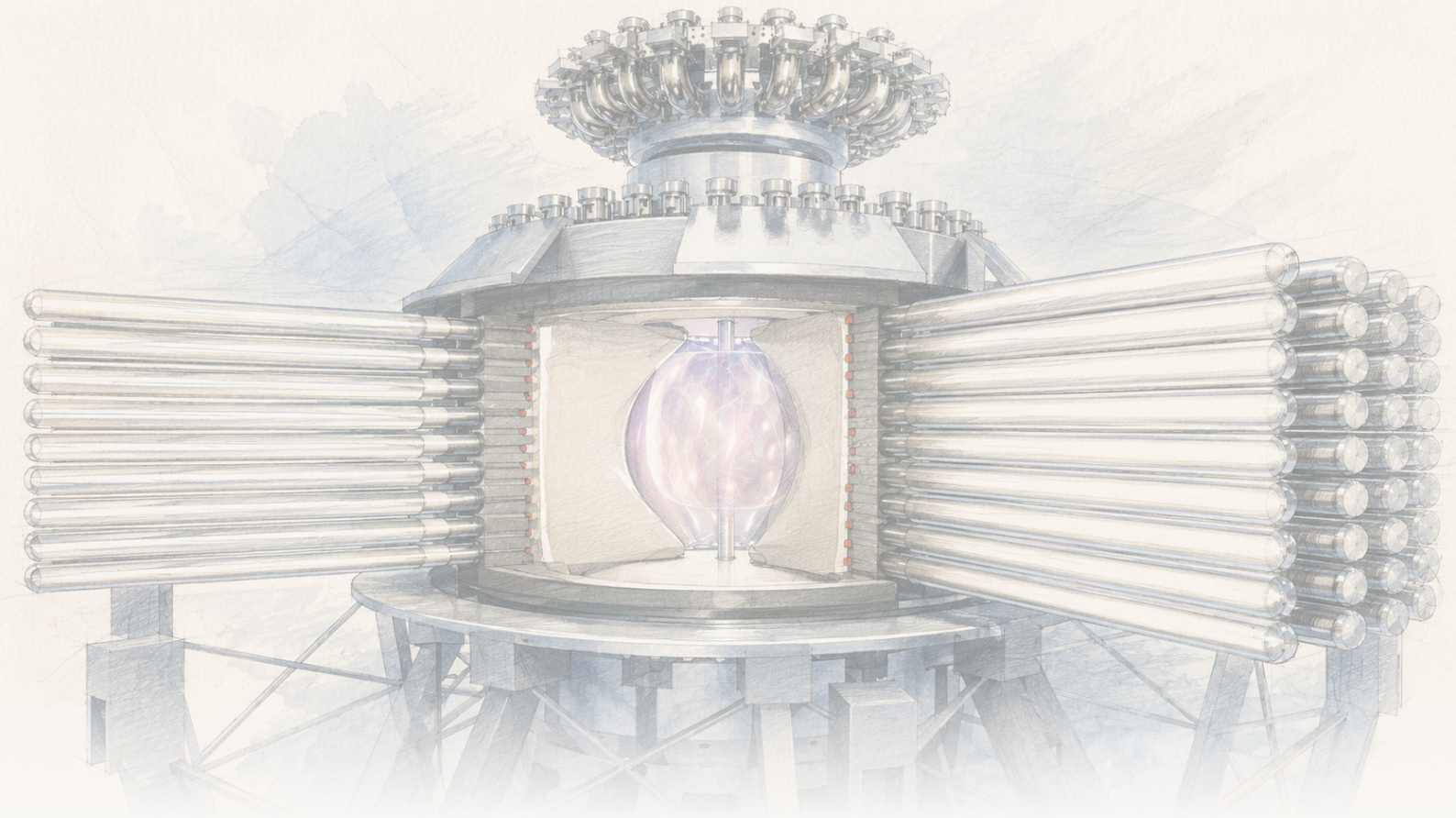


The Clean Paper

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

Sintezės įrenginys įkaitino plazmą ją suspausdamas — tikras žingsnis pirmyn, bet dar ne elektrinė

„General Fusion“ LM26 suspaudė magnetizuotą deuterio plazmą į vidų griūvančiu ličio apvalkalu ir parodė, kad ji įkaista: elektronų temperatūra padidėjo daugiau kaip tris kartus iki maždaug 0,72 keV (718 ± 80 eV, apie 8 mln. °C). Bendrovės analizė didžiąją kaitinimo dalį priskiria pačiam suspaudimui — mechanizmui, kuriuo remiasi magnetizuoto taikinio sintezė. Tai tikras inžinerinis patikros taškas. Tačiau tai pirmieji 11 vieno įrenginio šūvių, aprašyti dar nerecenzuotame bendrovės preprinte, o temperatūra tebėra maždaug dešimt kartų mažesnė už reikalingą degančiai plazmai: nėra nei grynosios energijos, nei energetinio lūžio, nei elektros.

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

Sintezės įrenginys įkaitino plazmą ją suspausdamas — tikras žingsnis pirmyn, bet dar ne elektrinė

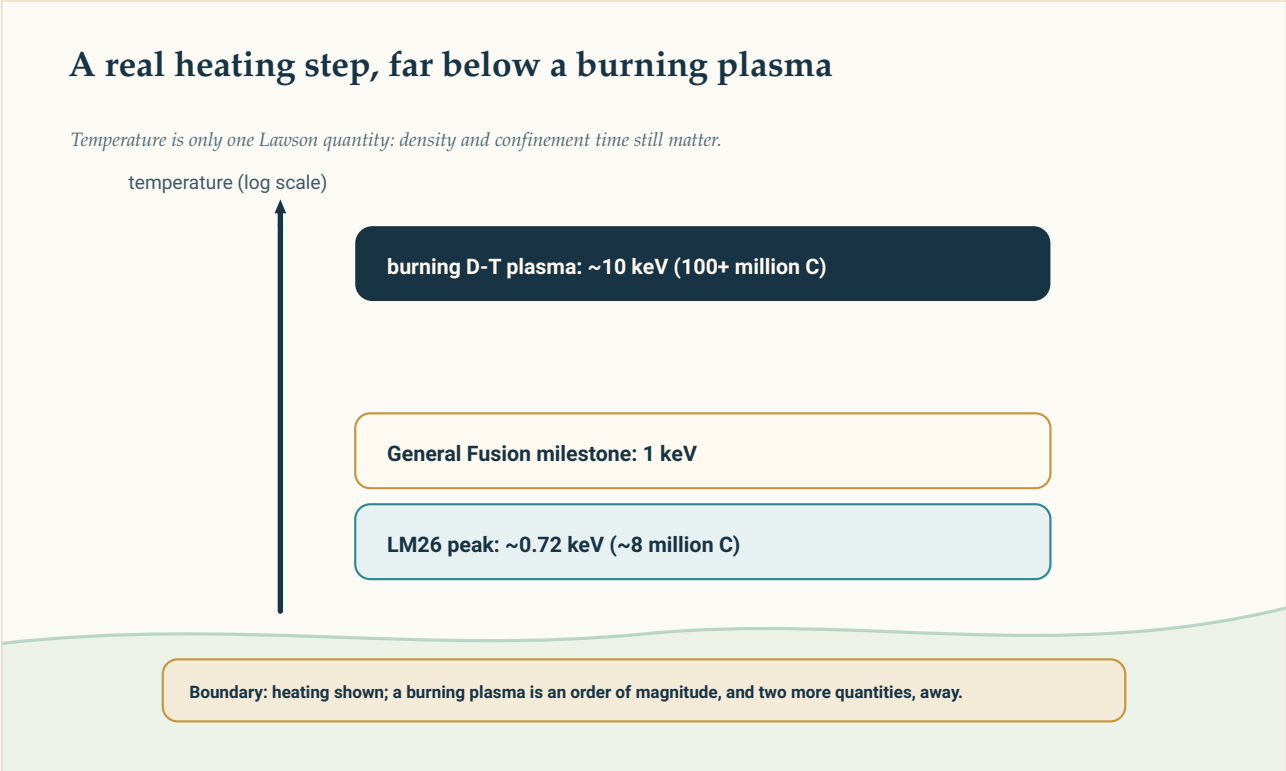
Kad branduolių sintezės reaktorius grąžintų daugiau energijos, negu reikia jam veikti, kuro plazma vienu metu turi būti pakankamai karšta, pakankamai tanki ir pakankamai ilgai išlaikoma — šios trys sąlygos sudaro vadinamąjį Lawsono kriterijų. Didžioji dalis sintezės tyrimų šio tikslo siekia milžiniškais superlaidžiais magnetais (tokamakuose, pavyzdžiui, ITER) arba didžiulių lazerių masyvais (inercinėje sintezėje, kaip JAV National Ignition Facility). Mažesnė įmonių grupė renkasi trečią kelią — **magnetizuoto taikinio sintezę** (MTF): pirmiausia suformuoti šiltą, magnetizuotą plazmą, o tada ją labai greitai mechaniškai *suspausti*, kad pats suspaudimas ją įkaitintų — panašiai kaip dyzeliniame variklyje kuras užsidega nuo suspaudimo, o ne nuo kibirkšties.

2026 m. birželį Kanados bendrovė **General Fusion** paskelbė savo **Lawson Machine 26 (LM26)** rezultatus, tikrinančius esminę šio metodo prielaidą: ar mechaniškai suspaudus magnetizuotą plazmą ji iš tiesų įkaista taip, kaip numato modeliai? Per pirmuosius 11 suspaudimo bandymų — sferinio tokamako deuterio plazmą spaudžiant į vidų griūvančiu *kieto ličio apvalkalu* — geriausiuose šūviuose plazma suspaudimo metu tapo gerokai karštesnė, tankesnė ir stipriau magnetizuota. Bendrovės analizė didžiąją įkaitimo dalį priskiria pačiam suspaudimui.

Tai tikras ir konkretus inžinerinis rezultatas MTF metodui. Tačiau tai taip pat tik pirmoji bandymų serija, aprašyta **bendrovės preprinte, kuris dar nerecenzuotas**, o pasiekta temperatūra tebėra gerokai žemesnė už reikalingą degančiai plazmai. Tai nėra sintezės energija, ne energetinis balansas ir ne elektrinė.

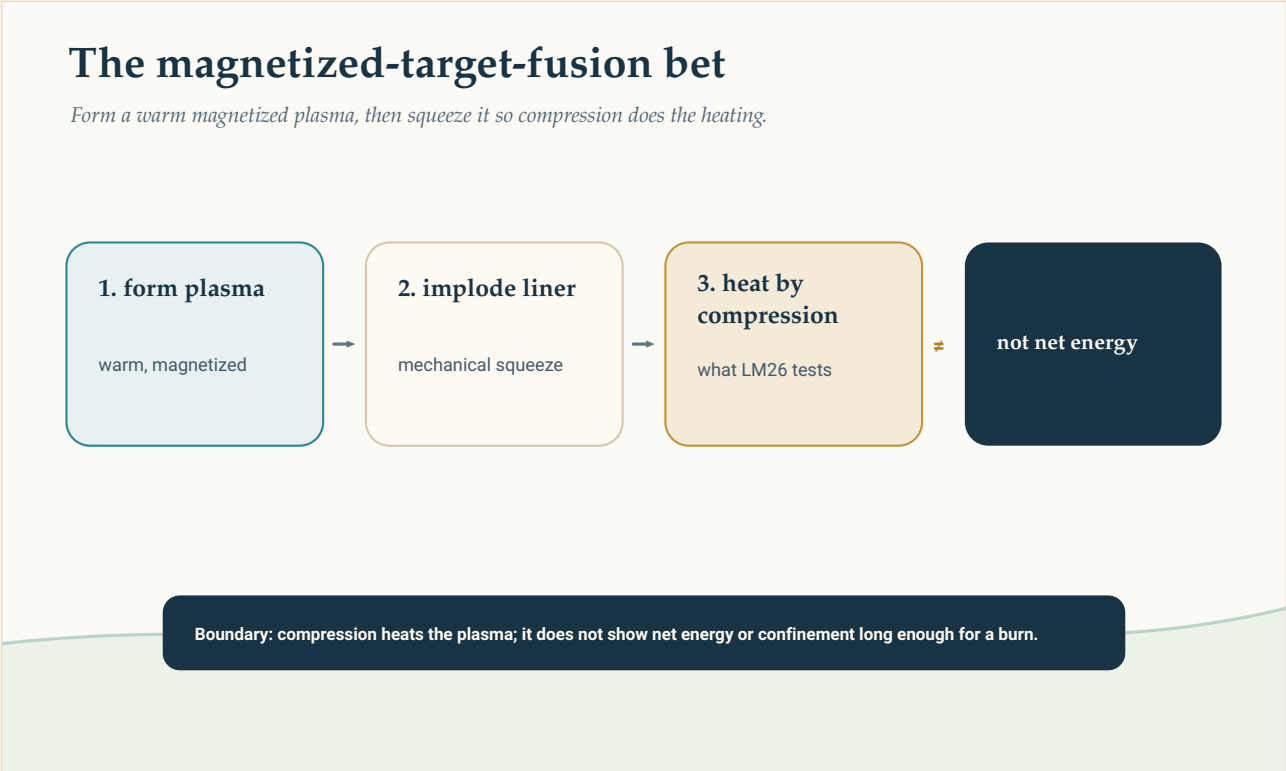
[video pending]

Tai „General Fusion“ reklaminė medžiaga, įtraukta tam, kad būtų matyti, kaip atrodo LM26; ji nėra nepriklausomas įrodymas, kad įrenginys pasieks būsimus sintezės tikslus.



Temperatūrų skalė: LM26 pasiekta ~0,72 keV, „General Fusion“ 1 keV tarpinis tikslas ir maždaug 10 keV, kurių reikia degančiai deuterio–tričio plazmai. Temperatūra yra tik viena iš trijų Lawsono kriterijaus dedamųjų.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Magnetizuoto taikinio sintezė: suformuojama šilta magnetizuota plazma, tada ji suspaudžiama į vidų griūvančiu apvalkalu, kad suspaudimas ją įkaitintų — tai tarsi dyzelinio variklio suspaudimo principas. LM26 tikrino, ar

suspaudimas iš tiesų kaitina plazmą, o ne ar gaunama grynoji energija ar pakankama išlaikymo trukmė.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Ką reiškia „magnetizuoto taikinio sintezė“, „keV“ ir Lawsono kriterijus

Sintezės tyrimuose plazmos temperatūra paprastai nurodoma **kiloelektronvoltais (keV)**, o ne laipsniais: 1 keV atitinka maždaug **11,6 milijono °C**. Kad deuterio ir tričio kuras sintezuotųsi efektyviai, reikia maždaug **10 keV** (daugiau kaip 100 milijonų °C), tačiau vien temperatūros neužtenka. **Lawsono kriterijus** reikalauja ir pakankamo **tankio**, ir pakankamos **išlaikymo trukmės**. Dažnai šios trys sąlygos sujungiamos į vadinamąjį „trigubą sandaugą“ (temperatūra × tankis × išlaikymo trukmė). Įkaitinti plazmą būtina, bet vien to iki veikiančio reaktoriaus labai toli.

Magnetizuoto taikinio sintezė (MTF) yra tarpinis kelias tarp dviejų pagrindinių metodų. Užuot ilgai laikius karštą plazmą milžiniškais magnetais arba beveik akimirksniu įkaitinus mažą taikinį lazeriais, MTF pirmiausia suformuoja magnetizuotą plazmą ir tada per mikrosekundes ją mechaniškai suspaudžia. Jei metodas veikia, suspaudimas vienu metu ir kaitina plazmą, ir didina jos tankį — potencialiai leidžiant pasiekti sintezei tinkamas sąlygas be ITER masto magnetų ar NIF masto lazerių. Ar tikrame įrenginyje suspaudimas iš tiesų suteikia žadėtą įkaitimą, ir yra būtent toks klausimas, kurį tikrina LM26.

Ką padarė autoriai

- Sukonstravo ir išbandė **LM26**, „General Fusion“ magnetizuoto taikinio sintezės įrenginį: jame suformuojama sferinio tokamako deuterio plazma, o tada ją suspaudžia į vidų judantis **kieto ličio apvalkalas** — maždaug **3 kartus sumažindamas radialinį dydį**.
- Atliko **pirmuosius 11 suspaudimo šūvių** ir gausiai juos instrumentavo: atkūrė plazmos temperatūros, tankio ir magnetinio lauko kitimą laike, registravo neutronus, rentgeno spinduliuotę ir matomą šviesą, taip pat greitomis kameromis filmavo plazmos sąveiką su sienelėmis.
- Sukūrė **integruotą fizikinį modelį**, kuriame suspaudimo kaitinimas sulyginamas su ominiu kaitinimu (dėl pačios plazmos srovės) ir energijos nuostoliais ties riba. Modelį palygino su matavimais, kad įvertintų, iš kur kilo stebėtas įkaitimas.

Ką jie nustatė

- **Spaudžiama plazma įkaito.** Geriausiuose šūviuose elektronų temperatūra padidėjo **daugiau kaip 3 kartus**, elektronų tankis — maždaug **10 kartų**, o poloidinis magnetinis laukas — apie **10 kartų**, kai radialinis dydis sumažėjo tris kartus. Geriausiame šūvyje išmatuota **didžiausia elektronų temperatūra apie 0,72 keV** (718 ± 80 eV, matuota Thomson sklaida) — maždaug 8 milijonai °C.
- **Didžioji dalis kaitinimo priskiriama suspaudimui.** Integruotas modelis rodo, kad *daugiau nei pusė* temperatūros padidėjimo kilo dėl mechaninio suspaudimo — būtent to mechanizmo, kuriuo

remiasi visas MTF metodas — o ne dėl ominio kaitinimo.
- **Suspaudimo metu padidėjo neutronų emisija**, kaip ir tikėtasi karštesnėje bei tankesnėje deuterio plazmoje.

Ko tai neparodo

- Tai **nėra** sintezės energija, energetinis lūžis ar grynasis energijos prieaugis. Čia nebuvo pagaminta daugiau energijos, negu sunaudota įrenginiui. Rezultatas susijęs su *plazmos kaitinimu* — vienu sintezės ciklo žingsniu — o ne su reaktoriaus energijos balansu.
- Temperatūra **vis dar maždaug dešimt kartų per maža** degančiai plazmai. 0,72 keV yra apie 8 milijonus °C; deuterio–tričio kurui reikia maždaug **10 keV (daugiau kaip 100 milijonų °C)** ir pakankamos tankio bei išlaikymo trukmės sandaugos. Pačios „General Fusion“ kitas tikslas — **1 keV** — irgi dar labai toli nuo užsidegimo.
- Teiginys, kad „**daugiausia kaitina suspaudimas**“, yra **modeliu pagrįsta išvada**, o ne tiesioginis matuoklio parodymas. Ji gaunama pritaikius integruotą fizikinį modelį diagnostikos duomenims; pasitikėjimas kaitinimo padalijimu į suspaudimą, ominį kaitinimą ir nuostolius priklauso nuo pasitikėjimo pačiu modeliu.
- Tai **bendrovės preprintas, dar nerecenzuotas.** Rezultatus paskelbė pati mašiną sukūrusi komanda, kurios verslas ir finansavimas remiasi šio metodo perspektyva; nepriklausomos recenzijos dar nebuvo.
- Neutronų padidėjimas **nėra energetiškai reikšminga sintezės išeiga.** Esant tokioms sąlygoms deuteris gali išskirti šiek tiek neutronų, tačiau jų kiekis nė iš tolo nepakankamas energijai gaminti.
- Rezultatas nieko neįrodo apie atskirą bendrovės teiginį, kad **būsima elektrinė tieks elektrą į tinklą** — nepriklausomi šaltiniai šį pažadą vertina labai atsargiai.

Kiek tvirti yra įrodymai

- **Pagrindinis teiginys siauras ir patikrinamas.** „Suspaudėme magnetizuotą plazmą, ji įkaito ir didžioji kaitinimo dalis kilo dėl suspaudimo“ yra būtent toks mechanizmo bandymas, kurį MTF metodas turi išlaikyti. Straipsnyje pateikta daug diagnostikos duomenų ir aiškus energijos balanso modelis. Jei rezultatas atlaikys recenzavimą, tai bus tikras, nors ir ankstyvas, šio metodo patvirtinimas.
- **Apribojimai esminiai, o ne kosmetiniai.** Vienuolika šūvių, vienas įrenginys, viena komanda, dar be recenzijos, o svarbiausia temperatūra vis dar eilės dydžiu žemesnė už reikalingą degančiai plazmai. Esminė išvada — kad dauguma šilumos kilo iš suspaudimo — remiasi modeliu, todėl svarbiausias recenzavimo klausimas bus, ar šis energijos padalijimas iš tiesų atsparus prielaidoms.
- **Sąžiningas statusas: parodytas mechanizmas, o ne pasiektas energetinis tikslas.** MTF žingsnis pasislenka nuo „suspaudimas *turėtų* kaitinti plazmą“ link „suspaudimas *kaitina* plazmą“, bet ne toliau.

Kodėl tai svarbu

Įdomiausia magnetizuoto taikinio sintezės dalis yra ekonomika, o ne rekordai. Jei mechaninis suspaudimas gali pakelti plazmą link sintezės sąlygų, teoriškai tai leistų apsieiti be ITER masto magnetų ar NIF masto lazerių — gauti pigesnį ir greičiau tobulinamą kelią, *jeigu* jis veiks. Būtent tas „jeigu“ ir yra svarbiausias. Jis sprendžiamas tokiais neįspūdingais, bet esminiais patikros taškais: ar suspaudimas tikrai suteikia tiek kaitinimo, kiek žada modeliai? Pirmųjų LM26 šūvių atsakymas yra atsargus „taip“. Tai verta pažymėti būtent todėl, kad atsakymas atsargus — vienas laiptelis ilgoje kopėčioje, apie kurį praneša patys ja kopiantys žmonės, dar nepatikrintas nepriklausomai ir vis dar labai toli nuo viršaus.

Trumpa santrauka

„General Fusion“ LM26 suspaudė magnetizuotą deuterio plazmą į vidų griūvančiu ličio apvalkalu ir parodė, kad ji įkaista: elektronų temperatūra padidėjo daugiau kaip tris kartus iki išmatuoto maždaug 0,72 keV maksimumo (718 ± 80 eV, ~8 milijonai °C). Bendrovės analizė didžiąją kaitinimo dalį priskiria pačiam suspaudimui — mechanizmui, kuriuo remiasi jos magnetizuoto taikinio sintezės metodas. Tai tikras ir konkretus inžinerinis žingsnis šiam sintezės keliui. Tačiau tai tik pirmieji 11 vieno įrenginio šūvių, aprašyti nerecenzuotame bendrovės preprinte, o temperatūra maždaug dešimt kartų per maža degančiai plazmai; nebuvo nei grynosios energijos, nei energetinio lūžio, nei elektros. Parodytas mechanizmas, ne pastatyta elektrinė.

Šaltiniai

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