

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LX. évfolyam

9. szám

2010. szeptember

ÜTKÖZÉSEK A NAPRENDSZERBEN

Szabó M. Gyula
MTA KTM Csillagászati Kutatóintézet
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

Az emberiség újkori történetét végigkíséri annak vizsgálata, hogy az égitestek leeshetnek-e a Földre, illetve ütközhetnek-e egymással. A közelmúltban a földközeli kisbolygók felmérése és általában a Naprendszer minden képzetet felülmúlóan részletes megismerése helyezte új megvilágításba a kérdést. Az elmúlt évtizedben betekintést nyertünk más csillagok bolygórendszereinek kialakulásába és szerkezetébe. Az új ismeretek két évtized alatt alapjában változtatták meg az ütközésekről alkotott képünket. Ez tendenciájában az ütközések szerepének háttérbe szorulásával járt: mivel korábban kevés, jobbra égi mechanikai jelenség szerepét ismertük föl a bolygórendszerek keletkezésében, olyan hatásokat is égi mechanikai eredetűnek véltünk, illetve ütközések hatásának tulajdonítottunk, amelyeket lényegében egészen más (pl. hidrodinamikai, termodinamikai, elektromos) folyamatok okoztak. Az új ismeretek fényében át kellett értékelnünk az ütközések szerepét a naprendszerek formálásában és fejlődésében.

Becsapódásokra utaló megfigyelések

A mai Naprendszerben a becsapódások nem gyakoriak. Két égitest ütközésének első, rekonstruálhatóan dokumentált megfigyelése 1178. június 18-áról származik, *Canterbury Gervasius* krónikájából. Ezen a napon öt szerzetes volt szemtanúja, hogy kevéssel napnyugta után a Hold sötét oldalán fényzarvak jelentek meg. A szarvak leírt helyzete alapján valószínű, hogy a 22 km átmérőjű Giordano Bruno nevű kráter kialakító becsapódást figyelték meg – ez a kráter az

űrszondák megfigyelése szerint valóban rendkívül fiatal. Ma hasonló megfigyeléseket számos amatőr csillagász készít videokamerával, a Hold árnyékos oldalán felvillanó tranziensek tucatjait örökítve meg. A tranziensek korrelációja az ismert meteorzáporokkal bizonyított, kapcsolata új kráterek keletkezésével pedig rendkívül valószínű. A tranziensek tehát minden bizonnyal kráterképződéssel járó mikrobecsapódások nyomai. Földbe csapódó égitestekről több híres értesítés tudósít, elegendő csak a Kr. e. 2597-ben lezuhló meteoritot(?) említeni, amely *Huang Ti* kínai császár halálát okozta; illetve az 1908-as Tunguz eseményt, amely egy légkörben fölrobbant üstökös vagy kisbolygó környezeti hatását illusztrálja. 1994. június 16. és 22. között volt megfigyelhető a már korábban darabokra hullott Shoemaker–Levy 9 üstökös maradványainak becsapódása a Jupiterbe, látványos légköri alakzatokat hozva létre. 2009 júniusában egy 500 méteres kisbolygó Jupiterbe csapódásának eredményeképpen hasonló felhőalakzatokat figyeltek meg, míg 2010 júniusában egy még kisebb aszteroida Jupiterbe csapódásának folyamatát is sikerült két videofelvételen rögzíteni.

A becsapódások közvetett megfigyelése – az eredményen keresztül – lényegesen könnyebb. Már *Galilei* megfigyelte a Hold krátereit, azonban a XIX. század legvégéig ezeket vulkanikus eredetűnek hitték. A becsapódásos eredet elleni fő érv az volt, hogy a becsapódó törmelék pályája várhatóan „lapos szögben” érkezik, és elnyúlt krátereiket kellene létrehoznia. Csak 1960 körül vált elfogadottá a becsapódásos eredet, amikor laboratóriumi kísérletekkel igazolták, hogy a szögben érkező törmelék is kör alakú krátereiket formál. Ebben az időben váltak ismertté a Merkúr, Vénusz, Mars bolygók krátermezői is.

A közelmúlt megfigyelései szinte áttekinthetetlen mennyiségű további érvvel támasztották alá a nagy-

A szerző köszöni az MTA Bolyai Posztdoktori Ösztöndíj, az MTA Lendület Fiatal Kutatói Program és a Magyar Állami Eötvös Ösztöndíj támogatását.



1. ábra. A korai Mars ütközése egy 934 km-es méretű aszteroidával. A roncsolódás és a kidobódó anyag szerkezete egzakt numerikus szimuláció eredménye (R. Lamb/NASA).

bolygók felszínét érő nagy becsapódások meghatározó szerepét. A talán legfontosabb bizonyíték a víz, amely a Földön kívül a Holdon, a Marson, a Merkúron és a Vénuszon is jelen van, ahová valószínűleg szintén óriási üstökösök becsapódási korszaka szállította a korai Naprendszer külső tartományaiból. A Vénusz fordított irányú – retrográd – forgása is egy korábbi hold jelenlétére utalhat esetleg, amelynek árapályereje fordította meg a forgásirányt, majd végül a Vénuszba csapódott. Az Uránusz, amely hidegebb légkörű bolygó, mint a Naptól távolabb keringő Neptunusz, légköre egészen más termodinamikai fejlődést követett, mint a Neptunuszé. Ennek oka szintén egy óriás becsapódás lehetett, és talán ennek hatására billent ki a bolygó mágneses tengelye is.

A *kisbolygók* sűrűn kráterezett felszínét az 1990-es évek közepétől figyelték meg űrszondás megközelítések alkalmával. A becsapódások jellegéről árulkodik a kisbolygók alakja is: a Vesta kisbolygó pólusához közel eső középponttal egy óriási kráter borítja a kisbolygó majdnem felének felszínét. Az ütközéskor kirepült töredékekből pedig jellegzetes színképű égitestek alkotta, bazaltos anyagú törmelékfelhő, kisbolygócsalád alakult ki, és kering a Vestához hasonló pályán. A kisbolygócsaládok vizsgálata során kiderült, hogy számos másik kisbolygócsalád is színképi homogenitást mutat, azt sugallva, hogy az azonos pályán keringő kisbolygók egy közös égitest szétredezésével jöttek létre. Az első színképi szegregációra mutató megfigyelést 1978-ban közölte Zellner. A mai legjobb adattár a Sloan Digitális Égboltfelmérés Mozgó Objektumok katalógusa, amelyben négyszázezer bejegyzés szerepel kisbolygók ötszín-fotometriai adataiból.

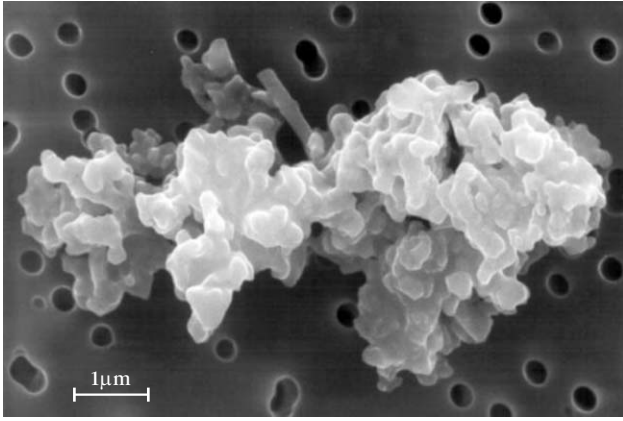
Az ismert és kevésbé ismert *meteoritkráterek* is tanúskodnak a becsapódások meglétéről a földi történelem során; elegendő a 65 km átmérőjű Chicxulubkráterre utalni, amely a dinoszauruszok kihalásával egyidős, és talán e nagy kihalási korszak közvetlen okozója. Hozzánk legközelebb Poznan mellett figyelhetünk meg 20–100 méter méretű meteoritkráterekben tavakat. A meteoritok is fontos információt szolgáltatnak a kozmikus ütközésekről. A legtöbb ismert meteorit különböző kisbolygócsaládok anyagával rokonítható. Ám ismerünk olyan meteoritot is, amely a Marsról származik, ékesen bizonyítva, hogy a külső bolygósomszédunkat is érték olyan erősségű bombázások, amelyek a helyi szökési sebességnél gyorsabb törmelék keletkezésével jártak, és beszennyezték a Naprendszert marsi anyaggal (1. ábra).

Egy ütközés lefolyása

Az ütközések során két test találkozik egymással, majd kisebb-nagyobb darabok leválása és összetapadások után számos apró és néhány nagyobb test hagyja el az esemény színhelyét. A pontos kimenetelt nagyban meghatározza az ütköző testek tömege, szilárdsága és az ütközés energiája. Ha az ütköző testek szilárdsága kicsi, például *kozmosz kőrakás* szerkezetűek, az ütközés energiájának egy része az anyag átrendezésére fordítódik. Ekkor átmeneti jellegű anyagkidobódások történnek az ütközés után, amelyek darabjai azonban később visszahullnak a nagyobb égitestekre. Nagyobb energiájú ütközés esetén lehet, hogy a kidobódó anyag egy része nem hullik vissza, az anyagcsomó saját legsűrűbb pontja felé kezd hullani, és egy holdat hoz létre az ütközést elszenvedett kisbolygó körül. Még nagyobb energia esetén a kidobódó anyag szétszóródik, vagyis végleg elhagyja az ütközés helyszínét. Kedvező kezdeti paraméterek esetén a két ütköző égitest össze is tapadhat, ekkor egy nagy égitest (és esetleg néhány szétszóródó fragmentum) lesz az ütközés végeredménye. Ha az ütköző test szilárdsága nagy, például monolitikus testről van szó, az ütközés a szilárd kőzet összetörésével, fragmentálódásával jár.

Az ütközés energiája meghatározza az érintett térfogat mértékét is. Nagy energiájú ütközések esetén a két égitest tömegének nagy része szétszóródik vagy fragmentálódik, ekkor katasztrofális eseményről beszélünk. Közepes testek becsapódása szeizmikus hullámokat generál az égitestben, ekkor az anyag átrendezéséről, megcsuszamlásáról lehet szó. Egészen kis testek becsapódása esetén pedig csak lokális hatások, például kráterképződés, a felszín lokális elszíneződése következik be.

Homogén égitestek ütközése és szétszóródása nyomán homogén anyagi összetételű törmelék keletkezik. A nagyobb méretű testek belseje azonban differenciálódhat (elsősorban olvadás következtében), az ilyen égitest szétszóródásakor a törmelék anyagi összetétele aszerint változik, hogy az égitest mely ré-



2. ábra. Egy kozmikus porszem mikroszkopikus képe. Megfigyelhető a kondenzációk fokozatos összeállásával kialakult, összetett szerkezet (Science Daily, 2008. szeptember 2.).

széből származik. Májig eldöntetlen kérdés, hogy a kisbolygócsaládok jellegzetes anyagi összetételének kialakulásában mekkora szerepet játszott a már differenciálódott égitestek szétszóródása, például az, hogy a fémből (vas-nikkel ötvözetből) álló kisbolygók bolygócsírák szétszóródott vasmagjai-e, vagy egyéb módon magyarázhatjuk kialakulásukat.

Numerikusan jól modellezhető néhány nagyobb kezdeti monolit vagy kórkás szerkezetű égitest szétszóródása és a létrejövő kisbolygó-populáció méreteloszlása. Fő szabály szerint egy egyensúlyi helyzetben lévő populáció (amikor az eloszlás jellege már nem változik tovább) méreteloszlása hatványfüggvényt követ, körülbelül $-2,5$ hatványkitevővel (kisebb égitestből jóval több van). A Naprendszerben ez a kitevő a néhány méternél nagyobb égitestek esetén -2 körüli érték (kisbolygócsaládonként kissé változik), míg a kis méretű törmelék és por bizonyos mérettartományokban – űrszondás detektorok adatai alapján – a -7 értékét is megközelíti. Ebből a megfigyelésből következik, hogy a Naprendszer kis égitestjeinek populációja jelenleg nem lehet ütközési egyensúly állapotában.

Az ütközések szerepe a naprendszerek kialakulásában

Az ütközések szerepe egyértelműen a fiatal naprendszerekben a legfontosabb. A bolygórendszerek kialakulását korábban sikeresen magyarázták az összeálló *bolygócsírák* (planetezimálok) modelljével. A fiatal csillagok a csillagközi anyag sűrűsödéseiből alakulnak ki, a perdületmegmaradás miatt általában olyan konfigurációban, hogy a fiatal csillagot egy sűrűbb anyagkorong, a protoplanetáris korong is körbeveszi. Az ütköző bolygócsírák elmélete onnan indul ki, hogy a fiatal csillag sugárzása az anyagkorongból kifújja a könnyű elemeket, a lehűlő közegben pedig a nehezebb elemek kondenzálódnak. A szilárd törmelék-szemcsék egymással ütközve egyre nagyobb testeket formálnak, amelyek végül bolygótestekké állnak össze. Az elmélet sikere, hogy egyszerű magyarázatot

ad a Naprendszer kisbolygóira (ezek olyan planetezimálok, amelyek a Jupiter hatásai miatt nem tudtak bolygókká összeállni), továbbá látszólag sikeresen magyarázza a Naprendszerben a bolygók jellegét (a belső bolygók kőzetből, a külső bolygók talán kőzetmagból, de főleg gázokból, túlnyomórészt hidrogénből, héliumból és illékony szerves molekulákból állnak); és nem utolsósorban teljesen konzisztens azzal a ténnyel, hogy a Naprendszerben a bolygók közel egy síkban (ekliptika), a Nap forgástengelyére nagyjából merőleges síkban, a Nap forgásával megegyező értelemben keringenek.

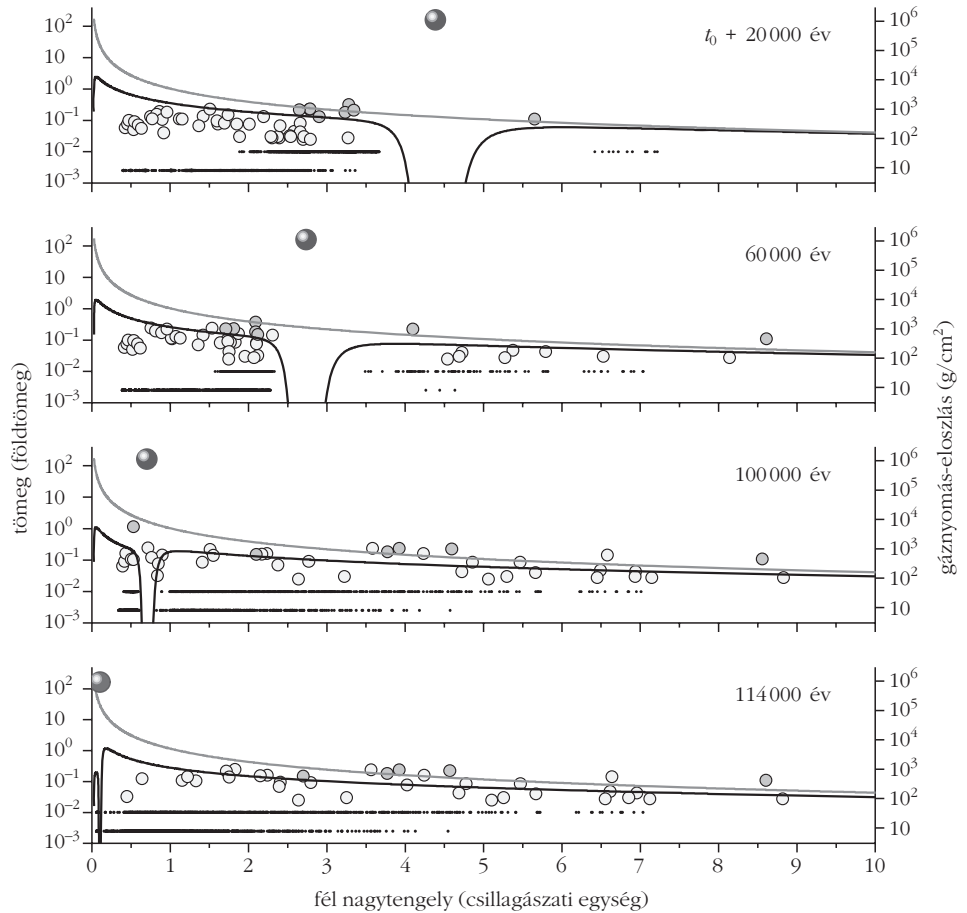
Az elmélet egyik gyengéje, hogy nem tudja megmagyarázni a centiméternél kisebb méretskálájú törmelékek (2. ábra) összeállását 100 m méretskálájú planetezimálokká. A kis mérettartományban az adhézió és az elektromos erők, a nagyobb mérettartományban a gravitáció hatékonyan tudja összetapasztani a kis sebességgel rugalmatlanul ütköző törmelékdarabokat, viszont nem ismerünk olyan fizikai folyamatot, amely a közbülső 4 nagyságrend áthidalásában hatékonyan szerepelhetne. Váratlan nehézséget jelentett a távoli naprendszerek szerkezetének megismerése is. Egyrészt kiderült, hogy a gázbolygók eloszlása általában nem követi a Naprendszerben megismert szerkezetet, sőt, a csillaghoz egészen közel is keringhetnek gázbolygók (ezek a *forró Jupiter*ek). Másrészt az exobolygók pályája az esetek jelentős részében (akár felében, de a kis minta miatt az arány még eléggé bizonytalan) keringhetnek a csillag forgástengelyére nagy szögben hajló pályán, és akár a csillag forgásával ellentétes irányban. Mivel a csillag egyenlítői síkja és a bolygópályák a megfigyelt rendszerek mintegy 30%-ában szembe fordítottak egymástól, a bolygórendszerek kialakulása nem lehet szabályszerűen kvázi-egyensúlyi folyamatok eredménye. Az „összevissza” irányban keringő bolygók magyarázatához heves szórási történetet, általában hosszan tartó kaotikus dinamikát szokás feltételezni, amelyekben nagy tömegű bolygókat veszít a naprendszer. Mivel ezeknek a folyamatoknak egyikéről sem tud számot adni, az ütköző bolygócsírák elmélete átfogó revízióra szorult.

Az új paradigma a diszk hidrodinamikai instabilitásának elmélete, amit *migráló bolygókeletkezés* névvel is szokás illetni. Maga az elmélet három migrációs fázist tartalmaz, és ezeket teljesen külön tárgyalja. Modellszámítások alkalmával azonban az egész folyamat egyetlen átfogó numerikus szimulációval kezelhető, így a migrációs fázisok átmenete *in silico* is hasonlóan simán megy végbe, mint a valóságban. Az első migráció a leglényegesebb. Az öngravitáló gázkorong instabillá válik, amint lehűl egy – sűrűségfüggő – hőmérséklet alá. Először turbulenciák jelennek meg benne, amelyek hamarosan látványos, a korongot globálisan meghatározó spirális szerkezetűvé állnak össze. (A szerkezet kialakulásához vezető folyamat egyébként analóg a galaxisok spirálszerkezetének magyarázatában fellépő hidrodinamikai jelenséggel.) A lokális turbulenciák helyén sűrű, kollabált magvak keletkeznek, amelyek bonyolult, örvénylő szerkeze-

ten keresztül nagyon gyorsan (millió éves időskálán) óriási mennyiségű anyagot nyelnek el, és kialakul a bolygók első generációja: mindegyik nagy tömegű gázbolygó. A második migrációs fázisban a kialakult bolygók a korong viszkozus közegében keringve egyre beljebb sodródnak, míg – egyelőre nem tisztázott arányban, de minden bizonnyal túlnyomórészt – a csillag légkörébe csapódnak. A harmadik migrációs fázisban a korong anyaga egyre ritkábbá válik, ahogy azt „végleg elnyelik” a gázbolygók, ekkor a gázbolygók tömegének lassú növekedése és a pályák stabilizálódása jellemző. (A naprendszer képe még jelentősen módosulhat, ha lassú perturbációk miatt ismét kaotikussá válik a rendszer, ám a bolygók kialakulását ez a fázis már nem érinti.) A bolygókeletkezés végső fázisában a maradék bolygócsírák kiszóródnak a rendszerből.

Eközben létrejönnek a *kisbolygóövek*, ahol a stabilizálódott pályájú planetezimálokat találjuk. Ezek egymással is ütköznek, eleinte jellemzően összetapadnak, majd a nagyobb darabok a további ütközések alkalmával szétaprózódnak – létrehozva így a kis égitesteket. A hasonló pályán keringő, közös anyagból származó törmelékdarabok alakítják ki a *kisbolygócsaládokat*. A szétaprózódási fázis kezdetén voltak a legnagyobbak az ősz-kisbolygók, ezek számát száz-as nagyságrend körül szokás becsülni. A jellemző méret széles skálán változik különböző szerzők álláspontja szerint, három jónévű kisbolygókutató becslése: 50 km (*Oort*), 120 km (*Pravec*) és 500–1000 km (*Farinella*). A szétaprózódás korszaka után becsapódási korszakok alakító munkáját figyelhetjük meg a bolygók, holdak felszínén. Árnyalja a képet a kisbolygócsaládok eltérő kora: a mai, családtagként azonosított törmelék pályáját időben visszafelé követve megállapítható az az időpont, amikor a család tagjai szétrepültek. A legidősebb családok 2-3 milliárd évesek, ám ismerünk néhány százmillió éves kisbolygócsaládot is.

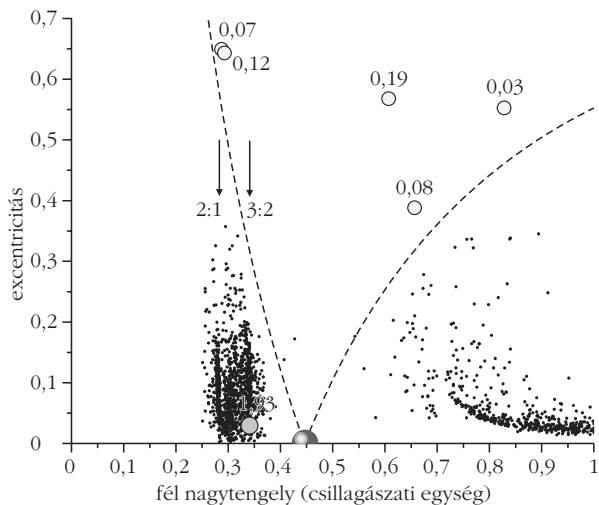
A bolygócsírák természetes ütemű fogyásának korszakához társul a *korai bombázás* korszaka. Perturbációs hatások következtében (rezonáns bolygópályák kialakulása, közeli csillag elhaladása a naprendszer



3. ábra. Migráló bolygókeletkezés numerikus szimulációja. Egy kezdetben 1 jupitertömegű bolygó indul a csillagtól 5,2 csillagászati egység távolságra, majd 115 ezer év alatt a csillagba csapódik. A korong kezdeti sűrűségprofilját a halvány, az aktuális profilt a fekete vonal ábrázolja. 0,01 és 1 földtömeg közötti bolygócsírák jönnek létre, amelyeknek egy része elhagyja a naprendszert, más részük pedig bolygóvá alakul. A panelek fentről lefelé a gázbolygó kialakulása után 20, 60, 100 és 114 ezer évvel megfigyelhető állapotot mutatják (Fogg, Nelson, 2007, *Astron. & Astroph.* 461, 1195 alapján).

mellett) ugyanakkor a relaxálódott rendszerben is instabillá válhatnak a pályák, és a kisbolygóövekből kiszóródó törmelék újabb, látványos becsapódási korszakhoz vezet (késői bombázás). A kisbolygóütközések során kiszóródó por az ekliptika síkjában szétterül, és az ekliptika síkjában szétterülő porkorongot hoz létre.

A migráló bolygókeletkezés elméletében a kőzetplanetezimálok a második migrációs fázisban jönnek létre, és a harmadik migrációs fázisban állnak össze bolygótestekké a naprendszer olyan tartományaiban, amelyeket dinamikailag is megengednek az óriásbolygók (3. és 4. ábra). Az elmélet rendkívül sikeres és általánosan elterjedt, azonban még legfontosabb jóslata megerősítésre vár: a migráló bolygókeletkezés szerint egymillió év alatt kialakulnak a gázbolygók, míg a bolygócsírák elmélete szerint a folyamat jóval tovább tart. Ha egymillió éves csillag körül gázbolygót találnánk, az perdöntő bizonyítékul szolgálna a migráló bolygókeletkezés modellje mellett. Ennyire fiatal gázbolygót még nem ismerünk (bár folyik a keresése), de a már megtalált, néhány millió éves bolygók mindenképpen a migráló keletkezést támasztják alá.



4. ábra. A 3. ábra szimulációjának állása 105 ezer éves időpontban, a fél nagytengely-excentricitás síkban ábrázolva. A planetezimálók tömegét a feliratok jelzik. A kialakuló belső kisbolygóövben megfigyelhetjük a 2:1 és 3:2 rezonáns űröket. A külső kisbolygóövben is létrejön az 1:2 rezonanciaűr 0,71 csillagászati egység fél nagytengelynél.

Az ütközések szerepe a mai Naprendszerben

Érvek az ütközések nagy szerepe mellett

Az 1990-es évtizedben futott csúcstra a naprendszerbeli ütközések szerepét hangsúlyozó értelmezés, amely számos bizonyítékot vonultatott föl. Ez a korszak esett egybe az első űrszondás kisbolygó-megfigyelésekkel, amikor szembesültünk a kisbolygók teljesen kráterezett felszínével, a kráterek méret szerinti eloszlásával és általában a kisbolygók egzotikus alakjával. Részben e látványos eredmények hatására elindult a Földre veszélyes kisbolygókat kereső kutatómunka, a leghíresebb, Föld közeli kisbolygókat kereső távcsövek a NEAT és a LINEAR programokhoz tartoztak.

Az egyik fontos érv, amely szerint az ütközések szerepe a mai Naprendszerben is meghatározó, a kisbolygók forgási statisztikájára épült. A tengelyforgások eloszlása a nagy égitestek esetében Maxwell-Boltzman jellegű, amelynek kialakulása ütközésekkel jól magyarázható. Ezenkívül meglepően nagy számban találtak kis méretű aszteroidákat, amelyek olyan gyorsan forognak, amennyire ez dinamikailag egyáltalán lehetséges. A forgásban lévő kisbolygón centrifugális erő lép fel, amely a gravitációs és a szilárdsági erőkkel nagyjából ellentétes irányú; a pontos numerikus értékek és irányok a kisbolygó alakjától és felépítésétől függenek. A lényeges momentum az, hogy a túl gyors forgás egyszerűen kettészakítja a kisbolygót. Egy adott kisbolygóhoz tehát tartozik egy maximális forgási periódus, amely mellett az égitest egyben maradhat, és a megfigyelések szerint a kisbolygók számottevő hányada ehhez a periódushoz közeli értékkel forog.

Erre a tényre egyszerű magyarázatot kínál az a modell, amelyben a kisbolygók katasztrofális szétvetések láncolatával keletkeznek, fejlődnek. A nagy energiájú ütközés általános esetben nem centrális helyzetű,

ezért a két test lendületének gyors megváltozásán túl a perdület is ugrásszerűen változik, általában jelentős értékre növekedve. Emiatt az ütközésből kikerülő égitestek túl gyorsan forognak, és olyan fokú fragmentációt szenvednek el, amely az ütközéssel járó „ütésből”, a testek belsejében terjedő lökéshullámok roncsoló hatásából nem feltétlenül következne. A forgás miatt fellépő darabolódás mindaddig folytatódik, amíg a keletkező törmelék már a forgás dinamikája szempontjából is stabillá válik. Amikor a további aprózódás folyamata leáll, az égitestek még mindig gyorsan forognak, a kritikus értékhez közeli, de már azt nem meghaladó forgási sebességgel; így a modell az erre vonatkozó megfigyelésekkel összhangban áll. Megemlítendő azonban, hogy néhány aszteroida forgási periódusa nagyon hosszú, több száz napos periódusok is ismertek, ez a megfigyelés nem magyarázható ütközési modellek segítségével.

Egy másik fontos megfigyelés, hogy a kisbolygók eltérése a gömbalaktól annál nagyobb, minél kisebb az égitest. A néhány kilométer átmérőjű kisbolygók között a nagyon elnyúlt, akár 1:10 tengelyarányú szilánkok sem ritkák, és ezeket a formákat a legkönnyebben ütközésről lepattant valódi szilánkokként lehet elképzelni.

A Földet jelentősen megközelítő kisbolygók is az ütközések nagy fontosságát sugallták. Ezeket az égitesteket az 1990-es években kezdték nagy számban fölfedezni, kifejezetten azzal a céllal, hogy megismerjük a veszély mértékét, amely a néhány száz méter átmérőjű égitestek becsapódásával fenyeget. A meglepő eredmény az volt, hogy relatíve nagyszámú égitest fölfedezésével járt az észlelési kampány. Ahhoz képest mindenképpen jelentős számú égitest kering a Földhöz közeli pályán, hogy mennyire nehéz (szinte lehetetlen) klasszikus égi mechanikai folyamattal egy fővbeli kisbolygót közel „juttatni” a Föld pályájához. Magyarozatképpen az ütközési elmélet szolgált: a legnagyobb energiájú ütközésekből esetleg akkora sebességgel szakadhatnak ki szilánkok, hogy a Földhöz közeli pályára lökődnek, ahol később a bolygók, immár elsősorban a Mars és a Föld dinamikai környezetében valamennyi időre stabilizálódnak.

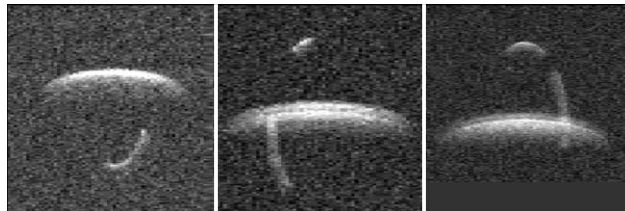
A kilencvenes évek második felében, elsősorban a kisbolygókat megközelítő űrszondák pályaváltozásának vizsgálatából következtetve kiderült, hogy a kis égitestek nem lehetnek monolit szerkezetűek, a sűrűségük ehhez egyszerűen túl kicsi. Elterjedt tehát a kozmikus kőrákás hipotézis, amely szerint a kis égitestek porozitása nagy: kisebb méretű, de összességében jelentős térfogatú üres térrészek vannak a belsejükben. Ez az érv teljesen átírta a kisbolygókkal kapcsolatos spekulációk sodorvonalát: egyrészt csökkentette a testekben fellépő gravitációt és a szilárdsági erőket, ezzel még exponáltabbá tette a már tárgyalt tengelyforgás problémáját. Másrészt viszont új lehetőséget kínált az elnyúlt alakok magyarázatául: a gyors forgás közvetlenül okozhat elnyúlt alakot, a centrifugális erő hatékonyan képes az alak ellapítására, ha a test nyírószilárdsága kellőképpen kicsi. Sőt, napvilá-

got láttak az elnyúlt alakok magyarázatát a bolygók megközelítésekor föllépő árapályerőkben kereső elméletek is, amelyek nem egyszer azzal is alátámasztották érveiket, hogy a nagyon elnyúlt kis égitestek aszimmetriái egyfajta – szó szerint megkövült – „árapálycsapot” látszanak formázni.

Szintén az elmúlt másfél évtizedben kezdtek el tucat számra fölfedezni a kettős és többszörös kisbolygókat, amelyek körül egy vagy több kísérő kering stabil pályán (5. ábra). A felfedezéshez használt módszerek szerteágazóak: lehetséges a hold közvetlen megfigyelése űrszondával vagy földi bázisú interferometriával; a hold kimutatása kölcsönös fedések alapján, ha a fedési kettőscsillagokhoz hasonló fénymenet figyelhető meg; a hold kimutatása csillagfedések megfigyelésével (többszörös elhalványodás látszik) stb. A megdöbbentő adat a kettős kisbolygók relatíve nagy száma, amely mindenképpen magyarázatot igényel. Egy lehetséges, becsapódás-orientált magyarázatot a katasztrofális ütközésből szétrepülő törmelék nagyobb része egy centrális égitestre visszahullik (létrejön egy porózus szerkezetű domináns kisbolygó), míg egy másik része egy vagy több kisebb csomóba tapadhat össze, ezek lesznek a kísérők. (A törmelék egy része egyszerű dinamikai okokból természetesen végleg elhagyja az ütközés helyszínét.) Ily módon tehát a kettős kisbolygók magyarázata is szorosan kapcsolódik össze az ütközésekkel.

Az ütközés numerikus modelljének fontos speciális esete a bolygótest méretű planetezimálok ütközése. Az ilyen eseményekben is megfigyelhető a nagy mennyiségű törmelék szétrepülése és a darabok nagy részének újbóli összeállása két égitestté, amelyek egy bolygó-hold párosként folytatják életüket. Valójában a Föld Holdjának kialakulására a mai napig a legsikeresebb magyarázatot az Ős-Föld és egy Mars méretű bolygócsíra ütközése szolgáltatja; egyedül ez a modell képes olyan finomságok megmagyarázására, mint a Hold elemgyakoriságainak és ásványainak hasonlósága a Földhöz, miközben a Hold életkora és a test sűrűsége kisebb a Földénél (hiszen a Föld kialakulása után keletkezett, jórészt a felső köpeny anyagából).

Az ütközések gyakoriságára és mai jelentőségére egy lehetséges végső érvet szolgáltat az *állatövi fény* léte. A főleg tavaszi napkelték előtt, őszi napnyugták után szabad szemmel is látható fénylés az ekliptika mentén az infravörös égbolt egyik leglátványosabb komponense, amely nem más, mint a Naprendszer síkjában keringő meleg por szórt fénye (az optikai tartományon) és hősugárzása (az infravörösben). Az állatövi porral kapcsolatos fontos ismeret, hogy a por-korong nem lehet stabil képződmény. A porszemcséket folyamatosan erodálja, aprítja a Nap elektromágneses sugárzása, különösen az ultraibolya és a röntgenkomponens; illetve a kis porszemcsék elég gyorsan örökre elhagyják a Naprendszert, hiszen a rájuk ható fénynyomás (a méret második hatványával, a keresztmetszettel arányos, anyagi jellemzőktől és mágneses orientációtól is függ) kis testek esetén a

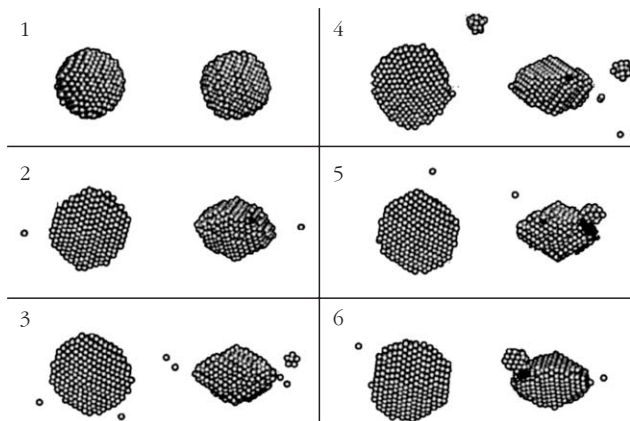


5. ábra. Az 1994 KW4 kisbolygó radarképe az 1999-es földközelség alkalmával. Az alak erősen elnyúlt, a test kistengelye mentén pedig egy kísérő keringését láthatjuk (a hold elmozdult a mérés alatt, ezért mosódik ívvé a képe).

gravitációval összemérhető erővé válik (ez utóbbi a térfogattól, tehát a méret harmadik hatványától függ), és a fénynyomás hatékonyan „fújja ki” a kis porszemcséket. A közepes porszemcsék élete nem ennyire egyszerű, ezek a később tárgyalandó Poynting–Robertson-effektus miatt belespiráloznak a Napba. A tanulság az, hogy a meglévő állatövi por néhány tízmillió éves időskálán elfogy a Naprendszerből, tehát ha jelenleg látunk port, az arra utal, hogy a por folyamatosan működő forrása jelen van a Naprendszerben. Az egyik lehetséges jelölt a kisbolygók ütközése, illetve az ütközésekben fölszabaduló mikroszkopikus méretű por.

Érvek az ütközések kisebb szerepe mellett

Az utóbbi években a Naprendszer kis égitestjeiről óriási mennyiségű információhoz jutottunk, másrészt megfigyelhettük kis égitestek övezetét más csillagok körül, harmadrészt pedig olyan egzotikus fizikai folyamatokra derült fény, amelyek végül jelentősen átalakították a naprendszerek dinamikájáról alkotott képünket. A megfigyelési anyag gyűjtésében élen járt a Sloan Digitális Égboltfelmérés (SDSS), amely csak a Naprendszer kis égitestjeiről (Sloan-os kifejezéssel élve: mozgó objektumairól) közel félmillió mérést végzett. A legfontosabb újdonság a kis égitestek méreteloszlásával kapcsolatos: kiderült, hogy a kisbolygók eloszlásában a 3-5 km mérettartomány körül látványos letörés következik be, a kritikus méretnél kisebb égitestek száma jelentősen elmarad attól, amit az 5 km-nél nagyobb tartomány lineáris extrapolációja sugallt. A kisbolygócsaládok részletes vizsgálata szerint a letörési pont és a letörés mértéke kismértékben változik a különböző családok között, de jellemzően azzal az eredménnyel jár, hogy a 100 méter körüli méretű égitestek darabszáma mintegy tízszer kisebb, mint a lineáris illesztés, vagy akár az egyensúlyi ütközési fejlődés sugallaná. Ez a mindennapi élet szempontjából is fontos információ, hiszen éppen a 100 méter nagyságrendű égitestek azok, amelyek a Földre leginkább veszélyt jelentenek: a Föld pályájához közel alig néhány ennél lényegesen nagyobb égitest kering; a 100 méteres méret elegendően nagy pusztítást tud véghezvinni becsapódás esetén, viszont ez a méret még éppen elég apró ahhoz, hogy az égitest nagyon sokáig észrevétlen maradhasson, sőt a becsapódás akár teljesen váratlanul érje az emberiséget. Ha a kisbolygók méreteloszlása olyan, hogy ebből a fajtá-



6. ábra. Kisbolygó alakjának fejlődése és hold kialakulása YORP effektussal (Walsb, Michel, 2008). Az égitestet a teljes szimuláció hat állapotában látjuk a forgástengely felől (a képpárok bal oldalán) és oldalról (a jobb oldalán). A teljes szimuláció animálva megtekinthető a youtube videomegosztón (<http://www.youtube.com/watch?v=nzyettXklqY>)

ból tízszer kevesebb van, mint azt korábban gondoltuk, az azt jelenti, hogy a közepes méretű becsapódások jelenkori gyakorisága egy nagyságrenddel marad el a korábban érvényes becsléstől. Ettől persze még nem alhatunk tízszer nyugodtabban, mint tíz éve...

Váratlanul sikeresnek bizonyult a forgó testek felszínén jelentkező hőszugárzási anizotrópia felismerése. Az elmélet egyszerre volt képes megmagyarázni a nagyszámú kisbolygót a Föld pályájához közel, a kisebb aszteroidák elnyúlt alakját, a sok kettős kisbolygót, a nagyon lassan forgó égitesteket és a kritikus sebességgel forgó kisbolygók nagy számát. A hőszugárzási anizotrópia oka a test hőtehetetlensége: a belső rétegek hűtési mechanizmusa miatt a felszín nem akkor a legmelegebb, amikor a Nap a lokális zenitben jár, hanem valamivel később: amikor a belső rétegek is átmelegedtek kissé, a felszíni hő elvezetése már kevésbé hatékony, viszont a besugárzás még mindig elegendően nagy. Ezt a jelenséget a Földön is észlelhetjük, egyszerűen megfogalmazva úgy, hogy kora délután melegebb van, mint délben. A kisbolygók felszínén a folyamat rendkívül bonyolult, jellegzetesen egyenetlen hőterképet hoz létre, ahol egy „délutáni” pontra esik a mindenkor legmelegebb terület. A felszín saját hőszugárzása ezért anizotróp, a délutáni oldal erősebben sugároz. A sugárzási anizotrópia miatt a hőszugárzás által elvitt összes lendület nem nulla, a délutáni oldal felől egy rendkívül kis mértékű, ám folyamatosan ható erő tolja el a pályán keringő égitestet. Ez az erő a *prográd*, keringéssel azonos forgású égitesteket egyre nagyobb, a *retrográd*, fordított forgási irányú testeket egyre kisebb sugarú pályára sodorja, és végül milliárd éves időskálán a teljes Naprendszer képét átalakítja (Jarkovszkij-jelenség). A Naprendszer földközeli égitestjeit is ez az erő terelte különleges pályára, ami annak fölfedezésekor derült ki, hogy ezek a kisbolygók túlnyomórészt retrográd irányban forognak! A helyzetet bonyolítja, hogy valójában rögtön kétféle Jarkovszkij-jelenséggel kell számolnunk: a napi komponens, amely a délutáni oldal

felmelegedésével kapcsolatos, míg az éves Jarkovszkij-jelenség a nyári félteke erősebb felmelegedése miatt lép föl.

Az állatövi porra is hat egy hasonló erő, de ott nem a hőtehetetlenség, hanem a fény aberrációja okoz aszimmetriát. A keringő porszem saját vonatkoztatási rendszerében a beeső napsugarak aberrációt szenvednek, olyan értelemben, hogy saját vonatkoztatási rendszerében a porszem mindig kicsit „előlről” kapja a napfényt. A fotonok ezért lassítják a porszemcsék keringését, amelyek a Napba spiráloznak (Poynting–Robertson-jelenség).

A Jarkovszkij-jelenségnél fellépő sugárzási anizotrópia forgatónyomatékokat is kifejt a forgó égitestre, amely százmillió éves időskálán képes jelentős mértékben „fölpörögni”: ez a YORP (Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack) jelenség. Ennek hatása az, hogy az alkalmas formájú kisbolygók forgása képes a test szétszakadásának határáig gyorsulni, aminek következtében a test szélsőségesen elnyúlttá válik, és megjelennek a jellegzetes „szilánk” alakzatok. Extrém esetben a test szabályosan kettéválik középen, a kisbolygó alakja „kutyacsont” formában deformálódik, vagy a leszóródó anyag újbóli összeállása után kisméretű kísérők, holdak jelennek meg a domináns égitest körül (6. ábra). Maga az effektus bonyolult viselkedéshez vezet, az alak elnyúltsága és forgási periódusa a kiinduló paramétereiktől és az égitest pályájának jellegétől függően akár monoton módon, akár periodikusan, akár kaotikusan változhat. Ellentétben a Jarkovszkij-jelenséggel, a YORP működésére közvetlen bizonyítékot nehéz találni, ám a forgási sebességek eloszlását összességében jól magyarázza, és az is kézenfekvő, hogy ha a Jarkovszkij-jelenség föllép a Naprendszerben, ott a YORP is szükségképpen fontos szerepet játszik.

Az ütközéses elméletek jelentős sikert értek el a Hold kialakulásának magyarázatában. Azonban úgy tűnik, más naprendszerekben ritkán zajlanak hasonló óriási ütközések. Egy ilyen ütközéshez ugyanis szükséges, hogy a fiatal naprendszerekben nagy mennyiségű törmelék legyen jelen, amelyből a bolygó méretű becsapódó testek összeállhatnak. A becsapódás után néhány tízmillió évig pedig magának a becsapódásnak az egyre oszló törmelékfelhőjét kellene megfigyelünk – ez jól látszana az infravörös tartományon. Azonban a megfigyelések szerint kevés olyan fiatal, távoli naprendszer van, amelyben jelentős mennyiségű törmelék van jelen, tehát föltételezhetően kevés naprendszerben alakul ki nagyobb hold valamelyik bolygó körül.

A becsapódások jelentősége melletti érvek közül utolsóként említettük az állatövi port, amelynek folyamatos forrására a kisbolygók ütközései nyújthatnak alkalmas magyarázatot. A múlt évben végeztek egy vizsgálatot a Spitzer-űrtávcsővel, amelyben az állatövi por ekliptikai eloszlását vetették össze a nagyobb kisbolygócsaládokkal és az üstökösökkel. Az összevetés eredménye meglepő: nincs olyan kisbolygócsalád, amelyhez egyértelműen köthető lenne az állatövi por

szerkezeté. Viszont a Jupiter üstökös családjá, a rövid periódusú üstökösök pályaeloszlása pontosan követi az állatövi por eloszlását; kézenfekvő magyarázat tehát, hogy az állatövi por nagy részben, legalább 85%-ban, az üstökösökből származik, a normális anyagtermelés eredményeként, ütközési folyamatok közbeiktatása nélkül.

Kitekintés

A naprendszerek ütközési korszakának közelmúltbeli átértékelése egy napjainkig zajló folyamat, amelynek tendenciája nyilvánvaló. Ennek ellenére nem beszélhetünk klasszikus paradigmaváltásról, talán még versengő paradigmákról sem (talán egyedül a sugárzási anizotrópiák elméletei illenének ebbe a fogalomkörbe). A jelenségek összetett voltát tekintve inkább hangsúlyeltolódásról kell beszélnünk: az ütközések szerepe kisebb súllyal jelenik meg a mai Naprendszerünk, tehát általánosságban fogalmazva, az öreg naprendszerek esetében, viszont sokkal tisztábban körvonalazódik szerepük a fiatal naprendszerekben és a bolygórendszerek korai fejlődésében. Ha csak az állatövi por üstökös eredetére gondolunk, eszünkbe

kell, hogy jusson az a jó néhány fiatal naprendszer, amelyben ezerszer, tízezerszer több meleg port detektálhatunk, mint a mai Naprendszerben. Lehetséges, hogy ott valóban tízezerszer akkora üstökös populáció kering, mint a Jupiter mai üstökös családjá? Ha arra gondolunk, hogy a Föld felszínére a vizet üstökösök (vagy jeges kisbolygók) becsapódása szállíthatta, a fiatal naprendszerek óriási üstökös populációjának elképzelése sem jelent áthidalhatatlan nehézséget, és egy ilyen üstökösfelhő detektálása sem reménytelen a mai legjobb műszerekkel.

Az elmúlt években a csillagászati kutatások valójában olyan dologgal szembesültek, amely egyáltalán nem volt váratlan: nem meglepő, hogy a korai naprendszerekben sokkal jelentősebb volt a becsapódások és az ütközések hatása, mint a fejlődés kései fázisában. Hogy mégis a mi Naprendszerünkben kellett föl kutatni az ütközések nyomát, annak egyszerűen az volt az oka, hogy szinte lehetetlen volt távoli, fiatal naprendszereket megfigyelni. Az obszervációs technikák gyors fejlődésének köszönhetően néhány éve már számos távoli naprendszerbe nyerhetünk bepillantást, és immár a legmegfelelőbb környezetben, a kialakuló naprendszerekben is tanulmányozni tudjuk az ütközések hatását.