

**Auringontutkimusluotaimen SOHO
hiukkastutkimuslaitteisto ERNE**

J. Torsti, E. Valtonen, T. Eronen ja E. Riihonen

Turun yliopisto

toukokuu 1996

1. ERNE-PROJEKTI.....	1
1.1 Taustaa	1
1.1.1 SOHO-ohjelma	1
1.1.2 ERNE-projekti	1
1.2 Tieteellinen työ.....	2
1.3 ERNE-projektin tavoitteet	3
1.4 SOHO-ohjelman laitteisto.....	4
1.5 CEPAC-laitteisto.....	6
1.6 ERNE-projektin organisointi.....	7
2. ERNE-INSTRUMENTIN KUVAUS.....	9
2.1 ERNE ja CEPAC	9
2.2 Teholähde	9
2.3 ERNE-sensoryyksikkö.....	10
2.3.1 Suunnittelun lähtökohdat, rajoitukset ja valittu ratkaisu	11
2.3.2 LED	12
2.3.3 HED	15
2.3.4 Elektroniikka.....	17
2.3.5 Mekaniikka-, lämpö- ja sähköinen systeemisunnittelu	20
2.3.6 Luotettavuus.....	22
3. ON-BOARD OHJELMISTO	23
3.1 Organisaatio.....	23
3.2 Laitteisto	23
3.2.1 Prosessori.....	23
3.2.2 Muisti.....	23
3.2.3 Liitospinnat	23
3.2.4 Ohjelmointikieli	24
3.2.5 Kehitysympäristö	24
3.3 Käyttöjärjestelmä ja käyttäjäprosessit.....	24
3.4 Mittausohjelmistot.....	25
3.4.1 Seurantaparametrit (valvontadata)	25
3.4.2 Mittaustiedot (tiededata)	25
4. INSTRUMENTIN KOKOONPANO, TESTAUS JA INTEGROINTI AVARUUSALUKSEEN.....	26
4.1 Mekaaninen ja sähköinen kokoonpano.....	26
4.2 Testaus	27
4.2.1 Tekninen suorituskyky	27
4.2.2 Tieteellinen suorituskyky	27

4.2.3 Ympäristötestit.....	27
4.3 Integrointi.....	28
5. MAATUKILAITTEISTO.....	29
5.1 Detektoritason EGSE	30
5.1.1 Detektorien paksuuskartoituslaitteisto	30
5.1.2 Ohjelmoitava pulssinkorkeusanalysointilaitteisto.....	32
5.1.3 Stimulaattori	34
5.2 Aliyksikkötason EGSE	35
5.2.1 Aliyksikkötason mittauslaitteisto	35
5.2.2 Aliyksikkötason ohjelmisto.....	36
5.3 SOHO-tason EGSE.....	37
5.3.1 CEPAC CEGSE.....	38
5.3.2 ESU SEGSE	40
5.4 Lennonaikaiset datan analysointilaitteet	46
6. TIETOJENKÄSITTELYSYSTEMI	46
6.1 Laitteisto	47
6.2 Datavirta.....	47
6.3 Tiedonkäsittelyvaiheet.....	47
7. LAADUNVARMISTUS	48
8. PROJEKTIORGANISAATIO	49
8.1 Projektin johto	49
8.2 SOHO projektiorganisaatio.....	49
8.3 SOHO Science Working Team Meeting	49
8.4 Principal Investigator.....	50
8.5 Science Operations Working Group	50
8.6 CEPAC kollaboraatio.....	50
8.7 CEPAC Technical Steering Committee Meeting.....	50
8.8 ERNE organisaatio	50
8.9 ERNE Review Board	51
9. PROJEKTIN HALLINTA.....	51
9.1 Tekninen johtoryhmä	51

9.2 Konfiguraation hallinta ja dokumentointi.....	51
9.3 Raportointi	52
9.4 Rahoitus.....	52
9.5 Alihankintasopimukset.....	53
9.6 Kustannuseuranta	53
9.7 Aikataulujen seuranta	54
10. TULOKSET	55
10.1 Asetettujen tavoitteiden saavuttaminen.....	55
10.2 Tieteelliset tulokset	55
10.3 Keskeiset tulokset teknologian kehittymisen ja hyödyntämisen kannalta	56
10.4 Teknologiasiirot.....	56
10.5 Teknologiset innovaatiot	57
10.6 Avaruusteknisen infrastruktuurin luominen Suomeen	57
10.7 Tulosten julkistaminen ja hyödyntäminen.....	58
11. KANSAINVÄLINEN YHTEISTYÖ.....	59
12. KOULUTUS.....	59
12.1 Tieteellinen koulutus.....	59

1. ERNE-projekti

1.1 Taustaa

1.1.1 SOHO-ohjelma

Kiinnostus aurinko-maa -fysiikan tutkimusta kohtaan kypsytti Euroopassa 80-luvun alkuvuosina ajatuksen kahdesta tutkimusohjelmasta SOHO:sta ja CLUSTER:sta. Edellinen suuntautui pääasiassa auringon tutkimukseen - jälkimmäinen maan lähiavaruuden tutkimukseen. Kummankin ohjelman suunnittelu- ja kehitystyö eteni aluksi omia teitään. Vähitellen ryhdyttiin kuitenkin ohjelmia tarkastelemaan toisiaan täydentävinä. Ohjelmien valmistelutyö päättyi lopulta siihen, että SOHO- ja CLUSTER-ohjelmat yhdessä muodostavat tieteellisesti laajan ja monipuolisen aurinko-maa - tutkimusohjelman STSP (Solar Terrestrial Science Programme).

Kuluvan vuosikymmenen avaruustutkimuksen kulmakiviohjelmiin kuuluu maa-aurinko -fysiikan tutkimus. Ohjelma käsittää kymmenkunta tutkimussatelliittia. Euroopan Avaruusjärjestön osuus on NASA:n kanssa yhdessä toteutettavat CLUSTER- ja SOHO -ohjelmat. Neljästä identtisestä satelliitista koostuvan ja laivueena lentävän CLUSTER:n ohjelma keskittyy maan lähiavaruuden tutkimukseen. SOHO:n tavoitteena on auringon tutkiminen.

Aurinko-maa -tutkimusohjelman painopisteluonne korostuu, kun myös Yhdysvaltojen, Venäjän ja Japanin avaruusjärjestöt osallistuvat siihen omilla ohjelmillaan.

1.1.2 ERNE-projekti

Suomesta toimitettiin heinäkuussa 1987 esitys SOHO:n energettisten hiukkasten analysointilaitteeksi. Esitys kantoi nimeä ERNE (Energetic and Relativistic Nuclei and Electrons). Viisiosaisen, yhteensä 155 sivua käsittävän suunnitelman valmistelu kesti runsaan vuoden.

Esityksen tieteellisen ohjelman valmistelu samoin kuin sen hiukkasilmäinten ja elektroniikan yleissuunnittelu tapahtui Turun yliopiston Wihurin fysiikantutkimuslaitoksella ja Fysikaalisten tieteiden laitoksella; mekaaninen ja terminen suunnittelu VTT:n Instrumenttitekniikan laboratoriossa sekä tietojenkäsittely-yksikön ja tiedonsiirtojärjestelmän suunnittelu VTT:n Tietokonetekniikan laboratoriossa.

SOHO:on esitettyjen suurienergiaisten hiukkasilmäinlaitteiden osalta laitevalinta pitkittyi aina kesäkuuhun 1988 saakka. Syynä oli tiukka kilpailu ERNE- ja COSTEP-ehdotusten välillä. COSTEP oli laaja saksalais-amerikkalais-japanilais-hollantilais-espanjalais-irlantilaiskonsortio, kun ERNE:n konsortio oli puhtaasti suomalainen. COSTEP:n päätutkijana oli Horst Kunow Kielin yliopistosta ja COSTEP:ssa oli mukana

joukko kansainvälisesti tunnettuja tutkijoita ja asiantuntijoita. Monilla heistä oli aikaisempaa kokemusta hiukkasilmäinten rakentamisesta satelliitteihin.

Maaliskuun 1988 kokouksessaan ESA jätti ERNE:n ja COSTEP:n osalta yksityiskohtaisen laitevalinnan avoimeksi ja velvoitti kumpaakin projektia neuvottelemaan siitä, miten ERNE- ja COSTEP-ehdotuksista voidaan koota paras mahdollinen hiukkasilmäinten kokonaisuus SOHO:a varten.

Maalis- ja huhtikuussa käydyt neljä neuvottelua projektien välillä johtivat sopuun, jonka tuloksena projektien päättäjät allekirjoittivat toukokuussa 1988 ERNE:n ja COSTEP:n välisen yhteistoimintasopimuksen. Yhteistyö sai nimekseen CEPAC (Costep-Erne Particle Analyser Collaboration).

ESA:n tiedeohjelmakomitea hyväksyi kokouksessaan 20.6.1988 Pariisissa yksimielisesti ERNE- ja COSTEP-esitykset samoin kuin CEPAC-yhteistyösopimuksen esitetyssä muodossa.

1.2 Tieteellinen työ

Tarve tutkia aurinkoa avaruudesta johtuu siitä, että maan ilmakehä absorboi tai sirottaa monia auringon tutkimuksen kannalta keskeisiä säteilykomponentteja. Ilmakehän ja maan geomagneettisen kentän ulkopuolisella havaintoasemalla on käytettävissään auringon koko sähkömagneettisen ja hiukkassäteilyn spektrit. Lisäksi voidaan mitata aurinkotuulta ja auringon atmosfääriin äkillisissä prosesseissa syntyviä suurienergiaisten hiukkasten virtoja.

SOHO-ohjelmassa on tavoitteena kerätä monipuolinen ja runsas havaintoaineisto, jonka pohjalta etsitään vastauksia moniin auringon ja aurinkokunnan fysiikkaa luotaaviin toistaiseksi selvittämättömiin perusongelmiin kuten:

- 1) millainen on auringon sisäosa rakenteeltaan ja millä tavoin auringon sisäosien erilaiset prosessit, muutokset ja vaihtelut ovat selitettävissä,
- 2) miksi auringolla on korona ja mikä mekanismi pystyy lämmittämään koronan miljoonan asteen lämpötilaan,
- 3) kuinka kaukana auringosta ja millä tavoin aurinkotuuli muodostuu.

Vastausta ensimmäiseen ongelmakokonaisuuteen etsitään uudesta aurinkofysiikan osa-alueesta, aurinkoseismologiasta. Auringon seismologian lähtökohtana on, että tähden sisäisestä rakenteesta, lämpötilasta ja paineesta sekä sen sisäosissa tapahtuvista dynaamisista muutoksista saadaan tietoa havaitsemalla pinnan värähtelyjä. On mahdollista, että auringon pintavärähtelyjen tunteminen johtaa viimeinkin auringon sisäosien rakenteen ja dynamiikan ymmärtämiseen esimerkiksi niin, että auringon magneettikentän kääntyminen 11 vuoden jaksoissa pystytään selittämään.

Auringon luminositeetin tiedetään heikkenevän muutaman prosentin kymmenesosan verran muutaman vuorokauden ajaksi, kun auringonpilkkujen määrä on erityisen suuri.

Mielenkiintoinen tutkimuskohde on se tapahtumien ketju, jolla aurinko tuottaa, varastoi ja säteilee energiaa. Myös pitkän aikavälin muutokset auringon säteilytuotossa ovat kiintoisia sekä näiden muutosten mahdollinen kytkeytyminen auringon perusjaksoon.

Toinen ja kolmas ongelmakokonaisuus liittyvät toisiinsa, ja niiden ratkaiseminen edellyttää auringon atmosfäärissä esiintyvien prosessien tutkimusta. Atmosfäärin uloin kerros on korona, harsomainen vaalea kaasukehä, joka voidaan erottaa auringonpimennyksen aikana. Auringon koronasta saa alkunsa aurinkotuuli, joka kuumana plasmavirtana syöksyy ulos auringosta täyttäen planeettainvälisen avaruuden. Aurinkotuulikin on sisäiseltä rakenteeltaan ja muodoltaan hyvin epäsäännöllinen. Havainnot osoittavat, että auringon atmosfäärin lämpötila fotosfäärin ja kromosfäärin rajalla on 5000 astetta ja kasvaa voimakkaasti siirryttäessä ulospäin saavuttaen muutaman miljoonan asteen lämpötilan koronan alaosan alueella.

Tähänastinen aurinkotutkimus on paljastanut auringon pinnalla vallitsevan monenkirjavan ilmiömaailman: auringonpilkkuja, aurinkosoihtuja, korona-aukkoja, koronan massapurkauksia, plasmasuihkuja, sokkiaaltoja jne. Syynä näille ilmiöille on pidetty paikallisten plasmavirtojen sekä magneettikenttien välisiä vuorovaikutuksia. Vuorovaikutusten yksityiskohdat ovat vielä hämärän peitossa.

Hiukkaskiihdytys on varsin tavallinen luonnonilmiö avaruudessa. Kiihdytystä esiintyy maan magnetosfäärissä, aktiivisissa galakseissa, supernovissa ja kvasaareissa. Moniin avaruuden räjähdysnomaisiin tapahtumiin kuten auringon atmosfäärin soihtupurkauksiin liittyy suurienergiasten hiukkasten tuottoa, jonka osuus räjähdyskokonaisenergiasta usein on huomattava.

Yleisesti hyväksytty käsitys on, että auringon soihtujen energianlähteenä ovat magneettikentät. Suotuisat olosuhteet purkauksen esiintymiselle merkitsevät monimutkaista magneettista rakennetta eli auringonpilkkujen paikallista keskittymää. Magneettikenttien räjähdysnomaiseen annihilaatioon liittyy sähkökenttiä, joissa myös tapahtuu hiukkaskiihdytystä. Samalla syntyy sokkiaaltoja ja pyörteisiä plasmavirtoja.

1.3 ERNE-projektin tavoitteet

Auringon läheisyyden johdosta voidaan sen atmosfäärissä esiintyvää hiukkaskiihdytystä ja kiihdytykseen liittyviä ilmiöitä seurata monipuolisesti ja yksityiskohtaisesti. Tietolähteinä ovat:

- kiihdytettyjen hiukkasten tuottama säteily atmosfäärin sähkömagneettisissa kentissä (jatkuva säteilyspektri)
- hiukkasten atomi- ja ydintörmäyksissä synnyttämä säteily (viivaspektri)
- planeettainväliseen avaruuteen syöksyvien hiukkasten virrat.

ERNE:n tavoitteena on tunnistaa auringon pinnalla tapahtuvissa räjähdyksissä planeettainväliseen avaruuteen syöksyvät hiukkaset (alkuaineiden ytimet sekä niiden eräät isotoopit ja elektronit), mitata hiukkasten energiat sekä saada tietoa hiukkasten kulkusuuntien jakautumisesta SOHO-satelliitin kohdalla. ERNE:llä tutkitaan myös planeettainvälisessä avaruudessa, aurinkokunnan rajasokissa sekä Linnunradalla syntyvien

suurienergiaisten hiukkasten virtoja. ERNE:n tutkimusohjelman samoin kuin koko SOHO-ohjelman tavoitteena on auringon rakenteen ja käyttäytymisen sekä aurinkokunnan modulaatioihin liittyvien avoimien ongelmien ratkaiseminen.

SOHO:n hiukkasilmaisimilla kuten myös kaukokartoituslaitteilla tullaan keräämään tietoa auringon atmosfääriin ja planeettainvälisen avaruuden ilmiöistä ja prosesseista.

Esimerkkejä ERNE:llä tutkittavista ilmiöistä ovat:

- energian vapautuminen ja kulkeutuminen auringon atmosfäärissä
- kemiallinen ja isotooppikoostumus eri osissa atmosfääriä
- hiukkaskiihdytys (suurienergia-alueelle asti)
- magneettikenttien uudelleenjärjestäytymiset (erilaiset mitta- ja aikaskaalat)
- erilaisten sokkien syntyminen ja ominaisuudet
- koronan aktiivisuusalueiden erilaisten ilmiöiden keskinäiset riippuvuudet (esim. soihdut, koronan massapurkaukset, sokit)
- suurienergiaisten hiukkasten eteneminen sekä auringon atmosfäärissä että planeettainvälisessä avaruudessa
- hiukkaskiihdytyksen luonne ja laajuus planeettainvälisessä avaruudessa

1.4 SOHO-ohjelman laitteisto

SOHO sisältää kaksitoista tieteellistä mittalaitetta (Taulukko 1.1).

SOHO-aluksen spektroskooppisilla mittauksilla saadaan tietoa aurinkoplasman tärkeimpien fysikaalisten ominaisuuksien - tiheyden, lämpötilan, nopeuden ja magneettikenttien - paikallisesta ja ajallisesta vaihtelusta.

Kuvaa täydentävät SOHO:n koronagraafiset havainnot, joilla saadaan tietoa kromosfääriin alaosien hienorakenteesta ja yläosien laaja-alaisten ilmiöiden ja aurinkotuulen välisistä yhteyksistä. Näiden kaukokartoitusta edustavien tutkimusten lisäksi tullaan tietoa koronasta hankkimaan mittaamalla aurinkotuulta avaruusaluksen kohdalla. Koska aurinkotuuli on hyvin harva kaasu, ovat aurinkotuulen hiukkasten väliset törmäykset harvinaisia. Näin aurinkotuulen ominaisuudet - hiukkasten energiat, kemiallinen koostumus, kulkusuunnat - antavat lisätietoa sen syntyhistoriasta.

Exp.	PI	Measurements	Technique	Bit rate
HELIOSEISMOLOGY				
GOLF	A.Gabriel IAS F	Global Sun velocity and magnetic field oscillations Harmonic degree $l=0-3$	Na-vapour resonant scattering cell, Doppler shift and circular polarization	0.160 (kb/s)
VIRGO	C.Fröhlich, PMOD/WRC CH	Low degree ($l=0-7$) irradiance oscillations and solar constant	Global Sun and low resolution (12 pixels) imaging, active cavity radiometers	0.1
MDI/SOI	P.Scherrer Stanford Univ. USA	Velocity oscillations, harmonic degree up to 4500	Doppler shift and magnetic field observed with Michelson Doppler Imager	5 (+160)
SOLAR ATMOSPHERE REMOTE SENSING				
SUMER	K.Wilhelm MPAE D	Plasma flow characteristics (T, density, velocity) chrom. through corona	Normal incidence spectrometer 50-160 nm, spectral resolution 20000-40000, angular res. 1.5"	10.5 (or 21)
CDS	R.Harrison RAL UK	Temperature and density: transition region and corona	Grazing incidence spectrometer 15-80 nm, spectr. res. 1000-10000, angular res. 2"	12 (or 22.5)
EIT	J.Delaboudinière IAS F	Evolution of chromospheric and coronal structures	Images (1024 x 1024 pixels in 42' x 42') at lines of He II, Fe IX, Fe XII and Fe XV	1 (or 26.2)
UVCS	J.Kohl SAO USA	Electron and ion temp. densities, velocities in corona (1.3-10 R)	Profiles and/or intensity of several spectral EUV lines between 1.3 and 10 R	5
LASCO	G.Brueckner NRL USA	Evolution, mass, momentum and energy trans. in corona (1.1-30 R)	1 internal and 2 externally occulted coronagraphs. Spectrometer for 1.1-3 R	4.2 (or 26.2)
SWAN	J.L.Bertaux SA F	Solar wind mass flux anisotropies and temporal variations	2 scanning telescopes with hydrogen absorption cell for Ly- α light	0.2
SOLAR WIND "IN SITU"				
CELIAS	D.Hovestadt MPE D	Energy distribution and composition of ions 0.1-1000 keV/e	Electrostatic deflection, time-of-flight measurements and solid state detectors	1.5
COSTEP	H.Kunow Univ. of Kiel D	Energy distr. and comp. of ions 0.04-53 MeV/n and electrons 0.04-5 MeV	Solid state and plastic scintillator detector telescopes	1.01
ERNE	J.Torsti Univ. of Turku FIN	Energy distr. and comp. of ions (p, Ni) 1.4-540 MeV/n and electrons 15-60 MeV	Solid state and scintillator crystal detector telescopes	

Taulukko 1.1 SOHO-ohjelman tutkimusprojektit.

SOHO-aluksen tutkimus pohjautuu kolmeen menetelmätyyppiin:

1. Kaukokuvauslaitteilla tutkitaan auringon atmosfäärin uloimpien kerrosten fysikaalista rakennetta ja käyttäytymistä aina 30 auringon säteen etäisyydelle.
2. Massaspektrometreillä ja eri energia-alueiden hiukkasilmmaisimilla mitataan auringosta lähtevien hiukkasten virtoja avaruusaluksen kohdalla.
3. Kahdella nopeusspektrometrillä ja useilla säteilymittareilla havainnoidaan auringon pinnan värähtelyjen nopeus- ja intensiteettialueita aurinkoseismologisen analysoinnin tarpeisiin sekä "aurinkovakion" vaihteluiden selvittämiseksi.

1.5 CEPAC-laitteisto

CEPAC-sopimuksen mukaan ERNE-projektissa rakennettiin kaksi hiukkasilmmaisinta LED ja HED sekä yhteinen teholähde ja maatumilaite kumpaankin projektiin. COSTEP-projekti rakensi kaksi hiukkasilmmaisinta EPHIN ja LION sekä yhteisen keskusyksikön.

ERNE-tutkimuslaitteisto käsittää kolme osalaitteistoa

- 1) ESU (ERNE Sensor Unit)
- 2) LVPC (Low Voltage Power Converter)
- 3) EGSE (Electrical Ground Support Equipment)

Ilmaisnlaitteisto ESU koostuu kahdesta hiukkasilmmaisimesta (LED, Low Energy Detector, ja HED, High Energy Detector). Teholähde LVPC muuntaa avaruusalukselta saatavan primaarijännitteen ERNE- ja COSTEP-laitteiden tarvitsemiksi sekundaarijännitteiksi. Nämä yksiköt on tarkemmin kuvattu luvussa 2.

Maatumilaite EGSE koostuu useista työasemista, joiden avulla suoritettiin laitteiden testaus rakentamisen ja integroinnin aikana, sekä operoidaan instrumenttia lennon aikana. Maatumilaitteet rakennettiin Turun yliopistossa. Laitteiston yksityiskohtainen kuvaus on luvussa 5.

Yhteisen keskustietokoneen (CDPU) rakensi espanjalalainen Alcala de Henaresin yliopisto yhteistyökumppaninaan Alcatel Espacio. CDPU:n tehtävänä on kerätä ESU:n ja COSTEP:n kahden sensorilaitteen mittaustulokset sekä toimintatiedot, siirtää ne avaruusalukselle, sekä vastaanottaa maasta käskyjä ja jakaa ne edelleen ilmaisnlaitteistolle.

COSTEP-projektin toisen hiukkasilmmaisimen, EPHIN:n, rakensi Kielin yliopisto, ja toisen, LION:n, St Patrick's College Irlannista. Alkuperäiseen CEPAC-sopimukseen kuului lisäksi japanilaisten vastuulla ollut MEICA-ilmaisim. MEICA:a ei kuitenkaan koskaan rakennettu, koska japanilaiset eivät saaneet rahoitusta hankkeelleen. MEICA:n puuttuminen oli jättämässä aukkoa tavoiteltuun, kuusi kertalukua käsittävään yhtenäiseen energijakautumaan SOHO:n kaikilla hiukkasilmmaisimilla. Aukko kuitenkin täytettiin ERNE LED-sensorin vähäisellä muutoksella. Tällöin LED:n 5 ohutta ilmaisinta kaikkiaan 7:stä korvattiin paksummilla ilmaisimilla. Muutoksen kustannusvaikutus ERNE:n

kannalta oli olematon, koska korvaavat paksut ilmaisimet olivat huomattavasti halvemmat kuin alunperin suunnitellut ohuet ilmaisimet.

1.6 ERNE-projektin organisointi

ERNE-projekti on ensimmäinen ESA:n avaruushanke, jonka Principal Investigator on Suomesta. Kun lisäksi ERNE-projektin kaikki vastuulliset tutkijat (Co-Investigator) ovat Suomesta, laitteen suunnittelu, rakentaminen ja testaus tapahtui lähes täysin suomalaisten toimesta. Kun projekti hyväksyttiin SOHO-ohjelmaan v. 1988, jouduttiin nopeasti kokoamaan organisaatio ja eri laiteosien suunnittelijat ja rakentajat.

Liikkeellelähtötilanteessa etsittäessä ERNE:n laiteosien alihankkijoita Suomen teollisuudesta, oli ongelmana se, että yrityksiä, joilla olisi ollut kokemusta avaruuslaitteiden rakentamisesta oli varsin niukalti. Normaalin tarjouskilpailun järjestämiselle ei ollut edellytyksiä. Yritykset tuntuivat vierastavan ajatusta lähteä uudelle tekniikan osa-alueelle. Lisäksi tuolloin teollisuuden tilauskanta oli korkea, yrityksillä ei yksinkertaisesti ollut työvoimaresursseja lähteä mukaan uusiin hankkeisiin.

Koska ERNE-laitteen rakentaminen ennakoitiin varsin suuritöiseksi ja koska yhtään sellaista toimittajaa ei löytynyt, joka olisi ottanut laitteen laaja-alaista toimitusvastuuta, jouduttiin laitteen suunnittelu ja rakentaminen pilkkomaan pieniin osiin. Laitteosien toimittajien määrä pysyi koko rakentamisvaiheen ajan noin kymmenenä. Tämä teki ERNE:n toteutuksesta, projektin johtamisesta ja organisoitumisesta erittäin vaativan ja raskaan.

Jotta yhteistyötä alihankkijan kanssa tämäläpöisessä projektissa oli ollenkaan syytä harkita, oli ensin varmistettava, että alihankkijalla on aitoa kiinnostusta, kykyä ja halua viedä projekti loppuun suunnitellulla tavalla. Mikäli kaikilla osapuolilla ei löydy vahvaa sitoutumista viedä projektia eteenpäin, ei onnistumisen mahdollisuuksia ole. Avaruuslaite on yhtä hyvä kuin on sen heikoin osa. ERNE:n organisaation kannalta voidaan todeta, että valitut alihankkijat olivat selvästi sitoutuneet projektin hyvään toteuttamiseen.

ERNE-organisaatio toimi alkuvuodet osittain hajautettuna ja osa-aikaisten johtohenkilöiden varassa. Organisaatio uudistettiin ERNE:n johtoryhmän ja SOHO-projektin kanssa käytyjen neuvottelujen tuloksena v. 1992 alussa. Tällöin todettiin välttämättömäksi saada projektiin päätoiminen tekninen projektipäällikkö, ja keskittää projektin koko johto Turun yliopistoon. Uusi organisaatio koettiin SOHO-projektin taholta myönteisenä.

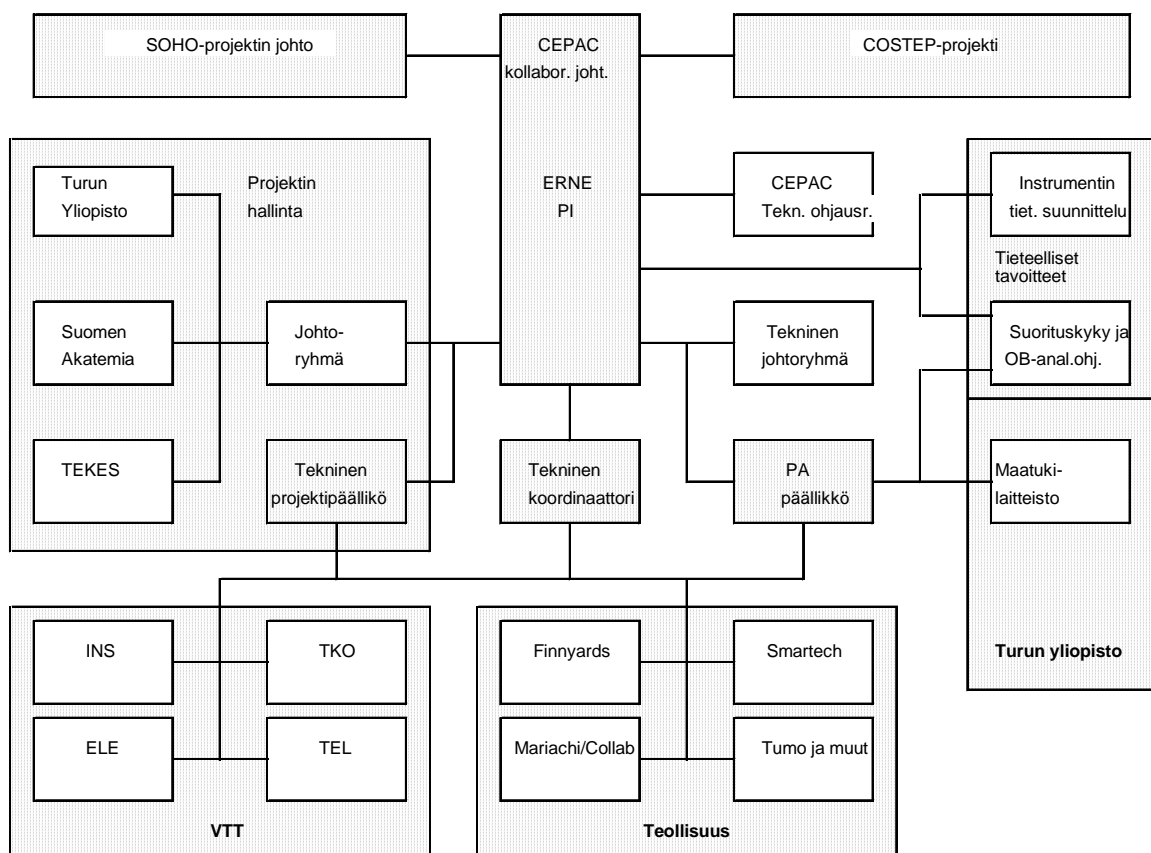
Työn projektiluonteesta johtuen kaikki työpaikat olivat määräaikaista. Nykyisessä taloudellisessa tilanteessa tähän liittyi huomattava henkilökohtainen riski. Työn kansainvälisyydestä seurasi suuri matkustustarve usein pitkiksiin ajoiksi ulkomaille. Työn sidonnaisuuksista johtuen oli ajoittain erittäin suuri tarve työajan joustoon. Normaaleihin kesälomiin ei ollut mahdollisuuksia mm. siitä syystä, että SOHO-projekti kiihdytti toimintojaan erityisesti heinäkuussa saadakseen aikataulun mukaiset tehtävät päätökseen ennen omia lomajaksojaan. Koska tällöin ERNE:n suomalaiset alihankkijat olivat lomalla ja koska ERNE-projektin tuli hoitaa oma osuutensa, joutui Turun yliopiston

Avaruustutkimuslaboratorion henkilökunta joustamaan vuosilomistaan. Näin tapahtui projektin koko keston ajan.

Työn houkuttelevuutta lisäsivät kuitenkin mahdollisuus osallistua uuden korkean teknologian alueen pioneerityöhön. Lisäksi alaa saattoi taatusti pitää mielenkiintoisena, haastavana ja vaativana.

ERNE:n organisaatiokaavio on esitetty kuviossa 1.1.

ERNE:n alihankkijat on esitetty liitteessä V, projektissa toimineet tutkijat ja tutkimuslaitokset liitteessä VI.

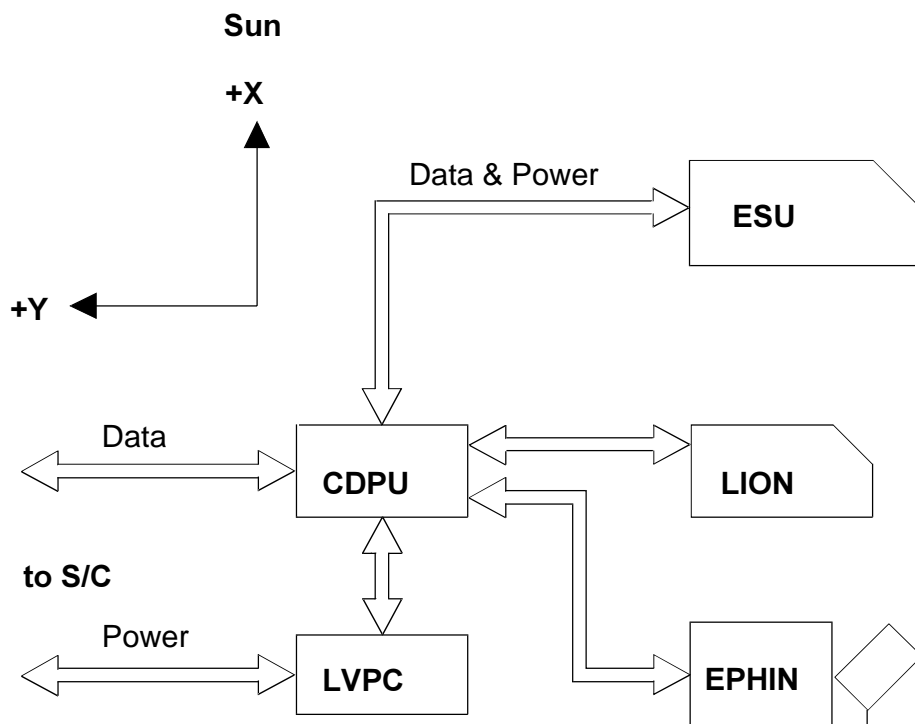


Kuvio 1.1 ERNE-projektin organisaatiokuva.

2. ERNE-instrumentin kuvaus

2.1 ERNE ja CEPAC

ERNE-instrumentti koostuu kahdesta yksiköstä: ilmaisinyksiköstä (ERNE Sensor Unit, ESU) ja teholähteestä (Low Voltage Power Converter, LVPC). SOHO-projektissa ERNE on teknisesti osa laajemmasta konsortioista nimeltä CEPAC (COSTEP-ERNE Particle Analyser Collaboration). Teholähde on yhteinen koko CEPAC-laitteistolle ja toimii ainoana teholiityntänä avaruusalukseseen. CEPAC:lla on myös yhteinen dataliityntä avaruusalukseseen CDPU:n (Common Data Processing Unit) kautta. Tietoliikenne ja telekomennot kaikille CEPAC-sensoryyksiköille (ESU, EPHIN, LION) kulkevat tämän yhden liittymän välityksellä. CEPAC-kokoonpano on esitetty kuviossa 2.1. Testausta varten CEPAC:lle kehitettiin myös yhteinen maatukilaitte, joka sisälsi simulaattorin avaruusaluksen liittymöille. Maatukilaitteen yksityiskohtainen kuvaus on luvussa 5.



Kuvio 2.1 CEPAC-laitteiston kokoonpano ja liittymät.

2.2 Teholähde

Teholähde on Finnyards Oy:n suunnittelema ja valmistama. Se tuottaa avaruusaluksen +28 V:n jännitteestä CEPAC-laitteiston digitaali- ja analogiaosien tarvitsemat jännitteet.

DC/DC-muuntimella on viisi virtarajoitettua lähtöä sensoriyksiköille (+5 V, +6 V, -6V, +12 V ja +27 V) ja yksi erillinen virtarajoitettu lähtö CDPU:lle (+5 V). Primaari- ja sekundaarijännitteet on erotettu toisistaan muuntajalla.

Sekundaaripuolen analogia- ja digitaalijännitteillä on erilliset paluulinjat, jotka ovat yhden pisteen maadoitusperiaatteen mukaisesti kytketty yhteen vain LVPC:n sisällä. Kaikki jännitelinjat kulkevat CDPU:n kautta (kuvio 2.1), joka mahdollistaa sensoriyksiköiden tehonkytkennän CDPU:n valvonnassa. CDPU:n ja sensorien digitaalijännitteillä on yhteinen paluulinja. Maadoituksen tähtipiste on kytketty LVPC:n runkoon. Muuntajissa on staattinen suoja, joka on myös maadoitettu tähtipisteeseen.

Primaaripuolen syöksyvirtarajoitus aikaansaa pehmeän käynnistymisen. Muuntimet on suojattu ylikuormalta sekundaarijännitteiden virtarajoittimilla. Oikosulkutilanteessa rajoitin kytkee jännitteen pois päältä.

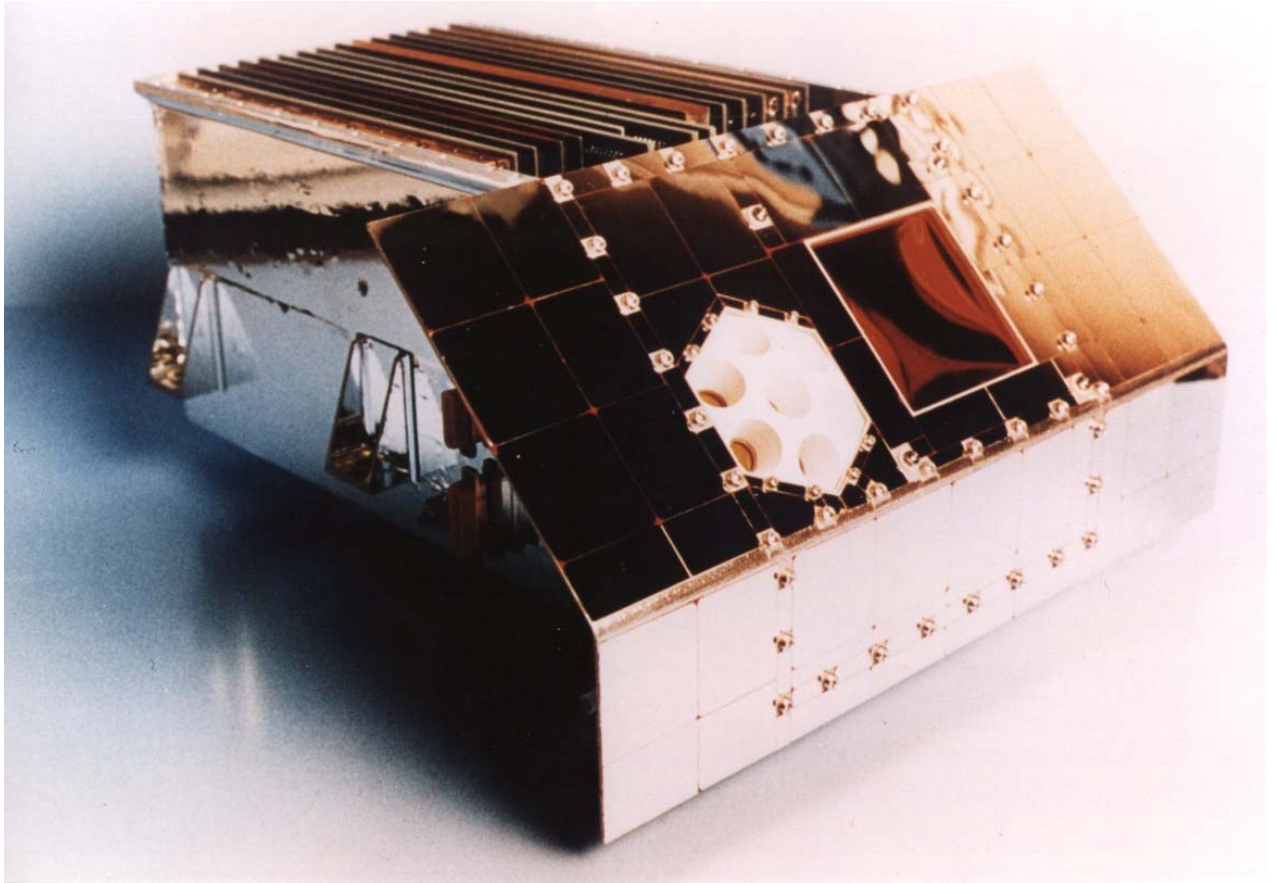
LVPC:ssa on kaksi identtistä DC/DC-muunninta, nominaali ja redundantti, joista vain toinen on tietyllä hetkellä toiminnassa. Releiden avulla voidaan valita kumman muuntimen sekundaarijännitteet ovat käytössä. Releiden toimintaa ohjataan suoraan avaruusaluksesta pulssikomennoilla.

LVPC:n jännitteiden arvoja valvotaan mittaamalla ne kerran minuutissa. Tiedot siirretään CDPU:n välityksellä CEPAC:n telemetriavirtaan. Jännitteiden lisäksi valvotaan lämpötilaa. Kaikkissa mittauksissa käytetään 8-bitin analogia-digitaalimuunninta.

Teholähteen lähtöjännitteiden nominaalit virrat ovat muutaman sadan milliampeerin luokkaa, paitsi +27 V:lla, jossa se on vain muutama milliampeeri. Jännitteiden tarkkuuden vaatimusspesifikaatiot ovat +2/-4 % luokkaa ja tyypillisesti alle 50 mV:n piikit huipusta-huippuun hyväksyttävissä. Käytännössä saavutettiin paljon pienemmät kohina-arvot. LVPC:n hyötysuhde CEPAC:n nominaalikuormituksella on n. 70 % ja sisäinen tehonkulutus 4.6 W.

2.3 ERNE-sensoriyksikkö

ERNE-sensoriyksikkö (ESU) sisältää ilmaisimet LED (Low Energy Detector) ja HED (High Energy Detector) sekä kaiken näihin liittyvän elektroniikan. Kuviossa 2.2 on esitetty ESU:n lentomalli.



Kuvio 2.2 ERNE-sensoryyksikkö.

ERNE:n tehtävänä SOHO-lennolla on mitata interplanetaarisessa avaruudessa esiintyviä hiukkasia energia-alueella $> 1\text{MeV/n}$, määrittää niiden energiajakautumat sekä erottaa toisistaan ja tunnistaa kaikki alkuaineet vedystä nikkeliin, mukaanlukien näiden yleisimmät isotoopit. Lisäksi määritetään hiukkasten tulosuunnat HED:n näkökentässä ja mitataan elektronien vuo. Päättökohteena ovat luonnollisesti auringon purkauksissa syntyvät hiukkaset, jotka erottuvat normaalista galaktisen ja ns. anomaalisen kosmisen säteilyn muodostamasta taustasta voimakkaina intensiteetti-peakkeina, jolloin myös intensiteetti-aika -profiilien määrittäminen antaa tietoa tapahtuman luonteesta ja hiukkasten kulkeutumisesta planeettainvälisessä avaruudessa.

2.3.1 Suunnittelun lähtökohdat, rajoitukset ja valittu ratkaisu

ERNE:n sensorien ja elektroniikan perussuunnittelu tehtiin Turun yliopistossa vuosina 1986-1988 suurelta osin ennen ESA:lle jätettyä laite-esitystä, mutta myös sen jälkeen lopullisen CEPAC-laitteiston aikaansaamiseksi. Instrumentin perussuunnittelussa korostuu suunnittelijan perehtyneisyys laitteistolla tehtävään tieteelliseen tutkimukseen, koska ilman tätä ominaisuutta varsinkin uusien innovatiivisten instrumenttien aikaansaaminen on täysin mahdotonta.

Instrumentin oli kyettävä mittaamaan sekä elektroneja että raskaita ytimiä ainakin nikkeliin asti. Toiminta-alueella 1 MeV/n :sta yli 500 MeV/n :iin energiat oli pystyttävä

määrittämään erittäin tarkasti. Massaresoluutiolle asetettiin tavoitearvo 0,5 atomimassayksikköä nikkelillä suurienergia-alueella ja huomattavasti parempi ($< 0,2$ amu) rajoitetulla energia-alueella ja kevyillä ioneilla.

Johtuen auringon hiukkasten jyrkästi laskevasta energiaspektristä instrumentin geometrisen tekijän, eli hiukkasten keräyskyvyn, tuli olla suurempi kuin aikaisemmillä vastaavilla laitteilla. Hiukkasten kulmajakautuman mittaamiseksi vaadittiin suuntaherkkyyttä. Kulmajakautuman mittaamiseksi tarvitaan lisäksi laaja näkökenttä.

Auringon suurienergiaisista hiukkasista protoneja on ylivoimaisesti eniten. Toisaalta raskaiden ionien runsauksien määrittäminen on tieteellisesti hyvin tärkeää. Tästä syystä katsottiin tarpeelliseksi suunnitella prioriteettijärjestelmä, joka takaa raskaiden ionien rekisteröinnin voimakkaankin protonivuon vallitessa.

Kuten tavallista avaruuslaitteille, suunnittelutyön voimakkaimpina rajoitteina olivat sallitut massa, teho ja telemetriakapasiteetti. Myös instrumentin tilavuudelle, erityisesti sen korkeudelle oli asetettu rajoituksia. Tärkeä avaruuslaitteiden ominaisuus on korkea luotettavuustaso. Tässä tapauksessa avaruusolosuhteissa pitäisi pystyä toimimaan vikaantumatta tai ilman merkittävää suorituskyvyn alentumista jopa kuusi vuotta, jonka arveltiin olevan SOHO:n toiminta-aika maksimissaan.

Huomioimalla instrumentin toimintaenergia- ja katettava massa-alue luonnollinen valinta perusrakenteeksi oli hiukkasteleskooppi. Teleskooppi koostuu useista päällekkäisistä ilmaisinkerroksista. Hiukkasten kokonaisenergian määrittäminen perustuu eri kerroksissa tapahtuvien energiahäviöiden yhteenlaskuun ja hiukkasten tunnistaminen energiahäviöiden suhteisiin.

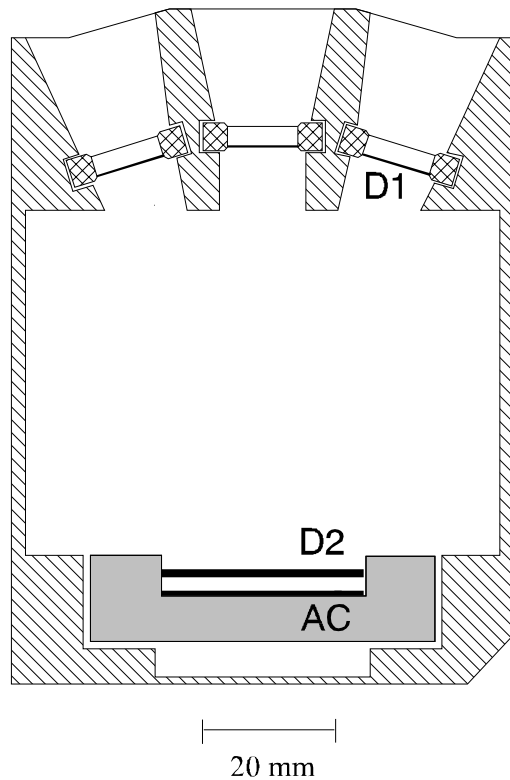
Oli ilmeistä, että kaikkien suunnittelutavoitteiden saavuttaminen edellytti joitakin kompromisseja sekä kahden teleskoopin konstruoinnista, joista kumpikin kattoi noin yhden kertaluvun energiassa osuen osittain päällekkäin. Kummankin teleskoopin piti kyetä tunnistamaan kaikki ionit vedystä nikkeliin. Elektronimittauksia tehtäisiin kuitenkin vain korkeammissa energioissa toimivalla sensorilla.

2.3.2 LED

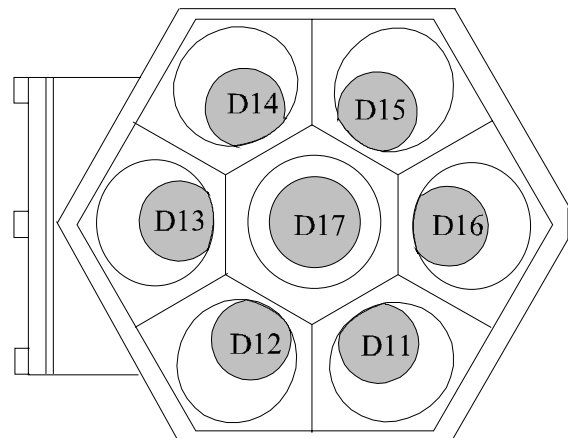
Low Energy Detector (LED) toimii matalilla energioilla. Suunnittelun tavoitteena oli energian alarajakynnys noin yhdessä megaelektronivoltissa nukleonia kohden (1 MeV/n). Tämä voitiin toteuttaa vain käyttämällä teleskoopin ylimmässä kerroksessa hyvin ohuita ilmaisimia. Nykyisillä teknologioilla vain pintaestoilmaisimet pystytään prosessoimaan riittävän ohuiksi. Näilläkin ilmaisimilla aktiivinen pinta-ala on vain neliösenttimetrin luokkaa. Tästä syystä, riittävän suuren geometrisen tekijän saavuttamiseksi, LED:n ensimmäinen ilmaisinkerros päätettiin koota useasta erillisestä ilmaisimesta. Tällä ratkaisulla oli myös useita muita etuja. Käyttämällä kuvion 2.3 mukaista kennorakennetta, jossa uloimmat ilmaisimet on kallistettu keskimmäiseen tasoon nähden, pystyttiin sensorin näkökartiota kasvattamaan ja samalla voitiin mekaanisella kollimaattorilla rajoittaa ilmaisimeen osuvien hiukkasten tulokulma. Jos tulokulmaa ei pystytä tarkasti määrittämään, on sen rajoittaminen erittäin tärkeää hiukkasten massan erotuskyvyn säilyttämiseksi. Ratkaisumallilla sensorin geometriseksi tekijäksi saatiin $1.0 \text{ cm}^2 \text{ sr}$.

Kennorakenne osoittautui onnistuneeksi myös myöhemmin, kun COSTEP:n MEICA instrumentti jäi rahoitusongelmien vuoksi toteuttamatta. Tällöin ERNE:n LED- ja HED-sensorien välinen energia-aukko pystyttiin peittämään yksinkertaisesti kasvattamalla joidenkin LED:n ensimmäisen ilmaisinkerroksen ilmaisinten paksuuksia. Ottamalla huomioon auringon hiukkasten energiajakautuman muoto, päädyttiin suhteeseen 2:5 ohuiden ja paksujen ilmaisinten lukumäärässä. Paksumpien ilmaisimien osalta päädyttiin toimintavarmuudeltaan parempaan pidettyyn ioni-implantaatioteknologiaan.

Vertical cross section

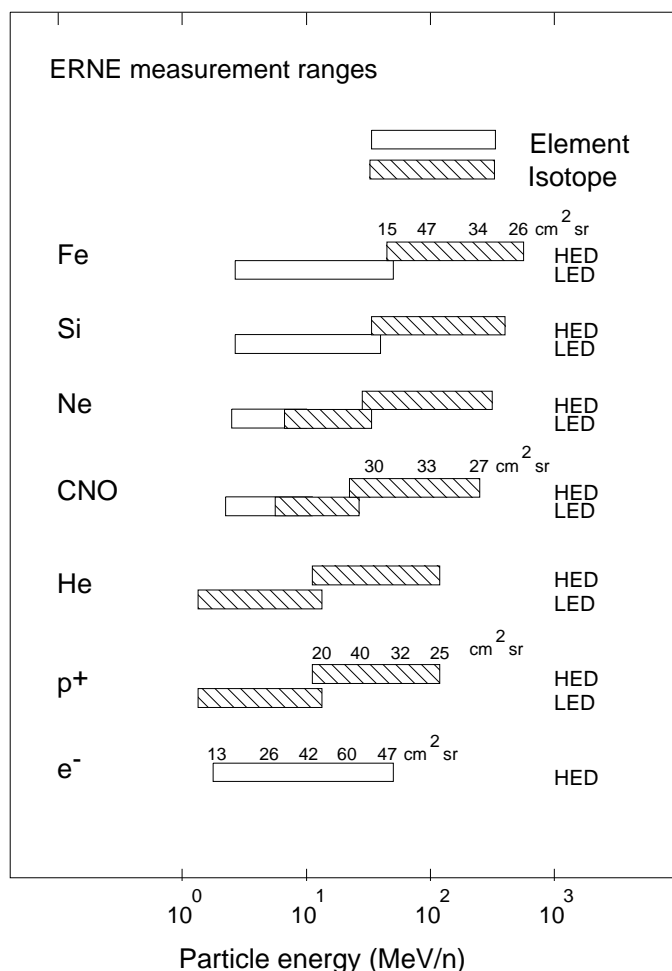


Top view



D11, D16 20 microns, surface barrier
D12-D15, D17 80 microns, ion implanted
D2 1000 microns, ion implanted
AC 500 microns, ion implanted

Kuvio 2.3 LED-sensorin rakennekaavio.



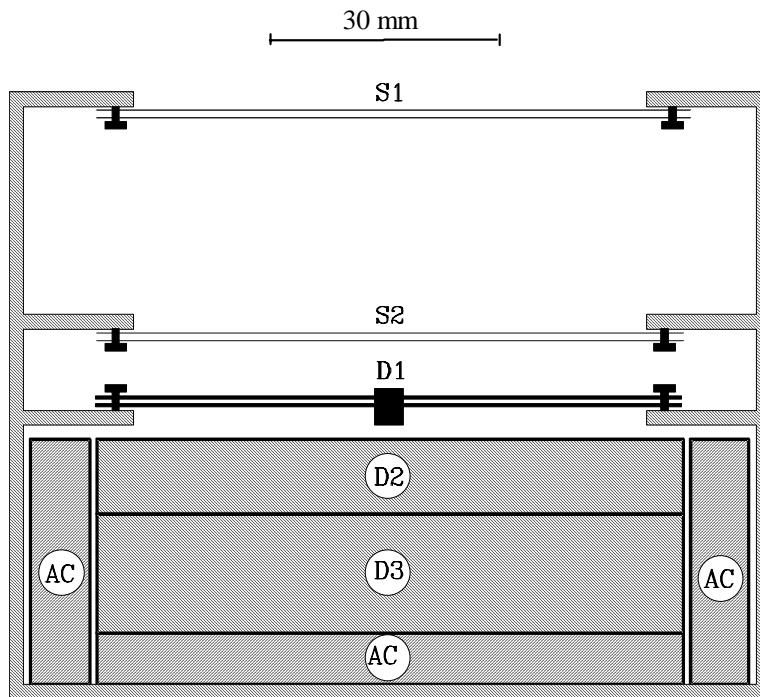
Kuvio 2.4 ERNE:n kattamat energia-alueet eri alkuaineilla.

Muita kennorakenteen etuja ovat mm. redundanssi ja usean erillisen pienen ilmaisimen matala kohinataso ja siten parempi energioresoluutio. Näiden etujen rinnalla haittapuolena olevan elektronikan monimutkaisemman rakenteen ei katsottu olevan merkittävänä.

LED:ltä edellytetty noin yhden kertaluvun toimintaenergia-alue pystyttiin saavuttamaan hyvin yksinkertaisella teleskooppirakenteella. Teleskoopin toiminta perustuu siihen, että hiukkaset, jotka halutaan tunnistaa ja joiden energiat halutaan mitata, pysähtyvät aktiiviseen ilmaisimateriaaliin. Energian alarajan määrää vaatimus, että hiukkasen on lävistettävä ylin ilmaisinkerros ja anettava signaali seuraavasta kerroksesta. LED:ssä energian ylärajaksi määriteltiin 12 MeV protoneilla, ja tähän päästiin käyttämällä vain kahta ilmaisinkerrosta energian mittaamiseen ja kolmatta antikoinssidenssisuojana. Suurienergiaiset hiukkaset, joiden energiat ovat tarkasteltavan alueen yläpuolella, hylätään. Paitsi vaadittavaan energia-alueeseen, tämä ratkaisu riitti tyydyttämään myös hiukkasten tunnistamiseen liittyvän vaatimuksen ylä- ja alakerroksiin jäävien energioiden suhteesta. LED-sensorin rakenne on esitetty kuviossa 2.3 ja toiminta energia-alueet eräille alkuaineille kuviossa 2.4.

2.3.3 HED

HED:n (High Energy Detector) suunnittelutavoitteena oli ulottaa ERNE:n mittausalue mahdollisimman korkeisiin energioihin ottamalla samalla huomioon jyrkästi laskevien energiaspektrien asettamat vaatimukset. Instrumentin koko- ja massarajoitusten puitteissa näitä vaatimuksia oli mahdotonta täyttää käyttämällä vain pii-ilmaisimia. Jotta keräyskyky korkeimmillakin energioilla olisi riittävän suuri, on teleskoopin oltava rakenteeltaan lyhyt. Toisaalta aktiivisen ilmaisimateriaalin kokonaismassatiheyden on oltava mahdollisimman suuri, koska tunnistettavien hiukkasten on pysähdyttävä teleskooppiin. Kompaktin rakenteen aikaansaamiseksi päätettiin teleskoopin alimpina ilmaisimina käyttää pii-ilmaisinten sijasta tuikeilmaisimia. Piihin verrattuna tuikeaineen herkkyys on pienempi, mutta koska tuikeilmaisimilla mitattaisiin vain suurienergiaisia hiukkasia, jäisi suhteellinen virhe pieneksi. Tuikeaineiksi valittiin CsI(Tl) ja BGO, joista ensinmainitun valontuotto on suurempi ja siten herkkyys parempi. BGO, jota käytetään HED:n alimpina ilmaisimina, on taas erittäin suuren pysäytyskyvyn omaavaa materiaalia (tiheys $7,13 \text{ g cm}^{-2}$), jolla mitataan kaikkein suurienergiisimmat hiukkaset.



- S1: two layers of silicon strip detectors, 300 microns each
- S2: two layers of silicon strip detectors, 300 microns each
- D1: two layers of silicon detectors, 500 microns each
- D2: CsI(Tl) scintillator, 8.0 mm
- D3: BGO scintillator, 15.0 mm
- AC: anticoincidence detector, plastic scintillator, 5.2 mm

Kuvio 2.5 HED:n rakennekaavio.

HED:n toiminta-alueen alarajan määräksi vaatimus energia-alueen osittaisesta päällekkäisyydestä LED:n kanssa. Tämä oli helposti saavutettavissa suhtellisen

paksuillakin pii-ilmaisimilla. HED:ssä analysoitavan tapauksen aiheuttaa hiukkanen, joka kulkee vähintään kolmen ylimmän ilmaisinkerroksen läpi ja aiheuttaa havaittavan signaalin vielä neljännessä (kuvion 2.5 S2:n alempi kerros) eikä osu tuikeilmaisipaketin sivuilla oleviin antikoinssidenssi-ilmaisimiin (AC). HED:n kattamat energia-alueet joillakin ioneilla sekä likimääräiset geometriset tekijät eri energioilla on esitetty kuviossa 2.4.

Hiukkasten tunnistamisen tarkkuuteen, massan erotuskykyyn, vaikuttavat ilmaisinten energiaresoluutioiden lisäksi voimakkaasti hiukkasten kulkuratojen suunnista johtuvat vaihtelut. Mitä vinommassa suunnassa hiukkanen osuu ilmaisimeen lävistäen sen, sitä suurempi on sen energiahäviö ja siten sen aiheuttama signaali. Avaruudessa hiukkasten vuo on pääsääntöisesti isotrooppinen. HED:n suuren aukeamakulman (120°) vuoksi kulmavaihtelun aiheuttama vaihtelu mitatussa energiahäviössä on merkittävä, ja se on otettava huomioon tapausta analysoitaessa. LED:n tapauksessa ongelma pyrittiin välttämään rajoittamalla tulokulma mekaanisella kollimaattorilla. HED:ssä tämä ei ollut mahdollista jo suurienergiasten protonien läpäisykyvynkin vuoksi.

HED-sensorissa haluttiin saavuttaa hyvä massaresoluutio raskaimmillakin alkuaineilla, koska esimerkiksi raudan eri isotooppien runsauksilla on huomattavaa tieteellistä mielenkiintoa. Siksi oli pystyttävä tarkasti määrittämään saapuvan hiukkasen rata, ja sitä kautta selvittämään hiukkasen näkemä ilmaisimen efektiivinen paksuus. Kun rata tunnetaan, saadaan selville hiukkasen ilmaisimessa kulkema matka ja sen avulla voidaan korjata tulokulmasta riippuva energiahäviö.

Hiukkasen rata HED:ssä määritetään piinauhailmaisimilla S1 ja S2 (kuviokuva 2.5). Ilmaisimet kehitettiin ERNE-projektia varten Turun yliopiston ja valmistajan (Canberra N.V., Belgia) yhteistyönä. Myös VTT:n asiantuntemusta käytettiin hyväksi. Ilmaisinten aktiivinen alue on $70.0 \times 33.0 \text{ mm}^2$. n-tyypin piisubstraatin toiselle puolelle on implantoitu 33 p^+ -nauhaa, joiden leveys on 0.90 mm ja väli 0.10 mm. Nauhojen pituus on 70.0 mm. Ilmaisimen toinen puoli, ns. ohminen kontakti, on alumiinoitu. Nauhoja vastaan kohtisuorassa suunnassa paikan määrittystarkkuus on n. 1 mm eli sama kuin nauhojen leveys.

Elektroniikan yksinkertaistamiseksi nauhailmaisimet suunniteltiin siten, että voitiin käyttää kapasitiivista signaalilukutekniikkaa. Tämä vaatii nauhojen välille voimakasta kapasitiivista kytkentää. Kytkentä aikaansaatiin höyrystämällä vierekkäisten p^+ -nauhojen päälle alumiininauha siten, että Al-nauhan toinen reuna oli ohmisessa kontaktissa toiseen p^+ -nauhaan, mutta pääosin sen naapurin päällä erittäin ohuen piioksidikerroksen eristämänä. Tällöin vierekkäisten p^+ -nauhojen välille muodostui kapasitanssi, joka oli erittäin suuri verrattuna ao. nauhojen ja ilmaisimen pohjan välisiin kapasitansseihin. Näin syntyi kapasitiivinen siirtoketju, jonka läpi minkä tahansa nauhan kohdalla syntynyt varaus siirtyy tehokkaasti ilmaisimen reunoille. Reunoilta se luetaan kahdella varauserkällä vahvistimella. Varausten summa antaa hiukkasen kokonaisenergiähäviön ilmaisimessa ja toisen reunapulssin suhde kokonaisvaraukseen hiukkasen osumakohdan.

Kumpikin ilmaisimien S1 ja S2 koostuu neljästä nauhailmaisimesta. Kummassakin kaksi ilmaisinta on asennettu rinnakkain kahteen kerrokseen. Päällekkäiset kerrokset on asennettu siten, että niissä nauhojen suunnat ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan. Siten kummassakin kerroksessa S1 ja S2 hiukkasen paikka voidaan määrittää kahdessa

dimensiossa. Kun väli S1-S2 on tarkasti tunnettu, voidaan mitattujen kahden pisteen avulla hiukkasen rata määrittää, josta edelleen saadaan tulokulma. Kulman määrittystarkkuus on noin 1° HED:n näkökentässä.

Yhdistettynä HED:n laajaan aukeamakulmaan, tulosuunnan määrittämisellä on myös tieteellistä merkitystä. Hiukkasten tulosuuntien avulla pystytään määrittämään hiukkasvuon mahdolliset anisotropiat. Tämä liitettynä aikainformaatioon antaa arvokasta tietoa hiukkasten etenemisestä planeettainvälisessä avaruudessa ja hiukkasten kiihdytysympäristöstä.

2.3.4 Elektroniiikka

ESU:n elektroniikan pääosat ovat vahvistinyksiköt, diskriminaattorit, signaalien ohjaus- ja valintalogiikka, signaalien pulssinkorkeuden analyysiin liittyvät osat sekä tietokone. Kuviossa 2.6 on esitetty elektroniikan toiminnan periaatteellinen lohkokaavio.

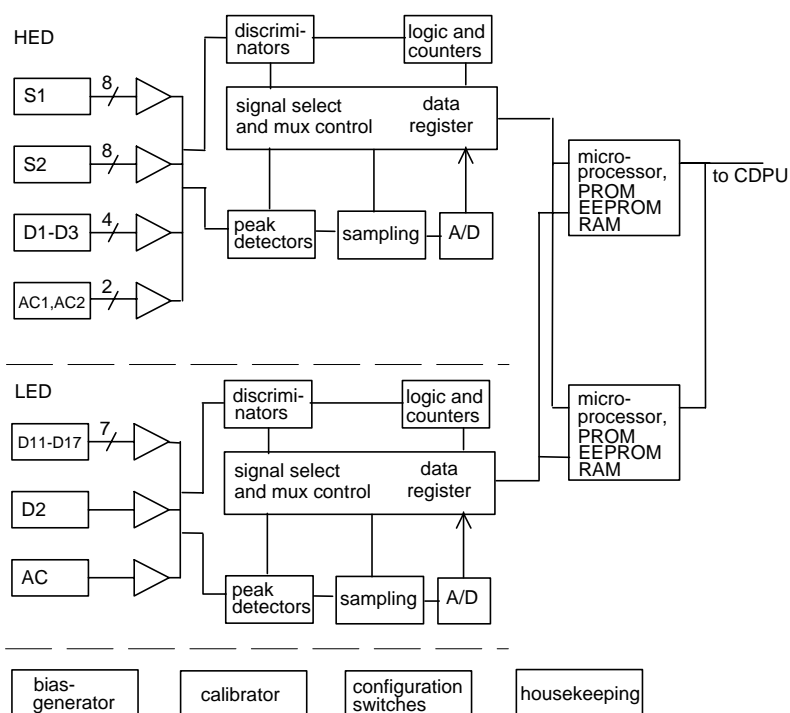
Tietokoneen päätehtäviin kuuluu instrumentin ohjaus toteuttamalla maasta lähetettävien telekomentojen edellyttämät toiminnot. Tärkeimpiä telekomennoin aikaansaatuja toimintoja ovat tehojen kytkentä sekä instrumentin konfigurointi erilaisiin toimintamoodeihin. Telekomennoilla voidaan myös tarpeen vaatiessa päivittää tietokoneen ohjelmistoja. Tieteelliseltä kannalta prosessorin tärkein tehtävä on luonnollisesti mittaustietojen kerääminen, talletus, analysointi ja siirtäminen CDPU:lle edelleen maahan lähetettäväksi. Muita tietokoneen tehtäviä ovat mm. valvontaparametrien arvojen kerääminen, talletus ja lähetys sekä ESU:n lämmönsäädön ohjauksen suorittaminen. Tietokoneen suunnittelusta ja toteutuksesta sekä sen käyttöjärjestelmästä vastasi VTT:n tietokonetekniikan laboratorio (nyk. VTT Elektroniiikka, Oulu). Tieteellisten analyysiohjelmien laatiminen oli Turun yliopiston vastuulla.

ESU:lla on kaksi tietokonetta, joista vain toinen on käytössä tietyllä hetkellä. Molemmat pystyvät kommunikoimaan kumman tahansa redundantin CDPU:n kanssa. Kaikki tietoliikenne ESU:n ja avaruusaluksen välillä tapahtuu CDPU:n kautta. Tietoliikenne käsittää sekä tiede- että valvontadatan ja telekomennot. Tiedot ESU:sta siirtyvät CDPU:lle kerran minuutissa yksinkertaisen protokollan mukaisesti asynkronisen sarjaväljän välityksellä.

ESU:n analogiaelektroniikan pääosat ovat 31 varausherkkää vahvistinta sekä niitä seuraavat muokkausvahvistimet (kuvio 2.6). Vahvistinketjujen tehtävä on muuntaa ilmaisimesta saadut erittäin pienet varauspulssit mitattaviksi jännitepulsseiksi. Samalla muokkausosassa signaalia suodatetaan kohinan minimoimiseksi. Varausherkkäksi vahvistimeksi valittiin erittäin suorituskykyinen, pienitehoinen avaruusvalifioitu kaupallinen hybridikomponentti. ESU:n ilmaisinten dynaaminen toiminta-alue on erittäin laaja, joka on seurausta vaatimuksesta ilmaista sekä kevyet hiukkaset (elektroni, protoni) että raskaat ionit (esim. rauta). Näiden hiukkasten ilmaisimiin jättämien energiahäviöiden suuruuksilla on maksimissaan yli neljän kertaluvun ero. Jotta sekä minimi- että maksimisignaali saatiin käsiteltävään muotoon, oli useimmissa muokkausvahvistimissa käytettävä kolmea vahvistinaluetta, joiden suhteelliset vahvistukset nominaaliarvoiltaan olivat 1:12:144. Näiden pulssinkorkeusanalyysiin tulevien hitaiden signaalien valinnan ohjaukseen tarvittiin lisäksi samasta varausvahvistimen signaalista muodostettuja nopeita

signaaleja, joilla oli kaksi eri vahvistusalueetta. Muokkausvahvistimien kokonaismäärä nousi siten 136:een. Näin suuren vahvistimäärän toteuttaminen erilliskomponenteilla ei ollut mahdollista. Tästä syystä päädyttiin vahvistimien hybridointiin. Vahvistinhybridien suunnittelusta ja valmistuksesta vastasi VTT:n elektroniikan laboratorio (nyk. VTT Elektroniikka, Oulu)

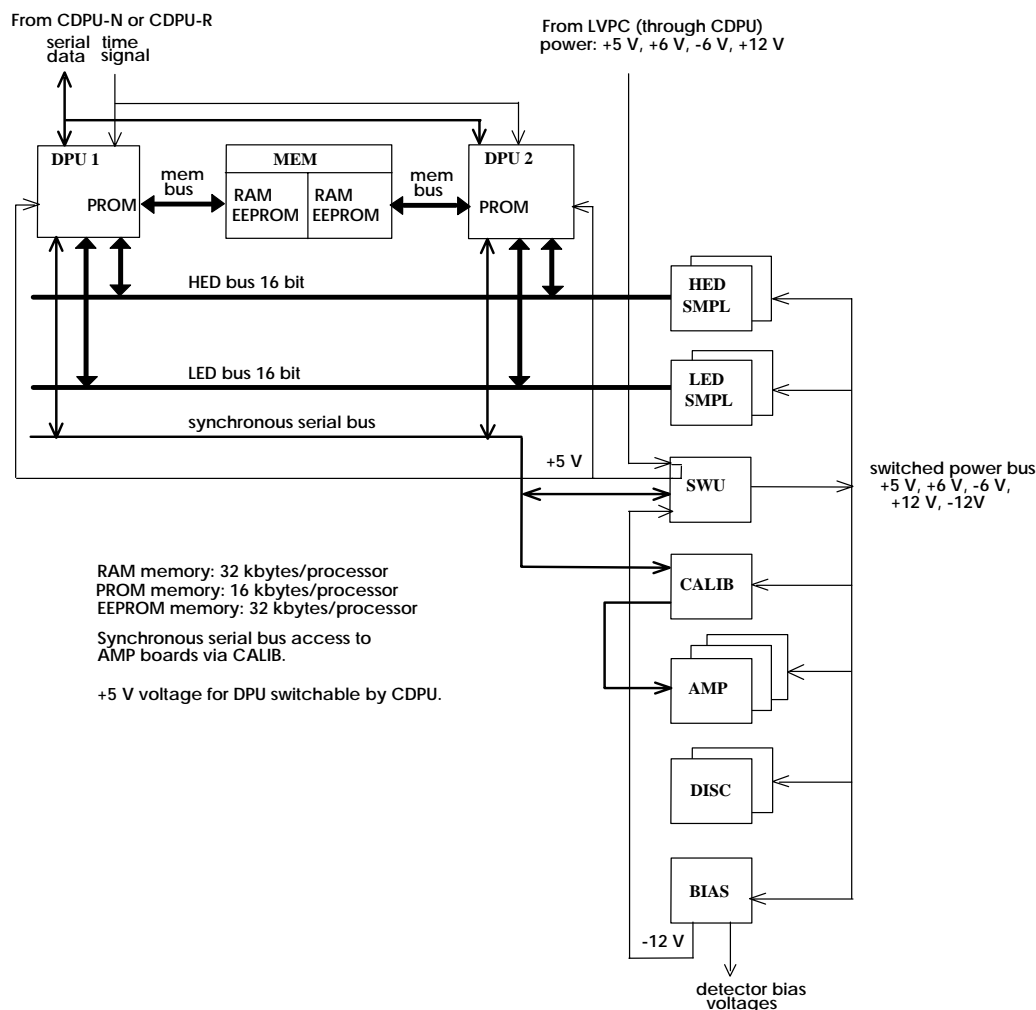
Vahvistinten hybridoinnin lisäksi toinen merkittävä elektroniikan kehitysprojekti ERNE:ssä oli logiikan toteuttaminen gate array -tekniikalla. Suunnittelusta vastasi tamperelainen Smartech Oy. Piirin valmistus tapahtui Matran Ranskan tehtailla. Gate arrayn rutiinitehtävä mittausten aikana on valita oikeat signaalit analysoitaviksi. Tämä tarkoittaa aktiivisten ilmaisinten signaalien valintaa optimaaliselta vahvistusalueelta. Informaatio, jonka perusteella gate array tekee päätöksen signaalien valinnasta saadaan diskriminaattoreilta. Gate array ohjaa myös huippuarvon ilmaisimia, pitopiirejä sekä AD-muuntimen toimintaa. Digitaaliseen muotoon muunnetut pulssinkorkeudet tallennetaan gate arrayn rekistereihin, josta tietokone käy ne lukemassa. Ohjaustoimintojen lisäksi gate array suorittaa myös muuta päätöksentekoa koskien esimerkiksi hyväksyttävää, analyysiin otettavia hiukkastapauksia sekä muodostaa diskriminaattorisignaaleista tiettyjä loogisia funktioita, jotka vastaavat hiukkasia eri energia-alueilla. Nämä rekisteröidään analysoitavista hiukkastapauksista riippumattomasti laskureihin.



Kuvio 2.6 Elektroniikan lohkoavaio.

ERNE-sensoryyksiköllä ei ole suoraa sähköistä liityntää avaruusalukseen, vaan teho- ja dataliitynnät tapahtuvat LVPC:n ja CDPU:n kautta. ESU:n elektroniikan käyttämät + 5 V, + 6 V, -6 V ja + 12 V jännitteet saadaan LVPC:stä. Näistä + 5 V on ESU:n tietokoneen käyttöjännite, ja sen voi CDPU telekomennolla kytkeä päälle ja pois. Muiden jännitteiden hallinta tapahtuu ESU:n sisäisillä kytkimillä.

Lisäksi ESU:n biasjännitelähteellä tuotetaan eräiden elektroniikan komponenttien tarvitsema -12 V sekä ilmaisinten biasjännitteet.



Kuvio 2.7 ESU:n teho-, data- ja ohjausliittynät.

Kuviosta 2.7 selviää elektroniikan toimintojen jako eri piirilevyille. Tietokoneet (DPU 1 ja 2) ja muisti (MEM), joka on jaettu kahteen riippumattomaan lohkoon, käsittävät kolme piirilevyä. Vahvistimet (AMP) ovat kolmella piirilevyllä, joista kaksi HED- ja yksi LED-sensoria varten. Sekä HED:n että LED:n tärkeimmät analogiaosat (HED SMPL, LED SMPL) on kahdennettu. Näillä piirilevyillä sijaitsevat ilmaisinsignaalien valintapiirit, pitopiirit ja analogia-digitaali -muuntimet. Myös signaalien valinnan ohjauksesta huolehtiva gate array -tekniikalla toteutettu logiikka sijaitsee samoilla piirikorteilla. Diskriminaattorien (DISC) tehtävänä on muuntaa kohinatason tai määrätyn korkeamman energia-arvon ylittävät ilmaisinsignaalit logiikkapulsseiksi. Kummallakin sensorilla on oma diskriminaattorikorttinsa. Diskriminaattorit ovat osittain redundanteja.

Elektroniikkaan kuuluvat lisäksi SWU-, BIAS- ja CALIB-piirikortit. SWU sisältää käyttöjännitekytkimet. Se suorittaa myös virtojen, jännitteiden ja lämpötilojen valvontaan liittyvät mittaukset. BIAS-kortilla tuotetaan edellä mainittu -12 V:n jännite sekä

ilmaisinten biasjännitteet, joilla on kuusi eri arvoa. Biasjännittegeneraattorit on kahdennettu siten, että tarvittaessa voidaan käyttää redundantteja generaattoreita, joiden lähtöjännitteet ovat 1,2-kertaiset nominaaliarvoihin verrattuna. CALIB-kortti sisältää pulssigeneraattorit, joiden avulla suoritetaan vahvistinkanavien lennonaikainen kalibrointi. Näitä sisäisiä signaalilähteitä käytettiin myös instrumentin toiminnalliseen testaukseen kaikissa vaiheissa kokoonpanon jälkeen.

Edellä luetellut 15 piirikorttia on kytketty toisiinsa äitilevyllä sijaitsevien analogia- ja digitaaliväylien kautta. Elektroniikan sisäisistä liittynöistä vain vahvistimille vietävät testipulssit on kytketty koaksiaalikaapeleilla CALIB- ja AMP-korttien välillä. Koaksiaalikaapeleita käytetään myös sensorien ja vahvistinkorttien välillä ilmaisinsignaaleja varten sekä sensorien ja BIAS-kortin välillä biasjännitteitä ja termistoreja varten. ERNE:n prototyypin ja teknisen mallin piirikortit valmistettiin kotimaassa. Lento- ja varalentomallin piirikorttien tuotannosta vastasi ulkomainen avaruusvalifioitua valmistutekniikkaa käyttävä toimittaja.

ERNE:n lento- ja varalentomallien elektroniikan toteutukseen osallistuivat aikaisemmin mainittujen VTT:n laboratorioiden ja Smartech Oy:n lisäksi VTT:n Instrumenttitekniikan laboratorio (nyk. VTT Automaatio), Finnyards Oy, Mariachi Oy sekä Collab Ky.

2.3.5 Mekaniikka-, lämpö- ja sähköinen systeemisuunnittelu

ERNE:n mekaniikka- ja lämpösuunnittelusta vastasi VTT:n Instrumenttitekniikan laboratorio. Tietokoneen ohjauksessa tapahtuva lämmönsäädön ohjaus suunniteltiin puolestaan VTT:n tietonetekniikan laboratoriossa. Mekaniikan valmistuksesta, elektroniikkakortteja lukuunottamatta, vastasivat VTT/INS ja Tumo Oy.

2.3.5.1 Mekaniikkasuunnittelu

Mekaniikkasuunnittelun pääkohteita olivat instrumentin kotelo, sensorit ja elektroniikka. Suunnittelun lähtökohtana oli kevyt ja kestävä rakenne. Sekä koko instrumentin (ESU, LVPC) että sensorien koteloiden päävalmistusmenetelmänä oli työstäminen kiinteästä alumiinista. Suunnittelua pyrittiin varmentamaan teoreettisilla rasite- ja dynaamisilla analyyseilla sekä kokeellisella moodianalyyseillä. Periaatteessa koteloiden suunnittelu ja valmistaminen oli suoraviivaista, joskin eräiden toleranssivaatimusten ja rakenneratkaisujen johdosta suurta huolellisuutta sekä materiaalin käsittelyn ja työstön kokemusta vaativaa.

Mekaniikkasuunnitteluun kuului myös oleellisena osana materiaalien valinta. Keveyden vuoksi materiaaleina käytettiin edellä mainitun alumiinin lisäksi pääasiassa erilaisia muoveja. Kaikki materiaalit pyrittiin valitsemaan ESA:n avaruuskäyttöön hyväksymien materiaalien listalta. SOHO:n instrumenttien keskeinen vaatimus oli muoveista tyhjössä tapahtuvan aineiden haihtumisen (outgassing) minimoiminen. SOHO-projektin vaatimuksiin kuului materiaali- ja prosessilistan ylläpito, josta vastasi VTT:n Instrumenttitekniikan laboratorio.

Sensoreissa mekaniikkasuunnittelun vaativimmat osat olivat ilmaisinten kiinnitykset ja ilmaisinten sähköisten kontaktien mekaaninen rakenne. Sensoreista erityisesti HED:n suunnittelussa tulivat esille myös kokoonpanon asettamat vaatimukset. HED toteutettiin moduulirakennetta käyttämällä. Sensorien erityispiirteinä olivat tyyppihuuhtelukanaavat.

Kokoonpanon jälkeen sensorit pyrittiin pitämään aina puhtaalla typpikaasulla täytettyinä, kaasun vaihtuessa hiljaisella virtauksella.

Elektroniikan mekaniikkasuunnittelussa tärkeintä oli piirikorttien koon, muodon, paksuuden ja niiden välisen etäisyyden määrittelyjen jälkeen piirikorttien tuenta. Tässä suhteessa suunnittelu kuitenkin epäonnistui ja ERNE:llä oli suuria vaikeuksia sekä teknisen mallin että vielä lentomallinkin tärinätestien läpäisyssä. Ongelmat ratkaistiin kuitenkin ilman viivästyksiä toimituksissa käyttämällä värähtelyjä vaimentavaa materiaalia piirikorttien välissä.

2.3.5.2 Lämpösuunnittelu

Termisesti ESU on ns. itsenäisesti kontrolloitu ja LVPC kollektiivisesti kontrolloitu yksikkö. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että ESU on avaruusaluksesta termisesti mahdollisimman hyvin eristetty ja LVPC taas siihen mahdollisimman hyvin yhteydessä. LVPC:n lämpösuunnittelu oli tältä osin suoraviivainen ja suunnittelussa vain varmennettiin riittävä lämmön siirtyminen kuumista pisteistä rungon kautta avaruusalukseseen sekä johtamalla että säteilemällä.

Koska ESU on termisesti eristetty avaruusaluksesta, tapahtuu lämpöenergian siirto ESU:sta säteilemällä avaruuteen. ESU:n etuosaan suunniteltiin radiaattori, joka on päällystetty peilimäisellä, optisella aurinkoheijastimella (OSR, Optical Solar Reflector) (kuvio 2.2). Heijastimen toiminta perustuu siihen, että sen absorptio auringon valon aallonpituusalueella on pieni ja emissio infrapuna-alueella suuri. Heijastimen pinta-ala valittiin arvioidun jäähdystarpeen mukaan.

Optisen heijastimen ominaisuudet muuttuvat ajan mukana siten, että sen absorptio kasvaa. Jotta jäähdysteho vielä usean vuoden lennon jälkeen olisi riittävä, yllimitettiin radiaattorin koko lennon alkuvaiheen vaatimukseen nähden. ESU:n lämpötilan pitämiseksi vakiona koko lennon ajan käytetään lennon alkuvaiheessa lämmittämiä, ja niiden tehoa pienennetään sitä mukaa kuin radiaattorin jäähdyttävä vaikutus pienenee.

Vaatus instrumenttien lämpötilan vakioarvosta koko lennon ajan tuli SOHO-projektilta. Syy tähän oli lämpötilan vaihteluiden aiheuttamien, avaruusaluksen runkoon kohdistuvien rasitusten minimoiminen. Tämä vaatimus taas johtui optisten instrumenttien erittäin suuresta kohdistustarkkuudesta. Jotta ESU:n lämpötila voitaisiin pitää vakiona, suunniteltiin tietokoneen ohjauksessa toimiva lämmönsäätöalgoritmi. Algoritmin toiminta perustuu kerran minuutissa mitattavien elektroniikkapiirien käyttämien virtojen ja jännitteiden arvoista laskettuun tehoon. Elektroniikan tehohäviön muuttuessa lämmittämiä säädetään siten, että ESU:n sisäinen lämpötila pysyy vakiona.

ESU:n lämpösuunnittelun erityispiirteinä olivat sensorien apertuurien päällä olevat kalvot. Kalvojen primaarisena tehtävänä on ilmaisinten suojaaminen auringon valolta. Lämpösuunnittelun kannalta kalvojen materiaalien ja pinnoitteiden valinnalla on kuitenkin keskeinen merkitys. Epäonnistuneet valinnat voivat aiheuttaa ilmaisinten liiallisen lämpenemisen ja vaikuttavat siten suoraan instrumentin tieteelliseen suorituskykyyn. ESU:n sensoreissa käytettiin kullattua kaptonkalvoa ja aluminoitua mylarkalvoa.

2.3.5.3 Sähköinen suunnittelu

Sähköisen suunnittelun kannalta häiriökysymykset, sekä niiden aiheuttaminen että niiden sieto, ovat erittäin keskeisellä sijalla. Sekä ESU:lla että LVPC:llä häiriöongelmat aiheuttivat lisätyötä. LVPC:n osalta teknisen mallin EMC-testeissä todettiin liian suuri emissiotaso tietyillä taajuuksilla. Näistä kuitenkin selvittiin vähäisin muutoksin jännitesuodatusta parantamalla.

ESU:lla ongelmat olivat paljon vaikeammat ilmaisielektroniikan suuren herkkyden vuoksi. Häiriöongelmien vuoksi ESU:n kahden prototyypin elektroniikan suorituskykytestaus jäi puutteelliseksi, ja vielä teknisen mallinkin osalta oltiin suurissa vaikeuksissa. Vahvistinkanavissa ilmenevien häiriöiden vuoksi suorituskyky ei ollut edes tyydyttävä. Suurimpana häiriölähteinä olivat ilmaisinten biasjännitegeneraattorit. Myöskään maadoituskonsepti ja johdotusten suojaus eivät olleet parhaat mahdolliset. Elektroniikkatoimittajien hellittämättömän työn tuloksena kaikki ongelmat oli kuitenkin ratkaistu lentomallia rakennettaessa. Lentomallin suorituskyky oli jo erittäin hyvä. Merkittävin parannus tekniseen malliin nähden oli biasjännitelähteen uudelleensuunnittelu kiinnittäen erityisesti huomiota säteilevän emission eliminoimiseen suojauksella. Myös sensorien maadoitusta ja johtimien ja liittimien suojausta parannettiin.

2.3.6 Luotettavuus

SOHO-projektin taholta ei instrumentille asetettu varsinaisia luotettavuuskriteerejä. Epävirallisesti ESU:lle ja LVPC:lle tehtiin joitakin luotettavuuslaskelmia vikataajuuden arvioimiseksi. Koska varsinaisia vaatimuksia ei kuitenkaan ollut, jäivät tulokset melko kvalitatiiviselle tasolle.

ERNE:n toimintavarmuuden takaaminen perustuu pääosin kriittisten osien kahdentamiseen. LVPC:iin rakennettiin kaksi identtistä muunninta, jotka kytkettiin avaruusaluksen kahteen redundantiin teholiittymään.

ESU:ssa täydellisesti kahdennettuja osia ovat tietokone ja muisti, signaalien ohjaus- ja valintalogiikka mukaanlukien gate array ja pulssinkorkeuksien analyysiin käytetyt piirit sekä biasjännitelähteet. Lisäksi varsinaisesti kahdennettuja osia on diskriminaattoreilla. Nämä osat voidaan siis vian sattuessa korvata identtisillä uusilla osilla suorituskyvyn mitenkään muuttumatta. Lisäksi ESU:ssa on redundanttisuutta, jota voidaan tarvittaessa hyödyntää, mutta joka alentaa suorituskykyä esimerkiksi pienentämällä instrumentin keräyskykyä, kun käytetään vain osaa ilmaisimista.

Ilmaisinten todennäköisin vika on vuotovirran kasvaminen esimerkiksi säteilyvaurioiden vaikutuksesta niin suureksi, että syntyvä kohina häiritsee muiden, vaurioitumattomien ilmaisinten toimintaa. Tällaisessa tapauksessa häiritsevän ilmaisimen signaalit voidaan gate arrayn ohjauksella kytkeä irti elektroniikasta. Instrumenttia voidaan myös rekonfiguroida kytkemällä käyttöjännitteet pois virheellisesti toimivista osista.

Elektroniikan suunnittelussa kiinnitettiin huomiota myös sen säteilykestoon. SOHO on maan säteilyvyöhykkeiden ulkopuolella, joten säteilyn keston vaatimukset eivät ole kovin korkeat. Yleiseksi vaatimukseksi asetettiin 15 kradin kokonaisannoksen sieto. Suunnittelussa SEU- ja lukkiutumisen ilmiöiden esiintyminen pyrittiin minimoimaan.

Instrumentin toiminnan perusajatuksena on jatkuvien mittausten suorittaminen pysyen koko ajan samassa toimintamoodissa. Siten kaikki muutokset instrumentissa ja telekomentojen lähettäminen minimoidaan. Normaalisti mittaukset keskeytetään vain instrumentin vahvistinkanavien kalibroinnin ajaksi. Tämä suunniteltiin tehtäväksi rutiininomaisesti kerran kuussa, mutta tämäkin on osoittautunut tarpeettomaksi ja SOHO:n lennon neljän ensimmäisen kuukauden aikana kalibrointi tehtiin vain kerran.

3. On-board ohjelmisto

3.1 Organisaatio

ERNEn lento-ohjelmistosta vastaavat VTT:n Elektroniikan laboratorio Oulussa sekä Turun yliopiston avaruustutkimuslaboratorio. VTT:n vastuulla ovat käyttöjärjestelmä ja apurutiinit mukaanlukien instrumentin valvonta- ja seurantatietojen keruu. Avaruustutkimuslaboratorio vastaa tieteellisen mittausohjelmiston suunnittelusta ja toteutuksesta.

3.2 Laitteisto

3.2.1 Prosessori

ERNEn prosessoriksi valittiin Marconi MAS-281 (McDonnell-Douglas MDC-281). Prosessori oli nopea muihin saatavilla olleisiin avaruuskelpoisiin vaihtoehtoihin verrattuna ja sen säteilykestävyys hyvä sekä tehonkulutus pieni. MAS-281 tukee USA:n ilmavoimien MIL-STD-1750A käskykanta-arkkitehtuuria.

3.2.2 Muisti

Tehorajoitusten vuoksi tietojenkäsittely-yksikön muistin määrä on varsin rajoitettu. Käytössä on 16 kilotavua käynnistys muistia (ROM), 32 kilotavua käyttömuistia (RAM), sekä 32 kilotavua jälleenohjelmoitavaa staattista muistia (EEPROM). Käynnistyksen yhteydessä käynnistysmuisti kopioidaan RAM:lle ja ROM-kytketään pois. Täten varsinaisen lento-ohjelmiston työtilaksi jää 16 kilotavua.

3.2.3 Liitospinnat

ERNEn ilmaisinyksikön (ESU) sisäinen tiedonsiirto DPU:n sekä SWU- ja CALIB-yksiköiden välillä on toteutettu käyttäen synkronista sarjaliitääntä. DPU:n ja CALIB-yksikön välinen linkki on yksisuuntainen (DPU -> CALIB) ja SWU liitäntä on kaksisuuntainen. Sensorien tiedonsiirto DPU:lle tapahtuu gate arrayn välityksellä. Kummankin sensorin välillä on 16 kpl. rinnakkaista datalinjaa, 6 kpl. osoitelinjoja sekä 4 kpl. kontrollilinjoja.

ESU DPU:n ja CEPAC DPU:n (CDPU) välillä on kaksisuuntainen asynkroninen sarjaväylä.

3.2.4 Ohjelmointikieli

Ohjelmointi oli toteutettava assembler kielellä sillä muistirajoitusten vuoksi korkeampien ohjelmointikielten käyttö oli mahdotonta. Samasta syystä ERNEn käyttöjärjestelmä (EOS), reaaliaikaydintä myöten, oli kirjoitettava itse. Laitteiston ainutkertaisuuden takia myös elektroniikan ohjelmistoliittynät matalan tason laiteajureita myöten ovat vartavasten ERNE instrumenttiin suunniteltuja.

3.2.5 Kehitysympäristö

Ohjelmiston kehitysympäristöksi valittiin Sabtech Information Systems AG:n PC-pohjainen ratkaisu. Pääasiallisena valintakriteerinä oli hinta, joka oli huomattavasti raskaampia työasemapohjaisia vaihtoehtoja alhaisempi. Valittu MAS-281, kuten tyypillisesti muutkin avaruuskelpoiset vaihtoehdot, edustaa yhdysvaltalaisista sotilastekniikka ja lisävaikeutena oli hankinta-ajankohtana suurten laitetoimittajien varovaisuus Suomen suhteen. Sveitsissä toimivan Sabtechin kanssa näitä ongelmia ei ollut.

Systemi koostuu MS-DOS käyttöjärjestelmän alaisuudessa toimivista Assembler kääntäjästä, linkkeristä, PC-kortilla olevasta Fairchildin F9450 MIL-STD-1750A prosessorista sekä tämän kanssa toimivista lataajasta ja debuggerista. Lisänä ovat omien ohjaus- ja testausohjelmien teon mahdollistavat aliohjelmakirjastot.

Kokemusten perusteella ratkaisun ideaalisuus voidaan asettaa kyseenalaiseksi. Kääntäjän ja linkkerin toiminnoissa oli useita puutteita ja virheitä ja toimittajan tuki aluksi vähäistä ja lopuksi olematonta. Useita miestyökuukausia on kulunut systeemiperäisten vaikeasti paikallistettavien virheiden etsintään sekä erilaisten 'ad hoc' käytäntöjen ja apuohjelmien kehittelyyn näiden virheiden välttämiseksi.

3.3 Käyttöjärjestelmä ja käyttäjäprosessit

ERNEn lento-ohjelmisto koostuu kahdesta tasosta: käyttäjäprosessit ja käyttöjärjestelmän ydin.

ERNEn käyttöjärjestelmän reaaliaikaydin tarjoaa seuraavat palvelut:

1. Systeemin alustus
2. Matalan tason laiteajurit
3. Prosessien skedulointi
4. Keskeytysten alkukäsittely
5. 'Postilaatikot' prosessien väliseen kommunikointiin (Mailboxes)
6. Semaforit prosessien keskinäiseen synkronointiin (Semaphores)
7. Prosessien viivästyttäminen (Delaying)

Tärkeimmät käyttäjäprosessit ovat:

1. ERNE DPU - CEPAC DPU -kommunikaatio
2. HED ja LED -tapausten analyysi
3. Telekomentojen käsittely
4. HED:n ja LED:n kalibrointiajot
5. Seurantaparametrien (HK-data) keräys ja lähetys
6. Lämpökontrolli

3.4 Mittausohjelmistot

3.4.1 Seurantaparametrit (valvontadata)

ERNE-laitteiston toiminnan ja kunnan seuranta varten kerättävä valvontadata, muodostaa oman erillisen kokonaisuutensa. Käyttöjärjestelmä huolehtii sen keräämisestä ja lähettämisestä edelleen CDPUn kautta avaruusaluksen H/K-kanavaan. Valvontadata tuotetaan operointimoodista riippumatta aina kun DPU on käynnissä.

3.4.2 Mittaustiedot (tiededata)

Tieteellisen mittaustiedon koontiin ja lähetykseen on käytössä kaksi 5756:n tavun telemetriapuskuria, joista toista täytetään samalla kuin toista lähetetään CDPU:lle ja edelleen avaruusaluksen datankäsittelyyn välitettäväksi.

3.4.2.1 Calibration- ja Maintenance-moodien mittaus

CALIB- ja MAINT- moodeissa puskurit täytetään ilmaisinten (HED ja LED) tuottamilla pulssinkorkeusdatoilla siten, että HED-tapaukset (26 tavua/tapaus) kirjoitetaan alkaen puskurin alusta loppuun päin ja vastaavasti LED-tapaukset (8 tavua/tapaus) lopusta alkuun päin. Jos puskurit tulevat täyteen kyseisen minuutin mittaus lopetetaan. Systeemillä ei ole käytössään minkäänlaista priorisointialgoritmia, joten se detektorit, jotka tuottavat enemmän dataa saa puskurista myös suuremman osan käyttöönsä.

3.4.2.2 ON-moodin mittaus

ERNE:n varsinaista mittauskonfiguraatiota kutsutaan ON-moodiksi. ERNE:n tiededatalle varattu kaistaleveys (767 b/s) on liian pieni, jotta kaikki ilmaisinten havaitsemat hiukkaset voitaisiin lähettää maahan pelkkinä pulssinkorkeustietoina. Suurien auringonpurkausten

yhteydessä hiukkastapauksia on tuhansia sekunnissa ja hiljaisenakin aikana HED-mittausalueella näkyvä galaktinen tausta useita satoja hiukkasia minuutissa.

Yli 99 % instrumenttien havaitsemista hiukkasista koostuu vedyn ja heliumin isotoopeista. Koska näiden kevyiden hiukkaslajien tunnistaminen on suhteellisen yksinkertaista, on päädytty menettelyyn jossa kevyet hiukkaset tunnistetaan ja käsitellään lentotietokoneella, ja maahan lähetetään vain näiden energia- ja kulkusuuntajakaumia kuvaavat taulukot. Raskaampien hiukkasten tiedot lähetetään pakattuina pulssinkorkeuksina (PHD). Myös keveiden hiukkasten tiedot kirjoitetaan PHD-muodossa sitä myöten kuin tila sallii. Tämän lisäksi ON-moodimittaus kykenee säätelemään vety-isotooppien ja läpäisevien hiukkasten otantataajuuksia gate-array:n 'sample rate divider' toimintoja ohjaamalla, jolloin suurimmatkaan odotettavissa olevat vuotiheydet eivät tuki systeemiä.

4. Instrumentin kokoonpano, testaus ja integrointi avaruusalueeseen

4.1 Mekaaninen ja sähköinen kokoonpano

LVPC:n kokoonpanosta vastasi Finnyards Oy. Myös LVPC:n piirilevyjen kokoaminen tehtiin Finnyards Oy:ssa. Kotelon ja muut mekaaniset osat toimitti VTT. ESU:n mekaaninen kokoonpano tapahtui VTT:n instrumenttitekniikan laboratoriossa. Instrumenttitekniikan laboratoriossa suoritettiin myös jonkin verran ESU:n piirikorttien komponenttien asennusta, mutta pääosin tämä tehtiin Mariachi Oy:ssa. Mariachi Oy vastasi myös ESU:n ja LVPC:n kaapeleiden valmistamisesta. ESU:n mekaanisen kokoonpanon päävaiheet olivat sensorien kokoaminen sekä sensorien, piirikorttien ja muiden osien asentaminen ESU:n koteloon. Kummankin sensorin kokoamisesta ja ESU-kotelon asennuksista laadittiin etukäteen yksityiskohtaiset ohjeet työn oikean ja harkitun etenemisen varmistamiseksi. Erityistä huomiota kiinnitettiin myös puhtauteen. SOHO:lla on optisten instrumenttien suorituskyvyn takaamiseksi erittäin korkeat puhtausvaatimukset.

Ennen elektroniikan asentamista ESU-koteloon kukin piirilevy testattiin ensin erikseen ja koko elektroniikka testattiin myöhemmin piirilevyjen integrointitestissä. Integrointitestissä varmennettiin liityntöjen yhteensopivuus sekä pyrittiin selvittämään elektroniikan kokonaisuuden suorituskykyä. Testit tehtiin niitä varten erityisesti suunnitellussa ympäristössä, joka mahdollisti mittausliityntöjen helpon kiinnityksen. Mittauksissa sensorit eivät olleet mukana, vaan vahvistimilla käytettiin keinokuormia. Integrointitestit tehtiin tekniselle mallille ja lentomallille VTT:n tietokonetekniikan laboratoriossa ja varalentomallille Turun yliopistossa.

Elektroniikan integrointitestauksen jälkeen piirilevyt lakattiin ja paahdettiin vakuumissa. Lakkauksen suoritti VTT:n tietokonetekniikan laboratorio. Vakuumpaahto tehtiin Turun yliopistossa ja siihen liittyivät myös outgassing-mittaukset.

4.2 Testaus

4.2.1 Tekninen suorituskyky

Elektroniikan suorituskykytestit käsittivät edellämainitut piirikorttien yksikkötestit ja integrointitestauksen. Yksikkötestin tarkoitus oli varmistua spesifikaatioiden toteutumisesta ja integrointitestissä selvitettiin yksiköiden yhteensopivuus. Kokoonpanon jälkeen ESU:lle tehtiin rajoitettu toiminnallinen testi (Limited Performance Test), joka sittemmin toistettiin monia kertoja eri yhteyksissä sekä täydellinen toiminnallinen testi (Comprehensive Performance Test), joka oli aikaa vievä ja erittäin monipuolinen toimintojen ja suorituskyvyn testaus. Näiden testien suunnittelusta ja toteutuksesta vastasi Turun yliopisto.

LVPC:lle oli laadittu Finnyards Oy:n toimesta ennen luovutusta suoritettavien testien spesifikaatiot, jotka ERNE-organisaatio oli hyväksynyt. Finnyards Oy myös vastasi testien suorittamisesta ja raportoinnista.

4.2.2 Tieteellinen suorituskyky

ERNE:n tieteellistä suorituskykyä testattiin useissa hiukkaskiihdytinajoissa. Testaukset aloitettiin jo sensorien varhaisilla prototyypeillä, jolloin saatuja tuloksia pystyttiin käyttämään apuna suunnittelussa. Alkuvaiheessa pääasiallisina testauspaikkoina olivat Jyväskylän yliopiston syklotroni sekä ISN:n SARA-laitteisto Grenoblessa. Tuolloin Jyväskylästä oli mahdollisuus saada vain protoni- ja heliumsuihkuja, kun taas Grenoblessa oli mahdollisuus käyttää raskaampia ioneja kalsiumiin asti.

Varsinaiset kalibroinnit tekniselle mallille sekä lento- ja varalentomallille tehtiin ISN:ssä Grenoblessa, GSI:ssä Darmstadtissa, Giessenin yliopistossa, GANIL:ssa Caenissa sekä Gentin yliopistossa. Näistä Giessenissä ja Gentissä käytössä olivat elektronisuihkut ja muissa paikoissa raskasionisuihkut. Grenoblen syklotronin energia-alue mahdollistaa etupäässä LED:n kalibroinnin, kun taas GANIL kattaa HED:n alkupään energiat. Kaikkein suurienergiasimpien suihkujen aikaansaamiseksi oli käytettävä GSI:n synkrotonia, jolloin päästiin HED:n energia-alueen ylärajalle. Jyväskylän yliopiston uutta syklotronia hyödynnettiin varalentomallin tuikeilmaisinosan testauksessa suurienergiasilla protoneilla.

Tieteellisen suorituskyvyn testaus oli luonnollisesti Turun yliopiston vastuulla. Kiihdytintestien tulosten analyysia varten kehitettiin erilaisia menetelmiä, jotka voitiin ottaa sellaisinaan käyttöön myös lennonaikaisen datan analysoinnissa.

4.2.3 Ympäristötestit

ERNE:lle suoritettiin SOHO-projektin vaatimat ympäristötestit. Näitä olivat värinä-, akustinen-, termobalanssi-, termovakuumi- ja EMC-testit. Värinä-, akustinen- ja termobalanssitestit tehtiin ERNE:lle yksikkötasolla, kun taas termovakuumi ja EMC-testit tehtiin CEPAC-laitteistolle samanaikaisesti.

Tärinätestit tehtiin VTT teletekniikan laboratorion (nyk. VTT-Automaatio) johdolla PTL/TELE:n testauslaboratoriossa. Tärinätestit tehtiin kaikilla malleille, tekniselle mallille ja lentomallille kvalifikaatiotasolla. Lentomallin kvalifikaatiotasoa johtui siitä, että tekninen malli ei läpäissyt testiä, eikä sen uudelleenqualifiointia suoritettu.

Akustinen testi tehtiin vain tekniselle mallille IABG:ssa Saksassa. Myös termobalanssitesti tehtiin ainoastaan tekniselle mallille. Suorituspaikkana oli VTT:n teletekniikan laboratorio.

Teknisen mallin termovakuumi- ja EMC-testit tehtiin VTT:n teletekniikan laboratoriossa. Näitä edelsi CEPAC-laitteiston integrointi Instrumenttitekniikan laboratorion tiloissa. Lento- ja varalentomallin TV- ja EMC-testit tehtiin IABG:llä lähinnä VTT:llä suoritettussa teknisen mallin TV-testissä ilmenneiden vaikeuksien vuoksi.

Edellämänittujen lisäksi tehtiin ESU:lle yksinään joitakin lämpötestejä VTT:n Instrumentitekniikan laboratoriossa. Niin ikään LVPC:lle tehtiin lämpötestejä Finnyardsin toimesta. ESU:n, LVPC:n ja molempien yksiköiden kaapeleiden puhtaustestit, joihin sisältyi vakuumpipahto, tehtiin Turun yliopistossa. Vakuumpahdossa mukana olleet testilevyt analysoitiin ESTEC:ssä.

4.3 Integrointi

CEPAC-laitteiston integrointi suoritettiin kaikkien osien yhteensopivuuden takaamiseksi. Esimerkiksi ESU:n ja LVPC:n yhteenliittäminen realistisella tavalla edellyttää CDPU:n paikallaoloa. Ennen CEPAC-integrointia myöskään LVPC:n ja CDPU:n liityntää ei oltu testattu. ESU:n prosessorin ja CDPU:n yhteistoimintaa oli sen sijaan jo aikaisemmin tutkittu Espanjassa. Liityntöjä avaruusalukseseen jäljiteltiin integroinnissa avaruusalussimulaattorilla. Simulaattori oli kaupallinen ESA:n spesifikaatioiden mukaan valmistettu laite, joka sisälsi data-, telekomento- ja teholiitynnät. CEPAC-laitteistoa komennettiin maatumilaitteiston (ks. luku 5) avulla avaruusalussimulaattorin välityksellä.

Teknisen mallin CEPAC-integrointi toteutettiin VTT:llä instrumentitekniikan laboratorion johdolla. Koska lento- ja varalentomallin TV- ja EMC-testit siirrettiin IABG:lle, suoritettiin siellä myös näiden mallien integrointi Turun yliopiston toimesta.

ERNE:n integrointi avaruusalukseseen oli kokonaan Turun yliopiston vastuulla. Instrumentin luovutusta edelsivät vastaanottokatselmukset, joihin sisältyivät kattavan dokumenttipaketin (Acceptance Data Package) tarkastus, instrumentin toiminnallinen testaus sekä puhtaustarkastus. Dokumenttipaketti koostui pääasiassa valmistuksen ja testauksen yhteydessä laadituista raporteista, ohjeista ja piirustuksista sekä yhteenveto-osista. Kaikkien luovutettujen mallien osalta yhteensä dokumenttipaketin arvioitu laajuus oli noin 3000 sivua. Kokoamisesta vastasi Turun yliopisto. Instrumentin toiminnallinen testaus ja puhtaustesti tehtiin kuljetuksen jälkeen Portsmouthissa.

Hyötykuormamoduulin mekaaninen ja sähköinen integrointi tehtiin Matra-Marconi Spacessa Portsmouthissa. ERNE:n osalta mekaaninen integrointi käsitti lähinnä yksiköiden kiinnittämisen hyötykuormamoduulin runkoon sekä kaapelien kiinnittämiset. Sähköisessä integroinnissa testattiin teho-, data- ja telekomentoliitynnät. Mekaaninen ja

sähköinen integrointi suoritettiin Matra-Marconin laatimien proseduurien mukaisesti. Yksittäisen instrumentin integroinnin jälkeen suoritettiin kyseisen instrumentin toiminnallinen testaus avaruusaluksen osana. Toiminnallinen testaus suoritettiin instrumentin toimittajan laatimien testisekvenssien mukaan. Kaikki myöhemmin suoritettu toiminnallinen testaus tehtiin samoja, integroinnin yhteydessä verifioituja ja referenssitulokset antaneita proseduureja käyttämällä. Hyötykuormamoduulin integrointivaihe päättyi kaikkien instrumenttien toimintojen yhtäaikaiseen testaukseen (System Functional Test), joka lentomallin osalta tehtiin kesäkuun lopussa 1994.

Koko avaruusaluksen, hyötykuormamoduulin ja huoltomoduulin, integrointi ja ympäristötestit tehtiin Matra-Marconi Spacessa ja Intespacessa Toulousessa. SOHO:n lentomallin ympäristötestit käsittivät värinätestin, akustisen testin, EMC-testejä, joita osittain oli tehty jo tekniselle mallille sekä termobalanssi- ja termovakuumitestit. Toiminnallisia systeemitestejä tehtiin sekä ympäristötestien yhteydessä että erikseen välittömästi avaruusaluksen integroinnin jälkeen sekä juuri ennen siirtoa Kennedy Space Centeriin. Avaruusaluksen integrointi ja testaustoiminnot lentomallin osalta Toulousessa kestivät tasan vuoden.

Elokuussa 1995 SOHO siirrettiin lentokuljetuksella kokonaisuutena suoraan Toulousesta Cape Kennedyyn. Laukaisun valmistelu kesti neljä kuukautta. Siihen sisältyi kaksi maasegmentin toiminnan testausta, jolloin verifioitiin, paitsi itse maasegmentin suorituskyky komentamalla avaruusalusta ja instrumentteja Goddard Space Flight Centeristä, myös instrumenttien lennonaikaisten komentoproseduurien toimivuus. Instrumenttien osalta viimeinen toimenpide ennen laukaisua oli suojakansien (red-tag items) poisto ennen huoltomoduulin tankkausta.

5. Maatukilaitteisto

Maatukilaitteiston (EGSE, Electrical Ground Support Equipment) tehtävänä on toimia testaus- ja kehitystyökaluna instrumentin rakentamisen aikana, sekä lennon aikana ottaa vastaan instrumentin tuottama telemetriavirta satelliittioperaattorin maasegmentistä.

SOHO-projektissa kehitetty EGSE ESU/CEPAC-instrumenteille voidaan jakaa erilaisiin aliyksiköihin esimerkiksi siten, että otetaan jaon pohjaksi kronologisessa järjestyksessä tapahtunut kehitys, tai sitten ottamalla pohjaksi systeemin sähköisten liityntäpintojen määrittelyt. Täten päädytään seuraaviin määrittelyihin kronologisessa määrittelyssä:

- i) detektoritason EGSE (pre-box level)
- ii) aliyksikkötason EGSE (box level / sub-unit level)
- iii) yksikkötason EGSE (unit level)
- iv) systeemitason EGSE (system level)
- v) lennonaikainen EGSE (flight time)

Näistä yksikkö- ja systeemitaso, sekä lennonaikainen EGSE ovat oleellisesti samanlaisia laitteita sähköisten liityntöjensä suhteen, joten liityntäpintojen mukaan jaoteltaessa päädytään seuraaviin määrittelyihin:

- i) detektoritason EGSE
- ii) aliyksikkötason EGSE
- iii) SOHO-tason EGSE

SOHO-projektissa satelliitin toimittajan, eli Matran, kannalta olleellisia maatukilaitteistoja ovat vain yksikkö-, systeemitason sekä lennonaikainen EGSE, koska vain näillä on liityntäpinta satelliitin rakentajan testauslaitteistoon. Toisaalta koko testauksen filosofia perustuu luonnollisesti siihen että laitteistot pyrittiin testaamaan mahdollisimman pienissä yksiköissä integroinnin edistyessä, joten myös aliyksikkö- ja detektoritason EGSE:t olivat olleellisia testauslaitteistoja varmistauduttaessa instrumenttien tieteellisestä ja teknillisestä suorituskyvystä.

Finnyards kehitti LVPC:lle oman EGSE:n, jota käytettiin LVPC:n testaamiseen ennen CEPAC-laitteiston integrointia eri testauslaboratorioissa. LVPC:n EGSE sisältää suorat liitynnät LVPC:n satelliitti- ja CDPU-liitäntöihin, joten kun CEPAC laitteisto on integroitu satelliittiin, niin LVPC:n EGSE:ä ei voida enää käyttää LVPC:n testaamiseen. Näin siis kaikki LVPC:n valvonta tapahtuu SOHO-tasolla yksikkötason EGSE:llä.

Seuraavassa esitetään eri maatukilaitteet niiden liityntäpintojen mukaan jaoteltuina. Näin päädytään kolmeen eri maatukilaitteistoon joita kutakin voidaan käyttää vain tietyn vaiheen aikana tapahtuvaan testaamiseen.

5.1 Detektoritason EGSE

ERNE:n sensoriyksikön tieteellisen suorituskyvyn testaaminen alkoi detektorien karakterisoinnilla. Tätä tehtävää silmälläpitäen Avaruustutkimuslaboratoriossa suunniteltiin ja rakennettiin kaksi mittauslaitteistoa. Nämä laitteistot ovat automaattinen detektorien paksuuskartoituslaitteisto jolla tutkittiin pii-detektorien aktiivisen alueen paksuusvaihteluja, sekä monikanavainen pulssinkorkeusanalysointilaitteisto jolla selvitettiin detektorien hiukkas / pulssi -vastetta.

Lisäksi Turun yliopiston Elektroniikan ja tietotekniikan laboratoriolta tilattiin hiukkasstimulaattori, jolla voitiin simuloida hiukkasten jättämiä varauspulsseja detektoreissa ja näin tutkia analogiaelektroniikan toimintaa.

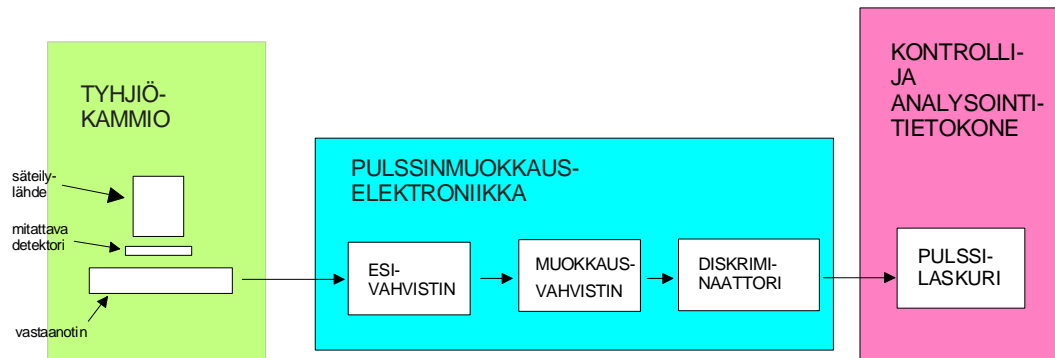
5.1.1 Detektorien paksuuskartoituslaitteisto

Detektorien massanerotuskyvyn yksi osatekijä on sen paksuuden vaihtelut. Toisin sanoen, mitä vähemmän detektorin aktiivisessa alueessa on paksuusvaihtelua, niin sitä tarkemmin tietyssä kulmassa detektoriin saapuvat hiukkaset kulkevat saman matkan detektorialueella riippumatta siitä mihin kohtaan detektoria ne osuvat.

Paksuuskartoituslaitteisto koostuu viidestä osasta:

- i) digitaalinen siirtopöytä ja säteilylähde
- ii) vakuumikammio
- iii) pulssinmuokkauselektronikka
- iv) pulssilaskuri
- v) kontrolli ja analysointitietokone

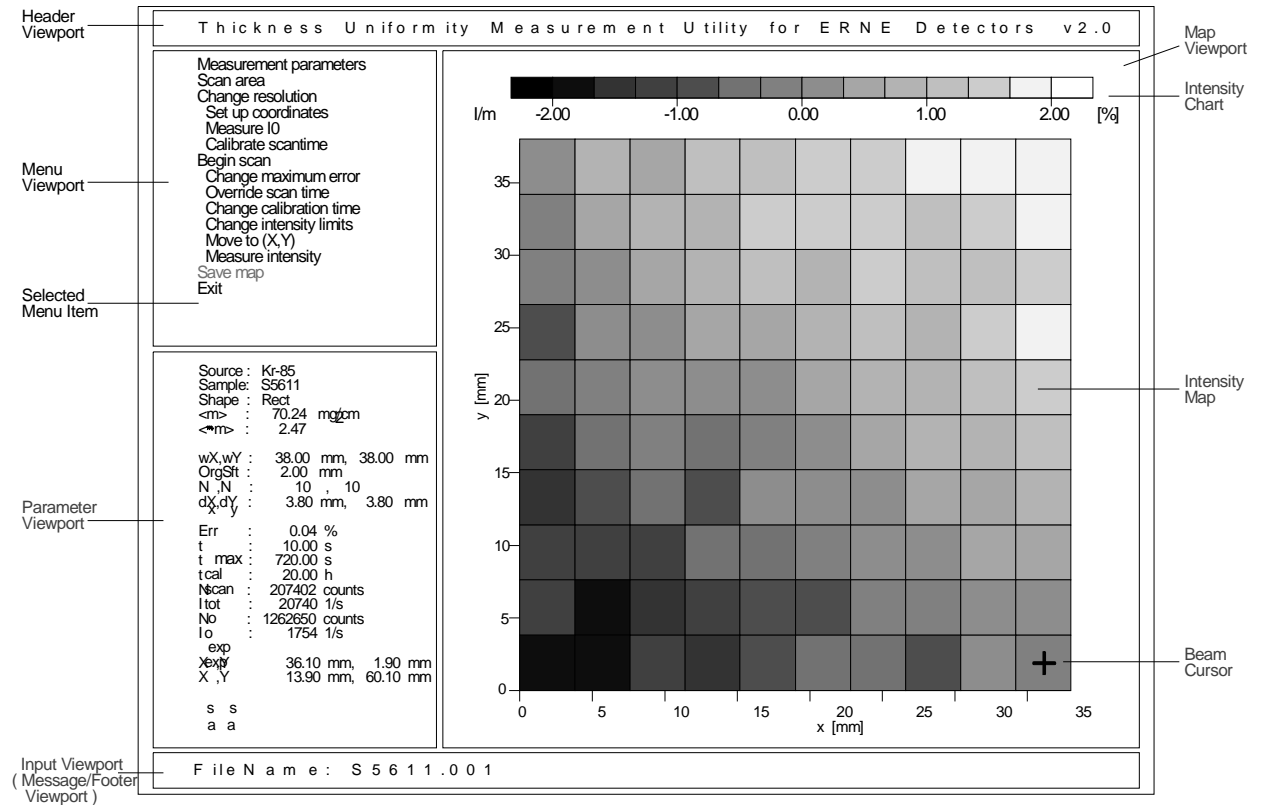
Kuviossa 5.1 on esitetty paksuuskartoituslaitteiston rakennekuva.



Kuvio 5.1 Paksuuskartoituslaitteiston rakennekuva.

Mittaus perustuu siihen että mitattavan detektorin yläpuolelle asetetaan kapeakeilainen beta-lähde ja alapuolelle vastaanotin (detektori) jolla mitataan beta-lähteen säteilyä. Näin beta-säteet joutuvat kulkemaan mitattavan detektorin läpi, joten mitä paksumpi detektori on keilan kohdalla, niin sitä enemmän siihen absorboituu säteilyä. Kun nyt mitattava detektori on kiinnitetty siirtopöytämekanismiin jolla sitä voidaan liikuttaa x-y -tasossa kontrollitietokoneen avulla, niin pulssilaskurilla voidaan laskea kussakin x-y -pisteessä pulssien määrä ja näin muodostaa paksuuskartta.

Kuviossa 5.2 on esitetty paksuuskartoituslaitteiston kontrollitietokoneen käyttäjäliityntä. Ohjelmisto on tehty Borland Pascal:illa ja apuna on käytetty Borlandin grafiikkakirjastoja datan esittämiseen graafisesti.



Kuvio 5.2 Paksuuskartoituslaitteiston käyttäjäliityntä.

Avaruustutkimuslaboratoriossa kehitettyä paksuuskartoituslaitteistoa voidaan käyttää sekä pyöreiden että suorakaiteen mallisten detektorien paksuusvaihteluiden mittaamiseen.

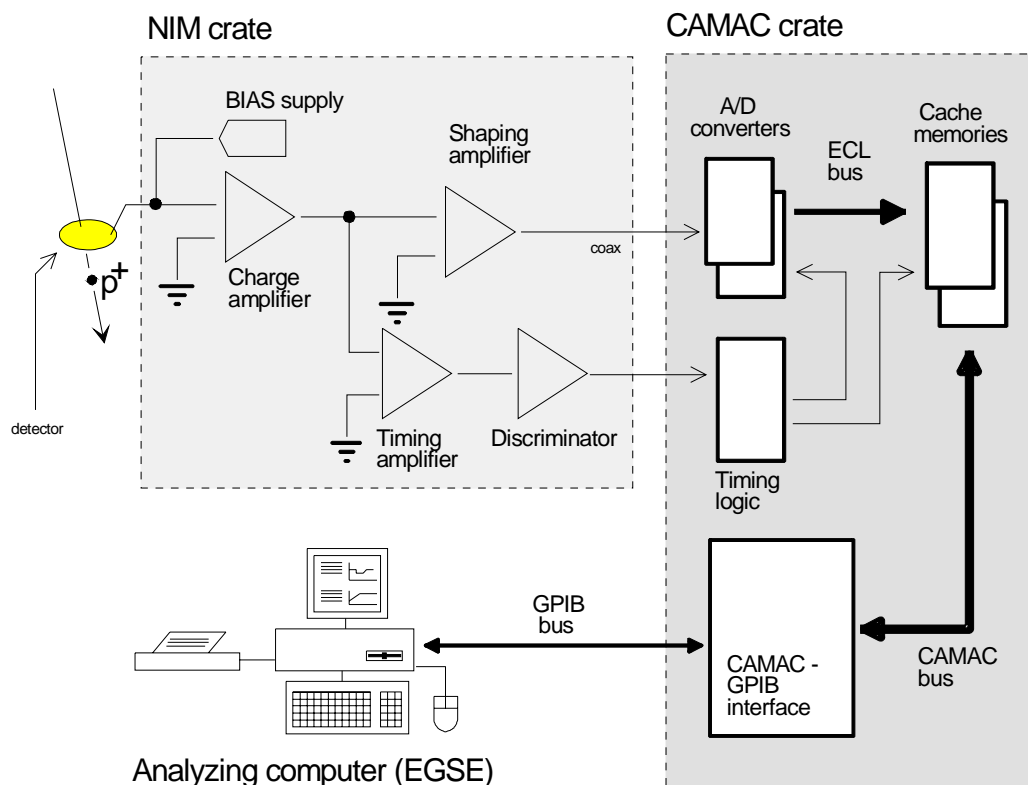
5.1.2 Ohjelmoitava pulssinkorkeusanalysointilaite

Kun detektoreita alettiin testata projektin alkuvaiheessa todettiin pian, että kaupalliset monikanavaiset pulssinkorkeusanalysointilaitteet olivat joko liian kalliita tai aivan liian rajoittuneita monimutkaisen detektorirakenteen testaamiseen ja datan esittämiseen reaaliajassa. Tällöin päätettiin suunnitella ja rakentaa ohjelmoitava monikanavainen pulssinkorkeusanalysointilaite, joka voitiin ottaa mukaan mittaus- ja testausmatkoille. Koska laitteisto on helposti siirrettävissä, niin kiihdytinlaboratorioissa ei tarvinnut turvautua paikallisiin mittalaitteisiin, joten mittaukset saatiin aloitettua välittömästi ilman että tarvitsi opetella paikallisten mittalaitteiden toimintaa.

Ensimmäinen analysointilaite perustui LeCroy:n 16 kanavaiseen FERA varaumuunninlaiteeseen, sekä LeCroy:n cache-muisteihin jotka perustuvat CAMAC-standardiin. Ko. konstruktion aikana oli se, että detektorien muodostama pulssi jouduttiin ensin muokkaamaan varaumuunninlaiteella jolloin tehdään itse asiassa varaus / jännite -muunnos, jonka jälkeen varaumuunnin ei enää ollut paras mahdollinen laite pulssin digitoimiseen. Tästä ongelmasta päästiin eroon ottamalla käyttöön kaksi kappaletta SILENA:n 8 kanavaista peak-and-hold tyyppistä muunninlaiteita. Lisäksi rakennettiin CAMAC-standardin mukainen

ajoitusmoduli joka tuotti A/D-muutimen ja cache-muistien tarvitsemat ajoitussignaalit yhdestä ulkopuoliselta elektroniikalta saatavasta ajoituspulssista.

Laitteiston rakennekuva on esitetty kuviossa 5.3.



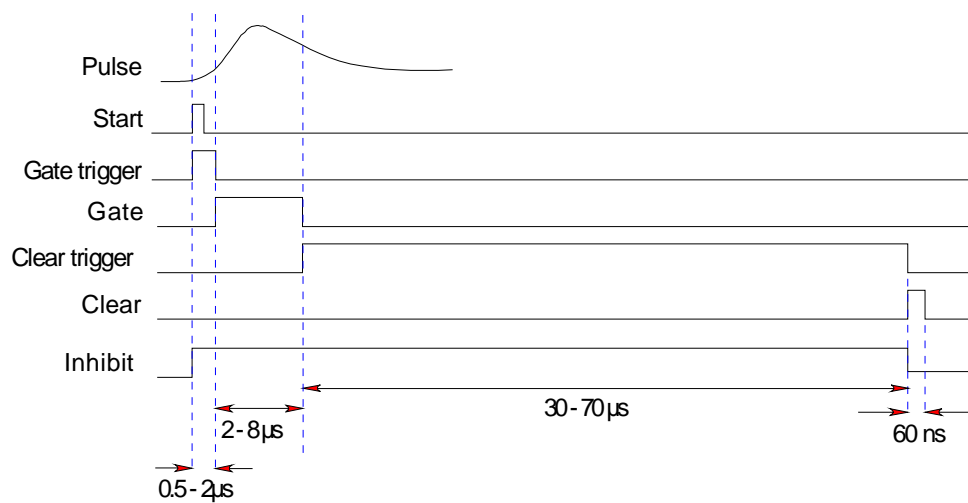
Kuvio 5.3 Detektoritason EGSE.

Laitteistoon kuuluu lisäksi NIM-moduleja joissa sijatsevat detektorien tarvitsemat bias-jännitegeneraattorit, varaus- ja pulssinmuokkausvahvistimet sekä diskriminaattorit. Nämä ovat kaupallisia laitteita joita on käytetty myös muissa laboratorion projekteissa. Tietokoneen ja CAMAC-väylän väliseen tiedonsiirtoon käytettiin GPIB-väylää. Tietokoneena käytettiin IBM:n PS/2 model 80 tyyppistä mikrotietokonetta, jossa oli 8MB keskusmuistia. Ohjelmistoon lisättiin myös laboratoriossa kehitetty muistinhallintayksikkö, jolloin kontrolliohjelmiston käyttämät datarakenteet voitiin pitää keskusmuistissa. Täten muistiin saatiin kerralla mahtumaan 8 kpl kolmeuloitteista matriisia joiden dimensiot ovat 384 x 384 x 256 bittiä ja lisäksi 16 kappaletta kaksiuloitteista energiaspektriä. Näin mittauksesta saatiin reaaliajassa seurattua mittauksen edistymistä ja muodostettua käsitys oliko statistiikka riittävä myöhempiä analyysejä silmälläpitäen.

Laboratoriossa kehitetty ajoitusmoduli on nelivaiheinen tilakone, jonka muodostama sekvenssi on kuvion 5.4 mukainen. Detektoriin osuva hiukkanen käynnistää syklin jolloin gate trigger -pulssi avaa laskevalla reunallaan A/D-muuntimen gate-piirin ja peak-and-hold elektroniikka alkaa seurata hiukkanen detektoriin jättämän pulssin jännitettä. Kun

ennalta säädetty aika on kulunut niin A/D-muuntimen gate suljetaan ja tehdään clear-pulssi jolla A/D-muunnin asetetaan odottamaan uutta hiukkasta. Samalla cache-muistin lukuelektronikka käynnistetään jolloin muunnetut datat siirtyvät A/D-muuntimelta cache muisteihin käyttäen ECL-väylää.

Cachemuistien käyttö perustuu siihen, että data voitiin puskuroida CAMAC systeemissä ennen sen lähetystä mittaustietokoneelle. Mittaustietokone tarkisti CAMAC-systeemiltä periodisesti oliko cache-muistit täynnä, ja jos ne olivat, niin data siirrettiin GPIB-väylän kautta mittaustietokoneelle. Näin laitteiston tehokkuutta voitiin lisätä huomattavasti kun mittaustietokoneelle siirrettiin 16 kilosanana paketeissa.



Kuvio 5.4 Pulssinkorkeusanalysoijan tilakoneen ajoituskaavio

Mittauslaitteisto on helposti siirrettävissä ja sen kokonpaneminen ja purkaminen kestää korkeintaan muutamia tunteja. Lisäksi laitteistoa voidaan jatkossa käyttää myös muissa vastaavissa projekteissa.

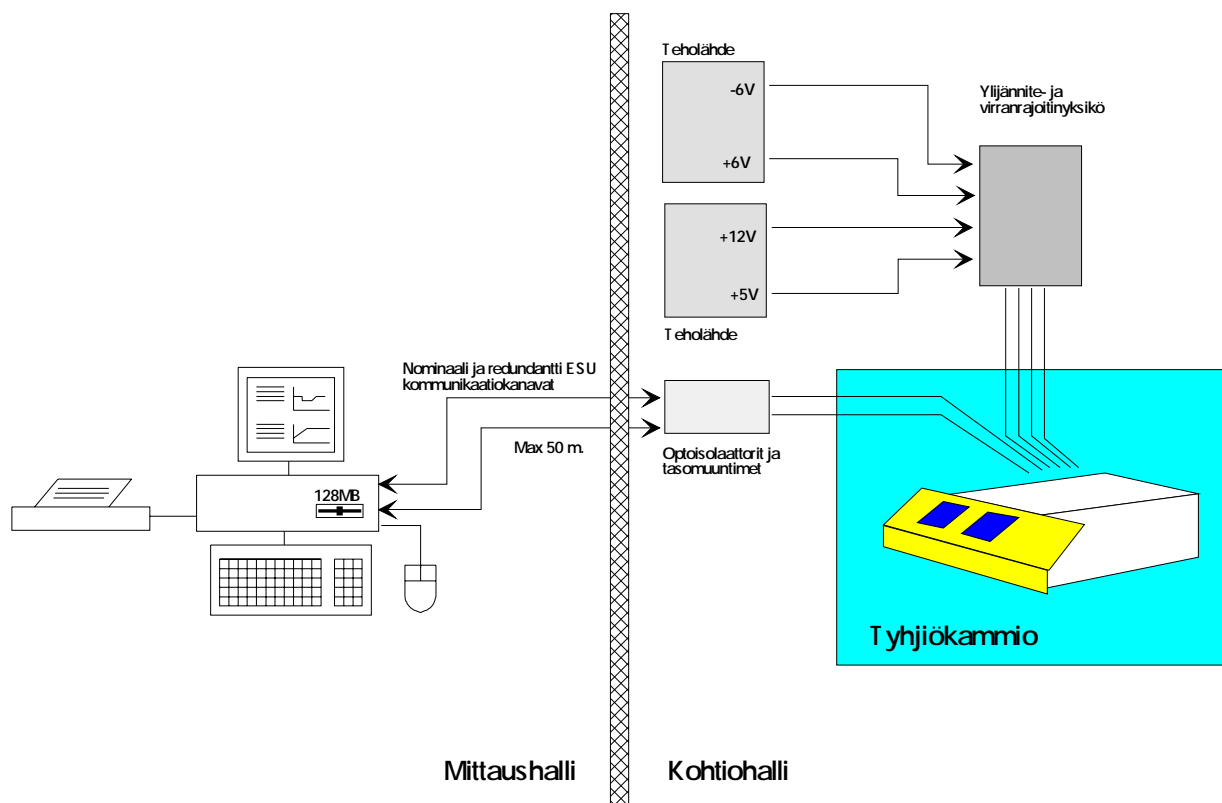
5.1.3 Stimulaattori

Analogiaelektronikan testaamista varten rakennettiin lisäksi stimulaattori, jolla voitiin detektoriin injektoida pieni varaus, joka elektronikan kannalta näytti kuin hiukkanen olisi osunut detektoriin. Tällaisella laitteella voitiin kokeilla mitä tapahtui kun detektoriin osui hiukkanen, joka jätti erilaisia varauksia kuhunkin detektorikerrokseen.

Stimulaattori oli lisäksi kauko-ohjattava, joten sitä voitiin käyttää hiukkaskiihdytinmittauksissa siten, että stimulaattori oli sijoitettu kohtiohalliin ja ohjaus tapahtui SEGSE:llä mittaushallista käyttäen sarjaväylää. Ohjausta varten stimulaattorin käyttäjäliityntä toteutettiin siten että käskyt voitiin välittää joko näppäimistöä tai sarjaväylän avulla.

5.2 Aliyksikkötason EGSE

Kun ESU:n eri osat olivat integroitu niin pitkälle, että sitä voitiin ohjata siten kuin ohjailu normaalisti lennonaikanaikin tapahtuu, eli ESU:n telekomento- ja telemetriakanavien kautta, niin tarvittiin maatumilaitteisto, jonka liityntä ESU:un tapahtuu em. kanavien kautta. Tällainen EGSE on varsinaisesti CDPU-emulaattori, koska se toimii ESU:n kannalta aivan kuten CDPU:kin.



Kuvio 5.5 Aliyksikkötason EGSE.

Laitteisto muodostuu (kuvio 5.5) teholähteistä, ylijännite- ja virtasuojista, optoisolaattoreista sekä mittaus tietokoneesta. Teholähteen tehtävänä oli jäljitellä LVPC:tä, jolloin tehonsyöttö ESU:un vastasi lennonaikaista tilannetta ja ylijännitesuojat tarvittiin mahdollisten virhekytkentätilanteiden varalle. Lisäksi optoisolaattorit suojasivat ESU:n CDPU-liityntää mahdollisilta linjoilla tapahtuvilta jännitepiikkien aiheuttamilta vaurioilta. Tasonmuuntimet tarvittiin koska mittaus tietokoneen liityntöinä käytettiin standardin mukaisia RS232 sarjaportteja joissa käytetään ± 12 voltin jännitetasoja, kun ESU:n kommunikaatiokanavissa käytettävät jännitetasot ovat +5 voltia.

5.2.1 Aliyksikkötason mittauslaitteisto

Mittaus tietokoneena käytettiin kiihdytintesteissä IBM:n PS/2 model 80 ja 90 tyyppisiä mikrotietokoneita, joissa oli 128 tai 200 megatavun magneto-optinen levy muisti datan arkistointia varten. Muissa testeissä kuten esim. termovakuumi ja värinätesteissä

käytettiin tilanteesta riippuen joko em. laitteistoja tai jopa kannettavia ns. lap top tietokoneita. Laitteiston keskusmuisti vaihteli testaustilanteesta riippien 1 - 32 megatavun välillä, joten systeemin ohjelmiston oli otettava tämä huomioon ajon aikana.

Näytönohjaimena oli kiihdytintesteissä IBM:n XGA-2 grafiikkaprosessori, jolla päästiin 1024 x 768 pikselin erotuskykyyn kun käytössä oli 256 väriä. Värejä käytettiin erityisesti matriisien esityksessä havainnollistamaan tapausten lukumäärää tietyssä x-y -koordinaatiston pisteessä. Muissa testeissä yleensä riitti pelkkä tekstinäyttö valvontadatojen esitykseen.

Kommunikointiin ESU:n kanssa käytettiin kahta normaalia sarjaporttia, joten sekä ESU:n nominaali että redundanti DPU voitiin testata ilman että liittimiä vaihdettiin testauksen aikana.

5.2.2 Aliyksikkötason ohjelmisto

Ohjelmistot on kirjoitettu suurimmaksi osaksi Borlandin Pascal kielellä. Poikkeuksena ovat grafiikkaprosessorin ja sarjaliikennepiirin ohjelmistomoduulit, sekä muistinhallintayksikkö, jotka ovat kirjoitettu assemblerilla. Muistinhallintayksiköllä voitiin ohittaa käyttöjärjestelmästä johtuva rajoitus datamuistin koossa, jolloin datarakenteiden käsittely tuli helpommaksi ja nopeammaksi kun kaikki matriisit ja spektrit mahtuivat kerralla muistiin, eikä tarvittu virtuaalimuistin käyttöä.

Datarakenteina olivat 111 kpl kolmiulotteista matriisia, joiden dimensiot ovat 512 x 512 x 256 bittiä, ja lisäksi 77 kaksiulotteista 4096 kanavaista energiaspektriä. Nämä ovat erityisesti ESU:n detektorirakenteen edellyttämiä vaatimuksia, joten ohjelmisto ei sinänsä ole yleiskäyttöinen toisin kuin detektoritason kohdassa kuvattu maatukilaitteisto.

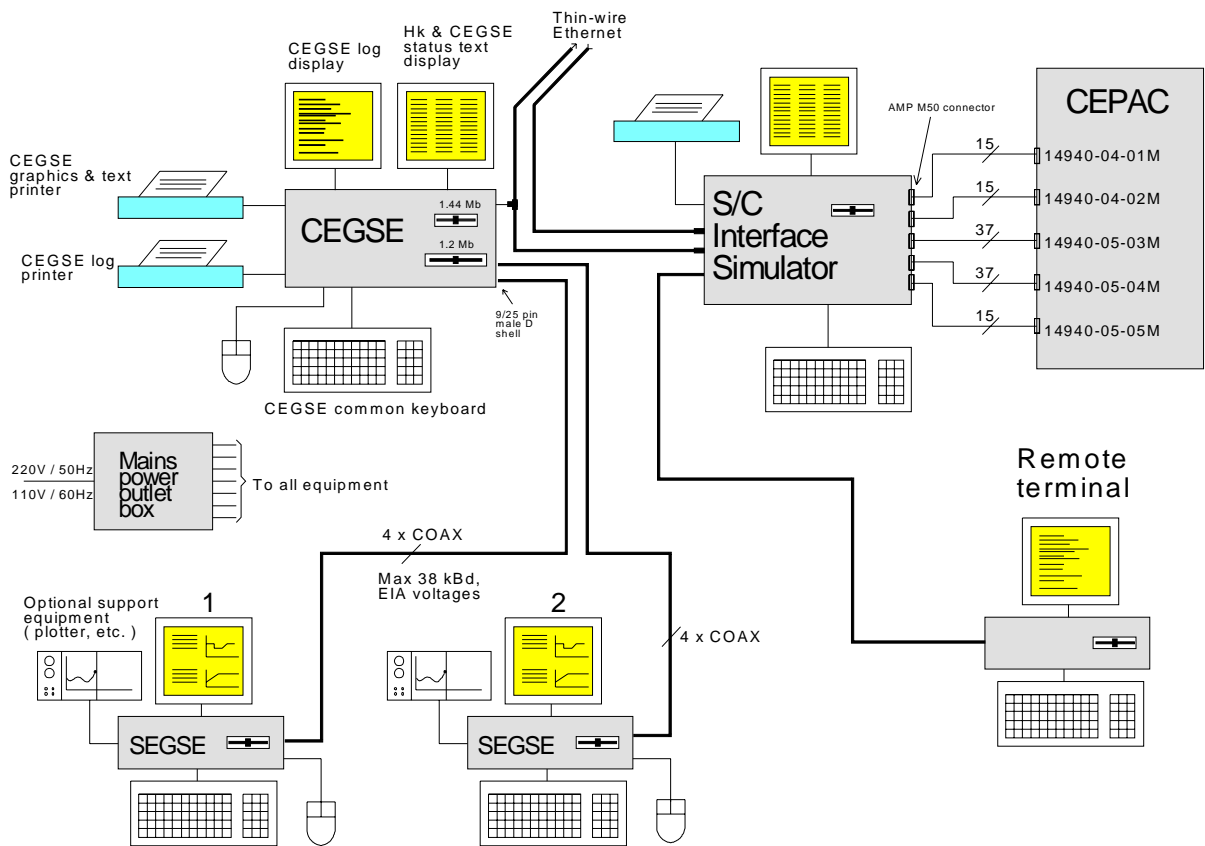
Matriisien tarvitsema muistilohkon koko on 29 megatavua ja spektrien tarvitsema koko on 1.3 megatavua. Lisäksi ohjelmakoodille ja käyttöjärjestelmälle varattiin 1 megatavu, joten maksimissaan tarvittiin 32 megatavua keskusmuistia. Mikäli mittauskoneessa ei ollut näin paljon muistia, ohjelmisto skaalasi datarakenteita siten, että ensin kokeiltiin mahtuiko muistiin pelkät spektrit ilman matriiseja, ja lopuksi mikäli muistia oli alle 4 megatavua suoritettiin ohjelma ilman graafisia näyttömoodeja. Täten ohjelmistoa voitiin käyttää myös kannettavissa mikrotietokoneissa, joissa ei ole kehittyntä grafiikkanäytönohjainta tai laitteistoissa joissa ei ollut riittävästi muistia suurille datarakenteille.

Ohjelmisto sisältää lisäksi interaktiivisen liittynnän ESU:un jolla voitiin suorittaa ennalta ohjelmoituja testisekvenssejä, sekä manuaalisesti lähettää telekomentoja sekä valvonta- ja tiededatan siirtokomentoja ESU:lle. Testisekvensseissä käytetty ohjelmointikieli suunniteltiin erityisesti ESU:n toimintoja silmälläpitäen, mutta vastaavanlainen komentokieli oli olemassa myös SOHO-tason testauksissa. Valvontadatat tulkittiin EGSE:n näytölle fyysisinä yksikköinä mittauksen edistyessä, joten instrumentin toimintaa voitiin seurata reaaliajassa.

5.3 SOHO-tason EGSE

SOHO-projektin alkuvaiheessa jouduttiin tilanteeseen, jolloin ESA edellytti että COSTEP- ja ERNE-projektit käyttävät yhteistä liityntää maasegmenttiin. Tästä oli seurauksena se, että CEPAC maatuksilaitteisto sisältää yhden yhteisen tietokoneen jonka kautta kaikki CEPAC:in komennot ja data kulkevat.

SOHO-tasolla ei maatuksilaitteistoa enää siis liitetä CEPAC-laitteistoon tai sen eri instrumentteihin, vaan liityntä tapahtuu ns. maasegmenttiin. Riippuen millä tasolla testaus tai operointi tapahtuu, on maasegmentin rakennekin erilainen. Oleellista kuitenkin on, että tiedon siirtoon käytetään samaa fyysistä ja loogista menetelmää oltiin sitten yksikkö-, systeemi- tai lennonaikaisella tasolla.



Kuvio 5.6 SOHO-tason EGSE.

CEPAC maatuksilaitteisto (kuvio 5.6) SOHO-tasolla koostuu neljästä mikrotietokoneesta, jotka ovat liitetty toisiinsa sarjaliikennöintiväylällä. Laitteistoon kuuluu CEGSE (Common Electrical Ground Support Equipment) sekä kullekin CEPAC:in sensorille (LION, EPHIN, ESU) yksi SEGSE (Sensor Electrical Ground Support Equipment). Kuviossa 5.6 avaruuslussimulaattorin tilalla voi operointitasosta riippuen olla esimerkiksi NASA:n maasegmentti tai Matran CCS segmentti.

Telemetriavirran vastaanottajana toimii CEPAC CEGSE, joka vastaanottaa CEPAC:in tuottaman informaation maasegmentistä käyttäen ESA:n määrittelemää pakettiprotokollaa. Tämä protokolla on suunniteltu erityisesti satelliittidatan siirtämiseen ja se on yleisesti käytössä useissa ESA:n satelliiteissa. Protokolla mahdollistaa minkä tahansa SOHO:on liittyvän datan vastaanoton mille tahansa maatuokilaitteelle, joten eri tutkimusryhmät voivat hyödyntää eri instrumenttien tuottamaa dataa reaaliajassa.

CEPAC maatuokilaitteisto on ohjelmoitu vastaanottamaan CEPAC:in valvonta- ja tiededatan, sekä osan SOHO:n huoltomoduulin valvontadatoista. CEGSE esittää valvonta- eli H/K-näytöllä suurimman osan CEPAC:in valvontadatoista sekä kaikki vastaanotetut SOHO:n huoltomoduulin valvontadatat, mutta CEPAC:in tiededatvoja CEGSE ei käsittele mitenkään. Lisäksi CEGSE lähettää kaikki valvontadatat sekä CEPAC:in tiededatan edelleen kunkin sensoriyksikön omalle SEGSE koneelle, joilla on vastuu kunkin CEPAC:in sensorin datan yksityiskohtaisemmasta analysoinnista.

Kukin SEGSE:n tehtävänä on analysoida tietyn sensorin tiededatvaa sekä esittää valvontadatoja esimerkiksi ajan funktiona. Lisäksi yksikkö- ja systeemitasoilla SEGSE:n tehtäviin kuului telekomentojen lähettäminen instrumenteille.

5.3.1 CEPAC CEGSE

CEGSE on mikrotietokone, jossa käyttöjärjestelmänä on MS-DOS. Liityntä ethernettiin tapahtuu SMC:n ethernet-kortilla ja TCP/IP ohjelmistona käytetään FTP Inc:n PC/TCP-pinoa. Suurin osa laiteläheisestä ohjelmistosta on kirjoitettu assemblerilla ja korkean tason logiikka- ja kontrollirakenteet Borlandin Pascal:illa.

SEGSE:t on liitetty CEGSE:en käyttäen standardisarjaliikenneväyliä.

5.3.1.1 CEGSE:n toiminnot

CEGSE päätoiminto on ottaa vastaan SOHO:n lähettämä telemetriavirta NASA:n maasegmentistä ja ohjata se edelleen kunkin sensorin SEGSE:lle. Datan vastaanotto tapahtuu siten, että CEGSE puskuroi verkosta saapuvia datapaketteja kunnes ollaan vastaanotettu minuutti CEPAC:in tuottamaa valvonta- ja tiededatvaa. Seuraavaksi datasta rakennetaan paketti, johon lisätään minuutin aikana tullut SOHO:n huoltomoduulin valvontadatat ja se lähetetään niille SEGSE:ille jotka ovat sitä pyytäneet. Minuutti on CEPAC:in sisäinen aikajako joka on sama kaikille CEPAC sensoreille.

Lisäksi CEGSE näyttää osan EPHIN ja ESU sensorien valvontadatoista ja toimii CDPU:n ja LVPC:n SEGSE:nä, koska niillä ei ole omia SEGSE:jä.

5.3.1.2 CEGSE:n liitynnät

Datan vastaanottoon käytetään ethernetverkkoa jossa tiedonsiirtoprotokolla on TCP/IP, jonka päällä ajetaan ESA:n määrittelemää "Packet telemetry standard" mukaista protokollaa. Protokolla takaa virheettömän tiedonsiirron ja mahdollistaa valinnan eri datatyypin vastaanottoon. Periaatteessa mikä tahansa EGSE voi pyytää, että sille lähetetään mitkä tahansa SOHO:n tuottamista datapaketeista.

CEGSE:n ja SEGSE:n välinen liityntä toteutettiin sarjaliikennöintiporttien kautta. Tätä varten CEGSE:en suunniteltiin erityinen keskeytyspohjainen laajennettava sarjaporttiliityntä. Protokollana käytettiin modifioitua ESA:n telemetriaprotokollaa jota käytettiin sekä komentojen lähettämiseen että datan vastaanottamiseen.

5.3.1.3 Telekomentojen lähetys CEGSE:n konsolilta ja SEGSE:ltä.

Yksikkötason testausvaiheessa CEPAC:in alustaminen oli CEGSE:n tehtävä. Tällöin CEGSE:ltä lähetettiin CDPU:lle komennot, joilla eri instrumenteille kytkettiin sähkö. Testioperaattorin tehtävänä oli painella valmiiksi ohjelmoidut telekomentosekvenssit käyntiin ja valvoa, että komennot todella suoritettiin CDPU:ssa mm. käytten avaruusalussimulaattorin virtamittaria sekä CDPU:n valvontadatoja.

Varsinaisesti sensorien ohjailukomennot lähetettiin SEGSE:iltä CEGSE:n kautta avaruusalussimulaattorille, koska niillä oli myös vastuu testisekvenssien suorituksesta ja tiededatan analysoinnista.

5.3.1.4 CEGSE:n valvontanäyttö.

CEGSE:n valvonta- eli H/K-näyttö on 25 riviä / 80 saraketta oleva tekstimuotoinen näyttö, jolla esitetään sekä CEPAC instrumentin että CEGSE:n status tietoja reaaliajassa. Näyttö on jaettu neljään osaan siten, että eri osat ovat omistettu kunkin CEPAC yksikön datojen esitykseen. LION:illa ei ole omaa osaa, koska sillä ei ole valvontadataa. Lisäksi näytöllä on osio CEGSE:n omalle statusnäytölle sekä SOHO:n huoltomoduulin valvontadatoille.

CEPAC EGSE v931022 "HK data display"				0/00
<u>CDPU HK data</u>	<u>EPHIN [FM]:</u>	<u>ESU [FM]:</u>	<u>ESU (cont'd)</u>	<u>CEGSE status</u>
ERTSH 12 123	Mode: STANDBY	Mode: STANDBY	Event: HED/LED	TS: 12345678
LTAW5 V 32A3		DPU: Nom	USART: 000	SF: 123456AB
1122 E 4F24	+5V/mA: xxxxx	CDPU: Nom		A/R: -/-
F TSH A326	+27V/mA: xx.x	+5V/mA: xxx	IbH1/μA: x.xx	RID: -/-/-
CNELBOU 1091	+6V/mA: xxxxx	+6V/mA: xxx	IbH2/μA: xx.x	Uon: -/-/-/-
TC : 345	-6V/mA: xxxxx	-6V/mA: xxx	IbH3/μA: xx.x	Link: Down
Etc: 4	+5V/V: x.xxx	+12V/mA: xxx	IbL1/μA: x.xx	TMrq: None
Ftc: 5	+27V/V: xx.x	-12VH/mA: xx.x	IbL2/μA: x.xx	TMtr: Idle
Ltc: 6	+6V/V: x.xxx	-12VL/mA: xx.x	IbL3/μA: x.xx	SYNC: Fail?
	-6V/V: x.xxx	+5V/V: x.xxx	HED/°C: xx.x	
<u>LVPC [FM]:</u>	T Box/°C: xx.x	+6V/V: x.xxx	LED/°C: xx.x	<u>S/C thermistors</u>
Cred +5V: x.x	A Bs/μA: x.xx	-6V/V: x.xxx	BASE/°C: xx.x	ESU1/°C: xx.x
Chom +5V: x.x	B Bs/μA: x.xx	+12V/V: xx.x	DPU/°C: xx.x	ESU2/°C: xx.x
+5.1V: x.x	C Bs/μA: xx.x	-12VH/V: xx.x		LION/°C: xx.x
+6V: x.x	D Bs/μA: xx.x	-12VL/V: xx.x		EPHIN/°C: xx.x
-6V: x.x	E Bs/μA: xx.x			
+12V: xx.x	F Bs/μA: xx.x			
+27V: xx.x	G HV/V: xxxxx			
T/°C: xxxxx				
-- Time: 12:34:56 ----- Level: Unit --- CDPU: Nom				

Kuvio 5.7 CEGSE:n valvontanäyttö.

Lennonaikaisen CEGSE:n valvontanäytöllä esitetään lisäksi CEPAC:in TRP (Temperature Reference Point) lämpötilat, CEPAC:in virrankulutus sekä lämmittimien tilatietoja.

5.3.1.5 CEGSE:n lokinäyttö.

CEGSE:n lokinäytöllä esitetään lähinnä CEGSE:n ja muun maasegmentin välisen telemetrian statustietoja, sekä tietoja mahdollisista virhetilanteista. Tällaisia ovat esim. tieto siitä onko maasegmentistä tuleva CEPAC data synkronissa vai puuttuuko siitä osia, jolloin sitä ei voida prosessoida ja lähettää edelleen SEGSE:ille. Tyypillisesti maasegmentistä saadaan korkeintaan muutamia tunteja 'kunnollista' dataa kerralla, joten CEGSE:n tehtävänä on synkronoitua virhetilanteiden jälkeen automaattisesti datavirtaan siten että SEGSE:ille lähetettävät datapaketit ovat virheettömiä.

Lisäksi unit-vaiheen testauksissa CEGSE:ltä lähetettyjen telekomentojen lokitiedot näytettiin CEGSE:n lokinäytöllä.

5.3.2 ESU SEGSE

ESU SEGSE on IBM PS/2 tyyppinen mikrotietokone, jossa käytetään PC-DOS käyttöjärjestelmää. SEGSE:ä varten kehitetty ohjelmisto vaatii 4MB keskusmuistia sekä vähintään 80386 prosessorin. Tämä johtuu siitä, että ohjelma pystyy hyödyntämään prosessorin ns. protected moodia, jolloin spektrit ja muut datarakenteet voivat olla muistissa huolimatta PC-DOS:in 640 kilotavun muistirajoituksesta.

Systeemin näytönohjaimeksi valittiin IBM:n XGA, jolla päästään tyydyttävään resoluutioon (1024 x 768 pikseliä) kun maksimi värien määrä on 256. Värien määrä ei SOHO-tason SEGSE:ssä ollut oleellinen koska matriiseja ei käytetty.

SEGSE:n ohjelmisto on tehty käyttäen Borlandin assembler ja Pascal kääntäjiä. Ohjelman laiteläheiset osat sekä muistinhallinta tehtiin assemblerilla ja kontrollilogiikka sekä ikkunointiosiot Pascalilla.

Ohjelmisto perustuu ikkunoiden käyttöön, joten useimmille SEGSE:n toiminnoille on omistettu oma ikkunansa johon ko. toiminnon tuloste sijoitetaan. Esimerkiksi sisäänrakennetuille editoreille on omat ikkunansa kuten myös telemetrian lokitiedoille ja valvontadatoille sekä tilatiedoille. Spektrien esittämiseen graafisesti käytettiin samaa grafiikkamoduulia joka kehitettiin aliyksikkötason ohjelmistoihin.

5.3.2.1 SEGSE:n status- ja optioikkuna

Kuviossa 5.8 on esitetty ESU SEGSE:n näyttö kun ohjelma on juuri käynnistetty. Avoinna on ainoastaan status- ja optioikkuna, joten operaattori joutuu erikseen avaamaan kaikki muut ikkunat jotka halutaan näytölle.


```
+-[_]----- Archive data -----[_]--+
|
| LVPC HK data:                                     -
| CDPU red +5V:   0.27 V                             -
| CDPU nom +5V:   5.07 V                             -
|   +5.1 volts:   5.13 V                             -
|   +6 volts:     6.06 V                             -
|   -6 volts:    -6.00 V                             -
|   +12 volts:   11.6 V                              -
|   +27 volts:   27.4 V                              -
| Temperature:   21.4°C                             -
|
|-----+-----
```

Kuvio 5.11 LVPC:n valvontadatat.

Kuviosta 5.11 nähdään esimerkiksi että LVPC syöttää nominaalia CDPU:ta ja että satelliitilta tuleva primaarijännite on luokkaa +27 voltia.

5.3.2.3 SEGSE:n komentosekvenssieditori

Kuviossa 5.12 on esitetty ohjelmaan sisäänrakennetun editorin ikkuna. Editori on suunniteltu erityisesti ESU:n komentosekvenssien luomiseen ja editoimiseen. Komentosekvenssejä varten kehitettiin oma komentokielenä, jolloin testaustapahtumasta voitiin tehdä automaattinen. Näin monimutkaiset testaussekvenssit, jotka sisälsivät telekomentojen lähetystä ja valvontadatan tulkintaa, voitiin suorittaa helposti valitsemalla suoritukseen tiedosto, joka sisälsi tarvittavat telekomentot ja kontrollirakenteet. Lisäksi voitiin olla varmoja, että sekvenssi suoritettiin joka kerralla samalla tavalla riippumatta siitä kuka oli operaattorina. Editorissa on lisäksi komentokielen syntaksin tarkistus, joten ennen komentojen lähettämistä ESU:lle sekvenssi voitiin tarkistaa mahdollisten virheiden varalta.


```
+-[_]----- Archive data -----[_]--+
|
|ESU science packet length: 5756 bytes.
|
|6 HED events:
|   Stat Words  Ch00 Ch01 Ch02 Ch03 Ch04 Ch05 Ch06 Ch07 Ch08 Ch09 Ch10
| 0: 5570 00A3 0  762  757  786  781  746  752  763  773  649  647  638
| 1: 5540 0000 0  762  765  775  774  744  753  744  768  649  647  632
| 2: 5570 00A3 0  757  749  776  794  742  753  754  771  647  652  628
| 3: 5570 00E3 4  765  761  788  790  739  760  760  775  650  593  437
| 4: 5570 0082 0  744  750  776  788  727  754  755  769  639  635  640
| 5: 5570 00A3 0  749  759  768  792  743  743  757  768    0    0    30
|
|700 LED events:
|   Stat Words  Ch00 Ch01
| 0: 0000 0000 0   30  177
| 1: 0000 0000 0   30   28
| 2: 0000 0000 0   30   28
| 3: 0000 0000 0   29   29
| 4: 0000 0000 0   30   29
|
|-more-
|
+-----+

```

Kuvio 5.15 Telemetrian loki-ikkunan tiededatan osuus.

Tiededata oli myös mahdollista esittää raakamuodossa, jolloin sitä ei tulkittu mitenkään. Tällöin koko ESU:n tiededatan puskuri tulostettiin peräkkäin heksadesimaalimuodossa. Raakamuotoinen näyttömoodi oli tarpeellinen esimerkiksi EEPROM:in upload / download -testauksissa kun haluttiin tarkistaa suurten muistilohkojen uudelleenohjelmoinnin onnistumista.

5.4 Lennonaikaiset datan analysointilaitteet

Varsinaisten CEGSE ja SEGSE maatuokilaitteistojen lisäksi lennonaikaiseen operointikeskukseen sijoitettiin ESU:n työasema, joka liitettiin NASA:n maasegmenttiin CEGSE:n rinnalle. Tällä työasemalla otetaan vastaan SOHO:n telemetriadataa samoin kuin CEGSE:lläkin, mutta datan analysoinnissa on kiinnitetty huomiota erityisesti valvontadatojen aikariippuvuuksien selvittämiseen. Laitteisto on esitetty tarkemmin luvussa 6.

6. Tietojenkäsittelysystemi

ERNE tuottaa 8.5 Megatavua digitaalista mittaustietoa päivässä. Pelkästään mittauspakettien rutiinomaisen purku ja käsittely laitteiston hiukkasympäristöä kuvaaviksi datatuotteiksi on monivaiheinen operaatio, joka vaatii sekä instrumentin ominaisuuksien ja toiminnan, että tutkittavien fysikaalisten ilmiöiden perusteellista hallintaa.

6.1 Laitteisto

Tietojenkäsittelyympäristön rungon muodostavat neljä Digitalin Alpha-työasemaa, käyttöjärjestelmänään OSF/1 (Unix). Kolme työasemista sijaitsee laboratorion tiloissa Turun yliopistossa. Neljäs on SOHO:n ohjauskeskuksessa Goddard Space Flight Center:ssä USA:ssa, jossa se mahdollistaa telemetrian reaaliaikaisen seurannan Suomesta Internet-yhteyden kautta, sekä toimii tarvittaessa GSFC:ssä vierailevien tutkijoiden työskentelypisteenä.

6.2 Datavirta

ERNE instrumentin keräämät tieteelliset mittaustiedot siirretään kerran minuutissa CEPAC:n yhteiselle tietokoneelle jossa ne yhdistetään muiden CEPAC instrumenttien tietojen kanssa edelleen avaruusaluksen tietojenkäsittelyjärjestelmälle lähetettäväksi telemetriapaketeiksi. SOHO:sta paketit siirtyvät radiolinkin välityksellä NASA:n Deep Space Networkin maa-asemille ja sieltä edelleen NASA:n sisäiseen tiedonsiirtoverkkoon. Tutkimusryhmille data levitetään NASA:n Central Data Handling Facility:n (CDHF) kautta. Instrumentin seurantatiedot kerätään neljä kertaa minuutissa ja välitetään edelleen CDHF:lle erillisen HK-kanavan kautta.

Käytössä on neljän vaiheen CDHF-dataa. Radiokontaktien aikana saadaan NASA:n sisäisestä verkosta siihen kytkettyihin työasemiin 'on-line' telemetriaa. Näistä tuotetaan myös noin kahden tunnin viiveellä instrumenttikohtaiset ns. 'Real Time Data'-tiedostot, jotka ovat saatavilla Internetin välityksellä CDHF:n telemetriapalvelimesta. Parin päivän viiveellä saadaan CDHF:n tuottamat instrumenttikohtaiset päivätiedostot, jotka sisältävät myös radiokontaktien ulkopuolella avaruusaluksen nauhureille kerätyn datan. Lisäksi näistä on puhdistettu suuri osa on-line telemetriassa esiintyvistä aikaisista virheistä ja anomaliaista, esim maa-asemien vaihdon aikana muodostuneet päällekkäisyydet ja puuttuvat paketit. Lisäksi näihin on tehty virheenkorjauskoodauksen mukaiset korjaukset. Lopullisesti korjattuna tämä ns. '0-tason' (Level Zero, LZ) -data saadaan CD-ROM levykkeillä noin kuukauden viiveellä.

6.3 Tiedonkäsittelyvaiheet

Tieteellisen analyysin lähtökohtana ovat CDHF-formaatissa olevat LZ-binääritiedostot. Kukin tiedosto käsittää yhden vuorokauden CEPAC telemetrian, sekä tiedot mahdollisesti puuttuvista tai puutteellisista datapaketeista, pakettien siirtovirheiden korjaamiseen käytetyistä menetelmistä jne. Ensimmäisessä vaiheessa virheelliset mittaussjaksot identifioidaan ja käyttökelpoisten osioiden osuudet kirjoitetaan omiin vuorokausitiedostoihinsa aikaleimoin varustettuina.

Seuraavassa vaiheessa mittaustiedot puretaan fysikaalisiksi yksiköiksi. Esimerkiksi PHD-taulukon arvoista lasketaan kunkin hiukkasen energiat detektorikerroksittain sekä radan koordinaatit käyttäen tunnettuja vahvistinten käyttäytymistä, varausten jakautumista sekä valontuottoa kuvaavia parametreja.

Kolmannessa vaiheessa tuotetaan kunkin mittausjakson hiukkasvirtaa kuvaavat, instrumenttitekijöistä puhdistetut fysikaaliset suureet. Näitä ovat tyypillisesti eri alkuaineiden ja isotooppien vuoarvot, energiaspektrit, runsaussuhteet sekä kulkusuuntajakaumat.

Tieteellisten perusmittausten tuottamisen rinnalla tapahtuu jatkuva instrumentin seuranta ja kalibrointi. ERNE-projektin yhteydessä on kehitelty menetelmät, joiden avulla instrumentin kalibrointi voidaan suorittaa mittausdatan perusteella. Lisäksi käytössä on säännöllisesti kalibrointipiirin avulla tuotetut tiedot sähköisten toimintojen muutosten seurantaan varten.

7. Laadunvarmistus

SOHO:n Experiment Interface Document A:ssa esitetään muodolliset, melko mittavat yleisluontoiset vaatimukset laadunvarmistukselle. Jo laite-esityksessä vaadittiin kuvaus laadunvarmistuksen periaatteista. Kuitenkin vain muutamilla erityisalueilla SOHO-projekti asetti tarkkoja laatuvaatimuksia. Tällaisia olivat esimerkiksi suorat liitynnät avaruusalukseen. Näiltä vaadittiin komponenttitasolla suurta luotettavuutta sekä vikamekanismien ja erityisesti niiden etenemismahdollisuuksien selvittämistä. Myös materiaalien valintoihin oli ohjeet ja materiaalien puhtausominaisuuksien tuli täyttää tietyt kriteerit. Konfiguraation valvontaan ja muutosesitysten hallittuun käsittelyyn kiinnitettiin huomiota. Muutos- ja poikkeamapyynnöt (Engineering Change Request, Request For Waiver) sekä poikkeamaraportit (Non-Conformance Report) käsiteltiin muodollisesti SOHO-organisaatiossa.

ERNE-projektissa laitteiden osatoimittajia oli erittäin suuri määrä. Pahimmillaan yksin elektroniikan suunnitteluun ja toimituksiin osallistui kahdeksan eri tahoja. Projektin alkuvaiheessa toimintaa haittasikin suuresti osasuoritusten valvonnan vaikeus ja toimittajien epätietoisuus vaatimuksista.

Toimitusten valvontaan ja sitä kautta laadunvarmistukseen saatiin merkittävä parannus ns. Proto-2 -vaiheessa jolloin laadittiin yksityiskohtaiset toimitusohjeet ja määriteltiin työn eri vaiheiden katselmuskäytäntö. Tässä vaiheessa ohjeet koskivat vain elektroniikkaa. Kun ERNE:lle v. 1992 alusta lähtien saatiin toimiva laadunvalvonnan johto, ohjeistoa pyrittiin soveltamaan kaikkiin ERNE:n laitetoimitusten osa-alueisiin. VTT:n tietokonetekniikan laboratoriollla olla merkittävä osuus ERNE:n laadunvarmistuksen paranatamisessa. Laadunvarmistusta johti laatupäällikkö apunaan laaturyhmä, johon hänen lisäkseen kuului kolme jäsentä.

Eri työvaiheita varten laadittiin suurehko joukko työ- ja tarkastusohjeita. Näillä oli ratkaiseva merkitys työtuloksen tasaisuudessa, koska samoja työvaiheita yleensä tehtiin useissa eri pakoissa. Vain poikkeustapauksissa jokin, yleensä tavallista vaikeampi työvaihe suoritettiin keskitetysti.

Työn valvontaan liittyi oleellisesti vaatimus ongelmien pikaisesta raportoinnista. Vaikeissa tapauksissa ongelmaraportit johtivat poikkeamaraporttiin ja mahdollisesti

edelleen muutospyyntöön. Kullakin lentomallin osalla tai osayksiköllä oli laadunvalvontakortti, josta selvisi eri työvaiheiden suoritus.

Laadunvarmistusohjeistot koskivat kaikkia instrumentin tuotantovaiheita spesifioinnista suunnitteluun, tuotantoprosesseihin ja testaukseen. Kunkin vaiheen päätyttyä sen tulokset katselmoitiin ennen siirtymistä seuraavaan vaiheeseen. Katselmuksot perustuivat ao. vaiheessa tuotettuihin dokumentteihin. Dokumentaatiossa versioinnin ja muutosten hallinta oli keskeisellä sijalla. Dokumenttiluettelon ylläpito oli lentomallin toteutusvaiheessa Turun yliopiston vastuulla, jolla oli myös kaikkien dokumenttien hyväksymisvastuu.

Käyttöönottovaiheessa ERNE:n laadunvarmistusjärjestelmä oli erittäin raskas vaatien kymmeniä katselmuskokouksia. Järjestelmää kevennettiin myöhemmin siten, että pääosa katselmuksista pyrittiin hoitamaan ilman kokouksia toimitettujen dokumenttien pohjalta. On kuitenkin varmaa, että ilman perusteellista katselmuskäytäntöä ja ohjeistoja ERNE:n kaltainen hajautetusti toteutettu projekti ei menestyisi.

8. Projektiorganisaatio

8.1 Projektin johto

SOHO-projekti on Euroopan Avaruusjärjestön ja Yhdysvaltojen Ilmailu- ja Avaruushallinto NASA:n yhteinen avaruushjelma. ESA:n tehtävänä oli avaruusaluksen rakentaminen. NASA on vastannut avaruusaluksen laukaisusta sekä lennonaikaisesta toiminnasta.

8.2 SOHO projektiorganisaatio

SOHO-projektin organisaatiokaavio on esitetty kuviossa 1.1 sivulla 8. Tieteellisten instrumenttien vastuorganisaatiot on annettu taulukossa 1.1 sivulla 5.

8.3 SOHO Science Working Team Meeting

SOHO-projekti on pitänyt puolivuositain yhteiskokouksia, joita kutsutaan nimellä SOHO Science Working Team Meeting. Kokouksissa SOHO-projektin teknillinen ja tieteellinen johto esittää katsauksensa projektin tilasta sekä suunnitelmat seuraavien kuukausien työskentelyn tavoitteista ja laiteprojekteilta edellytetystä työstä ja toimenpiteistä. Tutkimusprojektien johtajat esittivät omat katsauksensa edistymisestään.

SOHO:n ensimmäinen SWT-kokous pidettiin toukokuussa 1988. Järjestyksessä 17. kokous oli joulukuussa 1995 heti SOHO-laukaisun jälkeen.

8.4 Principal Investigator

ESA:n avaruusohjelmien projektien johtajana toimii Principal Investigator, jolla on yksinomainen vastuu projektin toteutuksesta. Päättökijä kantaa viimekädessä vastuun laitteen suunnittelusta, rakentamisesta, testauksesta, laitemallien luovutuksesta, laitteen tieteellisestä ja teknisestä suorituskyvystä, lennonaikaisesta toiminnasta ja tieteellisestä tutkimuksesta ja tuloksista. Käytännössä kuitenkin kontaktiverkko ESA:n ja laiteprojektin asiantuntijoiden kesken on tärkeä menestykselliselle hankkeelle. Siten oikeiden kontakti- ja yhteistyökumppaneiden löytäminen on PI:n tärkeitä tehtäviä.

ERNE-projektin johtajana, PI:na, on projektin alusta lähtien toiminut apulaisprofessori Jarmo Torsti Turun yliopistosta.

8.5 Science Operations Working Group

SOHO:n lennonaikaista operointia varten on toiminut SOHO:n erikoistiryhmä Science Operations Working Group. Työryhmän tehtävänä oli erityisesti suunnitella ja luoda välineet lennonaikaisen tieteellisen ohjelman toteutusta varten. ERNE:n edustajina työryhmässä oli aluksi DI Kari Leppälä VTT:ltä ja myöhemmin, työryhmän työn luonteen muuttuessa, FL Mikael Lumme Turun yliopistosta.

8.6 CEPAC kollaboraatio

CEPAC-yhteistyösopimuksen mukaan on kollaboraation johtajana toiminut J. Torsti Turun yliopistosta ja sen teknisenä johtajana Reinhold Müller-Mellin Kielin yliopistosta. Yhteistyöstä huolimatta projektit säilyttivät itsenäisyytensä ja toteutusvastuunsa. Kumpaakin projektia on johtanut sen päättökijä.

8.7 CEPAC Technical Steering Committee Meeting

CEPAC-kollaboraation yksityiskohtia valmisteltiin ja hiottiin ERNE- ja COSTEP-projektien yhteiskokouksissa CEPAC Technical Steering Committee Meeting, johon kumpikin projekti nimesi edustajansa. Kokousten puheenjohtajana toimi Reinhold Müller-Mellin. Kokouksia järjestettiin alkuvuosina puolen vuoden välein, myöhemmin huomattavasti harvemmin.

8.8 ERNE organisaatio

ERNE-projektin toimeenpanevan johdon ovat muodostaneet projektin johtaja, tekninen projektipäällikkö DI Pentti Peltonen Turun yliopistosta, tekninen koordinaattori dos. Eino Valtonen Turun yliopistosta ja laatuspäällikkö DI Kari Leppälä VTT:stä (Oulu). Näistä Valtonen on työskennellyt projektissa päätoimisesti koko projektin toteutusajan 1986-95 sekä Peltonen vuodet 1992-95. Kari Leppälä on ollut kiinteästi projektin toteutuksessa mukana ehdotusvaiheesta lähtien.

ERNE:n teknillisen työryhmän johtajana toimi tekninen projektipäällikkö. Jäseninä olivat tekninen koordinaattori, laatupäällikkö sekä eräitä alihankkijoiden asiantuntijaedustajia. Teknisen projektipäällikön tehtäviin kuului toimitussopimusten valvonta. Teknisen koordinaattorin tehtäviin taas kuului yhteydet SOHO-projektin teknisiin asiantuntijoihin. Kullekin alihankkijalle oli nimetty vartuhenkilö, jonka tehtäviin kuului mm. raportointi projektin johtajalle.

8.9 ERNE Review Board

ERNE:n johtoryhmän (ERNE Review Board) tehtävänä oli seurata ja ohjata ERNE-projektin etenemistä.

ERNE Review Boardissa ovat toimineet:

prof. Jorma Hattula ja prof. Pekka Tanskanen, Suomen Akatemia,
joht. Oiva Knuuttila, tutk.joht. Juhani Jääskeläinen ja joht. Martin Mäklin,
TEKES,
os. pääll. Jarkko Koskinen, prof. Kauko Mansikka ja prof. Ensio Laine, apul.prof.
Jarmo Torsti, Turun yliopisto,
prof. Väinö Kelhä, VTT,
joht. Osmo Laaksonen, Finnyards,
toim. joht. Henri Rantalainen, Smartech.

9. Projektin hallinta

9.1 Tekninen johtoryhmä

Teknisen johtoryhmän tehtävä oli työn edistymisen seuranta kaikilla osa-alueilla sekä ottaa kantaa esille tulleisiin vaikeuksiin, päättää toimintatavoista ja suunnitella toimintaa kuukausien tähtäimellä. Tilanteesta riippuen tekninen johtoryhmä kokoontui 4-6 kertaa vuodessa. Ryhmään kuuluivat projektipäällikkö Pentti Peltonen (pj, TY), tekninen koordinaattori Eino Valtonen (TY), laatupäällikkö Kari Leppälä (VTT/TKO) sekä VTT/INS:n projektipäällikkö Kimmo Ahola (VTT/INS). Teknisen johtoryhmän kokouksiin osallistui pääsääntöisesti myös teknisiä asiantuntijoita.

9.2 Konfiguraation hallinta ja dokumentointi

Konfiguraation hallinta perustui dokumentointipuhun, sekä ohjeisiin dokumenttien laatimisesta ja versioinnista. Kaikki dokumentaatiot toimitettiin ennen voimassa olevaan konfiguraatioon hyväksymistä laaturyhmän tarkastettavaksi. Poikkeustapauksissa tarkastuksen suorittivat vain laatupäällikkö ja tekninen koordinaattori. Tarkastuksen jälkeen laatupäällikkö kirjoitti yhteenvedon mahdollisista huomautuksista ja korjausesityksistä. Korjausten jälkeen tekninen koordinaattori hyväksyi dokumentit ja

toimitti ne dokumenttiluetteloon kirjattaviksi. Kaikki lento- ja varalentomallin dokumentit toimitettiin Turun yliopistoon, jossa ne arkistoitiin. Jokainen alihankkija oli lisäksi velvollinen arkistoimaan omat dokumenttinsa ja ylläpitämään voimassa olevien omien dokumenttinsa listaa.

9.3 Raportointi

SOHO-projektin johto edellytti, että jokainen projektiorganisaatio raportoi edistymisestään kuukausittain. Vastaavasti ERNE:n johto edellytti alihankkijoiden kuukausittaista raportointia.

Koska ERNE-projektissa oli mukana monia osapuolia, joiden oli tiedettävä projektin tilanne, oli projektin raportoinnin oltava varsin perusteellista sekä tiedonkulun nopeaa ja organisaation eri osapuolet kattavaa. ERNE:ssä noudatettiin käytäntöä, jossa raportti edistymisestä laadittiin kuukausittain. Raportin pääkohdat ovat olleet seuraavat:

- Lyhyt yhteenveto tärkeimmistä tapahtumista
- Projektin rajapintojen määrittelyssä tapahtuneet muutokset
- Toimitusaikataulun päivitys
- Lista avoinna olevista ECR:sta (muutospyyntö)
- Lista kokouksista ym. tapahtumista
- Edistyminen kuukauden aikana
- Organisaatiossa tapahtuneen muutokset
- Rahoitustilanteen muutokset
- Laadunvalvonnan raportti
- Raportti havaituista ongelmista ja selvitys korjaustoimenpiteistä

ERNE toimitti SOHO-projektijohdolle yhteensä 60 kuukausiraporttia. Alihankkijoiden raportoinnissa ERNE-projektin johdolle ilmeni ajoittain suuria vaikeuksia.

9.4 Rahoitus

Rahoitustarpeen arviointi on erityisen vaativaa ERNE:n kaltaisessa laiterakentamisprojektissa, kun vastaavaa laitetta ei ole aikaisemmin tehty. Yleensä teollisessa suunnitteluprojektissa rahoitustarpeen aliarvionnista johtuva virhe ei näy vuositasolla, koska se samalla aiheuttaa myös projektin ajallisen pitenemisen. Avaruusprojektien yhteydessä ei kuitenkaan ole mahdollista korjata rahoitustarpeen vajeusta aikatauluja venyttämällä. Yllättävien kustannusylitysten syynä on tavallisimmin jokin virhe tai muutos projektin ympäristössä, joka aiheuttaa samanaikaisesti sekä kustannus- että aikataulupaineita.

V. 1987 ennakoitiin ERNE:n kustannuksiksi vuoden 1993 loppuun 23 milj. mk. Liitteestä III ilmenee, että kustannukset olivat vuoden 1993 lopussa 40,3 milj. mk. Kustannustason yleinen kohoaminen ei selitä kustannuseroa, vaan syynä oli hankekokonaisuuden tekninen vaatavuus ja monet vasta toteutusvaiheessa esille nousseet kustannustekijät. Tämä vuorostaan synnytti projektin rahoituksesta vastuuta kantaneille tahoille lisäongelmia.

ERNE-projektin rahoittajat on esitelty liitteessä II.

ERNE-projektin kustannus- ja rahoituskehitys vuosina 1988-95 on liitteessä III. Kokonaiskustannukset ovat 48,4 milj. mk. TEKES:in rahoitusosuus oli 59 % (28,6 milj. mk), Suomen Akatemian 25 % (12,4 milj. mk) ja Turun yliopiston 13 % (6,4 milj. mk).

9.5 Alihankintasopimukset

ERNE-projektin luonteesta johtuen alkuvuosina alihankkijasopimukset perustuivat tuntiveloitussopimuksiin. Tämä osoittautui kuitenkin kustannuskehityksen kannalta kestäättömäksi. Vuodesta 1992 alkaen kaikki alihankintasopimukset ovat pohjautuneet kiinteähintaisiin tarjouksiin.

Alihankkijan kannalta oli tietysti mukavinta sopia asia niin, että laskutetaan kertyvien tuntien mukaan. Tästä seurasi kuitenkin se tilanne, ettei projektin taloudellista vastuuta jaettu kaikkien osallistujien kesken ja näin projektin johdon oli käytännössä mahdotonta valvoa rahankäytön tehokkuutta ja budjetointi oli epävarmalla pohjalla.

Normaaleihin kiinteähintaisiin tarjouksiin siirtyminen antoi selvästi paremman mahdollisuuden tehokkaaseen budjetin suunnitteluun ja seurantaan projektin loppuvuosina. Yksittäiselle alihankkijalle tämä merkitsi suurempaa vastuuta omasta kustannuskehityksestään ja toiminnan tehokkuudesta. Sopimusten laadintavaiheessa korostui tällöin huolellisen määrittelyn merkitys siitä, mitä katsottiin kuuluvan tilattuun työhön ja minkälaisen vastuun alihankkija otti tekemästään työstä. Rajapintojen selkeä määrittely oli sopimusten perusedellytys.

9.6 Kustannuseuranta

Projektin kustannukset ovat olleet valtaosin palkkamenoja, kun palkkoiksi lasketaan alihankintasopimukseen kuuluvat palkkakustannukset. Liitteessä IV on annettu projektin henkilötyövuosien kehitys toteutuslaitoksen mukaan. Yhteensä työvuosia ERNE-projektin rakentamisajalta kertyi n. 150. Turun yliopiston osuus henkilötyövuosista oli 57 %, VTT:n 31 % ja teollisuuden 12 %. Yhteensä palkkojen osuus kokonaismenoista on ollut 80 %. Materiaalien ja komponenttien osuus oli yli 10 % ja matkakustannusten alle 10 % kokonaiskustannuksista.

Huolimatta siitä, että tuntiveloitussopimukset perustuivat ennen toimituksen alkamista arvioon kokonaiskustannuksista, ennakoidut kokonaiskustannusarviot ylittyivät eräissä osatoimitustapauksissa selvästi. Projektin aikataulun seurantaohjelmisto oli tällöin jo käytössä. Alihankkijan kuukausiraporttien mukaan alkuvaiheessa kustannuskehitys näytti seuraavan työn edistymistä, kunnes päästiin tilanteeseen, että "90 %" työurakasta oli tehty. Tämän jälkeen oltiin tilanteessa, että kustannukset kasvoivat normaalia vauhtia, mutta työ vain ei valmistunut. Syynä oli yleensä jokin tekninen ongelma, joka esti työn valmistumisen (luovutuksen tilaajalle).

Kuitenkin pääosa toimittajista kykeni pitämään kiinni ennakoituista kustannusarvioista ja toimitusajoista.

Siirtyminen kiinteähintaisiin sopimuksiin poisti kustannuksiin kohdistuneet ongelmat. Osaselityksenä oli, että perustavaa laatua olevat tekniset ongelmat vuoden 1992 alussa oli pääosin ratkaistu.

9.7 Aikataulujen seuranta

Kun uutta avaruusprojektia ollaan aloittamassa, on sille yleensä varattu riittävästi toteutusaikaa. Tavallisesti aikataulusta tehdään tässä vaiheessa se päätelmä, ettei ole syytä vielä suotta panostaa projektiin kovin paljoa. Tämä on kuitenkin vakava virhe, koska projektin alussa laadittu suunnitelma ja ensimmäisestä prototyypistä saatu kokemus luovat pohjan koko projektin laatutasolle ja onnistumismahdollisuuksille.

ERNE-projektissa pyrittiin tietoisesti välttämään verkkaisen aloittamisen virhettä. Ensimmäisen proton suunnittelu- ja valmistelutyö käynnistettiin useiden alihankkijoiden yhteistyönä heti alkusyksystä 1988.

Etenkin avaruusprojektissa korostuu toimitettaviin malleihin myöhemmin tehtävien muutosten hankaluus. Prototyypin rakentamiseen varattu aika kannattaa käyttää tehokkaasti hyväksi, koska tarvittavien testien ja mahdollisten muutosten kokeilu on tässä vaiheessa vielä helppoa.

Kun teollisuuden yksittäisessä kehitysprojektissa tapahtuu viivästys, sitä lähes aina voidaan pitää normaalina erillistapahtumana, jolla ei ole sen laajempia seurauksia. Laajoissa kansainvälisissä yhteisprojektissa ei asioita kuitenkaan voida hoitaa näin, vaan jokainen alihankkija joutuu sitoutumaan tiettyyn aikatauluun. Tästä seuraa että alihankkijalla on oltava kyky hoitaa aikataulupaineet lisäämällä tarvittaessa omaa panostustaan projektiin. Kun henkilöstön lisääminen riittävän nopeasti tarpeen mukaan ei tavallisesti ole mahdollista, merkitsee tämä projektihenkilöstölle usein erityisen suurta työmäärää ja joustoa työajoissa.

Kun ERNE-projekti käynnistettiin, siitä oli olemassa makrotason aikataulu, jossa hahmotettiin eri toimittajille varattu aika oman osaprojektinsa toteuttamiseen. Jotta monimutkainen projekti voitiin toteuttaa hallitusti, oli jokaisen mukanaolijan sitouduttava noudattamaan yhteistä aikataulua. Aikataulun toteutumista seurattiin SOHO:ssa kuukausittain. Tämä aikataulu toimitettiin sekä projektitoimistolle että alihankkijoiden teknisille päälliköille.

SOHO:n projektijohto edellytti, että laiteprojektit ottavat käyttöönsä SOHO-johdon hankkiman aikatauluseurantaohjelmiston Schedule Control System (SCS). Ohjelmiston käyttö osoittautui raskaaksi, eikä se ollut riittävän monipuolinen. Näistä syistä ERNE-projektissa SCS:n käyttö keskitettiin Turun yliopistoon. Täydentäväksi järjestelmäksi hankittiin neljäntenä vuotena rinnakkainen aikataulun seurantajärjestelmä.

ERNE:n aikatauluseuranta oli vuodet 1988-1991 projektin johtajan vastuulla. Tämän jälkeen seuranta siirrettiin tekniselle projektipäällikölle.

10. Tulokset

10.1 Asetettujen tavoitteiden saavuttaminen

ERNE-projektin ensisijainen tavoite vuosien 1986-1995 aikana oli suunnitella ja saada hyväksytyksi tieteellinen instrumentti kansainväliseen SOHO-avaruuslentoan sekä laatia instrumentin tieteellinen tavoiteohjelma, rakentaa instrumentti suomalaisin voimin ja valmistautua avaruuslennon mittaustulosten analysointiin ja tulkintaan. Tehtävä oli mittava ja vailla aikaisempaa suomalaista vertauskohtaa. Siinä onnistuttiin erittäin hyvin. SOHO:n laukaisu joulukuussa 1995 aloitti ERNE-projektin toisen vaiheen, tieteelliset mittaukset.

Heti projektin alussa todettiin tarve avaruusteknisen osaamisen kehittämiseksi Suomessa. Suomen teollisuudesta ei löytynyt valmiutta ottaa kokonaisvastuuta ERNE-laitteiston rakentamisesta. Toteutus oli jaettava pieniin osiin ja hajautettava eri puolille maata. Siltikin alihankkijoiden löytäminen oli vaikeaa. Ymmärrettävä syy on liikeyritysten vastahakoisuus sijoittaa alaan, jonka volyyymi on pieni ja jatkuvuus erittäin epävarma. Avaruusprojekteissa tarvittavan teknisen osaamisen kehittämisestä ja valmiuksien luomisesta tuli ERNE-projektin tärkeä sivutulos.

Projektin näkyvimmit tulokset olivat ESU (ERNE Sensor Unit) tietokoneohjelmistoinen, LVPC (Low Voltage Power Converter) sekä maatukilaite (CEPAC CEGSE, ESU SEGSE). Laitteiston kaikkien osien kaikki mallit pystyttiin toimittamaan Euroopan avaruusjärjestölle vaadittuihin määräpäiviin mennessä ilman viivästyksiä. Tässä tosin edesauttoivat SOHO-projektin vaatimien toimituspäivien lykkääntymiset.

Työn voidaan katsoa onnistuneen tieteellisten ja teknisten vaatimusten suhteen erittäin hyvin. Useimmat arkkitehtuuriratkaisut ja perusspesifikaatiot pystyttiin pitämään lähes muuttumattomina. Kustannusten osalta ongelmia aiheutti etenkin alkuvaiheessa suunniteltua useampien prototyyppien teko sekä osittainen uudelleensuunnittelu eri vaiheissa. Toisaalta, kun otetaan huomioon, että kysymyksessä oli haastava ja täysin uusi suunnittelu ilman merkittävää teknologiaperimää, hanke oli myös kustannuksiltaan kohtuullinen.

10.2 Tieteelliset tulokset

Projektin tieteelliset tulokset liittyvät lähinnä instrumentin ominaisuuksien ja suorituskyvyn selvittämiseen sekä valmistautumiseen ERNE:n tieteellisten mittausten tulkintaan analysoimalla aikaisempien avaruuslentojen mittauksia. Luettelo tieteellisistä julkaisuista ja konferenssiraporteista vv. 1987-95 on esitetty liitteessä VIII.

10.3 Keskeiset tulokset teknologian kehittymisen ja hyödyntämisen kannalta

Teknologian kehittymisen ja hyödyntämisen kannalta ERNE-projektin keskeiset tulokset ovat luettelonomaisesti seuraavat:

- osallistuttiin säteilyn ilmaisimien valmistustekniikan kehittämiseen ja uusien menetelmien luomiseen sekä kehitettiin anturi- ja mittaustekniikkaa
- selvitettiin avaruuskelpoisen lentoelektroniikan suunnittelun ja rakentamisen perusteet
- analysoitiin ja kehitettiin avaruuskelpoisen, varmistetun prosessoriohjatun instrumenttielektroniikan arkkitehtuuri
- suunniteltiin ja rakennettiin avaruuskelpoinen teholähde
- suunniteltiin avaruuskelpoinen gate array
- integroitiin PC-pohjainen MIL 1750 -standardin mukainen ohjelmointiympäristö
- saatiin ensimmäiset käytännön kokemukset ESA:n ohjelmistostandardin käytöstä
- kehitettiin elektroniikan valmistusprosesseja
- kelpoistettiin projektikohtaisesti hybridipiirien tuotantolinja ESA:n vaatimusten mukaisesti
- hankittiin tietoa komponenttien säteilykestoisuuden suunnittelusta ja kehitettiin komponenttien säteilykeston testaustekniikkaa
- kehitettiin monikanavainen ohjelmoitava pulssinkorkeusanalysointilaite
- suunniteltiin ja pantiin käytäntöön avaruusinstrumentin kehittämisen laatuvarmistusjärjestelmä
- hankittiin tietoa avaruusinstrumenttien värinä-, vakuumi- ja EMC-testauksesta ja sovellettiin tieto käytäntöön
- kehitettiin menetelmiä avaruusinstrumentin valmistukseen ja kokoonpanoon erityisvaatimuksena korkea puhtaustaso
- perehdyttiin rakennesuunnittelun menetelmiin ja rakenneanalyysiin
- kehitettiin pinnoitusmenetelmiä
- kehitettiin merkittävästi lämpösuunnittelun valmiuksia
- parannettiin materiaalien valintoihin ja jäljitettävyyteen liittyvää tietämystä
- koulutettiin henkilöstä avaruuskelpoisen juotostekniikan käyttöön
- hankittiin käytännön tietoa ESD- ja EMI-suojauksesta
- kehitettiin ja sovellettiin käytäntöön materiaalien tyhjössä tapahtuvan höyrystymisen mittaustekniikkaa.
- perehdyttiin käytännössä avaruusaluksen integrointiin ja testaukseen

10.4 Teknologiasiirrot

Teknologiasiirtoon ei projektin tiukan kustannus- ja aikataulupuitteen takia pystytty paneutumaan tehokkaasti. Projektissa alihankkijoina toimineiden yritysten ja laitosten oppiminen oli kuitenkin ilmeisen tehokasta mm. korostetun dokumentointi- ja katselmustekniikan ansiosta. Monia ERNE-projektin aikana kehitettyjä menetelmiä sekä saatua oppia ja hankittua tietoa voidaan sellaisenaan soveltaa muualla, esimerkiksi:

- yleiset puhtautta vaativat työskentelytavat, puhtauden valvonta ja testaus
- avaruuskelpoinen juotostekniikka
- ESD- ja EMI-suojaus
- piirilevyjen ja hybridien layout -suunnittelu
- piirikorttien lakkaus (conformal coating)
- flat pack -komponenttien jalkojen viimeistelyprosessi
- komponenttien säteilynkeston testausmenetelmät
- elektroniikan ja mekaniikan kokoonpanomenetelmät
- lämpösuunnittelu
- pinnoitusmenetelmät
- laatu järjestelmät.

10.5 Teknologiset innovaatiot

ERNE-instrumentin valinta SOHO-lennolle perustui pitkälti HED-sensorin tieteelliseen suorituskykyyn. Suorituskyvyn kannalta merkittävin tekijä on piinauhailmaisimien käyttö ja erityisesti ilmaisinten suunnittelu siten, että lukuelektroniikka voidaan tehdä mahdollisimman yksinkertaiseksi. Sensorien osalta myös LED:n ohuet ioni-implantoidut pii-ilmaisimet vaativat valmistustekniikan parantamista, eivätkä vastaavat ilmaisimet vieläkään kuulu minkään valmistajan standardituotantoon. Edelleen ERNE-projektissa otettiin ensimmäisten joukossa käyttöön valodiodit raskaiden ionien tuikeilmaisimissa tuottamien valopulssien ilmaisuun.

ERNE:n merkittävimmät elektroniikan kehitysprojektit olivat avaruuskelpoisten vahvistinhybridien ja gate arrayn suunnittelu ja valmistus. Molempien projektien onnistunut läpivienti oli perusedellytys instrumentin toteutukselle asetetuissa teho-, massa- ja tilarajoissa.

Piirikorttien tuentaan kehitettiin menetelmä, joka perustui piirikorttien välissä olevaan värähtelyjä vaimentavaan materiaaliin. Myös tällä oivalluksella, joka varmennettiin sekä testeillä että analyysillä, oli merkittävä osuus projektin onnistuneeseen läpivientiin.

10.6 Avaruusteknisen infrastruktuurin luominen Suomeen

Projektin alkaessa avaruusteknisen infrastruktuurin luominen Suomeen ei ollut tavoitteena, mutta hyvin pian selvisi sen välttämättömyys. Suomesta ei löytynyt organisaatioita, joilla olisi suoraan ollut valmius avaruusinstrumenttien rakentamiseen tilojen ja työmenetelmien tai edes niihin liittyvän tietämyksen osalta.

ERNE-projektin aikana avaruusalan infrastruktuuria luotiin mm. seuraaville aloille:

- avaruuslaitteiden mekaniikan ja elektroniikan valmistus sekä ohjelmistojen toteutus
- avaruuslaitteiden kokoonpano ja testausvalmiudet
- mekaaninen ja lämpösuunnittelu
- maatukilaitteistojen suunnittelu ja toteutus
- puhdastilatyöskentely, puhdastilat ja puhtauden valvonta ja testaus
- dokumentaation hallinta ESA:n vaatimusten mukaisesti ja laatu järjestelmät
- projektin johtaminen ja rahoitus- sekä aikatauluseuranta erityisesti ESA:n vaatimukset huomioiden
- avaruuslaitteiden ja -komponenttien säteily- ja toimintatestaus hiukkaskiihdytinympäristössä
- lentolaitteen tiedeohjelman suunnittelu ja datan analysointi.

10.7 Tulosten julkistaminen ja hyödyntäminen

Kaikki ERNE-projektin tulokset, julkaisut ja dokumentaatio ovat julkisia ja vapaasti saatavilla. VTT oli voimakkaasti mukana projektin toteutuksessa, ja VTT:llä on edelleen merkittävä rooli tulosten hyödyntämisen varmistamisessa ja niiden soveltamisessa myöhempään hyötykäyttöön.

Välittömästi tuloksista ovat hyötäneet alihankkijoina olleet avaruuselektroniikkaa ja elektroniikan kokoonpanoa sekä mekaniikkaa toimittavat yritykset (ks. liite V). Nämä yritykset rakensivat projektin aikana asennustiloja sekä kehittivät prosessejaan. Näille yrityksille toimiminen ERNE:n alihankkijoina muodostaa myös merkittävän referenssin uusia tilauksia tavoiteltaessa. Välillisesti hyödynsajia ovat ne yritykset, joille on asiakas- tai konsulttisuhteen kautta siirretty ERNE:ssä hankittua kokemusta.

11. Kansainvälinen yhteistyö

Vaikka ERNE:n rakentaminen toteutettiin suomalaisin voimin, oli projekti silti luonteeltaan varsin kansainvälinen. Lähes jokapäiväistä oli kanssakäynti CEPAC-kollaboraation sisällä sekä ESA:n suuntaan. Tärkeimmät ulkomaiset organisaatiot, joihin oltiin yhteydessä ja joiden kanssa yhteistyötä harjoitettiin olivat:

Institut für Kernphysik, Universität Kiel, Kiel, Saksa
Universidad de Alcala de Henares, Alcala, Espanja
St. Patrick's College, Maynooth, Irlanti
ESA/ESTEC, Noordwijk, Hollanti
Matra Marconi Space, Portsmouth, Englanti
Matra Marconi Space, Toulouse, Ranska
NASA/Kennedy Space Center, USA
NASA/Goddard Space Flight Center, USA
Institut des Sciences Nucléaires de Grenoble (ISN), Grenoble, Ranska
Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt, Saksa
Grand Accélérateur National d'Ions Lourde (GANIL), Caen, Ranska
Instituut voor Nucleaire Wetenschappen (INW), Universiteit Gent, Gent, Belgia
Institut für Kernphysik, Universität Giessen, Giessen, Saksa.

12. Koulutus

Projektin puitteissa koulutusta sai useita kymmeniä henkilöitä erilaisissa teknisissä asioissa, työmenetelmissä sekä projektin hallinnassa. Koulutus tapahtui sekä normaalin työn osana, että myös alihankijoiden työntekijöilleen kustantamana erityiskoulutuksena (esim. juotoskurssit).

12.1 Tieteellinen koulutus

Luettelo Turun yliopistossa valmistuneista opinnäytteistä on liitteessä VII.

Liitteet

- I SOHO-ohjelman päävaiheiden aikataulu ja välitavoitteet
- II Projektin rahoittajat
- III Budjetti
- IV ERNE-projektin henkilötyövuosien kehitys
- V Projektissa toimineet alihankkijat
- VI Projektissa toimineet tutkijat ja tutkimuslaitokset
- VII Suoritettut tutkinnot Turun yliopistossa
- VIII Turun yliopiston ERNE-ryhmän tieteelliset julkaisut ja konferenssiesitelmät

Main schedule and milestones of the SOHO programme

Mission proposal November 1982

Phase A

Scientific goals and instrumentation 1986 March - 1989 November

- * Preparation of the Announcement of Opportunity issue March 1987
- * Experiment selection June 1988
- * Experiment Conceptual Design Review June 1989
- * Spacecraft contractor selection November 1989

Phase B

System and subsystem definition 1989 December - 1991 April

B1: system definition phase

B2: subsystem and unit contractor selection phase

B3: subsystem and unit definition phase

- * completion of interface design
- * selection of subcontractors
- * Experiment Intermediate Design Review November 1990
- * System Design Review April 1991

Phase C/D

Development and procurement	1991 May - 1995 June
* Structural Model	delivery December 1992
to qualify the Payload and Service Module including mechanical verification at spacecraft system level	
* Engineering Model	delivery March 1993
to provide electrical verification and validation of the test equipment and test methods at system level	
* Experiment Final Design Review	March 1993
* Flight Model and Protoflight Model	delivery January 1994
* Mission Critical Design Review	October 1993
* Experiment Flight Operation Review	July 1994
* Flight Acceptance Review	June 1995

Phase E

A nominal two month launch campaign at Kennedy Space Center

Launch	December 1995
--------	---------------

Phase F

Early orbit operation and spacecraft commissioning of flight operations. The flight operations are baselined over a period of four months until injection into halo orbit

Two years mission with enough on-board resources for an extension to six years

Projektin rahoittajat

ERNE-projektia ovat vuosina 1988-1995 rahoittaneet

Suomen Akatemia

TEKES

Turun yliopisto

VTT

Jenny ja Antti Wihurin rahasto

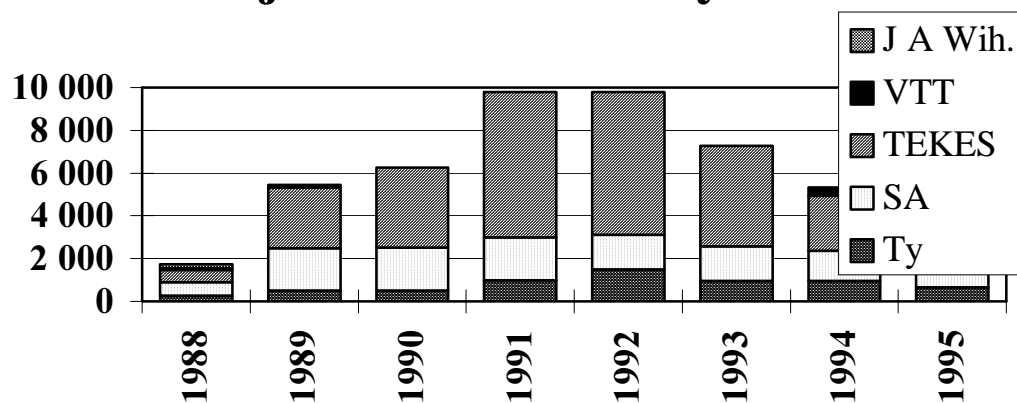
Turun yliopistosäätiö

ERNE-projektin rahoitus vuosina 1988-1995 mk 1000

	Ty	SA	TEKES	VTT	J A Wih.	Yht.
1988	270	619	577	100	169	1 735
1989	509	1 983	2 850		99	5 441
1990	520	2 000	3 750			6 270
1991	985	2 000	6 800			9 785
1992	1 500	1 600	6 700			9 800
1993	972	1 591	4 700			7 262
1994	964	1 409	2 560	400		5 333
1995	656	1 202	690			2 547
Yht.	6 375	12 404	28 627	500	268	48 174

Ty = Turun yliopisto, SA = Suomen Akatemia, J A Wih = Jenny ja Antti Wihurin rahasto

ERNE-projektin kustannus- ja rahoituskehitys



ERNE-projektin henkilötyövuosien kehitys

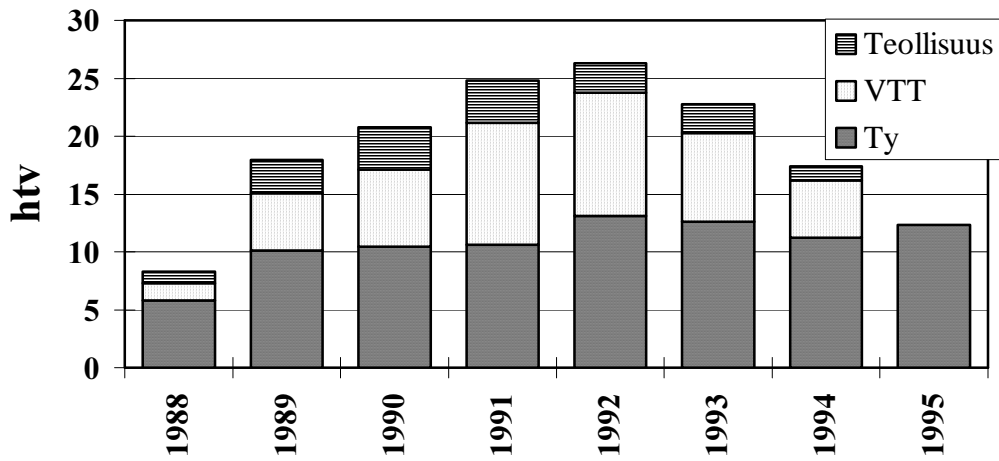
A. Toteutuslaitoksen mukaan

	Ty	VTT	Teollisuus	Yhteensä	%
1988	5,8	1,5	1,0	8,3	6
1989	10,1	5,0	2,9	18,0	13
1990	10,5	6,7	3,7	20,8	15
1991	10,6	10,6	3,6	24,8	17
1992	13,1	10,7	2,5	26,3	19
1993	12,6	7,7	2,5	22,8	16
1994	11,2	5,0	1,2	17,4	12
1995	12,3	0,0	0,0	12,3	9
Yhteensä	86,2	47,0	17,4	150,7	
%	57,2	31,2	11,6		

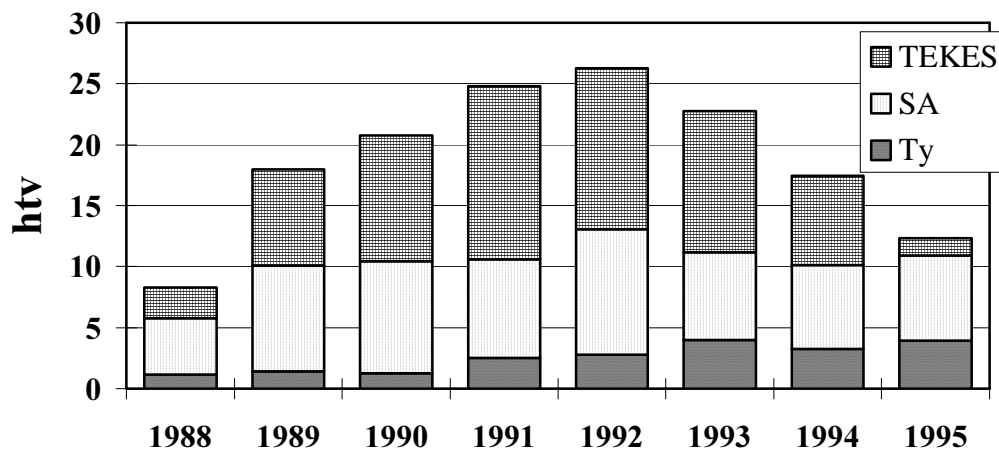
B. Henkilötyövuosien rahoittajan mukaan

	Ty	SA	TEKES	Yhteensä	%
1988	1,2	4,6	2,5	8,3	6
1989	1,4	8,7	7,9	18,0	13
1990	1,3	9,2	10,3	20,8	15
1991	2,5	8,1	14,2	24,8	17
1992	2,8	10,3	13,2	26,3	19
1993	4,0	7,2	11,6	22,8	16
1994	3,3	6,9	7,3	17,4	12
1995	3,9	7,0	1,4	12,3	9
Yhteensä	20,3	61,9	68,5	150,7	
%	14,3	43,6	48,2		

A. Toteutuspaikka



B. Henkilötyövuosien rahoittajat



Projektissa toimineet alihankkijat

ERNE-laitteen osatoimittajia vuosina 1988-1995 olivat

VTT

Instrumenttitekniikan laboratorio, Espoo
Tietokonetekniikan laboratorio, Oulu
Elektroniikan laboratorio, Oulu
Teletekniikan laboratorio, Espoo
Sähkölaboratorio, Espoo

Finnyards, Tampere

Smartech, Tampere

Mariachi, Turku

Collab, Turku

Tumo, Kaarina

Pyörre, Halikko

TH-Engineering, Oulu

Alnor, Turku

Projektissa toimineet tutkijat ja tutkimuslaitokset

Turun yliopisto, Fysiikan laitos:

Antti Anttila
Petri Aronkytä (nyk. Ericsson)
Marianne Bonn (Ty)
Timo Eronen
Sami Halen (TTKK)
Matti Halkosaari (Ericsson)
Esa Hoisko (Ericsson)
Leon Kocharov
Jyri Kuusela (ESA, Darmstadt)
Elina Laajavuori
Timo Laitinen
Mika Louhola (Nokia)
Mikael Lumme (Rauman ammatti-instituutti)
Arja Meriluoto
Markku Mähönen (Turun Puhelin)
Ari Mäkinen (Ericsson)
Ahti Nieminen (Nokia)
Tuula Niskanen (TYKS)
Markku Nieminen (Kokkolan Teknillinen Oppilaitos)
Juhani Peltonen (Biotekniikan keskus)
Pentti Peltonen (nyk. työpaikka tuntematon)
Esa Riihonen
Antti Sarjala (nyk. työpaikka tuntematon)
Göran Schultz
Samuli Silanto (Metorex)
Kaija Söderlund (Biotekniikan Keskus)
Matti Teittinen
Jarmo Torsti
Rami Vainio
Eino Valtonen

Turun yliopisto, Sovelletun fysiikan laitos:

Tom Kuusela
Esa Rae

VTT/AUT/AVA:

Seppo Aatola
Kimmo Ahola
Tapani Antila
Heikki Berg
Hans Boman
Christer Holmlund
Paula Holmlund
Matti Karjalainen
Väinö Kelhä
Pirjo Kinanen
Olli Klemola
Kaisa Kuisma
Jouko Kurki
Samuli Kuitunen
Gilbert Leppelmeier
Juha Pohjonen
Pertti Salmi
Kimmo Simomaa
Pauli Stigell
Jouni Vidgvist

VTT/AUT/Electrotechnical Testing:

Risto Hienonen
Olavi Nevalainen
Helge Palmen
Arto Salminen
Eero Sorri

VTT/ELE:

Seppo Kiiski
Matti Lahdenperä
Kari Leppälä
Ari Lähdepuro
Seppo Nousiainen
Jorma Pulkkinen
Jukka Rautio
Raimo Rikola
Pekka Ruuska
Esko Strömmer
Raimo Verkasalo

Collab:

Eero Koivula

Finnyards:

Harri Heine
Osmo Laaksonen
Vesa Lähteenmäki
Juha Malinen
Harri Mattsson
Heikki Rautonen

Helsingin yliopisto:

Petteri Nieminen
Heimo Saarikko

Jyväskylän yliopisto:

Rauno Julin
Pekka Taskinen
Juha Äystö

Mariachi:

Jukka Järvi-Laturi
Pekka Lamberg
Esa Suomi
Mika Talo

Smartech:

Mikko Moilanen
Henri Rantalainen

Teknillinen korkeakoulu:

Seppo Urpo

Tumo:

Olli Nummela

Suoritetut tutkinnot Turun yliopistossa

FT tutkinnot

1. Mikael Lumme: Data Analysis of the Energetic Particle Experiment On-Board the SOHO Satellite, 1995.
2. Juhani Peltonen: On the Design and Development of Particle Detectors and Electronics for the Energetic and Relativistic Nuclei and Electron Experiment ERNE, 1996.

FL tutkinnot

1. Juhani Peltonen: Studies of particle detectors and electronics of the Energetic and Relativistic Nuclei and Electron experiment (ERNE), 1991

FM tutkinnot

1. Timo Eronen: Mikroprosessoriohjattu 36 kanavainen pulssilaskentainstrumentti, 1990.
2. Esa Riihonen: Kosmisen säteilyn nopeista vaihteluista, 1990.
3. Veikko Oksanen: Euroopan avaruustutkimusjärjestön aurinkoluotaimen ERNE-laitteiston puolijohdeilmaisimien toiminnan testaus, 1990.
4. Mika Louhola: Paikkaherkät pii-ilmaisimet kosmisen hiukassäteilyn tutkimuksessa, 1992.
5. Esa Hoisko: ERNE-instrumentin rakenne, toiminta ja suorituskyvyn testaus, 1993.
6. Rami Vainio: Auringon suurenergiaisten hiukkasten kiihdytyksestä ja kuljetuksesta, 1993.
7. Juha Kasari: Auringon suurienergiaisten hiukkaspurkausten luokittelu GOES-6 satelliittihavaintojen perusteella, 1994
8. Jyri Kuusela: Aurinkopurkausten synnyttämä sokkiaalto, 1995

Turun yliopiston ERNE-ryhmän tieteelliset julkaisut ja konferenssisitelmät

Tieteelliset julkaisut

1. J. Torsti etc.: ERNE-Energetic and relativistic nuclei and electron experiment, ESA SP-1104, 81-84, 1988.
2. E. Valtonen, J. Peltonen and J.J. Torsti: Response of BGO and CsI (Tl) scintillators to heavy ions, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol. A286, 169-174, 1990.
3. J.J. Torsti, E. Valtonen, M. Lumme, J. Peltonen, T. Eronen, V. Kelhä and K. Leppälä: Scientific Performance of ERNE Sensors, Adv. Space Res. Vol. 11, pp. (1)401-(1)404, 1991.
4. J. Torsti, A. Anttila, C.G. Schultz and R. Vainio: Transport of Energetic Particles Derived from a Detailed Analysis of the September 29, 1989 Solar Flare, Adv. Space Res. 17, pp. (4/5)163-(4/5)166, 1996.
5. M. Lumme, E. Valtonen, T. Eronen, J. Torsti, M. Lewitowicz and D. Bazin: Solar Energetic Particle abundance measurement by ERNE on Board SOHO, Adv. Space Res. Vol. 15, pp. (7)73-(7)76, 1995.
6. J. Torsti, E. Valtonen, M. Lumme, P. Peltonen, T. Eronen, M. Louhola, E. Riihonen, G. Schultz, M. Teittinen, K. Ahola, C. Holmlund, V. Kelhä, K. Leppälä, P. Ruuska, E. Strömmer: Energetic Particle Experiment ERNE, Solar Physics Vol. 162, pp. 505-531, 1995.
7. L.G. Kocharov, G.A. Kovaltsov, J. Torsti, H. Zirin, A. Anttila, I.G. Usoskin, R. Vainio: The 1990 May 24 solar flare and cosmic ray event, accepted for publication in High Energy Solar Physics, eds. R. Ramaty, N. Mandzhavidze, X.-M. Hua, American Institute of Physics Conference Proceedings, New York, 1995.
8. J. Torsti, L.G. Kocharov, R. Vainio, A. Anttila and G.A. Kovaltsov: The 1990 May 24 Solar Cosmic Ray Event: 1. High energy protons, accepted for publication in Solar Physics, 1995.
9. L.G. Kocharov, J. Torsti, R. Vainio, G.A. Kovaltsov and I.G. Usoskin: The 1990 May 24 Solar Cosmic Ray Event: 2. Protons vs. neutrons, submitted to Solar Physics, 1995.
10. L.G. Kocharov, J. Torsti, R. Vainio, G.A. Kovaltsov: Propagation of solar cosmic rays: Diffusion versus focused diffusion, Solar Physics, Vol. 165, 205-208, 1996
11. J. Torsti, E. Valtonen, L. Kocharov, M. Lumme, T. Eronen, M. Louhola, E. Riihonen, G. Schultz, M. Teittinen, A. Anttila, J. Kuusela: Energetic particle investigation using the ERNE instrument, accepted to publication in Annales Geophysicae, 1995.
12. E. Riihonen, J. Torsti, A. Anttila, J. Kuusela, M. Lumme, E. Valtonen: Performance of ERNE in particle flux anisotropy measurement, accepted for publication in Annales Geophysicae, 1995.

Konferenssijulkaisut ja -sitelmät

1. M. Lumme and J. Torsti: Interplanetary propagation of solar energetic particles, Proc. 21st Int. Cosmic Ray Conf., Adelaide, vol. 5, p. 209-212, 1990
2. E. Riihonen, J. Torsti, T. Eronen, H. Kananen, H. Arvela, A.-M. Elo, M. Lumme, J. Peltonen, E. Valtonen: Diurnal Variation of High Frequency Cosmic Ray Scintillations: Proc. 21st Int. Cosmic Ray Conf., Adelaide, vol.6, p. 380-383, 1990.
3. J. Torsti, E. Riihonen, T. Eronen, H. Arvela, A.-M. Elo, M. Lumme, J. Peltonen, E. Valtonen: Cumulative Sum Analysis of Aperiodic Variations in the Cosmic Ray Intensity. Proc. 21st Int. Cosmic Ray Conf., Adelaide, vol. 6, p. 272-275, 1990.
4. J. Peltonen, J.J. Torsti, E. Valtonen, M. Lumme, V. Kelhä, K. Leppälä: Low energy solar particle detector, Proc. 21st Int. Cosmic Ray Conf., Adelaide, vol. 7, p. 231-234, 1990

5. E. Valtonen, M. Lumme, J.J. Torsti, J. Peltonen, V. Kelhä, K. Leppälä: High energy solar particle detector, Proc. 21st Int. Cosmic Ray Conf., Adelaide, vol. 7, p. 235, 1990
6. J.J. Torsti, E. Valtonen, M. Lumme, J. Peltonen, T. Eronen, V. Kelhä, K. Leppälä: Scientific performance of ERNE sensors, XXVIII COSPAR conference, The Hague, 25 June-6 July, 1990
7. E. Valtonen, J. Peltonen, T. Eronen, J. Torsti, M. Mähönen, M. Lumme, P. Taskinen, R. Julin, J. Äystö, J.B. Viano: Acceleration test of ERNE sensors, Proc. of the 12th European Cosmic Ray Symposium, p. SH/P-3, Nottingham, 1990.
8. J.J. Torsti, T. Eronen, M. Mähönen, E. Riihonen, C.G. Schultz, K. Kudela, H. Kananen: Search of peculiarities in the flux profiles of GLE's in 1989, 22nd International Cosmic Ray Conference, Dublin, Vol. 2, p. 488, August 1991.
9. E. Riihonen, J.J. Torsti, H. Kananen, K. Kudela: Detection of high frequency fluctuations in cosmic ray intensity, 22nd International Cosmic Ray Conference, Dublin, Vol. 2, p. 637, August 1991.
10. J.J. Torsti, T. Eronen, M. Mähönen, E. Riihonen, K. Kudela, H. Kananen: Analysis of flares observed in Lomnický and Oulu neutron monitors in 1989, European Geophysical Society XVI General Assembly, Wiesbaden, p. 187, April 1991.
11. E. Valtonen, J. Peltonen, T. Eronen, J. Torsti, M. Lumme, M. Mähönen, A. Nieminen, and J. R. Viano: High Energy Detector of ERNE for SOHO, Proc. 22nd Int. Cosmic Ray Conf., Dublin, Vol. 3, pp. 772-775, 1991
12. J.J. Torsti, T. Eronen, M. Mähönen, E. Riihonen, C.G. Schultz, K. Kudela, H. Kananen: Estimation of transport parameters for the solar cosmic ray events in 1989, 22nd International Cosmic Ray Conference, Dublin, Vol. 2, p. 487, August 1991.
13. J.J. Torsti, T. Eronen, M. Mähönen, E. Riihonen, C.G. Schultz, K. Kudela, H. Kananen: Search of peculiarities in the flux profiles of GLE's in 1989, 22nd International Cosmic Ray Conference, Dublin, Vol. 2, p. 488, August 1991.
14. E. Valtonen, J. Peltonen, T. Eronen, J. Torsti, M. Lumme, M. Mähönen, A. Nieminen, J.B. Viano: High Energy Detector of ERNE for SOHO, 22nd International Cosmic Ray Conference, Dublin, Vol. 2, p. 700, August 1991.
15. K. Kudela, M. Gobl, J.J. Torsti, E. Riihonen, T. Eronen: On the estimation of power spectra by different methods, 1st SOLTIP Symposium, Liblice, Czechoslovakia, September 1991
16. C. G. Schultz and J.J. Torsti: The Double Peak Present in the GLE Data of the Event of September 29, 1989: Analysis of World-Wide Data, at the EGU XVII General Assembly, Edinburgh 6.-10.4. (poster ST16-P3), 1992.
17. E. Valtonen, T. Eronen, E. Hoisko, M. Lumme, A. Nieminen, and J. Torsti, Tests of ERNE sensors with heavy ion beams, Proc. 13th European Cosmic Ray Symposium, Geneva, paper SH-11.03 1992.
18. C.G. Schultz and J.J. Torsti: The double peak present in GLE data of the September 29, 1989 event: analysis of world-wide data, European Geophysical Society XVI General Assembly, Edinburgh, April 1992.
19. E. Valtonen, T. Eronen, E. Hoisko, M. Lumme, A. Nieminen, and J. Torsti, Tests of ERNE sensors with heavy ion beams, Proc. 13th European Cosmic Ray Symposium, Geneva, paper SH-11.03 1992.
20. J. J. Torsti, T. Eronen, M. Mähönen, E. Riihonen, C.G. Schultz, K. Kudela and H. Kananen, Estimation of high energy solar particle transport parameters during the GLE's in 1989, Solar wind seven, Proceedings of the 3rd COSPAR Colloquium in Goslar, Germany, September 1991, 545-548 1992.
21. J. J. Torsti, E. Valtonen, T. Eronen, E. Hoisko, M. Louhola, M. Lumme, A. Nieminen, P. Peltonen, E. Riihonen, C.G. Schultz and M. Teittinen: Energetic particle analyser ERNE, Proc. of the 1st SOHO Workshop, Annapolis, Maryland, USA, 25-28 August 1992, ESA SP-348, pp. 47-50, 1992.
22. J. Torsti and C. G. Schultz: A Double-Peaked Solar Flare - Conclusions on Particle Transport, Proc. of the 1st SOHO Workshop, Annapolis, Maryland, USA, 25-28 August 1992, ESA SP-348, pp. 343-346, 1992.

23. K. Kudela, H. Debrunner, E.O. Flückiger and J. Torsti: On the Character of Cosmic Ray Variations at $f > 2 \cdot 10^{-5}$ Hz, Proc. 23rd Int. Cosmic Ray Conf., Calgary, vol. 3, p. 575-578, 1993
24. H. Kunow, J. Torsti, R. Müller-Mellin, S. McKenna-Lawlor and J. Sequeiros: CEPAC - Energetic Particle Analyser Instruments for SOHO, workshop on Coronal Magnetic Energy Releases, Caputh, Germany, May 16-20, 1994
25. J. Torsti, S. Halén, G. Schultz and R. Vainio: Coronal Transport of Solar Energetic Protons, Proc. of the Third SOHO Workshop: Solar Dynamic Phenomena and Solar Wind Consequences, 26-29 September 1994, Estes Park, Colorado, ESA SP-373, 117-122, 1994
26. J. Torsti, S. Halén and R. Vainio: Delayed Energetic Proton Events at 1 AU, Proc. of the Third SOHO Workshop: Solar Dynamic Phenomena and Solar Wind Consequences, 26-29 September 1994, Estes Park, Colorado, ESA SP-373, 311-314, 1994.
27. J. Torsti, G. Schultz, R. Vainio and A. Anttila: Anisotropies of Relativistic Solar Protons at 1 AU, Proc. of the Third SOHO Workshop: Solar Dynamic Phenomena and Solar Wind Consequences, 26-29 September 1994, Estes Park, Colorado, ESA SP-373, 263-268, 1994.
28. R. Vainio, J. Torsti, L.G. Kocharov and A. Anttila: GOES Response to Energetic Protons of Different Origin, Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf., Roma, vol. 4, p. 131-134, 1995.
29. J. Torsti, A. Anttila, L.G. Kocharov, R. Vainio and G.A. Kovaltsov: Energetic Protons from the 1990 May 24 Solar Flare as Detected by GOES Satellites, Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf., Roma, vol. 4, p. 135-138, 1995.
30. J. Torsti, A. Anttila, R. Vainio and L.G. Kocharov: Successive Solar Energetic Particle Events in the October 1989, Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf., Roma, vol. 4, p. 139-142, 1995.
31. L.G. Kocharov, G.A. Kovaltsov, J. Torsti, I.G. Usoskin and H. Zirin: Correlative Investigations of the 1990 May 24 Solar Flare, Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf., Roma, vol. 4, p. 159-162, 1995.
32. L.G. Kocharov, G.A. Kovaltsov, J. Torsti and R. Vainio: Search for Neutron Decay Protons from the 1990 May 24 Solar Flare, Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf., Roma, vol. 4, p. 163-166, 1995.
33. R. Vainio, J. Torsti, L.G. Kocharov, A. Anttila and G.A. Kovaltsov: Injection and Transport of Accelerated Particles as Deduced from GOES and Neutron Monitor Data, Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf., Roma, vol. 4, p. 321-324, 1995.