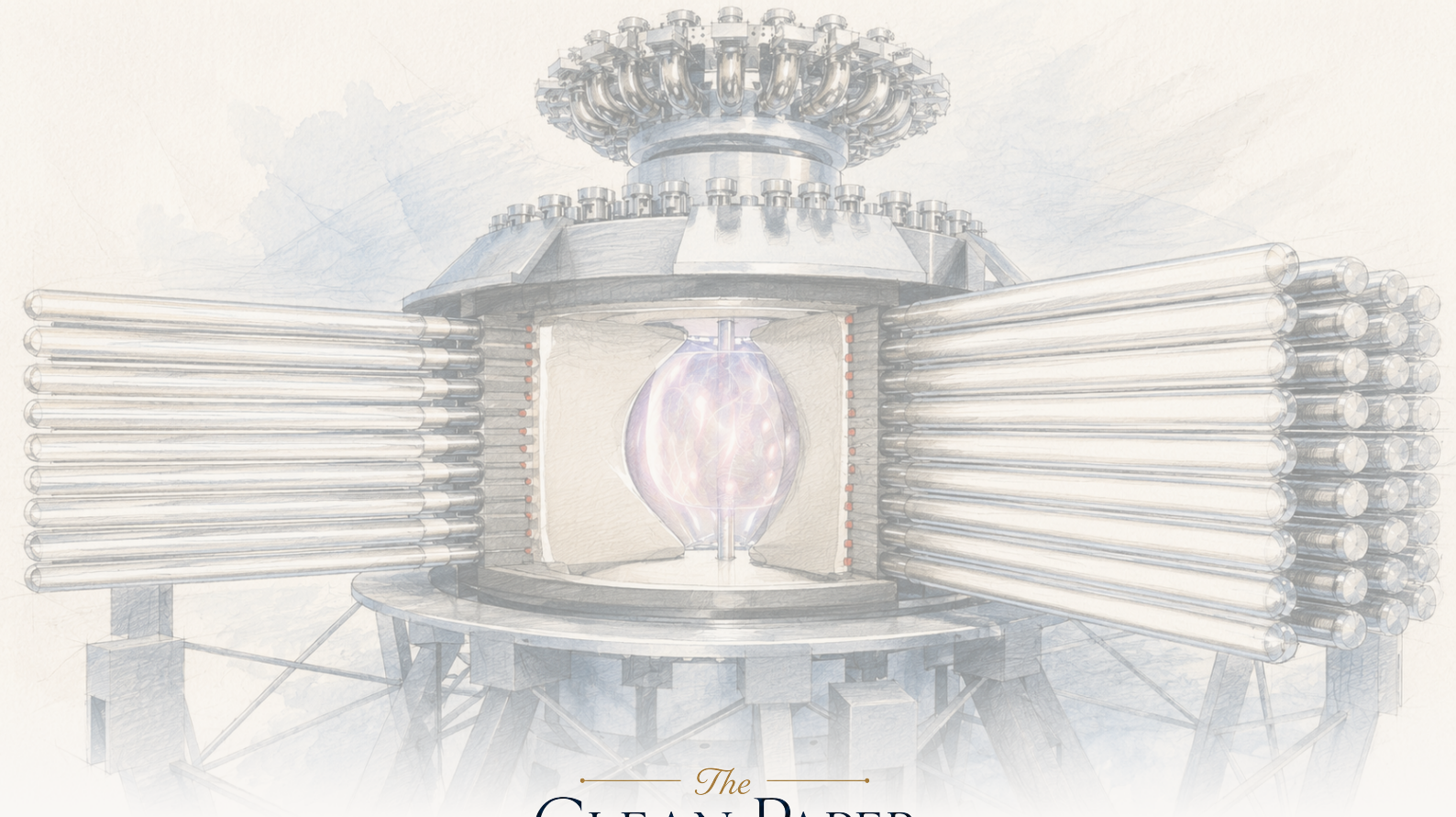


The Clean Paper

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

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

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 ± 80 eV, մոտ 8 միլիոն °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 չգրախոսված 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 էլեկտրակայ

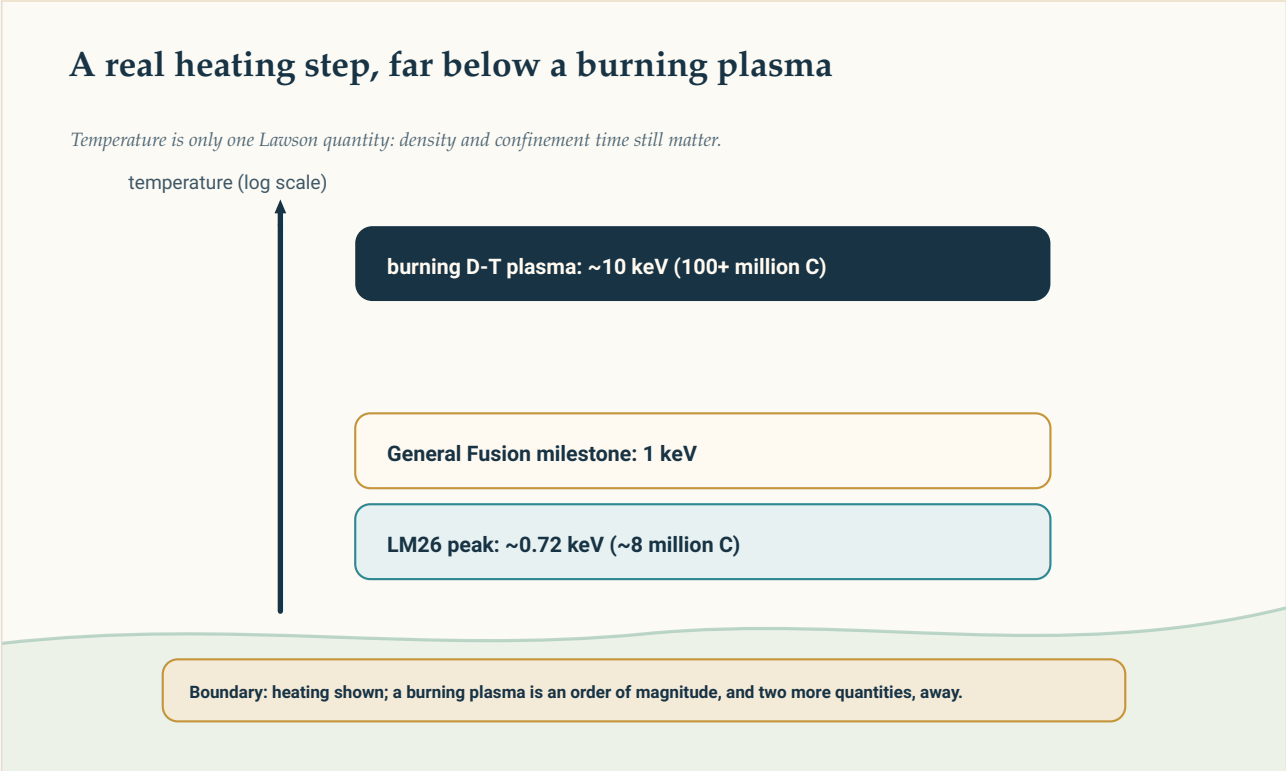
Որպեսզի ֆուզիոն ռեակտորը վերադարձնի ավելի շատ էներգիա, քան ինքն է պահանջում աշխատանքի համար, վառելիքային պլազման միաժամանակ պետք է բավականաչափ տաք, բավականաչափ խիտ և բավական երկար ժամանակ միասին պահված լինի: Այս երեք մեծությունները միասին ֆիզիկոսները կոչում են **Լոուսոնի չափանիշ**: Ֆուզիոն հետազոտությունների 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 խաղադրույք են կատարում երրորդ ճանապարհի վրա՝ **մագնիսացված թիրախային ֆուզիա** (*magnetized թիրախ միաձուլում*, 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 էլեկտրակայան չէ:

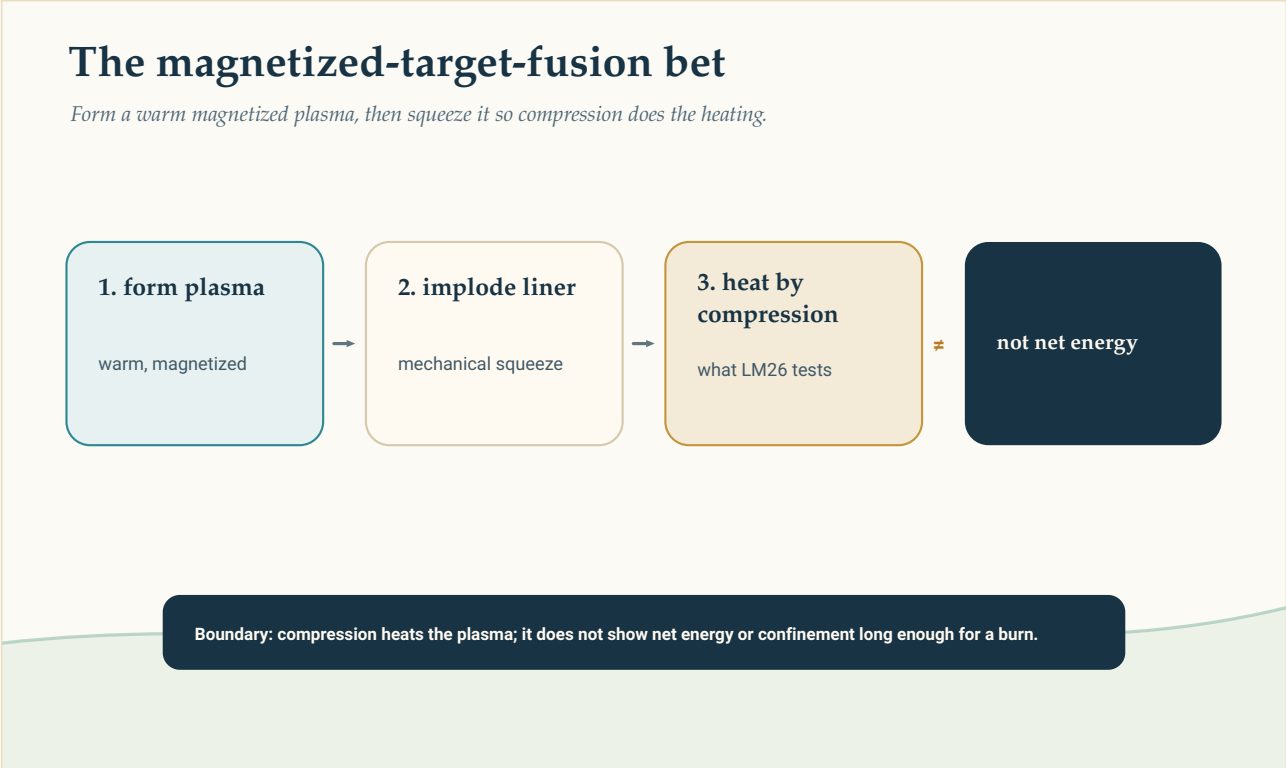
[video pending]

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



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



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 × խտություն × 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** մագնիսացվածթիրախայինֆուզիոն սարքը ընդհանուր Fusion-ում: Գնդաձև տոկամակի դեյտերիումային պլազման ստեղծվում է, ապա ներս է սեղմվում **պինդ լիթիումային liner**-ով՝ մոտավորապես **3× 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**×, էլեկտրոնային խտությունը՝ մոտ **10**×, իսկ պոլոիդալ մագնիսական դաշտը՝ մոտ **10**×՝ 3× շառավղային սեղմումի արդյունքում։ Լավագույն shot-ում Thomson scattering-ով չափված **գագաթային էլեկտրոնային ջերմաստիճանը մոտ 0.72 keV էր**՝ 718 ± 80 eV, այսինքն՝ մոտ 8 միլիոն °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 հաշվեկշռին։
- Ջերմաստիճանը դեռ **մոտ տաս անգամ ցածր է** այրվող պլազմայի համար անհրաժեշտից։ 0.72 keV-ը մոտ 8 միլիոն °C է, մինչդեռ դեյտերիում–տրիտիում վառելիքը պահանջում է մոտ **10 keV (ավելի քան 100 միլիոն °C)** և միաժամանակ բավարար խտություն × 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 ելք 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 փլուզվող լիթիումային 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