

## Поведение плазмы на периферии токамака



Ученые Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе впервые в мире провели исследование поведения электрического поля и скорости вращения плазмы во время периферийных локализованных мод (ELM) — быстрых и коротких всплесков активности, которые неизбежно возникают во время работы термоядерных установок. Исследователи экспериментально определили природу перераспределения энергии, тока и электрического поля в краевой плазме, которая при неблагоприятном раскладе способна повредить стенки реактора. Исследование механизмов этих процессов необходимо на пути к надёжной термоядерной энергетике. Результаты опубликованы в авторитетном журнале XXXXXXXXXX, исследование поддержано грантом РФФИ.

В токамаке плазма удерживается магнитным полем и напоминает очень горячую среду, в которой постоянно возникают колебания, потоки и неустойчивости. Одной из самых важных неустойчивостей являются периферийные локализованные моды, или ELM (Edge localized modes). Для эффективного термоядерного синтеза плазма в токамаке должна находиться в так называемом H-режиме (режиме улучшенного удержания). В этом состоянии на краю плазмы формируется невидимый барьер, который как стенка удерживает тепло внутри. Однако из-за огромной разницы давления на этом барьере периодически случаются срывы — периферийные локализованные моды. Их можно сравнить с предохранительным клапаном: они периодически стравливают излишки энергии и примесей, не давая плазме выйти из-под контроля. Но если этот клапан срабатывает слишком сильно, удар по стенкам камеры может быть разрушительным для всей установки.

Современные подходы к изучению физики плазмы полагали опасными лишь крупные ELM, а малые считались не только безопасными, но и почти идеальными для работы термоядерной установки: удержание плазмы хорошее, а разрушительных крупных всплесков нет. Ученые Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе провели эксперименты на сферическом токамаке Глобус-М2 и впервые в мире определили, как периферийные локализованные моды глубоко перестраивают всю периферийную область плазмы.

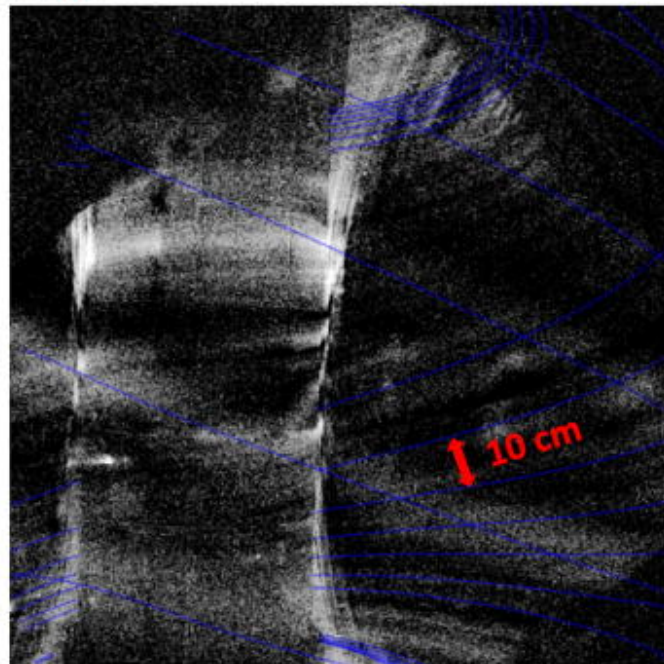
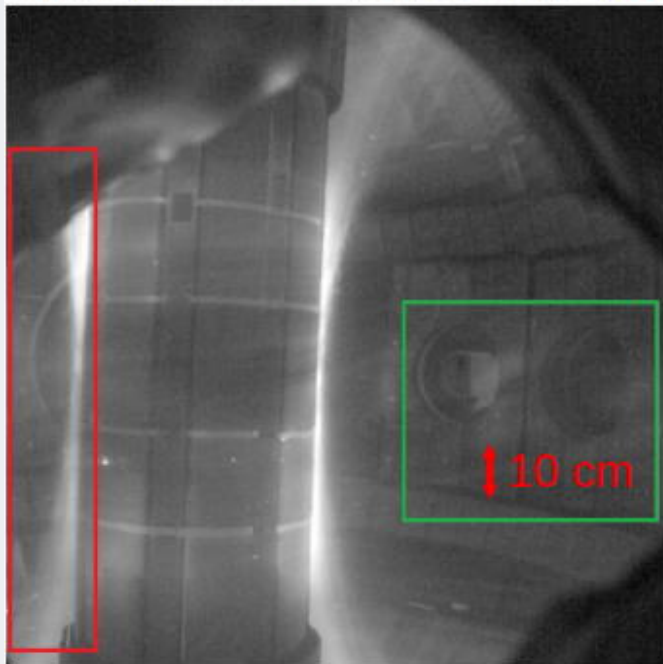
*«Эксперименты показали, что во время ELM резко растут температура и концентрация плазмы в приграничной области, заметно изменяются токи в области вне плазмы, происходит перенос и ускорение быстрых ионов, а также потери надтепловых электронов, формируются плазменные филаменты. Было показано, что скорость вращения плазмы возрастает во время ELM, причём эффект распространяется на несколько сантиметров внутрь плазмы, а не ограничивается узким слоем развития ELM, как считалось ранее. И всё это происходит за микросекунды, то есть чрезвычайно быстро. По отдельности малые ELM выглядят безобидно, но вместе формируют интенсивную и сложную динамику периферии плазмы. Малые ELM — это не просто ослабленные всплески, а самостоятельный динамический режим, в котором периферия плазмы живёт по своим быстрым и сложным законам», — отметил лаборант-исследователь Научной лаборатории перспективных методов исследования плазмы сферических токамаков Физико-механического института СПбПУ Арсений Токарев.*

По результатам измерений выяснилось, что температура электронов в приграничной области во время ELM увеличивается до 5 раз, концентрация возрастает примерно в 2 раза, скорость вращения плазмы увеличивается примерно на 50% на глубине до нескольких сантиметров, быстрые ионы регистрируются с энергией на 6 кэВ выше энергии инъекции, филаменты движутся со скоростью 3–10 км/с.

*«Практическая значимость полученных результатов для будущего мировой термоядерной энергетики огромна, так как они дают более реалистичное понимание нагрузок на стенки термоядерных установок. Будущие термоядерные реакторы должны работать долго и непрерывно, а не в виде коротких экспериментальных импульсов. Режимы с малыми ELM считаются основными кандидатами для такого режима. Кроме этого, получены уникальные данные о поведении параметров плазмы во время ELM, в частности, скорости вращения, которая была измерена впервые в мире. Это помогает перейти от эмпирического подбора режимов работы к осознанному управлению и снижает риск неожиданных эффектов при масштабировании от экспериментальных установок к реактору. Результаты помогут сделать будущий термоядерный реактор не просто работоспособным, а надёжным, предсказуемым и экономически оправданным», — отметил кандидат физико-математических наук, заведующий научной лабораторией «Диагностика высокотемпературной плазмы» Физико-механического института СПбПУ Александр Яшин.*

Исследования выполнены за счет гранта РФФИ № 23-72-00024 с использованием Федерального центра коллективного пользования «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» ФТИ им. А. Ф. Иоффе, включающего Уникальную научную установку «Сферический токамак Глобус-М».

Shot 45006,  $t = 146.534\dots146.536$  ms



Кадры быстрой камеры, на которых видны яркие линии — филаментарные структуры, синим выделены линии магнитного поля, вдоль которых филаменты и вытянуты.