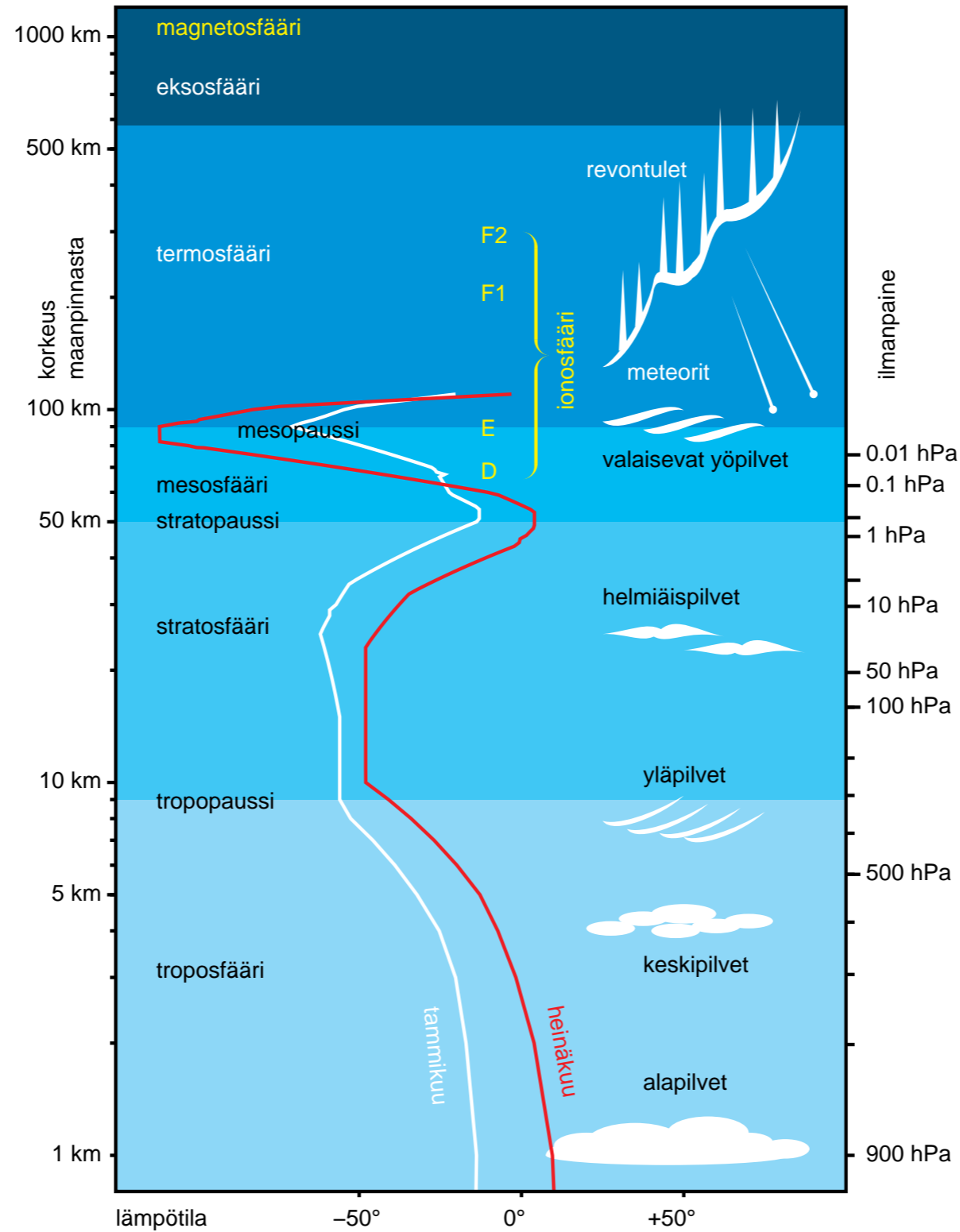


Planeettojen ilmakehät

Maan ilmakehän rakenne.



Ilmakehän *sfäärit* ovat kerroksia, joissa lämpötila korkeuden funktiona muuttuu samaan suuntaan.

Sfäärejä rajoittavat suhteellisen ohuet *paus(s)it*, joissa lämpötilagradientin suunta muuttuu.

Alin kerros on *troposfääri*, jossa lämpötila laskee ylöspäin \Rightarrow lämmitys on peräisin alhaalta, maanpinnasta.

Stratosfäärissä lämpötila nousee ylöspäin. Lämpö on peräisin lähinnä Auringon UV-säteilystä. Säteily absorboituu stratosfäärin otsoniin, joten se heikkenee syvemmälle (alaspäin) mentäessä.

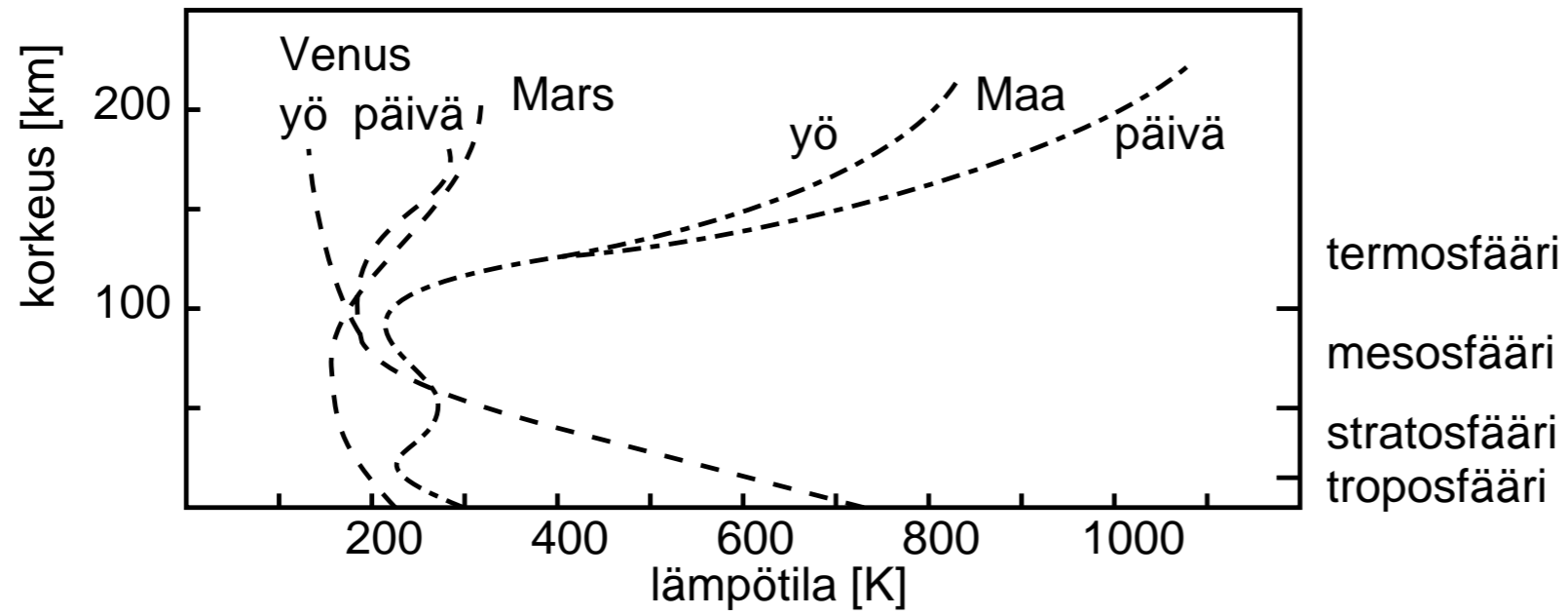
Mesosfääri absorboi hyvin vähän Auringon säteilyä, joten lämpötila laskee taas ylöspäin.

Termosfäärissä lämpötila alkaa taas nousta. Aine on jo hyvin ohutta. Sen lämpö on peräisin lähinnä Auringon hyvin lyhytaaltoisesta ultraviolettisäteilystä.

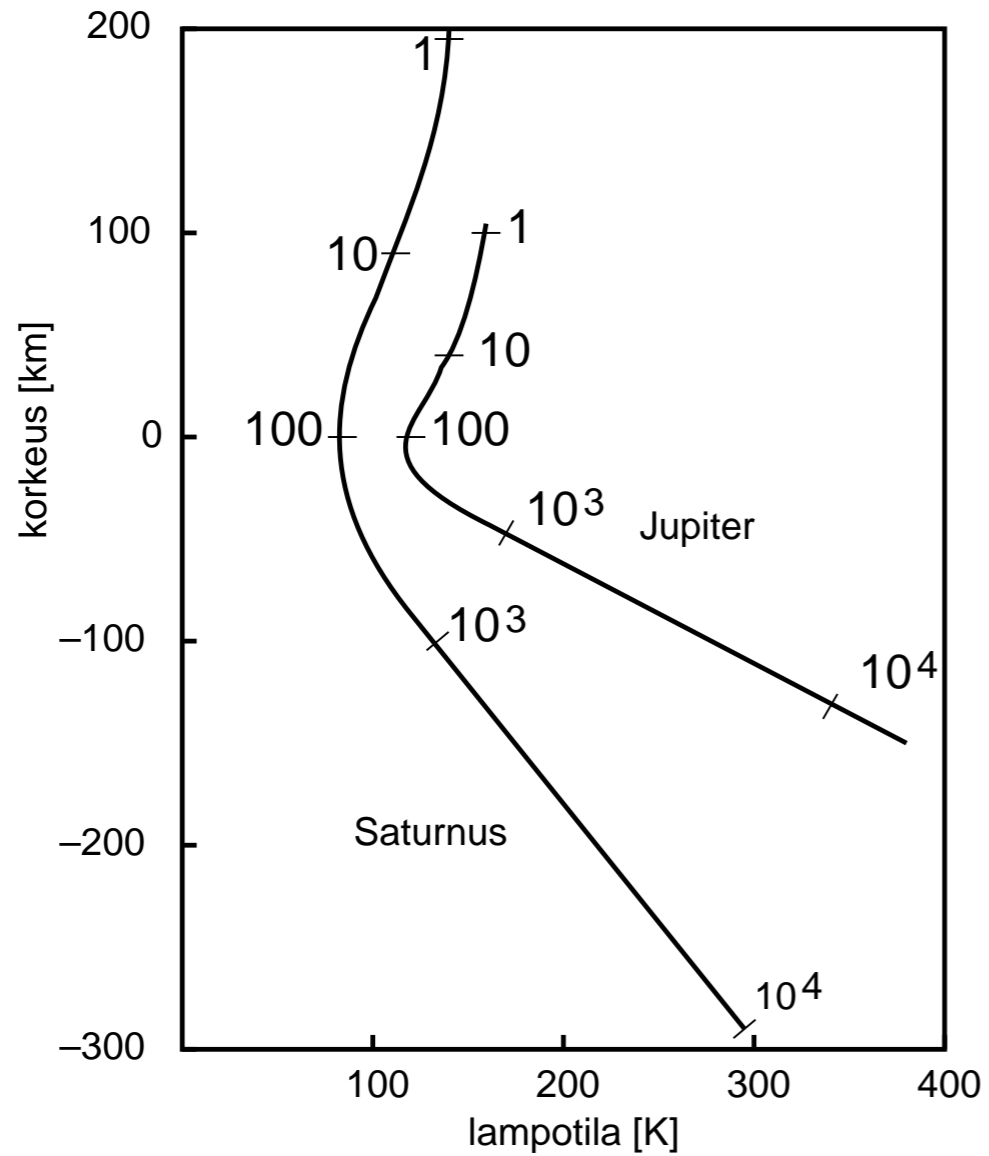
Soveltuvin osin samoja nimityksiä voidaan käyttää muidenkin planeettojen ilmakehien rakenteesta.

Maan ilmakehän erikoisuus on kaksi lämpötilan minimiä.

Venuksen, Maan ja Marsin atmosfäärin lämpötilat korkeuden funktiona. Venuksen ja maapallon atmosfäärin yläosien lämpötila vaihtelee vuorokaudenajan mukaan.



Jupiterin ja Saturnuksen atmosfäärien lämpötilajakauma. Nollakohtaksi on valittu korkeus, jossa paine on 100 millibaaria. Käyrien vieressä olevat luvut ilmoittavat ko. kohdassa olevan paineen millibaareina (tai vastaavina SI-järjestelmän mukaisina hehtopascaleina).



Pystysuora kiertoliike:

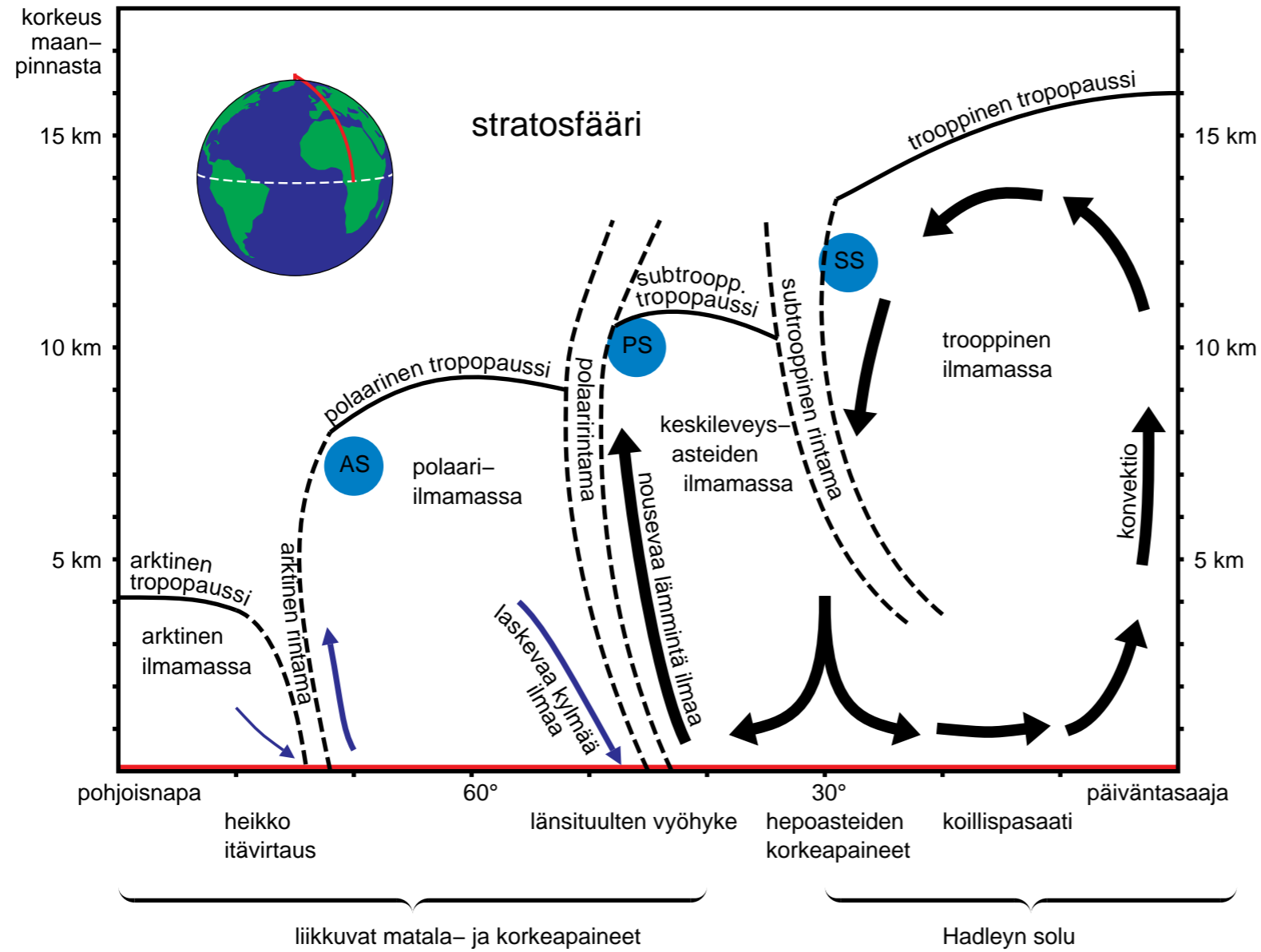
Hadleyn solu: ekvaattorin lämmin ilma nousee ylös ja laskeutuu alas korkeammilla leveyksillä. Tämä aiheuttaa Maassa subtrooppisten korkeapaineiden (hepoasteiden) korkeapaineen vyöhykkeet.

Ferrelin solu: Hadleyn solulle käänteinen kiertoliike.

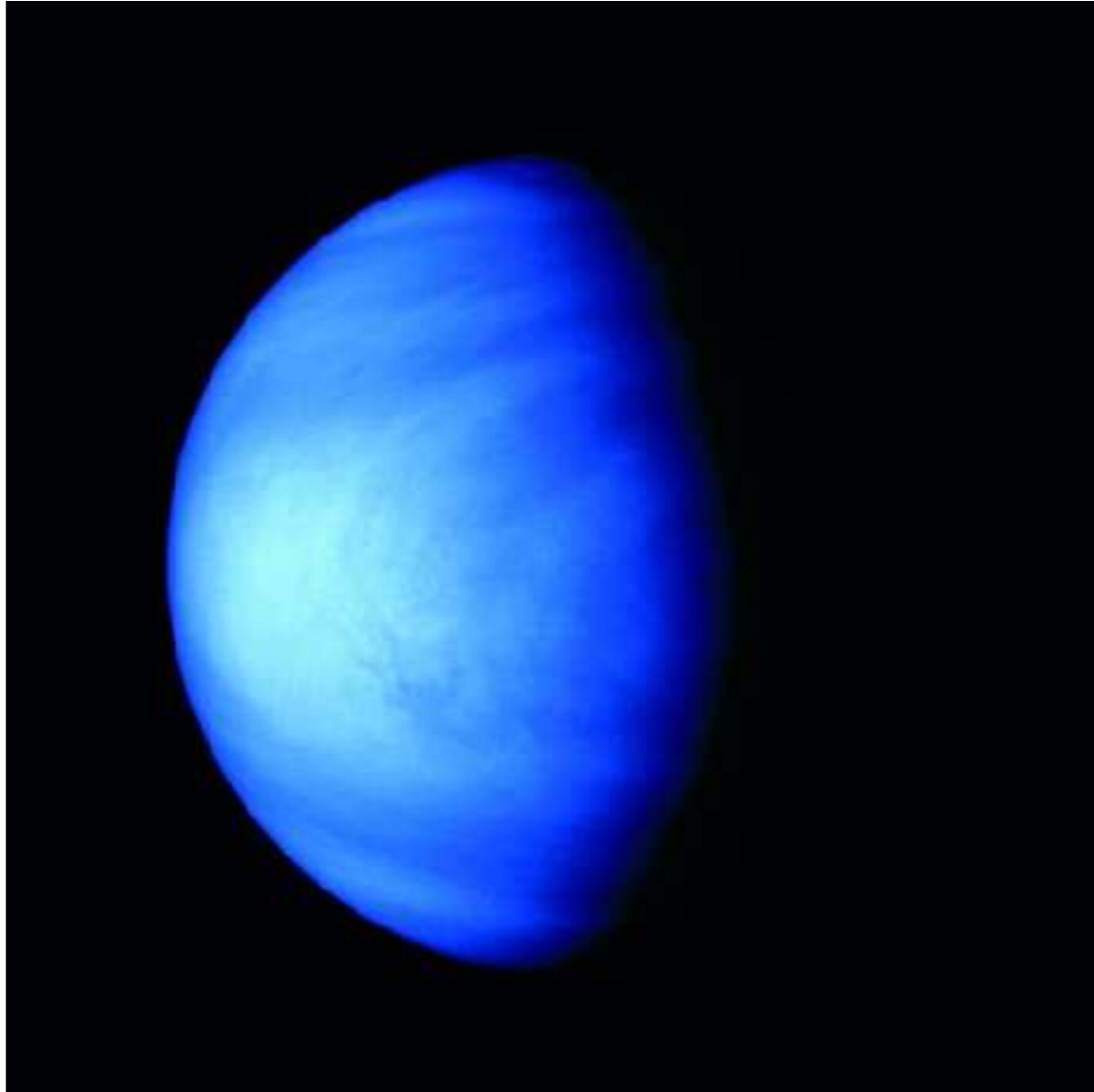
Hitaasti pyörivällä planeetalla (Venus) vain yksi Hadleyn solu kummallakin pallonpuoliskolla.

Nopeammin pyörivillä planeetoilla pystysuora kierto hajoaa useammaksi soluksi.

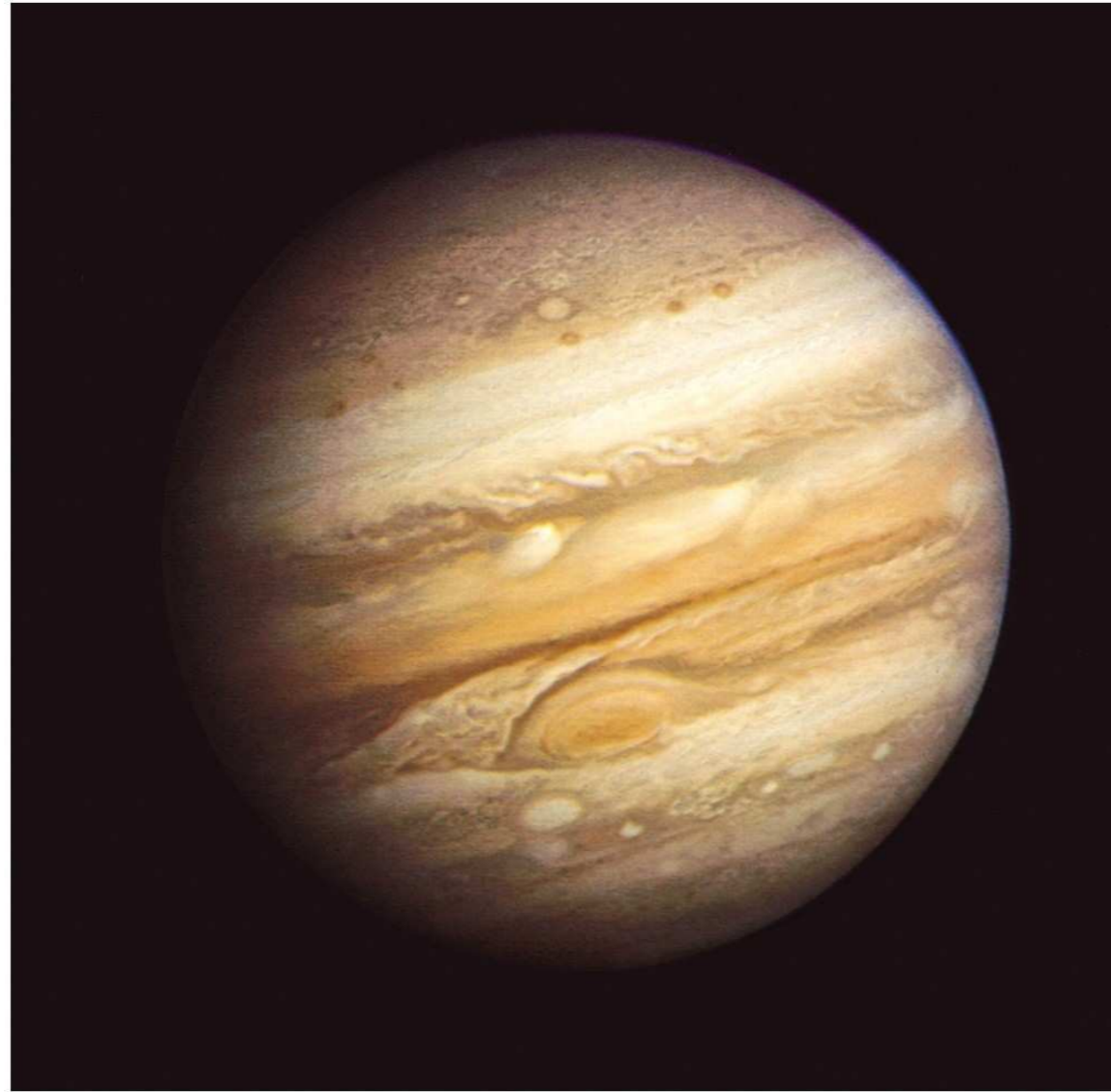
Maan ilmakehän pystysuorat kierto- ja kiertoliikkeet.



Venuksen ilmakehässä vain Hadleyn solut. Virtauskuviot näkyvät kunnolla vain lyhytaaltoisessa valossa (sininen tai UV).



Jättiläisplaneetoilla (erityisesti Jupiterilla) on useita virtaussoluja, joiden rajoilla virtaus turbulenttista.



Ilmakehän tiheys

Ilmakehän rakennetta kuvaa hydrostaattisen tasapainon yhtälö.

Paineen muutos dP siirryttäessä korkeudelta h korkeuteen $h + dh$ on

$$dP = -g\rho dh$$

missä g on gravitaatiokiihtyvyys. Jos ilmakehä on ohut, g on lähes riippumaton korkeudesta.

Ideaalikaasun tilanyhtälö on

$$PV = NkT,$$

josta saadaan paineelle P lauseke

$$P = \frac{\rho kT}{\mu}$$

missä N on atomien tai molekyylien lukumäärä, k Boltzmannin vakio, μ yhden atomin tai molekyylin massa ja $\rho = \mu N/V$.

Näistä seuraa

$$\frac{dP}{P} = -g \frac{\mu}{kT} dh,$$

josta integroimalla saadaan P korkeuden funktiona:

$$P = P_0 \exp \left(- \int_0^h \frac{\mu g}{kT} dh \right) = P_0 \exp \left(- \int_0^h \frac{dh}{H} \right).$$

Pituuden dimensioinen luku

$$H = \frac{kT}{\mu g}$$

on *skaalakorkeus*. Se on korkeus, jossa paine on pudonnut e :nteen osaan pinnalla vallitsevasta paineesta.

H on korkeuden funktio, mutta jälleen ensimmäisenä approksimaationa oletetaan H vakioiksi. Silloin

$$-\frac{h}{H} = \ln \frac{P}{P_0},$$

joten

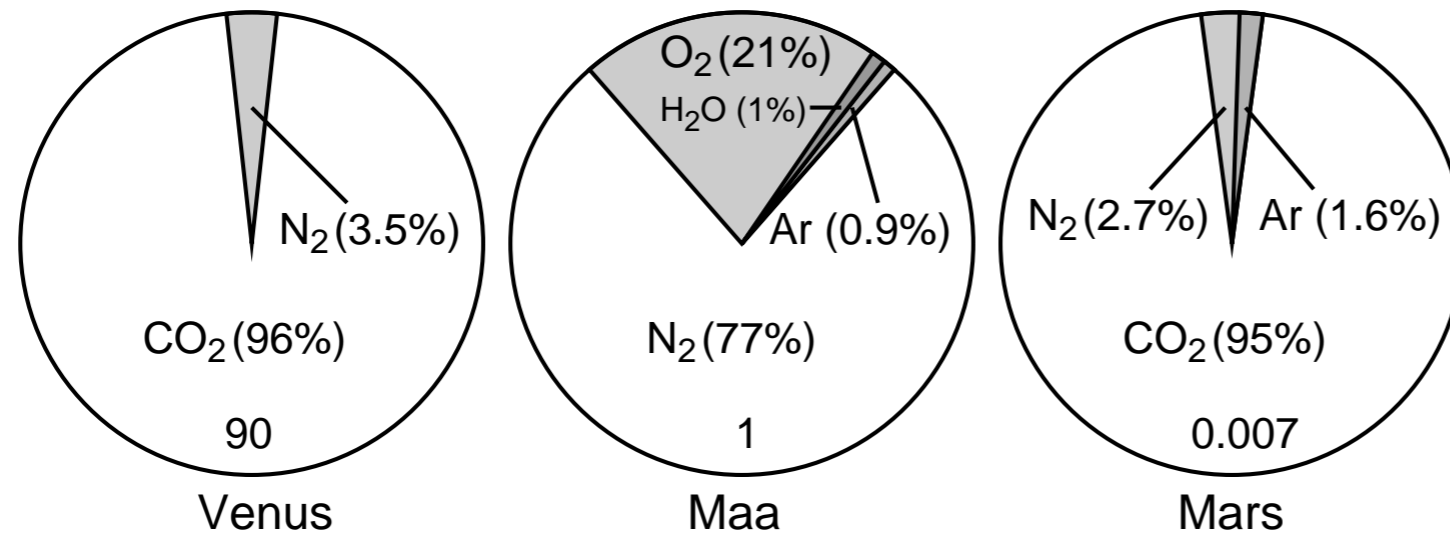
$$P = P_0 e^{-h/H}. \tag{1}$$

Jos paineen tai tiheyden muutos korkeuden funktiona tunnetaan, saadaan skaalakorkeus ja edelleen atmosfäärin kaasun keskimääräinen molekyylipaino.

Jupiterin atmosfäärin skaalakorkeudeksi mitattiin jo vuonna 1952 tähdenpeiton avulla noin 8 kilometriä. Tästä voitiin päätellä keskimääräisen molekyylipainon olevan välillä 3–5 amu (amu = atomimassayksikkö = $\frac{1}{12}m_{12C}$), joten atmosfääri koostui pääasiassa molekulaarisen vedyn ja heliumin seoksesta.

Eri kaasujen skaalakorkeuksia.

kaasu	molekyylipaino [amu]	Maa H [km]	Venus H [km]	Mars H [km]
H ₂	2	120	360	290
O ₂	32	7	23	18
H ₂ O	18	13	40	32
CO ₂	44	5	16	13
N ₂	28	8	26	20
gravitaatio- kiihtyvyys [m/s ²]		9.81	8.61	3.77
lämpötila [K]		275	750	260



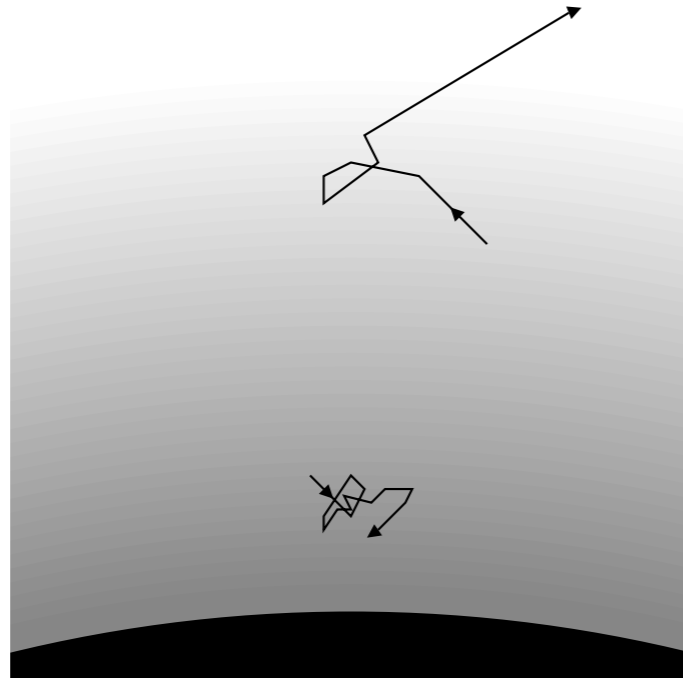
Eri kaasujen suhteelliset osuudet Venuksen, Maan ja Marsin atmosfääreissä. Kunkin ympyrän alareunassa oleva luku kertoo pinnalla vallitsevan paineen atmosfääreinä.

Ilmakehän haihtuminen

Planeetan atmosfäärin säilymiseen vaikuttavat planeetan koko ja lämpötila. Jos kaasumolekyylin nopeus on suurempi kuin pakonopeus, molekyyli karkaa avaruuteen.

Kriittinen kerros tai pakokerros on korkeus, jossa suoraan ulospäin liikkuva molekyyli törmää toiseen todennäköisyydellä $1/e$. Atmosfääristä karkaava molekyyli on todennäköisimminkin peräisin jostakin tämän kerroksen läheltä.

Kriittisen kerroksen yläpuolella olevaa atmosfäärin osaa kutsutaan *eksosfääriksi*.

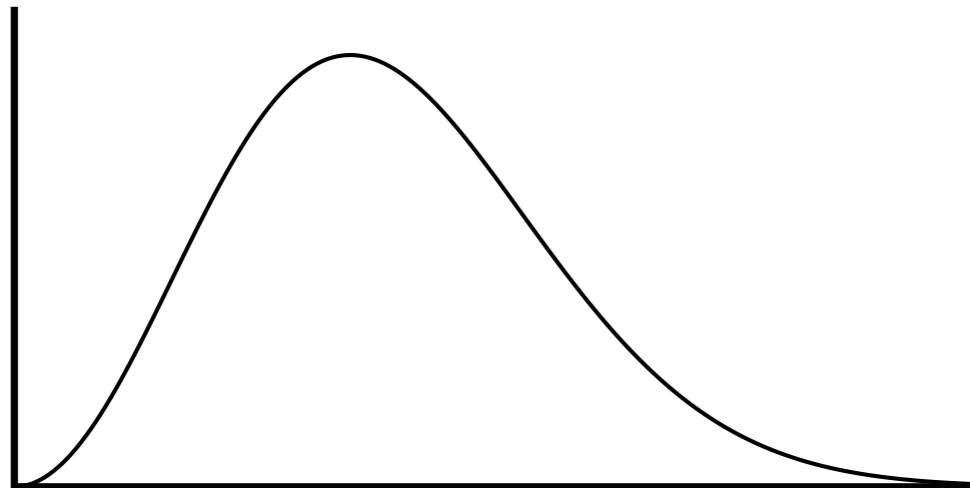


Terminen haihtuminen

Termisessä tasapainossa kaasumolekyylien nopeudet noudattavat Maxwellin jakaumaa

$$f(v)dv = N \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \left(\frac{m}{kT}\right)^{3/2} v^2 e^{-mv^2/(2kT)} dv,$$

missä N on molekyylien lukumäärätiheys, v nopeus ja m massa.



Kaasumolekyylien keskimääräinen nopeus \bar{v} on

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT_k}{m}},$$

missä T_k on kaasun kineettinen lämpötila.

Pakonopeus etäisyydeltä R M -massaisen kappaleen pinnalta on

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}}.$$

Käytännön kriteerinä voidaan pitää, että ainakin puolet atmosfääristä säilyy aurinkokunnan iän eli 10^9 vuoden luokkaa olevan ajan, jos nopeus $\bar{v} < 0.2v_e$.

Ei-terminen haihtuminen

Ilmakehän atomit ja molekyylit voivat saada erilaisissa prosesseissa niin paljon lisää nopeutta, että voivat haihtua avaruuteen.

- Lyhytaaltainen säteily ionisoi atomeja ja hajottaa molekyylejä; ylimääräinen energia muuttuu syntyvien hiukkasten liike-energiaksi.
- Nopeat avaruudesta tulevat hiukkaset voivat antaa ilmakehän hiukkasille lisänopeutta. Jos ilmakehä on hyvin ohut, myös pinnalta irti iskeytyvän aineen nopeus voi ylittää pako-nopeuden.
- Ionosfäärin sähkökenttä voi kiihdyttää varattuja hiukkasia, jotka voivat edelleen tönä myös neutraaleja hiukkasia.

Planeettojen magneettikentät

Planeetan magneettikentän voi synnyttää

- 1) Planeetan sisäinen dynamo; edellytyksenä nopeasti pyörivä planeetta, jolla sähköjohtava ydin. Maankaltaisilla planeetoilla rauta-nikkeli-ydin, jättiläisplaneetoilla metallista vetyä.
- 2) Aurinkotuulen ja ionosfäärin vuorovaikutus (Venus, komeetat).

Magnetosfäärin muoto ja suuruus riippuvat planeetan magneettikentän ja aurinkotuulen voimakkuudesta.

Auringon puolella on muutaman kymmenen planeetan säteen päässä *iskurintama*, johon aurinkotuulen varatut hiukkaset törmäävät. Sekä planeetan magneettikentän että aurinkotuulen voimakkuudesta riippuu, kuinka kaukana planeetasta iskurintama on.

Varsinainen magnetosfääri rajoittuu *magnetopausiin*, joka Auringon puolella on litistynyt ja vastakkaisella puolella leviää usean sadan planeetan säteen mittaiseksi pyrstöksi. Iskurintaman läpi päässeet varatut hiukkaset joutuvat planeetan oman magneettikentän vangiksi.

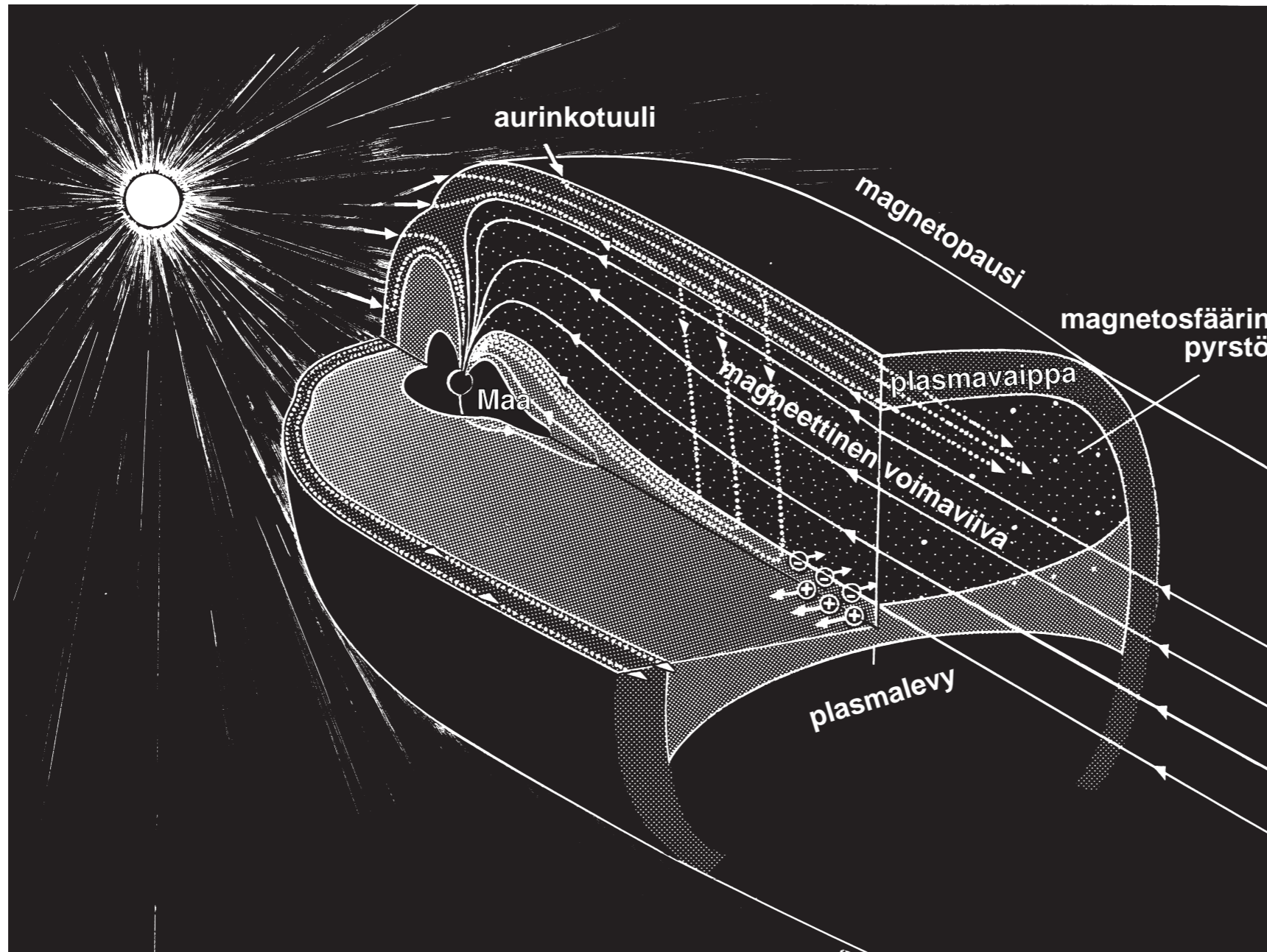
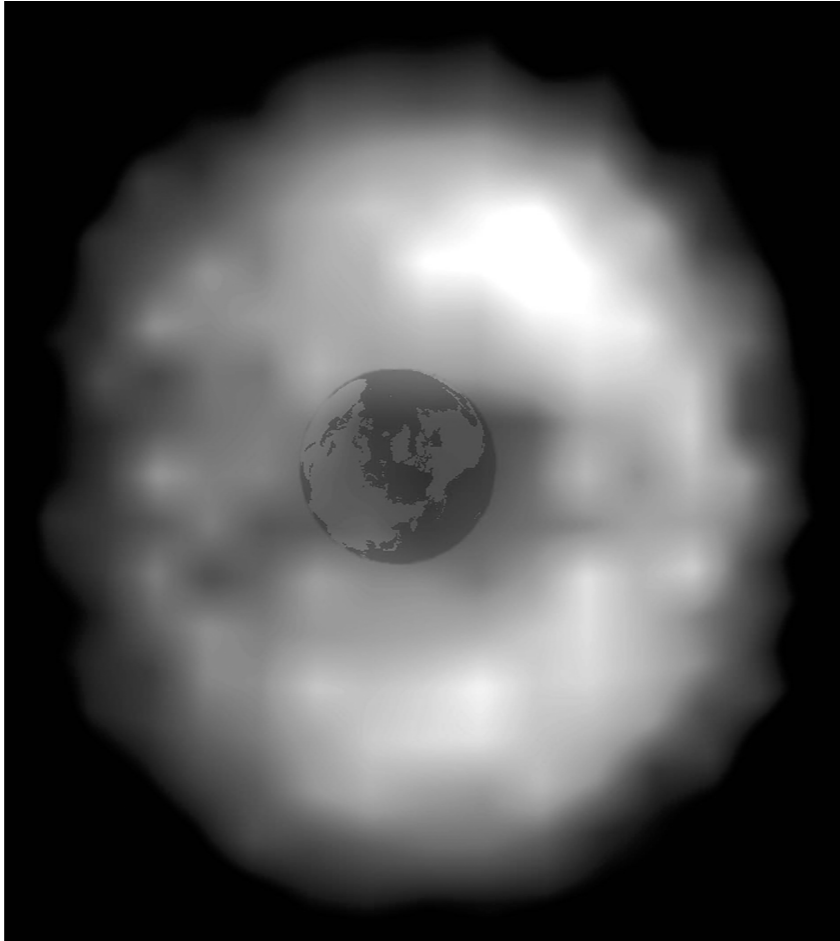
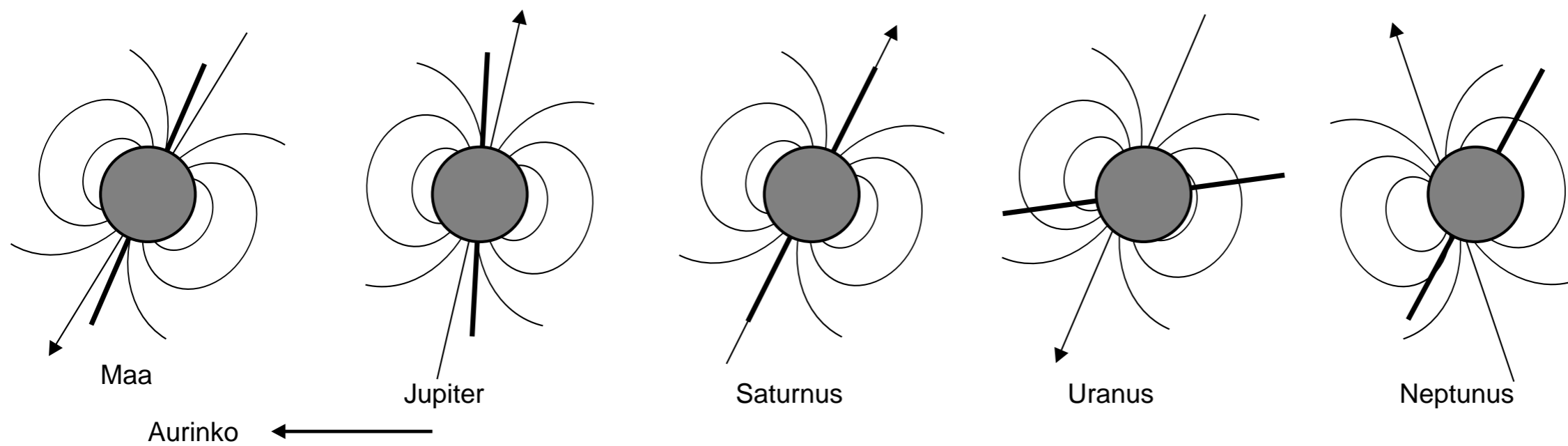


IMAGE-satelliitin kuvassa näkyy Maan magneettikentän vangiksi jäänyttä ionisoitunutta kaasua.



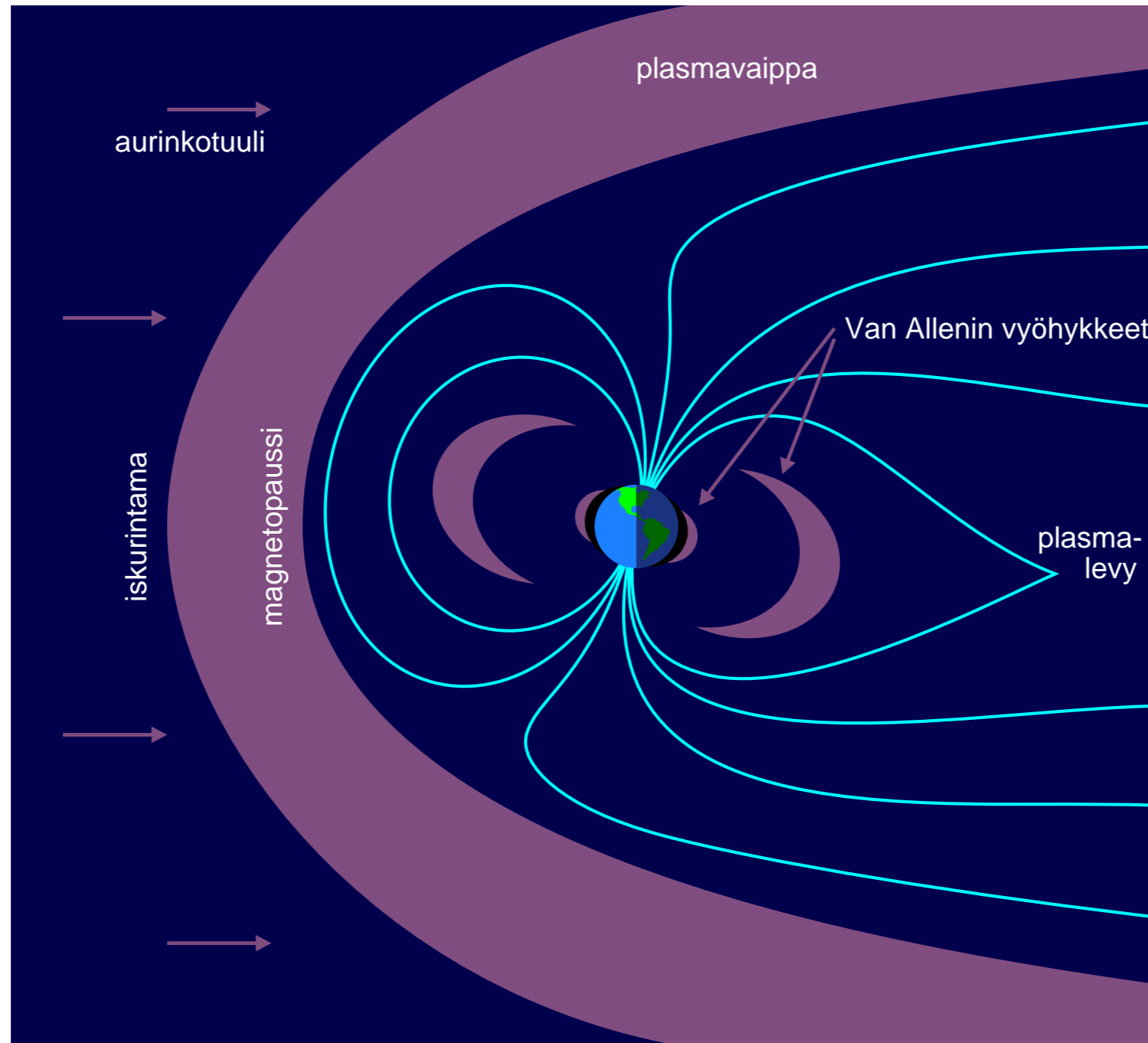


Planeettojen magneettikenttien asento ja sijainti planeetan suhteen. Paksumpi viiva (P) esittää pyörimisakselia ja ohuempi (M) magneettikentän akselia.

Säteilyvyöhykkeet (Van Allenin vyöt) ovat alueita, joissa on runsaasti varattuja hiukkasia.

Maan sisempi säteilyvyöhyke ($r \approx 1.5R_{\oplus}$) sisältää suurienergisiä protoneja (yli 10 MeV) ja elektroneja (0.5 MeV).

Ulomman vyöhykkeen ($r \approx 4R_{\oplus}$) hiukkasten energiat ovat pienempiä.



Avaruussää

Maan sähkömagneettisen ympäristön muutoksia, joita säätelevät Auringon säteilytoiminnan vaihtelut ja Auringon aktiivisuudesta seuraavat hiukkasvirrat.

Avaruussään tunnetuin ja näyttävin seuraus ovat revontulet.

Avaruussää vaihtelee 11 vuoden jaksoissa Auringon aktiivisuuden mukana.

Vaikutuksia

Voi indusoida korkeajännitelinjoihin ja pitkiin öljy- ja maakaasuputkiin sähkövirtoja. Keväällä 1989 Kanadan Quebecissä korkeajänniteverkko vaurioitui siten, että miljoonat ihmiset olivat vailla sähköä monen tunnin ajan.

Satelliittien vauriot. Tietoliikenteen välittämiseen käytettyjä satelliitteja on tuhoutunut ainakin tammikuussa 1994 (Anik), tammikuussa 1997 (Telstar 401), toukokuussa 1998 (Galaxy IV) ja lokakuussa 2003 Midori II -ympäristösatelliitti.

Hiukkaspurkaukset aiheuttavat vaaroja miehitetyille avaruuslennoille.

Lisääntynyt säteily saattaa olla vaarallista hyvin korkealla lentäville lentokoneille, joita on jouduttu avaruussäämyrskyjen takia ohjaamaan alemmille lentokorkeuksille säteilyriskin takia.

Avaruussään tuhomyrskyjä sattuu tyypillisesti 5–10 kertaa auringonpilkkujakson aikana, siis noin 11 vuoden kuluessa.