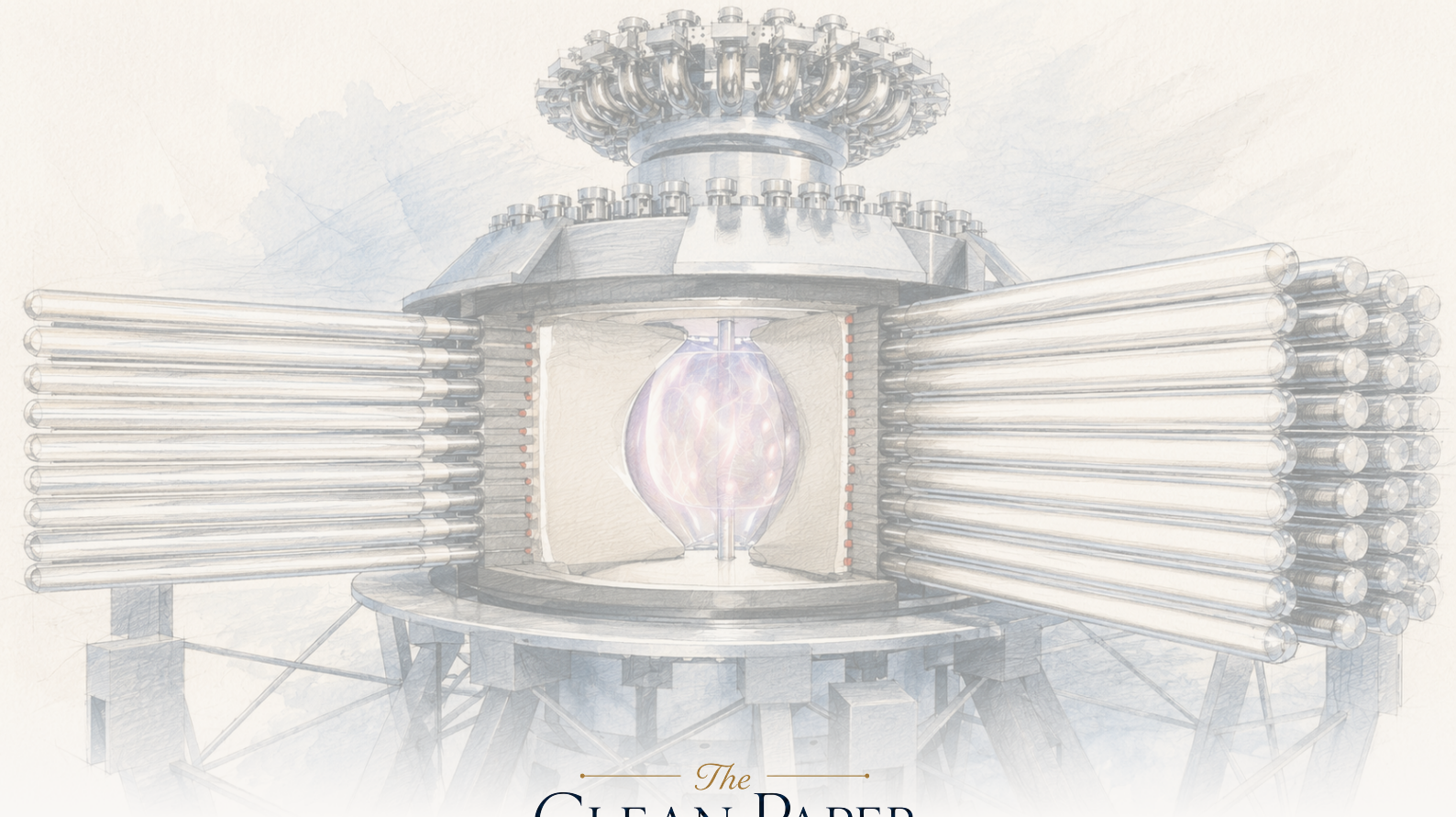


The Clean Paper

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

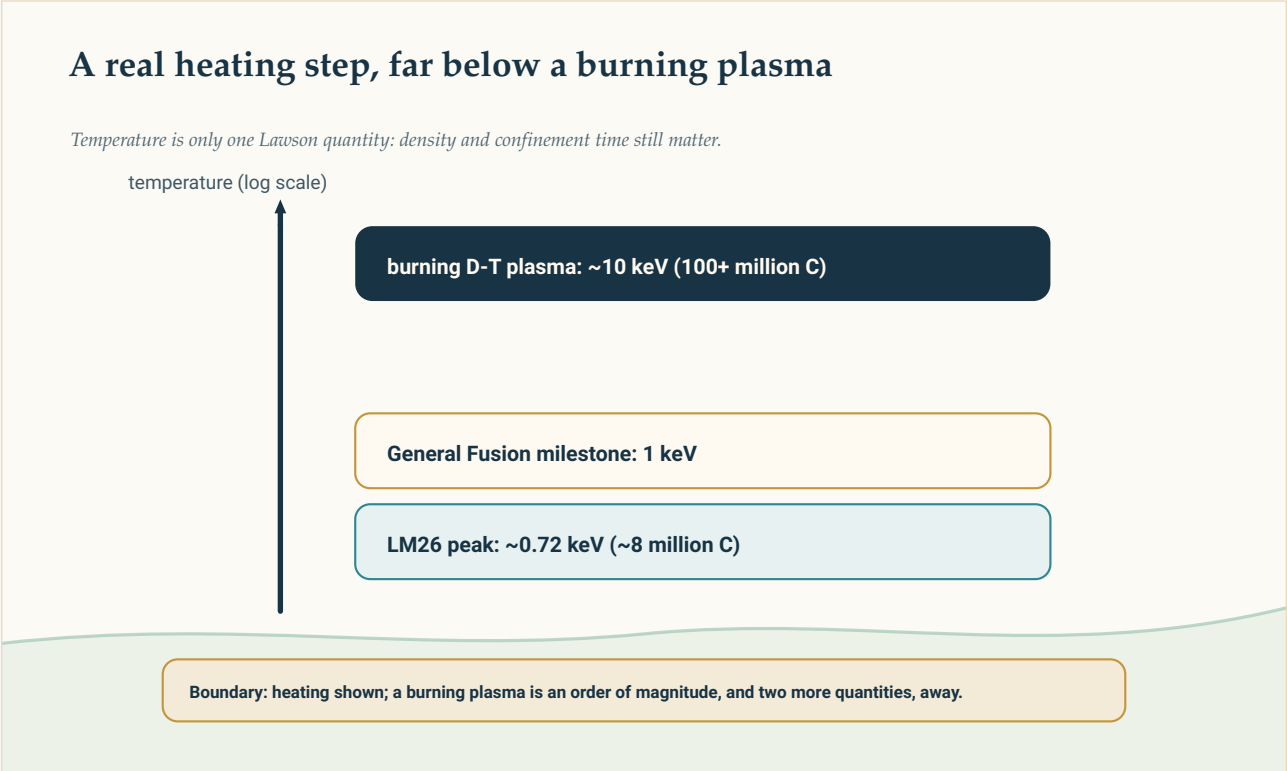
Щоб термоядерний реактор повертав більше енергії, ніж потрібно для його роботи, паливна плазма має одночасно бути достатньо гарячою, достатньо щільною і утримуватися достатньо довго — ці три величини фізики об'єднують у так званий критерій Лоусона. Більшість галузі намагається досягти цього за допомогою 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.

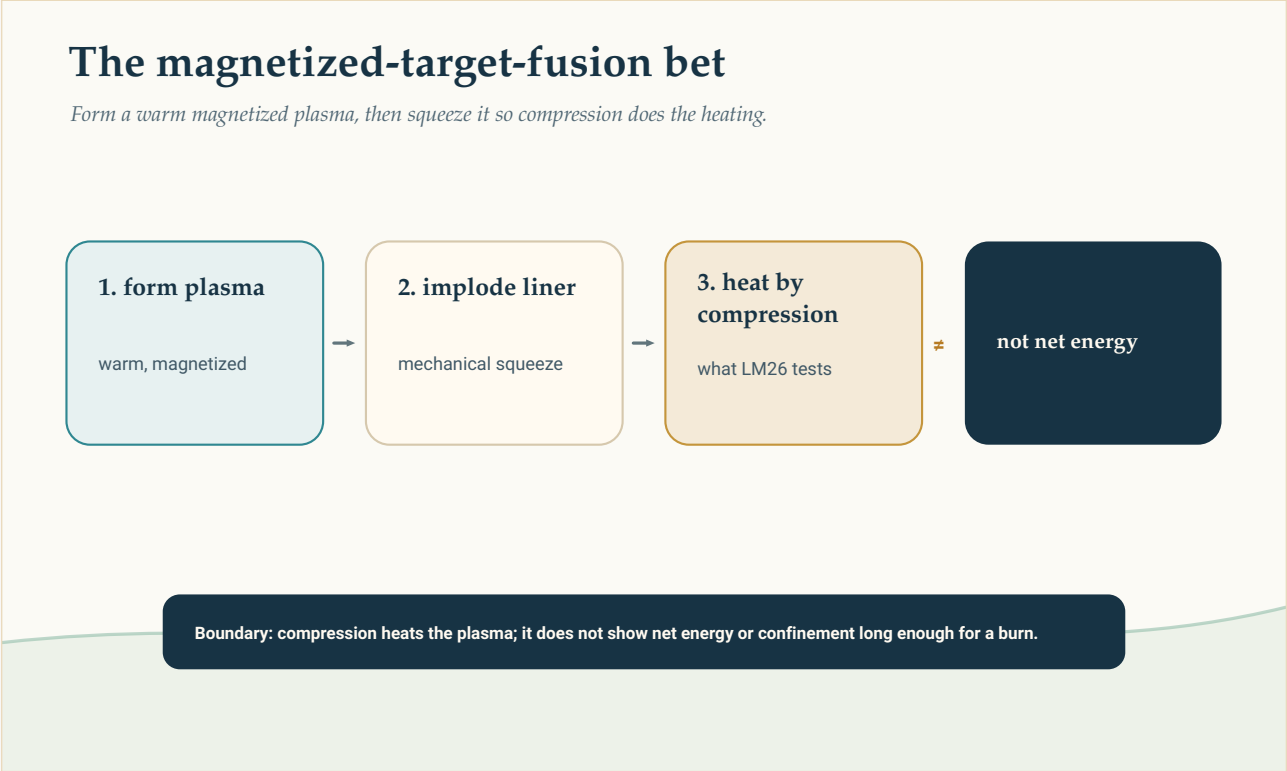
[video pending]

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.



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

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



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–тритій 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, омічне 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 омічне 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 виграш. 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–тритій 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, омічним 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 MTF. 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 MTF 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 перевірив, 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 MTF. 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