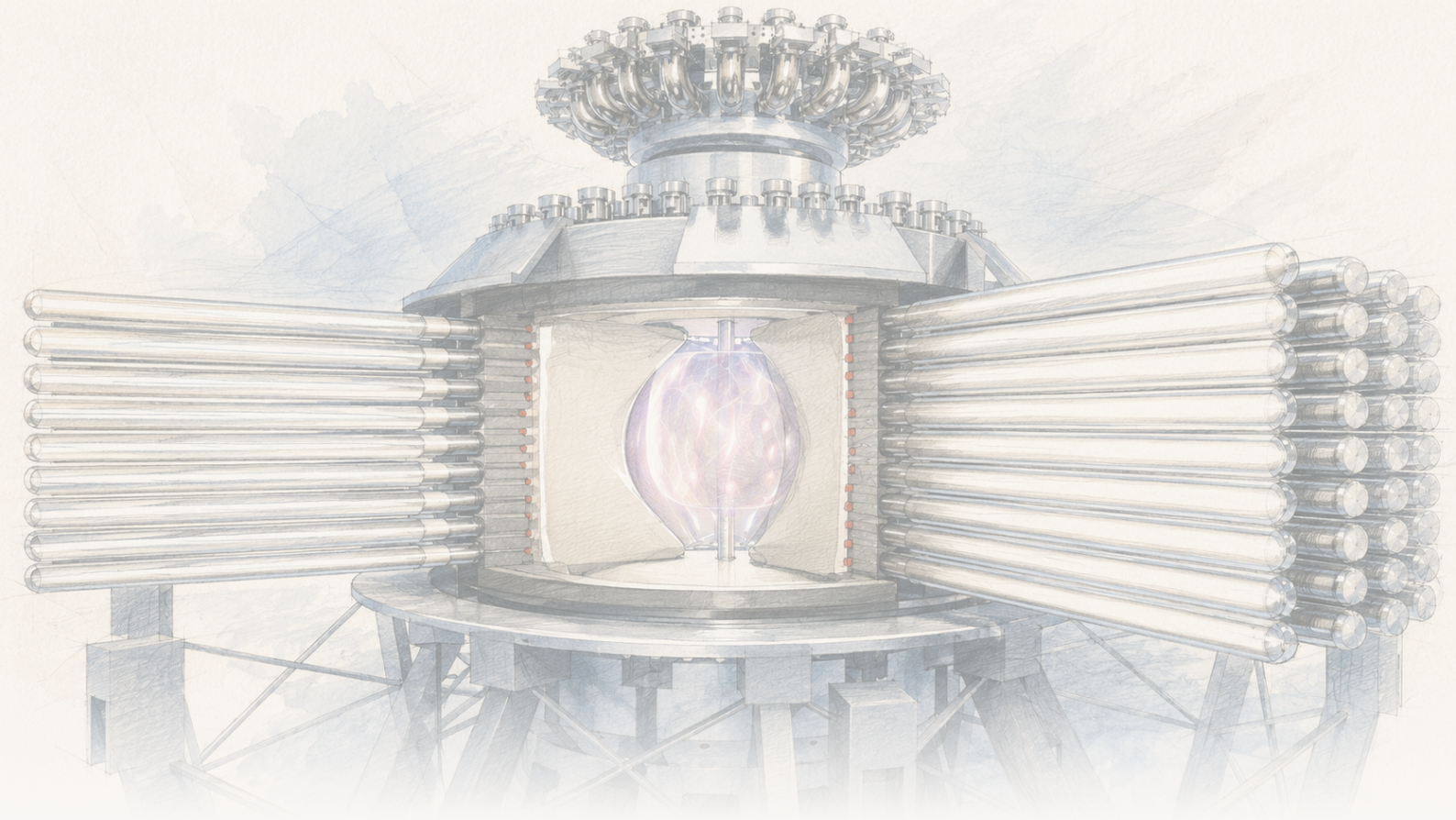


The Clean Paper

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

Kodolsintēzes iekārta uzkarsēja plazmu, to saspiežot — īstais solis un elektrostacija, kas tā vēl nav

General Fusion LM26 ar implodējošu litija oderējumu saspieda magnetizētu deitērija plazmu un novēroja tās uzkaršanu — elektronu temperatūra palielinājās vairāk nekā trīs reizes līdz izmērītam maksimumam ap 0,72 keV (718 ± 80 eV, aptuveni 8 miljoni °C), un uzņēmuma analīze lielāko daļu sildīšanas piedēvē pašai kompresijai, uz kuru balstās magnetizēta mērķa kodolsintēzes pieeja. Tas ir īsts inženiertehnisks kontrolpunkts šim kodolsintēzes ceļam. Taču tie ir tikai pirmie 11 šāvieni vienā iekārtā, aprakstīti uzņēmuma preprintā, kas nav recenzēts, un temperatūra joprojām ir aptuveni desmit reižu zem degošai plazmai vajadzīgās — bez neto enerģijas, līdzsvara punkta vai elektrības.

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

Kodolsintēzes iekārta uzkarsēja plazmu, to saspiežot — īstais solis un elektrostacija, kas tā vēl nav

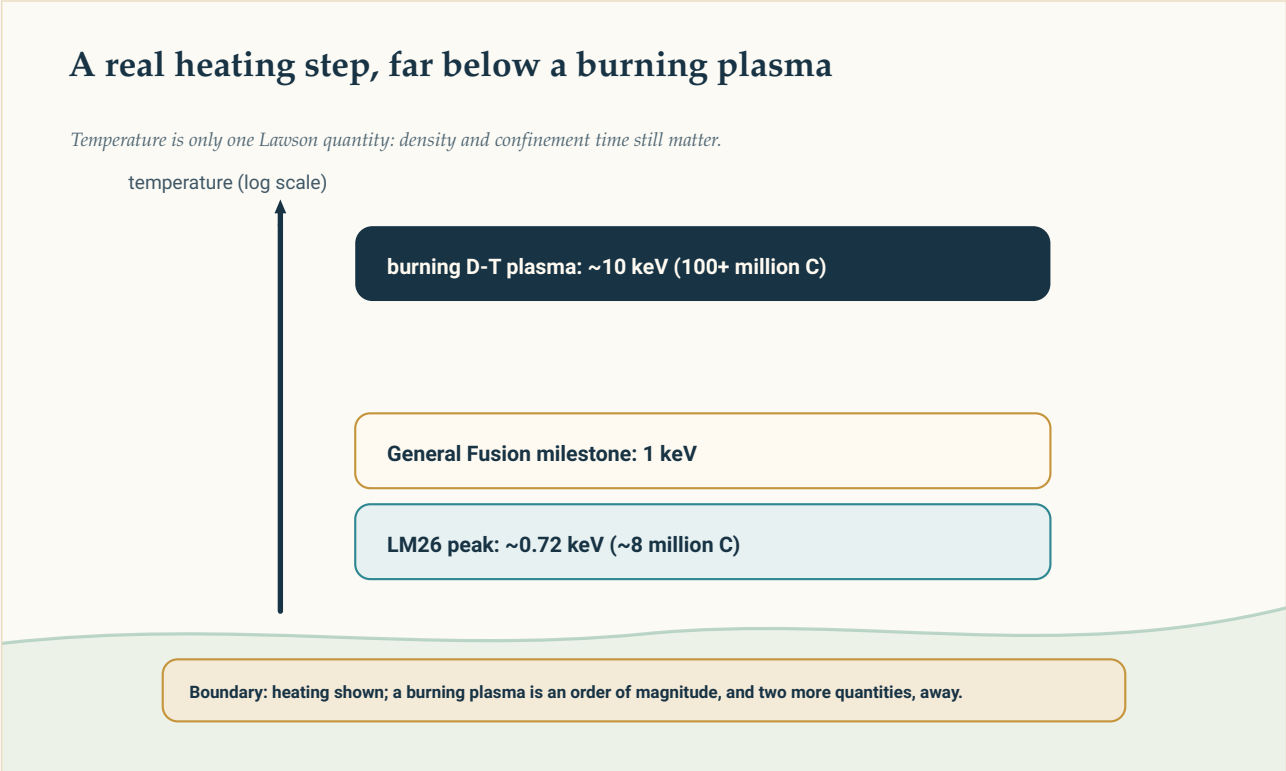
Lai kodolsintēzes reaktors atdotu vairāk enerģijas, nekā patērē pats, degvielas plazmai vienlaikus jābūt pietiekami karstai, pietiekami blīvai un pietiekami ilgi noturētai kopā — šie trīs lielumi veido to, ko fiziķi sauc par Losona kritēriju. Lielākā daļa nozares cenšas to sasniegt ar milzīgiem supravadošiem magnētiem (tokamaki, piemēram, ITER) vai ar jaudīgu lāzeru masīviem (inerciālā noturēšana, kā ASV National Ignition Facility). Mazāka uzņēmumu grupa liek likmi uz trešo ceļu — **magnetizēta mērķa kodolsintēzi** (magnetized target fusion, MTF): vispirms izveido siltu, magnetizētu plazmu, tad to ļoti ātri mehāniski *saspiež*, lai saspiešana pati kļūtu par galveno sildīšanas mehānismu — līdzīgi kā dīzeļdzinējā degviela aizdegas no kompresijas, nevis dzirksteles.

2026. gada jūnijā Kanādas uzņēmums **General Fusion** publicēja sava **Lawson Machine 26 (LM26)** rezultātus, kas pārbauda šīs pieejas centrālo pieņēmumu: vai magnetizētas plazmas mehāniska saspiešana patiešām to uzkarsē tā, kā sola modeļi? Pirmajos 11 saspiešanas šāvienos sfēriska tokamaka deitērija plazmu saspieda uz iekšu implodējošs *cieta litija oderējums*. Labākajos šāvienos plazma saspiešanas laikā kļuva ievērojami karstāka, blīvāka un spēcīgāk magnetizēta, un uzņēmuma analīze lielāko daļu temperatūras pieauguma piedēvē pašai kompresijai.

Tas ir reāls un konkrēts inženiertehnisks rezultāts MTF pieejai. Taču tie ir tikai pirmie šāvieni, aprakstīti **uzņēmuma preprintā, kas vēl nav recenzēts**, pie temperatūras, kas joprojām ir krietni zem degošai plazmai vajadzīgās. Tā nav kodolsintēzes enerģija, nav enerģijas līdzsvara punkts un nav elektrostacija.

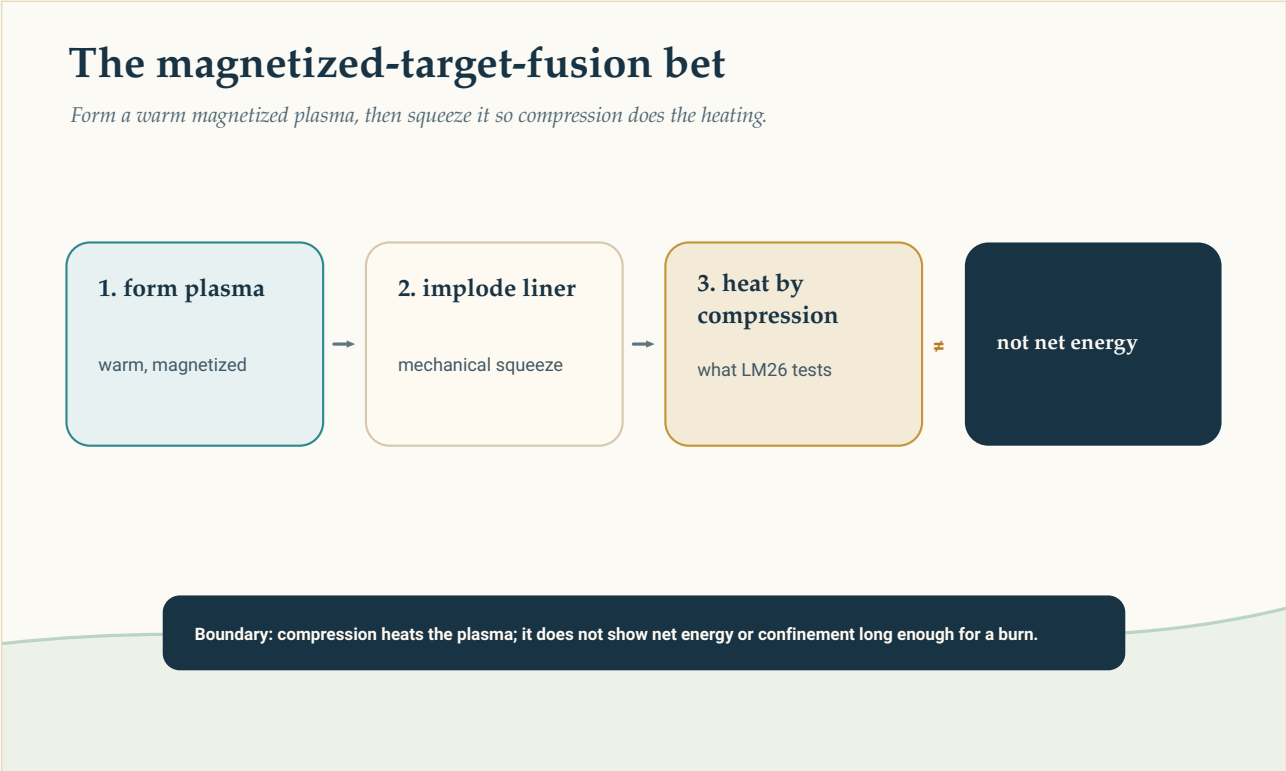
[video pending]

Šis ir General Fusion reklāmas materiāls, kas iekļauts, lai parādītu, kā izskatās LM26; tas nav neatkarīgs pierādījums, ka iekārta sasniegs nākamos uzņēmuma kodolsintēzes mērķus.



Temperatūras skala: LM26 aptuveni 0,72 keV, General Fusion nākamais 1 keV mērķis un aptuveni 10 keV, kas nepieciešami degošai deitērija–tritija plazmai. Temperatūra ir tikai viens no trim Losona kritērija lielumiem.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Magnetizēta mērķa kodolsintēze: izveido siltu, magnetizētu plazmu un pēc tam saspiež to ar implodējošu oderējumu, lai kompresija nodrošinātu sildīšanu. LM26 pārbaudīja, vai kompresija tiešām uzkarsē plazmu; tas

nepārbaudīja neto enerģijas ieguvi vai noturēšanas laiku.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Ko nozīmē "magnetizēta mērķa kodolsintēze", "keV" un Losona kritērijs

Kodolsintēzes plazmas temperatūru parasti izsaka **kiloelektronvoltos (keV)**, nevis grādos: 1 keV atbilst aptuveni **11,6 miljoniem °C**. Deitērija–tritija degvielai efektīvai kodolsintēzei vajag apmēram **10 keV** (vairāk nekā 100 miljonus °C), taču temperatūra ir tikai viens no trim nosacījumiem, kas jāizpilda vienlaikus. **Losona kritērijs** prasa arī pietiekamu **blīvumu** un pietiekamu **noturēšanas laiku**; šos lielumus bieži apvieno tā sauktajā "trīskāršajā reizinājumā" — temperatūra × blīvums × noturēšanas laiks. Plazmas uzkarsēšana ir nepieciešama, bet pati par sevi ne tuvu nav pietiekama.
Magnetizēta mērķa kodolsintēze (MTF) atrodas starp divām galvenajām pieejām. Tā vietā, lai karstu plazmu ilgi noturētu ar milzīgiem magnētiem vai gandrīz momentāni uzkarsētu mazu mērķi ar lāzeriem, MTF vispirms izveido magnetizētu plazmu un pēc tam mikrosekundēs to mehāniski saspiež. Ja tas darbojas, kompresija vienlaikus paaugstina temperatūru un blīvumu — teorētiski ļaujot sasniegt kodolsintēzes apstākļus bez ITER mēroga magnētiem vai NIF mēroga lāzeriem. Tieši jautājumu, vai reālā iekārtā kompresija patiešām nodrošina solīto sildīšanu, pārbauda tāds eksperiments kā LM26.

Ko autori darīja

- Uzbūvēja un darbināja **LM26**, General Fusion magnetizēta mērķa kodolsintēzes iekārtu: izveido sfēriska tokamaka deitērija plazmu un pēc tam to saspiež uz iekšu virzīts **cieta litija oderējums** — aptuveni **3×** **radiāla saspiešana**.
- Veica **pirmos 11 saspiešanas šāvienus** un tos intensīvi diagnosticēja, laika gaitā rekonstruējot plazmas temperatūru, blīvumu un magnētisko lauku, reģistrējot neitronus, rentgenstarojumu un redzamo gaismu, kā arī uzņemot ātrgaitas attēlus par plazmas mijiedarbību ar sienu.
- Izveidoja **integrētu fizikālu modeli**, kurā kompresijas sildīšanu salīdzina ar oma sildīšanu (plazmas paša strāvas radītu sildīšanu) un enerģijas zudumiem pie robežas, un salīdzināja modeli ar mērījumiem, lai noteiktu, no kurienes nāca temperatūras pieaugums.

Ko viņi atklāja

- **Plazma saspiešanas laikā uzkarsa.** Labākajos šāvienos elektronu temperatūra pieauga vairāk nekā **3**×, elektronu blīvums apmēram **10**×, un poloidālais magnētiskais lauks apmēram **10**×, ko izraisīja 3× radiālā saspiešana. Labākajā šāvienā izmērīta **maksimālā elektronu temperatūra ap 0,72 keV** (718 ± 80 eV, pēc Tomsona izkliedes) — aptuveni 8 miljoni °C.
- **Lielākā daļa sildīšanas piedēvēta kompresijai.** Integrētais modelis secina, ka *vairākums* temperatūras pieauguma radās no pašas mehāniskās saspiešanas — mehānisma, uz kuru balstās visa

MTF pieeja — nevis no oma sildīšanas.
- **Kompresijas laikā palielinājās neitronu emisija**, kas ir saderīgi ar karstāku un blīvāku deitērija plazmu.

Ko tas nepierāda

- Tā **nav** kodolsintēzes enerģija, līdzsvara punkts vai neto enerģijas ieguve. Šeit nekas neražoja vairāk enerģijas, nekā vajadzēja iekārtas darbināšanai. Rezultāts ir par *plazmas uzkarsēšanu* — vienu kodolsintēzes cikla posmu — nevis par reaktora enerģijas bilanci.
- Temperatūra joprojām ir **aptuveni desmit reižu par zemu** degošai plazmai. Aptuveni 0,72 keV ir ap 8 miljoniem °C; deitērija–tritija degvielai vajag ap **10 keV (vairāk nekā 100 miljonus °C)** un vienlaikus pietiekamu blīvuma × noturēšanas laika reizinājumu. General Fusion nākamais mērķis ir **1 keV**, kas pats par sevi vēl ir tālu no aizdegšanās.
- Frāze "**lielākā daļa sildīšanas nāk no kompresijas**" ir **uz modeļa balstīts secinājums**, nevis tiešs nolasījums. Tas izriet no integrēta fizikāla modeļa, kas pielāgots diagnostikas datiem; uzticība sadalījumam starp kompresiju, oma sildīšanu un zudumiem ir atkarīga no uzticības šim modelim.
- Tas ir **uzņēmuma preprints, nevis recenzēts darbs**. Rezultātus ziņo pati komanda, kas uzbūvēja iekārtu un finansējumu piesaistījusi, balstoties uz tās solījumu; neatkarīga recenzēšana vēl nav notikusi.
- Neitronu skaita pieaugums **nav enerģētiski nozīmīgs kodolsintēzes iznākums**. Pie šādiem apstākļiem no deitērija sagaidāmi daži neitroni, taču tie ir daudzkārt zem praktiskai enerģijas ražošanai vajadzīgā līmeņa.
- Rezultāts neko nepasaka par atsevišķo uzņēmuma apgalvojumu, ka **nākotnes elektrostacija piegādās elektrību tīklā**; neatkarīgie avoti pret šo solījumu izturas ļoti piesardzīgi.

Cik pārliecinoši ir pierādījumi?

- **Galvenais apgalvojums ir šaurs un pārbaudāms.** "Mēs saspiedām magnetizētu plazmu, tā kļuva karstāka, un lielākā daļa sildīšanas radās no kompresijas" ir tieši tas mehānisma tests, kas MTF pieejai jāiztur. Darbs to pamato ar bagātīgi diagnosticētu šāvienu sēriju un skaidru enerģijas bilances modeli. Ja rezultāts izturēs recenzēšanu, tas būs īsts, kaut arī agrīns pieejas apstiprinājums.
- **Atrunas ir būtiskas, nevis kosmētiskas.** Vienpadsmit šāvieni, viena iekārta, viena komanda, vēl nav recenzēts, un virsraksta temperatūra ir par kārtu zem degošai plazmai vajadzīgās. Galvenais secinājums — *vairākums sildīšanas no kompresijas* — balstās uz modeli, tāpēc centrālais recenzēšanas jautājums būs, cik robusts ir šis sadalījums.
- **Godīgais statuss: parādīts mehānisms, nevis sasniegta enerģētiska robežzīme.** Tas pabīda MTF no "kompresijai *vajadzētu* sildīt plazmu" uz "kompresija *silda* plazmu" — un neko grandiozāku.

Kāpēc tas ir svarīgi

Magnetizēta mērķa kodolsintēzes interesantākā daļa ir ekonomika, nevis rekordi. Ja mehāniska saspiešana spēj uzkarsēt plazmu līdz kodolsintēzei vajadzīgiem apstākļiem, teorētiski varētu iztikt bez ITER mēroga magnētiem vai NIF mēroga lāzeriem — iegūt lētāku pieeju, kurā iespējama ātrāka iterācija, *ja* tā darbojas. Šis "ja" ir visa jautājuma kodols, un to izšķir nevis iespaidīgi virsraksti, bet neglamūrīgi kontrolpunkti, kā šis: vai kompresija tiešām dod tādu sildīšanu, kādu sola modeļi? Pirmajos LM26 šāvienos atbilde ir piesardzīgs "jā". Tas ir ievērības cienīgi tieši tāpēc, ka atbilde ir ar atrunām — viens pakāpiens garās kāpnēs, par kuru ziņo paši kāpēji, kuru vēl nav pārbaudījusi neatkarīga recenzēšana un kas joprojām atrodas tālu no augšējā pakāpiena.

Īss kopsavilkums

General Fusion LM26 ar implodējošu litija oderējumu saspieda magnetizētu deitērija plazmu un parādīja, ka tā uzkarst — elektronu temperatūra palielinājās vairāk nekā trīs reizes līdz izmērītam maksimumam ap 0,72 keV (718 ± 80 eV, aptuveni 8 miljoni °C). Uzņēmuma analīze lielāko daļu sildīšanas piedēvē pašai kompresijai — mehānismam, uz kuru balstās magnetizēta mērķa kodolsintēzes pieeja. Tas ir reāls un konkrēts inženiertehnisks solis šajā kodolsintēzes ceļā. Taču tie ir pirmie 11 šāvieni vienā iekārtā, aprakstīti uzņēmuma preprintā, kas vēl nav recenzēts, pie temperatūras aptuveni desmit reižu zem degošai plazmai vajadzīgās — bez neto enerģijas, bez enerģijas līdzsvara punkta un bez elektroenerģijas ražošanas. Parādīts mehānisms, nevis uzbūvēta elektrostacija.

Avoti

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