The Clean Paper

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

Crust ya kwanza nyembamba na nusu kuyeyuka: model ambamo impacts, si joto la ndani, ziliendesha Hadean

Eon ya kwanza ya Dunia, Hadean, iliacha karibu hakuna rock record. Modelling study hii inauliza crust ingeonekanaje ukiacha kupuuza impacts. Kwa stochastic, declining impact-flux model na benchmarked simulations za crust na mantle heat flow, waandishi wanapata impact heat ingeizidi entire internal heat ya Dunia kwa angalau order of magnitude moja kwa sehemu kubwa ya Hadean, ikiacha thin crust (chini ya ~5 km) partially molten baada ya kilomita chache tu — dhaifu sana, wanahoji, kwa plate tectonics, na yenye tabia ya kujirecycle ndani ya mantle, jambo linaloweza kueleza kwa nini Hadean material kidogo sana survives. Impacts zilipopungua baada ya ~3.9 Ga, lasting continental crust ingeweza kuunda, karibu wakati oldest surviving felsic rocks zinaonekana — "likely not a coincidence," kwa maneno yao ya makini. Kwa sababu walitumia conservative lower-bound heating, qualitative result ni robust hata exact numbers zikiwa hazijafungwa. Ni strong, coherent model ya utoto wa Dunia — si direct observation yake.

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

Sura ya historia ya Dunia ambayo karibu kurasa zake zote zimepotea

Dunia ndiyo sayari pekee tunayojua yenye mabara — ardhi yenye silica nyingi, nyepesi kiasi na inayoelea, ambako tunaishi. Lakini jinsi mabara ya kwanza yalivyoundwa ni moja ya matatizo ya zamani zaidi ambayo geolojia bado haijatatua, kwa sababu kali sana: karibu ushahidi wote umetoweka.

Eon ya kwanza ya Dunia, Hadean, inaanzia kuzaliwa kwa sayari hadi karibu miaka bilioni 4.03 iliyopita (Ga). Kutoka nusu bilioni hiyo ya kwanza, karibu hakuna kitu kilichosalia. Miamba ya felsic (aina ya bara) iliyo intact zaidi ya zamani ni karibu 4.03 Ga. Miamba michache adimu ya basaltic hufikia ~4.2 Ga. Nyenzo ya zamani zaidi ya aina yoyote ni crystals chache za zircon — maarufu zaidi kutoka Jack Hills, Western Australia — zenye tarehe hadi 4.4 Ga. Hiyo ndiyo archive karibu yote ya utoto wa Dunia: maeneo machache na minerals zenye ukubwa wa chembe za mchanga.

Utafiti huu hauongezi mwamba mpya katika archive hiyo. Unafanya kitu tofauti: unajenga physical modeli ya jinsi crust ya Hadean ingeonekana chini ya physics hiyo, na kuuliza swali ambalo modeli nyingi za Dunia ya awali huliacha. Nini hutokea ukiacha kupuuza kwamba Dunia ya mwanzo ilikuwa ikipigwa mara kwa mara na impact?

Jibu la waandishi ni la kushangaza. Kwa sehemu kubwa ya Hadean, joto lililoletwa na impacts lingezidi kwa mbali joto lote la ndani la Dunia, likiacha crust nyembamba na nusu kuyeyuka — dhaifu sana, wanahoji, kwa kitu kama modern tektoniki ya mabamba. Ni modeli, si kumbukumbu. Lakini ni modeli inayojaribu, kwa mara moja, kuhesabu vurugu ya era inayoieleza.

A model of the Hadean, not a memory of it

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

Energy

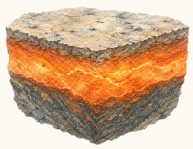
Impact heat dominates

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

Consequence

Thin, shallowly molten crust

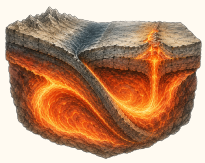
<5 km crust; >30% melt near 5 km in the model.



Record

Most crust recycles

Rare survivors: zircons and oldest rocks.



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

Impact heat inatawala energy budget ya modeli, crust nyembamba yenye melt karibu na surface inajirecycle, na

enduring ganda la bara inaonekana tu karibu na transition ya 4.0–3.9 Ga. Hii ni modeli ya Hadean, si memory ya moja kwa moja ya Hadean.

The Clean Paper CC BY 4.0

Walichofanya waandishi

Timu iliunganisha vipengele vitatu ambavyo mara nyingi hutenganishwa.

Kwanza, **modeli ya nasibu ya mtiririko wa migongano**—mvua ya asteroidi na miili mikubwa iliyogonga Mfumo wa Jua wa ndani katika Hadean na Archean ya mapema. Hii si dhana ya kilele kimoja cha "Late Heavy Bombardment"; ni kiwango kikubwa cha migongano mwanzoni kinachopungua kwa muda, huku migongano mikubwa ikitokea kwa nasibu. Modeli imepimwa upya kutoka takwimu za migongano ya Mwezi na Mfumo wa Jua wa ndani, na imechaguliwa ili iendane na mgawanyo wa umri wa zircon na ushahidi wa paleomagnetism.

Pili, waandishi walitumia **uigaji wa geodinamiki wa ganda na sehemu ya juu ya mantle**. Msimbo wao ulijaribiwa dhidi ya matokeo yanayojulikana na ukatumika katika hesabu za 1D na 2D (4.1 Ga) ili kufuatilia jinsi joto linavyoenea na jinsi ganda linavyoyeyuka baada ya migongano. Uigaji huo ulijumuisha vyanzo vya joto vya ndani—kama kuoza kwa elementi za mionzi na joto kutoka kiini—pamoja na usafirishaji wa joto na magma inayoinuka. Hivyo modeli haikuhesabu tu joto linaloletwa na mgongano, bali pia jinsi joto hilo linavyosambazwa katika ganda na mantle.

Tatu, **phase-equilibrium modelling** ya realistic early crust — hydrated Hadean metabasalt kutoka Nuvvuagittuq greenstone belt — ili kujua kwenye temperature na depth gani rock kama hiyo ingeanza kuyeyuka.

Chaguo moja la methodology ni muhimu kwa kusoma makala nzima: waandishi kwa makusudi waliweka dhana *dhidi* ya conclusion yao wenyewe. Walidhani "nonchondritic" mantle (yenye heat-producing radioactive material kidogo kuliko chondritic reference) yenye chini ya nusu ya internal heating ya standard modeli, wakatumia conservative heating rates, na kupuuza tidal heating kutoka Moon mchanga na uliokuwa karibu. Hiyo ina maana crustal temperatures walizohesabu ni **minima** — lower bounds. Kama kuna bias, Hadean halisi ilikuwa moto zaidi kuliko modeli.

Walichogundua

Impacts, si joto la ndani, zilitawala Hadean energy budget. Impact heat ikiintegratewa kwa muda, inapita internal contribution kwa mbali — angalau order of magnitude moja kwa sehemu kubwa ya Hadean. Katika picha hii, upashaji joto kutokana na migongano, si radioactive decay, ndiyo engine kuu ya early tectonism, na inaanza kuwa minor role tu baada ya karibu **3.9 Ga**.

Joto hilo liliweka crust nyembamba na iliyoyeyuka karibu na surface. Bila impacts na melt advection, modeli yao inatoa Hadean crust yenye partial melt tu chini ya karibu 10–15 km. Ongeza

impact heat, na melt zone inapanda kwa nguvu: crust inakuwa partially molten baada ya **kilomita chache tu** (chini ya karibu 2–5 km). Karibu depth ya 5 km, modeli zinatabiri zaidi ya 30% melt — hali ambayo rock ni dhaifu sana kushikamana kama rigid plate. Kati ya 5–10 km, temperatures za ~1000–1100°C zinamaanisha crust imeyeyuka sana karibu bila kujali composition yake. Solid crust iliyosalia ingekuwa **nyembamba, chini ya karibu 5 km**.

Crust nusu iliyoyeyuka hujifuta yenyewe. Melting kubwa huruhusu dense, iron- na magnesium-rich material kuzama na kutengana, huku lighter silica-rich melts zikinyanyuka. Kwa muda hii husukuma average crust kuelekea compositions zilizo evolved na silica nyingi — na kutengeneza aina ya felsic melt inayoweza crystallize zircon. Karibu crust yote nyembamba inge-recycle kurudi ndani ya convecting mantle, jambo linaloendana na chemical (isotopic) record. Katika modeli hii, karibu kutokuwepo kabisa kwa Hadean rock si pengo katika record — ni *prediction*. Rocks za 4.2 Ga na zircons za 4.4 Ga ni rare survivors za crust iliyoharibiwa karibu haraka ilivyoundwa.

Mwisho wa bombardment unalingana na continents za kwanza zinazodumu. Bombardment ilipopungua katika transition ya 4.0–3.9 Ga, crust hatimaye ingeweza kuwa nene na kudumu. Oldest surviving continental rocks zinaonekana karibu transition hiyo hiyo. Waandishi wanasema kwa makini: kwamba enduring ganda la bara ilionekana karibu wakati huu "likely not a coincidence."

hitimisho kuu yao: chini ya conditions hizi — crust nyembamba, molten baada ya kilomita chache — **Hadean tektoniki ya mabamba ni implausible.**

Pia wanaonyesha kwa nini kazi za awali zilifikia conclusion tofauti. Previous tafiti za stochastic impacts zilipata minor athari tu, na chini ya 2.5% ya crust ikiwa molten wakati wowote. tafiti hizo ziliacha vitu viwili ambavyo hii inajumuisha: global athari ya large impacts kwenye melting deep in mantle, na upward transport ya joto hilo kwa rising magma. Vikiwekwa ndani, thermal picha inabadilika sana.

Kwa nini modeli si memory

Kila kitu hapo juu ni output ya uigaji, si reading kutoka Hadean rocks — kwa sababu rocks hizo karibu zote hazipo tena. Hilo halifanyi matokeo kuwa weak, lakini linaamua ni aina gani ya matokeo.

Chain ni: *modeli* ya mtiririko wa migongano inaingia kwenye *modeli* ya mantle na crustal mtiririko wa joto, iliyocheckwa dhidi ya *modeli* ya jinsi rock maalum inayeyuka. Kila link ina physics yenye msingi na, inapowezekana, imebenchmarkiwa — lakini chain nzima ni argument coherent kuhusu Hadean *lazima ingeonekanaje* chini ya plausible physics, si kipimo ya jinsi *ilivyoonekana* kwa kweli.

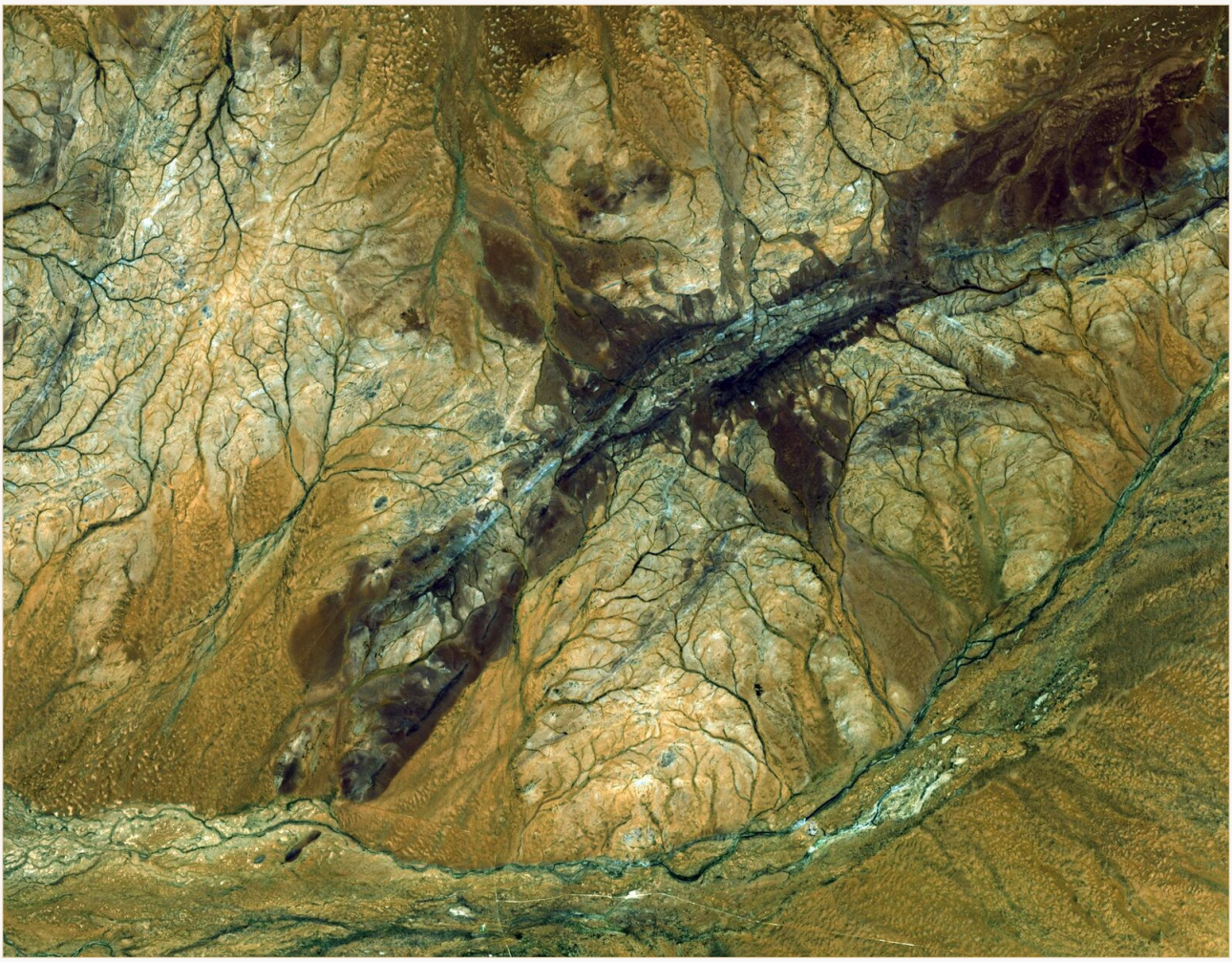
Ndiyo sababu dhana za tahadhari za waandishi ni muhimu. Walichagua makadirio ya chini ya upashaji joto na bado wakapata ganda la Dunia lenye kuyeyuka kwa kiasi kikubwa karibu na uso. Hivyo hitimisho la jumla — kwamba ganda la Hadean lilikuwa moto na dhaifu — halitegemei sana uchaguzi mmoja maalum wa vigezo. Kilicho na uhakika mdogo ni namba kamili: mteremko halisi wa joto, sehemu halisi iliyoyeyuka na unene halisi wa ganda. Mwelekeo wa matokeo una nguvu zaidi kuliko tarakimu zake za mwisho.

Hili halithibitishi nini

- **Halioni Hadean crust moja kwa moja.** Kuna karibu hakuna rock kutoka era hii; hii ni modelling matokeo kuhusu physics inachomaanisha, si kipimo.
- **Halitegemei "Late Heavy Bombardment."** mtiririko wa migongano inayotumiwa ni declining, stochastic — modeli haihitaji wala haitumii bombardment spike ya ghafla.
- **Halimalizi plate-tectonics debate.** "Implausible" hapa ni strong, physically grounded inference inayopendelea hot stagnant- au squishy-lid Dunia ya awali — lakini tectonic mode ya Hadean bado inabishaniwa kweli.
- **Halithibitishi impacts *zilisababisha* continents kuonekana karibu transition ya 4.0–3.9 Ga.** Timing match ni strong association ambayo waandishi wenyewe wanaita "likely not a coincidence" — lugha ya tahadhari kwa compelling correlation, si demonstrated cause.
- Jack Hills zircons **si preserved continents.** Ni rare surviving grains zinazoonyesha felsic material na water zilikuwepo mapema; point ya modeli ni kwamba crust iliyozitengeneza ilirecyclewa karibu yote.
- **Halijengi full history ya Dunia ya awali.** uigaji ni idealized — 1D profiles na 2D equatorial slices zenye impacts karibu equator, zilizochukuliwa kama snapshots — si complete four-dimensional modeli ya planet.

Ushahidi una nguvu kiasi gani?

Kwa central dai — upashaji joto kutokana na migongano ilikuwa first-order control ya Hadean crust, ikiweka nyembamba na shallowly molten — argument ina coherence na, kwa maana muhimu, conservative. Inatumia benchmarked geodynamics code, physically reasonable inputs, lower-bound dhana, na inaingiza chanzo cha joto ambayo previous modeli nyingi ziliipuuza. Pia inaongeza credibility kwa kueleza stubborn facts mbili kwa wakati mmoja: kwa nini karibu hakuna rock older than ~4 Ga survives (near-total recycling), na kwa nini lasting crust inaonekana tu bombardment inapofifia.



Jack Hills, Western Australia, zikionekana kwa NASA ASTER instrument. Zircons kutoka eneo hili ni miongoni mwa surviving material za zamani zaidi kutoka early crust ya Dunia, clues ndogo kutoka eon ambayo rocks zake karibu zote zilifutwa.

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

Limits ni wazi pia, na ni limits za deep-time modeli yoyote: ni modeli juu ya modeli, anchored kwa sparse rekodi ya miamba sana, na conclusion inayoweza kunukuliwa zaidi — “tektoniki ya mabamba is implausible” — ni inference, si observation. Msimamo sahihi ni kuitazama kama strong, well-reasoned hypothesis inayoreframe Hadean na sasa inawaalika wengine kujaribu dhana zake — hasa choice ya impact-flux modeli — badala ya closed case.

Summary yenye manufaa zaidi si “hivi ndivyo Hadean ilivyokuwa” wala “ni uigaji tu.” Ni: kwa plausible, conservative physics, Dunia ya awali iliyopigwa sana ingeonekana na thin, half-molten, self-recycling crust — na idea moja hiyo inaeleza sehemu ya kushangaza ya kile kidogo tunachoweza kuona.

Kwa nini ni muhimu

Picha maarufu ya Dunia ya awali mara nyingi huzunguka extremes mbili: serene, ya tektoniki ya mabamba water world karibu kama ya leo, au hellish lava planet. Kazi hii inachora middle maalum yenye msingi wa physics: crust nyembamba na iliyokuwa ikiremelt mara kwa mara baada ya kilomita chache tu, ikiendelea kuharibiwa na kutengenezwa upya, huku impacts — si joto la ndani — zikiweka masharti.

Reframing hiyo inafanya kazi halisi. Inatoa mechanism moja kwa facts mbili kubwa kuhusu utoto wa Dunia — karibu kutokuwepo kwa rekodi ya miamba, na timing ya continents za kwanza zinazodumu — na inaweka process inayopuuzwa mara nyingi, upashaji joto kutokana na migongano, katikati ya simulizi. Kama itaendelea kusimama, itabadilisha jinsi tunavyofikiri ni lini Dunia ilianza kuwa sayari yenye stable continents, na ina implications kwa rocky worlds nyingine zilizoundwa chini ya bombardments zao.

Hakuna kati ya hayo yanayohitaji modeli hii iwe jibu la mwisho. Inahitaji tu kuwa dhana nzuri ya kutosha kupimwa—na kwa kujifunga kwenye rekodi iliyosalia ya zircon na isotopu, inatimiza sharti hilo. Hapo ndipo wazo la “Hidden Hadean” linapopata maana: tunaweza kuifikia enzi hiyo hasa kwa modeli, kwa sababu enzi yenyewe ilifuta sehemu kubwa ya ushahidi wake.

Muhtasari safi

Eon ya kwanza ya Dunia, Hadean (kabla ya ~4.03 Ga), iliacha karibu hakuna rekodi ya miamba. Utafiti huu wa modeli unauliza ganda la Dunia lingeonekanaje ikiwa chanzo cha joto kinachoachwa mara nyingi—migongano—kitaongezwa. Kwa kuchanganya modeli ya mtiririko wa migongano unaopungua kwa muda na uigaji wa 1D na 2D wa mtiririko wa joto katika ganda na mantle, ikiwa pamoja na joto linalobebwa na magma inayoinuka, waandishi wanapata kwamba joto lililokusanyika kutokana na migongano lingeweza kuzidi joto lote la ndani la Dunia kwa angalau mpangilio mmoja wa ukubwa katika sehemu kubwa ya Hadean. Matokeo yake ni ganda jembamba, chini ya takriban km 5, ambalo baada ya kilomita chache tu lina sehemu iliyoyeyuka; karibu kina cha km 5, zaidi ya 30% inaweza kuwa imeyeyuka. Ganda dhaifu kiasi hicho, katika modeli hii, haliwezi kuunga mkono tektoniki ya mabamba. Pia lingeweza kurejelewa kwa kiasi kikubwa ndani ya mantle, jambo linalosaidia kueleza kwa nini nyenzo chache sana za Hadean zimehifadhiwa. Migongano ilipopungua karibu 4.0–3.9 Ga, ganda la bara linalodumu lingeweza kuanza kuundwa, karibu na wakati ambapo miamba ya zamani zaidi ya felsic iliyohifadhiwa inaonekana. Kwa kuwa waandishi walitumia makadirio ya chini na ya tahadhari ya joto, hitimisho la jumla halitegemei sana thamani kamili za vigezo. Ni modeli thabiti ya utoto wa Dunia, si uchunguzi wa moja kwa moja wa enzi hiyo.

Ukaguzi bila kupamba

Makala inaonyesha nini: Katika uigaji unaotegemea fizikia unaojumuisha joto la migongano na usafirishaji wa joto kwa magma, ganda la Hadean hutokea kuwa jembamba na kuanza kuyeyuka baada ya kilomita chache tu. Joto la migongano linatawala kuliko joto la ndani, ganda linarejelewa kwa kiasi kikubwa ndani ya mantle, na katika modeli hii haliwezi kuunga mkono tektoniki ya mabamba.

Kinachowezekana lakini hakijathibitishwa: Kwamba impacts ndiyo sababu enduring continents zinaonekana karibu 3.9 Ga; kwamba Hadean ilikuwa stagnant- au squishy-lid world badala ya early ya tektoniki ya mabamba one; kwamba karibu hakuna Hadean rock survives hasa kwa sababu molten crust ilijirecycle.

Isichoonyeshwa: kipimo cha moja kwa moja ya Hadean crust; settled answer kwa plate-tectonics debate; demonstrated causal link kati ya fading bombardment na first continents; kwamba Jack Hills zircons zinawakilisha preserved continents; complete modeli ya early planet.

Vikwazo vikuu: Rekodi ya miamba ya Hadean karibu haipo, kwa hiyo matokeo yanategemea modeli zilizofungwa na data chache sana. Ujenzi unaweka modeli juu ya nyingine — mtiririko wa migongano, geodynamics na phase equilibria — na uchaguzi wa mtiririko wa migongano wenyewe una kutokuwa na uhakika. Uigaji pia umerahisishwa: profaili za 1D na vipande vya 2D karibu na ikweta, kama picha za nyakati tofauti badala ya modeli kamili ya sayari. Dhana za tahadhari za kikomo cha chini zinaimarisha hitimisho la jumla, lakini hazifanyi mteremko maalum wa joto au sehemu ya kuyeyuka kuwa vipimo sahihi kabisa.

Msomaji wa kawaida anapaswa kuwa na uhakika kiasi gani? Uhakika mkubwa kwamba, chini ya plausible physics, heavily bombarded Dunia ya awali ingeonekana na hot, thin, shallowly molten crust. Uhakika wa kati kwamba hili linafanya Hadean tektoniki ya mabamba kuwa unlikely na linaeleza missing rekodi ya miamba. Uhakika mdogo kwa dai lolote kwamba hii *inathibitisha* continents ziliundwaje au lini hasa — ni strong conservative modeli inayoreframe Hadean, si moja kwa moja look.

Vyanzo

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