

teistyöverkostossa, johon kuuluu monia suomalaisia tutkimuslaitoksia ja metallialan yrityksiä. Aktiivisimmat osapuolet ovat Fysiikan tutkimuslaitoksen lisäksi Luvata Oy (kuperiseoksien materiaalitoimittaja), Metso Material Technology (bi-metallirakenteiden liittäminen), VTT (kiihdytinrakenteiden mikrotuotamisen koordinointi ja kehitys) sekä joukko pohjoiskarjalaisia mikrotuotamiseen erikoistuneita yrityksiä Imtec:in johdolla. Suomalaiset yritykset ovat tähän saakka työstäneet tarkimmat kiihdytinrakenteet (työstötarkkuus ± 8 mm kriittisissä kohdissa). Lisäksi Fysiikan tutkimuslaitos osallistuu CLIC-moduulin (noin 2,5 metrin pituinen) kokoonpanon suunnitteluun ja mekaaniseen integrointiin.

Fysiikan tutkimuslaitoksessa projektia johtaa **Kenneth Österberg** ja siihen kuuluvat diplomi-työntekijät **Risto Nousiainen** ja **Jouni Huopana**. Projektissa työskenteli vuoden myös **Jukka Paro** VTT:lta. Palattuaan VTT:lle hän on jatkanut CLIC-kiihdytinrakenteiden mikrotuotamisen kehitystyötä. Lisäksi CERN:in CLIC-ryhmässä työskentelee TKK:lla väitöskirjaansa tekevä **Samuli Heikkinen** tutkien kiihdytinrakenteiden termistä väsymistä.

Viitteet

[1] M. Battaglia, A. de Roeck, J.R. Ellis, D. Schulte (editors), Physics at the CLIC Multi-TeV Linear Collider: report of the CLIC Physics Working Group, CERN-2004-005, hep-ph/0412251.

[2] World Wide Study Group for the Physics and Detectors for the Linear Collider, Understanding Matter, Energy, Space, and Time: The Case for the Linear collider, April 2003 (available on <http://physics.uoregon.edu/~lc/wwstudy/>).

[3] The International Linear Collider homepage: <http://www.linearcollider.org/cms/>.

[4] The Compact Linear Collider Study homepage: <http://clic-study.web.cern.ch/clic-study/>.

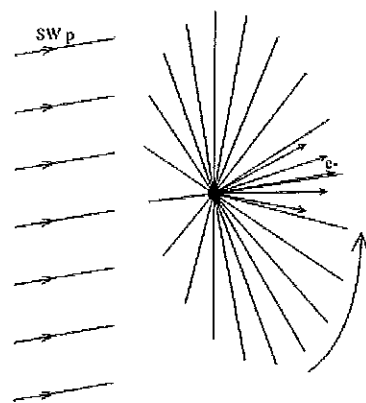
Sähköpurje, aurinkovoimasatelliitit ja energiantuotanto

Pekka Janhunen
Ilmatieteen laitos

Tässä pohditaan, miten kirjoittajan tekemää sähköpurjekeksintöä voitaisiin käyttää aurinkokunnan tutkimiseen ja hyödyntämiseen, erityisesti aurinkovoimasatelliittien saattamiseen hinnaltaan kilpailukykyiseksi energiantuotantomuodoksi.

Sähköpurje

Sähköpurje on suomalainen propulsiokeksintö [1,2], jossa valjastetaan aurinkotuuli (nopeus 300-800 km/s) avaruusaluksen työntövoiman lähteeksi. Sähköpurjealus pyörii hitaasti ja siitä on kelattuna ulos suurehko määrä (50-100 kpl) pitkiä (~20 km), johtavia liekoja (tethers). Aluksessa oleva aurinkosähköllä toimiva elektronitykki pitää aluksen ja lieat korkeassa positiivisessa potentiaalissa,



Sähköpurjeen toimintaperiaate. Pyöriminen pitää lieat suoristettuina ja elektronitykki ylläpitää rakennelman positiivista potentiaalia.

jolloin lieat hylkivät aurinkotuulen protoneja ja poikkeuttavat niitä radoiltaan. Protonivirtauksesta välittyy täten voimavaikutus liekoihin ja alukseen. Lieat on valmistettu esim. nelinkertaisesta ohuesta (20 mm) metallilangasta. Moninkertaisuus takaa sen, että koko lieka ei katkea, jos mikrometeoroidi katkaisee yksittäisen lankasäikeen. Ohjausta varten kunkin liean ja aluksen välissä on säätövastus eli potentiometri, jonka arvoa muuttamalla voidaan säätää liean potentiaalia yksilöllisesti. Koska aurinkotuulen liekaan kohdistama voima riippuu liean potentiaalista, säätö vaikuttaa liean kokemaan työntövoimaan, mistä saadaan keino aluksen ohjaamiseen. Työntövoiman suuruutta voidaan säätää elektronitykin jännitettä tai virtaa muuttamalla. Työntövoiman suuntaa voidaan säätää rajatusti kääntämällä liekojen pyörimistasoa suhteessa aurinkotuuleen. Aurinkotuuliplasmasta siirtyy lankoihin jatkuva elektronivirta, mutta koska hiukkastiheys on matala, plasma on erittäin törmäyksetöntä ja hiukkaset liikkuvat ballistisesti, jolloin niiden on vaikea osua ohuisiin lankoihin. Tästä syystä tarvittava elektronitykin teho on melko vaatimaton (~500 W). Erityisen mukavaa on, että tykin tehontarve skaalautuu Auringosta mitatun etäisyyden r funktiona samoin kuin aurinkopaneelien tuottama tehokin eli $1/r^2$, koska aurinkotuulen plasmatiheys pienenee kuten $1/r^2$ ja elektronivirta on verrannollinen siihen.

Perussähköpurje tuottaa 0.1–0.2 N työntövoiman, mikä antaa 100 kg painoiselle alukselle 1–2 mm/s² kiihtyvyyden. Vuodessa tämä kiihtyvyys muuttaa aluksen liiketilaa 30–60 km/s, mikä on jo erinomainen saavutus. Nopeus 50 km/s vastaa 10 AU:ta vuodessa, eli matka Neptunukseen kestäisi kolme vuotta ja Plutoon vähän kauemmin. Sähköpurjelaitteisto (lieat, elektronitykki sähköjärjestelmien ja aurinkopaneelit) painaa n. 50 kg tai jopa alle, joten muulle hyötykuormalle (johon sisältyy aluksen runko) jää tilaa tässä esimerkissä 50 kg. Työntövoimaa voidaan kasvattaa lisäämällä liekojen lukumäärää, kasvattamalla niiden pituutta tai nostamalla elektronitykin tehoa. Lisäksi saattaa olla mahdollista käyttää osa sähkötehosta tykin elektronisuihkun radiotaajuiseen modulointiin, millä voidaan ehkä lämmittää liekojen ympärillä kieppuvaa vangittua elektronipopulaatiota. Lämmitys laajentaa elektronipilveä eli nk. Debye-pituus kasvaa. Tällöin liean sähkökenttä tunkeutuu kauemmas ympäröivään aurinkotuuliplasmaan, minkä vuoksi liean purjepinta-ala ja työntövoima kasvavat. Elektronilämmityksen mallintaminen on varsin hankalaa, mutta sen testaaminen avaruudessa olisi suoraviivaista. Tämän vuoksi sähköpurjeen testimissio kannattaisi rakentaa mahdollisimman pian. Kunhan sähköpurjetekniikka opitaan hallitsemaan kunnolla, näillä keinoilla sen työntövoima voitaisiin periaatteessa kasvattaa noin satakertaiseksi edellä kuvatusta, eli muutamaan kymmeneen newtoniin, ennenkuin nykyisten materiaalien myötölujuus ja johdavuus tulevat ongelmaksi. Materiaalifysiikan edistyminen hiilinanoputkiliekojen teolliseen valmistukseen asti voisi mahdollisesti nostaa työntövoiman ylärajaa vielä tästäkin.

Purjehdus aurinkotuulesa
Sähköpurjeella voidaan luovia spiraalimaista rataa pitkin aurinkokun-

nassa sisään- tai ulospäin kohtalaisella hyötykuormalla. Matka-ajat ovat silloin samaa luokkaa kuin perinteisillä menetelmillä, mutta kustannus pienempi, koska polttoainetta ei tarvita ja laitteisto on kevyt. Toisaalta jos hyötykuorma valitaan pieneksi, voidaan lentää radiaalisesti ulospäin suurella nopeudella, tosin ilman pysähtymis- tai paluumahdollisuutta. Sähköpurjeen ehkä tärkein rajoitus on, että se ei juurikaan toimi Maan magnetosfäärin sisällä, koska siellä ei ole aurinkotuulta.

Sähköpurjeen käytännön toteutukseen liittyy teknisesti jossain määrin haastavia osia, kuten monilankaisen liean luotettava puolaaminen sekä pitkien liekojen teollinen valmistus. Toisaalta nämä tekniset kysymykset saattavat ratketa helpostikin; emme tiedä ennen kuin insinöörityöhön on toden teolla ryhdytty. Joka tapauksessa monien mielestä 1-ulotteisiin liekoihin perustuva sähköpurje on helpompi toteuttaa kuin 2-ulotteiseen pintaan perustuva perinteinen Auringon säteilypaineseen perustuva aurinkopurje. Aurinkopurje täytyy sitä paitsi rakentaa vain muutaman sadan nanometrin paksuisesta kalvosta ollakseen kilpailukykyinen sähköpurjeen kanssa.

Jos sähköpurje pystytään rakentamaan, se näyttäisi tuovan aurinkokunnan ulko-osat ja heliopausin takana odottavan tähtienvälisen avaruuden pienten tutkimusluotainten ulottuville siten, että matka-ajat ovat samaa luokkaa kuin nykyluotainten lennoissa sisäaurinkokuntaan ja sisemille jättiläisplaneetoille. Myös lennot sisäaurinkokunnassa tulisivat entistä halvemmiksi, vaikka matka-ajat eivät juuri muutukaan. Lisäksi voitaisiin lentää tutkimaan Aurinkoa lähietäisyydeltä tai rakentaa luotaimia jotka leijuvat Maan ja Auringon välissä ennustaen avaruussäätä nykyistä tarkemmin ja pitemmällä varoitussajalla.

Polttoainetehdas korkealla kiertoradalla

Sähköpurjeen sovellukset eivät pääty tähän, koska se pystyy myös kuljettamaan paljon itseään painavampia hyötykuormia, jos aikaa annetaan riittävästi ja jos matkan vaatima ”delta-v” (kiihtyvyyden itseisarvon aikaintegraali) on kohtuullinen. Sadan kilon painoinen sähköpurjealus voisi rahdata 2 tonnia hyötykuormaa asteroidilta korkealle Maan kiertoradalle noin neljässä vuodessa. Hyötykuormaksi kannattaa ottaa asteroidilta vesijäätä ja rakentaa korkealle Maan kiertoradalle vastaanottopiste, jossa aurinkoenergialla toimivaa vettä elektrolyytisesti hajottava polttoainetehdas tuottaa nestemäistä vetyä ja hapetta eli rakettipolttoainetta. Emme vielä tiedä, mitkä asteroidit sisältävät jäätä tai kuinka kauan pitää mennä, jotta tavoitetaan lähin sellainen. Sähköpurje pystyy noutamaan kuorman tarvittaessa vaikka Marsin radan takaa, jossa lähes varmasti jo on jäisiä kappaleita. Asteroideja on paljon ja sovellustamme varten riittää yksikin jääpitoinen kappale, vaikka epätyypillinen ja pienikin. Vähintään kilometrin kokoisia kappaleita on asteroidien joukossa puolisen miljoonaa. Jo yksi sellainen, jonka vesipitoisuus on 1%, sisältää 10 miljoonaa tonnia vettä. (Jäätä sisältävät kappaleet ovat todennäköisesti vanhoja komeettaytimiä, mutta emme tässä välitä kappaleiden alkuperästä vaan sanomme niitäkin asteroideiksi.)

Veden louhiminen jäiseltä asteroidilta vaatii vain hieman lämmitystä ja syntyvän vesihöyryn keräämistä tankkiin tai pussiin, jonka seinämiin sen annetaan tiivistyä tai härmistyä. Korkealla kiertoradalla oleva elektrolyyttinen polttoainetehdas ei sekään ole monimutkainen. Esimerkiksi 100 kW aurinkopaneelilla (sama suuruusluokka kuin Kansainvälisellä avaruusasemalla) voidaan tuottaa vuodessa yli 150 tonnia polttoainet-

ta. Kylmien nestepolttoaineiden varastointi aurinkosuojien takana ei ole iso ongelma, koska tehdas sijaitsee kaukana Maasta ja sen lämpösaiteilystä.

Visaisin pulma polttoainetehtaassa on veden taloudellinen siirto asteroidilta Maan kiertoradalle. Siirto voidaan tehdä vetyä polttavalla raketilla, silloin tosin matkalla kuuluu todennäköisesti suurin osa valmistetusta polttoaineesta (osuus riippuu eksponentiaalisesti siitä, miten suuren delta-v:n takana jääpitoinen asteroidi sijaitsee). Jos siirto tehdään ionimoottorilla, ajoainetta tarvitaan vähemmän, mutta ionimoottoriin sopivimmat jalokaasumaiset ajoaineet, jotka eivät sedimentoidu aluksen pintoihin, valitettavasti puuttuvat ilmakehättömiltä asteroideilta. Terminen vetyä ajoaineena käytävä fissioraketti olisi vielä yksi vaihtoehto. Sen ns. ominaisimpulssi on vedyn kevyen molekyyllipainon takia noin kaksinkertainen kemialliseen rakettiin verrattuna, jolloin ajoainetta kuuluu vähemmän. Mutta vety pitää valmistaa asteroidivedestä elektrolyysin avulla ja 89 % veden massasta on happea, joka jouduttaisiin fissioversiossa hylkäämään avaruuteen, kun taas kemiallisessa versiossa se otetaan talteen. Tästä syystä ainakaan tavallinen kiinteää ydinpolttoainetta käyttävä fissioraketti ei olisi tässä sovelluksessa kemiallista rakettia parempi.

Sähköpurje näyttäisi siis ratkaisevan nämä logistiikkaongelmat. Siinä ei tarvita lainkaan ajoainetta ja sen hyötykuorma voi olla suuruusluokkaa 20 kertaa painavampi kuin Maasta laukaistava alus, jos edestakainen matka-aika on 5 vuotta ja kohde sijaitsee Marsin radan etäisyydellä.

Polttoainetehtaan asiakkaaksi tarvitaan uudelleenkäytettävä versio nestevetyä polttavasta kantoraketin kolmannesta vaiheesta, mikä vaatii kohtuullisessa määrin uutta insinöö-

rityötä, koska pitkä käyttöikä on nyt tärkeä suunnittelutavoite. Tämän jälkeen meillä on infrastruktuuri, jolla pystytään siirtelemään hyötykuormia radalta toiselle laukaisematta polttoainetta Maasta. Esimerkiksi laukaistaessa tonnin painoinen viestintäsatelliitti geostationariselle (GEO) radalle joudutaan nykyään ensin nostamaan kolmen tonnin massa matalalle kiertoradalle. Massasta 2/3 on polttoainetta, joka kuuluu vietäessä varsinainen hyötykuorma GEO-radalle. Polttoainetehtäskonseptissa kantoraketti nostaa vain yhden tonnin massan matalalle kiertoradalle, josta uudelleenkäytettävä, asteroidipolttoaineella tankattu yhteysalus käy noutamassa sen GEO-radalle ja palaa itse (tai käydään hakemassa) polttoainetehtäälle tankattavaksi ja odottamaan seuraavaa tehtävää.

Polttoainetehtaan avulla sähköpurjeen tehokkuus saadaan käyttöön niissäkin sovelluksissa, joissa tarvitaan impulsiivista työntövoimaa (mm. laskeutuminen suurten kappaleiden pinnalle), suuria hyötykuormia (esim. miehitetty Mars-lento) tai halutaan operoida Maan kiertoradalla, joka on magnetosfäärin sisällä (lähes kaikki kaupallinen avaruustointiminta). Näin ollen, vaikka sähköpurje tuottaa vain heikkoa työntövoimaa eikä toimi Maan magnetosfäärin sisällä, sen hyödyt tuntuvat itse asiassa kaikessa avaruustoiminnassa.

Aurinkovoimasatelliitit

Aurinkovoimasatelliitti on tapa tuottaa kaupallista sähköenergiaa. Geostationarisella tai muulla radalla oleva aurinkovoimasatelliitti lähettää isoilla aurinkopaneeleilla keräämänsä sähkötehon Maahan muutaman GHz:n mikroaalloilla noin kymmenen neliökilometrin kokoiseen antennikenttään [3]. Siirtoketjun hyötysuhde aurinkokennon DC-tehosta maanpäällisen verkon AC-tehoksi on noin 50 % ja yhden satelliitin tuottama

teho gigawattiluokassa. Mikroaaltokeilan tehotehoisuus on valittu turvallisen matalaksi niin, että esim. lintu voi lentää sen läpi tuntematta tarvetta laskeutua jäähdyttelemään. Toisaalta mikroaaltokeila levenee pitkällä siirtomatalla, minkä takia vastaanottavan antennikentän on oltava melko iso. Näistä ehdoista seuraa yksikköteholle luonnollinen GW-suuruusluokka, mikä sopii hyvin sähköntuotannolle, joskin se hankaloittaa pienten demonstraatiolaitosten rakentamista.

Viemällä aurinkopaneelit avaruuteen saavutetaan kaksi tärkeää etua verrattuna maanpäälliseen asennukseen. Ensinnäkin avaruudessa ei ole yötä, pilviä eikä talvea, joten voimalla tuottaa jatkuvaa sähkötehoa eikä energian varastointiongelmaa ole. Toiseksi avaruudessa voidaan käyttää konsentraattorityyppejä keräimiä, joiden pinta-alasta suurin osa on kevytrakenteista parabolilheijastinta tai Fresnel-linssiä, jolloin kallis aurinkokennon puolijohdetta tarvitaan paljon vähemmän. Maanpäällisissä paneeleissa konsentraattorikeräimiä ei yleensä kannata käyttää, koska ne eivät tuota pilvisellä säällä sähköä lainkaan, vaativat aurinkoa seuraavan kääntömekanismin sekä tukirakenteita tuulikuorman takia. Jos aurinkokennojen valmistuskustannukset alenevat merkittävästi nykyisestä (vähintään kertaluvulla), jälkimmäinen etu putoaa pois, mutta ensimmäinen etu eli energian varastointiongelman poistuminen jää jäljelle joka tapauksessa.

Voidaan arvioida että käyttämällä nykyistä avaruustekniikkaa (laukaisukustannus matalalle kiertoradalle 5000 euro/kg kertakäyttöisellä raketilla ja siirto GEO-radalle kolminkertaiseen hintaan), aurinkovoimasatelliitteilla tuotettu sähköteho olisi noin 100 kertaa kalliimpaa kuin ydinsähkö. Hinnasta valtaosa muodostuu laukaisukustannuksista, joten siihen voidaan vaikuttaa yhtäältä halventa-

malla laukaisun kilohintaa ja toisaalta vähentämällä laukaistavaa massaa.

Usein arvioidaan, että siirtymällä uudelleenkäytettäviin kantoraketteihin (esim. Kistler K-1-projekti), laukaisukustannusta matalalle kiertoradalle voidaan vähentää tekijällä 10-50 nykyisestä, eli tasolle 100-500 euro/kg. Uudelleenkäytettävien kantorakettien tekniikka tunnetaan hyvin ja niiden käytännön toteutus odottaa oikeastaan vain hieman nykyistä suurempaa tilausta, ts. kaupallista tarvetta laukaista hyötykuormia nykyistä tiheämmin. Jos uudelleenkäytettävyydellä voidaan vähentää kustannuksia noin paljon, miksi sitten NASA:n avaruussukkula on käytännössä jopa kalliimpi laukaisusysteemi kuin kertakäyttöiset raketit? Sukkula tarvitsee aina miehistön, koska sitä suunniteltaessa 1970-luvulla tietotekniikka ei vielä aivan mahdollistanut lentokone-
maisen aluksen automaattista ohjausta. Miehistön läsnäolo jokaisella lennolla tekee testaamisen ja rajojen kokeilemisen vaikeaksi ja jäykistää projektin hallintoa. Toinen syy sukulan kalleuteen on että sen kahdesta vaiheesta vain ylempi eli massaltaan pienempi on uudelleenkäytettävä. Sukkulasta haluttiin tehdä siis halpa avaruusalus, maksoi mitä maksoi.

Uudelleenkäytettävä kantorakettijärjestelmä ei kuitenkaan yksinään välttämättä aivan riitä tuomaan aurinkovoimasatelliittien hintaa kilpailukykyiselle tasolle. Lisäksi olisi hyvä vähentää laukaistavaa massaa. Edellä esitellyn polttoainetehtaan avulla saataisiin GEO-radana laukaisumas-
sasta pois maksimissaan tekijä 2-3. Toinen, edellisen kanssa multiplikatiivinen tapa vähentää laukaistavaa massaa on rakentaa aurinkovoimasatelliitit osittain (esim. tukirakenteiden osalta) asteroideilta peräisin olevista raaka-aineista. Raaka-aineiden tuonti on mahdollista samalla sähköpurjetekniikalla, mitä käytetään polttoainekin tuotantoon. Lisäksi sopivia

metallipitoisia asteroideja on tarjolla lähellä Maata. Sopivan tuotantotehtaan rakentaminen kiertoradalle on toki suuri yksittäinen investointi, joka kuitenkin saattaa hyvinkin olla kannattava, jos tavoitteena on globaali aurinkovoimasatelliitteihin perustuva energiatalous. Laukaistavaa massaa voidaan tietysti periaatteessa pienentää myös parantamalla aurinkovoimasatelliitin teho/painosuhdetta.

Aurinkovoimasatelliittien nykyisen satakertaisen hintaeron kurominen umpeen on siis haaste, mutta se saattaa hyvinkin onnistua tai jopa ylittyä. Numeerisesti suurin hinnan pudotus tulee todennäköisesti uudelleenkäytettävän kantorakettijärjestelmän myötä, mutta myös asteroidiresursseihin perustuva polttoainetehtas ja materiaalitehdas saattavat vaikuttaa hintatavoitteen saavuttamiseen. Kuten yllä on selostettu, sähköpurje on tekniikka, joka näyttäisi tekevän asteroidipohjaisesta polttoainetehtaasta ja myös asteroidien materiaalien hausta taloudellisia. Voi-
ko pieniin muutaman tonnin kanta-
viin sähköpurjealuksiin perustuva polttoainetuotanto skaalautua palvelemaan suurimittaista aurinkovoimasatelliittien rakentamista, on kysymys, jota on toistaiseksi kuitenkin pidettävä avoimena. Jos sähköpurje-
laivaston koko kasvaa suureksi, esiin voi nousta lennonjohto- ja avaruusromu-
ongelmia, joita ei ole vielä kunnolla kartoitettu. Toisaalta laivaston koko kasvaisi maltillisemmin, jos sähköpurjeen työntövoima pystyttäisiin kasvattamaan satakertaiseksi, kuten edellä on spekuloitu.

Tällä hetkellä ei vielä tiedetä, onko Kuun napa-alueiden pysyvän varjon kraattereissa polttoainetuotantoon riittävää määrää vesijäätä. Jos jäätä on riittävästi, taloudellinen polttoainetehtas voisi ehkä perustua Kuun resursseihin asteroidien sijasta, kuten usein on ehdotettu. Polttoainetehtaan toteutuksessa ei silloin

tarvittaisi sähköpurjeen tapaista vielä kehitteillä olevaa propulsiotekniikkaa. Kuun tärkein etu on ajallisesti lyhyt siirtomatka, haitta puolestaan painovoima joka edellyttää kemiallisen raketin käyttöä nousussa ja laskussa (noin puolet tehtävästä polttoainees-
ta kuluisi siihen) ja kasvattaa pinnan infrastruktuurien kuten aurinkopaneelien ja louhijan massaa ja toimituskuluja perille. Myös napa-alueiden kuuperän kylmyys voi aiheuttaa päänvaivaa suunnittelijoille.

Edellä esitetty polttoainetehtaan käyttötapa ei ole ainoa mahdollinen. Jos laukaisukustannukset halpenevat riittävästi, siirrot GEO-radalle kannattaa ehkä jatkossakin hoitaa Maasta tuodulla polttoaineella. Mutta silloinkin, jos päädytään käyttämään aurinkovoimasatelliittien rakentamisessa apuna asteroidipohjaisia materiaaleja (mikä on onnistuessaan tapa vähentää kustannuksia periaatteessa rajattomasti), polttoainetehtaan tarvitaan, kun tuodaan materiaaleja GEO-radalle. Jos tuonti tapahtuu kemiallisella raketilla, sen polttoaine on saatava asteroideilta, ja jos sähköpurjeella, kuorman pysäyttämiseen GEO-radalle tarvitaan kemiallista polttoainetta, koska GEO-rata on magnetosfäärin sisällä, missä sähköpurje ei anna työntövoimaa.

Yhteenveto

Sähköpurjetta, polttoainetehtasta ja aurinkovoimasatelliitteja kannattaa tutkia tarkemmin ja asteroidien sekä Kuun jäätilanne on tarpeen selvittää. Jos sähköpurje saadaan toimimaan, sillä on joka tapauksessa suuri merkitys aurinkokunnan perustutkimuksen kannalta. Esimerkiksi juuri asteroidien jääkartoitus voitaisiin toteuttaa sen avulla. Sähköpurje näyttäisi mahdollistavan myös avaruustoimintaa kautta linjan halventavan polttoainetehtaan, vaikka menetelmän skaalautuvuus hyvin suuriin polttoainemääriin onkin toistaiseksi hieman epäselvä.

Toisaalta jos jättä sisältäviä kappaleita löydetään melko läheltä Maan rataa tai jos Kuussa osoittautuu olevan hyödynnettävissä olevaa jätettä, taloudellisen polttoainetehtaan voi toteuttaa myös uudelleenkäytettävillä kemiallisilla raketeilla. Jälkimmäisen konseptin etuna on varma skaalautuvuus.

Jos laukaisukustannukset alenevat riittävästi, kilpailukykyisiä aurinkovoimasatelliitteja voi rakentaa suoraankin, mutta polttoainetehtas vähentäisi mahdollisesti kustannuksia. Teknisesti haastavin mutta onnistuessaan halvimpään lopputulokseen johtava tapa on käyttää rakentamisessa apuna asteroidi- tai kuupohjaisia materiaaleja. Näiden materiaalien tuonnissa halutulle Maan kiertoradalle polttoainetehtas näyttää olevan lähes välttämätön. Jos ja kun aurinkovoimasatelliitit saadaan riittävän halvoiksi, avautuu mahdollisuus ympäristöystävälliseen, halpaan ja haluttamassa nykyistä laajempaan globaaliin sähköenergian tuotantoon ilman energian varastointiongelmiä.

Viitteet

[1] Janhunen, P., Electric sail for spacecraft propulsion, *J. Prop. Power*, 20, 763–764, 2004.

[2] Janhunen, P. and A. Sandroos, Simulation study of solar wind push on a charged wire: basis of solar wind electric sail propulsion, *Ann. Geophys.*, 25, 755–767, 2007.

[3] <http://www.ursi.org/WP/wp-SPS-1812061.doc>, ks. Myös <http://www.ursi.org/WP/SupportingDocument1.pdf>

Käänteiset ongelmat: kurkistuksia näkymättömään

Samuli Siltasen virkaanastujaisesitelmä

16.2.2007 TTY:llä

Lempielokuvassani *Matrix* on kaksi maailmaa: konkreettinen todellisuus ja aivoihin sähköisesti tuotettu todentuntuinen simulaatio. Elokuvan sankari oppii hallitsemaan simulaatiomaailmaa kiertämällä sen sääntöjä; lopulta hän kykenee taivuttamaan seiniä ja pysäyttämään luoteja kesken ilmalennon.

Nautin tästä elokuvasta niin paljon, että ryhdyin tutkiskelemaan itseäni: mikä *Matrixissa* minuun vetoaa? Vastaus taitaa olla se, että simulaation maailmaan astuminen muistuttaa suuresti rakastamaani tunnetta tutkimuksessa: sitä, kun sukellan matematiikan sisäiseen universumiin ja ryhdyn muokkaamaan sen rakennetta.

Mutta yllä mainittu tunne on yhteinen kaikelle matemaattiselle tutkimukselle! Oman alan, nimittäin käänteisten ongelmien, tutkimukseen liittyy kouriintuntuvampikin tapa kurkistaa näkymättömään.

Käänteisissä ongelmissa kuljetaan seurauksista syihin. Jos tunemme maapallon sisäisen rakenteen (syy), tiedämme myös maanjäristysten aiheuttamien värähdysaaltojen kulkureitit (seuraus). Mutta jos tunemme ainoastaan maan pinnalla tehdyt värähtelymittaukset, maanalaisen rakenteen selvittäminen on vaativa käänteinen ongelma. Vastaavia tilanteita syntyy myös lääketieteellisessä kuvantamisessa, teollisessa laadunvalvonnassa ja optioiden hinnoittelussa; kaikissa näissä esimerkeissä tuodaan näkyviin jotakin suoran havainnon tavoittamatonta.

Käänteisen ongelman ytimessä on matemaattisesti haastava ongelma, sillä suoraviivaiset ratkaisuyritykset ovat äärimmäisen herkkiä mitausvirheille.

Johann Radon julkaisi 1917 tärkeän artikkelin funktion rekonstruomisesta viivaintegraaleistaan; se on ensimmäisiä tuloksia käänteisten ongelmien matematiikassa. Yli 50 vuotta myöhemmin levy-yhtiö EMIn työntekijä **Godfrey Hounsfield** keksi saman kaavan uudestaan ja rakensi ihmiskehä kolmiulotteisesti kuvaavan röntgenlaitteen (samaan aikaan **Allan Cormack** päätyi vastaavaan ratkaisuun riippumattomasti). Tämä oli ensimmäinen käytännöllinen läpimurto inversio-ongelmien alalla ja johti lääketieteen Nobel-palkintoon Hounsfieldille ja Cormackille vuonna 1979. Mainittakoon, että kumpikaan näistä tutkijoista ei tuntenut Radonin työtä!

Inversio-ongelmien matematiikan tutkimus jatkui 1930-luvulla, jolloin **Andrei Nikolajevitsh Tihonov** kehitti kuuluisan regularisaatiomenetelmänsä. Tutkimuksen määrä on Tihonovin päivistä kasvanut ensin pikkujalaa ja viimeisten 30 vuoden aikana erittäin voimakkaasti. Miksi näin? Ilmeisin syy on tietokoneiden hurja kehitys, joka on mahdollistanut uudenlaiset matematiikkaan perustuvat ratkaisumenetelmät.

Toinen syy on historiallinen, nimittäin **Jacques Hadamardin** 1902 antama määritelmä ”hyvin asetetulle ongelmalle”: sellaiselle, jossa ratkaisu on olemassa ja yksikäsitteinen, ja lisäksi ratkaisu riippuu jatkuvasti alku- tai reuna-arvoista. Käänteiset