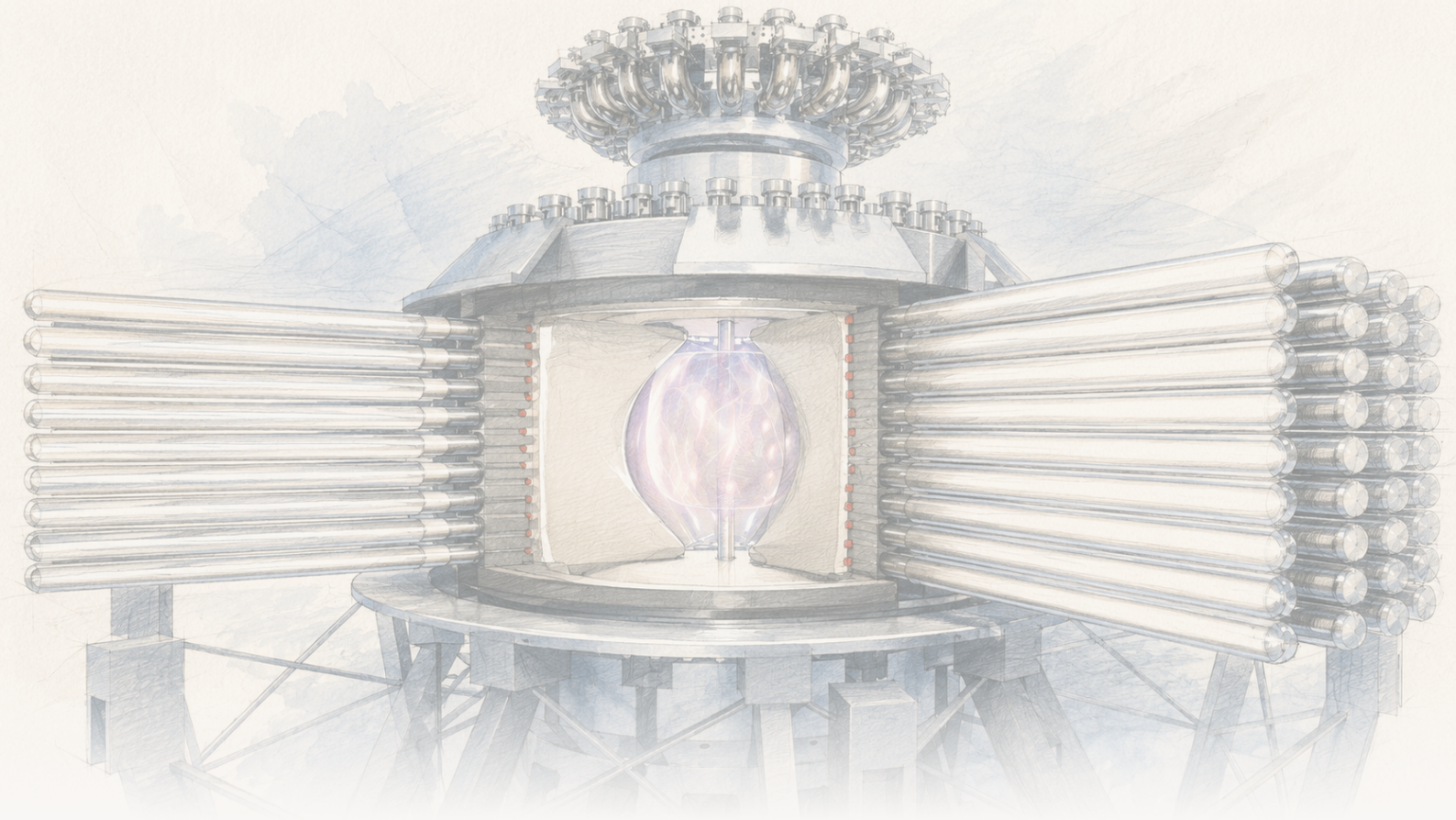


The Clean Paper

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

Termotuumasin kuumutas plasmat seda kokku surudes — tegelik samm, mitte valmis elektrijaam

General Fusioni LM26 surus magnetiseeritud deuteeriumiplasma kokku sissepoole liikuva liitiumvoodriga ning jälgis selle kuumenemist — elektronide temperatuur enam kui kolmekordistus mõõdetud tipuni umbes 0.72 keV (718 ± 80 eV, ligikaudu 8 miljonit °C), kusjuures suurem osa kuumenemisest omistati kokkusurumisele endale, mehhanismile, millele magnetiseeritud sihtmärgi termotuumasüntees toetub. See on selle termotuumatee jaoks reaalne insenertehniline kontrollpunkt. Samas on tegemist ühe masina esimese 11 katsega, mida kirjeldab eelretsenseerimata ettevõtte eelpublikatsioon, ning temperatuur on endiselt umbes kümme korda madalam kui põleva plasma jaoks vajalik — netoenergiat, tasuvuspunkti ega elektrit ei saadud. Mehhanism näidatud, elektrijaam ehitamata.

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

Termotuumasin kuumutas plasmat seda kokku surudes — tegelik samm, mitte valmis elektrijaam

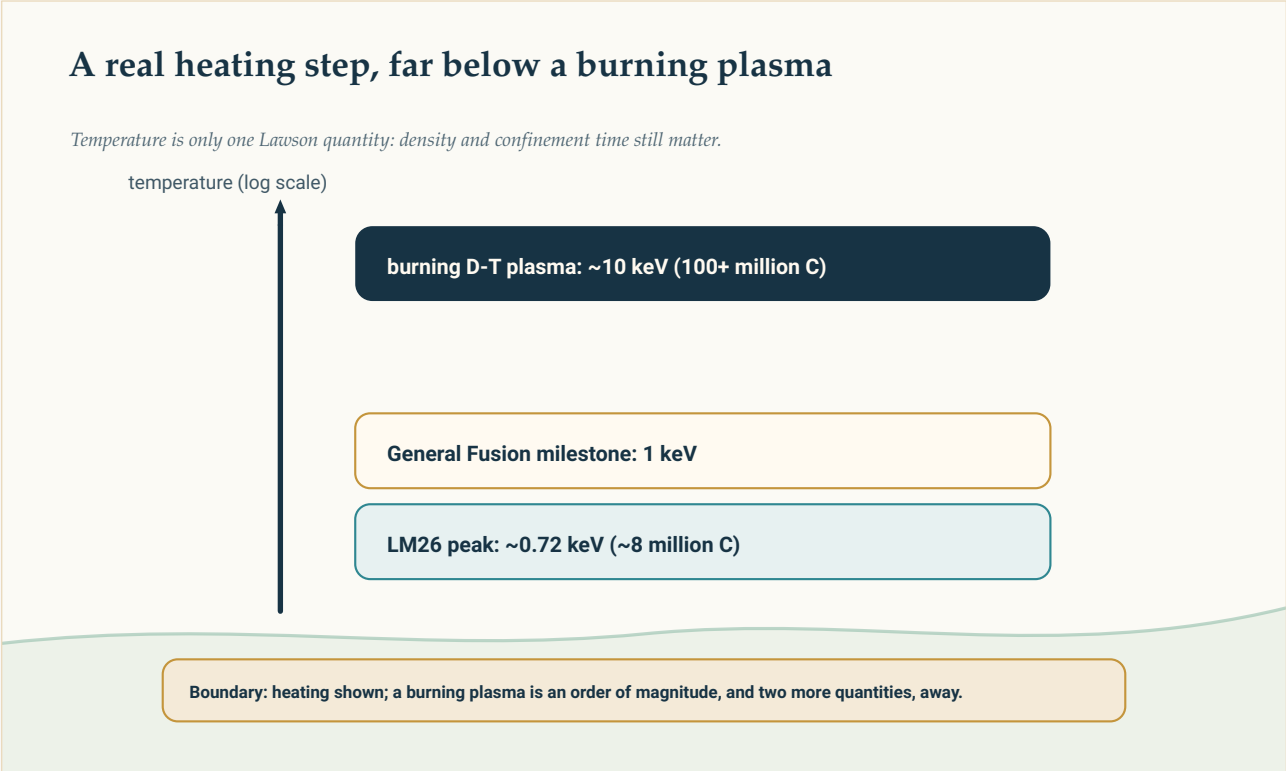
Selleks, et termotuumareaktor annaks tagasi rohkem energiat, kui selle käitamiseks kulub, peab kütuseplasma olema korraga piisavalt kuum, piisavalt tihe ja piisavalt kaua koos hoitud — need kolm suurust koondatakse sellesse, mida füüsikud nimetavad Lawsoni kriteeriumiks. Suurem osa valdkonnast püüab selleni jõuda hiiglaslike ülijuhtmagnetitega (tokamakid nagu ITER) või suurte laserite massiividega (inertsiaalkinnistus, näiteks USA National Ignition Facilitys). Väiksem rühm ettevõtteid panustab kolmandale teele, **magnetiseeritud sihtmärgi termotuumasünteesile** (*magnetized target fusion*, MTF): kõigepealt tekitada soe magnetiseeritud plasma ja siis see kiiresti mehaaniliselt *kokku suruda*, nii et just kokkusurumine tekitaks kuumenemise — umbes nagu diiselmootor süütab kütuse surve, mitte sädemega.

2026. aasta juunis avaldas Kanada ettevõte **General Fusion** oma **Lawson Machine 26 (LM26)** tulemused, mis kontrollivad, kas selle keskne panus üldse peab: kas magnetiseeritud plasma mehaaniline kokkusurumine tõepoolest kuumutab seda nii, nagu mudelid ennustavad? Esimese 11 kokkusurumiskatse käigus — kus sfäärilise tokamaki deuteeriumiplasmat surus kokku sissepoole varisev *tahke liitiumvooder* — muutus plasma parimates katsetes kokkusurumisel märgatavalt kuumemaks, tihedamaks ja tugevamalt magnetiseerituks ning ettevõtte analüüs omistab suurema osa kuumenemisest kokkusurumisele endale.

See on MTF-lähenemise jaoks reaalne ja konkreetne insenertehniline tulemus. Samas on tegemist esimese katseseeriaga, mida kirjeldab **ettevõtte eelpublikatsioon, mida pole eelretsenseeritud**, ning temperatuur on endiselt palju madalam kui põleva plasma jaoks vajalik — see ei ole termotuumaenergia, tasuvuspunkt ega elektrijaam.

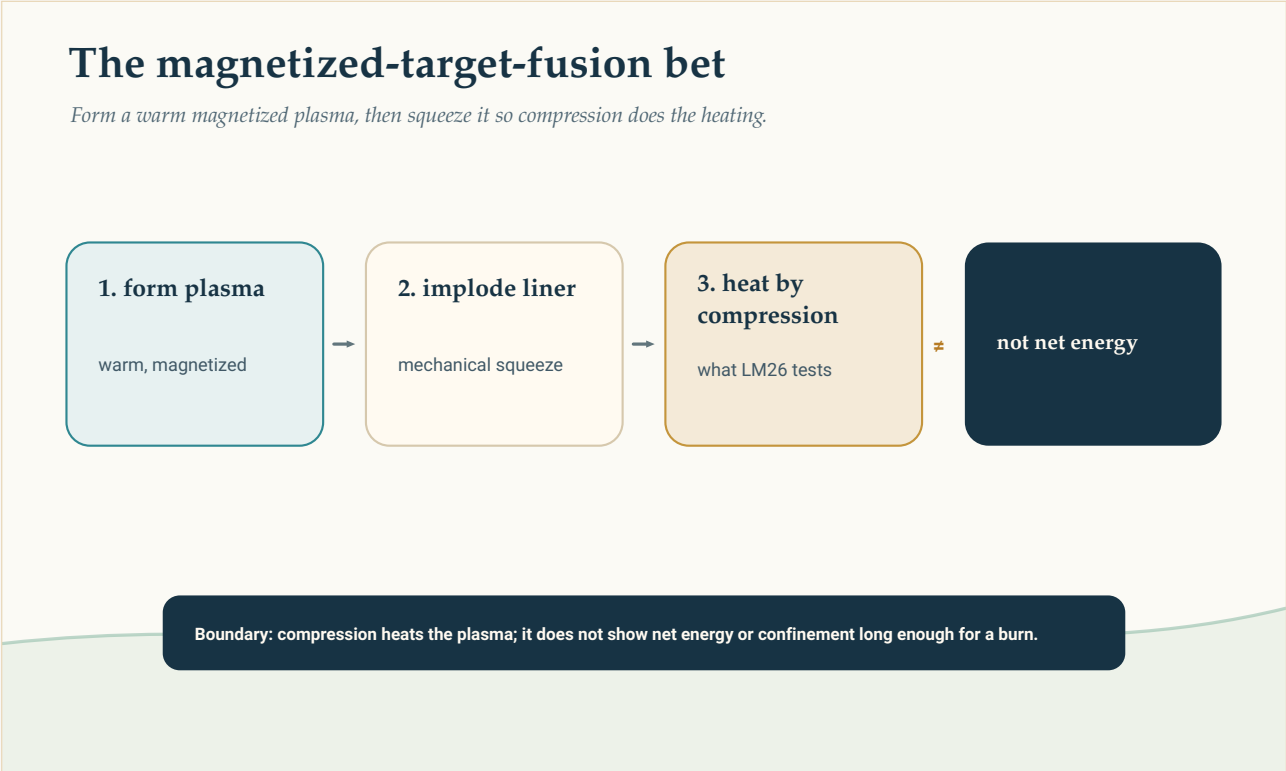
[video pending]

See on General Fusioni reklaammaterjal, mis on lisatud näitamaks, milline LM26 välja näeb; see ei ole sõltumatu tõend selle kohta, et masin saavutab tulevased termotuumaeesmärgid.



Temperatuuriredel: LM26 umbes 0.72 keV, General Fusioni 1 keV vahe-eesmärk ja umbes 10 keV, mida vajab põlev deuteeriumi-triitiumi plasma. Temperatuur on vaid üks Lawsoni kolmest vajalikust suurusest.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Magnetiseeritud sihtmärgi termotuumasüntees: tekitatakse soe magnetiseeritud plasma ja surutakse see seejärel kokku sissepoole liikuva voodriga, nii et surve teeb kuumutustöö — diiselmootori-laadne panus

kokkusurumisele. LM26 testis, kas kokkusurumine kuumutab plasmat; mitte netoenergiat ega kinnistust.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Mida tähendavad „magnetiseeritud sihtmärgi termotuumasüntees“, „keV“ ja Lawsoni kriteerium

Termotuumafüüsikas väljendatakse plasma temperatuuri tavaliselt **kiloelektronvoltides (keV)**, mitte kraadides: 1 keV vastab umbes **11,6 miljonile °C-le**. Deuteeriumi-triitiumi kütus peab tõhusaks termotuumasünteesiks jõudma ligikaudu **10 keV-ni** (üle 100 miljoni °C) — kuid temperatuur on ainult üks kolmest samaaegselt vajalikust tingimusest. **Lawsoni kriteerium** nõuab ka piisavat **tihedust** ja piisavalt pikka **kinnistusaega**, mida sageli ühendatakse ühte „kolmikproduktiks“ nimetatud suurusse (temperatuur × tihedus × kinnistusaeg). Plasma kuumutamine on vajalik, kuid üksi kaugeltki mitte piisav.
Magnetiseeritud sihtmärgi termotuumasüntees (MTF) paikneb kahe peamise lähenemise vahel. Selle asemel, et hoida kuuma plasmat kaua kinni tohutute magnetitega või kuumutada imepisikest sihtmärki peaaegu hetkega laseritega, tekitab MTF magnetiseeritud plasma ja surub selle mikrosekundite jooksul mehaaniliselt kokku. Kui see töötab, suurendab kokkusurumine nii plasma temperatuuri kui ka tihedust — võimaldades teoreetiliselt jõuda termotuumatingimusteni ilma ITERi mõõtu magnetite või NIF-i mõõtu laseriteta. Just seda, kas kokkusurumine päris masinas tõesti lubatud kuumenemise tekitab, peabki LM26-sarnane test kontrollima.

Mida autorid tegid

- Ehitasid ja käitasid General Fusionis **LM26** magnetiseeritud sihtmärgi termotuumasünteesi masinat: kõigepealt tekitatakse sfäärilise tokamaki deuteeriumiplasma, seejärel surub seda kokku sissepoole liikuv **tahke liitiumvooder** — ligikaudu **3× radiaalne kokkusurumine**.
- Tegid **esimesed 11 kokkusurumiskatset** ning varustasid süsteemi ulatuslike mõõteriistadega, rekonstrueerides plasma temperatuuri, tihedust ja magnetvälja ajas ning mõõtes eralduvaid neutroneid, röntgenkiirgust ja nähtavat valgust; lisaks kasutati kiiret kaamerat plasma ja seina vastastikmõju jälgimiseks.
- Koostasid **integreeritud füüsikamudeli**, mis tasakaalustab kokkusurumisest tuleva kuumenemise oomilise kuumenemisega (plasma enda voolust) ja piirpinnale kaotatud energiaga, ning võrdlesid seda mõõteandmetega, et hinnata, kust kuumenemine tegelikult pärines.

Mida nad leidsid

- **Plasma kuumenes kokkusurumisel.** Parimates katsetes tõusis elektronide temperatuur **rohkem kui 3×**, elektronide tihedus umbes **10×** ja poloidne magnetväli umbes **10×**, mida vedas 3× radiaalne kokkusurumine. Parimas katses mõõdeti **elektronide tipptemperatuuriks umbes 0.72**

keV (718 ± 80 eV, Thompsoni hajumise abil) — ligikaudu 8 miljonit °C.
- **Suurem osa kuumenemisest omistatakse kokkusurumisele.** Integreeritud mudeli järeldus on, et temperatuuri tõusust tuli *enamus* mehaanilisest kokkusurumisest endast — mehhanismist, millele kogu MTF-lähenemine toetub —, mitte oomilisest kuumenemisest.
- **Neutronemissioon kasvas kokkusurumise ajal**, mis sobib kuumema ja tihedama deuteeriumiplasmaga.

Mida see ei näita

- See **ei ole** termotuumaenergia, tasuvuspunkt ega netovõit. Siin ei toodetud rohkem energiat, kui masina käitamiseks kulus. Tulemus puudutab *plasma kuumutamist* — üht sammu termotuumatsüklis —, mitte reaktori energiabilanssi.
- Temperatuur on **endiselt umbes kümme korda liiga madal** põleva plasma jaoks. Umbes 0.72 keV on ligikaudu 8 miljonit °C; deuteeriumi-triitiumi kütus vajab suurusjärgus **10 keV (üle 100 miljoni °C)** *ning* piisavat tiheduse × kinnistusaja korrutist, et põlemist säilitada. General Fusioni enda järgmine vahe-eesmärk on **1 keV** — ka see on süttimisest kaugel.
- Väide „**suurem osa kuumenemisest tuleb kokkusurumisest**“ on **mudelipõhine järeldus**, mitte otsene mõõtenäit. See saadakse integreeritud füüsikamudelist, mis sobitatakse diagnostikaandmetega; usaldus jaotuse vastu kokkusurumise, oomilise kuumenemise ja kadude vahel sõltub seega ka mudeli usaldatavusest.
- Tegemist on **ettevõtte eelpublikatsiooniga, mitte eelretsenseeritud artikliga**. Tulemused raporteerib meeskond, kes masina ehitas ja kelle ettevõte on selle lubaduse põhjal kapitali kaasanud; sõltumatut eksperdihinnangut pole veel olnud.
- Neutronite arvu kasv **ei ole** energiakasutuseks oluline termotuumasünteesi saagis. Sellistes tingimustes on deuteeriumist mõningaid neutroneid oodata, kuid võimsuse tootmiseks vajalikust tasemest ollakse väga kaugel.
- See ei ütle midagi eraldiseisva ettevõtteväite kohta, et **tulevane elektrijaam annaks elektrit võrku** — sõltumatu ajakirjandus on sellesse väitesse suhtunud tugeva ettevaatusega.

Kui tugev on tõendus

- **Põhiväide on kitsas ja kontrollitav.** „Surusime magnetiseeritud plasma kokku ja see läks kuumemaks, peamiselt kokkusurumise tõttu“ on täpselt selline mehhanismitest, mille MTF peab läbima, ning artikkel toetab seda rohkelt instrumenteeritud katseseeria ja selge energiabilansi mudeliga. Kui tulemus peab eelretsenseerimisele vastu, on see lähenemise tõeline, ehkki varajane valideerimine.
- **Piirangud on sisulised, mitte kosmeetilised.** Üksteist katset, üks masin, üks meeskond, veel eelretsenseerimata ning tipptemperatuur suurusjärgu võrra madalam kui põleval plasmal. Kandev järeldus — *enamus kuumenemisest tuleb kokkusurumisest* — toetub mudelile, seega on keskne eelretsenseerimise küsimus, kui robustne see jaotus tegelikult on.
- **Aus staatus on „mehhanism näidatud“, mitte „energiaeesmärk saavutatud“.** See nihutab MTF-i

väitelt „kokkusurumine *peaks* plasmat kuumutama“ väitele „kokkusurumine *kuumutab* plasmat“ — ja mitte midagi suuremat.

Miks see oluline on

Magnetiseeritud sihtmärgi termotuumasünteesi huvitav osa on majandus, mitte rekordid. Kui mehaaniline kokkusurumine suudab plasmat termotuumatingimuste suunas kuumutada, võiks selleni jõuda ilma ITERi mõõtu magnetite või NIF-i mõõtu laseriteta — odavamal ja kiiremini iteratsiooni võimaldaval teel, *kui* see töötab. Just see „kui“ on kogu mäng ning see sõltub glamuurita kontrollpunktidest nagu käesolev: kas kokkusurumine annab päriselt mudelite lubatud kuumenemise? LM26 vastus oma esimestel katsetel on tingimuslik jah. Seda tasub tähele panna just *seetõttu*, et vastus on tingimuslik — üks pulk pikal redelil, raporteeritud inimeste poolt, kes ise seda redelit ronivad, veel teiste poolt kontrollimata ja väga kaugel tipust.

Lühidalt

General Fusioni LM26 surus magnetiseeritud deuteeriumiplasma kokku sissepoole liikuva liitiumvoodriga ning näitas plasma kuumenemist — elektronide temperatuur kasvas üle kolme korra mõõdetud tipuni umbes 0.72 keV (718 ± 80 eV, ~8 miljonit °C) — ning ettevõtte analüüs omistab suurema osa kuumenemisest kokkusurumisele endale, mehhanismile, millele nende magnetiseeritud sihtmärgi termotuumasünteesi lähenemine tugineb. See on selle termotuumatee jaoks reaalne ja konkreetne insenertehniline samm. Samas on tegemist ühe masina esimese 11 katsega, mida kirjeldab eelretsenseerimata ettevõtte eelpublikatsioon, temperatuuril umbes kümme korda allpool põleva plasma vajadust, ilma netoenergia, tasuvuspunkti või elektritootmiseta. Mehhanism on näidatud, elektrijaama pole ehitatud.

Allikad

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