Venuksen tutkimusluotaimet

LuK-tutkielma
Turun Yliopisto
Fysiikka
2025
Wili Sirén
Tarkastajat:
Prof. Rami Vainio
FM Christian Palmroos
FM Seve Nyberg

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO
Fysiikan laitos

Sirén, Wili Venuksen tutkimusluotaimet

LuK-tutkielma, 21 s.
Fysiikka
Maaliskuu 2025

Tutkielmassa käydään läpi yleistietoa Venuksesta, kerrotaan kahdesta Venukseen suunnatusta luotainlennosta ja näiden luotainlentojen tietojen pohjalta tehdyistä löydöistä. Luotainlennoksi valittiin Esan *Venus Express* ja Jaxan *Akatsuki*. Tutkielmassa käydään läpi erinäisiä tutkimuksia, jotka on tehty kyseessä olevien luotainlentojen keräämistä tiedoista. Tutkielmassa käydään läpi mitkä ovat meneillä olevan *Venus Life Finder* -mission tavoitteet, kuinka tavoitteet aiotaan toteuttaa ja ketkä toteuttavat ne.

*Venus Express*illä oli mukanaan seitsemän mittauslaitetta, joista viisi kuvasi Venusta eri aallonpituuksilla, ja kaksi viimeistä mittasi magneettisia vuorovaikutuksia sen indusoidussa magneettikentässä. *Akatsuki*lla oli mukanaan kuusi mittauslaitetta, joista viisi kuvasi Venusta eri aallonpituuksilla ja viimeinen keräsi dataa radioaallonpituuksilla.

Venuksesta löydettiin kolme pyrotooppia *Venus Express*in ottamista kuvista ja emissiodatasta, joilla oletettavasti on vulkaanista aktiivisuutta. Kuvatuilta pyrotoopeilta löydettiin neljä tulivuorta. Kehitettyjen mallien perusteella uskotaan, että Venuksen ydin on jäähtymässä.

Venuksen tuulet puhaltavat hitaasti, noin 2 m/s, alle 10 km:n korkeudella. Tuulten nopeus kuitenkin kasvaa voimakkaasti siitä lähtien aina noin 70 km:iin asti, jossa sen tuulet puhaltavat noin 100 m/s. Nopeasta tuulesta johtuen Venuksen yläilmakehän pilvet kiertävät sen noin 4,4 Maan päivässä. Venuksen pituus- ja levysastetuulten nopeudet vaihtelevat säännöllisesti noin 12,5 vuoden välein. Kummatkin vaihtelut jakavat saman jaksonajan, ja maksimi- ja minimiajankohdat.

Venus Life Finder on Rocket Labin ja Massachusetts Institute of Technologyn aloitteesta tehty suunnitelma. Suunitelmissa on lähettää ensimmäinen lento Venukseen vuonna 2026. Suunnitelmien kaksi viimeistä lentoa peruutettiin ja korvattiin kolmella muulla lennolla: Esan *Envisio* ja Nasan *Davinci* ja *Veritas*.

Asiasanat: Venus, Venus Express, Akatsuki, Venus Life Finder -missio

Sisällys

Johdanto **1**

1 Venus **1**

2 *Venus Express* ja sen mittauslaitteisto **3**

3 *Akatsuki* ja sen mittauslaitteisto **6**

4 *Venus Express*in ja *Akatsuki*n datasta saatuja tuloksia **8**

4.1 Venuksesta löytyneet pyrotoopit 8

4.2 Venuksen ilmakehän rakenne 11

5 *Venus Life Finder* -missio **15**

6 Yhteenveto **17**

Johdanto

Tässä tutkielmassa käydään läpi yleistietoa Venuksesta, kerrotaan *Venus Express*- ja *Akatsuki*-luotainten mittauslaitteista, niiden tavoitteista Venuksen tutkimisessa, ja niistä saatuja tutkimustuloksia Venuksen pinnasta ja ilmakehästä. Tutkielmassa käydään läpi mitkä ovat *Venus Life Finder* -mission tavoitteet, kuinka tavoitteet aiotaan toteuttaa ja ketkä toteuttavat ne.

Ensimmäisessä luvussa käydään läpi perustietoja, joita on mittaamalla saatu Venuksesta, ja kerrotaan Venuksen erikoisuuksista, kuten indusoidusta magnetosfääristä ja superrotaatiosta. Toisessa luvussa keskitytään Esan *Venus Express*in mittauslaitteistoon ja niiden tehtäviin luotainlennolla. Kolmas luku käsittelee Jaxan *Akatsuki*n mittauslaitteistoa ja niiden tehtäviä luotainlennolla. Neljännen luvun alussa kerrotaan Venuksen geologian tutkimisesta, jossa on käytetty *Venus Express*in keräämää dataa. Luvun loppuosassa perehdytään Venuksen ilmakehän liikkeisiin keskittyvään tutkimukseen. Tässä tutkimuksessa on käytetty kummankin luotaimen, *Venus Express*in ja *Akatsuki*n, keräämää dataa. Viidennessä luvussa käydään läpi *Venus Life Finder* -mission tavoitteet, kuinka ja millä laitteilla mittaukset aiotaan toteuttaa, sekä mitkä tekijät ovat osallisena lentoon.

Tämän tutkielman teossa ei ole käytetty tekoälyä.

1 Venus

Venus on toinen planeetta Auringosta ja kiertää sitä 1,08 $\cdot 10^8$ km päässä, kerran noin 224,7 päivässä. Se pyörii akselinsa ympäri hitaasti muihin planeettoihin verrattuna, vain kerran 243 päivässä. Venuksen päivä on hieman yli 18 päivää pidempi kuin Venuksen vuosi. [1]

Venuksella ei ole yhtään kiertolaista ja se on lähes täysin pallomainen. Joten Venuksen säde on kaikkialla sama, noin 6052 km, joka on noin 95 % Maan keski-

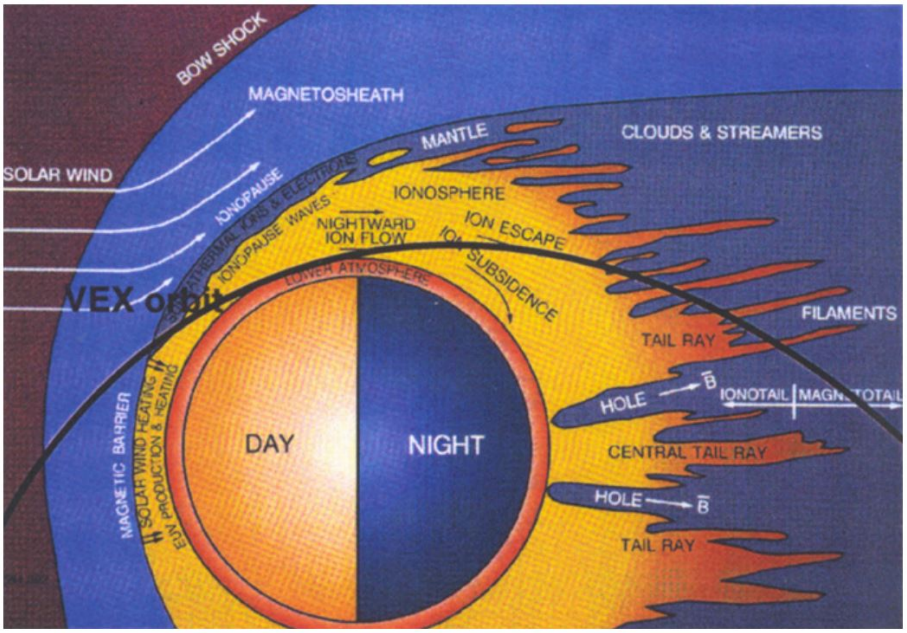
määräisestä säteestä. Venuksen massa on 4,867 $\cdot 10^{24}$ kg, joka vastaa noin 81,5 % Maan massasta. Venuksen pinnalla putoamiskiihtyvyys on 8,87 m/s^2, joka vastaa noin 90 % Maan putoamiskiihtyvyydestä merenpinnan tasolla. [1]

Venuksella ei ole planeetan sisäisten virtajärjestelmien generoimaa magneettikenttää, joten sillä ei ole samanlaista aurinkotuulelta suojaavaa magneettikenttää ympärillään kuin Maalla. Aurinkotuulen ja Venuksen ionosfäärin vuorovaikutusalueen virtajärjestelmät muokkaavat aurinkotuulen magneettikenttää planeetan ympäristössä ja tuloksena planeetalle muodostuu ns. indusoitu magnetosfääri. Ionosfääri ulottuu 120 km:stä 300 km:iin Venuksen pinnasta. Tällä korkeudella on aurinkotuulen ionisoimia Venuksen ilmakehän atomeja ja niiden vapaita elektroneja. Ionosfääri uudelleensuuntaa Venusta kohti tulevan aurinkotuulen sen ympäri, muodostaen keulashokin aurinkotuulen ja indusoidun magneettikentän rajalle. Venuksen indusoitu magneettikenttä, keulashokki ja ionosfääri on havainnollistettu Kuvassa 1. Suurin osa näistä tiedoista tulee *Pioneer Venus Orbiter* lennolta vuodelta 1978. [2]

Venuksen ilmakehä lähellä planeetan pintaa koostuu pääasiassa hiilidioksidista ja typestä [3]. Hiilidioksidia Venuksen ilmakehässä on noin 96,5 % ja typpeä on noin 3,5 %. Sen ilmakehästä löytyy myös pieniä määriä rikki-, kloori- ja hiilikaasuja vesihöyryn lisäksi [3]. Venuksen ilmakehä on optisesti läpinäkymätön johtuen rikkihappopilvistä ja -pisaroista, jotka sijaitsevat noin 47–70 km korkeudella [4].

Venuksen ilmakehä on kuin painekattila. Paine Venuksen pinnalla on 92 bar. Sen ilmakehän keskilämpötila on 464 °C, mikä johtuu Venuksen ilmakehässä vallitsevasta kasvihuoneilmiöstä [1, 5]. Kasvihuonekaasut, pääsiasiassa Venuksen tapauksessa hiilidioksidi, absorboivat Venuksen pinnalta heijastuvan Auringon lämpösäteilyn, ja lämmittää ilmakehän alimpia kerroksia emittoimalla absorboitua energiaa takaisin Venuksen pintaa päin [6].

Venuksen ilmakehä on superrotaatiossa (engl. *super-rotation*) länteen päin, pyörähtäen Venuksen ympäri kerran 4,4 päivässä. Ilmakehän superrotaatiolla tarkoite-



Kuva 1. Aurinkotuuli, joka osuu Venuksen ionosfääriin vasemmalta, muodostaa keulashokin ja indusoidun magnetosfäärin pyörteisen välivyöhykkeen, vaaleansinisen alueen. Ionosfääri on merkitty kuvaan keltaisella värillä ja sen alla oleva punainen alue on Venuksen alailmakehää. Musta viiva Venuksen pohjoisnavan yli näyttää *Venus Express*:in suunnitellun lentoradan. [3]

taan sitä, kun planeetan ilmakehä pyörii nopeammin kuin planeetta itse. Venuksen tuulten nopeus kasvaa korkeuteen verrannollisesti. Tuulten nopeus nousee jopa yli 100 m/s lähellä pilvien yläosia, noin 70 km korkeudessa. Ekvaattorilla Venuksen pinnan pyörimisliikkeen nopeus on 1,6 m/s (vrt. Maan tapauksessa 465,1 m/s). [7]

2 *Venus Express* ja sen mittauslaitteisto

Venus Express oli Esan ensimmäinen Venukseen kohdistunut lento. Sillä oli mukana seitsemän erilaista mittauslaitetta: Aspera, PFS, Spicav/Soir, Vera, Virtis, VMC ja Mag. Se laukaistiin avaruuteen 9. marraskuuta 2005. [3]

Aspera on avaruusplasmaa mittaava instrumentti, joka sisältää Ena-analysaattorin (engl. *Energetic Neutral Atoms*). Ena-analysaattori havaitsee varattujen hiukkasten tuottamia magneettikenttiä ja niiden häviämistä, kun varatut hiukkaset törmää-

vät hitaisiin neutraaleihin atomeihin plasmassa antaen varauksensa, mutta pitäen energiansa. Analysaattorin tarkoitus oli kerätä dataa miten aurinkotuulen plasma vuorovaikuttaa Venuksen ilmakehän kanssa luotaimen lentäessä läheltä Venuksen pohjoisnapaa, sillä Venuksella ei ole omaa magneettikenttää. *Venus Express*in lentorataa on havainnollistettu Kuvassa 1. Aspera myös karakterisoi kvantitatiivisesti plasmaprosesseja Venuksen ilmakehässä ja keräsi tietoa yleisesti plasman ja neutraalien atomien jakaumasta. Se myös identifioi Venuksen ilmakehästä poistuvien kaasujen koostumusta. [3]

Planetary Fourier Spectrometer (PFS) on infrapunaspektrometri, joka on suunniteltu ilmakehien tutkimiseen. Sen päätavoite oli tutkia Venuksen mesosfääriä ja Venuksen ylintä pilvikerrosta etenkin hiilidioksidin emittoimalla aallonpituusalueella (15 µm). Venuksen mesosfääriksi lasketaan alue joka on noin 60–100 km korkeudella sen pinnasta. Tällä aallonpituudella tultaisiin mittaamaan mesosfäärin lämpötilaa ja aerosolien rakennetta. PFS oli varustettu liikkuvalla alustalla, jotta koko luotainta ei tarvitsisi kääntää kuvien saamiseksi. Tämä laitteisto ei kuitenkaan toiminut kunnolla lennon aikana. [3]

Spicav/Soir koostuu kolmesta eri spektrometristä. Yhdestä ultraviolettialueella mittaavasta ccd-kamerasta (engl. *charge-coupled device*) ja kahdesta infrapunakamerasta. Ccd-kamera koostuu sirusta, jossa on piikiteistä tehtyjä pikseleitä, jotka keräävät varausta itsenäisesti niihin osuvista fotoneista ja keräimestä, joka muuntaa pikseleistä saadun varauksen kuvaksi. Näiden kameroiden tarkoituksena oli tutkia Venuksen ilmakehän rakennetta ja koostumusta mesosfäärissä ja ala-termosfäärissä. Termosfääri ulottuu mesosfäärin ylärajasta 120 km korkeuteen Venuksen pinnasta. Ccd-kameran, joka toimi ultraviolettialueella, oli tarkoitus kerätä dataa etenkin hiilidioksin ja rikkikaasujen emittoimilla aallonpittuuksilla, jotta saataisiin tietoa kyseisten molekyylien pitoisuuksista ja määrien vaihtuvuuksista näillä korkeuksilla. Soir taas kartottaisi muita yhdisteitä yläilmakehästä sen paremmalla spektrisellä

erotuskyvyllä Spicaviin verrattuna. [3]

Vera on radioalueella toimiva telekommunikaation alijärjestelmä, joka toimii X- ja S-kaistoilla, eli noin 3,5 cm ja 13 cm aallonpituuksilla. Sen tarkoitus oli kerätä dataa Venuksen ilmakehästä, ionosfääristä, maanpinnan muodoista, painovoimakentistä ja planeettojen välisestä avaruudesta radioaaltopituuksilla. Laitteistolla myös tutkittiin pitkätaajuuksisien radioaaltojen heijastumista sen pinnasta. [3, 8]

*Venus Express*in tavoite oli kuvata Virtisillä lähi-infrapunaspektroskopiaa käyttämällä Venuksen alinta ilmakehää, joka ulottuu sen pinnasta noin 60 km korkeuteen. Tämä on mahdollista, koska Venuksen yläilmakehä on läpinäkyvä lähi-infrapuna-aalloille. Näin *Venus Express* voi mitata H_2O-, SO_2-, COS-, CO-, HCl- ja HF-molekyylien pitoisuuksia ja pitoisuuksien vaihtuvuuksia eri alueilla ja korkeuksissa. Tarkoituksena oli lisätä ymmärrystä Venuksen alailmakehän kemiasta ja Venuksen pinnan muodoista. [3]

Venus Monitoring Camera (VMC) eli Venuksen monitorointikamera, on laajakulmakamera Venuksen ilmakehän ja maanpinnan kuvaukseen. Kamerassa on neljä kapeaa aallonpituuskanavaa: yksi uv-aallonpituudelle, yksi näkyvälle valolle ja kaksi infrapuna-aallonpituuksille. Uv-kanavalla oli tarkoitus tutkia uv:ta absorboivia kaasuja, jotta saataisiin lisää yleistietoa ilmakehien superrotaatiosta. Uv-aallonpituuksilla tutkittaisiin myös napapyörteitä luotaimen lentäessä Venuksen pohjoisnavan yli ja muita pienen skaalan liikkeitä ilmakehässä. Optisen aallonpituusalueen kanavalla tärkein kohde oli hapen tuottama ilmahehku. Ensimmäisellä infrapunakanavalla oli tarkoitus kartoittaa vesihöyryn jakaumaa yläpilvistä. Toisen infrapunakanavan tehtävänä oli löytää ja tunnistaa vulkaanista aktiivisuutta kuvaamalla Venuksen pinnan kuumia päästöjä luotaimen ollessa Venuksen yöpuolella. [3]

Mag on magnetometri, jolla mitataan magneettivuon tiheyttä ja suuntaa. Magissa oli kaksi magneettikenttäilmaisinta, joista toinen oli kiinnitetty sen runkoon ja toinen metrin mittaisen hiilikuitu puomin päähän. Näin laite voi erotella luotaimes-

ta syntyvät häiriöt sitä ympäröivästä magneettikentästä. Magnetometrin tehtävänä oli kartoittaa aurinkotuulen indusoimaa magneettikenttää, ionosfääriä ja indusoidun magnetosfäärin häntää (engl. *magnetotail*). [3, 8]

3 *Akatsuki* ja sen mittauslaitteisto

Akatsuki on Japanin kolmas planeettaluotain. Sen massa täyteen tankattuna ja lastattuna oli noin 500 kg ja kustannus noin 220 miljoonaa dollaria [5]. Sen matkassa oli 7 erilaista tutkimuslaitetta: 1-µm infrapunakamera (IR1), 2-µm infrapunakamera (IR2), *Ultraviolet Imager* (Uvi), *Longwave Infrared Camera* (Lir), *Digital Electronics unit* (DE), *Lightning and Airglow Camera* (Lac) ja *Radio Science* (RS) [7]. *Akatsuki* laukaistiin avaruuteen 21. toukokuuta 2010.

Ir1 on infrapuna-alueella toimiva kamera. Sen tehtävänä oli kuvata Venuksen päiväpuolta 0,90 µm aallonpituudella ilmakehäikkunassa (engl. *atmospheric window*). Ilmakehäikkunalla tarkoitetaan aallonpituusaluetta planeetan ilmakehässä, jossa säteily ei absorboidu yhtään tai absorboituu hyvin vähän ilmakehän hiukkasiin. Venuksen yöpuolta kuvattaisiin 0,90, 0,97 ja 1,01 µm ilmakehäikkunoissa. Päiväpuolen kuvauksella oli tarkoitus saada kuvia pilvistä, jotka heijastavat auringonvaloa ja seurata joitakin pilviä eri alueilla tuultennopeuksien laskemiseksi. Yöpuolen kuvauksella päätarkoitus oli kuvata Venuksen pinnan lämpösäteilyä. IR1:n eri aallonpituuksilla ottamia kuvia vertaamalla voidaan arvioida veden konsentraatiota pilvien alapuolella, koska vesihöyry absorboi vain osittain 0,97 µm aallonpituudella olevaa säteilyä. [7]

Toinen infrapunakamera IR2 käyttää 1,73, 2,26 ja 2,32 µm ilmakehäikkunoita. Kahdessa ensimmäisessä ilmakehäikkunassa vain hiilidioksidi absorboi säteilyä, ja viimeisessä ilmakehäikkunassa vain hiilimonoksidi absorboi säteilyä. Vertaamalla eri allonpituuksilla otettuja kuvia voidaan arvioida hiilidioksidin ja hiilimonoksidin konsentraatioita. Säteily näiltä aallonpituusalueilta tulee noin 35–50 km korkeuk-

sista. 2,26 µm aallonpituusaluetta käytettäisiin myös pilvien seurantaan Venuksen ilmakehässä. [7]

Uvi on uv-alueella toimiva kamera. Aikaisemmilta lennoilta saatujen tietojen mukaan Auringosta lähtöisin oleva uv-säteily siroaa ja absorboituu Venuksen pilvien yläosissa noin 200–500 nm aallonpituuksilla. Rikkidioksidi on syynä absorptioon 200–320 nm aallonpituuksilla, mutta yli 320 nm aallonpituuksilla syntyvään absorptioon ei ole löydetty vielä syytä. Uvi on suunniteltu kuvaamaan Venusta 283 nm ja 365 nm aallonpituusalueilla. Rikkidioksidi absorboi 283 nm säteilyä, mutta 365 nm säteilyn absorption syyn selvittäminen oli yksi luotaimen tavoitteista. [7]

Lir on pitkillä infrapuna-aalloilla toimiva kamera. Sen tehtävänä oli havainnoida kuumia lämpöemissioita pilvien yläosista 8–12 µm aallonpituuksilla, täten kartoittaen pilvien yläosien lämpötiloja. Toisin kuin muut *Akatsuki*n kuvausjärjestelmät, Lir toimii yhtä hyvällä kuvalaadulla sekä päivä- että yöpuolella. Kameran ottamista kuvista on mahdollista erottaa jopa 0,3 K lämpötilaeroja ja seurata pilviä sekä päivä- että yöpuolella Venusta. [7]

DE on kontrollointiyksikkö, joka ohjaa edellä mainittuja kameroita. Sen tehtävänä oli ohjata luotaimessa olevia tutkimuslaitteita luotaimen keskuskontrolliyksikön käynnistäessä dE:n ohjelman. Ohjelman käynnistyessä de ottaa kuvia luotaimen kameroilla, kääntää niiden suodatinpyöriä (engl. *filter wheel*) ja saattaa muuttaa niiden asetuksia riippuen luotaimen sijainnista. DE oli myös vastuussa laskennallisesta datan käsittelystä, datan pakkaamisesta ja mittaustietojen lähettämisestä Maahan. Laskennallinen datan käsittely pitää sisällään pimeänvirran, kuvakentän tasoituksen ja kuolleiden pikseleiden korjauksen sekä mediaanin laskemisen kuvasarjoista. Pimeävirta ja kuolleet pikselit ovat kameran pikselikohtaisia epätarkkuuksia aiheuttavia tekijöitä. Kuvakentän tasoitus ja mediaanin laskeminen taas parantavat kuvien laatua ja luotettavuutta. [7]

Lacin tarkoituksena oli etsiä salamoiden välähdyksiä ja kartoittaa ilmahehkua

Venuksen yöpuolelta, kun *Akatsuki* olisi täydellisesti sen varjossa. Venuksen salamoista ei ollut yhtenevää mielipidettä, joten Lacin tehtävänä oli saada todisteita niiden olemassaolosta. Lac kuvaisi Venuksen yöpuolta kolmella eri aallonpituuskanavalla, joista ensimmäinen on 777,4 nm aallonpituuskanava, joka vastaa atomaarisen hapen emissioaallonpituutta. Laboratorio-olosuhteissa toteutetun Venuksen ilmakehän kokeilujen perusteella sen salamat näkyisivät parhaiten juuri tällä aallonpituudella. Kahta muuta aallonpituuskanavaa (552,5 nm ja 557,7 nm) käytettäisiin ilmahehkun kuvantamiseen. [7]

RS on radioaaltolähetin, jolla oli tarkoitus kerätä lisää tietoa Venuksen ilmakehästä käyttäen radioaaltopituuksia. RS lähettäisi jatkuvaa radiosignaalia Maahan, kun *Akatsuki* lentäisi Venuksen varjoon, Maasta katsoen. Lähettimen radioaallot matkaisivat siten Venuksen ionosfäärin, ilmakehän ja kiinteän kuoren läpi. Nämä väliaineet aiheuttaisivat muutoksia lähetettyyn radiosignaaliin. Näistä muutoksista pystyttäisiin tulkitsemaan Venuksen ionosfäärin ja ilmakehän ominaisuuksia. [7]

4 *Venus Express*in ja *Akatsuki*n datasta saatuja tuloksia

Pelkästään *Venus Express*in tai *Akatsuki*n keräämästä datasta on hankalaa tehdä tutkimusta, mutta siksi tutkijat yleensä vertaavat dataa uusista luotaimista vanhaan olemassa olevaan dataan, tehden niiden perusteella uusia päätelmiä. Tässä kappaleessa käydään läpi kahta eri tutkimusta joissa käytetään *Venus Express*in ja *Akatsuki*n dataa.

4.1 Venuksesta löytyneet pyrotoopit

Tutkijaryhmä artikkelissa *Recent Hotspot Volcanism on Venus from VIRTIS Emissivity Data* (2010) [9] löysi kolme pyrotooppia Virtisin ottamista kuvista ja datas-

ta, joilla oletettavasti on vulkaanista aktiivisuutta. Pyrotoopilla tarkoitetaan geologista aluetta, jonka lämpötila on korkeampi kuin sitä ympäröivän alueen lämpötila. Lämpötilaero yleisesti johtuu geologisesta aktiivisuudesta. Tutkijaryhmä käytti pääasiassa uutta Virtisin ottamaa dataa Venuksesta ja vertasivat sitä vanhan *Magellan*-luotaimen saamaan dataan. [9]

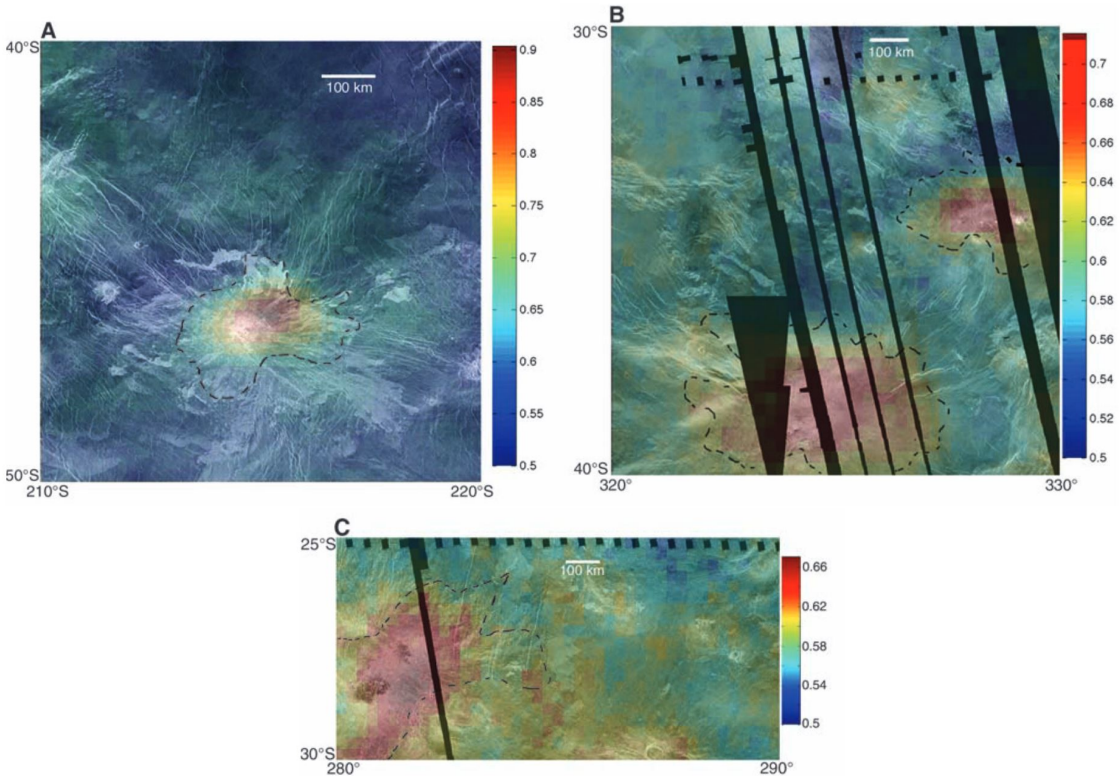
Pyrotoopit tunnistettiin vertaamalla niiden maaperän muotojen analogiaa Havaijin tulivuorten muotoihin. Tutkijaryhmä etsi samankaltaisuuksia topografisista nousuista ja painovoimakeskittymistä. Emissiodataa Virtisiltä ja vanhoja Magellan-luotaimen topografiakuvia ja painovoimatuloksia käytettiin tähän. [9]

Magellan-luotain on vuonna 1989 Nasan lähettämä luotain Venukseen. Se kuvasi Venuksen topografiaa ja teki painovoima-analyyseja aina vuoteen 1994 asti. [10]

Tutkijaryhmä löysi yhdeksän pyrotooppia käsitellystä datasta. Tutkijaryhmä oletti jokaisesta löytyvän tulivuoria tai muuta geologista aktiivisuutta. Virtis sai kuvattua vain kolmea yhdeksästä löytyneestä pyrotoopista, jotka olivat *Imdr Regio*, *Themis Regio* ja *Dione Regio*. Kuvassa 2 on Magellan-luotaimen ottamia mustavalkokuvia pyrotoopeista, joihin on lisätty Virtisin saama emissiodata värikoodilla. Kuvassa 2A on *Imrd Regio* -pyrotooppi, Kuvassa 2B on *Dione Regio* -pyrotooppi ja Kuvassa 2C on *Themis Regio* -pyrotooppi.

Kaikki kolme pyrotoppia ovat noin 0,5–1,6 km korkeampia kuin niitä ympäröivät tasangot ja niiden halkaisijat vaihtelevat 1400 km:stä 2700 km:iin. Pyrotoopeilla on todennäköisimmin tulivuoria sillä niiden litosfääri on ohuempi kuin niitä ympäröivän alueen. Litosfääri on Venuksen pinnan kiinteä kivikehä joka on suurilta osin Maan merenpohjan kaltainen ja on paksuudeltaan noin 11 km. [9]

Imrd Region ainoa tulivuori *Idunn Mons* on aktiivisin verrattuna muihin kuvattuihin pyrotooppien tulivuoriin. Seuraavaksi aktiivisimmat tulivuoret ovat Dione Region kaksi kolmesta tulivuoresta, *Hathor* ja *Innini Montes*, joilla on suurinpiirtein samanlaiset emissiot. Themis Region alueella on useita tulivuoria, ja *Mielikki Mons*



Kuva 2. Kuvat ovat Magellan-luotaimen ottamia mustavalkokuvia Venuksen pyrotoopeista. Mustavalkokuviin on lisätty Virtsin saamat emissiodatat värikoodilla. Kuvien sivuilla on selitys värikoodista. Punainen tarkoittaa suurta emissiomäärää ja tummansininen pientä emissiomäärää. Kuvien vieressä olevat astelukemat ovat kuvien pituus- ja leveyskoordinaatteja. Kuvissa katkoviivalla merkityt alueet ovat oletettuja tulivuoria. Kuvassa A on *Imrd Regio* -pyrotooppi ja *Idunn Mons* -tulivuori. Kuvassa B on *Dione Regio* -pyrotooppi ja sen tulivuoret *Hathor* (oikealla alhaalla) ja *Innini Montes* (vasemmalla). Kuvassa C on *Themis Regio* -pyrotooppi ja sen tulivuori *Mielikki Mons*. [9]

valittiin edustamaan sen alueen kuumia virtauksia. [9]

Tutkijaryhmä kehitti muutamia erilaisia malleja Venuksen ytimestä pyrotooppien emissiovirtauksien perusteella. Heidän tulostensa mukaan Venuksen ytimen prosessit ovat samankaltaisia kuin Maan. Tulivuorten purkaukset ovat maltillisia eivätkä katastrofaalisia räjähdyksiä. Jos vulkaanisen toiminnan keskittyminen pyrotooppeihin edustaa muutosta Venuksen vulkaanisessa toiminnassa, niin se voi tarkoittaa sitä, että Venuksen ydin jäähtyy eikä vain sen pinta. [9]

Artikkelissa *Venus surface temperature derived from VIRTIS on Venus Express in comparison to the Venus Climate Database* (2024) [11] todettiin, että Venuksen pyrotoopit vaikuttavat sen ilmakehän lämpötilaan. Aiemmin oletettiin, että Venuksen ilmäkehä olisi tasalämpöistä aikaisempien mittausten perusteella. Oletuksena oli, että Venuksen ilmakehän lämpötila olisi kaikkialla suoraan verrannollinen etäisyyteen sen pinnasta, sillä lämmön jakautumisen oletettiin olevan ilmakehässä hyvin tehokasta. Virtisin mittausten datan perusteella näin ei ole, vaan pintalämpötila vaihtelee paljon riippuen pyrotoopeista ja niiden kuumista virtauksista. Lämpötilaero alueiden välillä pysyy jokseenkin samana sekä päivällä että yöllä. [11]

4.2 Venuksen ilmakehän rakenne

Tutkijaryhmä artikkelissa *The Atmospheric Dynamics of Venus* (2017) [12] käy läpi dataa useista vanhoista luotaimista ja liittää niihin uutta dataa *Akatsuki*sta ja *Venus Messenger*istä. Tutkijaryhmä selittää niiden avulla Venuksen ilmakehän erilaisia ilmiöitä ja tuloksia mittauksiin perustuen. [12]

Tutkijaryhmä tarkentaa ensin Venuksen superrotaatiota kertomalla sen olevan taannehtivaa superrotaatiota (engl. *retrograde super-rotation*). Nimitys johtuu Venuksen pyörimisestä eri suuntaan akselinsa ympäri kuin muut aurinkokuntamme planeetat. [12]

Tutkijaryhmä jakaa Venuksen ilmakehässä puhaltavat tuulet kahteen eri pää-

ryhmään; leveysastetuuliin (engl. *zonal-winds*), jotka puhaltavat itä–länsi-suunnassa ja pituusastetuuliin (*meridional-winds*), jotka puhaltavat pohjois–etelä-suunnassa. Tuulten nopeus kasvaa mitä korkeammalle Venuksen pinnasta noustaan. Leveysastetuulet puhaltavat pituusastetuulia huomattavasti nopeammin, maksimissaan noin 100 m/s verrattuna pituusastetuulien maksimiin, noin 15 m/s. [12]

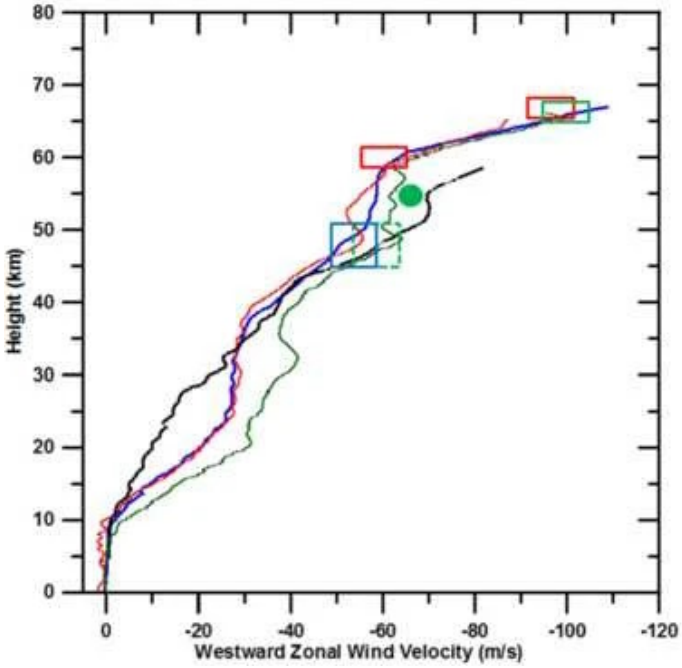
Leveysastetuulten nopeus Venuksen pinnalla, alle 10 km korkeudella, on noin 2 m/s. 10–60 km välimatkalla tuulten nopeus kasvaa noin 10 m/s per 10 km, mutta yli 60 km jälkeen tuulten nopeus kasvaa nopeammin ja saa maksiminopeuden noin 110 m/s noin 70 km korkeudessa. Kuvassa 3 on esitetty tutkijaryhmän yhteen tuomat datapisteet monelta eri lennolta. Tutkijaryhmän laskujen perusteella Venuksen korkeimmalla olevat pilvet kiertävät sen noin neljässä Maan päivässä. [12]

Venuksen nopeat leveysastetuulet hidastuvat vasta, kun ylitetään 45. leveysasteet planeetan pohjois- ja eteläpuolella. Leveysastetuulien nopeudet laskevat lineaarisesti sen jälkeen noin sadasta metriä sekunnissa lähelle nollaa lähestyttäessä planeetan napoja. [12]

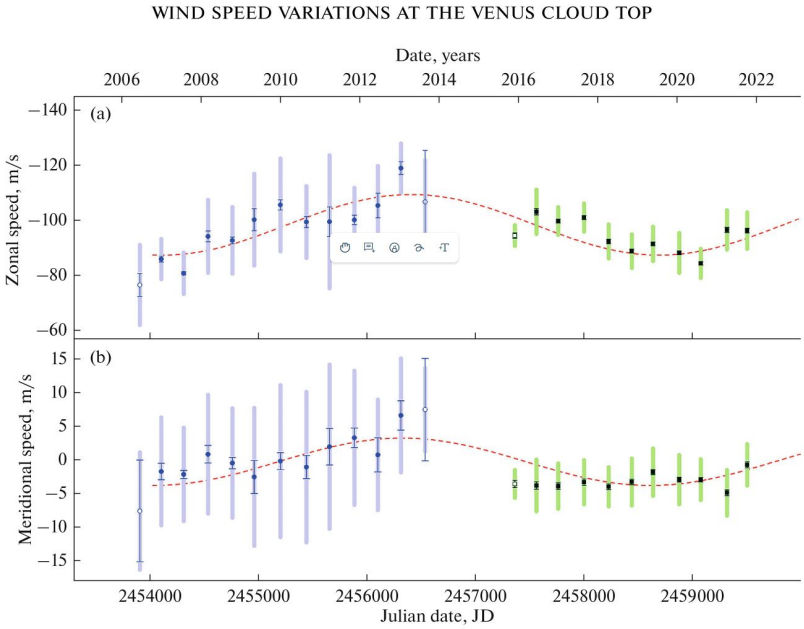
Tutkijaryhmä huomasi, että Venuksen leveysastetuulten nopeus kasvaa päivän edetessä iltapäivän maksimiin. Iltapäivällä tarkoitetaan Venuksen paikallisaikaa, joka on noin 17:00. Leveysastetuulet ovat noin 5–15 m/s keskiarvoa nopeampia Venuksen iltapäivällä kuin muina aikoina. Näin tapahtuu ainakin 10.–40. leveysasteiden välillä, mutta muista leveysasteista ei ole tarpeeksi dataa, jotta mitään tarkkaa arviota pystyttäisiin tekemään. [12]

Pituusastetuulista kerättiin data yhteen korkeuksilla 0–70 km. Venuksen päiväntasaajan kohdalla pituusastetuulet eivät puhalla lähes ollenkaan. Päiväntasaajalta siirryttäessä napoja kohti, pituusastetuulten nopeus kasvaa ja saa maksimiarvonsa noin 60. leveysasteen tienoilla. Niiden maksimiarvot ovat 10–15 m/s välillä. Tämän jälkeen tuulet hidastuvat olemattomiin napoja kohti mentäessä. [12]

Tutkijaryhmä huomasi, että Venuksen tuulten nopeudet vaihtelivat vuosikym-



Kuva 3. Venuksen leveysastetuulen nopeuden muutos pystysuunnassa. Kuvaajan pystyakselilla on korkeus Venuksen pinnasta (km), ja vaaka-akselilla leveysastetuulen nopeus (m/s), joka puhaltaa itä–länsi-suunnassa. Käyrät kuuvaajan datassa on mitannut *Pioneer-Venus*-luotaimen sondit *Sounder* (vihreä), *North* (musta), *Night* (punainen) ja *Day* (sininen). *Night*- ja *Day*-sondit tiputettiin samanlaisille leveysasteille, mutta eri paikallisaikaan. Vihreä pallo kuvaajassa on *Vega 1*:n ja *Vega 2*:n ilmapallojen mittaama nopeus. Nelikulmiot ovat Virtisin mittaamia nopeuksia pitkäaikaisesta pilviseurannasta eri korkeuksilla. Punaiset nelikulmiot ovat päiväsaikamittauksia ja siniset yöaikamittauksia. [12]



Kuva 4. Venuksen tuulten nopeuksien pitkäaikaiset vaihtelut. Länsi–itä-suunnassa tapahtuvat muutokset on esitetty kuvan ylemmässä osassa ja pohjois–etelä-suunnassa tapahtuvat muutokset kuvan alaosassa. Kuvaajan aikaskaala on esitetty Juliaanisessa ajassa. Vmc (*Venus Express*) on mitannut sinisellä merkityt tulokset ja Uvi (*Akatsuki*) on mitannut vihreällä merkityt tulokset. Tuulten nopeusvaihtelut on esitetty sinikäyrään sovitetulla punaisella katkoviivalla. [13]

menten välillä jopa 10 m/s [12]. Toinen tutkimus vahvistaa Venuksen tuulten nopeusvaihtelut vuosikymmenten kuluessa artikkelissa *Wind Speed Variations at the Venus Cloud Top above Aphrodite Terra According to Long-term UV Observations by VMC/VENUS Express and UVI/AKATSUKI* (2023) [13].

Venuksen tuulten nopeus, jotka on esitetty Kuvassa 4, vaihtelevat noin 12,5 vuoden jaksoissa. Leveysastetuulet vaihtelevat eniten, jopa 20 m/s. Pituusastetuulet vaihtelevat hieman alle 10 m/s. Kummatkin vaihtelut jakavat saman jaksonajan ja maksimi- ja minimiajankohdat. [13]

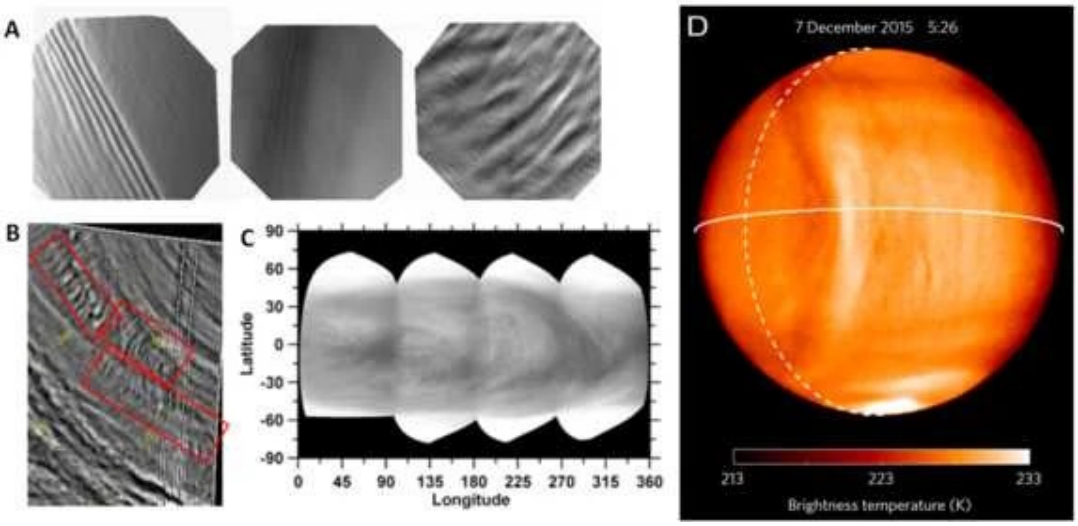
Seuraavaksi tutkijaryhmä käy läpi Venuksen ilmakehäaaltoja (engl. *atmospheric waves*). Niillä on monia syntylähteitä, kuten epästabiiliit virtaukset, päivittäinen ilmakehän lämpeneminen ja viilentyminen, paikalliset tuulet, vuorten yli puhaltavat tuulet ja planeetan pyöriminen. [12]

Ilmakehäaallot luokitellaan niiden syntymistapojen mukaan. Painovoima-aallot (engl. *gravity waves*) syntyvät planeetan painovoiman yrittäessä tasapainottaa sen ilmakehässä syntyviä siirtymiä tuulten tai planeetan pinnanmuotojen takia. Vuoristot tai kraaterit synnyttävät painovoima-aaltoja. Termiset aallot (engl. *thermal waves*) ovat säännöllisesti oskilloivia aaltoja, jotka syntyvät ilmakehän lämpenemisen ja viilenemisen seurauksena. Kelvin-aallot syntyvät coriolis-ilmiön aiheuttamista ilmakehän muutoksista ja esiintyvät pääasiassa vain päiväntasaajan ympäristössä. Coriolis-ilmiö syntyy taivaankappaleen pyörimisestä itsensä ja Auringon ympäri, ja vaikuttaa taivaankappaleen ilmakehään sekä mereen sillä ne eivät kiinteästi pyöri taivaankappaleen mukana. Rossby-aallot, toiselta nimeltä planetaariset aallot, syntyvät napoja kohti liikkuvista ilmamassoista. Monissa tapauksissa Kelvin- ja Rossby-aallot havaitaan yhtenä Y:n muotoisena aaltona planeetan päiväntasaajalla. [12]

Tutkijaryhmä löysi *Akatsuki*n havainnoimista pilvien päälliskuvista jousen muotoisen paikallaan pysyvän aallon. Pilviaalto oli suoraan ylänköjen yllä. Ryhmän mukaan tämä paikallaan pysyvä aalto saattaa olla topografisesti syntynyt painovoima-aalto. Simulaatiota ei ole vielä rakennettu, sillä siihen tarvittaisiin tarkasti suunniteltu tietokoneohjelma, joka sisältäisi tarkkoja tietoja Venuksen pinnanmuodoista ja aallonmuodostuslaskelmia. Syy miksi painovoima-aalto näkyy suurena aaltona Venuksen pilvien pinnalla on, että pieniamplitudiset aallot, jotka muodostuvat sen pinnalla, kasvavat amplitudissa noustessaan ylöspäin Venuksen ilmakehässä. Ilmiötä on havainnollistettu Kuvassa 5. [12]

5 *Venus Life Finder* -missio

Venus Life Finder (VLF) on Rocket Labin ja Massachusetts Institute of Technologyn (MIT) aloitteena tehty suunnitelma. Rocket Labin ja MIT:n suunitelmissa on lähettää ensimmäinen lento aikaisintaan 2026. Instituutiot suunnittelivat myös kaksi muuta lentoa, joiden tarkoituksena olisi ollut etsiä mikro-organismejä ja tuo-



Kuva 5. A kuvassa on *Venus Express*in vmc:n kuvaamia painovoima-aaltoja, joilla on lyhyitä aallonpituuksia (noin 10 km), Venuksen ylimmässä pilvikerroksessa (65–75 km). B kuvassa on *Venus Express*in Virtisin kuvaamia painovoima-aaltoja, joilla on pitkiä aallonpituuksia (100–300 km), Venuksen alemmalla pilvikerroksessa (45–50 km). C kuvassa on *Galileo*-luotaimen ohilentona ottama kuva planetaarisesta Y-aallosta. D kuvassa on *Akatsuki*n Lirin kuvaama paikallaan pysyvä painovoima-aalto, Venuksen ylimmässä pilvikerroksessa (65–75 km). [12]

da näyte Venuksen ilmakehästä takaisin Maahan. Näitä kahta viimeistä lentoja ei kuitenkaa toteuteta vaan ne on korvattu kolmella muulla lennolla: Esan *Envisio* ja Nasan *Davinci* ja *Veritas*. [14, 15]

Ensimmäinen lento tiputtaisi pienen luotaimen Venukseen, joka mittaisi tippuessaan sen ympäristöstä eri hiukkasia uv-valon avulla. Mittaus perustuu bentseeniyhdisteiden delokalisoituneiden vetyjen fluoresenssireaktioon, joka on voimakkaampi kuin muiden yhdisteiden fluoresenssireaktio. Mittauslaitteistolla pystyttäisiin myös havaitsemaan muita yhdisteitä, jotka eivät ole nestemäisiä kuten Venuksen rikkihappopilvet. Tämä antaisi paremman yleiskuvan Venuksen ilmakehän koostumuksesta kuin aiemmat kaukomittaukset.

Suunnitelmiksi jääneiden lentojen tehtävänä olisi ollut etsiä mikro-organismeja ja muita merkkejä elämästä. Viimeisen lennon tarkoitus olisi ollut ottaa näyte Venuksen ilmakehästä ja tuoda se Maahan tarkempaa tutkimusta varten. [14]

The ORganics Information Gathering INstrument system (Origin) on suunnit-

teilla oleva instrumenttiprototyyppi, joka olisi toteuttauttanut VLF:n toisen tehtävän. Origin sisältäisi heijastuslentoaikamassaspektrometrin (engl. *reflectron time-of-flight mass spectrometer, reflectron TOF MS*) ja siihen tarvittavan lasersäteen, joka ionisoisi tai ablatoisi näytteitä, ja näytteen keräimen. Näytteen ablatointi tarkoittaa kiinteän näytteen höyrystämistä. Origin käyttäisi heijastus-TOF MS:ää analysoidakseen seuraavien kemiallisten yhdisteiden määrää: aminohappojen, lipidien, polysyklisten aromaattisten hiilivetyjen, suolojen, metallien ja rikin isotoppien. Origin voisi myös löytää todisteita mikrobeista käyttäen heijastus-TOF MS:ää. [16]

Heijastus-TOF MS toimii samalla periaatteella kuin normaali TOF MS. Se ionisoi molekyylejä osittain hajoittaen niitä lasersäteellä ja kiihdyttäen ne kohti detektoria, joka sijaitsee pitkän tyhjiöputken päässä. Laite mittaa kuinka kauan ionisoiduilla molekyyleillä ja niiden osasilla kestää lentää detektorille. Se määrittää ionien lentoajasta niiden koostumuksen, sillä isommat ionit saavat lasersäteestä vähemmän vauhtia kuin pienet ja lentävät siten hitaammin. Heijastus-TOF MS:ssä pitkä tyhjiöputki on korvattu paljon lyhyemmällä tyhjiöputkella jossa on ioneja heijastava asteittaisesti voimistuva sähkökenttä, joka kääntää ionien liikesuunnan detektorille. [17]

Viimeinen VLF-luotain olisi tehnyt edestakaisen matkan Venukselle. Se tiputtaisi ilmapallolla varustetun aluksen Venuksen ilmakehään. Alus ottaisi noin litran näytteen ilmakehästä ja lentäisi takaisin luotaimelle, joka toisi näytteen takaisin Maahan. [18]

6 Yhteenveto

Venuksen ilmakehän keskilämpötila on 464 °C ja se kiertää toiseksi lähimpänä planeettana Aurinkoa [1]. Sen yläilmakehä ionisoituu aurinkotuulesta, koska sillä ei ole omaa magneettikenttää sen hitaasta pyörimisestä johtuen [2]. Venuksen pinta pyörii akselinsa ympäri vauhdilla 1,6 m/s, ja sen ilmakehä pyörii noin 110 m/s vauhdilla

yli 65 km korkeudessa, aiheuttaen ilmakehän superrotaation [7].

Venukseen on lähetetty monia luotaimia, joista käsittelimme tässä tutkielmassa kahta lähetettyä luotainta, *Venus Express*iä ja *Akatsuki*a. *Venus Express* oli Esan ensimmäinen Venukseen kohdistunut avaruusluotainlento. Sen tehtävään kuului kartoittaa Venusta infrapuna- ja uv-kanavilla, jotka näkivät eri syvyyksille sen pilvissä ja mitata Magilla plasman käyttäytymistä Venuksen yläilmakehässä ja aurinkotuulen indusoimaa magneettikenttää Venuksen ympärillä. [3]

Akatsuki oli Japanin kolmas planeettaluotain. Sen tehtävänä oli myös kuvata Venusta infrapuna- ja uv-kanavilla, tutkia radioaaltojen muuttumista niiden matkatessa Venuksen ionisfäärin ja ilmakehän läpi ja yrittää kuvata salamoita Venuksen ilmakehässä. [7]

Tutkielmassa käytiin läpi tutkimuksia, jotka oli tehty näiden kahden luotaimen keräämien tietojen perusteella, *Venus Express*n Virtis-kameran saamista kuvista löydettiin todisteita geologisesta aktiivisuudesta kolmella eri pyrotoopilla Venuksen pinnalla. Tutkijat arvelivat pyrotooppien vulkaanisen aktiivisuuden johtuvat Venuksen ytimen jäähtymisestä. [9]

Tutkimuksessa todettiin pyrotooppien vaikuttavan paikallisesti Venuksen ilmakehän lämpötilaan. Aiempi oletus oli, että Venuksen ilmakehä olisi hyvinkin tasalämpöinen sen hyvän lämmönjohtavuuden takia. [11]

Tutkimuksissa käytiin läpi Venuksen ilmakehän ominaisuuksia käyttäen kummankin lennon, *Venus Express*in ja *Akatsuki*n dataa. Venuksen tuulet jaettiin kahteen eri kategoriaan, leveys- ja pituusastetuuliin. Leveysastetuulet puhaltavat yli 100 m/s vauhdilla noin 65 km korkeudella Venuksen pinnasta lännen suuntaan. Pituusastetuulet voimistuvat päiväntasaajalta poistuttaessa aina 60. leveysasteeseen saakka ja sen jälkeen hidastuvat navoilla. Tutkijat huomasivat leveysastetuulien nopeuksien vaihtelevan vuosikymmenten välillä. Sen jälkeen tutkijat kävivät läpi erilaisia ilmakehäaaltoja jotka muodostuvat planeetan pinnan muotojen, painovoiman,

ilmakehän liikkeiden ja lämpenemisen seurauksena. [12]

Lopuksi tutkielmassa käytiin läpi suunnitteilla olevien VLF-avaruuslentoja, joista ensimmäisen lähettää Rocket Lab yhteistyössä Mitin kanssa vuonna 2026. Instituutiot suunnittelivat myös kaksi muuta lentoa, joidenka tarkoituksena olisi ollut etsiä mikro-organismejä ja tuoda näyte Venuksen ilmakehästä takaisin Maahan. Näitä kahta viimeistä lentoja ei kuitenkaa toteuteta vaan ne on korvattu kolmella muulla lennolla: Esan *Envisio* ja Nasan *Davinci* ja *Veritas*. [14, 15]

Viitteet

[1] D. R. Williams, Venus fact sheet, 2024.

[2] T. Zhang, W. Baumjohann, M. Delva, H.-U. Auster, A. Balogh, C. Russell, S. Barabash, M. Balikhin, G. Berghofer, H. Biernat, H. Lammer, H. Lichtenegger, W. Magnes, R. Nakamura, T. Penz, K. Schwingenschuh, Z. Vörös, W. Zambelli, K.-H. Fornacon, K.-H. Glassmeier, I. Richter, C. Carr, K. Kudela, J. Shi, H. Zhao, U. Motschmann ja J.-P. Lebreton, Planetary and Space Science **54**, 1336 (2006).

[3] H. Svedhem, D. Titov, D. McCoy, J.-P. Lebreton, S. Barabash, J.-L. Bertaux, P. Drossart, V. Formisano, B. Häusler, O. Korablev, W. Markiewicz, D. Nevejans, M. Pätzold, G. Piccioni, T. Zhang, F. Taylor, E. Lellouch, D. Koschny, O. Witasse, H. Eggel, M. Warhaut, A. Accomazzo, J. Rodriguez-Canabal, J. Fabrega, T. Schirmann, A. Clochet ja M. Coradini, Planetary and Space Science **55**, 1636 (2007).

[4] T. Sato ja T. Satoh, kirjassa *European Planetary Science Congress* (PUBLISHER, 2024), pp. EPSC2024–713.

[5] M. Banks, Physics World **23**, 7 (2010).

[6] W. M. Puolsen, Antje G., Tieteen Kuvalehti **-**, (2021).

[7] M. Nakamura, T. Imamura, N. Ishii, T. Abe, T. Satoh, M. Suzuki, M. Ueno, A. Yamazaki, N. Iwagami, S. Watanabe, M. Taguchi, T. Fukuhara, Y. Takahashi, M. Yamada, N. Hoshino, S. Ohtsuki, K. Uemizu, G. L. Hashimoto, M. Takagi, Y. Matsuda, K. Ogohara, N. Sato, Y. Kasaba, T. Kouyama, N. Hirata, R. Nakamura, Y. Yamamoto, N. Okada, T. Horinouchi, M. Yamamoto ja Y. Hayashi, Earth, Planets and Space **63**, 443 (2011).

[8] D. R. Williams, Venus Express, 2022.

[9] S. E. Smrekar, E. R. Stofan, N. Mueller, A. Treiman, L. Elkins-Tanton, J. Helbert, G. Piccioni ja P. Drossart, Science **328**, 605 (2010).

[10] D. R. Williams, Magellan, 2019.

[11] N. Mueller, S. Kulkarni, S. Lebonnois, A. Das ja H. Rauer, kirjassa *European Planetary Science Congress* (PUBLISHER, 2024), pp. EPSC2024–1062.

[12] A. Sánchez-Lavega, S. Lebonnois, T. Imamura, P. Read ja D. Luz, Space Science Reviews **212**, 1541 (2017).

[13] K. I. T. D. e. a. Patsaeva, M.V., Sol Syst Res **58**, 148 (2024).

[14] S. Seager, J. J. Petkowski, C. E. Carr, D. H. Grinspoon, B. L. Ehlmann, S. J. Saikia, R. Agrawal, W. P. Buchanan, M. U. Weber, R. French, P. Klupar, S. P. Worden, D. Baumgardner ja on behalf of the Venus Life Finder Mission Team, Aerospace **9**, (2022).

[15] S. S. G. J. e. a. Widemann, T., Space Science Reviews **219**, 56 (2023).

[16] N. F. W. Ligterink, K. A. Kipfer, S. Gruchola, N. J. Boeren, P. Keresztes Schmidt, C. P. de Koning, M. Tulej, P. Wurz ja A. Riedo, Aerospace **9**, (2022).

[17] B. A. Mamyrin, V. I. Karataev, D. V. Shmikk ja V. A. Zagulin, Soviet Physics JETP **37**, 45 (1973).

[18] R. Agrawal, S. Seager, J. J. Petkowski, C. E. Carr, W. P. Buchanan, K. Bywaters, M. de Jong, D. H. Grinspoon, I. Iakubivskyi, I. R. King, S. J. Saikia ja K. Zacny, Advances in Space Research **74**, 490 (2024).