

Illés Erzsébet:

## ÖSSZEHASONLÍTÓ PLANETOLÓGIA

(Up to date 2001. jul.)

Tartalomjegyzék

Az ELTE TTK Csillagászati Tanszék speciál kollégiumán 1996/1997, 1998/1999 és 2000/2001 második félévében elhangzott előadássorozatok vázlatai

**Az előadássorozat célja,** hogy a Naprendszer bolygótestjeivel kapcsolatos űrszondás megfigyelésekkel úgy ismertesse meg a hallgatókat, hogy logikai rendszerbe foglalja az irodalomban található eredményeket. Igyekszik egy-egy geofizikai jelenség kapcsán nemcsak példát mondani, hanem teljességre törekvően minden égitesten bemutatni a jelenséget, ahol azt megfigyelték, és rámutatni, hogy mi az oka, ha e jelenségek más-más égitesten megváltozott formában jelennek meg. Ezzel segítséget kíván adni az előadássorozat a hallgatónak ahhoz, hogy az irodalomban olvasott újabb eredményeket el tudja helyezni egy egységes Naprendszer-képbe.

1.) **Bevezetés.** Naprendszer képünk megváltozott az elmúlt 40 év folyamán.

Módszerek változása, ami miatt Naprendszerképünk megváltozott:

- Szondák bolygóközi térben (távérzékelés, in situ mérés)
- Labormérés
  - más p, T-n földi anyag
  - más égitestek anyaga (visszahozott minták, meteoritok)
- Számítástechnika: szimulációk lehetősége sok ponttal

Naprendszeréről alkotott kép változása:

szerkezete, égitest típusok (földszerű, gáz, planetezimál,  
KBO: Kuiper övbeli objektum = TNO: transneptunian object)

Legfontosabb új szempontok, amiket felismertek:

véletlen szerepe, árapályfűtés, üvegházhatás, mágneses tér szerepe  
1 helyett 26 "kérges" égitest (mint egy laboratóriumban)  
Kuiper öv égitestjeinek, csillagok porkorongjának felfedezése

2.) **Bolygótestek fejlődése akkréció után**

Fűtés formái, források; hűlés módjai;

Maximális fűtés mire volt elég: olvadtság, alak, cirkulációk

3.) **Felszíneken mi milyen nyomot hagy?**

Becsapódás; fűtés; hűlés; fázisátmenet

Becsapódásnyomok különböző égitesteken (milyenségét mi befolyásolja?)

4.) **Milyen fajta deformációk vannak jelen "kérges" égitesteken?**

Repedés; tágulás-nyom; kontrakció-nyom; vegyes

Milyen geológiai aktivitás-nyom realizálódott bármikor is a különböző "kérges" égitestek felszínén?

Vulkanizmus (jelen vagy valamikori) nyoma felszíneken

Szilikát, kén, jég-vulkanizmus

Miért különbözőek Jup.-Szat./Ur.-Nept. rendszer holdjainak vulkáni formái?

Miért hasonlóak Ur.-Nept. holdak/földtípusú bolygók vulkáni formái?

5.) **Illó anyagok**

Légkörök: semleges és ionizált összetevők

Folyadékcsférák: poláris sapkák, folyómedrek, óceánok

6.) **Mágneses terek, magnetoszférák**

Magnetoszférák alakja, mérete, szerkezete

Magnetoszférák működése (aurorák, SAR arc-ok, ENA, rádiósugárzás)

7.) **Miben különbözik egy bolygó-test és egy hold-test fejlődése?**

vagyis: milyen folyamatokon keresztül szől bele egy bolygó holdjának fejlődésébe?

8.) **A bolygórendszer és az óriásbolygók holdrendszereinek összehasonlítása**

9.) **A Naprendszer gyűrűinek összehasonlító áttekintése**

# 1. FEJEZET: BEVEZETÉS

## A Naprendszer-képünk megváltozott az elmúlt 40 év folyamán

### Módszerek változása

- Szondák bolygóközi térben
  - Távérzékelés (csillagászat mindig is) most más hullámhosszakon (X, UV, IR, gamma, mm, radar); térképezés is
  - In situ mérés
    - ◆ égimechanika kísérleti tudománnyá vált a szondák küldésével  
gravitációs terek feltérképezése bolygók körül; bolygótesten belüli anyageloszlásra következtetés
    - ◆ mágneses tér mérés irány és nagyság szerint
    - ◆ töltött részecskék sűrűsége, összetétele, sebessége a hely és idő függvényében, plazma hullámok
    - ◆ porszámolás (tömeg, sebesség)
    - ◆ por, gáz kémiai összetétele
    - ◆ felszíni anyagok kémiai összetétele (anyagminta, gamma besugárzás)
    - ◆ sok hullámhosszon térkép → geológiai térképek
- Labormérés
  - Milyen anyagot?
    - ◆ földi anyagok földtől eltérő körülmények között
    - ◆ meteorit (Antarktisz = "meteorit távcső" megötszörözte a minták számát, kő/vas szelekciós effektus nélkül)  
köztük Holdról, Marsról érkezettek is; jég meteorit még nincs
    - ◆ hozott minta (Holdról)
    - ◆ helyben mért minta (Marson, Eros kisbolygón)
  - Milyen tulajdonságot?
    - ◆ különböző anyagok spektrumait
    - ◆ kis hőmérsékleten illó anyagok viselkedését
    - ◆ nagy nyomáson a viselkedést (fém hidrogén)
    - ◆ keverékek (eutektikumok, peritektikumok), fém H, víz viselkedését
  - Kormeghatározást
    - ◆ milyen elem van → NR keletkezés előtti korok
    - ◆ mikor szilárdult meg olvadékból
    - ◆ mennyi ideig volt bolygóközi térben ( kozmikus sugárzás nyomai)
- Számolás
  - Naprendszer összeállítás, pályák fejlődése, bolygógyűrűk, rezonanciák szerepe pályavédelemben, gázfékezés – külső rezonancia szerepe: Titius-Bode szabály
  - légkör modellek
  - magnetoszféra modellek (poros plazma viselkedése, Lorenz rezonancia)
  - bolygóbelső cirkulációs modelljei
- Új-generációs műszerek Földről is, földkörüli pályáról is
  - Kuiper-övbeli objektumok (KBO=TNO), csillagok körüli porkorongok felfedezése
    - 3 és/vagy 4 féle égitest csoport
    - földszerű, gáz, jég (átalakult)
    - planetezimál (nem átalakult, keletkezéskori állapot-e üstökös vagy Kuiper-övbeli objektum?)

### **Naprendszer (NR) keletkezése (Kuiper övbeli objektumok: szerkezetileg új NR-kép)**

2 szupernóva robbanás előzte meg, második indította el

felhődarab leválik → kollapszus

- ◆ középső rész sűrűsödik → p,T nő → begyullad az ős-Nap → T(r) befelé nő; sugárnyomás gázt kifújja
- ◆ korong alakúra lapul: bolygókeletkezéshez itt elég nagy a sűrűség → bolygók pályasíkja kb. azonos
- ◆ füstszemcseméretű porból állnak össze a bolygótestek
  - T(r) befelé nő → Levis-Barsay kiválási sor → szemcse: *bent*: szilikátok, *kint*: különféle jégek is
  - sűrűség kifelé csökken → egyre kisebb bolygók keletkeznek kifelé
  - kivétel: ahol víz kifagy → sűrűségben nagy ugrás: első óriás itt (más NR-k bolygói csillagjukhoz miért közel?)
  - óriások: *vagy*: mag gyűjtőgetéssel + gáz gravitációsan, *vagy*: gravitációs kollapszussal?
- ◆ gyűjtőgetés módja: ütközés (természetes folyamat, "kérges" felszínnek mutatják)
  - segít a gázfékezés: külső rezonancia helyen kissebességű ütköztetés
  - itt nő egy következő bolygó → érthető Titius-Bode szabály
  - szekvenciális bolygókeletkezés (Vénusz, Jupiter kezd, Nap mágneses terében poros plazma segít indulni)
- ◆ gyűjtőgetés időrendje:
  - egyre gyorsuló (egyre nagyobb testek csapódnak be egyre nagyobb sebességre gyorsítva) véletlen szerepe nagy
  - érthető sok, nagy kráter
  - érthető Titius-Bode szabálytól az eltérés (nem kell ad hoc hipotézisnek venni)
  - következménye lehet: nagy mag, nagy tengelyhajlás, kicsi/nagy forgási periódus, Hold-keletkezés
  - meglepő: legősibb kráterek a Holdon topográfiában láthatók (Clementine), Marson is? (MGS mutathatja majd)

## 2. FEJEZET A BOLYGÓTESTEK FEJLŐDÉSE

**Bolygótestek fejlődése:** ütközéssorozat története + fűtés/hűlés = hőtörténet, mint az idő függvénye

Hőforrások egy bolygótest számára:

- becsapódás (1) ..... felszíni fűtés ..... aszimmetrikus ... epizodikus .....  $\Delta t \sim 0$
- gravitációs összehúzódás ..... térfogati fűtés ..... szimmetrikus ..... hosszú idejű ..... lecseng
- gravitációs szeparáció ..... térfogati fűtés ..... szimmetrikus ..... hosszú idejű ..... lecseng
- radioaktív fűtés ..... térfogati fűtés ..... szimmetrikus ..... hosszú idejű ..... lecseng
- árapályfűtés (2) ..... térfogati fűtés ..... epizodikus .....  $\Delta t \gg 0$
- napsugárzás ..... felszíni fűtés ..... aszimmetrikus ... folytonos
- magnetoszféra-fűtés (3) ..... térfogati fűtés ..... aszimmetrikus ... folytonos

Hűlés módjai egy bolygótesten:

- bolygóbelső a felszín felé:
  - ◆ vezetéssel
  - ◆ konvekcióval → vulkanizmus
- felszín a légkör felé, vagy légkör hiányában a világűr felé:
  - ◆ sugárzással
  - ◆ szublimációval, párolgással → szökés
- légkör:
  - ◆ sugárzással (4)
  - ◆ szökéssel

Kisebb átmérőjű test gyorsabban hűl, mert térfogatához képest nagyobb felszín hűti,  
mint egy nagyobb testet → gyorsabban vastagodik a kérge (Földhöz képest pl. Mars)

**Egy bolygótest által elszenvedett maximális fűtés mire volt elegendő?**

- nem volt elég a megolvadáshoz: szabálytalan alak
  - éppen csak elég volt a megolvadáshoz: gömbalak
  - több, mint ami elég volt a megolvadáshoz:  
gömbalak + geológiai aktivitás
- } → felszínváltozás csak becsapódás miatt  
} → gravitációs szeparáció

Ha megolvadt egy test, hőmérsékleti/összetételbeli inhomogenitások konvekciót indíthatnak be  
magban/köpenyben/folyadékszférában/légkörben

Konvekció következménye lehet

- magban/köpenyben: mágneses tér
  - magban: Merkúr, Föld, Mars?, Jupiter, Szaturnusz, Ganymedes, Europa?, Io?
  - köpenyben: Uránusz, Neptunusz
- köpenyben: vulkanizmus/tektonizmus → kigázosodás → hűlés gyorsabb (kéregvastagodás)
- folyadékszférában/légkörben
  - ◇ kéregerózió
  - ◇ energiák újraelosztása
    - ◆ Broecker conveyor a földi óceánban  
(nagy óceáni szállítószalag, amelynek részei a Golf és a Humbold áramlás is)
    - ◆ globális szélrendszerek légkörben
- légkörben
  - ◇ csapadékképződés
  - ◇ elektromos feltételek változása (villámlás, rekombináció)

Átmérő-határok megolvadásnál:

radioaktív fűtés esetén:

- ◆ szilikátos testeknél ~ 800 km
- ◆ jeges testeknél ~ 2000 km

árapályfűtés bekapcsolódása esetén ~ 400 km-ig lemehetnek az alsó határok  
(Hyperion szabálytalan, Mimas gömbalakú; mindkettő ~ 400 km átmérőjű)

## Megjegyzések

### (1) Becsapódás energiája átalakul részben

- hőenergiává → felszínt, légkört fűti
- kivágott törmelékterítő kinetikus energiájává
  - ♦ sugarak/halo kráter körül (Hold, Ganymedes, Callisto, Ariel, Oberon)
  - ♦ anyag megszökötése
    - meteoritok Holdról, Marsról
    - légkör "elfújása" (pl. Mars Argyre becsapódás)
- szeizmikus energiává: tektonizmust működésbe hozhatja
  - ♦ törésrendszer keletkezik becsapódás helyén
  - ♦ törés antipodális területen  
(nagyon nagy becsapódások esetén; Merkúr Caloris Medence)
  - ♦ becsapódás helye aktivitás lokális centrumává válik
- légkör esetén
  - ♦ akusztikus energiává
  - ♦ légköri lökésfront energiájává: felszíni anyag megőrlése  
("Tungúz esemény" Földön, Vénuszon)

### (2) Árapályfűtés szerepe nagyon lényeges lehet

- holdrendszer esetén rezonáns helyzetben való átmenetkor  
(Jupiter, Szaturnusz, Uránusz hold-rendszerek;  
Io-n: virulens vulkáni aktivitás; Europa fiatal felszíne,  
korábbi rezonáns helyzet: Ganymedes, Enceladus, Ariel, Miranda)
- elnyúlt pályára befogott hold pályájának körré válása idején (Triton, esetleg Charon)  
Plútó/Charon rendszer csaknem teljesen kötött (HST:  $e \neq 0$  !)
  - ma nincs árapályfűtés
  - nem várható geológiai aktivitás nyoma, ha nem volt pályafejlődés  
a kettős korábbi történetébenFöld nagyobb sűrűségében és főleg hosszan tartó geológiai aktivitásában árapályfűtésnek lehet szerepe

### (3) Ha egy hold (pl. Io) lényeges légkör (tehát lényeges ionoszféra) nélkül mozog egy bolygó magnetoszférájában, akkor a rajta keresztülmenő mágneses erővonal csőben folyó elektromos áramkörök ionoszféra hiányában a hold testén keresztül záródva fűthetik a holdat (az Amalthea pl. 5°-kal melegebb!)

- az áram belépési helyei = állandó vulkáni aktivitás helyei lehetnek (Io)
- víz vagy vízjég elektrolitikus bontásával durranógáz-felhalmozódás jöhet létre, aminek robbanását már egy kisebb becsapódás is triggerelheti

### (4) Hűlést lassíthatja üvegházhatás,

ami lehet

- légköri üvegházhatás
  - ♦ Vénusz esetében lényeges CO<sub>2</sub> nagy parciális nyomása miatt;
  - ♦ fontos lehet még a Titánon
- átlátszó jégréteg alatt szilárd fázisú üvegházhatás (Triton, Europa, Mars)  
gejzír-tevékenységet hajthat (Triton)

### 3. FEJEZET

## MILYEN NYOMOKAT HAGYNAK A BOLYGÓTEST-FELSZÍNEKEN A KÜLÖNBÖZŐ ESEMÉNYEK?

Fűtés: általában tágulást } kivéve speciális anyagot (víz 4°C -on a legsűrűbb →  
Hűlés: általában összehúzódást } Tethys repedésvölgye a test teljes megfagyásakor keletkezhetett)  
Fázisváltás: tágulást vagy összehúzódást

#### Becsapódás:

- sebhelyet: krátert a becsapódás helyén (minden kérges testen nagy számban megtalálhatók)
  - repedésrendszer középpontjává válhat a becsapódás helye
  - kéreg áttörése → vulkanizmus centrumává válhat a becsapódás helye (mare-k a Holdon, Tritonon?, fehér foltok Umbrielen?)
  - becsapódással ellentétes oldalon
    - ◆ összetöredezhet a felszín a becsapódás által kiváltott szeizmikus hullámok fókuszálódása következtében (csak nagy becsapódások esetén látványos, pl. a Merkúron a Caloris Medence antipodális területe)
    - ◆ mágneses erővonalakat összesűríti becsapódás által elgőzölögtetett ionizált felhő pl. "swirls" a Holdon (világos pamacs-szerű foltok, és erős lokális mágneses terek)
- lekopott sebhelyeket: a topográfia az ősi óriás-becsapódások nyomát még megmutatja (Clementine South-Pole-Aitken medence), de ezek rátekintésre már nem látszanak
- sugarakat/halot kráterek körül, ahogy a mélyebbről kivágott, más vagy friss anyagú törmelékterítő szétszóródik (Hold, Europa, Ganymedes, Callisto, Ariel, Titania, Oberon)
- túl nagy magot: nagyobb test lapos szögű (nem-centrális) becsapódása az ő-Merkúr kérgének nagy részét "lefröccsentette", a gőzzé vált anyagot a Nap sugárnyomása kifújta
- holdat:
  - a Földet ért hasonlóan nagy, lapos szögű becsapódás szintén "lefröccsentette" a kérget, ám az a Merkúr környezeténél hűvösebb helyen lévén a megolvadt cseppek és a gáz kifagyott, így azt nem fújta ki a sugárnyomás.  
A szemcsék csomósodtak, több kisebb darabba összeálltak. A legnagyobbból lett a Hold.  
A darabok az ő-Hold körül keringtek (ezek voltak a Hold holdjai), majd a Föld gravitációs zavaró hatása következtében fokozatosan belecsapódtak a Holdba: nagy medencék (mare-k).
  - egy, a Plútót ért esetleges óriás-becsapódást teszik felelőssé a Plútó-Charon kettős létrejöttéért is
- mascont (tömegkoncentrációt) Holdon a nagy medencék keletkezésével kapcsolatos gravitációs anomália: a köpeny sűrűbb anyaga benyomult a visszapattanó kéreg helyére
- légkör-elfújást (Marson az Argyre Medencét létrehozó becsapódás ideje előtti kéregdarabokon folyóvölgyek jelzik, hogy korábban sűrűbb volt a légkör)
- a becsapódó test anyagának implantálását
  - illó anyagot hozhatnak becsapódó üstökösök vagy kisbolygók a földszerű bolygókhoz (Föld óceánnyi mennyiségű vize így is kerülhetett a Földre)
  - becsapódó test szétporlott anyagát a szelek az egész légkörben szétterítik → a napfény leblokkolása miatt a felszín lehül ("nukleáris tél") (földi geológiai korszakváltások – kihalások?)
  - anomális összetételű réteggént a több év alatt lassan, az egész Föld-felszínen leülepedő finom por jelzi ma az egykori becsapódást (pl. iridiumban gazdag réteg a K/T határon)
- tsunamik (tengeri árhullámok) által okozott tengeri üledék-terítéseket kontinenshatárokon, ha a becsapódás óceánba történt (Föld, Afrika K-i partjain K/T határon)
- sokkhatást elszenvedett kvarcsemmeket, ha a becsapódás kontinentális kéregbe történt (Föld, É-Amerika, K/T határ)
- szénréteg lerakódását becsapódási hőtől keletkező világméretű tűzvész után (Föld, K/T határ)
- savas esőket

## A becsapódás hatását megváltoztató tényezők:

- a becsapódó test részéről
  - az ütközési sebesség különbsége miatt ugyanakkora tömeg esetén
    - ◆ planetocentrikus pályáról érkező test kisebb krátert hoz létre
    - ◆ heliocentrikus pályáról érkező test nagyobb krátert hoz létre:  
óriás kráterek, kettős- vagy több-gyűrűs medencék
  - impulzustól függően ugyanolyan céltest-anyag és gravitációs állandó ( $g$ ) esetén:
    - ◆ kis impulzusú becsapódásnál nem jön létre központi csúcs
    - ◆ nagyobb impulzus esetén létrejön központi csúcs
    - ◆ nagyon nagy impulzus esetén központi gyűrűhegy jön létre
  - a becsapódás szögétől függően
    - ◆ centrális (merőleges) becsapódás esetén
      - kör alakú kráter keletkezik (mindenütt megtalálhatók a kérges testeken)
      - céltest teljes széttörése (szabálytalan alakú holdak, meteor, por)
    - ◆ lapos becsapódási szög esetén
      - ellipszis alakú kráter, lepkeszárny szerű törmelékterítő (Mars, Hold)
      - a hirtelen elgőzölgött anyag jet-szerű, gyors áramlása nagyobb darabokat is felkaphat, és szökési sebességre is gyorsíthat (meteoritok a Holdról, Marsról)
      - kéreg-lefröccsentés (Merkúr, Föld, Plútó)
      - forgássebesség-változás,  
ha a becsapódás az egyenlítő síkban, nem centrálisan történik (Vénusz)
      - nagy tengelyhajlás,  
ha a becsapódás nem az egyenlítő síkban történik (Uránusz, Plútó?)
  - illóban gazdag becsapódó test: olvadék
- a céltest részéről
  - nagyobb  $g$  esetén laposabb kráter keletkezik
  - a kéreg merevségétől függ, hogy visszapattan-e: lesz-e központi csúcs
  - a felszíni anyag erősségétől függ, hogy a létrejött relief (sánc, központi csúcs, kráteraljzat)
    - ◆ megmarad-e (szilikát és kemény jég bolygóttesteknél megmarad:  
Hold: Mare Orientale, Mimas: Herschel kráter)
    - ◆ relaxálódik-e, azaz visszasüllyed-e a kéregbe (lágyabb jég-bolygóttesteknél igen: Callisto)  
Jupiter-holdakon ritka a központi csúcs, laposabbak a kráterek;  
a Tethys még lágy, képlékeny volt az Odysseus-becsapódáskor,  
ezért a keletkezett kráter aljzata felvette a Tethys-gömb görbületét;  
a Mimas belseje viszont teljesen fagyott volt a Herschel-becsapódáskor,  
mert aljzata már nem tudott relaxálódni.
  - illókban gazdag felszíni anyag esetén
    - ◆ "lebenyes" kráterek keletkeznek:  
törmelékterítő helyett "posvány-terítő" terül szét (Mars)
    - ◆ "negatív" kráter fejlődik a sáncfalból erózióval, ha a kráter keletkezése után vulkáni előntés vagy üledék veszi körül, amelynek anyaga keményebb (Mars, Föld Manicouagan kráter?)
    - ◆ központi dómmá alakul a központi csúcs (Callisto)
  - légkör/folyadékcszféra esetén
    - ◆ becsapódó test még a légkörben megolvad/elpárolog/széttörik/szétrobban  
(Vénuszon nincs 3 km-nél kisebb kráter; sok "Tunguz esemény" nyom  
Földön és Titánon várható még "levágás" a kráterméretben,  
de a Földön az erős erózió miatt nincs remény a kimutatására)
    - ◆ törmelék terítő aszimmetrikus (Vénusz)
    - ◆ ballisztikusnál messzebb terül ki a törmelékterítő (Vénusz)
    - ◆ virágszirom-szélű törmelékterítő (Vénusz)
    - ◆ törmelékterítő szegmense hiányzik ferdeszögű becsapódás irányába (Vénusz)
    - ◆ kráterek erodálódnak

## 4. FEJEZET

### ÁLTALÁBAN MILYEN FAJTA DEFORMÁCIÓK TALÁLHATÓK A KÉRGES BOLYGÓTESTEKEN?

Kéregrepedések görbületváltozás miatt? amit okozhat

- árapálydeformáció (Europa lineamentum-rendszere)
- dómkeletkezés köpenyfeláramlás felett  
Föld Kelet-Afrikai árok; Vénusz-i koronák radiális törésrendszere

Tágulási nyomok

- globális méretű repedésvölgy
  - fűtés miatt, amely az egész bolygótestre kiterjed
  - vízijégből álló hold belsejének teljes megfagyása miatt a már korábban megfagyott kéreg felreped  
Tethys, Titania, Dione?, Ariel?
- globális hálózatot alkotó repedésrendszer globális köpenycirkuláció miatt  
Ganymedes, Ariel, Umbriel, Triton óriási poligoniális egységeit elválasztó hálózat;  
Föld óceánalatti hátságok (lemeztektonika)
- lokális méretű repedésrendszer lokális fűtés miatt (Enceladus, Miranda)

Kompresszió nyomai:

- globálisan, egész bolygófelszínre kiterjedő rátolódásos vető-hálózat kiszáradás (kontrakció) miatt  
Merkúr
- lokális kompresszió-nyomok: kéreganyag-feltorlódás konvergáló köpenyáramlások felett
  - merev kéregblokkok kiemelése (Föld Tibeti Fennsík; Vénusz Lakshmi Planum; Miranda)
  - lejtőn lecsúszó kéreganyag nekinyomódik kéregkörnyezetének
    - ◆ hegyek lejtőjén: hegyek körüli körredők; Mars óriás pajzsvulkánjai körüli körredők,  
Vénuszon koronák annulusza (körösánca) dómosodás fázisából
    - ◆ nagyobb méretű kiboltosodás lejtőjén; Mars Tharsis hátság körüli redők
    - ◆ tesszera keletkezés (csak a Vénuszon ismert)  
köpenyfeláramlás felett létrejövő kéregboltozódás lejtőjén lecsúszó kéregdarabok redőződése, miközben a köpenyfeláramlás időben változtatja a helyét → ugyanaz a kéregdarab különböző időkben különböző irányokba csúszik, így egymást metsző redőrendszerjön létre
  - lánchegység keletkezése  
köpenyáramlás által elmozdított kéregdarabok összetorlódnak és megredőződnek  
Föld: Eurázsia K-Ny-i és Amerika nyugati partvonalala-menti É-D irányú gyűrt hegyrendszer;  
Vénusz Lakshmi Planum körüli gyűrt hegyek: Freya, Akna, Danu, Maxwell Montes  
Europán keletkezik redőződés, de hamar relaxálódik, vagyis visszasüllyed a jégkéregbe
  - plató: köpenyfeláramlás felett vulkanizmus által felszínre juttatott anyaggal megvastagított kéregdarab, amely a forró pontról leválva már csak izosztatikusan kompenzált "mini-kontinens" ; Vénusz-i platók (Ovda, Alpha, Thetis, Tellus); Hold (túloldalon)  
Földön Izland (ma még a forró pont fölött van)
  - kontinens: köpenyáramlás miatt összehordott, összeforrott, megvastagodott kéregdarab, amit az úszás archimedeszi törvénye alapján az izosztázia tart egyensúlyban: gravitációs anomália nem tartozik hozzá → a kéregvastagodás nemcsak felfelé, hanem lefelé, a köpeny felé is kiterjed: a kontinenseknek "gyökerük" van  
Földi kontinensek, Vénusz Ishtar föld, Hold túloldalán egy kéregdarab
  - szubdukciós zóna: egyik kéregdarab alátolódása egy másik kéregdarab alá, amikor is a felül maradó kéreg redőződik meg, és tornyosodik a magasba az alul maradó pedig betolódik a köpenybe, és beolvad  
Föld mélytengeri árkok, Vénusz-i koronák és chasmák bizonyos ívei mentén
- párhuzamos redőzet keletkezőfélben lévő, még képlékeny új kérgen, amely a keményebb, régi kéreg arrébbtolásával csinál magának helyet  
Ganymedes: világos csíkok; Enceladus; Ariel: árkok középvonalala; Föld: óceánközépi hátság

### Vegyes: tágulás és kompresszió által létrehozott formák

- transzform vető (Föld, Ganymedes, Enceladus, Triton)
- globális merev-lemez tektonika  
földi óceáni kéreg elég merev, hogy tágulási centrumoktól (tengeralatti hátságok) nagy távolságra (mélytengeri árkokig) továbbítsa a feszültséget, miközben ő maga csak a széleknél deformálódik
- képlékeny-lemez tektonika  
földi kontinentális kéreg diffúzan, lemezen belül is mindenütt deformálódik, nem elég merev a feszültség nagy távolságú továbbítására; Vénusz kérgé mindenütt

Becsapódás mindenféle deformáción módosulást hozhat létre.

### A becsapódásos kráterek három félék:

- óriásiak:  $\sim > 100$  km (legnagyobb  $\sim 2500$  km, Holdon: South Pole - Aitken medence)  
heliocentrikus pályáról érkező testek 1-2 nagyságrenddel több energiát hoznak, mint
- planetocentrikus pályáról érkezők (kisebb kráterek)
- lokális ok: közelben lévő testet ütközés szétrobbantotta

### Óriáskrátereket első, nagy bombázási periódusból

- Holdon csak topográfia (domborzat) őrizte meg (Clementine szonda térképek: 40-nél több ilyen) képen nem azonosíthatók, mert csak a későbbi, kisebb becsapódások nyoma látszik ilyen helyzettel más égitesten is találkozhatunk, ahol szisztematikus térképezés készül (Mars MGS szonda)
- amelyik égitesten hiányoznak az óriási kráterek, ott felszínújraképzés volt az első nagy bombázási periódus után.:  
Ariel  
Titánián csak néhány nagy kráter van  
Tethys Odysseus kráter keletkezésekor még képlékeny volt, de  
Mimas Herschel kráter keletkezésekor már fagyott  
Calliston Walhalla kráter keletkezése után a sánc hegyei visszasüllyedtek a lágy kéregbe
- planetocentrikus becsapódásoktól erősen kráteres Titánia, Mimas, Rhea  
→ üstökösök többen voltak, mint korábban hitték?  
(külső Naprendszerben főleg üstökösök, belső Naprendszerben főleg kisbolygók a fő kráter-létrehozó becsapódó testek)

### Kéreg

- elsődleges kéreg: az akkréció után teljesen vagy részlegesen (parciálisan) megolvadt bolygóanyag első differenciálódása következtében az olvadékból kiváló, legkönnyebb, felszínre kerülő és szilárduló része (pl. Hold felföldjeinek anortozitos anyaga)
- másodlagos kéreg: az elsődleges kéreg kiválása után maradt, olvadt köpenyanyag vulkanikus úton felszínre kerülő és megszilárduló része (Hold, mare)
- harmadlagos kéreg: az elsődleges vagy másodlagos kéreg újraolvadása után vulkáni úton a felszínre kerülő és megszilárduló anyag; megolvadáshoz a kérget csak a lemezteknika tudja a mélybe juttatni a szubdukciós zónákban: harmadlagos kéreg csak kéregalábukással rendelkező bolygótesteken várható (Föld óceáni kéreg)

## A geológiai aktivitásnak milyen szintjei realizálódtak konkrétan az egyes bolygótesteken?

### Nincs geológiai aktivitásnak nyoma

- a felszínen változás csak a becsapódások következtében történt  
összes kishold, Mimas, Hyperion, Callisto
- a felszínen csak albedo-alakzatok (repedések mentén): a kipárolgó illó anyag dér-lerakódása  
Dione és Rhea hátsó oldala
- nagy H<sub>2</sub>O tartalmú hold belsejének megfagyása: bolygóméretű repedésvölgy  
Tethys, Titania, Dione?, Ariel?
- kiszáradás (mag kontrakciója) rátolódásos vető  
Merkúr, Miranda

### Differenciálódás nyoma a felszínen:

- sugarak/halo becsapódásos kráterek körül a felszín többi részétől eltérő albedoval  
Merkúr, Hold, Ganymedes, Callisto, Ariel, Titania, Oberon
- mare előntés: alacsony-viszkozitású láva kifolyása mélyedéseket előnti  
Hold, Europa, Ganymedes, Triton
- lineáris albedo alakzatok repedésrendszerrel kapcsolatban  
Europa világos és sötét, illetve három-sávos lineamentumai

### Köpenyáramlás nyoma: egyes helyeken tágulás, más helyeken kompresszió

- bolygóméretnél kisebb repedésvölgy  
Vénusz Beta-Artemis chasma közötti "gyengeségi zóna"; Mars Valles Marineris
- lokális árok-gerinc rendszer
  - lokális fűtés miatt (Enceladus)
  - nagy blokkok felemelkedése vagy lesüllyedése miatt (Miranda ovoidjai)
- az ősi kéreg óriási, poligoniális darabjai
  - Ganymedes, Ariel, Umbriel, Triton, Föld
  - globális repedéshálózattal együtt  
Ganymedes, Ariel, Triton, Föld
  - párhuzamos gerincrendszerrel a repedéshálózat árkain belül  
Ganymedes, Ariel, Föld
  - és merőleges eltolásával a párhuzamos gerincrendszernek (transzform vető;  
gömb felszínén kéregdarabok lineáris elmozdulása következtében)
    - ♦ lokálisan (Ganymedes, Enceladus, Triton?)
    - ♦ globálisan, az egész bolygótesten: globális merev-lemez tektonika (Föld)
- pajzsvulkánok (forrópont vulkanizmus): lokális köpenyfeláramlás helyei  
Io vulkánjai; Vénusz: Beta, Atla, Western Eistla;  
Mars: óriásvulkánok; Föld: Hawaii-típusú vulkánok
- repedésmenti vulkanizmus: új kéreg keletkezik  
Ganymedes, Enceladus, Ariel, Föld: tengeralatti hátságok
- kéreg-eltűnés nyomai: fél-kráterek Ganymedesen, Enceladuson; Földön mélytengeri árkok
- kéregdarab kiemelés (Miranda, Vénusz: Ishtar, Föld)
- kéregredő: lánchegység  
Föld, Vénusz: Freya, Akna, Danu, Maxwell Montes;  
Europán is keletkezik, csak gyorsan visszasüllyed a kéregbe
- plató (Föld: Izland; Vénusz: Alpha, Ovda, Thetis, Tellus)
- kontinens (Föld, Vénusz: Ishtar föld)
- lejtőn lecsúszás nyoma
  - hegykolosszus körül körredő (Mars: Arsia Mons)
  - boltosodás körül körredő (Mars: Tharsis Bulge körül)
  - boltosodásról lecsúszás: tesszera, ha feláramlás helye időben változik (Vénusz)
  - dóm körül körredő (Vénusz korona annulus)

## Vulkanizmus

Vulkánnak nevezzük a kéregnek azt a környezetét, ahol a bolygótest köpenyének anyaga, vagy szilárd kérgének megolvadt anyaga kerül ki a bolygó felszínére

Földön, Vénuszon, Marson, Holdon, Merkúron, Ion szilikátok; Arielen jég

Gejzirek nevezzük a vulkánt, ha a bolygótest hőmérsékletén illó anyagnak számító összetevő folyékony állapotban kerül ki a kürtőn (Földön: víz; Ion: kén, kéndioxid; Tritonon: nitrogén)

Szolfatárának nevezzük a vulkánt, ha csak gázkibocsátás történik

Földön, Marson: vízgőz, CO<sub>2</sub>, S, SO<sub>2</sub>; Ion: SO<sub>2</sub>, Na; Tritonon: N<sub>2</sub>

Kürtő a nyílás neve

Magmakamra a vulkán alatt felgyülemelő lávaanyag tartózkodási helye

Kaldera a neve a berogyott kürtőnek, amely a magmakamra kiürülése után keletkezik

Vulkáni kifolyás fajtái:

- repedésmenti vulkanizmus:
  - a legnagyobb mennyiségű vulkáni anyag kerül ki ezzel a fajta vulkanizmussal
  - Föld: tengeralatti hátságok; Vénusz, Europa, Ganymedes, Enceladus, Ariel, Triton
- forrópont vulkanizmus:
  - Föld: Hawaii-típusú vulkánok; Mars, Io,
  - Vénusz koronák és vulkáni hegyek (miért ez a kétféle forma? mitől függ, hogy melyik jön létre?)
- szubdukcióval kapcsolatos vulkanizmus kéregbetolódás esetén (a betolódó kéregdarab megolvad):
  - lemeztektonika, mélytengeri árkok menti robbanásos vulkánok illóanyagban gazdag lávája
  - csak Földön, esetleg Marson, Vénuszon

Láva anyaga:

- szilikát magma: Merkúr, Vénusz, Föld, Hold, Mars, Io
  - Vénuszon a nagy sótartalom (szulfátok, karbonátok) miatt
  - híg folyós láva a magas (500° C-os) felszíni hőmérsékleten lassan hűlve
  - több száz, sőt több ezer km hosszú 1-1,5 km széles "folyómedreket" is váj
- kén, kéndioxid: Ion
- víz: Europa, Enceladus; de minden jeges holdon H<sub>2</sub>O a fő alkotóeleme a magmának;
  - Jupiter/Szaturnusz-holdakon NH<sub>3</sub>-al keverve (híg folyós)
  - Uránusz/Neptunusz-holdakon NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>3</sub>OH-val keverve (CH<sub>3</sub>OH miatt sűrű)
- jég: Ariel
- nitrogén: Triton

Vulkanizmus eredménye:

- plutónizmus = "sikertelen vulkanizmus" :
  - olvadt magma benyomul a felette lévő kéregbe, és ott lassan hűl le: intrúzió
  - csak erózió miatt válik láthatóvá: ovoid (Föld)
- felszín-újraképzés
  - vulkáni elöntés
    - ◆ híg folyós láva esetén: vulkáni síkság
      - Vénusz-felszín 65%-a; Io felszín zöme; Hold, Triton mare; Europa, Ganymedes
    - ◆ sűrűbb láva esetén: párkányos lávafolyás (Merkúr, Io, Uránusz-holdak, Triton)
    - ◆ sűrű láva és ismételt működés esetén: vulkáni építmény → pajzsvulkáni hegy
      - Föld, Mars, Vénusz
  - erózió: a folyékony láva erodálja a felszínt (Föld, Io, Vénusz "folyómedrek")
- kigázosodás: légkör utánpótlása

A vulkáni kilövellés magassága

- nő a kürtőn kiáramlás sebességével
- csökken a gravitációs-állandó növekedésével
- csökken a felszíni lég/folyadék nyomással, ha légkör/folyadékszférába történik a kiömlés

Jelenleg aktív:

Io: ~ 800 km magasra is feljut a kürtőből a vulkáni anyag

Triton: ~ 8 km magasra

Föld: ~ 10 km magasra

Enceladusról származó anyag alkotja a Szaturnusz E gyűrűjét

## 5. FEJEZET

### ILLÓANYAGOK: LÉGKÖRÖK, FOLYADÉKSZFÉRÁK, JÉGSZFÉRÁK

Az illóanyag-tartam eredete: a tömeg nagysága miatt

- az óriásbolygók a bolygókeletkezésnél képesek voltak magukhoz kötni a környezetükben lévő gázt is,
- a többiek csak a kis szemcsékre adszorbeálódtak, vagy jégként a planetezimálokba gyűlt gázt örökölték

Elsődleges primordiális légkörök: a legelső ősi légkörök a bolygókeletkezés után.

- Föld-típusúaknál: bolygótettek kigázosodása révén keletkezett, és mind elfűjték a nagy becsapódások;
- óriásbolygóké a nagy szökési sebesség miatt megmaradt; azoké tehát elsődleges légkör.

Másodlagos légkörök:

- forrás:

- kigázosodás a bolygótettek belsejéből; aktív vulkanizmus felgyorsíthatja
- becsapódó test illó anyaga a céltest légkörének részévé válik  
Földre óceányi vizet hozhattak üstökösök vagy kisbolygók
- napszélből implantálódó molekulák: általában elhanyagolható, kivéve nagyon ritka légköröket  
pl. hélium a Merkúron

- veszteségek:

- szökés (lassú mechanizmus)
  - ◆ hőmérséklettel nő, mert egyre több molekula éri el a szökési sebességet
  - ◆ bolygótömeg csökkenésével nő, mert csökken a szökési sebesség:  
kisebb bolygótettek kevésbé tudják megtartani légkörüket
  - ◆ holdak megszökött illó anyagát bolygójuk fogja be gravitációsan/elektromágnesesen  
Szaturnusznál  
Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea, Titán pályájának a távolságában  
több ion található a magnetoszférában, mint másutt.  
Az E gyűrű sűrűsége az Enceladusnál maximális.  
Jupiternél az Io esetében feltűnő a jelenség az Io vulkánjaiból kikerülő sok anyag miatt:  
az Io pályájának távolságában nátrium és kéngyűrű van a Jupiter körül;  
az Europa oxigénforrás lehet
- ◆ saját mágneses tér esetén elektromos terek felgyorsíthatnak ionokat szökési sebesség fölé:  
Földnél "poláris szél"
- ◆ ENA: a magnetoszféra gyors ionjai semlegesítődve nagysebességű semleges atomként  
szökési sebesség fölötti sebességgel rendelkezvén
  - elszökhetnek, ha semlegesítődéskori sebességvektoruk kifelé mutat
  - légkört fűtik, ha sebességük a bolygótettek felé mutat (SAR arc)  
Földnél mérték, Szaturnusz-gyűrűnél lehet még erős a hidrogénkorona miatt
- napszél erózió (lassú mechanizmus) különösen erős saját mágneses tér hiánya esetén.  
Légkörök ilyenkor csóva alakúak  
üstökösöknél, Holdnál, Vénusznál mindig; Marsnál nagy napaktivitás esetén
- légkör "elfűjása" becsapódással kapcsolatban (epizodikus, gyors esemény):  
Mars Argyre becsapódásánál volt jelentős; földszerű bolygók ősi légkörei mind így tűntek el
- talajba kötődés (lassú mechanizmus)
  - ◆ CO<sub>2</sub> karbonátokba kötődik víz jelenléte esetén (Föld, Mars)
  - ◆ H<sub>2</sub>O hidratált szilikátokba (Föld, Mars)
  - ◆ CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, Ar vízzel zárványvegyületeket (klatrátokat) alkothat (jégholdak):  
a víz kristályrácsának szabályszerű szerkezetéből adódó hézagaiba épülnek be a molekulák
- felszínre fagyás (lassú/gyors mechanizmus a hőmérséklettől és annak változásától függően)
  - ◆ gleccserek (Föld)
  - ◆ poláris sapkák (Föld, Mars, Triton, Plútó, Merkúr, Hold)
  - ◆ regolitba kötődés: légkörből vegyesen dér és porlerakódás → összecementálódik: Mars
- visszanyerés: adott anyag csak adott hőmérsékleti intervallumban nyerhető vissza
  - eső/harmat révén (Vénusz: kénsav, sósav; Föld: víz, savas esők)
  - hóesés/dérlerakódás révén (Föld: víz; Mars: víz, széndioxid; Io: kén, kéndioxid;  
Titán: nagyobb molekulású szénhidrogén-aeroszolok; Triton: nitrogén, metán)
- körforgás: – lecsapódott illó anyag párolgása vagy szublimálása révén } kerül vissza  
– lemeztektonika következtében lényeges mennyiségben csak a Földön } a légkörbe

## Légekörök: 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  $\rho_0$  a sűrűség a bolygó centrumától  $r_0$  távolságban,  $\rho$  pedig  $r$  távolságban.  $H$  a skálamagasság, és azt jelenti, hogy mekkora távolságon belül csökken az illető összetevő sűrűsége az  $e$ -ed részére.

$H$  fordítva arányos a molekulasúllyal → nagyobb molekulasúlyú összetevő előbb fogy ki a magassággal  
→ összetevők szerint rétegzett lesz a légkör azon magasság felett, ahol már nem keveredik jól.

A sűrű légkörök alsó részén a molekulák szabad úthossza kicsi → gyakran ütköznek

→ jól keveredik a légkör: összetétele itt állandó, magasságtól független (homoszféra).

Ahogy a sűrűség csökkenésével növekszik a szabad úthossz, a keveredés nem tökéletes, a légkör összetevők szerint rétegződni tud (heteroszféra).

Minden rétegben más lesz a domináns összetevő, molekula vagy atomsúlyuk a magassággal csökken.

Hidrogén-korona: minden légkörben legkívül a legkönnyebb elem, a hidrogén található.

Exobázisnak azt a magasságot nevezzük, amely felett a légköri összetevők szabad úthossza olyan nagy, hogy kellő sebesség esetén el tudnak szökni a bolygótól (exoszféra).

A nagyon kis sűrűségű légköröknél az exoszféra leér a felszínig (Europa, Ganymedes, Io, Merkúr, Hold).

Szuperrotáció: A légkörök is forognak együtt a bolygótestekkel, azonban nem merev testként. Ha a légkör gyorsabban vagy lassabban rotál, mint a bolygótést, 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 bolygótést.

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, tehát a napsugárzás által a maximálisan fűtött hely a pólus volt. (Emiatt egyesek azt várták, hogy a szelek a pólusról az egyenlítő felé fújnak.)

Differenciális rotáció: Az óriásbolygók és a Nap légköre a növekvő szélességgel csökkenő sebességgel rotál, ezért az egyenlítői légköri alakzatok segítségével meghatározott forgási periódus a legrövidebb.

### Bolygólégkörök fűtése

Forrás:

- bolygótéstől kiszivárgó hő (szimmetrikusan fűt)
- Nap (aszimmetrikusan fűt)
  - elektromágneses sugárzás (szubszoláris pontban maximális)
  - korpuszkuláris sugárzás (mágneses pólusok környékén maximális, mágneses tér hiánya esetén bárhol)

Fűtő közeg:

- felszín a légkör alját fűti: a légkörön áthatoló fény a felszínen elnyelődik, a felszín a szomszédos légrétegeknek adja át a hőt → a levegő hőmérséklete a magassággal csökken: troposzféra (a meteorológiai események színtere, pl. felhőképződés ebben a rétegben)
- termoszféra a légkör tetejének fűtése:
  - az ultraibolya és extrém ultraibolya sugárzás bontja a molekulákat → fűtés;
  - a hőmérséklet egy határértékig nő a magassággal (exoszférikus hőmérséklet:  $T_\infty$ ) (szökési sebességet elérő atomok elszöknek, ezért nem nő tovább a molekulák átlagos sebessége, vagyis a hőmérséklet)
- Földnél  $O_2 \rightarrow O + O$ ; Vénusznál, Marsnál  $CO_2 \rightarrow CO + O$ 
  - $CO_2$  kisebb hatáskeresztmetszettel disszociál, mint az  $O_2$
  - $CO_2$ -dominált légkörű Mars és Vénusz  $T_\infty$ -je sokkal alacsonyabb ( $\sim 300^\circ K$ ), mint a Föld  $O_2$  dominált légkörének  $T_\infty$ -je ( $\sim 1000^\circ K$ ).
- közbülső fűtőréteg előfordulása esetén a felszíntől kezdve a magasság növekedésével csökkenő hőmérséklet újra emelkedővé válik (sztratoszféra) (Földnél pl. az ózonréteg miatt)

### Napszakos hőmérsékletváltozás:

A Nap elektromágneses sugárzásával maximálisan fűtött helyen a hőmérséklet megnő – a levegő kitágul: azonos hőmérsékletű helyeket összekötő felület nagyobb magasságra emelkedik: légköri dudor (**bulge**); azonos magasságban szemlélve: a hőmérséklet nő a szubszoláris pont felé (a felszínnek azon pontja felé, ahol a Nap a zenitben van)

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 (Hold, Europa, Ganymedes, Callisto, Rhea, Merkúr, Vénusz, Plútó)

a felszíni anyag hőkapacitásától függően a maximális hőmérséklet elérésének időpontja különböző mértékben késik a helyi délhez képest;

Földön a kimért késési adat a a felsőlégkörben pl. 2-5 óra.

a maximálisan fűtött helyen létrejövő nyomásnövekedés hatására minden irányba radiálisan szelek indulnak (hajnali, esti szellő)

### 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 (Triton)

♦ pályája excentrikus, akkor a fűtés erőssége változik a keringés folyamán  
egy ilyen bolygó holdján ugyanilyen értelmű változás zajlik

A kettő kombinálódhat is

Marsnál emiatt erős szezonális változás → globális porviharok:

déli tavaszkor sok CO<sub>2</sub> dér elpárolog → CO<sub>2</sub> parciális nyomása ugrásszerűen megnő

### Hőmérsékleti övek:

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 öveget**) alakít ki.

Minél gyorsabban forog egy bolygó, annál több cirkulációs cella jön létre a szélességi körök mentén:

Vénuszon 1 cella van; az egyenlítőnél felszáll a meleg levegő, a pólusoknál le.

Földön 3 (trópusi, mérsékeltövi és sarkvidéki)

Jupiteren 6-8, 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 CO<sub>2</sub> légkör miatt.

A CO<sub>2</sub>-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 (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 bolygóttest körül: a **plazmaszférát**.

A töltéstől függő szétválás után az erősebb mágneses terű bolygóknál a felgyorsult elektronok a légköri összetevőknek ütközve uv fénylésre gerjesztik azokat: **electroglow** (az égbolt-fénylés egyik összetevője; Uránusznál nagyon erős, itt fedezték fel, 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: víz csak Földön és Marson (Vénuszon és Holdon csak lávacsatornák).

Felszínen jelenleg folyékony halmazállapotról (víz) csak a Földön tudunk.

A Marson folyékony halmazállapot csak történetének korai szakaszában volt, ma legfeljebb szivárgó víz és/vagy széndioxid van, amely elszublimálás előtt a Napnak nem-kitett völgyek oldalán folydogál.

## Óceán:

- egész bolygófelszínt beborító (globális: Europa, Ganymedes? víz)
- csak mélyedéseket elfoglaló (nem globális, beltengerek, tavak: Földön víz, Titánon szénhidrogének)

## **Jégszférák**

- jégkéreg: globális óceán tetején (vízjég: Europa, Ganymedes?)
- poláris sapkák:
  - légkör szállította illóanyag a bolygótest hidegebb részein lecsapódik  
Föld: H<sub>2</sub>O, Mars: H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, Triton: N<sub>2</sub>, Plútó: N<sub>2</sub>?
  - légkör nélküli égitesten bolygótestből kigázosodó vagy üstökösök által hozott illóanyag dér vagy jég formájában a felszínre ráakódik, és a napsütésnek nem-kitett, alacsony hőmérsékletű helyeken tartósan megmarad (Merkúr, Hold: H<sub>2</sub>O pólusok körüli kráterek belsejében)  
erős szezonális változás létrejöttének feltétele, hogy legyenek jeges és jégmentes területek egy bolygótesten
- gleccserek (jégárak): lehullott és szilárdra váló csapadék lejtők mentén szilárd fázisú folyással helyet változtat;  
Földön kívül még nem találtak gleccsereket, bár jégvulkanizmus esetén illó anyag szilárd fázisú folyása zajlik, csak nem lejtőn lefelé, hanem az égitest belsejéből a felszíne felé (Ariel, Europa)
- regolitba kötött jég:
  - légkörből lecsapódó H<sub>2</sub>O és a } keveréke összecementálódva
  - légkörből leülepedő por } jelentős mennyiségű jég-rezervoár (Mars)felszíni topográfiát elsimítva hullámzó síkságokat alkot

## Legfontosabb paraméterek az élet keletkezése szempontjából

- |                       |   |   |           |
|-----------------------|---|---|-----------|
| – hőmérsékleteloszlás | } | { | légkörben |
| – kémia               |   |   | óceánban  |
|                       |   |   | felszínen |

mindkettő erősen függ attól, hogy a Nap környezetében

A.) a szoláris köd anyaga már a helyén volt a planetezimálok keletkezése kezdetén  
vagy B.) az akkréció ideje alatt a csillagközi anyag folyamatosan hullott be a korongba

### Hőmérséklet

A.) esetén Földön: magma óceán a felszínen

- víz
  - magmában oldva ————— fémvas bontja
  - légkörben gázhalmazállapotban ——— uv fotonok bontják
- CO<sub>2</sub> — légkörben ————— üvegházhatás erős
- biomolekulák szétroncsolódnak (ha egyáltalán felépültek)

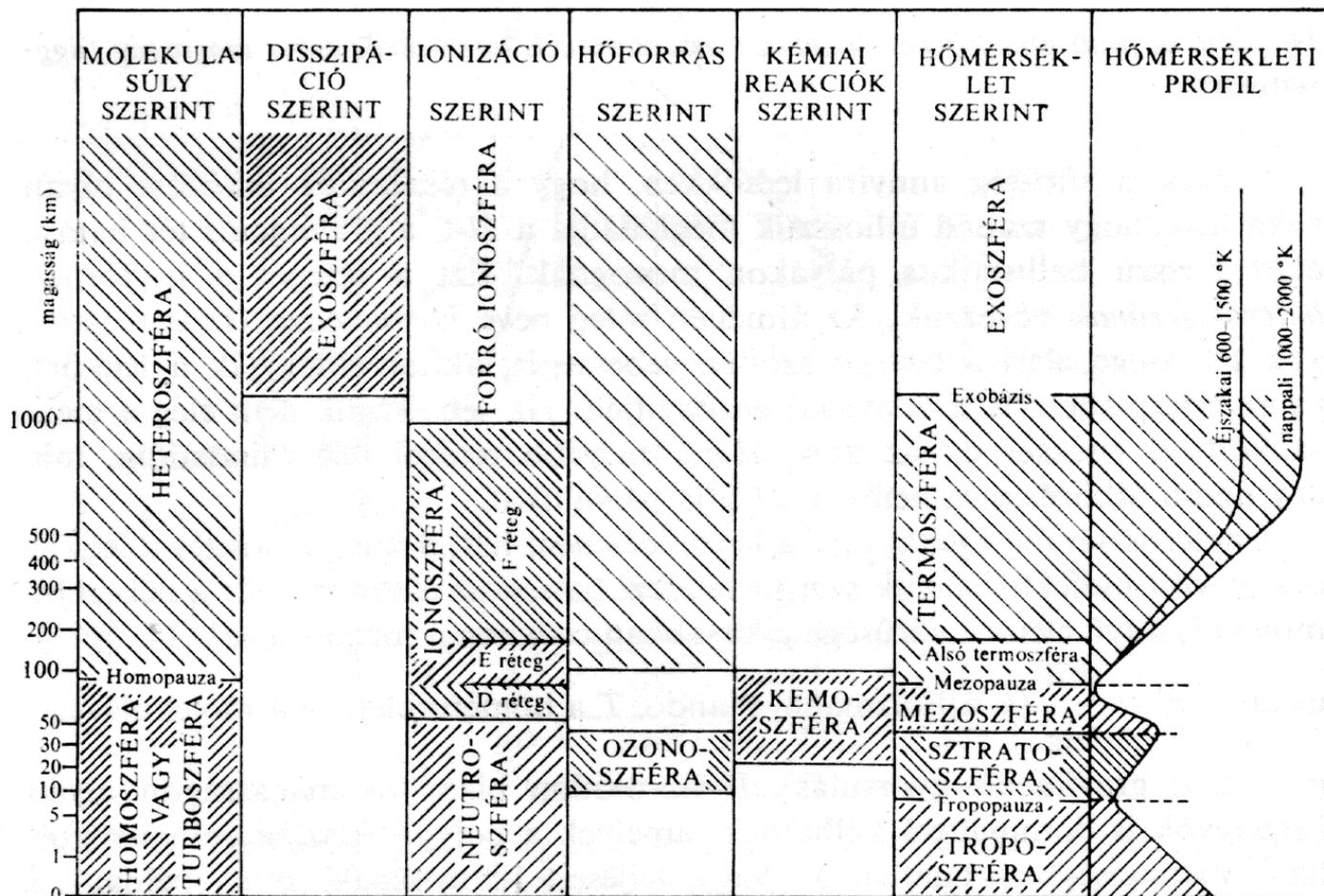
B.) esetén Földön: folyamatosan vízóceán a felszínen ~ a mai tömeggel az akkréció végére

- víz: üledékbe kötve → vízveszteség és oxigén-produkció lassú (~ mai szintű)
  - kontinentális terület kicsi
  - óceán nagyfelszínű és sekély
  - sok sziget a kiterjedt vulkanizmus miatt
- |   |   |   |
|---|---|---|
| } | { | – sok hely a biomolekulák számára a sekély  |
|   |   | vízben, ahol védve vannak az uv sugárzástól |
|   |   | – sok hely az agyagásványok keletkezésére   |

Ősi légkör összetétele annak feltételezésével, hogy a zöme a közönséges kondritok illóanyagösszetételével azonos (a közönséges kondritok lehetnek a végtermékei a csillagközi porszemcsék összeállásának), csak kis része jött a karbonkondritokból, és csak a maradék a légköri melléktermék.

- H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> ← közönséges kondritokból
- szénhidrogének ← szenes kondritokból
- NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub> sem közönséges, sem szenes kondritokból nem tud jönni
  - NH<sub>3</sub> keletkezés légköri melléktermékként
    - ♦ villámlástól a H<sub>2</sub>-ben gazdag légkörben hidrogént (maximum 1 %-ot) meteoritikus karbid (fémek szénrel alkotott vegyületei) és víz adja (oldott Fe<sup>2+</sup> fotoindukált oxidációján keresztül)
    - ♦ rutil (TiO<sub>2</sub>) homokon nitrogén a vizet fotonok segítségével redukálja az óceánpart hullám és árapályzónájában
  - CH<sub>4</sub> keletkezés alumíniumkarbidból?

## A földi légkör rétegei:



## Légkörök a Naprendszerben:

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

## Poláris sapkák anyaga a Naprendszerben:

Merkúr	H <sub>2</sub> O
Föld	H <sub>2</sub> O
Hold	H <sub>2</sub> O
Mars	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub>
Triton	N <sub>2</sub>
Plútó	N <sub>2</sub> ?

## Folyómedrek a Naprendszerben:

Vénusz	sókban-gazdag láva csatornái
Hold	lávacsatornák
Föld	víz
Mars	víz (ammónia?)

## Óceánok a Naprendszerben:

Föld	víz	nem globális
Europa	víz ~ kb. 100 km mély, tetején jégréteg	globális
Ganymedes?	víz ? ?	globális
Titan?	metán, etán, propán, propén	nem globális

## 6. FEJEZET

### MÁGNESES TEREK, MAGNETOSZFÉRÁK

#### **Mágneses tér:**

egy bolygótest körül lehet

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

Egy bolygótest felszínén mért mágneses tér a belső mágneses tér és a bolygótest körül mozgó töltött részecskék áramai által keltett mágneses tér eredője lesz.

- indukált mágneses tér: globális, elektromosan vezető réteggel rendelkező testben a környezetében lévő, térben vagy időben változó mágneses tér által indukált áramok mágneses tere a külső tér vagy a geometria változásával változik
  - belső mágneses térrel rendelkező bolygótesteknél ionoszférák, magnetoszférák, óceánok áramai által keltett mágneses terek
  - Europa, Callisto, Io?, Ganymedes? indukált mágneses tere (Jupiter mágneses tere által indukált)
- befagyott mágneses tér: olvadt ferromágneses anyag bármi okból meglévő mágneses térben a Curie pont alá lehűlve rendezett marad (Hold, Mars, Föld felszíni rétegei, Gaspra, Ida kisbolygók)

#### **Magnetoszféra:**

##### A magnetoszférák alakja:

A bolygók mágneses terét a napszél a magával hozott és a Naptól származó mágneses tér segítségével egy cseppalakú térrészbe szorítja be: ezt a térrészt nevezzük magnetoszférának, ezen belül tehát a bolygó mágneses tere, ezen kívül a napszél mágneses tere az uralkodó.

A bolygó mágneses erővonalai torzulnak:

a napszél dinamikus nyomása

- a Nap felőli oldalon összenyomja a bolygó mágneses erővonalait (magnetoszféra orr része),
- a Nappal ellentétes oldalon megnyújtja azokat (magnetoszféra uszálya vagy csóvája)

A bolygómagnetoszférán belül elhelyezkedő hold-magnetoszférát

a bolygó mágneses tere szorítja hasonló módon zárt térrészbe

(Jupiter-magnetoszférán belül helyezkedik el a Ganymedes magnetoszférája, amelyet a bolygóval-együttforgó bolygó-mágneses-tér és vele együtt mozgó töltött részecskék a forgás során lehagynak, ugyanis a korotáció gyorsabb, mint a Kepler-mozgás; ezért a Ganymedes csóvája a pályamozgása során előre mutat.)

##### A magnetoszférák mérete

- függ a bolygó mágneses terének erősségétől (elsősorban a dipólmomentum 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.
- függ a napszél erősségétől: minél nagyobb a napszél dinamikus nyomása (sebesség x sűrűség), annál kisebb térrészre nyomja össze a bolygó mágneses terét
  - a napszél változásával változik a magnetoszférák mérete (pl. Jupiter orrtávolsága 40-100 jupitersugár között változik).

### A magnetoszférák légkört védő hatása:

- erős mágneses terek magnetoszférái teljes egészében tartalmazzák a bolygótest légkörét, így védik azt a napszél-eróziótól (óriásbolygók, Föld)
- gyengébb terek (Marsé)
  - erős naptevékenység idején a magnetopauza beszorul a légkör külső rétegei alá, így ilyenkor nem védi a mágneses tér a külső légrétegeket a napszél-eróziótól
  - gyengébb naptevékenység idején azonban elég nagy-méretű a magnetoszféra, hogy az egész légkör számára védelmet biztosítson.
- mágneses tér hiánya esetén a légkört nem védi semmi a napszél-eróziótól: ilyenkor a légkörök csóvaszerűen elnyúlnak a Nappal ellentétes irányba.  
(Vénusz, üstökösök, Hold)  
Hold légkör 2-3-szor messzebb terjed ki Nappal ellentétes oldalon, mint a Nap irányába; üstökösöknél a kis gravitáció miatt 100-szoros ez az arány.

### A magnetoszférák szerkezete:

- zárt erővonalak: a bolygóhoz közeli erővonalak zártak maradnak, csak a külsők benyomódnak
  - plazmaszféra: az erővonalak talppontjainál kis és közepes szélességeken az ionoszféra gyors ionjai fel tudnak jutni az erővonal mentén nagyobb magasságokba: az általuk bejárt mentőöv-szerű térrész a plazmaszféra
  - sugárzási övezetek: bizonyos karakterisztikus energiájú töltött részecskék bizonyos erővonalakötegek környékét népesítik be  
(Földnél Van Allan övezetek elnevezés is használatos a felfedezőjük tiszteletére)  
Földnél általában három sugárzási öv van benépesítve,
    - ◆ nagy energiájú protonokból álló öv 1,6-2,0 földesugárnyi távolságban
    - ◆ nagy energiájú elektronokból álló öv 3,5-4,5 földesugárnyi távolságban
    - ◆ 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.; egyszeres ionizáltságukkal anomálisak a Napból 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  
(csak a Földnél figyelték meg)
- nyitott erővonalak: a bolygó külső erővonalaihoz erővonal-összekapcsolódással hozzacsatlakozik a napszél mágneses tere, azokat a napszél mozgásával hátrahúzza alakítja ki az uszályt, amelynek erővonalai így nyitottak a bolygóközi tér felé  
→ töltött részecskék a nyitott erővonalak mentén be tudnak jutni a napszélből.  
A napszél által a magnetoszférába betáplált energia az uszályban tárolódik a töltött részecskék mozgásában, illetve mágneses energiaként.  
Az uszály hoszú; a Jupiternél ~ 9000 bolygósugárnyi a ~ 100 R<sub>J</sub> orttávolsággal szemben.  
Az uszály két szimmetrikus lebenyre oszlik a mágneses egyenlítő síkjára szimmetrikusan.  
Mindkét lebenynek saját áramrendszere van, amelyben a napszélből származó protonok kollektív mozgása elektromos áramokat képvisel, és ezek ellentétes irányba folynak.  
A mágneses egyenlítői síkban a két lebeny határán a protonok nagyobb sűrűsége áramlepelként jelenik meg.
- lökésfront: 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 áttérjednek azokra a mágneses erővonalakra, amelyek rezonálni tudnak rá.  
Ezen erővonalak rezgései a talajban, mint tellurikus mágneses rezgések regisztrálhatók a mágneses obszervatóriumokban (PC1, PC2, PC3, P11, P12, stb. elnevezéssel a periódustól függően).  
Ez a héj- vagy erővonal-rezonancia a magyarázata annak, hogy e tellurikus hullámok megfigyelhetősége függ a mágneses szélességtől.

## A magnetoszférák működése

### • Erővonalösszekapcsolódás (merging)

A bolygóközi mágneses tér erővonalaival a nappali oldalon összekapcsolódnak a bolygó mágneses erővonalaival, 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 összenyomódván 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 vissza-kötődés spontán is bekövetkezhet:

öbölháborgás, substorm, szubvihar.

Az ilyen módon az áramlepel mentén beinjektált 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 síkja mentén egy köráram épül fel (gyűrűáram).

Az egész magnetoszférára kiterjedő zavart magnetoszféra viharnak nevezzük.

### • aurora övezet, vagy aurora ovál vagy sarkifény övezet: fénylő övek a mágneses pólusok körül, az aurora övezeteknek a pólusokhoz közelebbi széle

- messzebb van a pólusoktól az éjszakai oldalon
- szélesebb az éjszakai oldalon

magnetoszféra-vihar idején a vihar erősségétől függően

mindkét határvonala nagyobb távolságra tolódik a pólustól az egyenlítő felé

A sarki fény egyszerre lángol fel a két pólus körül, 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 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 az aurorák uv fénylését figyelték meg, de a Jupiternél és a Szaturnusznál már optikai hullámhosszon is megfigyelte az aurorát a HST.

Az Io "lábnyoma" 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 erővonalak köteg talppontjánál, de az Io hosszúságát kb. 15 fokkal megelőzve.

2001-ben már az Europa és a Ganymedes „lábnyomát” is lefotózta a HST.

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 harmónikusok erősek a dipól taghoz képest (Jupiternél ez dominál).

### • 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,

e ezért a felszínen a mágneses tér csökkenéseként érzékelhető a hatása,

ezt a csökkenést megelőzően a vihar kezdetét az erővonalak összenyomása miatt impulzusszerűen megnövekvő mágneses térerősség-ugrás jelzi (SI Sudden Impulse)

A gyűrűáram felbomlásáért, amely több napig tart (vihar visszatérési fázisa, recovery phase), kétféle folyamat a felelős:

- ENA: 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.
- SAR arc: 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:

- ◆ Io, Europa, Ganymedes "lábnyoma"
- ◆ Shoemaker Levy 9 üstökös becsapódásakor a déli félgömből az északira átdobódott és fűtött egy ionizálódott részecske-populáció 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 bolygóbelsőhöz 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 koordinátarendszert III-asnak nevezik

(I az egyenlítő forgásához, II-es a közepes szélességek forgásához kötött koordinátarendszer jelzése).

A Szaturnusz rádiósugárzását a 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

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 (Szaturnusznál). A Jupiternél ezzel a módszerrel fedezték fel a gyűrűt és néhány holdat (töltött-részecske csillagzat).



## 7. FEJEZET

### MIBEN KÜLÖNBÖZIK EGY BOLYGÓTEST ÉS EGY HOLDTEST FEJLŐDÉSE? (Milyen folyamatokon keresztül szől bele egy bolygó holdjának fejlődésébe?)

#### Hol szólhat bele egy bolygótest holdjának fejlődésébe?

– holdrendszer minden óriásbolygónál

- belső kicsik      hány darab    milyen távolságban
  - Jupiter            4db        1,8-3,1  $R_J$
  - Szturnusz        6db        2,2-2,5  $R_S$
  - Uránusz           11db       1,9-3,4  $R_U$
  - Neptunusz        6db        1,9-4,8  $R_N$

- reguláris nagyok

- Jupiter            4db        6-26  $R_J$
- Szturnusz        8db        3-59  $R_S$
- Uránusz           5db        5-23  $R_U$
- Neptunusz        1db?       14  $R_N$

Neptunusz kaptálta Tritont, az "felseperte" Neptunusz reguláris holdrendszerét

Triton egyetlen retrográd nagyhold, pályáját árapály tette körré

- külső kaptált kicsik

- Jupiter            20db       160-332  $R_J$
- Szturnusz        13db       215-250  $R_S$
- Uránusz           5db        234-700  $R_U$
- Neptunusz        1db        222  $R_N$

Neptunusz: Nereida  $\Delta m = 1,5 \text{ mg}$  (19,5 mg) kettős hold? árapállal szemben stabil?

irreguláris alak nem okozhatja fényességváltozást, mert akkor 670x160x160 km kellene, hogy legyen,  
de 400 km-nél nagyobb test már gömbalakú kellene, hogy legyen

inkább világos és sötét foltok okozhatják

– többi bolygónál

- Merkúr, Vénusz: nincs hold
- Mars: kisbolygókat kaptált (fogott be)
- Föld, Plútó: óriás ütközéssel keletkeztek a holdjaik,  
– amelyek nagyok bolygójukhoz képest

táblázatunk a második legnagyobb holdat, a Ganymedest adja összehasonlításaként

<i>Tömeg</i>	<i>test sugara</i>	<i>keringés távolsága</i>
$M_{\text{Föld}} = 81 M_{\text{Hold}}$	$R_{\text{Föld}} = 3,7 R_{\text{Hold}}$	Hold: 60 $R_{\text{Föld}}$
$M_{\text{Plútó}} = 11 M_{\text{Charon}}$	$R_{\text{Plútó}} = 1,96 R_{\text{Charon}}$	Charon: 17 $R_{\text{Plútó}}$
$M_{\text{Jupiter}} = 12800 M_{\text{Ganymedes}}$	$R_{\text{Jupiter}} = 27 R_{\text{Ganymedes}}$	Ganymedes: 15 $R_{\text{Jupiter}}$

– és "szárazak": illó anyag eltűnt ütközésnél

- ◆ Hold száraz szilikát, hiányzik illó: víz
- ◆ Charon "száraz" víz, hiányzik illó: metánjég

#### Differenciálódáshoz belső hó kell

korábban hitték: hőforrás csak urán és tórium radioaktív bomlása révén, mennyiségük arányos térfogattal

hővesztés arányos felszínnel → nagyobbak tovább tartják a hőt

ma már tudjuk, hogy más hőforrás is van

- lökést kaphattak rövid felezési idejű radioaktív bomlástól pl.  $^{26}\text{Al}$
- gravitációs energia akkrécio idejéből (a becsapódás energiájának egy része hővé alakult)
- árapályfűtés pályaeccentricitás miatt
- árapályfűtés pályarezonancia miatt holdrendszerekben: összehangolt mozgás
  - Jupiter: Io/Europa/Ganymedes = 1/2/4; Callisto nem → Ganymedes/Callisto dichotómia
  - Szturnusz: Enceladus/Dione = 2/1 → Enceladusnál E gyűrű, Dionenél repedések  
Enceladus/Janus régen
  - Uránusz: most nincs, de lehetett  $3,8 \cdot 10^9$  éve  
Miranda/Ariel  
Ariel/Umbriel → Umbrielen kéregfelrepedés korán  
Arielen  $\Delta T = 20^\circ$  is lehetett, amíg kaotikusan ki nem menekült rezonanciából  
Ariel/Titania = 4/1
- fázisátmenet a hold belsejében: latens hő felszabadul
- felszín közelében szilárd fázisú üvegházhatás

Tudjuk, hogy differenciálódott (van magjuk): Hold, Io, Europa, Ganymedes

Tudjuk, hogy nem differenciálódott:

Callisto, legfeljebb csak részlegesen, de ugyanakkor van indukált mágneses → elektromosan vezető rétegnek kell lenni:  
legalább 100 km mélységben 10 km vastag globálisan összefüggő sós víz réteg lehet ez

## Milyen folyamatokba szólhat bele a bolygótest holdjával kapcsolatban?

### 1.) Ütközésbe, kráterkeletkezésbe: szilárd felszíni bolygótesteken mindenütt becsapódásos kráterek

A nagy tömegű bolygó a becsapódó testeket

- fókuszálja: holdrendszerekben krátergyakoriság befelé nő  
Mirandán 2,5-szer annyi várható, mint Arielen  
Arielen 5,4-szer annyi várható, mint Oberonon (de nincs, mert felszínújraképzés volt az Arielen)
- felgyorsítja: a becsapódó testek nagyobb sebességgel csapódnak be a holdakba  
Jupiter belső kisholdjainál 10-szer több anyagot vág ki egy becsapódó test, mint a saját tömege  
→ porlásuk: a gyűrűk anyaga (többi óriásbolygónál is így van?)
- széttöri: SL9 üstökös árapályhasítása → kráterlánc: Ganymedes (Enki Catena + másik 12), Callisto, Hold, Föld
- szétdobott törmelékanyagot gravitációsan elveszi → az bolygó körüli pályára áll
  - törmelékhold lesz
  - vagy gyűrű anyaga
  - vagy a messzebről Poynting-Robertson effektussal befelé spiráló por  
másik holdra rácsapódó szemcséi annak felszíni anyagát változtatják: Phoebe pora Japetusra
  - másik hold találkozhat vele, "begyűjtheti"  
Triton becsapódásos kráterei a holdnak csak az egyik oldalán helyezkednek el  
→ ♦ vagy másik hold robbant akkor, amikor Triton közel volt  
♦ vagy Triton kötötte keringve hosszabb idő alatt "felseperte" a széttört hold törmelékét  
→ Triton felszíne még fiatalabb, mint eddig hitték
- leszakadt, és elektromosan feltöltött port a magnetoszféra felkapja, felgyorsítja és szétteríti  
Io vulkáni hamuját
  - ♦ Europa hátsó felére juttatja: kénsavmezők képződnek
  - ♦ egész Naprendszerbe ejektálja (kidobja)
  - ♦ sőt az a csillagközi térbe is kijuthat

## Milyen folyamat révén szólhat bele egy bolygó holdjának fejlődésébe?

### 2.) Árapályfűtés működik

- holdtársak mozgásával rezonáns mozgás esetén belső holdak erősebben fűtöttek, mint a távolabb lévők
  - $e \neq 0$  és/vagy  $i \neq 0$  esetén holdtársak nélkül is
  - nem szinkron rotáció esetén is
- } (árapály-dudor vándorol)
- Föld-kéreg árapályamplitúdó ~ 1 cm  
Io ~ 30 m  
Europa ~ 20 m

**árapályfűtés okoz:** olvadást → konvekció beindul sűrűségkülönbségek miatt

- tektonizmus
- vulkanizmus
- légkört fejleszt → illó anyagokat hold elveszítheti
- óceán keletkezhet; ha sós: → saját és/vagy indukált mágneses tér keletkezhet
- mag is megolvadhat: saját mágneses tér keletkezhet dinamó mechanizmussal

**Váratlan volt külső Naprendszerben:** sok bolygótest felszíne nagyon fiatal (Voyagerek 1978-89)

kicsiknél is ♦ gömbalak } honnan volt ehhez energia, amikor vulkanizmushoz  
♦ erős geológiai aktivitás } legalább részben olvadt anyag kell ?

ok: – holdrendszerekben árapályfűtés szerepe sokkal nagyobb, mint korábban hitték

– külső holdak anyagában sok az exotikus jég → keverékek jönnek létre: *eutektikumok*

- ♦ ammónia-víz keverék kb. 100°-kal alacsonyabb hőmérsékleten olvad, mint a tiszta víz

pl. Arielen ♦ a láva = jég; folyik, mint a Földön a gleccser

♦ régi kráterek 50-70 %-kal laposabbak: vagy nagyobb a hőáram, vagy vízjég keverék van az Arielen  
→ felszíni viszkozitás több nagyságrenddel kisebb, mint vízjég ugyanakkora hőmérsékleten

- ♦ finom szemcséjű vízjég-klatrát viszkozitása csökken, ha akár kevés "kenőanyag" folyadék van a szemcsék között, és ekkor könnyen eléri a felszínt, főleg mély repedések mentén

- ♦ metilalkohol jelenléte víz-ammónia keverék viszkozitását növeli

→ Uránusz- és Neptunusz-holdaknál szilikátvulkanizmushoz hasonló formák

Miranda: koronák széle tipikus folyásfront

- ♦ Triton: gejzirt figyeltek meg (olvadt nitrogén hajtja) → megrepedt a felső nitrogén réteget

fázisátmeneti vulkanizmus { alfa (kocka) } fázisok között reverzibilis átmenet  
{ béta (hexagonális) } 35,61 K-en 55,62 Cal/mol latens hő

A Triton belső hője Io után a legnagyobb, poláris sapkán nitrogén jég több száz m vastag lehet

### 3.) Holdak mozgása révén a bolygó körül

— a bolygó egyenlítő síkjában mozognak a közeli holdak, Uránuszé és Plútóé is, (a Naprendszer fősíkjára merőlegesen)

→ ezért a közeli holdak bolygó szezonális változását kénytelenek elviselni

- Titan (Szaturnusz tengelyhajlása  $26^\circ$ ) → É-D aszimmetria fényességben  
1972-78 napciklussal fázisban, ha ettől eltolódik, szétválasztható a két hatás

- Triton (Neptunusz tengelyhajlása  $28^\circ$ , Tritoné  $157^\circ = 33^\circ$ )

Nap zenitben  $50^\circ$ -ig → 50 évig süti a pólust a Nap, 100 évig az egyenlítőt

→ legextrémebb szezonális változás Naprendszerben a Tritonon zajlik

- ◆ 700 évenként nagyon extrém nyár: a legközelebbi 2007-ben lesz (5-10 éves késés is lehet)  
az ottani exotikus jegeknél a légköri nyomás nagyon függ a hőmérséklettől  
ha jégsapka van, még extrémebb a szezonális változás: néhány m metánjég elpárologhat  
→ 10 atm nyomásváltozás → légkörnél ezerszeres méretnövekedés: 2007-ben ilyen várható
- ◆ 300 év múlva minimális nyár: mindkét póluson sötét is → hideg → mindkét pólusra ráfagy a jég

— holdak szinkron rotálnak

- van vezető és követő oldal: van a pályamozgás során elől illetve hátul haladó oldal

→ félgömbök között különbség alakulhat ki

- ◆ anyagban: Europa követő oldalán kénsavmezők
- ◆ felszíni textúrában: Callisto vezető oldalán púder finomságú por, követő oldalán sziklás az anyag  
Phobos hold követő oldala vastagon poros
- ◆ mintázatokban: Holdnak csak az innenső oldalán vannak a nagy medencék
- ◆ köpenyáramlás → kéregvastagságban különbségek → eltolódás alak és gravitációs centrum között: offset  
→ gravitációs centrumot a bolygó maga felé húzza

Hold offset = 1,68 km,  $\Delta h = 16$  km, alakja egycellás köpeny-konvekció korai fázisát őrizte meg

Mars offset = 3 km Déli pólus irányába (lényeges tömegű kísérő hiányában akármerre lehet az eltolódás)

- ha mascon (tömegkoncentráció) jön létre

- ◆ vagy nagyobb sűrűségű becsapódó test megreked
- ◆ vagy becsapódás után visszapattanó kéreg felhúzza a sűrűbb köpenyt
- ◆ vagy késői, nem relaxálódó nagyobb sűrűségű lávaelőntés játszódik le  
→ test idővel elfordul a forgástengelyhez képest, hogy mascon egyenlítőre kerüljön

- ha nem-relaxálódó anyagihiány jön létre becsapódás miatt

→ test idővel elfordul a forgástengelyhez képest, hogy a hiány a forgástengelyre kerüljön

Holdnak 3 rotációs pólusa volt (Runkorn) 3,85, 4,0 és  $4,2 \cdot 10^9$  éve

- ha köpenyáramlás miatt megvastagszik valahol a kéreg → a vékonyabb kéreg-rész néz a bolygó felé

Hold: „tengerek” Föld felé; Io: hegyek Jupiterhez képest  $\pm 90^\circ$ -ra (Hargitai)

— ha nem szinkron rotál egy hold

Hyperion:  $164 \times 130 \times 107$  km → várták, hogy hosszú tengely néz Szaturnusz felé,

de nem, forgása kaotikus, inkább bukdácsolás, mint forgás:  $P_{\text{forg}} = 13$  nap,  $P_{\text{kering}} = 21$  nap

Europa: nagyon kicsi eltérés szinkron rotációtól; ugyanaz az oldal csak 6000 év múlva fordul vissza a Jupiter felé

→ Jupiterrel ellentétes oldalon repedések körbefordulnak a nem szinkron rotáció hatására

Charon: a Plútó-Charon rendszer nem teljesen szinkron rotál:  $P_{\text{Plútó forgás}} = P_{\text{Charon keringés}} = 6,387^{\text{d}} \neq P_{\text{Charon forgás}} = 5,877^{\text{d}}$

Phoebe:  $P_{\text{forg}} = 9,4$  nap,  $P_{\text{kering}} = 550$  nap

Triton: pályaeccentricitás és inklináció nagy

#### 4.) **Magnetoszféra folyamatok:** magnetoszféra-hold kapcsolat

- hold mozgása zavart kelt a magnetoszférában:

Ganymedes (200 millió km távolságból már észrevehető, hogy közeledik a hold)

Titán

sodornyom pályamozgás mentén előre áll, mert magnetoszféra korotál, hold Kepler pályán lassúbb

→ hátulról hagyják le a máneses erővonalak a holdakat

- ha holdban van elektromosan vezető réteg

- ◆ indukált mágneses tér keletkezik, ha a hold helyén változik a bolygó mágneses terének erőssége/iránya (pl. ha nem esik egybe bolygó forgás- és mágneses tengelye, vagy a hold elliptikus, vagy hajló pályán mozog)

Europa } sós óceán;

Callisto } indukált mágneses tér pólusai Jupiter forgási periódusával körbejárnak a holdak egyenlítősíkjában

- ◆ "swirls" keletkezik becsapódás után

– ha van mágneses tér a környezetben

– és ha a méretek olyanok, hogy a plazmafelhő mindkét irányba éppen körbefutja a bolygót, és a plazmafelhő a becsapódással ellentétes oldalon ütközik: Hold

- ha a hold anyagot bocsát ki (vulkán, gejzír, becsapódás kivágta por)

- ◆ semlegesből gyűrű lesz

Enceladus: Szaturnusz E gyűrűje

Titán: Szaturnusz semleges hidrogén tórusza

kis holdak: Jupiter gyűrűi

Io: Jupiter kén és nátrium gyűrűi

- ◆ ionizálódottak fluxuscsőben mozogva áramot képviselnek a bolygót a holddal összekötő erővonalcső mentén

Io vulkáni centrumokat ennek az áramnak a Joule-fűtése tarthatja folyamatosan nyitva

1 millió amper, 2 trillió watt, 400 ezer volt

Europának is lehet fluxuscsőve  $10^5$  amper árammal

Amalthea  $5^\circ$  melegebb, mint várták

- rádiósugárzást emittálnak a bolygóknál a tükrönpontból visszaforduló elektronok

Io Jupiter dekaméteres rádiósugárzását ( $10^8$  watt) modulálja

Dione Szaturnusz km-es rádiósugárzását modulálja

- rádiósugárzást emittálnak a holdaknál a tükrönpontokban visszaforduló elektronok

Titán Szaturnusz felé forduló oldala rádióforrás

- aurorát gerjesztenek a bolygó légkörében a fluxuscsőben a bolygó légköréig lejutó töltött részecskék

Io "lábnyoma"  $8^\circ$ -kal az egyenlítő felé, az Ion átmenő mágneses erővonalhoz képest  $15^\circ$ -kal előtte jár

Jupiter déli pólusán jobban látszik, mert ott a mágneses tér gyengébb

→ mélyebbre jutnak le a töltött részecskék, és jobban gerjesztik a légkört

Ioról korotáló magnetoszféra 1000 kg/sec anyagot visz el

Europa és Ganymedes lábnyomát is lefotózta a HST 2001-ben

- aurorát gerjesztenek a holdon a bolygó fluxuscsővében felgyorsított elektronok: Io, Triton

- ha a vízjég-holdak testébe behatol a fluxuscső árama, vízbontást végezhet

→ durranógáz halmozódhat fel → becsapódás robbanást triggerelhet

Amalthea esetleg nagyobb volt, vizét már emiatt elveszíthette, lehámózódhatott a robbanásoktól

- magnetoszférát feltöltik a holdak nehéz részecskéikkel, pl. Io vulkánokból: kén, nátrium:

magnetoszféra felkapja, felgyorsítja, viszi, rácsapja a többi holdra

- ◆ Europa követő oldalán Io kénjétől kénsavmezők

- ◆ jeges holdaknál  $H_2O$  dért, de az nem látszik a másik holdon, ha az is jeges

labormérés: Szaturnusz-holdaknál kozmikus sugárzás által erodált molekulák könnyen elszöknek vízben gazdag felszínekről, mert a holdak kis tömegűek → Szaturnusznál érhető nehéz ion tórusz

Titánnál kiterjedt semleges és ionizált hidrogén tórusz  $1,5 R_S$  vastag

30 g/sec részecskeforrás (Pioneer 11 mérés szoláris Ly  $\alpha$  szórás atomi H-n)

- ◆ Triton: nitrogén ionokat

- ◆ Umbrielen átmenő mágneses erővonalak távolságában több az ion és az elektron → Umbriel plazmaforrás

- a bolygó-magnetoszféra nagyenergiájú töltött részecskéi besugározzák a holdakat

Ganymedes „poláris sapkái”: saját mágneses tér miatt csak a pólusra csapódnak rá a töltött részecskék

Ganymedes, Callisto jegében ózont hoznak létre

Europában kivágyják, bontják a  $H_2O$ -t; H elszökik, O-ból  $O_2$  légkör lesz: Földön kívül ez az egyetlen oxigén légkör

Uránusz sugárzási övezete ~ mint földi Van Allen öv, erősebb, mint a Szaturnusznál → holdak, gyűrűk felszíne sötét lesz

500 keV-es protonok  $1-10$  millió ion /  $cm^2/sec$  → 100 – 10000 év alatt elsötétül minden szénhidrogénben gazdag felszín (először elvörösödik, aztán elsötétül egy sötét szín felé)

Szaturnusz E gyűrűje 100 – 10000 év alatt elerodálna → kell, hogy legyen utánpótlás

- hold viszont kontrollálhatja bolygója magnetoszféráját

Io pályájától kifelé a Jupiter magnetoszférájában a plazma nem korotál a bolygóval, lemarad:

a magnetoszféra nem győzi felgyorsítani a beléje töltött sok iont

Triton a Neptunusz külső magnetoszféráját kontrollálja  $14,4 R_N$ -n túl: hiányoznak a nagy energiájú ionok (150 keV), elektronok

Triton pályájánál elektronfluxus  $10^9$  watt teljesítményt visz be a Triton légkörébe (mérés):

→ érhető ultraibolya aurora Triton légkörében

Neptunuszba csak  $3 \cdot 10^7$  W-ot táplálnak be a 22 keV-es precipitáló (magnetoszférából kiszóródó) elektronok

## Légkör a holdaknál

- bolygó fűtéssel segít, hogy legyen
  - Io: léglőr pamacsok formájában vulkánok felett, néhány óra/nap alatt elszökik
  - Hold: Na, CO, CO<sub>2</sub> légkör
  - Titan: földinél négyszer sűrűbb légkör; felszíni légnyomás 1,5 atm: egyetlen hold komoly légkörrrel
    - ◆ elég meleg a Titan, hogy kigázosodjon
    - ◆ elég hideg, hogy meg ne szökjön tőle a légkör
    - ◆ Szaturnusz nem olyan óriási, mint Jupiter; kevésbé veszi el; de hidrogén tórusz Titan körül jelzi, hogy sok anyagot veszít
  - Triton: 10<sup>-11</sup> atm felszíni légnyomás, T = 38 K, leghidegebb, amit a Naprendszerben mértek
- bolygó mágneses tere segít védeni a légkört a napszélről, ha a hold a bolygó magnetoszférájának belsejében kering
- de az óriásbolygók nagy tömege miatt becsapódó testek
  - fókuszálódnak
  - gyorsítódnak } emiatt több és nagyobb becsapódás ér egy holdat, légkörét jobban elfűjják becsapódások
- de a bolygó mágneses terében mozgó nagyenergiájú töltött részecskék bombázása erodálja a holdak légkörét
- viszont ugyanezen nagyenergiájú töltött részecskék bombázása a felszínekből kilök molekulákat, s ezzel létrehoz légkört
  - Europa: O<sub>2</sub> légkör keletkezik így (egyetlen O<sub>2</sub> légkör a Földön kívül)
  - Ganymedes
  - Callisto } felszíni jegében ózon keletkezik így
- de a bolygó gravitációs tere elveszi a port és/vagy semleges gázmolekulákat
  - Phoebe pora Poynting-Robertson effektussal
    - ◆ Japetus vezető oldalára becsapódva sötétíti a felszín anyagát (59 R<sub>S</sub>)
    - ◆ Hyperionon nem látszik, hogy rácsapódik-e, mert az nem szinkron rotál (24 R<sub>S</sub>)
    - ◆ Titán légkörében eltűnik (?) nem látjuk, de lehet, hogy tóruszt segíti létrehozni (20 R<sub>S</sub>)
- de a bolygó mágneses tere elveszi az elektromosan feltöltött port, gázmolekulákat és szétteríti az egész magnetoszférában, és átjuttatja más holdakra is
  - Ioról
    - ◆ kén Europa és valószínűleg a többi hold hátoldalára is: Europa követő oldalán kénsavmezők
    - ◆ porviharok Jupiter-rendszerből Naprendszer többi része felé (Ulysses szonda mérése)  
sőt Nap környezetébe,  
sőt a csillagközi tér felé is

## 8. FEJEZET

# A BOLYGÓRENDSZER ÉS AZ ÓRIÁSBOLYGÓK HOLDRENDSZEREINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Napnak 9 bolygója van

Jupiternek	28	}	holdja ismert
Szaturnusznak	30		
Uránusznak	21		
Neptunusznak	8		

**Naprendszerben** ..... mi felel meg ..... **holdrendszerekben**

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• bolygók .....</li> <li>◆ nagybolygók 8 db .....<br/>83-8477 R<sub>☉</sub></li> <li>◆ kettős bolygó .....<br/>Föld – Hold<br/>Plútó – Charon<br/>nagy ütközéssel ..... keletkeztek .....</li> <li>◆ kaptált bolygó .....<br/>Plútó = kaptált planetezimál = KBO 8477 R<sub>☉</sub></li> <li>◆ belső kisbolygók nincsenek .....<br/>"Vulcan" bolygót keresték</li> <li>◆ Lagrange kisbolygók .....<br/>Jupiter pályán Trójaiak<br/>Szat., Ur., Nept.: eddig nem találtak<br/>Föld "por"holdja<br/>(Nap zavaró hatása miatt 15°-al távolabb)</li> <li>• Titius - Bode szabály ..... R<sub>n</sub> / R<sub>n+1</sub> .....<br/>Nap: konstans = 0,60</li> <li>• kisbolygóöv .....<br/>Jupiter nem hagyta összeállni bolygóvá</li> <li>• Kuiper öv .....</li> <li>• üstökös-zóna, Oort felhő .....</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• holdak</li> <li>◆ reguláris holdak<br/>Jupiter 4 db 6-26 R<sub>J</sub><br/>Szaturnusz 8 db 3-60 R<sub>S</sub><br/>Uránusz 5 db 5-23 R<sub>U</sub><br/>Neptunusz nincs?</li> <li>◆ kettős hold<br/>Szaturnusz: Janus - Epymetheus<br/>Neptunusz: Nereida? 1.5 mg fényváltozás<br/>ütközéssel? árapályhasítással?</li> <li>◆ kaptált holdak: külsők<br/>Jupiter: S/2000J1-től kifelé 20 db R<sub>J</sub> &gt; 105<br/>Szaturnusz: S/2000S5-től kifelé 13 db R<sub>S</sub> &gt; 188<br/>Uránusz: Calibantól kifelé 5 db R<sub>U</sub> &gt; 280<br/>Neptunusz: Nereida R<sub>N</sub> &gt; 222</li> <li>◆ belső kisholdak<br/>Jupiter 4 db 1,8-3,1 R<sub>J</sub><br/>Szaturnusz 6 db 2,2-2,5 R<sub>S</sub><br/>Uránusz 11 db 1,9-3,3 R<sub>U</sub><br/>Neptunusz 6 db 1,9-4,7 R<sub>N</sub></li> <li>◆ Lagrange holdak<br/>Szat.: Dione pályáján Helena<br/>Tethys pályáján Telesto, Calypso<br/>Jup., Ur., Nept.: nem találtak</li> <li>• létezik, csak konstans nem azonos<br/>Jupiter: konstans = 1,65<br/>Szaturnusz: konstans = 1,3<br/>Uránusz: konstans = 1,46</li> <li>• kishold-öv nincs<br/>nem zavarták környezetüket a nagy tömegű holdak?<br/>Ganymedes, Callisto?<br/>Titán?<br/>Oberon?</li> <li>• nincs **</li> <li>• nincs **</li> </ul> |
|--|---|



## 9. FEJEZET

### A NAPRENDSZER GYŰRŰINEK ÖSSZEHASONLÍTÓ ÁTTEKINTÉSE

#### Gyűrűk és felfedezéseik bemutatása

**Szaturnusz gyűrű:** megpillantása az első távcsöves ránézéskor: 1610 Galilei  
felismerése: 1655 Huygens  
rés felfedezése: 1675 Cassini (első jobb távcsővel már látszott)  
ismeretünk fejlődése:  
távcsöves megfigyelés  
Pioneer 11 1979  
Voyager 1,2 1980, 1981

gyűrű szerkezete (rések, gyűrűcskék résekben is)  
küllők: Kepler mozgás – korotáció  
poros gyűrűk  
gyűrűk és magnetoszféra kapcsolata  
poros plazma szerepe Naprendszerben  
A és B gyűrűt cm-es jég - vagy jeges szilikát szemcsék alkotják,  
kevés nagyobb darab van csak  
C, F gyűrűt porszemcsék alkotják

**Uránusz gyűrű:** felfedezése 1977-ben csillagfedéssel  
Voyager 2 fényképezte le először 1986-ban  
sötét, nagyon vékony, éles szélű por-gyűrűk  
egyik gyűrű elliptikus

**Jupiter gyűrű:** felfedezés "részecske-áram-csillagászattal" (Pioneer 10, 11, 1973, 1974)  
(magnetoszférában töltött részecskék hiánya jelezte, hogy ott valami van)  
Voyager szondák fényképezték le először 1979-ben  
sötét por-gyűrűk éles külső széllel

**Neptunusz gyűrű ívek:** felfedezés csillagfedéssel az 1980-as évek elején (hitték: csak gyűrűívek vannak)  
Voyager 2 fényképezte le először 1989-ben: folytonosak a gyűrűk, csak  
külső gyűrűben 3 helyen sokkal nagyobb az anyagsűrűség: ezek a gyűrűívek  
sötét, nagyon vékony, éles szélű por-gyűrűk

#### Kétféle gyűrű?

Szaturnusz A és B gyűrűje: cm-es jégdarabkák vagy jeges szilikát-szemcsék  
többi gyűrű : porgyűrű

#### Gyűrűk természetes fejlődése: kiszélesedés

akkor mitől ilyen keskenyek, éles szélűek a porgyűrűk?

mitől van a külső szél?

holdak porlása hozza létre a gyűrűket, a porló holdak távolsága adja a külső szél;  
szemcsék Poynting-Robertson effektussal, egyre közelebb keringenek a bolygóhoz  
befelé terjednek, majd a bolygó légkörében eltűnnek

akkor átmeneti jelenségek a gyűrűk → utánpótlás kell

por-gyűrűk utánpótlása: közeli, kis holdakból meteoritbecsapódások által kivágott por  
mitől nagyon élesek a belső és külső szélek is?

terelő holdak léte

mitől vannak rések?

külső holdakkal rezonanciák

mitől vannak a gyűrűcskék a gyűrűkön belül is és a résekben is?

távoli holdak sűrűségi hullámot hajtanak a gyűrűkben (sűrűségi hullám, mint a galaxisokban)

JUPITER GYŰRŰ- ÉS HOLDRENDSZERE  
Összeállította Illés Erzsébet 2001. július

A Jupiter gyűrű kb. 4000 km vastag

határok gyűrűk holdak	a bolygótól mért távolságok		
	km	bolygóugár	
<b>bolygósugár</b>	<b>71398</b>	<b>1,00</b>	
<i>c</i>	71400 - 120000	1,00 - 1,68	
<i>halo</i>	92000 - 122500	1,29 - 1,72	25000 km vastag
<b>akkréciós határ 2,0 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>117908</b>	<b>1,65</b>	
<i>b</i>	120000 - 126000	1,68 - 1,76	
<i>fényességcsökkenés</i>	122500 - 128940	1,72 - 1,81	Metis hold pályája környékén
Metis	127960	1,79	
Adrastea	128980	1,81	
<i>a = fő gyűrű</i>	128980	1,81	Voyager 126000 – 126800 -nál mérte a főgyűrűt
<b>akkréciós határ 3,0 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>134971</b>	<b>1,89</b>	
Amalthea	181300	2,54	
<b>Amalthea-fátyolgyűrű = d</b>	182065 - től befelé	2,55 -	Voyager 126800 – 128500 -nál mérte
<b>Roche határ 2,0 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>199789</b>	<b>2,80</b>	
Thebe	221900	3,11	
<i>Thebe-fátyolgyűrű</i>	224904	3,15	
<b>Roche határ 3,0 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>228701</b>	<b>3,20</b>	
<i>kéngyűrű</i>	400000	5,60	
Io	421800	5,91	
<i>porgyűrű</i>	563000	7,88	
Europa	671100	9,40	
Ganymedes	1070400	14,99	
Callisto	1882800	26,37	
S/2000J1	7500000	105	
Leda	11160000	156,30	
Himalia	11460000	160,51	
Lysithea	11710000	164,01	
Elara	11740000	164,43	
S/2000J11	12600000	176	
S/2000J7	21000000	294	
S/2000J3	21100000	295	
S/2000J5	21100000	295	
Ananke	21280000	298	
Carme	22350000	313	
S/2000J6	23100000	323	
S/2000J4	23200000	325	
S/2000J9	23300000	326	
S/2000J10	23400000	328	
Pasiphae	23620000	331	
S/2000J2	23700000	332	
S/2000J8	23900000	335	
Sinope	23940000	335	
S/1999J1	24100000	337	

# A SZATURNUSZ GYŰRŰ - ÉS HOLDRENDSZERE

Összeállította Illés Erzsébet 2001. július

A Szaturnusz gyűrűrendszere földi mérések alapján nem vastagabb 1,5 km-nél

Voyager 2 mérések: nem vastagabb 150 m-nél

napfény 15%-át blokkolja le

határok gyűrűk holdak	a bolygótól mért távolságok		
	km	bolygóugár	
<b>a bolygó sugara</b>	<b>60000</b>	<b>1,00</b>	
<i>D gyűrű</i>	60000 - 68600	1,00 - 1,14	Voyager 1 látta először
Guerin rés	68600 - 72600	1,14 - 1,21	
<i>C gyűrű</i>	72600 - 88800	1,21 - 1,48	korábban Földről: 60000 - 88800 1,00-1,48
<b>akkréciós határ 1,0 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>97965</b>	<b>1,63</b>	
<b>akkréciós határ 1,3 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>105766</b>	<b>1,77</b>	
<i>B gyűrű</i>	91800 - 117000	1,53 - 1,95	
<i>A gyűrű</i>	121800 - 137400	2,03 - 2,29	
Pan	133570	2,22	
Atlas	137700	2,28	
Prometheus	139400	2,32	
<i>F gyűrű</i>	140160 - 141260	2,336 - 2,354	Voyager 1 mérés: 150 km széles
<b>akkréciós határ 3,0 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>141290</b>	<b>2,35</b>	
Pandora	141700	2,36	
Janus	151400	2,52	
Epymethus	151450	2,52	
<b>G gyűrű</b>	153000	2,55	
<b>Roche határ 1,0 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>165997</b>	<b>2,77</b>	
<b>Roche határ 1,3 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>178797</b>	<b>2,98</b>	
Mimas	185700	3,09	
<b>E gyűrű</b>	198000 - 480000	3,30 - 8	A Naprendszer legnagyobb gyűrűje, 5000 km vastag
Enceladus	238300	3,97	
<b>Roche határ 3,0 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>239480</b>	<b>3,99</b>	
Telesto	294670	4,91	
Calypso	294670	4,91	
Tethys	294700	4,91	Tethys kontrollálja a Szaturnusz gyűrűjét
Dione	377700	6,29	
Helena	377400	6,29	
Rhea	527400	8,79	
Titán	1222200	20,37	
Hyperion	1481500	24,7	
Japetus	3562200	59,37	Cassini résben hajt sűrűségi hullámot = gyűrűcskék
S/2000S5	11300000	188	
S/2000S6	11500000	192	
Phoebe	12944300	215,74	
S/2000S2	15200000	253	
S/2000S8	15700000	262	
S/2000S3	17300000	288	
S/2000S10	17500000	292	
S/2000S11	17900000	298	
S/2000S4	18200000	303	
S/2000S9	18500000	308	
S/2000S12	19700000	328	
S/2000S7	20100000	335	
S/2000S1	23100000	385	

# AZ URÁNUSZ GYŰRŰ- ÉS HOLDRENDSZERE

Összeállította Illés Erzsébet 2001. július

határok gyűrűk holdak	a bolygótól mért t á v o l s á g o k		
	km	bolygóugár	
<b>bolygósugár</b>	<b>25559</b>	<b>1,00</b>	
<b>akkréciós határ 1,0 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>34013</b>	<b>1,331</b>	
86U2R	37000 - 39500	1,448 - 1,545	
<b>akkréciós határ 1,5 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>38935</b>	<b>1,523</b>	
6	41850	1,637	1-3 km széles
5	42240	1,653	2-3 km széles
4	42580	1,666	2-3 km széles
alfa	44730	1,750	7-12 km széles
béta	45630	1,785	7-12 km széles
éta	47180	1,846	0-2 km széles
gamma	47630	1,864	1-4 km széles
delta	48310	1,890	3-9 km széles
Cordelia = 86U7	49771	1,947	
lambda = 86U1R	50040	1,958	1-2 km széles csak
epsilon	51160	2,002	szélessége 22-93 km között változik, elliptikus
Ophelia = 86U8	53796	2,105	
<b>Roche határ 1,0 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>57633</b>	<b>2,255</b>	
Bianca	59173	2,315	
Cressida	61777	2,417	
Desdemona	62676	2,452	
Juliet	64352	2,518	
<b>Roche határ 1,5 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>65974</b>	<b>2,581</b>	
Portia	66085	2,58	
Rosalind	69942	2,73	
Belinda	75258	2,94	
86U10	76416	2,99	
Puck	86000	3,36	
Miranda	129900	5,07	
Ariel	191239	7,48	
Umbriel	265969	10,41	
Titania	435844	17,05	
Oberon	582596	22,79	
Caliban	7170000	280,5	
Stephano	7979000	313	
Sycorax	12178000	476	
Prospero	16665000	652	
Setebos	17879000	699	

# A NEPTUNUSZ GYŰRŰ- ÉS HOLDRENDSZERE

Összeállította Illés Erzsébet 2001. július

határok gyűrűk holdak	a bolygótól mért távolságok		
	km	bolygóugár	
<b>bolygósugár</b>	<b>24764</b>	<b>1,00</b>	
<b>akkréciós határ 2,0 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>38734</b>	<b>1,564</b>	
<i>89N3R = N42 = Galle</i>	<i>41900 - 43600</i>	<i>1,692 - 1,761</i>	<i>1700 km széles, diffúz, 40 – 70 %-a por</i>
<b>akkréciós határ 3,0 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>43612</b>	<b>1,761</b>	
Naiad	48230	1,948	
Thalassa	50020	2,019	
Despina	52530	2,121	
<i>89N2R = N53 =Leverrier</i>	<i>53200</i>	<i>2,148</i>	<i>keskeny gyűrű &lt; 15 km, 40 – 70 %-a por</i>
<i>89N5R = Lassel</i>	<i>57500</i>	<i>2,321</i>	<i>széles</i>
<i>89N4R = Arago</i>	<i>53200 - 59000</i>	<i>2,15 - 2,4</i>	<i>5800 km széles, kevés porral</i>
Galatea	61950	2,502	
<i>89N3</i>	<i>61950</i>	<i>2,502</i>	
<i>89N1R = N63 = Adams</i>	<i>62932</i>	<i>2,540</i>	<i>3 poros ív 33 fokon, &lt; 50 km széles</i>
<b>Roche határ 2,0 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>64556</b>	<b>2,607</b>	
Larissa	73550	2,970	
<b>Roche határ 3,0 g/cm<sup>3</sup>-hez</b>	<b>73899</b>	<b>2,984</b>	
Proteus	117640	4,75	
Triton	354800	14,33	
Nereida	5513000	222,62	