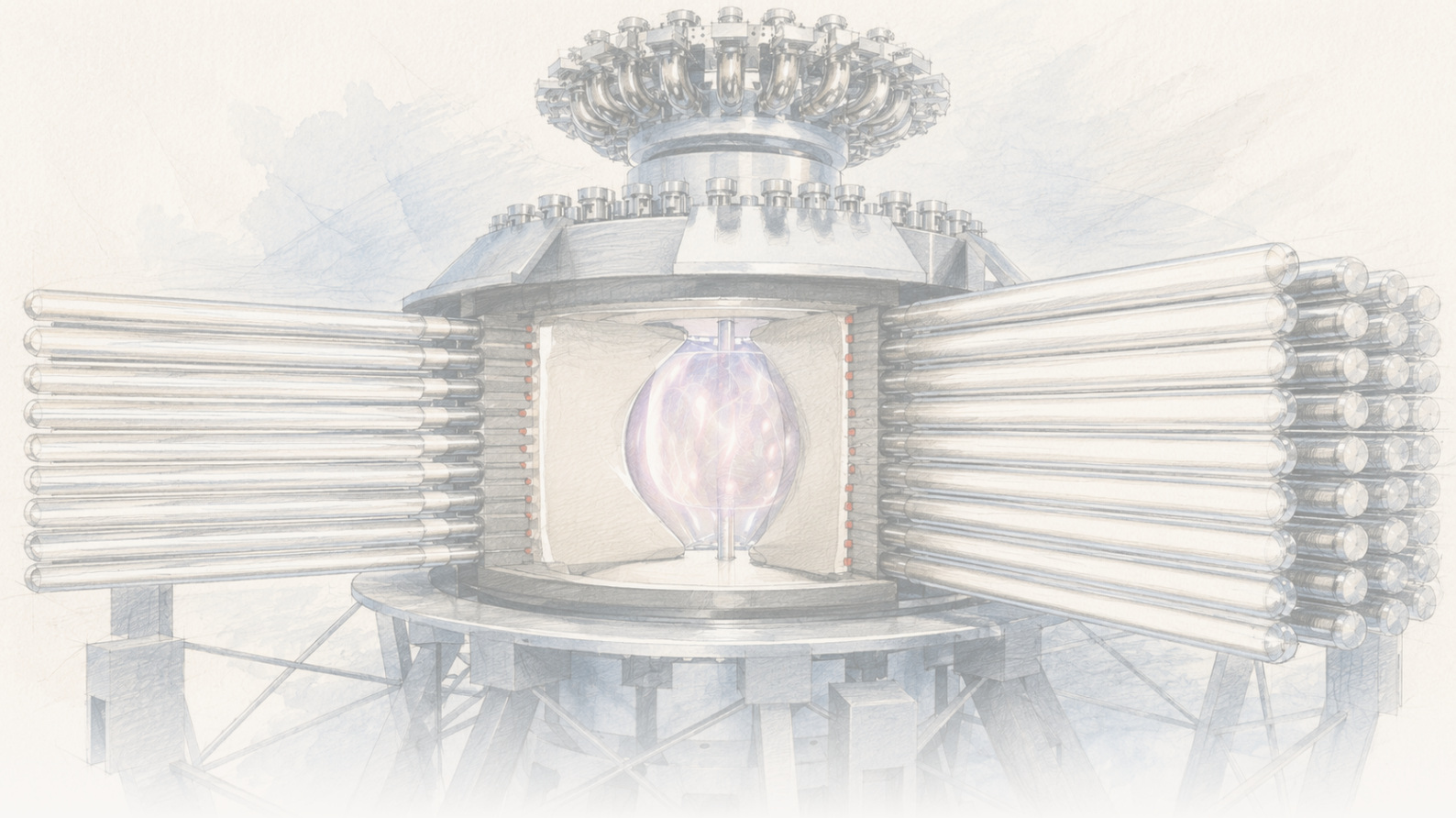


The Clean Paper

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

# Bir füzyon makinesi plazmasını sıkarak ısıttı — gerçek adım bu, ama bu bir elektrik santrali değil

*General Fusion'ın LM26'sı, içe çöken bir lityum astarla manyetize döteryum plazmasını sıkıştırdı ve plazmanın ısındığını gözledi — elektron sıcaklığı üç kattan fazla artarak ölçülen yaklaşık 0,72 keV (718 ± 80 eV, yaklaşık 8 milyon °C) tepe değerine ulaştı; şirketin analizine göre ısınmanın çoğu, manyetize hedef füzyonu yaklaşımının dayandığı mekanizma olan sıkıştırmanın kendisinden geliyor. Bu, bu füzyon yolu için gerçek bir mühendislik kontrol noktasıdır. Aynı zamanda tek makinedeki ilk 11 atış, hakem değerlendirmesinden geçmemiş bir şirket ön baskısı ve yanan plazmanın gerektirdiğinden hâlâ yaklaşık on kat düşük bir sıcaklık demek — net enerji, başa baş noktası ve elektrik yok. Gösterilmiş bir mekanizma; inşa edilmiş bir elektrik santrali değil.*

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 füzyon makinesi plazmasını sıkarak ısıttı — gerçek adım bu, ama bu bir elektrik santrali değil

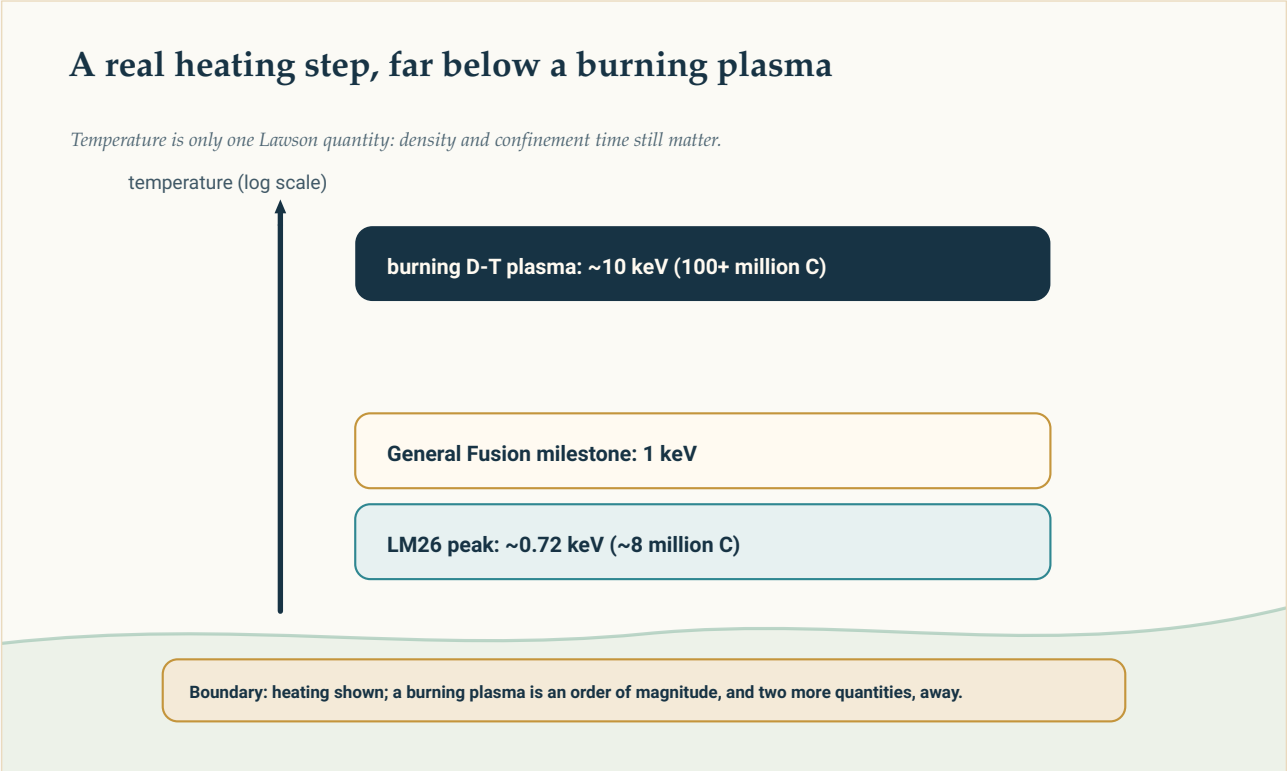
Bir füzyon reaktörünün çalıştırmak için harcadığından daha fazla enerji geri verebilmesi için yakıt plazmasının aynı anda yeterince sıcak, yeterince yoğun ve yeterince uzun süre bir arada tutulmuş olması gerekir — fizikçilerin Lawson kriteri dediği üç büyüklük. Alanın çoğu bunu devasa süperiletken mıknatıslarla (ITER gibi tokamaklar) ya da dev lazer dizileriyle (ABD Ulusal Ateşleme Tesisi'ndeki eylemsiz haps gibi) kovalar. Daha küçük bir şirket grubu üçüncü bir yola, **manyetize hedef füzyonuna** (MTF) bahis oynuyor: sıcak ve manyetize bir plazma oluştur, ardından onu hızlı biçimde mekanik olarak *sıkıştır*; ısıtmayı sıkışma yapsın — tıpkı dizel motorun yakıtını kıvılcımla değil sıkıştırmayla tutuşturması gibi.

Haziran 2026'da Kanadalı **General Fusion**, bu temel iddianın gerçekten geçerli olup olmadığını sınayan **Lawson Machine 26 (LM26)** sonuçlarını yayımladı: modellerin öngördüğü gibi, manyetize bir plazmayı mekanik olarak sıkıştırmak gerçekten onu ısıtıyor mu? İlk 11 sıkıştırma atışında — küresel tokamak biçimindeki döteryum plazması içe çöken *katı lityum astarla* sıkıştırıldı — en iyi atışlar plazmanın sıkıştırıldıkça belirgin biçimde daha sıcak, daha yoğun ve daha güçlü manyetize hâle geldiğini gösterdi; şirketin analizi ısınmanın büyük bölümünü sıkıştırmanın kendisine bağlıyor.

Bu, MTF yaklaşımı için gerçek ve belirli bir mühendislik sonucu. Aynı zamanda henüz hakem değerlendirmesinden geçmemiş bir **şirket ön baskısında** anlatılan ilk atış grubu; sıcaklık, yanan bir plazmanın gerektirdiğinin hâlâ çok altında. Ve bu füzyon enerjisi değil, başa baş noktası değil, elektrik santrali hiç değil.

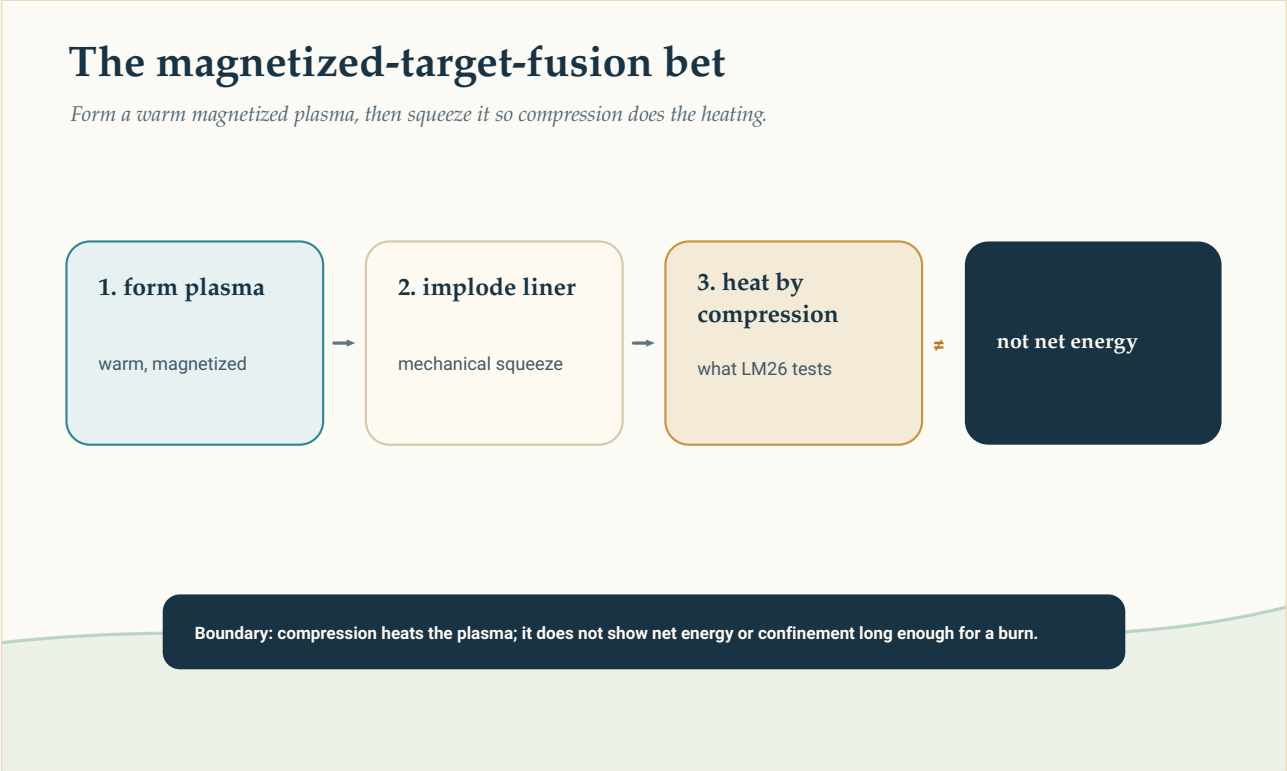
[video pending]

Bu, LM26'nın nasıl göründüğünü göstermek için eklenen General Fusion tanıtım görüntüsüdür; makinenin gelecekteki füzyon kilometre taşlarına ulaşacağına dair bağımsız kanıt değildir.




Bir sıcaklık merdiveni: LM26'nın ~0,72 keV değeri, General Fusion'ın 1 keV kilometre taşı ve yanan döteryum-trityum plazmasının ihtiyaç duyduğu ~10 keV. Sıcaklık, Lawson kriterindeki üç büyüklükten yalnızca biridir.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0




Manyetize hedef füzyonu: sıcak, manyetize bir plazma oluştur; ardından içe çöken bir astarla sıkıştır ve ısıtmayı

mekanik sıkışma yapsın — dizel sıkıştırma bahsi. LM26 sıkıştırmanın plazmayı ısıtıp ısıtmadığını test etti; net enerjiyi ya da yeterli haps süresini değil.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

**"Manyetize hedef füzyonu", "keV" ve Lawson kriteri ne demek?**

Füzyonda plazma sıcaklığı genellikle derece yerine **kiloelektronvolt (keV)** cinsinden verilir: 1 keV yaklaşık **11,6 milyon °C**'dir. Döteryum–trityum yakıtının verimli biçimde füzyona girebilmesi için kabaca **10 keV**'ye (100 milyon °C'nin üzerine) ulaşması gerekir — ama sıcaklık, aynı anda sağlanması gereken üç koşuldan yalnızca biridir. **Lawson kriteri**, bir reaktörün yeterli **yoğunluğa** ve yeterli **haps süresine** de ihtiyacı olduğunu söyler; bunlar genellikle tek bir "üçlü çarpımda" (sıcaklık × yoğunluk × haps süresi) birleştirilir. Plazmayı ısıtmak gereklidir, ama tek başına yeterli olmaktan çok uzaktır.
**Manyetize hedef füzyonu (MTF)** iki ana yaklaşım arasında bir orta yoldur. Sıcak bir plazmayı dev mıknatıslarla uzun süre hapsetmek ya da küçük bir hedefi lazerlerle neredeyse anında ısıtmak yerine, MTF manyetize bir plazma oluşturur ve onu mikrosaniyeler boyunca mekanik olarak sıkıştırır. Çalışırsa sıkıştırma hem plazmayı ısıtır hem yoğunluğunu artırır — potansiyel olarak ITER ölçeğinde mıknatıslar ya da NIF ölçeğinde lazerler olmadan füzyon koşullarına ulaşabilir. Sıkıştırmanın gerçek bir makinede gerçekten bu ısıtmayı sağlayıp sağlamadığı, LM26 gibi bir testin tam olarak ölçmeye çalıştığı şeydir.

# Yazarlar ne yaptı?

- General Fusion'da bir manyetize-hedef-füzyon makinesi olan **LM26**'yı kurup çalıştırdılar: küresel tokamak döteryum plazması oluşturuluyor, ardından içeri doğru sürülen ve çöken **katı lityum astar** tarafından sıkıştırılıyor — yaklaşık **3× radyal sıkıştırma**.
- **İlk 11 sıkıştırma atışını** gerçekleştirdiler ve yoğun biçimde ölçüm aldılar; plazmanın sıcaklığını, yoğunluğunu ve manyetik alanını zaman içinde yeniden yapılandırdılar, yayılan nötronları, X ışınlarını ve görünür ışığı kaydettiler, ayrıca plazma–duvar etkileşimini hızlı kamerayla görüntülediler.
- Sıkıştırmadan gelen ısıtmayı Ohmik ısıtma (plazmanın kendi akımından) ve sınıra kaybedilen enerjiyle dengeleyen **bütünleşik bir fizik modeli** kurdular; ardından ısınmanın gerçekte nereden geldiğini ayırmak için modeli ölçülen verilerle karşılaştırdılar.

# Ne buldular?

- **Plazma sıkıştırıldıkça ısındı.** En iyi atışlarda elektron sıcaklığı **3 kattan fazla**, elektron yoğunluğu yaklaşık **10 kat** ve poloidal manyetik alan yaklaşık **10 kat** arttı; bunlar 3× radyal sıkıştırmayla birlikte gerçekleşti. En iyi atışta makale, Thomson saçılmasıyla ölçülen yaklaşık **0,72 keV'lik tepe elektron sıcaklığı** (718 ± 80 eV) bildiriyor — kabaca 8 milyon °C.

- **Isınmanın çoğu sıkıştırmaya bağlanıyor.** Bütünleşik model, sıcaklık artışının *çoğunluğunun* Ohmik ısıtmadan değil, MTF yaklaşımının tamamının dayandığı mekanizma olan mekanik sıkıştırmanın kendisinden geldiği sonucuna varıyor.
- **Sıkıştırma sırasında nötron yayımı arttı**; bu, daha sıcak ve daha yoğun bir döteryum plazmasıyla uyumlu.

## Bu neyi göstermiyor?

- Bu **füzyon enerjisi, başa baş noktası ya da net kazanç değil**. Burada hiçbir şey çalıştırmak için harcanandan daha fazla enerji üretmedi. Sonuç, reaktörün enerji dengesiyle değil, füzyon döngüsündeki tek bir adımla — *plazmanın ısıtılmasıyla* — ilgili.
- Sıcaklık, yanan bir plazma için gerekenin **hâlâ yaklaşık on kat altında**. Yaklaşık 0,72 keV kabaca 8 milyon °C'dir; döteryum–trityum yakıtı yaklaşık **10 keV'ye (100 milyon °C'nin üzerine)** ve yanmayı sürdürecek yeterli yoğunluk × haps süresine ihtiyaç duyar. General Fusion'ın kendi bir sonraki kilometre taşı **1 keV** — o da ateşlemeden çok uzak.
- "**Isınmanın çoğu sıkıştırmadan geliyor**" ifadesi doğrudan bir okuma değil, **modele dayalı bir sonuç**. Tanısal ölçümlere uydurulan bütünleşik fizik modelinden geliyor; sıkıştırma, Ohmik ısıtma ve kayıplar arasındaki paylaştırmaya ne kadar güvenileceği, modele ne kadar güvenildiğine bağlı.
- Bu **hakem değerlendirmesinden geçmemiş bir şirket ön baskısı**. Sonuçlar, makineyi kuran ve onun vaadi üzerine finansman toplamış ekip tarafından raporlanıyor; bağımsız değerlendirme henüz yapılmadı.
- Nötron artışı, **enerji açısından anlamlı bir füzyon verimi değil**. Bu koşullarda döteryumdan bir miktar nötron beklenir; güç üretimi için yararlı düzeylerin çok altındadır.
- Şirketin ayrı bir iddiası olan **gelecekteki bir tesisin şebekeye elektrik vereceği** söylemi hakkında hiçbir şey göstermiyor — bağımsız haberler bu iddiayı ciddi ihtiyatla ele aldı.

## Kanıt ne kadar güçlü?

- **Temel iddia dar ve sınanabilir.** "Manyetize bir plazmayı sıkıştırdık ve plazma, büyük ölçüde sıkıştırma nedeniyle ısındı" tam olarak MTF yaklaşımının geçmesi gereken mekanizma testidir. Makale bunu yoğun biçimde ölçümlenmiş bir atış serisi ve açık bir enerji dengesi modeliyle destekliyor. Hakem değerlendirmesini geçerse, yaklaşımın gerçek — erken aşamadaki — bir doğrulaması olur.
- **Sınırlamalar kozmetik değil, yapısal.** On bir atış, tek makine, tek ekip, henüz hakemli değil ve öne çıkan sıcaklık yanan plazmanın yaklaşık bir büyüklük mertebesi altında. Yük taşıyan sonuç — *ısınmanın çoğunluğu sıkıştırmadan* — bir modele dayanıyor; dolayısıyla hakem değerlendirmesindeki ana soru, modelin bu paylaştırmasının ne kadar sağlam olduğu olacaktır.
- **Dürüst durum, enerji kilometre taşı değil, gösterilmiş bir mekanizma.** Sonuç MTF'yi "sıkıştırma plazmayı *ısıtmalı*" noktasından "sıkıştırma plazmayı *ısıtıyor*" noktasına doğru iter; bundan daha büyük bir iddia desteklenmiyor.

# Neden önemli?

Manyetize hedef füzyonunun ilginç yanı rekorlar değil, ekonomidir. Mekanik sıkıştırma plazmayı füzyon koşullarına doğru ısıtabiliyorsa, ITER ölçeğinde mıknatıslar ya da NIF ölçeğinde lazerler olmadan oraya ulaşmak mümkün olabilir — *çalışırsa* daha ucuz ve daha hızlı yinelenebilir bir yol. Bütün mesele bu "çalışırsa" sözcüğünde ve bu da bunun gibi gösterişsiz kontrol noktalarına bağlı: sıkıştırma gerçekten modellerin vaat ettiği ısıtmayı sağlıyor mu? LM26'nın ilk atışlardaki yanıtı, koşullu bir evet. Tam da koşullu olduğu için kayda değer — uzun bir merdivenin bir basamağı; tırmanan kişiler tarafından raporlanmış, henüz başkalarınca kontrol edilmemiş ve zirveden hâlâ çok uzakta.

# Kısa özet

General Fusion'ın LM26'sı, içe çöken lityum astarla manyetize bir döteryum plazmasını sıkıştırdı ve plazmanın ısındığını gösterdi — elektron sıcaklığı üç kattan fazla artarak ölçülen yaklaşık 0,72 keV (718 ± 80 eV, ~8 milyon °C) tepe değerine ulaştı; şirketin analizi ısınmanın çoğunu, manyetize hedef füzyonu yaklaşımının dayandığı mekanizma olan sıkıştırmanın kendisine bağlıyor. Bu, bu füzyon yolu için gerçek ve belirli bir mühendislik adımıdır. Aynı zamanda tek bir makinedeki ilk 11 atıştır; henüz hakem değerlendirmesinden geçmemiş bir şirket ön baskısında anlatılıyor; sıcaklık yanan plazmanın ihtiyaç duyduğunun yaklaşık on kat altında ve net enerji, başa baş noktası ya da elektrik yok. Gösterilmiş bir mekanizma; inşa edilmiş bir elektrik santrali değil.

---

# Kaynaklar

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