



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TEEMU SYVÄJÄRVI
MARSIN AEROSOLI-ILMIÖT
Diplomityö

Tarkastaja: professori Jyrki Mäkelä
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Luonnontieteiden tiedekunnan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
9.10.2013

Tiivistelmä

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknis-luonnontieteellinen koulutusohjelma

SYVÄJÄRVI, TEEMU: Marsin aerosoli-ilmiöt

Diplomityö, VII + 45 sivua

Lokakuu 2013

Pääaine: Teknillinen fysiikka

Tarkastaja: Professori Jyrki Mäkelä

Avainsanat: Mars, Marsin kaasukehä, aerosolit, aerosolioptiikka, putoamisliike, diffuusio ja koagulaatio

Mars on Auringosta lukien neljäs planeetta aurinkokunnassamme. Sillä on ympärillään ohut kaasukehä, joka koostuu pääosin hiilidioksidista. Marsin kaasukehässä leijuu oikeastaan aina pinnalta kaasukehään noussutta pölyä, joka voidaan jakaa karkeaan ja hienojakoiseen pölyyn eli Marsin kaasukehän pölyn kokojaukauma on niin sanotusti bimodaalinen eli kaksihuippuinen.

Karkea, läpimitaltaan noin mikrometrin kokoluokkaa oleva pöly, vaikuttaa Marsin päivätaivaan ja auringonlaskujen väreihin niin sanotun Mie-sironnan kautta siten, että Marsin pinnalta katsottuna päivätaivas näyttää ruskehtavalta tai jopa vaalean oranssilta. Lisäksi pöly aikaansaa Marsin auringonlaskujen ylle sinertävän kajon.

Tässä työssä on kuitenkin ollut pääasiassa tarkoitus tarkastella Marsin kaasukehän karkean pölyn leijumiseen liittyvää ongelmaa. Marsin suuria pölymyrskyjä tarkkailemalla on voitu havaita, että Marsin kaasukehän sisältämä karkea pöly jää intuition vastaisesti viikkokausiksi leijailemaan Marsin ohueen kaasukehään suurten pölymyrskyjen maksimijankohtien jälkeen ja tässä työssä on kyetty laskennallista tietä osoittamaan, että leijumiseen saattavat olla syynä joko ylöpäin puhaltavat kaasuvirtaukset tai sähköisestä poistovoimasta johtuva coulombinen repulsio.

Pienistä, noin 50 nanometrinen kokoisista, Marsin kaasukehän pölypartikkeleista on tässä työssä voitu laskemalla osoittaa, että ne ovat yllättävänkin diffundoituvia ja koaguloituvia. Lisäksi, vaikka niiden lukumääräpitoisuus on suhteellisen alhainen, näiden hiukkasten yksinkertainen monodisperssi koagulaatio on mahdollista ja niiden lukumääräpitoisuus alenee merkittävästi jo suhteellisen lyhyen ajan, esimerkiksi yhden tunnin kuluessa.

Abstract

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Master's Degree Programme in Science and Engineering
SYVÄJÄRVI, TEEMU: Aerosol Phenomena in Mars
Master of Science Thesis, VII + 45 pages

October 2013

Major: Engineering Physics

Examiner: Professor Jyrki Mäkelä

Keywords: Mars, the atmosphere of Mars, aerosols, aerosol optics, the dropping, diffusion, and coagulation

Mars is the fourth planet from the Sun in our solar system. Mars has a thin atmosphere, which mainly consists of carbon dioxide. Martian atmosphere always contains a considerable amount of levitating dust, which is coming from the surface. The dust can be divided to coarse and fine grained particles, indicating that its size distribution is bimodal.

The coarse dust particles, which are about one micrometer in diameter, affect the colour of daytime sky and sunsets of Mars when observed from the surface. The mechanism, which causes the above mentioned phenomena is called Mie scattering. The Mie scattering turns the colour of the daytime sky on Mars to light brown or even light orange. In addition the Mie scattering also causes a bluish afterglow to the sunsets of Mars.

However, this work is focused on the problem of levitation of coarse particles in the Martian atmosphere during and after the great dust storms of Mars. Against the intuition the coarse dust in the atmosphere of Mars stays aloft even for weeks after the maximum of a great dust storm, and this sets an interesting research problem for this work. In this work it has been shown by calculations that the explanation to the problem may be raising gas flows in the atmosphere, or more interestingly the solution could be found from the possible Coulombian repulsion between the surface of Mars and the levitating dust particles.

The small, about 50 nanometers in size, particles in the atmosphere of Mars have been shown in this work to be very diffusive and coagulative. Even though the number concentration of the particles is relatively low, it can be shown by relatively simple monodisperse coagulation calculations that the number concentration of the smaller aerosols decreases considerably in a short time, for example in a period of only one hour.

Alkusanat

Diplomityöni on ollut pitkäkö projekti, joka alkoi syksyllä 2012. Tällä hetkellä tuosta on kulunut jo noin puolitoista vuotta ja työ lähenee loppuaan, on siis kiitosten aika. Tämän työn valmistumiseen ovat merkittävästi vaikuttaneet ainakin seuraavat henkilöt, joista haluankin kiittää näiden alkusanojen yhteydessä. Professori Jyrki Mäkelä antoi paljon aikaansa tämän työn ohjaamiseen ja ilman hänen panostaan tämä työ ei olisi varmaankaan koskaan edes valmistunut. Veljeni Hans Syväjärvi jakoi lukea keskeneräisen työni kahteen kertaan lävitse ja antoi työn loppuunsaattamista ajatellen tärkeitä parannusehdotuksia. Toinen veljeni Tomi Syväjärvi auttoi erityisesti työn englanninkielisen tiivistelmän sanamuotojen hiomisessa. Kaveriltani Joel Salmelta sain myös muutamia tärkeitä ehdotuksia työn parantamiseksi ja myös kaverini Kristian auttoi minua huomattavan paljon työni loppuunsaattamisessa.

Tampereella 23.4.2014

Teemu Syväjärvi

Sisällys

Käytetyt symbolit.....	vi
1 Johdanto.....	1
2 Marsin tutkimuksen historiaa.....	3
2.1 Havaintoja Mars-planeetasta ennen kaukoputken keksimistä.....	3
2.2 Kaukoputkien avulla Marsista tehtyjä havaintoja.....	5
2.3 Avaruusluotainten avulla tehtyjä Mars-havaintoja.....	7
3 Marsin kaasukehä.....	16
3.1 Marsin kaasukehän koostumus, paine ja tiheys.....	16
3.2 Marsin pölypaholaiset ja suuret pölymyrskyt.....	17
3.3 Marsin kaasukehän aerosolioptiikan perusilmiöitä.....	18
4 Teoreettinen tausta ja tutkimuksen lähtökohdat.....	21
4.1 Aerosolimekaniikka.....	21
4.2 Aerosoleihin liittyvää sähköoppia.....	26
4.3 Hiilidioksidimolekyylin efektiivisen läpimitan arvioiminen.....	29
4.4 Marsin aerosolihiukkasten diffuusio- ja koagulaatiotarkasteluja.....	30
5 Tulokset ja niiden tarkastelu.....	34
5.1 Marsin pölyä simuloivan aerosolin käyttäytyminen maanpinnan lähistöllä..	34
5.2 Kaasumolekyylin vapaan matkan laskeminen ja Marsin pölyä simuloivan aerosolin putoamisliike Marsin kaasukehässä.....	36
5.3 Marsin kaasukehän pienien pölyhiukkasten monodisperssi koagulaatio	
6 Yhteenveto.....	42
7 Lähteet.....	44

Käytetyt symbolit

$APXS$	=	Alpha Particle X-ray Spectrometer
C_c	=	Cunninghamin liukukorjauskerroin
D	=	aerosolihiukkasen diffuusiokerroin
d	=	hiilidioksidimolekyylin efektiivinen halkaisija
d_{CO_2}	=	yhden hiilidioksidimolekyylin efektiivinen läpimitta
d_p	=	aerosolihiukkasen läpimitta
E	=	sähkökentän voimakkuus
e	=	alkeisvarauksen suuruus, yhden protonin sisältämä varaus
F	=	marsilaiseen aerosolihiukkaseen kohdistuvan sähköisen poistovoiman suuruus
G	=	yleinen gravitaatiovakio yhtälössä (4.3)
G	=	marsilaiseen aerosolihiukkaseen kohdistuva painovoima
g	=	putoamiskiihtyvyys
g_{Mars}	=	putoamiskiihtyvyys Marsin pinnan tasolla
K_0	=	monodisperssin aerosolin korjaamaton koagulaatiokerroin
k_B	=	Boltzmannin vakio
$LIMA - D$	=	Phobos2-luotaimen laite, jolla oli tarkoitus höyrystää Marsin kuun Phoboksen pintaa ja tutkia siitä irtoavien ionien jakaamaa.
M_{CO_2}	=	hiilidioksidin moolimassa
M_{Maa}	=	Maan massa
M_{Mars}	=	Marsin massa
m	=	testimassa
m_{CO_2}	=	nestemäisen hiilidioksidikuutiometrin massa
m_p	=	aerosolihiukkasen massa
N	=	Arkhimedeen lain mukaisen nostevoiman suuruus
N	=	koaguloituvien aerosolihiukkasten lukumääräpitoisuus
N_0	=	koaguloituvien monodisperssiivisten aerosolien alkuperäinen lukumääräpitoisuus
$N(t)$	=	koaguloituvien aerosolien ajan funktiona laskeva lukumääräpitoisuus
N_A	=	Avogadron vakio
N_{CO_2}	=	nestemäisen hiilidioksidikuutiometrin hiukkasmäärä
NL	=	Neuvostoliitto
n	=	alkeisvarausten lukumäärä yhtälössä (4.23)
n_{CO_2}	=	nestemäisen hiilidioksidikuutiometrin ainemäärä
p	=	vallitseva kaasunpaine
q_p	=	marsilaisen aerosolihiukkasen sisältämän sähkövarauksen suuruus
\Re	=	Reynoldsin luku
r_{Mars}	=	Marsin säde
r_p	=	pallomaisen aerosolihiukkasen säde
T	=	absoluuttinen lämpötila
V_{CO_2}	=	nestemäisen hiilidioksidikuutiometrin tilavuus
V'_{CO_2}	=	yhden hiilidioksidimolekyylin nesteessä viemä tilavuus

V_p	=	aerosolihiukkasen tilavuus
V_{TS}	=	aerosolihiukkasen asettumisnopeus

Kreikkalaiset kirjaimet:

η	=	väliaineen dynaaminen viskositeetti
λ	=	kaasumolekyylien keskimääräinen vapaa matka
π	=	ympyrän kehän ja halkaisijan pituuden suhde
ρ_{CO_2}	=	nestemäisen hiilidioksidin tiheys
ρ_g	=	kaasun tiheys
ρ_p	=	aerosolihiukkasen tiheys
χ	=	aerosolihiukkasen dynaaminen muototekijä Stokesin lain alueella

1 Johdanto

Mars on Auringosta lukien neljäs planeetta Aurinkokunnassamme. Mars on uloin niin sanotuista kiviplaneetoista, joita myös maankaltaisiksi planeetoiksi kutsutaan. Mars muistuttaa kaikista niin sanotuista klassisista planeetoista olosuhteiltaan eniten Maata. Marsin pinta-ala on lähes sama kuin Maapallon kaikkien mannerten yhteenlaskettu pinta-ala. Pinta-aloissa on eroa vain noin kolmen prosentin verran [6, s. 19].

Marsin pyörähdysaika akselinsa ympäri on vain vähän yli puoli tuntia pidempi kuin Maapallon [4, s. 113], joten Marsiin ehkä joskus pääsevät avaruuslentäjät kokevat vuorokausirytmien lähes samanlaisena kuin Maassakin. Marsin akselin kallistuskulma on myös lähes sama kuin Maa-planeetallakin. Kun Maapallon akselin kaltevuus on noin 23,5 astetta [23, s. 26], niin Mars-planeetalla akselin kaltevuus on vain vähän alle pari astetta suurempi kuin Maa-planeetalla [23, s. 28] eli 25,2 astetta. Tästä seuraa se, että Marsin vuodenaajat noudattavat jokseenkin samanlaista sykliä kuin Maankin mutta sillä erotuksella, että kun Maa-planeetalta kestää noin 365 vuorokautta [4, s. 112] edetä radallansa yhden kierroksen verran Auringon ympäri, niin Marsilta samaan suoritukseen kuluu jonkin verran kauemmin eli noin 687 Maan vuorokautta [4, s. 113].

Marsilla on ympärillään ohut kaasukehä, joka koostuu pääasiassa hiilidioksidista, jota on kaasukehän koostumuksesta jopa yli 95 tilavuusprosenttia. [6, s. 202] Marsin kaasukehässä on toki muitakin kaasuja, kuten esimerkiksi argonia mutta niiden osuus koko kaasukehän tilavuuspitoisuudesta on luonnollisesti huomattavasti pienempi kuin hiilidioksidin. Tässä työssä onkin noudatettu sellaista yksinkertaistusta, että Marsin kaasukehän katsotaan koostuvan ainoastaan hiilidioksidista.

Marsin kaasukehän paine on aina huomattavasti alhaisempi kuin Maan ilmakehän vastaavassa korkeudessa pinnasta mitattuna vallitseva paine. Kun Maan ilmakehän normaalipaineena pidetään yleisesti noin 1013 millibaarin lukemaa, niin Mars-planeetan tasankojen pinnalla keskimääräinen paine on vain noin 6 millibaaria [6, s. 206-207].

Marsin kaasukehässä leijuu käytännössä aina pinnalta kaasuun nousseita pölypartikkeleita ja Marsin kaasukehässä esiintyy myös silloin tällöin pilviäkin. Tässä työssä onkin tarkoitus tarkastella Marsin kaasukehän aerosoli-ilmiöitä erityisesti aerosolifysiikan näkökulmasta.

Erityisenä tutkimuskysymyksenä voidaan tässä työssä pitää sitä ongelmaa, jonka on havaittu liittyvän Marsin kaasukehässä silloin tällöin esiintyviin pölymyrskyihin. Sen lisäksi, että ne mekanismit, jotka nostavat Marsin pinnalla lojuvaa pölyä Marsin

kaasukehään ovat tiedeyhteisönkin piirissä heikosti tunnettuja, niin myös pölyn jatkuva leijuminen Marsin kaasukehässä muodostaa itsessään kiinnostavan tutkimusongelman.

Intuitiivisesti asiaa katsottuna on nimittäin aika selvää, että koska Marsin kaasukehä on varsin harva verrattuna Maan kaasukehään, niin luulisi, että Marsin pinnalta kaasukehään nousseet pölyhiukkaset laskeutuisivat pian takaisin. Kokeellisesti Marsia esimerkiksi kaukoputkilla tarkkailemalla on kuitenkin havaittu, että pöly saattaa jäädä leijumaan Marsin kaasukehään jopa viikkokausiksi. Tässä työssä onkin tarkoitus laskennallisesti selvittää tyypillisen marsilaisen pölyn asettumiseen ja muuhun pystyliikkeeseen vaikuttavat tekijät Marsin pinnan lähistöllä vallitsevissa olosuhteissa. Työssä tutkitaan kuitenkin myös sitä, että onko mahdollista, että marsilainen pöly jäisi leijumaan Marsin kaasukehään sähköisen poistovoiman ansiosta.

2 Marsin tutkimuksen historiaa

Mars-planeettaa on aikojen kuluessa havainnoitu useammilla erilaisilla tavoilla. Vanhimmat Marsista tehdyt havainnot ovat paljaalla silmällä tehtyjä näköhavaintoja, joiden perusteella saatiinkin lopulta selville Marsin ellipsimäinen rata Auringon ympäri. 1600-luvun alusta alkaen Marsista on tehty erilaisilla kaukoputkilla visuaalisia havaintoja, joiden avulla saatiin selville planeetta Marsin vaiheet, pyörähdysaika akselinsa ympäri, akselin kaltevuus ratatasoa vastaan ja onpa kaukoputkihavaintojen perusteella piirretty planeetta Marsista ensimmäisiä karttojakin. 1960-luvulta lähtien Marsia on tutkittu yhteensä yli 40 avaruusluotaimella, joista valitettavasti suurin osa on epäonnistunut tehtävänsä täyttämässä joko osittain tai täydellisesti. Kuitenkin luotaimet ovat tuoneet myös runsaasti lisää tietoa Marsista ja sen kaasukehästä ja voidaan sanoa, että ilman Marsia tutkineita avaruusluotaimia tuskin tätäkään opinnäytetyötä olisi koskaan tehty, sillä niin paljon avaruusluotaimet ovat avartaneet käsitystämme esimerkiksi Marsin kaasukehässä leijuvista aerosoleista.

2.1 Havaintoja Mars-planeetasta ennen kaukoputken keksimistä

Mars on Auringosta lukien neljäs planeetta Aurinkokunnassamme. Mars-planeetta on tunnettu jo muinaisista ajoista lähtien, koska se liikkuu tähtitaivaalla kiintotähtien suhteen selvästi erottuvana punaisena pistemäisenä kohteena. Perinteisesti planeetta Mars on yhdistetty roomalaisten sodanjumala Marsiin, josta planeetta on saanut nykyisen nimensäkin. Alla on yhdysvaltalaisen avaruusteleskooppi Hubblen ottama kokonaiskuva Mars-planeetan yhdestä puoliskosta.



Kuva 1. Mars-planeetta yhdysvaltalaisen avaruusteleskooppi Hubblen kuvaamana. [1]

Lukuun ottamatta Marsin liikettä koskevia havaintoja Marsista ei erotu paljaalla silmällä katsottaessa mitään yksityiskohtia. Tanskalainen tähtitieteilijä Tyko Brahe havainnoi kuitenkin Marsia 1500-luvun lopulla vuosikausia ja kirjasi juuri ennen kaukoputken keksimistä paljaalla silmällä ja erilaisilla mekaanisilla apuvälineillä tekemänsä havainnot muistiin. Hänellä ei kuitenkaan ollut kykyä käsitellä tekemiään havaintoja matemaattisesti eikä luoda niiden pohjalta matemaattista teoriaa planeettojen liikkeistä. Laskuapulaiseksi Tyko Brahe palkkasi vuonna 1600 Johannes Keplerin. Tyko Brahe kuitenkin kuoli yllättäen vuonna 1601 varsin pian Keplerin kohdattuaan ja hänen suuri havaintoaineistonsa jäi Johannes Keplerin haltuun. [2, s. 127]

Kepler osoittautui kuitenkin ensiluokkaiseksi matemaatikoksi ja alkoi systemaattisesti työstää Tyko Brahen havaintojen pohjalta matemaattista mallia planeettojen liikkeistä. Esimerkkitapaukseksi ja päättelyidensä lähtökohdaksi Kepler valitsi planeetta Marsin, koska Tykon havaintoaineistossa oli saatavilla pisimmät havaintojaksot juuri planeetta Marsista. Ei kuitenkaan pidä ajatella, että Kepler olisi nähnyt suoraan Tykon havaintoaineistosta, että Marsin rata Auringon ympäri on ellipsi, jonka keskietäisyys Auringosta on noin 228 miljoonaa kilometriä [4, s. 113], vaan että Tyko Brahen tarkat havainnot toimivat vain eräänlaisena hypoteesien tarkistusmateriaalina. Keplerin laskut,

joita on yhteensä tuhansia sivuja, ovat edelleen tallessa erään yliopiston kirjastossa. Kepler julkaisi laskutöidensä pohjalta myös kirjan nimeltä *Astronomia Nova*, jossa hän käy läpi paitsi viimein tapahtuneen läpimurtonsa Marsin radan selittämisessä, niin myös kaikki projektin hedelmättömät syrjäpolut. Eräätkin kirjassa esitetyt 15 sivun mittaiset laskelmat Keplerin täytyi laskea läpi 70 kertaa päästäkseen oikeaan lopputulokseen.

2.2 Kaukoputkien avulla Marsista tehtyjä havaintoja

Kun kaukoputki keksittiin Hollannissa vuonna 1608, niin silloin alkoi uusi ajanjakso tähtitaivaan tutkimuksen historiassa ja myös planeetta Marsista saatiin pikkuhiljaa uusia mielenkiintoisia tuloksia. Galileo Galilei havaitsi ensimmäisenä Marsin vaiheet, vaikkei ollutkaan varma tekemästään havainnosta [3, s. 33].

Marsin valkoiset napalakit havaittiin kaukoputkella myös jo vuonna 1666 [6, s. 201]. Kun Marsin pinnalta alkoi kaukoputkien koon kasvaessa ja optiikan parantuessa erottua yksityiskohtia, niin huomattiin myös, että Mars pyöri akselinsa ympäri. Kun aikaa kului ja havaintoja tehtiin lisää, niin Marsin pyörähdysajan arvo alkoi tarkentua kohti nykyistä arvoa. Nykyään tiedetään, että Marsin pyörähdysaika akselinsa ympäri on noin 24 h 37 min 23 s [4, s. 113].

Kun kaukoputkien koko ja tarkkuus vielä 1800-luvulle tultaessa edelleen kasvoivat, voitiin Marsista yrittää piirtää jo ensimmäisiä karttojakin. Huomattiin, että tässä työssä ihmissilmä on instrumenttina parempi kuin kaukoputkeen yhdistetty kamera. Vaikka valokuvauslevyä voidaan valottaa pitkiäkin aikoja, niin kuitenkin ilmakehän jatkuvat häiriöt tekevät suurillakin kaukoputkilla otetuissa kuvissa olevat yksityiskohdat epämääräisiksi. Sen sijaan ihmissilmällä katsottaessa ilmakehän pyörteily saattaa rauhoittua vaikkapa vain ohikiitäväksi hetkeksi, jolloin ihmissilmä näkee hetkellisesti tarkan kuvan Marsin pinnasta. Tällöin havaitut yksityiskohdat voidaan dokumentoida esimerkiksi piirtämällä ne paperille.

1800-luvun lopulla jotkut tähtitieteilijät ilmoittivat näkevänsä Marsin pinnalla viivamaisia yksityiskohtia, jotka pian tulkittiin kanaviksi. Alunperin Giovanni Schiaparellin havaintokertomuksessaan käyttämä sana ”canali” tarkoittaa luonnon muovaamaa kanavaa, esimerkiksi joenuomaa, mutta kun sana käännettiin englannin kielelle, niin se sai keinotekoista kanavaa merkitsevän sivumerkityksen. [3, s. 40] Myöhemmin on osoitettu, että kanavat olivat itse asiassa näköharjoja. Jotta marsilaisen kanavan olisi voinut nähdä 1800-luvun lopun teleskoopeilla Maasta käsin, sen tulisi olla ainakin noin 65 kilometriä leveä, minkä osoitti Simon Newcomb laskemalla jo 1800-luvun lopulla [3, s. 49].

Kiinnostava yksityiskohta on kuitenkin se, että Marsissa on itse asiassa kavavia, jotka voivat olla muinoin virranneen veden kuluttamia [3, s. 108]. Nämä kanavat ovat

kuitenkin niin kapeita, että ne erottuvat vain Marsia läheltä tutkineiden avaruusluotainten kuvista, eivätkä millään olisi voineet näkyä Maahan asti ja olla havaittavissa 1800-luvun lopun kaukoputkilla, koska nämä kanavat eivät erotu edes uusista avaruustelekooppi Hubblen ottamista kuvista, jotka sinänsä ovat parhaat Marsista koskaan saadut kokonaiskuvat. (Lukuisat Marsia tutkineet luotaimet ovat toki ottaneet Marsista tarkempia kuvia mutta niissä kuvissa ei näy kuitenkaan koko planeettaa, vaan ainoastaan pieniä osia siitä.)



Kuva 2. Mariner 9 -luotaimen ottama kuva, jossa eräs marsilainen kanava on hyvin näkyvissä. [5].

Eräs tärkeä havainto oli myös se, kun Asaph Hall löysi vuonna 1877 Marsilta kaksi kuuta. Sisempi Marsin kuu on nimeltään Phobos ja ulompi kuu sai nimekseen Deimos. Näiden kuiden löytyminen antoi ensimmäistä kertaa mahdollisuuden määrittää Mars-planeetan massan, joka voidaan laskea kuiden kiertoaikojen perusteella. [3, s. 158]

Kuitenkin on jo kauan aikaa ollut tiedossa, että Marsilla on kaasukehä, jonka kokonaispaineeksi Marsin pinnalla arvioitiin noin kymmenesosa Maan ilmakehän paineesta vielä 1960-luvun alussa ennen ensimmäisiä Marsia läheltä tutkineita avaruusluotaimia. Lisäksi tutkittiin Marsin pinnan lämpötilajakaumaa ja saatiin selville, että Marsin ekvaattorilla lämpötila saattoi helteisinä kesäpäivinä nousta jopa 30 Celsius-asteeseen, mutta samalla huomattiin myös se tosiasia, että Marsin navoilla on paljon kylmenpää, ja siellä lämpötila voi kylminä pakkasöinä laskea reilusti kylmemmäksi kuin -100 Celsius-asteeseen. [6, s. 25]

2.3 Avaruusluotainten avulla tehtyjä Mars-havaintoja

Yhdysvaltain ensimmäinen yritys tutkia planeetta Marsia ohilentoluotaimen avulla oli Mariner 3 -luotain, joka lähetettiin matkaan 5.11.1964. Yritys meni kuitenkin pieleen jo laukaisun loppuvaiheessa, kun luotaimen suojakartio ei irronnutkaan kunnolla luotaimesta, eikä luotain myöskään saavuttanut riittävää nopeutta, jotta se olisi päässyt Marsin ohi lentävälle radalle. Koska luotain ei kyennyt avaamaan aurinkopaneeleitaankaan, sen akkujen varaustaso laski melko nopeasti ja luotain katosi hylkynä Aurinkoa ympäröivälle radalle. [6, s. 46]

Vuonna 1965 yhdysvaltalainen Mariner 4 -avaruusluotain lensi Marsin ohi ja otti sen pinnasta ainakin 21 kokonaista mustavalkoista kuvaa, joista löydettiin Marsin kraaterit. Kukaan ei ollut aikaisemmin osannut ajatella, että Marsissa täytyy olla myös kraatereita. Lisäksi luotaimen havainnot Marsin kaasukehän paineesta osoittivat, että paineen täytyi olla Marsin pinnalla pienempi kuin aikaisemmin oli ajateltu – vain noin $\frac{1}{200}$ Maan pinnalla vallitsevasta ilmanpaineesta. Lisäksi luotain mittasi Marsin pinnan lämpötilaksi -100 Celsiusta. [6, s. 46]

Vuonna 1969 Yhdysvallat lähetti matkaan vielä kaksi Marsin ohilentoluotainta, jotka saivat nimikseen Mariner 6 ja Mariner 7. Mariner 6 lähetettiin onnistuneesti matkaan 24.2. ja Mariner 7 seurasi perässä 27.3. samana vuonna. Molemmat luotaimet pääsivät Marsin läheisyyteen ja kuvasivat yhteensä noin 20 prosenttia Marsin pinnasta. Kuvat olivat kuitenkin mustavalkoisia, ja koska luotaimet vain kiisivät Marsin ohi, kuvien resoluutio oli myös aika huono. Parhaimmillaankin yksi pikseli kuvissa vastasi noin 800 metriä Marsin maastossa. Mariner 7 -luotaimen saapuminen Marsin läheisyyteen viivästyi hieman sen vuoksi, että sen akkujen elektrolyytti pääsi vuotamaan avaruuteen luotaimen lennon aikana, mutta luotain sai aurinkopaneeleistaankin riittävästi sähkövirtaa, jotta sen toimintaa voitiin vielä jatkaa ja luotain kuvasikin suunnitellusti Marsin pintaa ohilentonsa aikana. [6, s. 46]

Mariner 8 oli yhdysvaltalainen avaruusluotain, jonka oli tarkoitus päästä ensimmäisenä ihmiskunnan tekemänä kappaleena Marsia ympäröivälle radalle. Luotain laukaistiin 8. 5.1971, mutta sen laukaisu epäonnistui ja luotain putosi Atlantin valtameren 1450 kilometrin päähän laukaisupaikastaan Cape Canaveralista. [6, s. 47]

Vuonna 1971 yhdysvaltalainen Mariner 9 -avaruusluotain asettui ensimmäisenä ihmiskunnan tekemänä kappaleena kiertämään Marsia. Luotain toimi suunnitellun 90 Maan vuorokauden toiminta-aikansa sijasta peräti 349 vuorokautta ja kartoitti ensimmäistä kertaa koko Marsin pinnan lähietäisyydeltä. Luotaimen mustavalkoisista kuvista paljastui Marsin pinnan omituinen kahtiajakoisuus: Marsin pohjoisosat ovat alavia tasankoja, kenties siellä on joskus Marsin historiassa lainehtinut suuri marsilainen

valtameri ja pinta on pohjoisosissa sen vuoksi tasaista. Marsin eteläosista paljastui paljon pohjoisosia suurempia korkeusvaihteluita, suuria sammuneita tulivuoria, kuten suuri Olympus Mons, jonka huippu kohoaa peräti 26 kilometrin korkeuteen Marsin tasankojen tasosta mitattuna. Lisäksi Marsin eteläiseltä pallonpuoliskolta löytyi peräti 4000 kilometriä pitkä ja jopa kuusi kilometriä syvä repeämälaakso, joka sai sen löytäneen Mariner 9 -luotaimen mukaan nimekseen Valles Mariners [6, s. 47].

Neuvostoliittolaisista Mars-luotaimista on tarpeen mainita Mars-sarjan luotaimet Mars 1 - Mars 7. Mars 1 -luotain lähetettiin kohti Mars-planeettaa 1.11.1962. Luotaimen laukaisu onnistui ja luotain toimi joitakin kuukausia, mutta 23.3.1963 luotaimen asennonsäätöjärjestelmä petti, eikä luotaimen antenni enää osoittanutkaan kohti Maata, joten yhteys luotaimeseen menetettiin. [6, s. 65]

Mars 2 -luotain laukaistiin 19.5.1971 ja se saavutti Mars-planeetan 27.11. samana vuonna, jolloin laskeutujaosa irrottautui kiertolaisosasta. Laskeutuja epäonnistui mahdollisesti laskeutumisessa sattuneen suuren tärähdyksen vuoksi, mutta se oli kuitenkin ensimmäinen ihmiskunnan tekemä kappale, joka saatiin toisen planeetan pinnalle. [6, s. 66]

Mars 3 -luotain saapui Marsiin 2.12.1971 ja sen laskeutujaosa onnistui laskeutumaan ainakin melko pehmeästi Marsin pinnalle. Laskeutuja toimi pinnalla vain noin kaksi minuuttia, koska paikalla riehui tuolloin erittäin voimakas pölymyrsky, joka saattoi aiheuttaa koronavaraantumisen ja siten tuhota laskeutujan radiolaitteiston. Toinen mahdollinen syy laskeutujan pikaiseen vaikeutumiseen saattoi olla se, että tuohon aikaan Neuvostoliiton laskeutujaluotaimet olivat paineistettuja, ja jos kyseinen laskeutuja tuli alas rajusti tömähäen, niin siihen saattoi tulla reikä, josta paineet pääsivät melko nopeasti pihisemään Marsin ohueen kaasukehään. Joka tapauksessa luotain ehti kuitenkin lähettää Marsin pinnalta noin 15 sekunnin ajan kuvasignaalia, josta voitiin vuosikymmenten kuluttua muodostaa erinäisten suodatusten ja kuvankäsittelyiden jälkeen pienikokoinen mustavalkoinen kuva Marsin pintahiekasta laskeutujan läheisyydessä. [6, s. 66] ja [8]

Mars 4 -luotain laukaistiin kohti Mars-planeettaa 21.7.1973. Se saapui perille Marsiin mutta sen jarruraketit eivät syttyneet ja luotain lensi planeetan ohi. Samoihin aikoihin Mars 4 -luotaimen kanssa laukaistu Mars 5-luotain sen sijaan pääsi Marsia ympäröivälle radalle ja lähetti sieltä joitakin hyvälaatuisia kuvia, mutta tämäkin luotain vaikenä lyhyen toimintajakson jälkeen. Mars 6 -luotaimen laskeutujaosa suoritti ensimmäisen laskeutumisen aikaisen mittausarjan Marsin kaasukehästä ja sai myös lähetettyä 148 sekunnin ajan laskeutumisen aikaista dataa emoluotaimelleen, mutta osa datasta oli lukukelvotonta. Dataa tutkittaessa paljastui kuitenkin, että Marsin kaasukehä sisältää runsaasti argonia. Mars 7 -luotain epäonnistui lähes täydellisesti, sen laskeutujaosa irrottautui emoluotaimesta väärällä hetkellä ja lensi Marsin ohi. [6, s. 66]

Yhdysvaltain seuraava yritys tutkia planeetta Marsia oli suurisuuntainen Viking-ohjelma, jonka puitteissa lähetettiin kaksi suurta luotainta, jotka kumpikin koostuivat Marsia kiertämään jääneistä osista sekä erityisistä laskeutujaosista. Luotaimet saivat nimikseen Viking 1 ja Viking 2. Ne lähetettiin avaruuteen vuonna 1975. Viking 1 -luotaimen laskeutumisosasta laskeutui Orbiter-osasta irrottauduttuaan Marsin pinnalle 20.7.1976 Chryse Planitia (Kylmä Tasanko) -nimiselle alueelle. [6, s. 51] Myös Viking 2 onnistui ja sen laskeutujaosa laskeutui Utopia Planitia (Utopian Tasanko) -nimiselle tasangolle 3.9.1976. Nämä laskeutajat suorittivatkin ensimmäiset onnistuneet laskeutumiset Marsin pinnalle.

Viking-laskeutajat toimivat Marsin pinnalla vuosien ajan ja etsivät merkkejä muun muassa marsilaisesta elämästä. Mitään havaintoja ainakaan näkyvästä elämästä ei kuitenkaan löytynyt. Tosin jotkut pintahiekkaa analysoineet kemialliset kokeet antoivat positiivisia signaaleja, mutta nämäkin selittynevät Marsin pintahiekan oudolla kemiolla.

Sen sijaan Viking-luotainten laskeutajat löysivät kolme hyvää syytä, miksi Marsin pinnalla ei voi olla elämää. Ensiksikin Marsilta puuttuu Maalle ominainen otsonikerros lähes kokonaan, mikä estää elämälle tuhoisan ultraviolettisäteilyn pääsyn Maan pinnalle. Marsilla tällaista otsonikerrosta ei juurikaan ole, joten pintaa pommittaa Auringosta peräisin oleva ultraviolettisäteily, joka tappaisi pinnalla olevat Marsin mikrobit muutamassa sekunnissa. Toiseksi Marsin ekvaattoriseudun pintahiekka on aivan kuivaa. Maapallolla on havaittu, että vesi on elämälle välttämätön elinehto ja tätä elinehtoa ei Marsin päiväntasaajan pintahiekasta löydy. Kolmanneksi pintahiekan havaittiin sisältävän orgaanisia yhdisteitä hajottavia kemikaaleja kuten vetyperoksidia. Monet tiedemiehet ovatkin sitä mieltä, että Viking-laskeutujien mittaukset ratkaisivat kerralla kysymyksen marsilaisen elämän olemassaolosta.

Viking 1 -luotaimen laskeutujaosa toimi Marsin pinnalla marraskuuhun 1982 saakka, kunnes Maasta lähetetty väärä käsky aiheutti radioyhteyden menetyksen. Lukuisista yrityksistä huolimatta yhteyttä ei saatu enää takaisin. Viking 2 -laskeutujaosa toimi puolestaan huhtikuuhun 1980 asti, kunnes luotaimen akut menivät liian heikkoon tilaan mittaussarjojen jatkamiseksi ja mittaukset lopetettiin 11.4.1980. [6, s. 52]

Neuvostoliitto piti epäonnisten Mars 1 – Mars 7 -luotaintensa jälkeen pitkän tauon Marsin tutkimisessa, mutta 1980-luvun lopulla Marsia kohti lähetettiin jälleen kuitenkin taas kaksi luotainta, jotka saivat nimikseen Phobos 1 ja Phobos 2 Marsin suurimman kuun Phoboksen mukaan. Taaskaan Neuvostoliitolla ei ollut onni matkassa, sillä vaikka molemmat luotaimet saatiin laukaistua matkaan onnistuneesti, niin Phobos 1 vaikenä jo alkumatkalla. Tämä tapahtui, kun sille lähetettiin vahingossa väärä käsky, joka ei käynnistänytkään aiotusti gammaspektrometriä, vaan käänsi luotaimen väärään asentoon niin, että luotaimen aurinkopaneelit eivät enää osoittaneetkaan Aurinkoa kohti,

jolloin luotaimen akut vähitellen tyhjenivät, ja yhteys katkesi 2.9.1988 mennessä. [7, s. 197] Phobos 2 -luotain sen sijaan pääsi Marsin lähetyville ja alkoi kiertää Marsia alkuvuodesta 1989. Yhteys tähänkin luotaimen menetettiin kuitenkin juuri, kun luotain lähestyi lentonsa huippukohtaa - Phoboksen lähiohitusta. Ilmeisesti luotaimen päätietokone hajosi kesken Phoboksen kuvausjakson ja tuloksena oli, että luotain ehti suorittaa kunnianhimoisesta missiostaan ainoastaan Marsin lähiympäristön tutkimusjakson sekä Marsin suurimman kuun Phoboksen kaukokuvaamisen [6, s. 68].

Phobos 1 ja Phobos 2 -luotaimissa oli mukana osittain suomalaistakin tekoa oleva LIMA-D -mittalaite, jonka piti Phoboksen lähiohituksen aikana, jolloin etäisyys Phoboksen pinnasta piti olla ainoastaan 30-80 metriä, pommittaa Phoboksen pintaa laservalopulsseilla, jotka sitten höyrystäsivät Phoboksen pinnasta erilaisia ioneja. Tutkimalla näin saatujen ionien jakaumaa oli tarkoitus saada yksityiskohtaista tietoa Phoboksen pinnan rakenteesta. Phobos 2 -luotain kuitenkin sammui päätietokoneensa hajoamiseen juuri ennen kuin Phoboksen lähiohitus piti suorittaa, ja näinollen mitään mittauksia LIMA-D -mittalaitteeltaakaan ei saatu. [6, s. 265-274]

Venäjän seuraava yritys tutkia Marsia oli suuri Mars 96 -luotain. Kyseinen luotain oli kansainvälinen hanke, jossa Suomikin oli mukana pienten Marsin pinnalle laskeutuviksi aiottujen pinta-asemien kehitystyössä. Aluksi luotaimen nimi oli Mars 92 ja nimeä Mars 94 käytettiin myös, kun luotaimen laukaisu viivästyi rahoitusongelmien vuoksi. Karttusen kirjoittama kirja kertoo, miten aikanaan huippuhienoa luotainta valmisteltiin Baikonurin kosmodromissa jopa kynttilänvalossa, sillä sähköyhtiö katkaisi välillä sähköt maksamattomien laskujen vuoksi [7, s. 198].

Lopulta kuitenkin Mars 96 laukaistiin 16.11.1996 venäläisellä Proton-kantoraketilla, joka sinänsä toimi moitteettomasti ja luotain pääsikin hyvin matalalle Maata ympäröivälle radalle, mutta raketin viimeinen neljäs vaihe ei kuitenkaan käynnistynyt toistamiseen, koska se ei saanut ohjelmistovirheen vuoksi käynnistyskomentoa. Näin ollen viimeinen ratkaiseva kiihdytys, joka olisi lähettänyt luotaimen Marsia kohti jäi tekemättä, ja luotain jäi hyvin matalalle Maata ympäröivälle radalle, josta se putosi ilmakehän jarruttavan vaikutuksen vuoksi takaisin Maan pinnalle jonnekin Chilen ja Bolivian rajan tuntumassa oleville Andien vuorille. [7, s. 198]

Yhdysvaltain seuraava yritys tutkia Mars-planeettaa, 17 vuotta Viking-ohjelman laukaisujen jälkeen, oli surullisenkuuluisa Mars Observer -luotain. Luotain oli noin miljardi dollaria maksanut jättihanke, jonka oli tarkoitus tutkia Marsin geologiaa, topografiaa, magneettikenttää ja Marsin kaasukehän sisältämän pölyn liikkeitä Marsia ympäröivältä radalta käsin. Vaikka luotain laukaistiinkin onnistuneesti matkaan 25. 9. 1992, ja sen lento kohti Marsia sujui pitkälti suunnitelmien mukaan, niin ongelmia alkoi ilmetä kolme päivää ennen Marsiin saapumista, kun polttoainetankit piti paineistaa. Koska paineistamisen pelättiin aiheuttavan mahdollisesti häiriöitä luotaimen

radioliikenteeseen, niin luotaimen radioyhteys katkaistiin tankkien paineistamisen ajaksi. [6, s. 56]

Radioyhteyskatkoksen oli tarkoitus kestää vain vähän aikaa, mutta radioyhteyttä luotaimen ei enää koskaan saatu palautettua takaisin. Epäonnistumista tutkimaan asetettiin komitea, joka loppulausunnossaan totesi, että onnettomuuden todennäköinen syy oli ilmeisesti se, että luotaimen rakettipolttoaineen tiivisteet olivat pitkän matkan aikana hieman vuotaneet, ja kun polttoainesäiliöt paineistettiin, niin polttoaineputkistossa ollut aiemmin höyrystynyt polttoaine räjähti aiheuttaen välittömästi vaurioita luotaimen elintärkeille osille. Lisäksi räjähdys saattoi luotaimen epänormaaliin pyörimisliikkeeseen, mikä vain pahensi ongelmaa. Ilmeisesti luotaimen radiolaitteisto tai sitä ohjaava elektroniikka vahingoittui tässä tapahtumasarjassa, eikä radioyhteyttä luotaimen enää koskaan saatu palautettua, vaikka radioyhteyskatkoksen oli alunperin tarkoitus kestää vain yhdeksän minuuttia. [6, s. 56]

Mars Observerin hävittyä tietymättömiin NASA:n silloinen johtaja Daniel Gould alkoi ajaa planeettatutkimukseenkin ”enemmän, paremmin, halvemmalla” -ideologiaa. Enää ei olisi varaa tehdä jättihankkeita, jotka saattaisivat kadota jäljettämiin hyvinkin pienestä syystä, vaan tarkoituksena oli lähettää useampia luotaimia, jotka kukin suorittaisivat omat osatehtävänsä, ja jos jokin yksittäinen luotain menetettäisiinkin, niin se voitaisiin kuitenkin korvata ajan mittaan seuraavalla, joka saattaisi tehdä puuttuvat mittaukset ja ehkä ylittääkin siihen kohdistetut odotukset.

Eräs hyvä esimerkki tämän ideologian onnistumisesta oli Mars Pathfinder -luotain. Kyseinen luotain lähetettiin kohti Marsia 4.12.1996 ja se saapui perille Marsin pinnalle 4.7.1997. Luotaimessa kokeiltiin ainakin kahta täysin uutta tekniikkaa. Ensimmäinen luotain saapui Marsin kaasukehään suoraan ulkoavaruudesta ja käytti ilmajarrutukseksi kutsuttua tekniikkaa, jossa luotaimen liike-energiaa muutettiin Marsin kaasukehän aiheuttaman kitkan avulla lämpöenergiaksi. Luotaimen lämpökilpi kuumentui ja osittain höyrystyi Marsin kaasukehään saavuttaessa. Kun luotaimen vauhti oli tarpeeksi hidastunut, niin voitiin avata ylitääninopeudessakin toimiva laskuvarjo, joka hidasti luotaimen menoa vielä lisää. Marsin kaasukehä on kuitenkin hyvin ohut ja vaikka luotaimessa olikin suuri laskuvarjo, niin luotaimen laitteet olisivat todennäköisesti tuhoutuneet törmäyksessä Marsin pinnan kanssa, ellei luotain olisi käyttänyt ilmatyynyjä iskun vaimentamiseksi. Ilmatyynyjä ei ollut koskaan aikaisemmin käytetty toisen planeetan pinnalle laskeuduttaessa mutta ne toimivat kuitenkin erinomaisesti. [6, s. 58-59]

Tömhädettyään Marsin pinnalle luotain pomppi ja kieri vielä vähän aikaa ennen kuin se pysähtyi – sattumalta aivan oikeaan asentoon, eikä luotaimen tarvinnut alkaa ponnistaa väärästä asennosta pystyyn. Mars Pathfinder -luotaimessa oli vielä kolmaskin uutuus, nimittäin Sojourneriksi kutsuttu pieni mönkijä, joka ajoi laskeutumisramppia pitkin

luotaimen päältä alas tutkimaan lähialueen kiviä. Vaikka emoluotaimen käyttöiäksi oli suunniteltu korkeintaan yhtä kuukautta ja mönkijän käyttöiäksi yhtä viikkoa, niin Pathfinder ja Sojourner toimivat Marsin pinnalla noin kolme kuukautta ja Sojourner ehti analysoida APXS-spektrometrillään 16 marsilaista kiveä. Lisäksi Sojourner lähetti Maahan emoluotaimensa välityksellä 550 kuvaa Marsin pinnalta. Itse Pathfinder-luotainkin kuvasi paljon ympäristöään ja teki noin 8 000 000 mittausta laskeutumispaiikalla vallinneista paineesta, lämpötilasta ja tuulen nopeudesta.

Noin kolmen kuukauden toimintajakson kuluttua Pathfinderin akut lopulta menivät liian heikkoon kuntoon jatkuvasta varaamisesta ja purkamisesta, ja tämän seurauksena luotaimen lämpötila laski Marsin yön aikana liian alas ja emoluotaimen kylmälle herkät laitteet menivät epäkuntoon, eikä radioyhteyttä Maahan enää saatu toimimaan. Kiinnostava yksityiskohta on kuitenkin se, että Sojourner-mönkijä toimi Marsin pinnalla pidempään kuin emoluotaimensa. Sojourner oli ohjelmoitu siten, että jos yhteys Pathfinderiin katkeaisi, niin Sojourner jäisi ajamaan kehää emoluotaimensa ympärillä odottaen uusia käskyjä. Kukaan ei tiedä, kuinka kauan Sojourner ajoi ympyrää Pathfinderin ympärillä ennenkuin senkin laitteet menivät epäkuntoon ja mönkijänkin meno pysähtyi.

Japanin ensimmäinen yritys tutkia Mars-planeettaa oli luotain, joka sai onnistuneen 4. 7. 1998 tapahtuneen lähtönsä jälkeen nimekseen Nozomi, joka merkitsee suomeksi toivoa. Vaikka luotain saatiinkin onnistuneesti Maata ympäröivälle radalle, niin sen täytyi kuitenkin suorittaa kaksi Kuun ohilentoa saadakseen lisää nopeutta Marsia kohti vievälle planeettainväliselle radalle siirtymistä varten. Luotain suoritti ratkaisevan kiihdytyspoltonsa ja sen kuviteltiin hetken ajan olevan matkalla kohti Marsia, mutta kun japanilainen lennonjohto sai joulukuun 1998 lopussa mitatuksi luotaimen nopeuden, he huomasivat, että Kuun ohilennot ja luotaimen päämoottorin kiihdytyspolto eivät olleetkaan olleet niin tehokkaita kuin japanilaiset olivat alunperin laskeneet, koska ratkaisevan kiihdytyspolton aikana eräs venttiili oli jäänyt väärään asentoon. Japanilaiset lennonjohtajat olisivat halunneet antaa luotaimelle lisävauhtia mutta tarkemmat laskelmat osoittivat kuitenkin pian, että lisäkiihdytykseen ei ollut varaa. Tarvittava luotaimen nopeuden lisäys olisi kuluttanut niin paljon polttoainetta, että luotain ei olisi enää kyennytkään asettumaan Marsia ympäröivälle radalle ja pääosa luotaimen tieteellisistä tehtävistä olisi jäänyt suorittamatta. Kuukauden miettimisen jälkeen löydettiin kuitenkin lopulta eräs mutkikas lentorata, jonka avulla Nozomi olisi päässyt Marsia tutkimaan lopulta vuoden 2003 lopussa, kun lisävauhtia olisi ensin haettu Maan ohilennolla vuonna 2002.

Tarvittava Maan ohilento toteutettiin, mutta keväällä 2002 voimakas auringonpurkaus tuhosi osan luotaimen laitteistoista, eikä luotaimen yhteydenpidossa tärkeää kantoaallon modulaatiota enää saatu toimimaan. Lennonjohto saattoi kuitenkin edelleen viestiä luotaimen kanssa pätkimällä itse kantoaaltoa päälle ja pois päältä, mutta

yhteydenpito tällä tekniikalla oli kuitenkin hidasta ja hankalaa. Lopulta vuoden 2003 loppuun suunniteltu Marsia ympäröivälle radalle asettuminen muutettiin pelkäksi Marsin ohilennoksi ja yhteydenpito luotaimen kanssa lopetettiin ohilennon jälkeen [12, s. 95-98].

Mars Climate Orbiter oli NASA:n luotain, jonka tarkoituksena oli tutkia Marsin säätä ja kaasukehää noin kahden Maan vuoden ajan. Luotain laukaistiinkin onnistuneesti matkaan 11.12.1998 ja sen lento kohti Marsia näytti sujuvan hyvin niin kauan kuin luotaimen paikanmääritys tehtiin ainoastaan tähtien ja luotaimen omien tietokonelaskujen perusteella. Kun luotain sitten oli jo lähestymässä Marsia ja sen ottamien kuvien perusteella voitiin tehdä paikanmääritys myös itse Marsin suhteen, saatiinkin tulos, jonka mukaan luotain joutuisi liian lähelle Marsia yrittäessään asettua sitä ympäröivälle radalle. Kun aluksen pelastustoimia vasta suunniteltiin, niin luotain aloitti Marsia ympäröivälle radalle siirtymisensä aikataulun mukaisesti mutta joutui liian syväälle Marsin kaasukehään ja sen laitteistot rikkoutuivat, eikä luotaimesta kuultu enää mitään. Syy onnettomuuteen selvisi kuitenkin pian: matkalla kohti Marsia tehdyt pienet radankorjaukset olivat olleet väärän suuruisia, koska luotainta suunniteltaessa oli sekoitettu SI-järjestelmän mukaiset Newtonsekunnit ja brittiläiset paunat keskenään. NASA oli koko ajan olettanut, että luotaimen radankorjauksissa käytetyt impulssit lasketaan NASA:n ohjeiden mukaisesti Newtonsekunteina mutta luotaimen rakentaja Lockheed Martin olikin käyttänyt luotainta suunniteltaessa impulssin yksikköinä paunoja. Tämän vuoksi luotaimen radankorjaukset olivat olleet oikeansuuntaisia mutta suuruudeltaan väärä, ja luotain ajautui liian lähelle Mars-planeettaa ja tuhoutui liian suuren aerodynaamisen vastuksen vuoksi. [13, s. 69-72]

Mars Polar Lander oli NASA:n lähettämä Mars-luotain, jonka tarkoituksena oli laskeutua ensimmäistä kertaa Marsin napa-alueelle. Luotain lähetettiin matkaan onnistuneesti 3.1.1999 ja se pääsi aivan Marsin pinnan läheisyyteen ehjänä, mutta tämäkin luotain menetettiin lopulta yksinkertaisen suunnitteluvirheen vuoksi. Luotaimen laskeutumisen loppuvaiheessa luotaimen nopeutta Marsin pinnan suhteen hidastettiin erityisillä jarruraketeilla, ja niiden toiminnan oli määrä loppua, kun luotain tömähttäisi Marsin pintaan. Luotain avasi kuitenkin laskeutumisjalkansa jo melko korkealla Marsin kaasukehässä, ja niiden avaamisesta aiheutui kova sysäys luotaimen. Luotaimen anturit ilmeisesti tulkitsivat tämän tärahdyksen olevan merkki luotaimen perillepääsystä ja sen jarrurakettimoottorit lopettivat toimintansa liian aikaisin ja luotain putosi loppumatkan kuin kivi ja murskautui Marsin pintaan. [13, s. 72-74]

Seuraavalla sivulla alkavassa taulukossa esitetään keskeiset Marsia tutkineet luotaimet 1960-luvulta vuoteen 2000 asti ja siinä esiintyvä lyhenne NL tarkoittaa entistä Neuvostoliittoa.

Taulukko 1. Alla oleva taulukko on mukailtu lähteestä [6, s. 45] löytyvästä taulukosta.

Laukaisu- päivämäärä	Maa	Nimi	Kuivamassa / kg	Päätulokset
1.11.1962	NL	Mars 1	890	Lensi Marsin ohi 200 000 km päästä.
5.11.1964	USA	Mariner 3	261	Lähti väärään suuntaan lähdön jälkeen.
28.11.1964	USA	Mariner 4	261	Nappasi ensimmäiset kuvat Marsista.
24.2.1969	USA	Mariner 6	412	Lähetti kuvia Marsista. Lensi planeetan ohi.
27.3.1969	USA	Mariner 7	412	Lähetti kuvia Marsin pinnasta.
19.5.1971	NL	Mars 2	2265	Pääsi Marsia ympäröivälle radalle. Laskeutuja murskautui Marsin pintaan.
28.5.1971	NL	Mars 3	2265	Pääsi Marsia ympäröivälle radalle. Laskeutuja onnistui laskeutumaan Marsin pinnalle mutta toimi siellä vain noin kaksi minuttia.
30.5.1971	USA	Mariner 9	559	Pääsi Marsia ympäröivälle radalle ja toimi siellä peräti 349 vuorokautta. Suoritti ensimmäisen Marsin kokonaiskartoituksen.
21.7.1973	NL	Mars 4	2270	Koska jarrutusmoottorit eivät toimineet, Mars 4 ohitti Marsin noin 10 000 km päästä.
25.7.1973	NL	Mars 5	2270	Toimi yhdeksän vuorokautta Marsia ympäröivällä radalla. Lähetti takaisin Maahan 60 kuvaa.
5.8.1973	NL	Mars 6	1200	Laskeutuja mittasi Marsin kaasukehän pystyprofiilin. Tiedot lähetettiin onnistuneesti emoluotaimelle mutta laskeutuja murskautui osuessaan Marsin pintaan.
9.8.1973	NL	Mars 7	1200	Laskeutuja lensi Marsin ohi.
20.8.1975	USA	Viking 1	1473	Mittauksia Marsin pinnalta. Menestykselliset mittausjaksot kestivät useita vuosia.
9.9.1975	USA	Viking 2	1473	Onnistui laskeutumaan Marsin pinnalle ja toimimaan siellä

				useita vuosia.
7.7.1988	NL	Phobos 1	2600	Yhteys luotaimeen menetettiin jo matkalla kohti Marsia luotaimelle lähetetyn väärän komennon seurauksena.
12.7.1988	NL	Phobos 2	2600	Yhteys luotaimeen menetettiin juuri, kun luotain oli lähestymässä ja kuvaamassa matkan pääkohdetta eli Marsin Phoboskuuta.
25.9.1992	USA	Mars Observer	1018	Yhteys luotaimeen menetettiin, kun luotain oli lähestymässä Marsia.
16.11.1996	Venäjä	Mars 96	3159	Hävisi jäljettömiin epäselvissä olosuhteissa.
7.11.1996	USA	Mars Global Surveyor	1030	Pääsi lopulta halutunlaiselle Marsia ympäröivälle radalle. Toimi Marsin ympäristössä lähes 10 vuoden ajan.
4.12.1996	USA	Mars Pathfinder	463	Laskeutui 4.7.1997 Marsin pinnalle ja toimi siellä noin kolme kuukautta.
4.7.1998	Japani	Nozomi	258	Luotain kohtasi lentonsa aikana monia vaikeuksia, eikä lopulta kyennytkään edes asettumaan Marsia ympäröivälle radalle.
11.12.1998	USA	Mars Climate Orbiter	338	Luotain tuhoutui Marsin kaasukehässä ilmajarrutuksen aikana, koska matkan aikana suoritettujen radankorjaukset olivat olleet väärän suuruisia. Brittiläiset paupt ja Newtonsekunnit menivät luotainta suunniteltaessa sekaisin.
3.1.1999	USA	Mars Polar Lander	519	Laskeutuja tuhoutui laskeutumisen aikana suunnitteluvirheen seurauksena. Jarruraketien poltto päättyi liian aikaisin.

3 Marsin kaasukehä

Tässä luvussa kerrotaan yleisiä asioita Marsin ympärillä olevasta ohuesta kaasukehästä. Tarkastelun kohteena ovat muun muassa kaasun koostumus, paine ja tiheys sekä Marsin kaasukehässä silloin tällöin esiintyvät pölymyrskyt. Luvun lopulla paneudutaan Marsin kaasukehässä tapahtuvan aerosolioptiikan eräisiin perusilmiöihin ja niiden selityksiin.

3.1 Marsin kaasukehän koostumus, paine ja tiheys

Marsilla on ympärillään ohut kaasukehä, joka koostuu pääasiassa hiilidioksidista, jota on kaasukehässä noin 95 tilavuusprosenttia. Lisäksi Marsin kaasukehässä on pienempiä määriä muita kaasuja kuten esimerkiksi typpeä noin 2,7 prosenttia ja argonia 1,6 prosenttia. [6, s. 202] Marsin kaasukehä sisältää toki muitakin kaasuja mutta niiden osuudet kaasukehän tilavuudesta ovat huomattavasti pienemmät kuin näiden pääasiallisten kaasukomponenttien. Muista kaasuista, joita Marsin kaasukehästä myös löytyy, mainittakoon vesihöyry, jota on vaihtelevia määriä mutta kuitenkin niin paljon, että suhteellinen ilmankosteus Marsin kaasukehässä ylittää paikoitellen 100 prosenttia, mistä johtuu se, että Marsin kaasukehässä on havaittu ajoittain olevan vesijääkiteistä koostuvia vaaleita pilviä. Marsin kaasukehässä on myös hiilidioksidijääkiteistä muodostuneita pilviä ja myös sellaisia pilviä tavataan, jotka ovat muodostuneet sekä vesi- että hiilidioksidijääkiteistä.

Marsin kaasukehän paine pinnalla vaihtelee pinnankorkeuden ja vuodenajan mukaan. Syvällä Hellaksen altaassa paine voi hyvinkin olla jopa 12-14 millibaaria, mutta Marsin korkeimman vuoren Olympus Monsin huipulla paine jää tyypillisesti noin yhteen millibaariin. [6, s. 206-207] Keskimääräinen Marsin kaasukehän pintapaine Marsin tasangoilla on kuitenkin noin kuusi millibaaria. Tässä esiintyy kuitenkin huomattavia Marsin vuodenajoista johtuvia vaihteluita, koska Marsin talven aikana hiilidioksidi härmistyy suoraan kaasukehästä hiilihappojääksi Marsin napa-alueelle. Tämän vuoksi paine jossakin paikassa Marsin pinnalla voi vaihdella vuodenajasta riippuen jopa joitakin kymmeniä prosentteja [6, s. 206].

Kiinnostavaa Marsin kaasukehässä on muun muassa myös se, että kaasukehän keskimääräinen pintapaine, noin kuusi millibaaria, asettuu veden kolmoispiesteeseen, [6, s. 206] ja jos lisäksi lämpötila nousee nollan paikkeille Celsius-asteikolla mitattuna, kuten tapahtuukin Marsin päiväntasaajan seuduilla silloin tällöin. Aineen kolmoispieste tarkoittaa sellaista paine- ja lämpötilayhdistelmää, jossa aineen – tässä tapauksessa divetymonoksidin - kaikki kolme pääasiallista olomuotoa, kiinteä, neste ja kaasu ovat tasapainossa keskenään ja aine voi muuttua olomuotoaan vaivattomasti näiden kaikkien kolmen olomuodon välillä. Tämä tarkoittaa sitä, että Marsissa voi olla ajoittain vettä

myös nestemäisessä olomuodossa ja itse asiassa muun muassa Curiosity-mönkijän viimeaikaiset tutkimustulokset antavat ymmärtää, että Marsissa on muinoin ollut paljon nykyistä paksumpi kaasukehä ja nestemäistä vettä on suorastaan virrannut planeetan pinnalla.

3.2 Marsin pölypaholaiset ja suuret pölymyrskyt

Koska Marsissa on kuivempaa ja pölyisempää kuin millään Maan aavikolla, niin pinnasta melko helposti leijaillemaan lähtevä pöly vaikuttaa merkittävästi Marsin ilmastoon. Pienessä mittakaavassa pinnalla esiintyy pölypaholaisia (dust devils), jotka siirtelevät hienojakoista ainesta paikasta toiseen. Itse asiassa eräässä lukemassani väitöskirjassa [10, s. 21] todetaan, että Määttäsen mielestä Marsin pinnalla tavallisesti puhaltavat tuulet ovat liian heikkoja siirtelemään Marsin pinta-aineen karkeita hiukkasia paikasta toiseen ja hänen mielestään hienojakoisen pölyn nouseminen Marsin pinnalta kaasukehään on todennäköisesti mahdollista vain, jos pölypaholaisissa olevat voimakkaat kaasuvirtaukset alkavat liikuttaa Marsin pintahiekan karkeita partikkeleita ja sitten nämä hiukkaset törmäilevät pienempiin hiekanjyväsiin ja irrottavat niitä pinnasta. Tätä prosessia kutsutaan suomeksi ”saltaatioksi”. Tämän jälkeen pölypaholaisten sisältämät voimakkaat pystysuuntaiset virtaukset nostavat hienojakoisen pölyn Marsin kaasukehään, jossa pöly voikin havaintojen mukaan pysyä jopa viikkokausia.

Suuremmassa mittakaavassa Marsin ilmastoa muokkaavat suuret pölymyrskyt, joita esiintyy yleensä silloin, kun Mars on juuri ohittanut perihelinsä eli lähimmän pisteensä Auringosta radallaan Auringon ympäri. Tämä on ymmärrettävissä esimerkiksi sitä kautta, että kun planeetta Mars tulee radallaan lähemmäksi Aurinkoa, niin sen pinta alkaa saada yhä enemmän lämpösäteilyä Auringosta osakseen. Tämä puolestaan aiheuttaa pinnasta ylöspäin nousevia lämpimiä kaasuvirtauksia, jotka voivat muodostaa edellä kuvattuja pölypyörteitä. Kun pyörteitä alkaa ilmaantua enemmän ja enemmän, niin ne voivat liittyä vähitellen yhteen ja muodostaa yhdessä yhä suurempia ja suurempia pölymyrskyjä. Marsin suuret pölymyrskyt voivatkin saada valtavat mittasuhteet ja peittää alleen pahimmillaan lähes kaikki planeetan pinnalta avaruuteen tavallisesti näkyvät yksityiskohdat.

Esimerkiksi vuonna 1971 riehunut suuri pölymyrsky peitti alleen lähes kaikki Marsin pinnan yksityiskohdat [9] ja myrskyn riehussa pahimmillaan Marsia tutkimaan saapuneet neuvostoliittolaiset Mars-luotainsarjan luotaimet Mars 2 ja Mars 3 lähettivät laskeutujansa pölymyrskyn sekaan ja kuvasivat planeetan pölypilviä pinnan yksityiskohtien sijasta, sillä neuvostoliittolaisissa luotaimissa elektroniikka oli niin alkeellista, että luotaimia ei voinut enää lähdön jälkeen uudelleenohjelmoida. [3, s. 59-60] Sen sijaan yhdysvaltalaisen Mariner 9 -luotaimen keskustietokone oli uudelleenohjelmoitavissa ja yhdysvaltalaiset tutkijat lähettivätkin luotaimelle komennot,

jotka viivästyttivät kuvausjakson aloittamista, kunnes pölymyrsky oli ehtinyt asettua ja Marsin pinnan yksityiskohdat alkoivat jälleen olla näkyvissä [3, s. 60] .

3.3 Marsin kaasukehän aerosolioptiikan perusilmiöitä

Todettakoon tässä yhteydessä, että Marsin pinnalta saatujen kuvien mukaan Marsin kaasukehä ei koskaan omaa Maan ilmakehälle niin ominaista sinistä perusväriä. Sen sijaan Marsin kaasukehä näyttää pinnalta katsottuna vaalean ruskealta tai jopa oranssilta, mikä johtuu nimenomaan kaasukehässä koko ajan leijailevasta pölystä. Itse asiassa Maan ilmakehän tunnusomainen sininen väri johtuu niin sanotusta Rayleighin sironnasta. Lordi Rayleighin 1800-luvun lopulla kehittämän sironnateorian mukaan, mikä toimii silloin, kun valoa sirottavien partikkeleiden koko on hyvin pieni, sironnan intensiteetti on kääntäen verrannollinen siroavan valon aallonpituuden neljänteen potenssiin. Tästä voidaan päätellä, että vaikka näkyvän valon aallonpituusalue onkin varsin kapea, suuruusluokkaa 390-780 nanometriä [14, s. 77], niin kuitenkin Maan ilmakehässä sininen valo, jonka aallonpituus on pienempi kuin punaisen valon, siroaa jopa noin 16 kertaa voimakkaammin kuin punainen valo [18, s. 360] ja niinpä Maan taivas näyttääkin päiväsaikaan perusväriltään sinertävältä, elleivät Maan ilmakehässä niin usein esiintyvät pilvet tule väliin ja häiritse tämän havainnon tekemistä.

Kun Marsin pinnalle ehjänä ja toimintakuntoisena saapuneet laskeutujaluotaimet ovat kuvanneet Marsilaisia auringonlaskuja, niin näistä kuvista on voitu selvästi huomata, että laskevan auringon yllä esiintyy melko voimakas sinertävä kajo. Tämäkin seikka kertoo siitä, että Marsin ohuessa kaasukehässä täytyy olla varsin paljon pölyä, koska itse asiassa eräistä 1880-luvun alkupuolella maalatuista maalauksista voi huomata, että maapallollakin on joskus esiintynyt sinertäviä auringonlaskuja. Näiden maalauksien tapauksessa on kuitenkin kyse ilmeisesti siitä, että vuonna 1883 Krakataun tulivuori purkautui räjähdysmäisesti ja kokonainen saari hävisi maailmankartalta. Tämän harvinaisen voimakkaan tulivuorenpurkauksen seurauksena Maan ilmakehään levisi todella paljon eri kokoisia tuhkapartikkeleita ja Krakataun näkökulmasta kaukaisessa Britanniassakin saatiin jonkin aikaa nauttia erikoisen värisistä auringonlaskuista.

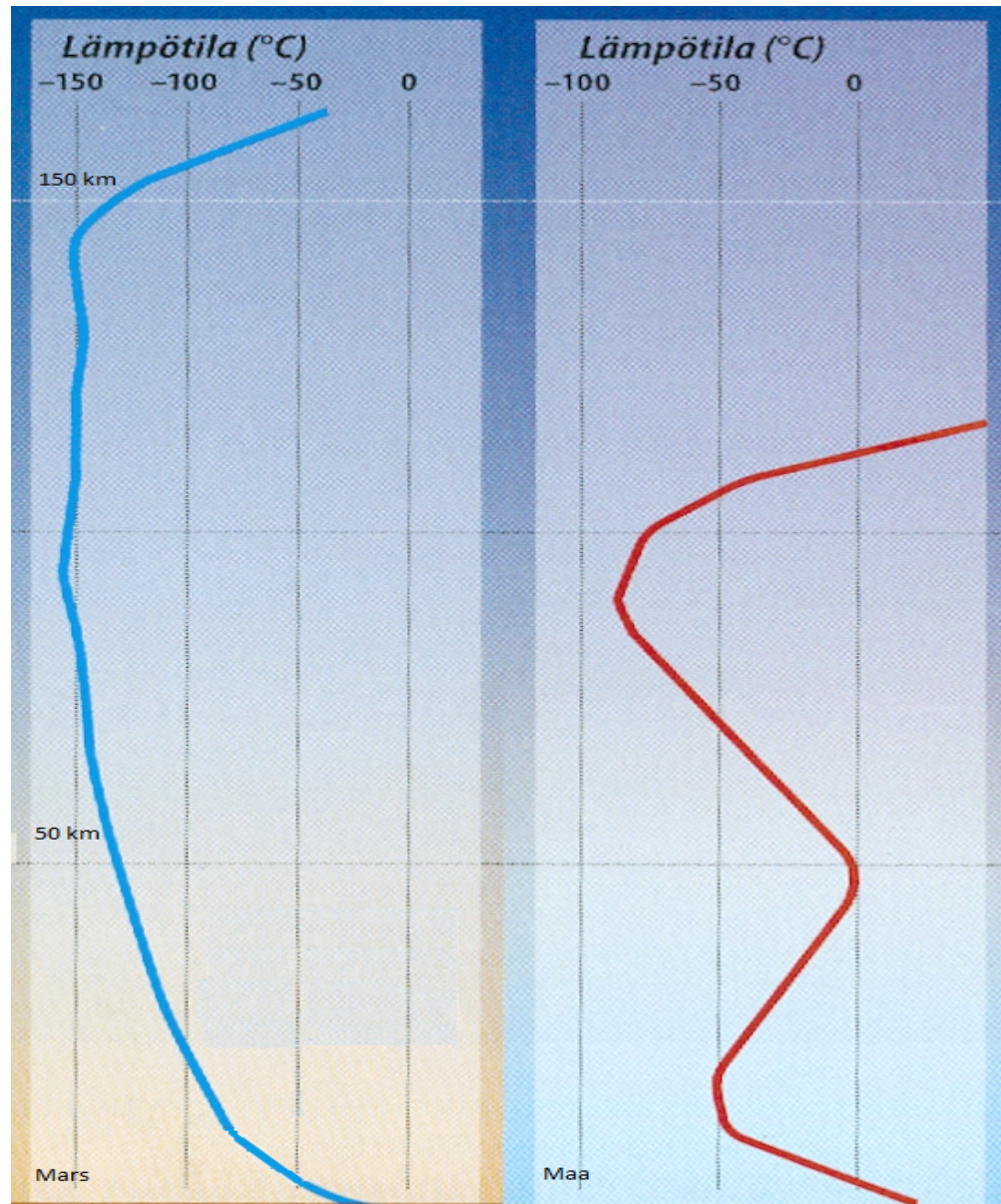


Kuva 3. Auringonlasku Gusevin kraaterissa NASA:n Spirit-mönkijän kuvaamana [11]. Kuvasta erottuu hyvin myös marsilaisille auringonlaskuille tyypillinen auringon suunnassa näkyvä sinertävä kajo, joka johtunee Marsin kaasukehän hiukkasista aiheutuvasta valon sironnasta.

Itse asissa se, että auringonlaskut ja joskus jopa Kuukin saattavat näyttää Maan pinnalta katsottuna sinertäviltä johtuu ilmaan esimerkiksi tulipaloista päässeistä alle mikrometrin halkaisijaltaan olevista savupartikkeleista. Marsin olosuhteista on puolestaan oletettu, että niissä Rayleighin sironnan vaikutus Marsin päivätaivaan väriin on varmaankin varsin vähäinen jo Marsin kaasukehän alhaisemman paineenkin vuoksi. Sen sijaan Marsin kaasukehässä käytännössä aina leijaileva pöly sirottaa ympärilleen punaista valoa ja tämän vuoksi marsilainen päivätaivas näyttääkin perusväriltään punertavalta tai jopa oranssilta. Sen sijaan marsilaisten auringonlaskujen yllä näkyvä sinertävä kajo selittyy sillä, että Auringosta tuleva valo on tällöin kulkenut jo suhteellisen pitkän matkan Marsin kaasukehässä ja siinä leijaileva pöly on jo ehtinyt sirottamaan aallonpituudeltaan pitkät punertavat värisävyt pois auringonvalosta ja näinollen marsilaiset auringonlaskut näyttävätkin enemmän tai vähemmän sinertäviltä, kuten yllä oleva Spirit-mönkijän ottama kuvakin osoittaa [19] ja [20].

Tämän työn eräs keskeinen tutkimustulos liittyy Marsin kaasukehän sekoittumiskorkeuteen. Kun Maan ilmakehässä sekoittumiskorkeus on yleensä vain noin kilometrin luokkaa ja korkeintaan kaksi kilometriä, niin erään lähteen [26] mukaan Marsin kaasukehän lämpötilaprofiileja kuvaavista kuvaajista voi päätellä, että Marsin olosuhteissa sekoittumiskorkeuden täytyy olla paljon suurempi kuin Maan ilmakehässä. Formisano ynnä muut [26] esittävät lämpötilan pystyprofiilin muotoja tunnin välein

marsilaisen päivän aikana. Kuvassa 4 on esitetty niistä yhdistelty periaatekuva.



Kuva 4. Tässä Marsin ja Maan kaasukehien lämpötiloja vertailevassa kuvassa näkyy kaasukehien lämpötilaprofiileiden merkittävä erilaisuus. Lähteestä [27] muokattu kuva.

Kuvasta 4 voi huomata, että Marsissa kaasun lämpötila laskee aluksi melko tasaisesti pinnalta ylöspäin mentäessä mutta Maan ilmakehän lämpötilakäyrä mutkittelee useita kertoa korkeuden funktiona.

4 Teoreettinen tausta ja tutkimuksen lähtökohdat

Tässä luvussa paneudutaan tämän työn kannalta keskeisiin teoreettisiin perusteisiin. Tarkastelun kohteena ovat pääasissa aerosolien mekaniikka ja sähköoppi. Luvun lopussa paneudutaan yksinkertaista monodisperssiä koagulaatiota kuvaavan Smoluchowskin differentiaaliyhtälön analyttiseen ratkaisemiseen tietyllä alkuehdolla.

4.1 Aerosolimekaniikkaa

Kun yli mikrometrin halkaisijaltaan oleva pallomainen hiukkanen alkaa pudota Maan ilmakehässä tyynessä ilmassa, niin se on aluksi kiihtyvässä liikkeessä maanpintaa kohti. Hiukkaseen vaikuttavat aivan aluksi vain painovoima ja Arkhimedeen lain mukainen nostevoima, mikä on yhtä suuri kuin hiukkasen syrjäyttämän väliainemäärän paino. Yleensä kuitenkin aerosolihukkasiin vaikuttava nostevoima on niin pieni suhteessa vallitsevaan painovoimaan, että se voidaan jättää ottamatta huomioon laskuissa.

Tämä asia voidaan kuitenkin perustella myös teoreettisesti. Jos tarkastellaan marsilaista aerosolihukkasta, joka on juuri aloittanut putoamisensa Marsin pintaa kohti tyynessä marsilaisessa kaasussa, niin hiukkaseen, jota ei tällä kertaa tarvitse edes olettaa pallomaiseksi, vaikuttavat ainoastaan Marsin vetovoima [4, s. 117] $G = m_p g_{Mars}$ ja Arkhimedeen lain mukainen nostevoima N , mikä on yhtä suuri kuin Marsin kaasukehässä putoavan aerosolihukkasen syrjäyttämän väliainemäärän paino eli Arkhimedeen lain mukaan [4, s. 119] on oltava voimassa

$$N = \rho_g V_p g_{Mars} \quad (4.1)$$

Symboli ρ_g tarkoittaa Marsin kaasukehän sisältämän kaasun tiheyttä yksiköissä, jonka lukuarvo on noin $0,020 \frac{kg}{m^3}$, V_p tarkoittaa marsilaisen aerosolihukkasen tilavuutta kuutiometreissä.

Lasketaan vielä nostevoiman ja marsilaisen aerosolihukkaseen kohdistuvan painovoiman suhde.

$$\frac{N}{G} = \frac{\rho_g V_p g_{Mars}}{m_p g_{Mars}} = \frac{\rho_g V_p}{m_p} \quad (4.2)$$

Marsilaisen aerosolihukkasen tiheydelle on [4, s. 119] voimassa

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (4.3)$$

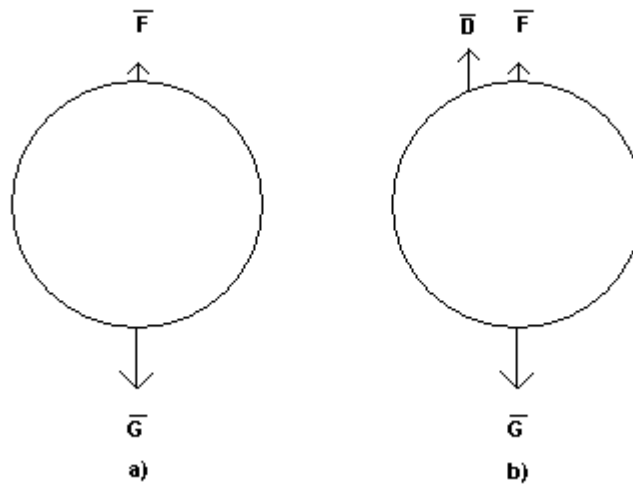
Kertomalla yhtälö (4.3) puolittain aerosolihiukkasen tilavuudella V_p saadaan

$$m_p = \rho_p V_p \quad (4.4)$$

Sijoittamalla yhtälön (4.4) tulos yhtälöön (4.2) voidaan sieventää nostevoiman ja marsilaisen painovoiman suhdetta vielä lisää.

$$\frac{N}{G} = \frac{\rho_g V_p}{m_p} = \frac{\rho_g V_p}{\rho_p V_p} = \frac{\rho_g}{\rho_p} = \frac{0,020 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = \frac{1}{110\,000} \quad (4.5)$$

Hetken kuluttua putoamisliikkeensä alkamisesta aerosolihiukkanen on ohittanut alussa olevan kiihtyvän liikkeen vaiheensa ja se putoaa tasaisella nopeudella kohti maanpintaa. Tällöin hiukkaseen vaikuttaa painovoiman lisäksi myös hiukkasen asettumisnopeuteen suoraan verrannollinen vastusvoima ja sanotaan, että kyseinen aerosolihiukkanen putoaa niin sanotulla Stokesin lain alueella, mikäli kyseiseen virtaustilanteeseen liittyvä Reynoldsin luku on pienempi kuin yksi.



Kuva 5. A-kohdan kuvassa aerosolihiukkanen on juuri aloittanut putoamisensa ja siihen vaikuttavat ainoastaan painovoima G ja nostevoima F . B-kohdassa hiukkanen putoaa jo tasaisella nopeudella ja siihen vaikuttaa myös vastusvoima D . Kuva löytyy lähteestä [24, s. 7].

Stokesin lain alueella putoavalle pallomaiselle yli mikrometrin halkaisijaltaan olevalle hiukkaselle voidaan johtaa asettumisnopeuden kaava, jonka brittiläinen fyysikko Stokes johti ensimmäistä kertaa jo 1850-luvulla. Kaavan johto on itsessään varsin hankala mutta onneksi lopputulos on kuitenkin varsin yksinkertainen. Aerosolihiukkasen

asettumisnopeudelle saadaan lopputulos [18, s. 46]:

$$V_{TS} = \frac{\rho_p d_p^2 g}{18 \eta} \quad (4.6)$$

Kaavassa V_{TS} tarkoittaa hiukkasen asettumisnopeutta metreinä sekunnissa, ρ_p tarkoittaa hiukkasen tiheyttä yksiköissä $\frac{kg}{m^3}$, d_p tarkoittaa hiukkasen halkaisijaa metreinä, g on vallitseva putoamiskiihtyvyyys, jonka lukuarvo on [4, s. 71] noin $9,81 \frac{m}{s^2}$ Maan pinnan lähistöllä olevissa olosuhteissa ja $3,71 \frac{m}{s^2}$ Marsin pinnan lähistöllä. Symboli η tarkoittaa hiukasta ympäröivän kaasun dynaamista viskositeettia, jonka lukuarvo on Maan ilmalle noin $1,8 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$ ja Marsin kaasukehän kaasulle (pääasiassa hiilidioksidille) on noin $1,42 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$.

Putoamiskiihtyvyyden lukuarvo Marsin pinnan lähistöllä voidaan laskea seuraavan yksinkertaisen tarkastelun avulla.

Yleisen gravitaatiovakion G lukuarvo on [4, s. 71] yksiköineen noin

$$G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2} .$$

Mars-planeetan säde r_{Mars} puolestaan on noin $r_{Mars} = 3397 \text{ km} = 3,397 \cdot 10^6 \text{ m}$. Toisaalta Mars-planeetan massa voidaan laskea Maa-planeetan massan avulla seuraavasti:

$$M_{Mars} = 0,1075 \cdot M_{Maa} = 0,1075 \cdot 5,974 \cdot 10^{24} \text{ kg} = 6,42205 \cdot 10^{23} \text{ kg} \quad (4.7)$$

Tämän alkuvalmistelun jälkeen voidaankin alkaa tarkastelemaan Marsin pinnan lähellä olevaa m-massaista kappaletta, joka on aluksi tietenkin tasaisesti kiihtyvässä putoamisliikkeessä Marsin pintaa kohti ja Mars-planeetan massasta aiheutuva painovoima toimii m-massaista kappaletta kiihdyttävänä voimana.

Yleisestä painovoimalaista seuraa tämän jälkeen seuraava yhtälö, koska m-massaiseen kappaleeseen vaikuttavan voiman suuruus täytyy olla yhtäsuuri kuin kyseessä olevaan kappaleeseen vaikuttava Marsin painovoima:

$$\frac{GmM_{Mars}}{r_{Mars}^2} = mg_{Mars} \quad (4.8)$$

Yllä oleva yhtälö (4.3) voidaan jakaa massalla m kun oletetaan, että massa m on suurempi kuin 0 kg. Tällöin putoamiskiihtyvyydelle saadaan suoraan seuraava yhtälö.

$$g_{Mars} = \frac{GM_{Mars}}{r_{Mars}^2} = \frac{6,67259 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2} \cdot 6,42205 \cdot 10^{23} kg}{(3,397 \cdot 10^6 m)^2} = 3,71 \frac{m}{s^2} \quad (4.9)$$

Jatkossa laskuissa tarvitaan myös kaasumolekyylien keskimääräistä vapaata matkaa λ , jonka lukuarvo on maanpinnan lähellä olevalle ilmalle noin $6,6 \cdot 10^{-8} m$ eli noin 66 nanometriä. Marsin pinnan lähistöllä olevissa olosuhteissa kaasumolekyylien keskimääräinen vapaa matka voidaan arvioida lähteen [17, s. 32] mukaisesti vaikkapa noin 5,16 mikrometriksi.

Kaasumolekyylin keskimääräinen vapaa matka ideaalikaasussa λ voidaan laskea seuraavan kaavan [15] avulla:

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi d^2 p} \quad (4.10)$$

Kaavassa k_B tarkoittaa Boltzmannin vakiota yksiköissä $\frac{J}{K}$, jonka tarkka arvo on noin $1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$, T tarkoittaa absoluuttista lämpötilaa Kelvineinä, d tarkoittaa kaasumolekyylin halkaisijaa metreissä ja p vallitsevaa painetta Pascaleina.

Mikäli aerosolihiukkasen halkaisija on maanpinnan lähellä olevissa olosuhteissa alle yhden mikrometrin, niin alkuperäistä Stokesin lakia tulee vielä korjata erityisellä Cunninghamin liukukorjauskertoimella C_c .

Allen ja Raabe tekivät aivan 1980-luvun alussa paljon kokeita erikokoisilla öljypisaroilla ja saivat johdettua Cunninghamin liukukorjauskertoimelle likimääräisen lausekkeen kaasumolekyylien vapaan matkan λ ja aerosolihiukkasen halkaisijan d_p funktiona. Kyseinen lauseke kuuluu seuraavasti [18, s. 49]:

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} (2,34 + 1,05 \cdot e^{-0,39 \cdot \frac{d_p}{\lambda}}) \quad (4.11)$$

Mikäli aerosolihiukkaset eivät olekaan muodoltaan pallomaisia, niin tällöin tulee ottaa huomioon myös hiukkasen dynaaminen muototekijä χ . Dynaamisen muototekijän lukuarvo on pallomaiselle hiukkaselle tasan 1,0 mutta mikäli hiukkasen muoto onkin tätä monimutkaisempi, niin dynaaminen muototekijä saakin ykköstä suurempia arvoja.

Alla olevassa taulukossa onkin taulukoituna aerosolihiukkasen dynaamisen muototekijän lukuarvoja Stokesin lain alueella erilaisille muodoille ja pölyille.

Taulukko 2. Alla oleva taulukko on mukailtu lähteestä [18, s. 52] lähteessä [24, s. 12] olevan taulukon mukaisesti.

Muoto	Dynaaminen muototekijä χ
Geometrinen muoto	
Pallo	1,00
Kuutio	1,08
Kompakti rypäs	
Kolme palloa yhdessä	1,15
Neljä palloa yhdessä	1,17
Erilaiset pölyt	
Bituminen hiili	1,05-1,11
Kvartsi	1,36
Hiekka	1,57
Talkki	1,88

Kun otetaan huomioon sekä Cunninghamin liukukorjauskerroin että hiukkasen dynaaminen muototekijä, niin aerosolihiukkasen asettumisnopeuden lauseke saa lopulta Stokesin lain pätevyysalueella muodon

$$V_{TS} = \frac{\rho_p d_p^2 g C_c(\lambda, d_p)}{18\eta\chi} \quad (4.12)$$

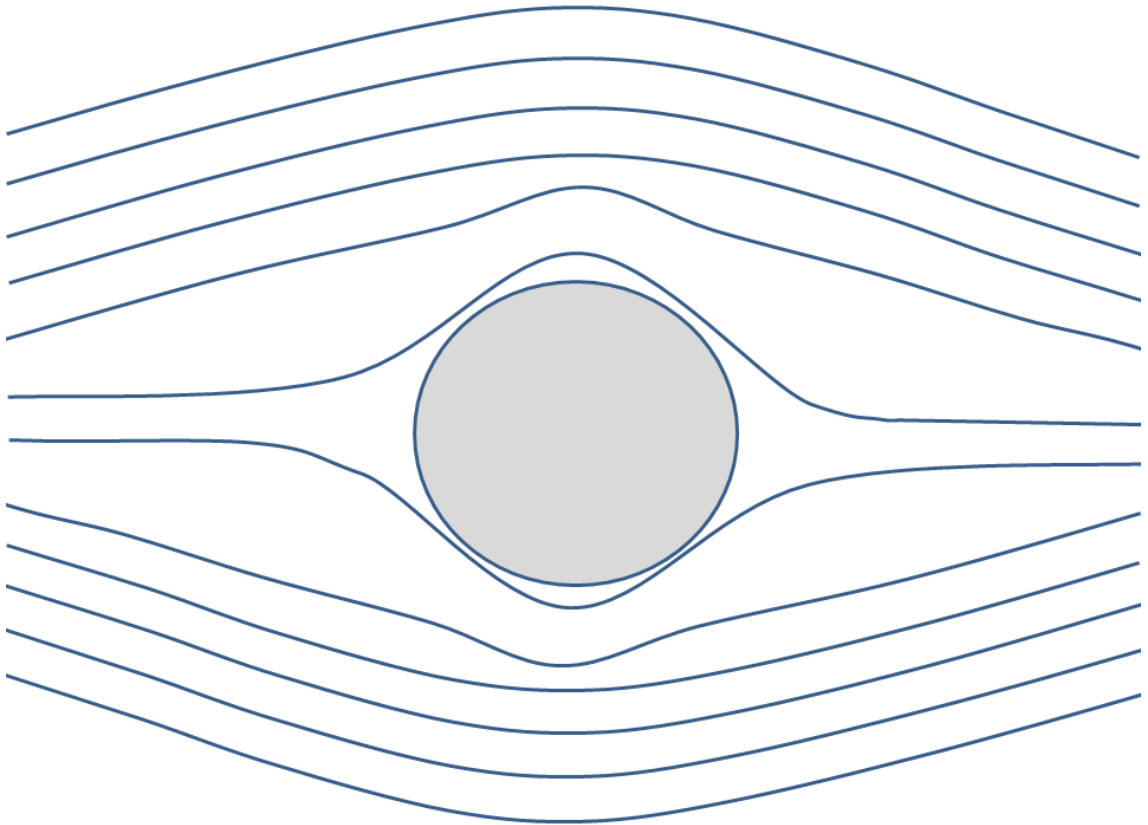
Yllä olevassa asettumisnopeuden kaavassa merkintä $C_c(\lambda, d_p)$ tarkoittaa sitä, että aerosolihiukkasen asettumisnopeus riippuu (voimakkaasti) sekä hiukkasta ympäröivän kaasun molekyylien keskimääräisestä vapaasta matkasta että hiukkasen halkaisijasta.

Koska ei ole aivan itsestään selvää, että hiukkanen putoaa laminaarisella virtausalueella, missä Stokesin laki on voimassa, niin aerosolifysiikan laskujen yhteydessä tulee aina laskea myös erityinen Reynoldsin luku, mikä on siis hiukkaseen vaikuttavien inertiaalisten ja kitkavoimien osamäärä [18, s. 28] :

$$\Re = \frac{\rho_g V_{TS} d_p}{\eta} \quad (4.13)$$

Dimensiottoman Reynoldsin luvun \Re kaavassa ρ_g tarkoittaa aerosolihiukkastasta ympäröivän kaasun tiheyttä, mikä on lukuarvoltaan noin $1,29 \frac{kg}{m^3}$ maanpinnan lähistöllä olevalle ilmalle. Vastaavasti Marsin pinnan lähistöllä leijailevalle lähestulkoon hiilidioksidikaasulle kaasun tiheys on vain noin $0,020 \frac{kg}{m^3}$. Mikäli Reynoldsin luku on pienempi kuin yksi, niin voidaan sanoa, että aerosolihiukkanen liikkuu turvallisesti

laminaarisella virtausalueella ja Stokesin vastuslaki on tällöin voimassa.



Kuva 6. Kuvassa on esitetty summittaisesti pallomaisen aerosolihiukkasen ympärillä kulkevat virtaviivat, kun Reynoldsin luku on pienempi kuin yksi.

4.2. Aerosoleihin liittyvää sähköoppia

Kun tarkastellaan sitä hypoteesia, että olisiko mahdollista, että Marsin kaasukehän tyypillinen karkea aerosolihiukkanen alkaisikin levitoimaan sähköisen poistovoiman ansiosta meidän on palattava hetkeksi takaisin aivan perusasioihin. Aloitetaan asian teoreettinen tarkastelu palauttamalla mieleen homogeenisen sähkökentän voimakkuuden määritelmä.

Homogeenisen sähkökentän voimakkuudelle on voimassa [21, s. 437] :

$$E = \frac{F}{q_p} \quad (4.14)$$

Suure E tarkoittaa sähkökentän voimakkuutta yksiköissä $\frac{V}{m}$, F tarkoittaa tässä tyypilliseen karkeaan marsilaiseen aerosolihiukkaseen kohdistuvaa sähköisen poistovoiman suuruutta Newtonina ja q_p tarkoittaa tyypillisen marsilaisen aerosolihiukkasen varausta Coulombeina.

Kaavassa (4.14) olevan voiman suuruus F voidaan olettaa yhtä suureksi kuin Marsin pinnan läheisyydessä vallitsevan painovoiman suuruus, koska edellä on osoitettu, että Arkhimedeen lain mukaisen nostevoiman suuruus marsilaiselle aerosolihiukkaselle on vain noin $\frac{1}{110000}$ osa Marsin pinnan lähistöllä vallitsevan painovoiman suuruudesta, joten se voidaan jättää ottamatta huomioon laskuissa ainakin tällä kertaa.

Saadaan siis seuraavanlainen yhtälö tarvittavalle sähkökentän voimakkuudelle:

$$E = \frac{m_p g_{Mars}}{q_p} \quad (4.15)$$

m_p tarkoittaa tyypillisen karkean marsilaisen aerosolihiukkasen massaa kilogrammoissa, g_{Mars} tarkoittaa putoamiskiihtyvyyden arvoa Marsin pinnan lähistöllä yksiköissä $\frac{m}{s^2}$.

Toisaalta aerosolihiukkasen tiheydelle on voimassa [4, s. 119] seuraavaa:

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (4.16)$$

Symboli V_p tarkoittaa aerosolihiukkasen tilavuutta kuutiometreissä. Kertomalla yhtälö (4.16) puolittain tyypillisen marsilaisen aerosolipartikkelin tilavuudella V_p saadaan seuraava kaava tyypillisen marsilaisen aerosolihiukkasen massalle:

$$m_p = \rho_p V_p \quad (4.17)$$

Tyypillinen marsilaisen aerosolihiukkasen keskitiheys on Merikallion [17, s. 34] mukaan noin $2200 \frac{kg}{m^3}$. Yhdistämällä yhtälöt (4.15) ja (4.17) saadaan tarvittavalle sähkökentän voimakkuudelle seuraava välitulos.

$$E = \frac{\rho_p V_p g_{Mars}}{q_p} \quad (4.18)$$

Toisaalta pallomaisen aerosolihiukkasen tilavuudelle V_p on olemassa yksinkertainen [4, s. 33] kaava.

$$V_p = \frac{4}{3} \pi r_p^3 \quad (4.19)$$

Symboli π tarkoittaa ympyrän kehän pituuden ja halkaisijan pituuden suhdetta, jonka likiarvo on noin 3,1415. Toisaalta symboli r_p tarkoittaa pallomaisen aerosolihiukkasen sädettä metreissä.

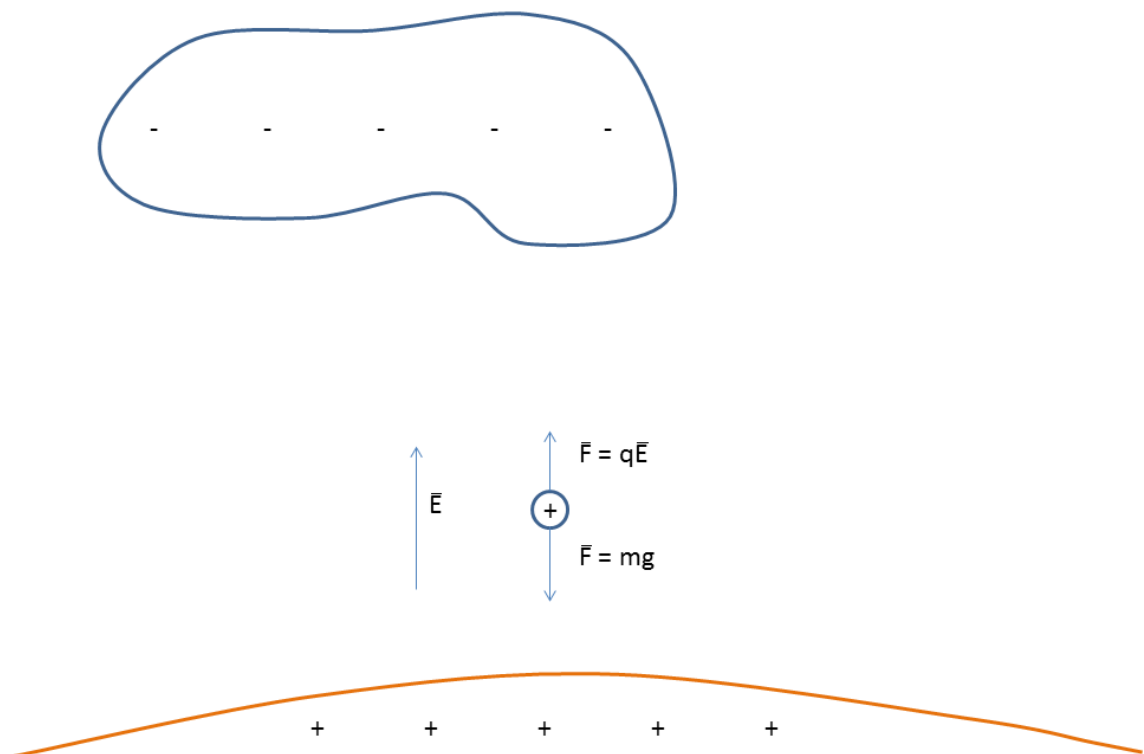
Toisaalta ympyrän säde on puolet ympyrän halkaisijan pituudesta, eli

$$r_p = \frac{d_p}{2} \quad (4.20)$$

Siis tyypillisen marsilaisen aerosolihiukkasen tilavuudeksi saadaankin

$$V_p = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_p}{2}\right)^3 = \frac{4}{3}\pi\frac{d_p^3}{8} = \frac{1}{6}\pi d_p^3 \quad (4.21)$$

Tarkastellaan vielä marsilaisen aerosolihiukkasen sähköistä voimatasapainoa kuvan keinoin:



Kuva 7. Kuvassa on esitetty graafisesti, mitä aerosolihiukkasen leijuminen Marsin kaasukehässä tarkoittaisi hiukkasen voimatasapainon kannalta.

Yhdistämällä yhtälöt (4.18) ja (4.21) saadaan lopultakin lopullinen lauseke tarvittavalle sähkökentän voimakkuudelle E

$$E = \frac{\pi g_{Mars} \rho_p d_p^3}{6 q_p} = \frac{3,1415 \cdot 3,71 \frac{m}{s^2} \cdot 2200 \frac{kg}{m^3} \cdot (1,5 \cdot 10^{-6} m)^3}{6 \cdot 50 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} C} = 1,8 \frac{kV}{m} \quad (4.22)$$

Toisaalta voidaan olettaa, että yhdessä tyypillisessä marsilaisessa aerosolipartikkelissa on ehkä korkeintaan 50 alkeisvarausta [22], joten

$$q_p = n \cdot e \quad (4.23)$$

n tarkoittaa alkeisvarausten lukumäärää tyypillisessä marsilaisessa aerosolihiukkasessa ja e on alkeisvaraus eli yhden protonin sisältämän varauksen määrä, joka on [4, s. 71] noin $1,602 \cdot 10^{-19} C$. Sijoittamalla kaavaan (4.22) tarvittavat lukuarvot saadaan tarvittavalle sähkökentän voimakkuudelle arvoksi $E = 1,8 \frac{kV}{m}$.

4.3 Hiilidioksidimolekyylin efektiivisen läpimitan arvioiminen

Jos haluamme tietää hiilidioksidimolekyylin halkaisijan marsilaisessa kaasussa, niin eräs tapa arvioida sitä on se, että laskemme kuinka suuren tilavuuden yksi hiilidioksidimolekyyliviekkään ollessaan nestemäisessä olomuodossaan. Wikipediasta [16] saadaan sellainen tieto, että nestemäisen hiilidioksidin tiheys 56 atmosfäärin paineessa ja +20 Celsius-asteen lämpötilassa $\rho_{CO_2} = 770 \frac{kg}{m^3}$. Toisaalta samalta sivulta [16] löytyy myös puhtaan hiilidioksidin massa yhtä moolia kohden:

$M_{CO_2} = 44,01 \frac{g}{mol} = 0,04401 \frac{kg}{mol}$. Laskussa tarvitaan myös Avogadron vakion N_A arvoa, jota ei tiedetä vielä nykyäänkään aivan tarkasti mutta jonka käypä likiarvo [4, s. 130] on $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{mol}$. Itse hiilidioksidimolekyylin halkaisijan arviointi etenee siis seuraavasti. Oletetaan, että meillä on tasan 1,00 kuutiometriä nestemäistä hiilidioksidia paineen alaisena säiliössä, eli siis

$$V_{CO_2} = 1,00 m^3.$$

Nestemäisen hiilidioksidin ainemäärälle n_{CO_2} mooleissa on [4, s. 131] voimassa

$$n_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{M_{CO_2}} = \frac{770 kg}{0,04401 \frac{kg}{mol}} = 17496 mol \quad (4.24)$$

Toisaalta nestemäisen hiilidioksidin hiukkasmäärä on yhtä suuri kuin ainemäärä kertaa Avogadron vakio, eli

$$N_{CO_2} = n_{CO_2} N_A = 17496 \text{ mol} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} = 1,0536 \cdot 10^{28} \quad (4.25)$$

Toisaalta taas yhden hiilidioksidimolekyylin nesteessä viemä tilavuus kuutiometreinä V'_{CO_2} voidaan laskea seuraavasti:

$$V'_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{N_{CO_2}} = \frac{1,00 \text{ m}^3}{1,0536 \cdot 10^{28}} = 9,4912 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3 \quad (4.26)$$

Jos sovelletaan aikaisemmin mainittua kaavaa (4.21) voidaan kirjoittaa myös, että

$$V'_{CO_2} = \frac{4}{3} \pi r_{CO_2}^3 = \frac{1}{6} \pi d_{CO_2}^3 \quad (4.27)$$

Kaavan (4.27) jälkimmäisestä muodosta voidaankin ratkaista yhden hiilidioksidimolekyylin halkaisija d_{CO_2} :

$$d_{CO_2} = \sqrt[3]{\frac{6V'_{CO_2}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 9,4912 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3}{3,1415}} = 5,66 \cdot 10^{-10} \text{ m} \quad (4.28)$$

Sijoittamalla kaavaan (4.28) tarvittavat lukuarvot, saadaan hiilidioksidimolekyylin halkaisijaksi $d_{CO_2} = 5,66 \cdot 10^{-10} \text{ m}$, mikä on jonkin verran enemmän kuin Merikallion tuloksien avulla käänteisesti laskettu hiilidioksidimolekyylin läpimitan arvo $d_{CO_2} = 4,59 \cdot 10^{-10} \text{ m}$.

4.4 Marsin aerosolihiukkasten diffuusio- ja koagulaatiotarkasteluja

Diffuusio tarkoittaa lämpöliikkeestä johtuvaa itsestään tapahtuvaa konsentraatioerojen tasoittumista nesteessä tai kaasussa. Aerosolihiukkasen diffuusiokerroin D (yhden mikrometrin halkaisijaiselle marsilaiselle pölypartikkelille) voidaan laskea seuraavan kaavan [18, s. 152] avulla.

$$D = \frac{k_B T C_c}{3 \pi \eta d_p} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot 220 \text{ K} \cdot 18,1}{3 \cdot 3,1415 \cdot 1,42 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 4,1 \cdot 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (4.29)$$

Toisaalta aerosolien koagulaatio tarkoittaa lämpöliikkeestä johtuvaa aerosolihiukkasten törmäilyä ja takertumista kiinni toisiinsa, jolloin kyseisen aerosolin lukumääräpitoisuus laskee ja keskimääräinen hiukkaskoko kasvaa ajan funktiona. Koagulaatiokerroin K_0 voidaan laskea yksinkertaiselle monodisperssille aerosolille seuraavasta [18, s. 262] kaavasta.

$$K_0 = \frac{4 k_B T C_c}{3\eta} = \frac{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} \cdot 220 K \cdot 18,1}{3 \cdot 1,42 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s} = 5,2 \cdot 10^{-15} \frac{m^3}{s} \quad (4.30)$$

Vertailun vuoksi Hindsin [18] mukaan yhden mikrometrin halkaisijaiselle aerosolihiukkaselle Maan olosuhteissa [18, s. 153] $D = 2,7 \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s}$ ja koagulaatiokertoimelle löytyy likiarvo [18, s. 262] $K_0 = 3,4 \cdot 10^{-16} \frac{m^3}{s}$. Tästä voidaan nähdä, että ilmeisesti Marsin olosuhteissa diffuusio- ja koagulaatiokertoimet ovat lukuarvoiltaan suurempia kuin Maan olosuhteissa vastaavan kokoiselle partikkelille.

Yksinkertaisen monodispersiivisen aerosolin koagulaatioprosessia kuvaa seuraava Smoluchowskin mukaan nimetty differentiaaliyhtälö, jonka ratkaisemista ja tietyn alkuehdon toteuttavaa erityisratkaisua tarkastellaan lähemmin seuraavaksi:

$$\frac{dN}{dt} = -K_0 N^2 \quad (4.31)$$

Yllä olevassa yhtälössä merkintä dN tarkoittaa koaguloituvien aerosolien lukumääräpitoisuuden differentiaalia ja toisaalta merkintä dt tarkoittaa koagulaatioprosessissa kuluvan ajan differentiaalia. Symboli K_0 tarkoittaa alunperin monodispersiivisten aerosolihiukkasten korjaamatonta koagulaatiokerrointa, minkä yksikkö on $\frac{m^3}{s}$ ja N tarkoittaa koaguloivien aerosolien lukumääräpitoisuutta yksiköissä $\frac{1}{m^3}$.

Yllä olevan yhtälön (4.31) ratkaiseminen kannattaa aloittaa kertomalla yhtälö puolittain differentiaalilla dt :

$$dN = -K_0 N^2 dt \quad (4.32)$$

Kun jaetaan tällä tavalla saatu yhtälö (4.32) puolittain koaguloituvien monodispersiivisten aerosolien lukumääräpitoisuuden neliöllä N^2 , niin saadaan seuraava yhtälö:

$$\frac{1}{N^2} dN = -K_0 dt \quad (4.33)$$

Integroidaan puolittain tällä tavalla saatu muuttujaeroteltu differentiaaliyhtälö (4.33) ja saadaankin seuraavaa:

$$\int \frac{1}{N^2} dN = \int -K_0 dt \quad (4.34)$$

Suoritetaan yhtälön (4.34) molemmilla puolilla olevat integroinnit ja lisätään integroimisvakio c yhtälön oikealle puolelle:

$$-\frac{1}{N} = -K_0 t + c \quad (4.35)$$

Kun kerrotaan tällä tavalla saatu yhtälö (4.35) puolittain -1 :llä, niin saadaankin

$$\frac{1}{N} = K_0 t - c \quad (4.36)$$

Kerrotaan vielä yhtälö puolittain aerosolien lukumääräpitoisuudella N :

$$1 = N(K_0 t - c) \quad (4.37)$$

Jaetaan juuri saatu yhtälö (4.37) lausekkeella $K_0 t - c$. Tällöin saamme yhtälön

$$N = \frac{1}{K_0 t - c} \quad (4.38)$$

Toisin sanottuna olemme juuri saaneet kasaan alkuperäisen differentiaaliyhtälön (4.31) yleisen ratkaisun aerosolien lukumääräpitoisuudelle ajan funktiona. Eli siis yleinen ratkaisu on muotoa:

$$N(t) = \frac{1}{K_0 t - c} \quad (4.39)$$

Alkuperäiselle differentiaaliyhtälölle (4.31) tarvitaan kuitenkin alkuehdon $N(0) = N_0$ toteuttava erityisratkaisu, mikä saadaankin seuraavasti:

$$N(0) = N_0 = \frac{1}{K_0 \cdot 0 - c} \quad (4.40)$$

Yhtälö (4.40) kuuluu hieman toisin kirjoitettuna siis seuraavasti:

$$N_0 = \frac{1}{-c} = -\frac{1}{c} \quad (4.41)$$

Kertomalla yhtälön (4.41) puolittain integroimisvakiolla c saadaankin

$$c N_0 = -1 \quad (4.42)$$

Jakamalla vielä yhtälö (4.42) puolittain aerosolien alkuperäisellä lukumääräpitoisuudella N_0 saadaan integroimisvakion c seuraava lauseke:

$$c = -\frac{1}{N_0} \quad (4.43)$$

Yhtälön (4.43) kertoma tulos integroimisvakion c arvolle voidaan puolestaan sijoittaa takaisin alkuperäisen differentiaaliyhtälön yleiseen ratkaisuun (4.39):

$$N(t) = \frac{1}{K_0 t - \left(\frac{-1}{N_0}\right)} = \frac{1}{\frac{K_0 t}{1} + \frac{1}{N_0}} \quad (4.44)$$

Laventamalla alkuperäisellä hiukkasmäärällä N_0 yhtälön (4.44) nimittäjien nimittäjät samannimisiksi saadaankin seuraava tulos

$$N(t) = \frac{1}{\frac{N_0 K_0 t}{N_0} + \frac{1}{N_0}} \quad (4.45)$$

Yhdistämällä yhtälön (4.45) oikean puolen lausekkeen nimittäjässä olevat lausekkeet saadaan seuraava yhtälö:

$$N(t) = \frac{1}{\frac{N_0 K_0 t + 1}{N_0}} \quad (4.46)$$

Yhtälön (4.46) oikeaa puolta voidaan sieventää muuttamalla jakolasku kertolaskuksi kertomalla osoittaja nimittäjän käänteisluvulla, jolloin saadaan seuraavaa

$$N(t) = \frac{1}{1} \cdot \frac{N_0}{N_0 K_0 t + 1} \quad (4.47)$$

Ykkösellä kertominen ei muuta yhtälön (4.47) oikean puolen arvoa, joten sen voi jatkossa jättää merkitsemättä. Differentiaaliyhtälölle (4.31) saadaan siis seuraava erityisratkaisu, joka kuvaa aerosolien lukumääräpitoisuutta N ajan t funktiona:

$$N(t) = \frac{N_0}{1 + N_0 K_0 t} \quad (4.48)$$

5 Tulokset ja niiden tarkastelu

Tässä luvussa lasketaan edellä käsitellyn teorian pohjalta esimerkkilaskuja ja esitetään Wolfram|Alphalla piirrettyjä kuvaajia Marsin pölyä simuloivan aerosolin Cunninghamin liukukorjauskertoimista, asettumisnopeuksista ja Reynoldsin luvuista sekä Maan että Marsin pinnan lähistöllä olevissa olosuhteissa. Luku päättyy monodisperssin aerosolin koagulaation tarkasteluun Marsin pinnan lähistöllä olevissa olosuhteissa.

5.1 Marsin pölyä simuloivan aerosolin käyttäytyminen maanpinnan lähistöllä

Esimerkiksi täsmälleen yhden mikrometrin halkaisijaltaan oleva Marsin pölyä simuloiva hiukkanen, jonka tiheys $\rho_p = 2200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ja dynaaminen muototekijä $\chi = 1,5$ putoaa Maan ilmakehässä Stokesin lain vaikutusalueella asettumisnopeudella

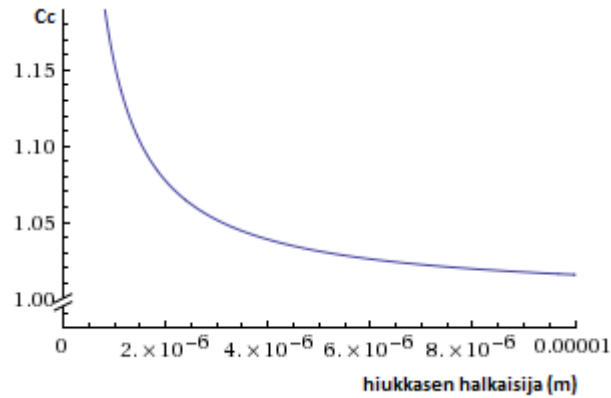
$$V_{TS} = \frac{2200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m})^2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{18 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot 1,5} = 4,4 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.1)$$

Itse asiassa yhden mikrometrin halkaisijaiselle partikkelille Maan ilmakehässä Cunninghamin liukukorjauskerroin $C_c = 1,15$, jolloin asettumisnopeudeksi saadaankin $V_{TS} = 5,1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Lasketaan vielä yllä olevaa tilannetta vastaava Reynoldsin luku:

$$\Re = \frac{1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 5,1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 3,7 \cdot 10^{-6} \quad (5.2)$$

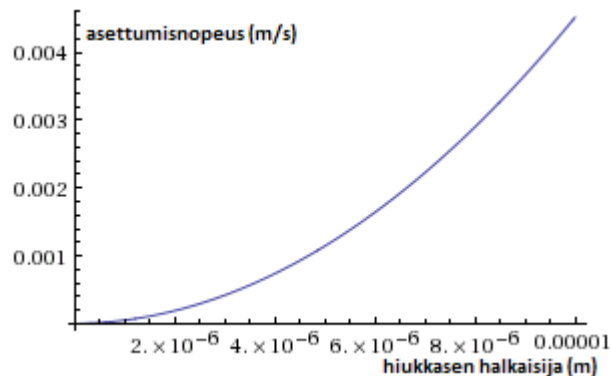
Tällä tavalla laskemalla saatu tulos on huomattavasti pienempi kuin Stokesin alueen rajalla oleva Reynoldsin luku 1,0. Siis hiukkasen putoamisnopeus on oikealla tavalla laskettu ja saatu lopputulos on luotettava. Alla olevassa kuvaajassa on laskettu Cunninghamin liukukorjauskerroin maanpinnan lähistöllä olevissa olosuhteissa aerosolihiihkasen läpimitan funktiona.



Kuva 8. Cunninghamin liukukorjauskertoimen arvoja maanpinnan lähistöllä olevissa olosuhteissa, kun ilmamolekyylien keskimääräinen vapaa matka on oletettu 66 nanometriksi. Kuvaajasta voi huomata, että liukukorjauskertoimen arvo alkaa kasvaa jyrkästi alle mikrometrin halkaisijaisilla partikkeleilla ja toisaalta, että liukukorjauskerroin lähestyy asymptoottisesti ykköstä, kun aerosolihiukkasen halkaisija suurenee.

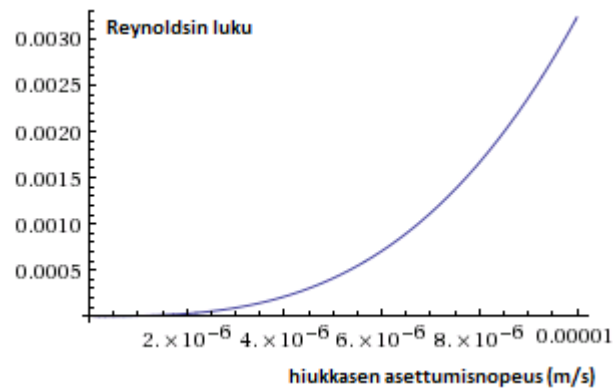
Itse asiassa yhdistämällä yhtälöt (4.11), (4.12) ja (4.13) voidaan laskea, että maanpinnan läheisyydessä olevissa olosuhteissa Reynoldsin luvun arvo 1,0 saavutetaan, kun veden tiheyksisen pallomaisen aerosolihiukkasen läpimitta on noin 77 mikrometriä.

Yhdistämällä kaavat (4.11) ja (4.12) saadaan monimutkainen lauseke, joka kuitenkin voidaan syöttää erääseen nettipalveluun ja saada tulokseksi seuraavanlainen kuvaaja.



Kuva 9. Marsin pölyä simuloivan ($\rho_p = 2200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \chi = 1,5$) aerosolihiukkasen asetumisnopeus hiukkasen halkaisijan funktiona. Kuvaajasta voi huomata, että kun aerosolihiukkasen läpimitta suurenee, niin sen asetumisnopeus kasvaa suunnilleen verrannollisena hiukkasen halkaisijan neliöön, eli mitä suurempi on aerosolihiukkasen halkaisija, niin sitä nopeammin se putoaa Maan gravitaatiokentässä saavutettuaan tasaisen putoamisliikkeen vaiheensa.

Lasketaanpa vielä, kuinka Reynoldsin luku käyttäytyy Marsin pölylle Maan olosuhteissa. Tätä selvittää seuraavanlainen kuvaaja:

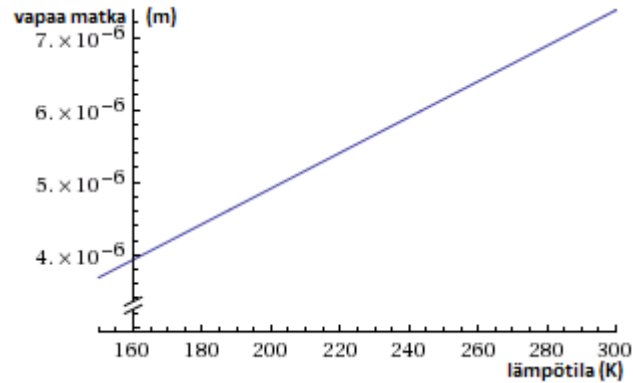


Kuva 10. Reynoldsin luku kasvaa voimakkaasti aerosolihiukkasen läpimitan funktiona, mutta sen arvot pysyvät kuitenkin reilusti alle yhdessä, kun hiukkasen halkaisija on korkeintaan kymmenen mikrometriä.

5.2 Kaasumolekyylin vapaan matkan laskeminen ja Marsin pölyä simuloivan aerosolin putoamisliike Marsin kaasukehässä

Esimerkinomaisesti voidaan simuloida Marsin pinnan lähellä olevia olosuhteita valitsemalla Marsin keskilämpötilaa jäljittelevä lämpötila $T = 210 \text{ K}$. Toisaalta Marsin kaasukehä koostuu pääosin hiilidioksidista, jonka lineaarisen molekyylin halkaisija [16] on noin $2,326 \cdot 10^{-10} \text{ m}$. Näin saatu hiilidioksidimolekyylin läpimitan arvo on kuitenkin liian pieni, jotta sen avulla laskettu kaasumolekyylien keskimääräinen vapaa matka olisi tarkka muuten kuin vain ainoastaan kertaluokan osalta.

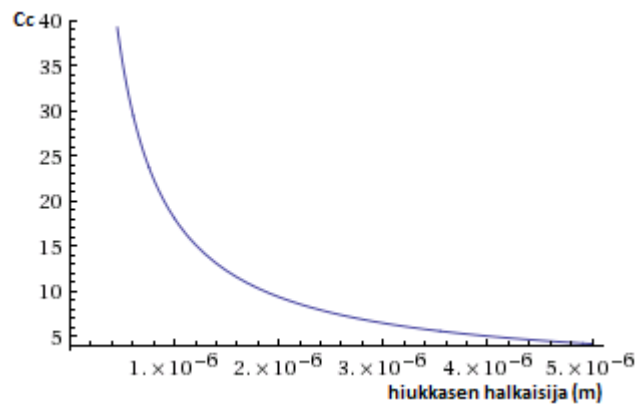
Jokseenkin oikeaan tulokseen pääsee, jos käyttää hiilidioksidimolekyylin läpimitan arvona jonkin verran tässä laskettua suurempaa arvoa, eli esimerkiksi lähteen [17, s. 32] perusteella käänteisesti laskettavissa olevaa arvoa. Näin laskemalla saa hiilidioksidimolekyylien keskimääräiselle vapaalle matkalle λ lukuarvon $\lambda = 5,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Tästä voidaan käänteisesti laskea, että hiilidioksidimolekyylin efektiivisen halkaisijan täytyy olla huomattavasti suurempi kuin lähteen [16] perusteella laskettu arvo. Itse asiassa jos kaasumolekyylien keskimääräisen vapaan matkan yhtälön syöttää erääseen nettipalveluun ja laskee, mikä täytyy olla hiilidioksidimolekyylin halkaisija, niin saa tulokseksi arvon $d = 4,59 \cdot 10^{-10} \text{ m}$. Alla oleva kuvaaja selvittää kaasumolekyylien keskimääräisen vapaan matkan riippuvuutta absoluuttisesta lämpötilasta.



Kuva 11. Kuvaajasta nähdään, että hiilidioksidikaasussa kaasumolekyylien vapaa matka on suoraan verrannollinen kaasun absoluuttiseen lämpötilaan.

Käyttämällä avuksi Wolfram|Alpha-nimistä palvelua voimme laskea vapaan matkan kuvaajan lämpötilan funktiona, kun oletetaan Marsin pinnan lähellä vallitseva paine täsmälleen 600 Pascaliksi.

Käyttämällä kaavaa (4.11) saamme tasan yhden mikrometrin läpimittaiselle Marsin kaasukehän aerosolihiukkaselle Cunninghamin liukukorjauskertoimen arvoksi $C_c = 18,1$. Lasketaanpa vielä, kuinka Cunninghamin liukukorjauskerroin riippuu aerosolihiukkasen halkaisijasta Marsin pinnan lähistöllä olevissa olosuhteissa.



Kuva 12. Kuvaajassa on laskettuna Cunninghamin liukukorjauskertoimen kuvaaja Marsin pintaa lähentelevissä olosuhteissa, jolloin kaasumolekyylien vapaa matka on oletettu 5,16 mikrometriksi. Myös tämä kuvaaja on laskettu Wolfram|Alpha-palvelun avulla.

Lasketaan vielä täsmälleen yhden mikrometrin kokoiselle Marsin aerosolihiukkaselle asettumisnopeus V_{TS} . Tätä varten tarvitsemme hiilidioksidikaasun dynaamisen viskositeetin Marsin olosuhteissa (6 mbar, -60 astetta Celsiusta) $\eta = 1,42 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$ (NASA Mars atmospheric model)

Lasketaanpa vielä esimerkin vuoksi asettumisnopeus täsmälleen yhden mikrometrin halkaisijaiselle Marsin pölyä simuloivalle partikkelille Marsin olosuhteissa:

$$V_{TS} = \frac{2200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m})^2 \cdot 3,71 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 18,1}{18 \cdot 1,42 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot 1,5} = 3,9 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.3)$$

Jotta voisimme laskea Reynoldsin luvun arvon, niin tarvitsemme puhtaan hiilidioksidikaasun tiheyden 6 millibaarin paineessa ja 215 Kelvin-asteen lämpötilassa.

Jos asian laskee ideaalikaasulaista, niin saa tulokseksi noin $\rho_{CO_2} = 0,0148 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ mutta jos ottaa huomioon Van der Waalsin tilanyhtälön, niin päätyy erinäisten laskelmien jälkeen hyvin lähelle arvoa $\rho_{CO_2} = 0,020 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Lasketaan vielä Reynoldsin luku tälle virtaustapaukselle:

$$\Re = \frac{0,020 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3,9 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{1,42 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 5,5 \cdot 10^{-7} \quad (5.4)$$

Siis tässäkin virtaustapauksessa ollaan vielä reilusti Stokesin lain alueella.

Jos ajattelemme vielä sitä aikaa, jonka täytyy vähintään kulua, kun tyypillinen yhden mikrometrin läpimittainen karkea marsilainen aerosolihiukkanen putoaa takaisin Marsin pinnalle 50 kilometrin lähtökorkeudesta, niin äkkiseltään saattaisi ajatella, että tämän putoamisajan voisi laskea suoraan tasaisen etenemisliikkeen yhtälöstä

$$s = vt \quad (5.5)$$

Jakamalla yhtälön (5.5) putoamisnopeudella v saataisiin putoamisajalle suoraan seuraava yhtälö.

$$t = \frac{s}{v} = \frac{5,0 \cdot 10^4 \text{ m}}{3,9 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1,3 \cdot 10^8 \text{ s} \quad (5.6)$$

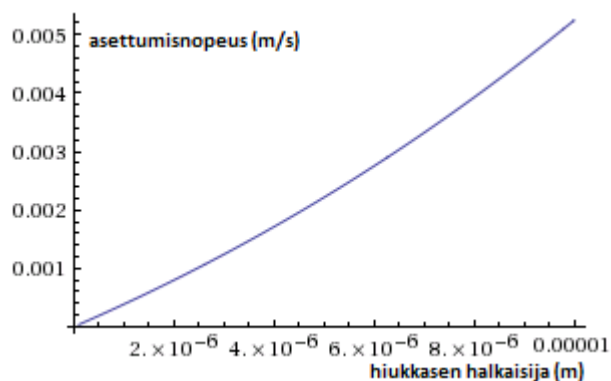
Siis kuluva aika olisi toisiksi aikayksiköiksi muutettuna yli neljä Maan vuotta (!)

Asia ei kuitenkaan ole näin yksinkertainen. Marsin kaasukehässä vallitseva paine riippuu voimakkaasti Marsin tasankojen tasosta mitatusta korkeudesta. Esimerkiksi Marsin korkeimman vuoren Olympus Monsin huipulla noin 26 kilometrin korkeudessa Marsin tasankojen korkeudesta vallitseva kaasun paine jää useinkin noin yhteen millibaariin. Lisäksi koska kaasumolekyylien keskimääräinen vapaa matka riippuu vallitsevasta kaasun paineesta. Toisaalta taas Cunninghamin liukukorjauskerroin riippuu

voimakkaasti kulloisestakin kaasumolekyylien keskimääräisestä vapaasta matkasta. Ajatusketjua voi jatkaa vielä tästäkin eteenpäin. Aerosolihiukkasen asettumisnopeus Stokesin lain alueella on puolestaan suoraan verrannollinen Cunninghamin liukukorjauskertoimeen. Lisäksi kaasumolekyylien keskimääräinen vapaa matka riippuu myös ympäröivän kaasun lämpötilasta, joka ei suinkaan ole vakio Marsin tasankojen korkeudesta lasketun korkeuden suhteen.

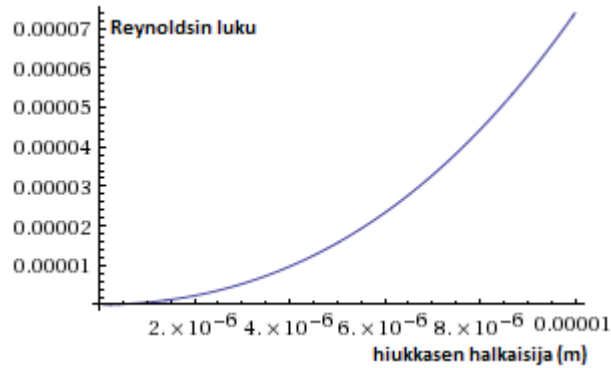
Tällä tavalla ajattelemalla tullaan helposti siihen johtopäätökseen, että tyypillisen karkean marsilaisen aerosolihiukkasen putoamisaikaa ei voida laskea ainakaan tarkasti pelkän tasaisen etenemisliikkeen tarkastelun avulla, vaan putoamisliike tulisi jakaa esimerkiksi yhden kilometrin mittaisiin osiin ja sitten laskea Marsin kaasukehää kuvaavasta mallista kullekin korkeudelle ominainen kaasun koostumus, lämpötila, kaasumolekyylien keskimääräinen vapaa matka ja tätä vastaava Cunninghamin liukukorjauskerroin. Tällä tavalla mallintamalla Marsin kaasukehän olosuhteita kerros kerrokselta voitaisiin laskea huomattavasti tarkemmin asioita esimerkiksi marsilaisten aerosolihiukkasten putoamisliikkeestä Marsin kaasukehässä mutta tällainen mallinnustyö jää valitettavasti tämän diplomityön aiheajauksen ulkopuolelle.

Lasketaanpa vielä, kuinka Reynoldsin luku käyttäytyy Marsin pölylle Maan olosuhteissa. Tätä selvittää seuraavanlainen kuvaaja siitä, miten Marsin pölyä simuloivan pölyn asettumisnopeus riippuu hiukkasen halkaisijasta Marsin olosuhteissa.



Kuva 13. Kuvaajassa on esitettyä Marsin pölyä simuloivan ($\rho_p = 2200 \frac{kg}{m^3}$, $\chi = 1,5$) aerosolihiukkasen asettumisnopeus Marsin pintaa vastaavissa olosuhteissa hiukkasen halkaisijan funktiona. Kuvaajasta voidaan huomata, että hiukkasen asettumisnopeus on verrannollinen suunnilleen aerosolihiukkasen halkaisijan neliöön.

Meitä kiinnostaa vielä kuitenkin esimerkiksi se, että kuinka aerosolihiukkasen asettumisnopeuteen liittyvä Reynoldsin luku käyttäytyy hiukkasen asettumisnopeuden funktiona. Tästä asiasta kertoo tarkemmin seuraava kuvaaja.



Kuva 14. Reynoldsin luku kasvaa voimakkaasti, kun hiukkasen halkaisija suurenee.

5.3 Marsin kaasukehän pienien pölyhiukkasten monodisperssi koagulaatio

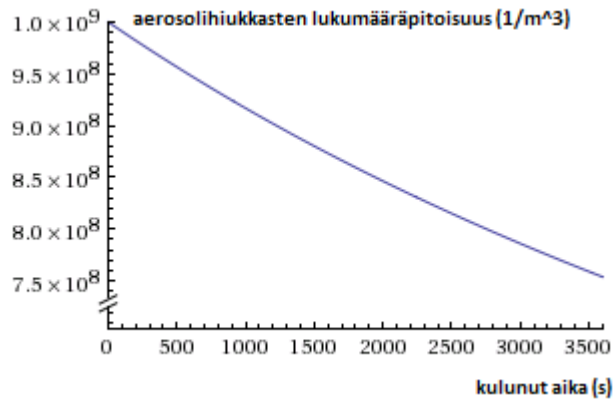
Yksinkertaisen monodisperssin aerosolin koagulaation tarkastelussa päädyttiin lopulta seuraavaan yksinkertaiseen yhtälöön koaguloituvan aerosolin lukumääräpitoisuudelle ajan funktiona:

$$N(t) = \frac{N_0}{1 + N_0 K_0 t} \quad (5.7)$$

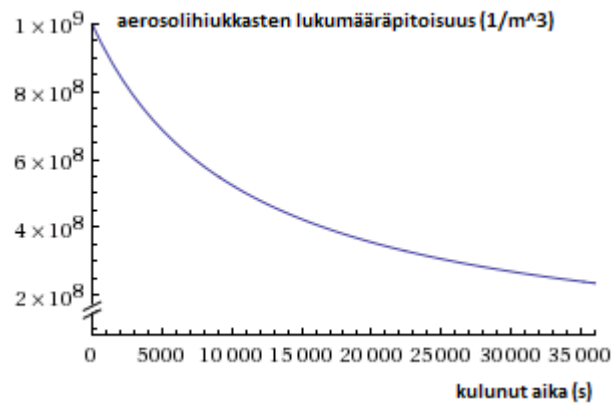
Jos tarkastellaan tuoreen [25] artikkelin mukaista kaksihuippuisen jakauman pienempiä aerosoleja, niin voidaan ajatella, että tällaisen aerosolin karakteristinen halkaisija olisi noin 55 nanometriä. Mikäli tällaiselle aerosolille laskee Cunninghamin liukorjauskerroimen lukuarvon yhtälöstä (4.6), niin saa tulokseksi niinkin suuren arvon kuin $C_c = 318,64$.

Vastaavasti tällaisen aerosolin korjaamaton koagulaatiokerroin $K_0 = 9,08 \cdot 10^{-14} \frac{m^3}{s}$, mikä on noin 63 kertaa suurempi kuin vastaavan aerosolin koagulaatiokerroin Maan olosuhteissa.

Piirretään vielä yhtälön (5.7) mukaiset kuvaajat marsilaisten hiukkasten koagulaatiolle, kun alkuperäinen lukumääräpitoisuus $N_0 = 1,0 \cdot 10^9 \frac{1}{m^3}$ ja kuluva aika on yksi tai kymmenen tuntia.



Kuva 15. Marsin hienojakoisen pölyn tunnin mittainen koagulaatioprosessi.



Kuva 16. Marsin hienojakoisen pölyn kymmenen tunnin mittainen koagulaatioprosessi.

Yllä olevista kuvaajista saattaa huomata sen tosiasian, että Marsin kaasukehän pienet aerosolihiukkaset koaguloituvat itse asiassa yllättävänkin voimakkaasti.

6 Yhteenveto

Tässä työssä tarkasteltiin lähinnä tyypillisen marsilaisen aerosolihiukkasen putoamisliikettä tyynessä marsilaisessa kaasussa. Aikaisemmin ratkaisemattomaan Marsin aerosolihiukkasten leijumisen ongelmaan saatiin sikäli selvyyttä, että laskennallisesti voitiin osoittaa, että Marsin pinnan lähellä olevissa olosuhteissa monet aerosolifysiikan perussuureetkin saavat huomattavasti maanpinnan olosuhteista poikkeavia lukuarvoja.

Esimerkinomaisesti voidaan mainita, että Marsin pinnan lähellä vallitsee maanpinnan olosuhteita huomattavasti alhaisempi kaasun paine, lämpötila ja tiheys. Koska Marsin kaasukehä koostuu pääasiassa hiilidioksidista, niin alhaisemman paineen vuoksi myöskin kaasumolekyylien keskimääräinen vapaa matka on huomattavasti pidempi kuin maanpinnan lähistöllä olevissa olosuhteissa. Tästä seuraa myös se, että Cunninghamin liukukorjauskertoimen lukuarvot ovat Marsin pinnan lähistöllä huomattavasti suurempia kuin samankokoisille partikkeleille maanpinnan lähistöllä olevissa olosuhteissa.

Tämän työn keskeisintä antia on varmastikin sen osoittaminen, että tyypilliset karkeat halkaisijaltaan noin mikrometrin kokoluokkaa olevat marsilaiset aerosolihiukkaset voivat tämän työn laskelmien perusteella leijua pitkäänkin Marsin kaasukehässä, mikäli läsnä on edes heikkoja ylöspäin puhaltavia kaasuvirtauksia. Tässä työssä on myös laskennallisesti osoitettu, että suhteellisen pienikin sähkökentän voimakkuus saattaa aiheuttaa sellaisen sähköisen poistovoiman, joka kykenee leijuttamaan tyypillisiä karkeita marsilaisia pölypartikkeleita.

Työssä selvitettiin myös lyhyesti Marsin kaasukehän aerosolioptiikan eräitä perusilmiöitä ja saatiinkin selville, että vaikka Rayleighin sironnan vaikutus onkin Marsin olosuhteissa ilmeisesti varsin vähäinen, niin kuitenkin niin sanottu Mie-sironta vaikuttaa marsilaisen päivätaivaan ja auringonlaskujen väriin.

Työn loppuvaiheissa paneuduttiin myöskin pienien marsilaisten pölyhiukkasten yksinkertaiseen monodisperssiin koagulaatioon ja kyettiin laskennallisesti osoittamaan, että intuition vastaisesti noin 55 nanometrinen halkaisijaltaan olevat pölyhiukkaset koaguloituvat jonkin verran jo suhteellisen lyhyen ajan, esimerkiksi tunnin kuluessa.

Kaikesta Marsin tutkimuksesta huolimatta monet Marsin kaasukehän aerosolifysiikkaan liittyvät perusasiatkin ovat edelleen tiedeyhteisöltäkin hämärän peitossa. Esimerkiksi ne mekanismit, jotka nostavat marsilaista pölyä pinnalta kaasukehään ovat edelleen huonosti tunnettuja. Lisäksi on olemassa vain vähän tietoa Marsissa vaikuttavien sähkökenttien suunnista ja voimakkuuksista. Vaikka aivan viime aikoina onkin

laskennallisesti havaittu, että Marsin kaasukehässä täytyy olla myös pieniä aerosolihiukkasia [25], niin näiden hiukkasten ominaisuudet ja käyttäytyminen Marsin kaasukehässä ovat vielä lähes kokonaan tieteelle tuntematonta aluetta. Tulevaisuudessa voisi esimerkiksi selvittää onko Rayleighin sironnalla sittenkin vaikutusta Marsin kaasukehässä tapahtuviin aerosolioptiikan ilmiöihin ja onko mahdollista, että pienemmän kokoluokan marsilaiset aerosolihiukkaset joutuvat niin sanottuun Brownin liikkeeseen.

7 Lähteet

- [1] Avaruustelekooppi Hubblen ottama kokonaiskuva Mars-planeetasta. http://www.desertedhotel.com/system/files/images/Mars_Hubble.jpg Katsottu 7.1.2013
- [2] **Karttunen H.** (1996) Vanhin tiede tähtitiedettä kivikaudesta kuulentoihin, URSA, 526 sivua.
- [3] **Hotakainen M.** (2005) Mars – myytistä maisemaksi, WSOY, 239 sivua.
- [4] **Seppänen R., Kervinen M., Parkkila I., Karkela L., Meriläinen P.** (2008) MAOL-taulukot, Otava, 167 sivua.
- [5] Mariner 9 -avaruusluotaimen ottama kuva marsilaisesta kanavasta. <http://2.bp.blogspot.com/Du57KoBWNNg/TtB23c4VSzI/AAAAAAAAADcw/MHIwRc2fWow/s1600/Nirgal+Vallis+02+by+Mariner+9.jpg> Katsottu 15.1.2013
- [6] **Pellinen R., Raudsepp P., et al.** (2000) Towards Mars!, Raud Publishing, 410 sivua.
- [7] **Karttunen H.** (2009) Matkalla avaruuteen Avaruustutkimuksen historia ja tekniikka, Otava, 336 sivua.
- [8] **Selivanov A. S.** (2013) On the First Panorama of the Surface of Mars, Solar System Research, 2013, Vol. 47, No. 3, pp.182-184.
- [9] **Hartmann, W. K., Price, M. J.,** (1974) Mars: Clearing of the 1971 Dust Storm, Icarus, 21, 28-34.
- [10] **Määttänen A.** (2007) Investigations of Planetary Boundary Layer Processes and Particle Formation in the Atmosphere of Planet Mars (väitöskirja), Aerosolitutkimusseura ry, 82 sivua.
- [11] NASA:n Spirit-mönkijän kuvaama marsilainen auringonlasku Gusevin kraaterissa. <http://en.wikipedia.org/wiki/File:MarsSunset.jpg> Katsottu 16.12.2013.
- [12] **Pellinen R., Raudsepp P., et al.** (2006) Towards Mars! Extra, Raud Publishing, 168 sivua.
- [13] **Oja H.** (2000) Saturnuksen taakse 1990-luvun löytöretket aurinkokunnassamme, Ursa, 159 sivua.
- [14] **Hecht E.** (2002) Optics Fourth Edition, Addison Wesley, 698 sivua.
- [15] **Lutišan J., Cvengroš J.** (1995) Mean free path of molecules on molecular distillation, The Chemical Engineering Journal, 56, 39-50.
- [16] Paljon perusasiaa hiilidioksidista. http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide

Katsottu 14.10.2013

[17] **Merikallio S.** (2003) Available Solar Energy on the Dusty Martian Atmosphere and Surface, (diplomityö), TKK, 84 sivua.

[18] **Hinds C. W.** (1999) Aerosol Technology, John Wiley & Sons, 483 sivua.

[19] Sivulla kerrotaan, miksi marsilaiset auringonlaskut ovat sinertäviä. <http://io9.com/5717358/why-martian-sunsets-are-blue> Katsottu 28.2.2014

[20] Sivulla selitetään muun muassa Marsin taivaan värien alkuperää ja valon sirontaa Marsin kaasukehässä. <http://www.webexhibits.org/causesofcolor/14C.html> Katsottu 1.3.2014

[21] **Mansfield M., O'Sullivan C.** (1999) Understanding Physics, John Wiley & Sons, 755 sivua.

[22] **Michael M., Tripathi S. N.** (2008) Effect of charging of aerosols in the lower atmosphere of Mars during the dust storm of 2001, Planetary and Space Science, 56, 1696-1702.

[23] **Couper H., Henbest N.** (1992) Avaruusatlas, WSOY, 64 sivua.

[24] **Syväjärvi T.** (2011) Inhaloitavat lääke aerosolit, kandidaatintyö, TTY, 23 sivua.

[25] **Fedorova A. A., Montmessin F., Rodin A. V., Korablev O. I., Määttänen A., Maltagliati L.** (2014) Evidence for a bimodal size distribution for the suspended aerosol particles on Mars, Icarus, 231, 239-260.

[26] **Formisano V., Grassi D., Ignatiev N. I., Zasova L.** (2001) IRIS Mariner 9 data revisited: water and dust daily cycles, Planetary and Space Science, 49, 1331-1346.

[27] **Liljeström A.** (2014) Marsin pilvet siirtyvät maanpinnalle, Tähdet ja avaruus, 1 / 2014, s. 14-18.