

Дисциплина «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»  
для специальности «Теплоэнергетика»

Дисциплина «Проектирование и эксплуатация установок возобновляемой  
энергетики»

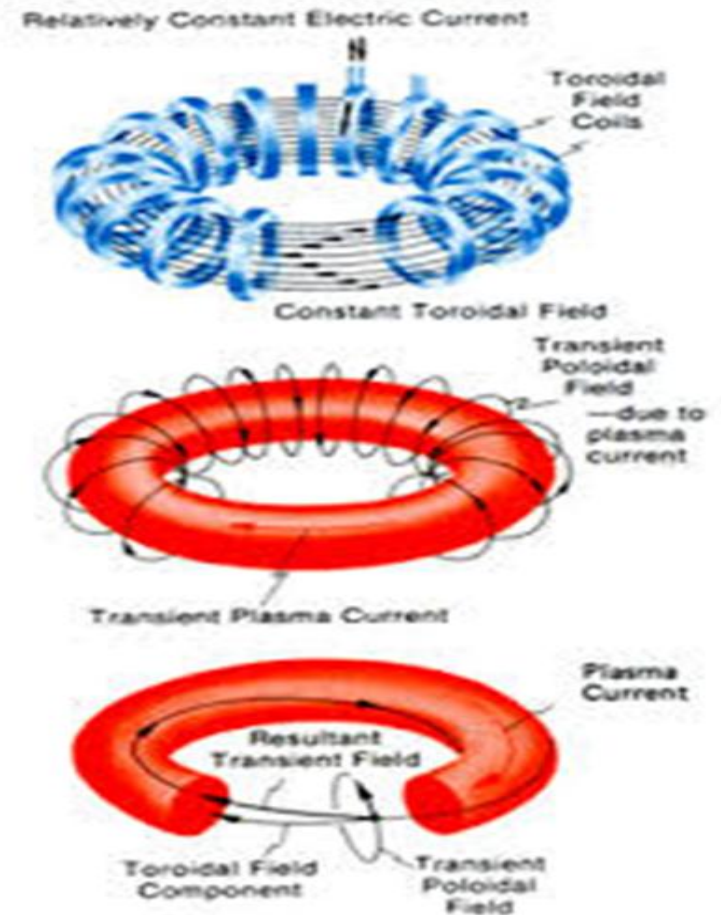
для специальности «Электроэнергетика»

Факультет энергетики, автоматики и телекоммуникации  
Кафедра «Энергетические системы»

**Калытка Валерий Александрович**

Доктор PhD; ассоциированный профессор (доцент); доцент кафедры  
«Энергетические системы»

# Лекция №10. Термоядерный синтез. Термоядерная энергетика



## Лекция № №10. Термоядерный синтез. Термоядерная энергетика

**Цель** лекции состоит в ознакомлении с физическими принципами и технологическими приложениями реакций термоядерного синтеза

Видеоролики:

1. Термоядерный синтез. Ловушка для Солнца  
(26 мин 03 сек)

<https://www.youtube.com/watch?v=BEPxdzr-6Ck>

2. Термоядерный синтез. Энергия будущего  
(25 мин 45 сек)

<https://www.youtube.com/watch?v=AFR4LGNZNRo&t=245s>

3. Меганаука. Термоядерный синтез  
(26 мин 17 сек)

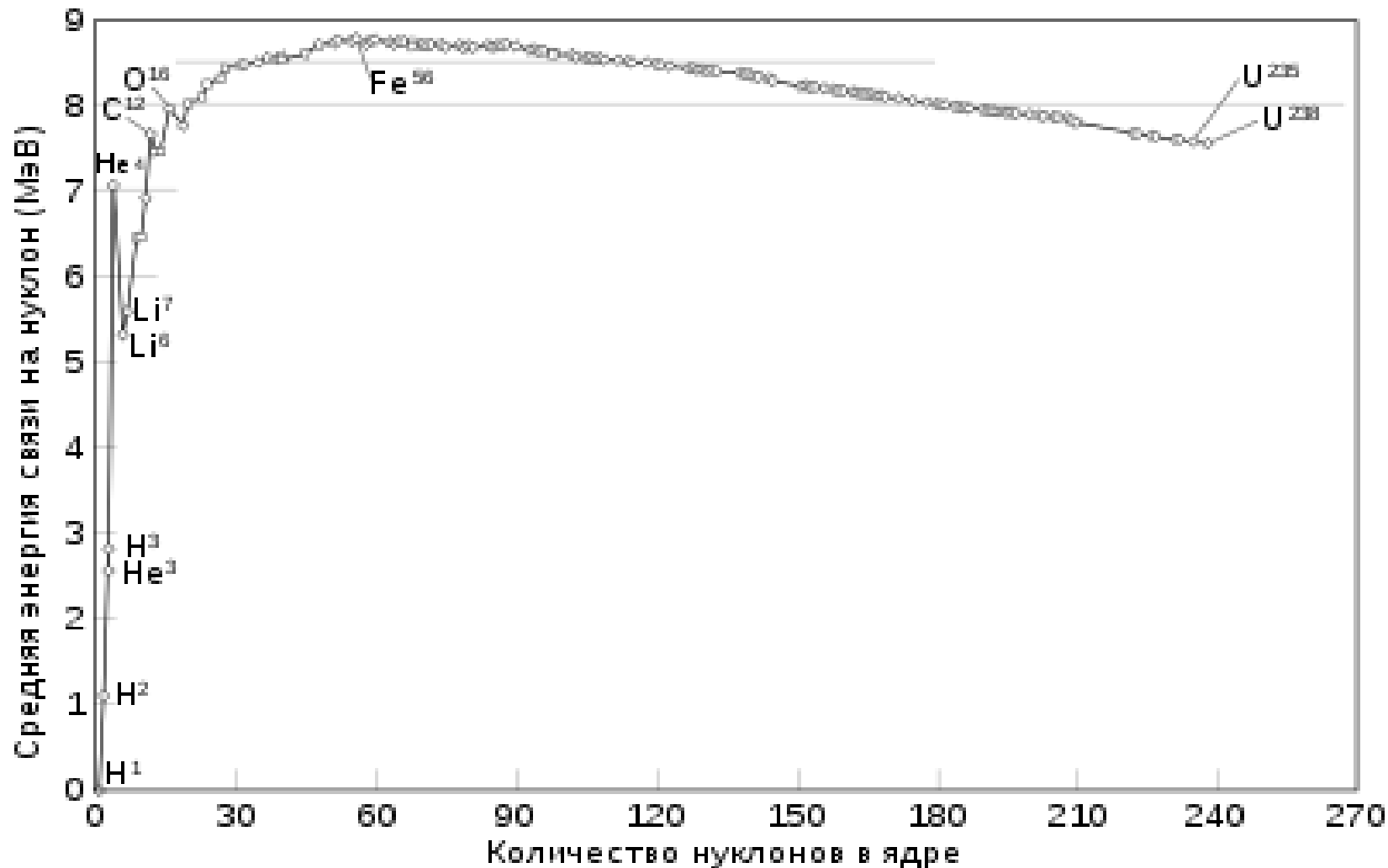
<https://www.youtube.com/watch?v=3-2a0aDyAD4&t=276s>

4. Термоядерные установки (1964 г.) (19 мин 56 сек)

<https://www.youtube.com/watch?v=A3233kp0ghI&t=449s>

- **Управляемый термоядерный синтез (УТС)** — синтез более тяжёлых атомных ядер в результате *эффекта слияния* более легких ядер с выделением энергии, которая, в отличие от взрывного (неуправляемого) термоядерного синтеза (используемого в термоядерных взрывных устройствах), носит управляемый характер. Управляемый термоядерный синтез отличается от традиционной ядерной энергетики тем, что в последней используется реакция распада, в ходе которой из тяжёлых ядер получаются более лёгкие ядра. В основных ядерных реакциях, которые планируется использовать в целях осуществления управляемого термоядерного синтеза, будут применяться дейтерий ( $^2\text{H}$ ) и тритий ( $^3\text{H}$ ), а в более отдалённой перспективе гелий-3 ( $^3\text{He}$ ) и бор-11 ( $^{11}\text{B}$ ).

Атомные ядра состоят из двух типов [нуклонов](#) — [протонов](#) и [нейтронов](#). Их удерживает вместе так называемое [сильное взаимодействие](#). При этом энергия связи каждого нуклона с другими зависит от общего количества нуклонов в ядре, как показано на графике. Из графика видно, что у лёгких ядер с увеличением количества нуклонов энергия связи растёт, а у тяжёлых падает. Если добавлять нуклоны в лёгкие ядра или удалять нуклоны из тяжёлых атомов, то эта разница в энергии связи будет выделяться в виде разницы между затратами на осуществление реакции и кинетической энергией высвобождающихся частиц. Кинетическая энергия (энергия движения) частиц переходит в тепловое движение атомов после соударения частиц с атомами. Таким образом ядерная энергия проявляется в виде нагрева.



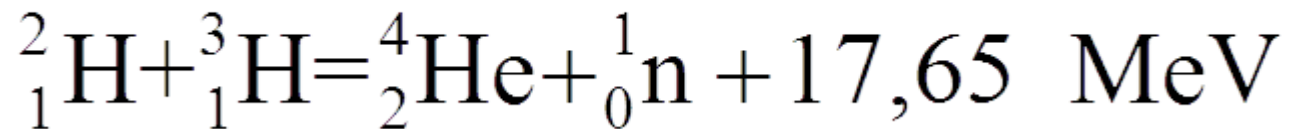
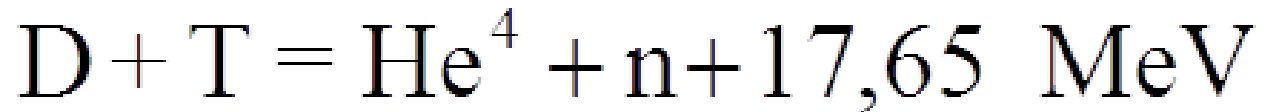
- Изменение состава ядра называется *ядерным превращением* или *ядерной реакцией*. Ядерная реакция с увеличением количества нуклонов в ядре называется *термоядерной реакцией* или *ядерным синтезом*. Ядерная реакция с уменьшением количества нуклонов в ядре — *ядерным распадом* или *делением ядра*.
- Протоны в ядре имеют электрический заряд, а значит, испытывают кулоновское отталкивание. В ядре это отталкивание компенсируется ***сильным взаимодействием***, удерживающим нуклоны вместе. Но сильное взаимодействие имеет радиус действия гораздо меньше среднего радиуса кулоновского отталкивания. Поэтому для слияния двух ядер в одно требуется сначала их сблизить, преодолевая кулоновское отталкивание. Известно несколько таких способов. В недрах звёзд это **гравитационные силы**. В ускорителях — **кинетическая энергия разогнанных ядер** или элементарных частиц. В термоядерных реакторах и термоядерном оружии — энергия теплового движения ядер атомов. В наше время гравитационные силы не подконтрольны человеку. Ускорение частиц настолько энергозатратно, что не имеет никаких шансов на положительный энергобаланс. И только тепловой метод выглядит пригодным для управляемого синтеза с положительным выходом энергии.

- Реакция синтеза заключается в следующем: два или более относительно лёгких атомных ядра в результате теплового движения сближаются настолько, что короткодействующее сильное взаимодействие, проявляющееся на таких расстояниях, начинает преобладать над силами кулоновского отталкивания между одинаково заряженными ядрами, в результате чего образуются ядра других, более тяжёлых элементов. Система нуклонов потеряет часть своей массы, равную энергии связи, и по известной формуле  $E=mc^2$  при создании нового ядра освободится значительная энергия сильного взаимодействия. Атомные ядра, имеющие небольшой электрический заряд, легче свести на нужное расстояние, поэтому тяжёлые изотопы водорода являются лучшим видом топлива для управляемой реакции синтеза.

- Установлено, что смесь двух [изотопов](#), дейтерия и трития, требует меньше энергии для реакции синтеза, по сравнению с энергией, выделяемой во время реакции. Однако, хотя смесь дейтерия и трития (D-T) является предметом большинства исследований синтеза, она в любом случае не является единственным видом потенциального горючего. Другие смеси могут быть проще в производстве; их реакция может надёжнее контролироваться, или, что более важно, производить меньше [нейтронов](#). Особенный интерес вызывают так называемые «безнейтронные» реакции, поскольку успешное промышленное использование такого горючего будет означать отсутствие долговременного радиоактивного загрязнения материалов и конструкции реактора, что, в свою очередь, могло бы положительно повлиять на общественное мнение и на общую стоимость эксплуатации реактора, существенно уменьшив затраты на вывод из эксплуатации и утилизацию. Проблемой остаётся то, что реакцию синтеза с использованием альтернативных видов горючего намного сложнее поддерживать, потому реакция D-T считается только необходимым первым шагом. Управляемый **термоядерный синтез** может использовать различные виды термоядерных реакций в зависимости от вида применяемого топлива.

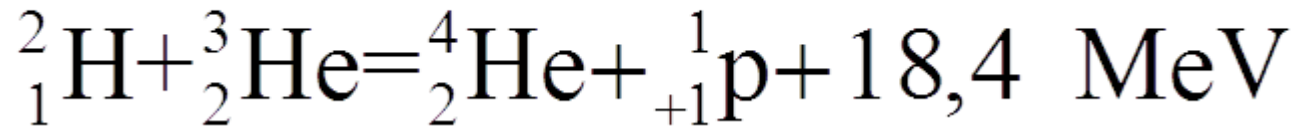
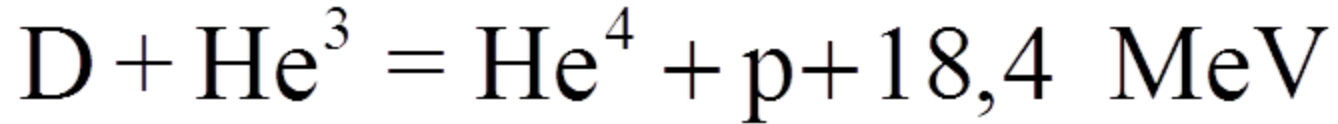


Реакция, осуществимая при наиболее низкой температуре. Два ядра: дейтерия (D) и трития (T) сливаются, с образованием ядра гелия (альфа-частица (3,55 MeV)) и высокоэнергетического нейтрона (14,1 MeV):



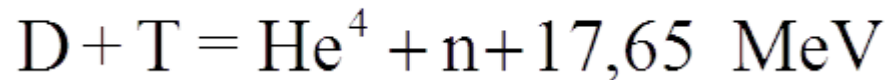
Такая реакция даёт значительный выход энергии. Недостатки — высокая цена трития, выход нежелательной нейтронной радиации

- Существенно сложнее, на пределе возможного, осуществить реакцию [дейтерий](#) + [гелий-3](#)



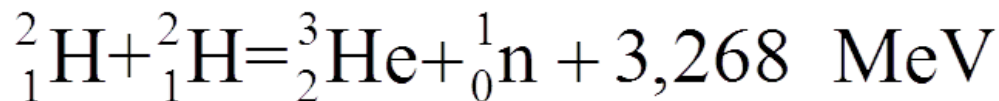
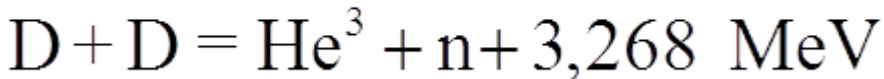
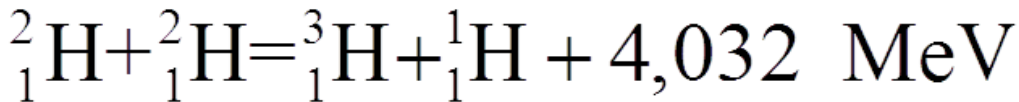
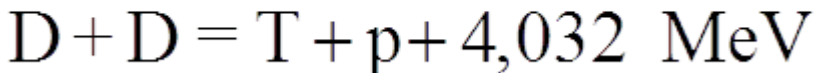
при энергетическом выходе 18,4 МэВ

Условия протекания реакции данного типа значительно сложнее, в сравнении с реакцией

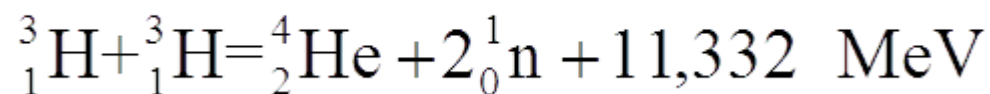
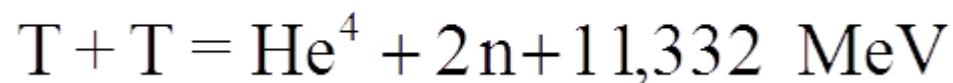
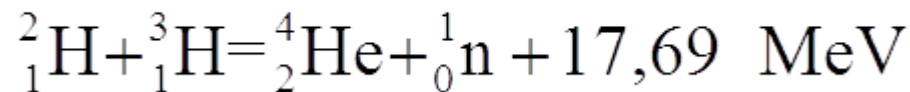
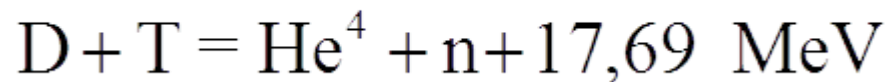
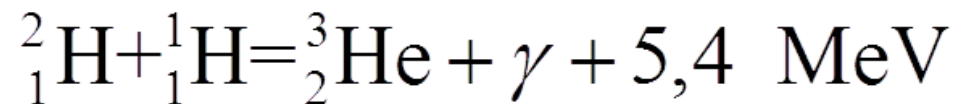
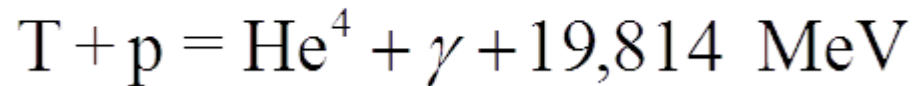
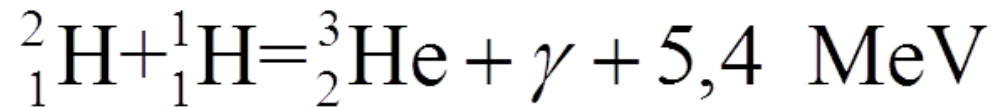
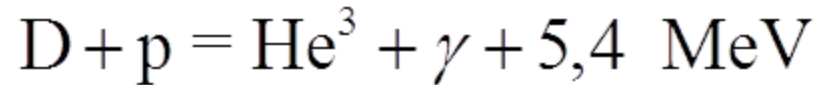


1. [Гелий-3](#), кроме того, является редким и чрезвычайно дорогим изотопом. В промышленных масштабах в настоящее время не производится.
2. Однако может быть получен из трития, получаемого в свою очередь на атомных электростанциях, или может быть добыт на [Луне](#)

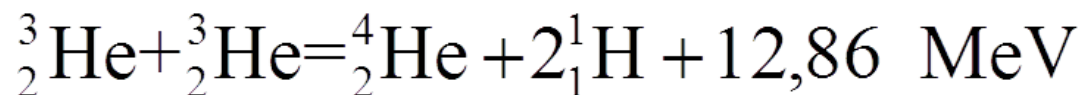
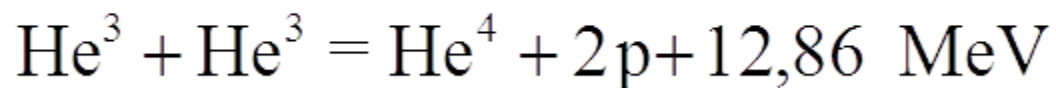
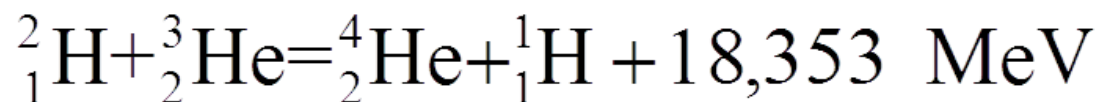
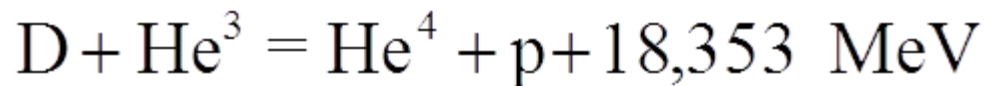
- **Реакция между ядрами дейтерия (D-D, монотопливо)**
- Также возможны реакции между ядрами [дейтерия](#), они идут немного труднее реакции с участием [гелия-3](#):



В дополнение к основной реакции в ДД-плазме также происходят:



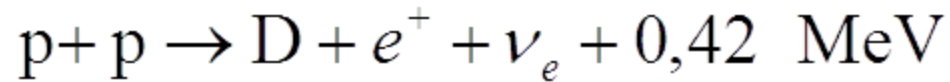
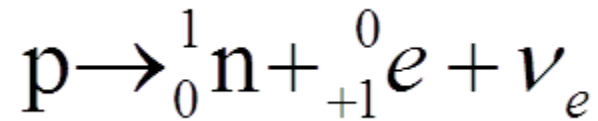
В дополнение к основной реакции в ДД-плазме также происходят:



Эти реакции медленно протекают параллельно с реакцией дейтерий + гелий-3, а образовавшиеся в ходе них тритий и гелий-3 с большой вероятностью немедленно реагируют с дейтерием.

## Реакции на лёгком водороде

Протон-протонные реакции синтеза, идущие в звёздах, не рассматриваются как перспективное термоядерное горючее. Протон-протонные реакции идут через слабое взаимодействие с излучением нейтрино, и по этой причине требуют астрономических размеров реактора для сколь-либо заметного энергосыделения.



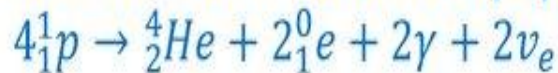
Протон-протонный цикл — совокупность термоядерных реакций, в ходе которых водород превращается в гелий в звёздах, находящихся на главной звёздной последовательности; основная альтернатива CNO-циклу. Протон-протонный цикл доминирует в звёздах с массой порядка массы Солнца или меньше, на него приходится до 98 % выделяемой энергии.

# Реакции ядерного синтеза

- Одним из видов ядерных реакций являются реакции синтеза легких ядер изотопов водорода, протекающие при сверхвысоких температурах. Поэтому такие реакции называются термоядерными:



Нельзя не упомянуть термоядерную реакцию, происходящую на солнце, осуществление которой даст человечеству практически безграничные возможности во всех сферах жизни:

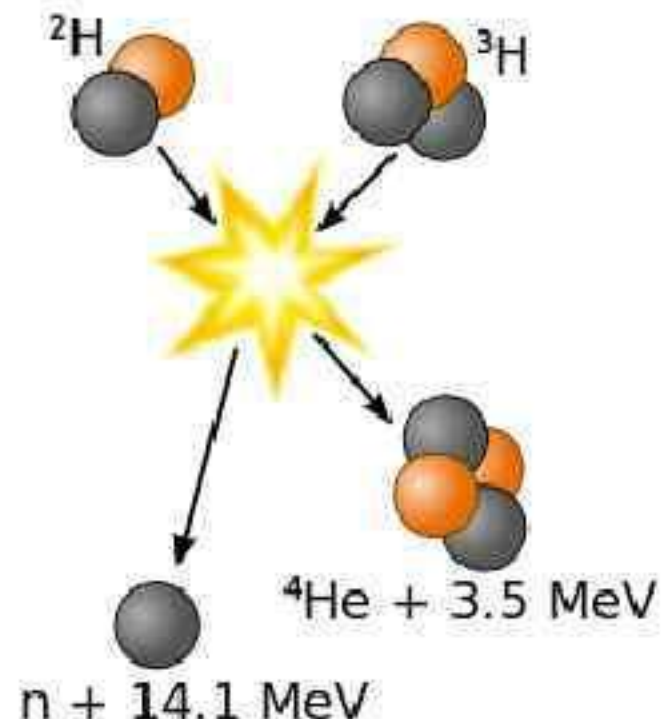
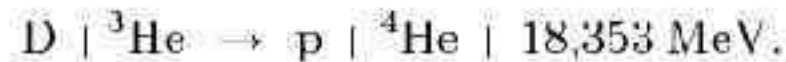
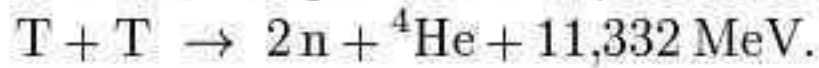
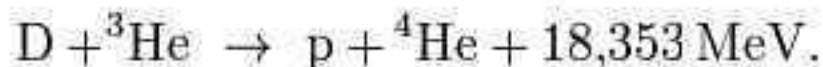
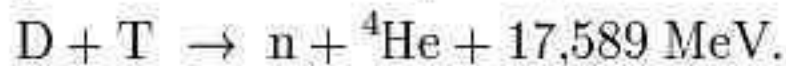
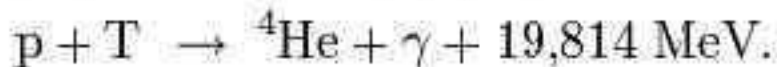
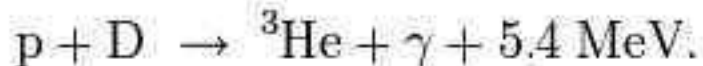
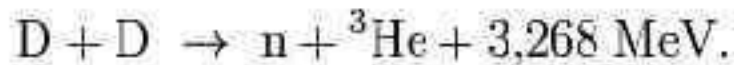


Превращение четырех протонов в ядро гелия с выделением энергии 26,72 МэВ

Ядерные реакции, протекающие в реакторах это распад тяжелых на более легкие. А в термоядерных реакциях наоборот происходит слияние легких ядер в тяжелые.



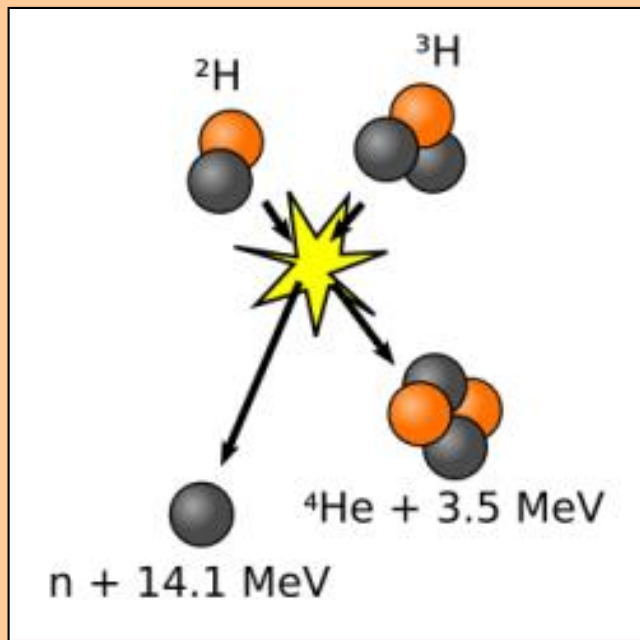
# Термоядерные реакции





# Условия протекания термоядерной реакции

---



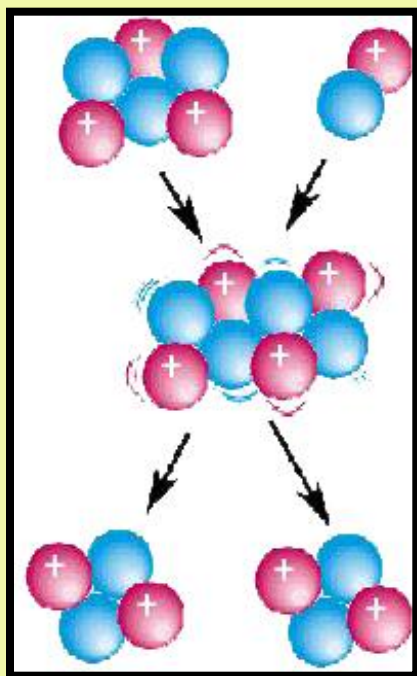
Для того, чтобы произошла реакция синтеза, исходные ядра должны попасть в сферу действия ядерных сил (сблизиться на расстояние  $10^{-15}$  м), преодолев силу электростатического отталкивания. Это возможно при большой кинетической энергии ядер. Для этого вещество должно иметь температуру  $10^8$  К.

Поэтому реакция названа «термоядерной» (от лат. *therme* - тепло).

# *Сравнение термоядерной энергии и выделяющейся при реакции горения*

*Синтез*

*4g гелия*



**=**

*Сгорание*

*2 вагонов каменного угля*



Управляемый термоядерный синтез возможен при одновременном выполнении двух условий:

1. Скорость соударения ядер соответствует температуре плазмы:  
 $T > 10^8$  К (для реакции D-T).

2. Соблюдение критерия Лоусона:  $n\tau \geq 10^{14} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}$

где  $n$  — плотность высокотемпературной плазмы,  $\tau$  — время удержания плазмы в системе. От значения этих двух критериев в основном зависит скорость протекания той или иной термоядерной реакции. Управляемый термоядерный синтез пока не осуществлён в промышленных масштабах. Наиболее трудная задача, стоящая на пути осуществления управляемого термоядерного синтеза, заключается в изоляции плазмы от стенок реактора

Строительство международного экспериментального термоядерного реактора (ITER) находится в начальной стадии.

## Конструкции реакторов

- Существуют две принципиальные схемы осуществления управляемого термоядерного синтеза, разработки которых продолжаются в настоящее время (2020):
- 1. Квазистационарные системы ( $n \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ;  $\tau \geq 1 \text{ с}$ ), в которых нагрев и удержание плазмы осуществляется магнитным полем при относительно низком давлении и высокой температуре. Для этого применяются реакторы в виде [токамаков](#), [стеллараторов](#) ([торсатронов](#)) и [зеркальных ловушек](#), которые отличаются конфигурацией магнитного поля. К квазистационарным реакторам относится реактор [ITER](#), имеющий конфигурацию токамака.
- 2. [Импульсные системы](#) ( $n \geq 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ;  $\tau \cong 10^{-8} \text{ с}$ ). В таких системах управляемый термоядерный синтез осуществляется путём кратковременного нагрева небольших мишеней, содержащих [дейтерий](#) и [тритий](#), сверхмощными [лазерными](#) лучами или пучками высокоэнергичных частиц ([ионов](#), [электронов](#)). Такое облучение вызывает последовательность термоядерных микровзрывов<sup>1</sup>.

Первый (квазистационарный) вид термоядерных реакторов разработан и изучен намного лучше, чем второй (импульсный).

В [ядерной физике](#), при исследованиях [термоядерного синтеза](#), для удержания [плазмы](#) в некотором объёме используется [магнитная ловушка](#) — устройство, удерживающее плазму от контакта с элементами [термоядерного реактора](#). Магнитная ловушка используется в первую очередь как [теплоизолятор](#). Принцип удержания плазмы основан на взаимодействии заряженных частиц с магнитным полем, а именно на спиральном вращении заряженных частиц вдоль силовых линий магнитного поля. Однако намагниченная плазма очень нестабильна. В результате столкновений заряженные частицы стремятся покинуть магнитное поле. Поэтому для создания эффективной магнитной ловушки используются мощные [электромагниты](#), потребляющие огромное количество энергии или применяются сверхпроводники.

Дейтерий

Тритий

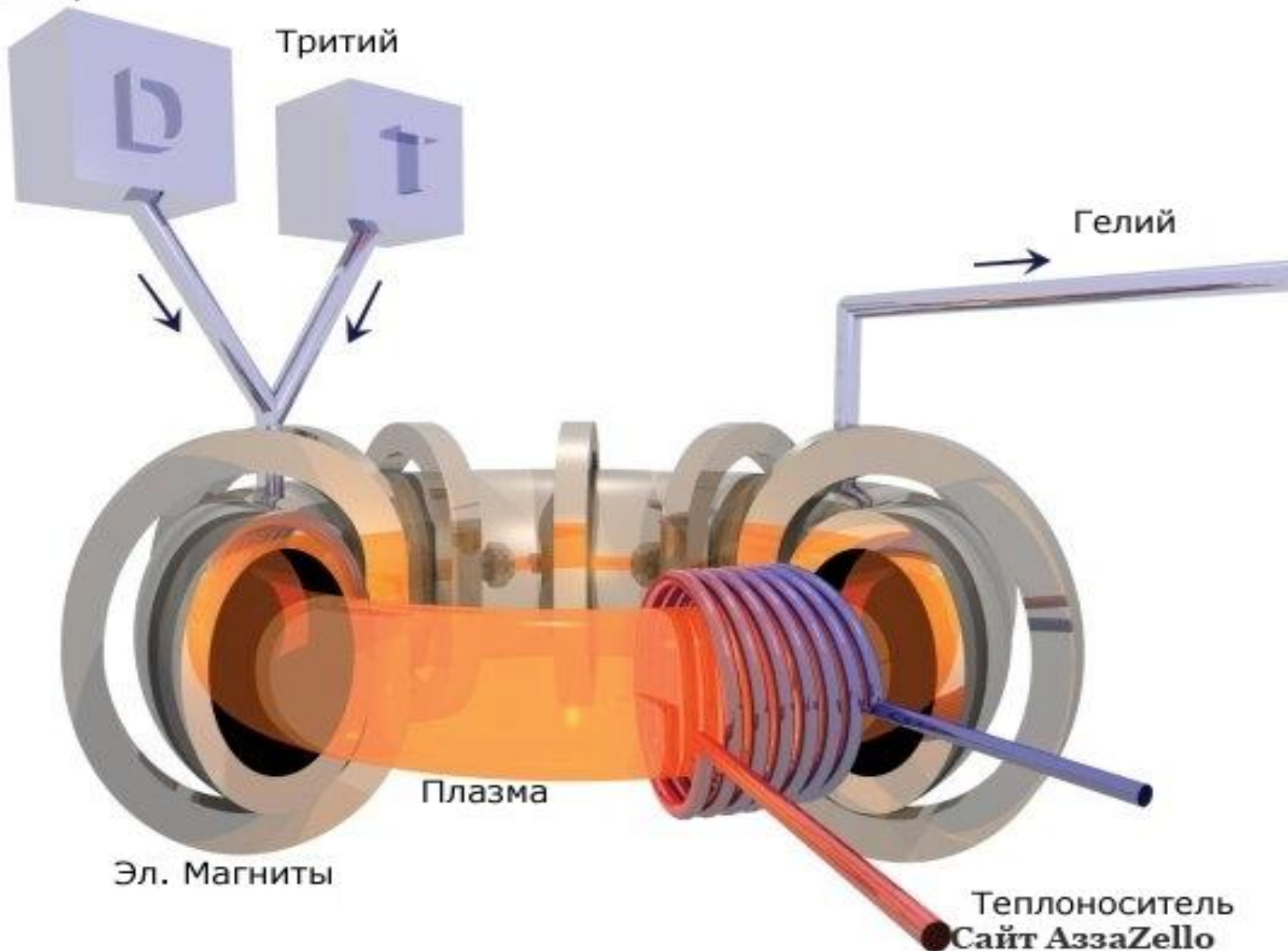
Гелий

Плазма

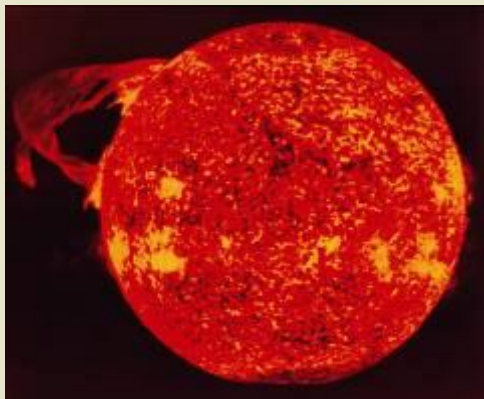
Эл. Магниты

Теплоноситель

Сайт AzzaZello  
[azza.telenet.ru](http://azza.telenet.ru)



# Неуправляемые термоядерные реакции



1. На Солнце уже миллиарды лет происходит неуправляемый термоядерный синтез. По одной из гипотез в недрах Солнца происходит слияние 4 ядер водорода в ядро гелия. При этом выделяется колоссальное количество энергии



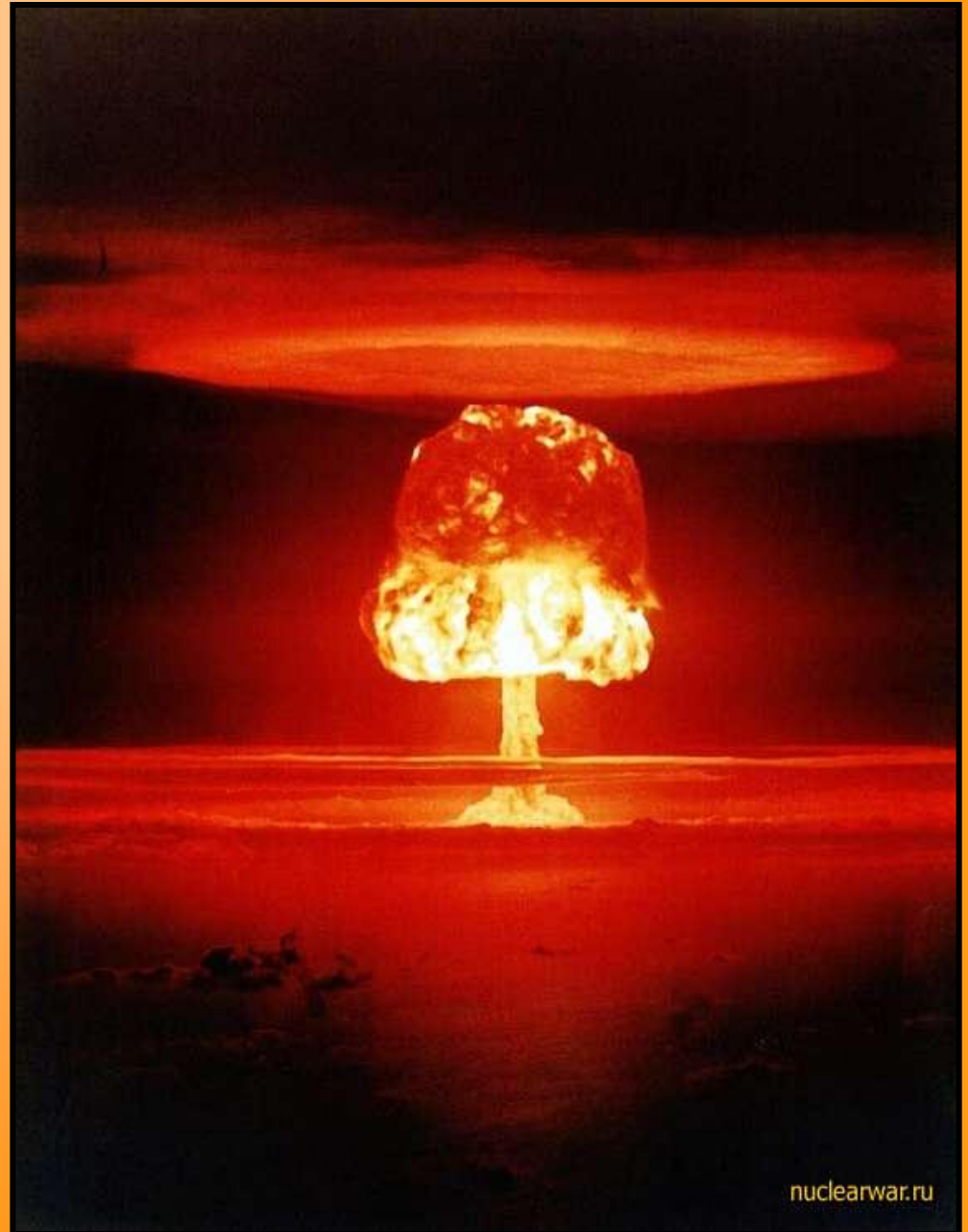
2. Водородная бомба.

Фотография взрыва первой французской термоядерной бомбы Канопус, которая была испытана 24 августа 1968 года во Французской Полинезии.



Самой мощной из испытанных бомб была водородная бомба мощностью 57 мегатонн (57 миллионов тонн тротилового эквивалента), создана в СССР.

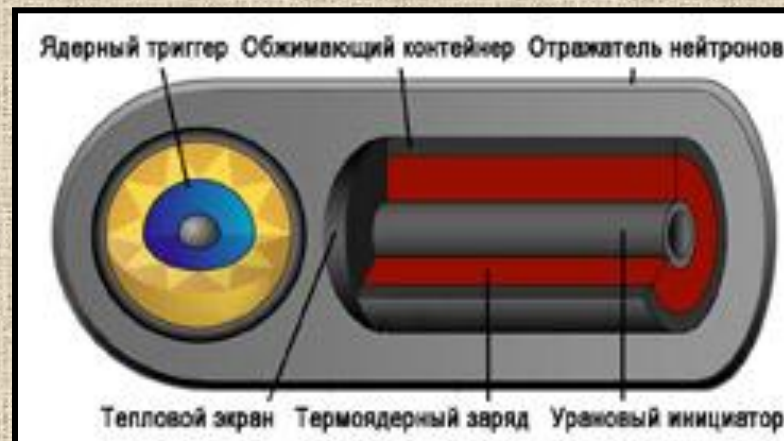
Среди разработчиков были Сахаров, Харитонов и Адамский. Утром 30 октября 1961 года в 11:32 бомба, сброшенная с высоты 10 км, достигла высоты 4000 метров над Новой Землей (СССР) и была приведена в действие. Место взрыва напоминало ад – землю устилал толстый слой пепла от сгоревших скал. В радиусе 50 километров от эпицентра все горело, хотя перед взрывом здесь лежал снег высотой в человеческий рост, в 400 километрах в заброшенном поселке были разрушены деревянные дома.. Мощность взрыва в 10 раз превысила суммарную мощность всех взрывчатых веществ, использованных во второй мировой войне.





## Механизм действия водородной бомбы.

Последовательность процессов, происходящих при взрыве водородной бомбы, можно представить следующим образом. Сначала взрывается находящийся внутри оболочки заряд-инициатор термоядерной реакции (небольшая атомная бомба), в результате чего возникает нейтронная вспышка и создается высокая температура, необходимая для инициации термоядерного синтеза. Нейтроны бомбардируют вкладыш из соединения дейтерия с литием-6. Литий-6 под действием нейтронов расщепляется на гелий и тритий. Затем начинается термоядерная реакция в смеси дейтерия с тритием, температура внутри бомбы стремительно нарастает, вовлекая в синтез все большее и большее количество водорода.



# Водородная бомба для стратегической авиации

*Самая первая  
водородная  
бомба,  
освоенная  
серийным  
производством  
и принятая  
на вооружение  
стратегической  
авиации.*

*Окончание  
разработки —  
1962 г.*



**Музей РФЯЦ–ВНИИТФ г.Снежинск.**

# ***Преимущества управляемой термоядерной реакции***

**Идея создания термоядерного реактора зародилась в 1950-х годах. В настоящее время (2010) управляемый термоядерный синтез ещё не осуществлён.**

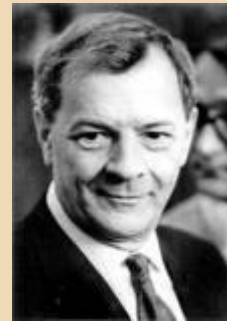
**Термоядерная энергетика, в которой используется абсолютно нерадиоактивный дейтерий и радиоактивный тритий, но в объемах в тысячи раз меньших, чем в атомной энергетике, будет более экологически чистой.**

**А в возможных аварийных ситуациях радиоактивный фон вблизи термоядерной электростанции не превысит природных показателей.**

**При этом на единицу веса термоядерного топлива получается примерно в 10 млн. раз больше энергии, чем при сгорании органического топлива, и примерно в 100 раз больше, чем при расщеплении ядер урана.**

**Источник этот практически неисчерпаем, он основан на столкновении ядер водорода, а водород - самое распространенное вещество во Вселенной.**

**Этой проблемой занимались в СССР И.В. Курчатов, А.Д. Сахаров, И.Е. Тамм, Л.А.Арцимович, Е.П. Велихов**

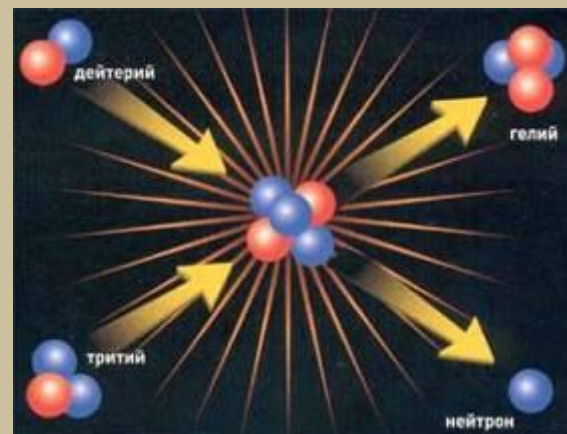
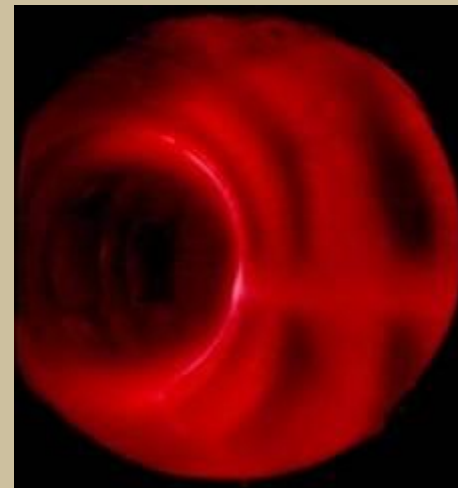


# Основные направления исследований УТС

Основная проблема – удержать газ при температуре  $10^7$  К (плазму) в замкнутом пространстве.

На данный момент достаточно интенсивно финансируются две принципиальные схемы осуществления управляемого термоядерного синтеза.

- **1. Квазистационарные системы**, в которых удержание плазмы осуществляется магнитным полем при относительно низком давлении и высокой температуре.
- **2. Импульсные системы**. В таких системах УТС осуществляется путем кратковременного нагрева небольших мишеней, содержащих дейтерий и тритий, сверхмощными лазерными или ионными импульсами. Такое облучение вызывает последовательность термоядерных микровзрывов.

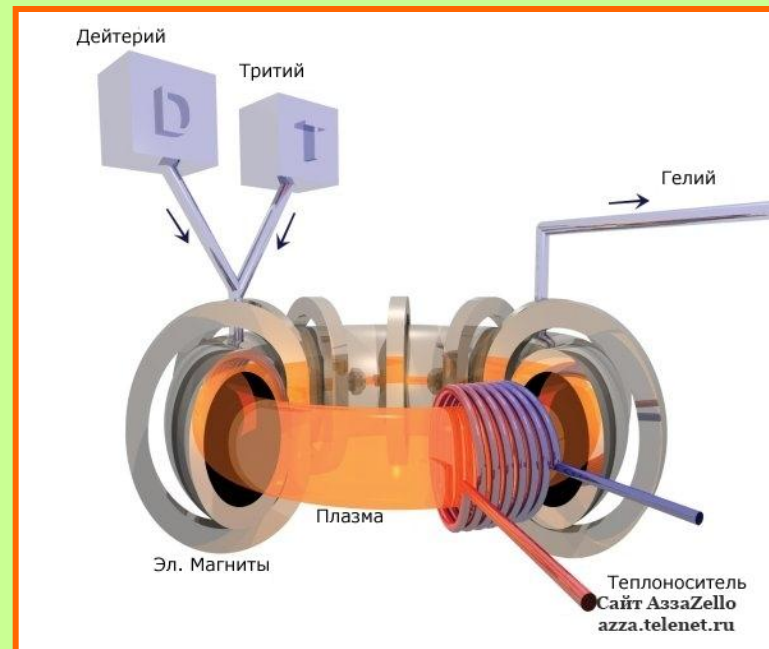




# Квазистационарные системы

**ТОКАМАК** — тороидальная вакуумная камера для магнитного удержания плазмы. Плазма удерживается магнитным полем, внутри которого плазменный «шнур» висит, не касаясь стенок камеры – «бублика». Впервые разработан в Институте атомной энергии им. Курчатова для исследования проблемы управляемого термоядерного синтеза. На камеру намотаны катушки для создания магнитного поля. Из вакуумной камеры сначала откачивают воздух, а затем заполняют её смесью дейтерия и трития. Затем, с помощью индуктора, в камере создают вихревое электрическое поле.

Индуктор представляет собой первичную обмотку большого трансформатора, в котором камера **ТОКАМАКа** является вторичной обмоткой. Вихревое электрическое поле вызывает протекание тока в плазме и её нагрев.

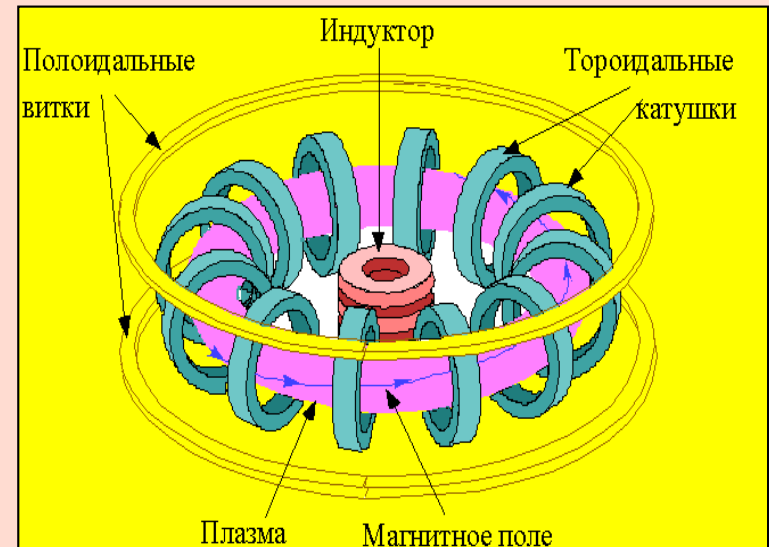


# Проблемы управляемого термоядерного синтеза в ТОКАМАКе

Пока удаётся получить плотность плазмы  $10^{14}$  частиц на  $\text{см}^3$  на время 1 с, что не позволяет пока запустить самоподдерживающуюся термоядерную реакцию. Производство плотности плазмы на время удержания должны быть в 20 раз больше, чем достигнуто сейчас.

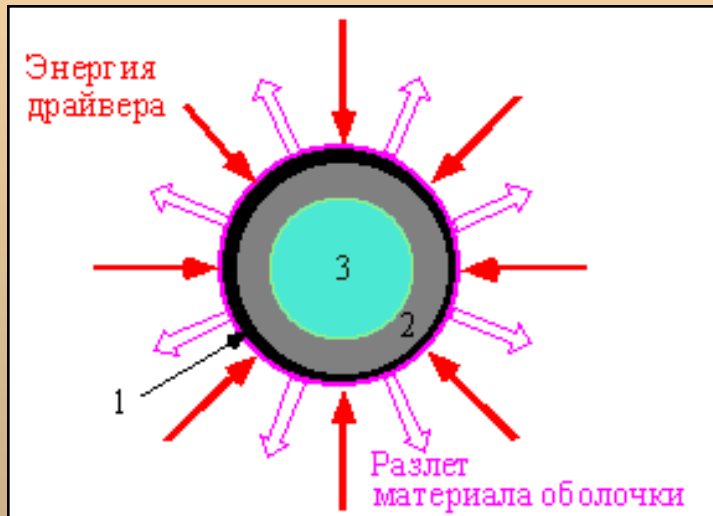
Для промышленного использования реакции термоядерного синтеза должны идти непрерывно в течение длительного времени. Чтобы добиться протекания реакции в требуемом масштабе, необходимо поднять давление в плазме.

Увеличение давления в плазме вызывает в ней процессы, отрицательно сказывающиеся на устойчивости этого состояния вещества. В ней возникают возмущения типа «шейки», «змейки», что ведёт к выбрасыванию плазмы на стенки камеры. Они разрушаются и плазма остывает. Магнитное поле должно препятствовать движению плазмы поперек силовых линий. Пока ТОКАМАК, магнитное поле которого создаётся при помощи сверхпроводящих электромагнитов, требует для удержания жгута плазмы больше энергии, чем выделяется вследствие слияния ядер.



# Импульсные системы

В таких системах УТС осуществляется путем кратковременного сжатия и сверхбыстрого нагрева небольших мишеней, содержащих дейтерий и тритий, сверхмощными многоканальными лазерами или ионными импульсами. Такое облучение вызывает в центре мишени термоядерную реакцию.



Мишень для УТС состоит из полый оболочки (1), слоя твердой замороженной ДТ смеси (2) и ДТ газа низкой плотности в центре мишени (3).

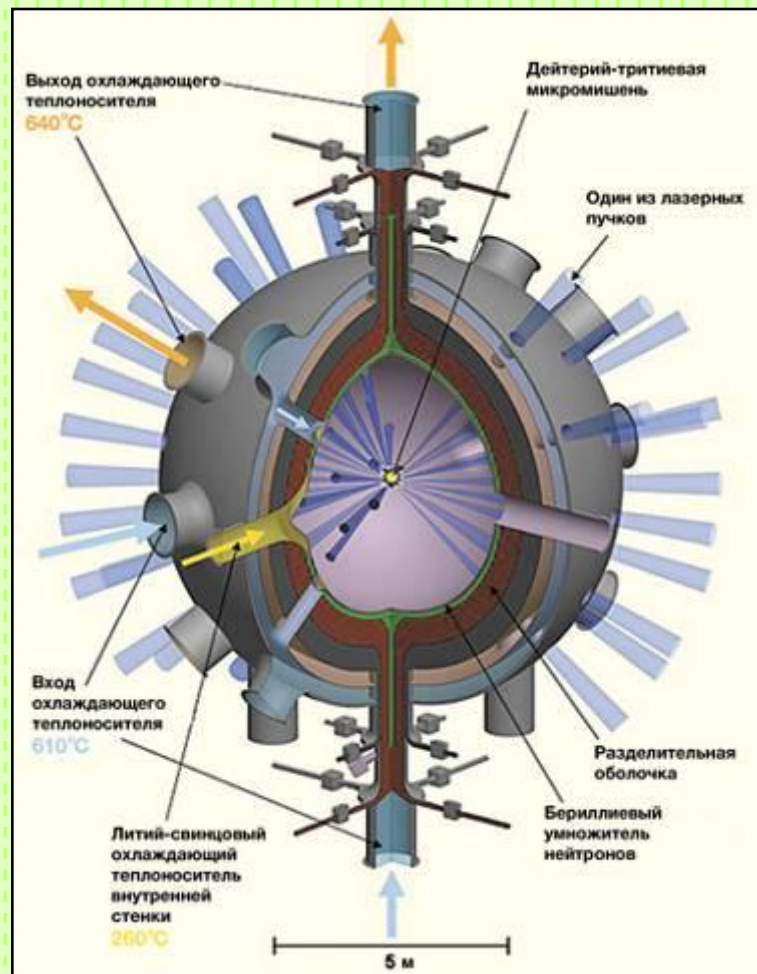
Главная идея - осуществление такого режима сжатия мишени, когда до температуры зажигания доводится лишь ее центральная часть, а основная масса топлива остается холодной. Затем волна горения распространяется к поверхностным слоям топлива.



# Ливерморская национальная лаборатория в Калифорнии - самый мощный в мире лазерный комплекс.

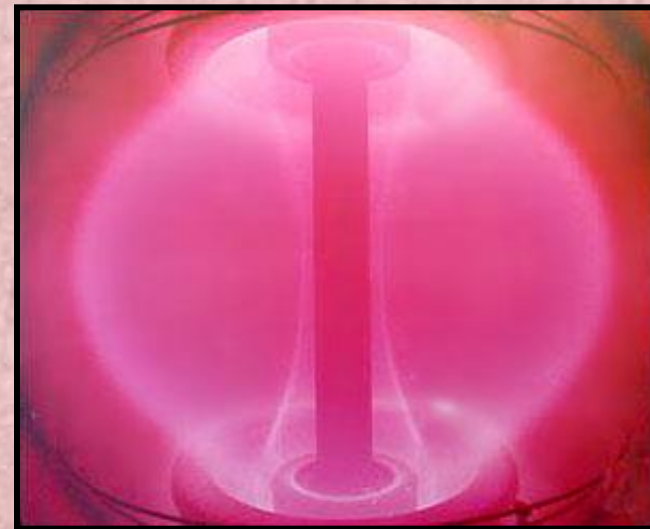
192 мощных лазера, которые будут одновременно направляться на миллиметровую сферическую мишень (около 150 микрограммов смеси дейтерия и трития). Температура мишени достигнет в результате 100 млн. градусов, при этом давление внутри шарика в 100 млрд. раз превысит давление земной атмосферы. То есть условия в центре мишени будут сравнимы с условиями внутри Солнца.

Импульсная термоядерная установка подобна двигателю внутреннего сгорания, в котором происходят взрывы горючего, периодически подаваемого в рабочую камеру. Трудности УТС заключаются в проблеме мгновенно и равномерно нагреть смесь. Расчеты показывают, что если достичь плотности в 1000 раз выше плотности твердого водорода, то одного миллиона джоулей будет достаточно для поджига термоядерной реакции. Но пока в экспериментальных установках плотность возрастает лишь в 30—40 раз. Основное препятствие — недостаточная равномерность освещения мишени.



# Термоядерный синтез-надежда современной энергетики

Термоядерный реактор будет потреблять очень небольшое количество лития и дейтерия. Например, реактор с электрической мощностью 1 ГВт будет сжигать около 100 кг дейтерия и 300 кг лития в год. Если предположить, что все термоядерные электростанции будут производить  $5 \cdot 10^{20}$  Дж в год, т.е. половину будущих потребностей электроэнергии, то общее годовое потребление дейтерия и лития составят всего 1500 и 4500 тонн. При таком потреблении содержащегося в воде дейтерия (0,015%) хватит на то, чтобы снабжать человечество энергией в течение многих миллионов лет.



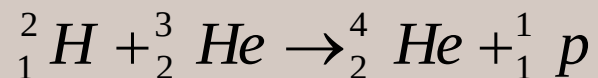
# Международный экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР

Проблема управляемого термоядерного синтеза настолько сложна, что самостоятельно с ней не справится ни одна страна. Поэтому мировое сообщество избрало самый оптимальный путь - создание проекта международного термоядерного экспериментального реактора - ИТЭР, в котором на сегодня участвуют, кроме России, США, Евросоюз, Япония, Китай и Южная Корея.

Термоядерный реактор будет построен в Кадараше (Франция) и введен в эксплуатацию примерно в 2016 году. Именно ТОКАМАК должен стать основой первого в мире экспериментального термоядерного реактора.



## *Топливо с Луны (гелий-3)*



Эта реакция требует более высоких температур, но является экологически чистой, поскольку выделяются не всепроникающие нейтроны, как в других ядерных реакциях, а заряженные протоны, которые несложно уловить без риска, что конструкционные материалы станут радиоактивными. Срок службы реактора значительно возрастает, конструкция упрощается, надежность возрастает. Так как протоны несут электрический заряд, возникает возможность прямого преобразования термоядерной энергии в электрическую, минуя потери на тепловое преобразование. На Земле гелия-3 всего 4 тысячи тонн. Для обеспечения России нужно приблизительно 20 тонн гелия-3 в год, для современной мировой экономики потребуется около 200 т гелия-3 в год. Его запасы в грунте Луны составляет около 1 млн. т. Добыча гелия-3 вполне по силам космическим ведомствам уже сейчас.





