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

შერწყმის მოწყობილობამ პლაზმა შეკუმშვით გააცხელა — ეს რეალური ნაბიჯია, მაგრამ ჯერ ელექტროსადგური არა

General Fusion-ის LM26-მა მაგნიტიზებული დეიტერიუმის პლაზმა ჩამოშლილი ლითიუმის ლაინერით შეკუმშა და მისი გათბობა აჩვენა — ელექტრონების ტემპერატურა სამჯერ მეტზე მეტად გაიზარდა და გაზომილმა პიკმა დაახლოებით 0.72 keV-ს (718 ± 80 eV, დაახლოებით 8 მილიონ °C-ს) მიაღწია. კომპანიის ანალიზი გათბობის უმეტესობას თავად შეკუმშვას მიაწერს, ანუ იმ მექანიზმს, რომელზეც მაგნიტიზებული სამიზნის შერწყმის მიდგომაა დამოკიდებული. ეს ამ გზისთვის რეალური საინჟინრო შემოწმებაა. მაგრამ ეს ასევე მხოლოდ პირველი 11 ცდაა ერთ მოწყობილობაზე, აღწერილი კომპანიის ჯერ არარეცენზირებულ პრეპრინტში, და ტემპერატურა წვადი პლაზმისთვის საჭიროზე დაახლოებით ათჯერ დაბალია — წმინდა ენერგიის, breakeven-ისა და ელექტროენერგიის გარეშე. ნაჩვენებია მექანიზმი, არა აშენებული ელექტროსადგური.

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

შერწყმის მოწყობილობამ პლაზმა შეკუმშვით გააცხელა — ეს რეალური ნაბიჯია, მაგრამ ჯერ ელექტროსადგური არა

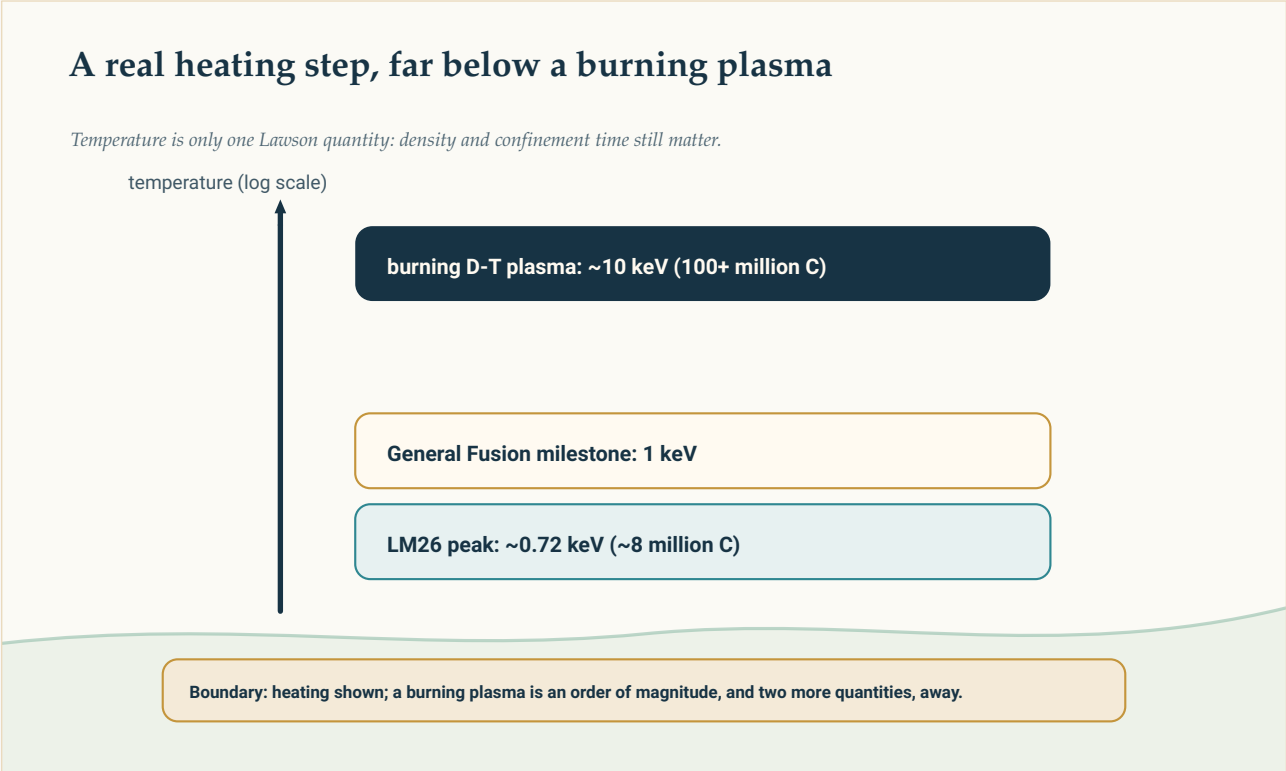
შერწყმის სფეროში ყველა ექსპერიმენტი ერთსა და იმავე ფუნდამენტურ პრობლემას ებრძვის: ატომური ბირთვები იმდენად უნდა გააცხელოთ და ერთმანეთს ისე მიუახლოვოთ, რომ მათ ელექტრულ განზიდვას გადალახონ და შეერწყან. ამის გაკეთების ერთ-ერთი გზა პლაზმის ძლიერი მაგნიტებით დიდი ხნით შეკავებაა; მეორე — პატარა სამიზნის ლაზერებით თითქმის მყისიერად შეკუმშვა. **მაგნიტიზებული სამიზნის შერწყმა (MTF)** შუა გზას ირჩევს: ჯერ ქმნის თბილ, მაგნიტიზებულ პლაზმას, შემდეგ კი მას მექანიკურად კუმშავს, ისე როგორც დიზელის ძრავა საწვავს ნაპერწკლის ნაცვლად შეკუმშვით აალებს.

2026 წლის ივნისში კანადურმა კომპანია **General Fusion**-მა გამოაქვეყნა თავისი **Lawson Machine 26-ის (LM26)** შედეგები, რომლებიც სწორედ ამ ცენტრალურ ვარაუდს ამოწმებს: მართლაც ათბობს თუ არა მაგნიტიზებულ პლაზმას მექანიკური შეკუმშვა ისე, როგორც მოდელები მოითხოვს? პირველ 11 შეკუმშვის ცდაში სფერული ტოკამაკის დეიტერიუმის პლაზმას შიგნით ჩამოშლილი *მყარი ლითიუმის ლაინერი* კუმშავდა. საუკეთესო ცდებში შეკუმშვისას პლაზმა შესამჩნევად უფრო ცხელი, მკვრივი და ძლიერად მაგნიტიზებული გახდა, ხოლო კომპანიის ანალიზი გათბობის უმეტეს ნაწილს უშუალოდ შეკუმშვას მიაწერს.

ეს MTF მიდგომისთვის რეალური და კონკრეტული საინჟინრო შედეგია. მაგრამ ეს ასევე მხოლოდ პირველი ცდებია, აღწერილი **კომპანიის პრეპრინტში, რომელსაც ჯერ რეცენზირება არ გაუვლია**, და მიღებული ტემპერატურა ჯერ კიდევ ბევრად დაბალია, ვიდრე წვადი პლაზმისთვისაა საჭირო. ეს არ არის შერწყმის ენერგია, არც ენერგეტიკული წონასწორობა და არც ელექტროსადგური.

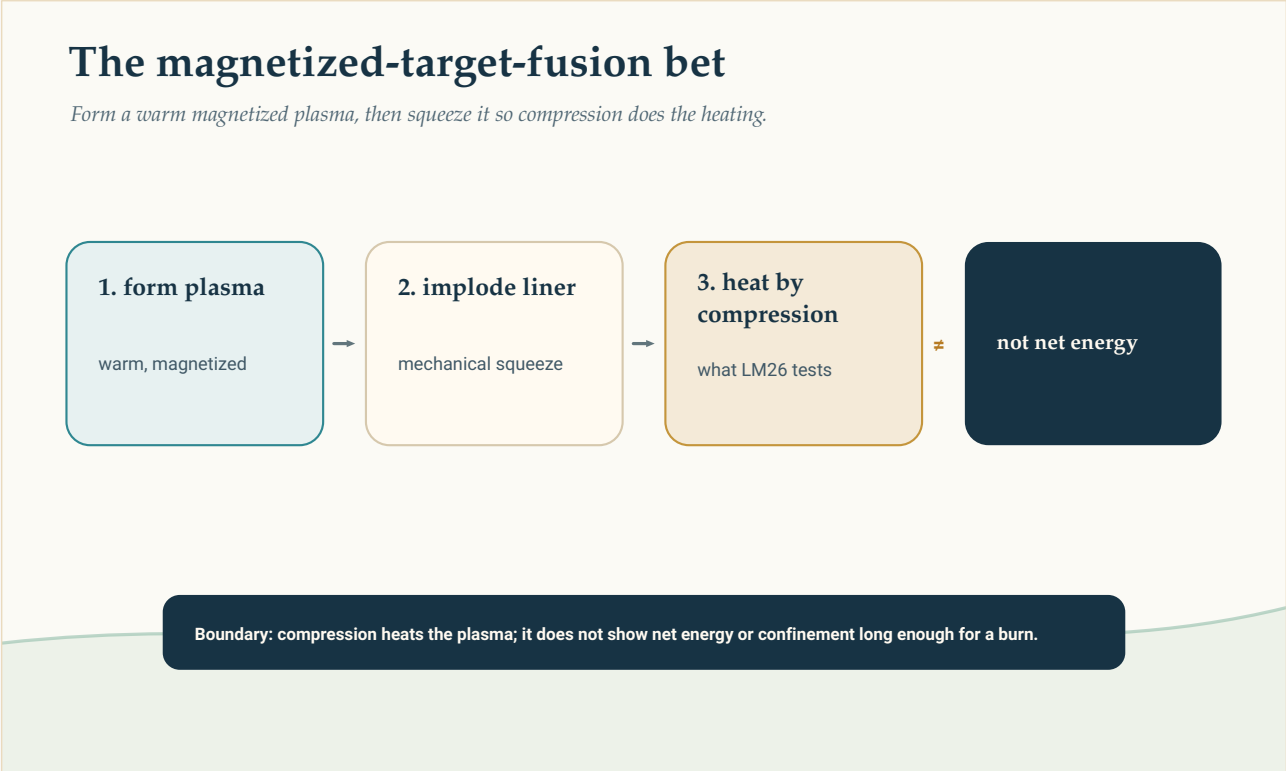
[video pending]

ეს General Fusion-ის სარეკლამო ვიდეომასალაა, რომელიც მხოლოდ იმის საჩვენებლადაა ჩართული, როგორ გამოიყურება LM26; ის დამოუკიდებელი მტკიცებულება არ არის იმისა, რომ მოწყობილობა მომავალ შერწყმის მიზნებს მიაღწევს.



ტემპერატურის სკალა: LM26-ის დაახლოებით 0.72 keV, General Fusion-ის 1 keV-იანი სამიზნე ნიშნული და დაახლოებით 10 keV, რომელიც წვად დეიტერიუმ–ტრიტიუმის პლაზმას სჭირდება. ტემპერატურა ლოუსონის კრიტერიუმის სამი კომპონენტიდან მხოლოდ ერთია.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



მაგნიტიზებული სამიზნის შერწყმა: ჯერ იქმნება თბილი მაგნიტიზებული პლაზმა, შემდეგ კი

ჩამოშლილი ლაინერი მას კუმშავს, რათა სწორედ შეკუმშვამ გააცხელოს — დიზელის ძრავის მსგავსად. LM26 ამოწმებდა, ათბობს თუ არა შეკუმშვა პლაზმას; ის არ ამოწმებდა წმინდა ენერგეტიკულ მოგებას ან საკმარისად ხანგრძლივ შეკავებას.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

რას ნიშნავს „მაგნიტიზებული სამიზნის შერწყმა“, „keV“ და ლოუსონის კრიტერიუმი

შერწყმის ფიზიკაში პლაზმის ტემპერატურას ხშირად **კილოელექტრონვოლტებში (keV)** გამოხატავენ და არა გრადუსებში: 1 keV დაახლოებით **11.6 მილიონ °C-ს** შეესაბამება. დეიტერიუმ–ტრიტიუმის საწვავს ეფექტური შერწყმისთვის დაახლოებით **10 keV** — 100 მილიონ °C-ზე მეტი — სჭირდება, მაგრამ მხოლოდ ტემპერატურა საკმარისი არ არის. **ლოუსონის კრიტერიუმი** მოითხოვს ასევე საკმარის **სიმკვრივეს** და საკმარის **შეკავების დროს**; ეს სამი პარამეტრი ხშირად ერთ „სამმაგ ნამრავლში“ ერთიანდება (ტემპერატურა × სიმკვრივე × შეკავების დრო). პლაზმის გაცხელება აუცილებელია, მაგრამ თავისთავად წარმატებულ რეაქტორს ჯერ ძალიან შორსაა.

მაგნიტიზებული სამიზნის შერწყმა (MTF) ორ მთავარ მიდგომას შორის შუა გზაა. იმის ნაცვლად, რომ ცხელი პლაზმა უზარმაზარი მაგნიტებით დიდხანს შეაკავოს ან პატარა სამიზნე ლაზერებით თითქმის მყისიერად გააცხელოს, MTF ჯერ ქმნის მაგნიტიზებულ პლაზმას და შემდეგ მიკროწამების მასშტაბზე მექანიკურად კუმშავს. თუ მეთოდი იმუშავებს, შეკუმშვა ერთდროულად გაზრდის პლაზმის ტემპერატურასა და სიმკვრივეს — შესაძლოა შერწყმის პირობებს ITER-ის მასშტაბის მაგნიტებისა და NIF-ის მასშტაბის ლაზერების გარეშე მიუახლოვდეს. სწორედ იმის შემოწმებაა საჭირო, რეალურ მოწყობილობაში იძლევა თუ არა შეკუმშვა დაპირებულ გათბობას; LM26-ის მსგავსი ტესტი ამას ამოწმებს.

რა გააკეთეს ავტორებმა

- General Fusion-ში ააგეს და აამუშავეს **LM26**, მაგნიტიზებული სამიზნის შერწყმის მოწყობილობა: იქმნება სფერული ტოკამაკის დეიტერიუმის პლაზმა, რომელსაც შემდეგ შიგნით მოძრავი **მყარი ლითიუმის ლაინერი** დაახლოებით **3-ჯერადი რადიული შეკუმშვით** კუმშავს.
- ჩაატარეს **პირველი 11 შეკუმშვის ცდა** და მრავალფეროვანი დიაგნოსტიკით აღადგინეს პლაზმის ტემპერატურის, სიმკვრივისა და მაგნიტური ველის დროში ცვლილება; ასევე გაზომეს ნეიტრონები, რენტგენული და ხილული გამოსხივება და სწრაფი კამერით გადაიღეს პლაზმისა და კედლის ურთიერთქმედება.
- ააგეს **ინტეგრირებული ფიზიკური მოდელი**, რომელიც შეკუმშვით გათბობას ადარებს ომურ გათბობას — პლაზმის საკუთარი დენის მიერ წარმოქმნილ სითბოს — და საზღვარზე დაკარგულ ენერგიას. შემდეგ მოდელი გაზომილ მონაცემებს

შეუთავსეს, რათა დაედგინათ, რეალურად საიდან მოდიოდა გათბობა.

რა აღმოაჩინეს

- **შეკუმშვისას პლაზმა გაცხელდა.** საუკეთესო ცდებში ელექტრონების ტემპერატურა **სამჯერ მეტზე მეტად** გაიზარდა, ელექტრონების სიმკვრივე — დაახლოებით **10-ჯერ**, ხოლო პოლოური მაგნიტური ველი — დაახლოებით **10-ჯერ**, 3-ჯერადი რადიული შეკუმშვის ფონზე. საუკეთესო ცდაში ნაშრომი აღწერს ელექტრონების **დაახლოებით 0.72 keV**-იან პიკურ ტემპერატურას (Thomson scattering-ით გაზომილი 718 ± 80 eV) — დაახლოებით 8 მილიონ °C-ს.
- **გათბობის უმეტესობა შეკუმშვას მიეწერა.** ინტეგრირებული მოდელის მიხედვით ტემპერატურის ზრდის *უმრავლესობა* თავად მექანიკურმა შეკუმშვამ გამოიწვია — სწორედ იმ მექანიზმმა, რომელზეც MTF მიდგომაა აგებული — და არა ომურმა გათბობამ.
- **შეკუმშვისას ნეიტრონული გამოსხივებაც გაიზარდა**, რაც უფრო ცხელ და მკვრივ დეიტერიუმის პლაზმას შეესაბამება.

რას არ აჩვენებს ეს შედეგი

- ეს **არ არის** შერწყმის ენერგია, ენერგეტიკული წონასწორობა ან წმინდა ენერგეტიკული მოგება. აქ არაფერი გამოუშვებდა იმაზე მეტ ენერგიას, ვიდრე მოწყობილობის მუშაობას დასჭირდა. შედეგი ეხება *პლაზმის გათბობას* — შერწყმის ციკლის ერთ ნაბიჯს — და არა რეაქტორის საერთო ენერგეტიკულ ბალანსს.
- ტემპერატურა **წვადი პლაზმისთვის საჭიროზე ჯერ კიდევ დაახლოებით ათჯერ ნაკლებია**. დაახლოებით 0.72 keV დაახლოებით 8 მილიონ °C-ს უდრის; დეიტერიუმ–ტრიტიუმის საწვავს კი დაახლოებით **10 keV (100 მილიონ °C-ზე მეტი)** და ამასთან საკმარისი სიმკვრივე × შეკავების დრო სჭირდება. General Fusion-ის შემდეგი საკუთარი ნიშნული **1 keV**-ია — ისიც ჯერ შორსაა აალების პირობებისგან.
- „**გათბობის უმეტესობა შეკუმშვისგან მოდის**“ არის **მოდელზე დაფუძნებული დასკვნა** და არა უშუალოდ ხელსაწყოზე წაკითხული სიდიდე. ის მიიღება ინტეგრირებული ფიზიკური მოდელის დიაგნოსტიკურ მონაცემებთან შეჯერებით; შეკუმშვას, ომურ გათბობასა და დანაკარგებს შორის განაწილების სანდოობა იმაზეა დამოკიდებული, რამდენად სანდოა ეს მოდელი.
- ეს არის **კომპანიის პრეპრინტი და არა რეცენზირებული ნაშრომი.** შედეგებს თავად იმ გუნდი აქვეყნებს, რომელმაც მოწყობილობა ააგო და მის დაპირებაზე დაფინანსება მოიზიდა; დამოუკიდებელი რეცენზირება ჯერ არ ჩატარებულა.
- ნეიტრონების ზრდა **ენერგეტიკულად მნიშვნელოვანი შერწყმის გამოსავალი არ არის.** ასეთ პირობებში დეიტერიუმისგან გარკვეული რაოდენობის ნეიტრონები მოსალოდნელია, თუმცა ეს ძალზე შორსაა ელექტროენერგიისთვის გამოსადეგი მასშტაბისგან.

- შედეგი არაფერს ამბობს კომპანიის ცალკე განცხადებაზე, თითქოს **მომავალი სადგური ელექტროენერგიას ქსელს მიაწვდის** — დამოუკიდებელი წყაროები ამ პრეტენზიას დიდი სიფრთხილით ეკიდებიან.

რამდენად ძლიერია მტკიცებულება

- **მთავარი მტკიცება ვიწრო და შემოწმებადია.** „მაგნიტიზებული პლაზმა შევკუმშეთ და ის გაცხელდა, ძირითადად შეკუმშვის გამო“ — სწორედ ის მექანიზმია, რომელიც MTF მიდგომამ უნდა დაამტკიცოს. ნაშრომი ამას მრავალმხრივ დიაგნოსტირებულ ცდებსა და მკაფიო ენერგეტიკულ მოდელს აყრდნობს. თუ შედეგი რეცენზირებას გაუძლებს, ეს მიდგომის რეალური, თუმცა ადრეული, დადასტურება იქნება.
- **შეზღუდვები არსებითია და არა კოსმეტიკური.** თერთმეტი ცდა, ერთი მოწყობილობა, ერთი გუნდი, ჯერ არარეცენზირებული შედეგი და პიკური ტემპერატურა, რომელიც წვადი პლაზმისთვის საჭიროზე დაახლოებით ერთ რიგით ნაკლებია. მთავარი დასკვნა — *გათბობის უმეტესობა შეკუმშვას უკავშირდება* — მოდელზე დგას, ამიტომ რეცენზირების ცენტრალური კითხვა იქნება, რამდენად გამძლეა ეს განაწილება.
- **ყველაზე ზუსტი შეფასებაა: მექანიზმი ნაჩვენებია, ენერგეტიკული ეტაპი კი ჯერ არა.** შედეგი MTF-ს ამოძრავებს მდგომარეობიდან „შეკუმშვამ პლაზმა *უნდა* გააცხელოს“ მდგომარეობისკენ „შეკუმშვა პლაზმას *რეალურად* აცხელებს“ — მაგრამ ამაზე მეტს ჯერ არ ამტკიცებს.

რატომ არის ეს მნიშვნელოვანი

მაგნიტიზებული სამიზნის შერწყმის საინტერესო მხარე რეკორდები კი არა, ეკონომიკაა. თუ მექანიკურ შეკუმშვას პლაზმის შერწყმის პირობებამდე გაცხელება შეუძლია, შესაძლოა ეს გაკეთდეს ITER-ის მასშტაბის მაგნიტებისა და NIF-ის მასშტაბის ლაზერების გარეშე — უფრო იაფი და სწრაფად გასამეორებელი გზით, *თუ* მეთოდი მართლაც მუშაობს. სწორედ ეს „თუ“ არის მთავარი, და ის ისეთ არაგლამურულ შემოწმებებზეა დამოკიდებული, როგორიც ესაა: ნამდვილად იძლევა შეკუმშვა იმ გათბობას, რასაც მოდელები გვპირდება? LM26-ის პირველი ცდების პასუხი პირობითი „კი“ არის. სწორედ იმიტომ ღირს ამის აღნიშვნა, რომ პასუხი პირობითია — გრძელი კიბის ერთი საფეხური, აღწერილი იმ ადამიანების მიერ, რომლებიც ამ კიბეზე ადიან, ჯერ სხვების მიერ შეუმოწმებელი და მწვერვალიდან ძალიან შორს.

მოკლე შეჯამება

General Fusion-ის LM26-მა მაგნიტიზებული დეიტერიუმის პლაზმა ჩამოშლილი ლითიუმის ლაინერით შეკუმშა და მისი გათბობა აჩვენა — ელექტრონების ტემპერატურა სამჯერ მეტზე მეტად გაიზარდა და გაზომილმა პიკმა დაახლოებით 0.72 keV-ს (718 ± 80 eV, დაახლოებით 8 მილიონ °C-ს) მიაღწია. კომპანიის ანალიზი გათბობის უმეტეს ნაწილს თავად შეკუმშვას მიაწერს, ანუ იმ მექანიზმს, რომელზეც მისი მაგნიტიზებული სამიზნის შერწყმის მიდგომაა დამოკიდებული. ეს ამ გზისთვის რეალური და კონკრეტული საინჟინრო ნაბიჯია. მაგრამ ის ასევე მხოლოდ პირველი 11 ცდაა ერთ მოწყობილობაზე, აღწერილი კომპანიის ჯერ არარეცენზირებულ პრეპრინტში, და მიღებული ტემპერატურა წვადი პლაზმისთვის საჭიროზე დაახლოებით ათჯერ დაბალია — წმინდა ენერგიის, breakeven-ის ან ელექტროენერგიის გარეშე. ნაჩვენებია მექანიზმი, არა აშენებული ელექტროსადგური.

წყაროები

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