



The CLEAN PAPER

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

一次薄而半熔融的初生地殼：一個以撞擊而非內部熱量為主導的冥古宙模型

地球的第一個冥古宙幾乎沒有留下岩石記錄。這項建模研究詢問，一旦停止忽略撞擊，地殼會是什麼樣子。作者使用隨機遞減撞擊通量模型和地殼與地幔熱流的基準模擬，發現撞擊熱量在冥古宙大部分時間裡至少超過地球全部內部熱量一個數量級，留下薄（約 5 公里以下）且在幾公里深處部分熔融的地殼——他們認為這太脆弱了，無法支持板塊構造，並且傾向於自我循環回地幔，這也解釋了為什麼冥古宙物質幾乎無一倖存。隨著撞擊在約 39 億年前減弱，持續的大陸地殼才能形成，恰與最古老的長英質岩石出現的時機一致——用作者謹慎的話說，「很可能不是巧合」。由於刻意使用了保守的下界加熱值，定性結果是穩健的，即使精確數字未定。

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso
· 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](https://doi.org/10.1126/science.aeb5402)

地球故事中幾乎不剩書頁的那一章

地球是我們已知唯一擁有大陸的星球——我們賴以生存的浮力富硅陸地。然而，大陸最初是如何形成的，是地質學中最古老的未解之謎之一，原因很殘酷：證據幾乎完全消失了。

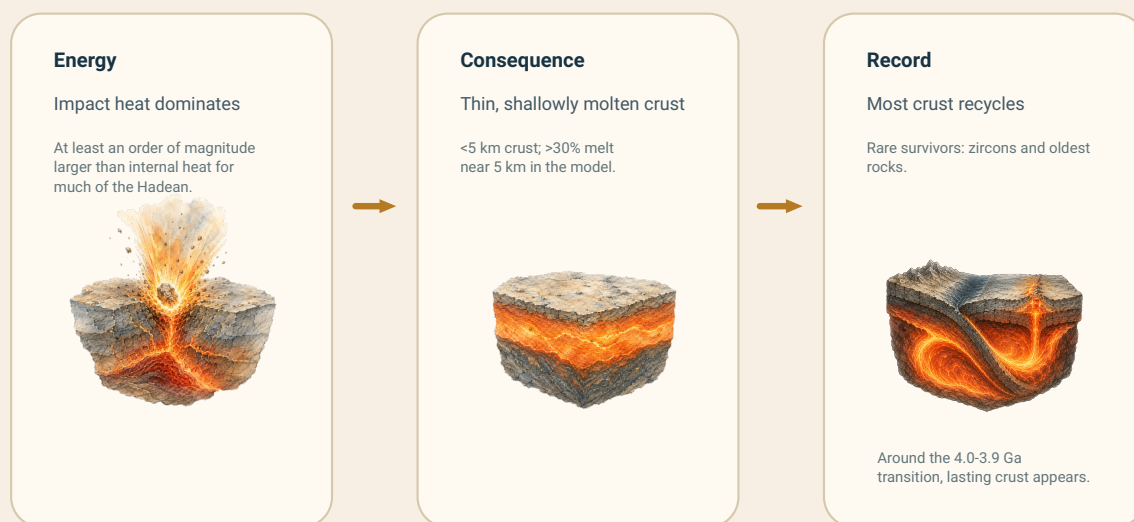
地球的第一個冥古宙，從行星誕生一直持續到約 40.3 億年前。在那最初的五億年裡，幾乎沒有任何東西倖存。最古老的完整長英質（大陸型）岩石距今約 40.3 億年。少數稀有的玄武岩可達約 42 億年。任何種類的最古老物質，是一把鋯石晶體——最著名的是來自西澳大利亞傑克山的那些——定年在 44 億年。這就是地球嬰兒期的全部檔案：幾個地點和一些沙粒大小的礦物。

這項研究並沒有為那個檔案增添一塊新岩石。它做了一件不同的事：它構建了一個物理模型，描述在那種物理學下冥古宙地殼會是什麼樣子，並提出了一個大多數早期地球模型忽略的問題。當你不再忽略早期地球正在遭受轟炸這一事實時，會發生什麼？

作者得出的答案引人注目。在冥古宙的大部分時間裡，撞擊傳遞的熱量會淹沒地球所有的內部熱量，使地殼變得薄而半熔融——他們認為它太脆弱了，無法支持任何類似現代板塊構造的東西。這是一個模型，不是一段記憶。但這是一個，終於嘗試解釋它所描述的時代的那份暴力的模型。

A model of the Hadean, not a memory of it

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



撞擊熱量主導了模型的能量預算，薄而淺層熔融的地殼自我循環，持續的大陸地殼僅在大約 40–39 億年的過渡期才出現。這是冥古宙的一個模型，而非對它的直接記憶。

作者做了什麼

團隊組合了三個通常被分開使用的要素。

第一，一個**撞擊通量的隨機模型**——在冥古宙和早太古代襲擊內太陽系的小行星和更大天體的雨。關鍵的是，這不是舊的「晚期大轟炸」尖峰概念。這是一個早期密集並**隨時間衰減**的通量，大型撞擊隨機（隨機地）到達，而不是按時間表。該模型由月球和內太陽系撞擊統計數據重新標定，並選擇與鉛石年齡譜和可獲得的古地磁證據一致。

第二，關於熱量如何通過地殼和上地幔傳輸的**地球動力學模擬**。他們使用了一個經過基準測試的格子玻爾茲曼代碼（Planet_LB），既運行了簡單的一維溫度對深度的計算，也運行了 41 億年前地幔的完整二維對流快照。這些包括普通的內部熱源——放射性衰變和來自地核的熱量——以及重要的**岩漿平流**：由上升熔體攜帶向上的熱量，這是大多數地殼熱模型遺漏的因素。

第三，對現實早期地殼的**相平衡建模**——一個來自 Nuvvuagittuq 綠岩帶的水化冥古宙變玄武岩——以計算出這種岩石在什麼溫度和深度下會開始熔融。

有一個方法學選擇影響著你如何閱讀整篇論文：作者刻意將牌堆向不利於他們自己結論的方向傾斜。他們假設了一個「非球粒隕石」地幔（比球粒隕石參考值含有更少產熱放射性物質的地幔），其內部加熱不到標準模型的一半，使用了保守的加熱率，並且忽略了來自年輕、近距離月球的潮汐加熱。這意味著他們計算的地殼溫度是**最小值**——下界。如果有什麼不同的話，真實的冥古宙比他們模擬的更熱。

他們發現了什麼

撞擊，而非內部熱量，主導了冥古宙的能量預算。當撞擊熱量在時間上積分時，它使內部貢獻相形見绌——在冥古宙的大部分時間裡至少高出一個數量級。在這幅圖景中，撞擊加熱而非放射性衰變，是驅動早期構造活動的主要引擎，而且它無處不在，融化著任何暴露的東西。

沒有放射性庇護所。因為撞擊熱量襲擊地表，它集中在最上面幾十公里處——恰好是地殼所在。放射性加熱雖然小得多，但分佈在整個地幔深處。上面的熱量極多，下面的熱量極少且分佈廣泛。脆弱的礦藏無處可藏。

薄而淺層熔融的地殼。在撞擊主導的模型運行中，地殼非常薄——可能不到約 5 公里——並在其底部幾公里處部分熔融。在約 5 公里深度處，熔體分數超過 30%，使地殼在機械上變得脆弱。受撞擊加熱的淺層被鎖定在一個循環中：熔融，重新混合回地幔，然後重新出現。這將解釋為什麼沒有冥古宙岩石倖存：不是它們從未存在過，而是它們不斷被抹除。

持久的大陸地殼在撞擊減弱時出現。只有當撞擊在約 40–39 億年的過渡期減弱時，足夠厚、足夠浮力的地殼才能持續存在而不被重新混合。這種持久的大陸地殼恰在最古老的長英質岩石開始出現的同一個窗口中形成——作者指出這「很可能不是巧合」。

板塊構造不太可能發生。在如此薄且淺層熔融的地殼中，該模型表明冥古宙板塊構造是「不可行的」。這並不意味著板塊構造從未在其他時間發生過，或在地球歷史的更晚階段沒有啟動——但它排除了冥古宙是板塊構造的。

為什麼模型不是記憶

上面的一切都是模擬的輸出，而不是從冥古宙岩石讀取的測量——因為這些岩石幾乎全部已不復存在。這並不使結果變弱，但它確定了這是哪一類型的結果。

鏈條是這樣的：一個撞擊通量模型饋入一個地幔和地殼熱流的模型，再與一個關於特定岩石如何熔融的模型進行校驗。每個環節在物理上都有動機，並且在可能的情況下都經過了基準測試——但整體是一個關於冥古宙必定是什麼樣子的自洽論證，基於合理的物理學，而不是對冥古宙實際是什麼樣子的測量。

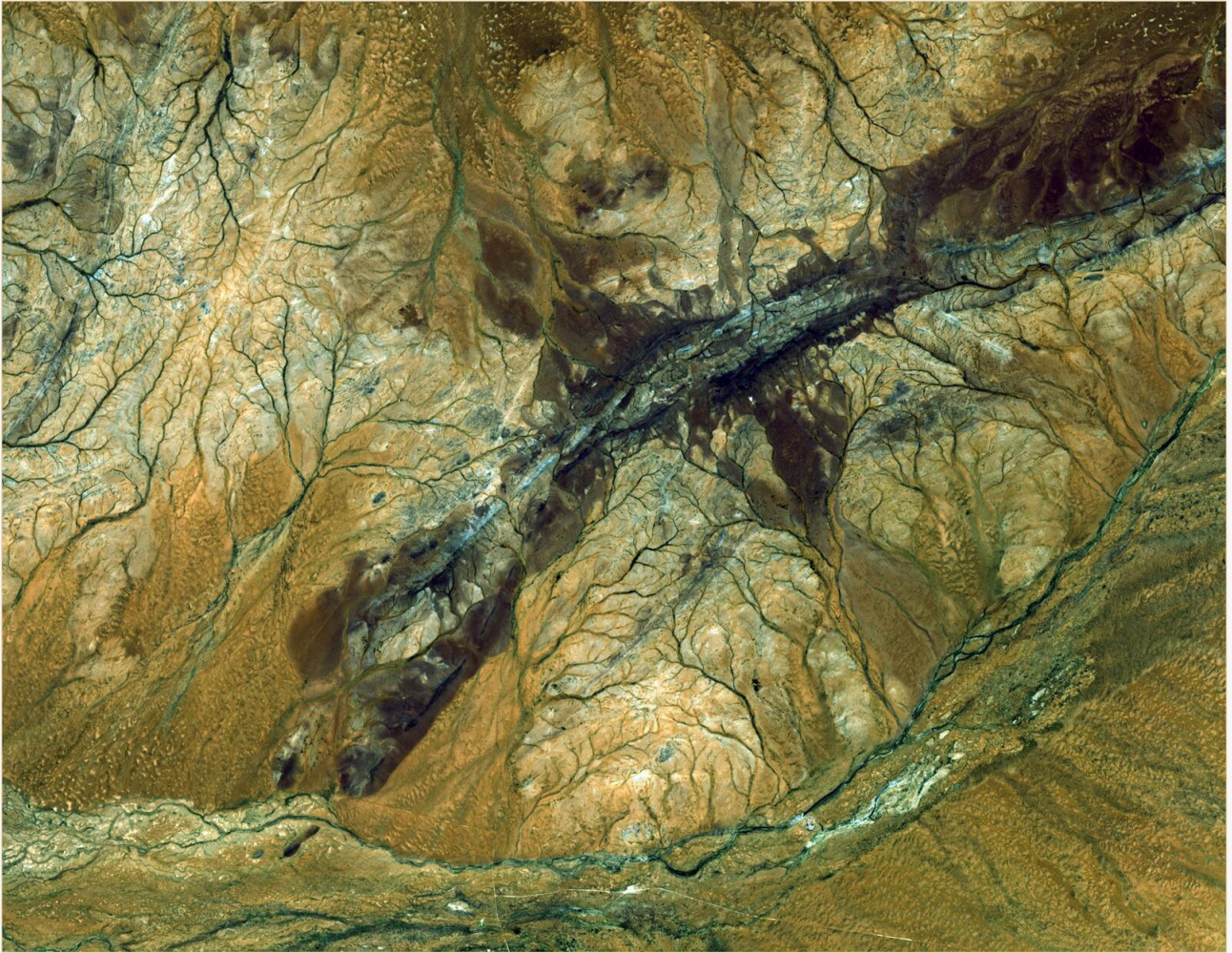
這就是為什麼作者的保守假設比它們看起來更為重要。因為他們選擇了下界加熱值，並忽略了潮汐加熱，卻仍然得到了普遍熔融的淺層地殼，所以定性結論——冥古宙地殼是熱的、弱的——對他們的選擇是穩健的。而不被此項研究所確定的是精確的數字：確切的地溫梯度、確切的熔融分數、確切的地殼厚度。將結果的方向視為強有力的，將小數點後的數字視為暫時性的。

這沒有證明什麼

- 它**沒有**直接觀察冥古宙地殼。幾乎沒有來自這個時代的岩石；這是一個關於物理學暗示了什麼的結果，而不是一次測量。
- 它**沒有**依賴於「晚期大轟炸」。所使用的撞擊通量是遞減的、隨機的——模型不需要，也不調用，一次突然的轟炸尖峰。
- 它**沒有**解決板塊構造的辯論。「不可行」在這裡是一個強有力的、物理上紮根的推論，傾向於一個熱的、停滯蓋或軟蓋的早期地球——但冥古宙的構造模式仍然真正存在爭議。
- 它**沒有**證明撞擊導致了大陸在約 40–39 億年過渡期出現。時間上的匹配是一個強有力的關聯，作者自己稱之為「很可能不是巧合」——這是對一個引人注目的相關性的謹慎措辭，而不是一個被證明的原因。
- 傑克山鎢石**不是**被保存的大陸。它們是稀有的倖存顆粒，表明長英質物質和水存在得很早；該模型的全部要點是，製造了它們的地殼大部分被循環回收了。
- 它**沒有**重建早期地球的完整歷史。模擬是理想化的——一維剖面和二維赤道切片，撞擊限制在赤道附近，以快照形式捕捉——而不是一個完整的行星四維模型。

證據有多強

對於其核心主張——撞擊加熱是冥古宙地殼的一階控制因素，使其保持薄且淺層熔融——該論證是自洽的，並且在一個重要的意義上，是保守的。它使用了一個經過基準測試的地球動力學代碼、物理上合理的輸入和下界假設，並整合了一個大多數先前模型直接忽略的熱源。它還通過同時解釋兩個頑固的事實贏得了可信度：為什麼幾乎沒有比約 40 億年更古老的岩石倖存（近乎完全的循環），以及為什麼持久的地殼恰在轟炸消退時出現。



傑克山，西澳大利亞，由 NASA 的 ASTER 儀器拍攝。來自該地區的鑽石包括一些已知最古老的地球早期地殼倖存物質，是一個岩石大部分被抹去的冥古宙留下的微小線索。

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

其局限同樣清晰，它們是任何深時模型的局限：它是模型疊在模型之上，錨定在一個非常稀疏的岩石記錄上，而其最可引用的結論——「板塊構造是不可行的」——是一個推論，而非一個觀察。正確的姿態是將其視為一個強有力的、推理良好的假設，它重新構建了冥古宙，並現在邀請其他人檢驗其假設——尤其是撞擊通量模型的選擇——而不是將其視為一個已結案的結果。

最有用的總結既不是「這就是冥古宙的樣子」，也不是「它只是一個模擬」。而是：給定合理的、保守的物理學，一個處於重轟炸下的早期地球將擁有薄、半熔融、自我循環的地殼——而這一個想法就解釋了我們實際能看到的少得驚人的事實。

為什麼重要

早期地球的流行形象往往在兩個極端之間搖擺：一個寧靜的、板塊構造的水世界，幾乎像今天一樣；或一個地獄般的熔岩行星。這項工作勾勒出一個具體的、物理上有動機的中間狀態：一個地殼很薄且在幾公里以下反覆重新熔融的星球，不斷被摧毀和重新製造，撞擊——而非內部熱量——設定了條件。

這種重新構建做了真正的工作。它為地球嬰兒期的兩個最大事實提供了一個機制——岩石記錄的近乎完全缺失，以及第一個持久大陸出現的時機——並將一個通常被忽視的過程，撞擊加熱，置於故事的中心。如果它成立，它將改變我們對地球何時成為一個擁有穩定大陸的行星的推理方式，並將其帶到那些在自身轟炸下形成的其他岩石世界上。

這一切都不要求該模型是最終結論。它要求它是一個足夠好的假設來檢驗——而通過將自己與倖存的鉛石和同位素記錄綁定，它確實是。標題中的「隱藏的冥古宙」正是重點：一個我們大多數只能通過建模來觸及的時代，因為這個時代抹去了自己的證據。

簡潔摘要

地球的第一個冥古宙（約 40.3 億年前之前）幾乎沒有留下岩石記錄。這項建模研究詢問，一旦加入一個通常被忽略的熱源——撞擊——地殼會是什麼樣子。使用一個隨機遞減撞擊通量模型，連同地殼和地幔熱流的經過基準測試的一維和二維模擬（包括由上升熔體攜帶的熱量），作者發現，時間積分的撞擊熱量在冥古宙大部分時間裡至少超過地球全部內部熱量一個數量級。結果是一個薄地殼（約 5 公里以下），在幾公里深處部分熔融，並且在約 5 公里深度處熔體超過 30%——太脆弱了，無法維持板塊構造，作者稱其在冥古宙不可行。這樣的地殼大部分會循環回地幔，這也解釋了為什麼冥古宙物質幾乎無一倖存；隨著撞擊在約 40–39 億年過渡期減弱，持久的大陸地殼才能形成，恰與最古老的長英質岩石出現的時間一致——「很可能不是巧合」。由於作者刻意使用了保守的下界加熱值，定性結果是穩健的，即使精確數字未定。這是一個關於地球嬰兒期的強有力的、自治的模型——而非對它的直接觀察。

No-BS 檢查

論文所展示的：在包含撞擊加熱和岩漿熱輸運的物理基礎模擬中，冥古宙地殼呈現出薄且在幾公里深處部分熔融，由撞擊熱量而非內部熱量主導，大部分循環回地幔，並且——在此模型上——無法支持板塊構造。

合理但未經證實的：撞擊是持久大陸約在 39 億年前出現的原因；冥古宙是一個停滯蓋或軟蓋世界，而非早期板塊構造世界；幾乎沒有冥古宙岩石倖存，具體是因為一個熔融的地殼自我循環了。

它沒有展示的：對冥古宙地殼的直接測量；板塊構造辯論的確定答案；轟炸消退與第一個大陸之間被證明的因果聯繫；傑克山鉛石代表被保存的大陸；早期地球的完整模型。

主要局限：冥古宙岩石記錄幾乎不存在，因此結果是一個受極少數數據約束的模型；它將模型疊在模型上（撞擊通量 → 地球動力學 → 相平衡）；撞擊通量本身是一個代表性的、不確定的選擇；模擬是理想化的（一維和二維赤道切片，時間快照）。保守的下界假設加強了定性結論，但並未使具體的地溫梯度變得精確。

普通讀者應抱有多大信心？高度信心認為，在合理的物理學下，一個遭受重轟炸的早期地球將會有一個熱、薄、淺層熔融的地殼。中等信心認為這使冥古宙板塊構造不太可能，並解釋了缺失的岩石記錄。低信心認為這證明了大陸是如何形成的或確切何時——這是一個強有力的、保守的模型，它重新

構建了冥古宙，而不是對它的一次直接觀察。

來源

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