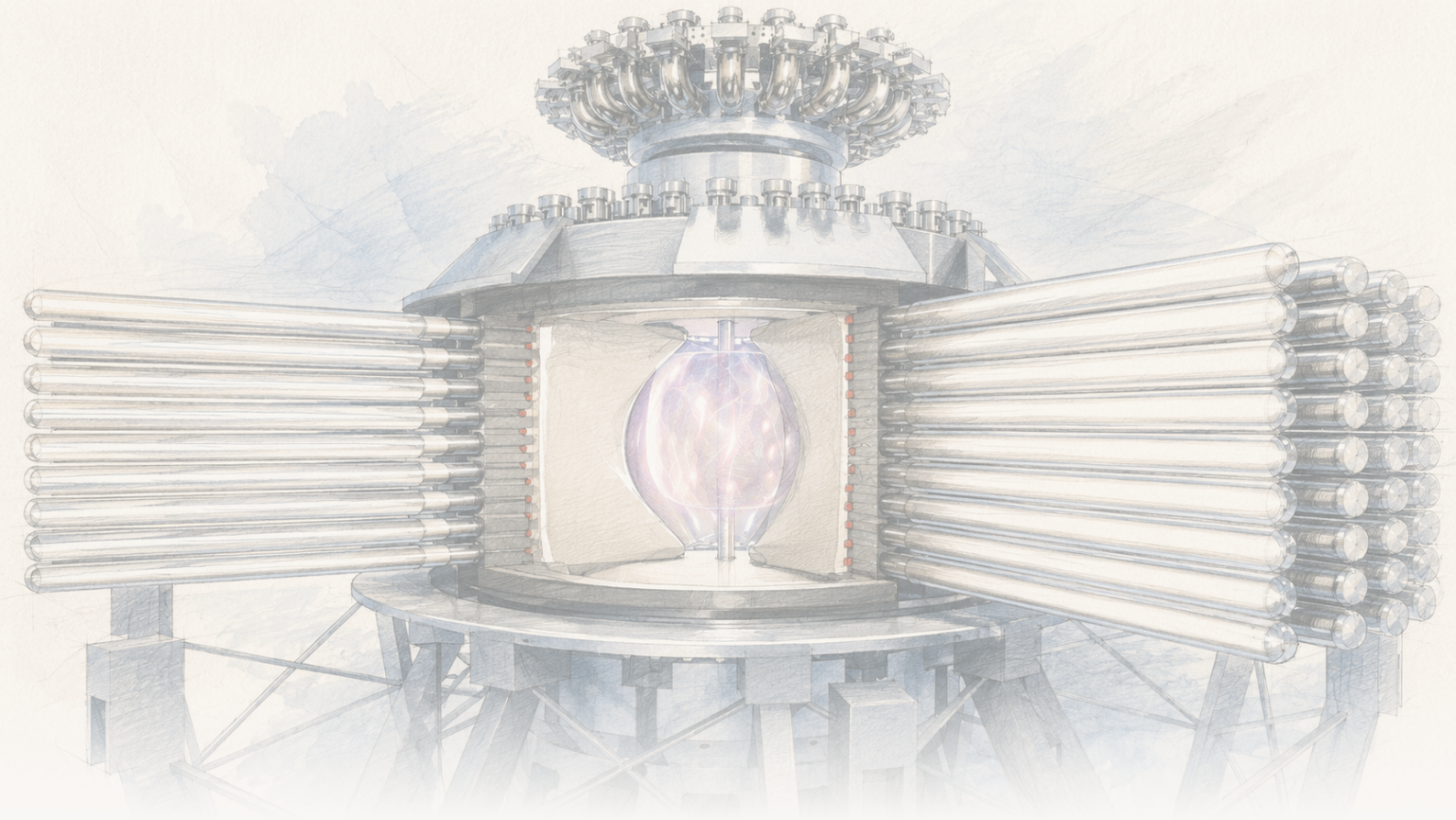


The Clean Paper

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

Fuzijska naprava je segrela plazmo s stiskanjem — resnični korak in elektrarna, ki to še ni

Naprava LM26 podjetja General Fusion je z implodirajočo litijevo oblogo stisnila magnetizirano devterijevo plazmo in pri tem opazila, da se segreva — temperatura elektronov se je več kot potrojila do izmerjenega vrha približno 0,72 keV (718 ± 80 eV, okoli 8 milijonov °C), analiza pa večino segrevanja pripisuje sami kompresiji, mehanizmu, na katerem temelji pristop magnetizirane tarčne fuzije. To je resnična inženirska kontrolna točka na tej poti do fuzije. Hkrati gre za prvih 11 sunkov ene naprave, opisanih v nerecenzirani predobjavi podjetja, pri temperaturi, ki je še približno desetkrat prenizka za gorečo plazmo — brez neto energije, brez energijskega izenačenja in brez elektrike. Dokazan mehanizem, ne zgrajena elektrarna.

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

Fuzijska naprava je segrela plazmo s stiskanjem — resnični korak in elektrarna, ki to še ni

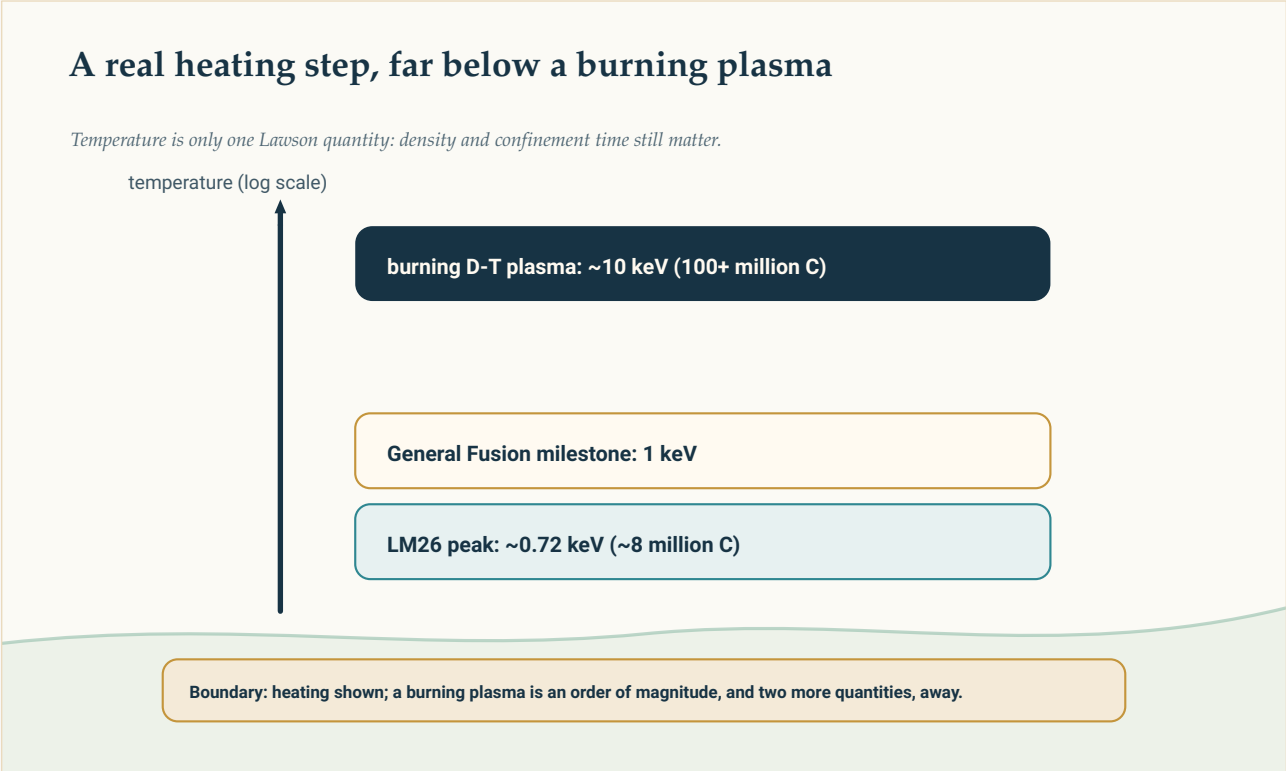
Da bi fuzijski reaktor vrnil več energije, kot je porabi za delovanje, mora biti gorivna plazma hkrati dovolj vroča, dovolj gosta in dovolj dolgo zadržana skupaj — tri količine, združene v tem, kar fiziki imenujejo Lawsonov kriterij. Večina področja to poskuša doseči z ogromnimi superprevodnimi magneti (tokamaki, kot je ITER) ali z nizi velikanskih laserjev (inercialno zadrževanje, kot v ameriškem National Ignition Facility). Manjša skupina podjetij stavi na tretjo pot, **magnetizirano tarčno fuzijo** (MTF): najprej ustvariti toplo, magnetizirano plazmo, nato pa jo hitro mehansko *stisniti*, tako da kompresija povzroči segrevanje — podobno kot dizelski motor vžge gorivo s stiskanjem in ne z iskro.

Junija 2026 je kanadsko podjetje **General Fusion** objavilo rezultate svoje naprave **Lawson Machine 26 (LM26)**, ki preverjajo, ali ta osrednja zamisel res drži: ali mehansko stiskanje magnetizirane plazme dejansko povzroči segrevanje, kot napovedujejo modeli? V prvih 11 kompresijskih sunkih — pri katerih je bila devterijeva plazma v sferičnem tokamaku stisnjena z implodirajočo *trdno litijevo oblogo* — so najboljši poskusi pokazali, da je plazma med stiskanjem postala opazno bolj vroča, gostejša in močneje magnetizirana. Analiza podjetja večino tega segrevanja pripisuje sami kompresiji.

To je resničen in specifičen inženirski rezultat za pristop MTF. Hkrati gre za prvi niz sunkov, opisan v **predobjavi podjetja, ki še ni bila recenzirana**, pri temperaturi, ki je še daleč pod potrebno za gorečo plazmo — in ne gre za fuzijsko energijo, energijsko izenačenje ali elektrarno.

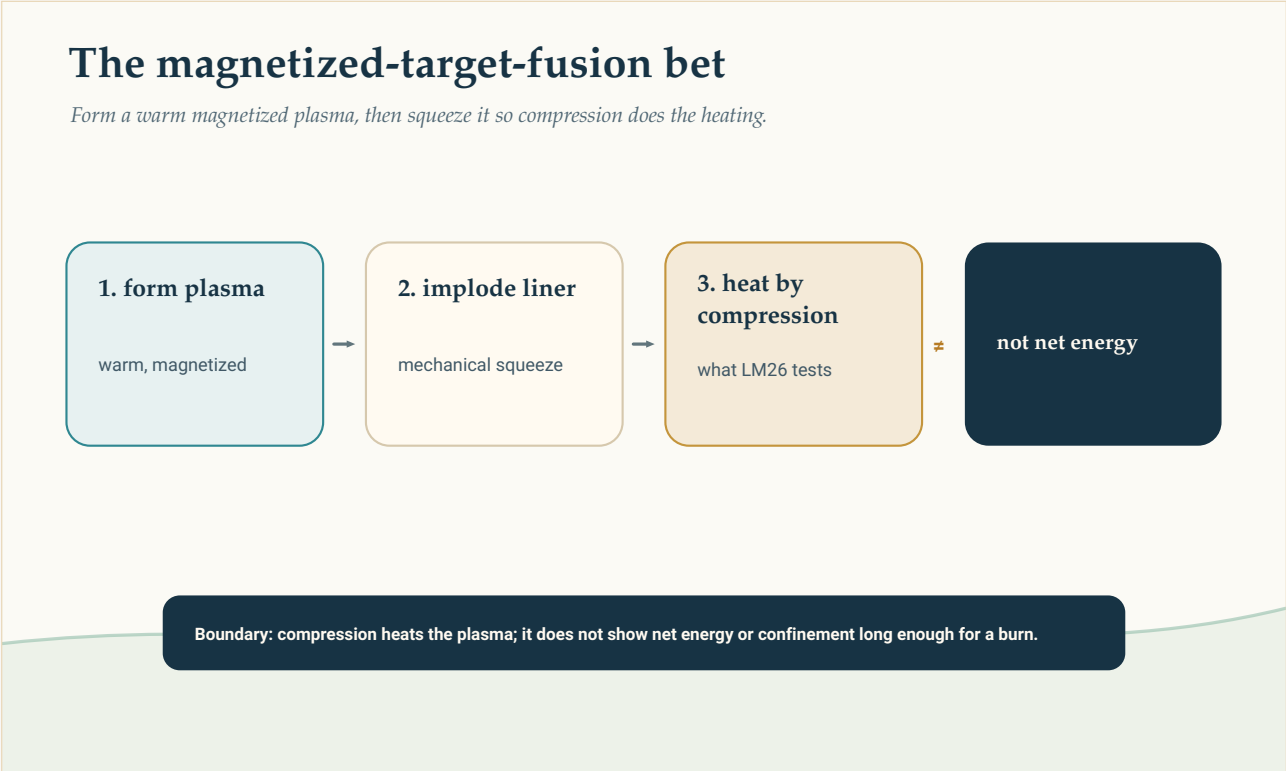
[video pending]

To so promocijski posnetki podjetja General Fusion, vključeni zato, da pokažejo, kako je LM26 videti; niso neodvisen dokaz, da bo naprava dosegla prihodnje fuzijske mejnike.



Temperaturna lestvica: približno 0,72 keV pri LM26, mejnik General Fusion pri 1 keV in približno 10 keV, ki jih potrebuje goreča devterij-tricijeva plazma. Temperatura je le ena od treh količin v Lawsonovem kriteriju.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Magnetizirana tarčna fuzija: ustvariti toplo magnetizirano plazmo, nato jo stisniti z implodirajočo oblogo, da kompresija opravi segrevanje — stava na načelo dizelske kompresije. LM26 je preveril, da stiskanje segreva

plazmo; ni pa preveril neto energije ali zadostnega zadrževanja.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Kaj pomenijo »magnetizirana tarčna fuzija«, »keV« in Lawsonov kriterij

Temperaturo plazme pri fuziji navadno navajamo v **kiloelektronvoltih (keV)** in ne v stopinjah: 1 keV je približno **11,6 milijona °C**. Devterij-tricijevo gorivo mora za učinkovito fuzijo doseči približno **10 keV** (več kot 100 milijonov °C), vendar je temperatura le eden od treh pogojev, ki morajo veljati hkrati. **Lawsonov kriterij** pravi, da reaktor potrebuje tudi dovolj veliko **gostoto** in dovolj dolg **čas zadrževanja**. Te količine se pogosto združijo v tako imenovani »trojni produkt« (temperatura × gostota × čas zadrževanja). Segrevanje plazme je nujno, samo po sebi pa še zdaleč ni dovolj.

Magnetizirana tarčna fuzija (MTF) je vmesna pot med dvema glavnima pristopoma. Namesto da bi vročo plazmo dolgo zadrževali z velikanskimi magneti ali majhno tarčo skoraj v trenutku segreli z laserji, MTF ustvari magnetizirano plazmo in jo nato v mikrosekundah mehansko stisne. Če pristop deluje, kompresija plazmo hkrati segreje in poveča njeno gostoto — potencialno brez magnetov velikosti ITER ali laserjev velikosti NIF. Ali kompresija v resnični napravi dejansko prinese takšno segrevanje, je prav vprašanje, za katerega je namenjen preizkus, kot je LM26.

Kaj so naredili avtorji

- Zgradili in sprožili so **LM26**, napravo za magnetizirano tarčno fuzijo pri General Fusion: najprej nastane devterijeva plazma v sferičnem tokamaku, nato jo stisne navznoter implodirajoča **trdna litijeva obloga** — približno **3-kratna radialna kompresija**.
- Izvedli so **prvih 11 kompresijskih sunkov** in jih opremili z obsežno diagnostiko. Skozi čas so rekonstruirali temperaturo, gostoto in magnetno polje plazme ter merili oddane nevtrone, rentgensko in vidno svetlobo, poleg tega pa s hitro kamero snemali stik plazme s steno.
- Zgradili so **integrirani fizikalni model**, ki primerja segrevanje zaradi kompresije z ohmskim segrevanjem (zaradi lastnega toka v plazmi) in izgubo energije na robu. Nato so model primerjali z meritvami, da bi ocenili izvor segrevanja.

Kaj so ugotovili

- **Plazma se je med stiskanjem segrela.** V najboljših sunkih se je temperatura elektronov povečala za **več kot 3-krat**, gostota elektronov za približno **10-krat**, poloidalno magnetno polje pa prav tako za približno **10-krat**, ob 3-kratni radialni kompresiji. V najboljšem sunku članek poroča o **najvišji temperaturi elektronov približno 0,72 keV** (718 ± 80 eV, izmerjeno s Thomsonovim sipanjem) — približno 8 milijonov °C.
- **Večino segrevanja pripisujejo kompresiji.** Integrirani model sklepa, da je *večina* povečanja tem-

perature izvirala iz mehanske kompresije same — mehanizma, od katerega je odvisen celoten pristop MTF — in ne iz ohmskega segrevanja.
- **Med kompresijo se je povečalo oddajanje nevtronov**, kar je skladno z bolj vročo in gostejšo devterijevo plazmo.

Česa to ne pokaže

- To **ni** fuzijska energija, energijsko izenačenje ali neto dobiček. Nič v teh poskusih ni proizvedlo več energije, kot je bilo potrebno za delovanje naprave. Rezultat govori o *segrevanju plazme* — enem koraku v fuzijskem ciklu — ne o energijski bilanci reaktorja.
- Temperatura je **še vedno približno desetkrat prenizka** za gorečo plazmo. Približno 0,72 keV pomeni okoli 8 milijonov °C; devterij-tricijevo gorivo potrebuje približno **10 keV (več kot 100 milijonov °C)** *in* dovolj velik produkt gostote in časa zadrževanja, da lahko vzdržuje gorenje. Naslednji lastni mejnik General Fusion je **1 keV** — tudi to je še daleč od vžiga.
- Trditev, da **»večina segrevanja izvira iz kompresije«**, je **sklep modela**, ne neposredna meritev. Izhaja iz integriranega fizikalnega modela, prilagojenega diagnostičnim podatkom; zaupanje v razdelitev na kompresijsko segrevanje, ohmsko segrevanje in izgube je zato odvisno od zanesljivosti modela.
- Gre za **predobjavo podjetja, ne za recenziran članek.** Rezultate poroča ista ekipa, ki je napravo zgradila in na njeni obljubi pridobiva financiranje; neodvisna strokovna presoja še ni bila opravljena.
- Povečanje števila nevtronov **ni energijsko pomemben fuzijski izplen**. Pri devteriju so pri teh pogojih nekateri nevtroni pričakovani, vendar je količina daleč pod vsem, kar bi bilo uporabno za proizvodnjo energije.
- Rezultat ne pove ničesar o ločeni izjavi podjetja, da bi **prihodnja elektrarna dobavljala elektriko v omrežje** — trditvi, do katere so neodvisna poročila zelo zadržana.

Kako močni so dokazi

- **Osrednja trditev je ozka in preverljiva.** »Stisnili smo magnetizirano plazmo in postala je bolj vroča, večinoma zaradi kompresije« je natanko preizkus mehanizma, ki ga mora pristop MTF prestati. Članek ga podpira z dobro instrumentiranim nizom sunkov in izrecnim modelom energijske bilance. Če rezultat prestane recenzijo, je to resnična — čeprav zgodnja — potrditev pristopa.
- **Omejitve so strukturne, ne kozmetične.** Enajst sunkov, ena naprava, ena ekipa, še brez recenzije in najvišja temperatura približno red velikosti pod gorečo plazmo. Ključni sklep — *večina segrevanja iz kompresije* — temelji na modelu, zato bo osrednje vprašanje recenzije, ali je takšna razdelitev robustna.
- **Pošten opis je: mehanizem je bil prikazan, ne pa dosežen energijski mejnik.** Rezultat premakne MTF od »kompresija *bi morala* segreti plazmo« proti »kompresija plazmo *dejansko* segreje« — in nič večjega od tega.

Zakaj je pomembno

Pri magnetizirani tarčni fuziji je zanimiva predvsem ekonomika, ne podiranje rekordov. Če lahko mehanska kompresija segreje plazmo proti fuzijskim pogojem, bi bilo to morda mogoče brez magnetov velikosti ITER ali laserjev velikosti NIF — cenejša pot, na kateri je mogoče hitreje ponavljati poskuse, *če* pristop deluje. Ta »če« je bistven in je odvisen od neprivlačnih, a nujnih kontrolnih točk, kakršna je ta: ali kompresija v resnici prinese segrevanje, ki ga obljubljajo modeli? Prvi sunki LM26 dajejo previdno pritrdilen odgovor. To je vredno omeniti prav *zato*, ker je odgovor omejen — ena stopnica na dolgi lestvi, o kateri poročajo ljudje, ki po njej plezajo, še brez neodvisnega preverjanja in daleč pod vrhom.

Kratek povzetek

Naprava LM26 podjetja General Fusion je z implodirajočo litijevo oblogo stisnila magnetizirano devterijevo plazmo in pokazala, da se plazma segreva — temperatura elektronov se je več kot potrojila do izmerjenega vrha približno 0,72 keV (718 $\pm$ 80 eV, okoli 8 milijonov °C). Analiza podjetja večino segrevanja pripisuje sami kompresiji, mehanizmu, na katerem temelji magnetizirana tarčna fuzija. To je resničen in specifičen inženirski korak za to pot do fuzije. Hkrati gre za prvih 11 sunkov ene naprave, opisanih v nerecenzirani predobjavi podjetja, pri temperaturi približno desetkrat pod potrebno za gorečo plazmo, brez neto energije, brez energijskega izenačenja in brez elektrike. Dokazan mehanizem, ne zgrajena elektrarna.

Viri

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