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

Kerak pertama yang nipis dan separa cair: model di mana hentaman, bukan haba dalaman, menguasai Hadean

Eon pertama Bumi, Hadean, hampir tidak meninggalkan rekod batuan. Kajian pemodelan ini menanyakan bagaimana rupa kerak apabila hentaman tidak lagi diabaikan. Dengan model fluks hentaman stokastik yang menurun dan simulasi aliran haba kerak serta mantel yang telah ditanda aras, para penulis mendapati haba hentaman akan melebihi seluruh haba dalaman Bumi sekurang-kurangnya satu order magnitud sepanjang sebahagian besar Hadean, meninggalkan kerak nipis (di bawah ~5 km) yang separa cair hanya beberapa kilometer ke bawah — terlalu lemah, menurut mereka, untuk tektonik plat, dan cenderung dikitar semula ke mantel, yang akan menjelaskan mengapa begitu sedikit bahan Hadean terselamat. Apabila hentaman reda selepas ~3.9 Ga (kira-kira 3.9 bilion tahun lalu), kerak benua berkekalan boleh terbentuk, tepat ketika batuan felsik tertua yang masih wujud muncul — 'kemungkinan besar bukan kebetulan,' dalam kata-kata berhati-hati para penulis. Oleh sebab mereka sengaja menggunakan pemanasan konservatif had bawah, hasil kualitatifnya kukuh walaupun angka tepat tidak tetap. Ini model kuat dan koheren tentang zaman bayi Bumi — bukan pemerhatian langsung.

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

Bab sejarah Bumi yang hampir tiada halaman tersisa

Bumi ialah satu-satunya planet yang kita tahu mempunyai benua — daratan kaya silika dan terapung yang kita diami. Namun bagaimana benua pertama terbentuk ialah salah satu masalah tertua yang belum selesai dalam geologi, atas sebab yang kejam: hampir semua buktinya sudah hilang.

Eon pertama Bumi, Hadean, bermula sejak kelahiran planet hingga kira-kira 4.03 bilion tahun lalu (Ga). Daripada setengah bilion tahun pertama itu, hampir tiada apa yang terselamat. Batuan felsik utuh tertua (jenis benua) berusia sekitar 4.03 Ga. Beberapa batuan basaltik yang jarang mencapai ~4.2 Ga. Bahan tertua daripada apa-apa jenis ialah taburan kristal zirkon — yang paling terkenal dari Jack Hills di Australia Barat — bertarikh sehingga 4.4 Ga. Itulah seluruh arkib zaman bayi Bumi: segelintir lokasi dan mineral sebesar butir pasir.

Kajian ini tidak menambah batu baharu kepada arkib itu. Ia melakukan sesuatu yang berbeza: membina model fizikal tentang rupa kerak Hadean di bawah fizik tersebut, lalu menanyakan soalan yang ditinggalkan kebanyakan model Bumi awal. Apa berlaku apabila kita berhenti mengabaikan hakikat bahawa Bumi awal sedang dihujani hentaman?

Jawapan para penulis cukup mengejutkan. Sepanjang sebahagian besar Hadean, haba yang dihantar oleh hentaman akan mengatasi seluruh haba dalaman Bumi, meninggalkan kerak nipis dan separa cair — terlalu lemah, menurut mereka, untuk sesuatu seperti tektonik plat moden. Ini model, bukan ingatan. Tetapi sekurang-kurangnya ia model yang cuba mengambil kira keganasan zaman yang diterangkannya.

A model of the Hadean, not a memory of it

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

Energy

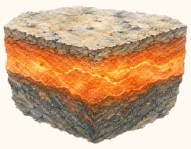
Impact heat dominates

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

Consequence

Thin, shallowly molten crust

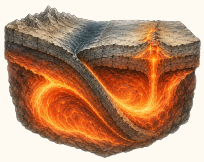
<5 km crust; >30% melt near 5 km in the model.



Record

Most crust recycles

Rare survivors: zircons and oldest rocks.



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

Haba hentaman mendominasi bajet tenaga model, kerak nipis yang cair pada kedalaman cetek mengitar semula dirinya, dan kerak benua yang berkekalan hanya muncul sekitar peralihan 4.0–3.9 Ga. Ini model Hadean, bukan

ingatan langsung tentangnya.

The Clean Paper CC BY 4.0

Apa yang dilakukan oleh para penulis

Pasukan itu menggabungkan tiga ramuan yang biasanya dikaji secara berasingan.

Pertama, **model stokastik fluks hentaman** — hujan asteroid dan jasad lebih besar yang menghentam Sistem Suria dalaman sepanjang Hadean dan Archean awal. Yang penting, ini bukan idea lama tentang satu lonjakan "Late Heavy Bombardment". Fluksnya sangat tinggi pada awal zaman dan **menurun dari masa ke masa**, dengan hentaman besar tiba secara rawak (stokastik), bukannya mengikut jadual. Model itu diskalakan semula daripada statistik hentaman Bulan dan Sistem Suria dalaman, dan dipilih supaya konsisten dengan spektrum umur zirkon serta bukti paleomagnet yang tersedia.

Kedua, **simulasi geodinamik** tentang bagaimana haba bergerak melalui kerak dan mantel atas. Mereka menggunakan kod lattice-Boltzmann yang telah ditanda aras (Planet_LB), menjalankan kedua-dua pengiraan 1D mudah suhu mengikut kedalaman dan gambaran konveksi mantel 2D penuh pada 4.1 Ga. Ini merangkumi sumber haba dalaman biasa — pereputan radioaktif dan haba daripada teras — serta, yang penting, **adveksi magmatik**: haba yang dibawa ke atas oleh leburan yang naik, sesuatu yang ditinggalkan oleh kebanyakan model haba kerak.

Ketiga, **pemodelan keseimbangan fasa** bagi kerak awal yang realistik — metabasalt Hadean terhidrat dari jalur batu hijau Nuvvuagittuq — untuk menentukan pada suhu dan kedalaman berapa batuan seperti itu mula mencair.

Satu pilihan metodologi penting untuk memahami seluruh makalah: para penulis sengaja membuat andaian yang *menentang* kesimpulan mereka sendiri. Mereka menganggap mantel "nonchondritic" (mengandungi lebih sedikit bahan radioaktif penghasil haba daripada rujukan chondritic) dengan kurang daripada separuh pemanasan dalaman model piawai, menggunakan kadar pemanasan konservatif, dan mengabaikan pemanasan pasang surut daripada Bulan muda yang ketika itu lebih dekat. Ertinya suhu kerak yang mereka kira ialah **nilai minimum** — had bawah. Jika ada, Hadean sebenar mungkin lebih panas daripada model mereka.

Apa yang mereka temui

Hentaman, bukan haba dalaman, mendominasi bajet tenaga Hadean. Apabila haba hentaman disepadukan sepanjang masa, ia jauh mengatasi sumbangan dalaman — sekurang-kurangnya satu order magnitud sepanjang sebahagian besar Hadean. Dalam gambaran ini, pemanasan hentaman, bukan pereputan radioaktif, ialah enjin utama yang mendorong tektonisme awal, dan hanya menjadi peranan kecil selepas kira-kira **3.9 Ga**.

Haba itu mengekalkan kerak nipis dan cair dekat permukaan. Tanpa hentaman dan adveksi lebu-

ran, model mereka menghasilkan kerak Hadean yang separa cair hanya di bawah sekitar 10–15 km. Tambahkan haba hentaman, dan zon lebur naik dengan drastik: kerak menjadi separa cair hanya **beberapa kilometer ke bawah** (di bawah kira-kira 2–5 km). Pada kedalaman sekitar 5 km, model meramalkan lebih daripada 30% leburan — keadaan di mana batu terlalu lemah untuk kekal sebagai plat tegar. Pada 5–10 km, suhu ~1000–1100°C bermaksud kerak sangat cair hampir tanpa mengira komposisinya. Kerak pepejal yang terselamat akan **nipis, kurang daripada kira-kira 5 km**.

Kerak separa cair memadam dirinya sendiri. Pencairan meluas membolehkan bahan padat kaya besi dan magnesium tenggelam serta berpisah, sementara leburan lebih ringan dan kaya silika naik. Lama-kelamaan ini mengubah purata kerak ke arah komposisi yang lebih berevolusi dan kaya silika — serta menghasilkan leburan felsik yang boleh menghablurkan zirkon. Hampir seluruh kerak nipis ini kemudian dikitar semula ke dalam mantel yang berkonveksi, sesuatu yang konsisten dengan rekod kimia (isotop). Dalam model ini, hampir ketiadaan batuan Hadean bukan jurang dalam rekod — ia satu *ramalan*. Batuan 4.2 Ga dan zirkon 4.4 Ga ialah mangsa terselamat yang jarang daripada kerak yang kebanyakannya dimusnahkan secepat ia terbentuk.

Berakhirnya pengeboman sejajar dengan benua pertama yang berkekalan. Apabila pengeboman berkurang sepanjang peralihan 4.0–3.9 Ga, kerak akhirnya boleh menebal dan bertahan. Batuan benua tertua yang masih wujud muncul sekitar peralihan yang sama. Para penulis memilih kata-kata dengan berhati-hati: bahawa kerak benua yang berkekalan muncul sekitar masa ini "kemungkinan besar bukan kebetulan".

Inferens utama mereka: dalam keadaan ini — kerak nipis, cair beberapa kilometer di bawah permukaan — **tektonik plat Hadean tidak munasabah**.

Mereka turut menunjukkan mengapa kerja terdahulu mencapai kesimpulan sebaliknya. Kajian sebelumnya tentang hentaman stokastik mendapati hanya kesan kecil, dengan kurang daripada 2.5% kerak cair pada satu-satu masa. Kajian tersebut meninggalkan dua perkara yang dimasukkan di sini: kesan global hentaman besar pada pencairan jauh di dalam mantel, dan pengangkutan haba itu ke atas oleh magma yang naik. Apabila kedua-duanya dimasukkan semula, gambaran haba berubah secara drastik.

Mengapa model bukan ingatan

Segala yang diterangkan di atas ialah keluaran simulasi, bukan bacaan yang diambil daripada batuan Hadean — kerana batuan itu hampir sepenuhnya tidak lagi wujud. Itu tidak menjadikan hasil lemah, tetapi menentukan jenis hasil yang sedang kita baca.

Rantainya ialah: satu *model* fluks hentaman memberi input kepada satu *model* aliran haba mantel dan kerak, yang diperiksa terhadap satu *model* bagaimana batuan tertentu mencair. Setiap pautan bermotivasi secara fizikal dan, apabila boleh, ditanda aras — tetapi keseluruhannya ialah hujah koheren tentang bagaimana Hadean *sepatutnya* kelihatan berdasarkan fizik yang munasabah, bukan ukuran bagaimana ia *sebenarnya* kelihatan.

Itulah sebabnya andaian konservatif para penulis lebih penting daripada yang mungkin kelihatan.

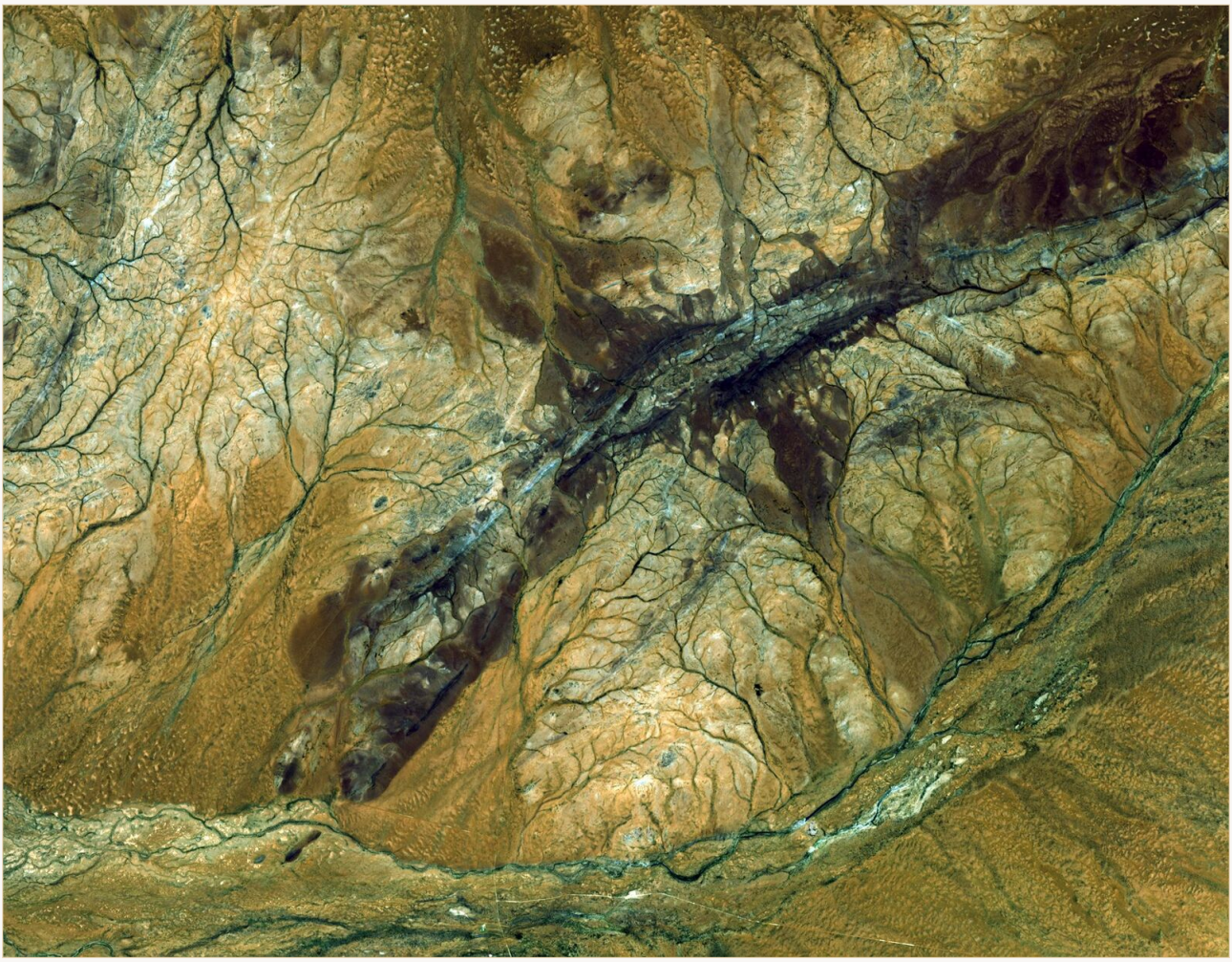
Oleh sebab mereka memilih pemanasan had bawah namun masih memperoleh kerak cetek yang cair secara meluas, kesimpulan kualitatif — bahawa kerak Hadean panas dan lemah — tahan terhadap pilihan mereka. Yang *tidak* ditentukan tepat ialah angka khusus: geoterma tepat, pecahan leburan tepat, ketebalan kerak tepat. Baca arah hasil sebagai kuat, dan tempat perpuluhan sebagai sementara.

Apa yang tidak dibuktikan oleh kajian ini

- Ia **tidak** memerhati kerak Hadean secara langsung. Hampir tiada batuan dari era ini; ini hasil pemodelan tentang apa yang tersirat oleh fizik, bukan pengukuran.
- Ia **tidak** bergantung pada "Late Heavy Bombardment". Fluks hentaman yang digunakan menurun dan stokastik — model tidak memerlukan atau menggunakan lonjakan pengeboman tiba-tiba.
- Ia **tidak** menyelesaikan perdebatan tektonik plat. "Tidak munasabah" di sini ialah inferens kuat berasaskan fizik yang memihak kepada Bumi awal jenis stagnant-lid atau squishy-lid yang panas — tetapi mod tektonik Hadean masih benar-benar diperdebatkan.
- Ia **tidak** membuktikan bahawa hentaman *menyebabkan* benua muncul sekitar peralihan 4.0–3.9 Ga. Padanan masa ialah perkaitan kuat yang para penulis sendiri sebut "kemungkinan besar bukan kebetulan" — bahasa berhati-hati untuk korelasi menarik, bukan sebab yang telah dibuktikan.
- Zirkon Jack Hills **bukan** benua yang terpelihara. Ia butiran terselamat yang jarang dan menunjukkan bahan felsik serta air wujud awal; keseluruhan hujah model ialah kerak yang menghasilkannya kebanyakannya dikitar semula.
- Ia **tidak** membina semula sejarah penuh Bumi awal. Simulasi diidealkan — profil 1D dan keratan khatulistiwa 2D dengan hentaman terhad berhampiran khatulistiwa, diambil sebagai gambaran pada waktu tertentu — bukan model empat dimensi lengkap planet.

Sejauh mana kukuh buktinya?

Bagi dakwaan pusatnya — bahawa pemanasan hentaman ialah kawalan peringkat pertama ke atas kerak Hadean, mengekalkannya nipis dan cair dekat permukaan — hujahnya koheren dan, dalam satu erti penting, konservatif. Ia menggunakan kod geodinamik yang ditanda aras, input fizikal yang munasabah dan andaian had bawah, serta mengintegrasikan sumber haba yang kebanyakan model terdahulu abaikan. Ia juga mendapat kredibiliti dengan menjelaskan dua fakta degil sekali gus: mengapa hampir tiada batuan lebih tua daripada ~4 Ga terselamat (kitar semula hampir menyeluruh), dan mengapa kerak berkekalan muncul tepat ketika pengeboman berkurang.



Jack Hills, Australia Barat, dilihat oleh instrumen ASTER NASA. Zirkon dari kawasan ini termasuk sebahagian bahan tertua yang diketahui masih terselamat daripada kerak awal Bumi, petunjuk kecil daripada satu eon yang batuannya kebanyakannya terpadam.

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

Batasannya sama jelas, dan ia memang batas semua model masa geologi sangat dalam: model dibina di atas model, ditambat kepada rekod batuan yang sangat jarang, dan kesimpulan paling mudah dipetik — "tektonik plat tidak munasabah" — ialah inferens, bukan pemerhatian. Sikap yang tepat ialah menganggapnya sebagai hipotesis kuat dan beralasan baik yang membingkai semula Hadean, serta kini mengajak penyelidik lain menguji andaian — khususnya pilihan model fluks hentaman — bukannya kes yang sudah ditutup.

Ringkasan paling berguna bukan "beginilah rupa Hadean" mahupun "ini cuma simulasi". Sebaliknya: berdasarkan fizik yang munasabah dan konservatif, Bumi awal di bawah pengeboman berat akan mempunyai kerak nipis, separa cair dan mengitar semula dirinya — dan satu idea itu menjelaskan jumlah yang mengejutkan daripada sedikit perkara yang benar-benar dapat kita lihat.

Mengapa ia penting

Imej popular Bumi awal sering berayun antara dua ekstrem: dunia air yang tenang dengan tektonik plat hampir seperti hari ini, atau planet lava yang seperti neraka. Kerja ini melakar bahagian tengah yang khusus dan bermotivasi fizikal: kerak nipis yang berulang kali cair semula dari beberapa kilometer ke bawah, sentiasa dimusnahkan dan dibentuk semula, dengan hentaman — bukan haba dalaman — menetapkan syaratnya.

Pembingkaian semula itu benar-benar berguna. Ia menawarkan satu mekanisme untuk dua fakta terbesar tentang zaman bayi Bumi — hampir ketiadaan rekod batuan, dan masa munculnya benua pertama yang berkekalan — serta meletakkan proses yang biasanya diabaikan, pemanasan hentaman, di tengah cerita. Jika ia bertahan, ia mengubah cara kita berfikir tentang bila Bumi menjadi planet dengan benua stabil sama sekali, dan ideanya boleh digunakan pada dunia berbatu lain yang terbentuk di bawah sejarah pengeboman masing-masing.

Tiada satu pun memerlukan model ini menjadi kata akhir. Ia hanya perlu menjadi hipotesis yang cukup baik untuk diuji — dan dengan mengikat dirinya kepada rekod zirkon dan isotop yang terselamat, ia memenuhi syarat itu. “Hadean tersembunyi” dalam tajuk tepat menggambarkan masalahnya: era yang sebahagian besarnya hanya boleh kita capai melalui pemodelan, kerana era itu sendiri memadam buktinya.

Ringkasan utama

Eon pertama Bumi, Hadean (sebelum ~4.03 Ga), hampir tidak meninggalkan rekod batuan. Kajian pemodelan ini menanyakan bagaimana rupa kerak apabila satu sumber haba yang biasanya ditinggalkan — hentaman — dimasukkan. Dengan model fluks hentaman stokastik yang menurun bersama simulasi 1D dan 2D yang telah ditanda aras bagi aliran haba kerak dan mantel (termasuk haba yang dibawa oleh leburan naik), para penulis mendapati haba hentaman yang disepadukan sepanjang masa akan melebihi seluruh haba dalaman Bumi sekurang-kurangnya satu order magnitud sepanjang sebahagian besar Hadean. Akibatnya ialah kerak nipis (di bawah ~5 km) yang separa cair hanya beberapa kilometer ke bawah dan, pada kedalaman ~5 km, lebih daripada 30% cair — terlalu lemah untuk menyokong tektonik plat, yang para penulis anggap tidak munasabah bagi Hadean. Kerak seperti itu kebanyakannya akan dikitar semula ke mantel, menjelaskan mengapa begitu sedikit bahan Hadean terselamat; apabila hentaman berkurang sepanjang peralihan 4.0–3.9 Ga, kerak benua berkekalan boleh terbentuk, sekitar masa batuan felsik tertua yang masih wujud muncul — “kemungkinan besar bukan kebetulan.” Oleh sebab para penulis sengaja menggunakan pemanasan konservatif had bawah, hasil kualitatifnya kukuh walaupun angka tepat tidak tetap. Ini model kuat dan koheren tentang zaman bayi Bumi — bukan pemerhatian langsung terhadapnya.

Semakan tanpa gembar-gembur

Apa yang ditunjukkan oleh makalah: Dalam simulasi berasaskan fizik yang memasukkan pemanasan hentaman dan pengangkutan haba magmatik, kerak Hadean menjadi nipis dan separa cair hanya beberapa kilometer ke bawah, dikuasai haba hentaman bukannya haba dalaman, kebanyakannya dikitar semula ke mantel dan — dalam model ini — tidak mampu menyokong tektonik plat.

Apa yang munasabah tetapi belum dibuktikan: Bahawa hentaman ialah sebab benua berkekalan muncul sekitar 3.9 Ga; bahawa Hadean ialah dunia stagnant-lid atau squishy-lid dan bukan dunia tektonik plat awal; bahawa hampir tiada batuan Hadean terselamat khusus kerana kerak cair mengitar semula dirinya.

Apa yang tidak ditunjukkan: Pengukuran langsung kerak Hadean; jawapan muktamad bagi perdebatan tektonik plat; hubungan sebab akibat yang terbukti antara pengeboman yang semakin reda dan benua pertama; bahawa zirkon Jack Hills mewakili benua terpelihara; model lengkap planet awal.

Had utama: Rekod batuan Hadean hampir tiada, jadi hasil ialah model yang dikekang oleh data sangat sedikit; ia menumpuk model di atas model (fluks hentaman → geodinamik → keseimbangan fasa); fluks hentaman sendiri ialah pilihan wakil yang tidak pasti; simulasi diidealkan (keratan khatulistiwa 1D dan 2D, gambaran pada titik masa tertentu). Andaian konservatif had bawah menguatkan kesimpulan kualitatif tetapi tidak menjadikan geoterma khusus tepat.

Berapa banyak keyakinan patut diberikan pembaca umum? Tinggi bahawa, di bawah fizik yang munasabah, Bumi awal yang dihujani hentaman besar akan mempunyai kerak panas, nipis dan cair dekat permukaan. Sederhana bahawa ini menjadikan tektonik plat Hadean tidak mungkin dan membantu menjelaskan rekod batuan yang hilang. Rendah bagi sebarang dakwaan bahawa ini *membuktikan* bagaimana benua terbentuk atau bila tepatnya — ini model kuat dan konservatif yang membingkai semula Hadean, bukan pandangan langsung terhadapnya.

Sumber

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