The Clean Paper

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

Nazik, yarımərimiş ilk qabıq: Hadean-ı daxili istilik yox, zərbələrin idarə etdiyi model

Yerin ilk eonu Hadean demək olar heç bir süxur record-u saxlamayıb. Bu modelling study impacts-ı görməzliyə vurmağı dayandıranda qabığın necə olacağını soruşur. Stochastic, azalan impact-flux modeli və qabıq-mantiya heat flow-un benchmark edilmiş simulations-ından istifadə edən müəlliflər impact heat-in Hadean-ın böyük hissəsində Yerin bütün daxili istiliyini ən azı bir order of magnitude üstələyəcəyini, ~5 km-dən nazik və cəmi bir neçə kilometr aşağıda qismən ərimiş qabıq yaradacağını tapırlar — onların fikrincə plate tectonics üçün çox zəif və özünü mantiyaya recycle etməyə meylli, bu da Hadean materialının niyə az qaldığını izah edə bilər. Impacts ~3.9 Ga-dan sonra zəiflədikcə davamlı continental crust ən qədim sağ qalmış felsic rocks göründüyü vaxtda yarana bilərdi — müəlliflərin diqqətli ifadəsi ilə "likely not a coincidence". Konservativ lower-bound heating istifadə edildiyinə görə keyfiyyət nəticəsi möhkəmdir, dəqiq rəqəmlər isə sabit deyil. Bu, Yerin körpəliyinin güclü coherent modelidir — birbaşa müşahidəsi yox.

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

Yer tarixinin demək olar heç bir səhifəsi qalmayan fəsli

Yer bildiyimiz planetlər arasında qitələrə — hamımızın yaşadığı, yüngül və silisiumla zəngin quru sahələrinə — malik yeganə planetdir. Amma qitələrin ilk dəfə necə yarandığı geologiyanın ən qədim açıq problemlərindən biridir və səbəbi sərtdir: dəlillər demək olar tamamilə yox olub.

Yerin ilk eonu olan Hadean planetin yaranmasından təxminən 4.03 milyard il əvvələ (Ga) qədər davam edir. Həmin ilk yarım milyard ildən demək olar heç nə qalmayıb. Ən qədim bütöv felsic (qitə-tipli) süxurlar təxminən 4.03 Ga yaşındadır. Bir neçə nadir bazalt süxuru ~4.2 Ga-ya çatır. İstənilən növdə ən qədim material isə əsasən Qərbi Avstraliyadakı Jack Hills-dən məlum, 4.4 Ga yaşlı səpələnmiş zircon kristallarıdır. Yerin körpəlik arxivi bundan ibarətdir: bir ovuc yer və qum dənəsi ölçüsündə minerallar.

Bu tədqiqat həmin arxivə yeni süxur əlavə etmir. Başqa iş görür: həmin fizika altında Hadean qabığının necə görünməli olduğuna dair fiziki model qurur və erkən Yer modellərinin çoxunun kənarda saxladığı sualı verir. Erkən Yerin bombardman edildiyi faktını görməzliyə vurmağı dayandıranda nə baş verir?

Müəlliflərin cavabı diqqətçəkəndir. Hadean-ın böyük hissəsində zərbələrin gətirdiyi istilik Yerin bütün daxili istiliyini üstələyərdi və qabığı nazik, yarımərimiş saxlayardı — müəlliflərin fikrincə, müasir plate tectonics-ə bənzər sistem üçün çox zəif. Bu modeldir, yaddaş deyil. Amma təsvir etdiyi dövrün zorakılığını bu dəfə hesaba almağa çalışan modeldir.

A model of the Hadean, not a memory of it

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

Energy

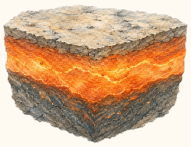
Impact heat dominates

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

Consequence

Thin, shallowly molten crust

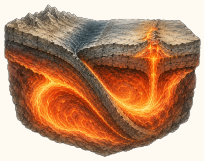
<5 km crust; >30% melt near 5 km in the model.



Record

Most crust recycles

Rare survivors: zircons and oldest rocks.



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

Modelin enerji büdcəsində zərbə istiliyi üstünlük təşkil edir, nazik və səthə yaxın ərimiş qabıq özünü təkrar emal edir, davamlı qitə qabığı isə yalnız təxminən 4.0–3.9 Ga keçidində görünür. Bu, Hadean-ın modelidir, onun

birbaşa yaddaşı deyil.

The Clean Paper CC BY 4.0

Müəlliflər nə etdilər

Komanda adətən ayrı saxlanılan üç komponenti birləşdirdi.

Birincisi, Hadean və erkən Archean boyunca asteroidlərin və daha böyük cisimlərin daxili Günəş sisteminə düşməsini təsvir edən **stochastic impact-flux modeli**. Kritik olaraq, bu, köhnə “Late Heavy Bombardment” adlı tək sıçrayış ideyası deyil. Flux əvvəlcə güclü olub zamanla **azalır**, böyük zərbələr isə cədvəl üzrə yox, təsadüfi (stochastic) gəlir. Model Ay və daxili Günəş sistemi zərbə statistikasından rescale edilib və zircon yaş spektrləri ilə mövcud paleomagnetic dəlillərə uyğun seçilib.

İkincisi, istiliyin qabıq və yuxarı mantiyada necə hərəkət etdiyini göstərən **geodynamic simulations**. Onlar benchmark edilmiş lattice-Boltzmann kodundan (Planet_LB) istifadə edib həm sadə 1D temperatur-dərinlik hesablamaları, həm də 4.1 Ga üçün mantiyanın tam 2D convection snapshot-larını işlətdilər. Modellərə adi daxili istilik mənbələri — radioaktiv parçalanma və nüvədən gələn istilik — və vacib şəkildə **magmatic advection**, yəni qalxan ərintinin yuxarı daşıdığı istilik də daxil edildi; qabığın thermal modellərinin çoxu bunu buraxır.

Üçüncüsü, real erkən qabıq materialının — Nuvvuagittuq greenstone belt-dən hidratlaşmış Hadean metabasaltının — hansı temperatur və dərinlikdə əriməyə başladığını hesablamaq üçün **phase-equilibrium modelling**.

Bütün paper-in necə oxunmasına təsir edən bir metodoloji seçim var: müəlliflər qəsdən öz nəticələrinə qarşı konservativ şərtlər qurdular. Standart chondritic reference-dən az istilik yaradan radioaktiv material saxlayan və daxili heating-i standart modelin yarısından da az olan “nonchondritic” mantiya qəbul etdilər, konservativ heating rates istifadə etdilər və gənc, Yerə yaxın Ayın tidal heating təsirini nəzərə almadılar. Deməli hesablanan qabıq temperaturları **minimumdur** — aşağı sərhədlər. Əgər fərq varsa, real Hadean modelləşdirilməndən daha isti olmalı idi.

Nə tapdılar

Hadean enerji büdcəsində daxili istilik yox, zərbələr üstün idi. Zərbə istiliyi zaman üzrə inteqrasiya ediləndə Hadean-ın böyük hissəsində daxili töhfəni ən azı bir order of magnitude üstələyir. Bu şəkildə erkən tectonism-i hərəkətə gətirən əsas mühərrik radioaktiv parçalanma yox, impact heating-dir və təxminən **3.9 Ga**-dan sonra kiçik rola düşür.

Bu istilik qabığı nazik və səthə yaxın ərimiş saxlayırdı. Zərbələr və melt advection olmadan model Hadean qabığının yalnız təxminən 10–15 km-dən aşağıda qismən ərimiş

olduğunu verir. Impact heat əlavə ediləndə melt zone kəskin yuxarı qalxır: qabıq cəmi **bir neçə kilometr dərinlikdə** (təxminən 2–5 km-dən aşağı) qismən ərimiş olur. Təxminən 5 km dərinlikdə modellər 30%-dən çox melt verir — süxurun rigid plate kimi bütöv qalmaq üçün çox zəif olduğu vəziyyət. 5–10 km-də ~1000–1100°C temperatur qabığın tərkibindən demək olar asılı olmayaraq geniş əriməsi deməkdir. Qalan bərk qabıq **nazik, təxminən 5 km-dən az** olardı.

Yarımərimiş qabıq öz izini silir. Geniş ərimə sıx, dəmir və maqneziumla zəngin materialın batıb ayrılmasına, daha yüngül, silisiumla zəngin ərintilərin yuxarı qalxmasına imkan verir. Zamanla bu, orta qabıq tərkibini daha evolved, silisiumla zəngin kompozisiyalara aparır — və zircon kristallaşdıra bilən felsic melt yaradır. Bu nazik qabığın demək olar hamısı sonra convecting mantle-a geri recycle olardı; bu, kimyəvi (isotopic) record-la uyğundur. Bu modeldə Hadean süxurlarının demək olar tam yoxluğu arxivdə boşluq deyil — *proqnozdur*. 4.2 Ga süxurları və 4.4 Ga zircon-ları yarandığı qədər sürətlə məhv edilən qabığın nadir sağ qalanlarıdır.

Bombardmanın sonu ilk davamlı qitələrlə üst-üstə düşür. Bombardman 4.0–3.9 Ga keçidində zəiflədikcə qabıq nəhayət qalınlaşıb qala bildi. Ən qədim sağ qalmış qitə süxurları da təxminən həmin keçiddə görünür. Müəlliflər diqqətlə yazır: davamlı continental crust-un bu vaxt yaranması “likely not a coincidence”.

Əsas inference: bu şəraitdə — nazik qabıq, bir neçə kilometr aşağıda ərimiş — **Hadean plate tectonics inandırıcı deyil**.

Onlar əvvəlki işlərin niyə əks nəticəyə gəldiyini də göstərirlər. Stochastic impacts üzrə əvvəlki tədqiqatlar istənilən anda qabığın 2.5%-dən azının ərimiş olduğu kiçik effekt tapmışdı. Həmin işlər bu paper-in daxil etdiyi iki şeyi buraxırdı: böyük zərbələrin dərin mantiyada əriməyə qlobal təsiri və həmin istiliyin qalxan magma ilə yuxarı daşınması. Bunları geri əlavə edəndə thermal mənzərə ciddi dəyişir.

Model yaddaş deyil

Yuxarıdakı hər şey Hadean süxurlarından götürülmüş ölçmə yox, simulations nəticəsidir — çünki həmin süxurların demək olar hamısı artıq yoxdur. Bu, nəticəni zəif etmir, amma onun hansı tip nəticə olduğunu müəyyən edir.

Zəncir belədir: impact flux-un *modeli*, mantle və crust heat flow-un *modelini* qidalandırır, o da konkret süxurun necə əridiyinə dair *model* ilə yoxlanır. Hər halqa fiziki əsaslıdır və mümkün olduğu yerdə benchmark edilib — amma bütöv sistem Hadean-ın plausible fizika altında necə *olmalı olduğu* barədə coherent arqumentdir, onun həqiqətən necə *olduğunun* ölçməsi deyil.

Buna görə müəlliflərin konservativ fərziyyələri göründüyündən vacibdir. Lower-bound heating seçib yenə də səthə yaxın geniş ərimiş qabıq aldıqlarına görə keyfiyyət nəticəsi — Hadean qabığı isti və zəif idi — seçimlərə qarşı dayanıqlıdır. Amma dəqiq rəqəmlər sabitlənmir: dəqiq geotherms, melt fractions və crustal thickness. Nəticənin istiqamətini güclü, onluq rəqəm-

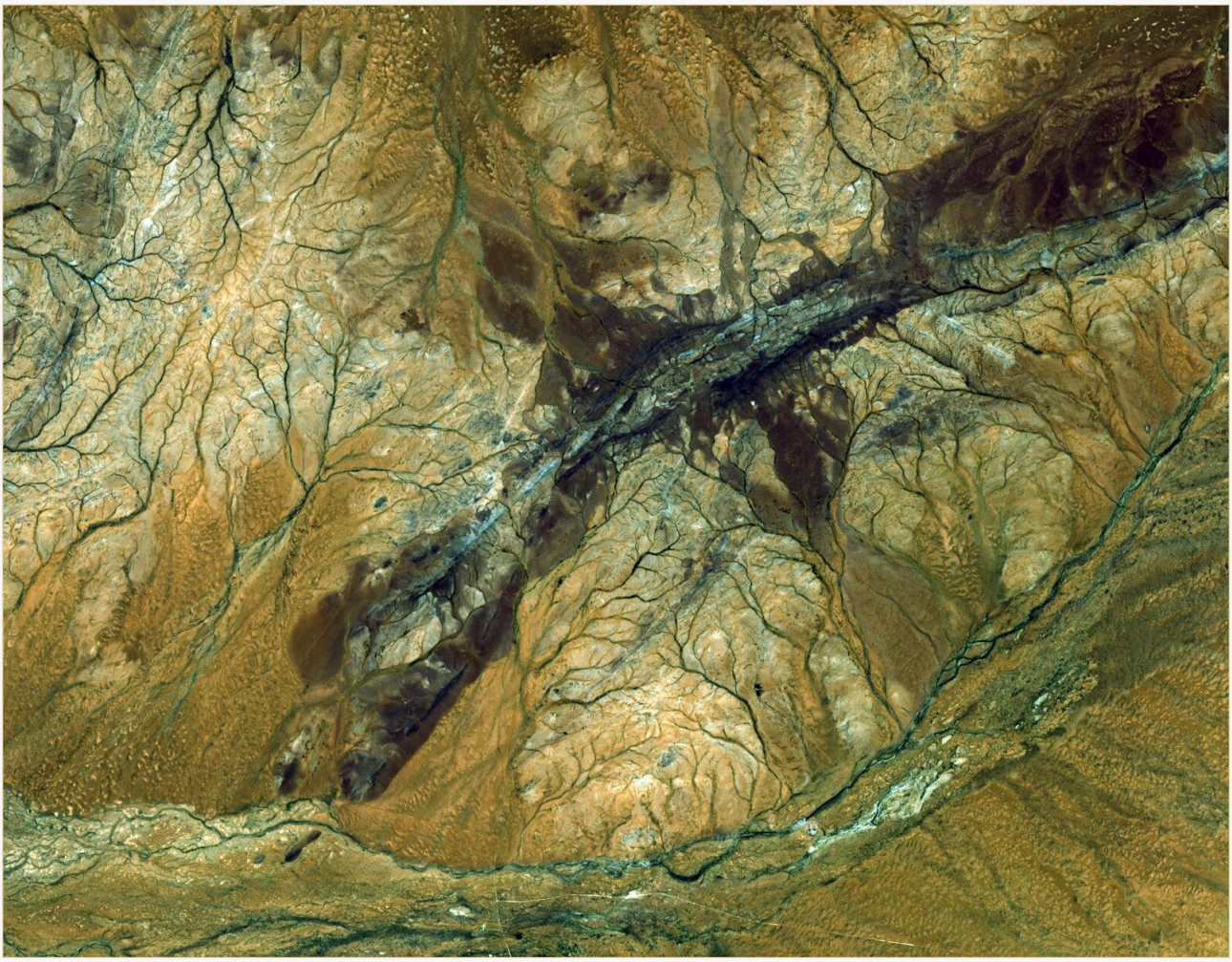
lərini provisional oxuyun.

Bu nəyi *sübut etmir*

- Hadean qabığını **birbaşa müşahidə etmir**. Bu dövrdən demək olar süxur yoxdur; fizikanın nə tələb etdiyinə dair modelləşdirmə nəticəsidir, ölçmə deyil.
- **"Late Heavy Bombardment"a söykənmir.** İstifadə olunan impact flux azalan, stochastic flux-dur — model qəfil bombardman sıçrayışına ehtiyac duymur və onu qəbul etmir.
- Plate-tectonics mübahisəsini **bağlamır**. Buradakı "implausible" isti, stagnant- və ya squishy-lid erkən Yer lehinə güclü fiziki inference-dir, amma Hadean tectonic mode hələ real mübahisə mövzusudur.
- Zərbələrin 4.0–3.9 Ga keçidində qitələrin yaranmasına *səbəb olduğunu* **sübut etmir**. Zaman uyğunluğu müəlliflərin "likely not a coincidence" adlandırdığı güclü association-dır — cəlbedici correlation, nümayiş olunmuş causation yox.
- Jack Hills zircons **qorunmuş qitələr deyil**. Onlar erkən felsic material və suyun mövcudluğunu göstərən nadir sağ qalmış dənələrdir; modelin əsas ideyası onları yaradan qabığın əsasən recycle olmasıdır.
- Erkən Yerin tam tarixini **rekonstruksiya etmir**. Simulations idealized-dir — 1D profiles və impacts ekvatora yaxın məhdudlaşdırılmış 2D equatorial slices, zaman snapshot-ları — planetin tam dördölçülü modeli deyil.

Dəlil nə qədər güclüdür?

Mərkəzi iddia üçün — impact heating Hadean qabığının birinci dərəcəli nəzarətçisi idi, onu nazik və səthə yaxın ərimiş saxlayırdı — arqument coherent və vacib mənada konservativdir. Benchmark edilmiş geodynamics code, fiziki baxımdan əsaslı inputs və lower-bound assumptions istifadə edir, əvvəlki modellərin çoxunun tam buraxdığı heat source-u inteqrasiya edir. Həm də iki inadkar faktı bir ideya ilə izah etməklə etibar qazanır: ~4 Ga-dan qədim süxurun niyə demək olar qalmaması (near-total recycling) və bombardman zəifləyən kimi davamlı qabığın niyə görünməsi.



Qərbi Avstraliyadakı Jack Hills NASA-nın ASTER cihazı ilə. Bu regionun zircon-ları Yerin erkən qabığından qalmış ən qədim materialların bəzisini daşıyır — süxurlarının böyük hissəsini özünün sildiyi bir eondan kiçik ipucları.

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

Məhdudiyyətlər də aydındır və dərin zaman modelinin məhdudiyyətləridir: çox seyrək süxur record-u üzərində model üstə model qurulur və ən sitatlıq nəticə — “plate tectonics implausible-dır” — müşahidə yox, inference-dir. Doğru mövqe bunu Hadean-ı yenidən çərçivələyən güclü, yaxşı əsaslandırılmış hipotez kimi görmək və başqalarının onun fərziyyələrini — xüsusən impact-flux model seçimini — test etməsini gözləməkdir; bağlanmış məsələ kimi yox.

Ən faydalı xülasə nə “Hadean məhz belə idi”, nə də “bu sadəcə simulyasiyadır”dır. Budur: plausible, konservativ fizika altında ağır bombardman olunan erkən Yer nazik, yarımərimiş, özünü recycle edən qabığa malik olardı — və bu bir fikir gördüyümüz azsaylı faktların təəccüblü çoxunu izah edir.

Niyə vacibdir

Erkən Yer barədə məşhur təsəvvür iki ekstremum arasında yellənir: demək olar bugünkü kimi sakit, plate-tectonic su dünyası və ya cəhənnəmvari lava planeti. Bu iş spesifik, fiziki əsaslandırılmış orta mənzərə çəkir: bir neçə kilometr aşağıdan başlayaraq dəfələrlə yenidən əriyən, daim məhv edilən və yenidən qurulan nazik qabıq; şərtləri daxili istilik yox, zərbələr müəyyən edir.

Bu reframing real iş görür. Yerin körpəliyi barədə iki böyük fakta — süxur record-unun demək olar tam yoxluğuna və ilk davamlı qitələrin zamanına — bir mexanizm təklif edir və adətən nəzərə alınmayan impact heating-i hekayənin mərkəzinə qoyur. Dayanıqlı çıxsa, Yerin ümumiyyətlə nə vaxt sabit qitələr planetinə çevrildiyini necə düşündüyümüzü dəyişir və öz bombardman şəraitində formalaşan başqa rocky worlds üçün də relevant olur.

Bunun üçün model son söz olmaq məcburiyyətində deyil. Test ediləcək qədər yaxşı hipotez olmalıdır — və sağ qalan zircon və isotope record-a bağlandığı üçün belədir. Başlıqdakı “hidden Hadean” məhz budur: süxurlarını özünün sildiyi üçün əsasən yalnız modelləşdirmə ilə çata bildiyimiz era.

Qısa xülasə

Yerin ilk eonu Hadean (~4.03 Ga-dan əvvəl) demək olar heç bir süxur record-u saxlamayıb. Bu modelling study adətən buraxılan heat source-u — impacts — daxil etdikdə qabığın necə olacağını soruşur. Stochastic, azalan impact-flux modeli ilə qabıq və mantiyada heat flow-un benchmark edilmiş 1D və 2D simulations-ını (qalxan melt-in daşıdığı istilik daxil) birləşdirən müəlliflər zaman üzrə inteqrasiya edilmiş impact heat-in Hadean-ın böyük hissəsində Yerin bütün daxili istiliyini ən azı bir order of magnitude üstələyəcəyini tapırlar. Nəticə ~5 km-dən nazik, cəmi bir neçə kilometr aşağıda qismən ərimiş və ~5 km dərinlikdə 30%-dən çox melt olan qabıqdır — müəlliflərin Hadean üçün implausible adlandırdığı plate tectonics-i saxlamaq üçün çox zəif. Belə qabıq əsasən mantiyaya recycle olardı və bu, Hadean materialının niyə az qaldığını izah edə bilər; impacts 4.0–3.9 Ga keçidində zəiflədikcə ilk sağ qalan felsic rocks göründüyü vaxtda davamlı continental crust yarana bilərdi — müəlliflərin sözləri ilə “likely not a coincidence”. Qəsdən konservativ lower-bound heating istifadə edildiyinə görə keyfiyyət nəticəsi dayanıqlıdır, dəqiq rəqəmlər isə sabit deyil. Bu, Yerin körpəliyinin güclü, coherent modelidir — birbaşa müşahidəsi yox.

No-BS yoxlaması

Paper-in göstərdiyi: Impact heating və magmatic heat transport daxil edilən fiziki əsaslı simulations-da Hadean qabığı nazik və səthdən cəmi bir neçə kilometr aşağıda qismən ərimiş çıxır, daxili istilik yox impact heat üstün olur, qabıq əsasən mantiyaya recycle olunur və bu

modeldə plate tectonics-i saxlaya bilmir.

Mümkün, amma sübut olunmayan: Impacts-ın ~3.9 Ga-da davamlı qitələrin yaranmasının səbəbi olduğu; Hadean-ın early plate-tectonic yox stagnant- və ya squishy-lid dünya olduğu; Hadean süxurlarının demək olar yoxluğunun məhz molten crust recycling-dən qaynaqlandığı.

Göstərmədiyi: Hadean qabığının birbaşa ölçməsi; plate-tectonics mübahisəsinin yekun cavabı; bombardmanın zəifləməsi ilə ilk qitələr arasında nümayiş olunmuş causal link; Jack Hills zircons-un qorunmuş qitələr olması; erkən planetin tam modeli.

Əsas məhdudiyyətlər: Hadean rock record demək olar yoxdur, buna görə nəticə çox az data ilə constrain olunan modeldir; model üstə model qurulur (impact flux → geodynamics → phase equilibria); impact flux özü representative, qeyri-müəyyən seçimdir; simulations idealized-dir (1D və 2D equatorial slices, time snapshots). Konservativ lower-bound assumptions keyfiyyət nəticəsini gücləndirir, amma spesifik geotherms-i dəqiq etmir.

Ümumi oxucu nə qədər əmin ola bilər? Plausible fizika altında ağır bombardman olunan erkən Yerin isti, nazik, səthə yaxın ərimiş qabığa malik olacağına yüksək. Bunun Hadean plate tectonics-i qeyri-mümkünə yaxın etməsinə və itmiş süxur record-unu izah etməsinə orta. Bunun qitələrin necə yarandığını və dəqiq nə vaxt yarandığını *sübut etməsinə* aşağı — bu, Hadean-ı reframing edən güclü konservativ modeldir, ona birbaşa baxış deyil.

Mənbələr

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