

KERESZTURI ÁKOS

# Nyomozás a meteoritok körül

A jó detektív néhány apró, alig észrevehető nyom alapján egy egész történetet vázol fel: ki, mit és milyen körülmények között csinált a tett színhegyén. A jó bolygókutató sem tervez kevesebbet: egy apró kődarabból, esetünkben meteoritból próbálja felvázolni, miként születtek az egyes bolygók, milyen körülmények között alakult ki a Naprendszer. Sőt, arról is szerezhetők ismeretek, hogy mi történt mindezek előtt, milyen csillagok léteztek és milyen körülmények uralkodtak a Tejútrendszer azon szegletében, ahol a Naprendszer megszületett. Bár aprók, nehezen vizsgálhatók, és a korábbi események csak némelyike hagy nyomot bennük, alapos munkával fontos események rekonstruálhatók a meteoritok segítségével. Az alábbiakban néhány meteorittípus alapján azt tekintjük át, milyen kép rakható össze elemzésükkel a múltunkat illetően.

Mindezek megértéséhez fontos a meteoritok esetében használt korok definiálása. Egy-egy meteorit kisebb részei meghatározott időpontban kristályosodtak ki. Ezek között még akár a Naprendszer 4,6 milliárd éves koránál régebbi is lehet – egyes szemcsék még a csillagközi térben jöttek létre, noha korbecslésük rendkívül nehéz. A legtöbb alkotórész azonban a Naprendszer születésekor (az ósnapot övező felhőben) képződött, majd ezek később ütközésekkel összetapadtak. Ez az esemény a teljes közzettest keletkezési korát jelzi. Mindez többször is megtörténhet: újabb ütközésekkel szétdarabolódik, majd megint összeáll egy-egy objektum – nem meglepő, hogy a korbecslés igen nehéz feladat, tüzetes nyomozás szükséges az események pontos rekonstrukciójához.

A már összeállt testen azonban a későbbiekben is történhetnek változások. A belsejében felszabaduló hőtől megolvadhat, ilyenkor anyaga átkristályosodik, utána pedig a megszilárdult szemcsék „belső órája” újraindul – itt tehát az átalakulás korát látjuk. Ha elég nagy a test, ilyen olvadás többször is bekövetkezhet, például vulkáni hatásra. Többszöri olvadás elsősorban a legnagyobb objektumoknál, bolygóméretű testeknél lehetséges, bár vulkanizmus a Holdon és a Vesta kisbolygón is fellépett.

Mindezek után még egy további becsapódás kell, amitől a kérdéses meteorit anyaga kilökődik az űrbe – ezt nevezik kilökődési kornak. Innen kezdve a meteoritunkat (amit a Földre érkezése előtt még meteoroidnak hívunk) már nem veszi körbe a vele együtt összeállt anyag, ezért a kozmikus sugárzás és a



**Vékonycsiszolat az NWA 8687 holdi meteoritból – a kicsi is nagy érték**  
(Kereszty Zsolt gyűjteménye)

Nap részecskesugárzása is szabadon éri. Mindez szintén nyomot hagy benne, amiből az becsülhető, mennyi időn keresztül keringett „védelem nélkül” a világűrben. Ha szerencsénk van, egy idő után a Föld légkörébe lép, jó esetben egy kis része túléli a felizzást, és meteoritként lehullik. Ez az esemény a lehullás idejét adja. Ezt követően is kell némi szerencse, hogy megtaláljuk, begyűjtsük – és ezután már elkezdhetjük a fenti történetet kinyomozni.

## Lenyomat a bolygóink előtti korokból

A kevésbé átalakult meteoritok (főleg az ún. szenes kondritok) viszonylag érintetlen állapotban a csillagközi térben született anyagokat is őriznek. Erről a témakörrel lapunk 2015. áprilisi számában részletesen is beszámoltunk. Kétségtelen, hogy az ún. preszoláris (tehát a Nap születése előtti időről szóló) ismeretek igen értékesek, azonban a mikroszkopikus szemcsék azonosítása és vizsgálata a meteoritokban is igen nehéz.

Az ilyen ősi összetevők speciális csoportjai azok a szerves anyagok, amelyek még a csillagközi tér jeges szemcséiben keletkeztek és erős deutériumdúsulással jelzik az ősi eredetet. Az viszont máig nem egyértelmű, hogy egy-egy meteorit szerves komponenseinek mekkora része ilyen preszoláris eredetű, és mekkora rész keletkezett később az összeállt testben cirkuláló vizes oldatok segítségével.

A szerves molekulák a szenes kondrit meteoritok néhány százaléknyi széntartalmának csak kisebb részét adják, amit nehéz a többi ásványtól elkülöníteni a részletes elemzéshez. Ahol ez sikerült, kiderült, hogy aminosavakban gazdagok a kozmikus látogatók, amelyekhez hasonlóak a földi élet keletkezését megelőzően bolygónkra is hullottak, talán elősegítve az élet megszületését. Ugyanakkor, ha megvizsgáljuk ezen szerves molekulák szerkezetét és összetételét, sok olyan aminosav is akad köztük, amelyek a földi élethez nem szükségesek. Emellett a bioszférában jellegzetes „balkezes” kiralitású aminosavakhoz képest a meteoritokban balos és jobbos szimmetriájú aminosavak egyaránt előfordulnak.

A szerves anyag esetenként apró globulák formájában koncentrálódik, amelyek részben szerkezetükben is őrzik a csillagközi jégben történt fotokémiai reakciótermékek halmazát. Ilyen apró szemcsék nemcsak a „klasszikus” meteoritokban akadnak, hanem az ún. IDP-k (interplanetary dust particle) belsejében is. Ezek üstökösökből származó szemcsék, és a földi felsőlégkörből lassan ülepednek a felszín felé. Hasonló anyagot a Stardust-űrszonda is gyűjtött a Wild-2 üstökös mellett elhaladva.

**Eltűnt bolygók nyomában**

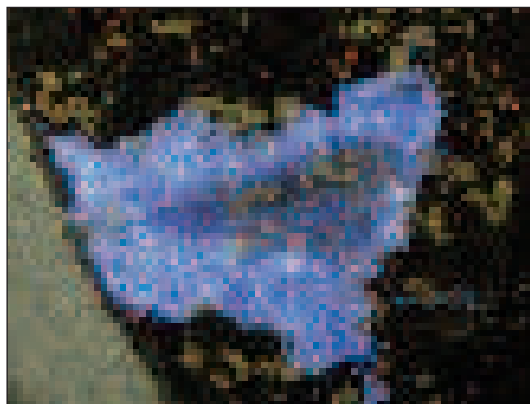
A legtöbb meteorit a kondritok csoportjába tartozik, amelyek a Naprendszer ősananyagát kisebb-nagyobb átalakulással, de máig őrzik. Közülük is a legprimitívebbek és legfontosabbak a szenes kondritok. Az ilyen meteoritok apró, közel mm-es kerek kondrumokból és a közöttük lévő alapanyagból (mátrix) állnak. Minden kondrum egy magas hőmérsékleten megolvadt, majd lehűlt és megszilárdult „kőzetcsepp”, amit az ősnap aktivitása forrosított fel. Koszmosz üledéknek is szokták nevezni anyagukat, mivel az apró, kerekded szemcsék az ősnap körüli anyagkorongban ütközéssel halmozódtak és tapadtak össze, egyre nagyobb testeket alkotva.

Noha kifejezetten ősi az anyaguk, enyhe átalakulás azért esetenként történt bennük is. Ez lehet vizes mállás, hőhatásra fellépett olvadás, vagy becsapódástól létrehozott töredezés és ásványok sokk-hatású átalakulása. Talán az első eset a legérdekesebb, itt feltehetőleg jég is kondenzálódott a halmozódó kozmikus üledék anyagába, ami a radioaktív fűtéstől megolvadt. Ebben főleg a rövidéletű <sup>26</sup>Al-izotóp játszott szerepet, amely elég gyorsan bomlik, de az ősi Naprendszerben jelentős arányban volt jelen. A gyors és intenzív fűtőhatása miatt a meglepően kis égitestek néhányszor 10 km-es átmérő felett már jelentősen felmelegedtek, és bennük víz cirkulált.

Az áramló meleg víz pedig látványosan átalakította az ásványokat, amelyekben vizes mállás lépett fel. Sok olivin ásványszemcse mállott el másodlagos ásványok sorát létrehozva. A vizes mállás sok szilikátásvány esetében exoterm kémiai reakcióval jár – azaz tovább melegíti a környezetet. Ennek nyomán forró vizes oldatok, sőt néhol feszítő hatású gőz is megjelent egyes meteoritok szülőégitestében. Nagy kérdés, hogy vajon ez szét is robbantott-e néhányat közülük? A modellek alapján több millió évig is fennmarhattak a folyékony halmazállapotú vízhez szükséges körülmények. Az ilyen vizes átalakulások olyan érdekes ásványokat is létrehozhatnak, mint a filloszilikátok (agyagásványok), amelyek érzékeny környezetindikátorok. Emellett oxidok, hidroxidok is létrejönnek – ugyanakkor, ha a melegedő környezetben egy kritikus érték fölé megy a hőmérséklet, vízvesztéssel tovább alakulhatnak az ásványok.

**Megolvadt ős-kisbolygók**

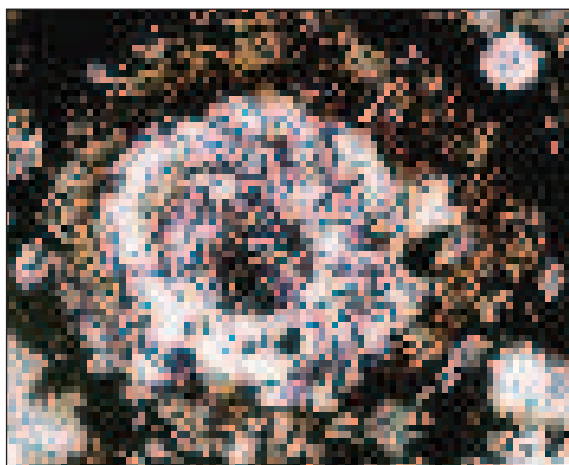
Amennyiben elég nagy egy ilyen ősi égitest (több 100 km átmérőjű), belsejében annyira meleg le-



**Hamisszínes katódlumineszcens felvétel az NWA 4964 meteorit részletéről. A kék színű kalciumban és alumíniumban gazdag ún. CAI-szemcse magas hőmérsékleten keletkezett nem sokkal a kondrumok előtt az ősi Naprendszerben (MTA CSFK)**

het, hogy sok ásvány teljesen lebomlik, és a nagy sűrűségű anyagok (például a vas) a mélybe süllyednek. A folyamattal egy sűrű, főleg vasból és nikkelből álló mag keletkezik az égitestben. Ha mindez később lehül, az olvadt fém megszilárdul. Ha az efféle objektumok egymással összeütköznek, szétdarabolódhatnak, némelyik töredékük vasmeteorit lesz, de akadnak köztük keverék kő-vas meteoritok is. Utóbbiak egy korábbi modell alapján a mag-köpeny határvidéken jönnek létre, ahol már az olvadt vassal szilikátásványok keveredtek. A feltételezések szerint az innen származó meteorikus testek ásványai alapján becsült hűlési sebesség igen széles skálán szóródik, ami arra utal, hogy némelyek egy nagyobb égitest mélyében lassan, mások viszont vékony „hőszigetelő” réteg alatt gyorsan hűltek. Utóbbi eset arra utal,

**Egy kondrum az NWA 5491 meteoritból, amelyet vastag, átalakulásos héj (nyilak) vesz körül (MTA CSFK)**



hogy sok hasonló meteorit az ütközések során szétdarabolódott, majd újra összeállt objektumból származhat.

Az ütközések és szétdarabolódások igen változatosá teszik a meteoritok eredetét és megbonyolítják nyomozásunkat. Általánosságban azonban kimondhatjuk, hogy az elsőként összeállt ún. szülőégitestek (amelyekből nagyságrendileg száz lehetett) egymással ütközve széttrórtak (így keletkeztek a kisbolygó családok), majd az immár forráségitesteknek nevezett objektumok felszínét érő becsapódások révén még kisebb töredékek keletkeztek – utóbbiak jutnak meteoritok formájában a Földre.

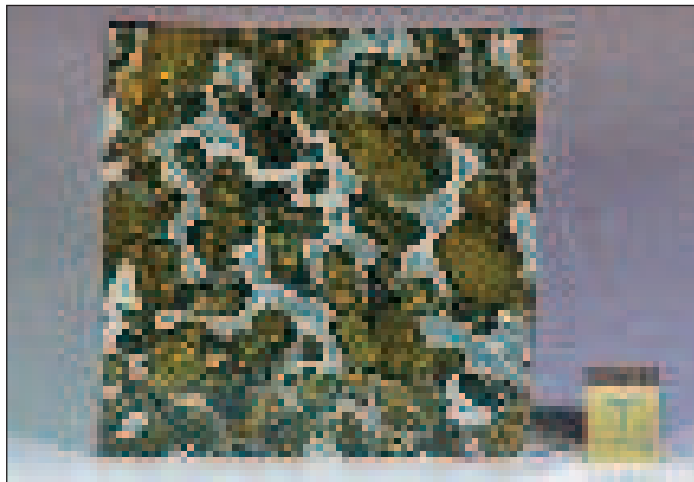
A fentiekben leírt olvadási események miatt a híres vasmeteoritok a kondritoknál már jobban átalakult égitestekből származnak. Ezek tehát az előbb említett ős-kisbolygók differenciált képviselőinek darabjai. Az olvadás során vasmag keletkezett sok

ilyen objektumban, ami jól megőrződő, lassan és gyengén málló meteoritok formájában található meg a Földön. Vas és nikkel anyaguk ősi égitestek magjának töredéke lehet. Kristályszerkezetük a szilárdulás jellemzőire utal, amiből a hűlési sebességük becsülhető. Általában több millió év alatt hűlhetek le teljesen. A becslések alapján a legtöbb vasmeteorit közel 1000 km-es ősi objektum(ok)ban jöhetett létre. Ugyanakkor sok kérdés még messze nem tisztázott. Nemcsak a szülőégitestek száma és átalakulásuk mértéke bizonytalan, hanem az események kronológiája sem elég tiszta még – egyes modellek alapján például a vasmeteoritok a kondrit meteoritoknál is idősebbek valamivel.

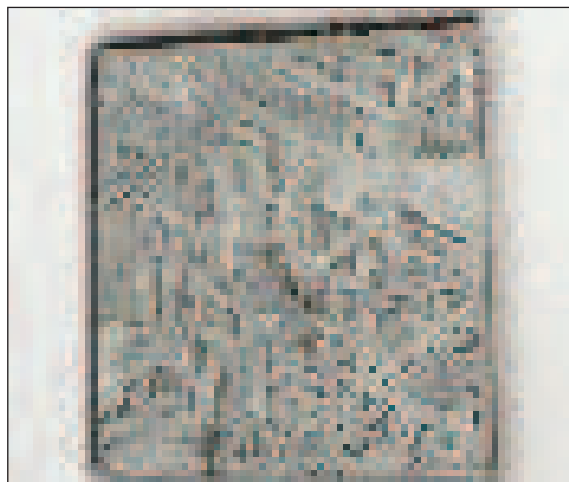
A vasmagot övező rétegek nehéz elemekben szegényebbek lettek, és sokféle szilikátásvány keletkezett itt. Az ilyen égitestek közül a leghíresebb a Vesta kisbolygó, és a róla érkezett HED meteoritok, ezek ugyanis egy kisbolygó bazaltos vulkáni tevékenységének nyomainak őrzik. A három alcsoportra osztott közetek (howardit-eukrit-diogenit) a Vesta egykori lávafolyásainak eltérő mélységű részeit képviselik: az eukritek a felszín közelébe jutott lávából állnak, a diogenitok a mélyben megrekedt és lassan kihűlt közetet jelzik, a howarditok pedig becsapódások révén a kettő összekevert anyagát tartalmazzák.

**Meteoritok a szomszédból**

Természetesen a Holdról is érkeznek meteoritok bolygónkra, a kísérőnket érő nagyobb becsapódások képesek kilökní azokat a világűrbe, majd jó



**A pallazitok csoportjába tartozó Brenham meteorit vékony kőzetszelete. A nagy sárga, átlátszó kristályok olivinásványok, az ezüstszínű, átlátszatlan rész közöttük vas-nikkel ötvözet**  
(Kereszty Zsolt gyűjteménye)



**A Domeyko vasmeteorit a lassú kihűléssel keletkező jellegzetes Widmanstätten-mintázattal**  
(Kereszty Zsolt gyűjteménye)

részük a Földre hullik. Ilyen meteoritok az elmúlt kb. 20 millió évben lökődtek ki, átlagosan 100 ezer évvel ezelőtt a Holdról. A holdi meteoritok anyaga amellet, hogy erősen átalakult a kondritokhoz képest, szokatlanul sok becsapódásos nyomot tartalmaz. Itt nemcsak sokkhatású töredezés ismerhető fel apró fragmentumok formájában, hanem sok üveges, a becsapódástól olvadt, majd gyorsan megszilárdult ásványszemcse („ásványcsepp”) is jellemző, amelyek cementként ragasztják össze a töredékeket. Ennek megfelelően a holdi meteoritok hosszú becsapódásos aprózódás, a regolitot átkeverő folyamat nyomát őrzik – tehát nem egy adott holdi kőzet mintájának, hanem sok holdi kőzet keverékének tekinthetők. Összetételük ennek ellenére arra azért rámutat, hogy a világos felföldi (terra) vagy a sötét lávasíkságok (mare) területéről származnak.

Noha szerkezetük üreges, azaz breccsás, az előbb említett megszilárdult olvadékcseppek jól összecementálják anyagukat, ezért élük túl gyakran a földi légköri belépést. A többszörös becsapódásos töredezés és olvadás nyomai esetenként részletesen is vizsgálhatók. A becsapódásos olvadás utáni újrakristályosodó ásványszemcsék magukba zárják az egyes elemeket, köztük izotópokat. A radioaktív izotópok és bomlástermékek segítségével pedig meghatározható, mikor történt az adott esemény. Ilyen elemzések alapján sikerült is igazolni a feltételezést, hogy kb. 3,6 milliárd évvel ezelőttig igen intenzív becsapódásos bombázás érte kísérőnket is, amely 4,5 és 3,8 milliárd év között erősen ritkult, majd átmenetileg kissé gyakoribbá vált – ám azóta viszonylag alacsony szintje jellemző. A bazaltos holdi meteoritok vizsgálata pedig

rámutatott, hogy a vulkáni tevékenység kísérőnk felszínén nem a kezdeti időszakban (valamivel 4,5 milliárd évvel ezelőtti összeállása után), hanem később, közel 3,0 milliárd évvel ezelőtt volt jellemző.

**Szerves anyag és víz nyoma a marsi meteoritokban**

A NASA és az ESA már régóta tervezi, hogy mintát hoz a vörös bolygóról – a földi laborokban ugyanis sokkal több állapítható meg a Mars jellemzőiről a minták részletes elemzésével, mint amire a legjobb űrszondák képesek a vörös bolygón. Azonban, amíg mintahozatal nem történik, a marsi meteoritok révén is tanulmányozhatjuk a bolygót. Ezek a testek külső szomszédunk felszínéről egy-egy nagyobb becsapódással robbantak ki, majd véletlenül landoltak a Földön. Magmás és vulkánikus kőzetek szövetét mutatják, részben felszíni lávafolyások, részben mélyebben megrekedt kőzetolvadék-testek megszilárdult darabjai.

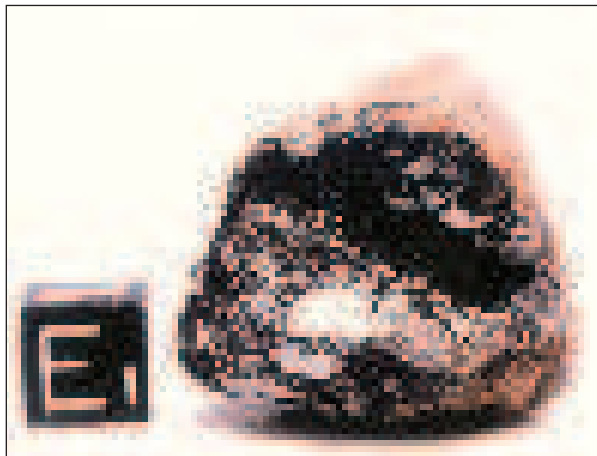
A marsi meteoritok többnyire néhány millió évet töltenek a világűrben, mielőtt közülük egyesek a Földön landolnak – avagy légkörünkben elégnék. Korukat tekintve általában a bolygó

utóbbi 100–600 millió évről adnak hírt, de kivételesen a bolygóval majdnem egykorú darabjaik is azonosíthatóak. A napjainkban ismert közel 100 marsi meteorit feltehetőleg csak 6–10 különböző helyről robbant ki a bolygó felszínén. Jelentőségük egyrészt az, hogy a marsi magmás folyamatokra utalnak, és lehetővé teszik a bolygó jellegzetes kőzetanyagának pontosabb megismerését, ebből pedig a belső átalakulás mértékére következtethetünk. Miközben a Mars körüli keringő egységek és a felszíni roverkék a vörös bolygó mállott felszíni vörös anyagát elemzik, a meteoritok a felszín alatti régióról nyújtanak információkat.

Két terület van, ahol a marsi meteoritok kiemelkedően fontosak: az ősi víz és a szerves anyag kérdésköre. A

**A Vesta kisbolygó bazaltos lávaanyagának kis darabja az NWA 7488 meteorit formájában**  
(Kereszty Zsolt gyűjteménye)

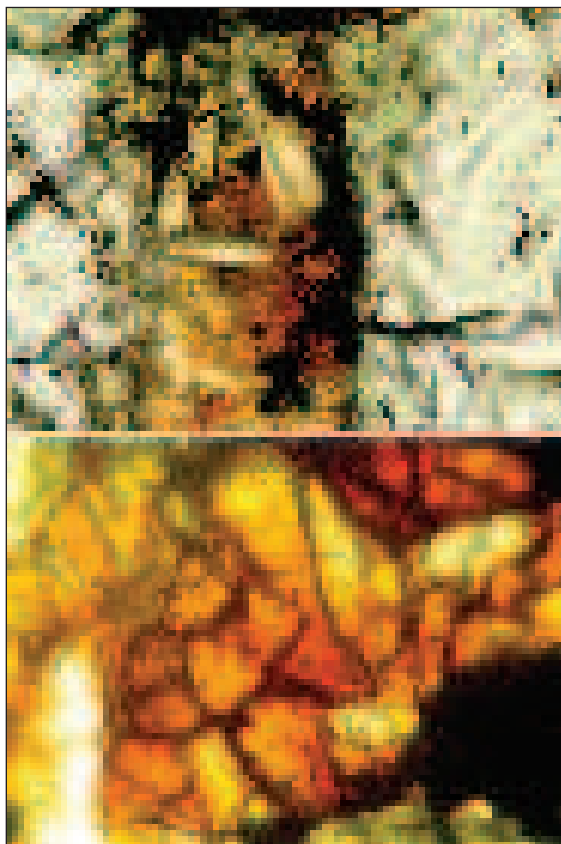




**Az Asuka-881757 holdi meteorit jól mutatja a korábbi becsapódások által összetöredezett breccsás szerkezetet (NASA, LPI)**

bolygón sokfelé láthatóak egykori folyásnyomok, de mára száraz a vidék. Az ősi víz elemzésében a marsi meteoritok is segítenek, részben a bennük kivált ún. másodlagos ásványokkal, amelyek az egykori mállás hőmérsékletére, pH-

**Vöröses, vizes mállásnyomok a Yamato 593 marsi meteorit repedéseiben, amelyek egykor benne cirkulált forró vizes oldatoktól származhatnak (MTA CSFK)**



jára utalnak. Emellett az ásványokban kötött  $H_2O$ -ban és  $OH$ -ban lévő deutérium-izotóp koncentrációjának változása alapján a bolygó ősi vízkészletének nagyságára, a világűr felé elveszett mennyiségre is következtethetünk. A meteoritok alapján a bolygó ősi vízkészlete nagyságrendileg 100–200 méter vastag rétegben boríthatta volna a Marsot, ha mind kicsapódik, és a bolygó szabályos gömb alakú lenne.

A marsi élet lehetőségének vizsgálatához fontos megállapítani, milyen és mennyi szerves anyag van vagy volt a bolygón. Egészen mostanáig (a Curiosity rover felfedező útjáig) csak a marsi meteoritokban találtak szerves komponenseket a kutatók. Ezek az ALH 84001 meteorit esetében vitára is okot adtak, mivel felmerült, hogy az biogén eredetű is lehet. A kérdést egyelőre nem sikerült tisztázni, de valószínűnek látszik, hogy akár élettevékenység nélkül is létrejöhetett. A marsi meteoritokban a szerves anyag egy része az izotópmérések alapján földi szennyezés, de jelentős mennyiség eredetileg is volt a vörös bolygón. Nagy kérdés, hogy ott helyben keletkezett, avagy meteoritok hozták az égitestre – erre talán a marsi meteoritok további vizsgálatának a helyszíni mérésekkel történő összevetése adhat választ. ◆

A cikkben bemutatott meteoritokhoz hasonló példányok a TIT Budapesti Planetárium *Égből pottyant kövek* kiállításán tekinthetők meg.

*Köszönetnyilvánítás*  
A cikkben bemutatott összefüggések hátterét adó munkát az MTA CSFK Asztrofizikai és Geokémiai Laboratóriuma, valamint a marsi Yamato 593 meteorit esetében az OTKA 105970 pályázat támogatta.



**Kutatók Éjszákája  
a TIT Budapesti Planetáriumban  
(X. kerület, Népliget)**

**2015. szeptember 25.**

### Program

#### KUPOLATEREM

16:00 – Idővándor (planetáriumi műsor)

17:30 – Láthatjuk a csillagok felszínét?

– előadás (Vida Krisztián, MTA

CSFK Konkoly Thege Miklós

Csillagászati Intézet)

19:00 – Égből pottyant kövek – a meteoritok nyomában – előadás, bevezető planetáriumi műsorral (Kereszturi Ákos, MTA CSFK Asztrofizikai és Geokémiai Laboratórium)

21:00 – Csillagászat a Világűrben – előadás (Frey Sándor, FÖMI Koszmos Geodéziai Observatórium)

#### KÖRFOLYOSÓ

16:00 – 22:00 – A Puli Space Csapat interaktív bemutatója

16:00 – 22:00 – Égből pottyant kövek – meteoritkiállítás

16:00 – 22:00 – A világ éjszakai arcai – TWAN asztrofotó-kiállítás

17:00 – 19:00 – Csillagászati kézműves foglalkozás gyerekeknek

17:00 – 22:00 – Meg van írva? – A magzati életesemények hatása hosszú távú egészségünkre az EpiHealthNet projekt nemzetközi diákjaitól

#### UDVAR

16:00 – Távcsoves Nap-bemutató (napnyugtáig – derült idő esetén)

19:00 – Távcsoves csillagászati bemutató (csillagképek ismertetése, csillaglegendák, Hold – derült idő esetén)

#### NÉPLIGETI SÉTÁNY

15:00–17:00 – A Sétáló Naprendszer felfedezése – Bolygóvadászat a méretarányos Naprendszerben a Népliget sétányán