

GYŰRŰK A BOLYGÓK KÖRÜL

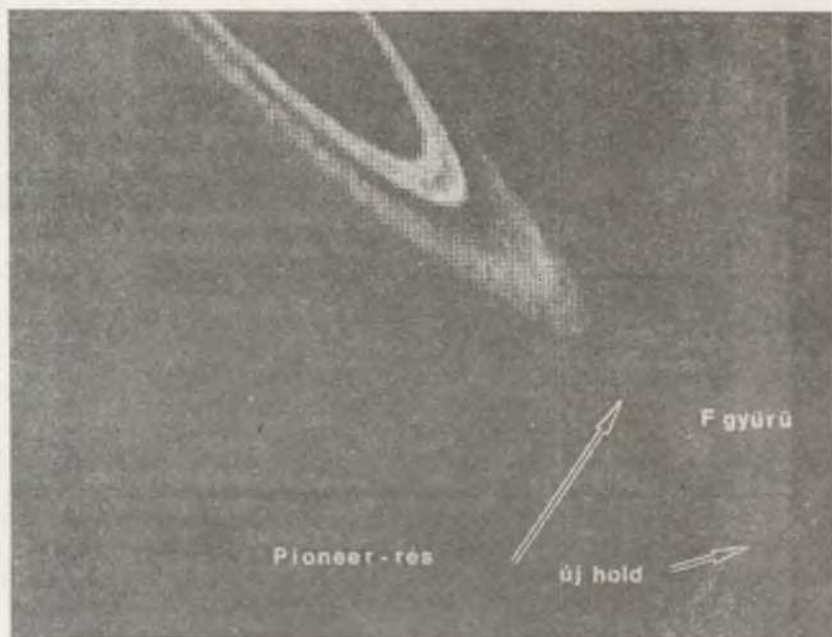
A Szaturnusz gyűrűjének felfedezését 1610-hez köti a tudomány, amikor GALILEI saját készítésű távcsövén keresztül valamiféle „füleket” látott a bolygó mellett. Tény azonban, hogy gyűrű jellegüket csak 1656-ban ismerte fel HUYGENS. Több mint háromszáz év telt el, amíg 1977-ben egy csillagfedés alkalmával az emberiség tudomást szerzett az *Uránusz gyűrűjéről*, s alig két évvel később a Voyager űrszondák mérései alapján felfedezték a *Jupiter gyűrűjét* is. A négy óriásbolygó közül három tehát gyűrűkkel rendelkezik; sokak meggyőződése, hogy a negyedik gyűrűrendszer is létezik, csak felfedezése várat még magára.

Ebben a cikkben a felfedezések sorrendjében áttekintést adunk a gyűrűkkel kapcsolatos megfigyelési tényekről, kiemelve közös tulajdonságaikat, és ismertetve azokat az elméleteket, amelyek keletkezésükre vonatkoznak. Miután a Pioneer—11 várható Szaturnusz-megközelítése idejére az 1979. évi Csillagászati Évkönyv cikket közölt a Szaturnuszról (a 186. oldalon), és abban a szerző összefoglalta a gyűrűre vonatkozó ismereteket is, az ismétlések elkerülésére itt csak az azóta nyilvánosságra hozott eredményekre térünk ki. Az előzmények iránt érdeklődő olvasónak tehát a fenti cikket ajánljuk figyelmébe.

Megfigyelési eredmények

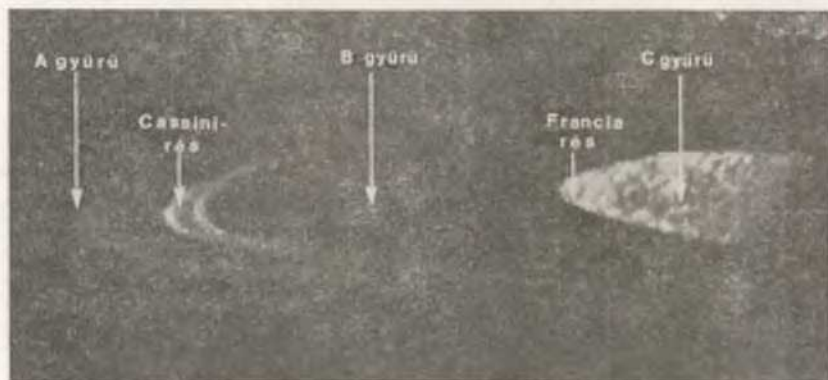
A Szaturnusz gyűrűje

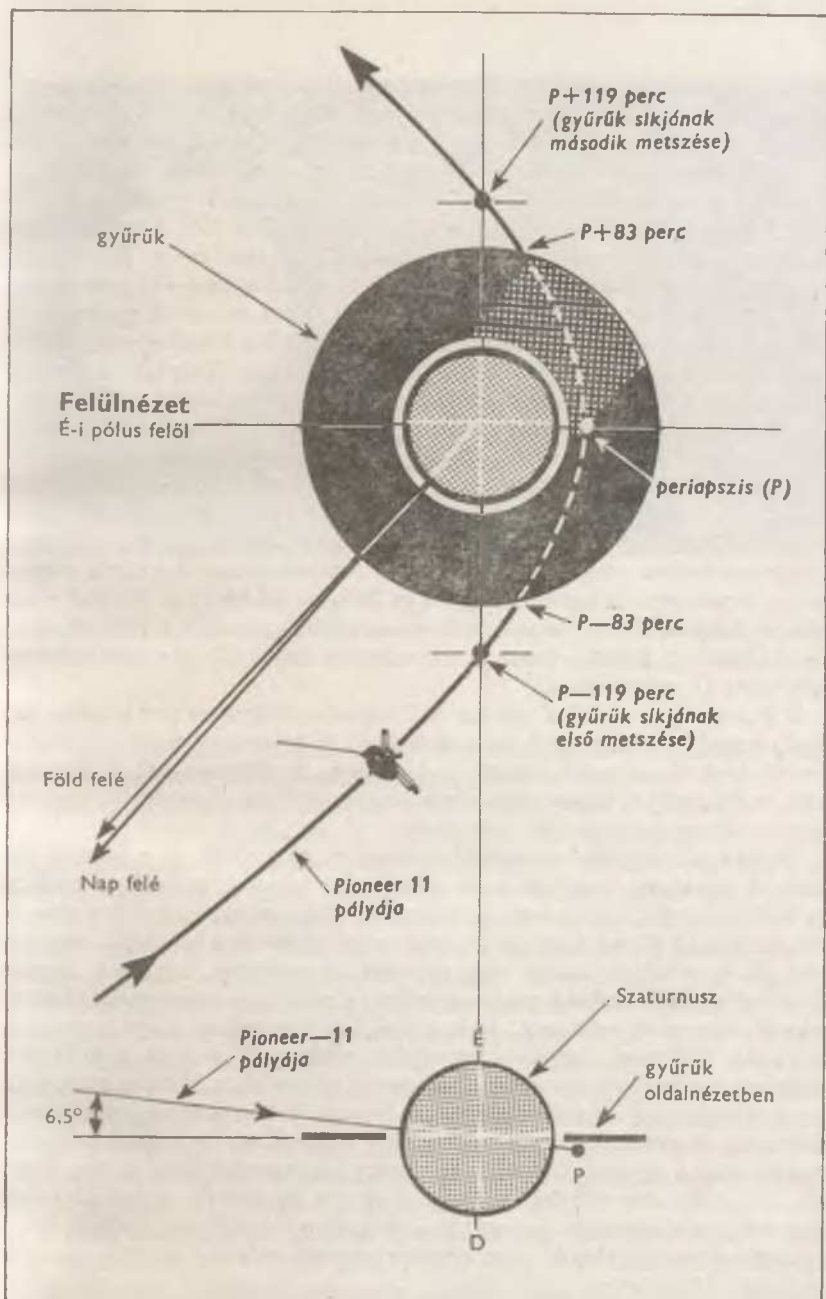
Erről az objektumról elsősorban a Pioneer—11 mérései szolgáltatottak új adatokat. A Pioneer—11 volt az első űrszonda, amely megközelítette a Szaturnuszt. A Pioneer—11 az *A*, *B* és *O* gyűrűt észlelte, de a belső és a külső (*D*, illetve *E*) fátyolgyűrűt nem. Nagy szerencsével túlélte a legkülsőnek hitt *E* fátyolgyűrűn való kétszeri áthaladást, 1979. szeptember 1-én, s további két gyűrűre bukkant. Az egyiket, amely 3500 km-rel az *A* gyűrűn túl helyezkedik el és 500 km széles, *F* gyűrűnek nevezték



1. ábra. A Szaturnusz újonnan felfedezett F gyűrűje, és a felfedező Pioneer—11 szonda tiszteletére elnevezett Pioneer-rés (NASA)

2. ábra. A Pioneer—11 ilyennek látta a gyűrűt hátulról (NASA)





3. ábra. A Pioneer—11 űrszonda pályája a Szaturnusz közelében. A szonda szeptember 1-én 21 400 km-re közelítette meg a bolygót

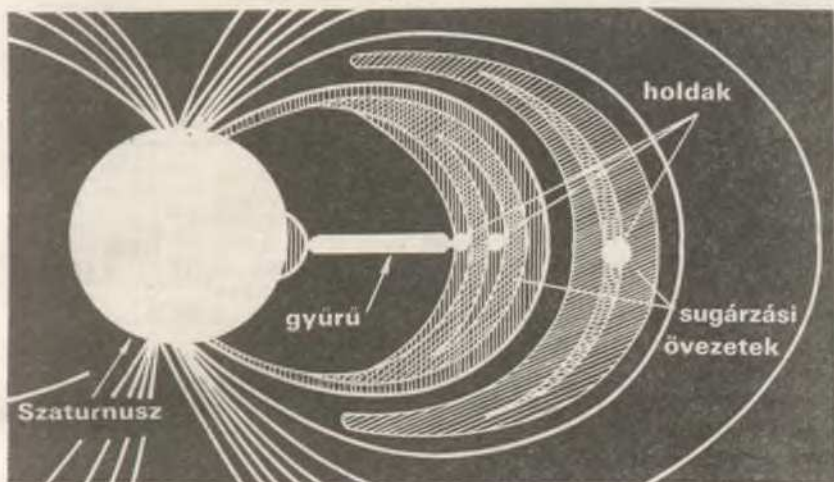
el. Az A és az F gyűrű közötti rés a szonda tiszteletére a *Pioneer-rés* nevet kapta (1. ábra). A másik új gyűrű (*G gyűrű*) az első publikáció szerint sokkal távolabb, a bolygótól mért 600 ezer és 900 ezer km-es távolság között helyezkedik el, és nagyobb testek alkotják, így inkább a kisbolygóövre emlékeztet, mint a Szaturnusz A és B gyűrűire.

A *Pioneer—11* újabb holdakat is felfedezett, legalább ötöt. Közülük négy az új gyűrűkben kering, az ötödik pedig a Janus és a Mimas holdak közötti pályán. Magát a Janus holdat a *Pioneer—11* nem látta.

A megközelítés idején a *Pioneer—11* 3500 km-rel az A gyűrűn túl repült a gyűrűk síkja alá, és alulról, áteső fényben fényképezte le azokat. Ekkor a bolygót 21 400 km-re közelítette meg. (Pályáját a Szaturnusz közelében a 3. ábra, a Szaturnuszról készített képeit pedig a II., III. és V. színes tábla mutatja.) Áteső fényben a gyűrűrendszer érdekes látványt nyújtott, mert az egyébként sötét rések világosakká váltak, a csillogó A és B gyűrű viszont majdnem teljesen sötétté, vagyis a gyűrűrendszer „negatív képe” állt elő (2. ábra). *Az a tény, hogy a rések hátulról világosak, azt mutatja, hogy innen sem hiányzik teljesen az anyag*, hiszen a fény szórásához elegendő részecske áll rendelkezésre. A gyűrűt alkotó anyag természetéről legtöbbet éppen az ilyen, áteső fényben történő vizsgálatok árulnak el, melyekre a Szaturnusz gyűrűi esetében a Földről soha nincs lehetőség, hiszen a Szaturnuszt sohasem látjuk 6°-nál nagyobb fáziszög alatt (I. színes tábla).

A *Pioneer—11* mérései szerint a Szaturnusz mágneses tere dipólus jellegű, tengelye pedig egybeesik a bolygó forgástengelyével. Sugárzási övezete sokkal gyengébb, mint a Jupiteré. A *Pioneer—11* a Szaturnusz-megközelítés teljes ideje alatt kapott akkora sugárdózist, mint a Jupiter környezetében két perc alatt!

Érdekes a kapcsolat a sugárzási övezetek, a gyűrűk és a holdak között. A sugárzási övezetek azon erővonalai mentén, melyek metszik a gyűrűket vagy a holdak keringési zónáit, *feltűnően gyenge a töltött részecskék fluxusa* (4. ábra). Úgy tűnik, hogy a gyűrűkbe és a holdakba csapódó részecskék nem pótlódnak elég gyorsan. A csaknem folytonos anyageloszlású gyűrűk érthető módon minden, a mágneses erővonalak mentén érkező részecskét befognak, de meglepő, hogy a holdak pályája mentén is kisebb a fluxus, vagyis a becsapódó részecskék helyett a hold egy keringési ideje alatt sem érkezik elegendő utánpótlás. Mindez arra utal, hogy a sugárzási övezetek részecskéi hosszú élettartamúak, ritkán cserélődnek. A részecskefluxus csökkenése a résekben is megmutatkozik, vagyis még a gyűrűk között is elég nagy az anyagsűrűség ahhoz, hogy sok részecske elnyelődjön. Érdekes, hogy az új gyűrűk és holdak helyét elsősorban a részecskefluxus csökkenéséből állapították meg, anélkül, hogy az optikai megfigyelés minden esetben sikerült volna.



4. ábra. A Szaturnusz sugárzási övezetének szerkezete. A gyűrűk és a holdak elnyelik a részecskéket

A gyűrűrendszer finomszerkezetének feltérképezése a Földről legeredményesebben csillagfedések megfigyelésével hajtható végre. J. O. PIIRONEN újra feldolgozta három jól megfigyelt csillagfedés (1917. február 9., 1957. április 28. és 1960. április 30.) történetét, és a megfigyelésekből az *A* gyűrűben négy rés jelenlétére következtetett. Ezek elhelyezkedését az 5. ábra szemlélteti. Ezek szerint maga az *A* gyűrű sem folytonos, hanem néhány elkülönülő gyűrűből tevődik össze. A rések határa rendkívül éles, és további krépe is létezhetnek. A csillagfény eltűnése e rések szélén annyira hirtelen következett be, hogy a gyűrűben alig 700 m a távolság a teljesen átlátszó és a szinte teljesen átlátszatlan helyek között. Ebből arra következtettek, hogy a gyűrű vastagsága sem lehet több néhány száz méternél, vagyis a gyűrűt alkotó testek is ennél kisebbek. Csillagfedések megfigyelésével találtak egy további rést a *C* gyűrűben is $11'',25 \pm 0'',15$ távolságban (6. ábra). Maga a *C* gyűrű $9''$ és $13''$ közötti szögtávolságban helyezkedik el. Az 1. táblázatban összefoglalva mutatjuk be a Szaturnusz egész rendszerét, a holdakkal, gyűrűkkel és azok réseivel együtt.

A földi radarmérésekből arra következtettek, hogy az *A* és a *B* gyűrűt néhány cm-nél nagyobb jég-, esetleg jeges szilikátdarabkák alkotják. Közülük csak kevésnek a mérete haladja meg a 200 cm-t. Anyaguk

A Szaturnusz rendszere

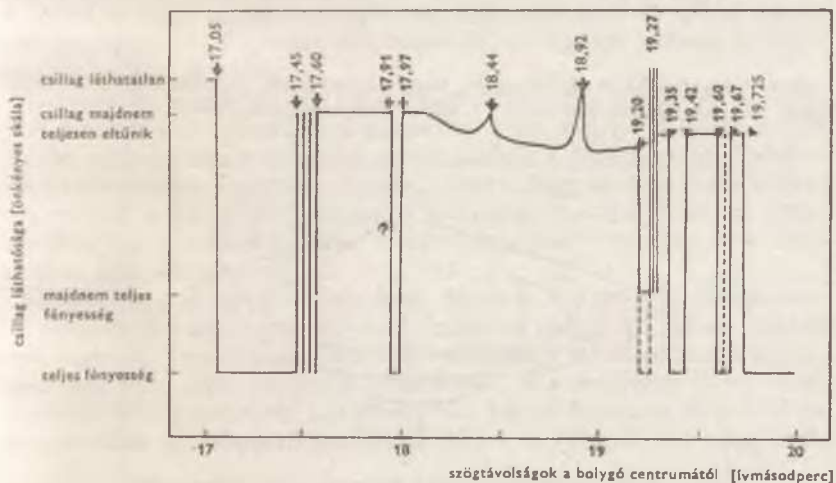
határok holdak	gyűrűk rések	távolságok a bolygó centrumától		szélesség vagy átmérő [km]
		[km]	[bolygósugarban]	
a_k ($\rho = 3$)		42 300	0,705	—
a_p ($\rho = 3$)		49 000	0,817	—
a_s ($\rho = 3$)		51 300	0,855	—
bolygó sugara		60 000	1,000	120 000
	D gyűrű	60 000—68 600	1,000—1,143	8 600
a_n ($\rho = 1$)		61 100	1,018	—
	Guérin-rés	68 600—72 600	1,143—1,210	4 000
a_p ($\rho = 1$)		70 700	1,178	—
	C gyűrű	72 600—88 800	1,210—1,480	16 200
	C2 gyűrű	72 600—75 750	1,210—1,262	3 150
	C rés	75 750—82 050	1,262—1,367	6 300
a_n ($\rho = 1$)		74 100	1,235	—
	C1 gyűrű	82 050—88 800	1,367—1,480	6 750
a_n ($\rho = 3$)		86 600	1,443	—
	Francia-rés	88 800—91 800	1,480—1,530	3 000
	B gyűrű	91 800—117 000	1,530—1,950	25 200
a_r ($\rho = 3$)		102 700	1,712	—
	Cassini-rés	117 000—121 800	1,950—2,030	4 800
	A gyűrű	121 800—137 400	2,030—2,290	15 600
	A5 gyűrű	121 800—123 850	2,030—2,064	2 050
	rés	123 850—124 250	2,064—2,070	400
	A4 gyűrű	124 250—131 600	2,070—2,193	7 350
a_n ($\rho = 1$)		125 100	2,085	—
	Encke-rés	131 600—132 476	2,193—2,208	876
	A3 gyűrű	132 476—133 200	2,208—2,220	724
	rés	133 200—133 660	2,220—2,228	460
	A2 gyűrű	133 660—134 860	2,228—2,248	1 200
	rés	134 860—135 320	2,248—2,255	460
	A1 gyűrű	135 320—137 400	2,255—2,290	2 080
	79 S3	137 520	2,292	?
	Pioneer-rés	137 400—140 160	2,290—2,336	2 760
	F gyűrű	140 160—141 260	2,336—2,354	1 100
	új hold = 79 S5	140 580	2,343	100
	új hold = 79 S6	141 000	2,350	?
a_r ($\rho = 1$)		148 300	2,472	—
	kisebb holdak (?)	149 400—153 000	2,49—2,55	3 600
	gyűrű (?)			
	S11 = új hold(?)	151 300	2,522	?
	új hold = 79 S1	152 040	2,534	170
	Pioneer-szikla			
	E gyűrű (?)	198 000—480 000?	3,30—8[?]	282 000(?)
	Dollfus-gyűrű	?—204 000	?—3,40	60 000(?)
	S10 = Janus	167 400	2,790	?
	új hold = 79 S4 (?)	169 000	2,817	?
	S1 = Mimas	185 000	3,087	400
	S2 = Enceladus	238 000	3,9	450

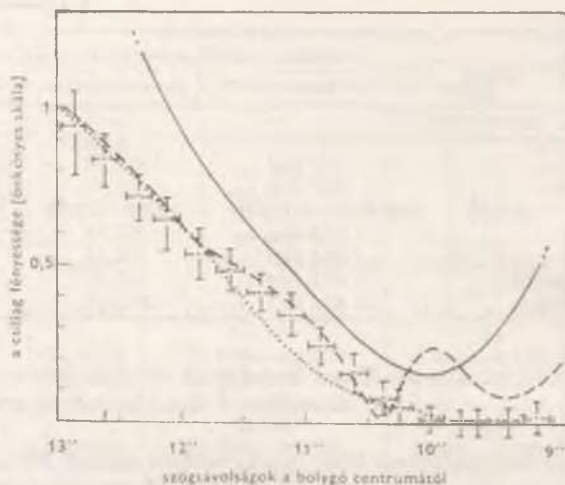
határok <i>határak</i>	gyűrűk <i>récek</i>	távolságok a bolygó centrumától		szélesség vagy átmérő [km]
		[km]	[bolygósugárban]	
<i>S3 = Telhys</i>		294 000	4,90	1 050
<i>S1 = Dione</i>		377 000	6,28	850
<i>S5 = Rhea</i>		527 000	8,78	1 600
G gyűrű		600 000—900 000	10,00—15,00	300 000
<i>S6 = Titan</i>		1 223 000	20,38	5 840
<i>S7 = Hyperion</i>		1 484 000	24,73	400
<i>S8 = Japetus</i>		3 563 000	59,38	1 200
<i>S9 = Phoebe</i>		12 950 000	215,83	300

nem lehet tiszta szilikát, de fémes összetételű darabok léte a mérésekkel még összeegyeztethető, ebben az esetben a darabok mérete viszont jóval kisebb lenne.

Az A gyűrű fényességében földi megfigyelések szerint 10%-nyi amplitúdójú *fényességváltozás* mutatható ki a Szaturnuszhoz viszonyított helyzet függvényében (7. ábra). A jelenség magyarázata elég bizonytalan, sok megalapozatlan hipotézis született már. MAXWELL 1856-ban elméleti megfontolásból feltételezte, hogy a darabkák közötti gravi-

5. ábra. A Szaturnusz A gyűrűjében csillagfedések segítségével talált rések helyeit az elfedett csillagok fényességének csökkenései mutatják, miközben végigvonnak az A gyűrű mögött





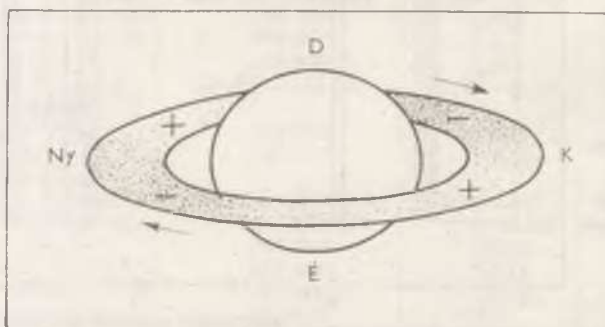
6. ábra. A Szaturnusz C gyűrűje által elfedett csillag fénygörbéje. A pontozott vonal a Cook és Franklin által 1958-ban publikált fedését.

A szaggatott vonal Guérin 1972-es megfigyelése. Guérin a $9^{\circ}3'$ környékén levő csökkenés alapján gondolta, hogy létezik a D gyűrű.

A keresztek Koutchmy közepelt méréseit mutatják a hibahatárokkal. Ezeknek az észleléseknek a $11''$ körüli enyhe felfele hajlásából lehet a C gyűrűben levő rés létére gondolni.

A folytonos vonal egyetlen mérés korrigálatlan fénygörbéje

7. ábra. Ez a sematikus rajz mutatja, hogy a Szaturnusz A gyűrűjében a várthoz képest hol van fényességtöbblet (+), illetve fényességhiány (—)



tációs kölcsönhatás következtében azok mozgó *spirálkarok mentén csoportosulnak*, hasonlóan a Tejútrendszer karjaihoz. Ma is ezt tekintik a legösszerűbb magyarázatnak a csak 1958-ban felfedezett, és 1976-ban újabb megfigyelésekkel bizonyított fényváltozási jelenségre. Maxwell modelljéből arra is lehet következtetni, hogy az A gyűrű darabkáinak mérete néhány cm és néhány km között váltakozik.

A B gyűrű nem mutat hasonló fényességingadozást, és ezt is (hogy tudniillik, ha az A mutat, akkor a B miért nem) nehéz értelmezni. Elképzelhető, hogy hiányoznak belőle a nagyobb méretű darabok.

A *gyűrűk fényének polarizációja* is vizsgálat tárgyát képezte. A várakozással ellentétben azt állapították meg, hogy a polarizáltság elsősorban a Nap — Szaturnusz — Föld sík helyzetével változik, és nem függ a gyűrű síkjának a megfigyelőhöz viszonyított állásától. E tényből arra következtettek, hogy a *fény szórása makroszkopikusan durva felületű, dérral bevont darabkákon történik*. Miután a dér polarizációs tulajdonságai meglehetősen kevésbé ismertek, PESHOT laboratóriumi méréseket végzett, melyekkel nagyon jól sikerült visszaadni a szaturnuszgyűrűk polarizációs tulajdonságait. A kísérletekben finom szemcséjű dérral bevont, durva felületű anyagot használt.

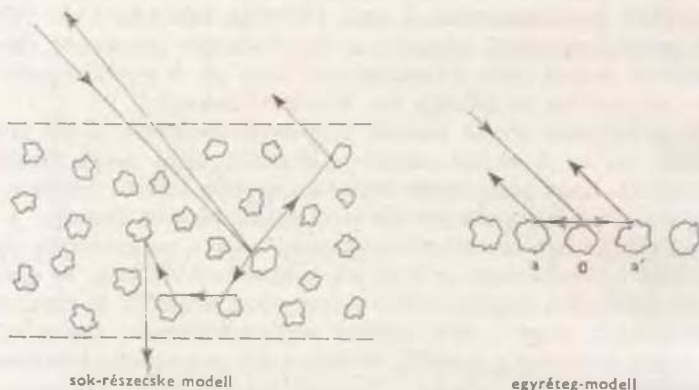
A *gyűrűk visszaverőképesége* az infravörös tartományban arra utal, hogy a darabkák vízjégből állnak, vagy legalábbis sok vízjeget tartalmaznak. Hőmérsékletük a távoli infravörösben 90 K körüli, ami megfelel a Szaturnusz távolságában elhelyezkedő, erősen visszaverő felületű testek egyensúlyi hőmérsékletének.

A megfigyelési tények összessége tehát egyre inkább arra mutat, hogy a *Szaturnusz A és B gyűrűjét alkotó darabkák főleg vízjég természetűek*. A gyűrűket vagy egyetlen rétegben egymás mellett elhelyezkedő darabkák (egyréteg-modell), vagy sok részecske vastagságú halmaz formájában képzelik el (8. ábra).

Lyman-alfa mérések segítségével a gyűrűk körül *hidrogénfelhő* jelenlétét mutatták ki. BLAMONT megbecsülte, hogy mennyi hidrogén szabadul fel azáltal, hogy a víz előbb szublimálódik a dérből, majd a vízgőzt a Nap ultraióbolya sugárzása elbontja, illetve, hogy mennyi vizet bont el közvetlenül a darabkák felületén a meteorok, a napszél, és az interasztelláris gáz bombázása. Ezek a hidrogénforrások azonban nem bizonyultak elegendőnek.

Érdekeségként megenlítjük, hogy éppen a Pioneer—11 Szaturnusz-közelsége idején jelent meg egy cikk, melynek szerzői a Jupiternél talált erős sugárzási övezet analógiájára feltették, hogy a Szaturnusz is hasonlóan erős van Allen övezettel rendelkezik, s a sugárzási övön belüli nagyobb részecskesűrűség következtében fellépő intenzívebb bombázás gondoskodna a hidrogéntermelésről. Mivel a Pioneer—11 megállapí-

8. ábra. Sokrészecske-modell, illetve egyréteg-modell a Szaturnusz A gyűrűjére



totta, hogy a Szaturnusz van Allen-övezete nagyságrendekkel gyengébb a Jupiterénél, a fenti hipotézist nyilván el kell vetni.

Miután az eddig feltételezett hidrogéntermelő források elégtelennek bizonyultak, CARLSON újra felhívta figyelmet a *Nap ultraibolya sugárzására*. A 100—180 nm (1000—1800 Å) hullámhosszú napsugárzás a gyűrű darabjainak legkülső molekularétegében is elbonthatja a vizet, és a felszabaduló hidrogén kb. egy napig még a gyűrű körül marad, majd megszökik. A megfigyelések magyarázatához összesen $3 \cdot 10^{28}$ atom/s erősségű hidrogéntermelő folyamat szükséges. A 2. táblázatban összefoglaljuk, hogy a különböző hidrogéntermelő folyamatok mennyi hidrogén felszabadítására képesek másodpercenként.

2. táblázat

Hidrogénatom-felszabadítás a Szaturnusz gyűrűje körül

H-atomot termelő mechanizmus	forráserősség (atom/s)
UV-fotonok bombázása	$1,5 \cdot 10^{28}$
fotoelektron-ion rekombináció	$9 \cdot 10^{23} - 9 \cdot 10^{24}$
szublimáció + disszociáció	$2,2 \cdot 10^{24}$
mikrometeoritok bombázása	$1,8 \cdot 10^{21}$
magnetoszféra ionjainak bombázása	$< 6 \cdot 10^{23}$
napszél bombázása	$1 \cdot 10^{23}$
csillagközi gáz bombázása	$2,2 \cdot 10^{22}$

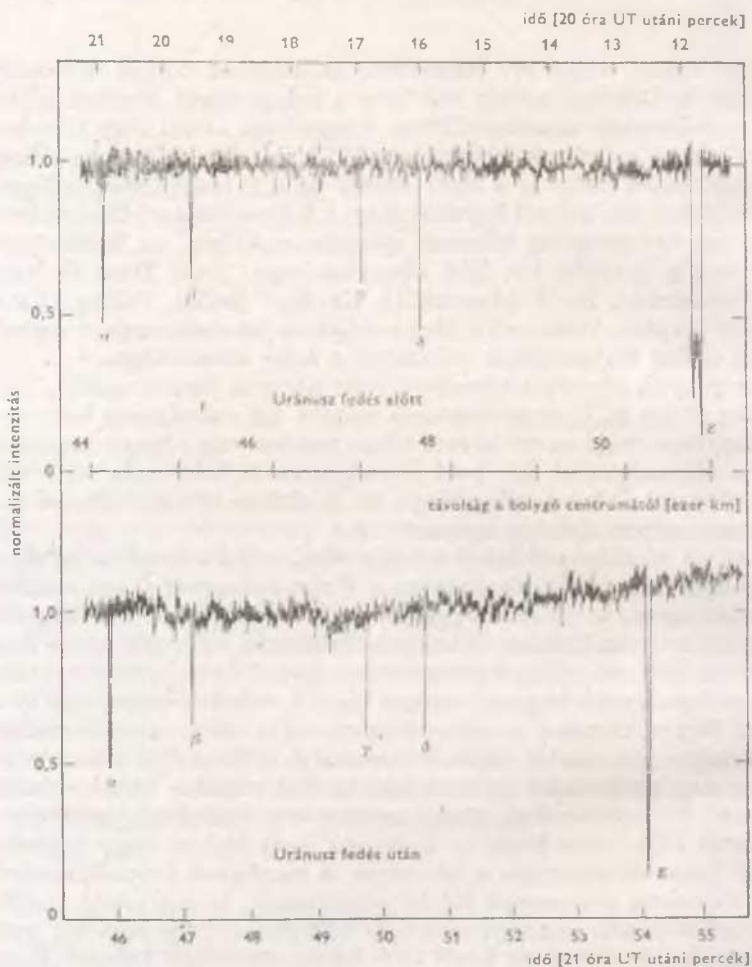
Kevéssé ismert, hogy W. HERSCHEL, az Uránusz bolygó felfedezője 1787-ben és 1789-ben gyűrűt vélt látni a bolygó körül. További hiábavaló próbálkozásai azonban 1798-ra meggyőzték arról, hogy tévedett.

Az Uránusz gyűrűinek felfedezésére 1977. március 10-ig várni kellett. A bolygó ekkor fedte el a *SAO 158687* jelű, 9 magnitúdós csillagot. A csillagfedést hét helyről figyelték meg: a Kuiper Airborn Observatory, amely egy távcsövekkel felszerelt speciális repülőgép, az Indiai-óceán felett repült, továbbá hat földi obszervatórium: Cape Town és Naini Tal (Dél-Afrika), Perth (Ausztrália), Kavalur (India), Peking (Kína) és Tokió (Japán). Valamennyi obszervatórium fotoelektromosan regisztrálta a csillag fényességének változását a fedés időszakában.

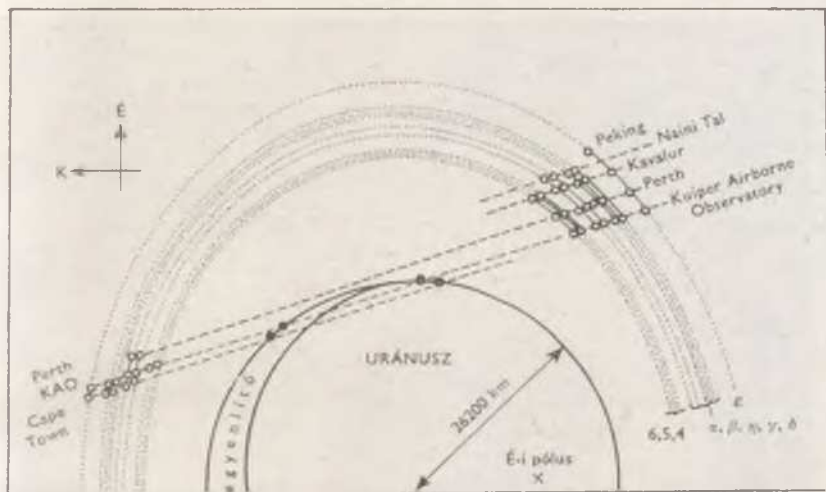
A megfigyelt jelenség a következő volt: negyven perccel azelőtt, hogy a csillag eltűnt az Uránusz korongja mögött, *hét másodpercig lecsökkent a csillag fénye*, majd az ezt követő kilenc percben *még négyszer megismétlődött a fénycsökkenés*, kb. 1—1 másodpercre. A fedés után fél órával ismét többször eltűnt a csillag fénye, de az eltűnés időintervallumai fordított sorrendben követték egymást.

Miután a repülőgépről mind a fedés előtti, mind a fedés utáni fénygyengüléseket észlelték, J. ELLIOT, a Kuiper obszervatórium munkatársa felismerte: *az Uránuszt gyűrűk veszik körül!* (A többi megfigyelő úgy vélte, hogy az Uránusz új holdjait fedezte fel.) Az első, gyors analízis öt (9. ábra), az utólagos elemzés kilenc gyűrű létét jelezte (10. ábra). E kilenc legnagyobb fénycsökkenésen kívül is voltak azonban igen éles, tűszerű fénycsökkenések a regisztrátumokon (11. ábra) melyek realitásában eleinte nem mertek hinni. A Kavalur és a Naini Tal obszervatóriumok megfigyeléseinek együttes feldolgozása azonban bebizonyította a tűszerű fénycsökkenések létét, ugyanis — a két megfigyelőállomás egymástól 1500 km-re lévén — kizárható, hogy légköri vagy műszeres eredetű hatás okozta volna a jelenséget. A megfigyelt fénycsökkenések a két állomáson nem azonos időben jelentkeztek, hanem annak megfelelő időeltolódással, amennyi szükséges volt ahhoz, hogy az adott gyűrűk árnyéka az állomások közti 1500 km-es távolságot befussa. Létezésükhöz tehát kétség sem férhet. Ezek szerint tehát további 27, nagyon keskeny gyűrűt találtak, vagyis *a bolygó gyűrűrendszere legalább 36 gyűrűből áll!* A 3. táblázat áttekintést ad az Uránusz gyűrűrendszeréről.

Szemben a Szaturnusz gyűrűinek mintegy 20 ezer km-es szélességével, az *Uránusz gyűrűi nagyon keskenyek*. Még a legszélesebb, az ϵ gyűrű sem szélesebb 20—100 km-nél, míg a többi gyűrű szélessége a 10 km-t sem éri el, általában csak néhány száz, illetve ezer méternyi. Távolságuk a bolygó felszínétől körülbelül megegyezik az Uránusz fél átmérőjével, alakjuk — az ϵ gyűrűé kivételével — kör. A gyűrűk közötti kb. 1000 km



9. ábra. A SAO 158687 jelű csillag fénygörbéje, mialatt az Uránusz gyűrűi mögött vonult végig. Az észlelést a Kuiper Airborn Observatory hajtotta végre

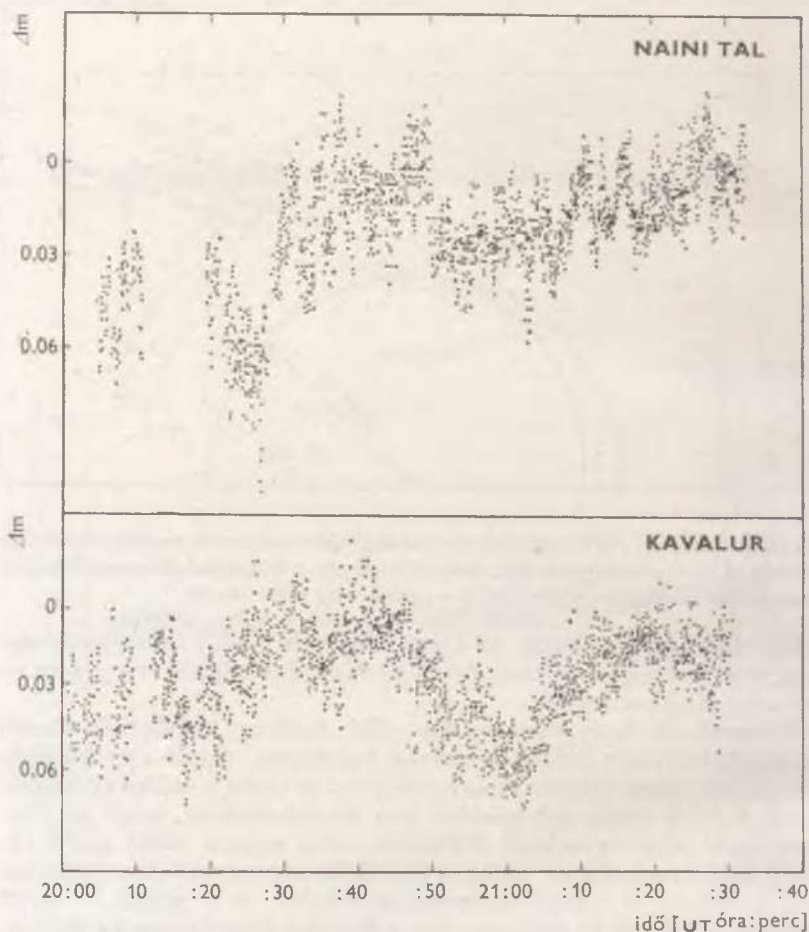


10. ábra. Elliott az 1977. március 10-i csillagfedés részletesebb analizise után így képzelte el az Uránusz gyűrűjét, megjelölve, hogy a különböző obszervatóriumok fénygörbéin talált fénycsökkenéseket a gyűrű mely része okozta

széles rések nagyon élesek. Az ϵ gyűrű kivételt képez: szélessége a bolygótól mért távolsággal változik, továbbá excentrikus helyzetű, vagy nem az egyenlítő síkjában fekszik.

Elképzeltető, hogy ezek az éles szélű, keskeny gyűrűcskék kisebb sűrűségű, folytonos gyűrűkbe vannak beágyazva, vagyis a gyűrűcskék közötti rések nem üresek. BHATTACHARYYA és társai a csillag extinkciójának a fedés alatti változásából arra következtetnek, hogy az Uránusz körül négy, egymástól elkülönülő, ritka anyagú, széles gyűrű (A, B, C, D) helyezkedik el. Ezekben éles szélű anyagcsomókként jelennek meg a keskeny és közepes szélességű gyűrűcskék. A D gyűrű 30 és 32 ezer km, a C gyűrű 33 és 36 ezer km, a B gyűrű 36 és 44 ezer km között, végül az A gyűrű 44 ezer km-en túl található. Bennük a csillagfény extinkciója különböző: 0,025, illetve 0,040 magnitúdó.

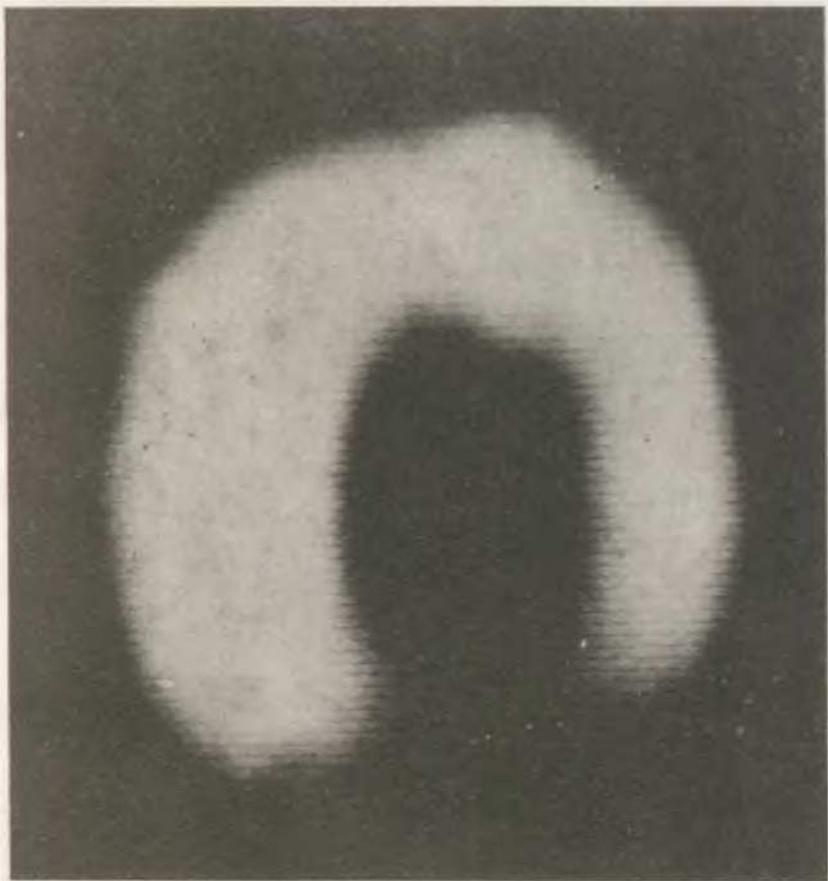
A gyűrűcskék felszíne a bolygóénak mindössze 1%-a, fényvisszaverő képességük (albedójuk) 3%-nál kisebb (a Szaturnusz gyűrűié 80–90%!). Felületük tehát olyan sötét, mint a feketeszéné vagy mint az Oberon és a Titania holdaké. Anyaguk bizonyosan nem vízjég, mint a Szaturnusz-gyűrűké, hanem inkább karbon kondrit. Kizártnak tűnik, hogy Herschel ezt a gyűrűt távcsövével észlelhette volna! Még a mai, kitűnő távcsövekkel is rekordnak számít a gyűrűcskék közvetlen megfigyelése a Földről. Ez eddig kétszer sikerült, de csak oly módon, hogy a megfigyelők



11. ábra. Az Uránusz gyűrűje mögött elvonuló SAO 158687 csillag fénygörbéjének egy részlete a Kavalur és a Naini Tal obszervatóriumok regisztrátumából, amelyek kiértékelése mutatta, hogy a gyűrűrendszer sokkal több komponensből áll, mint eleinte hitték

előre pontosan tudták, hogy hol, milyen tulajdonságú objektumot kell keresniük. A IV. színes tábla egyébként az Uránusz gyűrűjének fantáziaképét mutatja.

A palomar-hegyi 5 m-es távcsővel 1978. május 18-án észlelték az Uránusz gyűrűit. A megfigyelések a 2200 és az 1600 nm-es hullámhossza-



12. ábra. Az Uránusz gyűrűje a palomar-hegyi 5 m-es távcsővel (Palomar Observatory, California Institute of Technology)

kon történtek. Az előbbi hullámhosszon az Uránusz maga lényegesen sötétebb (13 magnitúdó), mint a gyűrűje (10,1 magnitúdó), ezért a hógó 1600 nm-en mért képét kivonták a 2200 nm-en mért teljes képből — a különbség a gyűrűrendszert adta (12. ábra). Hasonló módszerrel észlelték az Uránusz gyűrűjét a Lowell Obszervatórium 1,8 m-es távcsőjével is, a 890 és 730 nm-es hullámhosszakon. A metán 890 nm-es sávjában ugyanis az Uránusz negyvenszer halványabbnak látszik, mint a környező hullámhosszakon.

Az Uránusz rendszere

határok holdak gyűrűk*	távolságok a bolygó centrumától		szélesség vagy átmérő [km]
	[km]	[bolygósugárban]	
a_K ($\rho = 3$)	22 700	0,88	—
bolygó sugara	25 900	1,00	51 800
a_p ($\rho = 3$)	26 200	1,01	—
a_s ($\rho = 3$)	27 500	1,06	—
D gyűrű	30 000—32 000	1,16—1,23	~ 2000
27. gyűrűcske	30 400	1,17	?
28. gyűrűcske	30 500	1,18	?
26. gyűrűcske	31 100	1,20	?
25. gyűrűcske	31 200	1,20	?
29. gyűrűcske	31 400	1,21	?
30. gyűrűcske	31 500	1,22	?
24. = 31. gyűrű	32 400	1,25	?
32. gyűrű	32 600	1,26	?
a_K ($\rho = 1$)	32 700	1,26	—
23. gyűrű	32 700	1,26	?
33. gyűrű	32 800	1,27	?
C gyűrű	33 000—36 000	1,27—1,39	~ 3000
22. gyűrűcske	33 000	1,27	?
34. gyűrűcske	33 400	1,29	?
21. gyűrűcske	33 600	1,30	?
35. gyűrűcske	33 900	1,31	?
36. gyűrűcske	34 000	1,31	?
20. gyűrűcske	34 600	1,34	?
19. gyűrűcske	35 000	1,35	?
37. gyűrűcske	35 100	1,36	?
B gyűrű	36 000—44 000	1,39—1,70	~ 8000
18. gyűrűcske	36 100	1,39	?
a_p ($\rho = 1$)	37 700	1,46	—
17. gyűrűcske	37 900	1,46	?
16. gyűrűcske	38 800	1,50	?
15. gyűrűcske	39 000	1,50	?
a_s ($\rho = 1$)	39 600	1,53	—
14. gyűrűcske	41 400	1,60	?
13. gyűrűcske	41 700	1,61	?
12.(= 6.) [= κ] gyűrűcske	41 900	1,62	?
11.(= 5.) [= ι] gyűrűcske	42 400	1,63	?
10.(= 4.) [= θ] gyűrűcske	42 700	1,65	?
A gyűrű	44 000—?	1,70—?	?
9.(= α) gyűrűcske	44 800	1,72	1
8.(= β) gyűrűcske	45 800	1,76	1
a_R ($\rho = 3$)	46 400	1,79	—
7.(= η) gyűrűcske	47 300	1,82	?
6.(= γ) gyűrűcske	47 800	1,84	1

határok holdak	gyűrűk	távolságok a bolygó centrumától		szélesség vagy átmérő [km]
		[km]	[bolygósugárban]	
5.(= δ) gyűrűcske		48 500	1,87	1
4.(= ϵ) gyűrűcske		51 900	2,00	20—100
a_r ($\rho = 3$)		55 000	2,12	—
3. gyűrűcske		55 300	2,13	?
2. gyűrűcske		55 700	2,15	?
1. gyűrűcske		64 100	2,47	?
a_n ($\rho = 1$)		66 700	2,58	—
a_t ($\rho = 1$)		79 100	3,05	—
$U1 = \text{Miranda}$		130 000	5,02	200
$U2 = \text{Ariel}$		191 000	7,37	600
$U3 = \text{Umbriel}$		267 000	10,31	400
$U4 = \text{Titania}$		438 000	16,91	1000
$U5 = \text{Oberon}$		586 000	22,62	800

* A használt számok Bhattacharyya és Bappu jelölései

(The Moon and the Planets 21, 393—404., 1977.)

(): Elliott jelölése

(Nature 267, 330., 1977.; Astron. J. 83, 980., 1978.)

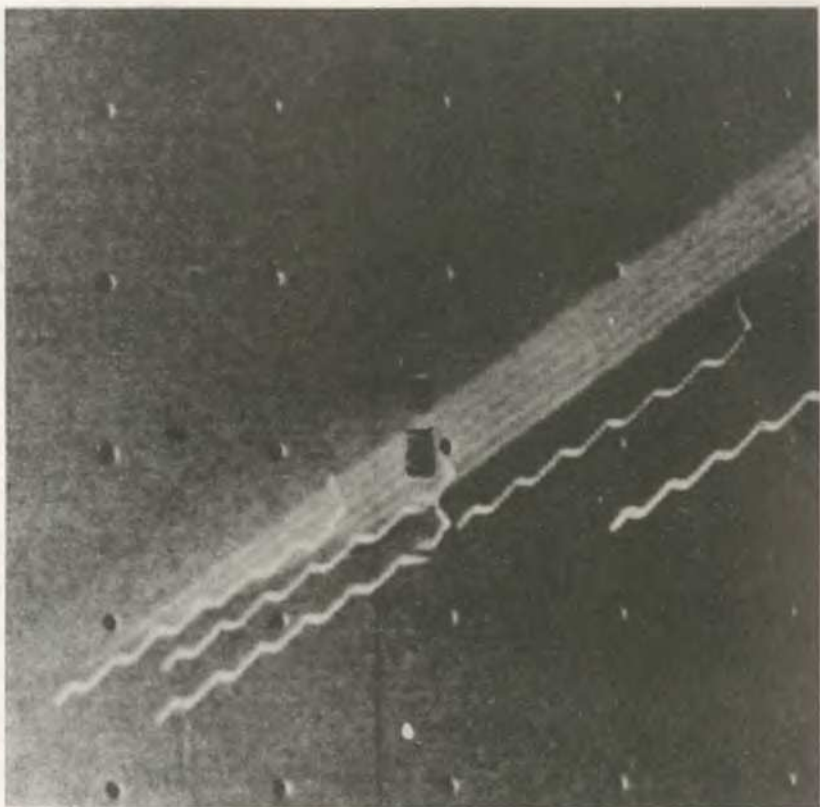
[]: Nicholson jelölése

(Astron. J. 83, 1240., 1978.)

A Jupiter gyűrűje

A jupitergyűrű első „megfigyelésének” VSZEHSZVJATSKIJ észlelése tekinthető, melyet STRUVE írt le 1960-ban. Vszehszvjatszkij szerint a Jupiter korongján egy szabálytalan, sötét vonal volt látható, amelynek pozíciója változott a szubszoláris ponthoz képest. A jelenség egy 2 jupitersugárnyi távolságon belül elhelyezkedő gyűrűvel magyarázható lett volna. A második „megfigyelés” ACUNA és NESS nevéhez fűződik. Ők a Pioneer—11 által a Jupiter körzetében mért részecskefluxust tanulmányozva 1976-ban arra a következtetésre jutottak, hogy a mért minimum egy 1,83 jupitersugárnyi távolságban levő gyűrűvel magyarázható. Ismerve az Amalthea hold által okozott fluxuscsökkenést, a szerzők arra következtettek, hogy a gyűrű felülete 20 ezer km² (feltéve, hogy az elnyelésben csak a geometriai hatáskeresztmetszet játszik szerepet).

A gyűrű tényleges felfedezésére 1979 márciusában, a Voyager—1 űrszonda felvételein került sor (13. ábra). A felfedezés után a még úton levő Voyager—2 programját úgy módosították, hogy széleslátószögű kamerájával minél több felvételt készítsen a gyűrűről (VII. színes tábla).



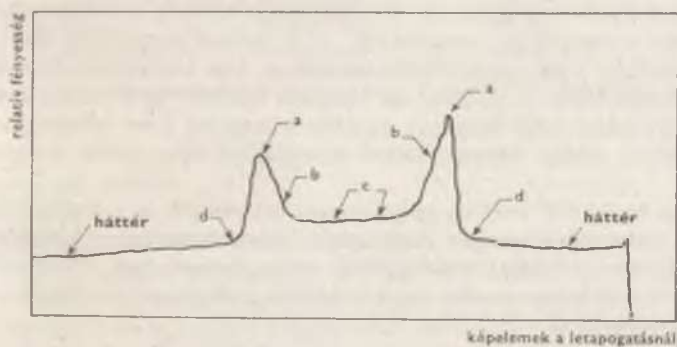
13. ábra. A Jupiter gyűrűjének felfedezésére ez a több expozícióból álló fénykép vezetett, amelyet a Voyager—1 készített. A fényes csíkok a gyűrű, a cikcakkok a csillagok nyomain

A Voyagerek Jupiter-megfigyelesi programjáról a Fizika 80—81 kötet közül részletes beszámolót.

A Voyager—2 felvételein (14. ábra) látszik, hogy a gyűrű négy komponensből áll. Ezeket *a*, *b*, *c*, *d* betűkkel jelölik. Az *a* gyűrű 800 ± 100 km szélességű, külső széle éles és fényes. Belülről csatlakozik hozzá a halványabb, 6000 km széles *b* gyűrű. A nagyon halvány, legbelső *c* gyűrű valószínűleg a bolygó felszínéig terjedő, folytonos, vékony leplet alkot. Leghalványabb a *d* gyűrű, amely az *a*-hoz kívülről csatlakozik és 1,8 jupitersugárnyi távolságig terjed (4. táblázat). A 15. ábra a gyűrűk fé-



14. ábra. A Voyager—2 fényképén látszik, hogy a Jupiter gyűrűje is több komponensből áll



15. ábra. A Jupiter gyűrűjének fényessége így változik a gyűrű síkja mentén a bolygótól mért távolság függvényében

nyességének változását mutatja a Jupitertől mért távolság függvényében.

A gyűrűket kb. $4\text{ }\mu\text{m}$ méretű *porrészecskék* alkotják, ezt a Voyager—2 felvételeinek kiértékelése alapján állapították meg. A gyűrűk vastagsága kb. 30 km.

1979-ben sikerült a gyűrűrendszert a Mauna Kea-i (Hawaii) 220 cm-es infravörös távcsővel közvetlenül is megfigyelni. Az infravörös spektrum 2200 nm-es sávjában a gyűrű 11 magnitúdóval halványabbnak látszott, mint a Szaturnusz gyűrűje.

Ennek az óriástávcsőnek a megfigyelései vezettek még egy újabb gyűrű felfedezésére, 1979-ben. Először 1975-ben a Wise Observatórium 1 m-es távcsővével IRENA KUPO vette észre, hogy az ionizált kén (671,6 és 673,1 nm-es) vörös vonalaiban sugárzás érkezik a Jupiter környezetéből. Amikor a Voyagerek felfedezték az Ión a működő vulkánokat, PILCHER a Mauna Kea 2,2 m-es reflektorával vizsgálat alá vette a Jupiter környezetét. Sikerült is a forrást megtalálni: egy 400 000 km távolságban elhelyezkedő kényűrűt, amely a Jupiter mágneses egyenlítője mentén található. A Jupiternél milliószor, az Io nátrium tóruszánál százszor halványabban sugárzó gyűrű lefényképezése óriási technikai bravúr.

A gyűrű fényessége és alakja egyaránt óriási változásokat mutat már nagyon rövid idő alatt is. Például 1979. április 9-én nagyobb volt, és kevésbé hajlott a Jupiter egyenlítőjéhez, mint az előző éjszaka. Ekkora objektum ilyen gyors változását nyilván az magyarázza, hogy egyrészt az őt alkotó gázok nagyon gyorsan cserélődhetnek (a nátrium tórusz anyaga 20 óra alatt szökik el), másrészt a Jupiter mágneses terével nagyon erős lehet az ionizált kénrészecskék kölcsönhatása. A kén-gőzök forrásai minden valószínűség szerint az Io működő vulkánjai. Ilyen értelemben persze az Io nátrium tórusza is gyűrűnek minősülhet. Vagy a kényűrűt nevezhetjük — a szilárd részecskék által alkotott gyűrűktől való megkülönböztetésül — kén tórusznak. Bár vannak olyan elképzelések is, például az Uránusz keskeny gyűrűivel kapcsolatban, hogy gázgyűrűk lennének miután a nagyon kicsi albedót a Naprendszerben eddig ismert szilárd anyagokkal elég nehéz megmagyarázni.

Ha az Io 62 000 km/óra pálya menti sebességét és a vulkánok 3600 km/óra kidobási sebességét figyelembe vesszük, akkor a kidobott kén maximálisan 3,3 fokkal hajló gyűrűt vagy tóruszt tud létrehozni. Az inklináció változása esetleg ilyen módon a különböző vulkánok működéséhez köthető.

A Jupiter rendszere

határok <i>holdak</i>	gyűrűk	távolságok a bolygó centrumától		szélesség vagy átmérő [km]
		[km]	[bolygósugárban]	
a_k ($\rho = 3$)		63 200	0,88	—
bolygó sugara		71 400	1,00	142 800
c gyűrű		71 400—120 000	1,00—1,68	~ 48 600
a_v ($\rho = 3$)		73 100	1,02	—
a_a ($\rho = 3$)		76 600	1,07	—
a_k ($\rho = 1$)		91 200	1,28	—
a_p ($\rho = 1$)		105 500	1,48	—
a_s ($\rho = 1$)		110 600	1,55	—
b gyűrű		120 000—126 000	1,68—1,76	~ 6 000
a gyűrű		126 000—126 800	1,76—1,77	~ 800
d gyűrű		126 800—128 500	1,77—1,80	~ 1 700
$J16 = 79J1$		128 000	1,79	30
a_R ($\rho = 3$)		129 300	1,81	—
a_t ($\rho = 3$)		153 300	2,15	—
$J5 = Amalthea$		181 500	2,54	240
a_R ($\rho = 1$)		186 500	2,61	—
a_t ($\rho = 1$)		221 100	3,10	—
$79J2$		223 000	3,12	70
kéngyűrű		400 000	5,60	?
$J1 = Io$		422 000	5,91	3 640
$J2 = Europa$		671 400	9,40	3 130
$J3 = Ganymedes$		1 071 000	15,00	5 280
$J4 = Callisto$		1 884 000	26,38	4 840
$J13 = Leda$		11 094 000	155,38	7
$J6 = Himalia$		11 487 000	160,88	170
$J7 = Elara$		11 747 000	164,52	80
$J10 = Lysithea$		11 861 000	166,12	14
$J12 = Ananke$		21 250 000	297,62	14
$J11 = Carme$		22 540 000	315,68	14
$J8 = Pasiphae$		23 510 000	329,27	16
$J9 = Sinope$		23 670 000	331,51	14

A Neptunusz gyűrűje

1846-ban LASSELL, 1847-ben CHALLIS látni vélte a Neptunusz gyűrűit. A gyűrűk tényleges megfigyelése csillagfedések idején, fotoelektromos úton várható. Csillagfedés azonban meglehetősen ritkán következik be, 1968. április 6-án egy nyolc magnitúdós, 1980. február 10-én egy tizenkét magnitúdós csillagot fedett el a bolygó.

A Vénusz bolygó nem óriás, és nem tartjuk számon a gyűrűs bolygók között. Érdekes azonban, hogy a Venyera—9 és —10 űrszondák a felszín felett 100—700 km magasságban fényt szóró részecskéket találtak, melyek nem mindig látszóttak. A 300—800 nm-es hullámhosszon végrehajtott megfigyeléseket *egy őv mentén elhelyezkedő porrészecskék* jelenlétével lehetett magyarázni, vagyis ilyen értelemben a Vénusznak is van „gyűrűje”!

Elméletek a gyűrűk természetéről

Minthogy a Szaturnusz gyűrűit ismerik legrégebben, a legtöbb hipotézis e rendszerrel kapcsolatban született. Eleinte a gyűrűs Szaturnuszt kivételes, egyedi jelenségnek tekintették, csak később merült fel a gondolat, hogy *a gyűrűk keletkezése a bolygórendszer fejlődésének természetes velejárója lehet*. A különféle hipotézisek a rések létrejöttének okaira, a gyűrűk anyagára és helyére, valamint korára és fejlődési ütemére vonatkoznak.

Pályarezonanciák

Ha egyetlen vonzócentrum körül több égitest kering, akkor ezek a kölcsönös gravitációs hatás következtében egymás mozgására is hatással vannak. Ha a másik „testvér-égitesttől” származó zavaró erő maximuma mindig ugyanarra a pályaszakaszra esik, akkor a hatások összegeződnek, és a pályaelemekben nagy változások jönnek létre. Ez a jelenség akkor áll elő, ha a két égitest keringési ideje egymásnak egész számú többszöröse; ilyenkor *pályarezonanciáról*, illetve *rezonáns pályákról* beszélünk. Elméletileg bebizonyították például, hogy a Jupiter keringési idejének felével körbejáró kisbolygókat a Jupiter zavaró hatása már néhány ezer év alatt eltávolítja pályájukról. Ezek után érthető, hogy miért nem található éppen ilyen keringési idővel rendelkező kisbolygó a Naprendszerben, holott ettől kissé eltérő keringési idők a kisbolygó-övezetben gyakran fordulnak elő. Hasonlóan hiányzik a sorból a Jupiteréhez viszonyított 1/3-, 1/4- és 1/6-szoros keringési idő is.

A szaturnuszgyűrűk réseit szintén pályarezonanciával, a Szaturnusz holdjainak zavaró hatásával próbálták magyarázni, meglehetősen sikerrel. A Cassini-rés létrejöttét a Mimas hold „tisztító hatásával” hozták összefüggésbe. A Jupiternél sokkal kisebb hold pályarezonancia-hatásának érvényesüléséhez azonban lényegesen hosszabb időre, évmilliókra van szükség.

Az Uránusz körüli gyűrűk réseinek magyarázata már keményebb dió-

nak bizonyult. A rések megfigyelt helyét egyes holdak zavaró hatásával egyáltalán nem, bizonyos holdpárok együttes perturbációjával pedig csak akkor sikerült megmagyarázni, ha feltételezték, hogy létezik egy még felfedezetlen uránuszhold is a gyűrű pályáján. Ez a hipotetikus hatodik hold 100 km átmérőjű és 18–20 magnitúdós lenne, ha feltételezzük, hogy albedója megegyezik a Mirandáéval.

A *Jupiter* a *gyűrűje* esetében annak éles külső szélét próbálták az Amalthea vagy az Io zavaró hatásával magyarázni. E helyen a részecskék keringési ideje 0,291 nap, míg az Amalthea periódusának $3/5$ -szöröse 0,299 nap, az Io keringési idejének $1/6$ -a 0,295 nap. Az Amalthea tömege azonban olyan kicsi, hogy aligha befolyásolhatja a gyűrű részecskéinek mozgását. Az Io esetében érthetetlen, hogy miért éppen a keringési idő hatoda játszana szerepet a gyűrűk alakulásában.

A gyűrűk réseinek igen éles határa azonban mindenképp arra enged következtetni, hogy a rezonancia jelensége fontos korlátozó szerepet játszik. A centrális gravitációs erőterben mozgó részecskék között lejátszódó, rugalmatlan ütközések az elmélet szerint ugyanis gyors változásokra vezetnek a differenciálisan rotáló gyűrűben, sőt *hosszabb idő alatt a gyűrű sugárirányban szétterjed*. Úgy tűnik, hogy ezt a szétterjedést akadályozza meg a holdak hatása. Ez a korlátozó tényező jelentős szerepet játszhatott már a holdak kialakulásakor is, elősegítve, hogy egy-egy hold a lehető legtöbb anyagot „gyűjtse be”.

Roche-határ és akkréció (gyarapodási) határ egy égitest körül

Egy nagyobb égitest gravitációs erőterében mozgó testekre a központi égitest olyan árapálykeltő hatást gyakorol, hogy azok bizonyos határtávolságoknál közelebb kerülve a centrumhoz megváltoztatják egyensúlyi alakjukat, illetve ütközéseik esetén egymáshoz tapadásuk feltétele más lesz.

A *klasszikus Roche-határ*: a_R az a legkisebb távolság egy égitest körül, amelynél egy „folyékony” test (melyet csak saját gravitációs tere tart össze) még szférikus marad, és nem szakad szét. Az a_k , illetve a_p pedig az a legkisebb távolság, amelynél egy kívülről jövő, illetve az égitest körüli pályán keringő szférikus, homogén test még nem törik darabokra. Ha azonban a test nem szférikus vagy esetleg repedések vannak rajta, akkor a szétválás már sokkal nagyobb távolságon is bekövetkezhet. Ilyen esetben — a szférikustól való eltérés, illetve a repedezettség mértékének függvényében — bármely a_k -nál, illetve a_p -nél nagyobb távolságban is várható, hogy törmeléket találunk a központi test körül.

Az *alsó, illetve felső akkréció (gyarapodási) határ*: a_a , illetve a_f . Egy égitest körül az a_a -nál kisebb távolságban keringő darabka esetében csak *molekuláris akkréció* (gyarapodás) lehetséges, vagyis tömege csak

azáltal növekedhet, hogy molekulák tapadnak rá. Két darabka már nem tapadhat össze.

Az a_a és a_f közötti távolságokon a nagyobb darabkák méretétől függetlenül lehetséges vagy nem lehetséges a kisebb darabkák rátapadása a nagyobbakra. Az a_f -nél nagyobb távolságokon *tetszőleges méretű* darabkák összetapadása lehetséges, tehát itt már nagyobb testek is formálódhatnak.

A felsorolt határok kiszámíthatók az

$$a = C (M/\pi\rho)^{1/3}$$

képlettel, ahol $C_R = 2,21$, $C_p = 1,25$, $C_x = 1,08$, $C_a = 1,31$ és $C_f = 2,62$; M az égitest tömege, ρ a darabkák sűrűsége.

Ezen határok ismeretében vizsgáljuk meg, hogy milyen esetben, hol, milyen méretű gyűrűk létrejötte várható! Az egyes határokat a Szaturnusz, az Uránusz és a Jupiter esetére a 2., 3., 4. táblázatban kétféle sűrűségértékre is közöljük, mégpedig jég ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$) és karbon kondrit vagy bazalt ($\rho \sim 3 \text{ g/cm}^3$) darabkákra.

Gyűrűk keletkezése az ősi protoplanetáris ködből

Sokféle Naprendszer-keletkezési hipotézis létezik, de közülük még mindig (az eredeti formájában LAPLACE által 1796-ban javasolt) *gyűrűleválási elmélet* a legnépszerűbb. Eszerint az összehúzódó, ősi szoláris köd egyre gyorsabban forog, s egy, az egyenlítő környéki öv mentén a centrifugális erő egyre nagyobb lesz, míg végül éppen kompenzálja a tömegvonzást. Ekkor ez a gyűrű függetlenné válik a köd többi részétől, és többé nem vesz részt az összehúzódásban. Amennyiben a gyűrű a Roche-határon kívül vált le, és tömege nagyobb egy bizonyos minimális érték-nél, anyagából bolygó alakul ki. PRENTICE és TER HAAR felteszi, hogy a Jupiter, Szaturnusz és Uránusz „nagyhold” rendszerei hasonló módon jöttek létre a protoplanetáris ködökből, mint a bolygók a protoszoláris ködből. (A „nagyhold” kifejezést a nagyobb méretű, szabályos alakú holdakra használjuk, szemben a kisebb, szabálytalan alakú „kisholdakkal”.)

A szerzők arra hivatkoznak, hogy a Jupiter, a Szaturnusz és az Uránusz holdrendszerében a nagyholdak távolságaira a Titius—Bode szabályhoz hasonló törvényszerűség érvényes. A bolygók középpontjaitól mért távolságarányok a Jupiter rendszerében 1,65, az Uránuszében 1,46, a Szaturnuszében 1,3 értéket adnak. A szerzőknek egyetlen paraméter alkalmas megválasztásával sikerült leírniuk, hogy hol jöttek létre a ködből a gyűrűk, mekkora volt az össztömegük és belőlük mekkora és milyen anyagú holdak keletkeztek. Cikkük még 1979 februárjában került nyomdába, tehát éppen az Uránusz távolabbi gyűrűinek és a Jupi-

ter gyűrűrendszerének felfedezése előtt. Érdekes megvizsgálni, hogy az elmélet előre jelezte-e a fenti képződményeket.

Az elmélet szerint a legbelső holdakon belül *mindhárom bolygó protoplanetáris ködében hátramaradt még néhány gyűrű*. A Jupiter esetében 170 és 270 ezer km távolságokra jelezték olyan ködgyűrű leválását, amelyből $2 \cdot 10^{21}$ g-nál kisebb össztömegű és sziklás darabkákból álló gyűrű jött létre. A számításokat nem folytatták tovább, mivel nem várták, hogy sikerül gyűrűket megfigyelni a Jupiter körül. A Szaturnusz esetében az elmélet szerint 110 és 140 ezer km távolságokban maradhattott vissza — főleg szilikátos összetételű — gyűrű. A 140 ezer km megfelel az A gyűrű külső szélének, de az újabb mérések szerint az összetétel nem egyezik jól az elmélettel. Az Uránusz esetében a szerzők 90 ezer km-en egy jeges szilikátgyűrű, 64 és 46 ezer km-en egy-egy szilikátgyűrű kialakulását várják. 1979 februárjában még csak az α , β , γ , δ , ϵ , η , θ , ι , κ gyűrűket ismerték, amelyek egy 46 ezer km távolság körül levált gyűrűből keletkezhetnek. A 64 ezer km távolságra előrejelzett gyűrű viszont szépen azonosítható az újonnan felfedezett gyűrűk külső szélével. A szerzők a Neptunusz esetében sem szabályos holdrendszert, sem gyűrűrendszert nem várnak; feltételezik továbbá, hogy a Neptunusz holdjai, valamint a Callisto, a Rhea, illetve az Oberon pályáján túli összes hold és az Amalthea is *kaptáció* útján kerültek a megfelelő bolygók körüli pályákra.

Egy-egy ködgyűrű leválásakor a *Roche-határon belüli anyag nem tud holddá összeállni*, kis darabkák formájában marad meg és kering a bolygó körül. E darabkák egymásra gyakorolt hatása, ütközése következtében a *gyűrű egyre vékonyabbá válik és radiálisan szétterjed*. Ezt a folyamatot akadályozhatja, s egyben a belső részen *rések létrejöttét is okozhatja a külső holdak rezonanciahatása*. Amikor a turbulens mozgás nagyon lecsökken a protoplanetáris ködben, akkor a ködből már nem különálló ködgyűrűk keletkeznek, hanem az anyag az egyenlítő síkjában folyamatosan hagyja el a ködöt. Ilyen mechanizmus működése esetén nem probléma megmagyarázni, hogy hogyan terjedt szét folytonos eloszlásúvá a gyűrű anyaga, viszont ekkor az Uránusz keskeny gyűrűkből álló rendszerének megmagyarázása okoz nehézséget. Az Uránusz esetében ugyanis a néhány 100 m széles gyűrűket több ezer km széles rések választják el. Ez a rendszer azt a benyomást kelti, hogy főleg résekből áll és a gyűrű a kivétel; ellentétben a Szaturnusz rendszerével, ahol 20 ezer km szélesek a gyűrűk és köztük csak néhány száz km-esek a rések (a Cassini-rés is csak 3000 km). A Jupiter rendszere annyiban emlékeztet a Szaturnuszéra, hogy folyamatos, tehát nem a rések dominálnak, viszont néhány ezer km-es össz-szélessége elhanyagolható a Szaturnusz gyűrűinek több tízezer km-es szélességéhez képest.

Gyűrűk keletkezése nagyobb testek feldarabolódásából

Mint már ismertettük, az árapályerők az a_k , illetve a_p határtávolság közelében feldarabolják a kívülről jött, illetve a bolygó körül keringő testeket. (Szabálytalan alakú vagy repedezett testek esetében még távolabb következik be a feldarabolódás.) A Naprendszerben sok kisebb test, kisbolygó, meteor és üstökös található, az ezek szétadarabolódásából keletkező törmelék — az eredeti égitest szabálytalan alakja miatt — a bolygók körül bárhol, a_k -nál vagy a_p -nél nagyobb távolságra is elhelyezkedhet. A törmelék úgy jön létre, hogy az égitest felszínéről folyamatosan kisebb darabkák válnak le. Ilyenkor egy elég keskeny, csomós szerkezetű gyűrű jön létre. Ha az eredeti széttöredezés néhány nagyobb darabot is eredményezett, akkor ezek mindegyikéből külön-külön keskeny gyűrűcskék keletkezhetnek. A már létrejött gyűrűt a kölcsönös ütközések folyamata szélesíti, a holdak perturbáló hatása pedig újrarendezi, illetve részeket hoz létre benne.

PLAVEC a meteorrajok létrejöttével kapcsolatos számításaiban arra az eredményre jutott, hogy ha egy égitest széttörik, akkor az egyéb perturbációk figyelembevétele nélkül is (pusztán a kölcsönös zavaró hatás következtében) darabjai néhány ezer év alatt szétoszolnak az egész pályán.

Olyan elképzelés is született, hogy a nagybolygók összes nagyholdjai is kaptált anyagból, főleg üstökösök maradványaiból keletkeztek volna a bolygófejlődésnek a bolygók kialakulását követő, későbbi időszakában. Az üstökös-befogási mechanizmus az óriásbolygók esetében eredményesebben működött, ezért keletkezett e bolygók körül kiterjedt holdrendszer.

Miért csökken a gyűrűt alkotó darabkák száma?

Többféle oka lehet annak, hogy a gyűrűk anyaga egyre fogy. A kölcsönös gravitációs zavarok, valamint a holdak hatása következtében alapvetően megváltozhat néhány darabka pályája: a bolygó felszínébe ütközik, vagy heliocentrikus pályára kerül, megszökik. A darabkák ilyen „eltűnése” a gyűrűrendszerből azonban kis valószínűségű esemény, legfeljebb a tíz bolygósugárnyi távolságon túl levő, μm -nyi méretű darabkák juthatnak erre a sorsra. Sokkal hatásosabban tűnteti el a részecskéket a gyűrűből a *Poynting—Robertson effektus*. Ezen effektus szerint annak következtében, hogy a részecskék a fényt csak egy oldalról kapják, de vissza minden irányba sugározzák, az 1 cm-nél kisebb részecskék *lefékeződnek*, és bizonyos idő alatt *spirálpálya mentén eljutnak a központi égitestig* (bolygóig, ha bolygó körül keringő, illetve a Napig, ha a Nap körül keringő részecskékről van szó). Számítások sze-

rint a jupitergyűrű $1\text{ }\mu\text{m}$ -nyi részecskéi $5\cdot 10^8$ év alatt érkeznek el spirálpályán a Jupiterig. Lehetséges, hogy a bolygók felszínéhez legközelebbi, ún. *fátyolgyűrűket* éppen a bolygóba „spirálózó” részecskék alkotják, vagyis egy-egy részecske csak átmenetileg tartózkodik a fátyolgyűrűben. Éppen a fátyolgyűrű állandó léte és folytonos volta lenne bizonyíték a folyamatos szétaprózódás és a Poynting—Robertson effektus működése mellett.

A *sugárnyomás* szintén perturbálhatja a részecskék pályáját, annyira, hogy azok végül elhagyják a gyűrűt. Dominálóvá ez a folyamat akkor válik, ha a részecske mérete bizonyos határ alá csökken. Ez a határméret függ a részecske sűrűségétől is.

A gyűrűk anyagának erodálódása (aprózódása, kopása)

Több olyan mechanizmust ismerünk, amely mindaddig morzsolja, aprózza egy gyűrű darabkáit, amíg azokra már a Poynting—Robertson effektus vagy a sugárnyomás hatása jelentőssé válik. Az egyik ilyen mechanizmus a darabkák ütközése. Még akkor is, ha a darabkák relatív sebessége nem nagy, kisebb részek letöredeznek, így lassan morzsolódnak, aprózódnak.

Figyelembe kell venni azt is, hogy a mikrometeorok, a napszél részecskéi, a bolygó sugárzási övezetének nagyenergiájú részecskéi és a Nap ultraibolya sugárzása is állandóan bombázza, „köpködi” a gyűrűk darabkáinak felszínét, molekulákat és atomokat szakítva le róla. Említettük már, hogy ilyen mechanizmussal magyarázzák a hidrogén jelenlétét a Szaturnusz gyűrűje körül. Létezik olyan elmélet is, mely e jelenségnek tulajdonítja az uránuszgyűrűk alacsony albedóját is; ha ugyanis a kondritikus anyagban levő ősi metánjég elbomlik, és a hidrogén megszökik, akkor a felszínen a fekete színű szén marad vissza. A Jupiter esetében DRAINE és SALPETER felbecsülte a sugárzási övezetek „köpködésének” erodáló hatását; a nagy energiájú ionok évente $5\text{--}10\text{ nm}$ -nyi ($50\text{--}100\text{ Å}$ -nyi) jég-, $0,2\text{--}0,3\text{ nm}$ -nyi ($2\text{--}3\text{ Å}$ -nyi) szilikát-, vagy $0,02\text{--}0,05\text{ nm}$ -nyi ($0,2\text{--}0,5\text{ Å}$ -nyi) grafitréteg lekoptatására képesek. Ezek szerint néhány millió év alatt igen sok kicsi részecske keletkezhett, és kerülhetett a Poynting—Robertson effektus hatása alá. Lehetséges, hogy a Jupiter erős sugárzási övezete miatt gyűrűje rövidebb életű, mint a Szaturnuszé vagy az Uránuszé, így fejlődése esetleg gyorsabb.

Ezek a mechanizmusok tehát, ha működésükhöz elegendő idő áll rendelkezésre, a gyűrű darabkáinak felaprózódására, a *gyűrű eltűnésére* vezetnek. Minthogy ezek szerint a gyűrű átmeneti jelenség, létéből vagy arra kell következtetnünk, hogy az említett eróziós jelenségek még nem tudták eltüntetni, vagy pedig arra, hogy működik egy, az eróziót ellensúlyozó mechanizmus, tehát a darabkák növekedni is tudnak.

A gyűrűk anyagának növekedése

A két akkréciós határ (a_a és a_f) között egy darabka tömege oly módon növekedhet, hogy kis relatív sebességű összeütközéskor a darabkák egymáshoz tapadnak. Az a_a határon belül a darabka már csak molekulák rátapadása révén növekedhet. A Szaturnusz esetében felteszik, hogy a gyűrű anyagát a bolygó légkörében disszociált vízmolekulák növelhetik, azáltal, hogy az ionok a mágneses erővonalak mentén elindulva beleütköznek a gyűrű darabkáiba, és ott kondenzálódnak. A 100 K alatt kondenzálódó H_2O dérburkot képez a darabkák felszínén. Ily módon „hizhattak meg” a darabkák, már a gyűrű kialakulása idején is, és rakódhatott rájuk a polarizációs megfigyelésekkel kimutatott dér. Lehetséges, hogy a közelebbi B gyűrűre vastagabb dérréteg rakódott, és ez az oka az A és a B gyűrű különbözőségének.

A gyűrűk kora

Valamely gyűrű vastagsága kiszámítható, ha ismerjük a működő szóródási folyamatokat. Egy gyűrű várható vastagsága kb. tízszerese legnagyobb darabkái méretének. Ezek szerint a Szaturnusz gyűrűiben néhány méter lenne a legnagyobb darabkák átmérője, s általában nem várható néhány tíz méternél vastagabb gyűrű kialakulása a Naprendszer keletkezése óta.

BRAHIC számításai szerint a gyűrűvastagság—darabkaméret összefüggés alapján az Uránusz gyűrűje mintegy százszor fiatalabb a Szaturnuszénál. Szerinte az Uránusz gyűrűje 10^7 — 10^8 éve keletkezett, amikor egy befogott, kóbor test feldarabolódása megkezdődött. A Jupiter gyűrűje ugyanezen gondolatmenet szerint egy nemrég széttört égitest maradáka lenne. Lehetséges azonban az is, hogy a gyűrű a pályáján talált 79 J1 jelű holdacska porlásából jelenleg, szemünk láttára alakul ki. Ebben az esetben viszont meglepő, hogy — ellentétben az ismertett feldarabolódási folyamattal — azonnal csomómentes gyűrű jön létre.

Összefoglalás

A gravitációs elméletek által megadott határokat felrajzoltuk a három, gyűrűvel rendelkező bolygóra, jég, illetve kondritikus összetétel esetére (VI. tábla). Mindkét ábrán megjelöltük a gyűrűk tényleges elhelyekedését is.

Megjegyzendő, hogy gyakorlatilag valamennyi gyűrű az a_k és a_p

határokon túl helyezkedik el. Ez azt jelenti, hogy *egyik gyűrű sem hozható kapcsolatba szférikus égitestek feldarabolódásával*, de szabálytalan vagy előzőleg megrepedezett testek porlódása nem zárható ki.

Csak a belső *fátyolgyűrűk* nyúlnak az a_s alsó akkréciós határon belülre. Ezek a gyűrűk átmeneti tartózkodási helyei az állandó gyűrűk darabkáiról lemorzsolódott részecskéknél, amelyek a Poynting—Robertson effektus hatására éppen a bolygó felé spiráloznak. E gyűrűk léte tehát semmiféle elméletnek nem mond ellent.

A Szaturnusz A és B, valamint az Uránusz A gyűrűjét kivéve valamennyi gyűrű az a_f felső akkréciós határokon belül található. Ezen utóbbiak sem nyúlnak túl a víz sűrűségéhez tartozó a_f határokon. Ez a tény is igazolja, hogy *sűrűségük túl nagy nem lehet*, mivel ellenkező esetben anyaguk igen gyorsan holddá állna össze. Ha tehát e gyűrűk még léteznek, akkor sűrűségük nagyságrendileg 1 g/cm^3 lehet.

Hol helyezkednek el a gyűrűk a Roche-határokhoz képest? A Jupiter gyűrűje messze a vízhez tartozó Roche-határon belül, és éppen a 3 g/cm^3 sűrűségnek megfelelő határon található. Ez összhangban van azzal a megfigyelési ténnyel, hogy a Jupiter gyűrűjét *porszemcsék* alkotják. A Szaturnusz A gyűrűje a vízhez tartozó Roche-határ környékén van, és a megfigyelések szerint valóban *vízjégdarabkák* alkotják. Érdekes, hogy a C gyűrű éppen a kondritikus anyag vagy a por sűrűségéhez tartozó Roche-határnál kezdődik. Lehetséges, hogy a Szaturnusz C gyűrűje azért halványabb a ragyogó A és B gyűrűnél, mert nem jég, hanem *poranyag* alkotja? Hasonló a helyzet az Uránusznál is, ahol a külső A gyűrű a vízhez tartozó Roche-határnál, míg a B gyűrű a kondritikus sűrűséghez tartozó határnál kezdődik. Elképzelhető, hogy az elfedett csillag extinkciója a két gyűrűben azért volt különböző, mert nem ugyanaz az alkotó anyag?

A *Jupiter és az Uránusz gyűrűi* tehát több szempontból alapvetően eltérnek a Szaturnusz gyűrűitől. Egyrészt *közelebb vannak a bolygófel-színhez, másrészt anyaguk nem jég, hanem por vagy kondritikus anyag*. Várható, hogy eredetük sem azonos. Még mielőtt a jupitergyűrű külső szélének távolságában megtalálták volna azt a holdat, amelynek a mérete is azonos a gyűrű vastagságával, már több szerző is egy ilyen, a gyűrűkben keringő hold porlásával hozta kapcsolatba a gyűrűk létrejöttét. GOLDREICH például feltételezte, hogy az Uránusz valamennyi gyűrűjében van egy-egy kis méretű hold, s a gyűrű darabkái annak felszínéről szakadnának le.

A „porláselmélet” híveit csak az *Uránusz e gyűrűjének excentricitása* zavarja. Szerintük ennél a gyűrűnél arról lehet szó, hogy egy közeli hold excentrikussá perturbálja a gyűrű darabkáinak pályáját; ezek azután a hold precessziós periódusával azonos periódusú, együttes precessziót végeznek. Mivel az Uránusz lapultsága nyilván igyekszik megváltoz-

tatni a gyűrű alakját, *egy gyűrű életének elliptikus szakasza csak átmeneti lehet*. Nincs kizárva, hogy fejlődése már a mai megfigyelési technikával is nyomon követhető.

A Jupiter gyűrűjével kapcsolatban még az a gondolat is felmerült, hogy az egész gyűrű az interplanetáris térből kaptált, a Poynting—Robertson effektus miatt a Jupiterhez egyre jobban közeledő porrészecskék átmeneti tartózkodási helye. A felaprózódó üstökösök és kisbolygók anyaga a gyűrűknek állandó utánpótlást biztosítana.

*

Az utóbbi évek egyik legérdekesebb csillagászati felfedezése, hogy a Szaturnusz évszázadok óta ismert gyűrűrendszere nem egyedülálló jelenség a Naprendszerben. Bár a gyűrűk létrejöttére (akárcsak az egész Naprendszerére) sokféle hipotézis létezik, és egyik sem képes arra, hogy valamennyi megfigyelési eredményre magyarázatot adjon, mégis lényegesen előbbre jutottunk azáltal, hogy az elméleteket immár nem egy, hanem három gyűrűrendszerre lehet, és kell alkalmazni. Lehetséges, hogy itt is (akárcsak a csillagászat sok más területén) az azonosnak látszó jelenségek különböző okokra vezethetők vissza, s nem egyszerű eldönteni, hogy melyik esetben melyik ok a felelős. Mégis az elmúlt 3—4 évben ugrásszerűen növekedett az az ismeretanyag, amely a bolygók gyűrűire vonatkozik, és ezzel lényegesen előbbre jutottunk a gyűrű mint csillagászati jelenség megértésében és értelmezésében.

A Nagy Vörös Folt kutatásának története

A *Voyager-űrszondák* Nagy Utazásának izgalmas állomásain túljutva minden bolygónál a kutatás szürke, de annál termékenyebb hétköznapijai kezdődtek meg. Ezen kutatások eredményei már nem olyan összefoglaló különkiadásokban jelentek meg, mint a bolygómegközelítések legérdekesebb felfedezéseit bemutató gyors cikkek, hanem időben is és folyóiratokban is elszórva találhatjuk meg őket. Természetes ez, hiszen egy-egy bolygó megközelítésekor tapasztalt sokféle jelenség mindegyikének kutatása külön életet él, a kérdések tisztázása nem egyforma időt és fáradságot igényel. Sőt, néha csak a következő bolygó vagy bolygók megközelítésekor mért adatok segítenek felismerni, hogy egyáltalán „jelenségről” volt-e szó.

Jó példa erre az angolul *electroglow*-nak nevezett jelenség (talán elektro-fénylésnek fordíthatnánk). A *Voyager*-szondák mérései szerint a Jupiter esetében még csak egy kicsit volt erősebb a bolygó korongjának lágy röntgensugárzása, mint amit a napfény szórása alapján vártak, így nem is gondoltak arra, hogy a többlet külön magyarázatra szorul. Amikor azután az Uránusz bolygónál a sugárzás már ezerszeresen múlta felül a várt szintet, a fejbeverően magas érték miatt rá kellett ébredni, hogy itt egy, az eddigektől eltérő gerjesztési mechanizmus működik, és ugyanez lehetett az oka a Jupiternél mért nagyobb intenzitásnak is. (Az elektro-fénylés jelenségét egyébként az okozza, hogy az ionizációkor szabadabbá váló elektronokat a bolygó erős mágneses tere az erővonalak mentén mozgásra kényszeríti, azonban a nagy légsűrűség miatt az elektronok hamar beleütköznek a légkör semleges atomjaiba, fénylésre gerjesztve őket. A mechanizmus nyilván minden mágneses térrel rendelkező bolygó esetében működik, hol észrevehetőenül gyenge, hol feltűnően erős sugárzást eredményezve.)

Mostani, a legújabb űrkutatási eredményeket is magábanfoglaló, áttekintő cikkünk témájának a Konkoly Observatórium megalapításának 120 éves évfordulója ad aktualitást. KONKOLY THEGE MIKLÓS munkásságát értékelendő, meg kell állapítanunk, hogy Jupiter-megfigyelései iskolát teremtettek. Nemcsak kortársait, barátait, a Herényben tevékenykedő tehetséges GOTHARD testvéreket sikerült rávennie a Jupiter és a Mars megfigyelésére, de a következő generációból WONASZEK ANTAL Kis-Kartalon és MASSÁNY ERNŐ Ógyallán folytatta ezt a nem kis ügyességet kívánó munkát. A bolygórajzolásnál ugyanis nem elég meglátni, észrevenni a fontosat, kell hozzá jókora kézügyesség, hogy azt és úgy rajzolja a megfigyelő, ahogy szeretné. A szubjektivitás tehát nemcsak abban van, hogy mit vesz észre, hanem abban is, hogy azt hogyan tudja visszaadni. Ugyanakkor a munka fontosságát nemcsak az mutatja, hogy a kortárs kutatók felhasználták megfigyeléseiket, hanem még inkább az, hogy a rajzok manapság is felhasználhatók a bolygószondák sok-sok felvételének és a távcsöves fotóknak a kiegészítésére. A Jupiter egyes felületi képződményeinek változása ugyanis olyan hosszú karakterisztikus idő alatt játszódik le (nem állítható, hogy olyan hosszú periódusú, mert a periodicitás ténye még nem bizonyított), hogy ha valamely jelenségnek az időbeli fejlődését akarjuk nyomomkövetni, örülhetünk, ha egy régi rajzzal vagy legalább egy megjegyzéssel, szóbeli leírással egybevetethetjük állításunkat.

A Nagy Vörös Foltra vonatkozó megfigyelések története

Mint ismeretes, GALILEI volt az első, aki 1609-ben távcsövéz az ég felé fordítva a Jupiterből többet láthatott, mint egy fénypontot. Hogy kezdetleges távcsövével mennyi volt ez a „több”, arról nem szól a fáma, csak egy KEPLER által félreértett vagy félmagyarázott anagrammáról, amelyben Kepler szerint Galilei a Jupiteren egy nagy foltot látott volna. Mindenesetre furcsa, hogy Kepler, aki 1630-ban meghalt, „Jupiter-foltról” ír, holott az első említés igazi foltról csak 1664-ből származik GIOVANNI CASSINI-tól és az angol ROBERT HOOKE-tól. Abban az időben az alakzatot „Hooke foltja” névvel illették. Cassini évekig figyelte a foltot, visszatéréseit 1665-ben arra használta fel, hogy a Jupiter forgási idejét meghatározza.

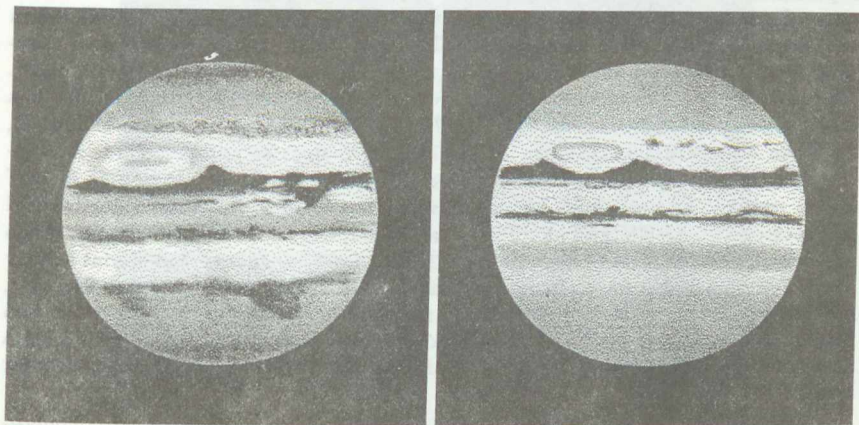
A következő ötven évben többen láttak foltot a Jupiteren. A foltok léte annyira hozzátartozott a Jupiterhez, hogy 1711-ben DONATO CRETÍ egyik festményén meg is örökítette (ez a kép ma a vatikáni képtárban, a *Pinacoteca Vaticana*-ban található). Azt nem tudjuk, hogy ugyanazt a foltot látták-e többen, vagy több folt is feltűnt az idők folyamán.

Tulajdonképpen 1878-tól kezdve lett híres és izgalmas a Folt, amikor is hirtelen feltűnően vörössé vált, és ez keltette fel az érdeklődést iránta. A Jupiter megfigyelése kedvenc időtöltése volt a csillagászoknak, de a műkedvelő, művelt közönségnek is. Mindig lehetett ugyanis valami változást várni, ha más nem, hát holdjainak helyzetváltozását. De egyenlítőjével párhuzamos sávjai is gyakran magukra vonták a figyelmet, színeik, szélességük változott, időről időre foltok jelentek meg bennük. A változások elég gyorsak voltak ahhoz, hogy észre lehessen venni őket, de elég lassúak, hogy le lehessen jegyezni vagy rajzolni a látványt. Emiatt sok kép készült a bolygóról. E szerencsés körülmény lehetett az oka, hogy amikor 1878-ban a Folt színe feltűnővé vált, sokan vették egyszerre észre, és ma — attól függően, hogy milyen nemzetiségű író könyvét vagy cikkét olvassuk — mást és mást jelölnek meg felfedezőként. Így DONNETT, PRITCHETT, TEMPEL, LOHSE, NIESTEN és BREGYIHIN is szerepel, mint felfedező. Nyilván egymástól függetlenül vették észre. Tulajdonképpen ebben az időben realizálódott, hogy ugyanarról a foltról van szó, egy hosszú életű alakzatról, amit érdemes elnevezni. Ekkor kapta a *Nagy Vörös Folt* nevet.

A felfedezés után visszakeresték a régi rajzokat, hogy vajon látszott-e a Folt már korábban is. 1859-ig folyamatosan követni lehetett a rajzokon. Korábbi szórványos megfigyelések voltak. SOUTH 1839. június 3-án megfigyelt egy foltot, amely negyed Jupiter átmérőjű volt, de 30 percen belül eltűnt. SCHWABE 1831-es és DAWES 1851-es rajzán is szerepel a Folt, de egy 1856-os rajzzal kapcsolatban nem történik említés róla. 1869-ben GLEDHILL és 1870-ben MAYER és ROSSE rajzán is szerepel, 1872. dec. 31-én egymástól függetlenül COPELAND és ROSSE is megfigyelte a Foltot.

Amint az 1878-as felfedezés híre 1879-re eljutott Magyarországra is, Konkoly Thege Miklós azonnal programjára tűzte a Jupiter megfigyelését, mielőtt a bolygó újra láthatóvá vált. Megfigyelését 1884-ig programon is tartotta, amikor is a Folt nagyon elhalványodott. A Folt egyébként 1880-ban volt a legfeltűnőbb vörös, aztán egyre halványabb és halványabb lett, annyira, hogy az 1884-ben készített Konkoly-rajzon szinte már csak a helye látszik, mint sávjának folytonossági hiánya (4.1. ábra). 1884-től 1889-ig senki sem tudta megtalálni, annyira elhalványodott. Aztán 1890-ben újra megjelent, 1891-ben volt a legintenzívebb. 1892-ben már csak halvány rózsaszín, néha eltűnt. 1897-re

újra erősebb, 1902-ben megint a legintenzívebb. 1908-ban Konkoly Nagy-Tagyoson a Meteorológiai Intézet igazgatójaként még mindig készített róla rajzot. A Folt 1910-ben ismét nagyon halvány. (Wonaszek Antal 1901-ben megpróbált több-kevesebb sikerrel az ógyallai Konkoly rajzok és külföldről beszerzett Jupiter-rajzok alapján az aktivitásban valamiféle periodicitást kimutatni: 11.76 évet talált, amely elég közel van a Jupiter keringési idejéhez. Úgy vélte, hogy a bolygó pálya-excentricitása következtében a Nap árapály hatásának és besugárzásának a keringés során fellépő változása okozhatja a Jupiter „felületének” változásait.)



4.1. ábra. Konkoly Thege Miklós rajzai a Jupiterről 1884 febr. 28. és márc. 23.

STANLEY WILLIAMS 1910-ben a Folt segítségével meghatározta a Jupiter tengelyforgási idejét, s egy másodpercen belül ugyanazt a forgási periódust kapta, mint Cassini 1665-ben. Ezért valószínű, hogy ugyanaz a folt élhetett már Cassini idejében is. Vagyis ezek szerint a Nagy Vörös Folt már legalább 325 éve létező alakzata a Jupiter felhőrendszerének. 1920-ban elhalványodott, 1953-ban ismét halvány, alig látszott, 1960-ban csak a halója látszott, de 1973–74-ben, amikor a *Pioneer* szondák ott jártak, elég feltűnő képződmény volt, és igen szép látványt nyújtott 1979-ben, a *Voyager*ek ottjártakor is.

Közben a Jupiteren a nagyon állandó Nagy Vörös Folton kívül más, viszonylag tartósabb alakzatok is fel-feltűntek — főleg a déli félgömbön több kisebb fehér folt néha 2–3 éves, néha hosszabb élettartammal. Volt olyan, amely 40 évig is megmaradt. Egyszer, 1972 júniusa és decembere között egy kisebb vörös folt is feltűnt az Északi Tropicus Zónában, a *Pioneer-10* le is fényképezte.

Volt azonban a Nagy Vörös Folttal kapcsolatos más, még érdekesebb jelenség is. Például 1912-ben egy Y-alakú felhőképződmény a Földről nézve szinte keresztülment rajta. Aztán 1901-ben keletkezett egy hosszabb életű alakzat, a Déli Tropicus Zavar, amely ugyanabban a sávban, de más sebességgel járta körül a Jupitert, mint a Nagy Vörös Folt. 1940-ben halt el, és addig kilencszer találkozott a Nagy Vörös Folttal. Ez a találkozás nagyon érdekes módon játszódtott le. A Zavar bolygórajzi hosszúságban néhány foktól 240 fokig változtatta a méretét, bár általában 60 fok körüli volt. Találkozáskor szinte

körülfolyta a Nagy Vörös Foltot. Mintha a Zavar végeit a Nagy Vörös Folt vonzotta volna, azok felgyorsultak, illetve lelassultak szétváláskor, miközben a Nagy Vörös Folt is felgyorsult a találkozás következtében. A Zavar ugyan elhalt 1940-ben, de 1955-ben ugyanazon a helyen újra kialakult egy másik (vagy ugyanaz lett újra látható?).

Milyen is tulajdonképpen a Nagy Vörös Folt?

A Nagy Vörös Folt egy, a Jupiter korongjához képest is óriási méretű, elliptikus légköri képződmény, amelynek színe a feltűnő vöröstől a fehérig változik. Néha el is tűnik. A Jupiter világos színű, déli tropikus zónájában foglal helyet, centruma a 22° déli szélességen van, helyzetét szélességben nem nagyon változtatja. A folt méretét szélességben nagyjából a zóna szélessége határozza meg, de a zóna legörbül, követi a folt határvonalát. Hossza sokkal nagyobb változásnak van kitéve. Jelenleg $26\,000 \times 14\,000$ km, de 1880-ban $40\,000 \times 14\,000$, 1897-ben $42\,000 \times 15\,000$, 1927-ben $41\,000 \times 14\,000$, 1960-ban $40\,000 \times 10\,000$, 1973-ban $40\,000 \times 13\,000$, 1986-ban $48\,000 \times 11\,000$ km méretet adtak meg rá. A Jupiter „felszínéhez” képest nem állandó helyzetű, bár FLAMMARION szerint 1883 és 1897 között nem vették észre, hogy helyzetét változtatta volna. Ugyanakkor a segítségével meghatározott tengelyforgási időről megállapították, hogy 1877-től 1900-ig nőtt, utána ingadozott, majd 1912-ben nem változott. A *Voyager-2* szonda mérései szerint a Nagy Vörös Folt naponta fél fokot tett meg nyugat felé. Ez 11 km/órás sebességnek felel meg, ami azt jelenti, hogy kb. 5 év alatt kerüli meg a Jupitert. Déli szélénél kelet felé fújó 290 km/órás, északi szélénél nyugat felé fújó 180 km/órás szelek vannak. A Folt forgása az óramutató járásával ellentétes, tehát anticiklonális. A szélén az anyag 6 nap alatt jár körbe.

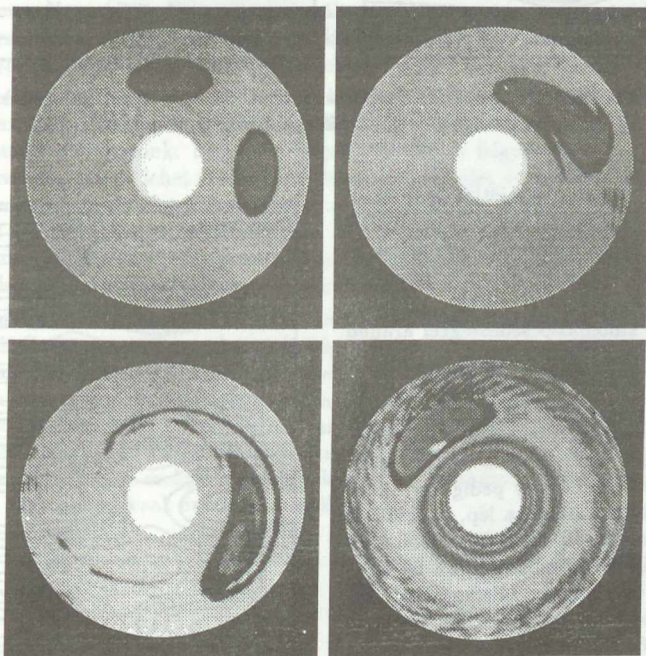
A déli félgömb fehér foltjai is anticiklonálisak, és infravörös spektrumuk megkülönböztethetetlen a Nagy Vörös Foltétól. Ezek azonban nem tartalmaznak olyan, a kék, ibolya és ultraibolya fényt erősen elnyelő anyagot, mint a Nagy Vörös Folt. Ennek az abszorbeáló anyagnak a mibenlétét egyébként még nem sikerült tisztázni, csak találgatások vannak rá. Egyesek a foszfint (PH_3) teszik felelőssé a bolygó csodálatos barna színéért. Érdekes viszont, hogy az északi félgömbön a Nagy Vörös Folttal nagyjából azonos szélességen nagy ritkán keletkező rövid életű foltok ugyanolyan spektrális tulajdonságúak, mint a Nagy Vörös Folt.

Magyarázatok a Nagy Vörös Folt

A századforduló táján a legelső elképzelések állandó felszíni alakzatokhoz, például „úszó szigethez”, „képződő felben lévő szárazföldhöz”, „lávához”, „olvadásban lévő anyaghoz” vagy egy folyamatosan működő vulkánhoz kapcsolódó légköri képződménynek vélték. Úgy gondolták, hogy a vulkán vörösre színezi a felette lévő felhőréteget. Ezt annál is inkább feltételezhatték, mert — mint az előző részben már említettem — az 1897-et megelőző 14 évben a helye és a mérete nem változott. De az igazsághoz tartozik, hogy még 1963-ban HIDE is egy topográfiai kiemelkedéshez tartozó *Taylor-oszlopként* értelmezte, annak ellenére, hogy természetesen ő már tudta, hogy ez a topográfiai kiemelkedés nem lehet egy szilárd felszín hegysége.

Az effajta magyarázatokat annak idején már megcáfolta az a megfigyelés, hogy a Nagy Vörös Folt hosszúságban változtatja a helyét, sőt majdnem állandó sebessége néha ugrásszerűen megváltozik. Ugyancsak emiatt tekinthetők nagyon valószínűtlennek

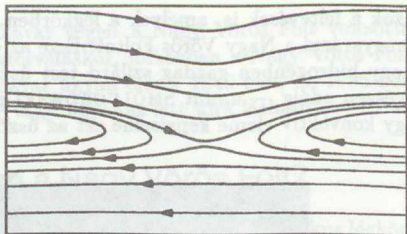
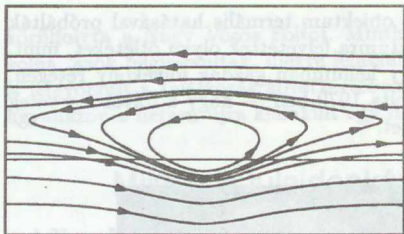
azok a feltevések is, amelyek a légkörben úszó objektum termális hatásával próbálták magyarázni a Nagy Vörös Foltot. Erre az objektumra felvetettek olyan ötleteket, mint, hogy hidrogénben gazdag szilárd test úszik egy héliumban gazdag folyékony rétegen, egészen odáig — amint SMOLUCHOWSKI gondolta 1970-ben — hogy a folyékony réteg egy konvektív eleme képviselné ezt az úszó testet.



4.2. ábra. Örvények egyesülése forgó folyadékkal végzett laboratóriumi kísérlet során

KUIPER vetette fel 1972-ben a „nagy vihar” hipotézist a Nagy Vörös Folt magyarázatára. Eszerint a földi hurrikánokhoz (trópusi ciklonokhoz) hasonló, *alacsony nyomású örvénnyel* állunk szemben. Ekkor azonban nehezen érthető az örvény hosszú élettartama és óriási mérete. Az előbbi azzal magyarázták, hogy mivel a Jupiternek valószínűleg nincs szilárd felszíne, ha már kialakult egy alacsony nyomású centrum, azt nem zúzó szét a felszíni súrlódás. A földi hurrikánok is zavartalanul fennmaradnak mindaddig, amíg csak a tengerek felett járnak, de tüstént szétesnek, ha a szárazföldek fölé érkeznek.

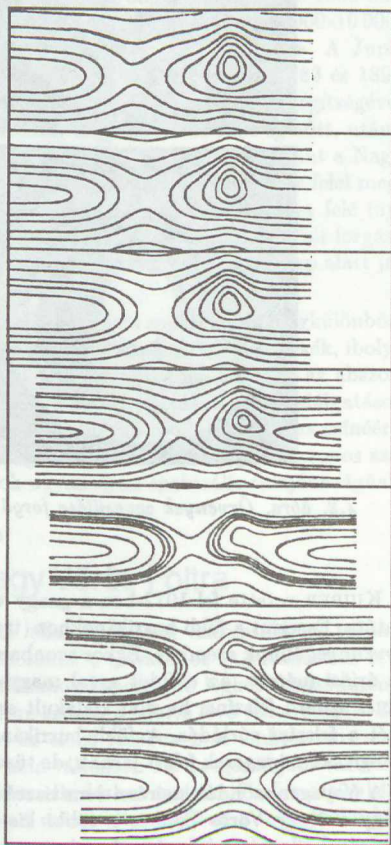
A Voyager-szondák mérései sem tisztázták egyértelműen a helyzetet, de az kiderült, hogy a Nagy Vörös Folt és a többi kisebb folt is anticiklonális, tehát az óramutató járásával ellentétes irányban forgó, magas nyomású képződmény, és nem alacsony nyomású, mint a földi hurrikánok. Az anyag forgása a Nagy Vörös Foltban inkább a szélekre korlátozódik, a közepe mintha állna.



4.3. ábra. E-típusú (balra) és D-típusú (jobbra) szoliton áramlási rendszere modellszámítás alapján

Ilyen nagy örvény létrejöttét csak mostanában sikerült számítógépes modellekkel és laboratóriumi kísérletekkel szimulálni. A káosz elmélete segített ebben a témában is. Egy cellákra szétosztott cirkulációjú bolygón, ahol a különböző sebességgel áramló sávok között szélnyírás is fellép, sok kis örvény szakad le a sávok határán. Azok, amelyeknek a forgásiránya megegyezik a szélnyírás irányával, életben maradnak, és nőnek, amelyeké nem, azok szétesnek, és elhalnak. A sok kis örvény pedig egymással találkozva kölcsönhatásba lép, egyesül, és rövidesen naggyá áll össze. Ily módon a kicsik energiájából növelheti aztán fel egyikük a saját energiáját, a találkozásnál „fel-falva” a többit. Az anticiklonális forgás az örvény szélén felemelkedve anyagot szállít fel az alsóbb rétegekből — ezek adnák a felhőzetnek a csodálatos színt. Az optikailag aktív anyag a Nap ultraibolya sugárzásától elbomlik és elszíntelenedik, majd az örvényen kívül visszajut az alsóbb rétegekbe. Az elmélet azonban nem tudja megmagyarázni a Déli Tropicus Zavarral való találkozáskor lezajló jelenségeket.

A Pioneer-szondák mérései azt mutatták, hogy a felhők a Nagy Vörös Folt felett néhány fokkal hidegebbek, és magasabban helyezkednek el, mint másutt. MAX-WORTHY és REDEKOPP 1976-ban ennek magyarázatára olyan hipotézist vetett fel, amely ellentétben a Taylor-oszlop és örvény hipotézisekkel nem egy, a légkör aljág is lenyúló képződményként értelmezne



4.4. ábra. D-típusú és E típusú szoliton találkozása modellszámítás alapján

a Nagy Vörös Foltot, hanem egy magányos hullámhegyként, úgynevezett *szolitonként*. Ez a felhők alja alá legfeljebb egy skálamagasságnyi hosszra lenyúló, tehát nem olyan nagy energiataartalmú légköri képződmény, és létrejötteének feltétele szintén a cellákra szétteső cirkuláció és szélnyírás. A szoliton egy zavart zóna összeomlása esetén alakulna ki. *E-típusú szoliton* jön létre anticiklonális cirkuláció esetén, amely a hullám centrumában megemeli a felhőréteget (az angol *elevated* = *megemelt* szó kezdőbetűje az E), ilyen lenne a Nagy Vörös Folt. Míg ciklonális cirkuláció esetén *D-típusú szoliton* alakul ki, amelynek centrumában a felhőréteg a környezeténél mélyebbre süllyed (a *depressed* = *besüllyedt* angol szóból jön a D), ilyen lehetett a Déli Tropikus Zavar.

Az elmélet előrejelzése ilyen szolitáris (magányos) hullámok találkozására kísértetiesen hasonlít azokhoz a leírásokhoz, amilyeneket a Nagy Vörös Folt és a Déli Tropikus Zavar találkozásáról olvashatunk. Például a végek látszólagos felgyorsítását a fázissebesség változásával nagyon jól lehet értelmezni. Eszerint az elmélet szerint a Jupiter tartósabb felhőalakzatai ilyen nemlineáris mechanizmus révén jönnének létre. Az E-szoliton által megemelt felhőréteg alatt, tehát a Nagy Vörös Folt közepén, a konvekcióra nagyon alkalmasak a feltételek, és ezáltal kerülnének fel az alsóbb rétegekből azok az optikailag aktív molekulák, amelyek a felhőzet színeiért felelősek.

Maxworthy és Redekopp 1976–78-ban az *Icarus* folyóirat hasábjain köszönetet mondott a Brit Csillagászati Egyesület vezetőségének, amiért szabadon használhatták a régi Jupiter-rajzokat tartalmazó Memoir-köteteket, és felhasználhatták azokat a Nagy Vörös Folt és más alakzatokra adott magyarázatuk alátámasztására. A cikkben idézett 21 forrásmunkából kilenc a régi rajzokat tartalmazó publikáció. Ez a példa is mutatja a megfigyelés fontosságát, megismételhetetlenségét, egyszerűségét, egyediségét. Soha nem tudhatjuk, hogy mikor szolgálja megfigyelésünk a tudományos megismerést: azonnal, évtizedek vagy esetleg csak évszázadok múlva.

Illés Erzsébet

Holdak a Naprendszerben

Bevezetés

A 60-as években még azt hittük, hogy az óriásbolygók körül keringő holdak is olyanok lehetnek, mint a mi Holdunk, és telítettségig tele vannak kráterekkel. Azóta azonban nagyon megváltozott a Naprendszer holdjairól alkotott képünk. A naprendszer-keletkezési elméletek a 70-es évek közepén mutattak rá arra, hogy a beinduló magfúzió miatt felforrósodó Nap a körülötte megmaradt gáz- és porfelhőt is felfűtötte. Emiatt ennek a *szoláris ködnek* a Naphoz közel lévő porszemcséiből az *illó anyagok*¹ gyorsan elpárologtak, és ezt a gáz halmazállapotú anyagot a napszél kifújta a kialakuló Naprendszer belső teréből. A Naphoz közelebbi tartományok tehát illó anyagokban nagyon elszegényedtek. A *bolygókezdemények*, *planetezimálok* összeállásában pedig csak szilárd szemcsék vesznek részt. Ezért állnak főként *szilikátokból*, és ezért tartalmaznak kevés illó anyagot a Föld típusú bolygók, valamint a Hold.

A Naptól távolodva a szoláris köd egyre ritkább volt, így egyre kisebb bolygók kialakulására volt elegendő az anyag. A Naptól távolodva azonban a szoláris ködnek a hőmérséklete is egyre alacsonyabb, és abban a távolságban, ahol már elég hideg volt a víz kicsapódásához, a szemcsék száma ugrásszerűen megnőtt. Az ennél távolabbi tartományban már a világegyetem leggyakoribb molekulája, a H_2O is részt vehetett — jég szemcsék formájában — a bolygókezdemények felépítésében. Ehhez a határhoz közel tudott kialakulni a legnagyobb óriásbolygó, a Jupiter. Ettől kifelé a szemcsesűrűség megint folyamatosan csökkent, tehát nagyobb távolságban kisebb bolygótestek felépülésére volt elegendő az anyag. A szoláris ködből jelentős mennyiségű gázt csak az óriásbolygók tudtak magukhoz kötni, de azok is csak az összeállás későbbi fázisában, amikor a már kellően nagy tömegű mag tömegvonzása meg tudta tartani a környezetükben maradt gázt.

A *Cassini program* egyik legfontosabb eredményét a Szaturnusz-légkör összetételének meghatározása adta. A metán részarányából megállapították,

1. Planetológiában illónak nevezünk minden olyan anyagot, amely földfelszíni körülmények között gáz halmazállapotú.

2.1. táblázat: Egyes ásványok kristályosodási hőmérséklete [1.]

T (K)	Vegyületek, reakciók	Ásványok
1600	CaO, Al ₂ O ₃ , ritkaföldfém-oxidok	oxidok
1300	Fe–Ni ötvözet	Fe–Ni fém
1200	MgO + SiO ₂ → MgSiO ₃	ensztatit
1200–490	Fe + O → FeO, FeO + MgSiO ₃	olivin
1000	alkáli oxidok + Al ₂ O ₃ + SiO ₂	földpát
680	H ₂ S + Fe → FeS	troilit
550	Ca-ásványok + H ₂ O	tremolit
425	Olivin + H ₂ O	szerpentin
175	H ₂ O-jég kristályok	vízjég
150	NH ₃ gáz + H ₂ O jég → NH ₃ ·H ₂ O	ammónia-hidrát
120	CH ₄ gáz + H ₂ O jég → CH ₄ ·7H ₂ O	metán-hidrát
65	metán, argon kristályosodik	metán-jég, argon-jég

hogy a Szaturnusz anyagában 7-szer gyakoribb a szén a hidrogénhez képest, mint a Napban. Ez egyértelműen bizonyítja, hogy nem a szoláris köd gáz- és poranyagának egyszerű gravitációs összeomlásával indult meg a Szaturnusz keletkezése, hiszen ekkor a bolygó összetételének a Napéval kellene megegyeznie. Először tehát a bolygó magja állt össze szilárd szemcsékből, és csak ezután gyűjtötte maga köré a környezetében még megmaradt gázt. Nagyon valószínű, hogy a Szaturnusznál kisebb Uránusz és Neptunusz keletkezése is hasonlóképpen, magképződéssel indulhatott meg. A Cassini vizsgálatait megelőzően nem lehetett választani e kétféle bolygókeletkezési modell közül. A nagyobb tömegű Jupiter esetére viszont ebből a mérésből nem lehet következtetést levonni, így az nem dőlt még el, hogy a legnagyobb bolygóra melyik keletkezési modell a helyes.

Jégholdak az óriásbolygók körül

1975-ben jelent meg a témában alpműnek számító Lewis – Barshay-féle táblázat (2.1. táblázat), amely megadja, hogy az egész Naprendszer alapanyagául szolgáló szoláris ködből egyensúlyi állapotban milyen hőmérséklet határok között kristályosodnak ki az egyes anyagok [1.]. A holdakra is igaz, hogy minél nagyobb naptávolságban – vagyis minél hidegebb környezetben – keletkeztek, anyagukban annál több illó anyag jege csatlakozott a szilikátokhoz. A Jupiter távolságában még legnagyobbbrészt csak a víz jege adódott hozzá a szilárd anyagokhoz, de minél messzebb megyünk a Naptól, annál több az egyre

alacsonyabb hőmérsékleten kifagyó, egzotikus jegek (szén-dioxid, ammónia, metán, szén-monoxid, nitrogén, argon és egyéb nemesgázok) mennyisége.

Ha megméri, hogy egy égitestben mennyi a nemesgázok aránya a hidrogénhez képest, akkor megmondható, hogy milyen hőmérsékleten összeállt bolygókezdemények építették fel. A nemesgáz/hidrogén arány alapján állították a *Halley-üstökösről* 1986 után, hogy körülbelül 40 AU távolságban alakulhatott ki. Ugyanezen alapul az az új állítás is, hogy a Jupiter esetleg a jelenlegi helyénél távolabb keletkezett. A *Galileo-űrszonda* ugyanis a Jupiter légkörében 2–2.5-szer annyi xenont, argont és neont mért, mint amennyi a jelenlegi naptávolságnak megfelelő helyen várható lenne. Ebből arra következtettek, hogy a Jupiter-rendszer nagyobb naptávolságon keletkezhetett, és később, a pálya lassú zsugorodása miatt került a mai távolságra. A másik lehetséges magyarázat, hogy a bolygókeletkezés idején az ő-Nap környezete hidegebb volt, mint azt a mai elméletek feltételezik. Az eddigi mérések még nem tudnak választani e két lehetőség közül, bár más bolygórendszerekben a csillaghoz nagyon közel talált óriásbolygók² inkább az első elmélet esélyeit növelik.

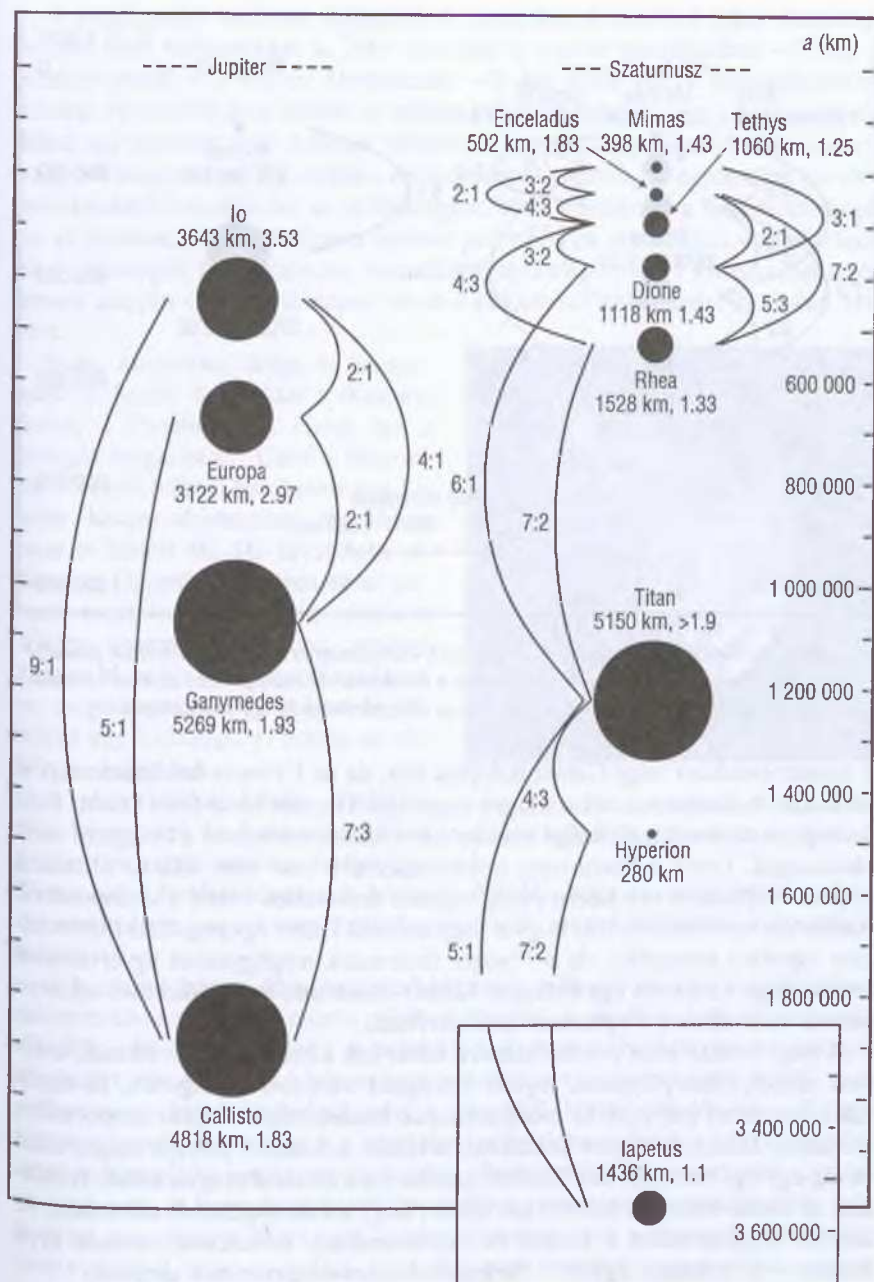
Az óriásbolygók holdjai tehát nem lehetnek tiszta szilikát testek. A Jupiter holdjaiban főleg vízjég és némi ammónia csatlakozhat a szilikátokhoz. A Szaturnusz és az Uránusz távolságában már a metán-jég is hozzáadódhat a holdak anyagához, a Neptunusznál és Plútónál pedig a nitrogén-jég is lényeges alkotóelem lehet. A jégholdaknál eddig az ammóniát sem szilárd sem gáz halmazállapotban nem mutatták ki, de a metánt és a nitrogént igen. Ezeknek a gázoknak a molekulái képesek beépülni a vízjég kristályrácsának hézagaiba, és csak akkor válnak szabaddá, ha a vízjég elolvad. Az ilyen, kristályrácsba zárt idegen molekulákat tartalmazó anyagot *kalitkavegyületnek* (*klatrátnak*) nevezzük. A Föld sarkvidéki óceánjainak a mélyén is nagy mennyiségben található hasonló szerkezetű anyag, a metán-hidrát.

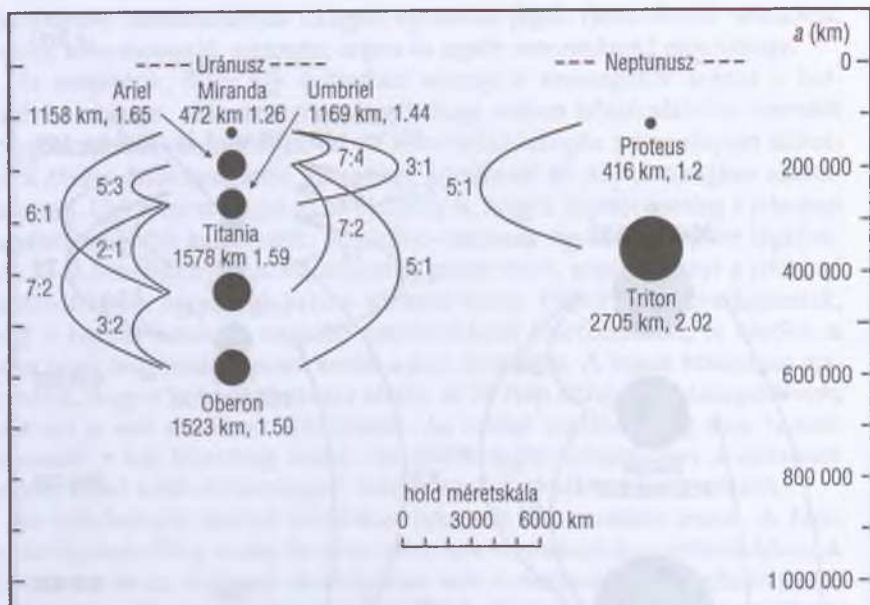
A holdrendszerek általános tulajdonságai

A belső Naprendszerben csak a Földnek és a Marsnak van holdja, az óriásbolygók körül viszont sok hold kering, ezek igazi holdrendszereket alkotnak. Az óriásbolygók holdrendszereiben legbelül, a bolygóhoz közel néhány kicsi hold kering, szabályos pályán. Ezek porlása szolgáltatja az óriásbolygók porgyűrűit [2.].

Kissé távolabb következnek a szabályos pályán mozgó nagy holdak (2.1. ábra), amelyeket reguláris holdaknak is nevezzünk. Ezek általános vélemény szerint a Naprendszer keletkezése idején, a bolygóval együtt alakultak ki a bolygó körül megmaradt por- és gázanyagból összeállva. Ez a magyarázat leginkább

2. Lásd például a *Megmérték egy exobolygó sugárzását* című hírt.





2.1. ábra. Az óriásbolygók reguláris holdjainak méretarányos rajza és a közöttük fennálló keringési rezonanciák. A távolságok (a) és a holdátmérők skálája nem azonos! A hold neve mellett az átmérője (km) és az átlagsűrűsége (g/cm³) is szerepel.

a Jupiter-rendszer négy Galilei-holdjára illik, de az Uránusz holdrendszerét is jól leírja. A Szaturnusznál a kiugró nagyságú Titanon kívül több kisebb hold kering, de ezeknek a sűrűsége nem csökken szisztematikusan a bolygótól mért távolsággal. Ezért a Szaturnusz holdrendszerére már nem illik az általános kép. A Neptunusz rendszere pedig teljesen érthetetlen ebből a szempontból. Korábban azt feltételezték, hogy a nagy méretű *Triton* egy reguláris holdrendszer egyetlen maradáka, de a *Voyager* űrszondák megfigyelései egyértelművé tették, hogy ez a hold egy befogott Kuiper-objektum, és keletkezését tekintve semmi köze nincs a Neptunusz rendszeréhez.

A nagy holdak után tovább haladva kifelé sok kisebb hold következik, amelyek szabálytalan pályákon, olykor retrográd irányban keringenek, és közülük sokat lehet pályájuk és mozgásirányuk hasonlóságai alapján csoportokba rendezni. Ezeket befogott holdaknak tekintik, a hasonló pályájú csoportokat pedig egy-egy befogott test későbbi szétdarabolódásával magyarázzák. Korábban az összes befogott holdról azt hitték, hogy a kisbolygóövből származik, de amióta megkezdődött a Kuiper-öv objektumainak felfedezése, számos ilyen holdat – a Tritonnal együtt – befogott Kuiper-objektumnak tartanak.

A megfigyelési technika fejlődésével egyre kisebb testeket lehet észrevenni már földi műszerekkel is. 2005 tavaszán a Jupiter távolságában ~ 3 km, a Szaturnusznál ~ 15 km, az Uránusznál ~ 30 km körül volt a felfedezhetőség határa. Felvetődik az a kérdés is: milyen méretnél húzzuk meg a határt, amely felett egy égitestet már holdnak tekintünk, alatta pedig meteoritikus testnek vagy porszemcsének? Egyáltalán, mi érdekes van abban, ha egyre több kis törmelékholdat fedezünk fel az óriásbolygók körül? Ezeknek a felfedezéseknek az az értelme, hogy a befogott holdak jellemzőinek statisztikai vizsgálatából az óriásbolygók keletkezésére, összeállási folyamataira lehet következtetni, és ennek alapján esetleg választani lehet a különböző keletkezési modellek között.

Nagy szerencse, hogy a Szaturnusz is fogott be holdat a Kuiper-övből, a Phoebét (2.2. ábra), így a bolygót megközelítő Cassini űrszonda közelről lefényképezhetett egy kisebb Kuiper-objektumot, és ehhez nem is kellett 40 AU távolságra elmennie. Ugyanolyan szerencsével járunk most is, mint annak idején a Viking űrszondák esetében, amikor azok a Mars kis holdjait lefényképezve megmutatták, hogy milyen is közelről egy kisbolygó (Phobos az évkönyv címlapján).

A nagy holdak között általában nem keringenek kis holdak (ez alól a Szaturnusz-rendszerben a Tethys és a Dione trójai holdjai jelentenek kivételt). Kérdés, hogy ez megfigyelési szelekció eredménye, vagy a nagy holdak gravitációs zavaró hatásának a következménye.

A holdak a felszíni fényvisszaverő-képesség (*albedó*) alapján is ugyanolyan csoportokba sorolhatók, mint a pályájuk alapján. A reguláris holdak világosak, albedójuk 40–100% közötti. A belső kis holdak és a távoliak viszont többnyire sötétek, fényvisszaverő-képességük mindössze néhány százalék körüli, csak a Szaturnusz belső holdjainál mértek 30–40% körüli albedót, de a bolygó holdrendszerében ezek így is a sötétebb kategóriába tartoznak. Az űrszondák által csak távolból megfigyelt kis holdak albedóértékei természetesen elég bizonytalanok. A bolygóhoz közeli kis holdak eredetének magyarázatára még kísérlet sem történt. Mindegyik holdrendszerben ezek a legsötétebbek, tehát nem valószínű, hogy a reguláris holdkeletkezés termékei vagy melléktermékei.



2.2. ábra. A Szaturnusz Phoebe nevű holdja befogott Kuiper-objektum (Cassini)

Különleges módon keletkezett holdak

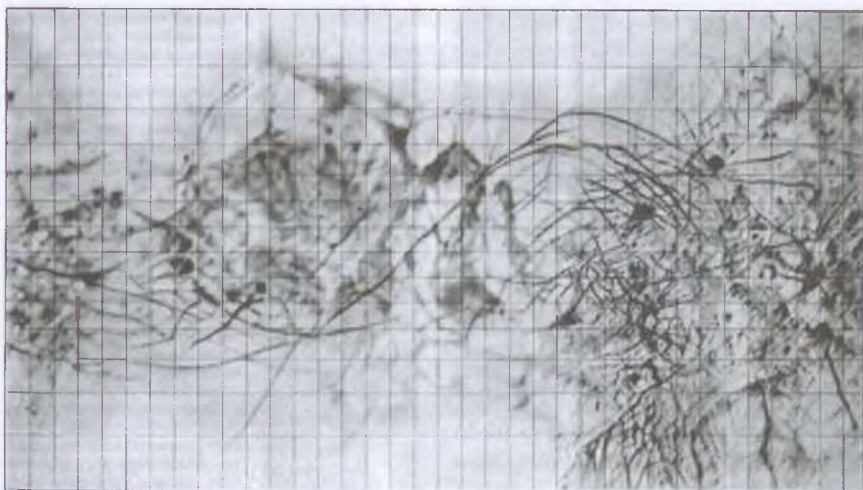
A Mars mindkét holdja befogott kisbolygó. A Föld kísérőjének, a Holdnak az anyagát pedig részben a Föld anyagából szakította ki egy Mars méretű test érintőleges ütközése a bolygókeletkezés előrehaladott fázisában, amikor a Föld anyaga már túl volt a belső megolvadáson és a sűrűség szerinti rétegződésen. Az ütközés által szétszórott kéreg- és köpenyanyag – a becsapódó test kéreg- és köpenyanyagával keveredve – kezdetben gyűrűt alkotott a Föld körül, és idővel ebből a gyűrűből állt össze a Hold. Az ütközés hője által elpárologtatott illó anyagot a napszél kifújta, ezért a Hold száraz, nagyrészt szilikátokat tartalmaz, és csak egy kicsi maghoz elegendő vas található benne. Keletkezését a véletlennek köszönheti, nem a Naprendszert létrehozó szabályos – reguláris – kozmogóniai folyamatnak, ezért nem tekintjük reguláris holdnak.

Hasonló óriási ütközést tételeznek fel a Plútó holdjának, a *Charonnak* a keletkezésére, tehát az szintén nem reguláris hold. A spektrális megfigyelések szerint ugyanis a Plútó felszínén metán- és nitrogénjég van, ezzel szemben a Charon felszínén csak vízjég található, ami az ottani hőmérsékleten „száraz” anyagnak számít. Tehát – ahogy a Holdon nincs víz és jég – a Charon anyagában sincs az ottani hőmérsékletnek megfelelő illó anyag.

A felszíni formák

A Hold felszínét a becsapódásos alakzatok uralják. Kétféle fő felszíntípust látunk rajta: világos színű felföldeket (*terra*) és sötét tengereket (*mare*). A felföldek telítettségig tele vannak kráterekkel, de az innenső oldal tengereinek területén is hatalmas, ősi becsapódási medencéket töltött fel később a Hold kérge alól előtört megolvadt kőzet. A *Clementine* űrszonda szisztematikus magassági térképezése (6. kép a színes mellékletben) mutatta ki, hogy a magassági viszonyok megőrizték sok nagy ősi becsapódás nyomát is. Ezek a becsapódások a 4 milliárd évvel ezelőtti nagy bombázási időszakban érték a Holdat. A Naprendszer kialakulása során, mintegy 4 milliárd évvel ezelőtt ugyanis már számos óriásira nőtt bolygókezdemény keringett a Nap körül. További növekedésükben, a Naprendszer jelenlegi égitestjeinek kialakulásában már e testek egymással való ütközése vette át a főszerepet. A Holdon megtalálták ezeknek az ősi becsapódásoknak a nyomait, a hatalmas, teljesen lekopott kráterek formájában. Hasonlóknak a megtalálására más égitesten nem sok esély van, mert a többi nagy égitesten azóta mindenütt újraképződött a felszín, azok a felszínek tehát sokkal fiatalabbak, mint a mi Holdunké.

A külső Naprendszer holdjai közül a felszíni formákat tekintve aktív kénvulkánjaival az *Io* a legkülönösebb. Több száz vulkáni centrum, kaldera van a



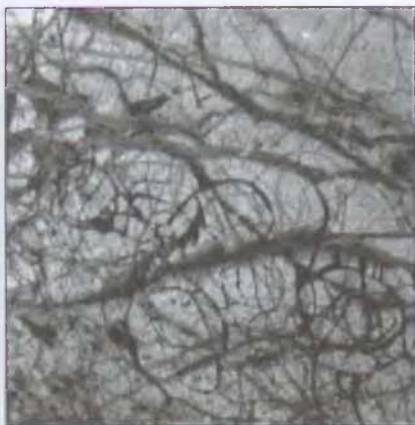
2.3. ábra. Az Europa repedései (Voyager-felvételek alapján készített hengervetületű térkép)

felszínén, de egyetlen becsapódásos krátert sem találtak még. Eszerint a felszíne nagyon fiatal, nem lehet több egymillió évesnél. Színét a kén határozza meg (4. kép a színes mellékletben). A fehér foltokat a vulkánok által kiszórt és lecsapódott kéndioxid-hó okozza, a vöröses színt a vulkáni gőzökből lecsapódó friss, amorf kén adja, amely később a hűlés folyamán átkristályosodva végül olyan sárga lesz, mint a földi vulkánok közelében is ismert és bányászott kén. A bársonyos fekete területek színét is magyarázhatjuk a kén jelenlétével, de lehet, hogy szilikátvulkanizmus juttat sötét anyagot a felszínre.

A többi hold felszínének formáit és színeit a jeges tulajdonságai határozzák meg, bár a Callisto esetében jég-szilikát keverék is jelen lehet. A jeges holdak felszínét a kerek krátereket okozó becsapódások mellett a nagyobb holdak mindegyikénél fellépő árapályfeszültségek változása alakítja. E hatás mellett sok – közöttük számos kisebb – holdnál a belső aktivitásból (belső fűtés okozta köpenyáramlásokból) származó erők is formálják a látható felszínt.

Ha a jégkéreg nem túlságosan vastag, az árapályfeszültségek repedéseket hoznak létre rajta. Ezek a repedések kis égitestrajzi szélességeken a hosszúsági körök irányával párhuzamosan futnak, közepes szélességeken többnyire 45° -ot zárnak be, nagy szélességeken pedig a hosszúsági körökre merőleges irányba fordulnak. A legjellemzőbb árapály-repedésrendszer az Európán látható (2.3. ábra), de a jeges holdak többségén megtalálhatók, vagy kontraszt növelő technikával kimutathatók – bár nem minden holdon követhetők a teljes felszínén. Hasonló vonalas alakzatokat a Földön is találunk, a többi Föld típusú bolygó és a Hold kérgén viszont nem.

Az *Europa* csaknem tökéletesen kötött keringést végez a Jupiter körül. A „csaknem” azt jelenti, hogy ez a hold a Jupiter irányához képest kb. 6000 év alatt tesz meg egy tengelyforgást, ennyi idő elteltével fordul ismét pontosan ugyanaz a területe a Jupiter felé. Ez az aszinkron tengelyforgás furcsa felszíni nyomot hagy az Európának a Jupiterrel ellentétes oldalán. Az árapály-repedések nem egyenes vonalak, hanem kisebb-nagyobb sugarú körívek (2.4. ábra). Ilyen aszinkron tengelyforgásra utaló nyomot más hold esetében eddig nem találtak.



2.4. ábra. Árapály-repedések az Európának a Jupiterrel áellenes oldalán (Voyager)



2.5. ábra. Becsapódási kráterből kiinduló repedés balra a Phoboson (Viking), jobbra a Ganymedesen (Galileo)

A holdak szilárd kérge alatti folyékony vagy képlékeny rétegben, a *köpenyben* jelentős anyagáramlások is lehetnek. Ezek szintén feszültséget okozhatnak a fölöttük lévő kéregben, ami ugyancsak repedésekhez vezethet. Ezek a tektonikus árkok az árapályfeszültségek által keltett repedésektől teljesen eltérő irányokba is futhatnak. Az árapályfeszültség azonban segítheti a megindult tektonikus repedés továbbhasadását, kiszélesedését, vagy elgörbítheti annak

irányát. A becsapódások is elindíthatnak repedéseket, ha a kéregben előzőleg feszültségek halmozódtak fel, amelyek önmagukban még nem voltak elég erősek a kéreg szétszakításához. Erre a Phoboson és a Ganymedesen láthatunk példákat (2.5. ábra). A jégholdak repedéseit a téli Balaton jegén a jelentős hőmérsékletváltozás hatására létrejövő rianások alapján lehet elképzelni.

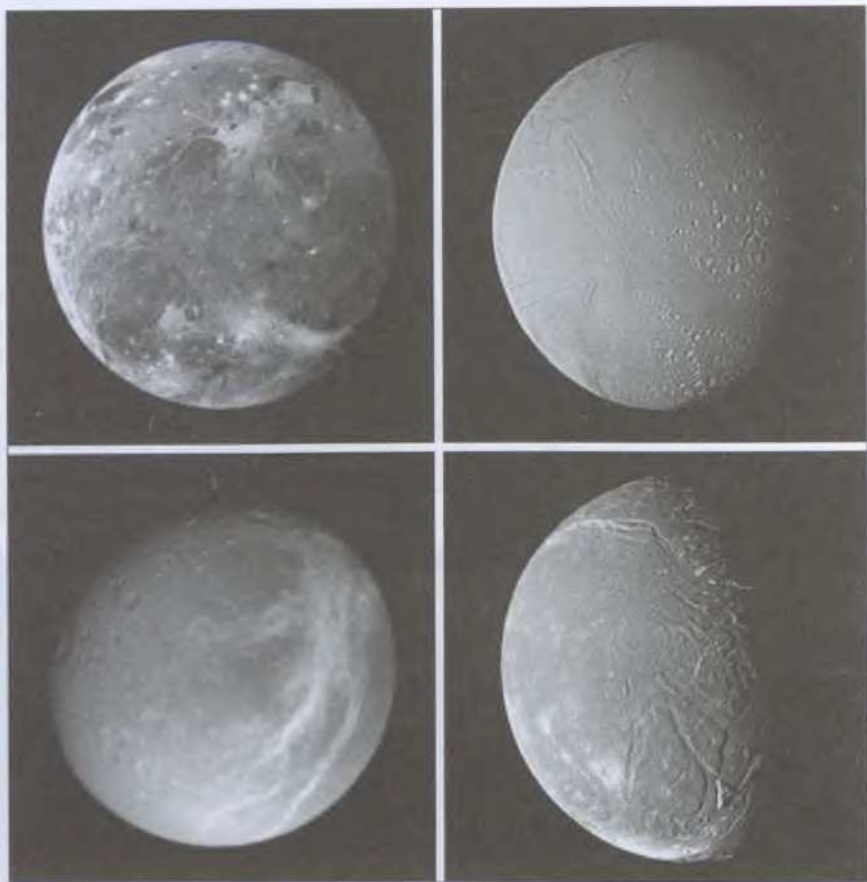
Az árapályfeszültségek napi változása során a repedések két oldalán lévő, szomszédos darabok egymáshoz képest oda-vissza elcsúszhatnak. A mechanikai hatás és a súrlódással járó hőtermelés miatt a jég kásássá válhat, és feltorlódhat a hasadék két oldalán. Szép példát láthatunk erre az Európán (2.6. ábra).



2.6. ábra. Jégkása feltorlódása az Europa egyik repedése mentén (Galileo)



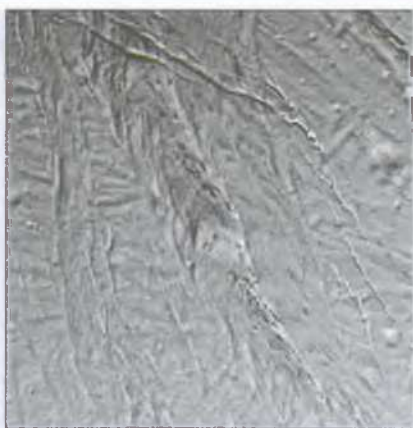
2.7. ábra. Káosz területek és repedések az Európán (Galileo)



2.8. ábra. Repedésrendszerek fent balra a Ganymedesen (Galileo), jobbra az Enceladuson (Voyager); lent balra a Dionén (Cassini) és jobbra az Arielen (Voyager)

A kéreg alatti képlékeny köpeny alján fellépő hőmérséklet-különbségek a melegebb helyekről felfelé haladó gomolyáramlásokat indítanak a köpeny anyagában, ami szintén fontos felszínformáló hatás. A meleg anyag feláramlása alulról elvékonyítja, és darabokra szakíthatja, vagy akár át is olvaszthatja a felette lévő jégkérget. Ez a *termális erózió* jelensége. Ilyen hatás alakítja ki az Európán található *káosz-területeket* (2.7. ábra). Káosz területeket más holdon nem találtak, de talán ilyen meleg feláramlás hozhatta létre azt a furcsa foltot a Iapetuson, amely a 2.10. ábra jobb oldalán látható. Viszont hasonló repedésrendszerek vannak a Ganymedesen, az Enceladuson, a Dionén, az Arielen (2.8. ábra) és a Tritonon is (2.17. ábra).

GREENBERG és GESSLER mutatták meg, hogy az Europa esetében a milliányi repedés és a számos káosz terület az itt leírt két mechanizmusra vezethető vissza. Az Europa felszínének története tehát évmilliók óta árapály okozta repedezés, hőfeláramlás által létrehozott átolvadás, szétúszás, majd visszafagyás és újrapedezés végtelen sorozata. Ezt *tektonikai felszínújraképzésnek* nevezzük, ellenében a Föld típusú égitesteken működő felszínújraképzési mechanizmusokkal, mint amilyen a földcsuszamlás, a vulkáni lávaeöntés, az üledék lerakódása vízből, vagy a portakáro kiüledése a légkörből.

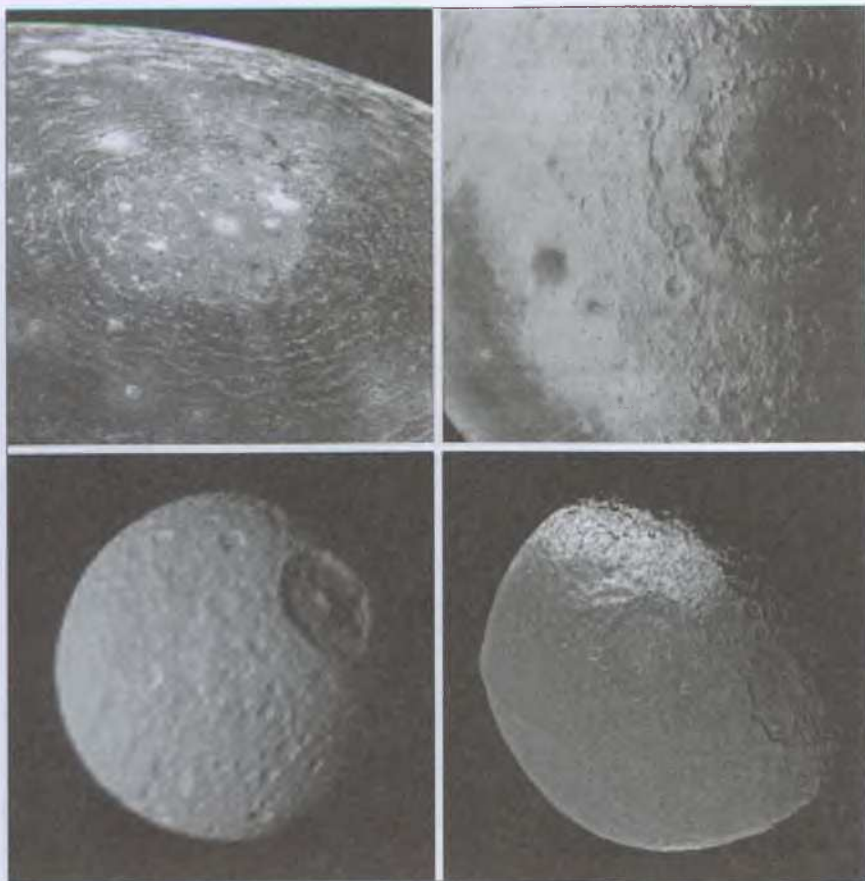


2.9. ábra. Tektonikai felszínújraképzés az Enceladuson (Cassini)



2.10. ábra. Meleg feláramlás okozta folt balra az Európán (Galileo), jobbra a Iapetuson (Cassini)

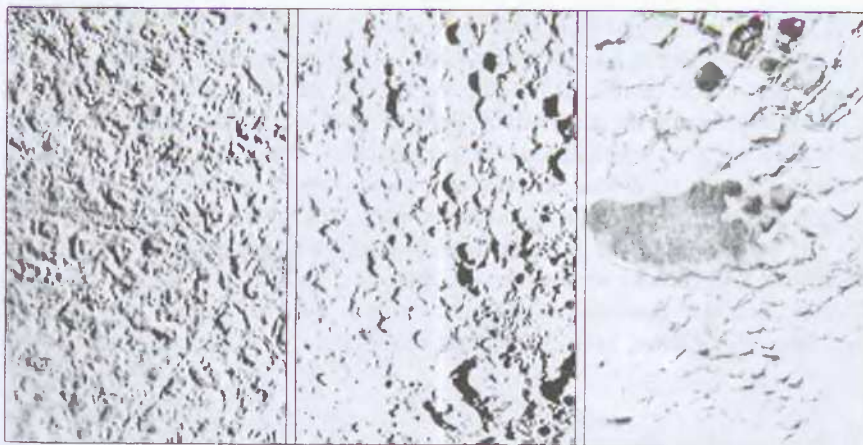
Egy égitest köpenyében a belső hő kifelé áramlása jelentős helyi eltéréseket mutathat, melegebb foltokat hozhat létre a kéreg egyes területein. Lokális felmelegedés azonban árapályfűtés hatására is létrejöhet. Hőáramlási okokkal magyarázható helyi felmelegedéseket, *feláramlási foltokat* eddig csak az Európán ismertünk, de ott nagyon sok helyen (2.10. ábra bal oldal). Lehetséges



2.11. ábra. Fent balra a Valhalla a Callistón (Voyager), jobbra a Mare Orientale a Holdon; lent balra krátersánc a Mimason (Voyager), jobbra egyenlítői gerinc a Iapetuson (Cassini) azonban, hogy a Iapetusnak a 2.10. ábra jobb oldalán látható nagy, kerek alakzata is inkább ilyen képződmény, mint becsapódásos kráter.

Az égitestek köpenyében a gomolyáramlások az egyik helyről elszállítják az anyagot, ott húzófeszültséget keltenek, esetleg repedést is kelthetnek a kéregben. A másik helyre pedig összehordják az anyagot, nyomásnövekedést s ennek következtében kiemelkedést, gerincet hoznak létre. Ezzel szemben az árapályerők, mint láttuk, csak repedéseket hoznak létre, kiemelkedő felszíni alakzatokat nem.

Egy kiemelkedés akkor marad meg tartósan egy bolygót testen, ha a kéreg kellően vastag és merev. Az Europa nem eléggé hideg, ezért jégkérgé nem



2.12. ábra. Balra kantalupdinnyehéj terület a Tritonon (Voyager), középen kráterekkel telített felföld a Holdon, jobbra fagymintás talaj a Földön

elégg merev ahhoz, hogy sokáig meg tudja tartani a „hegyeket”, azok visszasüllyednek a jégkéregbe. Ezért ennek a holdnak a felszínén csak nehezen találták meg a köpenyáramlások kompressziós nyomait. A becsapódásokkal kapcsolatban is azt találták, hogy a Jupiter jégholdjain keletkező sáncgyűrűk (Callisto Valhalla, 2.11. bal felső kép), vagy a központi csúcsok — ha egyáltalán létrejönnek — geológiai időskálán hamar visszasüllyednek, *relaxálódnak*. A szilikát kérgű égitesteken (például a Holdon, 2.11. jobb felső kép), vagy a hidegebb és ezért merevebb kérgű jeges holdaknál, például a Szaturnusz holdjainál is meg tudnak maradni a hegyek. Erre példa egy feltűnő kráter és központi csúcs a Mimason (2.11. bal alsó kép), az egyenlítői gerinc a Iapetuson (2.11. jobb alsó kép), vagy a redőgerincek az Enceladus hold nagyon vékony jégkérgén.

Még egy furcsa, sehol másutt nem látható felszíni forma van, amely nem sorolható be egyik eddigi kategóriába sem: ez a Triton egyenlítői vidékein található sáv, amelynek látványa a kantalupdinnye héjára hasonlít, erről is nevezték el (2.12. ábra bal oldal). A felszínt mozaikszerűen beborító kerek alakzatok átlagos méretük szerint két csoportba sorolhatók: az egyikbe az 5 km körüli, kisebb, a másikba az 50 km körüli, nagyobb darabok tartoznak. Ezek a kerek formák azonban nem egymástól független becsapódások nyomai, mint egy kráterekkel telített felszín esetén (2.12. ábra középen), hanem egy közös, mindenütt egyidejűleg ható folyamat eredményei. Ezt az bizonyítja, hogy sehol sem fekszik az egyik darab a másikra, hanem egymáshoz illeszkedve töltik ki a teljes felszínt. P. SHENK *diapírmezőnek* tartja a területet, amelyen a mélyeb-

ben lévő réteg anyaga helyenként nemcsak felnyomja a felette lévő, nagyobb sűrűségű fedőréteget, hanem fölé is nyomul. E cikk szerzője viszont a Földön ismert fagymintás talajok (2.12. ábra jobb oldal) képződéséhez hasonló folyamatnak tulajdonítja keletkezésüket. Emellett szól a kétféle jellemző méret, és az a tény, hogy az elhelyezkedésük hőmérsékleti övhöz igazodik. Ugyanis a földi fagymintás talajoknál az éves és a napos fagyási-olvadási ciklusok szintén kétféle méretű kerek formákat hoznak létre, és ezek a területek az örökké fagyott vidékek határain – tehát hőmérsékleti övhöz igazodva – alakulnak ki. Ennek a modellnek az a nehézsége, hogy a víz a Triton 37 K-es felszíni hőmérsékletén már kemény sziklát alkot, ott tehát a víz helyett más anyagot kell keresni, és lehet, hogy a folyamat működésére is más magyarázatot kell találni.

Jégvulkanizmus

A földtudomány azt a jelenséget nevezi vulkánnak, amikor valami olvadék (a köpeny vagy a megolvadt kéreg anyaga) kinyomul a kéreg repedésein. A kiáramló anyagot a felszínre kerülés előtt magmának, utána lávának hívjuk. A belső Naprendszerben a láva szilikát-olvadék, például olvadt bazalt töltötte fel annak idején a Hold nagy becsapódási medencéit. Ha forró víz vagy vízgőz nyomul ki a kéregből, azt gejzírnek nevezzük; ha csak gáz, például kén vagy kén-dioxid, azt szolfatárának. A tiszta jegek és a kalitkavegyületek alacsonyabb hőmérsékleten olvadnak meg, mint a szilikátok. Tehát ha egy testen a belső hőmérséklet nem elég a szilikátvulkanizmushoz, még elegendő lehet a jegek megolvasztásához. Vagyis a külső Naprendszerben a jegek olvadéka – például a víz – is betöltheti a magma és a láva szerepét, és az nyomulhat ki a kéreg repedésein. Ezt a jelenséget nevezzük *jégvulkanizmusnak* vagy *kriovulkanizmusnak*.

A kalitkavegyületek az olvadás során egészen másként viselkedhetnek, mint a tiszta vízjég. Olvadáspontjuk sokkal alacsonyabb is lehet, mint a tiszta vízjégé. Az olvadáspont-csökkenés függ az összetevő anyagok arányától, és például az ammónia-víz keverék esetében akár 100° is lehet.

Az olvadék folyékonysága is egészen más lesz, ha a jég egyéb anyagokat is tartalmaz. Ha a híg folyós ammónia-víz elegyhez egy kevés metilalkohol is keveredik, az nagyon megnöveli a viszkozitást, a folyadék sűrűvé, mézszerűvé válik. Ennek a hatásnak a jeges holdakon megfigyelhető jeleit G. KARGEL ismerte fel. A Jupiter és a Szaturnusz holdjain az ammónia-víz lávák olyan híg folyósak, mint a belső Naprendszerben – így a Holdon vagy Földön is – az olvadt bazalt. Az Uránusz és a Neptunusz rendszerében az ammónia-víz-metilalkohol keverékből álló lávák viszont sűrűek, ezért olyan meredek peremű folyásnyomokat hoznak létre, mint a belső Naprendszer égitestjein szo-



2.13. ábra. Az egész égitesten áthaladó repedésvölgy balra a Tethysen (Cassini), jobbra a Titánián (Voyager)

kásos sűrű, szilikátos lávák. Azt, hogy a metilalkohollal, az üstökösmagokban található harmadik leggyakoribb illó anyaggal számolni kell, a Halley-üstökös űrszondás spektroszkópiai méréseiből tudjuk. Ha pedig a 40 AU távolságban keletkezett Halley-üstökösre ez igaz, akkor a legkülső óriásbolygók jégholdjai is tartalmazhatnak metilalkoholt.

A vízjég többféle kristályos változata

A Föld felszínén, természetes körülmények között a víznek csak egyféle szilárd fázisát ismerjük, ez a közönséges jég (jég I). Elméleti számítások és laboratóriumi mérések szerint viszont rendkívül nagy nyomáson átkristályosodhat más szerkezetű jegekké (például jég V, jég VII), és ezeknek — az eltérő szerkezet miatt — különböző a sűrűségük is. A jégholdak belsejében megfelelő hőmérsékletű és nyomású környezetben ilyen különleges jegek is létezhetnek, sőt becsapódásoknál a felszíni jég I is átkristályosodhat. Ha az égitest fejlődése során átkristályosodás történik, ez a felszín alakításában is szerepet játszhat.

Egy nagyon sok vizet tartalmazó égitest hűlése során már az a fázisátmenet is nyomot hagyhat a felszínen, amikor a víz egyszerű jéggé alakul. A hűlés során az égitest mindig kívül keményedik meg először, így jön létre a kéreg. Ha az égitest elég kicsi ahhoz, hogy belsejének jelentős része is megfagyjon, akkor a jégkérgén hatalmas repedések keletkezhetnek. A közönséges vízjég ugyanis nagyobb térfogatú, mint a folyékony víz, és a test a fagyás után „nem fér bele a bőrébe”. Ilyen eredetű repedésnyomot három, kb. 1000 km átmérőjű

holdon is láthatunk: a Tethysen, a Titanián (2.13. ábra) és az Arielen (2.8. ábra).

Ha a holdak belsejében a jég hűlés vagy esetleg felmelegedés következtében átkristályosodik, akkor a fázisátalakulás során a sűrűsége is megváltozik. A sűrűség növekedésekor a felszínen vagy a kéreg közelében lévő tömb le-süllyedhet, a sűrűség csökkenésekor pedig a mélyebben lévő tömb felemelkedhet. Mindkét esetben olyan ovoid-szerű alakzatok keletkezhetnek a felszínen, amilyenekre a Mirandán láthatunk példát (2.14. ábra).

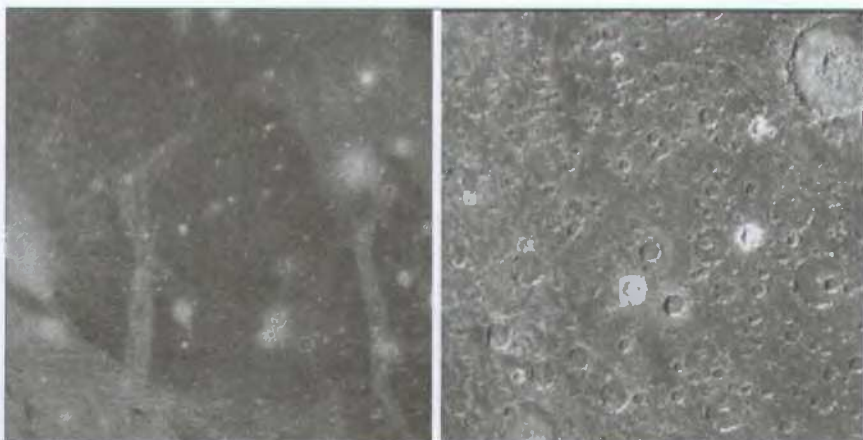
A vízjég átkristályosodása adhat magyarázatot a Ganymedes és a Callisto felszínének egyébként érthetetlen különbözőségére is (2.15. ábra). A Ganymedes felszíne geológiailag aktív, rajta mindenütt repedések húzódnak. A Callisto felszíne viszont teljesen inaktív, és telítettségig kráterek borítják, mint a mi Holdunkat. A Voyager űrszondák gravitációs mérései szerint a belsejében sincs számottevő sűrűség szerinti rétegződés, differenciálódás. A mágneses mérések viszont azt mutatják, hogy 170 km mélységben egy globális, mintegy 10 km vastagságú olvadt rétegnek kell lennie.



2.14. ábra. A Miranda különleges alakzatai, az ovoidok (Voyager)

Miért akalkult ki ez a különbség, hiszen mindkét hold a Naptól ugyanolyan távolságra — tehát ugyanabból az anyagból — jött létre, és nagyjából egyforma a méretük is. Kis összetételbeli különbséget létrehozhatott ugyan az ős-Jupiter járulékos hősugárzása, aminek hatására a közelebb keringő Ganymedesben kevesebb illó anyag maradt meg — ezt az átlagsűrűségek összehasonlítása is mutatja — de ez nem elegendő ok az alapvető különbségekre.

A Callisto távolabb van a Jupitertől, és nincs éles rezonáns pályán (2.1. ábra), így kisebb árapályfűtés hat rá, mint a Ganymedesre. Ehhez adódik még, hogy a kisebb tömegű Callisto belsejében a radioaktív fűtés is csekélyebb lehet. Talán ezek a kis különbségek vezethettek oda, hogy az égitest kialakulása során a belseje nem olvadt meg, és a vas nem tudott összegyűlni egy belső magban. A modellszámítások szerint vastag, hőszigetelő külső rétegében az átkristályosodott vízjégmódosulat nagyobb viszkozitása miatt a konvekció sem indult be, ahogyan ez közönséges jég esetében várható lenne. Így a belsejében termelődő hő csak lassan, hővezetéssel jut ki a felszínre, ezért nem



2.15. ábra. Balra a *Ganymedes* (*Voyager*) és jobbra a *Callisto* (*Galileo*) egy részlete. A két felszín jellege, kráterezettsége nagyon különböző

látszik rajta semmilyen aktivitás nyoma. De akkor ez a bennmaradt hó miért nem olvasztotta meg a belsejét, és miért nem differenciálódott a hold anyaga? A *Ganymedes*ben ugyanakkor — a nagyobb fűtés hatására — lezajlott a magképződés, amit belső eredetű mágneses terének léte igazol, és beindultak azok a köpenyáramlások is, amelyek a belső hó létét geológiai aktivitás formájában a felszínre írják. A *Ganymedes* és a *Callisto* összehasonlítása is azt szemlélteti, hogy a bolygótestek belső fejlődésének, magképződésének folyamata még nem teljesen világos a tudomány számára.

Árapályfűtés a holdrendszerekben

Egy bolygótesten sok kráter idős felszínről árulkodik, amelyet belső folyamatok már nem alakítanak, a kráterek hiánya pedig azt mutatja, hogy a kéreg a belső hatások nyomán gyorsan átalakul, újraképződik. Az óriásbolygók körül találunk telítésig kráterezett holdakat, de korántsem ez a jellemző. Azt sem lehet mondani, hogy minél kisebb egy hold, annál passzívabb test, amelynek a felszínét csak a becsapódások változtatják. A telítettségig kráteres holdak között van kicsi: a 400 km-es *Mimas*, akad közepes: az 1500 km-es *Rhea* és találunk óriásit is: a 4800 km-es *Callistót*. Viszont az apró, 400–500 km átmérőjű holdak között is találunk olyanokat, amelyeken a fantasztikus felszíni alakzatok nagy geológiai aktivitásról tanúskodnak. Ilyen apró holdak esetében pedig korábban még azt sem tételezték fel, hogy valaha is — legalább részlegesen — megolvadtak, tehát szabályos gömb alakot vettek fel.

A szilikátos anyagból összeállt égitestnél kb. 800–1000 km átmérő fölött várható, hogy a benne lévő radioaktív anyagok bomlási hője megolvasztja a belsejét. Ha az égitest anyagában a szilikátok mellett sok a jég is, akkor viszont 2000 km körül lehet ez a határ – a radioaktív elemek mennyisége ugyanis a szilikáttartalommal arányos. Ezekkel a várakozásokkal ellentétben viszont még a 400 km körüli jégholdak is gömb alakúak. Egyetlen kivétel a Hyperion.

Mi lehet a magyarázata a méret és a belső aktivitás ellentmondásainak? Az okok egyikéről, a magas jégtartalomról, illetve a keverék jegek alacsonyabb olvadáspontjáról már volt szó. A másik okot, a járulékos fűtés szerepét az elméleti kutatók vetették fel először, amit aztán nem sokkal később a megfigyelés is igazolt.

Az árapály jelenségét a Földön régóta ismerjük. A geofizikusok szerint azonban ez nem játszhatott lényeges szerepet a Föld és a Hold fejlődésében. A Voyager űrszondák már úton voltak a Jupiter felé, amikor PEALE és munkatársai modellszámításokat végeztek a Jupiter-holdakra ható árapályerők meghatározására. Megvizsgálták, hogy az Európával 2:1, a Ganymedes holddal pedig 4:1 rezonanciában keringő Io holdra milyen hatással lehet az árapály. Cikkekben – amely 1979-ben jelent meg, egy hónappal korábban, mint ahogy az első Voyager űrszonda odaért a Jupiterhez – azt a meglepő kijelentést tették, hogy „az Ión az árapályfűtés akár vulkáni aktivitást is okozhat”. A számítások ugyanis azt mutatták, hogy a hold kérgében az árapálypúp amplitúdója – ami a Föld kérgé esetében csak 1 cm körüli – elérheti az 50 m-t is!

Már az első Voyager–1 felvételek egyikén „profilból” megpillantottak egy vulkán- vagy inkább gejzírkitörést. Ezt további hét vulkán felfedezése követte, és e nyolc vulkáni kitörés közül hatot a néhány hónappal később odaérkező Voyager–2 még mindig működésben talált. A Galileo űrszonda képein is találtak hasonlókat (2.16. ábra). Bebizonyosodott tehát, hogy az óriásbolygók holdrendszereiben az árapályfűtés hatását nagyon komolyan kell venni.

Az árapályfűtés úgy működik, hogy az égitest alakját az árapályerő deformálja, az égitest mozgása miatt ennek a deformációnak a helye és nagysága folyamatosan változik, és a deformáció változása az égitest anyagának belső súrlódása miatt hőt fejleszt. Erős árapályfűtéshez az kell, hogy a hold közel keringjen a bolygóhoz, és változzék a két égitest távolsága – azaz a holdpá-



2.16. ábra. Vulkánkitörés az Ión (Galileo)



2.17. ábra. A Triton kergét árapályfűtés okozta repedésrendszer hálózata be

lyának ne nulla legyen az excentricitása. Kisebb mértékben hozzájárulhat a fűtéshez, ha a hold keringése nem kötött, azaz központi bolygójának irányához viszonyítva forgást végez. Egy holdrendszerben a többi holddal való keringési rezonancia folyamatosan biztosítja, hogy a hold pályája legalább kis mértékben excentrikus maradjon. A befogott holdak pedig elnyúlt pályára kerülnek, ahogy ez valószínűleg a Triton esetében is történt annak idején. Mindaddig, amíg a befogott hold pályája körré nem válik, a holdra árapályfűtés hat – ezt a Triton repedezett felszíne is bizonyítja (2.17. ábra).

A Voyager-szondák első képei óta folyamatosan figyelték az Iót földi infravörös távcsövekkel, 1995–2003 között pedig a Jupiter körül mesterséges holdként keringő Galileo űrszonda kameráival. Kiderült, hogy a vulkánok hónapokon, sőt éveken keresztül csaknem folyamatosan működnek. Némelyik vulkánkitörésnél 1500°C hőmérsékletet is mértek, ami arra utal, hogy az Io belsejében szilikátmagma-réteg, magmaóceán is lehet. Ilyen forró lávát manapság a Földön nem is találunk, utoljára 3.5 milliárd évvel ezelőtt létezhetett a nagy bombázási időszakban kapott becsapódási hő következtében. Az Io tehát a Naprendszer legvulkánikusabb égitestje, és nyilvánvalóvá vált, hogy



2.18. ábra. Balra a sötét és a világos terület határa a lapetuson (Cassini). Jobbra metángejzirek sötét foltyjai a Triton poláris sapkáján (Voyager)

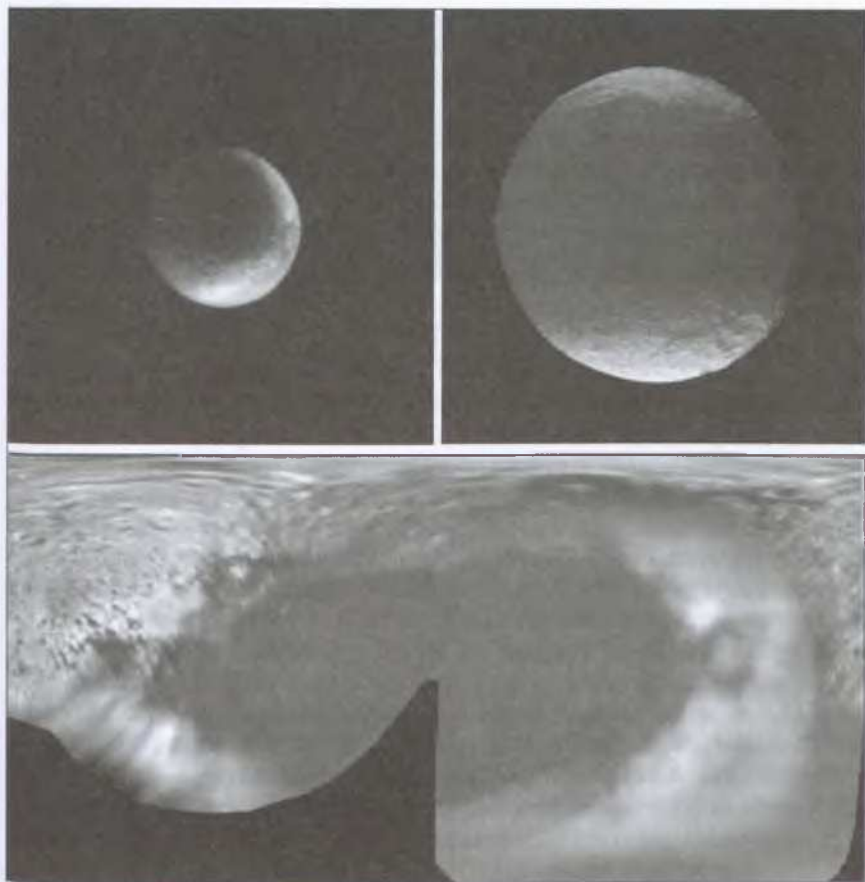
nemcsak az 1300°C körüli kénvulkanizmus működik az Ión, hanem az erős árapályfűtés komoly szilikátvulkanizmushoz is elegendő.

Az Io aktív szilikátvulkanizmusának nemcsak a holdak között, hanem a Föld típusú bolygók között sincs párja. Gejzíreket vagy gejzírek működésére utaló jeleket viszont más holdakon is találtak. A Triton poláris sapkáján látható elnyúlt, sötét, 100–150 km hosszúságú foltokat (2.18. jobb oldali kép) nitrogén-gejzirek tevékenységével magyarázzák. Ezek felszakítják a metánkéreg darabjait, és magukkal ragadva szétszórják a metán tartalmú port, ami később a Nap ultraibolya sugárzásának a hatására elsötétedik. Egy éppen zajló kitörést is sikerült lefényképezni.

Az Európán és az Enceladuson is működhetnek vizet kilövellő gejzírek. A Szaturnusz E gyűrűje az Enceladus távolságában a legsűrűbb, tehát ez a hold lehet az E gyűrű anyagának a forrása. A Cassini űrszonda a hold déli pólusa környékén vízgőz légkört és apró vízből „porszemcséket” észlelt. Ezek valószínűleg gejzírműködés termékei, és a „tigriskarmolásnak” nevezett déli poláris vidékről származhatnak. Ez a terület 10 fokkal melegebb a környezeténél, és hatalmas párhuzamos repedések szabdalják (5. kép a színes mellékletben).

A kétarcú lapetus

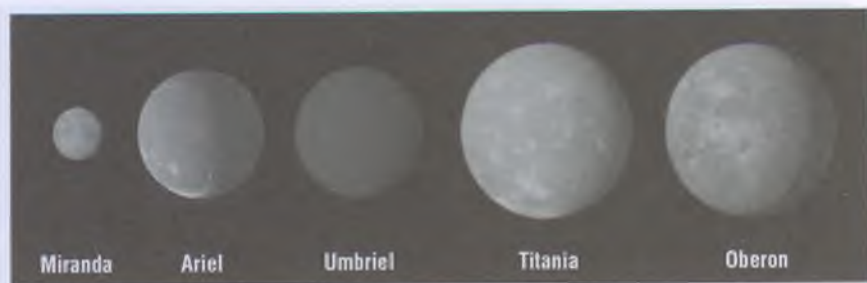
A Iapetus nagyon furcsa égitest (2.19. ábra). Keringése kötött, és a pálya menti mozgásának irányába mutató félgömbje, vagyis a vezető oldala olyan sötét, mint a szén (albedója 5% körüli), a másik félgömbje, a követő oldala



2.19. ábra. A Iapetus vezető félgömbjének sötét területe fent Cassini-képeken, lent albedó-térképen

pedig világos (albedója 50% körüli). A két félgömb között más holdon is található eltérés — főképp a Szaturnusz rendszerében — de nem ennyire megdöbbentő különbséggel. A követő oldalon a Iapetus anyaga olyan albedójú, mint a Szaturnusz többi jeges holdja, és a világos területeken van néhány sötét aljázatú kráter, de a sötét oldalon nincs világos aljázatú kráter. Ennek alapján azt feltételezték, hogy a vezető oldal sötétsége igényel magyarázatot.

Felvetették, hogy a Iapetus esetleg a Phoebéről származó sötét port seperiheti fel keringése közben. Ezt a magyarázatot azonban már a Voyager-képek és később a Cassini-képek is kétségessé tették, mert a becsapódó pornak az



2.20. ábra. Az öt Uránusz-hold méretarányos és fényességarányos képe. Látható, hogy az Umbriel sötétebb a többinél

egész vezető oldalt kellene érnie, és ekkor a sötét terület kör alakú lenne. A pólusok környékén viszont a vezető oldal felszíne is világos (2.19. ábra).

Másik magarázatként a vulkáni elöntést vetették fel, de ezt C. SAGAN is valószínűtlennek tekintette a sötét folt helyzete és alakja miatt. A Cassini-képeken nagyon diffúz az átmenet a sötét és fényes terület között (2.18. bal oldali kép). Ugyanakkor a Földről végzett radarmegfigyelések szerint a Iapetus két oldala egyformán veri vissza a radarhullámokat, tehát a két oldal felszíne csak egy nagyon vékony rétegben különbözhet.

Az egyik Cassini-képen majdnem a Iapetus egyenlítője mentén egy 1300 km hosszú és 13 km magas, egyenes hegyvonulat látható (2.11. jobb alsó kép). Ez a kompressziós gerinc úgy jöhetett létre, hogy a hold egycellás köpenyáramlásának feláramlása a hold világos oldalán volt, a leszálló áramlás pedig a sötét oldalon. A két oldalról az egyenlítő felé áramló köpenyanyag egymáshoz nyomta és feltorlasztotta a kéreg darabjait. Ezzel a kompressziós gerinccel kapcsolatban sok gejzír működése szórhatta szét azt a metántartalmú anyagot, ami később a Nap ultraibolya sugárzásának a hatására – a Triton gejzírfoltjaihoz hasonlóan – elsötétedett.

Az Uránusz Umbriel holdja (2.20. ábra) is hasonló módon kaphatott egy vékony, sötét felszíni réteget. De ott a gejzírek az egész felszínt beborító repedéshálózat mentén működhetnek.

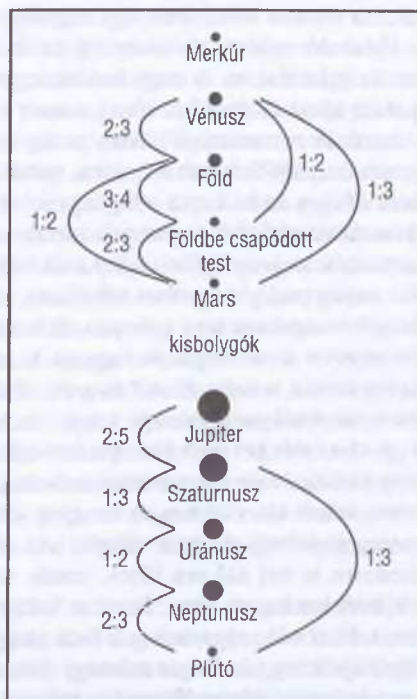
A holdak fejlődéstörténete

A Lewis–Barshay-táblázat közzététele óta egységes képbe illeszthetők a Föld típusú szilikátbolygók és a külső Naprendszer nagyrészt jégből álló égitestjei. De ha a Jupiter négy nagy holdja ugyanabból az anyagból alakult ki, akkor miért látunk az Ión aktív kénvulkanizmust, miért feltételezünk az Európán 100 km mély víz-óceánt, és miért nincs semmi nyoma a geológiai aktivitásnak a Callistón?

Az egyes holdak most látható állapotának különbségeit az eltérő hőmérsékleti viszonyok között zajlott fejlődéstörténetük magyarázza. A nagy, reguláris holdak kialakulása egy holdrendszeren belül nagyjából azonos anyagösszetételből indulhatott el. Az összeállás utolsó szakaszában, a nagy bombázási időszakban elszenvedett becsapódásoktól azonban az egyes holdak már nem azonos induló hőmennyiséget kaptak. Hőmérsékletük általában csökkent, de nem feltétlenül egyenletes tempóban. Egy hold keringési és tengelyforgási adatainak változása során, időszakonként jelentőssé válhatott az árapályfűtés, amely lassította, sőt átmenetileg vissza is fordíthatta a hőmérséklet csökkenését. A kémiai összetétel azonban az egész folyamat során csak egy irányba változott. Ha egy hold valamilyen anyagot elveszített, azt később már nem kaphatta vissza. Nagy becsapódással kaphatott esetleg más testtől utánpótlást, de egy ilyen esemény ugrásszerű változással egy új kiinduló anyageloszlást hozott létre, és új hőtartalékhhoz juttatta a holdat, ahonnan újra indult a hűlés.

A Nap a Naprendszer keletkezése idején felmelegítette a környezetét, emiatt az illékonyabb anyagok csak a távolabbi égítetek anyagába tudtak beépülni. Az óriásbolygók és holdrendszerük kialakulása során hasonló folyamat alakíthatta a holdak alapanyagát is. A gravitációs összehúzódnás hőfejlődéssel járt, a keletkező bolygó tehát számottevő többlethőt sugárzott szét a környezetében. Minél közelebb állt össze egy hold ehhez a „kályhához”, annál melegebb környezetből gyűjtötte anyagát, vagyis annál kisebb lett benne az illó anyagok aránya. Az anyabolygó többlethőjének hatása legjobban a Jupiter rendszerében követhető nyomon – bár ez nehezen választható szét a későbbi kigázosodás hatásától. Tehát már kezdetben az Iónak lehetett a legkisebb az illóanyag-tartalma, és a legnagyobb az átlagsűrűsége.

A holdak fejlődéstörténetéhez kapcsolódik az a kérdés is, hogy milyen pályákon, bolygójuktól milyen távolságokra keletkeztek holdak. A vá-



2.21. ábra. Keringési rezonanciák a bolygórendszer kialakulása idején (Patterson)

laszhoz induljunk ki a bolygó pályák szabályosságainak magyarázatából. A *Titius–Bode-szabály* szerint a Naprendszerben a bolygók keringési idejét összehasonlítva kis egész számokkal jellemezhető arányokat találunk. PATERSON ezt úgy magyarázza, hogy könnyebben alakulhattak ki bolygók az egymással erős keringési rezonanciában lévő pályákon, mint egyéb távolságokban (2.21. ábra). A Nap gázburkában keringő bolygókezdemények mozgását ugyanis fékezte a gáz, emiatt pályájuk mérete csökkent, így egyre közelebb kerültek a Naphoz. Ha azonban valahol már egy nagyobb csomó – bolygóembrió – kialakult, akkor a vele rezonanciában lévő külső pályákon a rezonancia akadályozta a planetezimálok további fékeződését. Az ilyen külső rezonáns pályák közelében tehát összegyűltek a kívülről oda fékeződött planetezimálok. A hasonló pályán keringő bolygókezdemények nagyobb térbeli sűrűsége és egymáshoz viszonyított kis sebessége pedig megkönnyítette összeállásukat, és elindulhatott egy következő bolygó gyors felnövekedése. A bolygók között kialakuláskor fennállt rezonanciák tartósan, akár napjainkig is fennmaradhattak, ha azokat időközben egy nagyobb testtel való ütközés nem rontotta el.

Hasonló módon történhetett az óriásbolygók gázburkában a holdrendszerek keletkezése is. A nagy holdak egymással keringési rezonanciában álló pályákon álltak össze (2.1. ábra), ennek nyoma legjobban a Jupiter rendszerében látható. A rezonáns pályákon pedig – amint erről már volt szó – annál nagyobb árapályfűtés hat a holdra, minél közelebb kering a bolygóójához. Így kezdettől fogva az Io kapta a legnagyobb fűtést. Láttuk, hogy kiinduló anyaga már eleve kevesebb illó összetevőt tartalmazott, és ezek mennyiségét tovább csökkentették az árapályfűtés által működésben tartott vulkánok. A sok kipöfékelt illó anyag pedig nagyrészt elszökött, mert a nagy tömegű Jupiter gravitációja és erős mágneses tere gyorsan eltávolítja a gázt a hold környezetéből. Az Ióról először a nemesgázok fogytak ki, aztán a szén-monoxid és a metán, majd az ammónia, a szén-dioxid és a víz. Most már a kén meg a nátrium a legillóbb elem, ezekből még van egy kevés, de lassan ezek is eltűnnek.

A távolabb keringő Europa belsejében már kisebb az árapályfűtés, de ez is elég ahhoz, hogy megolvassza a hold jéganyagának jelentős részét. A szilikátkéreg felett kb. 100 km-es vízréteg jöhetett létre, amit legkívül egy 2–20 km vastag jégkéreg zár le a világűr felé. A még nagyobb távolságban lévő Ganymedesre is hat akkora fűtés, amely mintegy 150 km mélységben egy globális víz-övet hozhatott létre. Erre az indukált mágneses tér létéből lehet következtetni. Hasonló mágneses mérések alapján a Callisto belsejében is feltételeznek egy folyékony vízréteget mintegy 170 km mélységben, pedig a Callisto jelenleg nem is kering élesen rezonáns pályán! Szóval azért még nem értünk mindent!

A hőmérséklettől függő fejlődéstörténet adhat magyarázatot arra a kérdésre is, hogy a Szaturnusz rendszerében miért csak a lapetust festette sötétre a gejzírek által kilövellt metántartalmú anyag, és miért világos a többi

hold. Lehetséges, hogy ezekbe a Szaturnuszhoz közelebb keringő holdakba a bolygó melegítő hatására már keletkezéskor kevesebb metán épült be, mint a messzebb összeállt Titanba vagy Iapetusba. Mára pedig már teljesen kifogyhatott belőlük a metán, így gejzíreik sem tartalmazzák ezt az anyagot.

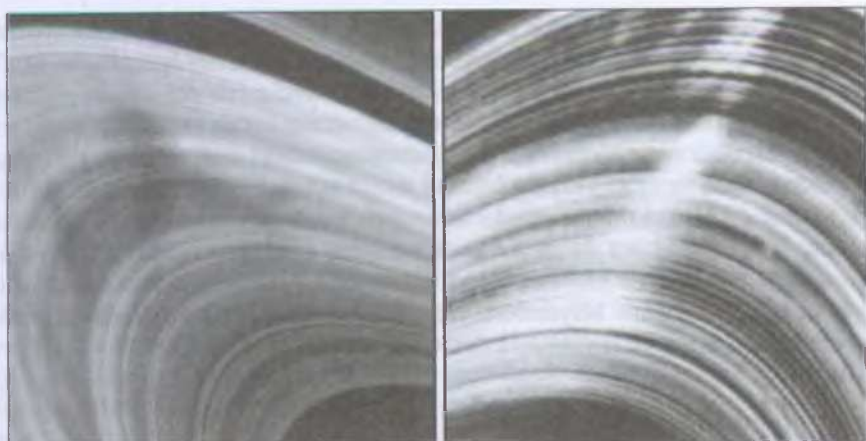
A Szaturnusz és az Uránusz rendszerében egyébként nem teljes az egyezés a pályarezonancia és az árapályfűtésnek tulajdonított felszíni aktivitás között. A Mimas például rezonáns pályán kering, de kevés felszíni aktivitás nyomát mutatja. A Mirandánál és az Arielnél ma nincs éles rezonancia (2.1. ábra), ennek ellenére nagyon aktívnak látszik a felszínük. Utóbbiak persze korábban lehettek éles rezonáns helyzetben, ezért látható mindkét hold felszínén sok olyan kráter, amelyek korábban keletkezett repedéseken ülnek.

Poroló holdak

A Naprendszerben sok példát találunk arra, hogy egy hold porral vagy gázzal szennyezi környezetét. Az óriásbolygók körüli porgyűrűk anyaga a sötétebb, belső holdakról származik. Az óriásbolygó gravitációja ugyanis felgyorsítja a holdak felszínébe csapódó meteoritikus testeket, és ezek a nagy sebességű ütközések számottevő mennyiségű porszemcsét szórnak ki. A gejzírműködés is sok anyagot juttat a bolygó körüli térbe. E folyamat eredménye a Szaturnusz E gyűrűje, amelyet valószínűleg az Enceladus holdból származó jégzemcsék alkotnak; valamint a Jupiter körüli kén- és nátrium-gyűrű, amelyeknek az anyaga az Io vulkánjaiból származik. A napszél töltött részecskéinek bombázása pedig a holdak légkörének anyagát segíti megszökni. Ilyen módon a Titan sok semleges hidrogént juttat a Szaturnusz környezetébe.

Az Io vulkánjaiból rengeteg anyag kerül ki a Jupiter körüli térbe. A légkör nélküli holdon a vulkánok akár 800 km magasra is fellövellik az anyagot. A kidobott anyag egy része visszahull, a többi megszökik, és Jupiter körüli pályára áll. A porszemcsék az elektromágneses vagy a részecskesugárzás hatására elektronokat veszítenek, vagy ionokat illetve elektronokat fognak be, vagyis elektromosan feltölthetnek. Az elektromosan töltött porszemcséket pedig a bolygó mágneses tere arra kényszeríti, hogy a mágneses erővonalak mentén mozogjanak, és eközben a mágneses tér forgási sebességével keringjenek a bolygó körül.

Ezzel a mechanizmussal emeli ki például a Szaturnusz magnetoszférája a finom port a gyűrű síkjából azon a részen, ahol a gyűrű anyaga a Szaturnusz árnyékából kilépve a napfény hatására sztatikus elektromossággal feltöltődik. A napsütötte oldalon a sötétebb porszemcsék kiemelkedő felhője sötét, sugárirányú csíkként, „küllőként” látszik a világos jégzemcsék háttere előtt. Az ellentétes töltésű por a gyűrű másik, árnyékos oldalán emelkedik ki, és fényes



2.22. ábra. „Küllők” a Szaturnusz gyűrűjében, balra a napsütötte oldalról, jobbra a sötét oldalról nézve (Voyager)

sávnak látszik (2.22. ábra). A szemcsék egy idő után elvesztik elektromos töltésüket, emiatt megszűnik a mágneses tér eltérítő hatása és a korotáció, így a bolygóárnyék határától távolabb a küllők szétnyíródnak, a jelenség már nem látható.

Az *Ulysses* és a Galileo űrszondák pordetektorai azt tapasztalták, hogy a Jupiter rendszeréből a bolygóközi térbe érkező por mennyisége időnként több nagyságrenddel megnő. HORÁNYI MIHÁLY és munkatársai bizonyították be, hogy ezeknek a „porviharoknak” az anyagát az Io vulkánjai indítják útjukra. Az így kidobott por a bolygóközi mágneses tér közreműködésével az egész Naprendszerben szétterjedhet, sőt a porszemcsék töltésüket elvesztve a helioszférából (a Nap mágneses tere által uralt térből) akár a csillagközi térbe is kijuthatnak. Tehát az állatövi fényt és az ellenfényt létrehozó poranyagot nemcsak az üstökösök porlása és a kisbolygók ütközései adják, hanem az aktív holdak vulkáni tevékenysége is.

A holdak mágneses tere

Egy égitestnek három okból lehet mágneses tere. *Belső eredetű állandó mágneses* térhez az szükséges, hogy az égitest belsejében jó elektromos vezetőképességű folyékony réteg legyen, amelyben az anyagáramlások a dinamóelv alapján felerősítik a test környezetében meglévő mágneses teret — legnagyobbbrst ilyen eredetű tere van a Földnek. Az állandó mágneses tér szerkezete, pólusainak helye a bolygótesthez képest hosszabb időskálán lényegesen nem változik.

Gyenge állandó mágneses tere akkor is lehet egy égitestnek, ha belsejében már nincs olvadt fémes anyag, de a korábban létezett belső vagy külső mágneses tér „befagyott” a kristályos kőzetek mágnesezhető anyagába. Ilyen *befagyott állandó mágneses tere* van a Holdnak. A Holdnak jelenleg nincs belső eredetű mágneses tere, de fejlődésének korai szakaszában lehetett. Erre utal a sok helyen talált erős mágneses anomália, amit a kéreg anyagában megmaradt mágneses tér okozhat.

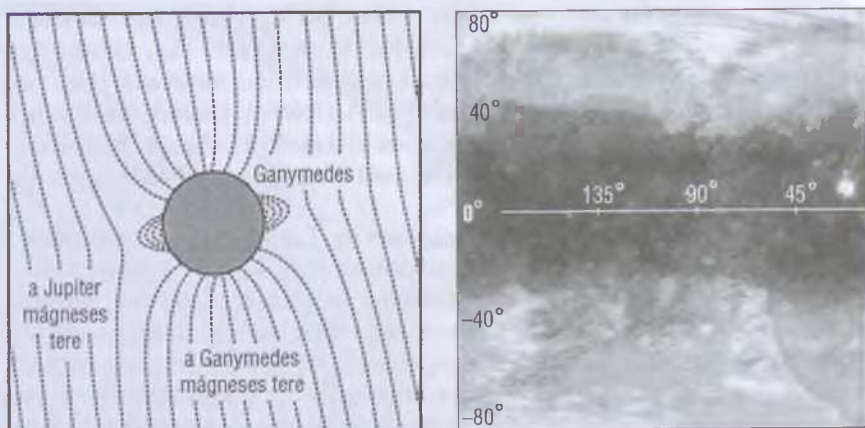
A harmadik lehetőség az *indukált mágneses tér*. Létrejöttének az a feltétele, hogy globális méretű, elektromosan vezetőképes réteg legyen az égitest belsejében, folyadékszférájában vagy a légkörében, és változó irányú vagy nagyságú külső mágneses tér legyen a test környezetében. A változó mágneses tér a vezetőképes rétegben áramot gerjeszt, és ezeknek az égitestet „körbefolyó” áramoknak tere az, amit az égitest indukált mágneses tereként mérhetünk. Az indukált mágneses tér szerkezete, pólusainak helye nem az égitest felszínéhez képest „marad állva”, hanem a gerjesztő külső térhez képest. Az indukált tér pólusai tehát az égitest tengelyforgása során mintegy körbejárnak az égitesten.

A Földön például az ionoszférában és az óceánban is indukál köráramot a Nap mágneses tere. Ezeknek a köráramoknak a mágneses tere okozza a Föld terének mérhető napi ingadozását. A változás azonban igen kicsi: a tízezernyi nT nagyságú dinamó-térhez képest az óceánokban indukált áram tere csak 2nT, az ionoszférában keltett köráramok tere pedig 30 nT körül van.

A Jupiter erős, állandó mágneses tere nem egyszerű dipól szerkezetű, nem forgásszimmetrikus, hanem igen összetett. A bolygóval együtt forgó mágneses tér pillanatnyi jellemzői tehát folyamatosan változnak a holdak körül. Ha egy holdon van globális elektromosan vezető réteg – ami lehet fémes mag, oldott sókat tartalmazó vízréteg, vagy ionoszféra a légkörben –, akkor létrejöhet körülötte indukált mágneses tér.

A Ganymedesről már a Voyager űrszondák jelezték, hogy zavart kelt a Jupiter magnetoszférájában. A Galileo űrszonda méréseire illesztett mágnesestérmodell pedig egyértelműen azt mutatta, hogy a Ganymedesnek állandó, dinamó-elven keletkező mágneses tere van, amely két holdsugárnyira kiterjedő kis magnetoszférát tart fenn (2.23. ábra). Ezzel a tulajdonságával a Ganymedes egyedülálló a Naprendszer holdjai között. A belső eredetű mágneses tér léte olvadt vasmagra utal. KIVELSON és munkatársai szerint a Ganymedes esetében a dinamó-elv alapján keletkező belső mágneses térhez hozzáadódik egy kisebb erősségű indukált mágneses tér is.

A Ganymedes mágneses terének erővonalai az egyenlítő környékén eltérítik a Jupiter magnetoszférájában mozgó töltött részecskéket, de a pólusok körül egészen a közepes szélességekig nyitott a tér, és ott a töltött részecskék bombáznak a felszínt. Ezért van számottevő albedó-különbség a hold poláris és egyenlítői vidékei között (2.23. jobb oldali kép).



2.23. ábra. Balra a Ganymedes mágneses tere, jobbra a hold albedótérképének egy része (Galileo)

A Cassini űrszonda a Titan körül meglepő módon nem talált belső eredetű mágneses teret. Lehetséges, hogy az Iónak is van olvadt vasmagja, és ezért belső eredetű mágneses tere, de annak kimutatásához kisebb távolságban végzett mérésekre lesz szükség. A hold ugyanis nagyon közel van a Jupiterhez, ezért a Galileo űrszonda mérési távolságában a hold saját tere talán nem emelkedett ki a Jupiter erős mágneses teréből.

A többi óriásbolygó holdrendszerében még nincsenek mérési adatok az indukált mágneses tér jelenlétére. A Szaturnusz bizonyos holdjain — például az Enceladuson — bizonyára van elektromosan vezető réteg, amelyben az indukció működhetne. A Szaturnusz mágneses tere azonban gyengébb és forgásszimmetrikusabb, mint a Jupiteré, azaz nem változik erősen a holdak környezetében, és emiatt kisebb lehet az indukciós hatása.

A témához kapcsolódik a *Mágneses adatok a Naprendszerben* című táblázat az évkönyv táblázatos részében.

Töltöttrészecske-bombázás mint energiaforrás

Régóta feltételezték, hogy a közönséges kondrit anyagú meteoritok szülőtestjei az *S típusú kisbolygók*. A távcsővel felvett kisbolygószíneképek azonban nem egyeztek meg a közönséges kondrit meteoritok laboratóriumban mért spektrumával, míg a többi meteoritfajta szülőtestje spektrális mérések alapján azonosítható volt. Az ellentmondást a *NEAR* űrszonda oldotta fel, amikor 2000-ben leszállt az *Eros* kisbolygóra, és megvizsgálta annak felszíni és felszín alatti rétegét. Ezek a mérések bizonyították be, hogy a napszél töltött részecs-

kéinek becsapódása kémiaiilag átalakítja és mállasztja az égitestek felszínének anyagát (millió évenként mintegy 1 cm-es réteget). A távcsóvel készített színképek pedig csak erről a legfelső rétegről adnak információt.

A töltött részecskék bombázása megdöbentően sok energiát is juttat a holdak felszínére. A Galileo űrszonda fluxusméréseit felhasználva és a Jupiter mágneses terének a modelljével számolva például megállapították, hogy az Europa hold felszíne annyi energiát kap a töltött részecskék becsapódásából, mint az összes belső eredetű fűtésből, vagyis a radioaktív és az árapályfűtésből együttvéve. A mikrometeoritok becsapódásából származó energia ehhez képest elhanyagolható, a kozmikus részecskék hatására gyorsan átalakuló réteg elkeverésében és eltemetésében azonban a meteoritbecsapódásoké a főszerep.

A jéggel borított égitesteken a töltött részecske-sugárzás a felszíni jégrétegből vízmolekulákat lök ki, amelyeket aztán a Nap ultrabolya sugárzása elbont. A keletkező hidrogén szinte azonnal elsökök a holdról, az oxigén távozása a nagyobb molekulatömeg miatt lassúbb, ezért a jégréteg felett nagyon ritka oxigén-légkör alakulhat ki. Oxigén-légkört a Naprendszerben a Földön kívül eddig csak az Európán találtak, bár ott a légnyomás csak 10^{-11} -szerese a földinek. Valószínűleg az Enceladus ritka légkörében is van oxigén, bár a Cassini űrszonda mágneses mérései szerint főleg vízgőzmolekulákat tartalmaz. A Cassini a Szaturnusz gyűrűje körül is talált ritka oxigén „légkört”, amit szintén a töltött részecskék bombázása szabadíthat fel a gyűrű jégdarabkáiból.

A külső Naprendszerben számos hold kering bolygójának magnetoszférájában a zárt erővonalakon belül. Ezekben a tartományokban a töltött részecskék mozgását alapvetően a bolygó mágneses tere határozza meg. A Jupiter közelében ez a részecskesugárzás nagyon erős: a Voyager űrszondák két perc alatt mértek akkoraösszsugárzást, mint amekkorát a Szaturnusz rendszerén átvezető egész útjuk folyamán.

A Jupiter körül a töltött részecskék többsége az Io vulkáni anyagából származik és az Iót éri a legnagyobb besugárzás is. A sorrendben a második az Europa. A Ganymedes és a Callisto távolabb van, ahol a sugárzás már kisebb. A többi óriásbolygónak pedig gyengébb a mágneses tere, illetve kevesebb töltött részecske mozog a magnetoszférájukban. Az Uránusz és Neptunusz körül különösen gyenge a sugárzás, mert ezen bolygók forgástengelye és mágneses tengelye nagyon eltérő irányú, és a mágneses tér középpontja is jelentősen eltér e bolygók tömegközéppontjától. Emiatt a töltött részecskék hamar el tudnak szabadulni a mágneses tér csapdájából (*Mágneses adatok a Naprendszerben* a táblázatos rész végén).

A magnetoszférákban mozgó töltött részecskék forrása lehet a napszél (a bolygó magnetoszférájába befogott protonok), a bolygó légköre (az ionoszférából feljutott és felgyorsított ionok), vagy a holdak felszínéről, légköréből

kijutott ionizált és felgyorsított anyag. Ezeket az ionokat a mágneses tér az erővonalak mentén spirális pályára kényszeríti. A mágneses tér és benne a befogott részecskék együtt forognak a bolygóval (korotálnak), így sokkal gyorsabban haladnak, mint a Kepler-pályán keringő holdak. A magnetoszféra ionjai tehát hátulról érik utol a holdakat, a hátsó, követő oldalukat bombázzák. Ez egy kötötten keringő hold esetében akár jól látható különbséget is létrehozhat a felszíni albedóban — különösen akkor, ha a becsapódó ionok különböznek a hold anyagától. Így az Europa főként tiszta vízjégből álló kérgén az Ióról származó kén vagy kén-dioxid ionok nagy kénsavmezőket hoznak létre a hold követő oldalán. A többi Jupiter-holdon is lehet hasonló feldúsulás, azonban minél messzebb van egy hold az Iótól, annál kevesebb molekula épül be a felszínébe. A többi bolygó holdrendszerében pedig azért nem feltűnő ez a hatás, mert azokban nincs az Ióhoz hasonló különleges hold. Az Io ugyanis olyan anyagot juttat a bolygó magnetoszférájába, amilyen a többi Jupiter-hold felszínén eredetileg nem található meg. A Szaturnusz magnetoszférájában legfőképpen a vízmolekula ionjai találhatók, vagyis ugyanaz az anyag kerül a holdak követő oldalára, mint amiből a holdak kérge áll.

Miért van a Titannak sűrű légköre?

A Titan az egyetlen hold, amelynek jelentős légköre van. A Naprendszer szilárd kérgű égitestjei közül legsűrűbb légköre a Vénusznak van, mintegy 90 atmoszféra felszíni légnyomással. A második a Titan, ahol a földinél négyszer sűrűbb légkör az ottani kisebb felszíni gravitáció miatt 1.5 atmoszféra légnyomást tart fenn. A sorban csak harmadikként következik a Föld. A Naprendszerben a Földön kívül egyedül csak a Titanon van olyan jelentősebb légkör, amelynek a nitrogén a fő összetevője. A nitrogén az ammónia (NH_3) bomlásából maradhatott vissza. Az ammóniát ugyanis a Nap ultrabolya sugárzása elbontja, a könnyebb hidrogén megszökik, csak a nitrogén marad meg.

Miért van sűrű légköre a Titannak, amikor még a Naprendszer legnagyobb holdjának, a Ganymedesnek sincs? Ennek a megértéséhez meg kell néznünk, hogyan keletkezik egy égitesten légkör, és mitől veszik el.

Légkör szilárd felszínű égitesteken főképp a kéregből kigőzölgő, kigázosodó molekulákból keletkezik. A kigázosodás függ a kéreg hőmérsékletétől. Minél melegebb van egy test felszínén, annál jobban párolognak az anyagok. Az aktív vulkánok az égitest mélyebb rétegeiből is nagyon sok anyagot juttathatnak a légkörbe. Kívülről becsapódó testek is gyarapíthatják a légkör anyagát, ha nem túlságosan nagy mozgási energiával érkeznek. Egy óriási becsapódás ugyanis elfújhatja az előzőleg meglévő légkört is.

A légkör elvesztésének tehát óriásbecsapódás lehet az egyik módja. A Naprendszer kialakulása idején ilyen esemény a kisebb bolygótesteken valószínűleg sokszor lejátszódhatott. A légkörvesztés másik, lassúbb módja az, hogy a molekulák egy részének a hőmozgási sebessége eléri a szökési sebességet, és ezek a molekulák egyszerűen elszöknek az égitesttől. Magasabb hőmérsékleten nagyobb a molekulák hőmozgásának az átlagsebessége, ezért a melegebb égitestekről könnyebben szökik el a légkör.

A szökési sebesség az égitest tömegétől és a tömegközépponttól mért távolságtól függ. Vagyis az elszökött molekulák száma az égitest tömege mellett függ attól is, hogy a légkör legkülső rétege milyen távol van a tömegközépponttól. A nagyobb tömegű égitesten a nagyobb szökési sebességet kevesebb molekula érheti el. Az óriásbolygóknak tehát azért maradhatott meg a Naprendszer kialakulása idején gyűjtött (primordiális) légköre, mert nagy a tömegük és alacsony a hőmérsékletük.

A szökés „besűríti” az égitest légkörét, mert minél könnyebb egy molekula, annál könnyebben tud a hőmozgás miatt elszökni. Leggyorsabban a hidrogén tűnik el, egy adott elem izotópjai közül pedig a kisebb atomsúlyúak. Ha megvizsgáljuk egy égitest légkörében valamelyik kémiai elem izotóparányait, és azt összehasonlítjuk a szenes kondrit meteoritokban mért izotóparányokkal (amelyek feltevéseink szerint a Naprendszer őanyagának összetételét őrzik), akkor megbecsülhetjük, hogy milyen mértékű volt a légkör szökése az égitesten.

Egy égitesten tehát egymással elletétesen ható feltételek bonyolult rendszerre határozza meg, hogy megmarad-e körülötte valamiféle légkör. A tömege legyen elég nagy, hogy a nagy szökési sebesség miatt a légkör molekulái ne tudjanak könnyen elszökni róla (ez a szempont a Ganymedesnek kedvezne, vagy legalább is hasonló az esélye, mint a Titannak). A hőmérséklete legyen elég magas a légkör keletkezéséhez (ez egyértelműen a Ganymedesnek adna nagyobb esélyt, mert az melegebb). Ne legyen túlságosan meleg, mert akkor nagyobb a hőmozgás miatti szökés esélye (ez már választóvonal lehet a Ganymedes és a Titan között). Rontja a Ganymedes esélyeit, hogy a Jupiter erős tömegvonzása, erős mágneses tere és a benne mozgó nagyenergiájú töltött részecskék árama gyorsan eltávolítja a holdak közeléből a légkör molekulái. A Szaturnusz kisebb tömegű, mágneses tere is gyengébb, és kevesebb töltött részecske mozog benne, összességében tehát kevésbé szívja el a Titan-légkör anyagát.

Miért különös a Szaturnusz rendszere?

A holdrendszerek közül a Jupiteré az egyetlen, amely nagyobb ellentmondások nélkül leírható a jelenleg elfogadott elméleti modellekkel. A négy nagy

Galilei-hold átlagsűrűsége és kémiai összetétele különböző. Minél távolabb kering egy hold, annál nagyobb az illóanyag-tartalma, és annál kisebb az átlagsűrűsége. Ez azt támasztja alá, hogy a holdrendszerek keletkezése idején az óriásbolygók is felmelegítették környezetüket.

A többi óriásbolygónál ezek a szabályszerűségek kevésbé vagy egyáltalán nem láthatók. Ezeknek a reguláris holdrendszerét valószínűleg teljesen átformálták a bolygókeletkezés időszakának nagy ütközései. Az óriásbolygók tömegvonzása ugyanis jelentősen felgyorsítja a holdakba csapódó testeket, növelve ezáltal az ütközések pusztító hatását. A Neptunusz valószínűleg az összes „szabályosan” keletkezett holdját elveszítette. A nagy energiájú becsapódások egyes kialakult holdakat akár többször is darabokra szakíthattak, és az egyre kevesebb illó anyagot tartalmazó darabokból esetleg újra összeállhattak a holdak. Erre a lehetőségre az Uránusz Miranda holdja hívta fel a figyelmet. A hold felszínén látható ovoidok ugyanis begyűjtött és lesüllyedt nagyobb törmelékdarabok nyomai is lehetnek (2.14. ábra).

Az Uránusz és Neptunusz rendszer különlegességéről sokat írnak, a Szaturnusz holdrendszerének furcsaságáról kevés szó esik. Van egy nagy hold, a Galilei-holdakkal összemérhető Titan, és a Jupiter reguláris holdjainál sokkal nagyobb számú, de viszonylag kicsi holdakból álló holdrendszer (2.1. ábra). Miért lett a Titan ilyen nagy? Ha volt elegendő anyag a Titan számára, akkor miért lett kicsi a többi? Talán ütközések sokasága verte szét a többi nagy holdat, és azok széttört darabjaiból lett a sok kicsi? Esetleg a Titan két test kis relatív sebességű ütközése révén tett szert ekkora tömegre? Mire utal a Iapetus $14^{\circ}7$ -os pályahajlása, amikor a reguláris holdaknál az egész Naprendszerben nem találunk 4° -nál nagyobb inklinációt? A Miranda pályahajlása is csak $4^{\circ}22$, pedig az ovoidok keletkezésével kapcsolatban sok nagy ütközés lehetősége vetődött fel. A Föld Holdjának pedig — amelyről ma már bizonyítottnak vehetjük, hogy egy hatalmas kozmikus karambol során keletkezett — csak $5^{\circ}1$ az inklinációja. Mi történhetett a Szaturnusz rendszerében? Ezekre a kérdésekre a Cassini további vizsgálataitól és a későbbi kutatásoktól várjuk a választ.

Befejezés

A hatvanas években még csak apró fénypontoknak ismertük a külső Naprendszer holdjait. A 20. század hetvenes éveitől azonban az űrkutatás jóvoltából egyre több információhoz jutottunk ezekről a távoli égitestekről is. Az új évezred elején már önálló arccal állnak előttünk ezek a fantasztikus világok. Elképesztő fejlődésnek lehettünk tanúi és részesei. Számos korábbi kérdésre megkaptuk a választ, de legalább annyi új kérdés is felvetődött.

Irodalom

- [1.] BARSHAY, S. S.–LEWIS, J. S. In: *The dusty Universe*. New York, 1975, Academic Publications.
- [2.] ILLÉS ERZSÉBET: *Természet Világa*, 2005. 3., 4.
- [3.] A Naprendszer holdjainak adattáblázatai a Csillagászati évkönyv korábbi kötetekben:
A Naprendszer holdjai. *Csillagászati évkönyv 2001*, 148. o.
A Naprendszer újabb holdjai (1). *Csillagászati évkönyv 2002*, 144. o.
A Naprendszer újabb holdjai (2). *Csillagászati évkönyv 2004*, 144. o.

ILLÉS ERZSÉBET

Hogyan látjuk ma az óriásbolygók világát?

Összehasonlító planetológiai áttekintés

Rengeteg új eredmény született a Jupiter rendszerével kapcsolatban a *Galileo*, valamint a Szaturnusz rendszerével kapcsolatban a *Cassini*-szonda mérései alapján. A mérések feldolgozása még egyik szonda esetében sem fejeződött be. A kutatóknak néha nagyon türelmes munkával évekig kell dolgozniuk egy-egy megfigyelés magyarázatán. Eredményeiket sokszor kis lépésenként publikálják, mindig egy-egy apró adalékot adva az eddigi ismeretekhez. Azonban mindig gondosan megvizsgálják, hogy az új eredmény mennyire illeszkedik bele az eddig elfogadott képbe. S ami a kívülállóknak csak „érdektelen részletnek” tűnik, az ennél a beillesztésnél kapja meg az igazi értékét. Ekkor látszik ugyanis, hogy egy-egy részmegfigyelés hogyan feszíti szét az addigi felfogás kereteit, és hol kell változtatni az elméleteken (és jó, ha arra is utalást kapunk, hogy milyen irányban). Más bolygószondák, a Hubble-űrtávcső (HST) és földi távcsövek mérései is segítik ennek a képnek az összeállítását. Cikkünk célja, hogy az óriásbolygókkal és a körülöttük keringő holdakkal és gyűrűkkel kapcsolatos – néha szemléletünket is megváltoztató – eredményeket összefoglalja.

A Galileo- és a Cassini-űrszonda útja

A *Galileo*-szonda 1995–2003 között működött a Jupiter rendszerében. Öt évvel dolgozott tovább, és négyszer több sugárzást szenvedett el a tervettnél. A szonda terveit 1977-ben kezdték kidolgozni. Kétszeri halasztás után 1989-ben indították Föld körüli pályáról. Egy Vénusz-megközelítés (1990. február 10., 16 124 km) és két Föld-megközelítés (1990. december 8., 960 km; 1992. december 8., 306 km) lendítette a szondát a Jupiter rendszerre felé, miközben elhaladt, és méréseket végzett a Gaspra (1991. október 29., 1 600 km) és az Ida (1993. augusztus 28., 2 400 km) kisbolygók környezetében. A Jupiter rendszerébe 1995. december 7-én érkezett meg a róla

1995. július 13-án levált légköri kapszulával együtt. Ez utóbbi leereszkedett az óriásbolygó légkörébe, és 57 percen keresztül továbbított in situ mérési adatokat a felhőzet alatti 156 km hosszú útról. Közben az anyaszonda 892 km-re közelítette meg az Io holdat, így annak fékező hatása segítségével – természetesen saját hajtóművét is használva – Jupiter körüli pályára állt, és reléállomásként fogadta a légköri szonda adatait.

Az eredeti mérési terv 1997 decemberéig, vagyis két évre szólt. Ezalatt a szonda 11-szer kerülte meg a Jupitert, miközben az Io és az Europa holdakat is többször megközelítette. Ezután a 12–25. keringés alatt, 1997 decembere és 2000. január 31. között zajlott megfigyelési program hat Europa-megközelítéssel főleg az ezzel a holddal kapcsolatos kutatásokat állította a középpontba (Galileo Europa Mission). Ennek az első kiterjesztett programnak a vége felé engedték csak meg a program vezetői, hogy a főantenna meghibásodása miatt fotózásra nem használt első Io-megközelítést pótolják. A Jupiter magnetoszférájának belső részében mozgó Io megközelítése ugyanis az erős sugárzás miatt a szonda számára kockázatos. Az Io három nagy megközelítése idején tőle 611 km-re, illetve 200 és 199 km-re haladt el a szonda, az első és a harmadik esetben az egyenlítője, a második esetben a déli pólusa felett.

A még mindig működőképes szonda egy további, az úgynevezett Galileo Millennium Mission nevű programban is részt vett, amikor 2000 decemberében a Jupiterhez érkező Cassini-szondával hajtott végre koordinált méréseket. Mielőtt még az utolsó csepp hajtóanyag is elfogyott volna, a 35. keringésekor, 2003 szeptemberében a Jupiter légkörébe irányították, hogy ott elégjen, és nehogy véletlenül a kontroll nélküli repülések során beleütközzön az Europa holdba.

A Cassini-szonda 2004 óta kering a Szaturnusz rendszerében. 1983-ban kezdték tervezni, 1997. október 15-én indították, és 2004. július 1-jén állt Szaturnusz körüli pályára két Vénusz-megközelítés (1998. április 21., 300 km-re és 1999. június 20., 2 267 km), egy Föld-megközelítés (1999. augusztus 16., 500 km) és egy Jupiter-megközelítés (2000. december 30., 10 millió km) után. 2004. december 24-én leválasztották róla a *Huygens* leszálló egységet, amely 2005. január 14-én ereszkedett le a Titán légkörébe. Az adatokat az első fél órában a felette elrepülő Cassini-szonda továbbította a Földre, de szerencsére a földi rádiótávcsövek közvetlenül is vették a *Huygens*-nek a talajt érés után még 2,5 órán keresztül 12 wattal sugárzott gyenge jeleit. Miután a Szaturnusz holdjai közül csak a Titán elég nagy tömegű ahhoz, hogy komoly pályamódosításokat okozzon, ezért az első négy év tervezett programjában szereplő 75 keringésből 45-ször a Titán holdat közelítették meg. Ezek közül 23 esetben 950 km-nél közelebb repült el

mellette a Cassini. A 2007. január közepén végzett pályamódosítást úgy hajtották végre, hogy a Cassini pályáját kiemeljék a gyűrűk síkjából, így egyrészt a gyűrűket, másrészt a Szaturnusz légkörét is mintegy „felülről” és „alulról” fotózhatta. A 2004–2008 közötti első négy éves megfigyelési programot két évre kiterjesztették Equinox Mission címen 2010. szeptemberig.

E vázlatos történeti áttekintés után nézzük, hogy összehasonlító planetológiai szempontból milyen fontosabb eredményeket hozott a Galileo- és a Cassini-szonda sikeres útja!

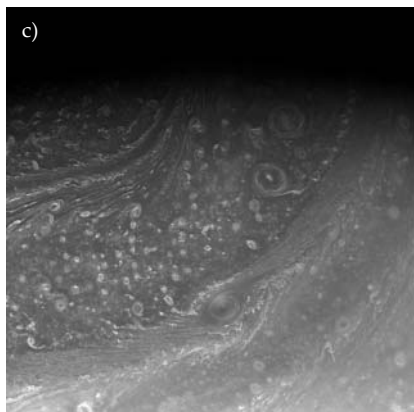
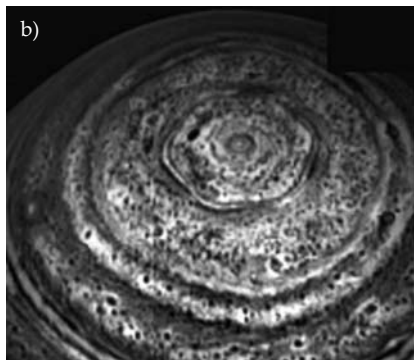
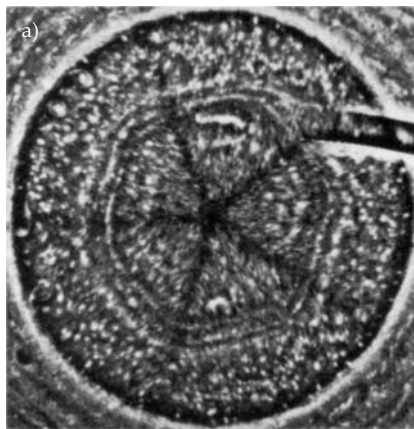
Az óriásbolygókkal kapcsolatos eredmények

Az óriásbolygók keletkezésének módja és helye (Galileo légköri szondája)

A Galileo leszálló szondájának kémiai összetételt vizsgáló berendezése a mérési helyen sokkal kevesebb héliumot, ugyanakkor sokkal több szennet, ként, nitrogént és nemesgázt (argont, kripton, xenont) talált a Jupiter légkörében, mint azt az eddigi Naprendszer-keletkezési elméletek alapján várták.

A több szén, kén és nitrogén a keletkezés módjára utal. Azt jelenti, hogy a Föld típusú bolygókhoz hasonlóan a Jupiter – s akkor a többi óriásbolygó még inkább – planetezimálok összeállásával indult növekedésnek, és nem gravitációs kollapszussal keletkezett. Vagyis az óriásbolygók a körülöttük lévő szoláris köd gázanyagát csak akkor tudták magukhoz kötni, amikor sziklás magjuk már elég nagy volt. Ez azt is jelenti, hogy ennek a sziklás magnak olyan gyorsan kellett összegyűlnie, hogy addig a napszél ne tudja kifújni a gázt a szoláris ködből. A kevesebb hélium viszont azt mutatja, hogy még most is differenciálódik a Jupiter. Héliumcseppek keletkeznek a belsejében, amelyek leülepednek. A belső hő ezekből a folyamatokból származik.

A több nemesgáz a keletkezés helyére utal. A nemesgázok az ősi szoláris köd távoli vidékein, alacsony hőmérsékleteken csapódnak csak ki, és épülnek be „sziklaalkotóként” a keletkező kis testekbe, amelyek később a bolygók összeállásakor a bolygók anyagát gazdagítják (az argon például 4 K környékén, tehát 40 CSE-re, vagyis a Neptunusz távolságán is túl). Az eddigi Naprendszer-keletkezési elméletek alapján úgy gondolták, hogy az óriásbolygók abban a távolságban keletkeztek, tehát anyagukat is ott gyűjtötték, ahol jelenleg keringenek. Az a tény azonban, hogy az 5 CSE távolságban keringő Jupiteren a vártnál több nemesgáz van, ellentmond ennek az elképzelésnek.



Megoldásként háromféle okra lehet gondolni: 1.) lehetséges, hogy a Jupiter távolabb keletkezett, és keletkezése óta közeledett a Naphoz. Ezt az elképzelést megerősíteni látszik a nemrégiben más csillagok körül felfedezett, sok Jupiter-szerű exobolygó esete, amelyek saját csillaguktól meglepően kis távolsága keringenek. 2.) lehetséges, hogy sok, a Neptunuszon túl keletkezett kis égitestet, planetezimált gyűjtögetett magába a Jupiter, tehát nemcsak saját környezetének anyagából épült fel. 3.) lehetséges, hogy az ősi szoláris köd, amelyből a Naprendszer keletkezett, sokkal hidegebb volt, mint eddig feltételezték.

E megfigyelési tény miatt mindenképpen finomítani kell a Naprendszer keletkezésére vonatkozó eddigi elképzeléseinket.

Poláris örvények segítik a légtömegek egymás melletti elcsúszását

(Cassini és Vénusz-szonda)

Már a korábbi szondák képei is mutatták, hogy a Szaturnusz északi pólusánál valami furcsa, hatszögletű mintázat van (1.a. ábra). Most a Cassini nagy szélességről készített felvételei nemcsak megerősítették ennek a több tízezer kilométer átmérőjű „hexagonnak” a létét (1.b.

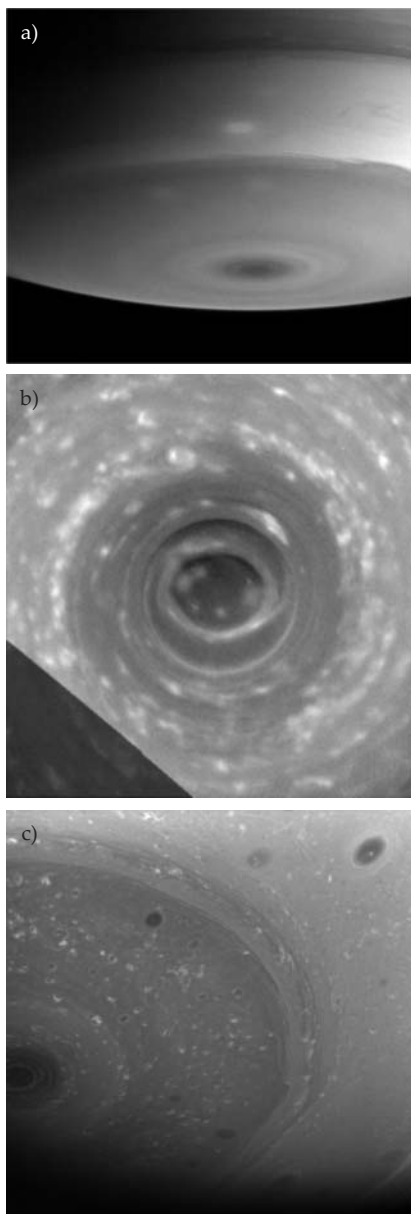
1. ábra. A Szaturnusz északi poláris örvényének hatszögű felhőmintázata (Hexagon) a: Voyager-2 fotón, b: Cassini-fotón, c: egy részlete nagyobb felbontással Cassini-fotón

ábra), hanem a finomszerkezetére is fény derült (1.c. *ábra*). Ugyanakkor a déli pólusnál egy körülbelül 2000 km átmérőjű, a földi trópusi ciklonokra emlékeztető örvény képe bontakozott ki (2.a. és b. *ábra*), ahol – a kutatók döbbenetére – a ciklon „szeme” körül 50–60 km magas felhőfal látszott. S ezt a „szemet” is egy több tízezer kilométer átmérőjű terület övezi, amelyen belül rengeteg kis örvény keletkezik, kavarog, és valószínűleg közelít a központi örvényhez (2.c. *ábra*).

Sajnos, sem a Voyagerek, sem a Galileo-szonda nem haladt olyan magas szélességek felett, hogy jól láthatnánk mi van a Jupiter pólusain. Vajon ott is vannak poláris ciklonok? De a Mariner-10 (3.a. *ábra*) és a Venus Express (3.b. *ábra*) a Vénusz déli pólusán talált poláris örvényt, amely ráadásul kétközpontú. Vajon minden légkörben egy-egy örvény forog a pólusokon, úgy hogy a bolygóval – nem szilárd testként – együttforgó (a pólus két oldalán egymással ellentétes irányba mozgó) légkör légtömegei egymás mellett elhaladva el tudjanak csúszni egymás mellett?

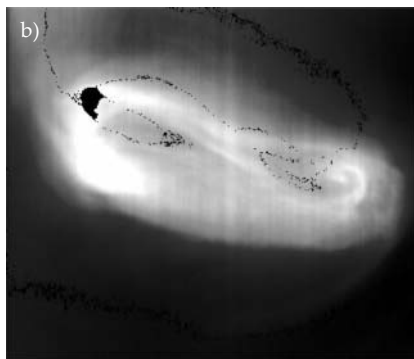
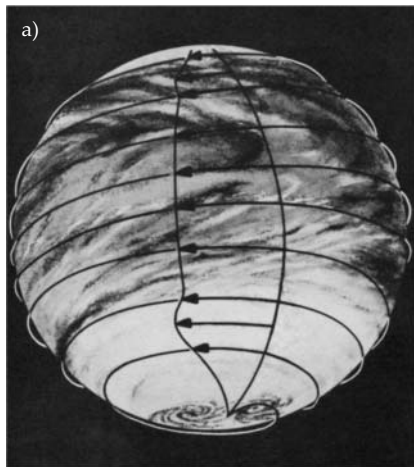
Miért aszimmetrikus a Szaturnusz két pólusa, vagy miért aszimmetrikus a Jupiter két félgömbjének mintázata? Erre még nem derült fény, de nagyon érdekes mindkét kérdés.

2. ábra. A Szaturnusz déli poláris örvénye egyre közelebből, Cassini-fotók



Belső hő hajtja az óriásbolygók meteorológiáját (Galileo és Cassini)

A Jupiterre vonatkozó másik lényeges eredmény egy zivatarfelhő megfigyeléséből adódott. A Jupiterrel kapcsolatban ugyanis régóta foglalkoztatja a kutatókat az a kérdés, hogy a Naptól távol hogyan tudnak rajta olyan dinamikus légköri jelenségek zajlani, amilyenekhez sok energiára van szükség. Pontosabban fogalmazva: a Naptól kapott energia vagy a Jupiter belső hője szolgáltatja-e az energiát a nagyléptékű meteorológiai jelenségekhez. Ezt a kérdést segítette megválaszolni a megfigyelt vihar.



3. ábra. A Vénusz déli poláris örvénye a: Mariner-10 és b: Venus Express-képen

A Galileo-szonda egyik éjszakai felvételén sok villám mutatkozott, majd a másnapi felvételek ugyan ezen a helyen magasba tornyosuló fehér felhőket mutattak egy körülbelül 4000 km hosszú és 50 km magas térrészben. Vagyis egy komoly vihar kialakulását lehetett nyomon követni. A villámok erősségéből, valamint a feltornyosuló fehér viharfelhő méreteiből és élettartamából kiszámolták, hogy mennyi energia szabadulhat fel egy ilyen viharban. A Voyager szondák idején meghatározott átlagos villámszámból, és az egy vihar alatt felszabadult energiából meg lehetett becsülni a viharokban felszabadult hőmennyiséget. Ez felület- és időegységre lebontva jól egyezett azzal a hőmennyiséggel, amely a Jupiter belsejét elhagyja. A kutatók ebből arra következtetnek, hogy a Jupiter belső hőjét ilyen viharfelhők juttatják keresztül a légkörön – vagyis a nagyskalájú meteorológiai képződményekhez az energiát a Jupiter belső hője szolgáltatja és nem a napfény. Ugyanerre a következtetésre vezet két korábbi megfigyelés is. Az egyik a Jupiternél a

Voyagerek villámmegfigyelése volt, amikor is villámokat nemcsak az egyenlítői övezetben, hanem mindenütt, tehát nagy szélességeken is láttak, ami napsütés okozta viharok esetén nem szokásos: a viharok inkább a forró égőben alakulnak ki. A másik megfigyelést a Voyager-2 Neptunusz-képei szolgáltatták, amelyek szerint meteorológiailag a Neptunusz is nagyon aktív bolygó, pedig 40-szer messzebb van a Naptól, mint a Föld. Ha a Nap sugárzása lenne a fő energiaszolgáltató az óriásbolygók légköre számára, akkor ekkora távolságkülönbségnek a légkör dinamikáján már látszania kellene.

Az is érdekes kérdés, hogy hogyan kerül egy trópusi ciklon a Szaturnusz pólusára. Az óriásbolygók több hőt sugároznak ki, mint amennyit a Naptól kapnak. Ha ránézünk az óriásbolygók, de főleg a Szaturnusz korongjáról készült fotókra és látjuk, hogy e bolygók a gyors forgás miatt milyen erősen lapultak, akkor már érthetőnek találjuk, hogy az óriásbolygókon a maghoz közelebb fekvő pólusok kapják a „kályhától” a több hőt. Valószínűleg a gyorsan forgó óriásbolygók mindegyikénél a melegebb övezet a pólusok környezetére esik, ellentétben a Föld típusú bolygókkal, ahol a Nap sugárzása a meghatározó.

A Szaturnusz forgása (Cassini)

A Szaturnuszt illetően a Cassini-szonda megfigyelései közül talán a bolygó forgásával kapcsolatos mérés szolgáltatta az egyik legváratlanabb eredményt. A Cassini mérései alapján a bolygó forgási ideje 6 perccel különbözött a Voyagerek által adott értékhez képest.

Az erős mágneses terű bolygók – vagyis az óriásbolygók és a Föld – természetes rádiósugárzást bocsátanak ki. E magnetoszférákban vannak helyek, ahol az elektronok relativisztikus sebességre tudnak felgyorsulni, és fékezési sugárzást bocsátanak ki. A Jupiter esetében használták először ezt a természetes rádióadót arra, hogy a bolygó belsejének forgási periódusát mérvék vele. Azt gondolták ugyanis, hogy miután a belső eredetű mágneses tér a bolygó belsejének áramlásai miatt épül fel, talán ez jobban jellemzi a tengelyforgási periódust, mint a differenciálisan rotáló légkör, vagy a felhők mozgása.

A meglepő most az volt, hogy a Szaturnusz nem igazolta ezt a várakozást. Nem reális ugyanis, hogy egy ekkora nagy test forgásában ekkora változás tud két évtized alatt létrejönni. A vizsgálatok két következtetést is megengedtek. Egyrészt a holdak által a magnetoszférába táplált nagyobb anyagmennyiség esetén a korotációtól jobban lemarad a plazma. Másrészt a napszélben terjedő zavarok nem hagyják érintetlenül a részekegyorsítás helyét, hanem annak elhelyezkedését a bolygóközi tér

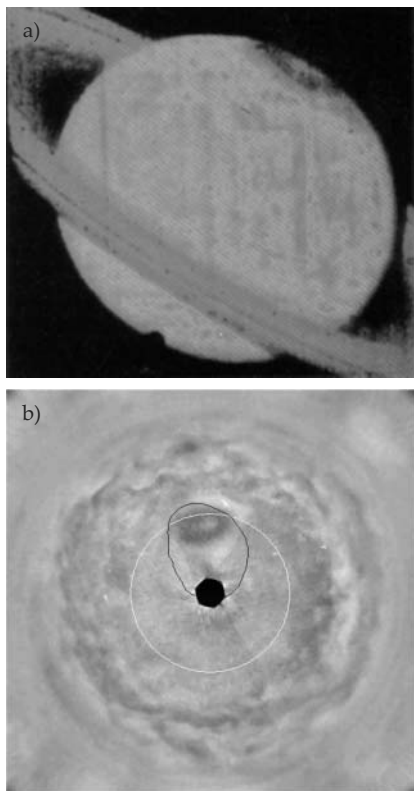
pillanatnyi állapota is befolyásolja. Nyilván azért lehetett ezt a finom változást a Szaturnusz esetében észrevenni, mert annak mágneses tengelye szinte egybeesik a bolygó forgástengelyével, tehát már kis változások is feltűnő különbségekre vezetnek. Olyan „csámpás” mágneses terekben, mint amilyent a másik három óriásbolygónál találtak, ilyen finom effektusok eltűntek volna a zajban.

Sötét sarki „fény” (HST és Cassini)

A Hubble-űrtávcső egyik felvételén vették észre először, hogy a Szaturnusz északi sarki fény (aurora-) övezete helyén sötét sáv jelent meg (4.a. ábra). A jelenséget szénhidrogén-párával magyarázták, ami a nagy-

energiájú részecskék bombázásának hatására jöhet létre. A metánmolekulákat ugyanis bonthatják a magnetoszféra nagy energiájú részecskéinek becsapódásai, és a maradék két CH_3 acetilén molekulává áll össze. A felhőréteg felett keletkező acetilénpára által alkotott szmog látszhat sötétnek a felhők világos háttére előtt.

A Cassini 2000-ben a Jupiter mellett elhaladva viszonylag távolról rálátott az északi pólusra, és így 11 héten keresztül megfigyelhették, amint egy Nagy Vörös Folt méretű sötét folt – vagy inkább fánk alakú gyűrű (4.b. ábra) – körbejár az északi pólus körül, az auroraövezeten belül. Eközben nem csak a helyét, de az alakját is változtatta. Valószínűleg ez a sötét folt is az aurorarészecskék bombázása által okozott kémiai átalakulás miatt jött létre. Ennél azonban nehezebb elképzelni, hogy milyen magnetoszférikus mechanizmus hozhat létre egy ilyen foltot, amely nem az egész övezetre terjed ki, mint a Szaturnuszé, és ráadásul körbejár a mág-



4. ábra. Sötét aurora a: a Szaturnuszon (HST-fotó), és b: a Jupiteren (Cassini-fotó)

neses pólus körül, miközben változtatja az alakját is. Leginkább még a holdakból kidobott anyagra, és azok fluxuscsöveivel való kölcsönhatásra gondolhatunk.

A magnetoszférák szétterítik a beléjük került port (Ulysses, Galileo és Cassini)

Az Io vulkánjainak működése rengeteg gázt és port juttat a Jupiter, az Enceladus gejzírjeinek működése pedig a Szaturnusz magnetoszférájába. A gázokat a Nap ultraibolya sugárzása ionizálja, a porszemcsékről leszakít elektronokat, vagy rájuk ülnek elektronok, ionok, így sztatikus elektromos töltést kapnak. Ezután már nemcsak a gravitációs tér szabja meg mozgásukat, hanem a mágneses tér hatásának is engedelmesskedniük kell. Ezt a poros plazmát a mágneses tér felkapja, a magnetoszféra elektromos terei pedig gyorsítják. A nagy mennyiségű hideg plazmát ugyan a magnetoszféra teljes egészében nem képes korotációig felgyorsítani, de azért viszi magával. A plazma sebessége még így is nagyobb, mint a Kepler-mozgással haladó holdaké, így azokat hagyva az ionok a holdak követő oldalára csapódnak. Azok az ionok, amelyek nem ütköztek a holdakba, továbbra is részt vesznek a magnetoszféra plazmaáramlásában. Az óriásbolygók sarkifény-tevékenységét elsősorban ez a magnetoszférában zajló plazmakonvekció hajtja, és csak másodsorban a napszéllal érkező zavarok. Ezért a Jupiteren és a Szaturnuszon szinte folyamatos a sarkifény-tevékenység.

A holdak felszínébe csapódó atomok, molekulák kölcsönhatnak a felszín anyagával, és kémiai reakciók révén más anyagok jöhetnek létre. Például az Europa hold hátoldalára becsapódó kén-dioxid molekulák a felszín vizével kénsavat alkotnak, így az Europa követő oldalán nagy kénsavmezők jönnek létre. Ilyen felszíni kémiai átalakulás akár évtizedek alatt is képes megváltoztatni egy vékony felszíni réteget. A becsapódó atomok, molekulák energiát is adnak a holdfelszíneknek, ami adott esetben akár több is lehet, mint a mikrometeorit-bombázás és az árapályfűtés által a felszínnek adott energia. A meteorit-bombázásoknak abban van nagy szerepük, hogy összetörik és elkeverik a felszín anyagát.

Az aktív holdak vulkánjai az egész Naprendszeret beszennyezhetik az általuk kidobott porral. Már a Nap vizsgálatára küldött Ulysses-szonda esetében is időnként sokkal több porszemcse becsapódását jelezték a műszerek, mint azt korábban várták: nem kéthetente, hanem percenként érkezett egy-egy porszem. Amikor pedig a Galileo-szonda 55 millió km távolságra volt a Jupitertől, napi 1 helyett 100–20 000 részecske becsapódását mérte. Analizálva a szondák méréseit, az okokra is fény derült. Nevezetesen az aktív

holdak – így az Io és az Enceladus – vulkánjai a bolygók magnetoszférája és a bolygóközi mágneses tér segítségével az egész Naprendszer, sőt még a csillagközi teret is szennyezik az általuk kidobott porral [1].

A gyűrűkkel kapcsolatos eredmények

Néhány évtizede még csak a Szaturnusz körül ismertünk gyűrűt. A Jupiter gyűrűit a Pioneer szondák töltött részecske-mérései kapcsán fedezték fel az 1970-es évek elején. Abból a megfigyelési tényből következtettek a létükre, hogy a Jupiter közelében bizonyos távolságokban sokkal kevesebb töltött részecskét találtak, mint másutt. A Voyager szondákkal készített képek aztán igazolták az elképzelést: nagyon keskeny, finom porból álló gyűrű képe látszott a felvételeken. Később csillagfedés-megfigyelések kimutatták, hogy az Uránusznak is és a Neptunusznak is vannak gyűrűi, majd a Voyager-2 ezekről is küldött fényképeket. Ezzel a felfedezés-sorozattal világossá vált, hogy a gyűrű mint jelenség ugyanúgy hozzátartozik az óriásbolygókhoz, mint a népes holdrendszer. A Galileo mérései a Jupiter gyűrűivel kapcsolatban bebizonyították, hogy a gyűrűk az óriásbolygók nagy tömegének és a körülöttük közeli pályákon keringő, kis törmeléktesteknek a természetes következményei [2]. A Nap körüli pályákon keringő és az óriásbolygókat megközelítő kisebb-nagyobb meteoritikus testeket a bolygók óriási tömege erősen felgyorsítja. Ha a bolygók közelében ezek a meteorok éppen eltalálnak egy kis holdat, akkora sebességgel vágódnak neki, hogy saját tömegük több százszorosát dobják ki por formájában. Egy kis tömegű holdra a gyenge gravitáció miatt ez a por ritkán esik vissza: a porszemcsék a nagy tömegű bolygó körüli pályán találják magukat. Vagyis ott keletkezik gyűrűkomponens, ahol kis hold kering. Minden óriásbolygónak annyi gyűrűkomponense van, ahány kis test mozog közel hozzá. Miután a Jupiter közelében csak négy holdacska van, ezért lehetett ezt a szabályszerűséget észrevenni. A Szaturnusz körül nagyon sok holdacska kering, ott már áttekinthetetlen a helyzet.

Egy gyűrű nem marad meg abban a távolságban, ahol leváltak a porszemcsék a holdacskáról. A gyűrű részecskéi egymás mozgását is zavarják, továbbá a többi hold gravitációs zavaró hatását is el kell szenvedniük. Ezért a gyűrű szétterjed. A Poynting–Robertson-effektus hatására pedig a finom porszemcsék spirális pályán egyre közelebb keringenek a bolygóhoz: a porszemcsék a napfényt egy irányból kapják, de tőle felmelegedve a hőmérsékleti sugárzást minden irányba sugározzák szét. A különböző

időben kilökött porszemcsék ezért egy sík mentén szétterülnek, amely a bolygó felszínéig ér. Végül a szemcsék a bolygó légkörével ütközve hullócsillagként elégnak a légkörben. Vagyis minden gyűrű a keletkezési távolságától befelé terjed. A legkisebb porszemcsék fékeződnek a legjobban, és ez magyarázza, hogy az úgynevezett fátyolgyűrűk vannak legbelül. Ha a részecskék a befelé mozgásuk során túlhaladnak azon a távolságon, ahol a következő holdacska gyűrűje keletkezik, akkor innen befelé már a két gyűrű anyaga keveredik.

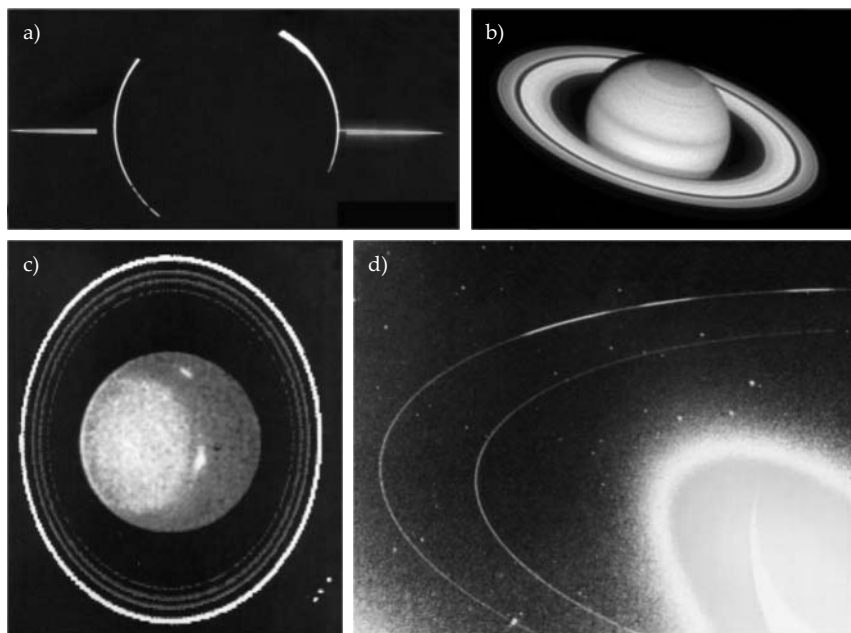
Ha egy holdacska pályája a bolygó egyenlítői síkjában fekszik, akkor minden kidobódott szemcse gyakorlatilag ebben a síkban kering tovább, és a gyűrű nagyon vékony lesz. Ha azonban a hold pályája hajlik a bolygó egyenlítőjének síkjához, akkor attól függően, hogy a hold pályájának mely részén kapta az ütést – éppen az egyenlítői síkban volt-e, vagy sem – a kirepülő törmelékfelhő sokkal szélesebb, tórusz alakú térrészt tölthet ki: a keletkező gyűrű sokkal vastagabb lehet.

Arra a kérdésre, hogy miért kisebb a belső holdak albedója mindegyik holdrendszerben, mint a külsőké, a választ az üstökösök sötét felszínét magyarázó munkahipotézis és a gyűrűkeletkezési mechanizmus együtt adhatja meg. Mivel a belső holdak sokkal több és sokkal nagyobb sebességű ütközést szenvedtek el, így felszíni rétegeik illó anyagának nagy részét elveszíthették már, és az ott maradt szilikátos vagy szerves anyag sötétebb kéregként lehet rajtuk. Ez lehet az oka annak, hogy a róluk kiszóródott porszemcsék is nagyon sötétek, ezért olyan sötétek a porgyűrűk. Nem csoda, hogy korábban nem fedezték fel őket. Sőt, nagy erőfeszítésbe kerül, hogy a Földről is lefényképezzék őket, miután csillagfedések vagy űrszondák már bizonyították a létüket.

A Szaturnusz gyűrűjét viszont Galilei 1610-ben az első távcsővel már azonnal felfedezte. Ez a gyűrű ugyanis más, mint a másik három bolygóé. Sokkal szélesebb és nagyon fényes (5. ábra). A Szaturnusznak is vannak sötét porgyűrűi, amiket szintén csak egy közel elhaladó szonda fedezhetett fel, a földi távcsövekkel nem lehet látni. A Szaturnusz fényes gyűrűi azonban jégből állnak. Keletkezésük talány: miután a többi óriásbolygónak nincsenek jéggyűrűi, csak egy nem túl gyakori jelenség hozhatta őket létre.

A bolygógyűrűkkel kapcsolatban a következő fontos megállapítások bizonyosodtak be:

1.) A fényes gyűrűk valóban vízjégből állnak, mint ahogy a Földről küldött radarjelek ezt korábban jelezték is, és inkább törmelékdarabok, mint egyforma gömböcskék, tehát nem lecsapódásból keletkeztek (vagyis itt inkább egy jeges test szétDarabolódásáról lehet szó).



5. ábra. A négy óriásbolygó gyűrűje a: Jupiter (Voyager-fotó), b: Szaturnusz (HST fotó), c: Uránusz (HST fotó), és d: Neptunusz (Voyager-fotó)

2.) Kis számban vannak a jéggyűrűt alkotó testek között néhányszor 10 méteresek is, amelyek propeller alakú ritkulásokat okoznak a kisebbek mozgásában.

3.) A Szaturnusz körül a jéggyűrűk mellett és között vannak sötétebb porszemcsékből álló gyűrűk is, amelyek valószínűleg ugyanúgy a sötét, belső holdacskák porlásából keletkeztek, mint azt a Jupiternél láttuk.

4.) A bolygók körüli sok-sok hold mind zavart kelt a (Szaturnusznál mindkét fajta) gyűrű részecskéinek a mozgásában – réseket, csomósodásokat, hullámokat hozva létre fantasztikus változatosságban.

5.) A gyűrűk és a magnetoszféra kölcsönhat egymással. Például a magnetoszférának a gyűrűkön áthaladó, zárt erővonalai mentén alig található nagy energiájú töltött részecske, mert a gyűrűt alkotó szemcsék (por vagy jég) zavart keltenek a mozgásukban, és kiszórják azokat. Esetleg elektronok, ionok ülnek rá a porszemcsékre – sztatikus elektromos töltést adva nekik. E „poros plazmának” már nemcsak a gravitációs, de az elektromágneses erőknek is engedelmeskednie kell. Így fantasztikus mintázatok

jönnek létre, például a Szaturnusznál a „küllők”, amelyeket a Voyager-szonda fedezett fel.

6.) A töltött részecskék eloszlása a Rhea körül is gyűrűt jelzett. Ezzel a Rhea az első hold, amely körül gyűrűt fedeztek fel.

A holdrendszerekkel kapcsolatos új felfedezések

Miután korábban Holdak a Naprendszerben címmel áttekintő cikkem jelent meg a holdakkal kapcsolatos ismereteinkről [1], itt nem részletezem az ottani magyarázatokat, de azokat itt is megemlítem, amelyek a szemléltetőváltoztató eredmények áttekintéséhez szükségesek.

Magmaóceán az Ión (Galileo, HST és földi mérések)

Körülbelül 4 milliárd évvel ezelőtt, a „nagy bombázás” időszakában sok bolygótest felszínén, de Holdunkon keletkezésekor bizonyosan létezett magmaóceán a Naprendszerben. Az ütközések ugyanis ekkor még túl gyakran követhették egymást, ezért az egyik ütközéstől a másikig egy-egy bolygótest nem tudta kisugározni az előző ütközéstől kapott hőt. Így teljes olvadás következhetett be a felszínhez közeli rétegekben. (Hogy a Holdunkon ilyen bizonyosan volt, azt a Clementine-szonda mérései bizonyították be.) A bolygótestek összeállásuk után aztán egyre hűltek, és a későbbi vulkáni tevékenység már csak lokálisan megolvadt anyagot présel ki a kéreg repedésein.

A Voyagerek, majd a Galileo-szonda is sok képet készített az Ióról, és ezek megmutatták, hogy milyen fantasztikusan aktív ez a hold. A Prometheus vulkánból például 140 km magasra felspriccelő anyag árnyékát is látni lehetett a felvételeken. A Pele vulkán körüli vörös gyűrűn pedig egyszer csak egy 400 km átmérőjű fekete folt jelent meg a Pillan Patera vulkáni működése következtében. A Loki vulkán közelében talált 2 forró folt egyike a kitörést, a másik, 100 km-rel távolabbi a láva és kéndioxid-jég kölcsönhatását jelezte. Itt a láva egy 100 km hosszú lávaalagút végén került a felszínre, ahol megolvasztotta és elgőzölgöztette a kéndioxid-jeget. A Földön a Hawaii-szigetek Kilauea vulkánjánál játszódik le hasonló jelenség, de ott a lávaalagút csak 10 km-es, és a második forró folt a tengerparton jön létre, ahol a forró láva a tengervízzel találkozik. Az Ióról készített közeli felvételek egyikén egy 25 km hosszú repedés látszott, amelyből annak teljes hossza mentén lávaszökőkút lövellt 1,5 km magasra. A láva olyan forró, amelyet a Földön az elmúlt néhány millió évben nem bocsátott ki vulkán. Ez a megfigyelés és a földi infravörös mérések is

1500 K-t megközelítő forró foltokat jeleztek az Ión, ami azt jelenti, hogy a holdon nemcsak kén-vulkanizmus működhet, hanem olvadt szilikát is a felszínre kerül. Vagyis az Io kerge alatt ma is összefüggő magmaóceán lehet [1].

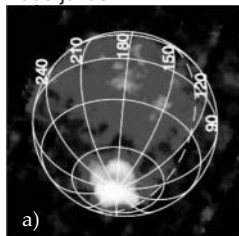
Árapályfűtés holdrendszerekben

Mint ismeretes, az Io vulkánjait, az Europa olvadt óceánját és a Ganymedes repedésrendszerét is az árapályfűtés hozza létre. Az árapályfűtést a Jupiter rendszerében az okozza, hogy az Io, az Europa és a Ganymedes 1:2:4-es szoros rezonanciában mozog egymáshoz képest [1].

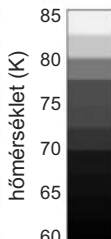
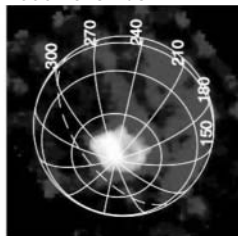
Az árapálydudor nagysága az Ión 50 m, a távolabb lévő Európán 20–30 m. Összehasonlításként a Hold által létrehozott árapályhullám amplitúdója a Földön a tengereken átlagban méter körüli, a szilárd földkéregben pedig csak centiméter nagyságrendű. A dagályhullám a holdakon állandóan változtatja a kéreg görbületét, és ezzel a felrepedéséhez vezethet. Ezért repedezik folyamatosan az Europa törékeny, vékony jégkérgé. Ugyanakkor a jégkéreg alatti tengerben az árapályhullám sűrűlódással jár, ami fűtést okoz. Ez tartja olvadtan az Io belső magmaóceánját és az Europa vízköpenyét. Folyadék esetén sokkal nagyobb árapályhullám tud létrejönni, mint a szilárd kéregben, és ez az, ami erősen fűti ezeket a holdakat.

A mindössze 500 km átmérőjű Szaturnusz-hold, az Enceladus viszont kicsi, mégis nagyon erős geológiai aktivitását mutat, s ez felkeltette a kutatók érdeklődését. A Cassini-szonda mérései szerint kétféle hőmérsékleti furcsaság is van az Enceladuson. Az egyik az, hogy a legmelegebb hely a holdon nem a Nap felé forduló oldal – ahogy ez minden napsütött testnél lenni szokott – hanem a déli pólus környéke (6.a. ábra). A másik, hogy a mérések az Enceladus déli pólusa környékén megfigyelt repedések, az úgynevezett tigriskarmolások (6.b. ábra) mentén a környezetüknél

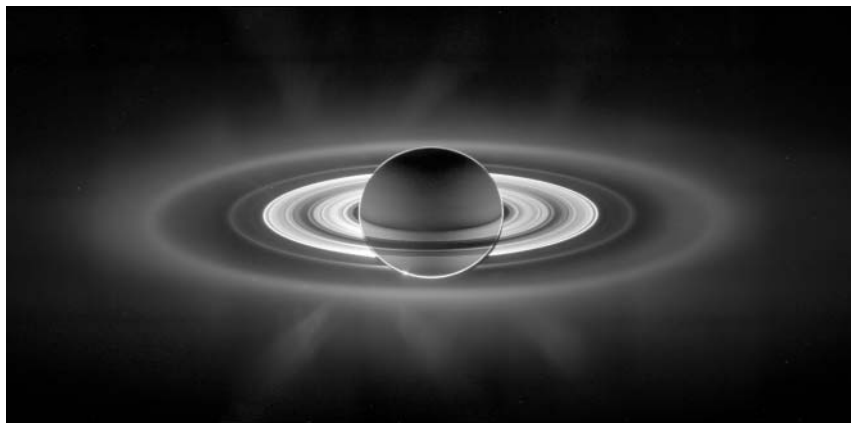
2005 július



2006 november



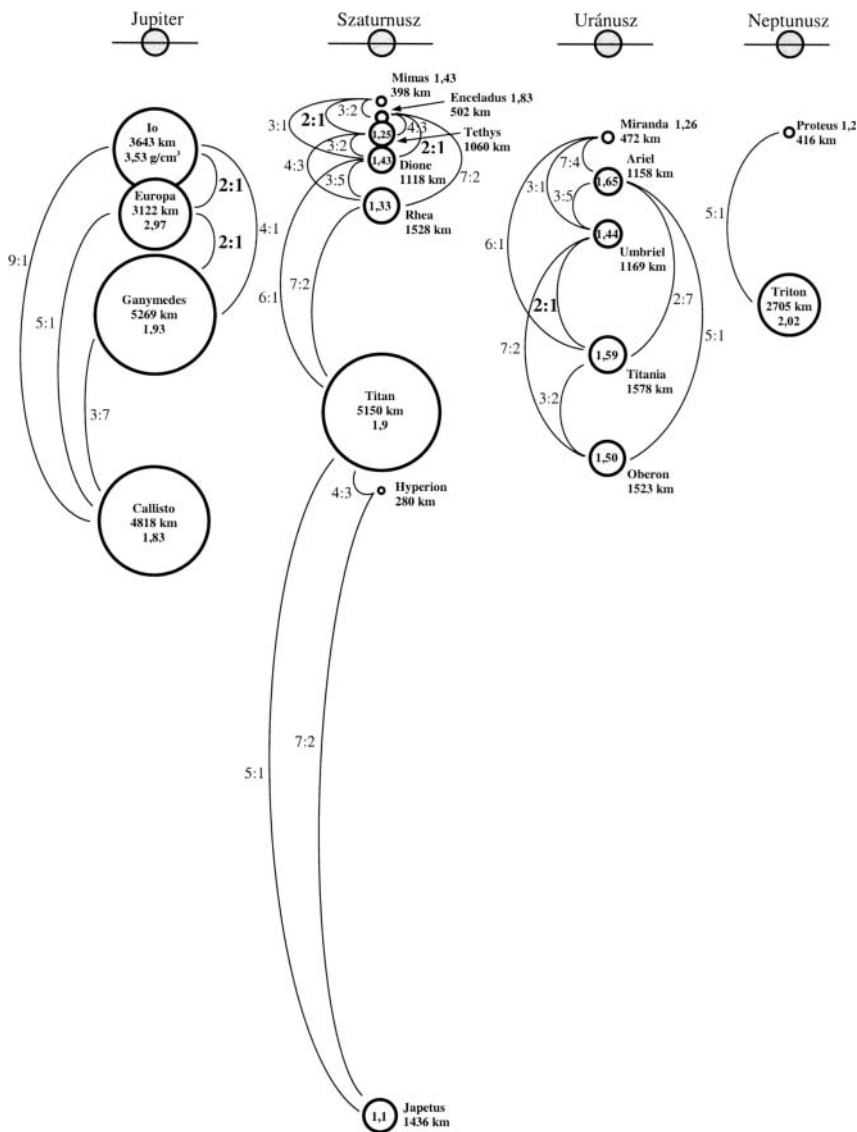
6. ábra. Enceladus (Cassini-eredmények), a: hőmérséklet-eloszlás a felszínén, b: a „tigriskarmolások” és környékük a redőkkel



7. ábra. A Szaturnusz E gyűrűjét is mutató, ellenfényben készült Cassini-kép

mintegy 10 fokkal melegebbnek mutatták a felszín hőmérsékletét. A repedésekből gejzírszerű kifújásokat is regisztráltak a műszerek és fényképeztek a kamerák. A mérések szerint szuperszonikus sebességű víz spriccel ki belőlük, és a vízgőz keskeny nyalábokat alkot. Ez arra utal, hogy nem a tigriskarmolások szétnyílása miatt felszínre került víz szublimációja a gejzírek forrása, hanem a mélyből, egy „meleg” (nulla fok körüli hőmérsékletű), vízforrásból kerül nagy nyomással a víz a felszínre a kéreg repedésein mint csatornán keresztül. A megfagyó finom permet jégporának egy része visszahullik a holdra, és mindig friss, fényes felszínt hoz létre. Más része megszökik a kis tömegű hold környezetéből, és Szaturnusz körüli pályára kerül. Ezek a jég szemcsék a Szaturnusz mintegy 800 ezer km átmérőjű E gyűrűjét (7. ábra) alkotják, amely egyben a Naprendszer legnagyobb gyűrűje is, és amely – most már érthető módon – a legsűrűbb az Enceladus hold pályájának a távolságában.

Úgy tűnik tehát, hogy az árapály ma elsősorban a déli pólus környékén fűti az Enceladust. Ott nemcsak repedések, hanem rátolódásos redők is találhatók (6.b. ábra). Ugyanakkor nincs egyetlen becsapódásos kráter sem, ami azt mutatja, hogy itt állandóan megújul a felszín – eltakarva a becsapódások nyomait. Az északi pólus környéke viszont tele van becsapódásos kráterekkel, tehát ott a felszín sokkal öregebb. Egyszerű modellszámításaink szerint ott akár kétszer olyan vastag is lehet a kéreg, mint a déli pólus környékén. Ez arra is utalhat, hogy egy egycellás köpenyáramlás működik az Enceladus belsejében, amelynek felszálló ága a déli pólus közelében van, és ez lehet a magyarázata a „meleg” víznek. Itt alulról a



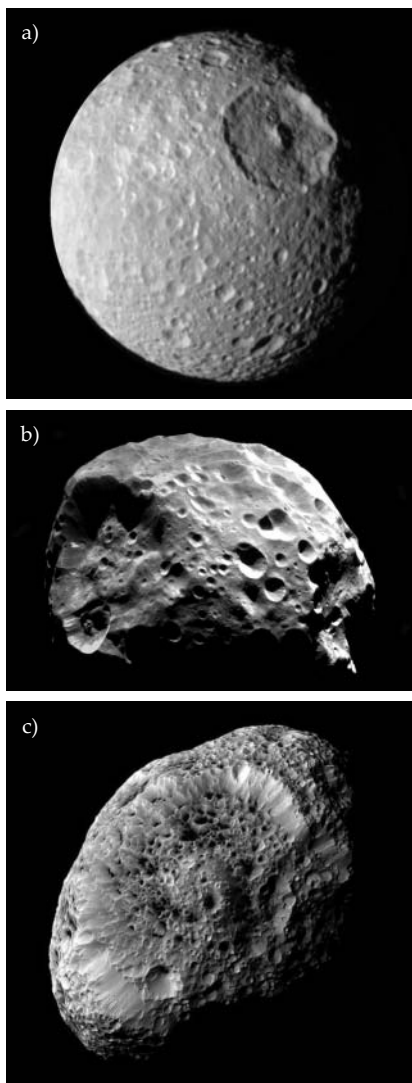
8. ábra. A holdrendszerek holdjainak távolságai bolygójuktól a bolygó sugarában kifejezve jól mutatja a Szaturnusz rendszerének különlegességét. (A Csillagászati évkönyv 2006, 197–198. oldalán lévő ábra km-ben mutatta ezeket, a Japetust azonban nem a helyén, hogy az ábra felső része olvasható legyen.)

termális erózió annyira elvékonyítja a jeget, hogy az árapályfeszültségek már képesek megrepeszteni azt. Más elképzelések szerint a déli pólus környékén szilikát diapírok felemelkedése okozza a jégköpeny megolvadását, és ebből a „melegviz-es tartályból” spriccel ki a víz szuperszonikus sebességgel.

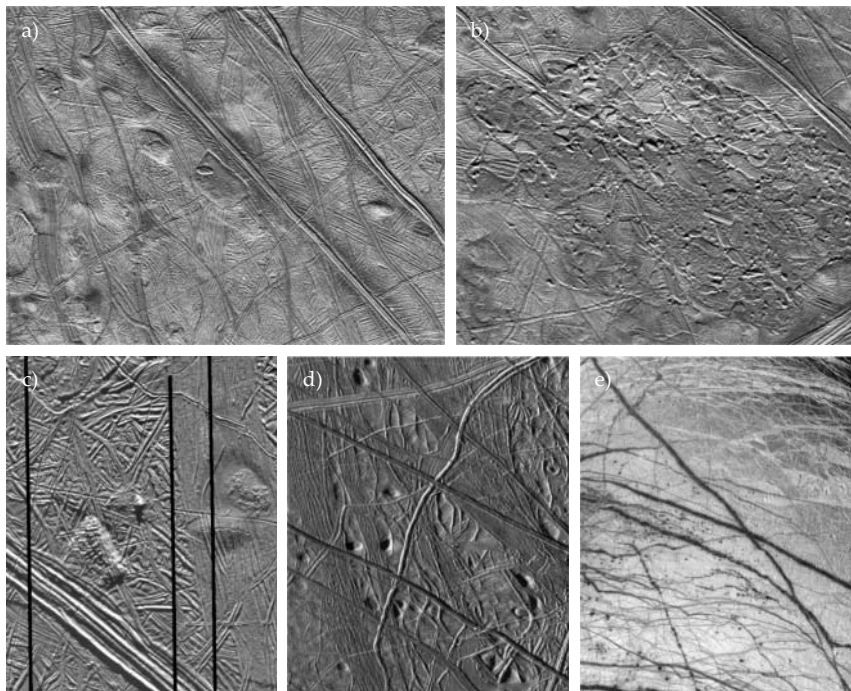
Mitől tud ilyen aktív lenni az Enceladus? Az 500 km-es Enceladus 2:1-es rezonancia közeli helyzetben van az 1100 km-es Dione holddal (8. ábra). A ráerőltetett excentricitás a számítások szerint már érthetővé teszi a hőfelszabadulást az Enceladus belsejében. Az Enceladusszal ellentétben a 400 km átmérőjű Mimason nem látszik semmiféle geológiai aktivitás nyoma (9.a. ábra), noha a Mimas és a Tethys hold mozgása is 2:1-es rezonáns helyzet közelében van (8. ábra). A Mimas és az Enceladus közötti különbség okát abban látom, hogy a Mimas már korán, nagyon rövid idő alatt kihűlt, megfagyott, és szilárd testében sokkal kisebb az árapály-mozgás, és ennek következtében a fűtés. Az Enceladus belseje viszont cseppfolyós maradt.

Holdrendszerek rezonáns holdjai nem foroghatnak kötötten? (Galileo)

A Galileo-szonda felvételei is alátámasztották a Voyager-2 szonda képei alapján megfogalmazott állítást, hogy az Europa jégfelszínét mindenütt repedések, rianások milliói szelik át. Ha az Europa diffe-



9. ábra. A Cassini felvételei három, nagyságra hasonló, jeges Szaturnusz-holdról, a: a keményre gyúrt Mimas, b: a már korábban is befogott üstökösnek gondolt Phoebe és c: a nagyon laza szerkezetű Hyperion



10. ábra. Galileo felvételek az Európáról, a: lék, b: káosz, c: meglágyult sáv, d: dómok, e: egymást metsző repedések, amelyek bizonyítékot szolgáltattak az Europa nem tökéletesen kötött keringésére.

renciálódott, a modellszámítások szerint egy 100 km mély óceán létezhet a jégkéreg alatt (ez kétszer annyi vizet tartalmazhat, mint a földi óceánok). A Galileo képek néha a 6 m-t is elérő térbeli felbontása lehetőséget adott a részletek aprólékos megfigyelésére. A felszíni magasságkülönbség sehol sem nagyobb 200–300 m-nél. Néhol „befagyott lék”-szerű képződmények (10.a. ábra), megdőlt jégtábladarabok 100–200 m magasra felálló szélei látszanak. Másutt hosszú repedések, „káosz”-nak nevezett, összetöredezett és egymástól elúszott, elfordult jégtáblák látszanak hátukon a repedésekkel (10.b. ábra), amelyek mutatják az elfordulást és utána a visszafagyást. Másutt lágy kontrasztú csíkok (10.c. ábra) vagy kör alakú, dómszerű alakzatok (10.d. ábra) vannak, amelyeket az alattuk lévő meleg óceáni feláramlások hozhatnak létre. S mindent át- meg átszönek az egyre újabb repedések. Becsapódásos kráter alig található még ezeken a nagyon részletgazdag képeken is. Tehát a felszín nagyon fiatal, a tektonika mindig újraképi azt.

A Ganymedes közelfelvételei is rengeteg repedésről árulkodnak, de ezek nem annyira rendezetlen repedések sokaságai, mint az Europa esetében, hanem egymással párhuzamosan elhelyezkedve rendszert: repedéskötegeket alkotnak. Ezek a repedéskötegek aztán egymáshoz képest össze-vissza állnak. Sok helyütt olyanok, mint a jégvirágok az ablakon. A repedéskötegek sok, kráterrel telepöttyözött, öregebb kéregdarabot fognak közre, tehát a Ganymedes felszínének újraképzése nem teljes.

A Ganymedessel szemben a Callisto holdon teljesen hiányoznak a repedések, csak becsapódásos kráterek vannak. Nagy mérete ellenére ez az egyik legöregebb felszínű bolygótest a Naprendszerben.

Az Europa repedései nemcsak a napi árapály hatását mutatják. A nagy, globális repedések egymáshoz képest eltolódott megismétlődése arra is következtetni enged, hogy az Europa rotációja nem tökéletesen szinkron, vagyis nem annyi idő alatt fordul meg a tengelye körül, mint amennyi idő alatt körbejárja a Jupitert. A különbség nagyon kicsi, néhány ezer-tízezer évenként fordul csak ugyanaz a terület ismét a Jupiter felé.

Miért aszinkron az Europa rotációja? Miért nem teszi szinkronná azt az árapály, ahogyan a mi Holdunk esetében tette? Aszinkron rotációt az árapály csak körpályán tud szinkronná tenni, nem nulla excentricitás esetén már nem képes erre [3]. A gravitációs összeállás módja, vagyis az ütközések miatt biztos, hogy a kialakuló holdpályáknak volt valami induló excentricitása, ami rezonáns holdrendszerekben ezek szerint sohasem tud nullává válni, tehát a hold aszinkron forgásból nem tud szinkronizálódni. Felmerül a kérdés, hogy ez nem vonatkozik-e más holdrendszerekre is? Persze nem biztos, hogy más hold felszíne is ilyen szépen meg fogja őrizni a bizonyítékokat, mint az Európáé, ahol az Udaeus és a Minos Linea vonalaival (10.e. ábra) bizonyítani lehetett, hogy az Europa nem tökéletesen kötött kering.

A nem tökéletesen kötött keringést a Cassini radarfelvételei a Titánnál is bebizonyították. Most a Titán a szinkronnál kicsit gyorsabban forog, mint ahogy ezt a korábbi radarmérések fél kilométer pontosságú helymeghatározásai mutatják. A Titán azonban nincs rezonanciában a többi holddal. Elképzelhető viszont, hogy a tengelyforgásban egy periodikus változás jön létre a légkör és a felszín közötti kölcsönhatás következtében a nagy tömegű, sűrű légkörrel burkolt és szezonális változást mutató hold esetén. Becslések szerint egy 70 km vastag szilárd kéreg tehetetlenségi nyomatéka csak 400-szorosa a légkörének (a Földön ugyanez az arány egy a millióhoz), tehát érthető lenne, ha a forgásváltozást a légkör szezonális változása hozná létre. Hogy valóban ez-e a helyzet a Titánnál, azt a Cassini 2008–2010 közötti kiterjesztett programja idején tudja majd tisztázni, tudniillik az évszakok miatt ekkor várható a leggyorsabb változás a tengelyforgásban.

Miért nem egyforma az óriásholdak hőfejlődése?

A 3000–5000 km-es holdakat egy külön csoportba is sorolhatjuk: az óriásholdakéba. Ez a csoport a mi Holdunkon kívül a Jupiter négy Galilei-holdját, valamint a Szaturnusz Titán holdját tartalmazza. A mi Holdunk különleges keletkezése kapcsán már eleve kilóg ebből a hatos csoportból, de a másik öt hold óriásbolygók holdrendszerében keletkezvén első rátekintésre egyívásúnak tűnhet. A Jupiter négy holdja közötti különbséget még csak meg lehet magyarázni a Jupitertől való távolsággal és az árapályfűtéssel, de a Galilei-holdak és a Titán közötti különbség már nem könnyen érthető.

Differenciálódás (Galileo és Cassini gravitációs mérések)

Nemcsak a jó minőségű fotók miatt okoztak meglepetést a Galileo-szonda egyes holdakat megközelítő elrepülései. A holdak gravitációs hatásának következtében ugyanis a szonda pályája megváltozott, gyorsulása követhető volt a holdaktól jövő rádiójelek Doppler-eltolódásában. Másképpen jelzi a pályaváltozás egy homogén és másképpen egy rétegezett felépítésű test zavaró hatását. A Galileo-szonda pályaváltozásából arra lehetett következtetni, hogy az Iónak, az Európának és a Ganymedesnek van magja (ez lehet vasmag vagy vasszulfid mag), és körülötte köpeny, illetve az Europa és a Ganymedes esetében még egy harmadik rétegnek is kell lennie. Ez a harmadik réteg az Europa esetében egyértelműen vízköpeny és nem kásás jég. A Callisto sem teljesen homogén, de nem olyan egyértelmű, hogy a magja teljesen különvált-e.

Az eddigi mérések alapján még nem világos, hogy a Titánnak van-e olvadt vízóceánja. Ezt a kérdést, mint említettük, csak a 2008–2010 közötti mérések dönthetik majd el. A holdtesthez képest nagyon nagy tömegű légkör fékező, illetve gyorsító hatása a Titán tengelyforgási idejét csak akkor képes változtatni, ha a kéreg a differenciálódás következtében lecsatolódott a szilárd belsőről, és ezért az hozzá képest el tud csúszni, tehát van egy folyékony réteg a hold belsejében.

Mágneses terek (Galileo és Cassini)

A Galileo mágneses mérései jelezték, hogy mind a négy hold kölcsönhat a Jupiter magnetoszférájával. Korábban részletesen foglalkoztam a Galileo eredményeivel, amelyek közül a legérdekesebb, hogy a Ganymedesnek egyértelműen van saját, belső eredetű mágneses tere, amely körülbelül olyan erős lehet, mint a Merkúr [1]. Az Europa és a Callisto esetében nem találtak belső eredetű mágneses teret, indukált teret azonban igen. A Callistónál a mágneses mérések csak úgy magyarázhatók meg, ha felteszik, hogy

körülbelül 100 km mélységben egy legalább 10 km vastag, globális, elektromosan vezető réteg van. A Titánnál az eddigi mérések nem jelezték, hogy lenne mágneses tere. Ha ez bebizonyosodik, akkor összehasonlítható planetológiai szempontból ez különösen érdekes lenne. A Titán ugyanis a Naprendszer második legnagyobb holdja. Mérete, tömege körülbelül akkora, mint a Ganymedesé. Azt várnánk, hogy a Titán is hasonló hőfejlődésen ment keresztül. Például a különböző elemek gravitációsán szétváltak, belsejében vasmag jött létre, felette pedig szilikátos köpeny, még magasabban összefüggő globális folyékony réteg alakult ki, amelynek felső vízjégreége adná a „szárazföldi sziklát”. Ammóniával kevert folyékony rétegében indukált mágneses tér keletkezését várnánk, akárcsak a Galilei-holdakban, esetleg azt, hogy folyékony vasmagjának áramlásai belső eredetű mágneses teret hoznak létre, mint a Ganymedesben. Ehelyett a Titánnál sem belső eredetű mágneses tér, sem a Szaturnusz körüli keringésből származó, indukált mágneses tér létéről nincs hír az irodalomban, bár lehet, hogy a mágneses mezőt csak majd egy, a Titán köré telepített szonda mérései mutathatják ki, mert a mostani elreplülések mérései erre nem alkalmasak.

Találtak viszont olyan jeleket a Titán körül végzett mágneses mérésekben, amelyek arra utalnak, hogy az ionoszféra áramai reagálnak a Szaturnusz mágneses terére, vagyis az ionoszférában létrejönnek indukált mágneses terek. S miután a Titán 20 bolygósugárnyi távolságban kering a Szaturnusz körül, ezért néha bekövetkezhet, hogy a magnetoszféra lökésfrontja elé kerülve kilép a napszélbe. Ezt eddig egy alkalommal, 2007. június 13-án, a Cassini 32. keringésekor figyelték meg, amikor a Titán a Szaturnusz Nap felőli oldalán járt, és ugyanakkor véletlenül egy, a napszélben érkező nagyon erős zavar a Szaturnusz mágneses terét kisebb térrészre szorította be. Ezáltal a Titánt a napszél vette körül, így egy egyedülálló megfigyelés vált lehetővé. A légkörrel és ionoszférával körülvett égitestek ugyanis vagy mindig a napszélben járnak, mint a bolygók, vagy mindig a bolygó magnetoszférájának zárt erővonalain belül mozognak, mint a Naprendszer reguláris holdjai. A magyar kutatók részvételével készült vizsgálat azt mutatta, hogy a Titán ionoszféra áramai nem azonnal tértek át az új „rezsimre”, hanem még akkor is a Szaturnusz mágneses tere által beállított áramlásokat követték, amikor a hold már több perce a napszélben járt. Tehát a létrejött áramlásoknak tehetetlenségük van.

Légkörök (Voyager, HST, Galileo és Cassini)

Az 5150 km átmérőjű Titán hold légköre a Vénusz után a legsűrűbb, és csak ezután jön a Föld! A Titán felszínén a légkör sűrűsége négyszer akkora, mint a Földön, és ez a kisebb gravitáció miatt másfélszer akkora felszí-

ni légnyomást tart fenn, mint a földi. A Titán légkörében a Szaturnusz által keltett árapály 400-szor akkora amplitúdójú, mint a földi légkörben a Hold hatására létrejövő árapályhullámé. Ugyanakkor a Nap besugárzása a Szaturnusz-rendszerben csak 1%-a annak, mint amennyit a Föld kap. Ez azt jelenti, hogy a Titánon csak nagy magasságban fontosak a termálisan gerjesztett szelek, a felszín közelében az árapály keltette szelek az uralkodók. A Huygens-szonda Doppler-eltolódásából meg lehetett határozni a szélsébségeket, amelyek 120 km magasan 430 km/óra, 60 km-en 60 km/óra, 25 km-en 8–10 km/óra és 8–10 km-en 6–7 km/óra értékűnek adódtak. Tehát a Titán légköre is a szilárd testhez képest gyorsabban forog, vagyis előre siet, akárcsak a Vénuszé és a Földé.

Meglepő ugyanakkor, hogy a Galilei-holdakon nincs számottevő légkör. Az Ionál ugyan már a Voyager szondák jelezték nátrium, kén és kén-dioxid jelenlétét, de a gázok csak helyenként, egy-egy vulkán felett alkotnak légkört rövid időre. A Hubble-űrtávcső azóta felfedezte az Europa oxigén-légkörét is, amelyet a Nap ultraibolya sugarai és a Jupiter magnetoszférájában mozgó, és az Europa jeges felszínére csapódó nagy energiájú töltött részecskék a felszíni jég bontásával állíthatnak elő. A hidrogén – mint legkönnyebb elem – gyorsan megszökik, az oxigénatomok pedig oxigénmolekulává állnak össze. A légnyomás rendkívül alacsony, azonban mégis a Föld után az Europa a második égitest a Naprendszerben, amelynél oxigénlégkört találtak. A töltött részecskék a Ganyumedes is bontják a vizet, ott a földi spektroszkópiai mérések a jégbe fagyva mutattak ki ózont.

Miért nincs a Titánnal nagyságrendileg azonos tömegű Galilei-holdaknak is légköre? Véleményem szerint ez a nagy különbség azoknak a viszonylag kis különbségek következtében jöhetett létre, amelyek a két bolygó, illetve a két bolygó holdjai között vannak [1]. Lehetséges azonban még egy másik magyarázat is. A Galilei-holdak a Jupiter körül olyan holdrendszerben keringenek, amely rezonáns mozgássá rendeződött, vagy már eleve így jött létre. Ez egész életük folyamán az illó anyagok vesztesét okozza, mert ezek a fűtés hatására a legkönnyebben szabadulnak fel. Lehet, hogy már sokkal több illó anyagot veszítettek el, vagyis sokkal jobban kiszáradtak, mint a Titán. A Titánnak viszont nincs nagy tömegű társa, amely rezonáns mozgásával őt is fűthette és kiszáradhatta volna, és így bőven van a légkörnek utánpótlása.

A Titán az ősi Föld állapotát legjobban megközelítő légkörű égitest. Az 1953-ban végrehajtott, Miller-féle híres laboratóriumi kísérletben éppen ilyen légkört használtak, amikor az ősi Föld körülményeit akarták szimulálni. Ott a villámkisülések aminosavak keletkezését okozták. Egy szerencsés véletlen következtében a Titánon is sikerült kimutatni villámok keletkezé-

sét. A szerencsés véletlen pedig az volt, hogy a természetes elektromos tér vízszintes összetevőjének mérésére tervezett MIP műszer (a Huygens szondával együtt) a nagyon erős szél belengett, és így a mérésekből a Titán elektromos terének nemcsak a vízszintes, hanem a függőleges összetevőjét is meg lehetett határozni. Az elektromos spektrum kisméretű részére pedig a Földön nagyon jól ismert Schumann-rezonanciákat mutatta, amit csak villámok tudnak kelteni és fenntartani. Az pedig, hogy egy elektromosan vezető kéreggel és ionoszférával burkolt bolygónál vagy holdnál milyen frekvencián jön létre Schumann-rezonancia, csak a méretek és a légkör vezetőképességének magasságfüggése határozza meg. Tehát az az adat az illető bolygóra jellemző. Miután a mért rezonáns frekvenciák megegyeztek azzal, amit a modellszámításokból a Titán tulajdonságaival a Titán esetére kaptak, ezért J. A. Morente és munkatársai biztosan állítják, hogy a Titán légkörében villámok keletkeznek. Kérdés, létrejönnek-e szerves molekulák is a Miller-kísérlethez hasonlóan.

A metán körforgása a Titánon (Cassini)

A Titánon a nitrogén mellett a másik két fő összetevő az argon és a metán (CH_4). A metán a Titánon uralkodó alacsony hőmérsékleten mindhárom fázisban előfordulhat, akár csak a Földön a víz. A mérések igazolták is, hogy a metán ott úgy viselkedik, mint a Földön a víz: elpárolog, felhőket képez, kicsapódik, és felhőszakadásszerű esőzések következtében folyékony állapotban folyóvölgyeket vág, amelyekben „kavicsokat” görgeszt. A „kavicsok” anyaga vízjég, amely ott a fő sziklaalkotó. Infra-vörös felvételeken a déli pólus körül, ahol akkor tavasz volt, a 25–35 km-en lévő légköri rétegekben fényes felhőket lehetett látni, amelyek a földi cirruszokra hasonlítanak, de szemcséi nagyok, több mm-esek. E felhők fényessége és elhelyezkedése is változott egymás utáni napokon fotózva, néha néhány óra alatt eltűntek, amiből arra következtettek, hogy felhőszakadásszerű „esőzéssel” kiürültek. (A légkörben lévő összes metán lecsapódva a felszínt mintegy 1,5 cm magasan borítaná be.)

Van azonban a Titán és a Föld légköre között egy óriási különbség. A vízgőz a Földön a levegő felfelé csökkenő hőmérséklete miatt a sztratoszférá határánál lévő hidegcsapda alatt kicsapódik, és visszahullik a felszínre. Emiatt az ózonréteg fölé nem tud feljutni, ahová a Nap ultraibolya sugarai viszont még lejuthatnak. Vagyis a mi szerencsénk a Nap ultraibolya sugárzása a Földön nem tudja felbontani a vizet, Földünk tehát meg tudja őrizni vízkészletét. A Titánon viszont a metánmolekulák feljutnak olyan magasra, ahol a Nap ultraibolya sugárzása bontani tudja őket. Egy hidrogénatom leválik, s mint legkönnyebb elem, felkerül a légkör

tetejére, ahonnan elszökhet. Sok molekula el is szökik a holdtól. A maradék CH_3 -ak pedig hosszú láncokká állnak össze, és rózsaszín „hópelyheként” szállingóznak a légköri szelek szárnyán felfelé. Ez a „fotokémiai köd” adja a Titán légkörének a rózsaszín árnyalatot, és hozzá létre azt a szmogot, amely miatt az optikai hullámhosszakon nem lehet lelátni a Titán felszínére. A Huygens-szonda a sok, vékony rétegből álló ködből csak a felszíntől 30 km-re lépett ki, csak ekkortól látta tisztán a tájat.

Az újabb mérésekből kiderült, hogy a szerves anyagok a Titán légkörében nem 100–200 km-en keletkeznek, ahogy eddig hitték, hanem sokkal magasabban, 1000 km környékén. Az odáig áteresztett napfény hullámhosszától függ, hogy hol milyen szerves molekulák keletkeznek és ülepednek le a légkörből. Tehát a felsőlégkör és a felszín között kémiai kapcsolat van. A lassan ülepedő rózsaszínű hó a modellszámítások szerint a Naprendszer néhány milliárd éve alatt néhány kilométernyi vastagságban gyűlhetett már össze a vízjég sziklák tetején – az egész bolygótesten, nem csak poláris sapkákat és magashegyi gleccsereket alkotva, mint a Földön és a Marson a hó. Az állandó irányú zonális szél „hófúvásokba”, „homokfodrokba” rendezheti ezt is, mint ahogy a vízjég-szemcsék alkotta „homokot” is – akár a Földön a szél a sivatagi homokot. A Titánról készült radarképek ezt mutatják is.

Szabad folyadékfelszín egy másik égitesten (Cassini)

A Titán felszínén a radar- és infravörös felvételekből kombinált képeken kevés becsapódásos kráter látszik. Ez arra utal, hogy a felszín fiatal, nem lehet több 10–100 millió évesnél. Ugyanakkor több helyen vulkáni kifolyások nyomait lehetett azonosítani, amelyek nagy valószínűséggel krio-vulkáni tevékenység, vagyis jég-vulkanizmus következtében kerülhettek a felszínre. A Huygens fotóin a leszállóhely környéke kifejezetten földi tengerpartra emlékeztette a kutatókat. A sötét, lapos részt „tengernek”, a fényes, durva részt szárazföldi felszínnek vélték. Utóbbin meanderező folyóvölgyek hálózata látszott, ami a Riviéra környékét juttatta az ember eszébe. A leszállás a sötét részre történt, mégsem „csobbant” a szonda, mint ahogy várták. Inkább mintha nedves homokfelszínre érkezett volna, amely 15 cm mélyre süllyedt be a leszállás után. A nagy hasonlóság ellenére a furcsa, földitől eltérő anyagok miatt azonban hónapokig senki nem merte vállalni a felelősséget, hogy kimondja, hogy hová is történt a leszállás: „tengerre” vagy „part-ra”. Az óvatosság a kutatók részéről érthető volt.

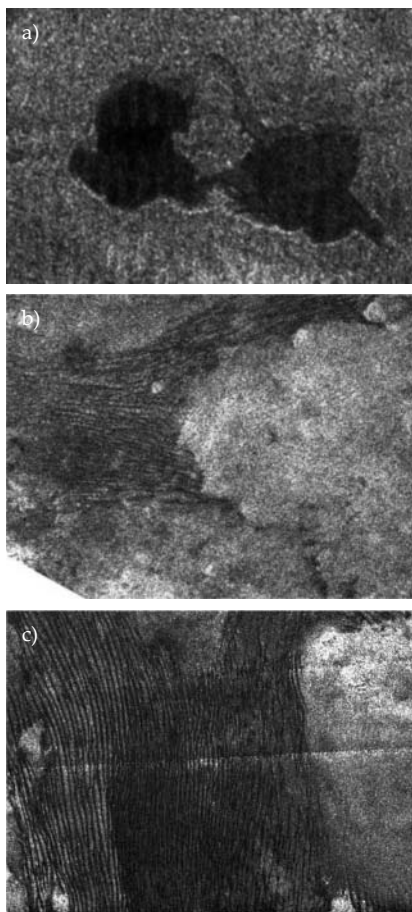
Később a radarfelvételeken megtalálták a keresett folyékony metánt és etánt a magasabb holdrajzi szélességeken tavak formájában. Olyanok ezek a tóvidékek, mint Finnország déli részén a tavak: egymást érik, össze

vannak kötve átfolyó ágakkal, partjaik zezugosak (11.a. ábra). Azért gondolják, hogy ezek tavak, mert a radarfelvételeken nagyon sötétek, mint a Földön is a környező, rücskös felszínű szárazföldeknel simább vízfelszínnek. Ezek ugyanis tükörhöz hasonlóan egyetlen irányba verik vissza a radarjeleket, így az adóhoz nem érkezik visszaszórt jel – hacsak véletlenül nem merőlegesen néz rá a szonda a folyadékfelszínre. Velük ellentétben az egyenetlen szárazföld minden irányba szórja a radarhullámokat – tehát az adó felé is – ezért a szárazföldek radarfényben fényesebbnek látszanak. A sötét foltok megtalálása már nyilvánvalóvá tette, hogy az egyenlítői szélességek környékén a „szürke” területek nem folyékony, hullámzó tengereket, hanem „sivatagokat” jelezhetnek, amelyeken az állandó, zonális szélfordrozódást, hosszú dűnesorokat (11.b. ábra) hozott létre. Amit alacsony szélességeken látunk, az sok ősi folyóvölgy látványos hálózata, kiszáradt tómeder, tengerfenék, alján sok sötét (szerves?) üledékkel. A lehulló csapadék ott elpárolog, folyadék csak a felszín alatt lehet, a felszínen csak a sarkvidékeken marad meg.

Ott azonban megmarad, tehát a Föld után a Titán a második égitest a Naprendszerben, ahol jelenleg is van tartós folyadékfelszín.

A jégholdak gejízei (Cassini)

Gejírszerű kilövellést először a Voyager szondák láttak az Ión, ahol kén tört fel, majd a Voyager-2 a Neptunusz Triton nevű holdján talált folyékony nitrogén hajtotta gejírt [1]. Legutóbb pedig a Cassini fedezett



11. ábra. Cassini radarfelvételek a Titánról a: tóvidék, b és c: dűnemezők

fel vizet kispriccelő gejzírt az Enceladuson. Ezek a megfigyelések szerint azt jelzik, hogy az óriásbolygók jeges holdjain a fő vulkáni mechanizmus a gejzírtevékenység lehet amiatt, hogy e testek illóanyag-tartalma nagyon nagy. Ez már kisebb melegítés hatására is megolvad, és a külső jégkéreg repedésein (a szilikátokhoz képest sokkal könnyebben) kipréselődhet. Ráadásul a keverékek még alacsonyabb hőmérsékleten olvadnak meg, mint az egyes összetevőik önmagukban. A víz-ammónia keverék például az összetételi aránytól függően a tiszta víznél akár 100 fokkal is alacsonyabb hőmérsékleten olvadhat, és híg, könnyen folyó lávát képez. Így az Europa holdon lefotózott fagyott tó az ottani hőmérsékleten tulajdonképpen „lávátónak” minősíthető.

Élet lehetősége az Europa, illetve az Enceladus óceánjában (Galileo és Cassini)

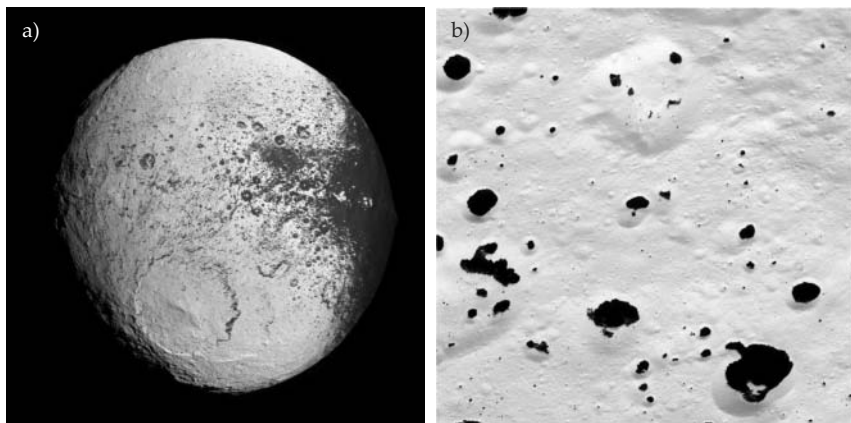
A média különösen hajlamos arra, hogy azt sugallja, ha valamely égitesten víz van, akkor ott életet is lehet találni. Természetesen mind az Európával, mind az Enceladusszal kapcsolatban ezt azonnal felvetették. Ha az Európán vékony jég réteggel fedett óceán van, akkor ott jogos lehet egy ilyen felvetés. Az Europa elég nagy tömegű és átmérőjű (3500 km) ahhoz, hogy a differenciálódás következtében a 100 km mély óceánja alatt szilikátos köpenye is legyen. A szilikátköpeny áramlásai szilikátvulkanizmust táplálhatnak az óceán alján. Ha ez igaz, akkor ott ugyanúgy megtalálhatóak lehetnek az élet feltételei, mint a Földön az óceánok mélyén, ahol primitív életformákat találtak. Ezek napfény helyett kémiai energiát hasznosítanak. Az Europa vastag vízóceánjának aljzatán a kisebb gravitáció miatt a feltételek hasonlóak lehetnek a földi tengeralatti hátságok körülményeihez, ahol a szuperkritikus állapotú víz lehetővé teszi, hogy a magas hőmérséklet ellenére primitív élőlények életben maradhassanak, sőt szaporodhassanak.

A Földön, nagy meglepetésre, az Antarktisz örök jégében is találtak életnyomokat. Ott ugyanis mintegy 70 helyen édesvízű tavak vannak a jégpáncélba zárva. Közülük a Vosztok állomás alatt mintegy 4 km mélységben van az egyik legnagyobb ilyen tó. Egy kísérleti fúrás során (amely még nem érte el a tavat) a felszínre hozott jégmagban baktériumokat találtak. Ennek a különleges életnek a tanulmányozása ötleteket adhat egy, az Európához küldendő szonda kísérleteinek a tervezéséhez. Nem zárható ki, hogy már a felszíni repedések mentén megtalálhatóak lesznek olyan primitív életformák, amelyeket a kipréselődő sós víz szállított a felszín közelébe. Ugyanakkor az Enceladus esetében nem tartom reálisnak egy ilyen mechanizmus működését, mert az 500 km átmérőjű Enceladus túl kicsi ahhoz, hogy szilikátvulkanizmust tarthasson fenn az óceánjának mélyén.

Poláris sapka légkör nélkül? (Cassini)

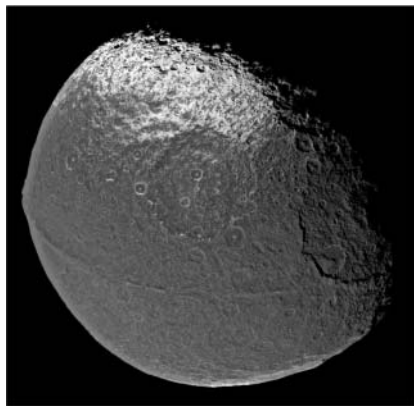
Mint ismeretes, a Szaturnusz Japetus nevű holdja a Naprendszer legaszimmetrikusabb albedójú holdja. Az egyik oldala olyan fényes, mint a hó, a másik olyan sötét, mint a szén. Ennek megmagyarázására egészen vad ötleteket vetettek fel. Egy viszonylag népszerű az, hogy a Phoebe-ről jövő port sepri fel a Japetus. A Cassini közeli felvételei (12.a. és 12.b. ábrák) csak növelték a kételyt ezzel a régi elképzeléssel kapcsolatban, de még mindig ez a legelfogadottabb magyarázat és toldozgatják-foltozgatják, ha valahol ellenérveket hoznak fel. Owen és kutatótársai például azt vetették fel, hogy nem a Phoebe-ről, hanem a Titánról jött a sötét por, amikor egy nagy becsapódás energiájától tholin tartalmú por keletkezett és szóródott szét a Titán környezetében.

Most egy újabb dolgozatban a beszennyezéses magyarázatokkal szemben hoztak fel érveket, hogy tudniillik miért nem az egész vezető oldal sötét, hiszen a poláris vidékek világosak [1]. Ezt az ellenérvet egy szintén furcsa magyarázattal próbálják kivédeni, mégpedig azzal, hogy a Japetusnak poláris sapkája van. A poláris sapka létrejöttét légkör nélkül úgy magyarázzák, hogy a poros, sötét egyenlítői vidékek jobban felmelegszenek, és az onnan elszublimált vízmolekulák ballisztikus pályán mozogva máshol csapódnak ki a felszínen. Onnan újra elszublimálnak, és valahol újra lecsapódnak. Végül egyes vízmolekulák szép lassan elérik a poláris vidéket. A hideg poláris vidékeken azonban már nem szublimálnak, hanem ott maradnak, és így hosszú idő alatt lassan újra fehérre festik a Phoebe porától feketére változott poláris vidékek felszínét.



12. ábra. Japetus, átmenet a fényes és a sötét oldal között (Cassini-fotók)

A Phoebe porával kapcsolatban már felvetődött az ellenvetés, hogy a többi hold miért nem kapott a porból. A poláris sapkával kapcsolatban is felvetődik, hogy ha ez a mechanizmus működik, akkor más holdnál is működni kell! A Galileo és a Cassini képek alapján már ellenőrizni lehetne, hogy más jeges holdak poláris vidékei is nagyobb albedójúak-e, mint az egyenlítői vidékek.



13. ábra. A Japetus egyenlítői hegygerince (Cassini-fotó)

Gyűrt hegygerinc egy holdon (Cassini)

Egy másik ok miatt is nagyon érdekes hold a Japetus. Az egyenlítője mentén egy hegygerinc fut végig (13. ábra), amely egyedülállóvá teszi a Naprendszer holdjai között. Gyűrt hegyet ugyanis eddig holdon csak a nagyon nagy és aktív Titánon találtak. A Japetus felszíne pedig öreg, tele van becsapódásos kráterrel. A hegygerincet viszont csak összenyomó erők hozhatták létre. A gyűrődés létrejöttét a Japetus alakjával magyarázzák. Az alakja olyan, mintha a mai 79 napos forgási periódusánál sokkal gyorsabban forgott volna kialakulásakor, vagyis a hold forgása keletkezése óta lelassult. Egy lassuló forgás egyre kisebb lapultságú forgási ellipszoid alakot hozna létre. Miután azonban a rajta talált sok becsapódás nyoma azt mutatja, hogy a hold fejlődésének már korai szakaszában kihűlt és megfagyott, ezért később a vastag kéreg alakja már nem tudott olyan könnyen megváltozni, mint egy még képlékeny testé. Ezért amikor a korábban nagyobb kidudorodású egyenlítői vidékek köpenyanyaga a vastag kéreg alól visszahúzódott, vagyis a kéreg felboltozódását már semmi sem támasztotta alá, az berogyott – ezt az egyenlítői redőt hagyva hátra. Ha a magyarázat helyes, akkor a hegygerincnek körbe kell érnie a holdat.

Porlavinák a Callistón (Galileo)

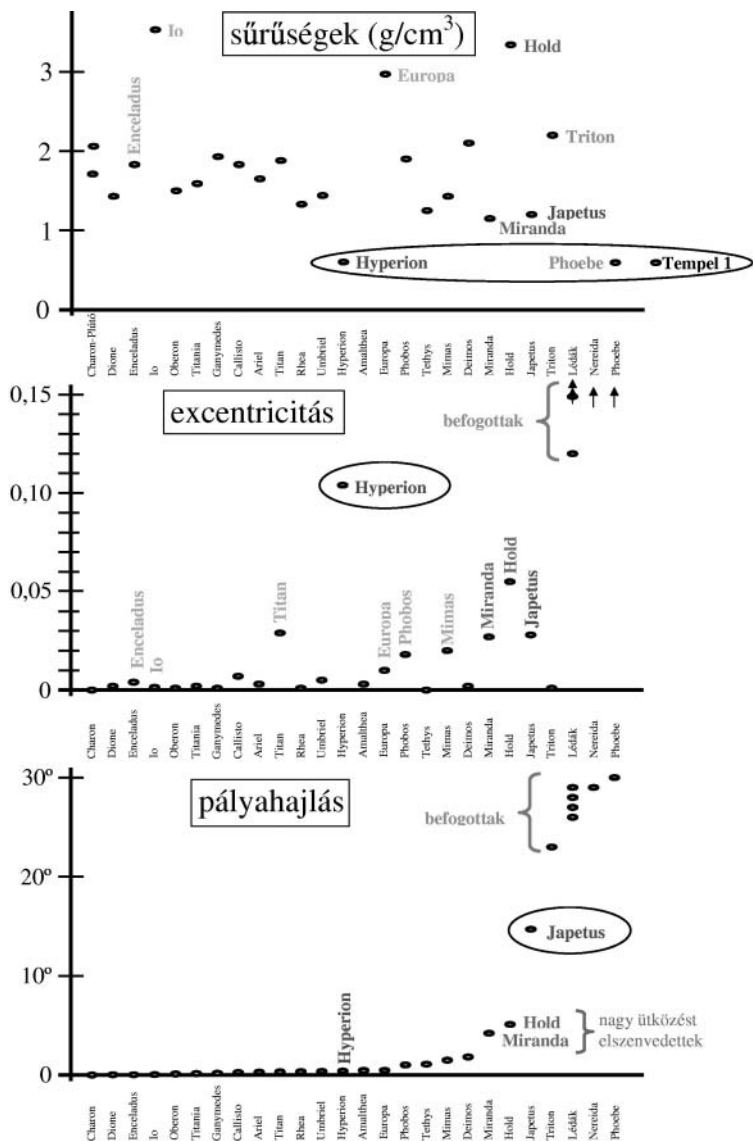
A Voyager-képekhez képest nagyfelbontású Galileo képek meglepetést hoztak a Callisto krátereivel kapcsolatban, ugyanis a legkisebb méretűek hiányoznak. Mintha valamilyen folyamat eltüntetné a kis krátereket.

Meglepetés az is, hogy a 10 km körüli kráterek némelyikében anyaglecsúszás nyomát találták, mégpedig nagy távolságra (3–3,5 km), amit egy víz nélküli égitesten nem várnánk. A nagy távolságból arra lehet következtetni, hogy nagyon finom por (nagy jégpor-tartalmú regolit) alkothatja a Callisto felszínének felső rétegét, amelynek lisztszerű szemcséi elektromosan fel is töltődhetnek, és ennek következtében lódul ilyen messzire a kráterek faláról porlavinaként lezúduló anyag.

Üstökösmagok a Szaturnusz holdjai között? (Cassini)

2004. június 11-én repült el legelőször a Cassini-szonda a Szaturnusz-rendszer legtávolabbi holdja, a Phoebe (9.b. ábra) mellett mintegy 2000 km távolságban. A Phoebe azért érdekes, mert a pályája alapján már korábban is befogott üstökösmagnak vélték. A Naptól való nagy távolsága miatt nem aktív, így a Phoebe képében láthatunk először közelről egy nem porfelhőbe burkolódzó üstökösmagot. A Cassini-szonda pályájában okozott változásból a hold tömege, tömegéből és méretéből pedig sűrűsége volt meghatározható. Az így kapott $0,6 \text{ g/cm}^3$ nagyon laza szerkezetre utal. A képeken lévő nagy, mély kráterek is jelzik, hogy a laza szerkezetű hold anyaga inkább beomlik, tömörödik egy-egy ütközés hatása alatt, mintsem kilökődne és elszökne a holdról.

Magam részéről a Hyperiont tartom a Szaturnusz-rendszer egyik legnagyobb talányának. Ez a hold viszonylag szabályos pályán, bent kering a Szaturnusz holdrendszerének közepén (8. ábra), pályahajlása is olyan, mint a többi reguláris holdé, bár az excentricitása jóval nagyobb (14. ábra alsó és középső diagramja). Amíg nem láttunk róla készült képet (9.c. ábra), senkinek se jutott volna eszébe, hogy ez is egy „kakukktójás”, és nem a Szaturnusz környezetében keletkezett. Legfeljebb az volt furcsa, hogy nem kötött kering, mint a legtöbb hold. Korábban arra gondoltak, hogy egy nemrég bekövetkezett ütközés lökte ki kötött forgásából, és az ütközés miatt szabálytalan az alakja is. A Cassini Hyperionról készített fotója (9.c. ábra) azonban nagyon furcsa, laza szerkezetű holdat mutat – legalább olyan mély, berogyó kráterekkel, mint a Phoebe esetében. Sűrűsége szintén $0,6 \text{ g/cm}^3$ körülinek adódott, amivel már teljesen kilóg a reguláris holdak közül (14. ábra felső diagramja). Közben a Deep Impact szonda mozgásának a megváltozásából sikerült meghatározni egy igazi üstökös, a 9P/Tempel 1 sűrűségét is, és azt is $0,6 \text{ g/cm}^3$ -nek mérték (14. ábra felső diagramja). Ezek a sűrűségmérések arra utalnak, hogy a Hyperion szintén befogott üstökösmag lehet. Hogyan kerülhetett erre a viszonylag normális pályára (14. ábra, alsó és középső diagramja) a holdrendszer közepére (8. ábra)?



14. ábra. A Naprendszer holdjainak pályahajlása, pálya-excentricitása és sűrűsége a pályahajlások növekedésének sorrendjében. A diagram jól mutatja, hogy a Japetus és a Hyperion milyen különleges a holdak között.

Összefoglalás

A bolygószondák vizsgálatai alapján sok vonatkozásban finomodott a Naprendszer keletkezéséről és a bolygóóriások világáról eddig alkotott kép, és néhány jelenség magyarázatánál már dönteni is lehetett az eddig még szóba jöhető elméletek között.

Az óriásbolygók keletkezésével kapcsolatban az újabb, űrszondás mérések az összeállásos (akkréciós) elméletet részesítették előnyben gravitációs összeomlással szemben, és rámutattak, hogy a bolygók összeállásukkor a szoláris ködnek nem – vagy nemcsak – a mostani helyükön lévő anyagát gyűjtögették be. Rámutattak továbbá, hogy az óriásbolygók meteorológiáját és sarkifény-tevékenységét nem elsősorban a Nap, hanem e bolygók belső folyamatai irányítják, valamint arra, hogy a bolygók rádiósugárzásának modulációjával nem lehet a bolygóbelsők forgását mérni. Bebizonyították azt is, hogy a magnetoszféráik segítségével a bolygók bonyolult kapcsolatban vannak a környezetükben lévő anyaggal. A holdaktól és gyűrűktől anyagot ragadnak el, és azt szétterítik egész környezetükben, sőt akár a csillagközi térbe is kijuttathatják. Az is láthatóvá vált, hogy a bolygóléggörök forgását a pólusoknál örvények segítik.

A gyűrűkkel kapcsolatban is viszonylag koherens kép állt össze arra vonatkozóan, hogy miért és hogyan jönnek létre, és milyen folyamatok határozzák meg a szerkezetüket. Egyértelművé vált, hogy bár mindegyik óriásbolygónak van belső holdjaik porlásából származó, sötét porgyűrűje, de a Szaturnusz körül emellett létezik egy jégdarabkákból álló, látványos jéggyűrű-rendszer is, ami ritka és efemer jelenség lehet a Naprendszerben.

A holdakkal kapcsolatban az Io megfigyelése bebizonyította, hogy nemcsak a Naprendszer korai állapotában létezhetett, hanem még ma is létezik magmaóceán egyes égitestek belsejében. Világosabbá vált, hogy az árapály milyen fontos szerepet játszik a holdrendszerekben: felelős a fűtésért, a kérgék felrepeztségéért, megváltoztathatja a holdak pályáját és forgását – s ennek következtében a felszíni domborzatukat. Lényeges szerepe lehet továbbá a differenciálódás, a mágneses terek, a légkörök és az életfeltételek létrejöttében. Felvetettünk a cikkben két hipotézist is, miszerint a jég-holdak vulkanizmusa főleg gejzírtevékenység, és hogy a Hyperion is egy befogott óriási üstökös-mag.

Irodalom

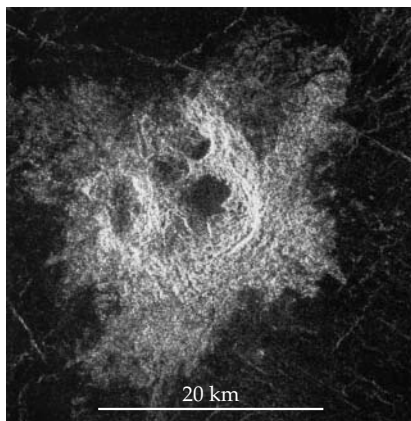
1. Illés Erzsébet: Holdak a Naprendszerben. Meteor csillagászati évkönyv 2006, 194–227. o.
2. Illés Erzsébet: A bolygógyűrűk eredete. Természet Világa 136. évf., 3. sz. (106–109. o.), 4. sz. (178–180. o.), 2005.
3. Greenberg, R.: Unmasking Europa. Springer, Praxis, Chichester, UK, 2008.
4. Illés Erzsébet: A jeges holdak aktivitásáról. Ionoszféra és Magnetoszféra Szeminárium 2006, 35–48. o.
5. Illés Erzsébet: A Naprendszer Hamupipőkéje: a megmagyarázott Europa. Élet és Tudomány LXIV. évf., 5. sz., 134–137. o., 2009.

ILLÉS ERZSÉBET

A Vénusz, ahogy ma látjuk

Bevezetés

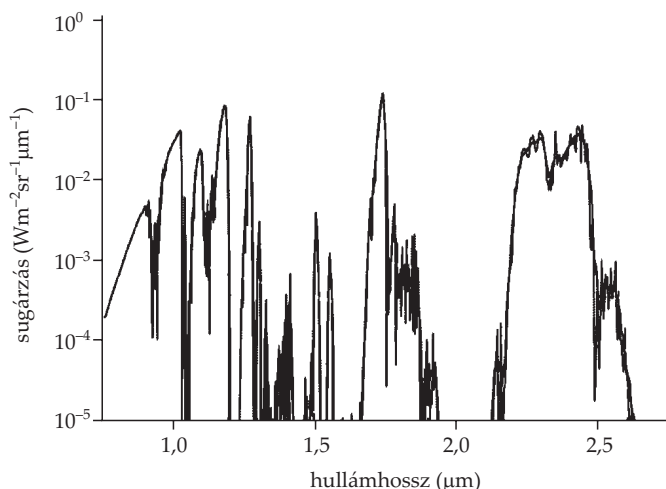
A Vénusz mint a Föld testvérbolygója, mindig is foglalkoztatta az emberek fantáziáját. Az űrszondás vizsgálata is nagyon korán, már 1961-ben megindult, és eddig több mint 30 űreszköz vizsgálta. Nem volt könnyű közelférkőzni hozzá! Eleinte az űrtechnika gyermekbetegségei hátráltatták a kutatást: sokadjára sikerült csak űrszondát indítani felé, aztán pedig a megérkezéskor fogadta a leszálló egységeket hihetetlenül kellemetlen környezet. A Vénuszt ugyanis kezdetben nem távérzékeléssel, hanem sűrű, átlátszatlan légköre miatt inkább a felszínre való leszállásokkal akarták megismerni. A sikertelen űrkísérletek okainak vizsgálata önmagában is sok új információt adott a Vénusz légköréről, míg végül a sikeres leszállások a légkörről és felszíni viszonyokról is informáltak. Az első sikeresen leszálló szonda a Venyera-7 volt, amely 1970. augusztus 10-én ereszkedett le, és 23 percen keresztül közvetített a felszínről. Ekkor derült ki, hogy a várakozásokkal ellentétben a Vénusz felszíne nem teljesen sötét, hanem a nap-



1. ábra. A Vénusz nagyon sűrű légkörébe behatoló testek az erős légköri súrlódás következtében a talajt érés előtt általában szétrobbannak, darabjaik egyszerre és egymáshoz közel csapódnak be a felszínbe (ezek a szinkron becsapódások). Törmelékterítőik ezért nem tudnak körszimmetrikusan, zavartalanul szétterülni, hanem még a légkörben, egymással ütközve a kis kráterek közötti egyenesek mentén hullanak vissza furcsa formákat alakítva ki.

fény 2%-a nagyon diffúzan ugyan, de eléri a talajt, ezért a következő szondákat (Venyera-9, -10, 1975. június 8. és 14.) már tv-vel is felszerelték. A 80-as évektől aztán radarképek készítésével próbálkoztak (Pioneer Venus, 1978. május 20., Venyera-15, -16, 1983. június 3. és 7., Magellan, 1989. május 4.). Ezek olyan nagyon érdekes, a Naprendszer más bolygóin nem található felszíni formákat mutattak, mint amilyenek az akkor parkettáknak (ma tesszeráknak), koronáknak, palacsinta-vulkánoknak nevezett alakzatok, vagy a szinkron becsapódási nyomok (1. ábra).

1984-ben Allen és Crawford felfedezték, hogy a Vénuszról a közeli-infravörös 0,8 és 2,5 m-es hullámhosszú fénysugarak kijutnak egy légköri ablakon keresztül (termális ablak). Ez megnyitotta az utat ahhoz, hogy a felszín és a 35 km alatti légköri rétegek távérzékeléssel is tanulmányozhatók legyenek. Azóta földi távcsöves megfigyelésekkel és elméleti modellezéssel a 0,8 és az 1,35 m közötti ablakot is megtalálták. A legfényesebb ablak 1,74 és 2,3 m-nél van, de több ilyen is létezik 0,85, 0,9, 1,01, 1,10, 1,18, 1,27 és 1,31 m körül. Az ablakok a CO₂ és a víz mély abszorpciós sávjai között helyezkednek el (2. ábra). A 0,85–1,01 m közötti sugárzás főleg a felszínről származik, tehát a felszín hőmérsékleti eloszlását, illetve fényvisszaverő képességét lehet feltérképezni ebben a hullámhossztartományban. A hosszabb hullámhosszak (1,31, 1,51, 1,55, 1,74, 2,3 m) a légkörről hoznak információt. A 2,25–2,50 m a CO, OCS, H₂O és



2. ábra. A Vénusz éjszakai oldalának hősugárzása. Szintetikus spektrum 0,8–2,7 μm között. Az 1,31, 1,74 és 2,3 μm-es sugárzás a légkörből származik.

SO₂ vizsgálatát teszi lehetővé. Ez a technika a nappali oldalon nem használható, mert ott a felhőzet által visszavert napfény túlrágyogja és elnyomja a bolygóról érkező gyenge sugárzást. A Galileo- és a Cassini-szondán elhelyezett műszerekkel próbálták ki, és bizonyították ezeknek a légköri ablakoknak a használhatóságát. Jelenleg az ESA által 2005-ben indított Venus Express szonda VIRTIS (Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer) műszere gyűjti az 1,18 m-en a 16 km-ről, az 1,51 és 1,55 m-en a 20–35 km-ről, a 2,3 m-en a 35 km-ről, az 1,74 m-en a 45–50 km-ről érkező információt. 60 km a legkisebb magasság, amelyet az 5,05 m-en mérni lehet. 400 m-en a visszavert napfény a 70 km-en lévő felhőtető vizsgálatát teszi lehetővé.

A Venus Express (VEx) 2006. április 11-én állt Vénusz körüli pályára. A 600 kg-os szonda poláris pályája erősen elliptikus: apocentruma 65 000 km-en van, pericentruma 88° szélességen 250–350 km magasság környékén teszi lehetővé in situ mérések végrehajtását. Az északi félgömb felett túl gyorsan mozog, ezért nem tud jó képeket készíteni, de az apocentrumtól a déli félgömböt 20 km-es felbontással tudja vizsgálni.

A Venus Express nem készít hagyományos fotókat. Spektrométereinek méréseiből háromdimenziós képeket készítenek a légköri rétegekről le a felszínig. Nem is gondolná az ember, hogy az űrkutatásban ma – az elképesztően jó minőségű képek világában – milyen érdekes információk gyűjthetők képek nélkül is. Ezeket a méréseket egészítik ki a Venus Express Radio Science (VeRa) mérései, amikor a Nap, a Föld, vagy valamelyik fényes csillag a Vénusz mögött látszik a szondáról. Ezek az okkultációs mérések vertikális profilok meghatározását teszik lehetővé, és 50 km, vagyis a felhőtető alatt is adnak információt, ahol egyébként már nehéz mérni. Az eredményeket a Vénusz légköréről szóló részben tekintjük át.

Ami a felszín tanulmányozását illeti, ezeken a hullámhosszakon a felszín fényvisszaverő képességének változása helyről helyre eléri a 20%-ot, ami már lehetőséget adna a gránit és a bazalt megkülönböztetésére is. Ezért ígéretes a VIRTIS/VEx globális térképe, ha elkészül a Vénusz egész felszínére. Addig pedig az eddigi radarképek alapján készített, az egész bolygóra kiterjedő tematikus térképek tanulmányozását folytatják a szakemberek. A Naprendszer többi bolygójáról, elsősorban a Földről megszerzett ismeretek (vagyis az összehasonlító planetológia) segítenek olyan új szempontok alapján megfogalmazni a kérdéseket, amelyek a speciálisan csoportosított adathalmazokból új ismereteket adnak a Vénuszra. A felszínről ilyen módon megszerzett új eredményeket a felszínről szóló fejezetben foglalom össze.

A Vénusz felszíne

A felszín nagy vonalakban

A Vénusz felszínének 65%-át hullámos síkság foglalja el (3. *ábra*, lásd a színes melléklet IV. oldalán), amelyet sokszori vulkáni előtések alakítottak ki. Erre a lávafolyások lebenyszerű peremei utalnak. A Venyera szondák jóvoltából van helyszíni információ is a felszín anyagáról, még a nyolcvanas évek előtti időkből. A mérések szerint a felszínen toleiites bazalt található, amelyet a Földről is ismerünk, mint nagyon híg, majdnem vízszerűen folyó vulkáni anyagot. Arról keveset lehet tudni, hogy a vulkáni előtések előtt milyen anyag alkotta a Vénusz kérgét.

A felszín 27%-át a közepesnél mélyebben elhelyezkedő mélyföldek teszik ki. A felszín 8%-át kitevő hegyvidéki területek viszonylag koncentráltan emelkednek ki a lávasíkságból. Ezek az északi pólus közelében elhelyezkedő Ishtar-föld, az egyenlítő mentén elterülő Aphrodite-föld, valamint néhány magas vulkáni komplexum. Az Ishtar-földet a Lakshmi Planum fennsíkja és ezt a fennsíkot négy oldalról körülölelő gyűrt hegyrendszerek csoportja alkotja (4. *ábra*, lásd a színes melléklet V. oldalán), amely azért érdekes, mert a Naprendszer kérges bolygótestjei közül a Földön kívül egyedül itt találhatók gyűrt hegyrendszerek.

A vulkáni hegyek

A Vénusz felszínét radarral már a Földről megpróbálták felderíteni. Már az első (Arecibóból végrehajtott) radarmérések különböző alakzatokat mutattak ki a felszínen: egy becsapódásos krátert (elnevezték Évának, és ennek központi csúcsa lett a Vénusz „Greenwich”-e), és két nagy radarvisszaverő-képességű területet (Alfa és Béta lett a nevük) azonosítottak. A Bétáról később kiderült, hogy több kilométer magas vulkáni hegy. Hasonló a hawaii hegyekhez, és forrópont-vulkanizmussal magyarázták a létét, mint ahogy a többi, hasonló hegyét is.

A Vénusz-felszín különleges alakzatai

A Venyera-15 és -16 radarfelvételei, amelyeket az északi pólus környékéről készítettek, a különleges alakzatok miatt nagy döbbenetet váltottak ki. A *tesszerák*, amiket akkor még találóan parkettának neveztek, nagyon összetört, elég nagy kiterjedésű, összefüggő területek, amelyek hirtelen, majdnem hogy szigetként emelkednek 1-2 km magasságra a környező síkságok fölé (5. *ábra*).

A legfeltűnőbbek azonban a nagy számban megjelenő, különböző méretű kerek alakzatok, amelyek mint pókok ülnek a felszínen. El is nevez-

ték őket *arachnoidoknak*. A 90-es években a Magellan-képek jobb felbontása alapján már látni lehetett a szerkezetüket is: egy-egy radiális repedésrendszert körárok vesz körül. A radiális repedések sokszorosan túlnyúlnak a körárkon. Ezeket a körárokkal körülvett képződményeket *koronáknak* nevezték (6., 7. 9., 10. 11. ábrák). Azokat az arachnoidokat, amelyeknek nincs körkörös szerkezetük, csak radiális törésrendszerük, *asztrák* (vagy nívák) névvel illetik (8. ábra).

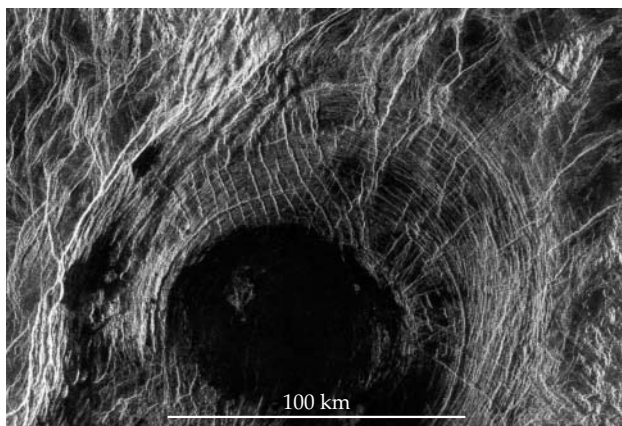
Az asztrák tulajdonképpen radiális törések centrumai, amelyek tipikusan 100–300 km átmérőjű területekre terjednek ki. Gyakran jelen vannak koronák belső részén, és ezért sokan úgy gondolták, hogy a koronakelet-



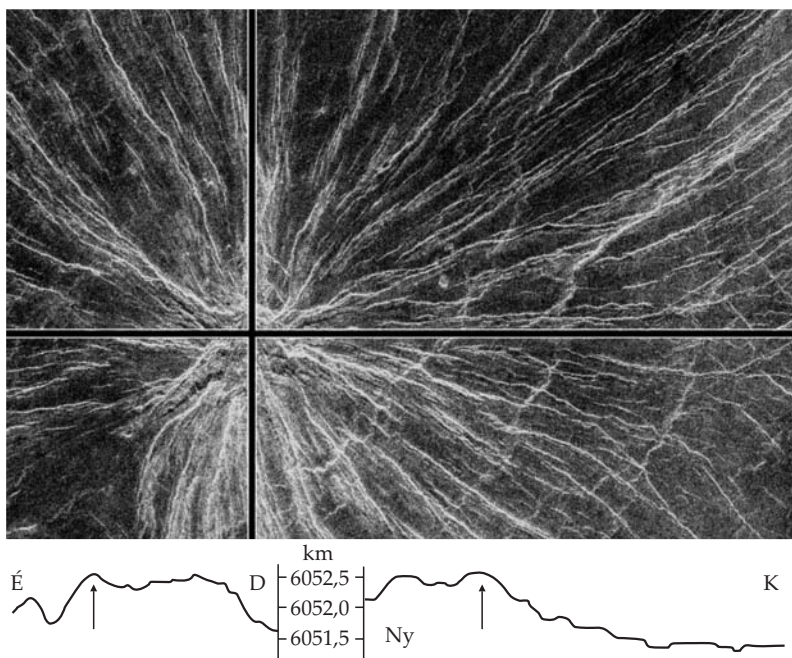
5. ábra. Egy tipikus tesszera terület szigetszerű elhelyezkedése a hosszan elnyúló redőgerincek között.



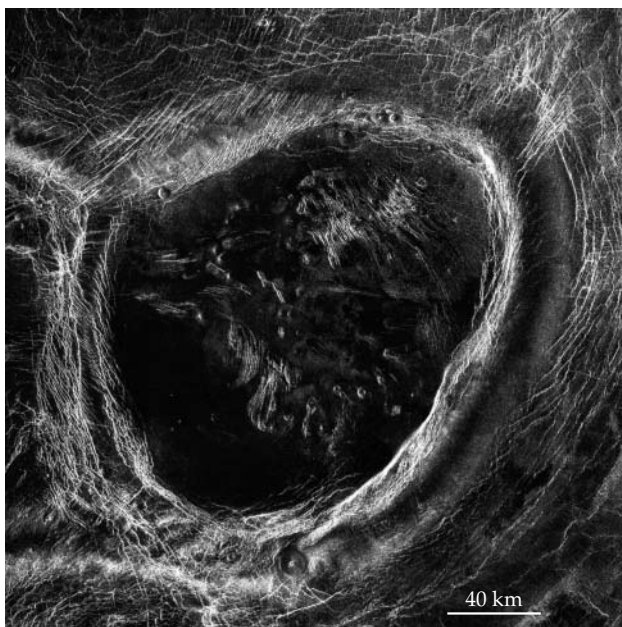
6. ábra. Koronamező az Eistla-régióban. A középtől kissé lejjebb, balra a 800 km átmérőjű Heng-O korona. (A középen fent elhelyezkedő – 100 km-es – korona és környéke a 11. ábrán kinagyítva látható.)



7. ábra. Egy tipikus korona radiális és koncentrikus redőrendszerrel.



8. ábra. Egy tipikus asztra radiális redőrendszere. Az alsó paneleken É–D-i, illetve K–Ny-i irányú (lásd fekete vonalak) magassági profilok láthatók. A nyílak az asztra középpontját jelölik, ahol a terepszint a legmagasabb.

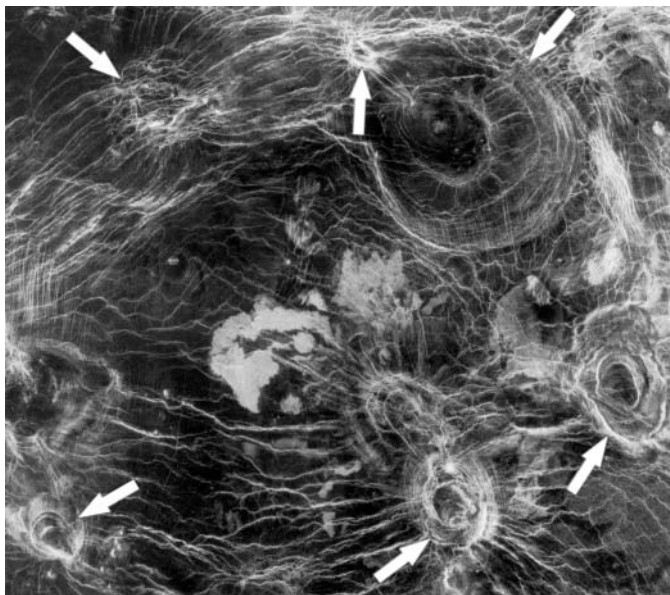


9. ábra. Egy tipikus korona vulkánokkal teli központi része.

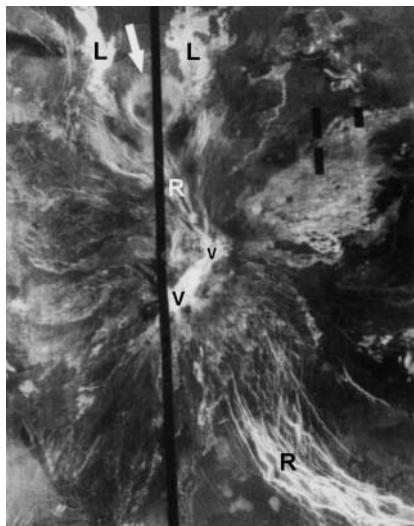
kezés vagy -fejlődés bizonyos fázisához kapcsolódik a keletkezésük. Mint a koronák (9. ábra), sokszor ezek is vulkanizmussal kapcsolatosak, és ezért arra gondoltak, hogy forró köpenyanyagnak a kőzetburokba való behatolása (a diapír/plume = köpenycsóva) okozza őket. Sok asztránál – mint ahogy a koronáknál is – látszik, hogy nemcsak egy időszakban keletkeztek, hanem vannak közöttük olyanok, amelyek már a most látható felszín korai időszakában létrejöttek.

A jobb felbontású Magellan-képeken azonosítható *redőgerincek* néhol párhuzamosan futó úgynevezett lineamentumokba (repedések?, gerincek?) rendeződnek, amelyek néha vulkáni hegyeket, néhol koronákat kötnek össze, de sok helyen csak úgy magukban találhatók (10–11. ábra). Ezek biztos, hogy tektonikus alakzatok, és a kéreg feszültségei hozták létre őket. A 10. ábrán látható szerkezet véleményem szerint biztosan azonos időben volt aktív, és a koronák szinkron keletkezésével kapcsolatos feszültségek hozhatták létre a redőket is.

A másik meglepő felfedezés valaminek a hiánya volt. Nevezetesen az, hogy a Földhöz hasonlóan hitt Vénusz nemcsak a légkörét illetően más,



10. ábra. A koronákat összekötő redőgerinc-kötegek mutatják, hogy a koronák (nyilakkal jelölve) – és velük a redőgerincek – nem egymás után, hanem egyetlen folyamat során, együttesen keletkeztek.



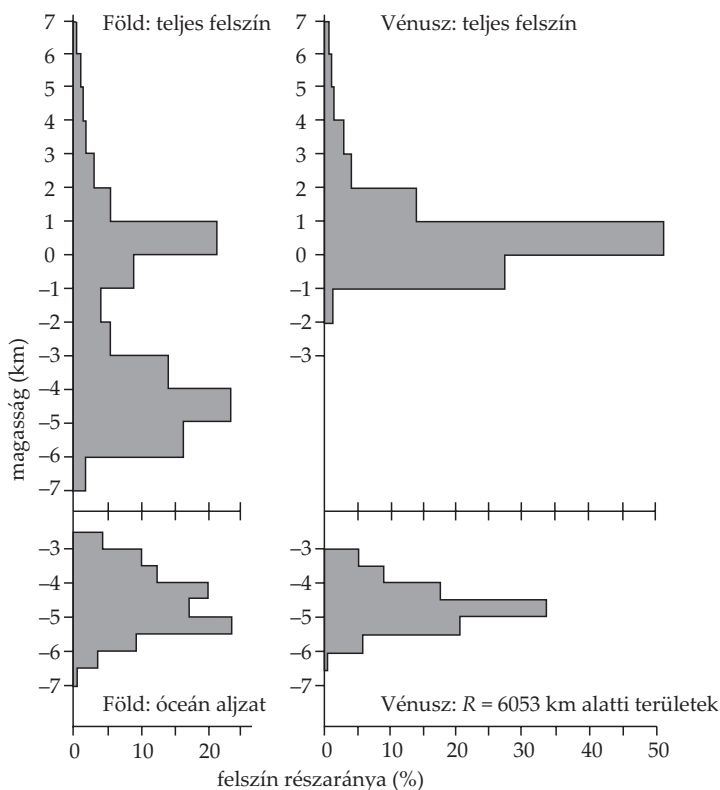
hanem a felszín domináns formáit illetően is. Nincsenek rajta sem a tengeralatti hátságokhoz, sem a szubdukciós zónákhoz hasonló képződmények.

Hogyan van az, hogy a csaknem akkora Vénusz teljesen másként működik, mint a Föld, és nincs rajta lemeztektonika?

11. ábra. A 6. ábrán látható 100 km átmérőjű korona környéke: a koronából kiinduló durva felszínű lávafolyások (L), a közeli kettős vulkáni hegy (V), és a közöttük levő, majd a hegyek után is folytatódó redőgerinc-köteg (R).

A Vénusz-felszín hipszogramja

A Vénusz felszínének tehát a legfeltűnőbb jellemvonása a 65%-át kitevő hullámos vulkáni síkság. Egy bolygó *hipszogramja* azt ábrázolja, hogy a felszín hány százaléka esik bizonyos magassági határok közé. A Föld esetében az óceáni medencék és a szárazföldek adják a két legnagyobb összterületet, és ezek különböző átlagmagasságban helyezkednek el. Ezeknél mélyebbek a mélytengeri árkok és magasabbak a magashegységek, de ezek részaránya az összfelszínnek csak nagyon kis százaléka. A kétféle – az óceáni és a szárazföldi – kéreg miatt a Föld hipszogramja



12. ábra. A Föld és a Vénusz hipszogramja azt mutatja, hogy a felszín hány százaléka esik bizonyos magassági határok közé. A felső diagramok 1 km-es felbontással a bolygók teljes felszínére, az alsók 0,5 km-es felbontással csak a mélyebben fekvő területekre vonatkoznak. A földi hipszogram két maximumát a kontinentális és óceáni kéreg adja, amelyek különböző átlagmagasságban helyezkednek el.

kétpúpú tevére hasonlít (12. *ábra*), és ezt tartják a lemeztektonikára jellemző formának a kétféle (az óceáni és a szárazföldi) kéreg léte miatt.

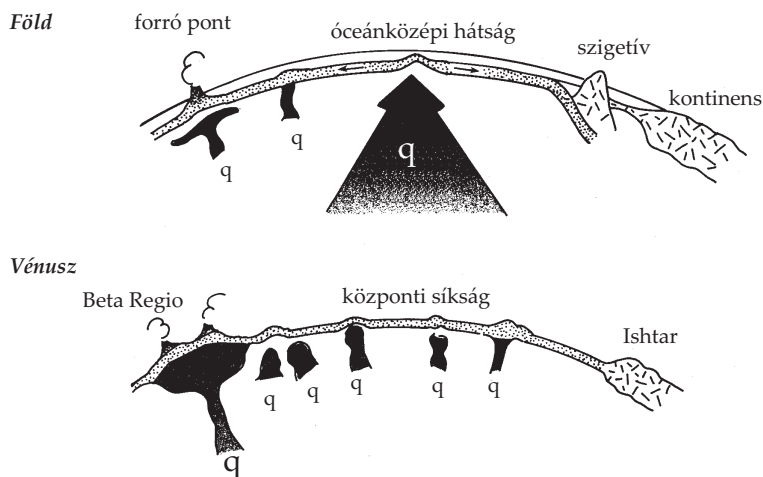
A Vénuszon semmi nyomát nem látjuk egy második púpnak (12. *ábra*). Azt jelenti-e ez, hogy a Vénuszon nincs kétféle kéreg, tehát geofizikai vonatkozásban a Vénusz nem földszerű, vagy a 65%-ot kitevő vulkáni síkságnál nem látjuk, hogy mi van a „tengeraljzaton”? A Vénusz hipszogramja olyan, mint amilyen a Földé lenne, ha azt a kontinens + tengerfelszínre szerkesztenénk meg, és nem a kontinens + tengeraljzatra.

A Vénusz hipszogramja szimmetrikus, és hasonlít a Föld óceáni kérgének magassági eloszlásához abban az értelemben, hogy az óceáni aljzaton forró foltok és fenékhegyek sokasága helyezkedik el. Vagyis mintha a Vénusz felszíne inkább a földi óceáni kéreghez hasonlítana. Ugyanakkor tágulási centrumokat, vagyis tengeralatti hátságokhoz hasonlókat a földi óceáni kéreggel ellentétben nem látunk rajta.

Az Ishtar-föld viszont nagyon különleges, nagyon eltér a Vénusz-felszín többi részétől a plató és az azt körülvevő gyűrt hegyek vonatkozásában is (4. *ábra*). Ez a terület inkább kontinens jellegű. Tehát a Földdel ellentétben, ahol az óceáni és a kontinentális kéreg részaránya nagyjából azonos (ennek eredménye a két púp a hipszogramon), addig a Vénuszon egy, a felszín nagy részét uraló „óceáni” kéreg van, és egy elhanyagolható részarányt képviselő „kontinentális” kéregdarab? Mindenesetre a helyes válaszhoz a felszíni alakzatok részletes tanulmányozását kellene nagyobb térbeli felbontású radarfelvételeken elvégezni.

Becsapódásos kráterek, kormeghatározás: katasztrofális vulkáni elöntési modell

Ugyancsak a Magellan képei alapján bizonyosodhattak meg a kutatók arról, hogy a Vénuszon a becsapódásos kráterek száma nagyon kicsi, körülbelül 1000, és az eloszlásuk az egész felszínen egyenletes. A kis szám arra utal, hogy a felszín nagyon fiatal, nem lehet öregebb 500–800 millió évesnél. Az egyenletes eloszlás pedig arra utal, hogy amit ma a felszínen látunk, az egy időben jött létre, vagyis, hogy az egész felszín azonos korú. Tehát nincsenek öregebb és fiatalabb felszíndarabok, mint például a Holdon. Ez szintén nagy döbbenetet váltott ki. Hogyan lehetséges ez? A geofizikusok McKenzie javaslata nyomán úgy képzelik, hogy a Vénuszon az egész kéreg egyszerre „fordult be”, és a belsejéből egyszerre kiáramló és a mindenhova szétömlő, forró, híg vulkáni anyag elborította a felszínt, eltakart minden előző képződményt. Ezt a szétömlő vulkáni anyagot azonosították a Venyera szondák a leszállási helyeken toleites bazaltként, és ez alkotja a hullámos síkságot. De hogyan tud a felszín így egyszerre „befordulni”?



13. ábra. A belső hő (q) kijutásának módja különböző a Földön és a Vénuszon. A tengeralatti hátságok menti vulkanizmus miatt a hő nem halmozódik fel a Föld esetében – ellentétben a Vénusszal, ahol epizodikus katasztrofális vulkáni előtételek formájában vezetődik ki a bolygó belsejéből.

Úgy gondolják, hogy a Földdel ellentétben – ahol főleg a tengeralatti hátságok repedései mentén a vulkanizmus révén a lemeztektonika folyamatosan szállítja a hőt a Föld belsejéből kifelé – a Vénuszon csak kevés forró folt felett kialakult óriási vulkán juttatja ki a hőt a belsejéből (13. ábra). A hő a bolygó belsejében így felhalmozódik, és amikor már a Vénusz belseje nagyon forró, és a kéreg elvékonyodik az alatta lévő forró anyagtól (termális erózió), egyszerűen felszínre tör az alatta lévő olvadt anyag elborítva az egész kérget, amely hidegebb és sűrűbb léven le-süllyed. Ez történhetett legutóbb körülbelül 800 millió évvel ezelőtt.

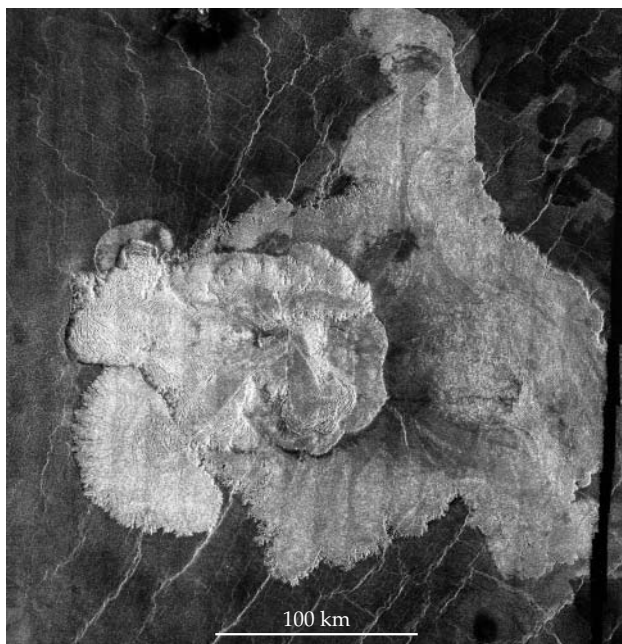
A Föld típusú bolygókon a vulkanizmus térbeli és időbeli eloszlása a fő forrás ahhoz, hogy megértsük geodinamikai fejlődésük történetét. Ezért a kutatók a Vénuszról készített korábbi radarképek alapján a vulkáni kiömlési területek eloszlásának vizsgálatába kezdtek ennek a katasztrofális felszín-újraképzési modellnek a bizonyítása céljából. A felszín 21%-át sikerült átvizsgálni. Ez a 21% a Vénusz felszínének két egymástól független részét képviselte. Mindegyik részen a legnagyobb kiömlési területek a felszín nagyon nagy részére terültek ki (59%, illetve 64%), és az ezeket alkotó vulkáni anyag a területen a kiömlött összes vulkáni anyagnak a 90%-át képviselte. Ez a két nagy vulkáni kiömlés egy még korábbi, öregebb vulkáni területen található. A többi 841 vulkáni kiömlési nyom fiatal-

labb is, és az összes kiömlött anyagmennyiségnek csak 6%-a. Ráadásul nem új helyre, hanem ennek a két nagy vulkáni területnek a tetejére ömölt ki. Érdekes példát mutat erre a 14. ábra.

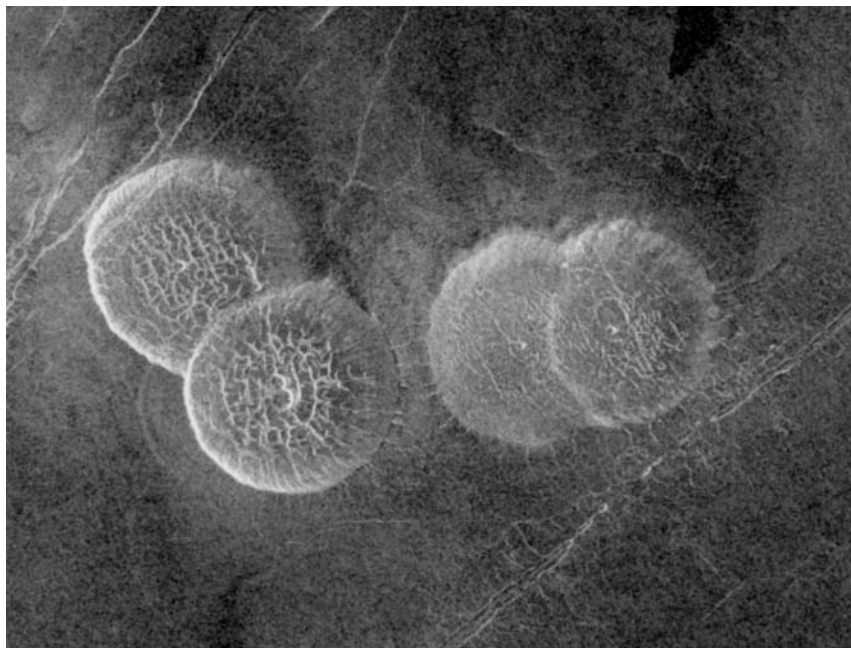
A talált eloszlás összeegyeztethetetlen egy egyensúlyi felszín-újraképzési modellel, és inkább a katasztrófa-modellel támasztja alá. A 841 vulkáni kiömlés lávamennyisége és elhelyezkedése azt jelzi, hogy a katasztrófális fázist a vulkanizmus lecsengése követte, amikor az aktivitás csak vulkáni centrumokra korlátozódott. A Vénuszon a fő vulkáni aktivitás nem köthető a jelenleg is látható aktivitási centrumokhoz, mert a vulkáni síkságok takarják ezeket a centrumokat.

Vagyis a Vénusz a hőt időszakos globális szubdukciós eseményeken keresztül veszíti el, amelyek a felszín hirtelen, katasztrófaszerű újraképzéséhez vezetnek. A vulkáni tevékenység ma a Beta, Atla, Themis (BAT) régióban koncentrálódik (3. ábra).

A Magellan radarképein látható *palacsinta-vulkánok* (15. ábra) sűrű, nagy viszkozitású, riolit szerű láva kiömlésével keletkeztek, ami egy egykori



14. ábra. A Vénusz felszínét a katasztrófális felszín-újraképződések idején elborító híg bazaltlávából álló síkságra (sötét, párhuzamos redőkkel szabdaltságot) később kiömlött sűrű vulkáni anyag.

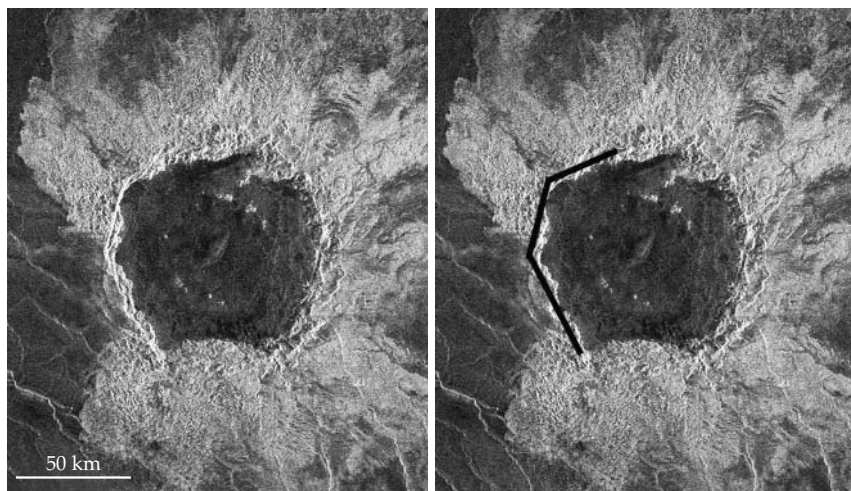


15. ábra. Lávadóмок (palacinta-vulkánok) a Vénuszon. A sűrű, nagy viszkozitású láva itt is a híg bazalttal elöntött síkságra tolul ki.

sziklás kéreg jelenlétére utal. Ilyen sziklás maradványok azonosítása lehetőséget adna arra, hogy belelássunk a Vénusz-felszín katasztrofális előntése előtti történetébe. Ezért is érdekes lesz a VIRTIS/VEx globális térképe az egész felszínre, mert azon esetleg lehet majd gránit felszínarabokat találni.

Az asztrák kialakulási időtartama

A krátorszámlálások alapján bizonytalannak ítélt kormeghatározás pontosítására vizsgálatot indítottak a kutatók a Magellan-szonda képein található asztrák felhasználásával. Az asztrák alapján is meg lehet állapítani a relatív kort hasonló módon, ahogy a becsapódásos kráterek alapján szokták. Repedéseik ugyanis néha átfutnak másfajta felszínformán is, vagy éppen folytatódnak más felszínformák túlsó oldalán. Vagyis látható, hogy egyes asztrák már a korai időszakban kezdtek kialakulni, formáló mechanizmusuk tehát már működött a jelen felszín legöregebb korától



16. ábra. Egyenes oldalú becsapódásos kráter a Vénuszon.

végig, mind a legújabb időkig. Ez az időszak pedig hosszabb, mint a Földön a forró pontokat tápláló köpenycsávák, de rövidebb, mint a Marson az Olympus Mons tápláló köpenycsáva élettartama.

A poligoniális becsapódásos kráterek egyenes szakaszai: a Vénusz-felszín „gyengeségi zónái”

A becsapódást elviselő test becsapódások előtti inhomogenitásai erősen befolyásolják a létrejövő kráter alakját, és emiatt a kráter körvonalában sokszor a körív helyett egyenes szegmensek láthatók (16. ábra). A Vénuszon a 12 km-nél nagyobb 550 kráter vizsgálatába kezdtek a kutatók ilyen sokszögletű krátereket keresve. 121-et találtak, ami a kráterek 22%-a. A kráterek peremének egyenes szakasza gyakran párhuzamos a környező tektonikai struktúrák irányával, főként a közeli tesszerák, koronák struktúrájával. Vagyis a kráterek egyenes szegmensei egyértelműen jelzik a kéregnek a becsapódást megelőző tektonikai szerkezetét, vagyis a gyengeségi zónák eloszlását és orientációját. Ilyen módon tehát feltérképezhető a bolygó.

Geológiaiilag aktív-e jelenleg a Vénusz?

A VIRTIS a déli félgömböt vizsgálta végig az 1,02 m-es légköri ablakon, amelyen 12%-ot is elérő változásokat talált. A VIRTIS spektrométer méréseit összevetve Magellan radarképeivel érdekes eredményt kaptak. A Magellan-

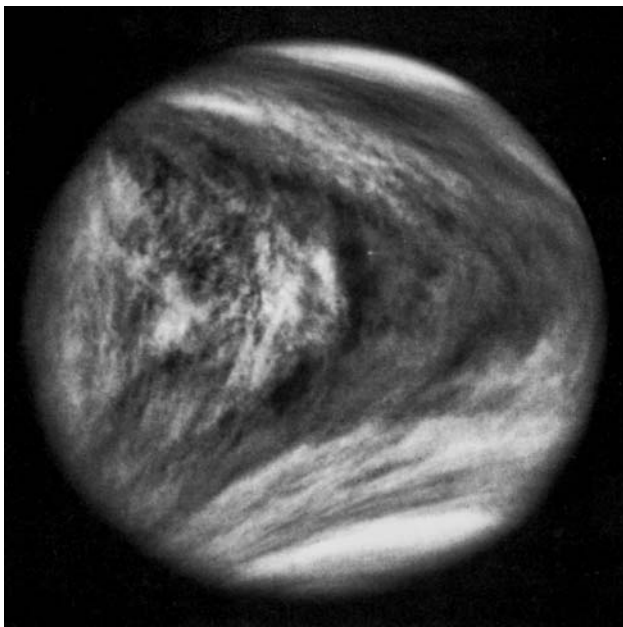
szonda térképein 9, a hawaii forró ponthoz hasonló területet vizsgáltak meg a Vénuszon, ahol nagy topográfiai kiemelkedések és nagy gravitációs anomáliák vannak. Ezek együtt arra utalnak, hogy a mélyben köpenycsávák vannak alattuk, tehát forró pontok lehetnek. A VIRTIS által mért hőtérképet három forró pont esetében rávetítve a Magellan-szonda térképére kimutatták, hogy éppen ezeken a helyeken erősebb a hősugárzás a környezetnél (17. ábra, lásd a színes melléklet V. oldalán). A lávafolyások itt nem idősebbek, mint 250 millió év, de lehet, hogy még fiatalabbak is. Ez arra utal, hogy a Vénusz geológiai értelemben ma is aktív.

A Vénusz légköre

A Vénusz a Földdel ellentétes (retrográd) irányban és lassan forog, a forgástengely hajlása csak 2° . Nagy tömegű légköre és sűrű, átlátszatlan felhőzete van. A Vénusznak és a Földnek körülbelül ugyanannyi szén-dioxidja van. Míg a Földön a CO_2 zöme mészkőbe zárva a kéregben van, a légkörben csak nyomokban van jelen, addig a Vénusznál a CO_2 a légkörben gáz állapotban található. Az összes légköri gáznak körülbelül a 96%-át teszi ki, és a következő leggyakoribb alkotóelem, a nitrogén, csak 3,4%. A nagy CO_2 -tartalom miatt a Vénuszon a felszíni légsűrűség 92-szerese a földinek, és a felszín közelében szuperkritikus viselkedésű, vagyis nem gázként, hanem folyadékként viselkedik. Ez magyarázza a becsapódásos krátereket körülvevő törmeléalakzatok virágsziromszerű formáját (18. ábra). A légkör jóformán semmiféle sugárzást nem enged át 1 mm alatt, kivéve néhány keskeny infravörös sávot.



18. ábra. Tipikus közepes méretű becsapódásos kráter. A sűrű légkörben a súrlódástól felizzó test külső részeinek robbanásszerű leválása légköri lökéshullámot kelt. Ennek energiája szétmorzsolja a talajt (a finom, szemcsés anyagra a radarképen levő sötét terület utal a kráter törmelékterítője körül), mint ahogy a Földön az 1908-as Tunguz-bechapódáskor a lökéshullám körben ledöntötte a fákat. A virágsziromszerű törmelékterítő a kritikusnál nagyobb nyomású légkör folyadékszerű viselkedése miatt alakul ki. A törmelékterítő aszimmetriája pedig azt mutatja, hogy a becsapódó test ferdén érkezett, és útján a légkörben erős, turbulens áramlást keltett. Ez akadályozta meg, hogy a törmelék minden irányban egyenletesen szétterüljön.



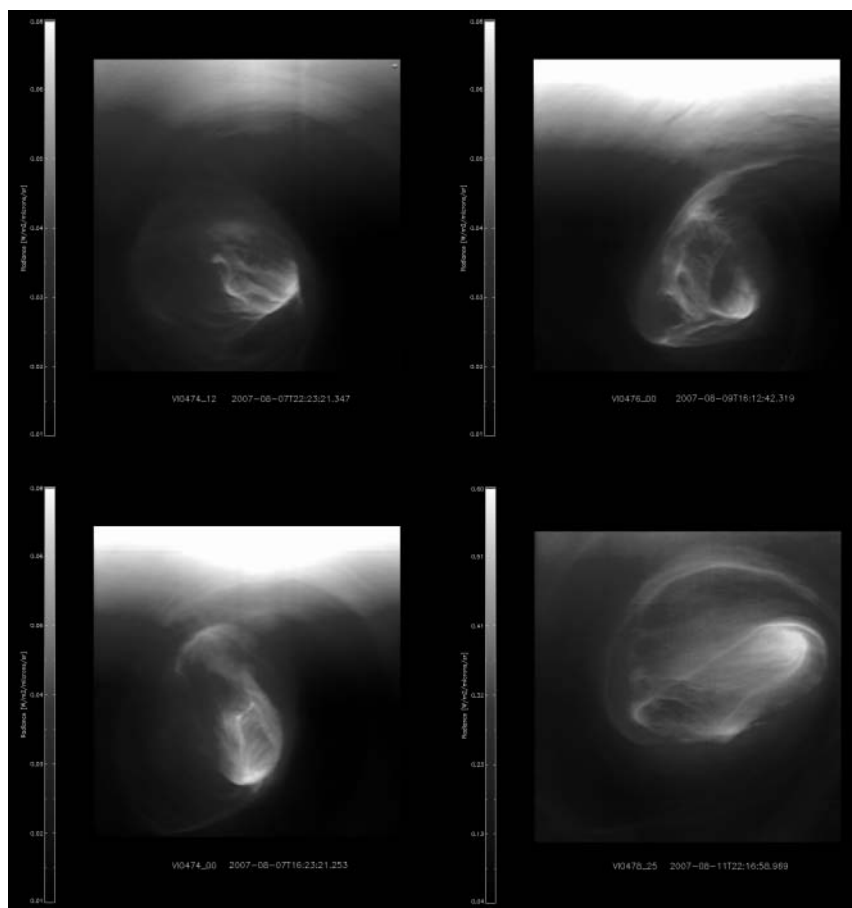
19. ábra. Az ultraibolya hullámhosszon készített felvételen a Vénusz felhőzete ragyogóan kirajzolja az egyenlítőre szimmetrikus légköri áramlásokat. A balról sütő Nap hatására a szubszoláris pont környékén a légkör konvektív, amely 60° szélességek környékén átmegy egy simább, sávós áramlásba. Ez a Vénusz lassú forgása miatt az éjszakai oldal felé egyre kisebb szélességekre terjed ki (Y-alak a felhőzetben), majd átadja helyét a fényes poláris gallérnak, amely körbezárja a poláris örvényt (a képen nem látszik).

A Vénusz felhőzete

A Vénuszt vastag, zárt felhőzet borítja, amit kénsav, kénessav, kevés szén-dioxid és valamiféle ismeretlen aeroszol alkot. Ezt az ultraibolyában abszorbeáló aeroszolt mind a mai napig nem sikerült azonosítani. Látható fényben a felhőzet semmiféle szerkezetet nem mutat, de ultraibolyában jellegzetes Y alakzatúnak látszik (19. ábra), amelynél a felhőzet $60\text{--}70^\circ$ szélességek környékén egy fényes poláris gallérban szinte feltorlódik. A galléron belül a sűrű, magas felhőzet nagyon alacsony hőmérsékletű, a közepes szélességeken lévő felhőzetnél mintegy 30 fokkal hidegebb. Ez a poláris gallér tulajdonképpen a hideg levegőnek egy széles és sekély légfolyama, amelyet az egyenlítőtől a pólus felé tartó áramlás táplál, és a gallér az áramlás pólusközel határát jelzi.

A sűrű felhőzet 40–60 km magasságok között helyezkedik el, óriási változékonyságot mutat, és a különféle rétegekben sokféle meteorológiai jelenség zajlik. A felhőtető kis és közepes szélességeken stabilan 70–72 km-en helyezkedik el, és gyors, retrográd mozgásban van (szuperrotáció).

A gallér körbezár egy örvényt (20. ábra), amely a hideg galléron belül egy magas szélességen elhelyezkedő cirkulációs cella lehet, és a földi téli-



20. ábra. A Venus Express infravörös felvételei a Vénusz déli poláris örvényéről időben nagyon változó formákat mutatnak.

félgömbi áramlási rendszerre hasonlíthat. Ez a *déli poláris örvény* egy gyors leáramlási hely, két központú (dipól), az átmérője néhány ezer km. A déli poláris örvény és gallér hasonló az északihoz, a kettő egymás tükörképe. A déli is azonos irányba forog, mint a szilárd bolygótest, és mint a szuperrotáló légkör.

A Pioneer Venus Orbiter 1979-ben 72 megfigyelési nap alatt végrehajtott infravörös sugárzásmérése alapján az északi örvény forgása 2,79–3,21 nap között változott. A forgási periódusban egy 40 napos oszcilláció látszott, és egy 10%-os csökkenés is kimutatható volt, ami még hosszabb periódusú oszcillációra utal. A déli örvény 2,5–2,8 földi nap periódussal forog körbe (átlagosan 2,48 nap alatt), vagyis kicsit gyorsabban, mint az északi tette a Pioneer Venus repülése idején. Középpontja gyakran 3°-ra is kitolódik a déli pólusról (20. ábra), ilyenkor 5–10 nap alatt körbejárja, „körbeprecesszálja” a pólust. A mintázat sokkal bonyolultabb annál, minthogy egy egyszerű forgással magyarázni lehetne. Lehetséges, hogy a különbség a két póluson elhelyezkedő örvény viselkedése között hemiszfrikus, de lehet, hogy csak az időbeli változás eredménye.

A hőmérséklet sokkal magasabb a poláris örvényben (250 K), mint a gallérban (210 K). A felhőtető magassága is különböző a poláris gallér és a poláris örvény esetében. A gallérnál 70–72 km magasban van a felhőtető, az örvénynél 64 km-en. Vagyis a poláris örvényben, a felhőtetőben egy depresszió, egy bemélyedés van. A mostani párhuzamos mérések ultraibolyában és infravörösben – amelyek különböző magasságú légköri rétegekre vonatkoznak – azt mutatják, hogy az örvény szerkezete és a cirkuláció legalább 50–55 km mélységig, vagyis az alsó felhőtetőig követhető, de a dipól megjelenése csak a felhőtető régióra korlátozódik.

A szélességet az örvényben a 75° szélességen 45–50 km-en 50 m/s-nak, de 60 km-en 35 m/s-nak mérték. 80° szélesség felett azonban már nem volt különbség, mindkét magasságban a struktúrák azonos sebességgel mozogtak.

A Vénusz-légkör hőmérséklete

A Vénusz felszínén a hőmérséklet 500 °C. Mivel a Vénusz forgástengelye csaknem merőlegesen áll a bolygó pályájára, ezért a Vénuszon nincsenek szezonális változások. A légkör gyors forgása miatt a nappal és az éjszaka között sincs hőmérséklet-különbség, vagyis a hőmérséklet a felszínen majdnem mindenütt ugyanolyan. A hőmérséklet a magassággal csökken. A felhőtetőnél a hőmérsékletben napról napra van változás, és itt már van nappal-éjszaka különbség is.

A leghidegebb légköri réteg 60 fokos szélességek és 100 km magasság felett van, amit *krioszféra*nak is neveznek. Ugyanakkor meglepő, hogy a termoszférában az éjszakai oldalon hőmérsékleti inverzió vagyis egy meleg réteg van a szoláris-antiszoláris termoszféra-áramlás következtében; ennek létére korábban nem számítottak.

Szél a Vénuszon

A kis hőmérséklet-különbségek következtében a felszínen a szelek nagyon gyengék, és gyenge a légköri erózió is. A szél erőssége a magassággal nő, és a felhőtető magasságában a legerősebb, ahol a légkör már 4 nap alatt körbefutja a 243 nap alatt megforduló bolygót (a földi 1,3-szoros szuperrotációval szemben a Vénuszé 61-szeres). Még mindig magyarázatra vár, hogy mi gyorsítja fel ennyire a légkört.

A különböző magasságokban a szélesebbésmérés a felhőzet különböző kontraszt-alakzatainak a nyomon követésével történt ultraibolya, illetve a felső párárétegen is áthatoló 1,74 és 5,05 m-es infravörös hullámhosszakon.

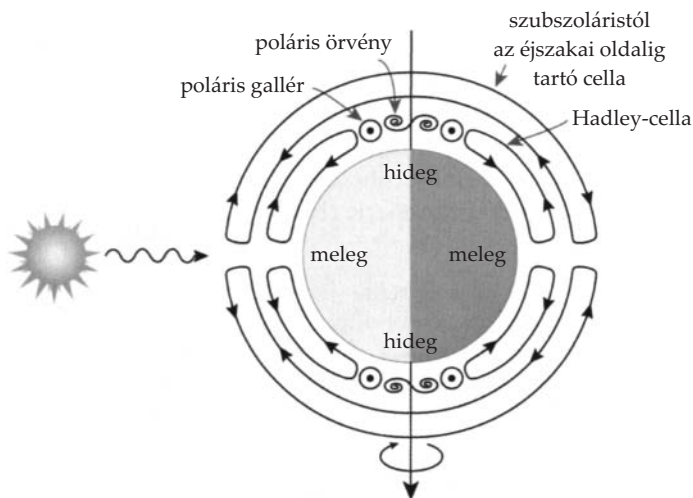
Az 50° szélesség környéke két szempontból is elég éles határt képvisel a szélnyírásban. Egyrészt azonos magasságban nézve a felhőtetőnél (70 km-en) az ultraibolya-mérések szerint 50° szélesség alatt 100 m/s a szélesebbé, de felette gyorsan csökken a pólus felé. Másrészt 50 km magasságban nézve erős, 3 m/s/km függőleges szélnyírást mértek az éjszakai oldalon 50° szélesség alatt, de felette nem volt szélnyírás.

A szélmérések durván megfelelnek annak, amit a modellek alapján várnak egy ilyen lassan forgó bolygónál, ahol – a gyorsan forgó Földdel és Marssal ellentétben – nem a Coriolis-erő dominál.

A Vénusz légkörének általános áramlási rendszere

Mivel nincsenek szezonális változások, a Vénuszon az áramlási rendszer nincs olyan nagy, éves átrendeződésnek kitéve, mint a Földön. Emiatt a galléron belül nagyobb, állandóbb poláris örvények épülhetnek fel, mint a Földön a téli félgömbön szokott.

A Vénusz-légkör meteorológiáját is – mint minden Föld típusú bolygót – a Naptól kapott hőszugárzás vezérli. A Vénuszon a sűrű, átlátszatlan felhőzet miatt a Nap fényének nagy része visszaverődik, a felszínig csak néhány százaléka jut le, a többi a légkörben nyelődik el. Az elnyelődés helyén, a szubszoláris pontban, vagyis az egyenlítő környékén a levegő felmelegszik, felszáll, és helyére nagyobb szélességekről áramlik vissza a levegő, mint ahogy a többi Föld típusú bolygónál is. Ezt az egyenlítő és a magasabb szélességek között folyó meridionális áramlást nevezik *Had-*



21. ábra. A Vénusz légkörének áramlási rendszere.

ley-cellának. A Földdel ellentétben azonban a Vénusz esetében a lassú forgás miatt a Coriolis-erő a Hadley-cella áramlását csak sokkal nagyobb szélességen, 60° környékén tudja a meridionális áramlástól zonális irányba eltéríteni, ezért a Hadley-cella a földihez képest a pólusokhoz közelebb hatol. Az egyenlítőtől a pólus felé 60–65 km magasságban halad 60° -ig, ahol a leáramlás van. Valószínűleg a megosztott fűtés következtében a magasság szerint két áramlási cella alakul ki mindkét félgömbön, az egyik a felszíni elnyelés miatt a felhők alatt, a másik a légköri elnyelés miatt a felhők felett (21. ábra). A pólus felé az áramlás sebessége a CO és más nyomjelzők vizsgálatával 65 km magasság felett 0,2 m/s-nak adódott, a visszatérési idő körülbelül 300 nap.

A szubszoláris pont környékén, a felszínen elnyelődött sugárzás következtében a légkör alsó részén szélesség szerint három réteg alakul ki. Kis szélességeken egy konvektív és hullám-dominált meteorológia, amely a közepes és magas szélességeken körülbelül 60° -ig átmegy egy simább sávós áramlásba, majd ott átadja a helyét a hideg poláris gallérnak.

A szuperrotáló felhőzetet a 100 km feletti termoszférától elválasztó átmeneti tartomány a *mezoszféra*, amelynek felső határa, a mezopauza 100–120 km-en helyezkedik el. A mezoszféra felett lévő termoszférában egy a nappalitól az éjszakai oldalig tartó áramlási rendszer uralkodik

(21. ábra). Ezt az éjszakai oldalon mért magas termoszferikus hőmérséklet magyarázatára kellett feltételezni, bizonyítani pedig az 1,27 m-es spektrumvonal mérésével sikerült, amelyet az oxigénmolekulák bocsátanak ki rekombináció közben. A nappali oldalon disszociált O_2 -ből származó oxigénatomokat ugyanis a Nap ultraibolya sugárzása ionizálja, majd az ionok a „pszeudo-mágneses tér”-rel az éjszakai oldalra sodródnak. Ott – miközben az áramlási cella leszálló ágával lefelé haladnak – a nagyobb sűrűségű magasságokban semlegessé válnak, és oxigénmolekulává állnak össze. Ez az emisszió nagyon változékony ugyan, de maximuma a mezopauza magasságában az antiszoláris pont környékén található. Ezt a fűtési mechanizmust a Föld felsőlégréjében többek között mi is felfedeztük az 1980-as években a mesterséges holdak fékeződése alapján (lásd irodalom).

A Vénusz-légkör kémiai összetétele

Mint korábban már szó volt róla, a légkör fő összetevője a szén-dioxid (CO_2), és csak néhány százalék az összes többi alkotó, vagyis azokat gyakorlatilag szennyeződésnek tekinthetjük. A mezoszférában CO , SO_2 , HCl , HF , H_2O és HDO -t tartalmazó finom ködpára található, amelynek függőleges eloszlása még nem ismeretes, mert a korábbi leszálló szondák csak 60 km alatt kezdtek mérni. A legfontosabbak közülük a szén-monoxid, a kén-dioxid, a kénsav, a sósav, a vízgőz és az oxigén.

Az alsó és középső légkörben a CO eloszlásával ellentétben a többi összetevő – köztük a H_2O is – sokkal egyenletesebben oszlik el a glóbuszon, legfeljebb 10% változás mérhető. A kémiai összetétel mérésének legfontosabb eredménye, hogy a CO mennyisége a szélességgel változik.

A szén-monoxid

Miután a CO élettartama hetekben mérhető, ez kitűnő nyomjelzővé teszi az általános cirkulációs mintázat meghatározásához. A CO -t 2,3 m-en nappal, a felhők felett mérték. Szélesség vagy a hosszúság szerint nem találtak semmiféle szerkezetet. A keveredési arány 62–67 km-en 58 ppm. Az eloszlásban 90 km felett az erős növekedés arra utal, hogy a CO fő forrása a CO_2 fotolízise a termoszférában. A szén-monoxid mennyisége az egyenlítőtől a pólus felé nő, 60°-on maximális – alátámasztva, hogy valóban a 60° szélesség lehet a Hadley-cella felső határa. A pólus felé szállítás sebessége 0,2 m/s-nak adódott, tehát az egyenlítőtől néhány hét alatt eljut a 60. szélességi fok közelébe a hideg gallér külső széléig. Ezután a Hadley-cella áramlásával lefelé süllyed a felhők alá, majd tovább, a felszín felé áramlik le.

A kén, kén-dioxid és kénsav

A kén a vulkánok juttatják a légkörbe. A H_2O bontásával szabadabbá váló oxigénnel alkot kén-dioxidot, és vízzel kénsavat vagy kénessavat. A H_2O kis előfordulási gyakorisága miatt a kénsav cseppecskéi uralkodnak a felhőket.

A Földön is keletkezik természetes úton kénsavfelhő 20–25 km-es magasságban a vulkánokból kidobott kén-dioxidból és vízgőzből. A földi légkörben egy-egy vulkánkitörés utáni hűlést ennek tulajdonítják, és már az is felmerült, hogy a globális felmelegedés kompenzálására kén-dioxidot juttassanak a levegőbe.

Az SO_2 mennyisége a Vénuszon a szélességgel csökken, és már néhány óra alatt is nagyon változik. A mérések szerint most több van, mint ahogy azt korábban mérték. Ez esetleg cáfolja azt az állítást, amit az 1980–90-es évek mérései alapján mondtak, hogy hosszú távon csökken a mennyisége, tehát az 1980-as éveket megelőzően vulkáni kiömlés lehetett a Vénuszon. A mostani mérések szerint 2007 elején is volt egy hirtelen növekedés, amelyet egy konvektív esemény – talán szintén vulkáni kiömlés – válthatott ki.

A sósav

A mostani mérések a HCl -t kevesebbnek találták, mint 40 évvel ezelőtt. A Földről 3,44 m-en végrehajtott infravörösmérésekből azt találták, hogy 70 km magasság környékén a HCl egyenletesen eloszlott az egész Vénusz-légkörben.

Vízgőz

A vízgőz fontos nyomgáz az alsólégkörben, fontos üvegházgáz is, és az SO_2 -vel kénsavat alkot. A Venyera-mérések 50 km-en 200 ppm-et, a felszínen 20 ppm-et adtak. 10–20 km-en a minimális mennyiség 30 ppm volt. A mostani mérések szerint a legnagyobb a H_2O előfordulási gyakorisága 47 km-en a felhőbázis alatt, efelett lecsökken a mennyisége. A felsőlégkörben a H_2O keveredési aránya csak 1–4 ppm, és nagyon változó.

Az oxigén a felsőlégkörben

A molekuláris oxigént az éjszakai oldalon mérték. Az emisszió 95 és 110 km magasságról érkezett, a csúcsa 96 km-nél volt. Ez megfelel annak a feltételezett mechanizmusnak, hogy a nappali oldalon bontott oxigént a szubszoláris-antiszoláris áramlás szállítja át az éjszakai oldalra, ahol újra molekulává áll össze.

A kén-dioxid-mérések modellezésénél 80° szélesség felett olyan eltéréseket találtak, amit a felhők felett található O_3 gáz abszorbeáló hatásával lehetne megmagyarázni. Érdekes lenne, ha az ózon léte beigazolódna.

Vízvesztés a Vénuszon

A D/H mérés a szökési mechanizmusokra mutat rá. A felsőlégkörben nemcsak a H_2O -ban, hanem a DHO tartalomban is nagy változékonyságot találtak. Mérték a mezoszférában is az eloszlásokat, és a $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ arányban az alsólégkörinél 2,5-szer többnek adódott. Általános H_2O csökkenést tapasztaltak 80–90 km felett, amire nem találtak magyarázatot.

A korábbi mérésekből a D/H a földi érték 150-szerese, ez erős légkörvesztésre utal. A mostani mérések szerint a D/H 200-szorosa, de akár 300-szorosa is lehet a földinek. Ma a termális szökés ugyan kicsi, de a hidrogén el tud szökni, tehát ma is veszít vizet a Vénusz.

Az űrkutatás történetében először történt, hogy az elszökő ionok összetételét is mérték (ASPERA-4; Analyser of Space Plasmas and Energetic Atoms 4). Azt találták, hogy a H^+ után a fő elszökő ion az O^+ (a He^+ -nél is nagy fluxust mértek). Ez azt jelenti, hogy a víz szökik – miután felbomlott hidrogénre és oxigénre, és ionizálódott. A vízvesztés gyorsabb a Vénusznál, mint a Földnél, nem elsősorban azért, mert közelebb van a Naphoz, hanem mert a vízgőz a Vénusz meleg légkörében nem fagy ki, és nem hull vissza. Nincsenek ugyanis hideg helyek a bolygón, ahova le tudna csapódni a víz. Ennek egyrészt az az oka, hogy nincsenek szezonális változások, másrészt az, hogy a Nap hőjét a lassú forgás miatt a nagy szélességig felhatoló Hadley-cella gyorsan a magas szélességekre szállítja. A légkörben lévő H_2O így előbb-utóbb felszáll, ahol eléri az ultraibolya sugárzás, és bontja. A hidrogén – mint legkönnyebb elem – felkerül a legfelső rétegbe, a hidrogénkoronába, és ionizálódva a napszél magával ragadja, mert a földivel ellentétben a Vénusz-légkör nem élvezheti a belső eredetű mágneses tér védő hatását. A Földön ellenben a hidegcsapda miatt még az ózonréteg magassága alatt ki-fagy a vízgőz, mielőtt az ultraibolya sugárzás elérné, és el tudná bontani.

Villámok a Vénusz légkörében

Már a felszínre leszálló Venyera-szondák is regisztráltak elektromágneses kitöréseket, amelyeket villámoknak tulajdonítottak. Később sokat vitatkoztak rajta, hogy ezeket a zajokat valóban villámok válthatták-e ki. Most a Vénusz Express szonda megerősítette, hogy a Vénuszon valóban keletkeznek villámok. Magnetométere ugyanis a pólus környékén, 73° szélességen a pericentrum közelében járva a vonulások felében regisztrált whistler típusú elektromágneses hullámokat a bolygó hajnali és esti oldalán. Ilyeneket a Földön villámok váltanak ki. A mérések arra utalnak, hogy a Vénuszon a villámkeletkezés gyakorisága fele lehet a földinek, de elérheti akár a földi gyakoriságot is, ha figyelembe vesszük, hogy a Földön ilyen hajnali és esti helyi időkből van a legkevesebb whistler.

A Vénusz ionoszférája

A Nap erős ultraibolya sugárzása a fotoionizáción keresztül sűrű ionoszférát hoz létre a bolygó nappali oldalán. A Marshoz hasonlóan a Vénuszon az O és a CO₂ ionizálódik (míg a Földnél az O és az N₂, a Titanon meg az N₂). A Nap ultraibolya sugárzásának és a napszélnek a változása miatt állandóan és erősen változik a plazma struktúrája és összetétele. Ha az ionoszférikus fotoelektronok energiáját elég jó felbontással sikerül majd mérni, akkor meg lehet pontosan mondani, hogy a nappali oldalról milyen forrásból származnak.

A pericentrum magasságáig in situ, az alatt rádióokkultációs mérésekkel lehet vizsgálni az ionoszférát. Eszerint az ionoszféra alja stabilan 120 km-en, az elektronsűrűség csúcsa pedig 140 km-en van 4 · 10⁵/cm³ körüli elektronsűrűséggel. A felső ionoszféra viszont nagyon változékony. Az elektron-hőmérséklet napról napra változott.

Mágneses mérések a Vénusz környezetében

A Venus Express magnetométere (MAG) 2006 nyarán 147 lökésfront-metszést regisztrált a terminátor környékén. Ezek alapján azt találták, hogy a 2006–2009 közötti méréssorozat idején, naptevékenységi minimumban 1600 km-rel közelebb volt a lökésfront (2,4 helyett most 2,14 Vénusz-sugár), mint a Pioneer Venus repülése idején 1979-ben, naptevékenységi maximum idején, de azért messzebb volt, mint a Venyera-9 és -10 repülése idején, 1975-ben. A legjobb közelítés ezekből a mérésekből a lökésfront távolságára a Nap felőli oldalon 1,32 Vénusz-sugár, vagyis 1900 km a felszín felett (a Földnél 10–15 földugár, vagyis 60 000–100 000 km).

A Vénusz ionoszférájának kölcsönhatása a napszéllel

A belső eredetű mágneses tér hiánya miatt a napszél közvetlenül a légkörrel hat kölcsön. Emiatt a Vénusznál a földitől eltérő eloszlásokat és energiákat lehet mérni mind az ionokra, mind az elektronokra, mind a nagyenergiájú semleges atomokra.

Ha saját mágneses tér nincs is, keletkezik azonban indukált tér, amely úgy viselkedik, mint egy akadály, és ezzel védi a légkört. A napszél nem jut be a légkörbe még naptevékenységi minimum idején sem. De hogy ez a leárnýékolás mennyire hatásos, az az eddigi mérésekből még nem világos. A 2010 utáni mérésekből talán többet lehet majd mondani, amikor közelebb (165 km-re) kerül a pericentrum a bolygóhoz.

A nappali oldalon a napszél mágneses tere feltorlódik, és az ionoszférába behatol, besodródik. A mágneses tér beburkolja a nappali oldal mentén a bolygót, és átkarolja az éjszakai oldalon is – egy közel teljes tóruszt

formálva („pszeudo-magnetoszféra”). Ez a görbült mágneses tér az éjszakai oldalon gyorsítani tudja a plazmát, ami a légkör legkülső rétegének – így elsősorban a hidrogén, vagyis a víz – vesztéséhez járul hozzá. A szökés a plazmalepelen (plasma sheet) keresztül történik, vagyis a plazmalepel ugyanúgy a szökést segíti elő, mint a Földnél a poláris tölcser, ahol poláris szélként távozik sok ion a földi légkörből.

Hogy milyen mélyen sodródnak be a napszél mágneses erővonalai az ionoszférába – vagyis, hogy mennyire mágnesezett lesz az ionoszféra –, az függ a napszél és az ionoszféra állapotától is. A Vénusz ionoszférájának emiatt kétféle állapota van, naptevékenységi minimumkor sokkal gyakrabban mágnesesződik, mint naptevékenységi maximumkor – azért, mert minimum idején az ionoszféra kevésbé sűrű – a Nap gyengébb ultraibolya sugárzása miatt. Az ionoszféra különbözően mágnesezett állapota befolyásolja a vezetőképességet, az áramokat és az elektronok és ionok szökését.

További tervek a Vénusz-kutatásban

A japán JAXA a Venus Climate Orbitert (ami az Akatsuki, illetve a PLANET-C nevet is kapta) 2010. március 21-én bocsátotta fel. A szonda ultraibolyában és infravörösben működő 5 különböző kamerájának segítségével a Venus Express-szel közös kutatásként a meteorológiát és a szuperrotációt tanulmányozza majd a felhők és a nyomjelzők eloszlásának vizsgálatán keresztül. 2010. december 18-án ért a Vénuszhoz, de sajnos ekkor nem tudott Vénusz körüli pályára állni. (Amikor 2–3 év múlva legközelebb újra a Vénusz közelébe kerül, újra megpróbálják ezt a manővert – talán nagyobb sikerrel.)

Távolabbi tervek között a légkörben lebegő léggömb és egy páros leszálló egység (VME, Venus Mobile Explorer) is szerepel, amelyeknek legalább 5 óra hosszáig mérőképesnek kellene maradniuk a felszínen, hogy a tervezett felszínkémiai méréseket elvégezhessek. Az eddigi csúcstartó a felszínen az 1981. október 30-án leereszkedett Venyera-13, amely 127 percig maradt működésképes.

Befejezés

A Venus Express után a Vénusz légköre már kevésbé misztikus, jobban megfelel az elméleti modelleknek, tehát jobban értjük, mint ahogy az űrkutatás kezdetén láttuk. Azt nem mondhatjuk, hogy a Vénusz olyan, mint a Föld –

ahogy azt régen várták –, de esetleg kijelenthetjük, hogy közvetlenül a bolygóösszeállás után az ősi Vénusz valóban olyan lehetett, mint az ősi Föld.

Most már értjük, hogy a légkörük fejlődése azért lett ennyire különböző, mert a Vénusz elveszítette a vizét, a Föld meg nem. Emiatt a Földön a légkörben lévő szén-dioxid az óceánokban karbonátokba tudott kötődni, ami miatt a Föld megszabadult az óriási üvegházhatás rémétől, amitől a Vénusz nem tudott. Geofizikusok azt állítják, hogy annak is a víz hiánya az oka, hogy nem tud működni a Vénuszon a lemeztektonika. Hiányzik ugyanis egy olyan réteg, amelyen a kőzetlemezek el tudnak csúszni az alattuk lévő rétegen.

A Venus Express után tehát most már több kérdésre meg lehet adni a választ, mint korábban.

Ha azt kérdezzük: miért olyan sűrű a Vénusz légköre, és miért nincs rajta lemeztektonika? A válasz: mert nincs vize.

Ha azt kérdezzük: miért nincs a Vénuszon víz? A válasz: mert nincs mágneses tere.

Ha azt kérdezzük: miért nincs mágneses tere? A válasz: mert lassan forog.

Ha azt kérdezzük: miért forog olyan lassan? A válasz: mert ????

Ezért a válaszáért, azt hiszem, a bolygóösszeállás végső fázisához, a kései nagy bombázás időszakához kell ellátogatnunk. Ahogy mondják, az óriásütéseknek – egy-egy furcsa-geometriájú ütközés révén – szerepük lehetett abban, hogy egyes bolygótesteknek nagyon extrém tulajdonságai lettek.

Összehasonlító planetológusként a 90-es évek óta foglalkoztat a kérdés, hogy forrópont-vulkanizmust sok helyen látunk a Földön kívül is, többek között a Vénuszon, de lemeztektonika miért csak a Földön van? Miért csak a Földnek van kétféle kérge? Hiszen a Vénusz akkora, mint a Föld. Milyen különleges tulajdonsága van a Földnek a többi bolygóhoz képest, amely miatt ilyen különleges a helyzete? Én két ilyen lényeges okot látok: a nagy tömegű Holdat és az erős mágneses tér létét.

Ha nagyon egyszerű lenne a lemeztektonika beindulása egy bolygón, – mint ahogy a geodinamika keretein belül a lemeztektonikát illetően már mindent nagyon szépen meg tud magyarázni a földtudomány – akkor más bolygón is látnunk kellene a lemeztektonika nyomait, legfőképp a Vénuszon. Ha pedig ez nincs így, akkor mégis csak valamilyen különleges esemény kell, hogy beindítsa azt. Az elmúlt néhány hónapban a Földdel kapcsolatban egy sor cikk került a kezembe, amelyek bizonyítják, hogy más kutatókban is megfogalmazódott e kétely. A cikkek szerzői azt állítják, hogy a lemeztektonika beindulásához az szükséges, hogy valami összetörje a kőzetburkot, ezt pedig szerintük belső erő nem tudja megtenni. Egy óriási becsapódás energiája viszont elégséges a kőzetburok széttöréséhez.

A jelenleg már elég általánosan elfogadott kései nagy bombázás koncepció szerint a bolygóösszeállítás vége felé minden bolygó elszenvedett egy vagy több ilyen óriási becsapódást. A becsapódások folyamatában pedig a véletlennek óriási szerepe volt. A Vénusz véletlenül „úgy” kaphatta a nagy ütközést, a Föld meg véletlenül „így”. A Vénusznál a becsapódó test a forgásiránnyal ellentétes irányból érkezhetett, energiája a bolygó forgásirányának a megváltoztatására fordítódott, de arra már nem volt elegendő, hogy fel is gyorsítsa ebbe az irányba, és ezért nincs a Vénusznak mágneses tere. A Föld a forgásirányban kaphatta az ütést, ami felpörgette, és ez magyarázhatja az erős mágneses terét. Lehetséges, hogy ez az ütközési esemény nemcsak Holdunk létét, de még további, eddig nem érthető különbségeket is meg tud majd magyarázni: például azt, hogy a primordiális kéreg egy részének (Föld?, Vénusz?) vagy egészének (Merkúr?) lefröccsentése után milyen lesz a bolygótest működése.

Irodalom

- Angsmann, A. et al: *Planetary and Space Science* 59, 327 (2011)
 Aittola, M. et al.: *Icarus* 205, 356 (2010)
 Bailey, J.: *Icarus* 201, 444 (2009)
 Binder, B., Keppler, H.: *Earth and Planetary Science Letters* 301, 190 (2011)
 Ge, Y. S., Russell, C. T., Khurana, K. K.: *Planetary and Space Science* 58, 1578 (2010)
 Hunten, D. H. et al. (eds.): *Venus*. The University of Arizona Press, Tucson (1983)
 Illés Erzsébet és Almár Iván: *Magyar Tudomány* 2009/3, 311 (2009)
 Iwagami, N. et al.: *Icarus* 207, 558 (2010)
 Luz, D. et al.: *Science* 332, 577 (2011)
 Marq, E. et al.: *Icarus* 211, 58 (2011)
 Romeo, I., Turcotte, D. L.: *Icarus* 203, 13 (2009)
 Rosing, M. T.: *Nature* 456, 456 (2008)
 Tsang, C. C. C. et al.: *Icarus* 201, 432 (2009)
 Sandor, B. J. et al.: *Icarus* 208, 539 (2010)
 Smrekar, S. E. et al.: *Science* 328, 605 (2010)
 Steinberger, B. et al.: *Icarus* 207, 564 (2010)
 Yamamoto, M.: *Icarus* 211, 993 (2011)
 Venus Express special issue, *Nature* 450, (2007)
 Wilson, C. F. et al.: *Icarus* 201, 814 (2009)