

Illés Erzsébet a múlt év őszén Houstonban megrendezett 2. Világűrkongresszuson előadást tartott arról, hogy milyennek is képzelni el egy üstökös magját. Kérésünkre most olvasóink számára is összefoglalja az általa alkotott modellt.

Hogy az üstökös milyen, már sok cikkben leírták az *Elet és Tudomány* hasábjain is, arról azonban, hogy milyen is lehet az a *szilárd test*, amelyből az üstökös *légkör*e (kómája) kialakul a napsugarak melegítő hatására, valamint *csóvája* a napsugarak fénynyomásának és a napszél dinamikus nyomásának hatására, már kevesebbszer esett szó.

Egy üstökös magját – még ha közel jön is a Földhöz – távcsövekkel nem lehet megfigyelni, mert por- és ködfátyolba burkolózik. Ezért csak spektroszkópiai mérések segíthetnek abban, hogy a légkörében lévő „leánymolekulák” alapján kitaláljuk, azok milyen anyagok széteséséből keletkezettek. Ilyen vizsgálatok alapján jutottak a kutatók arra a következtetésre, hogy az üstökösök magját főleg vízjég, szén-dioxid-jég és egyéb illóanyagok jegei alkotják – kevés porral keverve. Olyannak képzeltek el *Whipple* nyomán az üstökös magokat, mint egy piszkos hógolyót, csak, persze, nem öklömnyi, hanem inkább kilométeres méretben.

Halley, az „öreg”

Az üstökös kutatás történetében először 1986-ban a Halley-üstökös meglátogató űrszondák révén vált lehetővé, hogy közelről megnézhesük egy üstökös magját (1. kép). Nagy meglepetésként hatott, hogy a mag milyen sötét. Fényvisszaverő képessége (albedója) alig érte el a néhány százalékot, inkább szénre, mint egy piszkos hógolyóra emlékeztetett. Biztosan azért ilyen sötét – gondolták a kutatók –, mert ha elnyúlt pályáján napközeli jár, a Nap melege állandóan megolvasztja a felszínén a jegeket, azok elpárolognak, elszublimálnak, anyaguk az üstökös

1

MILYEN LEHET EGY ÜSTÖKÖS MAGJA?

*A Halley-üstökös a porjeteikkel
(A Giotto szonda felvétele)*

légkörébe kerül. De ott maradnak a porszemek, amelyek sötét koszréteggént fedik a felszínt. Olyanná válik az egész, mint tavasszal az út szélére tolt hókupac: a belsejében lévő hóból már semmi nem látszik.

Az üstökösök körül egyébként nagyon sok a por is. A napsugarak hatására átmelegedett felszínből elpárolgó jégmolekulák magukkal viszik, szinte kifújják a mikroszkopikus finom porszemcséket. De meglepetésként hatott 1986-ban az a felfedezés is, hogy a Halley sötét magját nem egyenletesen hagyta el a por, hanem élesen kirajzolódó szélű, erős *poráramok*, úgynevezett *porjete* indultak az üstökösrag bizonyos kisméretű helyeiről. Ezek az aktív felületdarabok a teljes felszínnek kevesebb, mint 10 százalékát tették ki.

Porfelszabadulás

Miért nem mindenhol szabadul fel az üstökösök felszínén a por? – tették fel a kérdést a kutatók. És a következő években sok elmélet született a jelenség magyarázatára. Biztosan nem egyenletes a felszín melegedése – vagy azért, mert hepehupás, mint ahogy a képek is mutatják, vagy azért, mert nem teljesen homogén a felszíni anyag. Ha bizonyos helyeken jobban melegszik, a felszín alatt felgyűlt gőz hirtelen szabadul ki, feltépheti, leszakíthatja a kérget. Ekkor szabadabbá válik a jéganyag, és

az a közvetlen napfénynek kitéve jobban párolog, az erős áramlás pedig könnyebben magával ragadja a porszemcséket.

Csakhogy a Halley-üstökös esetében a felszín albedotérképe nem erősítette meg, hogy az aktív területeknél a felszín világosabb lenne. Sőt, azt mutatták a mérések, hogy a fényvisszaverő képességben alig van különbség az aktív és nem aktív területek között. Továbbá a színekélemzés sem mutatta nyomát annak, hogy az aktív területeken szabad jég lenne a felszínen.

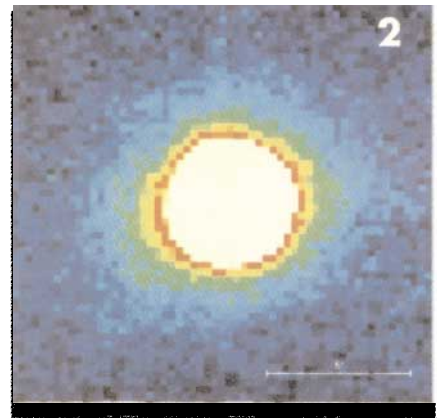
A másik magyarázat szerint a felszíni por mindenhol egyenletesen áramlik ki ugyan, csak bizonyos mélyedések, kráterek konkáv alakjukkal összeterelik, fókuszálják a kiáramló port, és ezért alakulnak ki a porjete. A Halley-mag sok rücskét, mélyedését tekintve akkor viszont több helyen várnánk jetet. A második űrszondás üstökösfigyelésből is ugyanezt a következtetést vonhatjuk le. 2001-ben ugyanis a *Deep Space 1* szonda a *Borrelly-üstökös* közelében járt, amely a Halleyhez teljesen hasonló képet mutatott – néhány éles porjettel, amelyek a felszínnek csak alig 8 százalékából indultak ki.

A jetekek egyébként nemcsak közvetlenül a mag közelében érzékelhetők,

hanem befolyásolják a csóva alakját is. Ennek alapján is lehet bizonyos következtetésekre jutni. *Keller és munkatársai* például periodikus üstökösök távcsöves megfigyelési anyagának tanulmányozásakor azt találták, hogy sok üstökösnél a későbbi visszatéréskor a jetekek elrendeződése, morfológiája nem változott, mintha a jetekek forrása továbbra is ugyanaz az aktív terület maradt volna.

Chiron, a fiatal óriás

A 2060 *Chiron*nak érdekes története van. 1977-ben fedezték fel, akkor a kisbolygók közé sorolták (1977UB), mert gondos vizsgálattal sem láttak körülötte kómát, vagyis légkört. Azért vizsgálták olyan nagyon, mert pályája üstököszerűen elnyúló volt, és eddig még nem találtak olyan kisbolygót, amely az óriásbolygók pályáját metszette volna. Azok a Jupiter pályáján belül keringtek. Még arra is gondoltak a kutatók, hogy talán egy másik kisbolygóval első tagját fedezték fel, amely a Szaturnusz és az Uránusz pályája között húzódik, sőt ezen elképzelés alapján az is felvetődött, hogy két-két óriásbolygó pályája között mindig létezhet egy kisbolygó. Aztán később, a 80-as évek végén egyre többször volt diffúz a *Chiron*ról készült kép, mintha mégis lenne körülötte légkör (2. kép). Ahogy ugyanis a *Chiron* elnyúlt pályáján, a Naphoz egyre kö-



Fotó a *Chiron* kómájáról

zelebb kerülve egyre jobban melegítették a napsugarak, egyszer csak légkör kezdett kialakulni körülötte. Ekkor ismerhettük fel igazi természetét, hogy egy óriási üstökösragról van szó. Csillagfedéssel meghatározott 240 kilométeres átmérője mellett a 10 kilométeres Halley eltörlül, pedig az

MILYEN LEHET EGY ÜSTÖKÖS MAGJA?

is nagyon mondható egy átlagos, 1-2 kilométeres üstökös-maghoz képest.

A Chiron tehát messze jár a Naptól: 8,5-18,8 csillagászati egységnyire. Ma már értjük, hogy nem újabb kisbolygóövek első tagját fedezték fel, hanem egy új égitesttípus első tagját. A Chiron ugyanis csillagászati érte-

felhasználták az alkalmat arra, hogy megfigyeljék, milyen hosszú ideig takarja el a csillagot a Chiron, s így pontosabban határozhatják meg ennek az óriási üstökös-magnak az átmérőjét. Csillagfedés-észlelés esetén a megadott időnél korábban kezdik a megfigyelést, nehogy a pontatlanság

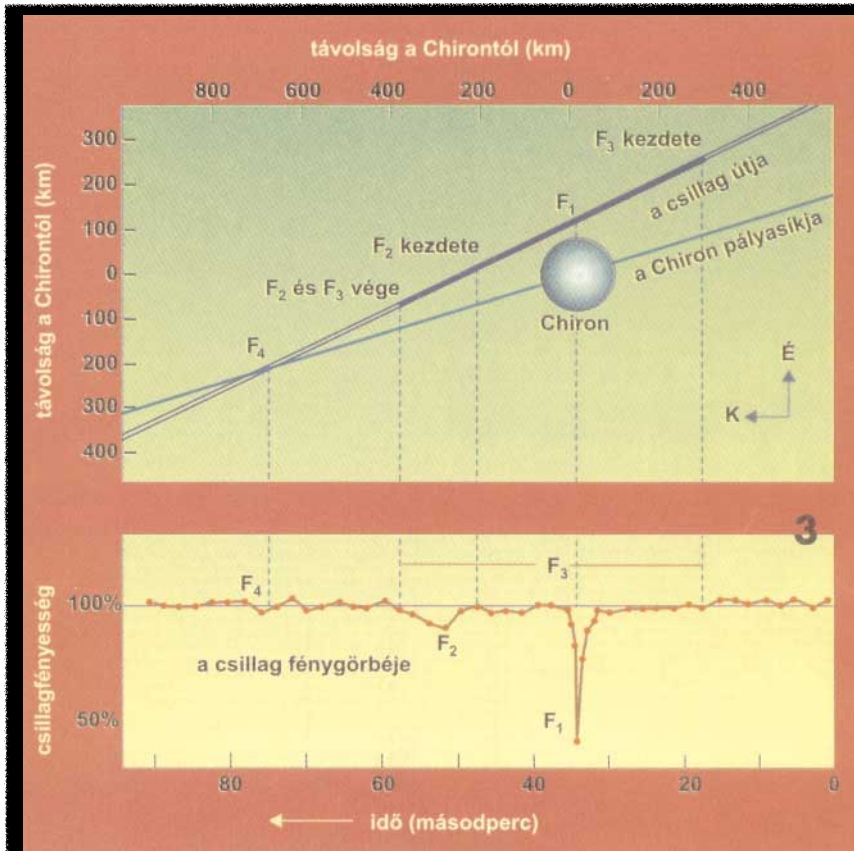
különböző mértékben. Ez arra utalt, hogy a Chiron magja közelében por-jeteknek kell lenniük, s ezek a „küllők” el-el-takarják a csillag fényét (3. kép).

Miután a Chiron még sohasem közelítette meg a Napot, nem alakulhatott ki rajta sötét kéreg. Ezt alátámasztja albedója is, amelyet *Altenhoff* és *Stumpff* 13 százaléknak talált. Ha viszont a Chironnál is vannak jetek, akkor a jetek mégsem a napsütötte sötét kéreg repedéseiből indulhatnak ki! A fiatal Chiron porjetei tehát arra utalnak, hogy a porjetek az üstökösök általánosan előforduló tulajdonságai közé kell hogy tartozzanak, és keletkezésüket másként kell magyarázni.

A Shoemaker Levy 9

Miután sok üstökös szétesett már több darabra, természetes volt a feltételezés, hogy az üstökös-magok a bolygóközi anyag több darabból összeállt csomói, ahogy ezt *Weissman* 1986-ban megfogalmazta. A darabokat – vagy „szubmagokat” – a vízjég és a többi illó anyag jege tarthatja össze. Ha a sok Nap-megközelítés után elfogy a cementáló jég, a darabokat már csak saját gyenge gravitációjuk tartja össze. Pályamozgásuk során azok a legkisebb erőhatásra egyszerűen szétválnak, szétúsznak a térben. Ez történt például 1845-46-ban a *Biela*- és 1976-ban a *West*-üstökösökkel is (4. kép). A *Shoemaker Levy 9* (SL9) üstökös pedig olyan közel haladt el a Jupiter mellett, hogy annak *árapályereje* tépte szét szubmagjaira, azaz alkotóelemeire az üstökös-magot.

Miközben 1994-ben nagy izgalom-



A Chiron kómájának csillagfedései. Mielőtt a Ch08 (GSC248-01674) csillag előtt elvonult a Chiron, a csillag fénye néhányszor elhalványodott (F1-F4), ami porjetek létét jelzi a Chiron magjának környezetében

lemben nemrég került be az óriásbolygók felségterületére abból a Neptunuszon túli, úgynevezett *Kuiper-övből*, amelynek létét 1949-ben *Edgeworth*, 1951-ben pedig *Kuiper* feltéte-



A szétdarabolódott West-üstökös

lezte, és amelynek első tagját (a 92 QB1-et) csak 1992-ben sikerült felfedezni a távcsövek nagymértékű javulása és a számítástechnika alkalmazása következtében.

Közben a 90-es évek elején, amikor a Chiron egy-egy csillag előtt elvonult, *Bui* és *Elliot munkatársai*kkal

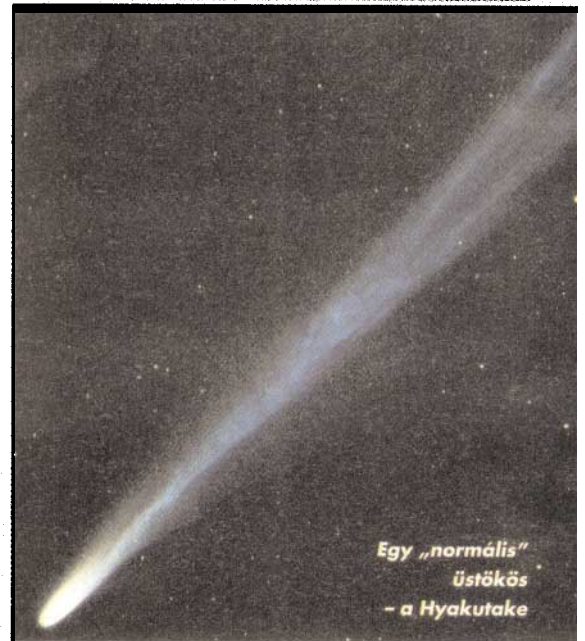
miatt a fedést éppen elszalasszák. És ebben az esetben a fedés előtti fényességmérés érdekes tudományos eredményt is adott: kiderült ugyanis, hogy a csillag fénye még a fedés előtt néhányszor rövid időre elhalványult, és a különböző alkalmakkor mindig

mal vártuk az SL9 darabjainak Jupiterbe csapódását, az üstökös-pálya pontos kiszámításához megfigyelések sorozatát készítették. És itt két meglepetés érte a kutatókat. (A következő számban folytatjuk.)

ILLÉS ERZSÉBET

(az MTA Csillagászati Kutatóintézet)

MILYEN LEHET EGY ÜSTÖKÖS MAGJA?



Egy „normális”
üstökös
– a Hyakutake

1993. március 27.

1993. április 15.

1993. május 21.

1993. június 12.

1993. július 17.

Egy „nem normális” üstökös, az SL9 – földi távcsővel

Az üstökös-magokból különböző irányú porkilövellések, jetek indulnak ki. Szerzőnk cikkének első felében (20. számunkban) részletesen ismertette, hogy ezek mind az évszázadok óta visszajáró Halley, mind a „pályakezdő” Chiron esetében fellépnek, a visszatérő üstökösöknek mindig ugyanazon helyein jelentkeznek, és függetlenek a mag „elpiszkolódásától”. Az eddigi magyarázatok ebből a szempontból nem megnyugtatók. Ám a Shoemaker Levy 9 üstökös darabjainak 1994-ben bekövetkezett Jupiterbe zuhanását elemezve két talányos megfigyelést tehattünk, és – mint a barkochbában – az újabb kérdések hirtelen egy új válasz lehetőségére világítottak rá.

2.
rész

A Shoemaker Levy 9 (SL9) üstökös darabjainak sorozatbecsapódása a Jupiterbe 1994-ben nemcsak rendkívüli látványosság volt, hanem a kutatóknak két meglepetéssel is szolgált. Először is nagyon érdekes volt a szubmagok sorozatából kialakult kis üstökösök „gyöngysora” (1. kép), az, ahogy széthúzódtak, eltávolodtak egymástól. Néhányuk a többiekénél sokkal jobban el is távolodott az átlagos pályától, a „gyöngysortól”. Azok a darabok, amelyek messze tá-

volodtak el, tehát nagyobb nem-gravitációs erőhatásnak voltak kitéve a belőlük kiáramló gázok „rakétahajtása” miatt, a Jupiterbe csapódva sokkal kisebb robbanást váltottak ki a légkörben, mint azok, amelyek a közös pályán maradtak (a 2. kép feletti pontsor és a 3. kép).

A másik érdekes megfigyelési tény az volt, hogy bár bizonyos darabok ugyanolyan fényesnek látszottak – tehát azt gondolhattuk volna, hogy körülbelül azonos nagyságú a hozzájuk tartozó üstökös-mag – mégis különböző hatást



A Shoemaker Levy 9 üstökös „gyöngysora”, HST fotó. A W jobbra a képmezőn kívül helyezkedik el. A fotó felett látható pontsor a becsapódási nyom nagyságát jelzi. Minél nagyobb a pont, annál nagyobb hatást váltott ki a Jupiter légkörében annak a darabnak a becsapódása. Az üres kör azt jelzi, hogy annak a darabnak becsapódási idejében nem volt megfigyelhető hatás

váltak ki a becsapódásnál. Például a B ugyanolyan fényes volt, mint az A vagy a C (2. kép), de a B becsapódási idején semmiféle hatást nem lehetett megfigyelni a légkörben (3. kép). És éppen azok a darabok nem okoztak hatást a légkörben, amelyek eltávolodtak a közös pályától, tehát nagy rakétahajtást szenvedtek el!

Egy lehetséges magyarázat

Egyszer az jutott eszembe, ha elfogadjuk azt a feltételezést, hogy az üstökösök magja több kisebb darabból, úgynevezett szubmagból tevődik össze, akkor egyetlen további feltételezéssel magyarázható az összes többi megfigyelés. Mégpedig csak azt kell feltételezni, hogy ezek az alkotórészek nem egyformán tömörök. Kétféle szubmag lehet, az egyik fajta laza, a másik kemény és kohézív.

Egy laza szerkezetű szubmagból ugyanis könnyebben és nagyobb sebességgel áramlanak ki a gázok. A nagyobb kigázosodás nagyobb és sűrűbb légkört hoz létre, tehát fényesebbnek látszik az üstökös. A kiáramló gázok rakétahajtása nagyobb pályaváltozást eredményez: ezek a darabok távolodnak el a gyöngysortól. Mindkét típus ugyanakkora pálya menti sebességgel érkezik a Jupiter légkörébe, a laza szubmagok azonban már nagy magasságban jóformán semmi nyomot nem hagyva szétesnek – ellentétben a kemény magokkal, amelyek mélyre hatolnak a légkörben, és nagy robbanást okozva nagy hatást váltanak ki. Ez tehát megmagyarázza az SL9-becsapódásakor látottakat.

A feltevés szerint az üstökösök magja a kétfajta állagú darabok konglomerátumai. Ha egy üstökös felületének egy darabján éppen egy ilyen laza szubmag alkotja a felszínt, onnan könnyen illannak el az elpárolgó molekulák, könnyen viszik magukkal a porszemcséket, tehát innen indulnak ki a jetek. És ezek a jetek nemcsak öreg, sötét, kérges, hanem friss üstökösöknél is azonnal létrejönnek, ahogy a Nap melege elindítja az illóanyagok elpárolgását. És mindig ez a területrészt lesz az aktívabb, amíg anyaga el nem fogy, tehát természetes, hogy az üstökös újabb visszatérésekor a jetek helyei nagyjából ugyanazok. Érthető továbbá az is, hogy az aktív és nem aktív területek albedója nem különbözik. Tehát azoknak kell bekövetkezni, amiket cikkem első részében felsoroltam. Így egyetlen feltételezéssel minden megfigyelést meg lehet magyarázni.

Azt, hogy valóban léteznek-e kétféle tömörségű szubmagok, és ha igen, miért jöttek létre, és hogyan épülhettek be egy üstökös magjába, további kutatásoknak

kell eldönteniük. Én itt mindössze néhány gondolatot vetek fel.

De mielőtt a szubmagok kialakulásáról beszélünk, nézzük meg röviden, hogy mikor és hogyan is keletkezhetek az üstökösök, és maga a bolygórendszer. Azaz vizsgáljuk kérdéseinket a Naprendszer kialakulásáról elfogadott elméletbe ágyazottnan.

A Naprendszer keletkezése

Ma úgy gondoljuk, hogy a Naprendszer helyén olyan óriási felhő volt, amelyből nagyon sok van mindenféle a csillagközi térben. Ez a felhő egyszer csak valamilyen hatásra darabokra sza-

kadt – például azért, mert a közelében felrobbant egy szupernóva, és annak lökéshullámja átsöpört a felhőn. A felhődarabok egyike (vagy mindegyike; minket a továbbiakban csak az érdekel, amelyből később a Naprendszer kialakult, és amelyet a továbbiakban szoláris ködnek nevezünk) saját gravitációjának hatására kezdett összehúzódni. Ahogy a benne lévő porszemcsék közelebb kerültek egymáshoz, összetapadtak, és piheszerű laza csomókat képezhettek, amelyek egyre nőttek, bár, ha nagyobb sebességgel csapódtak egymáshoz, újra szét is eshettek, vagy tömörödtek. Ahogy a központi sűrűsödés egyre nagyobb lett, begyulladt az ő-Nap, és kezdte környezetét melegíteni. Az ekkor kialakuló, befelé növekvő hőmérséklet-eloszlás az ő-Naphoz közeli szemcsék illóanyagát el is párologtathatta, a fény nyomása pedig a gáz-halmazállapotú összetevőt kezdte kifelé fújni. A kifelé áramló gázok aztán nagyobb távolságban újra kicsapódhattak, ahol a csökkenő hőmérséklet éppen elérte kifagyási hőmérsékletüket. Ezek, mint jégszemcsék, újra a szoláris köd „poranyagát” gazdagították, és begyűjtődtek a növekvő anyagsomókba, amelyeket *planetézimálok*nak is nevezünk. A belső Naprendszer-



A HST ultraibolya felvétele a Jupiterről 1994. július 21-én 7 óra 55 perckor (UT). A B, N és Q2 nyoma alig látszik

ben „kisbolygóknak”, a külső Naprendszerben „üstökösöknek” nevezzük a létrejött nagyobb csomókat.

A kisbolygók illóanyag-tartalma sokkal kisebb, mert a Jupiter pályáján belül, ahol azok összeálltak, melegebb volt a környezet, és az illóanyag nagy része gáz-halmazállapotban volt – ellentétben az üstökösökkel, ahol az illóanyag „por”, vagyis szilárd állapotban volt jelen, és beépült a csomókba. A csomók tovább növekedve képezték a „protobolygókat”, a maradék alkotja a kisbolygók és az üstökösök zömét. Ezért gondoljuk, hogy

MILYEN LEHET EGY ÜSTÖKÖS MAGJA?

az ő anyaguk képviseli a Naprendszer ősi anyagát, mert ezekben a kis testekben nem alakult át, nem differenciálódott az anyag. Ez, persze, nem teljesen igaz, mert mindkét csoportban lehettek ütközések, amelyek melegítették, tömörítették, sőt, darabolhatták is az anyagot. Ez azt jelenti, hogy egy mostani kis, méretű test – akár kisbolygó, akár üstökös – nem feltétlenül olyan, mint összeállása idején. De azért még mindig közöttük kell keresnünk azokat, amelyek legjobban megmutatják



nekünk, hogy milyen őanyagból jöttek létre a bolygók. Ha igazam van az üstökösszubmag-modellemmel kapcsolatban, akkor az üstökösök azon részén kell keresni ezt a legkevésbé átalakult anyagot, ahonnan a jetek indulnak ki.

Szoláris köd és magszerkezet

Ezek után nézzük, hogyan alakulhattak ki a különböző álagú szubmagok! Lehetséges, hogy a keményebb szubmagok véletlenül erősebb ütközést szenvedtek el, így tömörebbek lettek – még mielőtt lágy ütközéssel összeragadtak volna egy üstökös magjává. De azt is elképzelhetőnek tartom, hogy a Naphoz közelebbi térségben, az óriásbolygók felségterületén keményebbek lettek a szubmagok azért is, mert ott melegebb volt, mint a Naptól nagyobb távolságra, és azért is, mert ott a nagyobb sűrűség és az óriásbolygók gravitációs zavaró hatása miatt többször ütköztek, mint a Naptól távolabb. Ebben az esetben a kevert keménységű üstökösök léte, vagyis az, hogy találkozni tudtak a távolabb keletkezett laza és a közelebb keletkezett tömörebb szubmagok, azt jelzi, hogy egy-egy növekvő test nemcsak egy keskeny zóna anyagát gyűjtögethette magába, hanem sokkal szélesebb zónából – az óriásbolygótól a Kuiper-övig – kapott anyagot, vagyis nagyobb volt a keveredés a szoláris ködben.

Azt is elképzelhetőnek tartom, hogy laza szubmagok részben még az őseredeti óriás molekula felhő állapotában – vagyis még a Naprendszer kialakulása előtt – jöttek létre, ahogy ezt *Napier* és társai felvetik, ellentétben a sűrűbb állapotú szoláris ködben keletkezett üstökösszubmagokkal, amelyek a begyulladó ő-Nap miatt kialakult magasabb hőmérséklet és nagyobb sűrűség miatt bekövetkező több ütközés következtében keményebb szubmagokká váltak.

ILLÉS ERZSÉBET

(az MTA Csillagászati Kutatóintézete)