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

Тэрмаядзерная ўстаноўка нагрэла плазму, сціскаючы яе — рэальны крок, але яшчэ не электрастанцыя

LM26 кампаніі General Fusion сціснула намагнічаную дэйтэрыевую плазму абалонкай з літыю, якая калапсавала ўнутр, і назірала яе нагрэў — тэмпература электронаў вырасла больш чым утрая да вымеранага піка каля 0,72 keV (718 ± 80 eV, прыкладна 8 мільёнаў °C), прычым большую частку нагрэву прыпісалі самому сціскацню — механізму, ад якога залежыць падыход з намагнічанай мішэнню. Гэта рэальная інжынерная кантрольная кропка на гэтым шляху да сінтэзу. Але гэта таксама толькі першыя 11 імпульсаў на адной машыне, апісаныя ў нерэцэнзаваным прэпрынце кампаніі, пры тэмпературы ўсё яшчэ прыкладна ў дзесяць разоў ніжэйшай за неабходную плазме, здольнай гарэць, — без чыстага энергетычнага выйгрышу, без парытэту і без электраэнергіі. Паказаны механізм, а не пабудавана электрастанцыя.

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

Тэрмаядзерная ўстаноўка нагрэла плазму, сціскаючы яе — рэальны крок, але яшчэ не электрастанцыя

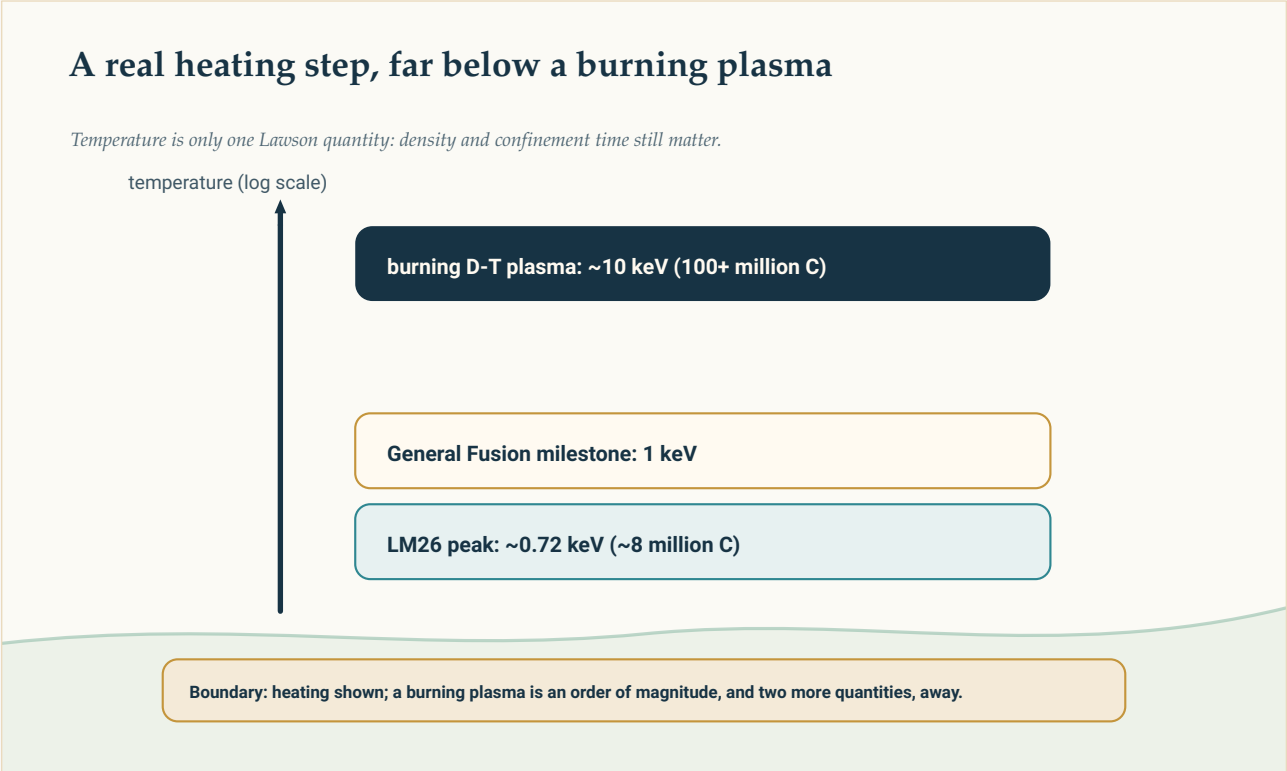
Каб тэрмаядзерны рэактар вяртаў больш энергіі, чым патрабуецца для яго працы, паліўная плазма павінна адначасова быць дастаткова гарачай, дастаткова шчыльнай і ўтрымлівацца дастаткова доўга — гэтыя тры велічыні фізікі аб'ядноўваюць у так званы крытэрый Лоўсана. Большая частка галіны спрабуе дасягнуць гэтага з дапамогай велізарных звышправодных магнітаў (токамакі кшталту ITER) або масіваў гіганцкіх лазераў (інерцыйнае ўтрыманне, як у амерыканскім National Ignition Facility). Меншая група кампаній робіць стаўку на трэці шлях — **магніта-інерцыйны сінтэз з намагнічанай мішэнню** (*magnetized target fusion*, MTF): спачатку стварыць цёплую намагнічаную плазму, а затым вельмі хутка механічна яе *сціснуць*, каб само сціскане нагрэла паліва — падобна да таго, як дызельны рухавік запальвае паліва сціскаеннем, а не іскрай.

У чэрвені 2026 года канадская кампанія **General Fusion** апублікавала вынікі сваёй установкі **Lawson Machine 26 (LM26)**, якія правяраюць, ці сапраўды працуе цэнтральная стаўка гэтага падыходу: ці награвае механічнае сціскане намагнічаную плазму так, як абяцаюць мадэлі? У першых 11 імпульсах са сціскаеннем — сферычна-токамачную дэйтэрыевую плазму сціскала абалонка з *цвёрдага літыю*, якая калапсавала ўнутр, — у найлепшых эксперыментах плазма падчас сціскання станавілася прыкметна гарачэйшай, шчыльнейшай і мацней намагнічанай. Аналіз кампаніі прыпісвае большую частку гэтага нагрэву самому сціскане.

Гэта рэальны і канкрэтны інжынерны вынік для падыходу MTF. Але гэта таксама толькі першая серыя імпульсаў, апісаная ў **прэпрынце кампаніі, які не прайшоў рэцэнзаванне**, пры тэмпературы, усё яшчэ нашмат ніжэйшай за патрэбную плазме, здольнай падтрымліваць тэрмаядзернае гарэнне. Гэта не тэрмаядзерная энергетыка, не энергетычны парытэт і не электрастанцыя.

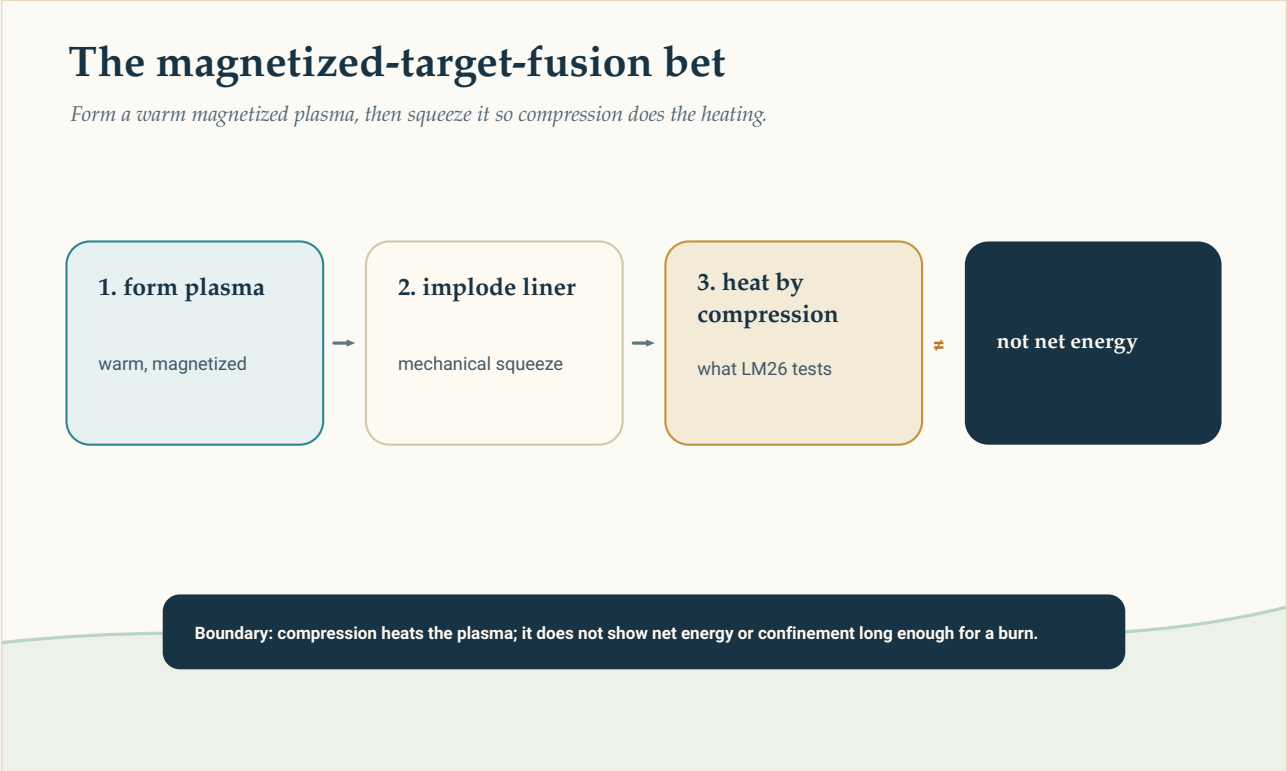
[video pending]

Гэта рэкламныя кадры General Fusion, прыведзеныя толькі для таго, каб паказаць, як выглядае LM26; яны не з'яўляюцца незалежным доказам таго, што ўстаноўка дасягне будучых тэрмаядзерных мэтаў кампаніі.



Шкала тэмператур: прыкладна 0,72 keV у LM26, мэта General Fusion у 1 keV і каля 10 keV, неабходных дэйтэрый-трытыевай плазме для самападтрымліваемага гарэння. Тэмпература — толькі адна з трох велічынь у крытэрыі Лоўсана.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Сінтэз з намагнічанай мішэнню: спачатку фарміруецца цёплая намагнічаная плазма, затым яе сціскае

абалонка, якая калапсуе ўнутр, і менавіта сціскане павінна нагрэць плазму — стаўка на «дызельны» кампрэсійны нагрэў. LM26 правярала, ці награвае сціскане плазму, а не ці дае ўстаноўка чысты выхад энергіі або дастатковы час утрымання.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Што азначаюць «сінтэз з намагнічанай мішэнню», keV і крытэрый Лоўсана

Тэмпературу плазмы ў тэрмаядзернай фізіцы звычайна выражаюць у **кілаэлектронвольтах (keV)**, а не ў градусах: 1 keV адпавядае прыкладна **11,6 мільёна °C**. Дэйтэрый-трытыеваму паліву трэба дасягнуць прыкладна **10 keV** (звыш 100 мільёнаў °C), каб эфектыўна ўступаць у рэакцыі сінтэзу, — але тэмпература толькі адна з трох умоў, якія павінны выконвацца адначасова. **Крытэрый Лоўсана** патрабуе таксама дастатковай **шчыльнасці** і дастатковага **часу ўтрымання**; іх часта аб'ядноўваюць з тэмпературай у адзін «трайны здабытак» (тэмпература × шчыльнасць × час утрымання). Нагрэў плазмы неабходны, але сам па сабе цалкам недастатковы.

Сінтэз з намагнічанай мішэнню (MTF) — прамежкавы шлях паміж двума асноўнымі падыходамі. Замест таго каб доўга ўтрымліваць гарачую плазму велізарнымі магнітамі або амаль імгненна награваць малюсенькую мішэнь лазерамі, MTF стварае намагнічаную плазму, а затым механічна сціскае яе на працягу мікрасекунд. Калі падыход спрацуе, сціскане адначасова будзе награваць плазму і павышаць яе шчыльнасць — патэнцыйна дазваляючы дасягнуць тэрмаядзерных умоў без магнітаў маштабу ITER або лазераў маштабу NIF. Ці сапраўды сціскане забяспечвае такі нагрэў у рэальнай машыне — менавіта гэта і павінен правяраць эксперымент кшталту LM26.

Што зрабілі аўтары

- Пабудавалі і запусцілі **LM26**, устаноўку General Fusion для MTF: спачатку фарміруецца сферычна-токамачная дэйтэрыевая плазма, а затым яе сціскае **абалонка з цвёрдага літыю**, якая рухаецца ўнутр, — прыкладна **трохразовае радыяльнае сціскане**.
- Правялі **першыя 11 імпульсаў са сціскаццем** і абсталявалі іх вялікай колькасцю дыягностык, аднаўляючы ў часе тэмпературу, шчыльнасць і магнітнае поле плазмы і рэгіструючы выпраменьваныя нейтроны, рэнтгенаўскае і бачнае святло, а таксама высакахуткасныя выявы ўзаемадзеяння плазмы са сценкай.
- Пабудавалі **інтэграваную фізічную мадэль**, якая балансуе нагрэў ад сціскання, омічны нагрэў (токам самой плазмы) і страты энергіі на мяжы, а затым параўналі мадэль з вымярэннямі, каб ацаніць, адкуль фактычна паступала цяпло.

Што яны выявілі

- **Плазма награвалася падчас сціскання.** У найлепшых імпульсах тэмпература электронаў вырасла **больш чым утрая**, электронная шчыльнасць — прыкладна **ў 10 разоў**, а паляідальнае магнітнае поле — таксама прыкладна **ў 10 разоў** у выніку трохразовага радыяльнага сціскання. У найлепшым імпульсе артыкул паведамляе пра **пікавую тэмпературу электронаў каля 0,72 keV** (718 ± 80 eV, вымерана томсанаўскім рассейваннем) — прыкладна 8 мільёнаў °C.
- **Большую частку нагрэву прыпісваюць сціскацню.** Інтэграваная мадэль аўтараў заключае, што *большасць* росту тэмпературы забяспечыла менавіта механічнае сціскацне — механізм, ад якога залежыць увесь падыход MTF, — а не омічны нагрэў.
- **Падчас сціскання ўзрасло нейтроннае выпраменьванне**, што ўзгадняецца з больш гарачай і шчыльнай дэйтэрыевай плазмай.

Чаго гэта не паказвае

- Гэта **не** тэрмаядзерная энергія, не энергетычны парытэт і не чысты энергетычны выйгрыш. Тут нішто не вырабіла больш энергіі, чым было выдаткавана на працу ўстаноўкі. Вынік датычыцца *нагрэву плазмы* — аднаго этапу тэрмаядзернага цыклу, — а не энергетычнага балансу рэактара.
- Тэмпература **ўсё яшчэ прыкладна ў дзесяць разоў ніжэйшая**, чым патрэбна плазме, здольнай падтрымліваць гарэнне. Каля 0,72 keV — гэта прыкладна 8 мільёнаў °C; дэйтэрый-трытыеваму паліву патрабуецца парадку **10 keV (звыш 100 мільёнаў °C)** *разам* з дастатковым здабыткам шчыльнасці на час утрымання. Наступная ўласная мэта General Fusion — **1 keV**, а гэта само па сабе ўсё яшчэ далёка ад запальвання.
- Фармулёўка «**большасць нагрэву адбываецца ад сціскання**» — **выснова мадэлі**, а не непасрэднае паказанне прыбора. Яна атрымана з інтэграванай фізічнай мадэлі, падагнанай да дыягнастычных даных; давер да размеркавання паміж кампрэсійным нагрэвам, омічным нагрэвам і стратамі залежыць ад даверу да гэтай мадэлі.
- Гэта **прэпрынт кампаніі, а не рэцэнзаваная праца.** Вынікі паведамляе каманда, якая пабудавала машыну і прыцягвала фінансаванне пад яе перспектывы; незалежнага рэцэнзавання яшчэ не было.
- Рост колькасці нейтронаў **не** азначае энергетычна значнага выхаду сінтэзу. Пры такіх умовах ад дэйтэрыю чакаецца пэўная колькасць нейтронаў, але яна непараўнальна ніжэйшая за ўзровень, карысны для энергетыкі.
- Вынік нічога не кажа пра асобную заяву кампаніі, што **будучая станцыя будзе падаваць электраэнергію ў сетку** — да гэтага сцвярджэння незалежныя аглядальнікі ставяцца з вялікай асцярогай.

Наколькі моцныя доказы

- **Цэнтральнае сцвярджэнне вузкае і правяральнае.** «Мы сціснулі намагнічаную плазму, яна стала гарачэйшай, і большую частку нагрэву выклікала сціскание» — менавіта той тэст механізму, які павінен прайсці падыход MTF. Артыкул падмацоўвае яго добра абсталяванай дыягностыкай серыяй імпульсаў і яўнай мадэллю энергетычнага балансу. Калі вынік вытрымае рэцэнзаванне, гэта будзе сапраўднае, хоць і ранняе, пацвярджэнне падыходу.
- **Агаворкі структурныя, а не касметычныя.** Адзінаццаць імпульсаў, адна машына, адна каманда, адсутнасць рэцэнзавання і загалоўная тэмпература на парадак ніжэйшая, чым у плазмы, здольнай гарэць. Ключавая выснова — *большасць нагрэву ад сціскання* — абапіраецца на мадэль, таму галоўнае пытанне для рэцэнзавання палягае ў тым, наколькі ўстойлівае гэта размеркаванне.
- **Сумленны статус — механізм паказаны, энергетычная вяха не дасягнутая.** Праца крыху зрушвае MTF ад «сціскание *павінна* награваць плазму» да «сціскание *награвае* плазму» — і не далей.

Чаму гэта важна

Самае цікавае ў сінтэзе з намагнічанай мішэнню — эканоміка, а не рэкорды. Калі механічнае сціскание здольнае награваць плазму ў кірунку тэрмаядзерных умоў, патэнцыйна можна абысціся без магнітаў маштабу ITER або лазераў маштабу NIF — атрымаць таннейшы шлях з хутчэйшымі ітэрацыямі, *калі* ён будзе працаваць. Гэтае «калі» — уся гульня, і вырашаецца яно на некідкіх кантрольных кропках кшталту гэтай: ці сапраўды сціскание дае нагрэў, абяцаны мадэлямі? Першыя імпульсы LM26 даюць асцярожнае «так». Менавіта дзякуючы гэтай асцярожнасці вынік і заслугоўвае ўвагі: гэта адна прыступка доўгай лесвіцы, пра якую паведамляюць людзі, што па ёй падымаюцца; ніхто яшчэ незалежна яе не праверыў, а да вяршыні вельмі далёка.

Коратка

LM26 кампаніі General Fusion сціснула намагнічаную дэйтэрыевую плазму абалонкай з літыю, якая калапсавала ўнутр, і паказала яе нагрэў — тэмпература электронаў вырасла больш чым утрая да вымеранага піка каля 0,72 keV (718 ± 80 eV, прыкладна 8 мільёнаў °C). Аналіз кампаніі прыпісвае большую частку нагрэву самому сціскание — механізму, на якім заснаваны яе падыход MTF. Гэта рэальны і канкрэтны інжынерны крок для гэтага шляху да сінтэзу. Але гэта таксама толькі першыя 11 імпульсаў на адной машыне, апісаныя ў нерэцэнзаваным прэпрынце кампаніі, пры тэмпературы прыкладна ў дзесяць разоў ніжэйшай за неабходную плазме, што гарыць, без чыстага энергетычнага выйгрышу, без парытэту і без вытворчасці электраэнергіі. Паказаны

механізм, а не пабудавана электрастанцыя.

Крыніцы

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