



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

Термоядерна установка нагріла плазму, стискаючи її — реальний крок, але ще не електростанція

LM26 компанії General Fusion стиснула магнітизовану дейтерієву плазму оболонкою з літію, що колапсувала всередину, і спостерігала її нагрівання — температура електронів зросла більш ніж утричі до виміряного піка близько 0,72 keV (718 ± 80 eV, приблизно 8 мільйонів °C), причому більшу частину нагрівання приписано самому стисканню — механізму, від якого залежить підхід із магнітизованою мішенню. Це реальна інженерна контрольна точка на цьому шляху до синтезу. Але це також лише перші 11 імпульсів на одній машині, описані в нерецензованому препринті компанії, за температури все ще приблизно в десять разів нижчої за потрібну плазмі, що горить, — без чистого енергетичного виграшу, без паритету й без електроенергії. Показано механізм, а не побудовано електростанцію.

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

Термоядерна установка нагріла плазму, стискаючи її — реальний крок, але ще не електростанція

Щоб термоядерний реактор повертав більше енергії, ніж потрібно для його роботи, паливна плазма має одночасно бути достатньо гарячою, достатньо щільною і утримуватися достатньо довго — ці три величини фізики об'єднують у так званий критерій Лоусона. Більшість галузі намагається досягти цього за допомогою величезних надпровідних магнітів (токамаки на кшталт ITER) або масивів гігантських лазерів (інерційне утримання, як у американському National Ignition Facility). Менша група компаній робить ставку на третій шлях — **магнітно-інерційний синтез із магнітизованою мішенню** (*magnetized target fusion*, MTF): спочатку створити теплу магнітизовану плазму, а потім дуже швидко механічно її *стиснути*, щоб саме стискання нагріло паливо — подібно до того, як дизельний двигун запалює паливо стисканням, а не іскрою.

У червні 2026 року канадська компанія **General Fusion** оприлюднила результати своєї установки **Lawson Machine 26 (LM26)**, які перевіряють, чи справді працює центральна ставка цього підходу: чи нагріває механічне стискання магнітизовану плазму так, як обіцяють моделі? У перших 11 імпульсах зі стисканням — сферично-токамачну дейтерієву плазму стискала оболонка з *твердого літію*, що колапсувала всередину, — у найкращих експериментах плазма під час стискання ставала помітно гарячішою, щільнішою та сильніше намагніченою. Аналіз компанії приписує більшу частину цього нагрівання самому стисканню.

Це реальний і конкретний інженерний результат для підходу MTF. Але це також лише перша серія імпульсів, описана в **препринті компанії, який не пройшов рецензування**, за температури, що все ще набагато нижча за потрібну плазмі, здатній підтримувати термоядерне горіння. Це не термоядерна енергетика, не енергетичний паритет і не електростанція.

[video pending]

Це рекламні кадри General Fusion, наведені лише для того, щоб показати, як виглядає LM26; вони не є незалежним доказом того, що установка досягне майбутніх термоядерних цілей компанії.

A real heating step, far below a burning plasma

Temperature is only one Lawson quantity; density and confinement time still matter.

temperature (log scale)

burning D-T plasma: ~10 keV (100+ million C)

General Fusion milestone: 1 keV

LM26 peak: ~0.72 keV (~8 million C)

Boundary: heating shown; a burning plasma is an order of magnitude, and two more quantities, away.

Шкала температур: приблизно 0,72 keV у LM26, ціль General Fusion у 1 keV і близько 10 keV, потрібних плазмі дейтерій–третій для самопідтримуваного горіння. Температура — лише одна з трьох величин у критерії Лоусона.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

The magnetized-target-fusion bet

Form a warm magnetized plasma, then squeeze it so compression does the heating.

1. form plasma

warm, magnetized

2. implode liner

mechanical squeeze

3. heat by
compression

what LM26 tests

not net energy

Boundary: compression heats the plasma; it does not show net energy or confinement long enough for a burn.

Синтез із магнітизованою мішенню: спочатку формується тепла магнітизована плазма, потім її стискає

оболонка, що колапсує всередину, і саме стискання має нагріти плазму — ставка на «дизельне» компресійне нагрівання. LM26 перевіряла, чи нагріває стискання плазму, а не чи дає установка чистий вихід енергії або достатній час утримання.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Що означають «синтез із магнітизованою мішенню», keV і критерій Лоусона

Температуру плазми в термоядерній фізиці зазвичай виражають у **кілоелектронвольтах (keV)**, а не в градусах: 1 keV відповідає приблизно **11,6 мільйона °C**. Паливу дейтерій–третій потрібно досягти приблизно **10 keV** (понад 100 мільйонів °C), щоб ефективно вступати в реакції синтезу, — але температура лише одна з трьох умов, які мають виконуватися одночасно. **Критерій Лоусона** вимагає також достатньої **густини** та достатнього **часу утримання**; їх часто об'єднують із температурою в один «потрійний добуток» (температура × густина × час утримання). Нагрівання плазми необхідне, але саме по собі зовсім недостатнє.

Синтез із магнітизованою мішенню (MTF) — проміжний шлях між двома основними підходами. Замість того щоб довго утримувати гарячу плазму величезними магнітами або майже миттєво нагрівати крихітну мішень лазерами, MTF створює магнітизовану плазму, а потім механічно стискає її протягом мікросекунд. Якщо підхід спрацює, стискання водночас нагріватиме плазму й підвищуватиме її густину — потенційно дозволяючи досягти термоядерних умов без магнітів масштабу ITER чи лазерів масштабу NIF. Чи справді стискання забезпечує таке нагрівання в реальній машині — саме це й має перевіряти експеримент на кшталт LM26.

Що зробили автори

- Побудували й запустили **LM26**, установку General Fusion для MTF: спочатку формується сферично-токамачна дейтерієва плазма, а потім її стискає **оболонка з твердого літію**, що рухається всередину, — приблизно **3-кратне радіальне стискання**.
- Провели **перші 11 імпульсів зі стисканням** і забезпечили їх великою кількістю діагностик, відновлюючи в часі температуру, густину та магнітне поле плазми й реєструючи випромінювані нейтрони, рентгенівське та видиме світло, а також швидкісні зображення взаємодії плазми зі стінкою.
- Побудували **інтегровану фізичну модель**, що балансує нагрівання від стискання, омичне нагрівання (струмом самої плазми) та втрати енергії на межі, а потім порівняли модель із вимірюваннями, щоб оцінити, звідки фактично надходило тепло.

Що вони виявили

- **Плазма нагрівалася під час стискання.** У найкращих імпульсах температура електронів зросла **більш ніж утричі**, електронна густина — приблизно **в 10 разів**, а полоїдальне магнітне поле — також приблизно **в 10 разів** унаслідок 3-кратного радіального стискання. У найкращому імпульсі стаття повідомляє про **пікову температуру електронів близько 0,72 keV** (718 ± 80 eV, виміряно томсонівським розсіюванням) — приблизно 8 мільйонів °C.
- **Більшу частину нагрівання приписують стисканню.** Інтегрована модель авторів робить висновок, що **більшість** зростання температури забезпечило саме механічне стискання — механізм, від якого залежить увесь підхід MTF, — а не омичне нагрівання.
- **Під час стискання зросло нейтронне випромінювання**, що узгоджується з гарячішою та щільнішою дейтерієвою плазмою.

Чого це не показує

- Це **не** термоядерна енергія, не енергетичний паритет і не чистий енергетичний вигаш. Тут ніщо не виробило більше енергії, ніж було витрачено на роботу установки. Результат стосується **нагрівання плазми** — одного етапу термоядерного циклу, — а не енергетичного балансу реактора.
- Температура **все ще приблизно в десять разів нижча**, ніж потрібно плазмі, здатній підтримувати горіння. Близько 0,72 keV — це приблизно 8 мільйонів °C; паливу дейтерій–третій потрібен порядок **10 keV (понад 100 мільйонів °C)** разом із достатнім добутком густини на час утримання. Наступна власна ціль General Fusion — **1 keV**, а це саме по собі все ще далеко від запалювання.
- Формулювання «**більшість нагрівання походить від стискання**» — **висновок моделі**, а не безпосередній показ приладу. Він отриманий з інтегрованої фізичної моделі, підігнаної до діагностичних даних; довіра до розподілу між компресійним нагріванням, омичним нагріванням і втратами залежить від довіри до цієї моделі.
- Це **препринт компанії, а не рецензована робота**. Результати повідомляє команда, яка побудувала машину й залучала фінансування під її перспективи; незалежного рецензування ще не було.
- Зростання числа нейтронів **не** означає енергетично значущого виходу синтезу. За таких умов від дейтерію очікується певна кількість нейтронів, але вона незрівнянно нижча за рівень, корисний для енергетики.
- Результат нічого не говорить про окрему заяву компанії, що **майбутня станція подаватиме електроенергію в мережу** — до цього твердження незалежні оглядачі ставляться з великою обережністю.

Наскільки сильні докази

- **Центральне твердження вузьке й перевірне.** «Ми стиснули магнітизовану плазму, вона стала гарячішою, і більшість нагрівання спричинило стискання» — саме той тест механізму, який має пройти підхід МТФ. Стаття підкріплює його добре інструментованою серією імпульсів та явною моделлю енергетичного балансу. Якщо результат витримає рецензування, це буде справжнє, хоча й раннє, підтвердження підходу.
- **Застереження структурні, а не косметичні.** Одинадцять імпульсів, одна машина, одна команда, відсутність рецензування й заголовкова температура на порядок нижча, ніж у плазмі, здатній горіти. Ключовий висновок — *більшість нагрівання від стискання* — спирається на модель, тому головне питання для рецензування полягає в тому, наскільки стійким є цей розподіл.
- **Чесний статус — показано механізм, а не досягнуто енергетичної віхи.** Робота трохи зсуває МТФ від «стискання має нагрівати плазму» до «стискання нагріває плазму» — і не далі.

Чому це важливо

Найцікавіше в синтезі з магнітизованою мішенню — економіка, а не рекорди. Якщо механічне стискання здатне нагрівати плазму в напрямку термоядерних умов, потенційно можна обійтися без магнітів масштабу ITER чи лазерів масштабу NIF — отримати дешевший шлях із швидшими ітераціями, *якщо* він працюватиме. Це «якщо» — вся гра, і воно вирішується на непоказних контрольних точках на кшталт цієї: чи справді стискання дає нагрівання, яке обіцяють моделі? Перші імпульси LM26 дають обережне «так». Саме через цю обережність результат і вартий уваги: це одна сходинка довгої драбини, про яку повідомляють люди, що нею піднімаються; її ще ніхто незалежно не перевірів, і до вершини дуже далеко.

Короткий підсумок

LM26 компанії General Fusion стиснула магнітизовану дейтерієву плазму оболонкою з літію, що колапсувала всередину, і показала її нагрівання — температура електронів зросла більш ніж утричі до виміряного піка близько 0,72 keV (718 ± 80 eV, приблизно 8 мільйонів °C). Аналіз компанії приписує більшу частину нагрівання самому стисканню — механізму, на якому ґрунтується її підхід МТФ. Це реальний і конкретний інженерний крок для цього шляху до синтезу. Але це також лише перші 11 імпульсів на одній машині, описані в нерецензованому препринті компанії, за температури приблизно в десять разів нижчої за потрібну плазмі, що горить, без чистого енергетичного виграшу, без паритету й без виробництва електроенергії. Показано механізм, а не побудовано

електростанцію.

Джерела

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>