

Nouse, Lennä, Kiertorata

Aurinkovoimainen elektroaerodynaaminen ilmalaiva

kestävän avaruus pääsyn takaamiseksi

Visio ja fyysiset perusteet

Lentämisen unelma on aina ollut kärsivällisyyden ja voiman välinen kilpailu. 1700-luvun varhaiset ilmapallolentäjät nousivat kevyesti taivaalle kelluvien kaasujen avulla, kun taas 1900-luvun raketti-insinöörit repivät läpi sen tulen avulla. Molemmat lähestymistavat jakavat saman tavoitteen – paeta painovoiman tyranniaa – mutta eroavat radikaalisti filosofiassa. Toinen käyttää ilmaa kumppanina; toinen kohtelee sitä esteenä. Näiden kahden ääripään välillä on kolmas tie, jota ei ole vielä toteutettu käytännössä, mutta joka ei ole enää periaatteessa mahdoton: **aurinkovoimainen ilmalaiva, joka voi lentää kiertoradalle**, nouseen ensin kelluvuudella, sitten aerodynaamisella nosteella ja lopuksi keskipakoisella tuella, kaikki ilman kemiallista polttoainetta.

Tämän konseptin ytimessä on **elektroaerodynaaminen (EAD) propulsio** – sähköinen työntövoima, joka käyttää sähköisiä kenttiä ionien kiihdyttämiseen ilmassa. Kiihdytyksissä ionit siirtävät liikemäärää neutraaleille molekyyleille, tuottaen massavirtauksen ja nettovoiman elektrodeille. Toisin kuin raketti, joka joutuu kantamaan reaktiomassaa, tai potkuri, joka tarvitsee liikkuvia siipiä, elektroaerodynaaminen propulsio toimii **ilman liikkuvia osia ja ilman aluksen pakokaasuja**, vain auringonvalolla ja ilmalla. Kun se kytketään tehokkaaseen aurinkopaneeliin ja asennetaan suureen, ultrakevyeen nostavaan runkoon, se tarjoaa puuttuvan ainesosan kestäväälle kiihdytykselle yläilmakehässä, jossa vastus on pieni mutta ilmaa on vielä läsnä.

Ehdotus on helppo kuvata mutta haastava toteuttaa:

1. **Nouse** – Kelluva ilmalaiva, täytettynä vedyllä tai heliumpuulla, nousee passiivisesti stratosfääriin, kauas säästä ja ilmailuliikenteestä.
2. **Lennä** – Ilmalaiva kiihdyttää vaakasuunnassa EAD-työntöä käyttäen, hitaasti kasvattaen nopeutta samalla kun se nousee ohuampaan ilmaan vastuksen vähentämiseksi.
3. **Kiertorata** – Viikkojen jatkuvan kiihdytyksen jälkeen keskipakoisvoima tasapainottaa painovoiman; ajoneuvo ei enää tarvitse nostetta, vaan muuttuu satelliitiksi sitkeyden sijaan räjähdyksen ansiosta.

Ajatus ei ole fantasia. Jokainen askel juurtuu tunnettuihin fysiikan lakeihin: kelluvuus, aurinkoenergia, elektrostaattinen ja kiertoradan mekaniikka. Muuttuja on aikaskaala. Sen sijaan että poltamme minuutteja, harkitsemme **viikkoja auringonvaloa**. Sen sijaan että kuljetamme tonneja polttoainetta, luotamme **kenttiin ja kärsivällisyyteen**.

Kiertoradan energia

Jokainen keskustelu avaruuslennoista alkaa ja päättyy energiaan. Jokaisen kilogramman massa tarvittava kineettinen energia pyöreän kiertoradan ylläpitämiseksi Maan ympärillä annetaan kaavalla

$$E_k = \frac{1}{2} v^2$$

missä v on kiertoradan nopeus. Matalalla Maan kiertoradalla $v \approx 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$, joten $E_k \approx 3.0 \times 10^7 \text{ J/kg}$, eli noin **30 megajoulea kilogrammaa kohti**. Se vastaa noin kilon bensiinin polttamista jokaista kiloa kohti kiertoradalle asetettuun massa. Se on suuri luku, mutta ei tähtitieteellisen suuri.

Vertaa nyt sitä jatkuvaan auringonvirtaukseen Maan ilmakehän yläosassa: noin **1 360 wattia neliometriä kohti**. Jos voisimme muuntaa vaikka pienen osan siitä kineettiseksi energiaksi päivien tai viikkojen aikana, voisimme periaatteessa toimittaa tarvittavan kiertoradalle tarvittavan energian. Modernit tehokkaat fotovoltit paneelit saavuttavat satoja watteja kilogrammaa kohti. $P_{sp} = 300 \text{ W/kg}$:lla yksi kilogramma paneelia tuottaa 300 joulea sekunnissa. Vuorokaudessa (8.64×10^4 sekuntia) se on 2.6×10^7 joulea – verrattavissa yhden kilogramman massan kiertoradalle tarvittavaan energiaan.

Tämä yksinkertainen vertailu näyttää lähestymistavan logiikan. Energia kiertoradalle on saatavilla auringolta noin **yksi päivä kilogrammaa kohti paneelia**, jos se voidaan tehokkaasti muuntaa työntövoimaksi. Käytännön haaste on, että vastus ja tehottomuudet imevät suurimman osan siitä. Ratkaisu on korkeus ja kärsivällisyys: työskentele ohuassa ilmassa, jossa vastus on matala, ja venytä prosessia viikoille tuntien sijaan.

Ajan vaihto polttoaineeseen

Raketti ratkaisee vastuksen ongelman raa'alla voimalla – ne menevät niin nopeasti, että ilma on merkityksetön. Ilmalaivat puolestaan työskentelevät ilman kanssa; ne voivat viipyä. Jos aikaa kohdellaan kulutettavana resurssina, se voi korvata polttoaineen massan. Ilmalaivan tehtävä on ylläpitää pientä mutta jatkuvaa kiihtyvyyttä pitkiä aikoja, ehkä 10^{-3} m/s^2 **suuruusluokkaa**, kunnes kiertoradan nopeus saavutetaan.

Jos nousu kiertoradalle kestää kolme viikkoa, eli noin 1.8×10^6 sekuntia, tarvittava keskimääräinen kiihtyvyys on

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{t} = \frac{7.8 \times 10^3}{1.8 \times 10^6} \approx 4.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$$

– vähemmän kuin puoli tuhannesosaa Maan painovoimasta. Tällaiset kiihtyvyyksien ovat ilmalaivalle helposti kestäviä; ne eivät aiheuta rakenteellista rasitusta. Ainoa vaikeus on **sen ylläpitäminen**, ottaen huomioon työntövoiman pieni määrä teholla mitattuna.

Jos ajoneuvolla on massa 10^3 kg , keskimääräinen kiihtyvyys $4 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ vaatii vain noin **4 newtonia nettovoimaa** – vähemmän kuin omenan paino. Näennäinen absurdus kiertoradalle pääsemisestä omenan työntövoimalla katoaa, kun aikaa venytetään viikoille.

Kelluvuus ja tie ohueen ilmaan

Ilmalaiva aloittaa matkansa kuten mikä tahansa kevyempi-kuin-ilma-laite: siirtämällä ilmaa kevyemmällä kaasulla. Kelluva voima annetaan kaavalla

$$F_b = (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{gas}})gV$$

missä V on kaasun tilavuus ja ρ vastaavat tiheydet. Merenpinnan lähellä $\rho_{\text{air}} \approx 1.2 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{He}} \approx 0.18 \text{ kg/m}^3$ ja $\rho_{\text{H}_2} \approx 0.09 \text{ kg/m}^3$. Vety tarjoaa hieman enemmän nostetta, noin **1,1 kg per kuutiometri**, verrattuna **1,0 kg per kuutiometri** heliumin. Ero vaikuttaa pieneltä, mutta kumuloituu tuhansien kuutiometrien yli.

Vety tarjoaa näin mitattavan suorituskykyedun, vaikka sytytysherkkyyden kustannuksella. Se vaatii tiukkoja sähköisiä vyöhykkeitä ja tuuletusprotokollia, erityisesti koska ajoneuvo kantaa myös korkeajännitteisiä elektrostaattisia järjestelmiä. Helium tarjoaa vähemmän nostetta mutta täydellistä inertiaa. Molemmat kaasut ovat elinkelpoisia; valinta riippuu tehtävän riskinsiedosta. Varhaisissa julkisissa tai asutuilla alueilla testeissä helium on suositeltava. Etäisissä tai kiertoratatesteissä vety voi olla perusteltu.

Kun ajoneuvo nousee, ilman tiheys laskee suunnilleen eksponentiaalisesti asteikon korkeudella $H \approx 7.5 \text{ km}$. 30 km:ssä tiheys on noin **1/65** merenpinnasta; 50 km:ssä **1/300**. Kelluvuus heikkenee vastaavasti, mutta myös vastus. Laitteisto on suunniteltu saavuttamaan **neutraali kelluvuus** korkeudessa, jossa auringon intensiteetti pysyy korkeana mutta dynaaminen paine minimaalisena – suunnilleen 30–40 km stratosfäärissä. Sieltä alkaa vaakasuuntainen kiihdytys.

Noste, vastus ja dynaaminen paine

Korkeuden ylläpitämiseksi kiihdytyksen aikana ilmalaiva voi luottaa osittain **aerodynaamiseen nosteeseen**. Nostavan rungon osalta noste- ja vastusvoimat ovat

$$F_L = \frac{1}{2}\rho v^2 A C_L, \quad F_D = \frac{1}{2}\rho v^2 A C_D$$

missä A on viiteala, C_L ja C_D noste- ja vastuskertoimet. Koska ρ on korkeudessa pieni, nämä voimat ovat pieniä; ajoneuvo kompensoi **suurella alalla** ja **matalalla painolla**.

Suhde $L/D = C_L/C_D$ määrittää aerodynaamisen lennon tehokkuuden. Modernit liitokoneet voivat ylittää $L/D = 50$ tiheässä ilmassa. Ultrakevyt ilmalaiva, suunniteltu äärimmäisellä sileydellä ja minimillä lisäosilla, voisi uskottavasti ylläpitää tehokasta L/D :ää 10–20 jopa ohuessa ilmassa. Mutta kun ilma ohenee edelleen, siirtymä orbittaaliseen lentoon ei rajoitu nosteeseen – se hallitaan **vastusteholla**.

Teho vastuksen voittamiseksi on

$$P_D = F_D v = \frac{1}{2}\rho v^3 A C_D$$

ja se skaalautuu nopeuden kuution kanssa. Tämän vuoksi raketit kiihtyvät nopeasti: jos ne viipyvät, vastus kuluttaa energiaansa eksponentiaalisesti. Ilmalaiva ottaa vastakkaisen reitin: se kiihdyttää siellä, missä ρ on niin pieni, että P_D pysyy rajallisena jopa kilometrien sekunnissa.

Jos esimerkiksi $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ (tyypillinen lähellä 60 km korkeutta), $A = 100 \text{ m}^2$, $C_D = 0.05$ ja $v = 1000 \text{ m/s}$, niin

$$P_D = 0.5 \times 10^{-5} \times (10^3)^3 \times 100 \times 0.05 = 2.5 \times 10^4 \text{ W},$$

eli 25 kW – helposti aurinkovoimalla saavutettavissa. Sen sijaan merenpinnalla sama kokoonpano vaatisi 25 gigawattia.

Sääntö on yksinkertainen: **ohut ilma ostaa aikaa, ja aika korvaa polttoaineen.**

Elektroaerodynaamisen mahdollisuus

1900-luvun alussa fyysikot havaitsivat, että voimakkaat sähköiset kentät terävien elektrodien lähellä ilmassa tuottavat heikon sinisen koronaa ja hienovaraisen ilmavirtauksen. Tämä ”sähköinen tuuli” johtuu liikemäärän siirrosta ionien ja neutraalien välillä. Sitä pidettiin enimmäkseen uteliaisuutena, kunnes korkeajännitteinen elektroniikka kypsyi. Kun se on oikein järjestetty, efekti voi tuottaa mitattavaa työntöä.

Elektroaerodynaaminen propulsio toimii soveltamalla korkeaa jännitettä **emittorin** ja **kerääjän** välillä, ohuen langan tai reunan, joka tuottaa ioneja, ja leveämmän elektrodin, joka vastaanottaa ne. Ioniit kiihtyvät sähköisessä kentässä, törmäävät neutraaleihin ilmamolekyyleihin ja siirtävät eteenpäin suuntautunutta liikemäärää kaasulle. Laite tuntee yhtä suuren ja vastakkaisen voiman.

Vaikka varhaiset näytökset olivat vaatimattomia, viimeaikaiset kokeet – mukaan lukien MIT:n vuonna 2018 lennättämä kiinteäsiipinen **ionikone** – ovat todistaneet, että vakaa, hiljainen lento on mahdollista. Silti idea edeltää tuota virstanpylvästä. Vuosia aikaisemmin tutkimus **Maxwell-tensor-pohjaisista kaavoista** elektroaerodynaamiselle työntövoimalle oli osoittanut, miten sama fysiikka voi skaalautua suurempiin geometrioihin ja ohuempaan ilmaan. Siinä formalismissa työntövoima ei synny ”tuulesta” vaan **elektromagneettisesta jännityksestä**, joka integroidaan purkausalueen yli.

Vastava kaava johdetaan **Maxwell-jännitystensorista $\mathbf{T}$** , joka elektrostaattiselle kentälle on

$$\mathbf{T} = \epsilon (\mathbf{E}\mathbf{E} - \frac{1}{2}E^2\mathbf{I})$$

missä ϵ on väliaineen permittiivisyys, $\mathbf{E}$ sähköisen kentän vektori ja $\mathbf{I}$ identiteettitensor. Nettovoima kappaleelle saadaan integroimalla tämä tensor sen pinnalla:

$$\mathbf{F}_{EM} = \oint_{\partial V} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS.$$

Ionisoituneessa alueessa tämä yksinkertaistuu **tilavuusvoimatiheyteen**

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E} - \frac{1}{2}E^2 \nabla \epsilon,$$

missä ρ_e on paikallinen varaustiheys. Kaasussa, jossa permittiivisyys on suunnilleen tasainen, toinen termi katoaa, jättäen kauniin **Coulombin kappalevoiman**

$$\mathbf{f} \approx \rho_e \mathbf{E}.$$

Tämä tiivis ilmaus on elektroaerodynaamisen propulsioon ydin: missä tahansa sähköinen kenttä ja avaruusvaraus koeksistuvat, netto kappalevoima vaikuttaa väliaineeseen.

Itse ionit ovat harvassa, mutta niiden liikemäärä välittyy neutraaleille törmäysten kautta. Keskimääräinen vapaa polku λ törmäysten välillä määrittää, miten liikemäärä diffundoituu; se skaalautuu käänteisesti paineen kanssa. Alemmissa paineissa ionit matkustavat pidemmälle törmäyksessä, ja siirron tehokkuus muuttuu. **Optimaalinen painekaista** on olemassa, jossa ionit voivat edelleen törmätä tarpeeksi usein työntääkseen kaasua mutta eivät niin usein, että hukkaavat energiaa lämmittämällä sitä. Maan ilmakehässä tämä kaista sijaitsee suunnilleen muutaman torrin ja muutaman millitorrin välillä – täsmälleen alue, joka kohdataan 40 ja 80 km korkeuden välillä.

Ilmalaivan kuori muuttuu näin ihanteelliseksi isännäksi elektroaerodynaamisille laatoille, jotka toimivat luonnollisessa ympäristössään. Ilmakehä itse on reaktiomassa.

Elektroaerodynaamisen propulsioon fysiikka

Ensimmäisellä silmäyksellä elektroaerodynaaminen propulsio vaikuttaa epätodennäköiseltä. Ajatus hiljaisesta, liikkumattomasta elektrodien sarjasta, joka tuottaa tarpeeksi voimakasta työntöä ilmalaivan liikkuttamiseksi, tuntuu arkipäiväisen kokemuksen vastaiselta. Näkyvän reaktiomassan tai liikkuvan koneiston puuttuminen haastaa intuitiot. Silti jokainen ioni, joka ajautuu sähköisessä kentässä, kantaa liikemäärää, ja liikemäärä on säilyvä. Kenttä toimii näkymättömänä vipuna, ja ilma sen työfluidina.

Tämän ilmiön perustat eivät ole eksoottisessa plasmafysikassa vaan **Maxwellin yhtälöissä** ja niiden mekaanisessa ilmaisussa, **Maxwell-jännitystensorissa**. Tämä tensorinen muotoilu tekee selväksi, että sähköiset kentät eivät ole vain potentiaalinen kuvioita – ne varastoivat ja siirtävät mekaanista jännitystä ympäröivään väliaineeseen.

Kenttäjännitys ja Coulombin kappalevoima

Maxwell-jännitystensor elektrostaattisessa on

$$\mathbf{T} = \epsilon (\mathbf{E}\mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \mathbf{I})$$

missä ϵ on permittiivisyys, $\mathbf{E}$ sähköinen kenttä ja $\mathbf{I}$ identiteettitensor. Ensimmäinen termi edustaa suuntautunutta painetta kenttälinjojen suuntaan, ja toinen termi isotropista jännitystä, joka vastustaa kentän hajaantumista.

Nettovoima elektromagneettinen kappaleelle upotettuna sellaiseen kenttään on tämän tensorin pinta-integraali:

$$\mathbf{F}_{EM} = \oint_{\partial V} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS.$$

Fysikaalisesti tämä ilmaus kertoo, että sähköinen kenttä aiheuttaa jännitystä minkä tahansa alueen rajoille, jotka sisältävät varausta tai dielektrisiä gradientteja. Mutta se

voidaan kirjoittaa uudelleen paikallisempaan, tilavuusmuotoon divergenssiteoreeman avulla:

$$\mathbf{f} = \nabla \cdot \mathbf{T} = \rho_e \mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon.$$

Ensimmäinen termi, $\rho_e \mathbf{E}$, on tuttu **Coulombin kappalevoima**: varaustiheys kokee kentän. Toinen termi merkitsee vain siellä, missä väliaineen permittiivisyys muuttuu nopeasti, kuten materiaalien rajoilla. Ilmassa ϵ on olennaisesti tasainen, joten $\nabla \epsilon \approx 0$, jättäen

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}.$$

Tämä näennäisen yksinkertainen yhtälö koodaa koko elektroaerodynaamisen propulsioin periaatteen. Jos on olemassa kaasun tilavuus, jossa ionit (tiheydellä ρ_e) kokevat sähköisen kentän $\mathbf{E}$, niin **netto voimatiheys** vaikuttaa siihen kaasuun. Kokonaistyönnön suuruus on $\rho_e \mathbf{E}$ tilavuusintegraali purkausalueen yli:

$$\mathbf{F} = \int_V \rho_e \mathbf{E} dV.$$

Elektrodit tuntevat yhtä suuren ja vastakkaisen reaktion, tuottaen työntöä.

Liikemäärän siirto ja törmäysten rooli

Ioniit ilmassa harvoin matkustavat pitkälle ennen törmäämistä neutraaleihin molekyyleihin. **Keskimääräinen vapaa polku** λ on kääntäen verrannollinen kaasun paineeseen p ja poikkipinta-alaan σ :

$$\lambda \approx \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$$

missä d on molekyylin halkaisija. Merenpinnan tasolla λ on pieni – kymmenien nanometrien suuruusluokkaa. Mesosfäärissä (noin 70 km) λ venyy millimetreiksi tai sentteiksi.

Kun ioni kiihtyy kentässä, se siirtää liikemäärää neutraaleille törmäyksissä. Jokainen törmäys jakaa osan ionin suuntautuneesta liikemäärästä; kumulatiivinen efekti on **massaneutraali virtaus** – mitä kokeilijat kutsuvat *ioni-tuuleksi*. Kaasu liikkuu emittorista kerääjään, ja elektrodit kokevat vastakkaisen reaktio-työnnön.

Erittäin tiheässä ilmassa ionit törmäävät liian usein; niiden ajautumisnopeus kyllästy, ja energia menetetään lämpönä. Erittäin ohuessa ilmassa törmäykset ovat liian harvinaisia; ionit lentävät vapaasti mutta eivät vedä tehokkaasti neutraaleja mukanaan. Näiden ääripäiden välillä on **makea kohta**, jossa keskimääräinen vapaa polku mahdollistaa tehokkaan liikemäärän siirron – täsmälleen alue, jonka ilmalaiva läpäisee matkallaan avaruuteen.

Paineissa noin 10^{-2} – 10^{-4} bar (vastaa 40–80 km korkeutta) ionit voivat kiihtyä makroskooppisilla etäisyyksillä ennen törmäyksiä, mutta törmäykset tapahtuvat silti tarpeeksi usein työntövoiman tuottamiseksi. **Elektroaerodynaaminen kytkentä** kentän ja kaasun välillä on suotuisimmillaan.

Tehon-työnnön suhde

Sähköinen teho, joka toimitetaan purkautumiseen, on $P = \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV$, joka on suunnilleen $\mathbf{IV}$ tasaiselle virralle $\mathbf{I}$ ja jännitteelle V . Hyödyllinen mekaaninen ulostulo on työntö kerrottuna kiihdytetyn ilmamassan nopeudella, mutta tasaisessa propulsiotilassa meitä kiinnostaa enimmäkseen **työntö-tehosuhde**, T/P .

Kokeelliset tutkimukset ovat raportoineet T/P -arvoja muutamista millinewtonista watilta (mN/W) lähes 0.1 N/W optimoituina olosuhteina. Ilmakehän ilmassa standardipaineessa EAD on tehottomia; mutta alennetuissa paineissa ionien liikkuvuus kasvaa ja virrantiheys voidaan ylläpitää matalammilla jännitteillä, parantaen T/P .

Yksinkertainen ulottuvuuden argumentti yhdistää kappalevoimatiheyden $f = \rho_e E$ virrantiheyteen $J = \rho_e \mu E$, missä μ on ionien liikkuvuus. Sitten

$$f = \frac{J}{\mu},$$

joten annetulle virrantiheydelle suurempi liikkuvuus (saavutettu matalammalla paineella) tuottaa enemmän työntöä virralta. Kokonaisteho on $P = JEV$, joten **työntö-teho** skaalautuu

$$\frac{T}{P} \approx \frac{1}{E\mu},$$

mikä viittaa siihen, että matalammat sähköiset kentät tai suurempi ionien liikkuvuus lisäävät tehokkuutta. Mutta matalampi E myös vähentää virtaa ja siten kokonaistyöntöä, joten taas on optimaalinen alue.

Nämä suhteet eivät ole teoreettisia uteliaisuuksia – ne määräävät jokaisen EAD-laatan suunnittelun. Annetussa korkeudessa jännite, raon etäisyys ja emittorin geometria täytyy säätää niin, että **Paschenin käyrä** (joka yhdistää läpimurtoljännitteen paine–etäisyys-tuotteeseen) täyttyy mutta ei ylitä.

Paschenin laki ilmalle voidaan ilmaista likimääräisesti

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln[\ln(1 + 1/\gamma_{se})]}$$

missä A ja B ovat empiirisiä vakioita ja γ_{se} on sekundaarisen elektronin emissiokerroin. Ilmalaivan muuttuva geometria mahdollistaa d :n, elektrodien etäisyyden, dynaamisen säätämisen tehokkaan korona-purkautuman ylläpitämiseksi ilman kaartaessa kun ympäristöpaine laskee nousun aikana.

Kentän geometria ja jännitystopologia

Varhaiset "lifter"-näytökset käyttivät ohutta lankaa emittorina ja tasainen foliota kerääjänä. Kenttälinjat olivat voimakkaasti kaarevia, ja suurin osa energiasta meni koronan ylläpitämiseen työntövoiman sijaan. Tehokkuus oli huono, koska **Maxwell-jännityskenttä** ei ollut linjassa halutun työntövoiman suuntaan.

Avainhavainto – kehitetty teoreettisessa työssä ennen MIT:n ionokonetta – oli kohdella sähköistä kenttää ei sivutuotteena vaan ensisijaisena suunnittelumuuttujana.

Työntövoima syntyy **elektromagneettisen jännityksen integraalista** kenttälinjojen varrella, joten tavoite on muotoilla nuo linjat rinnakkaiseksi ja johdonmukaiseksi laajalla alueella. Analogia on aerodynaaminen: kuten sileä laminaarivirtaus minimoi vastuksen, sileä elektrostaattinen kenttätopologia maksimoi suuntautuneen jännityksen.

Tämä “kenttätopologian insinööritiede” muotoilee laitteen *elektrostaattiseksi toimilaitteeksi* pikemmin kuin plasmaleikkikaluksi. Ohjaamalla elektrodien kaarevuutta, vartijapotentiaaleja ja dielektrisiä kerroksia voidaan tehdä **E** lähes tasainen kiihdytysreitin yli, tuottaen kvasilineaarista jännitystä ja välttämällä tuhoavan itsekeskittyneisyyden, joka aiheuttaa kaaria.

Seuraus on skaalautuvuus. Kun elektrodit tiilataan neliömetrien laatoiksi, joista jokaisessa on oma korkeajännitemuuntimensa ja ohjauslogiikkansa, koko ilmalaivan kuori voidaan muuttaa jättimäiseksi hajautetuksi EAD-verkoksi. Ei ole liikkuvia osia synkronisoitavaksi, vain kenttiä koordinoitavaksi.

Työntötiheys ja tie skaalautuvuuteen

Tilavuudellinen kappalevoimatiheys on $f = \rho_e E$. Tyypillisessä korona-purkautumisessa ilmakehän paineessa varaustiheys on 10^{-5} – 10^{-3} C/m³. Alennetussa paineessa se voi laskea hieman, mutta sähköinen kenttä **E** voidaan turvallisesti nostaa kymmeniin kilovolttiin senttimetrille ilman läpimurtoa.

Jos $\rho_e = 10^{-4}$ C/m³ ja $E = 10^5$ V/m, voimatiheys on $f = 10$ N/m³. Levitettynä 1 m paksun aktiivi-alueen yli se antaa pintapaineen 10 N/m² – vastaa muutamaa millipascalaa. Se saattaa kuulostaa pieneltä, mutta tuhansien neliömetrien yli se kasvaa merkittäväksi. 1000 m² pinta 10 N/m² jännityksellä tuottaa 10 000 N työntöä, tarpeeksi kiihdyttämään monitonniaista ajoneuvoa millig-tasoilla – täsmälleen viikkojen kiertoradan nostoon tarvittava alue.

Tällaiset arviot havainnollistavat, miksi EAD, huolimatta matalasta tehotiheydestään, on toteutettavissa **suuremmille, kevyille rakenteille** ohuessa ilmassa. Toisin kuin raketin suutin, joka saa tehokkuutta vain korkealla tehotiheydellä, EAD hyötyy alasta. Ilmalaivan kuori tarjoaa runsaasti alaa; sen muuntaminen aktiiviseksi pinnaksi on luonnollinen pari.

Yläilmakehän makea vyöhyke

Jokaisella fyysisellä järjestelmällä on toiminnallinen loksa. EAD-propulsioille paras alue on, jossa kaasupaine on tarpeeksi matala korkeiden jännitteiden ja pitkien ionien vapaan polun sallimiseksi, mutta ei niin matala, että plasma muuttuu törmäyksettömäksi.

Alle noin 20 km ilmakehä on liian tiheä: ionien liikkuvuus on matala, läpimurtoljännitteet korkeat ja energia hukataan kaasun lämmittämiseen. Yli noin 100 km ilma muuttuu liian harvinaiseksi: ionisaatiota ei voida ylläpitää jatkuvasti, ja neutraali reaktiomassa katoaa. Noin 40–80 km välillä on **siirtymäkaista** – alempi mesosfääri – jossa EAD-propulsiot voivat tuottaa parhaat työntö-tehosuhteet.

Sopivasti tämä on myös korkeusalue, jossa aurinkoenergia pysyy lähes vaimentumattomana ja aerodynaaminen vastus on suuruusluokkia pienempi kuin merenpinnalla. Se on kapea mutta anteeksiantava ikkuna, luonnollinen käytävä uudelle ajoneuvotyypille: ei lentokone eikä raketti, vaan jotain, joka elää niiden päällekkäisessä.

Tehokkuus ja energian virtaus

Missä tahansa hetkessä sähköinen sisääntulo P jaetaan:

1. **Hyödyllinen mekaaninen työntöteho** $P_T = T v_{\text{eff}}$, missä v_{eff} on ilmapvirtauksen tehollinen pakokaasunopeus.
2. **Ionisaatiotappiot** P_i , energia plasmien ylläpitämiseen tarvittava.
3. **Vastustappiot** P_r , ohmoksen lämmön ja vuodon vuoksi.
4. **Säteilijätappiot** P_γ , emittoituna valona (tuttu korona-kajo).

Kokonais tehokkuus on $\eta = P_T/P$. Kokeet viittaavat siihen, että η voi saavuttaa muutaman prosentin tiheässä ilmassa ja mahdollisesti kymmeniä prosentteja optimoituna matalapaineoperaatiossa. Vaikka vaatimaton, nämä luvut riittävät aurinkovoimaiselle järjestelmälle, joka toimii pitkiä aikoja, jossa tehokkuutta voidaan vaihtaa aikaan.

Toisin kuin kemiallinen propulsio, joka tarvitsee korkeaa tehokkuutta sekunnissa polttoaineen minimoimiseksi, aurinkovoimainen EAD-ilmalaiva voi varaffordoida tehottomuutta jos se voi **toimia loputtomiin**. Menestyksen mittari ei ole ominainen impulsse vaan **ominainen kärsivällisyys**: joulet kertyneinä päivien yli.

Maxwell-jännityksestä makroskooppiseen työntöön

Yhteyden havainnollistamiseksi kenttäteorian ja arkipäiväisen kokemuksen välillä harkitse rinnakkaislevykondensaattoria tyhjiössä. Paine levyjen välillä on $p = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$. Jos $E = 10^6 \text{ V/m}$, niin $p \approx 4.4 \text{ N/m}^2$. Kerro alalla, ja saat mekaanisen voiman levyjen erottamiseen tarvittavan. Elektrostaattinen jännitys on kirjaimellisesti mekaanista painetta.

EAD-propulsiot korvaa yhden levyn itse ilmakehällä. Ioniit ovat väliaine, jonka kautta kentän jännitys välittyy. Staattisen paineen sijaan saamme suuntautuneen virtauksen. Yhtälö $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ on staattisen kondensaattoripaineen dynaaminen analogi.

Kun summataan ilmalaivan pinnan yli, integroidusta jännityksestä tulee netto työntövektori, kuten siiven pinnan yli integroidusta paineesta saadaan noste. Analogia on syvä: aerodynaaminen noste on ilmamassan poikkivirtauksen poikkileikkaus; EAD-työntö on ionien kiihdytettyjen kenttävirtauksen poikkileikkaus.

MIT:n ionokone ja kokeellinen todiste

Vuosikymmenten ajan skeptikot hylkäsivät EAD:n laboratoriossa uteliaisuutena. Sitten vuonna 2018 MIT:n rakentama pieni kiinteäsiipinen ilma-alus osoitti **vakaan, potkurittoman lennon** pelkästään elektroaerodynaamisella työntöllä. "Ionokone" painoi noin 2,5 kg ja lensi kymmeniä metrejä akkukäytöllä. Sen työntösuhde painoon oli pieni,

mutta saavutus oli historiallinen: ensimmäinen raskaampi-kuin-ilma ajoneuvo, jota ylläpidettiin lennossa ionisella propulsiolla.

Ratkaisevaa on, että teoria ja konseptuaalinen perusta, joka johti siihen näytökseen, olivat jo itsenäisesti kehityksessä. Teoreettinen kehys, esitetty *Elektroaerodynaamisessa propulsiosta* (katso https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html), oli kuvannut saman mekanismin **Maxwell-jännityksen** ja **Coulombin kappalevoiman** termein vuosia aikaisemmin, painottaen kenttätopologiaa ja skaalautuvuutta korona-kemian sijaan.

MIT:n ionokone todisti efektin käytännöllisyyden tiheässä ilmassa. Rise-Fly-Orbit-projekti pyrkii laajentamaan sitä ohuempaan ilmaan, jossa fysiikka on vielä suotuisampi. Jos pieni lentokone voi lentää 1 bar:ssa, aurinkovoimainen ilmalaiva voi lentää kiertoradalle mikrobareissa, riittävällä kärsivällisyydellä ja auringonvalolla.

Yksinkertaisuuden hyve

EAD-propulsiot on konseptiltaan elegantti: ei liikkuvia osia, ei palamista, ei korkeaa nopeutta pakokaasuja, ei kryogeenista. Sen komponentit ovat luonnostaan kestävät – elektrodit, dielektrikot, tehonsiirtimet ja fotovoltttiset kuoret. Järjestelmä skaalautuu luonnollisesti alalla, ei massalla.

Tekninen haaste siirtyy termodynamiikasta **sähkötekniikkaan ja materiaalitieteeseen**: korona-eroosion estäminen, varauksen vuodon hallinta ja korkeajännite-eristykseen ylläpitäminen muuttuvissa paineissa. Nämä ovat ratkaistavissa moderneilla materiaaleilla ja mikroelektroniikalla.

Koska EAD-mekanismi riippuu vain kentän geometriasta ja ionien liikkuvuudesta, se on **sisäsyntyisesti modulaarinen**. Jokainen ilmalaivan ihon neliömetri voidaan käsitellä laatana, jolla on tunnetut T/P - ja jänniteominaisuudet. Ajoneuvon kokonaistyöntö on tuhansien itsenäisten laattojen vektorisumma. Tämä modulaarisuus mahdollistaa sulavan heikentymisen – muutaman moduulin vika ei vaaranna koko laitetta.

Elektroaerodynaaminen ilmalaiva järjestelmänä

Kun se kytketään aurinkoenergiaan, EAD-propulsiot ei ole vain työntölähde vaan **ilmastot** ajoneuville. Samat kentät, jotka tuottavat työntöä, ionisoivat myös hivenkaasuja, vähentävät pintavarausta ja mahdollisesti vaikuttavat rajakerroksen ominaisuuksiin. Sähköinen kenttä voi jopa toimia säädettävänä ”elektrostaattisena purjeena”, joka vuorovaikuttaa heikosti Maan magneettikentän tai yläilmakehän ympäristöplasman kanssa.

Pitkällä aikavälillä voidaan kuvitella aktiivista vastuksen ohjausta pintavarauksjakaumien manipuloimalla – **elektrodynaaminen vastussuoja**, joka vaihtelee paikallista kenttäjännitystä lennon polun trimmaamiseksi ilman mekaanisia ohjauspintoja.

Nämä mahdollisuudet siirtävät EAD-propulsiota uteliaisuudesta yleiskäyttöisen kiinteätila-lennonohjausteknologian valtakuntaan – sovellettavissa kaikkialla, missä kaasu tai plasma

voidaan polarisoida ja kiihdyttää sähköisillä kentillä.

Insinööriarkkitehtuuri ja lennodynamiikka

Rise-Fly-Orbit-konseptin perusetu ei ole eksoottisissa materiaaleissa tai vallankumouksellisessa fysiikassa vaan **tuttujen periaatteiden uudelleenjärjestelyssä**. Kelluvuus, aurinkoenergia ja elektrostaattinen ovat kaikki hyvin ymmärrettyjä. Uutta on tapa, jolla ne järjestetään yhdeksi jatkuvaksi: *nousu ilman katkoshetkeä*.

Raketit kulkevat erillisten tilojen läpi – laukaisu, palaminen, lipuminen, kiertorata. Elektroaerodynaaminen ilmalaiva puolestaan kokee vain asteittaisia siirtymiä. Se nousee kevyydellä, lentää nosteella ja kiertää inertiaa. Jokainen vaihe sulautuu seuraavaan, hallittuna saman vakaan kelluvien, aerodynaamisten ja elektrostaattisten voimien vuorovaikutuksen toimesta.

Kuori: rakenne ilmakehänä

Ilmalaivan kuoren täytyy tyydyttää ristiriitaisia vaatimuksia: sen täytyy olla sekä **kevyt että vahva, johtava että eristävä, läpinäkyvä auringonvalolle mutta säteilynkestävä**. Nämä ovat sovitettavissa kerroksellisella rakentamisella.

Ulkoreuna voi olla **metallisoitu polymeeri** – esimerkiksi ohut alumiinipinnoitettu Kapton- tai polyeteenitereftalaattifilmi. Tämä kerros tarjoaa UV-suojaa ja toimii osittaisena elektrodipintana EAD-laatoille. Sen alla on **dielektrinen kerros**, joka estää ei-toivotun purkautumisen ja määrittää raon sisäiseen kerääjäelektrodiin. Sisärakenne on verkko jännitettyjä kalvoja ja palkkeja, jotka ylläpitävät kokonaisgeometriaa pienellä sisäisellä ylipaineella, suuruusluokkaa $\Delta p \approx 300 \text{ Pa}$ – vain muutama tuhannesosa ilmakehän paineesta.

Tämä ylipaine riittää pitämään kuoren kireänä mutta ei aiheuta merkittävää rakenteellista massaa. Käytännössä koko ajoneuvo on valtava, kevyt kondensaattori, sen iho varattu ja elävä kenttälinjoilla.

Sisätilavuus täytetään nostokkaasulla – vedyllä tai heliumpuulla. Koska tarvittava ylipaine on pieni, materiaalin kuormitusvaatimukset ovat vaatimattomia. Päähaaste on kaasun läpäisevyys ja UV-hajoaminen pitkillä tehtävillä, molemmat ratkaistavissa moderneilla pinnoitteilla ja kerroksisilla kalvoilla.

Vety tai helium

Kaasun valinta muotoilee ajoneuvon persoonallisuuden.

Vety tarjoaa suurimman nosteen, noin 10 % enemmän kelluvuutta kuin helium. Tämä ero kasvaa merkittäväksi, kun kokonaistilavuus saavuttaa miljoonia kuutiometrejä. Vety on myös helpommin saatavilla ja voidaan jopa tuottaa paikan päällä aurinkovoimaisella veden elektrolyysillä. Sen haitta on tietysti syttymisherkkyys.

Korkeajännitteisen elektrostaattisen läsnäolo tekee vedyn hallinnasta ei-triviaalia. Turvallisuus riippuu huolellisesta erottelusta, elektrostaattisesta suojauksesta ja tuuletuksesta. EAD-moduulit itse ovat tiivistettyjä ja erotettu kaasusoluista dielektrisillä esteillä, ja potentiaalierot rungon yli minimoidaan symmetrisellä varauksenjaolla.

Helium puolestaan on inertti ja turvallinen mutta tarjoaa vähemmän nostetta ja korkeampia kustannuksia. Sen päähaitta on niukkuus; suuren mittakaavan käyttö voisi rasittaa tarjontaa. Varhaisissa testiajoneuvoissa ja julkisissa näytöslenoissa helium on harkitsevainen valinta. Operatiivisissa kiertoratahauissa etäisissä käytävissä vety voi olla perusteltu suorituskyvyn ja kustannusten perusteella.

Joka tapauksessa kuoren suunnittelu on suurelta osin yhteensopiva; vain kaasunkäsittely- ja turvallisuusjärjestelmät eroavat.

Aurinkoenergia ja energianhallinta

Aurinko on laitteen moottori. Jokainen watin sähköenergia alkaa auringonvalona, joka imeytyy fotovoltttiseen ihoon.

Tehokkaat, ultrakevyet fotovoltttiset – ohutkalvoiset gallium-arseniidi- tai perovskiihtikomposiitit laminoituina ilmalaivan pinnalle – voivat saavuttaa erityistehot lähellä **300–400 W/kg**. Paneelit järjestetään konformalisti aerodynaamisen sileyden ylläpitämiseksi. Tehohallinta on hajautettu: jokainen paneeliosa syöttää paikallista maksimitehopisteen seurantaa (MPPT), joka säätelee jännitettä korkeajännitebussille, joka ruokkii EAD-laattoja.

Koska ajoneuvo kokee päivä-yö-syklejä, se kantaa vaatimattoman **energiapuskurin** – kevyitä akkuja tai superkondensaattoreita – ylläpitämään matalatason toimintoja pimeässä. Mutta nämä eivät ole suuria; järjestelmän suunnittelufilosofia on **suora aurinkokäyttö**, ei varastoitu energia. Kiertoradakorkeuksissa laite voi jahtaa auringonvaloa lähes jatkuvasti, vain lyhyesti upoten varjostukseen.

Lämpöhallinta hoidetaan säteilyllä. Mitättömän konvektion korkeudessa lämmönpoisto nojaa **korkean emissiivisyys pintoihin** ja johtamisreitteihin radiattoreihin. Onneksi EAD-prosessi on suhteellisen viileä – ei palamista – ja pääkuormitus on imeytyneestä auringonvalosta.

Elektroaerodynaamiset laatat

Jokainen kuoren neliömetri toimii **EAD-laatan**a – itsenäisenä propulsiosoluna, joka koostuu emittorista, kerääjästä ja pienestä ohjauskaavasta. Emittori voi olla hienovarainen terävien pisteiden tai lankojen verkko korkealla positiivisella potentiaalilla, kun taas kerääjä on leveä verkko pidettynä lähellä maata tai negatiivisella potentiaalilla. Väli on kontrolloitu purkausalue.

Kun virritettäisiin, laatta muodostaa sähköisen kentän $\mathbf{E}$, tuottaa varaustiheyden ρ_e ja tuottaa paikallisen työn $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ tangentialisesti pitkin pintaa. Moduloimalla jännitteitä eri laatoilla ilmalaiva voi ohjata, kallistaa ja rullata ilman liikkuvia osia.

Sopeutuva geometria on avain. Kun ympäristöpaine laskee korkeuden myötä, keskimääräinen vapaa polku kasvaa. Tehokkaan purkauksen ylläpitämiseksi emittorin ja kerääjän tehollinen raon etäisyys d täytyy kasvaa suunnilleen $1/p$:n suhteessa. Tämä voidaan saavuttaa **joustavilla, täytettävillä dielektrisillä erottajilla**, jotka laajenevat hieman ulkoisen paineen laskiessa, tai **elektronisella moduloinnilla** potentiaaligradien-teista emuloiden suurempia rakoja.

Jokainen laatta raportoi telemetriaa – virta, jännite, kaarilukumäärät – keskusohjaimelle. Jos laatta kokee kaaren tai heikentymistä, se sammutetaan ja ohitetaan. Modulaarinen suunnittelu tarkoittaa, että yksittäisten laattojen menetys vaikuttaa hädin tuskin kokonaistyöntöön.

Kelluvuudesta työntöön

Lento alkaa hellästi. Laukauksessa ilmalaiva nousee kelluvuudella stratosfääriin. Nousun aikana EAD-järjestelmä toimii matalatehoisessa tilassa, tarjoten pientä työntöä stabilointiin ja ajautumisen ohjaukseen.

Noin 30–40 km korkeudessa, jossa ilma on ohut mutta edelleen törmäysaltis, alkaa pääkiihdytys. Ilmalaiva kääntyy vähitellen vaakalentoon, suuntaamalla pitkän akselinsa halutun kiertoliikkeen suuntaan.

Aluksi työntö tasapainotetaan vaakasuuntaisen kiihdytyksen ja nosteen lisäyksen välillä. Ajoneuvon jäännös kelluvuus kompensoi suurimman osan painostaan; EAD-työntö tarjoaa sekä eteenpäin että hieman ylöspäin suuntautuvia komponentteja. Kun nopeus kasvaa, dynaaminen noste kasvaa ja kelluvuus muuttuu mitättömäksi. Siirtymä on sujuva – ei ole “nousuhetkeä”, koska ilmalaiva ei koskaan istunut kiitotiellä.

Kolmen viikon nousu

Harkitse edustavaa ajoneuvon massaa $m = 2000 \text{ kg}$. Kiertoradan nopeuden $v = 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$ saavuttamiseksi $t = 1.8 \times 10^6 \text{ s}$ (kolme viikkoa), tarvittava keskimääräinen työntö on

$$T = m \frac{v}{t} = 2000 \times \frac{7.8 \times 10^3}{1.8 \times 10^6} \approx 8.7 \text{ N}.$$

Kahdeksan newtonia – pienen appelsiinin paino – on kokonaistyöntö, joka tarvitaan kiertoradalle jos sovelletaan jatkuvasti kolme viikkoa.

Jos järjestelmän T/P on 0.03 N/W , tyyppinen tehokkaalle EAD-toiminnalle matalassa paineessa, niin 8,7 N tuottaminen vaatii vain noin **290 W** tehoa. Tämä vaikuttaa hämmästyttävän pieneltä, ja käytännössä lisä vastustapportit nostavat vaatimuksen kymmeniin kilowatteihin. Mutta paneelit, jotka kattavat muutaman sadan neliömetrin, voivat helposti tarjota sen.

Sisällytä turvallisuustekijä 100 tehottomuuksille ja vastukselle: noin **30 kW** sähkötehoa. 15 % kokonaistehokkuudella auringonvalosta työntöön ajoneuvon täytyy kerätä noin **200 kW** aurinkoenergiaa. Se vastaa noin 700 neliömetriä aktiivista aurinkoalaa 300 W/m^2

ulostulolla – alaa pienempi kuin jalkapallokenttä, helposti integroitavissa 100 m pitkään ilmalaivaan.

Tämä yksinkertainen laskutoimitus osoittaa, että **energian virtaus on uskottava**. Mitä raketit saavuttavat tehotiheydellä, ilmalaiva saavuttaa kärsivällisyydellä ja alalla.

Vastus ja korkeakorkeuskäytävä

Vastus pysyy pääenergian nielejänä. Vastusvoima on $F_D = \frac{1}{2}\rho v^2 AC_D$, ja vastaava teho on $P_D = F_D v = \frac{1}{2}\rho v^3 AC_D$.

50 km:ssä $\rho \approx 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Jos $A = 100 \text{ m}^2$, $C_D = 0.05$ ja $v = 1000 \text{ m/s}$, niin

$$P_D = 0.5 \times 10^{-3} \times (10^3)^3 \times 100 \times 0.05 = 2.5 \times 10^6 \text{ W}.$$

Se on 2,5 megawattia – liian korkea. Mutta 70 km:ssä, missä $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$, sama kokoonpano tuottaa vain 25 kW vastustehoa. Tästä strategia: **nouse kiihdyttäessäsi**, pysyen radalla, jossa ρv^3 pysyy suunnilleen vakiona.

Optimaalinen käytävä on tasaisesti ohenevalla ilmalla, ehkä 40–80 km korkeudessa, jossa ilmakehä tarjoaa juuri tarpeeksi neutraaliitiheyttä EAD-toimintaan mutta niin vähän, että vastus pysyy hallittavana.

Ajoneuvon ohjaus ja vakaus

Ilman potkureita tai peräsimiä vakaus tulee kenttäsymmetriasta. Eri laattojen differentiaalinen aktivointi tarjoaa vääntömomenttia. Jos etummaisat laatat vasemmalla tuottavat hieman enemmän työntöä kuin oikealla, laite yawaa hellästi. Pitch-ohjaus saavutetaan ylä- ja alalaattojen vinouttamisella. Koska työntö per laatta on pieni, vaste on hidas, mutta laite toimii alueella, jossa ketteryyttä ei tarvita.

Asennon anturit – gyroskoopit, kiihtyvyysmittarit, tähtiseuranta – syöttävät digitaalista ohjausjärjestelmää, joka ylläpitää suuntausta maksimaalisen auringon kohdistumisen ja oikean lennonpolun varten. Ajoneuvon valtava koko ja hidas lentoregiimi tekevät siitä huomattavan vakaan.

Lämpö- ja sähköinen turvallisuus

EAD-toiminta sisältää kymmeniä–satoja kilovoltteja matalalla virralla. Stratosfäärin ohuessa, kuivassa ilmassa eristys käyttäytyy eri tavalla: kaaret voivat levitä pitkiä matkoja pintojen yli. Ilmalaivan sähköinen suunnittelu kohtelee koko rakennetta kontrolloidun potentiaalin järjestelmänä. Johtavat polut ovat redundantteja, eristekerrokset erottavat kaasusolut HV-linjoista.

Kaari ei ole katastrofaalinen – se on taipuvainen olemaan paikallinen ja itse-sammuttava – mutta se voi vahingoittaa elektrodeja. Jokainen laatta valvoo virta-aaltoilmaansa; jos purkaus piikkaa, ohjain vähentää jännitettä tai sammuttaa vaikutetun moduulin useiksi sekunneiksi.

Lämpötilallisesti konvektion puuttuminen tarkoittaa, että mikä tahansa paikallinen lämmitys täytyy levittää johtamalla säteilypaneeleihin. Materiaalit on valittu korkealla emissiivisyydellä ja matalalla absorptiolla infrapunaosassa, mahdollistaen ylimääräisen lämmön säteilemisen avaruuteen.

Skaalautuvuus ja modulaarisuus

Järjestelmä skaalautuu laatoituksella, ei jännitteen nostolla. Laattojen lukumäärän kaksinkertaistaminen kaksinkertaistaa työnnon; ei tarvitse suurempia purkauksia. Tämä tekee arkkitehtuurista **lineaarisesti skaalautuvan** laboratoriomalleista orbitaalisiin ajoneuvoihin.

Käytännöllinen prototyyppi voisi alkaa pienenä, heliumtäytettynä alustana kymmenellä neliömetrillä EAD-pintaa, tuottaen millinewton-työntöjä mitattuna tunneissa. Suurempia näyttöjä voisi seurata, kukin laajentaen alaa ja tehoa. Lopullinen orbitaaliversio voi ulottua satoihin metreihin, tuhansilla itsenäisesti ohjatuilla laatoilla, toimien täydellä aurinkoenergialla kuukausitolkulla.

Koska kaikki komponentit ovat kiinteitä, järjestelmällä on sisäsyntyinen pitkä käyttöikä. Ei ole turbiinilagerteja tai palamiskiertoja kulutettavaksi – vain asteittaista elektrodien eroosiota ja materiaalien ikääntymistä. Huolellisella suunnittelulla keskimääräinen vika-aika voisi saavuttaa vuosia.

Nousuprofiilit ja korkeussiirtymät

Koko tehtävä voidaan visualisoida sileänä spiraalina (v, ρ) -tasossa: nopeuden kasvaessa tiheys laskee. Polku valitaan niin, että tuote ρv^3 – joka määrää vastustehoa – pysyy kynnysarvon alla, jonka aurinkojärjestelmä voi toimittaa.

1. **Kelluva nousu** 30–40 km:iin.
2. **Kiihdytysvaihe:** ylläpidä suunnilleen vakio $P_D \approx 20\text{--}50\text{ kW}$ säätämällä kallistusta ja korkeutta.
3. **Siirtymä orbitaaliseen regimiin:** yli 70 km noste ja kelluvuus katoavat, ja ilmalaiva muuttuu tehokkaasti satelliitiksi, joka vielä hipaisee ilmakehää.

Siirtymä ”lennosta” ”kiertoradalle” ei ole terävä raja. Ilmakehä haalistuu vähitellen; työntökompensoi vastusta kunnes vastus lakkaa merkitä. Ajoneuvon polku muuttuu pyöreäksi balistisen sijaan, ja se pysyy ylhäällä loputtomiin.

Energiabilanssi ja kestävyys

Integroimalla koko nousun, kokonaissisääntulo auringolta on valtava verrattuna tarvittavaan. Vaikka vaatimattomalla keräysnopeudella 100 kW, kolmen viikon jatkuva toiminta kerää

$$E = 100,000 \times 1.8 \times 10^6 = 1.8 \times 10^{11} \text{ J.}$$

2000 kg ajoneuvolle se on **90 MJ/kg** – kolme kertaa kiertoradan kineettisen energian vaatimusta. Suurin osa tästä energiasta menetetään vastukseen ja tehottomuuksiin, mutta marginaali on antelias.

Tämä on aurinkokärsivällisyyden hiljainen taika: kun aikaa sallitaan venyä, energian runsaus korvaa tehon puutteen.

Huolto, paluu ja uudelleenkäyttö

Tehtävänsä jälkeen ilmalaiva voi hidastua vähitellen kääntämällä EAD-kentän napaisuutta. Vastus kasvaa laskeutuessaan; sama mekanismi, joka nosti sen, toimii nyt jarruna. Ajoneuvo voi palata stratosfääriin ja laskeutua jäännöskelluvuuden alla.

Koska ei heitetä pois kulutettavia vaihteita, järjestelmä on **täysin uudelleenkäytettävä**. Kuorta voidaan huoltaa, täyttää uudelleen ja laukaista uudelleen. Huolto sisältää heikentyneiden laattojen tai kalvojen vaihtamisen moottoreiden uudelleenrakentamisen sijaan.

Toisin kuin kemiallisissa raketeissa, joissa jokainen laukaisu kuluttaa säiliöitä ja polttoainetta, EAD-ilmalaiva on **energiaa kierrättävä avaruusalus**. Aurinko tankkaa sitä jatkuvasti; vain kulumisen vaatii ihmisen väliintuloa.

Laajempi insinööritieteellinen merkitys

Samat teknologiat, jotka mahdollistavat aurinkovoimaisen EAD-ilmalaivan – kevyet fotovoltttiset, korkeajännite-tehonelektroniikka, ohutkalvodielektrikit – ovat välittömiä maallisia sovelluksia. Stratosfääriset viestintäalustat, korkeuden ilmastoanturit ja pitkäkestoiset droonit hyötyvät samoista kehityksistä.

Järjestelmän tavoittelulla, joka saavuttaa kiertoradan ilman polttoainetta, keksimme myös uuden luokan **kiinteätila-ilma-aluksia** – koneita, jotka lentävät ei palamisella vaan kenttämanipulaatiolla.

Tässä mielessä Rise-Fly-Orbit-projekti sijoittuu linjaan, joka sisältää Wrightin Flyerin ja ensimmäiset nestepolttoaineiset raketit: ei täydellistettyä teknologiaa vaan **periaatteen todistus**, joka muuttaa ”lennon” merkitystä.

Sääntely, strategia ja hitaan nousun filosofia

Aurinkovoimaisen elektroaerodynaamisen ilmalaivan fysiikka on salliva; laki ei ole. Nykyiset lentosäännöt jakavat taivaan siististi rajattuihin domaineihin: **ilmatila** ilmailulain hallinnassa ja **ulkoavaruus** avaruuslain hallinnassa. Niiden välillä on harmaa alue – liian korkea lentokoneiden sertifiointille, liian matala orbittalirekisteröinnille. Kiertoradalle ilmalaiva elää suoraan siinä harmaassa, liikkuen jatkuvasti korkeuksissa, jotka paperilla eivät kuulu mihinkään kategoriaan.

Miksi se on ”mahdotonta”

Ilmatilasäädökset olettavat ajoneuvoja, jotka nousevat ja laskeutuvat tunneissa. Ne vaativat sertifioituja moottoreita, aerodynaamisia ohjauspintoja ja kykyä väistää liikennettä. Mikään näistä olettamuksista ei sovi autonomiselle, aurinkovoimaiselle ilmapallolle, joka voi viipyä viikkoja yli 60 km.

Laukaisualus-säädökset alkavat siitä, missä raketit syttyvät: erillinen sytytys, laukaisupaikka ja lentoterminaatiojärjestelmä räjähdysten sisältämiseksi suunniteltu. Meidän ilmalaivallamme ei ole näistä mitään. Se nousee hitaasti kuin pilvi; ei ole "laukaisun hetkeä." Silti koska se lopulta ylittää Mach 1:n ja saavuttaa kiertoradan nopeuden, se putoaa avaruuslentojen toimivaltaan. Tulos on paradoksaalinen: se ei voi laillisesti lentää lentokoneena, mutta täytyy lisensoida rakettina, jota se ei muistuta.

Hybridinen ilmakehä-orbittaalinen ajoneuvoluokka

Parannuskeino on tunnustaa uusi kategoria – **Hybridinen ilmakehä-orbittaalinen ajoneuvo (HAOV)**. Sen määrittävät piirteet olisivat:

- **Jatkuva domainien ylitys:** nousu pinnasta lähiavaruuteen ilman erillisiä vaiheita.
- **Matala kineettisen energian flux:** kokonaisliikemäärän vaihto ilmakehän kanssa monia suuruusluokkia alempi kuin raketeissa.
- **Passiivinen vikaturvallinen käyttäytyminen:** tehon menetyksessä laite ajautuu ja laskeutuu; se ei putoa ballistisesti.
- **Yhteistyöllinen seuranta:** aina näkyvissä radarille ja satelliittiantureille, lähettämässä tilavektoriaan kuten ADS-B-transponderit lentokoneille.

HAOV-kehys sallisi tällaisen laitteen sertifiointin **suoritusperusteisilla** kriteereillä **laitteistoperusteisten** sijaan – määrittäen turvallisuuden energian vapautumisen, maajalanjäljen ja autonomisen laskukyvyn termein moottoreiden tai polttoaineen läsnäolon sijaan.

Valtamerten tai aavikkojen **käytävät** voitaisiin määritellä, joissa HAOV:t voivat toimia jatkuvasti, valvottuna olemassa olevilla avaruusliikenneverkoilla. Niiden nousu aiheuttaisi vähemmän vaaraa ilmailulle kuin yksittäinen sääpallo, mutta nykyiset säännöt eivät tarjoa niille polkua.

Kärsivällisyyden politiikka

Sääntely seuraa kulttuuria, ja kulttuuri on koukussa nopeuteen. Avaruustapahtumat mitataan työntösuhteilla painoon ja minuutteina kiertoradalle. Ajatus ajoneuvosta, joka kestää **kolme viikkoa** kiertoradalle, kuulostaa ensikuulemalta regressediltä. Mutta kärsivällisyys on kestävyys hinta. Ilmalaiva ehdottaa eri mittaria: ei "kuinka nopeasti voimme polttaa energiaa" vaan "kuinka jatkuvasti voimme kerätä sitä".

Avaruusjärjestöille, jotka ovat tottuneet laukaisuaikoihin ja laskentoihin, tällainen laite vaatii toimintojen muutosta: tehtäväsuunnittelua kausilla sekuntien sijaan; kiertoradan asetteluja, jotka riippuvat auringon geometriasta, ei laukaisualustan saatavuudesta. Silti tämä muutos sopii laajempaan käänteeseen **vakioinfraan** – aurinkosähköisiin avaruusaluksiin, uudelleenkäytettäviin asemiin, pysyviin ilmastolattioihin.

Strateginen arvo

Uudelleenkäytettävä aurinko-EAD-ajoneuvo tarjoaa kykyjä, joita mikään raketti tai lentokone ei voi vastata:

- **Pysyvä korkeushavainnointi ja viestintä:** ennen täyttä kiertorataa ilmalaiva voi leijua kuukausia ylästratosfäärissä, välittäen dataa tai kuvaamaan Maata.
- **Lisäävä lastin toimitus:** pienet kuormat voidaan nostaa hellästi ilman laukaisun akustisia ja lämpöshokkeja.
- **Planetaariset analogit:** Marsissa, jossa kiertoradan nopeus on vain 3,6 km/s ja ilmapaine suosii pitkien ionikiihdytyspolkujen, sama arkkitehtuuri voisi toimia vielä paremmin.
- **Ympäristönsuojelu:** ei pakokaasuja, ei polttoainevuotoja, mitätön akustinen vaikutus.

Taloudellisesti ensimmäiset operatiiviset HAOV:t eivät korvaisi raketteja vaan täydentäisivät niitä, palvelen nichejä, joissa kuorman kärsivällisyys ylittää kiireellisyyden. Strategisesti ne irrottaisivat lähiavaruuden pääsyn polttoaineketjuista – houkutteleva piirre avaruusjärjestöille, jotka etsivät kestävästä infrastruktuurista.

Sääntökirjan insinööritointi

HAOV-kategorian luominen on vähemmän lobbausta kuin **mittausta**. Sääntelijät luottavat dataan. Polku eteenpäin on kokeellinen läpinäkyvyys:

1. **Helium-pohjaiset näytöt** etäisissä käytävissä, instrumentoituna tallentamaan rataa, energiankäyttöä ja vikakäyttäytymistä.
2. **Jatkuva telemetria** jaettu siviili-ilmailun ja avaruusseurannan verkkojen kanssa todistamaan ennustettavaa lennodynamiikkaa.
3. **Simulaatiot ja riskimallit**, jotka näyttävät pahimman tapauksen kineettisen energian fluxin asutuilla alueilla olevan mitätön.

Kun järjestöt näkevät kvantifioitun todisteen siitä, että HAOV ei voi vahingoittaa lentokoneita tai maaväestöjä, laillinen arkkitehtuuri seuraa – kuten korkeushöyrypallot ja droonit ennen niitä.

Eettinen ulottuvuus

Hidas lento kantaa moraalista painoa. Kemiaaliset laukaisijat saastuttavat eivät insinöörien huolimattomuuden takia vaan koska fysiikka ei tarjoa aikaa lämmön kierrätykseen. Aurinkovoimainen ilmalaiva puolestaan kuluttaa mitään korjaamatonta. Se korvaa melun hiljaisuudella, salaman hehkulla. Sen nousu olisi näkyvissä maasta kirkkaana, kiireettömänä pisteenä, ihmisen artefaktina, joka nousee väkivallatta.

Kiireen aikakaudella tällainen harkittu liike on lausunto: että teknologinen kunnianhimo ei tarvitse olla räjähtävä ollakseen syvällinen.

Valon kärsivällisyys

Kun raketti saavuttaa kiertoradan, se tekee sen raa'alla kiihdytyksellä: sekunteja palamista, jotka jättävät taivaan vapisevaksi. Elektroaerodynaaminen ilmalaiva saapuu eri tavalla. Jokainen fotoni, joka osuu sen ihoon, lisää kuiskauksen liikemäärää, välitettynä elektronien, ionien ja Maxwells yhtälöiden hiljaisen matematiikan kautta. Kolmen viikon yli nämä kuiskaukset kertyvät kiertoradaksi.

Sama ilmaus – $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ – joka kuvaa mikroamppeerin ioni-ajautumista laboratoriossa, hallitsee myös tuhannen tonnin nostavaa runkoa liukumassa yläilmakehän läpi. Skaala muuttuu; periaate ei. Maxwells tensor, Coulombs laki ja auringonvalon kärsivällisyys ovat universaaleja.

Jos ihmiskunta oppii hyödyntämään tuota kärsivällisyyttä, saamme uuden tavan jättää Maa – sellaisen, joka voidaan toistaa loputtomiin, voimansa samalla tähdellä, joka ylläpitää meitä.

Kohti palautettavan lennon aikakautta

Kemiallinen raketiteknikka on yksisuuntainen ele: valtava vaiva kiertoradalle ja äkillinen loppu palatessaan. Elektroaerodynaaminen ilmalaiva ehdottaa **palautettavaa polkua**. Se voi nousta ja laskeutua tahdolla, asuttaen missä tahansa troposfääristä kiertoradalle. Se on sekä avaruusalus että elinympäristö, ajoneuvo ja asema.

Siinä jatkuvuudessa on filosofinen käänne: avaruuslento ei lähtönä vaan ilmakehän laajentumisena. Gradientti ilmasta tyhjiöön muuttuu navigointikelpoiseksi maastoksi. Tällaiset laitteet hämärtäisivät meteorologian ja avaruuslennon rajan, muuttaen ”avaruuden reunan” eläväksi työtilaksi barriérin sijaan.

Loppusijoitukset

Ei tarvita uutta fysiikkaa – vain kestävyyttä, tarkkuutta ja uudelleenkuviteltua sääntelyä. Kiertoradan energiatalous voidaan maksaa auringonvalolla; työntö voi syntyä sähköisistä kentistä, jotka vaikuttavat ioneihin; aikaa voidaan lainata insinöörien kärsivällisyydeltä.

Esteet ovat kulttuurisia ja byrokraattisia: vakuuttamaan järjestöt siitä, että jotain ilmapalloa muistuttavaa voi matematiikan ja sitkeyden kautta muuttua satelliitiksi. Silti jokainen transformatiivinen teknologia alkoi paperityön anomaliana.

Kun ensimmäinen näistä aurinkovoimaisista elektroaerodynaamisista aluksista nousee, sen edistyminen on tunnista toiseen lähes huomaamaton. Mutta päivästä toiseen se kerää nopeutta, kunnes lopulta liukuu sään ulottumattomiin. Ei ole pahempaa – vain heikko, jatkuva kenttien humina ja auringonvalon tasainen kertyminen liikkeeksi.

Se merkitsee **uudelleenkäytettävän, kestävän ja hellän kiertoradan pääsyn alkua**: tavan nousta, lentää ja – ilman tulitikun raapaisua – kiertoradalle.

Viitteet & Lisälukemisto

- **Rise Fly Orbit -projekti:** <https://riseflyorbit.org/> - yleiskatsaus aurinkovoimaiseen ilmalaivaan-kiertoradalle-konseptiin ja liittyvään tutkimukseen.
- **Elektroaerodynaaminen propulsio -artikkeli:** https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html - syvälinen teoreettinen käsittely elektroaerodynaamisesta työntövoimasta Maxwell-jännitystensorin ja Coulombin kappalevoima-kaavan avulla.
- Barrett, S. et al., *Nature* (2018). "Flight of an Aeroplane with Solid-State Ionic Propulsion." - ensimmäinen kiinteäsiipisen ionivoimaisen lentokoneen näytös.
- Paschen, F. (1889). "Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure erforderliche Potentialdifferenz." *Annalen der Physik*, 273(5).
- Sutton & Biblarz, *Rocket Propulsion Elements*, 9th ed. - vertailuun energiatalouksissa ja Δv -harkinnoissa.
- NASA Glenn Research Center, "Solar Electric Propulsion Basics." - taustaa tehokkaille sähköisille työntöjärjestelmille.