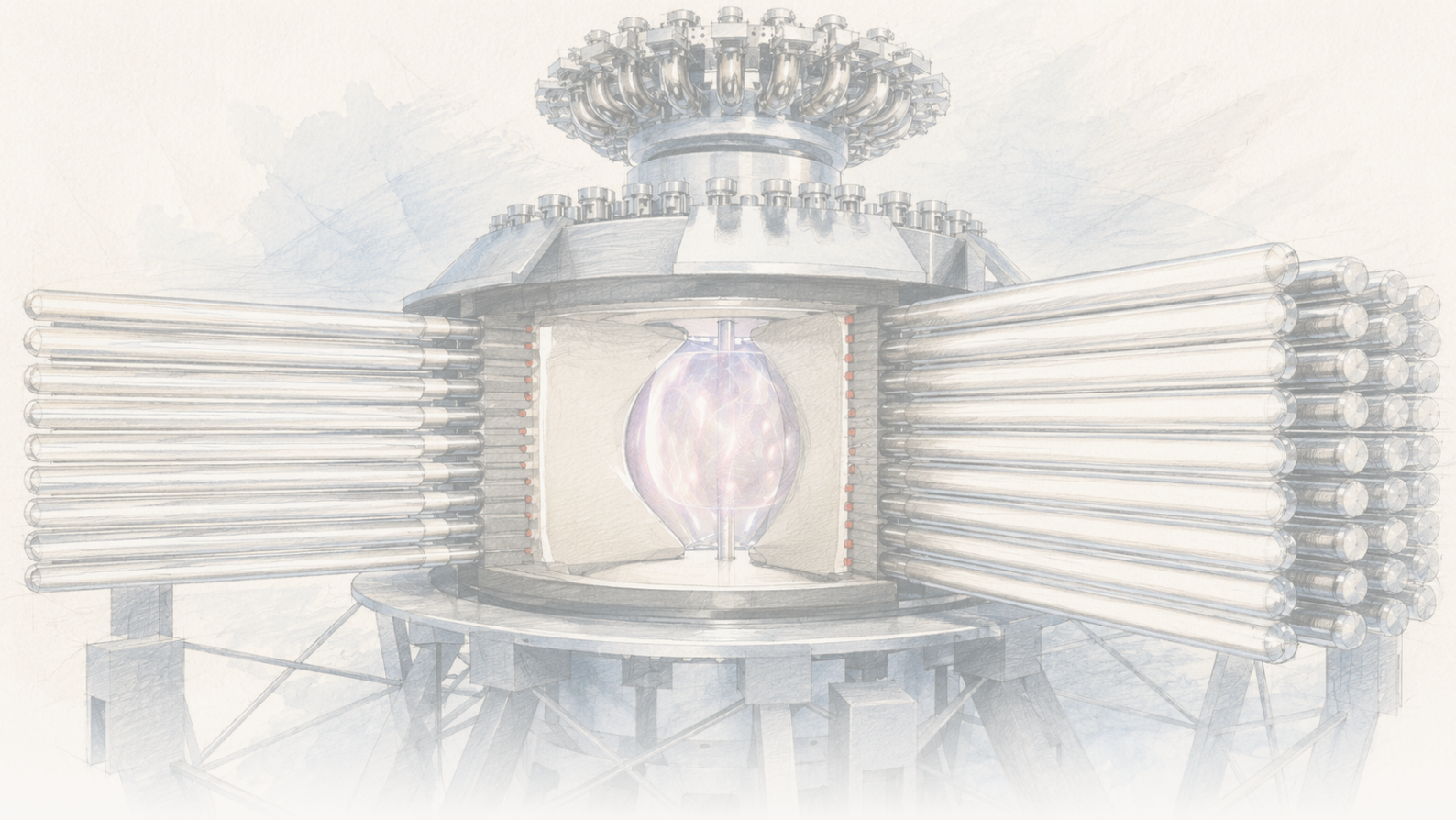


The Clean Paper

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

एक fusion machine ने प्लाज़्माकोसंपीड़ित करके गरम कयिा— असलीकदम यहीहै, बजिलीघर नहीं

General Fusion कीLM26 मशीन ने चुंबकति ड्यूटेरयिम प्लाज़्माकोभीतर कीओर धँसते ठोस lithium liner से दबायाऔर उसे गरम होते देखा। इलेक्ट्रॉन तापमान तीन गुने से अधकि बढ़कर लगभग 0.72 keV (718 ± 80 eV, करीब 8 मलियिन °C) के मापे गए शखिर तक पहुँचा।कंपनीके वशि्लेषण के अनुसार अधकिांश तापन स्वयं संपीड़न से आया— magnetized-target-fusion पद्धतकिा केंद्रीय तंत्र। इस मार्ग के लिए यह वास्तवकि इंजीनियरगि जाँच-बदिु है। लेकनि यह एक मशीन के केवल पहले 11 shots हैं, कंपनीके ऐसे preprint में जनिकीpeer review नहींहुई, और तापमान burning plasma कीजरूरत से अभीलगभग दस गुनाकम है। न net energy, न breakeven, न बजिली। तंत्र दखिाहै; बजिलीघर नहींबना।

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

एक संलयन मशीन ने प्लाज़्माकोदबाकर गरम किया— असली कदम यहीहै, शक्ति plant नहीं

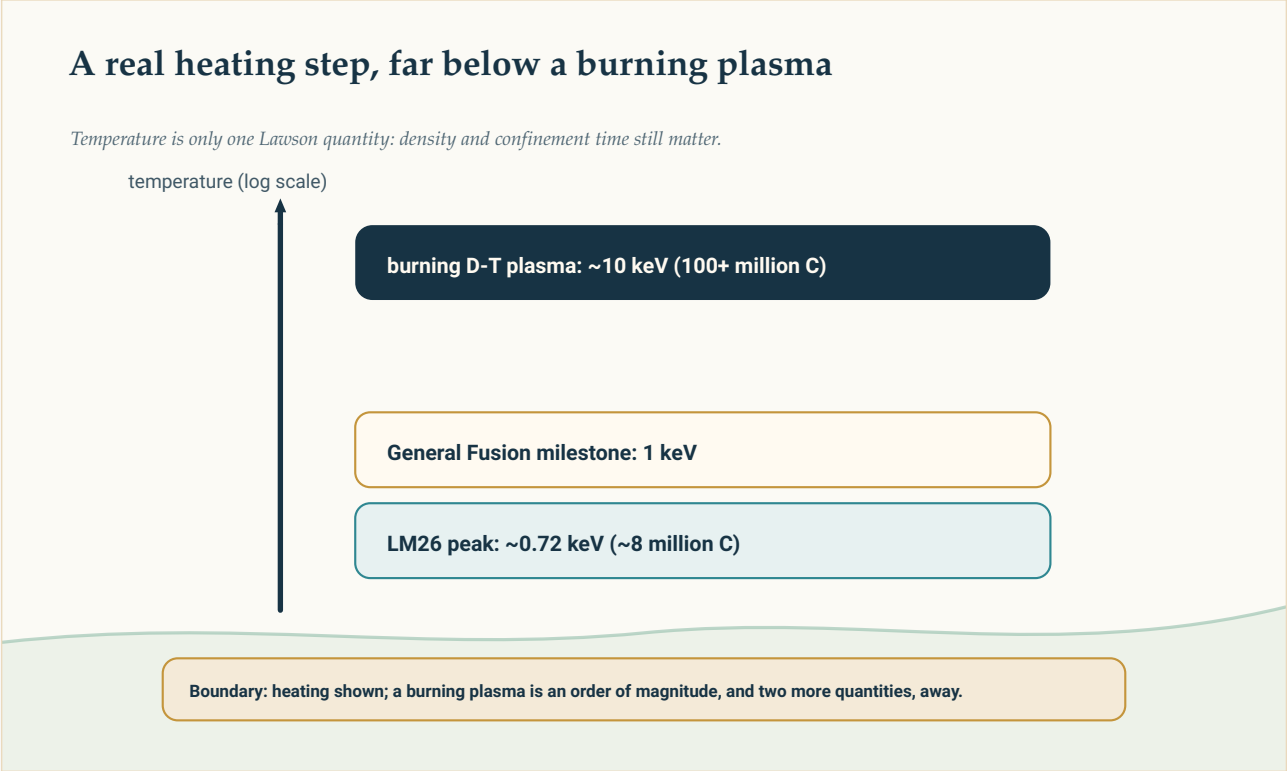
किसीसंलयन reactor कोचलाने में जितनीऊर्जालगतीहै उससे अधिक लौटाने के लिए fuel प्लाज़्माकोएक साथ पर्याप्त गरम, पर्याप्त घनाऔर पर्याप्त देर तक बँधारहनाचाहिए — यहीतीन राशियाँमिलकर वह बनातीहैं जिसे physicists **Lawson criterion** कहते हैं। क्षेत्र काबड़ाहिस्साइसे वशिाल superconducting magnets (ITER जैसे tokamaks) यावशिाल lasers कीarrays (US National Ignition Facility जैसीinertial confinement) से हासिल करने कीकोशिश करताहै। कुछ छोटी कंपनियाँतीसरे रास्ते पर दाँव लगारहीहैं: **चुंबकति लक्ष्य संलयन (MTF)**। पहले गरम, चुंबकति प्लाज़्माबनाइए, फिर उसे बहुत तेज़ीसे यांत्रिक रूप से दबाइए, ताकि संपीड़न हीतापन करे — लगभग वैसे जैसे diesel engine spark के बजाय संपीड़न से fuel जलताहै।

जून 2026 में Canadian कंपनी**सममित संलयन** ने अपने **Lawson मशीन 26 (LM26)** के परिणाम पोस्ट किए, जोइस मुख्य दाँव कीपरीक्षाकरते हैं: क्याचुंबकति प्लाज़्माकोmechanically संपीड़ित करने से वह वास्तव में वैसे हीगरम होताहै जैसा मॉडल कहते हैं? पहली11 संपीड़न प्रयास में — जिनमें spherical-tokamak ड्यूटेरियम प्लाज़्माकोinward imploding ठोस *lithium liner* से दबायागया— सबसे अच्छीप्रयास में प्लाज़्मासंपीड़न के दौरान स्पष्ट रूप से अधिक गरम, अधिक घना और अधिक मज़बूतीसे चुंबकति हुआ। कंपनीकाविश्लेषण कहताहै कि तापन काअधिकांश हिस्सासंपीड़न से हीआया।

यह MTF दृष्टिकोण के लिए एक वास्तविक, विशिष्ट अभियांत्रिकीपरिणाम है। लेकिन यह केवल शुरुआतीप्रयास हैं, **कंपनीप्रीप्रिंट में वर्णित हैं जिसकीपीयर रिव्यू नहीहुई**, तापमान अभीburning प्लाज़्माके लिए जरूरीस्तर से बहुत नीचे है — और यह संलयन ऊर्जानहीं breakeven नहीं, शक्ति plant नहीं।

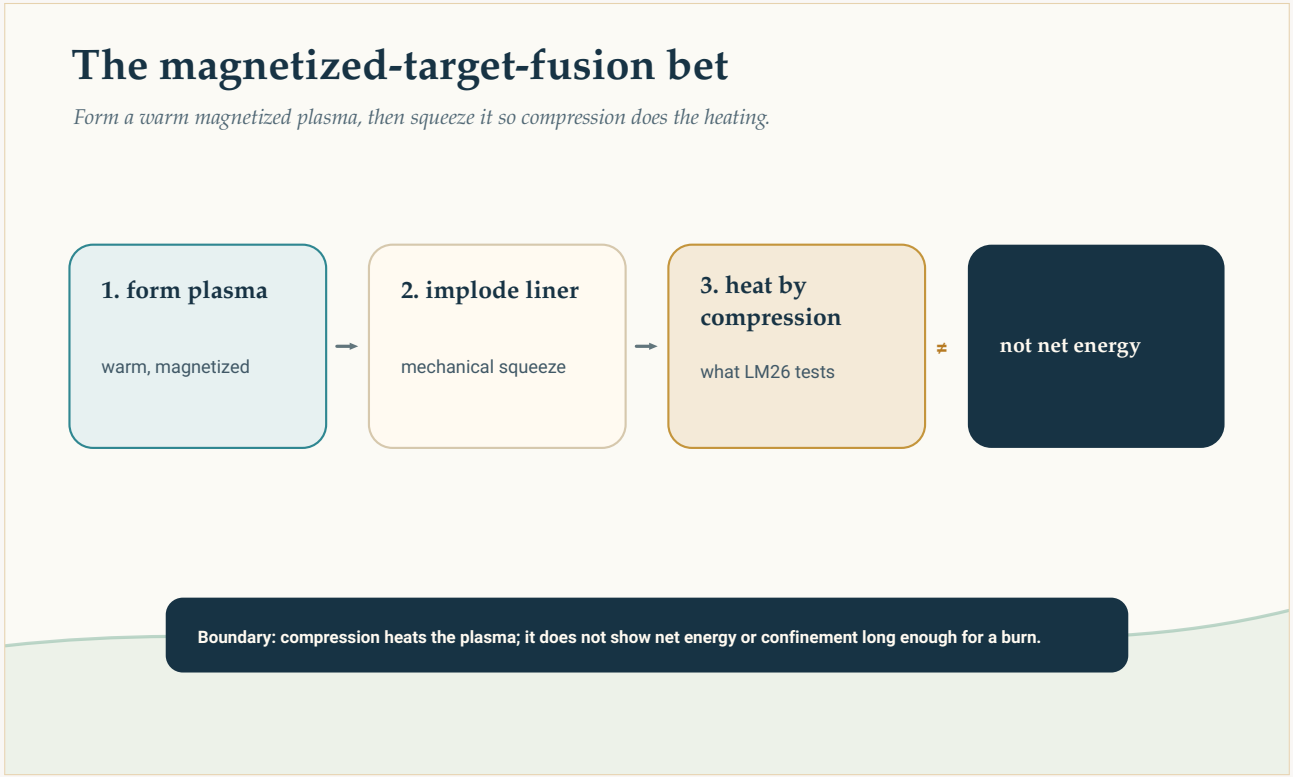
[video pending]

यह सममित संलयन कापromotional footage है, केवल यह दिखाने के लिए कि LM26 कैसादिखताहै; यह स्वतंत्र साक्ष्य नहींकि मशीन अपने भविष्य संलयन milestones हासिल करेगी।



तापमान ladder: LM26 का ~0.72 keV, सामान्य संलयन का 1 keV milestone, और burning ड्यूटेरियम–tritium प्लाज़्माके लिए जरूरी ~10 keV। तापमान Lawson कीतीन quantities में से केवल एक है।

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



चुंबकति लक्ष्य संलयन: पहले warm चुंबकति प्लाज़्माबनाइए, फिर imploding liner से उसे संपीड़ति कीजिए तक़ कि दबाव तापन करे — diesel-compression वालादाँव। LM26 ने यह जाँचाकि संपीड़न प्लाज़्माकोगरम करताहै; net ऊर्जायाconfinement नहीं।

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

“magnetized target fusion”, “keV” और Lawson criterion काअर्थ

संलयन में प्लाज़्मातापमान आमतौर पर degrees के बजाय **kiloelectronvolts (keV)** में दियाजाताहै: 1 keV लगभग **11.6 मिलियन °C** के बराबर है। ड्यूटेरियम–tritium fuel कोकुशलतापूर्वक fuse होने के लिए लगभग **10 keV** (100 मिलियन °C से अधिक) तक पहुँचनापड़ताहै — लेकिन तापमान केवल तीन जरूरतोंमें से एक है। **Lawson criterion** कहताहै कि reactor कोपर्याप्त **घनत्व** और पर्याप्त **confinement समय** भीचाहिए, जिन्हें अक्सर एक “triple product” (तापमान × घनत्व × confinement समय) में जोड़ाजाताहै। प्लाज़्माकोगरम करनाजरूरीहै, लेकिन अपने-आप में कहींसे पर्याप्त नहीं।

चुंबकति लक्ष्य संलयन (MTF) दोmainstream दृष्टिकोण के बीच कारास्ताहै। Huge magnets से गरम प्लाज़्मा कोलंबे समय तक confine करने, यालasers से छोटे लक्ष्य कोलगभग तुरंत गरम करने के बजाय, MTF चुंबकति प्लाज़्माबनाताहै और microseconds में यंत्रिक रूप से संपीड़ति करताहै। अगर यह कम करे तोसंपीड़न प्लाज़्माको गरम भीकरेगाऔर घनत्व भीबढ़ाएगा— संभवत:ITER-जैसे magnets यानIF-जैसे lasers के बिनासंलयन स्थितियाँ तक पहुँचते हुए। वास्तविक मशीन में संपीड़न वास्तव में इतनीतापन देतीहै यानहीं LM26 जैसीपरीक्षण ठीक इसी सवाल के लिए है।

शोधकर्ताओं ने क्याकिया

- समस्य संलयन में **LM26** बनायाऔर चलाया spherical-tokamak ड्यूटेरियम प्लाज़्माबनायाजाताहै, फिर inward-driven **ठोस lithium liner** से संपीड़ित कियाजाताहै — लगभग 3× **radial संपीड़न**।
- पहली11 **संपीड़न प्रयास** चलाकर उन्हें बहुत से diagnostics से मापा; प्लाज़्मातापमान, घनत्व और magnetic क्षेत्र कोसमय के साथ पुनर्निर्मित कियाऔर emitted neutrons, X-rays, दृश्य प्रकाश तथाप्लाज़्मा-दीवार इंटरैक्शन की fast-camera छवियाँरिकॉर्ड की।
- एक **integrated भौतिकीमॉडल** बनायाजोसंपीड़न तापन, Ohmic तापन (प्लाज़्माके अपने current से) और सीमापर खोई ऊर्जाकाbalance रखताहै, फिर मापाडेटासे तुलनाकर यह अनुमान लगायाकि तापन कहाँसे आई।

क्यामिला

- **प्लाज़्मादबने के साथ गरम हुआ।** सर्वोत्तम प्रयास में इलेक्ट्रॉन तापमान **3× से अधिक**, इलेक्ट्रॉन घनत्व लगभग **10×**, और poloidal magnetic क्षेत्र लगभग **10×** बढ़ा; जबकि radial संपीड़न 3× थी। सबसे अच्छीshot में शोधपत्र ने **peak इलेक्ट्रॉन तापमान लगभग 0.72 keV** (Thomson scattering से 718 ± 80 eV) मापा— लगभग 8 मिलियन °C।
- **तापन काअधिकांश हिस्सासंपीड़न कोदियागया।** Integrated मॉडल कानिष्कर्ष है कि तापमान rise काबहुमत यांत्रिक संपीड़न से आया— वहीतंत्र जिस पर पूराMTF दृष्टिकोण निर्भर करताहै — न कि Ohmic तापन से।
- **संपीड़न के दौरान neutron emission बढ़ा;** जोअधिक गरम और अधिक सघन ड्यूटेरियम प्लाज़्माके अनुरूप है।

यह क्यानहींदिखाया

- यह **संलयन ऊर्जा; breakeven यानet gain नहीं** है। यहाँमशीन चलाने में लगीऊर्जासे अधिक ऊर्जापैदानहींहुई। परिणाम *प्लाज़्मातापन* पर है — संलयन चक्र काएक कदम — reactor के ऊर्जाbalance पर नहीं।
- तापमान अभी**burning प्लाज़्मासे लगभग दस गुनाकम** है। लगभग 0.72 keV करीब 8 मिलियन °C है; ड्यूटेरियम–tritium fuel कोलगभग **10 keV (100 मिलियन °C से ऊपर)** *और* पर्याप्त घनत्व × confinement समय चाहिए ताकि burn टिक सके। समस्य संलयन काअपनाअगलाmilestone **1 keV** है — जोignition से खुद बहुत दूर है।
- "**Most तापन is से संपीड़न**" एक **मॉडल-based निष्कर्ष** है, प्रत्यक्ष पढ़नानहीं। यह diagnostics के साथ फिट किए integrated भौतिकीमॉडल से आताहै; संपीड़न, Ohmic तापन और losses कोअलग-अलग कितनामानाजाए, उस मॉडल कीविश्वसनीयतापर निर्भर करताहै।
- यह **कंपनीप्रीप्रिंट है, peer-समीक्षित नहीं।** परिणाम उसीटीम ने self-report किए हैं जिसने मशीन बनाई और उसके promise पर funding जुटाई; स्वतंत्र समीक्षाअभीनहींहुई।
- Neutron वृद्धि **energy-relevant संलयन उपज नहीं** है। इन स्थितियोंमें ड्यूटेरियम से कुछ neutrons अपेक्षित हैं, शक्ति के लिए उपयोगीमात्रासे बहुत नीचे।
- यह कंपनीके अलग बयान के बारे में कुछ नहींकहताकि एक **भविष्य plant ग्रिड कोelectricity देगा** — स्वतंत्र reporting ने उस दावाकोकाफ़ीcaution के साथ लियाहै।

प्रमाण कितनामजबूत है

- **मुख्य दावासंकीर्ण और जाँचाजासकने वालाहै।** “हमने चुंबकति प्लाज़्माकोसंपीड़ति कयिा वह गरम हुआ, और मॉडल के अनुसार तापन काअधकिांश हसि्सासंपीड़न से आया” — MTF दृष्टकिोण कोठीक यहीतंत्र परीक्षण पास करनाहै। शोधपत्र इसे भारीरूप से instrumented प्रयास और स्पष्ट energy-balance मॉडल से समर्थन करताहै। पीयर रविव्यू में कायम रहातोयह दृष्टकिोण कीवास्तवकि, भले शुरुआती validation होगी।
- **Caveats संरचनात्मक हैं।** Eleven प्रयास, एक मशीन, एक टीम, अभीसमीक्षानहीं सुरखीतापमान burning प्लाज़्मासे एक ऑर्डर of परमिाण नीचे। Load-bearing नष्किर्ष — *बहुमत तापन से संपीड़न* — मॉडल पर टकिाहै, इसलएि पीयर रविव्यू काकेंद्रीय सवाल यहीहोगाकि मॉडल काattribution कतिनामजबूत है।
- **ईमानदार स्थति: तंत्र दखिा, ऊर्जाmilestone नहीं।** यह MTF को“संपीड़न कोप्लाज़्मागरम करनाचहएि” से “संपीड़न प्लाज़्माको*गरम करतीहै*” कीओर धकेलताहै — इससे अधकि नहीं।

यह क्योंमहत्वपूर्ण है

चुंबकति लक्ष्य संलयन कीदलिचस्पीरकिॉर्ड से अधकि economics में है। अगर यंत्रकि संपीड़न प्लाज़्माकोसंलयन स्थतियिाँकीओर गरम कर सकतीहै, तोसंभवत:ITER-जैसे magnets यानIF-जैसे lasers के बनिावहाँपहुँचाजासके — सस्ता, तेजीसे iterate करने वालारास्ता, *अगर* कम करे। यही“अगर” पूराखेल है, और यह ऐसे गैर-नाटकीय checkpoints पर टकिाहै: क्यासंपीड़न वास्तव में वह तापन देताहै जसिकीमॉडल भवष्यिवाणीकरते हैं? LM26 कीशुरुआतीप्रयास काउत्तर qualified yes है। यहीबात नोट करने योग्य है, ठीक *क्योंकि* वह qualified है — लंबीसीढ़ीकीएक पायदान, उसीटीम कीरपिोर्ट जोउसे चढ़ रहीहै, अभीकसिीऔर ने verify नहींकी, और ऊपर तक बहुत दूरीबकीहै।

संक्षप्ति सार

समसि्य संलयन के LM26 ने imploding lithium liner से चुंबकति ड्यूटेरयिम प्लाज़्माकोसंपीड़ति कयिाऔर उसे गरम होते मापा— इलेक्ट्रॉन तापमान तीन गुने से अधकि बढ़कर लगभग 0.72 keV (718 ± 80 eV, ~8 मलियिन °C) peak तक पहुँचा — और कंपनीके वशि्लेषण ने तापन काअधकिांश हसि्सासंपीड़न कोदयिा, वहीतंत्र जसि पर उसकाmagnetized-लक्ष्य-fusion दृष्टकिोण नरि्भर है। यह संलयन के इस मार्ग के लएि वास्तवकि, वशिष्टि अभयिंत्रकीचरण है। लेकनि यह एक मशीन पर पहली11 प्रयास हैं, कंपनीप्रीप्रिंट में वर्णति हैं जसिकीपीयर रविव्यू नहींहुई, तापमान burning प्लाज़्माकी जरूरत से लगभग दस गुनानीचे है, और इसमें कोई net ऊर्जा breakeven याelectricity नहींहै। तंत्र दखिाहै, शक्ति plant नहींबना।

स्रोत

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