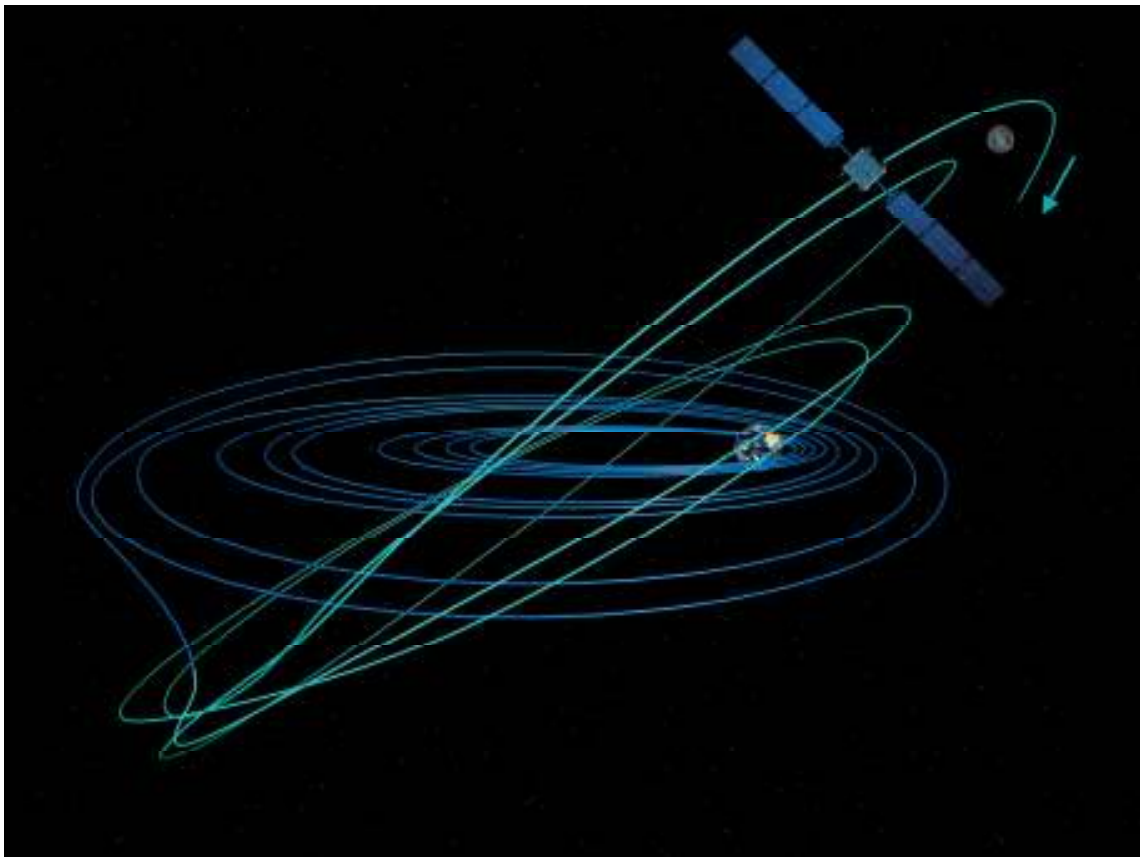


# AVARUUSLUOTAIN – RYMDSONDEN 3/2003



SMART-1 -luotaimen ensimmäiset, elliptiset radat. Luotaimen päästyä Kuun lähelle Kuun painovoima muuttaa luotaimen rataa. Ks. myös *Avaruus uutiset*, s. 5.

Kuva: AOES Medialab, ESA 2002.

## Katsaus tulevaisuuden avaruusalusten propulsiomenetelmiin

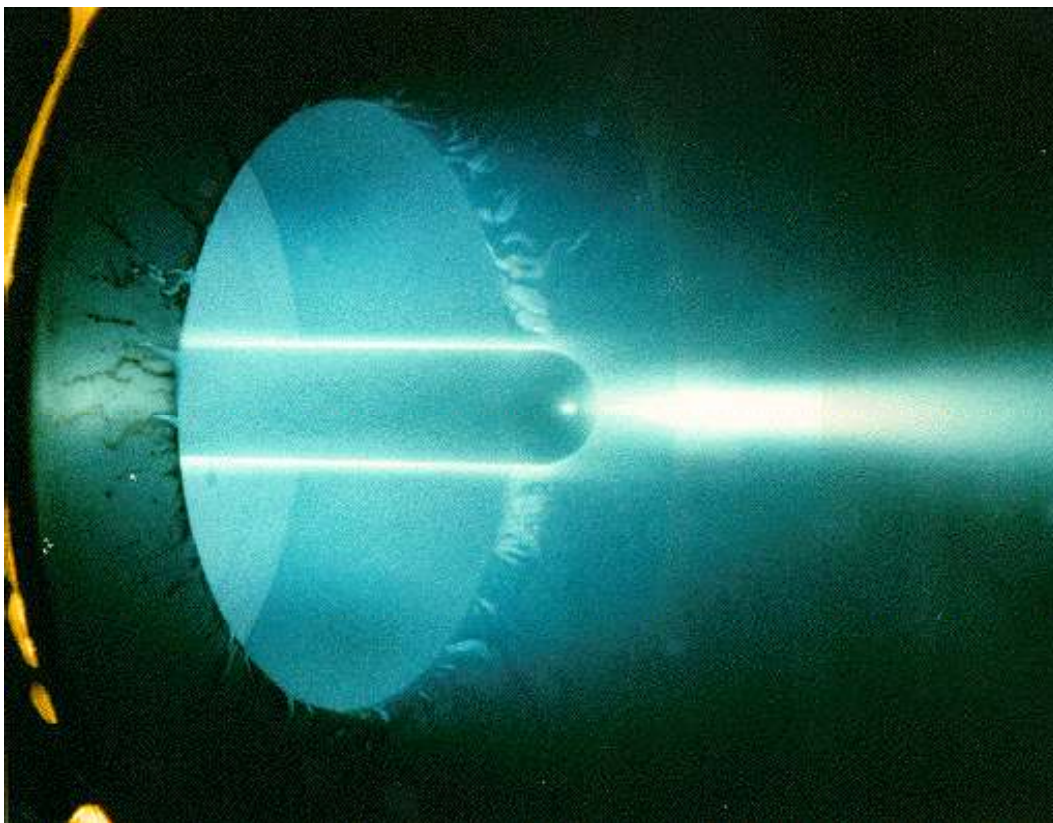
*Pekka Janhunen*

Propulsiolla tarkoitetaan erilaisia avaruus-  
alusten kiihdyttämiseen käytettäviä tekni-  
koita. Useimmin käytetty propulsiomene-  
telmä on palamiseen perustuva kemiallinen  
raketti. Kuten tunnettua, kemiallisten rake-  
teilla ei voida saavuttaa kovin suuria no-  
peuksia paitsi suuresti kasvattamalla aluk-  
sen lähtöpainoa (käytännön yläraja on ehkä  
20 km/s, silloin hyötykuorman suhde lähtö-  
painoon on jo todella pieni). Tästä syystä  
kemiallista rakettia parempia propulsiome-  
netelmiä on etsitty intensiivisesti jo 30-40  
vuotta ja etsintä jatkuu yhä.

Tämän katsauksen aiheena ovat kemiallista  
rakettia paremmat propulsiomenetelmät, jot-

ka toimivat tyhjässä avaruudessa. Kaiken-  
kokoisten hyötykuormien nosto ilmakehän  
läpi kiertoradalle nykyistä paljon taloudelli-  
semmin, joustavammin ja luotettammin on  
toinen tärkeä ratkaisua odottava ongelma,  
mutta sitä ei käsitellä tässä. Voidaan väittää  
että koko avaruustoiminnan luonne ja laa-  
juus tulevaisuudessa riippuvat kyvystämme  
ratkaista nämä kaksi propulsiotekniikan  
avainkysymystä. Tästä syystä on aika ajoin-  
syytä päivittää tietonsa ja luoda katsaus pro-  
pulsiomenetelmien nykytilaan: onko mullis-  
tavia menetelmiä tulossa tai kehitteillä?

Jatkuu sivulla 7... ➡



Magn etoplasmadynaaminen propulsiotestissä. Kuvaa:

<http://www.islandone.org/APC/>.

**Sisältö**

Katsaus tulevaisuuden avaruus-alusten propulsiomenetelmiin .....	2
Pääkirjoitus .....	3
Puheenjohtajalta.....	5
Avaruus uutisia .....	5
Katsaus tulevaisuuden avaruus-alusten propulsiomenetelmiin (jatkoa sivulta 2).....	7
new.opportunities@space.....	10
Hyppyportti eli Webbi uutisia .....	10

**Contents**

Review of propulsion methods for future spacecraft .....	2
Editorial .....	3
President's section .....	5
Review of propulsion methods for future spacecraft (cont'd from p. 2)....	7
new.opportunities@space.....	10
Jumpgate or WWW News .....	14

**Pääkirjoitus**

Tervehdys ja hyvää syksyä! Tässä lehdessä on palattu aiempaan käytäntöön Avaruus uutiset- ja Hyppyportti -palstojen osalta eli kumpainenkin lehdestä tällä kertaa löytyy.

Tässä numerossa on myös taannoisesta International Astronautical Federationin Bremenin kokouksesta varsin laajakin matkaraportti.

Viime aikojen ehkä tärkein uutinen oli Kiinan ensimmäinen miehitetty avaruuslento viime viikolla. Tähän aiheeseen paneuduimme jonkin verran ennakkoon Avaruusluotaimen numerossa 2003-01. Tämän vuoden viimeisessä numerossa on tarkoitus paneutua tuohon aiheeseen hieman tarkemmin ja pohtia sen vaikutuksia ja seuraamuksia.

Avaruustekniikan ja toiminnan perusteisiin kuuluvat erilaiset propulsiio- eli työntövoimajärjestelmät. Hieman eksoottisempiin - mutta kuitenkin realistisiin - propulsiomenetelmiin perehdytään Pekka Janhusen kirjoituksessa (s.2).

Hyvää syksyn jatkoa kaikille ja joka iikka syyskokoukseen (ks. s. 4)!

*Tero Siili, päätoimittaja*

**Päätoimittaja:** Tero Siili - **Toimituksen osoite:** C/o Ilmatieteen laitos, Geofysiikan tutkimus, PL 503, 00101 HELSINKI - **Puhelin:** (09) 19294660, (050) 5325462 - **Telekopio:** (09) 19294603 - **Sähköposti:** Tero.Siili@fmi.fi

**ISSN:** 0356-021X - **Painos:** 150 kpl - **Ilmestymistajuus:** neljä kertaa vuodessa - **Vuosikerran tilaushinta:** 22 € - **Ilmoitushinnat:** tiedustele päätoimittajalta.

**Julkaisija:**

Suomen avaruustutkimusseura - Sällskapet för astronautisk forskning i Finland - Finnish Astronautical Society, PL 507, 00101 HELSINKI. Kauppalaantie 6-8, 00320 HELSINKI, (09) 5874433, <http://netlander.fmi.fi/~sats/>.

**Pankkiyhitys:** Nordea 218518-129232

**Aineistopäivät vuonna 2003**

2/2003 10.6.

3/2003 20.9.

4/2003 30.11.

Nimellä tai nimimerkillä kirjoitetuissa artikkeleissa esitetyt mielipiteet ovat kirjoittajan henkilökohtaisia käsityksiä eivätkä välttämättä vastaa seuran tai lehden virallista kantaa.

päälle myös taloudellisesti. Niinpä Galileo ohjattiin suoralle törmäyskurssille Jupiteriin. Vajaan miljardin kilometrin päässä Maasta oleva bussin kokoinen luotain lensi 183000 kilometrin tuntivauhtia kohti planeetan yläilmakehää. Jupiterilla ei ole varsinaista pintaa, joten luotain höyrystyi päästyään riittävän syvälle planeetan kaasukehään, ja sen

suunnaton liike-energia vapautti pienen ydinpommin verran energiaa lämpönä. Viimeinen radioviesti luotaimelta lähti klo 18:57 GMT 21.9.2003.

Lisätietoja edellämmainituista uutispätkistä löytyy mm. Hyppyyportin verkkosivuilta (ks. s. 10).

## Katsaus tulevaisuuden avaruusalusten propulsiomenetelmiin (jatkoa sivulta 2)

*Pekka Janhunen*

### Ydin- ja aurinkoenergia

Aktiivisen propulsiomenetelmän energianlähteeksi käy ydin- tai aurinkoenergia. Yksinkertaisin tapa käyttää energialähdettä on kuumentaa sen avulla ajoainetta, jolloin syntyy alusta eteenpäin vievä suihku (ns. terminen propulsio). Ydinreaktoriin perustuvaa termistä propulsiota kehiteltiin 1970-luvun alussa NERVA-projektissa USA:ssa, mutta projekti keskeytettiin ennen pääsyä koelentovaiheeseen. Suunnitellulla 10 tonnin painoisella ja 1,5 gigawatin tehoisella NERVA-ydinraketilla olisi parhaassa tapauksessa päästy noin kaksinkertaiseen pakosuihkun nopeuteen kemialliseen rakettiin verrattuna (siis myös kaksinkertaiseen loppunopeuteen, mikäli lähtöpainon ja hyötykuorman suhde on sama molemmissa tapauksissa). Suurempi pakosuihkun nopeus johtuu siitä että NERVA:n suihku on molekylaarista vetyä, kun taas perinteisen vetyä polttavan kemiallisen raketin suihku on vettä. Koska vety-molekyylillä on vesimolekyylillä kevyempi, sen terminen nopeus samassa lämpötilassa on suurempi kuin vesimolekyylillä. Lämpötila on molemmissa tapauksissa suunnilleen sama (n. 3000 K); fissioreaktioista saataisiin toki energiaa vaikka kuinka paljon, mutta rajoittavana tekijänä on reaktorin sulamispiste. Koska saatava suorituskyky ei ole järin paljon kemiallisia raketteja parempi, mutta tekniikka on vaikeaa ja vaarallistakin, on

epätodennäköistä että NERVA:n kaltaista ydinrakettia koskaan rakennetaan.

Monimutkaisempi tapa käyttää ydinenergiaa on rakentaa alukseen kokonainen ydinvoimala nestekiertoineen, turbiineineen ja generaattoreineen ja varustaa alus vielä ionitai plasmamoottorilla joka muuntaa sähköenergian varattujen hiukkasten pakosuihkuksi. Tällainen propulsiomenetelmä on käytössä suunnitteilla olevassa JIMO-aluksessa (Jupiter Icy Moons Orbiter). Menetelmän etuja ovat periaatteessa mielivaltaisen suuri pakosuihkun nopeus (siis periaatteessa rajaton loppunopeus), modulaarisuus ja joustavuus. Nykytekniikalla toteutettuna haittapuolena on pieni työntövoima ja siitä seuraava vaatimaton kiihtyvyyden, mikä johtuu melko huonosta teho-painosuhteesta. Teho-painosuhteen  $P/m$  sekä kiihtyvyyden  $a$  ja pakosuihkun nopeuden  $v$  välillä vallitsee verrannollisuus  $P/m \sim a \cdot v$ . Pakosuihkun nopeus  $v$  puolestaan on verrannollinen saatavissa olevaan loppunopeuteen, verrannollisuuskerroin riippuu siitä, kuinka paljon lähtömassasta on ajoainetta. Jos halutaan suuri loppunopeus  $v$  (esim.  $v = 100 \text{ km/s}$ ) ja kohtuullinen kiihtyvyyden (esimerkiksi  $a = 0,01 \text{ m/s}^2$ ), pitää aluksen teho/painosuhteen olla suuruusluokkaa  $1 \text{ kW/kg}$  (karkeasti ottaen sama kuin nykyaikaisen autonmoottorin). Tällöin kiihtyminen loppunopeuteen  $100 \text{ km/s}$  kestäisi



Kuvassa nähdään täydellisen NERVA-järjestelmän mallikappale. Regeroivilla jäähdytyskanavilla varustettu suutin on alaosassa. Reaktoriydin on keskellä, reaktorin säätöjärjestelmät puolestaan yläosassa. Ytimen yläosassa näkyvät pienet suuttimet ovat kuumennettua vetyä käyttäviä ja osa asennonsäätöjärjestelmää. Päänestevetytankki on kartiomainen hahmo kuvan yläosassa. Neljän palomaisen tankin ryppään oli tarkoitus sisältää päävetypumppujen pettäessä ytimen hätäpysäytyksessä ja -jäähdytyksessä käytettävää nestevetyä.

Kuva: Westinghouse.

4 kk. Itse asiassa jos tällainen alus kyettäisiin valmistamaan, se merkitsi jo aikamoista vallankumousta avaruuden valloituksessa! Plasmamoottoria testaavan eurooppalaisen SMART-1 -luotaimen (ks. myös s. 5) massa on n. 300 kg ja teho n. 3 kW, eli teho-painosuhte on n. 10 W/kg. Tällaisella teho-painosuhteella kiihtyvyys olisi vain 0,0001 m/s<sup>2</sup> ja kiihtytys nopeuteen 100 km/s kestäisi peräti 30 vuotta. SMART-1 käyttää sähkö-

energian tuottamiseen perinteistä aurinkopaneelia.

Kohdistamalla auringon säteily parabolisen peilin tai polttolasin avulla pienelle alueelle päästään maksimissaan lähelle Auringon pintalämpötilaa (5800 K). Syntyvä kuumuus on siis riittävä, rajan asettaa taaskin materiaalin kestävyys eikä itse energialähde. Koska aurinkokeräin on pelkkä heijastin, se voidaan ainakin periaatteessa rakentaa pinta-alayksikköä kohti hyvin kevyeksi. Voidaan ajatella että mikä tahansa ydinreaktoriin perustuva propulsiomenetelmä voisi toimia myös aurinkokeräimen avulla: ydinreaktorihan ei ole mitään muuta kuin avaruusaluksen kiinteä osa jota jokin prosessi (fissio) lämmittää. Aurinkokeräimeen perustuvia sähkögeneraattoreita on kehitelty jo 1960-luvulla, mutta kokonaisia lentäviä aluksia propulsiosteemeineen ei tietävästi ole rakennettu. Syynä tähän on todennäköisesti enemmänkin poliittinen sattuma kuin suuret tekniset ongelmat.

Aurinkokeräin-plasmamoottoriyhdistelmä voi tulevaisuudessa olla varteenotettava vaihtoehto ydinreaktori-plasmamoottoriyhdistelmälle lennoilla jotka eivät ulotu liian kauas Auringosta. Vielä Marsin etäisyydellä säteeltään 30-metrinen aurinkokeräin pystyy keräämään lähes 2 megawatin lämpötehon. Tällaisen keräimen massa voisi olla alle 100 kg, jos se olisi valmistettu keskimäärin 10 mikrometrin paksuisesta alumiinista. Jos 20 % lämpötehosta pystyttäisiin muuttamaan plasmasuihkun energiaksi, tämä riittäisi antamaan tonnin painoiselle alukselle melko mukavan teho-painosuhteen 400 W/kg.

## Aurinkopurjeet ja magneettiset purjeet

Passiivisia propulsiomenetelmiä (purjeita) on myös kehitteillä. Maan etäisyydellä Auringon säteily aiheuttaa heijastavaan kohtisuoraan pintaan voiman, jonka suuruus on lähes 10 mikronewtonia neliömetrille. Kiihtyvyyden  $0,003 \text{ m/s}^2$  antamiseksi tonnin painoiselle alukselle tarvitaan 3 newtonin voima. Tällaisen voiman antaisi siis 30 hehtaarin aurinkopurje. Purjeen pitäisi kuitenkin olla todella ohut, alle 1 mikrometri, jotta sen massa jäisi alle tonnin ja tilaa jäisi vielä hieman hyötykuormallekin. Aurinkopurje on periaatteessa ekvivalentti 100-prosenttisellä hyötysuhteella toimivan aurinkoenergiaa käyttävän fotoniraketin kanssa. Koska tavoiteltavat loppunopeudet ovat kaukana valon nopeudesta, fotonien käyttö ajoaineena on energian tuhlausta. Tästä syystä aurinkopurjeen on oltava paljon plasmamoottorin aurinkokeräintä suurempi, jotta sillä päästäisiin samaan työntövoimaan. Toisaalta tasomainen aurinkopurje on helppo pingottaa muotoonsa esimerkiksi pyörittämällä kuin aurinkokeräin, jonka on oltava paraboloidin muotoinen.

Aurinkopurje käyttää siis voimanlähteenään Auringon säteilypainetta. Toisinaan julkisuudessa esiintyy harmillinen väärinkäsitys, jonka mukaan aurinkopurjeen voimanlähde olisi aurinkotuuli. Aurinkotuulenkin valjastamista propulsiotarkoituksiin on kyllä mietitty. Aurinkotuulen ns. dynaaminen paine vaihtelee suuresti, mutta on keskimäärin Maan etäisyydellä n. 2 nanonewtonia neliömetrille, siis n. 5000 kertaa heikompi kuin Auringon säteilypaine. Aurinkotuulen dynaaminen paine pienenee Auringosta mitatun etäisyyden neliössä kuten säteilypainekin. Aurinkotuulen etuna on kuitenkin, ettei sen poikkeuttamiseen tarvita välttämättä kiinteää purjetta, vaan esimerkiksi aluksen ympärille luotu vahva magneettikenttä riittää. Tutkimalla asiaa todetaan että optima-

linen ratkaisu on mahdollisimman suuri ja kevyt ympyränmuotoinen virtasilmukka jossa kulkee mahdollisimman suuri sähkövirta. Jos virtasilmukan läpimitta on muutamia kymmeniä kilometrejä ja siinä kulkee muutamien kymmenen kiloampeerin virta, se aikaansaa ympärilleen keinotekoisien magnetosfäärin, joka on jonkin verran silmukan läpimittaa suurempi. Jotta silmukka ei painaisi liikaa, sen pitäisi olla noin yhden millimetrin läpimittaista lankaa. Näin ohuessa sähköjohdossa voi kulkea kymmenien kiloampeerien virta vain jos lanka on suprajohtavassa tilassa. Lanka pitäisi siis saada mahdollisimman kylmäksi. Minkäänlainen aktiivinen jäähditys ei tule kyseeseen, koska se sisäisi systeemin painoa aivan liikaa. Passiivinen jäähditys on mahdollista: lanka voidaan päällystää materiaalilla, joka heijastaa mahdollisimman hyvin auringonvaloa, mutta päästää lämpösäteilyn lävitseen (kasvihuoneilmion vastakohta). Passiivisella jäähdityksellä päästään Maan etäisyydellä karkeasti noin -100 celsiusasteeseen. Tämä ei valitettavasti vielä ole riittävän kylmää nykyisin tunnetuille suprajohtaville materiaaleille.

### Mikä on paras menetelmä?

Aurinkokeräimeen tai ydinreaktoriin perustuvat plasmamoottorit ovat varmaankin todennäköisin seuraaja kemiallisille raketeille. Erilaisten plasmamoottorien kehittelyn soisi jatkuvan kiivaana, koska erilaisia toimintaperiaatteita on useita ja kaikkia ei välttämättä ole vielä keksittykään. Aurinkokeräimiä ei saisi unohtaa ja niiden pingotustekniikoita pitäisi selvittää. Koska ISS on olemassa, keräin tai purje voitaisiin myös koota kiertoradalla, jolloin sen ei tarvitse olla "itselaukeavaa" mallia. Keskeisintä on saada kaikkien komponenttien teho/painosuhdetta nostetuksi nykyisestä.

Tämän "mainstream"-vaihtoehdon ulkopuolelta voi tulla varteenotettavia haastajia, mi-

käli avaintekniikoissa tapahtuu läpimurtoja. Aurinkopurjeiden kohtalo riippuu ohuiden heijastavien kalvojen valmistustekniikasta, magneettisen purjeen tulevaisuus puolestaan korkean lämpötilan suprajohdeiden kehittämisestä. Fuusioenergiaa voitaisiin käyttää, kunhan sen synnyttäminen laboratorio-oloissa ensin onnistuisi. Ydinräjähteisiin perustuva propulsio ("Project Orion") olisi luultavasti teknisesti mahdollinen jo nykytekniikalla, mutta avaruusaluksen pitäisi olla valtavan suurikokoinen (vähintään satojen tonnien painoinen). Ydinräjähteen minimikoon sanelee neutronien vapaa matka, mikä ei ole tekniikan keinoin muutettavissa.

## Taustaa

Hyvä propulsiosivusto on osoitteessa <http://www.islandone.org/APC>. Ilmatieteen laitoksen Geofysiikan tutkimus tekee paraikaa ESA:n toimeksiannosta selvitystä magneettisen propulsio teorian. Tässä yhteydessä kirjoittaja tuli tutustuneeksi myös muiden propulsiomenetelmien teoriaan.

*Pekka Janhunen*

[Pekka.Janhunen@fmi.fi](mailto:Pekka.Janhunen@fmi.fi)

## Hyppyportti eli Webbiutisia

*Matti Anttila*

Edellisissä Avaruusluotaimen numeroissa olen kirjoittanut Hyppyporttia uutispalstan muotoon webbilinkeillä maustettuna. Tässä lehdessä uutisasiat ovat varsinaisessa uutisiosiossa, joten Hyppyportissa on enemmän linkkejä. Toisaalta tarjoan myös uutispalstan tiedonjyväsiin lisätietoja linkkien muodossa Hyppyportissa. Mukavaa nettisurffailua!

### Uutispalstaan liittyvät linkit:

SMART-1 matkallaan kohti Kuuta:

[http://www.space.com/missionlaunches/smart1\\_ion\\_031001.html](http://www.space.com/missionlaunches/smart1_ion_031001.html)

<http://www.ssc.se/SSD/smart1.html>

Aurora-ohjelman isojen missioiden sopimukset:

[http://www.esa.int/export/esaCP/SEM4YL0P4HD\\_index\\_0.html](http://www.esa.int/export/esaCP/SEM4YL0P4HD_index_0.html)

NASA 45-vuotias:

<http://www.nasa.gov/externalflash/NASA45th/index1.html>

Ei enää NASDA vaan JAXA:

[http://www.jaxa.jp/index\\_e.html](http://www.jaxa.jp/index_e.html)

<http://www.reuters.com/newsArticle.jhtml?type=scienceNews&storyID=3537155>

Galileo-luotaimen tulinen loppu:

<http://www.jpl.nasa.gov/releases/2003/129.cfm>

<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/galileo.o.html>

<http://www.edfac.usyd.edu.au/staff/souters/Humour/galileo.html>  
(huumoria...)

**Muut linkit ajankohtaisista avaruusasioista:**

Phobos-kuun tutkimus toi TKK:lle voiton ESAn avaruuskilvassa:

[http://www.tekes.fi/ajankohtaista/uutisia/uutis\\_tiedot.asp?id=2806&paluu=](http://www.tekes.fi/ajankohtaista/uutisia/uutis_tiedot.asp?id=2806&paluu=)