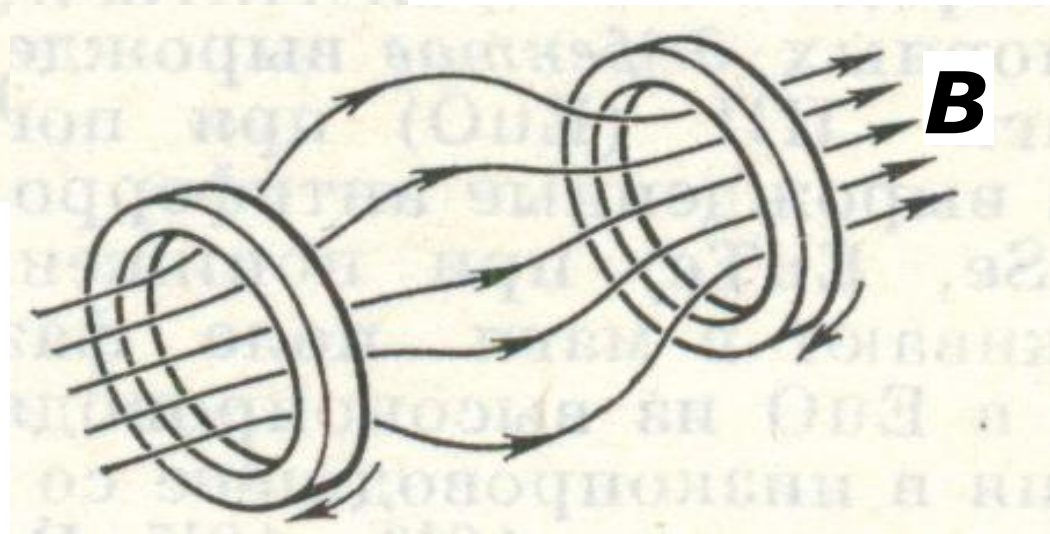
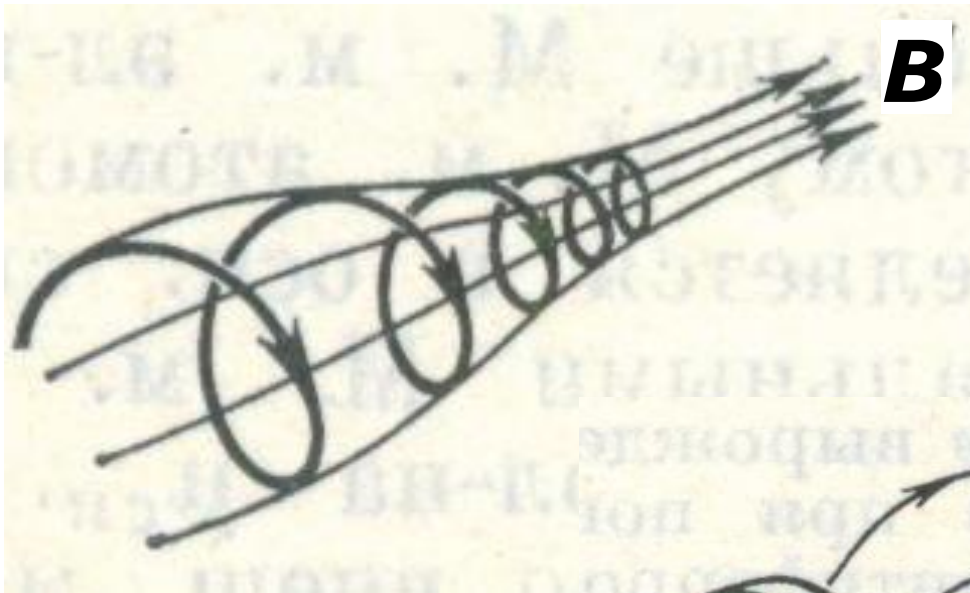
Открытые ловушки

- В системах с *открытыми ловушками* уход частиц из них определяется медленным процессом диффузии поперек линий индукции поля, либо из-за перезарядки ионов (обмена электронами).
- Уход плазмы вдоль линий индукции магнитного поля также замедлен из-за создаваемых областей усиленного магнитного поля (т.н. «магнитных зеркал» или «магнитных пробок»).
- Заполнение ловушек плазмой обычно ведется путем инъекции плазменных сгустков или пучков частиц.

Конфигурации магнитных ловушек: тороидальные катушки



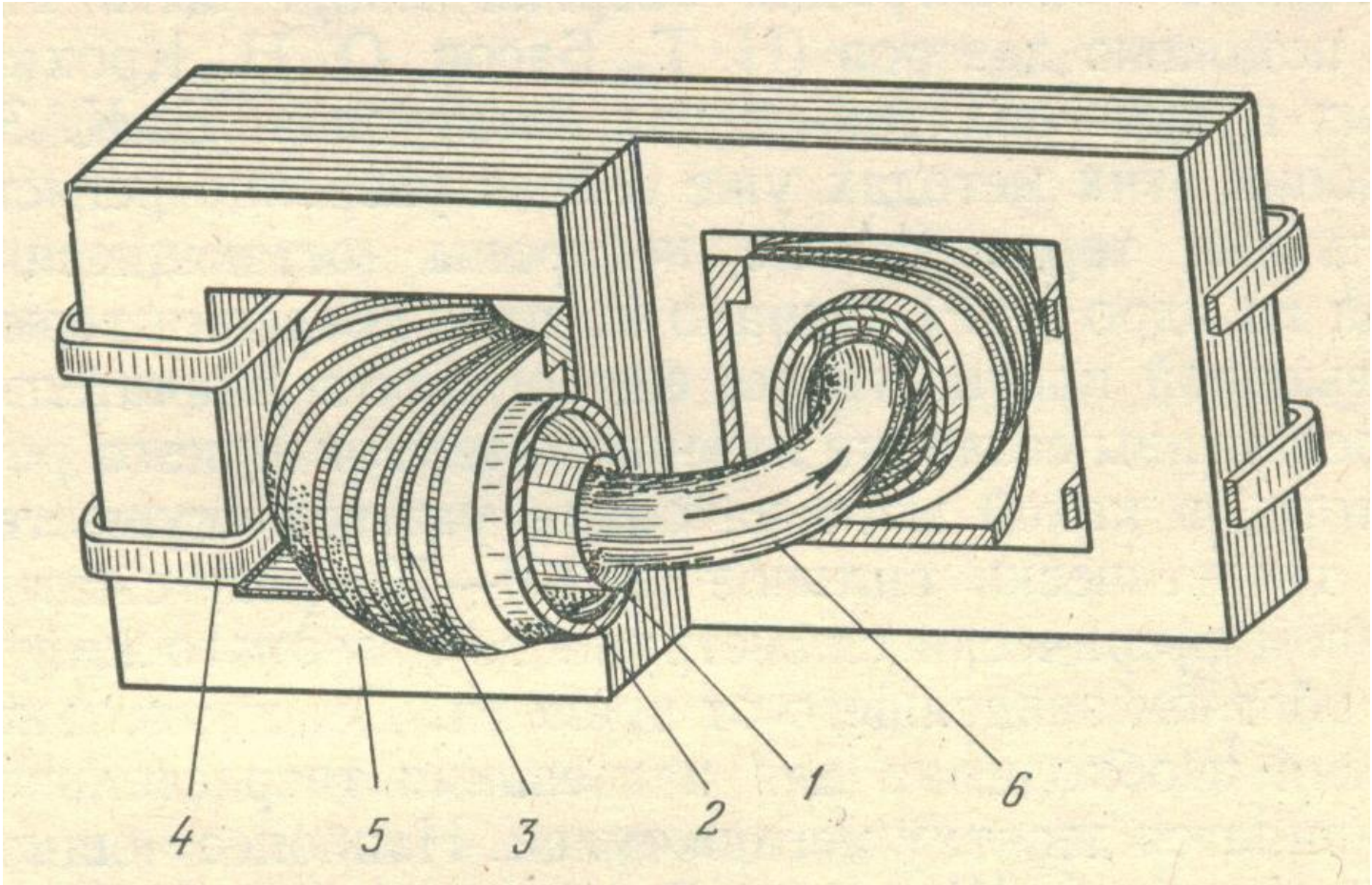
Адиабатические магнитные ловушки, или магнитные зеркала



ТОКАМАК

- В замкнутых магнитных системах инъекции плазмы не происходит, и плазма все время удерживается в области между ловушками. Примером такой установки является *токамак* (сокращение от слов: Тороидальная Камера с Магнитными Катушками – И.Н. Головин, Н.А. Явлинский, Л.А. Арцимович с сотр., СССР, 1951).
- Это – замкнутая магнитная ловушка, имеющая форму тора

TOKAMAK



Стелларатор

- Магнитное поле в стеллараторе создается с помощью внешних источников таким образом, что линии индукции многократно обходят вдоль тора и образуют систему замкнутых, вложенных друг в друга тороидальных магнитных поверхностей.
- Вращение магнитного поля осуществляется либо путем навивания проводников на тор, либо путем скручивания тора в восьмерку

Радиационный пояс Земли

- Магнитные ловушки создаются и природными объектами.
- Таковым является *радиационный пояс Земли*.
- Он представляет собой заряженные частицы космического излучения, захваченные магнитным полем Земли.
- Устойчивость плазмы в магнитных ловушках обеспечивается за счет электрического контакта захваченной плазмы с ионосферой.

Использование лазеров

- Еще одним способом создания необходимых условий для нагрева и сжатия плазмы является использование интенсивного лазерного излучения (Н.Г. Басов и др., СССР, 1962), а также интенсивных электронных пучков (Е.К. Завойский, СССР, 1968) или пучками ионов высоких энергий.
- Получаемые таким образом реакторы могут быть только импульсными, так как необходимые давление и температура достигаются на очень короткий промежуток времени. Подводимая излучением мощность должна иметь порядок 10^6 Дж, что, в принципе, достижимо при современном уровне исследований.

Метод инерциального удержания плазмы

- лазерный термоядерный синтез - ЛТС основан на инерции смеси, которая при мгновенном нагреве, например лазерным импульсом, "разлетается" не сразу. Практически все ныне созданные установки для ЛТС представляют собой камеру, в центр которой помещается дейтерий-тритиевая мишень.
- На ней фокусируется излучение нескольких мощных лазерных импульсов длительностью 10^{-9} - 10^{-10} секунды и суммарной мощностью порядка 10^{14} - 10^{15} Вт/см².

Метод инерциального удержания плазмы

- Расширяющиеся газы и реактивное давление сжимают сферическую оболочку, наполненную термоядерным горючим - смесью трития с дейтерием или просто дейтерием. примерно в 50 тысяч раз и нагревают его до температуры 10 кэВ (около 120 миллионов градусов).
- При этом оболочка ампулы испаряется, давление в смеси возрастает до миллиона атмосфер, а ее плотность - до 50-100 г/см³.
- Только при этих условиях, сохраняющихся лишь на время действия лазерного импульса, может начаться термоядерная реакция с выделением нейтронов и большого количества энергии:
- $D + T = He^4 + n + 17,6 \text{ МэВ.}$

- Наиболее современные исследовательские реакторы включают и лазерный синтез, например, установки Shiva и Nova Ливерморской лаборатории (США) с энергией излучения в импульсе до 120 кДж, "Искра-5" - до 30 кДж в Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ).

ИТЭР

- создается во Франции и станет первой демонстрационной термоядерной установкой с планируемым нейтронным выходом более 10^{20} нейтр./с.
- Этот проект объединяет финансовые, материальные и людские ресурсы большинства Европейских стран, России, США, Японии.
- ИТЭР — гибридный реактор, состоящий из двух частей, в котором ТОКАМАК служит источником нейтронов с энергией порядка 14 МэВ, и которые вызывают реакции деления в окружающем blankets, содержащем сырьевые нуклиды (^{238}U или ^{232}Th).
- В результате выделяется количество энергии, намного превышающее затраты на создание плазмы.

Задача ИТЭР

- демонстрация возможности коммерческого использования термоядерного реактора и решении физических и технологических проблем, которые могут встретиться на этом пути.
- Проектирование реактора полностью закончено и выбрано место для его строительства — исследовательский центр Кадараш на юге Франции, в 60 км от Марселя. Подготовка строительной площадки в Кадараш на юге Франции началась в январе 2007 года. Стройку, стоимость которой первоначально оценивалась в 5 миллиардов евро, планировалось закончить в 2016 году.

Задача ИТЭР

- Однако, в результате значительных технических трудностей и неопределённостей, при проектировании и производстве компонентов, сроки неоднократно сдвигались:
- в июне 2009 года был согласован перенос даты пуска на 2018 год;
- в феврале 2010 года срок был сдвинут на 2019 год;
- в ноябре 2015 года срок окончания постройки ITER сдвинули еще на 6 лет (от ранее запланированного 2019) к 2025 году.
- Предполагаемая сумма расходов выросла до 19 миллиардов евро.

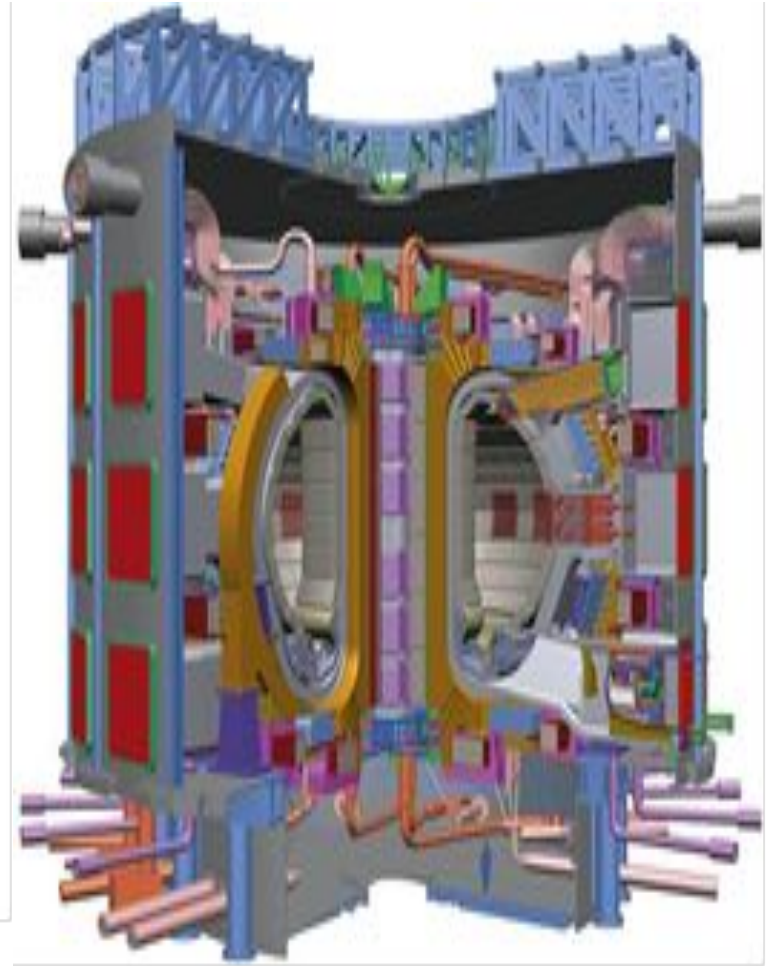
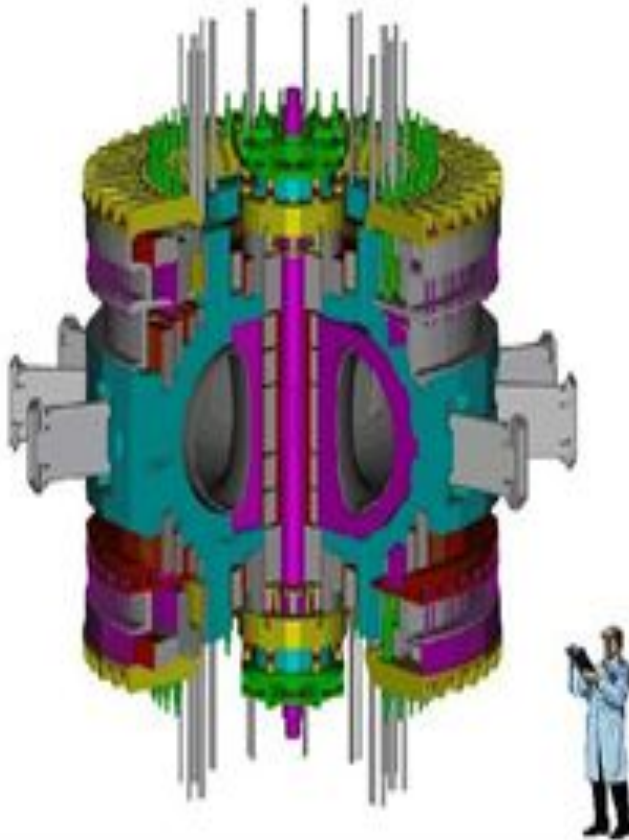
IGNITOR

- Под руководством академика Е.П. Велихова ведутся концептуальные проработки российско-итальянского проекта IGNITOR.
- IGNITOR - первый проект, который предложен для экспериментального подтверждения возможности достижения условий зажигания термоядерной реакции.
- Установка характеризуется оптимальной комбинацией высоких магнитных полей ($B_T = 13 \text{ Т}$), компактными размерами ($R_0 \sim 1,32 \text{ м}$), относительно низким характеристическим отношением ($A=2,8$) и значительным удлинением сечения плазмы и триангуляцией ($k = 1,83; \delta = 0,4$).

IGNITOR

ITER

IGNITOR MACHINE



ТЕРМОЯДЕРНЫЕ УСТАНОВКИ

- Демонстрация воспламенения от термоядерного синтеза является важной научно-технической целью современной физики.
- До тех пор, пока фундаментальные физические проблемы горения термоядерного синтеза не будут определены и подтверждены экспериментом, определяющие концепции термоядерного реактора будут оставаться неопределенными.
- Важная ценность базового эксперимента по воспламенению состоит в том, что процесс зажигания будет аналогичным для любой магнитно-ограниченной, преимущественно тепловой плазмы.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ УСТАНОВКИ

- В таком эксперименте также могут быть установлены методы нагрева и стратегии управления зажиганием, горением и остановом.
- Эти три проблемы, демонстрация воспламенения в магнитно-ограниченной плазме, физика процесса воспламенения, а также нагрев и управление горячей плазмой, специально рассматриваются в эксперименте IGNITOR.
- Его дизайн был основан главным образом на физических соображениях с момента его создания. Связанные с этим физические исследования вышли за рамки простой идентификации и включают взаимодействие физических процессов, связанных с воспламенением.

НЯЦ РК ТОКАМАК

- В Национальном ядерном центре Республики Казахстан в 2019 году реализован заключительный этап физического пуска первого в мире специализированного реактора «Токамак», предназначенного для испытания функциональных и конструкционных материалов будущей термоядерной энергетики.
- Получен плазменный разряд, удовлетворяющий требованиям второго и заключительного этапа физического пуска установки Казахстанский Токамак Материаловедческий (КТМ).

НЯЦ РК ТОКАМАК

- Проведена демонстрация работоспособности установки реактора и ее основных технологических систем с получением плазмы в омическом режиме (без использования средств дополнительного нагрева).
- «Токамак» является единственным термоядерным реактором в СНГ, который предназначен для испытания материалов будущих термоядерных реакторов в условиях воздействия плазмы, высоких температур и механических воздействий. Предполагается проводить исследования в рамках испытаний реакторов «Брест» на быстрых нейтронах с свинцово-висмутовым теплоносителем.

KTM



ЛИТЕРАТУРА

- 1. Кадомцев, Б.Б. Международный токамак-реактор ИТЕР. Фаза 1 / Б.Б.Кадомцев, В.И.Пистунович //Атомная энергия. – 1983. – Т. 54, В. 2.– С. 83.
- 2. Нагрев и сжатие термоядерных мишеней, облучаемых лазером / Н.Г. Басов [и др.] // Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. –1982.–Т. 26.–С.32.
- 3. Critical Physics Issues for Ignition Experiments / B. Coppi, A. Airoidi [et al.] // MIT RLE Report PTP 99/06. – 1999.
- 4. Takeda H. and JT-Team Improved particle control for high integrated plasma performance in Japan Atomic Energy Research Institute Tokamak-60 Upgrade / Takeda H. and JT-Team // Physics of Plasmas. – 2001 – Vol. 8. – P.2217

ЛИТЕРАТУРА

- 5.5.<http://dx.doi.org/10.1063/1.1357827>
- 6. Ohinishi, M. Self-ignition of an advanced fuel field-reversed configuration reactor by fusion product heating / M.Ohinishi, S.Ohi, M.Okamoto, H.Momota, J.Wakabayashi // Fusion Technol. –1987 – Vol. 12. – P. 249—256.
- 7. Momota H., Ishida A., Kohzaki Y. et al. Conceptual design of D–3He FRC reactor ARTEMIS. — Fusion Technol., 1992, vol. 21, p. 2307—2323.
- 8. <https://www.nkj.ru/archive/articles/2545>.
- 9. <https://www.inform.kz>