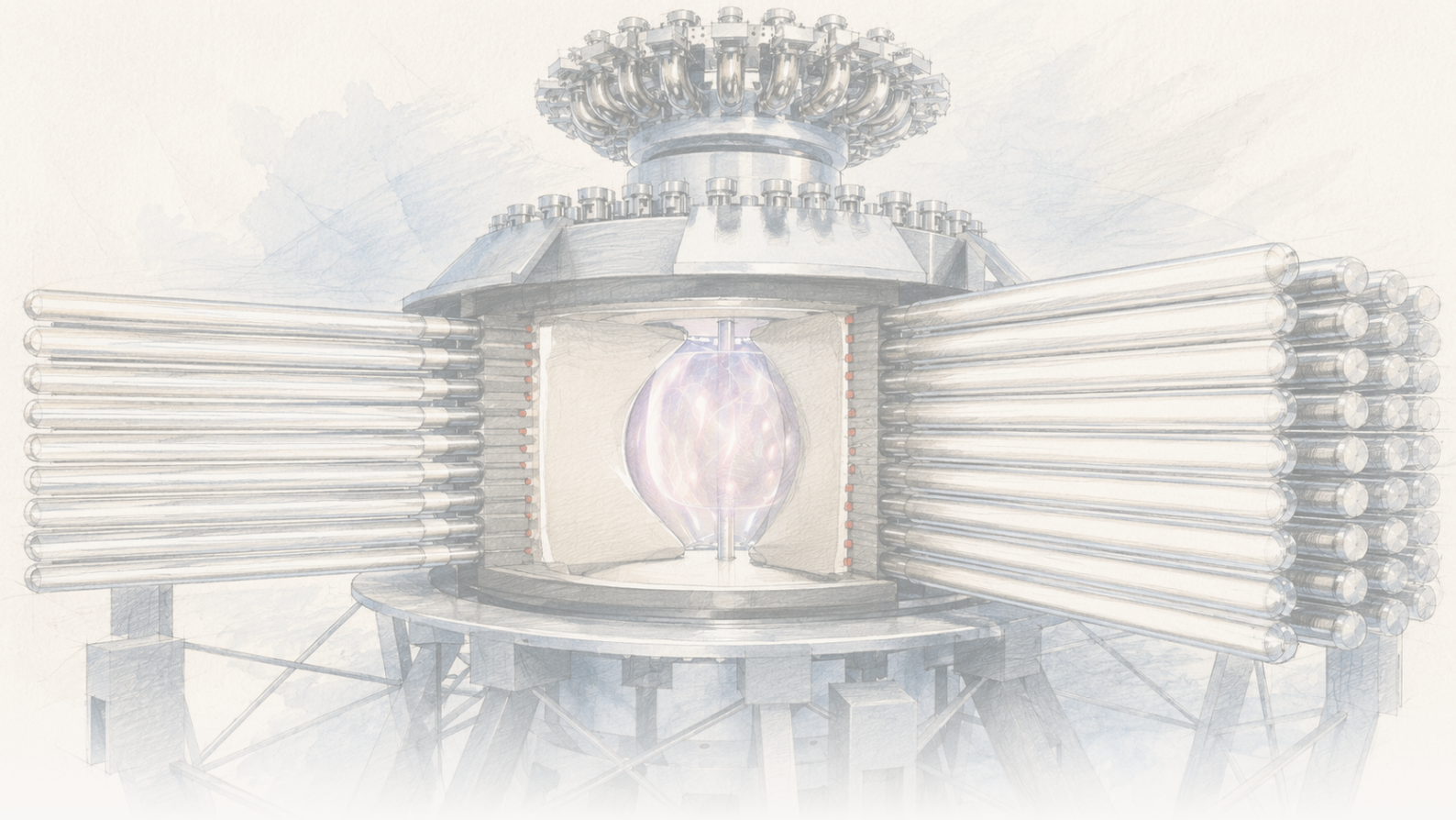


The Clean Paper

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

Bir sintez qurğusu plazmanı sıxaraq qızdırdı — real addım budur, amma bu hələ elektrik stansiyası deyil

General Fusion-un LM26 qurğusu maqnitləşdirilmiş deuterium plazmasını içəri çökən litium layneri ilə sıxdı və onun qızdığını göstərdi — elektron temperaturu üç dəfədən çox artaraq təxminən 0.72 keV (718 ± 80 eV, təxminən 8 milyon °C) pikə çatdı; qızmanın böyük hissəsi maqnitləşdirilmiş-hədəf-sintezi yanaşmasının söykəndiyi mexanizmə, kompressiyanın özünə aid edildi. Bu, həmin sintez yolu üçün real mühəndislik yoxlama nöqtəsidir. Amma bu, bir qurğuda ilk 11 atışdır, peer-review-dan keçməmiş şirkət preprintində təsvir olunur və temperatur yanan plazmaya lazım olandan hələ təxminən on dəfə aşağıdır — xalis enerji, breakeven və elektrik yoxdur. Mexanizm göstərilib, elektrik stansiyası tikilməyib.

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

Bir sintez qurğusu plazmanı sıxaraq qızdırdı — real addım budur, amma bu hələ elektrik stansiyası deyil

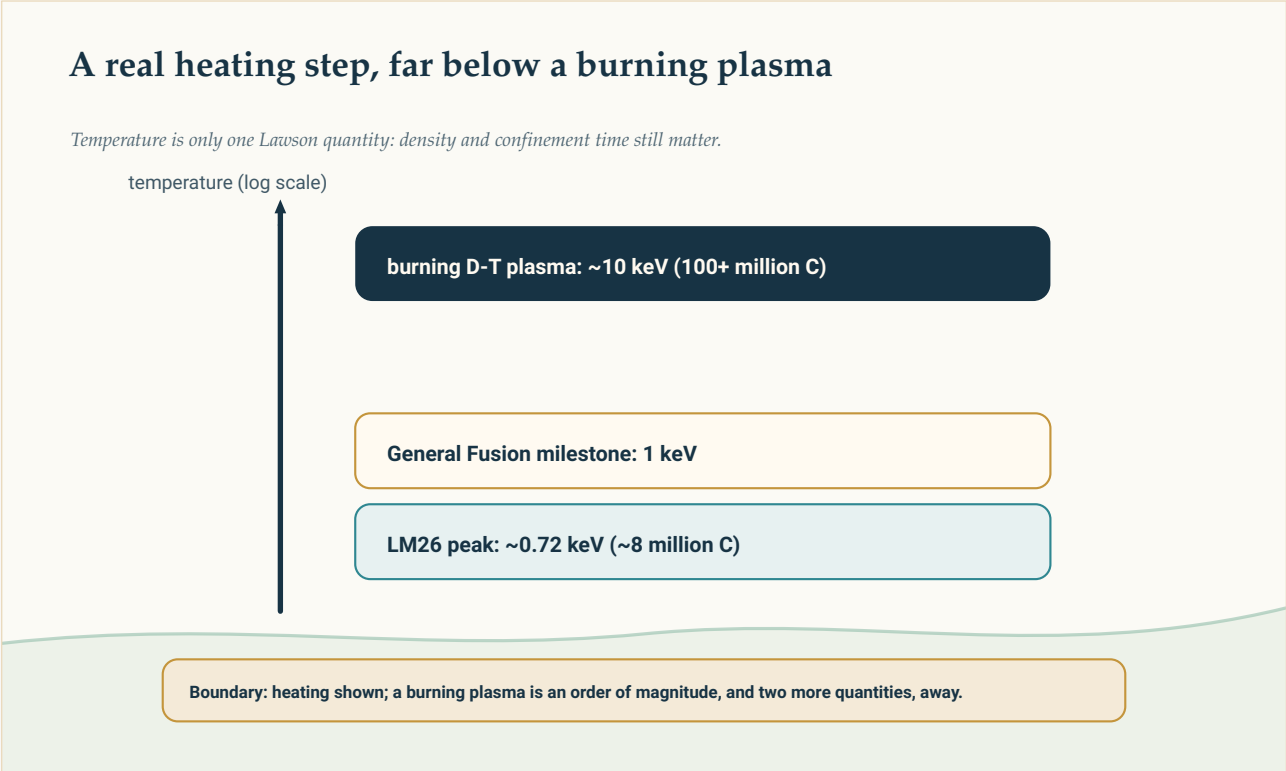
Sintez reaktorunun işləməsinə sərf ediləndən daha çox enerji qaytarması üçün yanacaq plazması eyni anda kifayət qədər isti, kifayət qədər sıx olmalı və kifayət qədər uzun müddət bir yerdə saxlanmalıdır — fiziklərin Lawson meyarı adlandırdığı üç kəmiyyət. Sahənin böyük hissəsi buna nəhəng superkeçirici maqnitlərlə (ITER kimi tokamaklar) və ya iri lazer massivləri ilə (ABŞ Milli Alovlanma Qurğusunda olduğu kimi inertial confinement) çatmağa çalışır. Daha kiçik bir şirkətlər qrupu üçüncü yola, **maqnitləşdirilmiş hədəf sintezinə** (magnetized target fusion, MTF) mərc edir: əvvəl ilıq, maqnitləşdirilmiş plazma yaradılır, sonra sürətlə mexaniki şəkildə *sıxılır* ki, qızmanı elə sıxılmanın özü versin — dizel mühərrikinin yanacağı qığılcımla yox, kompressiya ilə alışdırması kimi.

2026-cı ilin iyununda Kanadanın **General Fusion** şirkəti **Lawson Machine 26 (LM26)** qurğusundan bu əsas mərcin həqiqətən işləyib-işləmədiyini yoxlayan nəticələr yayımladı: maqnitləşdirilmiş plazmanı mexaniki sıxmaq modellərin vəd etdiyi kimi onu doğrudanmı qızdırır? Sferik-tokamak deuterium plazmasının içəri çökən *bərk litium layneri* ilə sıxıldığı ilk 11 kompressiya atışında ən yaxşı nəticələr plazmanın sıxıldıqca xeyli daha isti, daha sıx və daha güclü maqnitləşdiyini göstərdi; şirkətin analizi qızmanın böyük hissəsini məhz kompressiyanın özünə aid edir.

Bu, MTF yanaşması üçün real və konkret mühəndislik nəticəsidir. Eyni zamanda bu, **peer-review-dan keçməmiş şirkət preprintində** təsvir olunan ilk atış seriyasıdır, temperatur yanan plazmanın ehtiyac duyduğundan hələ çox aşağıdır — və bu, sintez enerjisi deyil, breakeven deyil, elektrik stansiyası deyil.

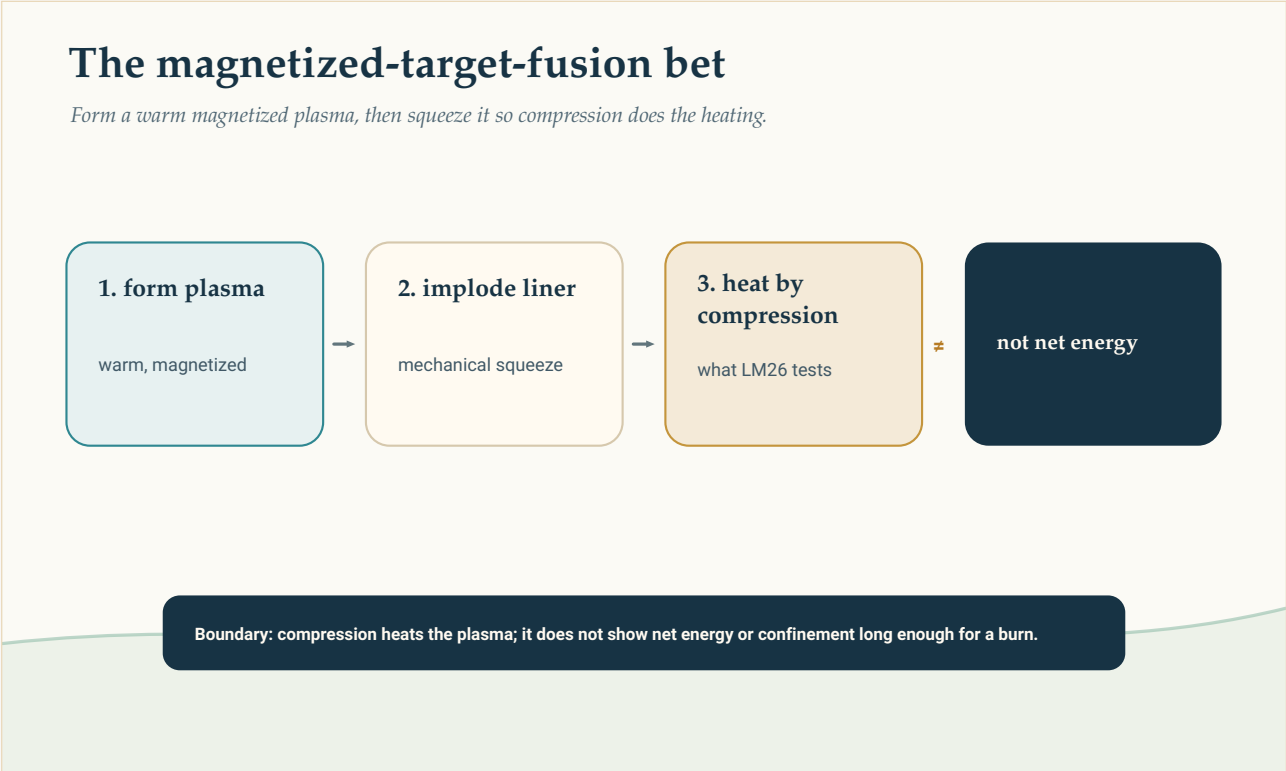
[video pending]

Bu, General Fusion-un tanıtım videosudur və yalnız LM26-nın necə göründüyünü göstərmək üçün daxil edilib; qurğunun gələcək sintez mərhələlərinə çatacağına dair müstəqil sübut deyil.



Temperatur pilləkəni: LM26-nın ~0.72 keV-i, General Fusion-un 1 keV hədəfi və yanan deuterium–tritium plazmasının ehtiyac duyduğu ~10 keV. Temperatur Lawson meyarındakı üç kəmiyyətdən yalnız biridir.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Maqnitləşdirilmiş hədəf sintezi: əvvəl ilıq maqnitləşdirilmiş plazma yaradılır, sonra içəri çökən laynerlə sıxılır və sıxılmanın özü onu qızdırır — dizel-kompressiya mərcidir. LM26 kompressiyanın plazmanı qızdırdığını yoxladı;

xalis enerjini və ya confinement-i yox.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

“Maqnitləşdirilmiş hədəf sintezi”, “keV” və Lawson meyarı nə deməkdir

Sintezdə plazma temperaturu adətən dərəcə ilə yox, **kiloelektronvolt (keV)** ilə göstərilir: 1 keV təxminən **11.6 milyon °C**-dir. Deuterium–tritium yanacağının səmərəli sintez üçün təxminən **10 keV**-ə (100 milyon °C-dən çox) çatması lazımdır — amma temperatur eyni anda ödənməli olan üç şərtdən yalnız biridir. **Lawson meyarı** reaktorun həm də kifayət qədər **sıxlıq** və kifayət qədər **confinement vaxtı** tələb etdiyini deyir; bunlar çox vaxt vahid “üçlü hasil”də (temperatur × sıxlıq × confinement vaxtı) birləşdirilir. Plazmanı qızdırmaq zəruridir, amma təkbaşına heç cür kifayət etmir.
Maqnitləşdirilmiş hədəf sintezi (MTF) iki əsas yanaşma arasında orta yoldur. Nəhəng maqnitlərlə isti plazmanı uzun müddət saxlamaq və ya çox kiçik hədəfi lazerlərlə demək olar ki, bir anda qızdırmaq əvəzinə, MTF maqnitləşdirilmiş plazma yaradır və onu mikrosaniyələr ərzində mexaniki sıxır. İşləsə, kompressiya həm plazmanı qızdırır, həm də sıxlığını artırır — potensial olaraq ITER miqyaslı maqnitlər və ya NIF miqyaslı lazerlər olmadan sintez şəraitinə çatmaq olar. Real qurğuda kompressiyanın həqiqətən bu qızmanı verib-vermədiyini yoxlamaq LM26 kimi testlərin məhz işidir.

Müəlliflər nə etdilər

- General Fusion-da **LM26** maqnitləşdirilmiş-hədəf-sintezi qurğusunu qurub işə saldılar: sferik-tokamak deuterium plazması yaradılır, sonra içəri doğru hərəkət edən **bərk litium layneri** ilə sıxılır — təxminən **3×** **radial kompressiya**.
- **İlk 11 kompressiya atışını** keçirdilər və onları çoxsaylı diaqnostika ilə izlədilər; plazmanın temperaturunu, sıxlığını və maqnit sahəsini zaman üzrə yenidən qurdular, neytron, rentgen və görünən işıq emissiyasını, həmçinin plazma–divar qarşılıqlı təsirinin yüksək sürətli kamera görüntülərini qeydə aldılar.
- Kompressiyadan gələn qızmanı Ohmik qızma (plazmanın öz cərəyanından) və sərhəddə itirilən enerji ilə tarazlaşdıran **inteqrə olunmuş fizika modeli** qurdular, sonra qızmanın əslində haradan gəldiyini ayırmaq üçün modeli ölçülmüş məlumatlarla müqayisə etdilər.

Nə tapdılar

- **Plazma sıxıldıqca qızdı.** Ən yaxşı atışlarda elektron temperaturu **3 dəfədən çox**, elektron sıxlığı təxminən **10×**, poloidal maqnit sahəsi də təxminən **10×** artdı; bunlar 3× radial kompressiya ilə baş verdi. Ən yaxşı atışda məqalə **pik elektron temperaturunu təxminən 0.72 keV** (Thomson scattering ilə 718 ± 80 eV) ölçür — təxminən 8 milyon °C.
- **Qızmanın böyük hissəsi kompressiyaya aid edilir.** İnteqrə olunmuş model temperatur

artımının *əksəriyyətinin* Ohmik qızmadan yox, MTF yanaşmasının bütünlüklə söykəndiyi mexanizmdən — mexaniki kompressiyanın özündən — gəldiyi qənaətinə gəlir.
- **Kompressiya zamanı neytron emissiyası artdı**, bu da daha isti və daha sıx deuterium plazması ilə uyğundur.

Bu nəyi göstərmir

- Bu, sintez enerjisi, breakeven və ya xalis qazanc **deyil**. Burada heç nə işləməsinə sərf ediləndən daha çox enerji istehsal etmədi. Nəticə *plazmanın qızdırılması* haqqındadır — sintez dövrünün bir addımı — reaktorun enerji balansı haqqında yox.
- Temperatur yanan plazmadan **hələ təxminən on dəfə aşağıdır**. Təxminən 0.72 keV təxminən 8 milyon °C-dir; deuterium–tritium yanacağına **10 keV (100 milyon °C-dən çox)** səviyyəsində temperatur *və* yanmanı davam etdirmək üçün kifayət qədər sıxlıq × confinement vaxtı lazımdır. General Fusion-un öz növbəti mərhələsi **1 keV**-dir — o da alovlanmadan çox uzaqdır.
- "**Qızmanın böyük hissəsi kompressiyadandır**" ifadəsi **modelə əsaslanan nəticədir**, birbaşa cihaz göstəricisi deyil. Diaqnostikaya uyğunlaşdırılmış inteqrə olunmuş fizika modelindən gəlir; kompressiya, Ohmik qızma və itkilər arasındakı bölgüyə nə qədər inanacağınız modelə nə qədər inandığınızdan asılıdır.
- Bu, **şirkət preprintidir, peer-review-dan keçməyib.** Nəticələri maşını quran və onun vədinə əsasən maliyyə cəlb edən komanda özü yayımlayıb; müstəqil elmi qiymətləndirmə hələ baş verməyib.
- Neytron artımı enerji baxımından əhəmiyyətli sintez məhsulu **deyil**. Bu şəraitdə deuteriumdan müəyyən neytronlar gözlənilir və miqdar enerji istehsalı üçün faydalı səviyyədən çox aşağıdır.
- Bu, şirkətin **gələcək stansiyanın şəbəkəyə elektrik verəcəyi** barədə ayrıca bəyanatı haqqında heç nə demir — müstəqil xəbərlərdə böyük ehtiyatla qarşılanan ayrıca iddiadır.

Sübut nə qədər güclüdür

- **Əsas iddia dar və yoxlanandır.** "Maqnitləşdirilmiş plazmanı sıxdıq və o, əsasən kompressiyaya görə qızdı" MTF yanaşmasının keçməli olduğu məhz mexanizm testidir; məqalə bunu çoxsaylı diaqnostikalı atışlar və açıq enerji-balans modeli ilə dəstəkləyir. Peer-review-dan sağ çıxsa, bu yanaşmanın real — amma erkən — təsdiqi olacaq.
- **Məhdudiyyətlər kosmetik yox, strukturdur.** On bir atış, bir qurğu, bir komanda, hələ yoxlanılmayıb və başlıq temperaturu yanan plazmadan bir böyüklük mərtəbəsi aşağıdır. Əsas yükü daşıyan nəticə — *qızmanın əksəriyyəti kompressiyadandır* — modelə söykənir; deməli peer-review-da mərkəzi sual həmin bölgünün nə qədər dayanıqlı olmasıdır.
- **Dürüst status: enerji mərhələsi elan edilməyib, mexanizm nümayiş etdirilib.** Bu, MTF-ni "kompressiya plazmanı *qızdırmalıdır*" nöqtəsindən "kompressiya plazmanı *qızdırır*" nöqtəsinə bir qədər yaxınlaşdırır — bundan artığını demir.

Niyə vacibdir

Maqnitləşdirilmiş hədəf sintezinin maraqlı tərəfi rekordlar yox, iqtisadiyyatdır. Mexaniki kompressiya plazmanı sintez şəraitinə doğru qızdıra bilirsə, bəlkə ITER miqyaslı maqnitlərsiz və ya NIF miqyaslı lazerlərsiz ora çatmaq olar — işlədiyi halda daha ucuz və daha tez iterasiya olunan yol. Oyunun hamısı elə bu "əgər" sözündədir və o da belə parıltısız yoxlama nöqtələrindən asılıdır: kompressiya modellərin vəd etdiyi qızmanı həqiqətən verir? LM26-nın ilk atışlardakı cavabı şərtli "bəli"dir. Məhz şərtli olduğu üçün bunu qeyd etməyə dəyər — uzun pilləkənin bir pilləsi, onu qalxan insanların özləri tərəfindən təqdim edilib, hələ başqası yoxlamayıb və zirvədən çox uzaqdadır.

Təmiz xülasə

General Fusion-un LM26 qurğusu maqnitləşdirilmiş deuterium plazmasını içəri çökən litium layneri ilə sıxdı və plazmanın qızdığını göstərdi — elektron temperaturu üç dəfədən çox artaraq ölçülmüş təxminən 0.72 keV (718 ± 80 eV, ~8 milyon °C) pikə çatdı; şirkətin analizi qızmanın çoxunu maqnitləşdirilmiş-hədəf-sintezi yanaşmasının söykəndiyi mexanizmə, kompressiyanın özünə aid edir. Bu, sintezə aparan həmin yol üçün real və konkret mühəndislik addımıdır. Amma bu, bir qurğuda ilk 11 atışdır, peer-review-dan keçməmiş şirkət preprintində təsvir olunur, temperatur yanan plazmaya lazım olandan təxminən on dəfə aşağıdır və xalis enerji, breakeven və elektrik yoxdur. Mexanizm göstərilib, elektrik stansiyası tikilməyib.

Mənbələr

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