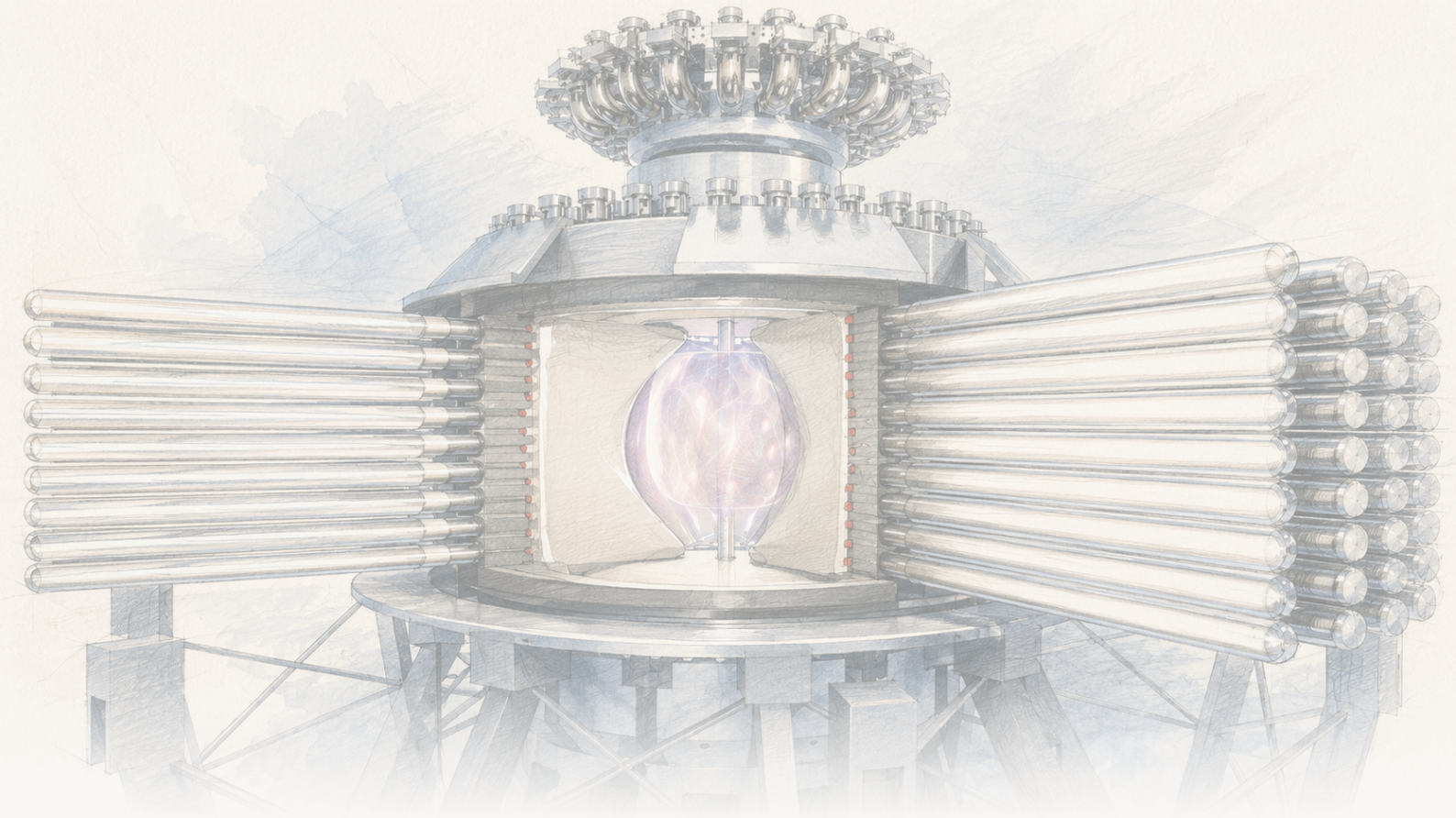


The Clean Paper

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

Fuzijski stroj zagrijao je plazmu stiskanjem — stvaran korak, ali ne i elektrana

LM26 tvrtke General Fusion sabio je magnetiziranu deuterijsku plazmu implodirajućom litijevom oblogom i pokazao da se zagrijava — temperatura elektrona porasla je više od tri puta, do izmjerenog vrha od oko 0.72 keV (718 ± 80 eV, približno 8 milijuna °C), a većina zagrijavanja pripisana je samoj kompresiji, mehanizmu na kojem počiva njihov pristup fuziji magnetizirane mete. To je stvarna inženjerska kontrolna točka za taj put prema fuziji. Ali to su i prvih 11 impulsa na jednom stroju, opisani u preprintu tvrtke koji nije recenziran, pri temperaturi još oko deset puta nižoj od one potrebne gorućoj plazmi — bez neto energije, breakevena i električne energije. Pokazan mehanizam, ne izgrađena elektrana.

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

Fuzijski stroj zagrijao je plazmu stiskanjem — stvaran korak, ali ne i elektrana

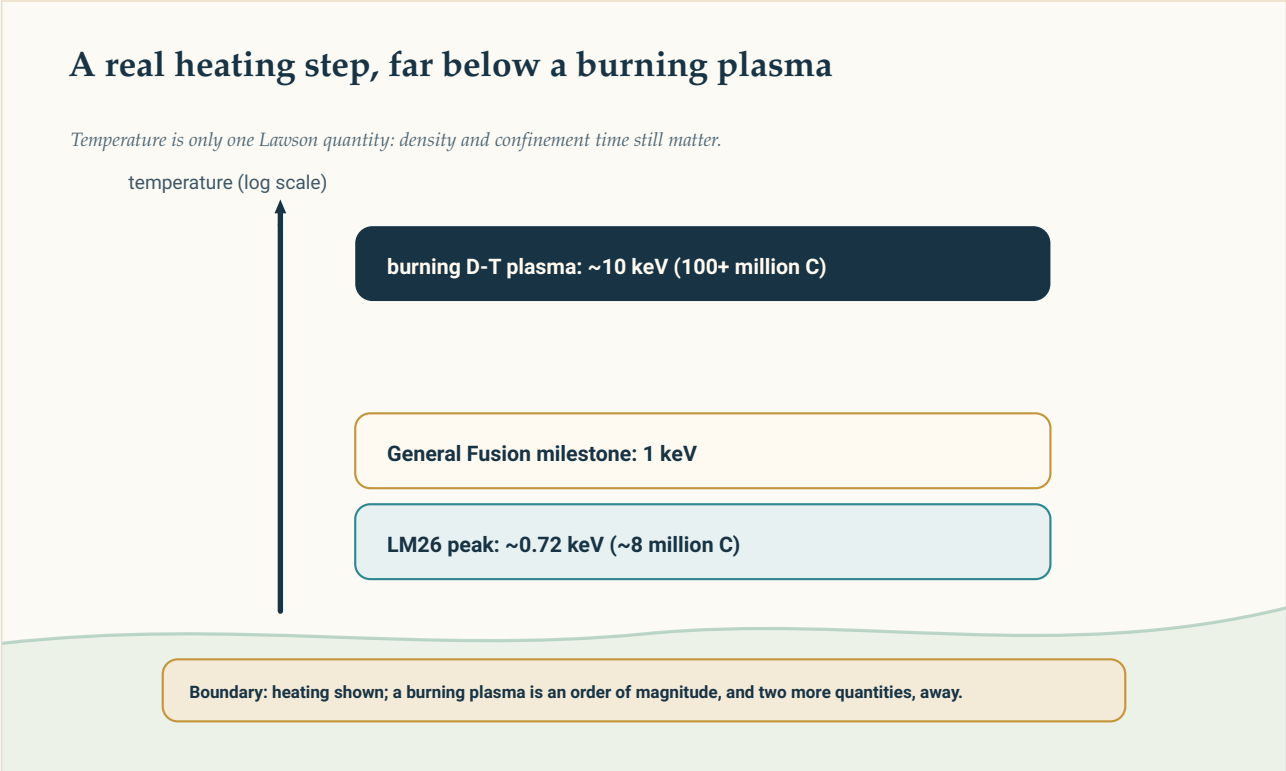
Da bi fuzijski reaktor vratio više energije nego što je potrebno za njegov rad, gorivna plazma mora istodobno biti dovoljno vruća, dovoljno gusta i dovoljno dugo zadržana — tri veličine objedinjene u ono što fizičari zovu Lawsonov kriterij. Većina područja to pokušava postići golemim supravodljivim magnetima (tokamaci poput ITER-a) ili nizovima divovskih lasera (inercijsko zatočenje, kao u američkom National Ignition Facilityju). Manji broj tvrtki kladi se na treći put, **fuziju magnetizirane mete** (MTF): najprije stvoriti toplu, magnetiziranu plazmu, a zatim je brzo mehanički *stisnuti* tako da samo stiskanje zagrijava gorivo — slično kao što dizelski motor pali gorivo kompresijom, a ne iskrom.

U lipnju 2026. kanadska tvrtka **General Fusion** objavila je rezultate svojeg **Lawson Machine 26 (LM26)** koji ispituju upravo tu središnju pretpostavku: zagrijava li mehaničko sabijanje magnetizirane plazme doista plazmu onako kako modeli predviđaju? U prvih 11 kompresijskih impulsa — u kojima je deuterijska plazma sfernog tokamaka stisnuta implodirajućom *čvrstom litijevom oblogom* — najbolji su impulsi pokazali da plazma tijekom kompresije postaje znatno toplija, gušća i jače magnetizirana, a analiza tvrtke većinu tog zagrijavanja pripisuje samoj kompresiji.

To je stvaran i specifičan inženjerski rezultat za MTF pristup. Ali to je i prvi niz impulsa, opisan u **preprintu tvrtke koji nije recenziran**, pri temperaturi još daleko nižoj od one potrebne za goruću plazmu — i nije fuzijska energija, nije breakeven i nije elektrana.

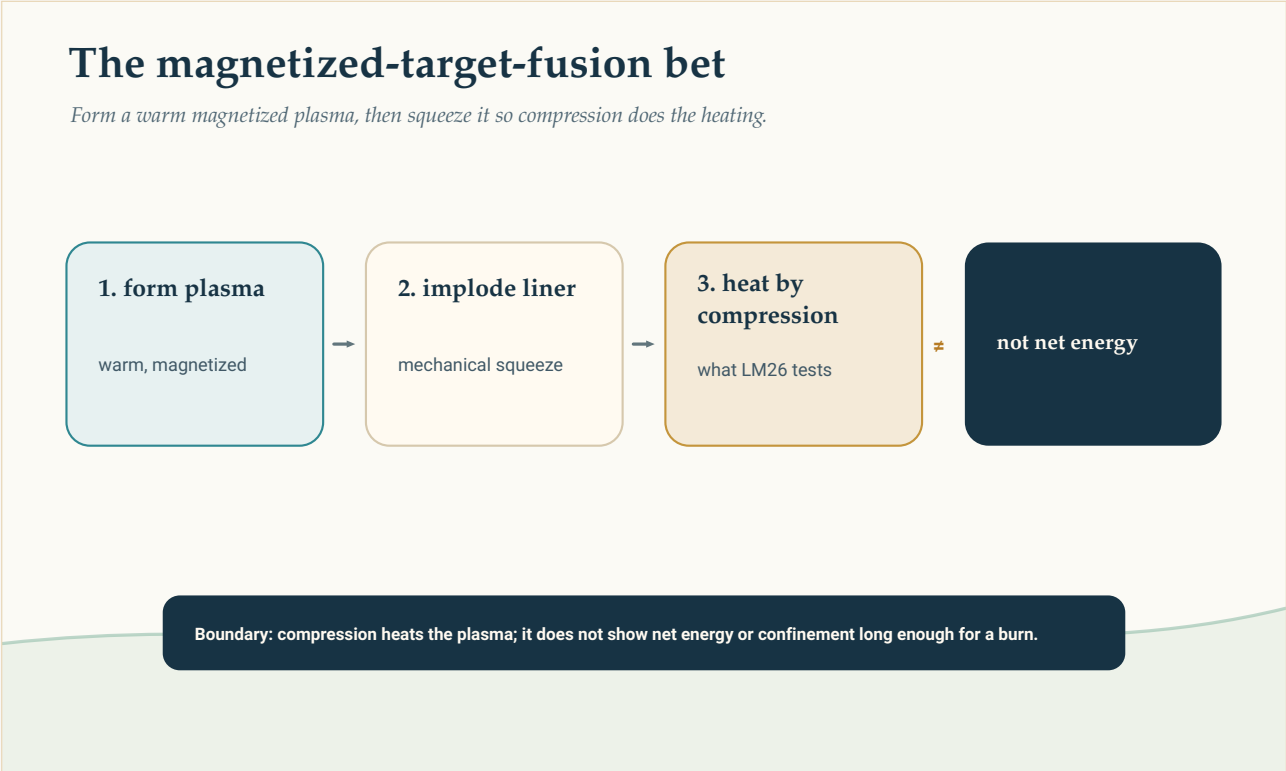
[video pending]

Ovo je promotivna snimka General Fusiona, uključena kako bi se vidjelo kako LM26 izgleda; nije neovisni dokaz da će stroj dosegnuti buduće fuzijske ciljeve.



Ljestvica temperature: oko 0.72 keV za LM26, cilj General Fusiona od 1 keV i oko 10 keV potrebnih gorućoj deuterij–tricij plazmi. Temperatura je samo jedna od triju Lawsonovih veličina.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Fuzija magnetizirane mete: stvoriti toplu magnetiziranu plazmu, zatim je sabiti implodirajućom oblogom kako bi stiskanje obavilo zagrijavanje — oklada na kompresiju poput one u dizelskom motoru. LM26 je ispitao zagrijava

li kompresija plazmu; nije ispitao neto energiju ni zatočenje.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Što znače „fuzija magnetizirane mete", „keV" i Lawsonov kriterij

Temperatura plazme u fuziji obično se navodi u **kiloelektronvoltima (keV)**, a ne u stupnjevima: 1 keV odgovara približno **11.6 milijuna °C**. Deuterij–tricij gorivo mora dosegnuti otprilike **10 keV** (više od 100 milijuna °C) kako bi se učinkovito fuzioniralo — ali temperatura je samo jedan od triju uvjeta koji moraju biti zadovoljeni istodobno. **Lawsonov kriterij** kaže da reaktor treba i dovoljnu **gustoću** i dovoljno dugo **vrijeme zatočenja**, što se često objedinjuje u jedan „trostruki produkt" (temperatura × gustoća × vrijeme zatočenja). Zagrijavanje plazme nužno je, ali samo po sebi ni približno nije dovoljno.
Fuzija magnetizirane mete (MTF) srednji je put između dvaju glavnih pristupa. Umjesto da se vruća plazma dugo zadržava golemim magnetima ili da se sićušna meta gotovo trenutačno zagrije laserima, MTF stvara magnetiziranu plazmu i potom je mehanički sabija tijekom mikrosekundi. Ako pristup uspije, kompresija istodobno zagrijava plazmu i povećava joj gustoću — potencijalno do fuzijskih uvjeta bez magneta veličine ITER-a ili lasera veličine NIF-a. Provjeriti proizvodi li kompresija to zagrijavanje u stvarnom stroju upravo je svrha pokusa poput LM26.

Što su autori napravili

- Izgradili su i pokrenuli **LM26**, stroj za fuziju magnetizirane mete tvrtke General Fusion: stvara se deuterijska plazma sfernog tokamaka, a zatim je prema unutra sabija implodirajuća **čvrsta litijeva obloga** — otprilike **3× radijalna kompresija**.
- Proveli su **prvih 11 kompresijskih impulsa** s velikim brojem dijagnostičkih instrumenata, rekonstruirali temperaturu, gustoću i magnetsko polje plazme tijekom vremena te bilježili emitirane neutrone, rendgensko zračenje i vidljivu svjetlost, kao i snimke interakcije plazme i stijenke brzom kamerom.
- Izgradili su **integrirani fizikalni model** koji uspoređuje zagrijavanje kompresijom s omskim zagrijavanjem (od vlastite struje plazme) i energijom izgubljenom na granici, a zatim ga usporedili s izmjerenim podacima kako bi procijenili odakle zagrijavanje doista dolazi.

Što su otkrili

- **Plazma se zagrijavala dok je bila stiskana.** U najboljim impulsima temperatura elektrona porasla je za **više od 3×**, gustoća elektrona za oko **10×**, a poloidalno magnetsko polje za oko **10×**, uz 3× radijalnu kompresiju. U najboljem impulsu rad mjeri **vršnu temperaturu elektrona od oko 0.72 keV** (718 ± 80 eV, Thomsonovim raspršenjem) — približno 8 milijuna °C.
- **Većina zagrijavanja pripisuje se kompresiji.** Njihov integrirani model zaključuje da je *većina*

porasta temperature došla od same mehaničke kompresije — mehanizma o kojem ovisi cijeli MTF pristup — a ne od omskog zagrijavanja.
- **Emisija neutrona rasla je tijekom kompresije**, što je u skladu s toplijom i gušćom deuterijskom plazmom.

Što ovo ne pokazuje

- Ovo **nije** fuzijska energija, breakeven ni neto dobitak. Ništa ovdje nije proizvelo više energije nego što je bilo potrebno za rad stroja. Rezultat se odnosi na *zagrijavanje plazme* — jedan korak u fuzijskom ciklusu — a ne na energetsku bilancu reaktora.
- Temperatura je **i dalje oko deset puta preniska** za goruću plazmu. Oko 0.72 keV odgovara približno 8 milijuna °C; deuterij–tricij gorivu potrebno je reda veličine **10 keV (više od 100 milijuna °C)** *i* dovoljno visok produkt gustoće i vremena zatočenja da bi se održalo izgaranje. Sljedeći vlastiti cilj General Fusiona jest **1 keV** — što je samo po sebi još daleko od paljenja.
- Tvrdnja da je „**većina zagrijavanja posljedica kompresije**" **zaključak temeljen na modelu**, a ne izravno očitanje. Dobivena je integriranim fizikalnim modelom prilagođenim dijagnostičkim podacima; koliko vjerujete razdvajanju doprinosa kompresije, omskog zagrijavanja i gubitaka ovisi o tome koliko vjerujete tom modelu.
- Riječ je o **preprintu tvrtke koji nije recenziran.** Rezultate izvještava isti tim koji je izgradio stroj i prikupio financiranje na temelju njegova obećanja; neovisna recenzija još nije provedena.
- Porast broja neutrona **nije** fuzijski prinos relevantan za proizvodnju energije. Pri ovim uvjetima očekuje se nešto neutrona iz deuterija, ali količine su daleko ispod onoga što bi bilo korisno za energetiku.
- Rezultat ne govori ništa o zasebnoj tvrdnji tvrtke da bi **buduća elektrana isporučivala struju u mrežu** — tvrdnji prema kojoj su neovisni izvještaji bili izrazito oprezni.

Koliko su dokazi jaki

- **Središnja tvrdnja uska je i provjerljiva.** „Sabili smo magnetiziranu plazmu i ona se zagrijala, uglavnom zbog kompresije" upravo je test mehanizma koji MTF mora proći, a rad ga podupire dobro instrumentiranim nizom impulsa i eksplicitnim modelom energetske bilance. Ako preživi recenziju, to je stvarna — iako rana — potvrda pristupa.
- **Ograničenja su strukturna, ne kozmetička.** Jedanaest impulsa, jedan stroj, jedan tim, rad još nije recenziran, a glavna temperatura za cijeli je red veličine ispod goruće plazme. Ključni zaključak — da *većina zagrijavanja dolazi od kompresije* — počiva na modelu, pa će središnje pitanje recenzije biti koliko je to razdvajanje robusno.
- **Pošten status jest demonstriran mehanizam, ne ostvarena energetska prekretnica.** Rezultat pomiče MTF od „kompresija bi *trebala* zagrijati plazmu" prema „kompresija *zagrijava* plazmu", i ne opravdava ništa grandioznije od toga.

Zašto je to važno

Zanimljivost fuzije magnetizirane mete više je ekonomska nego rekordna. Ako mehanička kompresija može zagrijati plazmu prema fuzijskim uvjetima, možda se do njih može doći bez magneta veličine ITER-a ili lasera veličine NIF-a — jeftinijim putem koji se brže može iterirati, *ako* radi. Cijela igra je u tom „ako", a on se odlučuje na neglamuroznim kontrolnim točkama poput ove: daje li kompresija doista zagrijavanje koje modeli obećavaju? Odgovor LM26 na prvim impulsima glasi: uvjetno da. Vrijedi ga zabilježiti upravo *zato što* je uvjetan — jedna prečka na dugim ljestvama, o kojoj izvještavaju ljudi koji se po njima penju, koju još nitko drugi nije provjerio i koja je još daleko od vrha.

Sažetak bez uljepšavanja

LM26 tvrtke General Fusion sabio je magnetiziranu deuterijsku plazmu implodirajućom litijevom oblogom i pokazao da se plazma zagrijava — temperatura elektrona porasla je više od tri puta, do izmjerenog vrha od oko 0.72 keV (718 ± 80 eV, ~8 milijuna °C) — a analiza tvrtke većinu zagrijavanja pripisuje samoj kompresiji, mehanizmu na kojem počiva njihov pristup fuziji magnetizirane mete. To je stvaran i specifičan inženjerski korak na tom putu prema fuziji. Ali to su i prvih 11 impulsa na jednom stroju, opisani u preprintu tvrtke koji nije recenziran, pri temperaturi oko deset puta nižoj od one potrebne gorućoj plazmi, bez neto energije, breakevena i električne energije. Pokazan mehanizam, ne izgrađena elektrana.

Izvori

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