



TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA

Kone- ja tuotantotekniikka

Tuotesuunnittelu

INSINÖÖRITYÖ

AVARUUSINSTRUMENTIN MEKANIKKASUUNNITTELU

**Työn tekijä: Matias Roos
Työn valvoja: Jyrki Kullaa
Työn ohjaaja: Seppo Vaijärvi**

Työ hyväksytty: __. __. 2007

**Jyrki Kullaa
yliopettaja**



ALKULAUSE

Tämä insinöörityö tehtiin Oxford Instruments Analytical Oy:lle osana Euroopan ja Japanin avaruusjärjestöjen BepiColombo-yhteistyöhanketta.

Haluan kiittää työn ohjaajana toiminutta DI, projektipäällikkö Seppo Vaijärveä ja työn valvojana toiminutta tekn. tri Jyrki Kullaata saamastani ohjauksesta.

E erityisen kiitoksen haluan esittää vanhemmalle tutkimusinsinöörille DI Hans Anderssonille instrumentin suunnitteluun ja avaruustekniikkaan liittyvästä opastuksesta.

Espoossa 30.3.2007

Matias Roos

INSINÖÖRITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Matias Roos	
Työn nimi: Avaruusinstrumentin mekaniikkasuunnittelu	
Päivämäärä: 30.3.2007	Sivumäärä: 57 + 16 liitettä
Koulutusohjelma: Kone- ja tuotantotekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Tuotesuunnittelu
Työn valvoja: Jyrki Kullaa, yliopettaja, TkT	
Työn ohjaaja: Seppo Vaijärvi, projektipäällikkö, DI	
<p>Tämän insinöörityön tarkoituksena on kehittää avaruusinstrumentti, joka on osa Euroopan avaruusjärjestön ESA:n ja Japanin avaruusjärjestön JAXA:n BepiColombo-yhteistyöhanketta. Satelliitti lähetetään Merkurius-planeetan kiertoradalle vuonna 2013. Avaruusaluksen matka Merkuriukseen kestää yhteensä kuusi vuotta ja on perillä vuonna 2019.</p> <p>Yksi BepiColombo-satelliitin tieteellisistä instrumenteista on Oxford Instruments Analytical Oy:n kehittämä SIXS-instrumentti (Solar Intensity X-ray and particle Spectrometer). Instrumentin tarkoituksena on mitata auringosta tulevaa röntgen- ja partikkelisäteilyä. Se toimii yhteistyössä Merkuriuksen pintaa mittaavan MIXS-instrumentin (Mercury Imaging X-ray Spectrometer) kanssa. Tuloksista pystytään analysoimaan ne alkuaineet, joista Merkuriuksen pinta koostuu.</p> <p>Työn alussa esitellään teoriataustaa alkuaineiden mittauksesta niiltä osin, kuin se tämän työn kannalta on tarpeellista. Työssä syvennytään tarkemmin auringosta tulevan säteilyn mittauksesta vastaavan instrumentin tekniikkaan ja mekaniikkasuunnitteluun. Instrumentin lämpöteknisestä suunnittelusta, värähtelymittauksista ja lujuusanalyysistä on työhön sisällytetty pääasiat.</p> <p>Työn tuloksena on kehitetty instrumenttiin tulevan partikkelidetektorin prototyyppi sekä instrumenttikotelon malli. Lopullisen koon instrumenttikotelolle määrittää vaadittavan elektroniikan viemä tila. Mittalaitteen kehitystyö jatkuu Oxford Instruments Analytical Oy:ssä vuoteen 2011 saakka.</p>	
Avainsanat: Avaruustekniikka, avaruusinstrumentti, röntgendetektor, partikkelidetektor, alkuaineiden mittaus, mekaniikkasuunnittelu, tuotesuunnittelu	

ABSTRACT

Name: Matias Roos	
Title: Mechanics design of a space instrument	
Date: 30.3.2007	Number of pages: 57 + 16 appendices
Department: Mechanical and Production Engineering	Study Programme: Product Design
Instructor: Jyrki Kullaa, principal lecturer, Dr.Tech.	
Supervisor: Seppo Vaijärvi, project manager, M.Sc.	
<p>The purpose of this graduate study is to develop a space instrument as part of European Space Agency ESAs and Japan Aerospace Exploration Agency JAXAs BepiColombo co-operation project. The spacecraft will be sent to the orbit of the planet Mercury in the year 2013. The voyage to Mercury takes six years, so the spacecraft will arrive in the orbit of Mercury in 2019.</p> <p>One of the scientific instruments used in the BepiColombo-satellite will be the SIXS-instrument (Solar Intensity X-ray and particle Spectrometer), developed and manufactured by Oxford Instruments Analytical Oy. The purpose of the instrument is to measure the X-ray and particle radiation emitted by the sun. It will work in cooperation with the MIXS-instrument (Mercury Imaging X-ray Spectrometer) measuring the surface of Mercury. The elemental composition of Mercury can be calculated from these measuring results.</p> <p>The graduate work opens with a presentation of the principles for measuring elements. This is then followed by a more detailed presentation of the mechanics design and the technology needed for the instrument measuring sun based radiation. The basics of thermal design, vibration tests and finite element modeling are also included in this work.</p> <p>As a result of this work, a prototype of a particle detector has been made. Also the instrument housing is developed to its well-nigh final form and the size of electronics will determine its final shape. Development process will continue until year 2011.</p>	
Keywords: Space technology, space instrument, X-ray detector, particle detector, elementary analysis, mechanics design, product design	

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

LYHENTEITÄ JA MÄÄRITELMIÄ

1	JOHDANTO	1
2	MERKURIUS-PLANEETAN PINNANKOOSTUMUKSEN MITTAUS	6
2.1	Mercury Imaging X-ray Spectrometer MIXS	6
2.1	Solar Intensity X-ray and particle Spectrometer SIXS	8
2.3	Röntgendetektorin ja partikkelidetektorin	9
2.3.1	<i>Partikkelidetektorin</i>	9
2.3.2	<i>Röntgendetektorin</i>	10
2.4	Lämpösuunnittelu ja olosuhdekuvaus	13
3	INSTRUMENTIN SUUNNITTELU	19
3.1	Full Pyramid -malli	19
3.2	Half Pyramid -malli	22
3.3	Partikkelidetektorin suunnittelu	29
3.3.1	<i>Partikkelidetektorissa käytetyt materiaalit</i>	30
3.3.2	<i>Partikkelidetektorin kehitys</i>	32
3.3.3	<i>Röntgendetektorin</i>	42
3.4	Instrumenttikotelon materiaalivalinta	44
4	VÄRÄHTELYMITTAUKSET JA LUJUUSANALYYSI	47
5	YHTEENVETO	50
	VIITELUETTELO	53
	LIITELUETTELO	57

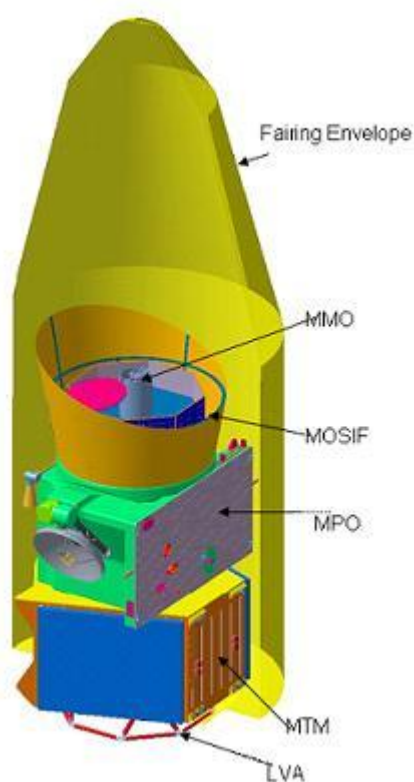
LYHENTEITÄ JA MÄÄRITELMIÄ

Absorptio	Fotonin energian siirtyminen atomille
Al ₂ O ₃	Alumiinioksidi
ASIC	<i>Application-Specific Integrated Circuit</i> . Tarpeita vastaava integroitu elektroniikkapiiri
CsI	<i>Caesium Iodide</i> . Cesium-jodidi -ioniseos
Detektori	Säteilyn mittauksessa käytetty sensori
eV	Elektronivoltti. Energian määrä, jonka elektroni saa kulkiessaan yhden voltin suuruisen potentiaalieron lävitse
Emissio	Säteilyn tai hiukkasten lähettäminen
ESA	<i>European Space Agency</i> . Euroopan avaruusjärjestö
Fluoresenssi	Aineessa tapahtuva ilmiö, jossa molekyylit absorboivat fotonin ja emittoivat toisen fotonin jolla on pienempi energia
Fotoni	Fotoni eli valokvantti on sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjähiukkanen
GaAs	<i>Galliumarsenide</i> . Galliumarsenidi on puolijohdesiin kuuluva yhdistepuolijohde
ISO	<i>Eng: International Organization for Standardization, Fra: Organisation Internationale de Normalisation</i> . Kansainvälinen standardointiorganisaatio

JAXA	<i>Japanese Aerospace Exploration Agency.</i> Japanin avaruusjärjestö
Kollimaattori	Komponentti, jolla saadaan ei-toivottu säteily rajattua pois
Lentomalli	Avaruuteen lähetettävä instrumentti
MIXS	<i>Mercury Imaging X-ray Spectrometer.</i> Merkuriuksen pinnankoostumusta mittaava instrumentti
MLI	<i>Multilayer Insulation.</i> Usean kerroksen terminen eriste
MMO	<i>Mercury Magnetospheric Orbiter.</i> Merkuriuksen magneettikenttää mittaava satelliitti
MPO	<i>Mercury Planetary Orbiter.</i> Merkurius-planeettaa analysoiva satelliitti
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration.</i> Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallinto
OIA	Oxford Instruments Analytical Oy
OSR	<i>Optical Solar Reflector.</i> Avaruusaluksissa käytetty radiaattorimateriaali
PCB	<i>Printed Circuit Board.</i> Piirilevy, jossa komponentit on kytketty toisiinsa ilman erillisiä johtimia
SIXS	<i>Solar Intensity X-ray and particle Spectrometer.</i> Auringosta tulevaa röntgensäteilyä ja partikkeleja mittaava instrumentti

1 JOHDANTO

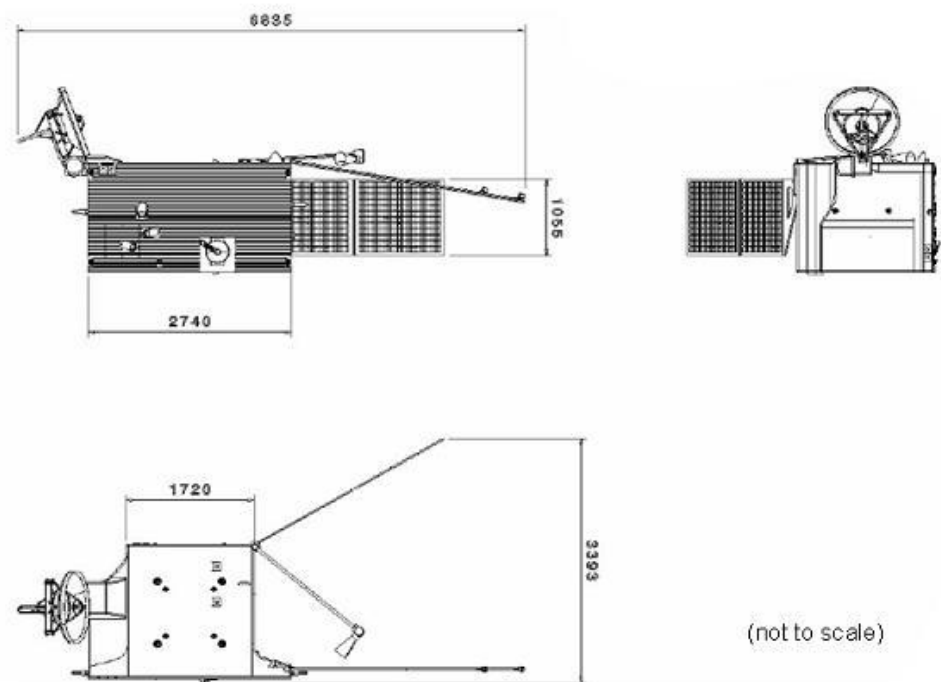
Euroopan avaruusjärjestö ESA (European Space Agency) ja Japanin avaruusjärjestö JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) lähettävät elokuussa 2013 kaksi planeettaa kiertävää satelliittia Merkuriukseen. Molemmat satelliitit laukaistaan yhdessä venäläisen TsSKB Progressin Soyuz-Fregat 2-1B -raketilla ja ne erotetaan toisistaan vasta, kun avaruusalus on päässyt Merkuriuksen kiertoradalle. /1./ Kantoraketin kuljettamat satelliitit on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. MMO- ja MPO-satelliitit kantoraketissa /2/

JAXA vastaa Mercury Magnetospheric Orbiterista, MMO-satelliitista, ja ESA vastaa Mercury Planetary Orbiterista, MPO-satelliitista (kuva 2). MMO on optimoitu mittaamaan Merkuriuksen magneettikenttää ja se on varustettu useilla tieteellisillä instrumenteilla tätä tarkoitusta varten. MPO puolestaan on optimoitu mittaamaan ja analysoimaan Merkuriuksen pintaa sekä pinnanalaista ainesta. MPO-satelliitin tulee valmistamaan eurooppalainen Astrium Ltd, joka on osa EADS-konsernia (European Aeronautic, Defence and Space

Company). ESA vastaa MPO:n lisäksi koko projektista mukaan lukien laukaisun, matkan sekä Merkuriuksen kiertoradalle saapumisen.



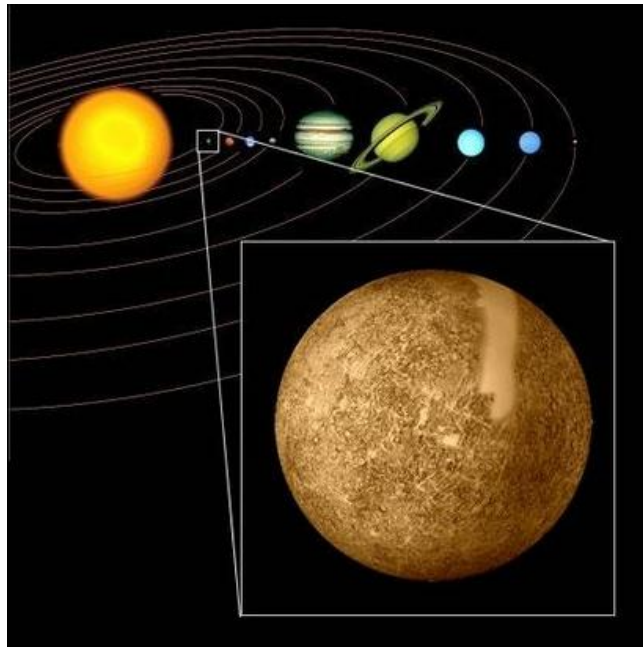
Kuva 2. Astrium Ltd:n valmistaman MPO-satelliitin päämitat /2/

Kantoraketin laukaisuajankohta eli laukaisuikkuna on määritelty tarkasti, koska kantoraketti ottaa vauhtia useiden planeettojen kiertoradoista polttoaineen säästämiseksi. Laukaisuikkuna käsittää ajanjakson, jonka sisällä raketti on laukaistava, jotta haluttu lentorata saataisiin aikaiseksi. Tyypillisesti laukaisuikkuna vaihtelee muutamista minuuteista useisiin tunteihin /3, s. 197–198/. Suunnitellussa laukaisuikkunassa avaruusaluksen matka Merkuriukseen kestää noin kuusi vuotta ja alus on perillä elokuussa 2019. Mittaustuloksia aletaan saada syyskuussa 2019, ja ne jatkuvat syyskuuhun 2020 asti. Lisäksi varataan mahdollisuus jatkaa mittauksia vuodella syyskuuhun 2021. /4./

ESA:n Merkuriusta tutkiva projekti on nimetty BepiColomboksi. Se on saanut nimensä italialaisen matemaatikon ja insinöörin, Giuseppe (Bepi) Colombon (1920–1984) mukaan. Professori Colombo oli mukana suunnittelemassa NASA:n (National Aeronautics and Space Administration) Merkuriusluotainta, Mariner 10:tä, joka lensi kolme kertaa Merkuriuksen ohi vuosina

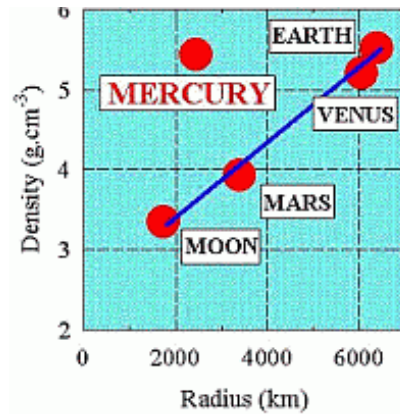
1974–1975. Ainoat Merkuriuksesta saadut lähikuvat ja suurin osa muusta Merkurius-tietämyksestä ovat peräisin tuolta lennolta. /4./

Eurooppalaiset avaruustiedemiehet ovat arvioineet BepiColombo-lennon tämän hetken haastavimmaksi pitkän tähtäimen avaruusprojektiksi. Suurin syy tähän on Merkuriuksen läheinen sijainti aurinkoon nähden. /4./ Kuvassa 3 on esitetty aurinkokuntamme ja siitä voidaan nähdä Merkuriuksen olevan aurinkomme läheisin planeetta. Suuri etäisyys maasta tuottaa ongelmia myös esimerkiksi tiedonsiirtoon. Siinä missä tieto saadaan siirrettyä esimerkiksi kuusta maahan 2,5 sekunnissa, kestää se Merkuriuksesta kahdestoista kahteenkymmeneen minuuttiin. /5./



Kuva 3. Merkurius aurinkokunnassamme /4/

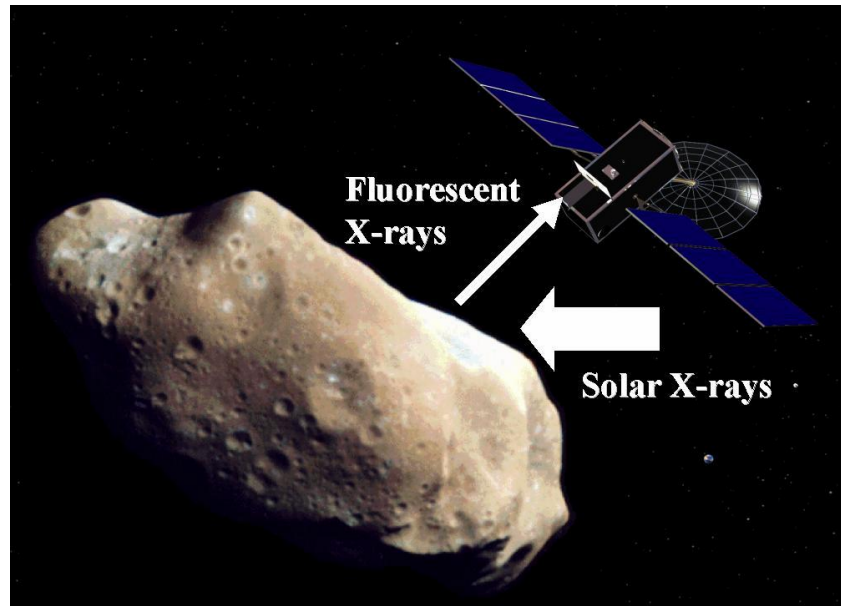
Merkurius on pieni, halkaisijaltaan 4880 km oleva planeetta. Kooltaan se sijoittuu kuun ja Mars-planeetan väliin. Merkuriuksen tiheyden tiedetään olevan erittäin korkea, $5,43 \text{ g/cm}^3$. Maan kaltaisilla planeetoilla on relaatio keskimääräisen säteen ja tiheyden suhteen, kuten kuvassa 4 on esitetty. Merkurius eroaa selvästi muista planeetoista siinä että sen sisus käsittää 70 % koko planeetan massasta. Merkuriuksella on myös pienin magneettikenttä koko tunnetussa universumissa. Lämpötila Merkuriuksen pinnalla vaihtelee $-180 \text{ }^\circ\text{C}$:sta $+430 \text{ }^\circ\text{C}$:seen. /1./



Kuva 4. Säteen ja massan suhde maan kaltaisilla planeetoilla /1/

Merkuriuksen tarkastelu maanpäällisillä teleskoopeilla on hankalaa, koska se voidaan erottaa auringosta vain syysaamuisin ja kevätiltaisain, ja tällöinkin se on lähellä horisonttia. Lisäksi maan ilmakehän turbulenssi haittaa tarkastelua. Merkuriusta ei voida tarkastella myöskään maapallon kiertoradalla kiertävällä Hubble-peiliteleskoopilla, koska sillä ei voida tutkia kohdetta, joka sijaitsee lähellä aurinkoa peiliteleskoopin vioittumisvaaran vuoksi. /1./

Oxford Instruments Analytical Oy (OIA) on mukana suunnittelemassa ja rakentamassa MPO-satelliittiin tieteellistä instrumenttia, joka on nimetty SIXS:ksi (Solar Intensity X-ray and particle Spectrometer). SIXS on auringon röntgen- ja partikkelisäteilyä mittaava instrumentti. Se toimii englantilaisen Rutherford Appleton Laboratoryn (RAL) rakentaman, Merkuriuksen pinnasta heijastuvaa säteilyä mittaavan MIXS-instrumentin (Mercury Imaging X-ray Spectrometer) referenssimittalaitteena. SIXS-instrumentilta saatu tieto analysoidaan MIXS-instrumenttia varten. Mittaustulosten perusteella voidaan määrittää Merkuriuksella esiintyvät alkuaineet sekä niiden pitoisuudet. Kuvassa 5 on esitetty auringosta tulevien röntgensäteiden ja planeetasta säteilevän röntgenfluoresenssin periaatekuva.



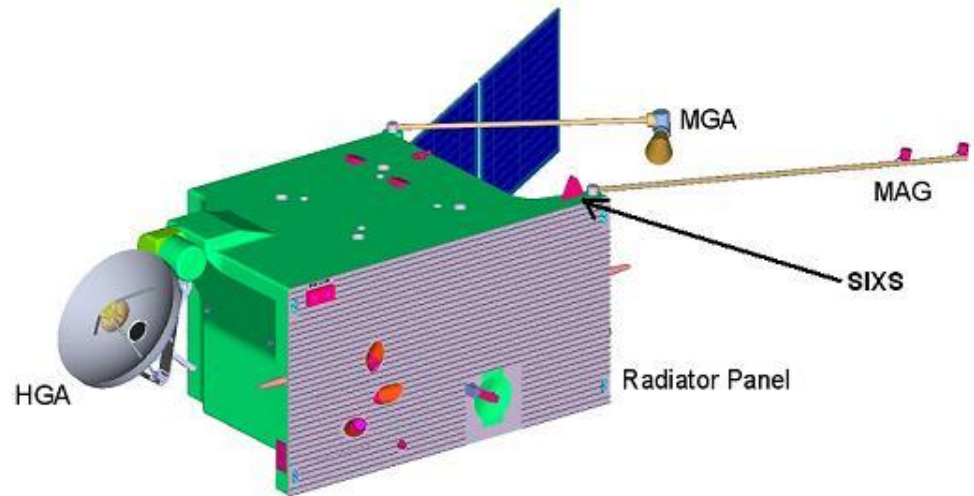
Kuva 5. Merkuriuksesta säteilevän röntgenfluoresenssin mittaus /6/

Lentomallit eli valmiiseen satelliittiin kiinnitettävä ja avaruuteen lähetettävä instrumentti ja sen varayksikkö toimitetaan Euroopan avaruusjärjestölle tammikuussa 2011.

Tämän insinööriyön tavoitteena on kehittää mittalaitetta, joka on osa Euroopan avaruusjärjestön ESA:n ja Japanin avaruusjärjestön JAXA:n Merkuriusplaneettaa tutkivaa BepiColombo-yhteistyöhanketta. Työssä esitellään lyhyesti MIXS-instrumentti ja keskitytään lähemmin SIXS-instrumenttiin ja sen mekaniikkasuunnitteluun. Insinööriyössä esitellään myös ne yksittäiset kaupalliset komponentit, jotka on valittu mittalaitteen toteutusta varten. Lisäksi esitellään osat, jotka on suunniteltu tätä instrumenttia varten. Käytetyt kaupalliset komponentit ovat osaltaan sanelleet ne mittasuhteet, jotka on täytynyt ottaa huomioon mekaniikkasuunnittelua tehtäessä ja geometriaa mitoitettaessa. Insinööriyön pääaiheena on ollut SIXS-instrumentin mekaniikkasuunnittelu mukaan lukien käytettävien detektorien ja instrumenttikotelon mekaniikka, materiaalivalinnat sekä optimaalisen geometrian muodostaminen.

Mittalaite sijoitetaan satelliitin päälle siten, että kiertäessään Merkuriuksen kiertoradalla se näkee auringon yhtäjaksoisesti lukuun ottamatta aikaa jolloin satelliitti on Merkuriuksen takana auringosta katsoen. Kuvassa 6 on esitetty Merkuriuksen kiertoradalle lähetettävän MPO-satelliitin 3D-malli. SIXS-

instrumentti on sijoitettu satelliitin kulmaan mahdollisimman esteettömän näkökentän saavuttamiseksi.



Kuva 6. SIXS-instrumentti sijoitettuna satelliitin kulmaan /2/

Tämä insinööriyö on tehty Oxford Instruments Analytical Oy:lle. Projektia johtaa Helsingin yliopiston observatorio. Muut suomalaiset yhteistyökumppanit ovat Aboa Space Research Oy, Space Systems Finland Oy, Ideal Product Data Oy sekä Patria Oyj. Esitutkimus mittalaitteista on käynnistynyt OIA:ssa vuonna 2000. Tämä insinööriyö on aloitettu syksyllä 2005 ensimmäisten instrumenttia käsittelevien 3D-mallien suunnittelulla.

2 MERKURIUS-PLANEETAN PINNANKOOSTUMUKSEN MITTAUS

Merkuriuksen pinnankoostumuksen mittauksessa käytetään kahta mittalaitetta, joista toinen mittaa Merkuriuksesta säteilevää röntgenfluoresenssia (MIXS) ja toinen auringon primäärisäteilyä (SIXS). Seuraavassa on esitelty BepiColombo-satelliitissa käytettävät instrumentit, joiden tarkoituksena on mitata Merkuriuksen pinnankoostumusta.

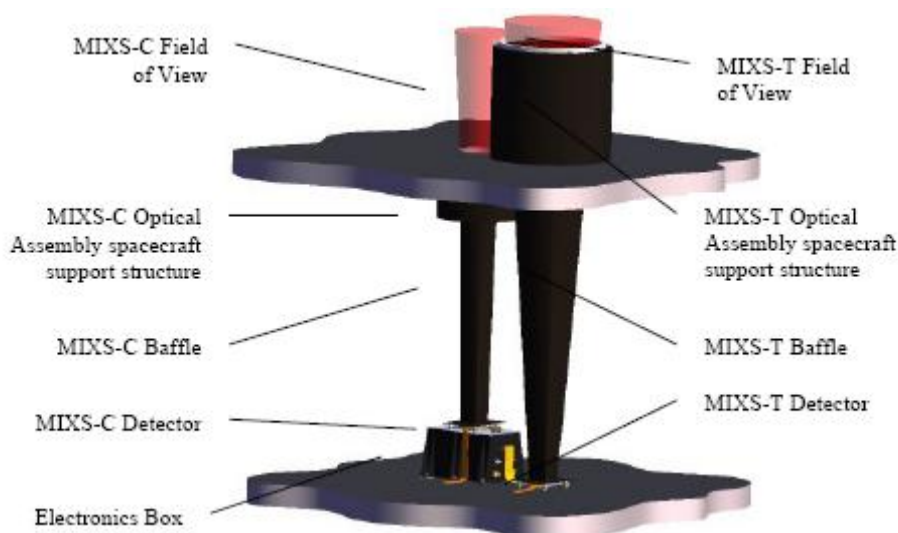
2.1 Mercury Imaging X-ray Spectrometer MIXS

MIXS-instrumentin tarkoitus on mitata Merkuriuksen pinnasta säteilevää röntgenfluoresenssia. Fluoresenssilla tarkoitetaan aineessa tapahtuvaa ilmiötä, jossa molekyylit absorboivat valokvantin eli fotonin (kvantin energia siirtyä atomille) ja emittoivat eli säteilevät toisen fotonin, jolla on pienempi

energia. Absorboitunut valo voi olla esimerkiksi ultraviolettivaloa tai röntgensäteilyä ja emittoitunut valo näkyvää valoa. /7./ Saaduista tuloksista määritetään alkuaineiden Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti ja Fe pitoisuudet Merkuriuksen pinnalla /8, s. 4/.

MIXS-instrumentti koostuu kahdesta optisesta kokoonpanosta, MIXS-C:stä ja MIXS-T:stä jotka on asennettu Merkurius-planeetan puoleiselle satelliitin kyljelle vierekkäin. Instrumentin detektorit molempia optiikkoja varten sekä tarvittava elektroniikka on asennettu MPO-satelliitin sisään. MIXS-C:n detektorikokoonpano on asennettu elektroniikkakotelon päälle. /9, s. 6–7./ Molempia optisia kanavia luetaan DEPFET-pikselidetektoreilla (DEpleted P-channel Field Effect Transistor).

MIXS-C:n katselukulma Merkuriusta kohden on ± 4 astetta ja MIXS-T:n katselukulma ± 1 astetta. MIXS-C:n detektorin katselukulman rajaa noin 80 mm pituinen kollimaattorirakenne eli detektorille tulevan säteilyn määrää rajaava komponentti. MIXS-T:ssä kollimaattorirakenne on noin 200 mm:n pituinen. Molempien detektoreiden päällä on hiilikuituinen, kartion mallinen välilevy (Baffle), joka estää avaruusluoksesta tulevan taustasäteilyn pääsyn instrumenttiin. /9, s. 6–7./ MIXS-instrumentin rakenne on esitetty kuvassa 7.



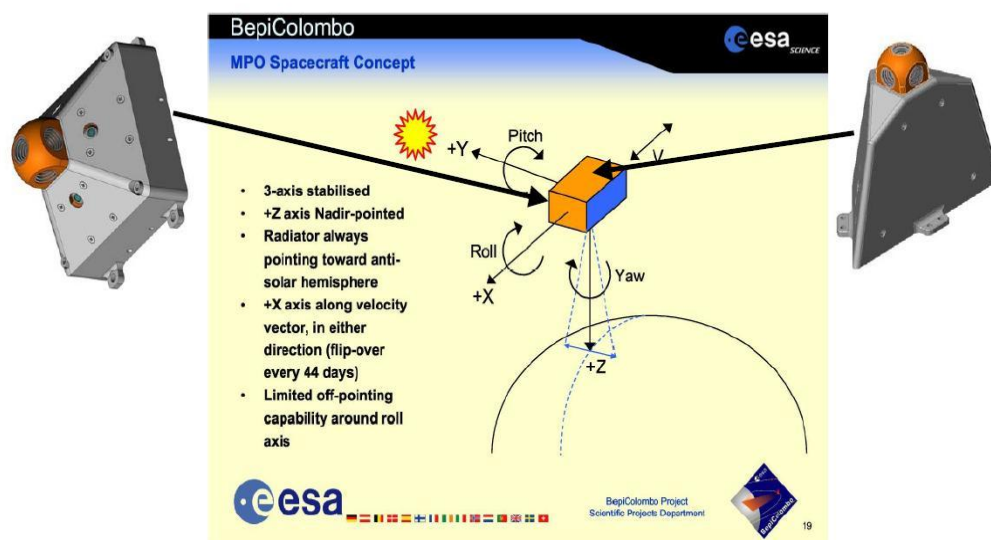
Kuva 7. MIXS-instrumentin katselukulma /9, s. 6/

2.1 Solar Intensity X-ray and particle Spectrometer SIXS

SIXS on röntgeninstrumentti, jossa tulee olemaan kolmesta neljään röntgen-detektoria ja yksi partikkelidetektori. Riippuen satelliitin valmistajasta instrumentti sijoitetaan joko satelliitin päälle siten, että instrumentti näkee sekä auringon että Merkuriuksen koko ajan, tai se sijoitetaan aluksesta katsottuna auringon puoleiselle sivulle. Päätös aluksen valmistajasta tehtiin ESA:n toimesta vuoden 2006 viimeisellä neljänneksellä.

Koska instrumentin sijoittelu avaruusalukseseen nähden oli tämän työn alkaessa vielä epäselvä, jouduttiin instrumentista aluksi kehittämään kahta erilaista versiota riippuen sijoitusasemasta. Tässä insinööriyössä aluksen auringon puoleiselle sivulle kiinnitettävää versiota kutsutaan "Full Pyramidiksi" ja aluksen päälle kiinnitettävää versiota "Half Pyramidiksi". Kuvassa 8 on esitetty instrumentin vaihtoehtoiset sijoituspaikat satelliitin pinnalla valittavan instrumenttityypin mukaan.

Röntgendetektorien määrä riippuu instrumentin sijoituksesta. Aluksen päälle kiinnitettävän puolipyramidin mallisen instrumentin on suunniteltu hyödyntävän kolmea röntgendetektoria ja täyden pyramidin muotoisen taas neljää röntgendetektoria. Full Pyramid -versiosta on aiemmin OIA:ssa työskennellyt diplomi-insinööri Henrik Leskinen tehnyt ensimmäisen karkean 3D-mallin. Half Pyramid -mallin kehitystyö lähti liikkeelle kirjallisista spesifikaatioista.



Kuva 8. SIXS-instrumentin sijoitus avaruusalukseseen nähden

SIXS-instrumentille on luotu massabudjetti. Kolmelle röntgendetektorille on varattu budjetista yhteensä 111 g, partikkelidetektorille 88 g, instrumentin kotelolle sekä vaadittaville kiinnitystarpeille yhteensä 545 g. Vaadittavalle elektronikalle röntgendetektoreita ja partikkelidetektoria varten on varattu yhteensä 135 + 95 g. Instrumentille varattu kokonaispaino on 1196 g sisältäen 20 %:n marginaalin. Instrumentin liittämiseksi avaruusaluukseen on varattu yhden metrin mittaiselle datakaapelille ja tarvittaville liittimille massabudjetista 200 g. Kokonaisarvio instrumentin massasta on siis noin 1400 g. /10./

Keskimääräinen tehonkulutusarvio SIXS-instrumentille on 1,81 W sisältäen 15 %:n marginaalin /11, s. 25/. SIXS-instrumentin ei ole kaavailtu tarvitsevan minkäänlaisia mekanismeja /11, s. 28/.

2.3 Röntgendetektorin ja partikkelidetektorin

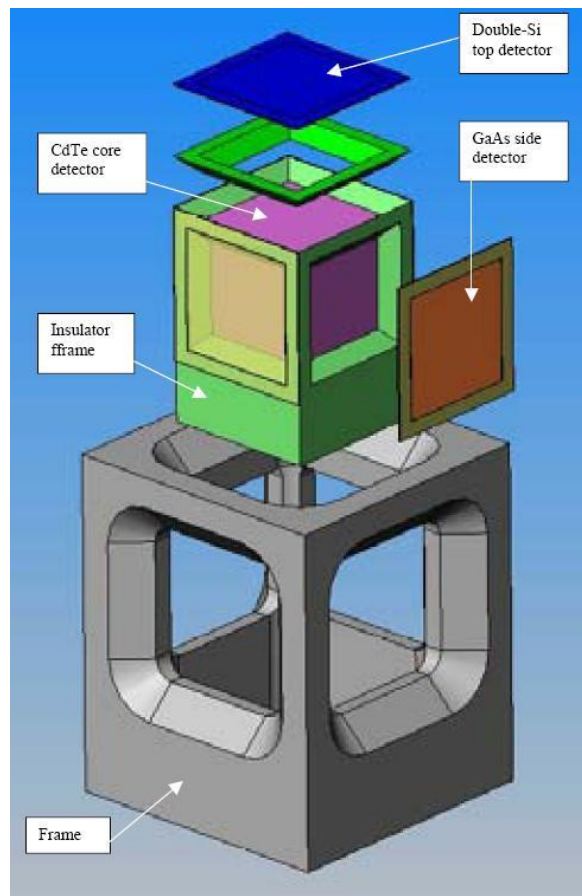
SIXS:n röntgendetektorien tehtävänä on mitata auringosta tulevaa röntgensäteilyä. SIXS:n detektorit eivät tule mittaamaan säteilyä silloin, kun aurinko paistaa +Z-suunnasta eli satelliitin ollessa Merkuriuksen takana auringosta katsoen. Tällöin MIXS-instrumentti näkee planeetasta vain tumman alueen, missä ei synny auringosta tulevan röntgensäteilyn indusoimaa emissiota, jota MIXS voisi mitata. Näin ollen myöskään röntgensäteilyn referenssimittauksia ei tarvita. /11, s. 26./ Partikkelidetektorin mittaa auringosta tulevia protonia ja elektroneja. Toistaiseksi on olemassa vain teorioita, miten partikkelit käyttäytyvät oltaessa lähellä aurinkoa. Myös auringosta tulevat partikkelit indusoivat Merkuriuksen pinnalta fluoresenssia. Tätä partikkelien muodostamaa fluoresenssisäteilyä kutsutaan partikkelien indusoiduksi röntgenemissioksi (PIXE, Particle Induced X-ray Emission). /12./

2.3.1 Partikkelidetektorin

Partikkelidetektorin tarkoituksena on havaita ja mitata korkeaenergisii partikkeleja /13/. Matalaenergisien partikkelien tullessa SIXS:n partikkelidetektorin, se pysähtyy galliumarsenidi (GaAs) detektorin jättäen siihen varauksensa. Korkeaenergisii partikkelit pääsevät GaAs-detektorin läpi, mutta jättävät siihen myös osan sisältämästään energiasta. GaAs-detektorin läpi mennyt energia osuu partikkelidetektorin sisällä olevaan tuikekiteeseen, jos-

sa partikkelin sisältämä energia synnyttää näkyvää valoa. Valo luetaan valodiodilla. /12./ Tulosten perusteella saadaan protonien ja elektronien suunta- ja energajakautuma /14, s. 3/.

Partikkelidetektorit tulevat katsomaan viiteen suuntaan yhtäaikaista. Detektorit tarvitsevat näkyvyyden yhtäaikaista aurinkoon (+Y) ja poispäin auringosta (-Y) /11, s. 26/. Näkökenttä kaikkiin suuntiin tarvitaan, koska auringosta Merkuriusta kohti tulevat partikkelit seuraavat planeetan magneettikenttää, eivätkä siis liiku suoraviivaisesti. Partikkelit voivat siis tulla partikkelidetektoriin mistä suunnasta tahansa. /12./ Kuva 9 esittää partikkelidetektorin rakennetta suunnittelun alkuvaiheessa.

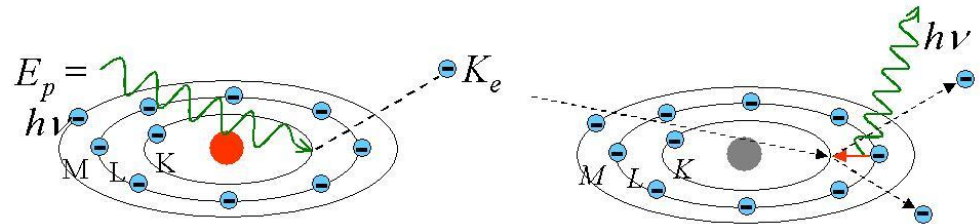


Kuva 9. H. Leskisen ensimmäinen luonnos partikkelidetektorista /6/

2.3.2 Röntgendetektorit

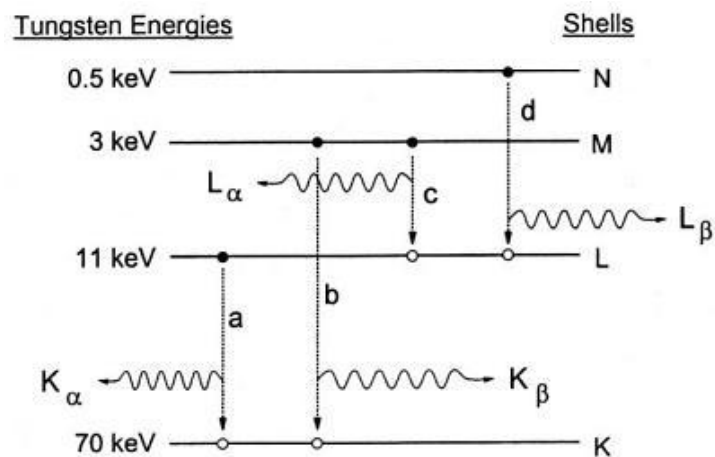
Kaikki materia koostuu atomeista. Atomi koostuu ytimeä, jonka ympärillä on materiaalista riippuva määrä kuoria. Säteilystä materiaa, tapahtuu

atomin kuorilla muutoksia. Säteilystä tulevan fotonin osuessa atomin kuorella olevaan elektroniin se siirtyy pois ja sen tilalle siirtyy elektroni ulommalta kuorelta. Tästä siirtymisestä vapautuu energiaa, jonka suuruus riippuu siitä, minkä materian elektronista on kyse (Kuva 10). Esimerkiksi rauta-atomille $FeK\alpha = 6,4 \text{ keV}$. $K\alpha$ -säteilyä syntyy kun elektroni siirtyy L-kuorelta K-kuorelle. $K\beta$ -säteilyä syntyy elektronin siirtyessä M-kuorelta K-kuorelle. Atomiin tuleva kvantti virittää atomin, joka purkaantuu fluoresenssisäteilyinä prosessissa.



Kuva 10. Atomiin tuleva kvantti virittää atomin, joka purkaantuu fluoresenssisäteilyinä /15/

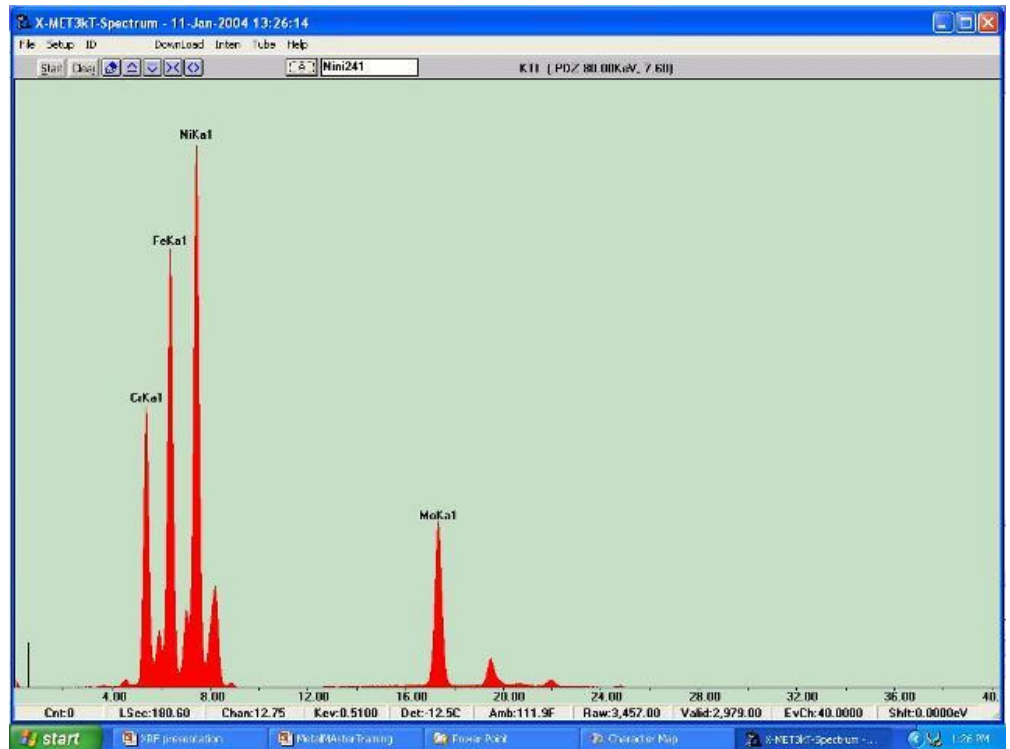
Atomista vapautuva fluoresenssi pystytään näkemään detektorilla. Detektorimateriaalissa tapahtuu valoabsorbaatiota, eli kvantti absorboituu detektorissa. Kvantti jättää energiansa detektoriin eli synnyttää sinne sähkövarauksen. Kuvassa 11 on esitetty wolframien energiajakauma.



Kuva 11. Wolframien energiajakauma /15/

Detektoriin absorboituneen kvantin energian määrän perusteella pystytään määrittämään kyseessä oleva alkuaine. Saatavassa spektrissä näkyy $K\alpha$ - ja $K\beta$ -piikit, mikäli ne eivät mene päällekkäin näytteessä olevien muiden alku-

aineiden kanssa. Kuvassa 12 on esitetty nikkelseoksesta saatu spektri. Korkein piikki syntyy nikkelin $K\alpha$ -säteilystä. Mentäessä nikkelin piikistä vasemmalle voidaan nähdä $FeK\alpha$ - ja $CrK\alpha$ -piikit. Nikkelistä oikealle nähdään molybdeenin $K\alpha$ -piikki. Piikin aiheuttaneen energia määrä voidaan lukea alalaidassa olevalta asteikolta (keV). Spektrin tarkkuutta voidaan parantaa parantamalla detektorin resoluutiota. /15./



Kuva 12. Nikkelseoksen spektri /15/

Maanpäällisessä käytössä säteilylähteenä käytetään yleensä röntgenputkea tai röntgenisotoppia. Merkuriusta mitattaessa röntgensäteily tulee auringosta.

Raskaat alkuaineet on helpompi analysoida detektorilla kuin kevyet alkuaineet. Kevyissä alkuaineissa, kuten alumiinissa, saattaa yksi fotonikvantti irrottaa atomin kuorelta kaksi elektronia. Toisen paikalle siirtyy elektroni ulommalta kuorelta, mutta toinen irtoaa koko atomista. Atomista irtoavasta elektronista ei synny fluoresenssia, jota voitaisiin nähdä. Tämä niin sanottu fluoresenssituotto vähenee kevyempiin alkuaineisiin mentäessä. Kaikista ongelmallisimpia ovat vety- ja heliumatomit, koska niillä on vain yksi kuori. Kuorelta vapautuvan elektronin tilalle ei näin ollen voi tulla uutta korvaavaa

elektronia, joten fluoresenssia ei voida nähdä lainkaan. Röntgenteknologialla ei voidakaan mitata H- ja He-atomeja. /15./

SIXS:n röntgendetektorit

Röntgendetektoreja on tarkoitus sijoittaa Full Pyramid -instrumenttiin neljä kappaletta ja Half Pyramid -instrumenttiin kolme. Kolmella detektorilla on kuitenkin noin 100 asteen kartionmuotoinen avaruuskulma avaruuden katsomiseen. Optiset akselit asetetaan siten, että vähintään yhdellä detektorilla on kerrallaan hyvä näkyvyys aurinkoon (+Y) olettaen, että satelliitin muut rakenteet eivät sitä estäisi. /11, s. 26./ Taulukossa 1 on esitetty röntgendetektorien asennuskulmat satelliitin akseleihin nähden.

Taulukko 1. Röntgendetektorien asennuskulmat verrattuna satelliitin akseleihin (asteina)

	+X	+Y	+Z
X-ray detector 1:	45	-45	75
X-ray detector 2:	135	45	75
X-ray detector 3:	90	0	15

Aktiivinen röntgendetektor valitaan ajanhetken perusteella sähköisesti. Yleensä paras näkökulma aurinkoon on detektorilla, joka on lähimpänä aurinkoa. /11, s. 26./

2.4 Lämpösuunnittelu ja olosuhdekuvaus

Seuraavassa on esitelty seikkoja, jotka on otettava huomioon avaruusinstrumenttia suunniteltaessa.

Lämpötila

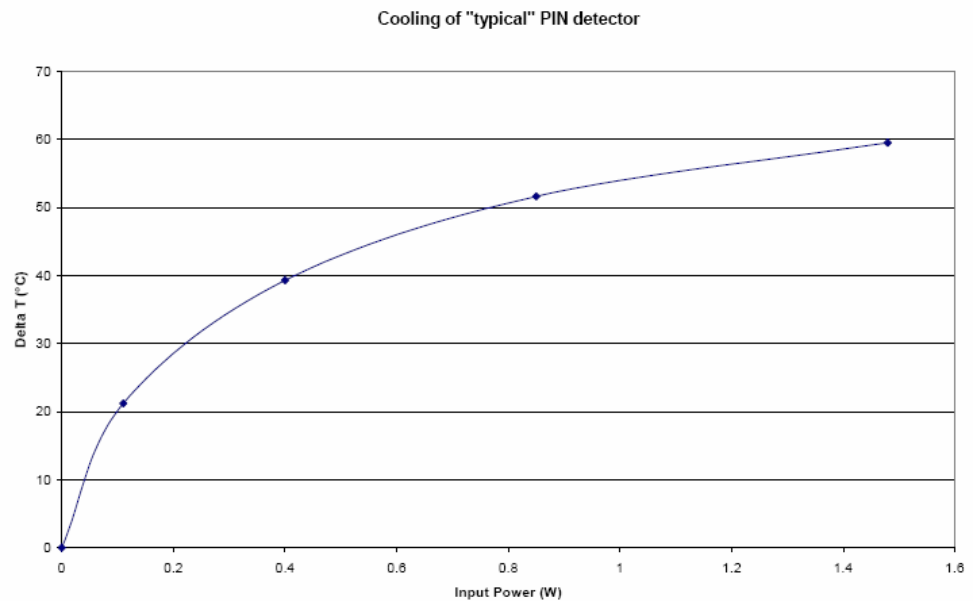
Instrumentin lämpöteknisen suunnittelun tekee Ideal Engineering Oy. SIXS-instrumentti asennetaan satelliitin ulkopuolelle ja se eristetään termisesti satelliitista. Röntgendetektorit instrumentin sisällä jäähdytetään peltier-elementeillä toimintalämpötilaansa alle 0 °C:n ja lämpö johdetaan instrumentin omaan radiaattoriin eli jäähdyttimeen. Peltier-elementti on pieni elektroninen laattamainen komponentti jolla pystytään siirtämään lämpöä elementin

puolelta toiselle. Elementin kylmää puolta käytetään yleisesti elektroniikassa jäähdyttämään erilaisia lämpöä tuottavia komponentteja. Komponentista, kuten esimerkiksi mikroprosessorista, lämpö johdetaan peltier-elementin avulla jäähdytyslevyyn. /16./ SIXS-instrumentin radiaattorina toimii kotelon –Y-puolella oleva seinämä, joka on pinnoitettu lämmön poistumista edesauttavalla OSR-materiaalilla (Optical Surface Reflector). Radiaattorin jäähdytysteho riippuu pinnan emissiosta eli säteilykyvystä (emittance, ϵ) ja vaikuttavasta lämpötilasta. Yleensä radiaattorimateriaaleina käytetään pinnoitetta, joilla on korkea infrapunasäteilyä (IR) emittoiva taipumus ($\epsilon > 0,8$). Jäähdytysteho \dot{Q} on voimakas lämpötilan funktio ja se pystytään laskemaan kaavasta 1.

$$\dot{Q} = A\epsilon\sigma T^4 \quad (1)$$

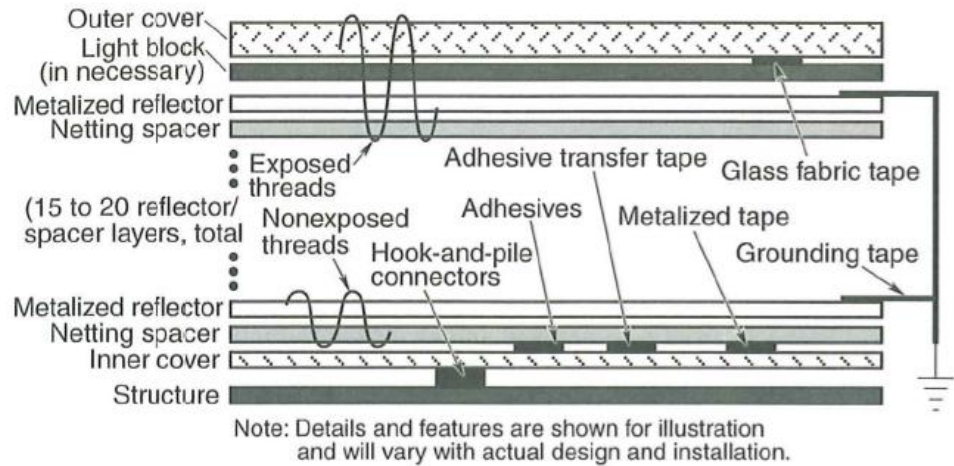
jossa A on radiaattorin pinta-ala, ϵ = emissio, σ = Stefan-Bolzmännin vakio [$5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$] ja T on absoluuttinen lämpötila [K]. /17, s. 207–208./

Lämpötilan nousu vaikuttaa oleellisesti tarvittavan jäähdytystehon määrään ja näin ollen instrumentin lämpötekninen suunnittelu ja tehobudjetti liittyvät oleellisesti toisiinsa /11, s. 32/. Kuva 13 esittää lämpötilan nousun vaikutusta tarvittavan jäähdytystehon määrään. Partikkelidetektorin sekä tarvittava elektroniikka pystyvät toimimaan $-20 \text{ }^\circ\text{C}$:n ja $+30 \text{ }^\circ\text{C}$:n välillä. Lisäksi instrumenttiin tarvitaan termostaattiohjattu lämmitin (survival heater) ääritilanteissa esiintyvää kylmyyttä vastaan. /11, s. 33./ Instrumentin ollessa kytkettynä pois päältä vastaa lämpötilavalvonnasta avaruusalus. Sallittu lämpötilavaihtelu instrumentin ollessa poiskytkettynä on $-30 \text{ }^\circ\text{C}$:sta $+60 \text{ }^\circ\text{C}$:seen.



Kuva 13. Lämpötilan kasvun vaikutus peltier-elementin tehonkulutukseen /11, s. 33/

Instrumentin lämpötilaa kontrolloidaan pinnoittamalla se niin sanotulla joustavalla usean kerroksen termisellä eristeellä (Multilayer Insulation, MLI) sekä radiaattoriksi tulevalla OSR:lla (Optical Solar Reflector) ja mustalla maalilla /11, s. 32/. Half Pyramid -mallin instrumenttikotelon pinnalle asennetaan 10 mm vahvuinen kerros MLI:tä /10/. MLI-pinnoitus on yksi tyypillisimmistä avaruusalusten lämpötilakontrollinnissa käytetyistä tavoista. MLI:llä voidaan suojata avaruusalusta tai yksittäistä instrumenttia hukkaamasta komponenteista tulevaa lämpöä, tai sillä voidaan suojata instrumentti ulkopuoliselta lämpösäteilyltä, kuten rakettimoottoreista tulevalta lämmöltä tai, kuten SIXS-instrumentin kyseessä ollessa, auringosta tulevalta lämpösäteilyltä. MLI:llä voidaan myös suojata instrumenttia myös esimerkiksi pieniltä, niin sanotuilta mikrometeoriiteilta. MLI koostuu useista matalaemissiivisistä kalvoista, kuten kuvassa 14 on esitetty. /17, s. 161–162./



Kuva 14. Tyypillisen MLI-kalvon rakenne /17, s. 162/

Paine ja kaasun purkautuminen

Yleisesti selkein ero olosuhteille avaruudessa ja maanpinnalla on ympäröivän paineen mataluus. Riippuen korkeudesta ja 11 vuotta kestävästä solaarista ajanhetkestä, voidaan avaruusinstrumenttia ympäröivä paine approksimoida olevan täydellinen tyhjiö. /18, s. 2–3./ 11 vuotisella solaarilla ajanhetkellä tarkoitetaan auringossa tapahtuvaa auringon pilkkujen esiintymistä, joka johtuu auringon energiatuoton vaihtelusta. Auringon ollessa muuttuva tähti, sen hiukkastuotto ja kokonaissäteily eli irradianssi vaihtelevat suhteellisen säännöllisinä muutoksina. Irradianssi ja hiukkastuotto saattavat esiintyä myös äkillisinä purkauksina. Tunnetuin säännöllisen aktiivisuuden muoto on auringon pilkkujen esiintyminen, joka noudattaa keskimäärin 11-vuoden ajanjaksoa. Pilkkujen ollessa runsaimmillaan aurinko säteilee kirkkaimmin. /19./

Alhainen paine aiheuttaa avaruusinstrumentissa käytetyille materiaaleille kaasun purkautumista (outgassing). Kaasun purkautumisessa kiinteä materiaali muuttuu kaasuksi ilman nestemäistä välitilaa. Eri materiaalit kaasuuntuvat eri tavalla. Lämpötilan nousu ja paineen lasku vaikuttavat kaasuun purkautumiseen sitä kasvattavasti. Eri materiaalien kaasun purkautumisarvoja voidaan nähdä tyhjiökirjallisuuden taulukoista. /18, s. 2–3./

Taulukko 2 esittää lämpötilan muutoksen vaikutusta kaasuuntumiseen 10^{-11} – 10^{-15} pascalin paineessa eli paineessa, jonka instrumentti kohtaa avaruudessa /20, s. 39/.

Taulukko 2. Lämpötilan vaikutus kaasun purkautumisen nopeuteen ilmaistuna vuoden mittaisella ajanjaksolla (°C) /20, s. 40/

Alkuaine	0.1 μm/a	10 μm/a	1mm/a
Cd	38	77	122
Zn	71	127	177
Mg	110	171	233
Au	660	800	950
Ti	920	1070	1250
Mo	1380	1630	1900
W	1870	2150	2480

ESA ja NASA ovat asettaneet materiaalien kaasun purkautumiselle mitattavissa olevia sallittuja arvoja. NASA on myös laatinut verkkotietokannan, josta eri aineiden kaasunpurkautumisarvoja voidaan nähdä /21/. Taulukossa 3 on esitetty kokonaismassahäviö 0,13 MPa:n paineessa ja 125 celsiusasteen lämpötilassa sekä aineeseen takaisin tiivistyvän kaasun määrä, kun materiaalin annetaan jäähtyä lämmityksen jälkeen 25:n celsiusasteeseen. Ilmoitettu luku on vuorokauden aikana tapahtuva tiivistyminen. /18, s. 58./ Taulukkoon neljä ja kuvaan 15 on kerätty tyypillisiä avaruussovelluksissa käytettyjä materiaaleja sekä niiden TML- (Total Mass Lost, kokonaismassahäviö) ja CVCM-arvoja (Collected Volatile Condensable Material, kaasun takaisin materiaaliin tiivistyminen).

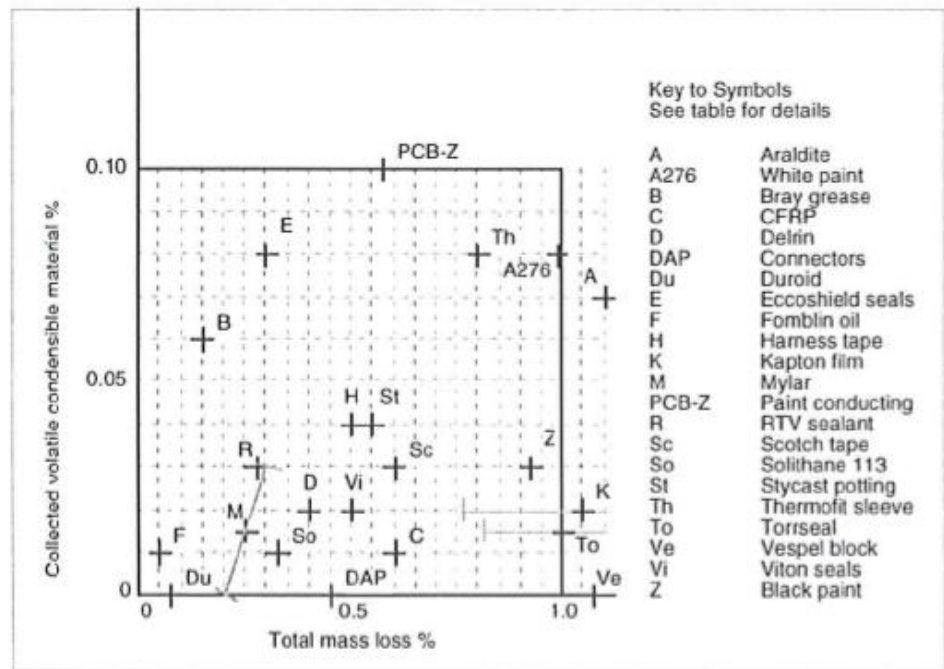
Taulukko 3. Materiaaleille sallitun kaasun purkautumisen määrittäminen /18, s. 58/

i) Kokonaismassahäviö (TML): 24 h:n jälkeen 125 °C:n ja 0,13 MPa (10^{-6} Torr) paineessa: < 1,0 %
ii) Kaasun takaisin materiaaliin tiivistyminen (CVCM): 24 h:n aikana 25 °C:n lämpötilassa < 0,1 %

Alhainen paine asettaa myös elektroniikkasuunnitteluun haasteita, sillä eteenkin korkeita jännitteitä käytettäessä se saattaa aiheuttaa käyttöhäiriöitä järjestelmissä /18, s. 2–3/.

Taulukko 4. Tyypillisiä avaruusaluksen materiaaleja ja niiden TML- sekä CVCM-arvoja /18, s. 59/

Material type	Name	Use	Key	TML (%)	CVCM (%)
Silicone	PCB-Z	White matt paint, conductive		0.6	0.10
Urethane	A 276	White paint		0.99	0.08
	Thermofit RT 876	Wire, insulation sleeve	Th	0.8	0.08
Silicone rubber	Eccoshield SV-R	Conductive seals	E	0.3	0.08
Epoxy	Araldite AV 100 / HV 100	Adhesive	A	1.1	0.07
Grease	Braycote 602	Lubricant	B	0.15	0.06
Epoxy	Stycast 1090 / 9	Potting foam	St	0.55	0.04
PETP	Gude Space DPTH	Harness tape	H	0.5	0.04
Urethane	Aeroglaze Z 306	Black paint	Z	0.92	0.03
Polyester	Scotch 850 Silver	Thermal tape	Sc	0.6	0.03
Epoxy	Scotchweld 1838	Adhesive	Sw	0.65	0.03
Silicone	RTV 566	Sealant, adhesive	R	0.27	0.03
Polyimide	Kapton H	(Thermal) film	K	1.03	0.02
Fluorocarbon	Viton B910	Rubber seals	Vi	0.5	0.02
Polyacetyl	Delrin 550	Plastic parts	D	0.39	0.02
Urethane	Torrseal	Sealing resin	To	1.0	0.015
PETP	Mylar A	(Thermal) film	M	0.25	0.015
Epoxy-Carbon	Cycon C89 / HM-S (40/60)	Structure composite	C	0.6	0.01
Urethane	Solithane 113	Potting resin	So	0.37	0.01
Fluoralkylether	Fomblin Z 25	Lubricating oil	F	0.06	0.01
Polyimide	Vespel SP-3	Machined insulators	Ve	1.08	0
DAP		Connector bodies		0.44	0
PTFE/glass/MoS ₂	Duroid 5813	Bearings, composite	Du	0.08	0
Glass, woven	Betacloth	Thermal blanket	W	0.03	0



Kuva 15. Taulukko 4:ssä esitetyjen materiaalien CVCM-testin tulokset avaruusalusten materiaaleista, joissa esiintyy merkittävää kaasun purkaantumista /18, s. 58/

3 INSTRUMENTIN SUUNNITTELU

Suunnitteluprosessin lähtökohtana oli ESA:n spesifikaatio mekaanisista ja termisistä vaatimuksista sekä alkumitoitus joiden pohjalta lähdettiin luomaan kahta erilaista instrumenttikotelomallia. Lähtökohtainen mitoitus kotelolle on esitetty myöhemmin tässä työssä kuvassa 20. Kotelon materiaaliksi oli suunniteltu alumiinia, jonka seinämävahvuus olisi 3 mm. Instrumenttikotelo mallinnettiin karkeasti havainnollistamaan tuotetta suunnittelupalaverissa. SIXS-instrumentin suunnittelussa käytettiin pääasiallisesti Dassault Systemès S.A:n SolidWorks 2006 -ohjelmistoa.

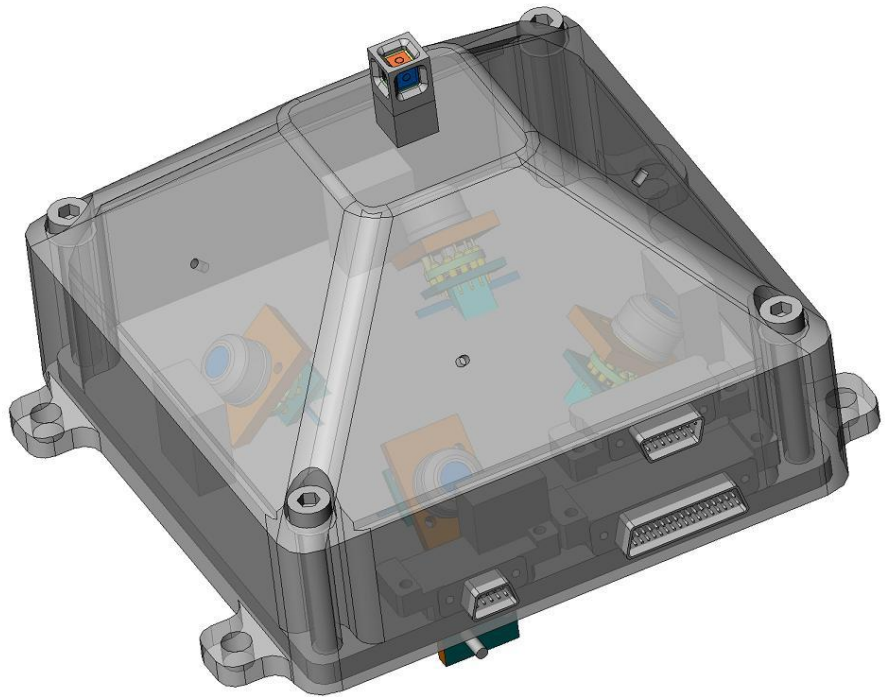
3.1 Full Pyramid -malli

Koska lopullinen valinta instrumenttityypistä kohdistui puolikkaan pyramidin malliseen instrumenttiin, esitellään tässä työssä Full Pyramid -malli vain lyhyesti.

Perusajatukseltaan täyden pyramidin mallinen instrumentti olisi ollut lähellä puolipyramidin mallista rakennetta. Suurimpana erona tällöin olisi ollut neljän

röntgendetektorin käyttäminen kolmen sijasta. Instrumentti olisi sijainnut aluksen +Y-akselin puoleisella sivulla siten, että partikkelidetektorit olisi katsonut suoraan kohti aurinkoa. Teknisesti säännöllisen muotoisen instrumentin toteuttaminen olisi ollut helpompaa monestakin syystä, näistä mainittakoon sisälle jäävä selkeä tila tarvittavaa elektroniikkaa varten ja yksinkertaisemmin toteutettavissa oleva röntgendetektorien esteetön näkymä taivaalle. Myös säännöllisen muodon valmistaminen olisi ollut helpompaa.

Full Pyramid -mallin kehitys lopetettiin lokakuussa 2006 satelliitin toimittajan varmistuttua. Kuvassa 16 on esitetty Full Pyramid -malli kehitystyön alkuvaiheessa helmikuussa 2006.



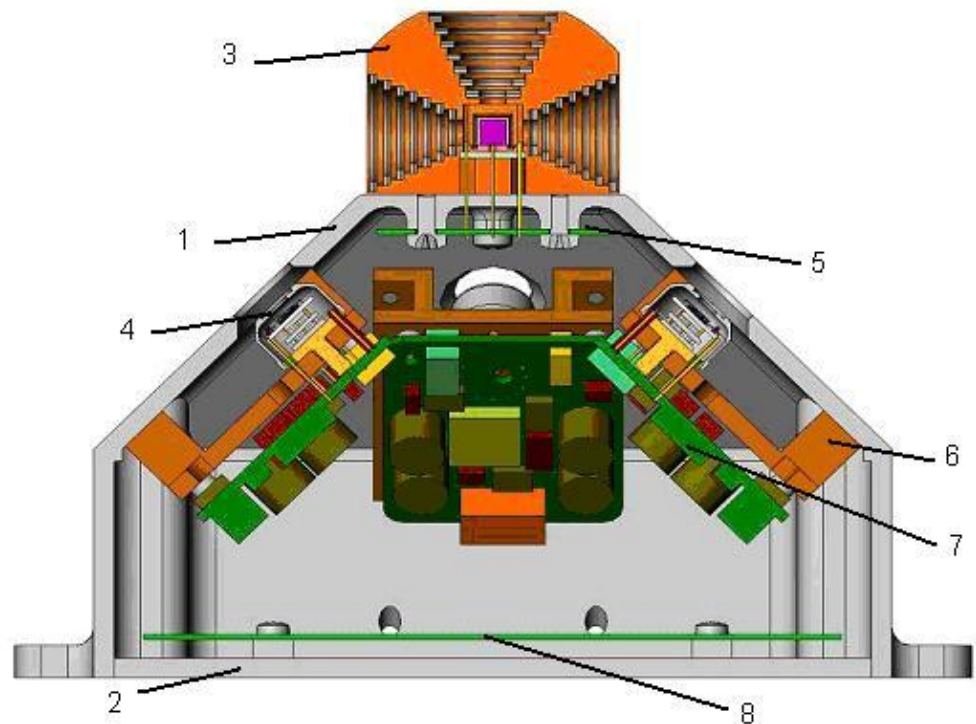
Kuva 16. Full Pyramid -malli helmikuussa 2006

Full Pyramid -mallin ulos näkyvät pääosat ovat (numerointi kuvan 17 mukaan)

- Instrumenttikotelo, 1 kpl (1)
- Pohjalaatta, 1 kpl (2)
- Partikkelidetektorit, 1 kpl (3)
- Röntgendetektorit, 4 kpl (4)

Full Pyramid -mallin sisään jäävät pääosat ovat (numerointi kuvan 17 mukaan)

- Partikkelidetektorin ASIC PCB, 1 kpl (5)
(ASIC, Application-Specific Integrated Circuit, tarpeita vastaava integroitu elektroniikkapiiri. PCB, Printed Circuit Board. Piirilevy, joka yhdistää komponentit toisiinsa ilman erillisiä johtimia)
- Röntgendetektorien jäähdytyslevy, 4 kpl (6)
- Röntgendetektorin esivahvistin, 4 kpl (7)
- Pää PCB, 1 kpl (8)

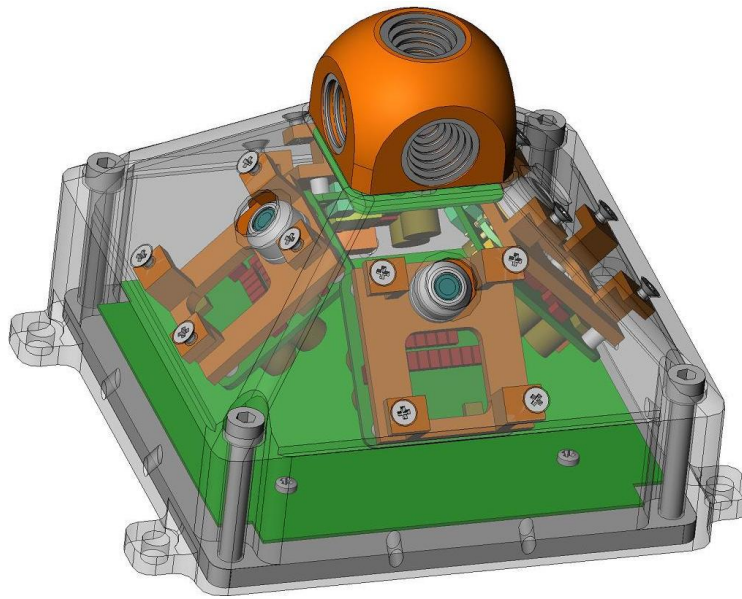


Kuva 17. Full Pyramid -mallin leikkauskuva ja pääkomponentit

Massa- ja dimensioestimaatio Full Pyramid -mallille

Full Pyramid -mallin pääpiirikortin (PCB) maksimipinta-alaksi on laskettu 10736 mm^2 , jolloin se vielä mahtuisi instrumenttikotelon sisään. Röntgendetektoreille tulevien esivahvistinkorttien pinta-alaksi on arvioitu 533 mm^2 .

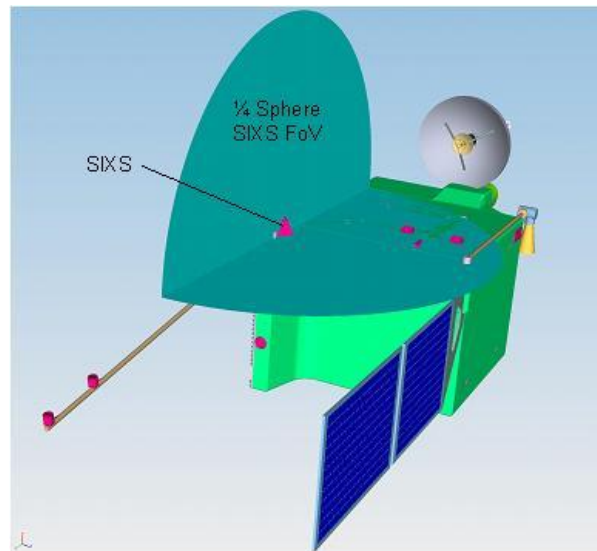
Karkea massa-arvio Full Pyramid -mallille kehitystyön lopussa oli 784 g sisältäen alumiinisen instrumenttikotelon, alumiinisen pohjalaatan, neljä röntgendetektoria joiden massan tiedetään olevan hyvin läheltä neljää grammaa kappaleelta, neljä röntgendetektorien alumiinista jäähdytyslevyä, partikkeli-detektorin sekä tarvittavat ruuvit, mutterit sekä aluslevyt. Massassa ei ole otettu huomioon tarvittavaa massabudjetin 20 %:n marginaalia eikä sisään tulevaa johdotusta. Kuvassa 18 on esitetty viimeisin Full Pyramid -malli ennen kehitystyön lopetusta.



Kuva 18. Full Pyramid -malli syksyllä 2006

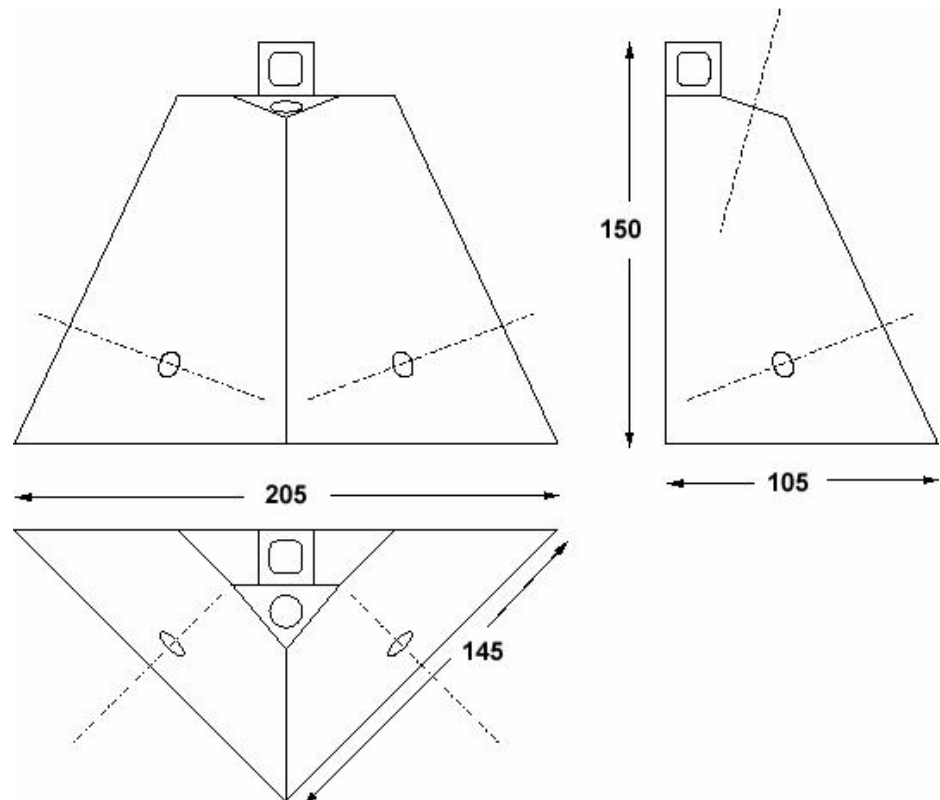
3.2 Half Pyramid -malli

Puolipyramidin mallista instrumenttikoteloa tarvittiin, sillä instrumentille oli varattu tilaa MPO-satelliitin –Z-kyljeltä. Instrumentin tulee toimia siten, että vähintään yksi röntgendetektorin näkee auringon koko ajan, pois lukien aika jolloin satelliitti on Merkuriuksen takana, eikä näe aurinkoa. Yhden detektorin katselukulman (FoV, Field of View) ollessa rajattuna 100 asteeseen, tuli detektorit sijoittaa sellaisiin kulmiin toisiinsa nähden, että mahdollisimman kattava kokonaiskatselukulma saataisiin aikaiseksi, kuten kuvassa 19 on esitetty. Partikkelidetektorin tulisi sijoittamaan instrumenttikotelon päälle.



Kuva 19. SIXS-instrumentin katselukulma (FoV, Field of View) /2/

Kotelon pohja suunniteltiin kolmion malliseksi, jossa suurin kulma olisi noin 270 astetta. Takalevyn pysyessä suorana kaksi muuta tahkoa kallistuisivat toisiaan kohti niin, että partikkelidetektorin mukaan lukien instrumentin kokonaiskorkeus olisi noin 150 mm, kuten alkuperäisessä suunnitelmassa oli määritetty (kuva 20). Partikkelidetektoria varten kotelon huipulle jätettiin tasainen alue, jolle tuleva detektorin voitaisiin kiinnittää. $-Z$ -suuntaan katsovan röntgendetektorin kiinnityspistettä kallistettiin hieman $+Y$ -suuntaan, jotta yhtenäinen katselukeila saatiin aikaiseksi.



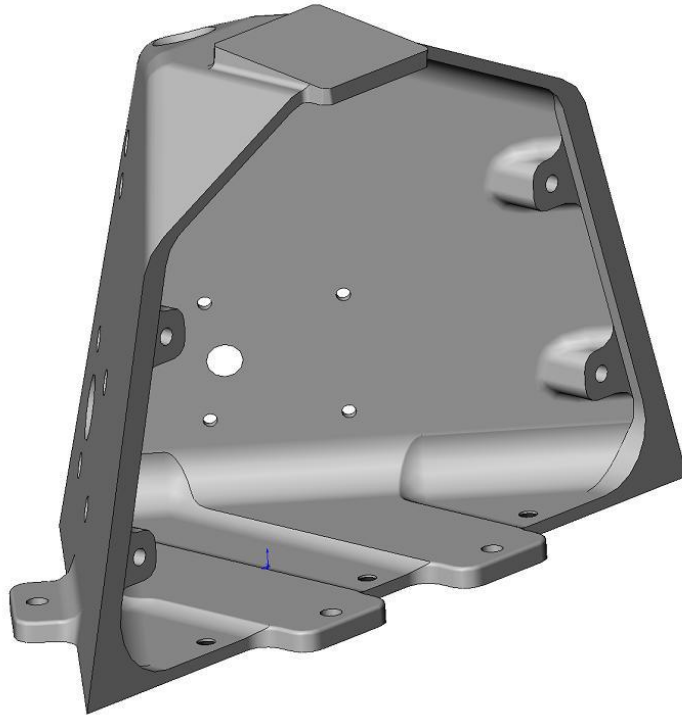
Kuva 20. Half Pyramid -mallin lähtökohtainen mitoitus /11, s. 25/

Röntgendetektorit suunniteltiin kiinnitettäväksi hyvin lämpöä johtavaan telineeseen, josta lämpö saataisiin siirrettyä kotelun runkoon. Teline toimisi röntgendetektorin jäähdytyslevynä. Todennäköisenä materiaalina pidettiin alumiinia sen keveyden [$\rho_{\text{NTP}} = 2,702 \text{ g/cm}^3$] ja hyvän lämmönjohtokyvyn vuoksi [$237 \text{ W/(m} \times \text{K)}$] /7/. Detektorien jäähdytyksessä käytettäisiin myös peltier-elementtejä. Lämpösuunnittelua on käsitelty tarkemmin luvussa 2.4. Instrumenttikotelon pohjaan suunniteltiin pohjalevy, jolla kotelo suljettaisiin. Ilmatiivis se ei saa olla, sillä laukaistaessa avaruusalus pois maan ilmakehästä täytyy kaiken instrumentin sisään jääneen ilman päästä poistumaan sieltä, jotta instrumentti ei räjähdä paineen alenemisen seurauksena.

Mahdollisina valmistusmenetelminä instrumenttikotelolle suunniteltiin muun muassa valamista jonka jälkeen tarvittavat pinnat koneistettaisiin. Valamisen ongelmana pidettiin kuitenkin sitä, että lopputuotteen materiaalin pitäisi olla avaruuskäyttöön soveltuva ja näin ollen se ei välttämättä olisi valettavissa. Alustavien tiedustelujen mukaan myös korkeat muottikustannukset tarkkuusvalussa olivat rajoittavana tekijänä. Kotelon koneistusta yhdestä tai useammasta osasta pidettiin mahdollisena. Lisäksi harkittiin kotelon hitsaa-

mista kasaan esisärmätyistä levyistä. Hitsauksen heikkoutena pidettiin vaikeutta tarvittavan tarkkuuden säilyttämiseksi etenkin särmien kulmien kaltevuuden osalta. Koneistus taas vaatisi todennäköisesti 5-akselisen työstökoneen koska kotelo koostuu useista erisuuntiin kaltevista tasoista ja hankalista sisäpuolisista muodoista. Kuitenkin ohuehkoa seinämävahvuutta (3 mm) pidettiin mahdollisena ongelmana lastuavassa työstössä.

Tätä insinööriä viimeisteltäessä kotelon valmistajan etsintä on parhailaan käynnissä, eikä valmistusmenetelmää ole vielä lopullisesti päätetty. Alustavien tiedustelujen mukaan Protoshop Oy pystyisi koneistamaan kotelon yhdestä kappaleesta mahdollisesti niin, että yritys koneistaisi ensin instrumenttikotelon sisäpuolen, jonka jälkeen koneistettaisiin sisäpuolinen tuurna tukemaan kappaletta ulkopuolen koneistuksen ajan. Instrumenttikotelon sisänurkkiin on jätetty suuri $r = 20$ mm säde, jotta kotelo voitaisiin koneistaa pallopäisellä jyrsinterällä. Kotelon sisäpuolisten säteiden mallintamiseksi jouduttiin mallinnusohjelma päivittämään uudempaan SolidWorks 2007 -versioon, koska vanhempi versio ei pystynyt laskemaan useaan suuntaan kaarevien pintojen säteitä. Kotelon päälle kiinnitettävän partikkelidetektorin kiinnityskohta on taitettu 7 astetta taaksepäin, jotta ongelmana ollut katselukulmien (FoV) leikkaantuminen voitaisiin estää. Ilman taitosta ja partikkelidetektorin pientä taaksepäin vientiä peittäisi partikkelidetektorin runko sektorin ylimmän röntgendetektorin katselukulmasta osan ja instrumenttikotelo peittäisi partikkelidetektorin katselukulmaa +Y-suunnassa. Kuva 21 esittää lähes valmista instrumenttikotelo.



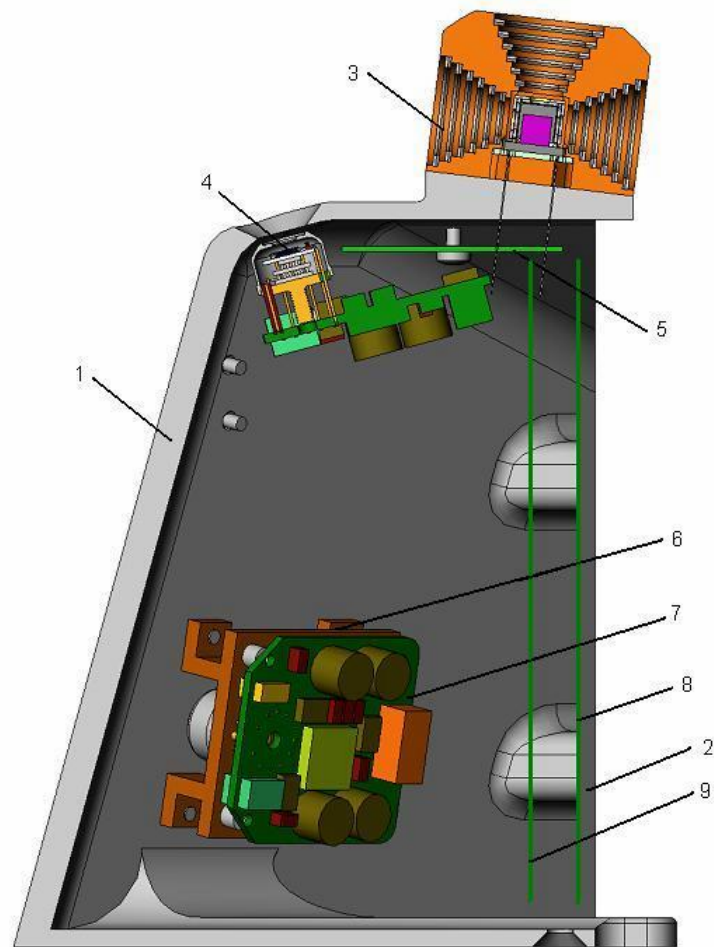
Kuva 21. Instrumenttikotelo helmikuussa 2007

Half Pyramid -mallin ulos näkyvät pääosat ovat (numerointi kuvan 22 mukaan)

- Instrumenttikotelo, 1 kpl (1)
- Kotelon kansi, 1 kpl (ei esitetty kuvassa) (2)
- Partikkelidetektorin ASIC PCB, 1 kpl (3)
- Röntgendetektorin jäähdytyslevy, 3 kpl (4)

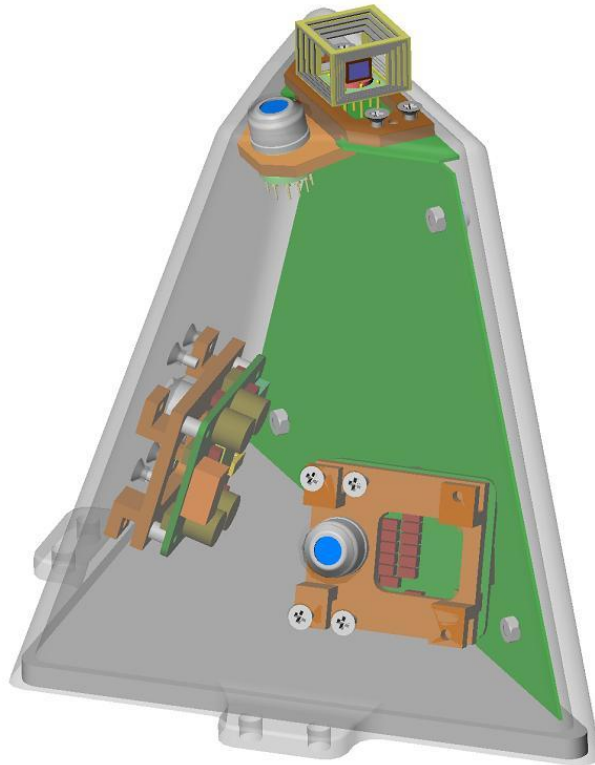
Half Pyramid -mallin sisään jäävät pääosat ovat (numerointi kuvan 22 mukaan)

- Partikkelidetektorin ASIC PCB, 1 kpl (5)
- Röntgendetektorien jäähdytyslevy, 3 kpl (6)
- Röntgendetektorin esivahvistin, 3 kpl (7)
- Pää PCB, 2 kpl (8 & 9)



Kuva 22. Half Pyramid -mallin leikkauskuva ja pääkomponentit

Full Pyramid -mallin mekaniikkasuunnittelussa on otettu huomioon käytettävän elektronikan vaatimukset siinä määrin kuin ne ovat kulloinkin olleet tiedossa. Kuva 23 esittää Half Pyramid -mallin ulkoista olemusta suunnittelu-prosessin alkuvaiheessa. Suunnittelun edetessä on komponenttien sijoittelua optimoitu muun muassa röntgendetektorien sijoittelun osalta, partikkeli-detektorille jätettävän tasaisen kiinnityskentän koon suhteen sekä instrumenttikotelon avoimen sivun suhteen. Kotelon suunnitteluun ja materiaalivalintaan liittyviä seikkoja on esitelty tarkemmin luvussa 3.5.



Kuva 23. Half Pyramid -malli huhtikuussa 2006

Massa ja dimensioestimaatio Half Pyramid -mallille

Half Pyramid -mallin pää piirikorttien (PCB) pinta-alaksi on arvioitu 14600 mm². Korttien lopullisen koon tulee määrittämään elektronikan vaatima tila. Tätä insinööriötä kirjoitettaessa näyttää siltä, että korttien kokoa joudutaan hieman kasvattamaan, mikä johtaa siihen, että koko instrumenttikotelon dimensioita on kasvatettava. Röntgendetektoreille tulevien esivahvistinkorttien pinta-alaksi on arvioitu 533 mm².

Half Pyramid -mallin kokonaismassa-arvio tammikuussa 2007 on 1219 g sisältäen 10 %:n marginaalin röntgendetektoreille ja muille osille 20 %:n marginaalin. Taulukkoon 5 on kerätty yksityiskohtaiset tiedot instrumentin massasta tammikuussa 2007.

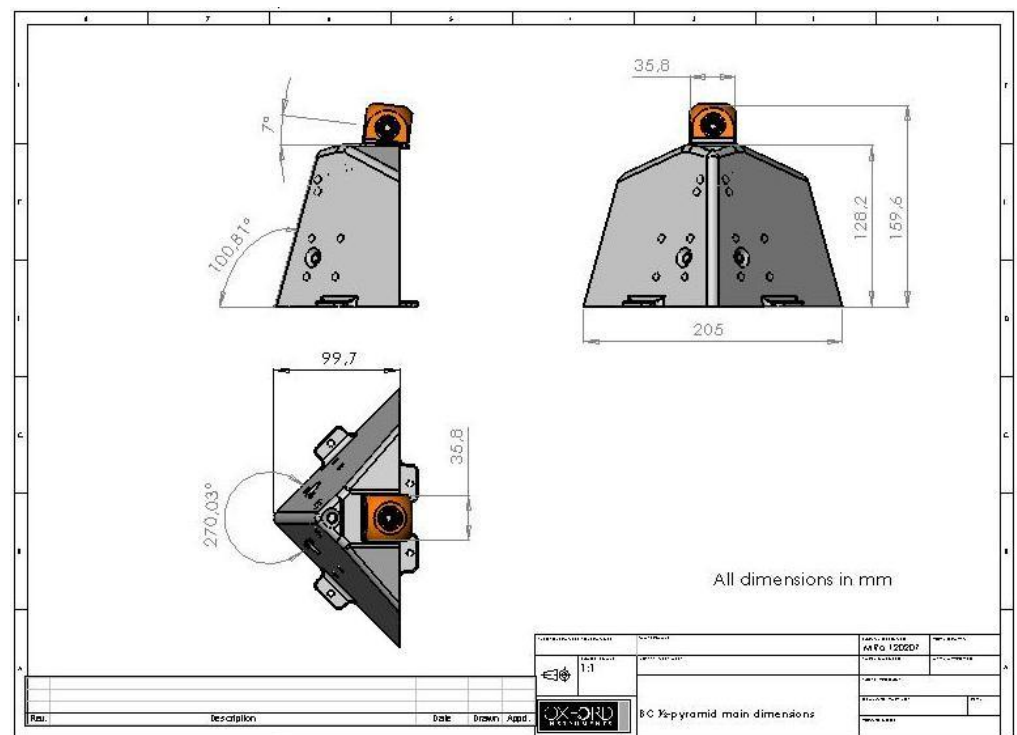
Taulukko 5. Half Pyramid -mallin massa-arvio tammikuussa 2007

BepiColombo SIXS ½ pyramid SU mass breakdown

19-Jan-07 / MRo,HA

	Material	Mass	No. of	Tot. mass	Cont. %	Mass with cont
Cover	Al	406	1	406	20	487
Base	Al	145	1	145	20	174
X-ray detector	misc.	5	3	15	10	17
X-ray detector heat sink	Al	12	3	36	20	43
X-ray detector preamp.	misc.	20	3	60	20	72
X-ray detector main PCB	misc.	95	1	95	20	114
Particle detector	misc.	80	1	80	20	96
Particle detector ASIC PCB	misc.	10	1	10	20	12
Particle detector main PCB	misc.	130	1	130	20	156
Spacers, nuts, bolts, wiring	misc.	40	1	40	20	48
Total (g)				1017		1219

Instrumentin päämitat helmikuussa 2007 selviävät kuvasta 24. Mittaluvut on esitetty millimetreissä ja asteissa.



Kuva 24. Half Pyramid -mallin päämitat helmikuussa 2007

3.3 Partikkelidetektorin suunnittelu

Partikkelidetektorin tarkoituksena on monitoroida auringon tuottamia energettisiä partikkeleja (protoneja ja elektroneja) ja mitata niiden energiajakaumaa.

3.3.1 Partikkelidetektorissa käytetyt materiaalit

Seuraavassa esitellään lyhyesti partikkelidetektorissa käytetyt materiaalit ja komponentit partikkelidetektorin toimintaperiaatteen ymmärtämiseksi.

Tuiekide

Tuiekide on suuri puolijohdekomponentti. Kiteeseen osuva ionisoiva hiukkanen tai kvantti aiheuttaa siinä virityksen, jonka purkautuessa syntyy tuikefotoni eli näkyvää valoa. Syntyneiden fotoelektronien lukumäärä on verrannollinen energiaan, jonka kvantti tai hiukkanen luovuttaa tuikeaineeseen. /23, s. 55–56./

Fotodiodi

Partikkelidetektorissa käytetyt fotodiodit ovat puolijohdeilmaisimia. Fotodiodi, eli toiselta nimeltään valodiodi, on valolle herkkä diodi. Se on esijännitetty estosuuntaan, jolloin kahden erityyppisen puolijohdemateriaalin muodostama liitos, eli pn-rajapinta, on tyhjä varauksenkuljettajista. Puolijohde, kuten pii, saadaan erityyppiseksi seostamalla se esimerkiksi fosforilla (n-tyyppi) ja boorilla (p-tyyppi). Tällöin virta ei juuri pääse kulkemaan diodin läpi. Kun valodiodiin tulee kvantti eli fotoni tai valohiukkanen, se absorboituu diodin pinnalla ja synnyttää elektroni-aukkopareja puolijohteen pn-rajapintaan aiheuttaen estosuuntaisen virtapulssin ilmaisimpiiriin. /22./

Valodiodin pääominaisuudet ovat muun muassa erinomainen lineaarisuus ja matala kohina, korkea kvanttihyötysuhde (n. 80 % 800 nm:ssä), helppo kalibroituavuus, vakaus ja pitkä käyttöikä. /22./

GaAs-detektorit

Galliumarsenidi koostuu kahdesta alkuaineesta – galliumista ja arsenidista. Se on tärkeä puolijohdekomponentti, jota käytetään muun muassa laserdiodeissa, aurinkokennoissa ja lääketieteellisissä röntgensovelluksissa. /7./

Detektorimateriaalina GaAs tuottaa spektriin vähemmän taustakohinaa kuin tavanomaisemmat pii-pohjaiset detektorit operoitaessa suurilla taajuuksilla.

Se myös kestää säteilyä paremmin kuin pii. GaAs sallii suuren elektronien liikkuvuuden. /24./

Alumiinioksidi

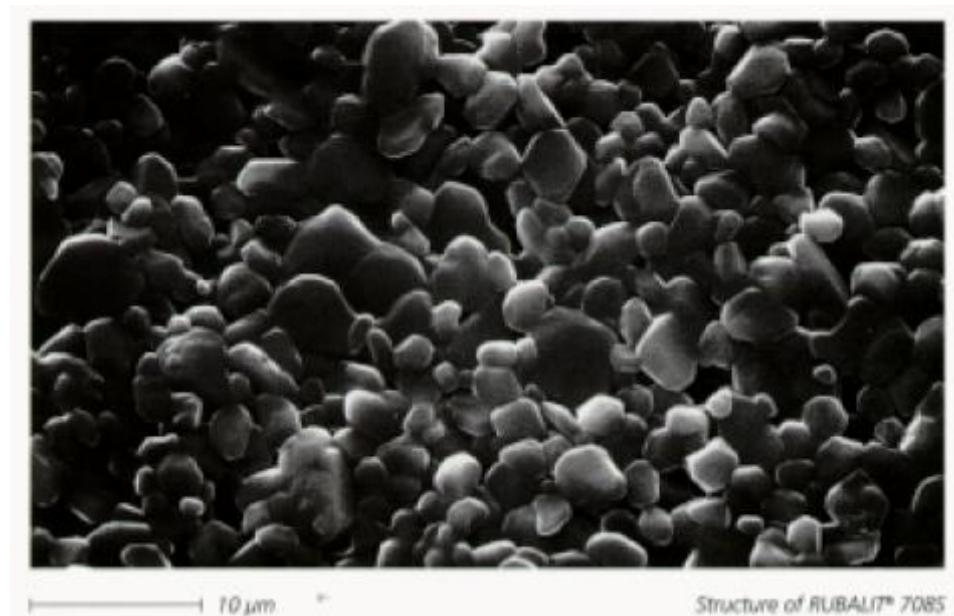
Keraamit voidaan jakaa kahteen pääluokkaan, perinteisiin keraameihin jotka valmistetaan luonnon raaka-aineista sekä erikoiskeraameihin. Erikoiskeraamit valmistetaan keinoitekoisesti tarkoin säädellyistä hienojakoisista jauheista. Erikoiskeraamit jaetaan useampiin alaluokkiin, joista yksi on konstruktiokeraamit. Alumiinioksidi (Alumina, Al_2O_3) on yksi yleisimmistä käytetyistä konstruktiokeraameista.

Keraamien hyviä ominaisuuksia ovat esimerkiksi hyvä lämmönkestävyys, korroosionkestävyys ja kulutuskestävyys sekä keveys ja jäykkyys. Keraamien rajoittavia tekijöitä ovat muun muassa niiden hauraus ja ominaisuuksien hajonta. /25, s. 114–115./ Alumiinioksidi tunnetaan myös nimellä korundi ja sitä tavataan myös luonnossa vieraiden aineiden värjäiminä jalokivinä, rubiinina ja safiirina /26, s. 12/. Taulukossa 6 on esitetty alumiinioksidin yleisimpiä fysikaalisia ominaisuuksia.

Taulukko 6. Al_2O_3 :n fysikaaliset ominaisuudet /26, s. 13/

Tiheys	3,95 g/cm ³
Sulamispiste	2050 °C
Kovuus	2400 HV
Kimmomoduli	380 GPa
Vetolujuus	200 - 310 MPa
Taivutuslujuus	250 - 400 MPa
Lämmönjohtavuus	20 - 30 W/Km
Poissonin luku	0,22

SIXS-instrumentin partikkelidetektorissa käytetty alumiinioksidi on CeramTec AG:n valmistamaa ja myymää Rubalit 708S -alumiinioksidia (96 % Al_2O_3). Alumiinioksidia käytettiin detektorin sisään tulevien keraamihäkkien materiaalina sekä detektorirakenteen pohjalevynä. Kuvassa 25 on kuvattu Rubalit 708S:n pinnan rakennetta voimakkaasti suurennettuna.



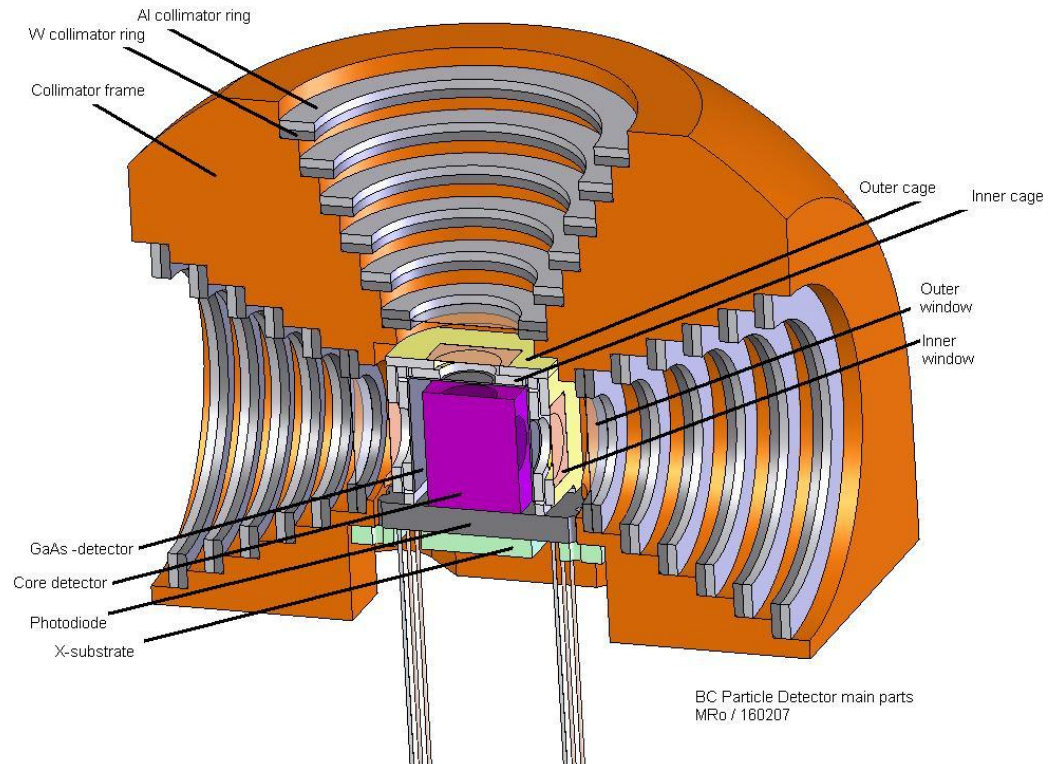
Kuva 25. Alumiinioksidin (Rubalit 708S) rakenne /27, s. 4/

Alumiini ja wolfram

Yhdistämällä alkuaineista kevyt alumiini ($\rho_{\text{NTP}} = 2,702 \text{ g/cm}^3$) ja raskas wolfram ($\rho_{\text{NTP}} = 19,3 \text{ g/cm}^3$) pystytään ei-toivotut vuotopartikkelit leikkaamaan pois, sillä ne eivät pääse läpäisemään rakennetta. Lisäksi yhdistelmällä pystytään vähentämään elektronin liike-energiasta syntyvää jarrutussäteilyä (bremsstrahlung). /28, s. 12./ Materiaaliparia käytetään SIXS:n partikkelidetektorissa katselukulman rajaamiseen.

3.3.2 *Partikkelidetektorin kehitys*

Instrumenttiin integroitava partikkelidetektor on yksi haasteellisimmista osaluista SIXS-instrumentissa. Detektorin sisäinen geometria on optimoitava jotta detektor toimisi halutulla tavalla. Kuvassa 26 on esitetty partikkelidetektorin pääkomponentit detektorin leikkauskuvannossa.

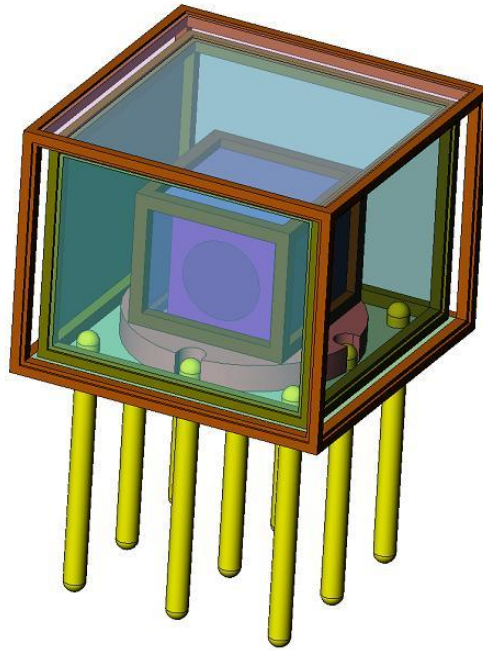


Kuva 26. Partikkelidetektorin pääosat valmiissa prototyypmallissa

Seuraavassa on esitetty detektorin kehitystyö pääpiirteittäin. Liitteessä 1 on kuvattu partikkelidetektorin versiohistorian kaikki päämuutokset sekä lyhyesti kuvattu syitä, miksi muutos on tehty. Saman partikkelidetektorin oli suunniteltu soveltuvan sekä Full Pyramid, että Half Pyramid -instrumentteihin.

Partikkelidetektori rakentuu keskellä olevasta tuikekiteestä, joka on kiinnitetty valodiodin päälle. Tuikekide synnyttää näkyvää valoa, joka luetaan fotodiodilla. Fotodiodi kiinnitetään keraamisen (Al_2O_3) laatan päälle, joka toimii samalla sähköisenä eristeenä. Kidettä ympäröi kaksi keraamista (Al_2O_3) häkkiä, joihin kiinnitetään kymmenen kalvoa, kaksi kullekin tahkolle sähköiseksi ja termiseksi eristeeksi sekä estämään valon ja alimman energiatason omaavien hiukkasten pääsyn detektorille /10/. Lähimpänä tuikekidettä on tasomaisia gallium-arsenidi (GaAs) -detektoreja liitettynä kullekin tahkolle yhteensä viisi kappaletta.

Signaalien läpivienti suunniteltiin aluksi toteutettavaksi kullatuilla pinneillä pohjan kautta, kuten kuvassa 27 esitetyssä detektorin ensimmäisestä mallista voidaan nähdä.

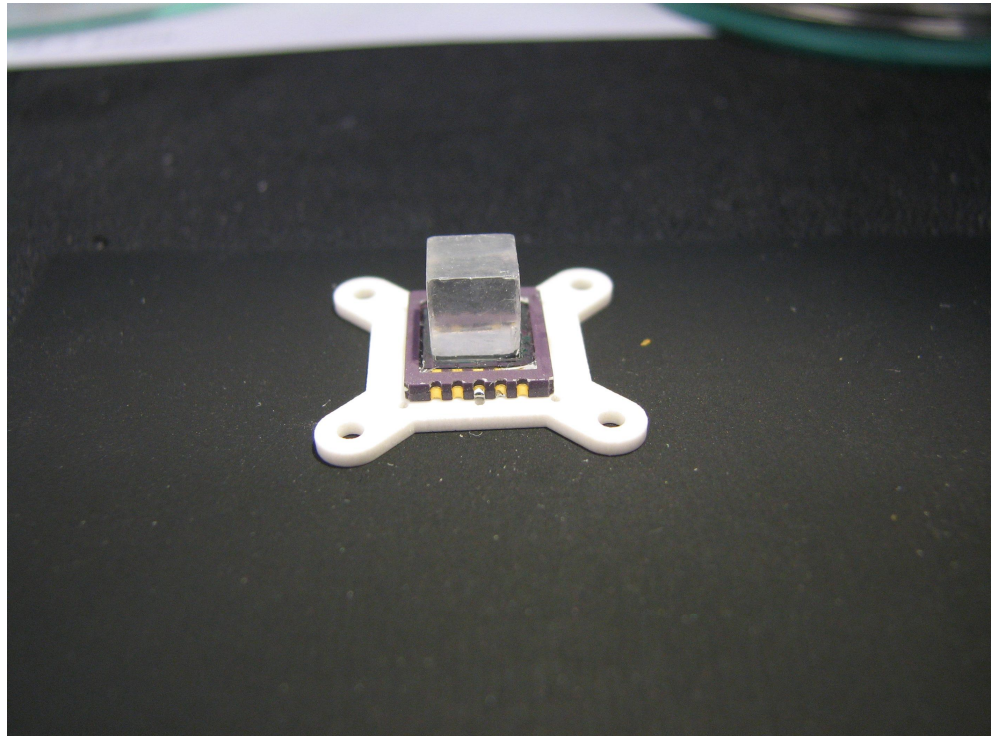


Kuva 27. Ensimmäinen mallinnus partikkelidetektorista joulukuussa 2006

Itse detektorin ympärille rakennetaan kollimaattorirunko, joka koostuu kartiomaisista portaista jotka rajaavat detektorin katselukulman halutuksi. Porrasmaisella kollimaattorimuodolla pystytään ehkäisemään partikkelien peilautuminen sivuseinistä detektorille ja estämään näin mittaustuloksiin tulevia häiriöitä. Portaiden päälle mallinnettiin raskaasta wolframista ja kevyestä alumiinista (W-Al) valmistetut kehät jotka liitettiin yhteen liimaamalla.

Viimeisin malli partikkelidetektorista on rakennettu cesium-jodidi (CsI) tuikekiteen päälle. Tuikekide materiaali jouduttiin vaihtamaan loppukesästä 2006 Elohopeajodidista (HgI_2) CsI kiteeseen epäonnistuneiden testien takia. Tuikekiteen kooksi suunniteltiin alun perin $4 \times 4 \times 4$ mm:n kokoista kidettä, joka käytettävän valodiodin varmistuttua muutettiin $5 \times 5 \times 5$ mm:n kokoiseksi valodiodin aktiivisen alueen mukaan. Alkuperäinen mitoitus ($4 \times 4 \times 4$ mm) oli suunniteltu siten, että se olisi tarpeeksi suuri pysäyttämään protonit 30 MeV:n saakka. /28, s. 10–13./ Viimeisimmässä mallissa tuikekiteen koko on määriteltä $5 \times 5 \times 6,3$ mm:n kokoiseksi. Korkeutta jouduttiin kasvattamaan, jotta partikkelidetektorin sisäinen geometria saatiin optimoitua. Ensimmäinen prototyyppi partikkelidetektorista on kuitenkin rakennettu $5 \times 5 \times 5$ mm:n kiteellä, sillä kiteet oli jo tilattu ennen kuin lopullinen geometria saatiin valmiiksi.

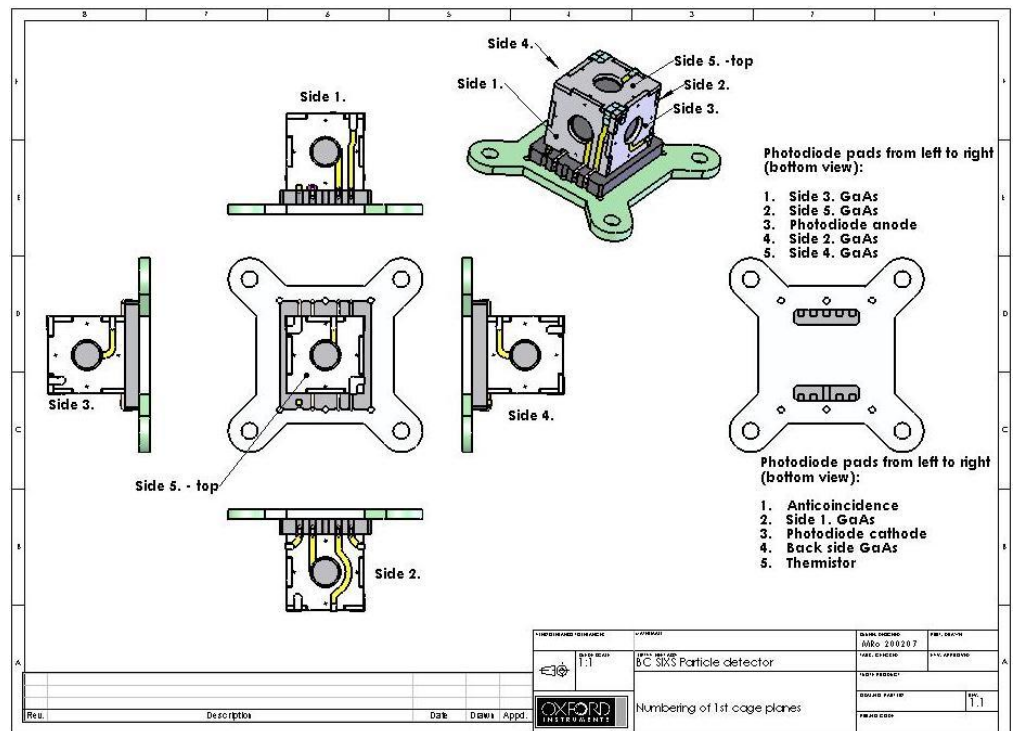
Tuiekide on liimattu Hamamatsu Photonicsin S5106 -valodiodin (liite 2) päälle ja keskitetty mikroskoopin alla tarkalleen valodiodin aktiivisen alueen (5 x 5 mm) kohdalle. Valodiodi on liimattu ristin mallisen laserleikatun alumiinioksidilevyn (X-substrate) päälle, joka toimii sekä sähköisenä eristeenä että koko detektorirakenteen pohjalevynä. Kuvassa 28 on esitetty liimatun rakenteen prototyyppi.



Kuva 28. Tuiekide liimattuna fotodiodin ja X-substraatin päälle

Tuiekiteen päälle rakennetaan viidestä laserleikatusta Al_2O_3 -levystä koostuva häkki joiden pintaan printataan kultaiset johteet signaalin siirtoa varten. Keraamiosien laserleikkaus teetettiin Veslatec Oy:ssä. Alumiinioksidin materiaalihyvyytenä käytettiin 0,5 mm:n vahvuista Al_2O_3 -levyä. Levystä jouduttiin tekemään erikoistilaus, sillä standardivahvuus ohuelle alumiinioksidilevyllä on 0,63 mm. Ohuempaan levyvahvuuteen päädyttiin optisen geometrian takia. Suorakulmioksi liimatun keraamihäkin toisiaan vastaavat johteet yhdistetään johtavalla liimalla kulmien yli. Prototyypissä johteet tehtiin liimaamalla levyjen pintaan ohuita johtimia johtavalla liimalla. Partikkelidetektorin kokoonpano-ohje (Assembly work order) on tämän insinööriyön liitteenä 3. Jokainen keraamitahko numeroitiin kuvan 29 esittämällä tavalla jotta kokoon-

pano-ohjeeseen kirjattavat työvaiheet saatiin erotettua tarvittaessa kullekin tahkolle erikseen.

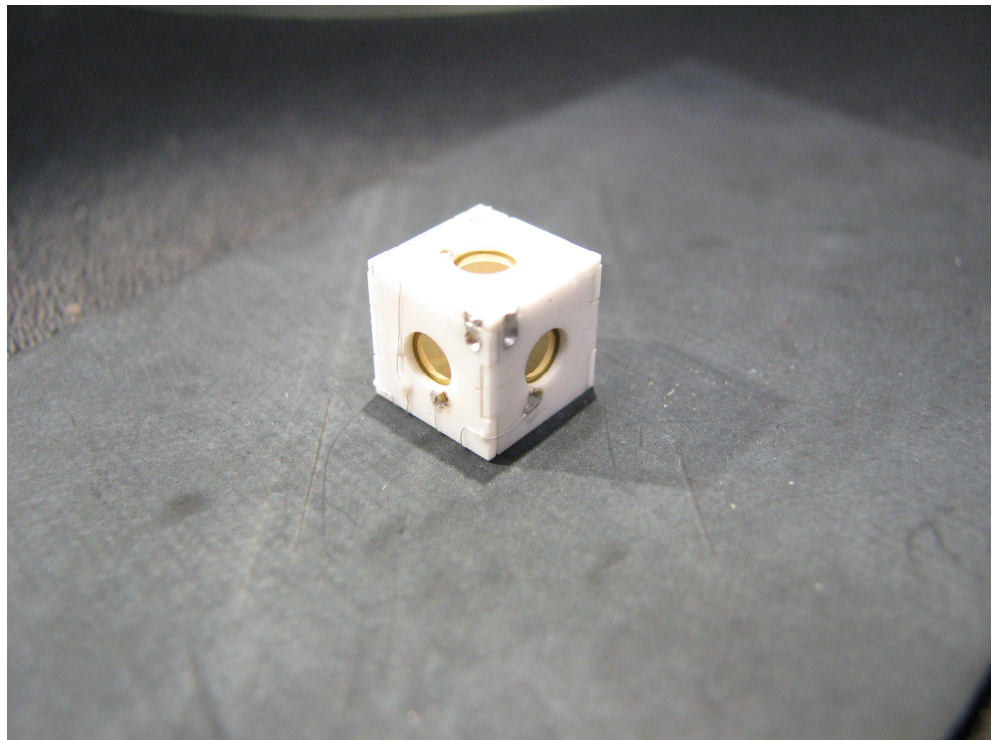


Kuva 29. Ensimmäisen keraamihäkin tahkojen numerointi

Ensimmäisen keraamihäkin sisään liimataan viisi kappaletta 50 μm :n GaAs-puolijohdedetektoreja, yksi kullekin tahkolle. GaAs-detektorit pysäyttävät matalaenergiset (100–300 keV) partikkelit ja niiden sisältämä energia mitataan detektorilla. Pienimmän kollimaattorirengasparin väliin laitetaan ohut timanttipinnoitettu kaptonkalvo, jolla pystytään rajaamaan detektorille tulevat noin 0,5 MeV:n (tai vaihtoehtoisesti noin 1 MeV:n, riippuen käytettävän kalvon paksuudesta) protonit mutta se päästää läpi 100 keV:n elektroneita ilman suurta energian häviötä. Koska partikkelien energiaspektri on tyypillisesti energian laskeva funktio, on paljon suurempi todennäköisyys, että partikkeli, jonka varaus on alle 300 keV, on elektroni eikä protoni. Tuiketeellä taas saadaan mitattua protonit, joiden varaus on yli 660 keV. /28, s. 11./

Detektorit keskitetään keraamilevyihin porattujen pienten, halkaisijaltaan $\phi = 0,2$ mm, reikien avulla. Jokaisessa GaAs-detektorissa on kaksi aktiivista aluetta, keskellä oleva ympyrän mallinen ($\phi = 2,6$ mm) sekä sen ympärillä oleva alue. Ympyrän muotoinen aktiivinen alue on keskitetty tarkasti kartiomaisen

kollimaattorirakenteen keskelle. Tätä aluetta käytetään energian detektointiin. GaAs-detektorien keskellä sijaitsevia pyöreitä aktiivisia alueita ympäröivät alueet on kytketty johtavalla liimalla toisiinsa yhdeksi isoksi viisitahkiseksi alueeksi, jonka tarkoituksena on laskea taustakohinan määrää ja vähentää elektronien sironnasta johtuvaa virhettä energioresoluutiossa. Kuvassa 30 on esitetty ensimmäinen toiminnallinen prototyyppi ensimmäisestä keraamihäkistä, jonka sisään on liimattu GaAs-detektorit. Sähköinen detektorien yhteen kytkeminen on prototyypissä tehty ohuilla johtimilla.



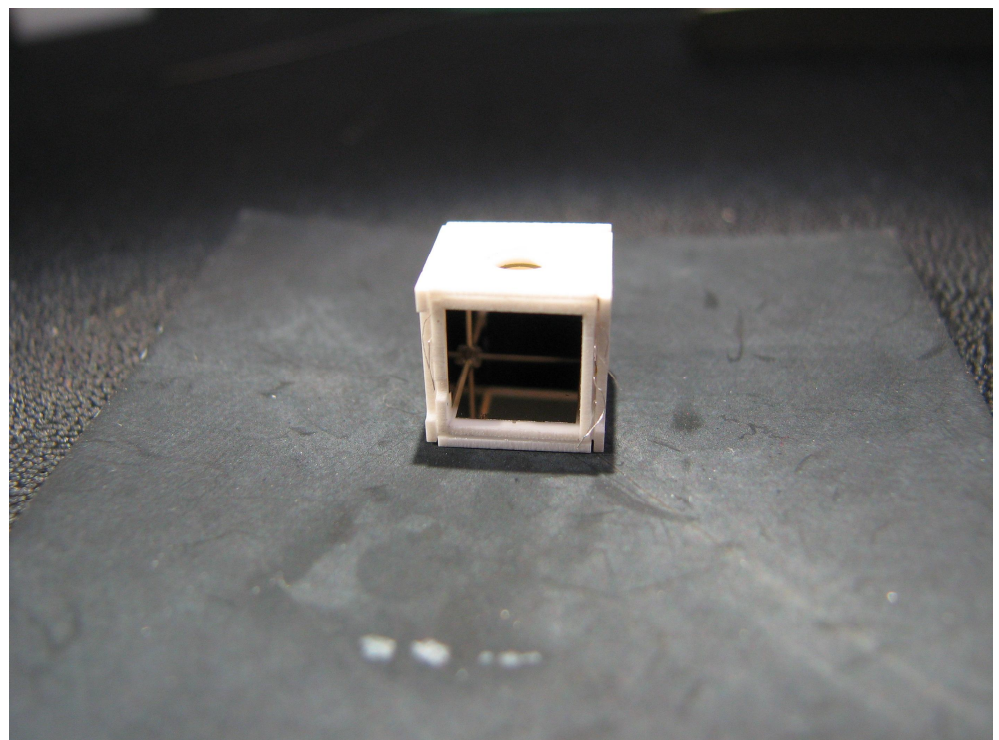
Kuva 30. GaAs-detektorit liimattuna ensimmäisen keraamihäkin sisään

Ensimmäisen häkin päälle liimataan viisi Al_2O_3 -levy toiseksi häkiksi. Toisessa häkissä oleva reikä detektorin pyöreälle aktiiviselle alueelle on suurempi kuin ensimmäisessä ja ne toimivat yhdessä viimeisenä kollimointiporttana. GaAs-detektorien keskellä olevat aktiiviset alueet bondataan ensimmäisen häkin ulkolaidalla kulkevaan johtimeen. GaAs-detektorien sisäpuolella olevaan yhtenäiseen alueeseen liimataan johtavalla liimalla ohut johdin, joka tuodaan ensimmäisen häkin alareunaan jätetyn uran kautta valodiodissa oleviin johteisiin. Sama ura toimii ilmanpoistoreikänä laukaistaessa instrumentti avaruuteen. Tarvittava ilmanpoistoreiän vähimmäiskoko voidaan laskea kaavasta 2.

$$Q_v = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \eta \cdot l} \cdot (P_1 - P_2) \quad \eta_{\text{ilma}} = 16,7 \cdot 10^{-6} \text{ Nsm}^{-2} \quad (2)$$

jossa Q_v = tilavuusvirta [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$], d = ympyränmuotoisen vuotoreiän halkaisija [m], η = kaasun viskositeetti, l = reiän pituus eli seinämävahvuus [m], P_2 = paine lopussa [Pa] ja P_1 = paine alussa [Pa] /29, s. 236–237/.

Kuvasta 31 voidaan sisemmän häkin vasemman puoleisen tahkon alalaidassa hahmottaa ura, joka on tehty ilman poistumista varten, verrattaessa sitä oikean puoleiseen tahkoon.

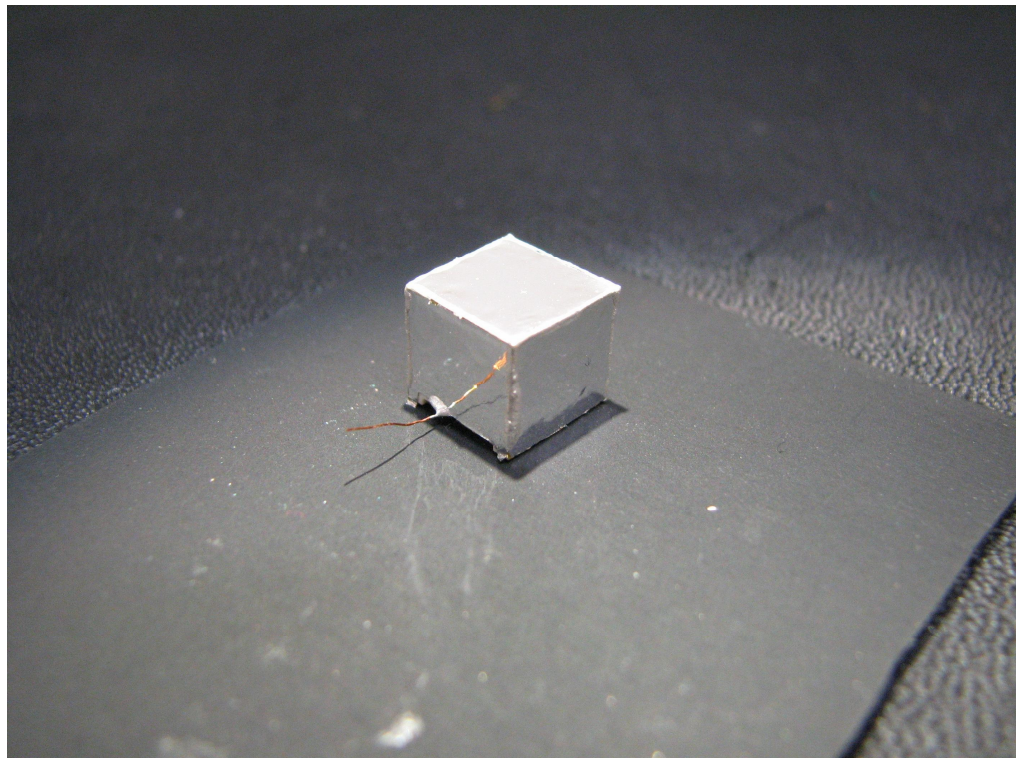


Kuva 31. Keraamihäkit liimattuna päällekkäin. Kuvassa vasemmalla laidalla kaasunpurkautumista varten jätetty aukko.

GaAs-detektorien keskellä olevasta pyöreästä aktiivisesta alueesta johdetaan signaali keraamihäkin pintaan printattujen kultajohteiden kautta häkin alalaitaan, josta signaali siirretään ohuilla johtimilla valodiodissa oleviin johteisiin. Valodiodissa on yhteensä 10 johdinta joista tässä sovelluksessa käytetään vain kahta valodiodin anodin ja katodin kytkemiseksi elektroniikkaan, joten kahdeksaa muuta on mahdollista käyttää signaalien siirtoon valodiodin alapuolelle. Viimeistä valodiodin vapaata johdinta käytetään detektorin lämpötilan mittauksesta tulevan signaalin siirtoon. Valodiodin pinnalle kiinnite-

tään pieni, 0,5 x 0,5 x 0,5 mm:n kokoinen termistori, jolla instrumentin lämpötilaa voidaan valvoa. Valodiodin alapinnasta signaali viedään esivahvistimelle liimaamalla sinne ohuet johtimet kutakin signaalia varten. Partikkelidetektorin esivahvistin integroidaan todennäköisesti partikkelidetektorin pää PCB:lle yhdeksi ASIC-piiriksi massa- ja tehonkäytön optimoinnin takia. /28, s. 13./

Toisen keraamihäkin päälle kiinnitetään lopuksi viisi 7,5 µm:n vahvuista polyimidi-, eli kaptonkalvoa, joiden pinnalle on höyrystetty 100 nm:n paksuinen alumiinikerros valon heijastumisen maksimoimiseksi, kuten kuvassa 32 on esitetty. /28, s. 13./

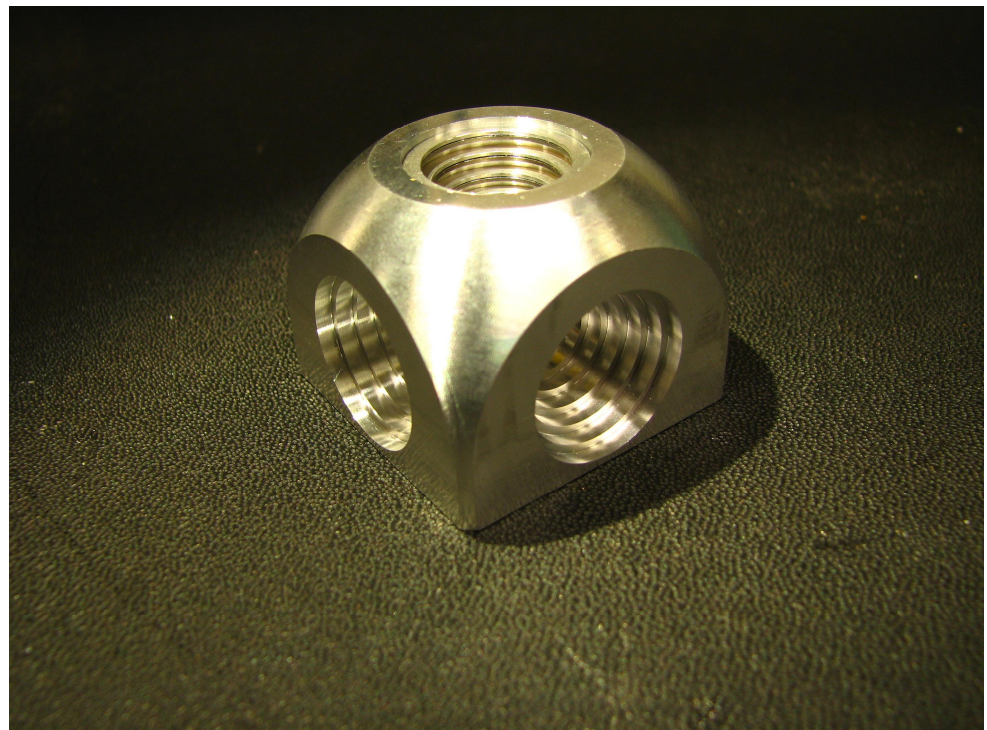


Kuva 32. Alumiinipinnoitettu kaptonkalvo keraamihäkkien päällä

Ensimmäisen prototyypin kollimaattorirunko koneistettiin alumiinista Protopaja Oy:n toimesta (kuva 33). Prototyypimallissa käytettiin tavanomaista AlMgSi1-alumiinia lopullisen alumiiniseoksen ollessa vielä epäselvä. Runkoosa koostuu viidestä yhtenevästä kartionmuotoisesta kollimointi reiästä. Kappaleen sisään on jyrstetty optimoitu tila edellä esiteltyä detektorirakennetta varten. Kollimaattorirungon työpiirustus on tämän työn liitteenä 4. Kappale

jätettiin prototyypivaiheessa kokonaan ilman pintakäsittelyä. Lopullinen kollimaattorirunko passivoidaan kromivapaalla Alodine 1200 S -käsittelyllä. Käsittelyä käytetään suojaavana pinnoitteena alumiinille ehkäisemään korroosiota ja parantamaan maalin tarttumiskykyä. Alodine 1200 S -käsittely on hyväksytty myös sotateollisuuden käyttöön standardissa MIL C-5541C. /31, s. 1; 32./

Kollimaattorirenkaat valmistettiin niin ikään Protopaja Oy:ssä lankasahamalla. Koska puhdas wolfram on kovuutensa takia erittäin hankalaa työstettävää, käytettiin kollimaattorirenkaiden valmistukseen Densimet-kauppanimellä kulkevaa koneistettavaa laatua, jossa on noin 95 % wolframia. Muut käytetyt seosaineet lastuttavuuden lisäämiseksi ovat nikkeli ja rauta. /33, s. 4–6./ Jokaiseen wolframrenkaaseen työstettiin pieni viiste ulkoreunalle, jotta ne eivät jäisi kantamaan asennettaessa niitä kollimaattorirunkoon koneistettuihin upotuksiin. Prototyypin alumiiniset kollimaattorirenkaat valmistettiin sorvaamalla AlMgSi1 -alumiiniseoksesta.



Kuva 33. Koneistettu kollimaattorirunko. Ylimpään kartioon kiinnitetty W-Al -kollimointirenkaat

Detektorikokoonpano asennetaan kollimaattorirungon sisään neljällä M1.6, 4.8 lujuusluokan ruuvilla. Ruuvien kokonaiskiristysmomentti voidaan laskea kaavasta 3.

$$M_A = M_G^+ + M_K = \frac{1}{2} F_M \left(1,55 \mu_G d_2 + \mu_K D_{km} + \frac{P}{\pi} \right) \quad (3)$$

jossa M_A = kokonaiskiristysmomentti [Nm], F_M = esikiristysvoima [Nm], μ_G = kierteen kitkakerroin, d_2 = ruvin kylkihalkaisija [m], μ_K = ruvin alustan ja kannan välinen kitkakerroin, D_{km} = keskimääräinen kitkan vaikutusympyrän halkaisija [m] ja P = kierteen nousu [m]. /34, s. 230–231./

Laskennallisesti kiristysmomentiksi saadaan 0,05 Nm:ä. Laskennallinen tulos poikkeaa kuitenkin tribology-abc.com verkkosivuilla olevan laskurin antamasta kiristysmomentista. Laskurin mukaan kokonaiskiristysmomentti M1.6–4.8-ruuville on 0,08 Nm. /35./ Kuvassa 34 on esitetty verkkolaskurilla saatu tulos. Taulukoista luettaessa sopiva kiristysmomentti yhtä lujuusluokkaa pienemmälle M1.6–4.6-ruuville on 0,065 Nm /36/. Partikkelidetektorin kokoonpano-ohjeeseen sopivaksi kiristysmomentiksi määritettiin 0,07 Nm laskettuna keskiarvona eri lähteistä saatujen tulosten pohjalta.

TIGHTENING TORQUE TO PRELOAD A BOLT



prescribed tensile stress ¹⁾

Metric thread : M1.6 - 4.8

prescribed tensile stress : $\sigma_t =$ 0.6 x R_{p0.2}

thread coeff. of friction : $\mu_{\text{thread}} =$ 0.15

head coeff. of friction : $\mu_{\text{head}} =$ 0.15

pitch P	0.35	mm
pitch diameter d ₂	1.373	mm
root diameter d ₃	1.17	mm
tensile stress area A _t = $\pi/4 d_0^2$; d ₀ = (d ₂ + d ₃)/2	1.27	mm ²
ultimate tensile strength R _m	400	MPa
yield strength R _{p0.2}	320	MPa
tensile stress $\sigma_t = \sigma'_t \times R_{p0.2}$	192	MPa
torsional stress $\tau = M_G/W_p$; W _p = $\pi/16 d_3^3$	137.3	MPa
equivalent stress $\sigma_e = (\sigma_t^2 + 3\tau^2)^{1/2}$	305.6	MPa
thread friction M _G	0.0431756	Nm
thread friction M _G -	-0.015194	Nm
head face friction M _{WD}	0.0380319	Nm
total tightening torque M_A = M_G + M_{WD}	0.0812075	Nm
initial preload F_i = $\sigma_t \cdot A_t$	0.2437944	kN

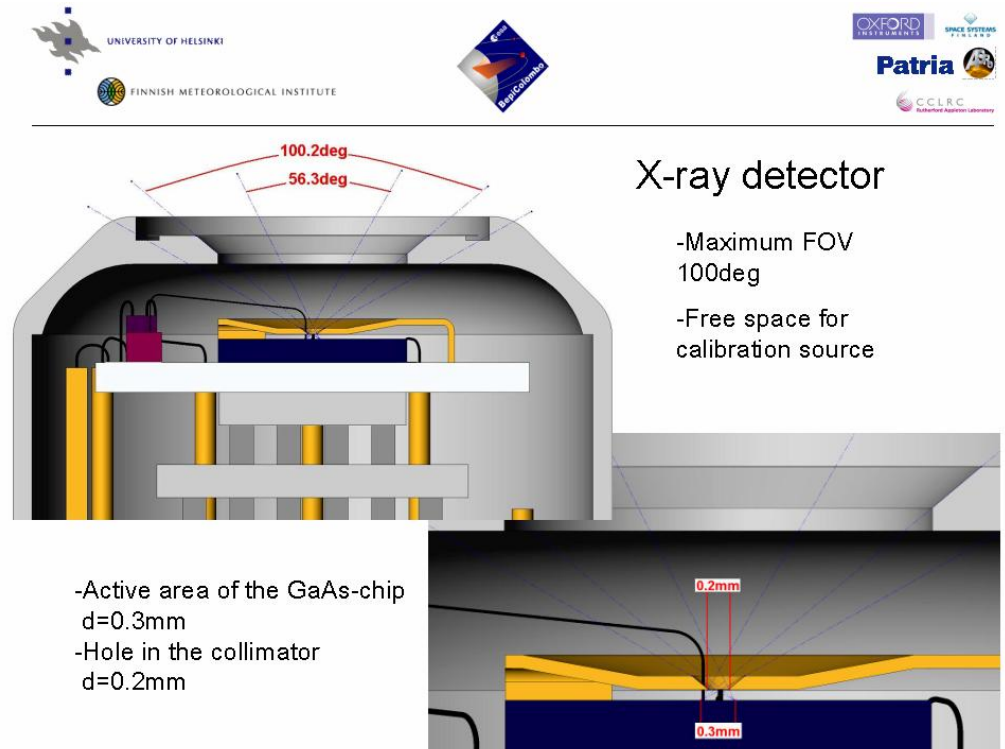
¹⁾ stress by torsion is relaxed after tightening.

Kuva 34. M1.6–4.8-ruuvien kiristysmomentti verkkolaskurin mukaan /35/

3.3.3 Röntgendetektor

SIXS-instrumentin röntgendetektoreina käytetään OIA:n tuotannossa oleviin SiPIN-detektoreihin pohjautuvia röntgendetektoreja. Käytettävien PentaPIN-detektorien geometria ja itse GaAs-detektoripiiri optimoidaan käyttöä varten. Lisäksi detektorin kuorta muokataan katselukulman rajaamiseksi 100 asteeksi, kuten kuvassa 35 on esitetty. Kuoren alle kiinnitetään renkaan muotoinen Fe55-isotooppilähde, jolla detektorin pystytään kalibroimaan /10, s. 21/. Ohuesta (0,125 mm) kultalevystä valmistettuun, itse detektorikiteen päälle asennettavaan katseluikkunaan (aperture window) porataan laserilla hal-

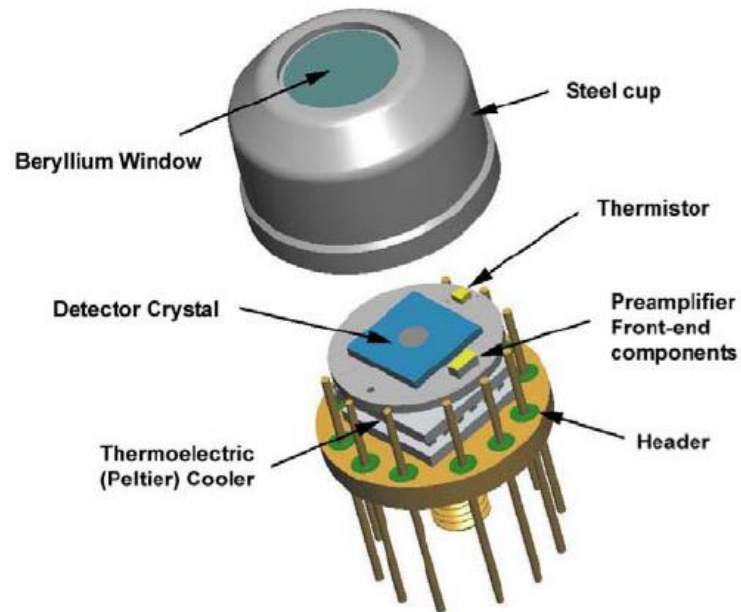
kaisijaltaan 0,2 mm:n reikä GaAs-detektorin aktiivisen alueen kohdalle, jonka halkaisija on 0,3 mm. Katseluikkunan reikään tehdään pieni viiste, joka tulee määräämään osaltaan detektorin katselukulman. Itse detektoripiiri kiinnitetään tavallisuudesta poiketen nurinpäin.



Kuva 35. Röntgendetektorin katselukulma /37/

Jokaisella röntgendetektorilla on oma esivahvistimensa, joista lennon aikana käytetään vain yhtä kerrallaan. Kehitysvaiheessa röntgendetektorien pääkortille jätetään varaus neljännen röntgendetektorin lisäämisestä myös puolipyramidin malliseen instrumenttiin, mikäli se kehitystyön edetessä havaittaisiin tarpeelliseksi. Tämä edellyttäisi kortille yhden liittimen lisäämistä sekä mekaanisia muutoksia kotelointiin. Toistaiseksi ei kuitenkaan ole oletettavissa, että Half Pyramid -instrumentti tulisi tarvitsemaan neljännen röntgendetektorin.

Ulkoisilta dimensioiltaan röntgendetektorit tulevat todennäköisesti pysymään samana kuin OIA:n tuotannossa olevat röntgendetektorit. Röntgendetektorin halkaisija tulee tällöin olemaan 13 mm, korkeus 17 mm mukaan lukien signaalin siirtoon käytetyt kullatut pinnit. Yhden röntgendetektorin massa tulee olemaan noin 4 grammaa. /39, s. 21–22./ Kuvassa 36 on esitetty röntgendetektorin räjäytyskuva.



Kuva 36. Röntgendetektorin kokoonpano /39, s. 22/

3.4 Instrumenttikotelon materiaalivalinta

Tyypillisesti avaruusinstrumentit on koteloitu alumiinista, teräksestä tai titaanista valmistettuihin instrumenttikoteloihin. SIXS-instrumentin kotelomateriaaliksi on valittu alumiini, koska alumiineilla on tyypillisesti korkea vahvuus suhteessa niiden massaan. Myös hyvä koneistettavuus vaikuttaa huomattavasti haastavan muodon materiaalivalintaan. Taulukossa 7 on esitetty tyypillisiä avaruusinstrumenteissa käytettyjä materiaaleja sekä niiden vahvuuksia ja heikkouksia.

Taulukko 7. Tyypillisten avaruusinstrumenteissa käytettyjen materiaalien vahvuudet ja heikkoudet /30, s. 436/

Material	Advantages	Disadvantages
Aluminum	<ul style="list-style-type: none"> • High strength vs. weight • Ductile • Easy to machine 	<ul style="list-style-type: none"> • Relatively low strength vs. volume • Low hardness • High coefficient of thermal expansion
Steel	<ul style="list-style-type: none"> • High strength • Wide range of strength, hardness, and ductility obtained by treatment 	<ul style="list-style-type: none"> • Not efficient for stability (high density) • Most are hard to machine • Magnetic
Heat-resistant	<ul style="list-style-type: none"> • High strength vs. volume • Strength retained at high temperatures • Ductile 	<ul style="list-style-type: none"> • Not efficient for stability (high density) • Not as hard as some steels
Magnesium	<ul style="list-style-type: none"> • Low density—very efficient for stability 	<ul style="list-style-type: none"> • Susceptible to corrosion • Low strength vs. volume
Titanium	<ul style="list-style-type: none"> • High strength vs. weight • Low coefficient of thermal expansion 	<ul style="list-style-type: none"> • Hard to machine • Poor fracture toughness if solution treated and aged
Beryllium	<ul style="list-style-type: none"> • High stiffness vs. density 	<ul style="list-style-type: none"> • Low ductility & fracture toughness • Low short transverse properties • Toxic
Composite	<ul style="list-style-type: none"> • Can be tailored for high stiffness, high strength, and extremely low coefficient of thermal expansion 	<ul style="list-style-type: none"> • Costly; requires development program • Strength depends on workmanship; requires individual proof testing

Alumiinien luokitukseen on olemassa erilaisia järjestelmiä joista ehkä tunnetuimmat ovat kansainvälinen ISO (Eng: International Organization for Standardization, Fra: Organisation Internationale de Normalisation) standardin mukainen luokitus sekä yhdysvaltalaisen Aluminum Associationin mukainen luokitus. Tässä insinööriyössä käytetään lähinnä yhdysvaltalaista järjestelmää, sillä se on aihetta käsittelevässä lähdekirjallisuudessa yleisemmin käytetty järjestelmä.

Suurin osa materiaalivalmistajista on hyväksynyt Aluminum Associationin nelinumeroisen järjestelmän alumiiniseoksille sekä kolmenumeroisen järjestelmän valettaville alumiineille. Taulukko 8:n mukaan ensimmäinen numero neljästä ilmaisee materiaalityypin. Toinen numero ilmaisee muutokset seosaineessa, jos niitä on muutettu pääaineesta poikkeaviksi. Jos toiseksi numeroksi on merkitty nolla "0", ei muutoksia pääseosaineeseen ole tehty. Jos muutoksia on tehty, ilmaistaan tämä numeroilla 1–9. Uudet, markkinoille vasta tulossa olevat alumiinilaadut merkitään ryhmänumeroilla 1xxx–9xxx, missä "x" korvataan numerolla seoksen vakiinnutettuaan asemansa. /38./

Taulukko 8. Alumiinien jaottelu Aluminum Associationin mukaan /38/

1xxx	Vähintään 99 % puhtaat alumiinit
2xxx	Seostettu pääasiassa kuparilla, lisää lujuutta mutta heikentää korroosionkestävyyttä
3xxx	Seostettu pääasiassa magnesiumilla lujuuden muokkaamiseksi
4xxx	Seostettu pääasiassa piillä sulamispisteen laskemiseksi ja nestemäisyyden lisäämiseksi valua varten
5xxx	Seostettu pääasiassa magnesiumilla jotta saadaan muokattava luja seos
6xxx	Seostettu pääasiassa magnesiumilla ja piillä jotta saadaan muokatava luja seos
7xxx	Seostettu pääasiassa sinkillä jotta saadaan korkealujuuksinen seos
8xxx	Indikoi ryhmää, joka on seostettu jollain muulla aineella kuin edellämainituilla
9xxx	Ryhmää ei ole vielä käytetty, mutta se on varattu tarvetta varten

Alumiinin lujuutta voidaan kasvattaa lämpökäsittelyllä. Lämpökäsittelyyn on olemassa useita menetelmiä. Aluminum Associationin järjestelmässä käytetty menetelmä merkitään alumiinilaadun loppuun kirjaimella ja numerolla.

Avaruuskäytössä tärkeää on materiaalin keveys ja kestävyys sekä helppo koneistettavuus. Alumiineista sopivia ovat esimerkiksi alumiini-piiseokset kuten 6061 ja 6082. Alumiini-kupariseos 2014 on kovempi, mutta se on herkempi korroosiolle lukuun ottamatta Alclad-levyä, joka on laminoitu Duralumiinista. /18, s. 62./ Myös seosta 7075-T6 on käytetty aiemmin avaruusinstrumenteissa /20, s. 260/.

Jos SIXS:n instrumenttikotelo koneistetaan, materiaaliksi valitaan todennäköisesti 6061-T6 eli ISO AlMg1SiCu. 6061-T6-alumiinia käytetään yleisesti muun muassa lentokoneiden osissa, kameran linssien pidikkeissä ja jarrusatulan männissä. Sen yleisiä ominaisuuksia ovat hyvät liitosmahdollisuudet, helppo pinnoitettavuus sekä siinä yhdistyvät suuri lujuus, hyvä työstettävyys ja korkea korroosion kestävyys. Lisäksi sitä on helposti saatavilla. Materiaalin lämpökäsittelyssä (T6) seos on lämmitetty lähes sulamispisteesensä saakka jonka jälkeen se on vanhennuttu noin 160–177 celsiusasteen lämpötilassa ilman kylmätyöstöä. Vanhennuksessa materiaalista on tullut supersaturoituunutta. /40./ Taulukko 9 esittää 6061-T6-alumiinin ominaisuuksia.

Taulukko 9. Alumiinin 6061-T6 ominaisuudet /40/

6061-T6**Koostumus**

Komponentti:	%	Komponentti:	%	Komponentti:	%
Al	95,8 - 98,6	Mg	0,8 - 1,2	Zn	0,4 - 0,8
Cr	0,04 - 0,35	Mn	Max. 0,15	Muut/komp.	Max. 0,15
Cu	0,15 - 0,4	Si	0,4 - 0,8	Muut/yht.	Max. 0,25
Fe	Max. 0,7	Ti	Max. 0,15		

Fysikaaliset ominaisuudet:	
Tiheys	2,7 g/cc
Mekaaniset ominaisuudet:	
Kovuus, Brinell	95
Korkein vetolujuus	310 MPa
Myötöraja	276 MPa
Kimmokerroin E	68,9 GPa
Poissonin kerroin	0,33
Väsymislujuus	96,5 MPa
Liukukerroin G	26 GPa
Lämpöominaisuudet:	
Sulamispiste	582 - 652 °C
Vanhennuslämpötila	160 - 177 °C

4 VÄRÄHTELYMITTAUKSET JA LUJUUSANALYYSI

FEM-analyysin instrumentille tekee Aboa Space Research Oy (ASRO).

Värähtelymittaukset instrumentille voidaan tehdä satunnaisherätteellä mekaanisella mittalaitteistolla (Random excitation vibration test) tai akustisessa kammiossa. Mekaaniset värähtelymittaukset ovat kuitenkin huomattavasti enemmän käytetty menetelmä. Menetelmässä herätelähde, tyypillisesti pietsokide on kiinnitetty dynaamisesti reagoivaan massaan josta värähtely johdetaan tärinäalustalle. Yleensä värähtelymittauksessa joko yksittäistä instrumenttia tai koko avaruusaluusta täristetään kaksi minuuttia kunkin kohtisuoran akselin suunnassa. /18, 51–53./

Värähtelymittaukset SIXS-instrumentille suoritetaan Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen VTT:n laboratoriossa Espoossa mekaanisella värähtelymittauksella.

Seuraavassa on esitelty avaruusalukseseen kohdistuvia voimia. Esimerkkinä on käytetty ESA:n Ariane 4 -kantorakettiin kohdistuneita voimia (kuva 37).



Kuva 37. Ensimmäisen Ariane 4 -kantoraketin laukaisu 15.6.1988 /7/

Kvasistaattiset voimat

Kvasistaattiset voimat eli näennäisstaattiset voimat (Quasi-static Loads) vaikuttavat samalla tasolla läpi koko avaruusaluksen. Ne muuttuvat ajan funktiona, mutta niiden taajuus on selvästi alle aluksen omien taajuuksien joten niillä ei ole suurta vaikutusta avaruusalukseseen kohdistuviin kiihtyvyyksiin. Suurimmat kvasistaattiset voimat esiintyvät yleensä silloin kun aluksen päämoottori sammutetaan. Juuri ennen moottorin sammutusta työntövoima on vielä maksimaalinen, mutta polttoaineen massa on pienimmillään. Kiihtyvyy-

det ovat tämän takia suurimmillaan. /20, s. 248./ Taulukko 10 esittää Arianne 4 -avaruusaluksen kohdistuneet kvasistaattiset voimat.

Taulukko 10. Arianne 4 -avaruusalukseen vaikuttaneet kvasistaattiset voimat /20, s. 248/

	Kiihtyvyys (g)	
	Pitkittäissuuntainen	Sivuttaissuuntainen
Suurin dynaaminen paine	-3.0	± 1.5
Juuri ennen moottorin sammutusta	-5.5	± 1.0
Moottorin sammutuksen aikana	+2.5	± 1.0

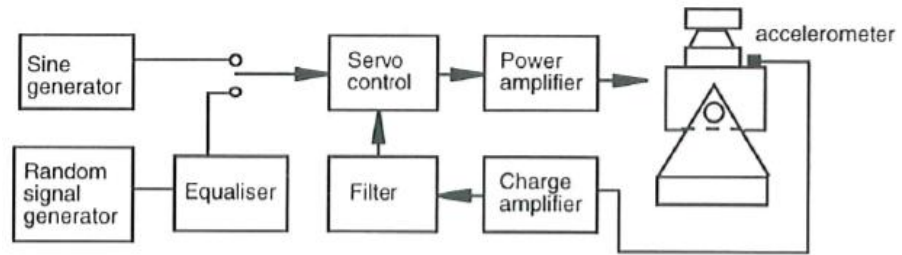
(Huom. miinusmerkki pitkittäissuunnan edessä kuvaa kokoonpuristumaa)

Sinivärähtelyt

Sinivärähtelyt (Sine vibration) ovat värähtelyjä, joita voidaan mitata edellä kuvatun kaltaisella tärinäpöydällä. Tärinätestissä pöytää ryhdytään täristämään 5 Hz:n taajuudella ja taajuutta nostetaan hitaasti 2 oktaavia minuutissa. Tyypillisesti alusta tai yksittäistä instrumenttia täristetään kahden minuutin ajan jokaista akselia kohden. /18, s. 51./ Taajuus nostetaan testin aikana 100 Hz:iin /20, s. 249–250/. Matalia taajuuksia käytettäessä instrumentissa mahdollisesti esiintyvät resonanssit saadaan esille. Käytännössä instrumenteissa ei sallita minkäänlaisten resonanssien esiintymistä. Suurimmat rakenteelliset ongelmat kohdistuvat instrumentteihin tyypillisesti vasta suurilla taajuuksilla, minkä takia avaruusinstrumentit testataan aina satunnaisvärähtelytestillä kasvattamalla taajuutta 2 kHz:iin saakka.

Sound and vibration -lehden artikkelissa maaliskuussa 2001 on esitelty NASA:n Deep Space 1 -avaruusaluksen värähtelymittauksia, joissa satunnaisvärähtelymittaukset on kuitenkin tehty vain 1600 Hz:n taajuuteen saakka /41, s. 1–2/.

SIXS-instrumentti testataan sekä matalilla että korkeilla taajuuksilla välillä 5 Hz–2 kHz. Kuvassa 38 on esitetty laitteisto, jolla sini- ja satunnaistärinätestit suoritetaan.



Kuva 38. Sini- ja satunnaistärinä testijärjestely /18, s.52/

5 YHTEENVETO

Tässä työssä on käsitelty Merkuriukseen lähetettävän SIXS-avaruusinstrumentin mekaniikkasuunnittelua osana Euroopan avaruusjärjestön ESA:n ja Japanin avaruusjärjestön JAXA:n BepiColombo-yhteistyöhanketta. Työ on tehty Oxford Instruments Analytical Oy:lle. Instrumentti lähetetään Merkuriuksen kiertoradalle vuonna 2013. Matka Merkuriukseen tulee kestämään kuusi vuotta. Mittaustuloksia aletaan saada vuonna 2019 ja ne tulevat jatkumaan vuoden 2020 syyskuuhun asti. Lisäksi varataan mahdollisuus jatkaa mittauksia yhdellä vuodella.

Työn aikana saatiin kehitettyä prototyyppi instrumenttiin liitettävästä partikkelidetektorista, jolla suoritettiin ensimmäiset testimittaukset. Partikkelidektorin toiminta ja geometria on optimoitu mittaamaan korkeaenergisää partikkeleja sekä detektoriin tulevaa säteilyä. Detektori tulee katsomaan yhtäaikaaisesti viiteen suuntaan, jotta Merkuriuksen magneettikentän vaikutuksesta kaarevia liikeratoja pitkin kulkevat partikkelit pystytään havaitsemaan. Partikkelidetektor rakentuu CsI-tuiketeestä, joka on kiinnitetty valodiodin päälle. Kidettä ympäröi kaksi alumiinioksidista valmistettua häkkiä, joiden sisemmän sisäpinnolle on kiinnitetty yhteensä viisi GaAs-detektoria. Detektorikokoonpano kiinnitetään alumiinista valmistetun, puolipallon muotoisen kollimaattorirungon sisään. Runkoon on työstetty kutakin GaAs-detektoria vastaan kohtisuorassa oleva kartion muotoinen kollimaattorirakenne. Rakenne koostuu pienistä portaista, joiden päälle on liimattu alumiinista ja wolframista valmistettuja renkaita, joiden tarkoituksena on rajata detektorin katselukulmaa avaruuteen.

Tätä insinööriötä viimeisteltäessä instrumenttiin liitettävien kolmen röntgendetektorin kehitystyö on kesken, mutta näkemys lopullisesta tuotteesta on olemassa. Detektorit pohjautuvat OIA:n tuotannossa oleviin röntgendektoreihin, jotka optimoidaan sovellusta varten komponenttien ja geometrian osalta. Kullakin röntgendetektorilla tulee olemaan noin sadan asteen katse-
lukulma avaruuteen, jolloin vähintään yhdellä detektorilla on kerrallaan hyvä näkyvyys kohti aurinkoa. Tehonkulutuksen minimoimiseksi detektoreita käytetään aikaohjatusti yksi kerrallaan. SIXS-instrumentin röntgendektoreissa käytetään GaAs-detektoripiirejä detektoinnin suorittamiseen.

Instrumenttikotelo, jonka sisään tarvittava elektroniikka asennetaan, saatiin kehitettyä siihen vaiheeseen, että prototyyppi siitä voitaisiin teettää. Työn alkaessa jouduttiin kehittämään kahta erilaista kotelotyyppiä, koska satelliitin valmistajaa ja siten myös SIXS-instrumentin sijoitusta aurinkoon nähden ei oltu vielä päätetty. Satelliitin toimittajan varmistuttua syksyllä 2006 lopetettiin toisen kotelotyyppin kehittäminen ja keskityttiin puolipyramidin muotoisen Half Pyramid -mallin kehittämiseen. Kotelon valmistusmenetelmänä tullaan käyttämään todennäköisesti lastuavaa työstöä yhdestä kappaleesta. Materiaalina koneistetulle kappaleelle käytetään 6061-T6-alumiinia. Lopullisen instrumenttikotelon koon tulee määrittämään tarvittavan elektroniikan vaatima tila ja näin ollen koteloa ei vielä ole teetetty. Tätä insinööriötä viimeisteltäessä näyttää siltä, että kotelon dimensioita joudutaan hieman kasvattamaan, jotta sekä röntgendetektorit esivahvistimiseen ja muu tarvittava elektroniikka saadaan sovitettua kotelon sisään.

Instrumentin lämpöteknisen suunnittelun tekee Ideal Engineering Oy. Instrumentti sijoitetaan satelliitin ulkopuolelle ja se eristetään termisesti satelliitista. Instrumentin takapinnalle, eli puolelle joka katsoo poispäin auringosta, tullaan tekemään radiaattoripinnoitus, jolla syntyvää lämpöä siirretään instrumentista pois. Radiaattorina tullaan käyttämään OSR-pinnoitusta. Muiden instrumentin tahkojen pinnalle asennetaan 10 mm:n vahvuinen kerros MLI-pinnoitetta korkean lämpötilan aiheuttamien haittojen ehkäisemiseksi. Instrumentin partikkelidetektorit ja elektroniikka pystyvät toimimaan lämpötila-alueella $-20\text{ °C} \dots +30\text{ °C}$. Röntgendetektorit jäähdytetään toimintalämpötilaansa 0:n celsiusasteeseen omilla peltier-elementeillä.

Värähtelymittaukset instrumentille suoritetaan, kun ensimmäinen kokonainen prototyyppi saadaan valmiiksi. Mittaukset tullaan suorittamaan alkaen matalista 5 Hz:n taajuuksista taajuutta asteittain nostamalla aina 2kHz:iin saakka. Oxford Instruments Analytical Oy:ssä SIXS-instrumentin tuotekehitysprojekti tulee jatkumaan vuoteen 2011 saakka, jolloin lentomalli ja sen varayksikkö toimitetaan Euroopan avaruusjärjestölle.

Tässä insinööriyössä esiteltyjen komponenttien lisäksi suunniteltiin useita erilaisia SIXS-instrumentin detektorien kehitystyössä tarvittavia vakuukammioita mittaus- ja testikäyttöön. Kammioilla pystytään detektorit saattamaan samanlaisiin tyhjiöolosuhteisiin, missä ne tulevat toimimaan Merkuriuksen kiertoradalla. Myös muutamia instrumentin kokoonpanoa helpottavia työkaluja suunniteltiin ja toteutettiin. Lisäksi työhön on kuulunut useiden työraporttien kirjoittaminen ja esitysten pitäminen SIXS-projektia koordinoivalle Ilmatieteenlaitokselle sekä Euroopan avaruusjärjestölle.

SIXS-instrumentin kehitystyö tulee jatkumaan kaikkien osa-alueiden osalta. Mekaniikkasuunnittelun kannalta tärkeimmät lähitulevaisuuden kehityskohdeet ovat röntgendetektorien geometrian viimeistely, elektroniikan vaatiman tilan sovittaminen instrumenttikoteloon sekä detektorien ja elektroniikan kiinnitysmenetelmien ratkaiseminen instrumenttikoteloon. Lisäksi tullaan keskittymään yksityiskohtiin, joilla instrumentti liitetään sekä mekaanisesti että sähköisesti satelliittiin.

VIITELUETTELO

- /1/ Japan Space Exploration Agency, JAXA. *BepiColombo: Info for Public*. [viitattu 25.12.2006]. Saatavissa: http://www.stp.isas.jaxa.jp/mercury/p_sci.html.
- /2/ Astrium BC-ASD-HO-00003, *Presentation to SWG-4. BepiColombo -Mission and Spacecraft Design Overview*. ESTEC. 29.11.2006.
- /3/ Meyer, Rudolf X., *Elements of space technology*. California: Academic Press. 1999.
- /4/ European Space Agency, ESA. *BepiColombo project homepage*. [verkkotietokanta]. [viitattu 10.11.2006]. Saatavissa: <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=30>.
- /5/ EADS Astrium, *Kate: Speaks with the Moon*. [verkkodokumentti]. 22.9.2003. [viitattu 25.12.2006]. Saatavissa: <http://www.astrium.eads.net/presscenter/archives/2003/102>.
- /6/ Oxford Instruments Analytical Oy. *Space kick-off -esitys*. 9.9.2005.
- /7/ Wikipedia Foundation, Inc. *Wikipedia The Free Encyclopedia* [verkkotietosanakirja]. [viitattu 28.1.2007]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/>.
- /8/ Maddison, Brian - Pearson, Jim - Dunkin, Sarah. *BC-CON-MXS-PL-001, rev 1. BepiColombo - MIXS, Scientific and technological plan*. ESA. 15.5.2004.
- /9/ Maddison, Brian. *BC-CON-MXS-PL-004, rev 2. BepiColombo - MIXS, Engineering plan*. ESA. 6.6.2004.
- /10/ European Space Agency, ESA. *BC-EST-MN-03202, BepiColombo - Minutes of Meeting*. ESA. 31.8.2006.
- /11/ Mälkki, Anssi - Huovelin, Juhani - Andersson, Hans. *BC-UH-SXS-PL-002, rev 3. BepiColombo – SIXS, EID-B, Experiment Interface Document – Part B*. ESA. 4.8.2005.
- /12/ Senior Research Engineer Hans Andersson. Haastattelu 24.1.2007. Oxford Instruments Analytical Oy.

- /13/ Columbia University Press. *The Columbia Electronic Encyclopedia, 6th ed. Particle detector*. [verkkotietosanakirja]. 2007. [viitattu 14.1.2007]. Saatavissa: <http://www.infoplease.com/ce6/sci/A0837745.html>.
- /14/ Anttila, Matti. *BC-SXS-PL-003, rev 5. BepiColombo SIXS – Engineering plan*. ESA. 11.10.2006
- /15/ Puusaari, Erkki. *XRF Theory*. Luento 10.–11.1.2007. Espoo.
- /16/ Thermoelectric Peltier LLC. *Peltier Device Information Directory*. [verkkotietokanta]. [viitattu 28.2.2007]. Saatavissa <http://www.peltier-info.com/info.html>.
- /17/ *Spacecraft thermal control handbook*. Editor David G. Gilmore. California: The aero-space Corporation. 2nd ed. 2002.
- /18/ Cruise, A.M. et al., *Principles of Space Instrument Design*. Cambridge: The University of Cambridge. 1998.
- /19/ Nevanlinna, Heikki ym. *Auringon aktiivisuussyklit, avaruusilmaston ja ilmakehän lämpötilan hitaat muutokset*. [verkkodokumentti]. [viitattu 28.2.2007]. Joensuun yliopisto, Ilmatieteen laitos. Saatavissa: http://spaceweb.oulu.fi/geofys03/pdf/No25_gfp03_availm.pdf.
- /20/ *Spacecraft Systems Engineering*. Edited by Fortescue, P. - Stark, J. - Swinerd, G., Hertfordshire: Astrium Limited. 3rd ed. 2003.
- /21/ National Aeronautics and Space Administration, NASA. *Outgassing Data for Selecting Spacecraft Materials Online*. [verkkotietokanta]. Päivitetty 30.11.2006. [viitattu 18.1.2007]. Saatavissa: <http://outgassing.nasa.gov>.
- /22/ Bock, R.K. - Vasilescu, A. *The Particle Detector BriefBook*. Päivitetty 9.8.1998. [viitattu 20.1.2007]. Saatavissa: <http://rkb.home.cern.ch/rkb/titleD.html>.
- /23/ Alanko, Seppo - Ahonen Anne-Maija. *761117P Säteilysfysiikka*. [luento-moniste]. [viitattu 25.1.2007]. Oulun yliopisto, Fysikaalisten tieteiden laitos. Kevät 2005. Saatavissa: http://physics.oulu.fi/fysiikka/oj/761117P/2005/00_00.pdf.
- /24/ Bates, R.L. et al., *Recent results on GaAs detectors*, päivitetty 28.8.1997 . [viitattu 5.2.2007]. Saatavissa: <http://ppewww.physics.gla.ac.uk/preprints/1997/05/psd1/node2.html>.

- /25/ Ihalainen, Erkki ym., *Valmistustekniikka*. Espoo: Otatieto. 1985.
- /26/ Oksa, Marko, *Alumiinioksidin sintraus*. Teknikkotyö. Helsingin teknillinen oppilaitos. Kone- ja metallitekniikan opintolinja. Helsinki. 1995.
- /27/ CeramTec AG. *Ceramic Substrates for the Electronics Industry*. [verkkosite]. [viitattu 10.2.2007]. Saatavissa: <http://www2.ceramtec.com/PDF/Electronic/C11.pdf>.
- /28/ Anttila, Matti. *BC-UH-SXS-PL-003, rev 5. BepiColombo - SIXS, Engineering plan*. ESA. 11.10.2006.
- /29/ Fontell, Armas ym., *Tyhjöttekniikka*. Helsinki: Insinööritieto Oy. 1986.
- /30/ *Space mission analysis and design*. Edited by Larson, Wiley J. - Wertz, James R., California: Microcosm, Inc. and Kluwer Academic Publishers. 2nd ed. 1992.
- /31/ Henkel. *Technical Process Bulletin, Alodine 1200S*. [tekninen tiedote]. [viitattu 20.2.2007]. Saatavissa: http://www.aerospace.henkel.com/Images/Datasheet_PDF/hst_alodine1200s.pdf.
- /32/ Army Research Laboratory, Weapons and Materials Research Directorate. *Military specification, Chemical conversion coatings on aluminum and aluminum alloys MIL-C-5541*. [tekninen tiedote]. 30.11.1990. [viitattu 20.2.2007]. Saatavissa: <http://www.assistdocs.com>.
- /33/ Plansee Holding AG. *DENSIMET-INERMET-Tungsten alloys*. [verkkosite]. [viitattu 20.2.2007]. Saatavissa: http://www.plansee.com/hlw/lib/DENSIMET_INERMET_710DE.pdf.
- /34/ Airila, Mauri ym., *Koneenosien suunnittelu*. Juva: WSOY. 1995.
- /35/ Tribology-abc.com. *Maximum tightening torque to preload bolt*. [Verkkolaskuri]. [viitattu 15.2.2007]. Saatavissa: <http://www.tribology-abc.com/>.
- /36/ Würth Oy. *Kiristysmomentti Nm M-kierre*. [Verkkodokumentti]. [viitattu 15.2.2007]. Saatavissa: http://www.wurth.fi/site/media/pdf/taulukkoja/Terasruuvit_Minimimurtolujuus.pdf.
- /37/ Roos, Matias. *BepiColombo SIXS Sensor Unit Mechanical Design – Presentation for Progress Meeting*. ESA. 22.01.2007.

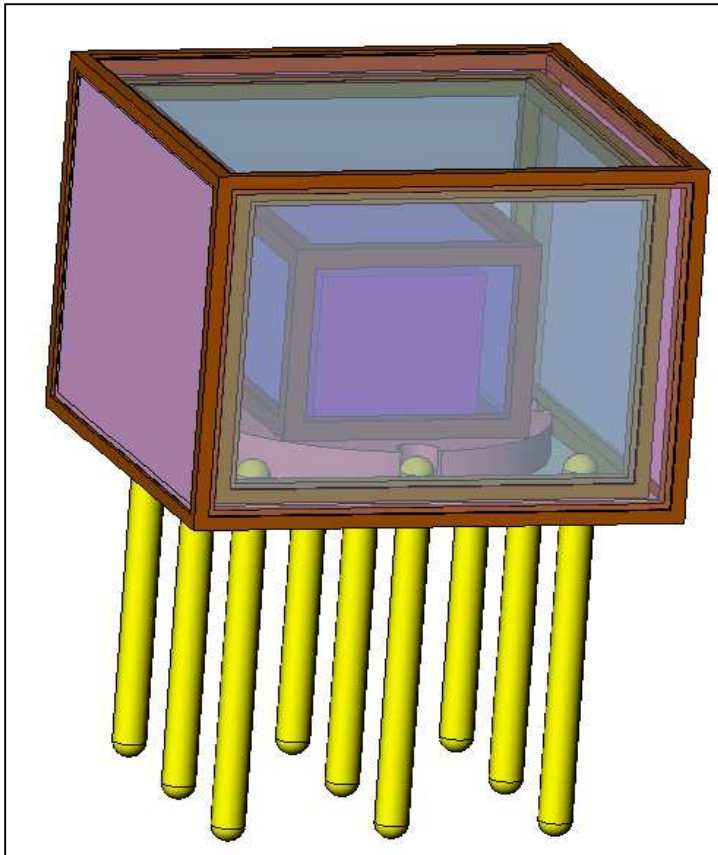
- /38/ BikePro.com. *Metals – Aluminum* [verkkodokumentti]. [viitattu 10.2.2007]. Saatavissa: <http://www.bikepro.com/products/metals/alum.html>.
- /39/ Huovelin, Juhani. *BC-UH-SXS-PL-001, rev 1. BepiColombo – SIXS, Scientific and technological plan*. ESA. 9.8.2004.
- /40/ Automation Creations, Inc. *MatWeb, material property data*. [online-tietokanta]. [viitattu 10.2.2007]. Saatavissa: <http://www.matweb.com>.
- /41/ Chang, Kumg y., *Deep Space 1 Spacecraft Vibration Qualification Testing*. [verkkolehti]. Sound and vibration / March 2001. [viitattu 19.2.2007]. Saatavissa: <http://www.mpihome.com/pdf/jpl.pdf>.

LIITELUETTELO

- LIITE 1. Partikkelidetektorin versiohistoria
- LIITE 2. Hamamatsu S5106 -valiodi
- LIITE 3. Partikkelidetektorin kokoonpano-ohje
- LIITE 4. Kollimaattorirungon työpiirustus

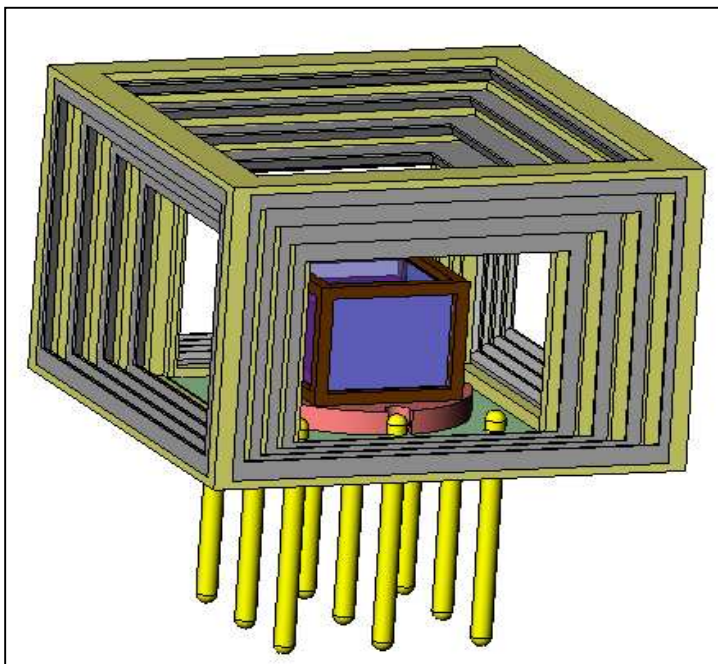
BepiColombo - SIXS. Partikkelidetektorin versiohistoria pääpiirteittäin

22.12.2005



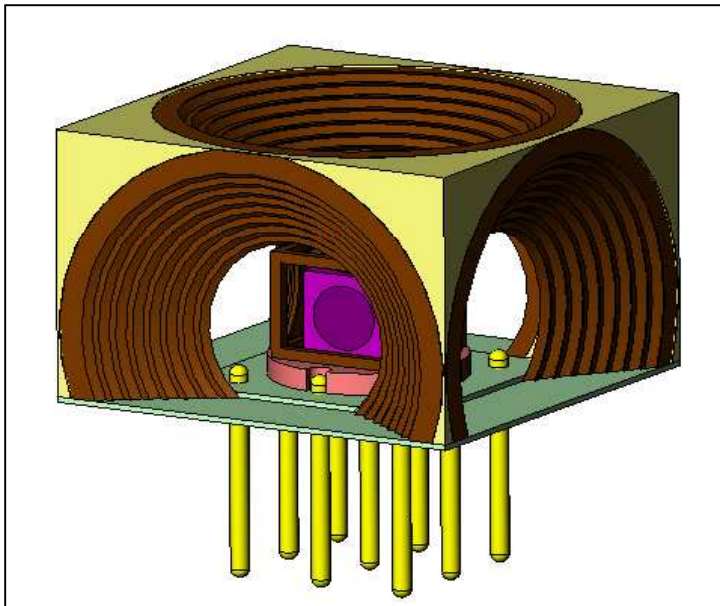
Ensimmäinen malli kahdella ohuella kehällä, joihin ohuet kalvot on kiinnitetty. Keskellä HgI_2 -tukekide asennettuna kahden keraamisen substraatin päälle (kuvassa punainen ja vihreä). Mallissa yhdeksän kultapinnoitettua ohutta pinniä signaalin siirtoa varten.

28.12.2005



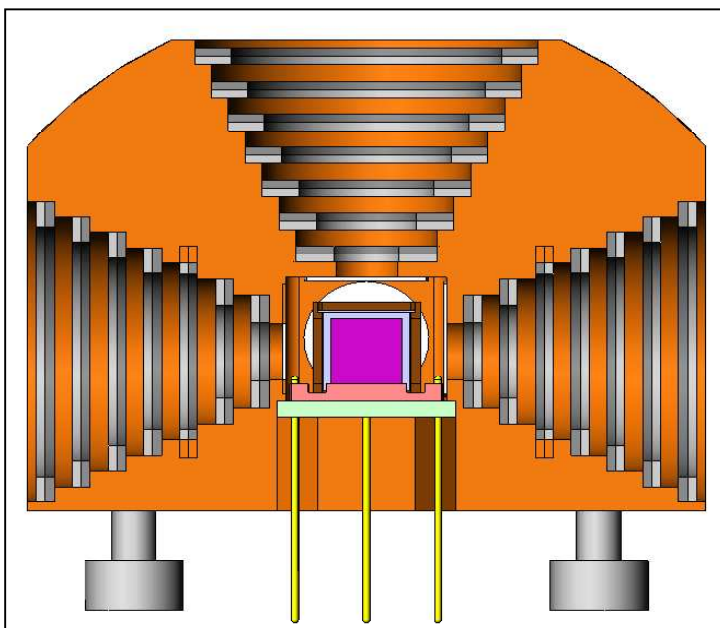
Toinen mallinnus, jossa tukekiteen ympärille oli luotu suorakaiteenmuotoinen kollimaattorirakene. Mallissa ongelmana oli keltaisella kuvatus kollimaattorirungon porrasmuodon nurkkapisteidän ohut seinämävahvuus, kun haluttu katselukulma oli määritetty.

16.1.2006



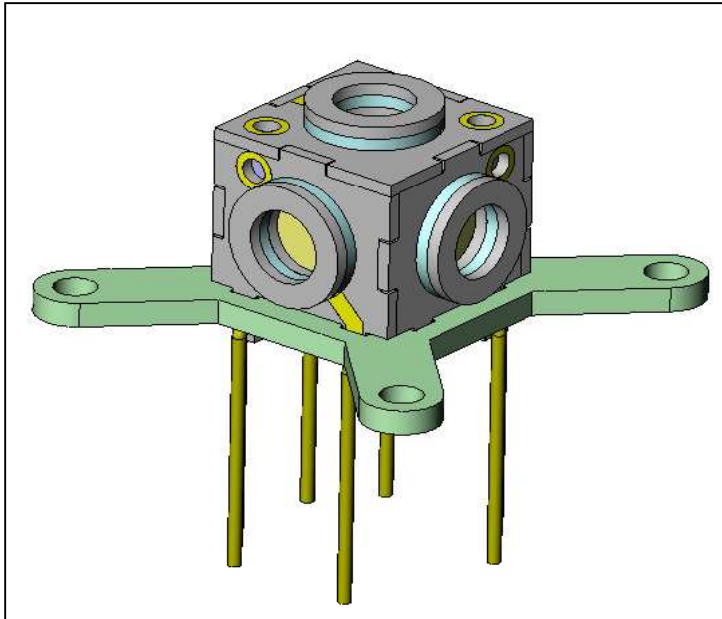
Kolmannessa versiossa kollimaattorimuoto muutettiin pyöreäksi.

20.2.2006



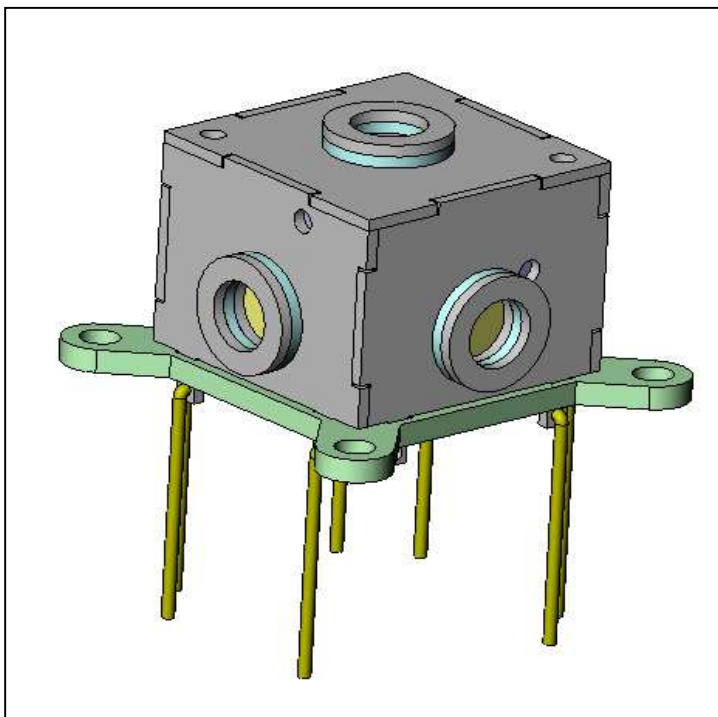
Nejännessä mallissa kollimaattorirunko muutettiin pallomaiseksi ja kollimointia varten mallinnettiin Al-W-renkaat. Tuikekide asennettuna kahden keraamilevyn päälle ja ympäröity yhdellä kehärakenteella.

28.9.2006



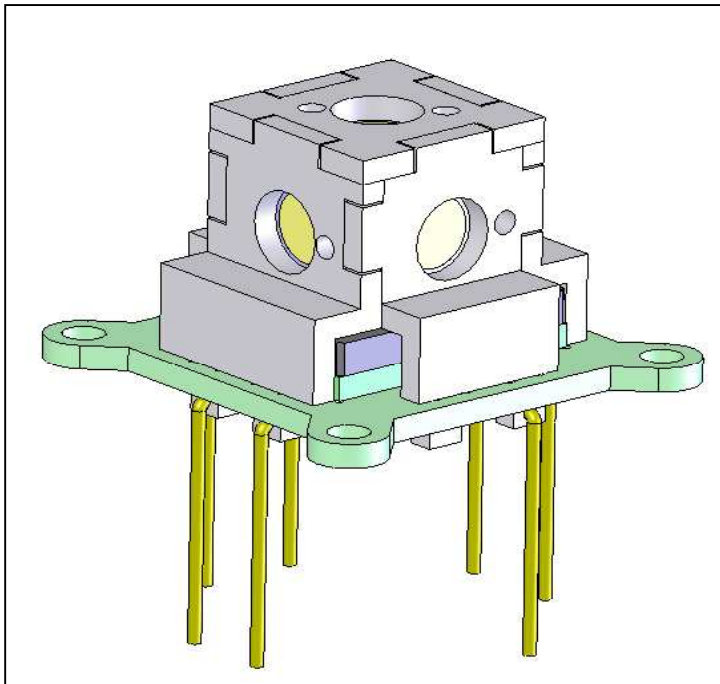
Viidennessä mallissa tuike-
kide sijoitettiin valodiodin
päälle. Tarkoituksena oli
käyttää pelkkää valodiodin
aktiivista aluetta, koska pa-
kattu valodiode nähtiin fyy-
sisiltä mitoiltaan liian suu-
reksi. Viimeisimmät kolli-
maattorirengaat liimattuna nyt
suoraan keraamihäkin
pintaan.

16.10.2006



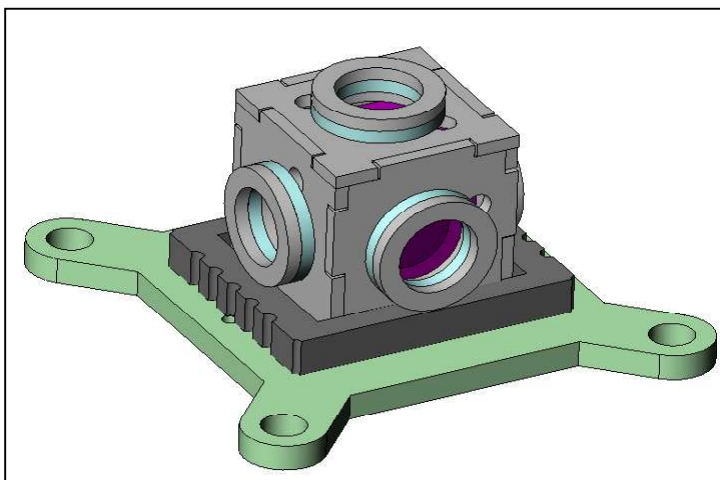
Kuudennessa mallissa
keraamihäkkiä jouduttiin
kasvattamaan, sillä kävi
ilmi, että valodioditoimittajilta
ei ollut saatavissa valo-
diodeja ilman kotelointia.

9.11.2006



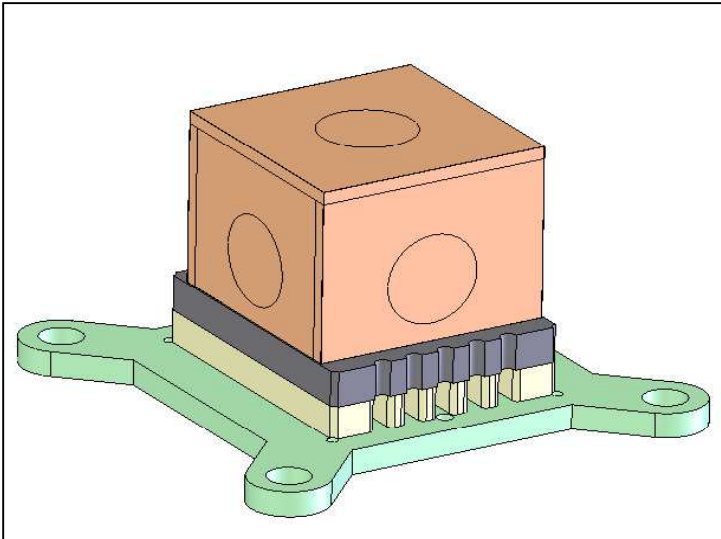
Seitsämännessä mallissa keraamihäkki suunniteltiin Z-kirjaimen malliseksi jotta GaAs-detektori saataisiin lähelle tuikekidettä ja pakattu valodiodi mahtuisi detektorirakenteen alle. Ongelmana oli kuitenkin keraamien työstäminen. Lasertyöstöllä se olisi kuitenkin onnistunut Suomen EMD Oy:n toimesta.

12.10.2006



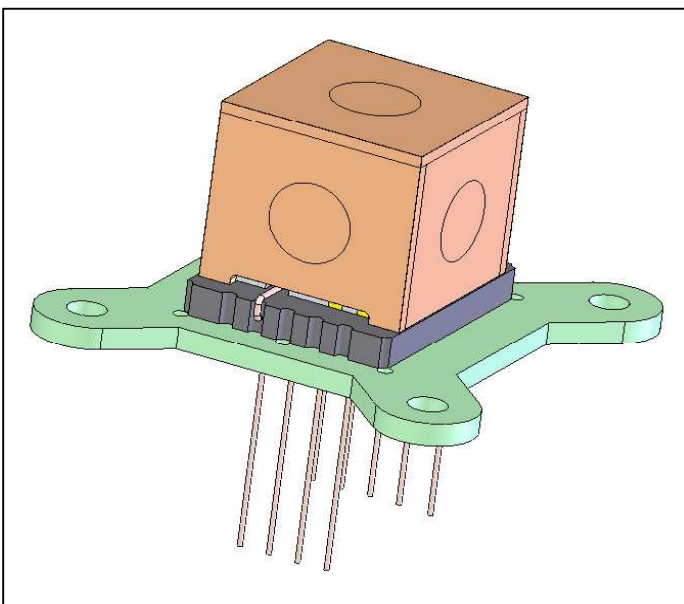
Kahdeksannessa mallissa keraamihäkki suunniteltiin upotettavaksi valodiodin sisään diodin aktiivisen alueen suojaksi asennetun epoksin tilalle.

21.11.2006

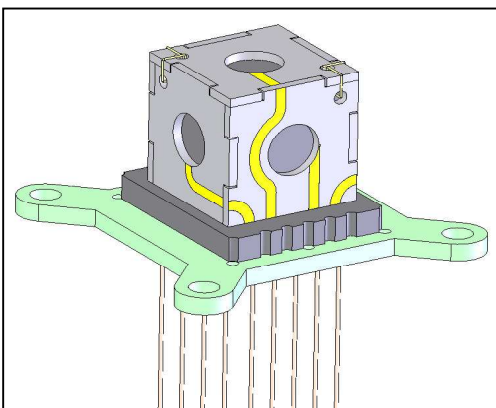


Yhdeksännessä vesiossa kaksi keraamihäkkiä kiinnitettiin suoraan valodiodin päälle ja tarvittavan korkeus- aseman määrittäminen kollimoinnin suhteen suunniteltiin toteutettavaksi erillisellä substraatilla valodiodin alle.

Viimeisin malli 15.11.2006



Viimeisemmässä mallissa keraamihäkki on liimattu suoraan valodiodin päälle. Korkeusasema kollimoinnin suhteen määritettiin kasvattamalla käytettävän tuiekiteen korkeutta 5 mm:stä 6,3 mm:iin.



Viimeisimmän mallin sisempi keraamihäkki, jonka pintaan on printattu kultaiset johtimet sähköisten liitännöiden tekemistä varten

Work Order

Document Name: SIXS Particle detector assembly		
Project: BepiColombo	Document Code:	Revision: Draft_14
Customer Number:	Serial Number:	MX Part Code:
Authorizing Engineer:		Date:
Author: M. Roos, H. Andersson, S. Tynnilä		Date: 28-Dec-06

Special instructions / Comments etc. Step 15 - 17 in clean room, class 1000 Glues used: Hysol EA 929 NA ECCOBOND 56 C Silver glue Torr-seal EPO-TEK H70E Scotch-weld 2216 B/A Sylgard 184 Silicone

Step	Work step description	Date/Initials	Notes
1	Wash collimator body, collimator rings and components for Al ₂ O ₃ cage in ultrasonic washer: 10 min, isopropyl alcohol.		
2	Take diamond coated kapton foil and place it on a clean surface. Glue 5 smallest (d = 9) densimet collimator rings with Hysol on the non diamond coated side of the foil. A small chamfer on the outer circle of the collimator ring must be outbound of the foil. Cure in oven, 125 °C 2h.		No glue allowed inside ring opening.
3	Glue 5 smallest Al -rings with Hysol over same diamond coated kapton foil so that we have a sandwich construction. Center rings together. Cure in oven, 125 °C 2h. Separate ring packages from each other and cut burrs away with a sharp knife.		No glue allowed inside ring opening.
4	Install collimator ring inside collimator body with Scotch-weld glue. Begin with the smallest ring packages assembled in step 3. Be sure that chamfer on the densimet ring is placed against aluminum collimator frame and that the diamond coated side faces outwards. After this, glue next size densimet ring (place chamfer against the collimator frame). After this, glue aluminum ring on top of previously glued densimet ring. Continue same way with the rest of the rings. Glue and cure one side at a time. 65 °C 1h.		No glue allowed inside ring opening.

Final Acceptance:	Date:
-------------------	-------

Work Order

Document Name: Particle detector assembly		
Project: BepiColombo	Document Code:	Revision: Draft_14
Author: M.Roos, H. Andersson, S. Tynnilä		Date: 28-Dec-06

Step	Work step description	Date/Initials	Notes
	Picture 1.		
5	Glue GaAs detectors on the internal side of Al ₂ O ₃ walls with EPO-TEK glue. Detectors must be centered to the hole under microscope. Cure 90 - 120 minutes. 80°C. See picture 2. Write detector number on drawing.		
6	Assemble first cage with Torr-seal glue. Install all of the pieces for the cage and cure with support 24h at room temperature. Pictures 2 and 3.		Use e.g. milling machine gauge pieces (parallels) as supports.
7	Connect two opposite inner corners of the GaAs detectors together with silver glue. Cure in oven for 1 - 2h 65°C. See picture 2.		
8	Use silver glue to connect printed pads on the outer corners of the cage and printed pads over edges. Cure at 125°C, 2h. Picture 4.		
9	Glue a d = 0.06 mm wire on the back side of the GaAs detector which is on the side 1. See pictures 2 and 3. Glue also 20 mm long wires on each printed pads. Use Eccobond 56 C, cure in oven for 1 - 2h 65°C See picture 5.		
10	Measure that all 3 of the printed pads and all 5 AC detectors are electrical connected		
11	Glue Al ₂ O ₃ pieces for second cage over the first cage. Be sure that the holes are centered. Grooves must be on side 1 and 3. Use Torr-seal, let dry in oven 1 - 2h 65°C. Picture 7.		Glue and cure one side at a time to avoid movement of the parts during curing.
12	Bond center areas of the detectors to the printed pads on the first Al ₂ O ₃ cage. Picture 6.		
13	Cut five 8,8 x 8,8 mm pieces from 7 μm aluminum coated kapton foil. Glue these pieces with Hysol on the outer walls of the outer Al ₂ O ₃ cage. Cure for 125°C 2h in oven. See picture 7. Cut burrs away with a surgical knife.		No glue allowed in openings.
14	Use Eccobond silver glue to connect edges of the kapton foils to each other and connect wire installed in step 9 to foils with Eccobond. Cure 1 - 2 h, 65°C.		
15	Measure and write down scintillator dimensions with microscope.		In clean room.

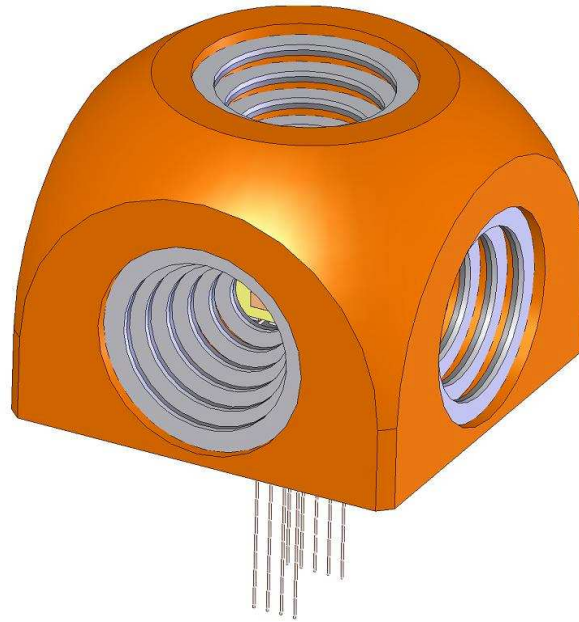
Work Order

Document Name: Particle detector assembly		
Project: BepiColombo	Document Code:	Revision: Draft_14
Author: M.Roos, H. Andersson, S. Tynnilä		Date: 28-Dec-06

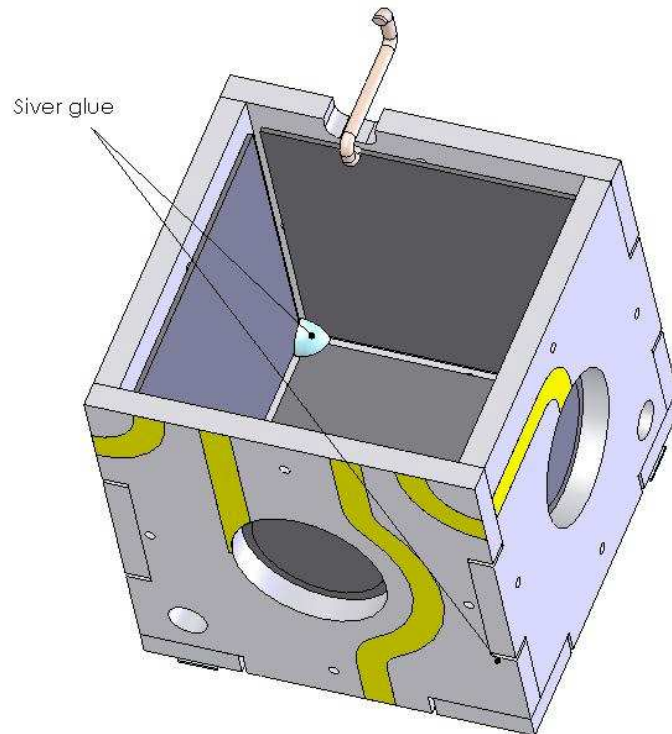
Step	Work step description	Date/Initials	Notes
16	Glue scintillator on the topside of Hamamatsu photodiode with silicone in clean room. Cube must be centered under microscope. Let dry in room temperature for 24h. See picture 8.		In clean room.
17	Glue cage assembly on the photodiode-scintillator assembly. Use microscope to center cage assembly. Side 1 of the cage must be on the cathode side of the photodiode. Cathode side is the side with one longer solder pad. See picture 8. Use Torr-seal, let dry 1-2h, 65°C.		In clean room.
18	Cut wires installed in step 9 and solder to pads on photodiode package.		
19	Solder wire installed in step 9 to the photodiode. The wire should be connected to the second pad counting from the left side. Picture 10.		
20	Glue photodiode with scintillator and cage package on the cross plate. Use holes for centering. Torr-seal 1-2h, 65°C. Picture 9.		
21	Glue thermistor on the photodiode package edge as shown in picture 10. Use Eccobond and sandwich a 0,006 mm wire between thermistor and photodiode package.		
22	Solder thermistor wire to photodiode package pad. Picture 10.		
23	Solder pads of photodiode package to pads on cross-plate.		
24	Install cage assembly inside collimator body with M1.6 x 6 A4 screws (x4) and teflon washers. Center cage assembly in the middle of all collimator holes. Tighten screws gently. Tightening torque 0,07 Nm. Stake with Scotch-weld.		

Work Order

Document Name: Particle detector assembly		
Project: BepiColombo	Document Code:	Revision: Draft_14
Author: M.Roos, H. Andersson, S. Tynnilä		Date: 28-Dec-06



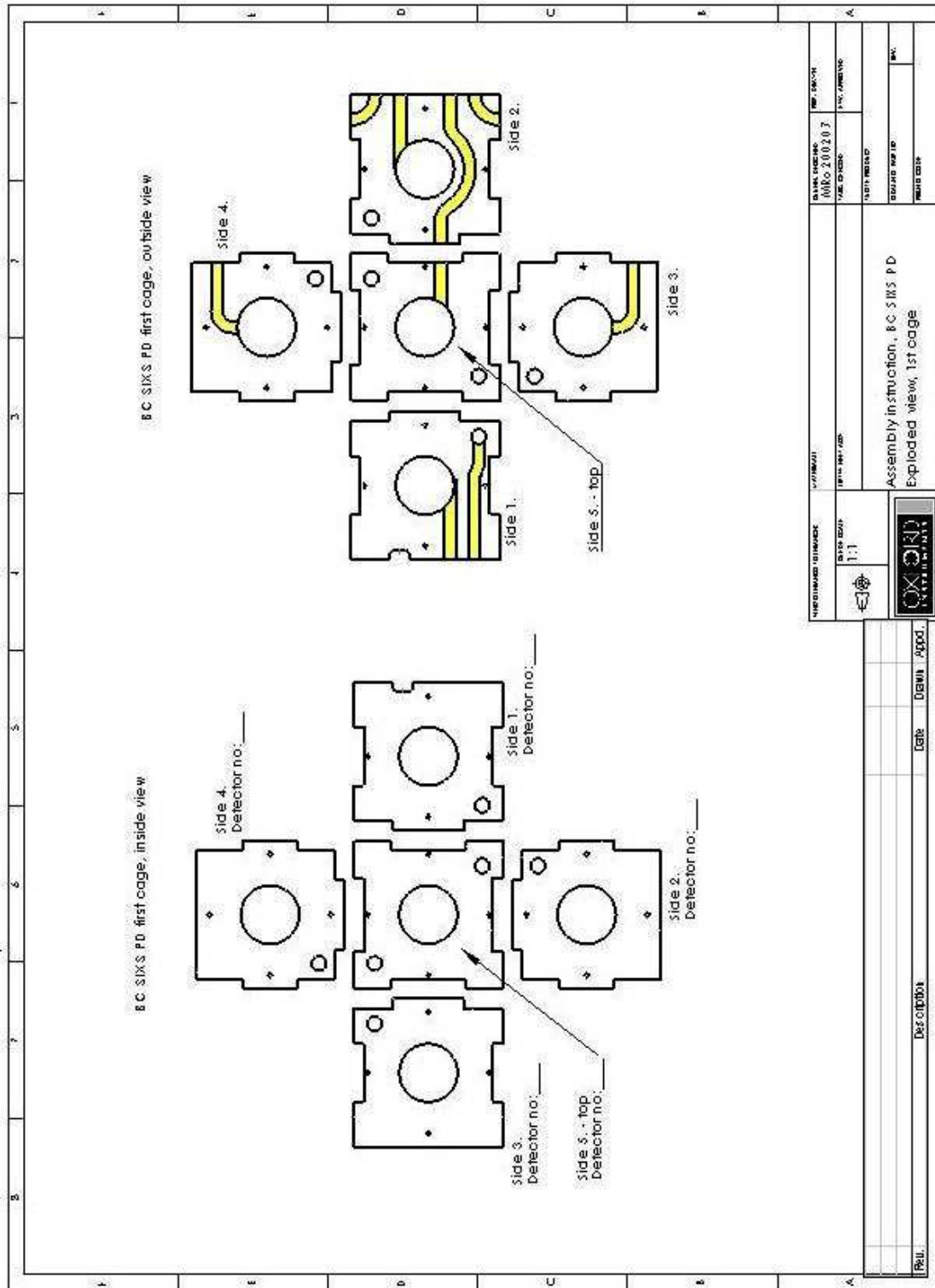
Picture 1 Collimator ring packages



Picture 2 First Al₂O₃ cage with GaAs detectors connected together with silver glue and wire attached

Work Order

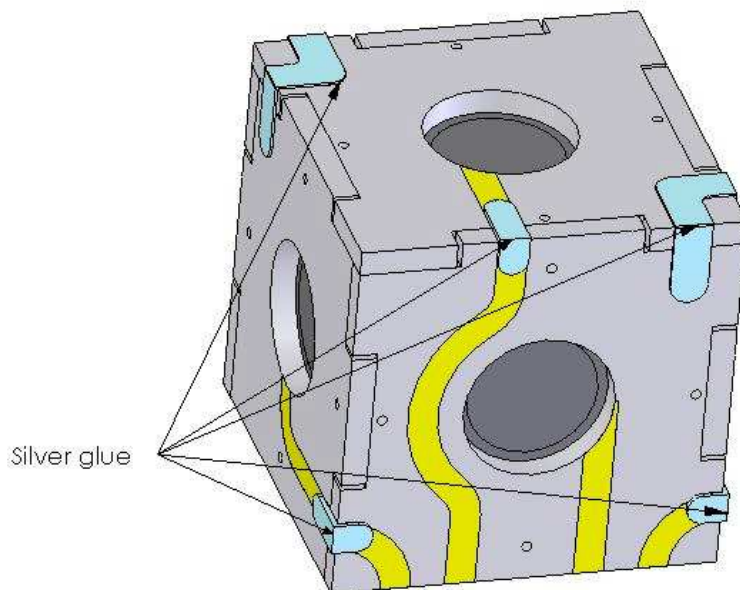
Document Name: Particle detector assembly		
Project: BepiColombo	Document Code:	Revision: Draft_14
Author: M.Roos, H. Andersson, S. Tynnilä		Date: 28-Dec-06



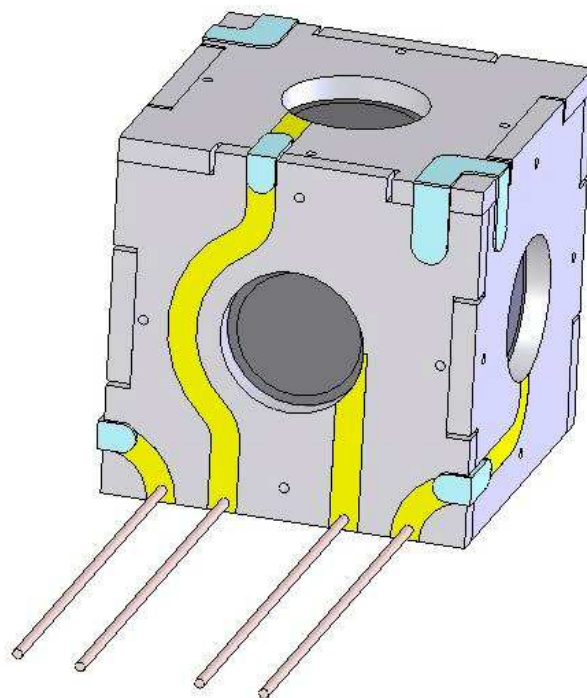
Picture 3 Assembly order for first cage

Work Order

Document Name: Particle detector assembly		
Project: BepiColombo	Document Code:	Revision: Draft_14
Author: M.Roos, H. Andersson, S. Tynnilä		Date: 28-Dec-06



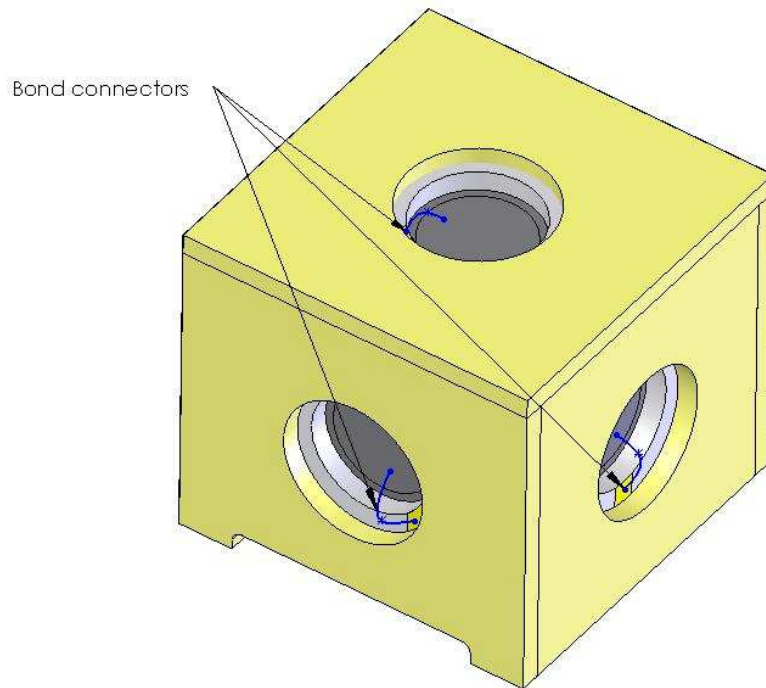
Picture 4 Connect corners with ECCOBOND glue and bond pads to center section of the GaAs detectors



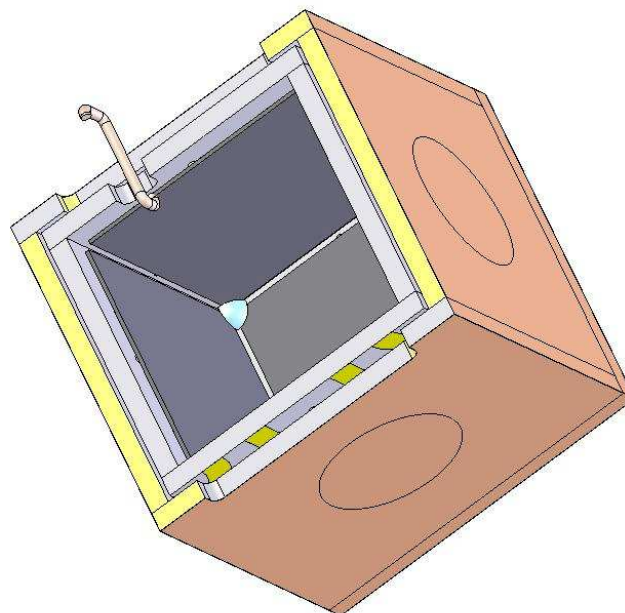
Picture 5 Glue six 20 mm long wires on each printed pads

Work Order

Document Name: Particle detector assembly		
Project: BepiColombo	Document Code:	Revision: Draft_14
Author: M.Roos, H. Andersson, S. Tynnilä		Date: 28-Dec-06



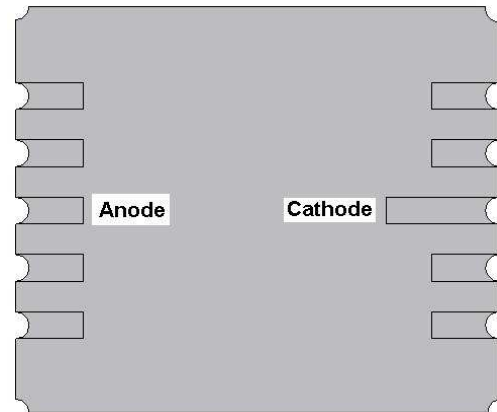
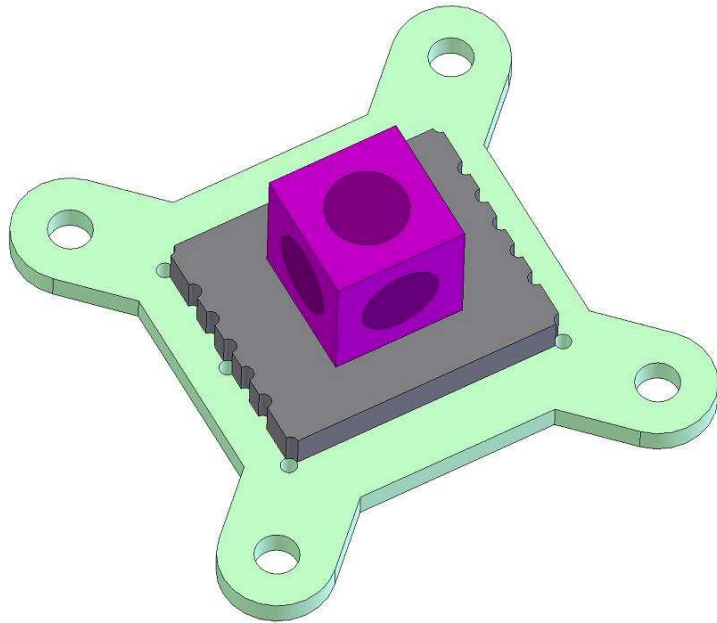
Picture 6 Bond connectors from center area of GaAs to pads on 1st cage



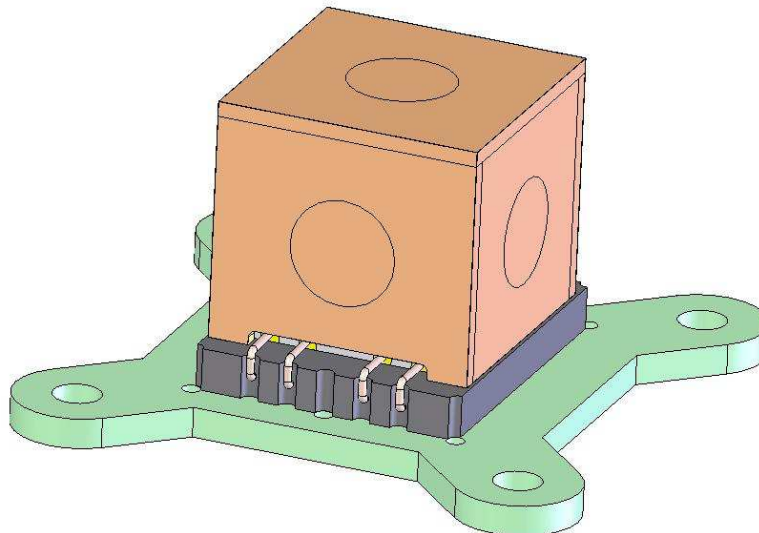
Picture 7 Glue cages together. Kapton foil shown with brown color.

Work Order

Document Name: Particle detector assembly		
Project: BepiColombo	Document Code:	Revision: Draft_14
Author: M.Roos, H. Andersson, S. Tynnilä		Date: 28-Dec-06



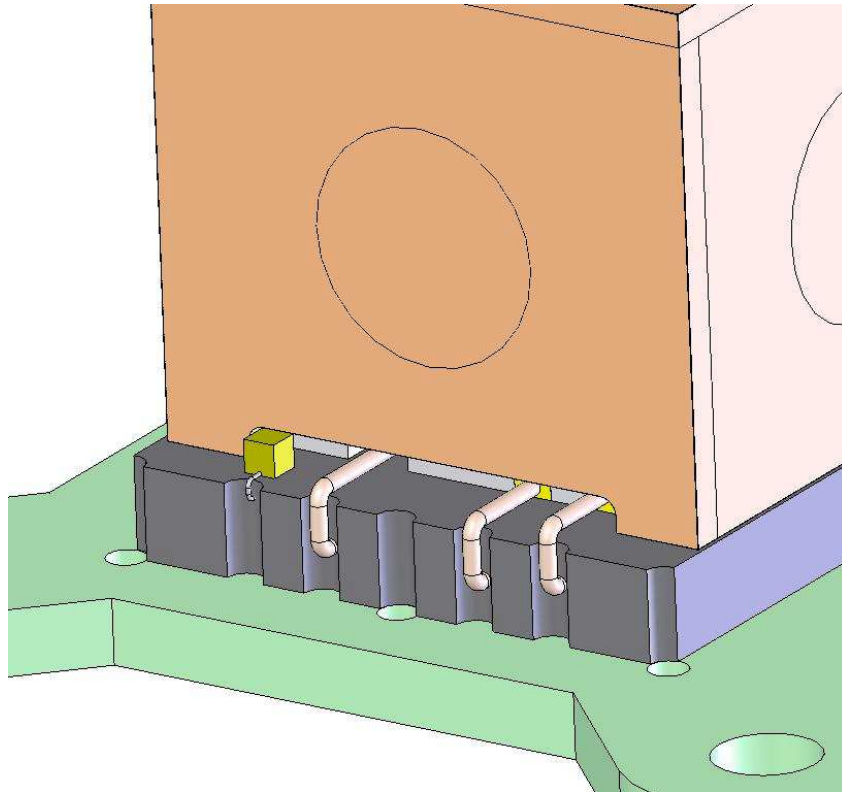
Picture 8 Cross plate, photodiode and scintillator



Picture 9 Cut wires installed and solder to pads on photodiode

Work Order

Document Name: Particle detector assembly		
Project: BepiColombo	Document Code:	Revision: Draft_14
Author: M.Roos, H. Andersson, S. Tynnilä		Date: 28-Dec-06



Picture 10 Glue thermistor and wire on photodiode

Notes:

Kollimaattorirungon koneistuspiirustus

