

egy-egy csomagban százmilliárd darab proton van. A keringés során változik a részecskecsomagok mérete, tágulnak és összehúzódnak. Az ütközési ponttól távol néhány cm hosszú és 1 milliméter széles a csomag, az ütközési ponthoz közeledve összenyomják a csomagokat, méretük mintegy 16 mikrométerre csökken, így nagyobb valószínűséggel következik be egy proton-proton ütközés. (Egy emberi hajszál kb. 50 mikrométer vastag.) Az LHC-ban 25 nanoszekundumonként (nano – milliárdod rész), vagyis kb. 7 méterenként követik egymást a részecskecsomagok. A két nyaláb találkozásakor a két találkozó csomagban lévő összesen 200 milliárd proton közül mindössze 20 ütközés megy végbe. A csomagok átlagosan másodpercenként 30 milliószor ütköznek, az LHC-ban tehát mintegy 600 millió ütközés következik be másodpercenként.

2008. augusztus 9-én léphetett be első ízben protonnyaláb az LHC-ba. Az előgyorsító rendszer pontos működését már korábban beszabályozták, leellenőrizték. Augusztus elején az LHC „ajtáját kinyitva” az egyik gyűrűbe való belépést tesztelték csak, a részecskecsomag 3 kilométeres utat tett meg az LHC-ban. Szeptember 10-én sikeresen körbevezették a protonnyalábokat mindkét gyűrűben. Hatalmas volt az öröm, mindenki készült a következő fontos próbára, a két szembefutó protonnyaláb ütköztetésére.

Szeptember 19-én azonban hélium szivárgást jeleztek a műszerek az LHC alagútjában. A vizsgálatok azóta feltárták a szivárgáshoz vezető folyamatokat, megkezdték a hibaelhárítást, a helyreállítást. Két mágnes között fellépett rövidzárlat indította el az eseménysort, amelynek végén nagy mennyiségű hélium került ki az alagútba. A lehűtött részeket körülölelő vákuumrendszer biztonsági szelepe nem győzte a hélium kiengedését, nem ekkora anyagmennyiség kibocsátására tervezték. A vákuumtérben kialakult megnövekedett nyomás pedig olyan erőhatást váltott ki, amely eltörte a mágnes alátámasztását, a mágnes elmozdult, újabb másodlagos káresemények indultak be. A javításhoz 39 dipólmágnezt és 14 kvadrupólmágnezt kell a felszínre vinni a 100 méter mélyen fekvő alagútból, ahová majd az átvizsgálások és javítások után ismét visszaszereznek őket.

A mágnesek kiszállítást befejezve, 2009. január elején láttak hozzá a javításokhoz lent az alagútban, február közepére szeretnék ezzel végezni. A mágnesek cseréje március végére zárulhat le. A mágnesek összekötését februárban kezdik meg, május végére végeznek vele. Ezután következnek a nyomáspróbák és a rendszer lassú lehűtése. 2009. június végén indulhatnak meg a gyorsítási próbák.

Jéki László, a fizika tudományok kandidátusa, szakíró

A Naprendszer keletkezése

befejező rész

Aktuális témák

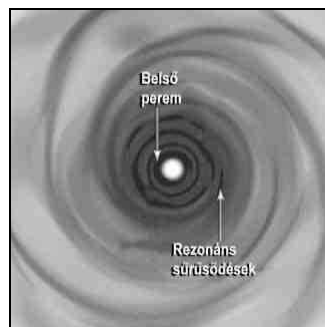
Struktúrák a protoplanetáris korongban. Híbrid modell

A fent vázolt magakkreciósi modell az időskála-problémát inkább csak elviselhetővé mérsékli, mintsem megoldja. Ráadásul az az elterjedt nézet, hogy az aszteroidaövből 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 lehe-

tővé vált a protoplanetáris korong többdimenziós hidrodinamikai modellezése. Boss az 1990-es évek végén végzett szimulációi szerint egy még elfogadható, néhány tized nap-tömegnyi szoláris köd hideg, külső részein felléphettek gravitációs instabilitások. Sajnos azonban ezek még az optimálisan beállított modellparaméterek mellett sem vezettek tartósan fennmaradó sűrűsödésekhez, „ősbolygókhoz”, 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 részén 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-katakliizma

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 nagy tengelyében.

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 Naprendszerünkötől erősen különböző bolygórendszerek kétségkívül léteznek. Magyarozatukra született az a feltevés, hogy az újonnan felfedezett óriásbolygók eredetileg csillagjuktól tisztes távolságban születtek, akárcsak Naprendszerünk óriásai, de beljebb vándoroltak. A bolygók ilyen gyors befelé vándorlását a proplid gáz- és poranyagával való gravitációs kölcsönhatása teheti lehetővé. Ennek fényében lassan azon kell csodálkoznunk, hogy a Naprendszer „megúsztá” 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 rezonanciában keringő *plutínók* eredetének megmagyarázására. (*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.) 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.

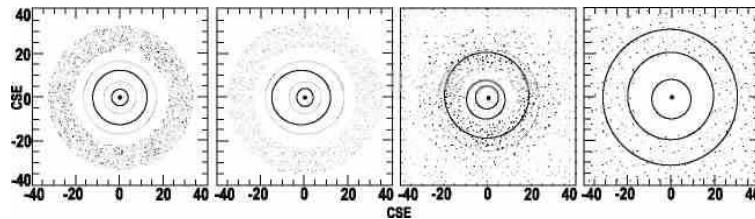
A feltételezett vándorlás lehetséges, ha figyelembe vesszük, hogy a korai Naprendszerben a bolygók mozgására nemcsak a többi bolygó, de az akkoriban még nagy számban jelenlevő planetezimál is hatott. Ha egy bolygó egy planetezimállal találkozik, azt vagy befelé, vagy kifelé szórja, ő maga pedig ellenkező 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 „veleszületett”, 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 bukkanunk 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 ikertestvéreé. 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 rövidebb 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 jégkisbolygók – és talán a gázóriások által perturbált aszteroidák – 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.



5. ábra.

Az óriásbolygók vándorlása és a kései erős bombázás Gomes és mtsai (2005) szimulációjában.

(a) A kezdeti konfiguráció a 4 óriásbolygóval és nagyszámú jégkisbolygóval.

(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.

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-katakliizma” néven is emlegetik.

Hogy a Hold-katakliizma 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 ősbibb medence korát. A katakliizma-pártiak ezzel szemben rámutatnak, hogy a mai pontos kor meghatározási 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 katakliizma-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 katakliizma-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 katakliizmában keletkezett. Mindenesetre emellett szóló körülmény, hogy a holdi eredetű meteoritok kora is erős gyakorisági csúcsot mutat a vizsgált időszakban.

Ha feltételesen elfogadjuk, hogy a Hold-katakliizma valóban bekövetkezett, úgy az nyilván nem korlátozódott mellékisbolygókra. Joggal hihetjük, hogy hasonló koreloszlást kell mutatniuk a Mars és talán a Merkúr becsapódásos medencéinek is. Feltűnő, hogy a földi élet legkorábbi nyomait éppen 3,85 milliárd éves kőzetekben találták meg – lehet, hogy ezek a becsapódó jégkisbolygók, 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 legrégebbi kőzetek kora)
Baldwin, R. B. (2006) *Icarus* 184, 308 (bolygóvándorlás a Naprendszerben, Hold-katakklizma)
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-katakklizma)
Cohen, B. A. et al. (2000) *Science* 290, 5497, 1754 (bolygóvándorlás a Naprendszerben, Hold-katakklizma)
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-katakklizma)
Grossman, L. (1972) *Geochim. Cosmochim.* 36, 597 (a kondenzációs sorozat)
Hartmann, W. K. & Davis D. R. (1975) *Icarus* 24, 504 (bolygóvándorlás a Naprendszerben, Hold-katakklizma)
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-katakklizma)
Margot, J. L. et al. (2007) *Science* 316, 710 (bolygóvándorlás a Naprendszerben, Hold-katakklizma)
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-katakklizma)
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 köd definíciója) Wilde, S. A. et al. (2001) *Nature* 409, 175 (a legrégebbi 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.psr.d.hawaii.edu/>

Petrovay Kristóf

A számítógépes grafika

VIII. rész

Számítógépes grafika – Az animációról (2.)

Az animációs film nem csupán állóképek sorozata. Nagy szerepe van a ritmusnak, plánozásnak, világitásnak, vágásnak stb. Karaktereink gondos mozgatásával gondolatokat, érzelmeket vagy történeteket mesélhetünk el. Az animáció nem más, mint a mozgás művészete.