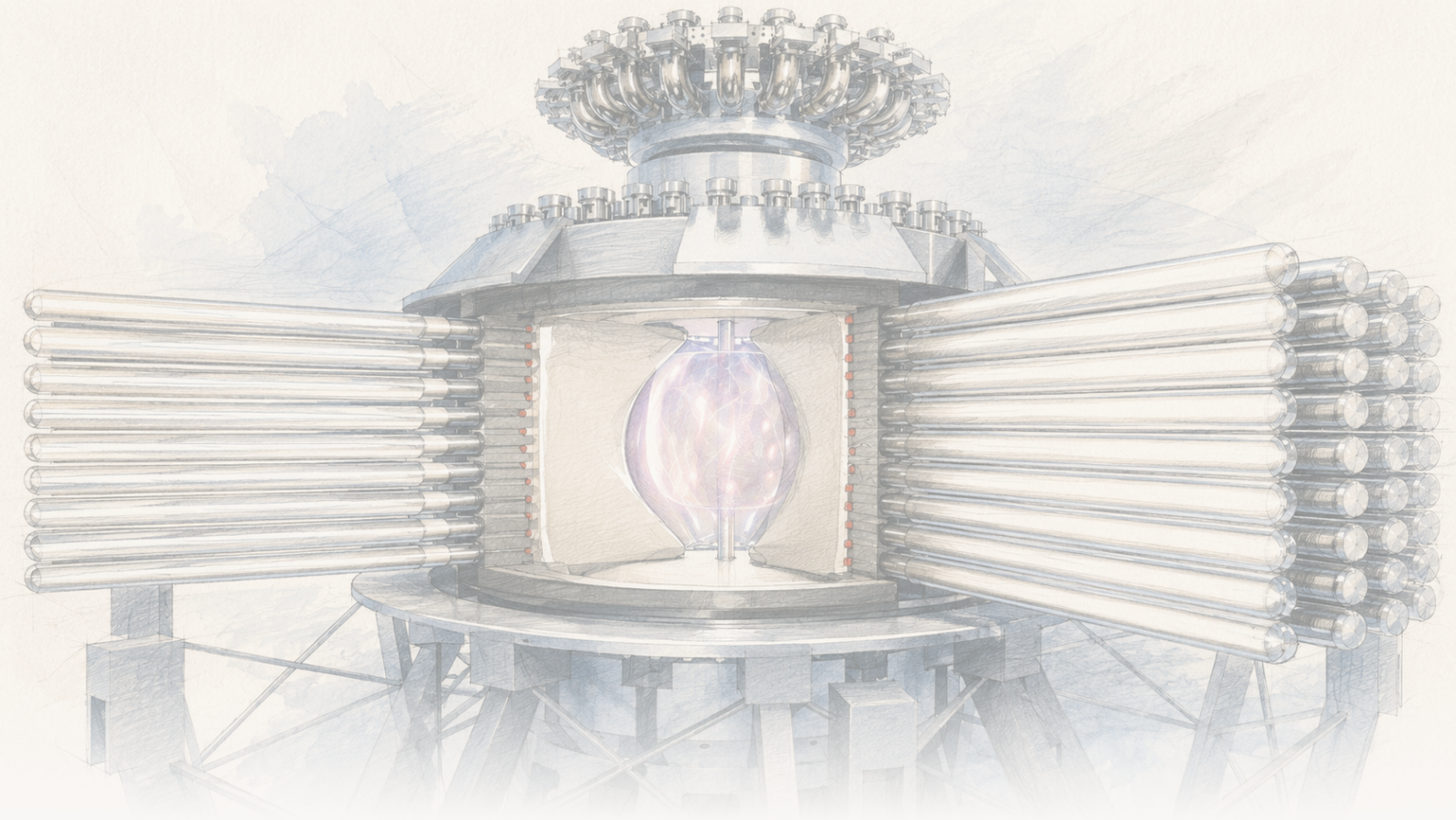


The Clean Paper

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

Fuusiolaite kuumensi plasmaa puristamalla sitä — todellinen askel, mutta ei voimalaitos

General Fusionin LM26 puristi magnetoidun deuteriumplasman kokoon romahtavalla kiinteällä litiumvaipalla ja havaitsi plasman kuumenevan: elektronilämpötila yli kolminkertaistui mitattuun noin 0.72 keV:n huippuun (718 ± 80 eV, noin 8 miljoonaa °C), ja analyysin mukaan suurin osa lämmöstä tuli itse puristuksesta — juuri siitä mekanismista, johon yhtiön magnetoituun kohdefuusioon perustuva lähestymistapa nojaa. Se on todellinen tekninen tarkistuspiste tällä fuusioreitillä. Samalla kyse on yhden laitteen ensimmäisistä 11 laukauksesta, joita kuvataan yhtiön vertaisarvioimattomassa preprintissä, ja lämpötila on yhä noin kymmenen kertaa liian matala palavalle plasmalle. Ei nettotuottoa, ei breakeveniä, ei sähköä. Mekanismi osoitettiin; voimalaitosta ei rakennettu.

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

Fuusiolaite kuumensi plasmaa puristamalla sitä — todellinen askel, mutta ei voimalaitos

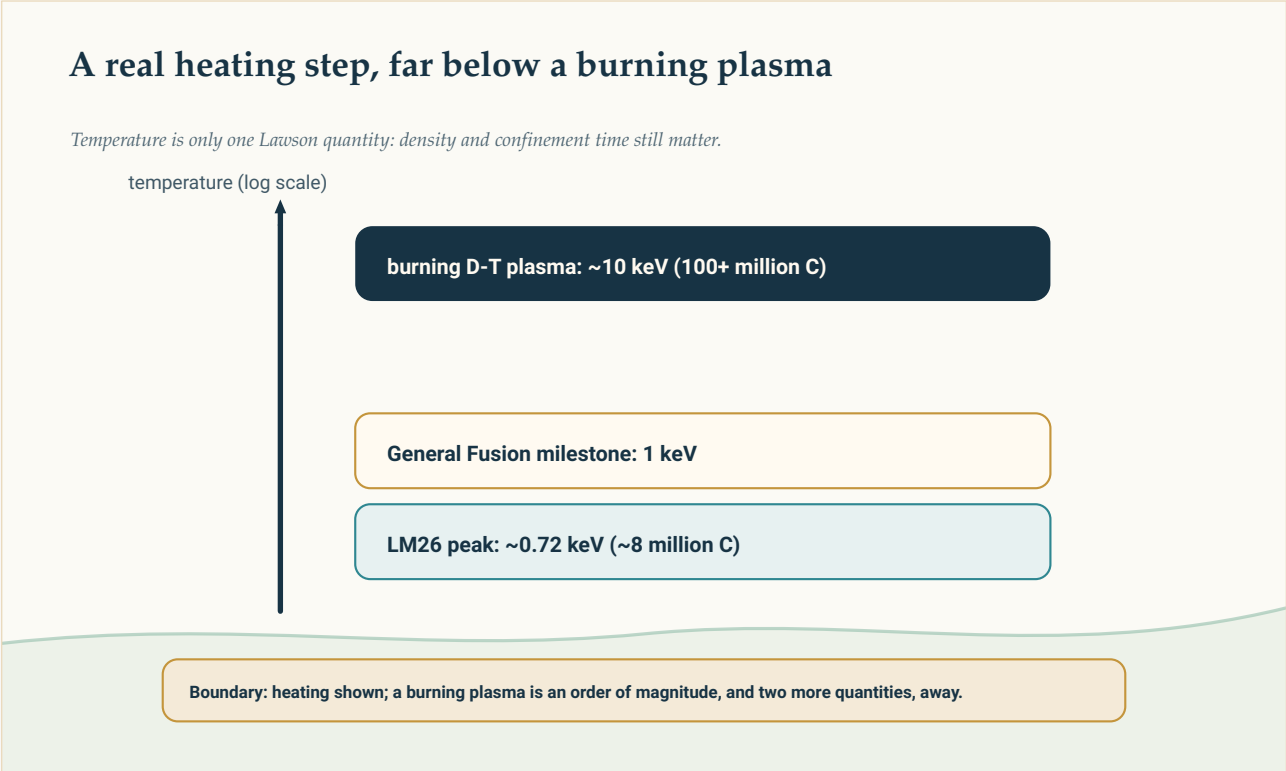
Jotta fuusioreaktori antaisi takaisin enemmän energiaa kuin sen käyttäminen vaatii, polttoaineplasman on oltava samanaikaisesti riittävän kuumaa, riittävän tiheää ja koossa riittävän pitkään — nämä kolme suuretta niputetaan fyysikoiden Lawsonin kriteeriksi kutsumaan ehtoon. Suurin osa alasta tavoittelee tätä valtavilla suprajohtavilla magneeteilla (ITERin kaltaiset tokamakit) tai jättimäisten laserien riveillä (inertiaalinen koossapito, kuten Yhdysvaltain National Ignition Facilityssä). Pienempi joukko yrityksiä panostaa kolmanteen reittiin, **magnetoituun kohdefuusioon** (*magnetized target fusion*, MTF): muodostetaan lämmin magnetoitu plasma ja sitten *puristetaan* se nopeasti mekaanisesti kokoon niin, että puristus itse kuumentaa plasman — vähän kuten dieselmoottori sytyttää polttoaineensa puristuksella eikä kipinällä.

Kesäkuussa 2026 kanadalainen **General Fusion** julkaisi tuloksia **Lawson Machine 26 (LM26)** -laitteestaan. Niillä testattiin tämän vedon ydinkysymystä: kuumentaako magnetoidun plasman mekaaninen puristaminen sitä todella niin kuin mallit ennustavat? Ensimmäisissä 11 puristuslaukauksessa pallomaisen tokamakin deuteriumplasma puristettiin kokoon sisäänpäin romahtavalla *kiinteällä litiumvaipalla*. Parhaissa laukauksissa plasma kuumeni selvästi, tiheni ja magnetoitui voimakkaammin puristuksen aikana, ja yhtiön analyysin mukaan suurin osa kuumenemisesta johtui itse puristuksesta.

Tämä on aito, tarkkarajainen tekninen tulos MTF-lähestymistavalle. Samalla se on ensimmäinen laukausjoukko, jota kuvataan **yhtiön vertaisarvioimattomassa preprintissä**, lämpötilassa joka on yhä kaukana palavan plasman vaatimasta — eikä se ole fuusioenergiaa, breakeven, eikä voimalaitos.

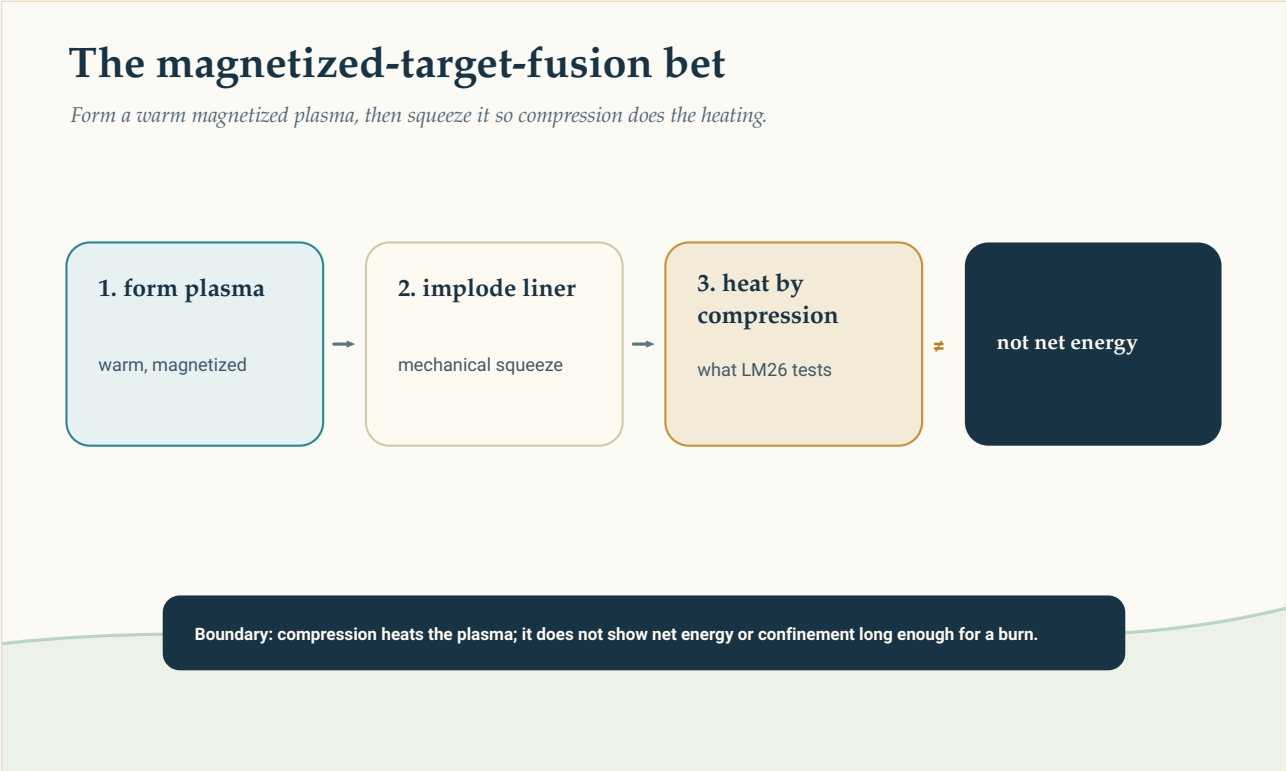
[video pending]

Tämä on General Fusionin promootiovideota, joka on mukana näyttämässä, miltä LM26 näyttää; se ei ole riippumatonta näyttöä siitä, että laite saavuttaisi tulevat fuusiotavoitteensa.



Lämpötila-asteikko: LM26:n ~0.72 keV, General Fusionin 1 keV:n välitavoite ja palavan deuterium–tritiumplasman tarvitsema ~10 keV. Lämpötila on vain yksi Lawsonin kolmesta suureesta.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Magnetoitu kohdefuusio: muodostetaan lämmin magnetoitu plasma ja puristetaan se sisäänpäin romahtavalla vaipalla niin, että puristus tuottaa lämmön — dieselpuristuksen kaltainen idea. LM26 testasi, kuumentaako

puristus plasman; ei nettoenergiaa eikä koossapitoa.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Mitä ”magnetoitu kohdefuusio”, ”keV” ja Lawsonin kriteeri tarkoittavat

Fuusioplasman lämpötila ilmoitetaan yleensä asteiden sijasta **kiloelektronivoltteina (keV)**: 1 keV vastaa noin **11.6 miljoonaa °C:ta**. Deuterium–tritiumpolttoaineen on päästävä suunnilleen **10 keV:iin** (yli 100 miljoonaan °C:seen), jotta fuusio olisi tehokasta — mutta lämpötila on vain yksi kolmesta ehdosta, joiden on täytyttävä samanaikaisesti. **Lawsonin kriteeri** edellyttää myös riittävää **tiheyttä** ja riittävää **koossapitoaikaa**, jotka yhdistetään usein yhdeksi ”kolmoistuloksi” (lämpötila × tiheys × koossapitoaika). Plasman kuumentaminen on välttämätöntä, mutta yksinään se ei ole läheskään riittävää.

Magnetoitu kohdefuusio (MTF) sijoittuu kahden valtavirran lähestymistavan väliin. Sen sijaan, että kuumaa plasmaa pidettäisiin pitkään koossa valtavilla magneeteilla tai pientä kohdetta kuumennettaisiin lähes hetkessä lasereilla, MTF muodostaa magnetoidun plasman ja puristaa sitä mekaanisesti mikrosekuntien aikana. Jos menetelmä toimii, puristus sekä kuumentaa plasman että nostaa sen tiheyttä — mahdollisesti kohti fuusio-olosuhteita ilman ITER-luokan magneetteja tai NIF-luokan lasereita. Juuri sitä, tuottaako puristus oikeassa laitteessa todella tämän kuumenemisen, LM26:n kaltainen koe testaa.

Mitä tutkijat tekivät

- Rakensivat ja laukaisivat **LM26:n**, General Fusionin magnetoituun kohdefuusioon tarkoitetun laitteen: pallomaisen tokamakin deuteriumplasma muodostetaan ja puristetaan sitten sisäänpäin liikkuvalla **kiinteällä litiumvaipalla** — säteittäinen puristus on noin **3**×.
- Tekivät **ensimmäiset 11 puristuslaukausta** ja mittasivat niitä laajasti. Plasman lämpötila, tiheys ja magneettikenttä rekonstruoitiin ajan funktiona; samalla kirjattiin neutronit, röntgensäteet ja näkyvä valo sekä nopeilla kameroilla plasma–seinämävuorovaikutus.
- Rakensivat **integroidun fysiikkamallin**, joka tasapainottaa puristuslämmityksen, ohmisen lämmityksen (plasman omasta virrasta) ja reunoille menetetyn energian. Mallia verrattiin mitattuun dataan sen päättelemiseksi, mistä lämpö käytännössä tuli.

Mitä he löysivät

- **Plasma kuumeni, kun sitä puristettiin.** Parhaissa laukauksissa elektronilämpötila nousi **yli 3**×, elektronitiheys noin **10**× ja poloidinen magneettikenttä noin **10**×, kun säteittäinen puristus oli 3×. Parhaassa laukauksessa artikkeli mittaa elektronilämpötilan huipuksi noin **0.72 keV** (718 ± 80 eV Thomson-sironnalla) — suunnilleen 8 miljoonaa °C.
- **Suurin osa kuumenemisesta selitetään puristuksella.** Integroitu malli päättelee, että *enemmistö* lämpötilan noususta tuli itse mekaanisesta puristuksesta — juuri siitä mekanismista, johon koko

MTF-ajatus nojaa — eikä ohmisesta lämmityksestä.
- **Neutroniemissio kasvoi puristuksen aikana**, mikä sopii yhteen kuumemman ja tiheämmän deuteriumplasman kanssa.

Mitä tämä ei osoita

- Tämä **ei** ole fuusioenergiaa, breakeveniä eikä nettovoittoa. Mikään tässä ei tuottanut enemmän energiaa kuin laitteen käyttö vaati. Tulos koskee *plasman kuumentamista* — yhtä vaihetta fuusioketjussa — ei reaktorin energiataseita.
- Lämpötila on **yhä noin kymmenen kertaa liian matala** palavalle plasmalle. Noin 0.72 keV on suunnilleen 8 miljoonaa °C; deuterium–tritiumpolttoaine tarvitsee noin **10 keV (yli 100 miljoonaa °C)** *sekä* riittävän tiheys × koossapitoaika -tulon palamisen ylläpitämiseksi. General Fusionin seuraava oma välitavoite on **1 keV** — sekin kaukana syttymisestä.
- ”**Suurin osa lämmöstä tulee puristuksesta**” on **malliin perustuva johtopäätös**, ei suora mittarin lukema. Se saadaan diagnostiikkaan sovitetusta integroidusta fysiikkamallista; luottamus puristuksen, ohmisen lämmityksen ja häviöiden väliseen jakoon riippuu siitä, kuinka hyvin malli toimii.
- Kyseessä on **yhtiön preprint, ei vertaisarvioitu artikkeli.** Tulokset raportoi itse laitteen rakentanut ryhmä, joka on myös kerännyt rahoitusta laitteen lupausten perusteella; riippumatonta arviointia ei vielä ole.
- Neutronien lisääntyminen **ei** ole energiantuotannon kannalta merkittävä fuusiotuotto. Deuteriumilta odotetaan näissä olosuhteissa jonkin verran neutroneja, mutta määrät ovat kaukana sähköntuotannon kannalta hyödyllisistä.
- Tulos ei sano mitään erillisestä yhtiön väitteestä, jonka mukaan **tuleva laitos syöttäisi sähköä verkkoon** — riippumaton raportointi on suhtautunut siihen erittäin varovaisesti.

Kuinka vahvaa näyttö on

- **Ydinväite on kapea ja testattavissa.** ”Puristimme magnetoitua plasmaa ja se kuumeni, pääosin puristuksen vuoksi” on täsmälleen se mekanismitesti, jonka MTF:n on läpäistävä. Artikkeli tukee sitä runsaasti instrumentoiduilla laukauksilla ja eksplisiittisellä energiataseen mallilla. Jos tulos kestää vertaisarvioinnin, se on aito — joskin varhainen — vahvistus lähestymistavalle.
- **Varaukset ovat rakenteellisia, eivät kosmeettisia.** Yksitoista laukausta, yksi laite, yksi ryhmä, ei vielä vertaisarvioitu, ja otsikkolämpötila yhtä kertaluokkaa palavaa plasmaa alempana. Keskeinen johtopäätös — *suurin osa lämmöstä puristuksesta* — nojaa malliin, joten vertaisarvioinnin ydinkysymys on, kestääkö tämä jako tarkastelun.
- **Rehellinen tila on: mekanismi osoitettu, ei energiavälitavoite saavutettu.** Tulos siirtää MTF:ää väitteestä ”puristuksen *pitäisi* kuumentaa plasmaa” kohti väitettä ”puristus *kuumentaa* plasmaa”, eikä sen suurempaan.

Miksi tällä on merkitystä

Magnetoidussa kohdefuusiossa kiinnostavaa on talous, ei ennätysten kerääminen. Jos mekaaninen puristus pystyy kuumentamaan plasman kohti fuusio-olosuhteita, tavoite voitaisiin ehkä saavuttaa ilman ITER-luokan magneetteja tai NIF-luokan lasereita — halvemmalla ja nopeammin iteratiivisesti, *jos* se toimii. Tuo ”jos” on koko peli, ja ratkaisu riippuu tämänkaltaisista epäseksikkäistä tarkistuspisteistä: tuottaako puristus todella mallien lupaaman lämmön? LM26:n ensimmäisten laukausten vastaus on varauksellinen kyllä. Se on huomionarvoista juuri *siksi*, että vastaus on varauksellinen — yksi askel pitkissä tikkaissa, jonka raportoivat itse kiipeäjät, jota muut eivät vielä ole tarkistaneet ja joka on vielä kaukana huipulta.

Tiivistelmä

General Fusionin LM26 puristi magnetoidun deuteriumplasman kokoon sisäänpäin romahtavalla litiumvaipalla ja osoitti plasman kuumenevan — elektronilämpötila yli kolminkertaistui mitattuun noin 0.72 keV:n huippuun (718 ± 80 eV, ~8 miljoonaa °C) — ja yhtiön analyysin mukaan suurin osa kuumenemisesta tuli itse puristuksesta, joka on sen magnetoituun kohdefuusioon perustuvan lähestymistavan keskeinen mekanismi. Se on todellinen ja täsmällinen tekninen askel tällä fuusioreitillä. Samalla kyse on yhden laitteen ensimmäisistä 11 laukauksesta, joita kuvataan vertaisarvioimattomassa yhtiön preprintissä, lämpötilassa noin kymmenen kertaa palavaa plasmaa alempana, ilman nettoenergiaa, breakeveniä tai sähköä. Mekanismi osoitettiin, voimalaitosta ei rakennettu.

Lähteet

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