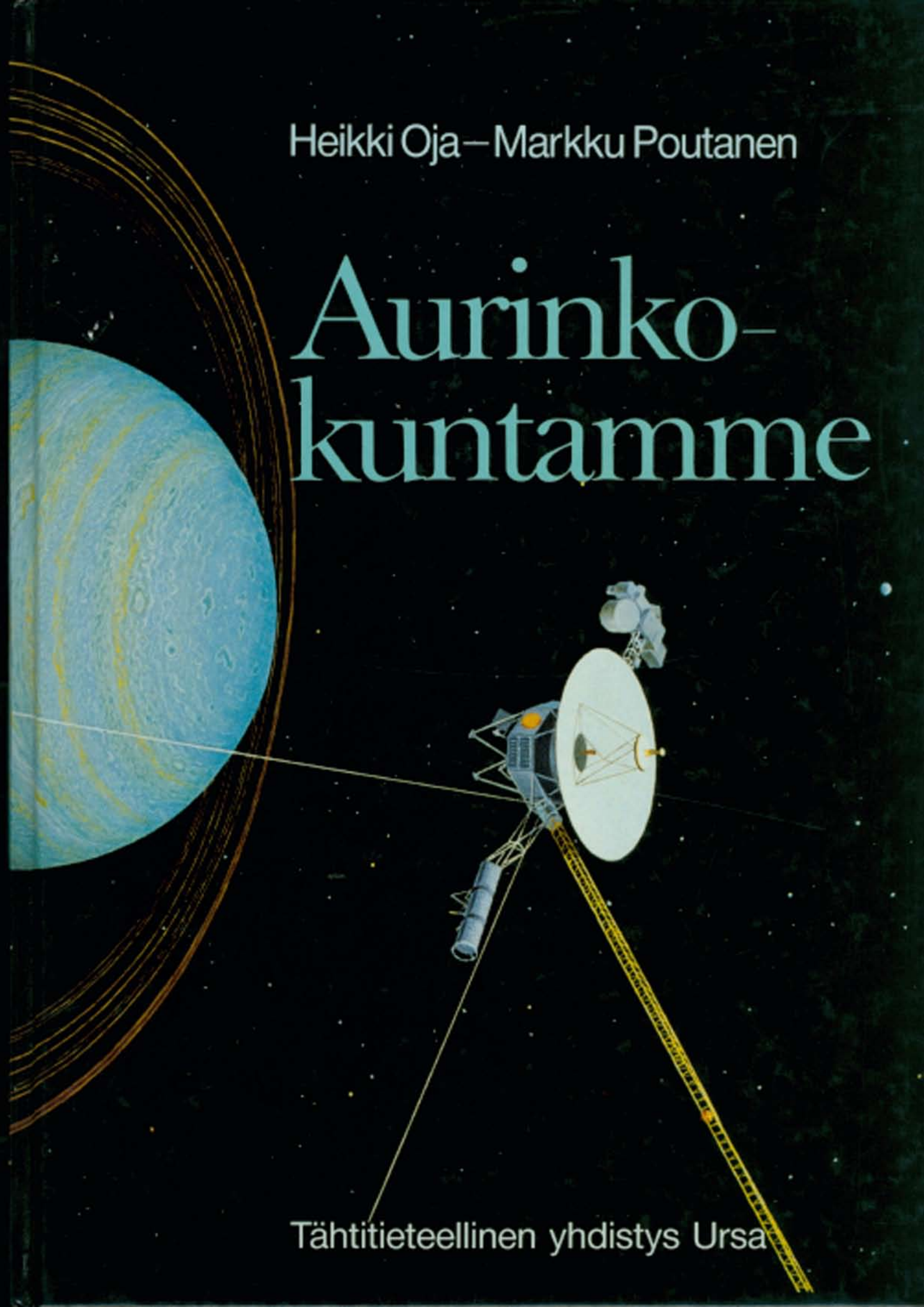
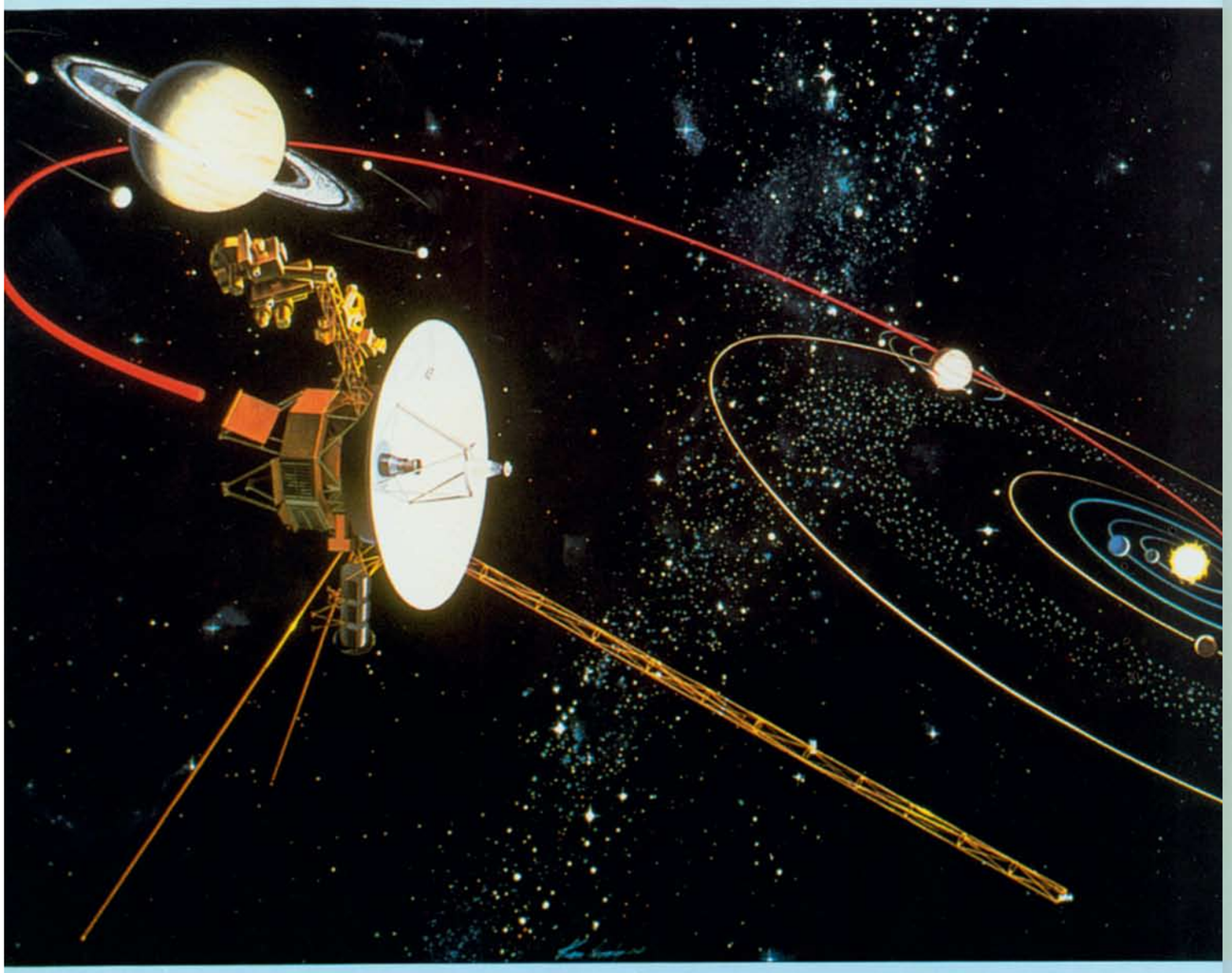
Heikki Oja – Markku Poutanen

Aurinko-kuntamme



Tähtitieteellinen yhdistys Ursa



Ursan julkaisuja 41

Heikki Oja – Markku Poutanen

Aurinko-kuntamme

Tähtitieteellinen yhdistys Ursa
Helsinki 1990

Kannessa taiteilijan piirros Voyager 2 -luotaimesta kiitämässä Uranuksen ohi. (Kuva JPL/Nasa)

Sivulla 3 Voyager-luotainten reitti Maasta Jupiteriin ja Saturnukseen. Voyager 2 jatkoi vielä Uranuksen ja Neptunuksen ohi. (Piirros Nasa)

Kirjan valokuvat ja piirrokset copyright
Tähtitieteellinen yhdistys Ursa,
Laivanvarustajankatu 3, 00140 Helsinki,
puh. 90-174 048.

Kirjan taitto Arja Latvala
Laatikoiden ladonta Markku Poutanen

Painokaari Oy,
Helsinki 1990

ISSN 0357-7937

ISBN 951-9269-54-1

Sisällys

Lukijalle 7
Aurinkokuntamme 9
Keskustähti Aurinko 24
Sisin planeetta Merkurius 31
Pilvien verhoama Venus 39
Kotiplaneettamme Maa 50
Mars – punainen planeetta 64
Jättiläisplaneetta Jupiter 76
Rengasplaneetta Saturnus 89
Utuinen Uranus 101
Kaukainen Neptunus 110
Tuntematon Pluto 120
Aurinkokunnan pienkappaleet 126
Kymmenen taulukkoa aurinkokunnan kappaleista 140
Sanasto 151
Kirjallisuusluettelo 155
Kirjoittajat 156
Hakemisto 157
Tähtitieteellinen yhdistys Ursa 160
Ursan julkaisuja 160

Chesley Bonestell (1888—1986) oli amerikkalainen taiteilija, joka 1940-luvulla erikoistui tähtitieteeseen. Hän piirsi kirjoihin ja elokuviin realistisia ja vaikuttavia kuvia avaruustutkimuksesta ja planeetoista. Bonestell suunnitteli maisemansa tuon ajan parhaan tietämyksen mukaisiksi. Vasta avaruusluotaimet ovat osoittaneet, millaista planeetoilla todellisuudessa on. Bonestellin kuvat olivat innoituksen lähteenä monille 1940- ja 50-luvun nuorille. Suomalaiset tuntevat Bonestellin ehkä parhaiten yhteistyössä Willi Leyn kanssa syntyneestä kirjasta Avaruuden valloitus (WSOY 1952). Yllä Bonestellin maalaus Saturnuksesta nähtynä Japetus-kuunsa pinnalta. Sisäsivuilla on useita muita Bonestellin maalauksia eri planeetoista.

Lukijalle

Elokuussa 1989 Voyager 2 -avaruusluotain lensi Neptunuksen ohi ja lähetti komeita kuvia planeetasta ja sen kuista ja renkaista.

Tämä ohilento merkitsi ison urakan valmistumista. Aurinkokuntamme kaikki kahdeksan suurinta planeettaa on nyt saatu lähitutkimuksen piiriin. Vain pienin Pluto on jäänyt vaille omaa avaruusluotaintaan.

Avaruusalukset ovat tutkineet neljää maankaltaista planeettaa ja neljää jättiläisplaneettaa. Luotainten ansiosta on tunnettujen kuiden lukumäärä noussut jo kuuteenkymmeneen. Kaikilta neljältä jättiläisplaneetalta on löydetty renkaat.

Avaruusluotaimet ovat aloittaneet myös aurinkokunnan pienempien kappaleiden tutkimisen. Kuiden ohella on saatu lähitietoja Halleyn komeetasta, ja vuoden 1991 lopulla Galileo-luotain lentää ensimmäisenä pikkuplaneetan ohi.

Kun kymmenisen vuotta sitten kirjoitimme Planeetat-kirjan, totesimme, että planeettatutkimus oli pienoisessa aallonpohjassa. 1980-luvun lama on kuitenkin jo takana. Tätäkin kirjoitettaessa on kaksi luotainta matkalla uusiin tutkimuksiin: Magellan Venukseen ja Galileo Jupiteriin. Alkaneelle vuosikymmenelle on suunniteltu useita avaruusluotaimia niin idässä kuin lännessä. Uusien löytöjen tulva näyttää jatkuvan.

* * *

Tässä kirjassa olemme käyttäneet osittain hyväksi Planeetat-kirjan tekstiä, joka on muokattu ajan tasalle, mutta suuri osa tekstistä on kokonaan uutta. Poutanen on kirjoittanut kaksi ensimmäistä lukua, Oja luvut Merkuriuksesta Marsiin ja Poutanen Jupiterista pienkappaleisiin. Kumpikin on tarkistanut toisen osuudet.

Kirjaa varten hankittiin runsaasti uusia väri- ja mustavalkokuvia, joista valittiin näyttävimmät kuvat kertomaan avaruusluotainten saavutuksista ja aurinkokunnan uusista maailmoista.

Haluamme kiittää Suomalaisen kirjallisuuden edistämisvarojen valtuuskuntaa, jonka apuraha osaltaan auttoi käsikirjoituksen valmistamista.

Helsingissä kesäkuussa 1990

Heikki Oja
Markku Poutanen

Tähtitaivas metsän yllä. Aikavalotuksella otetussa kuvassa tähdet piirtävät taivaalle viirun. (Kuva Heikki Ketola)

Aurinkokuntamme

Kautta aikojen ihminen on katsonut tähtiin. Joillekin yöllisen tähtitaivaan tuhannet valopisteet ovat merkinneet jumalten läsnäoloa, joillekin kompassia, jonka avulla suunnistaa pimeällä merellä ja joillekin suurta visuaalista elämystä. Vasta kaupunkilaistunut nykyihminen on kadottanut yhteytensä tähtitaivaalle. Yhä leviävä valosaaste himmentää tähdet, ja yhä harvempi tietää, miltä kuulaan, kuuttoman syysyön tähtitaivas näyttää, kun sitä katselee kaukana kaupunkien valoista.

Yö yöltä, vuodesta ja vuosikymmenestä toiseen tähtitaivas näyttää samalta ja muuttumattomalta. Vuoden kierron myötä näemme eri osan taivasta, mutta tähtien lukumäärä ja keskinäiset asennot eivät muutu. Ihmismittapuun mukaan tähdet ovat ikuisia.

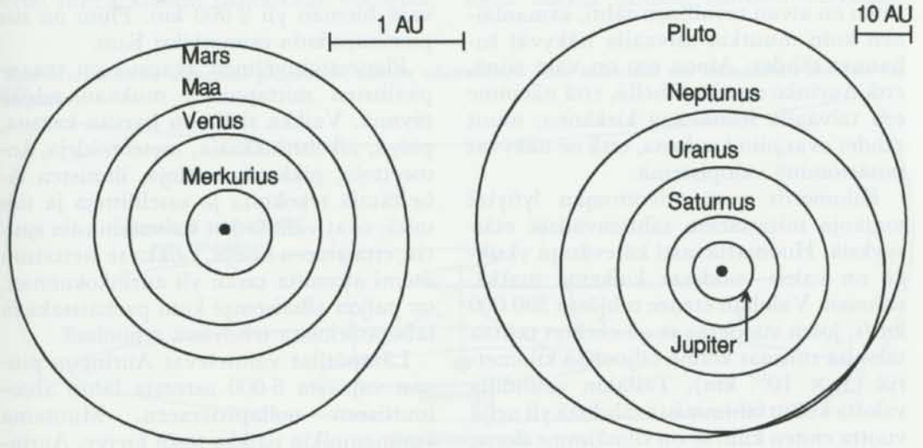
Taivaalla on myös liikkuvia kohteita: *planeettoja, komeettoja, tähdenlentoja* sekä tietysti *Kuu* ja *Aurinko*, jotka ovat määränneet ihmisten elämänrytmin. Ne kaikki ovat meitä lähellä olevia *aurinkokuntamme* kappaleita.

Maapallo on yksi Aurinkoa kiertävästä yhdeksästä planeetasta. *Merkurius, Venus, Maa, Mars, Jupiter* ja *Saturnus* olivat tunnettuja jo hamassa muinaisuudessa (vaikka Maata tuskin ajateltiin samaan kastiin muiden kanssa). Kolme kaukaisinta, *Uranus, Neptunus* ja *Pluto*, on löydetty vasta uudella ajalla, eivätkä ne näy ilman kaukoputken apua.

Planeettojen lisäksi Aurinkoa kiertää koko joukko pikkukappaleita: *meteoroideja, pikkuplaneettoja* ja *pyrstötähtiä*. Mutta myös planeetoilla on omia kiertolaisia, *kuita*. Maapallolla niitä on tasan yksi, mutta Saturnuksella peräti parikymmentä.

Aurinkokunnan mittasuhteet

Kuussa käyneet astronautit ovat kuvanneet Maata tyhjyyden keskellä kelluvaksi hauraaksi, tavattoman kauniiksi kappaleeksi. Tyhjyys on oikea sana kuvaamaan avaruutta. Jopa "ruuhkaisessa" aurinkokunnassamme, missä ainetta on keskimääräistä tiheämmässä, ei planeettojen välillä ole juuri mitään. Ja planeetat ovat pieniä pölyhiukkasia äärettömässä avaruudessa.



Planeettojen radat. (Piirrokset Markku Poutanen)

Planeettojen koko Maahan verrattuna. Tällä sivulla maankaltaiset planeetat ja Kuu, viereisellä sivulla jättiläisplaneetat. Kaikki kuvat ovat todellisia valokuvia, joita avaruusluotaimet ovat ottaneet. (Kuvat Astronomical Society of the Pacific -yhdistyksen diasarjasta The Worlds in Comparison ja The Planetary System)

Aurinkokuntamme keskuskappale Aurinko on aivan tavallinen tähti, samanlainen kuin muutkin taivaalla näkyvät tuhannet tähdet. Ainoa ero on vain siinä, että Aurinko on niin lähellä, että näemme sen taivaalla loistavana kiekkona, muut tähdet ovat niin kaukana, että ne näkyvät mitättöminä valopisteinä.

Kilometrit ovat toivottoman lyhyitä matkoja mitattaessa tähtienvälisiä etäisyyksiä. Huomattavasti kätevämpi yksikkö on valon vuodessa kulkema matka, *valovuosi*. Valohan etenee tyhjössä 300 000 km/s, joten vuodessa se on ehtinyt taittaa taivalta runsaat kolme biljoonaa kilometriä (3×10^{12} km). Tälläkin vauhdilla valolta kuluu lähimmistä tähdistä yli neljä vuotta ennen kuin se on silmäimme ilona.

Suurin osa taivaalla paljain silmin näkyvistä tähdistä on muutaman kymmenen valovuoden päässä. Aurinko on meistä kahdeksan valo*minuutin* etäisyydellä.

Aurinkokunnan sisäisiä etäisyyksiä mitataan vielä yhdellä uudella mitalla, *tähtitieteellisellä yksiköllä*, josta usein käytetään myös sen englanninkielistä lyhennettä AU (= Astronomical Unit). Se on Maan ja Auringon välinen etäisyys, 149.6 miljoonaa kilometriä eli juuri tuo kahdeksan valominuuttia. Uloimmat planeetat ovat yli 30 AU:n päässä.

Entä sitten itse planeetat? Maapallon läpimitan tiedetään olevan runsaat 12 000 km. Jupiter, suurin planeetoista on läpimitaltaan yli 142 000 km ja pienin, Pluto, vain hieman yli 2 000 km. Pluto on siis pienempi kuin esimerkiksi Kuu.

Planeettainvälinen avaruus on maanpäällisten mittapuiden mukaan tyhjää täynnä. Vaikka siellä on harvaa kaasua, pölyä, alkeishiukkasia, meteoroideja, komeettoja, pikkuplaneettoja, ihmisten lähettämiä tekokuita ja satelliitteja ja ties mitä, ovat välimatkat kuitenkin niin suuria, että aineen tiheys, vaikka se jaettaisiin atomi atomilta tasan yli aurinkokunnan, on paljon alhaisempi kuin parhaissakaan laboratorioissa tehdyissä tyhjiöissä.

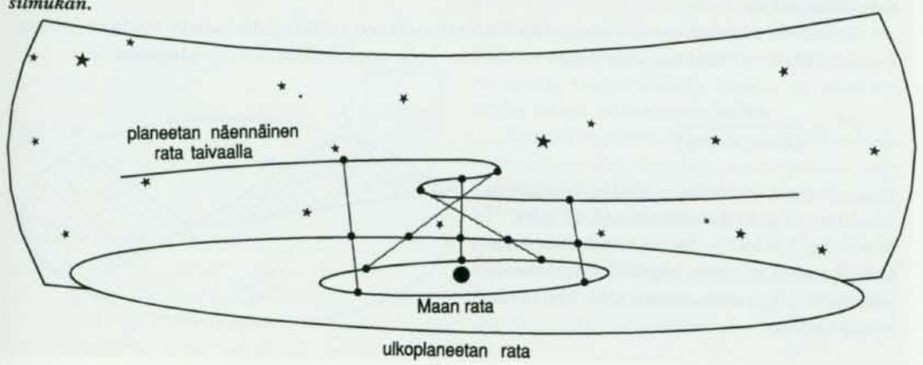
Lämpötilat vaihtelevat Auringon pinnan vajaasta 6 000 asteesta lähes absoluuttiseen nollapisteeseen. Muutama kuumempikin paikka tosin löytyy. Auringon keskustassa vallitsee yli 10 miljoonan asteen lämpötila, mutta vielä tätäkin kuumempaa on jättiläisplaneettojen Jupiterin ja Saturnuksen ympärillä.

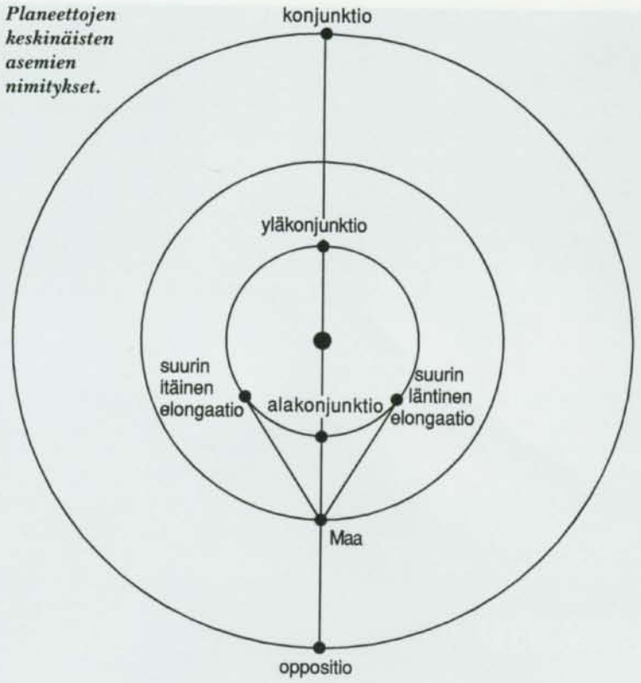
Lämpöhän on atomien ja molekyylien liikettä. Mitä nopeammin hitunen liikkuu, sitä korkeampaa lämpötilaa se tietää. Jupiterin ja Saturnuksen magneettikentät kiihdyttävät lähistölle joutuneet varatut hiukkaset sellaiseen vauhtiin, että lämpötilaksi tulkittuna se vastaa satoja miljoonia asteita. Kaasu tosin on niin harvaa, ettei siihen mahdu paljonkaan energiaa, eikä ympäristö muutenkaan taida vastata ennakkokäsityksiämme ns. kuumasta paikasta.

Se pyörii sittenkin

Pikainen vilkaisu taivaalle ei kerro mitään planeettojen liikkeestä. Yhden illan tai ehkä edes viikon kuluessa ei liikettä vielä näy, mutta jos sitkeästi jaksaa seurata viikosta toiseen, havaitsee kuinka planeettojen asema tähtien suhteen verkkaan

Kun Maa ohittaa ulomman planeetan, tämän näennäinen rata taivaalla voi muodostaa mutkan tai silmukan.





Planeettojen keskinäisten asemien nimitykset.

muuttuu. Kullakin planeetalla liike näyttää erilaiselta ja vieläpä samalla planeetalla se on erinäköistä eri vuosina.

Planeettoja on kahta tyyppiä: Merkurius ja Venus ovat aina enemmän tai vähemmän Auringon suunnalla. Yhteiseltä nimeltään ne ovat *sisäplaneettoja*, sillä ne kiertävät Aurinkoa lähempänä kuin maapallo ja näkyvät aina vain ilta- tai aamutaivaalla. (Itse asiassa Venusta kutsutaan joskus *ilta-* ja *aamutähdeksi*.) Sisäplaneetan liike on varsin yksioikoista: Se ilmestyy aluksi näkyviin iltataivaalle, etääntyy kappaleen matkaa Auringosta ja alkaa nopeasti taas lähestyä sitä. Pian planeetta on aamutaivaalla, missä se nopeasti etääntyy kauemmaksi Auringosta. Ennen pitkää se alkaa jälleen verkkaan lähestyä Aurinkoa ja näkyy aamu aamulta yhä huonommin, kunnes lopulta katoaa kokonaan.

Muut planeetat Marsista ulospäin ovat *ulkoplaneettoja*. Ne voivat näkyä myös keskellä yötä, täsmälleen vastakkaisessa suunnassa kuin Aurinko. Tuolloin niiden

Keplerin lait

Planeetat liikkuvat Auringon ympäri pitkin ellipsejä, joiden toisessa polttopisteessä on Aurinko. (Tätä kutsutaan Keplerin 1. laiksi.) Planeettojen rataellipsit ovat kuitenkin niin lähellä ympyröitä, että jos tämän kirjan sivulle piirrettäisiin rata oikean muotoisena, poikkeaisi ellipsi ympyrästä viivan paksuutta vähemmän. Komeettojen radat ovat paljon soikeampia: lähimmillään Aurinkoa ne saattavat tulla maapallon radan sisäpuolelle, kauimmillaan ne voivat olla kymmeniä kertoja kauempana kuin Pluto.

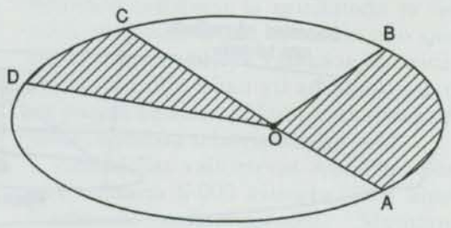
Kappaleen nopeus radallaan vaihtelee siitä riippuen kuinka kaukana Auringosta se on. Lähellä Aurinkoa kappale liikkuu nopeammin kuin ratansa kaukaisemmassa osassa. (Keplerin 2. laki.) Nopeus muuttuu siten, että jos aikavälit A–B ja C–D ovat yhtä pitkät, ovat pinta-alat ABO ja CDO yhtä suuret.

Keplerin 3. laki puolestaan antaa yhteyden radan koon ja kiertoajan välille: kahden planeetan kiertoaikojen neliöt ovat verrannollisia Auringosta mitattujen keskietäisyyksien kuutioihin.

Newtonin runsaat puoli vuosisataa Keplerin jälkeen esittämistä laeista voidaan johtaa 3. lain yleisempi muoto, joka pätee muillekin kuin aurinkokuntamme planeetoille:

$$P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(m_1 + m_2)},$$

jossa P on kiertoaika, a radan isoakselin puolikas, G gravitaatiovakio (6.67×10^{-11} N m^2/kg^2) sekä m_1 ja m_2 kappalten massat. Kaavaa voidaan käyttää laskettaessa vaikkapa planeetan massa sitä kiertävän kuun avulla.



sanotaan olevan *oppositiossa*. Ulkoplaneettojen näennäinen liike taivaalla voi olla varsin monimutkaista ja vieläpä eri aikoina erilaista. Ne ilmestyvät aamutaivaalle, mutta nousevat yö yöltä aikaisemmin. Tähtien suhteen planeetat liikkuvat samaan suuntaan kuin Kuu tai Aurinko. Viikkojen kuluessa liike kuitenkin hidastuu, pysähtyy ja kääntyy vastakkaiseksi. Oppositio on vastakkaisen liikkeen puolivälissä. Aikanaan liike jälleen kääntyy alkuperäiseen suuntaansa, ja pian planeetta näkyy enää lyhyen aikaa iltataivaalla, kunnes sitten katoaa Auringon loistoon. Planeetta näyttää tehneen tähtien suhteen silmukan tai Z:n muotoisen kuvion.

Jo muinaiset Kaksoisvirranmaan tähtitieteilijät tunsivat planeettojen liikkeet niin hyvin, että he osasivat laatia tauluja, joiden perusteella tulevia taivaan tapahtumia saattoi ennustaa. Myös Kiinassa ja Intiassa harrastettiin tähtitiedettä, mutta parhaiten meille on säilynyt Välimeren maiden perintö, tästä yhtenä osoituksena on planeettojen nykyinen nimistö, joka on saatu antiikin jumalolennoilta.

Uudelle ajalle saakka aurinkokunta oli

Planeettojen radat

Planeetan paikka taivaalla voidaan laskea, jos sen rata tunnetaan. Radan parametrit voidaan esittää usealla eri tavalla. Tietokonelaskuja varten annetaan yleensä kappaleen paikka ja nopeus jollain hetkellä. Näistä tiedoista voidaan laskea uusi paikka ja nopeus jollekin toiselle ajanhetkelle.

Tämä ei kuitenkaan ole kovin havainnollista. Perinteisesti rata on esitetty kuuden ns. rataelementin avulla, jotka antavat radan muodon, koon ja aseman avaruudessa sekä myös planeetan paikan radallaan. Nämä kuusi rataelementtiä ovat:

1. Isoakselin puolikas ("keskietäisyys") määrää radan koon.

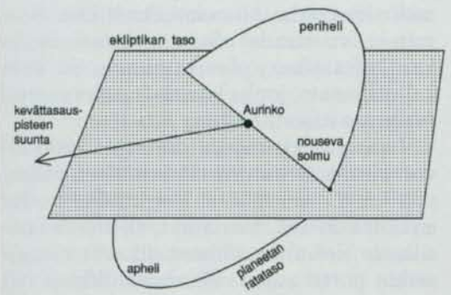
2. Eksentrisyys (epäkeskisyys) kertoo paljonko radan keskipiste poikkeaa Auringosta, ja määrää samalla radan muodon. Ympyäradan eksentrisyys on 0, ellipsin välillä 0–1; mitä soikeampi ellipsi, sitä lähempänä ykköstä eksentrisyys on. Paraabeliradan eksentrisyys on tasan 1 ja hyperbeliradan ykköstä suurempi.

3. Inklinaatio määrää radan kaltevuuden jonkin perustason suhteen. Usein perustasona käytetään maapallon radan tasoa eli ekliptikan tasoa.

4. Nousevan solmun pituus on pitkin em. perustasoa mitattu kulma siihen suuntaan, missä planeetan rata nousee tason yläpuolelle. Nollasuuntana voidaan käyttää esim. kevättasauspisteen suuntaa. Nousevan solmun pituus yhdessä inklinaation kanssa määrää ratatason asennon avaruudessa.

5. Perihelin argumentti ilmoittaa suunnan, jossa planeetta on lähimmillään Aurinkoa (eli perihelissä). Tämä kiinnittää planeetan radan lopullisesti.

6. Periheliajan avulla saadaan selville planeetan paikka radallaan. Periheliaika on se ajanhetki, jolloin planeetta on radallaan lähinnä Aurinkoa.



Planeettojen ja monien muidenkin aurinkokuntamme kappaleiden ratatiedot julkaistaan vuosittain tähtitieteellisissä almanakoissa. Usein paikatkin on jo taulukoitu valmiiksi efemerideiksi, mutta ne voidaan myös laskea rataelementeistä.

Laskut voidaan tehdä myös päinvastaiseen suuntaan: Jos kappaleen paikat taivaalla on mitattu vähintään kolmena eri kertana, voidaan näistä paikkahavainnoista laskea rataelementit. Käytännössä laskut ovat varsin monimutkaisia, ja tarkkojen rataelementtien saamiseksi tarvitsemme huomattavasti enemmän havaintoja.

Tähdet syntyvät suurista kaasu- ja pölypilvistä. Kuvassa Orionin sumu. (Kuva U. S. Naval Observatory)

maailmankaikkeus. Maa oli kaikkeuden keskus, jota Aurinko, Kuu ja planeetat kiersivät. Uloimpana oli kiintotähtien pallonkuori. Vuosisataisen kehityksen tuottama malli oli hyvin mutkikas, mutta se täytti ne tarpeet, jotka vielä keskiajallakin vallitsivat. Havaintojen ja teorian välillä ei ollut sovittamatonta ristiriitaa, sillä tarkkoja havaintoja ei ollut.

Vasta tanskalaisen *Tyko Brahen* loistavat havainnot 1500-luvun lopussa toivat muutoksen. Tyko pääsi siihen tarkkuuteen, mihin ilman kaukoputkea ylipäänsä on mahdollista päästä. Ja se riitti. Tykon työn perusteella *Johannes Kepler* saattoi aloittaa uuden aikakauden. Maa oli planeetta muiden joukossa, ja kaikki planeetat liikkuivat samojen lainalaisuuksien mukaan.

Pitkien tutkimustensa tuloksena Kepler vakuuttui, että planeettojen radat olivat ellipsejä ja että kaikki planeetat kiersivät Aurinkoa saman periaatteen mukaan. Mallinsa avulla hän pystyi laskemaan taivaankappalten paikat ennennäkemättömän tarkasti. Näennäiset liikkeet taivaalla olivat Maan ja planeetan rataliikkeiden yhteisvaikutusta; monimutkaisia rakennelmia ei enää tarvittu. Mutta Kepler näki vain seuraukset, syitä hänkään ei pystynyt ymmärtämään.

Runsasta puolta vuosisataa myöhemmin *Isaac Newton* loi planeettaliikkeen fysikaalisen ja matemaattisen perustan. Newtonin suurtyöstä, *Principiasta*, sai alkuna uusi tieteenala, taivaanmekaniikka. Seuranneet vuosisadat olivat taivaanmekaniikan kulta-aikaa; planeettakunta oli kuin kellokoneisto, jonka lainalaisuudet saattoi matemaattisesti hallita.

Taivaanmekaniikka kuihtui 1900-luvun alussa. Se tuntui saavuttaneen päätepisteensä: enempää ei ihmisvoimin ollut enää tehtävissä. Vasta nyt, yli kolme vuosisataa Newtonin jälkeen alkavat viimeisetkin portit aueta. Planeettaliikkeen lait olivat johtaneet niin monimutkaisiin yhtälöihin, ettei niitä voinut kynän, paperin ja logaritmitaulun avulla ratkaista. Ongelmat voidaan kiertää nopeiden tietokoneiden avulla, joissa hienostunut matematiikka korvataan raa'alla voimalla. Ilman tietokoneita eivät luotaimetkaan löytäisi matkansa päähän.

Vasta tällä vuosisadalla, ja erityisesti vasta luotainten myötä on planeettojen itsensä ominaisuuksia alettu tutkia. Jos tuijotetaan vain yksittäisiä planeettoja, ne luonnollisestikin poikkeavat melko tavalla toisistaan. Aurinkokunnassa on kuitenkin monia lainalaisuuksia ja piirteitä, jotka eivät ole sattumaa, vaan juontavat juurensa aurinkokunnan syntyyn saakka.

Ensimmäisenä pistää silmään aurinkokunnan litteys. Kaikki planeetat kiertävät Aurinkoa lähestulkoon samassa tasossa, joka on Auringon ekvaattorin taso. Suurimmat poikkeamat ovat sisimmällä ja uloimmalla planeetalla, Merkuriuksella ja Plutolla. Myös kiertosuunta on sama kuin Auringon pyörimisen suunta, ts. vastapäivään kun tilannetta katsellaan kaukaa maapallon pohjoisnavan yläpuolelta. Radat ovat hyvin lähellä ympyröitä, sillä jos planeetan rataellipsin piirtäisi oikeanmuotoisena tämän kirjan sivulle, poikkeaisi se ympyrästä viivan paksuutta vähemmän.

Sisimmät planeetat, Merkurius, Venus, Maa ja Mars ovat likimain samanlaisia, ainakin jos niitä verrataan neljään seuraavaan, Jupiteriin, Saturnukseen, Uranukseen ja Neptunukseen. Sisempiä planeettoja kutsutaan *maankaltaisiksi*. Ne kaikki ovat suhteellisen pieniä, niiden tiheys on selvästi veden tiheyttä suurempi ja niillä on kiinteä pinta. Ulommat ovat *jättiläisplaneettoja*, joilla ei ole kiinteää pintaa ja jotka koostuvat pääasiassa vedystä ja heliumista. Kooltaan ne ovat selvästi maankaltaisia planeettoja suurempia.

Itse planeetatkin pyörivät samaan suuntaan kuin Aurinko. Tästä on kaksi poikkeusta: Venus ja Uranus. Venuksen pyörimisliike on tavattoman hidasta, mutta tapahtuu kuitenkin vastakkaiseen

Törmäykset ovat näytelleet suurta osaa aurinkokunnan kappaleiden synnyssä ja pinnan muovautumisessa. Chesley Bonestellin piirros kuvaa Kuun Sateidenmeren syntyä.

suuntaan kuin muilla planeetoilla. Uranuksella pyörimisakseli makaa likimain planeetan ratatasossa, kun muilla se on enemmän tai vähemmän sitä vastaan kohtisuorassa.

Merkuriusta ja Venusta lukuunottamatta planeetoilla on kuita, ja kuujärjestelmät muistuttavat monilta ominaisuuksiltaan pientä aurinkokuntaa. Kuilla ei ole omia kuita, vaikkakin Saturnuksella on useita samaa rataa kiertäviä seuralaisia.

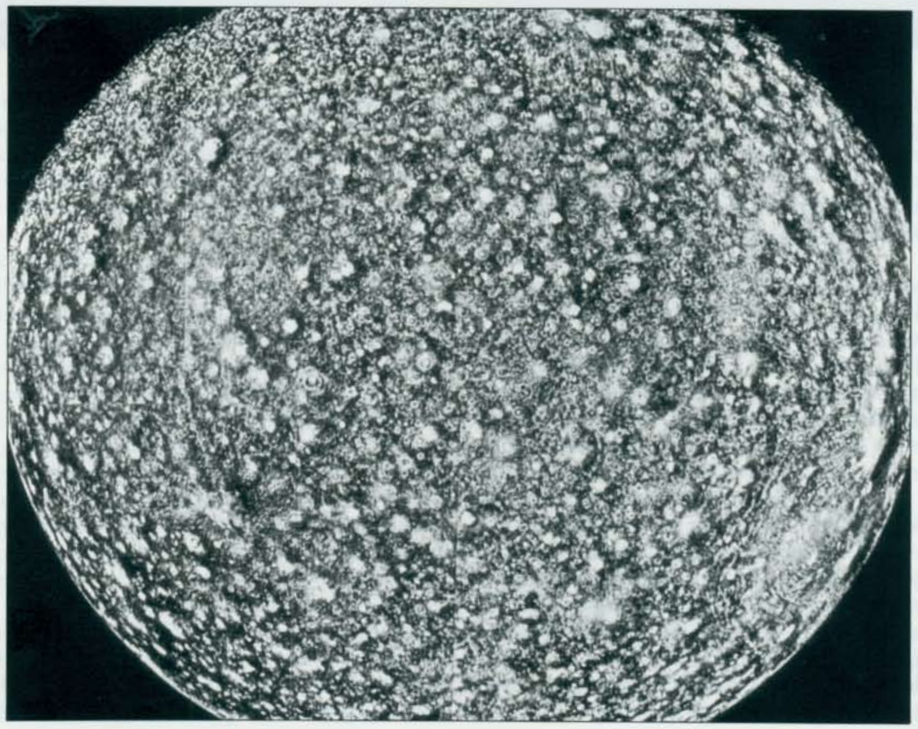
Aine ja impulssimomentti ovat jakautuneet epätasaisesti. Auringossa on ainetta tuhat kertaa enemmän kuin planeetoissa yhteensä. Se pyörii kuitenkin niin hitaasti, että koko aurinkokunnan impulssimomentista on Auringossa vain alle prosentti. (Pyörimisliikkeeseen liittyvä impulssimomentti on monille melko outo käsite, eikä syyttä: koulufysiikassa se vaietaan kuoliaaksi, vaikka onkin yhtä tärkeä säilyvä suure kuin esimerkiksi energia. Yhtä epäonnistunut on koko sana, samoin kuin jotkin muut siitä suomen kielessä käytetyt ilmaukset.)

Aurinkokunnan syntyteoriat

Sa kysyt: kuinka syntynyt on maa
ja kaikkeus? — Et muuta tietää saa:
sylistä valtameren nousee varjo
ja valtamereen jälleen vajoaa...
(Omar Khaijam: Teltantekijä,
suom. Toivo Lyy)

Kosmogonia on tieteenala joka tutkii aurinkokuntamme syntyä. Maapallon ja koko aurinkokunnan alkuvaiheiden selvittely on kärsivällisyyttä vaativaa salapoliisintyötä, sillä tuon 4.6 miljardin vuoden takaisen tapahtuman jäljet ovat lähes tyystin kadonneet. Jotain meidän on kuitenkin teorioittemme tueksi saatava ja edellä luetelluista yleispiirteistä on hyvä aloittaa.

Nykyiset mallit voidaan jakaa kahteen luokkaan: katastrofiteorioihin ja kehitysteorioihin. Edellisten mukaan planeettakunnan synty on hyvin harvinainen, jopa lähes ainutkertainen tapaus, jälkimmäiset näkevät planeetat luonnollisena osana tähden kehitystä. Valitettavasti meillä ei ole muuta esimerkkiä kuin oma aurinkokuntamme, joten emme tiedä, kuinka edustava otos tämä on. Joidenkin tähtien ympäriltä on (todennäköisesti) löydetty Jupiteria suurempia kiertolaisia tai infrapunahavainnoissa nähty ainekiekko, joka saattaisi olla planeettakunnan esiaste. Toistaiseksi nämäkin havainnot ovat varsin hataria.



Meteoriittikraatte-reiden määrä kertoo kuun pinnan iän. Vieressä Kalliston pintaa, joka on täpö täynnä kraattereita ja siksi hyvin vanhaa. Keskimmäisessä kuvassa Ganymedeen pintaa, jossa on jonkin verran kraattereita. Äärimmäisenä oikealla Ion pintaa, josta ei ole löydetty ollenkaan törmäyskraattereita: pinta uusiutuu jatkuvasti vulkaanisen toiminnan takia. (Kuvat Nasa/Voyager 1 ja 2)

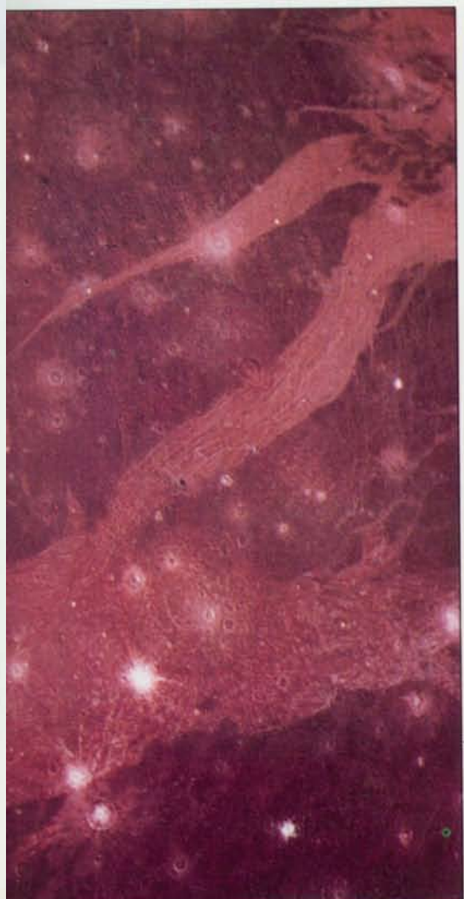
Epäsuoria todisteita saamme tähtien synnystä. Tähdet syntyvät valtavista tähtienvälisen aineen pilvistä tiivistymällä. Esimerkkejä tällaisista prosesseista on useita, näistä tunnetuimpana Orionin suuri kaasusumu, jonka sisällä parasta aikaa muodostuu uusia tähtiä. Ja jos kerran tähtiä, niin miksei sitten myös planeettoja.

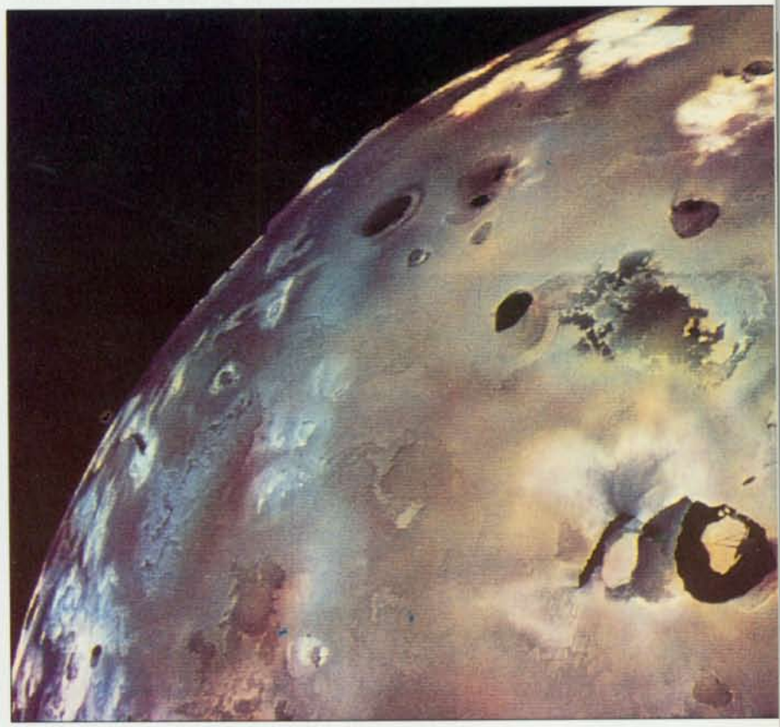
Ranskalaisen filosofin *René Descartes'n* (tai Cartesiuksen, niin kuin hänen nimensä latinankielinen muoto kuuluu) pyörreteoria vuodelta 1644 oli aurinkokunnan liikkeiden selitysyritys, eikä se suoraan liittynyt planeettakunnan syntyyn. Cartesiuksen mukaan maailmanavaruuden täyttävän eetterin pyörteet kuljettivat planeettoja Auringon ympäri, ja näin hän oli osaltaan vaikuttamassa aurinkokeskisen mallin läpimurtoon (vaikkakin väärällä mallilla. Kummallisen sitkeästi nämä pyörteet ovat kummitelleet kaikenlaisissa "teorioissa" nykypäiviin saakka. Eetteriäkään ei ole tällä vuosisadalla tarvittu kuin nukutuksissa, ja se eetteri taas on ihan toisenlaista ainetta...).

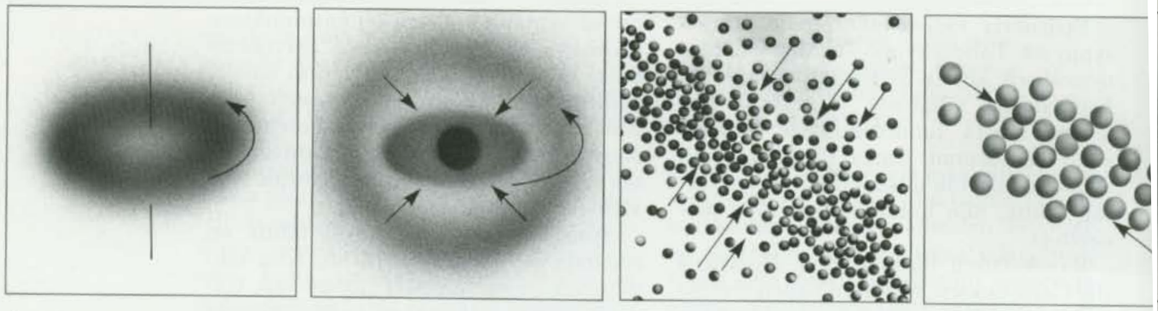
Satayksi vuotta myöhemmin *lordi Buffon* arveli aurinkokunnan syntyneen jättiläismäisen komeetan törmätessä Aurinkoon. Törmäyksessä Auringon ainetta sinkoutui avaruuteen ja tästä aineesta planeetat syntyivät. Tämä oli ensimmäinen lukuisista katastrofiteorioista. Myöhemmissä malleissa komeetta vaihtui läheltä kulkeneeseen tähteen, jonka synnyttämät valtavat vuoksiaallot repivät ainetta irti Auringosta. Planeetat muodostuivat sitten tästä aineesta, ja näin uskottiin aina 1900-luvun puoliväliin asti.

Auringon lähiympäristössä tähtiä on muutaman valovuoden välein. Kun tähtien keskinäiset nopeudet tunnetaan, voidaan läheisen ohituksen todennäköisyys laskea. Tulokseksi saadaan, että koko Linnunradassa on sen elinaikana tapahtunut vain muutama sopivan läheinen kohtaaminen. Aurinkokunta olisi siis lähestulkoon ainutlaatuinen. Auringosta sinkoutuva kaasu tuskin kuitenkaan suostuu tiivistymään planeetoiksi, vaan se hajoaa tähtienväliseen avaruuteen. Eikä maapallokaan muistuta koostumukseltaan Aurinkoa, vaikka Jupiter tuohon kuvaan saattaisikin sopia.

Vain kymmenen vuotta Buffonin jälkeen, vuonna 1755, *Immanuel Kant* esitti "nebulaarihypoteesin", jonka mukaan Aurinko ja planeetat ovat muodostuneet tiivistymällä suuresta pyörivästä kaasupilvestä. Vaikka tämänkaltaiset kehitysteoriat eivät tulevina parina vuosisatana saaneetkaan laajaa kannatusta, on Kan-







Aurinkokunta syntyi pyörivästä kaasu- ja pölypilvestä, jonka alkuperäinen massa oli 2—3 kertaa Auringon nykyinen massa. Keskiosat kutistuivat reunoja nopeammin. Syntyvän auringon ympärille muodostui kaasu- ja pölykiekko, planeettakunnan esiaste. Pölyhiukkasten törmäillessä toisiinsa syntyi suurempia hiukkasia. Hiukkaset vajosivat nopeasti samaan tasoon muodostaen hyvin litteän kiekon. Hiukkaset kasautuivat yhä suuremmiksi muodostelmiksi, likimain nykyisten asteroidien kokoisiksi. Löyhät ainekasautumat muodostivat vähitellen planeetan kokoisia kasautumia. Alkuplaneetan massan kasvaessa se pystyi keräämään kaasua ympäröivästä pilvestä. Voimakas aurinkotuuli puhalsi jäljellejääneen kaasun ja pölyn pois — planeettojen muodostuminen päättyi. (Heikki Luhtalan piirrokset Ursan Planeetat-kirjasta)

tin malli osoittautunut olevan yllättävän lähellä nykyisiä käsityksiä.

Kehitysteorioiden ehkä suurimpana ongelmana oli aineen ja impulssimomentin jakautuminen. Jos Aurinko ja planeetat olisivat muodostuneet samasta pilvestä, pitäisi Auringon pyöriä nykyistä huomattavasti nopeammin. (Piruettia pyörivä taitoluistelija käyttää impulssimomentin säilymistä hyväkseen: kun hän vetää kädet lähelle vartaloa, pyörimisnopeus kasvaa. Samoin kutistuvan kaasupilven ja erityisesti sen keskelle syntyvän tähden pyörimisnopeuden pitäisi kasvaa.) Tähden täytyy jollain tavalla päästä eroon liiasta vauhdistaan.

Vauhdin hidastumiseen on kaksi syytä: magneettikenttä ja aurinkotuuli. Tähtienvälisessä avaruudessa on Linnunradan heikko magneettikenttä. Kenttä on myös siinä pilvessä, josta tähti syntyy. Pilven kutistuessa magneettikenttä seuraa mukana, jolloin sen tiheys kasvaa pilven tiheyden myötä. (Sittemmin Auringolle kehittyi myös ikioma magneettikenttä.) Pyöriessään Auringon mukana magneettikenttä laahaa ympäröivässä pilvessä samalla jarruttaen pyörimistä.

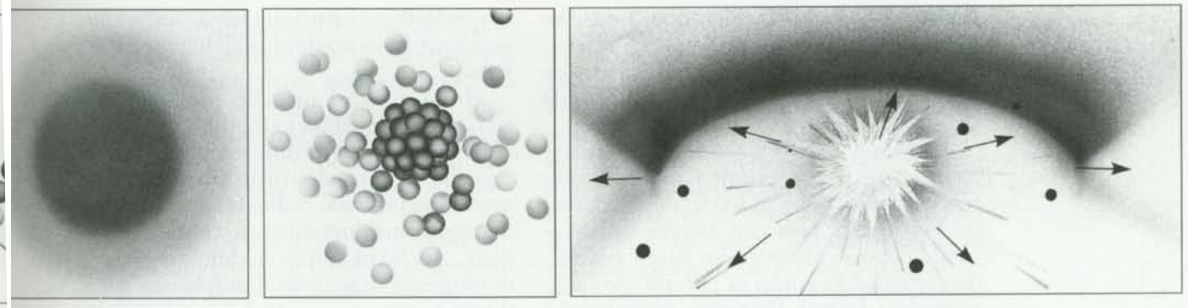
Erityisen tehokkaaksi jarrutus muuttui Auringon ydinreaktioiden käynnistyttyä, kun voimakas aurinkotuuli syntyi. Aurinkotuuli koostuu Auringosta pois kiitävistä protoneista ja elektroneista ja tällaiset varatut hiukkaset takertuvat tehokkaasti magneettikenttään. Pyörimisenergiaa siirtyy aurinkotuulen hiukkasiin ja kulkeutuu niiden mukana ulos aurinkokunnasta. Heti syntynsä jälkeen Aurinko oli muutaman kymmenen tuhatta vuotta ns. *T Tauri -vaiheessa*, jolloin se saattoi menettää aurinkotuulen mukana jopa kymmenesmiljoonasosan massastaan joka vuosi. Samalla se sai nykyisen hitaan pyörimisnopeutensa.

Kun planeetat syntyivät

Tähtienvälisessä avaruudessa on laajoja kaasun ja pölyn kasautumia, joista uusia tähtiä muodostuu. Yksi tällainen alue on Orionin tähdistön suunnalla näkyvä Orionin suuri kaasusumu. Se erottuu pienenä tähdenkaltaisena täplänä jo paljain silmin, mutta vasta valokuvissa näemme sumun kaikessa komeudessaan. Tuon pilven sisällä muodostuu tähtiä; niiden lähettämä lämpösäteily paljastaa ne, vaikka valo ei kaasu- ja pölykerroksen läpi vielä pääsekään.

Mikä sitten saa rauhallisen pilven äkkiä kutistumaan tähdiksi? Eräs mahdollisuus, vaikka ei suinkaan ainoa, on läheisen supernovan synnyttämä iskuaalto, joka puristaa pilveä kasaan. Supernova on raskaan tähden loppu, jossa koko tähti räjähtää hajalle levittäen ydinreaktioissa tuottamansa aineet laajalle avaruuteen. Jos pilven tiheys kohoaa riittävän suureksi, painovoima pääsee voitolle ja pilvi jatkaa luhistumistaan, jota kuumenevan keskiosan kasvava kaasunpaine parhaansa mukaan yrittää jarruttaa.

Supernovilla on toinenkin tehtävä: ne lisäävät raskaiden alkuaineiden osuutta tähtienvälisessä aineessa. Alun perin maailmankaikkeudessa ei ollut muuta kuin vetyä ja heliumia. Kaikki muut alkuaineet ovat syntyneet tähtien sisuksissa ja lähes jokainen meissäkin oleva atomi on



joskus ollut osana jotain tähteä. Ennen Aurinkoa oli ollut jo useita raskaiden, lyhytikäisten tähtien sukupolvia. Olemme kirjaimellisesti tähtien lapsia.

Tähdet eivät synny yksin vaan muutaman kymmenen tai sadan tähden joukoissa. Alkuperäisen pilven massa oli ehkä 1 000 Auringon massan luokkaa ja lämpötila muutama kymmenen kelviniä. Jo kutistumisen alkuvaiheissa pilvi hajosi muutaman Auringon massaisiin osiin, joista kukin jatkoi kutistumistaan. Yhdestä muodostui Aurinko.

Pilven keskiosa kutistui reunoja nopeammin. Keskustan lämpötila nousi nousemistaan, jolloin kaikki aineet kaasuuntuivat, mutta ulko-osat pysyivät suhteellisen viileinä. Keskelle muodostuvan Auringon lämpötila nousi edelleen, kunnes se lopulta ylitti ydinreaktioiden käynnistymisen vaatiman muutaman miljoonan asteen rajan. Uusi tähti oli syttynyt.

Tällä välin ympäröivän kaasupilven liike oli hidastunut ja lämpötila pudonnut niin alas, että aineet alkoivat tiivistyä takaisin kiinteiksi. Muodostuneet hiukkaset törmäilivät toisiinsa ja vajosivat samalla nopeasti yhteen tasoon. Pyörimisen vuoksi pilvi ei päässyt tason suunnassa enää kutistumaan; siitä oli tullut litteä kiekko. Tämä selittää aurinkokunnan nykyisen litteyden.

Hiukkaset takertuivat törmäyksissä kiinni toisiinsa muodostaen suurempia kasautumia. Yhdessä ne saivat aikaan huomattavan painovoimakentän, jonka pienen pienet epätasaisuudet voimistuivat hiukkasten ajautuessa yhä suuremmiksi kasautumiksi. Nämä löyhät, muutaman sadan metrin kokoiset muodostelmat kasvoivat edelleen. Niistä tuli ehkä nykyisten pikkuplaneettojen kokoisia alkioita, *planetesimaaleja*.

Aikaa myöten planetesimaalitkin kerääntyivät noin kymmeneksi suuremmaksi ja lukuisiksi pienemmiksi *protoplaneetoiksi*, nykyisten planeettojen, kuiden, pikkuplaneettojen ja komeettojen esiasteiksi. Jupiterin ja Saturnuksen etäisyydellä olevat protoplaneetat saivat ympäröivästä pilvestä lisää kaasua ja kasvoivat entistä suuremmiksi. Keskelle jäi tuo kivinen ydin jota ympäröi paksu kaasukerros.

Pilven lämpötila määräsi syntyvän planeetan koostumuksen. Merkuriuksen tiheys on 5.4 kertaa veden tiheys. Noin 60 % planeetasta on metallista rautaa ja nikkeliä, jotka tiivistyivät jo n. 1 400 kelvinissä. Maapallon etäisyydellä pilven lämpötila oli enää noin 600 K ja Marsin etäisyydellä 450 K. Maan vaipassa on jo n. 10 % rauta(II)oksidia FeO, jota Merkuriuksessa oli alun perin tuskin lainkaan. Vastaavasti Marsissa FeO:n osuus on suurempi kuin Maassa.

Saturnuksen etäisyydellä lämpötila oli niin alhainen, että jäästä muodostuneita kappaleita saattoi syntyä, ja ne ovat myös säilyneet nykypäiviin asti. Niinpä osa Saturnuksen kuista on lähes pelkkää jäätä, jota on jonkin verran jo Jupiterinkin kuissa. Vielä kauemmas mentäessä vesijään osuus jälleen pienenee. Tämän on selitetty johtuvan siitä, että hyvin alhaisissa lämpötiloissa huomattava osa vapaasta hapesta oli sitoutunut hiilen kanssa hiilimonoksidiksi eikä vedyn kanssa vedeksi.

Lämpötilajakautuma selittää maankaltaisten ja jättiläisplaneettojen välisen eron: Lähellä Aurinkoa vain raskaammat aineet pääsivät tiivistymään planeetoiksi. Siksi syntyvät planeetat olivat pieniä. Jupiterin etäisyydellä jo vety ja helium saattoivat jäädä syntyvän planeetan ympärille, jolloin siitä tuli paljon kaasua sisältävä jättiläinen.

Vaikka alkuperäinen pilvi muodostikin litteän kiekon ja hiukkaset törmäilivät toisiinsa, ei aine kuitenkaan päässyt sekoittumaan kiekon tasossa. Niinpä eri paikoissa syntyneet kappaleet saattavat isotooppisuhteiltaan olla erilaisia, mikäli täl-

laisia eroja alkupilvessä esiintyi. Jos tutkitaan vaikkapa Maan ja Kuun eri alkuaineiden isotooppisuhteita, saadaan viitteitä siitä, onko Kuu syntynyt Maan lähellä vai mahdollisesti jossain kauempana.

Auringon ydinreaktioiden käynnistyminen päätti planeettojen muodostumisen. Reaktiot alkoivat hyvin voimakkaina ja Auringosta poispäin kiitävä aurinkotuuli "lakaisi" planeettainvälisen avaruuden tyhjäksi kaasusta ja pölystä. Samalla saattoivat kadota sisimpien planeettojen alkuperäiset ilmakehätkin.

Kosminen biljardi

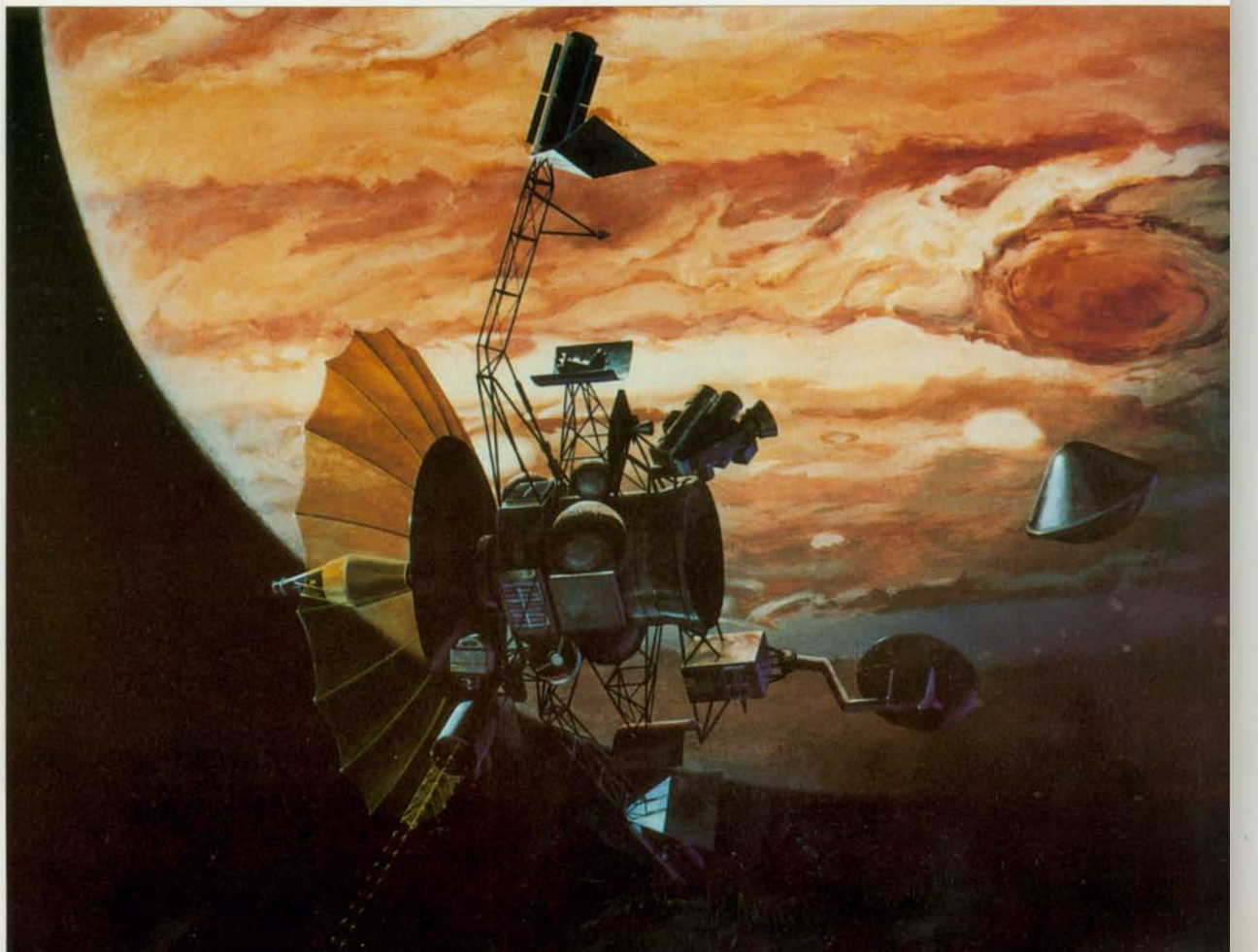
Planeettojen synty päättyi Auringon syttymisen myötä, mutta tämä oli vasta planeettakunnan kehityshistorian alku. Aikaa oli kulunut 50 miljoonaa vuotta.

Planeettojen lisäksi aurinkokuntaamme oli jäänyt lukematon määrä pikkukappaleita, jotka risteilivät planeettojen joukossa. Niistä osa sinkoutui ulos aurinkokunnasta, osa jäi pysyville radoille, kuten nykyiset pikkuplaneetat, ja osa törmäsi planeettoihin. Ensimmäisen miljardin vuoden aikana pommitus oli hyvin voimakasta.

Mutta ennen kuin näin pitkälle päästiin, olivat planeetat jo läpikäyneet yhden vaiheen, aineen erottumisen, *differentioitumisen*. Osittain meteoriittipommituksen, mutta pääasiassa radioaktiivisten aineiden hajoamislämmön vuoksi planeetat sulivat. Aurinkokunnan mahdollisesti synnyttäneessä supenovaräjähdyksessä muodostui huomattava määrä lyhytikäisiä radioaktiivisia aineita. Niiden hajoaminen vastasyntyneen planeetan sisuksissa vapautti niin paljon lämpöä, että se riitti sulattamaan planeetan.

Esimerkiksi maapallolla raskas metallinen aines vajosi keskelle ja pinnalle jäi ajelehtimaan kevyt kuona, se kiviaines jota nyt tallaamme. Pintakerrosten tiheys on vain n. 2.7 kertaa veden tiheys, vaikka koko maapallon keskitiheys on 5.5 kertaa veden tiheys. Keskellä on oltava suhteellisen suuri raudasta ja nikkelistä muodostunut ydin. Myös muut planeetat ja suurimmat kuut ovat kokeneet samantapaisen kohtalon.

Galileo-luotain asettuu 1995 Jupiterin kiertoradalle ja lähettää pienen laskeutumisaluksen jättiläisplaneetan kaasukehään. (Kuva JPL/Nasa)



Meteoriittipommitus oli alussa hyvin voimakasta, ja seassa oli runsaasti myös suurehkoja kappaleita. Esimerkiksi Kuun laavan täyttämät meret syntyivät tuolloin. Kuun pinta on kauttaaltaan paksun törmäysjätekerroksen peitossa, niin että alkuperäistä pintaa on mahdotonta löytää.

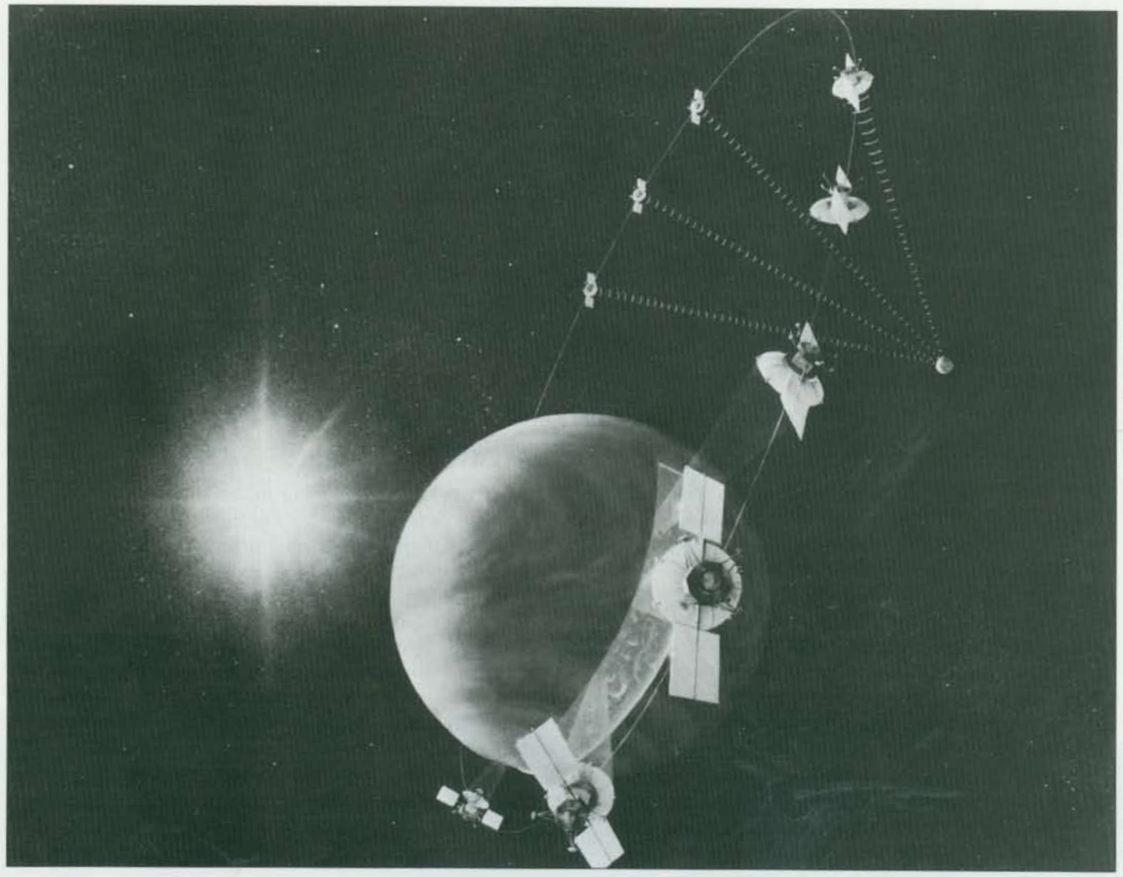
Maapallolta nämä vanhat törmäysjäljet ovat kadonneet ilmaston ja mannerliikuntojen vuoksi. Muualla aurinkokunnassa ne ovat ainakin osittain säilyneet, tätä osoittavat tuhannet luotainkuvat aurinkokuntamme eri kappaleista. Kraatterien määrä kertoo pinnan iän: mitä enemmän kraattereita, sitä vanhempi ja vähemmän uusiutunut pinta. Jupiterin kuun Kalliston pinta on yksi aurinkokuntamme vanhimmista, kun taas toisen Jupiterin kuun Ion pinta uusiutuu jatkuvasti, eikä siellä ole lainkaan kraattereita. Kraatterien puuttuminen siis merkitsee pinnan uusiutumista; yksikään aurinkokuntamme kappaleista ei liene välttynyt tältä kosmiselta pommitukselta.

Törmäykset jatkuvat edelleen, joskin huomattavasti vähentyneinä. Jos selkeänä iltana katsot tovin taivaalle, näet ennen pitkää tähdenlennon. Tähdenlento syntyy pienen kivensirun törmätessä ilmakehään ja palaessa poroksi. Vaikka ilmakehä suojaakin meitä näiltä pieniltä kappaleilta, ei se estä suuria murikoita tömähtämästä maan pintaan saakka. Jo muutaman kymmenen metrin läpimittaiset kappaleet synnyttävät ison kraatterin, joka säilyy jopa kymmeniä miljoonia vuosia. Kuussa jälki säilyisi lähes ikuisesti.

Planeettatutkimuksen vuosikymmenet

Vaikka planeettoja voidaan tutkia maanpäällisin keinoin, ovat luotaimet kuitenkin lähettäneet tarkimmat ja parhaimmat tiedot. Maasta tehtäviä havaintoja rajoittaa ilmakehä, joka päästää vain osan säteilystä lävitseen ja vääristää kaukoputkessa näkyvää kuvaa. Myös etäisyys on

Avaruusluotaimet ovat ratkaisevasti parantaneet tietojamme aurinkokunnan planeetoista. Vasemmalla Saturnus Maasta katsottuna, oikealla avaruusaluksen kuvaamana. (Luotainkuva Nasa/Voyager 2)



Magellan kuvaa Venusta kiertoradalta tutkan avulla. (Piirros Nasa)

tärkeä tekijä: luotaimet voivat vaikka laskeutua planeetan pinnalle tekemään yksityiskohtaisia tutkimuksia.

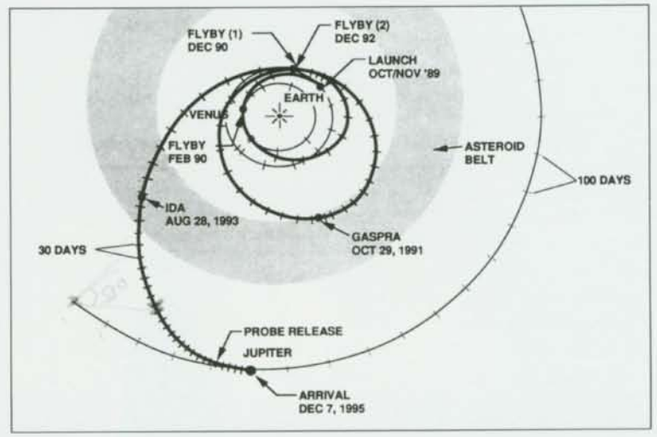
Jo pari vuotta ensimmäisen Sputnikin jälkeen, vuoden 1959 lopulla, saimme Luna 3:n lähettämiä kuvia Kuun Maahan näkymättömältä puolelta ja ensimmäinen planeettaluotain, Mariner 2, ohitti Venuksen v. 1962. Tuon jälkeen on kaikki aurinkokuntamme planeetat Plutoa lukuunottamatta tutkittu luotainten avulla: 1965 Mars, 1973 Jupiter, 1974 Merkurius, 1979 Saturnus, 1986 Uranus ja 1989 Neptunus. Venuksen ja Marsin pinnalle on laskeuduttu sekä Jupiterin ja Saturnuksen ohi on lentänyt useita luotaimia.

Tyypillinen luotain painaa pikkuauton verran ja siinä on mittauslaitteita kuin pienessä tutkimuslaitoksessa: radiolähetin ja -vastaanotin yhteydenpitoa varten, suunnistusjärjestelmä, tietokoneita, kameroita, fotometri, spektrometrejä, kosmisen säteilyn ilmaisin, magneettikentän mittareita jne. Sähkön tuotto hoidetaan joko aurinkopaneeleilla tai aurinkokunnan ulko-osiin suuntautuvilla lennoilla pienellä ydinvoimalalla. Lisäksi luotaimessa on moottorit ja ajoainetta suunnankorjailuja varten. Laskeutumisaluksissa on lisäksi varusteet laskeutumista ja pinnalla tehtäviä tutkimuksia varten.

Tieteisfilmien maailma on hämärtänyt käsityksiä toden ja kuvitelmien välillä. Luotainten lähettäminen ei ole niin helppoa ja yksinkertaista kuin *Tähtien sodan* tunnelmissa voisi kuvitella. Planeettaluotaimia ei edes voi lähettää milloin vain, vaan on odotettavia sopivia laukaisuikkunoita, jolloin kohdeplaneetta on sopivassa kohtaa rataansa.

Luotaimet eivät suinkaan kulje suoraa rataa, vaan ne lähetetään kulkemaan pitkin ellipsiä, joka toisessa päässään sivuaa Maan ja toisessa päässä kohdeplaneetan rataa. Energeettisesti tämä on edullisin rata, eikä muunlaisia ratoja nykytekniikka juuri sallisikaan; planeetat ovat vain hädintuskin ulottuvillamme. Itse asiassa kaikille planeetoille ei näin edes päästä. Esimerkiksi Saturnusta, Uranusta ja Nep-

Galileon mutkikas lento kulkee reittiä Maa—Venus—Maa—asteroidivyöhyke—Maa—asteroidivyöhyke—Jupiter. (Piirros JPL)



	Merkurius	Venus	Kuu	Mars	Jupiter	Saturnus	Uranus	Neptunus	Pluto
Maanpäälliset havainnot	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Luotaimen ohilento	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Kiertolaisluotain	-	+	+	+	-	-	-	-	-
Laskeutuja	-	+	+	+	-	-	-	-	-
Näytteitä Maahan	-	-	+	-	-	-	-	-	-

Millä menetelmällä kutakin planeettaa on tähän mennessä tutkittu. (Taulukko Markku Poutanen)

Viestintätekokuut ja sääsatelliitit ovat jo niin jokapäiväisiä, ettei tule ajatelleeksi, etteivät ne ole siellä aina olleet. Ja niiden tuottama hyöty on ollut moninkertainen johonkin planeettatutkimuksen kuluihin verrattuna.

Kaikkea hyötyä ei voi mitata rahassa. Tieteelliset tulokset ovat tärkeitä ja tulevaisuudessa niiden merkitys korostuu entisestään. Maapallo on planeetta muiden joukossa, ja jos opimme ymmärtämään muita planeettoja, opimme ymmärtämään myös maapalloamme. On muotia puhua kasvihuoneilmiöstä, otsonikadosta ja saastumisesta. Venus on mitä parhain käytännön esimerkki kasvihuoneilmiön vaikutuksesta ja Jupiterin ilmakehän liikkeistä meteorologit saavat uusia ideoita suurten ilmamassojen käyttäytymisestä.

Ihmiskunnan uteliaisuutta ei myöskään voi unohtaa. Se on vienyt muinaiset tutkimusmatkailijat uusille mantereille ja sama tiedonjano ohjaa myös nykypäivän tutkijoita. Hyötynäkökohdat vain ovat nykyisessä maailmanmenossa korostuneet. Niinpä rahakirstujen päällä istuville päättäjille täytyy sepitellä tarinoita tulevaisuudessa siintävistä suunnattomista mahdollisuuksista. Tai kukapa tietää. Kun James Clerk Maxwell viime vuosisadalla esitteli Englannin silloiselle pääministerille ilmiötä nimeltä sähkö, joutui hänkin vastaamaan kysymykseen "mitä hyötyä siitä on". Maxwell tuskin saattoi aavistaa kuinka oikeassa oli vastatessaan: "ehkä sitä voisi verottaa".

Magneettikentän voimaviivat työntyvät esiin Auringon pinnan läpi, ja kaasu virtaa niitä pitkin protuberansseina. (Kuva Nasa)

Keskustähti Aurinko

Aurinkokuntamme keskuskappale Aurinko on yli miljoonan kilometrin läpimittainen kaasupallo, jonka sisuksen ydinreaktioista vapautuva energia pitää yllä kaikkea elämää maapallolla. Aurinko on tyypillinen, noin viisi miljardia vuotta vanha tähti. Sen massa on tuhat kertaa suurempi kuin kaikkien planeettojen massat yhteensä ja se hallitsee lähes kaikkia aurinkokunnassa tapahtuvia liikkeitä.

Ylhäällä Aurinko laskemassa Turun tuomiokirkon taakse. (Kuva Pekka Parviainen)

Ydinmiilu

Aurinko koostuu suurimmaksi osaksi vedystä ja heliumista, maailmankaikkeuden yleisimmistä alkuaineista. Muita alkuaineita on yhteensä vain parisen prosenttia. Säteilemänsä energian Aurinko tuottaa lämpöydinreaktiolla (*fuusioreaktiolla*), jossa neljä vetyatomia yhtyy yhdeksi heliumatomiksi.

Tämä Auringon energianlähde askarrutti tutkijoita kauan. Geologiset todisteet maapallolla osoittivat, että Auringon on täytynyt pysyä vakaana miljoonia, ehkä jopa satoja miljoonia vuosia. Kemiallisista reaktioista, kuten palamisesta, vapautuva energia on niin vähäistä, että vaikka Aurinko olisi ensiluokkaista koivuhalkoa, olisi roihu sammunut muutamassa tuhannessa vuodessa.

Toinen mahdollinen energianlähde, Auringon hidas kutistuminen, näkyisi tarkoissa läpimittahavainnoissa. Auringon kutistuminen kolmellakymmenellä metrillä vuodessa riittäisi tuottamaan tarvittavan energian, mutta tätä iloa jatkuisi vain muutaman kymmenen miljoonaa vuotta. (Kotikonstein samanlaisen lämmitysjärjestelmän saa aikaan polkupyörän pumpulla. Ahkera pumppaaminen saa pumpun lämpenemään melko tavalla.)

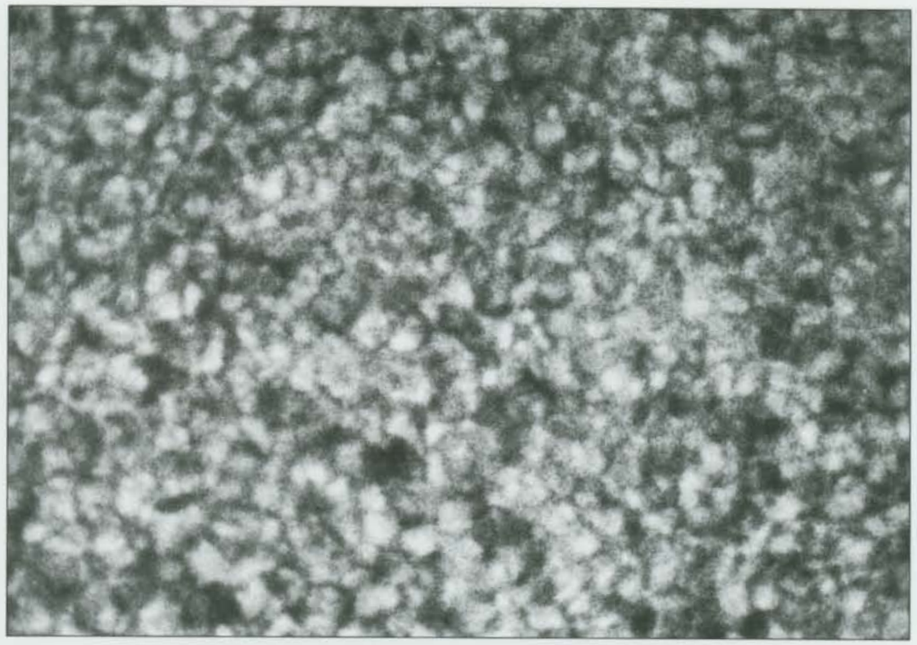
Pelastus energiapulaan tuli ydinfysiikasta ja Einsteinin kuuluisimmasta kaavasta $E=mc^2$, joka kertoo, että aine ja energia ovat yksi ja sama asia. Auringon sisuksissa aine muuttuu energiaksi ydinreaktioissa. Raskaiden alkuaineiden, kuten uraanin hajoaminen ei auta, sillä Auringossa ei ole riittäävästi uraania. Kevyintä alkuainetta, vetyä, sen sijaan on yllin kyllin ja yhtä lailla energiaa syntyy kevyiden atomien yhdistyessä.

Jo kaasujen käyttäytymisen perusteella osataan laskea, että Auringon sisuksissa täytyy vallita miljoonien asteiden lämpötila ja valtava paine. Vuonna 1938 *Hans Bethe* ja *Carl Friedrich von Weizsäcker* esittivät millä tavalla vety voi muuttua heliumiksi noissa olosuhteissa. Toistakymmentä vuotta myöhemmin keksittiin rinnakkaisia reaktioita, jotka toimivat alhaisemmassa lämpötilassa ja ovat vallitsevina Auringon kokoisissa ja sitä pienemmissä tähdissä. Näitä fuusioreaktioita kutsutaan usein harhaanjohtavasti palamiseksi, vaikka niillä ei ole mitään yhteistä edellä mainittujen koivuhalkojen palamisen kanssa.

Auringon energiantuotto perustuu *protoni–protoni-reaktiona* tunnettuun tapahtumaketjuun. Aluksi kaksi protonia törmää toisiinsa. Toinen protoneista muuttuu neutroniksi, jolloin syntyy vedyn raskas isotooppi, deuterium. Deuteriumiin törmää kolmas protoni, jolloin syntyy kevyttä heliumia, helium-3:a. Kaksi tällaista ydintä yhtyy muodostaen tavallista heliumia ja kaksi protonia. Koko reaktioketjun lopputuloksena on neljän protonin katoaminen ja yhden heliumatomin ytimen syntyminen.

Jos neljän protonin massat ynnätään, on lopputulos suurempi kuin yhden heliumatomin ytimen massa. Erotus, n. 0.7 % massasta on muuttunut energiaksi. Grammasta vetyä saadaan energiaa n. 600 miljardia Joulea (6×10^{11} J). Tämä määrä riittäisi sadan watin lampulle parinsadan vuoden ajaksi.

Aurinko tuottaa energiaa n. 4×10^{26} watin teholla. Einsteinin kaavalla laskien neljä miljoonaa tonnia ainetta muuttuu energiaksi joka sekunti. Kun ”hyötysuhde” oli 0.7 %, merkitsee tämä, että lähes



Auringon kiehuminen näkyy pinnan rakeisuutena, granulaationa. (Kuva Mt. Wilsonin observatorio)

600 miljoonaa tonnia vetyä muuttuu heliumiksi ja energiaksi joka ikinen sekunti vuosimiljoonasta toiseen. Riittääkö vety? Kyllä riittää. Tähän mennessä Aurinko on kuluttanut vetyvaroistaan vasta 5 %. Tosin kaikkea vetyään se ei voi käyttää, sillä tähden ulko-osissa lämpötila on aivan liian alhainen ydinreaktioiden käynnistyä. Todellisuudessa energiaa tuottava alue on hyvin pieni, ja sieltä jo noin puolet vedystä on kulunut. Auringolla on vielä toiset viisi miljardia vuotta elinaikaa jäljellä.

Auringon ja muiden tähtien elämä perustuu tarkkaan tasapainotteluun kahden voiman välillä. Toisaalta painovoima yrittää puristaa tähteä kokoon, toisaalta ulospäin pyrkivä energia saa aikaan paineen, joka on täsmälleen yhtä suuri kuin painovoiman aiheuttama. Ellei näin ole, tähti joko kutistuu tai laajenee, kunnes tasapaino on jälleen saavutettu.

Vedyn loppuessa suurin osa Auringon ytimestä on heliumia. Kun energiantuotto lakkaa, ei alati tilaisuuttaan kyttäävälle painovoimalle ole vastusta, tähti alkaa kutistua. Mutta tämä tietää lämpötilan nousua. Kun lämpötila on noussut riittävästi, alkavat heliumin ydinreaktiot, jossa kolmesta heliumatomista muodostuu yksi hiiliatomi. Reaktio on edellistä rajumpi, joten tähti laajenee; siitä tulee punainen jättiläinen.

Aurinkokin pullistuu aina Marsin radalle saakka nielaisten sisäänsä sisimmät planeetat maapallo mukaanlukien. (Vaikka tuomiopäivän profeetat ovat tähän saakka erehtyneet, ei tälle maailmanlopun ennustukselle ikävä kyllä käy samalla tavalla. Aikaahan tosin on vielä viitisen miljardia vuotta, joten ihan huomispäivän murhe se ei ole.)

Aurinko tuottaa heliumin ja energian ohella myös *neutriinoja*. Neutriinot ovat varauksettomia ja (ilmeisesti) massattomia hiukkasia, joita syntyy ydinreaktioissa. Neutriinot kulkevat lähes esteettä aineen läpi: edes tuhat valovuotta paksu lyijyseinä ei pysäyttäisi niitä kaikkia. Niinpä ne poistuvat Auringon keskustasta oitis paikalla syntymänsä jälkeen.

Neutriinojen havaitseminen on vaikeaa, joskaan ei täysin mahdotonta. Nykyisillä ilmaisimilla voidaan havaita vain pieni osa kaikkein energeettisimmistä neutriinoista, jotka syntyvät yhden proto-ni–proto-ni-ketjun vähäisen sivuhaaran reaktiossa. Edelleenkin näyttää siltä, että Auringosta tulee liian vähän neutriinoja, eikä varmaa selitystä havaintojen ja teorian ristiriitaan tiedetä.

Auringon ydinreaktiot

Aurinko on suurimmaksi osaksi vetyä ja heliumia. Sen keskustassa 13 miljoonan kelvinin lämpötilassa tapahtuvat ydinreaktiot tuottavat kaiken Auringon säteilemän energian. Reaktiossa neljä protonia (^{1}H) yhtyy yhdeksi heliumatomin ytimeksi (^{4}He). Protonin massa on 1.6725×10^{-27} kg ja heliumytimen 6.644×10^{-27} kg. Niinpä reaktiossa ko. massaero 4.6×10^{-29} kg muuttuu 4.1×10^{-12} jouleksi energiaa Einsteinin kaavan $E = mc^2$ mukaisesti.

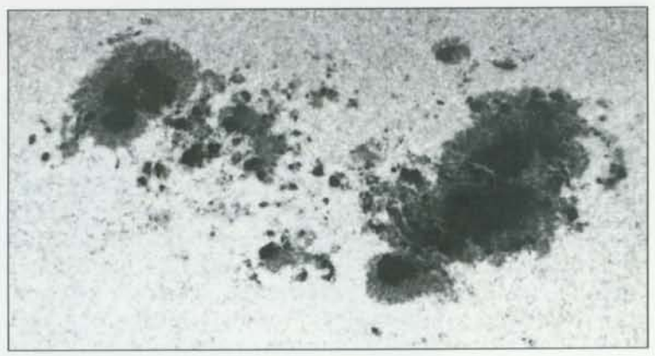
Tärkein energialähde on ns. protoni–protoni -ketju. Se koostuu seuraavista vaiheista:

$$^1\mathrm{H} + {}^1\mathrm{H} \rightarrow {}^2\mathrm{H} + e^+ + \nu_e \qquad (1)$$
$$^2\mathrm{H} + {}^1\mathrm{H} \rightarrow {}^3\mathrm{He} + \gamma \qquad (2)$$
$$^3\mathrm{He} + {}^3\mathrm{He} \rightarrow {}^4\mathrm{He} + 2\,{}^1\mathrm{H} \qquad (3)$$

Kaavoissa e^+ tarkoittaa elektronia, ν_e elektronin neutriinoa ja γ gammakvanttia (energiaa).

Ensimmäinen reaktioista on tavattoman hidas, eikä sitä ole pystytty saamaan aikaan laboratorioissa (mutta juuri sen hitaudesta johtuu, että Aurinko vielä loistaa). Vaihe (3) voi tapahtua usealla eri tavalla, joista yllä esitetty on tavallisin.

Yllä Auringon pintaa ja pieniä pilkkuja. Alla suurimpia koskaan nähtyjä auringonpilkkuja. Kuva on otettu 7.4.1947. (Kuvat Pekka Parviainen ja Mt. Wilsonin observatorio)



Magneettikenttä ja pilkut

Keskustassa syntynyt energia pyrkii tietysti ulos. Sillä on kaksi mahdollista tapaa

Voimakas purkautuva protuberanssi kuvattuna Skylab-avaruusasemalta 1973. (Kuva Naval Research Laboratory)

edetä: säteily tai virtaus. Jos kaasu on riittävän läpinäkyvää, on säteily tehokkaampi tapa. Tilanne on tällainen Auringon keskellä. Ulkokerrokset kuitenkin ovat niin läpinäkymättömiä, että säteily ei enää pääse etenemään. Syntyy aineen pystysuoria virtauksia, konvektiota, joka sitten näkyy Auringon pinnan ryynimäisenä rakenteena, granulaationa. (Perunakattilassa näet saman ilmiön kun vesi kiehuu; lämpö siirtyy konvektiolla kattilan pohjasta kohti pintaa. Perunat eivät liity asiaan mitenkään, mutta tuleepahan kokeen sivutuotteena kattilallinen keitettyjä perunoita.)

Auringossa tapahtuu myös muuta liikettä. Auringon pyörähdysaika akselinsa ympäri on ekvaattorin lähellä 25 vuorokautta ja 80. leveysasteen kohdalla jo noin 30 vuorokautta. Aurinko ei siis pyöri kiinteän kappaleen tavoin. Tätä pyörimistapaa sanotaan *differentiaalirotaatioksi*. Moisen pyörimisen täytyy aiheuttaa kaasun vaakasuoraa liikettä Auringon sisuksissa.

Kaasu Auringon pinnan alla on lähes täydellisesti ionisoitunutta. Pintalämpötila on vajaat 6000 astetta, mutta syvemmälle mentäessä lämpötila kasvaa nopeasti. Ionisoitunut kaasu, plasma, on mainio sähkönjohde. Liikkuvat varaukset synnyttävät magneettikentän, joka puolestaan vaikuttaa varausten liikkeisiin. Varaukset eivät kuitenkaan pääse liikkumaan kohtisuoraan magneettikenttää vastaan, jonka sanotaan "jäätyneen kiinni" aineeseen, ja aineen virtaukset kuljettavat magneettikenttää mukanaan. Ja sekä Auringon pyöriminen että energian virtaus aiheuttavat kaasun liikettä.

Lopputuloksena on monimutkainen vuorovaikutus, jossa magnettikentän voimakkuus muuttuu 11 vuoden jaksoissa. Magneettikentän napaisuus on kuitenkin päinvastainen kuin alussa, joten koko jakson kesto on 22 vuotta.

Paikoitellen magneettikenttä kiertyy rullalle ja muodostaa silmukoita, jotka voivat putkahtaa esiin pinnasta. Näillä kohdin aineen normaali virtaus hetkeksi estyy ja pintalämpötila laskee yli tuhat astetta. Syntyy *auringonpilkku*. Juuri pilkkujen runsaudessa nähdään Auringon 11-vuotinen jakso kaikkein selvimmin.

Auringonpilkku näyttää tummalta,

epämääräiseltä reialtä Auringon pinnassa, fotosfäärissä. Pilkun keskellä on tumma *umbra* ja reunoilla vaaleampi *penumbra*. Tumma väri vain johtuu kontrastista Auringon muuta pintaa vasten, todellisuudessa 4500-asteinen pilkku näyttää punahehkuiselta. Suurimmat ovat läpimitaltaan maapalloa suurempia. Pilkun elinaika on muutamasta päivästä useisiin kuukausiin. Usein pilkut esiintyvät pareittain tai ryhmissä.

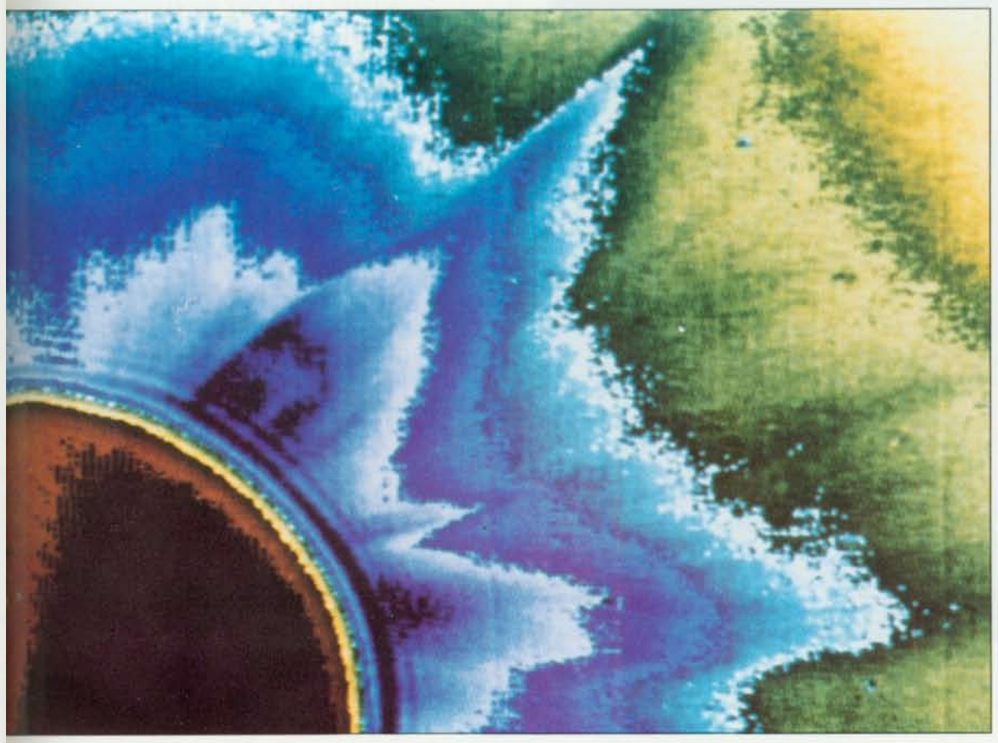
Auringonpilkkujen lähellä esiintyy usein lyhytaikaisia, äkillisiä purkauksia, ns. *flareja* ("roihuja"). Valkoisessa valossa niitä ei yleensä näe, koska ne hukkuvat Auringon kirkkauteen, joten niitä tarkkaillaan mm. vedyn α-viivan valossa. Flare-purkauksessa vapautuu hetkessä suunnaton määrä magneettikenttään varastoitunutta energiaa, joskaan purkausmekanismia ei tarkkaan tunneta.

Flaret aiheuttavat maapallolla saakka havaittavia ilmiöitä. Tämä johtuu paitsi aurinkotuulen voimakkaasta vahvistumisesta myös röntgensäteilystä, joka vaikuttaa maapallon ionosfääriin. Pari vuorokautta purkauksen jälkeen hiukkasvirta saavuttaa maapallon, jolloin syntyy voimakas magneettinen myrsky. Tähän liittyy yleensä myös revontulia.

Näyttävimpiä Auringon pinnan ilmiöistä ovat *protuberanssit*. Niitä havaitaan tavallisimmin Auringon reunalla näkyvinä kaarenmuotoisina rakenteina. Ne ovat magneettikentässä liikkuvia kaasuvirtauksia, jotka saattavat ulottua satojen tuhansien kilometrien päähän näkyvästä pinnasta.

Uloimpana Auringon kerroksista on *korona*. Se näkyy loistavana valokruununa täydellisen auringonpimennyksen aikaan, jolloin kirkas Auringon kiekko on peittyneenä Kuun taakse. Koronan lämpötila on miljoonan asteen luokkaa, mikä vaikuttaa lämpöopin vastaiselta: kuinka alla oleva 6000 asteen kerros voi lämmittää päällä olevaa miljoona-asteista kaasua? Varmaa vastausta kysymykseen ei ole, mutta yksi mahdollisuus on Auringon magneettikentän indusoima sähkökenttä, jolloin koronan harvassa kaasussa liikkuva sähkövirta kuumentaisi sitä vähän samaan tapaan kuin tapahtuu hehkulampussa. Joka tapauksessa koronan kaasu on niin harvaa, ettei siihen varastoitunut energia ole kovin suuri.

Korona ei ole tasapainossa, vaan se laajenee ulospäin *aurinkotuulena*. Tämän "tuulen" nopeus maapallon kohdalla on 300–600 km/s. Aurinkotuulta on tutkittu



Auringon kaasukehän ylin osa, korona, kuvattuna Solar Max -tekokuusta. Keinotekoiset värit kuvaavat koronan kirkkauseroja. (Kuva Nasa)

Auringon pinnan ilmiöitä. Yllä voimakas flare-purkaus toukokuussa 1970, alla rauhallista protuberanssia. (Kuvat Big Bear Solar Observatory)

luotainten avulla 1960-luvun alkupuolelta lähtien. Se koostuu pääasiassa protoneista ja elektroneista, mutta seassa on vähäisiä määriä mm. heliumatomin ytimiä. Maapallolla aurinkotuulen vaikutus havaitaan revontulina.

Kuinka havaitsen Aurinkoa

Aurinko on otollinen tähtiharrastajan havaintokohde. Se on aloittelijankin helppo löytää, sen takia ei tarvitse valvoa öitään ja se näkyy riittävän isona. Mutta on havaitsemisessa vaaransakin. Aurinko on niin kirkas, että jo lyhyt vilkaisu suojaamattomin silmin voi vaurioittaa näköä pysyvästi. Kiikarilla tai kaukoputkella ei koskaan saa katsoa Aurinkoa.

Paljain silmin katsottaessa paras suoja on hitsaajan lasi, joka suodattaa pois myös näkymättömän lämpösäteilyn. Myös täysin mustaksi valotettu ja kehitetty mustavalkofilmin negatiivi antaa moninkerroin taitettuna riittävän suojan. Värifilmiä tai noettua lasia ei pidä käytettämän; ne eivät estä lämpösäteilyn pääsyä silmään (ja mikä vaarallisinta, sitä ei itse huomaa). Ohut pilvikerros tai osittainen auringonpimennys eivät myöskään ole sopivia suotimia.

Ainoa täysin turvallinen tapa katsoa Aurinkoa kaukoputkella on heijastaa kuva putken taakse asetetulle varjostimelle. Joihinkin kaukoputkiin on saatavana okulaariin kiinnitettäviä, aurinkosuodattimen nimellä kulkevia lasinpaloja, joihin tulee suhtautua äärimmäisellä epäluulolla, sillä kuumentuessaan tällainen suodatin voi poksahtaa äkkiarvaamatta hajalle. Objektiivin eteen kiinnitettävät suodattimet ovat turvallisempia, mutta ne ovat suuria, hellävaroen kohdeltavia ja hinnaltaan tavallisen harrastajan ulottumattomissa.

Sisin planeetta Merkurius

Merkurius on aurinkokuntamme sisin planeetta. Se kiertää hyvin lähellä Aurinkoa. Etäisyys on pienimmillään noin 0.31 tähtitieteellistä yksikköä, siis vajaa kolmasosa Maan kiertoetäisyydestä. Suurin etäisyys on 0.47 AU.

Merkuriusta on melko vaikeaa nähdä maapallolta. Se etääntyy Auringosta korkeintaan noin 28 asteen päähän, ja sitä täytyy katsella joko aamu- tai iltataivaalla, jolloin taivas on vielä valoisa. Parhaat ajanhetket Merkuriuksen näkemiseen ovat keväällä iltataivaalla tai syksyllä aamutaivaalla.

Merkuriuksen ratataso on 7 astetta kallellaan Maan tasoon nähden, kun muilla planeetoilla (Plutoa lukuunottamatta) kaltevuus on vain pari astetta.

Merkuriuksen rata on muutenkin poikkeuksellinen. Se on soikeampi ellipsi kuin useimpien muiden planeettojen ja samalla epäkeskinen (eksentrinen). Juuri radan epäkeskisyydestä tietysti johtuu alussa mainittu etäisyyden vaihtelu Auringosta.

Radan lisäksi on jo kauan tunnettu Merkuriuksen koko ja massa. Planeetan läpimitta on vain runsaat 4800 km. Se on siis Kuuta suurempi, mutta paljon pienempi kuin muut planeetat (jos Plutoa ei lasketa mukaan). Vaikka Merkurius on pieni, se on koostunut hyvin raskaista aineista. Keskitiheys on suunnilleen sama kuin maapallon, joten Merkuriuksella täytyy olla suuri rautasydän.

Merkuriuksen pyöriminen

Merkurius on yksi viidestä jo muinaisista ajoista tunnetuista planeetoista. Auringon läheisyyden vuoksi monet sitä koskevat tiedot ovat kuitenkin puutteellisia. Vielä 1950-luvulla esimerkiksi luultiin, että Merkurius kääntää aina saman puolen Aurinkoa kohti.

Merkuriuksen suurin pyörömeri, Caloriksen allas, Mariner 10:n kuvaamana. Allas on puoliksi varjossa. Sen läpimitta on noin 1000 kilometriä. (Mariner 10:n kuvat Nasa)

Merkuriuksen kuumaa pintaa Chesley Bonestellin klassisessa maalauksessa. Pinnanmuodot ovat todennäköisesti rapautuneet loivemmiksi kuin kuvan piirtämisen aikaan arveltiin.

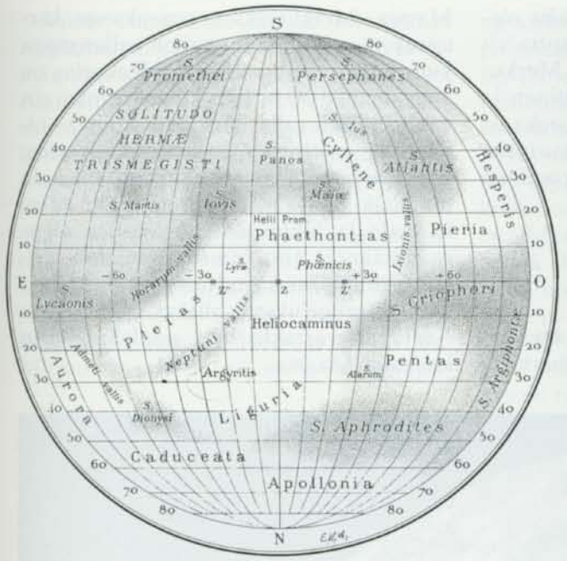
Lukkiutunut pyöriminen olisi kyllä ollut aivan luonnollista. Maapallon Kuuhan kääntää aina saman puolen meitä kohti, ja samoin tiedettiin, että Jupiterin suuret kuut ovat aina sama puoli emäplaneettaansa kohti.

Merkuriuksen kohdalla ensimmäiset pyörimiseen viittaavat havainnot saatiin 1960-luvun alussa. Tällöin onnistuttiin radiomittauksilla havaitsemaan Merkuriuksen lämpötila planeetan eri puolilla. Huomattiin, että pimeällä puolella lämpötila ei ollut suinkaan lähellä absoluuttista nollapistettä, vaan planeetta säteili sieltäkin melkoisesti lämpöä. Mittaukset antoivat pimeän puolen lämpötilalle arvoksi lähes sata kelviniä. Näin korkeaksi lämpötila ei voinut nousta, ellei planeetta hitaasti pyörinyt ja säteillyt yöpuolelta lämpöä, jonka se oli päivän puolella pintaansa varastoinut.

Varmennus Merkuriuksen pyörimiselle saatiin tutkamittauksilla. Radiosignaali lähetettiin Maasta suurella radioteleskoopilla kohti Merkuriusta ja havaittiin, että eri reunoilta heijastuneissa merkeissä oli tapahtunut erilainen aallonpituuden muutos (dopplersiirtymä). Tämä osoitti, että reunojen nopeus meidän suhteemme on erilainen: planeetta siis pyörii.

Merkuriuksen kiertoaika Auringon ympäri on noin 88 vuorokautta, ja pyörähdysajan havaittiin olevan täsmälleen kaksi kolmasosaa tästä arvosta (vajaat 59 vuorokautta). Pyöriminen on siten lukkiutunut sellaiseen asentoon, että joka toinen kerta periheliin (Aurinkoa lähinnä olevaan pisteeseen) tullessaan Merkurius kääntää aina saman puolen Aurinkoa kohti ja taas joka toisella kerralla vastakkaisen puolen. Osoittautui että havainnot, joista oli päätelty Merkuriuksen kääntävän jatkuvasti saman puolen Aurinkoa kohti, olivat juuri tästä syystä virheellisiä. Mittauksia oli tehty eniten Merkuriuksen parhaaseen näkymisaikaan eli keväisin ja syksyisin, noin kuuden kuukauden välein. Tässä ajassa Merkurius kiertää Auringon ympäri kaksi kertaa ja pyörähtää akselinsa ympäri täsmälleen kolme kertaa. Planeetta on keväällä ja syksyllä juuri sama puoli Aurinkoa kohti! Joitakin havaintoja oli muilta ajoilta, mutta koska pinnanmuotojen erottaminen oli joka tapauksessa vaikeaa, ne tulkittiin virheellisiksi.

Pyörähdysajasta ja kiertoajasta voidaan laskea vuorokauden pituus Merkuriuksen pinnalla. Tulokseksi saadaan, että aika Auringon noususta seuraavaan Au-



Merkuriusta on vaikea tutkia Maasta. Vasemmalla E.-M. Antoniadin piirtämä kartta 1930-luvulta, yllä Merkurius kulkemassa Auringon kiekon yli 1973.

Vuorokauden pituus

Miten vuorokauden pituus (p) planeetan pinnalla saadaan lasketuksi, kun tunnetaan planeetan kiertoaika (T) Auringon ympäri ja pyörähdysaika (P) akselinsa ympäri?

Planeetta pyörii akselinsa ympäri yleensä samaan suuntaan kuin kiertää Aurinkoa. Ajassa t planeetta kulkee radallaan kulman

$$\alpha = \frac{t}{T} \times 360°.$$

Samassa ajassa planeetta pyörii akselinsa ympäri kulman

$$\beta = \frac{t}{P} \times 360°$$

verran.

Vuorokauden pituus p eli esimerkiksi kahden keskiyön välinen aika on se aika, missä erotus $\beta - \alpha$ muuttuu täyden kierroksen, ts. 360°:

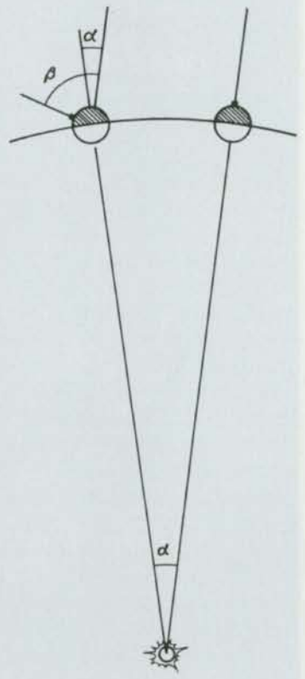
$$\beta - \alpha = 360°$$

$$\frac{p}{P} - \frac{p}{T} = 1 \quad \Rightarrow \quad p = \frac{TP}{T - P}$$

Esimerkiksi Merkuriukselle saadaan tällä kaavalla vuorokauden pituudeksi 176 Maan vuorokautta. Venus pyörii vastakkaiseen suuntaan, ja silloin vastaava tarkastelu antaa kaavaksi

$$p = \frac{TP}{T + P},$$

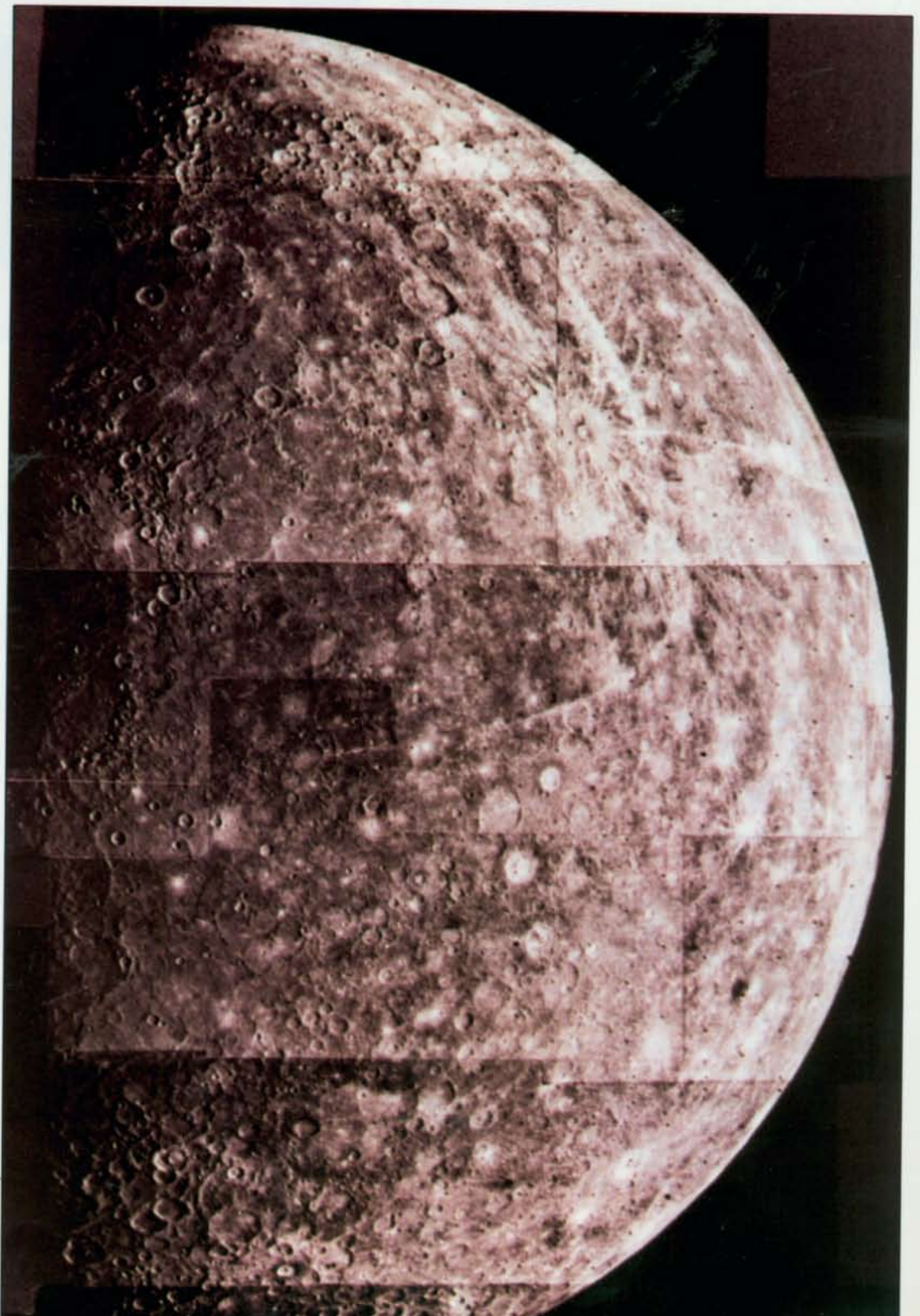
mistä vuorokauden pituudeksi Venuksessa saadaan 117 Maan vuorokautta.



ringon nousuun on päiväntasaajalla olevilla pisteillä 176 Maan vuorokautta eli lähes puoli vuotta. Päivä on siis Merkuriuksessa kolmen kuukauden pituinen ja yö samoin. Tämä on pitempi vuorokausi kuin millään muulla planeetalla aurinkokunnassamme (jos ei oteta lukuun oudosti pyörivää Uranusta).

Merkuriuksen pinta

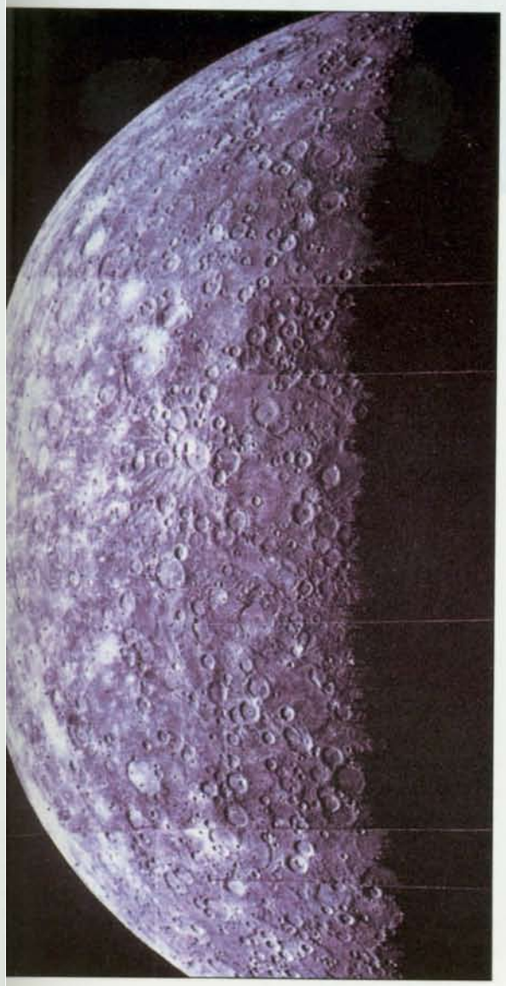
Merkuriusta on yritetty maapallolta kartoittaa samaan tapaan kuin esimerkiksi Marsia. Merkuriuksen tapauksessa kartoitustyö on kuitenkin paljon vaikeampaa kuin Marsin tapauksessa. Merkurius on aina samalla suunnalla kuin Aurinko, siis vaalealla taivaalla, kun taas Marsia voidaan helposti tutkia yötaivasta vasten, koska se kiertää Aurinkoa ulompana kuin maapallo. Lisäksi Merkurius on pieni kappale ja lähimpänä maapalloa ollessaan kääntää aina pimeän puolensa meihin päin. Siksi kartoitustyötä voi tehdä vain Merkuriuksen ollessa suunnilleen Auringon vastakkaisella puolella, hyvin kaukana Maasta.



Viime vuosisadan lopulla esimerkiksi ranskalainen Eugene M. Antoniadi ja tämän vuosisadan puolivälissä ranskalaiset Audouin Dollfus ja Henri Camichel laativat Merkuriuksesta karttoja, joissa on erilaisia tummia ja vaaleita alueita. Niille annettiin nimiä kreikkalaisen mytologian mukaan kuten Marsissakin, mutta alueiden luonteesta ei pystytty sanomaan mitään.

Ensimmäisiä varsinaisia tietoja Merkuriuksen pinnasta saatiin tutkimalla sen lähettämää säteilyä 1950- ja 60-luvulla. Mittauksia tehtiin radioaalloilla, infrapuna-aalloilla ja näkyvässä valossa (esim. polarisaatiomittauksia). Näillä saadaan selville esim. lämpötila ja pinnan heijastusominaisuudet. Kaikki tulokset viittasivat siihen, että Merkuriuksen pinta on hyvin samankaltainen kuin Kuun pinta. Sitä ilmeisesti peittää rosoinen hiekka- ja kivikerros. Mittauksista kävi myös ilmi, että Merkuriuksella ei ole ollenkaan ilmakehää. Tässäkin se siis muistuttaa Kuuta.

Merkurius Mariner 10:n kuvaamana. Vasemmalla on neljännes, jonka luotain näki ohilennon jälkeen, alla neljännes jonka se näki lähestyessään planeettaa. Mosaiikit on koottu useista Mariner 10:n kuvista. Väriero kuvien välillä on syntynyt kuvankäsittelyssä eikä ole todellinen.



Lämpötilamittaukset antoivat tuloksen, että planeetan päivän puolella vallitsee 300—400 celsiusasteen lämpötila ja yön puolella noin –180°C. Viidensadan asteen ero yön ja päivän välillä on paljon suurempi kuin millään muulla planeetalla aurinkokunnassa, ja se on ilmeisesti Merkuriuksen pinnalla voimakas rapauttava tekijä.

Lämpötila pinnan eri alueilla vaihtelee. Suurimmat lukemat sattuvat päiväntasaajalla pisteessä, joka perihelissä on Aurinkoon päin kääntyneenä. Auringon kulku Merkuriuksen taivaalla nimittäin näyttää hyvin erilaiselta sen mukaan missä pinnan kohdassa ollaan. Erot johtuvat Merkuriuksen radan epäkeskisyydestä ja lukkiutuneesta kiertoajasta.

Kuvitellaanpa, että ollaan Merkuriuksen päiväntasaajalla siinä pisteessä, jossa Aurinko on suoraan pään päällä silloin kun Merkurius on lähinnä Aurinkoa. Aurinko nousee idästä. Se on noustessaan kauimpana Merkuriuksesta ja sen kulmaläpimitta on noin 1.1 astetta. (Auringon halkaisija Maasta nähtynä on puoli astetta, joten Merkuriuksessa Aurinko on paljon suurempi kuin meillä.) Aurinko nousee korkeammalle taivaalle melko nopeasti. Vauhti hidastuu samalla kun Aurinko tulee suuremmaksi ja suuremmaksi. Zeniittiin, siis suoraan pään yläpuolelle, ehtiessään Aurinko on suurentunut 1.6 asteen läpimittaiseksi (yli kolme kertaa niin suureksi kuin Maassa). Kuljettuaan vähän zeniitin ohi Aurinko pysähtyy. Sitten se liikkuu pari astetta taaksepäin, kääntyy jälleen vastakkaiseen suuntaan ja alkaa vajota yhä suuremmalla nopeudella ja pienentyen kohti läntistä taivaanrantaa. Kahdeksankymmentäkahdeksan maapallon vuorokautta nousunsa jälkeen se laskee.

Sen sijaan havaitsija, joka seisoo päiväntasaajalla 90 asteen päässä edellisestä paikasta, havaitsee Auringon kulun toisenlaiseksi. Hän näkee suuren Auringon nousevan idästä. Sitten se sukeltaa takaisin alas, nousee uudestaan, alkaa yhä

Merkuriuksen pintaa hallitsevat kraatterit. Kuvan keskellä olevan kahden kraatterin läpimitta on 30 ja 10 km. Pienempi on hyvin nuori, ja siitä on sinkoutunut ympäristöön vaaleaa pölyä.

nopeutuvalla vauhdilla kiirehtiä kohti zeniittiä samalla kun se tulee yhä pienemmäksi. Se ohittaa nopeasti zeniitin ja alkaa hidastuvalla nopeudella laskea alaspäin ja tulee samalla suuremmaksi. Suuri Aurinko katoaa hitaasti länteen, nousee kuitenkin jälleen ylös ja katoaa hetken päästä lopullisesti taivaanrannan taakse.

Auringon erilainen käyttäytyminen pinnan eri pisteistä katsottuna vaikuttaa tietysti lämpötilaan. Ensimmäisessä tapauksessa Aurinko oli hyvin pitkän aikaa zeniitissä ja vielä hyvin suurena, koska Merkurius on tällöin lähimpänä Aurinkoa. Täällä lämpötila kohoaa yli 400 asteeseen. Toisessa tapauksessa Aurinko ohitti nopeasti zeniitin ja oli tällöin pienimmillään, koska Merkurius oli sillä hetkellä kauimpana Auringosta. Lämpötila pysyy lähes sata astetta alempana.

Vielä erilainen on tilanne planeetan napa-alueilla. Merkuriuksen akseli on melko tarkalleen kohtisuorassa ratatasoa vastaan, ja siksi navoilta katsottuna Aurinko on aina lähellä taivaanrantaa. Navoilla voi olla sellaisiakin paikkoja, jotka ovat ikuisesti varjossa, esim. jonkin syvän kraatterin pohja. Sinne ei Aurinko näy koskaan ja siellä lämpötila pysyy tasaisen alhaisena ympäri vuoden. Kun ihminen joskus perustaa ensimmäisiä tutkimusasemia Merkuriukseen, ne ilmeisesti sijoitetaan napojen läheisyyteen.

Merkurius luotaimen näkemänä

Merkuriusta on toistaiseksi tutkinut vain yksi avaruusluotain, eikä uusia Merkurius-luotaimia ole suunniteltu ainakaan 1990-luvulle.

Yhdysvaltain Mariner 10 lensi Merkuriuksen ohi kolme kertaa, maaliskuussa 1974, saman vuoden syyskuussa ja vielä maaliskuussa 1975. Merkurius paljastui luotaimen valokuvissa yllättävän paljon Kuun kaltaiseksi. Planeetta on täynnä erikokoisia *kraattereita*. Monista nuorista kraattereista lähtee säteittäisiä juovia kuten Kuun Tykosta. Pienet ja suuret kraatterit, pintaa peittävä pölykerros ja laavan täyttämät tasangot ovat kaikki suunnilleen samanlaisia Kuussa ja Merkuriuksessa.

Merkuriuksenkin kraatterit ovat ilmeisesti kaikki syntyneet meteoriitti-iskujen tuloksena. Ne ovat jonkin verran matalampia kuin Kuun, eikä iskujen ulosheittämä aine ole lentänyt yhtä kauaksi. Nämä seikat ovat luonnollisia seurauksia Merkuriuksen suuremmasta vetovoimasta.

Eroja Kuuhun nähden kuitenkin löytyy. Merkuriuksessa ei ole samanlaisia laavavirtojen aiheuttamia puroja, "rillejä", kuin Kuussa, mutta sen sijaan löydettiin suurempia pitkiä *harjanteita*. Ne ovat luultavasti syntyneet planeetan rautasydämen kutistuessa. Merkuriuksellahan on tiheä ydin, joka ulottuu säteen neljäsosan päähän pinnasta. Ytimen jäähtyessä kuorikin on rypistynyt, jolloin on muodostunut harjanteita. Ne kulkevat parin kilometrin korkuisina, satojen kilometrien pituisina valleina useilla alueilla pitkin Merkuriuksen pintaa.

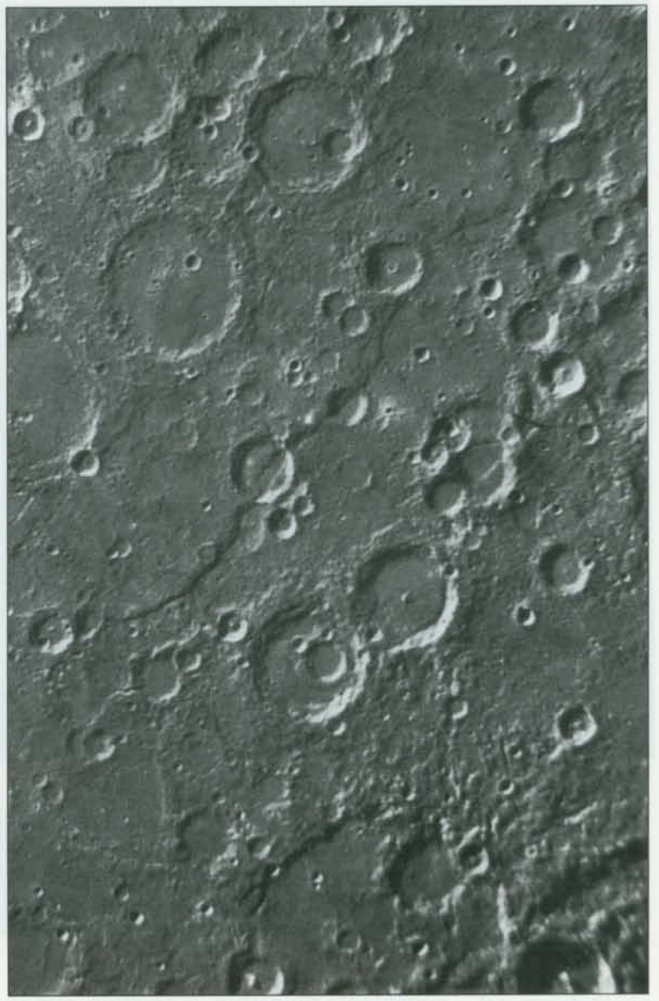
Merkuriuksessa ei ole myöskään yhtä paljon ns. mare-alueita eli meriä kuin Kuussa. Ainoa iso meri, *Caloriksen allas*, on 1300 km läpimittainen ja syntynyt luultavasti usean kymmenen kilometrin läpimittaisen meteoriitin syöksyessä pintaan. Syöksymisjälki on aluksi muistuttanut Kuun Mare Orientalea ja täyttynyt sitten planeetan sisältä tihkuneella laavalla. (Samalla tavalla on selitetty Kuun merien synty 3—4 miljardia vuotta sitten.)

Yhteenvetona Merkuriuksen rakenteesta voidaan sanoa, että planeetalla on Kuun kuori, mutta Maan sisus.

Maan ja Merkuriuksen sisuksen samankaltaisuudesta on osoituksena myös planeetalta löytynyt *magneettikenttä*. Se että yleensä magneettikenttä löytyi oli yllätys, sillä planeetta pyörii hyvin hitaasti. Magneettikentän ajateltiin liittyvän nopeasti pyöriviin planeettoihin, kuten Maahan, Jupiteriin ja Saturnukseen. Merkuriuksen magneettikentän voimakkuus on noin sadasosa Maan magneettikentästä.

Merkuriuksen pinnasta on saatu kuvatuksi vain vajaa puolet, sillä Merkurius käänsi aina saman puolen Aurinkoa kohti kun Mariner lensi sen ohitse. Pimeältä puolelta saatiin esimerkiksi lämpötilamittauksia, joista löydettiin muutamia ympäristöään lämpimämpiä kohtia, ilmeisesti tuoreita kraattereita tai kalliopaljastumia.

Merkuriuksen peitossa ollut puoli voi vielä tuoda tutkijoille yllätyksiä, kun sitä päästään kuvaamaan. Aurinkokuntamme monet kappaleet ovat nimittäin epäsymmetrisiä: esim. Kuu, Maa ja Mars näyttävät eri puolilta hyvin erilaiselta. Siksi Merkuriuksellakin voi olla toinen pallonpuolisko erilainen kuin toinen.

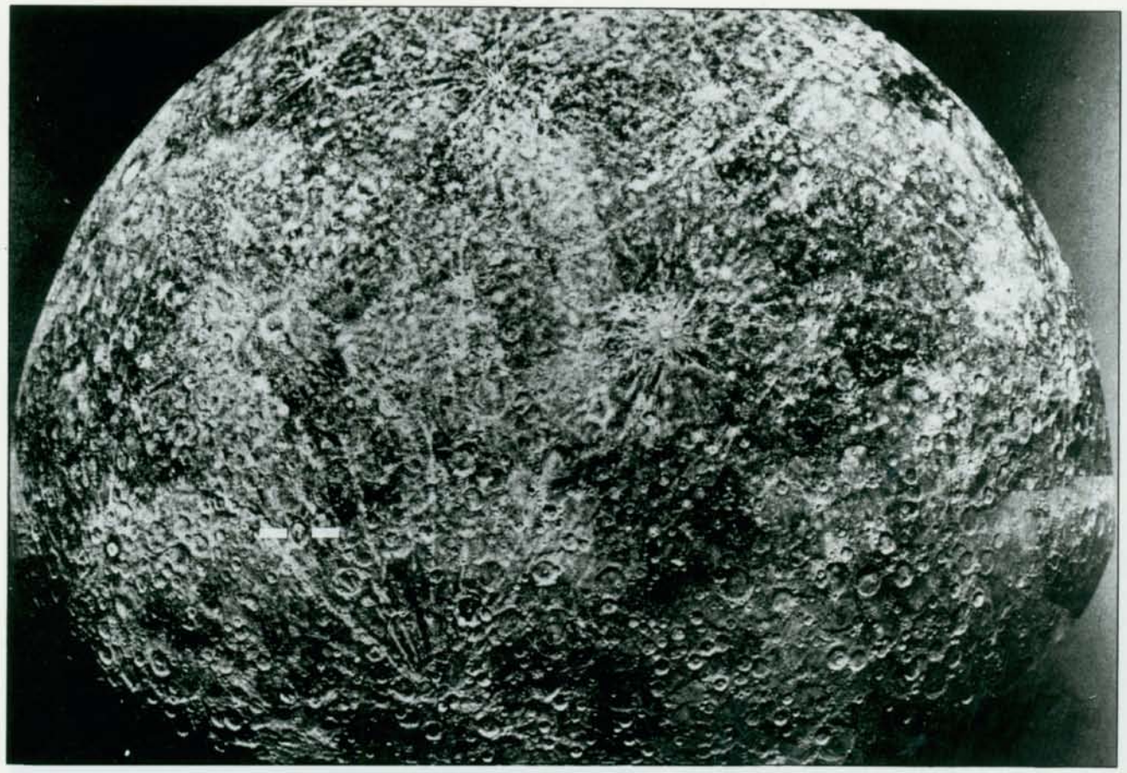


Planeetan pinnassa on paikoin ryppyjä ja harjanteita. Ne ovat luultavasti syntyneet kohta Merkuriuksen synnyn jälkeen, kun planeetta on jäähtynyt ja samalla kutistunut.

Vulkanuksen tarina

Ennen kuin siirrytään Merkuriuksesta seuraavaan planeettaan, Venukseen, meidän on selostettava *Vulkanuksen* tarina. Vulkanus on nimeltään salaperäinen sisin planeetta, jonka piti kiertää Aurinkoa Merkuriuksen radan sisäpuolella. Vulkanusta etsittiin vilkkaasti sata vuotta sitten. Sysäyksen etsintöihin antoi Merkuriuksen liikkeessä havaittu outo käyttäytyminen.

Merkuriuksen periheli ei pysy paikallaan avaruudessa vaan rata kiertyy. Kiertymisen suuruus on noin 575 kaarisekuntia vuosisadassa. Suurin osa kiertymisestä



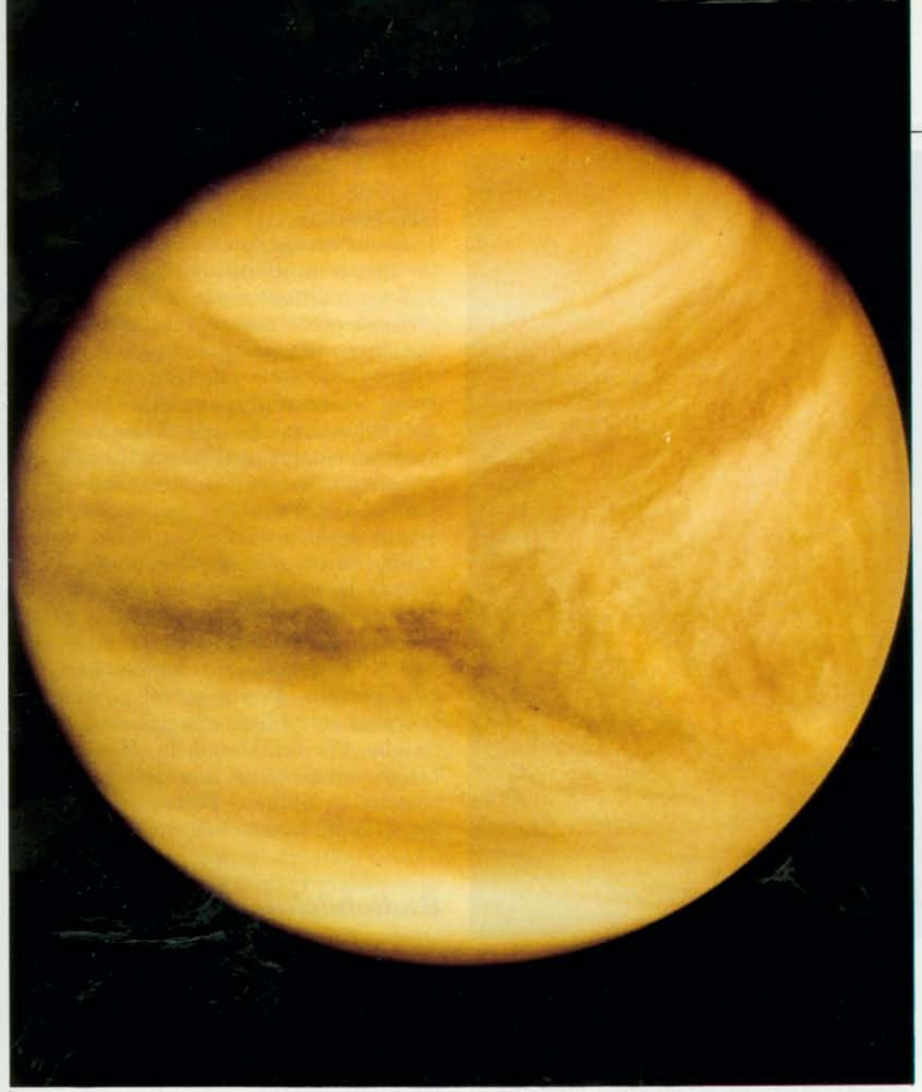
Merkuriuksen kraatterit ovat saaneet nimensä tunnettujen kirjailijoiden, taiteilijoiden ja säveltäjien mukaan. Suomalaisista on päässyt mukaan Sibelius, jolle nimetty kraatteri sijaitsee lähellä Merkuriuksen etelänapaa. Sibeliuksen läpimitta on vajaat 100 kilometriä.

johtuu toisten planeettojen vetovoimasta. Mutta kun kaikki nämä otetaan huomioon, jää perihelin liikkeeseen silti omituinen ilmiö: se kiertyy vuosisadassa 43 kaarisekuntia liian paljon. Tätä ei millään keinoin osattu 1800-luvulla selittää. Se oli ainoita poikkeamia, joita Newtonin vetovoimalaista tunnettiin, ja arveltiin, että se johtui tuntemattomasta massasta. Parikymmentä vuotta aiemmin oli Uranuksen liikkeiden häiriöistä löydetty uusi planeetta Neptunus, ja nyt koetettiin Merkuriuksen liike selittää uudella, sisemmällä planeetalla.

Sata vuotta sitten useat tähtitieteilijät pitivät kunnia-asianaan etsiä Merkuriuksen sisäpuolella olevaa planeettaa, Vulkanusta. Monessa julkaisussa tällainen todettiin löydetyksi, mutta mitään näistä löydöistä ei saatu vahvistetuksi. Erityisiä etsintöjä järjestettiin silloin kun Vulkanuksen piti kulkea Auringon kiekon ylitse, mutta sitä ei koskaan havaittu.

Vuonna 1916 julkaistu Einsteinin yleinen suhteellisuusteoria antoi sitten aivan uuden selityksen Merkuriuksen perihelin oudolle liikkeelle. Liike ei johtunutkaan tuntemattomasta massasta Auringon lähellä, vaan yksinkertaisesti siitä, että Newtonin vetovoimalaki ei ollut tarkasti oikea. Einsteinin oma teoria antoi paremman kuvauksen avaruudelle ja liikkeelle, ja tämän teorian mukaan Merkuriuksen periheli kulkee juuri 43 sekunnin verran vuosisadassa eri tavalla kuin Newton oli ennustanut.

Einsteinin todisteluista huolimatta on Merkuriuksen radan sisäpuolelta myöhemminkin yritetty etsiä puuttuvaa massaa. Tällä hetkellä tiedetään, että siellä ei voi olla planeettaa, ei edes pikkuplaneettaa, mutta tietysti pienempiä kappaleita sieltä voi löytyä. Vulkanuksen tarina päättyi Einsteinin suhteellisuusteoriaan.



Pioneer Venus -luotaimen kuva planeetan pilvistä. (Kuva Nasa)

Pilvien verhoama Venus

Ennen avaruusluotainten aikaa olivat tiedot Venuksesta hyvin vähäisiä. Sen liike taivaalla kyllä tunnettiin tarkasti, koska siitä oli tehty havaintoja jo tuhansien vuosien ajan. Venus kiertää Aurinkoa lähes ympyränmuotoista rataa, jonka säde on noin 0.7 kertaa niin suuri kuin Maan radan säde. Kiertoajaksi on saatu 224.7 vuorokautta, siis yli seitsemän kuukautta. Kun Venus Aurinkoa kiertäessään saavuttaa ulompana kulkevan maapallon ja ohittaa sen, se käy lähempänä Maata kuin yksikään toinen planeetta. Venus loistaa maapallon taivaalla Auringon ja Kuun jälkeen kirkkaimpana pisteenä.

Venus Maasta nähtynä

Jo Galileo Galilei havaitsi 1610 ottaessaan kaukoputken käyttöön, että Venuksella

Maasta katsottuna Venuksella on vaiheet kuten Kuulla. Kapean Venuksen sirpin kuvasi Matti Martikainen Ursan linssikaukoputkella keväällä 1985.

on *vaiheet* samaan tapaan kuin Kuulla. Vaikka Venus paljain silmin katsottuna näyttääkin vain kirkkaalta pisteeltä, kaukoputken tai kiikarin läpi nähtynä se on sirppi, "puolivenus" tai lähes täydellinen ympyrä. Tämä todisti selvästi että Venus kiertää Aurinkoa, ja se on lähempänä Aurinkoa kuin maapallo.

Venuksen paksun *ilmakehän* olemassaolo havaittiin 1700-luvun loppupuolella. Kun Venus 1761 sattui kulkemaan Maasta katsottuna Auringon pinnan yli, nähtiin planeetta muuten mustana, mutta sen ympärillä oli kirkas rengas. Se tulkittiin aivan oikein valon taipumiseksi Venuksen ilmakehässä.

Kaukoputken läpi katsottuna Venuksen *pinta* näyttää ilmeettömältä. Pinnalta yritettiin erottaa pysyviä merkkejä kuten Kuun tai Marsin pinnalta, niin että voitaisiin määrätä planeetan pyörähdysaika tai piirtää sen kartta, mutta kaikki näytti tasaisen harmaalta tai kellertävältä. Joskus pintaan ilmestyi tummempia läikkiä, jotka kuitenkin pian taas katosivat ja saattoivat olla vain silmän harhaa. Täytyi siis otaksua, että paksu pilvikerros peitti Venuksen pinnan.

Myös Venuksen *koko* tunnettiin. Se on vain vähän pienempi kuin maapallo, ja siksi oletettiin että Venus voisi olosuhteiltaan olla maapallon sisarplaneetta. Tämä olettamus osoittautui kuitenkin vääräksi.

Kun tähtitieteessä otettiin käyttöön *spektroskooppiset* menetelmät, niitä sovellettiin myös planeettojen tutkimiseen. Venuksen lähettämä valo koottiin kaukoputkella, hajotettiin prismalla tai hilalla spektriksi ja valokuvattiin. Kuvassa näkyi valoisan taustan päällä satoja ohuita mustia viivoja. Ne olivat enimmäkseen samoja kuin Auringon spektrissä, mikä osoitti Venuksen heijastavan Auringosta tullutta valoa, mutta oli myös muutamia uusia viivoja, ja niistä pystyttiin saamaan tietoa Venuksen ilmakehän koostumuksesta. Vuonna 1932 osattiin tulkita, että kaikki uudet viivat johtuivat samasta kaasusta, *hiilidioksidista*. Venuksen pilviverhon yllä ja seassa täytyi siten olla runsaasti hiilidioksidia. Pilvien alapuolella olevasta ilmakehän osasta tämä menetelmä ei pysty kertomaan mitään, koska sieltä ei valo maapallolle saakka heijastu.

Radiotuloksia

Ennen avaruusluotainten astumista mukaan tutkimuksiin saatiin maanpäällisillä mittauksilla vielä muutamia tärkeitä tuloksia Venuksesta. Radiotähtitiede oli pääsemässä vauhtiin 1950-luvulla, ja antennit suunnattiin myös Venusta kohti. Vuonna 1956 saatiin ensimmäiset havainnot *Venuksen radiosäteilystä*.

Koska Venus on lähempänä Aurinkoa kuin Maa, sen pitäisi olla laskujen mukaan noin 60 tai 70 astetta lämpimämpi kuin maapallo. Mutta radiosäteily olikin yllättävän voimakasta: Venuksen lämpötila näytti olevan 300, jopa 400 celsiusastetta. Havaintoja tehtiin lisää, ja kaikki antoivat samanlaisia lukemia. Mikä aiheutti tämän korkean lämpötilan Venuksen pinnalla? Syyksi paljastui kasvihuoneilmiö: Auringon valo pääsee kyllä Venukseen, mutta paksu ilmakehä ei laske lävitseen ulos pyrkivää lämpösäteilyä. Koko Venus on kuin suuri lämmin kasvihuone.

Paitsi lämpötilan mittaamiseen, radioteleskooppeja voidaan käyttää myös *tutkana*. Maapallolta lähetetään suurilla antenneilla voimakkaita signaaleja Venukseen, niin kuin Merkuriuksenkin tapauksessa tehtiin, ja samalla tavalla voidaan määrätä Venuksen pyörähdysaika ja pyörähdyssuunta. Niitä ei aikaisemmin tiedetty, koska Venuksen pinta on piilossa ihmissilmältä.

Ensimmäinen tutkakosketus planeettaan saatiin 1958, ja kolme vuotta myöhemmin alettiin saada pitkien koesarjojen jälkeen tuloksia *pyörähdysakselin suunnasta* ja *pyörähdysajasta*. Tässä koettiin yllätys: pyörähdyssuunta havaittiin päinvastaiseksi kuin aurinkokunnan normaalit pyörimissuunnat ja pyörähdysaika tavattoman pitkäksi. Myöhemmät havainnot tarkensivat tuloksen: Venus pyörähtää akselinsa ympäri kerran 243 vuorokaudessa, siis kahdeksassa maapallon kuukaudessa.

Pyörähdysajasta voidaan laskea päivän pituus Venuksen pinnalla. Se ei ole sama kuin puolet pyörähdysajasta, koska Venuksen kiertoaika Auringon ympäri on samaa suuruusluokkaa kuin pyörähdysaika. Aika Auringon noususta seuraavaan Auringon nousuun Venuksen pinnalla on 117 maanpäällistä vuorokautta. Päivän pituus on siis runsaat 58 vuorokautta ja yön pituus saman verran.

Pyörähdysakselin suunta saatiin määrätyksi vuonna 1964. Se on lähes kohtisuorassa ratatasoa vastaan. Venus siis pyörii hyvin pystyssä, mutta "päällään", päinvastaiseen suuntaan kuin muut planeetat.

Venus-luotaimet

Venukseen on lähetetty enemmän avaruusluotaimia kuin millekään muulle planeetalle. Pääosa luotaimista on ollut Neuvostoliiton lähettämiä. Kahdeksankymmentäluvun puoliväliin asti Neuvostoliitto keskittyi Venuksen tutkimiseen ja on sen jälkeen siirtänyt huomionsa Marsiin. Yhdysvallat on tutkinut tasaisemmin kaikkia planeettoja.

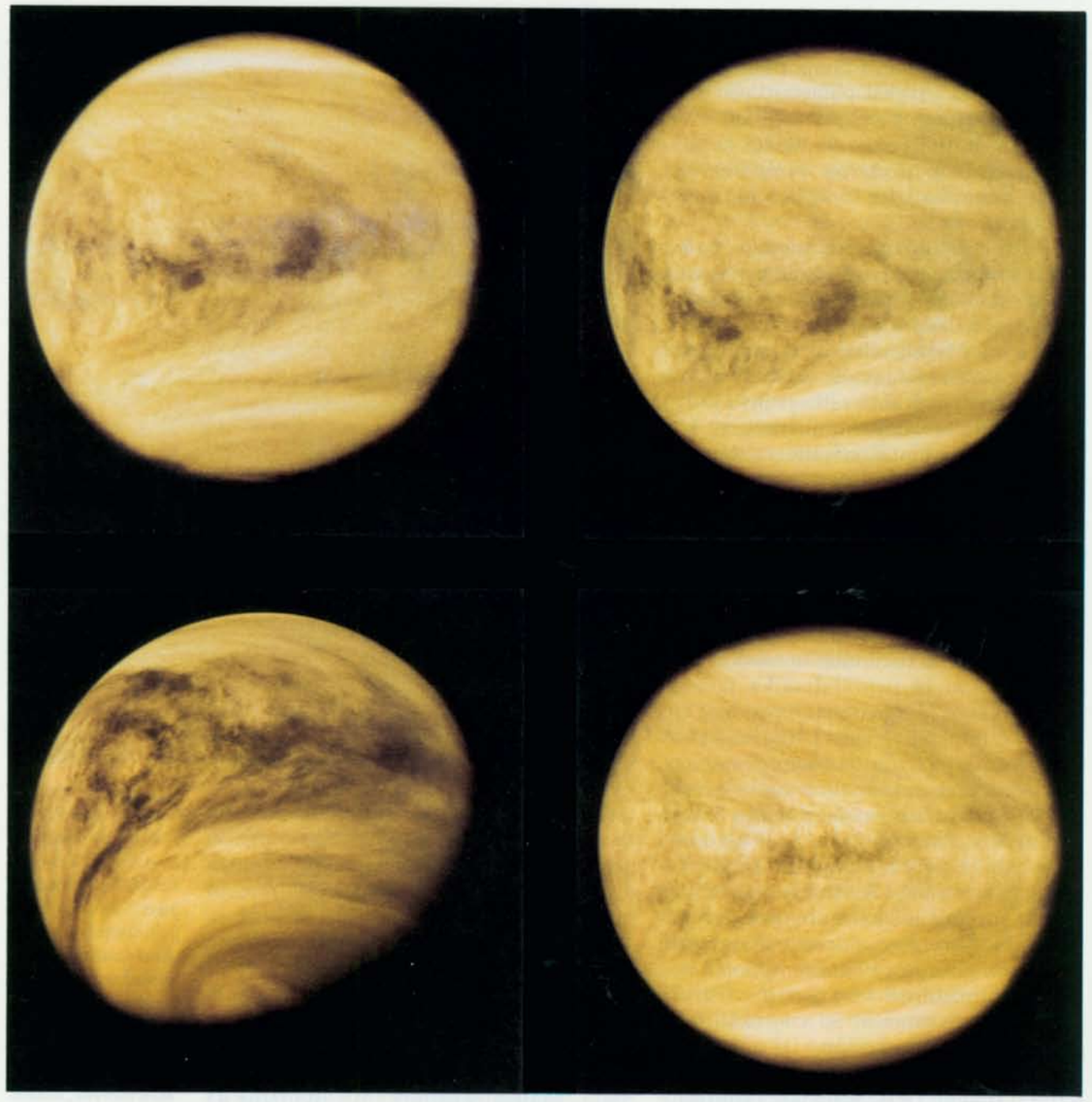
Koska Venuksen pinta on ikuisten pilvien peitossa, siitä ei Maan päältä voi tehdä kovinkaan paljon havaintoja. Avaruusalukset ovat antaneet Venuksesta ainutlaatuisia tuloksia, joiden ansiosta tämän maapallon "sisarplaneetan" salaisuudet ovat paljastuneet ihmiselle.

Ensimmäiset mittaukset Venuksen läheltä saatiin 1962 *Mariner* 2 -aluksen ohilennolla. Se vahvisti mm. Venuksen pinnan korkean lämpötilan. Venuksen ilmakehästä saatiin tietoja *Venera* 4 -aluksella 1967. Alus murskautui kuin munankuori parinkymmenen kilometrin korkeudessa, koska paine pinnalla oli arvioitu liian pieneksi.

Ensimmäiset tiedot pinnalta saatiin Venera 7 -luotaimella 1970. Ensimmäiset valokuvat saatiin lokakuussa 1975 Venera 9 ja 10 -aluksilla ja ensimmäiset värikuvat maaliskuussa 1982 Venera 13 ja 14 -luotaimilla. Pinnalla on niin kuuma, että yksikään luotain ei ole pystynyt toimimaan siellä paria tuntia kauempaa. Ennätys on Venera 13:lla, kaksi tuntia seitsemän minuuttia.

Ensimmäiset lähikuvat Venuksen pilvistä saatiin Mariner 10 -luotaimella 1973, kun se Merkuriusta kohti lentäessään ohitti Venuksen.

Ensimmäinen kuva Venuksen pinnalta saatiin 1975. Keskellä kuvaa kamera katsoo Venera 9 -laskeutumisluotaimen vierelle, oikealla ja vasemmalla kauemmaksi.



Venuksen pilvet ultraviolettivalossa. Vuorokauden sisällä on otettu neljä kuvaa, joista näkyy pilvien liike ja virtauskuvioiden kehitys. Kuvat ovat toukokuulta 1980. (Kuvat Pioneer Venus 1/Nasa)

sään kiepsahti Venuksen ohitse. Venuksen ensimmäiset kiertolaiset olivat Venera 9 ja 10 -emäalukset 1975, ja tarkkoja kuvia pilvistä ja tutkakuvia pinnasta saatiin *Pioneer Venus* 1 -luotaimella vuodesta 1978 alkaen. Tarkempia tutkakarttoja Venuksen pohjoisesta pallonpuoliskosta antoivat Venera 15 ja 16 vuonna 1983—84.

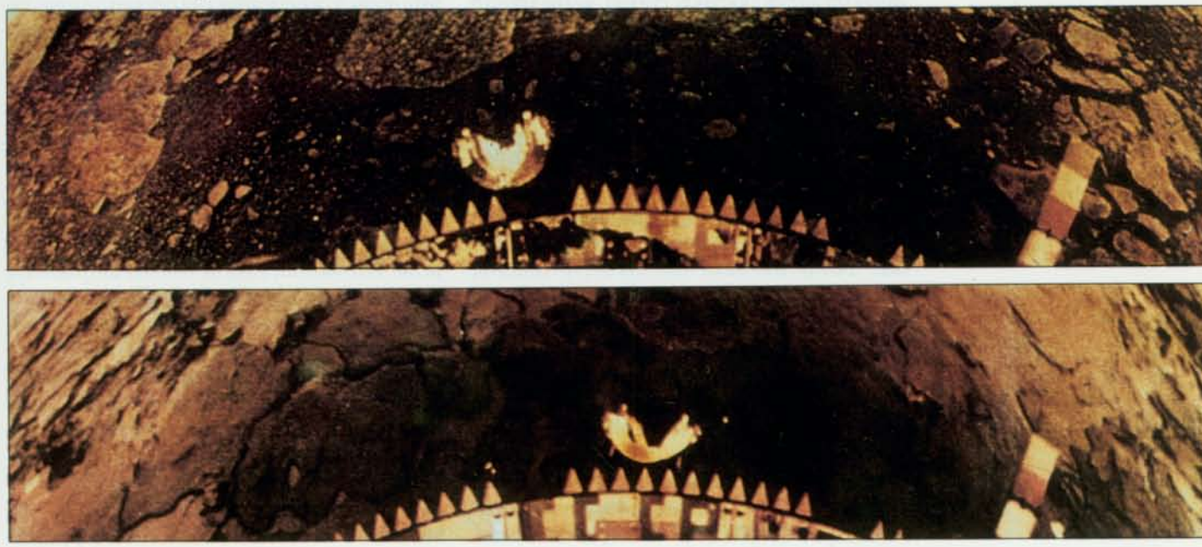
Ensimmäiset ilmapalloluotaimet ajelehtivat Venuksen pilvissä kesäkuussa 1985, kun Halleyn komeettaa kohti kiitävät *Vega*-luotaimet tipauttivat Venukseen laskeutumisaluksia. Uusin Venus-luotain on *Magellan*, joka lähetettiin matkaan toukokuussa 1989 ja oli perillä elokuussa 1990. Sen tehtävänä on kartoittaa koko planeetta tähänastista paljon tarkemmin.

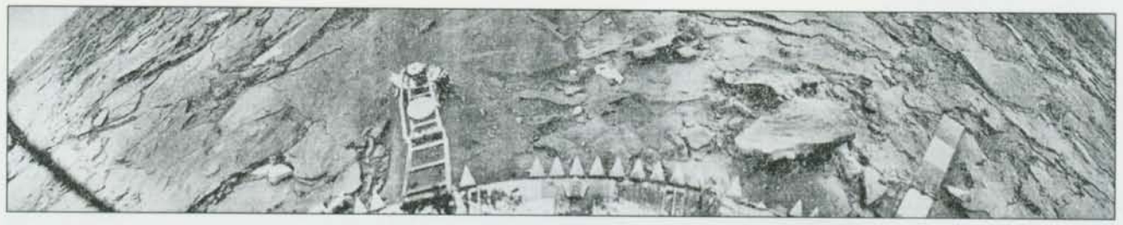
Pilvet ja ilmakehä

Avaruusluotainten mittausten mukaan on Venuksen ilmakehästä hiilidioksidia (CO_2) noin 96 %, typpeä (N_2) runsaat

Chesley Bonestellin maalaus 1950-luvulta: Venuksen hiekkamyrskyjä.

Ensimmäiset värikuvat Venuksen pinnalta (alla). Ylemmässä kuvassa kalliota Venera 13:n ja alemmassa Venera 14:n laskeutumiskohdalta. Kuvassa näkyy avaruusaluksen pyöreää, sahalaitaista jalustaa, irrotetut kameran suojukset ja värikartta.





Venera 13 ja 14 -aluksessa oli kamera kummallakin puolella. Ylhäällä Venera 14:n näkymä vastakkaiseen suuntaan kuin edellisen sivun värikuvassa. Pinnalle ojentunut käsivarsi yritti mitata pinnan ominaisuuksia, mutta pahaksi onneksi se osui hylätyn kameransuojuksen päälle ja mittasi sen ominaisuuksia. Alakuvassa sama näkymä "oikaistuna", jolloin horisontti on vaakasuorassa.

3 %, happea (O_2), neonia (Ne) ja argonia (Ar) prosentin murto-osa.

Tärkeä aine on myös vesihöyry (H_2O). Sen määrä on noin 0.1—0.4 %. Tämä tuntuu hyvin vähäiseltä ja onkin tietysti maapallon oloihin verrattuna pieni määrä, mutta vesihöyry yhdessä suuren hiilidioksimäärän kanssa riittää selittämään kasvihuoneilmiön. Auringonvalo pääsee tunkeutumaan Venuksen pinnalle, mutta pinnalta lämpö ei pääse haihtumaan avaruuteen, sillä vesihöyry ja hiilidioksidi estävät lämmön kulkemisen. Tästä syystä Venuksen pinta on niin kuuma paikka kuin on havaittu.

Venuksen pilvet peittävät planeetan hyvin paksuna ja yhtenäisenä vyöhykkeenä. Tosin navoilta on löydetty alueita, joissa nähdään kymmenisen kilometriä syvemmälle ilmakehään. Siellä eivät pilvet ole aivan yhtä paksut kuin muualla, mutta pinnalle asti ulottuvia repeytymiä ei pilvissä ole havaittu.

Pilvien koostumuksesta oli saatu viitteitä jo ennen luotaimia Maasta tehdyillä mittauksilla. Venuksen spektrissä nähtiin viivoja, joiden todettiin olevan peräisin rikkihapon (H_2SO_4) ja veden sekoituksesta. Pilvet ovat rikkihappopisaroita, maanpallon elämälle syövyttävää myrkkyä. Tämän myös luotaimet vahvistivat. Ne löysivät pilvistä myös pieniä määriä muita aineita.

Pilviverhon tihein kerros sijaitsee noin kolmen kilometrin paksuisena 49—51 kilometrin korkeudella planeetan pinnasta, siis huomattavasti korkeammalla kuin tavalliset maapallon pilvet. Tämä onkin luonnollista, koska Venuksessa on niin paljon tiheämpi ja paksumpi ilmakehä.

Pääkerroksen yläpuolella on yksi tai kaksi utumaista kerrosta, jotka muodostavat planeetan ulospäin näkyvän pinnan. Pääkerroksen alapuolella on taas melkein selkeää. Jonkin verran sumua esiintyy 50 ja 30 km välillä, mutta tämän alapuolella ilmakehä on lähes täysin selkeä.

Venuksen pilvet eivät ole yhtä tiheitä kuin maanpäälliset pilvet. Näkyvyys on huonoimmillaankin useita satoja metrejä. Pilvien tiheydet vastaavat lähinnä maapallon sumupilveä, siis ne ovat hyvin hienojakoista ja melko harvassa leijuvaa ainetta.

Voiko Venuksen pilvissä esiintyä minkäänlaista elämää? Vaikka rikkihappopilvet tuntuvatkin hyvin epävieraanvaraiselta paikalta, tietyllä korkeudella lämpötila on kuitenkin parinkymmenen asteen paikkeilla ja ilman tiheys ja paine kohtuulliset. Sieltä puuttuu tietysti kiinteä pinta, jolle elämä olisi voinut asettua. Ei osata sanoa, pystyykö elämä syntymään pilvissä ja leijumaan siellä ilman kiinteää kiinnityspintaa.

Venera 13:n toisen kameran panoraama.

Venuksen ulkopuolelta katsottuna pilvipeite on väriltään melko yhtenäinen, mutta ultraviolettivalossa on selviä tummia ja vaaleita, esimerkiksi Y:n muotoisia, muodostelmia. Niiden liike kertoo ilmakehän virtauksista. Auringon ollessa zeniitissä ilmakehä lämpenee eniten ja virtaa siitä sivuille ja navoille päin.

Venuksen ilmakehän yläosa ja pilvet ovat jatkuvassa nopeassa virtausliikkeessä. Venuksen näkyvän pinnan (siis pilvien yläkerrosten) todettiin jo maapallolta tehdyissä mittauksissa kiertävän noin neljässä vuorokaudessa planeetan ympäri. Tämän kiertoajan avaruusluotaimet vahvistivat. Itse planeettahan pyörähtää kerran ympäri kahdeksassa kuukaudessa.

Pilvien korkeudella, 50—70 km pinnasta ylöspäin, vallitsevat lähes 100 metrin sekuntinopeudella puhaltavat tuulet. Ne ovat tavattoman puuskaisia. Vega-ilmapalloluotaimet hyppivät tuulten ajamina jatkuvasti satoja metrejä ylös ja alas. Tuulet vaimenevat alaspäin mentäessä. Parinkymmenen kilometrin korkeudella ne ovat jo paljon heikompia, ja pinnalle päästäessä tuulet ovat lähes täysin laantuneet. Nopeudet ovat vain metrin luokkaa sekunnissa, mikä Maan päällä saisi järven pinnan vain vähän kareilemaan. Mutta Venuksen tiheässä ilmakehässä tuulen vaikutus on suurempi, ja se kuljettaa pölyä pitkin pintaa paikasta toiseen.

Korkeammalla ilmakehässä on muitakin häiriöitä kuin kovat tuulet: siellä riehuvat jatkuvat ukkosmyrskyt. Venuksen yöpuolelle laskeutuneet luotaimet ovat havainneet laskunsa aikana valonvälähtelyä, ja sähköpurkausmittarit ovat rekisteröineet jatkuvaa kaukaista salamointia. Se on kovimmillaan noin 15 kilometrin korkeudella ja heikkenee sitten pinnalle mentäessä. Tämä oli odottamaton tulos, sillä ilma on tällä korkeudella pilvetöntä. Salamoinnin arvellaankin liittyvän tulivuorenpurkauksiin. Purkauksissa kohoava pöly muodostaa pilviä, joissa riehuu ukonilmoja. Sama ilmiö on havaittu Maan päällä.

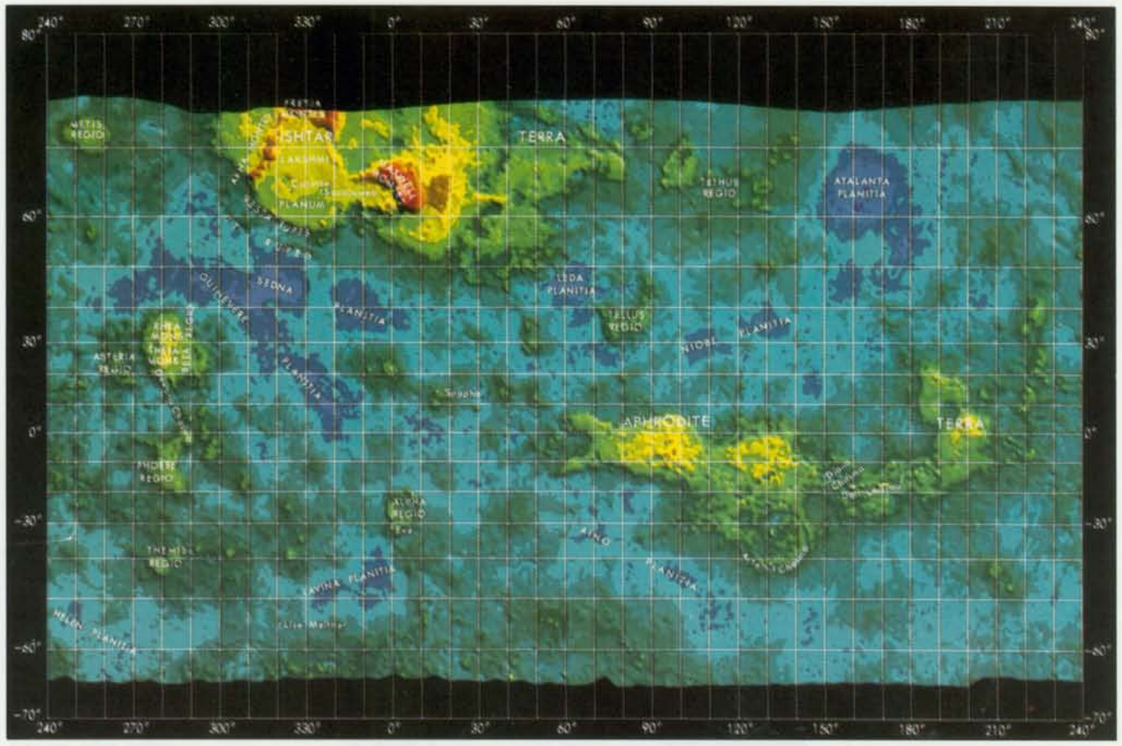
Venuksen pinnalla

Olosuhteet Venuksen pinnalla ovat todella helvetilliset. Lämpötila on noin 470—480 °C pinnan joka puolella, myös napa-alueilla. Tämä lämpötila riittäisi sulattamaan jo monen metallin, esimerkiksi lyijyn. Paine pinnalla on runsaat 90 ilmakehää. Tämä vastaa tilannetta kilometrin syvyydessä merenpinnan alla. Täällä ei mikään laite pysty toimimaan ilman mahtavaa panssarikuorta. Kaasun tiheys pinnalla on myös suuri, noin 60 kertaa niin suuri kuin Maan päällä.Tämä on vain viidestoistaosa veden tiheydestä.

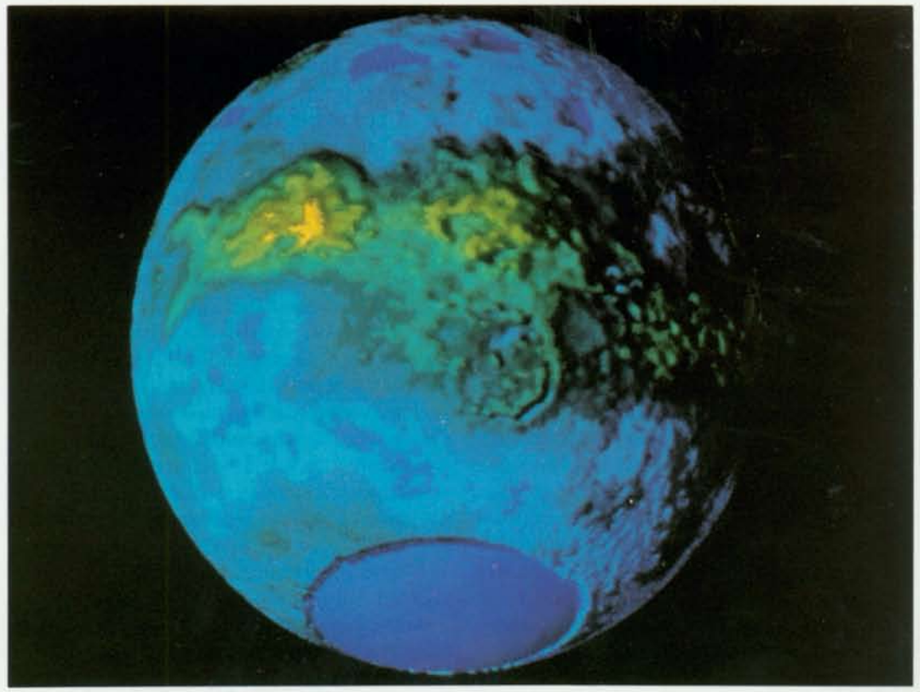
Paksu ilmakehä aiheuttaa outoja ilmiöitä. Tiheä hiilidioksidikaasu taittaa esimerkiksi valoa niin voimakkaasti, että Venuksen pinnalla voisi periaatteessa nähdä horisontin taakse, itse asiassa ympäri koko planeetan.

Mutta näkyvyys Venuksen pinnalla ei tietenkään ole rajaton. Parhaimmillaankin näkyvyys on päiväpuolella kilometrien luokkaa. Aurinko ei näy lainkaan pilvien läpi. Sen paikkaa ei pysty sanomaan, vaan kaikkialta taivaalta kumottaa valo. Valo on melko voimakasta, niin että valoisuus on sama kuin Maan päällä päiväsaikaan paksujen pilvien peittäessä taivaan. Yöpuolella Venuksessa on täysin pimeää. (Ja yöhän kestää lähes kaksi kuukautta.)

Venuksen ilmakehän väri ei ole sinertävä niin kuin maapallolla, vaan se on punainen. Kaikki maisemat näyttävät karmiininpunaiselta. Tämä johtuu siitä, että Venuksen paksu ilmakehä suodattaa



Venuksen kartta on laadittu Pioneer Venus -aluksen tutkakuvien perusteella. Siniset kohdat ovat alankoa, keltaiset ja punaiset ylänköä. Pinnanmuotojen nimet on annettu pääasiassa tunnettujen naisten mukaan. Aphroditen mantereen eteläpuolella on Ainon tasanko. Muita suomalaisnimiä Venuksessa ovat Louhi, Vellamo ja Rauni. (Kuva U. S. Geological Survey)



Venus ilman pilviverhoa. Keskellä näkyy Aphroditen manner. Etelänavan ympäristö kartoitetaan vasta 1990—91 Magellan-luotaimella. (Kuva Pioneer Venus/Nasa)

muut aallonpituudet tehokkaasti pois, vain punainen jää jäljelle. (Periaatteessa sama ilmiö näkyy maapallolla iltaruskon aikaan, kun auringonvalo joutuu kulkemaan paksun ilmamassan läpi ja punertuu.)

Venuksen pintaa peittää kaikkialla karu kallio. Avaruusluotainten kuvissa näkyy välillä kivikkoa, samantapaista kuin Vikingien kuvissa Marsin pinnalla, välillä laakeaa kalliota. Paikoin pinta on nuorta ja kovaa, paikoin rapautuneempaa. Mutta joka paikassa kivi on niin tukevaa, että pinnalla voisi huoletta ajaa autolla.

Pinnan koostumuksesta on saatu tietoja sekä laskeutumisalusten mittauksista että tutkakartoista. Venuksesta suurin osa on laavakenttien peitossa. Laskeutumispaikoilla on todettu laavan olevan eri-ikäistä ja koostumukseltaan erilaista. Venera 14 löysi tavallista basalttia, jollainen peittää Maan pintaa valtamerten kohdalla. Venera 13:n kohdalla basaltti on harvinaisempaa laatua, ja Vega 2 löysi samanlaista kiveä kuin Kuun vanhimmilta manneralueilta.

Planeetan pinnalla on tutkittu myös ”venuksenjäristyksiä”. Vaikka järistysmittareiden toiminta-ajat jäivät pakosta lyhyiksi, muutama liikahdus havaittiin. Ne liittyvät luultavasti pinnan tuliperäiseen toimintaan.

Tarkimmat tähänastiset tutkakartat Venuksesta on tehty Venera 15 ja 16 -luotaimilla ja Arecibon suurella radioteleskoopilla. Kuvassa värillinen kaistale on tehty Arecibon tietojen ja muu osa Veneroiden mukaan. Keskellä näkyy Lakshmin tasanko, joka on suunnilleen Suomen kokoinen ja sijaitsee Suomea vastaavalla leveysasteella Venuksen pohjoisella pallonpuoliskolla. Lakshmin oikealla puolella on punaisella merkitty Maxwellin vuori. (Kuva A. McEwen, U.S. Geological Survey)

Tutka tutkii planeettaa

Kuusikymmentäluvun lopulta alkaen on maanpäällisten radioteleskooppien avulla kartoitettu Venuksen pinnanmuotoja. Tämä perustuu siihen, että Maasta lähetetty radiosignaali kulkee eripituisen matkan Venuksen lähinnä olevaan pisteeseen kuin Venuksen laidoille ja hieman eripituisen matkan myös esimerkiksi vuoren huipulle kuin vuoren juurelle. Takaisinheijastuneen signaalin aikaeroja tutkimalla saadaan selville Venuksen pinnan korkeuseroja. Tutkakaiku myös muuttuu Venuksesta heijastuessaan sen mukaan, onko pinta kovaa kiveä vai pehmeää hiekkaa. Näin saadaan heijastuneiden signaalien laadusta tietoja myös pinnan pehmeydestä ja rakenteesta.

Ensimmäiset tutkakartat Venuksesta valmistuivat 1968. Niiden erotuskyky oli vielä hyvin pieni. Kartoista ei voitu juuri muuta päätellä kuin että planeetalla on eri tavalla heijastavia alueita. Parille alueelle annettiin jo nimi. *Alfa* ja *Beta* olivat hyvin voimakkaasti heijastavia laajoja kohtia, jotka tulkittiin vuoristoiksi. Planeetalla näkyi myös alueita, jotka heijastivat tutka-aaltoja huonommin.

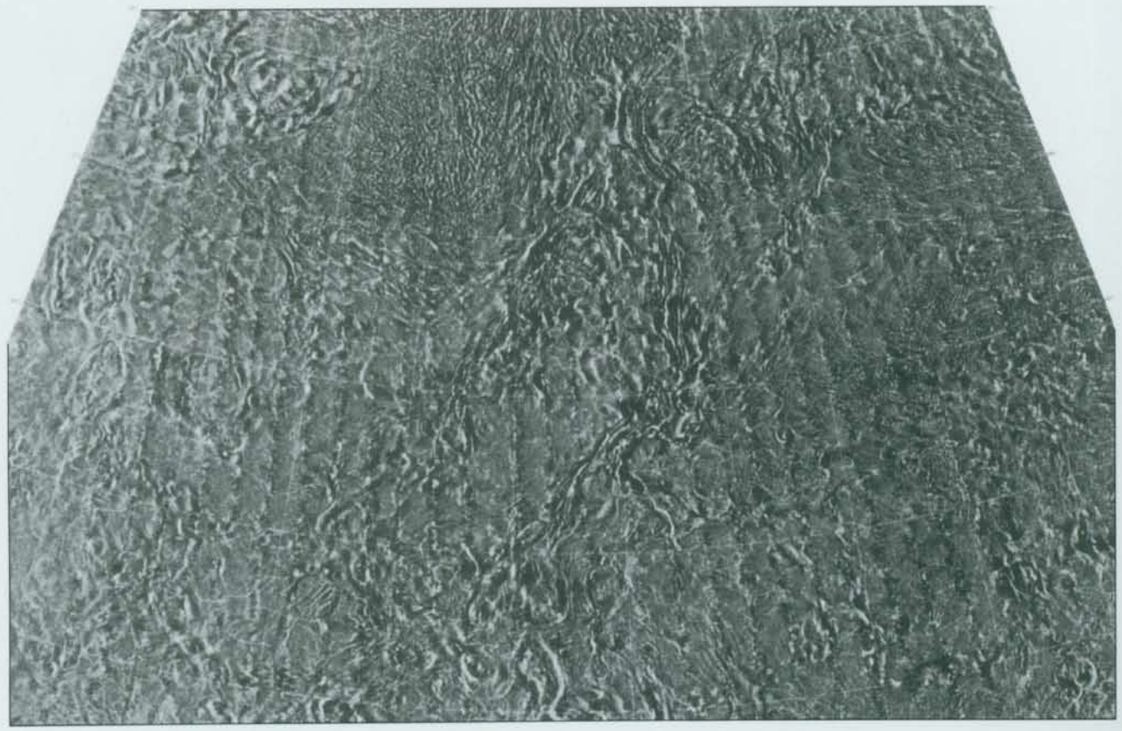
Tutkatekniikka parantui nopeasti. 1970-luvun puolivälissä huomattiin, että Venuksen pinnalla on kraattereita: pyöreitä muodostumia, joissa on selvästi kohollaan olevat reunat. Ne ovat ilmeisesti törmäyskraattereita, samanlaisia kuin esimerkiksi Merkuriuksen tai Kuun pinnalla on vieri vieressä. Venuksen pinnalla nähtiin myös tulivuoria: korkeita vuoria, joiden huipulla on selvä syvennys. Edelleen Venuksen pinnalta löydettiin pitkiä harjanteita ja syviä halkeamia.

Avaruusluotaimet ovat käyttäneet tutkaa 1970-luvun lopusta alkaen. Koska ne kiertävät planeettaa, ne näkevät pinnan paljon lähempää ja pystyvät kartoittamaan koko planeetan.

Vuonna 1980 valmistuneessa ensimmäisessä Venuksen kartassa näkyy kaksi suurta mannerta, Ishtar Terra ja Aphrodite Terra, vuoristoja, laaksoja ja tasankoja.

Venuksen pinnan korkein kohta on *Maxwellin vuori*, joka kohoaa noin 12 kilometriä planeetan pinnan keskitason ylä-

Venera-alusten tutkakuvissa näkyy salaperäisiä uomia ja ryppyjä, jotka voivat liittyä tuliperäiseen toimintaan Venuksen pinnalla.



puolelle. Se on siten selvästi matalampi kuin Marsin 25 kilometrin korkuiset vuoret, mutta yhtä selvästi se päihittää maapallon Mount Everestin (noin 8900 metriä).

Venuksen tulivuoret

Vaikka Venuksen pinnalla ei ole suoranaisesti nähty toimivia tulivuoria, niiden olemassaolosta ja tuoreista purkauksista on saatu monia viitteitä.

Edellä jo mainittiin valonvälähdykset ja sähköpurkaukset, joita laskeutuvat avaruusluotaimet ovat nähneet Venuksen ilmakehässä. Purkaukset tuntuvat keskittyvän tiettyjen pinnan kohtien, kuten Beta-vuoriston yläpuolelle.

Venera 15 ja 16 kartoittivat tutkan ohella Venusta myös lämpökameralla. Lämpökartassa näkyy laajoja ylätasankoja, joiden lämpötila on vähän alhaisempi kuin Venuksen keskilämpötila. Mutta lisäksi näkyy joitakin kuumia kohtia, joiden lämpötila on noin 700 celsiusastetta, yli 200 astetta ympäristöä korkeampi. On mahdollista, että nämä ovat toimivia tulivuoria.

Koska Venuksessa on niin kuumaa, useimmat tulivuoret ovat toisentyyppisiä kuin Maassa. Ne eivät purkaudu äkillisesti ja voimakkaasti, vaan niistä valuu laavaa jatkuvasti ja rauhallisesti. Laava pysyy hyvin juoksevana ja leviää laajalle alueelle eikä aina muodosta "vuorta" lainkaan.

Tuoreesta tulivuoritoiminnasta on saatu viitteitä myös Pioneer Venus -aluksen mittauksista. Vuonna 1983 alus havaitsi rikkidioksidin määrän Venuksen ilmakehässä laskeneen kymmenesosaan vuonna 1978 havaitusta määrästä. Selitykseksi arveltiin, että Venuksessa tapahtui 70-luvun lopulla valtava tulivuorenpurkaus, jonka jäljet kaasukehässä ovat vähitellen haihtuneet. Maanpäälliset radioteleskoopit ovat taas havainneet 1980-luvulla rikkihapon määrän selvästi vähentyneen. Rikkihappo on luultavasti peräisin samasta purkauksesta kuin rikkidioksidi.

Avaruusluotaimet ja Maasta tehdyt havainnot ovat antaneet Venuksesta kuvan aktiivisena planeettana. Siellä tapahtuu luultavasti edelleen tuliperäistä toimintaa, tulivuoret purkautuvat, maanjäristykset muuttavat pintaa. Ehkä suurten pintalaattojen liikkeet saavat aikaan harjanteita, kokonaisten vuorijonojen nousuja sekä repeämiä planeetan pinnassa aivan samoin kuin maapallolla. Venus on muuttuva planeetta, toisin kuin esimerkiksi Merkurius ja Kuu, joissa ei tapahdu juuri lainkaan muutoksia.

Venera 15:n tutkakuvassa näkyy yli tuhannen kilometrin läpimittainen pyöreä muodostuma, "korona", jollaisia ei ole tavattu muilta planeetoilta. Sen alkuperää ei tiedetä.

Kotiplaneettamme Maa

Maa on aurinkokuntamme kolmas planeetta Auringosta lukien. Sen keskietäisyys Auringosta on noin 149.6 miljoonaa kilometriä. Tämä välimatka on valittu tähtitieteellisen yksikön eli AU:n mitaksi.

Kooltaan maapallo on viidenneksi suurin yhdeksästä tunnetusta planeetasta, suurin maankaltaisista planeetoista. Maata kiertää yksi kuu.

Koska maapallo on tärkeä vertailukohde, kun puhutaan muiden planeettojen tutkimisesta, tarkastelemme sitä hiukan planeettana ja selvitämme esimerkiksi maapallon syntyä ja kehitystä sekä maapallon rakennetta.

Toinen tärkeä vertailukohde planeettatutkimuksessa on tietysti Kuu, josta 1960- ja 70-luvulla saatiin merkittäviä uusia tutkimustuloksia.

Maapallon liikkeet ja muoto

Maapallo kiertää Auringon ympäri pitkin ellipsirataa, jonka muoto on hyvin lähellä ympyrää. Yksi kierros kestää vuoden. Maapallo pyörähtää akselinsa ympäri kerran vuorokaudessa (ns. sideerisessä vuorokaudessa, jonka pituus on 23 h 56 min 4 s).

Maapallon pyörimisakseli pysyy suunnilleen kiinteässä suunnassa avaruudessa. Se ei ole ratatasoa vastaan kohtisuorassa, vaan 66.5 asteen kulmassa. Aurinko lämmittää osan vuotta enemmän eteläistä

Maapallon pinta on suurelta osalta pilvien peitossa. Kiertoradalta otetussa kuvassa näkyy vaimeneva myrskykeskus; laskeva Aurinko kajastelee merenpinnasta. (Tämän luvun kuvat Nasa ellei toisin mainittu)

pallonpuoliskoa ja osan pohjoista. Tästä syntyvät vuodenajat. Maapallon akselin suunta ei pysy tarkalleen vakiona, vaan huojuu hyrrän akselin tavoin. Akselin pää näyttää piirtävän taivaalla ympyrän n. 26 000 vuodessa. Kun tällä hetkellä akseli osoittaa lähelle Pohjantähteä, on 12 000 vuoden päästä uutena pohjantähtenä kirkas Vega. Tämän ns. *prekession* lisäksi akseli nyökyttelee 19 vuoden jaksoissa Kuun vetovoiman vaikutuksesta. Tätä liikettä sanotaan *nutaatioksi*.

Käsitys maapallon muodosta on kehittynyt "pannukakusta" palloksi ja edelleen litistyneeksi ellipsoidiksi, lähellä palloa olevaksi kappaleeksi. Nykyään tiedetään, että maapallo ei ole tarkasti mikään säännöllinen kappale. Sen muotoa sanotaan *geoidiksi*. Tämä on lähellä pyörähdysellipsoidia (kappaletta joka syntyy ellipsin pyörähtäessä akselinsa ympäri), jonka napaläpimitta on noin 1/298 pienempi kuin päiväntasaajan läpimitta. Satelliittien liikettä tutkimalla on saatu selville maapallon päärynämäinen muoto.

Maapallon rakenne

Tietoja maapallon sisäosien rakenteesta on melko vaikea saada, sillä syvimmätkin kairaukset ulottuvat vain runsaan 10 km syvyyteen. Näissä kairauksissa on todettu lämpötilan kasvavan tasaisesti noin kolme astetta sadalla metrillä alaspäin mentäessä. Syvemmällä lämpötilan kasvu on jonkin verran hitaampaa.

Maapallon suuri *keskitiheys* (5 500 kg/m^3) kertoo, että Maan sisuksessa täytyy olla hyvin raskaita aineita. Pintaosien ti-

heys on nimittäin vain noin 2 700 kg/m^3. Siksi otaksutaan, että maapallolla on suuri lähinnä raudasta ja nikkelistä muodostunut sydän.

Tärkeimpiä tietoja Maan sisuksesta saadaan *maanjäristyksiä* tutkimalla. Suurissa maanjäristyksissä syntyneet paineaallot kulkevat koko maapallon läpi. Niiden nopeuden on havaittu tietyillä syvyyksillä muuttuvan hyppäyksenomaisesti, ja näillä kohdilla aineen laatu ilmeisesti muuttuu.

Ns. poikittaisten järistysaaltojen pysähtyminen maapallon ytimessä taas kertoo, että osa ytimestä on nestemäisessä muodossa, koska poikittaiset aallot eivät nesteessä liiku. Pitkittäiset aallot sen sijaan kulkevat koko maapallon lävitse.

Lähdetään tarkastelemaan maapallomme rakennetta keskipisteestä pinnalle päin. Maapallon keskustassa vallitsee noin 6 000 asteen lämpötila ja 3 miljoonan ilmakehän paine. *Rauta-nikkeliydin* on keskustassa jähmeässä muodossa,mutta noin 5 000 km syvyydeltä noin 2 900 km syvyyteen nestemäisessä muodossa, siis sulana.

Ytimen ulkopuolella on *vaippa*, joka ulottuu 2 900 km syvyydestä melkein pinnalle asti. Vaippa on muodostunut keveiden metallien ja piin yhdisteistä eli metallisilikaateista ja keveiden metallien ja hapen yhdisteistä eli metallioksideista. Vaippa on ilmeisesti elastista, jonkin verran joustavaa, niin että kivessä tapahtuu hitaita virtauksia. Vaippa ei kuitenkaan ole nestemäisessä muodossa. Vaipassa tapahtuvat hitaat virtaukset vaikuttavat myös maapallon pintaosiin, joissa tapahtuu jatkuvaa mannerlaattojen liikuntaa.

Maapallon uloin osa on *kuori*. Sen paksuus mantereiden kohdalla on 36—60 km ja valtamerten alla vain 5—7 km. Vaipan ja kuoren välistä rajaa sanotaan Mohopinnaksi (jugoslavialaisen tutkijan Mohorovicicin mukaan).

Tärkeämpänä kuin kuoren ja vaipan välistä kemialliseen koostumukseen perustuvaa eroa pidetään nykyään ns. *litosfäärin ja astenosfäärin* välistä eroa. Litosfääri on jäykkää, kiinteää kiveä, ja se ulottuu noin sadan kilometrin syvyyteen. Sen yläosana on maapallon kuori ja alaosa kuuluu vaippaan. Astenosfääri ei ole yhtä kiinteää, vaan siinä tapahtuu hidasta kiven virtausta. Kiven seassa on ilmeisesti osittain sulaa ainetta. Astenosfääri kuuluu kokonaan vaippaan ja ulottuu ehkä 700 km syvyyteen. Eräiden tutkijoiden mukaan se voi ulottua syvemmällekin, ja virtauksia tapahtuisi tällöin lähes koko vaipan paksuudelta.

Litosfääri on hajonnut noin tusinaan *erilliseen laattaan,* jotka kelluvat astenosfäärin päällä ja hitaasti, pari senttimetriä vuodessa, liikkuvat toistensa suhteen. Merten keskiselänteiden kohdalla vaipasta tapahtuu nousevaa virtausta, niin että merenpohja liikkuu selänteestä poispäin ja keskelle syntyy uutta merenpohjaa siitä aineesta, jota astenosfääristä nousee. Toisella reunallaan laatat työntyvät toisten laattojen alle ja sulautuvat takaisin vaippaan. Monilla alueilla törmäyskohtaan kohoaa mahtava vuoristo. Esimerkiksi Himalaja on syntynyt Intian laatan törmätessä suureen Aasian laattaan.

Laattojen törmäyskohdissa tapahtuu maanjäristyksiä laattojen liikkuessa toistensa suhteen muutaman senttimetrin vuodessa. Näillä alueilla on myös usein tulivuoria. Tulivuorista pursuava laava ei ole peräisin maapallon sulasta ytimestä, vaan aivan pinnan lähellä olevista sulapesäkkeistä. Pesäkkeiden syntyyn vaikuttaa radioaktiivisten aineiden hajotessaan tuottama lämpö.

Euroopan ja Aasian valot avaruudesta. Satelliittien yökuvista on koottu mosaiikki, jossa Suomi näkyy vasemmassa yläosassa.

Maapallon synty ja kehitys

Maapallo syntyi noin 4.6 miljardia vuotta sitten, samoihin aikoihin kuin koko aurinkokunta. Kun maapallo oli kasautunut suunnilleen nykyiseen kokoonsa, se suureksi osaksi suli. Sulamisen aiheutti osittain törmäävistä meteoriiteista vapautuva lämpö, mutta suurimmaksi osaksi lämpö oli ilmeisesti peräisin lyhytikäisistä radioaktiivisista aineista, jotka hajotessaan tuottivat energiaa. Lämpeneminen johti maapallon osittaiseen sulamiseen, ja tällöin maapallon aine *differentioitui*. Tämä tarkoittaa sitä, että raskaimmat aineet painuivat keskustaan ja keveimmät nousivat pintaan, samaan tapaan kuin esimerkiksi sulassa metallissa kevyt kuona nousee pinnalle.

Raskaimpia aineita olivat rauta ja nikkeli, jotka vajosivat alas ja muodostivat maapallon ytimen. Keveimpiä olivat graniitin kaltaiset kivilajit, jotka kohosivat pintaan.

Jonkin aikaa syntymänsä jälkeen maapallo oli suuren meteoriittipommituksen kohteena. Aurinkokunnan synnystä oli jäänyt yli paljon pieniä kappaleita, jotka pommittivat kaikkia planeettoja. Osa aineesta katosi aurinkokunnan ulkopuolelle, mutta suuri osa törmäsi planeettoihin.

Kuun pinnasta on voitu päätellä, että alkupommitus kesti puolisen miljardia vuotta. Maapallon pintaan törmänneiden meteoriittien kraattereista ei ole jälkiä juuri nähtävissä, koska pinnalla eroosio, siis veden ja tuulen kulutus, hävittää törmäyksen merkit. Myös pinnan laattojen liikkeet ovat tuhonneet maapallon alkuhistorian tapahtumien jälkiä.

Suurten meteoriittien tai pikkuplaneettojen törmäykset ovat rikkoneet maapallon kuoren joistakin kohdista enemmän kuin toisista, ja tällöin vaipassa tapahtuvat hitaat virtaukset ovat panneet ehjäksi jääneitä alueita liikkeelle toistensa suhteen.

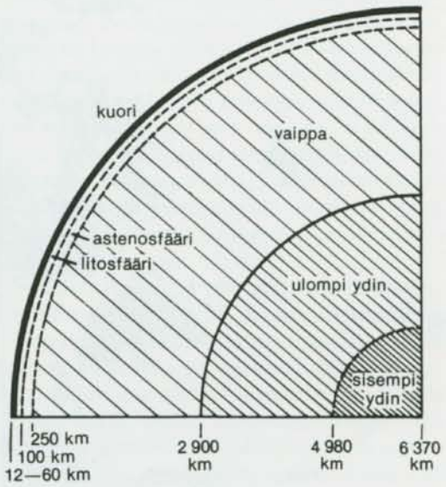
Meret ja ilmakehä

Samalla kun maapalloon satoi ainetta ulkoapäin, maapallon sisältä haihtui kaasuja ja höyryjä. Tälläkin hetkellä tulivuorista purkautuu kaasuja, jotka ovat pääasiassa vesihöyryä ja hiilidioksidia. Maapallon alkuaikoina sen sisältä purkautui valtavia määriä vesihöyryä, hiilidioksidia ja muita kaasuja.

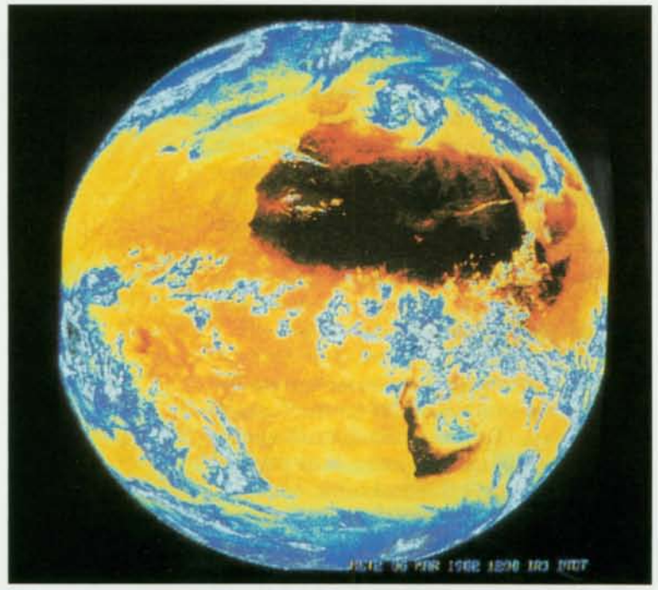
Purkautuvat aineet muodostivat hyvin nopeasti maapallolle tiheän ilmakehän. Ilmakehässä oli vesihöyryä, joka tiivistyi vedeksi. Jatkuvat sateet huuhtoivat paljaita kalliopintoja, kunnes syvänteisiin alkoi muodostua järviä ja lopulta meriä.

Maapallon ilmakehän kehityksestä sen synnystä nykyaikaan asti on tehty laskelmia tietokoneella. Tällaiset laskelmat ovat hyvin vaikeita, koska niissä on tavattoman monta tekijää, mutta voimme esimerkkinä käydä läpi yhden mahdollisen ilmakehän kehityskulun.

Maapallon sisältä purkautuvat vesihöyry ja hiilidioksidi muodostivat jo noin 150 miljoonan vuoden kuluttua syntymästä maapallon ympärille tiheän ilmakehän ja yhtenäisen pilviverhon. Pilvien alla pai-



Maapallon rakenne. Ohut kuori ja vaipan yläosa n. 100 km syvyyteen asti muodostavat ns. litosfäärin, joka koostuu liikkuvista laatoista. Sen alla on osittain sula astenosfääri, jossa tapahtuu kiven hidasta virtausta. Ulompi ydin on sulaa metallia.



Maapallon mantereista suuri osa on kuivien autiomaiden peitossa. Satelliitin lämpökuvassa Afrikan kuumimmat alueet näkyvät tummanruskeina. Alempana sukkulalennolla otettu kuva Namibian rannikon hiekkadyyneistä.

ne nousi jonkin verran korkeammaksi kuin nykyinen ilmanpaine. Meret keräytyivät Maan pinnalle.

Ilmakehä oli aluksi suurelta osin hiilidioksidia, mutta vähitellen hiilidioksidi sitoutui meriin ja kiviin. Osa hiilestä poistui myös vuosimiljardien aikana sitoutumalla eläviin olentoihin kuten kasveihin.

Elämä syntyi maapallon merissä jo melko pian sen jälkeen kun meret olivat pinnalle keräytyneet, noin neljä miljardia vuotta sitten. Se kehittyi ja monimutkaistui merissä, kunnes meret olivat täynnä elämää, mutta mantereet olivat yhä elottomia.

Noin kahden miljardin vuoden kuluttua maapallon syntymisestä ilmakehä oli pääasiassa metaania ja muita hiilivetyjä, mutta meriin syntynyt elämä hajotti jatkuvasti hiilivetyjä ja tuotti happea. Pilvikerros maapallon ympäriltä hajosi ja ilmanpaine laski jonkin verran alhaisemmaksi kuin nykyään. Lämpötila laski myös hieman alemmaksi kuin nykyinen keskilämpötila. Tällöin maapallo oli vähällä joutua ikuisen jääkauden valtaan.

Elämä alkoi yhä enemmän vaikuttaa ilmakehän koostumukseen. Happea tuli lisää ja lisää. Noin 400 miljoonaa vuotta sitten happi ja siitä syntynyt otsoni muodostivat ilmakehän yläosiin kerroksen, joka suojasi pinnan elämää Auringon vaaralliselta ultraviolettisäteilyltä. Nyt elämä pääsi leviämään myös maalle.

Tällä hetkellä koko maapalloa ympäröi biosfääri, elämää sisältävä kerros, joka ulottuu syvimmästä merenpohjasta ilmakehän yläkerroksiin, napaseutujen jäätiköiltä kuumille aavikoille. Maapallon hallitsevaksi lajiksi noussut ihminen on jo pyrkimässä maapallon ulkopuolelle, toisille taivaankappaleille.

Paljolti kasvien ansiosta maapallon ilmakehä on nyt toisenlainen kuin alkuaan. Tällä hetkellä ilmakehästä on n. 78 % typpeä ja 21 % happea. Hiilidioksidi on sitoutunut lähinnä kiviin. Muilla lähiplaneetoilla, Venuksessa ja Marsissa, hiilidioksidi on pysynyt ilmakehässä ja muodostaa yli 90 % kummankin planeetan kaasukehästä.

Ilmakehässä on maapallolla lisäksi vesihöyryä, jonka määrä vaihtelee napaseutujen 0.001 %:sta tropiikin jopa 5 tilavuusprosenttiin. Veden suuri määrä erottaa maapallon ilmakehän Venuksen ja Marsin kuivasta ilmakehästä.

Maapallon ilmakehä jaetaan useisiin kerroksiin. Merkittävin on alin, n. 10 km paksuinen troposfääri, jossa tapahtuvat lähes kaikki sääilmiöt. Maanpinnalla ilmanpaine on keskimäärin noin 1 000 millibaaria, ilman tiheys 1.2 kg/m^3 ja lämpötila n. +20°C.

Maapallon pilvet ovat muodostuneet vesipisaroista, ja niiden tyypillinen korkeus on pari kilometriä. Keskimäärin vajaa puolet maapallon pinnasta on joka hetki pilvien peitossa.

Maapallon magnetosfääri

Maapallon magneettinen vaikutusalue, *magnetosfääri*, ulottuu ilmakehän ulkopuolelle. Auringon suunnassa se yltää Maasta vajaan 100 000 km päähän, missä aurinkotuulen hiukkaset törmäävät ns. *sysäysrintamaan*. Vastakkaisessa suunnassa aurinkotuuli venyttää magnetosfäärin miljoonien kilometrien pituiseksi pyrstöksi.

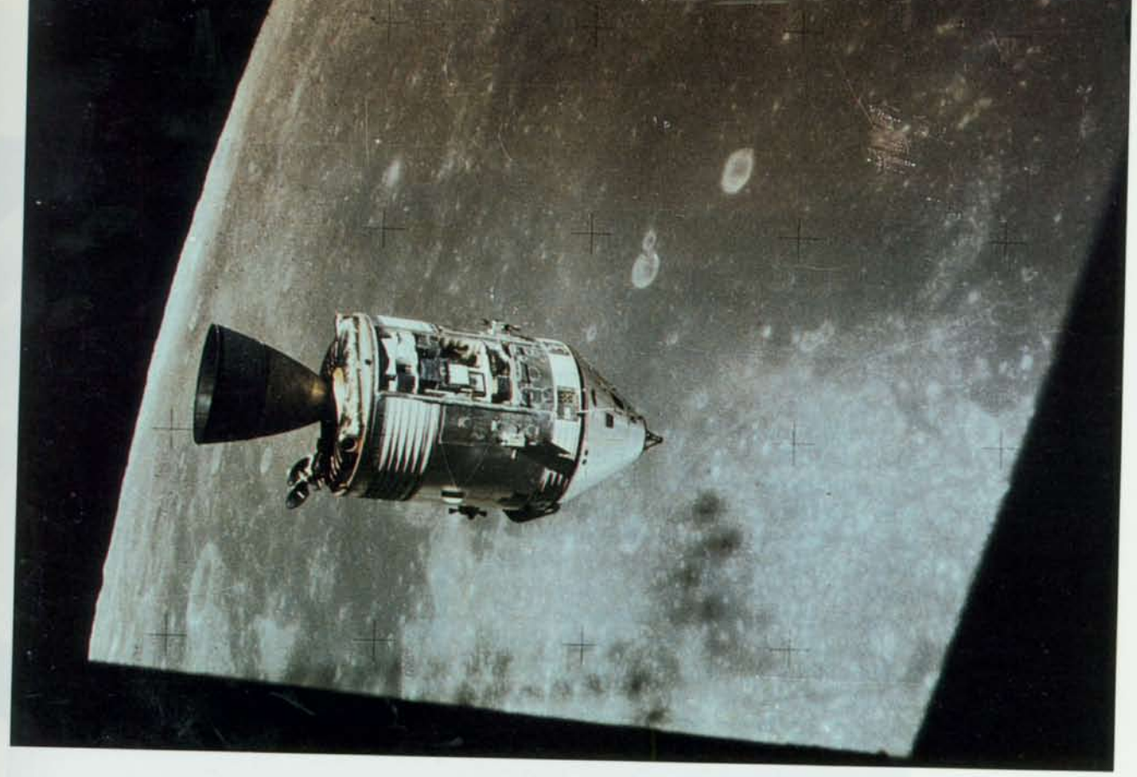
Maapallon magneettikenttä on vanginnut Auringosta lähteneitä protoneja ja elektroneja maapallon ympärille ns. *van Allenin säteilyvyöhykkeiksi*. Säteilyvyöhykkeistä ilmakehään tunkeutuvat hiukkaset aiheuttavat mm. revontulet.

Maan magneettikenttä saa ilmeisesti alkunsa maapallon ytimen sulassa osassa tapahtuvista virtauksista. Magneettikentän ja magnetosfäärin olemassaololla voi olla suuri merkitys ilmakehän kehittymisen kannalta, koska nykyisellään magnetosfääri muodostaa hyvän suojan aurinkotuulta vastaan. Jos aurinkotuuli pääsisi iskemään suoraan maapallon ilmakehään, kuten esimerkiksi Venuksessa, ilmakehän koostumus ja jopa pinnan olosuhteet voisivat olla toisenlaiset.

Kuun tutkiminen

Maapallo ja sitä lähinnä oleva taivaankappale, Kuu, muodostavat planeettaparin joka kiertää yhdessä Aurinkoa. Monia tietoja Kuusta saatiin selville vuosituhansien aikana Maasta tehtyjen havaintojen perusteella, mutta sen rakenne ja kehitys ovat alkaneet paljastua tarkemmin vasta viime vuosikymmeninä, kun sitä on automaattisilla ja miehitetyillä lennoilla voitu tutkia välittömästi pinnalta ja kiertoradalta.

Kuuta tutkittiin voimakkaasti avaruusluotaimilla 1959—76. Kuun takapuolelle päästiin kurkistamaan ensimmäisen kerran 1959, kun *Luna* 3 kiersi Kuun. Lähikuvia Kuun pinnasta alettiin saada 1960-luvun puolivälissä, kun ensin *Ranger*-luotaimet iskeytyivät Kuuhun ja kuvasivat pudotessaan pintaa ja sitten Luna- ja



Apollo-huoltoalus kuvattuna laskeutumisaluksen ikkunasta Kuun kiertoradalla.

Surveyor-luotaimet tekivät pinnalle pehmeän laskun.

Kuuta kartoitettiin kiertoradalta *Lunar Orbiter* -aluksilla, joiden avulla etsittiin sopivia laskeutumiskohtia miehitetyille *Apollo*-aluksille. Ensimmäiset Apollot kiersivät Kuuta, mutta heinäkuussa 1969 toteutui ihmisen suuri unelma: ensimmäiset avaruuslentäjät kävelivät Kuun pinnalla.

Apollo-lennoilla 1969—72 Kuussa kävi kaikkiaan 12 astronauttia. He tutkivat pintaa ja jättivät sinne automaattisia tutkimusasemia, jotka toimivat 1970-luvun lopulle asti. (Ne jouduttiin sammuttamaan, kun Yhdysvaltain avaruushallinnolla Nasalla ei ollut enää varoja ottaa vastaan niiden lähettämiä tietoja.)

Astronautit kuvasivat Kuuta myös kiertoradalta, ja pinnalta tuotiin Maahan yli 380 kiloa kivinäytteitä. Niistä osa on tutkittu, mutta osa on edelleen varastossa odottamassa tutkimusmenetelmien kehittymistä tarkemmiksi. Pieniä näytteitä Kuusta saatiin myös automaattisilla Luna-aluksilla, ja kaksi *Lunohodia* vaelteli automaattisesti Kuun pinnalla.

Viimeinen kuuluotain oli Luna 24 vuonna 1976, ja sen jälkeen Kuuta ei ole tutkittu yhdelläkään avaruusaluksella. Kuututkimuksen loistoaika oli lyhyt, mutta tuottoisa, ja sen ansiosta tietomme Kuusta ovat nyt huomattavasti paremmat kuin ennen avaruuskauden alkua.

Täysikuu Pekka Parviaisen kuvaamana.

Perustiedot Kuusta

Kuu kiertää Maata suunnilleen ellipsin muotoisella radalla, joka on kallellaan Maan ratatasoon nähden vähän yli 5°. Kuun kiertoaika Maan ympäri on runsaat 27 vuorokautta, mutta koska Maa ja Kuu ovat koko ajan liikkeessä Auringon ympäri, kahden peräkkäisen täydenkuun välinen aika on yli 29.5 vuorokautta. Kuun keskietäisyys maapallosta on 384 400 km eli runsaat 60 Maan sädettä; pienimmillään etäisyys on 356 000 km ja suurimmillaan 407 000 km.

Maasta katsottuna Kuu on vähän yli puolen asteen läpimittainen levy. Sen todellinen läpimitta on 3500 km. Koska Kuu pyörähtää akselinsa ympäri täsmälleen samassa ajassa kuin se kiertää Maan ympäri, se kääntää aina saman puolen meitä kohti. Radan elliptisyydestä ja Kuun omista pienistä heilahteluista johtuu, että vain 41 % sen pinnasta pysyy täysin näkymättömissä. Samoin 41 % on aina näkyvissä, ja loput 18 % näkyvän alueen reunoilla on välillä piilossa, välillä esillä.

Kuun massa on noin kahdeksaskymmenesosa Maan massasta. Se on siten emäplameettaansa verrattuna suhteellisesti suurempi kuin yksikään toinen kuu aurinkokunnassamme (lukuunottamatta Pluton kuuta Kharonia). Kuun keskitiheys on 3 340 kg/m^3, kun maapallon tiheys on 5 520 kg/m^3. Näin ollen painovoiman kiihtyvyys Kuun pinnalla on vain noin kuudesosa Maan vastaavasta arvosta.

Koska Kuulla ei ole samanlaista suojaavaa ilmakehää kuin Maalla, lämpötila pinnalla vaihtelee voimakkaasti. Kuun kaksiviikkoisen päivän aikana pintalämpötila kohoaa päiväntasaajan seuduilla 130 celsiusasteeseen ja laskee yöllä noin –200 asteeseen. Napaseuduilla vaihtelut eivät ole yhtä suuret. Mainitut arvot koskevat aivan Kuun pintaa; jo noin metrin syvyydellä pinnan alla lämpötila pysyy ympäri vuorokauden samana.

Kuun pinta

Kuun pinta jakautuu laadultaan kahteen pääosaan: tummiin *meriin*, jotka heijastavat noin 6—7 % auringonvalosta, ja vaaleaan *manneralueeseen*, joka heijastaa paikoitellen jopa 18 % siihen osuvasta valosta. Lähes kaikki suuret meret sijaitsevat Kuun näkyvällä puolella; takapuoli on melkein kokonaan mannerta.

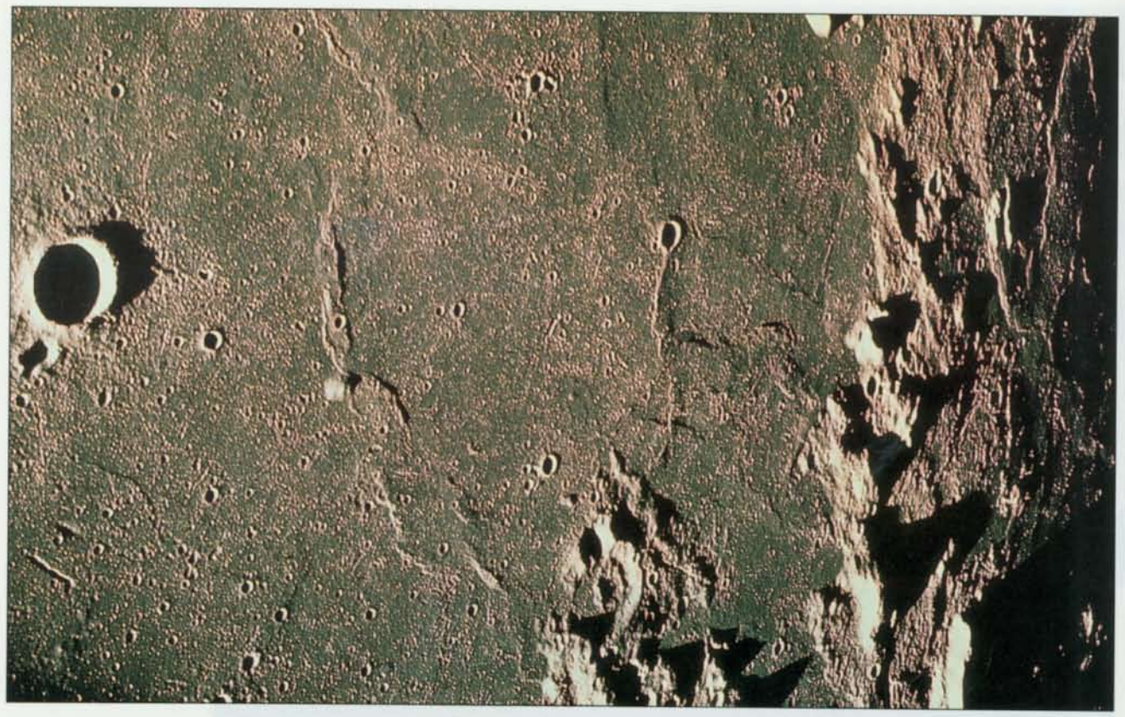
Nimitykset meri ja manner ovat peräisin ajalta, jolloin Kuun maisemien arveltiin olevan samanlaisia kuin Maan. Nimet on säilytetty, vaikka jo kauan on tiedetty, että meret ovat aivan yhtä vedettömiä kuin mantereet.

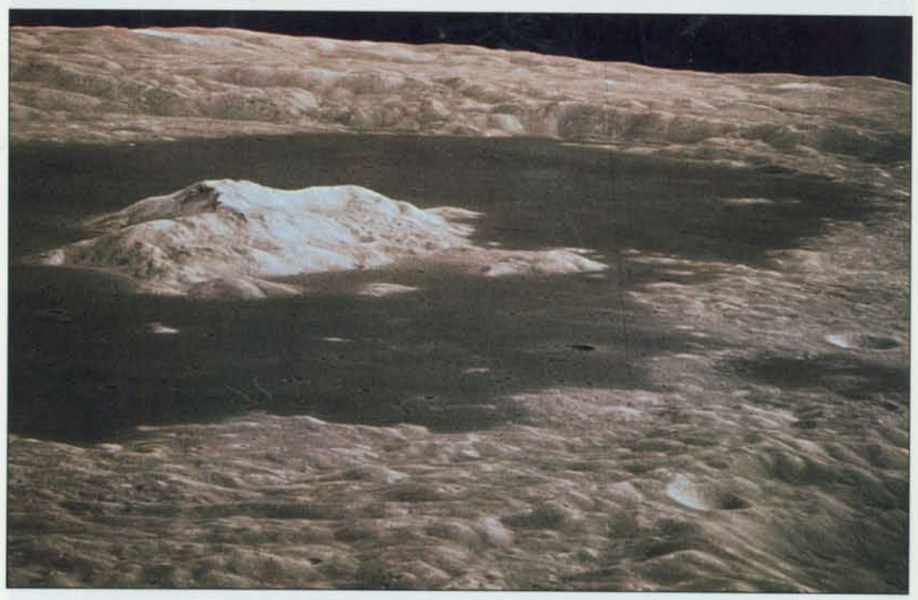
Jo kiikarilla voi kaikkialla Kuussa erottaa pyöreitä, rengasmaisia muodostumia, joita sanotaan *kraattereiksi*. Suurimmat ovat 300—400 km läpimittaisia, ja pienempiä löytyy sitä enemmän mitä tarkemmin katsoo. Kuulennoilla nähtiin pinnassa muutaman senttimetrin ja millimetrin suuruisia kraattereita, ja Maahan tuoduista kuunäytteistä on mikroskoopilla löydetty yhä pienempiä ja pienempiä. Kaikki kraatterit ovat luultavasti syntyneet meteoriittien iskuista. Yhtään varmaa tuliperäistä kraatteria ei Kuusta ole löydetty. Aikojen kuluessa Kuuhun on osunut ja osuu jatkuvasti erimassaisia meteoriitteja. Pienimpien mikrokraattereiden aiheuttajien on laskettu olevan pienenpieniä pölyhiukkasia. Suurimmat kraatterit ovat syntyneet 10—20 km suuruisten asteroidien iskusta, ja suurten merien kuopat ovat satojen kilometrien läpimittaisten pikkuplaneettojen muodostamia.

Noin suuria kappaleita ei aurinkokunnassa risteile enää läheskään yhtä paljon kuin heti sen synnyn jälkeen. 1970-luvulla Kuussa toimineet seismometrit rekisteröivät iskuja, joiden aiheuttajien paino vaihteli 100 grammasta 1000 kiloon.

Kun meteoriitti osuu valtavalla nopeudella Kuuhun, se työntyy syvälle pinnan sisään. Liike-energiasta noin kolmasosa

Kuun Sateidenmeri kuvattuna Mt. Wilsonin observatorion 2.5 metrin kaukoputkella.





Kuun pintaa kiertoradalta. Vieressä Kuun kääntöpuolen silmiinpistävin muodostuma, Tsiolkovskin kraatteri. Yläkuvassa Keskuslahtea ja Brucen kraatteri.

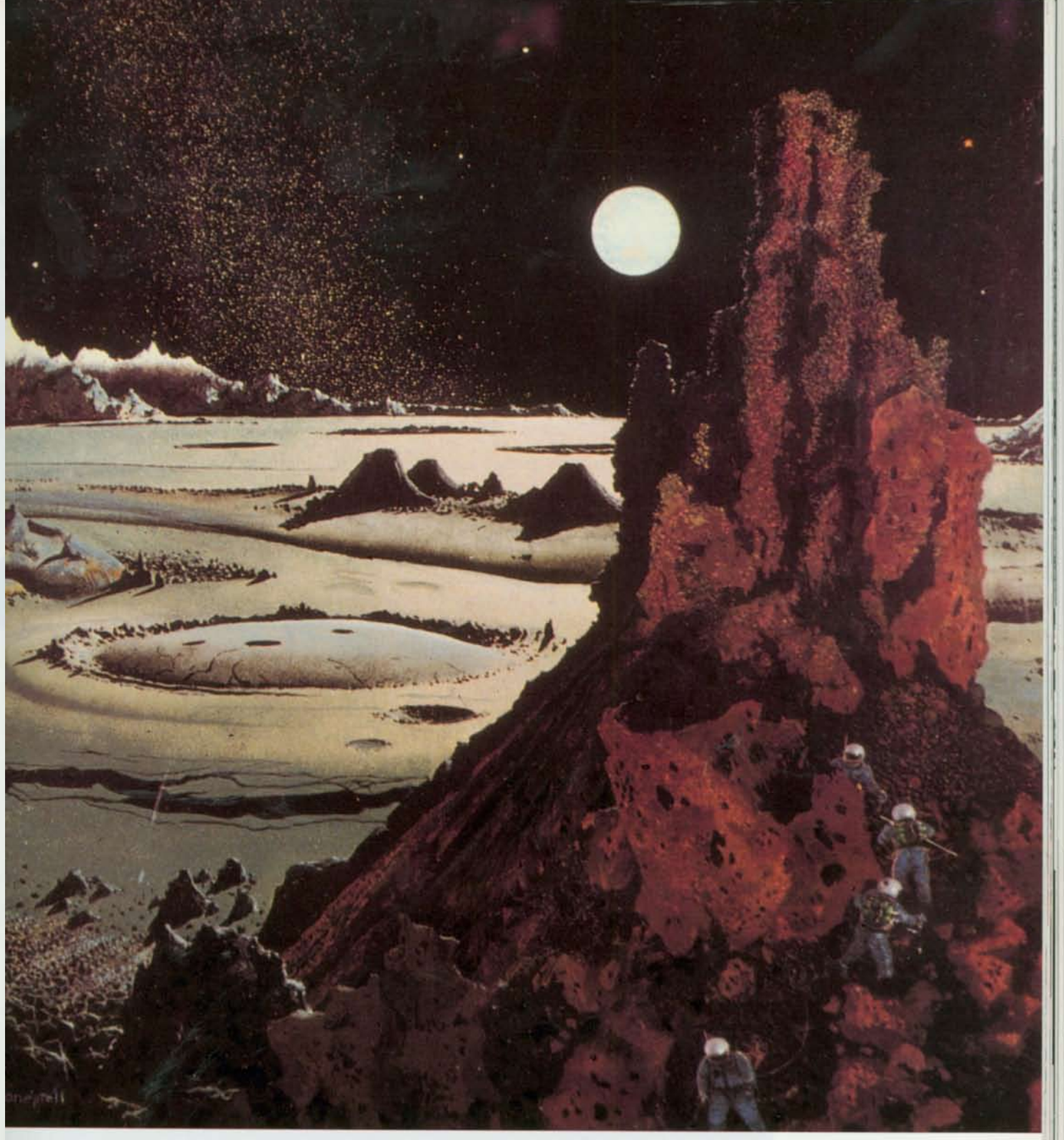
muuttuu lämmöksi, joka riittää hetkessä sulattamaan koko meteoriitin. Se räjähtää ja heittää yläpuolella olevan pintakerroksen syrjään. Näin syntyy yksi iso kraatteri, jolla on koholla oleva vallireuna, ja siitä lentäneistä kivistä runsaasti pienempiä ns. sekundaarisia kraattereita.

Muita Kuun luonteenomaisia pinnanmuotoja ovat

— *vuoret*, jotka ovat jättimäisten kraatterien (ympyränmuotoisten merien) murentuneita reunavalleja;

— kiemurtelevat *rotkot*, jotka ovat voineet syntyä pinnan repeäminä tai laavavirroista;

— merissä olevat *harjut*, jotka ovat ehkä syntyneet suurten laavakenttien jäähtyessä ja rypistyessä.



Chesley Bonestellin kuukuvissa vuoret olivat jyrkkiä ja jylhiä. Astronautit löysivät Kuusta paljon laakeampia maisemia.

Tarkkailemalla Kuun valoisuuden muuttumista sen eri vaiheiden aikana voitiin jo Maasta käsin päätellä, että Kuun pinta on hyvin rosoinen ja huokoinen. Kuu näyttää nimittäin täsmälleen täysikuun aikaan hyvin kirkkaalta, mutta heti sen jälkeen alkaa tummua (ns. oppositioilmiö). Tämä johtuu pienistä rei'istä ja halkeamista, joiden pohjaan suoraan yläpuolella oleva Aurinko pääsee paistamaan mutta joiden reunat heti täydenkuun jälkeen alkavat heittää varjon.

Ensimmäiset Kuuhun laskeutuneet automaattiluotaimet vahvistivat käsityksen pinnan huokoisuudesta. Pintakerroksen tiheys on n. 1 500 kg/m^3, ja koska jokaisen hiukkasen tiheys on n. 3 000 kg/m^3, puolet pölyn tilavuudesta on hiukkasten välissä olevaa tyhjää tilaa. Pinta on muokkaantunut nykyiselleen miljardeja vuosia kestäneen meteoriittipommituksen vaikutuksesta.

Taulukko 8.1. Kuun pinnan kemiallinen koostumus (prosentteina atomeista)

	O	Na	Mg	Al	Si	Ca+K	Ti	Fe
Meret	60,6	0,4	5,3	6,6	16,8	4,7	1,0	4,5
Mantereet	61,1	0,4	4,0	10,2	16,2	6,3	0,1	1,8

Pintakerroksen *kemiallinen koostumus* on saatu selville Kuusta tuoduista näytteistä. Näitä näytteitä on tutkinut mm. professori Birger Wiik Suomesta. Meri- ja manneralueen aine poikkeavat jonkin verran toisistaan. Meret ovat pääasiassa basalttia, tummaa, rautarikasta ja raskasta mineraalia, ja mantereet anortosiittia, joka on vaaleampaa, kevyempää ja alumiinirikasta. Oheisesta taulukosta nähdään eri alkuaineiden runsaus merien ja mantereiden pintakerroksessa. Koko aurinkokunnan runsauteen verrattuna Kuu sisältää noin kuusi kertaa enemmän alumiinia, kalsiumia ja titaania, mutta vain noin neljäsosan natriumia, magnesiumia ja rautaa. Kuun sisäosien koostumus ei kuitenkaan ehkä ole aivan sama kuin pinnan.

Kuun kivilajien *ikä* voidaan mitata radioaktiivisten aineiden hajoamisesta. Tämä menetelmä mittaa aikaa siitä hetkestä, jolloin kivi on jähmettynyt sulasta kiinteäksi. Aineen sulaminen virittää radioaktiivisen kellon aina uudelleen. Kuunäytteiden iänmääritys on antanut odottamattoman tuloksen. Melkein kaikki tähän mennessä tutkitut manneralueen kivet ovat syntyneet lyhyellä aikavälillä 4.1—3.9 miljardia vuotta sitten, ja lähes kaikki meribasaltit aikana 3.9—3.1 miljardia vuotta sitten. Koska Kuun uskotaan olevan samanikäinen kuin Maa, 4.6 miljardia vuotta vanha, saadut iät antavat viitteitä Kuun myrskyisestä nuoruudesta.

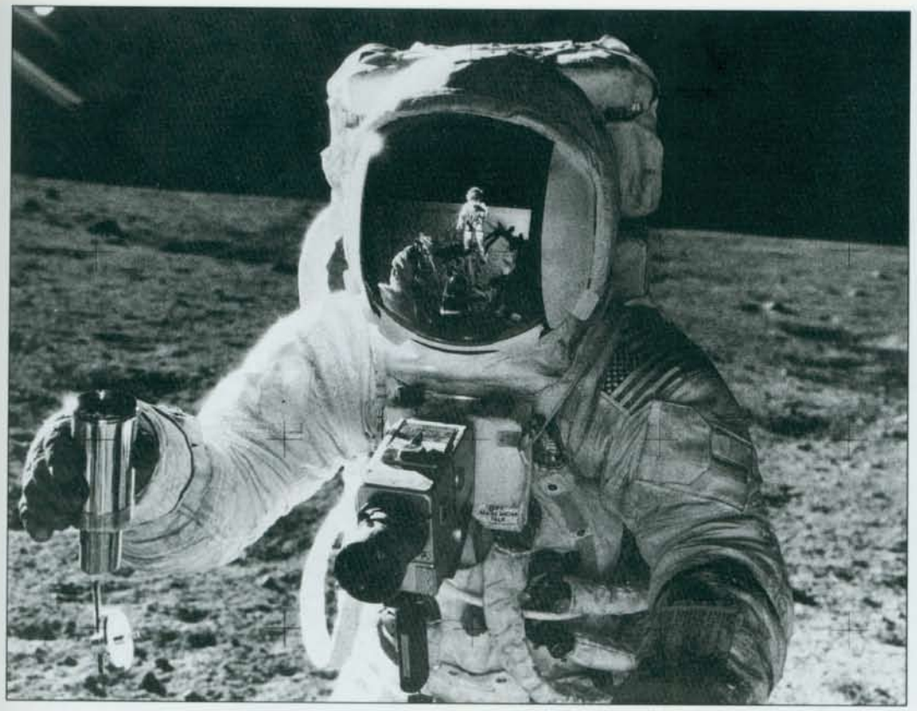
Kuun pinnalta ei ole toistaiseksi löytynyt yhtään näytettä, joka viittaisi viimeisten miljardien vuosien aikana tapahtuneeseen tuliperäiseen toimintaan. Tiettyjen pinnan kohtien, mm. Aristarkhus- ja Grimaldi-kraatterin yläpuolella, on havaittu kuitenkin pieniä kaasumääriä, jotka ovat voineet purkautua pinnan alta. Mainittujen kraattereiden kohdalla on Maasta havaittu silloin tällöin värinmuutoksia, leimahduksia tai muita ohimeneviä ilmiöitä, joita on pidetty jonkinlaisen vulkaanisen toiminnan merkkinä.

Kuun rakenne

Uusimpien tutkimusten mukaan Kuu koostuu eri kerroksista: 60—100 km vahvuisesta *kuoresta, vaipasta* joka jatkuu n. 1000—1100 kilometrin syvyyteen saakka, ja 600—700 kilometrin säteisestä *astenosfääristä* (osittain sulasta sydämestä). Kuun sisältä on saatu tietoja ennen kaikkea neljän Apollo-lennoilla asennetun seismometrin avulla, jotka ovat ottaneet vastaan kuunjäristysten ja meteoriitti-iskujen aiheuttamia seismisiä aaltoja. Aaltojen kulkunopeus eri syvyydellä antaa kuvan kivilajien ominaisuuksista.

Kuun kuori, joka koostuu kevyistä kivilajeista (esim. gabrosta), on n. 60 km paksuinen. Takapuolella se voi olla kaksi kertaa näin paksu. Tämä selittäisi sen,

Kopernikus-kraatteri Lunar Orbiter -aluksen kuvaamana.



Apollo-astronautti Kuun pinnalla.

miksi Kuun painopiste ei ole sama kuin pallon keskipiste, vaan poikkeaa siitä n. 2 km Maahan päin, 1 km pohjoiseen ja 1 km itään. Etupuolen rengasmaisten merien kohdalla on 20—30 kilometrin paksuinen basalttilaatta, keskeltä paksumpi, reunoilta ohuempi. Koska basaltin tiheys on suurempi kuin muun kuoren, merien kohdalla on havaittavissa suurempi painovoiman kiihtyvyys. Nämä basalttilaatat ovat Kuun *maskoneita,* massakeskittymiä, jotka löydettiin 60-luvun lopulla.

Kuoren pinnassa on kaikkialla muutaman kymmenen metrin syvyinen irtonainen maakerros (regoliitti) ja sen alla useita satoja metrejä paksu rikkinäinen kivikerros. Tästä alaspäin mentäessä kallioperä on yhä tiiviimpi.

Vaippa on 1 000 kilometrin paksuinen vyöhyke, jossa seismisten aaltojen nopeus on lähes vakio. Viidensadan kilometrin syvyydessä on kuitenkin rajavyöhyke, joka voi edustaa sitä syvyyttä, johon asti Kuun pinta synnyn jälkeen suli. Vaipan yläosa on tiheydeltään suunnilleen homogeeninen, mutta voi sisältää monenlaisia kivilajeja. 500—1 000 km syvyydessä kivi voi olla rautapitoisempaa kuin vaipan yläosissa.

Seismometriverkko on havainnut, että Kuu on paljon rauhallisempi taivaankappale kuin Maa, ja sen harvat ja heikot sisäiset järistykset sattuvat muutamassa kymmenessä eri keskuksessa. Nämä keskukset sijaitsevat yleensä 700—1000 km syvyydessä eli vaipan alaosissa. (Maapallolla ei järistyksiä tapahdu näin syvällä.) Kuunjäristysten syynä voivat olla Kuun sydämessä tapahtuvat virtaukset, mutta laukaisijana toimii Maan vetovoima (vuorovesi-ilmiö): useimmat järistykset tapahtuvat Kuun ollessa radallaan lähinnä Maata tai kauimpana siitä.

Kuun sisustaa luultiin aikaisemmin täysin kiinteäksi, mutta 1972 muutaman suuren meteoriitin törmäys antoi uusia havaintoja. Seismometrit löysivät Kuun läpi tulleista aalloista vain pitkittäisiä, mutta eivät poikittaisia. Tämä merkitsee sitä, että Kuun pinnan alla 1 000—1 100 kilometrin syvyydessä aine on luultavasti osittain sulanutta. Kuumaan sisukseen viittasivat myös Apollo 15 ja 17 -lennolla tehdyt mittaukset, joissa Kuun sisältä havaittiin virtaavan odotettua enemmän lämpöä. Lämpö syntyy uraanin radioaktiivisesta hajoamisesta, ja havaitun lämpömäärän perusteella on arvioitu, että Kuun uraanipitoisuus on kaksi kertaa niin suuri kuin Maan.

Koska Kuun kivien sulamislämpötila on noin 1 500°C, sydämen lämpötilaksi

Apollo 12 -astronautti asettelee Kuun pinnalle ALSEP-tutkimuslaitteistoa.

arvioidaan 1 400—1 600 astetta. Paine Kuun keskuksessa on noin 50 000 ilmakehää.

Kuun magneettikenttä

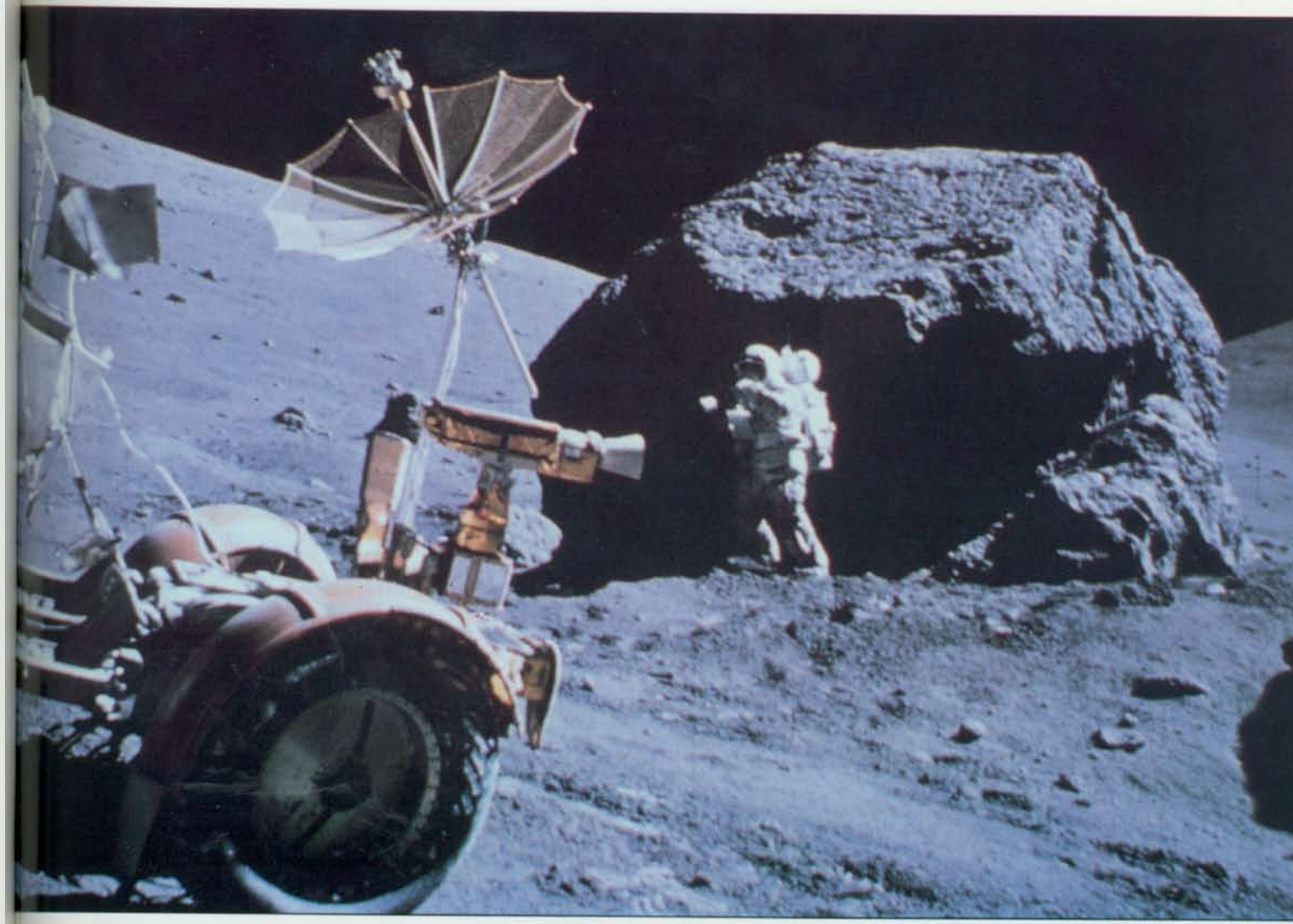
Kuun pinnalla ja kiertoradalla tehdyt mittaukset ovat osoittaneet, että Kuun *magneettikenttä* on hyvin epätasainen. Keskimäärin se on heikko, vain noin tuhannesosa Maan magneettikentän voimakkuudesta, ja se aiheutuu Kuun kuoren kivissä olevasta jäännösmagnetismista. Alimmat lukemat on mitattu merien kohdalta ja korkeimmat manneralueelta. Erot johtuvat siitä, että vuoriston breksiat (yhteeniskostuneista kivenpalasista muodostuneet kivilajit) sisältävät enemmän metalleja kuin merten basaltti, ja juuri metalleihin on magnetismi jähmettynyt.

Näinkin suuri magneettikenttä Kuussa oli tutkijolle suuri yllätys, ja sen synty on vaikea selittää. Kuun kaltainen taivaankappale voi saada pysyvän magneettikentän, jos se jäähtyessään tietyn lämpötilan alapuolelle (ns. Curien pisteen, joka esim. raudalle on n. 800°C) on voimakkaassa magneettikentässä. Yhtenä selityksenä on esitetty, että aurinkokunnassa syntyaikoina vallinnut voimakas kenttä magnetisoi Kuun kiinteän sydämen, joka sitten vuorostaan aiheutti jäähtyvään kuoreen magneettikentän. Koska Kuun sydämellä ei nykyään ole magneettikenttää, sen on täytynyt kadota ytimen lämpötilan ylittäessä Curien pisteensä.

Apollo 15 -lennolla Maahan tuotu kuukivi, joka painoi puolitoista kiloa. Kooltaan se vastasi lapsen päätä.

Kuun synty ja kehitys

Kuun oletetaan syntyneen erillisenä taivaankappaleena samaan aikaan kuin



muukin aurinkokunta eli noin 4.6 miljardia vuotta sitten. Tarkkaa selvyyttä Kuun synnystä ei edes Apollo-lentojen avulla kuitenkaan saatu. Kuu on voinut syntyä yhdessä maapallon kanssa, se on voinut syntyä muualla ja joutua Maan sieppaamaksi, tai se on voinut keräytyä Maan ympärille sen synnyssä ylijääneestä pienempien kuiden parvesta.

Kun Kuu oli muodostunut, sen uloimmat kerrokset satojen kilometrien syvyydelle sulivat ja niissä tapahtui kemiallinen erottuminen eli differentiaatio: keveimmät aineet nousivat pintaan. Sitten pinta jäähtyi ja siihen muodostui kiinteä kuori. Tämä tapahtui heti Kuun synnyn jälkeen.

Elämänsä 700 miljoonaa ensimmäistä vuotta Kuu oli jatkuvan voimakkaan meteoriittisateen kohteena. Siihen syöksyi aurinkokunnan synnyssä ylijääneitä kiviä ja suuria asteroideja. Pommitus huipentui 4.0—3.9 miljardia vuotta sitten tapahtuneisiin valtaviin iskuihin, jotka muodostivat Kuun pinnalla nykyään näkyvät rengasmaiset meret. On laskettu että esim. Sateidenmeri on syntynyt 200 kilometrin läpimittaisen pikkuplaneetan törmäyksestä. Jokainen suuri törmäys heitti avaruuteen mahtavat määrät ainetta, josta osa lensi ulos Kuun vetovoiman piiristä ja loppuosa peitti koko Kuun paksuun vaippaan. Nykyään kaikkialla on ilmeisesti usean sadan metrin paksuinen kerros törmäysjätteitä. Tämä selittää sen miksi yhdeltäkään kuulennolta ei ole saatu näytteitä alkuperäisestä kuoresta.

Noin 3.9 miljardia vuotta sitten Kuun elämässä alkoi rauhallisempi kausi. Törmäyksissä syntyneisiin kuoppiin alkoi syvemmältä Kuun sisästä tihkua sulaa basalttia, kunnes noin 3 miljardia vuotta sitten oli saavutettu tasapainoasema ja meret olivat täyttyneet ja jähmettyneet. Tämän jälkeen ei Kuun historiassa ole enää tapahtunut suuria muutoksia. Meteoriitit ovat edelleen synnyttäneet uusia kraattereita, mutta paljon pienemmässä mittakaavassa kuin ennen.

Apollo 17 -astronautti on kuuautollaan tullut tutkimaan suurta kivenlohkaretta.

Mars — punainen planeetta

Marsin nykypäivän arvoituksia ovat pitkät kuivat jokiuomat. Yllä Mangalan laaksoa. (Kuvat Marsin pinnasta Nasa/Viking 1 ja 2)

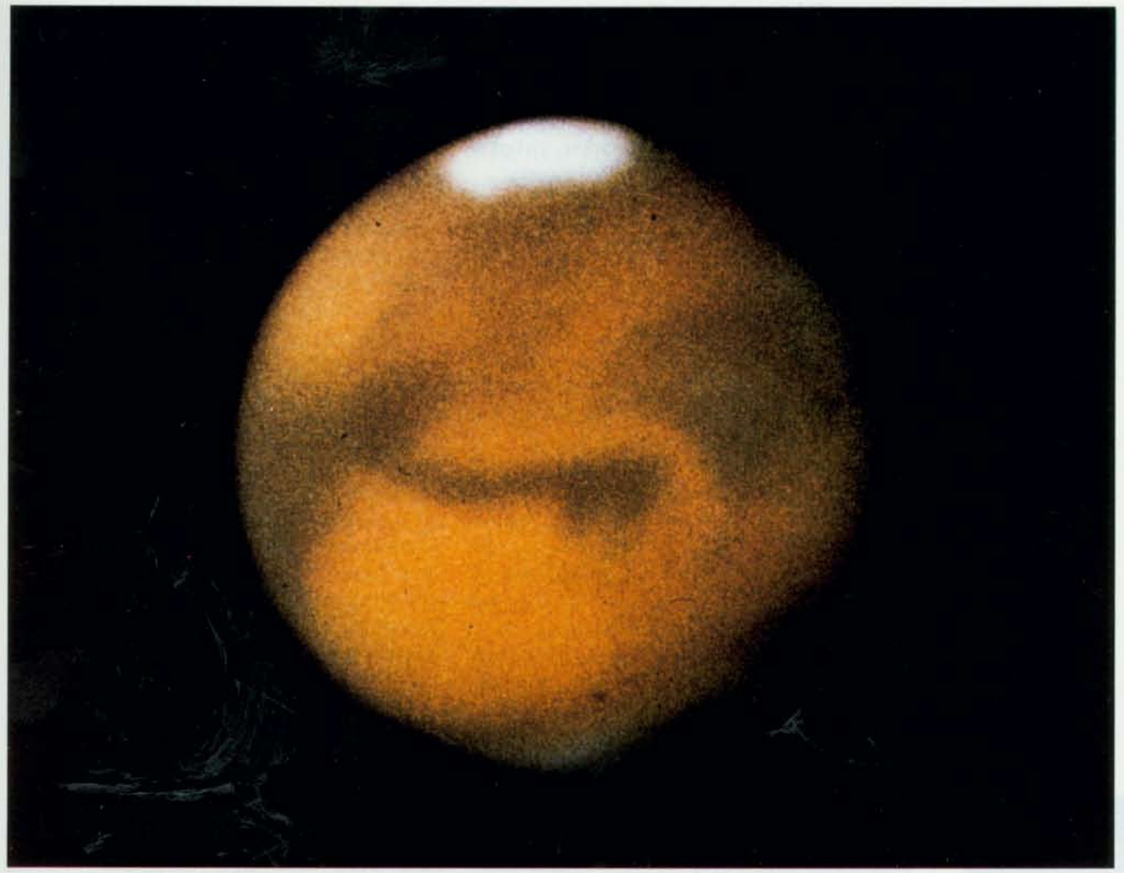
Mars on Auringosta lukien neljäs aurinkokuntamme planeetoista, maapallosta seuraava ulospäin. Kooltaan Mars on planeetoista pienimpiä, läpimitaltaan vain puolet Maasta ja massaltaan noin kymmenesosa.

Muutamilta ominaisuuksiltaan Mars muistuttaa paljon maapalloa. Sen vuorokauden pituus on vain puoli tuntia pitempi kuin Maassa, ja sen akseli on suunnilleen yhtä paljon kallellaan kuin maapallon. Marsin vuosi on kuitenkin melkein kahden maapallon vuoden pituinen, joten vuodenaikojen vaihtelu on siellä paljon hitaampaa. Marsin rata on myös paljon eksentrisempi, epäkeskisempi, kuin maapallon, ja siksi sen etäisyys Auringosta vaihtelee melkoisesti.

Myös etäisyys maapallosta Marsiin oppositioiden aikana vaihtelee paljon. Oppositio tarkoittaa niitä hetkiä, jolloin Mars on maapallolta katsottuna vastakkaisessa suunnassa kuin Aurinko, ja näinä aikoina Mars on lähinnä maapalloa ja myös edullisimmin havaittavissa pimeällä yötaivaalla. Marsin ollessa lähellä periheliään (ratansa Aurinkoa lähinnä olevaa pistettä) ja samalla oppositiossa, sen etäisyys maapallosta on vain noin 56 miljoonaa kilometriä. Jos taas Mars on oppositiohetkellä lähellä apheliaan, siis kauimpana Auringosta, etäisyys Maasta on lähes kaksi kertaa näin suuri, yli sata miljoonaa kilometriä. Niinpä parhaita havaintoja Marsista on tehty lähimpien, ns. suurten oppositioiden aikana. Niitä sattuu noin joka 17. vuosi.

Mars Maasta nähtynä

1960-luvulle asti Marsia tutkittiin vain maanpäällisillä kaukoputkilla. Niissä Mars näyttää pieneltä punertavalta levyltä, jossa on tummempia ja vaaleampia alueita. Napojen kohdalla näkyvät valkoi-



Maasta otetuissa valokuvissa näkyy Marsin napalakit ja pinnan tummempia ja vaaleampia alueita.

Chesley Bonestellin piirroksessa avaruuslentäjät ovat päässeet katsomaan Marsia Deimoksen pinnalta.

set napalakit, jotka kesällä kutistuvat melkein olemattomiin ja kasvavat talvella tuhansien kilometrien läpimittaisiksi. Joskus Marsin ilmakehässä näkyy ohuita pilviä, ja toisinaan keltainen pölymyrsky peittää koko planeetan useaksi viikoksi vaippaansa.

Runsaat sata vuotta sitten, 1877, ruvettiin ensimmäisen kerran puhumaan Marsin *kanavista*. Italialainen tähtitieteilijä Giovanni Schiaparelli arveli näkevänsä Marsin pinnalla ristiin rastiin kulkevia ohuita juovia. Niitä lähti useita aina samoista pisteistä, kulki välillä pari rinnakkain, välillä yksittäisinä juovina yli koko Marsin pinnan. Kanavia eivät kaikki havaitsijat pystyneet näkemään, mutta Schiaparellin lisäksi monet muut kertoivat tehneensä niistä havaintoja. Kanavista piirrettiin jopa tarkkoja karttoja. Jotkut tutkijat ajattelivat, että ne voisivat olla älykkäiden olentojen jälkiä, koska samaan tapaan maapallolla keinotekoiset kanavat lähtevät keitaista eri suuntiin.

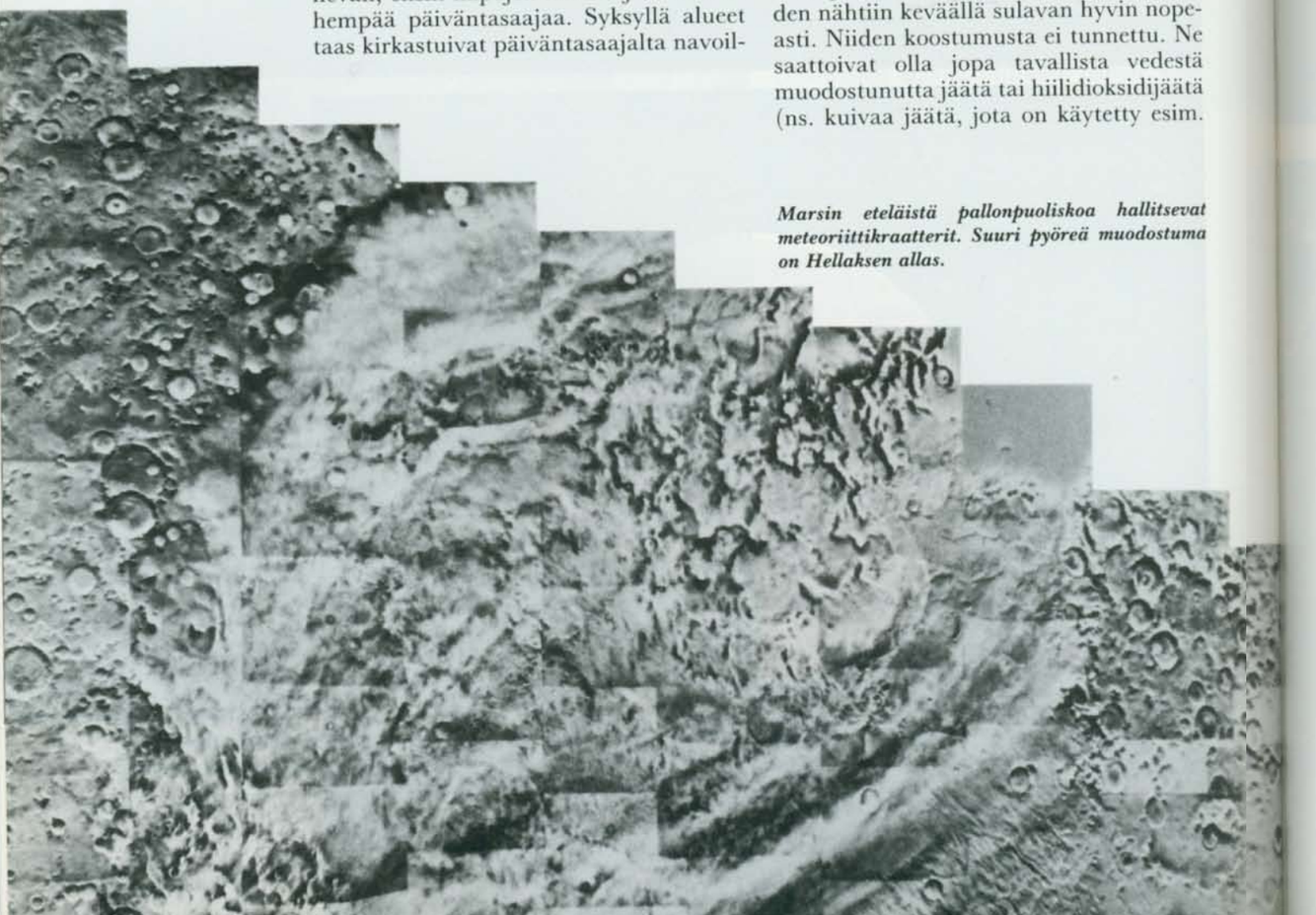
Toinen ilmiö, jonka arveltiin johtuvan elämän (tässä tapauksessa kasvien) olemassaolosta Marsissa, oli ns. tummenemisaalto. Kevään tullen nimittäin havaittiin Marsin pinnan jonkin verran tummenevan, ensin napojen läheltä ja sitten lähempää päiväntasaajaa. Syksyllä alueet taas kirkastuivat päiväntasaajalta navoille. Arveltiin, että napajäätiköiden sulaessa niistä vapautunut vesi virtasi kohti päiväntasaajaa ja samalla veden vaikutuksesta pinnalla alkoi kasvaa joitakin alkeellisia kasveja.

Monista muistakin Marsin olosuhteista kuin kanavista ja kasvillisuudesta tiedot olivat hataria, vaikka planeettaa oli maanpäällisin laittein tutkittu kymmenien oppositioiden aikana.

Esimerkiksi ilmakehän koostumusta ja painetta ei kunnolla tunnettu. Ilmakehän olemassaolo oli kyllä päätelty jo 1700-luvun lopulla, kun eräät Marsin alueiden värinmuutokset osattiin tulkita pilvien tai pölyn aiheuttamiksi.

Spektroskopian avulla oli selvitetty, että Marsin ilmakehässä on jonkin verran hiilidioksidia, mutta ei juuri lainkaan happea ja vesihöyryä. Maan ilmakehän yleisimmän aineen, typen, spektriviivat ovat kuitenkin kaukana ultravioletti-alueella, ja sitä ei toisilta planeetoilta voitu havaita. Monet arvelivat, että myös Marsin ilmakehä on suurimmaksi osaksi typpeä, ja seassa on pienet määrät argonia ja hiilidioksidia. Ilmanpaine pinnalla arvioitiin noin kymmeneosaksi Maan pinnan paineesta.

Napalakit arvioitiin ohuiksi, koska niiden nähtiin keväällä sulavan hyvin nopeasti. Niiden koostumusta ei tunnettu. Ne saattoivat olla jopa tavallista vedestä muodostunutta jäätä tai hiilidioksidijäätä (ns. kuivaa jäätä, jota on käytetty esim. jäätelökojuissa pakkausten jäähdyttämiseen).



Marsin eteläistä pallonpuoliskoa hallitsevat meteoriittikraatterit. Suuri pyöreä muodostuma on Hellaksen allas.

Mars kiertoradalta

Marsia on ehtinyt tutkia jo kymmenkunta avaruusluotainta. Ensimmäisiä lähitietoja saatiin *Mariner*-alusten ohilennoilla 1960-luvulla. Marinerien kuvista löydettiin Marsin kraatterit. Kukaan ei ollut tullut ajatelleeksi, että Marsin pinnassa täytyisi toki olla kraattereita, samaan tapaan kuin Kuukin on kauttaaltaan meteoriittien iskujen runtelema.

Koko Mars saatiin kartoitetuksi 1972 Mariner 9:n kiertäessä planeettaa lähes vuoden ajan. Suuri hyppäys Marsin tutkimuksessa koettiin 1976, kun vuotta aikaisemmin lähetetyt Yhdysvaltain *Viking*-alukset pääsivät perille. Kumpikin Viking koostui kahdesta osasta, joista toinen tutki Marsia kiertoradalta ja toinen laskeutui pinnalle. Viking-alukset antoivat aivan uudenlaisen, aiempaa paljon täydellisemmän kuvan Marsista.

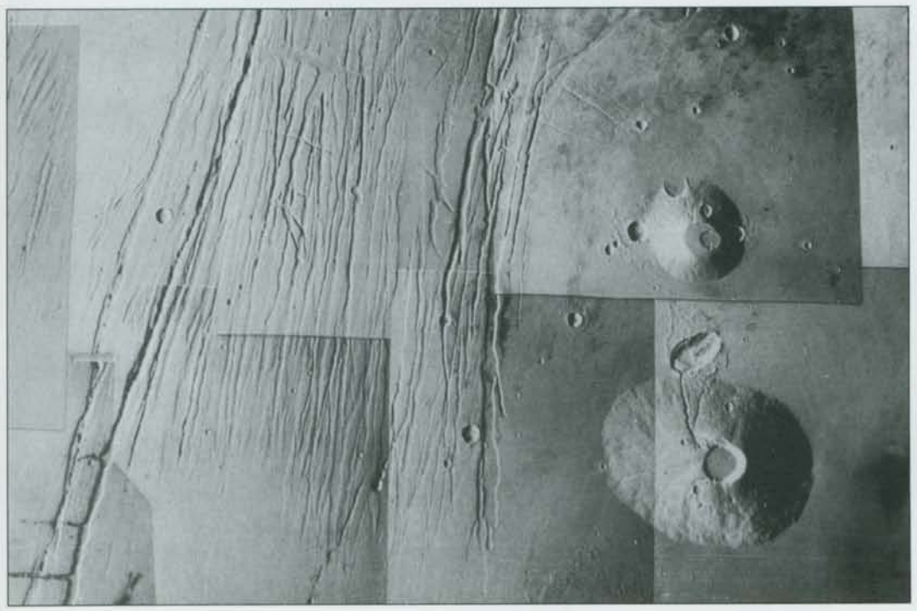
Neuvostoliitto lähetti 1988 kohti Marsia kaksi *Phobos*-luotainta, joissa oli myös suomalaisia laitteita. Ensimmäinen Phobos sammui kohta lähdön jälkeen. Toinen ehti tutkia Marsia kiertoradalta, ennen kuin sekin vaikeni. Päätehtäväänsä, Phobos-kuun tarkkaa tutkimista, se ei saanut suoritetuksi.

Mariner- ja Viking-kiertolaiset antoivat hyvän kuvan Marsin pinnanmuodoista. Hallitsevana piirteenä ovat kraatterit kuten Kuussa ja Merkuriuksessa. Niistä suurimmat, esimerkiksi Hellas ja Argyre, ovat 2 000 kilomerin läpimittaisia. Kraatterit ovat jakautuneet pinnalla epätasaisesti. Eteläisellä pallonpuoliskolla niitä on hyvin tiheässä ja ne ovat ilmeisesti hyvin vanhoja. Pohjoinen pallonpuolisko on sen sijaan suureksi osaksi paljasta tasankoa, jossa on vain jokunen tuoreempi kraatteri. Täällä vanha kraatterien peittämä pinta on jäänyt laavakenttien alle.

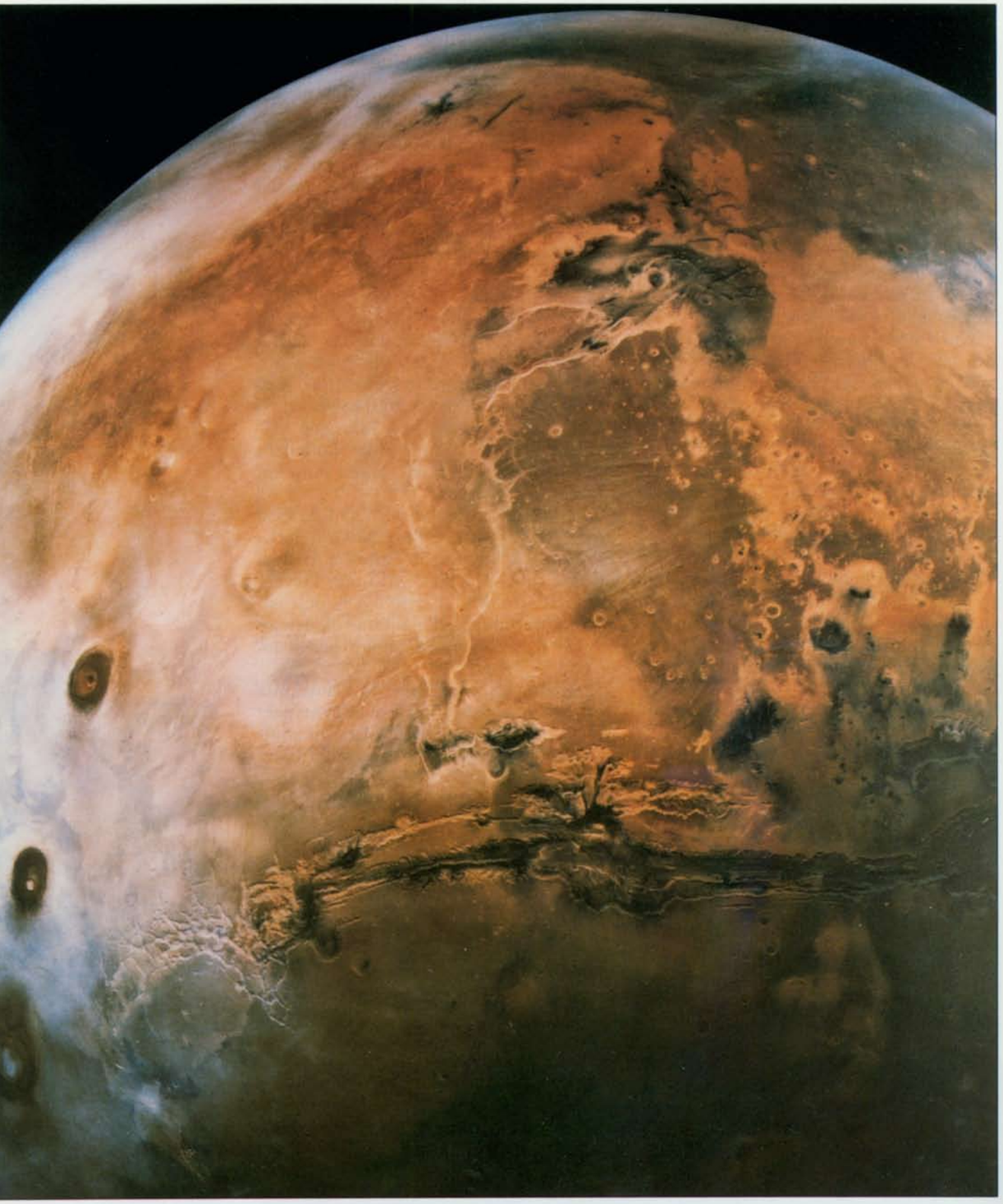
Vulkaanisesta toiminnasta on todisteena myös suuret tulivuoret, joita on ryhmä päiväntasaajan pohjoispuolella. Niistä suurimmat, *Olympus Mons* ja *Arsia Mons*, ovat aurinkokuntamme korkeimpia tunnettuja vuoria. Niiden huiput kohoavat yli 25 kilometriä ympäröivän tasangon yläpuolelle. Nämä vuoret ovat kuitenkin sammuneet aikoja sitten, kuten muutkin Marsin tulivuoret.

Merkillisiä maisemanpiirteitä Marsissa ovat pitkät kiemurtelevat laaksot, jotka muistuttavat kuivuneita *jokiuomia*. Osassa niistä on mahdollisesti virrannut laavaa, mutta suurin osa on syntynyt luultavasti veden kuluttamana. Palaamme näiden jokiuomien arvoitukseen tämän luvun lopussa.

Jokiuomia suurempia muodostumia ovat pitkät laaksot, jotka ovat syntyneet Marsin pinnan *repeäminä*. Niistä huomattavin on pitkin päiväntasaajaa noin 1 500

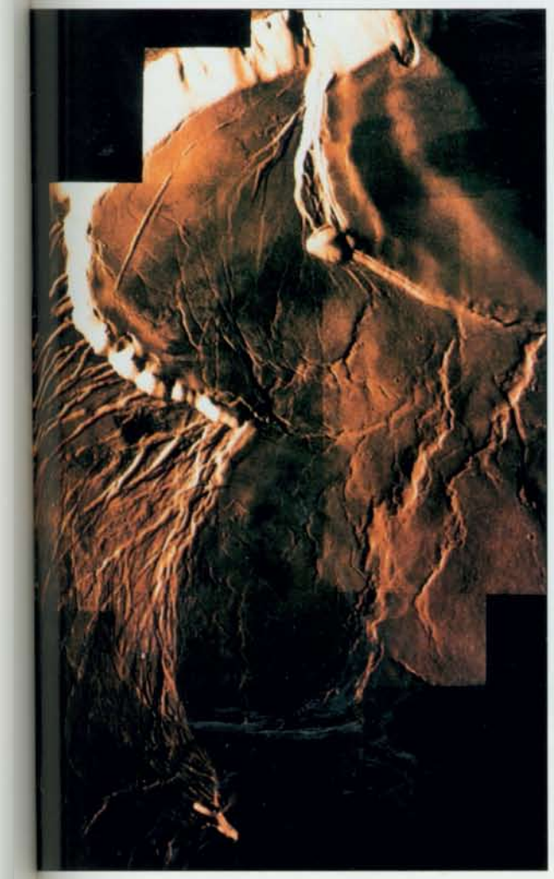


Marsin pohjoisella pallonpuoliskolla on tuoreempaa tuliperäistä maastoa. Kuvassa kaksi tulivuorta ja yhdensuuntaisia hautavajoamia Tharsiksen alueella.



Marsin pohjoista pallonpuoliskoa. Kuvan alaosassa kulkee valtava kanjoni, Valles Marineris. Vasemmassa reunassa on kolme tulivuorta, alhaalta lukien Arsia Mons, Pavonis Mons ja Ascraeus Mons. Näkymä on koottu sadastakahdesta Viking-kuvasta. (Kuvankäsittely Alfred McEwen, U. S. Geological Survey)

Osa Olympuksen vuoren suuresta purkausaukosta eli kalderasta ja siitä lähteviä laavauomia.

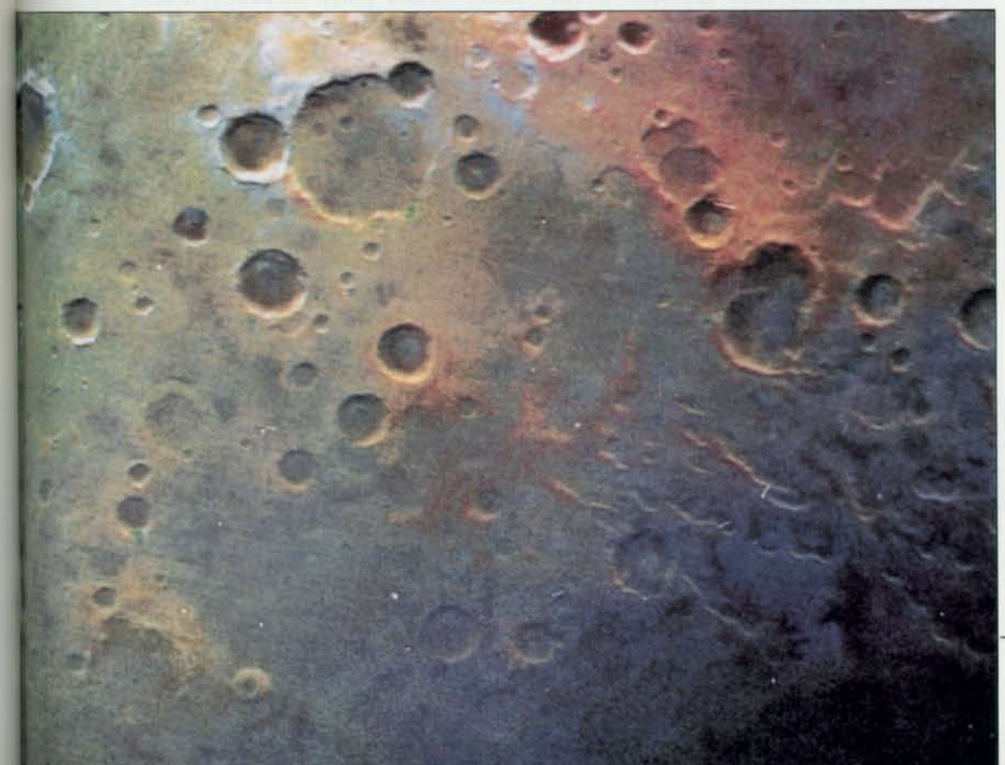


kilometrin pituisena, 200 kilometrin levyisenä ja parin kilometrin syvyisenä kulkeva *Valles Marineris*.

Marsin *napalakit* ovat pinnaltaan hiilidioksidijäätä eli kuivaa jäätä, joka kevään tullen höyrystyy kaasukehään. Hiilidioksidi kulkeutuu kaasuna vastakkaiselle puolelle planeettaa, jossa se sitoutuu jääksi toiseen napakalottiin. Hiilidioksidijään paksuus on kuitenkin vain muutamia kymmeniä senttimetrejä. Sen alla on paksulti tavallista jäätä. Viking-alukset saivat tämän selville tutkimalla jään lämpötilaa. Napalakeissa esiintyvien jäättömien kohtien lämpötila on −35°C paikkeilla, ja itse jään pinnan lämpötila on noin −70°C. Nämä arvot ovat liian korkeita hiilidioksidijäälle, joten napalakki on pääosiltaan jäätynyttä vettä.

Napalakin reunoilla näkyy tuulen kuluttamia *kanjoneita*. Niiden seinissä näkyvistä kerrostumista voidaan päätellä, että jääkerrokset voivat olla satoja, jopa tuhansia metrejä paksuja. Näinhän on maapallollakin: kummallakin navalla on mahtavat jäätiköt.

Vettä on muualta Marsista löydetty hyvin vähän. Ilmakehässä on vesihöyryä sen verran, että pinnalle tiivistyneenä se muodostaisi korkeintaan millimetrin paksuisen kerroksen. Ilma on siis käytännöllisisti katsoen täysin kuivaa. Koska vettä on planeetan muinaisuudessa kuitenkin esiintynyt vapaana ja ehkä virrannutkin pinnalla, sitä täytyy olla Marsin pintaker-



Meteoriittikraattereita eteläisen napa-alueen lähellä. Kraatterien reunavuorille on muodostunut huurretta. Värejä on keinotekoisesti korostettu.

Marsin pintaa Viking 1:n laskeutumispaikalla.

roksissa. Ilmeisesti planeetan pinnassa parin kolmen kilometrin syvyyteen asti on sitoutuneena valtavat määrät vettä ikiroutana ja navoilla napajäänä.

Paitsi että Mars on hyvin kuiva, myös lämpötilat tekevät siitä elämälle hyvin epäsuotuisan paikan. Kiertoradalta tehdyt mittaukset osoittivat, että lämpötila päiväntasaajalla tuskin nousee nollan celsiusasteen yläpuolelle ja taas yöllä ja planeetan talvenpuolella laskee noin −100° C:een.

Marsin aavikot

Marsin pinnalta otetut valokuvat paljastivat yllättävän samankaltaisia maisemia. Pinta on kivenlohkareitten peittämää punaista autiomaata, joka muistuttaa huomattavan paljon Arizonan autiomaita. Taivaanrannalla näkyy joitakin kohoumia ja kiviröykkiöitä, jotka voivat olla meteoriittikraatterien reunoja, ja horisontin yläpuolella näkyy vaaleanpunainen taivas.

Marsin taivas on punainen eikä sininen kuten maapallolla, ja punainen väri johtuu ilmassa leijuvasta pölystä. Myös Marsin pinta on punainen. Se on kauttaaltaan ruostekerroksen peitossa, ja tätä punaista pölyä leijuu myös ilmassa ja se värjää koko Marsin taivaan. Pinnalla näkyy jälkiä tuulen vaikutuksesta. Tuuli on kinostanut ohutta pölyä hiekkadyyneiksi, joiden muoto ajan mukana muuttuu.

Marsin *ilmakehän koostumus* ei ole elämälle kovin otollisen tuntuinen. Pääosa, noin 95 %, on hiilidioksidia. Toiseksi runsain aine on typpi, 2—3 % (maapallon ilmakehästähän pääosa, 78 %, on typpeä; lisäksi ilmakehässämme on happea 21 %, argonia 1 % ja hiilidioksidia 0.03 %). Argonia on Marsissa 1—2 % ja happea 0.1—0.4 %. Lisäksi on löydetty pieniä määriä vesihöyryä, hiilimonoksidia eli häkää ja otsonia.

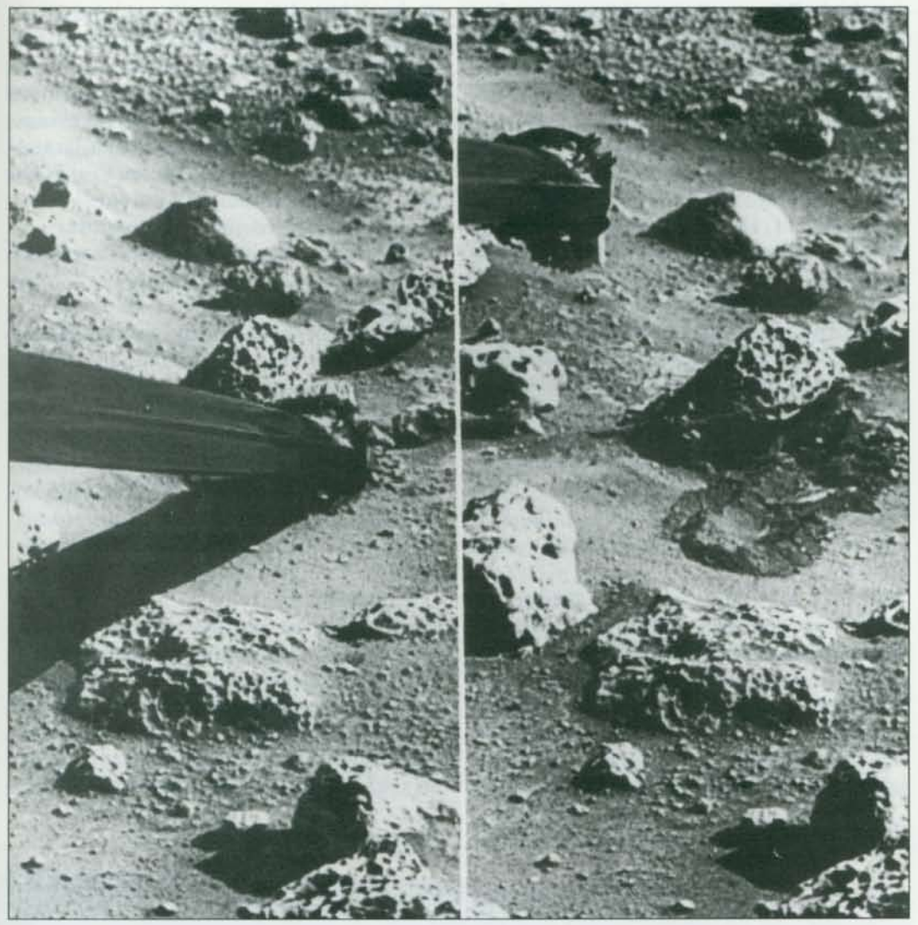
Marsin *sää* vaihtelee vuorokaudenaikojen ja vuodenaikojen mukaan. Marsin kesän aikaan lämpötila vaihtelee hyvin säännöllisesti noin −30 ja −80 asteen välillä. Talvella on kylmempää. Ilmanpaine on vain noin kahdessadasosa Maan ilmanpaineesta (noin 5—8 millibaaria paikasta ja vuodenajasta riippuen).

Tuulten nopeudet ovat Marsissa tavallisesti pieniä: suurin nopeus on viitisen metriä sekunnissa. Maan päällä tämä vastaisi heikkoa tai kohtalaista tuulta. Tilanne kuitenkin muuttuu, kun Mars tulee lähelle periheliään ja Aurinko lämmittää pintaa voimakkaasti. Lämpötilaerot nostavat voimakkaita tuulia, tuuli nostattaa pölyä ilmaan ja pölyinen ilma imee taas yhä tehokkaammin lämpöä. Näin syntyy myrsky, jonka aikana tuulen nopeus voi nousta yli sadan metrin sekunnissa. Sen voima ei ole kuitenkaan sama kuin Maan päällä, koska ilma on hyvin ohutta.

Parin vuoden välein toistuvien myrskyjen aikana Marsin pinta on Maasta tai kiertoradalta katsottuna tasaisen kellertävä ilman tuttuja maastonmuotoja. Esimerkiksi Mariner 9 -luotain näki Marsin saavuttaessaan juuri tällaisen yhtenäisen kellertävän Marsin, josta vasta pari kolme viikkoa perilletulon jälkeen alkoi erottua yksityiskohtia, ensin suurten tulivuorten huiput ja vähän sen jälkeen muita maastonmuotoja.

Pöly, joka irtoaa rapautuvasta kalliosta, pysyy Marsin pinnalla lähes ikuisesti, sillä siellä ei ole pölyn sitojia kuten valtameret ja kasvillisuus Maan päällä. Pöly täyttää pienet kraatterit ja kuluttaa vuorten juuria. Pölyn liike on myös antanut selityksen alussa mainitulle tummenemisaallolle, jota vielä parikymmentä vuotta sitten pidettiin mahdollisena merkkinä kasvien esiintymisestä. Avaruusalukset ovat nimittäin todenneet, että pinnan tummuminen johtuu yksinkertaisesti pölystä, joka kulkeutuu eri alueille, kun Marsin pinnalla puhaltavien tuulten virtaukset muuttuvat vuodenaikojen mukana.

Marsin pinnan *koostumus* on toisenlainen kuin Maan ja Kuun. Rautaa Marsin pinnassa oli hyvin paljon, viitisentoista prosenttia, kun sitä esimerkiksi Kuun pintahiekassa on vain viitisen prosenttia. Pinnan pääainekset ovat pii, kalsium ja rikki. Hiekan koostumus viittaa siihen, että Marsin pintaa peittää lähinnä tuliperäi-



Vikingin koekauha ottamassa Marsin pintahiekasta näytettä, josta etsittiin mm. elämän merkkejä.

nen kivi eikä graniitti, mikä taas merkitsee, että Mars ei ole kehittynyt samalla tavoin kuin maapallo.

Onko Marsissa elämää?

Ehkä mielenkiintoisimmat Viking-alusten kokeista 1976—77 koskivat elämän etsimistä Marsin pinnalta. Näissä kokeissa Vikingin käsivarsi otti pinnasta näytteitä, kaatoi niitä aluksen yläosassa olevaan suppiloon, josta ne kulkeutuivat kolmeen koekammioon, ja näissä koekammioissa sitten tutkittiin eri tavoin elämän merkkejä.

Yhdessä koekammiossa tutkittiin aineenvaihdunnan aiheuttamia muutoksia kammion kaasuissa. Elävät oliot nimittäin muuttavat ympäristönsä kaasun koostumusta, kun ne hengittävät, syövät ja lisääntyvät.

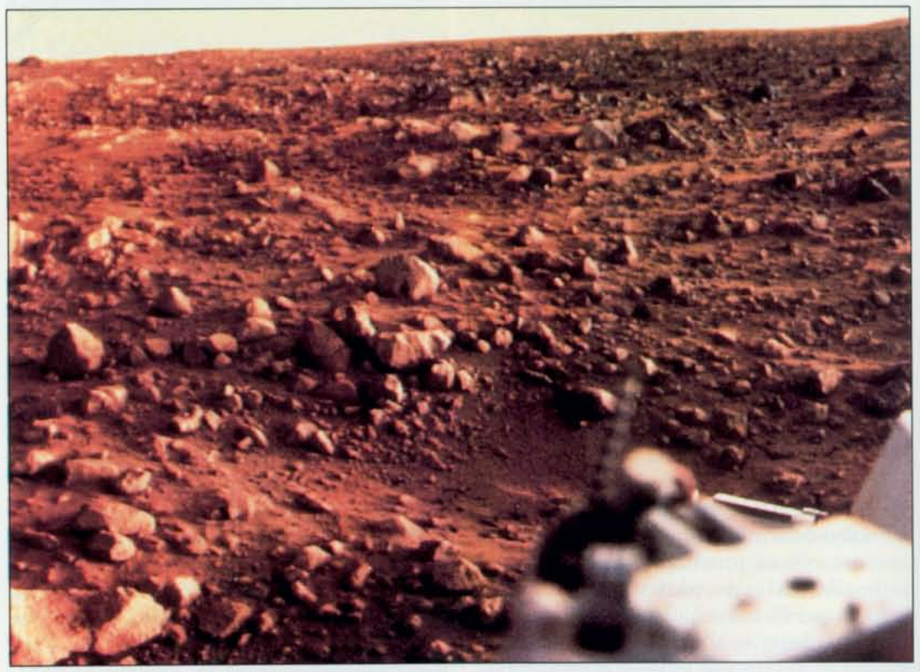
Toinen koe, ns. merkityn kaasun koe, perustui mikro-organismien kyvylle sulattaa ympäristöstään yhdisteitä ja tuottaa kaasua. Koekammioon pudotettu hiekka kostutettiin radioaktiivista hiili 14:ää sisältävällä ravinteella. Myöhemmin tutkittiin tästä kammiosta irtautuvia kaasuja, joiden pitäisi sisältää radioaktiivista hiiltä, jos jokin eliö sitä ravintoa nauttisi.

Kolmas koe, nimeltään kuumahajotuskoe, perustui myös radioaktiiviseen merkintäaineeseen. Hiekkaan lisättiin ravinnetta, ja jonkin ajan kuluttua koko kammion kaasu vaihdettiin ja hiekka lämmitettiin korkeaan lämpötilaan. Tällöin mahdollisten eliöitten piti hajota ja niihin sitoutuneen hiilen jälleen vapautua.

Vikingien antamat tulokset olivat yllättäviä. Kokeet antoivat hyvin toisenlaisia tuloksia kuin Maan päällä tehdyissä testeissä. Esimerkiksi kaasunvaihtokokeessa alkoi hiekkanäyte heti erittää jopa 15 kertaa odotettua suurempia määriä happea ja hiilidioksidia. Samoin kuumahajotuskokeessa saatiin eräitä tuloksia, jollaisia voitaisiin Maan päällä saada, jos mukana olisi joitakin eliöitä. Merkityn kaasun kokeessakin tulokset olivat odottamattomia. Ne olisivat voineet syntyä mikro-organismien vaikutuksesta.

Kuitenkin koetuloksia toistettaessa ja niitä myöhemmin käsiteltäessä on päädytty siihen, että oudot tulokset johtuvat Marsin pintahiekan erikoisesta kemiasta eikä biologisesta toiminnasta.

Tärkeä syy siihen, miksi Vikingien koetuloksia ei tulkittu elämän aiheuttamiksi, oli erään toisen laitteen antamat tulokset.



Vikingien laskeutumispaikat olivat usean tuhannen kilometrin päässä toisistaan, mutta pinta molemmissa kohdissa oli samankaltaista. Yllä Viking 1:n ja viereisellä sivulla Viking 2:n laskupaikka.

Yksi Vikingien laite nimittäin etsi orgaanisia yhdisteitä, elävien olioiden rakennusaineita. Tämä laite teki erittäin tarkkoja havaintoja Marsin pintahiekasta ja ilmasta eikä löytänyt ainuttakaan orgaanista molekyyliä (lukuun ottamatta pienen pieniä jälkiä niistä pesuaineista, joilla koekammiot Maan päällä pestiin). Tutkijat jopa siirsivät Marsin pinnalla kiviä siinä toivossa, että yhdisteet olisivat niiden alla paremmin säilyneet suojassa hajottavalta ultraviolettisäteilyltä, mutta sieltäkin otetut näytteet ovat olleet yhtä tyhjiä.

Koska kaikki elävät oliot ovat koostuneet monimutkaisista orgaanisista yhdisteistä, niiden puuttuminen on varma merkki siitä, että ainakaan Vikingien laskeutumispaikoilla ei elämää näytä olevan.

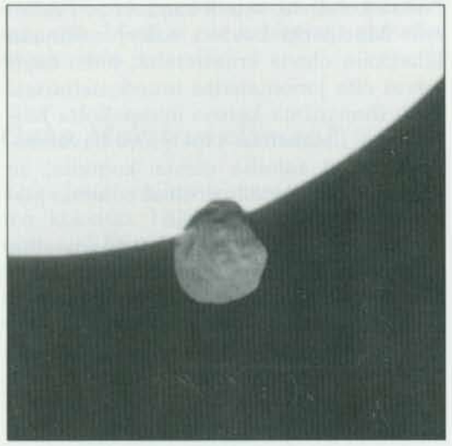
Marsin arvoitukset

Luvun alussa puhuttiin Marsin pinnalla risteilevistä kanavista, jotka oli havaittu 1800-luvun lopulla. Tämä oli yksi Marsin suuria arvoituksia, mutta se ratkesi avaruusluotainten kartoittaessa Marsin pinnan. Luotainten kuvista ei löydetty kanavia. Niiden olemassaolo oli näköharhaa. Niissä kohdissa, missä kanavia piti esiintyä, Marinerin kuvissa näkyy toisinaan lähekkäin olevia kraattereita, jotka saattoivat olla jonomaisissa muodostelmissa. Kun ihmissilmä katsoo maapallolta häiritsevän ilmakehän läpi juuri havaintotarkkuuden rajoilla olevia kohteita, se pyrkii yhdistelemään erillisiä tummia pisteitä yhtenäisiksi viivoiksi.

Suureksi arvoitukseksi Schiaparellin kanavien tilalle ovat kuitenkin astuneet Marsin jokiuomat. Vettä on Marsissa muinaisuudessa virrannut hyvin suuria määriä. Jokiuomia on varsinkin Marsin päiväntasaajan seuduilla paljon. Joet ovat uurtaneet kallioita, ne ovat muodostaneet välillä suuria järviä, ne ovat kiertäneet kraattereita ja muodostaneet saaria. Nämä ovat kaikki hyvin samanlaisia muodostumia kuin maapallon kuivuneissa jokiuomissa tavataan.

Marsin paine ei kuitenkaan ole nyt eikä ole pitkään aikaan voinut olla tarpeeksi korkea veden esiintymiseksi. Jotta vettä Marsissa olisi, ilmanpaineen täytyisi olla noin kymmenen kertaa niin suuri kuin nykyään ja lämpötilan tietysti veden jäätymispisteen yläpuolella.

Nykyisin arvellaan Marsin pinnan kehittyneen seuraavasti: Kun planeetta



Vaikka Neuvostoliiton Phobos-ohjelma 1988 epäonnistui päätehtävässään, saatiin Marsista ja Phoboksesta kymmeniä kuvia. Kuvankäsittelyyn osallistui myös Helsingin yliopiston observatoriossa toimiva työryhmä. Tässä Phobos kulkemassa Marsin reunan yli.

muodostui noin 4.6 miljardia vuotta sitten, siellä oli aluksi tiheä ja melko lämmin ilmakehä, jossa oli runsaasti vesihöyryä. Ilmakehän jäähtyessä vesihöyry alkoi tiivistyä, ja voimakkaat sateet huuhtoivat planeetan pintaa varsinkin päiväntasaajan seuduilla.

Sateet aiheuttivat jokien virtaamisen, ja niiden jäljet nähdään vielä nykyäänkin kuivuneina uomina. Sadevesi tunkeutui myös pinnan alle usean kilometrin syvyyteen ja lämpötilan laskiessa jäätyi roudaksi. Toisinaan, esimerkiksi suurten meteoriittien iskuissa, routa suli ja sen vankina ollut vesi pääsi virtaamaan sulana aiheuttaen lisää kanjoneita.

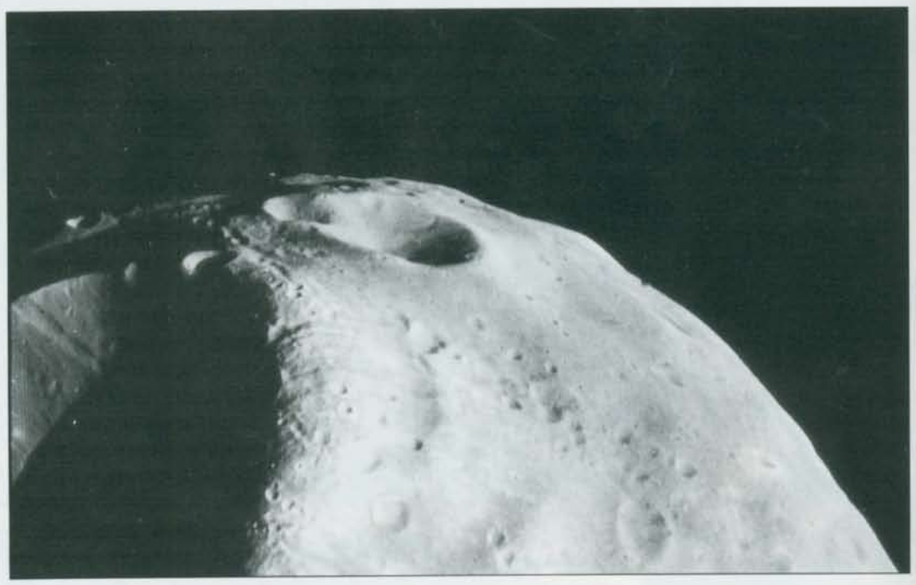
Lämpötilan edelleen laskiessa suurin osa ilmakehän lopusta vesihöyrystä ja myös hiilidioksidista sitoutui napalakkeihin ja pinnan alle, missä niitä on näinäkin päivinä valtavat varastot. Kaasujen poistuessa ilmakehästä myös paine laski ja tämä merkitsi, että vapaan veden esiintyminen ei enää ollut mahdollista.

Jokiuomien syntymiselle on viime aikoina tarjottu myös toista selitystä: ne olisivatkin jäävirtojen eivätkä veden uurtamia. Jäätikköjen virtaus jättää hyvin samantapaisia uomia kuin veden, ja lämpötilan Marsin pinnalla ei olisi tässä tapauksessa tarvinnut olla yhtä korkea kuin veden virratessa.

Olisiko Marsin alkuaikojen oloissa voinut kehittyä elämää? Ilmakehässä oli alkuun luultavasti runsaasti metaania ja ammoniakkia. Tiedetään että maapallolla syntyi tällaisissa olosuhteissa elämää jo lähes neljä miljardia vuotta sitten. Koska Marsin ilmasto oli tuohon aikaan lämpimämpi ja kosteampi kuin nykyään, on sielläkin voinut syntyä elämän alkuasteita. Mutta olisiko mahdollinen elämä sopeutunut myöhempiin karuihin oloihin ja säilynyt näihin päiviin saakka, sitä ei tiedetä. Sen ratkaisevat vasta tulevat Mars-luotaimet.

Marsin kuut

Marsilla on kaksi kuuta, *Phobos* ja *Deimos*. Nimet ovat suomeksi Pelko ja Kauhu. Näiden kuiden tarina alkaa jo 1700-luvun alkupuolelta, jolloin kirjailija Jonathan



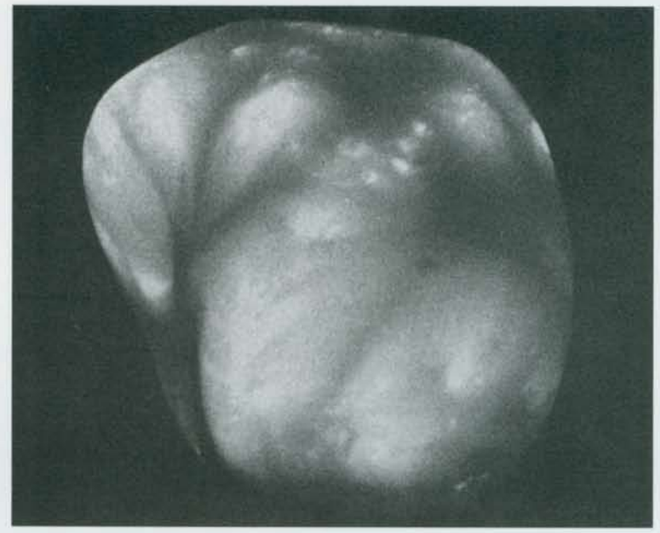
Viking-aluksen lähikuva Phoboksen pinnasta.

Swift kertoi Gulliverin matkoissa, että Marsilla on kaksi kuuta, ja ilmoitti siinä jopa niiden etäisyydet ja kiertoajat melko oikein. Itse kuut löydettiin vasta 1877, jolloin amerikkalainen tutkija Asaph Hall havaitsi Marsin lähellä kaksi pienen pientä liikkuvaa valopistettä.

Swiftin ilmoitus Marsin kuista perustui ilmeisesti puhtaaseen arvaukseen — samanlaisia arvauksiahan esitti jo Kepler. Maalla oli yksi kuu ja Marsia seuraavalta planeelta Jupiterilta tunnettiin neljä kuuta. Siksi oli luonnollista, että Marsilla arveltiin olevan kaksi kuuta, ja Keplerin lakien mukaan taas niitten kiertoajat ja etäisyydet voi suunnilleen arvata.

Tarkka kuva kuista saatiin Viking-avaruusluotaimilla 1970-luvulla. Molemmat kuut ovat kuin epäsäännöllisiä perunoita, ja ne ovat täynnä meteoriittien jälkiä. Varsinkin sisempi kuu Phobos, joka on myös suurempi, on täynnä pieniä ja isoja kraattereita. Sen pinnassa näkyy myös omituisia halkeamia ja kraatterijonoja. Monet repeymät alkavat säteittäisesti samasta kohdasta, suurimmasta Phoboksen pinnassa olevasta kraatterista. Siksi niiden on arveltu syntyneen kauan sitten, kun hyvin suuri meteoriitti osui kuun pintaan ja oli lähes halkaista sen.

Ulompi ja pienempi Deimos sen sijaan on pölykerroksen peittämä. Pienemmät kraatterit ovat pölyn peitossa. Tämä Phoboksen ja Deimoksen pölymäärien ero voi olla seurausta siitä että Phobos on lähempänä Marsia, ja siksi sen pinnalta irronnut pöly kulkeutuu Marsin vetovoiman piiriin eikä palaa takaisin kuun pinnalle kuten Deimoksen tapauksessa.



Marsin pienempi kuu Deimos "täysikuuna": Auringon valo tulee suoraan kameran takaa.

Molemmat Marsin kuut ovat ilmeisesti asteroidivyöhykkeestä siepattuja kappaleita. Niiden tiheydeksi arvioidaan noin 2200 kg/m^3, mikä vastaa eräiden meteoriittien, ns. hiilikondriittien, tiheyttä. Monet muutkin ominaisuudet vastaavat näitä tummia, hiilipitoisia meteoriitteja, joiden emäkappaleiden arvellaan kiertävän Aurinkoa asteroidivyöhykkeellä.

Vasemmalla Jupiter, Io ja Europa nähtynä noin 20 miljoonan kilometrin etäisyydeltä. (Jupiter-lähikuvat Nasa/Voyager 1 ja 2)

Jättiläisplaneetta Jupiter

Jupiter on aurinkokuntamme suurin planeetta. Sen massa on tuhannesosa Auringon massasta, 2.5 kertaa niin suuri kuin muiden planeettojen massat yhteensä. Jupiter on pääasiassa vedystä ja heliumista koostuva jättiläinen, jolla ei ole lainkaan kiinteää pintaa. Jupiterista alkaakin jättiläisplaneettojen alue, jossa yhteisenä tuntomerkkinä on suuri koko ja alhainen tiheys.

Jupiterin ohi on lentänyt neljä avaruusluotainta: vuonna 1973 Yhdysvaltain *Pioneer 10*, vuotta myöhemmin *Pioneer 11* ja vuonna 1979 *Voyager 1* ja *Voyager 2*. Niiden lähettämä valtava tietoaineisto mullisti monilta osin käsityksiämme. Kun joulukuussa 1995 *Galileo*-luotain asettuu pitkän matkansa päätteeksi Jupiteria kiertävälle radalle, voimme toivoa jälleen uusia löytöjä.

Vöitä, raitoja, pilkkuja

Ensimmäinen, joka näki Jupiterin kaukoputken läpi, oli *Galileo Galilei* vuosien 1609–1610 vaihteessa. Galilein tiliin lasketaan tavallisesti myös neljän suuren kuun löytäminen, vaikka Galilein aikalaisen ja kilpailijan *Simon Mariuksen* väitetäänkin nähneen ne paria viikkoa aikaisemmin. Joka tapauksessa Mariukselta on peräisin kuiden nykyisin käytetyt nimet *Io*, *Europa*, *Ganymedes* ja *Kallisto*.

Galilei kuvailee kuiden löytymistä ja näkymistä varsin yksityiskohtaisesti kirjassan *Sidereus Nuncius*, Tähtien sanansaattaja, vuodelta 1610. Hän kutsui kuita Medicin planeetoiksi, kuuluisan Medicin suvun mukaan, jonka suojeluksessa Galilei tuohon aikaan oli. Sittemmin niitä on ruvettu kutsumaan *Galilein kuiksi*.

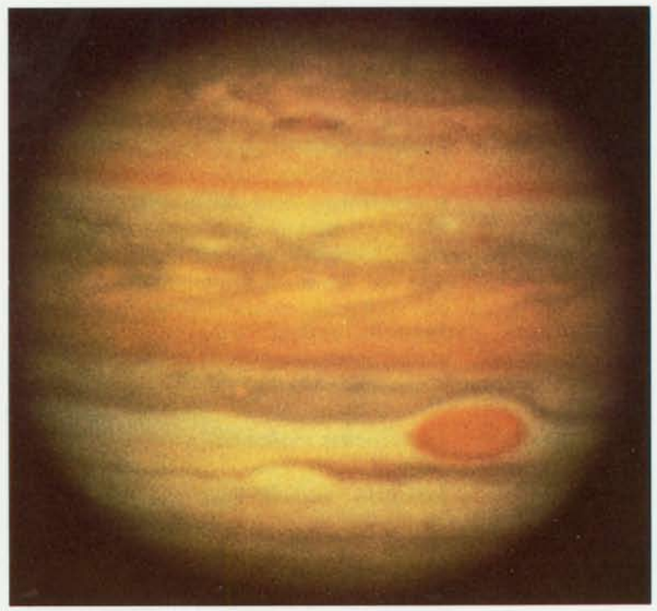
Galilein vaatimattomilla laitteilla ei voinut kuvitellakaan näkevänsä Jupiterin pinnan piirteitä, mutta jo muutamassa vuosikymmenessä kaukoputket olivat kasvaneet niin, että pieniäkin yksityiskohtia alkoi erottua.

Englantilainen fyysikko *Robert Hooke* löysi v. 1664 punertavan läiskän Jupiterin eteläiseltä pallonpuoliskolta ja vuotta myöhemmin sen havaitsi *Giovanni Cassini*. Läiskä sai nimekseen *Suuri punainen pilkku*. Pilkun väri ja koko on vaihdellut vuosisatojen saatossa, mutta yhä edelleen se on näkyvissä.

Jupiter on Maasta katsoen kirkkain planetta Venuksen jälkeen. Vain Mars voi kirkkaimmillaan olla yhtä silmiinpistävä kuin Jupiter. Suurimmillaan se näkyy n. 50 kaarisekunnin suuruisessa kulmassa. Jo pienelläkin kaukoputkella erottuvat Jupiterin ekvaattorin suuntaiset vaaleammat *raidat* ja tummemmat *vyöt*. Myös raitojen ja vöiden väri muuttuu ajan myötä, mutta kuitenkin ne pysyvät likimain aina samoilla paikoilla.

Vyöt ja raidat ovat pysyviä pilvimuodostelmia. Niissä olevia yksityiskohtia seuraamalla voidaan Jupiterin pyörähdysaika mitata. Jupiter ei pyöri jäykän kappaleen tavoin, vaan lähellä ekvaattoria aika on lyhyempi kuin navoilla. Niinpä puhutaan *systeemin I* ja *systeemin II* pyörähdysajasta.

Alle 9° päässä ekvaattorista (systeemi I) pyörähdysaika on 9 h 50 min 30.003 s. Tämän ulkopuolella (systeemi II) pyörähdysaika on 9 h 55 min 40.632 s. Todellisuudessa tuulten nopeudet vöiden ja rai-



Jupiter Maan päältä. Kuva on otettu Kitt Peakin 2.1 metrin teleskoopilla. (Kuva NOAO)

Chesley Bonestellin aikana arveltiin, että Jupiterilla on kiinteä pinta, jossa tapahtuu tuliperäistä toimintaa.

tojen välillä vaihtelevat huomattavastikin, eikä pilvien liikkeistä saada kovin luotettavia arvioita todelliselle pyörähdysajalle.

Jo 1950-luvulla Jupiterin tiedettiin lähettävän radiosäteilyä. Radiosäteilyn voimakkuudesta löydettiin 9 h 55 min 29.710 s jaksollisuus. Sittemmin vaihtelu havaittiin myös luotainten lähettämistä Jupiterin magneettikentän mittauksista. Tämä jakso on Jupiterin todellinen pyörähdysaika, sillä magneettikenttä syntyy syvällä Jupiterin sisässä. Tätä aikaa kutsutaan joskus *systeemi III*:ksi.

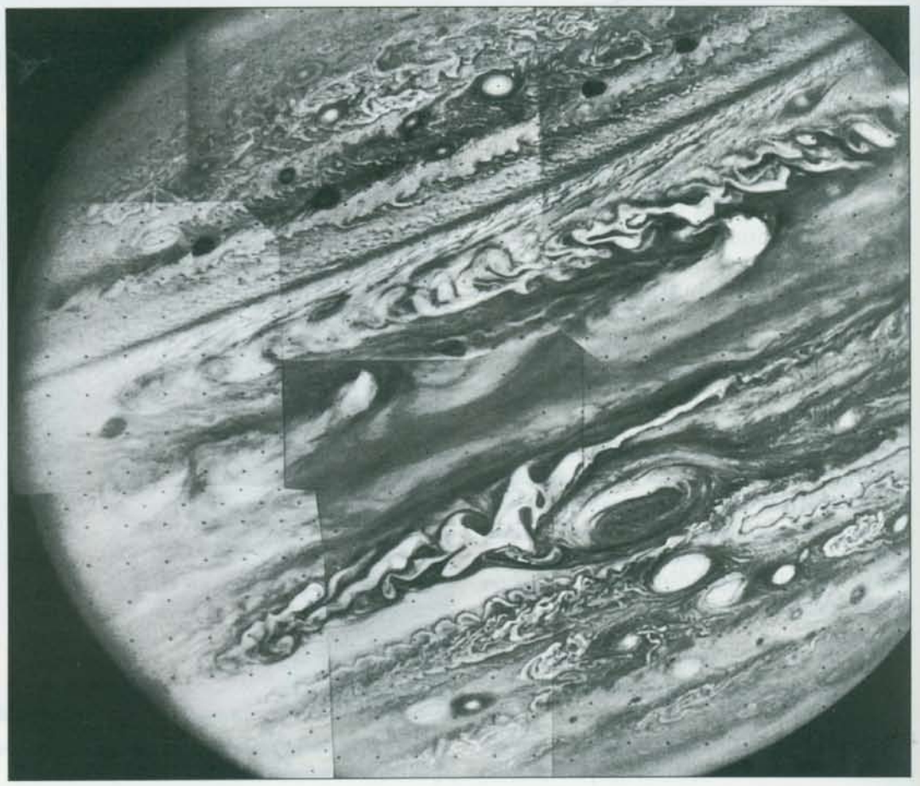
Jupiterin rakenne

Jupiterin keskellä on parinkymmenen Maan massainen rauta-silikaattiydin, jossa lämpötila on 30 000 astetta ja paine 100 miljoonaa ilmakehää. Suoraan havainnoista tätä ei kuitenkaan voi nähdä; tulokseen on päädytty teoreettisten laskujen tietä. Jupiterin koostumus on lähes samanlainen kuin Auringon, ts. vain muutama prosentti massasta on vetyä ja heliumia raskaampia alkuaineita. Jupiterin keskitiheys on 1 300 kg/m^3 (1.3 kertaa veden tiheys).

Suurin osa tilavuudesta kuitenkin on vetyä, jossa on seassa heliumia samassa suhteessa kuin esimerkiksi Auringossa. Tämä nestemäisen vedyn ja heliumin kerros on yli 40 000 km paksuinen. N. 25 000 km pilvien alapuolella on lämpötila saavuttanut 10 000 asteen rajan ja paine on yli miljoona ilmakehää. Näissä eksoottisissa olosuhteissa vedyn molekyylisidos purkautuu: tapahtuu eräänlainen faasimuutos, jossa nesteen ominaisuudet muuttuvat dramaattisesti. Tämä ns. *metallisen vedyn* kerros mm. johtaa hyvin sähköä, ja Jupiterin voimakas magneettikenttä syntyykin juuri tässä kerroksessa.

Metallisen kerroksen yläpuolella vety on molekyylimuodossa normaalina nesteenä. Nestekerros ulottuu lähes näkyvään pintaan saakka, sillä kaasumainen atmosfääri on vain n. 1000 km paksuinen.

Jupiter säteilee lämpöä kaksi kertaa niin paljon kuin se saa Auringosta. Tämä ylimääräinen lämpö on pääosin peräisin Jupiterin jäähtymisestä, joskin osa voi olla heliumin kohti keskustaa tapahtuvasta hitaasta vajoamisesta vapautuvaa potentiaalienergiaa (joka Saturnuksella on pääasiallisin lämmön lähde).



Jupiterin vöitä ja raitoja. Mosaiikki on koottu Voyager 1:n violetin suodattimen läpi ottamista kuvista.

Lämmön virtaaminen kohti pintaa ja Jupiterin nopea pyöriminen saavat aikaan virtauksia metallisen vedyn kerroksessa. Liikuvat sähkövaraukset synnyttävät magneettikentän, joka puolestaan vaikuttaa sähkövarausten liikkeeseen. Kentän voimakkuus ei kasva rajatta, koska magneettikenttä itse asiassa pyrkii vastustamaan sähkökentän voimistumista.

Tasapainotilassa tämä Jupiterin sisäinen dynamo saa aikaan magneettikentän, jonka voimakkuus pilvien yläosassa on kymmenkertainen maapallon magneettikenttään nähden. Kenttä on runsaat 10° kallellaan Jupiterin pyörimisakseliin nähden, mikä on lähestulkoon saman verran kuin maapallonkin magneettikentällä. Suunta on vastakkainen kuin maapallolla: Jupiterissa kompassi näyttäisi etelään.

Jupiterin pilvet

Ainoa, mitä Jupiterista näemme, on sen ilmakehän yläosa. Lähes 50. leveysasteelle saakka vaaleat raidat ja tummemmat vyöt vuorottelevat. Raidat ovat lähdes puhtaan valkoisia korkeapaineen alueita, joissa kaasu virtaa ylöspäin. Punaruskeissa vöissä virtaukset puolestaan ovat alaspäin. Jupiterin nopean pyörimisen vuoksi nämä korkea- ja matalapaineen alueet ovat levinneet koko planeetan ympäri ulottuviksi pysyviksi vyöhykkeiksi.

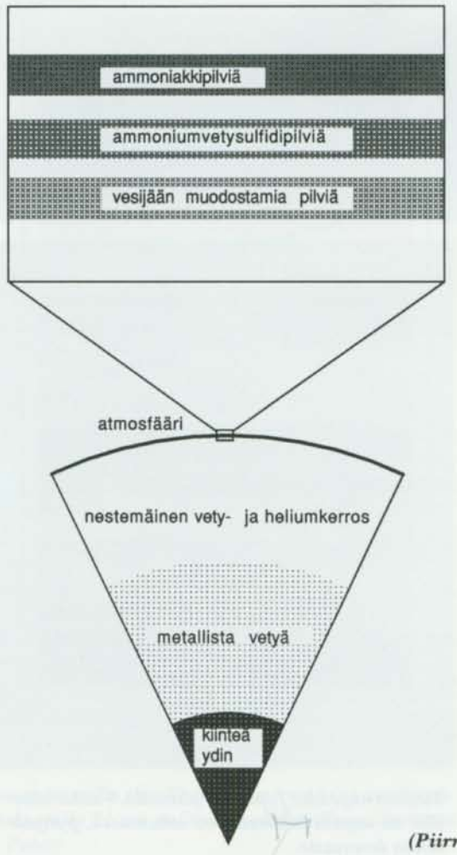
Tuulet puhaltavat vöiden ja raitojen suuntaisesti, nopeimmillaan n. 150 m/s (systeemin III suhteen). Raitojen alueella tuulet ovat pääasiassa planeetan pyörimisen suuntaan, vöissä vastakkaisia. Lämpötila pilvien yläosassa on n. 130 K (−140° C). Vaikka vöiden ja raitojen välinen lämpötilaero on vain muutama aste, voi tällä olla Jupiterin olosuhteissa merkittävä vaikutus tuulten suuntaan.

Jupiterin eteläisellä pallonpuoliskolla oleva Suuri punainen pilkku muistuttaa väriltään vöitä. Se ei ole kiinteä muodostelma, sillä se liikkuu systeemin III suhteen länteen päin puolisen astetta vuorokaudessa. Pilkun leveys on lähes vakio, n. 14 000 km, mutta pituus vaihtelee 25 000 ja 40 000 kilometrin välillä. Myös väri voi muuttua, ja ajoittain pilkku näkyy Maahan vain vaaleana, heikosti erottuvana läiskänä.

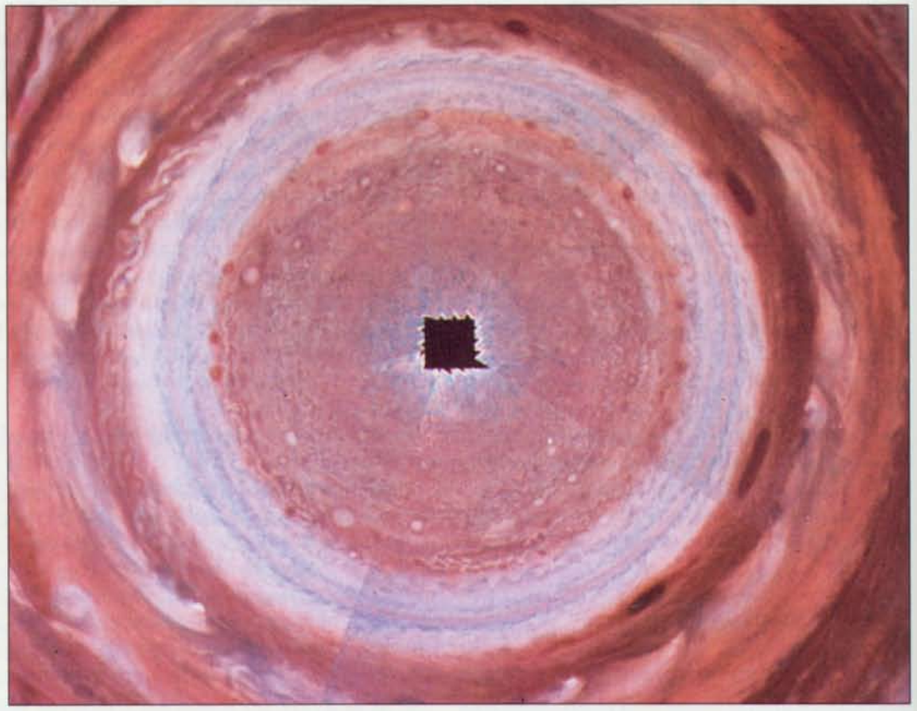
Suuren punaisen pilkun keskellä lämpötila on ympäristöä alhaisempi. Pilvet ovat hieman ympäristöä korkeammalla. Myös pilvien kiertosuunta tukee käsitystä, että pilkun alueella vallitsee korkeapaine. Ylöspäin nouseva virtaus on melko heikko, vain muutamia millimetrejä sekunnissa. Ylös joutunut aine valuu sitten hiljalleen takaisin alas, todennäköisimmin pilkun reunoilta.

Vaikka pilkku äkkipäätä muistuttaakin maanpäällisiä pyörremyrskyjä, on siinä kuitenkin joitakin eroja, ehkä selvimpänä "myrskyn silmän" puuttuminen. Pyörremyrskyssä on selvä keskus, jossa aine virtaa voimakkaasti alaspäin. Lisäksi pyörremyrskyn pilvet muodostavat spiraalimaisen rakenteen.

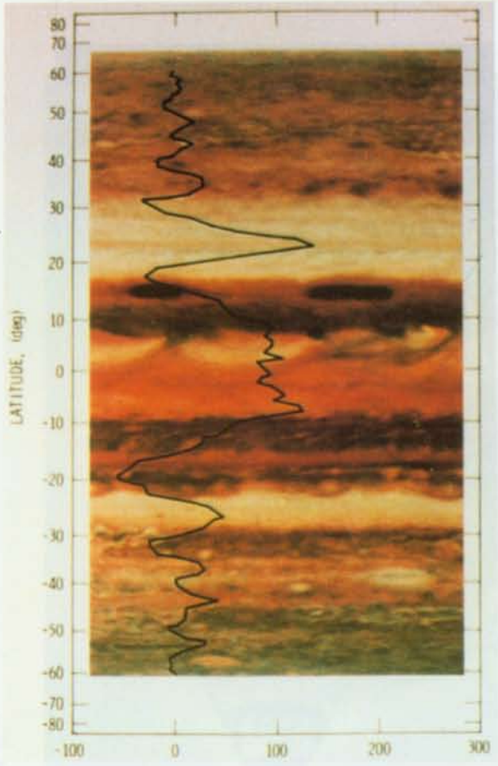
Suuri punainen pilkku ei ole ainutlaatuinen ilmiö. Esimerkiksi v. 1972 havaittiin pohjoisella pallonpuoliskolla pieni punertava pilkku, joka kuitenkin katosi parin vuoden kuluttua. Lisäksi Jupiterissa on useita vaaleita läiskiä, joiden väri muistuttaa raitojen väriä. Pienet pilkut näyttävät olevan suurta pilkkua lyhytikäisempiä; Suuren punaisen pilkun ikää ei tiedetä. Myöskään ei tiedetä pilkun synty-



Jupiterin rakenne. (Piirros Markku Poutanen)



Mosaiikkikuva Jupiterin pohjoisnavan ympäristöstä. Tässä värit ovat todelliset. Pohjoisnavan kohdalta (mustalta alueelta) eivät Voyagerit ottaneet kuvia.



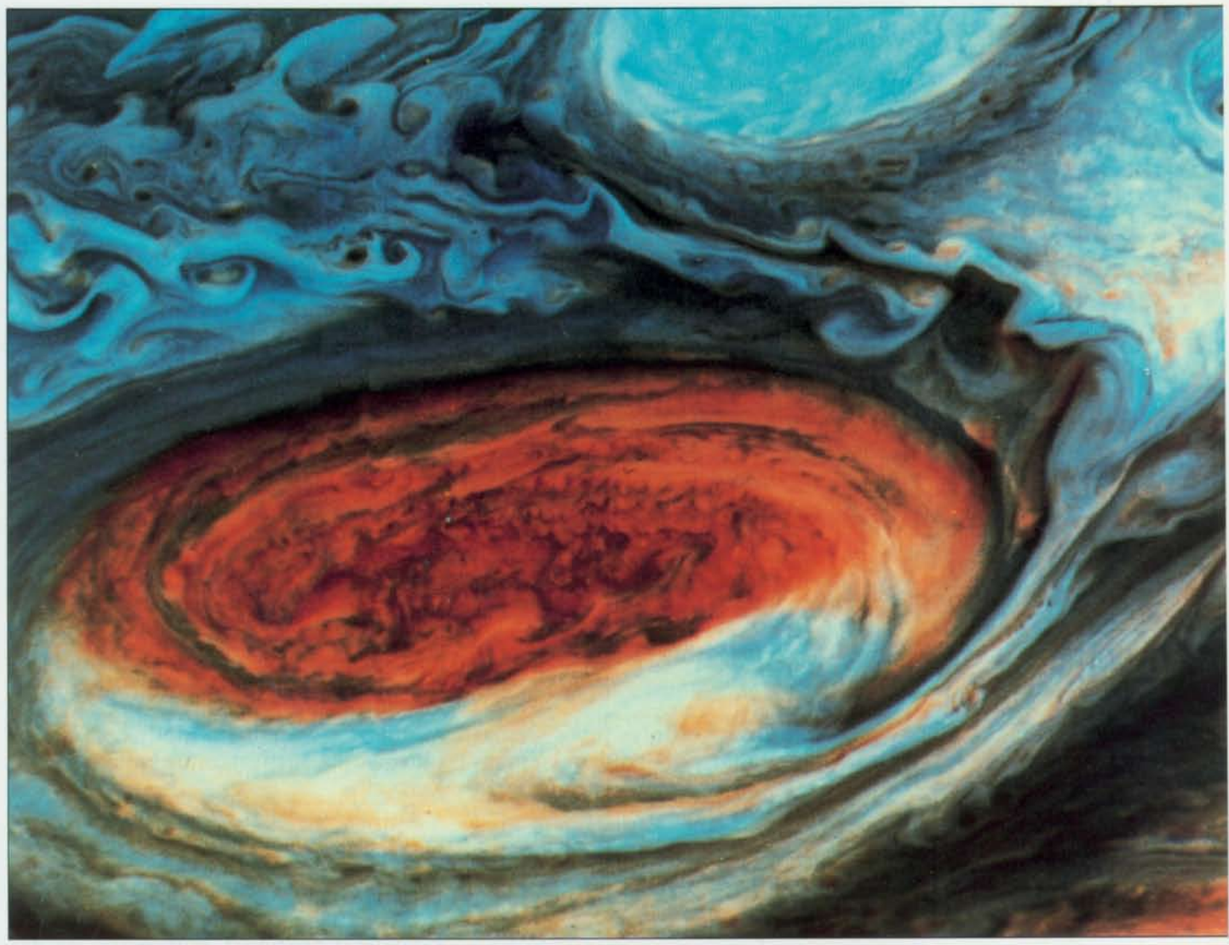
Tuulten nopeudet Jupiterin pinnalla. Vaaka-akselilla on nopeus kilometreinä sekunnissa, pystyakselilla leveysaste.

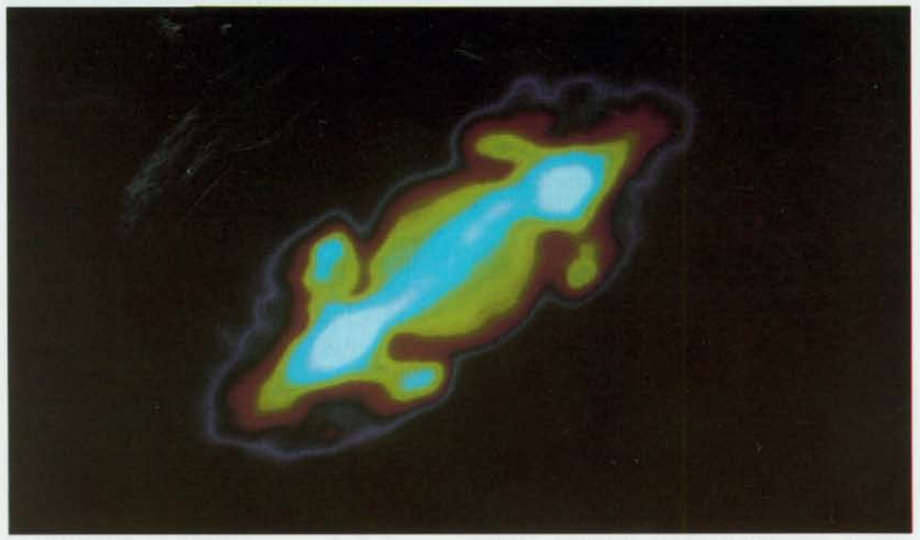
mekanismia. Vaikka useatkin teoriat voisivat selittää pilkun synnyn, on yksi ongelma silti ratkaisematta: miksi Jupiterissa on vain yksi Suuri punainen pilkku?

Luotainkuvissa Jupiterin pilvikuviot näyttävät varsin värikkäiltä. Esimerkiksi vesihöyrystä koostuvat Maan pilvet ovat yksitoikkoisen valkoisia, joten Jupiterin pilvien kemian täytyy olla melkoisesti maanpäällisestä poikkeavaa.

Korkeimmalla olevat vaaleat raidat ovat muodostuneet ammoniakkipilvistä. Tummat vyöt ovat osa n. 100 km alempana olevaa pilvikerrosta, joka pilkistelee vaaleiden ammoniakkipilvien lomitse. Tässä kerroksessa on mm. ammoniumhydrosulfidikiteitä (NH_4SH), muita ammoniakin yhdisteitä sekä vesijäätä. Kerroksia voi olla useita, ja ne voivat näkyä ylempänä olevien pilvien raoista. Kerroksissa tapahtuvat erilaiset kemialliset reaktiot aiheuttavat erivärisiä yhdisteitä, jotka sitten näkyvät Jupiterin väriskaalan runsautena. Mallia tukee sekin seikka, että värit eivät näy aikaa myöten sekoittuvan, vaan pysyvät erillään.

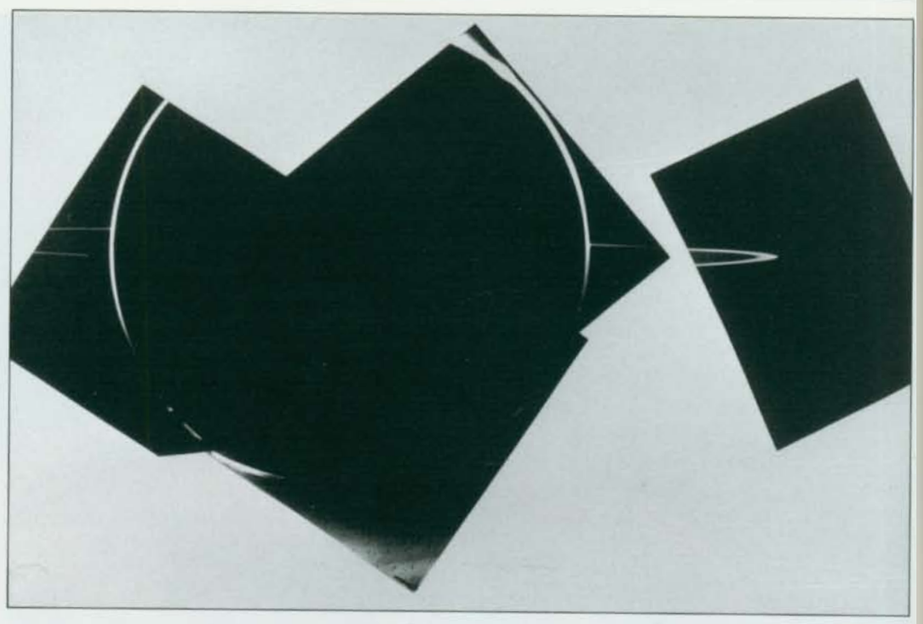
Suuren punaisen pilkun väri saattaa johtua punaisesta fosforista. Nouseva virtaus tuo syvistä kerroksista fosfiinia (PH_3), joka Auringon ultraviolettisäteilyn vaikutuksesta hajoaa fosforiksi. Vaaleiden





Yllä Suuri punainen pilkku ja sen ympäristö lähikuvassa. Värejä on huomattavasti korostettu ja näin saatu yksityiskohdat paremmin näkyviin.

Jupiterista otetussa radiokuvassa näkyvät planeetan molemmilla sivuilla olevat voimakkaat säteilyvyöhykkeet. Kuva on otettu amerikkalaisella VLA-teleskoopilla 21 cm aallonpituudella. (Kuva National Radio Astronomy Observatory, havaitsija Imke de Pater)



Jupiterin rengas näkyy planeetan takaa otetuissa kuvissa.

pilkkujen väri taas johtuu siitä, etteivät ne ulotu kyllin syvälle eikä fosfiinia pääse pinnalle.

Jupiterin pilvissä esiintyy myös voimakasta salamointia. Salamoiden voimakkuus vastaa kaikkein suurimpia Maassa havaittuja salamoita.

Magnetosfääri ja radiosäteily

Jupiterin magnetosfääri on varsin laaja: jos magnetosfäärin voisi nähdä paljain silmin, olisi se Maasta nähtynä Auringon kokoinen, vaikka Jupiter on aina vähintään neljä kertaa kauempana kuin Aurinko. Lisäksi suuri osa kosmisista säteistä (Maan ilmakehään osuvista suurienergisistä varatuista hiukkasista) on lähtöisin Jupiterin magnetosfääristä.

Auringon puolella Jupiterin magnetosfäärin sysäysrintama on 50–100 Jupiterin säteen päässä. Etäisyys vaihtelee huomattavasti mm. aurinkotuulen voimakkuuden mukaan. Vastakkaisella puolella magnetosfääri on venynyt aina Saturnuksen radan taakse ulottuvaksi pitkäksi pyrstöksi.

Sysäysrintaman jälkeen seuraa magneettikentässä pyörteinen kerros, magnetopaussi, jonka sisäpuolella sitten alkaa varsinaisesti Jupiterin magneettikentän määräämä alue. Aivan magnetopaussin sisäpuolella luotaimet havaitsivat hyvin suurienergisiä hiukkasia, joiden kineettinen energia lämpötilaksi tulkittuna merkitsee 300–400 miljoonaa astetta. Hiukkastiheys kuitenkin on niin pieni, ettei se juuri vastaa käsitystämme kuumasta paikasta.

Parinkymmenen Jupiterin säteen etäisyydellä ovat maapallon van Allenin vöitä vastaavat säteilyvyöhykkeet, joissa suurienergisiä hiukkasia on 10 000-kertaisesti maapallon van Allenin vöihin verrattuna. Luotaimet joutuivat kulkemaan näiden vyöhykkeiden poikki, jolloin ne saivat säteilyannoksia, jotka olivat satoja kertoja suurempia kuin mikä on ihmiselle kuolettava. Ei siis kovinkaan lohdullinen näkymä tulevaisuuden Jupiter-turistille.

Ohut, kiekkomainen, matalaenergisistä varatuista hiukkasista muodostuva plasmalevy on magneettisen ekvaattorin tasossa. Varausten liikkuessa levyssä syntyy voimakkaitakin virtoja. Koska levy pysyy magneettikenttään kiinnittyneenä, se näyttää Jupiterin pyöriessä heiluvan ylös alas kuin levylautasella oleva vääntynyt äänilevy.

Sisimmän suuren kuun, Ion, radalla on plasmarengas, joka on peräisin Ion tulivuorenpurkauksista. Renkaan hiukkastiheys vaihtelee ajan mukana riippuen Ion senhetkisestä aktiivisuudesta. Plasmarenkaan ja Jupiterin välillä liikkuu huomattava määrä varattuja hiukkasia. Tämä saa aikaan sähkövirran, joka on voimakkuudeltaan jopa 5 miljoonaa ampeeria. Jupiterin atmosfääriin syöksyvät hiukkaset synnyttänevät luotainten havaitsemat voimakkaat revontulet.

Jupiter on Maasta havaittuna voimakas radiosäteilijä; vain Aurinko "näkyy" radioalueella kirkkaampana. Havaittu kohina voidaan aallonpituutensa perusteella jakaa kolmeen ryhmään: *dekametri-*, *desimetri-* ja *terminen* säteily. Kunkin syntymekanismi on erilainen.

Planckin säteilylain mukaan jokainen kappale säteilee sähkömagneettista säteilyä, jonka voimakkuus ja maksimiaallonpituus riippuu kappaleen lämpötilasta. Koska Jupiterin ulko-osien lämpötila on 150 kelvinin luokkaa, on säteilymaksimi kaukana infrapuna-alueella, mutta myös termistä radiosäteilyä voidaan havaita senttimetri- tai millimetriaallonpituuksilla. Koska eri aallonpituudet läpäisevät Jupiterin kaasukerroksia eri tavalla, saadaan näin tietoa eri syvyyksistä. Myös yläpuolisten kerrosten koostumus vaikuttaa säteilyyn, sillä kullakin molekyylillä tai yhdisteellä on luonteenomainen absorptioviiva, joista useimmat tosin sijaitsevat infrapuna-alueella.

Dekametri- ja desimetrisäteilyn voimakkuus muuttuu ajan mukana ja niissä on huomattava ei-terminen osa. Desimetrisäteily ulottuu muutamasta senttimetristä muutamaan metriin, ja pääosa siitä tulee Jupiterin magneettisen ekvaattorin tasosta. Se on *synkrotronisäteilyä*, joka syntyy lähes valon nopeudella Jupiterin magneettikentässä kiertävistä elektroneista. Koska magneettikentän asento muuttuu Jupiterin pyörimisen mukana, vaihtelee myös desimetrisäteilyn voimakkuus samassa tahdissa. Tästä on määrätty systeemin III pyörähdysaika. Saapuvan säteilyn polarisaatiosta voidaan päätellä Jupiterin magneettikentän napaisuus.

Dekametrisäteily ulottuu muutamista metreistä aina satoihin metreihin saakka. Säteilyssä on äkillisiä, satunnaisia purkauksia, jotka kestävät muutamasta minuutista tunteihin. Ainakin osa purkauksista on yhteydessä sisimmän suuren kuun Ion paikkaan radallaan. Mahdollisesti Ion ja Jupiterin välillä kulkeva varattujen hiukkasten virta saa aikaan purkaukset, mutta mekanismia ei tunneta.

Himmeät renkaat

Jupiterin renkaat löytyivät yllättäen v. 1979 Voyager 1 -luotaimen ottamasta kuvasta. Maasta päin renkaat näkyvät hyvin himmeinä, mutta vastavaloon ne näyttävät kirkkaammilta. Tämä johtuu siitä, että rengashiukkaset ovat keskimäärin vain 4 mikrometrin kokoluokkaa. Tällaiset hituset sirottavat valoa paljon voimakkaammin eteen- kuin taaksepäin. (Saman ilmiön näkee utuisella säällä: utu näkyy Auringon suunnassa paljon selvemmin kuin vastakkaisella puolella.)

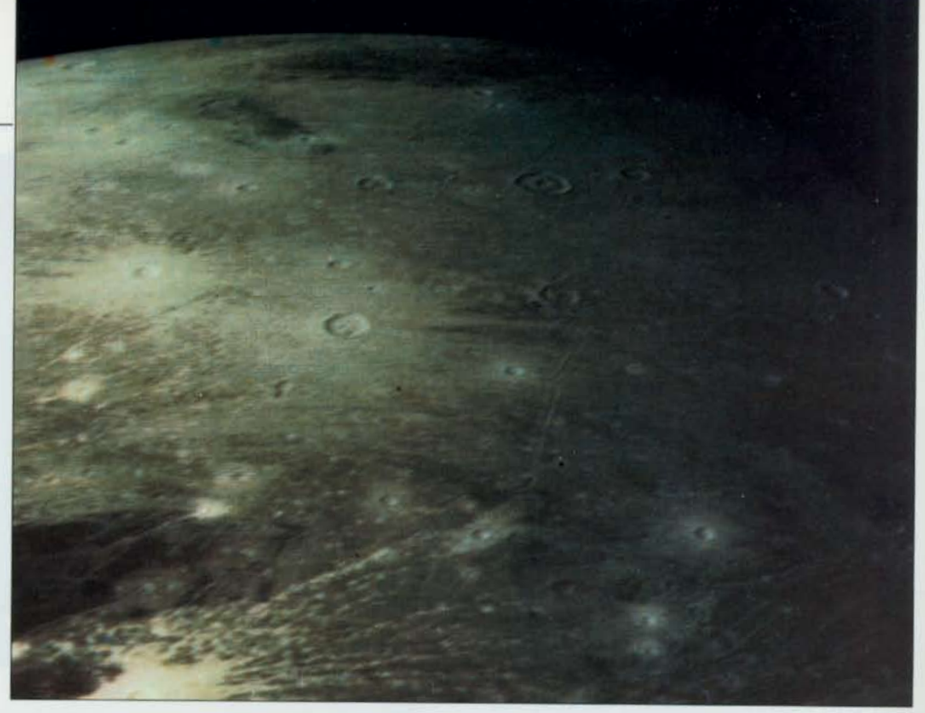
Jupiterin yöpuolella näkyy planeetan reunalla revontulten kajoa ja ilmakehässä mahtavien ukkosmyrskyjen salamointia.

Rengas koostuu useista osista. Kirkkain, suhteellisen kapea osa on 126 400 kilometrin päässä. Tästä vajaat 1 000 km sisäänpäin on toinen kirkastuma. Kovin selviä nämä rajat eivät kuitenkaan ole, ja itse asiassa rengashiukkasia näyttää riittävän harvakseltaan Jupiteriin saakka. Ulkoreuna sen sijaan on terävä, mikä johtuu tuolla etäisyydellä kiertävästä kuusta. Kuu lakaisee ratansa puhtaaksi estäen samalla rengashiukkasia ajautumasta ulospäin.

Näin pienistä kappaleista koostuva rengas ei ole pysyvä, vaan hiukkaset leviävät vähitellen joka suuntaan. Uutta ainetta on tultava jatkuvasti lisää. Todennäköisin raaka-ainelähde on Io-kuu, jonka pinnalla tapahtuvista purkauksista sinkoutuu kaasua avaruuteen.

Jupiterin kuut

Jupiterin 16 kuun perheestä vain neljä on suurta, helposti Maahan näkyvää. Loput ovat vain muutaman kymmenen kilometrin läpimittaisia. Niiden näkeminen Maasta käsin on vaikeaa. Neljä suurinta,



Ganymedes-kuun pinnassa on harvakseltaan tuoreita kraattereita.

Alakuvassa Galilein kuut perhepotretissa. Ylhäällä Io ja Europa, alhaalla Ganymedes ja Kallisto.

Galilein kuut, sen sijaan näkyvät jo tavallisella prismakiikarilla pieninä valopisteinä Jupiterin vieressä. Kuut näkyisivät jopa paljain silmin, ellei kirkas planeetta peittäisi niitä loistoonsa. Galilein kuut ja niitä sisempänä kiertävä *Amalthea* tunnetaan luotaintietojen perusteella varsin hyvin; muut kuut sen sijaan ovat edelleenkin vain piirteettömiä valopisteitä.

Sisimmät neljä kuuta ovat pieniä, kivistä muodostuneita kappaleita. Suurin, Amalthea, on kooltaan 270 × 165 × 150 km. Sen tumma, punainen pinta on täynnä kraattereita. Kolme muuta kuuta löytyivät Voyager-luotainten lähettämistä kuvista.

Neljän Galilein kuun jälkeen seuraa leveä aukko, ennen kuin saavutaan seuraavaan kuuhun. Jupiterin uloimmista kuista tiedetään hyvin vähän, edes kaikkien radat eivät ole kovin tarkasti tunnettuja. Kuut ovat järjestyksessä sisältä ulospäin *Leda*, *Himalia*, *Lysithea*, *Elara*, *Ananke*, *Carme*, *Pasiphaë* ja *Sinope*. Suurimman, Himalian, läpimitta lienee n. 150 km, muut ovat huomattavasti pienempiä.

Kuut ovat suhteellisen epäkeskisillä radoilla ja niiden ratatasot poikkeavat Jupiterin ekvaattoritasosta. Neljä ulointa muodostavat oman ryhmänsä ja ne kiertävät vastakkaiseen suuntaan kuin muut kuut. Onkin mahdollista, että ulommat kuut ovat Jupiterin sieppaamia pikkuplaneettoja.

Galilein kuut

Sisin Galilein kuista, Io, on hieman omaa Kuutamme suurempi. Ion värikkäässä pinnassa on lukuisia tummia purkausaukkoja, joista sinkoutuu ainetta jopa 250 km korkeuteen, saattaapa osa karata avaruuteenkin. Io on varsin aktiivinen, sillä Voyager-luotainten ohilennon aikaan useat purkausaukot olivat toiminnassa.

Ion pinnalla ei ole meteoriittikraattereita. Pinta on siis kauttaaltaan hyvin nuorta. Havaituista purkauksista on laskettu, että Ion sisältä ruiskuaa ainetta pinnalle 10 miljardin tonnin verran vuodessa. Jo miljoonassa vuodessa tästä kertyy 100 metrin paksuinen kerros yli koko Ion. Tämä peittää tehokkaasti meteoriittikraatterit.

Vuorovesivoimat pitävät yllä Ion "tuli-

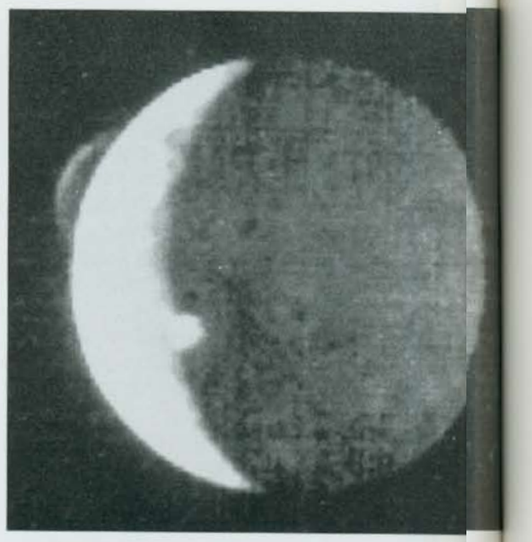
Ion tuliperäistä pintaa Ra Pateran alueella.

vuoritoimintaa". Kaksi muuta suurta kuuta, Europa ja Ganymedes, aiheuttavat pienen epäkeskisyyden Ion rataan, joka muuten olisi lähes täydellinen ympyrä. Koska Io kääntää aina saman puolen Jupiteriin päin, olisi ympyräradalla Jupiterin aiheuttama vuoksiaalto aina samassa kohtaa pintaa olevana pullistumana, toinen muhkura kohti Jupiteria, toinen siitä poispäin. Nyt kuitenkin Ion nopeus radallaan vaihtelee hieman, joten kuu ei käännä täsmälleen samaa puolta Jupiteriin päin (sillä eihän Ion pyörimisnopeus tiedä mitään ratanopeuden vaihteluista). Niinpä Ion kuorikerroksessa oleva jättiläismäinen vuoksiaalto liikkuu hieman edestakaisin, koska *se* pyrkii olemaan samassa asennossa Jupiterin suhteen. Liikkeessä syntynyt kymmenen biljoonan watin tehoinen kitkalämpö pitää pinnanalaisen rikkikerroksen sulana ja sula aines purskahtelee pinnalle lukuisista purkausaukoista.

Ion pinnalla on monia värejä punaisesta ja oranssista hiilenmustaan ja puhtaan valkeaan. Useat väreistä johtuvat erilaisista rikin yhdisteistä. Purkautuvassa kaasussa on mm. rikkivetyä (H_2S) ja rikkidioksidia (SO_2), jotka pinnalle jouduttuaan härmistyvät kiinteiksi.

Ion pintalämpötila on n. 130 K (−140°C), mutta siellä on useita purkausaukkoihin liittyviä kuumia läiskiä, joissa lämpötila saattaa olla 150 astetta ympäristöään korkeampi. Sulia rikkijärviä Ion pinnalla ei kuitenkaan ole, sillä se vaatisi yli 100 celsiusasteen lämpötiloja.

Pinnan alla sulaa rikkiä ilmeisesti kuitenkin on. Ion tiheys on n. 3.5 kertaa



Ion pinnalta löydettiin useita purkautuvia tulivuoria. Voyager 1:n kuvassa näkyy reunalla yksi purkaus ja yön ja päivän rajalla toinen.

Ganymedeen pintaa peittävät monimutkaiset uurrejärjestelmät.

veden tiheys, joten se koostuu lähes kauttaaltaan kiviaineksista. Sulan rikkikerroksen alla voi olla suhteellisen ohut kiinteä kerros, jonka alapuolella taas on sulaa magmaa. Keskellä lienee sitten kiinteä ydin. Jäästä tai vedestä ei ole havaittu merkkiäkään.

Seuraava kuista, Europa, on aurinkokunnan tasaisin kappale, sillä sen pinnalla laulun sanoja mukaillen ei ole laaksoa ei kukkulaa. Varjoja ei näy edes yön ja päivän rajaviivalla, missä valo osuu pintaan hyvin vinosti. Selviä meteoriittikraattereita ei myöskään ole löydetty; muutamia heikosti näkyviä jälkiä luotainkuvissa kuitenkin on.

Europa on pienin Galilein kuista, läpimitaltaan n. 3100 km. Tiheys on runsas 3 kertaa veden tiheys. Vaikka Europan pinta on jäätä, on jää- tai vesikerroksen paksuus korkeintaan 100 km; sisusta onkin sitten kiveä.

Vaikka Europa onkin tasainen, piirteetön se ei toki ole. Sen pinnassa risteilee lukematon määrä tummia juovia, jääkuoressa olevia halkeamia, jotka ovat täyttyneet pinnan alta pursuneella pehmeällä jäällä. Sisältä pursuava vesi on "likaisempaa" kuin vanha jää, tästä railojen tummempi väri.

Pinnanalainen kerros voi olla vettä tai jäätä. Vuorovesivoimat yksin tuskin riittävät tuottamaan kylliksi lämpöä jään sulattamiseen. Ytimessä tapahtuvasta radioaktiivisesta hajoamisesta vapautuu kuitenkin lisää lämpöä, mutta ei tiedetä onko sitäkään tarpeeksi.

Aurinkokuntamme suurin kuu Ganymedes on Merkuriusta suurempi. Sen läpimitta on 5300 km ja tiheys n. kaksi kertaa veden tiheys. Noin puolet Ganymedeestä on vettä tai jäätä. Jäisen pinnan alla on vedestä tai pehmeästä, mahdollisesti kivensekaisesta jäästä muodostunut vaippa ja sisimpänä kiviaineksista koostuva ydin.

Ensinäkemältä Ganymedes muistuttaa Kuuta vaaleine ja tummine alueineen ja meteoriittikraattereineen. Korkeuserot ovat paljon pienempiä kuin Kuussa, kraatterit ovat matalia eikä niissä ole keskusvuorta. Syynä on Ganymedeen jäisen pinnan heikkous: korkeita vuoria ei voi muodostua.

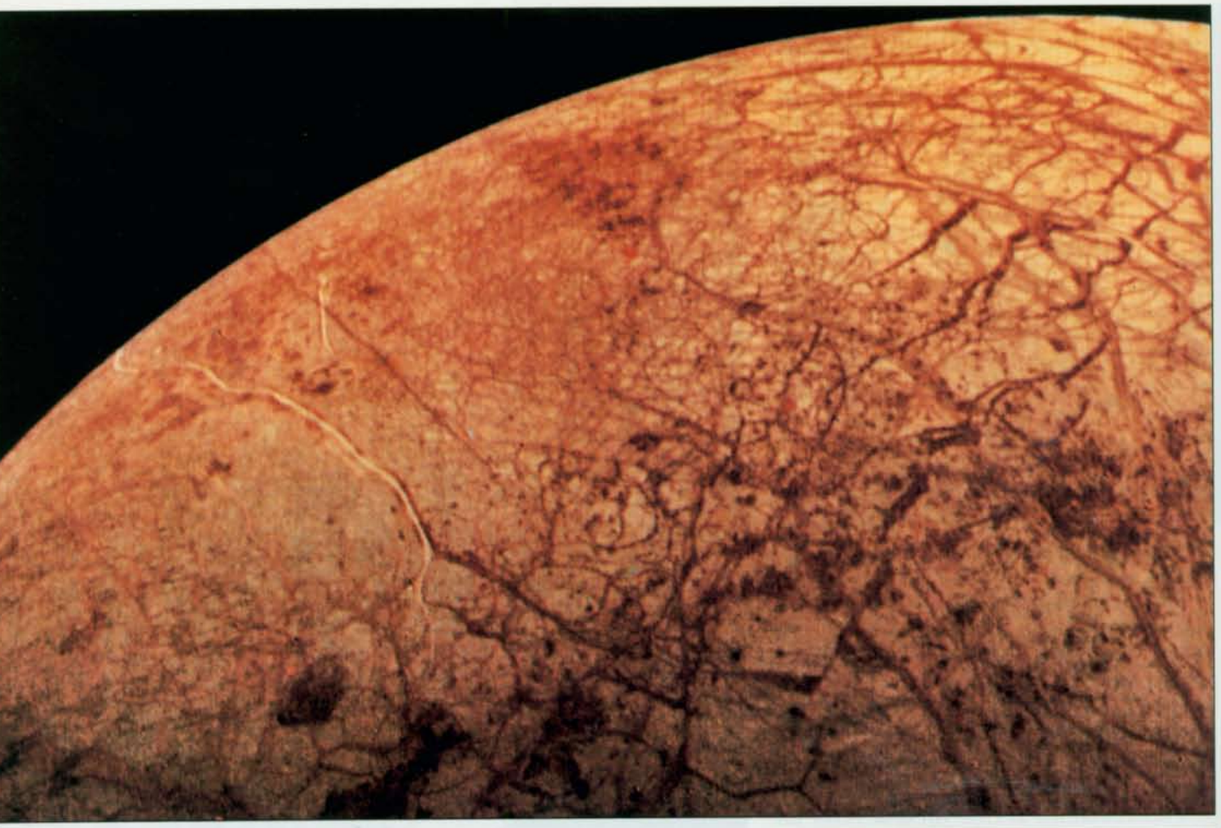
Pinta voidaan jakaa kahteen pääluokkaan. Tummemmilla alueilla on runsaasti kraattereita, joten ne ovat vanhempia kuin vaaleat alueet, joissa kraattereita on huomattavasti vähemmän. Vaaleat alueet

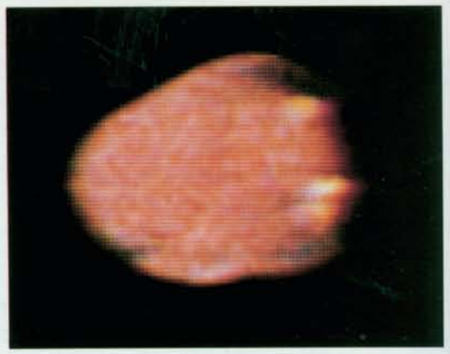
Kalliston pinta on meteoriittien pippuroima. Suuri pyöreä muodostuma vasemmassa reunassa on nimeltään Valhalla.

sen sijaan ovat täynnä yhdensuuntaisia, satojen kilometrien pituisia uurteita. Yksittäisen uurteen leveys on muutamia kilometrejä ja syvyys korkeintaan muutama sata metriä. Ne muodostavat kymmenien uurteiden ryhmiä, joiden yhteinen leveys voi olla sata kilometriä.

Uurteiden syntymekanismia ei tiedetä; on mahdollista, että ne ovat syntyneet aikojen kuluessa kuorikerroksen liikkuessa, puristuessa ja venyessä. Pinnan alta on tihkunut vettä tai pehmeää jäätä ja täyttänyt uurteiden pohjat. Kaikkein nuorimpia muodostelmia ovat ne kraatterit, joista lähtee vaaleita säteittäisiä juovia: tässä tumman pinnan alta on roiskunut puhtaampaa jäätä meteoriitin iskiessä Ganymedeen pintaan.

Uloin Galilein kuista on Kallisto. Se on vain hivenen Ganymedestä pienempi,

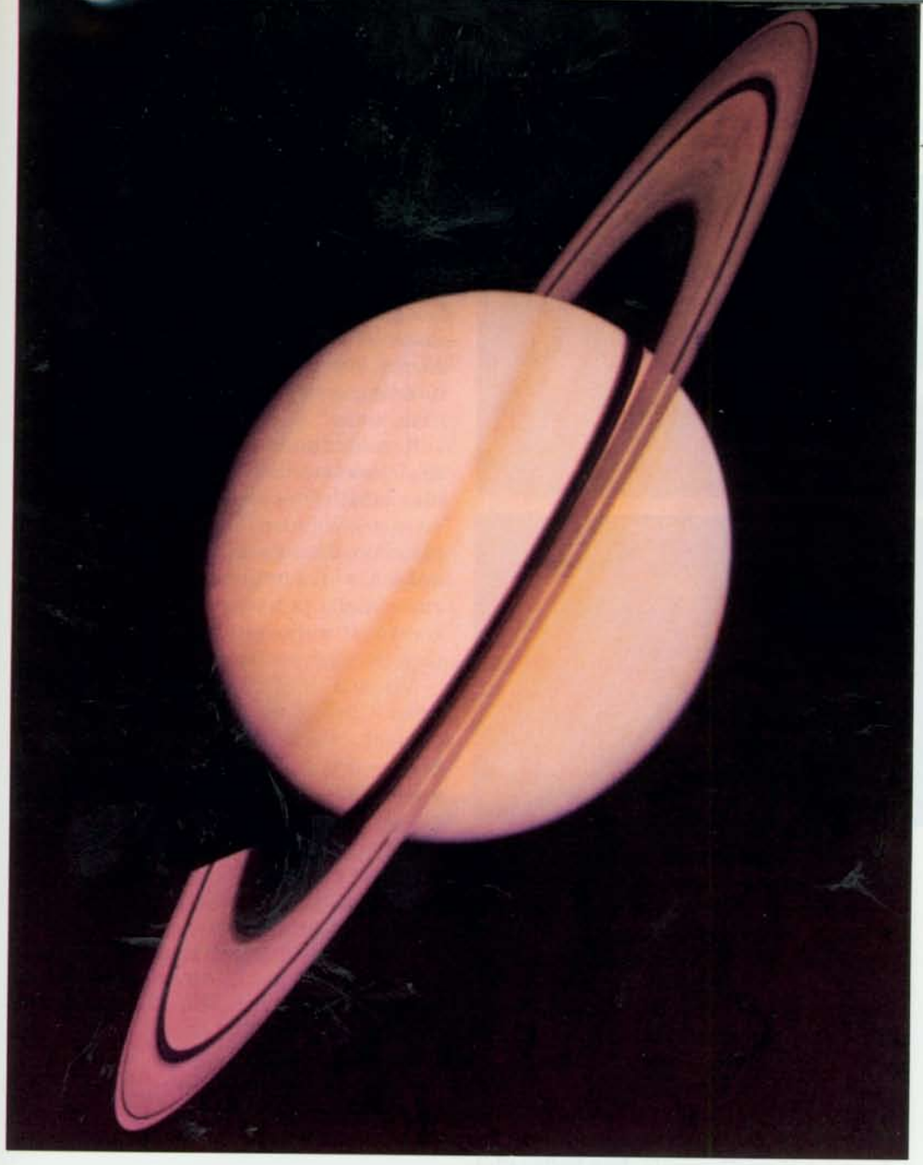




Yllä Europan jäistä pintaa. Värieroja on korostettu ja saatu pintaa halkovat railot paremmin näkyviin. Vieressä paras Voyagerin antama kuva Amalthea-kuusta.

mutta ulkonäöltään se poikkeaa täysin Ganymedeestä. Kalliston pinta on ikivanhaa, ehkä vanhinta, mitä olemme tähän mennessä aurinkokunnasta löytäneet, ja siis täpötäynnä kraattereita. Pinta on kiven ja jään sekoitusta, mutta syvemmällä lienee huomattava määrä pelkkää jäätä. Koska tiheys on vain 1.6 kertaa veden tiheys, ei kiviainesta voi olla puoltakaan kuun massasta.

Suurin Kalliston kraattereista, *Valhalla*, on läpimitaltaan n. 600 km, mutta sitä ympäröivät rengasmaiset vallit ulottuvat jopa 1500 km päähän kraatterin keskipisteestä. Ne ovat törmäyksessä sulaneen veden muodostama aallokko, joka jäätyessään jähmettyi paikoilleen.

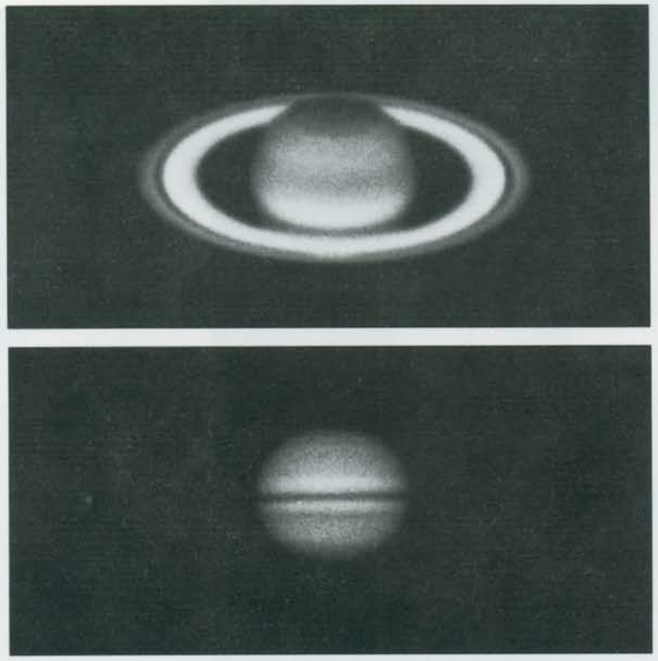


Rengasplaneetta Saturnus

Aurinkokuntamme toiseksi suurin planeetta, Saturnus, on läpimitaltaan n. 120 000 km. Sen tunnusomaisin piirre, ekvaattoritasossa oleva ohut rengas, erottuu pienelläkin kaukoputkella. Saturnus on uloin jo antiikin aikana tunnetuista planeetoista ja se on myös himmein paljain silmin näkyvä planeetta. Kolme luotainta on ohittanut Saturnuksen: Vuonna 1979 Pioneer 11, 1980 Voyager 1 ja 1981 Voyager 2.

Renkaiden arvoitus

Ensimmäinen, joka katseli Saturnusta kaukoputken läpi, oli *Galileo Galilei* vuonna 1610. Galilein vaatimattomalla kauko-



Saturnus Maasta nähtynä. Yläkuvassa renkaat näkyvät hyvin avoimina. Alakuvassa renkaat ovat kyljittäin, jolloin ne eivät näy. (Kuvat Lickin observatorio)

putkella ei voinutkaan kuvitella erottavansa yksityiskohtia. Niinpä Galilei näki itse planeetan ja sen vierellä molemmin puolin pienemmät pallot, joita hän aluksi luuli kuiksi. Kuut eivät kuitenkaan liikkuneet kuten vähän aiemmin löydetyt Jupiterin neljä kuuta, joiden liikkeen saattoi erottaa jopa yhden illan kuluessa. Paria vuotta myöhemmin Galilei koki toisenkin yllätyksen: "kuut" olivat kadonneet.

Saturnuksen arvoitus ratkesi vasta vuosikymmeniä myöhemmin, kun hollantilainen *Christian Huygens* vuonna 1655 näki, että itse asiassa Saturnusta ympäröi rengas, joka ei missään kohdassa kosketa itse planeettaan. Teoksessa *Systema Saturnium* vuodelta 1659 hän kuvailee renkaita ja selittää Galilein arvoituksen. Huygens löysi myös Saturnuksen suurimman kuun *Titanin*.

Pienen kaukoputkensa vuoksi Galilei ei erottanut renkaita renkaina, vaan vain päissä olevat leveimmät kohdat pieninä palloina. Kahdesti Saturnuksen 30-vuotisen kierroksen aikana renkaat nähdään Maasta käsin suoraan sivuilta. Käytännössä ne tuolloin katoavat näkyvistä. Tilanne oli juuri tuollainen Galilein toisen havainnon aikana.

Italialaissyntyinen tähtitieteilijä, sittemmin Pariisin observatorion johtajana toiminut *Jean Dominique Cassini* oli uuttera Saturnus-havaitsija. Hän löysi useita kuita ja havaitsi v. 1675 nimeään kantavan aukon, *Cassinin jaon*, n. kolmasosan päässä renkaiden ulkoreunasta. Vuonna 1837 Berliinin observatorion johtaja *Johann Franz Encke* näki toisen, hyvin heikon raon lähellä A-renkaan ulkoreunaa. Sitä kutsutaan nykyisin *Encken jaoksi* tai joskus myös *Keelerin aukoksi* amerikkalaisen *James Keelerin* mukaan, joka v. 1888 varmisti Encken havainnon.

Ranskalainen matemaatikko *Edouard Roche* laski vuonna 1848, että jos kuu tulee liian lähelle emoplaneettaansa, se saattaa vuorovesivoimien vaikutuksesta hajota palasiksi. Rochen laskujen mukaan Saturnuksen renkaat olivat juuri tuollaisella etäisyydellä ja hän esittikin, että renkaat koostuvat miljoonista pienistä kappaleista, jotka ovat peräisin hajonneesta kuusta.

Vuonna 1857 skotlantilainen fyysikko *James Clerk Maxwell* osoitti teoreettisesti, etteivät renkaat voi olla kiinteät, vaan niiden täytyy koostua pienistä osasista, joista kukin kiertää omaa rataansa Saturnuksen ympäri. Lopulta vuonna 1895 James Keeler sai kuvatuksi renkaiden spektrin, joka varmisti teoreettiset laskelmat.

Maanpäällisin havainnoin on nähty kolme rengasta, joille on annettu (mielikuvitusta kiehtovat?) nimet A, B ja C. Sisin, C-rengas on hyvin himmeä ja hädin tuskin erottuva. A ja B sen sijaan näkyvät helposti, samoin kuin niiden välissä oleva Cassinin jako.

Saturnus sisältä ja päältä

Kaukoputken läpi Saturnus näyttää varsin piirteettömältä, kellertävältä pallolta; mitään Jupiterin komeisiin pilvikuvioihin verrattavaa ei erotu. Luotainkuvatkaan eivät kertoneet paljon enempää. Joitakin yksityiskohtia sentään näkyy: heikkoja vöitä ja raitoja sekä joitakin yksittäisiä pilkkuja.

Pilvien liikkeiden avulla oli pyörähdysajaksi määrätty runsaat 10 tuntia. Luotainten antama tulos 10 tuntia 39.4 minuuttia on sisuksen pyörähdysaika ja saatu Saturnuksen radiosäteilyn ja magneettikentän vaihtelun jaksoista.

Tuulet puhaltavat ekvaattorilla planeetan pyörimissuuntaan jopa lähes 500 m/s. Ekvaattorin molemmin puolin on n. 40° levyinen vyöhyke, jossa tuuli on samansuuntainen, ja toisin kuin Jupiterissa ei vöiden ja raitojen välillä ole kovin selvää eroa. Heikkoja vyöhykkeisiä piirteitä näkyy aina 75. leveysasteelle saakka; ne siis ulottuvat huomattavasti lähemmäksi napoja kuin Jupiterissa.

Nopean pyörimisen ja suhteellisen pienen painovoiman vuoksi Saturnus on voimakkaasti litistynyt: napojen kohdalla halkaisija on vain 109 400 km. Eroa ekvaattorihalkaisijaan on yli 10 000 km. Saturnuksen tiheys on 0.7 kertaa veden tiheys. Se on ylivoimaisesti harvin jättiläisplaneetta. Vaikka Saturnuksen tilavuuteen mahtuisi yli 700 maapalloa, on sen massa kuitenkin vain 95 Maan massaa.

Rakenteeltaan Saturnus muistuttaa Jupiteria. Sisimpänä on kiinteä, 15–20 Maan massainen ydin, jota ympäröi nestemäisestä vedystä ja heliumista muodostunut vaippa. Lähinnä ydintä oleva vety lienee metallisessa muodossa kuten Jupiterissakin, mutta kerros on paljon ohuempi.

Saturnus säteilee 2.8 kertaa niin paljon energiaa kuin se saa Auringosta. Jupiterin lämpö oli suureksi osaksi peräisin planeetan jäähtymisestä, mutta Saturnus on sen verran Jupiteria pienempi, ettei sisäistä lämpöä riitä planeetan tähänastiseksi elinajaksi: Saturnuksen massaan nähden pintaa on suhteellisesti paljon enemmän kuin Jupiterissa ja planeetta olisi jäähtynyt nykyiselleen yli kaksi miljardia vuotta sitten.

Rochen raja

Jos kuu tulee liian lähelle emoplaneettaansa, se saattaa vuorovesivoimien vuoksi hajota palasiksi. Tämä johtuu siitä, että planeetta vetää kuun eri puolia eri suurella voimalla. Mitä löyhempi kappale, sitä helpommin hajoaminen tapahtuu. Kappale, jolla ei ole lainkaan vetolujuutta hajoaa ns. Rochen rajan etäisyydellä; todellisuudessa kuu voi pysyä ehjänä huomattavasti tätä rajaa lähempänäkin.

Rochen rajan etäisyys voidaan johtaa varsin helposti tarkastelemalla kahta m-massaista, r-säteistä palloa, jotka ovat kiinni toisissaan, etäisyyden R päässä planeetasta, jonka massa on M. Pieniin palloihin kohdistuvien vetovoimien erotus on

$$\Delta F = -GMm\left[\frac{1}{(R-r)^2} - \frac{1}{(R+r)^2}\right] \approx GMm\frac{4r}{R^3},$$

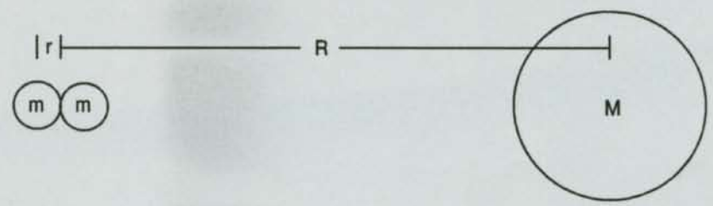
jossa viimeinen likiarvolauseke oli saatu olettamalla, että etäisyys R on paljon suurempi kuin pallojen säde r. Toisaalta pienten kappaleiden keskinäinen vetovoima on

$$F' = \frac{Gm^2}{4r^2}.$$

Jos vetovoimien ero ΔF on suurempi kuin pallosten keskinäinen vetovoima F', kappaleet "repeytyvät" irti toisistaan. Rochen rajalla voimat ovat yhtä suuret:

$$GMm\frac{4r}{R^3} = \frac{Gm^2}{4r^2} \quad \Rightarrow \quad R = \sqrt[3]{\frac{16Mr^3}{m}} = \sqrt[3]{\frac{12M}{\pi\rho}}$$

jossa viimeinen lauseke saadaan kun pallomaisen kappaleen tiheys $\rho = m/\frac{4}{3}\pi r^3$ sijoitetaan yhtälöön. Jos pallosten tiheys on sama kuin veden tiheys (1000 kg/m^3) ja massa Saturnuksen massa, saadaan Rochen rajaksi $R = 128\,000$ km.

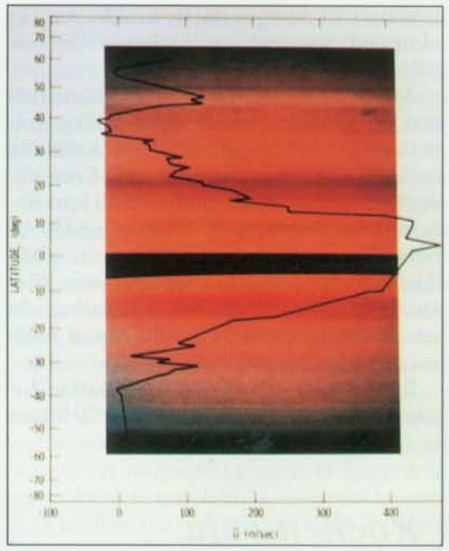


Yhdeksi syyksi on arveltu heliumin vajoamisesta kohti keskustaa vapautuvaa lämpöä. Havaittu heliumatomien suhde vetymolekyyleihin on runsaat 6 %, kun Jupiterissa se oli 11 %. Koska alun perin vedyn ja heliumin suhde on molemmissa planeetoissa täytynyt olla likimain sama, on puuttuva helium nyt näkymättömissä Saturnuksen sisuksissa. Heliumin hitaasta vajoamisesta vapautuu riittävästi energiaa pitämään Saturnuksen lämpöisenä.

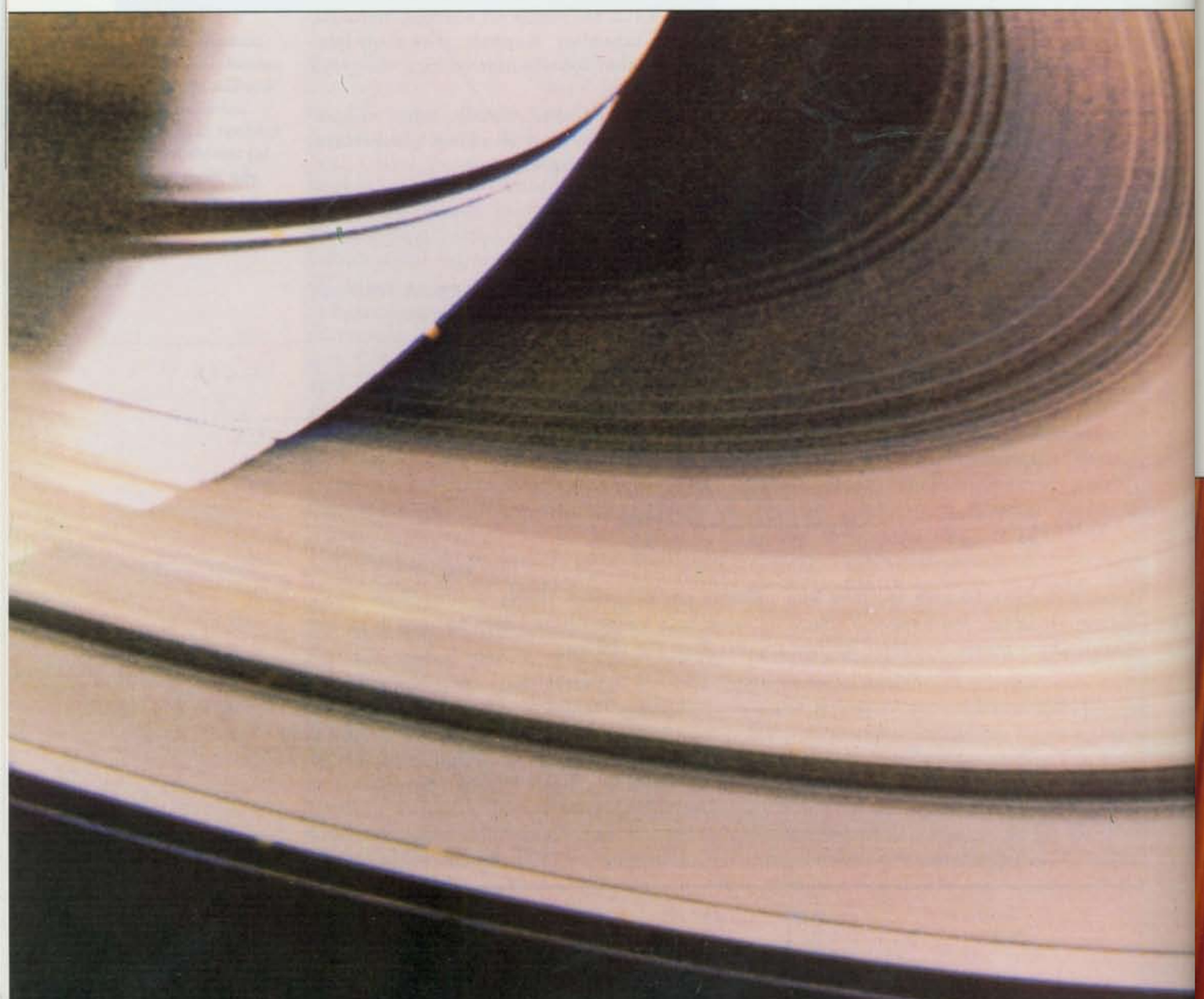
Saturnuksen kaasukehän lämpötila on matalimmillaan n. 94 K (−179°C) korkeudella jossa paine on 0.07 baaria. Hieman syvemmällä, kohdassa jossa paine on 1 bar, on lämpötila noussut jo 133 kelviniin (−140°C). Tällä korkeudella on ammoniakkikiteistä muodostuneita pilviä. Vöiden ja raitojen välinen lämpötilaero on vain pari astetta.

Ilmakehän yläosien lämpötila on kolmisenkymmentä astetta alempi kuin Jupiterissa. Alemmasta lämpötilasta johtuu, että vedystä, ammoniakista ja metaanista muodostunut, usean kymmenen kilometrin paksuinen usva leijailee varsinaisen pilvikerroksen päällä. Se heijastaa puolet siihen osuvasta auringonvalosta takaisin ja peittää näin pilvien virtauskuviot alleen.

Saturnuksen magneettikenttä on noin 1/35 Jupiterin magneettikentästä. Kentän voimakkuus pilvien yläosissa on samaa luokkaa kuin magneettikentällä maapallon pinnalla, joten lähde on noin tuhat kertaa voimakkaampi kuin maapallolla. Kenttä on dipolikenttä, jonka keskipiste on vain 0.04 Saturnuksen säteen päässä planeetan keskipisteestä ja akseli on lähestulkoon Saturnuksen pyörimisakselin suuntainen. Suunta on vastakkainen kuin



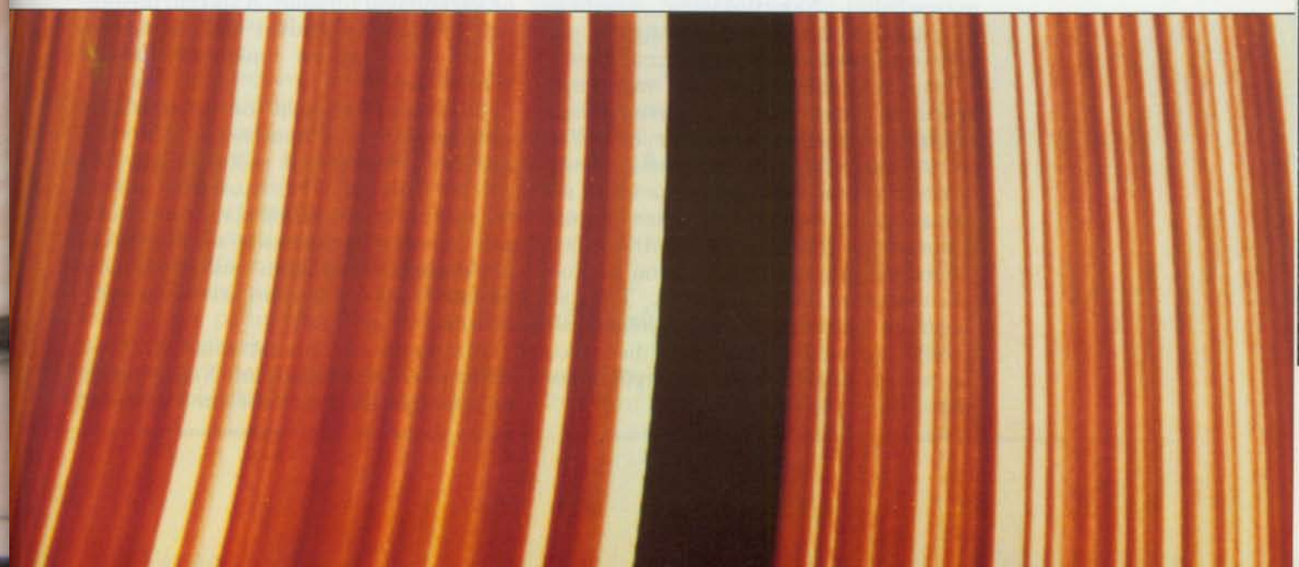
Tuulten nopeudet Saturnuksen pinnalla ovat suurempia kuin Jupiterissa. Vertaa sivun 80 kuvaan.

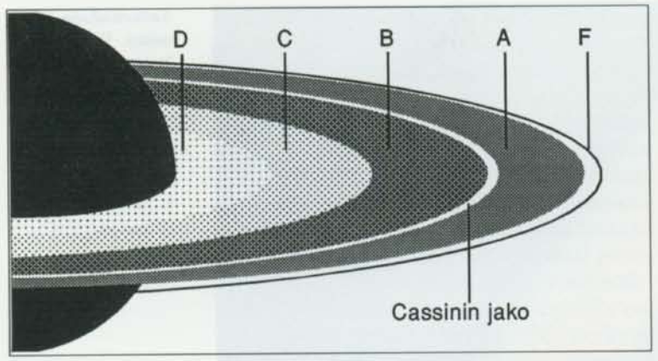


Saturnuksen renkaat kuvattuna 1.5 miljoonan kilometrin päästä planeetan takaa. Pinnalla näkyy renkaiden varjo. (Lähikuvat Saturnuksesta ja sen kuista Nasa/Voyager 1 ja 2)

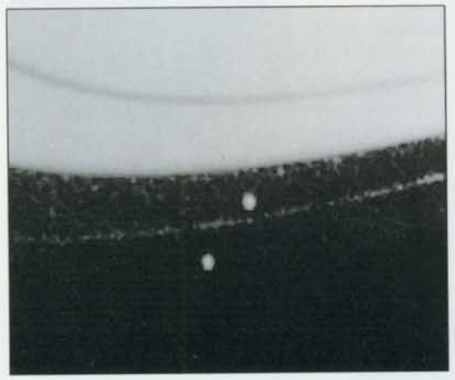
Saturnuksen pilvivöitä. Värejä on keinotekoisesti korostettu.

Voyager 2 tutki renkaiden hienorakennetta tähdenpeittokokeella: luotaimessa oleva fotometri mittasi tähden kirkkautta, kun tähti kulki renkaiden takaa. Kirkkauden vaihtelut paljastivat, että renkaat koostuvat hyvin kapeista osarenkaista. Alla A-renkaan hienorakennetta tietokoneen tulkitsemana. Musta väli on noin 50 kilometrin läpimittainen "Keelerin aukko", joka näkyy myös viereisessä kuvassa.

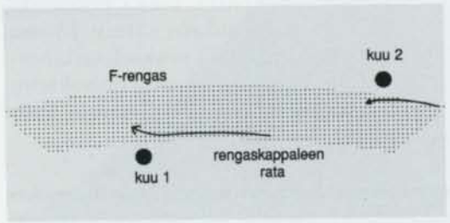




Saturnuksen renkailla on arkiset nimet. Vertaa edellisen aukeaman valokuvaan. (Piirros Markku Poutanen)



Saturnuksen F-rengasta paimentaa kaksi pientä kuuta (yllä). Sisäpuolella kiertävä siirtää taivaanmekaniikan lakien mukaan rengaskappaleita ulospäin ja ulkopuolella oleva sisäänpäin. (Piirros Markku Poutanen)



maapallolla: Saturnuksessa kompassi näyttäisi etelään. Myös kauempana planeetasta kenttä on hyvin säännöllinen.

Dynamomallien mukaan magneettikenttä ei "saisi" olla näin säännöllinen, ellei se ole nopeasti heikkenemässä. Yksi selitys voisi olla, että Saturnuksen magneettikenttä on juuri nyt vaihtamassa napaisuuttaan. Kenttä heikkenee, katoaa kokonaan ja jonkin ajan kuluttua alkaa jälleen kasvaa, mutta suunta on tuolloin päinvastainen kuin aiemmin. Tällaista tiedetään tapahtuneen maapallolla useita kertoja menneiden vuosimiljardien aikana, joten niin on voinut käydä myös Saturnuksessa.

Ohuet renkaat

Renkaat ovat Saturnuksen tunnusomaisin piirre. Ne näkyvät jo pienellä kaukoputkella ja myös Cassinin jako on harrastajien välineiden ulottuvissa. Vaikka muiltakin jättiläisplaneetoilta on löydetty rengasjärjestelmät, ovat Saturnuksen renkaat kirkkaudessaan ja koossaan ainutlaatuiset.

Saturnuksen kiertäessä radallaan nähdään renkaat enemmän tai vähemmän avautuneina. Noin viidentoista vuoden välein renkaat näkyvät suoraan sivulta. Silloin ne katoavat suurtenkin kaukoputkien näkökentästä.

Kaiken kaikkiaan renkaat ovat yli 70 000 km leveät, siis enemmän kuin Saturnuksen säde. Paksuutta niillä on kuitenkin ehkä vain satakunta metriä. Maasta tehdyt havainnot antavat paksuuden ylärajaksi pari kilometriä, luotainhavainnot parisataa metriä, mutta todellista paksuutta ei niistäkään ole erotettu. Vaikka Maasta katsoen renkaat ovat lähestulkoon yhtenäiset, ovat ne läheltä nähtyinä jakautuneet lukemattomiin kapeisiin osarenkaisiin, joiden kunkin leveys on ehkä vain muutamia kilometrejä.

B-renkaan poikki näyttää luotainkuvissa kulkevan pyörän puolaa muistuttavia juovia. Myötävaloon katsottuna juovat ovat tummia, vastavaloon vaaleita. Ilmeisestikin ne koostuvat valon aallonpituuden kokoluokkaa olevista kappaleista, jotka leijuvat rengastason yläpuolella. Tällä etäisyydellä rengashiukkasten kiertoaika Saturnuksen ympäri on likimain sama kuin Saturnuksen pyörähdysaika akselinsa ympäri. Niinpä Saturnuksen mukana pyörivä magneettikenttä pysyy lähes paikallaan rengashiukkasiin nähden. Kappaleet tulevat sähköisesti varatuiksi, jolloin ne karkottavat toisiaan. Kaikkein pienimmät hiukkaset poistuvat renkaan tasosta ja jäävät leijumaan renkaiden ylä- tai alapuolelle.

Renkaiden alueella on voimakkaita sähkökenttiä, sillä luotaimet ovat havainneet renkaista tulevaa radiosäteilyä, joka on peräisin sähköpurkauksista. Koska rengashiukkasten välillä ei ole tiheää kaasua, ei näkyviä salamoita synny, vaikka purkausten voimakkuus onkin miljoonakertainen maanpäällisiin salamoihin verrattuna.

Muutamat leveämmät aukot erottavat renkaan eri osat toisistaan. Näistä suurin on Cassinin jako, n. 5000 km leveä alue, jossa siinäkin tosin on jonkin verran ainetta. A-renkaassa on useita kapeampia aukkoja, kuten Encken jako.

Osa aukoista johtuu Saturnuksen kuiden aiheuttamista resonansseista. Jos rengashiukkasen ja kuun kiertoaikojen suhde on jokin yksinkertainen murtoluku, kuten 1/2 tai 1/3, aiheuttaa kuu hiukkasen rataan niin suuren häiriön, että hiukkanen siirtyy toiselle radalle: alue tyhjenee. Esimerkiksi Cassinin jaon sisäreuna on 1/2-resonanssissa Mimas-kuun kanssa. Hiukkasen kiertoaika jaon sisäreunassa on täsmälleen puolet Mimaksen kiertoajasta.

Kaikkia rakoja nämä resonanssit eivät voi selittää, eivät varsinkaan pieniskaalaisia piirteitä. Toisena mahdollisuutena ovat rengaskappalten seassa olevat muutaman kilometrin läpimittaiset kuut, jotka "lakaisevat" ratansa lähistön tyhjäksi. Tällaisia järkäleitä ei kuitenkaan ole havaittu.

Rengaskappalten koko vaihtelee: suurimmat ovat kuorma-auton kokoisia, pienimmät valon aallonpituuden suuruusluokkaa. Myös eri osissa renkaita osasten kokojakautuma on erilainen. Himmeä C-rengas koostuu pääasiassa hyvin pienistä, ehkä muutaman millimetrin tai senttimetrin läpimittaisista kappaleista, vaikka seassa on parimetrisiäkin murikoita. B-renkaan kappaleet ovat pääasiassa desimetrien läpimittaisia ja A-renkaassa niitä on varsin monenkokoisia, aina 10-metrisiin saakka.

Yksittäisiä kimpaleita ei luotainkuvissakaan luonnollisesti erotu, vaan koko on saatu selville muuta kautta. Erikokoisista kappaleista muodostuneet renkaat nimittäin heijastavat ja läpäisevät valoa ja radioaaltoja eri tavalla. Esimerkiksi metrien kokoluokkaa olevien kappaleiden osuus näkyy selvästi havaittaessa luotainten lähettämien radiosignaalien vaimenemista kun luotaimet ovat Maasta nähtynä renkaiden takana.

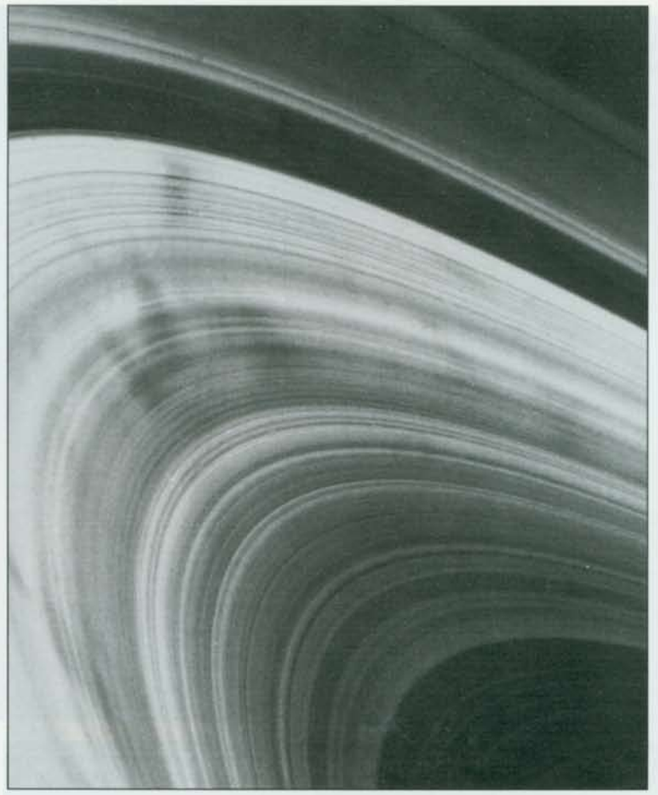
Rengaskappaleet ovat pääasiassa jäätä. Lämpötila renkaiden eri osissa vaihtelee riippuen siitä, onko paikka varjossa vai auringonpaisteessa. Korkeimmat lämpötilat ovat n. 93 K (−180°C) ja matalimmat Saturnuksen varjossa 73 K (−200°C).

Maasta näkyvien renkaiden lisäksi on luotainkuvista löytynyt koko joukko uusia renkaita. C:n sisäpuolella on hyvin harvaa ainetta, joka perinnettä noudattaen on nimetty D-renkaaksi.

Kolmisen tuhatta kilometriä A-renkaan ulkopuolella on muutaman sadan kilometrin levyinen F-rengas. Se koostuu useista kapeista osista, jotka kiemurtelevat ja jopa kiertyilevät toistensa ympäri. Renkaiden kummallakin reunalla on pieni kuu. Kuut estävät F-rengasta leviämästä, ja ehkä niillä on osuutensa myös renkaan outoon ulkonäköön.

F-renkaan ulkopuolella on toinen kapea rengas, G, josta ei ole muita luotainhavaintoja kuin renkaan heittämä varjo läheisen kuun pinnalla. Enceladus-kuun radalla on E-renkaaksi nimettyä hyvin harvaa ainetta, joka saattaa olla Enceladukseen törmänneen suuren meteoriitin synnyttämää.

Renkaissa on ainetta noin kymmenesmiljoonasosa Saturnuksen massasta. Tämä vastaisi yhtä n. 500 km läpimittaista jääpalloa. Renkaat ovat kuitenkin ilmeisesti syntyneet samoihin aikoihin Saturnuksen kanssa, eivätkä liene myöhemmin hajonneen kuun jäännöksiä.

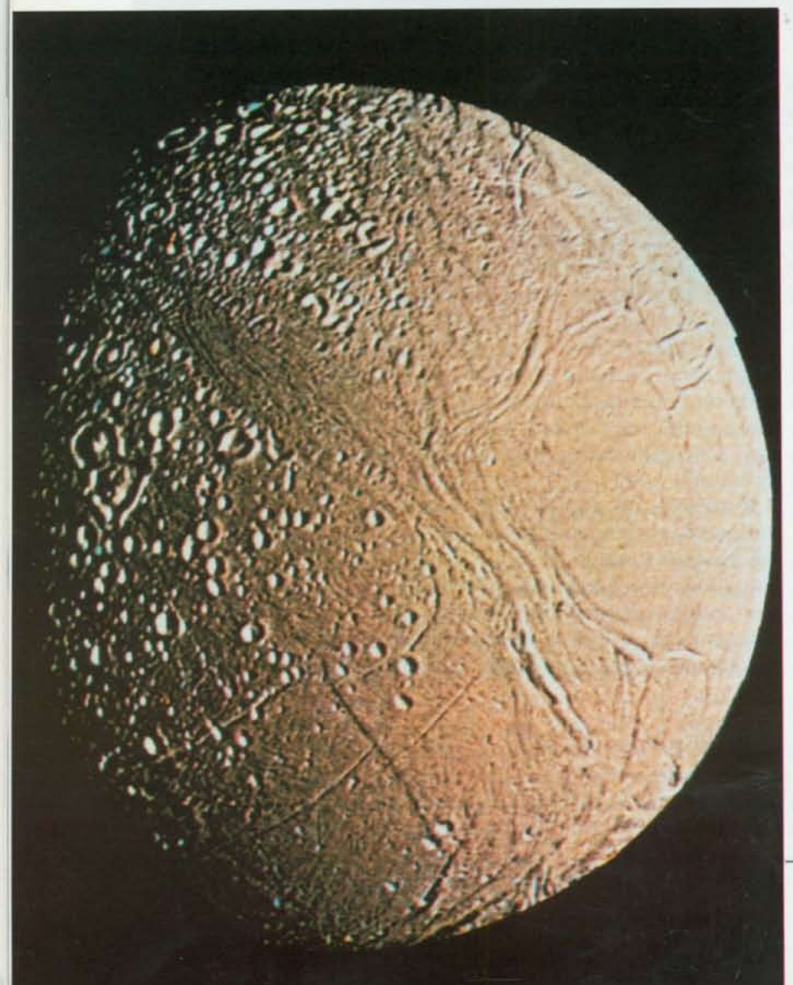


B-renkaassa näkyvät tummat "puolat" ovat renkaiden yläpuolella leijuvaa pölyä.

Saturnuksen kuut

Saturnukselta tunnetaan 20 kuuta, joista kahdeksan löydettiin Voyager-ohilennon

Usvakerrokset peittävät Titanin, Saturnuksen suurimman kuun, pinnan. Todellisia värejä on huomattavasti korostettu.



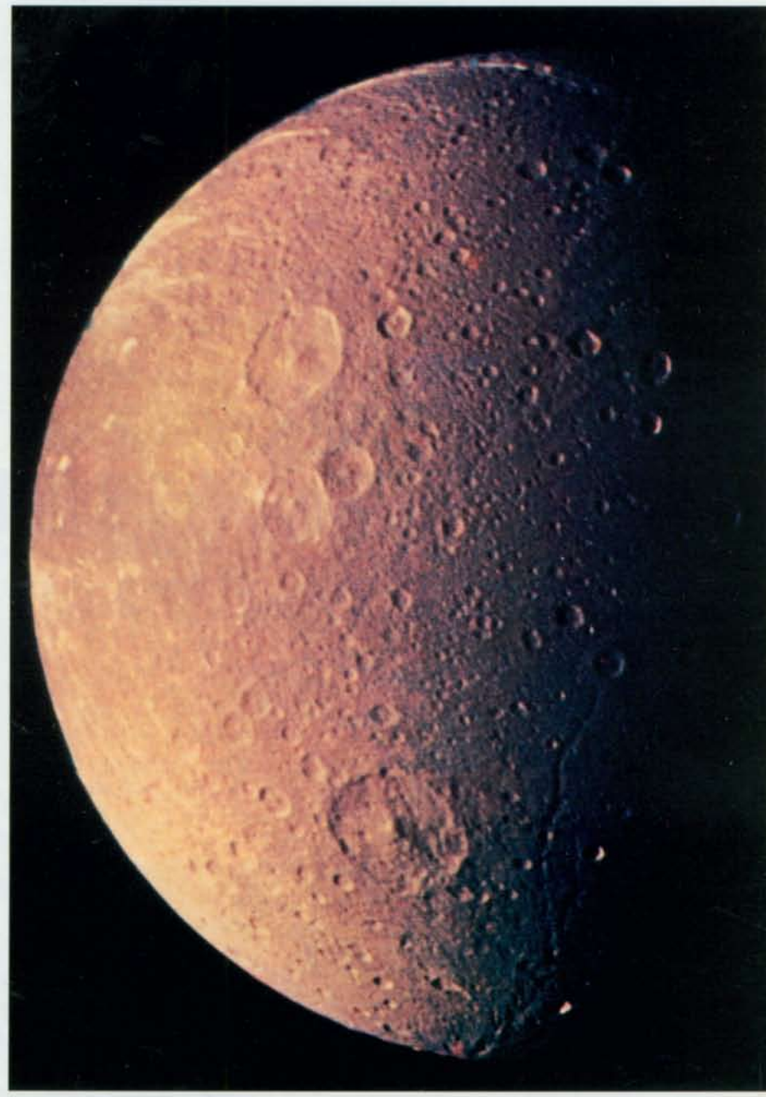
aikaan v. 1980 ja kolme epävarmaa tutkittaessa jälkikäteen Voyagerien lähettämää aineistoa. Kuut koostuvat suurimmaksi osaksi jäästä; joidenkin tiheys on vain vähän yli veden tiheyden. Suurimmalla kuulla *Titanilla* on paksu ilmakehä.

Etäisyyden perusteella kuut voidaan jakaa neljään ryhmään. Sisimmän muodostavat kuut Rheaan saakka. Tämän jälkeen on leveä aukko, jonka jälkeen tulevat Titan ja Hyperion. Japetus muodostaa oman ryhmänsä, ja kaukana kaikkien muiden ulkopuolella kiertää Phoebe vastakkaiseen suuntaan kuin muut.

Sisin kuista, luotainkuvista vuonna 1980 löydetty *Atlas,* kiertää noin 800 km A-renkaan ulkopuolella. Se on n. 30 km läpimittainen. Samoin kuin F-renkaan molemmin puolin olevat kuut, pitää Atlas A-renkaan ulkoreunan terävänä estäen rengashiukkasia leviämästä ulospäin. Kaikkien kolmen kuun etäisyydet Saturnuksesta ovat 3500 km sisällä. Ne ovat

Enceladus-kuu on läpimitaltaan noin 500 kilometriä. Sen pinta on jään peitossa, ja kraatterien puuttuminen osasta pintaa on merkki tuoreesta geologisesta toiminnasta. Kuvan pienimmät yksityiskohdat ovat noin kahden kilometrin suuruisia.

Paras Voyagerin värikuva Dionesta. Dionen läpimitta on noin 1000 kilometriä. Yön ja päivän rajalla näkyy pitkä repeytymälaakso, ja yläreunan yli kurottautuu vaaleita jääroiskeita.

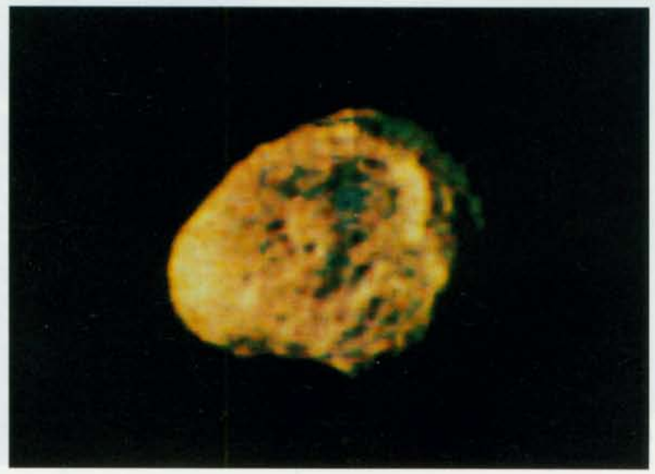


ilmeisesti resonanssissa suurten kuiden kanssa, joten ne pysyvät näin epävakailla radoilla.

Kaksi seuraavaa kuuta, Epimetheus ja Janus, ovat kuin esimerkki taivaanmekaniikan oppikirjasta. Kuut kiertävät lähes samalla radalla. Ratojen välillä on eroa vain viitisenkymmentä kilometriä, mikä on vähemmän kuin kuiden säde. Sisempää rataa kiertävä lähestyy vähitellen ulompaa. Kuut eivät kuitenkaan törmää, sillä takaa tuleva jarruttaa vetovoimallaan edellä menevää, joka siirtyy sisemmälle radalle. Vastaavasti takaa tuleva siirtyy ulommalle radalle. Kuiden roolit vaihtuvat ja ne alkavat jälleen etääntyä toisistaan, kunnes taas neljän vuoden kuluttua tilanne toistuu. Piirileikki voi jatkua hamaan ikuisuuteen.

Sisin vanhoista kuista on n. 400 km läpimittainen *Mimas*. Mimaksen huomattavin yksityiskohta on 130 km läpimittainen ja 10 km syvyinen kraatteri. Sen on synnyttänyt n. 10 km läpimittainen meteoriitti, joka törmäyksellään on lähestulkoon hajottanut koko kuun. Mimaksen pinnalla on vieri vieressä myös pienempiä kraattereita, joten pinta ei ole uusiutunut vuosimiljardien kuluessa.

Ennen luotainlentoja Mimaksen ja sen naapurin *Enceladuksen* uskottiin olevan hyvin samanlaisia. Arvaus ei olisi juuri enempää voinut mennä pieleen. Enceladus on ensinnäkin hyvin kirkas: pinta heijastaa yli 90 % siihen osuvasta valosta, mikä on enemmän kuin vastasatanut lumi heijastaa. Pinta on ilmeisesti erittäin puhdasta jäätä, johon ei ole sekoittuneena tummentavaa kiviainesta. E-rengas on Enceladuksen etäisyydellä, ja ilmeisesti se liittyy jollain tavoin kuuhun. Enceladuksen pinnalla ei ole suuria kraattereita, ja joillain alueilla kraattereita ei ole lainkaan. Monet merkit viittaavat siihen, että pinnanalainen jää on pehmeää tai jopa vettä. Vaikka vulkaanista toimintaa ei luotainkuvissa havaittukaan, on mahdollista, että siellä on vettä syökseviä "tuli-

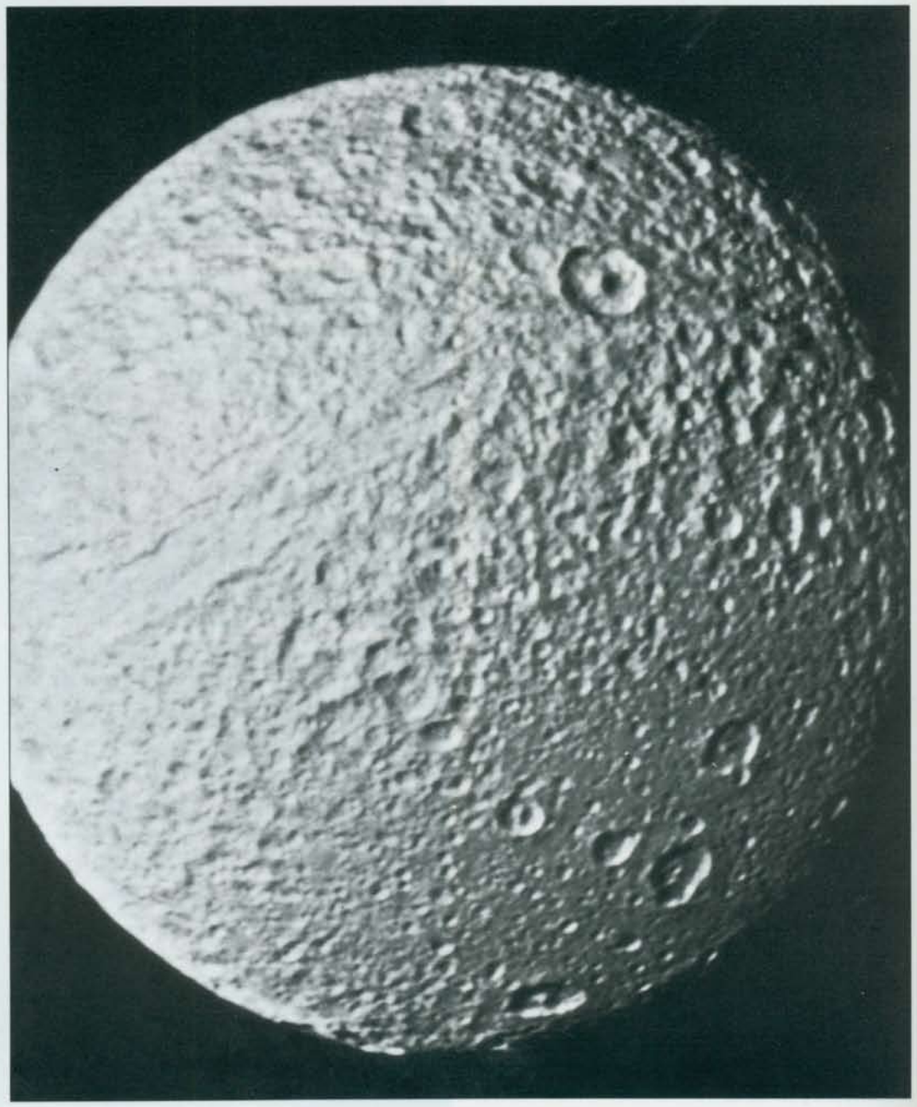


Hyperion-kuu on läpimitaltaan vain 300 kilometriä. Se on epäsäännöllisen muotoinen, tumma ja kraatterien peittämä.

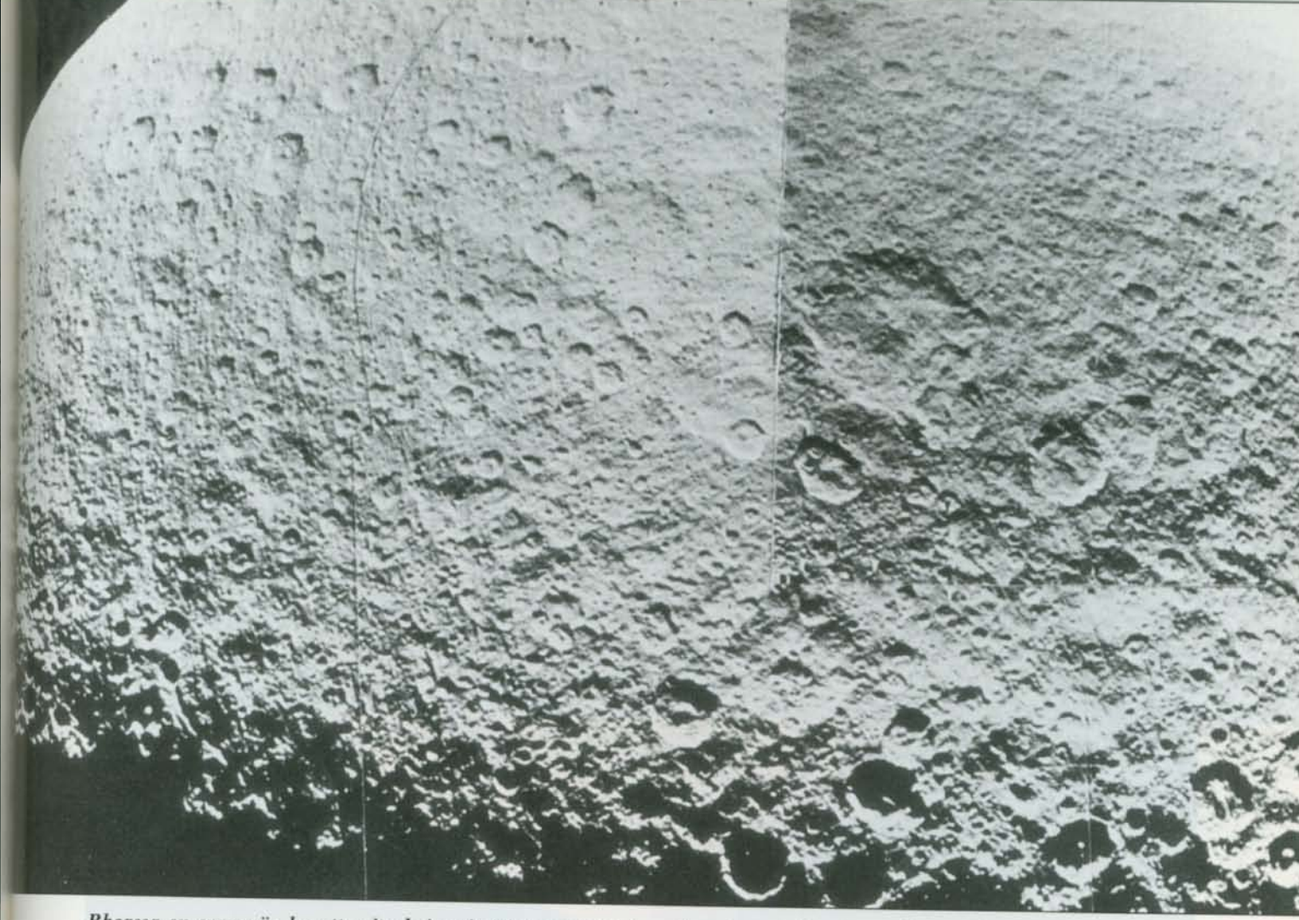
Mimas-kuun läpimitta on noin 400 km. Kuun tunnusmerkkinä on 120 km läpimittainen, 6 km syvyinen kraatteri. Se on nimetty Herscheliksi Mimaksen löytäjän mukaan.

vuoria". Enceladuksen radalla oleva aine saattaisi olla peräisin myös tällaisista purkauksista. Energialähteenä, samoin kuin Jupiterin kuun Ion tapauksessa, lienevät kuuta vääntelevät vuorovesivoimat.

Tethyksen pinnalla on valtaisa, 400 km läpimittainen kraatteri, jonka synnyttäneessä törmäyksessä on repeytynyt myös 2000 km pituinen ja useita kilometrejä syvä rotko. Koska Tethys on paljon isompi kuin Mimas, ei jäisellä pinnalla voi suuremman painovoiman vuoksi olla yhtä korkeita muodostelmia, vaikka pinta onkin täynnä erikokoisia kraattereita. Tethyksen tiheys on lähes sama kuin veden. Tethyksen radalla, n. 60° edellä ja jäljessä



Tethys on Dionen kaksoissisar, tuhannen kilometrin läpimittainen ja kraatterien peittämä. Kuvan yläosan suuresta kraatterista alas vasemmalle alkaa leveä laakso, Ithaca Chasma, joka ulottuu lähes koko kuun ympäri.



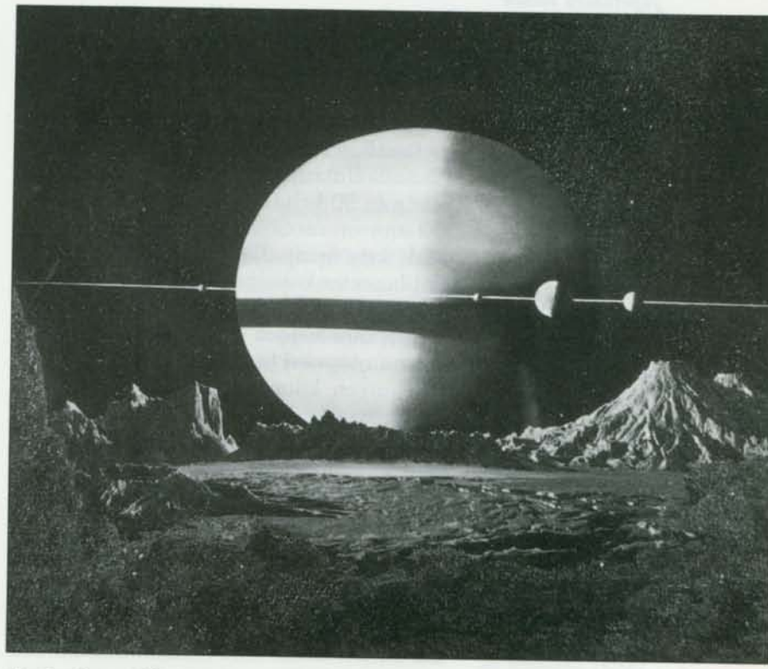
Rheassa on enemmän kraattereita kuin missään muussa Saturnuksen kuussa. Suurimmat kraatterit ovat jopa 300 km läpimittaisia. Rhean halkaisija on runsaat 1500 km.

kiertää kaksi pientä kuuta. Kuut ovat Lagrangen pisteiden L4 ja L5 läheisyydessä eikä niiden asema juurikaan muutu Tethykseen nähden. Ne siis vastaavat Jupiterin radalla olevia Troijalaisia asteroideja.

Samanlainen kuu kiertää myös *Dionen* radalla. Itse Dionen pinnalla on kraatterien lisäksi laajoja vaaleita juovia, jotka saattavat olla kuun sisästä pursuneen tuoreen jään aiheuttamia. Dione on tihein jäisistä kuista, tiheys on n. 1.4 kertaa veden tiheys.

Rhea on toiseksi suurin Saturnuksen kuista. Sen läpimitta on 1500 km. Rhean pinnalla on tummempia ja vaaleampia alueita. Tummemmilla alueilla ei ole lainkaan kraattereita, joita vanhemmilla vaaleilla alueilla on runsaastikin.

Saturnuksen suurin kuu Titan on ainoa kuu, jolla on tiheä kaasukehä. Esimerkiksi Neptunuksen kuulla Tritonilla atmosfääri on hyvin ohut. Titanin kaasukehä koostuu 99-prosenttisesti typestä. Metaania on prosentin verran, ja muita kaasuja, mm. vetysyanidia, on vähäisiä määriä. Titanin läpimitta on n. 5100 km, mutta näkyvä



Chesley Bonestellin piiroksessa on Saturnus ja sen sisimpiä kuita nähtynä Rhean pinnalta.

Japetuksen toinen pallonpuolisko on hyvin vaalea ja toinen tavattoman tumma. Kuun läpimitta on runsaat 1400 kilometriä.

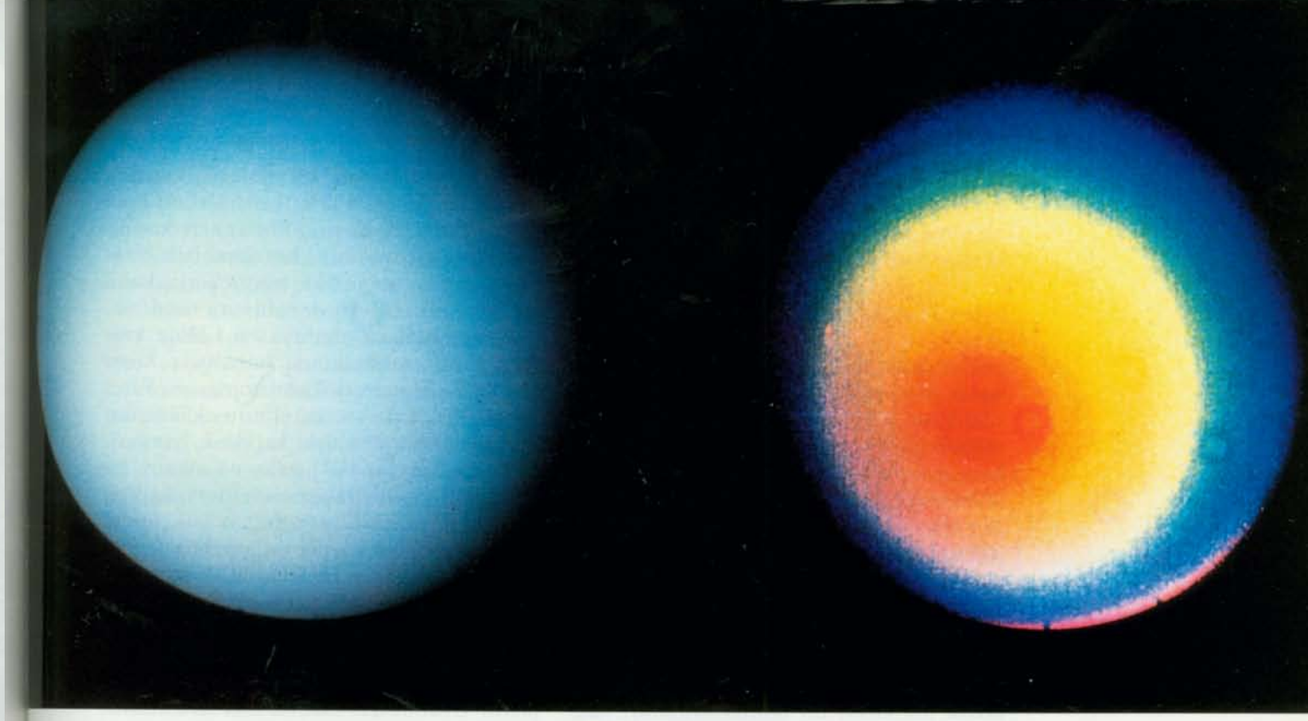
"pinta" on parisataa kilometriä korkeammalla, sillä ilmakehässä leijuu läpinäkymättömiä punertavia pilviä. Pilvet ovat useassa kerroksessa, ylimpänä fotokemiallisesti syntynyttä smogia ja alimpana metaanikiteistä muodostuneita pilviä. Pinnalla ilmanpaine on 1.6 baaria ja lämpötila n. 90 kelviniä.

Titan on monessa mielessä kuin syväjäädytetty maapallo. Jo yksin kooltaan se on planeetankokoinen kappale, suurempi kuin Merkurius. Titanin ilmakehässä oleva metaani hajoaa auringonvalon vaikutuksesta typeksi ja vedyksi. Vetyä karkaa avaruuteen kilon verran joka sekunti ja muodostaa laajan pilven Titanin radalle. Jäljelle jäänyt typpi reagoi metaanin kanssa muodostaen monimutkaisempia orgaanisia yhdisteitä. Osa vajoaa pinnalle, jossa sitä voi olla kymmeniä metrejä paksuna tervanmustana kerroksena. Titanin pinta on kuin suuri ulkoilmamuseo, jossa tapahtuu samantapaisia kemiallisia reaktioita kuin maapallolla nelisen miljardia vuotta sitten ennen ensimmäisen elämän syntyä. Titan taitaa vain olla liian kylmä paikka elämälle.

Hyperion on epäsäännöllinen, hampurilaista muistuttava kappale, kooltaan 410 × 260 × 220 km. Se ei ilmeisesti pidä aina samaa puolta Saturnukseen päin kuten muut suuret kuut, mutta pyörähdysaikaa ei tunneta. Myös Hyperionin pinta on kraatterinen.

Japetus on yksi merkillisimmistä kuista. Sen toinen puoli (kiertosuuntaan nähden etupuoli) on hyvin tumma, mutta toinen puoli on kymmenen kertaa kirkkaampi. Tummempi aines lienee levinnyt pinnalle suhteellisen äskettäin tai se uusiutuu jatkuvasti, sillä alueella olevat kraatterit ovat pohjastaankin mustia eikä niistä lähde vaaleita roiskeita. Toinen mahdollisuus on, että musta kerros olisi suhteellisen paksu.

Phoebe on uloin Saturnuksen kuista. Sen radan inklinaatio on 150 astetta, ts. kuu kiertää vastakkaiseen suuntaan kuin toiset kuut. Phoebe on tumma, pinnan heijastuskyky on likimain sama kuin Japetuksen tummemman puolen. Onkin ehdotettu, että Japetuksen tumma aine olisi peräisin Phoebesta, mutta siirtymismekanismia ei tunneta.



Utuinen Uranus

Uloin antiikin ajan planeetoista oli Saturnus. Se on myös kaukaisin planeetta joka näkyy paljain silmin. Niinpä ei olekaan ihme, että *Uranus* löydettiin vasta uudella ajalla, vuonna 1781, yli puolitoista vuosisataa kaukoputken keksimisen jälkeen. Uranus on samanlainen jättiläinen kuin Jupiter ja Saturnus, mutta kooltaan niitä pienempi. Vuonna 1986 Voyager 2 -luotain ohitti Uranuksen ja lähetti roppakaupalla lähitietoja tästä kaukaisesta kiertolaisesta.

Herschelin planeetta

Jo babylonialaiset tähtitieteilijät tunsivat "seitsemän kiertotähteä", ts. Auringon, Kuun ja planeetat Saturnukseen saakka. Ne näkyvätkin paljain silmin vallan mainiosti ja niiden liike erottaa ne tähdistä. Uranus näkyy myös paljain silmin, tosin vain kirkkaimmillaan ja erinomaisissa oloissa, mutta tuskinpa sitä löytää ilman kiikarin tai kaukoputken apua.

Uranus löytyi täysin sattumalta. Löytäjä, tähtitieteen harrastaja *William Herschel*, oli syntynyt Hannoverissa, Saksassa, vuonna 1738, mutta asunut Englannissa jo lähes neljännesvuosisadan. Ammatiltaan Herschel oli muusikko, mutta lopulta yhä kasvava kiinnostus tähtitieteeseen vei voiton. Herschel tunnetaan yhtenä kaikkien aikojen parhaana havaitsevana tähtitieteilijänä. Uranuksen löytymisen jälkeen Herschelistä tuli lopullisesti musiikin harrastaja ja tähtitieteen ammattilainen.

Maaliskuisena iltana vuonna 1781 Herschel oli tekemässä järjestelmällistä tähtiluotausta Kaksosten ja Härän tähdistön alueella tarkoituksenaan luetteloida kaikki näkyvät kaksoistähdet. Herschelillä oli käytössä itse valmistettu 15.7 cm peilikaukoputki, ja löytöhetkellä hän käytti okulaaria, joka antoi runsaat 200-kertaisen suurennuksen. Käyttämänsä kohtalaisen suuren suurennuksen vuoksi Herschelin huomio kiinnittyi tähteen, joka ei ollut pistemäinen, vaan näytti pi-

Uranus todellisissa väreissä (ylh. vas.) ja voimakkaasti värikorostettuna (oik.). Korostetussa kuvassa näkyy napa-alue punertavana, ja sen ympärillä on utuvöitä. (Uranus-lähikuvat Nasa/Voyager 2)

kemminkin kaukaiselta komeetalta, jolle ei vielä ole kehittynyt pyrstöä. Seuraavana yönä tehty havainto vahvisti epäilyn: kyseessä oli aurinkokunnan kappale, sillä se oli liikkunut toiseen paikkaan. Aluksi Herschel uskoi löytäneensä uuden komeetan.

Komeetan liike vain oli tavattoman hidasta, ja vähitellen alettiin epäillä saattaisiko kyseessä olla suuri, mutta kaukainen planeetta. Jo varsin pian löydön jälkeen kuninkaallinen astronomi ja *Nautical Almanacin* perustaja *Nevil Maskelyne* kirjoitti Herschelille epäilevänsä uutta kohdetta planeetaksi, sillä kun ei ollut mitään komeetan tunnusomaisia piirteitä.

Havaintojen lisääntyessä saatettiin yrittää laskea uuden kappaleen rataa. Periaatteessa rata voidaan laskea jo kolmen paikkahavainnon avulla, mutta käytännössä matkassa on monia mutkia. "Kilvan" voitti suomalaissyntyinen, Pietarin tiedeakatemiassa työskennellyt *Anders Lexell*. Hän ilmoitti ensimmäiset likimääräiset rataelementit: kiertoaika Auringon ympäri on lähes 83 vuotta ja etäisyys 19 tähtitieteellistä yksikköä. Kyseessä oli siis kaukana Saturnuksen takana oleva planeetta, ensimmäinen koskaan löydetty suuri aurinkokunnan kappale.

Kaikki paljain silmin näkyvät planeetat oli nimetty saman olympolaisen jumalperheen jäsenten mukaan (vaikkakin nimistä käytetään roomalaista muotoa, esim. Jupiter eikä Zeus). *Johann Elert Bode* ehdotti uudelle planeetalle nimeä Uranus. (Uranus oli Gaian (Maa) puoliso ja mm. titaani Saturnuksen isä.) Vaikka nimi näin jälkikäteen tuntuukin varsin sopivalta, kehittyi siitä parin sukupolven mittainen kiista.

Herschel itse ehdotti kuningas Yrjö III:n kunniaksi nimeä *Novum sidus Georgianum*, jonka latinaa paremmin taitavat saattoivat muotoon *Georgium Sidus* ja latinaa huonommin ymmärtävät muuttivat englanninkieliseen muotoon *The Georgian Planet*, Yrjön planeetta. Ymmärrettävistä syistä moinen ei kiehtonut ranskalaisia, jotka alkoivat kutsua planeettaa yksinkertaisesti "Herscheliksi" ja käyttivät tuota nimeä aina 1840-luvulle asti. Mutta sitkein oli Nautical Almanacin toimitus: vasta 1850 nimi vaihtui Yrjöstä Uranukseksi.

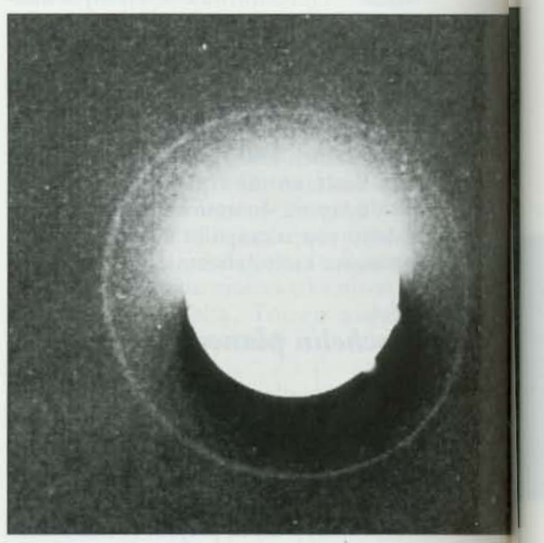
Pian ensimmäisten ratalaskujen jälkeen ryhdyttiin tutkimaan vanhoja tähtiluetteloita siinä toivossa, että sieltä löytyisi Uranus-havaintoja. Ja niitä löytyi. Ensimmäinen kuninkaallinen astronomi *John Flamsteed* oli havainnut Uranuksen vuosina 1690 ja 1712 sekä peräti neljästi vuonna 1715. *James Bradleyn*, kolmannen kuninkaallisen astronomin, havainnoista Uranus löytyi kolme kertaa, mutta kertaakaan sitä ei ollut erotettu tavallisista tähdistä.

Kyseenalaisen ennätyksen haltija kuitenkin on ranskalainen havaitsija *Pierre Charles Le Monnier* (joka kertoman mukaan oli erikoinen persoona, ei mitenkään suosittu ja joutui riitoihin kaikkien kanssa). Vuosien 1750 ja 1771 välisenä aikana Le Monnier'n muistiinpanoista löytyi kaikkiaan 12 Uranus-havaintoa, näistä kuusi yhdeksän päivän kuluessa vuonna 1769!

Nyt Uranuksen rata voitiin laskea tarkemmin. Ja sitä mukaa kuin uusia havaintoja kertyi, voitiin desimaaleja lisätä. Mutta Uranus ei seurannutkaan sille vaivalla laskettua rataa. Lopulta syyksi paljastui Uranuksen takana kiertävä tuntematon planeetta, Neptunus.

Piirteetön planeetta

Maasta kaukoputken läpi nähtynä Uranus on pieni, piirteetön, vihertävä läiskä. (Ellei Uranusta ole nähnyt luonnossa, saa siitä varsin hyvän käsityksen katselemalla puolen kilometrin päässä olevaa kuivattua hernettä.) Tammikuussa 1986 Uranuksesta saatiin ensimmäiset lähikuvat kun Voyager 2 -luotain ohitti planeetan.

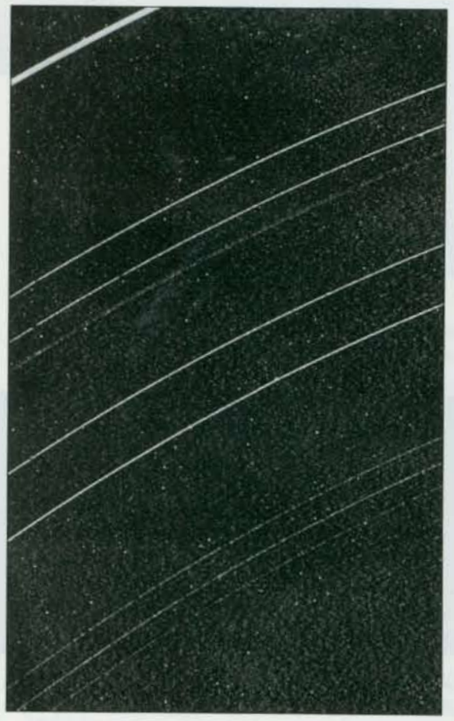


Uranuksen renkaat on saatu kuvatuksi maapallolta. Tietokoneella käsitellyssä kuvassa näkyy Uranuksen vahvin, epsilon-rengas.

Mutta luotainkuvatkaan eivät paljastaneet paljon enempää: koko planeetta on peittynyt savusumun alle. Tämä lienee syntynyt fotokemiallisten reaktioiden tuloksena metaanin pilkkoutuessa Auringon ultraviolettivalon vaikutuksesta. Syntyneet radikaalit ovat sitten muodostaneet mm. asetyleeniä ja etaania.

Voyagerin eri aallonpituusalueissa ottamat kuvat paljastavat joitakin heikkoja yksityiskohtia ja pilvivyöhykkeitä. 20. ja 45. leveysasteen välillä on havaittu heikkoja pilvimuodostelmia korkeudella, jossa paine on 1—2 baaria. Pilvet ovat metaania ja näiden pilvien avulla on voitu mitata tuulten nopeuksia Uranuksen ilmakehässä. Suihkuvirtauksissa nopeudet kohoavat 100 metriin sekunnissa ja tuulet puhaltavat planeetan pyörimissuuntaan eli päinvastoin kuin teoreettisten mallien perusteella saattoi odottaa.

Planeetan pyörimisakseli on kaikista muista planeetoista poiketen likimain ratatasossa: inklinaatio on 98°. Uranuksen 84-vuotisen kierroksen aikana kumpikin napa on yli kaksi vuosikymmentä yhtämittaisessa auringonpaisteessa ja yhtä kauan yhtämittaisessa pimeydessä.



Renkaat Voyagerin kuvaamana: ylhäältä lukien epsilon, delta, gamma, eta, beta, alfa, 4, 5 ja 6.

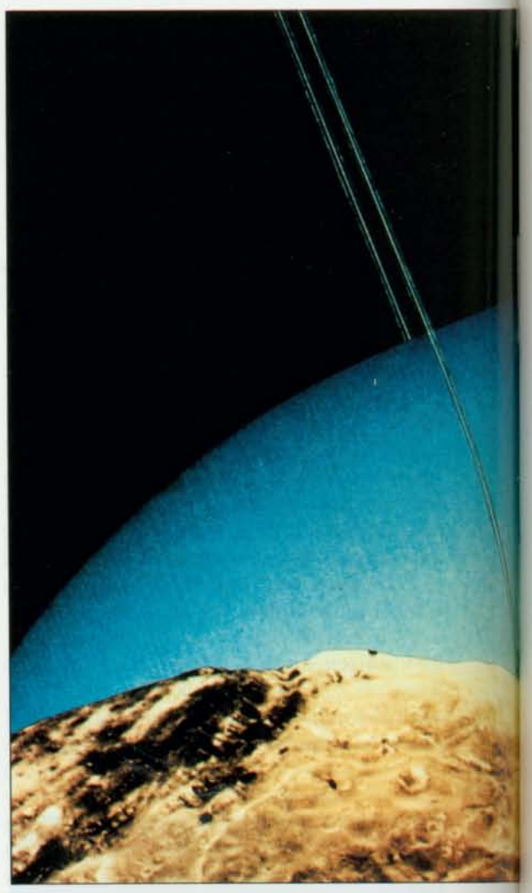
Syytä planeetan outoon asentoon ei tunneta, semminkin kun Uranuksen kuuperhe on aurinkokuntamme säännöllisimpiä. Esimerkiksi kaikki suuret kuut kiertävät Uranuksen ekvaattoritasossa.

Jos Uranus olisi jonkin kosmisen jättiläismäisen törmäyksen seurauksena muuttanut pyörimissuuntaansa, olisi kuuperhekin hajonnut tai ainakin kuut kiertäisivät nykyistä paljon epäsäännöllisemmillä radoilla. Pyörimisakselin on täytynyt olla nykyisellään jo ennen kuiden syntyä. Kuut eivät myöskään voine olla jälkikäteen siepattuja, sillä silloinkin niiden radat olisivat paljon epäsäännöllisemmät. Todennäköisimmin aivan ensimmäisten kappaleiden liittyessä toisiinsa tapahtuivat ne törmäykset, jotka määräsivät syntyvän planeetan pyörimisen suunnan. Tämän jälkeen kaikki onkin kehittynyt normaalisti.

Koska pilvet näkyvät vain heikosti, ei Uranuksen pyörähdysajasta ollut varmuutta ennen Voyagerin ohilentoa. Magneettikentän vaihteluista ja Uranuksen radiosäteilyn jaksollisuudesta pyörähdysajaksi on Voyager-havaintojen perusteella saatu 17.3 tuntia. Tämä kuvastaa planeetan sisustan pyörähdysaikaa, sillä magneettikenttä syntyy syvällä planeetan pinnan alla.

Voyager-ohilennon aikaan, vuonna 1986, Uranus oli ollut vuosikaudet eteläpuolinen kohti Aurinkoa. Silti napa-alueiden ja ekvaattorin välillä ei havaittu lämpötilaeroja, mikä kertoo pinnan alla tapahtu-

Takaapäin katsottuna Uranuksen rengasjärjestelmä näyttää erilaiselta, koska renkaiden välissä oleva hyvin hienojakoinen pöly sirottaa voimakkaasti auringonvaloa.



Uranus nähtynä Mirandan takaa. Kuvakoosteeseen on yhdistetty Voyager 2:n valokuvat Mirandasta ja Uranuksesta, ja taiteilija on piirtänyt päälle Uranuksen renkaat.

vista, lämpötilaa tasoittavista virtauksista. Ulossäteillyn lämmön perusteella on Uranuksen lämpötilaksi saatu 57 kelviniä. Uranuksen sisuksista ei virtaa kovinkaan paljon lämpöä ulos, toisin kuin esimerkiksi kaukaisemmasta Neptunuksesta.

Uranuksen läpimitta on 52 400 km ja massa 15 Maan massaa. Keskitiheys on 1.2 kertaa veden tiheys. Uranus koostuu kolmesta kerroksesta: Sisimpänä on (todennäköisesti) kiinteä kiviydin. Tätä ympäröi tuhansien kilometrien paksuinen, pääasiassa vedestä koostuva kerros. Uloimpana on vedyn ja heliumin muodostama kerros, kuten Jupiterilla ja Saturnuksella, ja aivan pinnassa tämä muuttuu Uranuksen ilmakehäksi.

Uranuksen magneettikenttä syntynee vesikerroksessa. Vesi tosin ei ole aivan samassa muodossa kuin Suomen tuhansissa järvissä. Veden ohella Uranuksen "meressä" on mm. metaania ja ammoniakkia. Tämä seos on valtavan paineen ja tuhansien asteiden lämpötilan vuoksi varsin eksoottisessa olotilassa. Vesi on hajonnut hydronium- ja hydroksidi-ioneiksi, ammoniakki ammonium-ioneiksi ja protoneiksi ja metaani protoneiksi ja hiiliatomeiksi. Seos on mitä suurimmassa määrin sähköäjohtavaa, sillä se käyttäytyy pikemminkin kuin sula suola ja sillä voi olla joitain metallisia ominaisuuksia. Tämän kerroksen virtaukset sitten synnyttävät Uranuksen magneettikentän.

Toisin kuin Maassa ja muissa planeetoissa (Neptunusta lukuunottamatta), ei Uranuksen magneettikenttä ole likimainkaan pyörimisakselin suuntainen, vaan n. 60° vinossa. Syytä ei tunneta, mutta kun ilmiö havaitaan sekä Uranuksessa että Neptunuksessa, joissa kummassakin kentän syntymekanismi on samantapainen, lienee myös syy vinoon asentoon sama.

Uranuksen ilmakehän yläosissa esiintyy revontulia, mutta näitä huomattavasti voimakkaampi on "sähköhehkuksi" nimetty ilmiö, joka revontulista poiketen näkyy planeetan päiväpuolella. Tämä ultravioletissa näkyvä hohde ulottuu jopa parin planeetan säteen päähän. Syntymekanismiksi arvellaan elektronien törmäämistä harvaan vetykaasuun. Maapallolla ei sähköhehkua ole havaittu ja Jupiterissa ja Saturnuksessa se on hyvin heikko.

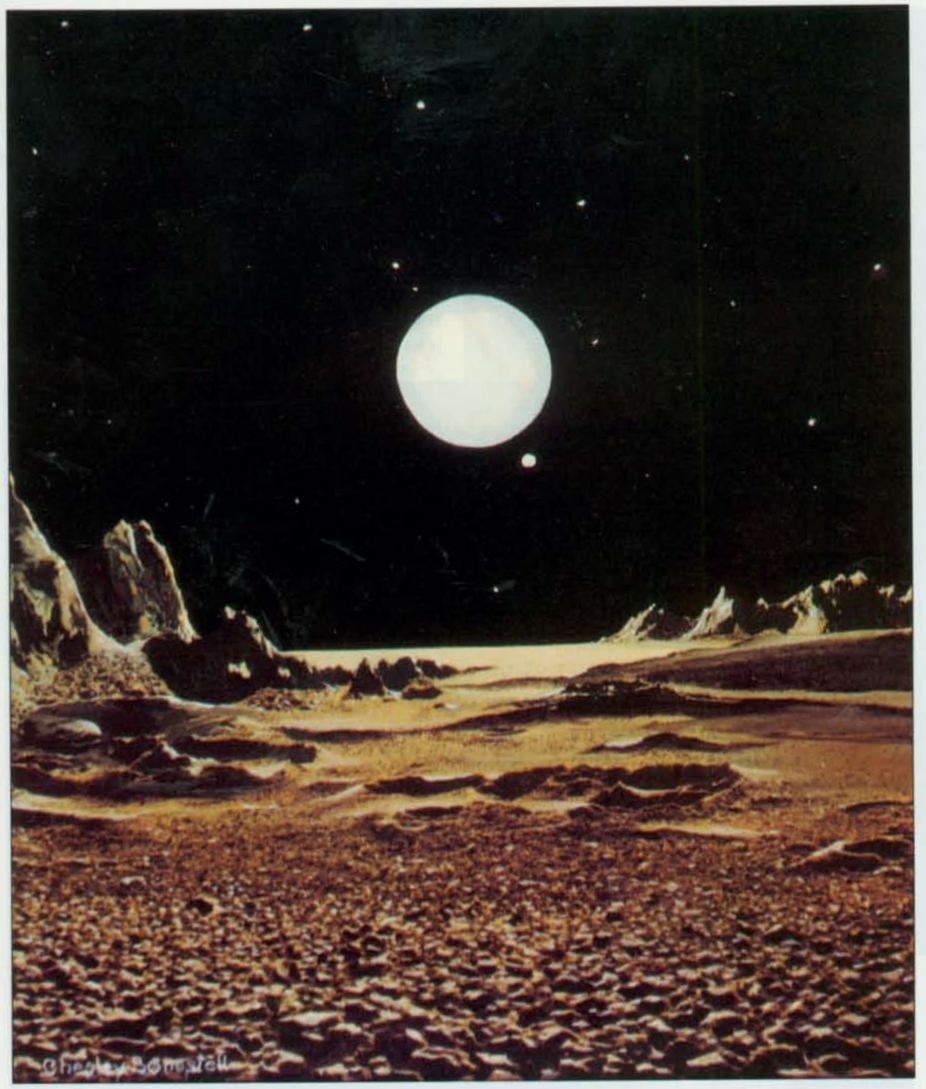
Uranuksen renkaiden yksityiskohtia saatiin selville tähdenpeittokokeella. Kahden tähden kirkkautta tutkittiin Voyager 2:n fotometrilla, kun tähdet kulkivat renkaiden takaa. Kuten Saturnuksen, myös Uranuksen renkaat koostuvat kapeista osarenkaista. Delta-rengas on eri kohdissa erilainen. (Kuva Larry Esposito, Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado)

Uranuksen renkaat

Vuoteen 1977 saakka Saturnus oli ainoa planeetta, jolta tunnettiin renkaat. Nyt tilanne on täysin päinvastainen: vuonna 1977 löytyivät Uranuksen renkaat, vuonna 1979 Jupiterilta ja lopulta vuonna 1989 myös neljänneltä jättiläisplaneetalta Neptunukselta löytyi himmeä rengasjärjestelmä. Kahta viimeistä osattiin etukäteen jo ounastellakin, mutta Uranuksen renkaat löytyivät täysin sattumalta.

Uranuksen läpimittaa on yritetty mitata useilla menetelmillä. Tarkin maanpäällisistä keinoista on tähdenpeiton hyväksikäyttäminen. Aika ajoin Uranus kulkee Maasta nähtynä jonkin tähden editse. Jos tapahtuman kesto saadaan tarkasti mitattua, saadaan tästä myös Uranuksen läpimitta selville. Tähdenpeitto vain näkyy kapealla vyöhykkeellä, jonka tarkka paikka saadaan selville vasta vähän ennen tapahtumaa.

Maaliskuussa 1977 oli tällainen otolli-

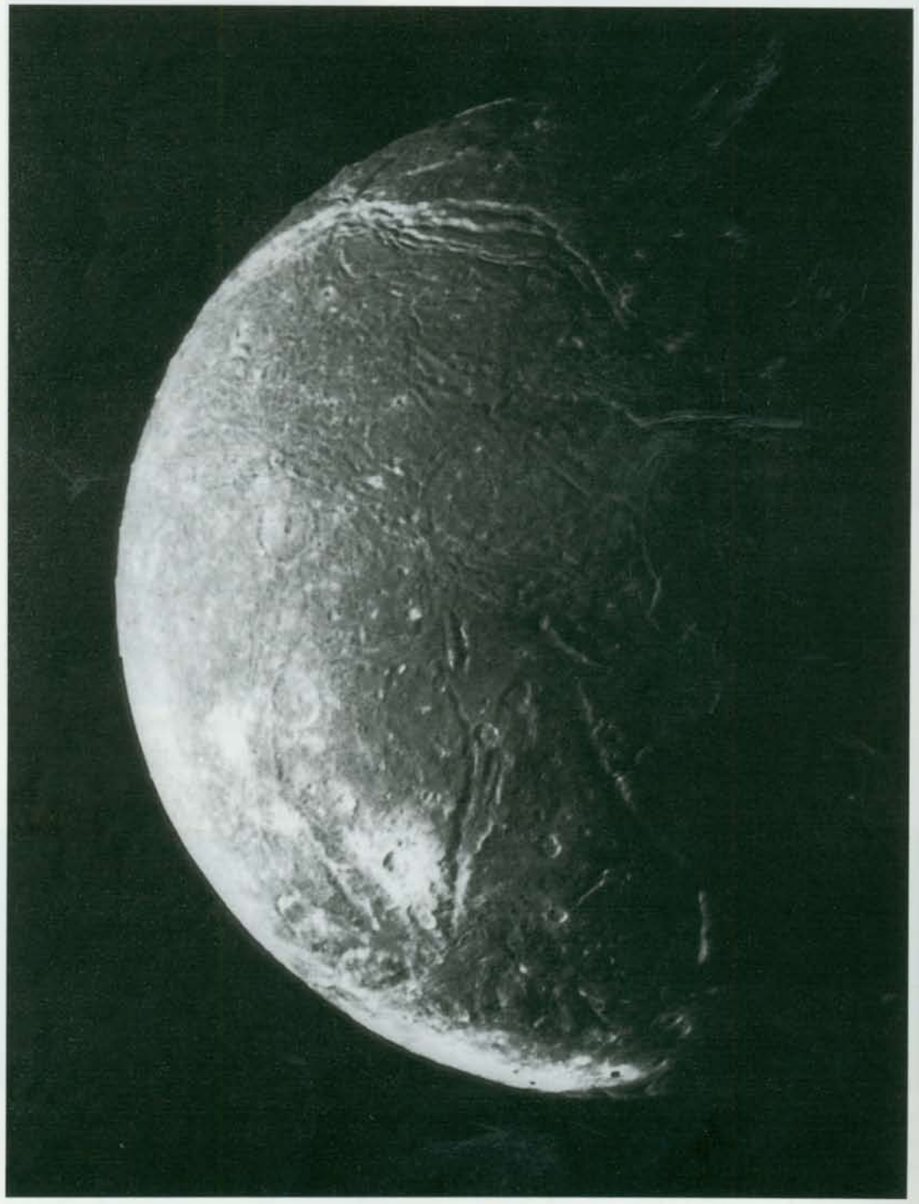


Uranus nähtynä Oberon-kuun pinnalta. Chesley Bonestellin maalaus 1950-luvulta.

nen hetki, kun Uranus peitti tähden SAO 158687. Tapahtumaa seurattiin Australiasta, Intiasta, Kiinasta, Etelä-Afrikasta sekä Intian valtameren päällä risteilevästä, lentäväksi observatorioksi muutetusta lentokoneesta.

Itse tähdenpeitto nähtiin vain lentokoneesta ja Etelä-Afrikasta, mutta myös muilla asemilla havaittiin ennen ja jälkeen varsinaisen tähdenpeittohetken tähden valon hetkeksi himmenevän ja ilmestyvän taas näkyviin. Tähti oli joutunut Uranusta kiertävien renkaiden taakse. Renkaat ovat vain muutamia satoja metrejä tai kilometrejä leveät ja niin himmeät, ettei niitä ollut muulla tavoin havaittu.

Sittemmin renkaat on saatu myös valokuvattua (kun on tiedetty niitä etsiä). Kun Uranusta havaitaan punaisessa tai lähi-infrapunavalossa, jossa metaanin absorptioviivat ovat voimakkaat ja Uranus siis näkyy suhteellisen himmeänä, voidaan suurilla kaukoputkilla, elektronisilla ilmaisimilla ja modernilla kuvankäsittelytekniikalla saada renkaat näkyviin, koska itse planeetta ei peitä niitä loisteeseensa.



Ariel-kuu on noin 1200 kilometrin läpimittainen. Pintaa peittävät kraatterit, hautavajoamat ja repeytymälaaksot.

Parhaiten renkaita voitiin tutkia Voyagerin ohilennolla. Renkaita on laskentatavasta riippuen noin yksitoista, joista viimeiset löydettiin Voyagerin välittämistä kuvista. Uranuksen renkaat ovat kaikki kapeita ja hyvin tummia; heijastuskyky on vain muutama prosentti. Ne kuuluvat niihin mustiin aurinkokunnan kohteisiin, joita 80-luvulla on löydetty useita.

Uranuksen renkaiden tummuuteen saattaa syynä olla metaanijää, joka aikaa myöten tummuu hiilenmustaksi. Laboratoriokokein on saatu selville, että jos metaanijäätä pommitetaan protoneilla, poistuu metaanista vetymolekyylejä ja jäljelle jää hiiltä. Ei kuitenkaan tiedetä, onko Uranuksen rengaskappaleissa riittävästi metaanijäätä selittämään havaittu tummuminen.

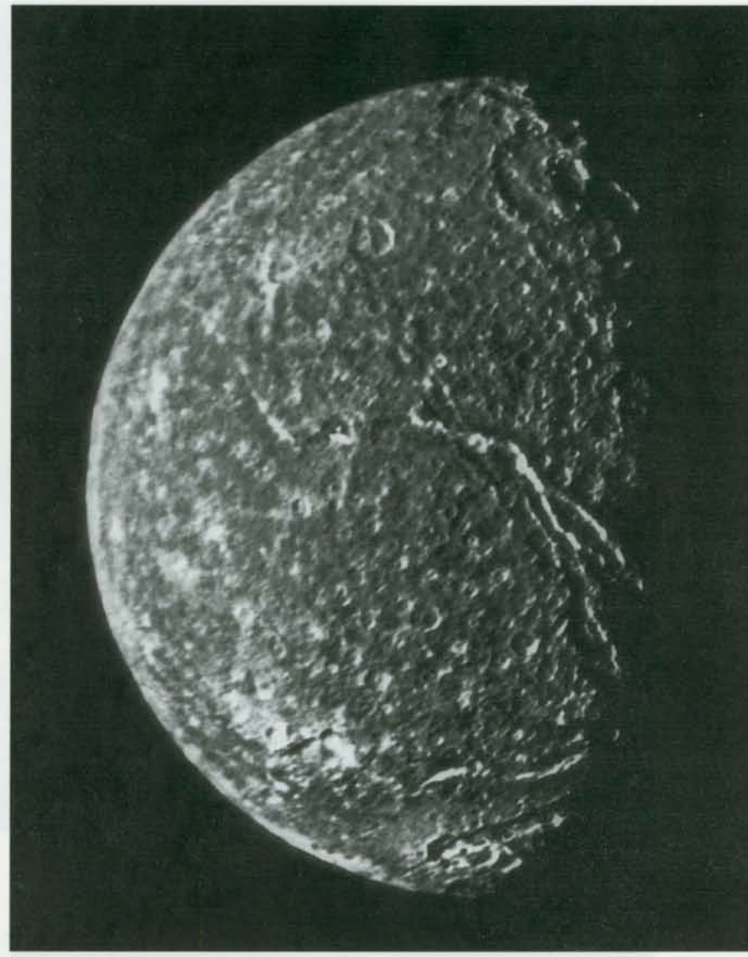
Rengaskappaleet ovat keskimäärin suurempia kuin Saturnuksen renkaissa. Koko saatiin selville havaitsemalla Voyager-luotaimen radiosignaalien heikkenemistä sen kulkiessa renkaiden taitse. Kappalten keskimääräinen koko on metrien suuruusluokkaa, eikä renkaissa juurikaan ole hienojakoista pölyä. Osa renkaista on myös hyvin teräväreunaisia. Ilmeisesti renkaiden reunan kohdalla kiertää pieniä kuita, jotka estävät niitä leviämästä. Jos kuut ovat kymmenen kilometrin läpimittaisia ja yhtä mustia kuin rengashiukkaset, ei niiden havaitsemisesta ainakaan maanpäällisin keinoin juuri ole toivoa.

Itse asiassa kaksi paimentavaa kuuta on jo löytynyt: *Cordeliaksi* ja *Opheliaksi* ristityt pienet kuut ovat uloimman ja kirkkaimman renkaan, epsilonin, molemmin puolin.

Vastavaloon katsottuna renkaat näyttävät erilaisilta, eikä niitä voi erottaa erillisinä, vaan ohutta pölyä on myös maapallon suunnasta näkyvien renkaiden välissä. Pölyä tosin on hyvin vähän. Myös joitakin lyhyitä renkaanpätkiä on nähty epsilonin ulkopuolella. Monet merkit viittaavat siihen, että Uranuksen renkaat saattavat olla suhteellisen nuoria ja että ne muuttuvat jatkuvasti.

Uranuksen kuut

Uranuksen viidestä kuusta tiedettin hyvin vähän ennen luotainlentoa. Näiden viiden lisäksi ohilennon aikana löydettiin kymmenen uutta kuuta. Kaikki uudet kuut ovat pieniä, tummia, alle sadan kilometrin läpimittaisia ja ne kiertävät Uranusta lähempänä kuin Miranda, sisin vanhoista kuista.



Titanian läpimitta on noin 1600 km. Suurimmat kuvassa näkyvät kraatterit ovat parinsadan kilometrin läpimittaisia.

Toisin kuin Saturnuksen kuut, eivät Uranuksen isot kuut ole valtavia jääpalloja, vaan niissä on jopa puolet kiveä. Keskitiheys on luokkaa 1.5–1.7 kertaa veden tiheys.

Oberon on uloin Uranuksen kuista. Läpimitaltaan se on 1 550 km, siis toiseksi suurin. Sen pintaa täplittävät suuret kraatterit, ja joistakin kraattereista lähtee vaaleita säteittäisiä juovia. Joidenkin suurten kraatterien pohja on tumman aineen peitossa. Tämä saattaa olla seurausta "vulkaanisesta" toiminnasta, jossa kuoreen syntyneistä halkeamista pursuaa "likaista" vettä kraatterin pohjalle ja sitten jäätyy sinne.

Suurin kuista on *Titania*, läpimitaltaan 1610 km. Pinnalla on kraattereita kuten Oberonissakin, mutta niiden lisäksi siellä on satoja kilometrejä pitkiä kanjoneita tai

Paras Voyagerin kuva Umbrielista. Pinta on kraatterien peittämä. Ylhäällä näkyy kirkas rengas, jonka läpimitta on 80 km. Umbrielin halkaisija on noin 1200 km.

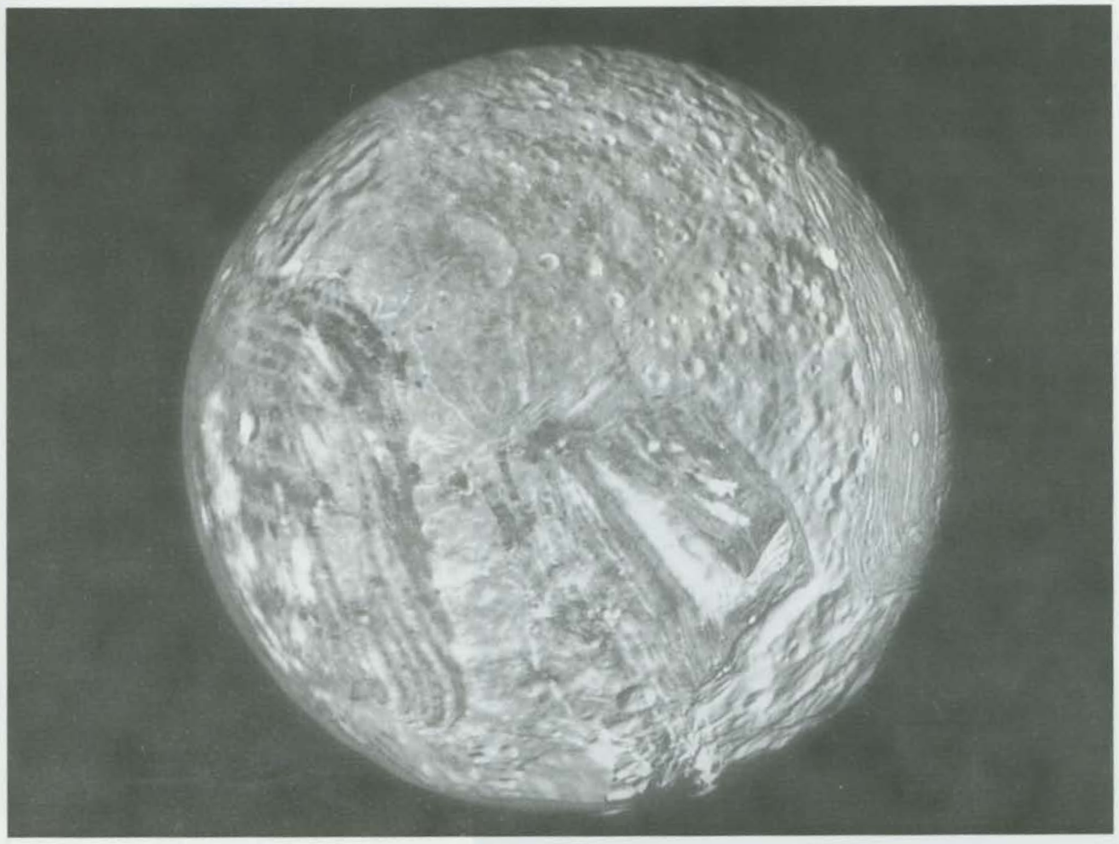
repeytymälaaksoja. Ne ovat saattaneet syntyä pinnan alla olleen veden jäätyessä. Jää vaatii suuremman tilan kuin vesi, joten kuu pullistui ja pintaan repeytyi railoja.

Seuraava kuu, *Umbriel*, on tummin suurista kuista, heijastuskyky on alle 20 %. Sen kraatterinen pinta on vanhaa, eikä Umbrielissa näy merkkejä tektonisesta toiminnasta. Metaanijäästäkään ei ole havaittu merkkejä, joten metaanijään tummuminen ei voi selittää pinnan väriä. Edes kraattereista ei lähde vaaleampia roiskeita, joten pinnan allakin on yhtä tummaa ainetta, tai sitten tummuminen on tapahtunut vasta kraatterien synnyn jälkeen. Joidenkin kraatterien pohja on ympäristöä vaaleampi.

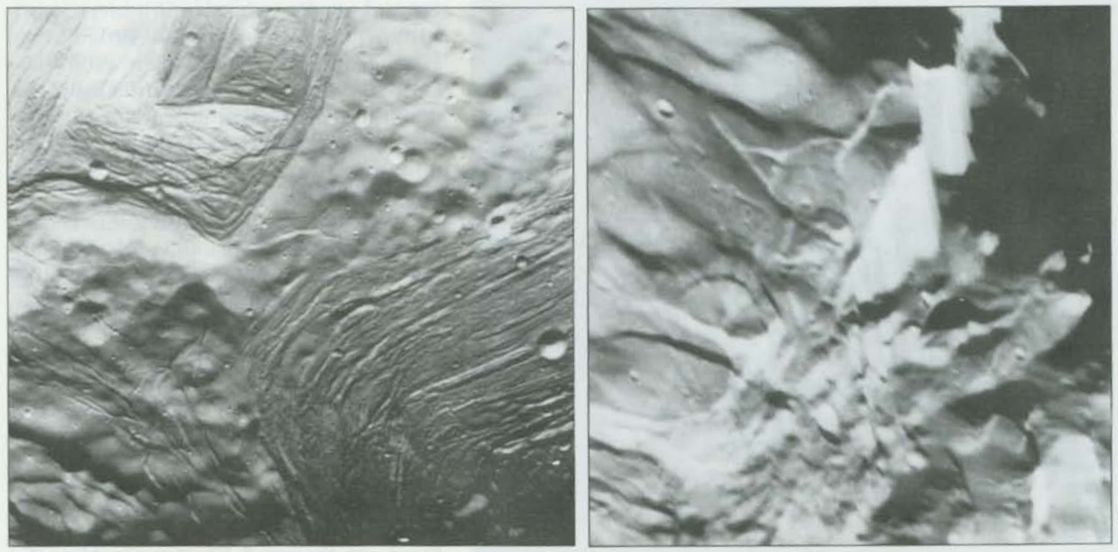
Ariel on toiseksi sisin vanhoista kuista. Sen pinta on huomattavasti ulompia kuita monimuotoisempi. Hyvin suuria ja vanhoja kraattereita ei ole, pienempiä on sen sijaan paikoitellen runsaastikin. Näillä alueilla on suuria, tasapohjaisia laaksoja, joista jotkut näyttävät virtaavan aineen kaivertamilta. Vesi tai jää ei ole voinut olla kyseessä, sillä Arielin lämpötilassa jää on kivikovaa. Yhtenä mahdollisuutena on metaani tai ammoniakki, jopa hiilimonoksidia (häkä) on ehdotettu, sillä se on tuossa lämpötilassa nestettä.

Sisin vanhoista kuista, *Miranda*, on vain vajaat 500 km läpimitaltaan. Sillä on kuitenkin ollut Uranuksen kuista kaikkein aktiivisin menneisyys. Osa pinnasta on vanhaa, kraattereiden täplittämää, osa uutta, jossa on varsin monimuotoisia piirteitä. Miranda on aurinkokuntamme vaikeimmin ymmärrettäviä kappaleita, sillä valtaisat kanjonit, harjut ja suuret suorakulmion muotoiset alueet eivät suinkaan ole voineet syntyä itsestään. Esihistoriassa tapahtunut suuri törmäys saattaisi selittää osan piirteistä, mutta ei suinkaan kaikkea. Miranda on edelleen suuri arvoitus.

Uranuksen uloin kuu Oberon on läpimitaltaan runsaat 1500 kilometriä. Vasemmassa alaosassa näkyy kuun reunalla yli 20 km korkea vuori. Kuvasta ei erotu yhtä pieniä yksityiskohtia kuin muista kuista, koska Voyager ohitti Oberonin kauempaa.

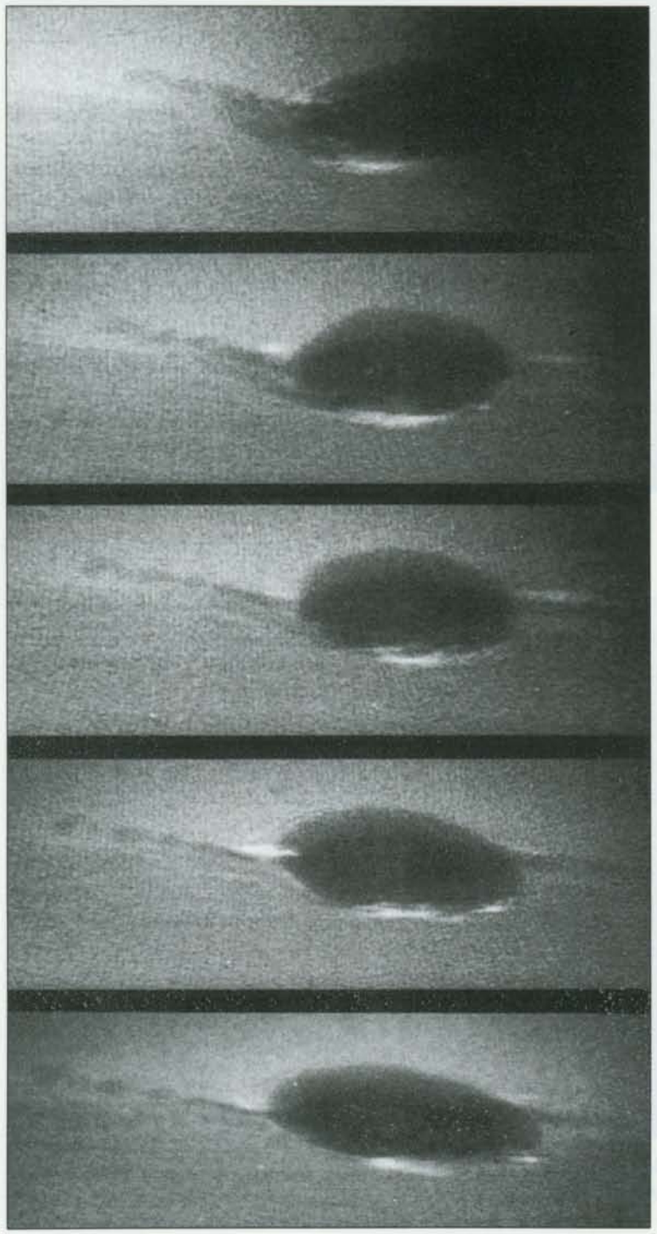


Kokovartalokuva Mirandasta ja sen ihmeellisistä pinnanmuodoista. Kuun läpimitta on noin 500 kilometriä.



Kaksi kuvaa Mirandan pinnalta. Vasemmalla salaperäisiä uurteita, oikealla noin 10 km korkea pystysuora kallioseinämä. Mirandan painovoima on niin heikko, että huipulta pudotettu kivi olisi vasta viiden minuutin päästä kallion juurella.

Kaukainen Neptunus



Neptunuksen Suuren tumman pilkun muodonmuutokset viiden peräkkäisen kierroksen aikana. Kuvat otti Voyager 2 lähestyessään planeettaa elokuussa 1989. Huomaa muutokset varsinkin pilkun vasemmassa reunassa. Pilkun pituus on noin 30 000 kilometriä.

Neptunus on uloin jättiläisplaneetoista. Vaikka se on likimain Uranuksen kokoinen, poikkeaa se sekä ulkonäöltään että monilta muiltakin ominaisuuksiltaan Uranuksesta. Vuonna 1989 Voyager 2 -luotain ohitti Neptunuksen ja suuri osa nykyisistä tiedoista on peräisin tästä ohilennosta.

Ennen Voyager-ohilentoa Neptunus tunnettiin varsin huonosti; jopa sen pyörähdysaika oli epävarma. Tähdenpeittojen ansiosta läpimitta sentään tiedettiin tarkasti. Epäiltiin myös, että Neptunuksella on ohuet, katkonaiset renkaat, sillä joissakin tähdenpeitoissa tähti oli pimentynyt hetkeksi ennen tai jälkeen varsinaisen peiton. Kuita Neptunukselta tunnettiin kaksi; Voyager löysi kuusi uutta.

Taivaallinen kellokoneisto

Uranuksen löytymistä seuranneet vuosikymmenet olivat kiihkeän tutkimuksen aikaa. Aiempien havaintojen avulla laskettu Uranuksen rata ei kuitenkaan täsmännyt uusien havaintojen kanssa: Uranus poikkesi jatkuvasti radaltaan. Ero oli niin merkittävä, ettei se voinut johtua havainto- tai laskuvirheistä.

Uranustahan oli havaittu useita kertoja ennen vuotta 1781, ja näitä paikkahavaintoja käyttäen rata saatettiin laskea huomattavasti tarkemmin kuin pelkästään vuoden 1781 jälkeen tehdyistä havainnoista. Kun Jupiterin ja Saturnuksen aiheuttamat häiriöt otetiin huomioon, voitiin Uranuksen tuleva rata ennustaa. Uranus vain tuntui vähät välittävän moisista

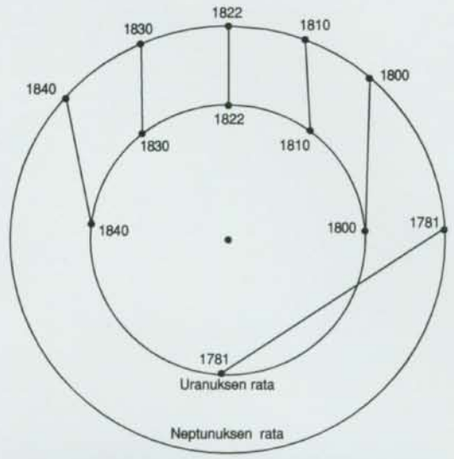
ennusteista ja 1830-luvulle tultaessa oli selvää, että jotain oli vialla. Ero lasketun ja havaitun paikan välillä oli kasvanut parhaissakin ennusteissa puoleen kaariminuuttiin.

Syytä poikkeamiin ei löydetty; jopa Newtonin vetovoimalaista yritettiin etsiä virheitä. Tuntematonta planeettaakin epäiltiin. Englannissa tähtitieteen harrastajana tunnettu *Thomas John Hussey* kirjoitti vuonna 1834 *Sir George Airylle* (joka seuraavana vuonna nimitettiin kuninkaalliseksi astronomiksi) ja esitti, että ero selittyy Uranuksen takana olevan tuntemattoman kappaleen avulla. Airy ei tähän uskonut, vaan arveli virheiden korjautuvan parempien havaintojen myötä.

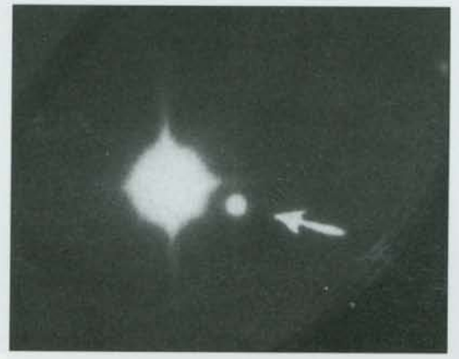
Oli myös niitä, jotka vakaasti uskoivat tuntemattoman planeetan olemassaoloon. Kaksi lahjakasta matemaatikkoa, Englannissa *John Couch Adams* ja Ranskassa *Urbain Jean Joseph Le Verrier* ryhtyivät toisistaan tietämättä tutkimaan ongelmaa matemaattisesti. Heidän tarkoituksenaan oli laskea tuntemattoman planeetan paikka Uranuksen ratahäiriöiden avulla.

Newtonin vetovoimalain mukaan kaikki massat vaikuttavat toisiinsa ja voima on suoraan verrannollinen kappalten massoihin ja kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön. Aurinko hallitsee planeettakunnan liikettä, mutta planeetat vaikuttavat myös toisiinsa. Vaikutus on varsin pieni, mutta havaittava, ja juuri tämän tiedon avulla Adams ja Le Verrier yrittivät löytää Uranuksen havaitusta liikkeestä "taaksepäin" laskemalla tuntemattoman kappaleen paikan. Matemaattisesti ongelma on vaikea, ja tilannetta mutkisti myös se, ettei uudesta planeetasta tiedetty mitään, ei sen paremmin massaa kuin etäisyyttäkään.

Vuoden 1845 loppupuolella sekä Adams että Le Verrier saivat valmiiksi ensimmäiset ennusteensa, mutta sekä Englannissa että Ranskassa suhtauduttiin yllättävän penseästi herrojen aikaansaannoksiin eikä vakaviin etsintäyrityksiin ryhdytty. Vasta seuraavan vuoden kesällä, kun Airy näki Le Verrier'n Ranskan Tiedeakatemialle esittämät laskelmat, hän kirjoitti Cambridgen observatorion johtajalle *James Challisille* pyytäen tätä aloittamaan etsinnät. Challis ryhtyi toimeen vitkastellen ja varsin haluttomasti,

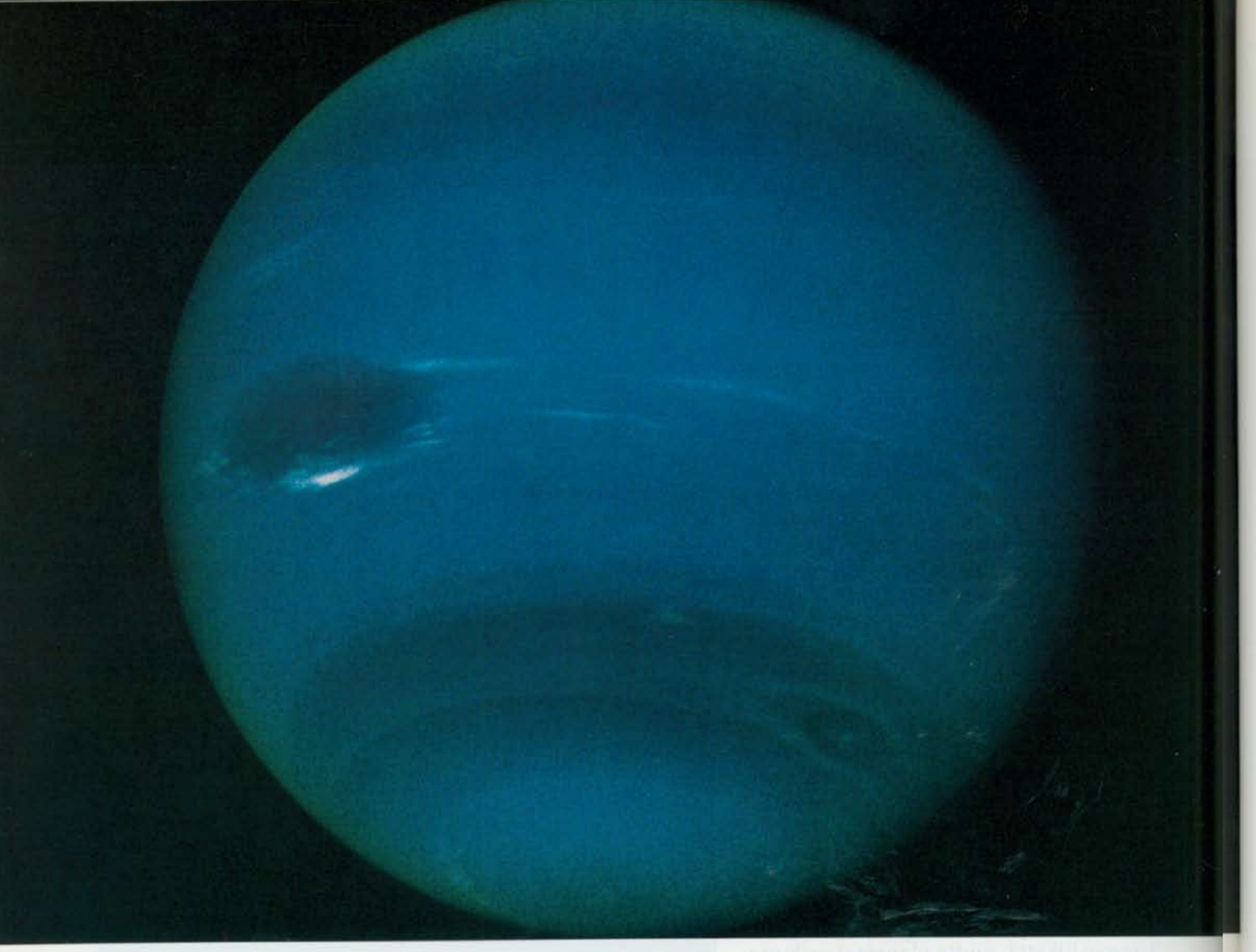


Uranus kulki Neptunuksen ohi 1800-luvun alussa, ja siksi planeetat häiritsivät toistensa liikettä.



Neptunus ja sen suurin kuu Triton Maasta otetussa kuvassa (vas.).

Chesley Bonestellin piirroksessa on Neptunus nähtynä Tritonin lumiselta pinnalta.



Neptunus kuvattuna lähestyvästä avaruusluotaimesta. (Neptunus-kuvat Nasa/Voyager 2).

vaikka sekä hänellä että Airylla oli kuukausia ollut hallussaan Adamsin laskelmat, jotka olivat yhtäpitävät Le Verrier'n tulosten kanssa.

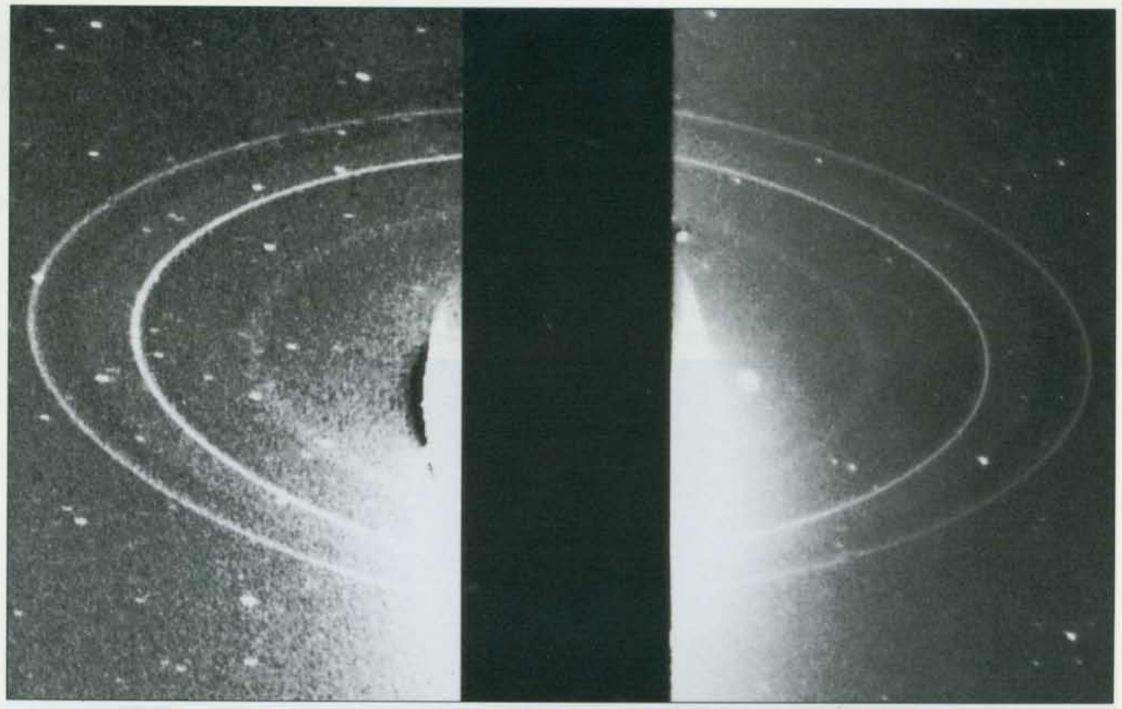
Ranskassa Le Verrier tuskastui lopulta ja kirjoitti Berliinin observatorioon *Johann Gottfried Gallelle*, joka vuotta aiemmin oli lähettänyt väitöskirjansa Le Verrier'lle. Kiitoskirjeessään Le Verrier mainitsi laskelmistaan ja pyysi Gallea aloittamaan etsinnät. Jo samana päivänä kun kirje saapui sai Galle observatorion esimieheltä *Johann Franz Enckeltä* luvan etsintöjen aloittamiseen. Samana iltana, syyskuun 23. päivänä vuonna 1846, löytyi planeetta Neptunus.

Gallella oli käytössään Berliinissä laadittu uusi tähtikartta, jonka avulla hän apulaisensa *Louis Heinrich d'Arrestin* kanssa kävi läpi kaikki tähdet Le Verrier'n ilmoittaman paikan läheltä. Vasta muutamia tähtiä oli tarkistettu, kun löytyi kahdeksatta magnitudia oleva kohde, jota ei ollut kartassa. Seuraavana yönä varmistui, että kyseessä oli etsitty planeetta, sillä se oli liikkunut hieman tähtien suhteen. Löytöpaikka poikkesi vain runsaan Kuun läpimitan verran Le Verrier'n ennustuksesta.

Kuultuaan Gallen löydöstä ryhtyi Challis käymään läpi parin aikaisemman kuukauden havaintojaan. Hän totesi, että oli nähnyt planeetan parikin eri kertaa sitä kuitenkaan tunnistamatta. Kunnia näytti auttamatta luiskahtavan manner-Eurooppaan. Mutta vaikeaa oli Ranskassakin.

Ranskalaisten ärtymystä tapahtuneesta varmasti lisäsi se, että planeetan löytäjä oli saksalainen. Ja Airy pahensi tilannetta ilmoittamalla, että joku tuntematon herra Adams Cambridgesta oli päätynyt Le Verrier'n kanssa samoihin tuloksiin. Le Verrier oli julkaissut laskelmansa, mutta onnettomuudekseen Adams oli kertonut omistaan vain kouralliselle ihmisiä, jotka puolestaan olivat pitäneet tietonsa ominaan. Kun Challis vielä löytäjän oikeudella ehdotti uudelle planeetalle nimeä *Oceanus*, oli katkera sanasota syttynyt.

Kiivaimmat hyökkäykset kohdistuivat Airyyn ja Challisiin, jotka myös omassa maassaan saivat arvostelua osakseen (eikä aivan syyttäkään!). Aikaa myöten tun-



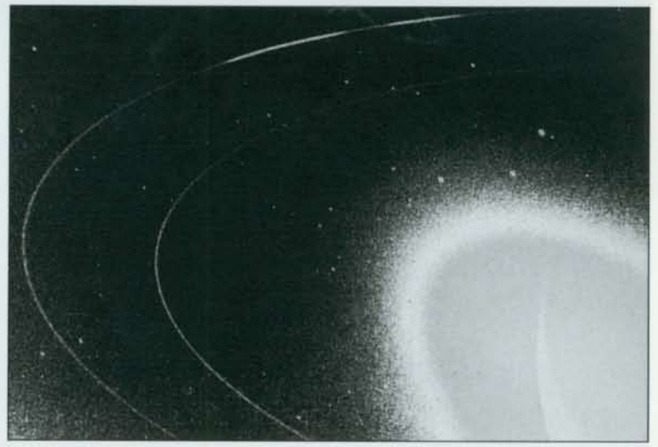
Neptunuksen renkaat takaapäin kuvattuna. Näkymä on yhdistetty kahdesta noin 10 minuutin valotuksella otetusta kuvasta.

teet vähitellen viilenivät Adamsin laskelmien tullessa julkisuuteen. Adams ja Le Verrier onnistuivat pysymään pahimman selkkauksen ulkopuolella, ja kun he ensi kerran vuonna 1847 tapasivat, kohtaaminen tapahtui sulassa sovussa.

Pian planeetan löytymisen jälkeen Le Verrier ehdotti sille nimeä *Neptunus*. Nimi hyväksyttiin niin nopeasti, että kun Le Verrier paria viikkoa myöhemmin katui valintaansa ja yritti saada planeetan nimetyksi itsensä mukaan, oli jo myöhäistä. (Uranuksen nimikiista oli edelleen käynnissä, vaikka planeetan löytymisestä oli kulunut jo yli viisi vuosikymmentä.)

Neptunuksen löytyminen oli yksi taivaanmekaniikan suurimmista riemuvoitoista ja varmistus Newtonin lakien pätevyydestä. Taivaallisen kellokoneiston salat olivat paljastumassa.

Neptunuksen todellinen rata osoittautui toisenlaiseksi kuin Adams ja Le Verrier olivat ennustaneet. Ensinnäkään etäisyys ei ollut Titiuksen–Boden lain mukainen 38 AU, vaan "vain" 30 AU, ja massa vastaavasti 40 Maan massan sijasta vajaat 20.



Neptunuksen kirkkaimmissa renkaissa on voimakkaita tihentymiä, joiden syntyä ei osata varmuudella selittää.

Miksi sitten kummatkin ennusteet antoivat paikan lähestulkoon oikein? Tämä johtui ennen kaikkea Uranuksen ja Neptunuksen keskinäisestä asemasta löytöä edeltäneinä vuosikymmeninä. Edes väärä oletus planeetan etäisyydestä ei johtanut kovin suureen virheeseen suunnassa. Mutta jos Neptunus olisi ollut toisella puolen rataansa, olisi sen vaikutus Uranukseen ollut 1800-luvun alussa varsin pieni ja planeettaa tuskin olisi löydetty vuosikymmeniin.

Myös Neptunus oli havaittu muutamia kertoja ennen löytymistään. Varhaisin

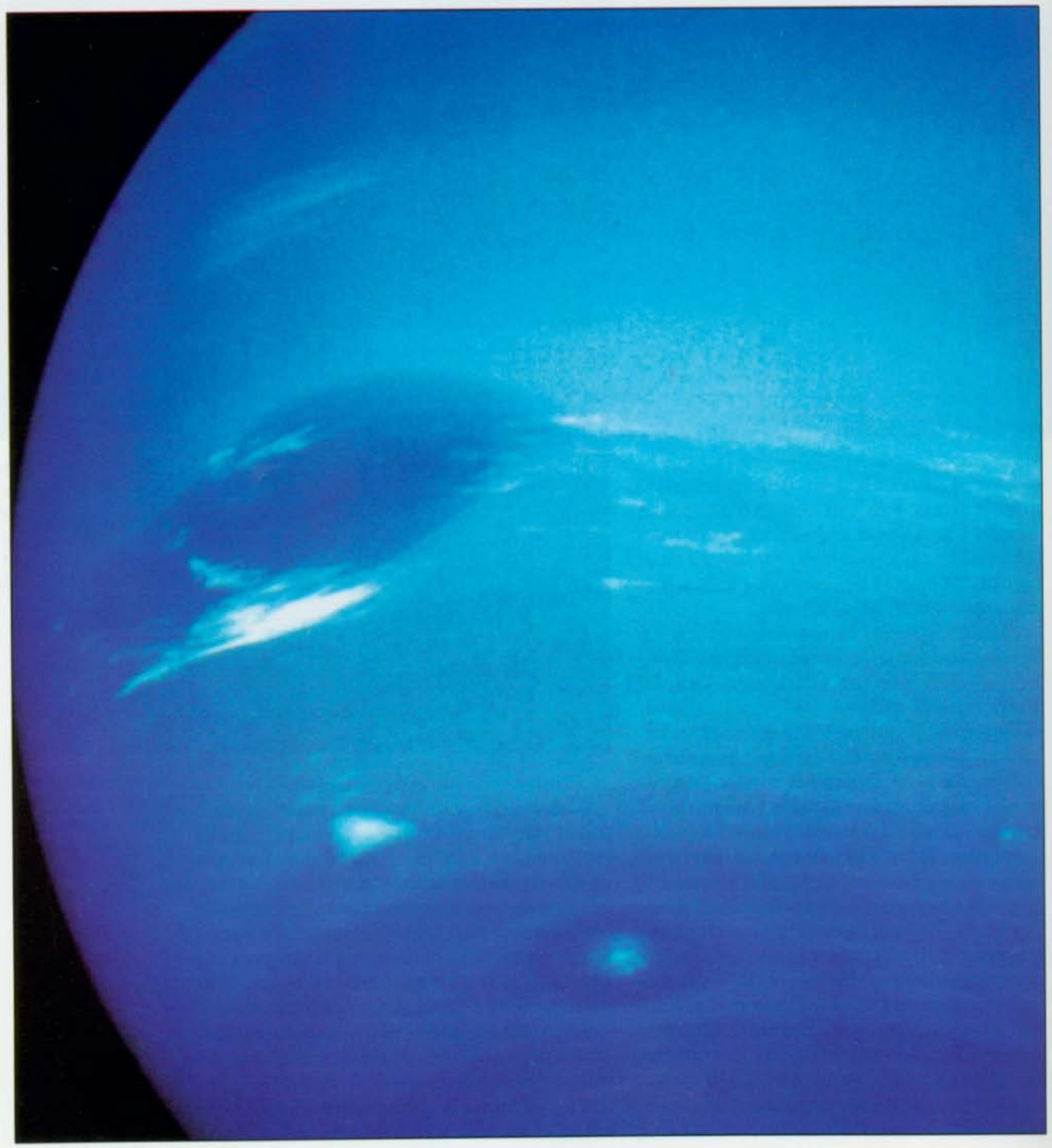
havainto on jo vuodelta 1612, jolloin *Galileo Galilei* näki Neptunuksen. Se oli tuolloin hyvin lähellä Jupiteria. Galilei merkitsi muistiinpanoihinsa lähellä Jupiteria olleen "liikkuvan" tähden, mutta jostain syystä ei tarkistanut havaintoaan.

Yksinkertainen jättiläinen

Neptunusta ei näe paljain silmin, mutta jo tavallisella kiikarilla se erottuu pienenä, tähdenkaltaisena valopisteenä. Toisaalta suurillakaan kaukoputkilla ei erota Neptunuksen pinnanpiirteitä, sillä planeetta on n. 30 tähtitieteellisen yksikön päässä ja näkyy vain parin kaarisekunnin suuruisessa kulmassa.

Ulkonäöltään Neptunus poikkeaa Uranuksesta. Uranushan on lähes piirteetön, koska pilvet peittyvät udun alle. Tällaista utua Neptunuksessa ei ole, joten se muistuttaa pikemminkin Jupiteria voimakkaine tuulineen ja pilkkuineen. Tuulten nopeus on jopa 400 m/s verrattuna planeetan sisempien osien pyörimisnopeuteen. Tuulet eivät kuitenkaan ole samalla tavalla vyöhykkeisiä kuin Jupiterissa, vaan ne puhaltavat pääasiassa planeetan pyörimissuuntaa vastaan.

Lähikuva Neptunuksen Suuresta tummasta pilkusta. Sen eteläpuolella on Skootteriksi ristitty valkoinen pilvi ja pienempi tumma pilkku, jolla on valkea keskus.



Pilvien liikkeitä seuraamalla Neptunuksen pyörähdysajaksi saadaan 16 ja 18 tunnin välillä olevia aikoja. Yllättäen lyhyin pyörähdysaika näyttäisi olevan napa-alueilla. Neptunuksen magneettikentän muutosten ja radiosäteilyn vaihteluiden avulla on sisuksen pyörähdysajaksi saatu 16 tuntia 7 minuuttia. Tämä on sama kuin nopeimpien havaittujen pilvien kiertoaika.

Neptunuksen pinnalla on samantapaisia pilkkuja kuin Jupiterissa. Suurin niistä, eteläisellä pallonpuoliskolla oleva "Suuri tumma pilkku", on pisimmältä kohdaltaan noin 30 000 km, siis täysin verrattavissa Jupiterin Suureen punaiseen pilkkuun. Pilvet kiertävät Suuren tumman pilkun ympäri vastapäivään n. 16 vuorokaudessa. Pilvien kiertosuunta kertoo, että pilkku on valtava korkeapaineen alue. Voyager-ohilennon aikana löytyi myös muita, pienempiä pilkkuja, mutta kuten Jupiterissakin, ne lienevät suurta pilkkua lyhytikäisempiä.

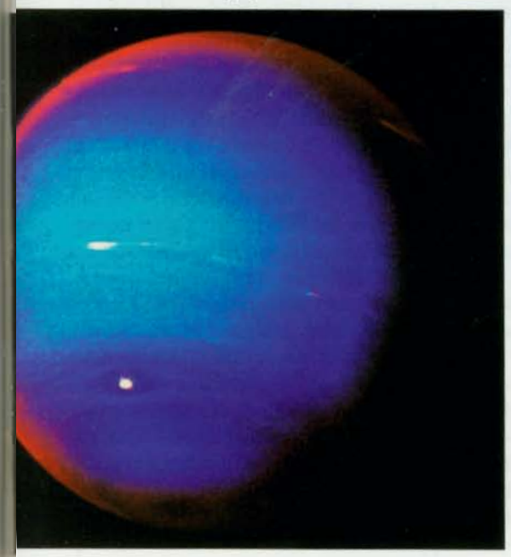
Neptunuksen ilmakehä on pääasiassa vetyä ja heliumia, mutta seassa on vähintään prosentti metaania. Juuri metaani aiheuttaa planeetan vihertävän värin: Metaanilla on voimakas absorptioalue punaisessa valossa. Niinpä planeetasta heijastuneesta valosta punainen väri on kadonnut ja jäljelle jäänyt osa näyttää vihertävältä.

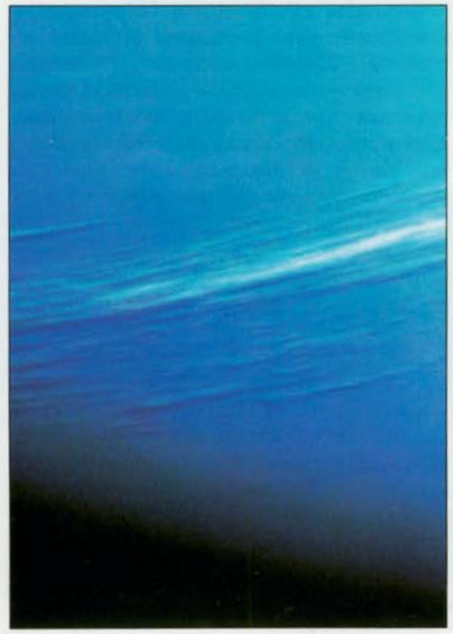
Uloimpana ilmakehässä on ohuita, cirrusta muistuttavia pilviä, joissa saattaa olla smogin tapaisia, fotokemiallisesti syntyneitä yhdisteitä. Niitä muodostuu kun metaani auringonvalon vaikutuksesta pilkkoutuu ja syntyneet radikaalit reagoivat keskenään muodostaen mm. asetyleeniä ja etaania. Alemmassa ilmakehässä, runsaan baarin paineessa, metaani itsessään kiteytyy muodostaen pilviä, ja lopulta n. 3 baarin paineessa alkavat paksut, läpinäkymättömät pilvet, joissa on mm. vetysulfidia.

Neptunuksen ekvaattori- ja napa-alueet ovat muita osia lämpimämpiä. Neptunuksen lämpötilaksi saadaan planeetan säteilemän lämpösäteilyn perusteella 59 kelviniä, ts. Neptunus säteilee 2.7 kertaa enemmän kuin se saa Auringosta. Lämmön siirtymismekanismia planeetan sisältä kohti pintaa ei tällä hetkellä varmasti tiedetä. Neptunuksen energiataloudella on osuutensa myös planeetalla vallitseviin koviin tuuliin ja ilmeisesti myös magneettikentän syntyyn.

Neptunuksen magneettikenttä on samaan tapaan kallellaan planeetan pyörimisakseliin nähden kuin Uranuksellakin. Vaikka Neptunuksen pyörimisakseli on

Värikorostetussa kuvassa Neptunuksen pinnan yllä leijuva utu näkyy punaisena.





Neptunuksen ilmakehässä on ylimpänä vaaleita metaanipilviä. Niiden varjot näkyvät alempien pilvien päällä.

Kaksi Voyagerin löytämää kuuta, yllä 1989N1 ja sen vieressä 1989N2.

vain n. 29° kallellaan, on magneettikenttä peräti 47° vinossa pyörimisakseliin nähden. Lisäksi kentän lähde ei ole planeetan keskipisteen suhteen symmetrisesti, vaan kenttä näyttää syntyvän jossain säteen puolivälin tienoilla. Koska kenttä ei ole symmetrinen, vaihtelee sen voimakkuus Neptunuksen pilvien yläosissa 1.2 ja 0.06 gaussin välillä. Magneettinen pohjoisnapa on planeetan pohjoisella pallonpuoliskolla, joten kenttä on vastakkaissuuntainen kuin Maan magneettikenttä.

Sisäiseltä rakenteeltaan Neptunus lienee varsin yksinkertainen. Keskellä on noin 16 000 kilometrin läpimittainen kivinen ydin, jota ympäröi vedestä ja nestemäisestä metaanista koostuva sohjo. Uloimpana on ilmakehä. Neptunuksen keskitiheys on 1.64 kertaa veden tiheys, eli se on tihein jättiläisplaneetoista.

Neptunuksen ydin voi olla kiinteä tai nestemäinen, mutta magneettikenttä ei synny siellä, vaan ydintä ympäröivässä vesikerroksessa. Todennäköisesti vesi on ionisoitunut niin, että se johtaa hyvin sähköä. Tässä kerroksessa kulkevat virrat synnyttävät sitten magneettikentän. Ulospäin pyrkivä lämpö yhdessä planeetan pyörimisen kanssa saa veden liikkeelle, ja näin muodostuu magneettikentän synnyttävä dynamo.

Neptunuksen magnetosfääri on lähestulkoon tyhjä. Siellä ei ole varattuja hiukkasia kuin n. 1/3000 siitä, mitä niitä on Jupiterin magnetosfäärissä. Osasyynä varmasti on planeetan suuri etäisyys Auringosta. Tästä huolimatta Neptunuksessakin esiintyy äärimmäisen heikkoja revontulia.

Kuut ja renkaat

Joidenkin tähdenpeittojen yhteydessä havaittiin tähden valon himmenevän ennen tai jälkeen varsinaisen tapahtuman. Himmentymistä ei nähty aina, eikä myöskään kaikilta havaintopaikoilta, joten Neptunuksen renkaiden oletettiin olevan hyvin ohuita ja jopa katkonaisia.

Auringon suunnalta katsottaessa näin näyttäisikin olevan, mutta vastavaloon renkaat näyttävät varsin yhtenäisiltä. Tämä johtuu siitä, että rengashiukkaset ovat hyvin pieniä, jopa valon aallonpituuden suuruusluokkaa. Tällaiset pienet pölyhiukkaset sirottavat valoa tehokkaammin eteen- kuin taaksepäin. (Saman ilmiön voi havaita aurinkoisena päivänä kun aurinko paistaa ikkunasta sisään: ikkunaa kohti katsottaessa näkyy suuri määrä pölyhiukkasia, vaikka muussa suunnassa auringonpaisteisissa kohdissa pölyä ei näy.)

Renkaista kaksi on selvää ja kapeaa. Niiden etäisyys planeetan keskipisteestä on n. 53 000 ja 62 000 km. Näiden puolivälissä on heikko rengas, joka saattaa olla ulkoreuna leveässä pölyvyöhykkeessä. Vyöhyke ulottuu sisempään kirkkaaseen renkaaseen saakka. Lähempänä planeettaa on vielä parintuhannen kilometrin levyinen heikko pölyrengas.

Ulompi kirkas rengas ei ole tasavahvuinen, vaan siinä on himmeämpiä ja kirkkaampia kohtia, ja juuri tämä lienee nähty maanpäällisissä tähdenpeittohavainnoissa. Rengaskappalten epätasaisen jakautuman syytä ei tiedetä.

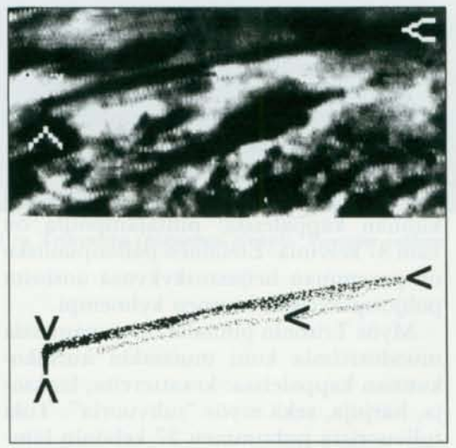
Salaperäisiä jääkuoppia Neptunuksen suurimman kuun Tritonin pinnalla.

Rengashiukkasten epätasaista jakautumaa tuskin voi selittää sillä, että ne sattumalta olivat näin juuri Voyager-ohilennon aikaan. Jos esimerkiksi pieni kuu hajoaisi pirstaleiksi, kestäisi osasten jakautuminen tasaiseksi renkaaksi vain muutaman vuoden. Mahdollisesti tihentymien sisässä tai välittömässä läheisyydessä on muutaman kilometrin läpimittaisia kappaleita, joiden vetovoima saa aikaan paikallisen tihentymän.

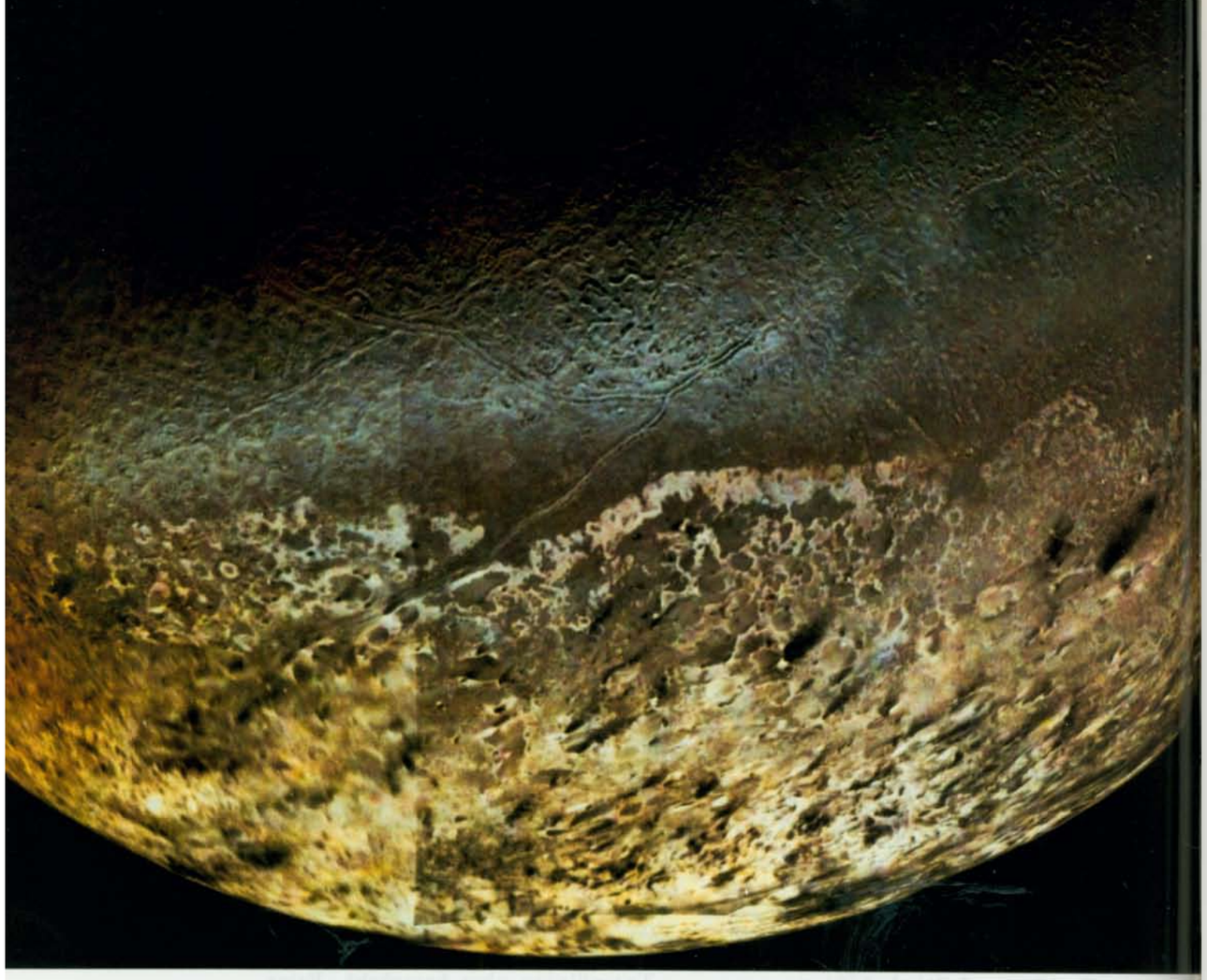
Aiemman kahden kuun lisäksi Voyager-luotaimen lähettämästä kuva-aineistosta löydettiin kuusi uutta kuuta. Ne kiertävät Neptunusta lähempänä kuin vanhat kuut *Triton* ja *Nereid*. Osa uusista kuista näyttää liittyvän renkaisiin aivan kuten Saturnuksellakin ja ne muodostavat säännöllisen, lähestulkoon Neptunuksen ekvaattoritasossa olevan järjestelmän. Kuut ovat hyvin tummia ja heijastavat vain muutaman prosentin niihin osuvasta valosta.

Kaikki uudet kuut kiertävät Neptunusta Rochen rajan sisäpuolella. Ne eivät kuitenkaan hajoa pirstaleiksi pienen kokonsa vuoksi. Suurta kuuta ei voisikaan olla näin lähellä planeettaa. Triton ja Nereid sen sijaan ovat edellisistä täysin poikkeavilla radoilla. Triton kiertää ympyräradalla, mutta vastakkaiseen suuntaan kuin muut kuut. Radan kaltevuus on 160°. Nereid puolestaan on hyvin soikealla radalla, jonka kaltevuus on 28°.

Tritonilla on ohut kaasukehä. Paine Tritonin pinnalla on vain sadastuhannesosa maapallon ilmakehän paineesta, mutta toisaalta Tritonin pienen vetovoiman vuoksi kaasukerros ulottuu 800 km korkeuteen. Siinä ajelehtii ohuita pilviä. Tritonin atmosfääri koostuu pääasiassa typestä, jonka seassa on hieman metaania.



Voyagerin Triton-kuvista löytyi toimivia "tulivuoria". Merkityssä kohdassa on 150 kilometrin pituinen purkauspilvi Tritonin ilmakehässä, ja pinnalla näkyy heikosti sen varjo.



Tritonin eteläinen pallonpuolisko on lumen peitossa. Lumessa näkyy mustia purkausjälkiä. Tritonin läpimitta on noin 2700 kilometriä.

Metaania on myös Tritonin pinnalla, jonka eteläinen pallonpuolisko on jäätyneen typen ja metaanin muodostaman "lumen" peitossa. Seassa olevat orgaaniset yhdisteet värjäävät lumen vaaleanpunaiseksi. Alue heijastaa n. 80 % valosta ja on siis aurinkokunnan kirkkaimpia alueita. Pohjoinen pallonpuolisko on hivenen tummempi, mutta sekin heijastaa 60 % tulevasta valosta. Spektrihavainnoissa ei ole näkynyt merkkejä vesijäästä, vaikka vettä lieneekin syvemmällä pinnan alla.

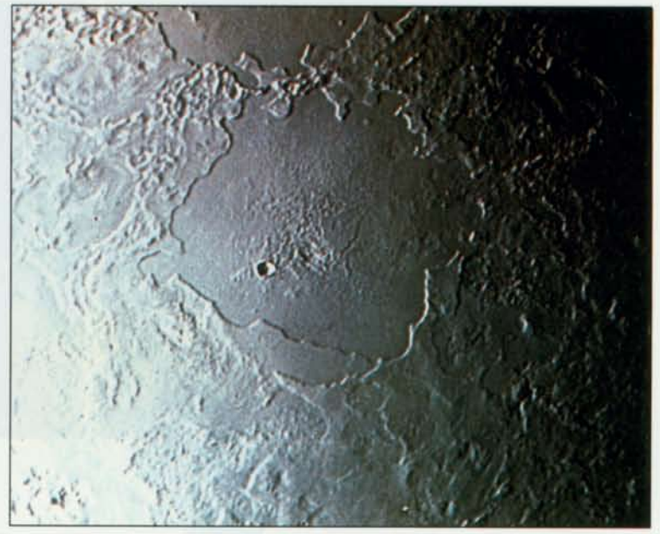
Triton on kylmin tunnetuista aurinkokunnan kappaleista: pintalämpötila on vain 37 kelviniä. Eteläinen pallonpuolisko on paremman heijastuskykynsä ansiosta pohjoispuoliskoa hivenen kylmempi.

Myös Tritonin pinnalla on samanlaisia muodostelmia kuin muissakin aurinkokunnan kappaleissa: kraattereita, laaksoja, harjuja, sekä myös "tulivuoria". Toki tulivuorista puhuminen 37 kelvinin lämpötilassa tarkoittaa muuta kuin hehkuvaa laavaa syökseviä pätsejä. Pinnan alla, jo parinkymmenen metrin syvyydessä lämpötila on typen sulamispisteen yläpuolella. Kuoreen tulevasta halkemasta pääsee purskahtamaan sulaa typpeä, joka purkaantuessaan kaasuuntuu, nousee jopa 40 km korkeuteen ja jäätyy. Tuulet levittävät "lumen" laajalle alueelle. Typen mukana pinnalle tulee myös metaania, joka aikaa myöten tummuu auringonvalon vaikutuksesta läiskiksi valkoiselle lumelle.

Tritonin pohjoisella pallonpuoliskolla on kymmenien kilometrien läpimittaisten jääkuoppien muodostamaa maastoa, jollaista ei ole muissa aurinkokuntamme kuissa. Kuopat ovat mahdollisesti syntyneet jäisen pinnan sulaessa ja luhistuessa. Varsinaisia meteoriittikraattereita Tritonin pinnalla on hyvin vähän, joten se on jossain kehityksensä vaiheessa ilmeisesti ollut pinnaltaan sula.

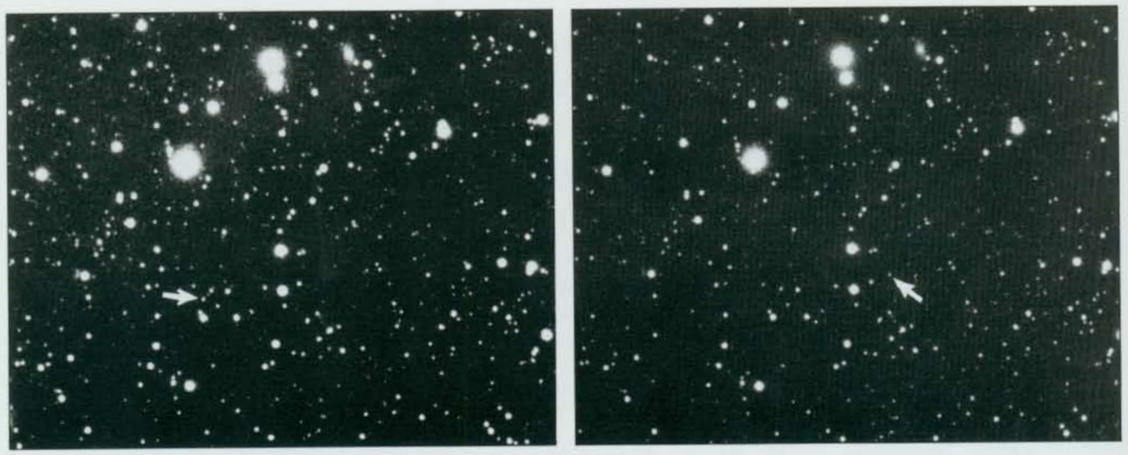
Tritonin pintakerros sisältää pääasiassa erilaisia jäitä. Runsaan 300 kilometrin syvyydessä alkanee kiinteä kiviydin. Keskitiheys on kaksi kertaa veden tiheys. Kooltaan Triton on vain hivenen Plutoa suurempi, ja tutkijat arvelevatkin, että Triton muistuttaa Plutoa enemmän kuin mikään muu tuntemistamme aurinkokunnan kappaleista.

Ehkä Tritonilla ja Plutolla on enemmänkin yhteistä. Plutoa on joskus sanottu Neptunuksen karanneeksi kuuksi. Vielä ei tiedetä mikä kosminen katastrofi on saanut Tritonin retrogradiselle radalleen ja miksi Nereidin rata on niin soikea (kun kaiken lisäksi kuusi muuta kuuta on hyvin säännöllisillä radoilla!). Kuka tietää, vaikka Plutokin olisi joskus kuulunut samaan perheeseen, vaikka varmaa vastausta tähän kysymykseen saamme tuskin koskaan.



Laavan täyttämiä tasankoja Tritonin pinnalla. Kuvan leveys on noin 500 km.

Voyager 2:n jäähyväiskuva Neptunuksesta (alempi) ja Tritonista (pienempi sirppi). Voyager jatkaa matkaansa tähtienväliseen avaruuteen.



Tuntematon Pluto

Aurinkokuntamme uloin planeetta *Pluto* on läpimitaltaan vain runsaat parituhatta kilometriä. Sitä kiertää yksi kuu, *Kharon*, joka löydettiin vasta vuonna 1978. Luotainlentoja Plutoon ei ole edes suunnitteilla, joten ainakaan tämä sukupolvi ei näe samanlaisia yksityiskohtaisia kuvia, joita on jo kaikista muista aurinkokuntamme planeetoista. Suurimmissakin kaukoputkissa Pluto näkyy pistemäisenä kuten tähdet.

Planeetta X

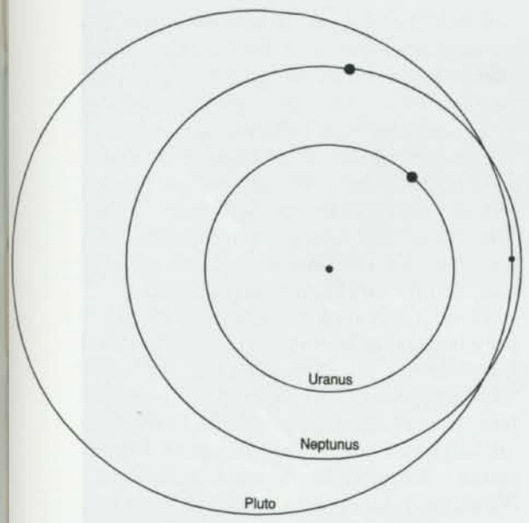
Neptunuksen löytyminen oli newtonilaisen taivaanmekaniikan riemuvoitto ja lopullinen varmistus sen pätevyydestä. Koko 1800-luku oli taivaanmekaniikan kulta-aikaa. Tähtitaivas toimi kuin kellokoneisto, jonka ymmärtäminen tosin vaati raskasta matemaattista mallia. Tätä mallia rakensivat aikansa etevimmät matemaatikot ja tähtitieteilijät sukupolvien ajan. Muutoksen merkit olivat kuitenkin näkyvissä, ja kun Pluto vuonna 1930 löydettiin, oli taivaanmekaniikka jo sukupuuttoon kuoleva tieteen dinosaurus. Vasta avaruuslentojen ja tietokoneiden myötä taivaanmekaniikka heräsi uudelleen henkiin.

1900-luvun alkuun tultaessa oli virinnyt epäilys Neptunuksen radan ulkopuolella olevasta planeetasta. Vaikka Neptunusta oli ehditty havaita vasta puoli vuosisataa, näytti siltä, että se ei noudata sille laskettua rataa. Poikkemat olivat varsin pieniä, mutta näiden perusteella yritettiin laskea häiritsevän planeetan paikka.

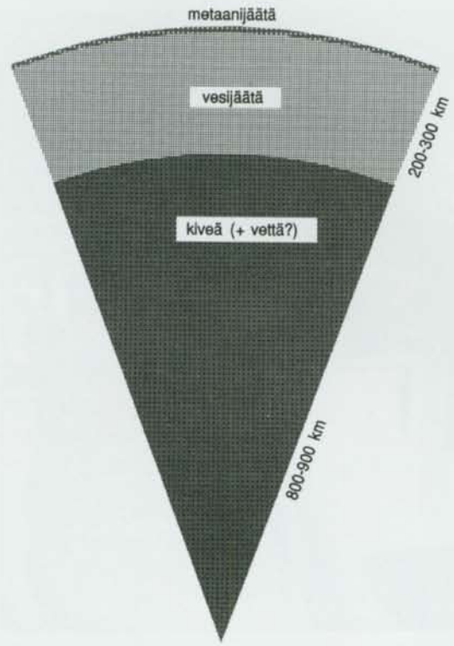
Ensimmäisen yrityksen teki *David Peck Todd* vuonna 1877. Todd arvioi uuden planeetan olevan 52 tähtitieteellisen yksikön päässä Auringosta ja läpimitaltaan Neptunusta suuremman, joten sen olisi pitänyt erottua tähdistä. Uutta planeettaa hän ei etsinnöissään löytänyt, ja ilman valokuvauksen apua se olikin varsin odotettavaa.

Jo 1890-luvulla *Max Wolf* Heidelbergissä otti ensimmäiset käyttökelpoiset tähtivalokuvat ja hän käytti valokuvausta apuna mm. pikkuplaneettojen etsimisessä. Samasta taivaanalueesta eri öinä otetuissa kuvissa tähtien keskinäiset asemat eivät muutu, mutta planeetan tai pikkuplaneetan kuva on siirtynyt. Kun samaa kohtaa taivasta kuvataan muutaman yön välein, nähdään tähtien suhteen siirtyneet pik-

Ylhäällä Pluton löytökuvat tammikuulta 1930. (Kuvat Lowellin observatorio)



Pluton rata on hyvin epäkeskinen. Osan aikaa Pluto on lähempänä Aurinkoa kuin Neptunus, esimerkiksi 1979—1999.



Nykyinen käsitys Pluton sisärakenteesta. (Piirrokset Markku Poutanen)

kuplaneetat varsin helposti. Samaa menetelmää käytettiin sittemmin myös Pluton etsinnöissä.

1900-luvun alun planeettametsästäjistä kaksi oli selvästi ylivertaista: *William H. Pickering* ja *Percival Lowell*. Pickering ennusti useita mahdollisia ratoja, jopa niin monta, että lopulta harvat enää uskoivat ennusteisiin. Monet näistä hän oli laskenut komeettojen radoissa havaittujen häiriöiden avulla. Kevyinä ja planeettojen ratojen poikki kulkevina kappaleina komeetat tosin ovat herkkiä planeettojen aiheuttamille häiriöille, mutta komeettojen radoissa on myös muita kuin painovoimasta johtuvia muutoksia. Näitä aiheuttavat mm. pinnasta purkautuvat kaasusuihkut. Näiden suuruutta on mahdotonta laskea, joten komeettojen käyttäminen uuden planeetan etsinnässä on vähintäänkin kyseenalaista.

Vuonna 1919 *Milton Humason* kuvasi Mount Wilsonilla Pickeringin erään ennusteen antaman paikan lähistöltä neljä levyä. Vasta Pluton löytymisen jälkeen havaittiin, että planeetta sattumalta näkyi yhden levyn reunalla.

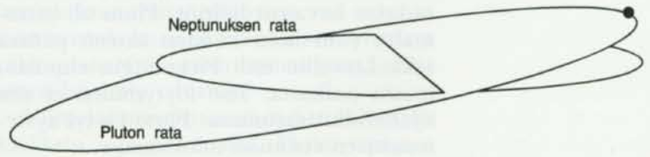
Percival Lowell perusti 1800-luvun lopussa Flagstaffin kaupunkiin Yhdysvaltain Arizonaan observatorion etupäässä Marsin tutkimista varten, mutta toinen Lowellin kiinnostuksen kohteista oli "Planeetta X", Neptunuksen radan takana kiertävä planeetta. Vuosina 1905–1907 Lowell kuvasi 440 levyä läheltä ekliptikan tasoa, mutta kaivattua planeettaa ei löytynyt.

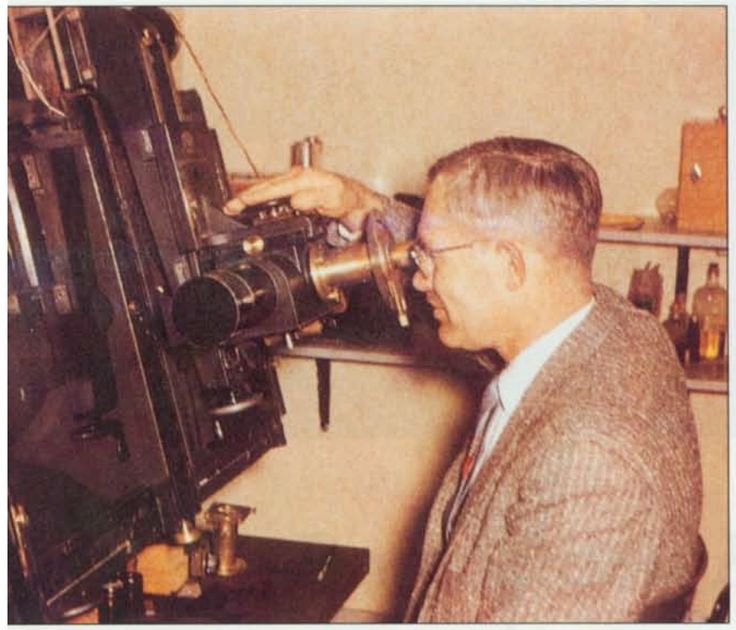
Vuonna 1911 Lowell jatkoi kuvauksia 40-tuumaisella peilikaukoputkella, mutta tämän pieni kuvakenttä vaikeutti laajamittaista etsintää. Vuosina 1914–1916 observatoriossa kuvattiin lähes tuhat levyä valokuvaukseen paremmin soveltuvalla 9 tuuman kaukoputkella. Yhdellä näistä levyistä oli myös Pluto, mutta niin himmeänä, ettei sitä tuolloin löydetty. Työ päättyi Lowellin kuolemaan v. 1916.

Keskeytynyttä työtä jatkettiin vasta vuonna 1929, jolloin valmistui tähtitaivaan valokuvaukseen hyvin soveltuva 13 tuuman linssikaukoputki. Mittavan valokuvaustyön suoritti *Clyde Tombaugh*. Kun vielä Lowell oli katsellut levyjä pelkän suurennuslasin läpi, saatiin nyt käyttöön etsintää oleellisesti helpottava laite: Blink-mikroskooppi.

Samasta taivaanalueesta eri öinä otetut kaksi levyä asetetaan mikroskooppiin, joka vuorotellen nopeassa tahdissa näyttää kumpaakin levyä. Tähtien kuvat pysyvät paikallaan, mutta liikkunut planeetta tai

Pluton ja Neptunuksen radat ovat kallellaan toisiinsa nähden eivätkä planeetat tule koskaan aivan lähelle toisiaan.





Clyde Tombaugh istumassa ns. Blink-mikroskoopin ääressä. Tällä laitteella hän löysi Pluton. (Kuva Charles Capen)

pikkuplaneetta nähdään hypähtelevänä pisteenä. Jos kuvat on vielä otettu lähellä oppositiota, on siirtymän suuruus verrannollinen kappaleen etäisyyteen. Näin Marsin ja Jupiterin välissä olevat pikkuplaneetat ja Neptunuksen radan takana kiertävä planeetta erottuvat helposti toisistaan.

Helmikuun 18. päivänä vuonna 1930 Clyde Tombaugh löysi vajaata kuukautta aiemmin otetusta levyparista odotetun suuruisen siirtymän. Huolellisten tarkistushavaintojen jälkeen uutinen julkaistiin maaliskuun 13. päivänä, jolloin Percival Lowellin syntymästä tuli kuluneeksi 75 vuotta ja Uranuksen löytymisestä 149 vuotta. Hieman myöhemmin planeetta sai nimen Pluto, kreikkalaisen mytologian manalan jumalan mukaan. Planeetta X oli löytynyt, vai oliko?

Jo heti ensimmäisinä viikkoina herätti huomiota se, että Pluto näkyi täysin pistemäisenä. Tästä voitiin laskea yläraja sen läpimitalle. Kun yhtään kuuta ei havaittu, ei massaa saatu selville. Näytti kuitenkin siltä, että kyseessä ei voinut olla etsitty planeetta: Pluto oli aivan liian pieni aiheuttaakseen Uranuksen ja Neptunuksen radassa havaitut häiriöt. Pluto oli sattumalta vain noin kuuden asteen päässä sekä Lowellin että Pickeringin ennustamasta paikasta. Itse löytyminen ei sen sijaan ollut sattumaa: Pluto löytyi systemaattisen etsinnän tuloksena.

Clyde Tombaugh jatkoi planeetta X:n etsintää aina vuoteen 1943 saakka. Tänä aikana hän löysi uuden pallomaisen tähtijoukon. komeetan, satoja pikkuplaneettoja ja laski levyiltä tuhansia galakseja ja muuttuvia tähtiä. Kaikkiaan hän arvioi nähneensä lähes 100 miljoonaa tähden kuvaa suururakkansa kuluessa! Tombaugh kävi läpi suuren osan taivasta, eikä hänen mukaansa tällä alueella voi olla 15. magnitudia kirkkaampaa planeettaa.

Planeetta X on kummitellut aina nykypäiviin saakka. Vieläkään ei tiedetä, miksi Uranuksen ja Neptunuksen radoissa näyttää olevan pienen pieniä ylimääräisiä häiriöitä. Planeetta X:n ohella häiriöiden aiheuttajaksi on esitetty kaukana Pluton radan ulkopuolella olevaa kääpiötähteä, *Nemesistä*, joka on niin himmeä, ettei sitä toistaiseksi olisi havaittu. Mutta kovin laihoja ovat todisteet Nemesiksenkin olemassaolosta, ja toistaiseksi ratahäiriöiden syylle ei ole löytynyt tyydyttävää selitystä. Osan toki voi panna äärimmäisen pienten havaintovirheiden tiliin, mutta tuskin kuitenkaan kaikkea. Ehkä aurinkokunnasta ulos kiitävien Pioneer- ja Voyager-luotainten liikkeet paljastavat, onko Pluton radan ulkopuolella vielä planeettoja.

Ongelma nimeltä Pluto

Lähes puoli vuosisataa Pluton läpimitta oli vain likimain tiedossa. Massan suhteen asiat olivat vieläkin huonommin, koska sen paremmin läpimittaa kuin tiheyttäkään ei tunnettu. Tilanne muuttui vasta 1978, kun *James Christy* löysi Pluton kuun Kharonin.

Vuorovesivoimien takia Kharon kääntää aina saman puolen Plutoon päin. Kiertoaika on sama kuin Pluton pyörähdysaika eli 6.387 vuorokautta, joten Plutokin kääntää aina saman puolen Kharoniin päin. Kharonin radan säde on 19 640 km. Keplerin kolmannen lain avulla Pluton ja Kharonin yhteiseksi massaksi saadaan 1.36×10^{22} kg eli 18.5 % Kuun massasta.

Vuosien 1985 ja 1990 välillä maapallo oli Kharonin ratatasossa, jolloin Pluto ja Kharon kulkivat joka kierroksella Maasta nähtynä toistensa editse. Tämä tilanne toistuu kahdesti Pluton 248-vuotisen kierroksen aikana. Keskinäisistä peitoista Pluton läpimitaksi saatiin 2245 km ja Kharonin 1192 km. Vuonna 1988 havaittu tähdenpeitto antoi Pluton läpimitaksi 2284 kilometriä, joka sopii hyvin yhteen

Aurinko on Plutosta katsottuna huomattavasti pienempi kuin Maasta. (Maalaus Chesley Bonestell)

pimennyshavaintojen kanssa.

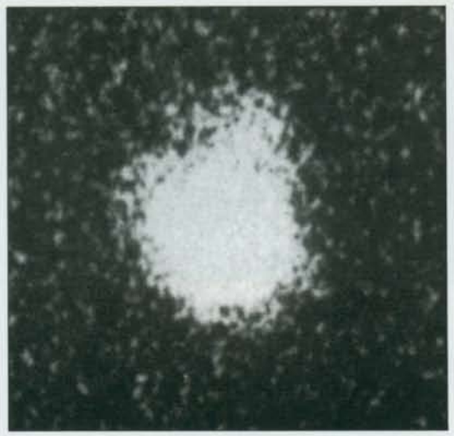
Pluton ja Kharonin läpimittojen ja yhteisen massan avulla järjestelmän keskitiheydeksi saadaan 1.99 kertaa veden tiheys. Jos Kharonin tiheyden voidaan olettaa olevan välillä 1–3, on Pluton itsensä tiheys 1.84–2.14 kertaa veden tiheys. Pluto sisältää runsaasti kiveä, jopa 70–80 % massasta, joten se on täysin erilainen kuin vaikkapa Saturnuksen jäiset kuut.

Havainnot eivät kuitenkaan kertoneet kaikkea Pluton sisärakenteesta. On mahdollista, että pian synnyn jälkeen Pluto osittain suli, jolloin raskas kiviaines vajosi keskelle ja jäät jäivät pinnalle. Tällöin Pluton jääkuoren paksuus olisi n. 200–300 km. Kuori koostuu pääasiassa vesijäästä, mutta pinnalla on myös metaanijäätä, joka näkyy myös Pluton spektrissä.

Toinen mahdolisuus on, että Pluto ei aikoinaan olekaan sulanut, jolloin differentioitumista ei olisi tapahtunut. Monet tutkijat ovat kuitenkin kallistuneet edellisen vaihtoehdon puolelle.

Kiviaineksen suuri osuus jäähän verrattuna antaa varmasti vihjeitä Pluton alkuperän tutkijoille. Onko Pluto Neptunuksen karannut kuu, onko se syntynyt aurinkokuntamme sisäosissa vai onko se vain aurinkokunnan ulko-osissa syntynyt pikkuplaneetta, oman lajinsa toistaiseksi ainoa löydetty edustaja?

Viimeksi mainittu vaihtoehto vaikuttaa kaikkein lupaavimmalta. Pluton synnyn



Pluton kuun löytökuva. Kharon näkyy pullistumana Pluton ylivalottuneen kuvan kyljessä.

aikoihin alkunebulan lämpötila tuolla etäisyydellä oli niin alhainen, että suuri osa vapaasta hapesta oli sitoutunut hiilen kanssa hiilimonoksidiksi eikä vedyn kanssa vedeksi, joten tämä selittäisi jäiden suhteellisen vähäisen osuuden. Laskut antavat jään osuuden teoreettiseksi alarajaksi noin 27 %, mikä on varsin lähellä Plutossa havaittua arvoa.

Tämä ei kuitenkaan kerro mitään Kharonin synnystä. Kharon on hyvin suuri Plutoon verrattuna; ne muodostavat pikemminkin kaksoisplaneetan kuin planeetta–kuu-parin. Kharon on saattanut syntyä Pluton muodostumisen aikoihin, kun samalla alueella liikkuvat alkiot törmäilivät toisiinsa. Mutta se on voinut myös repeytyä alku-Plutosta, kun tämä syntymänsä jälkeen suli ja kokoonluhistumisen vuoksi pyörimisnopeus kasvoi yli kriittisen rajan.

Kaikki nämä nivoutuvat myös kysymykseen Pluton radasta: miksi rata on niin soikea ja vinossa muiden planeettojen ratoihin verrattuna? Outo rata saattaisi puoltaa törmäysteorioita, vaikka muualla aurinkokunnassamme tällaiset kosmiset katastrofiteoriat ovatkin osoittautuneet vääriksi.

Vuoden 1988 kesäkuussa tapahtuneen tähdenpeiton avulla voitiin tutkia myös Pluton kaasukehää tähden valon kulkiessa Pluton ilmakehän lävitse. Kaasukehän todettiin sisältävän pääasiassa metaania, mutta paine pinnalla on vain pari miljoonasosaa Maan ilmakehän paineesta. Kaasukerros ei ole täysin kirkas, vaan pinnan lähellä on ohutta utua, joka ei kuitenkaan estä näkyvyyttä pinnalle.

Pluton ja Kharonin keskinäisten peittojen aikana tehdyt fotometriset havainnot paljastivat, että Pluto on väriltään huomattavasti punaisempi kuin Kharon ja että Pluton napa-alueet heijastavat auringonvaloa 3–4 kertaa paremmin kuin ekvaattorin seutu. Napa-alueilla metaanijään osuus saattaa olla suurempi kuin ekvaattorilla, jossa on pääasiassa vesijäätä.

Oma osuutensa Pluton pinnanpiirteisiin saattaa olla sillä, että Plutossa on nyt keskikesä. Maapallolla radan soikeudella ei juurikaan ole vaikutusta vuodenaikoihin, mutta Pluton tapauksessa se saattaa olla ratkaiseva. Lämpötilan ollessa nyt korkeampi haihtuu metaania ilmakehään, ja kun Pluto taas etääntyy Auringosta, härmistyy tuore valkoinen metaanilumi takaisin pinnalle.

Auringon ultraviolettisäteily muuttaa metaanilumen tummemmiksi yhdisteiksi, ja jos Pluton pinnalla olisi vain vanhaa metaanijäätä, täytyisi Pluton olla yhtä musta kuin Halleyn komeetta tai Uranuksen rengashiukkaset. Värimuutoksista onkin saatu vihjeitä. Viime vuosikymmenien aikana Pluto on tummunut, mikä voidaan selittää sillä, että nyt kesällä metaanijään haihtuessa on alta paljastunut vanhaa tummaa jäätä. Kun säiden viiletessä metaanilumi taas sataa takaisin, Pluton pinta vaalentunee jälleen.

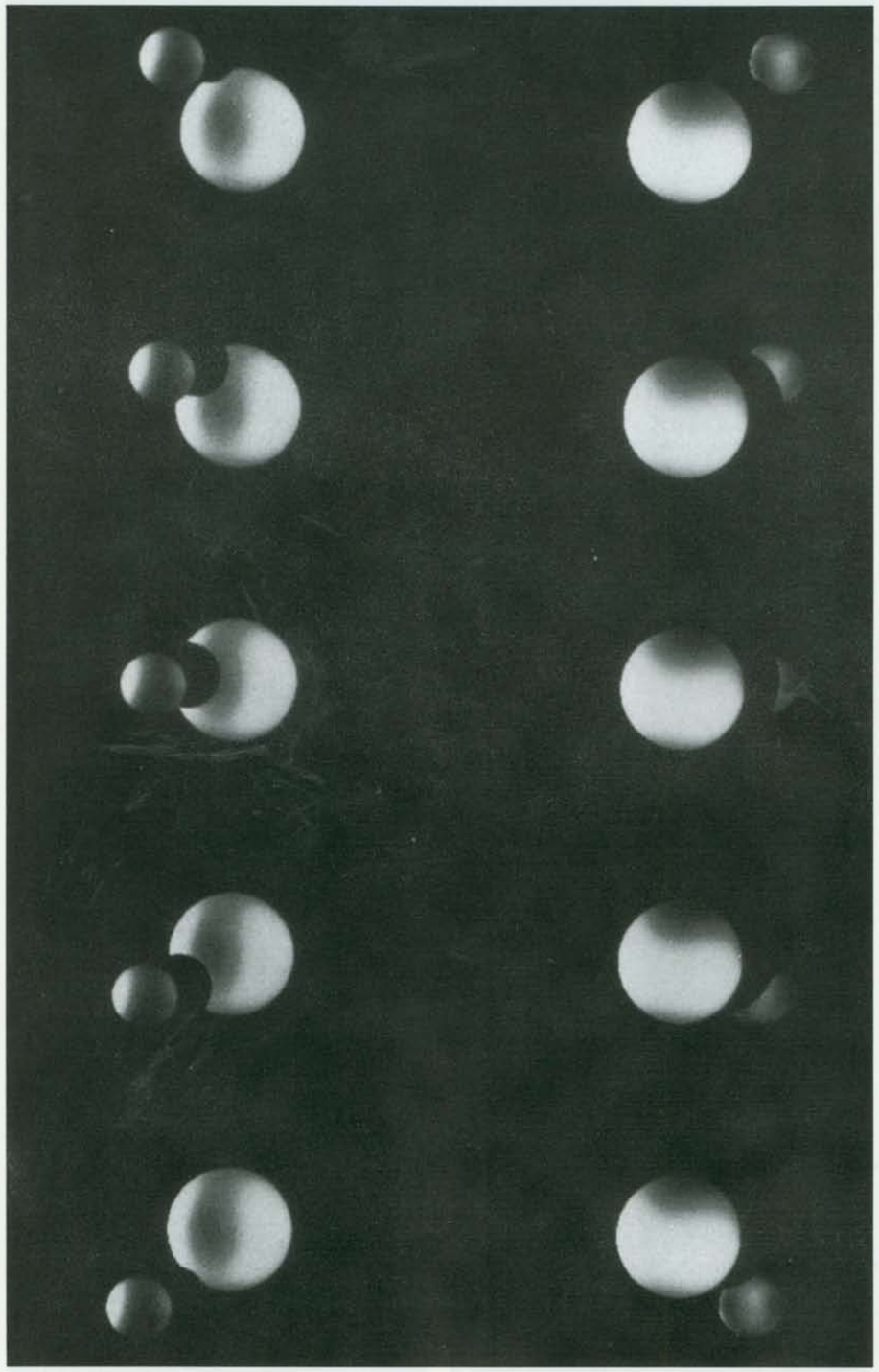
Pluton ja Kharonin keskinäisiä pimennyksiä nähtiin 1985–1990.

Pluton massa

Ennen Kharonin löytymistä ei Pluton massaa tunnettu kovinkaan hyvin. Keplerin 3. lain avulla Pluton ja Kharonin yhteinen massa kuitenkin saadaan tarkasti selville. Kharonin kiertoaika on 6.36 vrk ja radan isoakselin puolikas 20 000 km. Keplerin 3. laki antaa yhteiseksi massaksi

$$m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2 a^3}{GP^2} = \frac{4\pi^2(20\,000\,000)^3}{6.67 \times 10^{-11} \times (6.36 \times 24 \times 3600)^2} = 1.5 \times 10^{22}\ \text{kg}$$

Jos kummankin kappaleen tiheys oletetaan samaksi, jakautuu massa suhteessa $1120^3 : 600^3 \approx 8 : 1$. Pluton massa on siis n. 1.3×10^{22} kg ja tiheys n. 2200 kg/m^3.



Tietokonemalli Pluton ja Kharonin peitoista. Pimennysten avulla on saatu selville pinnan eri alueiden kirkkauksia. Vasemmalla Kharon peittää osan Plutosta, oikealla päinvastoin. (Kuva Marc Buie)

Westin komeetta vuodelta 1975.

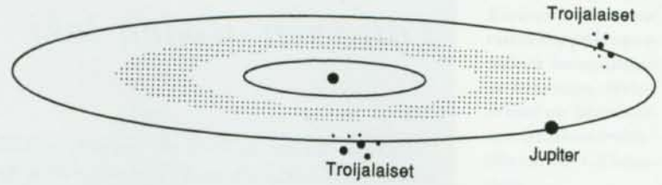
Aurinkokunnan pienkappaleet

Planeettojen ja planeettain kuiden ohella aurinkokuntaamme kuuluu koko joukko pienempiä jäseniä: pikkuplaneettoja eli *asteroideja*, *meteoroideja* ja pyrstötähtiä eli *komeettoja*. Lisäksi planeettojen välissä on hienojakoista pölyä, jonka olemassaolon näemme *eläinratavalona*, sekä *aurinkotuulena* Auringosta leviäviä atomiytimiä ja elektroneja. Ne kaikki ovat osa aurinkokunnan kehityshistoriaa.

Puuttuva planeetta

Planeettakarttaa silmäillessä Marsin ja Jupiterin välissä näyttäisi olevan aukko. Vuonna 1766 saksalainen *Johann Daniel Titius* keksi, että kaikkien planeettojen etäisyydet noudattivat yhtä yksinkertaista kaavaa (Saturnushan oli tuohon aikaan uloin tunnettu planeetta). Titiuksen huomaamattoman viittauksen näki muutamaa vuotta myöhemmin *Johann Elert Bode*, joka teki sen tunnetuksi. Riippuvuus tunnetaan nykyisin *Titiuksen–Boden lakina*, tai englanninkielisessä kirjallisuudessa usein pelkkänä Boden lakina.

Titiuksen–Boden laki ennustaa 2.8 AU:n etäisyydelle planeetan. Kun Uranus v. 1781 löytyi, vahvistui usko puuttuvasta planeetasta, sillä Uranuskin tuntui noudattavan tuota hämäräperäistä lakia. Niinpä vuonna 1800 *Johann Schroeter* perusti "taivaallisen poliisin", muutaman havaitsijan ryhmän, jonka tarkoituksena oli löytää puuttuva planeetta.



Suurin osa pikkuplaneetoista kiertää Aurinkoa Marsin ja Jupiterin radan välissä. Troijalaiset asteroidit kiertävät samalla radalla Jupiterin kanssa, Auringosta nähtynä 60 astetta Jupiterin edessä ja takana. (Piirros Markku Poutanen)

Ensimmäinen pikkuplaneetta löytyi kuitenkin sattumalta. Palermon observatorion johtaja *Giuseppe Piazzi* havaitsi uudenvuodenyönä 1801 tähdenkaltaisen kohteen, joka liikkui hitaasti tähtien suhteen kuten planeetta. Alustavat laskut antoivat etäisyydeksi likimain Titiuksen–Boden lain ennustaman 2.8 AU. Kappale sai nimen *Ceres*. Se on suurin pikkuplaneetoista, läpimitaltaan n. 1 000 km.

Seuraavien kuuden vuoden aikana löydettiin vielä kolme muuta pikkuplaneettaa, nimittäin *Pallas*, *Juno* ja *Vesta*, mutta tämän jälkeen kuluikin lähes neljä vuosikymmentä ennen kuin lisää asteroideja löydettiin. Nimeä asteroidi, "tähdenkaltainen", ehdotti *William Herschel*, koska kohteet näkyivät kaukoputkessa pistemäisinä kuten tähdet. Aiemmin käytettiin

Pikkuplaneetta Eunomia ohittamassa Kolmion suurta galaksia. Kuvat on otettu peräkkäisinä öinä syyskuussa 1985. (Kuvat Juhani Salmi)

Titiuksen–Boden laki

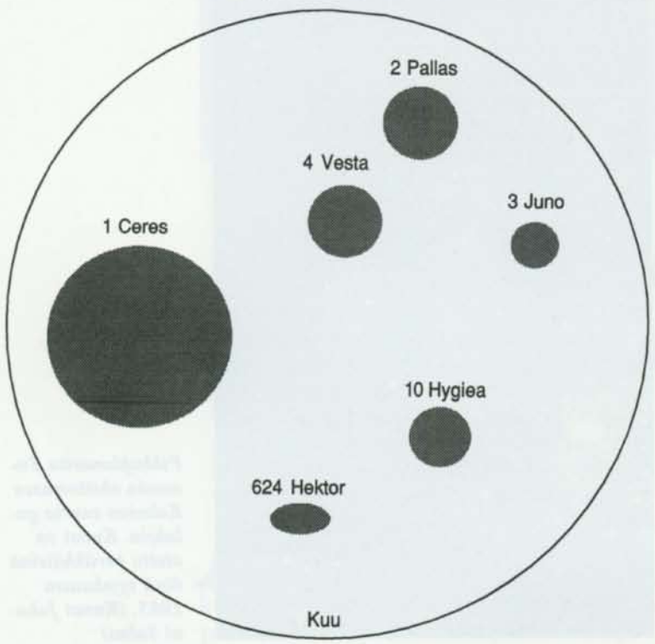
Titiuksen–Boden laille ei ole keksitty mitään yleispätevää fysikaalista selitystä, ja usein sitä käytetäänkin lähinnä muistisääntönä, jonka antaa planeettojen likimääräiset etäisyydet Auringosta. "Laki" pätee suhteellisen tarkasti Uranukseen saakka, mutta klassisessa muodossaan esitettynä se antaa Neptunuksen ja Pluton etäisyydet väärin. Se voidaan esittää esim. kaavalla

$$a = 0.4 + 0.3 \times 2^n$$

missä $n = -\infty$ Merkuriukselle, 0 Venukselle, 1 Maalle, 2 Marsille, 4 Jupiterille jne. Arvolla 3 saadaan pikkuplaneettavyöhykkeen likimääräinen etäisyys. Oheisessa taulukossa ovat Titiuksen–Boden lain antamat etäisyydet ja planeettojen todelliset radan isoakselin puolikkaat.

	n	T–B	todell.
Merkurius	$-\infty$	0.4	0.4
Venus	0	0.7	0.7
Maa	1	1.0	1.0
Mars	2	1.6	1.5
pikkuplaneetta	3	2.8	2.8
Jupiter	4	5.2	5.2
Saturnus	5	10.0	9.2
Uranus	6	19.6	19.2
Neptunus	7	38.8	30.1
Pluto	8	77.2	39.8

Alla joidenkin asteroidien kokoja Kuuhun verrattuna. (Piirros Markku Poutanen)



joskus myös nimitystä planetoidi, joka itse asiassa paremmin kuvaisikin näitä kappaleita.

Valokuvauksen käyttöönotto 1890-luvulla mullisti pikkuplaneettametsästyksen, ja valokuvaus on edelleenkin käytännössä ainoa tapa uusien asteroidien etsimiseksi. Kun samasta taivaanalueesta otetaan muutaman yön välein kaksi kuvaa, nähdään kuvia vertaamalla pikkuplaneetan liike; tähtien keskinäiset asemat luonnollisesti pysyvät muuttumattomina.

Kun rata on saatu niin hyvin selville, että pikkuplaneetta löydetään koska tahansa myöhemminkin, saa löytäjä nimetä sen. Ensimmäisten pikkuplaneettojen nimet olivat mytologian jumalattarien mukaan, mutta lukumäärän kasvaessa tavasta luovuttiin ymmärrettävästi varsin nopeasti. Nykyisin nimistö on monenkirjava. Mukana on koko joukko suomalaisnimiäkin, sillä varsinkin 1930- ja 1940-luvulla löydettiin Turussa *Yrjö Väisälän* johdolla toistasataa pikkuplaneettaa.

Tiedot pikkuplaneettojen radoista, kirkkauksista ja vuotuisesta näkymisestä

Suomesta löydetyn Kivesvaaran meteoriitin kappale suunnilleen luonnollisessa koossaan. Meteoriitti on harvinainen hiilikondriitti. (Kuva Kari Kinnunen)

sisältyvät Leningradin tähtitieteellisen instituutin vuosittain julkaisemaan pikkuplaneettaluetteloon *Efemeridy Malyh Planet*.

Sirpaleita ja jätteitä

Asteroidit kiertävät Aurinkoa pääasiassa Marsin ja Jupiterin ratojen välissä, n. 2.2–3.3 AU etäisyydellä. Myös Jupiterin radalla ja jopa sitäkin kauempana on joukko pikkuplaneettoja ja jotkut tulevat maapallon radan sisäpuolelle. Tunnettujen asteroidien koot vaihtelevat pienistä, satojen metrien läpimittaisista murikoista tuhanteen kilometriin saakka. Nimettyjä on nelisen tuhatta; määrä kasvaa muutamalla kymmenellä joka vuosi. Kaiken kaikkiaan pikkuplaneettavyöhykkeellä arvioidaan olevan puoli miljoonaa yli puolen kilometrin läpimittaista kappaletta, mutta mitä pienempiin mennään, sitä enemmän niitä on.

Asteroidit eivät ole jakautuneet tasaisesti asteroidivyöhykkeelle, vaan ne näyttävät karttavan tiettyjä alueita. Näitä tyhjiä alueita kutsutaan *Kirkwoodin aukoiksi* amerikkalaisen Daniel Kirkwoodin mukaan, joka huomasi pikkuplaneettojen oudon jakautuman jo 1800-luvun loppupuolella. Kirkwoodin aukot osuvat kohtiin, joissa Jupiterin ja pikkuplaneetan kiertoajan suhde on yksinkertainen murtoluku, esim. 1/2, 1/3 jne, ts. kappale ehtii kiertää Auringon kahdesti (tai kolme kertaa) yhden Jupiterin kierroksen aikana.

Kun pikkuplaneetta osuu usein radallaan samaan kohtaan Jupiterin ollessa myös samassa kohtaa rataansa, saavat Jupiterin aiheuttamat häiriöt pikkuplaneetan radan vähitellen muuttumaan. (Samantapaisen ilmiön voit havaita vaikka keinussa: pienikin tönäisy aina sopivassa kohdassa saa vauhdin muuttumaan.) Aivan näin yksioikoisia resonanssi-ilmiöt eivät kuitenkaan ole, sillä jotkut pikkuplaneetat ovat lukkiutuneet resonanssiradoille. Esimerkkeinä tällaisista ovat *Troijalaiset asteroidit*, jotka kiertävät Jupiterin radalla ja ovat siis 1/1 resonanssissa, ja *Hilda-ryhmä*, joiden kiertoaika on 2/3 Jupiterin kiertoajasta.

Kaikki tunnetut pikkuplaneetat kiertävät Aurinkoa samaan suuntaan kuin suuretkin planeetat, eivätkä niiden ratatasot poikkea merkittävästi planeettojen ratatasosta. Niinpä jo varsin pian ensimmäisten pikkuplaneettojen löytymisen jälkeen syntyi ajatus räjähtäneestä, 2.8 AU:n etäisyydellä olleesta planeetasta, josta kaikki nykyiset asteroidit olisivat muodostuneet. Koska pikkuplaneettojen yhteinen massa on vain tuhannesosa maapallon massasta, olisi suurin osa planeetan aineesta sinkoutunut räjähdyksessä teille tietymättömille.

Planeetan räjähdystä vain ei osata kovin luontevasti selittää, eikä sitä mikään havaintokaan tue. Toisen kappaleen törmääminen on äärimmäisen epätodennäköistä, ja tuskin sopivaa, planeetan hajottavaan ydinräjähdykseen johtavaa ketjureaktiotakaan voi noin vain syntyä (ja sen

Pikkuplaneettojen nimiluettelo tuntuu paikoitellen Suomen maantieteen hakemistolta. (Kuva teoksesta Efemeridy Malyh Planet 1990)

1491 Balduinus	1516 Henry
1492 Oppolzer	1517 Beograd
1493 Sigrid	1518 Rovaniemi
1494 Savo	1519 Kajaani
1495 Helsinki	1520 Imatra
1496 Turku	1521 Seinäjoki
1497 Tampere	1522 Kokkola
1498 Lahti	1523 Pieksämäki
1499 Pori	1524 Joensuu
1500 Jyväskylä	1525 Savonlinna
1501 Baade	1526 Mikkeli
1502 Arenda	1527 Malmquista
1503 Kuopio	1528 Conrada
1504 Lappeenranta	1529 Oterma
1505 Koranna	1530 Rantaseppä
1506 Xosa	1531 Hartmut
1507 Vaasa	1532 Inari
1508 Kemi	1533 Saimaa
1509 Esclangona	1534 Näsi
1510 Charlois	1535 Päijänne
1511 Dalèra	1536 Pielinen
1512 Oulu	1537 Transylvania
1513 Mátra	1538 Detre
1514 Ricouxa	1539 Borrelly
1515 Perrotin	1540 Kevola

jäljet kyllä näkyisivät vieläkin...). Mutta onhan tarjolla "luonnollinenkin" selitys.

Pikkuplaneetat eivät liene koskaan muodostaneet yhtä suurta kappaletta. Jupiterin aiheuttamien häiriöiden vuoksi tuolle alueelle ei koskaan päässyt syntymään yhtä suurta planeettaa. Lukuisat planetesimaalit, planeettojen alkiot, eivät päässeet liittymään suuremmiksi, sillä niiden keskinäiset nopeudet olivat kasvaneet niin suuriksi, että törmäillessään keskenään ne pikemminkin pilkkoutuivat palasiksi.

Törmäyksiä tapahtuu edelleenkin, vaikka ne ovatkin nyt paljon harvinaisempia kuin alun kaoottisina aikoina. Neitseellistä ainetta pikkuplaneettavyöhykkeeltäkään tuskin löytyy, sillä ehkä kaikkein suurimpia lukuunottamatta kaikki asteroidit ovat törmäysten tuloksena syntyneitä ja suurimpienkin pinnat ovat paksun törmäysjätekerroksen peitossa.

Asteroidien ominaisuudet voivat poiketa melkoisesti toisistaan: jotkut ovat lähes puhdasta metallia, toiset kiveä. Koostumuksen erilaisuus johtuu siitä, että ainakin osassa alku-pikkuplaneettoja oli tapahtunut kemiallista erottumista. Radioaktiivisten aineiden hajoamisesta syntynyt lämpö oli sulattanut kappaleet osittain, jolloin raskaampi metallinen aines oli vajonnut keskelle. Pilkkoutumisessa sisäosat ovat sittemmin paljastuneet.

Japanilainen *Kiyotsugu Hirayama* tutki 1920-luvulla asteroidien ratoja ja löysi muutamia ryhmiä, joissa radat olivat hyvin samankaltaisia. Niitä kutsutaan nykyisin *Hirayaman ryhmiksi*. Kuhunkin ryhmään kuuluvat pikkuplaneetat ovat ilmeisesti alun perin muodostaneet yhden kappaleen, joka sitten on törmäyksen vuoksi hajonnut.

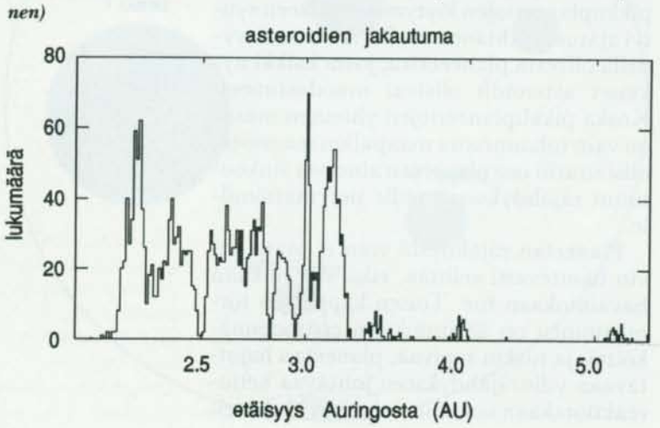
Suurin osa meteoriiteista on tätä samaa alkuperää. Asteroidien keskinäisissä törmäyksissä syntyy kaikenkokoisia sirpaleita ja osa sinkoutuu aina aurinkokokunnan sisäosiin saakka ulottuville radoille. Meteoriittien koostumus ja alkuaineiden isotooppisuhteet vaihtelevat yksilöstä toiseen, mikä onkin luonnollista, jos meteoriitit ovat peräisin useammasta kuin yhdestä emokappaleesta. Meteoriiteista ei ole löydetty yhdisteitä, jotka syntyvät korkeassa paineessa ja lämpötilassa, jollainen väistämättä vallitsisi suuremman planeetan sisällä. Radioaktiiviset iänmääritykset antavat meteoriittien iäksi muutaman tai muutaman kymmenen miljoonaa vuotta. Tätä ennen ne ovat olleet osana suurempaa kappaletta, suojassa kosmisten säteiden pommitukselta.

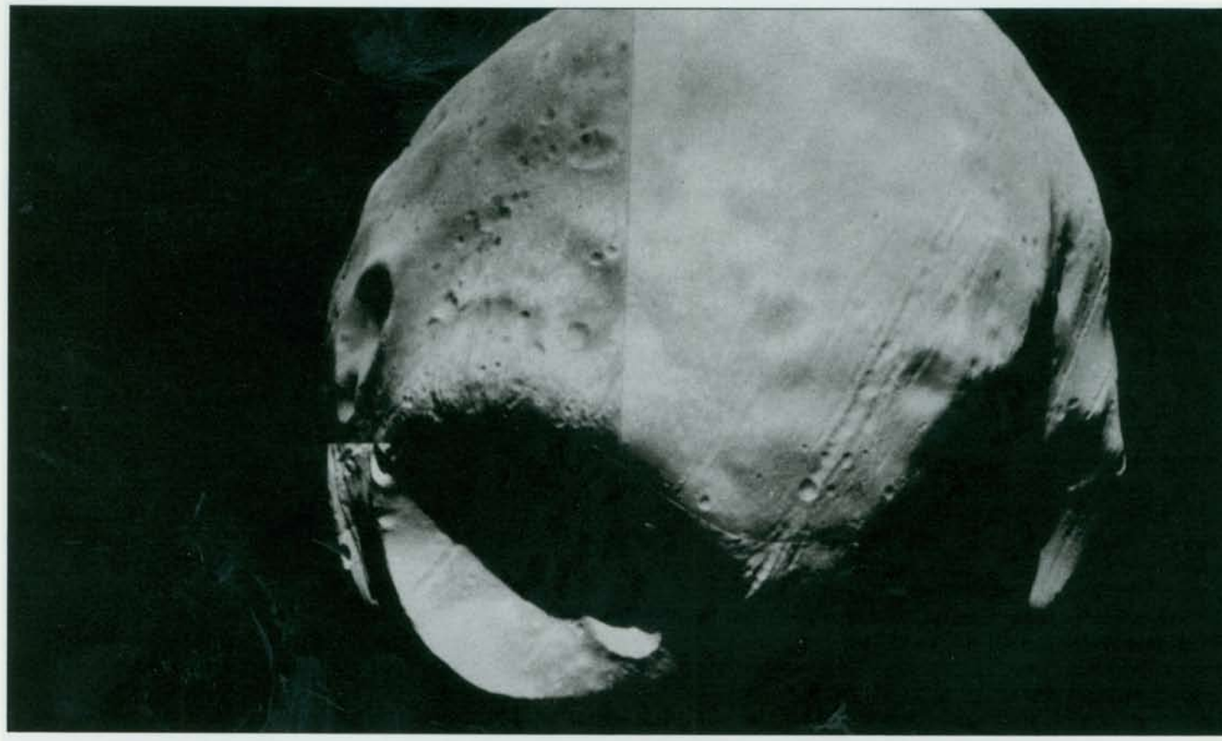
Kuinka komeetat sitten liittyvät tähän kuvaan? Komeetoissa on runsaasti herkästi haihtuvia aineita, joten ne eivät säily kauan aurinkokunnan sisäosissa. Ne lienevätkin syntyneet aurinkokunnan ulkoosissa eivätkä siis ole kovin läheistä sukua tavallisille pikkuplaneetoille.

Komeetat liikkuvat hyvin soikeita ratoja pitkin ja ne ovat suurimman osan ajastaan kaukana Pluton radan ulkopuolella. Jotkut kuitenkin jäävät vangiksi lyhyille kiertoradoille, jolloin ne menettävät haihtuvat aineensa suhteellisen nopeasti. Onkin arveltu, että ainakin osa Marsin ja Maan radan sisäpuolelle tulevista *Amor- ja Apollo-asteroideista* olisi entisiä komeettoja, joista kaikki haihtuva on jo haihtunut.

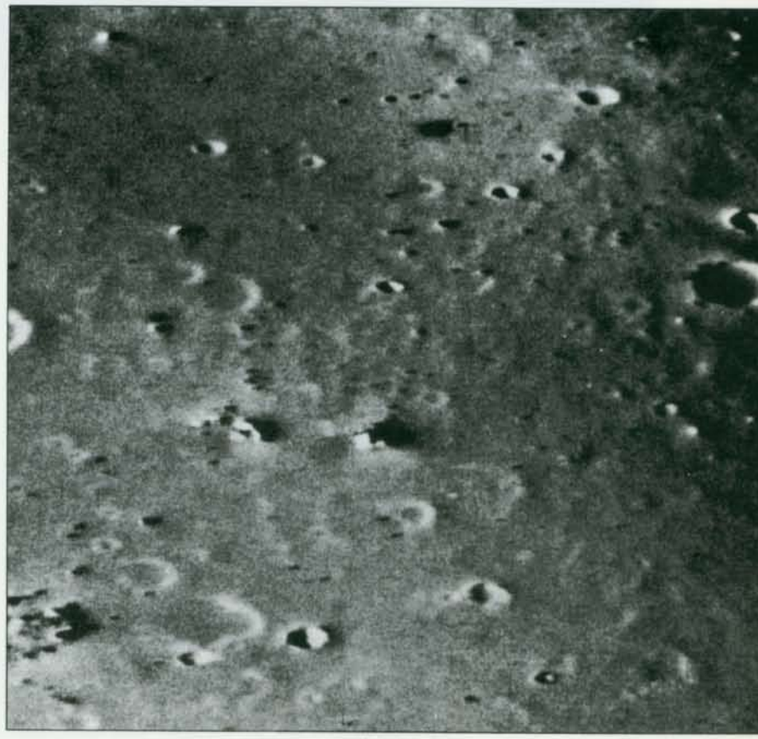
Komeettojen radalle jää tonnikaupalla

Kahdentuhannen kahdeksansadan pikkuplaneetan jakautuma Auringosta lasketun etäisyyden mukaan. Kirkwoodin aukot näkyvät selvästi. (Piirros Markku Poutanen)





Marsin kuut Phobos ja Deimos ovat luultavasti siepattuja asteroideja. Yllä Phobos, alla Deimoksen pintaa. (Kuvat Nasa/Viking 1 ja 2)



soraa ja muuta pikkutavaraa, joka synnyttää tähdenlentoja osuessaan Maan ilmakehään. Kappaleet ovat kuitenkin niin löyhiä, että ne hajoavat ja palavat poroksi ilmakehässä; maanpinnalle putoavat meteoriitit ovat peräisin asteroideista.

Asteroidien ja meteoroidien välinen raja on häilyvä. On makuasia, kutsuuko muutaman sadan metrin lohkaretta asteroidiksi vai meteoroidiksi. Vaikka tokkopa sillä on kovin suurta merkitystä, koska tällaisia kappaleita ei juurikaan pysty näkemään.

Kaikkein pienimmät hiukkaset sen sijaan näkyvät *eläinratavalona*, auringonlaskun suunnalla himmeästi erottuvana pystysuorana juovana. Eläinratavalo on planeettojenvälisistä pienistä hiukkasista sironnutta auringonvaloa. Pitkän hämärän vuoksi ei eläinratavalo näy Suomessa.

Pariakymmentä senttimetriä pienemmät kappaleet eivät kierrä pysyvillä radoilla, vaan ne kulkeutuvat vähitellen kohti Aurinkoa. Syynä on *Poyntingin–Robertsonin ilmiönä* tunnettu jarruuntuminen. Kun radallaan kiertävään kappaleeseen törmää Auringosta lähteneitä fotoneita ja hiukkasia enemmän etupuolelle kuin takapuolelle, pienenee hiukkasen liike-energia ja se kiertyy kohti Aurinkoa. Esimer-

Aurinkoa kiertänyt hiekansiru on osunut ilmakehään ja näkyy voimakkaana tähdenlentona. (Kuva Pekka Parviainen)

kiksi asteroidivyöhykkeeltä hiukkaset ajautuvat Aurinkoon lyhyemmässä ajassa kuin on kulunut aurinkokunnan synnystä. Niinpä Maan kohdalla olevien hitusten on täytynyt syntyä myöhemmin kuin itse aurinkokunta.

Miltä pikkuplaneetta näyttää?

Suurimmissakin kaukoputkissa pikkuplaneetat näkyvät pistemäisinä. Vielä ei yhdenkään ohi ole lentänyt luotainta, mutta jos Yhdysvaltain *Galileo*-luotain matkallaan kohti Jupiteria onnistuu suunnitelmien mukaan, saamme pikkuplaneetoista Gaspra ja Ida erinomaisia lähitietoja. Jo nyt meillä kuitenkin lienee varsin hyvä kuva tyypillisestä pikkuplaneetasta. Marsin kuut Phobos ja Deimos ovat pienen asteroidin kokoisia. Jupiterin Amaltheakuu on isohkon pikkuplaneetan kokoluokkaa, ja Saturnusta kiertävä Hyperion on mitä mainioin korvikeasteroidi.

Jo kauan on tiedetty asteroidien kirkkauden vaihtelevan säännöllisesti. Valonvaihtelu johtuu asteroidin pyörimisestä: väliin näemme suuremman pinnan valaistuna, väliin pienemmän, sillä asteroidin muoto voi olla varsin epäsäännöllinen. Kraatterit ja pinnan epätasainen väritys luovat oman lisänsä. Valonvaihtelun jaksosta saamme selville pikkuplaneetan pyörähdysajan. Ajat ovat pääasiassa 4 ja 20 tunnin välillä, vaikka sekä lyhyempiä että pitempiä jaksoja tunnetaan.

Suoraan ei asteroidien kokoja voida mitata kuin yhdellä vaivalloisella tavalla: tähdenpeittojen avulla. Joskus asteroidi kulkee Maasta nähtynä jonkin tähden editse. Jos peiton kesto saadaan tarkasti mitattua, voidaan asteroidin läpimitta laskea, ja jos tapahtuma vielä havaitaan usealla paikalla, saadaan likimääräinen muotokin selville. Tähdenpeitto vain näkyy hyvin kapealla vyöhykkeellä ja sen seuraaminen vaatii kaukoputken ja sähköisen rekisteröintilaitteen, jollainen harvoin osuu satunnaisen havaitsijan hyppysiin. Niinpä vain muutaman asteroidin läpimitta on onnistuttu mittaamaan tällä tavoin, mutta se on arvokas lisä epäsuorien menetelmien tarkistamiseksi.

Arizonan meteoriittikraatteri on runsaan kilometrin läpimittainen.

Epäsuorasti läpimitta tunnetaan nykyisin jo suurelle osalle asteroideja. Maapallon ja pikkuplaneetan kiertäessä Aurinkoa muuttuu asteroidin ja Auringon välinen kulma jatkuvasti. Samalla muuttuu myös pikkuplaneetan kirkkaus (ensin on tietysti poistettava etäisyyden vaihteluista ja asteroidin pyörimisestä johtuva valonvaihtelu). Kirkkauden muutoksesta voidaan laskea pikkuplaneetan valonheijastuskyky, koska tumman pinnan kirkkaus muuttuu eri tavalla kuin vaalean. Kun heijastuskyky ja havaittu kirkkaus tiedetään, voidaan laskea heijastavan pinnan ala ja tästä edelleen läpimitta.

Asteroidien väri ja pinnan kirkkaus vaihtelevat melkoisesti, mikä onkin ymmärrettävää, ovathan pikkuplaneetat peräisin paitsi monesta emokappaleesta, myös eri syvyydeltä alku-asteroideja. Värin, kirkkauden ja joidenkin muiden ominaisuuksien perusteella pikkuplaneetat jaetaan luokkiin. Luokittelu ei ole vakiintunut, mutta muutamat päätyypit erottuvat selvästi.

Noin kolme neljäsosaa asteroideista on hyvin tummia, ns. C-tyyppiä, jotka heijastavat saamastaan valosta vain muutaman prosentin. Ne ovat runsaasti hiiltä sisältäviä ja muistuttavat monilta ominaisuuksiltaan *hiilikondriitin* tyyppisiä meteoriitteja. Hiilikondriittien uskotaan olevan kaikkein alkuperäisintä, differentioitumattominta, ainetta. Alkuainekoostumus on sama kuin alkunebulassa, eikä aine ole läpikäynyt sulamis–jähmettymisprosessia, kuten esimerkiksi rautameteoriittien kohdalla on tapahtunut.

Noin kuudesosa asteroideista luokitellaan S-tyyppisiksi. Ne heijastavat vajaat kaksikymmentä prosenttia valosta, joten pinta on hivenen Kuun pintaa vaaleampi. S-asteroidien spektri muistuttaa joidenkin *kivi–rautameteoriittien* spektriä, joissa huomattavana osana ovat erilaiset silikaatit, mm. oliviini (Mg_2SiO_4 tai Fe_2SiO_4), ja

jossa seassa saattaa olla metallista rautaa ja nikkeliä. Ne ovat peräisin ainakin osittain sulaneesta aineesta eivätkä ole niin "alkuperäisiä" kuin C-tyypin asteroidit.

Kolmannen suhteellisen selvän (joskin harvinaisen) luokan muodostavat M-tyypin asteroidit, joiden spektrissä on merkkejä metallisesta raudasta ja nikkelistä, mutta ei silikaateista. Ne saattavat olla alku-asteroidien alastomia metallisia ytimiä, joista kaikki kiviaines on kadonnut lukuisten törmäysten myötä. Edellisten lisäksi on koko joukko tutkijoille päänvaivaa tuottavia sekarotuisia kappaleita, mikä törmäyshistorian perusteella ei ole kovinkaan merkillistä.

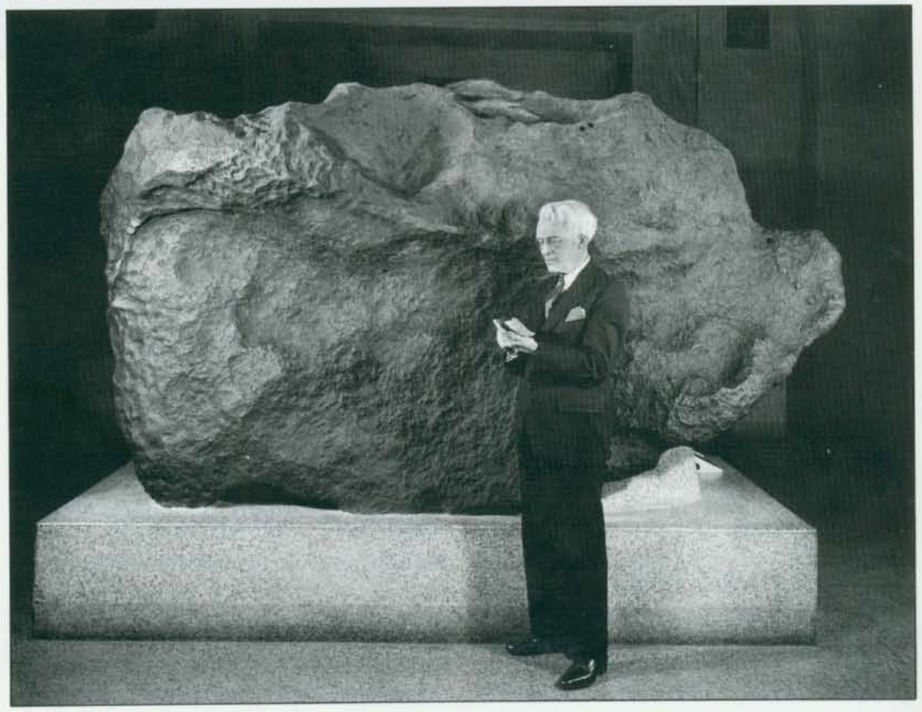
Kosmiset katastrofit

Osa pikkuplaneetoista ja meteoroideista kulkee planeettojen ratojen poikki. Vaikka törmäyksen todennäköisyys on hyvin pieni, niitä sattuu kuitenkin vuosimiljardien kuluessa. Varsin selvästi tämän näkee vaikkapa Kuussa, jonka pinta on täynnä erikokoisia törmäyskraattereita. Suurimmat iskut ovat synnyttäneet laavan täyttämiä merialtaita, pienimmät jäljet ovat mikroskooppisen pieniä. Myös maapallo on kokenut samanlaisen pommituksen, mutta kaikkein nuorimpia lukuunottamatta jäljet ovat lähestulkoon kadonneet.

Ilmakehä suojaa meitä kaikkein pienimmiltä kappaleilta. Jos selkeänä yönä katsot tovin taivasta, näet ennen pitkää *tähdenlennon* eli *meteorin*. Se on ilmakehään syöksyvä hiekanjyvän kokoinen kappale, *meteoroidi*, jonka nopeus suurimmillaan voi olla 70 km/s. Kitkan vaikutuksesta meteoroidi kuumenee hehkuvaksi ja palaa poroksi jo lähes 100 km korkeudessa.

Hieman suuremmat jyväset aiheuttavat komean *tulipallon* eli *bolidin*. Riittävän suuri, ehkä pään kokoinen lohkare säilyy osittain maan pinnalle saakka, jolloin sitä kutsutaan *meteoriitiksi*. Pienempien vauhti hidastuu ilmakehässä, jolloin ne putoavat loppumatkan kirjaimellisesti kuin kivi, mutta suuremmat, kymmenien metrien läpimittaiset tuskin edes huomaavat ilmakehää, vaan ne tömähtävät maahan kosmisella nopeudellaan.

Meteoriitteja putoaa Maan pinnalle vuosittain satoja, mutta niistä vain murtoosa koskaan löydetään. Itse asiassa maapalloon törmää sata tonnia erikokoisia meteoroideja päivässä. Vaikka määrä tuntuukin isolta, saa moinen sade jatkua triljoona vuotta (10^{15} v.) ennen kuin maapallon massa on tämän vuoksi kasvanut yhdellä vaivaisella prosentilla.



Maailman suurimpia rautameteoriitteja on Grönlannista löytynyt Ahnighito. (Kuva American Museum of Natural History)

Suuret lohkareet ovat onneksi harvinaisia. Suurin havaittu meteoriitti putosi v. 1947 Itä-Siperiaan. Tämä Sihote-Alinin nimellä kulkeva meteoriitti oli alun perin parimetrinen rauta–nikkelilohkare, josta putoamisen jälkeen kerättiin talteen kymmeniä tonneja. Ja tämä oli vielä varsin pieni kappale. Esimerkiksi Arizonan suuren meteoriittikraatterin sai aikaan noin kolmenkymmenen metrin läpimittainen lohkare.

Muutaman kymmenen metrin läpimittaiset meteoriitit saavat aikaan paljon pahempaa jälkeä kuin ydinpommi. Ne tunkeutuvat kilometrin parin syvyyteen, missä ne räjähtävät synnyttäen suuren kraaterin ja lennättäen tuhansia tonneja pölyä korkealle ilmakehään. Seurauksena saattaa olla ydintalvea muistuttava ilmastonmuutos, joka ulottuu koko maapallolle. On jopa esitetty, että dinosaurusten katoamiseen olisi ollut syynä tällainen katastrofi ja sitä seurannut ilmaston tilapäinen voimakas kylmeneminen.

Suomessakin on yksi hyvin tunnettu meteoriittikraatteri, Lappajärvi. Se on vajaan 80 miljoonan vuoden ikäinen törmäysjälki, jonka pituus on nykyisin runsaat 20 km ja leveys hieman yli 10 km. Tämän kokoluokan törmäyksiä sattuu onneksi varsin harvoin, korkeintaan ehkä kerran vuosimiljoonassa.

Sotaa, ruttoa ja nälänhätää

Komeetat eli *pyrstötähdet* ovat ehkä näyttävimpiä aurinkokuntamme kohteista. Ne ilmestyvät äkkiarvaamatta taivaalle ja niiden erikoinen muoto ja liike on ihmetyttänyt ja pelottanut ihmiskuntaa kautta aikain. Komeettoja onkin pidetty kaikenlaisten vitsausten airuina, ja niiden muodoissa on nähty enteitä niin hallitsijoiden kuin kokonaisten kansakuntien kukistumisesta.

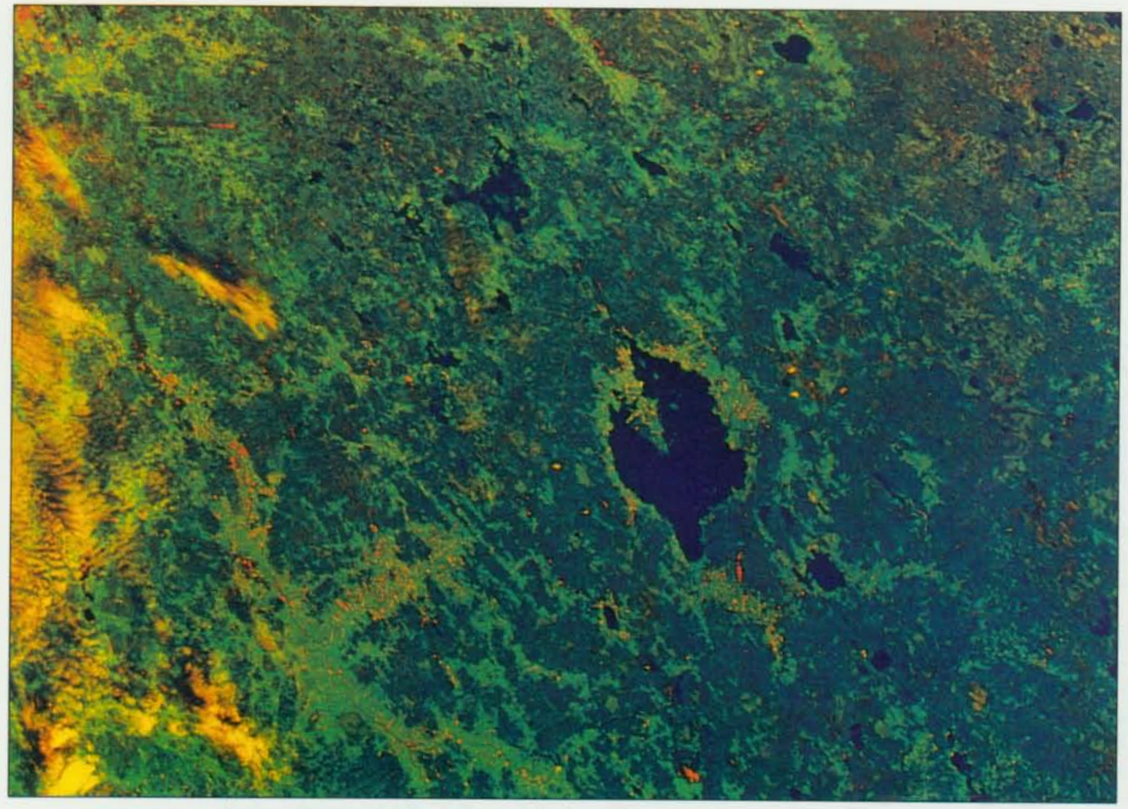
Vielä pitkään keskiajalle komeettoja pidettiin ilmakehään kuuluvina ilmiöinä. Käsitys oli peräisin Aristoteleelta, ja niinpä eurooppalaiset taivaan tarkkailijat eivät juurikaan välittäneet merkitä muistiin komeettojen paikkoja taivaalla. Kronikoissa ja aikalaisten kertomuksissa ovat kuvaukset varsin voimakkaasti värittyneitä. Onneksi kiinalaisten ja japanilaisten tähtitieteilijöiden toimia eivät eurooppalaiset ennakkoluulot häirinneet, joten heiltä löydämme monia tarkkoja komeettahavaintoja.

Tanskalainen *Tyko Brahe* osoitti tarkoilla havainnoillaan, että vuoden 1577 kirkas komeetta liikkui kuunylisessä maailmassa eikä voinut olla Maasta nousevaa palavaa suokaasua. *Isaac Newtonin* luoman taivaanmekaniikan avulla komeettojenkin oudoilta näyttävät liikkeet saatiin hallintaan. Ensimmäisenä tässä työssä kunnostautui *Edmund Halley*, Newtonin maanmies ja toinen kuninkaallinen astronomi. Komeettojen ratoja tutkiessaan hän havaitsi joidenkin toistuvan säännöllisin väliajoin ja joillekin muille hän sai laskuistaan lyhytjaksoiset radat. Yksi todella osoittautui ennustetun kaltaiseksi, ja tuo komeetta tunnetaan nykyisin *Halleyn komeettana*.

Tähdenlennot tulevat välillä parvina, kun maapallo törmää komeetan radalle jääneeseen pölyyn. Leonidien meteoriparvi oli tavattoman komea marraskuussa 1966. (Kuva National Optical Astronomy Observatories)

Syyttä suotta ovat komeettaparat maineensa saaneet. Itse komeetta ei ole kovin kummallinen. Se on muutaman kilometrin läpimittainen, jäistä, lumesta ja sorasta muodostunut harva-aineinen kappale. Varsinaista ydintä ympäröi harva vetykaasusta muodostunut kehä.

Komeetta viettää suurimman osan ajastaan kaukana planeettojen ratojen ulkopuolella. Vasta kun se tulee soikealla radallaan aurinkokunnan sisäosiin, alkaa tunnusomainen ulkonäkö muodostua.



Suomen tunnetuin meteoriittikraatteri on Lappajärvi. Järvi ja peltoaukeamat osoittavat kraatterin pyöreän muodon. (Satelliittikuva Mikko Punkari)

Kun komeetta on 2–3 AU:n päässä, alkaa sen Auringon lämmittämästä pinnasta haihtua jäätä. Kaasun mukana irtoaa myös pölyä. Pöly ja kaasu näkyvät ytimen ympärillä huntuna, josta aurinkotuuli ja Auringon säteilypaine levittävät aineen vähitellen pitkäksi pyrstöksi. Pyrstö saattaa pisimmillään olla yli 100 miljoonaa kilometriä ja Maasta käsin nähtynä ulottua lähes koko taivaankannen yli.

Usein komeetalla nähdään kaksi pyrstöä: sinertävä, suora ns. *plasmapyrstö* sekä kaarevampi, väriltään kellertävä *pölypyrstö*. Plasmapyrstö muodostuu osittain ionisoituneesta kaasusta sekä hyvin hienojakoisesta pölystä, jota aurinkotuuli painaa poispäin Auringosta. Osa pyrstön valosta on heijastunutta auringonvaloa, mutta sinertävä väri syntyy ultraviolettisäteilyn virittämistä atomeista ja molekyyleistä kun niiden viritystila purkautuu. Plasmapyrstössä näkyy usein myös mutkia tai sisäistä rakennetta. Sen saa aikaan Auringon magneettikenttä, jonka ohjaamana plasma liikkuu.

Koska komeetta liikkuu radallaan, ei pyrstö osoita aivan suoraan poispäin Auringosta, vaan näyttää jäävän hieman jälkeen. Plasmapyrstö on melko suora, mutta pölypyrstö voi olla hyvinkin kaareva, koska hiukkasten nopeudet ovat paljon pienemmät kuin plasmapyrstön ionien. Pölypyrstön hiukkaset liikkuvatkin Auringon säteilypaineen ajamina, joten nopeudet eivät kohoa kovin suuriksi.

Joskus komeetalla nähdään kohti Aurinkoa sojottava *vastapyrstö*. Todellisuudessa se on vain voimakkaasti kaareutunut pölypyrstö, joka Maasta katsoen näyttää sopivissa olosuhteissa osoittavan Aurinkoon.

Hyvin likainen lumipallo

Komeetan ydin on niin pieni, ettei sitä voi Maasta käsin havaita. Niinpä Halleyn komeetan vieraillessa aurinkokunnan sisäosissa vuonna 1986 tarjoutui erinomainen tilaisuus tutkia komeetan ydintä luotaimin.

Halley on ylivoimaisesti kuuluisin komeetoista. Sen kiertoaika Auringon ympäri on n. 76 vuotta ja komeetasta on merkintöjä historiankirjoissa jo kolmen vuosituhannen takaa. Halleyn rata on tar-

Halleyn komeetta kuvattuna Euroopan eteläisessä observatoriossa Chilessä 1.3.1986. (Kuva ESO)

Parhaat olemassaolevat kuvat Halleyn ytimestä, vasemmalla Neuvostoliiton Vega-luotaimen, oikealla eurooppalaisen Giotto-luotaimen kuvaamana. (Giotto-kuva copyright European Space Agency)

kasti tiedosssa, ja niinpä jo vuonna 1982, neljä vuotta ennen lähintä hetkeä, se löytyi häviävän pienenä pisteenä maailman suurimpien kaukoputkien ottamista kuvista. Myös neljä luotainta lähetettiin matkaan.

Luotainkuvissa Halley paljastui pinnaltaan hyvin tummaksi. Pinta on mahdollisesti jotain tervan tapaista orgaanista tököttiä, joka muodostaa eristävän kuoren itse ytimen ympärille. Kuori ei liene kovin paksu, ehkä vain senttimetrien luokkaa, ja sen täytyy uudistua jatkuvasti. Kuoren raoista suihkuaa kaasua ja pölyä voimakkaina purkauksina, ja tämä tekee komeettojen kirkkauksien ennustamisen erittäin vaikeaksi. Itse ydin oli kooltaan 13 × 7 km, keskeltä hieman laihempi kuin päistään.

Amerikkalaisen *Fred Whipplen* klassinen "likainen lumipallo" -malli ei aivan tarkkaan kuvaa komeettoja, sillä ainakin Halleyn tapauksessa pinta oli pikeminkin likaa kuin lunta. Tosin kuoren alta voikin paljastua mallin mukainen kappale, sillä haihtuvissa kaasuissa vettä oli n. 80 %. Loppu on pääasiassa hiilidioksidia sekä jonkin verran hydroksyyli-, ammonium- ja hiilivetymolekyylejä. Auringon säteily ionisoi irronneet atomit ja molekyylit hyvin nopeasti. Hiiliatomeja ja -molekyylejä oli odottamattoman paljon, mikä saattaisi viitata komeetassa mahdollisesti oleviin orgaanisiin yhdisteisiin.

Luotainmittausten mukaan Halleysta haihtui kaasua 10–40 tonnia sekunnissa määrän vaihdellessa ajallisesti varsin voimakkaasti. Tämän lisäksi irtosi komeetan Aurinkoon päin olevalta puolelta pölyä rekka-autolastillinen joka sekunti.

Viime vuosikymmenien komeimpia pyrstötähtiä on ollut Mrkosin komeetta syksyllä 1957. (Kuva Palomarin observatorio)

Arendin-Rolandin komeetalla oli voimakas vastapyrstö. (Kuva Turun yliopiston tähtitorni)

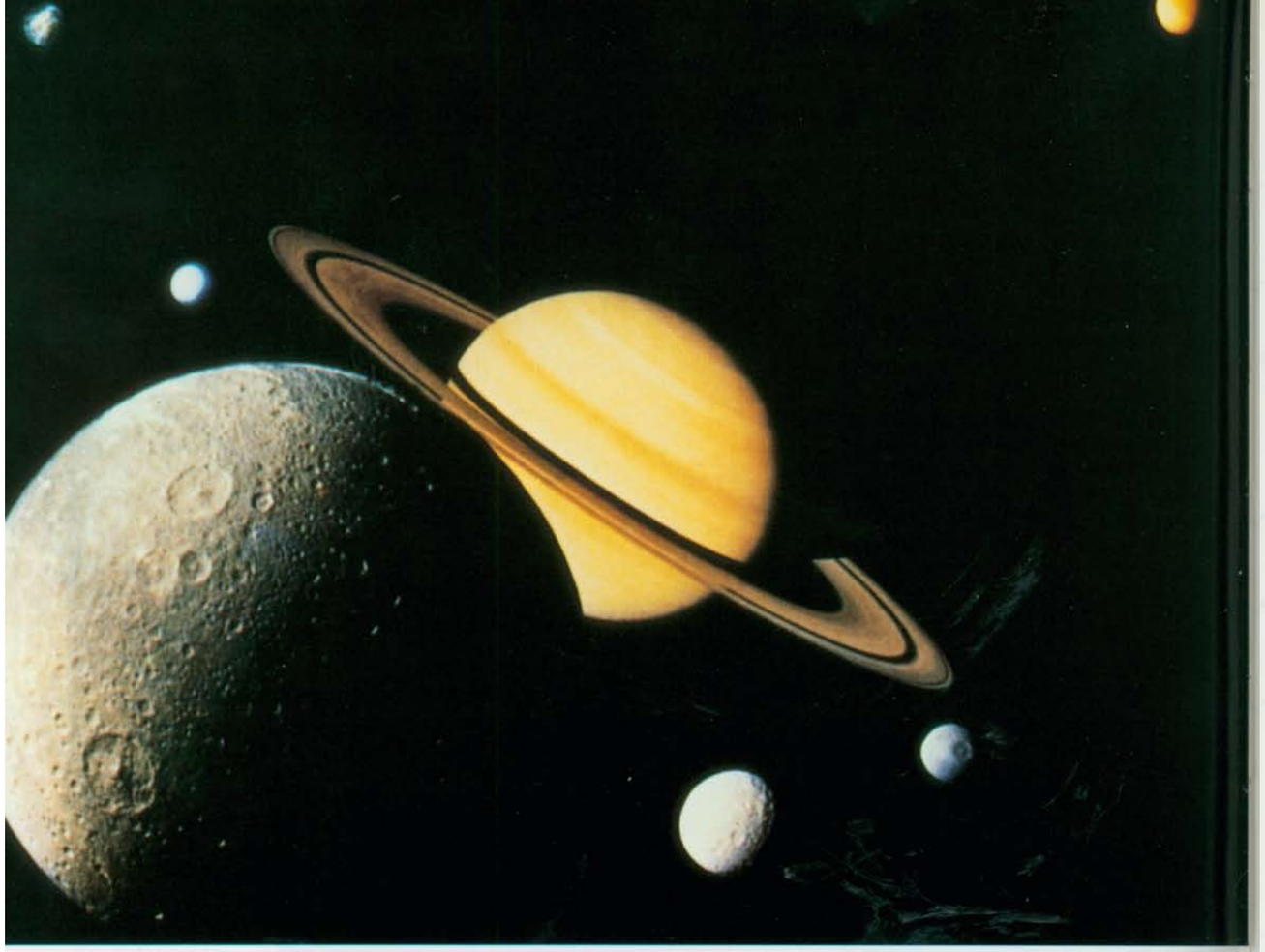
Loputtomiin ei komeetta moista laihdutusta siedä. Halleyn on laskettu olleen vasta runsaan 30 000 vuoden ajan lyhytjaksoisella radallaan, ja se lienee jo nähnyt parhaat päivänsä. Jossain on siis oltava käyttämättömien komeettojen varasto. Tällainen varasto on aurinkokuntaa ympäröivä ns. *Oortin pilvi*, jopa lähes valovuoden päähän ulottuva suunnaton alue, jossa lienee miljardeittain komeettoja.

Komeetat ovat ilmeisesti syntyneet samaan aikaan aurinkokunnan kanssa, mutta todennäköisesti sen ulkolaidoilla. Syntyneet harva-aineiset kappaleet sinkoutuivat kauas planeettojen taakse ulottuville radoille, missä lähitähtien aiheuttamat häiriöt saattoivat muuttaa ratoja niin, etteivät ne enää seuraavalla kierroksella palanneeetkaan aurinkokunnan sisäosiin. Lähes absoluuttisessa nollapisteessä ne ovat säilyneet muuttumattomina vuosimiljardista toiseen.

Aika ajoin jonkin rata muuttuu lähitähtien vaikutuksesta niin, että radan Aurinkoa lähin piste siirtyy aurinkokunnan sisäosiin. Tällaisia "ensikertalaisia" havaitaan vuosittain, mutta suurin osa nähdään vain kaukoputken avulla. Osa komeetoista jää vangiksi aurinkokunnan sisäosiin lyhytjaksoisille radoille. Näin on käynyt esimerkiksi Halleylle. Suurimpina syyllisinä ovat Jupiter ja Saturnus, jotka aiheuttavat häiriöitä komeettojen ratoihin.

Komeettojen aineen löyhyydestä on useita esimerkkejä. Vuonna 1845 *Bielan komeetta* hajosi kahtia. Osat havaittiin vielä komeetan seuraavalla kierroksella seitsemisen vuotta myöhemmin, mutta sen jälkeen niistä ei ole havaittu jälkeäkään. Myös muita hajoamisia on havaittu.

Vuonna 1908 tapahtui Siperian taigalla, Tunguskajoen alueella, voimakas räjähdys, joka kaatoi puita yli 30 km säteellä. Maahan ei jäänyt mitään kraatteria, joten kyseessä ei ollut meteoriitin putoaminen. Tunguskan räjähdys johtui mitä ilmeisimmin pienestä komeetan kappaleesta, joka räjähti hajalle jo muutaman kilometrin korkeudessa.



Yllä Saturnus ja joukko sen kuita. Näkymä on yhdistetty Voyager 1:n ja 2:n parhaista kuvista. (Kuva Nasa)

Kymmenen taulukkoa aurinkokunnan kappaleista

Taulukko 1. Perussuureita

tähtitieteellinen yksikkö (AU)	$1.496 \cdot 10^{11}$ m
parsek (pc)	206265 AU = $3.086 \cdot 10^{16}$ m
valon nopeus (c)	$2.997925 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}
gravitaatiovakio (G)	$6.67 \cdot 10^{-11}$N m^2 kg^{-2}
sideerinen vuosi	365.25636556 d
trooppinen vuosi	365.24219878 d
sideerinen vuorokausi	23 h 56 min 04.099 s
sideerinen kuukausi	27.321661 d
synodinen kuukausi	29.530588 d
Auringon massa	$1.989 \cdot 10^{30}$ kg
Auringon säde	$6.96 \cdot 10^{8}$ m
Auringon näennäinen visuaalinen magnitudi	−26.7
Auringon absoluuttinen visuaalinen magnitudi	+4.83
aurinkovakio	$1.39 \cdot 10^{3}$ W m^{-2}
Auringon efektiivinen lämpötila	5770 K

Taulukko 2. Yhteenveto tärkeimmistä tapahtumista planeettatutkimuksessa.

n. 3000—2000 eKr	ensimmäiset tunnetut havainnot planeetoista
n. 1400 eKr	varhaisimmat kiinalaiset kalenterit
n. 500 eKr	Pythagoraan koulukunta esittää käsityksensä taivaankappalten liikkeestä
n. 430 eKr	Anaksagoras selittää Kuun vaiheet
400—300 eKr	maailman malleja kehitellään, mm. Eudoksos esittää samankeskisten pallonkuorten teorian
n. 250 eKr	Aristarkhos Samoslainen esittää aurinkokeskisen järjestelmän
n. 200 eKr	Eratosthenes mittaa maapallon ympärysmitan
n. 160—127 eKr	Hipparkhoksen planeettaliikkeen malli
n. 140 jKr	Ptolemaios kehittää episykliteoriaa, Almagest ilmestyy
1448	ensimmäinen eurooppalainen almanakka
1543	Kopernikuksen De Revolutionibus ilmestyy
1546—1601	Tyko Brahe mittaa tarkasti planeettojen paikkoja
n. 1608	kaukoputki keksitään
1609	Kepler esittää kaksi ensimmäistä planeettaliikkeen lakiaan
1609—1610	Galileo Galilei ottaa kaukoputken käyttöön tähtitieteessä ja havaitsee Venuksen vaiheet, Jupiterin neljä suurta kuuta, Saturnuksen renkaat ym.
1618	Keplerin kolmas laki
1687	Newtonin Principia ilmestyy
1705	Halley julkaisee nimeään kantavan komeetan ratalaskut
1755	Kantin sumuhypoteesi — ensimmäinen "moderni" aurinkokunnan syntyteoria
1781	William Herschel löytää Uranuksen
1801	Giuseppe Piazzi löytää ensimmäisen asteroidin
1845—1846	LeVerrier ja Adams ennustavat Neptunuksen paikan
1846	Galle löytää Neptunuksen
1891	Max Wolf ottaa valokuvauksen käyttöön pikkuplaneettojen etsimisessä
1896	Poincarén Les Méthodes Nouvelles de la Méchanique Céleste ilmestyy
1907—1912	Sundman esittää kolmen kappaleen probleeman ratkaisun
1916	Merkuriuksen perihelikiertymän selitys Einsteinin yleisen suhteellisuusteorian avulla
1930	Clyde Tombaugh löytää Pluton
1957	Sputnik 1 kiertää maapalloa
1958	ensimmäinen tutkakosketus planeettoihin
1959	ensimmäiset kuvat Kuun Maahan näkymättömältä puolelta
1962	ensimmäiset luotaintiedot vieraan planeetan läheltä (Mariner 2 ja Venus)
1965	ensimmäiset luotainkuvat Marsista (Mariner 4)
1966	ensimmäiset tiedot Kuun pinnalta (Luna 9)
1967	ensimmäiset mittaukset Venuksen ilmakehässä (Venera 4)
1969	ensimmäiset ihmiset kuussa (Apollo 11)
1970	ensimmäiset tiedot vieraan planeetan pinnalta (Venera 7)
1973	ensimmäiset luotaintiedot Jupiterista (Pioneer 10)
1974	ensimmäiset lähikuvat Merkuriuksesta (Mariner 10)
1975	ensimmäiset kuvat Venuksen pinnalta (Venera 9)
1976	ensimmäiset kuvat Marsin pinnalta (Viking 1)
1977	Uranuksen renkaat löydetään
1978	Pluton kuu löytyy, havaintoja pikkuplaneettojen mahdollisista kuista
1979	ensimmäiset luotaintiedot Saturnuksesta (Pioneer 11), Jupiterin renkaat löydetään, Jupiter ja sen kuut kartoitetaan (Voyager 1 ja 2)
1980—1981	Saturnus kuineen ja renkaineen kartoitetaan (Voyager 1 ja 2)
1986	ensimmäiset lähikuvat Uranuksesta ja sen kuista; uusia Uranuksen kuita löydetään (Voyager 2)
1986	Halleyn komeettaa kuvataan luotainten avulla
1989	ensimmäiset lähikuvat Neptunuksesta ja sen kuista; uusia Neptunuksen kuita ja renkaat löydetään (Voyager 2)

Taulukko 3. Planeetat

nimi	merkki	planeetan säde km	planeetan säde Maa=1	massa kg	massa Maa=1	tiheys vesi=1	tiheys Maa=1	pyörähdysaika
Merkurius	☿	2439	0.382	$3.19 \cdot 10^{23}$	0.055	5.4	0.99	59 d
Venus	♀	6052	0.949	$4.73 \cdot 10^{24}$	0.815	5.2	0.95	244.3 d
Maa	⊕	6378	1.000	$5.80 \cdot 10^{24}$	1.000	5.5	1.00	23 h 56 min 4.1 s
Mars	♂	3397	0.533	$6.21 \cdot 10^{23}$	0.107	3.9	0.71	24 h 37 min 22.7 s
Jupiter	♃	71398	11.194	$1.84 \cdot 10^{27}$	317.89	1.3	0.21	9 h 55 min 30 s
Saturnus	♄	60000	9.41	$5.52 \cdot 10^{26}$	95.17	0.7	0.13	10 h 30 min
Uranus	♅	26320	4.4	$8.44 \cdot 10^{25}$	14.56	1.1	0.18	17 h 14 min
Neptunus	♆	24764	3.8	$1.00 \cdot 10^{26}$	17.24	1.7	0.31	16 h 7 min
Pluto	♇	1123	0.18	$1.0 \cdot 10^{22}$	0.002	2	0.36	6 d 9 h 17 min

Taulukko 4. Planeettojen radat. Rataelementit ovat vuoden 1991 arvoja.

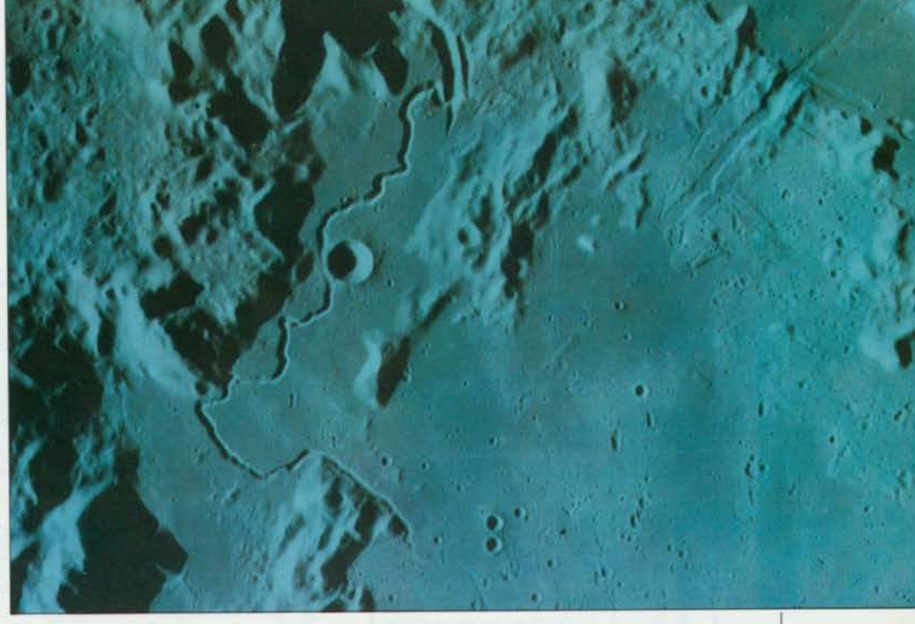
planeetta	radan isoakselin puolikas AU	radan isoakselin puolikas 10^6 km	eksentrisyys	inklinaatio (°)	nousevan solmun pit. (°)	perihelin pituus (°)
Merkurius	0.387	57.9	0.206	7.00	48.2	77.3
Venus	0.723	108.2	0.007	3.39	76.6	131.2
Maa	1.000	149.6	0.017	0.00	—	102.9
Mars	1.524	227.9	0.093	1.85	49.5	335.9
Jupiter	5.203	778.4	0.048	1.30	100.4	15.6
Saturnus	9.52	1424	0.055	2.49	113.6	93.3
Uranus	19.17	2867	0.048	0.77	74.0	169.5
Neptunus	30.01	4490	0.009	1.77	131.7	57.8
Pluto	39.56	5918	0.250	17.15	110.1	223.6

Kraatteri Merkuriuksen pinnalla. Räjähdyksessä ylös sinkoutuneet lohkareet ovat synnyttäneet ympäristöön paljon pikkukraattereita. (Kuva Nasa/Mariner 10)

ekvaattorin kaltevuus (°)	litistyneisyys	painovoima pinnalla ms^{-2}	painovoima pinnalla Maa=1	pakonopeus km/s	Bondin albedo	lämpötila K	suurin kirkkaus	tunnettuja kuita
0.0	0	3.63	0.37	4.2	0.06	615/130	− 1.8	0
177.3	0	8.57	0.87	10.3	0.76	750	− 4.3	0
23.44	1:297	9.81	1.00	11.2	0.36	300	−	1
25.19	1:192	3.73	0.38	5.0	0.16	220	− 2.0	2
3.12	1:16	25.90	2.64	60.2	0.73	140	− 2.5	16
26.73	1:10	11.38	1.16	36.2	0.76	100	+ 0.7	17
97.9	1:16	10.89	1.11	22	0.93	65	+ 5.5	15
29.6	1:50	14.03	1.43	25	0.84	55	+ 7.8	8
118	?	0.5	0.05	1	?	45	+14.9	1

perihelaika	sideerinen kiertoaika v	sideerinen kiertoaika d	synodinen kiertoaika, d	ratanopeus km/s	keskiliike °/d
25.9.1990	0.2408	87.97	115.9	47.9	4.092
8.9.1990	0.6152	224.70	583.9	35.0	1.602
4.1.1990	1.0000	365.25	—	29.8	0.986
30.6.1990	1.8808	687.00	779.9	24.1	0.524
10.7.1987	11.863	4333	398.9	13.0	0.083
8.1.1974	29.35	10721	378.1	9.6	0.033
19.5.1966	83.90	30650	369.7	6.8	0.012
2.9.1876	164.4	60050	367.5	5.4	0.006
12.9.1989	248.8	90870	366.7	4.7	0.004

Yutyn kraatteri Marsin pinnalla. Pinnan alla ollut routa on räjähdyksessä sulanut, ja ulos roiskunut aine on ollut kuin mutaa. (Kuva Nasa/Viking 1)



Yllä koto-Kuumme pintaa. Keskustan alapuolella kiemurteleessyvä Hadleyn rotko. Alla Saturnuksen Mimas-kuun kraatte-reita. (Kuvat Nasa)

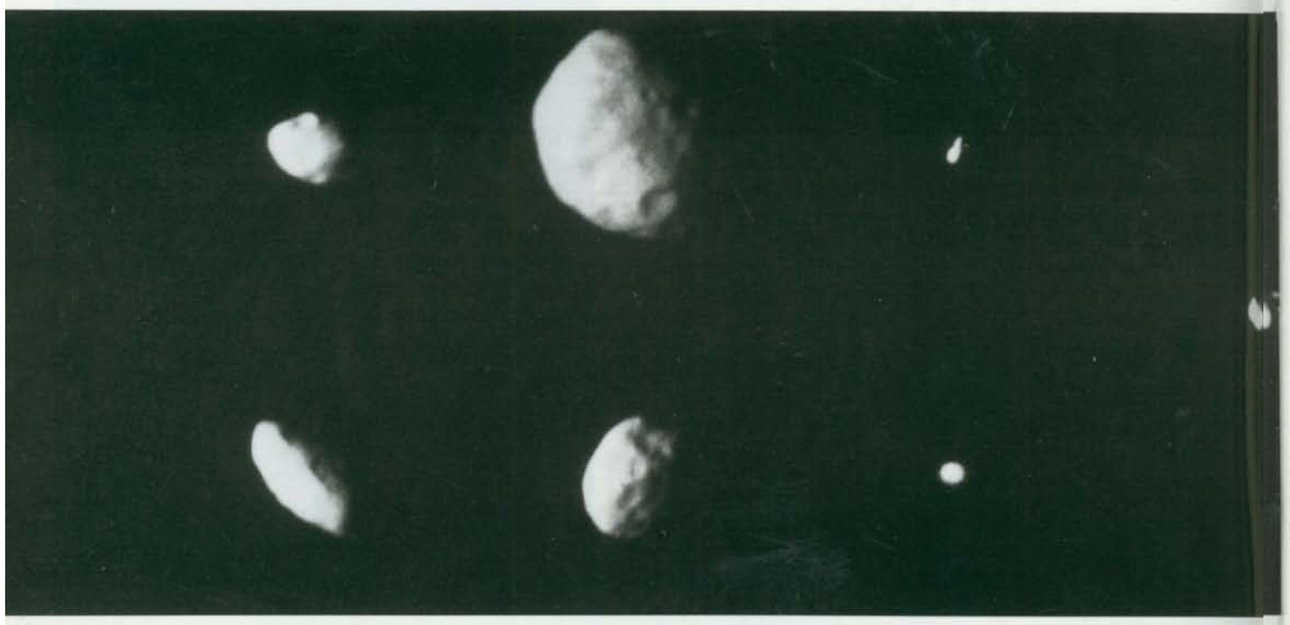
Taulukko 5. Planeettojen kuut

planeetta/ kuu	löytäjä	löytö-vuosi	radan iso-akselin puolikas 10^3 km	planeetan sädettä	sideerinen kiertoaika d	eksent-risyys	inklinaa-tio (°)	läpimitta km	massa (planeetan massaa)	tiheys vesi=1	geomet-rinen albedo	keskimäär. oppositio-magnitudi
Maa												
Kuu	—	—	384.5	60.2	27.3217	0.055	18–29	3476	1/81.3	3.34	0.12	−12.7
Mars												
Phobos	Hall	1877	9.37	2.67	0.3189	0.015	1.1	27×21×19	1.5×10^{-8}	2.0	0.06	+11.6
Deimos	Hall	1877	23.52	6.90	1.262	0.001	0.9–2.7	15×12×11	3×10^{-9}	2.0	0.07	+12.7
Jupiter												
XVI Metis	Voyager 1	1980	128	1.79	0.295	0	0	40			0.05	+17.5
XV Adrastea	Voyager 2	1979	129	1.81	0.298	0	0	20			0.05	+19.1
V Amalthea	Barnard	1892	181	2.54	0.498	0.003	0.4	270×165×153	$4\cdot10^{-9}$		0.05	+14.1
XIV Thebe	Voyager 1	1980	222	3.11	0.674	0.02	0.8	100			0.05	+15.6
I Io	Galilei	1610	422	5.91	1.77	0.0	0.0	3630	$4.7\cdot10^{-5}$	3.5	0.63	+ 5.0
II Europa	Galilei	1610	671	9.40	3.55	0.0	0.5	3138	$2.6\cdot10^{-5}$	3.0	0.64	+ 5.3
III Ganymedes	Galilei	1610	1070	15.0	7.15	0.001	0.2	5262	$7.8\cdot10^{-5}$	1.9	0.43	+ 4.6
IV Kallisto	Galilei	1610	1885	26.4	16.69	0.1	0.2	4800	$5.6\cdot10^{-5}$	1.8	0.17	+ 5.6
XIII Leda	Kowal	1974	11110	155.6	240	0.15	27	16				+20.2
VI Himalia	Perrine	1905	11470	160.6	251	0.16	28	186			0.03	+14.7
X Lysithea	Nicholson	1938	11710	164.0	260	0.13	29	36				+18.4
VII Elara	Perrine	1905	11740	164.4	260	0.21	25	76			0.03	+16.4
XII Ananke	Nicholson	1951	20700	290	617 R	0.17	147	30				+18.9
VII Pasiphae	Melotte	1908	23330	327	735 R	0.39	145	50				+17.7
IX Sinope	Nicholson	1914	23370	327	758 R	0.28	153	36				+18.3
Saturnus												
Atlas	Voyager 1	1980	137.7	2.29	0.602	0.0	0.3	40×20			0.9	+16
Prometheus	Voyager 1	1980	139.4	2.32	0.613	0.0	0.0	140×80			0.6	+16
Pandora	Voyager 1	1980	141.7	2.36	0.629	0.0	0.0	110×70			0.9	+18
Epimetheus	Cruikshank	1980	151.4	2.52	0.694	0.0	0.3	140×100			0.8	+15
Janus	Pascu	1980	151.5	2.52	0.695	0.0	0.1	220×160			0.8	+16
Mimas	W.Herschel	1789	185.5	3.09	0.942	0.0	1.5	392	$6\cdot10^{-8}$	1.2	0.5	+12.9
Enceladus	W.Herschel	1789	238.0	3.97	1.37	0.0	0.0	500	$1\cdot10^{-7}$	1.1	1.0	+11.8
Telesto	Lun Plan Lab	1980	294.7	4.91	1.89	—	—	34×26			0.5	+19
Tethys	Cassini	1684	294.7	4.91	1.89	0.0	1.9	1060	$1\cdot10^{-6}$	1.0	0.9	+10.3
Calypso	U.S.NavalObs	1980	294.7	4.91	1.89	—	—	34×22			0.6	+20
Dione	Cassini	1684	377.4	6.29	2.74	0.0	0.0	1120	$2\cdot10^{-6}$	1.4	0.7	+10.4
Helene	Laques, Lecacheux	1980	377.4	6.29	2.74	0.0	0.2	36×30			0.7	+19
Rhea	Cassini	1672	527.0	8.78	4.52	0.001	0.4	1530	$3\cdot10^{-6}$	1.3	0.7	+ 9.7
Titan	Huyhens	1665	1222	20.4	15.9	0.03	0.3	5150	$2.4\cdot10^{-4}$	1.9	0.2	+ 8.3
Hyperion	Bond	1848	1481	25	21	0.1	0.4	410×220			0.3	+14.2
Japetus	Cassini	1671	3561	59	79	0.03	15	1460	$4\cdot10^{-6}$	1.2	0.5/0.05	+11.1
Phoebe	Pickering	1898	12950	216	550 R	0.16	150	220			0.06	+16.5
Uranus												
Cordelia	Voyager 2	1986	49.77	1.89	0.335	0.0	0.1	50				
Ophelia	Voyager 2	1986	53.79	2.04	0.376	0.0	0.1	50				
Bianca	Voyager 2	1986	59.17	2.25	0.435	0.0	0.2	50				
Cressida	Voyager 2	1986	61.78	2.35	0.464	0.0	0.0	60				
Desdemona	Voyager 2	1986	62.68	2.38	0.474	0.0	0.2	60				
Juliet	Voyager 2	1986	64.35	2.44	0.493	0.0	0.1	80				
Portia	Voyager 2	1986	66.09	2.51	0.513	0.0	0.1	80				
Rosalind	Voyager 2	1986	69.94	2.66	0.558	0.0	0.3	60				
Belinda	Voyager 2	1986	75.26	2.86	0.624	0.0	0.0	50				
Puck	Voyager 2	1986	86.01	3.27	0.762	0.0	0.3	170				
Miranda	Kuiper	1948	130	5.13	1.41	0.02	3.4	480	$1\cdot10^{-6}$		0.27	+16.5
Ariel	Lassell	1851	191	7.54	2.52	0.003	0.0	1170	$1\cdot10^{-5}$		0.34	+14.4
Umbriel	Lassell	1851	260	10	4.1	0.004	0.0	1190	$6\cdot10^{-6}$		0.18	+15.3
Titania	W.Herschel	1787	436	17	8.7	0.002	0.0	1590	$5\cdot10^{-5}$		0.27	+14.0
Oberon	W.Herschel	1787	583	23	13.5	0.001	0.0	1550	$3\cdot10^{-5}$		0.24	+14.2
Neptunus												
1989 N6	Voyager 2	1989	48	2.0	0.296	0	5	54				
1989 N5	Voyager 2	1989	50	2.1	0.313	0	0	80				
1989 N3	Voyager 2	1989	52	2.1	0.333	0	0	150				
1989 N4	Voyager 2	1989	62	2.6	0.429	0	0	180				
1989 N2	Voyager 2	1989	74	3.0	0.554	0	0	190				
1989 N1	Voyager 2	1989	118	4.8	1.12	0	0	400				
Triton	Lassell	1846	355	14.6	5.9 R	0.0	160	2705		2.0	0.7	+13.6
Nereid	Kuiper	1949	5489	227	360	0.75	28	340				+18.7
Pluto												
Kharon	Christy	1978	19.6	13	6.39		95	1192	0.1?			+16−+17

Taulukko 6. Tunnettuja asteroideja

asteroidi	löytäjä ja löytövuosi	radan-isoakselin puolikas	eksentrisyys	inklinaatio (°)	sideerinen kiertoaika, v.	läpimitta km	pyörähdysaika h	geometrinen albedo	keskimäär. oppositiomag.	tyyppi
1 Ceres	Piazzi 1801	2.77	0.08	10.6	4.6	1025	9.08	0.06	7.9	C
2 Pallas	Olbers 1802	2.77	0.23	34.8	4.6	583	7.88	0.09	8.5	U
3 Juno	Harding 1804	2.67	0.26	13.0	4.4	249	7.21	0.16	9.8	S
4 Vesta	Olbers 1807	2.36	0.09	7.1	3.6	555	5.34	0.26	6.8	U
5 Astraea	Hencke 1845	2.58	0.19	5.3	4.1	116	16.81	0.13	11.2	S
6 Hebe	Hencke 1847	2.42	0.20	14.8	3.8	206	7.27	0.16	9.7	S
7 Iris	Hind 1847	2.39	0.23	5.5	3.7	222	7.14	0.20	9.4	S
8 Flora	Hind 1847	2.20	0.16	5.9	3.3	160	13.60	0.13	9.8	S
9 Metis	Graham 1848	2.39	0.12	5.6	3.7	168	5.06	0.12	10.4	S
10 Hygiea	DeGasparis 1849	3.14	0.12	3.8	5.6	443	18.00	0.05	10.6	C
433 Eros	Witt 1898	1.46	0.22	10.8	1.8	20	5.27	0.18	11.5	S
588 Achilles	Wolf 1906	5.18	0.15	10.3	11.8	70	?	?	16.4	U
624 Hektor	Kopff 1907	5.16	0.03	18.3	11.7	230	6.92	0.03	15.3	U
944 Hidalgo	Baade 1920	5.85	0.66	42.4	14.2	30	10.06	?	19.2	MEU
1221 Amor	Delporte 1932	1.92	0.43	11.9	2.7	?	?	?	20.4	?
1566 Icarus	Baade 1949	1.08	0.83	22.9	1.1	2	2.27	?	12.3	U
1862 Apollo	Reinmuth 1932	1.47	0.56	6.4	1.8	?	?	?	16.3	?
2060 Chiron	Kowal 1977	13.64	0.38	6.9	50.4	?	?	?	17.3	?

Saturnuksen pienet kuut ovat luultavasti samanlaisia epäsäännöllisiä kappaleita kuin asteroidit. Kuvassa kahdeksan kuuta, joiden läpimitta vaihtelee 20:stä 220 kilometriin. (Kuvat Nasa/Voyager 1 ja 2)



Taulukko 7. Tunnettuja komeettoja. Osa komeetoista on avonaisilla (hyperbelin tai paraabelin muotoisilla) radoilla, joille ei voi antaa kaikkia ratatietoja.

Komeetta	Viimeisin kerta perihelissä	Perihelietäisyys AU	Kiertoaika vuosia	Radan kaltevuus astetta	Aphelietäisyys AU	Seuraavan kerran perihelissä
Arend-Roland (1957 III)	1957	0.32	—	120	—	—
Bennett (1970 II)	1970	0.54	—	90	—	—
Encke (jaksollinen)	1987	0.34	3.3	12	4.1	1991
Halley (jaksollinen)	1986	0.59	76.1	162	35.3	2061
Kohoutek (1973 XII)	1973	0.14	—	14	—	—
Schwassman-Wachmann 1 (jaksollinen)	1989	5.54	16.1	10	7.2	2005
Stephan-Oterma (jaksollinen)	1981	1.60	38.8	18	21.3	2020
West (1976 VI)	1975	0.20	—	43	—	—

Taulukko 8. Voimakkaimmat tähdenlentoparvet. Parven nimen jälkeen on annettu se tähdistö, jossa parven radiantti eli säteilypiste sijaitsee. Parven meteoreja voi nähdä kolmannessa sarakkeessa ilmoitettuna aikana, parhaiten maksimiyönä. Toiseksi viimeisessä sarakkeessa on tunnissa näkyvien parven meteorien lukumäärä ja viimeisessä komeetta, josta meteorit ovat peräisin.

Parvi	Radiantin sijainti	Näkyvissä	Maksimi	Metoreja tunnissa	Komeetta
Kvadrantidit (bootidit)	Karhunvartija	1.—5.1.	3.—4.1.	30—40	—
Lyridit	Lyyra	19.—25.4.	22.4.	10	Thatcher
Eta-akvaridit	Vesimies	1.—12.5.	5.5.	5—10	Halley
Perseidit	Perseus	20.7—18.8.	12.8.	40—50	Swift-Tuttle
Kappa-cygnidit	Joutsen	17.—24.8.	20.8.	5	—
Orionidit	Orion	17.—26.10.	21.10.	10—15	Halley
Tauridit	Härkä	10.10.—5.12.	1.11.	5	Encke
Leonidit	Leijona	14.—20.11.	17.11.	10	Tempel-Tuttle
Geminidit	Kaksoset	7.—15.12.	13.—14.12.	40—50	—
Ursidit	Pieni karhu	17.—24.12.	22.12.	5	—

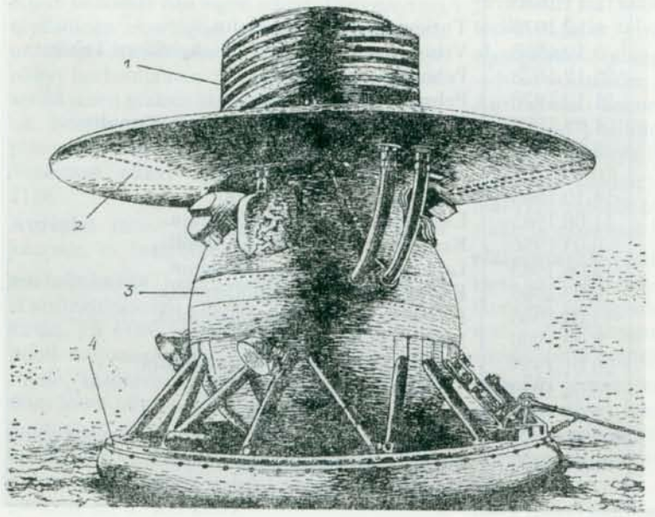
Bennettin komeetta näkyi hienosti 1970. (Kuva Lickin observatorio)

Taulukko 9. Onnistuneet kuulennot 1.4.1990 mennessä.

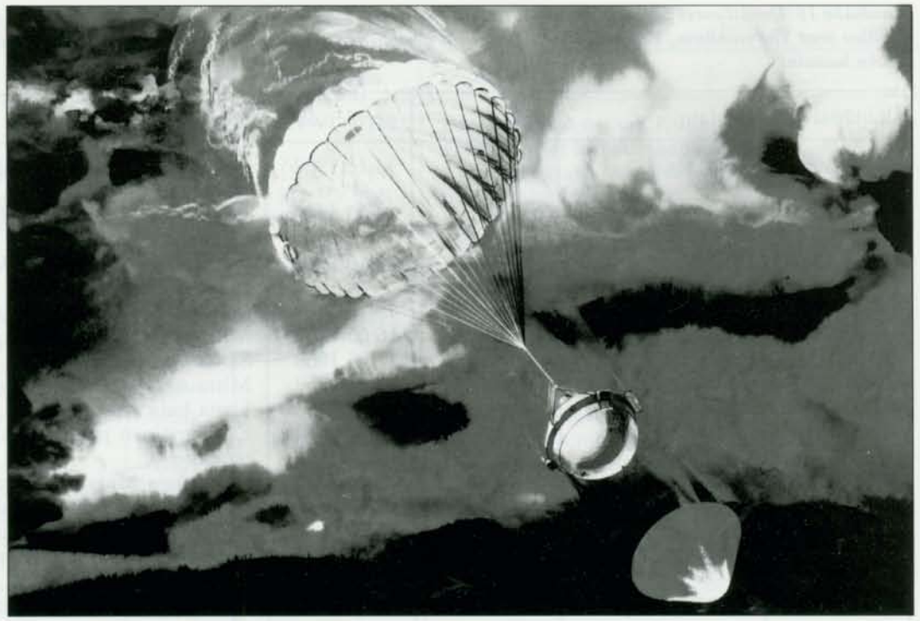
lähtöpäivä	nimi	maa	laskupaikka		toiminta
12.09.1959	Luna 2	NL	30N	1W	Ensimmäinen osuma Kuuhun.
4.10.1959	Luna 3	NL			Ensimmäiset kuvat takapuolelta.
28.07.1964	Ranger 7	USA	11S	21W	Lähetti kuvia syöksyessään pintaan.
17.02.1965	Ranger 8	USA	3N	25E	Sama kuin Ranger 7:llä.
21.03.1965	Ranger 9	USA	13S	2W	Sama kuin Ranger 7:llä
18.07.1965	Zond 3	NL			Tarkempia kuvia takapuolelta.
31.01.1966	Luna 9	NL	7N	64W	Ensimmäinen pehmeä lasku, kuvia pinnalta.
31.03.1966	Luna 10	NL			Ensimmäinen Kuun satelliitti.
30.05.1966	Surveyor 1	USA	3S	43E	Pehmeä lasku, valokuvausta.
10.08.1966	Lunar Orbiter 1	USA			Valokuvausta kiertoradalta.
24.08.1966	Luna 11	NL			Tutkimuksia kiertoradalla.
22.10.1966	Luna 12	NL			Sama kuin Luna 11:llä.
6.11.1966	Lunar Orbiter 2	USA			Valokuvausta kiertoradalta.
21.12.1966	Luna 13	NL	19N	62W	Tutkimuksia pinnalla.
5.02.1967	Lunar Orbiter 3	USA			Valokuvausta kiertoradalta.
17.04.1967	Surveoyr 3	USA	3S	23W	Tutkimuksia pinnalla.
4.05.1967	Lunar Orbiter 4	USA			Valokuvausta kiertoradalta.
19.07.1967	Explorer 35	USA			Tutkimuksia kiertoradalla.
2.08.1967	Lunar Orbiter 5	USA			Valokuvausta kiertoradalta.
8.09.1967	Surveyor 5	USA	1N	23E	Tutkimuksia pinnalla.
7.11.1967	Surveyor 6	USA	1N	1W	Sama kuin Surveoyr 5:llä
7.01.1968	Surveyor 7	USA	41S	12W	Sama kuin Surveyor 5:llä
7.04.1968	Luna 14	NL			Tutkimuksia kiertoradalla.
14.09.1968	Zond 5	NL			Kiersi Kuun ja palasi maahan.
10.11.1968	Zond 6	NL			Sama kuin Zond 5:llä
21.12.1968	Apollo 8	USA			Ensimmäiset ihmiset (Borman, Lovell, Anders) kiersivät Kuun ja palasivat Maahan.
18.05.1969	Apollo 10	USA			Stafford, Young ja Cernan kävivät 15 km:n päässä Kuun pinnasta.
16.07.1969	Apollo 11	USA	1N	24E	Ensimmäiset ihmiset Kuussa: Armstrong ja Aldrin, Collins kiersi Kuuta.
7.08.1969	Zond 7	NL			Kiersi Kuun ja palasi Maahan.
14.11.1969	Apollo 12	USA	3S	23W	Conrad ja Bean tekivät tutkimuksia Kuussa, Cordon oli kiertoradalla.
12.09.1970	Luna 16	NL	1S	56E	Haki automaattisesti näytteitä.
20.10.1970	Zond 8	NL			Kiersi Kuun ja palasi Maahan.
10.11.1970	Luna 17	NL	38N	35W	Vei Kuuhun Lunohod 1:n.
31.01.1971	Apollo 14	USA	4S	18W	Shepard ja Mitchell tekivät tutkimuksia pinnalla, Roosa kiersi Kuuta.
26.07.1971	Apollo 15	USA	26N	4E	Scott ja Irwin tekivät tutkimuksia pinnalla, Worden kiertoradalla.
28.09.1971	Luna 19	NL			Tutkimuksia kiertoradalla.
14.02.1972	Luna 20	NL	4N	57E	Haki automaattisesti näytteitä.
16.04.1972	Apollo 16	USA	9S	16E	Young ja Duke tekivät tutkimuksia pinnalla, Mattingly kiertoradalla.
7.12.1972	Apollo 17	USA	20N	31E	Viimeinen Apollo-lento, Cernan ja Schmitt tekivät tutkimuksia Kuussa, Evans kiertoradalla.
8.01.1973	Luna 21	NL	26N	30E	Vei Kuuhun Lunohod 2:n.
10.06.1973	Explorer 49	USA			Radioastronomisia tutkimuksia kiertoradalla.
29.05.1974	Luna 22	NL			Tutkimuksia kiertoradalla.
9.08.1976	Luna 24	NL	13N	65E	Haki automaattisesti näytteitä.
24.01.1990	Muses A	Jap			Tekninen koe.

Taulukko 10. Onnistuneet planeettalennot 1.4.1990 mennessä. Mariner-, Pioneer-, Voyager- ja Viking-alukset sekä Magellan ja Galileo ovat Yhdysvaltain, Venera-, Vega-, Mars- ja Phobos-luotaimet Neuvostoliiton lähettämiä. Suisei on Japanin ja Giotto ESAn luotain.

lähtöpäivä	luotain	kohde	perilletulo	tehtävä
27.08.1962	Mariner 2	Venus	14.12.1962	Ensimmäiset tiedot Venuksen läheltä ohilennon aikana.
28.11.1964	Mariner 4	Mars	14.07.1965	Ensimmäiset lähikuvat Marsista ohilennon aikana.
12.06.1967	Venera 4	Venus	18.10.1967	Ensimmäiset mittaukset Venuksen ilmakehässä.
14.06.1967	Mariner 5	Venus	19.10.1967	Mittauksia ohilennon aikana.
5.01.1969	Venera 5	Venus	16.05.1969	Mittauksia Venuksen ilmakehässä.
10.01.1969	Venera 6	Venus	17.05.1969	Sama kuin Venera 5:llä.
25.02.1969	Mariner 6	Mars	31.07.1969	Mittauksia ja kuvia ohilennon aikana.
27.03.1969	Mariner 7	Mars	5.08.1969	Sama kuin Mariner 6:lla.
17.08.1970	Venera 7	Venus	15.12.1970	Ensimmäinen pehmeä lasku Venuksen pinnalle.
19.05.1971	Mars 2	Mars	27.11.1971	Mittauksia Marsin kiertoradalla.
28.05.1971	Mars 3	Mars	2.12.1971	Ensimmäinen pehmeä lasku Marsiin, vaikeni pari minuuttia toimittuaan.
30.05.1971	Mariner 9	Mars	14.11.1971	Ensimmäinen Marsin kiertolainen; kuvia ja mittauksia kiertoradalta.
3.03.1972	Pioneer 10	Jupiter	4.12.1973	Ensimmäiset tiedot Jupiterin läheltä ohilennon aikana.
27.03.1972	Venera 8	Venus	22.07.1972	Mittauksia Venuksen pinnalta.
6.04.1973	Pioneer 11	Jupiter	3.12.1974	Mittauksia Jupiterin ja Saturnuksen ohilennon aikana.
		Saturnus	1.09.1979	
21.07.1973	Mars 4	Mars	10.02.1974	Mittauksia ja kuvia ohilennon aikana.
25.07.1973	Mars 5	Mars	12.02.1974	Kuvia ja mittauksia kiertoradalta.
5.08.1973	Mars 6	Mars	12.03.1974	Ensimmäiset mittaukset Marsin ilmakehässä; emäaluksen ohilento.
9.08.1973	Mars 7	Mars	9.03.1974	Mittauksia ohilennon aikana.
3.11.1973	Mariner 10	Venus	5.02.1974	Ensimmäiset tiedot Merkuriuksen läheltä.
		Merkurius	29.03.1974	Kuvia ja mittauksia yhden Venus- ja kolmen
			21.09.1974	Merkurius-ohilennon aikana.
			16.03.1975	
8.06.1975	Venera 9	Venus	22.10.1975	Ensimmäiset kuvat Venuksen pinnalta, ensimmäinen Venuksen kiertolainen.
14.06.1975	Venera 10	Venus	25.10.1975	Kuvia ja mittauksia pinnalta ja kiertoradalta.



Venera-kapseli Venuksen pinnalla. 1 = antenni, 2 = laskukaulus, 3 = laitepallo, 4 = laskeutumisjalusta.



Galileo-luotaimen laskeutumiskapseli syöksyy Jupiterin pilvien alle 1995. (Piirros Nasa)

lähtöpäivä	luotain	kohde	perilletulo	tehtävä
20.08.1975	Viking 1	Mars	19.06.1976	Laskeutui pehmeästi Marsiin 20.7.1976. Kuvia ja mittauksia pinnalta ja kiertoradalta.
9.09.1975	Viking 2	Mars	7.08.1976	Laskeutui pehmeästi Marsiin 3.9.1976. Kuvia ja mittauksia pinnalta ja kiertoradalta.
20.08.1977	Voyager 2	Jupiter	9.07.1979	Tutki ohilennolla kaikkia neljää jättiläisplaneettaa ja niiden kuita ja renkaita.
		Saturnus	26.08.1981	
		Uranus	26.01.1986	
		Neptunus	25.08.1989	
5.09.1977	Voyager 1	Jupiter	5.03.1979	Tutki ohilennolla Jupiteria ja Saturnusta.
		Saturnus	12.11.1980	
20.05.1978	Pioneer Venus 1	Venus	4.12.1978	Tutkimuksia kiertoradalta.
8.08.1978	Pioneer Venus 2	Venus	9.12.1978	Viisiosainen alus tutki ilmakehää eri kohdista.
9.09.1978	Venera 11	Venus	25.12.1978	Pehmeä lasku pinnalle.
14.09.1978	Venera 12	Venus	21.12.1978	Pehmeä lasku pinnalle.
30.10.1981	Venera 13	Venus	1.03.1982	Kuvia ja mittauksia Venuksen pinnalta.
4.11.1981	Venera 14	Venus	5.03.1982	Kuvia ja mittauksia Venuksen pinnalta.
2.06.1983	Venera 15	Venus	10.10.1983	Tutkakuvia kiertoradalta.
7.06.1983	Venera 16	Venus	14.10.1983	Tutkakuvia kiertoradalta.
15.12.1984	Vega 1	Venus	11.06.1985	Laskeutuja ja ilmapalloluotain.
		Halley	6.03.1986	Kuvia ja mittauksia ohilennolla.
21.12.1984	Vega 2	Venus	15.06.1985	Laskeutuja ja ilmapalloluotain.
		Halley	9.03.1986	Kuvia ja mittauksia ohilennolla.
2.07.1985	Giotto	Halley	13.03.1986	Kuvia ja mittauksia ohilennolla.
19.07.1985	Suisei	Halley	8.03.1986	Mittauksia ohilennolla.
12.07.1988	Phobos 2	Mars	29.01.1989	Kuvia ja mittauksia kiertoradalta.
4.05.1989	Magellan	Venus	10.08.1990	Tutkakuvia kiertoradalta.
18.10.1989	Galileo	Venus	9.02.1990	Mittauksia ohilennolla.
		Gaspra	29.10.1991	Mittauksia ohilennolla.
		Ida	28.08.1993	Mittauksia ohilennolla.
		Jupiter	7.12.1995	Tutkimuksia kiertoradalta.

Sanasto

aamutähti (morning star) Venus.

albedo (albedo) kappaleesta heijastuneen ja siihen osuneen valon intensiteettien suhde, heijastuskyky.

apeksi (apex) piste taivaalla (Herkuleen tähdistössä), jota kohti aurinkokunta liikkuu nopeudella 19.4 km/s muiden tähtien suhteen.

apheli (aphelion) Aurinkoa kiertävän kappaleen radan kaukaisin piste. Vastaavasti Maata kiertävän kappaleen radan kaukaisinta pistettä kutsutaan apogeumiksi; yleisesti pistettä sanotaan aposentriksi.

apsidiviiva (line of apsides) kappaleen radan aposentriä ja perisentriä yhdistävä viiva, radan isoakseli.

asteroidi eli **pikkuplaneetta** (asteroid, minor planet) Aurinkoa kiertävä, planeettoja huomattavasti pienempi kappale; ks. luku Aurinkokunnan pienkappaleet.

astronominen yksikkö (astronomical unit, AU) ks. tähtitieteellinen yksikkö.

atmosfääri (atmosphere) planeettaa ympäröivä kaasukerros, "ilmakehä".

atsimuutti (azimuth) yhdessä korkeuden kanssa taivaankappaleen näennäisen paikan taivaalla ilmoittava koordinatti. Kohteen atsimuutti riippuu havaintopaikasta ja -ajasta ja se muuttuu jatkuvasti. Vastaa likimain ilmansuuntaa.

auringonpilkut (sunspots) Auringon pinnalla näkyviä tummia läiskiä, ks. luku Aurinko.

auringonpimennys (solar eclipse) syntyy Kuun kulkiessa Auringon editse. Pimennys on täydellinen Auringon peittyessä kokonaan, muutoin osittainen. Täydellinen pimennys näkyy korkeintaan n. 260 km leveällä vyöhykkeellä ja sen maksimikestoaika on n. 7 minuuttia. Edellinen Suomessa näkynyt täydellinen pimennys oli 22.7.1990; seuraavan kerran Suomessa näkyy täydellinen pimennys v. 2126.

Aurinko (Sun) aurinkokuntamme keskuskappale, ks. luku Aurinko.

aurinkokunta (solar system) Auringon lisäksi aurinkokuntaan kuuluu 9 planeettaa, yli 60 kuuta, yli 4 000 luetteloitua ja arviolta lähes puoli miljoonaa vielä havaitsematonta asteroidia, komeettoja, meteoroideja ja planeettainvälistä ainetta.

aurinkotuuli (solar wind) Auringon koronasta lähteviä varattuja hiukkasia (protoneja ja elektroneja), joiden nopeus maapallon etäisyydellä on n. 400 km/s.

aurinkovakio (solar constant) Auringon säteilyn teho pinta-alayksikköä kohti. Maan etäisyydellä Auringosta aurinkovakion arvo on 1 390 W/m^2.

Boden laki (Bode's law) ks. Titiuksen—Boden laki.

bolidi (bolide) tulipallo, ks. meteori.

Cassinin jako (Cassini's division) Saturnuksen A- ja B-renkaan välissä oleva n. 1 800 km leveä aukko, jonka havaitsi ensimmäisenä Cassini vuonna 1675.

deklinaatio (declination) yhdessä rektaskension kanssa taivaankappaleen paikan taivaalla määrittelevä koordinaatti. Mitataan taivaanekvaattorista lähtien, positiivisena pohjoiseen, negatiivisena etelään. Vastaa leveysastetta maapallon pinnalla.

efemeridi (ephemeris) taivaankappaleiden etukäteen laskettujen paikkojen taulukko (esim. The Astronomical Almanac).

ekliptika (ecliptic) Auringon näennäisen radan muodostama isoympyrä taivaalla eli todellisuudessa Maan ratataso.

eksentrisyys (eccentricity) ellipsin epäkeskisyyttä kuvaava luku ($0 < e < 1$), ellipsin keskipisteen ja polttopisteen välisen etäisyyden suhde ellipsin isoakselin puolikkaaseen. Jos e. on nolla, on kyseessä ympyrä. Myös paraabeleille ja hyperbeleille voidaan määritellä eksentrisyys. E. on 1 paraabelille ja hyperbeleille suurempi kuin 1.

ekvaattori (equator) päiväntasaaja. Taivaanekvaattori on maapallon ekvaattorin kuvitteellinen jatke taivaanpallolla.

elongaatio (elongation) kulma planeetta—Maa—Aurinko, planeetan kulmaetäisyys Auringosta. Esimerkiksi "Venuksen itäinen elongaatio"; tällöin Venus on Auringon itäpuolella ja näkyy iltatähtenä.

eläinrata (zodiac) noin 4° ekliptikan kummallekin puolelle ulottuva vyöhyke, jossa Aurinko ja planeetat liikkuvat.

eläinratavalo (zodiacal light) lähinnä tropiikissa näkyvä himmeä valokeila, joka nähdään lännessä auringonlaskun jälkeen ja idässä ennen auringonnousua. Johtuu auringonvalon siroamisesta planeettojenvälisestä aineesta.

epookki (epoch) valittu ajanhetki, jolle esim. tähtitieteelliset koordinaatit tai planeettojen rataelementit ilmoitetaan. Mm. rektaskensio ja deklinaatio annetaan usein epookille 1950.0 tai 2000.0.

flare (flare) äkillinen, korkeintaan muutaman

tunnin kestävä auringonpilkkujen lähellä tapahtuva purkaus; ks. luku Aurinko.

fotosfääri (photosphere) Auringon näkyvä pinta.

Galilein kuut (Galilean satellites) Jupiterin neljä suurinta kuuta, jotka Galileo Galilei löysi v. 1610; ks. Jupiter.

granulaatio (granulation) Auringon pinnan "ryynimäinen" rakenne, joka johtuu sisältä pinnalle tulevista kuumista virtauksista, "kiehumisesta".

halo (halo) Kuun tai Auringon ympärillä näkyvä (joskus värillinen) kaari tai kehä, joka aiheutuu valon heijastumisesta ja taittumisesta maapallon ilmakehässä olevista jääkiteistä.

iltatähti (evening star) Venus.

inklinaatio (inclination) planeetan ratatason ja ekliptikan välinen kulma.

intensiteetti (intensity) valon voimakkuutta kuvaava suure. Verrannollinen pinta-alayksikölle tulevaan tehoon.

kaarisekunti (second of arc) asteen 1/3600 osa.

keskiaurinkoaika (mean solar time) kuvitellun, tasaisesti liikkuvan ns. keskiauringon mukaan määrätty aika. Todellisen aurinkoajan ja keskiaurinkoajan välistä eroa kutsutaan ajantasaukseksi, joka suurimmillaan on 16 minuuttia.

kevättasauspiste (vernal equinox) ekliptikan ja maapallon ekvaattorin jatkeen, taivaanekvaattorin leikkauspiste, jossa ekliptika nousee ekvaattorin pohjoispuolelle. Kevättasauspiste on tällä hetkellä Kalojen tähdistössä.

komeetta (comet) Aurinkoa kiertävä, suhteellisen harva-aineinen pikkukappale; ks. luku Aurinkokunnan pienkappaleet.

konjunktio (conjunction) planeetta on Maasta katsoen samassa suunnassa kuin Aurinko. Alakonjunktiossa planeetta on Maan ja Auringon välissä (vain Merkurius ja Venus) ja yläkonjunktiossa Auringon takana.

korkeus (altitude) yhdessä atsimuutin kanssa taivaankappaleen näennäisen paikan taivaalla ilmoittava koordinaatti, korkeus taivaanrannasta eli horisontista.

korona (corona) Auringon ilmakehän uloin kerros, joka ulottuu miljoonia kilometrejä Auringon näkyvästä pinnasta ulospäin; ks. luku Aurinko.

kosminen säteily (cosmic rays) maapallon ilmakehään osuvia suurenergisiä hiukkasia, joista n. 85 % on vetyatomin ytimiä, 14 % heliumatomin ytimiä ja 1 % elektroneja ja raskaampia atomiytimiä.

kromosfääri (cromosphere) Auringon fotosfäärin ja koronan välissä oleva n. 10 000 km paksuinen kerros.

kulminaatio (culmination) yläkulminaatio, hetki, jolloin taivaankappale on korkeimmillaan eli etelämeridiaanissa. Alakulminaatio, hetki, jolloin taivaankappale on matalimmillaan (useimmiten tuolloin taivaanrannan alapuolella).

kuukausi (month) Kuun kiertoaikaan maapallon ympäri liittyvä aikayksikkö:
— **anomalistinen kk** Kuun kiertoaika ratansa peri- tai apogeumista takaisin samaan pisteeseen = 27 vrk 13 h 19 min.
— **aurinkokk** trooppisen vuoden (ks. vuosi) 1/12 osa = 30 vrk 10 h 29 min
— **sideerinen kk** Kuun kiertoaika tähtiin nähden = 27 vrk 7 h 43 min
— **solmukk** (eli drakoniittinen kk) Kuun kiertoaika ratansa nousevasta solmusta nousevaan solmuun = 27 vrk 5 h 6 min
— **synodinen kk** ("kalenterikk") Kuun vaiheiden jakso, esim. uudestakuusta uuteenkuuhun = 29 vrk 12 h 44 min
— **trooppinen kk** Kuun kiertoaika ekliptikan napojen ja kevättasauspisteen kautta kulkevasta isoympyrästä takaisin samaan pisteeseen = 27 vrk 7 h 43 min.

kuunpimennys (lunar eclipse) syntyy Kuun kulkiessa Maan varjon läpi. Jos Kuu on kokonaan varjossa, on pimennys täydellinen, muutoin osittainen. Pimentynyt Kuu näkyy punertavana, mikä johtuu maapallon ilmakehässä taipuneesta valosta.

leveys (latitude) yhdessä pituuden kanssa määrittelee paikan maapallon pinnalla. Ekliptikaalista leveyttä käytetään joskus ilmoittamaan planeettojen paikkaa, ja se mitataan kulmaetäisyytenä ekliptikasta pohjoiseen tai etelään.

libraatio (libration) Kuun ratanopeuden vaihtelusta johtuva "huojuminen", jonka vuoksi n. 59 % Kuun pinnasta voidaan nähdä Maasta käsin.

luotain (probe) toisia planeettoja tutkimaan lähetetty avaruuslaite.

magnetosfääri (magnetosphere) planeettaa ympäröivä vyöhyke, jossa planeetan magneettikentän vaikutus on suurempi kuin esim. Auringon magneettikentän vaikutus.

magnitudi (magnitude) taivaankappaleen kirkkautta osoittava suure. Auringon näennäinen magnitudi on n. −27, täysikuun −12, Venuksen −4.6, kirkkaimpien tähtien 0, himmeimpien paljain silmin näkyvien tähtien +6.

meridiaani (meridian) zeniitin ja taivaannavan kautta taivaanpallolla kulkeva isoympyrän kaari. Meridiaani kulkee havaitsijan horisontin etelä- ja pohjoispisteiden kautta. Zeniitin ja eteläpisteen välistä meridiaanin osaa kutsutaan etelämeridiaaniksi. Taivaankappale on korkeimmillaan ollessaan etelämeridiaanin suunnalla; ks. kulminaatio.

meteori (meteor) ilmakehään osuvan, usein vain hiekanjyvän kokoisen kappaleen aiheuttama valoilmiö, "tähdenlento". Nimeä käytetään myös itse kappaleesta. Hyvin kirkasta tähdenlentoa kutsutaan bolidiksi, tulipalloksi.

meteoriitti (meteorite) meteori, joka ei ole kokonaan tuhoutunut ilmakehässä, vaan on pudonnut maahan saakka. Löydettyjen meteoriittien massat ovat muutamasta grammasta jopa useisiin tonneihin.

meteoroidi (meteoroid) avaruudessa liikkuva, pikkuplaneettaa pienempi kappale, joka ilmakehään osuessaan nähdään meteorina. Mikrometeoroidit ovat hyvin pieniä kappaleita, jotka ilmakehään osuessaan eivät aiheuta valoilmiöitä.

metri (metre) pituuden perusyksikkö. Matka jonka tyhjössä liikkuva valo kulkee 1/299 792 458 sekunnissa.

nutaatio (nutation) Kuun Maan pyörimisakselin suuntaan aiheuttama häiriö, jonka jakso on 18.6 vuotta.

okkultaatio (occultation) ks. tähdenpeitto.

oppositio (opposition) planeetta on vastakkaisella puolella Maata kuin Aurinko. Merkurius ja Venus eivät voi olla oppositiossa.

parsek (parsec) tähtitieteessä käytetty etäisyysmitta, etäisyys josta Maan radan isoakselin puolikas näkyy 1 kaarisekunnin suuruisessa kulmassa = 3×10^{16} m = 206 265 AU = 3.26 valovuotta.

periheli (perihelion) planeetan radan Aurinkoa lähinnä oleva piste. Maata kiertävän kappaleen radan Maata lähinnä olevaa pistettä sanotaan perigeumiksi; yleisesti pistettä sanotaan perisentriksi.

pimennys (eclipse) kappaleen joutuminen kokonaan tai osittain toisen varjoon, esim. kuunpimennys.

pikkuplaneetta (minor planet) ks. asteroidi.

pituus (longitude) yhdessä leveyden kanssa määrittelee paikan maapallon pinnalla. Ekliptikaalista pituutta käytetään joskus ilmoittamaan planeettojen paikkaa, ja se mitataan pitkin ekliptikaa kevättasauspisteen suunnasta lähtien.

planeetta (planet) Aurinkoa kiertävä, usean tuhannen kilometrin läpimittainen kappale; ks. kutakin planeettaa käsittelevää lukua.

planetoidi (asteroid) ks. asteroidi.

prekessio (precession) pyörivän kappaleen pyörimisakselin suunnan (hidas) muutos (vrt. hyrrä), maapallon pyörimisakselin suunnan muutos. Maan pyörimisakselin suunta muuttuu hyvin hitaasti: täyteen kierrokseen kuluu n. 26 000 vuotta.

protuberanssi (prominence) Auringon pinnasta lähtevä, usein lieskan muotoinen kaasusuihku; ks. luku Aurinko.

pyrstötähti (comet) ks. komeetta.

radiantti (radiant) eli **säteilypiste** piste, josta maapallon ilmakehään yhdensuuntaisina tulevat meteorit perspektiivin johdosta näyttävät tulevan.

rektaskensio (right ascension) yhdessä deklinaation kanssa taivaankappaleen paikan taivaalla määrittelevä koordinaatti. Mitataan vastapäivään pitkin taivaan ekvaattoria kevättasauspisteen suunnasta lähtien ja ilmoitetaan tavallisimmin tunteina (ts. on siis välillä 0—24 tuntia).

retrogradinen liike (retrograde motion) yleistä suuntaa vasten tapahtuva liike; erityisesti planeettojen näennäisten ratojen siitä osasta, jossa liike on yleistä itä-länsisuuntaa vastaan.

revontulet (aurora, Aurora Borealis) maapallon ilmakehän yläosissa esiintyvä valoilmiö, joka aiheutuu Auringosta lähteneiden varattujen hiukkasten (protonien ja elektronien) osumisesta maapallon ilmakehän atomeihin. Revontulia nähdään tavallisimmin lähellä napa-alueita.

satelliitti (satellite) yleisnimitys planeettaa kiertävälle seuralaiselle, kuulle. Käytetään myös maapalloa kiertävistä tekokuista.

sekunti (second) ajan perusyksikkö, 9 192 631 770 cesium 133 -atomin perustason kahden hyperhienotasosiirtymän välillä syntyvän säteilyn värähtelyn kestoaika. Aiemmin sekunti määriteltiin 1/31 556 925.9747 osana trooppisesta vuodesta (ks. vuosi) 0. päivänä tammikuuta 1900 klo 12.00 Greenwichin aikaa.

sideerinen kiertoaika (sidereal period) kappaleen todellinen kiertoaika; aika jossa kappale liikkuu radallaan 360° toisen ympäri.

sisäplaneetta (inferior planet) Maan radan sisäpuolella oleva planeetta, Merkurius tai Venus.

solmuviiva (line of nodes) kappaleen ratatason ja jonkin perustason leikkausviiva. Pistettä jossa kappale radallaan siirtyy perustason yläpuolelle, sanotaan nousevaksi solmuksi ja vastapäistä pistettä laskevaksi solmuksi.

synodinen kiertoaika (synodic period) planeetan maapallolta käsin havaittu kahden peräkkäisen tapauksen, esim. opposition, välinen aika; aika jonka kuluttua maapallo ja planeetta ovat samassa keskinäisessä asemassa Auringon suhteen.

taannehtiva liike (retrograde motion) ks. retrogradinen liike.

tekokuu (satellite) ks. satelliitti.

terminaattori (terminator) päivän ja yön rajaviiva.

Titiuksen—Boden laki (Bode's law) kokeellinen "laki", joka antaa Uranukseen saakka planeettojen etäisyydet Auringosta.

troijalaiset (Trojans) Jupiterin etäisyydellä Auringosta olevat asteroidit.

tähdenpeitto (occultation) Kuu, planeetta tai pikkuplaneetta kulkee tähden editse.

tähdenlento (meteor, shooting star) ks. meteori.

tähdenlentoparvi (meteor shower) samaa rataa Auringon ympäri liikkuvia meteoroideja, jotka maapallon ilmakehään osuessaan näyttävät tulevan samasta pisteestä, ks. radi-

antti. Tunnetuimpia tähdenlentoparvia ovat mm. perseidit elokuussa ja geminidit joulukuussa.

tähtiaika (sidereal time) kevättasauspisteen kulmaetäisyys etelämeridiaanista, maapallon pyörimiseen liittyvä aikayksikkö. Yksi tähtivuorokausi (aika jonka kuluessa tähtiaika on muuttunut 24 tuntia eli maapallo on tähtiin nähden pyörähtänyt 360 astetta) on n. 4 minuuttia keskiaurinkovuorokautta (= "seinäkelloaikaa") lyhyempi.

tähtitieteellinen yksikkö (astronomical unit, AU) maapallon radan isoakselin puolikas = 149.6 miljoonaa kilometriä.

ulkoplaneetta (superior planet) Maan radan ulkopuolella kiertävä planeetta.

umbra (umbra) auringonpilkun tumma keskiosa.

vaihekulma (phase angle) kulma Aurinko—kappale—Maa, planeetasta nähtynä Maan ja Auringon välinen kulmaetäisyys.

vaihekäyrä (phase curve) kappaleen kirkkauden muutos vaihekulman muuttuessa.

valokäyrä (light curve) kappaleen pyörimisestä aiheutuva kirkkauden muutos, esim. asteroidin valokäyrä.

valovuosi (light year) matka jonka valo kulkee vuodessa = 9.46×10^{15} m.

vastavalo (gegenschein) hyvin himmeä hohde, joka voidaan nähdä tropiikissa vastakkaisella puolella taivasta kuin Aurinko. Johtuu auringonvalon siroamisesta planeettainvälisestä aineesta.

vihreä välähdys (green flash) Auringon noustessa tai laskiessa joskus nähtävä valoilmiö, jossa juuri horisontin alapuolella olevan Auringon kohdalla näkyy kirkkaan vihreä, vain pari sekuntia kestävä "välähdys". Se johtuu valon taipumisesta maapallon ilmakehässä.

vuosi (year) Maan kiertoaikaan Auringon ympäri liittyvä aikayksikkö:

- **anomalistinen v.** aika joka kuluu peri- tai aphelistä uudelleen samaan pisteeseen = 365 vrk 6 h 14 min.
- **pimennys-** eli **solmu-** eli **drakoniittinen v.** aika joka kuluu ekliptikan ja Kuun radan solmusta uudelleen samaan pisteeseen = 346 vrk 14 h 53 min
- **sideerinen v.** Maan kiertoaika tähtiin nähden = 365 vrk 6 h 9 min
- **trooppinen v.** "kalenteriv."; aika joka kuluu Auringon näennäiseen kierrokseen ekliptikan ympäri kevättasauspisteestä samaan pisteeseen = 365 vrk 5 h 49 min.

yleisaika (universal time, UT) nollameridiaanin keskiaurinkoaika, "Greenwichin aika". Yleisaikaa käytetään esim. tähtitieteessä. Suomen virallinen aika on kaksi tuntia edellä yleisajasta.

ylikulku (transit) taivaankappale Maasta nähtynä kulkee Auringon kiekon editse. Käytetään tavallisimmin Merkuriuksen tai Venuksen tapauksessa. Myös mm. Jupiterin kuiden ylikulku Jupiterin kiekon editse.

zeniitti (zenith) suoraan havaitsijan yläpuolella oleva piste.

zodiakki (zodiac) ks. eläinrata.

zodiakaalivalo (zodiacal light) ks. eläinratavalo.

Kirjallisuusluettelo

Yleisteoksia

Seuraavia kirjoja on käytetty useammissa luvuissa tai niissä on yleisiä, aurinkokuntaamme liittyviä asioita:

Beatty, J.K., O'Leary, B., Chaikin, A. (toim.): The New Solar System. Sky Publishing Corporation, Cambridge, 1981 (3. painos, jossa mukana myös Neptunus, Uranus ja Halley, 1990)

Greeley, R.: Planetary Landscapes, Allen & Unwin, 1987

Jones, B.W.: The Solar System. Pergamon Press, 1984

Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M.: Tähtitieteen perusteet. Ursa, 1984

Chapman, C.: Planets of Rock and Ice. Scribners, 1982

Aurinkokuntamme

Teerikorpi, P., Valtonen, M.: Kosmos — maailmamme muuttuva kuva. Ursa, 1988

Valtonen, M., Oja, H. (toim.): Maapallo ja avaruus. Ursa, 1984

Aurinko

Nicolson, I.: The Sun. Mitchell Beazley Publ., 1982

Merkurius

Murray, B., Burgess, E.: Flight to Mercury. Columbia Univ. Press, 1977

Space Science Reviews, toukokuu 1979

Venus

Burgess, E.: Venus: An Errant Twin. Columbia Univ. Press,1985

Hunt, G., Moore, P.: The Planet Venus. Faber & Faber, 1982

Maa ja Kuu

Continents adrift and continents aground. W. H. Freeman & Co., 1977

Kakkuri, J.: Planeetta Maa. Ursa (ilmestyy 1991)

Cadogan, P.: The Moon: Our Sister Planet. Cambridge Univ. Press, 1981

Hockey, T.: The Book of the Moon. Prentice Hall, 1986

Lewis, R.: The Voyages of Apollo. Quadrangle, 1975

Mars

Burgess, E.: To the Red Planet. Columbia Univ. Press, 1978

Carr, M.: The Surface of Mars. Yale Univ. Press, 1981

Horowitz, N.: To Utopia and Back. Freeman, 1986 (elämän etsiminen Marsista)

Jupiter

Hunt, G., Moore, P.: Jupiter. Mitchell, 1981

Morrison, D., Samz, J.: Voyage to Jupiter. Nasa SP-439, 1980

Saturnus

Morrison, D.: Voyages to Saturn. Nasa SP-451, 1982

Yenne, B.: The Atlas of the Solar System. Bison Books, 1987

Uranus

Hunt, G., Moore, P.: Atlas of Uranus. Cambridge University Press, 1989

O'd Alexander: The Planet Uranus. Faber & Faber, 1965

Poutanen, M: Uranuksen salat paljastuivat. *Tähdet ja Avaruus* 3/86, 82—86, 1986

Neptunus

Beatty, J.K.: Getting to know Neptune. *Sky and Telescope* 79, No. 2 (February 1990), 146—155, 1990

Oja, H.: Jäähyväiset planeetoille. *Tähdet ja Avaruus* 6/89, 244—249, 1989

Tsurutani. B. T.: The Voyager 2 Neptune Encounter. *EOS Transactions, American Geophysical Union,* 70 (Oct. 24.1989), 915—921, 1989

Pluto

Beatty, J.K., Killian, A.: Discovering Pluto's Atmosphere. *Sky and Telescope* 76, No. 6 (December 1988), 624—627, 1988

Binzel, R.B.: Hemispherical color differences on Pluto and Charon. *Science* 241, 1070—1071, 1988

Hughes, D.W.: Interior and origin of Pluto. *Nature* 335, 205—206, 1988

McKinnon, W.B., Mueller, S.: Pluto's structure and compositon suggest origin in the solar, not a planetary, nebula. *Nature* 335, 240—243, 1988

Oja, H: Pluto käy lähinnä Aurinkoa. *Tähdet ja Avaruus* 4/89, 149—150, 1989

Seidelmann, P. K., Harrington, R.S.: Planet X — The Current Status. *Celestial Mechanics* 43, 55—68, 1988

Tombaugh, C.W., Moore, P.: Out of the darkness. The planet Pluto. A Mentor Book, 1981

Aurinkokunnan pienkappaleet

Gehrels, T. (toim): Asteroids. The University of Arizona Press, 1979

Kaila, K., Oja, H., Valtonen, M., Korhonen, T.: Komeetat. Ursa, 1983

Oja, H.: Likainen lumipallo — musta maapähkinä. *Tähdet ja Avaruus* 4/86

Sagan, C., Druyan, A.: Comet. Michael Joseph Ltd., 1985

Valtonen, M., Oja, H. (toim.): Maapallo ja avaruus. Ursa, 1984

Kirjoittajat

Dosentti **Heikki Oja** toimii Helsingin yliopiston tähtitieteen laitoksella tp. assistenttina ja vastaa almanakan tähtitieteellisten tietojen toimittamisesta. Oja on ollut kirjoittajana tai toimittajana useissa tähtitieteen yleistajuisissa kirjoissa.

Fil. lis. **Markku Poutanen** työskentelee tutkijana Geodeettisessa laitoksessa. Poutanen on suorittanut lisensiaattitutkintonsa tähtitieteessä. Harrastuksista mainittakoon tähtien pintakuvausmenetelmät, pikkuplaneetat, GPS-satelliittipaikannusjärjestelmä, ohjelmointi ja tähtitieteen kansantajuistaminen.

Hakemisto

aamutähti 12
Adams, John Couch 111-
Airy, Sir George 111
van Allenin säteilyvyöhyke 55
Antoniadi, Eugene M. 35
Apollo-lennot 23, 56-
Ariel 106, 108
d'Arrest, Louis Heinrich 112
astenosfääri 52, 60
asteroidi 126-
  Amor 130
  Apollo 130
  Ceres 127
  Eunomia 127
  Hilda-ryhmä 129
  jakautuma 130
  Juno 127
  kirkkaudenvaihtelu 132-133
  luokittelu 133-134
  löytyminen 127-
  Pallas 127
  radat 127-
  synty 129-
  troijalaiset 99, 127, 129
  tutkiminen 132-
  Vesta 127
asteroidivyöhyke 127-
AU, ks. tähtitieteellinen yksikkö
auringonpilkut 27-
Aurinko 9, 10, 24-
  havaitseminen 30
  kehitys 26-27
  korona 29
  magneettikenttä 27-
  pilkut 27-
  ydinreaktiot 20, 24-
aurinkokunta 9-
  synty 16-
  yleispiirteet 15-
aurinkotuuli 18, 29, 126

Bethe, Hans 25
Bode, Johann Elert 102, 127
bolidi 134
Bradley, James 102
Brahe, Tyko 14, 135
Buffon, lordi 17

Caloriksen allas 37
Camichel, Henri 35
Cartesius, ks. Descartes
Cartesiuksen pyörreteoria 17
Cassini, Giovanni (Jean Dominique) 77, 90
Cassinin jako 90, 94-95
Ceres 127
Challis, James 111-112
Christy, James 122

Deimos 74-75, 131
Descartes, Rene 17
differentiaalirotaatio 28
differentioituminen 20, 53
Dione 97, 99
Dollfus, Audouin 35

Efemeridy Malyh Planet 129
ellipsi 12
elongaatio 12
eläinratavalo 126, 131
eksentrisyys 13
Enceladus 96, 97
Encke, Johann Franz 90, 112
Encken jako 90, 94
Europa 77, 87-88

Flamsteed, John 102
flare 29
fuusioreaktio 24

Galilei, Galileo 39, 76, 89, 114
Galilein kuut 77, 84-
Galle, Johann Gottfried 112
Ganymedes 16, 77, 84-87
granulaatio 26

Hall, Asaph 75
Halley, Edmund 135
Halleyn komeetta, ks. komeetta
Herschel, William 101-102, 127
hiilikondriitti 133
Hirayama, Kiyotsugu 130
Hirayaman ryhmä 130
Hooke, Robert 77
Humason, Milton 121
Hussey, Thomas John 111
Huygens, Christian 90
Hyperion 97, 100

iltatähti 12
impulssimomentti 16, 18
inklinaatio 13
Io 16, 77, 85-87
isoakselin puolikas 13

Japetus 100
Jupiter 9, 76-
  Galilein kuut ks. Galilein kuut
  kuut 83-
  magneettikenttä 79, 82-83
  pilvet 77-

radiosäteily 78, 82-83
raidat 77-
rakenne 78-
renkaat 82-83
suuri punainen pilkku 77-
vyöt 77-
jättiläisplaneetat 15

Kallisto 16, 77, 84, 87-88
Kant, Immanuel 17
Keeler, James 90
Keelerin aukko 90, 93
Keplerin lait 12
Kepler, Johannes 14
Khaijam, Omar 16
Kharon 120, 122-
Kirkwood, Daniel 129
Kirkwoodin aukko 129
komeetta 9, 126, 130, 135-
Arend-Roland 139
Bennett 147
Biela 139
Halley 135-
Mrkos 138
radat 135-136
rakenne 136-138
West 126
konjunktio 12
kosmogonia 16
Kuu 9, 55-
ikä 60
järistykset 61
koostumus 60
magneettikenttä 62
meret 21, 56-
pinta 56-
pyöriminen 56
rakenne 60-61
rata 56
synty 62-63
tutkiminen 55-

Lagrangen pisteet 99
Le Monnier, Pierre Charles 102
Le Verrier, Urbain Jean Joseph 111-
Lexell, Anders 102
litosfääri 52
Lowell, Percival 121
luotain
Galileo 20, 23, 76, 132
Luna 55
Lunar Orbiter 56
Magellan 22, 42
Mariner 22, 35-36, 41, 67
Phobos 67
Pioneer 76, 89
Pioneer Venus 42
Ranger 55
Surveyor 56
Vega 42
Venera 41-42
Viking 67, 72
Voyager 23, 76, 89, 101, 110

Maa 9, 50-
elämä 54
ilmakehä 53-
kuu, ks. Kuu
magnetosfääri 55
muoto 51
pyöriminen 50-51
rakenne 51-52
rata 50
synty 53
maankaltaiset planeetat 15
magneettikenttä 18
magneettinen myrsky 29
Marius, Simon 77
Mars 9, 64-
elämä 66, 72-73
ilmakehä 66-
jokiuomat 64, 67, 73-74
kanavat 66
koostumus 71-72
kuut 74-75
lämpötila 69-
myrskyt 71
napalakit 65-
näkyminen 64
pinta 67-
rata 64
Maskelyne, Nevil 102
maskoni 61
Maxwell, James Clerk 23, 90
Merkurius 9, 12, 31-
etäisyys 31
koko 31
lämpötila 35-36
magneettikenttä 37
näkyminen 31-
perihelikiertymä 37-38
pinta 34-
pyöriminen 31, 32
rata 31
metallinen vety 78
meteori, ks. tähdenlento
meteoroidi 9, 126, 134
meteoriitti 129, 130, 134
Ahnighito 134
Kivesvaara 129
Sihote-Alin 135
meteoriittikraatteri 16, 134-135
Arizonan meteoriittikraatteri 133, 135
Lappajärvi 135, 136
Mimas 97, 98, 144
Miranda 104, 108-109

Nautical Almanac 102
nebulaarihypoteesi 17
Nemesis 122
Neptunus 9, 110-
kuut 116-
löytyminen 110-
magneettikenttä 115-116
rakenne 116
renkaat 113, 116
ulkonäkö 114-115
Nereid 117

Newton, Isaac 14, 135
neutriino 27
nouseva solmu 13
nutaatio 51

Olympus Mons 67-
Oortin pilvi 139
oppositio 11, 12
Orionin sumu 14, 18

penumbra 29
periheli 13
Phobos 74-75, 131
Phoebe 100
Piazzi, Giuseppe 127
Pickering, William H. 121
pikkuplaneetta, ks. asteroidi
planeetta 9
koot 10
kuut 16
liikkeet 11-
pyörimisakseli 15-16
radat 12, 13
synty 18-
planetesimaali 18
Pluto 9, 119, 120-
ilmakehä 124
läpimitta 122-123
löytyminen 120-
massa 124
peitot 124
rakenne 121, 123
rata 121-122
Poyntingin-Robertsonin ilmiö 131
prekessio 51
Principia 14
protoni-protoni -reaktio 25
protoplaneetta 18
protuberanssi 25, 28-
pyrstötähti, ks. komeetta

rataelementti 13
revontuli 29
Rhea 99
Roche, Edouard 90
Rochen raja 90, 91

satelliitti
Sputnik 20
Saturnus 9, 89-
koostumus 92
kuut 95-
lämpötila 92
magneettikenttä 93
pyöriminen 90
rakenne 91
renkaat 90-, 94-95
Schiaparelli, Giovanni 66
Schroeter, Johann 127
sisäplaneetta 12
supernova 18
suuri punainen pilkku 77-

taivaanmekaniikka 14, 120
Tethys 98
Titan 90, 96, 99-100
Titania 107
Titiuksen-Boden laki 113, 127, 128
Titius, Johann Daniel 127
Todd, David Peck 120
Tombaugh, Clyde 121-122
Triton 111, 117-
troijalaiset asteroidit, ks. asteroidit
tulipallo, ks. bolidi
tähdenlento 9, 21, 134
tähtitieteellinen yksikkö 10

ulkoplaneetta 12
umbra 29
Umbriel 108
Uranus 9, 101-
kuut 107-
löytyminen 101-102
magneettikenttä 104
pyöriminen 103
rata 102
renkaat 102-
ulkonäkö 103-

Valles Marineris 68-69
valovuosi 10
von Weizsäcker, Carl Friedrich 25
Venus 9, 12, 39-
ilmakehä 40-
kasvihuoneilmiö 44-45
pilvet 40-
pinta 40-
pyöriminen 41
radiosäteily 40
rata 39
tulivuoritoiminta 49
tutkahavainnot 48
vaiheet 40
Whipple, Fred 138
Wolf, Max 120
Vulkanus 37
vuorokausi 33
Väisälä, Yrjö 128

X, planeetta 120-122

Tähtitieteellinen yhdistys Ursa

Ursa on Suomen suurin tähtiharrastusyhdistys. Se perustettiin 1921, ja vuoden 1989 lopussa sen jäsenmäärä oli yli 5 500. Jäsenistöön kuuluu erityisen paljon nuorisoa.

Ursa toimii monella tavalla maamme tähtitieteen harrastuksen edistämiseksi. Se järjestää tähti- ja aurinkonäytäntöjä Helsingin Kaivopuiston tähtitornissa (tornin puh. 90-653 505) sekä esitelmätilaisuuksia. Sillä on laaja tähtitieteellinen kirjasto Helsingissä, os. Laivanvarustajank. 3. Kirjasto on auki maanantaisin ja torstaisin klo 18—20 ja tiistaisin ja keskiviikkoisin klo 15—17 (puh. 90-174 048). Ursan piirissä toimii harrastusjaostoja, jotka opastavat harrastajia ja suorittavat tähtitieteellisiä havaintoja. Ursassa on valmistettu kuljetettava kouluplanetaario, jota voidaan käyttää monipuolisesti tähtitieteen opetuksessa.

Ursa on Suomen suurin tähtitieteen kustantaja. Pyydä ajan tasalla oleva julkaisuluettelo Ursan toimistosta!

Ursan jäseneksi voi liittyä jokainen tähtitieteestä kiinnostunut. Jäsenetuina saat mm. kotiisi Tähdet ja Avaruus -lehden, voit käyttää Ursan kirjastoa ja tähtitornia, voit osallistua opintopiireihin, tähtileireille ja harrastusjaostojen toimintaan. Ursan tuotteista saat 15—20 % alennuksen. Ja liittymislahjana vielä Tähtitaivaan maailmat -lehtisen.

Vuonna 1990 jäsenmaksu on nuorilta (alle 18-vuotiailta) 70 mk ja aikuisilta 90 mk. Tähdet ja Avaruus -lehden voi tilata myös liittymättä jäseneksi, jolloin tilausmaksu vuonna 1990 on 90 mk. Seuraavina vuosina maksut voivat olla hieman korkeammat.

Helsingin lisäksi yli 30 paikkakunnalla Suomessa toimii oma tähtiharrastajien yhdistys. Löydät luettelon niistä Tähdet ja Avaruus -lehdistä.

Tähtitieteellinen yhdistys Ursa

Laivanvarustajank. 3, 00140 Helsinki. Puh. 90-174 048

Ursan julkaisuja

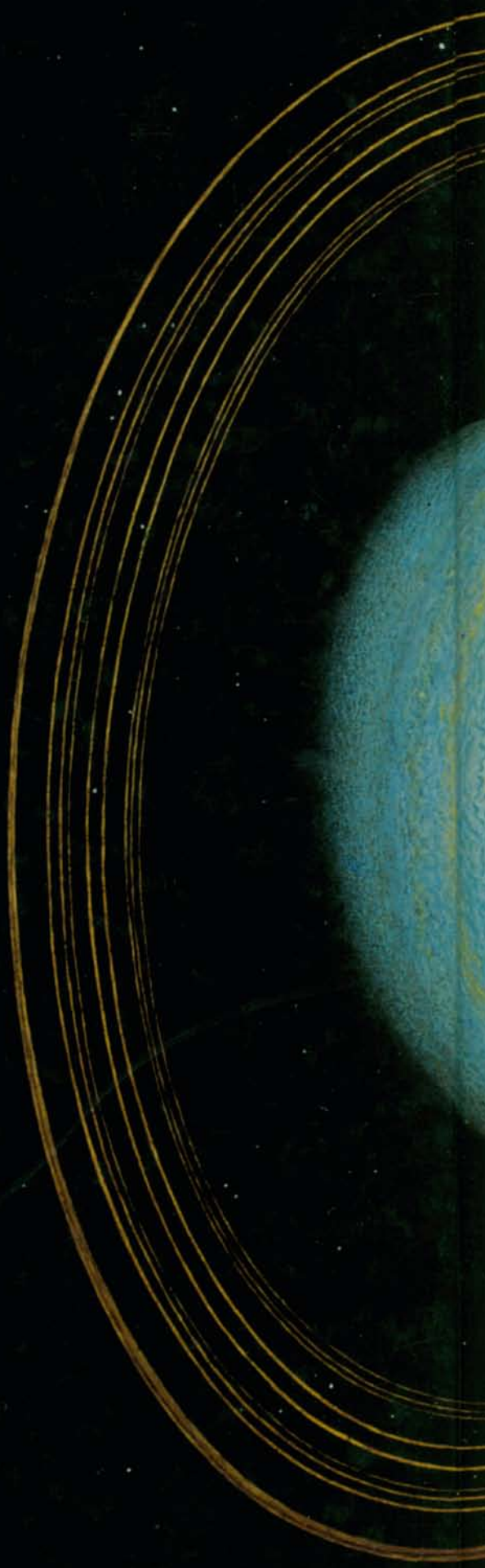
1. Tähtitiedettä harrastajille,
   E. ja I. Bonsdorff ym., 1926
2. Tähtitiedettä harrastajille II,
   I. Bonsdorff ym., 1938
3. Tähtitieteen harrastajan kirja,
   P. Kalaja — U. Kuuskoski (toim.), 1947
4. Tähtitiedettä harrastajille III,
   H. Alfvén ym., 1954
5. Tähtitiedettä harrastajille IV,
   B. Hielm ym., 1965
6. Teemme peilikaukoputken,
   J. M. Heikinheimo, 1966
7. Tähtien ja galaksien maailma,
   T. Markkanen — S. Linnaluoto (toim.), 1975
8. Mustaa aukkoa etsimässä,
   R. Keskinen — H. Oja, 1977
9. Tulipalloja taivaalla,
   H. Oja, 1978
10. 1982 kun planeetat kohtaavat,
    A. Jännes — H. Oja, 1978
11. Albert Einstein — tutkija ja ihminen,
    H. Oja — O. Vilhu (toim.), 1979
12. Tähtitaivaan opas,
    K. Kaila, 1979
13. Auringosta äärettömyyteen,
    K. J. Donner ym., 1979
14. Ufojen arvoitus,
    J. Kyröläinen — P. Teerikorpi, 1980
15. Maailmankaikkeutta tutkimassa,
    M. Valtonen, 1981
16. Planeetat,
    H. Oja — M. Poutanen, 1982
17. Tähtitieteen harrastajan käsikirja 1,
    K. Kaila — M. Lindqvist — H. Määttänen (toim.), 1982
18. Teemme aurinkokellon,
    A. Koivusalo, 1982
19. Tähtitieteen harrastajan käsikirja 2,
    K. Kaila — H. Määttänen (toim.), 1983
20. Uusia ikkunoita maailmankaikkeuteen,
    K. Mattila — H. Oja (toim.), 1983
21. Tähtitieteen perusteet,
    H. Karttunen — P. Kröger — H. Oja — M. Poutanen (toim.), 1984
22. Komeetat,
    K. Kaila — H. Oja — M. Valtonen — T. Korhonen, 1983
23. Tähtitaivaan arvoituksia,
    R. Anttila ym., 1984
24. Suomi avaruudesta,
    M. Punkari (toim.), 1984
25. Maapallo ja avaruus,
    M. Valtonen — H. Oja (toim.), 1985
26. Tähtitieteen harrastajan käsikirja 3,
    K. Kaila — H. Määttänen (toim.), 1985
27. Kaukoputken rakentajan käsikirja,
    J. Turunen, 1985
28. Väritä tuhat vuotta Halleyn pyrstötähteä,
    L. Kröger — H. Oja, 1986
29. Antti katsoo tähtiä,
    L. Kröger — H. Oja, 1986
30. Avaruuden saaret,
    J. Westman, 1986
31. Nainen ja maailmankaikkeus,
    E. Isaksson, 1987
32. Maiseman valot ja värit,
    M. Minnaert, 1987
33. Tähtitieteen harjoitustehtäviä,
    H. Karttunen — P. Kröger — M. Poutanen, 1987
34. Isaac Newton — jättiläisen hartioilla,
    R. Lehti — T. Markkanen — J. Rydman, 1988
35. Kosmos — maailmamme muuttuva kuva,
    P. Teerikorpi — M. Valtonen, 1988
36. Tähtitieteen harrastajan käsikirja 4,
    V. Mäkelä (toim.), 1988
37. Atomien haamu,
    P.C.W. Davies — J.R. Brown (toim.), 1989
38. Paholaisen asianajaja — opaskirja skeptikolle,
    H. Häyry — H. Karttunen — M. Virtanen (toim.), 1989
39. Antti katsoo kuuta
    J. Nykänen — H. Oja, 1989
40. Auringonpimennykset,
    J. Kakkuri — H. Oja — R. Anttila, 1989

Aurinkokuntamme kymmenet maailmat sanoin ja kuvin. Uusia, kiehtovia ja salaperäisiä maisemia!

Kun Voyager 2 lensi elokuussa 1989 Neptunuksen ohi, saatiin iso urakka päätökseen. Avaruusluotaimet ovat nyt tutkineet kaikkia kahdeksaa suurinta planeettaa. Vain Pluto on jäänyt tuntemattomaksi.

Tähän kirjaan on koottu nykyinen tietämyksemme koko aurinkokunnasta: planeetoista, niiden kuista, komeetoista ja asteroideista. Näyttävät, suurelta osin värilliset kuvat täydentävät yleistajuista tekstiä.

Kirjoittajat ovat tähtitieteen ammattilaisia ja tunnettuja popularisoijia.



Kansikuva JPL/Nasa
Päällys Arja Latvala

52

ISBN 951-9269-54-1

9 789519 269542