

# Rakettikoe: Yöaikaiset mesosfäärin ja termosfäärin emissiot (NEMI)

E. Turunen<sup>1</sup>, C.-F. Enell<sup>1</sup>, Th. Ulich<sup>1</sup>, A. Kero<sup>1</sup>, K. Kaila<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sodankylän geofysiikan observatorio, Oulun yliopisto, esa.turunen@sgo.fi

<sup>2</sup> Fysikaalisten tieteiden laitos, Oulun yliopisto

## Abstract

*A joint Finnish-Swedish rocket project, NEMI (Night-time Emissions from the Mesosphere and Ionosphere), is accepted for the HotPay II rocket to be launched at the Andøya Rocket Range, Norway, in October 2007. The launch is provided by an EU-funded programme, whereas the participating research groups supply the instrumentation, which consists of three photometers with filters centered at 391 nm, 500 nm and 762 nm. Background measurements at these and other wavelengths will be provided by ground-based instrumentation. The major scientific objective of NEMI is to study the coupling between ion production in the geomagnetically perturbed ionosphere and the night-time neutral chemistry of the polar mesosphere. We will make a comprehensive set of rocket-borne and ground-based measurements of the chemical state of the mesopause region in terms of the atomic oxygen and nitric oxide concentrations, the night-time production of nitric oxide and its relationship to electron density, the night-sky background emissions from the nitrogen dioxide continuum and aurora, and the mechanisms of the O<sub>2</sub> Chamberlain band excitation in the nightglow and its relationship to the atomic oxygen abundance and the O<sub>2</sub> atmospheric band.*

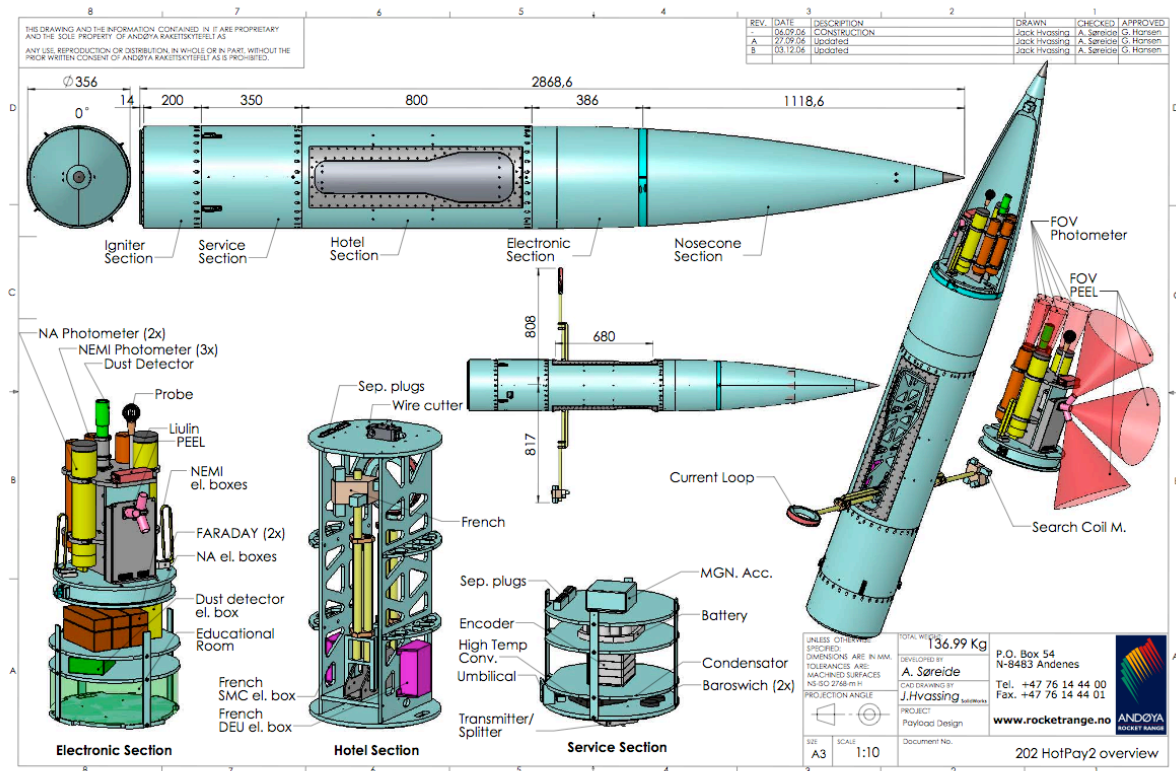
## 1. JOHDANTO

Sodankylän geofysiikan observatorion aeronomian tutkimusryhmä tutkii avaruussään vaikutuksia revontulialueen ionosfääriin, alatermosfääriin ja mesosfääriin. Neutraalin ja ionisoituneen yläilmakehän kytkentä on merkittävä korkeilla leveysasteilla. Tämän kytkennän globaali merkitys tunnetaan huonosti. Erityisen tärkeää olisi tuntea suurienergisien hiukkaspresipitaation aiheuttama parittoman typen ja vedyn tuotto, koska nämä puolestaan kykenevät tuhoamaan yläilmakehän otsonia.

Andøyalla Norjassa sijaitseva Arctic Lidar Observatory for Middle-Atmospheric Research (ALOMAR) koordinoi EU-rahoitteista infrastruktuurihanketta, jossa tutkimusryhmille tarjotaan mahdollisuutta sijoittaa omia mittalaitteitaan ilmaiseksi luotausrakettiin. ”Hotel Payload” -hanke käsittää kaksi rakettilaukaisua: HotPay I laukaistiin kesällä 2006 ja HotPay II laukaistaan lokakuussa 2007. Sodankylän geofysiikan observatorio ja Tukholman yliopiston Meteorologian laitos sijoittavat HotPay II -rakettiin 3 fotometriä yhteisessä projektissa: ”Night-time Emissions from the Mesosphere and Ionosphere (NEMI)”. Nämä fotometrit mittaavat emissioita NO<sub>2</sub>-jatkumossa 500 nm ympäristössä, O<sub>2</sub>-atmosfäärivyössä 762 nm lähellä ja N<sub>2</sub><sup>+</sup> sekä O<sub>2</sub> Chamberlain-vöissä 391 nm lähellä.

## 2. HOTPAY II –RAKETIN TIETEELLINEN TAVOITE

HotPay2-raketin hyötykuorma käsittää seitsemän instrumenttia useiden tieteellisten aiheiden tutkimiseksi. Hyötykuorman sijoittelu raketin kärkikartioon on esitetty kuvassa 1.



Page 1 of 1

202 HotPay2.SLDDRW

03.12.2006

Kuva 1. Hotpay II -raketin hyötykuorma ja eri instrumenttien sijoittelu raketin kärkikartioon.

Seuraavassa nämä instrumentit on ryhmitelty kolmeen kokonaisuuteen, joista NEMI-instrumenttia koskeva MLT-alueen tutkimus on esitelty tarkemmin:

### 2.1. Ylämesosfäärin/alatermosfäärin (MLT) tutkimus

Ensimmäisen kokeen tarkoitus on ymmärtää Na D-viivan emissio aallonpituudella 589 nm, joka on tärkeä komponentti yöaikaisessa ilmahehkussa. Emissio syntyy meteoreista peräisin olevien Na-atomien reagoissa  $O_3$ :n kanssa, jolloin syntävä NaO reagoi atomaarisen hapen kanssa ja muodostaa virittyneitä Na-atomeja. Kahden D-viivan intensiteettien suhdetta kuviteltiin aiemmin vakioksi (2.0), mutta nykyiset havainnot osoittavat sen vaihtelevan välillä 1.4-2.2. Tämän ajatellaan johtuvan konsentraatiosuhteesta  $O/O_2$ , jolloin 85 km yläpuolella suhteen tulisi kasvaa. Leedsin yliopiston rakentamat HotPay II-rakettiin sijoitettavat kaksi Na-fotometriä mittaavat Na D-viivasuhdetta ja absoluuttista intensiteettiä. Kolme NEMI-

fotometriä mahdollistavat revontuliemissiokorjauksen edelliselle mittaamalla atomaarisen hapen konsentraation. ALOMAR-observatorion Na Weber-lidar mittaa samanaikaisesti MLT-alueen Na-tiheyden ja lämpötilaprofiilin. Leedsin yliopiston ilmahehkuspektrometri mittaa integroidun D-viivasuhteen sekä muita ilmahehku- ja revontuliemissioita (esim. hapen vihreä ja OH Meinel).

NEMI-fotometreillä mitataan myös NO:n ja O:n tuottamaa virittyntä NO<sub>2</sub>:ta 70 km:n yläpuolella. Alatermosfäärin NO syntyy ionien ja molekyylien kemiasta ja korkeilla leveysasteilla elektronisade lisää tuottoa huomattavasti. NO:n kulkeutuminen alamosfääriin ja ylästratosfääriin voi vaikuttaa suuresti otsonikonsentraatioon korkeilla leveysasteilla. HotPay II-rakettiin sijoitettava PEEL-instrumentti mittaa presipitoituvien elektronien energiaspektrin.

New Hampshiren yliopiston pölydetektori mittaa mesospfäärissä olevaa varautuneiden raskaiden hiukkasten määrää. Nämä ovat todennäköisimmin meteorista alkuperää olevia savuhiukkasia, joista osa varautuu sähköisesti. Kiinnostavia kysymyksiä ovat kuinka savuhiukkaset varautuvat plasmassa ja se onko savuhiukkasten ja Na- ja ilmahehkukerrosten välillä yhteyttä kuten aiemmat rakettkokeet ovat indikoineet. Esimerkiksi on ehdotettu, että presipitoituvat elektronit saattaisivat irrottaa Na-atomeja savuhiukkasista, jolloin vuorovaikutus atomaarisen hapen kanssa näkyisi ilmahehkuemissioina.

Absoluuttinen elektronien konsentraatio sekä suuren resoluution korkeusprofiili positiivisten ionien konsentraatiosta mitataan Grazin yliopiston Faraday-kiertymiskokeella ja ionisensorilla. Nämä plasmamittaukset palvelevat kolmea tarkoitusta:

- (a) Määritetyt elektroni- ja ionitiheysprofiilit liitetään ionosfäärin mallinnuksen kokeelliseen tietokantaan. Lisäksi tarkasta elektroniitiheysprofiilista voidaan laskea galaktisen radiolähteen radioaallon absorptio ja täten HotPay II-lennolla voidaan kalibroida Andøyän uutta kuvaavaa riometriä.
- (b) Ionitiheysprofiilin hienorakenne on neutraalin ilmakehän turbulenssin mitta. Tämä parametri on tärkeä kun pyritään ymmärtämään sellaisten komponenttien kuin Na, O<sub>3</sub> ja O jakaumaa yläilmakehässä.
- (c) Plasmamittaukset ovat oleellisia tulkittaessa varatun pölyn mittauksia, erityisesti selvitetessä kuinka suuri osa aerosoleista on varautuneita ja millä tavoin.

## 2.2. Revontulitutkimus

Viimeisten kahden vuosikymmenien aikana on satelliittien, sirontatutkien ja numeeristen mallien avulla osoitettu voimakkaiden kentänsuuntaisten virtojen olemassaolo kapeissa revontulirakenteissa. CETP-instrumentti on kolmiakselinen magnetometri, joka mittaa magneettikentän komponentit DC:stä 6 kHz asti. Näistä mittauksista voidaan arvioida kentänsuuntaisten virtojen vaikutuksia. Sekä PEEL-, plasma-, että fotometri-instrumentit tukevat CETP-mittausten tulkintaa.

## 2.3. Kosminen säteilyvuo

Kosminen säteily on tärkein ilmakehää ionisoiva tekijä 70 km alapuolella. Syntyvät ionit voivat toimia tiivistymiskeskuksina ja näin kenties lopulta vaikuttaa myös ilmastoon. Liulin-

instrumentti mittaa primäärisen kosmisen säteilyn ja törmäyksissä ilmakehän molekyyliin syntyvien sekundaarihiukkasten energiaspektrin.

### 3. NEMI-FOTOMETRIT

Useat viimeaikaiset satelliittimittaukset ja teoreettiset mallinnukset ovat osoittaneet ionisoidun ja neutraalin ilmakehän kytkennän tärkeyden mesosfäärin/alatermosfäärin korkeusalueella. Suurienerginen hiukkassade, jota edustavat Auringosta peräisin olevat protonit, revontulielektronit ja säteilyvyöhykkeiden relativistiset elektronit, saa aikaan merkittävää parittoman tyypin tuottoa, joka puolestaan vaikuttaa otsonikemiaan. Vaikutukset neutraali-ilmakehään voivat olla niin pitkäaikaisia, että ne kytkeytyvät alempiin ilmakehän kerroksiin ja muille leveysasteille. Ioni- ja neutraalikemian kytkeytymisen yksityiskohtat on tunnettava ennenkuin voimme vastata kysymykseen mikä on suurienerginen hiukkassateen aiheuttamien ilmakehämuutosten globaali rooli.

NEMI-hankkeen tarkoituksena on tutkia revontulihukkassateen energeettisiä ja kemiallisia vaikutuksia tutkimalla atomaarisen hapen tuottoa, molekyylien viritystä ja typpioksidin tuottoa. Ionisoidun ja neutraalin ilmakehän kytkentää tutkitaan yksityiskohtaisella teoreettisella ionikemiamallilla Sodankylä Ion Chemistry (SIC).

NEMI-fotometreillä mitattavat emissiot on kuvattu seuraavassa:

#### 3.1 O<sub>2</sub>-atmosfäärivyö ja atomaarinen happi

Koska yksiatominen happi on tärkein kemiallisen energian kuljettaja ylämesosfäärissä ja alatermosfäärissä, on tärkeää tuntea sen konsentraation korkeusprofiili kaikissa kemiallisissa tutkimuksissa.

Luotausraketilla tehtäviä O<sub>2</sub> (0-0) atmosfäärivyön ( $b^1\Sigma_g^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-$ ) mittauksia 762 nm lähellä on yleisesti käytetty atomaarisen hapen konsentraation määrittämisessä. Korkeusprofiili saadaan tyypillisesti alueelta 88-100 km.

#### 3.2 Typpioksidi ja taustajatkumo

Typpioksidia NO tuottuu helposti hiukkassateen ja valokemian vaikutuksesta ja sen konsentraatio vaihtelee suuresti. NO on kemiallisesti aktiivinen ja osallistuu otsonin kemiaan. Auringonvalon puuttuessa NO on pitkäikäinen, niin että revontulien tuottama NO laskeutuu alaspäin ilmakehässä ja kulkeutuu myös eteläisemmille leveysasteille kuin missä se syntyi. Lisäksi NO on tärkein ionisoituva komponentti rauhallisessa päiväaikaisessa ionosfäärissä, joten sen konsentraatio määrittää ionosfäärin käyttäytymistä.

NEMI mittaa typpioksidin tuottoa ja vaikutusta ionosfäärissä tyypillisen revontulitapahtuman aikana. Mesopausin alueella syntyy NO<sub>2</sub>-emissioita jatkuvasti kolmen kappaleen reaktioissa  $NO + O + M \rightarrow NO_2 + M$ .

Tämän mekanismin perusteella NO-konsentraatio voidaan määrittää yhdistetystä NO<sub>2</sub>-jatkumon ja O<sub>2</sub>-atmosfäärivyön avulla määritettävän atomaarisen hapen konsentraation analyysistä. NO-analyysin lisäksi NO<sub>2</sub>-jatkumon mittaus toimii tärkeänä taustatietona HotPay II -raketin Na-fotometreille.

### 3.3 N<sub>2</sub><sup>+</sup> 1. negatiivinen vyö

Energeettinen elektronipresipitaatio tuottaa revontuliemissioita N<sub>2</sub><sup>+</sup>(B<sup>2</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>→X<sup>2</sup>Σ<sub>g</sub><sup>+</sup>) ensimmäisessä negatiivisessa vyössä. Tutkimme korkeusriippuvaa N<sub>2</sub><sup>+</sup>(B<sup>2</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>) tuottoa ionosfääritaustan funktiona. Ionisaatiota tutkitaan maanpinnalta EISCAT-tutkilla ja riometreilla. Lisäksi Grazin yliopiston Faraday-kiertymäkoee ja ionisensori mittaavat elektronien ja ionien konsentraatiota HotPay II –lennon aikana. 1. negatiivisen vyön mittaukset toimivat myös taustamittauksena HotPay II –raketin Na-mittauksille.

#### 2.1.4 O<sub>2</sub>-Chamberlain vyö

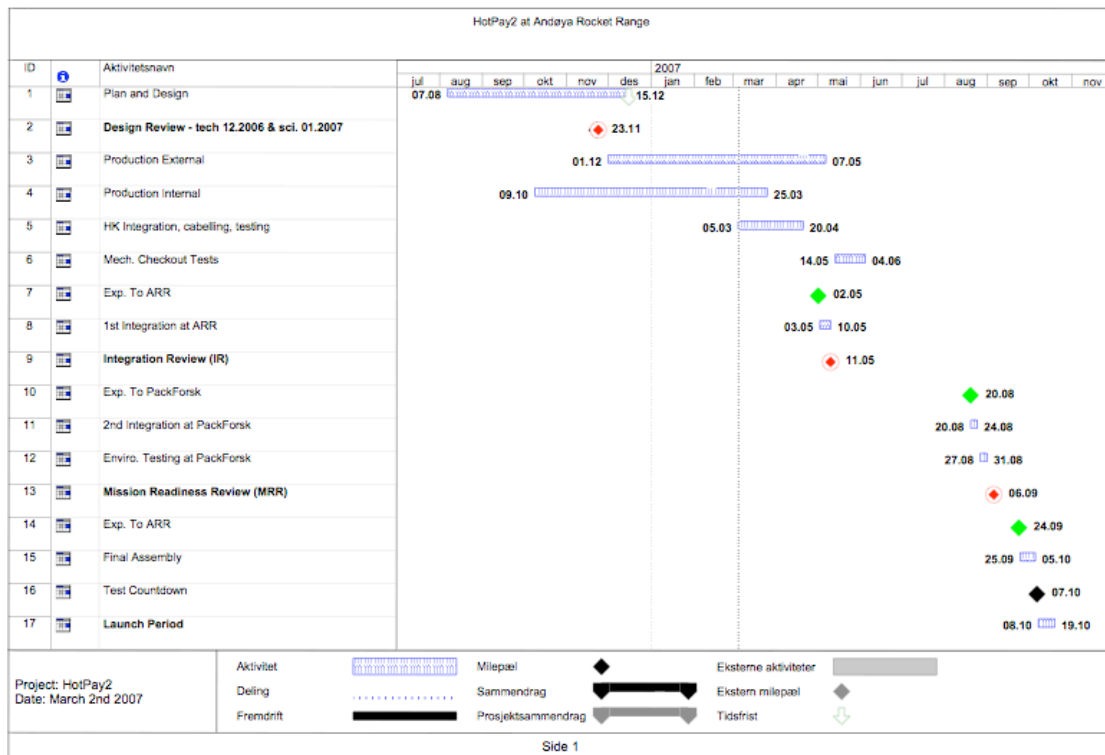
O<sub>2</sub>-Chamberlain vyö (A<sup>3</sup>Δ<sub>u</sub> → a<sup>1</sup>Σ<sub>g</sub><sup>+</sup>) on yksi vähiten tutkituista molekyylärisen hapen transiatioista Maan ilmahehkussa. Chamberlain vyön ja O<sub>2</sub>-atmosfäärivyön yhteinen analyysi mahdollistaa korkeusriippuvuuden vertaamisen atomaarisen hapen konsentraation korkeusprofiiliin. Sekä revontuli N<sub>2</sub><sup>+</sup> 1. negatiivista vyötä että Chamberlain vyötä mitataan allonpituudella 391 nm, 1–2 nm spektrinleveydellä. Tämä on mahdollista koska Chamberlain yöhehku saa alkunsa alle 100 km korkeudella kun taas N<sub>2</sub>-revontuliemissio tulee normaalisti yli 100 km korkeuksilta.

## 4. HOTPAY II -RAKETIN AIKATAULU JA LAUKAISU

HotPay II –raketin varsinainen laukaisuikkuna on 2 viikkoa ajalla 8.-19. lokakuuta 2007. Lentoradan apogee on 370 km ja Maahan (mereen) iskeytyminen tapahtuu 260-350 km etäisyydellä riippuen lähtökulmasta 85-83 astetta. Laukaisu tapahtuu Andøyen rakettkoeasemalta klo 19:00-03:00 UT välisenä aikana, kun seuraavat laukaisukriteerit täyttyvät:

1. Kirkas taivas zenitissä ja siitä 20 astetta pohjoiseen. Tällöin Na-kerros ja ilmahehku voidaan mitata optisesti ALOMAR:in instrumenteilla. Osittain pilvisessä tilanteessa laukaisua voidaan viivyttää hetkessä t-3min, kunnes maanpintamittaukset voidaan tehdä. Kuvaavalla riometrillä varmistetaan revontulikaaren läsnäolo.
2. Revontulikaari 120-180 km korkeudella pohjoisessa korkeuskulmassa alle 45 astetta. Oletettu esiintymisaika on 22:00-23:00 UT.
3. Pimeä taivas ylös lennettäessä: Aurinko vähintään 12 astetta horisontin alapuolella (terminaattori > 140 km); Kuun tulisi myös olla vähintään 12 astetta horisontin alapuolella vähintään 4 tuntia välillä 19-03UT. Lähtölaskennan tulisi alkaa klo 16:00 UT.
4. Na-kerros häiriintymätön, keskimääräisen Gaussisen profiilin mukainen.

Rakettikokeen yleisaikataulu on esitetty kuvassa 2.

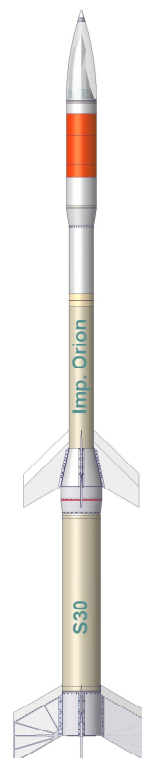


Kuva 2. HotPay II –rakettikokeen yleisaikataulu

HotPay II –raketti on kuvan 3. VS-30/improved Orion –yhdistelmä, jonka toimittaa DLR/Moraba.

**VS-30/Imp.Orion Data:**

	1 <sup>st</sup> Stage	2 <sup>nd</sup> Stage	Vehicle
Structural mass (kg)	335	156	491
Propellant mass (kg)	884	290	1,171
Burning time (s)	19.2	21.9	-
Total action time	29.0	26.0	-
Average thrust, vacuum (kN)	98.1	77.4	-
Total impulse, vacuum (MNs)	2.28	0.618	-
Specific impulse, vacuum (s)	258	204	-
Motor diameter (m)	0.557	0.356	-



Kuva 3. VS-30/improved Orion luotausraketti