The Clean Paper

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

เปลือกโลกแรกที่บางและกึ่งหลอม: แบบจำลองที่การชนไม่ใช่ความร้อนภายใน เป็นตัวขับ Hadean

บรมยุคแรกของโลก Hadean แทบไม่ทิ้งบันทึกหิน งานแบบจำลองนี้ถามว่าเปลือกจะเป็นอย่างไรเมื่อไม่ละเลยการชน ด้วยแบบจำลอง impact flux แบบ stochastic ที่ลดลงตามเวลาและ simulation การไหลความร้อนในเปลือกกับ mantle ที่ผ่าน benchmark ผู้เขียนพบว่าความร้อนจากการชนจะสูงกว่าความร้อนภายในโลกทั้งหมดอย่างน้อยหนึ่งลำดับขนาดตลอด Hadean ส่วนใหญ่ ทิ้งเปลือกบาง (ต่ำกว่า ~5 กม.) ที่หลอมบางส่วนเพียงไม่กี่กิโลเมตรใต้พื้น — อ่อนเกินไปสำหรับ plate tectonics ตามข้อเสนอของทีม และมีแนวโน้มรีไซเคิลกลับ mantle ซึ่งอธิบายว่าทำไมวัสดุ Hadean รอดน้อย เมื่อการชนลดลงหลัง ~3.9 Ga เปลือกทวีปที่คงทนจึงก่อตัวได้ ตรงกับเวลาที่หิน felsic รอดเก่าแก่ที่สุดปรากฏ — 'น่าจะไม่ใช่เรื่องบังเอิญ' ตามคำระวังของผู้เขียน เนื่องจากจงใจใช้ heating แบบ lower bound ผลเชิงคุณภาพ robust แม้ตัวเลขละเอียดไม่ตรึง นี่เป็นแบบจำลองวัยทารกของโลกที่แข็งแรง ไม่ใช่การสังเกตโดยตรง

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

บทหนึ่งของเรื่องราวโลกที่แทบไม่มีหน้ากระดาษเหลืออยู่

โลกเป็นดาวเคราะห์เพียงดวงเดียวที่เรารู้ว่ามีทวีป — พื้นดินที่ลอยตัวได้และอุดมด้วยซิลิกาซึ่งเราอาศัยอยู่ แต่ทวีปแรกก่อตัวอย่างไรยังเป็นหนึ่งในปัญหาเก่าแก่ที่สุดที่ธรณีวิทยายังแก้ไม่ได้ ด้วยเหตุผลที่โหดร้าย: หลักฐานแทบทั้งหมดหายไปแล้ว

บรมยุคแรกของโลก Hadean เริ่มตั้งแต่โลกถือกำเนิดจนถึงประมาณ 4.03 พันล้านปีก่อน (Ga) จากช่วงครึ่งพันล้านปีแรกนั้นแทบไม่มีอะไรเหลือรอด หิน felsic (ชนิดเดียวกับเปลือกทวีป) ที่สมบูรณ์เก่าแก่ที่สุดมีอายุราว 4.03 Ga หิน basaltic หายากบางก้อนย้อนไปถึง ~4.2 Ga วัสดุที่เก่าที่สุดทุกชนิดคือผลึก zircon กระจัดกระจาย — ที่มีชื่อเสียงที่สุดมาจาก Jack Hills ในออสเตรเลียตะวันตก — อายุถึง 4.4 Ga นั่นคือจดหมายเหตุทั้งหมดจากวัยทารกของโลก: ตำแหน่งไม่กี่แห่งกับแร่ขนาดเม็ดทรายบางส่วน

งานนี้ไม่ได้เพิ่มหินก้อนใหม่เข้าไปในจดหมายเหตุนั้น แต่ทำอีกอย่าง: สร้างแบบจำลองทางกายภาพว่าเปลือกโลก Hadean จะมีหน้าตาอย่างไรภายใต้ฟิสิกส์นั้น แล้วถามคำถามที่แบบจำลองโลกยุคต้นส่วนใหญ่มองข้าม จะเกิดอะไรขึ้นถ้าเราเลิกละเลยข้อเท็จจริงว่าโลกยุคต้นกำลังถูกวัตถุอวกาศถล่มอยู่?

คำตอบที่ผู้เขียนได้โดดเด่นมาก ตลอด Hadean ส่วนใหญ่ ความร้อนจากการชนจะท่วมความร้อนภายในโลกทั้งหมด ทำให้เปลือกบางและกึ่งหลอมเหลว — อ่อนเกินไปสำหรับสิ่งที่คล้าย plate tectonics แบบสมัยใหม่ตามข้อเสนอของทีม มันเป็นแบบจำลอง ไม่ใช่ความทรงจำ แต่เป็นแบบจำลองที่อย่างน้อยพยายามนับความรุนแรงของยุคที่มันกำลังอธิบายเข้าไปด้วย

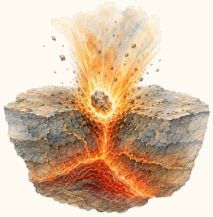
A model of the Hadean, not a memory of it

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

Energy

Impact heat dominates

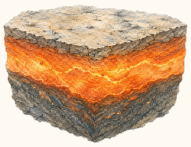
At least an order of magnitude larger than internal heat for much of the Hadean.



Consequence

Thin, shallowly molten crust

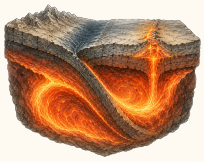
<5 km crust; >30% melt near 5 km in the model.



Record

Most crust recycles

Rare survivors: zircons and oldest rocks.



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

ความร้อนจากการชนครองงบพลังงานของแบบจำลอง เปลือกบางที่หลอมเหลวตื้น ๆ หมุนเวียนกลับตัวเอง และเปลือกทวีปที่คงทนปรากฏเพียงราวช่วงเปลี่ยนผ่าน 4.0–3.9 Ga นี่เป็นแบบจำลองของ Hadean ไม่ใช่ความทรงจำโดยตรงจากยุคนั้น

The Clean Paper CC BY 4.0

ผู้วิจัยทำอะไร

ทีมรวมองค์ประกอบสามอย่างที่ปกติมักแยกจากกัน

อย่างแรก **แบบจำลอง stochastic ของ impact flux** — ฝนดาวเคราะห์น้อยและวัตถุใหญ่กว่าที่ชนระบบสุริยะชั้นในตลอด Hadean และ Archean ยุคต้น จุดสำคัญคือนี่ไม่ใช่แนวคิดเก่าที่มี "Late Heavy Bombardment" พุ่งขึ้นครั้งเดียว แต่เป็น flux ที่รุนแรงมากในช่วงต้นแล้ว **ลดลงตามเวลา** โดยการชนใหญ่เกิดแบบสุ่ม (stochastic) ไม่ได้มาตามตาราง แบบจำลองปรับสเกลจากสถิติการชนของดวงจันทร์และระบบสุริยะชั้นใน และเลือกให้สอดคล้องกับสเปกตรัมอายุ zircon กับหลักฐาน paleomagnetic ที่มี

อย่างที่สอง **การจำลอง geodynamics** ว่าความร้อนเคลื่อนผ่านเปลือกและ mantle ชั้นบนอย่างไร ทีมใช้โค้ด lattice-Boltzmann ที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐาน (Planet_LB) ทั้งการคำนวณอุณหภูมิเทียบความลึกแบบ 1D อย่างง่าย และ snapshot convection แบบ 2D เต็มของ mantle ที่ 4.1 Ga การจำลองรวมแหล่งความร้อนภายในตามปกติ — การสลายกัมมันตรังสีและความร้อนจากแก่นโลก — และที่สำคัญคือ **magmatic advection**: ความร้อนที่ magma หลอมเหลวซึ่งลอยขึ้นพาขึ้นมา ซึ่งแบบจำลองความร้อนของเปลือกส่วนใหญ่มักละไว้

อย่างที่สาม **แบบจำลอง phase equilibrium** ของเปลือกโลกยุคต้นที่สมจริง — Hadean metabasalt ที่มีน้ำจาก Nuvvuagittuq greenstone belt — เพื่อหาว่าหินแบบนี้เริ่มหลอมที่อุณหภูมิและความลึกเท่าไร

ตัวเลือกด้านวิธีวิทยาหนึ่งสำคัญต่อการอ่านทั้งงาน: ผู้เขียนจงใจวางสมมติฐานให้ *ต้าน* ข้อสรุปของตนเอง พวกเขาสมมติ mantle แบบ "nonchondritic" (มีธาตุกัมมันตรังสีสร้างความร้อนน้อยกว่าค่าอ้างอิง chondritic) ซึ่งมีความร้อนภายในน้อยกว่าครึ่งของแบบจำลองมาตรฐาน ใช้อัตราความร้อนแบบอนุรักษ์นิยม และไม่รวม tidal heating จากดวงจันทร์วัยเยาว์ที่อยู่ใกล้โลก นั่นหมายความว่าอุณหภูมิเปลือกที่คำนวณได้เป็น **ค่าต่ำสุด** — lower bounds หากจะมีอคติ โลก Hadean จริงน่าจะร้อนกว่าที่แบบจำลองให้

พบอะไร

การชน ไม่ใช่ความร้อนภายใน ครองงบพลังงาน Hadean เมื่อนำความร้อนจากการชนมารวมตามเวลา มันใหญ่กว่าส่วนจากภายในอย่างมาก — อย่างน้อยหนึ่งลำดับขนาดตลอด Hadean ส่วนใหญ่ ในภาพนี้ impact heating ไม่ใช่การสลายกัมมันตรังสี เป็นเครื่องยนต์หลักของ tectonism ระยะแรก และบทบาทนี้เพิ่งลดเหลือเล็กน้อยหลังประมาณ **3.9 Ga**

ความร้อนนั้นทำให้เปลือกบางและหลอมเหลวตื้น หากไม่มีการชนและ melt advection แบบจำลองให้เปลือก Hadean เริ่มหลอมบางส่วนเฉพาะลึกกว่า 10–15 กม. เมื่อเติมความร้อนจากการชน เขตหลอมยกขึ้นอย่างมาก: เปลือกเริ่มหลอมบางส่วนเพียง **ไม่กี่กิโลเมตรใต้พื้น** (ประมาณต่ำกว่า 2–5 กม.) ที่ความลึกราว 5 กม. แบบจำลองคาดว่ามี melt มากกว่า 30% — สภาพที่หินอ่อนเกินกว่าจะคงตัวเป็นแผ่นแข็ง ที่ 5–10 กม. อุณหภูมิ ~1000–1100°C หมายความว่าเปลือกหลอมมากแทบไม่ขึ้นกับองค์ประกอบ เปลือกแข็งที่เหลืออยู่จะ **บาง ต่ำกว่าประมาณ 5 กม.**

เปลือกกึ่งหลอมลบตัวเองออกจากบันทึก การหลอมมากทำให้วัสดุหนาแน่นที่อุดมเหล็กและแมกนีเซียมจมลงและแยกออก ขณะที่ melt เบากว่าและอุดมซิลิกาลอยขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป เปลือกโดยเฉลี่ยพัฒนาไปสู่องค์ประกอบที่อุดมซิลิกามากขึ้น — และสร้าง felsic melt ชนิดที่ตกผลึก zircon ได้ เปลือกบางเกือบทั้งหมดจะถูกรีไซเคิลกลับลง mantle ที่ convect อยู่ ซึ่งสอดคล้องกับบันทึกเคมี (isotope) ในแบบจำลองนี้ การแทบไม่พบหิน Hadean ไม่ใช่ช่องว่างในหลักฐาน — แต่มันเป็น *คำทำนาย* หินอายุ 4.2 Ga และ zircon 4.4 Ga คือผู้รอดหายากจากเปลือกที่ถูกทำลายเกือบเร็วเท่าที่มันก่อตัว

ปลายยุคการถล่มตรงกับทวีปที่อยู่รอดชุดแรก เมื่อ bombardment ลดลงผ่านช่วง 4.0–3.9 Ga เปลือกจึงสามารถหนาขึ้นและคงอยู่ หินทวีปเก่าแก่ที่สุดที่รอดอยู่ปรากฏราวช่วงเปลี่ยนผ่านเดียวกัน ผู้เขียนใช้ถ้อยคำระวังว่า การที่เปลือกทวีปคงทน

ปรากฏช่วงนี้ “น่าจะไม่ใช่เรื่องบังเอิญ”

ข้ออนุมานพาดหัวของพวกเขาคือ ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ — เปลือกบางและหลอมเหลวไม่กี่กิโลเมตรใต้พื้น — **plate tectonics ใน Hadean ไม่น่าเป็นไปได้**

พวกเขายังแสดงว่าทำไมงานก่อนหน้าได้ข้อสรุปตรงข้าม งานก่อนที่ศึกษาการชนแบบ stochastic พบผลเพียงเล็กน้อย โดยเปลือกหลอมไม่ถึง 2.5% ณ เวลาใด ๆ งานเหล่านั้นละสองสิ่งที่งานนี้รวม: ผลทั่วโลกของการชนขนาดใหญ่ต่อการหลอมลึกใน mantle และการพาความร้อนนั้นขึ้นบนด้วย magma ที่ลอยขึ้น เมื่อใส่สองอย่างกลับเข้าไป ภาพความร้อนเปลี่ยนอย่างมาก

ทำไมแบบจำลองไม่ใช่ความทรงจำ

ทุกอย่างข้างต้นเป็นผลจาก การจำลอง ไม่ใช่ค่าที่อ่านจากหิน Hadean — เพราะหินเหล่านั้นแทบไม่เหลืออยู่ นี่ไม่ได้ทำให้ผลอ่อน แต่กำหนดว่าผลชนิดไหน

ห่วงโซ่คือ: *แบบจำลอง* impact flux ป้อน *แบบจำลอง* การไหลของความร้อนใน mantle และเปลือก ซึ่งตรวจเทียบกับ *แบบจำลอง* ว่าหินเฉพาะชนิดหลอมอย่างไร แต่ละลิงก์มีแรงจูงใจทางฟิสิกส์และชุดทดสอบมาตรฐาน เท่าที่ทำได้ — แต่ทั้งก้อนคือข้อโต้แย้งที่สอดคล้องกันว่า Hadean *ควรต้อง* มีสภาพอย่างไรภายใต้ฟิสิกส์ที่สมเหตุผล ไม่ใช่การวัดว่า *จริง ๆ* มันเป็นอย่างไร

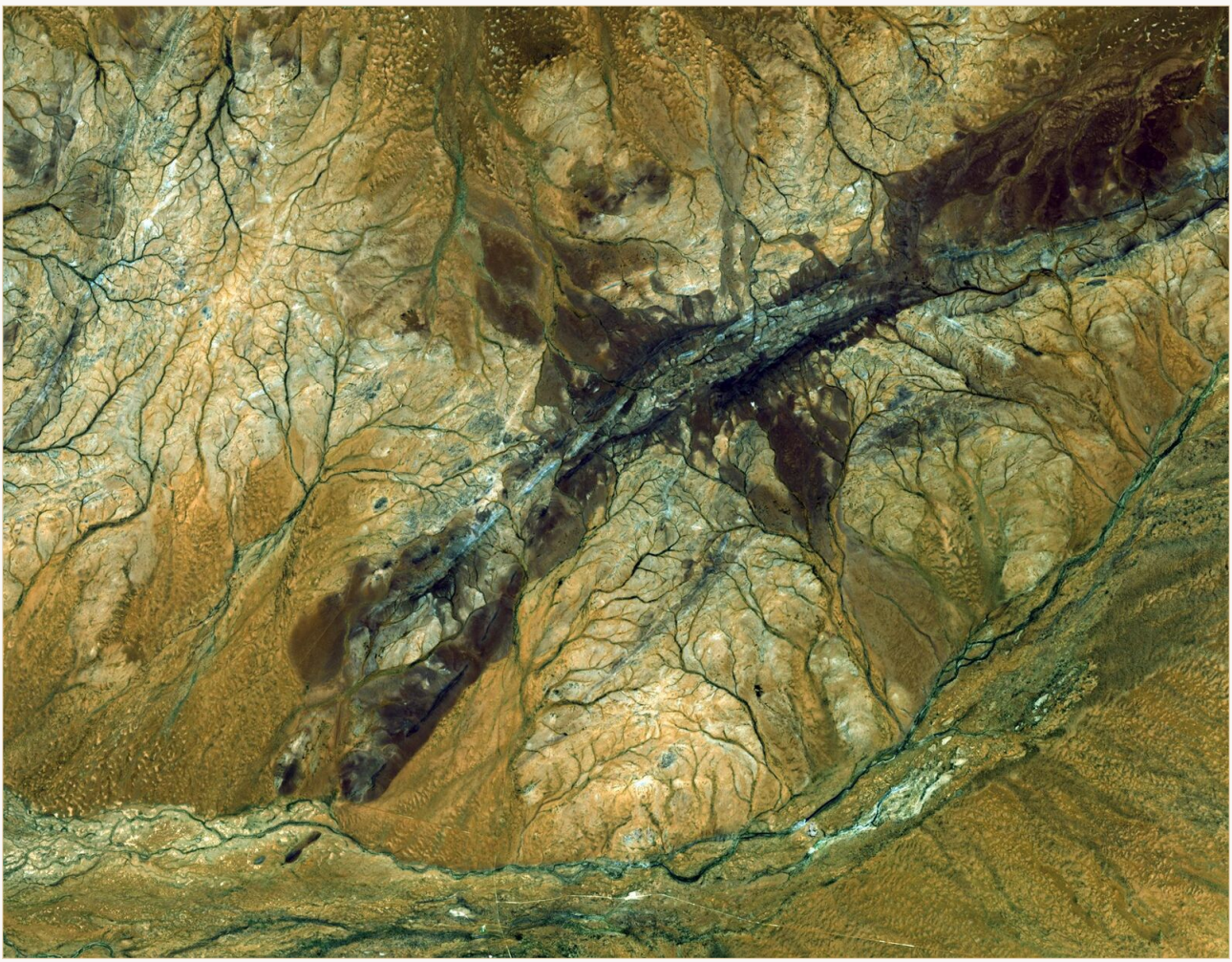
นี่คือเหตุผลที่สมมติฐานอนุรักษ์นิยมของผู้เขียนสำคัญกว่าที่ดู เพราะพวกเขาเลือก heating เป็น lower bound แล้วก็ยังได้เปลือกตื้นที่หลอมอย่างกว้างขวาง ข้อสรุปเชิงคุณภาพ — เปลือก Hadean ร้อนและอ่อน — จึง robust ต่อการเลือก แต่สิ่งที่งาน *ไม่ได้* ตรึงคือเลขละเอียด: geotherm ที่แน่นอน melt fraction ที่แน่นอน ความหนาเปลือกที่แน่นอน ให้เชื่อทิศทางของผลอย่างมาก และมองทศนิยมว่า provisional

สิ่งที่ผลนี้ *ยังพิสูจน์ไม่ได้*

- **ไม่ได้** สังเกตเปลือก Hadean โดยตรง หินจากยุคนี้แทบไม่มี นี่คือผลแบบจำลองว่าฟิสิกส์บอกอะไร ไม่ใช่ค่าที่วัด
- **ไม่ได้** พิง “Late Heavy Bombardment” impact flux ที่ใช้ลดลงและ stochastic — แบบจำลองไม่ต้องการและไม่ได้เรียกใช้ spike การถล่มฉับพลัน
- **ไม่ได้** ปิดข้อถกเถียง plate tectonics คำว่า “ไม่น่าเป็นไปได้” ตรงนี้เป็นข้ออนุมานทางฟิสิกส์ที่แข็งแรง สนับสนุนโลกยุคต้นแบบ stagnant-lid หรือ squishy-lid ที่ร้อน — แต่โหมด tectonic ใน Hadean ยังถกเถียงจริง
- **ไม่ได้** พิสูจน์ว่าการชน *ทำให้* ทวีปปรากฏราว 4.0–3.9 Ga การตรงกันของเวลาเป็นความสัมพันธ์ที่แข็งแรงซึ่งผู้เขียนเองเรียกว่า “น่าจะไม่ใช่เรื่องบังเอิญ” — เป็นภาษาระมัดระวังสำหรับ correlation ที่น่าสนใจ ไม่ใช่เหตุที่พิสูจน์แล้ว
- Zircon จาก Jack Hills **ไม่ใช่** ทวีปที่ถูกเก็บรักษา มันเป็นเม็ดแร่รอดหายากที่แสดงว่ามีวัสดุ felsic และน้ำตั้งแต่ต้น; แก่นของแบบจำลองคือเปลือกที่สร้างมันถูกรีไซเคิลไปเกือบหมด
- **ไม่ได้** สร้างประวัติโลกยุคต้นทั้งหมด การจำลองเป็น idealized — profile 1D และ slice เส้นศูนย์สูตร 2D โดย impact จำกัดใกล้เส้นศูนย์สูตร เก็บเป็น snapshot — ไม่ใช่แบบจำลองสี่มิติเต็มของดาวเคราะห์

หลักฐานแข็งแรงแค่ไหน?

สำหรับข้ออ้างกลาง — impact heating เป็นตัวควบคุมอันดับแรกของเปลือก Hadean ทำให้มันบางและหลอมตื้น — ข้อโต้แย้งสอดคล้องและในแง่สำคัญเป็นแบบอนุรักษ์นิยม ใช้โค้ด geodynamics ที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐาน อินพุตที่สมเหตุผลทางฟิสิกส์ และสมมติฐาน lower bound พร้อมรวมแหล่งความร้อนที่แบบจำลองก่อนหน้าส่วนใหญ่ละเลย มันยังเพิ่มความน่าเชื่อถือด้วยการอธิบายข้อเท็จจริงดื้อ ๆ สองข้อพร้อมกัน: ทำไมหินเก่ากว่า ~4 Ga แทบไม่รอด (รีไซเคิลเกือบหมด) และทำไมเปลือกที่คงอยู่เริ่มปรากฏพอดีกับช่วง bombardment ลดลง



Jack Hills ในออสเตรเลียตะวันตก จากเครื่อง ASTER ของ NASA Zircon จากบริเวณนี้รวมวัสดุเก่าแก่ที่สุดบางส่วนที่รู้จักจากเปลือกโลกยุคต้น เป็นเบาะแสเล็ก ๆ จากบรมยุคที่หินส่วนใหญ่ถูกลบออก

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

ข้อจำกัดก็ชัดเท่า ๆ กัน และเป็นข้อจำกัดของแบบจำลอง deep time ทุกชนิด: เป็นแบบจำลองซ้อนบนแบบจำลอง ยึดกับบันทึกหินที่บางมาก และข้อสรุปที่นำไปพาดหัวง่ายที่สุด — “plate tectonics ไม่น่าเป็นไปได้” — เป็นการอนุมาน ไม่ใช่การสังเกต ท่าทีที่เหมาะคือมองว่านี่เป็นสมมติฐานที่แข็งแรงและให้เหตุผลดี ซึ่งจัดกรอบ Hadean ใหม่และเชื้อเชิญให้คนอื่นทดสอบสมมติฐาน — โดยเฉพาะการเลือกแบบจำลอง impact flux — ไม่ใช่คดีที่ปิดแล้ว

สรุปที่มีประโยชน์ที่สุดไม่ใช่ “Hadean เป็นแบบนี้แน่” และไม่ใช่ “มันก็แค่ การจำลอง” แต่คือ: ภายใต้ฟิสิกส์ที่สมเหตุผลและอนุรักษ์นิยม โลกยุคต้นที่ถูกถล่มหนักจะมีเปลือกบาง กึ่งหลอม และรีไซเคิลตัวเอง — และแนวคิดเดียวนี้อธิบายสิ่งเล็กน้อยที่เรามองเห็นจริงได้มากอย่างน่าประหลาด

ทำไมจึงสำคัญ

ภาพยอดนิยมของโลกยุคต้นมักแกว่งระหว่างสุดขั้วสองฝั่ง: โลกน้ำสงบที่มี plate tectonics คล้ายวันนี้ หรือดาวเคราะห์ลาวานรก งานนี้วาดกลางทางที่เฉพาะและมีฐานฟิสิกส์: เปลือกบางที่ถูกหลอมซ้ำจากความลึกเพียงไม่กี่กิโลเมตร ถูกทำลายและสร้างใหม่ต่อเนื่อง โดยการชน — ไม่ใช่ความร้อนภายใน — เป็นตัวกำหนดเงื่อนไข

การจัดกรอบใหม่นี้ทำงานจริง มันเสนอกลไกเดียวสำหรับข้อเท็จจริงใหญ่สองข้อเกี่ยวกับวัยทารกของโลก — การแทบไม่มีบันทึกหิน และเวลาที่ทวีปคงทนชุดแรกปรากฏ — พร้อมวางกระบวนการที่มักถูกละเลยอย่าง impact heating ไว้กลางเรื่อง หากยืนระยะได้ มันจะเปลี่ยนวิธีคิดว่าโลกกลายเป็นดาวเคราะห์ที่มีทวีปเสถียรเมื่อใด และยังนำไปใช้คิดกับโลกหินดวงอื่นที่ก่อตัวภายใต้การถล่มของตัวเองได้

ทั้งหมดนี้ไม่ต้องการให้แบบจำลองเป็นคำสุดท้าย แค่ต้องเป็นสมมติฐานที่ดีพอจะทดสอบ — และด้วยการผูกตัวเองกับบันทึก zircon และ isotope ที่รอด มันก็เป็นเช่นนั้น "hidden Hadean" ในชื่อคือประเด็นพอดี: ยุคที่เราเข้าถึงได้แทบเฉพาะด้วยการสร้างแบบจำลอง เพราะยุคนั้นลบหลักฐานของตัวเองไปแล้ว

สรุป

บรมยุคแรกของโลก Hadean (ก่อน ~4.03 Ga) แทบไม่ทิ้งบันทึกหิน งานแบบจำลองนี้ถามว่าเปลือกจะเป็นอย่างไรเมื่อรวมแหล่งความร้อนที่มักถูกละไว้: การชน โดยใช้แบบจำลอง impact flux แบบ stochastic ที่ลดลงตามเวลา ร่วมกับ การจำลอง 1D และ 2D ที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐาน ของการไหลความร้อนในเปลือกและ mantle (รวมความร้อนที่ magma ลอยขึ้นพามา) ผู้เขียนพบว่าความร้อนจากการชนที่รวมตามเวลาจะสูงกว่าความร้อนภายในโลกทั้งหมดอย่างน้อยหนึ่งลำดับขนาดตลอด Hadean ส่วนใหญ่ ผลคือเปลือกบาง (ต่ำกว่า ~5 กม.) ที่หลอมบางส่วนตั้งแต่ความลึกเพียงไม่กี่กิโลเมตร และที่ ~5 กม. หลอมมากกว่า 30% — อ่อนเกินกว่าจะรองรับ plate tectonics ซึ่งผู้เขียนเรียกว่าไม่น่าเป็นไปได้สำหรับ Hadean เปลือกแบบนี้จะรีไซเคิลกลับลง mantle เกือบหมด อธิบายได้ว่าทำไมวัสดุ Hadean จึงรอดน้อยมาก; เมื่อ impact ลดลงผ่านช่วง 4.0–3.9 Ga เปลือกทวีปที่อยู่รอดจึงก่อตัวได้ ราวเดียวกับที่หิน felsic รอดเก่าแก่ที่สุดปรากฏ — "น่าจะไม่ใช่เรื่องบังเอิญ" ตามถ้อยคำระวังของผู้เขียน เพราะทีมจงใจใช้ heating แบบอนุรักษ์นิยมและ lower bound ผลเชิงคุณภาพจึง robust แม้ตัวเลขละเอียดไม่ได้ถูกตรึง นี่เป็นแบบจำลองวัยทารกของโลกที่แข็งแรงและสอดคล้อง — ไม่ใช่การสังเกตโดยตรง

ประเมินแบบไม่เกินจริง

งานวิจัยแสดงอะไร: ใน การจำลอง ที่มีฐานฟิสิกส์และรวม impact heating กับการขนความร้อนโดย magma เปลือก Hadean ออกมาบางและหลอมบางส่วนเพียงไม่กี่กิโลเมตรใต้พื้น โดยความร้อนจากการชนครองเหนือความร้อนภายใน รีไซเคิลกลับ mantle เกือบหมด และ — ในแบบจำลองนี้ — ไม่สามารถรองรับ plate tectonics

อะไรที่เป็นไปได้แต่ยังไม่พิสูจน์: การชนเป็นเหตุให้ทวีปคงทนปรากฏราว 3.9 Ga; Hadean เป็นโลกแบบ stagnant- หรือ squishy-lid แทน plate tectonics ยุคต้น; หิน Hadean แทบไม่รอดโดยเฉพาะเพราะเปลือกหลอมรีไซเคิลตัวเอง

มันไม่ได้แสดงอะไร: การวัดเปลือก Hadean โดยตรง; คำตอบที่ปิดข้อถกเถียง plate tectonics; ความเชื่อมโยงเชิงเหตุที่พิสูจน์แล้วระหว่าง bombardment ที่ลดลงกับทวีปแรก; ว่า zircon Jack Hills คือทวีปที่รอด; หรือแบบจำลองโลกยุคต้นแบบสมบูรณ์

ข้อจำกัดหลัก: บันทึกหิน Hadean แทบไม่มี ดังนั้นผลเป็นแบบจำลองที่ถูกบังคับด้วยข้อมูลน้อยมาก; ซ้อนแบบจำลองต่อกัน (impact flux → geodynamics → phase equilibria); impact flux เองเป็นตัวเลือกตัวแทนที่ไม่แน่นอน; การจำลอง เป็น

idealized (1D และ slice เส้นศูนย์สูตร 2D, snapshot ตามเวลา) สมมติฐาน lower bound แบบอนุรักษ์นิยมทำให้ข้อสรุปเชิงคุณภาพแข็งแรงขึ้น แต่ไม่ได้ทำให้ geotherm รายละเอียดแม่นยำ

ผู้อ่านทั่วไปควรมั่นใจแค่ไหน? สูงว่าภายใต้ฟิสิกส์ที่สมเหตุผล โลกยุคต้นซึ่งถูกถล่มหนักจะมีเปลือกร้อน บาง และหลอมตื้นปานกลางว่าสิ่งนี้ทำให้ plate tectonics ใน Hadean ไม่น่าเกิดและอธิบายบันทึกหินที่หายไป ต้าต่อข้ออ้างว่านี่ *พิสูจน์* ว่าทวีปก่อตัวอย่างไรหรือเมื่อใดพอดี — นี่คือแบบจำลองอนุรักษ์นิยมที่แข็งแรงและจัดกรอบ Hadean ใหม่ ไม่ใช่การมองตรงไปยังยุคนั้น

แหล่งข้อมูล

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