

VALÓBAN GAMMAKITÖRÉS OKOZTA A LEGREJTÉLYESEBB KIHALÁSI ESEMÉNYT?

DID REALLY A GAMMA RAY OUTBURST CAUSE THE MOST MISTERIOUS EXTINCTION EVENT?

Bujtor László

PhD, habilitált egyetemi docens, Pécsi Tudományegyetem Földrajzi és Földtudományi Intézet, Pécs
lbujtor@gamma.ttk.pte.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A földi bioszférát valaha sújtó legnagyobb kihalási események közül a második legsúlyosabb volt az ordoviciumi nagy kihalási esemény, amely az akkori tengeri élőlénynemzetségek 57%-át tüntette el. A kihalás okának sokáig a hirnanti glaciálist hozták fel, ám az eljegesedés bizonyítékai inkább következményei, semmint bizonyítékai voltak a nagy kihalásnak. Újabb bizonyítékok szerint az ordovicium végi sekélytengeri anoxia lehetett a kihalás végső oka, ám a rétegtani adatok alapján ez is korábbi esemény, mint maga a kihalás. Lehetséges okként extrateresztikus tényezők kerültek a kutatások homlokterébe, mint a közeli szupernóva-robbanásokhoz kapcsolódó gammakitörések. Ezek bizonyítékait meg is találták a Hold és Földünk mélytengeri üledékeiben ^{60}Fe izotópok formájában, ám ezek legfeljebb hatmillió évig igazolhatók. Jelenleg nyitott kérdés, hogy vajon a műszerek képesek lesznek-e a 440 millió éves rétegekből is kimutatni ugyanazokat a szupernóva-robbanás által Földünkre juttatott izotópokat, mint amiket a hatmillió évvel ezelőtt lerakódott kőzetekből igazoltak.

ABSTRACT

The second most severe extinction event that hit the Earth biosphere was the end Ordovician great extinction that erased 57% of the extant marine animal genera. The cause of that extinction for a long time was considered the Hirnantian glacial period, however the evidence of the glaciation were rather consequences than evidence of the great extinction. Newer data suggest that the final driver of the end Ordovician great extinction was driven by the shallow marine global anoxia. The problem is that even this happened earlier than the extinction event itself. Recently, the research focuses on the extra-terrestrial drivers as the possible cause of the great extinction like the gamma ray outbursts of neighbouring supernovae. The evidence of such outbursts is detected on the surface of our Moon and even in the oceanic deposits as special ^{60}Fe isotopes not later than 6 million years. For the moment there is an open question whether our recent instruments can detect the same isotopes sent to our planet by the supernovae outbursts 440 million years before as it is proven from layers deposited 6 million years ago.

Kulcsszavak: gammakitörés, evolúció, kihalási esemény, ordovicium, extraterresztrikus hatás

Keywords: Gamma-ray outburst, evolution, extinction event, Ordovician, extra-terrestrial impact

BEVEZETÉS

John Sepkoski, a kihalások természetének megértésében, kialakulásuk, lefutásuk és dinamikájuk kutatásában úttörő kutató, behatóan tanulmányozta a földi bioszférát a legutóbbi félmilliárd évben ért legnagyobb kihalási eseményeket, köztük az egyik legfontosabb és máig legrejtélyesebb eseményt, az ordovicium végi nagy kihalási eseményt (Sepkoski, 1995). Ennek során a tengeri élőlények nemzetségeinek 57%-a, míg a családok 25%-a tűnt el a Föld színéről (Trotter et al., 2008; Ausich–Deline, 2012). Az okok feltárása során nem mutatkozott olyan markáns földi vagy akár extraterresztrikus hatás, amely egyértelmű kiváltó tényezőként nevezhető meg. A finomrétegtani vizsgálatok leginkább következményeket, semmint kiváltó okokat azonosítottak, így hát vadabbnál vadabb vagy csak egyszerűen merész elképzelések kerültek elő a kihalás kiváltó okainak magyarázataként. Az egyik ilyen „merész” javaslat a gammakitörések (lehetnek akár szupernóva-robbanások) feltételezése volt. A nagy energiájú, hosszú (2 másodpercnél tovább tartó) és csillagászatilag a közelben lejátszódó gammakitörés akkor lépett elő a tudományos fantasztikum világából a valóban komolyan vehető okok közé (Melott et al., 2004), amikor atmoszferikus modellezéssel érthetővé és bizonyíthatóvá vált (Sarkis et al., 2021) az, hogy igen komoly hatásuk lehet a Föld atmoszférájára, ózonrétegére és ezzel a teljes földi bioszférára is. Jelen írás ezt az izgalmas, ma még ugyan nem teljes mértékben elfogadott, de rendkívül titokzatos jelenséget, az ordoviciumi nagy kihalást és az azt potenciálisan okozó gammakitörést, valamint bizonyítékait mutatja be. Az elegáns elmélet a rendkívül merész feltételezés igazolásával a földi életet sújtó, tömeges kihalást okozó tényezők sorába emeli be a gammakitöréseket.

AZ ORDOVICIUMI KIHALÁSI ESEMÉNY

A paleozoikum egyik legrejtélyesebb, ám sok szempontból legfontosabb földtörténeti periódusa az ordovicium. Nevét egy ókori kelta törzsről, az ordovikokról kapta, mert típusterülete, ahol elsőként tanulmányozták ezeket a rétegsorokat, a hajdanvolt törzs egykori szállásterületén található, a mai Walesben. Az ordovicium megnevezést Charles Lapworth vezette be 1879-ben, feloldva ezzel a korabeli vitát, mely a kambriumi és szilur időszaki rétegek elkülönítése fölött zajlott. A kambrium során megjelenő, majd robbanásszerűen elterjedő külső vá-

zas (és persze egyéb) szervezetek adaptív radiációja elsősorban a középső és késő ordovicium során zajlott, amely oly jelentős diverzitásnövekedést jelentett, amit ma már önálló eseményként (Great Ordovician Biodiversity Event, GOBE; nagy ordoviciumi biodiverzitási esemény) neveztek el. A középső–késő ordoviciumi lenyűgöző és folyamatos diverzitásnövekedés a földi bioszféra egyik első és a tengeri élővilág talán legnagyobb arányú és összetettségű radiációját jelentette (Servais et al., 2009), számos, korábban nem látott komplexitású alrendszer létrejöttét eredményezve, viszonylag rövid (földtörténeti értelemben vett) idő, nagyjából 25 millió év alatt. A lenyűgöző evolúciós vágta eredményeként a középső ordovicium kezdetétől a késő ordovicium végéig 320 új család és 1340 új nemzetség jelent meg (Trotter et al., 2008). Az impozáns fejlődésnek egy – a maga nemében – ugyancsak lenyűgöző katasztrófa vetett véget, amit a fanerozoikum öt legjelentősebb kihalási eseménye közt (Newell, 1967), a második legpusztítóbb eseményként (Sepkoski, 2001; Isozaki–Servais, 2017; Harper–Servais, 2018) tartunk számon.

A téma kutatói már igen korán felvetették (Schindewolf, 1963), hogy a nagy kihalási események extraterresztrikus okai közt szerepük lehet galaxisunk – csillagászatilag – közeli csillagjainak szupernova-robbanásokhoz kapcsolódó gammakitöréseinek. Számos becslés jelzi, hogy közeli, azaz Földünk bioszféráját befolyásolni képes erősségű gammakitörés egymilliárd évente két-három alkalommal valószínű (Melott et al., 2004). A csillagászati eredmények tehát a bioszféra hosszú távú fejlődése során egyáltalán nem elhanyagolható veszélyforrás létezését jelzik.

AZ ORDOVICIUMI ŐSKÖRNYEZET

A földtanban oly hasznos aktualizmus elve (a jelen folyamatai adják a kulcsot a múlt történéseinek megértéséhez) a jelentől egyre messzebbre távolodva az időben egyre korlátozottabban érvényes és használható. Különösen igaz ez az ordoviciumra, amely markánsan különböző környezeti feltételeket nyújtott az akkori élővilág számára, mint a jelenlegi vagy akár az 50, 100, 200 millió évvel ezelőtti földi környezetek. Az ordovicium idején napunk luminozitása 3%-kal kisebb volt a jelenleginél, a földfelszíni átlagos hőmérséklet 2 °C-kal volt magasabb, az egyenlítői tengerek felszíni vízhőmérséklete elérte (esetleg meg is haladta) a 40 °C-ot. Ezt a helyzetet árnyalta, hogy az átlagos tengerszint 220 méterrel emelkedett a jelenlegi fölél (talán az elmúlt félmilliárd év legmagasabb tengerszintje volt!), a Hold mindössze 160 000 km-re keringett a Földtől (jelenlegi átlagos távolsága bolygónktól 385 000 km), következőképpen jóval erősebb árapályhatást, magasabb dagályt okozva. Földünkön egy év ekkor 417 nappól állt, következőképpen egy nap 21 óra hosszat tartott. A légköri oxigén a jelenlegi szint 68%-a volt csupán, míg a légköri CO₂-szint az 1850-es évek előtti szint tizenötszörösére rúgott. Ám mindez igazából teljesen irreleváns volt a szárazföldi életre nézve, ugyanis ekkor az élet még nem jelent meg a szárazföldön.

Minden, amit földi életnek hívunk, akkoriban a tengerekre és óceánokra korlátozódott, a földi létformák még a csökkentsős-vízi vagy édesvízi környezeteket sem hódították meg. A lenyűgöző diverzitásnövekedést a téma kutatói szerint elsősorban a hűlő bolygó tette lehetővé. Az időszak kezdetén még a 40 °C-ot meghaladó felszíni hőmérsékletű egyenlítői óceánok vízhőmérséklete 27–32 °C közé csökkent, amivel együtt mindenhol csökkent az átlaghőmérséklet és az átlagos tengerszint, jóval optimálisabb életfeltételeket nyújtva, aminek lenyomata a nagy ordoviciumi biodiverzitási esemény.

AZ ORDOVICIUM VÉGI JÉGKORSZAK

Nagyon sokáig általánosan elfogadott nézet volt, hogy az ordovicium végi nagy kihalási eseményt egy globális lehűlésnek, avagy a hirnanti jégkorszaknak köszönhetjük (Brenchley et al., 1995). Egy-egy globális lehűlésnek, közkeletű szóval jégkorszaknak a hatásai jól nyomozhatók a rétegsorokban: számos könnyen azonosítható markáns jelenség jelzi (tillitek, ejtőkövek, az egykori egyenlítő környékén eljegesedésre utaló bizonyítékok, varvitok, csiszolt felszínek stb.), és ha nem adódik (vagy nem bizonyítható) egyéb kiváltó ok, akkor plauzibilis magyarázatát jelentheti egy-egy kihalási eseménynek. Mivel ez az eljegesedés globális volt, és együtt járt vele a biodiverzitás jelentős csökkenése, megfelelő magyarázatnak tűnt a kihalás értelmezésére. A kínzó kérdőjelek akkor jelentkeztek, amikor a szaporodó finomrétegtani és izotópsztratigráfiai adatok alapján a biodiverzitás drámai csökkenése, azaz az ordovicium végi nagy kihalás a hirnanti jégkorszak *után* jóval, csaknem egymillió évvel később következett be. A kutatások (Holmden et al., 2013) feltárták, hogy a korábban egyetlen jégkorszaknak vélt esemény valójában két, viszonylag rövid ideig (100 000–300 000 évig) tartó eljegesedéssel közrezárt interglaciális esemény volt, amely legfeljebb kétmillió évig tartott. Ez azonban semmiképpen sem okozhatta a nagy kihalást. Sőt, éppen ellenkezőleg! Tudásunk mai állása szerint ez az eljegesedés egyáltalán nem okozott biodiverzitás-csökkenést. Amennyiben megnézzük az ordovicium időszak (amely 41,6 millió évig tartott) egészére érvényes biodiverzitási görbét, azt látjuk, hogy a tengeri élővilág változatossága folyamatosan nő, esetleg szinten marad, és a nagy kihalási esemény előtt egyetlen esetben tapasztalunk diverzitáscsökkenést, ám annak 449 millió évvel ezelőtt vége lett, és utána ismét nőtt a diverzitás. Még jó pár millió év telik el addig, míg beköszönt a hirnanti eljegesedés, amelynek kezdete 445 millió évre tehető (Holmden et al., 2013). Ha tovább követjük az eseményeket, azt tapasztaljuk, hogy a hirnanti eljegesedés időben rövid, és első fázisát egy rövid (százezer éves léptékű) interglaciális követi, majd a jéggel borított területek felülete tovább nő, és bekövetkezik a nagy ordoviciumi kihalás.

MENNYIRE VOLT AZONNALI ÉS MINDENRE KITERJEDŐ A GAMMAKITÖRÉS HATÁSA?

A legizgalmasabb kérdés tehát az, hogy ténylegesen mi (vagy mik) okozta (okozták) a földi életet érő második legpusztítóbb kihalási eseményt? Vajon egyetlen tényező volt, vagy a folyamatos hatás mellett volt egy másik, instant esemény, amely valójában elvégezte a piszkos munkát, és csaknem negyvenmillió évnyi csodálatos fejlődést – melyhez hasonlót azóta sem tapasztalt meg a földi bioszféra – semmisített meg, visszalökve a földi élet gazdagságát arra a szintre, ahonnan az az ordovicium elején elindult. David A. T. Harper és szerzőtársai (2014) a többtényezős hatás mellett érvelnek, felhívva a figyelmet arra, hogy a hirnanti eljegesedés mellett az ordovicium végi nagy kihalásnak lemeztektonikai okok mellett valószínűleg egy globális anoxikus esemény is kiváltója volt, mely során az óceánok aljzatának és sekélytengeri peremrégióinak oxigénellátottsága jelentősen lecsökkent. A legfrissebb stabilizotóp-kutatások (^{98}Mo izotóp) alátámasztani látszanak (Dahl et al., 2021) a sekélytengeri anoxikus viszonyok nagy kiterjedésű jelenlétét, ami megfelelő magyarázat lenne a nagy kihalási eseményre.

A lemeztektonikai folyamatok modellezése meglehetősen megbízható, ekként ellenőrizhető, ám a harmadik ok már kevésbé meggyőző: mint később látni fogjuk, egyes mélytengeri élőlénycsoportok éppen hogy nem kihaltak, hanem felhőtlen virágzásba kezdtek akkor, amikor a sekélytengeri élőlények masszív kihalást szenvedtek el.

A helyzet természetesen nem fekete-fehér. Mint mindegyik, úgy ez a kihalási esemény is szelektív volt, azaz akadtak olyan csoportok, amelyekre egyáltalán nem volt hatással. Ilyen csoport volt a krinoideák (tengeri liliomok, a tüskésbőrűek egyik osztálya) csoportja is, amelyek a nagy ordovicium végi kihalást gyakorlatilag változás nélkül vészelték át, ám az azt megelőző esemény, ami a hirnanti eljegesedés előtt jóval következett be, sokkal pusztítóbb volt számukra (Ausich–Deline, 2012). Ez mindenképpen felveti azt, hogy amennyiben az ordoviciumi nagy kihalási esemény végső okát a gammakitörésben véljük megtalálni, akkor annak szelektivitása erős összefüggést mutat az élő szervezetek egykori élőhelyével: minél sekélyebb vízi szervezetek voltak, annál nagyobb mértékben hatott rájuk a gammakitörés következményeként lebomló ózonréteg azonnali megszűnése, és ezzel a pusztító ultraibolya-sugárzás behatolása a tengervízbe.

Egyetlen kérdés marad csak: van-e bármilyen bizonyítéka annak, ha egy közeli szupernova-robbanáshoz kapcsolódó gammakitörés érte a Földet? Ha ugyanis nincs kimutatható fizikai jelenség, akkor bizony a legelegánsabb elmélet is csak elmélet marad. De, az izgalmas felfedezések szerint igenis vannak bizonyítékok! Ám ezeket nem a Földön, hanem a Holdon kell keresni. Brian C. Thomas és munkatársainak (2016) kutatásai szerint radioaktív ^{60}Fe -izotópok igenis alkalmasak arra, hogy távoli gammakitörések indikátorai legyenek a Holdon, de akár Földünkön is. Ugyanis Klaus Knie és munkatársai (1999) adatai alapján mind Holdun-

kon, mind Földünk óceáni medenceüledékeiben a ^{60}Fe izotóp-tartalmú üledékek egyértelműen és kizárólag szupernóva-robbanások hatására jutottak el ezekre az égitestekre, és rakódtak le a felszínükön (Hold), vagy az óceáni üledékekben (Föld). A radiometrikus elemzések alapján ezek legfeljebb hatmillió évvel ezelőtt, két eseményhez köthetően keletkeztek, és minden kétséget kizáróan gammakitörések eredményezték ezen izotópoknak a Holdra és Földre jutását. Innen pedig már csak egy lépés annak igazolása, hogy ilyen izotópok kimutathatók-e nem hat, hanem 440 millió éves üledékekből? A válasz – sajnos – egyelőre az, hogy nem. Ám ez csupán idő kérdése. Amennyiben megvan a bizonyíték arra a közelmúltból, hogy márpedig szupernóvák igenis lényegében képesek Földünk légkörének alapvető megváltoztatásán keresztül lényegi hatást kifejteni a földi bioszférára, úgy ezen tény múltbeli bizonyítékainak keresése és megtalálása már nem elvi, hanem pusztán technikai kérdés.

ÖSSZEFOGLALÁS

A természet tanulmányozása során sokszor bebizonyosodik, hogy olyan komplex, sokszorososan csatolt és egymásra ható alrendszerekből felépített rendszer, mint a földi bioszféra, az őt ért egy-egy csapást képes kiheverni, vagy ha maga a változás lassú, akkor képes alkalmazkodni hozzá. Az igazi problémát az jelenti, ha nem egy, hanem több csapással kell szembenéznük az élő rendszereknek, amelyek különböző ökológiai feltételekben egyszerre jelentenek nagymértékű romlást. Általában ez az, amivel még a komplex ökoszisztéma sem képes megbirkózni, ezért ennek eredményeként a biológiai diverzitás zuhanásszerű csökkenésbe kezd. Ennek az eredményét rögzítik az üledékes rétegsorok, és ezeket nevezzük nagy kihalási eseményeknek. Egy-egy ilyen eseményt követően a bioszféra helyreállása igen hosszú időt vesz igénybe: elemzett példánkban az ordoviciumi nagy kihalást követően legalább húsz-, míg a földi életet ért legnagyobb csapás, a perm-triász kihalási eseményt követően százmillió évre volt szüksége a bioszférának arra, hogy diverzitása, sokszínűsége visszatérjen az adott kihalási esemény előtti szintre. Ezek az időbeli dimenziók számunkra felfoghatatlanok. A jelenlegi klímaváltozás további futása és a Föld átlaghőmérsékletének jelenleg megállíthatatlannak tűnő emelkedése hasonló jövőképet fest. A jelenleg Földünkön zajló, ember által kiváltott folyamatok legnagyobb veszélye ugyanis azok sebessége. A pillanatszerű katasztrófáktól eltekintve ilyen sebességű felmelegedést bolygónk sohasem tapasztalt. Még a talán legjobban ismert – bár következményeiben mindössze harmadik helyre sorolt – kréta végi kihalást is legalább tízmillió évnyi helyreállási időszak követte. Ennyi ideig tartott, míg az aszteroidabecsapódás következményeit bolygónk kiheverte, és visszatért arra a szintre, amely a dinoszauruszok végnapjaiban jellemezte a Földet.

IRODALOM

- Ausich, W. I. – Deline, B. (2012): Macroevo­lutionary Transition in Crinoids Following the Late Ordovician Extinction Event (Ordovician to Early Silurian). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 361–362, 38–48. DOI: 10.1016/j.palaeo.2012.07.022, https://www.researchgate.net/publication/256822170_Macroevo­lutionary_transition_in_crinoids_following_the_Late_Ordovician_extinction_event_Ordovician_to_Early_Silurian
- Brenchley, P. J. – Carden, G. A. F. – Marshall, J. D. (1995): Environmental Changes Associated with the “First Strike” of the Late Ordovician Mass Extinction. *Modern Geology*, 20, 69–82.
- Dahl, T. W. – Hammarlund, E. U. – Rasmussen, C. M. Ø. et al. (2021): Sulfidic Anoxia in the Oceans during the Late Ordovician Mass Extinctions – Insights from Molybdenum and Uranium Isotopic Global Redox Proxies. *Earth-Science Reviews*, 220, 103748. DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103748, https://findresearcher.sdu.dk/ws/files/185246682/1_s2.0_S001282522100249X_main.pdf
- Harper, D. A. T. – Hammarlund, E. U. – Rasmussen, C. M. Ø. (2014): End Ordovician Extinctions: A Coincidence of Causes. *Gondwana Research*, 25, 1294–1307. DOI: 10.1016/j.gr.2012.12.021, https://petbioufma.files.wordpress.com/2016/05/harper_et_al_2014_gr_onlineearly-leo-e-patricio.pdf
- Harper, D. A. T. – Servais, T. (2018): Contextualizing the Onset of the Great Ordovician Biodiversification Event. *Lethaia*, 51, 149–150. DOI: 10.1111/let.12264, <https://dro.dur.ac.uk/24569/>
- Holmden, C. – Mitchell, C. E. – LaPorte D. F. et al. (2013): Nd Isotope Records of Late Ordovician Sea-level Change – Implications for Glaciation Frequency and Global Stratigraphic Correlation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386, 131–144. DOI: 10.1016/j.palaeo.2013.05.014
- Isozaki, Y. – Servais, T. (2017): The Hirnantian (Late Ordovician) and End-Guadalupian (Middle Permian) Mass-extinction Events Compared. *Lethaia*, 51, 2, 173–186. DOI: 10.1111/let.12252, <https://bit.ly/3y67Uze>
- Knie, K. – Korschinek, G. – Faestermann, T. et al. (1999): Indication for Supernova Produced ^{60}Fe Activity on Earth. *Physical Review Letters*, 83, 18. DOI: 10.1103/PhysRevLett.83.18, https://www.academia.edu/46985715/Indication_for_Supernova_Produced_60Fe_Activity_on_Earth
- Melott, A. L. – Liebermann, B. S. – Laird, C. M. et al. (2004): Did a Gamma-ray Burst Initiate the late Ordovician Mass Extinction? *International Journal of Astrobiology*, 3, 1, 55–61. DOI: 10.1017/S1473550404001910, <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0309415#:~:text=Many%20possible%20causes%20have%20been,input%20of%20order%2010%20s>
- Newell, N. D. (1967): Revolutions in the History of Life. *Geological Society of America, Special Paper*, 89, 63–91.
- Sarkis, M. – Beck, G. – Thomas, B. C. (2021): Gamma-rays from Ultracompact Minihaloes: Effects on the Earth’s Atmosphere and Links to Mass Extinction Events. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 504, 3, 3523–3533. DOI: 10.1093/mnras/stab1074, <https://arxiv.org/abs/2007.15975>
- Schindewolf, O. H. (1963): Neokatastrophismus? *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft (Berlin)* 114, 2, 430–445. DOI: 10.1127/zdgg/114/1963/430
- Sepkoski, J. J., Jr. (1995): The Ordovician Radiations: Diversification and Extinction Shown by Global Genus-level Taxonomic Data. In: Cooper, J. D. – Droser, M. L. – Finney, S. C. (eds.): *Ordovician Odyssey*. Las Vegas, Nevada, USA: SEPM Book 77, 393–396.
- Sepkoski, J. J., Jr. (2001): Mass Extinctions, Concept of. In: *Encyclopedia of Biodiversity*, 4, 97–110. <https://enviro2.doe.gov.my/ekmc/wp-content/uploads/2016/08/1385463238-3-s2.0-B0122268652001917-main.pdf>

- Servais, T. – Harper, D. A. T. – Li, J. et al. (2009): Understanding the Great Ordovician Biodiversification Event (GOBE): Influences of Paleogeography, Paleoclimate, or Paleoecology? *GSA Today*, 19, 4–5, 4–10. DOI: 10.1130/GSATG37A.1
- Thomas, B. C. – Engler, E. E. – Kachelrieß, M. et al. (2016): Terrestrial Effects of Nearby Supernovae in the Early Pleistocene. *The Astrophysical Journal Letters*, 826, L3. DOI: 10.3847/2041-8205/826/1/L3, <https://arxiv.org/abs/1605.04926>
- Trotter, J. A. – Williams, I. S. – Barnes, C. R. et al. (2008): Did Cooling Oceans Trigger Ordovician Biodiversification? Evidence from Conodont Thermometry. *Science*, 321, 5888, 550–554. DOI: 10.1126/science.1155814