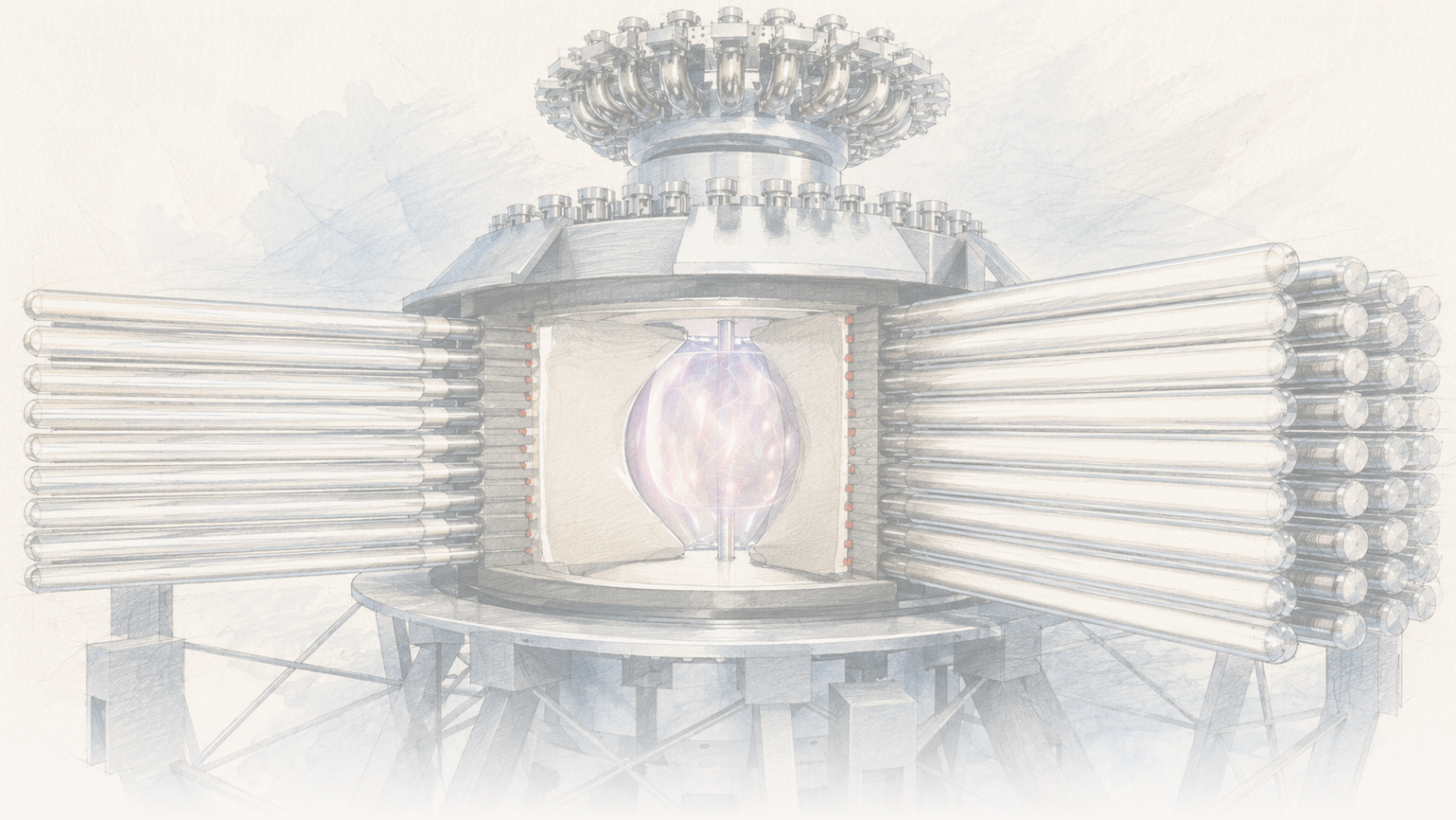


The CLEAN PAPER

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

آلة اندماج سخنت بلازمتها بالضغط — هذه هي الخطوة الحقيقية، وليست محطة كهرباء

ضغط *LM26* من *Fusion General* بلازما ديوتيريوم ممغنطة ببطانة ليثيوم منكمشة، فارتفعت درجة حرارة الإلكترونات أكثر من ثلاثة أضعاف إلى ذروة نحو 72.0 *keV* (718 ± 80 *eV*، قرابة 8 ملايين °م)، مع إسناد معظم التسخين إلى الضغط نفسه، وهي الآلية التي يعتمد عليها نهج اندماج الهدف الممغنط. إنها نقطة تحقق هندسية حقيقية لهذا المسار. لكنها أيضًا أول 11 نبضة على آلة واحدة، في مسودة شركة لم تُحكّم بعد، وعند حرارة ما زالت أقل بنحو عشرة أضعاف مما تحتاجه بلازما محترقة — من دون طاقة صافية أو تعادل أو كهرباء. آلية أُظهرت، لا محطة كهرباء بُنيت.

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: 23974.2606.arXiv/48550.10

آلة اندماج سخنت بلازمتها بالضغط — هذه هي الخطوة الحقيقية، وليست محطة كهرباء

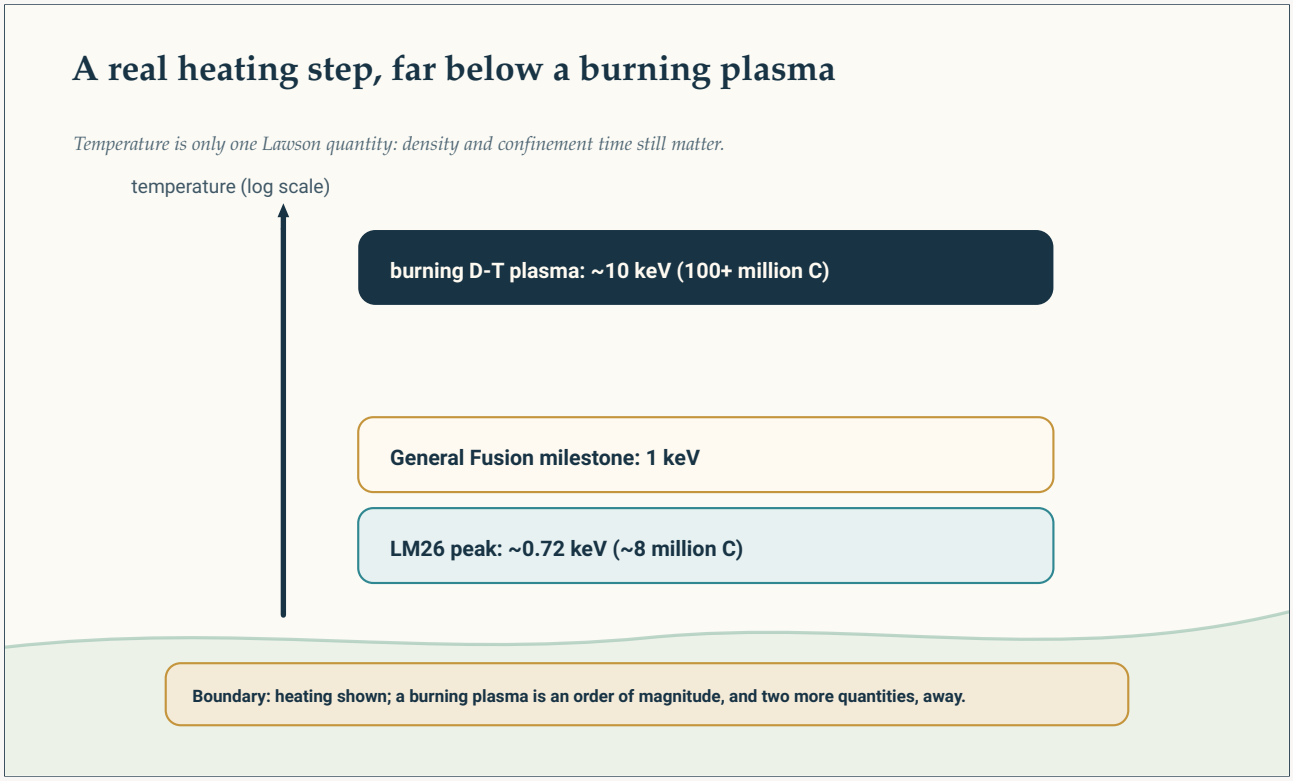
لكي يعيد مفاعل اندماج طاقة أكثر مما يستهلك لتشغيله، يجب أن تكون بلازما الوقود في الوقت نفسه ساخنة بما يكفي، وكثيفة بما يكفي، ومحتجزة مدة كافية — وهي الكميات الثلاث التي يجمعها الفيزيائيون في ما يسمى **معيار Lawson**. معظم المجال يلاحق هذا الهدف إما بمغانط فائقة التوصيل هائلة (توكاماك مثل ITER)، أو بمصفوفات من الليزرات العملاقة (الحصر القصوري كما في National Ignition Facility الأمريكية). لكن مجموعة أصغر من الشركات تراهن على طريق ثالث هو **اندماج الهدف الممغنط** (MTF): كوّن بلازما دافئة ممغنطة، ثم اسحقها ميكانيكيًا وبسرعة، بحيث يقوم الضغط نفسه بالتسخين — كما يشعل محرك الديزل وقوده بالضغط بدل الشرارة.

في يونيو 2026 نشرت الشركة الكندية **Fusion General** نتائج من **Machine Lawson 26 (LM26)** تختبر ما إذا كان هذا الرهان المركزي يصمد فعلًا: هل يؤدي الضغط الميكانيكي لبلازما ممغنطة إلى تسخينها كما تتنبأ النماذج؟ عبر أول 11 نبضة ضغط — ضُغطت فيها بلازما ديوتيريوم على هيئة توكاماك كروي بواسطة بطانة ليثيوم صلبة منكمشة إلى الداخل — أظهرت أفضل النبضات أن البلازما أصبحت أكثر سخونة وكثافة ومغنطة بوضوح مع الضغط، وينسب تحليل الشركة معظم هذا التسخين إلى الضغط نفسه.

هذه نتيجة هندسية حقيقية ومحددة لمسار MTF. لكنها أيضًا أول مجموعة من النبضات، موصوفة في مسودة أولية من الشركة لم تخضع للتحكيم، عند درجة حرارة ما زالت أقل بكثير مما تحتاجه بلازما محترقة — وليست طاقة اندماج، ولا تعادلًا للطاقة، ولا محطة كهرباء.

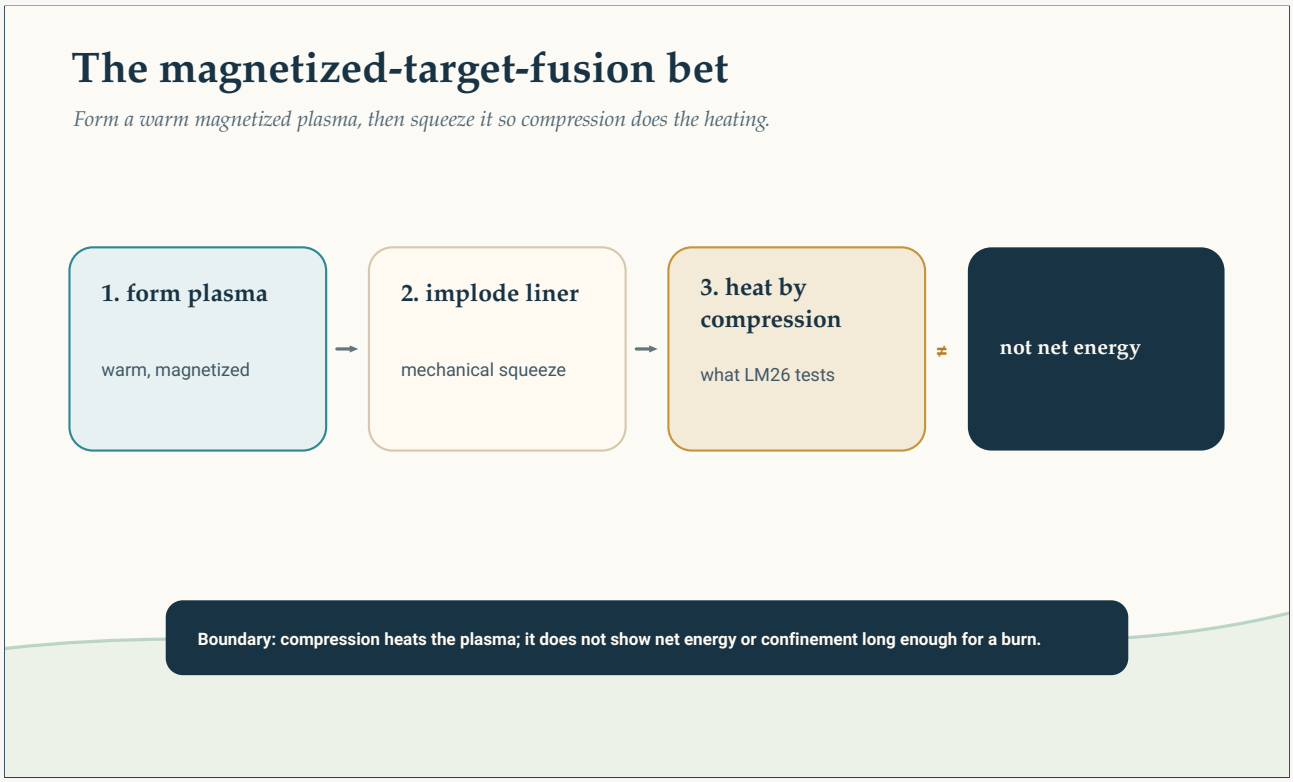
[video pending]

هذه لقطات ترويجية من Fusion General، أُدرجت لإظهار شكل LM26؛ وليست دليلًا مستقلًا على أن الآلة ستحقق محطات الاندماج المستقبلية التي تعلنها الشركة.



سلم درجات حرارة: ذروة LM26 عند نحو 72.0 keV، ومحطة Fusion General التالية عند 1 keV، ونحو 10 keV التي تحتاجها بلازما ديوتيريوم–تريتيوم محترقة. درجة الحرارة واحدة فقط من كميات Lawson الثلاث.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 0.4



اندماج الهدف الممغنط: كوّن بلازما دافئة ممغنطة، ثم اضغطها ببطانة منكمشة إلى الداخل لكي يتولى الضغط التسخين — رهان «ضغط الديزل». اختبر LM26 أن الضغط يسخن البلازما؛ ولم يختبر الطاقة الصافية أو الحصر الكافي.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 0.4

ماذا تعني «اندماج الهدف الممغنط» و«keV» ومعيار Lawson

فولت كيلوإلكترون (keV) بوحدة عادة الاندماج في البلازما حرارة درجة تُذكر بالدرجات: لا 1 keV يعادل نحو **6.11 مليون °م**. فقط واحدة الحرارة لكن — بكفاءة يندمج لكي °م) مليون 100 من (أكثر **10 keV** نحو إلى الديوتيريوم–التريتيوم وقود يحتاج تجمع وغالبًا كافٍ، **حصر زمن**و كافية **كثافة** إلى أيضًا يحتاج المفاعل إن **Lawson معيار** يقول معًا. تحقيقها يجب شروط ثلاثة من أن عن جدًا بعيد وحده لكنه ضروري، البلازما تسخين الحصر). زمن × الكثافة × الحرارة (درجة الثلاثي» «الحاصل في الثلاثة كافيًا. يكون

اندماج الهدف الممغنط (MTF) طريق وسط بين النهجين الرئيسيين. بدل حصر بلازما ساخنة مدة طويلة بمغانط هائلة، أو تسخين هدف صغير تقريبًا في لحظة بالليزر، يشكل MTF بلازما ممغنطة ثم يضغطها ميكانيكيًا خلال ميكروثوانٍ. إذا نجح، فإن الضغط يرفع الحرارة والكثافة معًا — وربما يصل إلى شروط الاندماج من دون مغانط بحجم ITER أو ليزرات بحجم NIF. والسؤال عما إذا كان الضغط يحقق فعلًا هذا التسخين في آلة حقيقية هو بالضبط ما صُمم اختبار مثل LM26 لفحصه.

ما الذي فعله الباحثون

- بنوا وشغّلوا **LM26**، آلة لاندماج الهدف الممغنط في Fusion: General تُشكل بلازما ديوتيريوم في توكاماك كروي، ثم تضغطها إلى الداخل **بطانة ليثيوم صلبة** منكمشة — بضغط شعاعي يقارب **3×**.
- أجروا **أول 11 نبضة ضغط** مع أجهزة تشخيص كثيرة، وأعادوا بناء درجة حرارة البلازما وكثافتها ومجالها المغناطيسي مع الزمن، وسجلوا النيوترونات والأشعة السينية والضوء المرئي المنبعث، إضافة إلى صور بكاميرا سريعة لتفاعل البلازما مع الجدار.
- بنوا **نموذجًا فيزيائيًا متكاملًا** يوازن التسخين الناتج من الضغط مقابل التسخين الأومي (من تيار البلازما نفسه) والطاقة المفقودة عند الحدود، ثم قارنوها بالبيانات المقاسة لاستنتاج مصدر التسخين.

ماذا وجدوا

- **سخنت البلازما مع ضغطها.** في أفضل النبضات ارتفعت درجة حرارة الإلكترونات بأكثر من **3×**، وكثافة الإلكترونات بنحو **10×**، والمجال المغناطيسي القطبي بنحو **10×**، نتيجة الضغط الشعاعي 3×. وفي أفضل نبضة تقيس الورقة **ذروة حرارة إلكترونات نحو 72.0 keV** (718 ± 80 eV بقياس تشتت Thomson — أي قرابة 8 ملايين °م.
- **يُنسب معظم التسخين إلى الضغط.** يخلص نموذجهم المتكامل إلى أن أغلبية ارتفاع درجة الحرارة جاءت من الضغط الميكانيكي نفسه — الآلية التي يعتمد عليها نهج MTF كله — لا من التسخين الأومي.
- **ازداد انبعاث النيوترونات أثناء الضغط**، بما يتسق مع بلازما ديوتيريوم أسخن وأكثر كثافة.

ما الذي لا تُظهره هذه النتيجة

- هذه **ليست** طاقة اندماج، ولا تعادلًا للطاقة، ولا كسبًا صافيًا. لم يُنتج هنا طاقة أكثر مما استُهلك للتشغيل. النتيجة عن تسخين بلازما — خطوة واحدة في دورة الاندماج — لا عن ميزانية الطاقة لمفاعل.
- درجة الحرارة ما **زالت أقل بنحو عشرة أضعاف** من بلازما محترقة. نحو 72.0 keV يساوي قرابة 8 ملايين °م؛ بينما يحتاج وقود الديوتيريوم–التريتيوم إلى نحو **10 keV (أكثر من 100 مليون °م)** مع كثافة × زمن حصر كافيين للحفاظ على الاحتراق. حتى محطة Fusion General التالية، **1 keV**، بعيدة عن الاشتعال.
- عبارة «**معظم التسخين من الضغط**» **استنتاج قائم على نموذج**، وليست قراءة مباشرة من جهاز. تأتي من نموذج فيزيائي متكامل ملائم لأجهزة التشخيص، والثقة في تقسيم الطاقة بين الضغط والتسخين الأومي والخسائر تعتمد على الثقة في ذلك النموذج.
- هذه **مسودة شركة لم تخضع للتحكيم.** النتائج معلنة ذاتيًا من الفريق الذي بنى الآلة وجمع تمويلًا على أساس وعدها، ولم تحدث مراجعة مستقلة بعد.
- زيادة النيوترونات **ليست** محصول اندماج ذا معنى للطاقة. بعض النيوترونات متوقع من الديوتيريوم في هذه الشروط، وبمستوى بعيد جدًا عن أي شيء مفيد للطاقة.
- ولا تقول شيئًا عن بيان الشركة المنفصل بأن **محطة مستقبلية ستوصل الكهرباء إلى الشبكة** — وهو ادعاء تعاملت معه التغطية المستقلة بحذر شديد.

ما مدى قوة الدليل

- **الادعاء المركزي ضيق وقابل للفحص.** «ضغطنا بلازما مغنطة فسخنت، ومعظم ذلك بسبب الضغط» هو بالضبط اختبار الآلية الذي يحتاج مسار MTF إلى اجتيازه، وتدعمه الورقة بنبضات كثيرة القياس ونموذج واضح لميزانية الطاقة. إذا صمد في التحكيم، فهو تحقق حقيقي — وإن كان مبكرًا — من النهج.
- **التحفظات بنيوية، لا تجميلية.** إحدى عشرة نبضة، وآلة واحدة، وفريق واحد، ونتيجة لم تُراجع بعد، ودرجة حرارة رئيسية أقل بمرتبة مقدار من بلازما محترقة. والنتيجة الحاملة للعبء — أغلبية التسخين من الضغط — تقوم على نموذج، لذلك سؤال التحكيم المركزي هو مدى متانة هذا التقسيم.
- **الحالة الصادقة: آلية أُظهرت، لا محطة طاقة تحققت.** تدفع MTF من «الضغط ينبغي أن يسخن البلازما» نحو «الضغط يسخن البلازما»، ولا شيء أعظم من ذلك.

لماذا يهم ذلك

المثير في اندماج الهدف الممغنط هو الاقتصاد لا الأرقام القياسية. إذا استطاع الضغط الميكانيكي تسخين البلازما نحو شروط الاندماج، فقد تصل إلى هناك من دون مغانط بحجم ITER أو ليزرات بحجم NIF — طريق أرخص وأسرع في التكرار، إذا نجح. وهذه الـ«إذا» هي اللعبة كلها، وتعتمد على نقاط تحقق غير براقة مثل هذه: هل يسلم الضغط فعلًا التسخين الذي تعد به النماذج؟ إجابة LM26 في نبضاته الأولى: نعم، لكن بشروط. وهذا يستحق الذكر بدقة لأنه مشروط — درجة على سلم طويل، يعلن عنها من يصعدون السلم أنفسهم، لم يفحصها أحد مستقل بعد، وما زالت بعيدة جدًا عن القمة.

خلاصة واضحة

ضغط LM26 من Fusion General بلازما ديوتيريوم ممغنطة ببطانة ليثيوم منكمشة وأظهر أنها تسخن — إذ زادت درجة حرارة الإلكترونات أكثر من ثلاثة أضعاف إلى ذروة مقاسة نحو 72.0 keV (718 ± 80 eV، قرابة 8 ملايين °م) — وينسب تحليل الشركة معظم التسخين إلى الضغط نفسه، وهو الآلية التي يعتمد عليها نهج اندماج الهدف الممغنط. هذه خطوة هندسية حقيقية ومحددة لهذا الطريق إلى الاندماج. لكنها أيضًا أول 11 نبضة على آلة واحدة، موصوفة في مسودة شركة غير محكمة، عند درجة حرارة أقل بنحو عشرة أضعاف مما تحتاجه بلازما محترقة، ومن دون طاقة صافية أو تعادل أو كهرباء. آلية أُظهرت، لا محطة كهرباء بُنيت.

المصادر

fusion target magnetized LM26 the on heating compressional of science The Fusion), (General al. et Howard J. S. (2026) [physics.plasm-ph] arXiv:2606.23974 experiment, https://arxiv.org/abs/2606.23974

Fusion Target Magnetized LM26 with Heating Plasma Compressional Achieves Fusion 'General Fusion, General (2026 June announcement, (company Machine' https://generalfusion.com/post/general-fusion-achieves-compressional-plasma-heating-with-l

(2026) remain' questions big but - grid to electricity deliver will plant says firm 'Nuclear-fusion news, Nature https://www.nature.com/articles/d41586-026-01795-z