

Что такое термоядерный синтез?

Маттео Барбарино, Департамент ядерных наук и применений МАГАТЭ



Термоядерный синтез — это процесс, в ходе которого два легких атомных ядра объединяются в одно более тяжелое ядро с высвобождением огромного количества энергии.

Реакции синтеза происходят в агрегатном состоянии вещества, называемом плазмой — горячем заряженном газе, состоящем из положительных ионов и свободно движущихся электронов, который обладает уникальными свойствами, отличными от свойств твердых тел, жидкостей или газов.

Солнце, как и другие звезды, излучает энергию именно благодаря этой реакции. Для того чтобы внутри Солнца произошло слияние ядер, они должны столкнуться друг с другом при чрезвычайно высокой температуре, около десяти миллионов градусов Цельсия. Высокая температура дает им достаточно энергии, чтобы преодолеть взаимное электрическое отталкивание. Как только ядра преодолевают его и оказываются на очень близком расстоянии друг от друга, ядерная сила притяжения между ними перевешивает силу отталкивания и позволяет им слиться. Чтобы это произошло, ядра должны находиться в замкнутом пространстве, что увеличивает вероятность их столкновения. Идеальные условия для термоядерного синтеза на Солнце обеспечивает колоссальное давление, создаваемое мощной гравитацией.

Для чего ученые изучают термоядерные процессы?

С тех пор, как в 1930-х годах была сформулирована теория ядерного синтеза, многие ученые, такие как Ханс Бете, Пётр Капица и Игорь Тамм, а в последнее время и инженеры, стремились воспроизвести этот процесс и управлять им. Это связано с тем, что если ядерный синтез удастся запустить на Земле и реализовать в промышленных масштабах, то он сможет обеспечить практически

безграничное количество чистой, безопасной и доступной энергии для удовлетворения мировых потребностей.

Термоядерный синтез способен генерировать в четыре раза больше энергии на килограмм топлива, чем деление ядер (используемое на атомных электростанциях) и почти в четыре миллиона раз больше энергии, чем сжигание нефти или угля.

Большинство разрабатываемых концепций термоядерных реакторов предполагают использование смеси дейтерия и трития — атомов водорода, содержащих дополнительные нейтроны. Теоретически, используя всего несколько граммов этих реактивов, можно получить тераджоуль энергии — такого количества энергии одному жителю развитой страны может хватить примерно на шестьдесят лет.



Термоядерное топливо широко распространено и легко доступно: дейтерий может быть извлечен из морской воды, для чего не требуются дорогостоящие технологии, а тритий потенциально может быть получен в результате реакции нейтронов, генерируемых при термоядерном синтезе, с литием, широко доступным в природе. Этих запасов топлива хватит на миллионы лет. Также будущие термоядерные реакторы безопасны по своей природе и, как ожидается, не будут вырабатывать высокоактивные или долгоживущие ядерные отходы. Кроме того, поскольку процесс термоядерного синтеза трудно запустить и поддерживать, нет риска возникновения цепной реакции и расплавления реактора; термоядерный синтез может происходить только в строгих эксплуатационных условиях, вне которых (например, в случае аварии или отказа системы) плазма естественным образом остынет, очень быстро потеряет

свою энергию и погаснет, прежде чем реактору будет нанесен какой-либо существенный ущерб.

Важно отметить, что ядерный синтез, как и [деление ядер](#), не приводит к выбросу в атмосферу углекислого газа и других парниковых газов, поэтому во второй половине этого века он может стать долгосрочным источником низкоуглеродной электроэнергии.

Горячее солнца

На Солнце условия для термоядерного синтеза естественным образом создаются благодаря мощнейшей гравитационной силе, однако без этой силы для запуска реакции необходима температура даже выше, чем внутри Солнца. На Земле для синтеза дейтерия и трития необходима температура более 100 миллионов градусов Цельсия, и одновременно с этим должно регулироваться давление и магнитные силы, чтобы обеспечить стабильное удержание плазмы и поддержание реакции синтеза в течение достаточно долгого времени, чтобы произвести больше энергии, чем потребовалось для ее запуска.

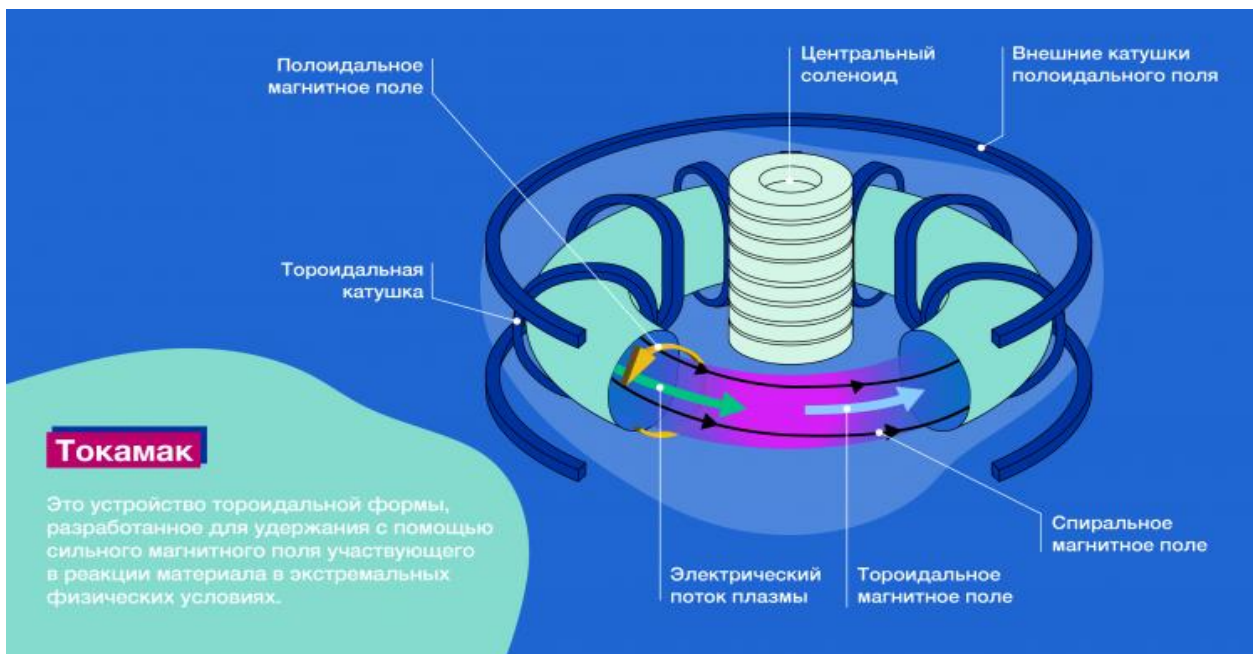
Хотя условия, очень близкие к необходимым для создания термоядерного реактора, в настоящее время регулярно воспроизводятся в ходе экспериментов, для поддержания реакции и устойчивого получения энергии все еще необходимо усовершенствовать методы удержания плазмы и обеспечения ее стабильности. Ученые и инженеры со всего мира продолжают разрабатывать и испытывать новые материалы и технологии для получения чистой термоядерной энергии.

Чего мы добились в развитии термоядерных технологий?

Исследования в области термоядерного синтеза и физики плазмы ведутся более чем в 50 странах, и термоядерные реакции были успешно запущены в ходе многих экспериментов, хотя пока и без выделения бóльшего количества энергии, чем изначально требовалось для запуска самой реакции. Специалистами уже были придуманы различные конструкции и установки на основе магнитов, в которых может происходить реакция термоядерного синтеза, такие как [стеллараторы](#), разработанные в США Лайманом Спитцером, и [токамаки](#), разработанные в СССР Андреем Сахаровым и Игорем Таммом, а также подходы, основанные на использовании [лазеров, линейных ускорителей и усовершенствованного топлива](#).

Сколько времени потребуется для успешного освоения термоядерной энергии будет зависеть от мобилизации ресурсов за счет создания глобальных партнерств и налаживания сотрудничества, а также от того, насколько быстро промышленность сможет разработать, проверить и сертифицировать новые термоядерные технологии. Другим важным вопросом является параллельное развитие необходимой ядерной инфраструктуры, в том числе требований,

стандартов и передового опыта, необходимых для работы с этим будущим источником энергии.



После 10 лет проектирования, подготовки площадки и производства компонентов по всему миру, в 2020 году во Франции началась сборка ИТЭР — крупнейшей в мире международной термоядерной установки. ИТЭР — это международный проект, целью которого является демонстрация научной и технологической осуществимости производства термоядерной энергии, а также отработка технологий и концепций для будущих демонстрационных термоядерных энергетических установок, называемых DEMO. ИТЭР начнет осуществлять свои первые эксперименты во второй половине этого десятилетия, а эксперименты на полной мощности планируется начать в 2036 году.



Временные рамки реализации программ DEMO в разных странах варьируются, но эксперты сходятся во мнении, что термоядерная электростанция, вырабатывающая электроэнергию, может быть построена и запущена к 2050 году. Параллельно с этим, определенные успехи в разработке концепций термоядерных электростанций также достигаются многочисленными коммерческими предприятиями, финансируемыми из частных источников. Опираясь на знания, накопленные за годы исследований и разработок, финансируемых государством, они стремятся обуздать термоядерную энергию еще раньше.

Какую роль играет МАГАТЭ?

МАГАТЭ уже давно находится в центре международных исследований и разработок в области термоядерного синтеза и недавно начало поддерживать инициативы по разработке и внедрению технологий на ранних стадиях.

- Для обмена информацией о достижениях в области ядерного синтеза МАГАТЭ начало выпускать в 1960 году [журнал](#), посвященный термоядерному синтезу. В настоящее время этот журнал считается ведущим периодическим изданием в данной области. МАГАТЭ также регулярно публикует [технические документы](#), информационные и образовательные материалы по термоядерному синтезу.
- Первая международная Конференция МАГАТЭ по энергии термоядерного синтеза была проведена в 1961 году, а с 1974 года МАГАТЭ созывает конференцию каждые два года, чтобы способствовать обсуждению разработок и достижений в этой области. Посмотрите короткий фильм об [истории](#) этой серии конференций.
- С 1971 года свой вклад в укрепление международного сотрудничества в области термоядерных исследований вносит [Международный совет МАГАТЭ по исследованиям термоядерного синтеза](#).
- [Соглашение по ИТЭР](#) передано на хранение Генеральному директору МАГАТЭ. Партнерство между МАГАТЭ и Организацией ИТЭР [осуществляется на основе соглашения о сотрудничестве](#), подписанного в 2008 году, которое было [расширено](#) в 2019 году.
- МАГАТЭ содействует международному сотрудничеству и координации деятельности по программам DEMO во всем мире.
- МАГАТЭ проводит ряд технических мероприятий и координированных исследований по темам, связанным с физикой термоядерного синтеза и разработкой и внедрением соответствующих технологий, а также организует и поддерживает образовательные и учебные мероприятия по термоядерному синтезу.
- МАГАТЭ администрирует цифровые базы основных данных по исследованиям термоядерной энергии, а также [Информационную систему по термоядерным устройствам \(FusDIS\)](#), в которой собрана информация о термоядерных устройствах, эксплуатируемых, строящихся или проектируемых по всему миру.
- МАГАТЭ осуществляет проект, посвященный синергизму развития технологий на стыке использования ядерных реакций деления и синтеза для производства энергии, а также обеспечению долгосрочной устойчивости — включая обращение с радиоактивными отходами — и правовым и институциональным вопросам в области термоядерных установок.

- МАГАТЭ изучает ключевые аспекты безопасности, охватывающие весь жизненный цикл термоядерных установок, что предполагает выпуск соответствующих руководящих материалов и специализированных справочных документов.
- МАГАТЭ содействует предварительному обоснованию типовой демонстрационной установки термоядерного синтеза.