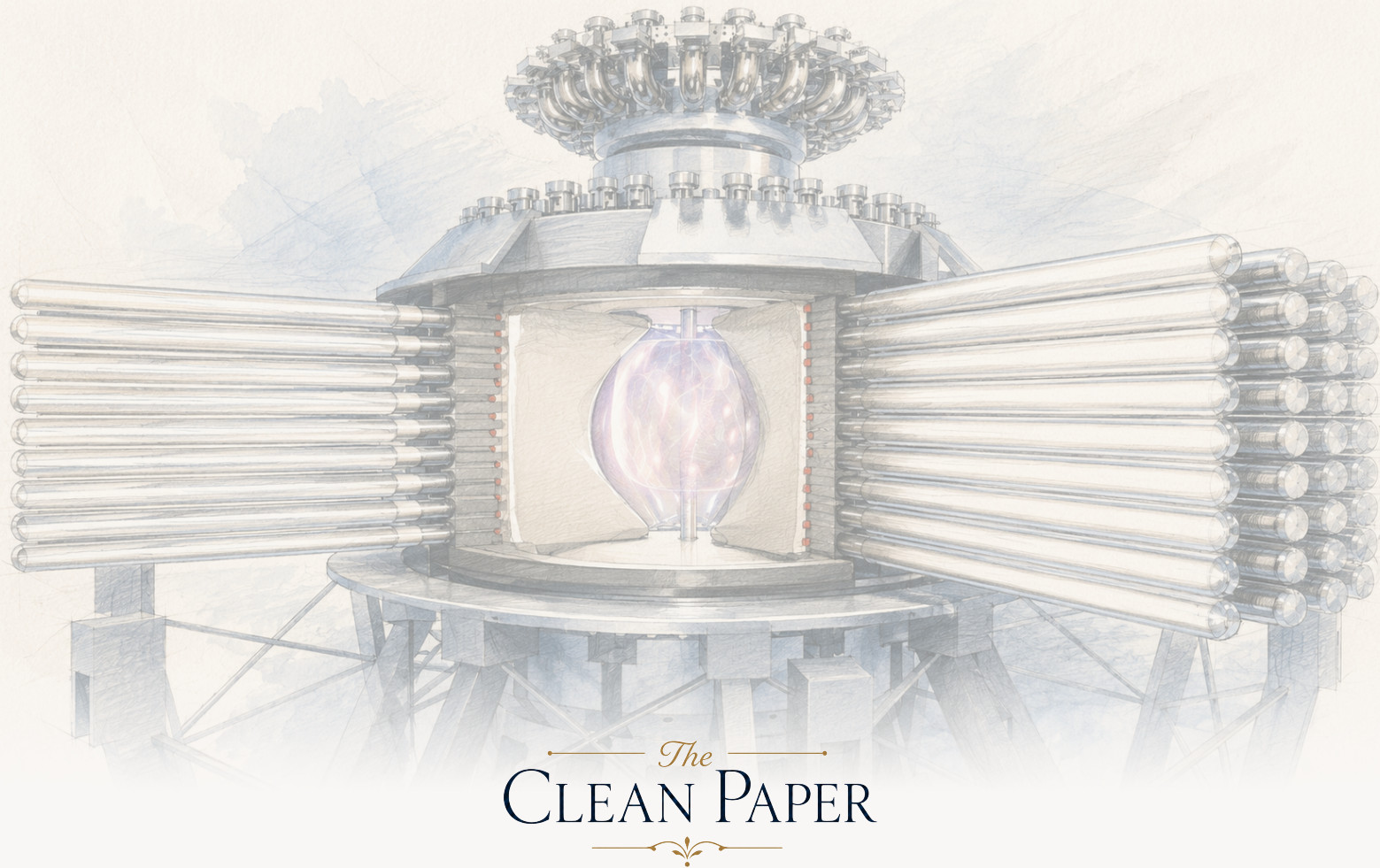




WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Ֆուզիոն սարքը պլազման տաքացրեց՝ սեղմելով այն. իրական քայլը, բայց ոչ Էլեկտրական

General Fusion-ի LM26-ը ներս փլուզվող լիթիումային liner-ով սեղմեց մագնիսացված դեյտերիումային պլազման և ավելի քան եռապատկեց Էլեկտրոնային ջերմաստիճանը՝ հասնելով մոտ 0.72 keV -ի ($718 \pm 80 \text{ eV}$, մոտ 8 միլիոն $^{\circ}\text{C}$): Ընկերության վերլուծությունը տաքացման մեծ մասը վերագրում է հենց compression-ին՝ MTF մոտեցման առանցքային մեխանիզմին: Սա իրական ինժեներական checkpoint է, բայց ընդամենը մեկ սարքի առաջին 11 shot -երը՝ դեռ չգրախուսված ընկերության preprint-ում, այրվող պլազմային անհրաժեշտ ջերմաստիճանից մոտ տաս անգամ ցածր մակարդակում և առանց net energy-ի, breakeven-ի կամ Էլեկտրաէներգիայի:

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

Ֆուզիոն սարքը պլազման տաքացրեց՝ սեղմելով այն. իրական առաջընթացը, բայց ոչ էլեկտրական

Որպեսզի ֆուզիոն ռեակտորը վերադարձնի ավելի շատ էներգիա, քան ինքն է պահանջում աշխատանքի համար, վառելիքային պլազման միաժամանակ պետք է բավականաչափ տաք, բավականաչափ խիտ և բավական երկար ժամանակ միասին պահված լինի: Այս երեք մեծությունները միասին ֆիզիկոսները կոչում են **Լոուսոնի չափանիշ**: Ֆուզիոն հետազոտությունների մեծ մասը փորձում է դրան հասնել հսկայական գերհաղորդիչ մագնիսներով՝ ինչպես ITER-ի նման տոկամակներում, կամ հսկայական լազերների զանգվածներով՝ ինչպես ԱՄՆ National Ignition Facility-ում կիրառվող իներցիոն confinement-ի դեպքում: Ավելի փոքր թվով ընկերություններ խաղաղորոյք են կատարում երրորդ ճանապարհի վրա՝ **մագնիսացված թիրախային ֆուզիա** (*magnetized target fusion*, MTF). նախ ստեղծել տաք և մագնիսացված պլազմա, հետո այն շատ արագ մեխանիկորեն *սեղմել*, որպեսզի հենց սեղմումն ապահովի տաքացումը՝ մոտավորապես այնպես, ինչպես դիզելային շարժիչը վառելիքը վառում է ոչ թե կայծով, այլ սեղմումով:

2026 թվականի հունիսին կանադական **ընդհանուր Fusion** ընկերությունը հրապարակեց իր **Lawson մեքենա 26 (LM26)** սարքի արդյունքները: Փորձի նպատակն էր պարզել՝ այդ հիմնական ենթադրությունը իրական սարքում գործո՞ւմ է. մագնիսացված պլազմայի մեխանիկական սեղմումն իսկապե՞ս այն տաքացնում է այնպես, ինչպես կանխատեսում են մոդելները: Առաջին 11 սեղմում shot-երի ընթացքում գնդաձև տոկամակի դեյտերիումային պլազման սեղմվել է ներս փլուզվող *պինդ լիթիումային liner*-ով: Լավագույն shot-երում պլազման սեղմման ընթացքում նկատելիորեն տաքացել, խտացել և ավելի ուժեղ մագնիսացվել է, իսկ ընկերության վերլուծությունը տաքացման մեծ մասը վերագրում է հենց սեղմումին:

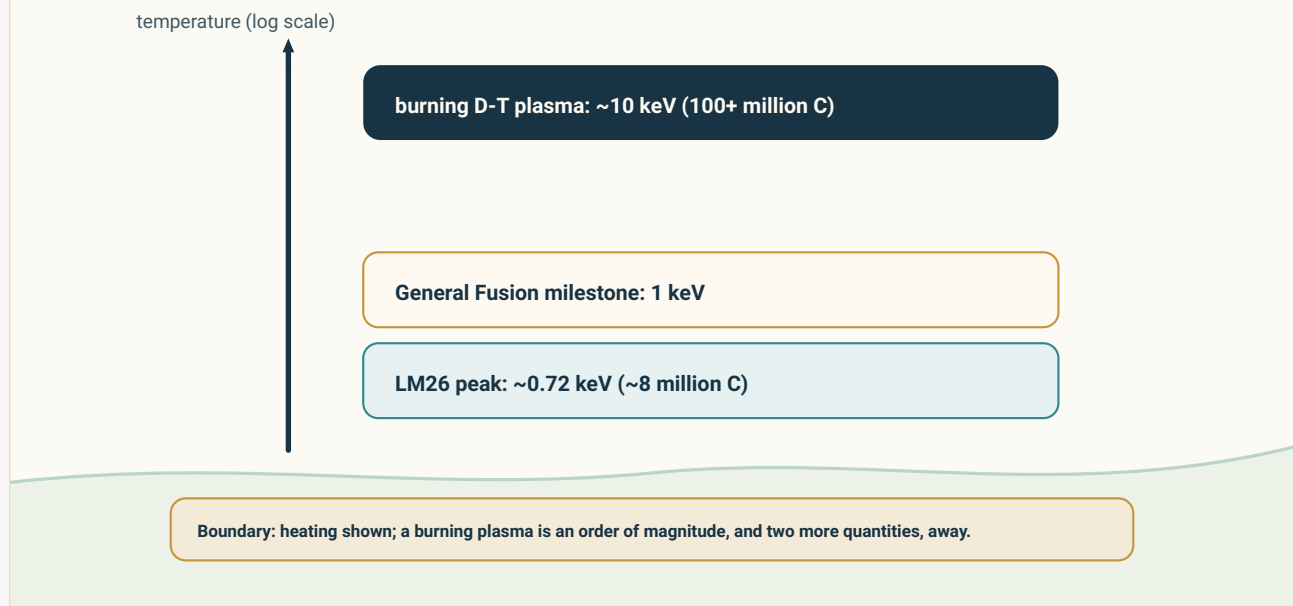
Սա MTF մոտեցման համար իրական ու կոնկրետ ինժեներական արդյունք է: Բայց սա նաև ընդամենը առաջին shot-երի շարքն է, նկարագրված **ընկերության նախատպագիրում, որը դեռ չի գրախոսվել**, և ստացված ջերմաստիճանը դեռ շատ ցածր է այրվող պլազմային անհրաժեշտ մակարդակից: Սա ֆուզիոն էներգիա չէ, շահավետության շեմ չէ և էլեկտրական չէ:

[video pending]

ընդհանուր Fusion-ի գովազդային տեսանյութը՝ LM26 սարքի տեսքը ցույց տալու համար: Այն անկախ ապացույց չէ, որ սարքը կհասնի ընկերության ապագա ֆուզիոն milestones-ին:

A real heating step, far below a burning plasma

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

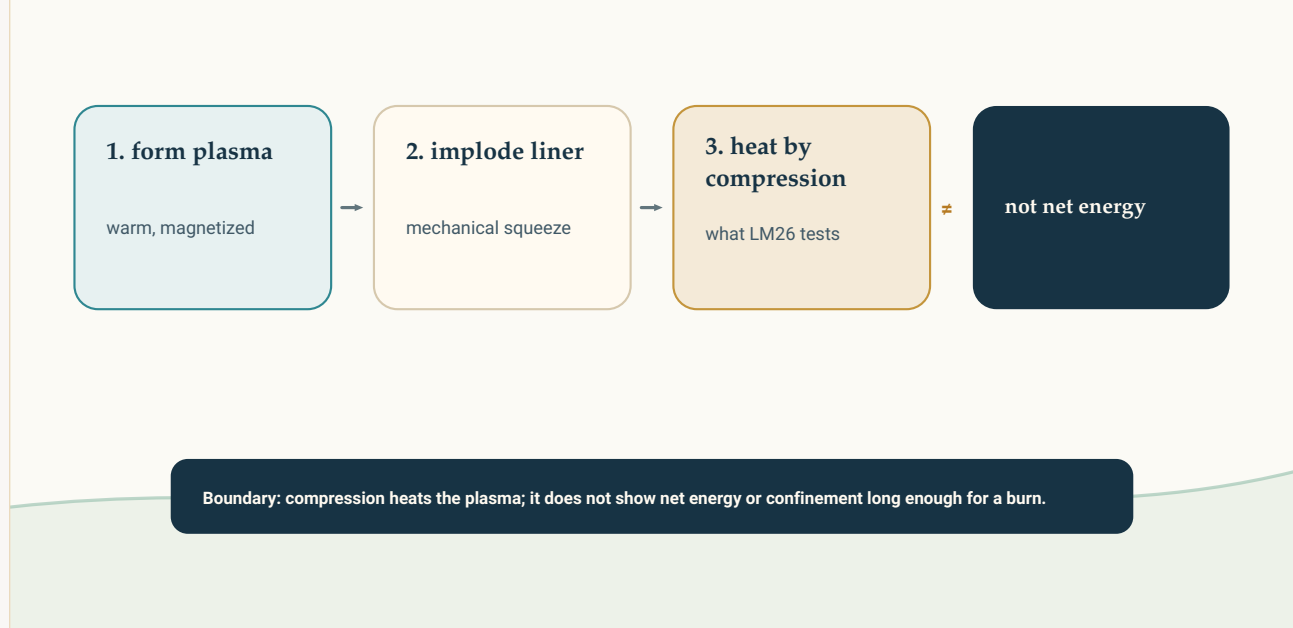


Ջերմաստիճանային սանդղակ՝ LM26-ի մոտ 0.72 keV-ից մինչև ընդհանուր Fusion-ի 1 keV milestone-ը և մոտ 10 keV, որը պետք է այրվող դեյտերիում-տրիտիում պլազմային: Ջերմաստիճանը Լոուսոնի երեք անհրաժեշտ մեծություններից միայն մեկն է:

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

The magnetized-target-fusion bet

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



Մագնիսացված թիրախային ֆուզիա. նախ ստեղծվում է տաք մագնիսացված պլազմա,

ապա այն սեղմվում է ներս փլուզվող liner-ով, որպեսզի սեղմումն ապահովի տաքացումը՝ դիզելային սեղմումի տրամաբանությամբ: LM26-ը փորձարկել է հենց այն, որ սեղմումը տաքացնում է պլազման, ոչ թե net էներգիաը կամ բավարար confinement-ը:

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Ինչ են նշանակում «magnetized թիրախ fusion»-ը, «keV»-ն և Լոուսոնի չափանիշը

Ֆուզիոն ֆիզիկայում պլազմայի ջերմաստիճանը սովորաբար արտահայտվում է ոչ թե աստիճաններով, այլ **կիլոէլեկտրոնվոլտներով (keV)**: 1 keV-ը մոտ **11.6 միլիոն °C** է: Դեյտերիում-տրիտիում վառելիքը արդյունավետ ֆուզիայի համար պետք է հասնի մոտ **10 keV**-ի՝ ավելի քան 100 միլիոն °C-ի, բայց միայն ջերմաստիճանը բավարար չէ: **Լոուսոնի չափանիշը** պահանջում է նաև բավարար **խտություն** և բավարար **confinement ժամանակ**: Դրանք հաճախ միավորում են «triple product»-ի մեջ՝ ջերմաստիճան $\times$ խտություն $\times$ confinement ժամանակ: Պլազման տաքացնելը անհրաժեշտ է, բայց ինքնին շատ հեռու է բավարար լինելուց:

Մագնիսացված թիրախային ֆուզիան (MTF) միջանկյալ ճանապարհ է երկու հիմնական մոտեցումների միջև: Հսկայական մագնիսներով շատ երկար confinement ապահովելու կամ փոքր թիրախը գրեթե ակնթարթորեն լազերներով տաքացնելու փոխարեն MTF-ն ստեղծում է մագնիսացված պլազմա և հետո այն մեխանիկորեն սեղմում միկրովայրկյանների ընթացքում: Եթե սա աշխատի, սեղմումը միաժամանակ և՛ տաքացնում է պլազման, և՛ բարձրացնում նրա խտությունը՝ հնարավոր դարձնելով ֆուզիոն պայմանների հասնել առանց ITER-ի չափի մագնիսների կամ NIF-ի չափի լազերների: Արդյոք իրական սարքում սեղմումն իսկապե՞ս տալիս է այդ տաքացումը՝ հենց դա է LM26-ի նման փորձի հարցը:

Ինչ արեցին հեղինակները

- Կառուցեցին և գործարկեցին **LM26** մագնիսացված թիրախային ֆուզիոն սարքը ընդհանուր Fusion-ում: Գնդաձև տոկամակի դեյտերիումային պլազման ստեղծվում է, ապա ներս է սեղմվում **պինդ լիթիումային liner**-ով՝ մոտավորապես **$3 \times$ շառավղային սեղմում**-ով:
- Իրականացրին **առաջին 11 սեղմում shot-երը** և դրանք հագեցրին մեծ թվով diagnostics-ներով՝ ժամանակի ընթացքում վերակառուցելով պլազմայի ջերմաստիճանը, խտությունն ու մագնիսական դաշտը և գրանցելով արտանետված նեյտրոնները, ռենտգենյան ու տեսանելի լույսը, ինչպես նաև արագ տեսախցիկներով plasma-wall փոխազդեցությունը:
- Կառուցեցին **ինտեգրված ֆիզիկական մոդել**, որը հավասարակշռում է սեղմումից ստացվող տաքացումը, Ohmic տաքացումը՝ պլազմայի սեփական հոսանքից, և սահմանային էներգետիկ կորուստները: Այն հետո համեմատեցին

չափված տվյալների հետ՝ գնահատելու համար, թե տաքացման որ մասն ինչ աղբյուրից է գալիս:

Ինչ գտան

- **Պլազման տաքացավ սեղմվելիս:** Լավագույն shot-երում էլեկտրոնային ջերմաստիճանը բարձրացավ **ավելի քան $3\times$** , էլեկտրոնային խտությունը՝ մոտ **$10\times$** , իսկ պոլիդայ մագնիսական դաշտը՝ մոտ **$10\times$** ՝ $3\times$ շառավղային սեղմումի արդյունքում: Լավագույն shot-ում Thomson scattering-ով չափված **գազաթային էլեկտրոնային ջերմաստիճանը մոտ 0.72 keV էր՝ $718 \pm 80\text{ eV}$** , այսինքն՝ մոտ 8 միլիոն $^{\circ}\text{C}$:
- **Տաքացման մեծ մասը վերագրվում է սեղմումին:** Ինտեգրված մոդելի համաձայն ջերմաստիճանի աճի *մեծամասնությունը* գալիս էր հենց մեխանիկական սեղմումից՝ այն մեխանիզմից, որի վրա հիմնված է ամբողջ MTF մոտեցումը, այլ ոչ Ohmic տաքացումից:
- **Compression-ի ընթացքում նեյտրոնային արտանետումը մեծացավ**, ինչը համահունչ է ավելի տաք ու խիտ դեյտերիումային պլազմայի հետ:

Ինչ սա չի ցույց տալիս

- Սա **ֆուզիոն էներգիա, շահավետության շեմ կամ net gain չէ:** Այստեղ ոչինչ ավելի շատ էներգիա չի արտադրել, քան ծախսվել է սարքը աշխատեցնելու համար: Արդյունքը վերաբերում է *պլազմայի տաքացմանը*՝ ֆուզիոն ցիկլի մեկ քայլին, ոչ ռեակտորի էներգետիկ հաշվեկշիռին:
- Ջերմաստիճանը դեռ **մոտ տասն անգամ ցածր է** այրվող պլազմայի համար անհրաժեշտից: 0.72 keV -ը մոտ 8 միլիոն $^{\circ}\text{C}$ է, մինչդեռ դեյտերիում-տրիտիում վառելիքը պահանջում է մոտ **10 keV (ավելի քան 100 միլիոն $^{\circ}\text{C}$)** և միաժամանակ բավարար խտություն $\times$ confinement ժամանակ: ընդհանուր Fusion-ի սեփական հաջորդ milestone-ը **1 keV** է, որն ինքնին դեռ շատ հեռու է ignition-ից:
- **«Տաքացման մեծ մասը սեղմումից է» եզրակացությունը մոդելի վրա հիմնված է**, ոչ ուղիղ չափում: Այն ստացվում է diagnostics-ին հարմարեցված ինտեգրված ֆիզիկական մոդելից, և սեղմումի, Ohmic տաքացումի ու կորուստների միջև բաժանումը վստահելի է այնքանով, որքանով վստահելի է հենց մոդելը:
- Սա **ընկերության նախատպագիր է, ոչ գրախոսված հոդված:** Արդյունքները հայտնում է սարքը կառուցած թիմը, որն իր բիզնեսը կառուցել է այս մոտեցման խոստման վրա: Անկախ գրախոսություն դեռ չկա:
- Նեյտրոնների աճը **էներգետիկորեն օգտակար ֆուզիոն էլք չէ:** Այս պայմաններում դեյտերիումը որոշ նեյտրոններ բնականաբար տալիս է, բայց քանակը շատ ցածր է էներգետիկ օգտագործման համար:
- Արդյունքը ոչինչ չի ապացուցում ընկերության առանձին պնդման մասին, թե **ապագա կայանը հոսանք կմատակարարի ցանցին:** Անկախ լրագրողական

վերլուծությունները այդ հայտարարությանը մեծ զգուշությամբ են վերաբերվել:

Որքա՞ն ուժեղ է ապացույցը

- **Հիմնական պնդումը նեղ է և ստուգելի:** «Մենք սեղմեցինք մագնիսացված պլազման, և այն տաքացավ՝ հիմնականում սեղմումի պատճառով» հենց այն մեխանիզմային փորձն է, որը MTF մոտեցումը պետք է անցնի: Preprint-ը դա հիմնավորում է diagnostics-ով հարուստ shot-երով և բաց ներկայացված էներգետիկ հաշվեկշռի մոդելով: Եթե արդյունքը դիմանա գրախոսությունին, դա կլինի իրական, թեկուզ վաղ, validation այս մոտեցման համար:
- **վերապահումները կառուցվածքային են, ոչ կոսմետիկ:** Տասնմեկ shot, մեկ սարք, մեկ թիմ, դեռ չգրախոսված արդյունք և վերնագիր ջերմաստիճան՝ մոտ մեկ կարգով ցածր այրվող պլազմայից: Իսկ գլխավոր եզրակացությունը՝ տաքացման մեծամասնությունը սեղմումից է, հենվում է մոդելի վրա, հետևաբար գրախոսությունի հիմնական հարցերից մեկը կլինի՝ արդյոք այդ բաժանումը կայուն է:
- **Ազնիվ վիճակը՝ մեխանիզմը ցուցադրված է, էներգետիկ milestone-ը՝ ոչ:** Սա MTF-ն տեղափոխում է «սեղմումը պետք է տաքացնի պլազման» վիճակից դեպի «սեղմումը իրականում տաքացնում է պլազման»: Ավելի մեծ եզրակացություն այս տվյալները չեն տալիս:

Ինչու է սա կարևոր

Մագնիսացված թիրախային ֆուզիայի հետաքրքիր կողմը ոչ թե ռեկորդներն են, այլ հնարավոր տնտեսագիտությունը: Եթե մեխանիկական սեղմումը կարողանա պլազման հասցնել ֆուզիոն պայմանների, տեսականորեն հնարավոր կլինի խուսափել ITER-ի չափի մագնիսներից կամ NIF-ի չափի լազերներից՝ ստանալով ավելի էժան և արագ փորձարկվող ուղի, եթե այն աշխատի: Հենց այդ «եթե»-ն է ամբողջ հարցը, և այն որոշվում է նման ոչ այնքան տպավորիչ checkpoints-երով. սեղմումը իրականում ապահովո՞ւմ է մոդելների խոստացած տաքացումը: LM26-ի առաջին shot-երի պատասխանը զգուշորեն դրական է: Դա արժե նշել հենց այն պատճառով, որ պատասխանը պայմանական է՝ երկար սանդուղքի ընդամենը մեկ աստիճան, ներկայացված այդ սանդուղքը բարձրացող թիմի կողմից, դեռ ոչ անկախ ստուգված և դեռ շատ հեռու վերևից:

Կարճ ամփոփում

ընդհանուր Fusion-ի LM26-ը ներս փուլովող լիթումային liner-ով սեղմեց մագնիսացված դեյտերիումային պլազման և ցույց տվեց, որ այն տաքանում է. էլեկտրոնային

ջերմաստիճանը բարձրացավ ավելի քան երեք անգամ՝ հասնելով մոտ 0.72 keV-ի (718 ± 80 eV, մոտ 8 միլիոն °C): Ընկերության վերլուծությունը տաքացման մեծ մասը վերագրում է հենց սեղմումին՝ այն մեխանիզմին, որի վրա հենվում է magnetized-թիրախմիաձուլում մոտեցումը: Սա տվյալ ֆուզիոն ճանապարհի համար իրական և կոնկրետ ինժեներական քայլ է: Բայց սա նաև մեկ սարքի առաջին 11 shot-երն են, նկարագրված չգրախոսված ընկերության նախատպագիրում, մոտ տաս անգամ ցածր ջերմաստիճանով, քան պետք է այրվող պլազմային, առանց net էներգիայի, շահավետության շեմի կամ էլեկտրաէներգիայի: Մեխանիզմը ցուցադրված է, էլեկտրակայանը՝ ոչ:

Աղբյուրներ

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>