

Tässä sarjassa tullaan käsittelemään sähköpurjeen sovelluksia. Jotkut sovellukset on aiemmin mainittu sähköpurjekolumneissa, osa tulee olemaan uusia. Aloitamme sarjan läheltä Maata, yksinkertaisesta lähiajan sovelluksesta joka on myös kaupallisesti mielenkiintoinen. Plasmajarru on sähköpurjeen pikkuveli joka on tarkoitettu pienehköjen satelliittien palauttamiseen ilmakehään tehtävän päätyttyä.

## Sähköpurjeen sovelluksia, Osa 1:

# Sähköpurjelieka plasmajarruna - avaruusromuongelma historian romukoppaan?

tutkija Pekka Janhunen, Ilmatieteen laitos

Aurinkotuulussa sähköpurjelieat varataan positiivisesti, jolloin ne hylkivät aurinkotuulen protoneja. Ne voisi varata myös negatiivisesti, jolloin ne vetäisivät protoneja puoleensa, mistä seuraisi samantapainen voimavaikutus koska voimavaikutuksen saamiseksi riittää häiritä protonien suoraviivaisia ratoja jollain tavalla. Negatiivisesti varatussa sähköpurjeessa on kuitenkin kaksi ongelmaa: elektronitykin sijasta pitää käyttää ionitykkiä ja jännitettä ei voi nostaa kovin korkeaksi jottei sähkökenttä repisi lieoista irti elektroneja (tarkemmin sanottuna: jännitteen suhde liean paksuuteen ei saa olla liian suuri). Negatiivisesti varatusta metallipinnasta irtoaa nimittäin elektroneja (kenttäemissio) paljon pienemmällä pintasähkökentällä kuin positiivisesti varatusta metallista voi irrota positiivisia ioneja. Ionitykki ei ole periaatteessa ongelma, mutta on kuitenkin elektronitykkiä monimutkaisempi ja kuluttaa ainetta josta ionit tehdään mikä rajoittaa toiminta-aikaa ainakin periaatteessa. Näistä syistä aurinkotuulussa lentävä sähköpurje yleensä ajatellaan positiivisesti varatuksi.

Sähköpurje ei toimi Maan magnetosfäärin sisällä missä satelliitit kiertävät, koska magneettikenttä estää aurinkotuulen pääsyn sinne. Sähköpurjeella voi kuitenkin jarruttaa satelliitin kulkua. Prosessi riippuu paljon satelliitin ratakorkeudesta. Alle tuhannen kilometrin korkeudella ionosfäärin plasma on tiheää, jopa miljoona kertaa aurinkotuulta tiheämpää, ja magneettikenttä on voimakas. Jos tavallinen sähköpurjelieka tuodaan tällaiseen ympäristöön ja pannaan positiiviseen jännitteeseen, lieka

alkaa kerätä tehokkaasti elektroneja tiheästä plasmasta. Kerätty elektronivirta kulkee pitkin liekaa, jolloin liekaan vaikuttaa magneettinen Lorentzin voima ( $j \times B$ -voima) koska Maan magneettikenttä on myös melko voimakas. Tämä niinsanottu elektrodynaaminen liekaefekti (ED-liekaefekti) on sähköpurje-efektiä suurempi, paitsi jos lieka on niin lyhyt kuin ESTCube-1:ssä eli noin 10 m. ED-liekaefektin kokonaisvoima kasvaa liean pituuden neliossa kun taas sähköpurje-efekti on suoraan verrannollinen liean pituuteen.

Tilanne kuitenkin muuttuu jos sähköpurjelieka on negatiivisesti varattu. Tällöin lieka kerää virtaa paljon maltillisemmin kuin positiivisessa tapauksessa, koska ionit liikkuvat paljon hitaammin kuin elektronit. Eroa vielä kasvattaa se että ionit tässä tapauksessa ovat enimmäkseen happi-ioneja jotka ovat 16 kertaa raskaampia kuin protonit. Elektronien kenttäemissio ei ole ongelma kunhan jännite pidetään maltillisena. Jännitteen ei tarvitse tässä tapauksessa olla järin suuri koska satelliittia vastaan tulevat ionosfäärin ionit lentävät vain nopeudella 7 km/s mikä vastaa 4-5 elektronivoltin energiaa (vertailun vuoksi aurinkotuulen protonien

DLR:n Olaf Krömer ja 'Viron Tehtäin' Enterprite Ettonian Urmas Uska kuuntelevat tarkkaavaisina kun Janhunen kertoo ideoistaan.  
Kuva Sini Merikallio



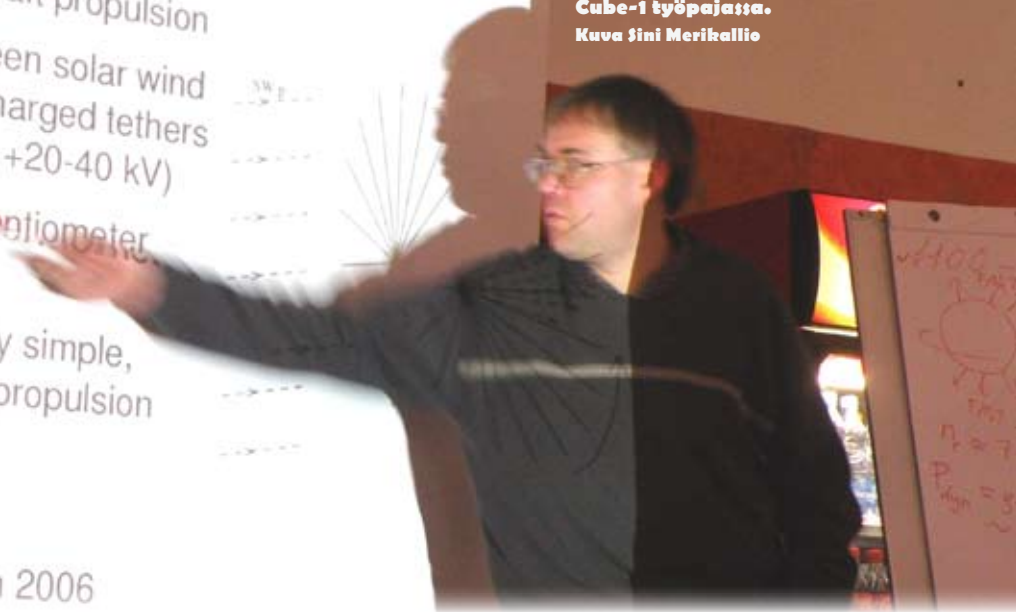
# Electric Solar Wind Sail

- Use solar wind for spacecraft propulsion
- Coulomb interaction between solar wind and long, thin, positively charged tethers (10-20 km, 25-50  $\mu\text{m}$  wire, +20-40 kV)
- Centrifugal stretching, **Potentiometer** guiding & navigation
- High-performance, relatively simple, general-use propellantless propulsion technique

First idea Janhunen 2004

In its present form Janhunen 2006

Pekka Janhunen esitelmöimässä Vooressa ESTCube-1 työpajassa Täppisteaduste syyskoolin yhteydessä järjestetyssä EST-Cube-1 työpajassa.  
Kuva Sini Merikallio



liike-energia on 1-4 keV). Ionitykki sentään tarvitaan, vai tarvitaanko?

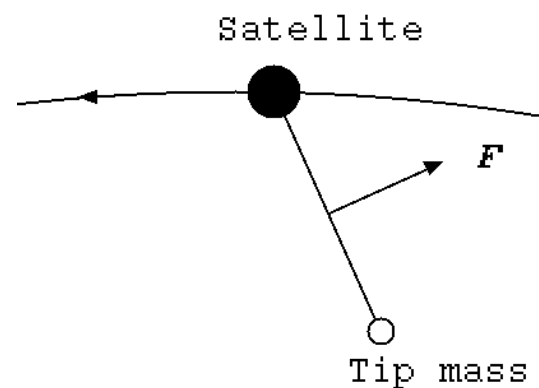
Ionitykkiä ei yleensä tarvita, koska tässä tapauksessa satelliitin johtava runko riittää keräämään plasmasta elektronivirran, joka kompensoi liean keräämän ionivirran. "Yleensä" tarkoittaa tässä sitä että asia riippuu satelliitin rungon johtavan osan koosta, mutta että tyypillisessä satelliitissa pinta-ala riittää varsin hyvin. Tarvitaan siis vain lieka ja jännitelähde, joka generoi satelliitin ja liean välille potentiaalieron jossa lieka on satelliittiin verrattuna negatiivinen. Satelliitti asettuu hivenen positiiviseksi ja lieka vahvasti negatiiviseksi. Maan painovoimagradiensti kiristää liean.

Pienille satelliiteille (noin 100-200 kg asti) sähköpurje-efektiin perustuva plasmajarru on karkeasti noin kymmenen kertaa tehokkaampi laite kuin ED-lieka. Tehokkuusero tulee siitä että lieka on ohut koska sen ei tarvitse kantaa virtaa, ainoastaan pysyä varattuna. Lisäksi tehonkulutus on pieni koska ohut lieka ei kerää paljon virtaa. Isommissa satelliiteilla (pitempi ja/tai paksumpi lieka) plasmajarru muuttuu jatkuvalla tavalla ED-lieaksi. Erittäin tärkeä etu suhteessa ED-liekaan on se että plasmajarrulieka on niin ohut että vaikka se katkeaisi, irtonainen pää ei muodosta uhkaa muille satelliiteille. Jos lieka osuu toiseen satelliittiin, jokaisesta ~50 mikrometrin langan osumasta syntyy n. 0.5 mm leveä ja 0.1 mm syvä vakomainen kraatteri. Tällaisen naarmun ei pitäisi normaalisti haitata muita satelliitteja. Sitäpaitsi irtonainen lieanpätkä putoaa ilmakehään tyypillisesti muutamassa viikossa ilmanvastuksen takia koska sen pinta-alan ja tilavuuden suhde on hyvin suuri, mikä pienentää todennäköisyyttä että se ehtisi osua muihin satelliitteihin. ED-lieat ovat paljon paksumpia ja siten potentiaalinen sekundäärinen avaruusromun lähde.

1-3 kg kuutiosatelliitin lähettäminen maksaa noin 50,000-100,000 € ja niiden määrä lisääntyy nopeasti kun yhä pie-

nemmät organisaatiot (tällä hetkellä isohkot yliopistot ja pienet maat, seuraavassa vaiheessa yksittäiset tutkimusryhmät, maakunnat ja yritykset) lähettävät niitä. Jossain vaiheessa cubesatien määrää joudutaan tavalla tai toisella rajoittamaan, koska niiden muodostama avaruusromuongelma on liian suuri, tai sitten ne pitää varustaa palautusmekanismilla. Palautusmekanismiksi ei käy tavallinen rakettimoottori, koska pyrotekniikka on kuutiosatelliiteissa kielletty. Kieltoon on hyvä syy, sillä jos niissä olisi sisällä rakettipolttoainetta, satelliitin rakentajan pitäisi todistaa kantorakettifirmalle (tai ottaa kallis vakuutus) että satelliitti ei voi räjähtää ja vaarantaa päähyötykuormaa (kuutiosatelliitithan laukaistaan aina piggybackinä eli isomman satelliitin oheishyötykuormana). Sähköpurjeen ideaa soveltava plasmajarru näyttäisi tarjoavan tähän lähitulevaisuuden ongelmaan ratkaisun joka on yksinkertainen, halpa, toimintavarma ja turvallinen.

ESTCube-1 tulee tämänhetkisen suunnitelman mukaan tehtävän loppupuolella demonstroimaan plasmajarrutusta ajamalla 10-metristä liekaansa negatiivisessa moodissa. Lieka on tosin niin lyhyt että sen avulla jarrutus ilmakehään asti kestää varsin pitkään, mutta ratakorkeuden



aleneminen pystyttäneen silti todentamaan. On myös keskusteltu mahdollisuudesta lisätä liean pituutta jo ESTCube-1:ssä, jolloin jarrutus olisi tehokkaampaa.

Plasmajarrun, samoin kuin ED-liean, teho putoaa yli 1000 km korkeudella nopeasti koska plasmatiheys on siellä pienempi. Mutta pahin avaruusromu-ongelma esiintyy juuri aurinkosynkronisten naparatojen (n. 700-800 km

kohdalla, missä plasmajarru toimii erinomaisesti.

Plasmajarrun ideaa voi laajentaa ja kehitellä eteenpäin. Jos sitä haluaa soveltaa isompiin, jopa tonnien painoihin satelliitteihin, liekoja pitää olla useita jolloin ne pitää stabiloida pyörittämällä. Voidaan myös ajatella erityistä romuntorjuntasatelliittia, joka vaelttaa esim. ionimoottorin avulla ja käy kiinnittämässä vanhojen satelliittiromujen kylkeen plasmajarruja esim.

magneetilla tai pienellä harppuunalla. Yksi plasmajarru painaa koosta riippuen ehkä 50-500 grammaa. Jos satelliitti on niin iso että se ei pala täydellisesti ilmakehässä, plasmajarrun voi varustaa paikantimella ja logiikalla joka säätää jännitettä niin että paluu ilmakehään tapahtuu halutussa paikassa esim. eteläisen Tyynenmeren yllä.

ESA on ilmaissut pyrkimyksen rahoittaa plasmajarrun lisätutkimuksia.



ESTCube-1 joukkue: takarivissä Toomas Vahter, Henri Seppänen, Jouni Envall, Paul Liias, Ramon Rantsus, Pekka Janhunen, Tanel Ainla, Sven-Erik Mändmaa, Endel Solo, Urmas Uska, Tavo Ani, Erik Kulu, Jaan Viru, Indrek Sünter ja Tõnis Eenmäe. eturivissä: Petri Toivanen, Jouni Polkko, Sini Merikallio, Olaf Krömer, Urmas Kvell, Mart Noorma, Agnes Bauchman, Ilmar Ansko

ESTCube-1 workshop Vooressa 30.10 - 1.11.2009

## Täppisteaduste Sygiskool

Sini Merikallio

Lokakuun lopulla kokoontui Eestin Vooreen reilu viisikymmentä opiskelijaa, joista kymmenkunta kuului ESTCube-1:n tiimiin. ESTCube-1 on Viron ensimmäinen satelliitti, jonka hyötykuormana on sähköpurjeen testi, sekin ensimmäinen laatuaan.

Tämä ESTCuben vaihe A:n katselmus alkoi itse keksijä Pekka Janhusen esitelmällä, jonka aikana sähköpurjeen toiminta selvitettiin perusteellisesti. Tämän jälkeen käytiin alijärjestelmät, niiden ongelmat ja status läpi: riittääkö virtaa, mitä jännitteitä tarvitaan, miten lieka oikein pakataan kelalle, entä mistä kohtaa satelliitin seinämää se kelautuu ulos ja osuuko se nyt varmasti kameran linssin eteen?

Idearikkaat opiskelijat vievät projektia innolla kohti laukaisua. Samalla kun sähköpurje-efekti tulee mitattua, saadaan koulutettua Eestiin koko joukko valmiimpia avaruusinsinöörejä ja tiedemiehiä, joilla tulee olemaan jo valmistussaan yksi toivottavasti onnistunut satelliittimissio takana.

Vilkasta keskustelua vielä paluumatkalla Suomalaisen tiimin kesken herätti mikrometeoriittiuhrin ja siihen valmistautuminen. Ideoitiin myös liean päähän maalattavaa Viron lippua, josta voitaisiin uloskelattaessa ottaa kuvia. □



Jaan Virun ryhmä on selvittänyt avaruusolojen vaikutusta satelliittiin