

II osa

Meie planeedisüsteem

5. Päikesesüsteemi üldised omadused

5.1 Päikesesüsteemi üldandmed

Praeguste teadmiste kohaselt sisaldab meie **päikesesüsteem** ühe tähe (Päikese), 8 planeeti, üle 65 planeedi kaaslast, 7 väikeplaneeti (asteroidi) mõõtmega üle 300 km, üle 7000 väiksema (ent hästiuuritud) asteroidi, suure koguse mõne kilomeetrise läbimõõduga komeete ja loendamatu hulga meteoroidide mõõtmega alla 100 m.

Tabelis on toodud planeetide mõned põhilised omadused. Võrdlusena on lisatud ka kaks kääbusplaneeti, komeet ja Päike. Iga planeedi kaugus Päikesest tuleneb Kepleri seadusest, kui vaid päikesesüsteemi absoluutne mastaap on Veenuse radarmõõtmisega fikseeritud. Planeedi (sideeriline) orbitaalperiood on kergelt mõõdetav, jälgides tema liikumist taevas (muidugi eeldusel, et Maa liikumine on korrektselt teada). Kaaslasti omavate planeetide massid on leitavad Newtoni seaduste abil kaaslaste liikumist mõõtes. Orbiitide mõõtmised on leitavad orbiitide nurkmõõtmetest.

Merkuuri ja Veenuse (ja Kuu ja Ceres) masse on veidi raskem määrata, kuna need planeedid ei oma looduslikke kaaslasti. Siiski on nende masse võimalik määrata, mõõtes täpselt nende mõju teistele planeetidele või tehiskaaslaste liikumisele. Päike sisaldab 99.9% päikesesüsteemi aine massist.

Objekt	Orbiidi suur pooltelg (aü)	Orbiidi periood (a)	Mass (M_{\odot})	Raadius (R_{\odot})	Kaaslaste Arv	Pöörlemise periood(p)	Keskm. tihedus (kg/m^3)
Merkuur	0.39	0.24	0.055	0.38	0	59	5400
Veenus	0.72	0.62	0.82	0.95	0	-243	5200
Maa	1.0	1.0	1.0	1.0	1	1.0	5500
Kuu	-	-	0.012	0.27	-	27.3	3300
Marss	1.5	1.9	0.11	0.53	2	1.0	3900
Ceres	2.8	4.7	0.00015	0.073	0	0.38	2700
Jupiter	5.2	11.9	318	11.2	16	0.41	1300
Saturn	9.5	29.4	95	9.5	18	0.44	700
Uraan	19.2	84	15	4.0	17	-0.72	1300
Neptuun	30.1	164	17	3.9	8	-0.67	1600
Pluuto	39.5	248	0.002	0.2	1	-6.4	2100
Hale-Bopp komeet	180	2400	0.000000001	0.004	-	0.47	100
Päike	-	-	332000	109	-	25.8	1400

Planeetide pöörlemise perioodid on määratud vaadeldes lihtsalt mingite planeedi pinnaelementide liikumist. Mõnede planeetide puhul on see keeruline, näiteks Veenuse pind on varjutatud paksu pilvekihi poolt või siis näiteks Jupiter ei oma üldse tahket pinda. Me kirjeldame neid juhtumeid aga hiljem.

Päikesele lähim planeet on Merkuur. Päikesest eemaldudes järgnevad Veenus, Maa, Marss, Jupiter, Saturn, Uraan, Neptuun. Kõik orbiidid on ellipsid, mille ühes fookuses (või väga lähedal) on Päike. Enamuse planeetide orbiitide ekstsentrilisused on väikesed. Eranditeks on Päikesele lähim planeet Merkuur. Seetõttu võib mõnikord üsna heas lähenduses kujutada orbiite ringidena.

Kõik planeedid tiirlevad ümber Päikese samas suunas – Maa põhjapooluse suunast vaadatuna kellaosuti vastassuunas – ja Maaga peaaegu samas tasandis (st ekliptikas). Merkuur langeb veidi sellest välja. Tema orbiidi tasand on ekliptikaga 7° nurga all. Võime kujutada päikesesüsteemi üsna lapikuna. Selle “paksus” risti tasandiga

on vähem kui 1/50 läbimõõdust. Planeetide orbiidid ei paikne ühtlaste vahemaade tagant: mida kaugemal on orbiidid, seda kaugemal nad ka üksteisest asuvad.

5.2 Maa-sarnased ja Jupiteri-sarnased planeedid, väikekehad

Joonisel on toodud kõikide planeetide ja Päikese võrdlus. Kuna Merkuuri, Veenuse ja Marsi füüsikalised ja keemilised omadused sarnanevad mõnevõrra Maa omadega, siis kutsutakse nelja sisemist planeeti **maa-sarnasteks**. Suured välisplaneedid – Jupiter, Saturn, Uraan ja Neptuun – on üksteisega samuti keemilise ja füüsikalise koostise poolest sarnased ja neid kutsutakse rühma suurima esindaja järgi **jupiteri-sarnasteks**. Nad erinevad üsnagi maa-sarnastest planeetidest.

Neli maa-sarnast planeeti on väikesed, kivimilise koostise ja tahke pinnaga. Mida lähemal Päikesele, seda raskemad elemendid domineerivad nende koostises. Ka atmosfäärid on üsna mitmekesised. Siiski, vaatamata nendele erinevustele on erinevused jupiteri-sarnastest planeetidest veel tohutumad. Tabelis on nende lühivõrdlus.

Maa-sarnased planeedid	Jupiteri-sarnased planeedid
Päikesele lähedal	Päikesest kaugel
tihedalt paiknevad orbiidid	hõredalt paiknevad orbiidid
väikesed massid	suured massid
väikesed raadiused	suured raadiused
valdavalt kivimilised	valdavalt gaasilised
tahke pind	mittetahke pind
suur tihedus	väike tihedus
aeglane pöörlemine	kiire pöörlemine
nõrk magnetväli	tugev magnetväli
vähe kaaslaseid	palju kaaslaseid
rõngad puuduvad	palju rõngaid

Kõrvuti üheksa tuntud planeediga liigub ümber Päikese ka loendamatu kogus kivi- ja jääkamakaid, mitmeid neist tugevalt ekstsentrilistel orbiitidel. Seda päikesesüsteemi komponenti tuntakse *planeetidevahelise aine* nime all – jäänused mõõtmatega peaaegu tuhandest kilomeetrist väikeste kivikesteni ja sealt edasi kuni planeetidevahelise tolmu terakesteni. Tolm tekib kui suuremad kehad põrkuvad ja purunevad väiksemateks tükkideks. Nende kogumass on palju väiksem kui Kuu mass, nii et need objektid ei ole tänapäeval planeetide ja kaaslaste kinemaatikas ja dünaamikas olulised. Ent neil on oma oluline roll siiski, sest nad kajastavad päikesesüsteemi koostist peale selle sünni. Paljude nende kehade aine ei ole peale tekkimist praktiliselt muutunud.

5.3 Päikesesüsteemi uurimine kosmosest

Alates 1960-ndatest on mitukümmend mehitamata kosmoselendu külasthanud päikesesüsteemi teisi planeete. Kõiki planeete, välja arvatud Pluuto, on külastatud üsna väikeste vahemaadeni.

5.3.1 Mariner 10 möödumine Merkuurist

1974. aastal möödus *Mariner 10* (USA) Merkuuri pinnast 10000 km kauguselt ja edastas Maale kvaliteetsed kujutised planeedist. Need fotod, millel oli näha detaile vaid 150 m mõõtmega, suurendasid tohutult meie teadmisi Merkuurist. Esmakordselt nägime

planeeti, mis osutus kaetuks kraatritega ja mitmes osas sarnanes Kuuga. Kokku saadeti Maale üle 4500 foto, mis kattis umbes 45 protsenti planeedi pinnast. Ülejäänud 55 protsenti on seniajani uurimata.

5.3.2 Veenuse uurimine

Veenust on alates 1970-ndatest aastatest külastanud umbes 20 erinevat tehiskaaslast, palju rohkem kui ükskõik millist teist planeeti. Vene programm uuris Veenuse atmosfääri ja pinda, ameerika programm teostas planeedi radarkaardistamist.

Vene *Venera* projekt (numbrid 4 kuni 12) uurisid aastatel 1967 – 1978 atmosfääri. Esimesed *Venerad* purunesid atmosfääris suure rõhu tõttu enne pinnale jõudmist, nii et alles *Venera 7* sooritas planeedile pehme maandumise ja töötas seal 23 minutit, edastades andmeid atmosfääri rõhu ja temperatuuri kohta. Hiljem on veel mitmed *Venerad* maandunud Veenusele ja edastanud fotosid pinnast ja analüüsinud atmosfääri ja pinnast. Ükski satelliit ei ole vastu pidanud kuumale ja tihedale atmosfääri tõttu üle tunni. Hiljem, 1983. aastal teostasid *Venera 15* ja *16* radarkaardistamist.

USA *Pioneer Venus* paigutas 1978. aastal orbitaaljaama 150 km kõrgusele Veenuse pinnast ja saatis erinevat aparatuuri atmosfääri. Pinnale langedes edastasid need andmeid atmosfääri tiheduse, temperatuuri ja keemilise koostise muutuste kohta. Teostati ka radarkaardistamist.

Viimane USA projekt oli *Magellan* 1990. a., mis teostas seni parima kaardistamise. Esimese kaardistamise 243-päevase tsükli lõpetas ta mais 1991. *Magellani* lahutusvõime oli 10 korda parem, kui varem saadud kujutistel, võidi eristada 120 m läbimõõduga objekte ja eristada 50 m vertikaalseid kõrguseid. Kaeti kogu Veenuse pind. Töö tulemusena oli võimalus mitmeid pinna kujunemise teooriaid hüljata või kinnitada.

5.3.3 Marsi uurimine

Marsi on püütud väga palju uurida nii Vene kui USA kosmoseagentuuride poolt alates 1960-ndatest. Vene projekte on paraku tabanud nii tehnilised probleemid kui ka vast lihtsalt halb õnn, nii et peaaegu kõik andmed pärinevad USA projektidest.

Esimesena jõudis Marsile *Mariner 4* (juuli 1965). Esimese täieliku kaardistamise lahutusega 1 km tegi *Mariner 9* (1971). *Mariner 9* kaartidel oli näha ulatuslikud tasandikud, vulkaanid, kuivanud voolusängid ja kanjonid. See avas tee uuele etapile – tegelikule maandumisele planeedi pinnal. Kaks USA satelliiti, *Viking 1* ja *2* maandusid Marsil 1976. a. Mõlemad satelliidid koosnesid kahest osast. Üks osa jäi ümber planeedi tiirlema ja kaardistas planeedi umbes 100 m lahutusega, teine osa maandus pehmelt Marsile ja sooritas terve rea huvitavaid geoloogilisi ja bioloogilisi eksperimente. Igasuguste kriteeriumite järgi oli *Viking* projekt tõeline õnnestumine. *Viking 2* töötas aprillini 1980, *Viking 1* novembrini 1982.

Augustis 1993. a. plahvatas teadmata põhjustel vahetult enne maandumist esimene USA satelliit peale *Vikingit* – *Mars Observer*, mis oli planeeritud saatma planeedi pinnast täpseid kujutisi ja andmeid planeedi atmosfääri kohta. *Mars Observeri* asendaja, nimetusena *Mars Global Surveyor* startis Maalt 1996. a. ja jõudis Marsini 1997. a. lõpus. See satelliit tiirleb praegu ümber Marsi, skaneerib Marsi pinda kaameratega ja teiste aparatuuridega ning kaardistab teda.

Mars Global Surveyorile järgnes *Mars Pathfinder*, mis jõudis Marsini 1997. a. juuni lõpus. Juuli algul eraldus temast väiksem aparaat *Sojourner*, mis maandus Marsi

pinnale. Sojourner töötas ligi kolm kuud, liikus kiirusega mõni meeter päevas ja sooritas geoloogilisi ja atmosfääri mõõtmisi. Üllatavalt olid mitmed kivimid koostiselt üsna sarnased maistele. Nad sisaldasid oodatust rohkem räni, mis viitas nende vulkaanilisele päritolule ehkki Marsil ei ole näha viiteid tektoonilisele aktiivsusele või teistele geoloogilise aktiivsuse vormidele. *Pathfinder*i reisiga on seotud ka olulised debadid, eriti tema *Sojourneriga*. See viimane ei olnud enne Maalt lahkumist steriliseeritud. Teised Marsil maandunud satelliidid (*Vikingid*) aga olid, et mitte viia Marsile mingeid maiseid baktereid. Kui nüüd on võimalus, et Marsil on isegi vaid fossiilne elu, siis ei ole loomulikult hea mõte seda saastada maiste vormidega. Järgmine lend Marsile toimus 1999. a. lõpus, mil *Mars Surveyor Lander* jõudis Marsini, ent kadus siis signaale andmata.

5.3.4 Reisid teiste planeetide juurde

Kaks paari 1970-ndate USA tehiskaaslast – *Pioneer* ja *Voyager* – muutsid kardinaalselt meie pilti Jupiteri-sarnaste planeetide maailmast. *Pioneer 10* ja *11* startisid 1972/73 ja jõudsid Jupiterini vastavalt 1973 ja 1974. Nad tegid palju fotosid ja olulisi mõõtmisi. Nende orbitaaltrajektoorid võimaldasid neil vaadelda ka Jupiteri polaarpiirkonda paremini, kui ühelgi järgnevatel reisivatel. Lisaks aitasid nad kaasa järgmise projekti *Voyager 1* ja *2* õnnestumisele. Võiks öelda, et *Pioneerid* näitasid, et on võimalik edukalt teostada kaugel lendu ilma asteroididega kohtumata. Nad kohtusid ja elasid üle ka Jupiteri ulatusliku kiirgusvöö. Lisaks, *Pioneer 11* kasutas Jupiteri gravitatsiooni et liikuda mööda sama trajektoori Saturnini, mida mööda kavandati *Voyager 2* visiit Saturni rõngaste juurde.

Voyager 1 ja *2* startisid 1977 ja jõudsid Jupiterini 1979. a. ja Saturnini 1980/81. *Voyager 2* jõudis Uraanini (1986) ja Neptuunini (1989). Satelliitidel paiknes keeruline aparatuur magnetväljade, raadiokiirguse, optilise kiirguse ja infrapunase kiirguse uurimiseks. Nii *Pioneerid* kui ka *Voyagerid* jätkavad lendu päikesesüsteemi ääremadele ja signaalida saatmist (kaugeimad, *Voyager* ja *Pioneer 10* asusid 1997. a. lõpus Päikesest umbes 70 aü kaugusel).

Hiliseim satelliit, *Galileo* startis 1989. aastal. Teepeal möödus ta kahest asteroidist küllalt lähedalt (1991/93) ning 1995. a. jõudis Jupiterini. *Galileo* koosnes planeedi ümber tiirlema jäävast osast ja atmosfääri sondist. Sond laskus Jupiteri atmosfääri ja teostas füüsikalisi ja keemilisi mõõtmisi. *Galileo* orbitaalosa trajektoor oli üsna keeruline, nii et ta sai külastada ka mitmeid Jupiteri kaaslasteid.

Peale starti selgus, et *Galileo* peaantenn ei avane ja seetõttu tuli andmeid saata väikese sekundaar-antenni kaudu, mis aga tugevalt vähendas andmete edastamise kiirust. Ent töötati välja andmete kokkusurumise meetodid, mis koos täiustunud töötlusmeetoditega võimaldas kõik kavandatud tööd teostada. Projekti edu oli nii suur, et otsustati seda pikendada veel kahe aasta võrra ja uurida täiendavalt Jupiteri sisemisi kaaslasteid Iod ja Europat.

Oktoobris 1997 saadeti NASA poolt välja Saturnile *Cassini* satelliit. Saturnini jõuab ta loodetavasti aastal 2004 ja eraldab endast väikese sondi Saturni suurima kaaslaste Titani atmosfääri uurimiseks. Ta jääb tööle Saturni kaaslaste lähedale neljaks aastaks sarnaselt *Galileole* Jupiteri juures.

Komeetide uurimise osas on olulisimad *Vega* (NL) ja *Giotto* (EU) projektid, mis 1986. a. möödusid üsna lähedalt Halley komeedist.

6. Maa ja maa-sarnased planeedid

6.1 Maa üldomadused, siseehitus

Tabelis on toodud olulisemad andmed Maa ja tema orbiidi kohta. Mitmel erineval viisil teostatud mõõtmised annavad Maa siseehitusest järgneva üldpildi. Maa sisemuses ümbritseb paks **vahevöö** väiksemat kaheosalist **tuuma**. Pinnal on meil suhteliselt õhuke **koor**, mis koosneb tahketest pinnast ning **hüdrosfäärist**, mis sisaldab ookeanide vee ja katab umbes 70 protsenti kogupindalast. Atmosfäär paikneb vahetult pinna kohal. Palju suurematel kõrgustel asub Maa magnetvälja poolt kinnihoitud laetud osakeste tsoon, mida nimetatakse **magnetosfääriks**.

Orbiidi suur pooltelg	1.00 aü	Ekvatoriaalraadius	6378 km
Orbiidi ekstsentrilisus	0.017	Keskmine tihedus	5520 kg/m ³
Periheel	0.98 aü	Pindgravitatsioon	9.80 m/s ²
Afeel	1.02 aü	Paakiirus	11.2 km/s
Keskmine orbitaalkiirus	29.79 km/s	Telje kalle	23.45°
Sideeriline orbitaal- periood	1.000038 troopilist aastat	Sideeriline pöörlemise periood	0.9973 solarpäeva
Orbiidi kalle	0	Keskmine pinnatemp.	290 K
Mass	5.97·10 ²⁴ kg	Kaaslaste arv	1

Maa siseehitus on tehtud kindlaks maavärinaid uurides. Maavärinad panevad kogu planeedi veidi võnkuma. Need võnkumised on **seismilisteks laineteks** ja nad levivad maavärina kohast eemale. Seda informatsiooni saab seismograafe kasutades registreerida ja salvestada. Maa sisestruktuuri uurimise seisukohast on olulised kahte liiki lained. *P-lained* on *rõhu* lained (nagu häälelained õhus), mis suruvad kokku ja hõrendavad perioodiliselt keskkonda, milles nad levivad. Seismilised P-lained levivad tavaliselt kiirusega 5–6 km/s ja levivad nii vedelas kui tahkes keskkonnas. *S-lained* tekivad ristisuunalist liikumist nagu nt kitarril keeles lained. S-lained levivad kiirusega 3–4 km/s. Nad ei saa levida vedelikes, kus nad neelduvad. Nii S- kui P-lainete levimise kiirus sõltub levimise keskkonna tihedusest. Seega, kui me mõeldame aega, mis kulub lainete levikuks maavärina piirkonnast registreerimise punkti, siis me saame määrata sisemuse aine tihedust.

Maavärinate lainete levik koos pinnakivimite omadustega on võimaldanud konstrueerida Maa sisemuse matemaatilise mudeli. Selle kohaselt on vahevöö umbes 3000 km paksune, koore keskmine paksus on vaid 15 km – veidi õhem (8 km) ookeanide all ja paksem (29–50 km) kontinentide all. Koore keskmine tihedus on 3000 kg/m³. Tihedus ja temperatuur kasvavad sügavuses: pinnast keskele minnes suureneb tihedus 3000 kg/m³–lt kuni 12000 kg/m³-ni tsentris, temperatuur kasvab 300 K kuni 5000 K-ni. Vahevöö omab põhiliselt tihedust 5000 kg/m³.

Järsk tiheduste erinevus tuuma ja vahevöö vahel tuleneb koostise erinevusest. Vahevöö koosneb *kivimilisest* ainest, nagu räni ja hapnik, tuum on *metallilistest* elementidest. Tuuma raadius on umbes 3500 km ja ta koosneb tahkest **sisetuumast**,

raadiusega 1300 km ja vedelast **välistuumast**. Sisemise ja välimise tuuma piiril järsku tiheduse hüpet ei ole – vaid aine olek muutub vedelast tahkeks. Mudel osutab, et tuum on raua, nikli ja mõnede kergemate elementide nt väävel segu.

Vaatamata asjaolule, et mingi puurimine ei ole jõudnud veel vahevöö aineni, ei ole me täielikus teadmatuses sellest. Vulkaanide pursetel murrab koorest läbi ja voolab välja kuum laava, mis annab võimaluse piiluda Maa sisemusse. Laava keemiline koostis ja füüsikaline olek on üldiselt kooskõlas mudelite ennustustega.

Maa ei ole seega homogeenne kivikera, vaid omab kihelist struktuuri, milles väikseima tihedusega koor asub pinnal, keskmise tihedusega aine vahevöös ja suurima tihedusega aine keskel tuumas. Selline tiheduse ja koostise muutumine on tuntud **kihistumise** nime all. Kihistumise põhjuseks on, et minevikus oli enamasti *sulanud* olekus. Tulemusena on suurema tihedusega aine settinud tuuma ja väiksema tihedusega aine tõusnud pinnale. Planeedi kuumutamise põhjusi on kaks.

Esiteks, planeetide formeerumine, mis toimus ümbritseva aine endasse haaramise teel, tekitas üsna palju sooja – nii palju, et Maa võis olla osaliselt sulanud selleks ajaks, kui ta saavutas oma praeguse suuruse. Teine oluline kuumutamise protsess on **radioaktiivsus**. Maa sisaldas algul hulgaliselt radioaktiivseid aatomeid ning oli ka piisavalt aega. Kivi on nii halb soojusjuht, et energial võtab kaua aega pinnani jõudmine ja kosmosesse kadumine, seega kogunes soojus sisemusse. Arvutuste kohaselt oli alguses Maas piisavalt radioaktiivseid aatomeid, et kogu planeet võis muutuda sulaks ja jääda selliseks umbes miljardi aasta vältel.

6.2 Maa atmosfäär

Maa atmosfäär on gaaside segu, millest kõige enam on lämmastikku (78 % ruumala järgi), hapnikku (21 %), veeauru (0.1–3%), argooni (0.9 %) ja süsihappegaasi (0.03 %). Võrreldes Maa üldmõõtmega ei ole atmosfääri ulatus suur. Seda atmosfääri osa, mis asub allpool 12 km, nimetatakse **troposfääriks**. Selle kohal, ulatudes 40 kuni 50 km kõrguseni asub **stratosfäär**. Edasi, 50-80 km vahel asub **mesosfäär**. Kõrgemal, peale 80 km on **ionosfäär**, kus aatomeid hoitakse osaliselt ioniseerituna Päikese ultraviolettkiirguse poolt.

Suur osa Päikese kiirgusest läbib atmosfääri ja jõuab maapinnani, kus see neeldub peaaegu täielikult. Tulemusena soojeneb päeva jooksul pinnas märgatavalt. Soojenedes kiirgab maapind aga neelatud energiast tagasi. See tagasikiiratud energia omab tavalist musta keha kiirgusspektrit. Pinnatemperatuuri kasvuga suureneb kiiratud energia kiiresti vastavalt Stefani seadusele. Teatud temperatuuri juures kiirgab maapind täpselt sama palju energiat tagasi kuipalju ta sai ning on tekkinud tasakaal. Igasuguste muude mõjude puudumisel oleks see tasakaaluline seisund keskmise temperatuuri 250 K (-23°C) juures.

Ent Maa atmosfäär peab seda tagasikiiratud infrapunast kiirgust osaliselt kinni. Peamine põhjus on veeauru ja süsihappegaasi olemasolu atmosfääris, mis neelavad infrapunast kiirgust väga hästi. Seetõttu pääseb vaid osa infrapunkkiirgusest tagasi ilmaruumi. Atmosfääris neelduv kiirgus aga tingib atmosfääri temperatuuri kasvu ja ka pinna temperatuuri kasvu 290 K-ni. Selline päikesekiirguse osaline kinnihoidmine atmosfääris on tuntud **kasvuhoone efekti** nime all.

Maa atmosfääri päritolu ja areng on olnud üsna pikk ja keeruline protsess. Kui Maa formeerus, siis tema võimalik *algne atmosfäär* koosnes noore päikesesüsteemi levinuimatest gaasidest. Need olid kerged gaasid, nagu vesinik, heelium. Ent peaaegu

kõik need kerged aatomid lahkusid kosmosesse esimese poole miljardi aasta jooksul peale Maa kujunemist.

Seejärel kujunes Maal välja sekundaarne atmosfäär, mis koosnes planeedi sisemusest vulkaanilise aktiivsuse tagajärjel vabanenud gaasidest (veeaur, metaan, CO₂, SO₂ ja lämmastiku ühendeid (sh ammoniaaki)). Päikese ultravioletkiirgus lagundas kergemad vesinikurikkad gaasid ja võimaldas vesinikul lahkuda, vabastas ka suure koguse lämmastikku. Kui Maa temperatuur langes, siis veeaur kondenseerus ja kujunesid ookeanid. Suur osa CO₂ ja SO₂ lahustus ookeanis ja ühines kivimitega. Aeglaselt kujunes üha lämmastikurikkam atmosfäär. Elu tekkides ookeanis umbes 3.5 miljardit aastat tagasi hakkasid organismid tasapisi tootma hapnikku. Asjaolu, et hapnik on atmosfääri põhikomponent, on otseselt elu arenguga seotud.

6.3 Maa magnetosfäär

Maa magnetosfäär on planeedi ümber asuv piirkond, mida mõjutab planeedi magnetväli. Magnetvälja jõujooned lähevad lõunast põhja. Põhja ja lõuna magnetpoolused, kus magnetvälja jooned lõikavad maapinda on ligikaudu ka piki pöörlemise telge.

Maa magnetosfäär sisaldab kahte piirkonda, kuhu on kontsentreerunud suurte energiatega laetud osakesed. Neid piirkondi nimetatakse **van Alleni vöödeks**. Me nimetame neid vöödeks, kuna nad on tugevamad ekvaatori kohal ja ümbritsevad Maad täielikult. Osakesed, mis moodustavad van Alleni vööd, pärinevad päikesetuulest. Magnetväli hoiab päikesetuule laetud osakesi (prootoneid ja elektrone) kinni ja koondab neid van Alleni vöödesse. Välimine vöö sisaldab põhiliselt elektrone, sisemine raskemaid prootoneid. Me ei jääks ellu, kui suure energiaga osakesed ei koonduks van Alleni vöödesse. Need suurekiiruselised laetud osakesed, põrkudes inimkehaga, vabastavad suure koguse energiat, mis kahjustab elavat organismi.

Van Alleni vöö osakesed lahkuvad tihti magnetosfäärist põhja ja lõuna magnetpooluste lähedal, kus jõujooned lõikuvad atmosfääriga. Nende põrked õhu molekulidega tekitavad haarava valgusemängu, mida nimetatakse **virmalisteks**. Värvide mäng tekib, kuna laetud osakesed ergastavad molekule, mis veidi aja pärast lähevad taas põhiseisundisse kiirates seejuures footoni. Tekivad paljud eri värvid, kuna iga tüüpi molekul omab mitmeid võimalusi põhiseisundisse naasmiseks.

Maa magnetväli ei ole sümmeetriline. Päikesepoolsele Maa küljel on magnetosfäär kokkusurutud päikesetuule osakeste voo poolt. Vastasküljel ulatuvad magnetvälja jõujooned aga väga kaugele, isegi lausa Kuu orbiidini.

Nii nagu dünamid mitmetes tööstuslikes masinates nii tekib ka Maa magnetism pöörleva elektrit juhtiva vedela metalltuumaga poolt. Teooriat, mis seletab planeedi magnetvälja niimoodi, nimetatakse **dünamo-teooriaks**. Vajalikud on nii kiire pöörlemine kui ka juhtiv vedel tuum.

6.4 Looded

Looded on Kuu ja Päikese gravitatsiooniline mõju Maale. Vaatame esmalt lihtsuse mõttes vaid Maa ja Kuu vastasmõju. Kuna gravitatsioonijõud sõltuvad kahe objekti vahelisest kaugusest, siis on Kuu gravitatsiooniline mõju tugevam sellele Maa küljele, mis asub Kuule lähemal kui vastasküljele. See erinevus gravitatsiooni jõududes on vaid umbes 3 % ent tekitab märgatava loodelise kühmu. Maa muutub veidi väljavenitatuks, kusjuures pikem telg on suunatud Kuu poole.

Suurimat deformatsiooni tunneb ookean, sest vedelikku on kergem liigutada (maismaa deformatsioon on umbes 100 korda väiksem). Ka Maa vastaspunktis Kuu suhtes tekib tõus. Seal on Kuu tõmme nõrgem ja vesi jääb Maa keskpunkti tõmbega võrreldes veidi maha. Seega, tõusud tekivad antud maakohas *kaks* korda ööpäevas.

Nii Kuu kui Päike tekitavad Maal loodelisi jõudusid. Ehkki Päike asub Maast 375 korda kaugemal kui Kuu, on ta tohtu palju massiivsem (umbes 27 miljonit korda) nii et tema tekitatud loodelised jõud on umbes pool Kuu tekitatust. Seetõttu on tegelikult kaks loodelist kühmu – üks Kuu suunaline ja teine Päikese suunaline ning nende vahekord muutub kuu ja aasta jooksul. Kui Maa, Kuu ja Päike asuvad samal joonel, siis looded tugevdavad teineteist, nii et suurimad tõusud ja mõõnad esinevad noorkuu ja täiskuu ajal.

Maa pöörleb ümber oma telje tähtede suhtes 23 tunni ja 56 minutiga – 1 sideeriline päev. Ent näiteks teatud tüüpi korallide uurimised (päevased ja aastased kasvumärgid) osutavad, et Maa pöörlemine pidevalt aeglustub. Pool miljardit aastat tagasi oli ööpäeva pikkus umbes 22 tundi ja aasta sisaldas 397 päeva.

Maa pöörlemise aeglustumise peamine põhjus on Kuu loodelised jõud. Tegelikult ei ole deformatsioon suunatud täpselt Maa – Kuu joont pidi. Hõõrdumise tõttu pinnases ja ookeanides näib Maa pöörlemine nagu tõusu-mõõna endaga kaasa vedavat ning selle kühm on Maa – Kuu joone suhtes veidi nihutatud Maa pöörlemise suunas. Kuu gravitatsiooniline tõmme püüab seda aga takistada, st aeglustab Maa pöörlemist..

6.5 Kuu ja Merkuur

6.5.1 Üldised omadused

Merkuur paikneb Maalt vaadatuna taevas alati Päikese lähedal: ta ei eemaldu Päikesest kunagi rohkem kui 28°. Seega on planeet nähtav vaid vahetult enne koitu või peale päikeseloojangut. Kuna Maa pöörleb kiirusega 15 kraadi tunnis, siis on Merkuur soodsaimatel juhtudel näha mingil antud ööl ülimalt kaks tundi. Parimat vaatlusaega siseplaneetide vaatlemiseks nimetatakse planeedi **elongatsiooniks** – siis kui on planeedi suurim eemalduvus Päikesest.

Tabelis on toodud Kuu ja Merkuuri olulisemad füüsikalised omadused.

Kuu

orbiidi suur pooltelg	384000 km	mass	0.012 Maa massi
orbiidi ekstsentrilisus	0.055	ekvatoriaalraadius	1738 km
perigee (vähim kaugus Maast)	363000 km	keskmise tihedus	3340 kg/m ³
apogee (suurim kaugus Maast)	406000 km	pindgravitatsioon	1.62 m/s ²
keskmise orbitaalkiirus	1.02 km/s	paokiirus	2.38 km/s
sideeriline orbitaalperiood	27.3 päeva	sideeriline pöörlemisperiood	27.3 päeva
sünoodiline orbitaalperiood	29.5 päeva	telje kalle	6.7°
orbiidi kalle ekliptika suhtes	5.2°	magnetväli	pole leitud
suurim nurkläbimõõt (Maalt)	32.9′	pinna temperatuur	100 – 400 K

Merkuur

orbiidi suur pooltelg	0.39 aü	ekvatoriaal raadius	2440 km
orbiidi ekstsentrilisus	0.206	keskmise tihedus	5430 kg/m ³
periheel	0.31 aü	pindgravitatsioon	3.70 m/s ²

Afeel	0.47 aü	paokiirus	4.2 km/s
keskmise orbitaalkiirus	47.9 km/s	sideeriline pöör. periood	58.6 solarpäeva
sideeriline orbitaalperiood	88.0 solarpäeva	telje kalle	0
sünoodiline orb. periood	115.9 solarpäeva	keskmise pinnatemperatuur	100 – 700 K
orbiidi kalle ekliptika suhtes	7°	kaaslaste arv	0
Suurim nurkläbimõõt Maalt	13''	mass	0.055 Maa massi

Kuu keskmine tihedus on oluliselt väiksem kui Maa keskmine tihedus, mistõttu on selge, et Kuu sisaldab vähem raskeid elemente. Kuu tihedus vastab Maa vahevöö kivimite tihedusele. Raskusjõud Kuu pinnal on ligikaudu 1/5 Maa raskusjõust.

6.5.2 Atmosfäärid

Kuul ja Merkuuril puudub atmosfäär. Atmosfääri puudumine on nende kehade nõrkade gravitatsiooniväljade ja temperatuuride otsene järelkus. Massiivsematel kehal on suuremad võimalused hoida oma atmosfääri kinni, sest mida massiivsem on keha, seda suuremat kiirust peavad omama aatomid ja molekulid lahkumiseks. Paokiirus Kuul on 2.4 km/s ja keskmise Kuu temperatuuri juures omavad ka rasked gaasiosakesed kiiruseid üle paokiiruse. Atmosfäär ei saa seega püsida. Merkuuri pinnal on paokiirus 4.2 km/s. Arvestades aga Merkuuri pinnatemperatuuri ei saa ka seal atmosfäär püsida.

Atmosfääri puudumine tingib suured temperatuuri kõikumised Kuu ning Merkuuri valgustatud ja pimedatel pooltel – valgustatud poolel on Kuu puhul pinnatemperatuur 400 K (üle vee keemistemperatuuri), pimedal poolel 125 K. Suur kõikumine on tingitud ka sellest, et Kuu ööpäev on väga pikk. Merkuuri päevane temperatuur on veel kõrgem – isegi kuni 700 K, öösel seevastu vaid 100 K. See temperatuuride erinevus on päikesesüsteemis suurim.

6.5.3 Pinna struktuur

Galilei hakkas oma Kuu vaatlustes 1609. a. tumedaid alasid nimetama “meredeks”. Need nimed on säilinud, olgugi et veega ei ole siin mingit pistmist. Need on lihtsalt minevikus laavavooludega täidetud madalamad alad. Laavavood pidid toimuma peale Kuu pinna formeerumist ja peale mõnede kraatrite teket. Enamus tumedaid alasid paikneb Kuu Maa-poolsel küljel. Madalikud on siledamad ümbritsevast kraatritega täispikitud pinnast. Nad on umbes 3 km ümbritsevast pinnast madalamad. Hea näide on suurim *Mare Imbrium* (Vihmade Meri), läbimõõduga ligi 1200 km. Tehiskaaslaste trajektooride uurimine osutab, et madalikud on massi-kontsentratsioonid: *Mare Imbriumi* kivimi tihedus on 3700 kg/m³, so märgatavalt üle ümbritsevate alade tiheduse (2900 kg/m³).

Kraatrid on pea kõikjal Kuu pinnal. Kõige paremini on kraatrid näha *terminaatori* lähedal (joon, mis eraldab pinna valgustatud ja pimedat osa). Enamik kraatreid on tingitud põrgetest. Kõik Kuu olulisemad pinnaelemendid omavad nimesid, näiteks Pilvede Meri, Alpid jne.

Merkuurist on parima ülevaate tehiskaaslaste pildid (Mariner 10) ja nii me teame, et tema pind sarnaneb üsnagi Kuu pinnaga – kraatritest ülekülvatud pind. Siiski, erinevalt Kuust on vähe ulatuslike laavavooludega täidetud alasid.

6.5.4 Pöörlemine

Kuu pöörlemise periood on täpselt võrdne tema tiirlemise perioodiga Maa ümber – 27.3 päeva – nii et Kuu on kogu aeg pöördunud Maa poole sama küljega. Seda tingimust, kus

ühe keha pöörlemise aeg on täpselt võrdne tema tiirlemise ajaga mingi teise keha ümber, nimetatakse **sünkroonseks orbiidiks**. Asjaolu, et Kuu tiirleb ümber Maa sünkroonsel orbiidil, ei ole juhus. See on nende kahe keha vahelise gravitatsioonilise tõmbe tulemus.

Nii nagu Kuu tekitab Maal tõususid ja mõõnasid, nii tekitab sedasama ka Maa Kuul. Maa on aga ligi 20 korda massiivsem kui Kuu ja seega on Maa mõju ka vastavalt suurem. Peatükis 7 nägime, et Kuu loodelised jõud tingivad Maa pöörlemise aeglustumise. Maa puhul võtab aga orbiidi sünkroonseks muutumine veel palju (vast isegi sadu) miljardeid aastaid aega. Kuu puhul on see protsess aga juba lõppenud. Enamuse planeetide kaaslastel tiirlevad sünkroonsetel orbiitidel.

Merkuuri pöörlemise periood on 59 päeva, mis on täpselt kaks kolmandikku planeedi orbitaalperioodist. Kuna see tähendab täpselt kolme pöört kahe tiiru jooksul, siis öeldakse, et see on 3:2 resonants. (Kuu on seega 1:1 resonantsis.) Merkuuri 3:2 resonants ei ole juhus. Ka Merkuuri puhul on põhjuseks loodelised jõud, ent veidi komplitseeritumalt – siin on mõju avaldanud ka orbiidi suur ekstsentrilisus. Päikesesüsteemis on jälgitavad veel mitmed erinevad resonantsid planeetide kaaslaste, rõngaste, asteroidide jm kehade puhul.

Merkuuri pöörlemise telg on peaaegu risti orbiidi tasandiga. Seetõttu on pooluste lähedal Päike alati üsna madalal horisondi kohal ja seal ei tõuse temperatuur kunagi üle 125 K. Seega, vaatamata kõrgele keskmisele päevasele pinnatemperatuurile võib pooluste juures olla säilinud isegi jääd.

6.5.5 Pinna struktuur

Kuu kraatrid on peaaegu kõik pörkekraatrid. Kui *Apollo* astronautid külastasid Kuud siis tõid nad kaasa ka kivimite proove erinevatest Kuu paikadest. Radioaktiivse dateeringu meetodeid kasutades oli seega võimalus määrata Kuu kivimite vanuseid. Loendades erinevates piirkondades kraatrite tihedusi ja teades vanust oli võimalik seega arvutada kraatrite tekkimise sagedust minevikus. Kuu kõrgustikud on tüüpiliselt üle 4 miljardi aasta vanad, merede vanused on 3.2 kuni 3.9 miljardit aastat. Kraatrite tihedus ei ole siiski ainult aja funktsioon – tuleb arvestada ka seda, millal antud piirkond tahkestus (enne tahkestumist tekkinud kraatrid kaovad kiirelt).

Kuu kivimid on eelkõige vulkaanilise päritoluga laava jahtumise tulemus. Laava jahtumise kiirus määrab kivimi teralisuse astme – mida kiirem jahtumine, seda peenemad terad. Seetõttu on madalike tume kivim jahtunud kiiremini kui heledad kivimid. Tume kivim on ka tihedam kui ümbritsevate alade hele kivim. Arvatavasti on tume kivim on tekkinud tihedamast ainekust sügavamal (vahevõõ aine), oli kuumem (1500 K) ja on jahtunud kiiremini. Hele kivim on tekkinud aeglasel jahtumisel suhteliselt madalamatel temperatuuridel.

Ka Merkuuril on peaaegu kõik kraatrid meteoriitide põrgetest tekkinud. Ent Merkuuri kraatrid ei paikne nii tihedalt ja kraatrite vahel on ulatuslikud kraatritevahelised tasandikud. Üks võimalik seletus väiksemast kraatrite tihedusest on, et vanemad kraatrid on täidetud vulkaanilise aktiivsuse poolt, umbes nagu Kuu meredki on tekkinud. Vulkaaniline minevik pidi aga olema erinev Kuu omast, sest selliseid tumedaid “meresid” nagu Kuul, Merkuuril ei ole.

6.5.6 Siseehitus

Üldiselt on Kuu palju vähemaktiivne võrreldes Maaga. Seni tugevaimad kuuvärinad on nii nõrgad, et inimene neid peaaegu ei tunnekski. See osutab, et praegu on Kuu külm ja tahkestunud kuni umbes 1000 km sügavuseni, mis vastab koore ja vahevöö ulatusele. Vahevöö on vaid veidi tihedam kui koor ja peaaegu sama koostisega. Veel ei ole teada, kas Kuu omab selget tuuma. Kui aga tuum on olemas, siis on ta tsentrist umbes 200 km kaugusele, temperatuur võib seal olla umbes 1500 K. Tuum ei ole vedel, sest Kuu magnetväli on väga nõrk. Samuti ei ole tuum ka metallist vaid ainult metallidega rikastatud. Tuuma ümber võib olla umbes 500 km paksune sisemine vahevöö pooltahketest kivimitest, mis sarnanevad Maa astenosfääri kivimitega. Selle peal on 900–950 km paksune välimine vahevöö tahketest kivimitest, mida ümbritseb 60–150 km paksune koor.

Merkuuri magnetväli on 1/100 Maa magnetväljast. Ent isegi nii väikese välja avastamine *Mariner 10* poolt tuli üllatusena. Ilmselt ju ei pöörle Merkuur kiirelt. Geoloogilise aktiivsuse puudumine viitab, et väliskihid on jahtunud üsna olulise sügavuseni nagu Kuulgi. Seetõttu peab praegune magnetväli olema jäänus kunagisest magnetväljast, mil tuum veel ei olnud tahkestunud. Merkuuri magnetväli ja suur keskmine tihedus viitavad, et planeet on kihistunud. Mudelite järgi domineerib sisemuses suur, raske ja rauarikas tuum raadiusega umbes 1800 km. Kas see tuum on vedel või tahke ei ole veel selge. Väiksema tihedusega, kuusarnase vahevöö paksus on 500–600 km. Tuuma ruumala osakaal on Merkuuril suurem kui ühelgi teisel planeedil.

6.5.7 Kuu päritolu

Kuu tekkimise kohta ei ole ühest arvamust. On pakutud mitut teooriat. Kõigepealt, kas Kuu ja Maa on tekkinud samas kohas?

Isotoopide suhtarvudes Kuu sarnaneb Maaga, mis viitab, et Kuu ja Maa on tekkinud samas kohas. Teisalt aga on ka keemilise koostise erinevusi – tervikuna on Kuu rauasisaldus Maa omast tugevalt väiksem, samuti ei sisalda Kuu mineraalid vett. Need erinevused viitavad, et Kuu on tekkinud kusagil mujal. Kokkuvõttes, Kuu koostis on Maaga sarnane, ent samas ka erinev.

Kirjeldame kõige tõepärasemaks peetavat nn Suure pörke teooriat. Selle järgi pörkas Marsi-suurune keha Maaga ajal, mil Maa ei olnud veel päris formeerunud. Pörke tulemusena osa Maa väliskihtide aineist ja suur osa pörkuva keha aineist jäi Maa ümber orbiidile tiirlema. Pörkuva keha metallist tuum pörkas vastu Maad ja ühines Maaga. Orbiidile jäi seega just see osa aineist, millest on Kuu tehtud. Kuu ja Maa koostise sarnased jooned pärinevad Maa aineist, erinevad jooned aga pörkuvast kehast.

6.6 Veenus

Veenus on teine planeet Päikesest. Tema orbiit on nagu Merkuurigi orbiit seespool Maa orbiiti ning seetõttu on ka Veenus alati Päikesele suhteliselt lähedal – Veenus ei eemaldu Päikesest kunagi kaugemale kui 47°. Arvestades Maa tiirlemise kiirust 15° tunnis tähendab see, et Veenus on horisondi kohal näha maksimaalselt 3 tundi peale (enne) Päikese loojangut (tõusu). Seetõttu kutsutakse Veenust “koidutäheks” või “ehatäheks”.

Veenus on heleduselt kolmas objekt taevast (peale Päikest ja Kuud). Kui teada, kuhu vaadata, siis on Veenust võimalik näha ka päeva ajal. Planeedi heledus on põhjustatud tema hästipeegeldavast pinnast. Peaaegu 70% pealelangevast valgusest

peegeldub tagasi (Kuul ja Merkuuril vaid 10%). Peegeldumine toimub valdavalt pilvkatte ülakihtidelt.

Võiks oletada, et Veenus on heledaim kui ta on “täis” – see tähendab et me näeme kogu päikesepoolset külge. Ent sel ajal jääb Veenus Päikesest Maaga võrreldes teisele poole ja on suurimal kaugusel meist 1.7 aü (seda asendit nimetatakse *ülemiseks konjunktsiooniks*). Kui Veenus on meile lähimas asendis, siis ei paista meile tema valgustatud külge üldse (nn *alumine konjunktsioon*). Osutub, et Veenuse maksimaalne heledus on kui ta on umbes 39° Päikesest eemal. Tabelis on põhilised andmed Veenuse kohta. Veenuse tihedus on üsna lähedane Maa tihedusele. Üldjoontes on seega tema keemiline koostis sarnane Maa omaga.

orbiidi suur pooltelg	0.72 aü	ekvatoriaal raadius	6052 km
orbiidi ekstsentrilisus	0.007	keskmise tihedus	5240 kg/m ³
periheel	0.72 aü	pindgravitatsioon	8.87 m/s ²
afeel	0.73 aü	paokiirus	10.4 km/s
keskmise orbitaalkiirus	35.0 km/s	sideeriline pöör. periood	-243 solarpäeva
sideeriline orbitaalperiood	224.5 solarpäeva	telje kalle	177.4°
sünoodiline orb. periood	383.9 solarpäeva	keskmise pinnatemperatuur	730 K
orbiidi kalle ekliptika suhtes	3.39°	kaaslaste arv	0
suurim nurkläbimõõt Maalt	64''	mass	0.82 Maa massi

Pilved, mis peegeldavad hästi valgust ja teevad Veenuse taevas kergelt vaadeldavaks, takistavad aga pinnadetailide nägemist nähtavas valguses. Radarvaatluste alusel määratud Veenuse pöörlemine andis pöörlemiseperioodiks tervelt 243 päeva. Lisaks osutus, et pöörlemine oli vastassuunaline Veenuse orbitaalliikumisele. Veenuse telje kalle on 177 kraadi ning Veenuse päev on umbes pool Veenuse aastat.

Miks Veenus pöörleb tagurpidi ja nii aeglaselt? Praegu on parim seletus, et oma arengu varajases staadiumis pörkus planeet mingi suure kehaga (umbes selline, mis pörkus Maaga ja tekitas Kuu) ning see pörge viis planeedi pöörlemise peaaegu nullini.

Radarsignaali töötlemine võimaldas koostada planeedi pinnast täieliku kaardi. Nagu juba märgitud, parimad kaardid on saadud *Magellaniga*. Veenuse pind tundub olevat üsna sile ja sisaldab vaid mõõduka kõrgusega mägesid. Kõrgeimate mägede kõrgused on kuni 14 km Veenuse sügavaimast kohast (võrdlusena, Everest on 20 km maakera sügavaimast kohast). Enamus mägesid on aga vaid 1–2 km kõrgused. Tavapäraselt nimetatakse pinnaelemente Veenusel naistenimedega – Aphrodite, Ishtar, Cleopatra jne. Muide ka Eesti astronoomid on andnud ühele mäele nime – Koidula. *Magellani* vaatlused võimaldavad peaaegu välistada igasuguse tektoonilise aktiivsuse. Põhiliseks liikumapanevaks jõuks tundub olevat korduvad ulatuslikud laavavoolud.

Paljudes Veenuse piirkondades on näha ulatuslikke vulkaanilisi moodustisi – lamedad laavakuuhjad läbimõõtudega kuni 25 km. Nad on tekkinud arvatavasti nii, et laava on pinnast väljunud, moodustanud kuhja, veidi tagasi tõmbunud ja tahkestunud. Kaudsed andmed osutavad, et vulkaaniline aktiivsus võib toimuda ka tänapäeval.

Mitte kõik kraatrid ei ole vulkaanilised. Mõned on tekkinud meteoriitidega pörgete tõttu. Veenuse atmosfäär on piisavalt paks, et päris väikesed meteoriidid pinnale ei jõua. Seetõttu puuduvad kraatrid alla 3 km läbimõõduga. Suurte kraatrite arv on 1/10 Kuu kraatrite tihedusest. Rakendades sama kraater–vanus dateeringut, mis Maa ja Kuu puhul, saame et enamus Veenuse pinnast on üsna noor – umbes miljard aastat. Osa

planetoloogid arvavad, et mõned piirkonnad on isegi veel nooremad – vaid 200–300 miljonit aastat.

Vene *Venera 9* ja *Venera 10* sooritasid 1975. a. Veenuse pinnal pehme maandumise ning said, et pind on väga kuiv ja tolmune. Joonisel on üks esimesi tõelisi fotosid Veenuse pinnast. Kumbki tehiskaaslane elas umbes tund aega peale mida nad lakkasid ülekuumenemise tõttu töötamast (aparatuur sõna otseses mõttes sulas üles). Tüüpilised kivid fotodel on 50 cm kuni 20 cm. Põhiline kivimite koostis oli basalt, mis taas viitab vulkanismile. Oli ka graniidisarnast kivimit.

Veenuse atmosfäär on palju massiivsem ja ulatub palju kõrgemale kui Maa atmosfäär. Rõhk planeedi pinnal on 90 atm, temperatuur 730 K. Kõrged pilvekihid liiguvad väga kiirelt (400 km/h). Lisaks liikumistele paralleelselt ekvaatoriga on küllalt sagedased ka suurte tsüklonite liikumine ekvaatorilt poolustele. Pinnalähedased õhuvoolud on suhteliselt aeglased, kuni 7 km/h, nii et suurt rõhku arvestades meenutab see pigem vedeliku voolamist. Ainult 1–3 % pealangevast valgusest jõuab planeedi pinnani. See valgus on tumepunane.

Atmosfääri vertikaalne kihistus on kujutatud joonisel. Troposfäär ulatub kõrguseni 100 km. Pilved, mis varjavad meile vaadet planeedi pinnast asuvad kõrgusel 50–70 km. Pilvedest allpool, kuni 30 km kõrguseni asub tolmukiht, mille all on õhuke ent tihe pilvekiht, koosnedes tilkadest ja kristallidest. Need tilgad on paraku aga väävelhappe tilgad, kristallid on ka väävliühendid. Allpool 30 km on atmosfäär selge.

Atmosfäär koosneb valdavalt CO₂-st (96%). Veeauru on vaid 10⁻⁶ Maa atmosfääris olevast. Kõrge temperatuuri tõttu ei ole veeaur kunagi veeks kondenseerunud, vaid on tõusnud kõrgele, kus ta aga lagunes Päikese UV kiirguse toimel. Atmosfääris on ka N₂ (3%) Ar jt .

Veenuse atmosfääri kõrge temperatuuri põhjuseks on kasvuhuone efekt. Süsihappegaas neelab 99% planeedi pinnalt lähtuvast infrapuna kiirgusest, vaid 1% pääseb tagasi ilmaruumi, mis on ka 730 K pinnatemperatuuri põhjus. Seetõttu on temperatuur pooluste juures ja ekvaatoril peaaegu sama ning ka planeedi öö- ja päevatemperatuurid erinevad vaid 10 K võrra.

Ent miks erineb Veenuse atmosfääri koostis nii tugevalt Maa atmosfääri koostisest? Mõlemal planeedil tekkis sekundaarne atmosfäär vulkaanilise aktiivsuse gaasidest 4 miljardit aastat tagasi ja ka koostised olid enam-vähem samad: vesi, CO₂, SO₂ ja lämmastiku-rikkad ühendid. Lämmastik vabanes päikesekiirguse toimel õhku.

Maal kondenseerus veeaur ookeanideks ja enamuse CO₂ ja SO₂ järk-järgult lahustus vees. Ülejäänud CO₂ ühines pinnakivimitega. Veenusel oli aga temperatuur kõrgem kui Maal, kuna Veenus on Päikesele lähemal. Seetõttu ookeane ei kondenseerunud, veeaur ja CO₂ jäid atmosfääri ning kasvuhuone efekt startis otsekohe. Tegelik erinevus Veenuse ja Maa vahel on seega, et kasvuhonegaasid ei lahkunud atmosfäärist pinnasesse, nagu see juhtus Maal.

Kasvuhuone efekt Veenusel oli väga intensiivne, sest atmosfäär sisaldas ka veeauru. Veeaur intensiivistas süsihappegaasi toimet ja aitas Veenuse pinnal temperatuuri tõusta umbes 2 korda kõrgema väärtuseni võrreldes praegusega. Nii kõrgetel temperatuuridel sai veeaur tõusta atmosfääris üsna kõrgele ülakihtidesse, nii et Päikese ultraviolettkiirgus lõhustas selle vesiniku ja hapniku aatomiteks. Kerge vesinik lahkus kiirelt atmosfäärist, aktiivne hapnik ühines kiirelt teiste elementidega. Nii kadus vesi Veenuselt igaveseks.

Veenus ja Maa on peaaegu sama suured ja ka nende siseehitus arvatakse olevat sarnane. Väiksema keskmise tiheduse tõttu on arvatavasti Veenuse tuum Maa tuumast väiksem, ulatudes 1/3 raadiusest, koosneb nii nagu Maalgi nikkeli- ja rauast. Ka vahevöö koostis on sama mis Maal.

Veenuse raudtuum peaks tekitama magnetvälja. Tõsi, Veenuse pöörlemine on 243 korda aeglasem kui Maa pöörlemine, seega peaks magnetväli olema tublisti nõrgem, ent siiski olemas. Seni ei ole aga õnnestunud magnetvälja detekteerida. Põhjus ei ole teada.

6.7 Marss

Välisplaneedina võib Marss taevas asetseda Päikesest lähedal või kaugel. Marss on suurim ja heledaim opositsioonis – st kui Maa asub Marsi ja Päikese vahel. Kui see juhtub periheeli ajal, siis on kaks planeeti vaid 0.38 aü kaugusel. Selline opositsiooni ja periheeli kokkulangevus on üsna harvad. Viimati juhtus see septembris 1988 ja järgmine kord juhtub augustis 2003.

Ehkki Marss on üsna hele ja opositsiooni ajal hästi vaadeldav ei ole ta nii hele kui Veenus. See on kolmel põhjusel. Esiteks on Marss Päikesest rohkem kui kaks korda kaugemal kui Veenus, teiseks on Marsi pind Veenuse pinnast vaid 30 protsenti, kolmandaks peegeldab Marsi pind päikesekiirgust halvemini kui Veenuse pind (peegeldusvõime 15% Veenuse 70% vastu). Ent tema iseloomulik punakas toon teeb ta väga atraktiivseks.

Tabelis on põhilised andmed Marsi kohta.

orbiidi suur pooltelg	1.52 aü	ekvatoriaal raadius	3394 km
orbiidi ekstsentrilisus	0.093	keskmise tihedus	3930 kg/m ³
periheel	1.38 aü	pindgravitatsioon	3.72 m/s ²
afeel	1.67 aü	paokiirus	5.0 km/s
keskmise orbitaalkiirus	24.1 km/s	sideeriline pöör. periood	1.026 solaarpäeva
sideeriline orbitaalperiood	686.9 solaarpäeva	telje kalle	23.98°
sünoodiline orb. periood	779.9 solaarpäeva	keskmise pinnatemperatuur	210 K
orbiidi kalle ekliptika suhtes	1.85°	kaaslaste arv	2
suurim nurkläbimõõt Maalt	24.5''	mass	0.11 Maa massi

Marsi pinna üks olulisi iseärasusi on erinevus Marsi põhja- ja lõunapoolkera vahel. Põhjapoolkera koosneb suure osas vulkaanilistest tasandikest, mis sarnanevad Kuu meredega. Need ulatuslikud laavatasandid moodustuvad pursetel, milledega kaasnesid tohutud laavavood. Lõunapoolkera koosneb enamasti mõne kilomeetri kõrgustest kõrgustikest, mis on üsna tugevalt kraatritega täidetud. Põhjaosa tasandikud on vähem kaetud kraatritega, mis viitab pinna noorusele – vanus umbes 3 miljardit aastat, lõunaosal seevastu 4 miljardit aastat. Ei ole selge, kuidas on põhjapoolkera saanud madalamaks ja täitunud laavaga.

Marsi vulkaanid on päikesesüsteemi suurimad – suurim on 25 km kõrge ja 600 km läbimõõduga. Ei ole seni leitud jälgi kulgevast või hiljutisest vulkanismist.

Enamik kraatreid Marsil ja tema kaaslastel on pörkekraatrid. Pörkel väljapaisatava aine struktuur on erinev Kuu kraatrite omast. Marsi kraatrite ümber on näha laineid, nagu oleks meteoriit pori sisse platsatanud, st lained ümber kraatri. See viitab, et Marsi pinnakihi all on jää kiht, mistõttu väljapaisatud aine on olnud vedel.

Marsil on leitud ka otseseid tunnustusi kunagi voolanud veest: voolukanalid. Voolukanalid on ulatuslikud süsteemid – mõnikord sadu kilomeetreid kogupikkust. Nende sarnasus Maa jõgede süsteemiga on üsna suur ning geoloogid arvavad et just need nad on olnudki. Osad kanalid on jäänus katastroofilistest üleujutustest Marsil ja nad ei moodusta tavaliselt ühendatud võrgustikku. Nad on tohutu suure voolu sängid, mis voolasid lõunaosa kõrgustikelt põhja poole. Voolud olid tõesti suured – sadu kordi suuremad kui Amazonase vool.

Tähelepanuväärne pinnase fenomeen on polaaralad. *Viking 1* ja *2* andmetel koosnevad polaaralad CO₂ jääst H₂O lisandiga. Põhjapoolne polaar-ala muutub vähem (H₂O+CO₂ jääsegu), lõunapoolne kaob suvel peaaegu täiesti (CO₂ jää, mis aurustub palju madalamal temperatuuril võrreldes H₂O+CO₂ jääseguga). Võimalik, et põhjapoolkera polaarala on põhiline vee reservuaar Marsil. Asümmeetria põhjuseks arvatakse olevat lõunapoolkera suured tolmutormid, mis mõjutavad kliimat.

Esimesed detailsed pildid planeedist pärinevad põhiliselt 1970-ndate USA *Mariner 9* ning *Viking 1* ja *2* kosmoseaparaatidelt. Pilt oli kivine kõrbeline maastik. Rooste annab pinnale eripärase punaka värvi. Maa puhul on raud koondunud pea täielikult keskossa, Marsil ei paista kihistumise protsess nii täielikult teostunud olevat. Viimane reis Marsile oli *Mars Pathfinder* ja selle robot *Sojourner*. Ootamatult pika eluea jooksul (3 kuud planeeritud 1 kuu asemel) jõudis *Sojourner* teha 50 m raadiuses oma maandumiskohast palju uuringuid. Neid andmeid alles analüüsitakse.

Marsi atmosfäär koosneb CO₂ (95%), N₂ (2%) ja O₂ (0.1–0.4%). Veeauru õhus peaaegu ei ole. Õhurõhk on 1/150 Maa õhurõhust ja vastav hõredusele umbes 40 km kõrgusel Maal. Suvel keskpäeval võivad pinnatemperatuurid pinnal ulatuda isegi 300 K-ni. Öösel langeb temperatuur 100 K-ni. Kuna atmosfäär on hõre, siis kasvuhoone efekt on väike. Stratosfääris on temperatuur nii madal, et süsihappegaas tahkestub ja moodustuvad nendest pilved.

Tuulte kiirused ulatuvad kuni 100 km/h. Suurimate tormide korral on tuule kiirus kuni 200 km/h ja tolmu tõuseb kuni 50 km kõrgusele ja katab pea kogu planeedi kuni üheks kuuks. Seejärel võtab mitu kuud aega, kuni tolmu jälle maha settib.

Arvatavasti omandas Marss sekundaarse atmosfääri nii nagu teised maised planeedid. Ent veeaur kondenseerus seal veeks. Marsi jõed tekkisid umbes 4 miljardit aastat tagasi, mil vett oli suhteliselt palju ja õhurõhk ja temperatuur kõrgemad (st sinine taevas ja kasvuhoone efekti tõttu keskmiselt 0° temperatuur!). See aeg ei olnud aga pikk, sisesoojuse vähenemise tõttu (kaugus Päikesest oli liiga suur) hakkas toimima vastupidine kasvuhoone efekt ja enamuse veest vajus pinnasesse ning külmus seal (süsihappegaas ühines ka kivimitega). Umbes 0.5–1 miljardit aastat hiljem suurtel aladel vulkaanilise aktiivsuse tõttu jää sulas ja oli teine veerikas epohh, mis kestis umbes 0.5 miljardit aastat. Praegu on jälle enamuse veest kuni 1 km sügavusel (mitmesaja meetri paksune kiht kohati) ja polaar-aladel (suuremas osas põhjapoolset polaar-alal). Millalgi järgmise miljardi aasta jooksul enamuse atmosfäärist kadus. Võimalik, et põhjus oli põrge mingi teise suure (Kuu suuruse) kehaga. Marsi atmosfäär muutus seepeale ebastabiilseks ja kadus.

Marsi keskmise tiheduse põhjal peaks Marsi siseehitus sarnanema Kuu ehitusega: sisemine osa on tuum, mis ei ole puhtalt metalliline, vaid koosneb raua ja raudsulfiidi (FeS) segust. Ülejäänud osa hõlmab põhiliselt vahevöö, mis koosneb Fe-Mg silikaatidest, raudoksiidist ja vähesest osast veest. üleminek tuuma ja vahevöö vahel ei ole täpselt

teada. Pealmine koor on umbes 50 km paks. Marsi magnetvälja pole leitud, nii et see on alla 1/1000 Maa magnetväljast.

Marsil on kaks satelliiti: Phobos ja Deimos - tavalised kivikamakad, sarnase koostisega meteoriite on leitud küll. Phobose mõõtmed on 20–30 km, Deimosel 10–15 km. Deimose tiirlemise periood ümber Marsi on 30 tundi, Phobosel 7 tundi. Mõlemad on loodeliste jõudude toimele loomulikult kogu aeg sama küljega Marsi poole pööratud. Huvitav on, et kuna Phobosel on tiirlemise periood lühem, kui Marsil pöörlemise periood, siis Marsilt vaadatuna Phobos tõused läänest ja loojub idas, seevastu kui Deimos tõused idast ja loojub läänes. Mõlemad satelliidi pinnal on näha kraatreid, millele analüüs annab, et nende pind on vähemalt 2 miljardit aastat vana. Arvatavasti on nad Marsi gravitatsiooni välja sattunud asteroidid.

7. Jupiter ja Saturn

7.1 Jupiteri üldomadused ja atmosfäär

Jupiter on öötaevas heleduselt kolmas (Kuu ja Veenuse järel), mistõttu ta on ka kergelt leitav. Jupiter on samuti heledaim oma opositsiooni lähedal. Tabelis on toodud Jupiteri põhiomadused.

orbiidi suur pooltelg	5.20 aü	ekvatoriaal raadius	71492 km
orbiidi ekstsentrilisus	0.048	keskmise tihedus	1330 kg/m ³
periheel	4.95 aü	pindgravitatsioon	24.8 m/s ²
afeel	5.46 aü	paakiirus	59.5 km/s
keskmise orbitaalkiirus	13.1 km/s	sideeriline pöör. periood	0.41 solaarpäeva
sideeriline orbitaalperiood	11.86 troop. aastat	telje kalle	3.08°
sünoodiline orb. periood	398.9 solaarpäeva	keskmise pinnatemperatuur	124 K
orbiidi kalle ekliptika suhtes	1.31°	kaaslaste arv	16
suurim nurkläbimõõt Maalt	50''	mass	317.8 Maa massi

Erinevalt maistest planeetidest on Jupiteril palju erinevate mõõtmetega ja omadustega kaaslaseid. Neli suuremat, nn **Galilei kuud**, on näha Maalt ka väikese teleskoobiga. Kuna nende liikumist jälgiti juba ammu, siis on ka Jupiteri mass juba ammu teada: 320 Maa massi ehk 0.001 Päikese massi. Jupiter pöörleb perioodiga veidi alla 10 tunni, so väga kiiresti. Kuna tegemist on gaasikeraga, siis tuleb täpsustada, et see on magnetvälja pöörlemise periood, mis on siis tegelikult magnetvälja tekitava piirkonna pöörlemise periood. Pindmised kihid (pilved) pöörlevad erineva kiirusega, poolustel veidi (5 minuti võrra) aeglasemalt kui ekvaatoril. Kiire pöörlemise tõttu on Jupiter märgatavalt lapik (lapikus 1/15). Paakiirus Jupiteril on tervelt 60 km/s nii et isegi vesiniku aatomid ei suuda seda ületada. Nii ongi Jupiteri ürgne koostis säilinud.

Visuaalselt domineerib Jupiteril kaks nähtust: mitmed paralleelselt ekvaatoriga paiknevad pruunikad atmosfääri ribad ning ovaalne moodustis, mida nimetatakse Suureks Punaseks Laiguks. Detailsemal vaatlusel on atmosfääri ribad on üsna erivärvilised – helekollased, helesinised, tumepruunid, erepunased jt.

Kõige levinum gaas on H₂ (85% aatomitest), seejärel He (14%). Leitud on ka vähesel määral metaani, ammoniaaki ja veeauru.

Jupiteri vöödilise väljanägemine on ligikaudu kirjeldatav vahelduvate heledate piirkondade ja tumedate ribadena. Ribad on tumedamad ja madalamad piirkonnad pilvkattes, kus gaas laskub allapoole (Joonis). Ribade vahel asuvates heledates kõrgemates piirkondades on tõusvad vertikaalvoolud. Ribad on madala rõhu alad, heledad piirkonnad on kõrgema rõhu alad. Ribades ja ribadevahelistes piirkondades on vahelduva suunaga ida-lääne liikumised. Piki vööd võib tuule kiirus ulatuda 300–500 km/h. Vööndite olemasolu on analoogne Maa atmosfääri tsüklonite-antitsüklonitega ent Jupiteri kiire pöörlemise tõttu on nende struktuur keerdunud ümber planeedi.

Pilvede värvused on tingitud keerulistest keemilistest protsessidest planeedi ülemises atmosfääris, ehkki detailid ei ole päris selged – pilvede keemia on väga keeruline. Kui me vaatleme Jupiteri värve, siis näeme me tegelikult planeedi atmosfääri paljusid erinevaid sügavusi. Jupiteri atmosfääri mudelit, mis baseerub suuresti Voyageri andmetel, testiti detsembris 1995. a. kui Galileo atmosfääri sond jõudis planeedini. Sond töötab umbes tund aega, enne kui suur atmosfääri rõhk ta purustas. Andmete analüüs näitas, et mudel oli üsna heas kooskõlas vaatlustega.

Efektseim atmosfääri fenomeen on Suur punane laik (SPL), mis avastati juba 17. sajandi keskel ning on seega eksisteerinud üle 300 aasta. *Voyageri* vaatlused näitasid, et laik on keeris, umbes nagu Maa atmosfääris taifuunid, periood on 6 päeva. Ta pöörleb ümber Jupiteri ligikaudu sama kiirusega, mis planeedi sisemus, mis viitab, et tema lätted on sügaval atmosfääri sisemuses. SPL päritolu ei ole teada, samuti ka tema energiaallikad. Punasest laigust väiksemad tormid on Jupiteril üsna sagedased – on mitmeid väiksemaid laiike, mis paistavad olema samuti keeristormid.

7.2 Jupiteri siseehitus ja magnetväli

Arvestades Jupiteri kaugust Päikesest arvutasid teadlased välja, et pilvkatte peal peaks kujunema tasakaaluline temperatuur umbes 105 K. Kui aga mõeldeti planeedi kiirgust raadio ja infrapuna vaatlustel, siis leiti, et vastav musta keha spekter omab temperatuuri 125 K. Ehkki erinevus 20 K võib tunduda väike, meenutagem, et planeedi poolt kiiratud energia kasvab temperatuuri neljanda astmega. Seetõttu annab see kiiratud energia erinevuse $(125/105)^4 = 2$ korda. Seega peab Jupiter omama mingi oma soojusallika. Arvatakse, et põhjuseks on aeglane gravitatsioonilise energia vabanemine.

Jupiteri mudeli konstrueerimisel kasutatakse andmeid massi, raadiuse, koostise, pöörlemise, temperatuuri jm kohta. Õnneks on koostise põhikomponendid, vesinik ja heelium, lihtsad gaasid ja nii on mudelid üsna tõepärased. Mõnetuhande kilomeetri sügavusel läheb gaas üle vedelasse olekusse. Edasi, 20000 km sügavusel on rõhk juba nii suur, et toimub teine muutus, seekord “metallilisse” olekusse, mille omadused on sarnased vedelate metallidega. Jupiteri magnetvälja seisukohalt on oluline, et see metalliline vesinik on suurepärase elektrijuht. Jupiteri vaadeldava lapikuse mudel nõuab, et planeedi keskel oleks tihe tuum massiga umbes 15-20 Maa massi. Tuuma täpne koostis ei ole teada, ent mudelite järgi on see kivimiline aine (Fe-Si), just selline, nagu on Maa-sarnased planeedid. (NB! Kivimiline tähendab tema koostise omadusi, mitte füüsikalist olekut. Suure rõhu tõttu erineb tuuma füüsikaline olek väga oluliselt maiste kivimite olekust.) Tsentris on rõhk umbes 50 miljonit atmosfääri, ehk 10 korda suurem kui Maa keskel, tihedus vast umbes 25000 kg/m^3 ning temperatuur 40000 K.

Jupiteri magnetvälja tugevuse ja ulatuse mõõtsid *Pioneerid* ja *Voyagerid*. Jupiteri magnetväli on umbes 30 miljoni km ulatusega. Nagu Maa magnetvälgi on päikesepoolne

osa kokkusurutud ja vastaspool tugevalt välja venitatud. Magnetvälja saba ulatub Saturni orbiidini (joonis). Pangem tähele, et planeedi magnetvälja ei lange ühte pöörlemisteljega, vaid on kallutatud umbes 10° võrra. Jupiteri magnetvälja tugevus on umbes 20000 korda tugevam Maa magnetväljast. See on kooskõlas Jupiteri siseehituse mudeliga – juhtiva metallilise vesiniku tsoon on väga suur ja pöörleb kiirelt.

7.3 Jupiteri kaaslaste ja rõngas

Kokku on Jupiteril vähemalt 16 kaaslast, neist neli on suuremad. Vaatamegi veidi lähemalt vaid neid nelja. Neli kaaslast erinevad keskmiste tiheduste poolest: Io – 3500 kg/m^3 , Europa – 3000 kg/m^3 , Ganymedes – 1900 kg/m^3 , Callisto – 1800 kg/m^3 . Et loetelu on ühtlasi ka järjestus vastavalt kauguse suurenemisele Jupiterist, siis on kohe näha tendents: kauguse suurenedes tihedus väheneb.

Io on geoloogiliselt aktiivseim objekt kogu päikesesüsteemis. Ta on veidi suurem Kuust, keskmise tiheduse alusel peaks tema koostises olema küllalt palju kivimilist ainet. Pind paistab punakas-kollakas-pruunikas. Io omab õhukest atmosfääri (rõhk on 10^{-10} atm), mis koosneb põhiliselt SO_2 . Leitud on tegutsevaid vulkaane – vulkaaniline tegevus on palju aktiivsem kui Maal. Põhjus on arvatavasti Jupiteri ja kolme ülejäänud suurema kaaslaste põhjustatud tugevad loodelised jõud (loodelised jõud tekitavad hõõrdumist, mis tekitab soojust, mis hoiab pinnakihi all olevat ainet sulana). Io pind on vulkaanilise aktiivsuse tõttu küllalt noor (alla miljardi aasta). Vulkaanid ei moodusta mägesid, vaid on rohkem geisri moodi, nii et laava voolab lihtsalt august välja. Vett ei ole Iol leitud.

Europa pind on kaetud H_2O jääga, nii et albeedo on 0.6. Pind on väga sile, ilma kraatriteta. Teisalt aga on pind kaetud arvukate ent väga madalate pragudega. Kuna kraatreid ei ole näha peab pind pidevalt uuenema sisemusest tuleva vee arvel. Vanus ei saa ületada mõnda miljonit aastat. *Galileo* vaatlused osutavad, et Europa on kaetud vedela vee ookeaniga, mille pind on külmunud jääks. Praod on tingitud Jupiteri ka teiste kaaslaste gravitatsioonilisest mõjust. Jää paksus on mõni kilomeeter ning jää all on kuni 100 km paksune veekiht. Europa keskel on küllalt suur ränist tuum. Päikesesüsteemis on veel vaid Maal vedelat vett märgatavas koguses. Seetõttu on mõned teadlased oletanud, et Euroopal võib esineda *mingis* vormis elu. Europa pinnatemperatuur on vaid 130 K ning atmosfääri rõhk vaid miljardik Maa atmosfääri rõhust.

Kaks järgmist suurt kaaslast, Ganymedes ja Callisto, paiknevad Jupiteri tsentrist vastavalt 15 ja 26 planeedi raadiuse kaugusel. **Ganymedes** on päikesesüsteemi suurim kaaslane (raadius 2600 km), suurem kui Merkuur. Pool ainet on vesi või H_2O jää, pool on silikaadid. Pind koosneb valdavalt jääst. Näha on kraatrid, aga mitte kõikjal – seega on eri vanusega piirkondi. Kraatritega kaetud pinna vanus hinnatakse olevat 4 miljardit aastat. Ganymedese tumedad alad (sarnanevad Kuu “meredele”) on kraatritega kaetuse tiheduse kohaselt noorem (nagu Kuulgi). Tumedad alad ongi arvatavasti ka tegelikult tekkinud sarnaselt Kuu tumedate aladega. Mudelite kohaselt peaks Ganymedes omama metallist tuuma raadiusega 400–1000 km, mida ümbritseb ränist vahevöö ja seda omakorda 800 km paksune jääkiht.

Callisto on tume (albeedo on alla 0.2). Pind on rohkem kaetud kraatritega kui Ganymedese pind, jälgi geoloogilisest aktiivsusest ei ole. Kuna pind koosneb suures osas jääst, siis on see küllalt plastiline ja kraatrid on suures osas tasandunud. Koostiselt sarnaneb Callisto Ganymedesega.

Õrn **rõngas** avastati Voyageri poolt 1979. a. Rõngas paikneb 50000 km pilvede ülaseri kohal ja seespool lähima kaaslaste orbiiti. Rõngas on õhuke ja kitsas, laius on mõnituhat kilomeetrit ja paksus mõnikümmend kilomeetrit.

7.4 Saturni üldomadused, atmosfäär, siseehitus

Opositsioonis, mil Saturn on heledaim, asub ta Maast 8 aü kaugusel. See on suur kaugus ja tema näiv heledus on oluliselt väiksem kui Jupiteril või Marsil. Ka mitmed tähed omavad suuremat näivat heledust. Tabelis on toodud tema olulisemad omadused.

orbiidi suur pooltelg	9.54 aü	ekvatoriaal raadius	60268 km
orbiidi ekstsentrilisus	0.054	keskmine tihedus	687 kg/m ³
periheel	9.02 aü	pindgravitatsioon	10.4 m/s ²
afeel	10.05 aü	paakiirus	35.5 km/s
keskmine orbitaalkiirus	9.65 km/s	sideeriline pöör. periood	0.44 solaarpäeva
sideeriline orbitaalperiood	29.42 troop. aastat	telje kalle	26.7°
sünoodiline orb. periood	375.1 solaarpäeva	keskmine pinnatemperatuur	97 K
orbiidi kalle ekliptika suhtes	2.49°	kaaslaste arv	18
suurim nurkläbimõõt Maalt	21''	mass	95.2 Maa massi

Saturn on massilt Jupiterist kolm korda väiksem. Keskmine tihedus on üllatavalt väike: 690 kg/m³. Kiire pöörlemise tõttu on tema lapikus isegi suurem kui Jupiteril. Ent hoolikas analüüs annab, et lapikus on siiski väiksem kui oleks täiesti vesinikust ja heeliumist koosneval kehal. Seega peaks tal ka olema mingi kivimiline tuum.

Tuntuimad on Saturni rõngad. Kuna rõngad paiknevad ekvatoriaal-tasandis, siis muutub nende näiv ilme. Saturni pöörlemise telg on märgatava kaldega orbiidi tasandi suhtes (ligikaudu nagu Maal ja Marsil). Seetõttu muutub aja jooksul rõngaste valgustus Päikese poolt. On kohe näha, et teatud aegadel on rõngad peaaegu nähtamatud (serviti) ja seega väga õhukesed – teame, et paksus on alla mõnesaja meetri, samal ajal kui läbimõõt on üle 200000 km.

Atmosfääri struktuurilt Saturn sarnaneb Jupiteriga: kiirest pöörlemisest tingitud ekvaatoriga paralleelsed ribad. Häiritusi (pööriseid) on ribades aga vähem, kui Jupiteril. Põhjus on arvatavasti suurem kaugus Päikesest. Ribade liikumise kiirused ulatuvad ekvaatoril kuni 1500 km/h – suurimad kiirused päikesesüsteemis. Koostiselt on atmosfäär Jupiteri omaga sarnane: H₂ (92%), He (7%), vähemas koguses metaani, ammoniaaki, etaani. Atmosfääri vertikaalne struktuur on ka sarnane. Saturnil on siiski temperatuurid madalamad, kuna ta asub Päikesest kaugemal. Saturn atmosfääri ribaline struktuur ja mõned keerised sarnanevad samuti Jupiteri omadega. Mudelite põhjal ei ole veel selge, miks on Saturni puhul ribade maksimaalsed kiirused nii palju suuremad kui Jupiteri maksimaalsed kiirused. Ei ole leitud ka Jupiteri Suure punase laigu sarnast keerist. Sama suuri keeriseid on leitud küll, ent nende eluiga ei ületa 0.5 – 1 aastat.

Saturni siseehituse mudel sarnaneb samuti Jupiteri omaga. Kõige sisemuses on arvatavasti Fe-Si tuum, massiga umbes 20 Maa massi, seejärel tuleb metallilise vesiniku kiht. Kuna Saturni mass on väiksem, siis ka metallilise vesiniku kiht on väiksem. Pealpool on jällegi H₂ paks kiht. Saturni elektriliselt juhtiv sisemus ja kiire pöörlemine tekitavad magnetvälja ja ulatusliku magnetosfääri. Väiksema massi tõttu on magnetväli 1/20 Jupiteri magnetväljast. Saturni magnetväli langeb täpselt kokku tema pöörlemise teljega.

7.5 Saturni rõngaste süsteem

Saturni iseloomulikum joon on tema ekvatoriaal-tasandis asuv rõngas. Rõngas on tehtud tavalisest H₂O jääst. Osakeste suurus muutub mõnest mikronist kuni kümne meetrini, olles enamasti küll sentimeetri ja meetri vahel. Rõngas on üsna lai (60000 km) ent väga-väga õhuke - kohati ainult mõni meetri, igal juhul aga alla 100 m. Maalt vaadatuna võib rõnga jagada kolmeks alaks (joonis), ent on võimalik teha ka detailsemat jaotust.

Millised olid rõngaste tekke protsessid? Et vastata, vaatame väikese satelliidi arengut suure planeedi läheduses. Satelliiti hoiavad koos sisemised jõud – tema enda gravitatsioon. Kui viime oma hüpoteetilise satelliidi suurele planeedile lähemale, siis loodelised jõud suurenevad. Meenutame, et loodelised jõud püüavad satelliiti välja venitada planeedi suunas. Meenutame ka, et loodelised jõud kasvavad kauguse vähenedes kiiresti. Mingil kaugusel ületavad loodelised jõud satelliiti koos hoidvaid jõudusid. Satelliit puruneb tükkideks ning tükid liiguvad omaenda orbiite pidi planeedi ümber moodustades rõnga. Iga antud planeedi ja satelliidi jaoks nimetatakse seda kriitilist kaugust, millest seespool satelliit puruneb, **Roche piiriks**. Kui satelliiti hoiab koos tema enda gravitatsioon ja tema keskmine tihedus on sama kui planeedil (hea lähendus Saturni puhul), siis on Roche piir umbes 2.4 planeedi raadiust. Seega ei saa Saturni puhul ükski kaaslane säilida tervena 144000 km kauguseni planeedi tsentrist. Näeme, et rõngad asuvad tõesti Roche piiri sees.

Voyageri pildid näitasid, et suurim tühimik rõngaste vahel ei ole täiesti tühi aine. Ent keskmine tihedus oli seal palju väiksem kui rõngastes. Tühimiku põhjuseks on resonants tühimiku osakeste ja Saturni põhilise sisemise kaaslane Mimase vahel. Tühimikus liikuvate osakeste orbitaalperiood on täpselt pool Mimase orbitaalperioodist st 2:1 resonants. Selle resonantsi tõttu tunnevad tühimiku osakesed Mimase gravitatsioonilist mõju alati täpselt samas kohas oma orbiidil. Järjestikused mõjud tugevdavad üksteist ja algselt ringorbiidid muutuvad elliptilisteks. Oma uutel orbiitidel pörkuvad nad teiste osakestega ja maanduvad lõpuks uutel ringorbiitidel. Tulemusena ongi tühimikus nii vähe osakesi. (“Mitteresonant” orbiitidel liiguvad osakesed tunnevad ka Mimase gravitatsioonilist mõju. Ent need mõjutused on hajutatud erinevate aegadel erinevatele orbiidi kohtadele ja kompenseerivad üksteist.) Ka teised resonantsid mõjutavad rõngaste kuju. Näiteks rõnga A terav välisserv on tekkinud resonantsist 3:2 Mimasega (kolm rõnga orbiiti kahe Mimase perioodi jooksul).

Saturni rõngaste päritolu seletamiseks on kaks peamist teooriat. Hinnatakse, et rõngaste aine kogumass on umbes 250 km läbimõõduga kaaslane mass. Kui selline kaaslane oleks liikunud Roche piiri sees või oleks purunenud selle piiri lähedal, siis oleks tekkinud rõngas. Teine teooria on, et rõngas on kujunenud Saturni tekkimisest ülejäänud ainest 4.6 miljardit aastat tagasi. Saturni gravitatsiooniline mõju oleks takistanud sellel kaugusel kaaslane teket. Saturni rõngaste dünaamiline aktiivsus viitab rõnga noorusel – umbes 50 miljonit aastat. Seega ta ei saanud tekkida planeedi tekkimise ajal. Muidugi, vastuväitena sellele tuuakse, et rõngas saab pidevalt ainet juurde kui meteoriidid pörkuvad Saturni kaaslastega. Rohkem aga usutakse mingi kaaslane katastroofilist purunemist.

7.6 Saturni kaaslased

Saturnil on kõige arvukamalt kaaslasi (18 kaaslast omab nime, ent lisaks on võib olla veel 2-4 nimetut kaaslast). Satelliidid jagunevad kolme rühma. Esimesse kuuluvad “väikesed”

kaaslased – jääkamakad mõõtmega alla 300 km. Teise kuuluvad kuus “keskmise suurusega” kaaslast läbimõõtudega 400–1500 km. Lõpuks on Saturni ainus “suur” kaaslane Titan, läbimõõduga 5150 km. Enamik neist koosnevad jääst mõningate mineraalide lisanditega, omades enamasti keskmist tihedust 1200-1900 kg/m³. Erinevalt Jupiteri neljast suurimast kaaslasest ei ole näha seost tiheduse ja kauguse vahel. Küllalt mitmete kaaslaste pinnad on täis kraatreid, st pind on küllalt vana.

Suurim ja kõige huvitavam kaaslane on **Titan**, tihedusega 1900 kg/m³ ja atmosfääriga (90% N₂, 9% Ar, rõhk 1.5 atm st tihedam kui Maal). Tihedusest tuleneb, et põhiliselt H₂O jää ja mineraalide vahekord on umbes 1:1 ning siseehitus sarnaneb Jupiteri kaaslaste Ganimedese ja Callisto ehitusega. Titani atmosfääri ülaosas on tihe tolmuhiht, nii et vaid väike osa Päikese kiirgusest jõuab Titani pinnani ning pinna temperatuur on vaid 94 K. Arvatakse, et atmosfääris võivad toimuda väga keerulised keemilised protsessid. Keerulised molekulid võivad atmosfäärist alla settida planeedi pinnale. Saturni ja Titani uurimise uus etapp algab 2004. a. mil *Cassini* jõuab sinna. Osa uurijaid peab võimalikuks, et Titanil võib esineda küllalt keerukaid molekule.

Miks on Titanil selline paks atmosfäär, samal ajal kui sarnasel Jupiteri kaaslasel Ganymedesel ei ole? Põhjuseks on Titani suurem kaugus Päikesest. Saturni kaaslaste moodustusid oluliselt madalamatel temperatuuridel, kus H₂O jää väljakondenseerumine oli soodsam ja see moodustaski suure osa Titani ainest. H₂O jää oli hea metaani ja ammoniaagi neelaja, mida algaegadel oli hulgaliselt. Titani sisemise radioaktiivsuse soojuse mõjul vabanesid jääst sinna suletud gaasid ja moodustasid paksu metaan-ammoniaak atmosfääri. Päikesevalgus lagundas ammoniaagi, ent metaan, mis oli raskemini lagundatav, säilis. Koos argooniga, mis vabanes Titani sisemusest moodustavadki need atmosfääri põhikomponendid.

8. Uraan, Neptuun, Pluuto

8.1 Uraani ja Neptuuni üldomadused

Uraani avastas inglise astronoom William Herschel 1781. a. Kuna tegemist oli esimese uue planeedi avastamisega viimase eelmise 2000 aasta jooksul, siis oli avastus laia kõlapinnaga. Kui Uraan oli avastatud, siis hakkasid astronoomid määrama tema orbiiti ja leidsid varsti selles väikeseid vastuolusid tegeliku ja teoreetilise orbiidi vahel. Loogiline järeldus oli, et mingi tundmatu keha gravitatsiooni jõud häirib planeedi orbiiti. Selle probleemi lahendasid sõltumatult kaks matemaatikut 1840-ndatel aastatel ning peatselt leiti uus planeet Neptuun, sealt kus see teoreetiliste ennustuste kohaselt pidi olema.

Kaks planeeti on oma omadustelt üsna sarnased. Tihedused viitavad, et kivimiline tuum moodustab suurema osa planeedi massist kui oli Jupiteril ja Saturnil. Nagu teisedki Jupiteri-sarnased planeedid pöörleb ka Uraan üsna kiirelt ja diferentsiaalselt. Omapärane on aga, et Uraani atmosfäär pöörleb pooluste juures *kiiremini* kui ekvaatoril (14.2 tundi ja 16.5 tundi vastavalt). Uraani pöörlemise telg on orbiidi tasandi normaali suhtes kallutatud 98°, mis on suuresti omapärane. Tulemusena on poolused kümneid aastaid kas pimeduses või päikesevalguses. Tabelites on toodud Uraani ja Neptuuni tähtsamad omadused.

Uraan

orbiidi suur pooltelg	19.19 aü	ekvatoriaal raadius	25559 km
orbiidi ekstsentrilisus	0.047	keskmise tihedus	1271 kg/m ³
perihel	18.29 aü	pindgravitatsioon	8.87 m/s ²
afeel	20.10 aü	paokiirus	21.3 km/s
keskmise orbitaalkiirus	6.80 km/s	sideeriline pöör. periood	-0.72 solaarpäeva
sideeriline orbitaalperiood	83.75 troop. aastat	telje kalle	97.9°
sünoodiline orb. periood	369.7 solaarpäeva	keskmise pinnatemperatuur	58 K
orbiidi kalle ekliptika suhtes	0.77°	kaaslaste arv	17
suurim nurkläbimõõt Maalt	4.1''	mass	14.54 Maa massi

Neptuun on omapärane selle poolest, et tema atmosfäär pöörleb *aeglasemalt* kui tuum. Uraani ja Neptuuni tihedatelt pilvedelt peegeldunud valguse spektroskoopiline uurimine osutab, et nende välised atmosfäärid sarnanevad Jupiteri ja Saturni omadele. Levinuim element on H₂ (84%), He (14%), metaan (2% Uraanil ja 3% Neptuunil).

Tugevate metaani neeldumisjoonte tõttu infrapunases piirkonnas näib Uraan rohekas. Atmosfäär näib üsna struktuuritu, sest kõige peal paikneb tolmutilvede kiht. Atmosfääri kihtide liikumise kiirus paralleelselt ekvaatoriga on umbes 200-500 km/h. Siiski on olemas ka liikumised ekvaatorilt poolustele. Pilvede struktuur Neptuunil on komplitseeritum kui Uraanil, sest näha on tumedaid keeriseid nii nagu Jupiterilgi. Tuulte kiirus ulatub kuni 400 km/h.

Neptuun

orbiidi suur pooltelg	30.07 aü	ekvatoriaal raadius	24766 km
orbiidi ekstsentrilisus	0.009	keskmise tihedus	1638 kg/m ³
perihel	29.81 aü	pindgravitatsioon	11.1 m/s ²
afeel	30.33 aü	paokiirus	23.5 km/s
keskmise orbitaalkiirus	5.43 km/s	sideeriline pöör. periood	0.67 solaarpäeva
sideeriline orbitaalperiood	169.7 troop. aastat	telje kalle	29.6°
sünoodiline orb. periood	367.5 solaarpäeva	keskmise pinnatemperatuur	59 K
orbiidi kalle ekliptika suhtes	1.77°	kaaslaste arv	8
suurim nurkläbimõõt Maalt	2.4''	mass	17.15 Maa massi

Uraani ja Neptuuni tihedatelt pilvedelt peegeldunud valguse spektroskoopiline uurimine osutab, et nende välised atmosfäärid sarnanevad Jupiteri ja Saturni omadele. Levinuim element on H₂ (84%), He (14%), metaan (2% Uraanil ja 3% Neptuunil).

Tugevate metaani neeldumisjoonte tõttu infrapunases piirkonnas näib Uraan rohekas. Atmosfäär näib üsna struktuuritu, sest kõige peal paikneb tolmutilvede kiht. Atmosfääri kihtide liikumise kiirus paralleelselt ekvaatoriga on umbes 200-500 km/h. Siiski on olemas ka liikumised ekvaatorilt poolustele.

Pilvede struktuur Neptuunil on komplitseeritum kui Uraanil, sest näha on tumedaid keeriseid nii nagu Jupiterilgi. Tuulte kiirus ulatub kuni 400 km/h.

Voyager 2 mõõtis Uraanil ja Neptuunil üsna tugevad magnetväljad – umbes 100 korda tugevamad Maa omast. Mõlemal on ka arvestatava suurusega magnetosfäärid. Uraani magnetväli on kallutatud pöörlemise telje suhtes 60° (suurim kalle planeetide seas). Magnetvälja telg läheb tsentrist ka tervelt 1/3 planeedi raadiuse võrra mööda. Ka Neptuuni magnetvälja telg on tsentrist kõrvale nihkunud ja nurk pöörlemisteljega on 42° (joonis).

Teoreetiliste mudelite kohaselt on Uraanil tsentris kivimiline tuum (10 Maa massi või vähem), seejärel vee (jäa) kiht ja kõige peal kõige paksem molekulaarse vesiniku ja heeliumi vahevöö. Suure rõhu tõttu on veekihi vee molekulid dissotseerunud ioonideks (või ammoniaagi lisanditega) mistõttu veekiht juhib elektrit ja tekitab Uraani magnetvälja.

Hiidplaneetidest omab Neptuun suurimat tihedust. Umbes 1/3 raadiusest on silikaatidest tuum. Seda ümbritseb vee ja vedela metaani kiht (samuti 1/3), välimine 1/3 on N₂.

8.3 Uraani ja Neptuuni kaaslasted ning rõngad

Uraanil on 17 kaaslast, milledest kaks avastati alles 1997. a. septembris. Viis suurimat kaaslast on mitmes mõttes sarnased Saturni kuue keskmise suurusega kaaslastega. Nende tihedused on 1100-1700 kg/m³, mis viitab jää ja kivimite segule. Lähimõõdud on 1600 km-st (Titania ja Oberon) kuni 480 km (Miranda). Väga suuri kaaslast ei ole.

Miranda on üks kõige huvitavamate objektidest. Tema pinnal on esindatud kõikvõimalikud pinnavormid ja lisaks veel omapäraseid V-kujulised moodustised. Võimalik, et peale tekkimist on Miranda mingil kokkupõrkel purunenud ja seejärel uuesti jälle kokku koondunud.

Neptuunil on 8 kaaslast, ent need ei moodusta korrapärasest kaaslaste süsteemi – st nad kaaslane ei liigu ligikaudu ringikujulisel, ekvatoriaalsel ja päripidisel orbiidil. Suurim kaaslane, Triton, on raadiusega 1360 km ja omab ringikujulist vastusuunalist orbiiti 14.3 planeedi raadiuse kaugusel, kallutatud 20° ekvatoriaaltasandi suhtes. Ta on ainus suur satelliit päikesesüsteemis, mis omab vastusuunalist orbitaalliikumist. Suuruselt kolmas, Nereid, liigub päripidi ent väga tugevalt elliptilisel orbiidil. Massid (ja seega tihedused) on teada vaid Tritoni ja Nereidi jaoks, tihedused on vastavalt 2100 kg/m³ ja 1200 kg/m³. Ei ole üheselt teada sündmus või sündmused, mis põhjustasid Tritoni vastusuunalise liikumise või Nereidi tugevalt elliptilise orbiidi.

Uraani ümber on nõrk rõngaste süsteem. Need rõngad avastati 1977. a., mil vaadeldi Uraani möödumist ühe kauge heleda tähe eest. Vaatluste eesmärk oli tegelikult uurida planeedi atmosfääri struktuuri. Ent 40 minutit enne ja pärast varjutust viitas tähe heleduse võnkumine rõngaste olemasolule. Hiljem 1989. a. tegi *Voyager 2* juba rõngaste täpsema struktuuri. Kõik rõngad on tumedad ja väga kitsad. Erinevalt Jupiterist ja Saturnist sisaldavad Uraani rõngad üsna vähe tolmu, osakesed on lähimõõduga üle 1 meetri.

Ka Neptuun omab suhteliselt tugevaid rõngaid. Rõngad on tumedad, kolm on väga kitsad ent kaks on laiad ja hajusad. Kõik rõngad paiknevad Roche piiri sees.

8.4 Pluuto üldomadused

Pluuto avastati alles 1930. a. Pluutost ei ole tema suure kauguse ja väiksuse tõttu peaaegu midagi teada peale tema üldiste parameetrite (needki ebakindlalt), mis on toodud tabelis.

orbiidi suur pooltelg	39.48 aü	ekvatoriaal raadius	1137 km
orbiidi ekstsentrilisus	0.249	keskmise tihedus	2060 kg/m ³
periheel	29.66 aü	pindgravitatsioon	0.66 m/s ²
afeel	49.31 aü	paokiirus	1.2 km/s
keskmise orbitaalkiirus	4.74 km/s	sideeriline pöör. periood	-6.39 solarpäeva
sideeriline orbitaalperiood	248.0 troop. aastat	telje kalle	118°

sünoodiline orb. periood	366.7 solaarpäeva	keskmine pinnatemperatuur	40-60 K
orbiidi kalle ekliptika suhtes	17.15°	kaaslaste arv	1
suurim nurkläbimõõt Maalt	0.11''	mass	0.0021 Maa massi

Pluuto asub kohati Päikesele lähemal isegi kui Neptuun oma orbiidi suure lapikuse tõttu. Pluuto orbitaalperiood on täpselt 1.5 korda suurem kui Neptuunil, st kaks planeeti on seotud 3:2 resonantsiga. Selle tulemusena, isegi vaatamata sellele, et nende orbiidid lõikuvad, ei ole ohtu nende planeetide kokkupõrkeks. Orbiitide resonantsi tõttu ja kuna Pluuto orbiit on väga palju kaldu ekliptika suhtes on vähim kaugus, milleni nad võivad läheneda, tervelt 17 aü. Pluuto mass tehti korrektelt kindlaks alles 1978. a., mil avastati, et Pluutol on kaaslane Charon. Charoni avastamisega sai võimalikuks ka Pluuto raadiuse täpne määramine, mis osutus väga väikeseks. Charoni orbiit juhtus olema aastatel 1985 kuni 1991 nii soodsalt, et ta varjutas Pluutot mitmel korral. Pluuto tihedus on selline, et ta peaks ehituselt sarnanema Neptuuni suurima kaaslane Tritoniga. Enamuses on ta teatud külmunud jääst teatud räniühenditega. Spektroskoopilised uuringud näitavad ka külmunud metaani olemasolu.

Kuna Pluuto orbiit paikneb osalt Neptuuni orbiidi sees, siis on võimalik, et Pluuto on kunagi olnud Neptuuni kaaslane. Teisalt on võimalik siiski ka, et nad on tekkinud seal kus nad on. Ei saa üheselt otsustada kumbagi teooria kasuks.

9. Asteroidid, komeedid. Päikesesüsteemi teke

9.1 Asteroidid

Asteroidid on suhteliselt väikesed, kivimilised objektid, mis tiirlevad tavaliselt üsna ekstsentrilistel orbiitidel Marsi ja Jupiteri vahel, 2.2–3.3 aü kaugusel Päikesest. Vaid mõned neist on rohkem kui 300 km läbimõõduga, enamik tublisti väiksemad. Suurim asteroid, Ceres, omab 940 km läbimõõtu. Asteroidide kogumass on vähem kui 1/10 Kuu massi. Üle 0.5 km läbimõõduga asteroidide koguarvuks hinnatakse pool miljonit.

Asteroidid jaotatakse nende spektroskoopiliste omaduste alusel kolmeks. C-asteroidid on tumedad, sisaldavad hulganisti süsinikku, sarnanevad kivi-meteoritidele, neid on 75%. S-asteroidid on heledamad, omavad raud-kivi meteoritide koostist (rohkem räni) ja neid on 15-20%. M-asteroidid koosnevad rohkem metallidest, neid on 5-10%. Marsi lähedal on enamasti vaid S-asteroidid, mida kaugemale, seda rohkem tuleb C-asteroide. On levinud on seisukoht, et C-asteroidid on ürgsed ja S- ja M-asteroidid on läbinud teatud keemilise evolutsiooni.

Kuna enamik asteroide on koondunud suhteliselt kitsasse kauguste vahemikku, annab see vihje, et nad on kas purunenud taevakeha jäänused või tükid, mis ei ole planeediks formeerunud. Enamik uurijaid toetab teist vaatekohta: asteroidide kogumass on purunenud planeedi tükkide jaoks liiga väike ning keemilise koostise küllalt suur varieeruvus samuti viitab, et nad ei pärine ühest objektist. Tõenäolisem on, et Jupiteri tugev gravitatsiooniväli häiris nende liikumist liialt ja takistas nii kuhjumast. Seega tekkisid asteroidid samal ajal kui planeedidki. Algul olid nad tunduvalt suuremad (vastavadki suurimatele tänapäevastele) kuid on omavahel põrkudes purunenud väiksemateks tükkideks.

Esimesed head pildid asteroididest saadi 1990. ja 1993. aastal, mil *Galileo* sputnik pildistas kahte asteroidi oma teel Jupiterini. Nad sarnanevad üsnagi Marsi kaaslastele Phobosele ja Deimosele, omavad läbimõõte vastavalt 20 ja 60 km. Ida tihedus $2200\text{--}2900\text{ kg/m}^3$ on kooskõlas tema klassifikatsiooniga S-tüüpi. Juunis 1997. a. külastas *NEAR* (*Near Earth Asteroid Rendevouz*) C-tüüpi asteroidi Mathilde teel oma peamise eesmärgini, asteroid Eroseni. Mathilde on 60 km läbimõõduga ja omab tihedust 1400 kg/m^3 . Veebruaris 2000. a. jäi *NEAR* Erose ümber umbes üheks aastaks. Eros on S-asteroid, pikima mõõtmega 33 km ja tihedusega 2900 kg/m^3 . Ülejäänute asteroidide massid ja tihedused ei ole kahjuks teada.

Lisaks asteroidide võõle on teada poolsada < 10 km asteroidi, millede orbiitide periheel on Maa orbiidist seespool ja afeel Maa ja Marsi vahel (loomulikult tiirlevad nad ikkagi ümber Päikese). Nad läbivad regulaarselt Maa orbiiti ja on olemas võimalus, et mõni neist põrkub Maaga. Hinnatakse, et miljoni aasta jooksul võib aset leida 2-3 põrget. Nt asteroid 1991BA möödus Maast vaid 170000 km kauguselt ning 1994XM1 ainult 105000 km kauguselt. Tõsi, enamuse taoliste asteroidide mõõtmed on alla 1 km, ent ka sellise asteroidi põrge Maaga oleks inimeste jaoks tõsine katastroof. Seetõttu on alustatud potentsiaalselt ohtlike asteroidide monitooringut.

On veel mõnisada nn **Trooja asteroidi**, mis asuvad Jupiteri kaugusel. Neid hoiab 1:1 resonants orbiidil Jupiteri gravitatsioonijõud ning stabiilne asend on täpselt 60o Jupiterist seespool ja tagapool Jupiteri orbiidil (Lagrange punktides).

Asteroidide jaotus nn võõs ei ole ühtlane, vaid selles esinevad tühjad ribad (joonis). Suurimad tühjad ribad asuvad kaugustel, kus tiirlemise perioodi suhe Jupiteri tiirlemise perioodi on lihtne suhe $1/2, 1/3, 1/4, 2/5, 2/7, 3/7, 9/4$. Sellisel kaugustel oleks asteroidi liikumine resonantsis Jupiteri liikumisega ja väikesedki häiritused asteroidi liikumiseks hakkaksid kasvama ning asteroidi orbiit muutuks.

9.2 Komeedid

Komeedid koosnevad mitmete gaaside jää, lume ja tolmu segust. Enamasti on komeetide läbimõõt alla 20 km. See on nn komeedi **tuum**. Ja suurema osa oma teekonnast ongi komeet vaid see tuum. Kui komeet jõuab Päikesest umbes 2 aü kaugusele, siis hakkab Päikese soojus jääd ja lund sulatama. Aurunud gaas ja tolm moodustab tuuma ümber ulatusliku **ümbrise** mõõtmetega kuni 100000 km. Päikese kiirgusrõhk ja päikesetuul venitavad ümbrise tugevalt välja, mis moodustab komeedi **saba** pikkusega kuni 1 aü.

Komeedi saba on alati suunatud Päikesest eemale. Tavaliselt on kaks saba: gaasi **ioonsaba** ja **tolmu saba**. Gaasi ioone viib komeedist eemale päikesetuul, enamus gaasi saba helendusest on tingitud ergastatud aatomite kiirgusest. Tolmu saba viib eemale kiirgusrõhk ja tema heledus on peegeldunud päikesevalgus. Kuna tolmuosakeste kiirused on väiksemad kui gaasiosakestel, siis on tolmu saba rohkem kõverdunud kui gaasi saba. Komeetidel on ka teatud mõõduka aktiivsuse ilmingud, st aeg-ajalt nende heledus. On täheldatud ka suunatud väljapurskeid. Gaasisaba spektris domineerivad CO, CO₂, N₂, NH₃ jm jooned. Infrapunase piirkonna vaatlused osutavad, et ka silikaate on küllalt palju, eriti pinnakihi, kust jää on aurustunud. Palju on ka vett. Komeedi-aine ja temperatuur mõnikümme kelvinit.

Kuna komeedid Päikese lähedal purunevad kergelt, siis peab eksisteerima nende pidev taastootmise allikas. Arvatakse, et 10000–50000 aü kaugusel asub nn **Oorti pilv**, mis ümbritseb päikesesüsteemi. Juhuslike häirituste tõttu saab aeg-ajalt mõni komeet

kiiruse, mis viib ta Päikese lähedale. Need on pikaperioodilised komeedid. Lühiperioodilised komeedid pärinevad Neptuuni orbiidi taga paiknevast nn **Kuiperi vööst** kaugustel 30 – 100 aü Päikesest.

Komeetide orbiidid ei ole tingimata seotud ekliptika tasandiga. Lühiperioodilised orbiidid siiski eriti kõrgele ekliptika kohale ei lähe ent pikaperioodilised komeedid võivad omada suvaliselt orienteeritud orbiiti

Komeetide masse on mõnikord määratud nende interaktsioonidest muude päikesesüsteemi objektidega või on ka hinnatud lihtsalt nende tuumade mõõtmete alusel, eeldusel, et nad on tehtud jääst (tihedus võib olla vaid 100 kg/m^3). Nii on saadud tüüpilised massid 10^{12} kuni 10^{16} kg., mis on võrreldav väiksemate asteroidide massidega. Aja jooksul komeetide massid vähenevad, sest iga lähenemisega Päikesele osa ainest aurustub.

9.3 Meteoroidid

Piir asteroidide ja meteoroidide vahel on hajuv. Kokkuleppeliselt nimetakse meteoroidideks alla 100 m suurust keha. Täpsustus: meteoroidid ei ole ainult väiksemad asteroidsed objektid, vaid ka komeetide tükid, eriti osade meteoriidivoolude puhul. Terminoloogia täpsustus: keha enne sisenemist atmosfääri nimetatakse meteoroidiks. Kui keha on atmosfääri sisenenud, siis tehakse vahet meteoriidi ja meteoori vahel. Maapinnale jõudvat keha nimetatakse meteoriidiks; meteoor maapeale ei jõua, vaid põleb atmosfääris ära.

Optilise perspektiivi tõttu need meteoorid, mis sisenevad atmosfääri samast suunast, näivad taevas radiaalselt teatud punktist, nn radiandist laiali lendavat. Selliseid voolusid nimetatakse vastava tähtkuju järgi, nt perseiidid (Perseuse tähtkujus) augustis ja geminiidid (Kaksikute tähtkujus) detsembris. Osa meteoorivoolusid liiguvad samal orbiidil kui mõni tuntud komeet, need ongi arvatavasti komeedi fragmendid.

Raudmeteoriitide leitakse umbes 1/4 kõigist ja nende koostis on peaaegu puhas Ni-Fe. Raudmeteoriitide lihvimisel tuleb tavaliselt ilmsiks veel nende eripärane kristallstruktuur. Umbes 3/4 leitud meteoriitidest on kivimeteoriidid. Tegelikult (st taevas) on raudmeteoriitide osakaal tublisti vähem, ent nad elavad atmosfääri läbimise ja põrke kergemini üle.

9.4 Päikesesüsteemi tekke mudelite iseloomustus

Planeetide ja nende kaaslaste päritolu on keeruline ja veel mitte täiesti lõpuni lahendatud mõistatus, ehkki põhilised toimivate protsesside omadused on üsna hästi mõistetud.

Igasugune meie päikesesüsteemi teooria peab arvestama olemasolevate faktidega. Näiteks järgmistega.

1. *Iga planeet on ruumis suhteliselt isoleeritud.* Jämedates joontes, iga planeet paikneb eelnevast kaks korda suuremal kaugusel kui eelnev sisemine naaber.
2. *Planeetide orbiidid on ligikaudu ringikujulised.*
3. *Planeetide orbiidid paiknevad ligikaudu samas tasandis.*
4. *Suund millega planeet tiirleb ümber Päikese (Maa põhjapooluse suunast vaadatuna kellaosuti vastassuund) on see sama suund, millega Päike pöörleb ümber oma telje.*
5. *Enamik planeetide pöörlemise suund ümber oma telje on sama suund, millega Päike pöörleb ümber oma telje.* (Eranditeks on Veenus, Uraan ja Pluuto).
6. *Enamik teadaolevaid planeetide kaaslaseid tiirleb oma koduplaneetide ümber samas suunas kui planeet pöörleb ümber oma telje.*
7. *Meie planeedisüsteem on tugevalt jaotunud.* Siseplaneete iseloomustab suur tihedus, aeglane pöörlemine ja väike kaaslaste arv. Välimised planeedid on väikese tihedusega, kiire pöörlemisega ja paljude kaaslastega.
8. *Asteroidid on väga vanad ja nende omadused ei ole iseloomulikud ei sisemiste ei välimiste planeetidele ega ka nende kaaslastele.*
9. *Komeedid on primitiivsed jäised fragmendid, mis ei tiirle ekliptika tasandis ja paiknevad Päikesest suurtel kaugustel.*

Kõik need asjaolud viitavad tugevale korrastatusele päikesesüsteemis.

Võrdselt tähtis on mõista, mida meie planeedisüsteemi tekke teooria *ei* seleta. Planeedid on peale oma kujunemist oluliselt arenenud ja need omadused ei kuulu meie loetelusse. Näiteks, Veenuse kasvav kasvahoone efekt, Kuu sünkroonne pöörlemine, tühikud asteroidide vöös jms.

Lisaks mitmetele seaduspärasustele on meie päikesesüsteemis ka palju *irregulaarsusi*, milledest mõnesid oleme juba maininud. Nad ei ole mingil juhul meie teooriale kahjulikud, vaid aitavad meie selgituste piire kombata. Näiteks, meie teooria ei tohi nõuda, et *kindlasti kõik* planeedid omaksid *ainult* päripidi tiirlevaid kaaslasi. Seega peab teooria omama teatud paindlikust ja lubama kõrvalekaldeid.

9.5 Kondensatsiooni teooria

Teooria lätted lähevad 17. sajandi prantsuse filosoofi Descartes'ini, kes kirjeldas tähtedevahelise gaasi pilve kokkutõmbumist, tihenemist ja kuumenemist. Selle tsentris tekib täht – Päike, välimine külmem osa moodustab hiiglasliku pöörleva aine piirkonna, millest tekivad planeedid. 18. sajandi lõpul arendas prantsuse astronoom-matemaatik Laplace kvantitatiivse mudeli. Ta näitas, et impulssmomenti jäävuse kohaselt peab tähtedevahelise gaasi pilv kokku tõmbudes hakkama kiiremini pöörlema. See peab aga tähendama udukogu *kuju* muutumist – udukogu võtab lapiku kuju.

Astronoomid on üsna veendunud, et sellised gaasikettad tekivad, kuna mitme teise tähe ümber on sarnaseid kettaid vaadeldud. Ketaste läbimõõt on umbes 500 aü – ligikaudu 10 kordne Pluuto orbiidi läbimõõt.

Kaasaegsete mudelite järgi toimub päikesesüsteemi kujunemine järgmistes ligikaudsetes etappides. Tolmurikas tähtedevahelise gaasi pilv mõõtmega umbes 1 va. Mingi väline sündmus, tõenäoliselt lähedase tähe plahvatus, algatab pilve kokkutõmbumise mõõtmetereni umbes 100 a. Kui pilv tõmbub kokku, siis hakkab ta ka ühtlasi kiiremini pöörlema ja muutub lapikumaks.

Vastavalt kondensatsiooniteooriale formeeruvad planeedid kolmes etapis.

Esimese etapina moodustavad tolmuosakesed kondensatsioonituumad, millede ümber aine hakkab koonduma. Esialgne kasv toimub väga kiirelt. Kiirelt toimub ka kondensatsioonituumade esialgne omavaheline ühinemine. Kuhjumid kasvavad suhteliselt kiirelt tennisepalli, korvpalli suuruseks ja veel edasi. Seda järk-järgulist väiksemate objektide kasvamise protsessi pörkumiste ja ühinemiste teel nimetatakse **akretsiooniks**. Sel teel tekivad objektid suurusega mõnisada kilomeetrit. Suuruse kasvades hakkab lisaks objektide ristlõikele pörkumistele mõjuma ka objektide gravitatsioon, mis soodustab kasvamist. Selle esimese etapi lõppedes koosneb meie päikesesüsteem vesinik-heelium gaasist ja miljonitest **planetesimaalidest** – kuni 1000 km suurustest objektidest, millede gravitatsiooniväli on piisavalt suur, et mõjutada oma naabreid.

Akretsiooniprotsessi teises faasis hakkavad planetesimaalid gravitatsioonijõudude mõjul pörkuma ja ühinema omavahel suuremateks objektideks. Kuna suuremad objektid omavad suuremat gravitatsiooni, siis muutuvad suuremad objektid veel suuremaks ja peaaegu kõik planetesimaalid koonduvad lõpuks mõneks suureks protoplaneediks ja seejärel juba tänapäevasteks planeetideks. Joonisel on näidatud päikesesüsteemi keskosa kujunemise arvutimudel. Pangem tähele, et kaugemal paiknevad tekkinud planeedid hõredamalt. Protoplaneetide kasvades leiab aset ka suurte kiirustega pörkeid, mis viivad **fragmentatsioonile**. Seega suuremad muutuvad suuremaks ja väiksemad purunevad. Teatud kogus väiksemaid 10-100 km objekte lendab eemale ja saavad asteroidideks ja komeetideks. Matemaatiliste mudelite kohaselt kujuneb kaasaegsed üheksa planeeti välja juba 100 miljoni aasta jooksul.

Neli suurimat protoplaneeti said piisavalt suureks, et siseneda kolmandasse etappi: koondada enda ümber suur kogus päikesesüsteemi gaasi ja moodustada see, mida tuntakse jupiteri-sarnasteks planeetideks. Väiksemad, sisemised planeedid ei olnud piisavalt suured ja nad jäidki väikeseks. Teise seletusena on pakutud, et neli suuremat jupiteri-maailma planeeti on tekkinud päikeseudu külmade välispiirkondade ebastabiilsuse tulemusena. Selle stsenaariumi järgi on jupiteri-sarnased planeedid kujunenud otse, jättes läbimata algse akretsiooni etapi.

Paljud planeetide kaaslased (ent mitte Kuu) on tõenäoliselt tekkinud väiksema mastaabiliste akretsioonide tulemusena oma emaplaneetide gravitatsiooniväljas.

Maa-sarnaste ja jupiteri-sarnaste planeetide põhilised erinevused on mõistetavad kondensatsiooni protsesside analüüsi alusel. Selleks on vaja vaadelda esmalt päikeseudu temperatuuri jaotust. Kui ürgne päikesesüsteem tõmbus kokku ja muutus lamedamaks siis tema temperatuur tõusis. Keskosades oli temperatuur kõrgem ja perifeerias madalam. Arvutused annavad, et keskel oli temperatuur mõnituhat kelvinit. Kaugusel 10 a, seal kus asub praegu Saturn, oli temperatuur umbes 100 K.

Igas kohas saavad kondenseeruda vaid need ained, mis on võimelised antud temperatuuri üle elama. Merkuuri orbiidi läheduses saavad kondenseeruda vaid metallilised terakesed – temperatuur on liiga kõrge teiste osakeste eksisteerimiseks.

Veidi kaugemal, umbes 1 au juures oli lisaks metallidele võimalik kondenseeruda ka räniühenditel. Kaugemal kui 3-4 au võis juba eksisteerida ka H₂O jää jne. Kondenseeruva aine koostis määras ära ka selle aine, millest planeedid antud kaugusel kujunesid. Näiteks, suurtel kaugustel oli temperatuur piisavalt madal, et veeaur, ammoniaak, metaan kondenseeruksid tahkeks ning need on ka jupiteri-sarnaste planeetide atmosfääride peamised koostisosad.

Paljud allesjäänud planetesimaalid paisati hiidplaneetide (eriti Uraani ja Neptuuni) gravitatsiooniväljade mõjul miljonite aastate vältel päikesesüsteemi välisosadesse. Astronoomid arvavad, et nad moodustavad praegu Oorti pilve, mille liikmed aeg-ajalt külastavad päikesesüsteemi siseosa komeetidena.

Toodud skeemi oluline ennustus on, et mõned algsed planetesimaalid peaksid olema säilinud planeetidest väljaspool, moodustades Neptuuni orbiidi taga asuva nn Kuiperi vöö. 1993. a. leiti mitmed asteroidi-suurusel objektid kaugustel 30-35 au Päikesest, mis andis tugeva kinnituse planetesimaalide teooriale. Praeguseks on teada üle 60 Kuiperi vöö objekti mõõtmega 100 kuni 400 km.

Ent mis sai gaasist? Miks me ei näe seda tänapäeval kõikjal päikesesüsteemis? Hiidplaneetide juures haarati osa gaasi hiidplaneetide gravitatsiooniväljade poolt. Ent siseosades seda ei juhtunud. Siin võttis juhtrolli oma kätte asjaformeerunud Päike. Kõik noored tähed elavad üle suure aktiivsuse perioodi, mis on tuntud T Tauri faasi nime all. Sellel etapil on tähe kiirgus ja päikesetuul väga intensiivne. Iga planeetidest allesjäänud gaas puhutakse lihtsalt eemale päikesetuule ja Päikese kiirgusrõhu poolt vahetult enne termotuumareaktsioonide algust Päikese tsentris.

9.6 Katastroofide tähtsus, impulssmomendi probleem

Nagu aga märgitud, teooria peab lubama ka teatud kõrvalekaldeid ideaalsest. Kondensatsiooni teoorias on see võimalik, kuna planetesimaalide pörked on juhuslikud. Kui kehade arv väheneb ja nende massid suurenesid, siis iga üksik pörge omandas suurema tähtsuse. Nende pörgete mõju on mitmetes päikesesüsteemi osades tänapäeval näha.

Olles alustanud üheksast korrapärasest punktist, lõpetame kaheksa ebakorrapärase omaduse loeteluga. Nende omadusi ei ole võimalik kontrollide otseselt üksikult, kuid on tõepärane oletada, et mõned (või isegi kõik) nendest on seletatavad pörgete juhuslikkusega.

1. Merkuuri ebatavaliselt suur raud-nikkel tuum võib olla kahe osaliselt kihistunud protoplaneedi pörke tulemus. Tuumad sulasid ühte ja suur osa vahevöö ainet hajus.
2. Veenuse ebatavaliselt aeglase pöörlemise seletab kahe suure keha pörge ja ühinemine.
3. Maa-Kuu süsteem võib olla tekkinud proto-Maa ja Marsi-suuruse keha pörkel.
4. Hiline pörge suure planetesimaaliga võib põhjustada Marsi põhja-lõunapoolkera asümmeetria ja paisata eemale suure osa planeedi atmosfäärist.
5. Uraani pöörlemistelje kalle võib olla tingitud pörkest piisavalt suure planetesimaaliga või kahe väiksema planeedi ühinemisest.
6. Uraani kaaslane Miranda võib olla peaaegu purunenud planetesimaaliga pörkest ja moodustunud on omapärased pinnamoodustised.
7. Interaktsioonide tõttu liigub Triton vastupidises suunas.

8. Pluuto võib olla lihtsalt Kuiperi vöö ebatavaliselt suur esindaja ja Pluuto-Charon süsteem võib olla kahe jäise planetesimaali interaktsiooni tulemus.

Ehkki Päike sisaldab 1000 korda rohkem ainet kui planeedid, omab ta vaid 0.3% päikesesüsteemi impulssmomentist. Kõik matemaatilised mudelid ennustavad, et Päike peaks pöörlema väga kiirelt (vähemalt 100 korda kiiremini) ja omama suurema osa impulssmomentist, kuna ta sisaldab suurema osa massist. See aga ilmselt ei ole nii. Seletus on Päikese formeerumise algaegade intensiivses päikesetuules. Suure kiiruselised laetud osakesed liikusid mööda magnetvälja jõujooni. Päikese pöörlev magnetväli püüdis seega neid osakesi endaga kaasa vedada, mis ei ole aga lihtne. Osakeste eemaldudes Päikesest kandsid nad endaga kaasa ka impulssmomenti. Suur osakeste arv pidurdas nii efektiivselt päikese pöörlemise. Ka tänapäeval aeglustub Päikese pöörlemine pidevalt.