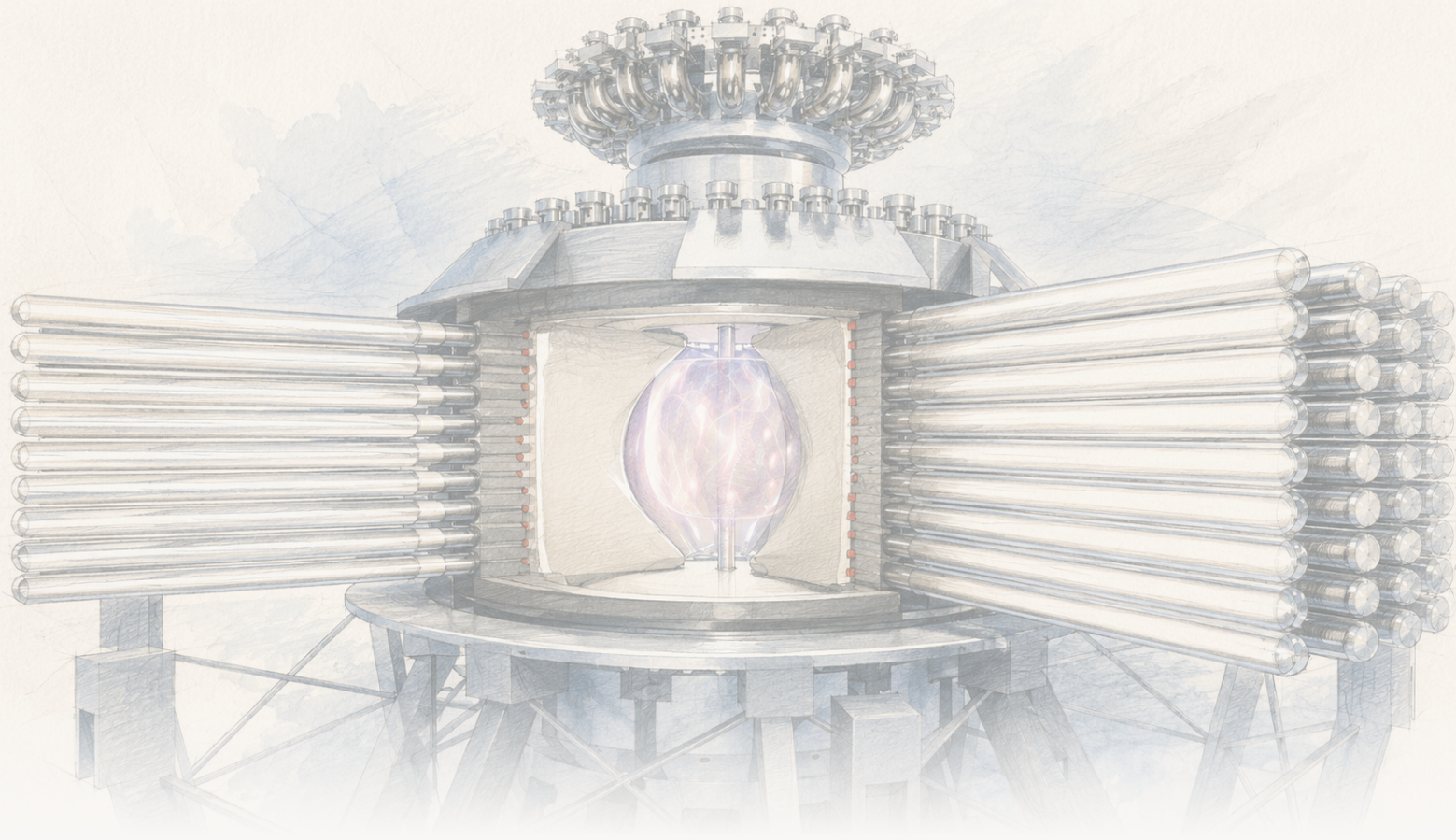




The CLEAN PAPER

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

מכונת היתוך חיממה את הפלזמה שלה באמצעות דחיסה — זה הצעד האמיתי, ולא תחנת הכוח שהוא איננו

LM26 של *Fusion General* דחסה פלזמת דאוטריום ממוגנטת באמצעות מעטפת ליתיום שקורסת פנימה והראתה שהיא מתחממת — טמפרטורת האלקטרונים עלתה ביותר מפי שלושה לשיא נמדד של כ- 0.72 keV ($80 \pm 718 \text{ eV}$ בערך 8 מיליון $^{\circ}\text{C}$), כשהניתוח של החברה מייחס את רוב החימום לדחיסה עצמה, המנגנון שעליו נשענת גישת *magnetized-target-fusion* שלה. זהו ציון דרך הנדסי אמיתי במסלול הזה להיתוך. אבל אלה גם 11 הניסויים הראשונים במכונה אחת, ב-*preprint* של החברה שלא עבר ביקורת עמיתים, בטמפרטורה שעדיין נמוכה בערך פי עשרה מזו שפלזמה בוערת דורשת — בלי אנרגיה נטו, בלי *breakeven* ובלי חשמל. מנגנון שהודגם, לא תחנת כוח שנבנתה.

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

מכונת היתוך חיממה את הפלזמה שלה באמצעות דחיסה — זה הצעד האמיתי, ולא תחנת הכוח שהוא איננו

כדי שכור היתוך יחזיר יותר אנרגיה מזו שנדרשת להפעלתו, פלזמת הדלק צריכה להיות בו-זמנית חמה מספיק, צפופה מספיק ומוחזקת יחד זמן מספיק — שלושת הגדלים שמאוגדים במה שפיזיקאים מכנים קריטריון Lawson. רוב התחום מנסה להגיע לשם באמצעות מגנטים על-מוליכים עצומים, בטוקמאקים כמו ITER, או מערכים של לייזרים ענקיים, כמו בכליאה אינרציאלית ב-Facility. Ignition National US קבוצה קטנה יותר של חברות מהמרת על מסלול שלישי, fusion target magnetized (MTF): יוצרים פלזמה חמה וממוגנטת ואז דוחסים אותה מכנית ובמהירות, כך שהלחיצה עצמה מחממת אותה — בדומה למנוע דיזל שמצית דלק באמצעות דחיסה ולא באמצעות ניצוץ.

ביוני 2026 פרסמה החברה הקנדית Fusion General תוצאות מ-Lawson Machine 26 (LM26) שבדקות אם ההימור המרכזי הזה אכן עובד: האם דחיסה מכנית של פלזמה ממוגנטת באמת מחממת אותה כפי שהמודלים מבטיחים? ב-11 ניסויי הדחיסה הראשונים — שבהם פלזמת דאוטריום בטוקמאק כדורי נדחסה באמצעות מעטפת ליתיום מוצקה הקורסת פנימה — הניסויים הטובים ביותר הראו שהפלזמה נעשית חמה יותר, צפופה יותר וממוגנטת יותר באופן ניכר בזמן הדחיסה, והניתוח של החברה מייחס את רוב החימום לדחיסה עצמה.

זו תוצאה הנדסית אמיתית וספציפית לגישת MTF אבל זו גם סדרה ראשונה של ניסויים, המתוארת ב-preprint של החברה שלא עבר ביקורת עמיתים, בטמפרטורה שעדיין נמוכה בהרבה מזו שפלזמה בוערת דורשת — וזה לא ייצור אנרגיית היתוך, לא breakeven ולא תחנת כוח.

[video pending]

זהו סרטון תדמית של Fusion General שנכלל כדי להראות כיצד LM26 נראה; הוא אינו ראיה עצמאית לכך שהמכונה תעמוד באבני הדרך העתידיות שלה בתחום ההיתוך.

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)

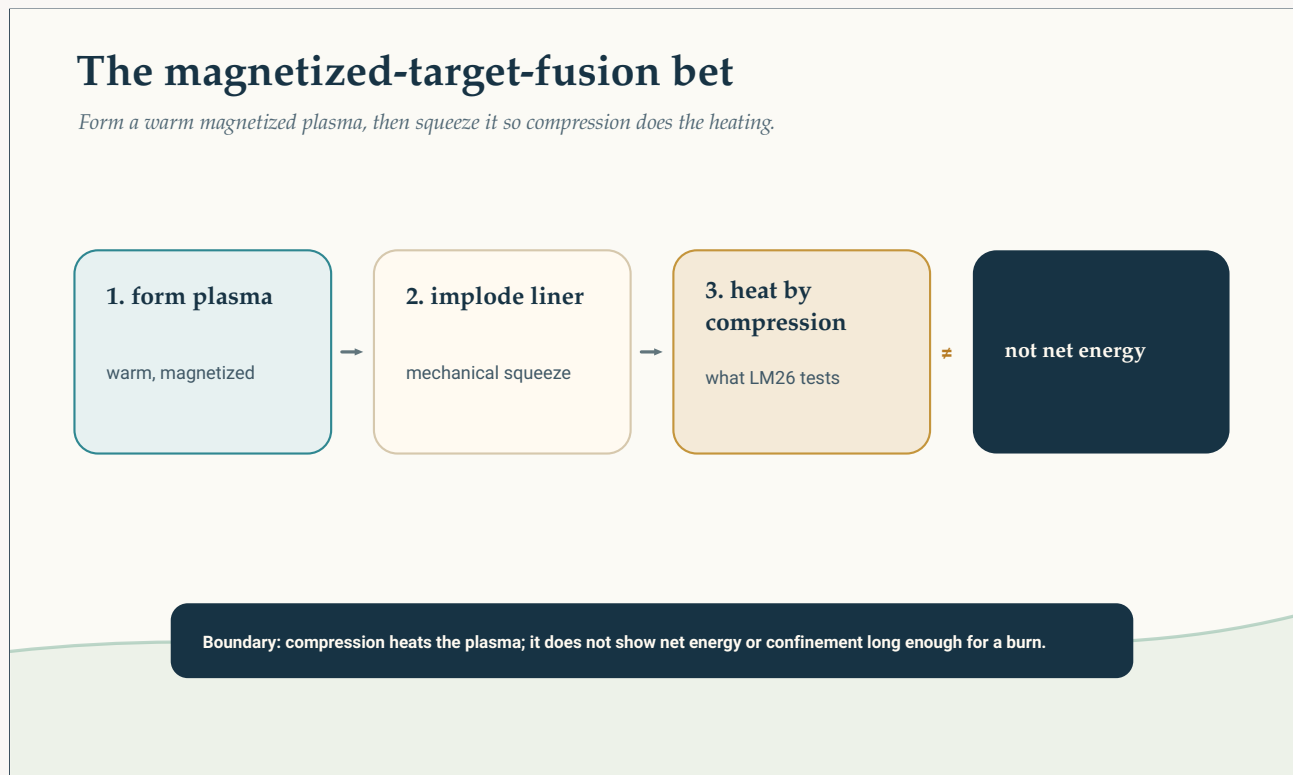
General Fusion milestone: 1 keV

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

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

סולם טמפרטורות: כ-0.72 keV ב-LM26, אבן הדרך של Fusion General ב-1 keV, וכ-10 keV הדרושים לפלזמת דאוטריום-טריטיום בוערת. טמפרטורה היא רק אחד משלושת הגדלים בקריטריון Lawson.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



fusion: target Magnetized — היוצרים פלזמה חמה וממוגנטת ואז דוחסים אותה באמצעות מעטפת שקורסת פנימה, כך שהלחיצה מבצעת את החימום — ההימור של דחיסה בסגנון דיזל. LM26 בדקה שהדחיסה מחממת את הפלזמה; לא אנרגיה נטו ולא זמן כליאה מספיק.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

מה פירוש "magnetized target fusion", מהו keV ומהו קריטריון Lawson

בערך הוא 1 keV במעלות: ולא (keV) קילואלקטרון-וולטב- כלל בדרך ניתנת בהיתוך פלזמה טמפרטורת כדי — °C מיליון מ-100 יותר — 10 keV- בערך להגיע צריך דאוטריום-טריטיום דלק. °C מיליון 11.6 Lawson קריטריון יחד. להתקיים שצריכים תנאים משלושה אחד רק היא טמפרטורה אבל ביעילות, להתמזג אחת: משולשת "ל"מכפלה מאחדים שלעיתים מספיק, כליאה זמנול- מספקת צפיפות- גם זקוק שכור אומר מלהספיק. מאוד רחוק לבדו אבל הכרחי, הפלזמה חימום כליאה. זמן × צפיפות × טמפרטורה Magnetized target fusion (MTF) היא דרך ביניים בין שתי הגישות המרכזיות. במקום לכלוא פלזמה חמה במשך זמן רב בעזרת מגנטים עצומים, או לחמם מטרה זעירה כמעט מיד באמצעות לייזרים, MTF יוצרת פלזמה ממוגנטת ואז דוחסת אותה מכנית במשך מיקרו-שניות. אם זה עובד, הדחיסה גם מחממת את הפלזמה וגם מעלה את צפיפותה — ובאופן פוטנציאלי יכולה להגיע לתנאי היתוך בלי מגנטים בקנה המידה של ITER או לייזרים בקנה המידה של NIF. האם הדחיסה באמת מספקת את החימום הזה במכונה אמיתית — זו בדיוק השאלה שניסוי כמו LM26 נועד לבדוק.

מה עשו החוקרים

- בנו והפעילו את LM26, מכונת magnetized-target-fusion של Fusion: General נוצרת פלזמת דאוטריום בטוקמאק כדורי, ולאחר מכן היא נדחסת באמצעות מעטפת ליתיום מוצקה הקורסת פנימה — בערך דחיסה רדיאלית של פי 3.
- ביצעו את 11 ניסויי הדחיסה הראשונים עם מערך מדידה צפוף, שחזרו לאורך הזמן את טמפרטורת הפלזמה, צפיפותה והשדה המגנטי שלה, ותיעדו ניטרונים, קרני X ואור נראה שנפלטו, וכן תמונות ממצלמות מהירות של האינטראקציה בין הפלזמה לדופן.
- בנו מודל פיזיקלי משולב שמאזן בין חימום מדחיסה, חימום אוהמי — מן הזרם של הפלזמה עצמה — ואנרגיה שאובדת בגבול, והשוו אותו לנתוני המדידה כדי להעריך מאין הגיע החימום בפועל.

מה הם מצאו

- הפלזמה התחממה בזמן שנדחסה. בניסויים הטובים ביותר טמפרטורת האלקטרונים עלתה ביותר מ-פי 3, צפיפות האלקטרונים בכ-פי 10, והשדה המגנטי הפולואידי בכ-פי 10, בעקבות דחיסה רדיאלית של פי 3. בניסוי הטוב ביותר נמדדה טמפרטורת אלקטרונים מרבית של כ-0.72 keV (80 ± 718 eV, באמצעות Thomson scattering) — בערך 8 מיליון °C.
- רוב החימום מיוחס לדחיסה. המודל המשולב שלהם מסיק שרוב העלייה בטמפרטורה נבעה מן הדחיסה המכנית עצמה — המנגנון שעליו נשענת כל גישת MTF — ולא מחימום אוהמי.
- פליטת הנייטרונים עלתה בזמן הדחיסה, באופן שתואם פלזמת דאוטריום חמה וצפופה יותר.

מה זה לא מראה

- זו לא אנרגיית היתוך, breakeven או רווח אנרגטי נטו. שום דבר כאן לא הפיק יותר אנרגיה מזו שנדרשה להפעלה. התוצאה עוסקת בחימום פלזמה — שלב אחד במחזור ההיתוך — ולא במאזן האנרגטי של כור.
- הטמפרטורה עדיין נמוכה בערך פי עשרה מזו של פלזמה בוערת. 0.72 keV הם בערך 8 מיליון °C; דלק דאוטריום-טריטיום זקוק לסדר גודל של 10 keV — מעל 100 מיליון °C — וגם לצפיפות $\times$ זמן כליאה מספיקים כדי לקיים בעירה. אבן הדרך הבאה של Fusion General עצמה היא 1 keV, שגם היא רחוקה מהצתה.
- "רוב החימום נובע מדחיסה" היא מסקנה מבוססת מודל, לא קריאה ישירה ממכשיר. היא מתקבלת ממודל פיזיקלי משולב שהותאם לאבחונים; מידת האמון בחלוקה בין דחיסה, חימום אוהמי ואיבודים תלויה במידת האמון במודל הזה.
- זהו preprint של חברה, שלא עבר ביקורת עמיתים. התוצאות מדווחות בידי הצוות שבנה את המכונה ושגייס כסף על בסיס ההבטחה שלה; ביקורת עצמאית עדיין לא התרחשה.
- העלייה בנייטרונים אינה תפוקת היתוך רלוונטית לאנרגיה. בתנאים האלה צפויים כמה ניטרונים מדאוטריום, הרבה מתחת לכל דבר שימושי לייצור חשמל.
- זה לא אומר דבר על הצהרה נפרדת של החברה שלפיה תחנה עתידית תספק חשמל לרשת — טענה שסיקור עצמאי התייחס אליה בזהירות רבה.

עד כמה הראיות חזקות?

- **טענת הליבה צרה וניתנת לבדיקה.** "דחסנו פלזמה ממוגנטת והיא התחממה, בעיקר בגלל הדחיסה" הוא בדיוק מבחן המנגנון שגישת MTF צריכה לעבור, והמאמר תומך בו באמצעות סדרת ניסויים עמוסת אבחונים ומודל מפורש של מאזן אנרגיה. אם התוצאה תשרוד ביקורת עמיתים, זו ולידציה אמיתית — גם אם מוקדמת — של הגישה.
- **ההסתייגויות מבניות, לא קוסמטיות.** 11 ניסויים, מכונה אחת, צוות אחד, עדיין ללא ביקורת, וטמפרטורת כותרת שנמוכה בסדר גודל מפלזמה בוערת. המסקנה נושאת המשקל — רוב החימום מדחיסה — נשענת על מודל, ולכן שאלת ביקורת העמיתים המרכזית היא אם החלוקה שהמודל נותן יציבה.
- **הסטטוס הישר הוא מנגנון שהודגם, לא אבן דרך אנרגטית שהושגה.** זה מזיז את MTF מ"הדחיסה אמורה לחמם את הפלזמה" לעבר "הדחיסה אכן מחממת את הפלזמה" — ולא מעבר לכך.

למה זה חשוב

הדבר המעניין ב-fusion target magnetized הוא הכלכלה, לא שיאים. אם דחיסה מכנית יכולה לחמם פלזמה לכיוון תנאי היתוך, ייתכן שאפשר להגיע לשם בלי מגנטים בקנה המידה של ITER או לייזרים בקנה המידה של NIF — מסלול זול יותר שמאפשר איטרציות מהירות יותר, אם הוא עובד. ה"אם" הזה הוא כל המשחק, והוא תלוי בנקודות בדיקה לא זוהרות כמו זו: האם הדחיסה באמת מספקת את החימום שהמודלים מבטיחים? התשובה של LM26 בניסויים הראשונים היא כן מסויג. כדאי לשים לב לכך דווקא משום שהוא מסויג — שלב אחד בסולם ארוך, שדווח בידי האנשים שמטפסים עליו, עדיין לא נבדק בידי אחרים, ורחוק מאוד מן הקצה העליון.

בקצרה

LM26 של Fusion General דחסה פלזמת דאוטריום ממוגנטת באמצעות מעטפת ליתיום שקורסת פנימה והראתה שהיא מתחממת — טמפרטורת האלקטרונים עלתה ביותר מפי שלושה לשיא נמדד של כ-0.72 keV (80 ± 718) eV, בערך 8 מיליון °C — והניתוח של החברה מייחס את רוב החימום לדחיסה עצמה, המנגנון שעליו נשענת גישת magnetized-target-fusion שלה. זהו צעד הנדסי אמיתי וספציפי במסלול הזה להיתוך. אבל אלה גם 11 הניסויים הראשונים במכונה אחת, המתוארים ב-preprint של החברה שלא עבר ביקורת עמיתים, בטמפרטורה הנמוכה בערך פי עשרה מזו שפלזמה בוערת דורשת, בלי אנרגיה נטו, בלי breakeven ובלי חשמל. מנגנון שהודגם — לא תחנת כוח שנבנתה.

מקורות

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->

(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>