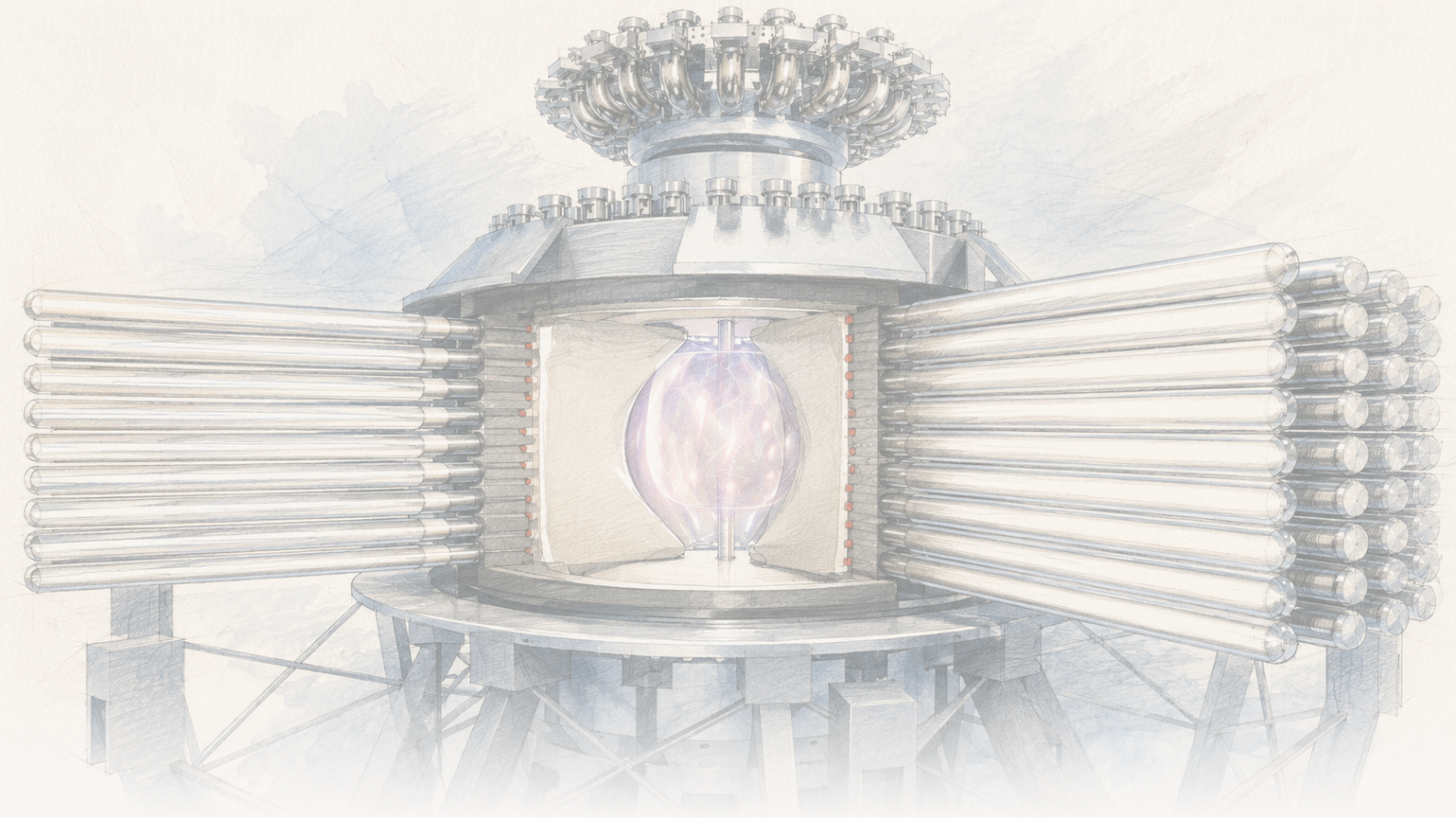


The Clean Paper

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

एक fusion machine ने प्लाज़्माकोसंपीड़ित करके गरम किया— असलीकदम यहीहै, बिजलीघर नहीं

General Fusion कीLM26 मशीन ने चुंबकित ड्यूटेरियम प्लाज़्माकोभीतर कीओर धँसते ठोस lithium liner से दबायाऔर उसे गरम होते देखा। इलेक्ट्रॉन तापमान तीन गुने से अधिक बढ़कर लगभग 0.72 keV (718 ± 80 eV, करीब 8 मिलियन °C) के मापे गए शिखर तक पहुँचा। कंपनीके विश्लेषण के अनुसार अधिकांश तापन स्वयं संपीड़न से आया— magnetized-target-fusion पद्धति काकेंद्रीय तंत्र। इस मार्ग के लिए यह वास्तविक इंजीनियरिंग जाँच-बिंदु है। लेकिन यह एक मशीन के केवल पहले 11 shots हैं, कंपनीके ऐसे preprint में जिनकीpeer review नहींहुई, और तापमान burning plasma कीज़रूरत से अभीलगभग दस गुनाकम है। न net energy, न breakeven, न बिजली। तंत्र दिखाहै; बिजलीघर 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

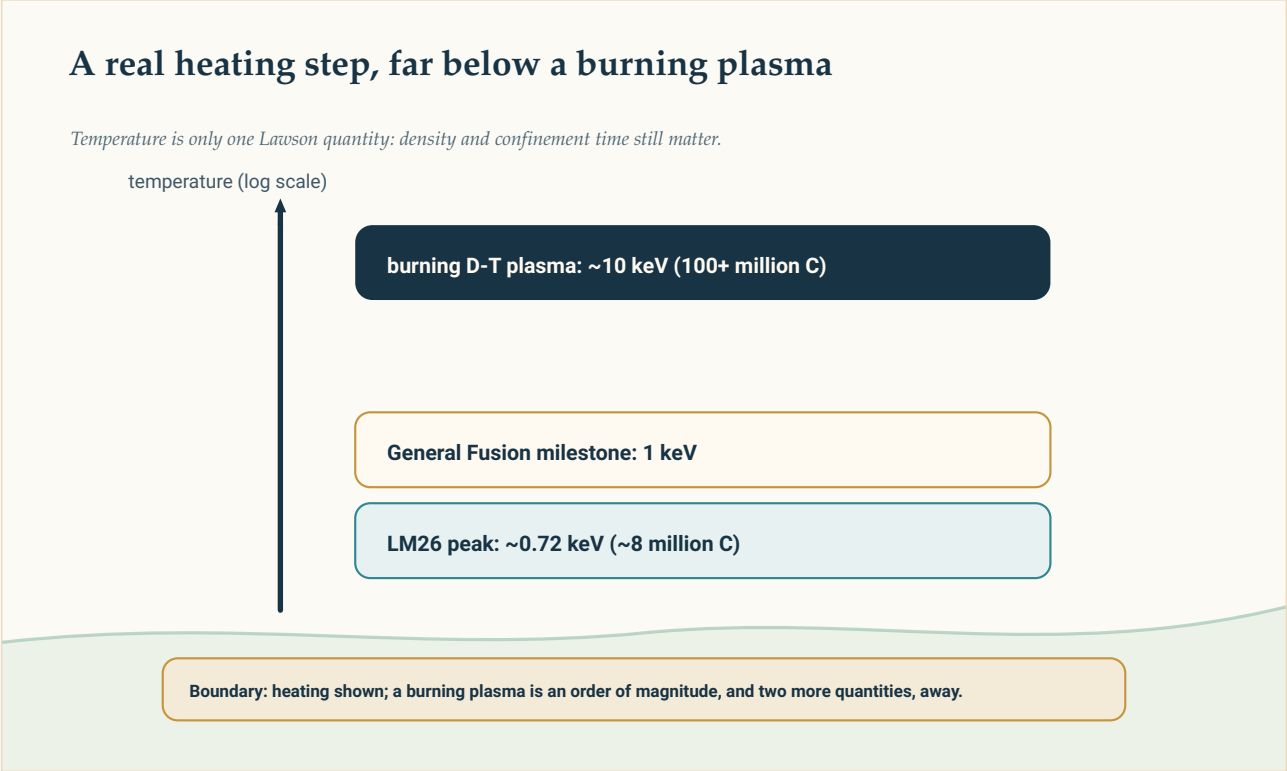
किसीसंलयन reactor कोचलाने में जितनीऊर्जालगतीहै उससे अधिक लौटाने के लिए fuel प्लाज़्माकोएक साथ पर्याप्त गरम, पर्याप्त घनाऔर पर्याप्त देर तक बँधारहनाचाहिए — यहीतीन राशियाँमिलकर वह बनातीहैं जिसे physicists **Lawson criterion** कहते हैं। क्षेत्र काबड़ाहिस्साइसे विशाल superconducting magnets (ITER जैसे tokamaks) यावशाल lasers कीarrays (US National Ignition Facility जैसीinertial confinement) से हासिल करने कीकोशिश करताहै। कुछ छोटी कंपनियाँतीसरे रास्ते पर दाँव लगारहीहैं: **चुंबकित लक्ष्य संलयन (MTF)**। पहले गरम, चुंबकित 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**समान्य संलयन** ने अपने **Lawson मशीन 26 (LM26)** के परिणाम पोस्ट किए, जोइस मुख्य दाँव कीपरीक्षाकरते हैं: क्याचुंबकित 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 चुंबकित 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 नहींहुई**, तापमान अभीburning प्लाज़्माके लिए जरूरीस्तर से बहुत नीचे है — और यह संलयन ऊर्जानहीं, breakeven नहीं, शक्ति plant नहीं।

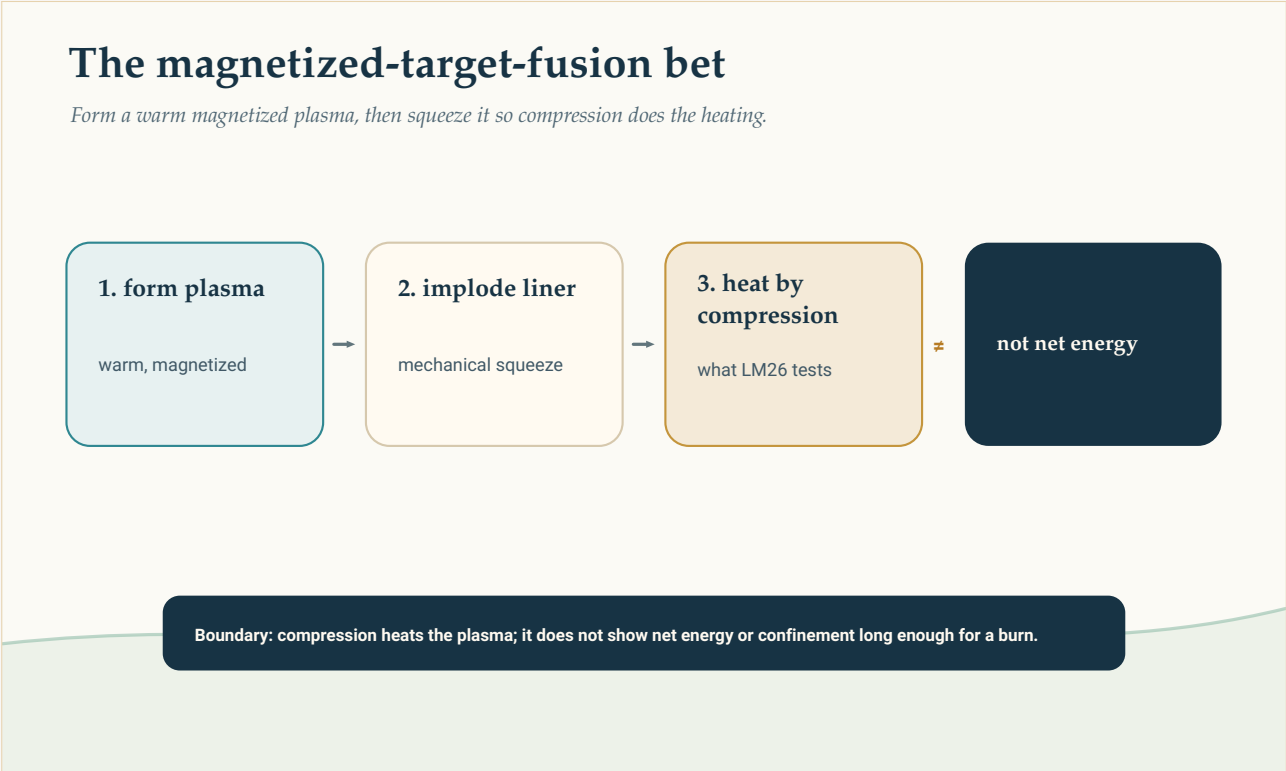
[video pending]

यह समान्य संलयन काpromotional 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, समान्य संलयन का 1 keV milestone, और burning ड्यूटेरियम–tritium प्लाज़्मा के लिए जरूरी ~10 keV। तापमान Lawson की तीन quantities में से केवल एक है।

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



चुंबकित लक्ष्य संलयन: पहले warm चुंबकित प्लाज़्मा बनाइए, फिर imploding liner से उसे संपीड़ित कीजिए ताकि दबाव तापन करे — diesel-compression वाला दाँव। LM26 ने यह जाँचा कि संपीड़न प्लाज़्मा को गरम करता है; net ऊर्जा या confinement नहीं।

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

"magnetized target fusion", "keV" और Lawson criterion का अर्थ

संलयन में प्लाज़्मा तापमान आमतौर पर degrees के बजाय **kiloelectronvolts (keV)** में दिया जाता है: 1 keV लगभग **11.6 मिलियन °C** के बराबर है। ड्यूटेरियम–tritium fuel को कुशलतापूर्वक fuse होने के लिए लगभग **10 keV** (100 मिलियन °C से अधिक) तक पहुँचना पड़ता है — लेकिन तापमान केवल तीन जरूरतों में से एक है। **Lawson criterion** कहता है कि reactor को पर्याप्त **घनत्व** और पर्याप्त **confinement समय** भी चाहिए, जिन्हें अक्सर एक "triple product" (तापमान × घनत्व × confinement समय) में जोड़ा जाता है। प्लाज़्मा को गरम करना जरूरी है, लेकिन अपने-आप में कहीं से पर्याप्त नहीं।

चुंबकित लक्ष्य संलयन (MTF) दो mainstream दृष्टिकोण के बीच का रास्ता है। Huge magnets से गरम प्लाज़्मा को लंबे समय तक confine करने, या lasers से छोटे लक्ष्य को लगभग तुरंत गरम करने के बजाय, MTF चुंबकित प्लाज़्मा बनाता है और microseconds में यांत्रिक रूप से संपीड़ित करता है। अगर यह काम करे तो संपीड़न प्लाज़्मा को गरम भी करेगा और घनत्व भी बढ़ाएगा — संभवतः ITER-जैसे magnets या NIF-जैसे lasers के बिना संलयन स्थितियाँ तक पहुँचते हुए। वास्तव कि मशीन में संपीड़न वास्तव में इतनी तापन देती है या नहीं LM26 जैसी परीक्षण ठीक इसी सवाल के लिए है।

शोधकर्ताओं ने क्या किया

- समय संलयन में **LM26** बनाया और चलाया spherical-tokamak ड्यूटेरियम प्लाज़्मा बनाया जाता है, फिर inward-driven **ठोस lithium liner** से संपीड़ित किया जाता है — लगभग **3× radial संपीड़न**।
- पहली **11 संपीड़न प्रयास** चलाकर उन्हें बहुत से diagnostics से मापा: प्लाज़्मा तापमान, घनत्व और magnetic क्षेत्र को समय के साथ पुनर्निर्मित किया और emitted neutrons, X-rays, दृश्य प्रकाश तथा प्लाज़्मा-दीवार इंटरैक्शन की fast-camera छवियाँ रिकॉर्ड कीं।
- एक **integrated भौतिकी मॉडल** बनाया जो संपीड़न तापन, Ohmic तापन (प्लाज़्मा के अपने current से) और सीमा पर खोई ऊर्जा का balance रखता है, फिर मापा डेटा से तुलना कर यह अनुमान लगाया कि तापन कहाँ से आई।

क्या मिला

- **प्लाज़्मा दबने 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 अच्छी shot में शोधपत्र ने **peak इलेक्ट्रॉन तापमान लगभग 0.72 keV** (Thomson scattering से 718 ± 80 eV) मापा — लगभग 8 मिलियन °C।
- **तापन का अधिकांश हिस्सा संपीड़न को दिया गया।** Integrated मॉडल का निष्कर्ष है कि तापमान rise का *बहुमत* यांत्रिक संपीड़न से आया — वही तंत्र जिस पर पूरा MTF दृष्टिकोण निर्भर करता है — न कि Ohmic तापन से।
- **संपीड़न के दौरान neutron emission बढ़ा,** जो अधिक गरम और अधिक सघन ड्यूटेरियम प्लाज़्मा के अनुरूप है।

यह क्या नहीं दिखाता

- यह **संलयन ऊर्जा, breakeven या net gain नहीं** है। यहाँ मशीन चलाने में लगी ऊर्जा से अधिक ऊर्जा पैदा नहीं हुई। परिणाम *प्लाज़्मा तापन* पर है — संलयन चक्र का एक कदम — reactor के ऊर्जा balance पर नहीं।
- तापमान अभी **burning प्लाज़्मा से लगभग दस गुना कम** है। लगभग 0.72 keV करीब 8 मिलियन °C है; ड्यूटेरियम–tritium fuel को लगभग **10 keV (100 मिलियन °C से ऊपर)** *और* पर्याप्त घनत्व × confinement समय चाहिए ताकि burn टिक सके। समय संलयन का अपना अगला milestone **1 keV** है — जो ignition से खुद बहुत दूर है।
- "**Most तापन is से संपीड़न**" एक **मॉडल-based निष्कर्ष** है, प्रत्यक्ष पढ़ना नहीं। यह diagnostics के साथ फिट किए integrated भौतिकी मॉडल से आता है; संपीड़न, Ohmic तापन और losses को अलग-अलग कितना मानना जाए, उस मॉडल की विश्वसनीयता पर निर्भर करता है।
- यह **कंपनी प्रीप्रिंट है, peer-समीक्षित नहीं।** परिणाम उसी टीम ने self-report किए हैं जिसने मशीन बनाई और उसके promise पर funding जुटाई; स्वतंत्र समीक्षा अभी नहीं हुई।
- Neutron वृद्धि **energy-relevant संलयन उपज नहीं** है। इन स्थितियों में ड्यूटेरियम से कुछ neutrons अपेक्षित हैं, शक्ति के लिए उपयोगी मात्रा से बहुत नीचे।
- यह कंपनी के अलग बयान के बारे में कुछ नहीं कहता कि एक **भविष्य plant ग्रिड को electricity देगा** — स्वतंत्र reporting ने उस दावा को काफ़ी caution के साथ लिया है।

प्रमाण कितना मजबूत है

- **मुख्य दावा संकीर्ण और जाँचा जा सकने वाला है।** "हमने चुंबकित प्लाज़्मा को संपीड़ित किया, वह गरम हुआ, और मॉडल के अनुसार तापन का अधिकांश हिस्सा संपीड़न से आया" — MTF दृष्टिकोण को ठीक यही तंत्र परीक्षण पास करना है। शोधपत्र इसे भारी रूप से instrumented प्रयास और स्पष्ट energy-balance मॉडल से समर्थन करता है। पीयर रिव्यू में कायम रहा तो यह दृष्टिकोण की वास्तविकी, भले शुरुआती validation होगी।
- **Caveats संरचनात्मक हैं।** Eleven प्रयास, एक मशीन, एक टीम, अभी समीक्षा नहीं। सुर्खी तापमान burning प्लाज़्मा से एक ऑर्डर of परिमाण नीचे। Load-bearing निष्कर्ष — *बहुमत तापन से संपीड़न* — मॉडल पर टिका है, इसलिए पीयर रिव्यू का केंद्रीय सवाल यही होगा कि मॉडल का attribution कितना मजबूत है।
- **ईमानदार स्थिति: तंत्र दिखा, ऊर्जा milestone नहीं।** यह MTF को "संपीड़न को प्लाज़्मा गरम करना चाहिए" से "संपीड़न प्लाज़्मा को *गरम करती है*" की ओर धकेलता है — इससे अधिक नहीं।

यह क्यों महत्वपूर्ण है

चुंबकित लक्ष्य संलयन की दिलचस्पी रिकॉर्ड से अधिक economics में है। अगर यंत्र कि संपीड़न प्लाज़्मा को संलयन स्थितियों की ओर गरम कर सकती है, तो संभवतः ITER-जैसे magnets या NIF-जैसे lasers के बिना वहाँ पहुँचा जा सके — सस्ता, तेजी से iterate करने वाला रास्ता, *अगर* काम करे। यही "अगर" पूरा खेल है, और यह ऐसे गैर-नाटकीय checkpoints पर टिका है: क्या संपीड़न वास्तव में वह तापन देता है जिसकी मॉडल भविष्यवाणी करते हैं? LM26 की शुरुआती प्रयास का उत्तर qualified yes है। यही बात नोट करने योग्य है, *ठीक क्योंकि* वह qualified है — लंबी सीढ़ी की एक पायदान, उसी टीम की रिपोर्ट जो उसे चढ़ रही है, अभी किसी और ने verify नहीं की, और ऊपर तक बहुत दूरी बाकी है।

संक्षिप्त सार

समान्य संलयन के LM26 ने imploding lithium liner से चुंबकित ड्यूटेरियम प्लाज़्मा को संपीड़ित किया और उसे गरम होते मापा — इलेक्ट्रॉन तापमान तीन गुने से अधिक बढ़कर लगभग 0.72 keV (718 ± 80 eV, ~8 मिलियन °C) peak तक पहुँचा — और कंपनी के विश्लेषण ने तापन का अधिकांश हिस्सा संपीड़न को दिया, वही तंत्र जिस पर उसका magnetized-लक्ष्य-fusion दृष्टिकोण निर्भर है। यह संलयन के इस मार्ग के लिए वास्तविकी, विशिष्ट अभियंत्रिकी चरण है। लेकिन यह एक मशीन पर पहली 11 प्रयास हैं, कंपनी प्रीप्रिंट में वर्णित हैं जिसकी पीयर रिव्यू नहीं हुई, तापमान burning प्लाज़्मा की जरूरत से लगभग दस गुना नीचे है, और इसमें कोई net ऊर्जा, breakeven या electricity नहीं है। तंत्र दिखा है, शक्ति plant नहीं बना।

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