

Virtuaalitodellisuuden hyödyntäminen avaruustutkimustulosten havainnollistamisessa: Aalto-yliopiston virtuaaliplanetaario

Eetu Reinikainen

Sähkötekniikan korkeakoulu

Kandidaatintyö

Espoo 24.5.2020

Vastuuopettaja

TkT Markus Turunen

Työn ohjaaja

Prof. Esa Kallio



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Copyright © 2020 Eetu Reinikainen



Tekijä Eetu Reinikainen

Työn nimi Virtuaalitodellisuuden hyödyntäminen avaruustutkimustulosten havainnollistamisessa: Aalto-yliopiston virtuaaliplaneetaario

Koulutusohjelma Elektroniikka ja sähkötekniikka

Pääaine Elektroniikka ja sähkötekniikka

Pääaineen koodi ELEC3013

Vastuuopettaja TkT Markus Turunen

Työn ohjaaja(t) Prof. Esa Kallio

Päivämäärä 24.05.2020

Sivumäärä 34

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Virtuaalitodellisuuslaitteiden viimeaikaisen lisääntymisen myötä myös virtuaalitodellisuuteen toteutetun sisällön määrä on lisääntynyt runsaasti. Yksi esimerkki virtuaalitodellisuuteen toteutetusta sisällöstä on Aalto-yliopistossa toteutettu virtuaaliplaneetaario. Tämän pääasiallisena tavoitteena on ollut havainnollistaa aurinkokunnan kappaleiden ja aurinkotuulen vuorovaikutuksessa syntyviä plasmaympäristöjä ihmisen havainnoinnille luonnollisessa kolmiulotteisessa ympäristössä.

Työn päätarkoituksena oli tutkia Aalto-yliopiston virtuaaliplaneetaarion toteutusta ja luoda kokonaisvaltainen kuva sen kehityksen taustoista. Erittäin tärkeässä roolissa kehityksen osalta ovat toimineet simulaatiot, joiden tulosten pohjalta on voitu muodostaa sekä aurinkokunnan plasmaympäristöt että itse virtuaaliplaneetaario. Plasmaympäristöt voidaan jakaa neljään toisistaan poikkeavaan ympäristötyyppiin, joiden erot perustuvat pääosin siihen, onko kappaleella magneettikenttää tai kaasukehää.

Itse virtuaaliplaneetaario on toteutettu käyttäen kehitysalustana Unity3D-ohjelmistoa. Tämän lisäksi on käytetty esimerkiksi Paraview-ohjelmistoa, jonka avulla kappaleen ympäristöön on voitu luoda esimerkiksi hiukkastiheyksiä kuvaavia tasa-arvopintoja, sekä magneettikenttiä ja aurinkotuulen etenemistä kuvaavia vektorikenttiä. Näiden lisäksi planeetaarion toteutuksen kannalta tärkeässä roolissa on ollut löytää ratkaisut VIMS-nimisen ilmiön aiheuttaman pahoinvoinnin välttämiseksi.

Tällä hetkellä virtuaaliplaneetaarion sisältö muodostuu Auringosta, Merkuriuksesta, Venuksesta, Maasta sekä komeetta P67/Churyumov-Gerasimenkosta. Uusien kohteiden lisääminen on luonnollisesti yksi tärkeistä planeetaarion kehitystavoitteista. Näiden lisäksi planeetaarioon olisi mahdollista sisällyttää myös monia muita ominaisuuksia kuten mahdollisuus aurinkokunnan ja sen kappaleiden kokojen vertailulle.

Avainsanat Virtuaalitodellisuus, planeetaario, aurinkokunta, plasmaympäristöt

Alkusanat

Haluan kiittää professori Esa Kalliota tästä erittäin mielenkiintoisesta työn aiheesta ja sen ohjaamisesta. Työ tutustutti minut moneen uuteen aiheeseen ja sen avulla olen myös voidut muodostaa paremman kuvan siitä, mitä voin ja haluan tulevaisuudessa tehdä.



Eetu Reinikainen

Espoossa 6. toukokuuta 2020

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ALKUSANAT	4
SISÄLLYSLUETTELO	5
SYMBOLIT JA KÄSITTEET	6
1 JOHDANTO	7
2 TEOREETTINEN TAUSTA	8
2.1 AURINKOTUULI	8
2.2 SIMULAATIOT AURINKOTUULEN VAIKUTUKSISTA	9
3 AURINKOKUNNAN PLASMAYMPÄRISTÖT	13
3.1 MAAN KALTAISEN VUOROVAIKUTUS	13
3.2 VENUKSEN KALTAISEN VUOROVAIKUTUS	14
3.3 KOMEETAN KALTAISEN VUOROVAIKUTUS	16
3.4 KUUN KALTAISEN VUOROVAIKUTUS	16
4 AALTO-YLIOPISTON VIRTUAALIPLANETAARIO	18
4.1 TAUSTAA	18
4.2 TOTEUTUS	19
4.3 SISÄLTÖ	22
4.4 POHDINNAT	25
5 YHTEENVETO	29
LÄHTEET	31
A HTC VIVE PYSTYTYSOHJE	34

Symbolit ja käsitteet

Symbolit

B	magneettikenttä
E	sähkökenttä
J	virrantiheys
k_b	Boltzmannin vakio, $1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
n_e	elektronitiheys
n_p	makrohiukkasen ionitiheys
p_e	elektronien muodostama paine
q_e	elektronin varaus, $-1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
q_p	makrohiukkasen varaus
U_e	elektronien keskimääräinen nopeus
ϵ_0	tyhjiön permittiivisyys, $8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti, $1,257 \times 10^{-6} \text{ N/A}^2$

Käsitteet

AU	Astronomical Unit. Tähtitieteellinen yksikkö, joka vastaa etäisyyttä, jolla Maa keskimäärin kiertää Aurinkoa, 149 597 871 km
Ekliptika	Maan kiertoradan muodostama taso, jonka läheisyydessä myös muut aurinkokunnan planeettojen kiertoradat sijaitsevat
Huotra	Plasmaympäristön osa, jota pitkin aurinkotuuli ohittaa kappaleen ja joka englanniksi tunnetaan termillä magnetosheath
IMF	Interplanetary Magnetic Field. Aurinkotuulen muodostama avaruudessa etenevä magneettikenttä
Makrohiukkanen	Plasmasimulaatiossa identtisten ionien muodostama kokonaisuus
Plasma	Varauksellisista hiukkasista muodostunutta kaasua, jonka kokonaisvaraus on usein nolla
VIMS	Visually Induced Motion Sickness. Pahoinvointi, joka voi syntyä, mikäli näkö- ja tasapainoaistin kokemat havainnot henkilön liikkeestä eivät vastaa toisiaan
Ångström, Å	Pituuden yksikkö, joka vastaa 10^{-10} metriä

1 Johdanto

Tietokoneiden keksimisen jälkeen monien avaruustutkimusten suorittaminen on muuttunut selvästi aiempaa tehokkaammaksi muun muassa simulaatioiden ansiosta. Simulaatioita käyttäen tutkimuksia on voitu tehdä tilanteista ja kohteista, joiden tutkiminen muilla tavoilla olisi ollut erittäin haastavaa tai jopa mahdotonta. Myös tutkimustulokset ovat simulaatioiden avulla pystytty tuottamaan ihmisen kannalta helposti tulkittavassa visuaalisessa muodossa. Simulaatiot kuitenkin rajoittuvat tietokoneen tai muun laitteen ruudulta havaittaviksi kuviksi. Viemällä simulaatiotulokset ihmisen kannalta luonnollisempaan kolmiulotteiseen ympäristöön, virtuaalitodellisuuteen, voidaan mahdollistaa entistä luontevampi tapa havainnoida saatuja avaruustutkimustuloksia.

Vuodesta 2016 lähtien markkinoille on tuotu runsaasti kuluttajille tarkoitettuja virtuaalitodellisuuslaitteita [1]. Pääasiallisesti nämä laitteet ja niille kehitetyt sovellukset ovat olleet suunnattuja pelaamistarkoitukseen, mutta niille on luotu myös paljon sisältöä opetustarkoitukseen, ja niitä on käytetty jopa tutkimusten apuvälineenä. Yksi esimerkki tällaisesta opetus- ja tutkimuskäyttöön kehitetystä sovelluksesta on Aalto-yliopistossa toteutettu virtuaaliplaneetaario, Aalto Virtual Planetarium. Se on virtuaalitodellisuutta hyödyntävä sovellus, jossa on mahdollista päästä havaitsemaan aurinkokunnan sisäosien kappaleita sekä näitä ympäröiviä plasmaympäristöjä. Sen pääasiallisena tavoitteena on esittää Aalto-yliopistossa tehtyjen avaruustutkimuksien tuloksia tavallisia simulaatiota havainnollistavammin sekä toimia opetus- ja esittelyvälineenä.

Virtuaaliplaneetaarion kehityksen taustalla on useita tutkimuksia esimerkiksi erilaisista plasmaympäristöistä, kuten Maan ja komeetta 67P/Churyumov-Gerasimenkon plasmaympäristöistä sekä joistakin avaruusluotaimista ja -operaatioista, kuten Rosetta-luotaimesta ja Suomi100 -satelliitista. Näiden tutkimusten tuloksina on saatu muun muassa kyseisiä kohteita kuvaavia simulaatioita. Simulaatiotulokset ovat puolestaan toimineet toteutetun virtuaaliplaneetaarion aineistopohjana. [2]

Työn tarkoituksena on selvittää, Aalto-yliopistossa kehitettyä virtuaaliplaneetaariota esimerkkinä käyttäen, miten virtuaalitodellisuutta voidaan hyödyntää avaruustutkimustulosten esittämiseen. Tämä toteutetaan esittämällä kokonaisvaltainen kuva planeetaarion toteutuksen taustoista. Työn alkuun esitellään tietoa aurinkotuulesta sekä virtuaaliplaneetaarion luomiseen käytettyjen simulaatioiden toteutuksesta, ja tätä seuraa näiden simulaatioiden tulosten eli erilaisten aurinkokunnan plasmaympäristöjen esittely. Tämän jälkeen tarkastellaan lähinnä teoreettisella tasolla, kuinka nämä tulokset on toteutettu virtuaalitodellisuudessa havaittavassa muodossa. Tarkastelu ei täten sisällä varsinaista ohjelmakoodia tarkastelevaa osuutta. Lopuksi tehdään katsaus planeetaarion nykyhetken tilanteesta sekä sen mahdollisista tulevaisuuden kehitysalueista.

2 Teoreettinen tausta

Aalto-yliopiston virtuaaliplanetaarion taustalla on paljon tutkimusta aurinkokunnan kappaleista ja niiden plasmaympäristöistä. Suurin plasmaympäristöihin vaikuttava tekijä on aurinkotuuli, joka vaikuttaa suuresti koko aurinkokunnan olosuhteisiin. Tutkittaessa aurinkotuulen vaikutuksia erilaisten kappaleiden plasmaympäristöihin, suuressa roolissa ovat toimineet simulaatiot, jotka ovat avaruusluotaimella toteutettuun tutkimukseen nähden selvästi helpommin ja edullisemmin toteutettavissa. Virtuaaliplanetaarion luomisen kannalta simulaatiot ovatkin olleet välttämättömiä, sillä tämä on luotu täysin simulaatioista saatujen tulosten perusteella.

2.1 Aurinkotuuli

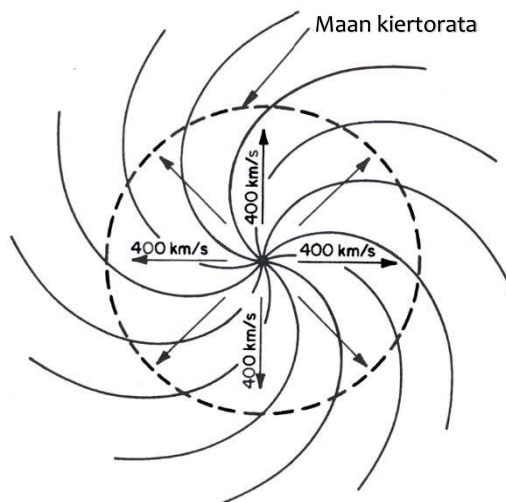
Aurinkotuuleksi kutsutaan Auringosta peräisin olevaa ionisoituneiden hiukkasten eli plasman muodostamaa jatkuvaa Auringosta poispäin suuntautuvaa virtausta. Tämä koostuu pääasiassa vetyatomeista peräisin olevista protoneista ja elektroneista, mutta mukana on myös hieman esimerkiksi heliumytimiä sekä muista Auringossa esiintyvistä alkuaineista peräisin olevia ioneja [3]. Aurinkotuulen etenemisnopeus voi vaihdella hyvinkin paljon riippuen esimerkiksi auringon sen hetkisestä aktiivisuudesta. Esimerkiksi 1 AU:n etäisyydellä eli Maan keskimääräisellä etäisyydellä Auringosta virtauksen etenemisnopeus voi vaihdella noin 200 km/s nopeudesta jopa yli 1000 km/s nopeuteen, mutta tyypillisimmillään aurinkotuuli kuitenkin etenee noin 400 km/s nopeudella. Tämä nopeus on selvästi aurinkotuulen äänen nopeutta suurempi, joka 1 AU:n etäisyydellä on noin 60 km/s. Täten vapaasti avaruudessa edetessään aurinkotuuli kulkee selvästi ylitäänisellä nopeudella. [4, s. 94,96]

Aurinkotuuli on lähtöisin Aurinkoa ympäröivästä koronaksi kutsutusta kaasukehästä. Koronassa sijaitseva kaasu on lämpötilaltaan noin miljoona astetta, minkä seurauksena myös siinä sijaitsevan kaasun paine muodostuu suureksi. Paine pyrkii laajentamaan kaasua, mutta koronan sisäosissa paineen vaikutus ei kuitenkaan riitä voittamaan Auringon painovoimasta aiheutuvaa laajenemista estävää vaikutusta. Koronan ulko-osissa paineen vaikutus puolestaan ylittää painovoiman aikaansaaman vaikutuksen, minkä seurauksena kaasu pääsee laajenemaan. Se että paineen vaikutus voittaa lopulta painovoiman johtuu siitä, että paineen vaikutuksen voimakkuus pienenee etäisyyteen nähden kääntäen verrannollisesti, kun puolestaan painovoiman vaikutus heikkenee kääntäen verrannollisena etäisyyden neliöön. Tämän tapahtuman seurauksena koronan ulko-osien kaasu pääsee karkaamaan planeettainväliseen avaruuteen muodostaen aurinkotuulen. [4, s. 97–104]

Aurinkotuulen mukana kulkee sen hyvin sähköä johtavien ionien ansiosta myös magneettikenttä, jonka aurinkotuuli perii Auringon magneettikentästä. Aurinkotuulen mukana kulkevaa magneettikenttää kutsutaan planeettainväliseksi magneettikentäksi, josta yleensä käytetään englanninkielistä lyhennettä IMF (Interplanetary Magnetic Field). IMF:n sanotaan usein olevan jäänyt aurinkotuuleen, millä tarkoitetaan tämän kulkeutumista täysin aurinkotuulen hiukkasten mukana. Tämä aiheutuu siitä, että IMF:n magneettivoima säilyy laajenevassa aurinkotuulella. Tämän tiedon pohjalta voisi olettaa, että IMF:ää voisi mallintaa suoraan Auringosta poispäin suuntautuvilla suorilla magneettikenttäviivoilla. Tämä ei kuitenkaan pidä paikkaansa, mikä johtuu muun muassa Auringon pyörimisestä akselinsa suhteen, joka on likimain kohtisuorassa ekliptikaan eli planeettojen muodostamaan tasoon nähden. Tämän seurauksena samaan magneettikenttäviivaan kytkeytyneet eri ajan hetkillä Auringosta lähteneet hiukkaset suuntautuvat eri suuntiin

aikaansaaden IMF:n kenttäviivojen muodostumisen spiraaliin muotoon kuvan 1 tapaan. Esimerkiksi Maan kohdalla IMF on taittunut etenemissuuntaan nähden noin 45° kulmaan. [4, s. 104–107]

Aurinkotuuli voi vaikuttaa aurinkokunnan avaruusympäristöön niin IMF:n kuin myös itse hiukkastenkin kautta. Mikäli aurinkotuulen eteen tulevalla kappaleella on magneettisia ominaisuuksia, vaikuttaa siihen sekä IMF:n aiheuttama magneettinen paine että hiukkasten aiheuttama työntävä paine, jota usein kutsutaan dynaamiseksi paineeksi. Mikäli puolestaan kappaleella ei ole magneettisia ominaisuuksia, muodostuu vaikutus pääosin dynaamisen paineen aiheuttamana. Dynaamisesta paineesta suurin osa muodostuu aurinkotuulen protonien vaikutuksesta, niiden selvästi elektroneja suuremman massan ansiosta. [4, s. 93–94] Dynaamisen ja magneettisen paineen lisäksi aurinkotuuli muodostaa myös termisen paineen [4, s. 93], joka muodostuu plasman lämpöliikkeen vaikutuksesta. Aurinkotuulen vaikutusalueita kutsutaan heliosfääriksi, ja tämän uskotaan ulottuvan noin 100 Maan kiertoradan säteen, AU, etäisyydelle, eli selvästi kaikkia aurinkokunnan planeettoja kauemmille etäisyyksille [3].



Kuva 1. Aurinkotuulen mukana kulkee magneettikenttä, jonka kenttäviivat muodostuvat spiraaliksi Auringon pyörimisen vaikutuksesta.
Muokattu lähteestä [4, s. 108]

2.2 Simulaatiot aurinkotuulen vaikutuksista

Aurinkotuulen vaikutusten tutkiminen on yksi vieraille aurinkokunnan kappaleille lähetettävien avaruusluotainten tärkeitä tutkimuskohteita. Näitä vaikutuksia koskevia tutkimuksia voidaan kuitenkin suorittaa myös jo kauan ennen luotaimen lähettämistä, suorittamalla kohteen plasmaympäristöstä simulaatioita. Simulaatiot pystytään luomaan hyödyntäen Maan pinnalta ja muualta avaruudesta käsin aiemmin saatuja tutkimustuloksia. Kappaleelle lähetettävällä avaruusluotaimella simulaatioiden paikkansapitävyys voidaan varmistaa, ja toisaalta luotaimien avulla löytyy välillä myös uusia odottamattomia ilmiöitä, joiden mahdollisia syitä voidaan jälleen tutkia simulaatioiden avulla.

Suomessa on jo pitkään oltu hyvin aktiivisia niin plasmaympäristöihin liittyvien simulaatioiden kuin myös avaruusalusten ja -luotainten saralla. Suomalaisia mittalaitteita on esimerkiksi ollut yli 40 avaruusaluksessa [5]. Näitä ovat muun muassa 1988 suomalaisen avaruushistorian aloittaneet Phobos 1 ja 2 -luotaimet, joiden tutkimuskohteena

toimi Mars [5], sekä Venusta tutkinut Venus Express [6]. Näiden suorittamat avaruusmittaukset toimivat myös motivoijana uusille avaruusplasmasimulaatioille, kuten simulaatioille Marsin plasmaympäristöstä [7]. Viimeaikaisia esimerkkejä avaruusaluksista, joissa on hyödynnetty suomalaisia mittalaitteita ovat puolestaan vuosina 2014–2016 toimineet Rosetta-luotain sekä sen Philae-laskeutuja, jotka tutkivat komeetta 67P/Churyumov-Gerasimenkoa [8], Maan kiertoradalla Maata kuvaava ja tutkiva Suomi 100 -satelliitti [9] sekä 2018 Merkuriusta kohti laukaistu BepiColombo [5]. Nykyään, muun muassa edellä mainittujen avaruusalusten suorittamien mittaustulosten perusteella, aurinkokunnan plasmasimulaatioita Suomessa toteuttavat esimerkiksi Aalto-yliopisto ja Ilmatieteen laitos [10].

Plasmaympäristöjen simulaatiot voidaan toteuttaa hyvin usealla tapaa, mutta yleisimmin käytetyt toteutustavat voidaan jakaa kolmeen eriävään kokonaisuuteen. Simulaatiototeutuksista monimutkaisin on täysin kineettinen malli, jossa sekä elektronit että ionit käsitellään yksittäisinä massallisina hiukkasina. Muihin malleihin verrattuna tässä mallissa plasmasta tehdään vähemmän ennakko-oletuksia, mutta koska kaikki hiukkaset käsitellään erillisinä kappaleina, on kyseinen malli laskennallisesti erittäin raskas. Tämän takia täysin kineettistä mallia voidaan yleensä käyttää lähinnä pienten alueiden tutkimiseen, mutta toisaalta tällä pienellä alueella voidaan tutkia hyvin nopeitakin ilmiöitä. Täysin kineettisessä mallissa, kuten muissakin esiteltävissä malleissa plasman sähkökentän ja magneettikentän ajatellaan olevan toisistaan riippuvaisia, eli esimerkiksi magneettikentän muutos muuttaa myös sähkökenttää, joka puolestaan aikaansaa jälleen magneettikentän muutoksen. [11]

Magnetohydrodynaamiseksi (MHD) malliksi kutsutussa simulaatiotyypissä puolestaan tehdään useita simulaatiotilannetta yksinkertaistavia ennakko-oletuksia. Siinä elektroneja ja ioneja käsitellään ikään kuin nesteinä, jotka pysyvät koossa nesteen sisäisten törmäysten sekä sähkömagneettisten voimien ansiosta. Nämä nesteet muodostavat plasmakokonaisuuksia, joille voidaan simulaation avulla saada ainoastaan parametrien keskiarvoja, kuten keskimääräinen nopeus, tiheys ja lämpötila. Mallissa oletetaan, että plasma on kokonaisvaraukseltaan neutraalia, toisin kuin täysin kineettisessä mallissa, jossa aurinkotuulen neutraalius ei ole välttämätöntä. MHD-malli olettaa myös esimerkiksi, että plasman ominaisuuksia voidaan kuvata yhdellä tai useammalla Maxwellin jakaumalla. Vaikka MHD-malli tekeekin useita oletuksia, on se hyvin käytetty simulaatiotyyppi, sillä sen vaatima laskentateho on selvästi alhaisempi kuin täysin kineettisellä mallilla ja seuraavaksi esiteltävällä hybridimallilla. Täten MHD-mallin avulla voidaan vaittomammin mallintaa myös laajoja alueita käyttäen suuria tarkkuuksia. Yleisesti ottaen MHD-malleja käytetään kuitenkin lähinnä tutkittaessa hitaita ja suuren mittakaavan prosesseja. [11]

Täysin kineettisen mallin ja MHD-mallin väliin jää simulaatiototeutus, jota kutsutaan hybridimalliksi. Tämän mallin erikoisuus on, että se käsittelee ioneja massallisina hiukkasina, mutta elektroneja se käsittelee massattomana nesteinä. Täten hybridimalli on ikään kuin kompromissi täysin kineettisen ja MHD-mallin välillä. Sen avulla simulaation sisäisistä pienekin mittakaavan tapahtumista voidaan saada MHD-mallia luotettavampia tuloksia, ja toisaalta simulaatioita voidaan suorittaa suhteellisen hyvällä paikkaerotuskyvyllä myös suuremmille alueille kuitenkaan tarvitsematta täysin kineettisen mallin vaatimaa laskentatehoa. [11] Muun muassa näiden syiden takia Aalto-yliopiston virtuaaliplanetaario onkin tähän mennessä toteutettu lähes täysin hybridimallin tuottamien simulaatioiden pohjalta.

Kuten muissakin malleissa, myös hybridimallissa on omat oletuksensa. Elektronien nestemäisen esitysmuodon lisäksi myös ioneja käsiteltäessä tehdään oletuksia, sillä yksittäisten hiukkasten sijaan ioneja käsitellään ikään kuin pieninä simulaatiossa

käytettävien solujen kokoisina pilvinä, joita kutsutaan makrohiukkasiksi. Makrohiukkasten voidaan ajatella sisältävän useita identtisiä ioneja, joiden massa riippuu makrohiukkasen kokonaismassasta ja hiukkastiheydestä. [11] Lisäksi virtuaaliplanetaariota varten käytetyssä niin kutsutussa kvasineutraalissa hybridimallissa oletetaan MHD-mallin tavoin plasman olevan varaukseltaan neutraalia, jolloin sen varaustiheydelle pätee yhtälö

$$\rho_q = \sum_p q_p n_p + q_e n_e = 0, \quad (1)$$

jossa

q_p on makrohiukkasen varaus
 n_p on makrohiukkasen ionitiheys
 q_e on elektronin varaus
 n_e on elektronitiheys [10] [11].

Kvasineutraalia hybridimallia ja sen toimintaa kuvaa varaustiheyden yhtälön lisäksi myös useita muita fysiikan lakeja. Ensinnäkin makrohiukkasten liike plasmassa on sidottu suoraan plasman sähkömagneettiseen kenttään Lorentzin voiman avulla [10], joka voidaan esittää seuraavassa hiukkasen kokeman painovoiman sekä mahdolliset muut voimat huomioivassa muodossa

$$m_p \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = q_p (\mathbf{E} + \mathbf{v}_p \times \mathbf{B}) + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_m, \quad (2a)$$

$$\frac{d\mathbf{x}_p}{dt} = \mathbf{v}_p, \quad (2b)$$

jossa

m_p on makrohiukkasen massa
 $\mathbf{v}_p$ on makrohiukkasen nopeus
 $\mathbf{E}$ on plasman sisäinen sähkökenttä
 $\mathbf{B}$ on plasman sisäinen magneettikenttä
 $\mathbf{F}_g$ on plasman kokema painovoima
 $\mathbf{F}_m$ on plasman kokemat muut voimat
 $\mathbf{x}_p$ on makrohiukkasen paikka.

Elektronien liikkeen ajatellaan kvasineutraalissa hybridimallissa puolestaan voivan muuttua äärettömän nopeasti, eli niillä ei ajatella olevan hitautta normaalin massallisen kappaleen tapaan. Täten kvasineutraalissa hybridimallissa elektronien liikettä kuvataan niin sanotulla yleisellä Ohmin lailla muodossa

$$\mathbf{E} + \mathbf{U}_e \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{J}}{\sigma} + \frac{\nabla p_e}{q_e n_e}, \quad (3)$$

jossa

$\mathbf{U}_e$ on elektronien keskimääräinen nopeus
 σ on plasman sähkönjohtavuus
 $\mathbf{J}$ on plasman virrantiheys
 p_e on elektronien muodostama paine.

Elektronien tapauksessa käytetään myös ideaalikaasun tilayhtälöä, joka sitoo elektronien muodostaman paineen niiden tiheyteen ja lämpötilaan seuraavasti

$$p_e = n_e k_b T_e, \quad (4)$$

jossa k_b on Boltzmannin vakio ja T_e on elektronien lämpötila. Plasman virrantiheyden ratkaisemiseksi puolestaan käytetään yhtälöä

$$\mathbf{J} = \sum_p q_p n_p \mathbf{V}_p + q_e n_e \mathbf{U}_e, \quad (5)$$

jossa $\mathbf{V}_p$ on makrohiukkasen keskimääräinen nopeus. Kuten aiemman perusteella voi todeta, ovat plasman sähkömagneettiset ominaisuudet erittäin tärkeässä osassa simulaatioiden suorittamisessa. Näitä ominaisuuksia kuvaamaan kvasineutraalissa hybridimallissa käytetään neljää Maxwellin yhtälöä, jotka esitetään muodossa

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}, \quad (6)$$

jossa μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti,

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_q}{\varepsilon_0}, \quad (9)$$

jossa ε_0 on tyhjiön permittiivisyys. Yhtälöiden 1–9 avulla voidaan siis kuvata kvasineutraalin mallin fysikaaliset ominaisuudet. Yhtälöiden avulla suoritettavat simulaatiot voivat kuitenkin erota toisistaan paljonkin, sillä näiden lisäksi tuloksiin vaikuttavat esimerkiksi parametreille annettavat alkuarvot, kuten simuloitavan kappaleen tuottaman magneettikentän suuruus sekä plasman tiheys ja lämpötila. [10] [11] [12] Toisaalta tämä on simulaatioiden hienous, sillä niiden avulla voidaan suorittaa suhteellisen helposti tutkimuksia niistäkin kappaleista, joiden tutkiminen muita keinoja hyödyntäen olisi monin kerroin haastavampaa tai jopa mahdotonta.

3 Aurinkokunnan plasmaympäristöt

Aurinkotuulen vaikutus aurinkokunnan kohteisiin voidaan ryhmitellä neljään eri tyyppiin ensinnäkin sillä perusteella, että onko kappaleella sisäistä magneettikenttää ja toisaalta ympäröikö sitä kaasukehä. Tässä luvussa viimeisenä esitellään Kuun kaltainen vuorovaikutus, mutta tällä hetkellä Aalto-yliopiston virtuaaliplaneetaariosta ei kuitenkaan vielä löydy tätä vuorovaikutustyyppiä esittelevää kappaletta. Se on kuitenkin haluttu esitellä ensinnäkin paremman kokonaiskuvan luomiseksi ja toisaalta ennakoiden tilannetta, jossa tällainen kappale päätetään järjestelmään lisätä.

3.1 Maan kaltainen vuorovaikutus

Maan kaltainen vuorovaikutus on aurinkokunnan planeettojen keskuudessa yleisin vuorovaikutustyyppi aurinkotuulen kanssa. Tämän vuorovaikutuksen kautta syntyvä plasmaympäristö esiintyy Maan lisäksi Merkuriuksella, Jupiterilla, Saturnuksella, Uranuksella sekä Neptunuksella. Kappaleille on ominaista, että niillä on sekä magneettikenttä että ilmakehä, jotka kummatkin luovat omat ominaisuutensa kappaletta ympäröivään plasmaympäristöön.

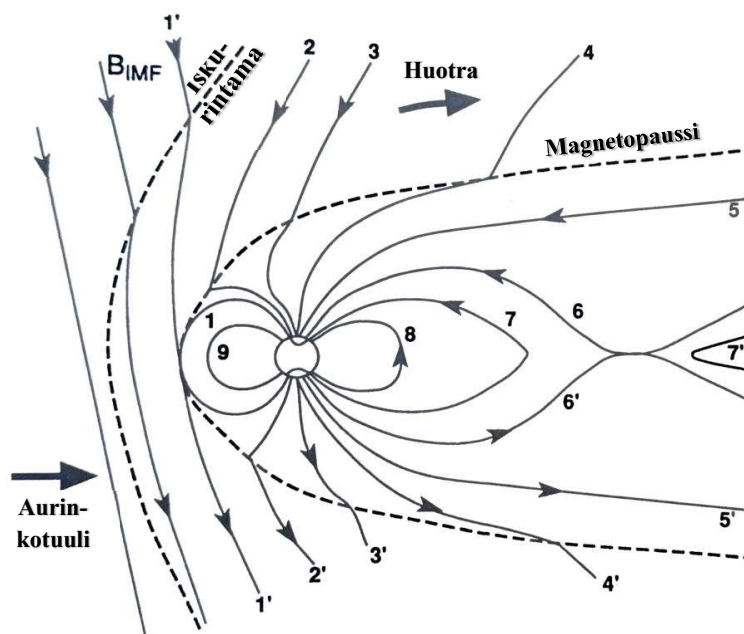
Kappaleen magneettikentän ja aurinkotuulen vuorovaikutus muodostaa kappaleen ympärille magnetosfäärin sekä magnetosfäärin ulkopuolella sijaitsevan keulasokin eli iskurintaman. Iskurintamassa kappaleen magneettikentän vuorovaikutus aurinkotuulen varauksellisten hiukkasten kanssa johtaa näiden hiukkasten hidastumiseen ylitäänisestä aliääniseksi. [13] Samalla aurinkotuuli myös puristuu kokoon, sekä lämpenee ja muuttaa suuntaansa [14]. Nämä ilmiöt jatkuvat myös iskurintamaa seuraavassa huotrassa (magnetosheath) eli kappaleen ympärille muodostuvassa vyöhykkeessä, jota pitkin suurin osa aurinkotuulesta ohittaa kappaleen ja sen magnetosfäärin [13].

Huotran jälkeen alkaa kappaleen varsinainen magnetosfääri, jonka uloin osa on magnetopausi. Se on rajapinta, jossa aurinkotuulen aiheuttama paine, eli täten myös voima, joka kappaleen magneettikenttään kohdistuu, on tasapainossa magneettikentän aurinkotuuleen vaikuttavan voiman kanssa. Täten aurinkotuulen hiukkasvirta on rajapinnassa keskimäärin tangentiaalista tarkoittaen sitä, että suurin osa aurinkotuulen hiukkasista ei pääse etenemään magnetopausia lähemmäs kappaletta. [4, s. 169] Lähimmillään kappaletta magnetopausi on suoraan aurinkotuulen suunnassa, jossa aurinkotuulen aiheuttama paine magneettikenttään on suurimmillaan. Kauimmat pisteet puolestaan ulottuvat kauas kappaleen taakse, jossa sijaitsee magnetosfäärin pyrstöksi kutsuttu alue. Esimerkiksi Maalla magnetopausi sijaitsee aurinkotuulen suunnassa keskimäärin noin 10 Maan säteen etäisyydellä sen keskipisteestä, kun taas magnetosfäärin pyrstö sillä ulottuu kymmeniä kertoja kauemmas [13].

Kuten luvussa 2 todettiin, aurinkotuulen mukana kulkeutuu myös sen hiukkasten aiheuttama magneettikenttä, IMF. Tämän magneettikentän suunta on keskimäärin päinvastainen verrattuna esimerkiksi Maan magneettikenttään. Näiden magneettikenttien kohdatessa lähellä magnetopausia ne yhdistyvät tuottaen samalla lämpöä sekä kiihdyttäen ympäröivää plasmaa, minkä seurauksena kyseisen plasman energia lisääntyy. Tätä prosessia kutsutaan magneettikentän uudelleenkytkeytymiseksi. Nämä uudet Maan tai muun planeetan magneettikenttään yhdistyneet magneettikentät jatkavat liikettään magnetosfäärin pyrstöä kohden taittuen samalla pyrstön magneettikenttien suuntaan. Lopulta magneettikentät taittuvat niin, että ne törmäävät toisiinsa. Koska nämä magneettikentät ovat aiemmin kadottaneet yhteytensä ja niiden suunnat ovat törmäyksessä vastakkaisuuntaisia,

tapahtuu niiden välillä uudelleenkytketyminen, jossa jälleen vapautuu suurienergistä plasmaa. Tätä prosessia on havainnollistettu kuvassa 2. [4, s. 242–246]

Magnetopausissa ja magnetosfäärin pyrstössä tapahtuvien uudelleenkytketyksien seurauksena suuren energian saaneet varaukselliset hiukkaset alkavat liikkumaan muodostuneita magneettikenttiä pitkin kohti planeetan napa-alueita. Näiden kiihtyneiden varattujen hiukkasten törmätessä yläilmakehän hiukkasten kanssa syntyy revontulia. Näitä syntyy sekä planeettojen päivä- että yöpuolelle muodostaen magneettisten napa-alueiden ympärille ovaalin muotoiset alueet, joilla revontulet yleisimmin esiintyvät. [4, s. 463–466]



Kuva 2 Maan kaltaisessa vuorovaikutuksessa esiintyviä plasma-alueita, sekä numerojärjestyksessä oleva kuvaus magnetosfäärin magneettikenttäviivojen uudelleenkytketyksen vaiheista. Muokattu lähteestä [4 s. 243]

3.2 Venuksen kaltainen vuorovaikutus

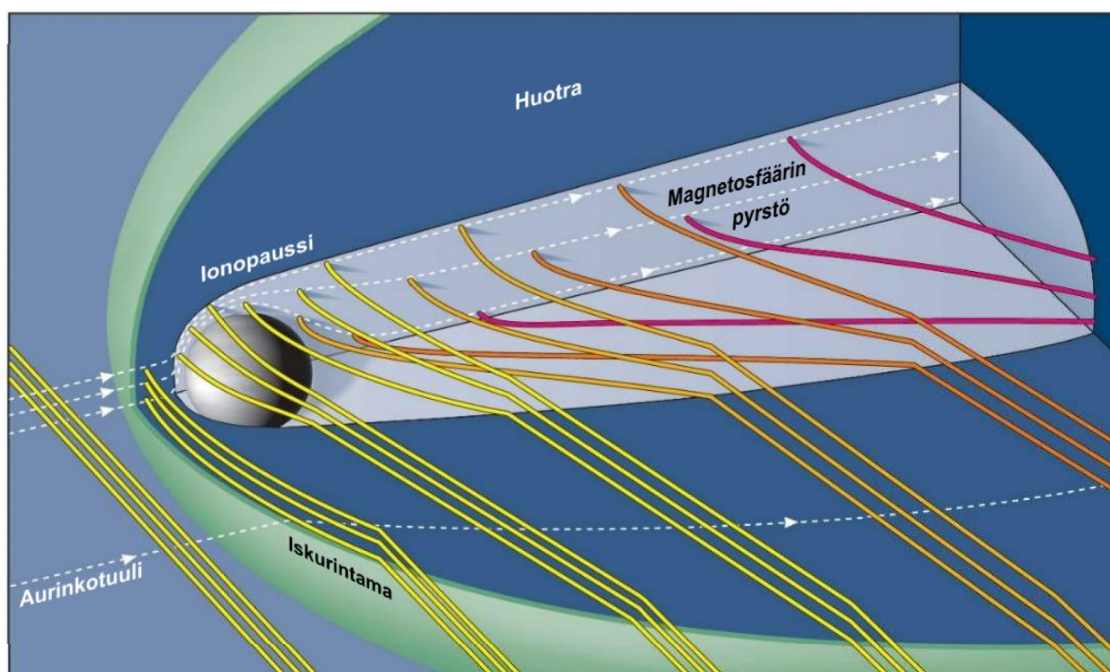
Venuksen kaltaisen vuorovaikutuksen mukaisilla kappaleilla ei Maan kaltaisesta vuorovaikutuksesta poiketen ole vahvaa sisäistä magneettikenttää. Aurinkokunnassa näitä kappaleita ovat Venus ja Mars. Niillä kuitenkin on kaasukehä, jonka tärkein kokonaisuus plasmaympäristön muodostumisen kannalta on ionosfääri. Siinä sijaitsevat ionit muodostuvat pääasiassa auringon säteilyn aiheuttaman fotoionisaation seurauksena. Nämä ionit toimivat hyvänä johteena, minkä ansiosta ionosfääriin muodostuu sen vuorovaikuttaessa aurinkotuulen muuttuvan magneettikentän kanssa Lenzin lain mukaisesti virta, jonka luoma magneettikenttä pyrkii estämään aurinkotuulen magneettikentän muutosta. Tämän ilmiön seurauksena plasman magneettikenttä ja täten plasma itsessään ei pääse etenemään kappaleen pinnalle asti, vaan nämä päätyvät kiertämään kappaleen. [4, 207–208]

Myös Venuksen kaltaisessa vuorovaikutuksessa kappaleen eteen muodostuu iskurintama. Iskurintaman etäisyys kappaleesta on kuitenkin Venuksen kaltaisessa vuorovaikutuksessa huomattavasti pienempi kuin Maan kaltaisessa vuorovaikutuksessa, sillä ionosfäärin suhteellinen vaikutusalue on selvästi suppeampi kuin kappaleen luomalla vahvalla magneettikentällä. Esimerkiksi Venuksella iskurintama sijaitsee vain hieman yli 0,3

Venuksen säteen etäisyydellä sen pinnasta, kun Maalla vastaava luku on noin 13 Maan sädettä. [4, s. 135, 207–211]

Iskurintaman jälkeen sijaitsee jälleen huotra, jonka kautta aurinkotuuli ohittaa kappaleen. Tämän kappaleen ohittavan aurinkotuulen mukana kulkeva magneettikenttä luo kappaleen ympärille IMF:ään kiinnittyvän magneettikentän, jonka kenttäviivat vaikuttavat ikään kuin kietoutuvan kappaleen ympärille kuvan 3 tapaan. Tämä aiheutuu siitä, että iskurintamassa ja huotrassa hidastuneet hiukkaset pysyvät hidastumisesta huolimatta kiinni samoissa IMF:n kenttäviivoissa johtaen sen taipumiseen. [4, s. 209] Magneettikenttäviivat voivat yllättävästi myös päästä tunkeutumaan kappaletta ympäröivään ionopausiin, joka on magnetopausia vastaava huotran jälkeinen rajapinta, jota lähemmäs kappaletta aurinkotuulen hiukkaset eivät yleensä pääse. Ionopausin sisälle päässeiden magneettikenttäviivojen indusoimana muodostuu kappaleelle magnetosfäärin pyrstö. [4, s. 218–219]

Kuten kuvasta 3 voidaan havaita, sijaitsee ionopausi aurinkotuulen suunnassa erittäin lähellä kappaleen pintaa. Esimerkiksi Venuksella tämän on havaittu sijaitsevan alimmillaan vain noin 225 km etäisyydellä sen pinnasta [4, s. 214]. Koska aurinkotuuli pääsee näin lähelle kappaletta, pääsee se myös vaikuttamaan planeettaa ympäröiviin ioneihin ja varsinkin niihin, jotka ionisoituvat ionopausin ulkopuolella. Tämän seurauksena ionit voivat saada aurinkotuulesta energiaa, jonka avulla niiden on mahdollista paeta kappaleelta. Kappaleelta paenneista ioneista onkin havaittu muodostuvan kappaleen taakse alueita, joissa näitä ioneja esiintyy muuta ympäristöä runsaammin. Näitä alueita on tutkittu esimerkiksi Marsin ympäriltä Phobos 2-avaruusluotaimella, jonka tulosten analysointi tietokonesimulaatioiden avulla on osoittanut, että Marsin kaasukehästä pakenee ioneja avaruuteen noin 100–400 grammaa sekunnissa. [15] Marsin ionosfäärin ionien määrä ei kuitenkaan hupene tämän ilmiön seurauksena, sillä ioneja ionisoituu Marsissa Auringon säteilyn ansiosta enemmän kuin mitä aurinkotuuli niitä pystyy poistamaan [16].



Kuva 3 Esitys Venuksen kaltaisen vuorovaikutuksen plasmaympäristöstä ja sen magnetosfäärin pyrstöön mahdollisesti tunkeutuvien magneettikentän kenttäviivojen etenemisestä. Muokattu lähteestä [17].

3.3 Komeetan kaltainen vuorovaikutus

Komeetan plasmaympäristö muodostuu Venuksen kaltaisen vuorovaikutuksen tapaan aurinkotuulen vuorovaikutuksessa kaasukehän kanssa. Komeetat kuitenkin eroavat näistä kappaleista esimerkiksi selvästi pienemmän kokonsa sekä hyvin elliptisen kiertoratansa ansiosta. Ne myös muodostuvat suurelta osin jäädä [18], millä on yllättävän suuri vaikutus niiden plasmaympäristöön.

Komeetan liikkeessa kiertoradallaan lähemmäs Aurinkoa alkaa sille muodostua kokonsa nähden erittäin suuri kaasukehä. Tämä muodostuu Auringon lämmittäessä komeetan pintaa, minkä seurauksena osa komeetan jäädä sublimoituu kaasukehän muodostaviksi kaasuiksi. [18] Kaasukehän suuri koko puolestaan johtuu komeettojen pienestä koosta ja täten niiden alhaisesta painovoimasta, minkä seurauksena kaasu pääsee helposti pakenemaan kauas kappaleesta. Tämän pakenevan neutraaleista hiukkasista muodostuvan kaasukehän virtausnopeuden komeetasta poispäin onkin todettu olevan noin 1 km/s. [4, s. 221]

Auringon läheisyydessä komeettojen plasmaympäristö voi joiltain osin muistuttaa Venuksen kaltaista vuorovaikutusta. Aktiivisille komeetoille voi esimerkiksi muodostua ionosfääri pakenevien neutraalien hiukkasten ionisoituessa Auringon säteilyn vaikutuksesta. Ionosfäärin esiintymisen myötä komeetoilta voi löytyä myös iskurintama, joka on kuitenkin selvästi heikompi kuin muissa jo esitetyissä vuorovaikutustyypeissä. [19] Tämä johtuu siitä, että paetessa ionisoituneet hiukkaset voivat vuorovaikuttaa aurinkotuulen kanssa hyvinkin kaukana varsinaisesta iskurintamasta. Vuorovaikutuksen seurauksena aurinkotuuli luovuttaa energiaansa näille ioneille hidastaen samalla vähitellen omaa nopeuttaan ja täten itse iskurintamassa ei tapahdu enää niin suurta nopeuden alenemista kuin muissa vuorovaikutustyypeissä. Aurinkotuulen hidastumisen myötä myös komeettojen kohdalla IMF voi taittua Venuksen kaltaisen vuorovaikutuksen tapaan sekä ennen kappalletta että sen jälkeen. [4, s. 222]

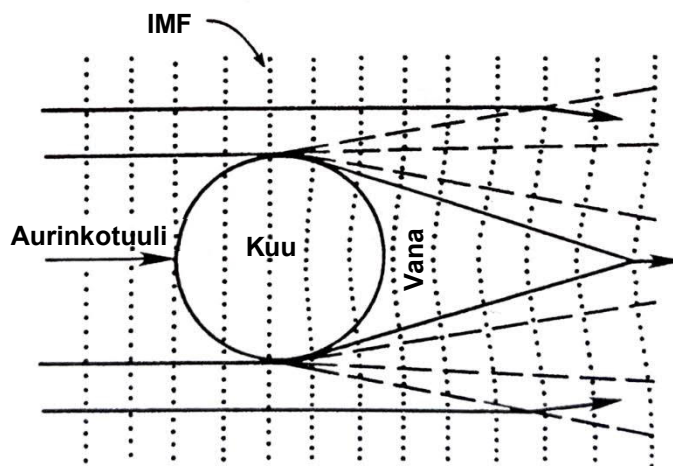
Komeetoilla on myös muita mielenkiintoisia ominaisuuksia. Yhden näistä muodostavat komeetalle auringon läheisyydessä muodostuvat pyrstöt, plasma- ja pölypyrstö. Plasmapyrstö on aurinkotuulen työntämistä ionosfäärin ioneista muodostuva lähes suora auringosta poispäin suuntautuva alue. [18] Pölypyrstö puolestaan muodostuu komeetan mahdollisesti sisältämästä pölystä, jota irtoaa komeetan pinnasta kaasuksi muuttuvien jäiden mukana. Pöly liikkuu auringon säteilyn työntämänä komeetan taakse muodostaen kaarevan pölypyrstön. [20] Toinen mielenkiintoinen komeettojen ominaisuus on niiden suuresta Auringon etäisyyden vaihtelusta aiheutuva kaasukehän suuruuden muutos. Komeetan siirtyessä kauemmas Auringosta, alkaa komeetan kaasukehä heikentyä [19] auringon säteilyn jäätä ja pölyä irrottavan vaikutuksen heiketessä. Lisäksi myös aurinkotuulen ionisoiva vaikutus pienenee. Täten kaasukehä ja ionosfääri harvenevat lopulta niin heikoksi, että aurinkotuuli pääsee kulkemaan komeetan läpi lähes häiriintymättömänä [19].

3.4 Kuun kaltainen vuorovaikutus

Kuun kaltaisella vuorovaikutuksella tarkoitetaan aurinkotuulen vuorovaikutusta sellaisen kappaleen kanssa, jolla ei ole vahvaa sisäistä magneettikenttää eikä kaasukehää. Näitä kappaleita ovat esimerkiksi suurin osa aurinkokunnassa sijaitsevista kuista sekä magnetisoitumattomat asteroidit. Magneetti- ja kaasukehättömyyden seurauksena aurinkotuuli pääsee etenemään näiden kappaleiden pinnalle lähes häiriintymättä johtaen siihen, ettei niille myöskään muodostu esimerkiksi iskurintamaa. Tässä vuorovaikutuksessa ilmeisin

ominaisuus onkin kappaleen taakse muodostuva vana, jonka plasmatiheys on muuta ympäristöä alhaisempi. [4, s. 203] Esimerkiksi Kuulla tämän vanan on havaittu ulottuvan yli 10 Kuun säteen etäisyydelle [21]. Kuuta koskevissa tutkimuksissa on löydetty myös useita muita ilmiöitä kuten pintaan törmäävien hiukkasten sirontaa sekä pienimuotoisia magneettikenttiä Kuun pinnalla [22].

Kappaleen taakse muodostuvan vanan pituus riippuu suuresti ympäristön olosuhteista. Yksi tällainen vaikuttava tekijä on aurinkotuulen virtausnopeuden suhde sen lämpöliikkeeseen. Tämä johtuu siitä, että plasman virtausnopeus osoittaa aina keskimäärin samaan suuntaan, kun taas lämpöliikkeen suunta on satunnaisempaa. Tämä mahdollistaa aurinkotuulen liikkeen myös virtaussuuntaan nähden kohtisuoraan suuntaan, minkä seurauksena aurinkotuuli alkaa sen edetessä täyttämään vanaa. Täten mikäli virtausnopeus on satunnaiseen lämpöliikkeeseen verrattuna suuri, kestää aurinkotuulella pitkään täyttää vana ja täten se muodostuu pitkäksi. Lämpöliikkeen ollessa suurta muodostuu vana puolestaan melko lyhyeksi nopean täyttymisen ansiosta. Toinen vanan pituuteen vaikuttava tekijä on IMF:n suunta kappaleen kohdalla. Mikäli sen suunta on esimerkiksi lähes yhdensuuntainen aurinkotuulen etenemissuunnan kanssa, estää tämä etenemissuuntaan nähden kohtisuorasti tapahtuvaa plasman liikettä johtaen vanan ulottumiseen pitkälle. IMF:n suunnan ollessa, kuvan 4 tapaan, lähes kohtisuorassa aurinkotuuleen nähden on vaikutus puolestaan päinvastainen ja täten vana täyttyy kappaleen jälkeen nopeasti. [4, s. 203–204]



Kuva 4 Esimerkki Kuun kaltaisessa vuorovaikutuksessa kappaleen taakse muodostuvasta vanasta. Magneettikentän kenttäviivojen (katkoviivat) hienoinen taipuminen kappaleen jälkeen aiheutuu vanan täyttävien aurinkotuulen hiukkasten hienoisesta jälkeen jäämisestä. Muokattu lähteestä [4, s. 204].

4 Aalto-yliopiston virtuaalipianetaario

Aalto-yliopiston virtuaalipianetaario on Aalto-yliopistossa kehitetty aurinkokunnan kappaleiden plasmaympäristöjen esittämiseen keskittyvä virtuaalitodellisuussovellus. Pianetaarion plasmaympäristöt on toteutettu suurelta osin luvussa 2.2 kuvatun kvasineutraalin hybridimallin avulla, mutta Auringon simuloimiseen on käytetty myös MHD-mallin mukaisen simulaation tuottamia tuloksia [23]. Tämä luku esittelee kyseisen virtuaalipianetaarion teoreettista toteutusta sekä käy läpi sen nykyhetken tilannetta ja tulevaisuuden kehitysmahdollisuuksia.

4.1 Taustaa

Ajatus virtuaalitodellisuuden kaltaisesta sisällöstä on kiinnostanut ihmisiä jo lähes vuosisadan verran. Esimerkiksi vuonna 1931 Aldous Huxley julkaisi kirjan, *Brave New World*, joka esitteli idean elokuvasta, joka sisältäisi kuvan ja äänen lisäksi havainnon kosketuksesta. Ensimmäinen toteutus tämän kaltaisesta virtuaalitodellisuudesta oli Morton Heiligin 1957 kehittämä Sensorama. Kyseessä oli pyöräilysimulaattori, jossa käyttäjä pystyi esimerkiksi näkemään ympärillään kolmiulotteisen kaupungin, kuulemaan sen äänet, sekä tuntemaan tuulen ja penkin värinän. [24] Tätä seurasi ensin vuonna 1961 julkaistu Philco HMD, joka oli ensimmäinen päähän kiinnitettävä näyttölaite sekä tämän jälkeen vuonna 1968 julkaistu *Sword of Damocles*, joka puolestaan oli ensimmäinen tietokoneella luotua ympäristöä esittävä päähän kiinnitettävä laite. Nämä laitteet olivat kuitenkin erittäin painavia ja kalliita ja vasta vuonna 2016 virtuaalitodellisuuslaitteiden kehitys saavutti pisteen, jossa niiden tekniikka ja hinta oli edennyt riittävälle tasolle aikaansaamaan kuluttajalaitteiden selkeän yleistymisen markkinoilla. [1]

Aalto-yliopistossa näiden laitteiden tulo markkinoille toimi osalla tutkijoista inspiraation lähteenä toteuttaa asioita uudella tavalla. Tämän seurauksena esimerkiksi aurinkokunnan plasmaympäristöjä tutkineet tutkijat saivat idean siirtää simulaatioiden avulla saadut tulokset virtuaalitodellisuuteen, minkä ansiosta syntyi Aalto-yliopiston virtuaalipianetaario. Tutkijoiden alkuperäinen tavoite virtuaalisisällön luomiselle oli saada käyttöön uudenlainen väline avustamaan simulaatiotulosten analysoinnissa sekä tulosten ymmärtämisessä [25]. Sisällön kehityksen aikana ymmärrettiin myös sen mahdollisuudet opetus- ja esittelykäytössä ja täten planetaariota alettiin kehittämään enemmän myös näihin tarkoituksiin. Nämä ovatkin muodostuneet tärkeäksi osaksi planetaariota, ja esimerkiksi vuoden 2017 syksyksi planetaariosta kehitettiin versio, jota käytettiin avaruustieteitä ja teknologiaa esittelevässä Avaruusrekka 2017 -tapahtumassa [26]. Planetaariosta on nykyään myös tarjolla kaikkien saatavilla oleva versio [23], joka toimii lähes kaikilla virtuaalitodellisuuslaitteilla.

Planetaarion kehityksen kannalta tärkeänä tekijänä ovat luonnollisesti toimineet sen luomiseen käytettävät ohjelmistot. Näistä suurimmassa roolissa on toiminut Unity3D [27], jota on käytetty planetaarion pääasiallisena kehitysalustana. Unity3D on C# -pohjainen pelimoottori ja -kehitysohjelmisto, joka täyttää myös teollisuuskäyttöön vaadittavat standardit. Sen etuina ovat olleet esimerkiksi sen monipuoliset mahdollisuudet tarjoava kirjastovalikoima, sen mahdollistama yhteensopivuus lähes kaikkien virtuaalitodellisuuslaitteiden kanssa sekä ohjelmiston kohtuullinen hinnoittelu. Toinen tärkeä kehityksessä käytetty ohjelmisto on ollut Paraview [28], joka on datan analysointiin ja visualisointiin keskittynyt ohjelmisto. Se tarjoaa mahdollisuuden kolmiulotteiseen datan visualisointiin niin tietokoneen näytöllä kuin myös virtuaalitodellisuudessa. Sen avulla on onnistuttu luomaan useita kokonaisuuksia kuten hiukkastiheyttä kuvaavia tasa-arvopintoja,

jotka on voitu tuoda Unity3D-ohjelmiston käytettäväksi. Kokonaisuuksia ei kuitenkaan olla voitu tuoda suoraan Paraviewistä Unityyn vaan välissä on täytynyt käyttää MeshLab-ohjelmistoa [29], jolle tiedosto on ensin tuotu .x3d-tiedostomuodossa. Tämän jälkeen tiedostoa on mahdollisesti vielä hienosäädetty MeshLabin avulla ja lopulta se on muunnettu .dae-tiedostomuotoon, jota käyttämällä kokonaisuus on saatu siirrettyä Unityn käyttöön. [26]

Laitteiston osalta planetaarion kehityksessä ja testauksessa on päädytty käyttämään pääasiassa HTC Vive -laitteistoa. Tämä on vuonna 2016 markkinoille tuotu HTC Corporationin ja Valve Corporationin yhteistyössä kehittämä virtuaalitodellisuuslaitteisto, joka koostuu päähän kiinnitettävän näytön lisäksi esimerkiksi kahdesta ohjaimesta sekä kahdesta tai useammasta liikkeen seurannan mahdollistavasta tukiasemasta [1] [30]. Planeetaarion ajamiseen käytetään Valven kehittämää SteamVR-ohjelmistoa [31], jonka avulla virtuaalisältöä voidaan ajaa HTC Vive -laitteiston lisäksi myös useissa muissa virtuaalitodellisuuslaitteistoissa [26]. Ohjelman ajaminen virtuaalitodellisuuslaitteistolla vaatii kuitenkin suhteellisen tehokkaan tietokoneen. Planeetaarion ajamiseen tarvittavista järjestelmävaatimuksista ei ole suoritettu tarkkoja tutkimuksia, mutta tämän hetken tietojen perusteella voi kuitenkin sanoa, että hyvin todennäköisesti taulukossa 1 esitettävät suurelta osin SteamVR-ohjelmiston sekä HTC Vive -laitteiston järjestelmävaatimuksia vastaavat vaatimukset kuvaavat hyvin myös planetaarion vaatimuksia. Vaatimuksiin vaikuttaa joissain tapauksissa kuitenkin myös käytettävä virtuaalitodellisuuslaitteisto, jonka osalta järjestelmävaatimukset voivat ylittää taulukossa esitettävät vaatimukset.

Taulukko 1 Tässä työssä arvioidut Aalto-yliopiston virtuaaliplanetaarion järjestelmävaatimukset

Järjestelmän komponentti	Vaatimukset
Käyttöjärjestelmä	Windows 7 SP1 / Windows 8.1 / Windows 10
Prosessori	Intel Core i5-4590 / AMD FX 8350 / muu vastaava tai parempi
Näytönohjain	Vähintään: NVIDIA GeForce GTX 970 / AMD Radeon R9 290 / muu vastaava tai parempi Suositus: NVIDIA GeForce GTX 1060 / AMD Radeon RX 480 / muu vastaava tai parempi
Muisti (RAM)	4 Gt
Tallennustila	4 Gt (Virtuaaliplanetaario) + 6,1 Gt (SteamVR)
Muut	1x USB 2.0 tai uudempi, HDMI 1.4 tai uudempi, DisplayPort 1.2 tai uudempi

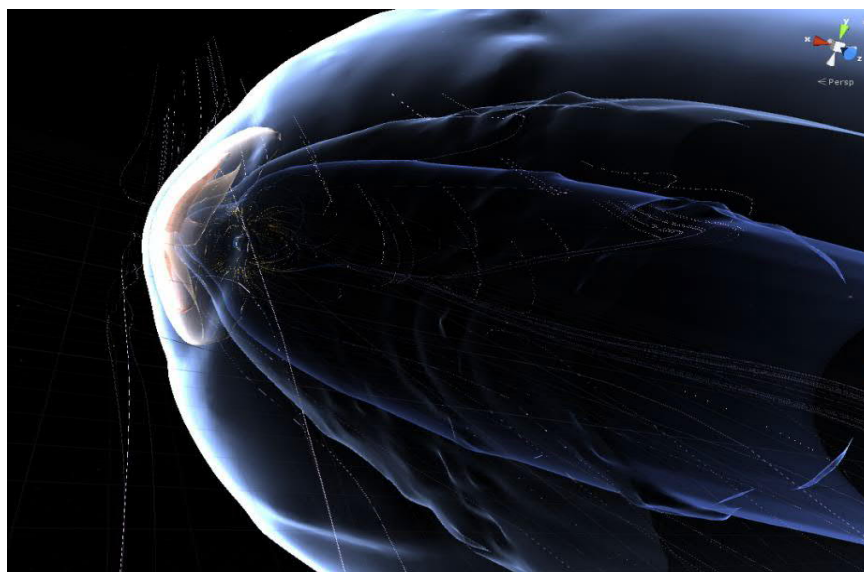
4.2 Toteutus

Planetaario sisältää luonnollisesti useita erilaisia osakokonaisuuksia, joista yhden muodostavat itse aurinkokunnan kappaleet. Tiedot näiden kappaleiden tekstuurien luomista varten on saatu niitä tutkineiden avaruusluotaimien keräämän tutkimustiedon sekä kuvamateriaalin pohjalta. Esimerkiksi Maan osalta kuvamateriaalia on saatu muun muassa Nasan julkisesta The Blue Marble -kuvakokoelmasta [26], joka tarjoaa useiden satelliittien havaintojen perusteella Maapallosta luodut värikuvat jokaiselle kuukaudelle [32]. Tarkkuudeltaan nämä kuvat ja niiden perusteella muodostettavat tekstuurit ovat

86 400x43 200 pikseliä, minkä ansiosta Maan tekstuurin erotuskyvyksi saadaan noin 500 metriä pikseliä kohden [33], mikä sopii planetaarion tarpeisiin erinomaisesti. Normaalisti Unity rajaa tekstuurien koon 8192x8192 pikseliin, mutta Unity kuitenkin sisältää myös Granite-kirjaston, joka mahdollistaa jopa 262 144x262 144 pikselin kokoisten tekstuurien esittämisen ja on täten mahdollistanut halutun tarkkuuden saavuttamisen [26]. Kunkin planetaarion sisältämän kappaleen tekstuurin tarkkuus riippuu kuitenkin suuresti esimerkiksi niin kappaleen koosta ja saatavilla olevasta materiaalista kuin myös tarkkuuden tarpeellisuudesta. Esimerkiksi Maata selvästi pienemmällä Merkuriuksella tekstuurin tarkkuus on Maan tapaan noin 500 metriä pikseliä kohden [23], kun puolestaan suurimmillaan vain noin 4 kilometriä leveällä [26] komeetta 67P/Churyumov-Gerasimenkolla tarkkuuden tulee olla huomattavasti suurempi hyödyllisen tuloksen muodostamiseksi.

Toinen planetaarion kehityksen kannalta tärkeä kokonaisuus muodostuu kappaleiden ympärille sijoitettavista skalaarikentistä. Näillä kentillä on pyritty kuvaamaan kappaleen ympäristössä paikan funktiona muuttuvia ominaisuuksia kuten hiukkastiheyttä. Kenttien mallintaminen on toteutettu kokoamalla niistä useita tasa-arvopintoja. Ratkaisuun on päädytty, sillä mikäli kenttä esitettäisiin normaalin skalaarikentän tapaan jokaisessa pisteessä, jossa se on määritelty, muodostuisi kuvan tuottaminen ja tiedon säilöminen läskennallisesti erittäin kalliiksi. Tämän lisäksi pinnat on luotu läpikuultaviksi, jotteivat ne estä näkemästä muita pintoja tai itse kappaletta. Mikäli läpikuultavuuden voimakkuus olisi kaikkialla tasa-arvopinnoilla vakio, johtaisi tämä hyvin usein sekaviin kokonaisuuksiin. Tämän takia läpikuultavuuden toteutuksessa on päätetty käyttää reunavarjostuksena (rim shading) tunnettua tekniikkaa, jossa läpikuultavuus määritellään suurimmaksi suunnassa, jossa planetaarion käyttäjän katsomissuunta ja tasa-arvopinnan normaali ovat yhdensuuntaiset ja puolestaan pienimmäksi suunnassa, jossa katsomissuunta ja pinnan normaali ovat toisiaan vasten kohtisuorassa. Tekniikka myös mahdollistaa entistä esteettömämmän mahdollisuuden kappaleen tarkastelulle tuoden lisäksi hyvin ilmi pintojen kolmiulotteisuuden kuten kuvasta 5 voidaan havaita. [26]

Skalaarikenttien lisäksi planetaarioon sisältyy myös toisenlaisia kenttiä, vektorikenttiä. Näitä käytetään pääasiassa mallintamaan aurinkotuulen etenemistä sekä sen kanssa vuorovaikuttavien kappaleiden magneettikenttiä. Niiden luominen on päätetty toteuttaa käyttäen virtaviivoja, joiden toteuttaminen esimerkiksi Paraview-ohjelmistossa on suhteellisen yksinkertaista. Paraviewin käytöstä on kuitenkin tässä tapauksessa



Kuva 5 Maan plasmaympäristö vuoden 2017 virtuaaliplanetaariossa, jossa skalaarikentän tasa-arvopinnat on toteutettu reunavarjostuksen avulla. Myös Maapallo on selvästi havaittavissa, pienestä koostaan huolimatta. [26]

aiheutunut myös ongelmia, sillä mahdollisuudet tuoda siinä muodostettuja virtaviivoja muiden sovellusten käytettäväksi ovat osoittautuneet rajallisiksi. [26] Ongelman ratkaisemiseen on kuitenkin löytynyt useita toimintatapoja [26] ja vektorikenttien toteutus onkin nykyään oikein onnistunut. Esimerkiksi verrattaessa kuvaa 5, joka on otettu planetaariosta vuonna 2017 ja vuonna 2020 otettua kuvaa 6 sivulla 22 voidaan selvästi huomata ero magneettikenttien toteutuksien välillä. Vuoden 2017 versiossa otetussa kuvassa Maan magneettikenttä on hyvin heikosti havaittavissa, kun puolestaan vuoden 2020 versiossa tämä ongelma on onnistuttu korjaamaan ja magneettikenttää on helppo havainnoida kauemmiltakin etäisyyksiltä.

Planetaariota luotaessa on täytynyt ottaa huomioon myös monia käyttäjäystävällisyyteen liittyviä tekijöitä, joista todennäköisesti tärkein on ollut VIMS (Visually Induced Motion Sickness) nimisen ilmiön huomioiminen. Tämä on etenkin virtuaalitodellisuuden käyttöön liittyvä ilmiö, jossa näköhavainnon ja tasapainoelimistön kokemat eriävät havainnot voivat aiheuttaa käyttäjälle pahoinvointia. Ilmiö voi tapahtua esimerkiksi odottamattoman kuvakulman kääntymisen tai kääntymättömyyden seurauksena. Tämä on vaikuttanut esimerkiksi planetaarion kappaleiden välisten siirtymien toteutukseen, sillä tällöin kuvakulmaa joudutaan yleensä kääntämään käyttäjän liikkeestä eroavasti. Siirtymien ajaksi kuvaruudulle on päätetty tulostaa ruudukko, johon käyttäjä voi keskittyä eikä näin koe yhtä todennäköisesti VIMS:n mahdollisia vaikutuksia. Ruudukon voi kuitenkin myös halutessaan poistaa, jolloin käyttäjä voi myös siirtymien ajan paremmin havainnoida ympäristöään. [26]

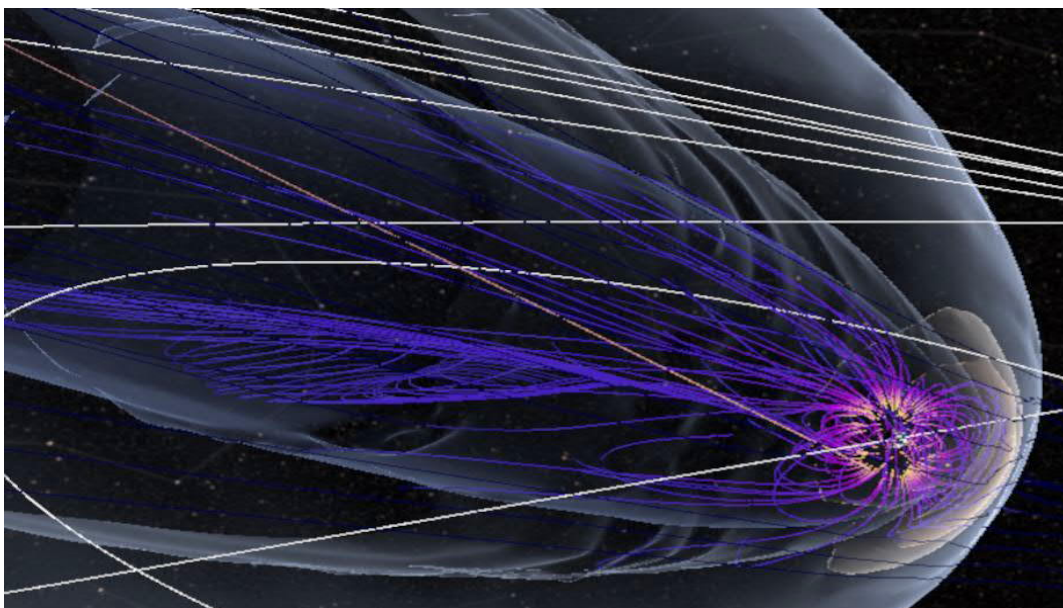
Käyttäjän näkökulmasta yksi tärkeimpiä kokonaisuuksia virtuaalitodellisuudessa koskee siellä tapahtuvaa liikkumista ja virtuaalitodellisuuden kanssa tapahtuvaa vuorovaikutusta. Aalto-yliopiston virtuaaliplaneetariossa onkin määritetty muutamia erilaisia tapoja, joilla käyttäjä pystyy virtuaaliympäristöä hallitsemaan. Myös näiden toteuttamisessa on täytynyt ottaa huomioon mahdolliset VIMS:n aikaansaamat vaikutukset. Planetaarion kehittäjän onneksi tämä on onnistunut erittäin yksinkertaisesti. Testien perusteella on nimittäin havaittu, että liikkuminen on mahdollista toteuttaa liikuttamalla itse hahmoa ja tästä huolimatta aivot ymmärtävät tilanteen ympäristön liikkumisena käyttäjän ympärillä. Täten näköhavainnon ja tasapainoaistin välille ei synny ristiriitaa, jonka seurauksena pahoinvointi voisi ilmetä. Jotta tämän kaltainen toteutustapa toimii, tulee käyttäjän liikkeiden tietenkin vastata hänen odotuksiaan. Täten esimerkiksi liikkuminen eteen- ja taaksepäin on toteutettu niin, että käyttäjän tulee liikkuaakseen painaa ohjaimessa sijaitsevaa liipaisinta ja liikuttaa ohjainta eteen- tai taaksepäin. Tämän seurauksena hahmon liike virtuaalitodellisuudessa suuntautuu ohjaimen liikettä vastakkaiseen suuntaan, eli käyttäjä kokee siis ikään kuin vetävänsä tai työntävänsä edessään olevaa ympäristöä lähemmäs tai kauemmas itsestään. Hieman samanlaista lähestymistapaa on hyödynnetty myös kuvakulman kääntämisessä, eli käyttäjän näkökulmasta kappaleen tai ympäristön kääntämisessä. Myös tämä toteutus vaatii käyttäjää ensin painamaan ohjaimen liipaisinta, ja tämän jälkeen ohjainta kääntämällä käyttäjä voi tuntea kääntävänsä kappaletta. Todellisuudessa kuvakulman kääntäminen toteutetaan liikuttamalla hahmoa halutun pisteen ympärillä ohjaimen kiertosuuntaa vastakkaiseen suuntaan. Tämän lisäksi käyttäjän on mahdollista muuttaa ympäristön mittakaavaa painamalla ensin kummankin ohjaimen liipaisinta ja tämän jälkeen viemällä ohjaimia lähemmäs tai kauemmas toisistaan. Mikäli planetaariota käytetään HTC Vive laitteistolla, voidaan mittakaavan muuttaminen toteuttaa myös yhden ohjaimen avulla liikuttamalla sormeja ohjaimen kosketuslevyllä suuntaan, johon mittakaavan halutaan suurenevan. Puolestaan planetaarion sisältämissä valikoissa liikkumista varten ohjaimen kärjestä piirretään lähtemään säde, jota ohjaimen liikkeet liikuttavat. Valintapainikkeena tällöin toimii ohjaimen liipaisin, jota painamalla valitaan kohde, johon laser sillä hetkellä osoittaa. [26]

4.3 Sisältö

Planetaarion sisältö muodostuu tällä hetkellä lähinnä aurinkokunnan sisäosien kappaleista. Näitä ovat itse Aurinko sekä planeetat Merkurius, Venus ja Maa. Ainoana poikkeuksena toimii komeetta 67P/Churyumov-Gerasimenko, jonka elliptinen kierorata ylettyy kauimmillaan Jupiterin kiertoradan taakse [34]. Jokaiselle näistä kohteista on toteutettu vähintään yksi valmis havaintokokonaisuus, johon käyttäjä voi helposti siirtyä planetaarion valikon avulla. Käyttäjän ei kuitenkaan tarvitse tyytyä pelkästään näihin valmiiksi määriteltyihin kokonaisuuksiin, vaan hän voi myös tietyin rajoittein itse säätää, mitä ilmiöitä kappaleen ympärillä näytetään. Rajoitteet eri kohteissa johtuvat esimerkiksi siitä, ettei kaikkia ilmiöitä ylipäätään esiinny kaikilla kappaleilla ja toisaalta myös siitä, että kohteiden simuloiminen ja mallintaminen virtuaaliplanetaarioon ovat hieman eriävissä kehitysvaiheissa.

Sisällöltään monipuolisin kohde planetaariossa on Maa. Tämän ympäristössä on mahdollista tehdä havaintoja niin magneettikentän aikaansaamista vaikutuksista, ionosfäärin tapahtumista kuin myös joistakin Maata kiertävistä satelliiteista. Kuvassa 6 hyvin esillä olevien magneettikentän vaikutusten osalta sisältö onkin hyvin kattavaa. Aurinkotuulen muokkaamien Maan magneettikenttäviivojen lisäksi muita esiteltäviä osia tämän osalta ovat iskurintama, magnetopausi sekä niin päivä- kuin yöpuolellakin tapahtuva magneettikenttien uudelleenkytkäytyminen. Maan ionosfäärin tapahtumien osalta puolestaan planetaario tarjoaa mahdollisuuden havainnoida Maan yöpuolella esiintyviä revontulia sekä animaatioita 5 MHz ja 10 MHz taajuuksilla kulkevien radiosignaalien etenemisestä ionosfäärissä. Näistä signaaleista 10 MHz taajuisen signaalin voi havaita pääsevän etenemään ionosfäärin läpi joiltain osin jopa lähes häiriöttä, mutta puolestaan 5 MHz taajuisessa signaalissa voidaan nähdä selvästi, kuinka se heijastuu ja taivutuu saapuessaan ionosfääriin. Planetaariosta löytyvistä satelliiteista tärkeimmässä roolissa on toiminut Suomi 100 -satelliitti, jonka tarkastelua varten on luotu myös oma havaintokokonaisuutensa. Tämän lisäksi planetaariosta löytyy myös muita satelliitteja kuten Aalto 1 -satelliitti sekä kansainvälinen avaruusasema ISS, joiden osalta havainnointimahdollisuudet kuitenkin rajoittuvat näiden kiertoratoihin. [26]

Maan lisäksi pisimpään planetaarion kehityksessä mukana ollut kohde on komeetta 67P/Churyumov-Gerasimenko [26]. Tämän toteutuksessa suuressa osassa on ollut itse



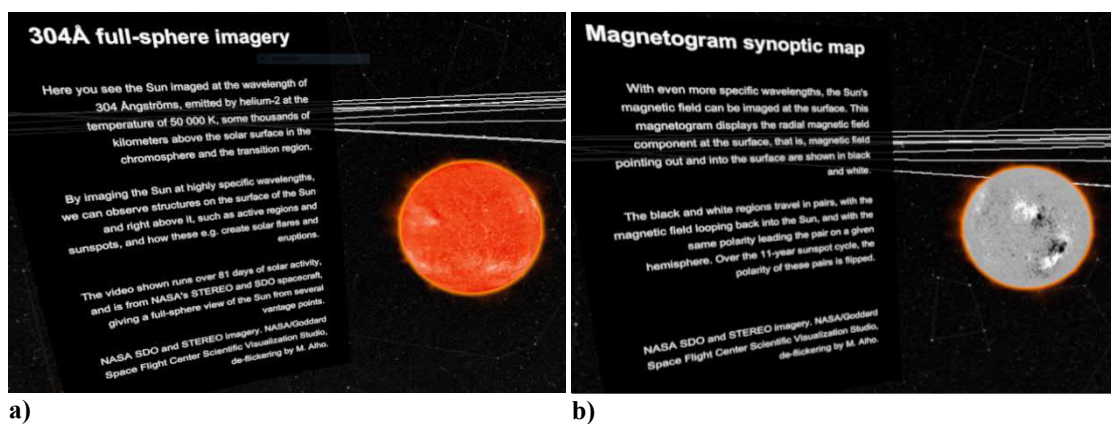
Kuva 6 Maan plasmaympäristö vuoden 2020 virtuaaliplanetaariossa [35]

kohteen esittämisen lisäksi muun muassa mallinnus sen ionisoituneesta kaasukehästä, joka komeetalle tyypillisesti on Auringon läheisyydessä erittäin suuri. Planetaarion malli on tehty esittämään tätä kaasukehää komeetan sijaitessa noin 2,4 AU:n etäisyydellä Auringosta [26]. Kaasukehän kuvaaminen on toteutettu sen ioniteheyksiä kuvaavilla tasavärvipinnoilla, joiden arvojen suuruutta on pyritty ilmaisemaan pintojen värien avulla. Myös kyseistä komeettaa tutkineista Rosetta-luotaimesta ja Philae-laskeutujasta on muodostettu planetaarion omat havaintokokonaisuutensa, joissa nämä kohteet on kuvattu komeetan pinnalla oikeissa mittasuhteissa.

Myös Aurinko on luonnollisesti ollut tärkeä osa planetaarion sisältöä. Yksi sen osalta esitettävistä kokonaisuuksista on Auringon pinnasta otettu video, joka havainnollistaa Auringon aktiivisuutta kokonaisuudessaan 81 päivän ajalta. Tästä näkyy esimerkki kuvassa 7a. Erikoisuutena videossa on se, että se on toteutettu kuvaamalla Aurinkoa ainoastaan 304 Ångströmin (10^{-10} m) aallonpituudella. [35] Kuvaaminen on toteutettu tarkasti vain tällä aallonpituudella, sillä tämä on yksi auringon pinnalla runsaasti esiintyvän heliumin emittoimista aallonpituuksista [35], ja täten tämän avulla on voitu luoda hyvä kuva Auringon pinnan tapahtumista.

Muut Auringon osalta toteutetut kokonaisuudet liittyvät vahvasti sen magneettikenttään. Yksi Auringon magneettikenttää kuvaavista kokonaisuuksista on toteutettu edellisen esimerkin tapaan kuvaamalla Aurinkoa hyvin tarkasti tietyllä aallonpituudella. Tuloksena on voitu muodostaa esitys Auringon pinnan säteittäisestä magneettikentästä eli magneettikentästä, joka suuntautuu joko pinnasta ulos- tai sisäänpäin. Nämä magneettikentän säteittäiset komponentit esitetään kuvan 7b tapaan mustalla ja valkoisella värillä. Auringon magneettikenttää on planetaariossa mahdollista havainnoida myös magneettikenttäviivojen avulla, joiden avulla magneettikenttää voidaan havaita myös Auringon pinnan yläpuolella. Näiden lisäksi planetaariossa on myös nähtävissä auringonpilkkuaniimaatio, joka on luotu Aalto-yliopistossa tuotetun maailman ensimmäisen Auringon kaltaista auringonpilkkujen kiertokulkua kuvaavan simulaation avulla. [35] Myös auringonpilkut liittyvät Auringon magneettikenttään, sillä ne syntyvät magneettikentän estäessä lämmön johtumista Auringon pintaosiin magneettikentän esiintymisalueella täten viilentäen kyseistä aluetta ja näin muodostaen tummempana näkyvät alueet eli auringonpilkut [36].

Myös Merkuriuksen osalta planetaario tarjoaa suhteellisen laajat havainnointimahdollisuudet. Maan tapaan sitä ympäröi sen sisäisen magneettikentän ja aurinkotuulen magneettikentän yhteisvaikutuksesta muodostuva kokonaisuus. Tämän osalta havaittaviin osakokonaisuuksiin kuuluvat magneettikenttäviivat, iskurintama sekä magnetopaussi.



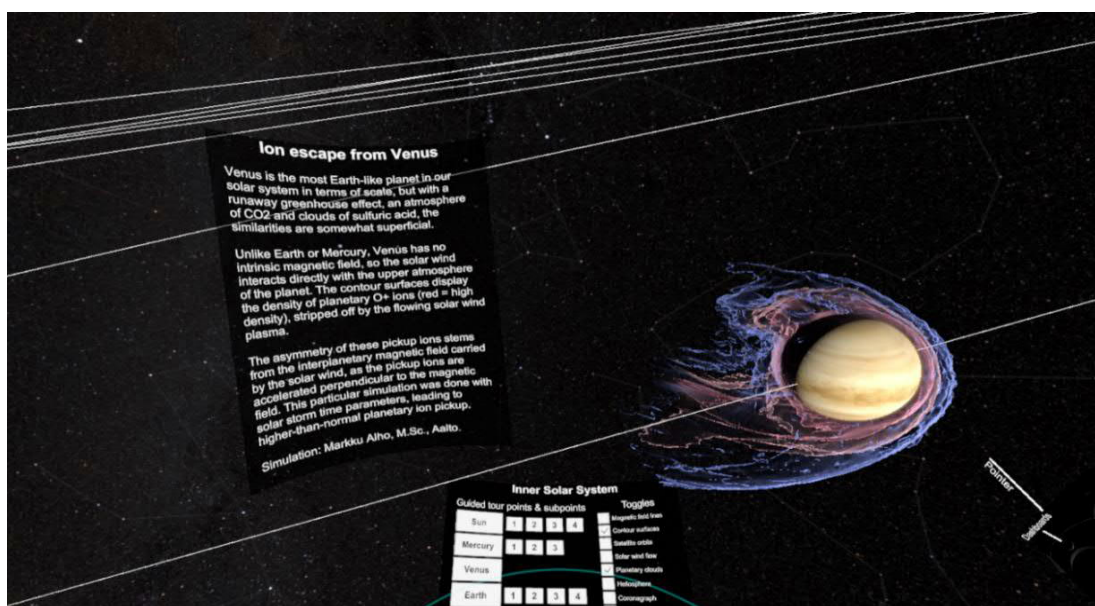
Kuva 7 a) Aurinko kuvattuna 304 Ångströmin aallonpituudella.

b) Auringon pinnassa esiintyvän magneettikentän säteittäiset komponentit. Pinnasta ulospäin suuntautuva magneettikenttä esitetään mustalla ja pinnan sisään suuntautuva magneettikenttä valkoisella värillä. Molemmissa kuvissa on esitetty kyseisen kokonaisuuden yhteydessä esitettävä posterit. [35]

Planetaariossa Merkuriuksen ympäristössä on myös mahdollista tehdä monipuolisia havaintoja itse aurinkotuulesta. Ensinnäkin tämä on mahdollista aurinkotuulen tiheyttä havainnollistavien punaisten ja sinisten tasa-arvopintojen avulla. Näistä punaiseksi värjäyty pinnat kuvaavat Merkuriuksen magneettikentän vaikutuksesta tiivistynyttä aurinkotuulta. Sinisellä värjätty pinta puolestaan kuvaa Merkuriuksen taakse muodostuvan vanan ulkorajaa, jonka sisäpuolella aurinkotuuli on tiheydeltään erittäin harvaa. Toisaalta havaintoja voi tehdä myös aurinkotuulen etenemistä kuvaavien vektorikenttäviivojen avulla. Näitä käyttäen voi hyvin nähdä kuinka aurinkotuuli törmää ensin Merkuriuksen iskurintamaan ja tämän vaikutuksesta alkaa kaartumaan ja lopulta kiertää planeetan. Näiden lisäksi Merkuriuksen osalta on päätetty myös mallintaa iskurintaman edessä sijaitsevaa esisokiksi (foreshock) kutsuttua aluetta. [35] Alue muodostuu iskurintamasta aurinkotuulen suuntaa vastaan heijastuvista hiukkasista sekä tämän lisäksi huotrasta iskurintaman ulkopuolelle karkaavista hiukkasista, joiden vaikutuksesta alueelle myös muodostuu noin 1 mHz – 10 Hz taajuuksilla aurinkotuulen suuntaan eteneviä magneettikenttiä [37]. Planetaariossa onkin keskitytty näiden magneettikenttien etenemisen esittämiseen. Vaikka tämä ilmiö esitetään planetaariossa vain Merkuriuksen ympäristössä, löytyy se kuitenkin myös joiltakin muilta iskurintaman muodostavilta kappaleilta kuten esimerkiksi Maalta [37].

Venus puolestaan on tämän hetken planetaarion kohteista vähäsisältöisin. Tämän osalta on mahdollista tarkastella itse planeettaa kahdella eri tavalla, nimittäin normaalisti Venuksen kauttaaltaan peittävän paksun pilvikerroksen lisäksi planetaario tarjoaa mahdollisuuden tarkastella myös Venuksen varsinaista kiinteää pintaa. Kuva pinnasta on toteutettu vääräväriskuvana Nasan MAGELLAN-luotaimen suorittamien mittausten perusteella [23]. Tämän lisäksi planetaario tarjoaa mahdollisuuden havainnoida Venuksen kaasukehän yläosista aurinkotuulen irrottamia happi-ioneja näiden tiheyttä kuvaavien tasa-arvopintojen avulla, jotka on esitetty kuvassa 8 [35].

Edellä kuvattujen varsinaisten kohteiden lisäksi planetaariossa on myös paljon muuta kohteiden tutkimista tukevaa sisältöä. Yhden näistä muodostavat kuvissa 7 ja 8 esillä olevat posterit, jotka on luotu esittämään tietoa jokaisesta valmiista havaintokokonaisuudesta. Näiden avulla kohteiden havainnointi ja tilanteen ymmärtäminen pyritään tekemään mahdollisimman helpoksi. Myös planetaarion valikko on tärkeä osa sisältöä tämän mahdollistaessa niin liikkumisen eri kohteiden välillä kuin myös kohteessa havaittavien



Kuva 8 Kuvassa esitetään Venuksen kaasukehästä irtoavien happi-ionien tiheyden perusteella muodostetut tasa-arvopinnat. Siinä näkyvät myös tätä kokonaisuutta kuvaava posterit sekä suurin osa planetaariossa käytössä olevasta valikosta. [35]

kokonaisuuksien hallitsemisen. Suurin osa valikosta on nähtävillä kuvassa 8. Kolmas tärkeä planetaarion sisältöä tukeva kokonaisuus muodostuu sen taustasta, joka on toteutettu Nasan toteuttaman tähtikartan ja tähän yhdistettyjen tähtikuvioden avulla [23]. Näiden avulla planetaarioon voidaan luoda hyvin realistisen ja luonnollisen oloinen ympäristö. Tämän lisäksi planetaarioon on myös sisällytetty oikeita avaruudesta käsin tehtyjä äänitallenteita [23], joita on mahdollista kuulla pääasiassa Maan läheisyydessä liikuttaessa. Suurimmaksi osaksi planetaarion äänimaailma kuitenkin koostuu jatkuvasti taustalla soivasta musiikista.

4.4 Pohdinnat

Planetaariolla on tähän mennessä kehitystyötä takana muutaman vuoden ajalta ja tässä ajassa siitä onkin saatu muodostettua jo suhteellisen hyvä kokonaisuus. Tässä ovat auttaneet esimerkiksi erilaiset tapahtumat, kuten Avaruusrekka 2017 -tapahtuma, joiden avulla planetaariota on voitu esitellä laajalle yleisölle ja samalla saada arvokasta käyttäjäpalautetta. Palautteen avulla on esimerkiksi voitu tutkia kokonaisvaltaisesti, kuinka hyvin VIMSin vaikutukset on onnistuttu välttämään. Tämän osalta toteutukset ovatkin osoittautuneet yllättävän hyvin toimiviksi, sillä tästä aiheutuvaa pahoinvointia tavataan vain harvoin ja tällöinkin oireet jäävät lieviksi [26].

Esittelytilanteita varten planetaarioon on sisällytetty myös mahdollisuus havaintokokonaisuuksien välillä liikkumiseen sekä planetaariossa nähtävien kokonaisuuksien hallintaan tietokoneen näppäimistön avulla. Tähän ratkaisuun on päädytty siitä syystä, että yleensä esittelytilanteet ovat kiireisiä ja planetaariosta kiinnostuneita on paljon, minkä takia valmiiksi suunniteltu esittelijän ohjattavissa oleva esittely nopeuttaa jonotusaikoja ja täten parantaa käyttäjäkokemusta. Varsinkin se, että tutkimusryhmällä on esittelyitä varten käytössään vain yksi virtuaaliodellisuuslaitteisto, on vaatinut esityksiltä tilanteeseen vaadittavaa optimoimista, jotta jonotusajat on saatu pidettyä kohtuullisina. Samalla on kuitenkin ollut myös tärkeää mahdollistaa jokaiselle mahdollisimman miellyttävä ja monipuolinen kokemus, ja saadun palautteen perusteella tässä onkin onnistuttu hyvin [26].

Nykyään Aalto-yliopiston virtuaaliplaneetario pystyy onneksi tarjoamaan planeetariokokemuksen myös esittelytilaisuuksien ulkopuolella. Tämän on mahdollistanut planeetariion julkistaminen kaikkien saataville. Täten jokainen, joka omistaa virtuaaliodellisuuslaitteiston voi ladata ja käyttää ohjelmaa omalla laitteistollaan [23]. Myös henkilöiden, jotka eivät omista omaa laitteistoa on mahdollista päästä käyttämään planeetariota, sillä se on saatavilla myös Aalto-yliopiston oppimiskeskuksen VR Hub -tilassa. Näin jokaisella on mahdollisuus päästä kokeilemaan virtuaaliplaneetariota täysin vapaasti juuri niin syvällisesti kuin itse haluaa.

Vaikka virtuaaliplaneetariossa onkin jo tällä hetkellä melko runsaasti sisältöä, on sillä kuitenkin vielä paljon tulevaisuuden kehitysmahdollisuuksia. Yksi näistä on tietenkin kohteiden määrän lisääminen, ja planeetariota kehittävällä tutkimusryhmällä onkin haaveena sisällyttää planetaarioon lopulta koko aurinkokunta ja sen plasmaympäristöt [26]. Tätä varten onkin tehty jo runsaasti simulaatioita [26], ja esimerkiksi Mars olisi tällä hetkellä täysin toteutettavissa. Tämän lisäksi yksi mielenkiintoinen lisäys voisi olla mahdollisuus verrata aurinkokunnan kappaleiden ja niiden plasmaympäristöjen kokoja. Tämä voitaisiin toteuttaa esimerkiksi sijoittamalla kappaleet ympyräkehälle käyttäjän ympärille. Tämän jälkeen käyttäjä voisi halutessaan vaihtaa esitettäviä kohteita ja päättää haluaako hän vertailla vain kappaleita vai myös plasmaympäristöjä. Käyttäjä voitaisiin pitää koko ajan ympyrän keskipisteessä, mutta hänelle voisi antaa mahdollisuudet liikuttaa

kohteita ympyräradalla niin yksi kerrallaan kuin kaikkia yhdessä. Tämän lisäksi hän voisi muuttaa ympäristön mittakaavaa. Täten voitaisiin varmistaa, että kohteiden suhteelliset koot pysyisivät oikeina ja samalla käyttäjälle annettaisiin kuitenkin yksinkertainen ja monipuolinen tapa kohteiden vapaalle tutkimiselle. Toisaalta planetaariossa voisi olla mahdollista esittää myös aurinkokunnan kokoluokkaa ja etäisyyksiä havainnollistavia kokonaisuuksia. Suuri osa nykyään aurinkokunnasta esitettävistä kuvista ei kuvaa aurinkokunnan oikeita mittasuhteita, vaan yleensä joko kappaleiden suhteellinen koko tai niiden välinen etäisyys poikkeaa todellisuudesta. Virtuaaliplaneetaariossa aurinkokuntaa olisi kuitenkin mahdollista kuvata oikeissa mittasuhteissa sen tarjoaman laajan katselualan ansiosta. Oikeastaan planetaariossa onkin jo tällä hetkellä täydet valmiudet tämän toteuttamiseen, sillä siitä löytyy jokaisen aurinkokunnan planeetan sekä komeetta 67P:n kiertoradat. Sijoittamalla käyttäjä tarpeeksi kauas ekliptikasta voisi aurinkokunnan mittasuhteita havainnollistaa erinomaisesti näiden kiertoratojen avulla.

Yksi virtuaaliplaneetaarion käytön rajoitteista on luonnollisesti sen käytön rajoittuminen virtuaalitodellisuuteen. Loppujen lopuksi suhteellisen harvalla kuitenkaan on käytettävissä virtuaalitodellisuuden käyttöön vaadittavaa laitteistoa. Planeetaarion tarjoamalle sisällölle voisi kuitenkin olla kysyntää myös tapauksissa, joissa virtuaalitodellisuuslaitteistoa ei ole käytettävissä. Tällöin tietenkin menetetään yksi virtuaaliplaneetaarion tärkeistä ominaisuuksista, mutta näin sen sisältö voitaisiin tuoda paremmin jokaisen saataville myös sen ansiosta, että tällöin käytettävältä tietokoneeltakaan ei vaadittaisi lähellekään yhtä suurta suorituskykyä kuin virtuaalitodellisuuslaitteistoa käytettäessä. Tällä hetkellä planeetaario on mahdollista ajaa myös ilman virtuaalitodellisuuslaitteistoa, mutta tällöin siinä tapahtuva liikkuminen rajoittuu näppäinkomennoilla tapahtuvaan liikkumiseen eri havaintokokonaisuuksien välillä. Useassa tapauksessa tämä ei kuitenkaan mahdollista itse kohteen havaitsemista vaan yleensä havaintokokonaisuudessa oletuksena esitettävä suuntaus poikkeaa kohteen suunnasta. Täten mikäli haluttaisiin mahdollistaa planeetaarion käyttö ilman virtuaalitodellisuuslaitteistoa, tulisi kohteiden havainnointia varten luoda mahdollisuus myös vapaammalle liikkuvuudelle. Yksinkertaisesti tämän voisi toteuttaa sisällyttämällä sovellukseen mahdollisuuden liikkua näppäimistön avulla esimerkiksi käyttäen nuolinäppäimiä, joiden avulla voitaisiin liikkua eteen- ja taaksepäin sekä muuttaa kuvakulmaa sivuttaissuunnassa. Tämän lisäksi voitaisiin käyttää esimerkiksi Page Down- ja Page Up -näppäimiä sekä Home- ja End-näppäimiä, joiden avulla voitaisiin liikkua ylös- ja alaspäin, sekä muuttaa kuvakulmaa pystysuunnassa. Toinen mahdollisuus olisi yhdistää liikkuminen tietokoneen hiiren ja sen vieritysrullan liikkeisiin.

Myös tämän työn kannalta mahdollisuus vapaampaan virtuaaliplaneetaariossa liikkumiseen olisi ollut hyödyllinen ominaisuus. Tämä johtui ensinnäkin siitä, ettei tätä työtä tehneellä henkilöllä ollut käytettävissä omaa virtuaalitodellisuuslaitteistoa. Tämän lisäksi viruksen SARS-CoV-2 aiheuttamien vaikutusten seurauksena virtuaaliplaneetaarion käyttö ei ollut mahdollista myöskään Aalto-yliopiston oppimiskeskuksen VR Hub -tilassa. Planeetaariossa liikkumiseen löydettiin kuitenkin ratkaisu, jossa päähän sijoitettava näyttölaite voitiin korvata älypuhelimien avulla. Täten puhelinta kääntämällä onnistuttiin kääntämään myös planeetaarion kuvakulmaa monin paikoin samaan tapaan kuin varsinaista näyttölaitetta käytettäessä. Tämän mahdollistamiseen käytettiin ilmaista KinoVR-älypuhelinsovellusta sekä tietokoneelle tätä varten tarvittavia ajureita [38]. Kuvakulman kääntäminen tämän sovelluksen avulla toimi pääosin hyvin, mutta mikäli puhelinta käännettiin liikaa taakse- tai ylöspäin, johti tämä planeetaarion virheelliseen kuvakulman kääntymiseen. Toinen esimerkki vastaavat ominaisuudet mahdollistavasta sovellusympäristöstä muodostuu sekä tietokoneelle että älypuhelimelle asennettavasta VRidge-sovelluksesta [39]. Tämän osalta käyttö on mahdollista aloittaa tietokonesovelluksen ilmaisversiolla, mutta tätä käytettäessä yhden käyttökerran pituus rajoittuu 10 minuuttiin. Täten

sovelluksen käyttäminen vaatisi käytännössä tällä hetkellä 14,99€ maksavan täysversion hankintaa, jossa käyttöaikaa ei ole rajoitettu. [39] Pelkän näyttölaitteen tapaisen ohjaamisen lisäksi VRidge-sovellusympäristö tarjoaa myös mahdollisuuden älypuhelimien käyttöön virtuaalitodellisuusohjaimena. Tätä varten tulee kuitenkin hankkia myös VRidge Controller -älypuhelinsovellus, joka on tällä hetkellä saatavilla vain Android-puhelimille hintaan 4,99€ [40]. Tämän sovelluksen myötä VRidge-sovellusympäristö kuitenkin tarjoaa mahdollisuuden toteuttaa HTC Viven kaltainen kokonainen virtuaalitodellisuuslaitteisto käyttäen yhtä puhelinta ikään kuin näyttölaitteena ja kahta muuta puhelinta ohjaimena.

Näiden lisäksi sekä KinoVR- että VRidge-sovelluksessa on yksi mielenkiintoinen ominaisuus. Ne nimittäin muodostavat tietokoneen näytöllä esiintyvistä kuvasta automaattisesti älypuhelimien näytölle kuvan, jota voidaan käyttää virtuaalisisällön luomiseen hyödyntämällä Google Cardboardin tapaista toteutusta. Nämä ovat laitteita, jotka mahdollistavat älypuhelimien käytön virtuaalitodellisuuden toteuttavana näyttölaitteena. Nämä ovat yleensä selvästi HTC Viven tapaisia virtuaalitodellisuuslaitteistoja edullisempia ja täten näiden avulla planetaarion sisältöä olisi mahdollista päästä havainnoimaan suhteellisen edullisesti myös virtuaalitodellisuudessa. Näin toteutetun virtuaalisisällön laatu kuitenkin riippuu suuresti niin sekä tietokoneen että älypuhelimien suorituskyvystä kuin myös näiden välisen yhteyden nopeudesta. Sisällön laatu ei kuitenkaan näin toteutettuna todennäköisesti koskaan vastaa varsinaisella virtuaalitodellisuuslaitteistolla tuotetun sisällön laatua.

Myös käyttöliittymän osalta on tullut ilmi kaksi käyttöä todennäköisesti helpottavaa parannusehdotusta. Ensimmäinen näistä koskee valikkoa, jossa havaintokokonaisuudet eritellään kappaleen nimen tai nimeä seuraavan numeron avulla. Se että useat kokonaisuudet esitetään tässä vaiheessa vain numeroin heikentää käyttökokemusta varsinkin ensimmäisillä käyttökerroilla, kun käyttäjä ei tiedä jokaista kohdetta ulkoa. Tällöin käyttäjä ei voi tietää varmaksi mikä kokonaisuus minkäkin numeron takaa löytyy. Tämän lisäksi, jos käyttäjä haluaa palata johonkin jo tarkastelemaansa kokonaisuuteen, mutta ei muistamalla numerolla kyseistä kokonaisuutta kuvattiin, voi hän huonoimmassa tapauksessa joutua käymään läpi jopa neljä muuta kokonaisuutta ennen kuin löytää haluamansa kokonaisuuden. Tämä voitaisiin välttää esimerkiksi sillä, että käyttäjän osoittaessa jotain valikon numeroista esitettäisiin näytöllä tällöin kyseistä havaintokokonaisuutta kuvaava otsikko. Näin käyttäjän olisi helpompi suunnistaa haluamiensa kohteiden välillä. Toinen käyttöliittymään kohdistuva havainto on se, ettei planetaariossa eritellä tarkasti kaikkia kappaleiden magneettikentän aikaansaamia osia. Esimerkiksi Maan osalta nämä sisältävät myös iskurintaman ja magnetopauassin [26], mutta näitä ei olla selvästi eritelty muista pinnoista ja täten käyttäjä joutuu tekemään tulkinnan tilanteesta täysin omien tietojensa perusteella. Maan osalta tilannetta vaikeuttaa varsinkin se, että sen osalta esitetään sekä valkoisia että keltaisia tasa-arvopintoja, mutta kokonaisuutta kuvaavassa posterissa ei olla kerrottu mitä kumpikaan näistä tasa-arvopintatyypeistä kuvaa. Eri pintojen kuvaus voitaisiin tehdä yksinkertaisesti esimerkiksi sijoittamalla näytölle osio, jossa eriväriset pinnat kuvattaisiin enintään muutaman sanan mittaisin selityksin esimerkiksi MATLABin legend-komennon tapaan.

Planetaarion käyttöliittymä on kaikesta huolimatta jo tällä hetkellä erittäin toimiva ja helppokäyttöinen. Sen käytön aloittamisen helpottamista varten siihen on esimerkiksi luotu planetaarion eri komentoihin tutustuttava ohjeistus, ja oletusarvoisesti myös ohjainten näppäimien toiminnot esitetään niihin osoittavien tekstien avulla, mistä esimerkki löytyy kuvan 8 oikeasta alakulmasta. Myös kohteiden tarkkailua helpottamaan luodut posterit tarjoavat edellä kuvattua Maan tapausta lukuun ottamatta hyvin yleistajuisen sekä tietorikkaan katsauksen tarkasteltavaan kokonaisuuteen ja täten helpottavat käyttäjää

kunkin kokonaisuuden ymmärtämisessä. Tulevaisuudessa sisällön edelleen lisääntyessä tulee Aalto-yliopiston virtuaaliplaneetario todennäköisesti tarjoamaan erittäin monipuolisen kokonaisuuden, jota voidaan hyödyntää yhä paremmin niin aurinkokunnan plasmaympäristöjen opetus- ja esittelykäytössä kuin myös aihetta koskevien tutkimusten apuvälineenä.

5 Yhteenveto

Työssä päätarkoituksena oli tutkia Aalto-yliopistossa toteutetun aurinkokunnan plasmaympäristöjen esittelyyn keskittyvän virtuaaliplaneetaarion toteutusta ja siihen johtaneen kehityksen taustoja. Näitä aiheita käsittelemällä on pyritty luomaan kokonaisvaltainen kuva siitä, kuinka planeetaarion taustalla olevien tutkimusten ja niiden tulosten perusteella on voitu kehittää tuloksia virtuaalitodellisuudessa havainnollistava kokonaisuus. Tämän takia työssä tärkeässä roolissa ovat olleet myös planeetaarion luomiseen käytettyjen tutkimusten eli plasmaympäristöjä mallintavien simulaatioiden sekä näiden tuloksena saatujen plasmaympäristöjen esittely.

Aurinkokunnan erilaiset plasmaympäristöt syntyvät aurinkotuulen vuorovaikutuksessa aurinkokunnan kappaleiden ja niitä mahdollisesti ympäröivän magneettikentän ja kaasukehän kanssa. Aurinkotuuli vuorovaikuttaa näiden kanssa sen sisältämien ionien ja elektronien sekä näiden mukana kulkevan magneettikentän välityksellä. Näiden vaikutusta kappaleiden plasmaympäristöihin on pyritty tutkimaan simulaatioiden avulla, joiden tulosten perusteella myös Aalto-yliopiston virtuaaliplaneetaario on toteutettu. Virtuaaliplaneetaarion kannalta tärkein simulaatiotyyppi on ollut kvasineutraali hybridimalli, jossa ionit ja elektronit muodostavat varaukseltaan neutraalin hiukkasvirtauksen, jonka ioneja mallinnetaan yksittäisinä massallisina hiukkasina ja elektroneja massattomana nesteinä. Vuorovaikutusten mallintamisessa on päädytty käyttämään juuri tätä simulaatiotyyppiä, sillä sen avulla simulaatioita on voitu suorittaa tarpeeksi suurilla alueilla saaden suhteellisen luotettavia tuloksia myös pienen mittakaavan tapahtumista kuitenkin liiallista laskentatehoa tarvitsematta. Esimerkiksi tätä kehittyneemmässä täysin kineettisessä mallissa myös elektroneja käsitellään yksittäisinä massallisina hiukkasina, mutta sen tarvitsema laskentateho tarpeeksi suurten alueiden mallintamiseksi on nykytekniikalla haastava saavuttaa.

Simulaatioiden perusteella saadut aurinkokunnan kappaleiden plasmaympäristöt voidaan jakaa neljään plasmaympäristötyyppiin. Nämä ovat Maan kaltainen, Venuksen kaltainen, komeetan kaltainen ja Kuun kaltainen vuorovaikutus. Maan kaltaisessa vuorovaikutuksessa kappaleella on sekä ilmakehä että magneettikenttä. Näiden vaikutuksesta kappaleelle esimerkiksi muodostuu magnetosfääri, jonka suurin osa aurinkotuulesta kiertää. Osalla tämän plasmaympäristön mukaisista kappaleista esiintyy myös revontulia, jotka muodostuvat magneettikentän ja ilmakehän ionosfäärin tapahtumien yhteisvaikutuksesta. Venuksen kaltaisessa vuorovaikutuksessa kappaleella puolestaan on kaasukehä, muttei magneettikenttää. Tällöin aurinkotuuli pääsee vuorovaikuttamaan suoraan kaasukehän kanssa, minkä seurauksena esimerkiksi siinä sijaitsevat ionit voivat saada aurinkotuulesta riittävästi energiaa karatakseen kappaleelta. Tämän seurauksena kappaleen taakse kehittyvät alueita, joissa ionien määrä muodostuu muuta ympäristöä suuremmaksi. Myös komeetan kaltaisessa vuorovaikutuksessa kappale omistaa ainoastaan kaasukehän. Komeetat kuitenkin eroavat Venuksen kaltaisen vuorovaikutuksen mukaisista kappaleista elliptisen kiertorataansa sekä jäästä ja pölystä muodostuvan koostumuksensa ansiosta. Näiden vaikutuksesta komeettojen kaasukehän suuruus vaihtelee suuresti riippuen sen etäisyydestä Aurinkoon. Kuun kaltaisessa vuorovaikutuksessa puolestaan kappaleella ei ole magneettikenttää eikä kaasukehää, jolloin aurinkotuuli pääsee vaikuttamaan kappaleen pintaan lähes häiriöttä. Tämä on näistä vuorovaikutustyypeistä ainut, jota ei vielä ole virtuaaliplaneetaarioon toteutettu.

Itse virtuaaliplaneetaario on toteutettu käyttäen kehitysalustana Unity3D-ohjelmistoa. Tämän lisäksi on käytetty esimerkiksi Paraview-ohjelmistoa, jolla on voitu luoda esimerkiksi hiukkastiheyksiä ilmaisevia tasa-arvopintoja sekä magneettikenttiä ja aurinkotuulen etenemistä kuvaavia vektorikenttiä. Näiden lisäksi planeetaarion toteutuksen kannalta

tärkeässä roolissa on ollut VIMS nimisen ilmiön välttäminen. Ilmiöllä tarkoitetaan näköhavainnon ja tasapainoaistin eriävistä kokemuksista aiheutuvaa pahoinvointia. Tämä on tullut ottaa huomioon planetaarion jokaisessa liikkumista sisältävässä toteutuksessa.

Planetaariolla on tähän mennessä kehitystyötä takana muutaman vuoden ajalta ja tässä ajassa siitä onkin saatu muodostettua jo suhteellisen hyvä kokonaisuus. Tällä hetkellä sen sisältöön kuuluvatkin jo Aurinko, Merkurius, Venus, Maa sekä komeetta P67/Churyumov-Gerasimenko. Planetaariota toteuttavan tutkimusryhmän tavoitteeseen koko aurinkokunnan plasmaympäristöjen sisällyttämiseen [26] on kuitenkin vielä matkaa. Uusien kappaleiden ja niiden plasmaympäristöjen lisäksi planetaarioon olisi mahdollista sisällyttää myös muita ominaisuuksia kuten mahdollisuus aurinkokunnan ja sen kappaleiden ko-kojen havainnointiin oikeissa mittasuhteissa. Planetaarion kehitys on tälläkin hetkellä suhteellisen aktiivista, joten tämän ja jo tähän mennessä saadun positiivisen palautteen perusteella sen tulevaisuuden näkymien voikin sanoa olevan suhteellisen positiivisia.

Lähteet

1. Virtual Reality Society. History of Virtual Reality. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 27.3.2020]. <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality/history.html>.
2. Kallio, E. & Alho, A. & Järvinen, R. & Kärkkäinen, T. & Wedlund C. S. & Harmainen, V. Touching space: Space physics demonstrators at Aalto University. AGU Fall Meeting 2019 -tapahtumassa esitetty poster, jossa aiheina Aalto Virtual Planetarium, MULTI cloud service ja Terrella Cubica. Tiivistelmä saatavissa: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019AGUFMED43C1126K/abstract>.
3. Ilmatieteen laitos. Aurinkotuuli. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.3.2020]. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/aurinkotuuli>.
4. Kivelson, M. G. & Russell, C. T. (toim.). Introduction to Space Physics. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1995. 568 s. ISBN 0-521-45714-9.
5. Ilmatieteen laitos. Ilmatieteen laitoksen mittalaitteita avaruudessa. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 21.3.2020]. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/avaruushavainnot>.
6. Kallio, E. & Zhang, T.L. & Barabash, S. & Jarvinen, R. & Sillanpää, I. & Janhunen, P. & Fedorov, A. & Sauvaud, J.-A. & Mazelle, C. & Thocaven, J.-J. & Gunell, H. & Andersson, H. & Grigoriev, A. & Brinkfeldt, K. & Futaana, Y. & Holmström, M. & Lundin, R. & Yamauchi, M. & Asamura, K. & Baumjohann, W. & Lammer, H. & Coates, A. J. & Linder, D. R. & Kataria, D. O. & Curtis, C. C. & Hsieh, K. C. & Sandel, B. R. & Grande, M. & Koskinen, H. E. J. & Säles, T. & Schmidt, W. & Riihelä, P. & Kozyra, J. & Krupp, N. & Woch, J. & Luhmann, J. G. & McKenna-Lawlor, S. & Orsini, S. & Cerulli-Irelli, R. & Mura, A. & Milillo, A. & Maggi, M. & Roelof, E. & Brandt, P. & Russell, C. T. & Szego, K. & Winningham, J. D. & Frahm, R. A. & Scherrer, J. R. & Sharber, J. R. & Wurz, P. & Bochsler, P. The Venusian induced magnetosphere: A case study of plasma and magnetic field measurements on the Venus Express mission. Planetary and Space Science. Vol. 56:6. 2008. S. 796–801. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2007.09.011>. ISSN 1873-5088.
7. Kallio, E. An empirical model of the solar wind flow around Mars. Journal of Geophysical Research: Space Physics. Vol. 101:A5. 1996. S. 11133–11147. <https://doi.org/10.1029/96JA00164>. ISSN 2169-9402.
8. ESA. Rosetta. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.4.2020]. https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Rosetta.
9. Suomi 100 -satelliitti. Mikä on Suomi100 -satelliitti? [Verkkodokumentti]. [Viitattu 21.3.2020]. <http://www.suomi100satelliitti.fi/mika>.
10. Ilmatieteen laitos. The Physics of the HYB-*Model. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 26.3.2020]. <https://sites.google.com/site/impexfp7/home/hmm/description-hmm/the-physics>.
11. Kallio, E. & Chaufray, J.-Y. & Modolo, R. & Snowden, D. & Winglee, R. Modeling of Venus, Mars, and Titan. Space Science Reviews. Vol. 162. 2011. S. 267–307. <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9814-8>. ISSN 1572-9672.

12. Dyadechkin, S. & Kallio, E. & Jarvinen, R. A new 3-D spherical hybrid model for solar wind interaction studies. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. Vol. 118:8. 2013. S. 5157-5168. <https://doi.org/10.1002/jgra.50497>. ISSN 2169-9402.
13. Ilmatieteen laitos. Maan magneettikehä. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 22.2.2020]. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/magneettikeha>.
14. Paty, C. Magnetosphere: Currents and Boundary Layers. [Luentomateriaali]. Georgia Institute of Technology, USA. 2017. [Viitattu 22.2.2020]. <http://www.physics.usyd.edu.au/~cairns/teaching/lecture13/node2.html>.
15. Kallio, E. & Janhunen, P. Ion escape from Mars in a quasi-neutral hybrid model. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. Vol. 107:A3. 2002. SIA 1-1–SIA 1-21. <https://doi.org/10.1029/2001JA000090>. ISSN 2169-9402.
16. Ramstad, R. & Barabash, S. & Futaana, Y. & Nilsson, H., & Holmström, M. Global Mars-solar wind coupling and ion escape. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. Vol. 122:8. 2017. S. 8051– 8062. <https://doi.org/10.1002/2017JA024306>. ISSN 2169-9402.
17. University of Colorado Boulder, Laboratory for Atmospheric and Space Physics, Magnetospheres of Outer Planet Group. Graphics. [Kuvakokoelma]. [Viitattu 10.4.2020]. <http://lasp.colorado.edu/home/mop/resources/graphics/>.
18. NASA Science. Comets – In depth. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 6.3.2020]. <https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/comets/in-depth/>.
19. Nilsson, H. & Stenberg Wieser, G. & Behar, E. & Simon Wedlund, C. & Kallio, E. & Gunell, H. & Edberg, N. J. T. & Eriksson, A. I. & Yamauchi, M. & Koenders, C. & Wieser, M. & Lundin, R. & Barabash, S. & Mandt, K. & Burch, J. L. & Goldstein, R. & Mokashi, P. & Carr, C. & Cupido, E. & Fox, P. T. & Szego, K. & Nemeth, Z. & Fedorov, A. & Sauvaud, J.-A. & Koskinen, H. & Richter, I. & Lebreton, J.-P. & Henri, P. & Volwerk, M. & Vallat, C. & Geiger, B. Evolution of the ion environment of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko - Observations between 3.6 and 2.0 AU. *Astronomy & Astrophysics*. Vol. 583. 2015. A20. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526142>. ISSN 1432-0746.
20. COSMOS - The SAO Encyclopedia of Astronomy. Cometary Dust Tail. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 7.3.2020]. <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/C/Cometary+Dust+Tail>.
21. Kallio, E. Formation of the lunar wake in quasi-neutral hybrid model. *Geophysical research letters*. Vol. 32:6. 2005. L06107. <https://doi.org/10.1029/2004gl021989>. ISSN 1944-8007.
22. Bhardwaj, A. & Dhanya, M. B. & Alok, A. & Barabash, S. & Wieser, M. & Futaana, Y. & Wurz, P. & Vorburger, A. & Holmström, M. & Lue, C. & Harada, Y. & Asamura, K. A new view on the solar wind interaction with the Moon. *Geoscience Letters*. Vol. 2:10. 2015. 15 s. <https://doi.org/10.1186/s40562-015-0027-y>. ISSN 2196-4092.
23. Aalto-yliopisto. Software for planetary and space science: Aalto Virtual Planetarium. [Verkkosivu]. [Viitattu 16.4.2020]. <https://space.aalto.fi/software/>.

24. Mihelj, M. & Novak, D. & Begus, S. Virtual reality technology and applications. Dordrecht, Alankomaat: Springer, 2013. 236 s. (Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering 68).
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-6910-6>. ISBN 978-94-007-6909-0 (painettu). ISBN 978-94-007-6910-6 (sähköinen).
25. Kallio, E. VS: Tiedustelua kandiasioista. Yksityinen sähköpostiviesti. 29.1.2020. Viestin saaja: Eetu Reinikainen.
26. Alho, M. Virtual Reality for Space Science Outreach and Research. [Verkkodokumentti]. Erikoistyö. Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu. Espoo. 2017. 28 s. [Viitattu 16.4.2020].
https://space.aalto.fi/pdf/Special_assignment_Alho_VR_Outreach.pdf.
27. Unity Technologies. Unity. [Verkkosivu]. [Viitattu 23.5.2020]. <https://unity.com/>.
28. Kitware, Inc. Paraview. [Verkkosivu]. [Viitattu 23.5.2020].
<https://www.paraview.org/>.
29. ISTI-CNR. MeshLab. [Verkkosivu]. [Viitattu 23.5.2020]. <http://www.meshlab.net/>.
30. Kinnunen, S. Liikkeenkaappaus HTC Vive työkalustolla. [Verkkodokumentti]. Opinnäytetyö. Kajaanin ammattikorkeakoulu, tradenomi. Kajaani. 2019. 63 s. [Viitattu 14.5.2020]. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201905109096>.
31. Valve Corporation. SteamVR. [Verkkosivu]. [Viitattu 23.5.2020].
<https://store.steampowered.com/steamvr>.
32. NASA: Visible Earth. The Blue Marble. 8.2.2002. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 31.3.2020]. <https://visibleearth.nasa.gov/images/57723/the-blue-marble>.
33. Stöckli, R. & Vermote, E. & Saleous, N. & Simmon, R. & Herring, D. The Blue Marble Next Generation - A true color earth dataset including seasonal dynamics from MODIS. 2007. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.4.2020].
<https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/archive/bluemarble/bmng/readme.pdf>.
34. Nummila, S. Rosetta on perillä! Tähdet ja avaruus. Vol. 6. 2014. S. 14–19. ISSN 0355-9467.
35. Aalto-yliopisto. Aalto Virtual Planetarium -versio 1.0. [Tiedostokansio]. [Viitattu 19.4.2020]. space.aalto.fi/software/distribute/AVP_1.0.zip.
36. Strassmeier, K.G. Starspots. Astronomy and Astrophysics Review. Vol. 17:3. 2009. S. 251–308. <https://doi.org/10.1007/s00159-009-0020-6>. ISSN 1432-0754.
37. Jarvinen, R. & Alho, M. & Kallio, E. & Pulkkinen, T. Ultra-low frequency waves in the ion foreshock of Mercury: A global hybrid modeling study. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Vol. 491:3. 2019. S. 4147–4161.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stz3257>.
38. Kinoni. KinoVR. [Verkkosivu]. [Viitattu 4.5.2020]. <http://kinovr.kinoni.com/>.
39. Riftcat. VRidge. [Verkkosivu]. [Viitattu 4.5.2020]. <https://riftcat.com/vridge>.
40. Riftcat. VRidge Controller. [Verkkosivu]. VRidge Controller -sovelluksen lataussivu Google Play Kaupassa. [Viitattu 4.5.2020].
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.riftcat.vridgecontroller&hl=fi>.

A HTC Vive pystytysohje

- Aseta tukiasemat jalustojen avulla toiminta-alueen rajoille enintään 5 metrin etäisyydelle toisistaan, niin että niiden välillä on näköyhteys.
 - Tukiasemat voidaan kytkeä toisiinsa myös käyttäen 3.5 mm kaapelia, jolloin näköyhteys asemien välillä ei ole välttämätön.
- Kytke tukiasemat virtakaapelin avulla verkkovirtaan.
- Mikäli käytössä on kaksi tukiasemaa ja niitä halutaan käyttää langattomasti, tulee toinen näistä säätää asentoon b, kuten kuvassa A1, ja toinen asentoon c. 3.5 mm kaapelilla yhdistettäessä, tulee tukiasemat säätää asentoon A ja b. Puolestaan vain yhtä tukiasemaa käytettäessä, tulee tämä säätää asentoon A. Asennon säätäminen onnistuu kunkin aseman takana sijaitsevan näppäimen avulla.



Kuva A1 Tukiasema asetettuna b-asentoon

- Kytke virtajohto sekä tietokone kuvassa A2 näkyvän liitäntäyksikön PC puolelle.
 - Tietokoneen kytkeminen tapahtuu HDMI ja USB-A -kaapeleiden avulla.
- Kytke HTC Vive-lasit liitäntäyksikön VR puolelle käyttäen mukana toimitettavaa yhdistelmäkaapelia.
- Tarvittaessa lataa ja tämän jälkeen käynnistä SteamVR-sovellus.
- Yhdistä ohjaimet painamalla niiden kosketuslevyn alapuolella sijaitsevaa näppäintä.
- Mikäli järjestelmän kalibrointi ei ala automaattisesti, suorita tämä valitsemalla SteamVR-sovelluksen vasemmasta yläreunasta avautuvasta valikosta "Kartoita huone" ja seuraa saamiasi ohjeita.
- Järjestelmä on nyt käyttövalmis



Kuva A2 HTC Vive liitäntäyksikkö kytkettynä tietokoneeseen sekä VR-laseihin