

NASA:n MESSENGER-luotain Merkuriukseen

LuK-tutkielma

Turun yliopisto

Fysiikka

2025

Fil. yo. Hanna Suominen

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

Suominen, Hanna NASA:n MESSENGER-luotain Merkuriukseen

LuK-tutkielma, 18 s.
Fysiikka
Maaliskuu 2025

Tämä tutkielma kertoo NASA:n MESSENGER-luotaimen kyydissä olleista mittalaitteista ja niiden toiminnasta. MESSENGER oli toinen koskaan Merkuriuksen luona käynyt luotain ja ensimmäinen sen kiertoradalle jäänyt. Tutkielma käy läpi kahdeksan mittalaitetta, niiden päätavoitteet, rakenteen ja fysikaaliset toimintaperiaatteet, sekä esittelee joitain tärkeimpiä mittaustuloksia.

MESSENGER:in hyötykuormassa oli kahdeksan mittalaitetta, joista viisi oli spektrometrejä: gamma-, neutroni-, infrapuna-, ultravioletti- ja röntgenspektrometrit. Lisäksi mukana oli varattujen hiukkasten spektriä mittaava instrumentti. Muut mittalaitteet sisälsivät kamerasysteemin planeetan pinnan kuvantamiseen, pinnan topografiaa laserin heijastusta mittaamalla kartoittavan laitteen ja magnetometrin.

Luotaimen päätavoitteisiin kuului Merkuriuksen pinnan alkuainekoostumuksen selvittäminen, topografian kartoittaminen ja pinnan kuvantaminen, sekä magneettikentän ja magnetosfäärin tutkimus. Lisäksi pyrittiin selvittämään napa-alueiden pysyvästi varjossa olevien paikkojen koostumusta ja vesijään löytymisen mahdollisuutta.

Asiasanat: Merkurius, MESSENGER, planeettaluotain, spektrometri

Sisällys

Johdanto	1
1 MESSENGER-luotain	2
2 Spektrometrit	3
2.1 Gammasäteilyä mittaava <i>Gamma-Ray Spectrometer</i>	3
2.2 Röntgensäteilyä mittaava <i>X-Ray Spectrometer</i>	5
2.3 Neutroneja mittaava <i>Neutron Spectrometer</i>	7
2.4 Ultravioletti-infrapuna-aluetta kuvantava <i>Mercury Atmospheric and Surface Composition Spectrometer</i>	8
2.5 Varattuja hiukkasia mittaava <i>Energetic Particle and Plasma Spectrometer</i>	10
3 Muut mittalaitteet	12
3.1 Merkuriuksen pintaa kuvaava <i>Mercury Dual Imaging System</i>	12
3.2 Magnetometri <i>Magnetometer</i>	14
3.3 Merkuriuksen pinnan topografiaa kartoittava <i>Mercury Laser Altimeter</i>	15
4 Yhteenveto	16

Johdanto

Planeettaluotaimet tarjoavat mahdollisuuden tehdä in-situ-havaintoja kaukaisista-kin kohteista. Vaikka Maasta käsin havaintoja on mahdollista tehdä jatkuvasti, rajoittaa välimatka suuresti sitä tiedon määrää, joka näillä menetelmillä on saavutettavissa. Pelkän välimatkan lisäksi taivaankappaleiden radat ja liike vaikuttavat Maan pinnalta tehtäviin havaintoihin. Planeettaluotaimet mahdollistavat huomattavasti monipuolisemmat ja tarkemmat mittaukset, ja sitä myötä tarkempien teorioiden kehittämisen muun muassa planeettojen muodostumisesta ja aurinkokunnan historiasta, kun samanlainen mittaus voidaan suorittaa usealla eri planeetalla.

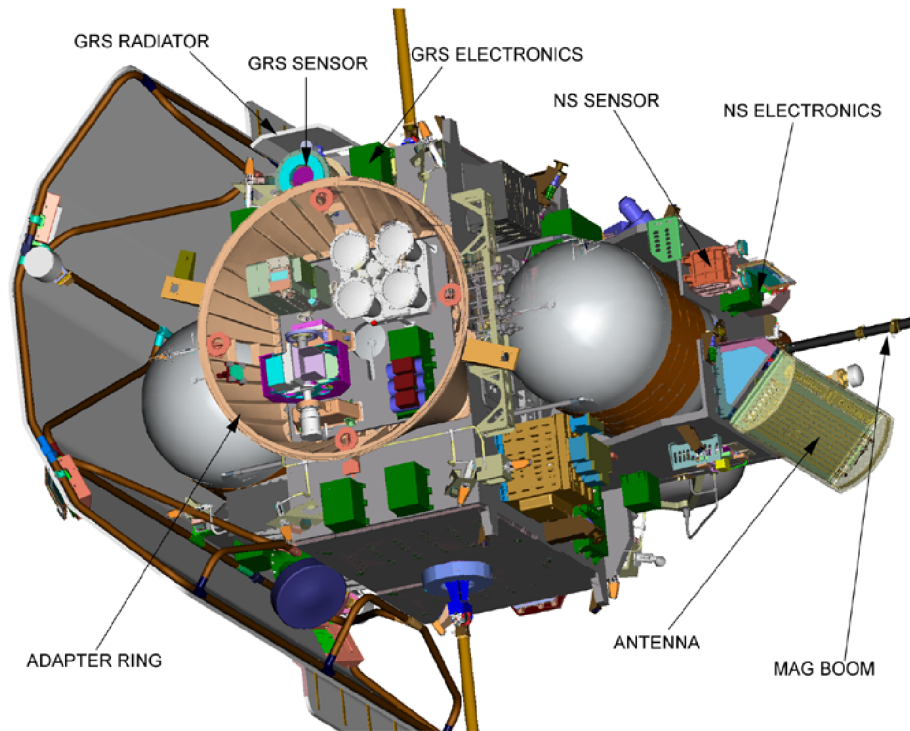
Merkurius on aurinkokuntamme kiviplaneetoista vähiten tutkittu vaikean saavutettavuutensa vuoksi, ja tutkimustulokset sen koostumuksesta ja ominaisuuksista tarjoavat lisätietoa sekä Merkuriuksen että aurinkokunnan historiasta ja muotoutumisesta. Vuosina 1974 ja 1975 yhteensä kolme Merkuriuksen ohilentoa suorittanut Mariner 10 -luotain oli ensimmäinen Merkuriusta lähietäisyydeltä havainnoinut planeettaluotain [1]. Marinerin mittaukset johtivat useisiin yllättäviinkin havaintoihin, kuten Merkuriuksen sisäisen magneettikentän löytymiseen, jota oli aiemmin pidetty planeetan ominaisuuksien valossa epätodennäköisenä [2].

Kolmekymmentä vuotta myöhemmin Marinerin jälkeen seuraavan Merkuriukselle suunnanleen luotaimen, 2004 laukaistun MESSENGER:in, hyötykuorman suunnittelu pohjasikin vahvasti Marinerin keräämään dataan, koska se mahdollisti tarkempien oletusten tekemisen olosuhteista [1]. Vastaavasti uudemmat ja tarkemmat tulokset auttavat tulevien luotainmissioiden suunnittelussa ja mahdollistavat entistä tarkemmat hypoteesit ja sitä myötä myös uusien mittauskohteiden löytymisen.

1 MESSENGER-luotain

NASA:n MESSENGER-luotain (*MErcury, Surface, Space ENvironment, GEOchemistry and Ranging*) oli ensimmäinen Merkuriuksen kiertoradalle jäänyt luotain, ja vasta toinen ohilennon suorittanut luotain Mariner 10:n 1974 ja 1975 tekemien ohilentojen jälkeen [1]. MESSENGER laukaistiin elokuussa 2004, jonka jälkeen se matkasi 6,6 vuotta ennen asettumistaan Merkuriuksen kiertoradalle maaliskuussa 2011. Matkan aikana luotain suoritti useita ohilentoja, kerran Maan luona, kaksi Venuksella ja kolme Merkuriuksella. Alustava missio oli yhden Maan vuoden pituinen, mutta sitä ehdittiin jatkaa kolme kertaa ennen kuin luotain putosi Merkuriuksen pinnalle käytettyään polttoaineensa loppuun huhtikuussa 2015. [3]

Merkurius on haastava toimintaympäristö monesta syystä; Auringon läheisyyden takia lämpötilavaihtelut ovat suuret ja kiertoradalle pääseminen vaikeaa. Mukana olevan laitteiston on siis kestettävä haastavat olosuhteet ja oltava mahdollisimman kevyt. MESSENGER-luotaimen hyötykuorma koostui kahdeksasta tieteellisestä instrumentista sekä kommunikaatiojärjestelmästä. Kuva 1 esittää luotainta. Siihen on merkitty mittalaitteiden paikat. Instrumenttien tutkimuskohteita olivat Merkuriuksen pinnan alkuainekoostumus, pinnan vuorovaikutus planeetan eksosfäärin kanssa ja eksosfäärissä tavattavat hiukkaslajit, magneettikenttä ja magnetosfäärin varatut hiukkaset sekä planeetan pinnan topografia. Mittalaitteista suurin osa oli kiinnitetty vastakkaiselle puolelle luotainta aurinkosuojaan nähden instrumenttien pitämiseksi poissa suorasta auringonvalosta, ja suunnatut detektorit katsoivat siten planeettaa yhtä aikaa. [1]



Kuva 1. Mittalaitteet luotaimessa, suurin osa instrumenteista on kuvan etualalla näkyvän sovitinrenkaan (adapter ring) sisällä. Oikeassa reunassa näkyy magnetometrin puomi, siitä vasemmalle punaisella neutronispektrometri NS ja vasemmassa reunassa aurinkosuojaja. [4]

2 Spektrometrit

2.1 Gammasäteilyä mittaava *Gamma-Ray Spectrometer*

Gamma-Ray Spectrometer (GRS) mittasi Merkuriuksen pinnan emittoimaa gammasäteilyä. Mitatusta spektristä saatiin tietoa Merkuriuksen alkuainekoostumuksesta pinnalta muutamien kymmenien senttimetrien syvyyteen. Mittauksia voitiin tehdä vain melko läheltä planeettaa, noin yhden Merkuriuksen säteen etäisyydelle asti (noin 2440 km [2]) ja koska luotaimen kiertorata oli hyvin eksentrisen, se oli kiertoaikansa aluksi 12 tunnin kestoista vain noin 45 minuuttia mittausetäisyydellä Merkuriuksesta. Samasta syystä mittaukset kattoivat planeetan pohjoisen pallonpuoliskon, jossa luotaimen kiertorata oli lähimpänä planeettaa, mutta vain osan eteläisestä pallonpuoliskosta, noin 20. leveysasteelle asti. Korkeimman mittauskor-

keuden yläpuolelta kerättyä dataa käytettiin taustan määrittämiseen, joka paransi mittausten kalibrointitarkkuutta. [3]

Suurin osa havaitusta gammasäteilystä oli lähtöisin atomiydinten viritystilojen purkautumisesta. Osuessaan planeetan pintaan kosminen säteily vapauttaa neutroneita atomeista ja vapautuneiden neutronien vuorovaikutus atomien kanssa vapauttaa gammasäteilyä. Gammasäteilyä Merkuriuksen pinnalla aiheuttaa myös radioaktiivisten alkuaineiden, esim. K, Th ja U, hajoaminen. [3]

GRS mittasi gammasäteilyä energia-alueella 60 keV – 9 MeV käyttäen detektorina germanium-kidettä (Ge) tavallisen puolijohdeilmäsimen toimintaperiaatteen mukaan: fotonin osuessa detektoriin siinä muodostuu elektroni–aukko-pareja, jotka kulkevat detektorin vahvassa sähkökentässä elektrodeille. Niille muodostunut varaus moninkertaistetaan vahvistimessa ja se tuottaa jännitteen, jonka amplitudi on verrannollinen detektoriin saapuneen fotonin energiaan. Signaalia käsitellään hiukan lisää, sen huippuarvo mitataan ja tallennetaan, jolloin signaalien joukko muodostaa gammasäteilyn spektrin. [4]

Ge-detektori pidettiin mittausten aikana alhaisessa lämpötilassa (noin 90 K), koska se vähentää detektorin alttiutta säteilyvaurioille ja pitää vuotovirran pienenä. Tämän saavuttamiseksi detektori oli hyvin eristetty muusta luotaimesta ja sillä oli oma Stirlingin kiertoa hyödyntävä jäähdytin. Stirlingin kierrolla tarkoitetaan kahdesta kaasusylinteristä koostuvaa lämpövoimakonetta, joka siirtää lämpöä kuumalta kylmälle lämpösäiliölle, eli jäähdyttää. Kuumasäiliön luona kaasu laajenee isotermissi, jonka jälkeen se siirretään kylmäsäiliölle, jossa se luovuttaa lämpöä isokoorisesti, ja puristetaan lopuksi takaisin alkuperäiseen tilavuuteensa ennen siirtoa takaisin kuumasäiliölle. [3, 5]

Jäähdytin oli lisäksi yhdistetty alumiinilevyyn, jonka tarkoitus oli säteillä lämpöä avaruuteen helpottaen jäähdyttimen työtä ja siten pidentäen sen rajallista elinaikaa [4]. Gammasäteilymittaukset loppuivat kesäkuussa 2012, kun jäähdytin meni rikki

toimittuaan yli ennakoitun ajan [3].

Mahdollisia virhelähteitä olivat myös kosminen säteily ja neutronit, jotka voisivat luotaimeen törmätessään tuottaa gammasäteilyä. Näitä pyrittiin minimoimaan ja mittaamaan ympäröimällä detektori muualta kuin planeetan puolelta muovisilla tuikeilmaisimilla, joiden materiaali absorboi tehokkaasti neutroneja. Tuikeilmaisimet oli yhdistetty valomonistinputkeen signaalin lukemista varten. Valomonistinputki on laite, jossa fotonin fotokatodilta irrottamat elektronit ohjataan dynodille, johon törmätessään ne irrottavat lisää elektroneita. Ne jatkavat seuraavalle dynodille, ja niin edelleen, kunnes vahvistunut signaali mitataan. Gammaspektrometrin data auttoi muun muassa selvittämään Merkuriuksen pinnalla olevan suhteellisen runsaasti planeetan pinnasta helposti irtoavia alkuaineita (Na, S, Cl ja K) ja vähän rautaa. [3, 4, 6]

2.2 Röntgensäteilyä mittaava *X-Ray Spectrometer*

Merkuriuksen pinnan alkuainekoostumusta 100 μm syvyydeltä selvitettiin mittamalla pinnan emittoimaa röntgensäteilyä. Tämä on pääasiassa Auringon röntgensäteilyn seurausta, joten säteilyä havaittiin erikseen sekä planeetan pinnalta että Auringon suunnasta. Säteilyä vaimentavan ilmakehän puuttuminen mahdollisti mitaukset Merkuriuksen pinnalta. *X-Ray Spectrometer* (XRS) havaitsi röntgensäteilyä pääasiassa energia-alueella 1–10 keV, jolle mitattujen alkuaineiden (Mg, Al, Si, S, Ca, Ti ja Fe) $K\alpha$ -viivat sijoittuvat. $K\alpha$ -viivoilla tarkoitetaan säteilyä, joka syntyy elektronin siirtyessä atomin alimpien (K ja L) elektronikuorten välillä. [7, 8]

Planeettaa havainnoiva sensori, joka on Kuvassa 2 oikealla (merkitty MXU), koostui kolmesta verrannollisuuslaskurista (engl. proportional counter) eli kaasutäytteisestä putkesta, joiden sisällä oli yksi anodilanka ja siten sähkökenttä. Putkeen saapuessaan fotonit ionisoivat kaasua. Syntyneet ionit olivat suhteessa paljon elektroneja raskaampia, joten putken sähkökenttä kiihdytti elektroneita huomatta-



Kuva 2. Röntgenspektrometrin komponentit, oikealla Merkuriusta havainnoinut sensori MXU, vasemmalla Aurinkosensori SAX ja keskellä laitteiden elektroniikkaa sisältävä MEX. [8]

vasti enemmän. Vapaiden elektronien liikkua kohti anodia ne ionisoivat lisää kaasu tuottaen lisää vapaita elektroneja. Mittaus loppui kaikkien vapaiden elektronien päädyttyä anodille, mikä tuotti signaalipulssin. Pulssien spektristä saatiin selville röntgensäteilyn energiaspektri. [8]

Koska putken sisäinen sähkökenttä vaikuttaa siihen missä suhteessa röntgensäteilyn vapauttamien elektronit ionisoivat muita atomeja, oli anodin jännite pidettävä vakaana. Putkien energiarisoluutio ei ollut riittävä joillekin pienienergisistä Mg-, Al- ja Si-spektriviivoista, joten ongelma ratkaistiin laittamalla yhden putken aukon eteen ohut magnesiumkalvo ja toisen eteen alumiinikalvo. Kalvot toimivat suodattimina heikentäen osaa spektriviivoista ja mahdollistavat näin niiden erottamisen toisistaan. [8, 9]

Auringon röntgensäteilyä mittasi luotaimen aurinkosuojaan kiinnitetty pieni Si-PIN-tyyppinen puolijohdedetektor. Säteilyvuo suoraan Auringon suunnasta on huomattavan suuri, joten detektoriin päätyvän säteilyn ja lämmön määrää rajoitettiin pienellä apertuurilla ja beryllium-kalvolla. Aurinkomonitori oli altis säteilyvaurioille, mutta ne voitiin suurimmaksi osaksi kumota lämmittämällä detektori noin 100 °C lämpötilaan noin 24 tunnin ajaksi. [8]

XRS:n datasta selvisi Merkuriuksen pinnan Mg/Si-suhteen olevan Kuuhun ja Maahan verrattuna suuri, kun taas Al/Si- ja Ca/Si-suhteet ovat pieniä. Tulokset on esitetty suhteina, sillä se on tarkempi tapa määrittää esiintyvyyksiä kuin absoluuttinen arvo. Myös rautaa ja titaania löytyi suhteellisen vähän. Rikin runsaus on Merkuriuksen pinnalla jopa kertaluokkaa suurempi kuin Kuussa tai Maassa. [10]

2.3 Neutroneja mittaava *Neutron Spectrometer*

Neutronien mittauksen tarkoituksena oli röntgen- ja gammaspektrien tapaan Merkuriuksen pinnan alkuainekoostumuksen selvittäminen. Neutronispektrissä ei kuitenkaan ole samanlaisia karakteristisia piikkejä kuin sähkömagneettisessa spektrissä, josta voisi suoraan tunnistaa eri alkuaineita, joten sen mittatuloksia käytettiin auttamaan esim. gammaspektrin tulkinnessa. Vety on yksi poikkeuksista, jotka voidaan tunnistaa pelkästään neutronien spektristä, ja sen runsauden kartoittaminen oli yksi mittalaitteen päätehtävistä. Vetyä havaitsemalla voitiin myös tutkia, onko Merkuriuksen napa-alueiden pysyvästi varjossa olevilla alueilla vesijäätä. Neutronit menettävät tehokkaammin energiaa törmätessään vetyyn, kuin muihin alkuaineisiin, koska H-ytimen massa on melkein sama kuin neutronin. Tällöin havaittu suurienergiasten neutronien vuo on pienempi, joka mahdollistaa vedyn havaitsemisen. Yleisesti suurimassaiset atomiytimet hidastavat neutroneita pienimassaisia vähemmän, jolloin havaitun vuon perusteella voidaan kartoittaa myös keskimääräistä atomimassaa Merkuriuksen pinnalta. [4]

Kolmen eri energia-alueen neutroneita mitattiin: termisiä (0–1 eV), epitermisiä (1 eV – 500 keV) ja nopeita (500 keV – 7 MeV) neutroneita. Mittalaite koostui kolmesta tuikeilmaisimesta, jotka oli yhdistetty erillisiin valomonistinputkiin. Detektoreista kaksi oli lasia, johon oli lisätty litiumia. Li-lasi-detektorit havaitsivat pääasiassa termisiä neutroneita. Kolmas tuikeilmaisim oli muovia ja booria, ja se havaitsi epitermisiä ja nopeita neutroneita. Muovisen detektorin ympärillä olevat materiaalit

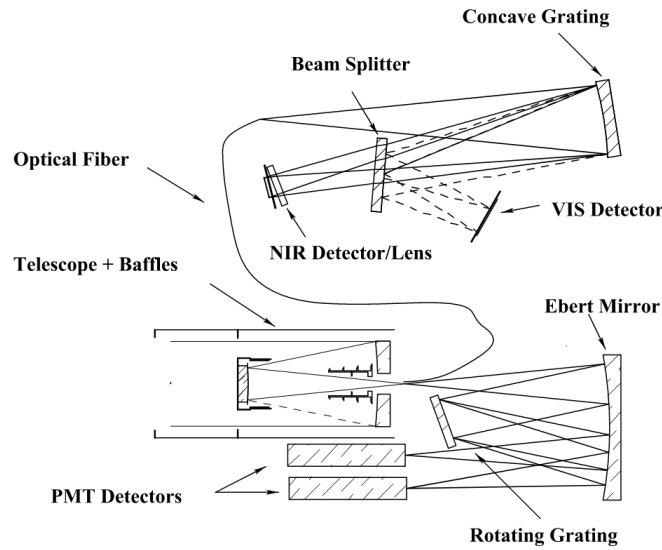
absorboivat tehokkaasti neutroneja, jolloin vain suurienergiaiset havaittiin. Nopeat neutronit aiheuttivat detektorissa kaksi valopulssia, yhden saapuessaan detektoriin ja sirotessaan, toisen absorboituessaan booriatomiin. Pienempienergiaisista neutroneista aiheutui vain jälkimmäinen, absorboitumisessa syntyvä pulssi. Pulssien välissä kuluneen ajan ja toisen pulssin energian avulla voitiin arvioida oliko pulssi taustaa ja siten eliminoida osa virhesignaaleista. Pulssit muutettiin sähköisiksi valomonistinputkissa. [4]

Nopeiden ja epitermisten neutronien vuolle mitattiin Merkuriuksen pohjoisella napa-alueella muita pienempiä arvoja, joka viittaa suurempaan vetykonsentraatioon ja siten mahdolliseen vesijäähän. Nopeiden neutronien data ei kuitenkaan tue ajatusta paksusta yhtenäisestä kerroksesta vetyrikasta materiaalia, ja tietojen yhdistäminen viittaa jonkin verran pinnan muun aineen alla olevaan vetyä runsaasti sisältävään kerrokseen. Tämä päätelmä on yhtäpitävä muiden mittalaitteiden tulosten kanssa. [11]

2.4 Ultravioletti-infrapuna-aluetta kuvantava *Mercury Atmospheric and Surface Composition Spectrometer*

Ultravioletti- ja infrapuna-alueiden mittauksilla selvitettiin Merkuriuksen eksosfäärin ja pinnan koostumusta. Merkuriuksella ei ole varsinaista ilmakehää vaan harvempi eksosfääri, joka vuorovaikuttaa planeetan pinnan ja magnetosfäärin kanssa ja jonka ominaisuudet määrittyvät niiden mukaan. Eksosfäärin hiukkasten tyyppin ja korkeusjakauman kartoitus auttoi lämpötilan ja tiheyden määrittämisessä ja mahdollisti aineiden jakautumisen kartoittamisen suuressa skaalassa. Parempi tietämys eksosfäärin prosesseista tarjoaa lisätietoa myös planeetan pinnasta, sekä pinnan ja eksosfäärin vuorovaikutuksesta. Mittauksia varten luotaimen kyydissä oli pieni Cassegrain-tyypin teleskooppi, josta valo ohjattiin kahteen mittalaitteistoon. [12]

Teleskoopissa oli kovera pääpeili ja apupeilinä kupera pallopeili, joka kohdis-



Kuva 3. MASCS-mittalaitteen optiikka ja valon kulku teleskoopilta kaikille detektoreille. [12]

ti kuvan pääpeilin taakse. Toinen kahdesta mittalaitteesta, *Ultraviolet and Visible Spectrometer*, eli lyhyesti UVVS, mittasi kolmea eri aallonpituusaluetta: ultraviolettisäteilyä (UV) alueilla 115–190 nm ja 160–320 nm sekä näkyvää valoa 250–600 nm alueelta. UVVS oli optimoitu eksosfäärin mittauksiin ja planeetan pinnan heijastaman valon UV-alueen havainnointiin. Laite koostui pallopeilistä, johon valo saapui suoraan teleskoopilta. Peililtä valo heijastui hilaan, ja diffraktoituneesta valosta osa aallonpituuksista heijastui samasta peilistä valomonistinputkille. Putkia oli yksi kullakin aallonpituusalueelle, ja niissä käytetyt materiaalit oli valittu sen mukaan. Hila oli kääntyvä, joka mahdollisti spektrin havaitsemisen suuremmalta aallonpituusalueelta. Optiikka ja valon kulku mittalaitteessa on esitetty Kuvassa 3. [12]

Toinen mittalaitteista oli Merkuriuksen pinnan infrapunaspektrejä ja näkyvän valon spektrejä havainnut *Visible and Infrared Spectrograph*, lyhyesti VIRS. VIRS teki mittauksia kahdella aallonpituusalueella, 300–1050 nm ja 850–1450 nm. Optiikka ja valon kulku laitteessa on esitetty Kuvassa 3. Teleskoopilta valo kuljetettiin mittalaitteelle valokuidulla, jolta se saapui koveraan hilaan. Diffraktoitunut valo erotellaan säteenjakajalla (engl. beam splitter) aallonpituuden mukaan eri detektoreil-

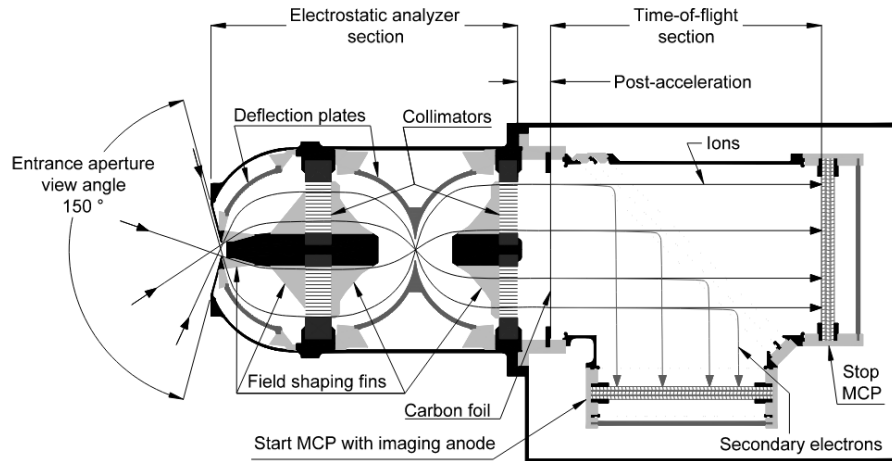
le. Näkyvä valo heijastuu, ja mitataan Si-puolijohdedetektorilla. Infrapuna läpäisee säteenjakajan ja saapuu kokoavan linssin kautta InGaAs-puolijohdedetektorille. [12]

2.5 Varattuja hiukkasia mittaava *Energetic Particle and Plasma Spectrometer*

Varattujen hiukkasten käyttäytymisestä saadaan tietoa magneettikentästä, tässä tapauksessa mittauksia käytettiin apuna magnetometrimittausten kanssa Merkuriuksen sisäisen magneettikentän ja magnetosfäärin virtojen luomien ulkoisten kenttien erottamiseen. Lisäksi mittauksia käytetään apuna planeetan koostumuksen selvittämisessä. Laitteisto sisälsi kaksi sensoria, suurienergiaisia elektroneita ja ioneja havaitseva EPS (*Energetic Particle Spectrometer*), ja pienienergiaisia ioneja havaitseva FIPS (*Fast Imaging Plasma Spectrometer*). [13]

FIPS voitiin jakaa kolmeen pääkomponenttiin: sylinterisymmetrinen ESA (*Electrostatic Analyzer*), TOF (*Time-of-flight*) sekä sensorin elektroniikka. Kaksi ensimmäistä on esitetty Kuvassa 4, jossa näkyy sensorin sisärakenne ja hiukkasten kulureitit. ESA päästi läpi vain tiettyjä energia/varaus (E/Q) -suhteita omaavia ioneja, riippuen poikkeutuslevyjen (engl. deflection plate) jännitteestä. Ionien saapuessa mittalaitteeseen ne joutuivat staattiseen sähkökenttään, jolloin niiden rata kaareutui. Ionit ohjattiin poikkeutuslevyjen avulla kollimaattoriin, jonka raot olivat laitteen symmetria-akselin suuntaiset, eli vain siihen suuntaan liikkuvat ionit pääsivät läpi. Ennen toista kollimaattoria laitteessa oli tiimalasin muotoinen alue, jotta saatiin vähennettyä eteenpäin pääsevän ultraviolettisäteilyn määrää. Toisen kollimaattorin jälkeen ioneja kiihdytettiin, ja ne läpäisivät hiilikalvon matkallaan TOF-osalle. Kiihdytys vähensi energiahajontaa ja varmisti, että myös pienienergiaiset ionit läpäisivät kalvon. [13]

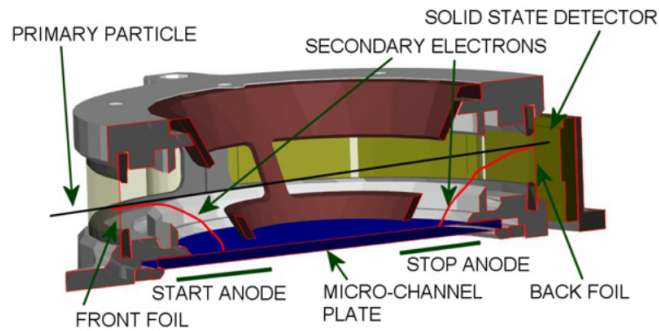
Kun ioni läpäisi hiilikalvon, vapautui pienienergiaisia elektroneja. Ionit jatkoivat matkaansa suoraan ja päätyivät detektorille, samalla kun elektronit ohjattiin omal-



Kuva 4. Kaaviokuva FIPS-sensorin sisärakenteesta. Kuvaan on merkitty tärkeimmät komponentit ja ionien ja elektronien radat. Hiukkaset saapuvat mittalaitteeseen kuvassa vasemmalta, keskellä on ESA ja oikeassa reunassa TOF-osa. [13]

le detektorilleen. Ionien matka-aika hiilikalvolta detektorille määritettiin ionien ja elektronien signaalien ajoista. Piti myös huomioida elektronien matka-aika kalvolta detektorille, joka oli vakio ja riippui systeemin potentiaaleista. FIPS mittasi lisäksi ionien saapumiskulmaa laitteeseen. Mitä suurempi kulma ionin radan ja ESA:n symmetria-akselin välillä oli, sitä kauempana keskeltä ionit läpäisivät kollimaattorit ja siten myös hiilikalvon. Kalvosta irronneiden elektroneiden paikkaa detektorilla havaittiin, ja sen avulla saatiin selville saapumiskulma. [13]

EPS mittasi sekä elektroneja että H-, He-, CNO- ja Fe-ioneja. Laitteen rakenne näkyy Kuvassa 5, johon on merkitty myös hiukkasten reitit. Mittalaite koostui sylinterimäisestä TOF-kammioista, johon hiukkaset saapuivat alumiinipäällystetyn kalvon läpi. Useimpien ionien tapauksessa tämä vapautti sekundääri elektroneja, jotka ohjattiin omalle lukijalleen, ja tuottivat ensimmäisen ajoitussignaalin. Protonit tuottivat sekundääri elektroneja muita ioneja huonommalla todennäköisyydellä ja ajoitussignaalin puuttuminen johti protonin sivuuttamiseen tai väärintulkintaan elektroneiksi. Ioni jatkoi lentoaan kammion toiselle reunalle, jossa se läpäisi toisen kalvon, muuten samanlaisen mutta alumiinin sijaan palladiumilla päällystetyn. Va-



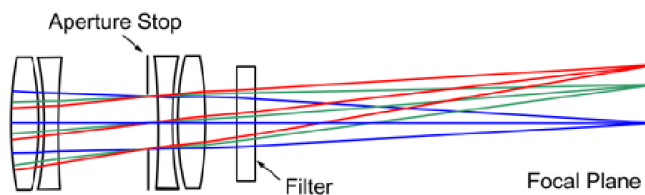
Kuva 5. Poikkileikkauskuvaa EPS-sensorista. Kuvassa on sensorin sisärakenne, johon on merkitty tärkeimmät komponentit sekä mitattavien hiukkasten radat. [13]

pautuneet elektronit tuottavat toisen ajoitusignaalin, ja ionin matka-aika saadaan näin laskettua. Heti toisen kalvon takana oli kuusi piidetektoria. Kukin detektori oli jaettu neljään osaan, joista kaksi oli päällystetty ohuella alumiinikerroksella. Päällystetyillä osilla havaittiin elektroneja alumiinin torjuessa protonit 110 keV energiaan asti. Päällystämättömät detektorit havaitsivat sekä elektronit että ionit. Elektronit eivät kuitenkaan tuottaneet ajoitusignaaleja, koska eivät vapauttaneet kalvot läpäistessään sekundääri elektroneja, joten signaalien puuttumisen perusteella voitiin erotella elektronihavainnot ioneista. [13]

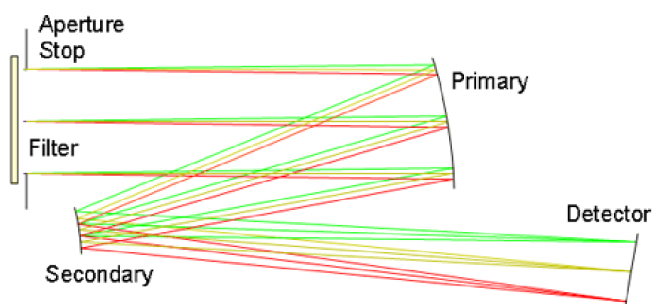
3 Muut mittalaitteet

3.1 Merkuriuksen pintaa kuvaava *Mercury Dual Imaging System*

MESSENGER:in kyydissä oli kaksi kamerajärjestelmää, laajan näkökentän (engl. field-of-view, FOV) omaava WAC (*wide-angle camera*) ja kapean näkökentän NAC (*narrow-angle camera*). WAC hyödynsi linssi-optiikkaa ja NAC peilioptiikkaa. Molemmilla detektorina oli 1024×1024 pikselin CCD-kamera (*Charge-Coupled Device*). Kamerat oli kiinnitetty kääntyvälle jalustalle, jotta kuvakulmaa saatiin säädettyä



Kuva 6. WAC-kameran optiikka ja valon kulku laitteistossa. [14]



Kuva 7. NAC-kameran optiikka ja valon kulku laitteistossa. [14]

muuttamatta luotaimen orientaatiota. Alustan suuri liikerata (noin 240°) mahdollisti myös kameroiden laittamisen "piiloon" ja siten optiikan suojelemisen ylimääräiseltä kontaminaatiolta. Molempien optiikassa oli myös lämpösäteilyä torjuvat suotimet. Mukana oli kalibrintikohde, joka mahdollisti tasoituskuvienv (engl. flat-field) ottamisen helposti. Kameroiden datasta saatiin tietoa muun muassa Merkuriuksen pinnanmuodoista, materiaaleista sekä kraaterien ja osumakohtien avulla tietoa planeettaan törmänneistä kappaleista. [14]

WAC-kameran optiikka ja valon kulku on esitelty Kuvassa 6. Kamerassa oli 12 suodinta, joista 11 oli aallonpituusalueella 345–1040 nm, valittu oletettujen pintamateriaalien mukaan, ja yksi laajakaista tarkoitettu tähtien avulla navigoimiseen. Polttoväli oli suotimesta riippuen 78–78,5 mm ja FOV $10,5^\circ$. [14]

NAC-kameran optiikka ja valon kulku on esitelty Kuvassa 7. Mustavalkokamerassa oli vain yksi suodin, keskitetty aallonpituuteen 750 nm, ja sen päätehtävä oli Merkuriuksen suuren resoluution kuvaus. FOV oli $1,5^\circ$ ja systeemin polttoväli 550

mm. Pääpeili oli muodoltaan ellipsoidinen ja apupeili hyperbolinen. Molemmat peilit olivat kullalla päällystettyä alumiinia, jolloin lämpötilasta johtuvat vääristymät pysyivät pieninä. [14]

3.2 Magnetometri *Magnetometer*

Magnetometrिन päätehtävät olivat Merkuriuksen magneettikentän rakenteen selvittäminen sekä sen ja aurinkotuulen vuorovaikutuksen tutkiminen. Magneettikentän tutkimus mahdollistaa päätelmät kentän alkuperästä sekä planeetan sisäisen rakenteen ja muodostumisen teorioiden tarkastelun ja rajoittamisen. Lisäksi magneettikenttähavaintoja tarvittiin avuksi EPS- ja FIPS-sensoreiden keräämän datan tulkintaan. [2]

Mittalaite koostui kolmesta ortogonaalisesta, rengassydämmisestä sensorista. Sensorit oli kiinnitetty 3,6 m pitkän puomin päähän, jotta ne saatiin mahdollisimman kauas luotaimesta ja sen laitteistojen aiheuttamien magneettikenttien tuottama virhe mittauksiin minimoitua. Asennuksesta johtuvat pienet poikkeamat sensoreiden täydellisestä ortogonaalisuudesta korjattiin dataa prosessoidessa ennen lentoa suoritettujen kalibraatiomittausten perusteella. [2]

Käytetty sensori koostuu käämistä, jossa on ferromagneettinen sydän, sekä sen ympärillä olevasta toisesta käämistä. Ensimmäiseen käämiin kytketään vaihtovirta, jolloin toiseen käämiin indusoituu jännite. Ulkoisessa magneettikentässä indusoitunut jännite muuttuu, joka mahdollistaa kentän havaitsemisen. Sensoreiden jännite oli suoraan verrannollinen magneettikentän kussakin suunnassa mitattuun komponenttiin [2, 15].

Puomi sensoreineen sijaitsi vastakkaisella puolella luotainta kuin aurinkosuoja ja osoitti normaalisti pois päin auringosta. Merkuriuksen kiertoradalla luotaimen orientaatio oli kuitenkin välillä toinen, ja laitteella olikin oma pieni kartiomainen aurinkosuojansa, jotta välttyttiin suoralta auringonvalolta. Vaikka laite olikin rakennettu

tarvittaessa kestävämmän altistus, pyrittiin se pitämään tasaisemmissa olosuhteissa mittaustarkkuuden turvaamiseksi. [2]

3.3 Merkuriuksen pinnan topografiaa kartoittava *Mercury Laser Altimeter*

Merkuriuksen pohjoisen pallonpuoliskon topografiaa kartoitettiin laserpulsilla, jonka heijastumista planeetan pinnasta ja matkaan kulunutta aikaa mitattiin. Pinnan merkittävimpien geologisten muodostelmien lisäksi mitattiin pinnan heijastavuutta käytetyn laserin aallonpituudella. Mittaukset piti tehdä tarpeeksi läheltä planeettaa (maks. 1800 km), jonka takia mittausaikaa jäi 15–45 min/kierros riippuen siitä, missä vaiheessa Merkurius oli kiertorataansa Auringon ympäri. [16]

Laserin aallonpituus oli 1064 nm, ja se ammuttiin noin 20 mJ energiaisina, 5 ns pulsseina 8 Hz taajuudella. Laserissa oli fotodiodi, joka havaitsi laserin ja tuotti pulssin, josta mitattiin emittoitu energia ja jota käytettiin merkkamaan laserpulsin lähtöaikaa. Heijastunut pulssi havaittiin neljällä teleskoopilla, joilta se siirrettiin valokuidulla suotimen kautta yhdelle Si-APD-tyyppiselle (*Silicon Avalanche Photodiode*) puolijohdedetektorille. Teleskoopit olivat keskenään identtisiä linssiteleskooppeja, sillä ne olivat peiliteleskooppeja helpompia ja halvempia valmistaa sekä soveltuivat paremmin Merkuriuksen haastaviin lämpötilaolosuhteisiin. Linssit oli valmistettu safiirista, koska se kestää hyvin säteilyä ja lämpötilanvaihteluita sekä sen pienen infrapuna-absorbtion takia. Heijastuneen pulssin havaitseminen pysäytti ajanmittauksen. Pulssin vertaaminen lähtömittaukseen ja tieto matka-ajasta mahdollistivat planeetan pinnan topografian ja heijastavuuden arvioinnin. [16]

4 Yhteenveto

MESSENGER teki Maan, Venuksen ja Merkuriuksen ohilentojensa lisäksi mittauksia Merkuriuksen kiertoradalta käsin neljän vuoden ajan. Planeetan pinnan alkuainekoostumusta pyrittiin selvittämään gammasäteilyn, röntgensäteilyn, neutronien sekä ultravioletti- ja infrapuna-alueiden spektrejä tutkimalla sekä kuvaamalla pinta näkyvän valon alueella. Mittausten tuloksena todettiin Merkuriuksen pinnalla olevan Maahan ja Kuuhun verrattuna huomattavasti runsaammin rikkiä ja hieman enemmän magnesiumia suhteessa piihin. Alumiinin ja kalsiumin runsauksien suhteessa piihin todettiin olevan taas pienempiä, kuten myös raudan ja titaanin. Neutronispektrin tärkein tehtävä oli mahdollisen vesijään havaitseminen vedyn runsauden avulla, ja tulokset Merkuriuksen pohjoiselta napa-alueelta pysyvistä varjopaikoista vastaavat mallia, jossa vesijäätä on kerros hieman pinnan alapuolella. [3, 4, 8, 10–12, 14]

Merkuriuksen sisäistä magneettikenttää sekä planeetan magnetosfäärin ilmiötä ja käyttäytymistä selvitettiin mittaamalla magneettivuon tiheyttä ja varattujen hiukkasten spektriä magnetosfäärissä. Merkuriuksen pohjoisen pallonpuoliskon topografiaa mitattiin laseria hyväksikäyttäen. Mittaukset tarjosivat myös tietoa planeetan pinnan heijastavuudesta käytetyn laserin aallonpituudella. [2, 13, 16]

Seuraava Merkuriusta tutkiva planeettaluotain on ESA:n ja JAXA:n BepiColombo, joka on jo suorittanut useamman ohilennon Merkuriuksella ja tehnyt mittauksia. BepiColombo jatkaa Merkuriuksen tutkimista ja tarkentaa MESSENGER:in tekemiä havaintoja. [17]

Viitteet

- [1] R. E. Gold, S. C. Solomon, R. L. McNutt, A. G. Santo, J. B. Abshire, M. H. Acuña, R. S. Afzal, B. J. Anderson, G. Andrews, P. D. Bedini, J. Cain, A. F. Cheng, L. G. Evans, W. C. Feldman, R. B. Follas, G. Gloeckler, J. O. Goldsten, S. Hawkins Iii, N. R. Izenberg, S. E. Jaskulek, E. A. Ketchum, M. R. Lankton, D. A. Lohr, B. H. Mauk, W. E. McClintock, S. L. Murchie, C. E. Schlemm Ii, D. E. Smith, R. D. Starr ja T. H. Zurbuchen, *Planetary and Space Science* **49**, 1467 (2001).
- [2] B. J. Anderson, M. H. Acuña, D. A. Lohr, J. Scheifele, A. Raval, H. Korth ja J. A. Slavin, *Space Science Reviews* **131**, 417 (2007).
- [3] L. G. Evans, P. N. Peplowski, E. A. Rhodes, J. O. Goldsten, R. D. Starr ja S. C. Solomon, *Icarus* **288**, 186 (2017).
- [4] J. O. Goldsten, E. A. Rhodes, W. V. Boynton, W. C. Feldman, D. J. Lawrence, J. I. Trombka, D. M. Smith, L. G. Evans, J. White, N. W. Madden, P. C. Berg, G. A. Murphy, R. S. Gurnee, K. Strohhahn, B. D. Williams, E. D. Schaefer, C. A. Monaco, C. P. Cork, J. Del Eckels, W. O. Miller, M. T. Burks, L. B. Hagler, S. J. DeTeresa ja M. C. Witte, *Space Science Reviews* **131**, 339 (2007).
- [5] D. Schroeder, *An Introduction to Thermal Physics* (Oxford University Press, 2021), s. 133–134.
- [6] H. Karttunen, K. J. Donner, P. Kröger, H. Oja ja M. Poutanen, *Tähtitieteen perusteet* (Ursa, 2024), s. 105.
- [7] M. Jabua, D. Gotta, T. Strauch, C. Weidemann, B. Fricke ja K. Rashid, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* **121**, 11 (2016).
- [8] C. E. Schlemm, R. D. Starr, G. C. Ho, K. E. Bechtold, S. A. Hamilton, J. D. Boldt, W. V. Boynton, W. Bradley, M. E. Fraeman, R. E. Gold, J. O. Goldsten, J. R. Hayes, S. E. Jaskulek, E. Rossano, R. A. Rumpf, E. D. Schaefer, K. Strohhahn, R. G. Shelton, R. E. Thompson, J. I. Trombka ja B. D. Williams, *Space Science Reviews* **131**, 393 (2007).
- [9] R. Starr, P. E. Clark, M. E. Murphy, S. R. Floyd, T. P. McClanahan, L. R. Nittler, J. I. Trombka, L. G. Evans, W. V. Boynton, S. H. Bailey, J. Bhangoo, I. Mikheeva, J. Brückner, S. W. Squyres, E. M. McCartney, J. O. Goldsten ja R. L. McNutt, *Icarus* **147**, 498 (2000).
- [10] L. R. Nittler, R. D. Starr, S. Z. Weider, T. J. McCoy, W. V. Boynton, D. S. Ebel, C. M. Ernst, L. G. Evans, J. O. Goldsten, D. K. Hamara, D. J. Lawrence, R. L. McNutt, C. E. Schlemm, S. C. Solomon ja A. L. Sprague, *Science* **333**, 1847 (2011).
- [11] D. J. Lawrence, W. C. Feldman, J. O. Goldsten, S. Maurice, P. N. Peplowski, B. J. Anderson, D. Bazell, R. L. McNutt, L. R. Nittler, T. H. Prettyman, D. J. Rodgers, S. C. Solomon ja S. Z. Weider, *Science* **339**, 292 (2013).

- [12] W. E. McClintock ja M. R. Lankton, *Space Science Reviews* **131**, 481 (2007).
- [13] G. B. Andrews, T. H. Zurbuchen, B. H. Mauk, H. Malcom, L. A. Fisk, G. Gloeckler, G. C. Ho, J. S. Kelley, P. L. Koehn, T. W. LeFevre, S. S. Livi, R. A. Lundgren ja J. M. Raines, *Space Science Reviews* **131**, 523 (2007).
- [14] S. E. Hawkins, J. D. Boldt, E. H. Darlington, R. Espiritu, R. E. Gold, B. Gotwols, M. P. Grey, C. D. Hash, J. R. Hayes, S. E. Jaskulek, C. J. Kardian, M. R. Keller, E. R. Malaret, S. L. Murchie, P. K. Murphy, K. Peacock, L. M. Prockter, R. A. Reiter, M. S. Robinson, E. D. Schaefer, R. G. Shelton, R. E. Sterner, H. W. Taylor, T. R. Watters ja B. D. Williams, *Space Science Reviews* **131**, 247 (2007).
- [15] A. Mosahebfard, O. Daneshmandi, A. Hosseinzadeh, M. Abdi ja M. Yazdjerdy, *Pramana* **95**, 119 (2021).
- [16] J. F. Cavanaugh, J. C. Smith, X. Sun, A. E. Bartels, L. Ramos-Izquierdo, D. J. Krebs, J. F. McGarry, R. Trunzo, A. M. Novo-Gradac, J. L. Britt, J. Karsh, R. B. Katz, A. T. Lukemire, R. Szymkiewicz, D. L. Berry, J. P. Swinski, G. A. Neumann, M. T. Zuber ja D. E. Smith, *Space Science Reviews* **131**, 451 (2007).
- [17] L. Z. Hadid, D. Delcourt, Y. Harada, M. Rojo, S. Aizawa, Y. Saito, N. André, A. N. Glass, J. M. Raines, S. Yokota, M. Fränz, B. Katra, C. Verdeil, B. Fiethe, F. Leblanc, R. Modolo, D. Fontaine, N. Krupp, H. Krüger, F. Leblanc, H. Fischer, J.-J. Berthelier, J.-A. Sauvaud, G. Murakami ja S. Matsuda, *Communications Physics* **7**, 1 (2024).