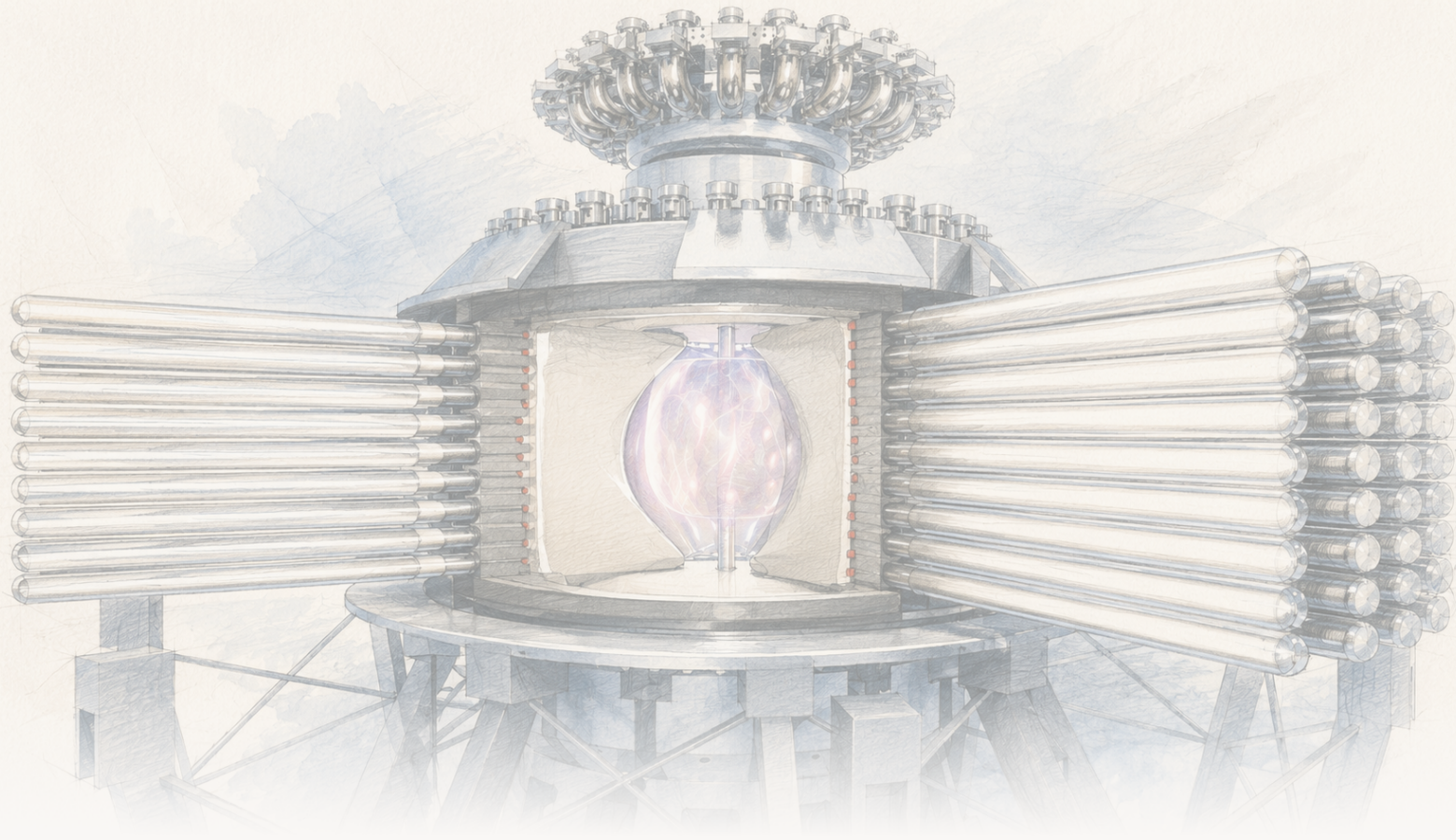




The CLEAN PAPER

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

প্লাজমাকে চপে ধরে গরম করল একটি fusion machine — সত্যকিররে অগ্রগতি, কিন্তু power plant নয়

General Fusion-এর LM26 একটি magnetized deuterium plasma-কে imploding lithium liner দিয়ে compress করে electron temperature $3\times$ -এর বেশি বাড়িয়ে প্রায় 0.72 keV-এ নিয়ে গেছে। কোম্পানির model বলছে heating-এর অধিকাংশ এসেছে compression থেকে — MTF পদ্ধতির মূল mechanism। ফলটি বাস্তব engineering step, কিন্তু peer-review না হওয়া প্রথম ১১টি shot, burning plasma থেকে এখনও বহু দূর, এবং কোন net energy বা breakeven নয়।

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

সংযোজন যন্ত্র প্লাজমাকে চপে গরম করছে—এটাই বাস্তব ধাপ; বদ্যুৎকেন্দ্র নয়

একটি ফিউশন রিঅ্যাক্টর থেকে নেটি শক্তি পতে হলে জ্বালান-প্লাজমাকে একই সঙ্গে যথেষ্ট গরম, যথেষ্ট ঘন এবং যথেষ্ট দীর্ঘ সময় আবদ্ধ রাখতে হয়। পদার্থবিদরা এই তিনটি শর্তকে **Lawson মানদণ্ড**-এ একসঙ্গে ধরেন। মূলধারার একদিকে ITER-এর মতো বিশাল অতিপরিবাহী চুম্বক-নরিভর টোকামাক; অন্যদিকে US National Ignition Facility-এর মতো বিশাল লজোর-অ্যারে-নরিভর জড়তাভিত্তিক আবদ্ধকরণ। ছোট একটি দিল তৃতীয় পথে কাজ করছে: **চুম্বকতি লক্ষ্য ফিউশন (MTF)**। এতে প্রথমে উষ্ণ চুম্বকতি প্লাজমা তরৈকিরে দ্রুত যান্ত্রিকভাবে সংকুচিত করা হয়, যাতে সংকেচন নজিই প্লাজমাকে আরও গরম করে—ডিজলে ইঞ্জিনিং সংকেচন প্রজ্বলনের মতো।

জুন 2026-এ কানাডীয় প্রতিষ্ঠান **সাধারণ সংযোজন** তার **Lawson যন্ত্র 26 (LM26)**-এর ফল প্রাপ্তিটি প্রকাশ করে। কেন্দ্রীয় ধারণার পরিকল্পনা পরীক্ষা: চুম্বকতি প্লাজমা যান্ত্রিকভাবে সংকুচিত করলে সত্যিই কমিডলের মতো তাপ হয়? প্রথম **11 সংকেচন শট**-এ গোলাকার-টোকামাক ডিউটেরিয়াম প্লাজমা ভেতরে ধসে পড়া **কঠিন লিথিয়াম লাইনার** দিয়ে চাপ দিয়ে সংকুচিত করা হয়। সেরা শটে তাপমাত্রা, ঘনত্ব ও চৌম্বক ক্ষেত্র বাড়বে, এবং প্রতিষ্ঠানের সমাকলিত বিশ্লেষণ বলে তাপমাত্রা বৃদ্ধির অধিকাংশ সংকেচন থেকেই এসেছে।

এটি MTF পথের জন্য নির্দিষ্ট প্রকটী ফল। কিন্তু এটি শুধু প্রথম শট, **প্রতিষ্ঠান প্রাপ্তি**, সহকর্মী পর্যালোচনা হয়নি, তাপমাত্রা দহন প্লাজমার প্রয়োজনীয়তার অনেক নচি। এটি সংযোজন শক্তি, সমতা-বিন্দু বা বদ্যুৎকেন্দ্র নয়।

[video pending]

সাধারণ সংযোজনের প্রচারমূলক ভিডিও; LM26 দেখতে কমন তা দেখোনার জন্য, ভবিষ্যৎ সংযোজন মাইলফলক পূরণ করবে—এমন স্বাধীন প্রমাণ নয়।

A real heating step, far below a burning plasma

Temperature is only one Lawson quantity: density and confinement time still matter.

temperature (log scale)

burning D-T plasma: ~10 keV (100+ million C)

General Fusion milestone: 1 keV

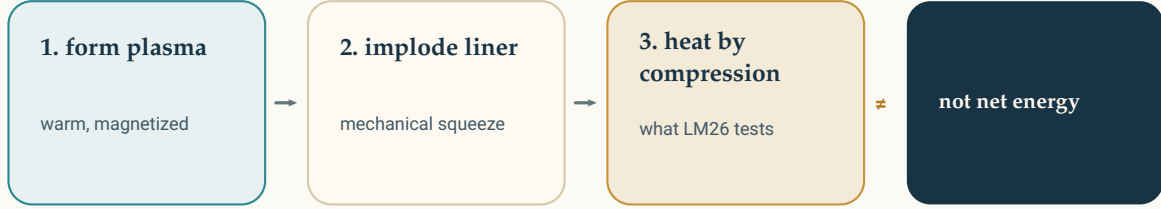
LM26 peak: ~0.72 keV (~8 million C)

Boundary: heating shown; a burning plasma is an order of magnitude, and two more quantities, away.

তাপমাত্রা ধাপক্রম: LM26 ~0.72 keV, সাধারণ সংযোজনে 1 keV মাইলফলক, এবং দহন D-T প্লাজমার ~10 keV। তাপমাত্রা Lawson মানদণ্ডের মাত্র একটি রাশি।

The magnetized-target-fusion bet

Form a warm magnetized plasma, then squeeze it so compression does the heating.



Boundary: compression heats the plasma; it does not show net energy or confinement long enough for a burn.

MTF-এ উষ্ণ চুম্বকতি প্লাজমা তৈরিকরে ভেতরে ধসে পড়া লাইনার দিয়ে সংকুচিত করা হয়, সংকে চেন থেকে উত্তাপ/ঘনত্ব বৃদ্ধি পাওয়ার উদ্দেশ্যে। LM26 সংকে চেন উত্তাপ পরীক্ষা করছে; নটি শক্তি বা আবদ্ধতা মাইলফলক নয়।

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

MTF, keV এবং Lawson মানদণ্ড কী

সংযোজন প্লাজমা তাপমাত্রা সাধারণত ডিগ্রি নিন, কলি ইলেকট্রনভোল্ট (keV)-এ লেখা হয়। 1 keV প্রায় 11.6 মিলিয়ন °C। D-T জ্বালানীদিক্ভাবে ফিউজ হতে প্রায় 10 keV (>100 মিলিয়ন °C) দরকার, কিন্তু তাপমাত্রা একা যথেষ্ট নয়। যথেষ্ট ঘনত্ব এবং আবদ্ধতা সময়-ও একই সঙ্কে দরকার; তাপমাত্রা $\times$ ঘনত্ব $\times$ আবদ্ধতা সময়কে প্রায়ই “ত্রিগুণ উৎপাদ” বলা হয়।

চুম্বকতি লক্ষ্য সংযোজন চৌম্বক আবদ্ধতা ও জড়তামূলক আবদ্ধতার মাঝামাঝি কৌশল: প্লাজমা চুম্বকতি করা হয়, তারপর মাইক্রোসেকেন্ড সময়মাত্রায় যান্ত্রিক সংকে চেন। যদি কাজ করে, সংকে চেন একসঙ্গে তাপমাত্রা ও ঘনত্ব বাড়াতো পারে—ITER-পরসির চুম্বক বা NIF-পরসির লজোর ছাড়া। LM26-এর মতো পরীক্ষার প্রথম প্রশ্ন তাই খুব মৌলিক: চাপ দিয়ে সংকুচিত করা সত্যিই উত্তাপ দেয় কিনা।

গবেষকরা কী করছেন

- সাধারণ সংযোজনে LM26 build/fire করছেন। গোলাকার-টোকারাক ডিউটেরিয়াম প্লাজমা রূপ করে ভেতরে ধসে পড়া কঠিন লিথিয়াম লাইনার দিয়ে প্রায় $3 \times$ রডিয়াল সংকে চেন করা হয়েছে।
- প্রথম 11 সংকে চেন শট-এ ভারী নরিনায়ক পরিমাপ: প্লাজমা তাপমাত্রা, ঘনত্ব, চৌম্বক ক্ষেত্র সময়-সমাধানকৃত পুনর্গঠন; নিসৃত নিউট্রন, X-রশ্মি, দৃশ্যমান আলো নথি; দ্রুত ক্যামেরায় প্লাজমা-প্রাচীর মথিস্ক্রিয়া।
- একটি সমাকলিত পদার্থবিদ্যা মডেল বানানো হয়েছে যা সংকে চেন উত্তাপ, Ohmic উত্তাপ (প্লাজমা বর্তমানের কারণে) এবং সীমানা কক্ষ ভারসাম্য করে। পরিমাপিত তথ্যের সঙ্গে তুলনা করে উত্তাপ উৎস ভাগ করে অনুমান করা হয়েছে।

তারা কী পয়েছেন

- সংকেচনরে সঙ্গে প্লাজমা আরও গরম হচ্ছে। সরো শটে ইলেকট্রন তাপমাত্রা $>3\times$, ইলেকট্রন ঘনত্ব প্রায় $10\times$ এবং পোলয়ডাল চটাম্বক কষতের প্রায় $10\times$ বেড়েছে, প্রায় $3\times$ রেডিয়াল সংকেচনরে সঙ্গে। সর্বোচ্চ পরিমাপিত ইলেকট্রন তাপমাত্রা ছিল ~ 0.72 keV—Thomson বচ্ছুরণে 718 ± 80 eV, অর্থাৎ প্রায় 8 মিলিয়ন °C।
- মডলে অধিকাংশ উত্তাপ সংকেচনকে প্রধান কারণ হিসেবে দেখায়। MTF-এর কেন্দ্রীয় প্রক্রিয়া—যান্ত্রিক চাপ দিয়ে সংকুচিত করা—তাপমাত্রা বৃদ্ধির অধিকাংশ ব্যাখ্যা করে, Ohmic উত্তাপ নয়।
- সংকেচন চলাকালে নডিট্রন নিঃসরণ বেড়েছে, hotter/denser ডিউটেরিয়াম প্লাজমার সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণ।

এটুকী দেখায় না

- সংযোজন শক্তি, সমতা-বন্দি বা নটি লাভ নয়। যন্ত্র চালাতে যত শক্তি লাগে তার চেয়ে বেশি ফেরত আসেনি। এটি প্লাজমা উত্তাপ প্রক্রিয়া পরীক্ষা।
- তাপমাত্রা দহনশীল-প্লাজমা লক্ষ্য থেকে এখনও প্রায় এক মাত্রার ক্রম নচি। 0.72 keV প্রায় 8 মিলিয়ন °C; D-T জ্বালানির জন্য প্রায় 10 keV-এর পাশাপাশি যথেষ্ট ঘনত্ব $\times$ আবদ্ধতা সময় দরকার। প্রতিষ্ঠানের পরবর্তী মাইলফলক 1 keV—স্টেটিও প্রজ্বলন থেকে অনেকে দূরে।
- “অধিকাংশ উত্তাপ সংকেচন থেকে” সরাসরি তাপমাপক রডিআউট নয়; সমাকলতি পদার্থবিদ্যা মডলে নির্ণায়ক পরিমাপের সঙ্গে মানানসই করে অবদান বভিক্ত করেছে। কেন্দ্রীয় সহকর্মী-পর্যালোচনা প্রশ্ন তাই মডলে দৃঢ়তা।
- প্রতিষ্ঠান পরিপূর্ণিট, সহকর্মী-পর্যালোচনা চিঠি নয়। দল নিজস্ব যন্ত্র বানিয়েছে এবং বাণিজ্যিক প্রতিষ্ঠানগুলির ওপর অর্থায়ন তুলছে; স্বাধীন পর্যালোচনা হয়নি।
- নডিট্রন বৃদ্ধি শক্তি-প্রাসঙ্গিক সংযোজন ফলন নয়। এই ডিউটেরিয়াম শর্তে কিছু নডিট্রন প্রত্যাশিত; কষমতার জন্য অনেকে ধাপ দূরে।
- ভবিষ্যৎ গ্রুপি বদিয়ে দাবি এই পরীক্ষা প্রতিষ্ঠা করে না।

প্রমাণ কতটা শক্তিশালী?

মূল দাবি সংকীরণ এবং পরীক্ষায়োগ্য: চুম্বকতি প্লাজমা সংকুচিত করা হয়েছে, তাপমাত্রা/ঘনত্ব/কষতের বেড়েছে, সমাকলতি ভারসাম্য মডলে সংকেচনকে প্রধান উত্তাপ উৎস বলছে। প্রক্রিয়া যাচাই হিসেবে ব্যাপকভাবে যন্ত্রসজ্জিত তথ্য অর্থবহ। সহকর্মী পর্যালোচনা টকি থাকলে MTF পদ্ধতির বাস্তব প্রাথমিক যাচাই হবে।

সতর্কতা সামান্য নয়: 11 শট, একটি যন্ত্র, একটি প্রতিষ্ঠান, অ-সহকর্মী-পর্যালোচনা, দহন প্লাজমা থেকে অনেকে নচি। কারণ-নির্ধারণ “অধিকাংশ থেকে সংকেচন” মডলে-নির্ভরশীল। তাই কাঁচা উত্তাপ প্রযুক্তিগত ও কারণ নির্ধারণ একই আস্থা স্তরে পড়া ঠিক নয়।

সতর্ক ভাষায় ফলটি হলো: প্রক্রিয়াটি দেখানো হয়েছে, শক্তি উৎপাদনে মাইলফলক নয়। আগে ছিল “সংকেচনে প্লাজমা গরম হওয়ার কথা”; এখন দেখানো গেছে “এই যন্ত্রে সংকেচনে সত্যিই প্লাজমা গরম হয়েছে।” দাবি এর বেশি নয়।

কনে এটি গুরুত্বপূর্ণ

MTF-এর আকর্ষণ শুধু তাপমাত্রার রেকর্ডে নয়—সম্ভাব্য অর্থনীতিতে। যান্ত্রিক সংকেত চন যদি সত্যিই প্লাজমাকে ফিউশনে উপযোগী অবস্থার দিকে নতি পাবে, তবে ITER-পরিসরে চুম্বক বা NIF-পরিসরে লজোর ছাড়াই তুলনামূলক সস্তা ও দ্রুত পরীক্ষা-চকর সম্ভব হতে পারে। কিন্তু “যদি” শব্দটাই বড়। সটে যাচাই হয় খুব সাধারণ এক প্রশ্নে: সংকেত চন মডেলে যতটা উত্থাপনে প্রতীতি দেয়, বাস্তব যন্ত্রে কিস্তি ততটা পাওয়া যায়? LM26-এর প্রথম শটগুলো সেই প্রশ্নে শর্তসাপেক্ষে হ্যাঁ দিয়েছে।

এই শর্তসাপেক্ষে ফলই সার্থক উল্লেখ করে: দীর্ঘ ধাপক্রমের একটি ধাপ, আরো হিঁদরে নজিদের প্রতীতি, স্বাধীন যাচাই এখনো নেই, এবং শীর্ষ অনেকে দূরে।

সংক্ষিপ্ত সারাংশ

সাধারণ সংযোজনে LM26 ভেতরে ধসে পড়া লিথিয়াম লাইনার দিয়ে চুম্বকতি ডিউটেরিয়াম প্লাজমা সংকুচিত করে ইলেকট্রন তাপমাত্রা $>3 \times$ বাড়িয়েছে; সরো পরমাপতি শখির $\sim 0.72 \text{ keV}$ ($718 \pm 80 \text{ eV}$, ~ 8 মিলিয়ন °C)। প্রতীতি মডেলে তাপমাত্রা বৃদ্ধির অধিকাংশ যান্ত্রিক সংকেত চনকে আরোপ করে—MTF পথের কনৈরীয় প্রক্রিয়া। এটি বাস্তব প্রকট শল ধাপ, কিন্তু শুধু প্রথম 11 শট, প্রতীতি প্রপিন্ট, সহকর্মী পর্যালোচনা নেই, দহন প্লাজমার $\sim 10 \text{ keV}$ লক্ষ্য থেকে প্রায় দশ গুণ নচি, নটি শক্তি/সমতা-বিন্দু/electricity কছিই নেই। প্রক্রিয়া দেখানো; বদ্যুৎকনৈর তরৈনয়।

উৎস

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-magnetized-target-fusion-machine>

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>