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

Ohut, puoliksi sula ensimmäinen kuori: malli, jossa törmäykset — eivät sisäinen lämpö — hallitsivat hadeeista eonia

Maan ensimmäisestä eonista, hadeeisesta, jäi lähes olematon kivirekisteri. Tämä mallinnustutkimus kysyy, millainen kuori olisi ollut, kun törmäyksiä ei enää jätetä huomiotta. Satunnaista ja ajan myötä vähenevää törmäysvirtaa kuvaavalla mallilla sekä vertailutestatuilla kuoren ja vaipan lämpövirtaussimulaatioilla kirjoittajat löytävät, että törmäysten tuoma lämpö olisi ylittänyt Maan koko sisäisen lämmön vähintään kertaluokalla suurimman osan hadeeisesta eonista. Se olisi pitänyt kuoren ohuena (alle ~5 km) ja osittain sulana jo muutaman kilometrin syvyydellä — kirjoittajien mukaan liian heikkona laattatektoniikalle ja taipuvaisena kierrättämään itseään takaisin vaippaan, mikä selittäisi vähäisen hadeeisen aineksen säilymisen. Kun törmäykset vähenivät ~3.9 Ga:n jälkeen (noin 3.9 miljardia vuotta sitten), pysyvää mannerta saattoi muodostua juuri silloin, kun vanhimmat säilyneet felsiset kivet ilmestyvät — kirjoittajien varovaisin sanoin 'todennäköisesti ei sattumaa'. Koska he käyttivät tarkoituksella konservatiivista, alarajan lämmitystä, laadullinen tulos on vakaa, vaikka tarkat luvut eivät ole lukittuja. Kyse on vahvasta ja johdonmukaisesta mallista Maan lapsuudesta — ei sen suorasta havainnosta.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Impact heating and the hidden Hadean*, Tim E. Johnson, Craig O'Neill, Simon Turner, Christopher L. Kirkland, Science (2026), 392:1408-1412 · DOI: 10.1126/science.aeb5402

Maan tarinan luku, josta ei juuri jäänyt sivuja

Maa on ainoa tuntemamme planeetta, jolla on mantereita — kelluvaa, piirikasta maata, jolla kaikki elämme. Silti mantereiden alkuperä on yksi geologian vanhimmista ratkaisemattomista ongelmista, julmasta syystä: näyttö on lähes kokonaan kadonnut.

Maan ensimmäinen eoni, hadeeinen eoni, ulottuu planeetan synnystä noin 4.03 miljardin vuoden taakse (Ga). Tuosta ensimmäisestä puolesta miljardista vuodesta ei juuri mitään ole säilynyt. Vanhimmat ehjät felsiset eli mannermaiset kivet ovat noin 4.03 Ga vanhoja. Muutamat harvinaiset basalttikivet yltävät ~4.2 Ga:han. Vanhin minkäänlainen materiaali on hajallinen joukko zirkonikiteitä — kuuluisimpina Länsi-Australian Jack Hillsin kiteet — joiden iäksi on mitattu 4.4 Ga. Tässä on koko Maan lapsuuden arkisto: kourallinen paikkoja ja hiekanjyvän kokoisia mineraaleja.

Tämä tutkimus ei lisää arkistoon uutta kiveä. Se tekee jotain muuta: rakentaa fysikaalisen mallin siitä, miltä hadeeinen kuori olisi näyttänyt näillä fysiikan säännöillä, ja kysyy asian, jonka useimmat varhaisen Maan mallit jättävät pois. Mitä tapahtuu, kun ei enää sivuuteta sitä, että varhaista Maata pommitettiin jatkuvasti?

Kirjoittajien vastaus on hätkähdyttävä. Suurimman osan hadeeisesta eonista törmäysten tuoma lämpö olisi hukuttanut alleen kaiken Maan sisäisen lämmön ja pitänyt kuoren ohuena ja puoliksi sulana — heidän mukaansa liian heikkona nykyisen kaltaiselle laattatektoniikalle. Tämä on malli, ei muisto. Mutta se on malli, joka yrittää kerrankin ottaa huomioon kuvaamansa aikakauden väkivaltaisuuden.

A model of the Hadean, not a memory of it

The logic is thermal: impacts heat, crust melts, the archive erases itself.

Energy

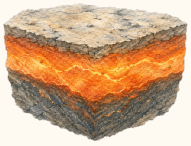
Impact heat dominates

At least an order of magnitude larger than internal heat for much of the Hadean.

Consequence

Thin, shallowly molten crust

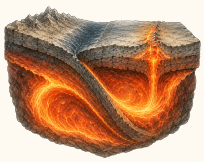
<5 km crust; >30% melt near 5 km in the model.



Record

Most crust recycles

Rare survivors: zircons and oldest rocks.



Around the 4.0-3.9 Ga transition, lasting crust appears.

Törmäyslämpö hallitsee mallin energiataseita, ohut ja matalalla osittain sula kuori kierrättää itseään ja pysyvä mannerkuori ilmestyy vasta noin 4.0–3.9 Ga:n siirtymässä. Kyse on hadeeisen eonin mallista, ei suorasta

muistosta siitä.

The Clean Paper CC BY 4.0

Mitä kirjoittajat tekivät

Ryhmä yhdisti kolme osatekijää, joita yleensä käsitellään erillään.

Ensimmäinen oli **törmäysvirran stokastinen malli** — asteroidien ja suurempien kappaleiden sade sisäiseen Aurinkokuntaan hadeeisen ja varhaisen arkeeisen eonin aikana. Ratkaisevasti kyse ei ole vanhasta ajatuksesta yhdestä ”Late Heavy Bombardment” -piikistä. Virta on aluksi voimakas ja **vähenee ajan myötä**, ja suuret törmäykset saapuvat satunnaisesti (stokastisesti) eivätkä aikataulutettuina. Malli on skaalattu Kuun ja sisäisen Aurinkokunnan törmäystilastoista ja valittu yhteensopivaksi zirkonien ikäjakaumien ja käytettävissä olevan paleomagneettisen näytön kanssa.

Toinen osa oli **geodynaaminen simulointi** siitä, miten lämpö liikkuu kuoren ja ylävaipan läpi. He käyttivät vertailutestattua lattice-Boltzmann-koodia (Planet_LB) ja ajoivat sekä yksinkertaisia 1D-lämpötila–syvyyslaskuja että täydellisiä 2D-konvektiokuvia vaipasta ajalta 4.1 Ga. Mukana ovat tavalliset sisäiset lämmönlähteet — radioaktiivinen hajoaminen ja ytimen lämpö — sekä tärkeänä lisänä **magmaattinen advektio**: nousevan sulan ylöspäin kuljettama lämpö, jonka useimmat kuoren lämpömallit jättävät pois.

Kolmas osa oli realistisen varhaisen kuoren **faasitasapainomallinnus** — Nuvvuagittuqin vihreäkivivyöhykkeen hydratoitu hadeeinen metabasaltti — jolla määritettiin, missä lämpötilassa ja syvyydessä tällainen kivi alkaisi sulaa.

Yksi metodologinen valinta ratkaisee, miten koko paperia kannattaa lukea: kirjoittajat pinosivat tarkoituksella kortit *omaa johtopäätöstään vastaan*. He olettivat ”ei-kondriittisen” vaipan (vähemmän lämpöä tuottavaa radioaktiivista ainetta kuin kondriittisessa vertailussa), jonka sisäinen lämmitys oli alle puolet vakiomallista, käyttivät konservatiivisia lämmitysnopeuksia ja jättivät nuoren, lähellä olleen Kuun vuorovesilämmityksen kokonaan pois. Siksi lasketut kuoren lämpötilat ovat **minimejä** — alarajoja. Jos jotakin, todellinen hadeeinen Maa oli mallia kuumempi.

Mitä he löysivät

Törmäykset, eivät sisäinen lämpö, hallitsivat hadeeisen eonin energiatasetta. Ajan yli integroituna törmäyslämpö ylittää sisäisen osuuden valtavasti — vähintään kertaluokalla suurimman osan hadeeisesta eonista. Tässä kuvassa törmäyslämmitys, ei radioaktiivinen hajoaminen, on varhaisen tektonismin päämoottori, ja sen rooli pienenee vähäiseksi vasta noin **3.9 Ga** jälkeen.

Lämpö piti kuoren ohuena ja matalalta sulana. Ilman törmäyksiä ja sulan advektiota malli tuottaa hadeeisen kuoren, joka on osittain sula vasta noin 10–15 km:n syvyyden alapuolella. Kun törmäyslämpö lisätään, sulamisvyöhyke nousee dramaattisesti: kuori on osittain sula jo **muutaman kilo-**

metrin syvyydellä (noin 2–5 km:n alapuolella). Noin 5 km:n syvyydessä mallit ennustavat yli 30% sulaa — tilaa, jossa kivi on liian heikko pysyäkseen jäykkänä laattana. 5–10 km:n syvyydessä ~1000–1100°C lämpötilat merkitsevät laajaa sulamista lähes koostumuksesta riippumatta. Säilynyt kiinteä kuori olisi ollut **ohut, alle noin 5 km**.

Puoliksi sula kuori pyyhkii itsensä pois. Laaja sulaminen antaa tiheän, rauta- ja magnesiumrikkaan aineksen vajota ja erottua samalla kun kevyemmät, piipitoiset sulat nousevat. Ajan myötä tämä vie kuoren keskimääräistä koostumusta kehittyneempään ja piipitoisempaan suuntaan — ja tuottaa sellaista felsistä sulaa, josta zirkoni voi kiteytyä. Lähes koko ohut kuori olisi sitten kierrätetty takaisin konvektoivaan vaippaan, mikä sopii kemialliseen eli isotooppiseen aineistoon. Tässä mallissa hadeeisten kivien lähes täydellinen puuttuminen ei ole aukko aineistossa — se on *ennuste*. 4.2 Ga:n kivet ja 4.4 Ga:n zirkonit ovat harvinaisia selviytyjiä kuoresta, joka tuhoutui lähes yhtä nopeasti kuin syntyi.

Pommituksen loppu osuu yhteen ensimmäisten kestävien mantereiden kanssa. Kun pommitus väheni 4.0–3.9 Ga:n siirtymän aikana, kuori saattoi vihdoin paksuuntua ja säilyä. Vanhimmat säilyneet mannerkivet ilmestyvät suunnilleen samassa siirtymässä. Kirjoittajat muotoilevat asian varovasti: se, että pysyvä mannerkuori ilmaantui tähän aikaan, on ”todennäköisesti ei sattumaa”.

Heidän tärkein johtopäätöksensä: näissä oloissa — ohut kuori, joka on sula muutaman kilometrin syvyydessä — **hadeeinen laattatektoniikka on epätodennäköistä**.

He näyttävät myös, miksi aikaisempi työ päätyi vastakkaiseen johtopäätökseen. Aiemmissa stokastisia törmäyksiä koskevissa tutkimuksissa vaikutus jäi pieneksi ja alle 2.5% kuoresta oli milloinkaan sulana. Niistä puuttui kaksi asiaa, jotka tämä työ sisältää: suurten törmäysten globaali vaikutus syvän vaipan sulamiseen sekä nousevan magman tuoma lämmönkuljetus. Kun nämä palautetaan mukaan, lämpökuva muuttuu rajusti.

Miksi malli ei ole muisto

Kaikki edellä oleva on simulaatioiden tulosta, ei hadeeisista kivistä otettua mittausta — koska noita kiviä ei lähes enää ole olemassa. Se ei tee tuloksesta heikkoa, mutta määrää, millainen tulos se on.

Ketju kulkee näin: törmäysvirran *malli* syöttää vaipan ja kuoren lämpövirtauksen *mallia*, jota verrataan tietyn kivilajin sulamisen *malliin*. Jokainen lenkki perustuu fysiikkaan ja on mahdollisuuksien mukaan vertailutestattu — mutta kokonaisuus on johdonmukainen argumentti siitä, miltä hadeeisen eonin *täytyi* näyttää uskottavalla fysiikalla, ei mittaus siitä, miltä se *todella* näytti.

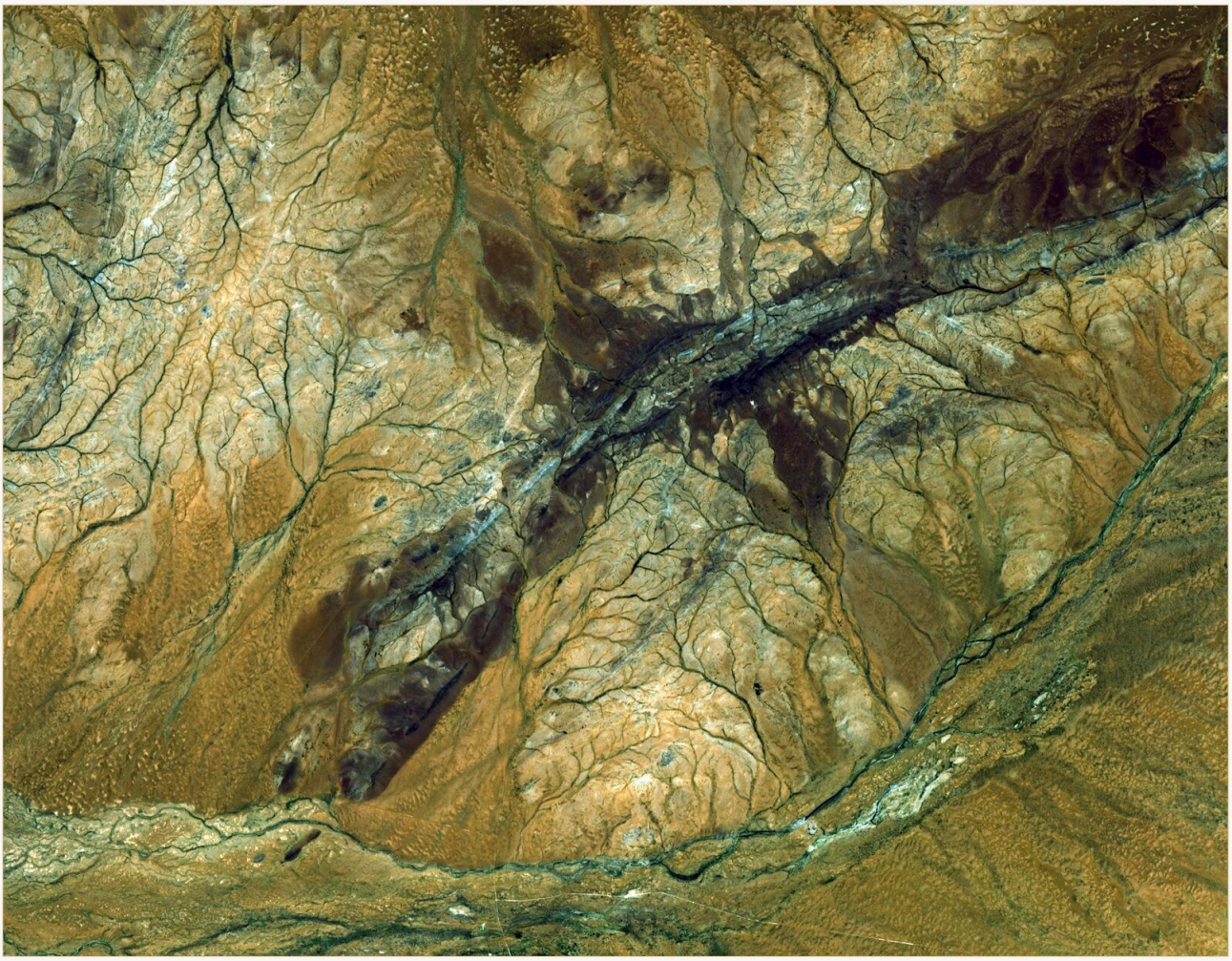
Siksi kirjoittajien konservatiiviset oletukset merkitsevät enemmän kuin ensi silmäyksellä. Koska he valitsivat lämmityksen alarajan ja saivat silti laajalti sulan matalan kuoren, laadullinen johtopäätös — hadeeinen kuori oli kuuma ja heikko — on vakaa valinnoille. Mitä tämä *ei* lukitse, ovat täsmälliset luvut: geotermit, sulamisosuudet ja kuoren tarkka paksuus. Tuloksen suuntaa kannattaa pitää vahvana, desimaaleja alustavina.

Mitä tämä *ei* osoita

- Se **ei** havainnoi hadeeista kuorta suoraan. Tältä aikakaudelta ei juuri ole kiveä; kyse on mallinnustuloksesta siitä, mitä fysiikka merkitsee, ei mittauksesta.
- Se **ei** nojaa ”Late Heavy Bombardment” -ajatukseen. Käytetty törmäysvirta vähenee ajan myötä ja on stokastinen — malli ei tarvitse eikä oleta äkillistä pommituspiikkiä.
- Se **ei** ratkaise laattatektoniikkakiistaa. ”Epätodennäköinen” on tässä vahva ja fysikaalisesti perusteltu päätelmä kuumaa stagnant-lid- tai squishy-lid-varhaismaata kohti, mutta hadeeisen eonin tektoninen tila on aidosti kiistanalainen.
- Se **ei** osoita, että törmäykset *aiheuttivat* mantereiden ilmaantumisen 4.0–3.9 Ga:n siirtymän aikaan. Ajoituksen osuma on vahva yhteys, jota kirjoittajat itse kutsuvat ”todennäköisesti ei sattumaksi” — huolellista kieltä vaikuttavalle korrelaatiolle, ei osoitetulle syy-yhteydelle.
- Jack Hillsin zirkonit **eivät** ole säilyneitä mantereita. Ne ovat harvinaisia säilyneitä rakeita, jotka osoittavat felsisen aineksen ja veden olemassaolon varhain; mallin koko ajatus on, että niitä tuottanut kuori kierrätettiin enimmäkseen pois.
- Se **ei** rekonstruoi varhaisen Maan täydellistä historiaa. Simulaatiot ovat idealisoituja — 1D-profiileja ja 2D-päiväntasaajaleikkauksia, joissa törmäykset on rajattu päiväntasaajan lähelle ja jotka ovat ajallisia tilannekuvia — eivät planeetan täydellinen nelidimensionaalinen malli.

Kuinka vahvaa näyttö on?

Keskeisestä väitteestä — että törmäyslämmitys oli ensimmäisen kertaluokan vaikutus hadeeiseen kuoreen pitäen sen ohuena ja matalalta sulana — argumentti on johdonmukainen ja tärkeällä tavalla konservatiivinen. Se käyttää vertailutestattua geodynamiikkakoodia, fysikaalisesti järkeviä syötteitä ja alaraja-oletuksia ja lisää lämmönlähteen, jonka useimmat aiemmat mallit yksinkertaisesti jättivät pois. Se saa uskottavuutta myös selittämällä kerralla kaksi sitkeää havaintoa: miksi lähes mitään ~4 Ga:ta vanhempaa kiveä ei säily (lähes täydellinen kierrätys) ja miksi pysyvä kuori ilmestyy juuri pommituksen hiipuessa.



Jack Hills Länsi-Australiassa NASA:n ASTER-instrumentin kuvaamana. Alueen zirkoneihin kuuluu vanhimpia tunnettuja Maan varhaisesta kuoresta säilyneitä aineksia — pieniä vihjeitä eonista, jonka kivet suurelta osin pyyhkiytyivät pois.

NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team fair-use

Rajat ovat yhtä selvät, ja ne ovat kaikkien näin syvää aikaa käsittelevien mallien rajoja: mallien päälle rakennetaan malleja, harvan kivirekisterin ankkuroimana, ja lainattavin johtopäätös — ”laattatektoniikka on epätodennäköistä” — on päätelmä, ei havainto. Oikea suhtautuminen on pitää tätä vahvana, hyvin perusteltuna hypoteesina, joka kehystää hadeeisen eonin uudelleen ja kutsuu muita testaamaan sen oletuksia — erityisesti törmäysvirtamallin valintaa — eikä suljettuna tapauksena.

Hyödyllisin yhteenveto ei ole ”tällainen hadeeinen Maa oli” eikä ”se on vain simulaatio”. Se on: uskottavalla ja konservatiivisella fysiikalla voimakkaasti pommitetulla varhaisella Maalla olisi ollut ohut, puoliksi sula ja itseään kierrättävä kuori — ja yksi ajatus selittää yllättävän paljon siitä vähästä, minkä voimme oikeasti nähdä.

Miksi tämä on tärkeää

Varhaisesta Maasta on tapana piirtää kaksi äärikuvaa: lähes nykyisen kaltainen rauhallinen, laattatektoninen vesimaailma tai helvetillinen laavaplaneetta. Tämä työ hahmottelee täsmällisen, fysikaalisesti motivoidun välimuodon: kuori oli ohut ja suli toistuvasti uudelleen muutaman kilometrin syvyydestä alkaen, tuhoutui ja rakentui jatkuvasti uudelleen, ja ehtoja määräsi sisäisen lämmön sijaan törmäyslämmitys.

Uudelleenkehystys tekee oikeaa työtä. Se tarjoaa yhden mekanismin kahdelle Maan lapsuuden suurimmalle tosiasialle — kivirekisterin lähes täydelliselle puuttumiselle ja ensimmäisten kestävien mantereiden ajoitukselle — ja nostaa usein sivuutetun prosessin, törmäyslämmityksen, tarinan keskelle. Jos malli kestää, se muuttaa tapaamme ajatella sitä, milloin Maa ylipäätään muuttui vakaiden mantereiden planeetaksi, ja ajatus ulottuu muihin kiviplaneettoihin, jotka muodostuivat omien pommitustensa alla.

Mikään tästä ei edellytä, että malli olisi viimeinen sana. Sen pitää olla vain riittävän hyvä hypoteesi testattavaksi — ja sitomalla itsensä säilyneeseen zirkoni- ja isotooppirekisteriin se on sitä. Otsikon ”hidden Hadean” on juuri pointti: aikakausi, johon pääsemme enimmäkseen vain mallintamalla, koska aikakausi pyyhki oman aineistonsa pois.

Tiivistelmä

Maan ensimmäisestä eonista, hadeeisesta (ennen ~4.03 Ga), jäi lähes olematon kivirekisteri. Tämä mallinnustutkimus kysyy, millainen kuori olisi ollut, kun mukaan otetaan yleensä pois jätetty lämmönlähde: törmäykset. Stokastista ja vähenevää törmäysvirtaa kuvaavan mallin sekä vertailutestattujen 1D- ja 2D-kuori- ja vaippalämpösimulaatioiden (mukaan lukien nousevan sulan kuljettama lämpö) perusteella kirjoittajat löytävät, että ajan yli integroitu törmäyslämpö olisi ylittänyt Maan koko sisäisen lämmön vähintään kertaluokalla suurimman osan hadeeisesta eonista. Seurauksena on ohut kuori (alle ~5 km), joka on osittain sula jo muutaman kilometrin syvyydellä ja ~5 km:n syvyydessä yli 30% sula — liian heikko ylläpitämään laattatektoniikkaa, jota kirjoittajat kutsuvat hadeeisessa eonissa epätodennäköiseksi. Tällainen kuori kierrättyisi suurelta osin takaisin vaippaan, mikä selittäisi vähäisen hadeeisen aineksen säilymisen; kun törmäykset vähenivät 4.0–3.9 Ga:n siirtymässä, pysyvä mannerkuori saattoi muodostua suunnilleen silloin, kun vanhimmat säilyneet felsiset kivet ilmestyvät — ”todennäköisesti ei sattumaa”. Koska kirjoittajat käyttivät tarkoituksella konservatiivista alarajalämmitystä, laadullinen tulos on vakaa, vaikka tarkat luvut eivät ole lukittuja. Kyse on vahvasta ja johdonmukaisesta mallista Maan lapsuudesta — ei suorasta havainnosta.

Realistinen arvio

Mitä paperi osoittaa: Fysikaalisesti perustelluissa simulaatioissa, joissa törmäyslämmitys ja magmaattinen lämmönkuljetus otetaan mukaan, hadeeinen kuori on ohut ja osittain sula jo muutaman kilometrin syvyydessä, törmäyslämmön eikä sisäisen lämmön hallitsema, suurelta osin takaisin vaippaan kierrätetty ja — tämän mallin mukaan — kykenemätön ylläpitämään laattatektoniikkaa.

Mikä on uskottavaa mutta ei osoitettu: Että törmäykset ovat syy pysyvien mantereiden ilmaantumiseen noin 3.9 Ga; että hadeeinen Maa oli stagnant-lid- tai squishy-lid-maailma varhaisen laattatektoniikan sijaan; että lähes kaiken hadeeisen kiven katoaminen johtuu nimenomaan sulan kuoren kierrättämisestä.

Mitä se ei osoita: Hadeeisen kuoren suoraa mittausta; ratkaistua vastausta laattatektoniikkakiistaan; osoitettua syy-yhteyttä pommituksen hiipumisen ja ensimmäisten mantereiden välillä; että Jack Hillsin zirkonit edustavat säilyneitä mantereita; täydellistä varhaisen planeetan mallia.

Tärkeimmät rajoitukset: Hadeeista kivirekisteriä ei juuri ole, joten tulos on hyvin vähäisen datan rajoittama malli; se pinoaa malleja mallien päälle (törmäysvirta → geodynamiikka → faasitasapainot); itse törmäysvirta on edustava mutta epävarma valinta; simulaatiot ovat idealisoituja (1D- ja 2D-päiväntasaajaleikkauksia, ajallisia tilannekuvia). Konservatiiviset alaraja-oletukset vahvistavat laadullista johtopäätöstä mutta eivät tee yksittäisistä geotermeistä täsmällisiä.

Kuinka paljon luottamusta tavallisella lukijalla pitäisi olla? Paljon siihen, että uskottavalla fysiikalla voimakkaasti pommitetulla varhaisella Maalla olisi ollut kuuma, ohut ja matalalta sula kuori. Kohtalaisesti siihen, että tämä tekee hadeeisesta laattatektoniikasta epätodennäköistä ja selittää puuttuvan kivirekisterin. Vähän väitteisiin, että tämä *todistaisi* mantereiden syntytavan tai tarkan ajankohdan — kyse on vahvasta, konservatiivisesta hadeeista eonia uudelleen kehystävästä mallista, ei suorasta katseesta siihen.

Lähteet

Johnson, O'Neill, Turner & Kirkland, Science 392:1408-1412 (2026)
https://doi.org/10.1126/science.aeb5402