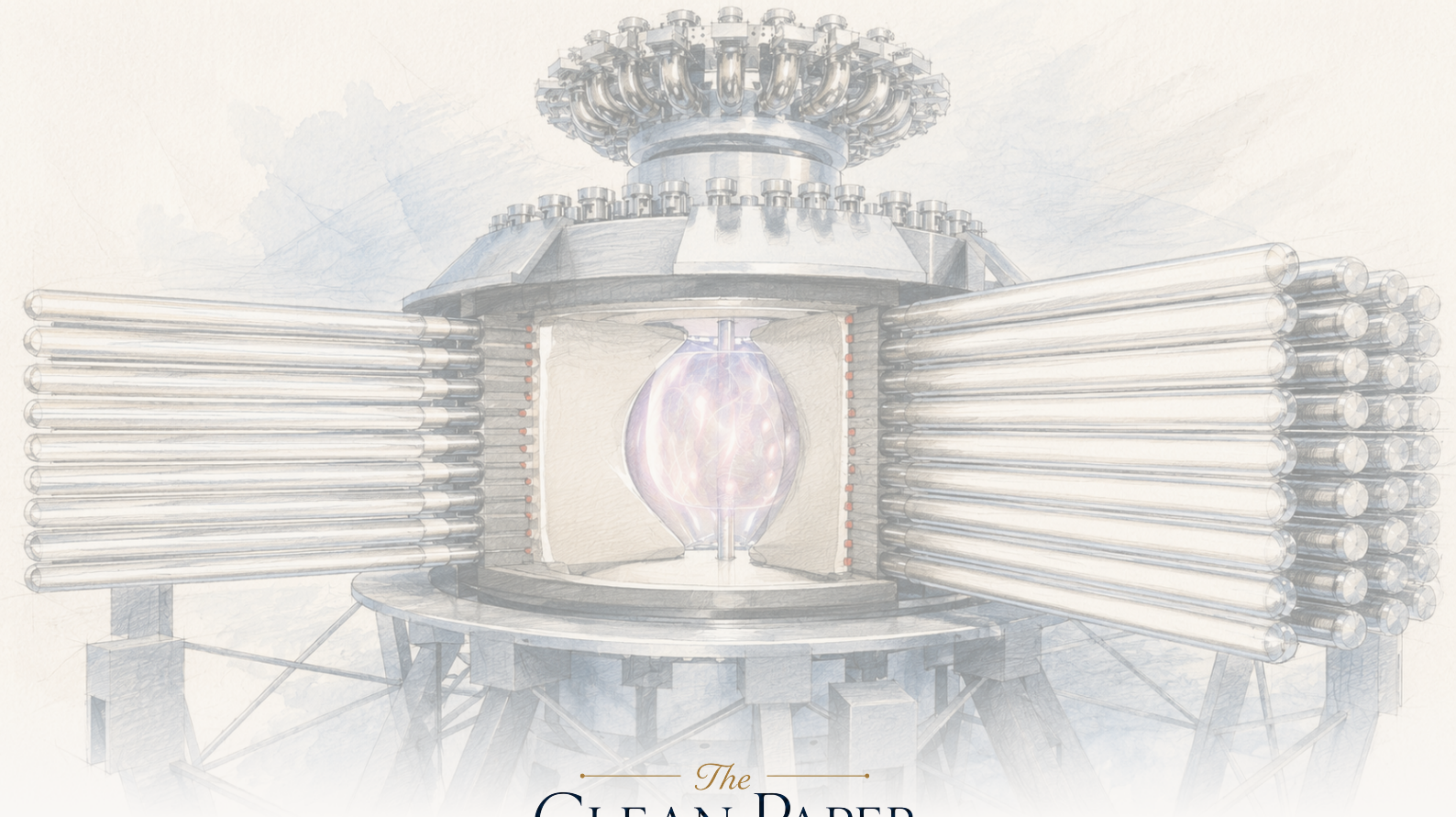


The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Термоядерная установка нагрела плазму, сжимая её — реальный шаг, но ещё не электростанция

LM26 компании General Fusion сжала намагниченную дейтериевую плазму оболочкой из лития, коллапсировавшей внутрь, и наблюдала её нагрев — температура электронов выросла более чем втрое до измеренного пика около 0,72 keV (718 ± 80 eV, примерно 8 миллионов °C), причём большую часть нагрева приписали самому сжатию — механизму, от которого зависит подход с намагниченной мишенью. Это реальная инженерная контрольная точка на этом пути к синтезу. Но это также лишь первые 11 импульсов на одной машине, описанные в нерецензированном препринте компании, при температуре всё ещё примерно в десять раз ниже необходимой горящей плазме, — без чистого энергетического выигрыша, без паритета и без электроэнергии. Показан механизм, а не построена электростанция.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *The science of compressional heating on the LM26 magnetized target fusion experiment*, S. J. Howard et al. (General Fusion), arXiv:2606.23974 [physics.plasm-ph] (preprint) · DOI: 10.48550/arXiv.2606.23974

Термоядерная установка нагрела плазму, сжимая её — реальный шаг, но ещё не электростанция

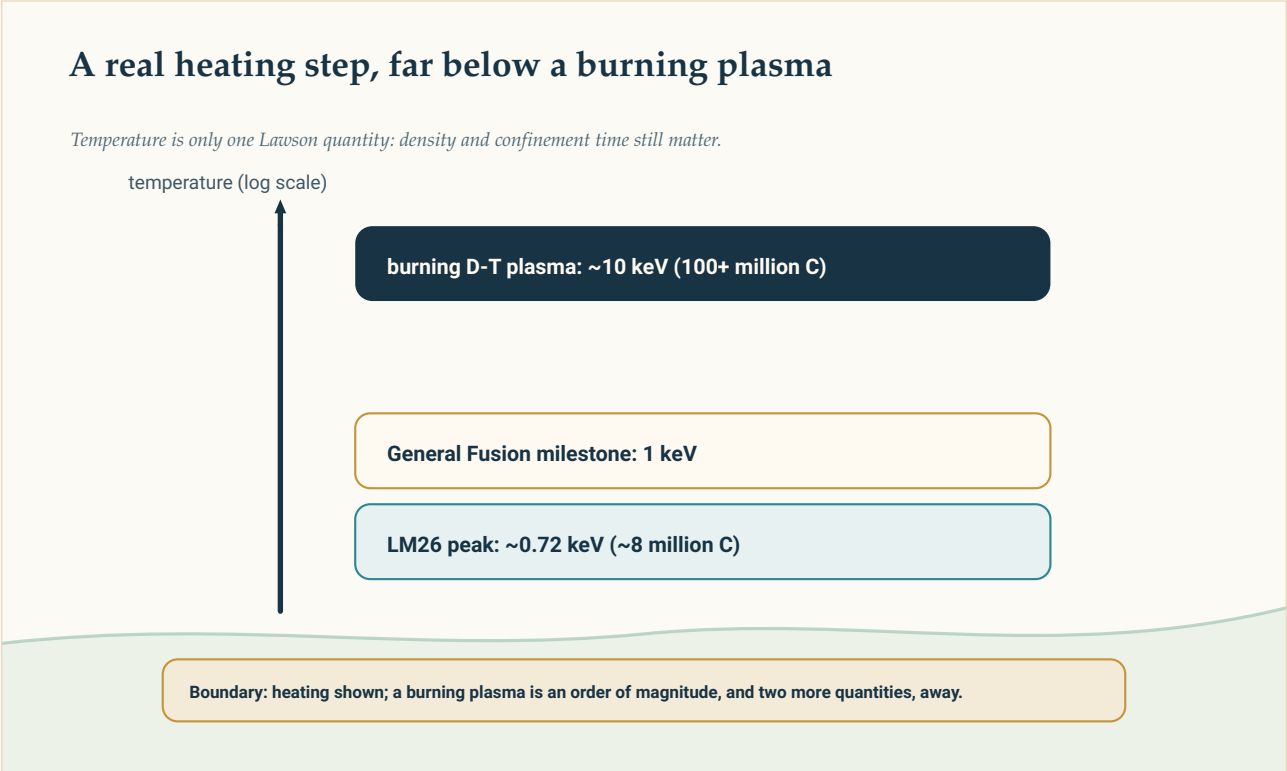
Чтобы термоядерный реактор возвращал больше энергии, чем требуется для его работы, топливная плазма должна одновременно быть достаточно горячей, достаточно плотной и удерживаться достаточно долго — эти три величины физики объединяют в так называемый критерий Лоусона. Большая часть отрасли пытается добиться этого с помощью огромных сверхпроводящих магнитов (токамаки вроде ITER) или массивов гигантских лазеров (инерциальное удержание, как в американском National Ignition Facility). Меньшая группа компаний делает ставку на третий путь — **магнито-инерциальный синтез с намагниченной мишенью** (*magnetized target fusion*, MTF): сначала создать тёплую намагниченную плазму, а затем очень быстро механически её *сжать*, чтобы само сжатие нагрело топливо — подобно тому, как дизельный двигатель воспламеняет топливо сжатием, а не искрой.

В июне 2026 года канадская компания **General Fusion** опубликовала результаты своей установки **Lawson Machine 26 (LM26)**, проверяющие, действительно ли работает центральная ставка этого подхода: нагревает ли механическое сжатие намагниченную плазму так, как обещают модели? В первых 11 импульсах со сжатием — сферически-токамачную дейтериевую плазму сжимала оболочка из *твёрдого лития*, коллапсировавшая внутрь, — в лучших экспериментах плазма во время сжатия становилась заметно горячее, плотнее и сильнее намагниченной. Анализ компании приписывает большую часть этого нагрева самому сжатию.

Это реальный и конкретный инженерный результат для подхода MTF. Но это также только первая серия импульсов, описанная в **препринте компании, не прошедшем рецензирование**, при температуре, всё ещё намного ниже необходимой плазме, способной поддерживать термоядерное горение. Это не термоядерная энергетика, не энергетический паритет и не электростанция.

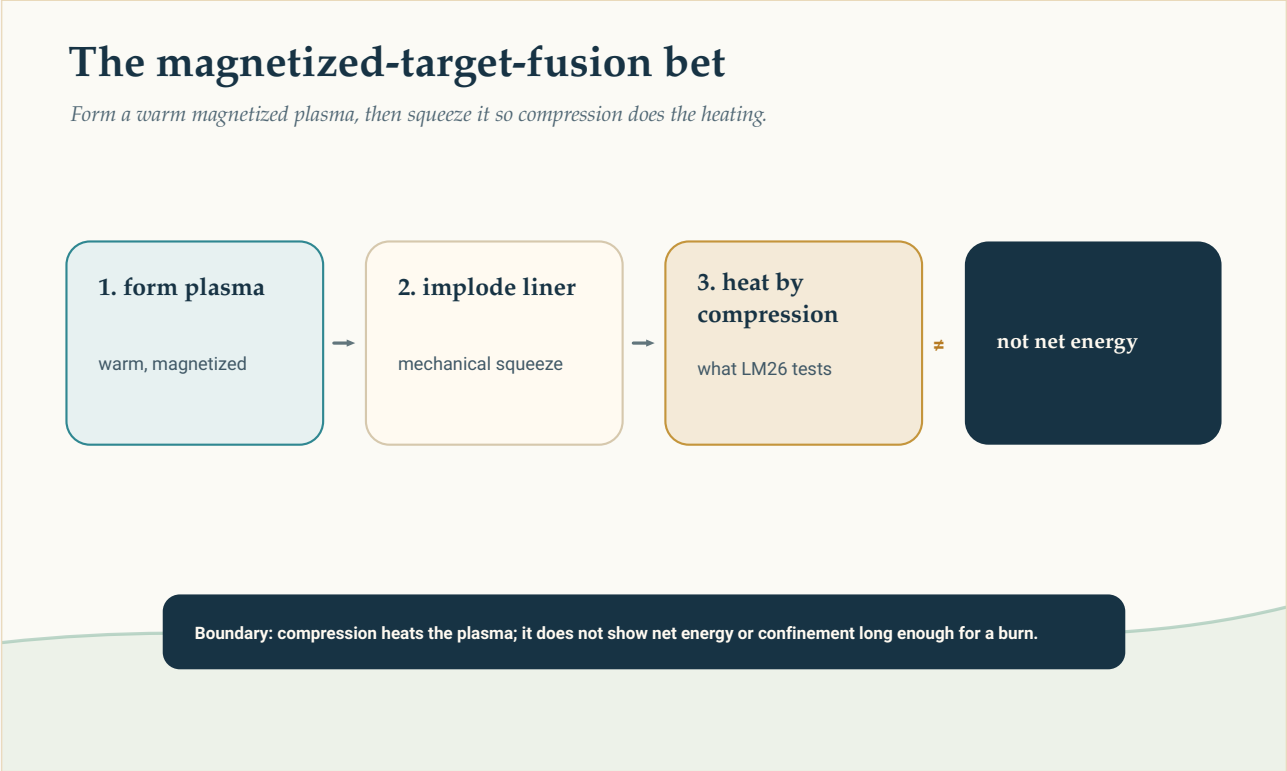
[video pending]

Это рекламные кадры General Fusion, приведённые только для того, чтобы показать, как выглядит LM26; они не являются независимым доказательством того, что установка достигнет будущих термоядерных целей компании.



Шкала температур: примерно 0,72 keV в LM26, цель General Fusion в 1 keV и около 10 keV, необходимых дейтерий-тритиевой плазме для самоподдерживающегося горения. Температура — лишь одна из трёх величин в критерии Лоусона.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Синтез с намагниченной мишенью: сначала формируется тёплая намагниченная плазма, затем её

сжимает оболочка, коллапсирующая внутрь, и именно сжатие должно нагреть плазму — ставка на «дизельный» компрессионный нагрев. LM26 проверяла, нагревает ли сжатие плазму, а не даёт ли установка чистый выход энергии или достаточное время удержания.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Что означают «синтез с намагниченной мишенью», keV и критерий Лоусона

Температуру плазмы в термоядерной физике обычно выражают в **килоэлектронвольтах (keV)**, а не в градусах: 1 keV соответствует примерно **11,6 миллиона °C**. Дейтерий-тритиевому топливу нужно достичь примерно **10 keV** (свыше 100 миллионов °C), чтобы эффективно вступать в реакции синтеза, — но температура лишь одно из трёх условий, которые должны выполняться одновременно. **Критерий Лоусона** требует также достаточной **плотности** и достаточного **времени удержания**; их часто объединяют с температурой в одно «тройное произведение» (температура × плотность × время удержания). Нагрев плазмы необходим, но сам по себе совершенно недостаточен.

Синтез с намагниченной мишенью (MTF) — промежуточный путь между двумя основными подходами. Вместо того чтобы долго удерживать горячую плазму огромными магнитами или почти мгновенно нагревать крошечную мишень лазерами, MTF создаёт намагниченную плазму, а затем механически сжимает её в течение микросекунд. Если подход сработает, сжатие одновременно будет нагревать плазму и повышать её плотность — потенциально позволяя достичь термоядерных условий без магнитов масштаба ITER или лазеров масштаба NIF. Действительно ли сжатие обеспечивает такой нагрев в реальной машине — именно это и должен проверять эксперимент вроде LM26.

Что сделали авторы

- Построили и запустили **LM26**, установку General Fusion для MTF: сначала формируется сферически-токамачная дейтериевая плазма, а затем её сжимает **оболочка из твёрдого лития**, движущаяся внутрь, — примерно **трёхкратное радиальное сжатие**.
- Провели **первые 11 импульсов со сжатием** и оснастили их большим количеством диагностик, восстанавливая во времени температуру, плотность и магнитное поле плазмы и регистрируя испускаемые нейтроны, рентгеновский и видимый свет, а также высокоскоростные изображения взаимодействия плазмы со стенкой.
- Построили **интегрированную физическую модель**, балансирующую нагрев от сжатия, омический нагрев (током самой плазмы) и потери энергии на границе, а затем сравнили модель с измерениями, чтобы оценить, откуда фактически поступало тепло.

Что они обнаружили

- **Плазма нагревалась во время сжатия.** В лучших импульсах температура электронов выросла **более чем втрое**, электронная плотность — примерно **в 10 раз**, а полоидальное магнитное поле — также примерно **в 10 раз** вследствие трёхкратного радиального сжатия. В лучшем импульсе статья сообщает о **пиковой температуре электронов около 0,72 keV** (718 ± 80 eV, измерено томсоновским рассеянием) — примерно 8 миллионов °C.
- **Большую часть нагрева приписывают сжатию.** Интегрированная модель авторов заключает, что *большинство* роста температуры обеспечило именно механическое сжатие — механизм, от которого зависит весь подход MTF, — а не омический нагрев.
- **Во время сжатия выросло нейтронное излучение**, что согласуется с более горячей и плотной дейтериевой плазмой.

Чего это не показывает

- Это **не** термоядерная энергия, не энергетический паритет и не чистый энергетический выигрыш. Здесь ничто не произвело больше энергии, чем было потрачено на работу установки. Результат относится к *нагреву плазмы* — одному этапу термоядерного цикла, — а не к энергетическому балансу реактора.
- Температура **всё ещё примерно в десять раз ниже**, чем нужно плазме, способной поддерживать горение. Около 0,72 keV — это примерно 8 миллионов °C; дейтерий-тритиевому топливу требуется порядок **10 keV (свыше 100 миллионов °C)** *вместе* с достаточным произведением плотности на время удержания. Следующая собственная цель General Fusion — **1 keV**, а это само по себе всё ещё далеко от зажигания.
- Формулировка «**большинство нагрева происходит от сжатия**» — **вывод модели**, а не непосредственное показание прибора. Он получен из интегрированной физической модели, подогнанной к диагностическим данным; доверие к распределению между компрессионным нагревом, омическим нагревом и потерями зависит от доверия к этой модели.
- Это **препринт компании, а не рецензированная работа.** Результаты сообщает команда, которая построила машину и привлекала финансирование под её перспективы; независимого рецензирования ещё не было.
- Рост числа нейтронов **не** означает энергетически значимого выхода синтеза. При таких условиях от дейтерия ожидается некоторое количество нейтронов, но оно несопоставимо ниже уровня, полезного для энергетики.
- Результат ничего не говорит об отдельном заявлении компании, что **будущая станция будет подавать электроэнергию в сеть** — к этому утверждению независимые обозреватели относятся с большой осторожностью.

Насколько сильны доказательства

- **Центральное утверждение узкое и проверяемое.** «Мы сжали намагниченную плазму, она стала горячее, и большую часть нагрева вызвало сжатие» — именно тот тест механизма, который должен пройти подход MTF. Статья подкрепляет его хорошо инструментированной серией импульсов и явной моделью энергетического баланса. Если результат выдержит рецензирование, это будет настоящее, хотя и раннее, подтверждение подхода.
- **Оговорки структурные, а не косметические.** Одиннадцать импульсов, одна машина, одна команда, отсутствие рецензирования и заголовочная температура на порядок ниже, чем у плазмы, способной гореть. Ключевой вывод — *большинство нагрева от сжатия* — опирается на модель, поэтому главный вопрос для рецензирования состоит в том, насколько устойчиво это распределение.
- **Честный статус — механизм показан, энергетическая веха не достигнута.** Работа немного сдвигает MTF от «сжатие *должно* нагревать плазму» к «сжатие *нагревает* плазму» — и не дальше.

Почему это важно

Самое интересное в синтезе с намагниченной мишенью — экономика, а не рекорды. Если механическое сжатие способно нагревать плазму в направлении термоядерных условий, потенциально можно обойтись без магнитов масштаба ITER или лазеров масштаба NIF — получить более дешёвый путь с более быстрыми итерациями, *если* он будет работать. Это «если» — вся игра, и решается оно на неброских контрольных точках вроде этой: действительно ли сжатие даёт нагрев, обещанный моделями? Первые импульсы LM26 дают осторожное «да». Именно благодаря этой осторожности результат и заслуживает внимания: это одна ступень длинной лестницы, о которой сообщают люди, поднимающиеся по ней; никто ещё независимо её не проверил, а до вершины очень далеко.

Краткий итог

LM26 компании General Fusion сжала намагниченную дейтериевую плазму оболочкой из лития, коллапсировавшей внутрь, и показала её нагрев — температура электронов выросла более чем втрое до измеренного пика около 0,72 keV (718 ± 80 eV, примерно 8 миллионов °C). Анализ компании приписывает большую часть нагрева самому сжатию — механизму, на котором основан её подход MTF. Это реальный и конкретный инженерный шаг для этого пути к синтезу. Но это также лишь первые 11 импульсов на одной машине, описанные в нерецензированном препринте компании, при температуре примерно в десять раз ниже необходимой горящей плазме, без чистого

энергетического выигрыша, без паритета и без производства электроэнергии. Показан механизм, а не построена электростанция.

Источники

S. J. Howard et al. (General Fusion), The science of compressional heating on the LM26 magnetized target fusion experiment, arXiv:2606.23974 [physics.plasm-ph] (2026)
https://arxiv.org/abs/2606.23974

General Fusion, 'General Fusion Achieves Compressional Plasma Heating with LM26 Magnetized Target Fusion Machine' (company announcement, June 2026)
https://generalfusion.com/post/general-fusion-achieves-compressional-plasma-heating-with-lm26-magnet

Nature news, 'Nuclear-fusion firm says plant will deliver electricity to grid - but big questions remain' (2026)
https://www.nature.com/articles/d41586-026-01795-z