

Illés Erzsébet

Egy üstökös találkozása a Jupiterrel

Egyedülálló jelenség következik be a csillagászat történetében a P/Shoemaker—Levy 9 nevű üstökös és a Jupiter találkozásakor. A mesterséges égitesteket nem számítva ugyanis olyan jelenség megfigyelésére még sohasem volt példa, amikor a csillagászat előre jelezhetette és megfigyelhetette volna két égitest fizikai találkozását.

Az égitestekről szerezhető információk

Előrejelzés eddig csak látszólagos találkozásokra vonatkozott, amikor is két égitest egy harmadikról nézve ugyanabban az irányban látszik. Ha a Holdra, a Napra és a Földre vonatkozik az előrejelzés, akkor ez jelenthet holdfogyatkozást, amikor is a Hold a Föld árnyékába jutva nem kap napfényt, tehát nem világít. Vagy napfogyatkozást, amikor a Föld elől a Hold eltakarja a Napot, s így a Föld egy része sötétségbe borul. A régi civilizációknál ezen látszó találkozásoknak az előrejelzése különösen fontos volt. Manapság viszont az adatgyűjtés szempontjából van jelentősége. Más bolygók holdjainak elvonulása hold-társuk vagy bolygójuk előtt ugyanis lehetővé teszi, hogy a mögöttes lévő égitest felszínét „letapogassuk”. (Így derült például fény arra, hogy a Plútónak is van poláris sapkája.) Ha egy csillagot elfed egy bolygó vagy egy hold, a fedés idejéből az elfedő test mérete kiszámítható, a fedés kezdetén és végén a fénycsökkenés, illetve növekedés gyorsaságából és menetéből pedig az elfedő test légkörére lehet következtetni, és ez az elfedő test tőlünk mért távolságától függetlenül végrehajtható.

Megfigyelés többféle lehet. Vannak állandónak tekinthető jelenségek — leg-
alábbis emberöltőnyi időben mérve —, mint például egy átlagos csillag fényessége
vagy színe. Ezeket bármikor megfigyelhetjük. Vannak jelenségek, amelyek vál-
toznak ugyan, de periodikusan, mint például bizonyos változócsillagok fénye, vagy
a bolygók és holdjaik helyzete, ezek azonban bármikor megfigyelhetők, és szinte
mindegy, hogy melyik ciklust figyeljük meg. Ez a kategória az, amely előre jelezhető.



Egy szokásos üstökös.

Vannak aztán olyan jelenségek, amelyek hirtelen tűnnek ugyan fel, de később nyomon követhetők a további változások, mint például egy nóva, szupernóva vagy üstökös esetében. Vannak végül olyan jelenségek, amelyek ritkán, hirtelen jelentkeznek, és rövid ideig tartanak, mint például a gamma-viharok vagy egy tűzgömb megjelenése. Ezek észrevételéhez vagy a teljes ég folyamatos megfigyelése szükséges, vagy óriási szerencse, hogy valaki a megfelelő műszert éppen a megfelelő helyre irányozza abban a pillanatban.

Fizikai kölcsönhatást égitestek között folyamatában megfigyelni csak a Nap vagy más csillag esetében tudunk: elektromágneses sugárzásuk melegít és ionizál, ezek kimutathatók, sugárnyomásuk üres buborékot fúj körülöttük, ez látható, a kiáramló napszél magnetoszférát alakít ki mágneses társaik körül, s ennek viharai sarki fény tevékenységben vagy rádiósugárzásban nyilvánulnak meg.

Lezajlott fizikai kölcsönhatások nyoma szilárd kérgű bolygó- vagy holdfelszíneken jól látható a milliónyi becsapódásos kráter formájában később is. Számuk mutatja, hogy az ütközés gyakori jelenség lehet a Naprendszerben. A kráterszám-lálások tanúsága szerint az ütközések különösen gyakoriak voltak a Naprendszer kialakulása idején, minthogy ilyen mechanizmussal gyűlt össze a bolygók anyaga. A bolygókeletkezés maradékanyaga vagy az ütközésekkor keletkező „forgácsok” mikrometeoritek vagy meteorok formájában még ma is állandóan hullanak a Földre, meg más bolygótestekre is, évente több ezer vagy több tízezer tonna mennyiségben. A porszemcsék beérkezését hullócsillagként láthatjuk, a nagyobb darabokét tűzgömbként. Még nagyobbak — km vagy 10 km nagyságúak — már ritkábban, néhány tíz vagy száz millió évente érkeznek. Az ilyenek által kiváltott hatás bolygóméretű lehet, a geológiai korszakváltásokat újabban ilyenekkel is magyarázzák.

Az ütközés egyaránt rombolhat és építhet is. Ha a relatív sebesség kicsi és/vagy nem túl rideg az ütköző testek anyaga, akkor a darabok összetapadnak, ellenkező

esetben rombolják egymást, és a törmelék szétszóródik. A sokkal kisebb testet az ütközésnél rendszerint „bekebelezi” a nagyobb. Ha a nagynak szilárd kérge van, akkor a becsapódás emlékét egy-egy kráter őrzi.

A kráter mérete függ a két test tömegétől és a relatív sebességtől. A Földön például akkora krátert vág egy-egy Nap-körüli pályáról érkező test, amely saját méretének mintegy tízszerese. Szilárd felszíneken ezek a kráterek megmaradnak, amíg vagy az erózió el nem koptatja, vagy a felszín újraképződése (vulkanizmus, üledékképződés) be nem takarja azokat. Légkör és vulkanizmus nélküli bolygótesteken a Naprendszer keletkezése óta megmaradtak a kráterek. Gázbolygók, mint a Jupiter is, legfeljebb anyaguk áramlásának mintázatában őrzik a becsapódások nyomát.

A Föld esetében a becsapódás folyamatát néha közvetlenül megfigyelhetjük, mint például nemrég, amikor egy tűzgömb elérését Amerikában végigfilmezték, mert megfelelő időben történt: a hét végi sportesemények miatt sok néző kezében videokamera volt. Nem ennyire ártalmatlan, de azért még nem globális katasztrófát okozó volt az 1908-as tunguz meteor beérkezése. Azóta is folyik a vita, hogy kisbolygó vagy üstökös volt-e a beérkező test.

Egy különleges üstökös

Most tehát *nem látszólagos, hanem nagyon is valószínű pozíció-egybeesésre vonatkozik az előrejelzés*: a Shoemaker–Levy 9 üstökös pályája keresztezi a Jupiter pályáját, s a két égitest ez év júliusában ugyanakkor érik a keresztezés helyére — vagyis összeütköznek. Nyilván ebből az ütközésből az üstökös húzza a rövidet. Az izgalmas kérdés azonban az, hogy az ütközés energiája milyen jelenségeket gerjeszt majd a Jupiteren. Ezért készülnek a jelenség megfigyelésére az obszervatóriumok. A földi obszervatóriumokon kívül bekapcsolódik a megfigyelésbe a Kuiper Repülő Obszervatórium, a Föld körüli pályán keringő Hubble-űrtávcső, a Mír űrállomás, a Jupiter felé tartó Galileo űrszonda, a már messze járó Voyager 2, valamint más űrszondák is.

A Shoemaker–Levy 9 üstökös a kilencedik rövid periódusú üstökös, amelyet Eugene és Carolyn Shoemaker valamint David Levy felfedezett. Az első fotografikus lemez, amelyen megpillantották, 1993. március 18-án készült a Palomar-hegyi Schmidt távcsővel. Ezen a felvételen az üstökös a Jupiterhez igen közel látszott. A következő négy hónap alatt 156 pályapozíció gyűlt össze. Az ezek alapján meghatározott pálya nagyon különlegesnek bizonyult, ugyanis a Jupiter körül zárult. Ezen a pályán mozoghat az üstökös már 1970 óta. Ugyancsak furcsa volt, hogy az üstökös több, legalább 9 különálló darabból, magból állt, bár ilyen jelenséget korábban más üstökösökkel kapcsolatban is megfigyeltek már. A pályaszámítás azt mutatta, hogy a Shoemaker–Levy 9 üstökös már 1992. július 8-án is elhaladt a Jupiter közelében, mégpedig alig 43 ezer km-rel a felhőtető felett, ami nagyon kis távolság. Van ugyanis egy határ minden égitest körül, amelyen belül került testet az árapályerők szétszakítanak. Valószínűleg az 1992-es megközelítéskor szakadt darabokra az üstökös.

A Roche-határrol a csillagászatban nagyon sokszor esik szó, akár akkor, amikor azt kell magyarázni, hogy miért nincs hold a bolygókhoz közel (nem tud összeállni az anyag), akár azt, hogy miért van az óriás bolygóknak gyűrűje (odakerült nagyobb darabok elporlanak). Ez azonban az első alkalom a csillagászat történetében, amikor megfigyelhettük, hogy valóban működik is ez a hatás.

Mi is a Roche-határ? Edouard Roche XIX. századi francia matematikus számításai szerint egy folyadékból álló gömbben, amelyet csak saját gravitációja tart össze, a másik égitest gravitációs hatása olyan árapály-feszültségeket kelt, hogy a test egyre elnyúltabb lesz, majd szétszakad, ahogy egyre jobban megközelíti a másik testet. Az a távolság — a Roche-határ —, ahol ezzel a veszéllyel számolni kell, függ mindkét test sűrűségétől. A Jupiter esetében egy főleg jégből álló üstököskés esetén 110 ezer km, egy kődarab esetén 60 ezer km magasságban van a felhőtető felett. Tehát a Shoemaker—Levy 9 üstököskés a 43 ezer km-rel bőven behatolt a veszélyes területre, emiatt gondolják, hogy a Jupiter erős gravitációs tere tépte szét darabokra. A Hubble-űrtávcső felvételein 22 különálló kis üstökösmag volt azonosítható, amelyek gyöngysorként sorakoznak a felvételen (2. ábra). Mindegyik darab külön kis üstökösként viselkedik, porcsóvája van, de gázkiáramlást nem figyeltek meg, ami ekkora távolságban a Naptól nem is várható.

Az üstökösök pályái általában a Nap körül zárulnak, de túlnyomó többségük távol, messze túl a bolygókon rója köreit a Nap körül. Hogy miért téved mégis egy-egy a bolygók felségterületére, nem tudjuk — csak gyanítjuk, hogy más testek, például a szomszédos csillagok gravitációs hatása zavarja meg a pályájukat. Ha a Naprendszer belső részében véletlenül túl közel haladnak el egy bolygóhoz, akkor annak hatására pályájuk ismét megváltozhat, és örökre a belső térrészben maradnak. Az ilyeneket nevezzük periodikus üstökösöknek, és ezt a nevük elé írt P betűvel jelöljük: P/Shoemaker—Levy 9. Természetesen a Jupiter, a Naprendszer óriása az, amely a legnagyobb hatást fejt ki. Össze is gyűlt mintegy 70 üstököskés — amely csoportot a „Jupiter családja” névvel illetik — olyan módon, hogy a Nap körüli pályájuknak a naptávolság-pontja a Jupiter pálya távolságában van.

Kaptáción a csillagászatban azt a mechanizmust értjük, amikor egy test befog, maga körüli pályára kényszerít egy másikat, amely eredetileg csak elhaladt volna mellette. A Mars két holdjáról vélik, hogy valamikor a Nap körül keringő kisbolygók voltak, de a Mars befogta azokat.

Az égi mechanika törvényei értelmében két test esetén az egyik nem tudja befogni a másikat, legfeljebb a pályáját tudja megváltoztatni. A befogáshoz segítségre van szükség, vagy egy harmadik test gravitációs közreműködésére, vagy egy nem gravitációs hatásra, amely működhet rakéta-elv alapján (mesterséges égitestnél valódi rakéta, üstökösnél hirtelen gázkiáramlás), esetleg egy gázburokban történő fékeződés révén. A Mars-holdak esetében ezen utóbbira gondolnak, amikor is a Mars ósi, sűrű, nagy kiterjedésű légköre segített volna a Marshoz túl közel elhaladó kisbolygók lefékezésében. Egyébként ma már bolygók köré telepítendő űrszondák esetében is használják ezt az aerobrakingnek nevezett módszert, például így fékezték le a Vénusz körül a Magellan űrszondát a gravitációs mérésekhez.



A P/Shoemaker—Levy 9 üstökös Hubble-űrtávcsővel készült képe.

A Shoemaker—Levy 9 esetében valószínűleg valamelyik Galilei-hold gravitációja segített a Jupiternek a befogáshoz. A csillagászatban gyakran tárgyalják a kap-táció folyamatokat, de ezzel a mechanizmussal kapcsolatban is ez az első eset, amikor közvetlenül megfigyelték működését. A Shoemaker—Levy 9 üstökös most inkább a Jupiter egy lazán kötött holdjának tekinthető, mert a 43 ezer km-es megközelítés után 1993. július 16-ára 50 millió km-re távolodott el a bolygótól, majd újra közelít egy számára végzetes találkozásra.

A Shoemaker—Levy 9 üstökös darabjainak igazi méreteit nem ismerjük, még a Hubble-űrtávcső sem tudja felbontani. Csak becslést lehet adni. Ha feltesszük, hogy a darabok felszíne olyan sötét, mint a Halley üstökösé (5–6 %-át veri vissza a ráeső napfénynek), a fényesség ismeretében kiszámítható, hogy mekkora a darabok mérete. Ebből a megfontolásból a legnagyobb darab átmérője is csak 4 km körül lehet. Persze lehetséges, hogy egy frissen szét tört üstökös felszíne még világosabb, mint az öreg felszínű Halley üstökösé, ugyanis még nem volt idő vastag porköpeny kialakulására a felszínen, ami miatt olyan sötét a Halley. Ebben az esetben viszont még kisebb méret elegendő a mért fényesség megmagyarázására, tehát lehet, hogy még kisebbek a darabok: a Jupiter számára aligha lesz végzetes a találkozás.

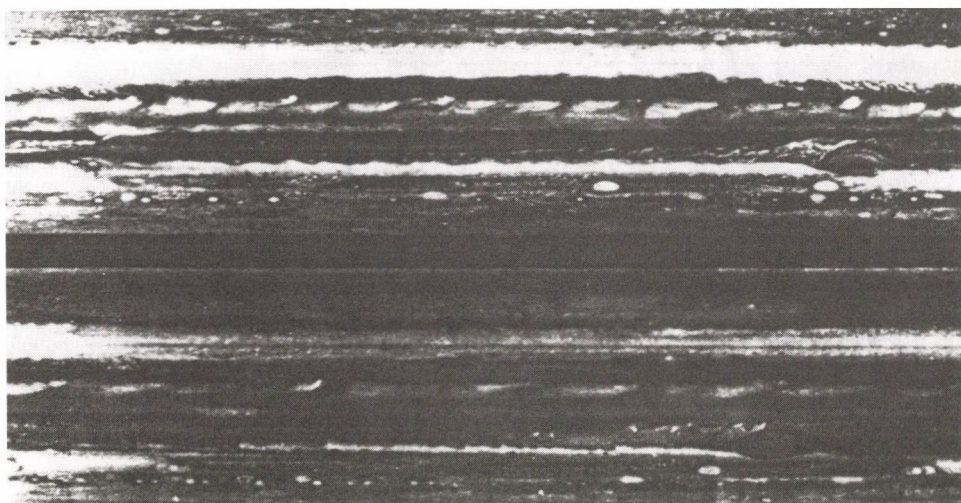
Találkozás az óriással

A *Jupiter*, a találkozás másik résztvevője, Naprendszerünk legnagyobb bolygója. Tömege 318-szor, sugara több mint 10-szer nagyobb a Földénél: 71 ezer km. Kívülről fényes felhőzetét látjuk, amely az egyenlítővel párhuzamosan elhelyezkedő világosabb és sötétebb sávokra oszlik (3. ábra). Ezekben a sávokban erős keletnyugat irányú szelek fújnak, mégpedig a szomszédosakban ellentétes irányba. A sávok határán így nagy a szélnyírás, és örvények keletkezésére nagyon alkalmasak a feltételek. Bár a szélső sebesség változása a szélességgel nem túlságosan különböző az északi és a déli félgömbön, mégis látszólag nagy különbség van a két félteke

között. Nemcsak a Nagy Vörös Folt léte okozza ezt az aszimmetriát, hanem az is, hogy az ugyancsak anticiklonikus, fehér színű örvények szintén a déli féltekén fordulnak elő nagyobb számban, a sötét oválok meg kizárólag az északin. A Nagy Vörös Folt egy 14 ezer km széles és 26 ezer km hosszú elliptikus viharzóna a déli szélesség $20\text{--}25^\circ$ -án. Kisebb átmérőjét az a sáv határozza meg, amelyben keletkezett, nagyobbik átmérője változik. Saját mozgása van, mint ahogy a földi légörvényeknek is: lassabban járja körül a Jupitert, mint a környezetében lévő légtömegek. Benne az anyag hatnapos periódussal körbejár, olyan mozgást végez a két, ellentétes mozgású szomszédos sáv között, mint amikor két tenyerünk között egy ceruzát pörgetünk tovább. Úgy tűnik, hogy a Nagy Vörös Folt legalább 300 éve létezik, amióta távcső áll az emberiség rendelkezésére, azóta mindig említést tesznek egy nagy foltról. A színe változó, néha nagyon vörös, néha meg alig különböztethető meg a környezetétől. Nem is érthető igazán, hogy miért vörös színű, míg a hozzá hasonlóan szintén anticiklonikus mozgású többi kisebb folt fehér. Arra gondolnak, hogy talán a Nagy Vörös Folt örvénye mélyebbre nyúlik le, és szélrendszere foszfortartalmú anyagot szállít fel a mélyből, amely a barnás színért felelős. Igazából az sem érthető, hogy miért létezik a Nagy Vörös Folt. Bár számítógépi szimulációk mutatják, hogy a zónák-övek határán leszakadó kis örvények fel tudnak növelni egyet-egyet maguk közül, energiájukat átadván annak.

Az üstökös becsapódása ez év júliusában várható. Nagy valószínűséggel az összes darab bele fog ütközni a Jupiterbe. A vízszinteshez képest 45° körüli szögben, déli irányból érkeznek a becsapódás helyére a darabok. Az ütközés a déli félgömbön, a $44^\circ,3 \pm 0^\circ,6$ környékén várható (ez a szélesség a fehér foltok kedvenc keletkezési sávja) a Jupiter túloldalán, 55° -ra a peremtől. A hely a Jupiter

3. ábra



A Jupiter Voyager-szonda által készített képe merkátor-vetületben.

gyors forgása következtében hamar befordul a tőlünk is látható oldalra. Lehetséges, hogy ez nem is előnytelen pozíció, mert valószínűleg egy óriási, több száz km magas, gomba alakú felhő fog keletkezni az ütközés következtében, és ennek magasságát így, a bolygó peremén jobban meg lehet mérni. A Galileo űrszondának, amely 200 millió km távolságra lesz a Jupitertől az események idején, jó rálátása lesz a becsapódási területre, és 2000 km-es felbontással tud majd felvételeket készíteni róla. A felvillanást láthatja a Voyager 2 is, bár már nagyon messze jár a Jupitertől. Így remélhetőleg magáról a becsapódásról is lesz majd mérésünk, legalábbis ami a felvillanás erősségét illeti.

A sok darab ütközése időben 6 napra el fog húzódní, a magok pályájuk mentén ugyanis már eltávolodtak egymástól. A legelső mag ütközése július 16-án 18 óra 45 perckor várható világidőben, a legnagyobbé július 20-án szintén 18 óra 45 perckor, az utolsóé július 22-én 7 órakor. Az ütközések előrejelzése az eddigi megfigyelések alapján körülbelül 40 percre pontos, amely később még javulhat, amint egyre kisebb távolságra kell extrapolálni. Gáz-kiszabadulás azonban rakéta-elven működő gyorsulást, és így pályamódosulást bármikor okozhat egy üstökösnél, ezért nem biztos, hogy az előrejelzés javul. A távoli űrszondák szempontjából pedig fontos lenne pontosabban tudni, hogy mikorra adják ki az expozícióra a parancsot. A magok relatív helyzete, és így a becsapódások relatív ideje egymáshoz képest egyébként pontosabban határozható meg, ezért, ha egyet sikerül megfigyelni, akkor a többi fotózására már nagyobb a remény. Ezért is jó, hogy így elhúzódnak a becsapódások, mert a parancsok így időben odaérhetnek a szondákhoz. A Voyager 2 már 41 csillagászati egység távolságban, a Plútó pályáján jóval túl jár. A rádiójeleknek több mint 5 órára van szükségük, hogy odaérjenek.

Miután a Jupiter forog a tengelye körül — 9 óra 55 perc alatt végezve egy fordulatot — a különböző darabok beérkezése idejére a bolygó más-más hosszúsági sávja fordul oda a következő ütközéshez. Ez azt eredményezi, hogy a Déli Mérsékeltövi Zónát az ütközések nemcsak egy helyen zavarják meg, hanem sok helyen körbe a bolygó körül. A találkozási sebesség 60 km/sec, ami körülbelül 200 ezer km/órának felel meg. Ez egy 1 km-es darab becsapódásakor 10^{28} erg energia felszabadulását jelent, vagyis 250 ezer megatonna TNT felrobbanásával ekvivalens. 5 km-es méretű darab becsapódásánál pedig 600-szor több energia szabadul fel.

A várható következmények

Az üstökös-magok a Jupiter légkörébe belépve az atmoszféra ellenállásától lefékeződnek, és felizzanak épp úgy, mint ahogy a földi légkörben is felizzik egy meteor vagy bolida, hosszú, forró, ionizált levegőcsikot hagyva az útja mentén. A forró gázcsőben akár több tízezer fokok is lehet a hőmérséklet. Leszakadnak, lerobbannak róluk darabok. A kisebbek néhány másodperc alatt elpárologhatnak, talán még a felhőréteg felett, de az is lehet, hogy egy részük a felhőréteg alá is lejut. A nagyobbak biztosan lejutnak a felhőréteg alá, és ott nagy robbanással teljesen szétesnek. A keletkező forró gáz gomba alakú felhője a becsapódási hely felett magasra feltornyosul. A környező légkört felmelegítve vízszintesen is terjed a hatás. Gyorsan hűl a gáz, ezért inkább infravörösben és mikrohullámon várható,

hogyan észlelni tudjuk, amikor a becsapódási hely befordul a Föld irányába. A robbanás által kiváltott lökéshullám oldalirányba, de lefelé is terjed, és a szeizmikus hullámok — akárcsak a Földnél — a bolygó belsejének különböző határfelületeiről visszaverődve a becsapódás helye körül jelentkeznek. Emiatt a Jupiteren a becsapódási hely körül gyenge lokális hőmérsékletnövekedés várható. A lökéshullám kiválthatja az egész bolygótest oszcillációját is, amelynek megfigyelése a csillagszeizmológia módszerének alkalmazását tenné lehetővé a Jupiter esetében. Az eddigi megfigyelési pontosság még nem elegendő ahhoz, hogy a Jupiter jelenlegi gyenge oszcillációt kimutassa. De ha az üstökös becsapódása által keltett mesterséges rengés „rezgésbe hozza” a bolygót, mint egy ütés a dob, az sokat segíthet a Jupiter belső szerkezetének a vizsgálatában. Bár, minthogy ez a sorozatütés különböző helyeken jelentkezik, hatásuk szuperpozíciója bonyolult és érdekes eredményre vezethet. Ezért a kérdéses időszakban mindenképpen célszerű nagy pontossággal és folyamatosan figyelni a bolygó fényességét.

Érdekes kölcsönhatásra lehet számítani a Jupiter erős mágneses terével is. Az üstökösök elhagyott pora a Nap ultrabolya sugárzása és a Jupiter sugárzási övezetében fogva tartott, nagy energiájú töltött részecskék bombázása következtében nagy valószínűséggel elektromosan feltöltődik, és mozgását ezek után már a Jupiter mágneses tere is befolyásolja, nemcsak a gravitáció. A töltött porszemcsék elindulnak a Jupiter mágneses erővonalai mentén, mintegy kiemelkedve az üstökös pályasíkjából. A mágneses erővonalak igyekeznek ezeket magukkal vinni, korotációra kényszeríteni. Ez a Szaturnusz gyűrűjének küllőihez hasonló jelenséghez vezethet a belső magnetoszférában azon rövid idő alatt, amíg a porcsík még elég sűrűn egybemarad, és ott, ahol a mágneses tér még elég erős ahhoz, hogy a porszemcséket magával ragadja. Egy idő után a porcsík szétoszlik, ideiglenes tóruszt képezve a Jupiter körül. Vajon mekkora lesz az élettartama?

A szétrobbant és magasra került üstökösanyag szintén ionizálódik, és a magnetoszféra elektromos tere által felgyorsítva egy része a sugárzási övezetekbe kerülhet, megnövelve ott a nehéz ionok arányát. Érdekes lesz megvizsgálni, hogy hogyan változtatja meg a sarki fény erősségét és helyét valamint a Jupiter rádiósugárzásának forráshelyét és frekvenciáját a magnetoszférába betáplált gáz és por. Most ugyancsak az Io hold vulkánjai által a magnetoszférába betáplált anyag miatt az aurora tevékenység ott a legerősebb, ahova az Io holdon átmenő erővonalak futnak be. A kilométeres hullámhosszú rádiósugárzás szintén kapcsolatban van az Io holddal, az általa kidobott anyagból képződő tórusz külső része, illetve az aurora övezet egy része a forrás. Ezen utóbbi akkor kapcsol be, ha a Io annak mágneses hosszúságán halad át.

Ez a becsapódási esemény egyébként egy olyan kísérletnek felel meg a Jupiter magnetoszférájában, mint amit a Föld esetében AMPTE néven mesterséges holdról hajtottak végre. Ekkor ionokat lőttek ki a magnetoszférába, és mérték a mesterségesen létrehozott sarki fényt mindkét aurora övezetben. A *Naprendszer történetében ilyen esemény* valószínűleg nem először fordul elő. Jay Meloshnak, amikor meglátta a Shoemaker—Levy 9 üstökös fotóját, eszébe jutott, hogy néhány hold felszínén a Voyager szondák által készített felvételeken furcsa, egyenes sorban elhelyezkedő, azonos, 10–20 km átmérőjű kráterek sorozatát figyelték meg. Ezek



A Gipeul Catena nevű kráterlánc a Calliston.

eredetére még csak ötletük sem volt annak idején. Lehetséges, hogy azok is egy széttört üstökös vagy kisbolygó becsapódásának nyomai? Az azonos pályán mozgó, de egymástól már kissé széthúzó darabok megérkezése közötti idő alatt a holdak kissé elfordulnak a tengelyforgás következtében, és a darabok sorozata végigpásztazza a felszínt. Melosh és Schenk a Galilei-féle holdak közül a Ganymedes és a Callisto felszínét vizsgálta át, ezeken van ugyanis elég sok kráter. A Calliston 12, a Ganymedesen pedig 3 ilyen kráterláncot találtak (a 4. ábra a Callisto azóta már híressé vált Gipeul Catena nevű, 620 km hosszú kráterláncát mutatja).

Elképzelhető persze, hogy a többi bolygó közelében is szakadt szét így kisbolygó vagy üstökös, ezért a többi bolygó holdjait is érdemes ebből a szempontból végigvizsgálni.

A csillagászok világszerte nagy érdeklődéssel várják a július végi eseményeket. Éppen a jelenség egyedülálló jellege miatt még sok meglepetés várható.

A NASA egy planetáris adatbázist tart fenn, amelynek egyik alközpontja Magyarországon, az MTA Csillagászati Kutató Intézetében van. A Naprendszer kisebb égitestjeire, így az üstökösökre vonatkozó adatokat tartalmaz ez az alközpont, és egyben ellátja az európai megfigyelőket a legfrissebb információkkal, illetve összegyűjti, és hozzáférhetővé teszi majd a becsapódással kapcsolatban készült európai megfigyeléseket a kutatók számára. Idén nyáron üstökösszezon lesz uborkaszezon helyett.

Illés Erzsébet

A Föld mint égitest

Nekünk — Föld-lakóknak — természetes, hogy olyan a Föld, mint amilyen. Egy eszkimó nem csodálkozik el a jégvilágon, egy beduinak nem csoda a sivatag, de fordítva igen. Kívülről nézve a Földet — a többi bolygó tükrében — azonban sok „csoda” fedezhető fel rajta, s így talán jobban megértjük azt is, hogy mi nem természetes, meg azt is, hogy ami van, az miért olyan, amilyen.

A Voyager 2 — ez a csodálatos kis robot, amely ikertestvérével együtt oly sok érdekességgel ismertetett meg bennünket a külső bolygók világát illetően — a bolygórendszer határáról visszanézett, és ahogy *Carl Sagan* megálmodta, búcsúzóul egy „családi fényképet” készített a Napról annak összes bolygóival együtt. Ez a fénykép nem olyan látványos, mint azok a képek, amelyek bolygóközelben „teleobjektívvel” készültek, de reálisan mutatja, hogy milyen parányiak is ezek az égitestek az űr óriási méreteihez képest. Hogy ez a kilenc bolygó micsoda irdatlan térrészt jár be a Nap körül — vagyis, hogy milyen nagy a Nap „felségterülete” —, világosan látszik abból, hogy ha ezt a térrészt egyetlen fényképen szeretnénk bemutatni, akkor szinte láthatatlanná törpül az a néhány „óriási” anyagcsomó, amelyek egyike nekünk az egész világ, a mi kék bolygónk, a Föld.

Negyven évvel ezelőttig ezt a családot jóformán csak ilyen kis fénypontokként ismertük — kivéve természetesen a miénket, amelynek felszínét bejártuk, belaktuk, és azt hittük, hogy nagyon jól ismerjük is. Azt hittük, hogy beláthatatlanul nagy, végtelen időig elég lesz nekünk embereknek. Nos, egyre inkább kérdéses, hogy ez az elképzelés megfelel-e a valóságnak.

A többi kis fénypontról — vagyis bolygóról — korábban csak annyit tudtunk, hogy mozog, és hogy hogyan mozog a Nap körül. Sőt, az egyik mozgásából még azt is meg tudtuk mondani, hogy van még egy másik is, amelyet addig nem ismertünk: éppen tavaly volt 150 esztendeje, hogy *Le Verrier* számításai nyomán *Galle* felfedezte a Neptunuszt. A bolygótestek által visszavert napfényt hullámhossz szerint analizálva meg lehetett mondani, hogy milyen anyag van a felszínükön

vagy légkörükben. Meg tudtuk mérni, hogy fényességük változik-e, s ebből a légkörrel nem rendelkezők esetében felszínük fényvisszaverő-képességének egyenletlenségeiből azonnal adódott a tengely körüli forgás ideje. A csillagászok ugyan elnevezték őket, de a név nem mondott semmit még nekik sem.

A Naprendszer mint kozmikus laboratórium

S jött az űrkorszak. Egyre gyorsuló ütemben táult az a tér, ameddig szondáink eltávolodtak a Földtől, s egyre nagyobb távolságból láttuk, hogy Földünk milyen kicsi. A Föld körüli űrhajókról még a fél eget eltakarta, de az Apollo program asztronautáinak már a Föld „kelt fel” a Hold egén, már a Föld mutatott „holdfázisokat”, már egyértelműen égitestként viselkedett, és nem „földként”, amelyen járunk.

A szédületes fejlődés az űrkutatásban műszereinket először csak a Holdig, majd a Marsig, aztán a Vénuszig, majd a Merkúrig juttatta el, de közben már megkezdődött az elindulás kifelé, az óriásbolygók világába (1971–72, Pioneer 10, 11). A 70-es évek elején egy egyetemista számítógépes „játékából” jött a felismerés, hogy most a bolygók olyan szerencsésen helyezkednek el, hogy egyetlen szondával végig lehetne látogatni valamennyit. Hát mire a szervezés, a technika, a pénz megmozdult, a bolygók is arrébb mozdultak egy kicsit, és a „grand tourból” a Plútó lemaradt. De így is „grandiózus”, ami megvalósult. A két Voyager szonda a Pioneer 10 és 11 által „feltérképezett” gravitációs teret felhasználva lendült egyik óriástól a másikig, s közben mért, fotózott, s jelek millióit küldte „haza”, a Földre. És minden működött rajta, úgy, ahogy a mérnökök megálmodták. Szinte eszünkbe sem jutott, hogy lehetne ez másképp is. (Azóta már tudjuk, hogy lehetne. A Fobosz szondák csaknem, a Marsz'96 és a Mars Observer pedig teljesen elveszett, a Galileo csak részben működik. De sérülten is teljesíti feladatait, s micsoda eredményeket produkál!)

És a nevek, amelyeket azelőtt csak a csillagászok ismertek, egymás után egyeniséggé váltak, s most már nemcsak a csillagászoknak mondanak valamit. A sok-sok információból pedig a 80-as évek végére fokozatosan előállt egy csodálatos „laboratórium”, amelyben a négy óriás gázbolygó mellett a Földdel együtt 26 kérges test állt rendelkezésre, amelyeket tanulmányozni lehet. Ez a földtudományokban is lehetővé teszi az összehasonlító vizsgálatokat és a „kísérletezést”, amelyet a fizikusok és a vegyészek laboratóriumaikban mindig is végeztek: vagyis, hogy megváltoztatva a feltételeket megnézik, hogy hogyan változik az eredmény. Természetesen ebben a kozmikus laboratóriumban azért nem olyan egyszerű a helyzet, mint a földiben, mert nem lehet akármilyen feltételeket „előállítani”, nem lehet a paramétereket tetszőleges kis lépésekben változtatgatni. De azért mégis laboratórium ez, amelyben a korábban a Földre megalkotott elméleteket, modelleket — legyen az akár a légkörére, akár a magnetoszférájára vagy a belsejére vonatkozó — ellenőrizhetjük. Van persze néhány olyan jelenség is, amely sehol máshol nem található meg, csak a Földön, ezért ezek nem kontrollálhatók, és ez nemcsak az élet jelenségére vonatkozik.

Először is az űrből sok mindent megláttunk a Földön, amit lentől nem ismertünk fel. Hiába, a „fától nem látszik az erdő”. Például egyértelművé vált sok, feltűnően kerek alakzat, amely kisbolygók becsapódásának a Föld felszínéről fel nem ismert nyoma lehet. Továbbá az űrből könnyen fel lehetett ismerni, hogy van egy lineamentum-rendszer (repedések, vetődések, gerincek, hegyek) a volt Szovjetunió területén, amely a Föld forgástengelyéhez rendezett — s ezt az akkori ország nagy mérete miatt globális jelenséggént kell értelmezni. A *jelenlegi* forgástengelyhez rendezett ez a rendszer, pedig az elmúlt évmilliók alatt is volt pólusvándorlás, kontinensvándorlás, s így a forgástengely és a kontinensek kölcsönös helyzete változott. Azt mondják, a rendszert a Hold árapályereje hozza létre a kéregben a maga feszültségkeltő hatásával. Vajon mennyi idő alatt „veszi tudomásul” egy kéregdarab, hogy hova sodorta a sors (vagy a köpenyáramlás), és merre van hozzá képest az új forgástengely? Vajon új lineamentumok keletkeznek-e ilyenkor, vagy a meglévő milliányi és mindenféle irányú repedés, vető közül csak azok „szólalnak meg”, aktivizálódnak (ezek a megfelelő „receptorok”), amelyek megfelelő irányba állnak? A többi meglévő repedés talán „tektonikai hallgatásba burkolózik” (betakarja és láthatatlanná teszi őket az üledék?) arra az időre, amíg nem ők állnak az éppen aktuális forgástengelynek megfelelő irányban? Az óriásbolygók holdrendszerén belül mindenütt működnek árapályerők, és sok égitesten van repedésrendszer (Europa, Ganymedes, Enceladus, Rhea, Dione, Tethys, Ariel, Titania, Triton). Az elmélet tehát sok példán ellenőrizhető.

A légkörök laboratóriuma

A Földnek elég jelentős légköre van, amelynek nyomása és hőmérséklete folyadékszféra jelenlétét teszi lehetővé, még hozzá nem is akármilyet, hanem hidroszférát, amely az élethez nagyon fontos. S talán a vízburoknak is köszönhető — mint ezt az Europa hold ritka oxigénlégkörének példája is most mutatja nekünk — hogy fejlődésének korai szakaszában légkörében oxigén halmozódott fel (amelynek mennyiségét az élet keletkezése után a növények még gyarapították). A vizet ugyanis az ultraibolya sugárzás bontja, s a hidrogén mint legkönnyebb elem megszökik, az oxigén pedig két atomból — vagy ha elég sok van belőle, az ultraibolya sugárzás hatására három atomból — álló molekulákat hoz létre. A Marson is megtalálták az ózont, azonban ott nem elég gyakori molekula ahhoz, hogy az ultraibolya sugarak zömét feltartóztassa. Azok le is hatolnak a felszínig, a vízgőzt elbontják, a hidrogén elsökik. A Vénuszról a magas felszíni hőmérséklet miatt ez a mechanizmus óceánnyi mennyiségű vizet tudott eltüntetni. A Földet viszont a kialakult ózonpajzs már megvédi. Az a hidegcsapda ugyanis, amely miatt a vízgőz lecsapódik és visszahull a felszínre, az ózonpajzs alatt foglal helyet. Tehát a vízgőz-molekulák nem jutnak fel olyan magasra — legalábbis a zöme nem — ahol az ultraibolya sugárzás elbontaná őket. Ennek köszönhető kivételes helyzetünk, mert van csapadék a Földön, aminek kellemes következményei vannak. A lehulló csapadék ugyanis egyrészt a talajt megnedvesítve nem engedi, hogy a szelek szárnyán nagy mennyiségű por kerüljön a levegőbe. Másrészt a csapa-

dékképződés jég-magként felhasználja, illetve kimossa a fotokémiai reakciók által létrehozott aeroszoloikat, illetve a légkörbe a szél által felkavart port, és nem lesz miatta átlátszatlan globális szmog, mint a Titánon, illetve globális porvihar, mint a Marson.

A Föld légköre főleg nitrogént és oxigént tartalmaz. Ilyen légkörök érdekes módon nem a többi Föld-típusú bolygók világában, hanem a külső Naprendszer bizonyos holdjain fordulnak elő. Nitrogén-légkört a Titánon, a Tritonon és a Plútón, tehát messze kint találtak csak a szondáink, oxigén jelenlétét viszont az Europa holdon regisztrálta a Hubble-űrtávcső. Ez az égítést is a vízének köszönheti oxigén-légkörét, hiszen abból szabadul fel. Ott azonban a Nap ultraibolya sugárzásához lényegesen hozzájárulnak a Jupiter magnetoszférájában nagy sebességgel mozgó töltött részecskék is, amelyek szintén bontják a vizet.

A Mars és a Vénusz légkörében a szén-dioxid dominál, ami az élet szempontjából kedvezőtlen. Hogy ez az összetevő a Föld légkörében nem olyan nagy jelentőségű, szintén elsősorban a víznek (meg a biomasszának) köszönhető. Víz jelenlétében ugyanis mészkő formájában a szén-dioxid a kéregbe kötődik, és ott marad mindaddig, amíg vagy a vulkánok vagy egy magas hőmérsékletre megszaladt üvegházhatás „ki nem engedi a szellemet a palackból”.

A „laboratóriumban” nincs kontroll-lehetőség a hidroszféra és a légkör kölcsönhatásának a vizsgálatára. Pedig ez az éghajlat hosszabb és rövidebb távú alakulására biztosan hatással van. A rövidebb távú befolyásra nagyon jó példa az El Nino jelenség, amelynek globális voltát már ki lehetett mutatni. A hosszabb távú hatásra pedig az olyan időszakok fellépését említhetjük, amikor is a meleg tengeráramlatok nem hűlnek le kellő mértékben, ezáltal nem tudnak lebukni az óceán mélyére, s ezzel az egész óceáni medence áramlásrendszere megváltozik, s vele a Naptól kapott hő újraelosztása, tehát az éghajlat is.

A mágneses terek és a légkörök kölcsönhatásának laboratóriuma

A Föld vasmagjának külső olvadt része cirkulációjával mágneses teret épít fel, méghozzá nem is akármilyet, hanem elég erőset! A négy óriásbolygón kívül csak a Földnek van természetes rádiósugárzása. Ezt persze csak üreszközökkel, kívülről fedezhettük fel, hiszen az ionoszféra kívülről sem enged be bizonyos hullámhosszúságú rádióhullámokat ugyanúgy, ahogy belülről sem kifelé (ezt a rádiózásban erősen ki is használjuk).

A „laboratóriumban” megtalálható a Föld lényeges légkörrel és erős, a légkört védő mágneses térrel, a Vénusz nagyon sűrű légkörrel, de mágneses tér nélkül, a Mars ritka légkörrel és nagyon gyenge mágneses térrel, és a Merkúr légkör nélkül, de mágneses térrel. Kell ennél szebb? S mindezek a Nap magnetoszférájába, a napszélbe vannak beágyazva — nagyon is érzékelve a naptevékenység változását. (Sokat írhatnánk a 200 km feletti légkör kiterjedéséről, tulajdonságairól, óriási változékonyságáról, a magnetoszférával való kölcsönhatásáról a naptevékenységgel kapcsolatban — ezeket szintén csak az űrszondák segítségével ismerhettük fel.) És akkor jön a Galileo szonda, és felfedezi a Ganymedes mágneses terét, amely

a Jupiter magnetoszférájába van beágyazva! Vajon a naptevékenység a Jupiter magnetoszférán keresztül befolyásolni tudja-e a Ganymedes magnetoszféráját?

A Föld magnetoszférája teljes egészében tartalmazza a légkört, védi azt a napszél szétziláló hatásától. Ugyanakkor a Földdel majdnem azonos méretű Vénusz légköre nem kap védelmet, mert nincs mágneses tere. Azt mondják, azért, mert nagyon lassan forog a tengelye körül (243 nap), s ez nem kedvez olvadt vasmagjában a kellő sebességű cirkulációk kialakulásának, amelyek a meglévő gyenge mágneses teret felerősítenék. A Marsnak sincs lényeges mágneses tere, pedig olyan gyorsan forog, mint a Föld. Azt mondják, azért, mert kicsi, gyorsan lehűlt, és ezért már nem olvadt a vasmagja. Ugyanakkor a Marsnál kisebb, és nála lassabban forgó Ganymedes esetében a Galileo szonda mégis talált belső eredetű mágneses teret és olvadt vasmagot. Miért?

A kérgék és köpenyek „laboratóriuma”

Ebben a laboratóriumban is Földünket szeretnénk a többi égitesthez viszonyítva vizsgálni. Földünk a kéreggel bíró égitestek közül a legnagyobb a Naprendszerben. Olvadt köpenyén úszó kérgé kétféle: kontinentális és óceáni. Ez az első hallásra természetesnek tűnő megállapítás a Föld nagyon különleges helyzetét jelzi az összes többi kérges bolygótesttel szemben.

Kialakultak ugyanis elsődleges kérgék a bolygótesteken, ezek az ősi magma-óceánokból felszínre került legkönnyebb anyag megszilárdulásával jöttek létre. A legtöbb kis égitest kérgé ilyen, de ilyen a Hold és a Mars felföldjeinek világos színű kérgé is. A másodlagos kérgék az ez után megmaradt olvadékok felszínre ömlésével és megszilárdulásával jöttek létre (a Hold sötét foltjai, hasadékok mentén felszínre került anyagok, például a Ganymedesen). A Földön azonban harmadlagos kérgé is kialakult a lemeztektonika következtében, amely fokozatosan új kérget hoz létre és a régít megsemmisíti. A könnyebb, kontinentális kéregről az erózió által lehordott hordalék a tengerfenékre kerülve az óceáni lemezzel együtt a szubdukciós zónákban betolódik a köpenybe, megolvad, a köpenyanyagba keveredik, átdolgozódik, majd a vulkánok által a felszínre hozva és megszilárdulva jön létre a harmadlagos kérgé.

Ma még nem tudunk más égitesten működő lemeztektonikáról, bár kéregrepedést, sőt egymáshoz képest kéreglemezek eltolódását is megfigyelték néhol, ezen utóbbit transzform vetők léte igazolja az Enceladuson, a Ganymedesen és a Tritonon.

Korábban azt hitték, hogy a Vénuszon találunk még a földihez hasonló lemeztektonikát — azon a bolygón, amely méretét tekintve nagyon hasonló a Földhöz. Ezt azonban az első mérések nem támasztották alá. Hiányzott ugyanis róla a lineáris töréshálózat, amelyet a tenger alatti hátságok és a mélytengeri árkok képviselnek a Földön. Azt mondták, azért nem működik ott a lemeztektonika, mert a Vénuszon nincs víz, amely a földi lemeztektonikában a kenőanyag szerepét játssza. A közelmúltban a Magellan szonda még pontosabban, a 100 m-t is elérő felbontással térképezte fel a Vénusz felszínét (ezzel már pontosabban ismerjük a

Vénusz-felszínt, mint a Föld tengeraljzatát). E térképek és a gravitációs mérések azt mutatják, hogy a Vénusz kérge a köpeny minden „rezdülését” jelzi, „megmondja”, hogy mi megy alatta végbe a köpenyben, ugyanis nagyon jó a korreláció a topográfia és a gravitáció között. Továbbá azt a következtetést is le lehetett vonni, hogy a Vénuszon is vannak táglási centrumok, mint a Földön az óceán-középi hátságok, mégpedig a nagy vulkáni hegyeket keresztülszelő hasadékvölgyek lennének ezek (például a Devana Chasma a Beta hegységnél), és kéregmegsemmisülési helyek (szubdukciós zónák, mint amilyenek a Földön a mélytengeri árkok), mégpedig az óriási koronák vagy kerek hasadékok (chasmák) bizonyos ívei lennének ezek. E táglási centrumok és kéregbetolódási helyek azonban nagyon közel esnek egymáshoz, sokkal közelebb, mint földi megfelelőik. Vagyis a Vénuszon egyfajta „képlekenylemez”-tektonika működik, amely nem a földivel azonos módon, de a harmadlagos kéreg létrehozásában kb. azonos hatásokkal dolgozhat.

A Vénuszt megismerve most már látjuk, hogy a Földön elsősorban az óceáni kéregnek vannak különleges tulajdonságai. Ez a vékony, mindössze 6–8 km vastag földi óceáni lemez abban különleges, hogy a feszültséget deformálódás nélkül, nagy távolságra tudja továbbítani — a táglási centrumoktól a nagyon messze lévő mélytengeri árkokig. Vagyis a feszültség nem oszlik el diffúz módon rajta, mint a Vénusz kérgénél vagy mint a földi kontinens-kéregnél, hanem teljes egészében továbbítódik a betolódási helyekre, és csak ott hajlik meg az óceáni kéreg. Ez azt jelenti, hogy ez a kéreg lecsatolódott az alatta lévő köpenyről: a topográfia nincs korrelációban a gravitációval.

Érdekes a Földön a kétféle kéreg viselkedése. Az óceáni kéreg merevlemez-tektonikát tesz lehetővé, a kontinentális kéreg pedig képlekenylemez-tektonikát: a kontinentális kéreg megredőződik, mintha akadozna a csúszása. Pedig a Földön van víz, amely mindkét kéreg csúszását lehetővé tenné. Miért van ez a kétféle viselkedés?

A Földön több ciklust járt végig a lemeztektonika, miközben összehordta, majd újra összetörte és széthordta a kontinenseket. A Földön kívül víz csak az Europa holdon van óceánnyi mennyiségben. Igaz túl sok is: az Europa 1–2 km vastag jégkérgé alatt 100 km mély óceán lehet. De a kisebb gravitáció miatt ennek az óceánnak az alján ugyanakkora lehet a nyomás, mint a földi óceánok mélyén. A Galileo szonda képei alapján a Jupiter ezen holdján olyan összetöredezett, szétűszott, majd újra összefagyott jégfelszín tárul elénk, mint amilyen a földi sarki óceánokon, ami azt jelzi, hogy nincs fenéig befagyva és van hőtartaléka. Hát kíváncsi lennék ennek az Európának a tengeraljzatára! Vajon mutatja-e az a tartós merevlemez-tektonika nyomát? Találunk-e rajta sok-sok transzform vetőt? Mert ha igen, akkor ezen az égitesten lehetne ellenőrizni a lemeztektonikára vonatkozó hipotézist a víz kenőanyag-szerepét illetően.

Az árapályfűtés szerepe

A Ganymedes rezonanciában mozog az Ioval és az Európával a Jupiter körül, s emiatt mindhárom hold pályája kényszerűen excentrikussá alakul a másik két

hold gravitációs hatására. Az óriási méretű Jupiter az excentrikus pályán mozgó holdakban nagy árapályfűtést hoz létre; annál nagyobb, mennél közelebb van egy égitest a Jupiterhez. A Jupiter holdrendszerében az árapályfűtés leglátványosabb megnyilvánulása az Io hold nagyon aktív vulkanizmusa. Azt mondják, hogy emiatt az árapályfűtés miatt olvadt az Io köpenye és vasmagja, de a Ganymedes vasmagja is, illetve az Europa vízköpenye is. A Galileo képek alapján arról is meg van győződve a tudományos közvélemény, hogy az Europa szilikátköpenye is olvadt, és hogy óceánjának aljzatán vulkanizmus működik. Gyanítja, hogy a földi óceánok mélyén talált „fekete füstölőkhoz” hasonló vulkáni kúrtók körülihez hasonló élet lehet ott is.

Lehetséges, hogy a Föld bolygó fejlődéstörténetében is nagyobb szerepe volt az árapályfűtésnek, mint ahogy azt általában hiszik? Nem az erősségére gondolok itt, hanem arra, hogy esetleg a Föld valamely paramétere éppen olyan állapotban van, hogy ez a kis többletfűtés már jelentős szerepet kaphat. Ilyen, a kritikus érték közelében lévő esetre a „laboratóriumban” van példa: a Jupiter két külső Galilei-holdja, a Ganymedes és a Callisto. Ezek a holdak majdnem egyforma nagyok, ugyanolyan távolságban vannak a Naptól, tehát keletkezési feltételeik azonosak voltak, mégis a Ganymedes felszíne erős geológiai aktivitásról tanúskodik, míg a Callisto teljesen halott, és soha nem is volt más, mint a kozmikus becsapódások passzív célpontja. Azt mondják, hogy a hőmérséklet egy fázismenethez tartozó kritikus érték alá, illetve fölé eshet ebben a két égitestben, s ez okozhatja ezt a viselkedésbeli dichotómiát.

A Hold által a Földben kiváltott árapályfűtést elhanyagolhatónak tekintik a radioaktív fűtéshez képest, ami biztosan így is van. Az a tény azonban, hogy a Föld kérge nem vastagodik túlságosan gyorsan, hanem éppen olyan állapotban marad sok-sok cikluson keresztül, hogy a lemeztektonika tartósan működhessen, elgondolkoztató. Talán annak a kis többletfűtésnek lehet ebben szerepe, amit a Hold (és a Nap) a Földbe árapályfűtésként betáplál. Sajnos ennek az ötletnek az igazi kontrolljára hiányzik a „laboratóriumból” a megfelelő kísérleti alany: nincs még egy gyorsan forgó, vizes bolygó hold nélkül (a Vénusz ugyanis lassan forog, és nincs víz rajta). Illetve nincs még egy olyan kettős rendszer, mint a Föld—Hold, ahol egy nagybolygó körül hozzá képest igen nagy tömegű hold kering, de a bolygón nem működik a lemeztektonika. A Plútó—Charon kettős nem megfelelő ellenőrzésül, mert egyrészt nagyon kicsi a bolygó (2300 km), másrészt azonos a forgási és a keringési idejük, vagyis mindketten kötötten keringenek, ilyenkor pedig nem lép fel a bolygóban árapályfűtés.

Miért jó, ha a többi bolygót is ismerjük?

A többi bolygó megismerése egy sor olyan kérdést vetett fel, ami a Földdel kapcsolatban nélkülük nem fogalmazódott volna meg, illetve nem ismertük volna fel, hogy miben különleges a Föld. S azok az elméletek, amelyeket a Földre kidolgoztak, kontrollálhatók máshol, más kezdőfeltételekkel, ezért a Föld jövőjére belőlük levont következtetésekben jobban bízhatunk, ha az elmélet tágabb para-

méertartományban is képes megmagyarázni a megfigyeléseket. Tehát a Naprendszer kutatása fontos saját Földünk jobb megértése szempontjából. A folyamatokat megértve — és most már nem extrapolációval — pontosabban tudjuk előre jelezni a veszélyes antropogén hatásokat is.

Amíg él az édesanyánk vagy egészségünk rendben van, addig észre sem vesszük, hogy milyen jó nekünk. Értéküket akkor tudjuk igazán felmérni, ha elvesztettük őket. Ha erre a felismerésre még meglétükkor rájőnnénk, nem folytatnánk „rablógazdálkodást” velük szemben, mint ahogy, sajnos általában tesszük.

A Földön jelenleg még nem fejlődik ki globális szmog és porvihar, megszaladt üvegházhatás, kénsaveső, globális jégkéreg, pedig mi emberek sok mindent megteszünk, hogy ezek előálljanak. Ezért lett napjainkra törékeny is a Föld, nemcsak kicsi! Sajnos, önmagunktól kell óvnunk! Én optimista szeretnék lenni; talán segít, ha előre felismerjük a veszélyeket, és talán leszünk olyan okosak mi, emberek, hogy „nem vágjuk magunk alatt a fát”. Ezért a felismerésért, tehát a Föld érdekében, van szükség úrkutatásra!

BOLYGÓTESTEK

A NAPRENDSZERBEN

Illés Erzsébet

tudományos főmunkatárs,

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete

illes@konkoly.hu

A cikkben bemutatom, hogy az 1960-as évek óta hogyan fejlődtek ismereteink a Naprendszer bolygótestjeit illetően, és mit tudunk ma róluk. Mondhatnánk szubjektívnek is, hogy miért a '60-as évektől tekintem át a témát. Az én pályafutásom ugyanis akkor kezdődött, tehát azóta van közvetlen élményem a Naprendszer-kép fejlődéséről. De tarthatjuk objektívnek is az okot, hiszen a '60-as években kezdődött a Naprendszer kutatása szempontjából is fontos úrkorszak.

Mit tudtak a Naprendszer bolygótestjeiről az 1960-as években?

Mindenekelőtt ismerték a pályáikat. Saját fénye egyik bolygónak vagy holdnak sincs, de láthatóak, mert a Nap rájuk eső fényét visszaverik. Helyzetük így megfigyelhető, és pályáik pontosan ismertek voltak az égi mechanika tudománya jóvoltából. A Nap körül keringő testeket bolygóknak, a bolygók körül keringő testeket holdaknak nevezték, és akkor még azt hitték, hogy ez lényeges különbséget takar. Azóta már tudjuk, hogy a testek geológiai fejlődése szempontjából ez nem fontos, ezért nem is teszünk különbséget a megnevezésben, és bolygótestnek nevezzük őket függetlenül attól, hogy pályájuk a Nap vagy egy bolygó körül húzódik-e. Bár meg kell jegyeznünk, hogy a holdak hőfejlődését befolyásolja, ha egy bolygó körüli holdrendszer tagjaként élük életüket.

Néhány nagyobbban a felszíni részletei ugyan megfigyelhetők voltak, de a legtöbb csak fénylő pont maradt még a legjobb távcsövekben is. Fényességük változásából azonban következtetni lehetett arra is, hogy elnyúlt alakúak, vagy nem egyenletes a felszínük fényvisszaverő képessége (albedója). E fényváltozásból a forgási periódust meg lehetett határozni. Furcsa módon voltak olyan, a távcsövekben kiterjedt korongot mutató bolygók, amelyeknek a forgását viszont nem ismerték pontosan, mert vagy túl közel voltak a Naphoz, és nehezen lehetett őket megfigyelni (Merkúr), vagy sűrű, globális, részleteket nem mutató felhő takarta el a felszínüket, mint a Vénusz esetében.

A pályák ismeretében meghatározhatók voltak a tömegek, ezek segítségével pedig a méret ismeretében a sűrűség. Tudták, hogy a belső négy bolygó sűrűbb, mint a külső négy, és nem értették, hogy mit keres a kicsi Plútó kilencediknek ott kint, az óriásbolygók után.

Ismertek voltak a tengelyhajlások, így tudták, hogy hol várható erős évszakos változás. Tudták, hogy melyiknek van sűrű légköre. Felfedezték a Mars poláris sapkait, amelyeknek a mérete változik a Nap körüli keringés folyamán.

Most az alkalmazott új módszerek szerint csoportosítva nézzük meg, hogy azóta mennyi minden derült ki bolygórendszerünkéről!

Hogyan gyűlték az új ismeretek?

Az űrszondák

Az űrszondák felfedezőútjai a bolygóközi térben ugyan nem jelentenek új módszert, mert a csillogászat mindig is „távérzékeléssel” dolgozott; az égitestek által kibocsátott vagy visszavert fény vizsgálatából vonta le következtetéseit. De már csak azzal is, hogy a szondák közelebb mentek, és jobb térbeli felbontással vizsgálták a céltárgyakat, sok újat mondtak róluk. Ráadásul azért, hogy a vizsgálat a földi légkörön kívülről történik, lehetőség nyílt más hullámhosszakon is megnézni őket, mint amelyek a Föld felszínéről észlelhetők.

Elrepülések

Az első megközelítések során a szondák pontosabban megmérték a bolygótestek tömegét és lapultságát. (Ez utóbbi rendszerint annál nagyobb, minél gyorsabban forog a bolygótest.) A szonda pályáját ugyanis megváltoztatja a test gravitációs hatása, és ennek a változásnak az eltérése az előre számítottól lehetővé tette a tömeg pontosítását. (Például ezt tették a Pioneer 10 és 11 szondák az óriásbolygóknál.) A tapasztalat alapján aztán a következő szondák pályáit már a felszínbe ütközés veszélye nélkül közelebb lehetett vezetni a bolygókhoz. Ezt az utat követték a Voyagerek az óriásbolygóknál. Ennek következtében nemcsak azért lehetett jobb felvételeket készíteni, mert az öt évvel később indított szondákra jobb technikai eszközök kerülhettek, hanem mert közelebből is készülhettek a felvételek.

Bolygók körüli űrszondák

Sokkal részletesebb vizsgálatot tett már lehetővé, ha az űrszonda egy-egy bolygó köré került mesterséges holdként. Eleinte csak a Föld, majd a Hold (1966), később a Mars (1971), a Vénusz (1975), a Jupiter (1995) és legutóbb az Eros kisbolygó (2000) esetében így lehetővé vált olyan globális, vagyis az egész bolygótestet lefedő térképek készítése,

amelyek megmutatják a bolygótesten belüli tömegeloszlást, a felszín magasságviszonyait, a mágneses tér szerkezetét és annak térbeli és időbeli változásait a bolygótest körül. A különböző hullámhosszakon készült felmérések kombinációiként geológiai térképek is készülhettek. Egyébként egy szondát idegen égitest körül keringési pályára állítani nem könnyű feladat, mert az égitestek közelről már nem pontszerűen viselkednek, gravitációs terük már nem gömbszimmetrikus, és különösen egy olyan elnyúlt kicsi testnek, mint az Eros kisbolygó, nagyon furcsa a gravitációs tere.

Már a megközelítések is, de még inkább a bolygó körüli keringés lehetővé tette a bolygótestek környezetének a vizsgálatát. Ha a bolygó környezetében időben hosszabban lehetett mérni a mágneses teret (irány és nagyság szerint is), az megmutatta, hogy a bolygótestnek van-e „természetes dinamó” hajtotta, saját mágneses mezeje, ami arra utal, hogy van olvadt vasmagja (a holdak közül eddig egyedül a Ganymedesnél sikerült ezt kimutatni). Vagy van-e indukált mágneses tere (eddig csak a Jupiter Europa és Callisto holdjai esetében mutatták ki), ami azt jelzi, hogy elektromosan vezető, globális olvadt réteg van valahol a hold belsejében. Míg a gravitációs tér a test differenciálódásáról tud információt adni, addig a mágneses tér léte olvadt anyagról hoz hírt a test belsejéből.

Az égitest környezetében az elektromosan töltött részecskék számlálása holdak vagy gyűrűk létre utalhat. A holdak vagy gyűrűk zavaró hatása bizonyos távolságokban ugyanis hiányt okoz a részecskék számában. A Pioneer 10 és 11 szondák mérései alapján így fedezték fel a Jupiter gyűrűjét, amelynek létét a Voyager szondák képei erősítették meg. A töltött részecskék a Jupiter magnetoszférájában öt Jupiter-sugárnyi távolságig együtt forognak a bolygóval (korotáció). Onnantól kezdve azonban fokozatosan lemaradnak. Ennek okát ma mártudjuk.

Az Io vulkánjaiból kidobott rengeteg port – amit a Nap ultraibolya sugárzása ionizál – a magnetoszféra nem képes azonnal a korotáció sebességére felgyorsítani, de felkapja, és szétszórja az egész Jupiter-rendszerbe. A mágneses tér gyorsabban forog, mint ahogy a holdak Kepler-pályájukon a bolygó körül haladnak – így a ként is a többi hold „követő” (vagyis a kötött keringő hold pályamozgása során hátul haladó) oldalára csapja, ahol az a holdak anyagával kölcsönhatva például az Európán óriási kénsavmezőket hoz létre.

A bolygók környezetében található porszemcsék számlálása szintén a Jupiter környezetéről hozott érdekes eredményeket. A Nap megfigyelésére felbocsátott Ulysses szonda a Jupiter mellett haladva ugyanis időnként a porszemcsék számának nagyon erős megnövekedését tapasztalta. A nyugalmi időben szokásos öt szemcsével szemben húszezer porszemét is regisztrált másodpercenként. A Jupiter körül keringő Galileo szonda mérései alapján az USA-ban élő Horányi Mihály és munkatársai aztán megtalálták a magyarázatot. Világossá vált, hogy ez az Io vulkánjai által kidobott por, amely a Jupiter mágneses terének segítségével nemcsak az egész Jupiter-rendszerbe terül szét, hanem a Nap mágneses terének segítségével kijut az egész Naprendszerbe is, sőt a semleges komponens a csillagközi térbe is kikerülhet.

A bolygótestek körül keringő szondák a saját maguk által kibocsátott vagy a Nap gammasugárzásának hatására kilökődött neutronok számlálásával a felszín anyagára tudnak következtetni (gamma-spektroszkópia). Például a Clementine szonda így próbálta megerősíteni a földi radarokkal kapott korábbi eredményt, miszerint a Hold pólusain a kráterek állandóan árnyékban lévő belsejében valószínűleg dér formájában vízjég van jelen. Hasonló módszerrel mutatta ki a Mars Odyssey szonda a Mars talajának felső egy méterében lévő vízjeget a pólusok környékén.

Sima leszállások

Még részletesebb, lokális vizsgálatokat tett lehetővé az, amikor az űrszondák simán leszálltak egy-egy égitest felszínére, és helyben vizsgálhatták azokat. Ez először 1966-ban a Holdnál történt meg, majd 1970-ben a Vénusznál (Venyera 7), 1971-ben a Marsnál (Marsz 3), majd 1995-ben a Jupiternél (a Galileo szonda leszálló kapszulája elsőként hatolt be egy óriásbolygó légkörébe), 2001-ben pedig az Eros kisbolygónál (a NEAR szonda, miután elsőként állt pályára egy kisbolygó körül, leszállt annak felszínére). 2004 nyarán a Titán holdra próbál leereszkedni a Szaturnusz rendszeréig küldött Cassini szonda egy egysége, a Huygens leszállóegység.

Hogy melyik leszállás a nehezebb? Mind egyik egyformán nehéz! Az óriásbolygóknál a nagy tömeg miatt nagy a gyorsítás. Nehéz követelmény, hogy a légkörben a sűrűlődtől felizzó kapszula még mérjen is, és a Földre továbbítsa méréseit. A Mars ritka légkörében viszont nehéz megvalósítani, hogy elég nagy legyen a fékezőerő a sima leszálláshoz, és a szonda ne csapódjon a talajhoz. A Vénusz 90 atmoszféra nyomású, 470°C hőmérsékletű, pokoli légkörében olyan, a kénsavfelhők maró hatását is kibíró érzékelők kellettek, amelyek még a felszínen is mének – mielőtt a túlmelegedéstől beszüntetnék a működésüket. A 25 km méretű, elnyúlt alakú Eros kisbolygó esetében olyan lassan kellett leszállni, hogy a szonda ne pattanjon vissza. A gyenge gravitációs tér miatt ugyanis egy, a Földön normálisnak számító ugrással 180-200 km magasra jutnánk fel, tehát, ha a leszállás nem abszolút simára sikerül, akkor a szonda esetleg teljesen kidobódik a világűrbe. A nem gömbszimmetrikus gravitációs tér miatt ugyanis nem biztos, hogy sikerül az égitestre visszaesnie, hiszen a „függőn” még közelítőleg sem mutatna mindentűt a felszínre merőlegesen. Ezekkel a szoros megközelítésekkel, keringésekkel és leszállásokkal az égi mechanika

nemcsak bebizonyította hatásosságát, vagyis képességét arra, hogy a valóságot jól írja le, de a csillagászati tudományok közül elsőként vált kísérleti tudománnyá.

Laboratóriumi vizsgálatok

Az űrszondák által főleg a külső Naprendszer bolygótestjeinél talált furcsaságok felgyorsították a laboratóriumi kutatásokat is. Korábban is vizsgáltak anyagokat – például meteoritokat – földi laboratóriumokban, de a nagyon ritka vagy sűrű, a nagyon hideg vagy forró és más összetételű légkörök felfedezése ráirányította a figyelmet arra, hogy a különféle anyagok viselkedését a földtől eltérő körülmények között is meg kell vizsgálni. Krio-laboratóriumok épültek, ahol különféle anyagok például a Neptunusz távolságában uralkodó 38–40 K-es hőmérsékleten is vizsgálhatók. És miután az űrszondák felvételei alapján egyértelművé vált, hogy a Naprendszer bolygótestjei ütközések sorozatával álltak össze, laborkísérletek indultak az ütközések mechanikájának, anyagátalakító hatásának tanulmányozására különböző anyagú lövedékek és céltárgyak esetében. Továbbá a napszél létének igazolásával és a magnetoszférák sugárzási övezeteinek felfedezésével összefüggésben kezdetét vette a különböző összetételű légkörök és bolygófelszínek besugárzásos átalakulásainak vizsgálata is laboratóriumi körülmények között.

A laboratóriumi vizsgálatok számára gazdag extraterresztrikus anyagmintát szolgáltatott az antarktiszi meteoritok. Japán kutatók ugyanis felfedezték, hogy az Antarktiszi fehér jégmezőin feltűnőek, könnyen észrevehetőek a sötét színű meteoritok. Ezek nagy számban találhatók például ott, ahol egy hegynék ütköző gleccser feltorlódik. Az esetleg már több tízezer év óta beágyazódott meteoritok a szublimáló gleccserjégből ki-kopva a felszínre kerülnek, és ott könnyen megtalálhatók. Ezzel a felfedezéssel az ismert meteoritok száma hamarosan kétezerről

tízezer fölé emelkedett, vagyis sokkal több Földön kívüli test összetétele, kristályos szerkezete és hőtörténete vált pontosabban megismerhetővé. Még világosabban kiderült, hogy milyen testek voltak a Naprendszerben, de az nem, hogy hol fejlődtek ilyenekké. A származási hely azonosítását végül az tette lehetővé, hogy bizonyos meteoritok laboratóriumban előállított szinképe döbbenetesen hasonlított bizonyos kisbolygók szinképeéhez. Ezáltal lehetett összekapcsolni az anyagi minőséget azzal a naptávolsággal, ahonnan a meteorit származik.

Az antarktiszi meteoritgyűjtés nemcsak azért érdekes, mert immár sokkal több meteorit áll rendelkezésre, hanem azért is, mert szelekciós effektus nélkül lehet gyűjteni őket, tehát pontosabban mutatják a kő- és vasmeteoritok arányát. A szárazföldön kövek között kutatva ugyanis a kőmeteoritok sokkal nehezebben találhatók meg, mint a vasmeteoritok.

Egyfajta meteorit azonban még nem került elő – mint erre Bérczi Szaniszló rámutatott –, mégpedig a jégmeteorit. A Naprendszer anyagának nagy részét ugyanis – főleg a Jupiter-pályán túl – illó anyagok jege, főleg vízjég alkotja. Ebből az anyagból érthető okokból még nincs mintánk a Földre esett és megtalált meteoritok között. A Föld melegebb vidékein azért, mert még ha egy jégmeteor el is éri olvadás nélkül a földpálya távolságát, és túléli a légkörön való áthaladást, a felszínre érve hamar elolvad. Tehát csak az Antarktiszi vagy az Arktiszi „mélyhűtője” lehet alkalmas arra, hogy valamедdig tovább megmaradjon. Ezeket azonban *ott*, a fehér környezetben nehéz megtalálni. Földi Tivadar szerint a földi jegeknél nagyobb ammóniatartalmuk miatt esetleg a dielektromos állandójuk különbsége segíthet a kimutatásukban.

Ha jégmeteoritokat eddig nem is találtak még az Antarktiszon, de találtak a Holdról és a Marsról érkezett meteoritokat. Ezek forrás-helyét a beléjük zárt gázok izotóposzerkezete alapján sikerült azonosítani: a Holdról hozott

minták laboratóriumi méréseivel, illetve a Viking szondák *in situ* marsfelszíni méréseivel összehasonlítva. Arra, hogy ezek a meteoritok hogyan tudták elhagyni a Hold vagy a Mars felszínét, megint csak a laborkísérletek adtak magyarázatot. Amikor ugyanis a becsapódásos kísérleteknél egyre csökkentették a becsapódás szögét, az egészen lapos becsapódásoknál (mint ahogy a „kacsázásnál” laposan dobunk kavicsokat a vízbe) az elgőzölgő anyag gyors gázkiáramlása fel tudott kapni kisebb darabokat. A bolygótest szökési sebessége fölé gyorsulva ezek aztán elszökhettek a bolygótesttől, és Nap körüli pályára állhattak. Előfordulhatott, hogy pályájuk néhány millió évnyi bolyongás után éppen a Földet keresztezte, és a meteorit a Földre érkezett. Ezáltal mintát kaptunk e távoli világok anyagából.

Újabban az antarktiszi „jégsivatag” után a homoksivatagokat is rendszeresen kutatják meteoritok után, és elég sokat találtak is a Szaharában. Ezek egyike, az NWA011 jelű, egy különleges meteorit, amelynek szülőtestjén vulkáni működés zajlott, de összetétele különbözik az eddig találtakétól, amelyek mind egyetlen szülőtest, a Vesta kisbolygó darabjai. Azért izgalmas az a kérdés, hogy ez a meteorit honnan érkezett, mert nincs túl nagy választék a Naprendszerben olyan égitestek között, amelyek egyrészt elég nagyok ahhoz, hogy vulkanizmus működhessen rajtuk, másrészt elég kicsik ahhoz, hogy elszökhessen róluk egy kő. Ha nagy szerencsénkre a Merkúr lenne ez az égitest, akkor szenzáció lenne, hogy már anyagmintánk is van róla.

Laboratóriumi körülmények között vizsgálták azt is, hogy nagy nyomáson és hőmérsékleten hogyan válik fémes tulajdonságúvá a hidrogén. A számítások korábban azt mutatták, hogy az átmenet hirtelen történik, ami arra utalna, hogy az óriásbolygók belsejében a molekuláris és atomos hidrogénzóna közötti átmenet határfelülettel történik. Ezzel szemben most a laborkísérletek azt bizonyí-

tották, hogy ez az átmenet fokozatos, tehát nincs határfelület, és a fémes viselkedés a középponttól sokkal nagyobb távolságig jellemző, mint azt a számítások mutatták. Ez azt jelenti, hogy a felszínhez sokkal közelebbi tartományokban is keletkezhet mágneses tér, és akkor érthető, hogy a magasabb rendű tagok olyan mértékig „kilógnak” a felszín fölé, mint ahogy azt a szondák magnetométereinek mérései a Jupiter esetében mutatták.

Vizsgálták továbbá nagy nyomásokon és hőmérsékleteken a víz és az ammónia fázisdiagramját. Kiderült, hogy a víznek is és az ammóniának is létezik fémes viselkedésű átmenete. Akkor pedig az Uránusz és a Neptunusz vízköpenyének áramlásával keletkező mágnesestér-komponens miatt érthető, hogy miért tér el olyan nagyon a bolygók esetében az illesztett mágneses dipól középpontja a tömegközépponttól.

A különféle radioaktív elemek és leányelemeik előfordulási arányainak laboratóriumi mérése segít megállapítani a koradatokat: például azt, hogy a Naprendszer keletkezését mennyivel előzte meg egy-egy szupernóva-robbanás, vagy hogy a meteorit az olvadékból mikor szilárdult meg, illetve – a benne található kozmikus sugárzási nyomokból – azt, hogy mennyi ideig keringett védtelenül a bolygóközi térben.

A távcsövek és a számítástechnika fejlődése

A megismerést elősegítő tényezők közül hamediknek említem a távcsövek (lásd Szabados László cikkét) és a számítástechnika fejlődését. A számítástechnika nélkül maga az űrkutatás sem születhetett volna meg. Most azonban csak azokat az eredményeket tekintjük át, amelyek közvetlenül hatottak a Naprendszer kutatására.

A nagyteljesítményű számítógépek megjelenése lehetővé tette a Naprendszer keletkezésének szimulációját – sok millió tömegpontból kiindulva, sőt kiterjedt testekkel is,

ahogy azok egymás gravitációs erőterében mozogtak, és ütközésekkel egyre nagyobb csomókká álltak össze. S ahogy a mesterséges holdak mozgásának fokozatos fékezése a földi felsőlégkörben felhívta a figyelmet a gázfékezés fontosságára, a kutatók rádöbrentek, hogy az ősi szoláris köd gáza is fékezte a benne mozgó, kialakuló anyagcsomókat, tehát azok is egyre zsugorodó pályán keringtek az egyre melegebb Nap körül. Ha pedig valahol egy nagyobb anyagcsomó – bolygócsíra – már létrejött, akkor az pályájának rezonáns helyein „megfoghatta” a hozzá kívülről közeledő kisebb anyagcsomókat. E rezonáns helyeken a kis planetezimálok nagyobb sűrűsége és közel azonos pályamenti sebessége lassú, lágy ütközéseket tett lehetővé. Vagyis egy bolygócsíra rezonáns helyein elindulhatott egy-egy újabb test – újabb bolygócsíra – növekedése. Innen származhat az ismert Titius-Bode-szabály a Naprendszerben.

A számítógépes modellek szerint – akár milyen kezdőfeltételekkel indul is el a számítás – mindig több száz bolygócsíra indul fejlődésnek mind a Föld típusú, mind az óriásbolygók „felségterületén”. Az összeállási időszak vége felé ezek csapódnak egymásba, ahogy egymás pályáját zavarják, perturbálják. Ahogy nőnek a bolygók, úgy lesznek egyre nagyobbak, katasztrófálisabbak az ütközések. Az összeállási folyamat végére mindig csak négy-öt bolygó marad meg. Ezeknél az utolsó nagy ütközéseknél a véletlennek már óriási szerepe van abban, hogy az ütközés kicsit kifelé vagy befelé löki-e a pályán a bolygót, hogy felgyorsítja vagy lefékezi a forgását, vagy esetleg a test nagyfokú precesszióba kezd az ütközés következtében. Ezek az utolsó, nagy ütközések felelősek a Titius-Bode-szabálytól való eltérésekért.

A nagy számítógépek lehetőséget adnak továbbá bonyolult modellek készítésére a bolygók magnetoszféráinak, légköreinek vagy olvadt belsejükben folyó áramlásoknak és ezek

kölcsönhatásainak leírására. Számítógépi szimulációk mutatták ki, hogy a Jupiter erős mágneses terében mozgó nagy mennyiségű nagyenergiájú töltött részecske a felszínbe ütközve olyan sok energiát ad át például az Europa holdnak, mint amennyit a radioaktív és árapályfűtés együttesen szolgáltat. Ez a nagy energiabevitel a holdak felszíni anyagát évtizednyi idő alatt kémiailag átalakítja. Ehhez az energiához képest az ütközések energiája a kémia szempontjából elhanyagolható, de hatása az átalakult anyag elkeverésében lényeges. Bár be kell ismerni, hogy a földi légkör viselkedésének megbízható előrejelzése túl nagy feladat a mostani legnagyobb számítógépek számára is.

A földi és űrtávcsövek sikeres működését is a számítógépes vezérlés teszi lehetővé, de a számítógépek az elkészített képek vizsgálatánál is óriási segítséget jelentenek. Például olyan szoftverek készültek, hogy egy-egy új hold felfedezése valamelyik óriásbolygó körül ma már rutinfeladatnak számít. A bolygó környezetéről különböző időben készített felvételek alapján a szoftver pillanatok alatt kikeresi az elmozduló fénypontot. S azzal, hogy a távcsövek halványabb fénypontokat látnak, ma már tízesével fedezik fel a két-három km átmérőjű kísérőket a Jupiter távolságában, a tíz-tizenöt km-t meghaladókat a Szaturnusz távolságában, vagy a harminc km-nél nagyobbakat az Uránusz távolságában. Ilyen kisebb testekből pedig láthatólag sok van az óriásbolygók környezetében, mert például a Jupiter holdjainak száma az elmúlt évben huszonnyolcra hatvan-egyre nőtt. Talán érdemes lenne most már meggondolni, hogy adott méretűnél kisebb holdaknak érdemes-e egyáltalán külön nevet adni. Egy odalátogató űrszonda pályája szempontjából az ütközés veszélye miatt azonban fontos ismerni minden kis égitest pályáját, ahogy a Föld környezetében az űrszemét darabjaiét is.

A távcsövek teljesítményének a növekedése 1992-ben egy egészen új égitesttípus

első tagjának felfedezéséhez vezetett. Ezeknek a Kuiper-övbeli objektumoknak felfedezésével pedig a Föld-szerű bolygók, a gáz-bolygók, illetve az óriásbolygók jégholdjai után megismertük a negyedik égitestípust a Naprendszerben: a még át nem alakult planetezimálokat (lásd Tóth Imre cikkét).

A szerencse

Mindezeken túl szerencse is segített, például abban, hogy a Plútót, amelyhez űrszondát eddig még nem indítottak, közelebből megismerhessük. Szerencse volt, hogy James Christy 1978-ban felfedezte: a Plútónak holdja van (Charon). A kettősség lehetővé tette a tömegek és a sűrűségek meghatározását. A Plútó tömege a korábbi becsléseknél sokkal kisebbnek bizonyult, és nyilvánvalóvá tette, hogy a Plútó nem is igazi nagybolygó. A hold felfedezése jókor történt, mert rövidesen úgy fordult a pályasíkjuk, hogy a Földről éppen átvonulni láttuk egyiket a másik előtt, és ezért a fedéssorozatot végig figyelemmel követték. A fedéskor egyrészt a felszínnek különböző részei voltak vizsgálhatók, vagyis albedó-térképet lehetett készíteni, és kiderült, hogy a Plútónak poláris sapkái vannak. Másrészt külön lehetett tanulmányozni a Plútó spektrumát, amikor a bolygó eltakarta a Charont. A közös spektrumból pedig kivonva a Plútó spektrumát, előállt a Charon színképe. A meglepő az volt, hogy míg a Plútó felszínén metánjeget találtak, addig a Charont főképp vízjég borítja. Ráadásul – felfedezése óta először – éppen ezekben az években járt a Plútó napközelpontban. Rövid ideig még a Neptunusznál is közelebb volt a Naphoz nagyon elliptikus pályáján. Napközelpontban a Plútó már légkört fejlesztett (mint egy igazi üstökös), amit nagyobb naptávolságon eddig még nem lehetett megfigyelni.

A Plútó-Charon kettős bolygó nemcsak abban hasonlít a Föld-Hold rendszerre, hogy a bolygóhoz képest nagyon nagy a holdja, hanem abban is, hogy a hold a bolygóhoz képest

illóanyagban nagyon szegény. Tehát lehetséges, hogy a Charon születését is egy óriási ütközéssel magyarázhatjuk, mint a mi Holdunkét? A Hold keletkezését ugyanis ma úgy magyarázzák, hogy az ősi Föld a Naprendszer keletkezésének utolsó nagy bombázási periódusában egy Mars méretű testtel ütközött. A nem centrális ütközés lefröccsentette az ősi Föld kérgét. A lefröccsent anyag gáz halmazállapotú összetevőjét a napszél kifújta, de a megfagyott szemcsék a Föld körül gyűrűként keringtek, majd lassan csomósodva a Holddá álltak össze. Ezért lenne száraz a Hold anyaga. A Plútó távolságában uralkodó 30-40 K-en a metán mint illó anyag eltűnt, de megmaradt a Charont alkotó, ott „száraznak” számító vízjég.

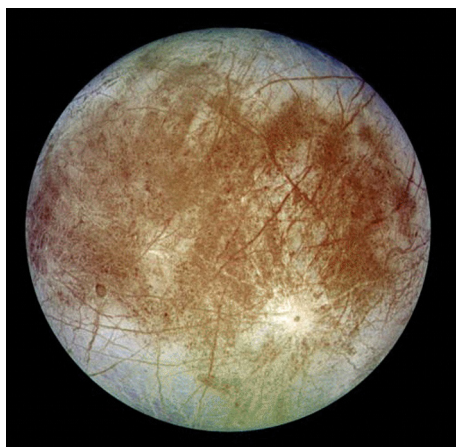
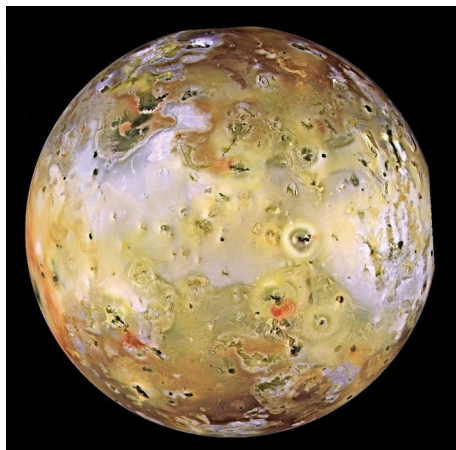
Meglepetések az új Naprendszer-kép kialakulása kapcsán

Végezetül foglaljuk össze, hogy az elmúlt negyven év során melyek voltak a legfontosabb új felismerések!

Az űrszondák felvételein a kerges bolygók felszínén talált rengeteg becsapódási nyom egyértelműen bizonyította, hogy a bolygók összeállása ütközések sorozatával történt. Viszont új volt az a felismerés, hogy az ütközések folyamán a véletlennek milyen nagy szerepe van a bolygók alakításában és további fejlődésében.

Korábban az sem volt ismert, hogy a rezonanciának ilyen nagy szerepe van már az égitestek keletkezésénél is. Arra is csak közvetlenül a Voyager szondák Jupiterhez érkezése előtt utaltak a számítások, hogy a holdrendszerek rezonáns helyzetei milyen nagy árapályfűtést eredményezhetnek, és hogy ez milyen nagy geológiai aktivitást (erős vulkanizmust és tektonizmust) okozhat még olyan kis testeknél is, amilyeneknél korábban még gömb alakot, vagyis olvadási folyamatot sem tételeztek fel.

Meglepetést okozott az üvegházhatás hatássága a Vénuszon, ahol 470 °C felszíni hőmérsékletet találtak.



A Jupiter négy nagy holdja – Io, Ganymedes, Europa, Callisto – mind más.



Tipikus csillagkeletkezési terület az 5000 fényév távolságban levő Omega-köd. Az infravörösben készült felvételen az optikai hullámhosszakon nem látható részletek is feltárulnak. (Az Európai Déli Obszervatórium [ESO] 3,6 méteres NTT távcsövével készült felvétel)

Érdekes volt felismerni, hogy a jégholdak belsejében a vízjég különböző kristályosodási formái vezetnek oda, hogy a Jupiter Ganymedes és Callisto nevű holdjain annyira különböző felszín látunk. A Callistóban ugyanis – szemben azzal, ami a Földön ismert vízjég esetében várható lenne – nem jön létre a jégköpeny cirkulációja, mert a vízjég más kristályszerkezetűvé alakult át. Ezért nem tudott a bolygótest lehűlni, nem vesztette el belső hőjét, és ezért nem látható semmiféle aktivitás nyoma a Callisto felszínén. Meglepetés volt ugyanakkor, hogy belsejében 170 km mélyen egy globális, elektromosan vezető réteg van – valószínűleg kásás jég vagy sós víz –, ugyanis a magnetométerek tanúsága szerint a Jupiter változó mágneses terének hatására indukált mágneses tér tud kialakulni körülötte.

Senki sem gondolta, hogy a mágneses tereknek olyan nagy szerepük van a bolygók környezetében lévő poros plazmák mozgásában (a Szaturnusz gyűrűinek „küllői”, fluxuscső az Iót és a Jupitert összekötő zárt mágneses erővonal mentén stb.). Ahogy erre Hannes Alfvén már korábban utalt, e jelenségeknek még a Naprendszer kialakulása idején is szerepe lehetett abban, hogy hol kezdett el az első nagyobb anyagsomó – vagyis az első bolygócsíra – kialakulni.

Azt sem várta senki, hogy a nálunk közönséges víz más égitesten a „láva” szerepét tölti be. Egyáltalán nem gondoltak a krio-vulkanizmus olyan furcsaságaira, hogy alacsonyabb hőmérsékleten az eutektikumok (például víz-ammónia keverék) vagy sós vizek vulkáni kifolyásokhoz vezetnek, és hogy a jeges holdak belsejében lévő viszonylag kevés radioaktív elem az árapályfűtéssel kiegészítve már biztosítani tudja a vulkáni kifolyások megindulását.

Senki sem gondolt arra, hogy a víz alapú vulkanizmus a Föld típusú bolygók szilikátvul-

kanizmusához hasonló vulkáni formákat képes létrehozni, ha a víz-ammónia keverékhez egy kevés metilalkohol is keveredik. Ekkor ugyanis az addig híg folyós „láva” hirtelen nagyon sűrűvé válik. Márpedig a Halley-üstökös spektroszkópiai vizsgálata feltárta, hogy az Uránusz-Neptunusz távolságában keletkezett üstökösökben – és valószínűleg az Uránusz és Neptunusz jégholdjaiban is – a harmadik leggyakoribb illó anyag a metilalkohol.

Váratlan eredmény volt, hogy a Vénusz pokoli forróságában nemcsak az illó anyagok, de a fémek is elgőzölögnek, és a légkör részeivé válnak, hogy aztán a hőmérséklet csökkenésével bizonyos magasságban lecsapódjanak a felszínre. Annak ellenére sem számítottak erre, hogy mind a Merkúr, mind a Hold ritka légkörének összetevői között megtalálták az elgőzölgött nátriumot és káliumot. Ez a lecsapódás az oka annak, hogy a magasabb helyeknek sokkal erősebb a radarvisszaverő képessége, mint a síkságoké. A hegyek szinte „fénylenek” a radarfényben. A Földön a hóhatár hoz létre ilyen jelenséget.

Végül: senki sem számított arra, hogy már a 20. század végén huszonhat kérges bolygótestet vizsgálhatunk, amelyek, mint egy igazi laboratóriumban, különböző feltételekkel mutatják, milyen is egy bolygó. Van, amelyiknek nincs se légköre, se mágneses tere (Hold), van, amelyiknek nincs légköre, de van mágneses tere (Merkúr), van, amelyiknek sűrű légköre van, de nincs mágneses tere (Vénusz), és van, amelyiknek mindkettő van (Föld). E változatosság lehetővé teszi a bolygórendszer részletes tanulmányozását, ami már eddig is nagymértékben hozzájárult saját bolygónk alaposabb megismeréséhez.

Kulcsszavak: *bolygó, hold, planetológia, árapályfűtés, atmoszféra, magnetoszféra*

MIÉRT NEM OLYAN AZ EGYIK, MINT A MÁSIK?

A NAPRENDSZERBELI BOLYGÓTESTEK ÖSSZEHA- SONLÍTÓ PLANETOLÓGIAI ÁTTEKINTÉSE

Illés Erzsébet

a fizikai tudomány kandidátusa, tudományos főmunkatárs
MTA KTM Csillagászati Kutatóintézete – illes@konkoly.hu

Bevezetés

Az ember azt hinné, hogy a fejlődésük különböző fázisában lévő bolygótestek sorba rakhatók, és valamiféle egyértelmű megfeleltetés rajzolódik ki, ha a bolygó egyik jellemző paramétere függvényében ábrázolunk egy másik paramétert. Azt gondolnánk, hogy legfontosabb jellemző a tömeg, és az határozza meg, hogy egy bolygótest milyen fejlődési utat jár be, s azt milyen gyorsan teszi. De vajon igaz-e ez?

Mindenesetre a bolygótestek között látunk olyan eseteket, amikor azt várnánk, hogy az azonos helyen történt keletkezés, a hasonló összetétel vagy a nagyjából azonos tömeg miatt valahogy hasonló lesz a kialakult helyzet is. Ebben az írásban most az összehasonlító planetológiát ezen aspektusból szemléljük, és azokat az eseteket vesz-szük számba, ahol égitestpárok vagy -csoportok között vagy egy égitesten belül érthetetlen kettősséget találunk. Azon természetesen nem csodálkozunk el, hogy a tömegek olyan nagy különbözősége, mint amilyen a Föld típusú bolygók és az óriásbolygók között van, más-más fejlődési utat jelöl ki.

Az űrkutatás jóvoltából ma már a 400 km-nél nagyobb átmérőjű, kéreggel borított bolygótestek közül huszonhatot ismertünk közelebbről. (Itt ne legyünk tekintettel arra,

hogy egy test hol végzi mozgását: a Nap körül kering-e, tehát bolygó, vagy egy bolygó körül kering-e, tehát hold. Csak az a fontos, hogy megindult-e a megolvadás, a gravitációs szétválás vagy valamiféle geológiai aktivitás útján. Közös néven nevezzük őket bolygótesteknek.)

Az összehasonlító planetológia legelső rácsodálkozó megállapításai azok voltak, hogy a törvényszerűségek máshol is olyanok, mint amilyeneket a Földön megismertünk, hogy ott is olyanok a folyásnyomok, mint itt, hogy ott is úgy néznek ki a vulkánok, mint itt, hogy ott is úgy fúj a szél, mint itt. Szóval a Földön szerzett ismeretekkel, tapasztalatokkal máshol is megmagyarázhatók a dolgok. Aztán ahogy egyre több mindent megismertünk máshol is, egyre furcsább párhuzamok kerültek elő. Talán nem is elég megmondani, hogy egy égitest mekkora, hogy felvázoljuk fejlődésének történetét, ahogy korábban gondoltuk? Mi minden szól bele abba, hogy mi lesz egy-egy közbülső állapot?

E cikkben áttekintést adunk a Naprendszer bolygótestei között az olyan párokról vagy csoportokról, amelyeknél hasonló eredményt várunk, és megpróbáljuk felvázolni azokat az okokat is, amik miatt esetükben mégis különbséget találunk. Bizonyos furcsaságok és magyarázatok sok

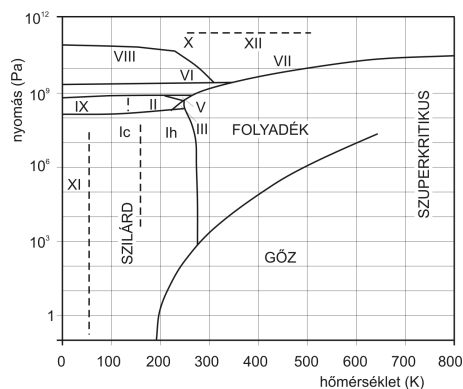
esetben közismertek a tudományos közvéleményben, másokat e cikk keretében vetünk fel először. Ezen utóbbi esetben utalunk rá, hogy nem közismert ellentmondásról vagy a közvélemény által már elfogadott okról ejtünk szót, tehát a tisztelt Olvasó fogadja kellő fenntartással a gondolatébresztőnek szánt példákat.

Milyen lehet a többi hold?

A csillagászok a Hold alapján úgy képzeltek, hogy a Naprendszer minden holdja kráterekkel teli, élettelen világ lehet, és nagy meglepetést keltett, amikor a Voyager szondák fotói nemcsak hogy gömb alakú, de sok esetben geológiai aktivitást mutató holdakról hoztak hírt még a néhány száz km átmérőjű, kisebbek köréből is. Ez esetben az elmélet és a megfigyelés szinte versenyt futva szolgáltatta az információt azokról az okokról, amelyek miatt más lett a valóság, mint amit az 1960-as években vártak. Nevezetesen, a Naprendszer kémiai övessége nemcsak a bolygók, de holdjaik esetében is érvényesül. Vagyis – ellentétben a Föld típusú bolygók környezetében keletkezett testekkel – nem szilikátos, hanem nagyobb részét jeges anyagból állnak az óriásbolygók holdjai is, annak következtében, hogy a Naprendszer keletkezése idején a fiatal Nap felfűtötte környezetét, és így a belső térségekben csak a magasabb olvadáspontú anyagok tudtak szilárd halmazállapotúak maradni és a Föld típusú bolygókba beépülni, de a távoli, hidegebb vidékeken már az illó anyagok jege is képes volt erre. Továbbá a nagyszámú holdat tartalmazó holdrendszerekben a rezonancia és a nagy központi égitestek miatt fellépő árapályfűtés segíthet a kisebb testek megolvasztásában, így a gömb alak megjelenésében, sőt rajtuk a vulkanizmus megjelenésében is. A jéganyag pedig, s főként a keverék jegek – mint pl. a víz-ammónia keverék jege – megolvasztásához sokkal kisebb hőmenny-nyiség is elegendő, mint a szilikátokéhoz.

A Ganymedes–Callisto dichotómia

De ezen általános képen túl nagyon sok részletben is meglepetés várt ránk. Azt még szintén viszonylag könnyű volt megmagyarázni az árapályfűtés távolsággal csökkenő mértékével, hogy a Jupiter holdrendszerében a bolygóhoz legközelebbi Io a legaktívabb, és az egyre távolabb keringő holdak egyre kisebb geológiai aktivitást mutatnak. Az azonban hosszú ideig teljesen érthetetlen volt, hogy a két külső Galilei-hold felszíne miért annyira különböző (Illés, 2004). A Ganymedes ugyanis aktív, repedésekkel teli, míg a Callisto felszínén semmiféle geológiai aktivitás nyoma nem látszik, csak becsapódásos kráterek borítják. Pedig a két hold majdnem egyforma nagy, majdnem azonos távolságra kering a Jupiter körül. A Nap körül mindenesetre azonos távolságra keringenek az egész Jupiter-rendszerrel együtt, tehát ugyanabból az anyagból épülhetnek fel. Talán a Ganymedes–Callisto dichotómia volt az első az összehasonlító planetológia történetében, amikor fel kellett ismerni, hogy két, nagyjából egyforma tömeg esetén is különböző lehet az eredmény, és az átmenetek nem mindig folyamatosak. Pedig a Földön a tél beköszöntö minden évben rádöbbenheti erre a közepes szélességek lakóit, hogy



1. ábra • A H_2O fázisdiagramja (Baranyai, 2006 alapján).

nulla fok körül fehér lesz a határ – az albedó hirtelen megváltozik! De akár magasabb, akár alacsonyabb hőmérsékleten nagy hőmérséklet-tartományban nem következik be ilyen látványos változás.

A Ganymedes–Callisto esetében a hirtelen változásra a magyarázatot a víz többféle kristályos formájával próbálták megadni. A mindennapi életben ismert jég (jég I) ugyanis a víznek nem az egyetlen kristályos változata, létezik több is (1. ábra). Nagyobb nyomáson a jég I átkristályosodhat más kristályszerkezetű jéggé. A kristályszerkezettel nemcsak a sűrűsége, hanem például a folyási tulajdonsága is megváltozik. És amíg a jég I reológiai tulajdonságaival számoló belső szerkezeti modellek azt jelezték, hogy a Callisto belsejében be kellett volna indulnia egy szilárd fázisú áramlásnak, amely a bolygótest belsejéből kihozza volna a termelődő hőt, és ennek nyomán a felszínen geológiai aktivitásnak kellene látszania, addig, ha más kristályszerkezetű jéggé kristályosodott át a belseje, akkor a rosszabb folyási képesség miatt nem biztos, hogy be tudott indulni a köpeny cirkulációja. Ez lehet az oka annak, hogy egy vastag, passzív felső réteg felszíne az, amit a Callisto esetében látunk, és ezen 4,5 milliárd éve csak a becsapódások változtatják a tájat, semmi más. A Ganymedes viszont még épp azon határ felett maradt, amelynél ez az átkristályosodás nem történt meg, tehát a felszíne mutatja, hogy a köpenyáramlás beindult.

A holdak mágneses tere és légköre

Egyedül a Ganymedesnek van saját, belső eredetű mágneses tere a holdak között. A Titánnak miért nincs? Pedig a Titán mérete is és sűrűsége is körülbelül akkora, mint a Ganymedesé. Azt lehetne várni, hogy a Titánnak is van vasmagja. Vagy talán a Titán sem differenciálódott eléggé, mint ahogy azt a Galileo szonda gravitációs mérései a Callisto esetében mutatták, és nem alakult ki még a magja, nem különült el a vas?

És az Európának és az Iónak miért nincs belső eredetű mágneses tere? Méretre kisebbek, de sűrűségük sokkal nagyobb, mint a Ganymedesé. Valószínűleg az illóanyag-tartalmuk lehet kisebb. Tehát lehetne nekik is vasmagjuk. Forgási sebességük nagyobb, mint a Ganymedesé, tehát várható lenne esetükben is dinamó hajtotta mágneses tér. Hogy az Iónak van-e, ahhoz a Galileo szonda mérései még nem adhattak egyértelmű választ. Az Io ugyanis olyan közel van a Jupiterhez, hogy annak erős mágneses terében az Io gyenge, saját mágneses terét kimutatni sokkal közelebbről és tartósabban végzendő, pontos mérésekkel lehet majd.

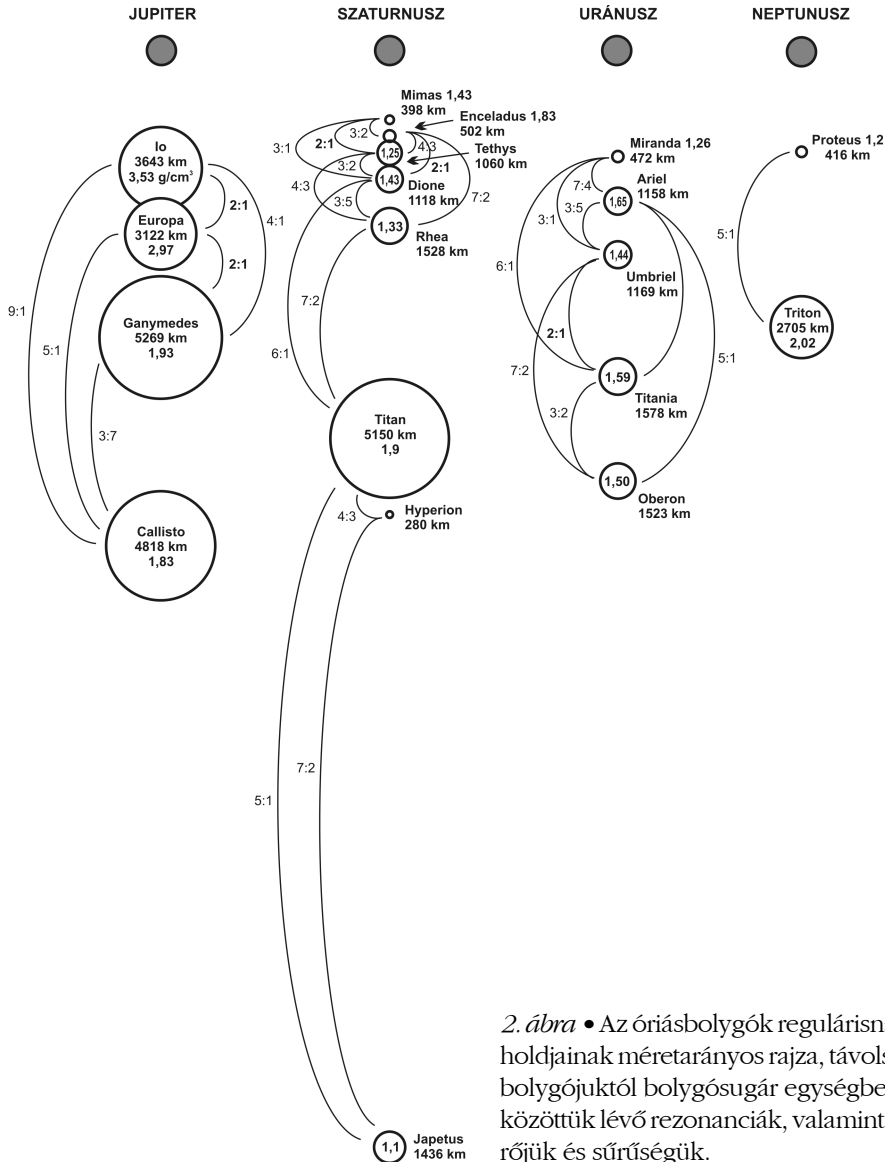
Viszont a Titánnak számottevő légköre van, de semelyik másik holdnak, még a Ganymedesnek sincs. Ennek az ellentmondásnak az okát abban látom, hogy a Titán még elég meleg ahhoz, hogy fejlődjön rajta légkör, de nem túl meleg, és elég nagy tömegű is, s így meg is tudja tartani azt (Illés, 2005c).

Az Umbriel érthetetlenül alacsony fényvisszaverő képessége

Hasonló kettősség holdak között az Uránusz rendszerében is fellép. Az öt Uránusz-holdat szemlélve ugyanis az Umbriel sokkal sötétebb, mint a másik négy. Miért? Hiszen ugyanabból az anyagból épülhetett fel mind az öt hold. Az Umbrielnél kettő közelebb, kettő távolabb kering az Uránusz körül, tehát semmi nem indokolja, hogy ő más anyagból legyen. Csak egy felszíni réteg léte okozhatja ezt a megjelenésbeli különbséget. Ezt az is alátámasztja, hogy két friss becsapódásos kráternél látunk friss, fehér anyagot, amit nyilván a becsapódás hozhatott a felszínre. A sötét megjelenés okára az irodalomban eddig semmi elfogadható magyarázat nem található. Viszont a jelenleg a Szaturnusz rendszerében keringő Cassini szonda egyik képe esetleg elvezethet a magyarázathoz, ha majd további megfigyelések alátámasztják az alábbi következtetéseim helyességét.

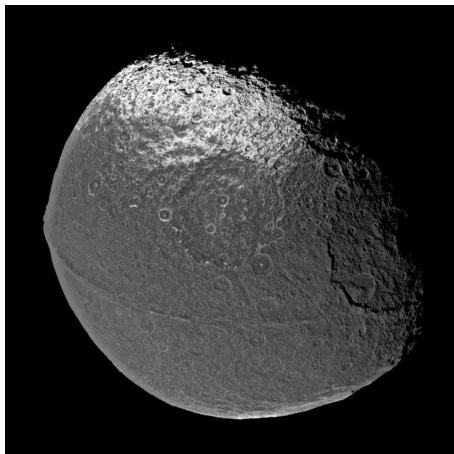
A Szaturnusz holdjai között van ugyanis egy nagyon furcsa hold, amely felfedezése (1671) óta izgatja a csillagászok fantáziáját. Ez az 1436 km átmérőjű Japetus, amely a Szaturnusztól legtávolabb keringő reguláris holdnak számít (2. ábra), vagyis úgy gondolják, hogy a bolygó összeállása idején a bolygóval

együtt keletkezett. E hold egyik fele olyan fényes, mint a friss hó, a másik olyan sötét, mint a szén, s ez a különbség már a korai távcsövekkel is észrevehető volt. Itt egy égitesten belül látjuk azt a felszíni dichotómiát, amit az Uránusz rendszerében a különböző holdak között. Mi lehet az ok?



2. ábra • Az óriásbolygók regulárisnak hitt holdjainak méretarányos rajza, távolságaik bolygójuktól bolygósugár egységben és a közöttük lévő rezonanciák, valamint átmérőjük és sűrűségük.

Az irodalomban sokféle magyarázat található a Japetus esetére, azonban egyiket sem tekintették teljesen kielégítőnek. A Cassini szonda 2004 szilveszter éjszakáján készített egyik fotóján (3. ábra) egy legalább 1300 km hosszú és 13 km magas hegygerinc látszik a Japetus sötét oldalán, majdnem pontosan az egyenlítője mentén. E cikk szerzőjének az a véleménye, hogy a hegygerinc egy egycellás köpenycirkuláció következtében torlódhatott fel az összeáramlási határon, tehát kompresszió nyomát jelzi a kéregben (Illés, 2005c). Ez a kompresszió a hegygerinc – a kompresszió vonala – mentén gejzirkifújások sorozatát okozhatta vagy okozhatja. S a metán, amely a Szaturnusz Titán holdján is nagy mennyiségben fordul elő, gejzírtevékenység következtében kispriccelhetett a felszínre, amely később a Nap ultraibolya sugárzása következtében elsötétíthette/el-sötétítheti a felszínt. A sötét és világos terület határa a gerinccel párhuzamosan fut magas bolygórajzi szélességen, és fényesen hagyja a pólus környezetét. A határ távolsága a gerinctől 700–800 km magasságig felspriccelő gejzír felhőre enged következtetni; ilyen magas vulkáni felhőt mértek az Io vulkánjainál is. Ott kén- és kén-dioxid-kifújásokat láttak



3. ábra • A 13 km magas és legalább 1300 km hosszú hegygerinc a Japetuson. Cassini-kép.

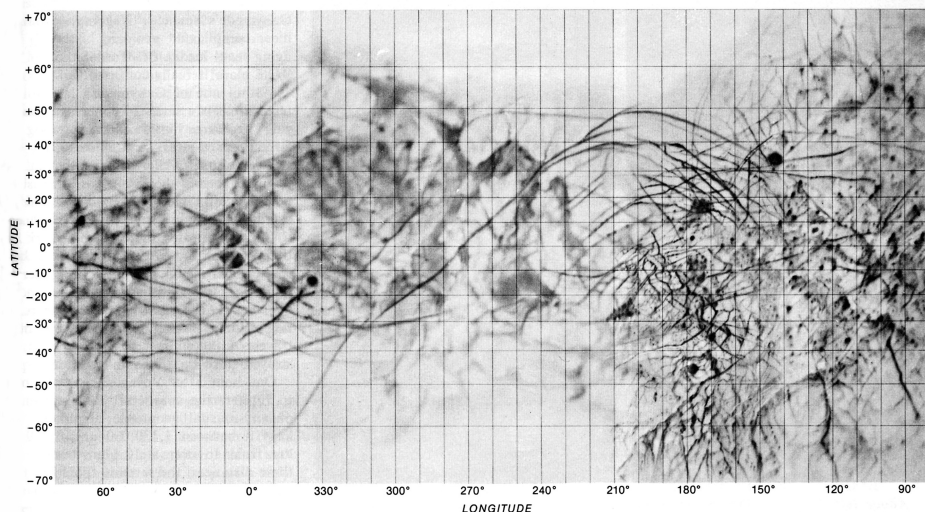
korábban a Voyagerek és nemrég a Galileo szonda kamerái is. A Japetuson a felhők magasságára tehát az Io, az elsötétedő felületre a Triton poláris sapkáin talált gejzírfojtók szolgáltattak már példát – tehát nem irreális az elképzelés.

S hogy kerül a képbe az Umbriel? A Voyager-képeken kontraszt-növelő technikát alkalmazva már az első eredmények azt mutatták, hogy az Umbriel nagyon sötét felszínét a szélességi körökre 45 fokban futó repedéshálózat borítja a közepes szélességeken. Ez az Európán látható repedésrendszerekhez hasonló (4. ábra), és szintén árapály-feszültségek hatásának tulajdonítják. E repedéshálózat mentén bárhol gejzirkifújások juttathattak metánt a felszínre, amely később elsötétedik, akár a Nap ultraibolya sugárzásának, akár részecskesugárzás bombázásának a hatására – legyen az a Napból jövő részecskesugárzás, a galaktikus kozmikus sugárzás vagy az Uránusz magnetoszférájában mozgó töltött részecskék sugárzása.

További példák az egycellás köpenyáramlásokról

Ha már a Japetus kapcsán áttértünk az egy égitesten belüli dichotómiára, akkor nézzünk ezekre további példákat a Naprendszerben! Ez is érdekes, hiszen az egycellás köpenycirkuláció sok furcsa következménnyel jár más égitestek esetében is. A Holdnál és a Marsnál beszélnek még egykori egycellás köpenyáramlásról. Emiatt a Holdnál is és a Marsnál is nagyon aszimmetrikus felszíni dichotómiát látunk, de a marsi légkör, illetve folyadék- és jégszféra furcsa kettősségét is magyarázhatja az egycellás köpenycirkuláció következtében létrejövő topográfiai dichotómia.

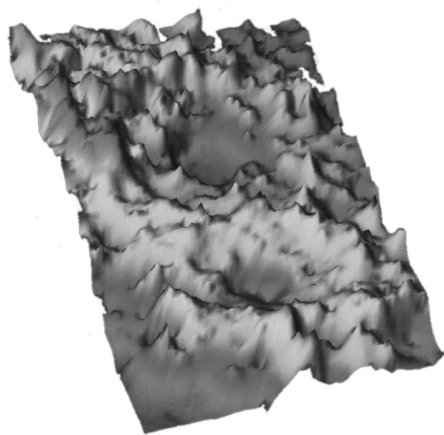
A Hold egycellás köpenyáramlásának felszálló ága jelenleg a Föld felé néző oldalon van. A felszállás helyén a melegebb köpenyanyag alulról elvékonyította a kérget (vagy eleve ezen a helyen vékonyabb ké-



4. ábra • Voyager-képek alapján készített térkép az Europa repedésrendszeréről

reg tudott létrejönni, mert mindig elhordta a köpenyáramlás a képződött új kérget a másik oldalra). Ma a túloldalon, a Koroljov-krátertől északra van a visszaáramlás helye, ahol összehordva megvastagodott a kéreg (8 km-rel magasabban fekszik ez a hely, mint az átlagos magasság). Miután az innenső oldalon vékonyabb a kéreg, és az innenső oldali becsapódások össze is töredezték azt, néhány százmillió évvel később a köpenyáramlás felszálló ágában a vulkáni bazalt megtalálhatta az utat a felszínig, hogy a nagy medencék aljzatát előntesse. Ezeket látjuk most mint sötét foltokat a Hold korongján. Miután a Hold túloldalán a köpenyáramlás leszálló része volt, s ezért a kéreg sokkal vastagabb, ott az SPN néven emlegetett képződmény (South Pole – Aitken-medence) aljzatát nem öntötte el a bazalt annak ellenére, hogy az sokkal mélyebben van (8,2 km-rel az átlagos magasság alatt), mint az innenső oldali medencék aljzata (5. ábra).

A Mars egycellás köpenyáramlásának következményei. Ahogy a Holdnál már említettük, csak vékony kéreg marad a felszállás helyén, és megvastagszik a kéreg a leszállás környékén. Ha az ilyen bolygóttest alakjához



5. ábra • A Holdon a Clementine szonda magasságméréseiből mintegy negyven ősi becsapódásnyom rajzolódott ki, amelyek a bolygóttestek összeállásának az utolsó nagy bombázási időszakában keletkezhetnek. Ezek a fotókon már nem láthatók, mert a későbbi becsapódások „elmosták” a képet, de a magassági viszonyok még kirajzolják a nagy medencéket. Az ábrán a Clementine magassági térképén a Mendel–Rydberg-kráterek láthatók.

illesztünk egy felületet, akkor annak közép-pontja nem esik egybe a gravitációs közép-ponttal. A Hold esetében 1,6 km a két köz-pont közötti távolság, a Mars esetében 3 km. A több cirkulációs-cellás köpenyáramlású égitesteknél nem tud ilyen nagy különbség kialakulni. Hemiszférikus szimmetria esetén minél több cirkulációs cella van, annál kisebb ez a különbség.

A Marsnál a 3 km-es eltolódás azt jelenti, hogy amerre a kéreg megvastagodott – és ez ott a déli pólus iránya –, az a környék 3 km-rel messzebb van a tömegközépponttól, tehát gravitációsan magaslatnak számít. Amerre a kéreg elvékonyodott – s ez a Marsnál az északi pólus környéke –, az a környék 3 km-rel közelebb van a tömegközéppont-hoz, tehát gravitációsan mélységnek számít. A déli pólus környéke tehát 6 km-es „magaslat” az északi pólus környékéhez képest. A gravitációs tömegmozgások ezt „úgy élik meg”, mintha ott hegy lenne. Mi mindenben nyilvánul ez meg?

Ha folyadék lenne (vagy volt) a Mars-on, az délről észak felé folyna (vagy folyt). Valóban, a folyóvölgyek délről észak felé vezetnek! Ha volt óceán, akkor az az északi pólus környékén foglalt helyet. És valóban, az északi síkság körül találtak egykori tengerpartra utaló nyomokat!

Hogyan csapódnak ki ezen a furcsa alakú bolygón a légkörben lévő illóanyagok: a vízgőz és a szén-dioxid? A hőmérsékleti viszonyok olyanok, hogy a levegőben lévő kevés vízgőz még a felszín közelében kondenzálódhat akár az egyenlítő környékén is, de a földrajzi szélességgel csökkenő hőmérséklet miatt az északi póluson is. A déli pólusra viszont nem ér fel, mert ahogy a levegő hőmérséklete a magassággal egyre csökken, már sokkal kisebb magasságon kicsapódik belőle dér formájában. Viszont ennek a 6 km magas „hegynek” a magasságában a hőmérséklet már olyan alacsony, hogy ott télen eléri a szén-dioxid kicsapódási

hőmérsékletét, és szén-dioxid-hó rakódik le. Ennek egy része a megmaradó hósapka, de egy része a déli nyár folyamán szublimál, tehát szezonális változásnak van kitéve. A Mars Global Surveyor szonda pontos magassági mérései szerint 1-2 méteres szén-dioxid-hó réteg az, ami telente lerakódik, és tavasztól újra a légkörbe kerül vissza.

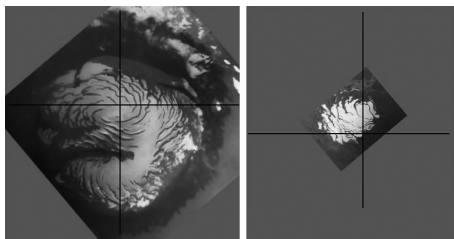
Tehát az egycellás köpenyáramlással magyarázható az összetételei dichotómia a Mars két poláris sapkája között, s talán ez az oka elsősorban a kiterjedésbeli dichotómiának is. A Mars északi poláris sapkája ugyanis sokkal nagyobb kiterjedésű, mint a déli (6. ábra). Bár ehhez a dichotómiához hozzájárulhat a Mars pályájának nagy excentricitása, és főleg az, hogy a Mars éppen a déli nyár idején jár napközelen. Vagyis ekkor halad a pályáján leggyorsabban, és ekkor a legnagyobb a besugárzás. Ezért délen a nyár „forró”, de rövid. A Földön a Marssal ellentétben nagyjából egyforma nagyok a poláris sapkák.

Még egy fontos dolgot megmagyaráz a Mars egycellás cirkulációja: a Föld típusú bolygók szélrendszerének dichotómiáját. A Mars légkörzése nagyban különbözik a Föld légkörzésétől, pedig napjaik hossza és tengelyhajlásuk is hasonló. Azt várhatná az ember, hogy a széljárás is nagyon hasonló a két bolygón.

Az egyenlítőre szimmetrikus légkörzés kialakulása

A bolygók légköre együtt forog a bolygókkal, csak nem merev testként. Ha a légkör valahol előresiet vagy lemarad a felszínhez képest, azt a felszínen álló megfigyelő szélként érzékeli.

A Föld típusú bolygók szélrendszerét a Nap melege hajtja. A legmelegebb hely egy bolygón a szubszoláris, vagyis a Naphoz legközelebb eső pont (ahol a bolygó felszínén álló megfigyelő számára a Nap a zenitben tartózkodik). A légkörön keresztül beérkező napfény itt melegíti fel legjobban a talajt, és a légkör a talajtól veszi át a hőt. Felmelegszik,



6. ábra • A Mars északi (bal) és déli (jobb) poláris sapkája. Mars Global Surveyor-fotó.

kitágul, sűrűsége kisebb lesz a környező levegőnél, felszáll, helyére a környezetéből áramlik levegő, és beindul a cirkuláció. Így indul el függőlegesen egy-egy légköri cirkulációs cella szimmetrikusan észak és dél felé.

Hogy az egyenlítő és a pólus között milyen távolságon belül záródik egy-egy ilyen cella, az nagyban függ a bolygó tengelyforgási sebességétől, vagyis a Coriolis-erő nagyságától. Ha nagyon lassan forog egy bolygó, mint például a Vénusz, akkor a cella az egyenlítőtől közvetlenül a pólusokig el tud jutni, tehát egyetlen lépésben szállítja az egyenlítőn kapott meleget a poláris vidékekre. Azt mondjuk, hogy egycellás légköri cirkuláció alakul ki, pedig igazából itt két cella van az egész glóbuszra vonatkoztatva, és a hőt az északi ill. déli pólus felé szállító cellák szimmetrikusan helyezkednek el az egyenlítőre, mint a legjobban fűtött helyre vonatkozóan.

Ha egy bolygó gyorsabban forog, akkor az áramlás már előbb eltérül, nem ér el a poláris vidékekre, és alacsonyabb szélességen megtörténik a visszatérés. Ilyenkor fogaskerékyszerűen beindul egy másik cella mindkét félgömbön, esetleg egy harmadik is. A Föld esetében mindkét félgömbön három cellán keresztül jut így el az Egyenlítőn kapott hő a poláris vidékekre: forró égöv, mérsékelt öv és sarki égöv alakult ki ennek következtében, szimmetrikusan mindkét félgömbön.

Mit várunk a Marsnál, miután napjának hossza nagyon hasonló a földihez? Azt, hogy

hasonló lesz a széljárás is. A Mars ritka légkörében ritkán képződnek felhők, amelyek kirajzolnák a légkör mozgását, ezért kellő számú pontos adatot majd a felszínén és a légkörében mozgó mérőszondák fognak szolgáltatni. Eddig a két Viking szonda leszállóegységeinek leszállás közbeni és felszíni mérései, illetve az újabb marsjárók mérései állnak rendelkezésre a modellszámításokhoz. A modellek igen érdekes széljárásra utalnak.

A Marson is működhet a Föld esetére leírt szélrendszer, ahol a széljárást a Nap besugárzása tartja fenn. Azonban ugyanúgy, ahogy a Földön is a fix felszíni kényszerek, például hegyek, elterelik a szeleket, illetve lejtőirányba segítik, hegyre felmenet pedig lassítja a levegő mozgását, így a Marson is a lejtő irányába – vagyis az északi félgömb felé – ez a mozgás könnyebb, és nagyobb távolságig juthat el a cella, de dél felé, vagyis „hegymenetnek” nehezebb. És ha ehhez a Nap fűtötte kényszerhez hozzájön egy másik mozgáskomponens, nevezetesen a tengelyhajlásból adódó szezonális, akkor furcsa, igazi egycellás cirkuláció lesz az eredmény – mégpedig az egész glóbuszra vonatkozóan egycellás.

A déli félgömb tavaszán ugyanis a déli poláris sapkáról egyre több szén-dioxid-jég szublimál a növekvő besugárzás hatására. Ezzel ott nagyon megnövekszik a szén-dioxid parciális nyomása a légkörben. A nagyobb légnyomás hatására radiálisan, minden irányba meginduló szelek a magasan fekvő déli pólus környékéről mint lejtő menti szelek rohannak lefelé az egyenlítő menti gyenge komponensét elsodorva csatlakoznak az erősebb északi cella széléhez, és így erős transzekvatoriális szélként túlfutnak az egyenlítőn. Vagyis valóban az egész glóbuszra vonatkozóan egycellás cirkuláció, és nem az egyenlítőre szimmetrikus áramlási kép alakul ki. Ez az oka annak, hogy a déli

félgömb tavaszán tör ki a legtöbb globális porvihar. A Mars felszínének vastag, finom porát ugyanis nagyon könnyen felkapja a szél, és az egész bolygót beburkolja vele. Csapadék hiányában pedig csak nagyon lassan, néha hónapok múlva tud kihullani a rengeteg finom por. Ezzel magyarázható az a megfigyelés, hogy a felszínen lévő por összetételét az egymástól nagy távolságra leszálló két Viking szonda is meg a Pathfinder is ugyanolyannak mérte, hiszen ezek a globális porviharok összekeverik a bolygó-felszín porait, és mindenhova ezt a kevert port terítik szét.

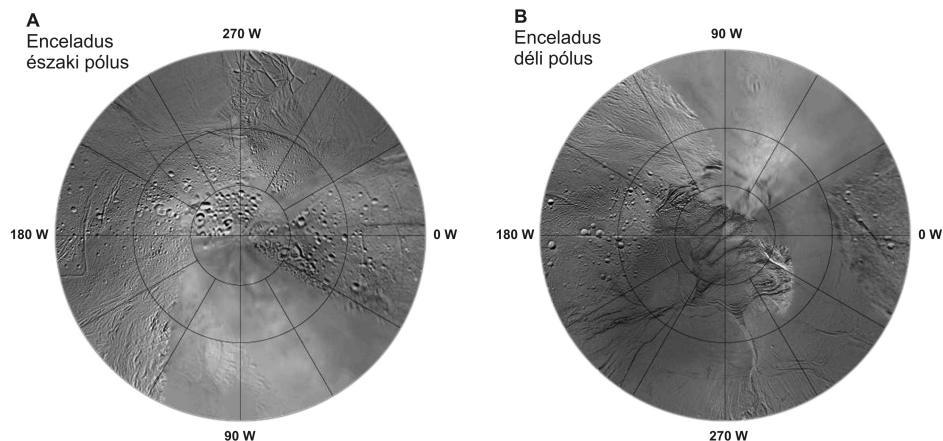
A legaktívabb jéghold

A Szaturnusz *Enceladus* holdjánál is nagyon érdekes jelenséget okoz az egycellás köpenycirkuláció. Ez a mindössze 500 km átmérőjű holdacska a Dione holddal van 2:1 arányú rezonanciában, és ez elegendő ahhoz, hogy a jelek szerint talán a legaktívabb jéghold legyen a Naprendszerben. Az az érdekes, hogy a Mimas a Tethysszel ugyanilyen jó rezonanciában mozog, és közelebb is vannak a Szaturnuszhoz, a Mimas

geológiaiilag mégsem aktív. Vajon miért? Ez is dichotómia, csak itt két égitest között.

A Cassini-képek tanúsága szerint az *Enceladus* északi pólusának környéke öreg, tele van becsapódásos kráterekkel – ellentétben a déli pólus környékével, ahol viszont sok repedés található (7. ábra). Sőt, a hold déli pólusa környezetében vízjégszemcsékből álló „légkört” is detektáltak a Cassini szonda műszerei. Ez arra utal, hogy nem a jég szublimálásával kerültek vízmolekulák a hold körüli térségbe, hanem gejzírek által kispriccelt jégpor vagy újra megfagyott víz az, amit a műszerek regisztráltak.

A repedések iránya a déli félgömbön olyan, amelyet árapályfeszültségek alapján várnánk, és amelyet az Europa holdon is látunk (4. ábra). Az Európánál a repedés-rendszer azonban az egyenlítőre szimmetrikus, ahogy azt egy egyenletes vastagságú kéreg esetén a modellek mutatják. Véleményem szerint az *Enceladus* belseje olvadt lehet, mint a Jupiter Europa holdjának belseje, miután azonban az árapályfeszültségek a déli félgömbön meg tudják repeszteni a kérget, de az északi pólus környékén nem, a kéreg



7. ábra • a: Az *Enceladus* hold kráterekkel teli, öreg északi félgömbje. A 90 fokos hosszúság környékén lévő homályos részről még nem készült nagyfelbontású kép. b: Az *Enceladus* hold repedésekkel teli, fiatal déli félgömbje.

nem lehet ugyanolyan vastag mindenütt. Hogyan lehetséges, hogy az északi pólus környékén vastagabb a kéreg?

Szerintem ha egy, a Marséhoz és a Holdhoz hasonló egycellás köpenyáramlás van az Enceladus óceánjában is (ami nem feltétlenül víz, hanem lehetséges, hogy kásás jégből álló óceán), akkor az áramlás vagy elhordja a jégkérget és feltorlaszolja azt az északi pólus környékén, vagy termális erózióval elvékonyítja a kérget a déli pólus környékén, ahol azt már az árapályfeszültségek képesek megrepeszteni. A repedések mentén gejzirkifújásokat működtet a napi árapály, aminek hatására találták a finom vízjég-port a déli pólus környezetében. Ez a mechanizmus adhatja a Szaturnusz E gyűrűjének az anyagát is, azzal, hogy a vízjég-porszemcsék egy idő után Szaturnusz körüli pályára állnak. Ugyanúgy, ahogy az Io vulkánjaiból kikerülő kén vagy nátrium az Io körül mintegy 20 órát mozog, majd a Jupiter kén-, illetve nátriumgyűrűjét gazdagítja.

Az érdekes azonban az, hogy miért éppen így áll az Enceladus, vagyis hogy a legvékonyabb kéregrész miért a déli pólus felé néz, és miért nem a Szaturnusz irányába? Mint ahogy az is érdekes, hogy ha a Japetusnál is egycellás köpenyáramlás van, a felszálló ág miért a követő oldalon van, és miért nem a Szaturnusz felé néz? Geofizikailag ugyanis az lenne a plauzibilis, ahogy a Föld is „fogja” a Holdat, vagyis hogy a legvékonyabb kéregrész néz a Föld felé, mert ott a köpeny sűrűbb anyaga által képviselt gravitációs anomáliát „fogja meg” a Föld gravitációs tere. Egyébként az Io hold is úgy mozog a pályáján, hogy a legvékonyabb kéregrész fordul a Jupiter felé. A Marsnál is az lenne a plauzibilis, hogy a legvékonyabb kéregrész nem a déli pólus irányába, hanem a Nap felé néz. A Mars tengelyforgása azonban nem kötött, az Enceladusé és a Japetusé viszont igen, ahogy a Föld Holdjáé is.

A Titán különleges státusa a Szaturnusz holdjai között

Véleményem szerint a Szaturnusz holdjai között vagy a Titán a kakukktojás és a többi hold normális, vagy a Titán normális és a többi nem az. A Titán akkora, mint a Jupiter nagy reguláris holdjai, a többi, regulárisnak tekintett Szaturnusz-holdhoz képest viszont nagyon nagy (2. ábra). Ha volt elegendő anyag a Naprendszer keletkezése idején ahhoz, hogy a Szaturnusz körül is létrejöjjenek olyan nagy holdak, mint a Jupiter körül – márpedig a Szaturnusz és a Jupiter hasonló mérete alapján ez feltételezhető –, akkor miért olyan kicsik a többiek? Ütközés verte szét őket? Ha pedig azért olyan kicsik a többiek, mert nem volt elég anyag, akkor mitől olyan nagy a Titán? Két protohold ütközött, és anyaguk egyetlen naggyá olvadt össze? Ezt a lehetőséget támogatja egyébként egy mások által már felvetett furcsaság a pályákban, hogy tudniillik a belső, regulárisnak hitt holdak és a Titán között is, meg a Titán és a nála meszszebb keringő Japetus között is van egy-egy nagy üres térész a Szaturnusz körül. Persze az sem lehet lehetetlen, hogy mind a kétféle esemény lejátszódhatott a Szaturnusz körül; szét is verődhetek protoholdak, és össze is olvadhattak mások.

Furcsa persze a Szaturnusz holdjai között az is – ahogy a 2. ábra képe feltűnően nyilvánvalóvá teszi –, hogy a Japetus olyan nagy távolságra „kilóg” a rendszerből a többi holdhoz képest. És ha igaz az, amivel a vezető oldal sötét anyagát magyarázom, akkor érthetetlen, hogy honnan van a Japetusnak a geológiai aktivitáshoz szükséges energiája. Ebben a távolságban már az árapályfűtés egyébként is kicsi lenne, de a hold nincs is rezonanciában semmivel. Lehetséges, hogy a Titánnal kapcsolatos feltételezett ütközés excentrikus és nagy inklinációjú pályára lökte őt, amely pályának a körré válása kapcsán kapott árapályfűtés adta volna neki az energiát, mint a Tritonnak a Neptunustól kapott

árapályfűtés? (A Tritont befogott holdnak tartják; a Japetusról ez még nem vetődött fel, mert nem retrográd a pályája. Pedig 14 fokos pályahajlása éppúgy predesztinálná erre, mint a Tritont a 23 fokos pályahajlás.)

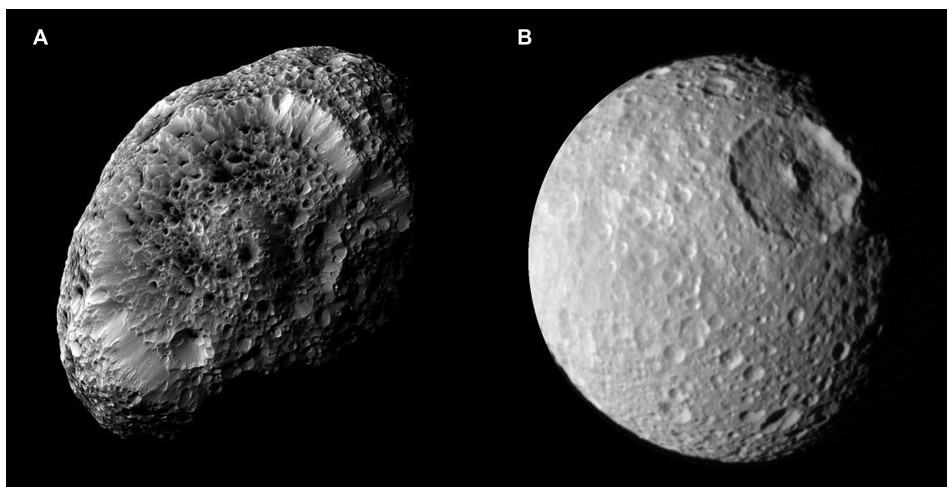
Érdekes még az is, hogy a Titán és a Japetus között mozgó Hyperion a Cassini legújabb felvételei szerint inkább egy laza, a Kuiper-övből származó objektum lenne (8. ábra), mint egy kompakt hold. Hogy kerülhetett egy befogott hold a reguláris holdak felségterületére, és hogyan lett pályaeccentricitása és pályahajlása olyan, mint egy reguláris holdé? Ha a holdrendszer belsejében van egy befogott Kuiper-objektum, akkor ebben is különleges a Szaturnusz rendszere.

S ha ehhez még hozzávesszük a Szaturnusz-gyűrű különlegességét magyarázó munkahipotézisemet (Illés 2005a, b), miszerint a Szaturnusz jéggyűrűje egy most szétदारabolódó üstökösmag jeges anyagából származhat, akkor még azt a feltevést is megkockáztathatjuk, hogy a Hyperion ennek az óriási üstökösmagnak egyik, a Roche-határon kívül maradt darabja lehet.

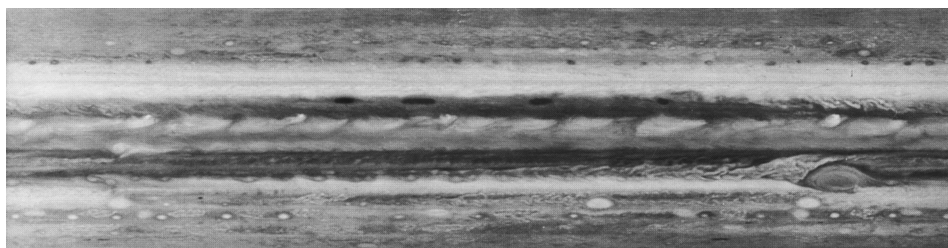
Dichotómia az óriásbolygóknál

A Jupiter két félgömbje nem egyforma, pedig az ember azt hinné, hogy egy gázgömb egyszerűbb eset, mint egy szilárd bolygó. Nemcsak a Nagy Vörös Folt léte teszi a Jupiter-t aszimmetrikussá, hanem például az úgynevezett fehér foltok is csak a déli félgömbön fordulnak elő egy szélességi sávban (9. ábra). Ugyanakkor a sötétbarna, elnyúlt elliptikus foltok csak az északi félgömb egy bizonyos szélességén keletkeznek. (Ezek a keskeny oválisok felhőmentes övezetek lehetnek, amelyekben mélyre lehet látni a Jupiter légkörébe. Hosszúsági kiterjedésük körülbelül akkora vagy valamivel nagyobb, mint a déli hemiszféra egy-egy nagyobb fehér viharfoltjáé, de a fehér foltokkal ellentétben szélességi kiterjedésük sokkal keskenyebb azokénál, és azonos a teljes hosszuk mentén.)

A Földön a ciklonok szintén egy bizonyos szélességi sávban fordulnak elő, igaz, ez a sáv a Nap éves vándorlásával szélességben mozog az Egyenlítőhöz képest. De ez az egymást követő ciklonok sorozata mint hullámjelenség nagyjából szimmetrikusan lép fel a



8. ábra • a: A Cassini szonda közelképe a Hyperionról. b: Összehasonlításként egy körülbelül azonos nagyságú normális szaturnuszhold, a Mimas.



9. ábra • A Jupiter bolygó Voyagerszondák képeiből összeállított Mercator-vetületű térképe. Az elnyúlt barna foltok csak az északi, a fehér oválok csak a déli félgömbön jelennek meg.

két félgömbön. S ha mégis van hemiszférikus aszimmetria, azt a Földön elsősorban a különböző kontinensborítottságnak tulajdonítják. De a Jupiteren nincs felszín, nincsenek kontinensek, a köpeny nagy nyomású, kritikus állapotban lévő anyaga folyamatosan mehet át a légkör anyagába. Mi okozhatja ezt a kettősséget a két félgömb között?

Én magam azt feltételezem, hogy a mágneses tér szól bele valahogy még a légköri rétegek áramlási rendszerébe is. Illetve lehet, hogy a Jupiter esetében talán fordítva lenne helyesebb mondani. Az az aszimmetria, amely a bolygóbelső, vagy inkább a fémesen viselkedő atomos hidrogénből álló köpeny cirkulációs rendszerében fellépett – és aminek a következménye maga a mágneses tér is –, még a légkörben is hat, és ennek hatására látjuk ezt a hemiszférikus aszimmetriát. Vajon a földi légkör nagyléptékű aszimmetriájába mennyire szól bele a mágneses tér különbözősége a két félgömbön?

Kutatásaink során a semleges felsőléggör (250–500 km) összecsűrűségi adataiban furcsa aszimmetriát találtunk a 60. szélességi körök

közötti tartományban. A holdak mozgásából levezetett sűrűségértékekből minden ismert effektus hatását a legjobb felsőléggöri modellekkel levonva a maradéknak fehér zajt kellett volna adnia, ha a modellek mindent jól írnak le. Ezzel szemben a modellmaradékok azt mutatják, hogy a földi felsőléggörben a sűrűség monoton csökken az északi 60. foktól a déli 60.-ig haladva. Tehát nem szimmetriát találtunk. Az Egyenlítő környékének semmiféle kiütetett szerepe nem volt.

Egy szilárd kérgű bolygó, tehát a Föld esetében a légkör sűrűsége – vagy inkább fűtése és ennek következtében a sűrűsége – a mágneses tér, tehát a magnetoszféra folyamatai miatt változhat, ha valóban az változtatja, és nem valami más. Mindenesetre, amiket más bolygótestek esetében tapasztalunk, azokat érdemes megvizsgálni a Föld esetében is. A planetológia tapasztalatai segíthetnek bizonyos érthetetlen földi jelenségek értelmezésében.

Kulcsszavak: *bolygó, bolygógyűrű, hold, összehasonlító planetológia*

IRODALOM

- Baranyai András (2006): A jég változatos szerkezete. *Természet Világa*. 137, 1, 38–39.
 Illés Erzsébet (2004): Bolygótestek a Naprendszerben. *Magyar Tudomány*. 6, 710–721.
 Illés Erzsébet (2005a): A bolygógyűrűk eredete I. *Ter-*

- mészet Világa*. 136, 3, 106–109.
 Illés Erzsébet (2005a): A bolygógyűrűk eredete II. *Természet Világa*. 136, 4, 178–180.
 Illés Erzsébet (2005c): Holdak a Naprendszerben. In: *Meteor Csillagászati Évkönyv 2006*. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 194–227.

felelő tudományos álláspontot fejtettek ki ebben a kérdésben; ilyen elmarasztalás parlamenti képviselők részéről is elhangzott már.

Kulcsszavak: *géntechnológia, GM-mezőgazdaság, médiumok, veszélytelenség bizonyítása, növénynemesítés*

IRODALOM

Huxley, Aldous (1958): *Brave New World Revisited*. Harper–Row

ISAAA Brief 37–2007 (2007): *Executive Summary*. <http://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/37/executivesummary/default.html>

Venetianer Pál (1998): *A DNS-szép új világa*. Kulturtrade, Budapest

Venetianer Pál (1999): Géntechnológia-ellenesség – Tudományellenesség? Magyar Tudomány. 44, 10, 1170–1176.



FELSŐLÉGI KÖRI KUTATÁSAINK AZ ŰRKUTATÁS HAJNALÁTÓL NAPJAINKIG

Illés Erzsébet

a fizikai tudomány kandidátusa, tud. főmunkatárs
MTA KTM Csillagászati Kutatóintézete
illes@konkoly.hu

Almár Iván

a fizikai tudomány doktora, tud. tanácsadó
MTA KTM Csillagászati Kutatóintézete
almar@konkoly.hu

Bevezetés

1957 nyarán a Szovjet Tudományos Akadémiától levél érkezett az MTA-nak, amelyben felkérték Magyarországot a Nemzetközi Geofizikai Év keretében felbocsátandó szovjet mesterséges holdak optikai követésére. Egyúttal felajánlották, hogy a megfigyelésekhez átadnak negyven darab AT–1 jelzésű kis távcsövet is. Az MTA a Csillagvizsgáló Intézethez és annak akkori igazgatójához, Detre Lászlóhoz fordult. A feladatot az intézetnek nyilván el kellett vállalnia, annak ellenére, hogy az égen gyorsan haladó égitestek (kisbolygók, üstökösök) pozícióinak megfigyelése akkor igen távol állt az intézet asztrofizikai orientációjától. A még gyorsabban haladó műholdak megfigyelésében pedig 1957 októberéig még senkinek nem lehetett semmiféle tapasztalata.

A megfigyelőhálózat megszervezésére Almár Iván kapott megbízást. 1957 végén már folytak megfigyelési kísérletek az intézet főépületének tetőteraszáról, s megkezdődött a vidéki állomások kiválasztása és felszerelése is. Kevéssel később, ötven évvel ezelőtt, 1958-ban már megkezdődött, és szolgálatra is került az átvonuló szovjet szputnyikok égi pozícióinak rögzítése Budapesten, majd Baján, Szom-

bathelyen és évekkel később Miskolcon is. Az előrejelzéseket táviratilag kaptuk a moszkvai központtól, és eredményeinket is kódolt táviratokban küldtük Moszkvába.

Ez időben a megfigyelési technika és a módszerek javítása volt napirenden. Az első tudományos közlemény, amely a magyar megfigyelők által alkalmazott új módszerre vonatkozott, Almár Iván *A 2. szputnyik földárnyékba való belépésének megfigyelése pontos térbeli helyzetének meghatározása céljából* című cikke volt, amely az *Asztromicseszkij Cirkulár* 1958. május 26-i számában jelent meg. Tudomásunk szerint ez volt az első, kifejezetten a mesterséges holdakhoz kapcsolódó, idegen nyelvű tudományos célú írás Magyarországról. A *Magyar Tudomány* ugyancsak 1958-ban közölte első, az űrkorszak kezdetéhez kapcsolódó cikkét (Almár, 1958).

Az előrejelzések pontosságának növekedése és a megfigyelések technikai feltételeinek jelentős javulása (TZK binokuláris távcsövek félig automatizált változatainak bevezetése, az időpontok rögzítésének korszerűsítése stb.) következtében egyre több viszonylag pontos (tized fok, illetve tized másodperc pontosságú) megfigyelés gyűlt össze Magyarországon, illetve természetesen más, együttműködő országokban is. Az 1960-as évek elején már

nyilvánvaló követelménnyé vált ezek közös értékelése és tudományos hasznosítása – a szovjet pályaszámító központ igényeinek kielégítésén túl. A régióban elsőként az Ill Márton által kezdeményezett INTEROBS-program tett kísérletet ilyen feldolgozásra, a műholdpályának közvetlenül a megfigyelésekből történő levezetésére, majd a keringési idő változásából a fékező felsőlégkör sűrűségének meghatározására. Ezt követően számos további javaslat született arra, hogy miként lehetne speciális (vizuális) műholdmegfigyelésekkel a felsőlégkörre vonatkozó, hasznos ismeretekhez jutni. Mi magunk is kezdeményeztünk több ilyen új eljárást, illetve elkezdtünk – az akkori primitív számítástechnika hazánkban rendelkezésre álló eszközeit is bevetve – korszerű feldolgozó programokat készíteni (Illés Erzsébet és Horváth András).

Az 1960-as évek végén a műholdmegfigyelések és a szovjet és amerikai műholdak pályaadatái már gyakorlatilag mindenki számára hozzáférhetőek voltak. Magyarország mint az Interkozmosz-program tagállama is publikálta megfigyeléseit, és megkapta azokat is, amelyeket más programok keretében hajtottak végre. Egyre aktuálisabbá vált az a probléma, hogy milyen célra és hogyan dolgozzuk fel a rendelkezésre álló megfigyelési anyagot. Ott, ahol nagyobb pontosságú, fotografikus, később lézeres megfigyelések álltak rendelkezésre, a geodéták kezdeményezték a Föld pontos alakjának levezetését bizonyos pályaelemek változásai alapján. Ehhez azonban nagyteljesítményű számítógépekre is szükség volt, amilyenek hazánkban akkor még nem működtek. Maradt a másik, hasonlóan ígéretes feladat: a felsőlégkör sűrűségének, hőmérsékletének, esetleg kémiai összetételének vizsgálata sok hold segítségével, de a megfigyelési technika és a számítástechnika

területén kisebb elvárásokkal. Ésszerű döntés volt, hogy mi is a felsőlégköri modellek vizsgálatával, ellenőrzésével kapcsolatos lehetőségekre koncentráltunk.

Az 1970-es évek elején már egyre jobb felsőlégköri modellek álltak rendelkezésre világszerte. Elsősorban *Luigi Jacchia* amerikai tudós nevét kell megemlíteni mint az első, igazán használható modellek kidolgozóját. Ezekből jött létre a CIRA, vagyis a COSPAR nemzetközi referencialégkörök sorozata – később MSIS néven is szerepelt, pl. MSIS'86 = CIRA'86 (Rees – Fuller-Rowell, 1988), amely már annyira tökéletesnek látszott, hogy a korábban e területen dolgozó sok kutatócsoport abba is hagyta a műholdak pályaváltozásain alapuló felsőlégköri vizsgálatokat, mert nem látott lehetőséget a továbblépésre.

A mi kis kutatócsoportunk a Csillagvizsgáló Intézetben más állásponton volt. Úgy láttuk, hogy ezek a felsőlégköri modellek *általánosságban jók* ugyan, de különleges esetekben, például *napkitörések által kiváltott geomágneses viharok idején nem* írják le megfelelően a felsőlégkör sűrűségének a beérkező naprészecke-áram hatására bekövetkező megnövekedését. Más, ugyancsak nehezen magyarázható anomáliákat is találtunk, és a további években ezekre koncentráltuk kutatásainkat. Az 1980-as évekre – nemzetközi együttműködés keretében – már hozzáférhetővé váltak olyan *in situ* sűrűségmérések is, amelyet francia és olasz műholdak fedélzeti műszerei hajtottak végre. Ezek a mérések igen gyakoriak és pontosak voltak ugyan, de tekintve a kérdéses műholdak speciális, az egyenlítőhöz közeli pályáit és viszonylag rövid élettartamát, csak bizonyos feladatok vizsgálatára voltak alkalmasak. Mi igyekeztünk éppen ezekre koncentrálni, ugyanakkor nem feledkeztünk el arról a rendkívül gazdag megfigyelési anyag-

ról sem, amely évtizedek alatt a különböző magyar és külföldi követőállomásokon gyűlt össze. Felhasználtuk és továbbfejlesztettük a rendelkezésre álló számítástechnikai programokat is. Főbb eredményeinket az alábbiakban foglaljuk össze.

A nemzetközi felsőlégköri modellek

Már az 1960-as évek elejére világossá vált, hogy a Napon lejátszódó változások és a Nap–Föld geometria határozza meg, hogy a Napból jövő elektromágneses sugárzás és részecskeáram milyen változásokat idéz elő a felsőlégkörben. A geometria változásából következően a Föld Nap körüli pályáján való végighaladás az excentricitás és a tengelyhajlás miatt éves és szezonális változást, a Föld tengely körüli forgása napszakos, a Nap tengelyforgása 27 napos, a naptevékenység változása kb. tizenegy éves (huszonkét éves?), illetve random jelentkező változásokat idéz elő. A geometria miatti változásokat a különböző ciklushosszak miatt könnyen szét lehetett választani, és le lehetett írni, a naptevékenység okozta változások azonban nehezebben megfoghatóaknak bizonyultak. Annál is inkább, mert a felsőlégkörre ható elektromágneses sugárzás egy része nem jut le a Föld felszínére, így nem áll folyamatosan a modellszámítások rendelkezésére. A már a 60-as években a Föld körül keringő holdak méréseiből elég jó korreláció látszott a Nap ultraibolya (UV-) és extrém ultraibolya (EUV-), valamint a Föld felszínén is mérhető 11 cm-es rádiósugárzása között, így ezt a paramétert használták a modellekben a naptevékenységből adódó UV- és EUV-sugárzások okozta sűrűségváltozások jellemzésére ($S_{10,7}$ vagy $F_{10,7}$ jelzéssel).

A korpuszkuláris fűtés okozta változások leírására pedig az *Ap* geofizikai paramétert használták, ugyanis a hirtelen megjelenő,

nagy sűrűségváltozásokról hamar felismerték, hogy geomágneses viharok idején lépnek fel. Az *Ap* planetáris geomágneses index, amelyet az aurora-övezet környékén elhelyezkedő több geofizikai állomás méréseiből határoznak meg, pedig éppen a geomágneses viharok erősségét jellemzi. Hogy ezt a geomágneses viharok idején fellépő sűrűségváltozást hamar fel lehetett ismerni, abban nagy szerepe volt annak a szerencsés véletlennek, hogy az első szputnyikok felbocsátása idején szokatlanul erős naptevékenységi maximum volt, és az azt követő években voltak a rekord erősségű geomágneses viharok. Ekkor már több mesterséges hold keringett a Föld körül, tehát több magasságban, párhuzamosan lehetett látni a hirtelen fellépő, nagy fékeződést.

A gyűrűáramfűtés felfedezése

A Konkoly Obszervatórium budapesti Szputnyikmegfigyelési Csoportjában a földi felsőlégkör sűrűségváltozásaira vonatkozó kutatásainkat saját megfigyeléseink alapján a modellek kontrolljával kezdtük. Miután láttuk, hogy a fotografikus észleléseknél pontatlabb, de nagyon nagy számú vizuális észleléseink a legnagyobb és előre jelezhetetlenül jelentkező sűrűségváltozások követésére sokkal alkalmasabbak lehetnek, mint a már viszonylag elég jól leírt egyéb változások vizsgálatára, úgy döntöttünk, hogy az előbbieket vizsgálatát tűzzük magunk elé célként. Bár az akkori megfigyelési és számítástechnikai eszközeink nem voltak egy szinten a nyugati világ obszervatóriumainak lehetőségeivel, de célunk mégis az volt, hogy a COSPAR kongresszusain bemutatott legjobb felsőlégköri modelleket (Jacchia modelljei, CIRA, MSIS) ellenőrizzük és javítsuk.

Az órák vagy egy-két nap alatt lezajló geomágneses légsűrűség-növekedések esetében

azonban a vizuális megfigyeléseknek nemcsak a pontossága, de az időfelbontása sem volt elegendő arra, hogy a légsűrűség és a hőmérséklet gyors időbeli változásait követni lehessen. Ugyanis csak nagyon ritka esetben sikerült egymás utáni átvonuláskor megfigyelni egy-egy szputnyikot (ami 1,5 órás időfelbontást jelent a periódusgörbén), jó esetben ez naponta (ami egynapos időfelbontás), de néha csak többnaponta sikerült.

Almár Iván, aki korábban csillagspektroszkópiával is foglalkozott, felismerte, hogy az ott az abszorpciós színekpóvonalak összintenzitásának jellemzésére használt *ekvivalens szélesség* paraméter nagyon jól általánosítható a geomágneses vihar alatt létrejövő sűrűségváltozás-görbe alatti integrál meghatározására, amely a vihar által kiváltott össz-sűrűségváltozást jellemzi. Az általa kidolgozott módszer

pedig az, hogy, ha a geomágneses vihar előtti és utáni nyugalmi időszakban meghatározzuk a periódusgörbét – ami nyugalmi időszakban egyenletesen csökkenő, vagyis lefelé tartó egyenes – akkor a periódus hirtelen esésének mértéke a vihar előtti szintről a vihar utáni szintre adja ezt az integrált (1. ábra). A modellértékekkel összehasonlítva látjuk, hogy hol és mikor kell a modellt javítani.

Az 1960-as évektől az 1970-es évek közepéig Illés Erzsébet vezetésével mintegy hatvan szputnyikmegfigyelő állomás tizenkét évnnyi megfigyelési anyagából kikerestük a geomágneses viharok körüli megfigyeléseket, digitalizáltuk, és az általunk írt számítógépi programokkal feldolgoztuk. Ehhez a magyar hálózat megfigyelésein kívül felhasználtuk egész Eurázsia megfigyelési hálózatának anyagát: angol, francia, finn, német, lengyel, román,

bulgár és a volt Szovjetunió összes megfigyelő-állomását is. Ezeket ekkoriban csak nyomtatásban tették hozzáférhetővé az egyes állomások. A többmillió adatból 89 ekvivalens időtartamot (D) sikerült meghatározni, amelyek a jelentős számú (34) mesterséges hold különböző magasságokban történt fékeződése miatt a modellhibák magasságfüggésére engedtek következtetni. A D -értékekből vezettük le, hogy főleg 200–300 km között a modellek nagyon alábecsülik a sűrűségváltozásokat geomágneses viharok idején, néhol több száz százalékkal is. Hogy ez milyen lényeges, az akkor derült ki, amikor a Skylab űrállomás élettartama lényegesen rövidebbnek bizonyult, mint amennyit a szokásos felsőlégköri modellek alapján számoltak, vagyis a vártnál sokkal hamarabb fékeződött le, és égett el a légkörben.

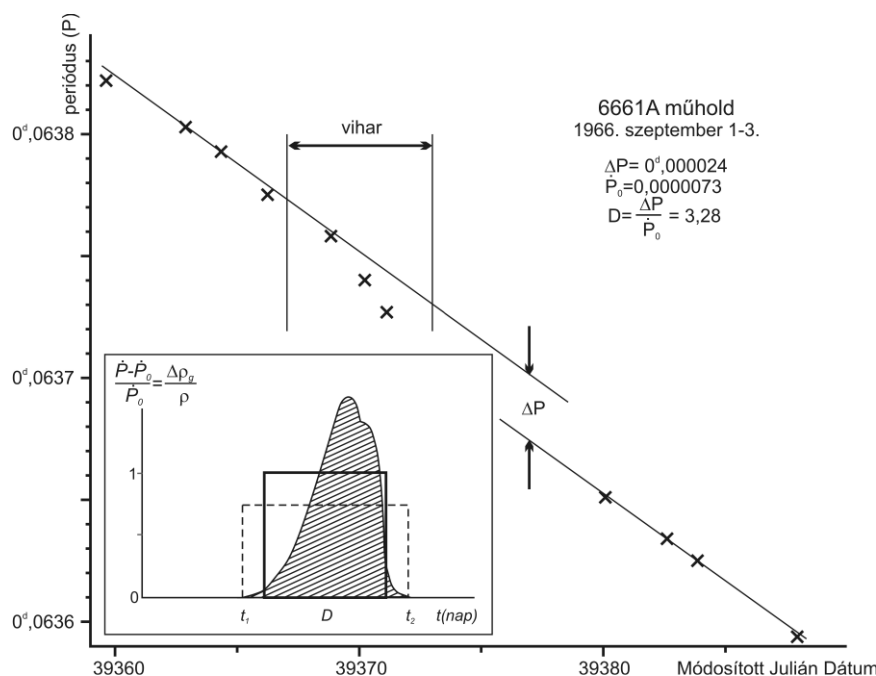
A több mesterséges hold párhuzamos mérése nemcsak a magasságfüggést, de a földrajzi szélességtől és a napszaktól való függés vizsgálatát is lehetővé tette. Észrevettük, hogy az éjszaka közepén mindig van egy, a nappalihoz képest kisebb sűrűségi maximum a maradékokban (2. ábra), amely sokkal erőteljesebb geomágneses viharok idején. Nagyobb földrajzi szélességek felé a maximum nagysága csökken, és fázisban is későbbi helyi időre tolódik át. A geomágneses szempontból nyugodt időben megjelenő éjszakai sűrűségnövekedést – amit egyébként mások is megtaláltak – egy, a szubsoláris pontból radiálisan kiinduló szelek által kiváltott kompressziós fűtésnek tulajdonítottuk. A viharok alatt felépő, megnövekedett amplitúdójú maximumnak viszont tovább kerestük az okát.

Ebben sokat segített a MANT (Magyar Asztronautikai Társaság) által 1972 óta évente, majd később kétfévente szervezett Ionoszféra-Magnetoszféra Szeminárium (a sorozat azóta

is létezik), amelyen geofizikus, fizikus, meteorológus, ionoszféra-kutató, napfizikus és csillagász kollégákkal együtt vettünk részt, hogy egymással ismertessük az intézeteinkben folyó, az űrkutatással kapcsolatos tevékenységünket. Többek között *Vérő József, Szemerédy Pál, Abonyi Iván, Tarcsay György, Benkő György, Varga András* és legfőképpen *Bencze Pál* (akivel tartós együttműködés is kialakult) a magnetoszférát, a bolygóközi teret és a galaktikus kozmikus sugárzást tárgyaló előadásai alapján ismertük fel, hogy a modellmaradékokban talált maximumoknak a helyi időben elfoglalt helyei (3. ábra) arra utalnak, hogy a geomágneses viharok idején létrejövő sűrűségnövekedésnek nem csak az aurora-övezet lehet a forrása, ahogy ezt a modellek feltételezik, és az Ap indexszel leírják.

Legalább húszféle geofizikai és bolygóközi paramétert vizsgáltunk meg mind a modell-leírás, mind a jelenség mögötti fizika megértése érdekében. Azt találtuk, hogy a galaktikus kozmikus sugárzás Deep Riverben mért beütésszáma (C_{DR}) önmagában jobb paraméter lenne a felsőlégkör sűrűségének leírására, mint az addig használt $S_{10,7}$ és Ap . Ez arra utalt, hogy a bolygóközi térben a napszéllel terjedő zavarok, amelyek a kozmikus sugárzás részecskéit is szétszórják, és ezzel csökkentik a Föld felszínén mért beütésszámukat is (Forbush-csökkenések), okozhatják az általunk talált többszörös-effektust.

Tehát a geomágneses viharok környékét kezdtük részletesebben vizsgálni. Kiderült, hogy viharok után a sűrűséggörbe nem tér azonnal vissza a nyugalmi szintre, ahogy ezt az Ap görbe alapján várnánk, hanem még kb. egy hétig magasabban marad (4. ábra). Ez azt eredményezi, hogy a viharok előtti és a viharok utáni időkben ugyanazon Ap értékhez más sűrűségérték tartozik: a sűrűség az Ap kétér-

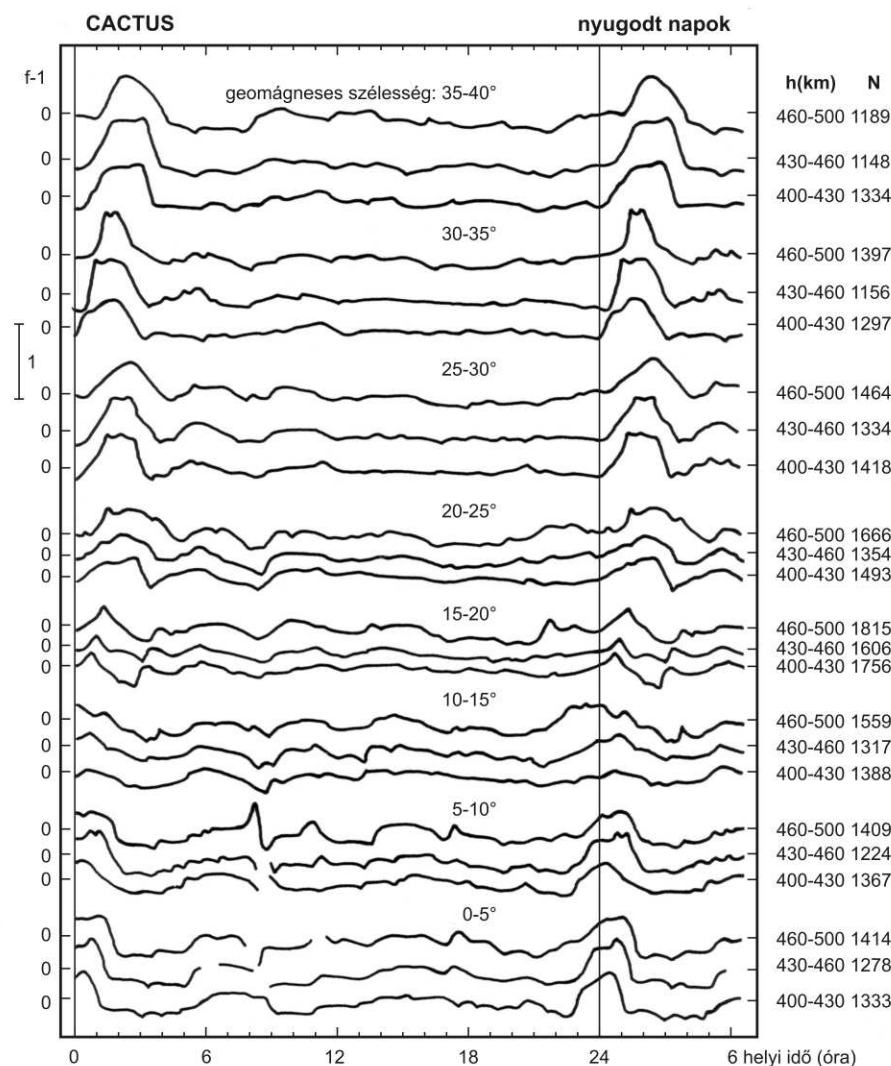


1. ábra • A D meghatározásának módszere egy geomágneses vihar okozta perióduscsökkenés példáján bemutattva (Inszertben a D ekvivalens időtartam definíciója.)

tékü függvénye, tehát az A_p önmagában nem alkalmas a geomágneses effektus leírására.

Ez vezetett annak a felismerésére, hogy az aurora-fűtés mellett kell, hogy legyen egy másik forrása is a magnetoszférán keresztül a napszélből megcsapolt energiabetáplálásnak. A talált effektusok a következők voltak: a

földrajzi szélességtől való függés – a nagyobb maradékokkal az egyenlítőnél –, az éjszakai és maximum és a hatórási helyett csak kétórás időzés a Dst indexhez képest. A Bencze Pállal folytatott diskussziók révén jutottunk arra a következtetésre, hogy a gyűrűáramból kiszóródó részecskék (a napszélből származó

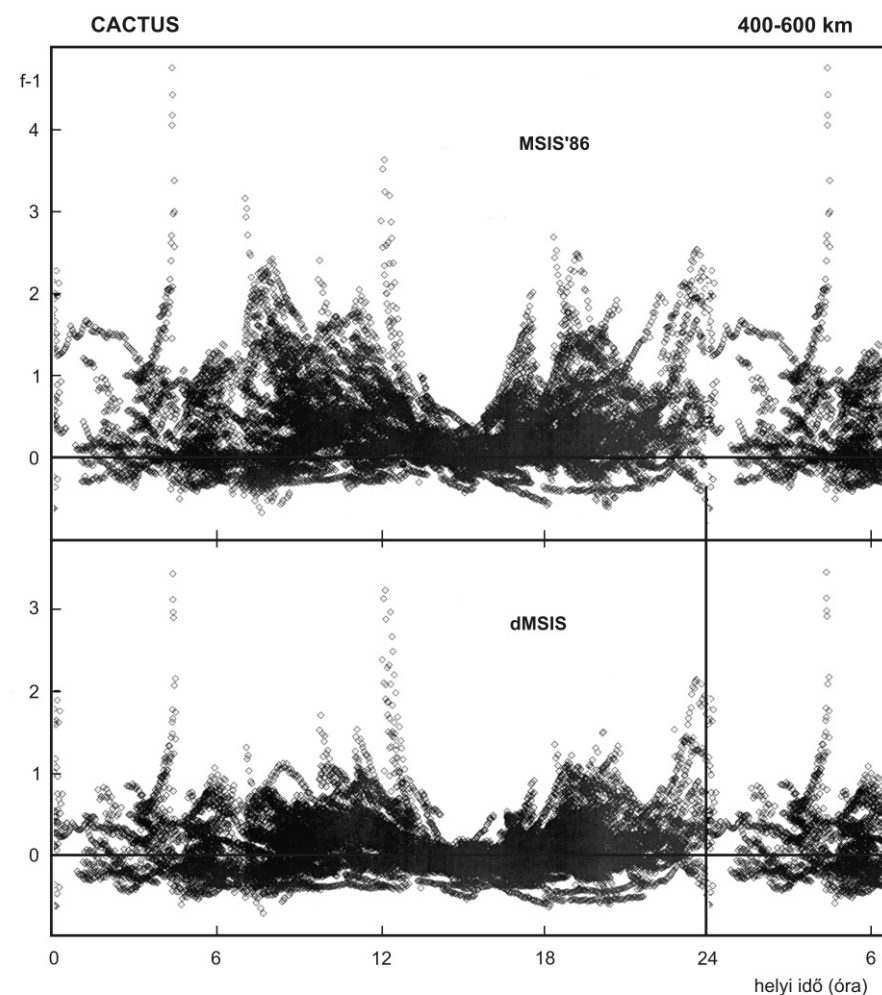


2. ábra • Geomágnesesen nyugodt napokon az éjféli körüli maximum feltűnően jelentkezik a modellmaradékokban ($f-1 = [\rho^{\text{mért}} - \rho^{\text{modell}}] / \rho^{\text{modell}}$), különösen az egyenlítő körzetében és közepes szélességeken (ott az LST helyi időben némileg későbbre tolódva).

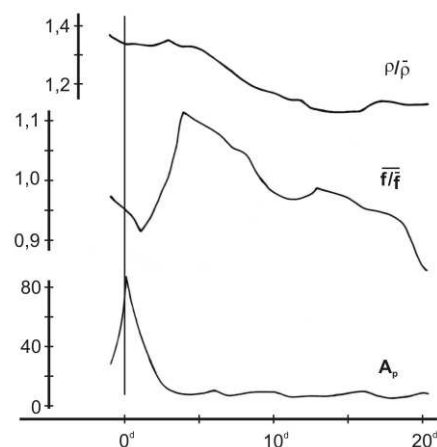
protonok, illetve az ionoszféra eredetű oxigénionok) fűtése hozhatja létre azt a jelenséget, hogy a légsűrűség geomágneses viharok után még napokig nem tér vissza a korábbi nyugalmi szintre. Ezért a légsűrűség számításánál az A_p mellé (amelyhez képest a modellek hatórási időzésével számoltak) egy, a gyűrűáram erősségének változását jellemző $\Delta Dst/\Delta t$ paramétertől függő szorzófaktorot vezettünk be, a Dst -hez képest kétórás időké-

séssel. Mivel a $\Delta Dst/\Delta t$ arányosnak bizonyult a Dst -vel, ezért a feltételek egyenletekben Dst -t használtuk indexként. Ezzel sokkal jobb leírást tudtuk adni a magnetoszféra-viharokkal kapcsolatos felsőlégtörési sűrűség-növekedéseknek, mint a nemzetközi modellek (3. ábra).

Az 1980–1990-es években már megszületett a Dst -t is figyelembe vevő dMSIS modellünk, majd ennek a magasság- és napszakfüggést is figyelembe vevő változata, a ddMSIS,



3. ábra • Nyilvánvalóan látszik, hogy a CACTUS-mérések maradékai a nemzetközi modellekhez képest (felső panel) nagyobbak, mint a mi dMSIS modellünkhöz viszonyítva (alsó panel).



4. ábra • Geomágneses viharok után a légsűrűség (felső görbe) nem tér azonnal vissza a nyugalmi szintre, mint a modellekben indexként használt A_p (alsó görbe). Tehát nyilvánvaló, hogy a légsűrűség nem lehet az A_p (vagy K_p) egyértékű függvénye, ahogy ez az összes felsőlégköri modellben szerepel.

(Almár – Illés-Almár, 2004; Illés-Almár, 2004a), amelynek megalkotásánál már rendelkezésünkre álltak a francia CASTOR-hold CACTUS mikro-akcelerométerének nagyfelbontású és nagy pontosságú *in situ* sűrűségmérései is (a mérések gyakorisága 10 s volt). Ezzel felhívtuk az elméleti szakemberek figyelmét arra is, hogy a belső magnetoszféra és a légkör kapcsolata sokkal bonyolultabb, mint ahogy azt harminc éven keresztül gondolták, és a magnetoszféra fűtésének ezt a második forrását, mármint a gyűrűáramfűtést is bele kell építeni a fizikai leírásba.

Hogy mikét érthettük el ezeket az eredményeket, noha ezeket az *in situ* méréseket előtűnk már mások is analizálták? Azzal, hogy nem a sablonos, mindenki által használt statisztikai programokat használtuk csak, hanem magunk fejlesztettünk a kitűzött feladatokhoz alkalmasabb számítógépi programokat.

A szokványos statisztikai programok feltételi egyenleteibe új tagokat vettünk be, amire az 1960-as évek óta nem volt példa. Így sikerült két új fűtés létét bizonyítani, és a modellekbe a leírásukat bevezetni (ddMSIS-modell).

A gyűrűáramfűtés felfedezése és az egyenlítőn a nagy energiájú semleges atomok által közvetített fűtés bizonyítása után szerettük volna kimutatni a gyűrűáramból a hullám-részecske kölcsönhatás miatt kiszóródó részecskék fűtését is az aurora-övezet alatti ún. SAR-ív régióban (5. ábra). Ezt azonban sem a CACTUS, sem az akkor már szintén rendelkezésünkre álló, olasz San Marco V hold akcelerométeres méréseiből nem sikerült végrehajtani, mert a CACTUS-akcelerométert szállító CASTOR-hold 30°-os inklinációjú, a San Marco V pedig 3°-os inklinációjú pályán mozgott, tehát sohasem mértek az 50–60° szélesség felett. Ezért 2000–2001-ben a régi vizuális észlelésekhez nyúltunk vissza. Ezek az észlelések azonban nem voltak elég pontosak ennek a finom effektusnak a kimutatásához, viszont melléktermékként egy másik jelenség felfedezését tették lehetővé.

Észak–dél aszimmetria a felsőlégkör sűrűségében és hőmérsékletében

Nevezetesen kiderült, hogy az északi félgömb felett melegebb a felsőlégkör, mint a déli felett (Illés-Almár – Almár, 2006). Miután a megfigyelési anyag tizenkét éve mindenféle évszakot, naptevékenységet, napszakot stb. tartalmaz, ez átlagban értendő. Mi okozhat ilyen különbséget a két félgömb hőmérsékletében? A szárazföld–tenger borítottság, esetleg a geomágneses tér aszimmetriája? A geomágnesesen nyugodt és zavart napok között azonban nem találtunk különbséget; ha van, az finomabb, mint amit a pontatlan vizuális észlelésekkel ki lehet mutatni. A tengerborítottság mint

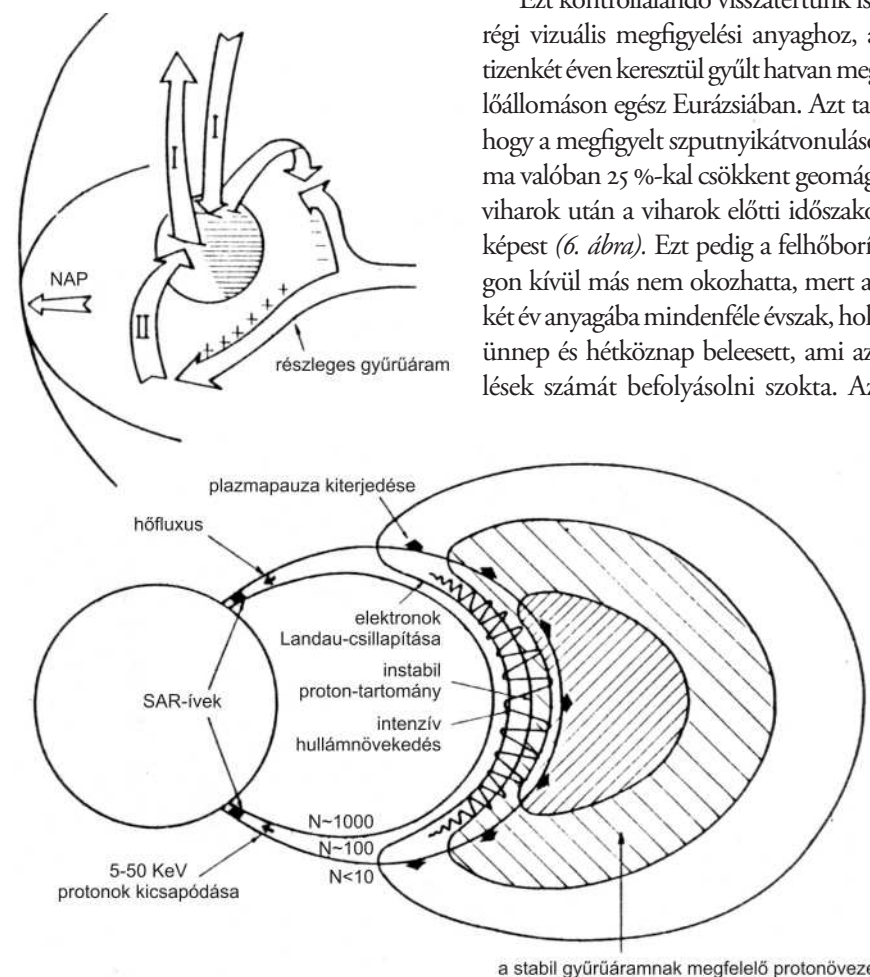
okozó esetén érdekes, hogy a víz nagyobb fajhője még 200–400 km magasságok között is éreztetheti a hatását!

Geomágneses viharok után több a felhő Eurázsia felett

2000 után a geomágneses vizsgálatoknak még egy másik, érdekes mellékterméke is adódott (Illés-Almár, 2004b). Amikor az 1970-es évek elején az ekvivalens időtartamokhoz gyűjtöt-

tuk a megfigyelési anyagot, észrevettük, hogy geomágneses viharok után sokkal kevesebb a megfigyelés a viharok előtti észlelésszámhoz képest, de magunk sem mertük elhinni, hogy itt egy reális jelenséget fedezhetnénk fel. A 2000-es évekre azonban mások kutatásai is ebbe az irányba mutattak, sőt elmélet is született, hogy a galaktikus kozmikus sugárzás beütésszámának megváltozása miatt a levegő vezetőképességében létrejövő változás szól bele a felhőképződésbe.

Ezt kontrollálandó visszatértünk ismét a régi vizuális megfigyelési anyaghoz, amely tizenkét éven keresztül gyűlt hatvan megfigyelőállomáson egész Euráziában. Azt találtuk, hogy a megfigyelt szputnyikátvonulások száma valóban 25 %-kal csökkent geomágneses viharok után a viharok előtti időszakokhoz képest (6. ábra). Ezt pedig a felhőborítottságon kívül más nem okozhatta, mert a tizenkét év anyagába mindenféle évszak, holdfázis, ünnep és hétköznap beleesett, ami az észlelések számát befolyásolni szokta. Az igaz,

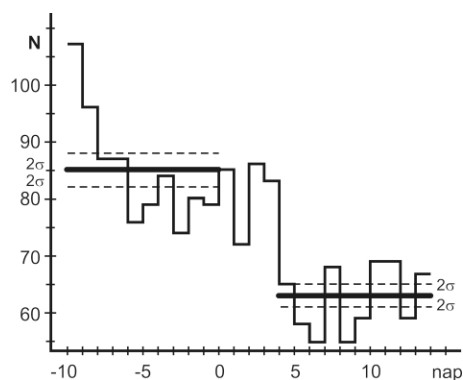


5. ábra • Vázlat a gyűrűáram-jelenség magyarázatához, megjelölve a SAR-ív övezet helyzetét

hogy mesterséges holdat megfigyelni általában csak este szürkület után és reggel szürkület előtt lehet, amikor a megfigyelő már sötétben van, de az átvonuló szputnyikot még megvilágítja a nap. Tehát azt állíthatjuk, hogy szürkületek idején a geomágneses viharok utáni nyugalmi időszakokban Eurázia felett kb. 25 %-kal nagyobb volt a felhőborítottság, mint ugyanezen napszakokban a geomágneses viharok előtt. Hogy ezek milyen fajta felhők, arról nem tájékoztatnak a megfigyelések, csak arról, hogy az észlelők nem látták a műholdak átvonulását.

A felsőlégköri gravitációs és akusztikus hullámok

A *Dst*-vel jellemzett gyűrűáramfűtés-tagot is levonva, a maradékok már fehér zajt adtak; mi legalábbis semmiféle paramétertől nem találtunk függést. A szórás pedig sokkal nagyobb volt, mint amit akár a CACTUS, akár a San Marco V hold mérési pontossága megengedhetett volna. Ezért a szórást kezdtük vizsgálni mindenféle paraméter függvé-

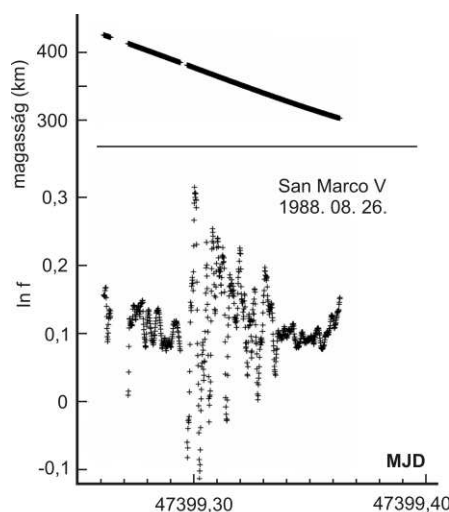


6. ábra • Az egy-egy nap alatt észlelt műholdátvonulások száma (N) geomágneses viharok (nulladik nap) előtt és után. A szuperponált epochák módszerét 14 geomágneses vihar időszakára alkalmaztuk.

nyében. Ezt a vizsgálatot különösen a San Marco V hold egy másodperc időfelbontású mérései tették lehetővé. A régi vizuális és a CACTUS-anyag csak statisztikai vizsgálatokra volt alkalmas (Illés-Almár et al., 2001).

A szórás nőtt a magassággal, a napszakkal, a földrajzi szélességgel. Kiderült, hogy a hullámzás amplitúdója ugrásszerűen megnő egy bizonyos magasság felett, amely magasság a napszakkal változik. Találtunk példát olyan esetre is, amikor a Hold egy viszonylag alacsony magasságon olyan térrészen ment át, amelyen belül a hullámzás amplitúdója hirtelen nagyobb lett, mint a térrész környezetében (7. ábra).

Továbbá kétféle, nagyon gyors sűrűségváltozást találtunk. Az egyik fajta effektus egy néhány tíz másodpercig tartó hirtelen sűrűségcsökkenés vagy sűrűségcsökkenés-sorozat, amelynek mélysége hat-tízszere a környezet



7. ábra • Példa az általunk felfedezett felsőlégköri hullámjelenségek egyikére. Ebben az esetben a hold olyan térrészen haladt át, ahol a légköri hullámok amplitúdója nagyobb volt a környezeténél (térbeli rezonancia).

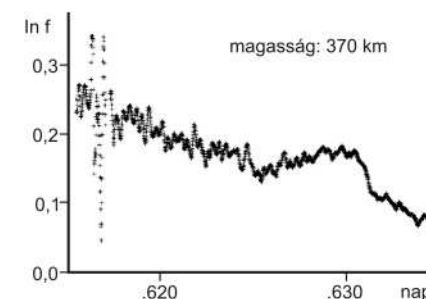
hullámamplitúdójának. Ezt Bencze Pállal közösen a San Marco V hold ionoszféra-burorékon való áthaladásával hoztuk összefüggésbe. Robert W. Schunk és Howard G. Demars (2003) modellszámításai is igazolták ezt a hipotézisünket. A másik fajta változás a háttér-hullámzás amplitúdójánál tíz-hússzor nagyobb, hirtelen sűrűség-növekedések (8. ábra), amikor a San Marco V hold meteoronyokon haladhatott keresztül (Bencze Pál hipotézise).

Egyébként ezekből a vizsgálatokból nyilvánvalóvá vált, hogy a 200 km feletti termoszférában is állandóan jelen vannak belső gravitációs és akusztikus hullámok, amelyek miatt a modellek 10–15 %-nál pontosabban gyakorlatilag sohasem tudják előre megadni egy pontban a pillanatnyi légsűrűséget – ami re egyébként már többek között vezető amerikai geodéták is felhívták a figyelmet.

Miért fontos a felsőlégkör vizsgálata?

A semleges felsőlégkör műholdas vizsgálata nem tartozik a „divatos” kutatási témák közé, pedig a Nap–Föld fizikai kapcsolatok fontos részét képezi. Ugyanis a Nap-hatások kapcsolata a földi magnetoszférával, továbbá a kölcsönhatás a gyakorlatilag azonos rétegben egyidejűleg jelenlévő, töltött részecskék alkotott *ionoszféra*, illetve a semleges részecskékből álló *felsőlégi kör* között ezúton tanulmányozható a legtisztábban.

A Napról sugárzás formájában érkező energia nagy része éppen a semleges felsőlégkörben termalizálódik. A szoláris fűtés helyeinek pontos meghatározása által juthatunk el annak tisztázásáig, hogy hol és milyen formában áramlik be ez az energia (3. ábra). A felsőlégkörben sokkal tisztábban látszanak



8. ábra • Példa az általunk felfedezett felsőlégköri hullámjelenségek egyikére. A görbe elején látható nagy sűrűség-növekedés majd csökkenés feltehetőleg arra utal, hogy a hold egy meteoritot metszett.

ezek a fontos folyamatok, mint a meteorológia által tanulmányozott alsólégkörben: egyrészt a légkör felfelé exponenciálisan csökkenő sűrűsége miatt (a ritka felsőlégkörben a kisebb szoláris effektusok is viszonylag könnyen azonosíthatóak), másrészt a talaj közelében olyan erősen érvényesülnek a felszín lokális hatásai, hogy a kozmoszból érkező hatások elkenődnek, illetve módosulnak. Ami a felsőlégköri kutatásokat még napjainkban is igazán nehézé teszi, az az a körülmény, hogy a felsőlégkör sűrűségét (hőmérsékletét) csak nagyon kevés mesterséges hold méri közvetlenül, s azok is viszonylag rövid időszakokon belül. Ezért volt szükségünk arra, hogy több évtizedig tartó vizsgálatainkban a műholdak fékeződésén alapuló, közvetett módon levezetett adatokat is felhasználjuk. Eredményeink e két eljárás egyedülálló kombinációjának köszönhetőek.

Kulcsszavak: *felsőlégi kör modellek, hullámok a felsőlégkörben, műholdmegfigyelés, Nap–Föld fizikai kapcsolatok, űrkutatás*

IRODALOM

- Almár Iván (1958): Asztronautika – története, felosztása és egyes problémái. Magyar Tudomány. 65, 3, 1–2.
- Almár Iván (1979): *A felsőlégköri geomágneses effektusösszintenzitásának vizsgálata*. Doktori értekezés. MTA, Budapest
- Almár Iván – Illés-Almár Erzsébet (2004): A Proposal to Improve the CIRA'86 Model in the Equatorial Region: The ddMSIS Model. Advances in Space Research. 34, 8, 1768–1772.
- Rees, David – Fuller-Rowell, Timothy J. (1988): Chapter 2. The CIRA Theoretical Thermosphere Model. Advances in Space Research. 8, 5–6, 27–106.
- Illés Erzsébet (1993): *A semleges légköri geomágneses fűtés egyenlítői forrásának kimutatása és vizsgálata*. Kandidátusi értekezés. MTA, Budapest
- Illés-Almár Erzsébet – Almár I. – Bencze P. – Laneve,

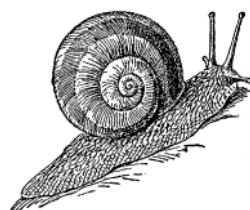
G. (2001): Wave-like Variations and Sudden Density Decreases in the Lower Thermosphere As Measured by the San Marco V Satellite. Physics and Chemistry of the Earth (C). 26, 4, 275–280.

Illés-Almár Erzsébet (2004a): Two Distinct Sources of Magnetospheric Heating in the Atmosphere: The Aurora and the Ring Current. Advances in Space Research. 34, 8, 1773–1778.

Illés-Almár Erzsébet (2004b): Weather Reacting to Geomagnetic Storms. Advances in Space Research. 34, 2, 376–378.

Illés-Almár Erzsébet – Almár Iván (2006): A North-South Asymmetry in Thermospheric Density. Advances in Space Research. 38, 11, 2461–2464.

Schunk, Robert W. – Demars, Howard G. (2003): Effect of Plasma Bubbles on the Thermosphere. Journal of Geophysical Research. 108, A6, SIA5, 1–8.



AZ ENERGIASTRATÉGIA SAROKPONTJAI

Reményi Károly

az MTA rendes tagja
remenir@freemail.hu

Az energetikáról a társadalom minden közöségének, szervezetének és rétegének van véleménye. A véleményeket érdekek, ismeretek és érzelmek befolyásolják. Itt, sajnos igen nagy anyagi tételekről van szó, és a rossz vagy jó döntések gazdasági hatása óriási mértékű. Az energiastratégiák kialakításakor a megoldandó problémák három nagy csoportba sorolhatók:

- A hozzáférés biztosítása (Accessibility)
- A különböző energiatípusok rendelkezésre állása (Availability)
- A társadalmi elfogadás (Acceptability)

A helyes döntésnél első és legfontosabb kérdés, hogy mivel gazdálkodhatunk, az adott energiahordozó milyen mennyiségben, minőségben és költséggel áll rendelkezésre.

A három nagy csoport:

- Fosszilis energiahordozók: szén, szénhidrogének, nyersolaj, földgáz
- Nukleáris energiahordozók: felhasználásuk szerint fissziós vagy fúziós
- Természeti közvetlen energiaforrások (megújulók): víz, nap, szél, geotermikus, biomassa

A világhelyzet

A vagyon mennyiségének értékelése sohasem zárható le, mivel az új lelőhelyek felfedezésével és az új hasznosítási technológiákkal változik. Ennek részletesebb elemzését a fosszilis

és a nukleáris energiahordozókkal kapcsolatosan végzem el.

Az első és legfontosabb kérdés, hogy az adott energiahordozóból az ellátás mennyi időre biztosítható. Erre a kérdésre általában nagyon felületes választ kapunk. Egyértelművé kell tenni, miről beszélünk. A nem pontos meghatározások igen jelentős nézetkülönbségeket idézhetnek elő. Nem sorolom fel a különböző forrásokban található fogalom meghatározásokat, és összehasonlításukkal sem foglalkozom. Az általam használt forrásoknál egyértelművé teszem a fogalmakat, és elemzem azok használhatóságát.

A fogalmak és használatuk:

Műrevaló (ipari) igazolt vagyon (proved recoverable reserves) – az adott helyen, a jelen és a helyi – várhatóan gazdaságos – feltételek között működő és rendelkezésre álló technológiával feltárható, igazolt mennyiség (ezzel számolunk).

Termelés (production) – az adott energiahordozó-vagyonból a vizsgált évben kitermelt mennyiség.

Elterjedten használják egy-egy energiahordozó értékelésekor a két mutató arányát.

R/P...vagyon/termelés...reserves/production.

Az arány dimenziója: év; mert tömeg/tömeg/év a műveletben résztvevő fogalmak. Felületesen értékelve azt mutatja, hogy az