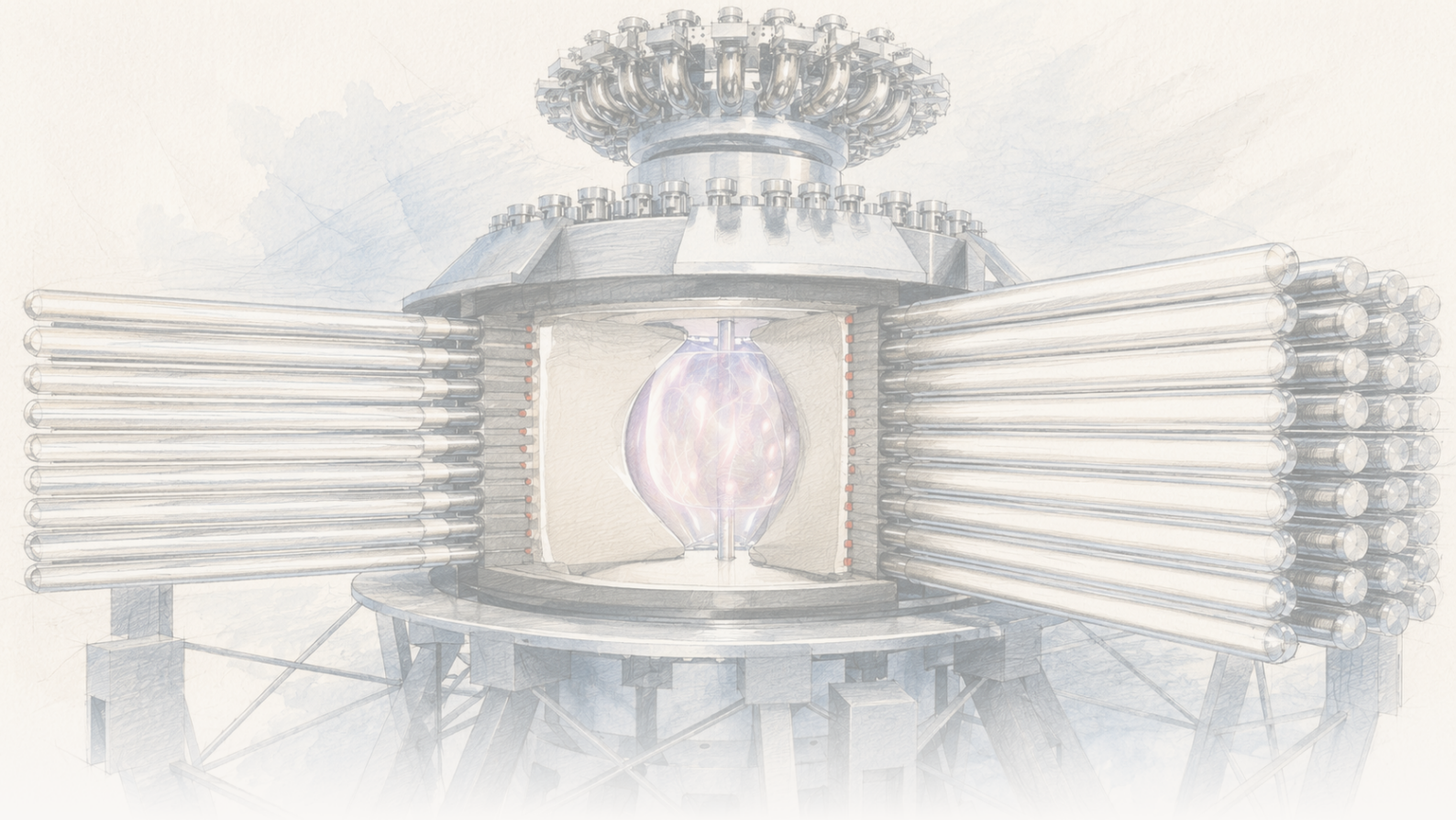


The Clean Paper

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

Samrunavél hitaði plasma sitt með því að þjappa því saman — raunverulega skrefið, og raforkuverið sem þetta er ekki

LM26 frá General Fusion þjappaði segulmögnuðu deuteríumplasma með innfallandi litíumhjúp og hækkaði mældan rafeindahita í um 0,72 keV; greining fyrirtækisins rekur mest af hituninni til þjöppunarinnar sjálfrar. Það er raunverulegt verkfræðilegt skref fyrir magnetized-target fusion, en byggir á fyrstu 11 skotunum í óritrýndum fyrirtækjaforprenti og er enn langt frá brennandi plasma, jafnvægispunkti eða raforkuframleiðslu.

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

Samrunavél hitaði plasma sitt með því að þjappa því saman — raunverulega skrefið, og raforkuverið sem þetta er ekki

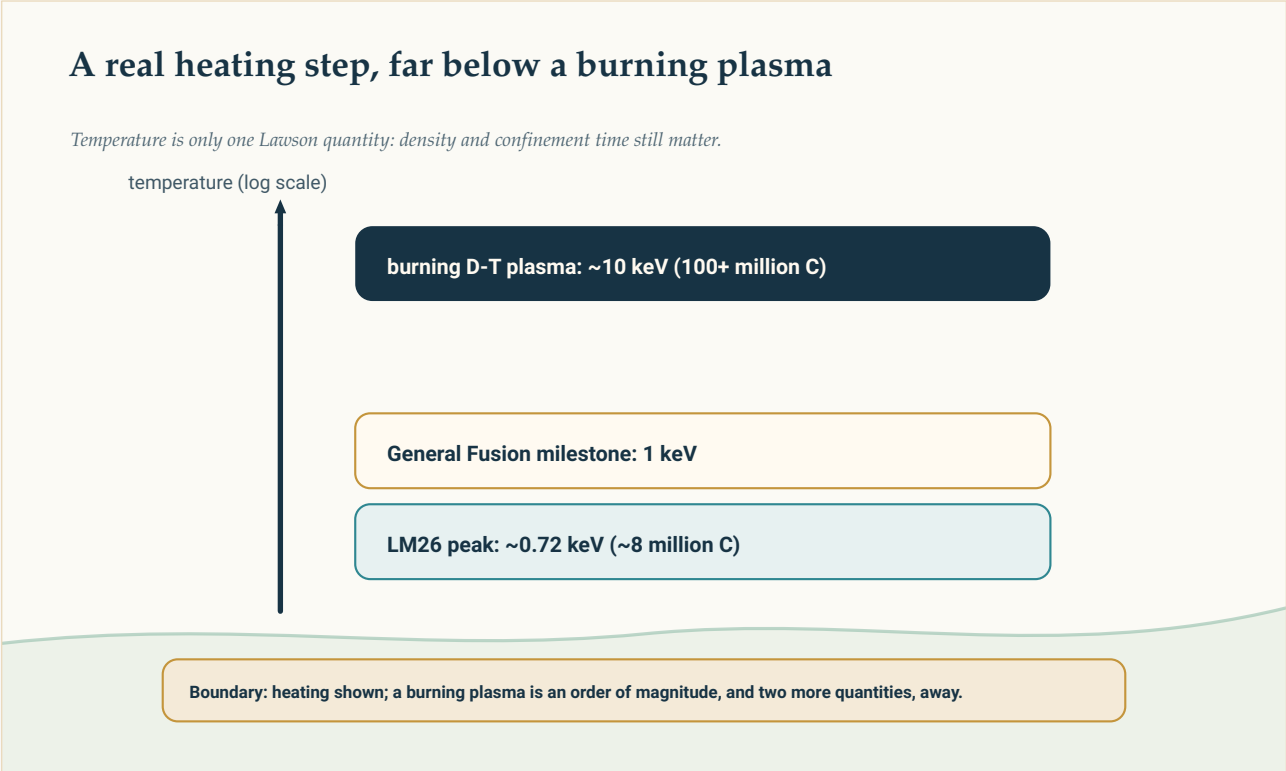
Til að samrunaofn skili meiri orku en þarf til að keyra hann þarf eldsneytisplasmað að vera samtímis nógu heitt, nógu þétt og haldið saman nógu lengi — þrjár stærðir sem eðlisfræðingar sameina í því sem kallast Lawson-skilyrðið. Megnið af samrunarannsóknum reynir að ná þessu með risastórum ofurleiðandi seglum (tokamak-ofnum eins og ITER) eða röðum stórra leysigeisla (tregðusamruna eins og í bandarísku National Ignition Facility). Minni hópur fyrirtækja veðjar á þriðju leiðina, **segulmagnað marksamruna** (magnetized target fusion, MTF): fyrst er búið til hlýtt, segulmagnað plasma og síðan er því *þjappað* hratt með vélrænum hætti þannig að þjöppunin sjálf hiti það — svipað og dísilvél kveikir í eldsneyti með þjöppun fremur en neista.

Í júní 2026 birti kanadíska fyrirtækið **General Fusion** niðurstöður frá **Lawson Machine 26 (LM26)** sem prófa sjálfan kjarna þessarar hugmyndar: hitar vélræn þjöppun á segulmögnuðu plasma það í raun eins og líkönin spá? Í fyrstu 11 þjöppunarskotunum — þar sem deuteríumplasma í kúlulaga tokamak var kreist saman af innfallandi *föstum litíumhjúp* — varð plasmað í bestu skotunum greinilega heitara, þéttara og segulmagnaðra við þjöppun. Greining fyrirtækisins rekur meirihluta hitunarinnar til þjöppunarinnar sjálfrar.

Þetta er raunveruleg og afmörkuð verkfræðileg niðurstaða fyrir MTF-aðferðina. En þetta eru líka fyrstu skotin, lýst í **forprenti fyrirtækisins sem hefur ekki verið ritrýnt**, við hitastig sem er enn langt undir því sem brennandi plasma þarf. Þetta er ekki samrunaorka, ekki jafnvægispunktur og ekki raforkuver.

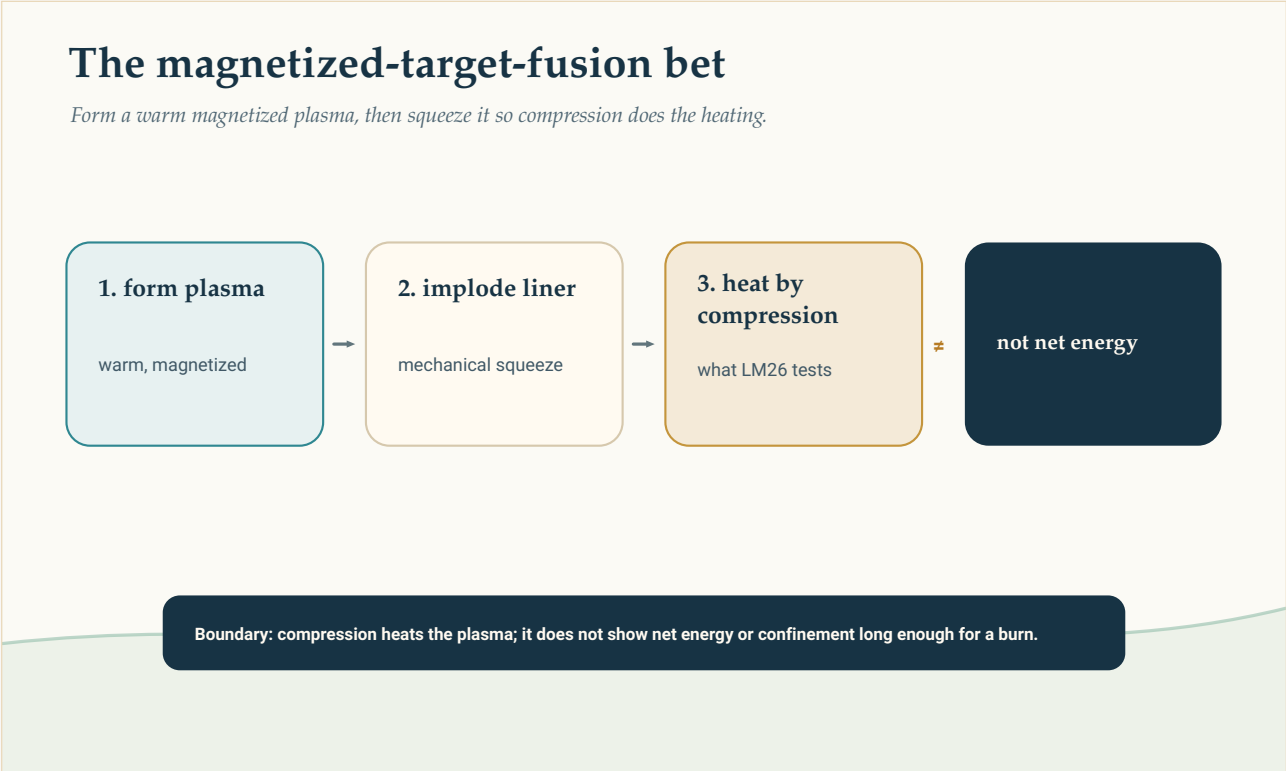
[video pending]

Þetta er kynningarmyndband frá General Fusion, birt til að sýna hvernig LM26 lítur út; það er ekki óháð sönnun þess að vélin muni ná framtíðarmarkmiðum sínum í samruna.



Hitastigsskali: um 0,72 keV í LM26, 1 keV markmið General Fusion og um 10 keV sem brennandi deuteríum–tritíumplasma þarf. Hitastig er aðeins ein af þremur stærðum Lawson-skilyrðisins.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Segulmagnaður marksamruni: myndað er hlýtt segulmagnað plasma og síðan þjappað með innfallandi hjúp þannig að þjöppunin hitar það — veðmálið á dísil-líka þjöppun. LM26 prófaði að þjöppunin hiti plasmað, ekki

nettóorku eða innilokun.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Hvað „magnetized target fusion“, „keV“ og Lawson-skilyrðið þýða

Hitastig plasma í samruna er yfirleitt gefið í **kílórafeindarvoltum (keV)** fremur en gráðum: 1 keV samsvarar um **11,6 milljónum °C**. Deuteríum–tritíumeldsneyti þarf að ná um **10 keV** (meira en 100 milljónum °C) til að renna saman á skilvirkan hátt — en hitastig er aðeins eitt af þremur skilyrðum sem verða að vera uppfyllt samtímis. **Lawson-skilyrðið** krefst einnig nægs **þéttleika** og nægilegs **innilokunartíma**, oft sameinað í eitt „þrefalt margfeldi“ (hitastig × þéttleiki × innilokunartími). Að hita plasmað er nauðsynlegt, en alls ekki nægilegt eitt og sér.

Segulmagnaður marksamruni (MTF) er millileið milli tveggja meginaðferða samruna. Í stað þess að halda mjög heitu plasma lengi með risastórum seglum eða hita örlítið mark nánast samstundis með leysum myndar MTF segulmagnað plasma og þjappar því síðan vélrænt saman á míkrósekúndum. Ef þetta virkar hitar þjöppunin plasmað og eykur jafnframt þéttleika þess — hugsanlega að samrunaskilyrðum án segla á stærð við ITER eða leysikerfa á stærð við NIF. Hvort þjöppunin skili raunverulega þessari hitun í alvöru vél er nákvæmlega það sem próf eins og LM26 á að kanna.

Hvað höfundarnir gerðu

- Smíðuðu og skutu **LM26**, vél fyrir segulmagnaðan marksamruna hjá General Fusion: deuteríumplasma í kúlulaga tokamak er myndað og síðan þjappað með innfallandi **föstum litíumhjúp** — um það bil **3×** **geislaþjöppun**.
- Framkvæmdu **fyrstu 11 þjöppunarskotin** og mældu þau með mörgum greiningartækjum. Endurgerð voru hitastig, þéttleiki og segulsvið plasmaðsins yfir tíma, auk nifteinda-, röntgen- og sýnilegrar geislunar og hraðmyndatöku af snertingu plasma við vegginn.
- Byggðu **samþætt eðlisfræðilíkan** sem jafnar hitun frá þjöppun gegn ómískri hitun (frá eigin rafstraumi plasmaðsins) og orkutapi við jaðarinn. Líkanið var borið saman við mæligögn til að meta hvaðan hitunin kom.

Hvað þeir fundu

- **Plasmað hitnaði við þjöppun.** Í bestu skotunum jókst rafeindahitastig um meira en **3×**, rafeindaþéttleiki um um **10×** og pólíska segulsviðið um um **10×**, knúið af 3× geislaþjöppun. Í besta skotinu mældi greinin **hámarks rafeindahitastig um 0,72 keV** (718 ± 80 eV, með Thomson-dreifingu) — um átta milljónir °C.
- **Meirihluti hitunarinnar er rakinn til þjöppunarinnar.** Samþætta líkanið kemst að því að *meirihluti* hitahækkunarinnar komi frá vélrænu þjöppuninni sjálfri — því ferli sem öll MTF-hugmyndin

byggir á — en ekki frá ómískri hitun.
- **Nifteindageislun jókst við þjöppun**, sem samræmist heitara og þéttara deuteríumplasma.

Hvað þetta sýnir ekki

- Þetta er **ekki** samrunaorka, jafnvægispunktur eða nettóorkuávinningur. Ekkert hér framleiddi meiri orku en þurfti til að keyra kerfið. Niðurstaðan snýst um *hitun plasmaðs* — eitt skref í samrunaferlinu — ekki heildarorkujöfnuði ofns.
- Hitastigið er **enn um tífalt of lágt** fyrir brennandi plasma. Um 0,72 keV eru um átta milljónir °C; deuteríum–tritíumeldsneyti þarf á stærðargráðunni **10 keV (yfir 100 milljónir °C)** *og* nægt þéttleika × innilokunartíma til að halda bruna gangandi. Næsta eigið markmið General Fusion er **1 keV** — sem er sjálft langt frá kveikingu.
- „**Meirihluti hitunarinnar kemur frá þjöppun**“ er **niðurstaða byggð á líkani**, ekki bein aflestur mælitækis. Hún kemur úr samþættu eðlisfræðilíkani sem er stillt að mæligögnunum; traustið á skiptingunni milli þjöppunar, ómískrar hitunar og tapa fer því eftir trausti á líkaninu.
- Þetta er **forprent fyrirtækis, ekki ritrýnd grein.** Niðurstöðurnar eru birtar af teyminu sem smíðaði vélina og hefur aflað fjármagns út á loforð hennar; óháð ritrýni hefur ekki farið fram.
- Aukning nifteinda er **ekki** samrunaframleiðsla sem skiptir máli fyrir orkuvinnslu. Nokkrar nifteindir eru væntanlegar frá deuteríum við þessar aðstæður, langt undir nytsamlegri orkuvinnslu.
- Niðurstaðan segir ekkert um sérstaka fullyrðingu fyrirtækisins um að **framtíðarver myndi skila rafmagni inn á dreifikerfið** — fullyrðingu sem óháð umfjöllun hefur tekið með verulegum fyrirvara.

Hversu sterk eru gögnin?

- **Kjarnafullyrðingin er þröng og prófanleg.** „Við þjöppuðum segulmagnað plasma og það hitnaði, að mestu vegna þjöppunarinnar“ er nákvæmlega það ferlipróf sem MTF þarf að standast. Greinin styður það með miklum mælingum og skýru orkujafnvægislíkani. Ef niðurstaðan stenst ritrýni er hún raunveruleg, þó snemma komin, staðfesting á aðferðinni.
- **Fyrirvararnir eru grundvallaratriði, ekki snyrtivara.** Ellefu skot, ein vél, eitt teymi, enn ekki ritrýnt og hámarkshitastig um stærðargráðu undir brennandi plasma. Aðalniðurstaðan — *meirihluti hitunar frá þjöppun* — byggir á líkani, þannig að lykilspurning ritrýni er hvort sú skipting sé traust.
- **Hreinskilna staðan er að ferli hefur verið sýnt, ekki orkumarkmiði náð.** Niðurstaðan færir MTF frá „þjöppunin *ætti* að hita plasmað“ í átt að „þjöppunin *hitar* plasmað“, og ekkert stórfenglegra en það.

Af hverju þetta skiptir máli

Það áhugaverða við segulmagnaðan marksamruna er hagfræðin, ekki metin. Ef vélræn þjöppun getur hitað plasma í átt að samrunaskilyrðum gæti verið hægt að komast þangað án segla á stærð við ITER eða leysikerfa á stærð við NIF — ódýrari leið sem má endurtaka hraðar, *ef* hún virkar. Þetta „ef“ er allt málið og ræðst af óspennandi áföngum eins og þessum: skilar þjöppunin í raun þeirri hitun sem líkönin lofa? Svar LM26 í fyrstu skotunum er varfærnislegt já. Það er þess virði að taka eftir því einmitt *af því* að svarið er skilyrt — eitt þrep á löngum stiga, birt af fólkinu sem er að klífa hann, enn óstaðfest af öðrum og langt frá toppnum.

Í stuttu máli

LM26 frá General Fusion þjappaði segulmagnað deuteríumplasma með innfallandi litíumhjúp og sýndi að plasmað hitnaði — rafeindahitastig meira en þrefaldaðist upp í mælt hámark um 0,72 keV (718 ± 80 eV, um 8 milljónir °C). Greining fyrirtækisins rekur meirihluta hitunarinnar til þjöppunarinnar sjálfrar, ferlisins sem segulmagnaður marksamruni þess byggir á. Þetta er raunverulegt og afmarkað verkfræðilegt skref fyrir þessa leið til samruna. En þetta eru líka fyrstu 11 skotin í einni vél, lýst í forprenti fyrirtækisins sem ekki hefur verið ritrýnt, við hitastig um tífalt undir því sem brennandi plasma þarf — án nettóorku, án jafnvægispunkts og án rafmagns. Ferli sýnt, ekki raforkuver byggt.

Heimildir

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