

AVARUUS- SCIFIN

kirjoittajan
tietopaketti

JUSSI KATAJALA & MARKUS KOSKIMIES
KUVAT: NASA

Johdanto

JUSSI KATAJALA & MARKUS KOSKIMIES

Kun kirjoitamme nykymaailmaan sijoituvia tarinoita, joissa etsivä ratkaisee rikosta kahdessa kaupungissa, vaikkapa Lontoossa ja Tokiossa tai Oulussa ja Tampereella, meillä on käsitys siitä, kuinka etsivä siirtyy kaupunkien välillä: mitä kulkuvälineitä voidaan käyttää, millaisella varoitussajalla voidaan lähteä, kauanko matka kestää, mitä matkalaukkuun pakataan.

Kun kirjoitamme tarinan, jossa keskiaikaisessa fantasiamaailmassa elävä etsivä ratkaisee rikosta kahdessa kaupungissa, meillä on edelleen jonkinasteinen käsitys siitä, millaisia kulkuvälineitä voi käyttää, miten matka järjestetään ja kauanko se suunnilleen kestää.

Mutta entä jos tarinan etsivän pitäisi ratkaista rikosta kahdella eri planeetalla, niin kuinka hän siirtyisi planeettojen välillä? Kuinka kauan matka kestää? Mitä hänen pitäisi huomioida matkaa järjestäessään? Mitä hän pakkaisi matkalaukkuunsa? Entä jos rikoksen ratkaiseminen veisi etsivämme toiselle tähdelle?

Tämän artikkelisarjan tavoitteena on antaa työkaluja tarinoille, jotka tapahtuvat avaruudessa. Kuten proosaa, historiallista fantasiaa tai maagista realismia kirjoittaessa, kirjoittajan ei ole syytä kahlita mielikuvitustaan realismin

kahleisiin syyttä suotta. Mutta toisaalta aivan kuten muissakin kirjoittamisen lajeissa, myös tulevaisuuteen ja avaruuteen sijoittuvaa fantasiaa kirjoittaessa on hyvä tietää, miltä osin tarina on realistinen, miltä osin sen voi saada nojaamaan realismiin ja missä kohtaa on tarpeellista ottaa vapauksia.

Atomic Rockets -sivuston tulokulma aiheeseen on se, että fiktiota kirjoittaessa pitäisi pyrkiä rikkomaan fysiikkaa mahdollisimman vähän sieltä, missä se on mahdollista, uhraamatta kuitenkaan hyvää tarinaa ”realismille”. Hyvän fiktion tavoite on uskottavuus, ei realismi. Todellisuuden rajoja rikkovat elementit – fantasian lohikäärmeet ja scifin valoa nopeammat alukset – voivat olla uskottavia ja loogisia tarinan sisäisessä universumissa olematta realismia.

Jos rikot realismin rajoja, niin riko niitä mieluiten sellaisissa paikoissa, jotka ovat olennaisia itse tarinalle. Älä suotta riko realismia tarinan ja sen juonen kannalta merkityksettömissä yksityiskohdissa. Lukijoita häiritsee huomattavasti enemmän se, etteivät läheiset tunnista Clark Kentiä Teräsmieheksi hänen laittaessaan silmälasit päähänsä, kuin se, että hän osaa lentää ja näkee rakennusten läpi.

Avaruus tarinan näyttämönä

JUSSI KATAJALA & MARKUS KOSKIMIES

Avaruuteen sijoittuvan tarinan kannalta tapahtumaympäristön valinta on keskeisempi tekijä kuin monessa muussa genressä. Millaisiin paikkoihin tarinan tapahtumat sijoittuvat? Sijoittuuko tarina meidän aurinkokuntaamme ja jos, niin minne: Maapallolle, Kuuhun, Marsiin, asteroidivyöhykkeen kappaleille tai Jupiterin kuihin? Tapahtuuko tarina syvällä avaruudessa vai vieraassa aurinkokunnassa? Jos tarina sijoittuu vieraaseen aurinkokuntaan, kuinka kaukana keskustähdestä se tapahtuu? Ollaanko ihmisen kannalta elinkelpoisella planeetalla? Sijoittuuko tarina suurelle vai pienelle taivaankappaleelle?

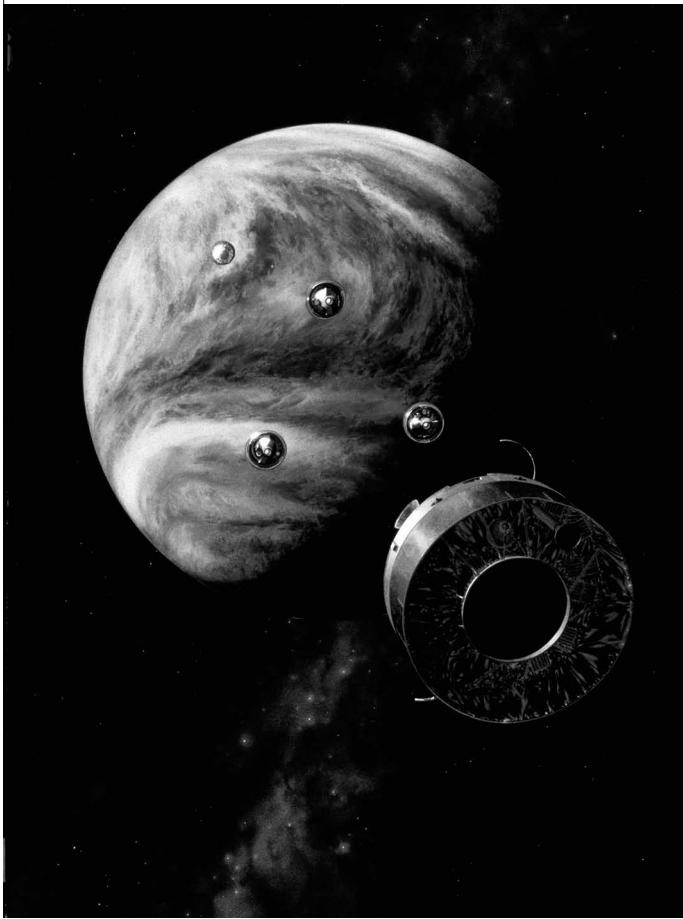
Tässä artikkelissa käydään spekulatiivisten aurinkokuntien rakentamisen peruselementit läpi yleisellä tasolla. Tämän artikkelin kirjoittamishetkellä syksyllä 2018 tunnetaan nelisen tuhatta planeettaa noin kolmen tuhannen tähden ympäriltä. Vaikka tietynlaisia planeettoja on helpompi löytää, nykyisten havaintojen perusteella voidaan sanoa, että kappaleet kaikilla aurinkokunnilla noudattavat tiettyjä lainalaisuuksia. Tästä syystä spekulatiivista aurinkokuntaa suunnitellessa voi hyvin ottaa lähtökohdaksi omasta Aurinkokunnastamme löytyviä planeettoja.

Planeetan kaksi keskeisintä ominaisuutta ovat massa ja etäisyys tähdestä, jota planeetta kiertää. Planeetan etäisyys keskustähdestään vaikuttaa sen saamaan säteilytehoon sekä sen kiertoradan periodiin eli vuoden pituu-

teen. Mitä lähempänä tähteä planeetta on, sitä enemmän se saa säteilyä ja sitä nopeammin se kiertää tähden ympäri. Planeetan massa vaikuttaa ensisijaisesti sen pinnalla olevan painovoiman suuruuteen, sitä itseään kiertävien kappaleiden kiertoratojen korkeuksiin ja nopeuksiin, sekä planeetan painovoimakentstä irtautumiseen vaadittavan pakonopeuden suuruuteen.

Toissijaisesti massa vaikuttaa planeetan “yleisilmeeseen”. Lähes riippumatta etäisyydestä keskustähteen, pienet kappaleet ovat kuivia ja kaasukehättömiä, ja suuret kappaleet ovat kaasujättiläisiä. Näiden väliin jää kappaleita (noin luokkaa $0.5\text{--}5 \times$ Maapallon massa), joiden pinnalla vallitsevia olosuhteita määrittelee niiden etäisyys keskustähteensä.

Paljon Maapalloa raskaammat kappaleet ovat aina kaasuplaneettoja. Raskas planeetta kykenee aurinkokunnan syntyvaiheissa pitämään ympärillään myös kevyet alkuaineet kuten vedyn, joka muodostaakin suurimman osan kaasujättiläisten massasta. Kaasuplaneettojen koostumus lähestyy tähtien koostumusta eli 75% vetyä ja 25% heliumia, minkä vuoksi niiden tiheydet ovat pieniä. Esimerkiksi Saturnuksen tiheys (687 kg/m^3) on pienempi kuin veden (1000 kg/m^3). Vaikka kaasuplaneetta koostuukin pääasiassa keveistä alkuaineista, ne ovat kaasui-
na vain jättiläisplaneetan noin 1000 kilometrin paksuisessa pintakerroksessa: sen alla ne ovat suunnattoman paineen takia metallisessa olomuodossa. Kaasuplaneetoilla ei ole selkeästi



määriteltävää kiinteää pintaa, mutta niillä saat-
taa olla kokonsa nähden pieni raskaammista
aineista koostuva ydin.

Paljon Maapalloa kevyemmät kappaleet
ovat kaasukehättömiä miltei riippumatta siitä,
kuinka lähellä tai kaukana ne kiertävät tähte-
ään. Tällaisia ovat esimerkiksi Aurinkoa lähellä
kiertävä Merkurius, oma kuumme ja kaukana
Auringosta oleva Jupiterin suurin kuu Ganyme-
des sekä kääpiöplaneetta Pluto.

Pienellä planeetalla voi alun perin olla kaa-
sukehä, mutta heikon painovoiman takia se
karkaa vähitellen avaruuteen. Mars on halkai-
sijaltaan noin puolet Maapallosta ja massaltaan
10% Maan massasta. Koska Marsin etäisyys Au-
rinkoon on suurempi kuin esimerkiksi Merku-
riuksen, kaasukehän vuotaminen avaruuteen
on ollut hitaampaa. Nykyisellään Marsilla on
jäljellä harva kaasukehä, joka sekin katoaa vähi-
tellen pois. Poikkeustapauksia toki on. Jos kevyt
kappale on tarpeeksi kylmä ja koostumuksel-
taan sopiva, sillä voi olla paksukin kaasukehä,
kuten Saturnuksen Titan-kuulla (2% Maan
massasta), jonka pintalämpötila on n. -180 °C.

Suunnilleen saman kokoiselta Ganymedes-
kuulta kaasukehä puolestaan puuttuu.

Kappaleen kaasukehän pysymiseen vaikuttaa
massan ja etäisyyden lisäksi se, mistä kaasukehä
muodostuu. Mitä raskaammista molekyyleistä
kaasukehä muodostuu ja mitä kauempana kap-
pale kiertää tähteään, sitä helpompi planeetan
on pitää se ympärillään. Toisaalta raskaammil-
la molekyyleillä kiehumispiste on korkeampi,
joten ne esiintyvät kaasuna vain jos planeetta
kiertää riittävän lähellä keskustähteään. Mikäli
planeetalla on magneettikenttä, se edesauttaa
kaasukehän säilymistä. Kaasukehän koostumus
voi myös aiheuttaa sivuvaikutuksia, esimerkik-
si voimakkaan kasvihuoneilmiön, jonka vuoksi
planeetan pinta voi olla lämpimämpi kuin mitä
pelkkä etäisyys antaisi ymmärtää. Esimerkiksi
Venuksen pintalämpötila on kasvihuoneilmiön
takia noin 500 °C. Teoriassa esimerkiksi Marsia
voitaisiin koettaa "maankaltaistaa" tuottamal-
la sen kaasukehäksi jotain riittävän raskasta
kaasua – ihminen ei ehkä pärjäisi ilman hen-
gityslaitetta, muttei kuitenkaan tarvitsisi pai-
nepukua, ja pinnalla saattaisi esiintyä jälleen
nestemäistä vettä.

Jos planeetalla ei ole kaasukehää, sen pin-
nalla vallitsee tyhjiö. Tyhjiössä nesteet kiehu-
vat hyvin matalissa lämpötiloissa, minkä vuoksi
kaasukehän haihtuessa planeetalla mahdolli-
sesti olevat nesteet höyrystyvät ja katoavat
kaasukehän perässä. Vastaavasti mitä tiheämpi
kaasukehä planeetalla on, sitä suurempi pai-
ne sen pinnalla vallitsee ja sitä helpommin sen
pinnalla voi esiintyä ainetta nestemäisessä olo-
muodossa.

Kaasukehättömät planeetat ovat siis kuivia,
mutta se ei tarkoita vedettömyyttä. Vesi on ava-
ruudessa hyvin yleinen kappaleiden rakennus-
materiaali, mutta se esiintyy useimmiten jäänä,
kuten Jupiterin ja Saturnuksen kuilla. Pluto kier-
tää niin kaukana Auringosta, että sen kallioperä
koostuu jään lisäksi pääosin sellaisista aineista,
jotka lähempänä kiertävillä kappaleilla esiinty-
vät kaasuna: tyydestä (sulamispiste -209,86 °C),
metaanista ja hiilimonoksidista. Lisäksi pienel-
läkin kappaleella vesi voi esiintyä nestemäisenä
pinnanalaisina merinä, kuten esimerkiksi Ju-
piterin suurilla jääkuilla: Europa, Ganymedes
ja Kallisto.

Aurinkokunnastamme puuttuvat esimerkit kahdesta sellaisesta planeettatyypistä, joita muilta tähdiltä on havaittu: kuumat jupiterit ja supermaapallot. Kuuma jupiter on massiivinen kaasuplaneetta, massaltaan tavallisesti Jupiteria huomattavasti suurempi, joka kiertää lähellä keskustähteään, toisin kuin Aurinkokuntamme kaasuplaneetat. Tämän kokoinen kappale keskustähden läheisyydessä tekee aurinkokunnasta enemmän kaksoistähtijärjestelmää muistuttavan – vakaat kiertoradat ovat joko hyvin läheltä keskustähteä tai sen suurta kumppania, tai kaukana molemmista kappaleista.

Supermaapalloiksi kutsutaan planeettoja, joiden massa on Maan ja Neptunuksen massan välissä. Supermaapallojen lainalaisuuksia

tunnetaan vielä huonosti, koska sen kokoluokan kappaleet puuttuvat Aurinkokunnasta. Aurinkokunnassa kappaleet ovat jakautuneet selvärajaisesti Maapallon massaa lähellä oleviin kiviplaneettoihin (Venus, Maa, Mars ja Merkurius), ja huomattavasti suurempiin kaasujättiläisiin, joista pienimmät ovat noin 15 kertaa Maata raskaammat Uranus ja Neptunus. Supermaapallot (n. 2–5 x Maan massa) ovat kuitenkin nyky löytöjen perusteella toiseksi yleisin planeettatyyppejä heti Neptunuksen kokoluokan jälkeen.

Taulukko 1 antaa esimerkkejä eri kokoisista kappaleista.

Tieteistarinoiden kirjoittajille jo pelkkä planeetan massa antaa mahdollisuuden ajatusleikkeihin. Mitä jos ihmiskunta löytää elinkelpoisen

Taulukko 1. Esimerkkejä eri kokoisista kappaleista

Kappaleen massa	Esimerkki	Kommentti
0,0001 x Maa	Ceres	Iso asteroidi
0,002 x Maa	Pluto	Kääpiöplaneetta
0,01 x Maa	Kuu	
0,02 x Maa	Titan, Ganymede	
0,05 x Maa	Merkurius	Planeetta
0,1 x Maa	Mars	
1,0 x Maa	Maa, Venus	
1,0–5,0 x Maa	Supermaa(pallo)	
n. 5 x Maa	Eksoplaneetta Gliese 581c	”kaasukääpiö”, ”jääjättiläinen”
15 x Maa	Neptunus, Uranus	
100 x Maa	Saturnus	Kaasujättiläinen
300 x Maa = 1 x Jupiter	Jupiter	
n. 15–75 x Jupiter	Ruskea kääpiötähti	Tähti
yli 75 x Jupiter	Tähdet	Tähti

supermaapallon ja keksii keinon matkustaa sinne, mutta painovoima onkin moninkertainen Maapalloon verrattuna? Kuinka ihmiskunta sopeutuu elämään siellä? Tai miten ihmisen evoluutio jatkuu planeetalla, jossa on pienempi painovoima, esimerkiksi Marsissa?

Monen avaruustarinan keskiössä on planeetta, jonka pinnalla ihminen voi elää ilman erityisempiä apuvälineitä. Apuvälineitä käyttämällä ihminen voisi elää myös sellaisilla planeetoilla, jotka eivät luonnollisesti olisi elinkelpoisia. Äärimmilleen vietyinä, jos teknologia antaa mahdollisuuden järjestää suljettu kierto, eläminen on kiinni pelkästään energian saatavuudesta.

Jotta planeetta olisi ihmiselle elinkelpoinen, sen pinnalla tulee olla nestemäistä vettä. Keskuksien ympärillä olevaa vyöhykettä, jossa säteilytehon puolesta vesi voi esiintyä pinnalla nestemäisenä kutsutaan elämänvyöhykkeeksi. Elämänvyöhykkeen rajat eivät ole vielä erityisen hyvin tunnettuja, mutta yleisesti arvioidaan, että Aurinkokunnassa Venus on elämänvyöhykkeen sisärajan tuntumassa jommalla kummalla puolella, ja Mars sen ulkoreunan tuntumassa; Maapallo on Aurinkokunnassa elämänvyöhykkeen sisällä. Yksinkertaistettuna elämänvyöhyke tarkoittaakin etäisyyttä, jossa planeetta saa suunnilleen saman verran säteilyä kuin Maapallo saa Auringosta. Karkeasti sanoen elämänvyöhykettä lähempänä kiertävät kappaleet ovat tapahtumapaikkana Merkuriuksen ja Venuksen

kaltaisia kuumia maailmoja ja sitä kauempana kiertävät kappaleet ovat jäisiä ja kylmiä.

Tarinan tarpeisiin vieras elinkelpoinen planeetta on helppoa tehdä suunnilleen Maapallon kokoiseksi ja sijoittaa Auringon kaltaisen tähden ympärille, mikäli tarina ei aseta tälle esteitä. "Elinkelvottomia" – ihmiselle ja nestemäiselle vedelle liian kuumia tai kylmiä, tai liian pieniä tai suuria – planeettoja voi sijoitella huomattavasti vapaammin, kunhan sijoittaa ne oikealle puolelle elämänvyöhykettä eli kuumat kappaleet lähemmäksi ja kylmät kauemmaksi.

Planeettaa voi jonkin verran hienosäätää tarinan tarpeisiin. Jos planeetan kiertorata on tarinan vuoksi sijoitettava lähemmäs keskustähteä, lisäämällä planeettaan jonkin verran massaa sen on helpompi pitää kiinni kaasukehästään. Toisaalta, siirtämällä planeettaa hiukan kauemmaksi ja tekemällä siitä vähän kylmempi, se voi olla jonkin verran kevyempi. Äärimmäisyyksiä kannattaa välttää, jos ei ole valmis perehtymään asiaan tarkemmin.

Toinen vaihtoehto on hienosäätää keskustähteä. Tähdet jaetaan pintalämpötilansa mukaan eri luokkiin. Kuumimmat tähdet sijoitetaan luokkaan O, kun taas viileimmät tähdet sijoitetaan luokkaan M. Viilenevässä järjestyksessä luokat ovat O, B, A, F, G, K ja M. Pääsarjan tähdille luokitus kertoo tähden massan, joka puolestaan määrää aurinkokunnan skaalan eli sen, paljonko kappale saa säteilyä milläkin etäisyydellä ja kuinka pitkiä kiertoajat ovat.

Taulukko 2: Pääsarjan tähden luokitus ja tyypillinen massa (x Aurinko), laskennallinen kirkkaus (x Aurinko) ja sellaisen radan etäisyys ja kiertoaika jossa planeetan saama säteilyenergia vastaa Maata.

Luokka		Massa x Aurinko	Kirkkaus x Aurinko	Etäisyys x Maa	Kiertoaika	Esimerkki
A		2,0	25,4	5,04	7,88 a	Sirius A
F	valk	1,5	6,93	2,63	3,49 a	Procyon
G	kelt	1,0	1,00	1,00	365 d	Aurinko
K	orans	0,7	0,15	0,39	106 d	61 Cygni A
M	pun	0,31	0,01	0,11	25 d	Gliese 581

Pääsarjan tähdille luokka kertoo pintalämpötilan, säteilytehon ja massan lisäksi myös niiden eliniän.

Aurinko on G-sarjan tähti. Sijoittamalla Maapallon kaltainen elinkelpoinen planeetta hie-
man kevyemmän oranssinkeltaisen K-sarjan tähden ympärille planeetan vuosi lyhenee ja koko aurinkokunta ”pakkautuu” jonkin verran. Sijoittamalla planeetta hiukan raskaamman F-sarjan tähden ympärille käy päinvastoin, eli planeetan vuosi sekä ympäröivä aurinkokunta ”venyy” hiukan. On myös huomattava, että elinkelpoinen vyöhyke on nimenomaan vyöhyke, eli rataa voi joka tapauksessa hienosäätää jonkin verran tarvitsematta vaihtaa tähteä.

Massiiviset O- ja B-sarjan tähdet syntyvät ja kuolevat nopeasti. Tällaisilla tähdillä ei välttämättä ole lainkaan planeettoja, ja vaikka olisikin, ne kiertävät hyvin pian syntymänsä jälkeen kylmässä avaruudessa. Suurempien A- ja F-sarjan tähtien, M-sarjan punaisten kääpiötähtien sekä kaksois- tai kolmoistähtien ympärille rakennetuissa maailmoissa on omat haasteensa. Jos sellaisesta haluaa uskottavan, joutuu perehtymään huomattavasti enemmän siihen, kuinka aurinkokunnat syntyvät, millaisia on löydetty, ja miten keskustähti ja etäisyys vaikuttavat planeetalla vallitseviin olosuhteisiin.

Nyrkkisääntöinä:

- kevyt tähti on pieni, himmeä, oranssi tai punainen ja pitkäikäinen, ja sen planeettojen kiertoradat ovat lähempänä ja matkaajat ovat lyhyempiä
- raskas tähti on suuri, kirkas, sinertävän valkoinen ja lyhytikäinen, ja sen planeettojen kiertoradat ovat kauempana ja matkaajat ovat pidempiä.
- Tähtien luokituksesta – eli niiden massoista, väristä, kirkkaudesta ja eliniästä, sekä elinkelpoisen vyöhykkeen sijainnista – löytää hyvin lisää tietoa Wikipediasta.

Keskustähden valinnasta esimerkkinä voitaisiin käyttää tarinaa, jossa planeetan kiertoaika tähtensä ympäri haluttaisiin suunnilleen samaksi kuin ihmisen elinikä eli n. 70 maapallon vuotta. Jokainen planeetalle syntynyt ihminen näkisi elämänsä aikana vuodenaajat vain kerran,

yhden kesän ja yhden talven. Syksyllä syntynyt ihminen elää nuoruutensa talvella, aikuisuutensa keväällä ja kesällä, ja kuolee seuraavana syksynä. Omassa aurinkokunnassamme tällainen planeetta on Uranus, jonka kiertoaika on 84 vuotta. Toki Maapallon kokoisen kappaleen kiertäminen elämänvyöhykkeellä 70–80 vuoden kiertoradalle vaatisi hillittömän kokoisen keskustähden, josta seuraisi paljon muita ongelmia, mutta hienosäätöä voi aina tehdä, eikä planeetan tarvitse välttämättä olla ihmiselle elinkelpoinen ilman teknologian apua.

Itseään voi haastaa valitsemalla tarinansa tapahtumapaikaksi epätavallisen kevyen tai raskaan, tai sijoittamalla se haasteelliselle kiertoradalle. Haasteita ei kuitenkaan kannata pelätä. Niiden ei lopulta tarvitse olla täydellisessä harmoniassa todellisuuden kanssa tullakseen lopulta klassikoiksi niin hyvässä kuin pahassakin. Esimerkkejä tästä ovat vaikkapa **Hal Clementin** *Painovoima 700* tai **Robert Forwardin** *Lohikäärmeen muna* – huikeita fysikaalisia spekulatioita joka tapauksessa.

Jos oman aurinkokunnan kehittäminen tuntuu liian vaikealta, inspiraatiota voi hakea todellisuudesta. Erittäin mielenkiintoista informaatiota muista aurinkokunnista on tarjolla esimerkiksi eksoplaneettoja koskevista Wikipedian artikkeleista. Tieteistarinoiden kirjoittajilla on helpompaa nykyään kuin ennen vuotta 1992, jolloin löydettiin ensimmäinen planeetta oman aurinkokuntamme ulkopuolelta. Sitä ennen vieraat maailmat piti luoda itse alusta alkaen.

LINKKEJÄ

- <https://en.wikipedia.org/wiki/Exoplanet>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Circumstellar_habitable_zone
- https://en.wikipedia.org/wiki/Circumstellar_habitable_zone#/media/File:Gliese_581_-_2010.jpg

Elää ja kuolla avaruudessa

JUSSI KATAJALA

Avaruus ei ole mukava paikka. Avaruuteen pääseminen on vaarallista ja vaikeaa, siellä oleminen on usein epämiellyttävää eikä paluu takaisin Maapallollekaan ole turvallista. Olisi kuitenkin väärin sanoa, että avaruus olisi vihamielinen tai että avaruus yrittäisi tappaa sinne matkanneen kaikin mahdollisin keinoin. Ihmistä ei vain ole tarkoitettu avaruuden olosuhteisiin. Ihmiset ovat kuitenkin aina suunnanneet äärimmäisiin ja tuntemattomiin paikkoihin vaaroista välittämättä.

Tämä artikkeli käsittelee avaruusmatkailun vaaroja ja haasteita, joista scifin kirjoittaja voi ammentaa ideoita ja realismia avaruuteen sijoittuviin tarinoihinsa. Draamaa on helpompi kehittää, kun tietää, mikä voi mennä pieleen ja aiheuttaa vastuksia. Pääpaino on miehitetyissä avaruuslennoissa. Avaruudella tarkoitetaan tässä yhteydessä noin sadan kilometrin korkeudessa sijaitsevan Kármánin rajan ylittämistä. Sen yläpuolella ilmakehän tiheys on niin pieni, että perinteinen lentokone ei pysty enää lentämään.

Tulevaisuudessa avaruuteen saatetaan päästää avaruushissillä tai ampumalla alus avaruuteen raidetykillä, mutta ne vaativat teknologiaa ja materiaaleja, joita ei ole vielä olemassa. Tällä hetkellä ainoa tapa päästä avaruuteen on rakettimoottori. Rakettimoottorissa ajoaineen palaminen tuottaa kuumaa palamiskaasua, joka työntää rakettia eteenpäin Newtonin kolmannen lain mukaisesti. Toisin kuin lentokoneiden

suihkumoottori, rakettimoottori kuljettaa mukanaan sekä polttoaineen että hapettimen ja toimii siten myös tyhjiössä.

Raketin tehokkuutta kuvaa sen paloaikanaan aikaansaama nopeuslisä, jota kutsutaan ajokyvyksi. Jotta raketti pystyy nostamaan hyötykuormansa pois planeetan tai muun tai-vaankappaleen painovoimakentästä, sen on saavutettava pakonopeus. Esimerkiksi Maapallon kiertoradalle pääsemiseen vaadittava pakonopeus on 8,2 km/s. Raketin ajokyvyn on oltava siis vähintään 8,2 km/s, jotta sen avulla päästään avaruuteen. Sama asia voidaan ilmaista sanomalla, että ajotarve kiertoradalle pääsemiseksi on 8,2 km/s. Jos halutaan päästä kokonaan pois Maapallon painovoimakentästä, ajotarve on 11,2 km/s.

Mitä tehokkaampi raketti on, sitä nopeammin pakonopeus voidaan saavuttaa ja sitä vähemmän tarvitaan polttoainetta. Tehokkuuteen vaikuttaa eniten rakettimoottorissa käytetty polttoaine. Tehokkaamman polttoaineen säilyttäminen ja käyttäminen on yleensä vaarallisempaa ja vaikeampaa kuin vähemmän tehokkaan. Rakettimoottorin polttoaineena käytetään usein pitkälle jalostettua kerosiinia. Nestevely olisi kerosiinia tehokkaampaa, mutta se pitää paineistaa ja jäähdyttää alle -252 °C:en. Kerosiinia voi säilyttää huoneenlämmössä ja se on paljon vähemmän räjähdysherkkää.

Tässä kohdassa törmätään ensimmäisen kerran ihmiskehon aiheuttamiin rajoituksiin. Avaruusmatkailussa kiihtyvyyttä mitataan G-

voimalla, jonka yksikkö on g. Yhden g:n suuruinen kiihtyvyys on 9,81 m/s² eli sama kuin Maapallon putoamiskiihtyvyys. Maan pinnalla olevaan ihmiseen kohdistuu siis 1 g:n suuruinen voima. Altistuminen liian pitkään liian suurille G-voimille aiheuttaa hetkellisiä näköongelmia, tajuttomuutta ja pahimmillaan kuoleman. Suuretkaan G-voimat eivät yleensä aiheuta pysyviä vammoja, elleivät ne kohdistu äkillisesti niskaan tai selkärankaan.

Hyvässä fyysisessä kunnossa oleva ihminen kestää 5 g:n suuruisen räsituksen ilman apuvälineitä. Helpoin tapa säästää avaruusmatkajia G-voimilta on rajoittaa raketin tehoa. Avaruussukulan lähdössä matkustajiin kohdistui enimmillään 3 g:n ja Sojuz-aluksen laukaisussa 4,2 g:n voima. Korkeampia g-voimia varten on kehitetty erityisiä g-pukuja, jotka puristavat raajoja ja estävät veren pakenemisen päästä.

Kun ihminen on saatu avaruuteen, hänet täytyy pitää hengissä, mikä ei ole avaruuden olosuhteissa helppoa. Ihminen vaatii selviytyäkseen minimissään ilmaa, vettä, ravintoa, suojan ulkoisilta olosuhteilta sekä unta. Näistä uni on ainoa asia, jota ei tarvitse kuljettaa avaruuteen kantoraketilla. Maapalloa kiertävällä aluksella päivä ja yö vaihtelevat nopeammin kuin 24 tunnin syklissä. Esimerkiksi kansainvälinen avaruusasema ISS kiertää Maapallon 24 tunnissa 16 kertaa, joten sen ”vuorokausi” kestää vain 90 minuuttia avaruusaseman siirtyessä Maapallon päiväpuolelta yöpuolelle. Tämän vuoksi avaruusaluksiin luodaan keinotekoinen vuorokausirytmä valaistuksen avulla.

Hapenpuute aiheuttaa väsymystä, tajuttomuutta ja pahimmillaan kuoleman. Happea voidaan kuljettaa avaruuteen paineistettussa muodossa. Sitä pystytään myös tuottamaan aluksella joko

elektrolyysillä vedestä tai polttamalla natriumklooraattia ja rautajauhetta sisältäviä ”happikynttilöitä”. Aluksen ilmanlaatua parannetaan suodattamalla ilmasta hiilidioksidia ja muita epäpuhtauksia. Koneellisella ilmanvaiholla varmistetaan, että hiilidioksidi ei keräänny vaaralliseksi kaasupilveksi yhteen paikkaan.

Ilmanpaine aluksen sisällä on yleensä sama kuin Maapallolla ja myös hengitysilman hapen sekä typen suhde pidetään samana kuin Maapallolla. Aluksen täyttäminen puhtaalla hapella on äärimmäisen huono idea. Puhtaan hapen hengittäminen aiheuttaa keuhkoihin tulehdusta ja turvotusta jo muutamassa tunnissa. Puhdas happi saa myös mahdolliset tulipalot leviämään räjähdysmäisesti. Näin tapahtui Apollo 1:ssä, jonka miehistö kuoli vaurioituneista sähköjohdoista alkaneessa tulipalossa.

Myös vettä pystytään suodattamaan ja kiertättämään hyvin tehokkaasti. Jätevesi, hiki ja virtsa muunnetaan yhä uudelleen ja uudelleen juomavedeksi. Kun elektrolyysistä ylijäänyttä vettä ja ihmisten uloshengittämää hiilidioksidia yhdistetään, saadaan aikaan vettä ja metaania. Vesi voidaan juoda ja metaanin voi pumpata ulos avaruuteen. Tulevaisuudessa metaania voi mahdollisesti käyttää energiantuotannossa tai jopa polttoaineena.

Ravinnon saannin turvaaminen ei ole yhtä helppoa. Aikuisen ihmisen päivittäinen energiantarve on 2000–3000 kcal. Koska eri ruoat sisältävät eri määrän energiaa, on vaikea sanoa mitään yksiselitteistä ruokamäärää, joka tarvitaan.



Energiantarpeen saa katettua esimerkiksi syömällä perunoita noin 3 kg päivässä, mutta niistä ei saa kaikkia tarvittavia vitamiineja ja hivenaineita. NASA:n laskujen mukaan astronautti syö keskimäärin 0,7 kg ruokaa joka aterialla. Jos aterioita on kolme päivässä, astronautti tarvitsee täten päivässä 2,1 kg ruokaa.

Avaruuteen mukaan otetun ruoan tulee olla kuivattua, säteilytettyä tai muulla lailla säilytettyä, sillä sen on säilyttävä kauan aikaa. Kasvien kasvattamista on kokeiltu pienimuotoisesti kansainvälisellä avaruusasemalla ISS:llä, mutta omavarainen ruoantuotanto avaruudessa maanviljelyllä ei ole tällä hetkellä mahdollista. Vesi, lämpö ja valo saadaan järjestettyä, samoin hiilidioksidi. Suurempi ongelma ovat ravinteet ja lannoitteet. Ihmisperäistä lannoitetta olisi saatavilla, mutta sen käyttäminen on terveysriski. Viljelykasveilla pitäisi myös olla hyvä hyötysuhde, jotta niiden kasvattaminen avaruudessa olisi taloudellisesti järkevää. Eläinperäisen ravinnon tuottaminen avaruudessa olisi vielä hankalampaa, sillä eläimetkin tarvitsevat ravintoa ja happea.

Ilman, veden, ravinnon ja unen turvaamisen jälkeen tarvitaan vielä suojaa ulkoisilta olosuhteilta. Ihmiselle vaarallisia olosuhteita avaruudessa ovat tyhjiö, lämpötila, säteily, painottomuus ja avaruudessa liikkuvat kappaleet. Tyhjiöltä voidaan suojautua yksinkertaisesti paineistamalla alus. Tyhjiöön joutuminen ei tapa välittömästi. Ihminen ei räjähdä tyhjiössä kuin ilmapallo eikä hänen verensä ala kiehua. Suurin ongelma on hapensaanti. Maan pinnalla tai veden alla hengitystä voi pidättää jopa useita minutteja vetämällä keuhkot ensin täyteen ilmaa. Tämä ei onnistu tyhjiössä, sillä keuhkoissa olevat kaasut laajenevat. Jos yrittää pidättää hengitystään, seurauksena on keuhkojen repeäminen. Ainoa tapa estää keuhkovauriot on hengittää ulos. Tällöin keuhkot tyhjenevät ilmasta eikä vereen pääse enää happea. Keho kuluttaa veressä olevan hapen noin 15 sekunnissa, jonka jälkeen seuraa tajuttomuus. Verenpaine romahtaa noin minuutissa ja veri lakkaa kiertämästä. Jos tyhjiöstä pääsee pois alle 90

sekunnissa selvinnee ilman vakavia vammoja. Sitä pidempi altistuminen aiheuttaa todennäköisesti vähintään aivovaurioita.

Lämpötila avaruudessa vaihtelee suuresti ja riippuu siitä, kuinka lähellä Aurinkoa tai muuta tähteä ollaan. Kaukana Plutossa lämpötila voi laskea $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$:hen ja tähtienvälisessä avaruudessa lämpötila on vain kymmenisen astetta absoluuttisen nollapisteen yläpuolella. Maapallon kiertoradalla lämpötila on varjon puolella noin $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, mutta auringon puolella lämpösäteily voi kuumentaa metallisen esineen jopa $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$:een. Mikäli ihminen päätyy avaruuteen ilman avaruuspukua, hän ei palellu hengiltä. Tyhjiö johtaa huonosti lämpöä, joten kehon lämpötila laskee hitaasti. Siinä vaiheessa kun ruumiinlämpö laskee hypotermiaan asti, on jo kuollut hapenpuutteeseen.

Miehitettyjen avaruusalusten sisälämpötila pyritään pitämään $20\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa. Avaruusaluksen saa suojattua liialta lämpenemiseltä laittamalla sen pyörimään akselinsa ympäri kuin grillivartaan, jolloin yksi puoli ei kuumene liikaa. Kylmältä taas saa suojauduttua yksinkertaisesti lämmittämällä alusta. Avaruuspuvuissa ongelma hoidetaan jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmillä, sillä avaruuskävelyllä olevaa astronauttia ei voi laittaa pyörimään.

Ihminen altistuu avaruudessa kosmiselle säteilylle ja auringon säteilylle. Kosminen säteily on peräisin ulkoavaruudesta ja saanut alkunsa supernovaräjähdyksistä sekä muista kosmisista tapahtumista. Kummassakin tapauksessa kyse on ionisoivasta säteilystä, joka lisää syöpärisiä. Suurina kerta-annoksina ionisoiva säteily aiheuttaa säteilysairautta. Lievissä tapauksissa säteilysairaus aiheuttaa pahoinvointia, vakavammassa tapauksissa seurauksena on sisäistä verenvuotoa, hiustenlähtöä, infektioita, luuytimen tuhoutumista ja mahdollisesti kuolema. Lievästä säteilysairaudesta voi toipua pelkällä levolla, vakavampi saattaa vaatia luuydinsiirron eikä sekään välttämättä auta.

Niin kauan kuin pysytään matalalla kiertoradalla Maapallon magneettikenttä suojaa avaruusmatkaajia säteilyltä. Lisäksi alusten

Ihminen ei räjähdä tyhjiössä kuin ilmapallo eikä hänen verensä ala kiehua.

pintamateriaalina käytetty alumiini torjuu suurimman osan jäljelle jäävästä säteilystä. Suomalaisen keskimääräinen säteilyannos on noin 3,2 millisievertiä vuodessa. Kansainvälisellä avaruusasemalla saa vuodessa noin 72 millisievertin kokoisen säteilyannoksen. Vaikka kyseessä on moninkertainen annos, se ei vielä vaaranna terveyttä. Kevyen säteilysairauden raja on 1–2 sievertiä eli yli kymmenen kertaa enemmän.

Kun poistutaan Maapallon magneettikentän suojasta säteilyannos kasvaa suuremmaksi, jolloin se vaarantaa matkustajien terveyden. Voimakas säteily voi myös vaurioittaa elektronisia laitteita, mikä aiheuttaa omat vaaransa. Pitkällä avaruusmatkalla pelkkä alumiini ei riitä säteilysuojaksi. Yksinkertaisin keino olisi pinnoittaa alus alumiinin sijaan lyijyllä, mutta lyijy on paljon raskaampaa materiaalia, jolloin tarvitaan lisää ajoainetta. Yksi potentiaalinen suojaustapa olisi keinotekoinen magneettikenttä, joka toimisi kuten Maapallon magneettikenttä. Se vaatisi kuitenkin paljon energiaa.

Painottomuus saattaa tuntua mukavalta ajatukselta, mutta käytännössä painottomuus tai mikropainovoimassa oleskelu aiheuttaa fyysisiä ongelmia. Tasapainoaisesti perustuu sisäkorvassa oleviin nesteisiin, jotka eivät käyttäydy painottomuudessa normaalisti. Seurauksena on matkapahoinvointia muistuttava avaruuspahoinvointi. Oloa ei helpota se, että myös vatsassa oleva ruoka ja juoma alkavat liikkua painottomuudessa. Karu totuus on, että jokainen oksentaa aluksi päästyään avaruuteen.

Pahoinvointia pahempi ongelma on se, että lihakset surkastuvat ja luut haurastuvat painottomuudessa. Kuntoilu avaruudessa on hankalaa, mutta pakollista, mikäli haluaa vielä kävellä palattuaan Maapallolle. Tällä hetkellä ainoa tunnettu tapa luoda keinotekoinen painovoima on laittaa alus pyörimään akselinsa ympäri, jolloin keskipakovoima luo illuusion painovoimasta. Otetaan esimerkiksi ruotsinlaiva, jonka halkaisija on keskimäärin 30 metriä. Jos samankokoisen avaruusaluksen ulkoseinille haluttaisiin luoda Maapallon painovoimaa vastaava keinotekoinen painovoima, aluksen pitäisi pyöriä akselinsa ympäri noin 5,5 kertaa minuutissa. Näin nopea pyöriminen rasittaisi aluksen runkoa ja aiheuttaisi aluksen raken-

nusmateriaaleille vaatimuksia, joita nykyään käytetty alumiini ei pystyisi täyttämään.

Avaruudessa liikkuvat kappaleet muodostavat törmäysriskin. Mikrometeorittien lisäksi Maan kiertoradalla on valtava määrä avaruusrumua, joka on peräisin hajonneista satelliiteista. Pienikin irronnut mutteri voi aiheuttaa suurta tuhoa, jos se törmää alukseen tuhansien kilometrien tuntinopeudella. Maan kiertoradalla on tällä hetkellä noin 18000 kappaletta, joiden liikkeitä pystytään seuraamaan. Pienempiä kappaleita saattaa olla miljoonia eikä niitä pysty väistämään. Onneksi törmäys pienen kappaleen – kuten mikrometeoritiin – kanssa ei yleensä johda räjähdysmäiseen paineenalenumiseen, vaan siitä syntynyt vuoto ehditään korjata ennen kuin ilma karkaa avaruuteen. Mikäli kappale sattuu osumaan tietokoneeseen tai muuhun tärkeään laitteeseen, ongelma on ihan toista kokoluokkaa.

Edellä kuvattujen ongelmien lisäksi avaruusmatkailijaa uhkaavat esimerkiksi bakteerinfektiot, mökkihöperyys, masennus ja tekniset viat. Yhden hengen avaruusaluksia ei enää ole, mutta eläminen ahtaissa tiloissa muiden ihmisten kanssa on pidemmän päälle stressaavaa.

Maapallolle palaamisessa on myös omat haasteensa. Aluksen on osuttava ilmakehään juuri oikeassa kulmassa. Mikäli kulma on liian loiva, alus kimpooa takaisin avaruuteen. Mikäli tulokulma on liian jyrkkä, ilmakehän aiheuttama kitka nostaa lämpötilan niin suureksi, että alus tuhoutuu. Kitka kuumentaa alusta joka tapauksessa niin paljon, että siinä olevien ihmisten suojaksi tarvitaan lämpökilpi, joka ottaa vastaan kovimman kuumuuden.

Aluksen päästyä ilmakehään ei olla vielä turvassa. Yläilmakehässä ilmanpaine on niin matala, että ilma saattaa edelleen karata aluksessa, mikäli runkoon tulee reikä. Sojuz 11:n paineentasausventtiili hajosi yläilmakehässä ja koko miehistö kuoli, koska heillä ei ollut avaruuspukuja päällään.

Saavuttuaan alailmakehään alus kulkee edelleen moninkertaisella äänennopeudella. Turvallista laskeutumista varten nopeutta pitää laskea hallitusti, pelkkä ilmakehän kitka ei riitä. Jarruttamiseen voitaisiin käyttää rakettimoottoreita, mutta ne vaatisivat polttoainetta. Nykyään käytössä olevat alukset – venäläisten



Sojuz ja kiinalaisten Shenzhou – jarruttavat ja laskeutuvat laskuvarjojen avulla. Aina ne eivät toimi. Sojuz 1:n päälaskuvarjo ei toiminut ja sen varavarjon narut sekoittuivat laukaisuvarjoon, jolloin alus syöksyi maahan. Avaruussukkula puolestaan hidasti nopeuttaan liitolennolla, kunnes laskeutui niin kuin lentokone.

Maan pinnalle pääseminen ei vielä tarkoita, että avaruusmatkaaja olisi turvassa. Veteen laskeutunut alus voi saada vuodon ja upota kuten Mercury 4. Astronautti pääsi tässä tapauksessa kuitenkin turvaan. Laskeutumisaikaa voi myös olla täysin väärä, ja kestää kauan, ennen kuin alus löydetään ja matkustajat saadaan noudettua. Sojuz-aluksissa on edelleen varustuksena puoliautomaattinen pistooli siltä varalta, että alus päätyy keskelle metsää ja kosmonautin kimppuun hyökkää karhu tai muu villieläin.

Kuten tästä artikkelista käy hyvin selväksi, ihmisen lähettäminen avaruuteen on äärimmäisen vaarallista. Silti miehitettyjä avaruuslentoja tullaan tekemään jatkossakin. Myönnä pois, että todennäköisesti sinäkin lähtisit tilaisuuden tullen avaruusmatkalle, vaikka nyt tiedätkin suuren osan siihen liittyvistä riskeistä.

LISÄTIETOA

- **NASA:n sivut** ovat paras lähde, jos haluaa tietoa pitkäaikaisesta avaruudesta asumisesta. Kansainvälinen avaruusasema ISS on tällä hetkellä ainoa pysyvästi asutettu avaruusasema, joten siitä kerääntynyttä tietoa kannattaa käyttää hyväksi.
- **NASA:n ISS-sivusto:** https://www.nasa.gov/mission_pages/station/main/index.html
- **Tietoa ISS:n toiminnasta ja rakenteesta:** https://www.nasa.gov/pdf/508318main_ISS_ref_guide_nov2010.pdf
- **Human Research Program** kertoo avaruuden vaikutuksesta ihmiseen: <https://www.nasa.gov/hrp>
- **Moon to Mars** kertoo miten NASA aikoo aloittaa uudestaan miehitetyt lennot Kuuhun ja sieltä edelleen Marsiin: <https://www.nasa.gov/topics/moon-to-mars>

Matkustaminen avaruudessa

MARKUS KOSKIMIES
KIITOKSET MM.: ANTTI ERONEN, JUSSI KATAJALA

Olet ideoinut tarinan. Olet hahmotellut sen henkilöt ja tapahtumapaikat. Nyt pitäisi enää järjestää henkilöt planeetalta A planeetalle B. Miten se tehtäisiin?

Matka-aika: Yleensä tarinan kannalta keskeisin tekijä planeettojen välillä matkustamisessa on matkaan kuluva aika. Hyvin harvassa tarinassa tarvitaan mitään muuta kuin karkea arvio. Arviointiin voi käyttää kahta menetelmää. Ensimmäinen ja helpoin on ottaa matka-ajaksi puolet kauempana kiertävän kohteen vuodesta (kiertoajasta). Hiukan tarkemman arvion saa, kun laskee yhteen planeettojen kiertoajat ja jakaa sen neljällä.

Arviot ovat sitä tarkempia, mitä lähempänä lähtö- (A) ja tulopaikan (B) kiertoajat ovat tois-

siaan. Mutta vaikka kiertoajat (P) poikkeaisivat toisistaan paljonkin, niin arviot menevät silti samalle hehtaarille todellisten matka-aikojen kanssa. Esimerkkejä on taulukossa 1.

Hyvin todennäköisesti matka-ajan pituus yllättää varautumattoman kirjoittajan. Suunniteltu juoni nitisee liitoksissaan, kun planeettojen välistä rikosta tutkiva etsivä joutuu lojumaan avaruusaluksella viikkoja, kuukausia tai vuosia. Tässä vaiheessa moni kirjoittaja alkaa helposti etsiä keinoja “teleportata” henkilönsä suoraan planeetalta toiselle.

Ensimmäinen vinkki koskeekin jo suunnitteluvaihetta. Mitä pahaa siinä on, jos avaruusmatkat kestävät oman aikansa? Miksi niihin ei voisi suhtautua kuin vaikkapa 1500-luvun merimatkoihin? Onko kahdella planeetalla rikosta

Taulukko 1: Matka-aikojen arviointi

Lähtö (A)	P(A)	Tulo (B)	P(B)	Arvio 1(*)	Arvio 2(**)	Hohmann
LEO(***)	90 min	Kuu	27.45 d	13.73 d	6.88 d	4.98 d
Maa	12.18 kk	Mars	22.90 kk	11.45 kk	8.77 kk	8.63 kk
Maa	12.18 kk	Venus	7.49 kk	6.09 kk	4.92 kk	4.87 kk
Maa	1.00 a	Jupiter	11.87 a	5.94 a	3.22 a	2.73 a
Jupiter	11.87 a	Saturnus	29.54 a	14.77 a	10.35 a	10.02 a

(*) Puolet pidemmästä kiertoajasta.
(**) Kiertoaikojen summa jaettuna neljällä.
(***) LEO, *Low Earth Orbit*, kiertoradat Maapallon ympärillä n. 300–500 kilometrin korkeudella.

tutkivan etsivän pakko päästä toisen planeetan pinnalle välittömästi jatkamaan tutkimuksiaan, vai saattaisiko avaruusmatkan aikana tapahtua jotain, joka pyöräyttää kuviot aivan toiseen suuntaan?

Jos suhtaudut avaruusmatkaan samaan tapaan kuin fantasiatarinan merimatkaan, puolet ongelmista on jo nitistetty. Anna avaruusmatkoille aikaa. Hyvin usein fantasiaa kirjoitettaessa matkat – tapahtuivat ne laivalla, ratsain tai jalkaisin – ovat itsessään osa tarinaa, joiden aikana tapahtuu olennaisia käänteitä. Avaruusscifiin kirjoittajalle voi suositella samankaltaista lähestymistapaa, mikäli tarina itse vain antaa sille periksi.

Nyrkkisääntönä voi sanoa, että mitä enemmän annat aikaa avaruusmatkalle, sitä vähemmän valistuneemmat lukijat nikottelevat. Liiallinen kiirehtiminen johtaa nopeasti uskotavuuden karisemiseen.

Mikäli avaruusmatkan tekeminen olennaiseksi osaksi tarinaa osoittautuu turhan vaikeaksi, eräs yleisesti käytetty menetelmä ohittaa matkojen aikajänteet on tehdä ne jonkinlaisessa horrostilassa (syväunessa). Vaikka tarinan maailmassa tällöinkin kuluu oikeaa aikaa juuri sen verran kuin matkaan menee, niin tarinan henkilöiden ei tarvitse tätä kokea. Horrostilassa matkustaminen on suosittu keino myös siksi, ettei kirjoittajan tarvitse tällöin kertoa juuri mitään itse matkan yksityiskohdista.

Jos tarinan kaari vaatii päähenkilöä suorittamaan päiväreissun Maasta Marsiin ja takaisin, niin oikeastaan ainoa käyttökelpoinen vinkki tällaiseen tapaukseen on se, että unohda realismi.

Mikäli et ole vielä hylännyt realismia, olet sijoittanut avaruusmatkalle jotain tarinan kannalta olennaista ja päättänyt, että se tehdään ilman horrosunta, niin tarvitset suunnittelun tueksi reilun annoksen tietoa, johon paneudumme seuraavaksi.

Peruskäsitteet

Lähes täydellinen tyhjiö on avaruuden ominaisuus, mutta painottomuus ei ole. Kappaleiden (galaksit, tähdet, planeetat) vetovoima ulottuu joka puolelle avaruutta, toki heikentyen etäi-

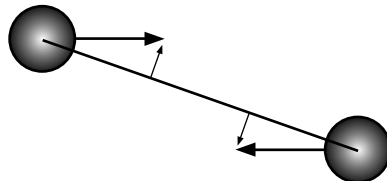
syyden kasvaessa. Painottomuus on seurausta siitä, kun kappaleiden annetaan kulkea vapaasti painovoiman kaareuttamilla radoilla. Avaruusaluksella ja -asemalla vallitsee painottomuus aina, kun se ei käytä moottoreitaan. Matkustaja ja miehistö ei välttämättä tätä painottomuutta koe, mikäli alukselle on järjestetty keinopainovoima.

Gravitaation takia mikään ei ole avaruudessa paikoillaan. Olipa kappale missä tahansa avaruuden osassa, muiden kappaleiden vetovoima laittaa sen liikkeelle. Mikäli kappaleet lähestyvät kohtisuoraan toisiaan, ne törmäävät. Mutta jos kappaleilla on tarpeeksi sivuttaista (tangentialista) keskinäistä nopeutta, ne joutuvat toistensa kiertoradalle tai todennäköisimmin, mikäli keskinäistä nopeutta on liikaa, ohittavat toisensa kaareutuneella paraabeli- tai hyperbeliradalla (kuva 1).

Kuva 1.



1. Kappaleet lähestyvät kohtisuoraan toisiaan (eli tangentialinen nopeus on nolla), jolloin ne törmäävät toisiinsa.



2. Kappaleet eivät lähesty kohtisuoraan, jolloin niillä on keskinäistä sivuttaista eli tangentialista nopeutta (pienemmät nuolet). Ne kaareuttavat toistensa radat, ja keskinäisestä nopeudesta riippuen joko jäävät toistensa kiertoradoille tai ohittavat toisensa kaarevalla radalla keskinäisestä nopeudestaan riippuen.

Tämän ensimmäisen osuuden matematiikka

on “ulkoistettu” Juhani Kaukorannan kirjoittamaan esitelmään: <http://jukaukor.mbnet.fi/fysiikka/avaruusfysiikkaa.pdf> – jos kaipaat esitettyihin asioihin tarkennuksia ja/tai keinoja niiden laskemiseen, suosittelen lämpimästi tutustumaan kalvosettiin.

Kiertorata (engl. orbit): Avaruudessa kaikki kappaleet ovat kiertoradoilla (tai ohitusradoilla, jos keskinäistä nopeutta on tarpeeksi). Kappaleet kiertävät galaksia (kuten tähdet), tähtiä (kuten planeetat) tai planeettoja (kuten kuut). Mikään kappale ei voi pysyä paikoillaan gravitaation takia.

Korkeus, ratanopeus ja kiertoaika: Mitä kauempana keskuskappaleesta kierretään, sitä pienempi on (ympyrä)radan ratanopeus. Tämä puolestaan vaikuttaa kiertoaikaan kahdella mekanismilla: radan piiri kasvaa etäisyyden kasvaessa, ja samalla rataa kuljetaan yhä hitaammin. Toisin sanoen, kiertoaika kasvaa nopeammin kuin etäisyys, vrt. Keplerin kolmas laki.

Massa ja kiertoaika: Keskuskappaleen massan suhde kiertoaikaan on universaali siinä mielessä, että se pitää paikkansa niin tähtiä kiertäville planeetoille kuin planeettoja kiertäville kuille ja satelliiteille – kaikille avaruudessa oleville kappaleille galakseja ja tiiliskiviä myöten.

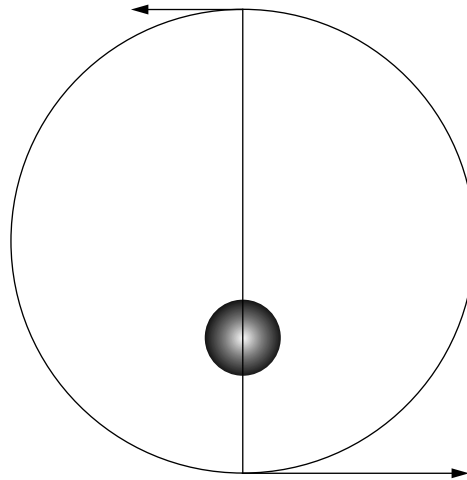
Ajatellaan kiertorataa, jonka korkeus pidetään vakiona. Kun keskusmassaa lisätään, niin pysyäkseen radalla ratanopeutta on lisättävä. Koska radan korkeus on pidetty vakiona, niin radan piiri pysyy vakiona, ja siten lisääntyvä nopeus pienentää kiertoaikaa.

Ympyrärata: Ympyräradalla ratanopeus ja -korkeus pysyy vakiona. Hyvin usein kiertorata on synonyymi ympyräradalle. Kun avaruusaluksen sanotaan olevan parkissa planeetan kiertoradalla, niin tällä kiertoradalla hyvin usein tarkoitetaan ympyrärataa.

Ellipsirata: Ellipsiradalla radan korkeus ja ratanopeus vaihtelevat. Samaan tapaan kuin vuoristoradalla, kappaleen nopeus on suurimmillaan radan matalimmalla kohdalla: kappale on tippunut kohti keskuskappaletta, menettäen samalla potentiaalienergiaa, joka on lisännyt sen liike-energiaa. Vastaavasti, kun kappale kippua kauemmas keskuskappaleesta, sen nopeus laskee ja potentiaalienergia kasvaa.

Periapsis ja apoapsis: Ellipsiradoilla radan matalinta kohtaa kutsutaan periapsikseksi. Radan korkeinta kohtaa kutsutaan apoapsikseksi. Aurinkoa kiertävällä radalla voidaan käyttää termejä periheli ja apheli, joita käytetään usein planeettojen radoista puhuttaessa. Maapalloa kiertävällä radalla voidaan käyttää termejä perigeum ja apogeum, esimerkiksi satelliittien radoista puhuttaessa.

Kuva 2.



Ylhäällä: Apoapsis, radan korkein kohta, jossa nopeus on pienimmillään.

Alhaalla: Periapsis, radan matalin kohta, jossa nopeus on suurimmillaan.

Oheisessa kuvassa 2 on eräs ratojen kannalta tärkeää huomioitava. Miksi kappaleen ollessa apoapsiksessa tiedetään, että se on radalla, joka tulee viemään sen lähemmäksi keskuskappaletta? Se johtuu siitä, että tällaisen radan ratanopeus lakipisteessään on pienempi kuin ympyräradan ratanopeus samalla etäisyydellä. Se kertoo vääjäämättömästi, että radan matalin kohta on jossain lähempänä, kappaleen nopeus on liian pieni, jotta se säilyttäisi korkeutensa saatikka että sen radan korkein kohta olisi jossain kauempana. Samalla tavalla periapsiksessa voidaan jo ratanopeudesta (joka on suurempi kuin ympyräradan korkeus vastaavalla etäisyydellä) suoraan kertoa se, että kappale tulee

nousemaan korkeammalle.

Poltto (engl. burn) on termi, jolla tarkoitetaan sitä, kun avaruusalus käyttää moottoreitaan muuttaakseen nopeuttaan (määrää ja/tai suuntaa). Kappaleen paikka- ja nopeusvektori määräävät yksikäsitteisesti sen kiertoradan, joten **kun nopeus muuttuu, niin rata muuttuu**. Karkeasti sanoen, jos nopeutta vähennetään, niin aluksen kiertoradan periapsis (matalin kohta) laskee; jos sitä lisätään, niin kiertoradan apoapsis (korkein kohta) nousee.

Moottoreita tarvitsee käyttää vain radan vaihtamiseksi. Kaikkina muina aikoina alus on aina "parkissa" radallaan. Polton suuruutta kuvataan sillä, kuinka suuri nopeuden muutos (delta-v) sillä saavutetaan.

Kirjoittajan kannalta on tärkeää huomata se, että useimmissa tapauksissa juuri rataa vaihtavat poltot ovat matkan erikoistapahtumia, jotka matkustajat huomioivat tavalla tai toisella. Jos et ohittanut avaruusmatkaa horrosunella, niin realistisen matka-ajan jälkeen seuraava realismissa kiinni pitävä tekijä on matkan polttojen sijoittaminen suunnilleen oikeisiin matkan vaiheisiin, pääpiirteiltään oikean kokoisina ja mittaisina.

Kirjoittajana sinun kannattaa huomioda, että avaruusaluksen polttoihin liittyvillä tapahtumilla kerrotaan lukijalle rivien välissä se, millaisella moottorilla aluksesi on varustettu. Tämän kertominen tapahtuu sivulauseissa: jos moottorin poltto aiheuttaa suuria kiihtyvyyksiä, sen ajaksi miehistö haluaa kaiken irtotavaran säilytyslokeroihin ja matkustajat penkkeihin turvavöissä istumaan kuten lentokoneiden nousussa ja laskussa. Jos kirjoittajan ajatteleman moottorin tarjoama kiihtyvyys on vain vienoa vaimeampi henkäys, polttoihin ei liity mitään avaruusaluksen arjesta poikkeavia erikoistoimenpiteitä.

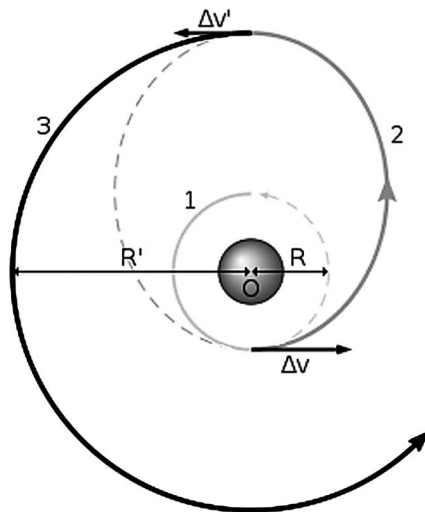
Kirjoittajalle on aina plussaa, jos hän osaa polttojen sijoittamisen lisäksi ottaa huomioon sen, kuinka rutinoitunut hänen avaruusmatkajansa on. Rutinoitunut matkustaja ei huomioi radan vaihtoihin liittyviä pieniä polttoja, kun taas ensikertalainen hätäntyy pienistä radankorjauksistakin.

Siirtorata (engl. trajectory): Kiertoradan ja siirtoradan ero on vain semanttinen. Avaruusalus on aina "parkissa" radallaan, vaikka

sen olisikin tarkoitus olla vain väliaikainen rata siirryttäessä radalta A radalle B. Siirtorata tarkoittaa – jos kaikki menee suunnitelmien mukaan – väliaikaista kiertorataa.

Hohmannin siirtorata: Hohmannin siirtorata on perustyökalu avaruudessa liikkumisessa. Se määrittää yleisessä tapauksessa ajotarpeell-
taan edullisimman siirtoradan kahden kiertoradan välillä.

Kuva 3.



Matka keskuskappaleen O ympärillä etäisyydeltä R etäisyydelle R'. Matka koostuu kahdesta poltosta ja kolmesta erilaisesta radasta. Ensinnä alus on kiertämässä lähtöradallaan 1 (vaaleanharmaa). Se suorittaa polton siirtoradalle 2 (harmea). Saavuttaessaan oikean korkeuden, se suorittaa toisen polton siirtymään uudelle kiertoradalle 3 (musta). Mikäli kakkospoltoa ei suoritettaisi, alus jäisi kiertämään keltaiselle radalle. (Kuva: Wikipedia)

Pinnalta toiselle vaihe vaiheelta

Tässä kappaleessa käydään ensin läpi peruskaskeario planeettojen välillä matkustamiseksi, ja sen jälkeen esitetään tarkentavaa tietoa eri vaiheista. Vaikka esimerkkinä käytetään omassa Aurinkokunnassamme olevien kappaleiden välillä liikkumista, parametrit ovat silti täsmälleen samat kaikille samankokoisille kappaleille myös

kuvitteellisissa aurinkokunnissa. Kun sijoitat tarinasi kuvitteelliseen aurinkokuntaan, on hyvä etsiä kiertoajoiltaan ja massoiltaan samankaltaisia Aurinkokunnan kappaleita. Niistä saat valmista materiaalia tarinan tarpeisiin.

Esimerkkinä käytetään monin paikoin Maan, Marsin ja Venuksen välisiä lentoja. Tämä sen vuoksi, että luultavasti useimmiten avaruustarinoiden keskeiset tapahtumat sijoittuvat aurinkokuntien elinkelpoisten planeettojen liepeille, niin kutsutulle elämänvyöhykkeelle. Aurinkokunnassa tälle alueelle sijoittuvat Venus, Maa ja Mars.

Aina ei matkusteta planeetan pinnalta toiselle, vaan joskus pelkästään planeettojen kiertoratojen välillä. Tällöin matka koostuu vain keskimmäisestä, planeettojen välillä tapahtuvasta osuudesta.

Pinnalta kiertoradalle: Nousu planeetan pinnalta kiertoradalle on useimmissa tapauksissa lennon raskain vaihe. Tämä johtuu siitä, että pinnalta lähtiessä aluksen ratanopeus on nolla. Alus joutuu hankkimaan yhdellä kovalla

kymmenisen minuuttia kestäväällä rykäisyllä kaiken kiertoradan saavuttamiseen tarvittu nopeuden.

Jos kyseessä ei ole todella pieni asteroidi, niin kuka tahansa huomioi lähtöpolton helposti, koska se on niin järeä. Planeetan tai kuun pinnalta irrottautuminen vaatii riittävästi kiihtyvyyttä ja se on suoritettava suhteellisen lyhyessä aikaikkunassa.

Todennäköisesti ensikertalaisen yllättää se, että poltto ei rajuudesta huolimatta ole pitkä: Maapallon kokoluokkaa olevalta planeetalta lähtiessä kaikkineen vain vajaa kymmenen minuuttia. Sen jälkeen aluksen moottorit sammuvat! Aluksen matkustajat saavat silloin ensimmäisen kosketuksen painottomuuteen. Matkustajat eivät välttämättä kuitenkaan saa lähteä penkeiltään leijumaan pitkin matkustamo, koska heidän paimentamisensa myöhemmin takaisin istumaan saattaisi olla liian suuri urakka miehistölle.

Kun kyseessä on Maapallon kokoinen kappale, nousu kiertoratakorkeuteen kestää vajaan

Kuva 4.

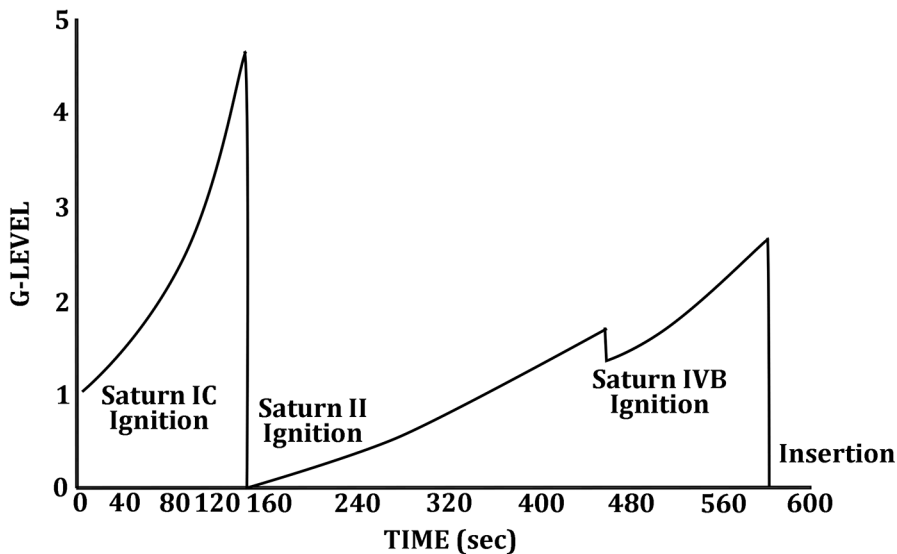


Figure 2. Typical Apollo launch profile – Saturn V launch vehicle

Kolmivaiheisen Saturn-raketin laukaisuprofiili Maapallolta kiertoradalle (lähde: NASA). Ykkösvaiheen polton pituus on noin 140 sekuntia (vajaa 2,5 minuuttia) ja molempien vaiheiden yhteenlaskettu polton pituus noin 580 sekuntia (vajaa 10 minuuttia). Profiilista näkee kasvavan kiihtyvyyden aluksen massan pienentyessä. Ykkösvaiheessa kiihtyvyys on maksimissaan 5 g, kolmosvaiheen lopussa noin 2,5 g.

tunnin. Lakikorkeudessaan avaruusalus suorittaa polton, jolla se parkkeeraa itsensä kiertoradalle jottei putoaisi takaisin planeetan pinnalle. Tämä poltto on hyvin mieto verrattuna ensimmäiseen: kun lähtöpolto on kaikkineen luokkaa 8000–9000 m/s, niin radalle parkkeeraus tapahtuu vain noin 100 m/s poltolla. Rutinoituneempi matkustaja ei tätä välttämättä noteeraa lainkaan. Siitä huolimatta matkustajat voidaan käskää sen ajaksi penkkeihin ja turvavöihin, ja kaikki irtain pitää olla säilytyslokeroissa.

Elinkelpoisten planeettojen kanssa voi aina ottaa lähtökohdaksi Maapallon, koska ihmiselle elinkelpoinen planeetta ei voi erota Maapallosta kovin paljoa. Mitä raskaampi kappale, sen raskaampaa on nousta kiertoradalle. Kovin raskaille kappaleille – sanotaan 4–5 x Maan massa tai yli – ei kuitenkaan ole mielekästä laskeutua eikä sellaiselta nousua tarvitse siten ajatella. Massan kasvaessa olosuhteet pinnalla – lähinnä paine, mutta myös painovoima ja lämpötila – käyvät kovemmiksi. Kun planeetalla on tarpeeksi massaa, aine sen sisällä ei ole enää kiinteää, nestettä tai kaasua siinä mielessä kuin me sen miellämme, vaan kaikki aine (kuten avaruusalukset ja niiden sisällä olevat robotit ja ihmiset) puristuu kasaan ja käyttäytyy kuin jähmeä neste.

Kirjoittajan on turvallisinta olettaa, että nousu tapahtuu raketilla. Raketti on käyttökelpoinen väline planeetan koosta ja koostumuksesta riippumatta. Toki matkustajille voi olla hiukan

epämiellyttävää istua odottamassa penkkiin sidottuna kasvot taivasta kohti kuin jossain huvipuiston laitteessa. Vaakatasossa lähtevän avaruuslentokoneen tai avaruushissin valitseminen nousumenetelmäksi vaatii hiukan enemmän taustatyötä, jos sen haluaa uskottavaksi.

Kiertoradalle parkkeerauksen jälkeen matkustajat odottavat. Alus telakoidaan joko avaruusasemaan tai suoraan interplanetaariseen alukseen, mutta turvallisuussyistä johtuen tätä ei tehdä suoraan kiertoratapoltton päätteeksi. Molemmilla osapuolilla täytyy olla riittävästi varmuusvaraa keskeyttää telakointi ja koettaa myöhemmin uudestaan. Asemaa lähestytään vähitellen useamman kierroksen ajan. Maapallon ympärillä yksi kierros kestää noin puolitoista tuntia, joten koko operaatioon voi helposti heittää hihasta vaikkapa 12 tuntia tai enemmän.

Tässä artikkelissa ei käsitellä sen tarkemmin kiertoratakohtaamisia. Mainittakoot kuitenkin, että keskuskappaleen kaareuttamilla radoilla lähestyminen tapahtuu osittain järjenvastaisesti: kohti kiihdyttäminen tuo hetken aluksia lähemmäs toisiaan, mutta vähitellen kohde alkaa painua alle ja karkaa kauemmas. Vastaavasti jarrutettaessa ensin välimatka kasvaa, mutta hetken kuluttua kohde alkaa nousta ja ”tippuu” korkeammalta päälle.

Joku voisi väittää, etteivät kaareutuvat radat vaikuta niin pienillä etäisyyksillä kuin telakoituvat alukset, mutta hän on väärässä. Sekä kiihdytykset että jarrutukset aiheuttavat kohteen

Taulukko 2: Erilaisia kappaleita ja parametreja niitä 300 kilometrin korkeudella kiertävälle radalle. Kiertoradan ratanopeus kertoo karkeasti sen, paljonko aluksen nousupolto on. Super- ja jättiläismaat ovat kuvitteellisia planeettoja, joiden tiheys on sama kuin Maalla, mutta massa kaksin- tai nelinkertainen.

Kappale	m	tiheys	r	g	v (300 km)	P (300 km)
Kuu	0.01	3365 kg/m ³	0.27	0.16	1556 m/s	137 min
Mars	0.11	3908 kg/m ³	0.53	0.38	3403 m/s	114 min
Maa	1.00	5511 kg/m ³	1.00	1.00	7729 m/s	90 min
Supermaa	2.00	5511 kg/m ³	1.26	1.26	9783 m/s	89 min
Jättiläismaa	4.00	5511 kg/m ³	1.58	1.58	12372 m/s	88 min

“luistamista” ohi juuri vääraltä puolelta.

Planeetalta toiselle: Kiertoradalla matkustajat siirtyvät interplanetaariseen avaruusalukseen. Kun alus on lähtövalmis, se siirretään yhdellä isommalla poltolla irti planeetan painovoimakentästä keskustähtä kiertävälle radalle niin, että se lakipisteessä (korkeimmassa tai matalimmassa kohdassa) saavuttaa kohdeplaneetan kiertoradan.

Tässä vaiheessa kirjoittaja kertoo implisiitaisesti lukijalle sen, millaisella moottorilla hänen planeettojen välinen avaruusaluksensa on varustettu. Planeetan pinnalta nousuun ei ole kauheasti vaihtoehtoja, mutta avaruudessa niitä riittää. Mikäli matkustajat tuntevat lähtöpolton kiihdytyksenä ja viettävät sen ajan vaikkapa tuoleissa istuen, valistunut lukija arvelee aluksen moottorin olevan perinteinen kemiallinen moottori tai jokin määrittelemätön ydinrakettimoottori. Mikäli matkustajat alkavat elää avaruusaluksen “matka-arkea” heti alukselle päästyään, valistunut lukija ajattelee kirjoittajan valinneen aluksensa moottoriksi ionimoottorin tai aurinkopurjeen.

Kun alus on viimein kohdeplaneetan tuntumassa, se jarruttaa tämän kiertoradalle. Tässäkin yhteydessä kirjoittaja implisiitaisesti kertoo valistuneelle lukijalle, millaisin menetelmin hänen aluksensa jarruttaa. Kirjoittajalle on edullista valita tähän vaiheeseen rakettimoottori silloinkin kun on ajatellut lähdön sujuvan ionimoottorilla tai purjeella. Toisin kuin lähtövaiheessa, jarrutusvaihe on aikakriittisempi. Vaikka alus olisi lähtenyt matkustajien huomaamatta, niin perille tultaessa voidaan silti turvautua suurempiin työntövoimiin, jottei kohdeplaneetta lipsahdaisi pois aluksen ulottuvilta ja alus palaisi kiertämään planeettojenväliseen avaruuteen.

Kohdeplaneetan kiertoradalle päästyään interplanetaarinen alus telakoidaan avaruusasemaan tai suoraan radalla odottamassa olevaan laskeutumisalukseen, samaan tapaan hiljalleen hivuttamalla kuin noustessa tehtiin. Interplanetaarisen aluksen ei voi olettaa itse laskeutuvan koskaan.

Laskeutuminen pinnalle: Matkustajat siirtyvät laskeutumisalukseen, joka aloittaa matkan viimeisen vaiheen. Matkustajat huomaavat

laskeutumisvaiheen selkeästi. Se alkaa pienellä, radalle parkkeerausta vastaavalla poltolla, joka pudottaa aluksen radan matalimman kohdan planeetan pinnan (tai tiheän kaasukehän) tuntumaan.

Kymmenen–kaksikymmentä minuuttia sen jälkeen alkaa jarrutus, joka on raju menetelmästä riippumatta. Aluksen on päästävä muutamassa kymmenessä minuutissa eroon koko kiertoratanopeudestaan, joka Maapallon kokoluokkaa oleville kappaleille on noin 8000 m/s (28,800 km/h).

Jarrutusmenetelmät voivat poiketa toisistaan planeetasta riippuen. Mikäli planeetalla on kaasukehä (esim. Maa, Venus ja Mars), sitä yleensä koetetaan hyödyntää osana jarrutusta (kts. *aerobraking*). Laskeutumisen viimeinen vaihe voi kaasukehällisillä planeetoilla sisältää liitovaiheen (kuten avaruussukkula) tai laskevarjot. Kaasukehättömille kappaleille (esim. Kuu) laskeuduttaessa koko nopeus on poistettava rakettimoottoreilla.

Laukaisuikkuna: Tarinan aikajänteitä suunniteltaessa matka-ajan jälkeen seuraavaksi tärkein huomioitava asia on laukaisuikkuna, tai oikeammin niiden periodi eli laukaisuikkunoiden väli. Kirjoittajan ei tarvitse laskea tarkkoja laukaisuhetkiä, mutta on hyvä olla karkeasti selvillä aikajänteestä, koska se vaikuttaa matkan järjestämiseen.

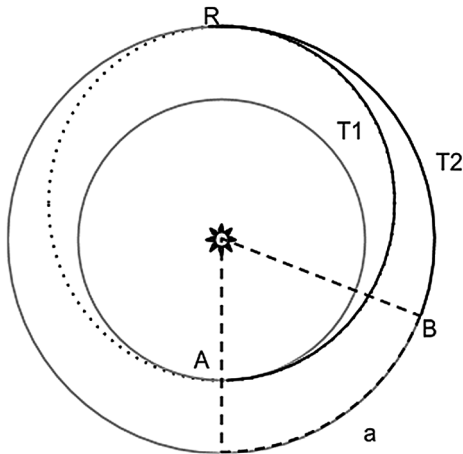
Mitä laukaisuikkuna tarkoittaa? Avaruusalus voi tehdä radansiirtonsa tietysti koska haluaa. Se ei kuitenkaan johda kohtaamiseen määränpäässä, mikäli ajanhetki ei ollut oikea. Jotta avaruusalus kohtaisi tavoitellun kappaleen (planeetta, avaruusasema), se on laukaistava siirtoradalle oikealla ajanhetkellä.

Kuvassa 5 on esitetty aluksen matka kohteesta A kohteeseen B.

Laukaisuikkunan periodi: Laukaisuikkunan periodi syntyy siitä, miten usein lähtö- ja tulopaikkojen keskinäinen sijainti toistuu eli miten nopeasti niiden keskinäinen sijainti muuttuu eli kuinka suuri on kappaleiden ratojen **kulmanopeuksien ero**. Se muuttuu sitä hitaammin, mitä lähempänä kappaleiden kiertoaika on toisiaan.

Kun liikutaan kiertoradoilla Maan kokoluokkaa olevan planeetan tuntumassa, laukaisuikkunoiden periodi on yleensä ihmisen kannalta

Kuva 5.



Alus ja kohde kohtaavat toisensa pisteessä R (Rendezvous). Jotta kohtaaminen tapahtuu, kohteen (B) on oltava lähtöhetkellä sellaisessa asemassa suhteessa lähtöpisteeseen (A), että sen kiertoradalla käyttämä aika kohtauspisteeseen (T2) on sama kuin aluksen matkaan käyttämä aika (T1), eli $T1 = T2$. Tämä toteutuu kun laukaisuhetkellä lähtöpisteen A ja kohteen B välinen kulma (a , katkoviivat) on oikea. Kaikkina muina aikoina matkaan lähetetty alus ei kohtaa lakikorkeudellaan kohdetta.

merkityksetön. Esimerkiksi Maapallon tapauksessa ikkunat pinnalta kiertoradalle – ja takaisin – ovat avoinna noin tunnin välein, geosynkroniselta radaltakin päivittäin, joten aluksia voi lähteä niille samaan tapaan kuin lentokentältä koneita. Poikkeuksena ovat esimerkiksi laukaisuikkunat Maapallon erittäin korkeilta kiertoradoilta (HEO, *High Earth Orbit*) Kuuhun, mutta aniharvassa avaruustarinassa tämänkaltaiset skenaariot ovat tarinan keskipisteessä.

Ikkunoiden periodi tulee merkitykselliseksi planeettojenvälisillä lennoilla. Mikäli planeettojen kiertoaikojen ero on suuri, laukaisuikkuna on auki suunnilleen jokaisella lähempänä kiertävän kappaleen kierroksella. Esimerkiksi laukaisuikkunat Maasta (kiertoaika 1 vuosi) Jupiteriin (kiertoaika 12 vuotta) ja takaisin ovat auki suunnilleen vuosittain (n. 400 päivän välein), **mutta silti vain vuosittain**.

Sivuhuomautuksena sanottakoot, että Aurinkokunnan kappaleille on kerrottu niin kutsuttu **synodinen periodi**. Tämä on jakso, jonka aikana

Maapallo ja taivaankappale ovat jälleen samassa keskinäisessä asemassa. Toisin sanoen, se on laukaisuikkunan periodi Maan ja tuon kappaleen välillä.

Mikäli kappaleiden kiertoaajat ovat lähellä toisiaan, laukaisuikkunoiden periodi kasvaa. Maa ja Mars kiertävät toisiaan sen verran lähellä olevilla kiertorajoilla, että laukaisuikkunoiden periodi venyy reiluksi kahdeksi vuodeksi. Maan ja Venuksen välillä laukaisuikkunoiden periodi on 19 kk (584 päivää) eli noin puolitoista vuotta, joka on aika huomattava venyminen suhteessa Venuksen kiertoaikaan (225 päivää).

Tämä on hyvä huomioda silloin, kun on rakentanut oman kuvitteellisen aurinkokunnan, jossa on kaksi tai kolme elinkelpoista planeettaa: ollakseen elinkelpoisia niiden on kierrettävä nk. elämänvyöhykkeellä, joten niiden kiertoaajat ovat väkisinkin lähellä toisiaan, ja siten niiden välisten lentojen laukaisuikkunoiden periodi venyy.

Äärimmäisenä esimerkkinä laukaisuikkunoista voi toimia siirtyminen kahden asteroidivyöhykkeellä sijaitsevan kappaleen välillä: näillä kiertoaika on pitkä, ja nämä pitkät kiertoaajat ovat lähellä toisiaan. Valitaan kappaleiksi Ceres ja Pallas, jotka ovat molemmat vyöhykkeen kookkaimpia kappaleita. Kappaleiden kiertoaajat ovat hyvin lähellä toisiaan, molemmilla noin 4,6 vuotta. Siirtyminen Cerekseltä Pallakselle on ajotarpeeltaan miltei merkityksettömän pieni (kaikkineen ajotarve on vain noin 12 m/s) ja kestää noin 2,3 vuotta. Ratojen pienestä kulmanopeuserosta johtuen laukaisuikkuna on kuitenkin auki **vain kerran 2100 vuodessa!** Käytännössä näin lähellä toisiaan olevien kohteiden välillä ei matkusteta Hohmannin radoilla ja sen laukaisuikkunoilla, vaan käyttämällä kalliimpia kiertoradalla kohtaamiseen tarkoitettuja ratoja. Näiden ratojen matka-aika on suunnilleen samaa luokkaa kiertoaajan kanssa, eli Cerekseltä Pallakselle matkustaminen kestää noin neljä ja puoli vuotta, ja laukaisuikkunan periodi on suunnilleen samaa luokkaa.

Lentoprofiilit: Laukaisuikkunoiden takia matkat planeettojen välillä tapahtuvat “keskitetysti” tiettyinä aikoina. Jos olet terminaalissa odottamassa Marsiin lähtevää lentoa, niin kaikki muutkin paikalla olevat ovat lentämässä

Marsiin samalla radalla, vaikkeivät välttämättä samalla aluksella: kiertoradalla voi odottaa kokonainen Marsiin lähtevien alusten laivasto, joista jokainen lähtee matkalle viikon parin aikaikkunassa. Silloin tällöin tietysti kahden tai useammankin eri kohteen laukaisuikkunat osuvat samalle ajanjaksolle, ja terminaalissa on harvinaista interplanetaarista vipinää.

On huomattava, että **laukaisuikkunan ajallinen sijainti on ratakohtainen**. Edullisimman radan lisäksi kohteisiin saatetaan ampua "lisälentoja" hiukan epäedullisemmilla, joko ajotarpeeltaan vaativammilla tai matka-ajaltaan pidemmällä lentoradoilla. Ihmiset ja rahti eivät siten välttämättä ole aivan täydellisessä loukussa edullisimman laukaisuikkunan ulkopuolella, jos vain kohteiden välillä on tarpeeksi liikennöintiä. Todennäköisesti edullisimmat radat ovat suosituimpia eli silloin rahtia ja ihmisiä liikkuu planeettojen välille eniten – ja ne on todennäköisesti varattava hyvissä ajoin etukäteen (tai luotettava peruutuspaikan vapautumiseen).

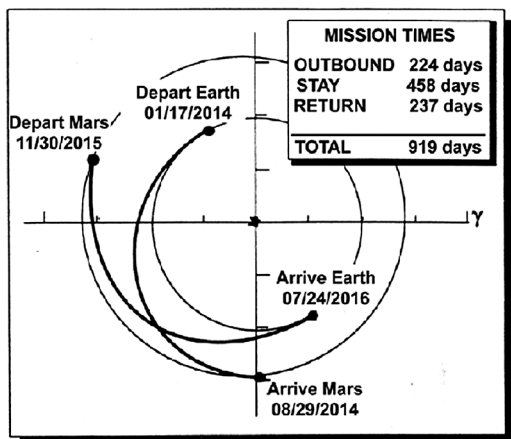
On myös mahdollista, että miehitetyt ja miehitämättömät lennot suosivat hiukan toisistaan poikkeavia profiileja.

Esimerkki lentoprofiilista: Perinteinen edestakainen Mars-lento kestää kaikkiaan reilu 900 päivää: näistä 450 (2 x 225) päivää kuluu matkoihin ja 450 paikan päällä oleskeluun. On kuitenkin olemassa muunkinlaisia harkitsemisen arvoisia lentoprofiileja. Yksi näistä on sellainen, jossa menomatka on kyllä perinteinen 225 päivää, mutta Marsista lähdetään jo 30 päivän jälkeen paluumatkalle pidemmällä (291 päivää) ja hieman kalliimmalla radalla, joka "koukkaa" Venuksen kautta takaisin Maapallolle.

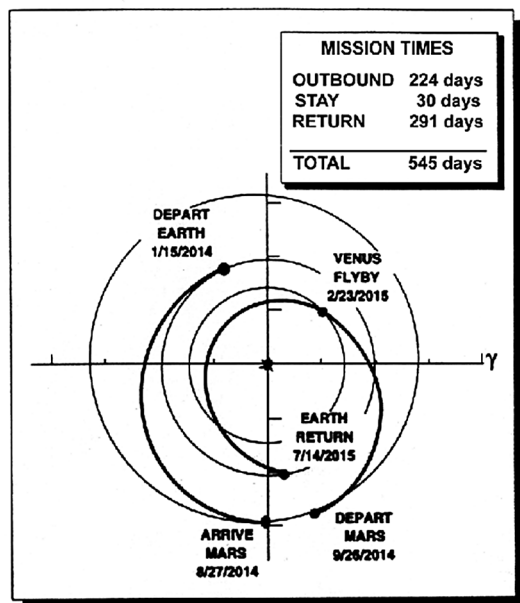
Realisminkin rajoissa on toki mahdollista puristaa hieman lentoaikoja, mutta paljon sitä helpompaa on venyttää niitä, jotta laukaisuikkuna saadaan edullisempaan ajankohtaan.

Kaikenkaikkiaan kirjoittaja saa taklattia sekä lentoihin että aikaikkunoihin liittyviä tekijöitä sillä, että antaa hahmoilleen sekä aikaa matkustaa että viettää aikaa perillä. Valistuneemmat

Kuva 6.



Kaksi erilaista edestakaista Mars-matkasuunnitelmaa (NASA, <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/mars/marsprof.html>) esimerkkinä matkojen profileista. Ensimmäinen on perinteinen, kokonaispituudeltaan 919 päivää, jossa Marsissa vietetään 458 päivää. Toinen on kokonaispituudeltaan 545 päivää, jossa Marsin pinnalla vietetään 30 päivää. Paluulento on erikoinen "koukkaus" Venuksen kautta takaisin Maahan.



lukijat nikottelevat oikeastaan ainoastaan silloin, kun kirjoittaja on tehnyt aikataulusta liian kiireisen: sen sijaan kukaan ei koskaan huomaa, jos kirjoittaja on venyttänyt aikataulun tarpeetomankin suureksi.

Matalat kiertoradat: Avaruustarinoissa voidaan miltei aina lähteä siitä oletuksesta, että planeetan pinnalta nousee vain matalalle kiertoradalle. Matalilla kiertoradoilla olevat asemat ovat planeetan avaruussatamia. Siellä telakoidutaan ja vaihdetaan ”oikeaan” avaruusalukseseen. Pääasiallinen syy tähän on se, että planeettojen pinnoilta nousemaan kykenevät alukset eivät ole optimaalisia avaruudessa matkustamiseen. Mikäli avaruudessa on enemmän toimintaa, ei ole paljoa syytä rakentaa sellaisia interplanetaarisia aluksia, jotka voivat itse nousta ja/tai laskeutua planeetoilta.

Poikkeuksena ovat matkat asumattomille tai esimerkiksi sotilaallisesti vihamielisille planeetoille. Silloin aluksen voi olettaa kuljettavan mukanaan kalustoa planeettojen pinnoille laskeutumiseen ja niiltä nousemiseen. Mutta tällöinkään ei ole oletettavaa, että avaruuden halki matkannut alus itse laskeutuu planeetalle, vaan se jää planeetan kiertoradalle ”tukialukseksi”.

Matalan kiertoradan korkeus riippuu kappaleen mahdollisen kaasukehän korkeudesta, joka puolestaan riippuu kappaleen massasta ja kaasukehän koostumuksesta. Maapallon tapauksessa matalimmat suhteellisen pysyvät kiertoradat ovat noin 300 kilometrin korkeudessa.

Kaasukehättömillä kappaleilla, kuten Kuulla ja Merkuriuksella, matalimmat kiertoradat voivat teoriassa viihestä pintaa, kunhan siis eivät törmää mihinkään kiinteään planeetan muotoon eli vuoreen. Hyvin pienillä kappaleilla (pienet asteroidit ja komeetat) matalat kiertoradat ovat paitsi korkeudeltaan matalalla myös ratanopeuksiltaan sitä luokkaa, että ihminen voi ponnistaa kiertoradalle. Tietysti kiertoradalle ponnistanut ihminen tarvitsee mukaansa vaikkapa vaahtosammuttimen voidakseen ”parkkeerata” ratansa ettei palaisi lähtöpaikalleen.

Pakonopeus: Planeettojen välinen matka menee samaan tapaan Hohmannin siirtoradalla kuin radanvaihdot planeettojen ympärillä – nyt vain keskuskappaleena toimii aurinkokunnan keskustahti.

Aluksen matka alkaa lähtöplaneetan painovoimakentästä irrottautumisella. Kappaleen (kuu, asteroidi, planeetta, tähti) vaikutuspiiristä pois pääsemiseksi täytyy ylittää pakonopeus. Muussa tapauksessa aluksen rata kiertyy takaisin. Pakonopeus on sidoksissa kappaleen massaan ja aluksen etäisyyteen siitä. Kiertoradalla olevalla aluksella on jo osa pakonopeudesta saavutettuna: esimerkiksi Maapallon kiertoradalta pakonopeus on noin 11 km/s, josta kiertoradalla olevalla aluksella on jo noin 8 km/s saavutettuna. Lisäksi avaruudessa poltto saa venyä pidemmäksikin – nopeuden muutoksen ei tarvitse olla samalla tavalla rivakka kuin pinnalta lähtiessä – jopa niin pitkäksi, että aluksen rata kiertyy ellipsistä spiraaliksi, kuten aurinkopurjeilla ja ionimoottoreilla: tällöin matka-aika lähtee kuitenkin kasvamaan kiertoaikojen monikerroiksi.

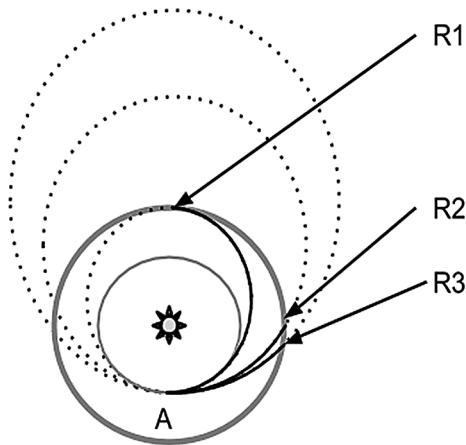
Vastaavasti ulkopuolelta saapuva kappale – myös interplanetaarinen alus – on aina ohitusradalla. Sen nopeus kasvaa etäisyyden pienentyessä pysyen koko ajan pakonopeuden yläpuolella (muistathan, että pakonopeus on sidoksissa etäisyyteen). Esimerkiksi: avaruudesta tuleva kappale (avaruusalus, komeetta, asteroidi) kohtaa Maan ilmakehän aina **vähintään 11 km/s** nopeudella (pakonopeus Maan pinnalla). Jos ulkopuolelta saapuva kappale (avaruusalus) halutaan toisen kappaleen kiertoradalle, sen on hidastettava nopeutensa alle pakonopeuden.

Kuriositeettina mainittakoon, että määränpäässä interplanetaarinen alus saattaa hyödyntää planeetan kaasukehää jarrutukseen päästäkseen asettumaan kohdeplaneetan kiertoradalle – nykyaikana tätä on käytetty paljon apuna luotainten asettamiseksi Jupiterin ja Saturnuksen kiertoradoille. Alus on kuitenkin rakennettava sen hyödyntämiseksi. Useimmissa tarinoissa ei ole tarpeen erikseen miettiä, käyttääkö alus sitä vai ei.

Matka-aika uudelleen käsiteltynä

Tähän saakka olemme ottaneet annettuna totuutena sen, että matkat planeettojen välillä tehdään Hohmannin siirtoradalla, jolloin matka-ajat ovat luokkaa puolet kiertoajasta. Mennään hiukan syvemmälle tähän aiheeseen.

Kuva 7.



Nopeat radat: Onko avaruudessa mahdollista matkustaa Hohmannin siirtorataa nopeamilla radoilla kohteisiin? Kyllä on. Rata voi olla ”ylikorkea” ja/tai ”alimatala”. Kuva 7 esittää ylikorkeat radat.

Ongelma on kuitenkin se, että hiukan merkittävämpi ajan säästäminen kasvattaa ajotarpeen nopeasti moninkertaiseksi, ja kuten moottoreita käsittelevässä kappaleessa myöhemmin huomataan, se puolestaan räjäyttää aluksen massasuhteen nopeasti tähtitieteelliseksi. Matkasta tulee yllättävän nopeasti järeistävän kallis tai käytännössä mahdoton, vaikka tavoiteltaisiin vain maltillisia matka-ajan säästöjä.

Kirjoittajalle on varmasti hirveän houkuttelevaa nojata tarinassaan tarkemmin määrittelemättömiin nopeisiin ratoihin planeettojen välillä. Kehottaisin kuitenkin äärimmäiseen varovaisuuteen, ja jos mahdollista, laskemaan radan ajotarve. On paljon todennäköisempää, että avaruusalusten kehittyvää moottoriteknologiaa käytetään rahdin määrän kasvattamiseen ja lennon halventamiseen kuin että sitä käytettäisiin merkittävien aikasäästöjen tavoittelemiseen. Ennen kuin teknologian taso antaa myöten moottorien tehon tuhraamista nopeilla radoilla, matkat tavallisilla radoilla ovat olleet pitkään päivittäistä arkea, joten niiden suorittamiseen tarvittu teknologia (mm. elossapitojärjestelmät) on moneen kertaan toimivaksi todet-

tu. Siksi tavalliset radat mitä todennäköisimmin myös pysyvät arkipäivänä kaikille niille, joilla ei ole ylimääräistä rahavuorta poltettavaksi nopeilla radoilla.

Avaruuspelastus: Yksi realistisesti mahdollinen tavallista nopeampien ratojen käyttäjä voisi olla jonkinlainen avaruuspelastusalus. Sen olisi tarkoitus saavuttaa väärälle radalle joutunut rahti ja siirtää se kulkemaan jonnekin tavoitettavaksi. Tällainen pelastusalus olisi varsinainen ”muskelivene”, koska sen täytyisi tavoittaa karannut rahti ratamekaanisesti epäedullisista olosuhteista ja sen lisäksi saada siirrettyä rahti paremmalle radalle poimittavaksi. Karanneen rahdin on varmasti oltava erittäin arvokasta, jotta sen pelastamista edes harkittaisiin.

Linkoradat: Kun nykypäivänä luotain lähetetään Venusta lähemmäs tai Marsia kauemmas, se käyttää miltei poikkeuksetta linkoratoja (kts. *Gravity Assisted Trajectory*). Luotainten yhteydessä linkoradoilla tavoitellaan parempaa massasuhdetta eli matka tarvitsee vähemmän ajoainetta kuin mitä tarvittaisiin suoralle lennolle. Matka-aika kokonaisuudessaan venyy kuitenkin suoraa lentoa pidemmäksi.

Linkoradalla voitaisiin tavoitella myös nopeampia ratoja, mutta on todennäköistä, että selaisella moottoriteknologialla, jolla tätä voitaisiin tavoitella, kokonaisuhyöty linkoefektistä jäisi silti marginaaliseksi. Linkoradat saattavat siis lopulta jäädä (avaruusscfin kannalta) kuriositeetiksi niiden nykyiseen käyttötarkoitukseen, mahdollistamaan edullisemmat massasuhteet rahdin siirtämiseksi – siis enemmän maksettua rahtia samalla ”ylikuormatulla” aluksella.

Ilman syvempää taustatyötä kirjoittajan ei kannattane ottaa tarinaansa linkoratoja lyhentämään matka-aikoja. Tästä syystä niiden käsitteleminen tätä tarkemmin ei liene perusteltua tässä artikkelissa.

Matkat vierailta aurinkokunnilla

Kun puhutaan vieraista aurinkokunnista, niin meille lähin esimerkki on Jupiter, jonka kuut ovat kuin oma miniaurinkokuntansa. Jupiterin oma säteily ei riitä pitämään kuita lämpiminä, mutta niistä lähimmät ovat silti hyvinkin aktiivisia. Jupiterin isoista kuista Io on koko Au-

rinkokunnan vulkaanisesti aktiivisin kappale, koska sitä lämmittää paitsi Jupiterin säteily radioaaltojen taajuuksilla, myös läheisyyden aiheuttamat voimakkaat vuorovesi-ilmiöt. Jupiterin ja Ion välillä on huikean suuri sähköinen potentiaaliero, joka näkyisi salamointina, jollei välissä olisi tyhjiö. Muutenkin vuorovesi-ilmiöt ovat keskeisessä asemassa Jupiterin kuista puhuttaessa.

Jo kauan ennen kuin ensimmäistäkään eksoplaneettaa oltiin löydetty, Jupiteria ja sen kuita pidettiin tieteellisissäkin papereissa omana "miniaurinkokuntanaan". Jo silloin spekuloitiin sillä, että entä jos Jupiter olisi hiukan massiivisempi ja sen kuut suurempia, niin millainen oma minimaailmansa sen ympärillä olisi.

TRAPPIST-1: Nykyään ei tarvitse enää spekuloida. TRAPPIST-1 on minimaalisen pieni M8-sarjan punainen kääpiötähti noin 40 valovuoden päässä Maasta. Se on halkaisijaltaan vain hiukan Jupiteria suurempi, mutta massaltaan yli 90-kertainen. Aurinkoon verrattuna TRAPPIST-1 on pieni, alle kymmenesosa Auringosta.

Kyllä, laskit oikein: Jupiter, joka yksinään painaa enemmän kuin kaikki Aurinkokunnan muut kappaleet yhteensä, on silti vain tuhannesosa oman Aurinkomme massasta – Aurinko itse on yli 500 kertaa painavampi kuin sen ympärillä oleva Aurinkokunta.

TRAPPIST-1 on tähtenä lähellä sitä rajaa, että se olisi "vain" ruskea kääpiö (raja on n. 75 x Jupiterin massaa). Ero on se, että punaisen kääpiötähden sisuksissa vedyn fuusio on syttynyt. Ruskean kääpiötähden massa – eikä siis tietenkään myöskään Jupiterin massa – ei riitä sitä sytyttämään.

TRAPPIST-1 -tähten tekevät mielenkiintoiseksi sitä kiertävät planeetat (taulukko 3), jotka **kaikki** ovat samassa kokoluokassa Maapallon kanssa ja joista lisäksi tiedetään hämmästyttävän paljon.

Kuten kiertoajoista ja -etäisyyksistä nähdään, kyseessä on todellinen "miniatyyriaurinkokunta". Planeettakunnan etäisyydet keskustähtensä ovat samaa luokkaa Jupiterin kuiden kanssa. Esimerkiksi lähin planeetta TRAPPIST-1b kiertää emotähteään noin 1,6 miljoonan kilometrin etäisyydellä, kun Jupiterin Callisto-kuu kiertää planeetta 1,8 miljoonan kilometrin etäisyydellä. Koska TRAPPIST-1 on huomattavasti Jupiteria raskaampi, kiertoajoissa on eroa: TRAPPIST-1b kiertää tähtensä ympäri 36 tunnissa, kun Callisto käyttää Jupiterin kiertämiseen 16 päivää. Vaikka TRAPPIST-1 on hyvin himmeä tähti (säteilyteho on noin 1/2000-osa Auringosta), lähellä kiertävä TRAPPIST-1b on silti erittäin kuuma (arvio pintalämpötilasta on 1000–1500 C). Callisto on puolestaan kylmä, koska Jupiter

Taulukko 3: TRAPPIST-1 -tähten planeetat.

Planeetta	Etäisyys (AU)	P (d)	Flux (x Maa)	M (x Maa)	R (x Maa)	Tiheys kg/m ³
b	0.012	1.51	4.3	1.017	1.121	3978
c	0.016	2.42	2.2	1.156	1.095	4851
d	0.022	4.07	1.1	0.297	0.784	3396
e	0.029	6.10	0.6	0.772	0.910	5645
f	0.039	9.21	0.4	0.934	1.046	4497
g	0.047	12.35	0.2	1.148	1.148	4181
h	0.062	18.77	0.1	0.331	0.773	3948

ei säteile merkittävästi eikä kaukana oleva Aurinko riitä sitä lämmittämään.

Keskitytään d- ja e-planeettoihin, joiden saama säteilyteho on samaa luokkaa Maapallon kanssa. TRAPPIST-1d saa keskustähdeltään säteilytehoa hieman enemmän kuin Maa. Se on Maapalloa selvästi kevyempi planeetta ja arvioidun tiheyden (3,4 tonnia per kuutio) perusteella sen uskotaan sisältävän hyvin paljon vettä eli olevan nk. "merimaailma", kauttaaltaan syvän valtameren peitossa. Painovoima pinnalla on kutakuinkin puolet Maapallosta.

TRAPPIST-1e on massaltaan ja tiheydeltään hyvin lähellä Maapalloa. Planeetan tiheys antaa olettaa sen olevan Maan tapainen kiviplaneetta, jolla on rautaydin. Painovoima pinnalla on suunnilleen sama kuin Maassa. Se saa keskustähdeltään säteilytehoa hieman Marsia enemmän ja noin puolet siitä, mitä Maapallo

saa Auringosta.

Taulukosta 4 huomataan, kuinka saman kokoluokan planeetoilla myös nousut kiertoradoille ovat matka-ajoiltaan ja ajotarpeiltaan lähellä toisiaan. Kun ratakorkeus pidetään vakiona (tässä tapauksessa 300 km), niin kevyemmillä planeetoilla (TRAPPIST-1d) radan periodi luonnollisesti kasvaa.

Pienen tähden ympärillä olevassa kompaktissa planeettakunnassa matka-ajat ovat lyhyitä, koska planeetat kiertävät niin lähellä keskustähteään ja niiden kiertoaajat ovat lyhyitä. Lyhyet kiertoaajat lyhentävät myös laukaisuikkunoiden periodeja, vaikka kappaleet kiertävätkin lähellä toisiaan. Ajotarpeet ovat kuitenkin yllättävän suuria: se johtuu siitä, että kappaleiden ratanopeudet ovat suuria, koska ne kiertävät niin lähellä (planeettoihin verrattuna) massiivista keskusta.

Taulukko 4: Ajotarpeet planeettojen matalille kiertoradoille 300 kilometrin korkeudella, huomioimatta kaasukehän ja gravitaation aiheuttamia häviöitä.

Planeetta	Rata-korkeus	Nousu	Kierto-ratap.	Matka-aika	Kiertoaika
TRAPPIST-1d	300 km	4938 m/s	69 m/s	56 min	117 min
TRAPPIST-1e	300 km	7376 m/s	90 m/s	43 min	90 min
Maapallo	300 km	8000 m/s	90 m/s	44 min	90 min

Taulukko 5: Interplanetaarinen matka kiertoradalta toiselle, ei siis sisällä nousuja ja laskuja pinnoille. Vertailun vuoksi matka Jupiterin Ganymedeltä Callistolle.

	TRAPPIST-1 d – e	Aurinko Maa – Mars	Jupiter Ganymede – Callisto
Matka-aika:	2.5 päivää	259 päivää	5.8 päivää
Laukaisuikkunan periodi:	12 päivää	2.1 vuotta	12 päivää
Ajotarve (lähtö):	3019 m/s	3590 m/s	1407 m/s
Ajotarve (tulo):	3586 m/s	2091 m/s	1220 m/s
Ajotarve (yht):	6605 m/s	5681 m/s	2627 m/s

Avaruusaluksen moottorit

Useimmissa avaruustarinoissa kirjoittajan ei tarvitse ottaa juuri lainkaan kantaa moottoriteknologian yksityiskohtiin. Joissain tapauksissa kirjoittajalle voi kuitenkin olla eduksi tuntea avaruusalusten moottoreiden pääpiirteet. Näistä kaksi tärkeintä on (1) tietää suurpiirteisesti useimmin scifissä käytettyjen moottoreiden sovellusalueet, ja (2) tietää niiden työntövoima.

On sinänsä erikoista, että siinä missä spekulatiot avaruusalusten moottoreista harvoin kiinnittävät mitään huomiota moottorin työntövoimaan, niin avaruustarinan kirjoittajan kannalta se voi hyvinkin olla se keskeisin ominaisuus tarinaa kirjoittaessa. Työntövoiman tunteminen tulee kirjoittajalle tarpeelliseksi sellaisissa tapauksissa, joissa hän joutuu kirjoittamaan siitä, miten avaruusaluksen miehistö ja matkustajat kokevat radansiirrot.

Seuraava osuus voi olla paikoitellen mameattisesti turhankin raskas, koska toisin kuin edellisissä osioissa, tämän osion matematiikan ulkoistaminen ei ole onnistunut. Jos kirjoittaja kuitenkin joutuu tarinansa puitteissa arvioimaan moottorivalintoja, niin on todella vaikeaa antaa siihen mitään vinkkejä esittämättä ensin niitä tekijöitä, joihin moottorit ja niiden suorituskyky perustuvat. Jos podet kaava-allergiaa, niin ohita ihmeessä liian raskaat osat ja jatka myöhemmistä kappaleista.

Rakettimoottori: Avaruusaluksen moottoreiden perustyyppi on väljästi määritelty rakettimoottori. Rakettimoottori on yhden tyyppinen reaktimoottori (engl. *Reaction Engine*): reaktimoottorissa kappaleen liikemäärää muutetaan liikuttamalla reaktiomassaa¹ vastakkaiseen suuntaan.

Reaktimoottoreihin luetaan myös mm. laivoissa, sukellusveneissä ja lentokoneissa käytetyt potkurit sekä suihkuturbiinit. Laivat ja sukellusveneet voivat käyttää reaktiomassana ympärillä olevaa vettä ja lentokoneet (ja esim. ilmatyyny-lukset) ympärillä olevaa ilmaa, mutta koska avaruudessa on tyhjiö, avaruusalus joutuu yleensä kantamaan ulos suihkutettavan reaktiomassan

eli ajoaineen (engl. propellant) mukanaan.

Moottorin parametrit: Avaruusaluksen moottorilla on kaksi tärkeää parametria, suihkutussnopeus v_e (engl. *exhaust velocity*) ja työntövoima F (engl. *thrust*). Näitä kahta sitoo toisiinsa moottorin teho (eli käytettävissä oleva energia): tehon (P), työntövoiman (F) ja suihkutussnopeuden (v_e) välillä on yhtälö:

$$P = 0.5 \times F \times v_e$$

Tässä on tärkeää huomata se, että moottori on kompromissi ajokykyyn vaikuttavan suihkutussnopeuden ja kiihtyvyyteen vaikuttavan työntövoiman välillä: käytössä oleva energia voidaan käyttää jompaan kumpaan, muttei molempiin yhtä aikaa.

Työntövoimaa tarvitaan erityisesti planeetan pinnalta kohoamiseen, koska aluksen kiihtyvyyden täytyy olla suurempi kuin planeetan gravitaatiokiihtyvyys, jotta alus kohoaisi irti pinnasta. Avaruudessa kiortoratojen välillä liikuttaessa pääpaino kohdistuu suihkutussnopeuteen, joka keventää alusta (tai kasvattaa sen hyötykuormaa), eikä työntövoimalla ole niin suurta merkitystä: tiettyyn rajaan saakka pieneksi jäävä työntövoima vain kasvattaa polton pituutta.

Jos etsii moottorien parametreja netistä, niille on monesti annettu suihkutussnopeuden sijaan ominaisimpulssi (I_{sp} , engl. *specific impulse*). Rakettimoottoreille ominaisimpulssin ja suihkutussnopeuden suhde on:

$$v_e = g \times I_{sp} = 9.81 \text{ m/s}^2 \times I_{sp}$$

Ominaisimpulssia käytetään siksi, että se on sovellettavissa myös muihin kuin rakettimoottoreihin ja antaa tavan vertailla erityyppisiä moottoreita keskenään.

Polton pituuden arvioimiseksi voidaan työntövoimasta ja suihkutussnopeudesta laskea massavirta ($\dot{m}$, kg/s):

$$F = \dot{m} \times v_e$$

$$\dot{m} = F / v_e$$

Sen voi myös laskea tehosta ja suihkutussnopeudesta:

$$\dot{m} = 2 \times P / v_e^2$$

1 Reaktiomassa fysikaalisessa mielessä, siis voimavastavoima -mielessä, ei kemiallisessa mielessä.

Spekulatiiviset moottorit: Ajoaineen suihkutussnopeus voidaan laskea teoreettisesti, kun tiedetään, paljonko energiaa on käytössä mas-
san suhteen, ts. tiedetään moottorin ajoaineen ominaisenergia E_{sp} (J/kg). Suihkun teoreettinen maksiminopeus saadaan yhtälöstä:

$$E = 0.5 \times m \times v_e^2 \quad (\text{suihkun kineettinen energia})$$

$$v_e = \sqrt{2 \times E/m}$$

$$v_e = \sqrt{2 \times E_{sp}}$$

Tämä on tärkeää huomata siksi, että vaikka emme vielä osaa rakentaa esimerkiksi fuusio-
moottoria, niin voimme silti arvioida sen suori-
tuskyykyä. Fysiikan lakeja rikkovat teknomaa-
giset moottorit ovat tietysti asia erikseen.

Ajokyyky: Edellisissä kappaleissa on todettu,
että kun avaruusaluksen nopeutta muutetaan,
sen rata vaihtuu. Ajokyyvillä tarkoitetaan sitä,
kuinka paljon kaiken kaikkiaan alus voi muuttaa
nopeuttaan, eli millaisiin radanmuutoksiin se
pystyy. Nopeuden muuttaminen – ja sitä kaut-
ta radan muuttaminen – perustuu liikemäärän
säilymlakiin:

$$m_1 \times v_1 = m_2 \times v_2$$

Koska avaruusalus kevenee samalla kun se
suihkuttaa ajoainetta ulos, aluksen ajokyyky saa-
daan liikemääräyhtälöstä integroimalla. Lop-
putuloksena on nk. Tsiolkovskyn rakettiyhtälö:

$$dv = \ln(m_0 / m_1) \times v_e$$

$$dv = \ln(R) \times v_e$$

jossa:

dv	Aluksen ajokyyky (delta-v)
v_e	Ajoaineen suihkutussnopeus
m_0	Aluksen massa täytenä (kuivamassa + ajoaineen massa)
m_1	Aluksen massa tyhjänä (kuivamassa)
R	Massasuhde (m_0 / m_1)

Hieman järjenvastaisesti avaruusaluksen lop-
punopeus voi olla – ja useimmissa tapauksissa
onkin – suurempi kuin ajoaineen suihkutuss-
nopeus. Esimerkiksi Maapallolta kiertoradalle
nousevat raketit käyttävät moottoreita, joiden
suihkun nopeus on noin 4 km/s, mutta alukset
saavuttavat silti kiertoradan n. 8 km/s nopeuden.

Suihkutussnopeus ja massasuhde: Suihku-
tussnopeudella ei ole suoraa vaikutusta ava-
ruusaluksen loppunopeuteen, mutta sillä on
ratkaiseva vaikutus aluksen massasuhteeseen,
siis kuinka paljon ajoainetta aluksella täytyy
olla jokaista kuivamassan kilogrammaa kohti,
jotta se saavuttaa tietyn ajokyyvyn.

Rakettiyhtälössä kannattaa kiinnittää erityis-
tä huomiota tekijään $\ln(m_0/m_1) = \ln(R)$. Massa-
suhde nimittäin määrää kertoimen ajokyyvyn ja
suihkutussnopeuden välille. Koska kerroin $k =$
 $\ln(R)$, niin $R = e^k$:

$k = \ln(R)$	$R (m_0/m_1)$	ajokyyky
0,25	1,28	$\frac{1}{4} \times v_e$
0,5	1,64	$\frac{1}{2} \times v_e$
1	2,72	$1 \times v_e$
2	7,39	$2 \times v_e$
3	20,1	$3 \times v_e$
4	55,0	$4 \times v_e$
5	148	$5 \times v_e$
10	22 026	$10 \times v_e$
20	485 165 195	$20 \times v_e$

Huomataan, että ajokyyvyn nostaminen
massasuhdetta kasvattamalla tulee nopeasti
mahdottomaksi. Massasuhde ei voi käytän-
nössä kasvaa loputtomiin edes monivaiheisilla
raketeilla. Nykyisillä monivaiheisilla raketeilla
massasuhteet ovat kokonaisuutenaan luokkaa
30–40 eli kerroin k on noin 3,5.

Suhtaudu varauksella kaavoihin, jotka anta-
vat helpon tavan nostaa monivaiheraketin mas-
sasuhdetta, koska siellä on tietty ansakuoppa.
Monivaiheraketille massasuhteen laskeminen
esitetään usein muodossa, jossa vaiheiden mas-
sasuhteet kerrotaan keskenään, esimerkiksi
 $5 \times 5 \times 4 = 100$. Kuulostaa äärimmäisen hyvältä,
eikö vain? Jos jokin kuulostaa liian hyvältä, se ei
todennäköisesti ole totta. Tässä esitetään mas-
sasuhde hämäävästi vaiheiden omana massa-
suhteena, mikä ei pidä paikkansa: esimerkiksi
ykkösvaiheen kuivamassaksi lasketaan paitsi
ykkösvaiheen ajoainesäiliöt sekä moottorit,
myös kaikki ylemmät vaiheet tankattuna. Toisin
sanoen, edellä esitettyssä kaavassa lopullinen
kuivamassa on luokkaa 1/200 koko raketin mas-
sasta. Oikeilla, toteutetuilla kolmivaiheraketeilla

sama yhtälö on suunnilleen muotoa $1,6 \times 3,5 \times 6,1 = 34,2$ eli kerroin $k \sim 3,5$.

Moottorityyppejä

Energia: Antaakseen ajoaineelle liike-energiaa avaruusalus tarvitsee energiaa. Energia voi tulla joko (1) mukana kannetusta ajoaineesta itsestään, (2) mukana kulkevasta erillisestä energianlähteestä, tai (3) se voidaan syöttää alukseen ulkopuolelta.

Laskennallisesti kohdat 1 ja 2 voidaan yhdistää, koska laskemisessa tarvitaan vain ominaisenergia eli paljonko energiaa on käytössä per ajoaineen kilogramma. Toisaalta tässä artikkelissa niputetaan yhteen kaikki ne konseptit, joissa alus itsessään ei sisällä energianlähdettä, vaan energia saadaan ulkopuolelta jonkinlaisella keräimellä, esimerkiksi:

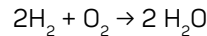
- Aurinkopaneeleilla toimivat sähköiset moottorit (engl. *electric propulsion*),
- Konseptit, joissa aurinkoenergia keskitetään peileillä lämmittämään ajoainetta (kts. *Solar Thermal Rocket*),
- Konseptit, joissa energia saadaan jonkinlaiselta asemalta esim. suunnatulla laserilla tai mikroaalloilla, ja käytetään joko tuottamaan sähköä ionimoottorille tai lämmittämään ajoainetta edellisten auriongon voimalla toimivien alusten tapaan (kts. *BEP, Beamed Energy Propulsion*).

On huomattava, että myös nämä moottorit noudattavat silti rakettiyhtälön lainalaisuuksia perinteisempien rakettien tavoin.

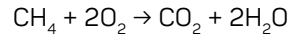
Kemialliset moottorit: Kemialliset rakettimoottorit saavat energiansa ajoaineen kemiallisesta reaktiosta. Tarkastelun kannalta ei ole väliä sillä, onko ajoaine yksi-, kaksi- vai useam-
pikomponenttinen. Esimerkiksi tavallinen kak-
sikomponenttinen vety-happi -raketti voidaan käsitellä rakettina, jossa vety ja happi ovat iloi-
sesti sekaisin samassa tankissa. Toteutettuna se olisi tietysti hirveän vaarallinen, varsinkin jos on kyseessä itsesyttävä reaktio.

Kemiallisen moottorin ominaisenergian saa periaatteessa selvitettyä lämpöarvotaulukosta – periaatteessa: lämpöarvotaulukoissa anne-

taan lämpöarvo per kilogramma polttoainetta, mutta siinä ei ole kerrottu, kuinka paljon happea reaktioon osallistuu. Hapen määrän selvittäminen onnistuu reaktioyhtälön avulla. Esimerkkinä pari reaktioyhtälöä:



(Lämpöarvo ilmoitettu kilolite vetyä)



(Lämpöarvo ilmoitettu kilolite metaania)

Yhtälöstä summataan yhteen polttoaineen atomien atomimassat (m_f) ja hapettimen eli hapen atomimassat (m_{ox}), jonka jälkeen ominaisenergia voidaan laskea ilmoitetusta lämpöarvosta:

$$E_{sp} = E \times m_f / (m_f + m_{ox})$$

Esimerkki: vedyn lämpöarvo on taulukosta katsottuna 141,86 MJ/kg. Reaktioyhtälöstä ($\text{H}_2 + \text{O}$) saadaan

$$m_f = 2 \times 1,008 = 2,016, \text{ ja}$$

$$m_{ox} = 1 \times 15,999, \text{ jolloin}$$

$$m_{tot} = 2,016 + 15,999 = 18,015, \text{ joten}$$

$$E_{sp}(\text{H}_2 + \text{O}) = 141,86 \text{ MJ/kg} \times 2,016 / 18,015 = 15,875 \text{ MJ/kg}.$$

Kiinteillä itsehapettavilla ajoaineilla – kuten taulukossa 6 mukana olevat TNT ja APCP – suihkutussnopeus jää pienehköksi (luokkaa 2500 m/s), mutta niillä on etunaan suuri työntövoima ja ajoaineen hyvä varastoitavuus.

Taulukkoon on valittu kolme yleistä nestemäistä polttoainetta. Nestemäinen vety (LH_2) antaa parhaimman suorituskyvyn, mutta sen varastointi on hankalaa. LH_2 -LOX-raketit tankataan usein vain hetkeä ennen laukaisua. Kerosiinin (RP-1 , $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$) etuna on helppo varastoitavuus, mutta tarinassa ongelmana voi olla saatavuus elottomilla ja hiilettömillä taivaankappaleilla. Metaani (CH_4) on yhdenlainen ”välimalli” nestemäisen vedyn ja kerosiinin välissä sekä suorituskyvyltään että varastoitavuudeltaan. Metaania kaavaillaan Marsin pinnalla tankattavien alusten ajoaineeksi sillä oletuksella, että metaanin synteesi onnistuu riittävässä määrin Marsin kaasukehän hiilidioksidista ja vesijäädästä.

Taulukko 6: Muutamien kemiallisten polttoaineiden energiasisältö (ominaisenergia J/kg), suihkun teoreettinen maksiminopeus, laskennallinen suihkun nopeus nykyraketeille tyypillisellä 60% hyötysuhteella sekä ajokykijä erilaisilla massasuhteilla.

Ajoaine	Esp	ve (max)	ve (60%)	1:1	1:2	1:5	1:10
TNT	4,61 MJ/kg	3,04 km/s	2,35 km/s	1.63	2.58	4.21	5.64
APCP	4,96 MJ/kg	3,15 km/s	2,44 km/s	1.69	2.68	4.37	5.85
RP-1 + LOX	10,32 MJ/kg	4,54 km/s	3,52 km/s	2.44	3.87	6.31	8.44
CH ₄ + LOX	11,14 MJ/kg	4,72 km/s	3,66 km/s	2.53	4.02	6.55	8.77
LH ₂ + LOX	15,88 MJ/kg	5,63 km/s	4,36 km/s	3.03	4.80	7.82	10.47

Sähköiset moottorit: Ajoainetta voidaan kiihdyttää myös sähköenergialla käyttäen erilaisia menetelmiä. Periaatteessa ajoaineena voitaisiin käyttää miltei mitä tahansa, mutta usein sellaisena toimii raskas jalokaasu kuten ksenon tai argon. Näillä kaasuilla on pieni ionisoimisenergia, ja toisaalta kevyet aineet antaisivat nurinkurisesti vähän liiankin suuret suihkutussnopeudet laskien työntövoimaa entistä alemmas. Raskaiden jalokaasujen saatavuus suurempina määrinä voi olla haastavaa.

Sähköisten moottorien etuna ovat suuret suihkutussnopeudet, ja rajoittavana tekijänä

on useimmiten teho. Esimerkiksi aurinkopaneelilla voidaan tuottaa sähköä Maan radan tuntumassa vain luokkaa 1,3 kW/m², ja aurinkopaneelien teho tippuu nopeasti kun etäisyys Aurinkoon kasvaa. Toteutetut sähköiset moottorit ovat olleet tehoiltaan luokkaa 50–200 kW. Suuren suihkutussnopeuden ja pienen tehon takia moottorien massavirta ja siten työntövoima on todella pieni.

Sähköisten moottorien suihkutussnopeuksissa on huomattavat erot verrattuna kemiallisiin moottoreihin, mutta samalla tavoin erot tehossa ja työntövoimassa ovat huomattavia. Esimer-

Taulukko 7: Sähköisiä moottoreita sekä kaksi verrokkimoottoria toisesta ääripäästä, sukkulan apuraketti SSSRB ja Saturn-raketin kerosiinia polttava F-1-moottori.

Moottori	v(ex)	P	flow	F	1:1	1:2	1:5	1:10
NSTAR	30.40	1.4 kW	3.0 mg/s	0.092 N	21.1	33.4	54.5	72.9
HiPEP	94.34	31.6 kW	7.1 mg/s	0.670 N	65.4	103.6	169.0	226.2
VASIMR	49.03	139.7 kW	116.3 mg/s	5.700 N	34.0	53.9	87.9	117.6
SSSRB	2.63	18.4 GW	5330 kg/s	14.00 MN	1.8	2.9	4.7	6.3
F-1	2.98	11.6 GW	2606 kg/s	7.77 MN	2.1	3.3	5.4	7.2

kiksi SSSRB (avaruussukkulan apuraketti) on teholtaan 18,4 GW eli miltei miljoona kertaa tehokkaampi kuin HiPEP. Myös massavirrat ovat omissa luokissaan, sähköisten moottorien massavirtojen ollessa milligrammoja, ja SSSRB- ja F-1-moottoreiden massavirtojen ollessa 2,6–5,3 tonnia sekunnissa.

Pieni massavirta tarkoittaa sitä, että jos sähköisillä moottoreilla suoritetaan suuria ratamuutoksia, polttoaika kasvaa todella pitkäksi. Polttoajan venyessä siirtorata vääntyy ellipsistä spiraaliksi. Ongelma on sitä suurempi, mitä suuremmasta massasta on kyse. Esimerkiksi HiPEP-moottorilla yhden tonnin suihkuttaminen kestää 4,5 vuotta. Käytännössä nykyiset sähköiset moottorit on tarkoitettu pienille luotaimille, joiden ajotarpeet ovat huomattavan pieniä suhteessa suihkutussuhteeseen. Ajoaineen määrä on ollut luokkaa 50 kg. Tällöin ajoaineen kokonaisuus pysyy järjellisenä suhteessa massavirtaan, ja polttoajat pysyvät järjellisenä.

Auringon säteilyenergian käyttö aurinkopaneeleilla ei ole ainoa vaihtoehto. Sähköisen moottorin voimanlähteenä voi olla myös vaikkapa mukana kulkeva ydinparisto tai -voimala. Ydinparistolla toimivia sähköisiä moottoreita on käytetty kauemmas Aurinkokuntaan suunnatuissa luotaimissa. Eräs vaihtoehto on tuoda

energia esimerkiksi laserilla maa-asemalta. Kaikissa tapauksissa kyse on kuitenkin ensisijaisesti sisään saatavasta tehosta ja tehonlähteen tai keräimen massasta per tuotettu teho.

Lämpöydinmoottorit: Ydinmoottoreissa energia otetaan ydinreaktioista. Energia voidaan toki muuntaa sähköksi ja käyttää edellä esitetyissä sähköisissä moottoreissa, mutta yleensä ydinmoottorilla tarkoitetaan moottoria, joka muuntaa ydinreaktiosta saadun lämmön suoraan kineettiseksi energiaksi (nk. lämpöydinmoottori, engl. *Nuclear Thermal Rocket*) kemiallisten moottoreiden tapaan.

Ydinpolttoaineita on kolmea päätyyppiä: fissio, fuusio ja antimateria. Fissiomoottori voidaan rakentaa nykyteknologialla, ja sellaisia on kokeiltu esimerkiksi 1970-luvun vaihteessa (kts. esim. KIWI ja NERVA). Fuusioreaktori on scifin kannalta katsottuna ”nurkan takana”, vaikka siitä ei vielä olekaan toiminnassa. Antimaterian valmistus, varastointi ja käyttö teollisessa mitakaavassa on melko puhtaasti spekulatiivista.

Taulukossa 8 oleva sekoitussuhde tarkoittaa suunnilleen tätä: jos ajoaineena on Th232 1%, niin 100 tonnia ajoainetta sisältää yhden tonnin toriumia moottorin energialähteeksi ja 99 tonnia jotain soveltuvaa ajoainetta, vaikkapa vetyä tai vettä. Vedyn fuusioreaktioissa kyseessä voi

Taulukko 8: Ydinmoottoreita. Ensimmäisenä 1972 rakennettu ja testattu NERVA-moottori. Sen jälkeen laskennallisia parametreja avoimen syklin moottoreille erilaisilla ydinpolttoaineilla ja laimennussuhteilla.

Ajoaine/ moottori		ve (max)	ve (60%)	1:1	1:2	1:5	1:10
NERVA		-	8.34 km/s	5.8	9.2	14.9	20.0
Th232	1%	1261 km/s	977 km/s	677	1073	1750	2342
D-D	1%	1327 km/s	1028 km/s	712	1129	1841	2464
D-T	1%	2607 km/s	2020 km/s	1400	2219	3619	4843
D-He3	1%	2701 km/s	2092 km/s	1450	2299	3749	5020
D-He3	1%	6030 km/s	4669 km/s	3236	5130	8370	11200
Antivety 0.1%		13410 km/s	10390 km/s	7200	11410	18610	24910

mien liikuttamisessa tai pienten radanmuutosten tekemisessä suurille kuormille (esimerkiksi asemien radansäätö).

Samaan kategoriaan voi arvella tipahtavan myös aurinkopurjeiden, olivatpa ne sitten sähköisiä, magneettisia tai fyysisiä. Vaikka kirjallisuudessa onkin spekuloitu aurinkopurjeiden käyttöä tähtien välisessä matkailussa, niin koska aurinkopurjeiden kyky tarjota nopeuden muutoksia heikkenee nopeasti etäisyyden kasvaessa keskustähteen, purjeesta tulisi epäkäytännöllisen suuri.

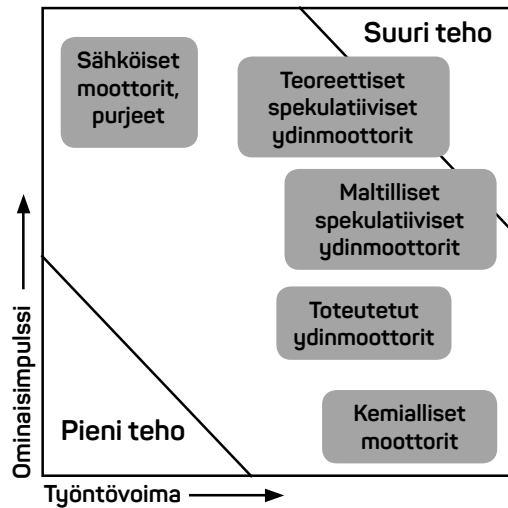
Ydinmoottorien kohdalla voitaisiin sanoa, että nykymaailma ei ole vielä niille valmis. Ominaisuuksiensa puolesta niistä voisi odottaa kemiallisten rakettien manttelinperijää ja interplanetaarisen rahtauksen kuormajuhtaa. Näiden moottorien kehitys pääsee oikeasti käyntiin vasta siinä vaiheessa, jos niille löytyy kaupallista käyttöä esimerkiksi interplanetaarisen matkustuksen ja rahtauksen (s.o. suuret kuormat ja suuret ajotarpeet) muodossa – kuten monissa avaruusscifi-tarinoissa on tapahtunut.

Moottorin valintakriteerit

Suorituskyky: Ensimmäinen kriteeri on tietysti se, että ajoaineen ja sitä käyttävän moottorin suorituskyky riittää tarkoitettuun tarpeeseen. Suihkutusnopeuden on oltava riittävä suhteessa ajotarpeeseen, jotta aluksen massasuhde pysyy toteuttamiskelpoisena. Työntövoiman on tarjottava alukselle riittävä kiihtyvyys. Massavirran täytyy olla riittävä, jottei poltto veny epäkäytännöllisen pitkäksi.

Kuvassa 8 on karkeasti esitettyä moottoreiden sovellusalueet ominaisimpulssin ja työntövoiman suhteen. Kaavion ääripää muodostavat sähköiset moottorit (ml. purjeet) ja kemialliset moottorit. Ydinrakettimoottoreista toivotaan ”perillistä” kemiallisille moottoreille sillä tavalla, että ne laajentaisivat hyvän työntövoiman omaavien moottoreiden valikoimaa kohti parempaa ominaisimpulssia tarjoamalla suurempia kokonaistehoja. Teoreettisemmissa ydinmoottorispekulaatioissa niiden toivotaan yltävän sähköisten moottoreiden tasolle tarjoten kuitenkin paljon suuremman tehoalueen.

Kuva 8.



Teknologian taso: Kun tiedät sen, millaiset ominaisuudet moottorilta vaaditaan tarinan skenaarioon, voit arvioida sitä, millaisia vaihtoehtoja maailmasi tekninen taso mahdollistaisi. Vaikka spekulatiivisille moottoreille saadaan laskennallisia parametreja, niitä ei välttämättä pystytty toteuttamaan. Korkeammalla teknologian tasolla avautuu laajempi valikoima moottoreita tarinan tarpeisiin.

Ajoaineen saatavuus: Saadaanko ajoaine paikan päältä, vai onko se kuljetettava jostain muualta? Hieman epäedullisempikin moottori on harkitsemisen arvoinen, jos sen ajoaineen saa paikan päältä tai edes lähialueilta. Elinkelpoisten planeettojen voi aina olettaa sisältävän hiiltä sekä biomassana että hiilidioksidina ja myös vettä, josta saadaan ajoaineeksi hapen lisäksi vetyä, metaania tai (vähintään synteettistä) kerosiinia raketteihin. Kuun kaltaisten pienten ja kuivien kappaleiden voi usein olettaa sisältävän kiviperässään ainakin alumiinia, josta voidaan saada kiinteää ajoainetta.

Säädettävyyttä: Joissain tapauksissa alukselle riittää ballistisen ohjuksen tai sukkulan apurakettien tyyppinen ratkaisu, jossa raketti palaa kerran sytyttyään loppuun saakka. Joissain muissa tapauksissa raketilta vaaditaan säädettävyyttä, esimerkiksi työntövoiman tai suihkutuksen nopeuden säätöä olosuhteiden mukaan. Joissain tapauksissa raketti täytyy voida sammuttaa ja sytyttää uudelleen, useitakin kertoja.

Varastoitavuus, säilyvyys, luotettavuus:

Esimerkiksi nestevety on vaativa varastoitava, mistä syystä vetyä käyttävät raketit tankataan vasta vähän ennen laukaisua. Monet kiinteät ajoaineet ovat helppoja varastoitavia, minkä takia niitä käytetään mm. mannertenvälisissä ohjuksissa.

Nämä kriteerit saattavat olla kaikkein tärkeimpiä, kun valitaan moottoreita pitkien tehtävien kulminaatiopisteisiin. Äärimmäisenä esimerkkinä vaikkapa sukupolvialuksen jarrutusmoottorit. Mikäli jarrutusmoottorit eivät sytykään kohteessa 5000–10000 vuoden matkan jälkeen, koko hanke, kaikki siihen käytetty aika ja vaiva valuu hukkaan.

Myrkyllisyys: Kaikissa tilanteissa ei ole suotavaa se, että joko varastoitava ajoaine tai ulos suihkuava virtaus on myrkyllistä, syövyttävää ja/tai radioaktiivista. Tämä on hyvä huomioida miettiessään nousua ja laskua elollisilla planeetoilla. Myrkyllisten ajoaineiden käyttö ei ole välttämättä suotavaa elottomillakaan planeetoilla, jos niiden pelätään aiheuttavan vaaraa esimerkiksi paikan päällä työskenteleville ihmisille.

Tähtienvälinen matkustaminen

Tähtien välillä matkustaminen on jätetty moottoreiden käsittelyn jälkeen hyvästä syystä. Kun nyt olemme tutustuneet erilaisten moottorien suorituskykyyn, voimme arvioida, millaisella tekniikalla voitaisiin matkustaa tähtien välillä.

Otetaan esimerkkinä matkustaminen Auringon ja Alfa Centauri A -tähten välillä. Tähtien välinen etäisyys on 4,37 valovuotta. Matkustetaan väli ”maltillisella” 10% valonnopeudella (29 979 km/s), jolloin matka-aika tähtienvälisessä avaruudessa on 43,7 vuotta. Jos matkanopeus nousee kovin lähelle valonnopeutta, tässä artikkelissa esitetyt klassiseen mekaniikkaan nojaavat laskelmat eivät pidä paikkansa, vaan ne on tehtävä relativistisilla yhtälöillä.

Alus lähtee Maan radalta (etäisyys Auringosta 1 AU), ja jarrutetaan Alfa Centauri A:lla samalle etäisyydelle (1 AU tähdestä). Pakonopeus Aurinkokunnasta Maan kiertoradalta on 42,1 km/s. Tästä nopeudesta aluksella on jo 29,8 km/s (Maan ratanopeus), jolloin lisänopeuden tarve on 12,3 km/s. Alfa Centauri A on tähtenä

lähes identtinen Auringon kanssa, joten siellä jarrutustarve 1 AU:n kiertoradalle on vastaava (laskennallisesti 12,9 km/s).

Tavoiteltu matkanopeus 29 979 km/s on kuitenkin yli 2000-kertainen verrattuna aurinkokuntien pakonopeuksiin, joten ne voi käytännössä jättää huomiotta, eli ajotarve on karkeasti $2 \times 29\,979 = 59\,958$ km/s.

Muistatko rakettiyhtälön esittelystä sen tärkeän huomion? Massasuhte räjähtää käsiin, jos ajotarve on yli kolme kertaa suurempi kuin ajokyky. Voimme melko suoraan sanoa, että tällaisen tähtialuksen moottorin suihkutusnopeuden täytyy olla suurempi kuin 19 986 km/s (I_{sp} n. 2 037 308 s). Kun katsomme aiemmin esiteltyjä olemassaolevia ja spekulatiivisia moottoreita, niin voimme suorilta käsin sanoa, että ainoastaan spekulatiivinen antimateria-moottori (antivety 0,1% sekoitussuhteella, teoreettinen $ve = 13\,410$ km/s) saattaisi olla käytökelpoinen.

Rakettiyhtälöä voi käyttää paitsi ajokyvyn ratkaisemiseen massasuhteen perusteella myös toisin päin, massasuhteen selvittämiseksi ajotarpeen perusteella. Taulukossa 9 on laskettu aluksen massasuhte erilaisilla moottoreilla kuvitteellisella 60% hyötysuhteella, kun ajotarve on 59 958 km/s.

Kun puhutaan siitä, ettei ihminen lennä kemiallisilla raketeilla koskaan tähtiin, niin yllä olevan taulukon täytyisi viimeistään kertoa syy. Jopa spekulatiivisella fuusiomoottorilla, jonka suihkun nopeus on 400–500-kertainen kemialliseen rakettiin verrattuna ja 20-kertainen sähköisiin moottoreihin verrattuna, massasuhte räjähtää käsiin. Tehtävä helpottuu monella kertaluokalla, jos ajotarvetta voidaan vähentää kasvattamalla matkustusaika esimerkiksi vaikkapa 5000 vuoteen (matkustusnopeus olisi 0,1% valonnopeudesta eli 262 km/s). Jos matka-aika voidaan kasvattaa esimerkiksi 20–50 000 vuoteen, alkukiihdytys voitaisiin antaa nykyisellä raketiteknologialla. Loppujarrutukseen sopivaa teknologiaa ei vielä tunneta: ei sen takia, ettäkö se olisi ratamekaanisesti vaativa, vaan sen takia, ettei tunneta raketti- ja ajoaineteknologiaa, joka säilyisi toimintakykyisenä koko tuon ajan.

Taulukosta on helppo huomata, että tarkoitukseen soveltuisi antimateria-moottori, jossa

Moottori	v_e	R
D-He3 1%	2088 km/s	2 958 573 298 585,37
D-He3 5%	4669 km/s	377 543,52
D-He3 20%	9340 km/s	613,73
Antivety 0,1%	10390 km/s	321,11
Antivety 1,0%	32940 km/s	6,17

Taulukko 9: Aluksen massasuhte erilaisilla moottoreilla, kun ajotarve on 59 958 km/s.

seossuhde on luokkaa 1% (eli jokaista 99 tonnia kohti annihiloidaan 1 tonni materiaa, johon käytetään 0,5 tonnia antimateriaa). Massasuhteeksi tulee maltillinen 6,17, jolloin 100 tonnia painava alus tarvitsee 517 tonnia ajoainetta, josta antimateriaa on noin 2,5 tonnia.

Yhden prosentin seossuhteella 1 kg ajoainetta sisältää 898,76 TJ energiaa. Jos tällaisen 100 tonnia painavan aluksen moottorin teho on 1 GW, niin polttojen kokonaispituudeksi tulee 14 720 vuotta! Terawatin tehoisella moottorilla

poltojen kokonaispituudeksi tulee 14,72 vuotta, joka on siis suunnilleen suhteessa 43 vuoden matka-aikaan.

Kun lukemia taulukossa 10 katsoo, niin varmaan ensimmäisenä huomio kiinnittyy aluksen kuivamassan pienuuteen. Sata tonnia hyötykuormalle, 500 tonnia vetäville ajoainesäiliölle ja gigawatin tehoiselle moottorille 50 vuoden lentomatkalle on todella vähän: se on luokkaa kolme raitiovaunua, tai kaksi puutavararekkaa. Suunnitelma ei kuitenkaan skaalaudu suoraan.

Taulukko 10: Alus numeroina

Kuivamassa	100 tonnia	(pieni, esim. ISS n. 400 t)
Ajoaineen massa	517 tonnia	
Antimateriaa	2.5 tonnia	
Matka-aika	43.7 vuotta	
Ajotarve	59 958 km/s	
Suihkun nopeus	32 940 km/s	
Moottorin ottoteho	1000 GW	
Moottorin hyötysuhde	60%	
Suihkun teho	600 GW	(n. 60 x Saturn F-1 -moottori)
Moottorin käyttöaika	14.82 vuotta	
Kiihdytys	10.57 vuotta	(ulos Aurinkokunnasta)
Jarrutus	4.25 vuotta	(jarrutus Alfa Centauri A:lle)
Massavirta	1.1 g/s	(:o)
Keskikiihtyvyys(1)	0.089 m/s^2	Lähtöpoltoissa
Keskikiihtyvyys(2)	0.223 m/s^2	Jarrutuspoltoissa

Jos aluksen kuivamassa kerrotaan kymmenellä (1000 t eli pienen sukellusveneen verran), niin ajoaineen määrä kyllä skaalautuu 5170 tonniin, mutta moottorin teho ei: polttoaika kymmenkertaistuu 148,2 vuodeksi. Alus tarvitsee 10,000 gigawatin tehoisen moottorin päästäkseen samoihin polttoaikoihin.

Realistiset vaihtoehdot ovat vähissä ja niissäkin on omat heikkoutensa (kuten esimerkiksi matka-ajat) ja suuret kysymysmerkkinsä. Jos tarinan tapahtumapaikat ovat eri tähdillä, monet kirjoittajat – muun muassa **Asimov** – ottavat suosiolla käyttöön jonkinlaisen fysiikan lakeja rikkovan ”tähtiemoottorin” (kutsutaan sitä sitten poimumoottoriksi, epätodennäköisyysmoottoriksi tai vaikkapa hyperavaruusmoottoriksi), jolla aurinkokuntien vaihto onnistuu kätevästi ihmisen eliniän puitteissa.

Mutta onko se pakollista? Ei ole. Monetkin kirjoittajat ovat ottaneet toisenlaisen asenteen tähtienväliseen matkailuun: ne ovat hitaita ja lopulta yksisuuntaisia. Vaikka joskus palaisitkin lähtöpaikkaasi, aikaa olisi kulunut niin paljon, ettet enää tunnista paikkaa. Tällaisissa tarinoissa tähtienväliseen matkailuun liittyy tietty haikeus, surumielisyys ja luopuminen, mikä ei useinkaan ole tarinoille haitaksi.

LUKEMISTA

- **Tero Niemi & Anne Salminen:** Kirjallinen liite kannevakuuskorvausanomukseen (*Tiamatin värit*). Tässä nimenomaisessa Nimbus-novellissa planeettojenvälinen matka tekniikkoineen on kuvattu niin arkisesti, että se muistuttaa rahdin ajamista rekalla Helsingistä Ouluun.
- **Alastair Reynolds** lähtee *Ilmestysten avaruus* -maailmassaan liikkeelle valoa hitaammasta matkaamisesta tähtien välillä. Vaikka tässä sarjassa Reynolds pohjimmiltaan turvautuu teknomagiseen moottoriin (koska muuten valoarkit eivät saisi energiaa tarpeeksi kiihtyäkseen lähelle valonnopeutta), niin monilta osin kirjoista voi ammentaa ideoita siihen, mitä pitkällä avaruusmatkoilla voisi tapahtua. Reynoldsin muista kirjoista mainittakoon *Jäänpuskijat*, jossa on hyvinkin tarkkaan harkittua kuvausta realismiin nojaavasta tulevaisuuden avaruusaluksesta.



LINKKEJÄ

- Juhani Kaukoranta: <http://jukaukor.mbnet.fi/fysiikka/avaruusfysiikkaa.pdf>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Reaction_engine
- https://en.wikipedia.org/wiki/Tsiolkovsky_rocket_equation