

A NAPRENDSZER BOLYGÓTESTJEINEK ÖSSZEÁLLÁSA: GRAVITÁCIÓS CSOMÓSODÁS

Illés Erzsébet

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutató Intézete
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 13-17
illes@konkoly.hu

A Naprendszerben a földtípusú bolygók és az óriásbolygók magjai a koronggá lapult ősi szoláris köd hideg, füstszemcse-méretű porából álltak össze. Kezdetben laza, piheszerű csomócskák raja jött létre összetapadással, ahogy a szoláris köd gázanyagának mozgásai kis sebességgel raja jött létre összetapadással, ahogy a szoláris köd gázanyagának mozgásai kis sebességgel egymáshoz csapták a szemcséket. Ezek egyre nőttek, és egyre keményebb magokká váltak a növekvő relatív sebességű ütközésekkel, ahogy a néhány gyorsan növekvő, domináns bolygócsíra perturbálta pályáikat. Nem túl nagy relatív sebesség esetén gyűjtögetés, túl nagy relatív sebesség esetén rombolás és anyagvesztés lett az ütközés eredménye. A szoláris köd forgásából örökölt Kepler-mozgás az ütközések révén hasonló értelmű forgást adott ezeknek a keletkező **planetezimáloknak**.

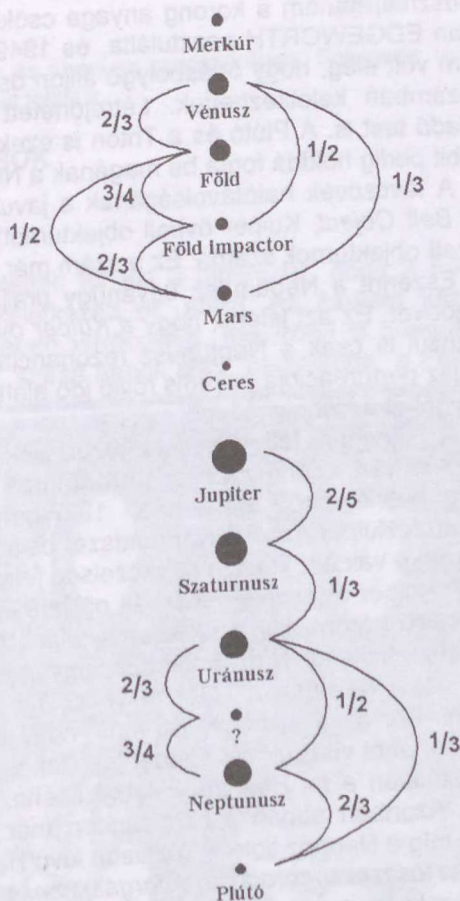
A begyulladó Nap óriási kiterjedésű légköre fékezte a benne mozgó testeket, amelyek ennek következtében egyre közelebb kerültek a Naphoz. Amikor azonban egy-egy bolygóembrió kialakult, az két-test rezonanciával valamely külső rezonáns pályán megfogta a planetezimálokat, amelyek nem tudtak tovább fékeződni. A nagyobb bolygócsírák külső rezonáns helyeiken ezért egyrészt a testek nagyobb sűrűségét biztosították az összeütközéshez, másrészt a közel azonos pályán tartás kis sebességű, lágy ütközést tett lehetővé, amivel nemcsak, hogy egy következő bolygócsíra keletkezését indították el, hanem annak gyors, megszaladó növekedését segítették elő.

Így a Vénustól és a Jupitertől elindulva gravitációs csomósodással szekvenciálisan alakultak ki a bolygók sokkal rövidebb idő alatt, mint azt korábban a gázfékezés és külső rezonancia nélküli modellek alapján gondolták. Ez a rezonáns keletkezés (1. ábra) magyarázza a Titius-Bode szabályt.

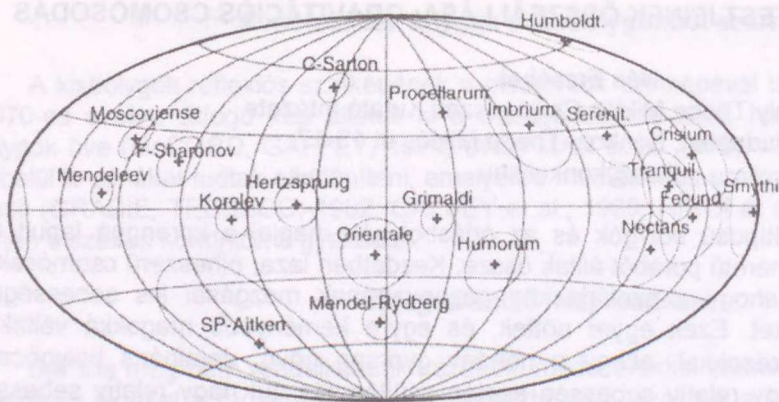
A számítógépek teljesítményének növekedése egyre realisabb kezdeti feltételekkel, egyre több pontra, a kiterjedt és gravitációs kölcsönható testek reális pályaváltozásainak figyelembevételével teszi lehetővé a bolygók összeállításának számítógépes szimulációját. Ezekből a számításokból látszik, hogy bárhogy is indítják el a szimulációs programot, mindig többszáz ősbolygó keletkezik a földtípusú bolygók és az óriásbolygók felségterületén is, amelyek az akkrécio végére pl. a Naprendszer belső vidékein mindig 4-5 bolygóvá állnak össze.

Ez azt is jelenti – és a szilárd felszínű bolygótesteken az óriás-kráterek léte ezt mutatja is (2. ábra és lásd az „Összehasonlítás a bolygórendszer tagjaival” c. cikkben a 16, 17, 18, 19. ábra) – hogy az akkrécio vége felé sok óriási becsapódás zajlott le. Ekkor már a szétforgácsolódás is fontossá vált, és a véletlen szerepe igen jelentős lehetett. A *felnövő bolygórendszer szabályos rezonáns helyzetét az utolsó 1-2 legnagyobb becsapódás esetenként nagyon megváltoztathatta*, ennek következménye például az eltérés a Titius-Bode szabálytól, és nem centrális ütközés esetén a nagy tengelyhajlás vagy lelassult/felgyorsult forgás, kéreglefröccsenés, aminek az anyagából hold állhatott össze (pl. a mi Holdunk), vagy a megmaradt anyagból nagysűrűségű bolygó (pl. Merkúr).

A szimulációk azt is mutatják, hogy az akkrécio alatt kb. tízszer annyi anyag dobódott ki a bolygórendszer területéről, mint amennyi a bolygókba összeállt. Ez egyrészt magyarázhatja a korongpopulációtól eltérő eloszlású közeli üstökös-rezervoár eloszlását, másrészt azt, hogy



1. ábra: Egy-egy növekedő bolygócsíra külső rezonáns helyeken kéttest-rezonanciával megindíthatta, és elősegíthette további bolygócsírák növekedését. Ez a rezonáns keletkezés megmagyarázhatja a bolygórendszerben észlelhető Titius-Bode szabályt.



2. ábra: A nagy medencék elhelyezkedése a Holdon. A 270° szelenografikus hosszúságra szimmetrikus térképen a jobb oldal a Hold innenső, a bal oldal a Hold túlsó felét mutatja.

mint amennyit akkor várnánk, ha a Jupiter keletkezése a mostani távolságban történt volna.

A *gázfékezéssel rezonáns kaptáció* azért is előnyös, mert lerövidíti az óriásbolygók magjának kezdeti összeállását, s a megszaladó akkréció miatt még időben létre tud jönni az a nagy tömeg, amely már lehetővé teszi, hogy ezek a bolygók gravitációsan a környező gázt is magukhoz kössék. Ezzel kapcsolatban ugyanis versenyfutás zajlott. Ha az óriásbolygók magjának gravitációs összeállása 10^7 évnél jobban elhúzódik, akkor már nincs elég gáz a környezetükben, amit magukhoz tudnának kötni, mert azt a begyulladó Nap szele addigra kifújta.

A szoláris közből belapuló korongból végül is létrejött a négy földtípusú bolygó, és a négy óriásbolygó. A korong azonban nem ért véget 40 Csillagászati Egység távolságban, vagyis a Neptunusznál, hanem a korong anyaga csökkenő felszíni sűrűséggel tovább folytatódott, ahogy ezt 1943-ban EDGEWORTH posztulálta, és 1949-től KUIPER gyakran hangoztatta. Itt a sűrűség ahhoz már nem volt elég, hogy óriásbolygó álljon össze, de néhány száz km átmérőjű planeteszimák még szép számban keletkezhettek. Létrejöhetett még néhány darab nagyobb, 1000 km-es méretet meghaladó test is. A Plútó és a Triton is ezek közé tartozhatott. Az előbbi rezonáns pályára juttatta, az utóbbit pedig holddá fogta be magának a Neptunusz.

A távcsövek hatótávolságának a javulása 1992-re tette lehetővé, hogy az első ilyen **KBO-t** (*Kuiper Belt Object*, Kuiper övbéli objektumot) felfedezzék, s ma, 10 év múlva már 400 felett van a felfedezett objektumok száma. Ez a szám már statisztikai megfontolásokat is lehetővé tesz.

Eszerint a Neptunusz ugyanúgy uralja ennek az övnek a belső részét, ahogy a Jupiter a kisbolygóövet. Ez azt jelenti, hogy a *Kuiper öv belső részének is rezonáns szerkezete van*, s hogy a KBOk közül is csak a Neptunusz rezonanciájával védett helyeken maradhat meg egy-egy test. A Neptunusz perturbációja ugyanis rövid idő alatt eltávolítja a többi testet a pályájáról, ahogy a Jupiter is a kisbolygókat a kisbolygóövből.

Az újonnan felfedezettek között sok van, amely a Plútóhoz hasonlóan a Neptunusszal rezonáns pályán kering. Ezeket **plutínóknak** nevezték el. A Kuiper övből az óriásbolygók felségterületére befelé lökött testeket az 1977-ben elsőként felfedezett Chiron mintájára **kentaurokról** nevezik el. A Kuiper övből a Naprendszer belső részébe belökött kisebb testek pedig **rövidperiódusú üstökösökké** válnak, amint a napközelség felmelegedésre és illó anyaguk kibocsátására vezet.

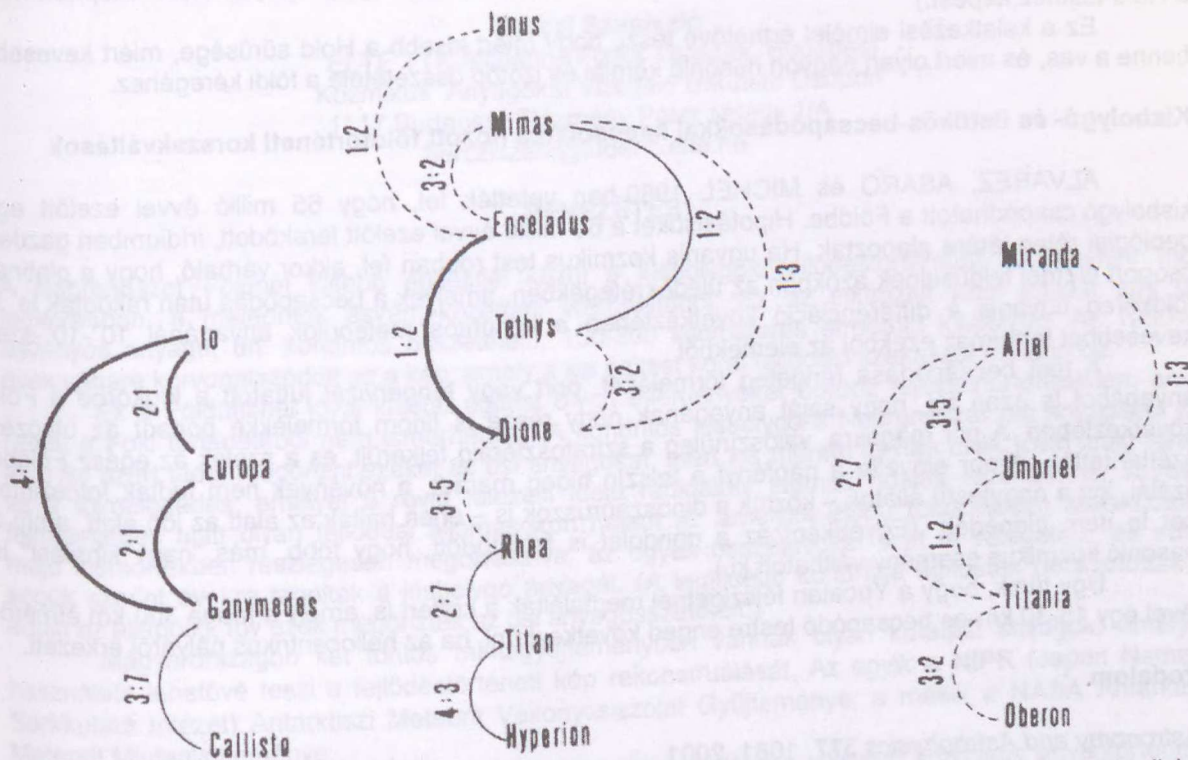
A Kuiper öv befelé perturbált pályájú objektumai közül többet kaptálhattak az óriásbolygók is, főleg a külső három. Így azok szabálytalanabb pályán lévő kisebb, külső holdjai valószínűleg ezek közül kerülhetnek ki. Mint említettük, ugyancsak a Kuiper öv nagyobb testjei közül származhat a Plútón kívül a Neptunusz Triton nevű holdja is, sőt esetleg a Plútó 1978-ban felfedezett holdja, a Charon is. Bár az a megfigyelési tény, hogy a Charon felszínén csak vízjeget találtak – a Plútóval ellentétben, ahol viszont metánjeget jeleztek a spektroszkópiai mérések – felveti azt a lehetőséget is, hogy hasonlóan a mi Holdunk keletkezéséhez egy, a Plútót ért óriási becsapódás hozhatta létre a Charont. Azonban abban a távolságban már a H_2O a megmaradt „száraz” anyag, ami felépíti a Charont, míg a Naphoz sokkal közelebb lévő Holdnál a H_2O az az illó anyag, ami eltűnt.

Az *összezsugorodó test forgássebességének a növekedése nemcsak a Napnál, hanem az óriásbolygóknál is az egyenlítői anyag gyűrűszerű leválását eredményezi, ami a bolygókhoz hasonlóan holdrendszerek összeállását teszi lehetővé az óriásbolygók környezetében.*

Az óriásbolygók körül ebből az anyagból összeállt holdakat **reguláris holdaknak** nevezzük. Mindegyik reguláris holdrendszer rezonáns helyzetet mutat (3. ábra), csak minden bolygónál más a konstans. A Jupiter holdrendszerében még talán az is tetten érhető, hogy a Jupiter saját hőtermelése hatással volt a körülötte kialakuló holdak anyagi összetételére (a Jupitertől távolodva egyre csökken a holdak átlagsűrűsége). Ez azonban lehet egy későbbi hatás következménye is, amennyiben a

az óriásbolygók ennek az anyagkidobásnak az ellenhatásaként elvándorolhattak a keletkezésük zónájától. A Jupiter például a Naphoz közelebb kerülhetett. Ez két megfigyelési ténnyel is harmonizál. Egyrészt más csillagok körül talált óriásbolygók közül nagyon sok kering sokkal közelebb a csillagához, mint ahogy azt a korábbi naprendszer-keletkezési elméletek alapján várni lehetett. Másrészt a Jupiter légkörébe leereszkedő *Galileo* szonda 2-2,5-szer annyi nemes gázt talált a Jupiter légkörében,

holdrendszerben a holdak által elszenvedett árapályfűtés sok illóanyag elvesztését, és így besűrűsödést eredményezett. A két effektus hatását ma még nem választották szét.



3. ábra: Rezonanciák a holdak között a Jupiter, Szaturnusz és Uránusz rendszerében. Folytonos vonallal a meglevő, szaggatott vonallal a lehetséges korábbi rezonanciákat jelöltük.

A FÖLDDEL KAPCSOLATBA HOZOTT BECSAPÓDÁSOK

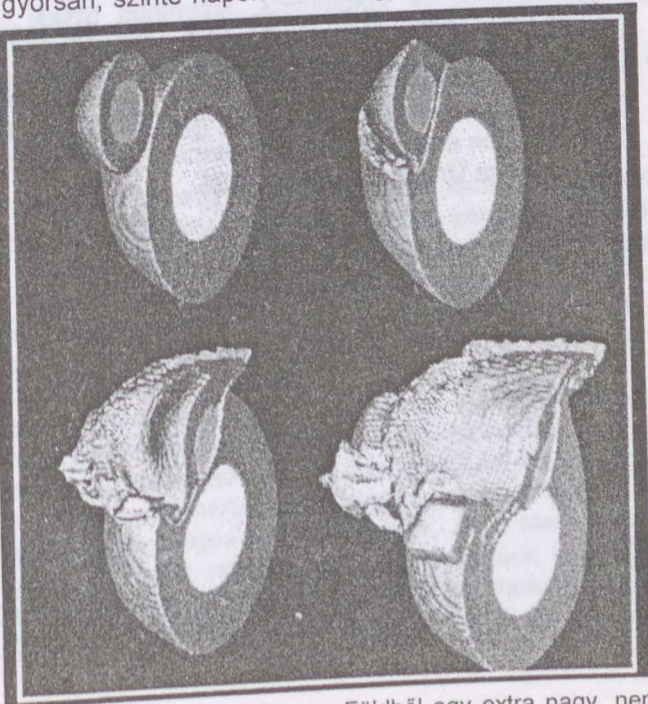
A Hold keletkezése egy óriási becsapódással

CAMERON valamint HARTMAN és DAVIS vetették fel azt a hipotézist, hogy a Föld-Hold rendszer egy extra nagy, nem centrális ütközéssel keletkezett (4. ábra). Az ős-Föld kérge egy majdnem Mars méretű testtel való ütközés következtében lefröccsent, miközben a bombázó test maga is szétporladt. Ennek vasmagját nagyon gyorsan, szinte napok alatt "begyűjtötte" a Föld, majd annak egy része a gravitációs szeparáció miatt a mélybe süllyedve egyesült a Föld vasmagjával. A két test kevert kéreganyagának egy része a Föld mostani felső kérge, lefröccsent részének zöme pedig gyűrűként földköri pályán maradt, és lassan-lassan egyre nagyobb csomókká, majd kisebb holdakká, és végül a Holddá állt össze.

A Hold összeállása így több lépésben történhetett.

Előbb holdjaiként keringett a Hold körül néhány nagyobb darab. Ezek végül is a Föld árapályhatása következtében egyre közelebb keringtek hozzá, majd néhány millió éven belül lapos szög alatt az éppen aktuális egyenlítője mentén nagyon kis sebességgel egymás után beleütköztek a felszínébe. Súlyuk áttörte a kérget. Így jöttek létre a mare-k nagy medencéi, amelyek mind a Hold Föld felé néző félgömbjén helyezkednek el, és amelyeknek későbbi sötét bazalt-láva előlítése adja a mai Hold jellegzetes arcát.

A becsapódás következtében létrejött, megváltozott tömegeloszlás a Hold-



4. ábra: A Hold keletkezése a Földből egy extra nagy, nem centrális ütközéssel. (Nature, 1989. márc. 2, címlap)

testet addig mozgatta, amíg a legnagyobb tehetetlenségű tengelye egybe nem esett a forgástengellyel. A következő holdacska már az új egyenlítő mentén ütközött a Holdba. (Az angol RUNCORN az *Apollo* paleomágneses mérései alapján 3-4 ilyen „tengelyáthelyeződést” állapított meg a Hold-testhez képest.)

Ez a keletkezési elmélet érthetővé teszi, hogy miért kisebb a Hold sűrűsége, miért kevesebb benne a vas, és miért olyan nagyon hasonló kémiai és izotóp összetétele a földi kéregéhez.

Kisbolygó- és üstökös-bechapódásokkal kapcsolatba hozott földtörténeti korszakváltások

ALVAREZ, ASARO és MICHEL 1980-ban vetették fel, hogy 65 millió évvel ezelőtt egy kisbolygó csapódhatott a Földre. Hipotézisüket a 65 millió évvel ezelőtt lerakódott, irídiumban gazdag geológiai réteg létrehozta. Ha ugyanis kozmikus test robban fel, akkor várható, hogy a platina-csoport elemei feldúsulnak azokban az üledékrétegekben, amelyek a bechapódás után rakódtak le. A földkéreg ugyanis a differenciáció következtében a kondritos meteoritok anyagánál 10^4 - 10^5 -szer kevesebbet tartalmaz ezekből az elemekből.

A test bechapódása rengeteg törmelék, port vagy tengervizet juttatott a légkörbe a Föld anyagából is azon túl, hogy saját anyagának nagy része is finom törmelékké porladt az ütközés következtében. A por magasra, valószínűleg a sztratoszféráig felkerült, és a szelek az egész Földön szétterítették. A por elnyelte a napfényt a felszín hideg maradt, a növények nem tudtak fotoszintetizálni, így a nagytestű állatok – köztük a dinoszauruszok is – éhen haltak az alatt az idő alatt, amíg a por le nem ülepedett. (Egyébként az a gondolat is felvetődött, hogy több, más "nagy kihalást" is hasonló kozmikus esemény válthatott ki.)

Úgy tűnik, hogy a Yucatan félszigetnél megtalálták a krátert is, amely a maga 300 km átmérőjével egy 15-30 km-es bechapódó testre enged következtetni, ha az heliocentrikus pályáról érkezett.

Irodalom

Astronomy and Astrophysics **377**, 1081, 2001.

Bérczi Szaniszló: Kristályoktól bolygótestekig, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991.

Dynamics of Astrophysical Discs (ed.: J.A. Sellwood) Cambridge Univ. Press.

Earth, Moon, and Planets: **21**, 43, 1979; **37**, 187, 1987; **39**, 21, 101, 129, 207, 1987; **67**, 217, 1995.

EOS Transactions **72**, 473, 1991.

Icarus: **36**, 240, 1978; **62**, 16, 1985; **69**, 249, 1987; **70**, 319, 1987; **78**, 63, 1989; **92**, 234, 1991; **98**, 2, 20, 61, 1992; **100**, 274, 1992; **114**, 1, 1995; **115**, 60, 1995; **116**, 315, 1995; **124**, 62, 1996; **127**, 461, 1997; **129**, 134, 317, 1997; **142**, 219, 1999; **143**, 15, 45, 60, 2000; **145**, 220, 332, 382, 2000; **146**, 240, 2000; **149**, 235, 2001; **150**, 288, 314, 323, 2001; **155**, 436, 454, 2002.

Journal of the British Interplanetary Society **41**, 41, 1988.

Nature: **335**, 496, 1988; **338**, 29, 1989; **361**, 40, 1993; **383**, 697, 2001; **391**, 166, 1998; **402**, 269, 599, 633, 635, 1999.

Planetary and Space Science: **37**, 329, 1989; **38**, 1351, 1990; **43**, 1019, 1995; **48**, 679, 1117, 1447, 2000.

Protostars and Planets (ed.: T. Gehrels) The Univ. of Arizona Press, 1978.

Sky and Telescope: Jan.1999, p.36; Aug.2000, p.26; Oct.2001, p.18.

The Formation and Evolution of Planetary Systems (eds.: H.A. Weaver, L. Danly) Cambridge University Press, 1989.

ÖSSZEHASONLÍTÁS A BOLYGÓRENDSZER TAGJAIVAL

Illés Erzsébet

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutató Intézete

1121 Budapest, Konkoly Thege út 13/17

illes@konkoly.hu

A BOLYGÓTESTEK BEMUTATÁSA

A Hold

A Hold a planetológiában a minta-feladat. Legközelebb lévén hozzánk a legtöbb fajta mérést először ott végezték el, a módszereket ott dolgozták ki. És miután eddig csak a Holdról hoztak vissza mintát, a felszínek kormeghatározására használt kráterszámlálásos relatív kort csak a Hold esetében lehetett a minták radiometrikus kormeghatározásával kalibrálni.

Bár jelentős számú űrszonda mért már a Hold közelében, le is szállt a felszínére, így sok-sok lokális mérés gyűlt össze, szisztematikus térképezésre mégis csak 1994-től kezdődően került sor a *Clementine*, illetve a *Lunar Prospector* szondák segítségével. A *Clementine* globális topográfiai és színtérképe a *Lunar Prospector* globális kémiai összetételi térképével, valamint gravitációs térképével összekapcsolva sokat segített abban, hogy most jobban értjük a Holdat, mint korábban.

A Hold, mint ezt eddig is tudtuk, telítettségig tele van **becsapódásos kráterekkel**. Azt viszont a mostani térképezések tárták fel, hogy a fényképeken látható kráterpopuláción kívül a topográfiában kimutatható egy ősi, mintegy 40 darab, nagyméretű kráterből álló populáció (pl. a 19. ábra), amely az őket felülíró, későbbi kráterek miatt a fényképeken már nem látszik. Ezek létrejöttük nyilván keletkeztek kicsi kráterek is, amelyeknek a nyomait teljesen eltüntették a későbbi becsapódások, de a nagyok – úgy látszik – a topográfiában megőrződtek. Az ősi felszíneken ezért más bolygótestek esetében is meglepetést hozhat még a rendszeres térképezés.*

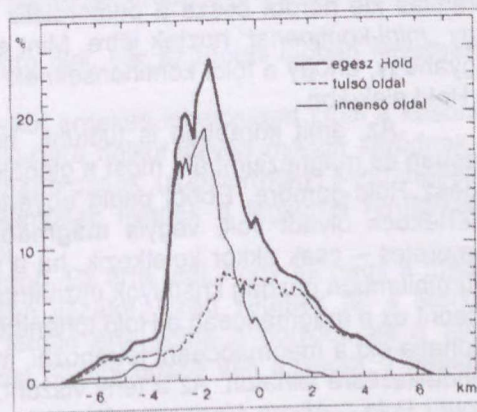
A nagy kráterek közül a legnagyobb a 2500 km átmérőjű *South Pole – Aitken Medence* (19. ábra). Ez a kráterperemtől az aljzatáig mért 12 km-es magasságkülönbségével feltehetőleg a Naprendszer legnagyobb átmérőjű és legmélyebb becsapódásos medencéje. Az ütközés kb. 120 km mélységből, a köpenyből vághatott ki anyagot.

A Hold-felszín egészére elkészített hipszogramon egyetlen csúcs található, azonban az innenső és a túloldalra külön-külön megszerkesztett hipszogramnak sem az alakja, sem a szélessége nem hasonlít (1. ábra).

A hipszogram alapján *ötféle térszint* különböztethető meg. A legmagasabb térszint egy helyen összpontosul: a túloldalon a Koroljov krátertől északra. A legalacsonyabb, vagyis a -2,5 km-es csúcshoz tartozó területek több helyen, szétszórva, de főleg az innenső oldalon találhatók, ezek a mare bazalt területek. Az egyes egységek a többi *Clementine* térkép alapján is egyértelműen elkülönülnek egymástól, mintha a hipszogram alapján megkülönböztetett felszíni egységek egyúttal geofizikai egységeket is jelentenének (lásd a táblázatot).

A Hold körül elvégzett gravitációs mérésekre illesztett **Goddard Lunar Gravity Model (GLGM)** azt mutatja, hogy Hold-alak ellipszoidjának középpontja 1,68 km-rel különbözik a gravitációs centrumtól. Ezek a pontok

km-rel különbözik a gravitációs centrumtól. Ezek a pontok a Föld-Hold egyenes mentén természetesen úgy helyezkednek el, hogy a gravitációs centrum a Földhöz van közelebb. Gravitációsan a felföldek teljesen, a régi medencék pedig csaknem teljesen Földhöz van közelebb. Gravitációsan a felföldek teljesen, a régi medencék pedig csaknem teljesen Földhöz van közelebb. Ez azt jelenti, hogy akkor keletkeztek, amikor a Hold simák, szinte tökéletesen relaxálódtak (2. ábra). Ez azt jelenti, hogy akkor keletkeztek, amikor a Hold simák, szinte tökéletesen relaxálódtak (2. ábra). Ez azt jelenti, hogy akkor keletkeztek, amikor a Hold simák, szinte tökéletesen relaxálódtak (2. ábra). Ez azt jelenti, hogy akkor keletkeztek, amikor a Hold simák, szinte tökéletesen relaxálódtak (2. ábra).



1. ábra: A Hold-felszín magassági adatainak eloszlását jellemző hipszogram az egész holdfelszínre (vastag vonal) és a két oldalra külön-külön megszerkesztve a *Clementine* szonda magassági mérései alapján.

* E cikk leadása után jelent meg az a publikáció (Geophys. Res. Lett. 29, 10.1029/ 2001 GLO 13832, 2002.), amelyben beszámolnak róla, hogy a Mars Global Surveyor magasságmérései alapján a Marson is találtak csak a topográfiában azonosítható kráterpopulációt.

A Hold-felszín 5 nagyobb hipszografikus egységének összehasonlítása más jellemzőkkel

Hipszogram csúcsa	Topográfia, magassági intervallum	Hol található a Hold felszínén	Összetételi jellemzők		Albedo
			geokémiai mérések		
-5,5 km	-7 – -4 km	túloldalon főleg a Déli Pólus – Aitken-medence			
-3 km	-4 – -2,5 km	főleg innenső oldali mare-bazalt			legalacsonyabb albedo
-2 km	-2,5 – -1 km	főleg innenső oldali felföldek	magasabb Fe-, Th-, Ti-, Mg/Al-tartalom	a máfikus komponens egyre nő ↑	alacsonyabb albedo
0 km	-1 – +3 km	főleg túloldal	közepes Fe-, Th-, Ti-, alacsonyabb Mg/Al- tartalom		alacsony albedo
+4 km	+3 km felett	túloldalon összefüggő terület a Koroljev-krátertől északra	alacsonyabb Fe-, Th-, Ti- tartalom anortozit		nem anomális albedo

az albedo egyre csökken ↑

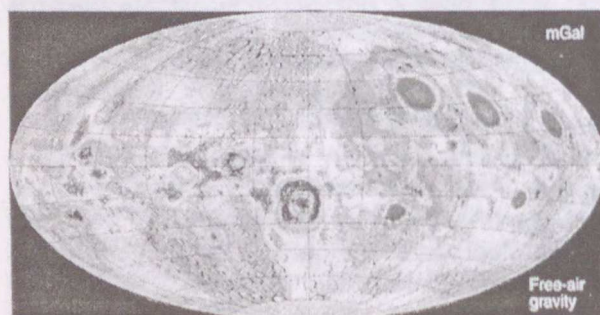
koncentráció), az azonban korábban nem volt ismert, hogy a pozitív gravitációs anomália körül a medencéken kívül negatív gravitációs anomáliák gyűrűje található. Ez arra utal, hogy a mare bazalt elöntéseket a merev kőzetlemez hajlása tartja meg.

A **masconok** létét a kráterkeletkezés mechanizmusával magyarázzák. A becsapódáskor benyomódó kéreg ugyanis visszapatánásával köpenyfelboltozódást hozott létre, amely nagyobb sűrűségével képviseli a felszín alatti tömegkoncentrációt. Ehhez csak hozzájön a környezeténél nagyobb sűrűségű és később bekövetkezett bazalt-elöntés hatása.

A Hold felszíne nem egységes, és a Hold-kéreg vastagsága is nagyon különböző a két oldalon. Míg az innenső oldalon átlagosan 60, a túloldalon átlagosan 68 km vastag. A túloldalon a legnagyobb kéregvastagság 107 km, és ez ugyanott van, ahol a legnagyobb topográfiai magasság is, vagyis a Koroljev krátertől északra.

K. RUNCORN szerint a különböző kéregvastagság és a Hold alakja azt jelzi, hogy az ősi Hold köpenyében *egycellás cirkuláció* alakult ki. Ennek felszálló ága az innenső oldalon volt, s ez a felette lévő kérget elvékonyította. Végül a felszínre kiömlött híg folyós bazaltláva elöntött minden mélyedést, és ez okozza az innenső oldal hipszogramjának keskenységét is. A cirkuláció leszálló ága a túloldalon volt a Koroljev krátertől északra, ahol most a legmagasabb a terepszint, és legvastagabb a kéreg. Az áramlás ide hordta össze a primordiális anortozitos kéregdarabokat, amelyek egymáson feltorlódva egy „mini-kontinent” hoztak létre. Mint ezt az izosztatikus kompenzátság jelzi, ennek gyökere van, ugyanúgy, ahogy a földi kontinenseknek. Amikor a Hold lehűlt, ez az egycellás cirkuláció fagyott bele a Hold alakjába.

Az, amit korábban is tudtunk, hogy a felföldek anyaga gazdag alumíniumban és szegény vasban és magnéziumban, most a globális multispektrális globális térképek alapján általánosítható az egész Hold-gömbre. Ebből pedig egyértelművé vált, hogy a Hold legkülső rétege valamikor teljes mértékben olvadt volt, vagyis **magmaóceán** létezett a Hold felszínén. Anortozit ugyanis – mint ismeretes – csak akkor keletkezik, ha a szilikátolvadék lassan kristályosodik ki, amittől kis sűrűségű, alumíniumban gazdag kristályok úszhatnak a mamatest tetején. Az anortozit minták izotóp-összetétele szerint ez a magmaóceán a Hold történetének korai szakaszában létezhetett. Egyetlen ismert hőforrás tudhatja ezt a magmaóceánt létrehozni, mégpedig a nagyon gyors akkréció. Ez az óriás-ütközés után rendelkezésre állhatott. Az a tény viszont, hogy a Hold legnagyobb alakzata, a 2500 km átmérőjű ősi *South Pole – Aitken Medence* aljzatában feldúsult a vas, a titán és a tórium – ellentétben a medence



2. ábra: A Hold gravitációs térképe a Clementine szonda mérései alapján. A sötét szürke helyek a pozitív gravitációs anomáliákat jelzik. A kép jobboldalán a nagy pozitív gravitációs anomáliák a Hold innenső oldali tengereinél lévő maszonokat (mascon, mass concentration) jelzik.

környezetében lévő felföldekkel, amelyek viszont kifejezetten szegények vasban – azt jelzi, hogy a *South Pole – Aitken Medence* létrehozó óriási becsapódás áttörte a felső alumíniumos kérget, és láttatni engedte az alatta lévő, vasban gazdag réteget. Ez viszont arra utal, hogy a Hold kérge többretegű, van egy alumíniumban gazdag felső és egy vasban, titánban és tóriumban gazdag alsó kéreg. Továbbá az a tény, hogy a Holdon a vasban gazdag helyeken a vas-tartalom 10% körül van, míg a földkéregben 30%, azt mutatja, hogy a Hold vastartalma

lényegesen kisebb a Földénél. Ez is, és a magmaóceán léte is alátámasztja a Hold óriás-ütközéses keletkezési elméletét. Ugyanakkor a korábbi sejtésekkel ellentétben *létezik egy kisebb, mintegy 300 km átmérőjű vasmagja*. Ezt a gravitációs mérésekből következtették ki.

Ma már a Holdnak nincs belső eredetű mágneses tere, de bizonyos helyeken lokális tereket mértek, ami azt jelzi, hogy valamikor volt.

A marékat a bazaltvulkanizmus hozta létre azáltal, hogy a Föld felé forduló oldal vékonyabb kérgének repedései mentén könnyebben érte el a magma a felszínt, és az ősi medencéket mindenütt feltöltötte. Ez a bazalttréteg néhol nagyon vékony, csak néhány méter, ahogy azt azokból a becsapódásokból meg lehet becsülni, amelyek áttörték a felső bazalt kérget. A túloldali medencékben nem jött létre bazaltelöntés jórészt a vastag kéreg miatt, de pl. az a tény, hogy a South Pole – Aitken Medence 11 km mély, tehát sokkal mélyebb seb, mint az innenső oldaliak, és mégsem öntötte el a bazalt, arra utal, hogy a köpeny sem volt ugyanolyan állapotban a két oldalon.

A Hold anyaga nagyon száraz, még a szilikátokba beépülve – vagyis hidratált szilikátok formájában – sincs víz. Az a megfigyelés, hogy a pólusok környékén az örökké árnyékban lévő kráterbelsőkből víz-jég lehet, külső forrásra utal, vagyis nagy víztartalmú meteoritek, kisbolygók és üstökösök hozhatták. A továbbiakban a Hold az egész belső Naprendszer impakt-vízzel való ellátottságára fog adalékot szolgáltatni, ha majd az űrszondák mérései megadják, hogy mennyi vízjég lehet a Holdon. Így információt kaphatunk arra vonatkozóan is, hogy milyen mennyiségű víz érkeztetett pl. a Földre üstökösök és kisbolygók révén.

A Merkúr

A bolygórendszer legbelső tagját eddig csak egyetlen szonda látogatta meg, amely felszínének 2/3-ad részét tudta fotózni. A Holdéhoz hasonlóan, erősen kráteres felszínen (7. ábra) a kráterközi, sima területek valamikor, a nagy bombázási időszak vége felé bekövetkezett *vulkáni elöntésekről* árulkodnak. Hosszú, a becsapódásos krátereket is keresztülszelő, rátalódásos vetőit (28. ábra) magjának zsugorodásával magyarázzák. Egy óriás becsapódás nyomát őrzi a *Caloris medence* (18b. ábra), amelynek kidobott anyaga a fél bolygót beborítja, és a keletkezésekor elinduló szeizmikus hullámok fókuszálódása a becsapódás antipodális területének összetöredését eredményezte.

A Merkúrnak *légkörre gyakorlatilag nincs*, bár a napszélből befogott héliumot, hidrogént és oxigént, illetve a forró felszínből kigőzölgő káliumot és nátriumot találtak a környezetében. A Merkúr tengelyforgása és pályaperiódusa 2/3-os rezonanciában van. Ez a nagy pályaeccentricitással kombinálódva azt eredményezi, hogy felszínén két hely van, amely felett hosszabb ideig tartózkodik a binálódva azt eredményezi, hogy felszínén két hely van, amely felett hosszabb ideig tartózkodik a Nap. Ezen két „forró pólus” anyaga ilyenkor annyira átmelegszik, hogy a kőzetekből a még megmaradt illó anyagok, így a kálium és a nátrium eltávozik – pamacszerűen légkört képezve a forró pólus felett.

A Merkúr körül mért *mágneses tér* ma is olvadt magra utal, bár az utóbbi időben felvetették befagyott mágneses tér lehetőségét is.

A légkör nélküli, de mágneses térrel rendelkező Merkúr érdekes lehetőséget kínál a későbbi szondák vizsgálataihoz. Például talán tisztázható, hogy ionoszféra nélkül milyen módon záródnak a magnetoszférikus áramkörök, és hogyan zajlanak az öbölháborgások (*substormok*). Mindenesetre megfigyelték a bolygó felé irányuló gyorsított részecskeáramokat. Ilyenek a légkörrel rendelkező bolygók aurora (sarki fény) tevékenységet szoktak kiváltani.

A bolygók között a *Merkúr átlagsűrűsége a legnagyobb*. Ez arra utal, hogy túl nagy a magja ahhoz, hogy kondritikus anyagból disszipációval le lehessen vezetni. Ezért vetették fel a Merkúr esetében is az óriás-ütközés hipotézisét. Az ütköző test ferdén érte volna a bolygót, és a felső kérgétől megfosztott bolygó lenne a mai Merkúr. Az ütközés hőjétől gőzzé vált anyagot a napszél elfújta.

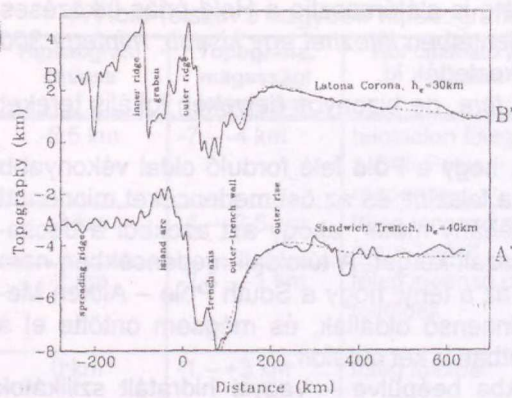
A Vénusz

A Vénusz sűrű légkörrel rendelkező földtípusú bolygó. Felszínét a felhőkkel tele, átlátszatlan légkör miatt csak radaral térképezhették fel (4a. ábra).

A tengelyforgás retrográd, és nagyon lassú: a bolygó 243 nap alatt fordul meg a tengelye körül. A légkör azonban már 4 nap alatt körbefutja a bolygót, tehát nagyon nagyfokú az ún. **szuperrotáció**.

A légkör 96%-ban CO_2 -t tartalmaz, felhői kénsav és kénessav cseppecskék. Felszíni hőmérséklete 500°C körül van, a felszíni légnyomás közel 90 atmoszféra. Az egyenlítő mindkét oldalán a légkörben egyetlen cirkulációs cella alakult ki, amely a poláris örvényig közvetlenül szállítja a hőt (35a. ábra). Ennek következtében a hőmérsékletben alig van különbség az egyenlítői és a poláris vidékek között, a szuperrotáció miatt pedig a nappali és az éjszakai oldal között. Ezért a felszíni szél nagyon gyenge. Csak a kémiai mállás és a gravitációs anyagmozgatás okoz változást.

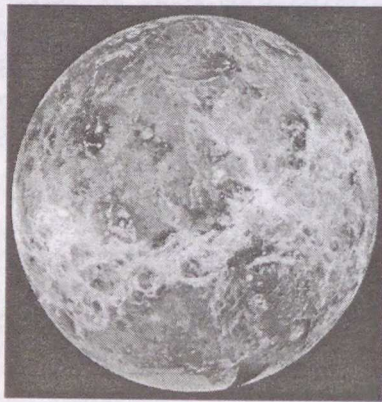
A Vénusz felszíne nagyon fiatal, kevés becsapódásos krátert találtak. A felszín 65%-a



3. ábra: A vénuszi Latona Corona (felső) és a földi Sandwich-árok (alsó) magassági profilja még méretben is hasonlít egymásra.

tartozó gravitációs anomáliák a koronán kívülre esnek, *szubdukció helyeivel azonosítják ezeket a koronaíveket.*

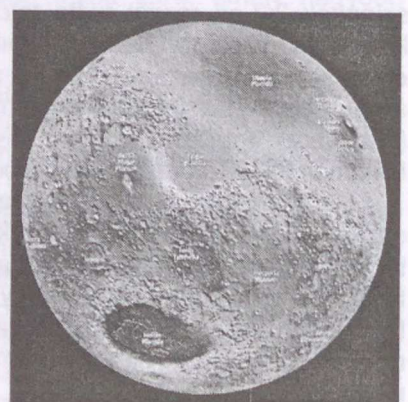
A Vénusz az egyetlen égitest a Földön kívül a Naprendszerben, ahol *gyűrt hegységrendszert* találtak az *Ishtar Föld* magas fennsíkjának az oldalai mentén (33a. ábra). Földihez hasonló merevlemez tektonika nyomát ugyan nem látjuk, de valamiféle *lágylemez tektonika* működhet a felszínén, ahol a távolú centrumokhoz nagyon közel lennének a szubdukciós helyek, és a lágylemez mindenütt redőződik.



a



b



c

4. ábra: A Vénusz (a; Magellan radarkép), a Föld (b) és a Mars (c; MGS magassági mérések) felszíne.

A Mars

A Mars északi és déli félgömbje nagyon különböző megjelenésű: a déli öreg, telítettségig kráteres felföld, míg az északi fiatal síkság, vagy inkább mélyföld (4c. ábra). A következmény az, hogy a felszínhez illesztett ellipszoid középpontja a gravitáció középpontjától 3 km-rel el van tolódva a déli pólus irányába. Ennek a különbségnek pedig messzeható következményei vannak a fluid övezet mozgásaira.

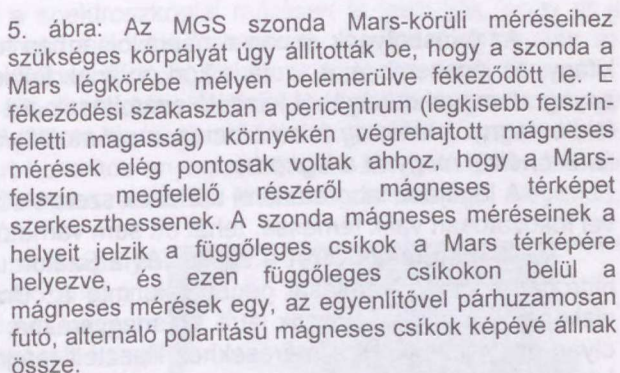
A két felszíni egység kérgének vastagsága is nagyon különböző: a déli 100 km körülivel szemben az északi sokkal vékonyabb.

A Marsnak ma már nincs belső eredetű mágneses tere. A Mars Global Surveyor azonban helyenként erős lokális mágneses tereket mért, sőt az egyenlítővel párhuzamosan, egymással is párhuzamosan futó, alternáló polaritású sávok képe rajzolódik ki (5. ábra). Ezt ősi lemeztektonika nyomának tartják, bár a nem az egész felszínre kiterjedő térképezés miatt a mérésekből szimmetria központ vagy sáv nem állapítható meg, és a topográfiával való kapcsolat sem világos.

Az északi félgömb két helyét uraló vulkáni működés nyoma (*Tharsis Hátság* és *Elysium*) ősi forrópont vulkanizmusra utal. A felszínt az egyenlítővel párhuzamosan keresztező *Valles Marineris* 4 ezer km hosszú és 4-10 km mély völgyének szerepe még nem teljesen tisztázott. Egyesek szintén a lemeztektonika-beindulás nyomának tekintették, azonban a *Tharsis Hátság* közelsége miatt a nagymennyiségű lávakiáramlás hatására létrejött radiális repedés is magyarázhatja keletkezését.

A felszín öreg része (az *Argyre Medencét* létrehozó becsapódás előtti felszín) tele van ősi folyóvölgyek nyomaival (36. ábra), amelyek a felszínnek a gravitációs centrumtól való távolsága miatt délről haladnak észak felé. A folyásnyomok kétféle megjelenésűek. Vannak egymásba torkolló folyóvölgyek (völgyhálózat), amelyek a földi csapadékgyűjtők völgyhálózatához hasonlítanak, és

A mintegy 3 km vastag északi állandó hósapka egyébként kb. annyi H_2O -t tartalmazhat, mint a Grönlandon lévő jégmező. Lényegesen nagyobb lehet az a **H_2O rezervoár**, amit a vastag regolit réteg képvisel a porviharok után a légkörből kiülepedő, és a porszemcsékre, mint kicsapódási magokra rakódott jéggel. Ennek a kapacitása 100 ezer éves skálán változhat a pályaelemek változásával. Hidegebb klíma mellett eltemetődik, melegebb klímánál elszublimál a H_2O . A közepes szélességeken több helyen talált „berogyott talajok” (termokarszt, 45. ábra) tanúsága szerint most éppen *melegedő*



5. ábra: Az MGS szonda Mars-körüli méréseire szükséges körpályát úgy állították be, hogy a szonda a Mars légkörébe mélyen belemerülve fékeződött le. E fékeződési szakaszban a pericentrum (legkisebb felszínefeletti magasság) környékén végrehajtott mágneses mérések elég pontosak voltak ahhoz, hogy a Mars-felszín megfelelő részéről mágneses térképet szerkeszthessenek. A szonda mágneses méréseinek a helyeit jelzik a függőleges csíkok a Mars térképére helyezve, és ezen függőleges csíkokon belül a mágneses mérések egy, az egyenlítővel párhuzamosan futó, alternáló polaritású mágneses csíkok képévé állnak össze.

gyedül ezeken láttuk szezonális változások nyomait. A tavaszi porviharok alkalmával más-más mennyiségű por

nén nagy mennyiségű finom por és olyan jelentős szelek keletkeznek. Emiatt hatalmas **porviharok** urkolják. A többi poros égitesten nincs légkör (Hold szelek (Vénusz), vagy pedig az esők visszamossák anyagának kis hőkapacitása egyébként is viharos zek állandóan a levegőbe emelik a Mars felszínének is poláris sapka CO_2 jege elszublimál – hirtelen ezek nagy porviharokat kavarnak fel. Ezek különösen élgömb nagyobb topográfiai magassága miatt ezek, yenlítő vidékéig is, vagy még tovább. A por ilyenkor napfényt elnyeli, a felszín hideg marad. Csapadék edik, és kitisztul a levegő. A felkapott port a szél az lönböző helyeken leszálló *Viking* és *Mars Pathfinder* elszín anyagában.

ég miatt a **légköri cirkuláció** is valószínűleg más, ritkán és kevés helyen láthatók a Marson, amelyek ritkaságokkal lehetett képet alkotni a marsi légközéről. A légköri cirkulációja szimmetrikus az egyenlítő két oldalán: az egyenlítő felől elnyelt hő a pólusok felé, hogy ott egyenletesen eloszoljon, a pólusok felé elinduló felszálló áramlás miatt. Ez a lejtő mentén felemelkedő levegőben kicsapódó CO₂-ből álló ködök keletkeznek, amelyek a pólusok felé szállítják, ahol az a poláris sapkára csapódik le. Ez a poláris sapka az évszakok során változik: télen a CO₂ teljesen lefagy, nyáron pedig a CO₂ elpárolog, és a pálya jelen elhelyezkedése is. A déli nyár a legmelegebb, míg az északi nyár nem annyira meleg, így a déli nyáron a CO₂ sokkal többet tartalmazhat, mint a északi nyáron.

sapka egyébként kb. annyi H_2O -t tartalmazhat, mint a lehet az a **H_2O rezervoár**, amit a vastag regolit réteg tölt, és a porszemcsékre, mint kicsapódási magokra éves skálán változhat a pályaelemek változásával. (mimánál elszublimál a H_2O . A közepes szélességeken (45. ábra) tanúsága szerint most éppen *melegedő*

időszak van, amikor a kiszublimált H₂O miatt lazává vált regolit saját súlya alatt összerogyik. A Mars Odyssey szonda hidrogén-tartalom mérései is ezt igazolják: az 1 m-es felső talajréteg 60 cm alatti rétegeiben jelezték a mérések a hidrogén jelenlétét a déli pólust körülvevő területeken. A Mars Odyssey 1 m mélységig tudja kimutatni a hidrogén jelenlétét, az ezalatti vízmennyiségről még fogalmunk sincs. Az északi póluson azért nem jeleztek vízjeget a kezdeti mérések, mert ott azt a szezonális 1-2 m vastag CO₂ jég eltakarta.

Ellentétben tehát azzal, amit korábban vártak, *nem az egyenlítő környékén van remény az életkereséshez, mert ott már kiszáradt a talaj, hanem a poláris vidékeket körülvevő területeken.* Ezért is tartjuk nagyon ígéretesnek és a helyszínen megvizsgálandónak azt a hipotézist, amit HORVÁTH András magyar kutató vetett fel, hogy a déli poláris vidékeken a tavaszi olvadás idején a fekete dűnéken megjelenő sötét foltok különleges morfológiai tulajdonságai és évszakos változásai primitív marsfelszíni élet jelei lehetnek. Egykori primitív marsi élet maradványait egyébként a Földön talált, és a Marsról származó meteoritban is felismerni vélték.

Az óriásbolygók

Az óriásbolygók abban a naptávolságban tudnak kialakulni az ősi szoláris ködből, ahol a víz kifagy, és jégszemcséi a szoláris köd porának felületi sűrűségét lényegesen megnövelik. A kondritos anyag elemgyakoriságából kiinduló számítások azt mutatják, hogy pl. a Jupiter esetében egy kb. 10 földtömegnyi *közetmag felett atomos, majd molekuláris hidrogén zóna alkotja a köpenyt, amely határfelület nélkül megy át a légkörbe.*

A legújabb laboratóriumi mérések szerint a hidrogén a hőmérséklet és a nyomás növekedésével fokozatosan válik fémessé, tehát ott sem várható határfelület.

A **mágneses teret** a Jupiter és a Szaturnusz esetében főként a fémesen viselkedő atomos hidrogén-köpeny áramlásai generálják, míg az Uránusznál és a Neptunusznál inkább egy ionizált vízköpeny áramlásai hozzák létre. Ez magyarázná, hogy az Uránusz és a Neptunusz esetében miért olyan nagy az eltérés a mérésekhez illesztett mágneses dipól középpontja és a gravitációs centrum között (~ 0,4 bolygósugár).

Az óriásbolygók mindegyike **rádióforrás** is. Ebben a földtípusú bolygók közül csak a Föld a partnerük. Magnetoszféráikban az elektromos tereken relativisztikus sebességre felgyorsuló elektronok bocsátják ki a sugárzást, amelyet bizonyos holdak mozgása modulál. A Jupiternél az Io, a Szaturnusznál a Dione hatását sikerült eddig kimutatni.

Sarkifény jelenséget a Jupiternél és a Szaturnuszánál figyeltek meg (42. ábra). A hidrogénben gazdag légkörökből nemcsak látható fény, hanem Lyman alfa sugárzás is gerjesztődik. Sőt az aurorát létrehozó precipitáló elektronok bombázása kémiai változásokat is okoz, ami szénhidrogén-szmog képződésével jár, így „sötét aurorát” is megfigyeltek a Szaturnusz, majd később a Jupiter esetében (43. ábra). A Jupiternél az Io a Jupiterrel összekötő fluxuscső talppontjánál kimutatható volt az Io „lábnyoma” is (42b. ábra). Ez egy, a sarkifény ováltól határozottan elkülönülő aurora-folt. Attól jön létre, hogy az Io vulkánjai által kidobott anyagot a Nap ultraibolya sugárzása ionizálja, majd az ionizált atomok és elektronok a zárt mágneses erővonalak mentén a Jupiter légköréig eljutva – és a légkör molekuláiba ütközve – azokat fénylésre gerjesztik.

Az óriásbolygók *több hőt sugároznak ki, mint amennyit a Naptól kapnak.* A Jupiter esetében pl. 2,5-szeres a többlet. A modellek szerint a hidrogén és a hélium szeparációja (hélium cseppek keletkezése és leesőzése formájában) és a még mindig tartó kontrakció szolgáltatja ezt a hőt.

A légkörökben lévő különféle illó anyagok kondenzációja többretegű **felhőket** hoz létre. A Jupiternél a *Galileo* szonda nagy éjszakai viharzónákat fotózott le sok villámmal, nappal ugyanott a földiekhez hasonló, feltornyosuló víz-zivatarfelhőket látott. Ebből és a *Voyager* szonda villámszámlálásaiból megbecsülhető volt a viharok létrehozásához szükséges energia. A számítások arra a következtetésre vezettek, hogy *az óriásbolygók légkörének dinamikájához az energiát nem a napsugárzás, hanem a belső hő szolgáltatja.*

Így már jobban érthető két korábbi megfigyelési tény. Egyrészt 1986-ban a *Voyager* szonda ottjártakor az Uránusz légköri szelei ugyanúgy zonálisak voltak, mint a többi bolygóé, annak ellenére, hogy az Uránusz pályasíkjában fekvő forgástengely éppen a Nap felé nézett, és ezért a napsütötte pólusról kiinduló globális szeleket vártak. Másrészt a legerősebb szelek a Neptunuszon fújnak, pedig az van legmesszebb a Naptól.

Az óriásbolygók holdjai

Az óriásbolygók körül a **reguláris holdakon** kívül sok kicsi „**törmelék-hold**” is kering. A reguláris holdaknál távolabb mozgó holdak befogott kisbolygók vagy **KBO-k** (Kuiper Belt Objects).

A reguláris holdrendszeren belüliek a bolygó fókuszáló hatása következtében sokkal több becsapódást kapnak, gyorsító hatása következtében pedig sokkal nagyobb becsapódásokat szenvednek el, mintha egyedül rónák pályáikat a Nap körül. A Jupiter legbelső négy kis holdján pl. egy-egy

becsapódó test saját tömegének tízszeresét is kivágja, s a por a Jupiter körüli pályára állva a bolygó gyűrűjét alkotja. Így keletkezhet a többi óriásbolygó vékony **porgyűrűje** is.

A Szaturnusz fényes gyűrűje, amely egyébként cm-es jégdarabkákból áll, nem ebbe a kategóriába tartozik, hanem valószínűleg egy, a bolygóhoz túl közel került óriásüstökös, egy KBO szétdarabolódása után megmaradt törmelékhalma a Szaturnusz körül. Ilyen eseményre számítógépi szimulációk szerint a Naprendszer élete folyamán átlagosan egyszer van esély.

Az óriásbolygók holdjai is lényegesen *több illő anyagot tartalmaznak*, mint a belső bolygók, minthogy ilyen környezetben jöttek létre. Ezt sűrűségük is mutatja. Azonban, a Szaturnusz Titán és a Neptunusz Triton holdját kivéve, valamennyien *légkör nélküli testek*. Felszínük általában tele van **becsapódásos kráterekkel** (16, 18c, 22, 23, 24. ábrák). Az Uránusz és a Neptunusz rendszerében főleg a becsapódó üstökösmagok, míg a Naphoz közelebbi tartományban inkább a kisbolygók és szilánkjaik bombáztak. A becsapódásos kráterekben központi csúcs szinte mindenütt van, csak a Jupiter holdjain hiányzik gyakran – jelezve, hogy itt a magasabb hőmérséklet miatt lágyabb a jégkéreg. A Szaturnusz-holdakon nem fedezhető fel a kráterek körül sugarasan kidobott anyag más albedójú nyoma (16, 22. ábra), ami arra utal, hogy a felszíni rétegek nagy mélységig azonos összetételűek. Már a kis sűrűségek is jelzik, de a spektroszkópiai mérések is igazolják, hogy itt a **vízjég** a fő összetevő. Néhány esetben tetten érhető a holdak belsejének a teljes megfagyása az egész holdat végigszelő, széles repedésvölgy formájában (Tethys, 20. ábra, Ariel, 24. ábra, Titania).

A várakozásokkal ellentétben kis mérete ellenére sok hold felszíne áruklodik valamikori vagy jelenkori **geológiai aktivitásról**, pl. az *Enceladus* (22. ábra), vagy a *Miranda* (29. ábra), amelyeknek az átmérője csak 500 km. Ez azért meglepő, mert kondritos anyagból kiinduló modellszámítások azt mutatják, hogy 1000 km alatti átmérőjű jeges holdaknál a radioaktív fűtés még ahhoz sem elegendő, hogy a hold gömbalakot vegyen fel.

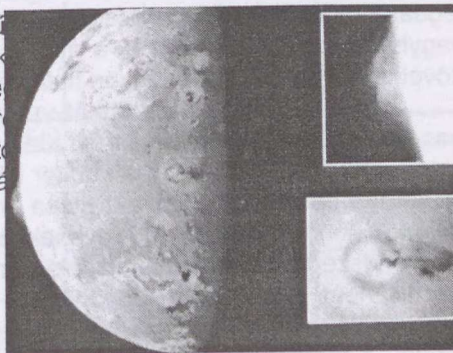
A kis holdak nagy geológiai aktivitására az **árapályfűtődés**, repedés mentén a hold belsejéből kiáramló anyagnak (27. ábra), kéregeltűnést (27. ábra, inkább ráfolyás és/vagy meztelenség) (28. ábra), a kéreg elmozdítását (29. ábra) és a *Europa* esetében a széttolt kéregdarabok által okozott kompressziókat (30. ábra) figyelhetjük meg. A vulkánok a felszíneken (34. ábra). A vulkáni kifolyások morfológiai sajátosságai (35. ábra). A *Szturnusz* rendszerében sós víz és ammónia keveréke, az *Ura* rendszerében ammónia és metilalkohol keveréke lehet.

Ezek az eutektikumok és peritektikumok lehetővé teszik a **kriovulkáni működést**, minthogy lényegesen alacsonyabbra viszik az olvadáspontot, mint amilyen az tiszta víz esetében lenne. Ammónia hozzáadása például mintegy 100°-kal csökkenti az olvadáspontot. Így az árapályfűtés energiája elég ahhoz, hogy az árapálymozgatás következtében létrejött repedések mentén a megolvadt „láva” a felszínre kerüljön. A Jupiter rendszer víz-ammónia lávája híg folyós, de nagyon kis mennyiségű metilalkohol hozzáadása a keverékhez már jelentősen megnöveli a láva viszkozitását, így a nehezen folyó, sűrű lávák a belső bolygók szilikát-vulkanizmusához hasonló morfológiát mutatnak az Uránusz és a Neptunusz rendszerében.

A Jupiter **Io** holdja azért áll a tudományos érdeklődés középpontjában, mert a Földön kívül ez az egyetlen égitest a Naprendszerben, amelyen jelen időben **vulkáni működés** zajlik (6. ábra), mégpedig sokkal nagyobb intenzitású, mint a Földön. Felszínét a kidobott vulkáni anyag rövid idő alatt mekrátert sem találtak rajta. Viszont száznál több vulkáni központ körülre tehető az **aktív vulkánok** száma, amelyek közül néme vulkáni anyagot. Légkör hiányában a fellövés magassága esernyőszerű, főleg *ként és kéndioxidot* kijuttató nagy vulkáni nevezhetők gejzireknek, de az 1300°C-ot is meghaladó, é hőmérsékletű láva már valódi **szilikátvulkanizmusra** utal.

Az energiát a vulkánok működéséhez az árapályfűtés szolgáltatja. A vulkánokból kilövellt kén a felszínre visszahullva vörös színű bevonatot képez, amely előbb S_6 -tá, később S_8 -cá alakul át (ez a földi vulkánok közelében is jól ismert sárga színű kén).

Az *Io* környezetébe kilövellt kén, nátrium és egyéb anyagok egy része nem kerül vissza a felszínre, hanem elszökik az *Io*tól, és Jupiter körüli pályára áll (ez a Jupiter kén- és nátrium-gyűrűje). A Nap ultraibolya sugárzása által ionizált atomok, molekulák pedig a Jupiter mágneses erővonalai mentén mozogva fluxuscsvét alkotnak, amelyben az áramerősség ezer amper körül van, és amelynek talppontjainál a Jupiter légkörébe ütköző részecskék hozzák létre az *Io* „lábnyomának” nevezett fénylő aurora foltot a sarkifény övezet egyenlítői oldalán (42b. ábra). Az ilyen „lábnyomot” az *Europa*



6. ábra: Az Ion jelenleg is működő vulkánok láthatók. A kép peremén lévő a jobb felső, a közepén lévő a jobb alsó kis kép mutatja kinagyítva. Ezen utóbbi felhőjének az árnyéka is megfigyelhető. Galileo fotó.

és a *Ganymedes* hold esetében is lefotózta már a Hubble Űrteleszkóp.

Az *Io* vulkánjaiból kidobott és a holdtól megszökött poranyagot – amennyiben az elektromosan feltöltődik – a Jupiter magnetoszférája az egész Jupiter-rendszerben szétteríti. Így a Kepler pályán mozgó holdaknál gyorsabban, a bolygóval együtt korotáló mágneses erővonalak a holdakat pályamozgásuk során hátulról hagyva a részecskéket a követő oldal anyagába implantálják, ahol azok a felszín anyagával kölcsönhatnak. Így magyarázzák például az *Europa* hold követő oldalán talált kénsavmezők keletkezését. Számítások egyébként azt mutatják, hogy egy hold felszínének besugárzása, vagyis a Jupiter magnetoszférájából az energikus részecskék által szállított energia – pl. az *Europa* felszínére – elérheti az összes belső energiát (vagyis a radioaktív és az árapályfűtés energiáját együtt). Az *Io* pora az egész Naprendszerben is szétterjedhet, sőt a semleges komponens a Nap magnetoszféráját figyelmen kívül hagyva, közvetlenül kiléphet a csillagközi térbe is.

A Jupiter *Europa* holdja (25. ábra) a maga mintegy 100 km mély, **folyékony víz-óceánjával** különleges eset a holdak között. Az óceánt – a jégkérgét áttörni nem tudó hat becsapódás alapján – 4-5 km-nél vastagabb, mintegy 20 km vastag víz-jég kéreg zárhatja le a világűr felé. A nem tökéletes szinkron rotáció (6000 év alatt fordul ugyanaz a terület újra a Jupiter irányába) és a rezonáns helyzet miatt az *Io* és a *Ganymedes* által az *Europa* pályájára erőltetett excentricitás nagy árapályfeszültségeket kelt a kéregben – annak megrepedését eredményezve. A napi árapálymozgás aztán ezen repedések két oldalának „helybenjáró” mozgásával nyitva tartja a repedést. E repedések antipodális szimmetriájából nagy, 30°-ot is elérő pólusvándorlásra lehetett következtetni, amikor is az egész kéreg, mint egység fordult el a forgástengelyhez képest – valamely a jégkéregben lévő sűrűségi inhomogenitás miatt.

Az árapályfűtés meleg feláramlásokat indít el az óceánban, és az alulról ható termális erózió „kaotikus” területeket hoz létre – darabokra repesztve, és egymáshoz képest néha el is úsztatva a jégdarabokat, amelyek a melegáramlás megszűnése után újra összefagynak. Ez a két mechanizmus, vagyis a tágulás–repedés és a meleg feláramlás váltogatja egymást, és változtatja a felszínt. Ennek következtében a felszín nagyon fiatal, a becsapódásos kráterek száma alig éri el a húszat.

A **tengeraljzaton szilikát-vulkanizmus működhet**, és a földi „fekete füstölők” környezetéhez hasonló életközösségek léte nem tűnik lehetetlennek. Ezért nagy az érdeklődés az *Europa* iránt.

Nagyon különböző a Jupiter két külső, nagyméretű Galilei holdjának felszíne (18c, 23. ábra). A *Ganymedes* geológiai aktivitása mellett (fiatal felszíne tele van tektonikai árkokkal, redőkkel) feltűnő, hogy a majdnem ugyanakkora méretű *Callisto* felszíne az egyik legöregebb felszín a Naprendszerben. Telítettségig tele van becsapódásos kráterekkel, és semmiféle geológiai aktivitás nyoma nem látszik rajta. Ugyanakkor a mágneses mérések indukált mágneses teret mutattak ki a környezetében, ami azt jelzi, hogy a belsejében globálisan olvadt, elektromosan vezető anyagnak kell lennie. A méréseket egy kb. 150 km mélyen lévő 10 km vastag sósvíz réteg már magyarázni tudná, ugyanakkor minden eddigi modellszámítás szerint belsejének teljesen fagyottnak kellene lennie. Az a legújabb modellszámítás oldotta meg a problémát, amikor figyelembe vették a vízjég átkristályosodásait a hőmérséklet és a nyomás növekedésével. Ez a modell már megengedi, hogy 150 km-rel a felszín alatt olvadt, globális óceán legyen. A felette lévő vastag hőszigetelő réteg pedig érthető módon nem mutat semmit a belső aktivitásból, és rossz hővezető lévén megőrzi a *Callisto* belső hőjét.

A *Galileo* űrszonda magnetométere az összes hold közül eddig egyedül a *Ganymedes*nél (23. ábra) talált belső eredetű **mágneses teret**. A tér gyenge, de kb. két holdsugár méretű, saját magnetoszférát tart fenn, amely a hold egyenlítői vidékeit védi a Jupiter magnetoszférájában mozgó, nagyenergiájú töltött részecskéktől. Miután azok a pólusok körül a felszínt azért elérik, és bombázni tudják, a *Ganymedes*nek „poláris sapkája” van, ahol a nagyenergiájú részecskék becsapódása a felszín kémiai átalakulását eredményezi.

A *Titán* a *Ganymedes* után a második legnagyobb hold a Naprendszerben, és az egyetlen, amelynek **lényeges légköre** van. A földinél négyszer sűrűbb, 85% nitrogént, 12% argont és kevés metánt tartalmazó légköre van. A földinél 1,6-szor nagyobb légnyomást hoz létre a felszínen. *A metán ugyanazt a szerepet tölti be a Titánon, mint a Földön a víz.* A légkör átlátszatlan, mert tele van vörös szénhidrogén-aeroszolokkal, amelyek a Naprendszer 4,5 milliárd éve alatt leülepedve a felszínen 3-4 km vastagságú réteget hozhattak létre. E légköri szmog miatt a felszín közvetlenül nem tanulmányozható. Földi infravörös megfigyelések egy Ausztrália méretű, világosabb albedójú foltot mutatnak a Titánon, radarmérések pedig azt jelzik, hogy folyékony szénhidrogénekből (metán, etán, stb.) álló, de nem az egész égitestet beborító óceán lehet a felszínen. A világos folt ezen szénhidrogén óceán vízjégből álló kontinense lehet. A 2004-ben a Szaturnusz rendszeréhez érkező amerikai *Cassini* szonda egy, a Titánra leszálló európai egységet szállít (Huygens), hogy jobban megismerhessük ezt az ős-földi körülményekhez hasonló légkört.

A Neptunusz rendszerében a *Triton* hold egy befogott, óriási, Kuiper övből származó objektum (KBO) lehet. Elliptikus pályájának körré válása idején az elszenvedett nagy árapályfűtés olvasztotta meg, és tette lehetővé azt, hogy geológiailag aktívvá váljon. **Poláris sapkája** van (38. ábra), és **nitrogén hajtotta gejzirjei** ma is működnek. Ritka légköre nitrogént és metánt tartalmaz.

A Naprendszer-keletkezési elméleteknek a Plútóval kapcsolatos korábbi problémáját – hogy tudniillik az óriásbolygók után hogyan alakulhatott ki újra egy kicsi bolygó – mint már említettük, a Neptunuszon túli objektumok, a KBO-k felfedezése oldotta meg. A Plútó tehát *nem nagybolygó* a szó valódi értelmében, de történelmi okok miatt még a bolygók között tartjuk számon.

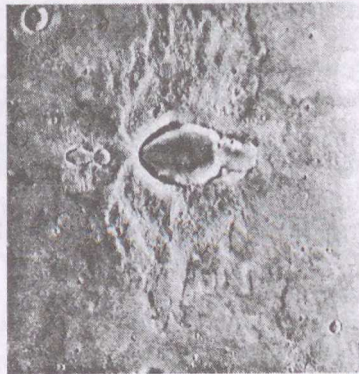
Az elmúlt 2,5 évtizedben egész sor véletlen szerencse segítette abban a tudományt, hogy bár a Plútó az egyetlen bolygó, ahova még nem sikerült űrszondát küldeni, mégis sok ismeret gyűlt össze róla. Ezek közé a véletlenek közé tartozik, hogy holdjának pályasíkja éppen 1978-ban történt felfedezése után haladt át a Földön, tehát a 80-as évek vége felé fedések sorozatát lehetett megfigyelni. A kettősség önmagában is nagy segítség, mert méreteket és sűrűséget lehet meghatározni. A fedések pedig lehetővé tették légkörök keresését, illetve azt, hogy a két test spektrumát szét lehessen választani. Ezzel kiderült, hogy a *Plútó felszínén metán és nitrogénjég van, de a Charonon csak vízjég*. A fedések sorozata pedig lehetővé tette, hogy a Plútó-korong különböző szélességi sávjai előtt elvonuló Charon mintegy végigtapogassa a Plútó felszínét. Innen tudjuk, hogy a Plútónak szintén van poláris sapkája, mint a Tritonnak. A másik véletlen szerencse a nagy napközelség, vagyis, hogy a Plútó perihélimátvonulására – felfedezése óta először – éppen ebben az időben került sor. Ez azzal járt, hogy a *megnövekedett besugárzás légkört fejlesztett a Plútón*.

A NAPRENDSZER, MINT LABORATÓRIUM

Bolygótest neve	átmérő (km)	V A N – E				
		dinamó-hajtotta, saját mágneses tere	l é g k ö r e felszíni nyomás (atm)	folyadék-szférája	poláris sapkája illóanyag lecsapódásából	kontinense
Föld	12756	van	van, 1	van, H ₂ O	van, H ₂ O	van
Vénusz	12104	nincs	van, nagyon sűrű	nincs	nincs	van (annak nevezhető?)
Mars	6787	van?	van, ritka	volt, H ₂ O	van, H ₂ O, CO ₂	annak nevezhető?
Ganymedes	5276	van	nincs	kéreg alatt H ₂ O	egész felszínen H ₂ O	
Titan	5150	?	van, sűrű	lehet, szénhidrogén	?	
Merkúr	4878	van	nincs	nincs	van, H ₂ O	
Callisto	4820	nincs	nincs	kéreg alatt H ₂ O	egész felszínen H ₂ O	
Io	3632	van?	van, nagyon ritka	nincs	nincs	
Hold	3476	volt	van, nagyon ritka	nincs	van, csak kráterekben H ₂ O	annak nevezhető?
Europa	3138	van?	van, $2,5 \times 10^{-11}$ nagyon ritka	van, H ₂ O jégkéreg alatt	egész felszínen H ₂ O	
Triton	2705		van, $1,4 \times 10^{-5}$ nagyon ritka	?, N ₂	van, N ₂	
Plútó	2302		most van, ritka lehet		van, N ₂	
Titania	1610				egész felszínen H ₂ O	
Oberon	1550				egész felszínen H ₂ O	
Rhea	1530				egész felszínen H ₂ O	
Japetus	1460				?	
Umbriel	1190				?	
Charon	1186				felszínen H ₂ O	
Ariel	1160				egész felszínen H ₂ O	
Dione	1120				egész felszínen H ₂ O	
Tethys	1060				egész felszínen H ₂ O	
Enceladus	502				egész felszínen H ₂ O	
Miranda	484				egész felszínen H ₂ O	
Proteus	416				egész felszínen H ₂ O	
Hyperion	410				egész felszínen H ₂ O	
Mimas	394				egész felszínen H ₂ O	



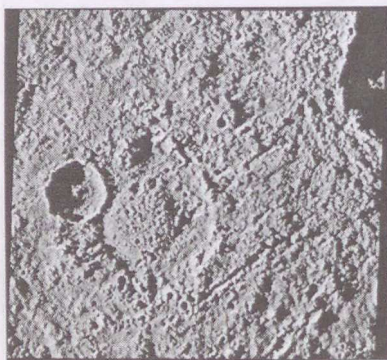
7. ábra: A Merkúr felszíne tele van becsapódásos kráterekkel. Ezek közül sok az olyan szabályos becsapódásos kráter, amelyet a köralakú körsánc és a központi csúcs jellemez. A kráterközi síkságok egykori vulkáni kifolyásokra utalnak. Mariner 10 fotó.



8. ábra: Mars. Ferdeszögű becsapódás esetén ellipszis alakú kráter és lepkeszárny alakú törmelékterítő jöhet létre. Viking fotó.



9. ábra: Vénusz. Központi gyűrű-hegy, és olvadék nyoma a körsáncban belül a becsapódás után. A törmelékterítő nem körszimmetrikus. Magellan radarkép.



10. ábra: Callisto. Központi dóm jöhet létre központi csúcs helyett, ha nagy H_2O tartalmú kéregbe történt a becsapódás, amelynek hője megolvasztotta a kéreg anyagát. Megfagyás után a jég nagyobb térfogatot foglalt el, mint a megolvadt víz. Érdekes, hogy az ugyanoda történt újabb, bár kisebb becsapódás központi csúcsú krátert hozott létre. Galileo fotó.



11. ábra: Mars. Posvány-terítő jöhet létre törmelékterítő helyett, ha nagy illó anyag tartalmú kéregbe történik a becsapódás. Viking fotó.



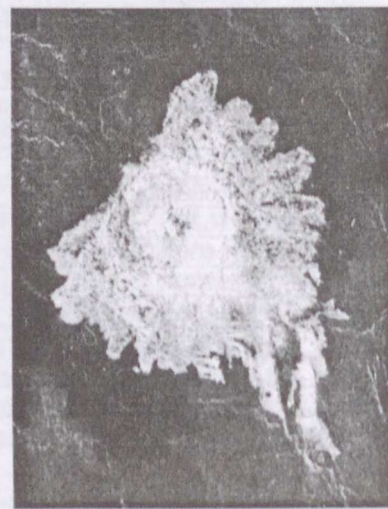
12. ábra: Mars. „Negatív kráter” akkor jöhet létre, ha nagy illóanyag tartalmú kéregbe történt becsapódás után keményebb anyagú elöntés (vulkán) vagy lerakódás (üledék) csaknem eltemeti a krátert. A későbbi erózió pedig könnyebben kikoptatja a lazább anyagú kráter-sáncot – árkot hagyva vissza a helyén. Viking fotó



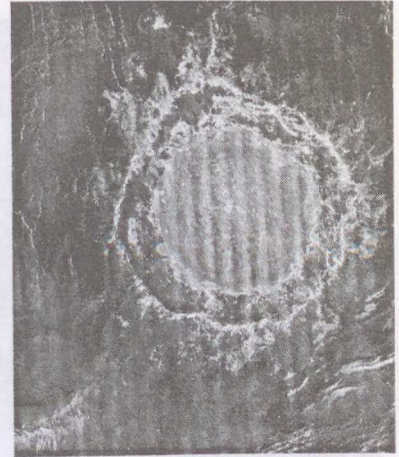
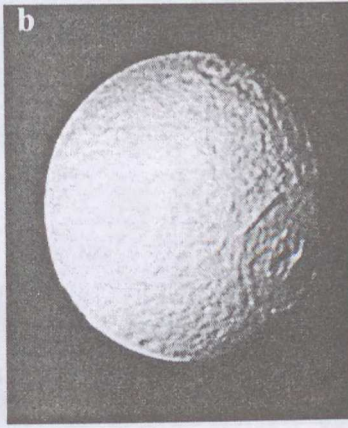
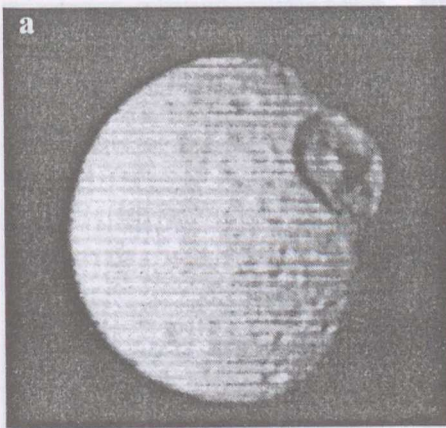
13. ábra: Vénusz. Szinkron becsapódás nyomát mutatja a három kráter balra fenn. Magellan radarkép.



14. ábra: Vénusz. Egy „Tungúz esemény” nyomát őrzi a „radar-sötét” terület becsapódásos kráter körül (lent) és becsapódásos kráter nélkül (fent). Magellan radarkép.

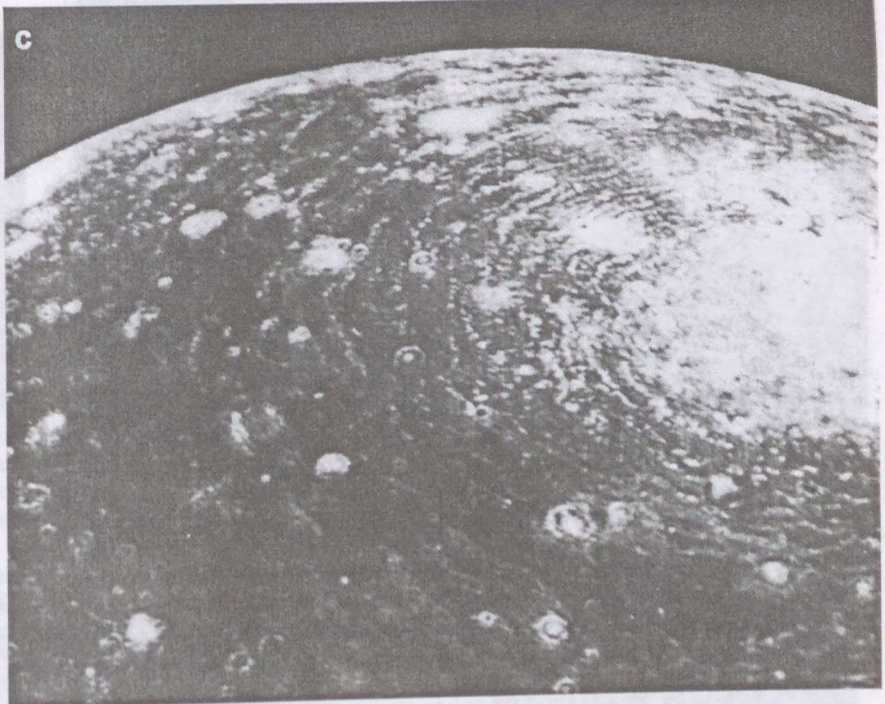
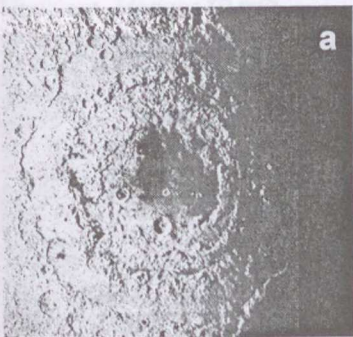


15. ábra: Vénusz, Aglaonice kráter. Aszimmetrikus és virágszirom szélű törmelékterítő körülötte nagyobb radar-sötét területtel. Magellan radarkép.

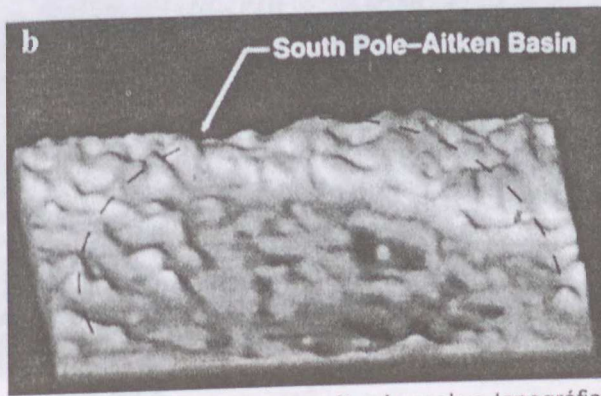
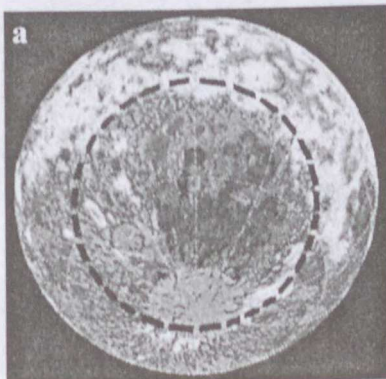


16. ábra: Két Szaturnusz hold. A Mimas (a) Herschel nevű óriáskrátérre már a vastag, szilárd kérgű holdba történt becsapódással keletkezett, de a Tethysen (b) még volt relaxációra mód az Odysseus óriáskrátér keletkezése után, mert a kráter aljzata fel tudta venni a test görbületét. Voyager fotók.

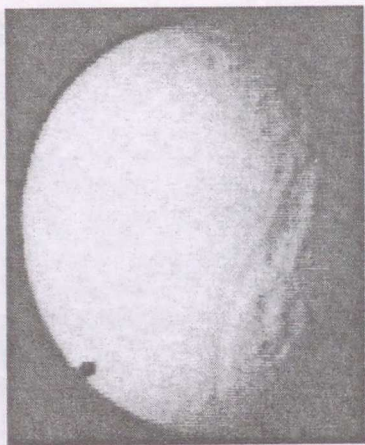
17. ábra: Kettősfalú kráter a Vénuszon. Magellán radarkép



18. ábra: Több-gyűrűs medencék szilikát (a, b) és jég bolygótesten (c). a: A Holdon a Mare Orientale, Lunar Orbiter 4 fotó. b: A Merkúron a Caloris Medence, Mariner 10 fotó. c: A Calliston a Walhalla, Voyager fotó.



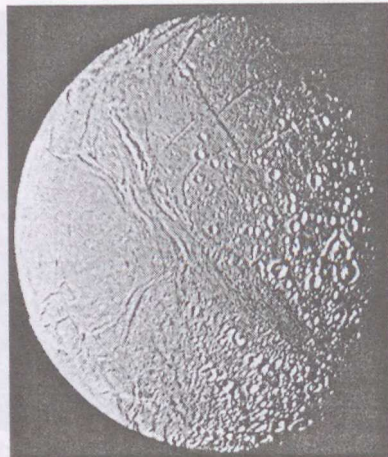
19. ábra: A nagy bombázási időszak ősi becsapódásainak nyomait már csak a topográfia őrít meg, mint ezt a Holdon talált South Pole – Aitken Medence is mutatja. Clementine magasságmérés.



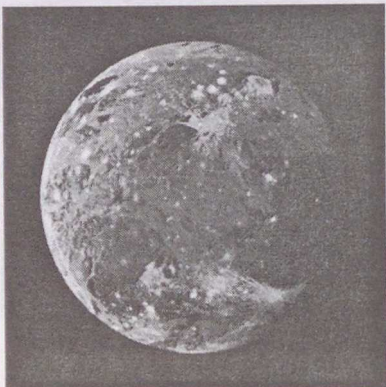
20. ábra: A főként H_2O -ból álló Tethys bolygó méretű repedésvölgye akkor keletkezett, amikor a holdtest belseje is megfagyott. Voyager fotó.



21. ábra: A Dione követő oldalán látható albedo alakzatot a repedés mentén kigázosodó H_2O dérlerakódásai hozhatták létre. Voyager fotó.



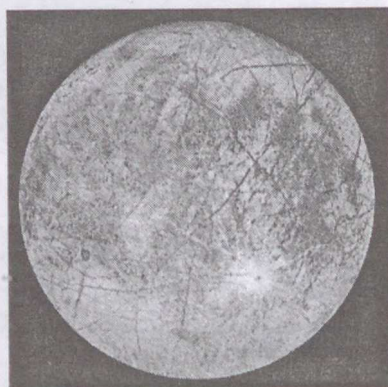
22. ábra: Az Enceladuson repedések párhuzamos eltolódása (jobbra fent) és fél kráterek (jobbra lent) figyelhetők meg. Voyager fotó.



23. ábra: A Ganymedes sötét, kráterekkel teli, öreg kéregblokkjai, és az azokat körülölelő fiatal, világos csíkjai. A fényes foltok a becsapódások által kivágott törmelékterítők. Galileo fotó.



24. ábra: Az Ariel. Balra fent egy globális repedésvölgy vége látszik, ami a főképp H_2O tartalmú hold belsejének megfagyása miatt keletkezett. Lent a globális repedéshálózat elemei. A világos foltok becsapódások törmelékterítői. Voyager fotó.



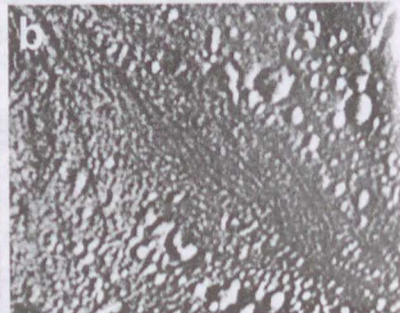
25. ábra: A repedésekkel keresztül-kasul szabdalt Europa. Jobbra lent a fiatal felszín kevés becsapódásos krátereinek egyike, a Pwyll kráter látható nagykiterjedésű törmelékterítőjével. Galileo fotó.



26. ábra: Víz-jég, mint vulkáni anyag az Arielen (fehér nyilak). Nem vízként folyhatott ki itt a "láva", mert nem tölti ki a völgyet. Voyager fotó.

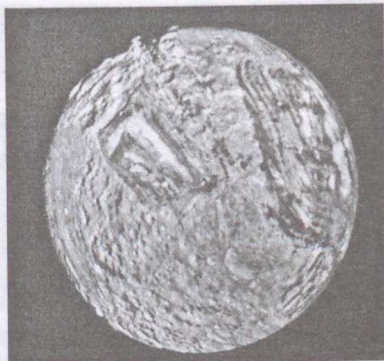


27. ábra: Felszínrészletek a Ganymedesről (a) és az Enceladusról (b). A repedések belsejében a repedések középvonalával párhuzamos gerincrendszer látszik, és a kéreg-eltűnés nyomaként a fél-kráterek. Voyager fotók.





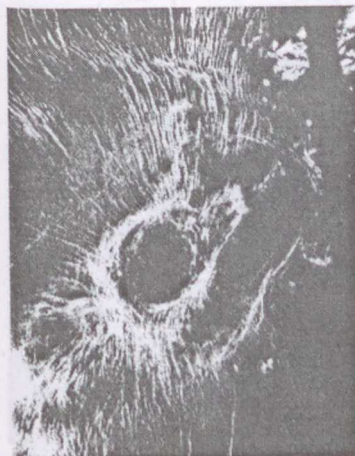
28. ábra: Rátolódásos vető a Merkúron. *Mariner 10* fotó.



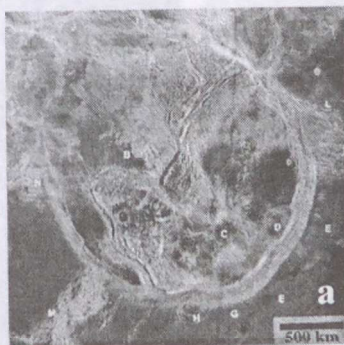
29. ábra: A Miranda a három nagy ovoiddal és a rátolódásos vetővel a bal és a középső ovoid között, valamint a 20 km magas falú kiemelkedéssel (felül). *Voyager* fotó.



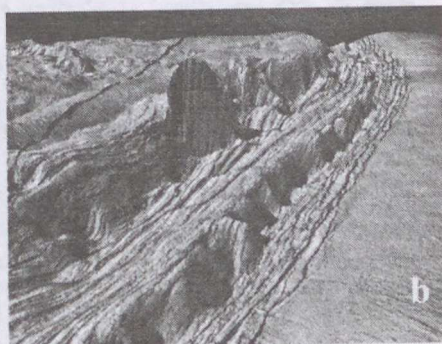
30. ábra: Néhány száz km átmérőjű korona a Vénuszon. Az őket összekötő repedéshálózat arra utal, hogy itt több köpenyáramlás egyidejűleg működött, és redőzte meg a Vénusz bőrszerűen vékony kérgét. *Magellan* radarkép.



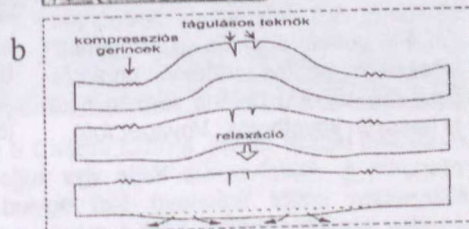
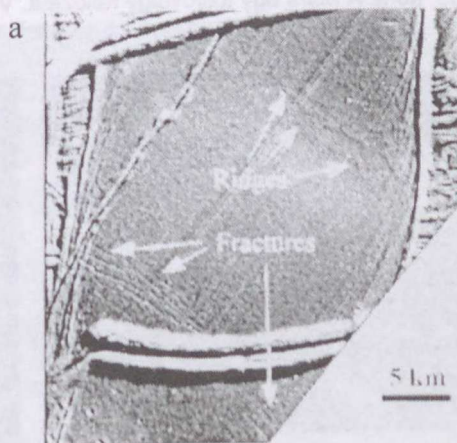
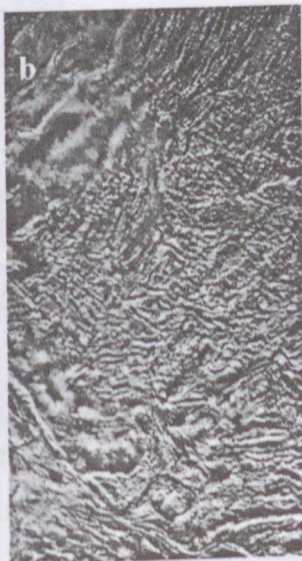
31. ábra: Egy korona a Vénuszon. A radiális és körkörös repedésrendszer jól látszik. *Magellan* radarkép.



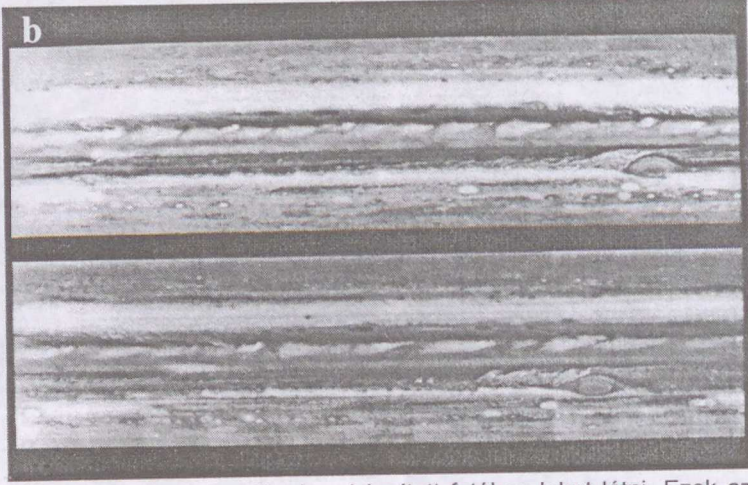
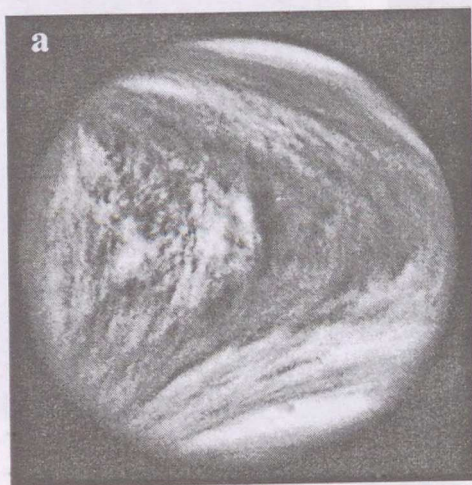
32. ábra: A legnagyobb korona a Vénuszon, a 2500 km átmérőjű Artemis Chasma felülnézetben (a), és körredőjének egy részlete (b) számítógéppel beforgatva, mintha felette repülnénk. *Magellan* radarkép.



33. ábra: Vénusz. a: A Lakshmi Planum felföldet (fekete folt a képen alul) körülölelő gyűrűs hegyrendszer (radar-fényes görbült csíkok), és tőlük északra az Itz'papatol't tesszera két elnyúlt foltja (világosabb szürke foltok a kép felső részén). *Magellan* radarkép. b: Egy tipikus tesszerát részletesebben bemutató *Venýera* fotó.



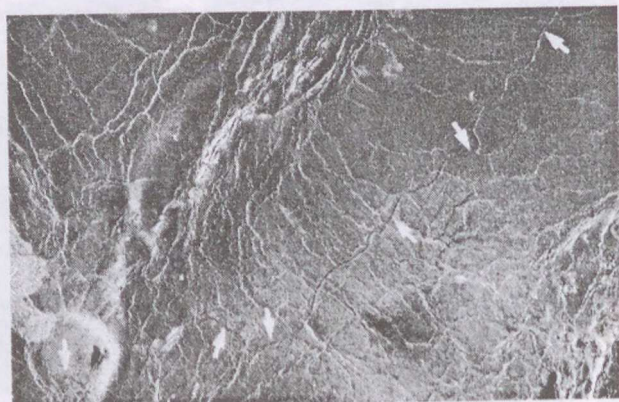
34. ábra: Az Europa felszínén (a) egy repedésen belül a felső fehér nyílak relaxálódott kompressziós nyomokra mutatnak. A relaxáció folyamatát a b. ábrán lehet követni. *Galileo* fotó.



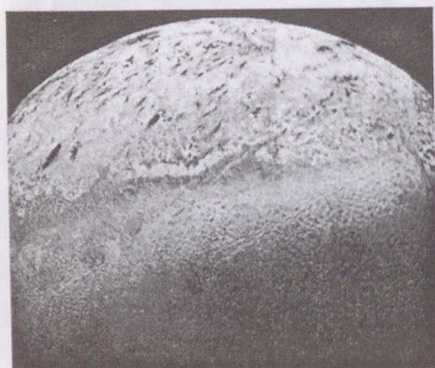
35. ábra: a: A Vénusz felhőzetének részleteit csak az ultraibolya fényben készített fotókon lehet látni. Ezek az egyenlítő mindkét oldalán egyetlen cirkulációs cella és a gyors szuperrotáció okozta "sodornyom" jelenlétére utalnak. *Magellan* fotó. b: A Jupiter esetében legalább nyolc cirkulációs cella (felhősáv) van az egyenlítő mindkét oldalán. Ezt a két képet a két *Voyager* szonda felvételeiből állították össze, így láthatók a néhány hónap alatt bekövetkező változások, és a foltok "sajátmozgásai".



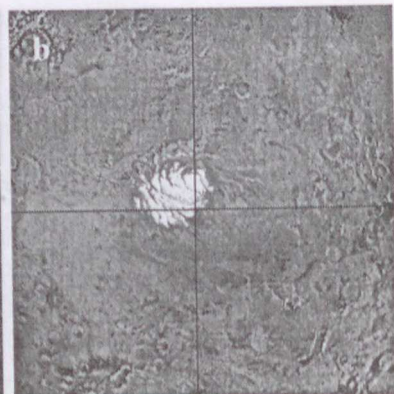
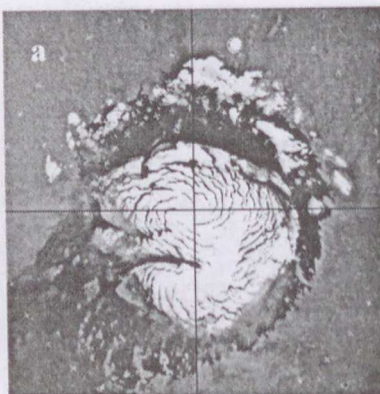
36. ábra: A Mars egy folyóvölgy hálózata. *Viking* fotó.



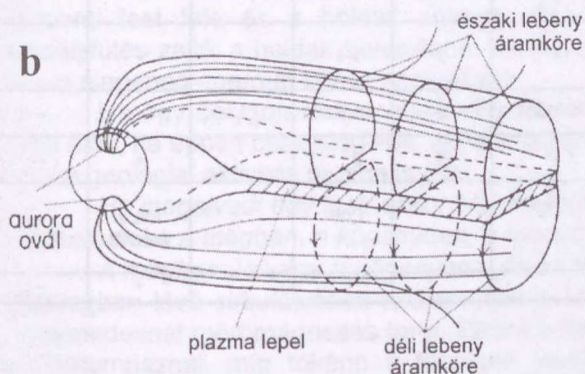
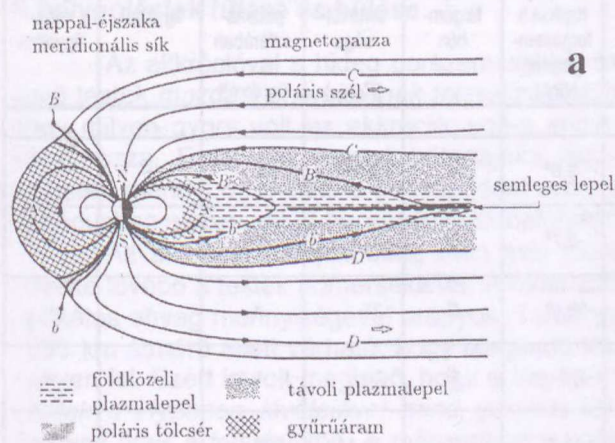
37. ábra: Egy, a Vénuszon található láva-völgy, amely 6800 km hosszú, és 1,5 km-nél sehol sem szélesebb. Ez nagyon lassan hűlő, híg lávára utal. *Magellan* radarkép.



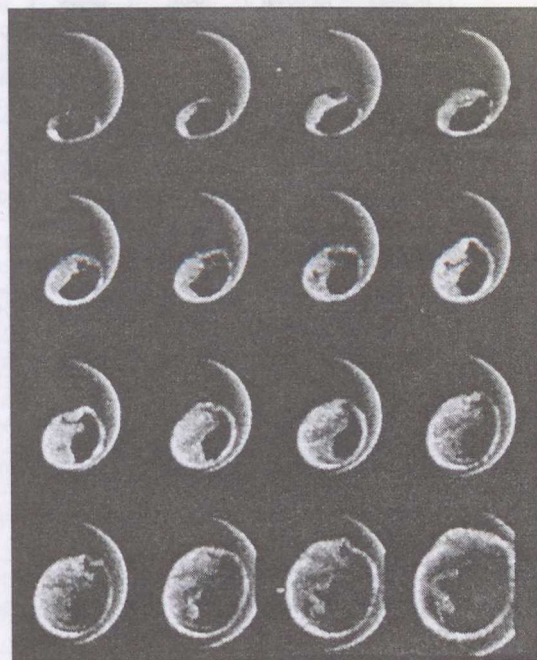
38. ábra: A Triton óriási, nitrogénjégből álló poláris sapkája. Az egyenlítői vidékek jégmentes területén látható repedések néhol a poláris sapkán belül is hosszan követhetők. *Voyager* fotó.



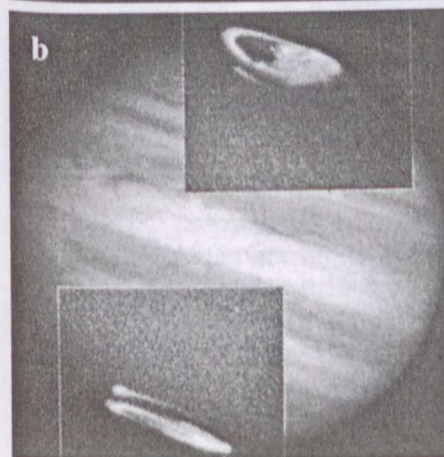
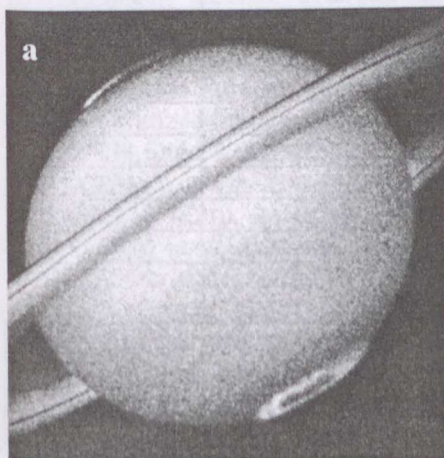
39. ábra: A Mars északi (a) és déli (b) poláris sapkája nagyon különböző méretű. Feltűnőek a poláris sapkába bevágódó spirális völgyek. A permanens északi sapka főleg víz-jégből, a déli főleg széndioxid-jégből áll. *Mars Global Surveyor* fotó.



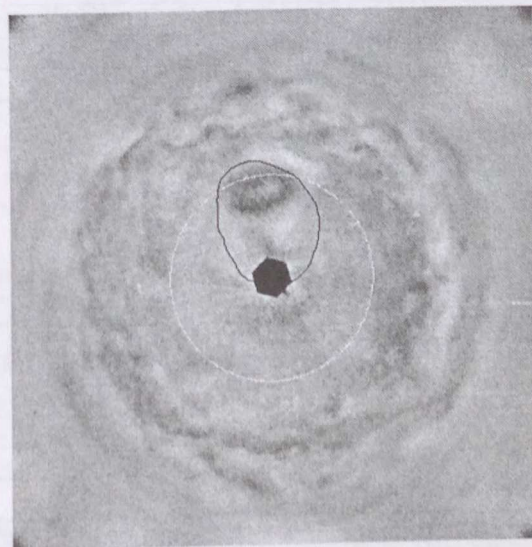
40. ábra: Egy magnetoszféra szerkezete két-dimenziósan a forgástengelyre és a Nap-bolygó irányra illeszkedő sík mentén (a), és csak a nyitott erővonalak három-dimenziósan (b).



41. ábra: A földi aurora ovál 16 képe, ahogy a Dynamic Explorer hold felette elrepülve látta, miközben egy geomágneses vihar zajlott. A jobb-oldali fényes ív minden képnél a Föld sarlója (újholdnak megfelelő fázis), ahogy a Nap a túloldról megvilágítja a Földet. Jól követhető, ahogy a vihar kifejlődésével az aurora övezete egyre nagyobb átmérőjű, és az éjszakai oldalon egyre szélesebb, és egyre távolabbra terjed ki a pólustól.



42. ábra: A Hubble Űrtávcső felvételei a Szaturnusz (a) és a Jupiter (b) aurorájáról. Látható, hogy a két póluson egyszerre lángol fel a sarki fény. A Jupiter mindkét aurora övén kívül jól kivehető fénylő folt az Io "lábnyoma". A déli póluson jobban látszik, mert ott gyengébb a mágneses tér.



43. ábra: Ezen a Cassini fotón a Jupiter északi pólusának környékét láthatjuk egy sötét aurora-folttal. A magnetoszférában a bolygó felé gyorsított töltött részecskék bombázásának hatására a felsőlégrében kémiai változások zajlanak, s az ily módon létrejött aeroszol szemcsék (szmog) felhője rajzolja ki a sötét aurora-foltot. A fekete vonal csak fel akarja hívni a figyelmet a fekete foltra.

Mágneses terek

	sziderikus rotációs periódus (nap)	milyen rétegben keletkezik	mágneses dipól- momentum (gauss cm ³)	felszíni térerő: egyenlítői É-i pólus D-i pólus (gauss)	offset = közép- pontok közötti eltolódás (km)	mágneses tengely hajlása a forgástengelyhez (fok)	É-i pólus melyik félgömbön	magneto- szféra orttávolsága (R _{bolygó})	részecske- sűrűség a plazma- szférában (ion/cm ³)	aurorát meg- figyelték	rádió- sugárzást meg- figyelték
Nap			$9 \cdot 10^{43}$								
Jupiter	0,41	fémeshidrogén	$1,6 \cdot 10^{30}$	4,28 15 12	4850 0,068 R _J	-9,6°	É	45-100	4000	+	+
Szaturnusz	0,44	fémeshidrogén	$4,7 \cdot 10^{28}$	0,21 0,83 0,69	900 0,015 R _{Sz}	-0,7°	É	21	20	+	+
Uránusz	0,72	ionizált víz-köpeny	$4 \cdot 10^{27}$	0,25 1,1 0,1	7700 0,3 R _U	-58,6°	É	27	4	+	+
Neptunusz	0,74	ionizált víz-köpeny	$2 \cdot 10^{27}$	0,13	9600 0,4 R _N	-47°	É	26	1,4	+	+
Föld	1	olvadt vasmag	$8 \cdot 10^{25}$	0,31 0,58 0,68	460 0,072 R _F	+11,7°	D	10-15	100	+	+
Merkúr	58,65	olvadt vasmag	$5 \cdot 10^{22}$	0,0035 0,007 0,007	0	+14°	D	1,4		+	-
Mars	1,02	olvadt vasmag	$< 2 \cdot 10^{22}$	0,00064	0	< +15°	É	1,5		-	-
Ganymedes	7,15	olvadt vasmag	?	0,00719	?	+ 4°	D	2		+	-
Vénusz	243,01	bolygó-közi erővonal-kötegek	$< 10^{21}$	0,000003	-	-		1,05		+ foltos aurorát	-
Triton	5,88	-								+	-

Légkörök

	átmérő	légnomás (atm)	összetétel	felszíni hőmérséklet
Vénusz	12104	90	CO ₂ (96%), N ₂ (3,4%)	773°K
Titan	< 5150	1,6	N ₂ (85%), CH ₄ , Ar (12%)	94°K
Föld	12756	1	N ₂ (78%), O ₂ (21%), H ₂ O, Ar	288°K
Mars	6787	0,007	CO ₂ (93%), N ₂ (3%), Ar (1,6%)	293°K
Triton	2705	$1,4 \cdot 10^{-5}$	N ₂ , CH ₄	34°K
Europa	3138	$2,5 \cdot 10^{-7}$	O ₂	110°K
Io	3632	10^{-9}	SO ₂ , S, Na	133°K
Ganymedes	5276	10^{-11}	O ₂	145°K
Hold	3476	$\sim 10^{-12}$	CO ₂ , CO, CH ₄ , Ne, Ar, Na, K	403°K
Merkúr	4878	10^{-15}	He (98%), H, O, Na, K	703°K
Plútó	2302	?	N ₂ , CO, CH ₄ , Ar	60°K

Poláris sapkák anyaga

Merkúr	H ₂ O
Föld	H ₂ O
Hold	H ₂ O
Mars	H ₂ O, CO ₂
Triton	N ₂
Plútó	N ₂ ?

Folyómedrek

Vénusz	sókban-gazdag láva csatornái
Hold	lávacsatornák
Föld	víz
Mars	víz

Óceánok

Föld	víz	nem globális
Europa	víz ~ kb. 100 km mély, tetején jég réteg	globális
Ganymedes?	víz ~ kb. 170 km mélyen 10 km vastag	globális
Callisto	víz ~ kb. 150 km mélyen 10 km vastag	globális
Titan?	metán, etán, propán, propén	nem globális

Jelenlegi vulkanizmus

Mely testeken zajlik jelenleg aktiv vulkanizmus	Milyen magasra jut fel a vulkáni anyag
Io	~ 800 km
Triton	~ 8 km
Föld	~ 10 km
Enceladus ?	Szaturnusz E-gyűrűjét adja
Europa ?	Az Europa-pályán kívüli gáztóruszt adja

A bolygótestek fűtése és hűlése

Az akkrécióval a hideg porszemcsékből összeállt bolygótestek anyagát az ütközésben résztvevő testek *mozgási energiájának termalizálódása* felfűtötte. Hogy milyen mértékig, az attól függött, hogy milyen gyors volt az akkréció; volt-e annyi idő két becsapódás között, hogy a hőt a bolygó kisugározza. Ezért egy bolygó hőtartáléka nagyon függ ettől az időszaktól, vagyis hogy milyen gyorsan, mennyi és mekkora becsapódást szenvedett el. Ezt elsősorban az utolsó nagy bombázási periódusban elszenvedett becsapódások befolyásolják.

Az akkréció befejeződése után már csak a bolygótestekbe beépült *radioaktív elem bomlás* növelte tovább a testek hőmérsékletét. A radioaktív elemek – és így ez a fűtés is – a testekbe beépült szilikátos anyag mennyiségével arányos. Tehát az óriásbolygók nagy illóanyagtartalmú holdjain csak 2000 km átmérő felett várható, hogy elegendő hő áll rendelkezésre ahhoz, hogy a hold gömbalakot vegyen fel. Ezért is volt meglepő, hogy a *Voyager* szondák tanúsága szerint a *400 km feletti átmérőjű holdak a Hyperion kivételével mind gömbalakúak, és nagyon sokan ráadásul geológiai aktivitás nyomait őrzik a felszínükön.* A magyarázat a holdrendszerek rezonáns szerkezete, az óriási tömegű központi test léte és a holdak anyaga. Rezonáns helyzeteken való átmenetkor ugyanis nagy árapályfűtés zajlik a holdak belsejében, amely nemcsak megolvadásukhoz, de geológiai aktivitásukhoz is elegendő energiát képes szolgáltatni.

Ha egy bolygótesten a maximális fűtés nem volt elég a megolvadáshoz, akkor azt szabálytalan alak, ha éppen csak elég volt, azt gömbalak, ha pedig több, mint ami elég volt, azt a gömbalakon kívül a geológiai aktivitás nyoma is jelzi.

Ha megolvadt egy test, akkor hőmérsékleti és/vagy összetételbeli inhomogenitások konvekciót indíthatnak be a magban, a köpenyben, a folyadékszférában és a légkörben is.

A magban és/vagy a köpenyben játszódó konvekció *mágneses teret* hozhat létre. A folyékony vasmagban lévő cirkulációnak tulajdonítjuk a Merkúrnál, a Földnél, az ősi Holdnál, a Marsnál és a Ganymedesnél mért mágneses teret, főként a fémes hidrogénköpenyben játszódónak a Jupiternél és a Szaturnuszánál, míg főképp a fémesen viselkedő vízköpenyben játszódónak az Uránusz és a Neptunusz mágneses terét. A köpeny cirkulációjának egyébként vulkanizmus és/vagy tektonizmus lehet a következménye. A folyadékszférában és/vagy a légkörben zajló cirkuláció következménye kéregerózió, és az energiák újraelosztása. Az óceánban pl. a Földön az ú.n. *Broecker conveyor* említhetjük, vagyis a nagy óceáni szállítószalagot, amelynek részei a *Golf* és a *Humboldt áramlás* is. A légkörben globális szélrendszerek alakulnak ki, csapadékképződés indul meg, és az elektrosztatikus feltételek megváltozhatnak (villámlás, rekombináció).

A bolygótestek belsejéből a hő vezetéssel és anyagáramlással juthat ki a felszínre. Az anyagáramlás lehet a köpenyben lezajló **konvekció** és **vulkanizmus**. Ezen utóbbi nagyon gyorsan hűt, mert közvetlenül a kéreg fölé juttatja a forró anyagot.

A fűtés általában tágulást, a hűlés általában összehúzódást okoz – kivéve speciális anyagot, mint amilyen a víz, amely 4°C-on a legsűrűbb. A test belsejének a teljes megfagyása hozhatta létre a *Tethys* (20. ábra), a *Titania* és az *Ariel* (24. ábra) nagy repedésvölgyeit, amelyek csaknem teljesen körbeérik a bolygótesteket. Fázisváltozás tágulást vagy összehúzódást eredményezhet attól függően, hogy az átkristályosodás térfogatnövekedéssel vagy csökkenéssel jár.

A felszín sugárzással és légkör és/vagy liquidoszféra esetén vezetéssel is továbbadja a hőt. A hűlés annál gyorsabb, minél kisebb a test, mert térfogatához képest annál nagyobb felület hűti. Ezért a *kisebb testek kérge gyorsabban vastagszik*, ami egy kritikus vastagságnál leállítja a vulkanizmust és a tektonikai mozgásokat is.

A légkör/liquidoszféra vezetéssel, áramlással, sugárzással, párolgással, szökéssel adja le a hőt a világűr felé. Ha a légköri összetevők valamelyike infravörösben elnyel, akkor üvegházhatás működhet, amely lassítja a bolygótest hűlését azzal, hogy a kisugárzott hő egy részét visszatartja. Előfordulhat azonban szilárd fázisú üvegházhatás is, ami a Triton nitrogén-jegével és esetleg a Mars széndioxid-jegével kapcsolatban merült fel.

Kéreg

Egy bolygótesten **háromféle kéreg** keletkezhet.

Egy magmaóceán lehetővé teszi a differenciálódást, vagyis a nehezebb és könnyebb elemek elkülönülését. E differenciáció miatt a hűléssel először a legkönnyebb anyagból képződnek kristályok a felszínen, és úsznak a magmatest tetején, tehát hűlés közben először ezekből jön létre a kéreg: ez az **elsődleges kéreg**. Ha a köpenyben áramlások indulnak be hőmérsékletbeli vagy sűrűségbeli inhomogenitások miatt, akkor ezeket a könnyű kristályokat az áramlás összesodorja, és bizonyos helyeken összegyűjti. Ezeken a helyeken a kéregdarabok egymáson feltorlódhatnak, a kéreg megvastagszik, és az úszás archimédieszi törvénye szerint úszik az alatta lévő magmán, vagyis izosztas-

tikusan kompenzált. Ha a köpeny áramlása egy egycellás cirkuláció, akkor az összehordott kéregdarabok az égitest egyik oldalára gyűlnek össze, mint ezt a Hold és a Mars esetében láttuk. Ilyenkor az égitest alakjának középpontja nagyon eltér a gravitációs középponttól (a Holdnál 1,6, a Marsnál 3 km a különbség).

Amikor a feláramlás helyéről már minden könnyű kristályt elhordott a köpenyáramlás, és az olvadék megmaradó része kristályosodik ki a hűlés folyamán, akkor keletkezik a **másodlagos kéreg**. Ez úgy is létrejöhet, hogy vulkáni működés feljuttatja az olvadékot az elsődleges kéreg tetejére vagy mélyedéseibe, mint ahogy ez a Hold *mare* területei esetében történt.

Ha azonban egy égitesten működik a lemeztektonizmus, akkor a betolódási zónáknál a másodlagos kéreg magával viheti az elsődleges kéregből letört darabokat, meg a légköri és/vagy folyadékerosózió miatt főleg az elsődleges kéregből képződött üledéket, és mindezt beolvasztva a köpenyanyagba összedolgozza. Ha ebből az anyagból új kéreg képződik, azt nevezzük **harmadlagos kéregnek**. Az ilyen kéreg keletkezéséhez az kell, hogy több cikluson keresztül, folyamatosan működjön a lemeztektonizmus. *Jelen tudásunk szerint ilyen harmadlagos kéreg csak a Földön létezik.*

Kráterek

Mint említettük, a bolygók összeállása ütközéssel történt, és ahogy nőttek a testek, egyre katasztrofálisabb ütközéseket szenvedtek el (4c, 16, 18, 19. ábra). A becsapódás energiája részben hőenergiává alakult át, amely a felszínt és a légkört fűtötte, részben a kivágott törmelékterítő kinetikus energiájává és akusztikus energiává alakult, valamint a légköri lökésfront energiájává, amely a felszíni anyagot megörölte ("Tungúz esemény" a Földön, a Vénuszon, 14. ábra).

Az űrkutatás megmutatta, hogy a *felszíneken a leggyakoribb felszíni formáció a becsapódások nyomaként létrejött becsapódásos kráter*. Bár keletkezésük mindenütt ugyanolyan törvények szerint zajlik, és keletkezési mechanizmusuk elég jól ismert, mégis meglepő, hogy a különböző bolygótesteken nem ugyanúgy néznek ki. A becsapódás hatását ugyanis a becsapódó test részéről is és a céltest részéről is több tényező megváltoztathatja.

A **becsapódó test részéről** az *ütközési sebesség* különbsége miatt ugyanakkora becsapódó tömeg esetén *heliocentrikus* pályáról érkező test nagyobb krátert (óriás krátereket, 4c, 16, 19. ábra; kettős falú krátereket, 17. ábra; vagy több-gyűrűs medencéket, 18. ábra), míg *planetocentrikus* pályáról érkező test kisebb krátert (22, 27. ábra) hoz létre.

Planetocentrikus becsapódásoktól erősen kráteres a *Titánia*, a *Mimas*, a *Rhea*. Ebből arra következtetnek, hogy több az üstökösmag, mint korábban hitték, mert a külső Naprendszerben főleg üstökösmagok, míg a belső Naprendszerben főleg kisbolygók a fő kráter-létrehozó becsapódó testek. Lokális ok is létrehozhat krátereket, pl. ha egy közelben lévő testet szétrobbantott egy ütközés. Ilyennek a nyomát a *Triton* holdon lehet látni, ahol csak a hold egyik oldalán vannak becsapódásos kráterek.

A becsapódás szögétől függ a kráterek alakja. Centrális (merőleges) becsapódás esetén kör-alakú kráter keletkezik (mindenütt megtalálhatók a kerges testeken, pl. 7. ábra), vagy a céltest teljesen széttörik (szabálytalan alakú holdak, meteordarabok, por). Lapos becsapódási szög esetén ellipszis alakú kráter és lepkeszárnyyszerű törmelékterítő keletkezhet (8. ábra). A Marson és a Holdon fotóztak ilyeneket a szondák. A hirtelen elgőzölgött anyag *jet*-szerű, gyors áramlása ilyenkor nagyobb darabokat is felkaphat, és szökési sebességre is gyorsíthat (meteoritok a Holdról, Marsról).

Nem-centrális óriás ütközésnél kéreg-lefröccsentés (Merkúr, Föld, Plútó), ha a becsapódás az egyenlítő síkban és nem centrálisan történik, akkor forgássebesség-változás (Vénusz), ha a becsapódás nem az egyenlítő síkban történik, nagy tengelyhajlás (Uránusz, Plútó?) lehet az eredmény. Ha illókban gazdag a becsapódó test, olvadék maradhat a kráterben utána (Vénusz, 9. ábra).

A **céltest részéről** is többféle tényező szól abba bele, hogy milyen lesz egy kráter.

Kisebb bolygótesten például magasabb falú és központi csúcsú kráter jöhet létre a kisebb gravitáció miatt.

Ugyanazon a testen kisebb impulzusú becsapódásnál nincs központi csúcs (28. ábra), nagyobbánál van (7. ábra), még nagyobbánál központi gyűrűhegy (9. ábra), majd kettős falú kráter (17. ábra) jön létre, míg óriásnál többgyűrűs medence (18. ábra) és esetleg az antipóduson összetört terület.

Lágy anyagú testen pl. a Jupiter jégholdjain gyakran nem jön létre központi csúcs (27a. ábra), mert a kéreg nem elég merev, hogy visszapattanjon. Már teljesen megfagyott vagy nagyon vastag kergű testen nincs relaxációra mód (a *Mimas* hold *Herschel* nevű óriáskrátéré, 16a. ábra), míg vékony kergű testen a kráter aljzata utólag felveheti a test görbületét (a *Tethys* még képlékeny volt az *Odysseus* kráter létrehozó becsapódás idején, 16b. ábra). A magasabb hőmérséklet miatt nem olyan kemény anyagú *Calliston* a *Walhalla* óriási becsapódásnyom (18c. ábra) körgyűrűinek hegységei visszasüllyedtek a kéregbe, és csak a környezettől eltérő albedo jelzi egykori helyüket.

Több felszíni-rétegű testbe történt becsapódás esetén, ha a becsapódás elég mély volt, hogy áttörje a felső réteget, az alsó réteg kivágott és szétterült anyaga látszik sugarak vagy halo formá-

jában (18c, 23, 24, 25. ábra). Ha a bolygótest felszíni anyagát töltött részecske besugárzás elsötétíti, akkor a frissen kivágott és szétszórta anyag világos színe rajzolja ki a sugarakat vagy halót. A *Holdon*, a *Ganymedesen*, a *Calliston* és az *Oberonon* látunk ilyen krátereket, a Szaturnusz holdjain azonban nem (16, 22. ábra). Vízben nagyon gazdag felszíni anyag esetében a kráterfalon belül megolvadt és megrekedt víz központi dómmá alakul, amikor megfagy, mert a jég nagyobb térfogatú lesz (*Callisto*, 10. ábra).

Ha a céltest felszíni rétegei sok illó anyagot tartalmaznak, mint pl. a Mars, nem törmelék-, hanem **posvány-terítő** (11. ábra) terül szét a kráter körül, ahogy az ütközés hője megolvasztja a céltest anyagát. Ilyen testen „**negatív kráter**” (12. ábra) is keletkezhet, ha az illóban gazdag anyagban létrejött kráter környezetét és belsejét később keményebb anyag, láva vagy üledék tölti fel, és még később a laza anyagból álló körsánc hegyeinek anyaga kikopik – körárkot hagyva maga után.

Nagyon sűrű légkör esetén, mint pl. a Vénuszon, **nincsenek kis kráterek**, mert a légkör elégeti a becsapódó kicsi testeket, így azok nem vágnak krátert. A nagyobb testeket viszont annyira felmelegíti a súrlódás, hogy azok szétrobbannak a talajtérés előtt, így a darabok **szinkron csapódnak be**. A Vénuszon a 10-20 km-es kráterek mind szinkron becsapódásról tanúskodnak (13. ábra). Ha nagyobb test érkezik a légkörbe, a robbanás által létrehozott légköri lökéshullám porrá töri a talajt, így a kráterek körül több kráter-átmérőnyi távolságig „**radar-sötét**” terület látható a Vénuszról készült radarképeken („Tungúz esemény”, 13, 14, 15. ábra). Vajon a Földön a Tungúz meteor lökéshullámainak nyomát a fák ledöntésén kívül a talaj is jelzi-e? Ezt a talaj-összetörést közvetlen fényképezéssel nyilván sokkal nehezebben fedezhettük volna fel, de az éppen megfelelő hullámhosszon készült radarképek nagyon feltűnően mutatják.

A Vénusz sűrű légköre miatt a **törmelékterítők aszimmetrikusak** (15. ábra) lesznek ferde becsapódás esetén a kráterek körül, mert a behatoló test súrlódása által felmelegített légoszlop turbulens áramlásai nem engedik a törmelékterítőt kiterülni a beérkezés irányába. **Virágszirom-alakúak** (15. ábra) is lesznek, és **messzebb** is terülnek ki, mert a becsapódáskor felmelegedő sűrű levegő turbulens áramlásai felkapják, és messzebb viszik a szétterülő anyagot, mint ahogy az ballisztikus pályán szétterülne. A virágszirom alak azért alakul ki, mert a turbulens áramlások által a talajra lecsapott törmelék a légköri gombafelhők alakját rajzolja ki a talajra.

Becsapódásnak több minden lehet a következménye. Sebhely, vagyis kráter keletkezhet a becsapódás helyén, ezek minden kérges testen nagy számban megtalálhatók. A topográfia az ősi óriás-becsapódások nyomát még megmutatja lekopott sebhelyekként, mint a Holdon a *South Pole – Aitken medence* (19. ábra), de ezek rátekintésre már nem látszanak.

Repedésrendszer középpontjává válhat a becsapódás helye, és a kéreg áttörése esetén vulkanizmus centrumává is válhat. *A becsapódással ellentétes oldalon összetöredezhet a felszín a becsapódás által kiváltott szeizmikus hullámok fókuszálódása következtében.* Ez csak nagy becsapódások esetén látványos, mint pl. a Merkúron a *Caloris medence* antipodális területén.

Túl nagy mag is maradhat egy nagyobb test lapos szögű (nem-centrális) becsapódása után, mint az az ős-Merkúrral történhetett, vagy hold, ahogy az a Földdel és a Plútóval történhetett. Mascon (tömegkoncentráció) is utalhat egy egykori becsapódásra, mint a Holdon a nagy medencék keletkezésével kapcsolatos gravitációs anomáliák (2. ábra), ahol a köpeny sűrűbb anyaga benyomult a visszapattanó kéreg helyére. Légkör-elfújás is létrejöhet egy becsapódás következményeként, mint pl. a Marson az *Argyre medencét* létrehozó becsapódás.

A becsapódó test anyaga implantálódhat a céltest kérgébe vagy légkörébe. Pl. illó anyagot hozhatnak becsapódó üstökösmagok vagy kisbolygók a földszerű bolygókhoz. *A Föld óceánnyi mennyiségű vize így is kerülhetett a Földre.* A becsapódó test szétporolt anyagát a szelek az egész légkörben szétteríthetik. A napfény leblokkolása miatt ilyenkor a felszín lehűl, ún. „**nukleáris tél**” léghőben szétteríthetik. A napfény leblokkolása miatt ilyenkor a felszín lehűl, ún. „**nukleáris tél**” köszönthet be. Lehetséges, hogy ilyeneknek is szerepe volt a földi geológiai korszakváltásokban. Anomális összetételű rétegeként a több év alatt lassan, a Föld egész felszínén leülepedő finom por jelzi ma is az egykori becsapódást (pl. irídiumban gazdag réteg a K/T határon). Ha a becsapódás óceánba történt, akkor a becsapódás ereje tsunamikát (tengeri árhullámokat) indíthat el, amelynek nyomát ma tengeri üledék-terítéseként találhatjuk meg kontinenshatárokon, (Föld, Afrika K-i partjain K/T határtengeri üledék-terítéseként találhatjuk meg kontinenshatárokon, (Föld, Afrika K-i partjain K/T határon). Ha a becsapódás kontinentális kéregbe történt, akkor sokkhatást elszenvedett kvarcsezemcséket találhatunk (Föld, É-Amerika, K/T határ). Ha a becsapódási hőtől világméretű tűzvész keletkezett, akkor globális szénréteg rakódhatott le, (Föld, K/T határ), és savas esők eshettek az esemény után.

A geológiai aktivitás milyen szintjei valósultak meg az egyes bolygótesteken?

– A leghatározottabb égitesten geológiai aktivitásnak semmi nyoma nincs. Ilyen az összes kishold, a *Mimas* (16a. ábra), a *Hyperion* és a *Callisto* (18c. ábra), ahol a felszíneken változás csak a becsapódások következtében történik.

– A második fokozat az, amikor repedések vagy száradás nyoma látszik. Ebbe a kategóriába tartozik például az, amikor nagy H₂O tartalmú hold belseje megfagy, és ennek következtében bolygó-méretű repedésvölgy jön létre, mint a *Tethys* (20. ábra), a *Titania*, a *Dione*(?) és az *Ariel* (24. ábra)

esetében. Vagy repedések mentén a kipárolgó illó anyag dér-lerakódását lehet megfigyelni, pl. a *Dione* (21. ábra) és a *Rhea* hátsó oldalán lévő albedo-alakzatok formájában. Kiszáradás (mag kontrakciója) következtében létrejövő rátolódásos vetőket a Merkúron (28. ábra) és a *Mirandán* (29. ábra) láthatunk.

– Aktívabbnak minősíthetünk egy testet, ha már a differenciálódás nyoma látszik a felszínen, pl. sugarak vagy halo formájában a becsapódásos kráterek körül a felszín többi részétől eltérő albedoval. Ilyeneket láthatunk a Merkúr, a Hold, a *Ganymedes* (23. ábra), a *Callisto* (18c. ábra), az *Ariel* (24. ábra), a *Titania* és az *Oberon* esetében. A „mare elöntés” léte is differenciációra utal. Ekkor az alacsony-viszkozitású láva kifolyása a mélyedéseket elönti. A Holdon, az *Europán*, a *Ganymedesen* és a *Tritonon* (44. ábra) figyelhetünk meg ilyeneket. A repedés-rendszerrel kapcsolatban létrejövő lineáris albedo alakzatok is más anyag kiáramlására, tehát differenciációra utalnak. Ilyenek az *Europa* (25. ábra) világos és sötét, illetve „háromsávós” lineamentumai.



44. ábra: A Tritonon egy mare-kifolyás sima felszíne látható. A peremén a párkányok léte többszöri kifolyásra utal. Voyager fotó.

– Köpenyáramlásra utal, ha egyes helyeken tágulás, más helyeken kompresszió nyoma látszik, pl. bolygóméretnél kisebb repedésvölgy formájában (a Vénusz *Beta* – *Artemis-chasma* közötti „gyengeségi zónája”, a Marson a *Valles Marineris*), vagy lokális árok-gerinc rendszer jön létre lokális fűtés miatt, mint az *Enceladuson* (22. ábra). Nagy blokkok felemelkedése vagy lesüllyedése (a *Mirandán* az **ovoidok**, 29. ábra), vagy az ősi kéreg óriási, poligoniális darabjai (*Ganymedesnél*, 23. ábra, az *Arielnél*, 24. ábra az *Umbrielnél*, a *Tritonnál*, 38. ábra, és a Földnél, 4b. ábra) szintén a köpenyáramlás jelei. Ezen utóbbi együttjárhat globális repedés-hálózattal (a *Ganymedesnél*, 23. ábra, az *Arielnél*, 24. ábra, a *Tritonnál*, 38. ábra és a Földnél, 4b. ábra), ahol gyakran párhuzamos gerincrendszer látszik a repedéshálózat árkaiban belül (a *Ganymedesnél*, 27a. ábra, az *Arielnél* és a Földnél). Helyenként egymáshoz képest eltolódik a párhuzamos gerincrendszer, lokálisan, mint a *Ganymedesen*, az *Enceladuson* (22. ábra), az *Europán* és a *Tritonon*, vagy globálisan transzform vető hálózat jön létre az egész bolygótesten, mint a Földön (merev-lemez tektonizmus, 4b. ábra).

Ugyancsak köpenyáramlásra utalnak a pajzsvulkánok (forrópont vulkanizmus), amelyek lokális köpenyfeláramlás helyei, és a repedésmenti vulkanizmus is, ahol új kéreg keletkezik. Az előbbieket az *Ion*, a Vénuszon a *Beta*, *Atla*, *Western Eistla* vulkáni építmények esetében, a Mars óriásvulkánjainál és a Föld Hawaii-típusú vulkánjainál figyelhetünk meg, az utóbbit pedig a *Ganymedesen* (27a. ábra), az *Enceladuson* (27b. ábra), az *Arielen* (26. ábra) és a Földön a tengeralatti hátságoknál. Kéregeltűnés nyoma is köpenyáramlásra utal, így a fél-kráterek a *Ganymedesen* és az *Enceladuson* (27. ábra), valamint a Földön a mélytengeri árkok mentén.

Általában milyen fajta deformációk találhatók a kérges bolygótesteken?

Kéregrepedések keletkezhetnek görbületváltozás miatt, amit okozhat árapálydeformáció (az *Europa* lineamentum-rendszere, 25. ábra) vagy dómkeletkezés, pl. egy köpenyfeláramlás felett (mint pl. a Földön a Kelet-Afriai árok vagy a Vénuszon a koronák radiális törésrendszere, 30, 31. ábra).

Tágulási nyomok, pl. **globális méretű repedésvölgy** alakulhat ki fűtés miatt, amely az egész bolygótestre kiterjed vagy vízjégből álló hold belsejének teljes megfagyása miatt, amikor is a már korábban megfagyott kéreg felreped (*Tethys*, 20. ábra, *Titania*, *Dione*?, *Ariel*, 24. ábra).

Globális hálózatot alkotó repedésrendszer jöhet létre globális köpenycirkuláció miatt (*Ganymedes*, 23. ábra, *Ariel* – 24. ábra, *Umbriel*, *Triton* – 38. ábra) óriási poligoniális egységeit elválasztó hálózat vagy a Föld óceánalatti hátságainak hálózata (4b. ábra) a lemeztektonizmussal kapcsolatban.

Lokális méretű repedésrendszer lokális fűtés miatt is létrejöhet, mint ezt az *Enceladus* (22. ábra) és a *Miranda* (29. ábra) esetében láthatjuk.

Kompresszió globálisan, egész bolygófelszínre kiterjedő **rátolódásos vető-hálózatot** hozhat létre kiszáradás (kontrakció) miatt, mint ezt a Merkúr (28. ábra) esetében magyarázzák. Lokális kompresszió nyomaként értelmeznek kéreganyag-feltorlódást konvergáló köpenyáramlások felett, pl. merev kéregblokkok kiemelését (Földön a Tibeti Fennsík, a Vénuszon a *Lakshmi Planum* vagy a *Mirandán*, 29. ábra).

Kompresszió jön létre akkor is, ha lejtőn lecsúszó kéreganyag nekinyomódik kéreg-környezetének, pl. hegyek lejtőjén lecsúszó anyag hegyek körül körredőt hozhat létre. Ilyeneket látunk a Mars óriás pajzsvulkánjai körül, vagy a Vénuszon a koronák **annulusza** (kørsánca, 30, 31, 32 ábra) ilyen módon jön létre a dómosodás fázisából. Hasonlóan jöhettek létre redők nagyobb méretű kiboltosodás lejtőjén is, pl. a Marson a *Tharsis* hátság körül.

A **tesszera** (33. ábra) keletkezést is lecsúszással magyarázzák, amikor a köpenyfeláramlás felett létrejövő kéregboltozódás lejtőjén lecsúszó kéregdarabok megredőződnek, miközben a köpenyfeláramlás időben változtatja a helyét, így ugyanaz a kéregdarab különböző időben különböző irányokba csúszik, s ezzel egymást metsző redőrendszer jön létre. (A tesszerákat csak a Vénuszról ismerjük, más égitesten még nem találtunk ilyen képződményt.)

A **lánchegységek** is kompresszió miatt keletkeznek, mert a köpenyáramlás által elmozdított kéregdarabok összetorlódnak, és megredőződnek. A Földön az eurázsiai K-Ny-i és Amerika nyugati partvonala-menti É-D irányú gyűrt hegységszer, valamint a Vénuszon (33a. ábra) a *Lakshmi Planum* körüli gyűrt hegyek (a *Freya*, az *Akna*, a *Danu*, és a *Maxwell Montes*) lehetnek a példák. Az Európán keletkezik még redőződés, de ez hamar relaxálódik, vagyis visszasüllyed a lágy jégkéregbe (34. ábra).

A **platót** a planetológiában úgy definiálják, hogy az egy köpenyfeláramlás felett a vulkanizmus által felszínre juttatott anyaggal megvastagított kéregdarab, amely a forró pontról leválva majd már csak izosztatikusan kompenzált „mini-kontinens” lesz. A Vénuszon platók az *Ovda*, az *Alpha*, a *Thetis* és a *Tellus*, a Földön pedig Izland.

Kontinensnek a köpenyáramlás miatt összehordott, összeforrott, megvastagodott kéregdarabot nevezzük, amit az úszás archimédeszi törvénye alapján az izosztázia tart egyensúlyban. Gravitációs anomália nem tartozik hozzá, mert a kéregvastagodás nemcsak felfelé, hanem lefelé, a köpeny felé is kiterjed: a kontinenseknek „gyökerük” van. Ilyenek a földi kontinensek, a Vénuszon az *Ishtar Föld*, a Holdon pedig a túloldalon a *Koroljov krátertől* északra lévő vastag kéregdarab, amely plató volt, de ma már „mini kontinens”.

Szubdukciós zónáról akkor beszélünk, ha az egyik kéregdarab alátolódik egy másik kéregdarab alá, amikor is a felül maradó kéreg megredőződik, és feltornyosodik a magasba, az alul maradó pedig betolódik a köpenybe, és beolvad. Ezek a Földön a mélytengeri árkok, a Vénuszon az óriás *koronák* és *chasmák* bizonyos ívei mentén helyezkednek el (3. ábra).

Párhuzamos redőzet keletkezőfélben lévő, még képlékeny új kérgen keletkezik, amely a keményebb, régi kéreg arrébbtolásával csinál magának helyet. A *Ganymedesen* a világos csíkokon belül (23, 27a. ábra), az *Enceladuson* (22, 27b. ábra), az *Arielen* az árkok középvonalában (24. ábra) és a Földön az óceánközépi hátságánál találhatók ilyenek.

Vegyes, vagyis tágulás és kompresszió által létrehozott formák a **transzform vetők**, amelyeket a Földön lehet azonosítani. A globális merev-lemez tektonizmust csak a Földön találunk, ahol is az óceáni kéreg elég merev, hogy a tágulási centrumoktól (tengeralatti hátságok) nagy távolságra, egészen a mélytengeri árkokig továbbítsa a feszültséget, miközben ő maga csak a széleknél deformálódik. A Vénuszon lehet képlékeny-lemez tektonizmus, amely hasonlóan a földi kontinentális kéreghez diffúzan, lemezen belül is mindenütt deformálódik, és nem elég merev a feszültség nagy távolságú továbbítására.

Becsapódás mindenféle deformáción módosulást hozhat létre.

Vulkanizmus

A planetológiában általában a földi minták alapján a kéreg azon környezetét nevezzük **vulkánnak**, ahol a bolygótest belsejének megolvadt anyaga kerül ki a bolygótest felszínére.

A megfigyelések azt mutatják, hogy vulkáni tevékenység zajlik vagy zajlott a Földön, a Vénuszon, a Marson, a Holdon, a Merkúron, az *Ion*, az *Arielen*, az Európán és a *Tritonon*.

Gezírőről beszélünk, ha a bolygótest hőmérsékletén illó anyagnak számító összetevő áramlik ki (a Földön, az *Ion*, az Európán?, az *Enceladuson*?, a *Tritonon*).

A vulkáni kifolyás létrejöhet **forrópont vulkanizmussal** (Földön a Hawaii vulkánok, a Mars óriásvulkánjai, a Vénusz koronái és vulkáni építményei, az *Io* vulkánjai, 6. ábra), **repedésmenti vulkanizmussal** (földi tengeralatti hátságok, az *Europa*, *Ganymedes*, *Ariel*, *Triton* repedései), valamint kéregbetolódás esetén a bevitt megolvadó illó anyag miatt **robbanásos (explóziós) vulkanizmus** formájában (ilyeneket csak a Földön találunk a mélytengeri árkok menti vulkánok esetében).

A **láva** anyaga az olvadt köpenyanyag vagy a megolvadt kéreganyag. A láva szilikát a Merkúr, a Vénusz, a Föld, a Hold, a Mars és az *Io* esetében, kén vagy kéndioxid az *Ion*, víz az Európán, jég az *Arielen* (26. ábra) és nitrogén a *Tritonon*. A láva nagyon higfolyós a Vénuszon – valószínűleg a nagy sótartalom (szulfátok, karbonátok) miatt – ahol az 500°C-os meleg felszínen lassan hűlve több száz, sőt több ezer km hosszú, azonos szélességű „folyómedreket” vájt. A leghosszabb vénuszi „folyóvölgy” a Nilusnál is hosszabb (6800 km), és egyenesen 1-1,5 km széles (37. ábra). A Jupiter és a Szaturnusz holdjain is higfolyós a láva, ahol víz és ammónia keverék alkotja. Ugyanakkor az Uránusz és Neptunusz holdjain már egy kevés metilalkohol is keveredik a víz és ammóniához, s ettől az nagyon viszkózussá válik.

A **vulkáni tevékenység a felszín újraképzésével jár**. Amelyik égitesten hiányoznak az óriási kráterek, ott felszínújraképzés volt az első nagy bombázási periódus után. Pl. az *Arielen* és a *Titánián*

csak néhány nagy kráter van.

A Vénuszon a nagymennyiségű, híg láva feltöltött minden mélyedést, ennek következtében a felszín 65%-a hullámszerű vulkáni síkság. Az *Io* felszínének zöme szintén vulkáni síkság, és lokálisan 10 éves időskálán újul meg. A *Hold mare* elöntései az innenső oldali medencéket töltötték fel hasonló módon bazalttal. De ilyen "mare"-k láthatók a *Tritonon* (44. ábra) nitrogén-, az *Europán* víz-feltöltés következtében.

A Vénusz felszíne nagyon fiatal. Csak nagyon kevés, mintegy 800 db. becsapódásos krátert találtak. A vulkáni elöntés valószínűleg egyszerre történt az egész felszínen, legalábbis ezt a következtetést lehet levonni a becsapódásos kráterek egyenletes eloszlásából. Ezt úgy képzelik el, hogy nincsenek állandóan működő hőelvezető szelepek, s így a bolygó belsejéből hosszú ideig nem vezetődik el a hő, hanem felhalmozódik, és időnként hirtelen egy nagy „kéreg-befordulás” (*overturn*) következtében az egész felszín egyszerre újul meg.

Sűrűbb lávák esetén párkányos lávafolyások keletkeznek. Ilyeneket a Földről, a Vénuszról, a Marsról és az Uránusz és a Neptunusz holdakról ismerünk. A Naprendszer legnagyobb vulkáni hegye az *Olympus Mons*, amelynek léte 25 km magasságával és alapjának 600 km-es átmérőjével egyértelműen jelzi egyrészt, hogy a Mars kérge nagyon vastag, hogy ekkora építményt elbír, másrészt, hogy a Marson tartósan működött a vulkanizmus, harmadrészt, hogy lemeztektonizmus nem vitte arrébb közben a lemezt, hogy szigetsor jöjjön létre.

A vulkánok szerepe lényeges a légkörök utánpótlásában az illó anyagok kibocsátásával. Az illó anyagok körforgása – a felszíni rezervoárokat nem tekintve – a köpeny és a légkör között csak a lemeztektonizmus működése esetén biztosított, így jelen tudásunk szerint csak a Földön működik.

A vulkáni kilövellés magassága sok mindentől függ. Nő a kürtön való kiáramlás sebességével, a felszíni gravitáció csökkenésével és légkör/folyadékszféra esetén a lég/folyadék-nyomás csökkenésével. Így érthető, hogy a Földnél kisebb *Tritonon* 8 km magasságig is fellövellnek a gejzírek, míg az *Ion* légkör és folyadékszféra hiányában 800 km magasra is fellövell a vulkáni anyag.

III. lók

A bolygótestek illóanyaga a szilárd szemcsékre adszorbeálódva a szoláris köd porával került a bolygókba. Az óriásbolygók később, amikor már tömegük elég nagy volt, gravitációsan is magukhoz tudták kötni a környezetükben lévő gázt.

Számítógépi szimulációk alapján úgy gondolják, hogy bolygórendszer belső részére – ahol a Nap erős sugárzása miatt a hőmérséklet olyan magas volt, hogy a porszemcsékkel együtt nem épülhetett be illó anyag – az üstökösök és a 20-30%-nyi vizet tartalmazó kisbolygók szállították a vizet a Naprendszer külső részéről, és becsapódásukkal implantálták azt pl. a Földre is.

A bolygók keletkezése után a szilárd kérgű bolygótestek **elsődleges, primordiális légkörét** az ütközésektől felmelegedett testek kigázosodása hozta létre. Ezeket azonban a viszonylag alacsony szökési sebességek miatt mind el is fűjták a nagy becsapódások. Az óriásbolygók légköre a nagy szökési sebesség miatt a Naprendszer egész élete folyamán megmarad, azok légköre elsődleges.

A másodlagos légkörök szintén a szilárd kéregből kipárolgó illó anyagokból jöttek létre. Ezt a folyamatot nagyon felgyorsította, ha volt a bolygó felszínén vulkáni működés. A céltest légkörének a részévé váltak a becsapódó test illó anyagai is, továbbá a napszélből implantálódó atomok. Bár ezen utóbbiak a nagytömegű légkörök esetén elhanyagolhatóak, a nagyon ritka légkörrel rendelkező bolygótesteknél lényegesek: például a Merkúr légkörének 98%-a a napszélből származó hélium.

Az *Io*val és a Merkúrral kapcsolatban megemlíthetjük az ú.n. **pamacslégkör** fogalmát. Akkor használjuk ezt a kifejezést, ha nem az egész bolygót beburkoló légkör jön létre, hanem egy lokális hely felett keletkezik rövid időre illóanyag-burok. A Merkúron a forró pólusok kigőzölgése hoz létre légkörpamacsokat, az *Ion* pedig a vulkánok környezetében egy 15-20 órás időintervallumra jön létre légkör, amely kb. 20 óra alatt a nagytömegű Jupiter miatt elszökik tőle.

A légkör többféle módon tűnhet el egy bolygótest környezetéből. Nagy becsapódás akár az egész légkört is elfújhatja egy pillanat alatt. *A Mars esetében ma úgy gondolják, hogy az Argyre medencét létrehozó nagy becsapódás vetett véget ilyen módon az ősi, meleg, nedves éghajlatnak, amikor folyók és állóvizek lehettek a Mars felszínén a nagy légnyomás és üvegházhatás okozta melegebb klíma miatt.*

A hőmozgás lassú szökést tesz lehetővé, amely a hőmérséklet növekedésével és a bolygó-tömeg csökkenésével nő, mert egyre több molekula éri el a szökési sebességet. Ez a lassú folyamat különbséget tesz az izotópok között, ennek következtében a magasabb atomsúlyúak besűrűsödnek. Ha feltételezzük, hogy a Naprendszer összes bolygótestje ugyanabból az anyagból állt össze, amelyet ma a szenes kondritokban még megtalálhatunk, akkor az izotóparányok megváltozása a szenes kondritok anyagához képest segít annak megbecslésében, hogy pl. mennyi víz tűnhetett el a Marsról vagy a Vénuszról ilyen módon. (A becsapódás okozta elfűvás által elvesztett vízmennyiségről ez a módszer nem mond semmit.)

A napszél is erodálja a bolygólégköröket, ha nincs egy, a légkört tartalmazó magnetoszféra –

saját vagy egy hold esetében a bolygóé – amely eltereli a napszél részecskéit. Ilyenkor a légkör üstökös-szerűen elnyúlik a Nappal ellentétes oldal felé. Pl. a Hold ritka légköre kétszer, az üstökösöké több százszor olyan távolságig terjed ki a Nappal ellentétes oldalon, mint a Nap irányába.

Saját mágneses tér esetén a magnetoszféra elektromos terei felgyorsíthatnak ionokat szökési sebesség fölé, és így „poláris szél” révén pl. a Föld is veszít légköréből. Nagysebességű semleges atomként (*Energetic Neutral Atoms*; ENA) a magnetoszféra gyors ionjai semlegesítődve (pl. a hidrogénkoronák semleges hidrogénatomjaival való töltéscsere folyamatok révén) elszökhetnek, ha a semlegesítődéskor sebességvektoruk éppen kifelé mutat.

A felszínre fagyhat a légkörnek az a része, amely a bolygótest hőmérsékletén le tud csapódni poláris sapkák (Föld, Mars, 39. ábra, Triton, 38. ábra, Plútó, Merkúr, Hold) vagy gleccserek (eddig csak a Földről ismerjük) formájában, vagy a porviharok porával a regolitba (Mars). Talajba is kötődhetnek a légkör bizonyos összetevői. Így a szabaddá vált oxigén rozsdát képezhet, a széndioxid karbonátokba kötődhet víz jelenléte esetén. A Földön nagy mennyiségű CO₂ tűnt el így a levegőből, de a Marson is talált karbonátot a *Mars Pathfinder*. A H₂O hidratált szilikátokba kötődhet (Föld, Mars, kisbolygók), és vízzel zárványvegyületeket (*klatrátokat*) alkothatnak a jéghegyek alacsony hőmérsékletén a CO₂, NH₃, CH₄, az N₂ és az Ar.

Visszanyeréshez megfelelő szerencsés hőmérsékleti intervallum szükséges lecsapódás, pl. eső/harmat révén (a Vénuszon kénsav, sósav, a Földön víz, savas esők), vagy hóesés/dérlerakódás révén (a Földön hó vagy dér, a Marson H₂O-dér vagy széndioxid-dér, az *Ion* kén és kéndioxid, a *Titán*on metán-eső vagy nagyobb molekulásúlyú szénhidrogén-aeroszolok, a *Triton*on nitrogén-dér, metán-dér formájában). Amelyik bolygótesten nincs olyan légköri összetevő, amely elnyeli a Nap ultraibolya sugarait, mint a Földön az ózon, ott az ultraibolya sugárzás lejut a felszínig, mint pl. a Marson, és az elszublimáló H₂O-t azonnal bontja. A hidrogén feldiffundál a hidrogénkoronába, és megszökik, az oxigén pedig oxidál, vagy szabad oxigénként felszaporodik a légkörben.

Kőfogás is lehetséges a rezervoárok (poláris sapka, gleccserek, óceán, regolit) és a légkör között (Föld, Mars, *Titán*, *Triton*), ha a hőmérsékletváltozások ezt lehetővé teszik, valamint a köpeny és a légkör között, ha a lemeztektonizmus aktív egy bolygótesten.

A holdak közül csak a *Titánnak* van lényeges légköre. Hogy ez miért lehetséges, amikor a többi nagyholdnak nincs, nem pontosan értjük. Mindenképpen szerepet játszik benne néhány körülmény összejátszása. Például a *Titán* már elég nagy tömegű ahhoz, hogy a szökési sebesség elég nagy legyen, tehát meg tudja tartani a légkörét (ettől a Galilei holdaknak is lehetne légköre), de ugyanakkor elég hideg ahhoz, hogy a légkör kisebb hőmozgású molekulái közül kevesebb érje el ezt a szökési sebességet. Továbbá a Szaturnusz nem olyan óriási méretű, mint a Jupiter, amely gravitációsan is (ha semleges), illetve a magnetoszféra segítségével is (ha ionizált) elragadja a holdak légkörének anyagát. Miután a Szaturnusznak nem olyan erős a mágneses tere, mint a Jupiternek, és sokkal kevesebb is benne a nagyenergiájú töltött részecske, ezért a töltött részecskék okozta légkör-erózió is sokkal kisebb, mint a Jupiternél.

Légkörök: semleges és ionizált összetevők

Semleges légkör

A légkörök sűrűsége a barometrikus magasságformulával leírható módon változik a magassággal

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{r_0 - r}{H}}$$

ahol ρ_0 a sűrűség a bolygó centrumától r_0 távolságban, ρ pedig r távolságban. H a skála-magasság, és azt jelenti, hogy mekkora távolságon belül csökken az illető összetevő sűrűsége az e -ed részére. H azt fordítva arányos a molekulásúllyal, vagyis nagyobb molekulásúlyú összetevő előbb fog ki a magassággal. Ennek az lesz a következménye, hogy összetevők szerint rétegzett lesz a légkör azon magasság felett, ahol már nem keveredik jól.

A sűrű légkörök alsó részén a molekulák szabad úthossza kicsi, ezért gyakran ütköznek. Itt jól kevert a légkör, összetétele állandó, a magasságtól független lesz (*homoszféra*). Ahogy a sűrűség csökkenésével növekszik a szabad úthossz, a keveredés nem lesz tökéletes, ezért a légkör összetevők szerint rétegződni tud (*heteroszféra*). Minden rétegben más lesz az uralkodó összetevő, az egymás feletti rétegekben a molekula- vagy atomsúly a magassággal csökken. Minden légkörben legkívül a legkönnyebb elem, a hidrogén található. Ezt nevezzük *hidrogén-koronának*. *Exobázisnak* legkívül a legkönnyebb elem, a hidrogén található. Ezt nevezzük *hidrogén-koronának*. *Exobázisnak* azt a magasságot nevezzük, amely felett a légköri összetevők szabad úthossza olyan nagy, hogy a megfelelő sebesség esetén el tudnak szökni a bolygótól (*exoszféra*). A nagyon kis sűrűségű légköröknél az exoszféra leér a felszínig (*Europa*, *Ganymedes*, *Io*, Merkúr, Hold).

A légkörök együtt forognak a bolygótestekkel, azonban nem merev testként. Ha a légkör gyorsabban vagy lassabban rotál, mint a bolygótest, ezt *zonális szélként* érzékeljük a felszínhez kötött koordináta-rendszerben. *Szuperrotációról* beszélünk, ha gyorsabban rotál. A Vénuszon a legerősebb a szuperrotáció: 4 nap alatt futja körbe a légkör a 243 nap alatt körbeforduló bolygót. A Titánon várnak

még erős szuperrotációt. A földi felsőlégkör 1,3-szor gyorsabban rotál csak, mint a bolygótest. Miután a légkörök együtt forognak a bolygótestekkel, ezért érthető, hogy az Uránusz bolygón is az egyenlítővel párhuzamos zonális áramlást találtak a *Voyager* szonda ottjártakor, annak ellenére, hogy a pályasíkban elhelyezkedő forgástengely éppen a Nap felé nézett. Az óriásbolygók és a Nap légköre a növekvő szélességgel csökkenő sebességgel rotál, ezt *differentiális rotációnak* nevezzük. Ez az oka annak, hogy az egyenlítői légköri alakzatok segítségével meghatározott forgási periódus a legrövidebb.

Bolygólégkörök fűtése

A légkörök a bolygótest belsejéből és a Naptól kapnak hőt. A bolygótestből kiszivárgó hő szögeloszlása egyenletes, míg a Naptól érkező sugárzás aszimmetrikusan fűti a bolygótestet. A Naptól érkező elektromágneses sugárzás maximálisan a szubszoláris pontban fűt, vagyis azon pontban, ahol a Nap a zenitben tartózkodik. A korpuszkuális sugárzás által okozott fűtés mágneses tér esetén a mágneses pólusok környékén maximális, de mágneses tér hiánya esetén bárhol fűthet.

A fűtő közeg elsősorban általában a felszín, amely a légkör alját fűti. A légkörön áthatoló fény ugyanis a felszínen nyelődik el, és a felszín a szomszédos légrétegeknek adja át a hőt. Ennek az a következménye, hogy a levegő hőmérséklete a magassággal csökken. Ezt a részt nevezzük *troposzférának*, és ez a meteorológiai események színtere, pl. felhőképződés ebben a rétegben történik.

A másik fűtőközeg a *termoszféra*, a légkör teteje. Az ultraibolya és extrém ultraibolya sugárzás bontja a molekulákat, és ez fűtést eredményez. A hőmérséklet egy határértékig nő a magassággal (*exoszferikus hőmérséklet*: T_{∞}), de innen már a szökési sebességet elérő atomok elszöknek, ezért nem nő tovább a molekulák átlagos sebessége, vagyis a hőmérséklet. A Földnél az oxigént, a Vénusznál és a Marsnál a széndioxidot bontja az *euv* (kemény ibolyántúli) sugárzás. Miután a CO_2 kisebb hatáskeresztmetszettel disszociál, mint az O_2 , ezért a CO_2 -dominált légkörű Mars és Vénusz exoszferikus hőmérséklete sokkal alacsonyabb ($\sim 300^\circ\text{K}$), mint a Föld O_2 -dominált légkörének az exoszferikus hőmérséklete ($\sim 1000^\circ\text{K}$).

Közbülső fűtőréteg előfordulása esetén a felszíntől kezdve a magasság növekedésével csökkenő hőmérséklet újra emelkedővé válik (*sztratoszféra*). A Földnél pl. az ózonréteg miatt válik újra emelkedővé a hőmérséklet.

Napszakos hőmérsékletváltozás

A Nap elektromágneses sugárzásával maximálisan fűtött helyen a hőmérséklet megnő, a levegő kitágul. Ez más szavakkal azt jelenti, hogy az azonos hőmérsékletű helyeket összekötő felület nagyobb magasságra emelkedik: légköri dudor (*bulge*) jön létre. Ez a légköri dudor a Napról nézve mindig ugyanott van, csak a bolygótest forog el alatta. Azonos magasságban szemlélve a jelenséget ez úgy látszik, hogy a hőmérséklet nő a szubszoláris pont felé. A Földön kívül csak a Marson mérték ki a napi görbét a Viking leszálló egységek, de a nappali és éjszakai hőmérsékletekről máshonnan is rendelkezünk mérési adatokkal, így a Holdról, az Európáról, a *Ganymedesről*, a *Callistoról*, a *Rheáról*, a Merkúrról, a Vénuszról és a Plútóról.

A felszíni anyag hőkapacitásától függően a maximális hőmérséklet elérésének időpontja különböző mértékben késik a helyi délhez képest. A Földön a kimért késési adat a felsőlégkörben pl. 2-5 óra. A maximálisan fűtött helyen létrejövő nyomásnövekedés hatására minden irányba radiálisan szelek indulnak. Forgó bolygótesteken ezeket téríti el a Coriolis erő.

Szezonális változás

Ha egy bolygó forgástengelye nem merőleges a pályasíkra, akkor a maximálisan fűtött hely szélessége változik a keringés folyamán. Egy ilyen bolygó kötött keringő holdján is ugyanilyen értelmű változás zajlik. Egy ilyen bolygó hajló pályán keringő holdján a két hajlás kombinálódása nagyon bonyolult szezonális változást eredményez. A *Tritonon* például emiatt a „Rák-” és „Bak-térítő” szélessége is változik, és előfordul, hogy 56° -os szélesség felett is zenitbe kerül a Nap.

Ha egy bolygó pályája excentrikus, akkor a fűtés erőssége változik a keringés folyamán. Egy ilyen bolygó holdján ugyanilyen értelmű változás zajlik. A Marsnál a tengelyhajlás és a nagy pályaeccentricitás együttes hatása miatt van erős szezonális változás, aminek következtében nagyon kedvezőek a feltételek a globális porviharok kialakulására. A déli tavaszkor ugyanis sok CO_2 dér párolog el, s így a széndioxid parciális nyomása ugrásszerűen megnő.

A hőmérséklet, s vele a nyomás növekedése a maximálisan fűtött helyről minden irányba globális cirkulációt indít el, amely a légkör forgásával kölcsönhatva ú.n. cirkulációs cellákat (*hőmérsékleti öveket*) alakít ki. Minél gyorsabban forog egy bolygó, annál több cirkulációs cella jön létre a szélességi körök mentén. A Vénuszon 1 cella van (35a. ábra), az egyenlítőnél felszáll a meleg levegő, a pólusoknál le. A Földön 3 (trópusi, mérsékeltövi és sarkvidéki), a Jupiteren 6-8 (35b. ábra), a Szaturnuszon 20 cirkulációs cella is azonosítható.

Belső mágneses térrel rendelkező bolygóknál a nagyon szabályos zonális áramlást a korpuszkuláris sugárzásból energiát merítő, és a magnetoszféra viharok idején a mágneses sarkok környékén betáplált fűtés megzavarja, torzítja.

Üvegházhatás

Ha a légköri összetevők valamelyike infravörösben elnyel, akkor a felmelegedett bolygófelszín által kibocsátott hőmérsékleti sugárzás infravörös része fogva marad a légkörben mindaddig, amíg a felszín annyival melegebb nem lesz, hogy az általa így már rövidebb hullámhosszon kibocsátott sugárzás át tud hatolni a légkörön.

A Vénuszon nagyon erős az üvegházhatás a nagynyomású CO₂ légkör miatt. A CO₂-n kívül üvegházhatást okoz a vízgőz, a metán és az ammónia is.

Ionoszférák

A Nap ultraibolya sugárzása minden gázt ionizál, így a bolygólégkörök legkülső rétegét is, amely még a sugárzás számára átjárható. Attól függően, hogy melyik összetevő ionjai dominálnak egy rétegen belül, több *ionoszféra réteg* is keletkezhet (a Földnél D, E, F1, F2 réteg). A sűrűbb légrétegekben még gyakran ütközve az ionok rekombinálódnak, de ahol nagyobb a szabad úthossz, a mágneses tér jelenléte esetén az ionizált összetevők mozgása töltésüktől függően szétválik, sebességük az elektromos tereken felgyorsul. Mozgásukat a mágneses erővonal körüli giromozgás dominálja, így nagyobb magasságba feljuthatnak, egy övszerű tartományt töltenek fel a bolygótest körül, a *plazma-szférát*.

A töltéstől függő szétválás után az erősebb mágneses terű bolygóknál a felgyorsult elektronok a légköri összetevőknek ütközve UV fénylésre gerjesztik azokat: ez az *electroglow* (elektronfénylés). Ez az égbolt-fénylés egyik összetevője, amely az Uránusznál nagyon erős, itt fedezték fel, de a Jupiternél is észrevehető.

Folyadékszférák

Ha a bolygótest felszíni hőmérséklete és légnyomása olyan tartományba esik, amely mellett valamely illó anyag cseppfolyós állapotban maradhat, akkor folyadékszféra is kialakul az égitest felszínén.

Folyónyomok

Vízfolyás nyomai csak Földön és Marson (36. ábra) találhatók, a Vénuszon (37. ábra) és Holdon lévő völgyek csak lávacsatornák. A felszínen jelenleg folyékony halmazállapotról (víz) csak a Földön tudunk. A Marson folyékony halmazállapot csak történetének korai szakaszában volt, ma legfeljebb szivárgó víz van, amely elszublimálás előtt a Napnak nem-kitett völgyek oldalán folydogál.

Óceán

Egész bolygót beborító globális óceán jelen tudásunk szerint az *Europán* van egy vékony jégkéreggel lezárva a világűr felé, továbbá valószínűleg 150 km mélyen a *Ganymedesen* és a *Calliston*. Nem globális, csak a mélyedéseket elfoglaló óceánt, beltengereket, tavakat a Földön víz, a *Titánon* valószínűleg szénhidrogének alkotnak.

Jégszférák

Jégkéreg globális óceán tetején az *Europán* található, és ezt víz-jég alkotja. (A Ganymedes és a Callisto óceánja jéges-szilikátos anyagrétegek között foglalhat helyet.)

Poláris sapkák akkor keletkeznek, ha a légkör szállította illóanyag a bolygótest hidegebb részein lecsapódik (a Földön H_2O , a Marson H_2O és CO_2 (39. ábra), a Tritonon N_2 (38. ábra), a Plútón is valószínűleg N_2).

Légkör nélküli égitesten bolygótestből kigázosodó vagy üstökösök által hozott illóanyag dér vagy jég formájában a felszínre ráakad, és a napsütésnek nem-kitett, alacsony hőmérsékletű helyeken tartósan megmarad, így a Merkúron is és a Holdon is a mérések jeleztek H_2O -t a pólusok körüli kráterek belsejében, ahova soha nem süt be a Nap, és így nem szublimál el a jég.

Egyébként erős szezonális változás létrejöttének feltétele, hogy a bolygótesten legyenek jeges és jégmentes területek.

Gleccserek (jégárak)

Ha szilárd csapadék halmozódik fel, és lejtők mentén szilárd fázisú folyással helyet változtat, akkor beszélünk gleccserekről. Földön kívül még nem találtak gleccsereket, bár a Mars néhány, nagy ívekkel meanderező völgyével kapcsolatban felvetették, hogy inkább jégfolyás nyomai lehetnek. Jég-vulkanizmus esetén a Földön illónak számító anyag szilárd fázisú folyása zajlik, csak nem lejtőn lefelé, hanem az égitest belsejéből a felszínre felé, mint az *Ariel* esetében (26. ábra), ahol víz-jég a „láva”.

Regolitban megkötött jég

Porviharok után a Marson a légkörbe felkavart por szemcséire rácsapódott H_2O a légkörből a porral együtt leülepszik, és a felszíni topográfiát elsimítva hullámzó síkságokat alkot, összecementálódik. Ez jelentős mennyiségű jég-rezervoár, amelynek kapacitása a bolygó pálya-elemeinek változásával együtt száz-ezer éves időskálán változik (45. ábra).



45. ábra: Berogyott talaj a Marson. MGS fotó

Az élet keletkezése szempontjából legfontosabb paraméterek

A hőmérsékleteloszlás és a kémiai összetétel is erősen függ attól, hogy a Nap környezetében a szoláris köd anyaga már a helyén volt a planetezimálok keletkezése kezdetén, vagy az akkréció ideje alatt a csillagközi anyag folyamatosan hullott be a korongba.

Az előbbi esetben a *hőmérséklet* olyan tartományba eshetett a Földön, hogy magma óceán létezhetett a felszínen. Ekkor a víz egyrészt a magmában volt oldva, és itt a fémvas bonthatta, a hidrogén megszökhetett, másrészt a víz a légkörben gázhalmazállapotban volt, s itt az ultraibolya fotonok bonthatták, és így a hidrogén megint csak megszökhetett. Az oxigén oxidokat képezhetett, vagy felhalmozódhatott. A CO_2 a légkörben volt, ez erős üvegházhatást hozhatott létre. A biomolekulák széttronszóldtak (ha egyáltalán felépültek).

A második esetben a hőmérséklet olyan tartományba eshetett a Földön, hogy folyamatosan vízóceán létezhetett a felszínen – az akkréció végére a mai tömeggel. A víz üledékbe kötődhetett. Így a vízvesztés és oxigénprodukciónak lassú, vagyis a mai szintű lehetett. A kontinentális terület kicsi volt, de sok hely volt a biomolekulák számára, mert az óceán nagyfelszíne és sekély vízében védve voltak az ibolyántúli sugárzástól. Sok volt a sziget a kiterjedt vulkanizmus miatt, és ez sok helyet biztosított az agyagásványok keletkezésére.

Milyen lehetett az ősi légkör összetétele?

Miután a közönséges kondritok lehetnek a végtermékei a csillagközi porszemcsék összeállításának, feltételezhetjük, hogy az ősi légkör zöme a közönséges kondritok illóanyag-összetételével azonos, csak kis része jött a karbonkondritokból, és csak a maradék a légköri melléktermék. Így a H_2O , CO_2 , CO , N_2 , SO_2 a közönséges kondritokból jött, a szénhidrogének pedig a szenes kondritokból. Az NH_3 , CH_4 sem közönséges, sem szenes kondritokból nem tud jönni. Az NH_3 légköri melléktermékként a villámlástól a H_2 -ben gazdag légkörben keletkezett, míg a hidrogént (maximum 1%-ot) meteoritikus karbid (fémek szénvel alkotott vegyületei) és a víz adja (oldott Fe^{2+} fotoindukált

oxidációján keresztül) úgy, hogy rutil (TiO_2) homokon a nitrogén a vizet fotonok segítségével redukálja az óceánpart hullám és árapályzónájában. A CH_4 pedig alumíniumkarbidból keletkezhetett.

Mágneses terek, magnetoszférák

Egy bolygótest körül mért mágneses tér lehet belső eredetű, amikor a bolygótest olvadt és elektromosan vezetőképes rétegének áramlása **dinamó-mechanizmussal** felerősíti a környezetében meglévő, gyenge mágneses teret. Ha a dinamóhatást a magban lévő rétegek szimmetrikus cirkulációi hozzák létre, akkor a felépülő mágneses térben a dipól tag dominál, amelynek centruma egybeesik a tömegközépponttal, és a tengelye a forgástengellyel (Szaturnusz), vagy, ha nem szimmetrikus cirkulációi hozzák létre (Föld, Merkúr, Jupiter, Ganymedes), akkor a magasabbrendű tagok esetleg nem csengenek le a felszín eléréséig, hanem azok „kilóghatnak a felszín fölé” (Jupiternél lényeges). Ha viszont a köpeny anyagának a cirkulációja a forrás (Uránusz, Neptunusz), akkor a dipól tag centruma jobban eltolódik a tömegközépponthoz képest, és nagyobb lesz a hajlás a forgási és a mágneses tengely között.

Indukált mágneses tér akkor keletkezik, ha elektromosan vezető, globális réteggel rendelkező testben a környezetében lévő, térben vagy időben változó mágneses tér elektromos áramot kelt. Az Európában, a Callistóban, az Ioban(?) és a Ganymedesben indukálódik mágneses tér amiatt, hogy a holdak tartózkodási helyén változik a Jupiter mágneses terének erőssége és iránya egyrészt, mert a holdak mozognak, másrészt, mert a Jupiter forog. De a bolygóközi mágneses tér változásának hatására a Földben, az óceánokban és az ionoszférában indukált áramok mágneses tere is indukált mágneses tér.

Befagyott mágneses tér akkor jön létre, ha olvadt ferromágneses anyag bármi okból meglévő mágneses térben a Curie pont alá lehűlve rendezett marad (Hold, Mars, Föld felszíni rétegei, Gaspra, Ida kisbolygók).

Egy bolygótest felszínén mért mágneses tér a belső eredetű, az indukált és a befagyott mágneses terek eredője lesz.

Magnetoszféra

A bolygók mágneses terét a napszél a magával hozott és a Naptól származó mágneses tér segítségével egy cseppalakú térrészbe szorítja be (40a. ábra). Ezt a térrészt nevezzük **magnetoszférának**. Ezen belül a bolygó mágneses tere, ezen kívül a napszél mágneses tere az uralkodó. A bolygó mágneses erővonalai torzulnak a napszél dinamikus nyomásának a hatására: a Nap felőli oldalon összenyomódnak a bolygó mágneses erővonalai (**magnetoszféra orr része**), a Nappal ellentétes oldalon pedig megnyúlnak (**magnetoszféra uszálya** vagy **csóvája**). A bolygó-magnetoszférán belül elhelyezkedő hold-magnetoszférát a bolygó mágneses tere szorítja hasonló módon zárt térrészbe. Így pl. a Jupiter-magnetoszférán belül helyezkedik el a Ganymedes magnetoszférája. Érdekesség, hogy a Ganymedes csóvája a pályamozgása során előre mutat, ugyanis a korotáció gyorsabb, mint a Kepler-mozgás, ezért a Jupiterrel együttforgó bolygó-mágneses-tér és vele együtt mozgó töltött részecskék – amelyek felelősek a Ganymedes csóvájának a kialakulásáért – a forgás során lehaladják a Ganymedest.

A magnetoszférák mérete függ a bolygó mágneses terének erősségétől (elsősorban a dipól-momentum erősségétől, mert a magasabbrendű összetevők rövidebb távon csökkennek le). Minél erősebb a mágneses tér, annál nagyobb a magnetoszféra, annál nagyobb távolságban tudja megállítani a napszelet. A magnetoszféra mérete függ a napszél erősségétől is. Minél nagyobb a napszél dinamikus nyomása (sebesség $\times$ részecske-sűrűség), annál kisebb térrészre nyomja össze a bolygó mágneses terét, tehát a napszél változásával változik a magnetoszférák mérete (pl. Jupiter ortávolsága 40-100 jupitersugár között változik).

A magnetoszférák védik a beburkolt bolygótest légkörét. Erős mágneses terek magnetoszférái teljes egészében tartalmazzák a bolygótest légkörét, és ha holdak mozognak a magnetoszféra belsejében, akkor azokat is védik a napszél-erőzítőtől (óriásbolygók, Föld). Gyengébb terek (pl. a Marsé) erős naptevékenység idején nem védik a külső léggrétegeket a napszél-erőzítőtől, mert a magnetopauza beszorul a légkör külső rétegei alá. Mágneses tér hiánya esetén a légkört nem védi semmi a napszél-erőzítőtől ilyenkor a légkörök csóvaszerűen elnyúlnak a Nappal ellentétes irányba (Vénusz, üstökösök, Hold). A Hold légköre pl. 2-3-szor messzebb terjed ki Nappal ellentétes oldalon, mint a Nap irányába, az üstökösöknél a kis gravitáció miatt legalább 100-szoros ez az arány.

A magnetoszférák szerkezete

A **bolygóhoz közeli erővonalak zártak** maradnak (40a. ábra), csak a külsők benyomódnak. Az erővonalak talpontjainál kis és közepes szélességeken az ionoszféra gyors ionjai fel tudnak jutni az erővonal mentén nagyobb magasságokba, az általuk bejárt mentőövszerű térrészt nevezzük **plazmaszférának**. Bizonyos karakterisztikus energiájú töltött részecskék bizonyos erővonalkötegek

környékét népesítik be, ezeket sugárzási övezeteknek nevezzük (Földnél *Van Allen övezetek* elnevezés is használatos a felfedezőjük tiszteletére). A Földnél általában három sugárzási öv van benépesítve. Az egyik a nagy energiájú protonokból álló öv 1,6-2,0 földszugárnyi távolságban, a másik a nagy energiájú elektronokból álló öv 3,5-4,5 földszugárnyi távolságban, és a harmadik az anomális sugárzási öv a protonok övében belül, amelyet a csillagközi térből a Naprendszerbe semlegesként bejutó – és itt a Nap ultraibolya sugárzásától egyszeresen ionizálódó – nehéz atomok népesítenek be (neon, oxigén, nitrogén, stb.). Ezek az egyszeres ionizáltságukkal anomálisak a Naptól származó többszörösen ionizált atomokkal szemben. Anomális sugárzási övet eddig még csak a Földnél figyeltek meg. Időnként új övek is felépülnek rövidebb időre (néhány hónapra) egy-egy erősebb magnetoszféra-viharral kapcsolatosan (eddig még ilyent is csak a Földnél figyeltek meg).

A bolygótól távolabb elhelyezkedő erővonalak nyitottak (40b. ábra). Ezekhez a külső erővonalakhoz ugyanis erővonal-összekapcsolódással (merging) hozzácsatlakozik a napszél mágneses tere, azokat a napszél mozgásával hátrahúzza alakítja ki az uszályt, amelynek erővonalai így nyitottak a bolygóközi tér felé. Ezen nyitott erővonalak mentén a töltött részecskék a napszélből is be tudnak jutni a magnetoszférába. A napszél által a magnetoszférába betáplált energia az uszályban tárolódik a töltött részecskék mozgásában, illetve mágneses energiaként. Az uszály hosszú, pl. a Jupiternél ~ 9000 bolygósugárnyi a ~ 100 R_J ortávolsággal szemben. Az uszály két szimmetrikus lebenyre oszlik a mágneses egyenlítő síkjára szimmetrikusan. Mindkét lebenynek saját áramrendszere van, amelyek ellentétes irányba folynak, és amelyben a napszélből származó protonok kollektív mozgása elektromos áramokat képvisel. A mágneses egyenlítői síkban a két lebeny határán a protonok nagyobb sűrűsége áramlepelként jelenik meg.

A napszélben a magnetoszféra előtt egy ív alakú lökésfront jön létre. A lökésfront belső oldalán helyezkedik el a magnetopauza. A napszél töltött részecskéi magnetohidrodinamikai hullámokat gerjesztenek a magnetoszféra határán, amelyek a magnetopauzában terjedve átterjednek azokra a mágneses erővonalakra, amelyek rezonálni tudnak rájuk. Ezen erővonalak rezgései a talajban, mint tellurikus mágneses rezgések regisztrálhatók a mágneses obszervatóriumokban (PC1, PC2, PC3, PI1, PI2, stb. elnevezéssel a periódustól függően). Ez a héli- vagy erővonal-rezonancia a magyarázata annak, hogy e tellurikus hullámok periódusa és megfigyelhetősége függ a mágneses szélességtől.

A magnetoszférák működése

A bolygóközi mágneses tér erővonalai a nappali oldalon összekapcsolódnak a bolygó mágneses erővonaláival, és hátrahúzzák azokat mozgásukkal a Nappal ellentétes oldalra. Miután a bolygó forog, az erővonal a bolygó forgásával együtt továbbforog az éjszakai oldalról a hajnali oldalra. Ott a bolygóközi tér erővonala leválik róla, s az erővonal-visszakapcsolódással ismét zárttá váló bolygó-erővonal újra visszatér a nappali oldalra, és ott újra összenyomódik a napszél dinamikus nyomásának hatására. Visszahúzódnak közben a körülötte spirálozó töltött részecskéket hozza magával a bolygó közelébe. Ha különösen sok töltött részecske tárolódott már a csóvában, vagy a bolygóközi térben zavar érkezik a magnetoszférához, erővonal visszakötődés spontán is bekövetkezhet. Ezt öbölháborgásnak vagy substorm-nak vagy szubviharnak nevezik. Az ilyen módon az áramlepel mentén beinjekciózott részecskék a mágneses irányszögüktől függően két helyre kerülnek be: egyrészt a nyitott erővonalak mentén szimmetrikusan a két mágneses pólus körüli aurora övezetekbe, másrészt a mágneses egyenlítő síkjára mentén egy köráram épül fel (gyűrűáram). Az egész magnetoszférára kiterjedő zavart magnetoszféra viharok nevezzük. Az aurora övezet, vagy aurora ovál vagy sarkifény övezet (41, 42. ábra) a mágneses pólusok körüli fénylő övek elnevezése. Az aurora övezeteknek a pólusokhoz közelebbi széle az éjszakai oldalon messzebb van a pólusoktól, és szélesebb is ott. Magnetoszféra-viharok idején a vihar erősségétől függően az aurora öv mindkét határvonala nagyobb távolságra tolódik a pólustól az egyenlítő felé (41. ábra). A sarki fény egyszerre lángol fel a két pólus körül (42. ábra), és változásai is szinkronban vannak. A felfénylés néhány óráig tart, változásai szekundumos skálán zajlanak. A felfénylést az elektromos tereken felgyorsított, és a mágneses erővonalak mentén a légkörig lejutó elektronok okozzák, amikor is a légkör összetevőivel ütköznek, és fénylésre gerjesztik azokat. A sarki fény színe a gerjesztett légköri összetevő milyenségétől függ. A zöld a nitrogéntől, a vörös fény az oxigéntől származik. Az óriásbolygóknál a hidrogén miatt az aurorák ultraibolya fénylését figyelték meg, de a Jupiternél és a Szaturnusznál már optikai hullámhosszon is megfigyelte az aurorát a Hubble Űrtávcső (HST; 42. ábra). A sarkifény-függöny mozgását a részecskéket vezető mágneses erővonalak helyzetének az oszcillációi okozzák. Az aurora övezetben elsősorban a töltött részecskék mozgása által képviselt elektromos áram Joule-fűtése fűti a környező légkört, de a légkörre csapódó részecskék (precipitáció) mozgási energiája is termalizálódik, és ez is fűtésként nyilvánul meg. Mágneses tér hiánya esetén a napszél részecskéit nem terelik a mágneses erővonalak, így azok bárhova rácsapódhatnak egy bolygóra (Vénusz: folto aurora). A két aurora övezet egymáshoz képest aszimmetrikus lehet, ha a bolygó mágneses centruma nem esik egybe a tömegközépponttal (Uránusz, Neptunusznál ez dominál) vagy a magasabbrendű harmonikusok erősek a dipól taghoz képest (a Jupiternél ez dominál).

Az Io „lábnyoma” (42b. ábra) egy fénylő folt a Jupiter aurora-övezetén kívül, az aurora öv egyenlítő felé eső szélétől kb. 8°-ra az egyenlítő felé az Ion átmenő mágneses erővonalköteg talp-pontjánál, de az Io hosszúságát kb. 15 fokkal megelőzve. 2001-ben már az Europa és a Ganymedes „lábnyomát” is lefotózta a HST.

A gyűrűáram

Magnetoszféra-viharok idején a mágneses egyenlítői síkba beinjektált töltött részecskék driftmozgása következtében néhány óra alatt felépülő gyűrűáram által keltett mágneses tér ellentétes irányú a belső mágneses térrel, ezért a felszínen a mágneses tér csökkenéseként érzékelhető a hatása. Ezt a csökkenést megelőzi egy impulzusszerű mágneses térerősség növekedés (SI Sudden Impulse), amely a vihar kezdetét jelzi az erővonalak összenyomódása miatt.

A gyűrűáram felbomlásáért, amely több napig tart (vihar visszatérési fázisa, recovery phase), kétféle folyamat a felelős. Egyrészt a gyűrűáram ionjai semlegesíthetnek a hidrogénkoronák semleges hidrogénjével történő töltéscsere reakciók révén, és így nagyon nagy sebességű semleges atomok (ENA, Energetic Neutral Atoms) jönnek létre, amelyek mozgását a mágneses tér már nem befolyásolja. Semlegesítődésük pillanatában meglévő sebességükkel (irány és nagyság szerint) ballisztikus pályán folytatják útjukat: amelyik atom sebessége kifelé irányul, az megszökhet, amelyiké a bolygó felé irányul, az a légkörre csapódva az alacsony szélességeken fűt az egyenlítő körüli sávban. Másrészt a bolygóközi mágneses tér megnövekedett erőssége idején összenyomott bolygó-magnetoszféra kisebb térrészre benyomott mágneses erővonalai miatt a gyűrűáram benyomódik a plazmaszféra ionoszféra-eredetű, hideg plazmájának a felségterületére. A kétféle plazma keveredése magnetohidrodinamikai hullámokat kelt, és ezen hullámok és a részecskék kölcsönhatása irányszög-szórást okoz, így a töltött ionok kiszóródnak a gyűrűáramból a gyűrűáramon keresztül futó zárt mágneses erővonalak mentén: (SAR arc – Stable Auroral Red arc, stabil aurorális vörös fénylés, amelyet csak a Föld esetében figyeltek meg még eddig). A SAR arc övezetek az aurora-övezet nyitott erővonalainak az egyenlítői oldalán helyezkednek el. A Földön a SAR arc övezet egy kb. 200 km széles, az aurora-övezeteket az egyenlítői oldalon körbefutó, a mágneses egyenlítővel párhuzamos övezet, amely mentén infravörös fénylés erősödik meg magnetoszféra-viharok után 1-2 napra, vagyis a viharok visszatérési fázisára. Ez időben is és térben is stabil (az elnevezésben ezért szerepel a stabil jelző), és csak az infravörös érzékelők felfedezése után voltak felfedezhetők.

A Jupiternél két jelenség kapcsán figyeltek meg SAR arc szerű tevékenységet – tehát zárt erővonalak menti részecske-precipitációt. Az egyik az Io, az Europa és a Ganymedes „lábnyoma” egy ilyen zárt erővonal mentén létrejövő jelenség. A másik a Shoemaker Levy 9 üstökös becsapódásával kapcsolatban lépett fel időlegesen, amikor a déli félgömből az északra átdobódott, és fűtötte a légkört egy ionizálódott részecskepopuláció a becsapódási helyen átmenő zárt erővonalak mentén.

Rádiósugárzás

Az óriásbolygóknál és a Földnél figyeltek meg rádiósugárzást. A bolygómagnetoszférák bizonyos helyein elektrongyorsítás játszódik le, és a relativisztikus sebességre felgyorsított elektronok fékezési sugárzása adja a bolygó rádiósugárzását. A magnetoszférák teljesítményének néhány százaléka hagyja el a bolygót rádiósugárzás formájában. Miután rádiósugárzás nem mindenütt keletkezik egy magnetoszférában, a bolygó körbefordulásával a rádiósugárzás erősségének változása lehetőséget ad megmérni a bolygó belsejének forgási periódusát, miután a mágneses tér a bolygó-belsőhöz kötött. Az óriásbolygóknál különösen fontos ez, miután egyrészt differenciálisan rotálnak, másrészt az alakját változtató felhőzettel nehéz a rotációs periódus meghatározása. A Jupiternél a mágneses térhez kötött koordináta-rendszert III-asnak nevezik (I az egyenlítő forgásához, II-es a mágneses térhez kötött koordináta-rendszer jelzése). A Szaturnusz rádiósugárzását a közepes szélességek forgásához kötött koordináta-rendszer pedig az Io mozgása modulálja. Miután Dione, a Jupiter rádiósugárzásának egyik komponensét pedig az Io mozgása modulálja. Miután bizonyos frekvenciájú rádiósugárzás kívülről ugyanúgy nem hatol keresztül az ionoszférán, mint ahogy belülről sem kifelé, a Föld természetes rádiósugárzását csak űrszondákról fedezték fel.

Holdak, gyűrűk és magnetoszférák kölcsönhatása

A nagyobb testek mozgása zavart kelt a magnetoszférákban (pl. üstökösök, Ida, Gaspra kisbolygók a bolygóközi térben, Ganymedes a Jupiter magnetoszférájában), aminek következtében az óriásbolygók magnetoszférájában a holdak és a gyűrűk távolságában kevesebb (vagy esetleg több) a magnetoszféra iontartalma, mint másutt (pl. a Szaturnusznál). A Jupiternél ezzel a módszerrel fedezték fel a gyűrűt és néhány holdat (töltött-részecske csillagászat).

A bolygó milyen folyamatokon keresztül szól bele holdjának fejlődésébe

Az óriásbolygók körüli holdak keletkezésén túl a fejlődését is befolyásolja az óriásbolygó léte. A holdrendszerekben a rezonáns pályán mozgó holdak egymás pályájának excentricitását növelni igyekezték az óriásbolygótól nagy árapályfűtést kényszerítenek rá egymásra. Minél közelebb van egy

hold a bolygóhoz, annál nagyobb ez a fűtés. A Jupiter holdrendszerében a legfeltűnőbb a jelenség. A legközelebbi Io holdon több, mint 100 vulkáni centrum, a következőn, az Europa holdon az olvadt óceán jelzi az árapályfűtés hatásosságát.

Az óriásbolygó fókuszáló és gyorsító hatása miatt a holdakra több meteor csapódik és nagyobb sebességgel. Ez különösen a belső holdaknál hatásos, és oda vezet, hogy szétporladva a becsapódó testek tömegénél tízszer több anyag hagyja el ezeket a holdakat. Az óriásbolygók körül emiatt alakulnak ki a sötét, keskeny porgyűrűk, mint ezt a Galileo szonda mérései bizonyították.

A holdak – néhány kivételtől eltekintve – a bolygójuk egyenlítő síkjában mozognak, és szinkron rotálnak. Ez két következménnyel jár. Az első következmény, hogy kénytelenek elviselni bolygójuk szezonális változásait, mert az ő forgástengelyük ugyanúgy hajlik a bolygó pályasíkjához, mint a bolygóé. Ha saját tengelyhajlásuk eltér a saját pályájukra emelt merőlegestől, vagy a pályájuk síkja hajlik a bolygó egyenlítői síkjához, akkor ez tovább bonyolítja a szezonális változást (a Triton esete). A második következmény, amit a szinkron rotáció okoz, hogy a pályamozgás során mindig ugyanaz az félgömb halad elől (vezető oldal), és a vele szemben lévő félgömb halad hátul (követő oldal), ami miatt hemiszférikus különbségek alakulhatnak ki a két oldal között.

E hemiszférikus különbség kialakulhat a felszíni textúrában (*Callisto*, *Phobos*), pl. azért mert a holdról a becsapódások által kivágott port a bolygó körüli pályáról a hold újra összegyűjti (a *Phobos* hold követő oldala porosabb). A különbség kialakulhat a felszín anyagában is. A bolygóval együttforgó magnetoszfera nagyenergiájú ionjai a holdtól eltérő anyagot implantálnak a felszíni rétegekbe (az *Europa* követő oldalán detektált kénsavvezők), vagy más holdról származó anyag bombázása kémiai átalakulást hoz létre a hold felszíni anyagában (a Szaturnusz *Japetus* nevű holdjának a vezető oldalán lévő sötét anyagot a *Phoebe* holdról származó por bombázásának következtében létrejövő kémiai átalakulásnak tudják be).

A töltött részecske besugárzás a Jupiter magnetoszférájából elég sok energiát szállít a holdakhoz. A Galileo szonda fluxusmérésein alapuló, reális számítások azt mutatják, hogy az *Europa* holdnál ez az energia elérheti az összes belső energiát (tehát a radioaktív- és árapályfűtését együtt), a *Ganymedes* egyenlítői vidékein pedig a radioaktív fűtését. Ez azt jelenti, hogy az Európán 10 év alatt 1 cm mély felszíni anyag kémiai átalakulása történik meg. A mikrometeorit-bombázás, illetve az Io semleges atomjainak vagy szilánkjainak az energiája a kémia szempontjából elhanyagolható ehhez képest, azonban nagy szerepük van az átalakult anyag elkeverésében és eltemetésében.

A magnetoszfera más folyamatokba is beleszólhat. Pl. indukált mágneses teret hozhat létre a hold körül, ha annak belsejében globális, elektromosan vezető réteg van (az *Europa*, *Ganymedes* és a *Callisto*). A holdak légkörében sarki fényt gerjeszthetnek a bolygó magnetoszférájában felgyorsított elektronok (*Io*, *Triton*), a felszínben kémiai átalakulást hozhatnak létre (*Ganymedes* és *Callisto* jegében ózont). Molekulákat vághatnak ki a felszínből a becsapódó töltött részecskék: így keletkezik az *Europa* ritka oxigén légköre (ez az egyetlen oxigén légkör a Naprendszerben a Földön kívül.)

Befejezés

Szádeczky Geonómia c. könyvének megírása (1974) óta fejlődött ki igazán a planetológia tudománya. Erről egész könyvet kellett volna írni, ha ezen tanulmánykötet többi részéhez mérhető részletességgel szeretnénk volna tárgyalni a témát. Helyhiány miatt azonban annyira tömören kellett fogalmazni – az ábrákkal és az irodalommal együtt – amennyire csak lehetett. A szerző azonban reméli, hogy azért még érthető módon sikerült áttekintést adnia a Naprendszerrel, annak keletkezéséről, az összehasonlító planetológiáról a bolygótestek keletkezéséről, valamint belsejét, légkörét és mágneses terét illetően. És szintén reméli a szerző, hogy talán segíti ez a tanulmány az olvasót abban, hogy a legkülönbözőbb tudományterületeken előkerült fogalmak mögött meglássa az összefüggéseket is.

Merkúr

Icarus **124**, 690, 1996; **128**, 75, 1997; **149**, 1, 2001.
Nature **335**, 496, 1988; **404**, 159, 2000.
Planet. Space Sci. **49**, 1395, 2001.
Science **268**, 1455, 1995.
Sky and Telescope Sept.1990, p.256; Oct.1994, p.12.

Vénusz

Adv. Space Res. **5**, 99, 1985.
Ann. Rev. Astron. Astrophys. **16**, 141, 1978.
Astronomitseskij Vestnik **XIII**, 3, 1979.
Astronomy Sept.1991, p.32; Febr.1995, p.37; May.1997, p.48.
Earth, Moon and Planets **41**, 45, 1988; **44**, 219, 1989; **74**, 191, 1996; **76**, 67, 1997-1998.
Icarus **41**, 18, 1980; **61**, 521, 1985; **62**, 221, 458, 1985; **112**, 211, 253, 1994; **115**, 399, 1995; **120**, 332, 1996; **125**, 364, 1997; **128**, 415, 1997; **129**, 147, 232, 1997; **130**, 198, 1997; **145**, 533, 2000; **146**, 301, 404, 2000; **148**, 307, 2000; **150**, 19, 2001.
Geophys. Res. Letters **9**, 499, 1982.
Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics **57**, 537, 1995.
Journal of Geophysical Res. **100**, 23317, 23329, 1995; **101**, 2279, 1996.
Kosmitseskie Issledovania **XIX**, 613, 1981.
Nature **296**, 13, 1982; **298**, 15, 1982; **336**, 360, 1988; **337**, 55, 1989.
Pisma v Astron. Zh. **5**, 3, 163, 211, 217, 222, 229, 1979; **8**, 387, 391, 399, 404, 411, 414, 419, 424, 429, 433, 437, 444, 1982; **12**, 30, 41, 46, 90, 1986.
Planet. Space Sci. **34**, 585, 1986; **43**, 1001, 1995; **48**, 1479, 2000.
Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference **XIX** p. 349, 1989.
Science **216**, 181, 630, 1982; **247**, 1191, 1990; **252**, 213, 247, 249, 252, 260, 265, 270, 276, 288, 297, 312, 1991; **270**, 1460, 1995; **289**, 1897, 2000.
Scientific American Aug.1980, p.46; Aug.1980, p.57.
Sky and Telescope June 1985, p.507; Apr.1989, p.360; Dec.1990, p.603; Jul.1991, p.24; Aug.1993, p.22; Aug.1997, p.34.
Sterne und Weltraum 11/1991, p.664.
Venus. (eds. Hunten, D. M. et al.) Arizona, 1983.

Föld

Astronomy July 1996, p.30.
 Brjuhanov et al.: Kosmitseskaja karta SSSR. 27th Int. Geological Congress, 1-14 Aug. 1984. Nauka, Moscow, 1984.
Geophys. Res. Letters **22**, 1205, 1209, 1995.
Earth, Moon and Planets **37**, 1, 187, 1987; **70**, 21, 1995.
Icarus **38**, 212, 1979.
Journal of the British Interplanetary Society **41**, 95, 1988.
Journal of Geophysical Research **99**, 16805, 1994.
Nature **298**, 123, 1982; **334**, 115, 145, 1988; **336**, 714, 1988; **390**, 154, 1997; **416**, 307, 2002.
Physics Today Nov. 2001, p.41.
Review of Geophys. and Space Phys. **22**, 131, 1984.
Science **246**, 104, 1989; **286**, 1925, 2141, 2254, 1999; **294**, 2109, 2342, 2001.
Sky and Telescope July 1991, p.38; Apr.1992, p.387; Apr.1996, p.12.
Tectonophysics **216**, 1, 31, 1992.

Hold

Astronomy Oct.1994, p.28; Apr.1995, p.36; Oct.1995, p.72.
Geophys. Res. Letters **18**, 2117, 1991.
<http://lunar.arc.nasa.gov>
Icarus **36**, 245, 1978; **146**, 98, 2000; **149**, 54, 2001; **150**, 1, 2001.
Journal of Geophysical Research **100**, 23279, 1995.
Nature **338**, 29, 1989; **389**, 353, 1997.
Science **266**, 1835-1862, 1994; **281**, 1475-1500, 1998; **290**, 1142, 2000; **293**, 1779, 2001.
Sky and Telescope July 1995, p.32; Oct.1995, p.15; March 2001, p.28.
Sterne und Weltraum 9/1999, p.742
Természet Világa **127**, 120, 1996.

Mars

- Adv. Space Res.* **20**, 1561, 1997.
A Földgömb XVIII, 50, 2000.
Astronomy June 1993, p.27; Aug.1997, p.39.
<http://science.nasa.gov>; www.spacedaily.com/news; www.space.com/scienceastro;
cu-ames.arc.nasa.gov/marslife; mars.webdesign.hu/mgs/msss; mars.sgi.com;
mpfwww.jpl.nasa.gov/mgs/sci/mola; mpfwww.jpl.nasa.gov/mgs/msss;
ltpwww.gsfc.nasa.gov; www.spaceref.com/news; nasa/jpl/malin space science systems;
Earth, Moon and Planets **36**, 97, 1986; **37**, 287, 1987; **39**, 275, 1987; **42**, 107, 1988; **69**, 249, 1995;
74, 93, 1996; **76**, 127, 1998; **77**, 55, 1998.
Geophys. Res. Letters **25**, 4393, 4409, 4417, 1998.
Icarus **109**, 393, 1994; **113**, 110, 213, 277, 1995; **114**, 80, 93, 113, 130, 403, 1995; **124**, 296, 1996;
125, 455, 1997; **126**, 183, 197, 373, 1997; **130**, 87, 96, 115, 222, 1997; **143**, 376, 2000; **145**, 91,
524, 546, 555, 645, 648, 2000; **146**, 326, 343, 366, 2000; **158**, 267, 2002.
Journal of Geophysical Research **96**, 18883, 1991; **100**, 23301, 23307, 1995.
Mars. (eds. Kieffer H.H. et al.) Arizona, 1992.
Nature **290**, 759, 1981; **326**, 30, 1987; **374**, 432, 1995; **391**, 619, 1998; **404**, 32, 50, 161, 163, 2000;
412, 411, 2001; **419**, 350, 2002.
Nógrád Megyei Csillagászati Alapítvány körlevele: II/7, 1995.
Planet. Space Sci. **36**, 125, 1988; **43**, 123, 179, 695, 1995; **45**, 281, 289, 401, 1997; **47**, 411, 1999.
Precambrian Research **106**, 15, 2001.
Review of Geophysics **23**, 61, 1985.
Science **194**, 1293, 1976; **271**, 184, 1996; **278**, 1743-1774, 1997; **279**, 5357, 1998; **284**, 719, 790,
794, 1495, 1999; **286**, 94, 2134, 1999; **287**, 218, 1788, 2000; **288**, 2330, 2000; **289**, 714, 1909,
2000; **290**, 1879, 1927, 2000; **294**, 1914, 2107, 2141, 2001; **296**, 2209, 2002; **297**, 75, 78, 81, 2002.
Sky and Telescope Febr.1999, p.20; Oct.2000, p.34; March 2001, p.20.
Sterne und Weltraum 7/2001, p.534.
The Planetary Report XX, 10, 2000.
Tudomány 1986/7, p.50.

Óriásbolygók

- Astronomy* June 1998, p.40.
Encyclopedia of the Solar System, p. 315, Academic Press, 1999.
Earth, Moon and Planets **67**, 77, 1995.
<http://www.jpl.nasa.gov/galileo>
Icarus **29**, 261, 1976; **62**, 4, 1985; **98**, 82, 1992; **114**, 21, 1995; **122**, 242, 1996; **128**, 189, 294, 322,
1997; **129**, 21, 466, 1997; **130**, 49, 57, 1997; **135**, 220, 230, 251, 265, 1998; **141**, 236, 1999; **145**,
140, 454, 2000; **146**, 19, 48, 2000; **149**, 66, 94, 2001; **150**, 48, 219, 234, 244, 2001; **152**, 140, 151,
2001; **153**, 236, 2001.
Journal of the British Interplanetary Society **41**, 49, 1988.
Jupiter, ed.: T. Gehrels, Univ. of Arizona Press, Tucson, Arizona, 1976.
Nature **283**, 461, 1980; **292**, 675-755; **323**, 605, 1986; **331**, 689, 1988; **337**, 309, 1989; **371**, 16, 1994;
389, 125, 159, 1997; **390**, 23, 1997.
Planet. Space Sci. **21**, 623, 1973; **45**, 483, 1997; **48**, 699, 2000; **49**, 1067, 1137, 2001.
Saturn. (ed. Gehrels T.) Arizona, 1984.
Sky and Telescope Dec.1994, p.11; March 1999, p.20; May.2000, p.24.
Science **206**, 925-950, 1979; **207**, 400-453, 1980; **210**, 1107, 1980; **212**, No. 4491, 1981; **218**, 276,
1982; **233**, 4-109, 1986; **245**, 1450, 1989; **246**, 1417-1501, 1989; **248**, 308, 1990; **267**, 1237,
1282-1317, 1995; **268**, 1595, 1879, 1995; **269**, 951, 1697, 1995; **283**, 44, 1999; **289**, 1737, 2000.
Scientific American Sept.1975, p.119; Febr.2000, p.24; May 2000, p.60.
The Astrophysical Journal **238**, 1, 1980.
The Moon and the Planets **19**, 61, 1978.
Tudomány March 1987, p.12.

Óriásbolygók holdjai

- Adv. Space Res.* **26**, 1677, 2000.
Astronomy Apr.1993, p.31; Febr. 1995, p.44; Jun. 1995. p.24; July 1995, p.20; Jan. 1996 p.28;
Oct. 1996, p.68; Febr. 1999, p.26.
Aviation Week and Space Technology 16. Oct. 1995, p.26.
EAS Journal Vol. **17**, 1993.
Earth, Moon and Planets **38**, 299, 1987; **39**, 195, 225, 1987; **41**, 295, 1988; **44**, 7, 1989; **67**, 95, 1995;
74, 61, 1996.
Earth-Oriented Appl. Space Techn. **2**, 63, 1982.

Encyclopedia of the Solar System. Academic Press, 1999.

Élet és Tudomány **LII**, 657, 675, 1997.

Geophys. Res. Letters **6**, 731, 1979.

<http://www.spaceviews.com>

Icarus **56**, 246, 1983; **70**, 334, 354, 1987; **76**, 295, 1988; **78**, 90, 1989; **79**, 75, 1989; **81**, 220, 1989; **91**, 112, 1991; **99**, 82, 1992; **115**, 219, 250, 1995; **119**, 385, 1996; **123**, 557, 1996; **124**, 1, 45, 1996; **125**, 83, 1997; **127**, 93, 354, 394, 1997; **128**, 181, 469, 1997; **129**, 48, 178, 202, 289, 367, 1997; **135**, 4, 41, 64, 79, 95, 107, 127, 146, 166, 175, 181, 276, 303, 317, 345, 1998; **137**, 341, 1999; **141**, 53, 263, 287, 1999; **145**, 445, 609, 2000; **146**, 75, 125, 444, 476, 2000; **149**, 79, 133, 160, 2001; **150**, 279, 2001; **153**, 157, 2001; **156**, 143, 152, 2002; **157**, 456, 507, 2002; **158**, 24, 178, 2002.

Mercury May-June 1980, p.53.

Nature **282**, 811, 1979; **289**, 17, 1981; **301**, 666, 1983; **321**, 49, 1986; **391**, 363, 371, 1998; **405**, 48, 637, 2000; **412**, 395, 2001; **417**, 419, 2002; **420**, 796, 2002; **421**, 920, 2003.

Planet. Space Sci. **43**, 971, 1995; **48**, 617, 747, 1457, 2000; **49**, 1265, 1285, 1303, 2001.

Satellites of Jupiter, eds.: D. Morrison, M.Sh. Matthews, Univ. of Arizona Press, Tucson, Arizona, 1982, p.521.

Satellites of the Outer Planets (D.A. Rothery) Oxford Univ. Press.

Science **203**, 892, 1979; **286**, 77, 1999; **289**, 941, 1340, 1305, 2000; **290**, 467, 2000; **294**, 1258, 2001.

Scientific American Jan. 1982, p.73; May. 1987, p.40.

Sky and Telescope Jan. 1981, p.14; Oct. 1986. p.336; Oct. 1998, p.18, 20; Jan. 1999, p.20;

Febr. 1999, p.42; March. 2000, p.24.

Természet Világa **120**, 7, 299, 1989.

Gyűrűk

Csillagászati Évkönyv 1981, 153. old., Gondolat, Budapest, 1981,

Earth, Moon and Planets **22**, 103, 1980; **67**, 179, 1995.

<http://photojournal.jpl.nasa.gov/news>

Icarus: **70**, 366, 1987; **92**, 194, 1991; **116**, 397, 1995; **122**, 251, 1996; **125**, 348, 1997; **129**, 304, 1997; **141**, 253, 1999; **146**, 1, 2000.

Nature **318**, 544, 1985.

Publ. Astron. Soc. Japan **44**, 135, 1992.

Science **207**, 181, 1980; **246**, 1431, 1989.

Sky and Telescope Dec.1998, p.20.

Plútó

Astronomy Jan.1994. p.40.

BAAS **21**, No. 3, p. 986, 1989.

Icarus **70**, 483, 1987; **125**, 245, 1997; **126**, 362, 1997; **127**, 258, 1997; **130**, 16, 1997.

Nature **329**, 522, 1987; **335**, 240, 1988; **336**, 452, 1988.

Sky and Telescope May.1994, p.15; Nov.1994, p.14; May.1996, p.10.

Kisbolygók

Acta Astronautica **12**, 455, 1985.

Adv. Space Res. **27**, 1489, 2001.

Earth, Moon and Planets **75**, 95, 1996.

<http://www.space.com/scienceastronomy; near.jhuapl.edu/news>

Icarus **92**, 94, 118, 1991; **124**, 141, 1996; **127**, 130, 255, 1997; **128**, 83, 88, 95, 104, 241, 456, 1997; **129**, 1, 94, 440 1997; **130**, 177, 1997; **158**, 98, 2002.

Nature **390**, 439, 1997; **401**, 565, 1999; **402**, 155, 1999; **413**, 390, 2001; **417**, 608, 721, 2002; **419**, 49, 2002.

Planetary and Space Science: **48**, 887, 2000; **49** 787, 793, 831, 2001.

Science: **278**, 2109, 1997; **285**, 560, 1999; **289**, 2085, 2000.

Scientific American May 2000, p.28.

Sky and Telescope Jan. 1992, p.13; Aug. 1997, p.19; Oct.1997, p. 30; Dec. 1997, p.67; July 2000, p.19; Febr. 2001, p.26; July 2001, p.44; Jan. 2002, p.20; Febr. 2002, p.24.

Sterne und Weltraum 10/1995, p.695.

Meteorok

Earth, Moon and Planets **72**, 495, 1996.

<http://www.jpl.nasa.gov/snc/>

Nature **334**, 14, 1988; **344**, 813, 1990.

Planet. Space Sci. **49**, 763, 769, 2001.

Review of Geophysics **23**, 391, 1985.
Science **290**, 283, 791, 2000; **296**, 271, 334, 2002.
Sky and Telescope June 1994, p.14.

Üstökösök

Antarctic Meteorites Vol.XX, Abstracts, p.93, Tokyo, 1995.
Astronomy Sept,1990, p.31.
Astron. and Astrophys. **377**, 1081, 2001.
Earth, Moon, and Planets **36**, 263, 1986; **41**, 155, 1988.
Icarus **128**, 114, 368, 1997; **145**, 580, 2000.
Nature **361**, 40, 1993; **383**, 418, 697, 1996; **405**, 285, 2000.
Planetary and Space Sci. **48**, 1447, 2000; **49**, 907, 2001.
Science **290**, 1071, 2000; **292**, 1307, 2001; **296**, 12, 22, 1087, 2002.
Science News July 27, 1996, p.60; Aug.24, 1996, p.119.
Sky and Telescope July 1995, p.10; Aug.2000, p.24.

KBO-k

Astronomy Dec.1992, p.39.
Icarus **116**, 180, 1995; **118**, 322, 1995; **126**, 212, 1997; **160**, 32, 2002.
Nature **387**, 573, 1997; **416**, 711, 2002; **420**, 643, 2002.
Planet. Space Sci. **50**, 57, 2002.
Sky and Telescope Febr.1994, p.11; July 1994, p.10; March 1995, p.13; Sept. 1997, p.22;
March 2001, p.26; Dec. 2001, p.25.
Sterne und Weltraum 10/1996, p.786.

Planetológia

Adv. Space Res. **8**, No.5-6, 1988; **18**, 1996.
Akasofu, S., S. Chapman: Solar-Terrestrial Physics. Oxford at the Clarendon Press. 1972.
Andromeda 1993/5, 8; 1993/6, 22; 1993/7-8, 20; 1993/9, 10.
Annales Geophysicae **12**, 113, 565, 1994.
Astronomy July 1988, p.21; Jan. 1999, p.59.
Earth, Moon and Planets **36**, 167, 1986; **45**, 101, 237, 1989; **67**, 31, 101, 131, 161, 1995;
77, 125, 1999.
Előadások az I. Planetológia Szeminárium anyagából. MANT, Budapest, 1980.
EOS Transactions Aug. 1994, p.9; Nov. 1999, p.535.
Fizika 1981-1982. 87. old. Gondolat, Budapest, 1982.
Geophys. Res. Letters **9**, 1073, 1982; **18**, 1493, 1607, 1631, 1991.
<http://spacescience.com>
Icarus **67**, 88, 1986; **89**, 93, 1991; **94**, 368, 1991; **100**, 556, 1992; **115**, 258, 1995; **116**, 215, 1995;
122, 209, 397, 1996; **124**, 537, 1996; **126**, 336, 1997; **128**, 28, 171, 1997; **135**, 25, 1998; **142**, 249,
1999; **145**, 108, 2000; **149**, 277, 2001.
Ionoszféra-Magnetoszféra Fizika Vol.I-XXIII, 1973-2001.
Journal of Geophysical Research **85**, 1171, 5959, 1980; **86**, 7679, 8513, 1981; **95**, 215, 1990; **96**,
3725, 1991; **99**, 19213, 1994; **103**, 23347, 1998.
KFKI preprint: KFKI-1990-50/C, 44. old.
Kondratyev K.Y., G.E. Hunt: Weather and Climate on Planets. Pergamon Press, 1982.
Kosmitseskie Issledovania: **XXV**, 307, 1987; **XXVII**, 411, 1989.
NASA/TM—2001—209985, 2001.
Nature **283**, 815, 1980; **298**, 44, 1982; **302**, 385, 663, 1983; **354**, 273, 1991; **391**, 268, 1998;
401, 861, 1999.
Nishida, A.: Geomagnetic diagnostics of the magnetosphere. Springer, New York, 1978.
Planet. Space Sci. **38**, 127, 149, 207, 211, 231, 483, 765, 1051, 1133, 1990; **47**, 1175, 1999; **48**, 671,
717, 727, 2000; **49**, 1005, 2001.
Review of Geophysics **25**, 615, 1987.
Reviews of Geophysics and Space Physics **18**, 813, 1980; **22**, 373, 1984.
Science **206**, 1071, 1979; **238**, 170, 1987; **246**, 457, 1989; **254**, 548, 1991; **265**, 753, 1994; **266**, 1340,
1994; **270**, 1338, 1995; **289**, 1740, 2000; **294**, 39, 1472, 2001; **295**, 802, 2002.
Sky and Telescope Febr. 1989, p.149; Apr. 1994, p.12; May. 1998, p.22; March 2000, p.35.
Space Sci. Rev. **42**, 375, 1985; **47**, 303, 1988; **55**, 81, 1991.
Sterne und Weltraum 1/1996, p.20; 6/1996, p.436; 8-9/1997, p.726.
Természet Világa **120**, 299, 1989; **123**, 294, 361, 1992; **126**, 152, 1995; **127**, 120, 1996; **132**, 494,
557, 2001.

ACCRETION OF THE PLANETARY BODIES IN THE SOLAR SYSTEM: THE "GRAVITATIONAL CLUMPING"

by
Erzsébet Illés-Almár
Konkoly Observatory,
H-1525 Budapest Box 67
illes@konkoly.hu

All the Earth-type planets and the cores of the giant planets of the Solar System have been accreted from cold dust of the size of smoke particles. At the beginning of the accretion showers of fluffy, tiny clumps came into being by sticking as the particles, driven by the motion of the gas within the solar nebula, collided with small velocities. These clumps became more and more bulky and increasingly harder with the collisions of increasing relative velocities as those few, quickly growing, dominant planetary embryos perturbed their trajectories. The result of a hit was assembling (accretion) in the case of not too high relative velocities but destruction and mass loss in the case of too high relative velocities.

The Kepler motion, inherited from the rotation of the solar nebula, gave a rotation of similar direction to these growing planetesimals through the collisions.

The drag of the extensive atmosphere of the infant Sun decreased the size of the orbits of the bodies moving within it, consequently, they were spiraling inward and getting nearer to the Sun. When, however, somewhere a planetary embryo came into being they were locked by two-body resonance on an outer resonant orbit, and could not be broken further. That is why the larger planetary embryos on their outer resonant places assured on the one hand the larger density of planetesimals leading to collision, and on the other hand holding them on a similar orbit that made the collisions of small relative velocities possible. As a consequence, another planetary embryo has not only started to grow, but a quick growing of it was assisted. That is, planets starting from **Venus** and **Jupiter** came into being by gravitational clumping sequentially in a much shorter time interval than it was calculated earlier by the models without gas drag and without outer resonance. This resonant origin explains the **Titius Bode law**.

With the perfection of the **computer simulations** of the accretion process of the planetary bodies became possible for more and more points – as gravitationally attracting, extended bodies – and also taking into consideration their real orbit variations.

One can see from these simulations that independently of the initial conditions always several hundred planetary embryos are emerging on the territory of the Earth-type as well as of the giant planets, and to the end of the accretion period they are always accreting into 4-5 planets for example in the inner part of the planetary system. This means – and it is supported by the observations that a lot of giant craters are existing on the solid crusts of the planetary bodies – that at the end of the accretion period very many giant impacts took place. At that time the breaking into fragments and the disintegration became important, and the role of the chance was very significant. The resonant situation of the growing planetary system could have been substantially modified by the last largest collisions in particular, the consequence of which might be the deviation from the Titius Bode law. In the case of non-central collisions large obliquities might arise or it could slow down or speed up the spin of a body or even splash down a part of its crust (from which a satellite could have been accreted – see for example our **Moon**) or from the residual material a planet with a large core could be left behind (see for example **Mercury**).

The simulations also demonstrate that *during the accretion period ten times more material was ejected from the territory of the planetary system than that was accreted into the planets*. This can explain on the one hand the different distribution of comets in the nearest reservoir from the disk distribution. On the other hand it explains how the giant planets could drift away from their feeding zones as a reaction to this material ejection. **Jupiter** – for example – could get nearer to the Sun. This harmonizes with two observational facts. On the one hand many of the giant exoplanets are orbiting much nearer to their star, than it could have been expected on the basis of the earlier theory of our Solar System's origin. On the other hand the Galileo probe descending into the atmosphere of **Jupiter** measured 2-2.5 times higher inert-gas content than it could be expected, if **Jupiter** would have been accreted at the present distance from the Sun.

The resonant capture together with the gas drag theory is also advantageous, because shortens the core accretion period of the giant planets. By the running accretion these planets can collect large core-masses in shorter time periods, consequently they could accrete the surrounding gas by gravitational attraction before the solar wind and the radiation pressure would blow it out.

From the flattening disk of the solar nebula finally **the four terrestrial and the four giant planets** came into existence. The disk, however, came not to an abrupt end at 40 Astronomical Units – that is, at the **Neptune's** orbit – but continued with diminishing surface density, as it was postulated by **Edgeworth** and later by **Kuiper**.

There the density was not enough for the accretion of giant planets but several bodies with diameters over one thousand km-s and a large number of objects with diameters of several hundred km-s still could come into being (*Kuiper belt objects: KBO-s*). **Pluto** and **Triton** could belong to these bodies. Neptune could capture the former one for a resonant orbit, while the latter one became a Neptunian satellite.

In 1992 the perfection of the telescopes made the first discovery of a KBO possible (92QB1). Today – ten years later – the number of the discovered KBOs is over 400, that makes already statistical considerations possible. The result is that **Neptune** controls the inner part of the Kuiper belt in a similar manner as Jupiter does the asteroid belt. Consequently, the inner part of the Kuiper belt has a resonant structure and among the KBOs only those can remain on their orbits that are protected by a resonance with **Neptune**. Namely the perturbation of **Neptune** removes the other bodies from their orbits in a short time – like Jupiter removes the asteroids from the asteroid belt.

Among the newly discovered KBOs there are some orbiting on a 3:2 resonant orbit with **Neptune** – like **Pluto**. They are called *plutinos*. The ones that were thrown inward from the Kuiper belt into the territory of the giant planets are called *centaurs*, as the first one, discovered in 1977, was named after Chiron, a centaur. From the inward perturbed KBOs more could be captured by the giant planets, especially by the outer three. So the *outer smaller moons moving on irregular orbits*, originate very probably from the Kuiper belt. Some of the smaller bodies, however, expelled from the Kuiper belt inwards into the inner part of the planetary system, become *short-period comets* since the heating of the near-by Sun launches the release of their volatile material. From the larger objects of the Kuiper belt besides **Pluto** and **Triton** (the moon of **Neptune**) **Charon** (the moon of **Pluto**, discovered in 1978) could originate as well. The fact, however, that on the surface of **Charon** only water ice has been observed – to the contrary of **Pluto**, where methane ice was announced by the spectroscopic observations – raised the possibility, that similarly to the origin of our **Moon**, a giant impact gave birth also to **Charon**. At that large distance from the Sun, however, H₂O is already the "dry" material that builds **Charon**; while in the case of our **Moon** – being much nearer to the Sun – H₂O is the "volatile" material that disappeared as a consequence of the impact heat.

The increase of the spin rate of the contracting bodies caused – not only at the Sun but also in the case of the giant planets – the detachment of the equatorial belt of material that made the accretion of moon-systems in the vicinity of the giant planets possible. These moons are called *regular moons*. All the regular moon-systems show up a resonant structure, only the constant differs at the different planets. In the case of the Jupiter system one can even think that the infant-**Jupiter's** temperature had an effect on the composition of its forming moons (as their density is lower if they are orbiting further from **Jupiter**). This, however, can be the consequence of a later effect as well, as in the satellite systems the tidal heating suffered by the moons caused the loss of a part of the volatile material, and so the drying up of the moons. The two components have not been separated up till now.

References

- Astronomy and Astrophysics* **377**, 1081, 2001.
 Bérczi Szaniszló: *Kristályoktól bolygótestekig*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991.
 Dynamics of Astrophysical Discs (ed.: J.A. Sellwood) Cambridge Univ. Press.
Earth, Moon, and Planets: **21**, 43, 1979; **37**, 187, 1987; **39**, 21, 101, 129, 207, 1987; **67**, 217, 1995.
 EOS Transactions **72**, 473, 1991.
Icarus: **36**, 240, 1978; **62**, 16, 1985; **69**, 249, 1987; **70**, 319, 1987; **78**, 63, 1989; **92**, 234, 1991; **98**, 2, 20, 61, 1992; **100**, 274, 1992; **114**, 1, 1995; **115**, 60, 1995; **116**, 315, 1995; **124**, 62, 1996; **127**, 461, 1997; **129**, 134, 317, 1997; **142**, 219, 1999; **143**, 15, 45, 60, 2000; **145**, 220, 332, 382, 2000; **146**, 240, 2000; **149**, 235, 2001; **150**, 288, 314, 323, 2001; **155**, 436, 454, 2002.
 Illés Erzsébet: A Naprendszer égitestjeinek összeállása: gravitációs csomósodás. In: Geonómia az ezredforduló után. pp. 41-44., (ed.: E. Dudich), MTA Geonómiai Albizottság, Budapest, 2003.
Journal of the British Interplanetary Society **41**, 41, 1988.
Nature: **335**, 496, 1988; **338**, 29, 1989; **361**, 40, 1993; **383**, 697, 2001; **391**, 166, 1998; **402**, 269, 599, 633, 635, 1999.
Planetary and Space Science: **37**, 329, 1989; **38**, 1351, 1990; **43**, 1019, 1995; **48**, 679, 1117, 1447, 2000.
 Protostars and Planets (ed.: T. Gehrels) The Univ. of Arizona Press, 1978.
Sky and Telescope: Jan.1999, p.36; Aug.2000, p.26; Oct.2001, p.18.
 The Formation and Evolution of Planetary Systems (eds.: H.A. Weaver, L. Danly) Cambridge University Press, 1989.

COMPARATIVE PLANETOLOGY

by

Erzsébet Illés-Almár

Konkoly Observatory, H-1525 Budapest Box 67

illes@konkoly.hu

The Solar System, like a real laboratory, offers the possibility to investigate the planetary bodies under different conditions. Mercury has a magnetic field but no atmosphere, Venus has no magnetic field but has a thick atmosphere, the Earth has both of them, Mars has neither of them. The Table, containing 26 planetary bodies of diameter larger than about 400 km and having a solid crust, represents this "virtual laboratory".

1. THE THERMAL HISTORY OF A PLANETARY BODY

1.1. Heating and cooling of planetary bodies

Planetary bodies being accreted from cold dust particles are *heated by the thermalisation of the kinetic energy* as they impacted each other. The temperature reached depends on the fact how rapid the accretion was. If it was fast then there was no time to radiate away the heat generated by the previous impact. That is why the heat reserve of a planetary body is strongly dependent on the circumstances: the frequency of impacts, the number, mass and the impact direction of the impactors during this time period. The result was influenced mostly by the latest large impacts during the last intensive bombardments.

After the decline of the accretion process the planetary bodies were *heated mostly by the decay of the radioactive elements*, proportional to their silicate content. Consequently, in case of the icy moons of the giant planets a spherical shape is expected only over diameter of 2000 km. But, on the contrary, the observations reveal that all but one satellite (**Hyperion**) of diameter over 400 km have a spherical form and even several surfaces preserved traces of geological activity. The explanation of this surprising phenomenon may be the **tidal heating** because of the resonant structure of the satellite systems of the giant planets. So if the maximal heating was not enough for melting, an irregular shape remained; if it was just enough, a spherical shape came into being; if it was more than enough, then in addition to making the shape spherical, traces of geological activity are visible on the surface.

The *heat can flow out* from the planet's interior mainly by conduction or by material flow. The material flow can either be mantle convection or volcanism (material outflow through the crust). This latter – since it brings hot matter directly to the surface – is able to cool very effectively.

The *surface* can transfer the heat with radiation and – in the case of liquidsphere or atmosphere – with conduction as well. Cooling is faster on a smaller body, because of its larger surface-to-volume ratio. Therefore the crust of smaller bodies becomes thicker in a shorter time period, which at a critical thickness stops the volcanism and the tectonic movements as well.

The *liquidosphere* loses its heat by conduction, by circulation, by radiation and by evaporation. The *atmosphere* transfers the heat to space by radiation and by particle escape. If some atmospheric constituents absorb in the infrared, then *greenhouse effect* is working in the atmosphere that will slow down the cooling by retaining a part of the heat radiated by the surface. A solid state greenhouse effect may also exist as it has been suggested in connection with the nitrogen ice on the surface of **Triton** and probably with CO₂ ice on the surface of **Mars**.

Heating causes generally *expansion*, *cooling* generally *contraction*, except the special case of water which is densest at 4°C. So the freezing of the interior of a certain body containing a large amount of water can produce long fracture of the crust encircling almost their whole surface e.g. the valley on **Tethys**, on **Titania** and on **Ariel** respectively. *Phase transitions* can cause expansion or contraction as well depending on the crystallisation process, which may cause either increase or decrease of the volume.

1.2. How is a planetary body working?

If a planetary body is molten then an inhomogeneity in its temperature and/or composition may initiate **convection** in its core, mantle, liquidsphere and atmosphere. The convection in the core and/or in the mantle can produce a **magnetic field** by dynamo action. We attribute the existence of the magnetic field on **Mercury**, on the **Earth**, on **Ganymede**, on the **proto-Moon** and on the **proto-Mars** to their molten iron core. In the case of Jupiter and Saturn mostly the metallic hydrogen mantle, in the case of **Uranus** and **Neptune** mostly the metallic behaviour of the water mantle is responsible for the magnetic field. The consequences of mantle circulation on crusty planetary bodies are **volcanism** and **tectonism**. The consequences of the circulation in the liquidsphere and/or in the atmosphere are the redistribution of energy (and the erosion on the surface). In the

terrestrial oceans we can mention the Broecker conveyor – constituent of which are the Gulf and Humboldt streams. In the atmosphere global wind-systems arise, precipitation starts and the electrostatic conditions can change (lightning, recombination etc.)

2. THE CRUST

2.1. Three kinds of crust may exist on planetary bodies.

1.) The quick accretion produced a magma ocean that made the differentiation possible (the heavier elements could sink down). Because of the differentiation, as the bodies were cooling, the first formed crystals of the lightest material were floating on the surface of the magma ocean: this first crust is called the *primordial crust*. If circulation was initiated in the mantle because of temperature or density inhomogenities, then these light crystals were carried together by the circulation and were collected.

THE SOLAR SYSTEM AS A LABORATORY

		D O E S E X I S T ?				
The name of the planetary body	Dia- meter (km)	proper magnetic field	atmosphere surface pressure (atm)	liquidosphere	polar cap	continent
Earth	12756	yes	yes, (N ₂ ,O ₂ ,H ₂ O) 1	yes, H ₂ O	yes, H ₂ O	yes
Venus	12104	no	yes, very dense (CO ₂) 90	no	no	yes
Mars	6787	is? was?	yes, thin (CO ₂) 10 ⁻³	was, H ₂ O	yes, H ₂ O, CO ₂	?
Ganymede	5276	yes	very thin (O ₂) 10 ⁻¹¹	under icecrust H ₂ O	whole surface H ₂ O	
Titan	5150	?	yes,dense(N ₂ ,Ar,CH ₄) 1,6	may be, hydrocarbon	?	
Mercury	4878	yes	very thin(He,H,O,Na,K)10 ⁻¹⁵	no	yes, only in craters H ₂ O	
Callisto	4820	no	no	under icecrust H ₂ O	whole surface H ₂ O	
Io	3632	?	yes, patchy <<10 ⁻⁹ very thin (SO ₂ ,S,Na)	no	no	
Moon	3476	was	yes, very thin 10 ⁻¹² (Ne,Ar,Na,K)	no	yes, H ₂ O only in craters	?
Europa	3138	?	yes, 2,5 × 10 ⁻¹¹ very thin, (O ₂)	yes, H ₂ O under icecrust	whole surface H ₂ O	
Triton	2705		yes, thin(N ₂ ,CH ₄)1,4 × 10 ⁻⁵	?, N ₂	yes, N ₂	
Pluto	2302		now yes 5 x 10 ⁻⁵ thin (N ₂ ,CO,CH ₄ ,Ar)		yes, N ₂	
Titania	1610				whole surface H ₂ O	
Oberon	1550				whole surface H ₂ O	
Rhea	1530				whole surface H ₂ O	
Japetus	1460				?	
Umbriel	1190				?	
Charon	1186				whole surface H ₂ O	
Ariel	1160				whole surface H ₂ O	
Dione	1120				whole surface H ₂ O	
Tethys	1060				whole surface H ₂ O	
Enceladus	502				whole surface H ₂ O	
Miranda	484				whole surface H ₂ O	
Proteus	416				whole surface H ₂ O	
Hyperion	410				whole surface H ₂ O	
Mimas	394				whole surface H ₂ O	

Consequently on some places of the body crust pieces were piling up and the crust became thicker. On the basis of the Archimedean rule of floating this crust was floating on the magma underneath, that is, it was isostatically compensated. If the circulation of the mantle had a one-cell circulation then the collected pieces of the crust were concentrated on one side of the planetary body (as in the case of the **Moon** and **Mars**). In such cases the centre of the shape strongly differs from the centre of mass (this difference is 1,6 km at the **Moon** and 3 km in the case of **Mars**). If the mantle had not a one-cell circulation, then this offset is much smaller.

2.) When all of the light crystals were carried away by mantle circulation from the site of the upwelling, and the remaining part of the melt was crystallised, then a **secondary crust** came into being. Such a secondary crust could arise also when the melt from the mantle is uplifted by volcanic activity either on top of, or into the lows of the primordial crust. This happened in case of the "mare regions" on the **Moon**.

3.) If, however, **plate tectonism** is in action on a planetary body, then in subduction zones the secondary crust can carry with itself some broken pieces of the primordial crust as well as the sediment formed from the primordial crust by atmospheric (eolian) or fluidal erosion. This mixed primordial and secondary crust material will be worked into the mantle and a new crust material is formed which is called **tertiary crust**. It is a necessary condition for the formation of a tertiary crust that plate tectonism should act continuously through several cycles. According to our present knowledge such tertiary crust exists only on our **Earth**.

2.2. Impact craters

The accretion of planetary bodies happened by a series of impacts. As the bodies became larger and larger, the consequences of these impacts became more and more catastrophic. Impact energy was converted into heat, acoustic energy and into shock wave energy, that ground the surface material down to dust (see the Tunguz event on **Earth** and many cases on **Venus**).

Space probes proved that *impact craters are the most common surface feature on planetary bodies*. Although they originated everywhere by the same procedure and the mechanism of their origin is well known, nevertheless, surprisingly, they have different appearances on different planetary bodies. The result of the impact can be changed considerably by the properties of the impacting as well as of the target bodies.

As regards the *impacting body* the impact velocity is a decisive factor. An impactor coming from a heliocentric orbit will create a larger crater (giant, double wall crater or multiring basin) than coming from a planetocentric orbit. The shape of an impact crater depends on the impact angle. A central impact creates a ring like crater with a ring-like ejecta blanket (or the target body might be completely destroyed). In the case of a highly inclined trajectory the result will be an impact crater of elliptic shape, and/or a "butterfly"-shaped ejecta blanket (or the outer part of the target body will be splashed down). The jet stream, which is the result of the sudden evaporation of the surface matter, can pick up stones from the surface and accelerate them to escape velocity (see meteorites on the **Earth's** surface coming from **Moon** and **Mars**).

Non-central giant impacts can splash the crust down (in the case of **Earth**, **Mercury**, **Pluto**). In such a case a moon can or cannot be the result of the accumulation of the condensed material placed into orbit around the target body (in the case of **Moon** or **Charon**). If the non-central impact is in the equatorial plane of the target body then its rotation rate, if out of the equatorial plane then its rotation rate and its orbital obliquity will change.

As regards the *target body* there are several factors that can change the shape of an impact crater. On smaller bodies the wall and also the central peak can be higher. On bodies of softer material no central peak will occur, and/or the mountains of multiring basins may relax and sink into the crust leaving only an albedo pattern at the place (like Valhalla on **Callisto**). On frozen bodies with thicker crusts there is no possibility for relaxation (see *Herschel crater* on **Mimas** versus *Odyseus crater* on **Tethys**). If the crust of the target body has more than one layer and if the impact is deep enough, than a halo or a ray system with a different albedo might indicate the ejected material.

If the crust of the target body contains a lot of volatile material then a lobate crater will arise (see **Mars**). Even a "negative" crater can come into being in such cases, if the environment was flooded by harder material (lava flow or sediment) and later the ring mountain of the impact was eroded (see **Mars**). In the case of a very dense atmosphere of the target body there are no small craters at all, because the smaller incoming bodies are burned in the atmosphere (cut off limit at about 3 km on **Venus**). Even larger incoming bodies are exploding before reaching the surface and they impact simultaneously (craters with diameters smaller than 10-20 km on **Venus**). In some cases the explosion of larger impactors already at high altitudes in the dense atmosphere can produce a shock wave which reaching the surface is grinding the soil down to dust. The result will be a large "radar-dark" region of several crater diameters around the impact crater, or in the case of a total explosion of the impacting body only a "radar dark" region remains without a crater. In case of an oblique impact the ejecta blanket becomes asymmetric because of the turbulent motion of the dense atmosphere, which does not allow the spreading of the debris into the direction of the arrival. The form of the ejecta blanket is similar to a petal because the form of the ejecta blanket is a map of the turbulent mushroom cloud itself. The ejecta blanket may be larger than expected, because the turbulent motion of the hot air may pick up dust particles and bring them further away.

What are the consequences of an impact? The impact crater is a scar which can be seen in large numbers on every crusty planetary body. Sometimes traces of ancient giant impacts can be inferred only by the surface topography (South Pole - Aitken and other basins on the **Moon**) because they are overwritten by many new, smaller craters. An impact can be also the centre of a fracture system or volcanic activity. At the antipode of a large impact the crust can be fractured because of focusing the seismic waves (see Caloris antipode on **Mercury**). After a non-central impact a relatively larger core may remain (in the case of the **proto-Mercury**), or a big moon (the cases of **Earth** and **Pluto**), or some gravitational anomaly in connection with mascons (when the denser mantle material intrudes into the place of the rebound crust, like in the case of the **Moon**). As another consequence of the impact an atmosphere may be blown off, as for example in the case of the *Argyre basin* impact on **Mars**.

The material of the impactors can be implanted into the crust and/or into the atmosphere: the material of cometary nuclei and/or of asteroids are contributing to the volatile content of Earth-like planets. For example the water of the oceans of the **Earth** may have arrived in such a way. The disintegrated material of the impactor can be spread throughout the atmosphere by winds, causing the so called "*nuclear winter*" phenomenon.

2.3. What kinds of deformation are caused by the different processes on a crusty planetary body and where it was observed in the Solar System?

On the most passive planetary bodies there is *no trace of any geological activity*, surface changes occurring only as a consequence of impacts. All the satellites smaller than about 400 km and **Callisto** belong to this category.

Cracks in the crust can take their origin from curvature changes because of tidal deformation (see the lineament system on **Europa**) or because of dome formation over upwellings of the mantle (see the East-African *Great Rift Valley* on **Earth**, or the radial fracture systems of the *coronae* on **Venus**). Traces of expansion, like valleys of global dimension, can be formed by heating of the whole body, or because of the total freeze of the whole body containing large amount of H₂O (see **Tethys**, **Titania**, **Ariel**, **Dione**?). *Global thrust-fault systems* can develop because of outdrying and contraction of the core (see **Mercury**).

More active is a planetary body if traces of *differentiation* can be seen on its surface in the form of rays or halo around the impact craters (see **Mercury**, **Moon**, **Ganymede**, **Callisto**, **Ariel**, **Titania**, **Oberon**) or in the form of mare (like on the **Moon**, on **Europa** and on **Triton**) or as other kinds of volcanic outflow (volcanic plane: **Venus**, **Io**, **Ganymede**; volcanic edifice: **Mars**, **Venus**, **Earth**). A linear albedo pattern connected to fracture system also refers to differentiation (see the light and dark lineaments on **Europa**).

Global fracture systems or traces of dilatation at one place and traces of compression on others refers to *circulation within the mantle* (only polygonal features of the ancient crust: see on **Umbriel**; fracture system: see on **Ganymede**, on **Ariel**, on **Triton**; rift valley network connected with plate tectonics: see on **Earth**; traces of local dilatation: see on **Enceladus** and the weakness zone between *Beta* and *Artemis Chasma* on **Venus**, *Valles Marineris* on **Mars**; the traces of local compression: see ovoids on **Miranda**, the *Freya*, *Akna*, *Danu* and *Maxwell* chain mountains around *Lakshmi Planum* on **Venus** and chain mountains on **Earth**. Bending occurs also on **Europa**, but it relaxes and does not remain as mountains for a long time).

Local ridge-groove systems can arise from local heating (see **Enceladus**). The raising up of crust material is considered as a trace of local compression: for example lift off of rigid blocks of crust (see *Tibet* on **Earth**, *Lakshmi Planum* on **Venus** or the lifting off on **Miranda**). Compression can arise when crust material is slipping down along the slope of a mountain or dome (see circular ridges around the *giant volcanoes* on **Mars**, or the *annuli* around *coronae* on **Venus**). The gravitational slipping down can also play a role in the origin of *tesserae* on **Venus**.

We may speak about *subduction zones* if a piece of crust is moved below another, down into the asthenosphere (see *deep oceanic trenches* on **Earth**, certain *corona arches* or *chasms* on **Venus**, the half craters on **Ganymede** and **Enceladus**?).

Plateau is defined as a piece of crust that has been thickened by volcanism above an upwelling of the mantle. After leaving off its hot spot the piece of crust becomes an isostatically compensated mini-continent (see *Ovda*, *Alpha*, *Thetis*, *Tellus* on **Venus** and *Iceland* on **Earth**). A *continent* is a thickened piece of crust that was carried together and accreted by mantle circulation, and is isostatically compensated. It shows no gravity anomaly since continents have their "roots" extending downwards into the mantle as well (see continents on **Earth**, *Ishtar Terra* on **Venus** and a piece of crust north from *Korolev crater* on the **Moon**).

Global rigid-plate tectonism exists only on **Earth**, where the oceanic crust is rigid enough to transfer the tension from the spreading centres (at mid-oceanic ridges) to great distances, i.e. to the deep oceanic trenches, meanwhile it deforms only at the plate edges. On **Venus** some kind of soft-plate tectonics may be at work, where the plates are plastic, therefore they deform in a diffuse manner everywhere inside the plate, like the continental crust on **Earth**, but they are not rigid enough to transfer the tension to great distances.

Impacts can alter every kind of deformation.

2. 4 Volcanism

The feature on the crust is called *volcano* when molten material is flowing out from the interior of a planetary body to the surface. There is observational evidence that volcanic activity *was* going on on **Venus**, on **Mars**, on the **Moon**, on **Ganymede**, on **Ariel** and on **Europa**, and *is* going on on **Earth**, on **Io** and on **Triton**. We are speaking about a *geyser* when such a component is flowing out from the interior which is considered volatile at the surface temperature of that planetary body (water on **Earth**, sulphur and sulphur dioxide on **Io**, nitrogen on **Triton**, water on **Europa** ? and water on **Enceladus**?).

The volcanic outflow can take its origin from a *hot spot volcanism* (see *Hawaii volcanoes* on **Earth**, giant volcanoes on **Mars**, coronae and volcanic edifices on **Venus**, volcanoes on **Io**), or by *volcanism along fractures* (mid-oceanic ridges on **Earth**, fractures on **Europa**, **Ganymede**, **Ariel**, **Triton**) and also by *explosive volcanism* at the subduction zones where the intruded an melted volatile material causes the explosion (only on **Earth** in connection with deep oceanic trenches).

The *material of the lava* is molten material of the mantle or molten material of the crust. It is silicate on **Mercury**, on **Venus**, on **Earth**, on the **Moon** and on **Mars** and partly on **Io**, but mostly sulphur or sulphur dioxide on **Io**, water on **Europa**, ice on **Ariel** and nitrogen on **Triton**. The very high (1600-1700 K) temperature of some lavas on **Io** reveals that a magma ocean exists under the crust even today. The Venusian lava was extremely fluid, very probably because of its high salt content. Several hundred or even several thousand km long and similarly broad valleys were carved out. The lava is also very fluid on the satellites of **Jupiter** and **Saturn**, where its composition is mainly a mixture of water and ammonia. On the satellites of **Uranus** and **Neptune**, however, some methanol is mixed to the water and ammonia, therefore the lava becomes more viscous there.

In the case of fluid lava *maria* arise, when the *low viscosity lava* fills the low lying parts of the surface (**Moon**, **Europa**, **Triton**). In the case of *dense lava flows* the flow fronts are characterised by rims (see the **Earth**, **Venus**, **Mars** and the satellites of **Uranus** and **Neptune**). In the case of *repeated outflow* volcanic edifice is constructed (**Mars**, **Venus**, **Earth**). The existence of *Olympus Mons*, the largest volcano in the Solar System (its height is 25 km, the diameter of its base is 600 km) hints at the following conclusions: (1) the Martian crust has to be very thick if it can support such a big construction, (2) the volcanism on **Mars** was active for a long time, (3) there is no plate tectonism transporting the plates which could have produced a series of islands instead of one big edifice.

The *height of volcanic eruptions* depends on many aspects. It is increasing with the outflow velocity through the chimney, it decreases with surface gravity and also with the pressure of the atmosphere or liquidosphere. So it is understandable that, because of the lack of an atmosphere/liquidosphere on **Io**, the eruptions of the volcanic material can reach 800 km height.

The volcanic activity is connected with *resurfacing*. The lack of giant craters on a planetary body means that resurfacing has to happen after the large bombardment (see **Ariel**, **Titania**). On **Venus** a huge quantity of viscous lava has filled up all lows of the surface, as a consequence, 65% of the surface is covered by rolling planes. The surface of **Venus** is very young. The very few impact craters (about 800) are distributed uniformly on the whole surface indicating that the volcanic flood very probably happened at the same time on the whole surface by overturn of the crust. The bulk of the surface of **Io** consists also of volcanic planes, regenerated locally on a time scale of 10 years. All maria on the **Moon** are basaltic plains, which have been filled similarly. But a similar type of mare exists also on **Triton** (filled by nitrogen) and on **Europa** (filled by water).

The role of volcanism is very important in supplying atmospheres by the emission of volatiles. The volatile recycling between the mantle and the atmosphere is guaranteed, however, only in the case of a working plate tectonism (as far as we know it, it is only on the **Earth**).

3. VOLATILES

3.1. The volatile content came into the planetary bodies absorbed on the dust particles. Computer simulations indicate that in the inner part of the Solar System the too high temperature prevented the incorporation of volatiles with dust particles into planetary bodies, therefore only later cometary nuclei and asteroids (containing 20 – 30% H₂O) could transport water from the outer part of the planetary system to them. Giant planets later, during their accretion, when their core was large enough, could accumulate by gravitational attraction some of the surrounding gas as well.

3.2. Atmospheres

The first atmospheres are called *primordial atmospheres*. On the one hand, the first atmospheres of the crusty planetary bodies came into being after the accumulation period by outgassing of the impact heated bodies.

All these atmospheres, however, were blown off by giant impacts because of the small escape velocities. On the other hand, the atmospheres of the giant planets, because of the large escape velocities, remain during the whole lifetime of the Solar System. So the giant planets all have primordial atmospheres.

The *secondary atmospheres* also originated by outgassing of solid crusts. This process has been accelerated by volcanism, if it was working on a planet. The volatile content of the impacting bodies, as well as the implanted atoms from the solar wind, became part of the atmosphere of the target planet. The solar wind component is negligible in the case of large mass atmospheres, but is essential if the atmosphere is thin (e.g. 98% of the atmosphere of **Mercury** is helium, originating from the solar wind).

In connection with **Io** and **Mercury** we have coined a new name: *patchy atmosphere*. We are using this name when an atmosphere is not covering the whole planet, but only local atmospheric patches are arising for short time periods. On **Mercury** this happens above the “hot poles”, on **Io** above active volcanoes. In the latter case a gas cloud exists for 15 – 20 hours before Jupiter picks it up.

An *atmosphere can disappear* in several ways. A large impact can blow it off suddenly. Slow escape is possible due to heat motion. Since this mechanism is making a difference between isotopes, one can estimate for example how many water disappeared from a planet. Solar wind erosion can contribute also to the disappearance of the atmosphere of a planetary body without a magnetosphere. If, however, a magnetosphere exists in the vicinity of a planetary body, either its own or that of its planet nearby, then it can divert solar wind particles.

In the case of a proper magnetosphere, its electric field can accelerate ions over the escape velocity, i.e. the planetary atmosphere loses a part of its gas-content by polar wind. After neutralisation even quick ions transformed into *energetic neutral atoms* (ENA) can escape, if the direction of their velocity vector points away from the planet. Part of the atmosphere can also freeze out to the surface, or can precipitate into the polar caps (see **Earth**, **Mars**, **Triton**, **Pluto**, **Mercury**, **Moon**) or into glaciers (we know only terrestrial examples) or into the regolith with the dust during dust storms (see **Mars**). Some constituents of the atmosphere may become bound into the soil: the released oxygen can oxidize, the CO₂ can bound into carbonates in the presence of water, the H₂O can bound into hydrated silicates (**Earth**, **Mars**, **asteroids**) or can compose clathrates with CO₂, NH₃, CH₄, N₂ or Ar on the low temperature of the icy moons.

If on a planetary body there is no constituent absorbing the ultraviolet radiation of the Sun – like the ozone on **Earth** – there the UV radiation gets down to the surface (as for example on **Mars**), and immediately dissociates the subliming H₂O. The hydrogen migrates up into the hydrogen corona and escapes, the oxygen either oxidizes or accumulates in the atmosphere.

To *retrieve* some component of the atmosphere it is necessary to have a specific temperature interval for rain, dew (sulphuric or hydrochloric acid on **Venus**, water or acid rain on **Earth**), or for snow/frost (H₂O snow/frost on **Earth**, H₂O frost and CO₂ frost on **Mars**, sulphur or SO₂ frost on **Io**, CH₄ rain or hydrocarbon aerosols on **Titan**, nitrogen and methane frost on **Triton**). *Recycling* is possible between the atmosphere and the reservoirs (polar caps, glaciers, ocean, regolith) when the temperature changes make it possible (**Earth**, **Mars**, **Titan**, **Triton**), as well as between the mantle and the atmosphere, if the plate tectonism is active on a planetary body (only on **Earth**).

Among the moons only **Titan** has a dense atmosphere in spite of the fact that the Galilean moons have about the same dimension. The reason may be fourfold. **Titan** has a large enough mass with a high enough escape velocity to retain its atmosphere and it is cold enough, that the molecules are moving with smaller heat motion, so only a few can reach the escape velocity. Since also **Saturn** has smaller mass and weaker magnetic field than **Jupiter**, it picks up less of the molecules of the satellite's atmosphere.

3.3. Neutral and ionised components

Neutral atmospheres

The density of an atmosphere decreases exponentially with height. The distance, on which a component decreases by a factor of e , is inversely proportional to the molecular weight. Consequently, a constituent of larger molecular weight will decrease with height at smaller altitude than the light ones, and so a layered atmosphere will appear over a given height, where the mixing is not strong enough (*heterosphere*). Under this given height is the *homosphere*, where the free path is small, the molecules collide frequently, and so here the atmosphere is well mixed. The molecular weight in the layers in the heterosphere is decreasing with height, so in every atmospheres the external layer is dominated by the lightest element, the hydrogen: this is the *hydrogen corona*. That height, over which the free path of the atmospheric constituents is large enough to escape is called *exobase*. The part of the atmosphere over the exobase is the *exosphere*. In very thin atmospheres the *exosphere* can reach the surface (**Europa**, **Ganymede**, **Io**, **Mercury**, **Moon**).

The *atmospheres rotate* together with the planetary bodies, but not rigidly. If the atmosphere rotates slower or faster, then it as a zonal wind may be observed on the surface. We speak about *superrotation*, if the atmosphere rotates faster than the surface (superrotation of Venus is very strong, 4 versus 243 days). The

atmospheres of the giant planets and the Sun rotate slower with increasing latitude: this phenomenon is called *differential rotation*.

Heating of the atmospheres.

The atmospheres receive heat from inside (from the interior of the planetary body) and from outside (electromagnetic and corpuscular radiation from the Sun). The angular distribution of the internal heating is uniform, but that of the external heating is asymmetric. The heating of the electromagnetic radiation from the Sun has a maximum at the subsolar point, while the corpuscular heating is maximal around the magnetic poles. (This heating is particularly strong during geomagnetic storms. If there is no proper magnetic field, the corpuscular radiation can heat anywhere (**Venus**).

The *heating medium* is generally the surface material or the dust in the atmosphere (strong on **Mars** at the time of dust storms). The surface heats the neighbouring atmosphere, consequently, the temperature of the atmosphere will decrease with height (*troposphere*). The other heating medium in an atmosphere is called the *thermosphere*. This is the upper part of the atmosphere, where the ultraviolet and the extreme ultraviolet radiation is absorbed and cause the dissociation of the molecules, the consequence of which is the increasing of the temperature. But the temperature increases only until a certain limit (*exospheric temperature*) because from here the fastest molecules can already escape.

If an intermediate heating medium is present (like ozone on **Earth**) then the rate of the temperature decrease will change, on **Earth** it becomes even increasing (*stratosphere*). Not every planetary atmosphere has a stratosphere.

If any of the atmospheric constituents absorbs in infrared, then the infrared part of the heated surface will be captured (*greenhouse effect*; very strong on **Venus**).

Diurnal temperature changes

In the case of electromagnetic radiation the maximal heating is at the subsolar point. Depending on the heat capacity of the surface material the maximum of the atmospheric temperature will have a delay with respect to the local noon. Because of the increased temperature the air expands, that is, the iso-temperature surface will have a bulge. Because of the increased pressure on the place of maximal heating winds will arise into all directions. This winds will be deviated by the Coriolis force on a rotating planetary body. By these winds, interacting with the rotation of the atmosphere, circulation cells (temperature zones) will arise. The faster a planet rotates the more circulation cells come into being along the latitudinal circles (**Venus** has one, **Jupiter** about eight, **Saturn** more than twenty zones). In the case of a proper magnetic field this regular zonal flow will be disturbed by the heat coming in in the vicinity of the magnetic poles during magnetospheric storms.

Seasonal changes

If the *spin axis* of a planetary body is not normal to the orbital plane, then the latitude of the *place of the maximal heating* will change during the orbital motion (during the "year" of that body). The heating will change accordingly on a moon of such a planet because the moons are moving in their planet's equatorial plane. If the moon of such a planet is moving on an oblique orbit, then combination of the two obliquities results in a very complicated seasonal change (see **Triton**). If the orbit of a planet is *eccentric*, then the *intensity of the heating* is changing along the orbit (during the "year" of that planet). The heating will change accordingly on a moon of such a planet. The obliquity is larger than 20° at the case of the **Earth**, **Mars**, **Saturn**, **Uranus**, **Neptune** and **Pluto**. The eccentricity is larger than 0,09 at **Mercury**, **Mars** and **Pluto**. On **Mars** because of the obliquity of the spin axis and the large eccentricity the seasonal changes are quite complicated.

Ionospheres

The ultraviolet radiation of the Sun will ionise every gas near by, even in the outer part of the planetary atmospheres. In the denser part of the atmospheres the ions colliding recombine, but where the free path is longer, the movement of the ionised component is divided, depending on their charge. They can be accelerated by the electric fields of the magnetosphere. As they gyrate around the magnetic field lines, they can reach larger height around the magnetic equator, and fill a belt-like zone, the *plasmasphere*. Depending on the ionisation of the different constituents of the atmosphere different ionospheric layers can arise (D, E, F layers on **Earth**).

3. 4. Liquidospheres

If on the surface of a planetary body the atmospheric temperature and pressure falls in such a range that one or more components of the volatile inventory can remain in fluid state, then a "liquidosphere" (on **Earth** hydrosphere) will arise on the surface. To liquidosphere *rivers*, *lakes*, *inland seas* and *ocean* are classed. Traces of flowing water are present on **Earth** and on **Mars**, at present continuously fluid water is only on the surface of the **Earth**. Global ocean is only on **Europa** (closed with a thin ice crust to space). Non-global ocean exists on **Earth** (water) and probably on **Titan** (hydrocarbons).

3. 5. Ice spheres

Global ice crust is present on **Europa**.

Polar caps exist if volatile material is transported by atmospheric motion, and it precipitates on the cooler parts of a planetary body (**Earth**: H₂O, **Mars**: H₂O and CO₂, **Triton**: N₂, **Pluto**: N₂). On airless body outgassing volatile material or impacting cometary volatile material covers the surface and in permanent shadows can remain for a longer time (**Moon** and **Mercury**).

The condition of strong seasonal changes is the existence of icy and non-icy regions on the surface of a planetary body.

Glaciers

We are speaking about glaciers if solid precipitation accumulates and changes its position by rigid flow. We know glaciers up till now only on **Earth**.

Ice bounded in regolith

On **Mars** after dust storms the atmospheric H₂O aggregates on the dust particles and will settle together with the dust. This is a larger H₂O reservoir on **Mars** than the polar caps. Its capacity is changing with the variation of the orbital elements of **Mars** on a timescale of 100 thousand years.

4. MAGNETIC FIELDS, MAGNETOSPHERES

4.1. **The magnetic field** around a planetary body can be caused by an intrinsic magnetic field, by an induced magnetic field or by a frozen-in magnetic field. The measured magnetic field will be the resultant of all of them.

In case of an *intrinsic magnetic field* the circulation of an inner molten and electrically conducting material produces the magnetic field by dynamo mechanism. If the dynamo is operated by an axisymmetric circulation in the core then the dipole term will dominate, the centre of which coincides with the centre of mass, its axis with the rotation axis of the body (**Saturn**). If the circulation is not symmetric then an obliquity of the magnetic axis will arise (**Earth**, **Mercury**, **Jupiter**, **Ganymede**) and/or the higher terms are important (**Jupiter**). If, however, the source of the magnetic field is the circulation of the mantle then the offset of the centre and the obliquity of the axis will be even larger (**Uranus**, **Neptune**).

In case of an *induced magnetic field* the planetary body ought to have a global, electrically conducting layer and a changing (in strength and/or in direction) magnetic field in the vicinity. For example in response to changes in the interplanetary magnetic field the ionospheric electric currents vary in the **Earth's** atmosphere; in response to **Jupiter's** magnetic field differences in the changing actual position of its moons, induced magnetic fields will arise in them (in the **Jupiter** system it was proven already in **Europa**, **Callisto** and **Ganymede**, but surely it exists in **Io** as well). While in case of an intrinsic magnetic field the magnetic axis is more or less fixed to the planetary body as long as the circulation remains unchanged, in case of an induced magnetic field the direction of the magnetic axis is changing together with the change of the driving magnetic field.

Frozen in magnetic field will arise when molten ferromagnetic material cools below the Curie point in the presence of any magnetic field (**Moon**, **Mars**, surface layers on **Earth**, asteroids **Gaspra** and **Ida**).

4.2. Magnetospheres

The magnetic field of a planetary body will be compressed into a drop-shaped space by the surrounding magnetic field (by the magnetic field of the solar wind in the case of planets, or by the planet's magnetic field in the case of a moon; until now we know that out of the moons only **Ganymede** has an own, intrinsic magnetic field). So the magnetic field lines of the planet will be deformed: they will be compressed from the direction of the Sun and will lengthen on the anti-sunward side (*tail of the magnetosphere*). The magnetic tail of a moon will point to the forward direction of its motion, because the magnetic field lines of the planet will overtake the moon as the planet's magnetosphere is corotating with the planet itself and is moving faster at the distance of the moon than the Kepler motion.

The *dimension of a magnetosphere* depends on the strength of the planet's magnetic dipole moment and on the dynamical compression of the solar wind (velocity times number density). As the solar wind is highly variable the dimension of a planet's magnetosphere is changing accordingly (between 40-100 Jupiter-radii in the case of **Jupiter** in the sunward direction).

A magnetosphere can protect the atmosphere of a "resident" planetary body from the solar wind erosion. So the planet's magnetosphere protects the moon's atmosphere as well, if the moon is orbiting inside the planet's magnetosphere (giant planet's regular moons) but at the same time the moon is exposed to the magnetospheric erosion of the planet. In lack of a magnetosphere there is no protection against the solar wind erosion; in such cases the atmospheres extend further in the anti-sunward direction (tails of comets, **Venus**, **Moon**).

The structure of the magnetospheres. The field lines near to the planet remain *closed* but will be compressed and deformed. At low and mid-latitudes, at the footprints of the field lines, the fast ions of the ionosphere can reach larger heights along the field lines: the torus-like space populated by them is called *plasmaphere*. Particles of certain energy populate certain beams of field lines: these are called *radiation belts* (Van Allen belts around the **Earth**).

The field lines that are further from the planet are *open* because of merging with the magnetic field lines of the solar wind. They are pulled back by the motion of the solar wind and so a tail of the magnetosphere will be formed. Here the particles of the solar wind can enter into the magnetosphere. The energy feeded by the solar wind into the magnetosphere is stored in the tail in the form of particle motion and/or in magnetic energy.

The tail has two lobes with proper current systems flowing into opposite directions, where the collective motion of the protons, originating from the solar wind, forms the electric current. In the plane of the magnetic equator, at the boundary of the two lobes, the larger density of protons appears like a current sheet. If there are too many particles stored already in the tail, or some disturbance is arriving from the interplanetary space, then field lines merging back will follow: this is called a substorm. At such a time particles from the current sheet will be injected towards the auroral oval and the magnetic equator where a ring current will arise (such particle injections have been observed at **Earth** and at **Mercury**).

In the vicinity of the aurora regions the atmosphere will be heated by the Joule heating of the electric current (that is represented by the movement of charged particles) and by the impact of precipitating particles. At the vicinity of the equator the atmosphere will be heated by ENAs (**E**nergetic **N**eutral **A**toms – which are the neutralized ions of the ring current by charge exchange with the neutral atoms of the hydrogen corona), and also by ion impacts because of wave-particle interaction (SAR arc – **S**table **A**uroral **R**ed arc, that was observed until now only at **Earth**).

On the sunward side of the magnetosphere a shock wave will be formed, on the inner side of which is the magnetopause. The charged particles of the solar wind cause magneto-hydrodynamic waves at the boundary of the magnetosphere. Some field lines can resonate to them and the oscillation of these field lines can be recorded in the magnetic observatories as telluric magnetic oscillations.

Radio waves were observed by space probes at the **Earth** and at the **giant planets**. On special places of the planetary magnetospheres electron acceleration is occurring, and the synchrotron radiation of the electrons accelerated to relativistic velocities, generates the planetary radio waves. As radio waves do not arise in every place in the magnetospheres the variation of the strength of the radio signal with the rotation of the planet makes possible the determination of the rotation period of the interior, to which the magnetic field is linked,. This phenomenon is important in the determination of the rotation of the giant planets, as they have differential rotation. In case of **Jupiter** the coordinate system linked to the magnetic field is called system III (I is linked to the rotation of the equator, II is to mid-latitudes).

CONCLUSION

As we can see, all but one (plate tectonism) of the “**geophenomena**” occur on some other planetary bodies as well. But their form of appearance and their importance are not the same as in the case of the **Earth** – because of the different initial and/or environmental conditions.

There are, however, some phenomena that appear somewhere on other planetary bodies but not on **Earth**, or only simply we did not recognize its importance up till now on **Earth**.

To explain some phenomena on other planetary bodies the “ground truth” helps, that is, direct terrestrial investigation is needed. But the contrary is true as well. To recognize some negligible components of a phenomenon on **Earth**, other planetary bodies are of great help, where the given component is important and conspicuous; even that is why we could recognize it there. After this recognition we can build it into our terrestrial models, and hence the *real role of the other components* will be clearer. As a consequence our model will be better, and later at the extrapolation with this model the usefulness of the forecast will be more convincing. Nowadays, for example, as the problem of global warming and the role of anthropogenic influences in it became so depressing, it is of great importance if our atmospheric model worked well also under conditions different from the present ones.

References

Mercury

- Icarus* **124**, 690, 1996; **128**, 75, 1997; **149**, 1, 2001.
- Nature* **335**, 496, 1988; **404**, 159, 2000.
- Planet. Space Sci.* **49**, 1395, 2001.
- Science* **268**, 1455, 1995.
- Sky and Telescope* Sept.1990, p.256; Oct.1994, p.12.

Venus

- Adv. Space Res.* **5**, 99, 1985.
- Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **16**, 141, 1978.
- Astronomitseskij Vestnik* **XIII**, 3, 1979.

Astronomy Sept.1991, p.32; Febr.1995, p.37; May.1997, p.48.
Earth, Moon and Planets **41**, 45, 1988; **44**, 219, 1989; **74**, 191, 1996; **76**, 67, 1997-1998.
Icarus **41**, 18, 1980; **61**, 521, 1985; **62**, 221, 458, 1985; **112**, 211, 253, 1994; **115**, 399, 1995; **120**, 332, 1996;
125, 364, 1997; **128**, 415, 1997; **129**, 147, 232, 1997; **130**, 198, 1997; **145**, 533, 2000; **146**, 301, 404, 2000;
148, 307, 2000; **150**, 19, 2001.
Geophys. Res. Letters **9**, 499, 1982.
Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics **57**, 537, 1995.
Journal of Geophysical Res. **100**, 23317, 23329, 1995; **101**, 2279, 1996.
Kosmitseskie Issledovania **XIX**, 613, 1981.
Nature **296**, 13, 1982; **298**, 15, 1982; **336**, 360, 1988; **337**, 55, 1989.
Pisma v Astron. Zh. **5**, 3, 163, 211, 217, 222, 229, 1979; **8**, 387, 391, 399, 404, 411, 414, 419, 424, 429, 433,
437, 444, 1982; **12**, 30, 41, 46, 90, 1986.
Planet. Space Sci. **34**, 585, 1986; **43**, 1001, 1995; **48**, 1479, 2000.
Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference XIX p. 349, 1989.
Science **216**, 181, 630, 1982; **247**, 1191, 1990; **252**, 213, 247, 249, 252, 260, 265, 270, 276, 288, 297, 312, 1991;
270, 1460, 1995;
289, 1897, 2000.
Scientific American Aug.1980, p.46; Aug.1980, p.57.
Sky and Telescope June 1985, p.507; Apr.1989, p.360; Dec.1990, p.603; Jul.1991, p.24; Aug.1993, p.22;
Aug.1997, p.34.
Sterne und Weltraum 11/1991, p.664.
Venus. (eds. Hunten, D. M. et al.) Arizona, 1983.

Earth

Astronomy July 1996, p.30.
Brjuhanov et al.: Kosmitseskaja karta SSSR. 27th Int. Geological Congress, 1-14 Aug. 1984. Nauka, Moscow, 1984.
Geophys. Res. Letters **22**, 1205, 1209, 1995.
Earth, Moon and Planets **37**, 1, 187, 1987; **70**, 21, 1995.
Icarus **38**, 212, 1979.
Journal of the British Interplanetary Society **41**, 95, 1988.
Journal of Geophysical Research **99**, 16805, 1994.
Nature **298**, 123, 1982; **334**, 115, 145, 1988; **336**, 714, 1988; **390**, 154, 1997; **416**, 307, 2002.
Physics Today Nov. 2001, p.41.
Review of Geophys. and Space Phys. **22**, 131, 1984.
Science **246**, 104, 1989; **286**, 1925, 2141, 2254, 1999; **294**, 2109, 2342, 2001.
Sky and Telescope July 1991, p.38; Apr.1992, p.387; Apr.1996, p.12.
Tectonophysics **216**, 1, 31, 1992.

Moon

Astronomy Oct.1994, p.28; Apr.1995, p.36; Oct.1995, p.72.
Geophys. Res. Letters **18**, 2117, 1991.
<http://lunar.arc.nasa.gov>
Icarus **36**, 245, 1978; **146**, 98, 2000; **149**, 54, 2001; **150**, 1, 2001.
Journal of Geophysical Research **100**, 23279, 1995.
Nature **338**, 29, 1989; **389**, 353, 1997.
Science **266**, 1835-1862, 1994; **281**, 1475-1500, 1998; **290**, 1142, 2000; **293**, 1779, 2001.
Sky and Telescope July 1995, p.32; Oct.1995, p.15; March 2001, p.28.
Sterne und Weltraum 9/1999, p.742
Természet Világa **127**, 120, 1996.

Mars

Adv. Space Res. **20**, 1561, 1997.
A Földgömb **XVIII**, 50, 2000.
Astronomy June 1993, p.27; Aug.1997, p.39.
<http://science.nasa.gov>; www.spacedaily.com/news; www.space.com/scienceastro;
cu-ames.arc.nasa.gov/marslife; mars.webdesign.hu/mgs/msss; mars.sgi.com;
mpfwww.jpl.nasa.gov/mgs/sci/mola; mpfwww.jpl.nasa.gov/mgs/msss;
ltpwww.gsfc.nasa.gov; www.spaceref.com/news; nasa/jpl/malin space science systems;

Earth, Moon and Planets **36**, 97, 1986; **37**, 287, 1987; **39**, 275, 1987; **42**, 107, 1988; **69**, 249, 1995; **74**, 93, 1996; **76**, 127, 1998; **77**, 55, 1998.
Geophys. Res. Letters **25**, 4393, 4409, 4417, 1998.
Icarus **109**, 393, 1994; **113**, 110, 213, 277, 1995; **114**, 80, 93, 113, 130, 403, 1995; **124**, 296, 1996; **125**, 455, 1997; **126**, 183, 197, 373, 1997; **130**, 87, 96, 115, 222, 1997; **143**, 376, 2000; **145**, 91, 524, 546, 555, 645, 648, 2000; **146**, 326, 343, 366, 2000; **158**, 267, 2002.
Journal of Geophysical Research **96**, 18883, 1991; **100**, 23301, 23307, 1995.
Mars. (eds. Kieffer H.H. et al.) Arizona, 1992.
Nature **290**, 759, 1981; **326**, 30, 1987; **374**, 432, 1995; **391**, 619, 1998; **404**, 32, 50, 161, 163, 2000; **412**, 411, 2001; **419**, 350, 2002.
Nógrád Megyei Csillagászati Alapítvány körlevele: II/7, 1995.
Planet. Space Sci. **36**, 125, 1988; **43**, 123, 179, 695, 1995; **45**, 281, 289, 401, 1997; **47**, 411, 1999.
Precambrian Research **106**, 15, 2001.
Review of Geophysics **23**, 61, 1985.
Science **194**, 1293, 1976; **271**, 184, 1996; **278**, 1743-1774, 1997; **279**, 5357, 1998; **284**, 719, 790, 794, 1495, 1999; **286**, 94, 2134, 1999; **287**, 218, 1788, 2000; **288**, 2330, 2000; **289**, 714, 1909, 2000; **290**, 1879, 1927, 2000; **294**, 1914, 2107, 2141, 2001; **296**, 2209, 2002; **297**, 75, 78, 81, 2002.
Sky and Telescope Febr.1999, p.20; Oct.2000, p.34; March 2001, p.20.
Sterne und Weltraum 7/2001, p.534.
The Planetary Report **XX**, 10, 2000.
Tudomány 1986/7, p.50.

Giant planets

Astronomy June 1998, p.40.
Encyclopedia of the Solar System, p. 315, Academic Press, 1999.
Earth, Moon and Planets **67**, 77, 1995.
<http://www.jpl.nasa.gov/galileo>
Icarus **29**, 261, 1976; **62**, 4, 1985; **98**, 82, 1992; **114**, 21, 1995; **122**, 242, 1996; **128**, 189, 294, 322, 1997; **129**, 21, 466, 1997; **130**, 49, 57, 1997; **135**, 220, 230, 251, 265, 1998; **141**, 236, 1999; **145**, 140, 454, 2000; **146**, 19, 48, 2000; **149**, 66, 94, 2001; **150**, 48, 219, 234, 244, 2001; **152**, 140, 151, 2001; **153**, 236, 2001.
Journal of the British Interplanetary Society **41**, 49, 1988.
Jupiter, ed.: T. Gehrels, Univ. of Arizona Press, Tucson, Arizona, 1976.
Nature **283**, 461, 1980; **292**, 675-755; **323**, 605, 1986; **331**, 689, 1988; **337**, 309, 1989; **371**, 16, 1994; **389**, 125, 159, 1997; **390**, 23, 1997.
Planet. Space Sci. **21**, 623, 1973; **45**, 483, 1997; **48**, 699, 2000; **49**, 1067, 1137, 2001.
Saturn. (ed. Gehrels T.) Arizona, 1984.
Sky and Telescope Dec.1994, p.11; March 1999, p.20; May.2000, p.24.
Science **206**, 925-950, 1979; **207**, 400-453, 1980; **210**, 1107, 1980; **212**, No. 4491, 1981; **218**, 276, 1982; **233**, 4-109, 1986; **245**, 1450, 1989; **246**, 1417-1501, 1989; **248**, 308, 1990; **267**, 1237, 1282-1317, 1995; **268**, 1595, 1879, 1995; **269**, 951, 1697, 1995; **283**, 44, 1999; **289**, 1737, 2000.
Scientific American Sept.1975, p.119; Febr.2000, p.24; May 2000, p.60.
The Astrophysical Journal **238**, 1, 1980.
The Moon and the Planets **19**, 61, 1978.
Tudomány March 1987, p.12.

Satellites of the giant planets

Adv. Space Res. **26**, 1677, 2000.
Astronomy Apr.1993, p.31; Febr. 1995, p.44; Jun. 1995, p.24; July 1995, p.20; Jan. 1996 p.28; Oct. 1996, p.68; Febr. 1999, p.26.
Aviation Week and Space Technology 16. Oct. 1995, p.26.
EAS Journal Vol. **17**, 1993.
Earth, Moon and Planets **38**, 299, 1987; **39**, 195, 225, 1987; **41**, 295, 1988; **44**, 7, 1989; **67**, 95, 1995; **74**, 61, 1996.
Earth-Oriented Appl. Space Techn. **2**, 63, 1982.

Encyclopedia of the Solar System. Academic Press, 1999.

Élet és Tudomány **LII**, 657, 675, 1997.

Geophys. Res. Letters **6**, 731, 1979.

<http://www.spaceviews.com>

Icarus **56**, 246, 1983; **70**, 334, 354, 1987; **76**, 295, 1988; **78**, 90, 1989; **79**, 75, 1989; **81**, 220, 1989; **91**, 112, 1991; **99**, 82, 1992;

115, 219, 250, 1995; **119**, 385, 1996; **123**, 557, 1996; **124**, 1, 45, 1996; **125**, 83, 1997; **127**, 93, 354, 394, 1997; **128**, 181, 469, 1997;

129, 48, 178, 202, 289, 367, 1997; **135**, 4, 41, 64, 79, 95, 107, 127, 146, 166, 175, 181, 276, 303, 317, 345, 1998; **137**, 341, 1999;

141, 53, 263, 287, 1999; **145**, 445, 609, 2000; **146**, 75, 125, 444, 476, 2000; **149**, 79, 133, 160, 2001; **150**, 279, 2001; **153**, 157, 2001;

156, 143, 152, 2002; **157**, 456, 507, 2002; **158**, 24, 178, 2002.

Mercury May-June 1980, p.53.

Nature **282**, 811, 1979; **289**, 17, 1981; **301**, 666, 1983; **321**, 49, 1986; **391**, 363, 371, 1998; **405**, 48, 637, 2000; **412**, 395, 2001; **417**, 419, 2002; **420**, 796, 2002; **421**, 920, 2003.

Planet. Space Sci. **43**, 971, 1995; **48**, 617, 747, 1457, 2000; **49**, 1265, 1285, 1303, 2001.

Satellites of Jupiter, eds.: D. Morrison, M.Sh. Matthews, Univ. of Arizona Press, Tucson, Arizona, 1982, p.521.

Satellites of the Outer Planets (D.A. Rothery) Oxford Univ. Press.

Science **203**, 892, 1979; **286**, 77, 1999; **289**, 941, 1340, 1305, 2000; **290**, 467, 2000; **294**, 1258, 2001.

Scientific American Jan. 1982, p.73; May. 1987, p.40.

Sky and Telescope Jan. 1981, p.14; Oct. 1986. p.336; Oct. 1998, p.18, 20; Jan. 1999, p.20; Febr. 1999, p.42; March. 2000, p.24.

Természet Világa **120**, 7, 299, 1989.

Rings

Csillagászati Évkönyv 1981, 153. old., Gondolat, Budapest, 1981,

Earth, Moon and Planets **22**, 103, 1980; **67**, 179, 1995.

<http://photojournal.jpl.nasa.gov/news>

Icarus: **70**, 366, 1987; **92**, 194, 1991; **116**, 397, 1995; **122**, 251, 1996; **125**, 348, 1997; **129**, 304, 1997; **141**, 253, 1999; **146**, 1, 2000.

Nature **318**, 544, 1985.

Publ. Astron. Soc. Japan **44**, 135, 1992.

Science **207**, 181, 1980; **246**, 1431, 1989.

Sky and Telescope Dec.1998, p.20.

Pluto

Astronomy Jan.1994. p.40.

BAAS **21**, No. 3, p. 986, 1989.

Icarus **70**, 483, 1987; **125**, 245, 1997; **126**, 362, 1997; **127**, 258, 1997; **130**, 16, 1997.

Nature **329**, 522, 1987; **335**, 240, 1988; **336**, 452, 1988.

Sky and Telescope May.1994, p.15; Nov.1994, p.14; May.1996, p.10.

Asteroids

Acta Astronautica **12**, 455, 1985.

Adv. Space Res. **27**, 1489, 2001.

Earth, Moon and Planets **75**, 95, 1996.

<http://www.space.com/scienceastronomy; near.jhuapl.edu/news>

Icarus **92**, 94, 118, 1991; **124**, 141, 1996; **127**, 130, 255, 1997; **128**, 83, 88, 95, 104, 241, 456, 1997; **129**, 1, 94, 440 1997; **130**, 177, 1997;

158, 98, 2002.

Nature **390**, 439, 1997; **401**, 565, 1999; **402**, 155, 1999; **413**, 390, 2001; **417**, 608, 721, 2002; **419**, 49, 2002.

Planetary and Space Science: **48**, 887, 2000; **49** 787, 793, 831, 2001.

Science: **278**, 2109, 1997; **285**, 560, 1999; **289**, 2085, 2000.

Scientific American May 2000, p.28.

Sky and Telescope Jan. 1992, p.13; Aug. 1997, p.19; Oct.1997, p. 30; Dec. 1997, p.67; July 2000, p.19; Febr. 2001, p.26; July 2001, p.44;

Jan. 2002, p.20; Febr. 2002, p.24.

Sterne und Weltraum 10/1995, p.695.

Meteorites

Earth, Moon and Planets **72**, 495, 1996.
<http://www.jpl.nasa.gov/snc/>
Nature **334**, 14, 1988; **344**, 813, 1990.
Planet. Space Sci. **49**, 763, 769, 2001.
Review of Geophysics **23**, 391, 1985.
Science **290**, 283, 791, 2000; **296**, 271, 334, 2002.
Sky and Telescope June 1994, p.14.

Comparative planetology

Adv. Space Res. **8**, No.5-6, 1988; **18**, 1996.
Akasofu, S., S. Chapman: *Solar-Terrestrial Physics*. Oxford at the Clarendon Press. 1972.
Andromeda 1993/5, 8; 1993/6, 22; 1993/7-8, 20; 1993/9, 10.
Annales Geophysicae **12**, 113, 565, 1994.
Astronomy July 1988, p.21; Jan. 1999, p.59.
Earth, Moon and Planets **36**, 167, 1986; **45**, 101, 237, 1989; **67**, 31, 101, 131, 161, 1995; **77**, 125, 1999.
Előadások az I. Planetológia Szeminárium anyagából. MANT, Budapest, 1980.
EOS Transactions Aug. 1994, p.9; Nov. 1999, p.535.
Fizika 1981-1982. 87. old. Gondolat, Budapest, 1982.
Geonómia az ezredforduló után pp. 67-100, Ed.: E. Duduch, MTA Geonómiai Albizottság, Budapest, 2003.
Geophys. Res. Letters **9**, 1073, 1982; **18**, 1493, 1607, 1631, 1991.
<http://spacescience.com>
<http://www.konkoly.hu/staff/illes>
Icarus **67**, 88, 1986; **89**, 93, 1991; **94**, 368, 1991; **100**, 556, 1992; **115**, 258, 1995; **116**, 215, 1995; **122**, 209, 397, 1996; **124**, 537, 1996;
126, 336, 1997; **128**, 28, 171, 1997; **135**, 25, 1998; **142**, 249, 1999; **145**, 108, 2000; **149**, 277, 2001.
Ionoszféra-Magnetoszféra Fizika Vol.I-XXIII, MANT, Budapest, 1973-2001.
Journal of Geophysical Research **85**, 1171, 5959, 1980; **86**, 7679, 8513, 1981; **95**, 215, 1990; **96**, 3725, 1991; **99**, 19213, 1994; **103**, 23347, 1998.
KFKI preprint: KFKI-1990-50/C, 44. old.
Kondratyev K.Y., G.E. Hunt: *Weather and Climate on Planets*. Pergamon Press, 1982.
Kosmitseskie Issledovania: **XXV**, 307, 1987; **XXVII**, 411, 1989.
NASA/TM-2001-209985, 2001.
Nature **283**, 815, 1980; **298**, 44, 1982; **302**, 385, 663, 1983; **354**, 273, 1991; **391**, 268, 1998; **401**, 861, 1999.
Nishida, A.: *Geomagnetic diagnostics of the magnetosphere*. Springer, New York, 1978.
Planet. Space Sci. **38**, 127, 149, 207, 211, 231, 483, 765, 1051, 1133, 1990; **47**, 1175, 1999; **48**, 671, 717, 727, 2000; **49**, 1005, 2001.
Review of Geophysics **25**, 615, 1987.
Reviews of Geophysics and Space Physics **18**, 813, 1980; **22**, 373, 1984.
Science **206**, 1071, 1979; **238**, 170, 1987; **246**, 457, 1989; **254**, 548, 1991; **265**, 753, 1994; **266**, 1340, 1994; **270**, 1338, 1995; **289**, 1740, 2000; **294**, 39, 1472, 2001; **295**, 802, 2002.
SH Atlasz ŰRTAN pp. 130-166, Eds.: Almár et al, Springer Budapest, 1996.
Sky and Telescope Febr. 1989, p.149; Apr. 1994, p.12; May. 1998, p.22; March 2000, p.35.
Space Sci. Rev. **42**, 375, 1985; **47**, 303, 1988; **55**, 81, 1991.
Sterne und Weltraum 1/1996, p.20; 6/1996, p.436; 8-9/1997, p.726.
Természet Világa **120**, 299, 1989; **123**, 294, 361, 1992; **126**, 152, 1995; **127**, 120, 1996; **132**, 494, 557, 2001.