

## Ядерная наука и технологии

### Освоение энергии термоядерного синтеза

#### Что следует знать?

Производство энергии при помощи термоядерного синтеза рассматривается как одна из наиболее масштабных технических задач в области энергетики. Множество исследователей и инженеров во всем мире изучают способы получения энергии синтеза, воссоздавая на Земле условия, в частности, плотность и температуру вещества, которые естественным образом поддерживаются внутри звезд.

В отличие от реакции деления ядер, когда для получения энергии атомы расщепляются, при термоядерном синтезе происходит слияние **легких атомных ядер** и образование более тяжелых атомных ядер с высвобождением энергии. Именно таким образом в звездах незначительное количество вещества превращается в огромное количество энергии. Без реакций термоядерного синтеза, лежащих в основе процессов внутри Солнца, жизнь на Земле была бы невозможна.

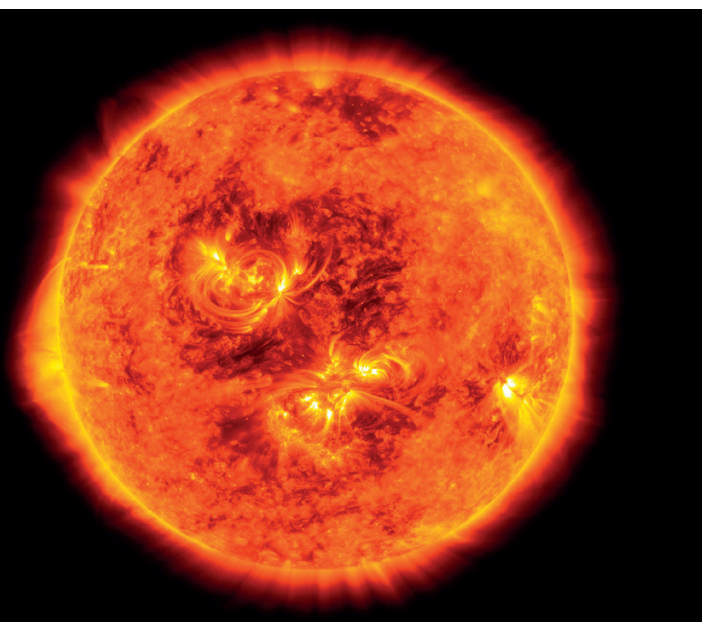
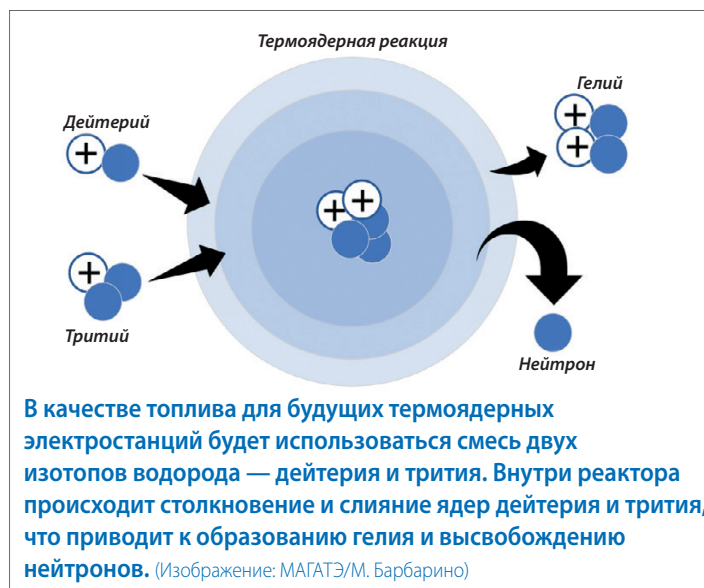
Несмотря на ожидаемые выгоды производства энергии для человечества с помощью термоядерного

синтеза, такие как обширные запасы и доступность топлива, отсутствие выбросов углекислого газа и высокорadioактивных отходов, практическое использование энергии синтеза остается одной из наиболее сложных областей экспериментальной физики и инженерно-технических работ: управление реакцией термоядерного синтеза при температурах более 100 млн градусов Цельсия представляет собой сложную, требующую громадных усилий задачу.

Если эту задачу удастся решить, то термоядерный синтез может стать практически неистощимым, безопасным, экологически чистым и повсеместно доступным источником энергии, способным удовлетворять глобальные энергетические потребности.

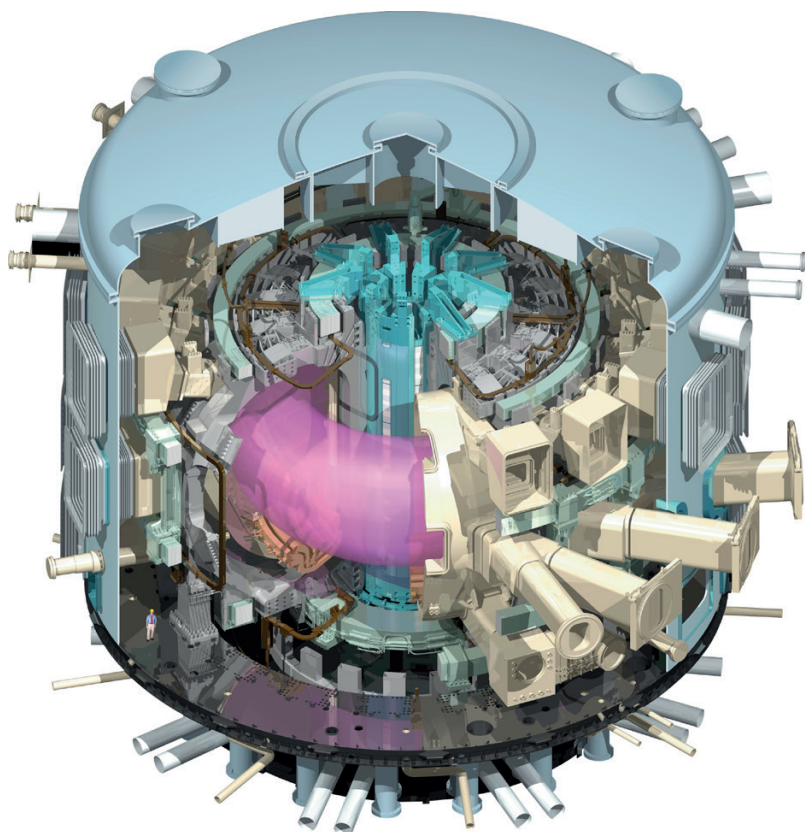
#### Как протекает термоядерная реакция?

В центре звезды, где вещество пребывает в состоянии плотной плазмы, при температурах, превышающих 10 млн градусов Цельсия, между атомами водорода происходят реакции слияния. Плазма представляет собой четвертое состояние вещества и обладает уникальными свойствами, отличающими ее от твердого, жидкого и газообразного вещества. Она состоит из свободного движущихся заряженных частиц и образуется при высоких температурах,



Солнце — единственный действующий на данный момент в Солнечной системе термоядерный реактор — вырабатывает большую часть всей энергии, используемой в нашей жизни.

(Изображение: NASA/SDO/AIA)



Токамак ИТЭР будет иметь высоту почти 30 метров и весить 23 000 тонн. Чтобы получить некоторое представление о масштабах этой установки, обратите внимание на изображенную на рисунке слева внизу крошечную фигуру человека. Конструкция токамака ИТЭР состоит из приблизительно одного миллиона деталей.

(Изображение: US ITER)

когда происходит отрыв электронов от нейтральных атомов. Согласно современным представлениям, более 99 процентов вещества во Вселенной, включая межзвездную материю и сами звезды, такие как наше Солнце, существует в виде плазмы.

Для работы энергетической установки на основе управляемого термоядерного синтеза должны выполняться три следующих условия:

1. сверхвысокие температуры (более 100 млн градусов Цельсия), при которых начинаются столкновения высокоэнергетических частиц;
2. достаточная концентрация частиц в плазме, где создаются условия реакции, для повышения вероятности таких столкновений;
3. приемлемая система удержания плазмы, обеспечивающая непрерывное протекание реакций термоядерного синтеза.

На сегодняшний день лучшие результаты удержания достигнуты на реакторах типа «токамак» (название происходит от русской аббревиатуры, означающей «тороидальную камеру с магнитными катушками»), изобретенных еще в 1950-х годах, в которых плазма с помощью мощных магнитов удерживается в кольцевой камере. В токамаках можно уже сейчас создавать необходимые для ядерного синтеза условия с точки зрения температуры и плотности плазмы, что позволяет запустить термоядерную реакцию. Однако

для того, чтобы обеспечить чистый выигреш по энергии, еще предстоит добиться более качественного и длительного удержания плазмы, которое определяется тем, насколько разогретая плазма может удерживаться магнитным полем в течение требуемого времени.

### Что представляет собой проект ИТЭР и почему он так важен?

ИТЭР («Международный термоядерный экспериментальный реактор») представляет собой реализуемый на основе сотрудничества 35 стран проект по осуществлению крупнейшего в мире эксперимента в области термоядерного синтеза. В настоящее время в местечке Сен-Поль-ле-Дюранс, Франция, идет сооружение реактора, а его эксплуатацию планируется начать в конце 2025 года.

Проект ИТЭР зародился в 2007 году в результате обсуждений на форумах МАГАТЭ, охвативших несколько инициатив, нацеленных на сотрудничество по линии международных исследований и развитие технологий в области термоядерного синтеза. Депозитарием Соглашения ИТЭР является Генеральный директор МАГАТЭ.

ИТЭР имеет целью наглядно показать осуществимость управляемой реакции термоядерного синтеза с намного большей отдачей энергии, чем все другие

проведенные на сегодняшний день эксперименты в данной области. Потребляя порядка 50 МВт энергии на разогрев плазмы, реактор, как планируется, сможет производить 500 МВт тепловой энергии в длительных импульсах мощности продолжительностью от 400 до 600 секунд. И хотя энергия, произведенная в ИТЭР, для выработки электричества использоваться не будет, данный проект подготовит почву для создания предназначенной для этого установки.

Следующим после ИТЭР этапом, на котором будет отрабатываться преобразование тепловой энергии в электрическую, станет демонстрационная термоядерная энергетическая установка, известная под аббревиатурой DEMO. Ожидается, что DEMO позволит изучить и продемонстрировать возможности непрерывной или близкой к непрерывной работы, топливной самодостаточности и производства энергии в промышленных масштабах, в том числе ее преобразование в электрическую, и примерно к 2050 году может быть подключен к энергосети.

### Образуются ли при ядерном синтезе радиоактивные отходы, как это происходит при делении ядра?

Самая простая для осуществления термоядерная реакция требует наличия двух изотопов водорода: дейтерия и трития. Тритий радиоактивен, однако имеет короткий период полураспада (12,32 года). Он используется в весьма малых количествах, поэтому, в отличие от долгоживущих радионуклидов, серьезной опасности не представляет.

В результате реакции «дейтерий-тритий» образуется атом гелия (инертного газа) и нейтрон, энергия которых может быть задействована, соответственно, для поддержания работы реактора и производства электроэнергии. Таким образом, термоядерные реакции не порождают долгоживущих радиоактивных отходов.

Тем не менее, ядерный синтез приводит к активации под воздействием нейтронного излучения материалов, окружающих плазму. Иными словами, когда нейтроны (образующиеся в результате термоядерной реакции) сталкиваются со стенками реактора, его конструкции и элементы становятся радиоактивными. Соответственно, одной из важных задач при сооружении будущих термоядерных электростанций станет оптимизация строительных конструкций в целях минимизации наведенной нейтронами радиоактивности и сокращения объемов образующихся в результате этого радиоактивных отходов.

### Какую роль играет МАГАТЭ в исследованиях в области термоядерной плазмы и термоядерного синтеза?

С момента своего создания в 1957 году МАГАТЭ поддерживает исследования в области термоядерного синтеза. Многочисленные мероприятия МАГАТЭ, связанные с термоядерными исследованиями, направляются [Международным советом по термоядерным исследованиям](#) — консультативным органом МАГАТЭ, в состав которого входят участники из многих стран мира.

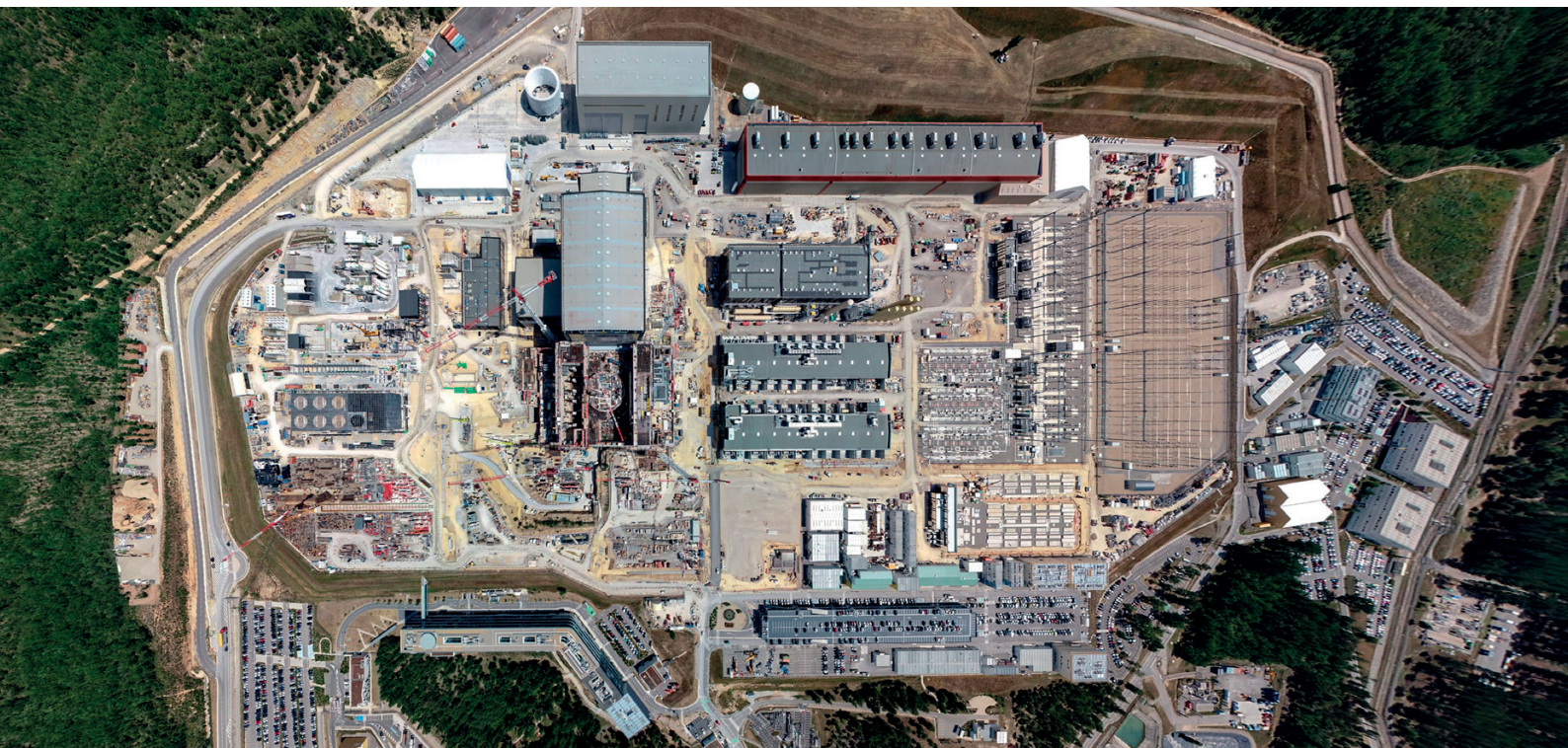
МАГАТЭ координирует международные усилия по проведению исследований и развитию технологий в области термоядерного синтеза, привлекая к этой работе, в том числе, физиков-ядерщиков, материаловедов, специалистов по ядерным данным, инженеров и экспертов по физике плазмы. Агентство организует также [Конференцию по энергии термоядерного синтеза](#) — крупнейшее в мире международное мероприятие по тематике термоядерного синтеза.

В рамках [семинаров-практикумов по программе DEMO](#) МАГАТЭ выступает в роли центра, координирующего разработку программ и запуск новых исследовательских и опытно-конструкторских проектов, направленных на разработку различных концепций демонстрационных термоядерных энергетических реакторов.

В последние годы МАГАТЭ работает над созданием руководств и справочных документов, предназначенных для специалистов, занимающихся термоядерным синтезом. Эти материалы призваны облегчить и оптимизировать различные процессы и обмен информацией в области термоядерных исследований и разработок. В частности, первым международным руководящим документом, касающимся термоядерного синтеза, стал недавно опубликованный технический документ МАГАТЭ [«Integrated Approach to Safety Classification of Mechanical Components for Fusion Applications»](#) («Комплексный подход к классификации безопасности механических элементов для применений в области термоядерного синтеза») (IAEA TECDOC No. 1851).

### Какую помощь оказывает МАГАТЭ в сфере создания потенциала?

Значительный вклад в развитие исследований и разработок в области термоядерного синтеза, а



## Строительство ИТЭР: вид сверху на строительную площадку ИТЭР в июне 2019 года.

(Фото: Организация ИТЭР)

также в подготовку необходимых руководств и соответствующих стандартов вносит сотрудничество между лабораториями и экспериментальными центрами по линии МАГАТЭ.

В рамках деятельности в области координированных исследований учреждены несколько сообществ по малым термоядерным устройствам, которые успешно используются для формирования комплексного подхода к поиску решений по ряду остающихся вопросов. В частности, с помощью этих сообществ организуются совместные эксперименты, в ходе которых эксперты из различных учреждений собираются вместе для того, чтобы провести испытания конкретной установки, тем самым обеспечивая разнообразие мнений и извлекая из эксперимента максимальные научные результаты. Другим примером международных инициатив, способствующих созданию потенциала в данной области, является серия мероприятий «Совместный колледж МФТР-МАГАТЭ по физике плазмы».

Деятельность МАГАТЭ направлена также на обучение и подготовку следующего поколения ученых и инженеров, специализирующихся на термоядерном синтезе. Это имеет особое значение, так как научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области термоядерного синтеза требуют все большего внедрения новейших технологий и выходят за рамки доступных на сегодняшний день ноу-хау.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Отдел физических и химических наук  
Международное агентство по атомной энергии  
Vienna International Centre  
PO Box 100, 1400 Vienna, Austria  
Эл. почта: [Fusion-physics@iaea.org](mailto:Fusion-physics@iaea.org)  
Веб-сайты:  
[nucleus.iaea.org/sites/fusionportal](http://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal)  
[www.iaea.org/topics/fusion](http://www.iaea.org/topics/fusion)  
[www.iaea.org/publications/nuclear-fusion](http://www.iaea.org/publications/nuclear-fusion)

Информационные буклеты МАГАТЭ издаются Бюро общественной информации и коммуникации  
Редактор: Аабха Диксит • Дизайн и верстка: Риту Кенн

С более подробной информацией о МАГАТЭ и его работе можно ознакомиться на сайте [www.iaea.org](http://www.iaea.org)  
или на наших страницах

или в ведущем издании Агентства «Бюллетень МАГАТЭ» по адресу: [www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)

МАГАТЭ, Венский международный центр, а/я 100, 1400 Вена, Австрия  
Эл. почта: [info@iaea.org](mailto:info@iaea.org) • Телефон: +43 (1) 2600-0 • Факс: +43 (1) 2600-7

