

2006-ban ismert fő kisbolygóövi üstökösök

Objektum	Pálya fél nagy tengely a (CSE)	Pálya ex- centricitás E	Pályahaj- lás i (fok)	Tisserand- paraméter T_J	Perihélium q (CSE)	Aphélium Q (CSE)	Átmérő D (km)
133P/Elst– Pizarro (7968 Elst– Pizarro)	3.156	0.165	1.39	3.184	2.636	3.677	5.0
P/2005 U1 (Read)	3.165	0.253	1.27	3.153	2.365	3.965	2.2
(118401) 1999 RE70	3.196	0.192	0.24	3.166	2.581	3.811	4.4

Üstökösaktivitást mutató ismert objektumok a kentaur régióban 2006-ban

Objektum	a (CSE)	E	i (fok)	q (CSE)	Q (CSE)	Keringési idő (év)	T_J
29P/SW1 ¹	6.00	0.044	9.39	5.72	6.25	14.65	2.976
39P/Oterma	7.25	0.246	1.94	5.47	9.03	19.53	3.003
95P/Chiron	13.70	0.381	6.93	8.48	18.92	50.71	3.355
165P/LINEAR	18.03	0.621	15.91	6.83	29.22	76.53	3.090
166P/NEAT	13.89	0.383	15.37	8.56	19.21	51.74	3.298
167P/CINEOS	16.15	0.270	19.12	11.78	20.52	64.91	3.502
174P/Echeclus	10.77	0.456	4.33	5.86	15.69	35.36	3.037
C/2001 M10 (NEAT) ²	26.66	0.801	28.08	5.30	48.02	137.67	2.557

Megjegyzés:

a : fél nagytengely, E : excentricitás, i : pályahajlás az ekliptika síkjához,
 q, Q : perihélium- és aphéliumtávolság, T_J : a Jupiterre vonatkozó Tisserand-paraméter.

¹ kentaur – ekliptikai üstökös átmeneti objektum² Az üstökösaktivitás gyenge vagy kérdéses.

Petrovay Kristóf A Naprendszer keletkezése

A magyar csillagászati irodalom régi adóssága a Naprendszer keletkezéséről szóló átfogó, korszerű beszámoló. Az utolsó ilyen jellegű, magyar nyelvű összefoglalók három-négy évtizede íródtak, s jobbára a tudománynak még ennél is régebbi, 1960 körüli állását tükrözik. Pedig bolygókozmozgóniai elképzeléseink azóta több tekintetben gyökeresen átalakultak.

A témától való húzódozás egyik oka talán a terület „gazdátlansága”, vagyis multidiszciplináris jellege. A Naprendszer eredetének vizsgálata jártasságot igényel az *ásvány- és kőzettanban*, a *geokémiában*, az izotópos vizsgálatok alapjait jelentő *atomfizikában*, az *űrfelvételek* alapján történő kormeghatározást megalapozó *planetológiában*, a *nap- és űrfizikában*, az *égi mechanikában*, az *exobolygó-rendszereket* és más csillagok propidjait vizsgáló *észlelő asztrofizikában*, a *csillagkeletkezés és csillagfejlődés elméletében*, és nem utolsósorban a *szoláris köd fejlődését meghatározó hidro- és magnetohidrodinamikában*. Hogy most mégis egymagam megpróbálkozom e régi adósság törlesztésével, annak oka az illő szerénység hiányán túl egyetemi oktatói tapasztalataimban keresendő. Ha az ember még államvizsgázó csillagászhallgatóktól is ősrégi jegyzetekben talált, rég elavult, ködös kozmogóniai koncepciókat hall, előbb-utóbb elszánja magát a helyzet orvoslására.

A Naprendszer kozmogóniájának régi ismertetései hagyományosan történeti felépítést követtek: voltaképpen egyes tudósok időben egymást követő elméleteinek felsorolásából álltak. Ezzel a hagyománnyal ezúttal szakítunk. Az utóbbi négy évtizedben ugyanis az űrkutatás, az izotópos vizsgálatok és a modern számítógépeken végzett elméleti modellezés eredményeképpen a Naprendszer eredetének kutatása minőségileg új korszakba lépett, „normálisabb tudományterületté lett, amit nem csak egymás elméleteivel hadakozó, különc öregurak űznek” (Wetherill 1990). Ez a fejlemény szempontunkból irrelevánsá teszi az 1960-as éveket megelőző Naprendszer-kozmozgóniai elméletek zömét, melyekre legfeljebb mint zseniális korai megsejtésekre utalunk majd futólag. Másik gyakori vonása az efféle ismertetéseknek, hogy az elemzést egy sor alapvető empirikus tény ismertetésével kezdik, amelyekre magyarázatot kellene találni. E hagyományhoz

alkalmazkodva tekintsük át mindenekelőtt mi is az ilyen megfigyelési tényeket!

1. táblázat

Megfigyelési tények

[MT1]	A Naprendszer égitesteinek többsége nagyjából egy síkban, körhöz közel álló pályán kering. (Kivételt képeznek az üstökösök.)
[MT2]	Bolygórendszer a csillagok igen nagy hányadához tartozik.
[MT3]	Fiatal csillagok körül a legtöbb esetben gáz- és porkorong található. Ez a csillag születése (láthatóvá válása) után néhány millió évig marad meg. (Néhány esetben azonban jóval tovább fennmarad, pl. Vega, β Pic.)
[MT4]	A Naprendszer teljes impulzusmomentumának 99,5%-a a tömeg 0,2%-át kitevő bolygókban van.
[MT5]	A bolygórendszer anyaga vegyileg differenciált (elkülönült). A Naptól távolodva egyre alacsonyabb olvadás- és forráspontú (és egyben sűrűségű) anyagok az uralkodók. Különösen markáns ez a különbség a Naptól mintegy 4 CSE távolságban húzódó ún. hóhatár két oldala között. E határon túl az égitestek jelentős részben jégből állnak, míg azon belül a jég a légkör nélküli égitestek felszínéről a Nap melege miatt elillan, ott tartósan nem maradhat meg. Az egyes bolygók és holdak anyaga általában ugyancsak vegyi rétegződést mutat.
[MT6]	A kémiai elemek relatív gyakorisága a legősibb, differenciálatlan meteoritokban (szenes kondritok) a Nap fotoszférájában mérthez igen közel áll. Kivételt képeznek a szobahőmérsékleten is gáz vagy folyékony halmazállapotú illó anyagok összetevői (H, He, C, N, O), amelyek a meteoritokból természetesen nagyrészt hiányoznak.
[MT7]	A könnyűfémek (Li, Be, B) a planetáris testekben sokkal gyakoribbak, mint a Nap fotoszférájában.
[MT8]	A Naprendszer legősibb kőzetei 4567 ± 1 millió éve szilárdultak meg. Minden ismert égitest legősibb szilárd anyagai ezután $\sim 10^8$ éven belül alakultak ki.
[MT9]	Egyes rövid ($< 10^6$ év) felezési idejű radioaktív izotópok gyakorisága a Naprendszer keletkezésének idején igen magas volt.
[MT10]	A bolygók pályasugarai kb. mértani haladvány szerint nőnek (Titius–Bodeszabály).
[MT11]	Az óriásbolygók holdrendszerei sok tekintetben a Naprendszer kicsinyített másai, így a fenti tények rájuk is igazak. (De: MT4 kisebb mértékben.)
[MT12]	A Naprendszer égitesteinek tengelyforgási periódusa többnyire 5–10 óra; forgástengelyük közel merőleges a pályasíkjukra, s a forgás direkt irányú. A kevés kivétel közé tartoznak a nagyobb égitestek közül: Merkúr, Vénusz, Föld, Mars, Uránusz.

A szoláris köd és eredete

Az az egyszerű és közismert tény, hogy a Naprendszer legtöbb égiteste hozzávetőleg egy síkban és közel körpályákon kering [MT1], messzemenő következtetéseket enged meg a rendszer eredetére nézve. A statisztikus mechanika nyelvén szólva a bolygórendszer ma *ütközésmentes rendszer*. Ez azt jelenti, hogy a planetáris testek egy keringés alatt elenyésző eséllyel ütköznek másokkal, vagyis a két ütközés közötti *szabad repülési idő* sokkal hosszabb a rendszeren való áthaladás idejénél. Ilyen körülmények között semmi akadályja nem lenne annak, hogy az égitestek egymást metsző, excentrikus és inklinált pályákon mozogjanak (ahogyan azt teszik is pl. az üstökösök).

Ha azonban a planetáris testek anyagát sokkal nagyobb számú, kisebb részecskébe osztanánk szét – vagyis porrá vagy gázzá alakítanánk –, az ilyen rendszer a részecskék közötti kis távolságok miatt már ütközéses lesz, vagyis a részecskék a keringési időnél sokkal rövidebb időközönként ütköznek egymással. Az ütközések során a részecskék impulzusa és így impulzusmomentuma is megmarad, viszont mozgási energiájuk egy része hővé alakul és elsugárzódik. Ennek következtében a rendszer zsugorodik. A forgástengelyre merőleges irányban ugyanakkor a perdület megmaradása akadályozza a zsugorodást, ezért az anyag bizonyos idő elteltével egy korongba esik össze. A korong síkjában a részecskék közel körpályákon mozognak, mivel adott perdület esetén ezek a legkisebb energiájú pályák. Hűlő és zsugorodó gáz- és porfelhőknek tehát természetes konfigurációja a korong alak; ezzel magyarázható pl. a galaxiskorongok keletkezése is. A ma ütközésmentes bolygórendszer jellemzői tehát arra utalnak, hogy *planetáris testek egy gáz- és/vagy porkorongból az ún. protoplanetáris korongból* (protoplanetáris diszk, vagy elterjedt szóösszevonással *proplid*) *alakultak ki*. Ez tehát lényegében minden Naprendszer-keletkezési modell kézenfekvő kiindulópontja.

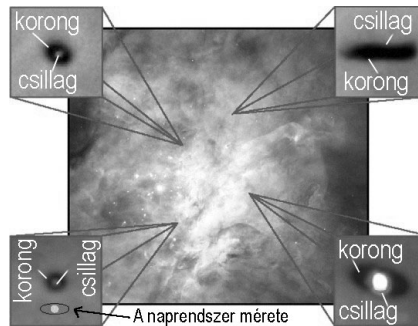
Ez azonnal két, egymástól nagyrészt független kérdést vet föl:

1. Honnét eredt a protoplanetáris korong?
2. Hogyan alakult bolygókká?

Az utóbbi húsz évben az űrteleszkópok és a precíziós földfelszíni spektroszkópia forradalmasították ismereteinket más csillagok formálódó és már kialakult bolygórendszereiről. Ennek nyomán jóval biztosabb alapra kerültek a Nap proplidja, a *szoláris köd* eredetére és jellemzőire vonatkozó elképzeléseink. Az azt megelőző két évtizedben pedig az űrkutatás és a modern számító-

gépes szimulációk eredményei lehetővé tették, hogy a bolygók protoplanetáris ködből való kialakulási folyamatáról átfogó, konzisztens képet alkossunk. Ennek nyomán napjainkra a fenti alapkérdésekre részletekbe menő, s fő vonásait tekintve számos bizonyítékkal alátámasztott válaszokat adhatunk. Ebben a fejezetben az első kérdést vizsgáljuk meg, míg a második kérdés a következő fejezet tárgya.

A fiatal csillagok körül törvényszerűen megfigyelhető gáz- és por-korongok (1. ábra) szemléletesen mutatják, hogy a bolygórendszereket szülő proplidok a csillaggal együtt, nyilván ugyanazon anyagból születnek, egy csillagközi gáz- és porköd (lat. *nebula*) anyagának összetömörülésével [MT3]. Az ilyen *nebularis elméletek* hosszú múltra tekintenek vissza Kant (1755) és Laplace (1796) korai, zseniális megsejtései óta. Velük szemben a legsúlyosabb ellenvetés – mely a XX. század elején átmeneti kegyvesztésükhöz vezetett – sokáig az ún. *perdület-probléma* volt.



1. ábra. Proplidok újszülött csillagok körül az Orion-ködben

A perdület-probléma és feloldása

A probléma lényege közismert [MT4]. A Naprendszer teljes perdületének 99,5%-a a tömeg 0,2%-át adó bolygók pálya-impulzusmomentuma formájában van jelen. A tömeg 99,8%-át kitevő Nap ugyanakkor igen lassan forog, így csak a teljes perdület 0,5%-át tartalmazza. Ha a bolygók és a Nap ugyanazon anyagból alakultak ki, amint azt a nebularis elméletek feltételezik, akkor hogyan lehet ennyire eltérő a fajlagos impulzusmomentumuk?

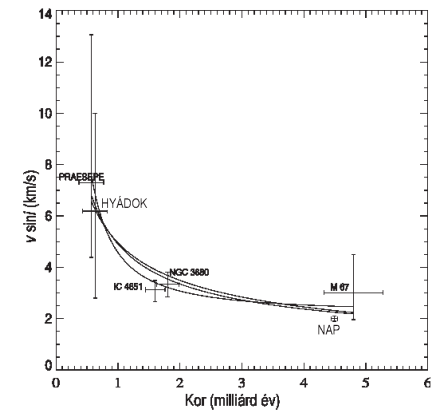
Világos, hogy a probléma feloldásához egy belülről kifelé, a Naptól a bolygók felé irányuló perdületátadásra van szükség. Mivel a korongban a centrumhoz közelebbi anyagrészek Kepler harmadik törvénye értelmében gyorsabb keringést végeznek, a közeg belső sűrűsége éppen ilyen perdületátadást okoz. Csakhogy a számszerű becslések szerint a viszkozitás túlságosan kicsiny volt ahhoz a szoláris ködben, hogy ez a transzport számottevő legyen. A XX. század derekán azonban két olyan folyamatot is azonosítottak, amelyek a szoláris köd belső sűrűsödését, „merevségét” kellően fokozhatták: a ködben zajló *turbulenciát* (Weizsäcker, Kuiper), illetve a részben ionizált gázból álló ködöt átható, abba

befagyott *mágneses teret* (Alfvén, Hoyle). Ezen úttörő javaslatok nyomán mára a perdület-probléma magyarázatát illetően a következő konszenzus alakult ki.

A szoláris köd őse egy kiterjedt csillagközi gáz- és porfelhő helyi sűrűsödése, egy ún. felhőmag volt, mely instabillá vált és gravitációs kollapszusba kezdett. A kollapszust a forgástengelyre merőleges irányban a centrifugális erő megakadályozta, így az anyag nagyrészt egy koronggá esett össze. (Csupán a forgástengelynél levő anyag perdülete volt annyira kicsi, hogy közvetlenül behullhatott a centrumban képződő protocsillagba – ezen részek tömege azonban a későbbi Napénak még csak századrésztéte lehetett ki.) A korongban főként a turbulencia s emellett részben a mágneses tér folytán fellépő belső sűrűsödés folytonosan fékezte az anyag keringését, amely így lassan befelé spirálozott, mígnem behullott az ő-Napba. A Nap tehát már eleve az impulzusmomentumát veszített anyagból alakult ki, de kezdetben még így is viszonylag gyorsan, Kepler-sebességgel (körsebességgel), azaz a szétszakadás határán kellett forognia.

A Nap forgásának további lassulása az ún. *mágneses fékezés* révén ment végbe. E még ma is tartó folyamat lényege, hogy a Napból kiinduló napszél csekély tömegéhez képest aránytalanul sok perdületet visz el. A többlet-perdületet az anyagát a napfelszínhez láncoló, befagyott mágneses erővonalak révén nyeri a kiáramló plazma. Szemléletesen úgy képzelhetjük el, hogy a befagyott mágneses tér erővonalai rugókként kötik össze a kiáramló anyagdarabokat a felszínnel. A perdület megmaradása miatt a felszínhez képest visszamaradó anyagcsomókat a megnyúló „rugók” a forgásirányba húzzák, ezzel forgatónyomatékokat gyakorolva rájuk.

A Naphoz hasonló, de nála fiatalabb csillagok megfigyelése megerősíti a fenti képet. Jellemzően a Napnál tízszer fiatalabb csillagok mintegy ötödszöri idő alatt fordulnak meg tengelyük körül, mint a Nap (2. ábra).



2. ábra. Mágneses fékezés. Nap típusú csillagok kora és forgási sebessége

Történeti kitérő: A nebuláris elmélet alternatívái

A XX. század első felében a bolygók anyagát átmenetileg olyan kis valószínűségű véletlen folyamatokból eredeztették, mint egy sűrű csillagközi felhőmagból való befogás (befogási elmélet; Smidt 1941) vagy a Napból való kiszakadás egy közelben elhaladó másik csillag árapálykeltő hatására (árapály- vagy katasztrófaelmélet; Chamberlin 1905, Jeans 1917). Az utóbbi évtizedben tömegesen felfedezett exobolygó-rendszerek [MT2] fényében effajta lehetőségek többé fel sem merülhetnek, hiszen a fenti folyamatokhoz szükséges szoros találkozás a Nap és egy más égitest között csupán a csillagok elenyészően csekély hányadával fordulhatott volna elő. Valójában a fenti lehetőségeket már a XX. század derekán elvetették, főként kémiai megfontolások alapján. Mivel a lítium és egyéb könnyűfémek a csillagok belsejében lebomlanak, a bolygók anyagában tapasztalt, a napléggörben mértnél jóval nagyobb gyakoriságuk [MT7] ellentmond annak a feltevésnek, hogy a szoláris köd anyaga jóval a Nap keletkezése után szakadt volna ki abból. A befogási elméletet másfelől valószínűtlenné teszi az ősi meteoritikus anyag és a napléggör vegyi összetételének általános jó egyezése [MT6]. Ráadásul ez az elmélet azt sem magyarázza meg, miért áll közel a bolygók pályásíkj a Nap egyenlítői síkjához.¹

Preszoláris szupernóva?

Az asztrofizikai megfigyelésekből régóta tudjuk, hogy a szupernóva-robbanások keltette lökéshullámok a csillagközi anyagban csillagképződési folyamatokat válthatnak ki. Ez alapján már a XX. század derekától többször felvetődött, hogy a Naprendszer keletkezését is effajta lökéshullám indíthatta el. Az elképzelés akkor lépett elő merő spekulációból hipotézissé, amikor 1975-ben Wasserburg és munkatársai kimutatták, hogy egyes ősi meteoritok anyagában feltűnően gyakori a magnézium 26-os tömegszámú izotópja, a „rendes”, 24-es izotóphoz képest. Egy ún. kondrula több, mikroszkopikus méretű darabkáját megvizsgálva azt találták, hogy az anomália annál erősebb, minél nagyobb a minta alumíniumtartalma. Ez arra utal,

¹ A befogási elméletnek később Woolfson (1960–78), valamint Alfvén és Arrhenius (1960–76) olyan változatait javasolták, ahol a befogott anyag a Napot szülő csillagközi felhőcsomóból származik. Ezek az elméletek voltaképpen átmenetet jelentenek a nebuláris elméletek felé, részleteiket tekintve azonban továbbra is kevésbé meggyőzőek annál.

hogy a ²⁶Mg a ²⁶Al radioaktív izotóp bomlásával keletkezhetett. Utóbbi izotóp rövid (720 ezer éves) felezési ideje viszont azt jelenti, hogy a szoláris köd anyagát egy, legfeljebb kétmillió évvel az első meteoritikus szemcsék keletkezése előtt fellángolt szupernóva radioaktív izotópokkal szórhatta tele [MT9].

A felfedezést követően az elmélet évtizedekre a viták kereszttüzébe került. Többen rámutattak, hogy a ²⁶Al nemcsak egy csillag belsejében jöhetett létre, hanem pl. az Ős-Nap erős nagy energiájú részecskesugárzásának (protonflerjeinek) hatására is; ráadásul az is felvetődött, hogy ezen izotóp általános gyakorisága a csillagközi anyagban nem tér el lényegesen a szoláris ködben mutatott kezdeti gyakoriságától.

Újabb fordulatot hozott az ügyben a ⁶⁰Ni izotóp kimutatása egyes meteoritokban (Tachibana & Huss 2003). Ez az izotóp a ²⁶Mg-hoz hasonlóan csak a ⁶⁰Fe bomlásterméke lehet (felezési idő: 1,5 millió év), mely azonban kizárólag csillagok magjában keletkezhet. Ez a ²⁶Al esetében felvetődött alternatívákat kizárja, megerősítve a preszoláris szupernóva hipotézist. A legfrissebb modellszámítások szerint a szupernóvának a szoláris ködtől legfeljebb néhány parszekre kellett fellángolnia, ami valószínűvé teszi, hogy az a Nap „idősebb testvére” lehetett. Tudjuk, hogy a Naphoz hasonló legtöbb csillag (többnyire rövid életű) csillaghalmazban keletkezik, tehát Napunkról is feltételezhetjük ezt. A halmaz egy néhány millió évvel korábban létrejött, igen nagy tömegű tagja lehetett az, amely életét hamar leélve szupernóvává vált, nehéz elemekben feldúsítva a Napot szülő felhőmagot, s talán annak összeomlását is okozva.

A szoláris ködtől a bolygókig

Mekkora lehetett a szoláris köd tömege? Erre nézve alsó becslést kaphatunk, ha figyelembe vesszük, hogy a bolygókban a nehéz elemek egymáshoz viszonyított aránya megegyezik a Nap fotoszférájában mérttel, míg az illó anyagok összetevőit (H, He, C, N, O) tekintve a planetáris testekben jelentős hiány tapasztalható – nyilván azért, mert az utóbbiak elszöktek. A nehéz elemeket a hiányzó könnyű elemekkel kiegészítve megkaphatjuk, minimálisan mennyi anyagnak kellett lennie a szoláris köd egészében és egyes zónáiban. Ezen ún. *minimális szoláris köd* tömege mintegy 0,02 M_{\odot} -nek adódik.

A felső tömeghatár jóval bizonytalanabb, de különböző megfontolások alapján valószínű, hogy a Nap proplidjának tömege jóval a központi csillag alatt lehetett, tehát legfeljebb néhány tized naptömeg volt. Újabb sok

modell a két szélsőség között középutként $0,1 \mathcal{M}_{\odot}$ körüli értéket feltételez a szoláris köd tömegére.

Kezdetben a szoláris köd igen forró lehetett, egyfelől a benne befelé spirálozó anyagban felszabadult és hővé alakult helyzeti energia, másfelől az ősz-Nap nagy luminozitása és erős aktivitása következtében. A Naptól távolabb mindkét hatás jelentősége kisebb, tehát a hőmérséklet a ködben kifelé csökkent, de néhány csillagászati egységen belül 1500–2000 fokra lehetett. Ennek következtében a Napot szülő felhő porszemcséi zömmel elpárologtak, csak kis hányaduk „úszhatta meg” szárazon. Az akkréció megszűnésével, a Nap halványulásával és a naptevékenység mérséklődésével azután a köd lassan hűlt.

A bolygók kialakulására nézve kétféle lehetőség kínálkozik: a forró gázköd anyagának közvetlen gravitációs kollapszusa (összeomlása), vagy a lassan hűlő ködből kicsapódó porszemek fokozatos összeállása nagyobb égitestekké.

Forró (más néven összeomlásos vagy kollapszusos) keletkezési mechanizmus

Ez a Kuiper holland származású amerikai és Cameron amerikai csillagászok által javasolt mechanizmus az 1960-as években volt igen népszerű.

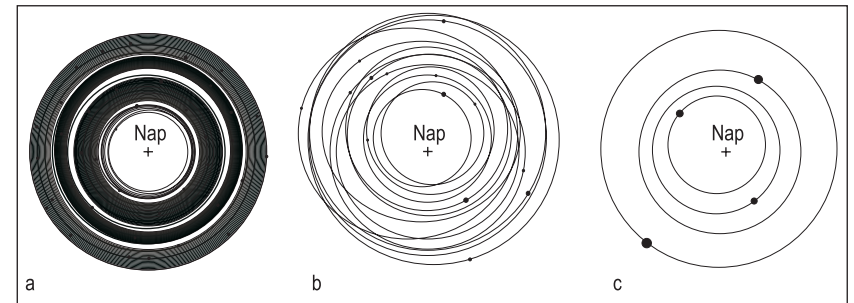
Ha a köd anyaga elég sűrű volt, a benne fellépő véletlen sűrűsödések gravitációsan instabillá válhattak, és megállíthatatlan összeomlásba kezdhettek. Ez a folyamat lényegében az egész Naprendszer létrejöttének kisebb léptékű mása, így természetes módon magyarázhatja a gázóriások és a körülöttük kiépült holdrendszerek képződését [MT11]. A folyamat rendkívül gyors, alig néhány ezer év leforgása alatt kialakulhatott így pl. a Jupiter. A számítások szerint azonban a gravitációs instabilitáshoz a szoláris köd tömegének jóval egy naptömeg fölött kellett volna lennie, ami alig valószínű. A naprendszerbeli kis égitestek (aszteroidák, üstökösök) eredetét pedig az elmélet egyáltalán nem magyarázza meg.

További nehézséget jelent a kőzetbolygók képződése. A forró keletkezési elmélet szerint a Föld és társai valaha a Jupiterhez hasonló gázóriások kőzetmagját alkották, s kiterjedt gázburkukat az idők során a Nap közelsége miatt veszítették volna el. Ez a hatalmas mértékű gázvesztés azonban nem minden gázt érintett volna egyformán: a nagy atomsúlyú nemesgázoknak (Ar, Kr, Xe) vissza kellett volna maradniuk, így ezekből a kőzetbolygóknak ma sokkal többet kellene tartalmazniuk. Ez a megfontolás gyakorlatilag kizárja a kőzetbolygók kollapszusos eredetét.

Hideg (más néven összeállásos vagy akkréciós) keletkezési mechanizmus

Ha a szoláris köd tömege nem volt elég nagy ahhoz, hogy gravitációsan instabil legyen, akkor *lassú hűlése során belőle apró porszemek kondenzálódhattak*, mint a hűlő párából a vízcseppek ill. jégkristályok. A porszemcsék kezdetben elektrosztatikusan tapadhattak össze nagyobb konglomerátumokká, ahogyan a jégkristályok hópelekévé vagy – kevésbé esztétikus hasonlattal – a porszemek a szoba sarkában pormacskává. Efféle képződmények a bolygóközi porban ma is találhatók. Ha azután az így létrejött centiméteres nagyságú bolyhok valami úton-módon *kilométeres darabokká álltak össze*,² akkor már a tömegvonzás vehette át az irányítást. A nagyobb darabokhoz egyre több és több társuk nőtt hozzá (lat. „hozzánövés” = *akkréció*), míg ezek a bolygókezdemények (*planetézimálok*) aszteroida, majd bolygó méretűvé híztak.

Ezen összeállási folyamat részletes matematikai modelljének kifejlesztése Szafronov orosz planetológus nevéhez fűződik. Szafronov a moszkvai Földfizikai Intézet munkatársa volt, amelyet a már említett O. J. Smidt, a befogási elmélet kidolgozója vezetett. Ebben az elméletben, mint láttuk, a szoláris ködöt a Nap egy csillagközi felhőből fogta volna be. A főnökével nyíltan szembeszállni nem óhajtó Szafronov volt az első, aki egyértelműen kimondta: a szoláris köd eredetének kérdése lényegében független a bolygók kialakulásának problémájától, így saját munkája bármelyik kontextusba beilleszthető.



3. ábra. Planetézimálok összeállása néhány bolygóvá. Egy számítógépes szimuláció fázisai

² Ez a lépés az elmélet egyik gyenge pontja. Egyik lehetőség, hogy a bolyhok leülepedtek a protolid szimmetriasíkjába, egy vékony, sűrű rétegbe, s e porréteg (de nem a gáz) gravitációs instabilitása vezetett a nagyobb képződmények összeállásához.

Eredményeit Szafronov orosz szaklapokban, majd 1969-ben egy orosz nyelvű monográfiában tette közzé. Szélesebb körben akkor váltak ismertté, amikor könyve egy izraeli szakfordítási program keretében 1972-ben megjelent angolul. Szafronov analitikus számításai nyomán több amerikai kutató megkezdte a folyamat részletes numerikus modelljének kifejlesztését (3. ábra). Az összeállási elmélet hamarosan végképp háttérbe szorította az összeomlási elméletet, és a bolygóképződés máig általánosan elfogadott modelljévé vált.

Az összeállásos elmélet fő vonzereje az, hogy magyarázatot ad a Naprendszer megfigyelt vegyi differenciálódására [MT5]. A lassan hűlő szoláris ködből először a legmagasabb olvadáspontú ásványok csapódnak ki, majd egyre alacsonyabb olvadáspontúak, a jegekig (az illó anyagok szilárd fázisáig) bezárólag. Kémiai számításokkal levezethető, hogy a Naphoz hasonló elemösszetételű ködből milyen ásványok, milyen sorrendben és milyen arányban csapódnak ki. Ez a *kondenzációs sorozat* főbb vonalakban a 2. táblázat első két oszlopában látható. Mármost mivel a hőmérséklet a ködben kifele csökkent, adott időpontban a kondenzációs folyamat mindig jóval előrehaladottabb volt a Naptól nagyobb távolságban. Ha a szoláris köd maradék gázanyaga egy idő után eltűnt, ez az állapot konzerválódhatott, azaz a Naphoz közelebbi részeken egyre inkább csak magas olvadáspontú ásványokat találunk. A táblázat harmadik oszlopa jelzi, a tapasztalat szerint mely naptávolságokon akadhatott meg az adott szinten a kondenzációs folyamat.

2. táblázat

A kondenzációs sorozat

Kondenzációs hőmérséklet [K]	Főbb ásványcsoportok	Melyik égitestnél állt meg itt a kondenzáció?
1500	Ca, Al, Ti oxidjai	ősi zárványok meteoritokban
1400	vas, nikkel	Merkúr
1300	szilikátok	Vénusz, Föld
700	vas oxidálódik	Mars
600	szén, szénvegyületek	aszteroida-öv
200	vízjég	Jupiter, Szaturnusz
100	ammónia- és metánjég	Uránusz, Neptunusz, Kuiper-öv

Miért tűnt el a maradék gázanyag? Ennek oka minden bizonnyal a gyorsan forgó és rendkívül aktív ős-Nap (ebben az időben T Tauri típusú változócsillag) erős csillagszele lehetett, amely egyszerűen elfújta a maradék gázt. Mindenesetre a T Tauri csillagok megfigyelése azt mutatja, hogy proplid többnyire csak 2–3 millió évesnél fiatalabb csillagok körül figyelhető meg, tehát a gáz bizonyosan elég hamar eltűnik. Ráadásul a Nap közelsége miatt pl. a víz a belső Naprendszerben – a 4 CSE tájékán húzódó ún. *hőhatáron* belül – még akkor sem csapódhatott volna ki, ha a köd sokkal tovább megmarad.

A kőzetbolygók keletkezése. Kozmikus kataklizmák

A Hold, valamint a kisbolygóövből és a Marsról származó meteoritok tapasztalt sajátosságai arra utalnak, hogy az egyre nagyobb darabokká összeálló kőzettestek a száz km körüli méretet elérve részlegesen vagy teljesen megolvadtak. Az ehhez szükséges hőt a becsapódások során felszabadult mozgási energia (képződéshő) és a radioaktív izotópok bomlása szolgáltathatta. A fűtésben szerepet játszhattak az aktív, fiatal Nap erős mágneses tere által a keringő égitestekben generált áramok is.

Az olvadt kőzetanyagban a nagyobb fajsúlyú vas az égitest *magjába* szivárgott, míg a könnyebb szilikátos kőzetek a *köpenyben* gyűltek össze. A köpeny anyaga viszonylag hamar megszilárdult, míg a mélyen fekvő mag hűlése sokáig elhúzódott. Nagyobb égitestekre a felszín/térfogat arány kisebb, ezért sugárzásos hűlésük kevésbé hatékony. Ezért a nagyobb kőzetbolygók magja ma is legalább részben folyékony állapotban van. Az állandó bombázásnak kitett felszíni rétegek is tízmillió éveken át olvadt állapotban maradhattak (*magmaóceán*), és még később is újra és újra részleges olvadásnak voltak kitéve a becsapódások és a vulkáni tevékenység következtében. Ezen felszíni réteg, a *kéreg* tehát különösen erős differenciálódáson ment keresztül, s így vegyi jellemzői eltérnek az alatta fekvő, ősből tulajdonságokat megőrzött köpenytől.

Az összeállási folyamat sajátossága, hogy végső fázisában már aránylag kis számú és nagy méretű égitest marad a rendszerben. A bolygóképződés végső fázisában tehát a már kialakult ősbolygókba aránylag nagy méretű kisebb égitestek csapódtak nagy sebességekkel. A kőzetbolygók egyes jellemzőit, elsősorban forgási periódusukat e néhány utolsó nagy ütközés paraméterei határozták meg, lényegében véletlenszerűen. E tekintetben tehát a „kis számok törvénye” érvényesült, így érthető, hogy valamennyi kőzetbolygó rotációs jellemzői szokatlanok. A Vénusz igen lassan, retrográd

irányban forog, míg a Föld és a Mars nagy tengelyferdeséget mutat. (A Merkúr és a Föld forgási periódusának kialakításában a Nap ill. a Hold árapály-keltő ereje játszott szerepet.)

Az összeállás végső fázisában bekövetkezett óriási becsapódások következménye volt mai elképzelésünk szerint a Hold létrejötte is. Az Ős-Földdel rézsútosan ütköző, közel Mars nagyságú másik ősbolygó (fantáziánévén a Theia) becsapódásának hatására a Föld köpenyanyagából jókora adag elpárolgott, majd Föld körüli pályán ismét kikondenzálódott, s belőle állt össze testvérbolygónk, a Hold (Hartmann & Davis 1975; Cameron & Ward 1976). Egyedül ez az első hallásra hajmeresztőnek tűnő hipotézis képes egyidejűleg megmagyarázni a következő tényeket:

- 1. A Holdnak – átlagsűrűsége és az Apollo űrhajók által telepített szeizmográfok mérései alapján – nincs számottevő vasmagja. Így a Hold nem lehet a Föld párhuzamosan keletkezett „ikertestvére”.
- 2. A holdkéregben az oxigénizotópok aránya a földivel azonos, noha ez az arány (ma még egyébként tisztázatlan okok miatt) különben minden bolygóra más és más. A Hold tehát nem lehetett eredetileg független bolygó, melyet a Föld befogott.
- 3. A holdkéreg elemösszetétele a földköpeny összetételéhez általában hasonló. Ugyanakkor viszont feltűnően gazdag magas olvadáspontú elemekben (pl. Ti), míg hiányoznak belőle az alacsony olvadáspontú anyagok (alkáli fémek, illók). Ez érthető, ha a Hold az elpárolgott köpenyanyag újra-kondenzációjával jött létre.

Az óriás becsapódásra az utóbbi évtizedekben részletes számítógépes modelleket fejlesztettek ki, amelyek megmutatták, hogy a feltételezett esemény nem túl valószínűtlen, és jól reprodukálják kísérőnk főbb jellemzőit.

A fenti keletkezési kép alapján a kőzetbolygók alacsony olvadáspontú és illó anyagokat gyakorlatilag egyáltalán nem tartalmazhatnának, hiszen azok a Naphoz ilyen közelségben sohasem csapódtak volna ki a szoláris ködből. Hogyan magyarázzuk tehát a Föld és a Mars számottevő víz- ill. jég-készletét? A ma általánosan elfogadott elképzelés szerint a Naprendszer külső térségeiben keletkezett jég-kisbolygók, üstökösök becsapódásai útján érkezhettek e bolygók mai vízkészlete – talán éppen az ún. *kései nagy bombázás* idején (l. *Vándorló bolygók és a Hold-katakizma* fejezetet).

A fentihez hasonló problémát vet fel az a legújabb felfedezés, hogy a Merkúr vasmagja a bolygó forgási sebességének ingadozásai alapján ma is legalább részben olvadt állapotú (Margot és mtsai. 2007). Ez a hűlési modellek szerint csak akkor tűnik lehetségesnek, ha a magban a vashoz más, alacso-

nyabb olvadáspontú anyag, legvalószínűbben kén is elegyedik. Egy ilyen jelentős kénkészlet eredetét viszont szintén nem könnyű megmagyarázni. Korábban már felvetődött, hogy a Merkúr aránytalanul nagy vasmagját talán nem a kondenzációs sorozatnak megfelelő helyzete (2. táblázat) okozhatta, hanem egy, a Földet érthet hasonló óriás becsapódás, amely eredeti köpenyének nagy részétől megfosztotta a bolygót. Ha ez így volt, akkor a Merkúr keletkezési helyén nem feltétlenül uralkodott túl magas hőmérséklet a szoláris ködben, s így talán a kén is kicsapódhatott ott.

Az óriásbolygók keletkezése

Míg az összeomlásos keletkezési mechanizmus a kőzetbolygók megmagyarázására képtelen, addig az összeállással az óriásbolygókkal vannak nehézségek. Az óriásbolygók holdrendszerei sok tekintetben a Naprendszer kicsinyített másainak látszanak [MT11], ami a Naprendszeréhez hasonló eredetet sugall, egy gravitációs instabilitással képződött korongból. Igaz, ebben az esetben egy alternatív magyarázat is felmerülhet. Ismeretes, hogy az árapályerő hatására egy keringő égitest pályahajlása és excentricitása lassan csökken. A Naprendszer égitestjeinek pályasugara annyira nagy a Nap méretéhez képest, hogy mozgásukra – az egy Merkúr kivételével – az árapályerők nem gyakorolhatnak számottevő hatást; a holdrendszerek kialakításában viszont ez a hatás komoly szerepet játszhat.³

A fő gondot azonban az időskálák jelentik. Kepler harmadik törvényének megfelelően a külső Naprendszerben a keringésidők rohamosan hosszabbodnak, így a keringő planetezimáloknak egy bolygóba való besöpréséhez is egyre több idő kell. A Jupiter kialakulása több tízmillió évig tartott volna, a Naptól 30 csillagászati egységre keringő Neptunusz esetében pedig kérdéses, hogy egyáltalán hogyan jöhetett létre. Ez az „időskála-probléma” vagy „Neptunusz-probléma” az összeállásos modell fő nehézsége.

Ennek feloldására, vagy legalábbis nagymértékű enyhítésére fejlesztette ki a Kiotói Egyetemen C. Hayashi, a neves asztrofizikus által alapított és C. Mizuno vezette kutatócsoport a *magakkréció*s (más néven *nukleációs*) modellt, amely az óriásbolygók képződésének ma legáltalánosabban elfogadott mechanizmusa. Eszerint a jéghatáron túl a jég kicsapódásával ugrásszerűen nő a szilárd, főként jégből álló planetezimálok mennyisége. Ezekből aránylag rövid idő alatt tíz földtömeg körüli bolygókezdemények állhattak össze. E magok azután magukhoz vonzották a főként hidrogénből és héliumból

³ Az óriásbolygók holdjairól bővebben l.: Illés E.: Holdak a Naprendszerben. *Csillagászati évkönyv* 2006, 194. o.

álló maradék gázt, azaz lényegében göcként szolgáltak a gáz – egyébként csak sokkal sűrűbb köd esetén bekövetkező – kollapszusához. Így a modell „visszacsempészi” az összeállásos elméletbe az összeomlásos elmélet előnyeit. A javasolt mechanizmus akkor működőképes, ha a szoláris köd tömege legalább $0,08 M_{\odot}$ volt.

Az összeomlás gyorsasága folytán az időskála-probléma lényegesen enyhül, bár a Neptunusz képződéséhez még így is kényelmetlenül hosszú, legalább $3 \cdot 10^7$ évnyi idő kell. Miután a megfigyelések szerint a proplid csak néhány millió évig marad fenn [MT3], ez nehézséget jelent. Persze talán éppen ez magyarázza, hogy a gázóriásokkal (Jupiter, Szaturnusz) szemben a vízbolygóknak (Uránusz, Neptunusz) miért csak jóval kisebb a hidrogén-hélium légköre.

A kis égitestek eredete

A Mars és a Jupiter pályája között keringő kőzet-kisbolygók (*aszteroidák*) össztömege alig 25-öd része a Hold tömegének. Ez az anyaghiány feltehetőleg a Jupiter perturbáló hatásának következménye lehet. A perturbációk megnövelték az itt keringő planetezimálok pályahajlását és excentricitását. Az ebből következően nagyobb sebességű ütközések viszont már nem az égitestek összeállításához, hanem éppen szétdarabolódásukhoz vezettek. Az ütközéses erózió végeredményben a planetezimálok tömegének zömét porrá alakította. A bolygóközi por pedig számos hatás (pl. a Nap sugárnyomása) eredményeképpen nem marad meg tartósan a Naprendszerben, hanem részben kifúvódik, részben behullik a Napba. Így az övezetben levő anyag nagy része eltűnt, s a kezdetben kialakult egyetlen törpebolygó (az összes többi aszteroida tömegének felét kitevő Ceres) nem nőhetett tovább. Lehetőséges, hogy a Marsnak a szomszédos kőzetbolygókhoz képest feltűnően kis tömegét is a Jupiter hatása magyarázza.

A beljebb keringő planetezimálok és ősbolygók megolvasztásához vezető fűtési mechanizmusok erősebbek voltak a Naphoz közelebb. (Itt nagyobbak a keringési, s így az ütközési sebességek is; emellett a rövidebb keringési idők folytán az összeállás gyorsabban zajlott, így a gyorsan bomló radioaktív izotópok hőtermelése is jelentősebb lehetett.) A Naptól 1,5–2 CSE távolságon túl, az aszteroidaövben az olvadás már nem lehetett nagymértékű. Színképük és a belőlük származó (az összes meteorit 85%-át kitevő) *kondritmeteoritok* tanúsága szerint a főövbeli aszteroidák csak csekély mértékben differenciálódott égitestek.

A meteoritok fennmaradó 15%-a zömmel az aszteroidaöv belső széléről származik. Nagyobb részük vas- ill. kő-vasmeteorit, de akadnak köztük kő-

meteoritok is, az *akondritok*. Ezek erősen differenciálódott objektumok töredékeinek tűnnek. Sőt az aszteroidaöv belső peremén olyan kisbolygók is találhatóak, amelyek színképi jellemzőik alapján a többi aszteroidaétól lényegesen eltérő vegyi összetételűek: azok széngazdagságával szemben a kőzetbolygókhoz hasonlóan szilikátos kőzetekből állnak. Némelyikük maga is erősen differenciált égitestnek tűnik. Legnevezetesebb példájuk a Vesta, melynek kergéből származtatható aszteroidák szintén előfordulnak az akondritok között. Honnét eredhetnek ezek?

A Föld térségében keringő, differenciálódott planetezimálok az ütközések során össze-össze töredezték. E töredezési és összeállási folyamatot újabban Bottke és munkatársai (2006) modellezték. Eredményük szerint a keletkezett törmelék egy kis hányada a már kialakulófélben levő ősbolygók perturbációinak hatására kiszóródhatott az aszteroidaöv belső peremére, ahol akár a mai napig fennmaradhatott. Ebből a tartományból származnak a vasmeteoritok (az ősi differenciált planetezimálok magjából eredő szilánkok), a kő-vasmeteoritok (a mag és köpeny határáról), valamint az akondritmeteoritok (a kéregből). Az ősi égitestek köpenyanyagából származtatható meteoritokból feltűnően kevés akad – talán azért, mert ezek, a többiekénél kevésbé ellenálló anyagokból lévén, már szétporladtak az ütközésekben. Az aszteroidaöv belső szélére a szilánkok mellett a Vestához hasonló, komplett, differenciálódott planetezimálok is kiszóródhattak.

A Neptunusz pályáján kívül elterülő, jég-kisbolygókból álló *Kuiper-öv* eredete az aszteroidaövéhez hasonlóan magyarázható, csak éppen itt a Jupiter helyett a Neptunusz volt a perturbációk forrása. Mindkét esetben döntő az időskála: a Jupiternek illetve a Neptunusznak akkor kellett megjelennie a színen, amikor már megjelent néhány törpebolygó, de bolygó méretű égitest még nem tudott összeállni. A Kuiper-övből olykor a perturbációk hatására jég-kisbolygók tévednek be a Naprendszer belsőbb tartományába. Ezeket az objektumokat nevezzük *kentauroknak*, illetve, ha a jéghatárnál beljebb jutnak, *periodikus üstökösöknek*.

A *parabolikus üstökösök* ezzel szemben eredetileg a Kuiper-objektumoknál beljebb, az óriásbolygók tartományában keletkezhettek, ám a bolygók perturbációi igen távolra szórták ki őket, ahol extraszoláris hatások (más csillagok ill. a Tejút gravitációs tere) irányítják további pályafejlődésüket.

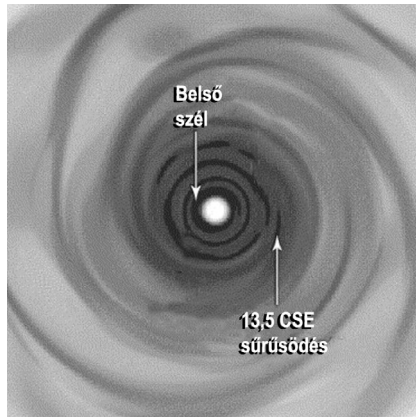
Aktuális témák

Struktúrák a protoplanetáris korongban. Hibrid modell

A fent vázolt magakkreciók modell az időskála-problémát inkább csak elviselhetővé mérsékli, mintsem megoldja. Ráadásul az az elterjedt nézet, hogy az aszteroidaövben az anyagihiányért a Jupiter hatása felelős, feltételezi, hogy a Jupiter már a kőzetbolygók keletkezésekor a helyén volt, vagyis igen gyorsan kialakult.

A fenti nehézségek hatására az utóbbi évtizedben néhány kutató ismét leporolta a kollapszusos keletkezés ötletét. Elősegítette ezt, hogy a számítógépek fejlődésével lehetővé vált a protoplanetáris korong többdimenziós hidrodinamikai modellezése. Boss az 1990-es évek végén végzett szimulációi szerint egy még elfogadható, néhány tized naptömegnyi szoláris köd hideg, külső részein feléphettek gravitációs instabilitások. Sajnos azonban ezek még az optimálisan beállított modellparaméterek mellett sem vezettek tartósan fennmaradó sűrűsödésekhez, „ösbolygókhoz”, helyett rövidesen feloszlottak.

Boss nyomdokain haladva az utóbbi években Durisen és munkatársai (2004) tovább vizsgálták a szoláris köd gravitációs instabilitását. Ilyen instabilitás közepes tömegű szoláris köd esetén csak a Naptól nagyon távol, a mai Naprendszer határain túl lép fel, és ott sem tartós anyagcsomók keletkezéséhez, hanem – a galaxisok esetéhez hasonlóan – spirális sűrűség hullámok gerjesztéséhez vezet. Ezek viszont kihatnak a proplid belső vidékeire is, ahol a szimulációban gyűrűszerű sűrűsödések jelennek meg (4. ábra). A gyűrűk fellépte részben a spirálgalaxisok mechanikájából is ismert ún. Lindblad-rezonanciák következménye. A ködből kicsapódott por különösen erősen „fokuszálódik” a gyűrűk középvonalába, ahol az így kialakult nagy porsűrűség nagyon meggyorsíthatja a bolygótestek akkrécióját.



4. ábra. Spirálszerkezet a szoláris köd külső részén és az általa gerjesztett gyűrűk a belső részen Durisen és mtsai. (2004) hibrid modelljében. A képen a sötétebb szín nagyobb sűrűséget jelent.

A szerzők hibrid modellnek nevezik elképzelésüket, ahol a gravitációs instabilitás közvetlenül nem vezet ugyan bolygóképződéshez, ám közvetve elősegíti azt.

Vándorló bolygók és a Hold-katakizma

A csillagászokban hosszú ideig fel sem merült a gondolat, hogy a főbolygók pályasugara keletkezésük óta számottevően megváltozhatott volna. Hiszen a bolygók egymásra gyakorolt vonzereje jelenleg csak elenyészően kicsiny szekuláris perturbációkat okoz a pályák fél nagytengelyében.

Az exobolygók tömeges felfedezése azonban az utóbbi évtizedben felhívta a figyelmet a bolygóvándorlás (migráció) egy igen hatékony mechanizmusára, amely drámai következményekkel járhat a bolygórendszer szerkezetére nézve. Az eddig felfedezett exobolygók többsége ugyanis a csillagjához meglepően közel (a hóhatáron belül) keringő óriásbolygó. Bár ez a statisztika főként annak a következménye, hogy mai észlelési technikánk elsősorban éppen az ilyen rendszerek kimutatására alkalmas, ez nem változtat azon a tényen, hogy ilyen, a mi Naprendszerünkől erősen különböző bolygórendszerek kétségkívül léteznek. Magyarázatukra született az a feltevés, hogy az újonnan felfedezett óriásbolygók eredetileg csillagjuktól tisztes távolságban születtek, akárcsak Naprendszerünk óriásai, de beljebb vándoroltak. Az ilyen gyors befelé vándorlást a bolygóknak a proplid gáz- és poranyagával való gravitációs kölcsönhatása teheti lehetővé. Ennek fényében lassan azon kell csodálkoznunk, hogy a Naprendszer „megúsza” az ilyen drasztikusabb átalakulást – talán azért, mert a Nap proplidja aránylag korán feloszlott.

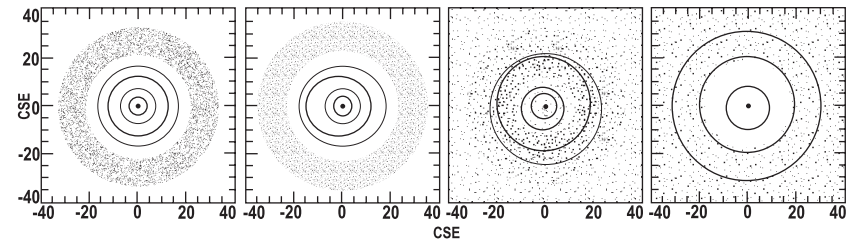
A bolygóvándorlásnak ugyanakkor van egy másik, lassabb, de hosszabban tartó mechanizmusa is, amely a proplid eltűnése után is folytatódhatott. Ezt a lehetőséget tulajdonképpen még az exobolygók felfedezése előtt javasolta Malhotra (1993) a Neptunusszal 2:3 arányú rezonanciában⁴ keringő *plutínók* eredetének megmagyarázására. Elképzelése szerint a Neptunusz lassan kifelé vándorolt, keringési periódusa növekedett, így egyre újabb és újabb planetezimálok kerültek vele rezonanciába. A rezonanciába bekerült égitestek pedig ott is maradtak, így a kifelé vándorló óriásbolygó mintegy „összeseperte” maga előtt a planetezimálokat, köztük a Plútót.

⁴ Az égi mechanikai rezonancia azt jelenti, hogy két keringési vagy forgási periódus egymással kis egész számok arányában áll. Rezonancia esetén ugyanazon konfiguráció gyakori ismétlődése folytán a perturbációk hatása különösen felerősödik. A rezonanciákról l. Sándor Zsolt cikkét a 2005-ös Csillagászati évkönyvben.

A feltételezett vándorlás lehetséges, ha figyelembe vesszük, hogy a korai Naprendszerben a bolygók mozgására nemcsak a többi bolygó, de az akkori még nagy számban jelenlevő planetezimál is hatott. Ha egy bolygó egy planetezimállal találkozik, azt vagy befelé, vagy kifelé szórja, ő maga pedig ellenkező irányba mozdul el. A Jupiter nagy tömege folytán az általa kifelé szórt égitestek hatalmas, több ezer CSE távolságra kerültek a Naptól, ahonnan az extraszoláris perturbációk miatt már nemigen tértek vissza; ezzel szemben a befelé szórt planetezimálok gyakran visszatértek, és újra véletlenszerű irányba szóródtak. A Jupiter tehát átlagosan több planetezimált szórt kifelé, mint befelé, és így ő maga lassan befelé vándorolt. A másik három óriásbolygóval fordítva állt a helyzet. Kisebb tömegük folytán az általuk kifelé szórt égitestek nem jutottak olyan messzire, s így előbb-utóbb visszatértek, míg a befelé szórtakat a beljebb fekvő bolygók gyakran újra szórták, s így nem tértek vissza. A Szaturnusz, Uránusz és Neptunusz tehát lassan kifelé vándorolt. Ez a vándorlás az időskála-problémát is mérsékelheti, hiszen a Neptunusz és Uránusz így beljebb keletkeztek.

A migráció következtében a Titius–Bode-szabály sem a Naprendszer „veszülötett”, hanem szerzett sajátosságának tűnik ma már. Az egymás keringési idejével való rezonanciák környékén a migráció lelassulhatott, így miután a köd és a planetezimálok eltűntével a vándorlás megszűnt, olyan állapot konzerválódott, melyben a szomszédos bolygók keringési periódusa egymással közel rezonanciában van. Ez magyarázhatja a pályasugarak mértani haladványszerű növekedését. (Ha pl. minden bolygó 1:2 arányú rezonanciában állna külső szomszédjával, Kepler 3. törvénye miatt pontosan $2^{2/3}$ kvociensű mértani sorozatot kapnánk.)

A Naprendszer óriásbolygóinak vándorlását modellezve meglepő jelenségekre bukkantak a Nizzai Observatórium munkatársai (Gomes és mtsai 2005). Modelljükben a Jupiter 5,5, a Szaturnusz 8,6, a Neptunusz 12, az Uránusz pedig 15 CSE körüli pályasugárral született. A Neptunusz tehát eredetileg az Uránusznál közelebb keringett a Naphoz, ami megmagyarázná, miért nagyobb a sűrűsége, mint ma beljebb keringő ikertestvére. A rendszer kialakulása után a kijebb keringő és bolygóvá nem összeálló planetezimálok hatására megkezdődött a fent leírt migráció. Több százmillió év (hogy pontosan mennyi, az a kezdeti feltételek függvénye) elteltével a Jupiter rövidülő és a Szaturnusz hosszabbodó keringésideje 1:2 arányú rezonanciába került. Ennek következtében a két gázóriás által a többi égitestre, de különösen a Neptunuszra gyakorolt perturbációk hatása rendkívül megnőtt. A Neptunusz hirtelen az Uránusznál is kijebb került, s ennek során az Uránusz pályáján túl keringő Kuiper-objektumokat szétszórta (5. ábra). A szórt jég-kisbolygók – és talán a gázóriások által perturbált aszteroidák



5. ábra. Az óriásbolygók vándorlása és a kései erős bombázás Gomes és mtsai (2005) szimulációjában. (a) A kezdeti konfiguráció a 4 óriásbolygóval és nagyszámú jég-kisbolygóval. (b) A Jupiter és Szaturnusz 1:2 rezonanciája előtti helyzet. (c) A szóródás megkezdődött. (d) 200 millió évvel későbbi állapot. Látható, hogy az Uránusz és a Neptunusz helyet cserélt.

– egy része a belső Naprendszerbe is bejutott, ahol a kőzetbolygókon legfeljebb néhány tízmillió évig tartó, rendkívül heves bombázást okozhatott.

Vannak-e megfigyelhető nyomai egy ilyen feltételezett kései erős bombázásnak? Nos, a planetológusok körében már évtizedek óta ismert ez a fogalom, elsősorban a holdközvetek izotópos és rétegtani vizsgálatainak alapján. Először az 1970-es években figyeltek fel arra, hogy a holdi medencék zöme közel egykorú: mintegy 3,8–3,9 milliárd éves. A jelek szerint ekkor fellépett erős kisbolygó-becsapódási hullámot „Hold-katakliзма” néven is emlegetik.

Hogy a Hold-katakliзма valóban megtörtént, azt ma a legtöbb planetológus elfogadja, bár akadnak kételkedők is. Szerintük a Hold látható féltekéjén mindenfelé előforduló egykorú kőzetek mind az utolsó nagy becsapódás, az Imbrium-esemény törmelékanyagából valók, és nem feltétlenül jelzik a hozzájuk épp legközelebb fekvő ősi medence korát. A katakliзма-pártiak ezzel szemben rámutatnak, hogy a mai pontos kormeghatározási módszerekkel szignifikáns különbségek mutathatók ki a különböző medencék körüli törmelékanyagban, így az nem származhat egyazon becsapódástól. A korok azonban egy igen szűk, legfeljebb 70 millió év hosszúságú időintervallumba esnek.

Újabban R. Baldwin, a planetológia egyik nagy öregje is ringbe szállt a katakliзма-elmélet ellen. Fő érve, hogy a holdi medencék kontrasztja nagyon eltérő, ami azzal magyarázható, hogy a fiatal Hold képlékenyebb kérgében a medencéket övező hegységek lassan megsüllyedtek. Ez tehát a különböző medencék különböző korára utalna. A vita elsősorban a Nectaris-medence körül forog, amely lepusztultabbnak tűnik az Imbriumnál, és melynek kora az Apollo-16 leszállási helyén talált breccsák alapján 4,1 milliárd évesre becsülhető. A katakliзма-pártiak szerint ez a medence is 3,9 milliárd éves, és az említett kőzetek teljes átolvadás nélkül dobódtak ki a környező felföldre.

Természetesen néhány idősebb medence léte még nem zárna ki azt, hogy a nagy becsapódások többsége egyetlen kataklizmában keletkezett. Mindezenre emellett szóló körülmény, hogy a holdi eredetű meteoritok kora is erős gyakorisági csúcsot mutat a vizsgált időszakban.

Ha feltételeken elfogadjuk, hogy a Hold-kataklizma valóban bekövetkezett, úgy az nyilván nem korlátozódott mellékbolygókra. Joggal hihetjük, hogy hasonló koreloszlást kell mutatniuk a Mars és talán a Merkúr becsapódásos medencéinek is. S feltűnő, hogy a földi élet legkorábbi nyomait éppen 3,85 milliárd éves kőzetekben találták meg – lehet, hogy ezek a becsapódó jég-kisbolygók, üstökösök és meteorok hozták bolygónkra az éltető vizet, s netán még az élet építőköveit: az aminosavakat és más szerves vegyületeket is? Ha így volt is, valamennyi víz már jóval korábban is lehetett bolygónkon. Az ismert legöregebb földi ásványtöredék, a nyugat-ausztráliai Jack Hillsben talált 4,4 milliárd éves cirkónium kristály ugyanis az elemzések szerint már folyékony vízzel való érintkezés nyomait hordozza (Wilde és mtsai. 2001).

Irodalom

- Boss, A. P. (1998) *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 26, 53
 Brush, S. G. (1990) *Rev. Mod. Phys.* 62, 43
 Lissauer, J. J. (1993) *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 31, 129
 Wetherill, G. W. (1990) *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 18, 205 *Mérföldkövek a Naprendszer kozmogóniájának utóbbi évtizedeiből*
 Amelin, Y. et al. (2002) *Science* 297, 1678 (a legrégebb kőzetek kora)
 Baldwin, R. B. (2006) *Icarus* 184, 308 (bolygóvándorlás a Naprendszerben, Hold-kataklizma)
 Bottke, W. F. et al. (2006) *Nature* 439, 821 (a vasmeteoritok eredetéről)
 Cameron, A. G. W. & Ward, W. R. (1976) *Abstracts Lunar Planet. Sci. Conf.* 7, 120 (bolygóvándorlás a Naprendszerben, Hold-kataklizma)
 Cohen, B. A. et al. (2000) *Science* 290, 5497, 1754 (bolygóvándorlás a Naprendszerben, Hold-kataklizma)
 Durisen, R. H. et al. (2004) *Icarus* 173, 417 (hibrid modell, spirális sűrűség hullámok)
 Gomes, R. et al. (2005) *Nature* 435, 466 (bolygóvándorlás a Naprendszerben, Hold-kataklizma)
 Grossman, L. (1972) *Geochim. Cosmochim.* 36, 597 (a kondenzációs sorozat)
 Hartmann, W. K. & Davis D. R. (1975) *Icarus* 24, 504 (bolygóvándorlás a Naprendszerben, Hold-kataklizma)
 Lewis, J. S. (1974) *Science* 186, 440 (a kondenzációs sorozat)
 Looney, L. W. et al. (2006) *Astrophys. J.* 652, 1755 (a preszoláris szupernóváról)
 Malhotra, R. (1993) *Nature* 365, 819 (bolygóvándorlás a Naprendszerben, Hold-kataklizma)
 Margot, J. L. et al. (2007) *Science* 316, 710 (bolygóvándorlás a Naprendszerben, Hold-kataklizma)

- Mizuno C. (1980) *Prog. Theor. Phys.* 64, 544 (magakkréció)
 Szafronov, V. Sz. (1969) *Evoljucija doplanetnogo oblaka i obrazovanyije Zemlji i planet*, Nauka, Moszkva
 [Angolul: *Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and Planets*. NASA Reports TT-F-677. (1972)] (az akkréciós modell)
 Tachibana S. & Huss, G. R. (2003) *Astrophys. J.* 588, L41 (a preszoláris szupernóváról)
 Tsiganis, K. et al. (2005) *Nature* 435, 459 (bolygóvándorlás a Naprendszerben, Hold-kataklizma)
 Wasserburg, G. J. (2003) *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 31, 1 (a preszoláris szupernóváról)
 Weidenschilling, S. J. (1977) *Astroph. Space Sci.* 51, 153 (a minimális szoláris kód definíciója)
 Wilde, S. A. et al. (2001) *Nature* 409, 175 (a legrégebb kőzetek kora)

További olvasmányok

A Naprendszer kozmogóniájának magyar nyelvű ismertetései reménytelenül elavultak. Még az ekkor már egyre elterjedtebb kondenzációs-akkréciós elméletet sem említik. Csupán néhány, a hetvenes években íródott külföldi ismeretterjesztő könyv magyar fordításában találunk modernebb koncepciókat:
 Friedemann, Ch. (1974) *A Világegyetem*. Gondolat, Bp.
 Francis, P. (1988) *A bolygók*. Gondolat, Bp.

Az óriásbolygók holdjairól és részben eredetükről jó, modern ismertetés:
 Illés E. (2005) Holdak a Naprendszerben, in *Csillagászati évkönyv 2006*, MCSE, Bp.

Angol nyelven

Negyedszázados, de rendkívül modern szemléletének köszönhetően ma is jól használható, kiváló, közérthető tankönyv:
 Hartmann, W. K. (1983) *Moons and Planets*. 2nd ed. Wadsworth Publishing

Érdekes, közérthető ismertetések a Naprendszer kutatásának új eredményeiből:
<http://www.psrd.hawaii.edu/>