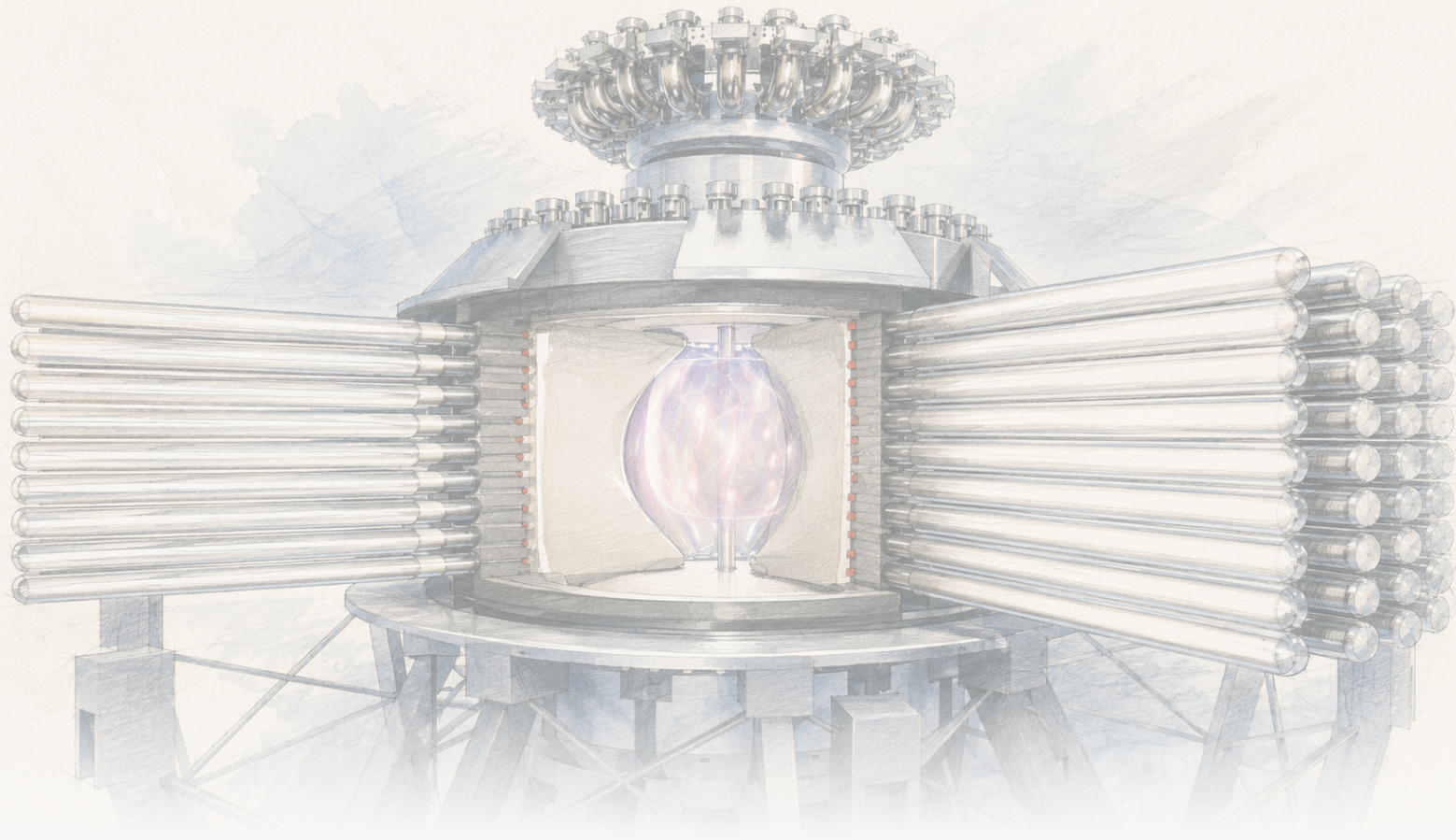




The CLEAN PAPER

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

Maszyna fuzyjna ogrzała plazmę przez ściskanie — rzeczywisty krok, ale nie elektrownia

LM26 firmy General Fusion ścisnął namagnesowaną plazmę deuterową implodującą wkładką litową i zaobserwował jej ogrzewanie — ponad trzykrotny wzrost temperatury elektronów do zmierzonego maksimum około 0,72 keV (718 ± 80 eV, mniej więcej 8 milionów °C), przy czym większość ogrzewania przypisano samemu ściskaniu, mechanizmowi podejścia MTF. To rzeczywisty inżynierski punkt kontrolny tej drogi do fuzji. Jest to również pierwszych 11 strzałów jednej maszyny, opisanych w firmowym preprincie bez recenzji, przy temperaturze nadal około dziesięć razy niższej od potrzeb płonącej plazmy — bez energii netto, punktu równowagi i elektryczności. Pokazany mechanizm, nie zbudowana elektrownia.

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

Maszyna fuzyjna ogrzała plazmę przez ściskanie — rzeczywisty krok, ale nie elektrownia

Aby reaktor termojądrowy oddawał więcej energii, niż potrzeba do jego działania, plazma paliwa musi być jednocześnie dostatecznie gorąca, gęsta i utrzymywana razem dostatecznie długo — te trzy wielkości łączy kryterium Lawsona. Większość dziedziny dąży do tego za pomocą ogromnych magnesów nadprzewodzących (tokamaki takie jak ITER) albo zestawów gigantycznych laserów (konfinement inercyjny, jak w amerykańskim National Ignition Facility). Mniejsza grupa firm stawia na trzecią drogę, **fuzję z namagnesowanym celem** (magnetized target fusion, MTF): wytworzyć ciepłą, namagnesowaną plazmę, a następnie szybko mechanicznie ją *zgnieść*, tak aby samo ściskanie zapewniło ogrzewanie — podobnie jak silnik Diesla zapala paliwo sprężaniem zamiast iskry.

W czerwcu 2026 roku kanadyjska firma **General Fusion** opublikowała wyniki urządzenia **Lawson Machine 26 (LM26)**, sprawdzające, czy to zasadnicze założenie rzeczywiście działa: czy mechaniczne ściskanie namagnesowanej plazmy naprawdę ogrzewa ją zgodnie z modelami? W pierwszych 11 strzałach kompresyjnych — w których deuterową plazmę sferycznego tokamaka ścisnęła implodująca *lita wkładka litowa* — najlepsze próby pokazały wyraźny wzrost temperatury, gęstości i namagnesowania plazmy, a analiza firmy przypisuje większość ogrzewania samemu ściskaniu.

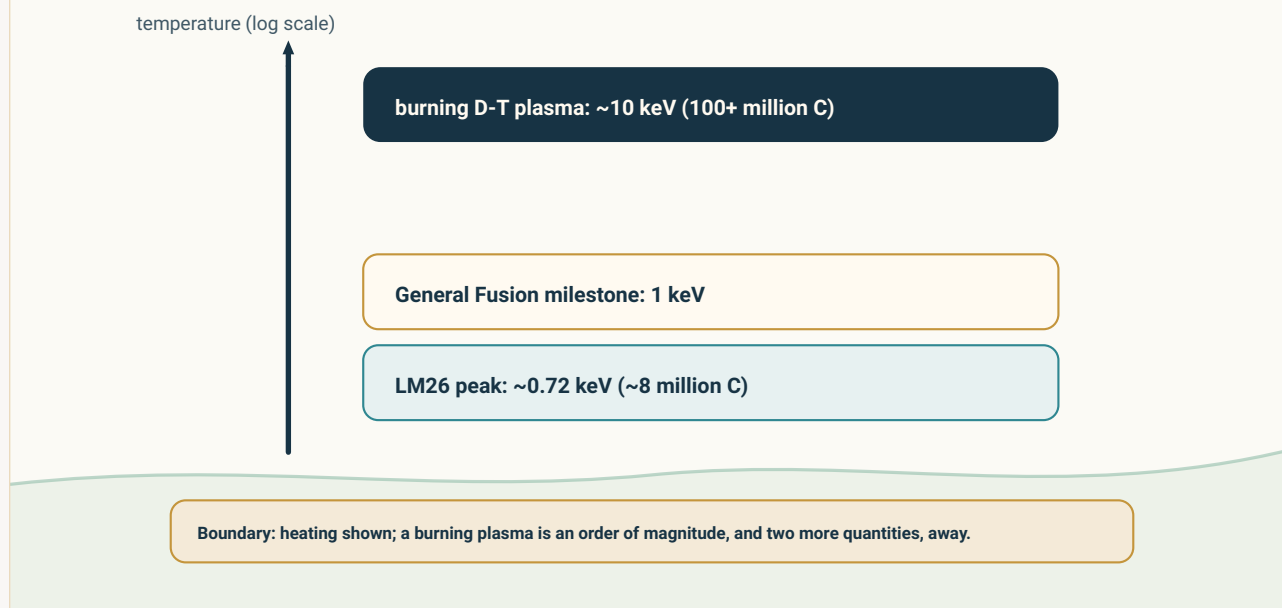
To rzeczywisty, konkretny wynik inżynierski dla podejścia MTF. Jest to również pierwszy zestaw strzałów, opisany w **firmowym preprincie bez recenzji naukowej**, przy temperaturze nadal znacznie niższej od wymaganej dla płonącej plazmy — nie jest energią z fuzji, punktem równowagi ani elektrownią.

[video pending]

To materiał promocyjny General Fusion dołączony, aby pokazać wygląd LM26; nie stanowi niezależnego dowodu, że maszyna osiągnie przyszłe cele fuzyjne.

A real heating step, far below a burning plasma

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

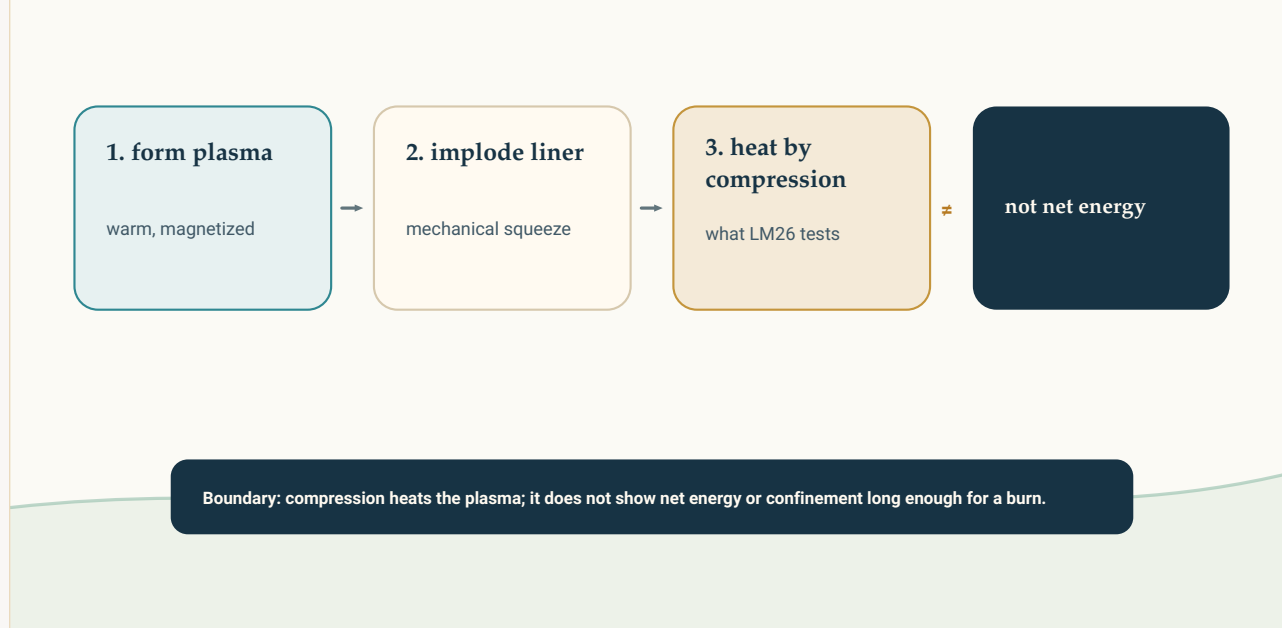


Drabina temperatur: około 0,72 keV LM26, cel General Fusion 1 keV i około 10 keV potrzebne płonącej plazmie deuterowo-trytowej. Temperatura jest tylko jedną z trzech wielkości kryterium Lawsona.

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.



Fuzja z namagnesowanym celem: wytworzyć ciepłą namagnesowaną plazmę, a następnie ścisnąć ją implodującą wkładką, by sprężanie ją ogrzało — założenie podobne do sprężania w silniku Diesla. LM26

sprawdzał ogrzewanie plazmy przez kompresję, nie energię netto ani konfinement.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Co oznaczają „fuzja z namagnesowanym celem”, „keV” i kryterium Lawsona

Temperaturę plazmy w fuzji zwykle podaje się w **kiloelektronowoltach (keV)** zamiast stopniach: 1 keV odpowiada około **11,6 miliona °C**. Paliwo deuterowo-trytowe musi osiągnąć mniej więcej **10 keV** (ponad 100 milionów °C), aby skutecznie ulegać fuzji — lecz temperatura jest tylko jednym z trzech warunków, które trzeba spełnić jednocześnie. **Kryterium Lawsona** wymaga także odpowiedniej **gęstości** i dostatecznego **czasu konfinementu**, zwykle łączonych w „potrójny iloczyn” (temperatura $\times$ gęstość $\times$ czas konfinementu). Ogrzanie plazmy jest konieczne, ale samo w sobie zdecydowanie nie wystarcza.

Fuzja z namagnesowanym celem (MTF) jest drogą pośrednią między dwoma głównymi podejściami. Zamiast długo utrzymywać gorącą plazmę ogromnymi magnesami albo niemal natychmiast ogrzewać mały cel laserami, MTF tworzy namagnesowaną plazmę i mechanicznie ściska ją w ciągu mikrosekund. Jeśli zadziała, kompresja jednocześnie ogrzeje plazmę i zwiększy jej gęstość — potencjalnie osiągając warunki fuzji bez magnesów skali ITER lub laserów skali NIF. Testy takie jak LM26 mają właśnie sprawdzić, czy w rzeczywistej maszynie kompresja naprawdę zapewnia takie ogrzewanie.

Co zrobili autorzy

- Zbudowali i uruchomili **LM26**, urządzenie MTF w General Fusion: deuterowa plazma sferycznego tokamaka zostaje wytworzona, a następnie ściśnięta przez implodującą **litą wkładkę litową** napędzaną do wewnątrz — kompresja promieniowa wynosi około **3×**.
- Przeprowadzili **pierwszych 11 strzałów kompresyjnych** z bogatą aparaturą pomiarową, odtwarzając w czasie temperaturę, gęstość i pole magnetyczne plazmy oraz rejestrując emitowane neutrony, promienie X i światło widzialne, a także szybkie obrazy oddziaływania plazmy ze ścianą.
- Zbudowali **zintegrowany model fizyczny**, który bilansuje ogrzewanie przez kompresję, ogrzewanie omowe (od własnego prądu plazmy) i energię tracącą się na granicy, a następnie porównali go z pomiarami, aby ustalić rzeczywiste źródło ogrzewania.

Co odkryli

- **Plazma ogrzewała się podczas ściskania.** W najlepszych strzałach temperatura elektronów wzrosła **ponad 3×**, ich gęstość około **10×**, a poloidalne pole magnetyczne około **10×**, dzięki 3-krotnej kompresji promieniowej. W najlepszym strzale praca mierzy **szczytową temperaturę elektronów około 0,72 keV** (718 ± 80 eV, metodą rozpraszania Thomsona) — mniej więcej 8 milionów °C.

- **Większość ogrzewania przypisano kompresji.** Zintegrowany model wskazuje, że *większość* wzrostu temperatury pochodziła z samego mechanicznego ściskania — mechanizmu, od którego zależy całe podejście MTF — a nie z ogrzewania omowego.
- **Emisja neutronów wzrosła podczas kompresji**, co jest zgodne z gorętszą i gęstsza plazmą deuterową.

Czego to nie pokazuje

- To **nie** jest energia z fuzji, punkt równowagi ani zysk netto. Nic nie wytworzyło tu więcej energii, niż zużyto do działania. Wynik dotyczy *ogrzewania plazmy* — jednego kroku cyklu fuzyjnego — nie bilansu energetycznego reaktora.
- Temperatura nadal jest **około dziesięć razy za niska** dla płonącej plazmy. Około 0,72 keV odpowiada mniej więcej 8 milionom °C; paliwo deuterowo-trytowe potrzebuje rzędu **10 keV (ponad 100 milionów °C)** oraz odpowiedniej gęstości $\times$ czasu konfinementu, by podtrzymać spalanie. Następnym celem General Fusion jest **1 keV** — nadal daleko od zapłonu.
- „**Większość ogrzewania pochodzi z kompresji**” to **wniosek modelowy**, nie bezpośredni odczyt. Wynika ze zintegrowanego modelu fizycznego dopasowanego do diagnostyki; zaufanie do podziału między kompresję, ogrzewanie omowe i straty zależy od zaufania do tego modelu.
- To **firmowy preprint, a nie praca recenzowana**. Wyniki raportuje sam zespół, który zbudował maszynę i pozyskał pieniądze na jej obietnicę; niezależna ocena jeszcze się nie odbyła.
- Wzrost neutronów **nie** jest istotną energetycznie wydajnością fuzji. Przy tych warunkach można oczekiwać części neutronów z deuteru, ale jest ich znacznie za mało do wytwarzania energii.
- Wynik nie mówi nic o odrębnym twierdzeniu firmy, że **przyszła elektrownia dostarczy prąd do sieci** — niezależne relacje traktowały je z dużą ostrożnością.

Jak silne są dowody

- **Główne twierdzenie jest wąskie i sprawdzalne.** „Ścisnęliśmy namagnesowaną plazmę, która się ogrzała, głównie wskutek kompresji” jest dokładnie takim testem mechanizmu, jaki musi przejść podejście MTF, a praca wspiera go bogato opomiarowanym zestawem strzałów i jawnym modelem bilansu energii. Jeśli wynik przetrwa recenzję, będzie rzeczywistym — choć wczesnym — potwierdzeniem podejścia.
- **Zastrzeżenia są strukturalne, nie kosmetyczne.** Jedenaście strzałów, jedna maszyna, jeden zespół, brak recenzji i główna temperatura o rząd wielkości poniżej płonącej plazmy. Nośny wniosek — *większość ogrzewania pochodzi z kompresji* — opiera się na modelu, więc zasadniczym pytaniem recenzji będzie odporność tego podziału.
- **Uczciwy status to wykazany mechanizm, nie deklarowany kamień milowy ku energii.** Wynik przesuwą MTF od „kompresja powinna ogrzewać plazmę” do „kompresja ogrzewa plazmę” i nie dalej.

Dlaczego to ważne

W fuzji z namagnesowanym celem interesująca jest ekonomia, nie rekordy. Jeśli mechaniczne ściskanie potrafi ogrzać plazmę w kierunku warunków fuzyjnych, można byłoby dojść do nich bez magnesów skali ITER i laserów skali NIF — tańszą drogą o szybszych iteracjach, *jeśli* zadziała. To „jeśli” jest sednem i zależy od mało widowiskowych punktów kontrolnych takich jak ten: czy kompresja rzeczywiście daje ogrzewanie obiecanie przez modele? Odpowiedź LM26 na podstawie pierwszych strzałów brzmi: tak, z zastrzeżeniami. Warto ją odnotować właśnie *dlatego*, że jest warunkowa — to szczebel długiej drabiny, opisany przez ludzi, którzy się po niej wspinają, jeszcze przez nikogo niezależnie niesprawdzony i daleko poniżej szczytu.

Zwięźle podsumowanie

LM26 firmy General Fusion ścisnął namagnesowaną plazmę deuterową implodującą wkładką litową i wykazał jej ogrzewanie — ponad trzykrotny wzrost temperatury elektronów do zmierzonego maksimum około 0,72 keV (718 ± 80 eV, około 8 milionów °C) — przy czym analiza firmy przypisuje większość ogrzewania samemu ścisnaniu, czyli mechanizmowi, na którym opiera się podejście MTF. To rzeczywisty, konkretny krok inżynierski dla tej drogi do fuzji. Jest to zarazem pierwszych 11 strzałów jednej maszyny, opisanych w firmowym preprintcie bez recenzji, przy temperaturze około dziesięć razy niższej od potrzeb płonącej plazmy, bez energii netto, punktu równowagi i elektryczności. Pokazany mechanizm, nie zbudowana elektrownia.

Źródła

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>