

Hækka, fljúga, brautarflug

Sólknúið rafmagnsloftknúið loftskip fyrir sjálfbæran aðgang að geimnum

Sjónarmið og líkamleg grundvöllur

Draumurinn um flug hefur alltaf verið samkeppni milli þolinmæðis og krafta. Snemma loftbílstjórar 18. aldarins hækkuðu hægt upp í himininn með notkun svífandi gassa, á meðan eldflaugaingeniör 20. aldarinnar réttu sig gegnum það með eldi. Bæði nálgunin deila sama markmiðinu - sleppa undan kúgunni af þyngdarkrafti - en mismunast grundvöllum. Annar notar loftið sem samstarfsaðila; hinn traktar það sem hindrun. Á milli þessara tveggja öfganna liggur þriðji vegurinn, sá sem enn hefur ekki verið framkvæmdur í verki en er ekki lengur ómögulegur í meginreglum: **sólknúið loftskip sem getur flogið í braut**, hækkingi fyrst með svífun, síðan með loftfræðilegri lyftingu og loks með miðcentrifugalum stuðningi, allt án efnafræðilegs eldsneytis.

Í hjarta þessarar hugmyndar er **rafmagnsloftknúið (EAD) vélknúning** - gerð rafmagnsprýstings sem notar rafmagnssvið til að hraða jónum í lofti. Hraðaðir jónir flytja hreyfingu á hlutlausum sameindum og mynda stóran straum og netprýsting á rafhlöðunum. Í samanburði við eldflaugar, sem verða að bera viðbragðsþyngd, eða skrúfu, sem þarf hreyfanleg blöð, virkar rafmagnsloftknúið **án hreyfanlegra hluta og án innbyggðs útblásturs**, bara sólarljósi og lofti. Þegar það er tengt hávirkni sólaröfnun og sett á stórt, óþyngt lyftibotn, veitir það vantandi þáttinn fyrir stöðugum hraðaaukningu í efri gufuhvolfinu, þar sem tog er lítið en loftið er enn til staðar.

Tillagan er einföld að lýsa en erfið að framkvæma:

1. **Hækka** - Svífandi loftskip fyllt vetni eða helium hækkar óvirkt upp í stratósferið, langt yfir veðri og flugumferð.
2. **Fljúga** - Loftskiptið hröðast lárétt með EAD prýstingi, hægt hækkingi hraða á meðan það klífur upp í þynnra lofti til að draga úr togi.
3. **Brautarflug** - Eftir vikur stöðugs hraðaaukningar jafnast miðcentrifugakrafturinn við þyngdarkraftinn; farartækið þarf ekki lengur lyftingu, það er orðið gervitungl með seiglu frekar en sprengingu.

Hugmyndin er ekki fantasía. Hvert skref er rótgróið í þekktri eðlisfræði: svífun, sólrunnur, rafmagnsstatik og brautarverkfræði. Það sem breytist er tímaskalan. Í stað mínútna brennslu íhugum við **vikur sólarljóss**. Í stað tonna af eldsneyti treystum við á **svið og þolinmæði**.

Orkan í braut

Allar umræður um geimferðir byrja og enda með orku. Gagnslíkan orkan á kílógramm af massi sem þarf til að viðhalda hringlaga braut um jörðina er gefin með

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

þar sem v er brautarhraði. Fyrir lágjaðar braut um jörðina er $v \approx 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$, svo $E_k \approx 3.0 \times 10^7 \text{ J/kg}$, eða um **30 megajólar á kílógramm**. Þetta er orkuígildi brennslu um einnar kílógrömm bensíns fyrir hvert kílógramm sett í braut. Það er stórt tal, en ekki stjörnufræðilega stórt.

Nú berðu það saman við stöðugan sólstrauminn efst í jörðens gufuhvolfi: um **1.360 watt á fermetra**. Ef við gætum breytt jafnvel litlum hluta af því í gagnslíkan orku yfir daga eða vikur, gætum við, í meginreglum, veitt nauðsynlegu brautaroðuna. Núverandi háhæfni ljósbúnaðar-arrays hafa sérstakar orkur í röðinni af nokkur hundruð watt á kílógramm. Við $P_{sp} = 300 \text{ W/kg}$ framleiðir ein kílógramm array 300 júl á sekúndu. Yfir daginn (8.64×10^4 sekúndur) er það 2.6×10^7 júl - sambærilegt brautaroðunni á einu kílógrammi af massa.

Þessi einfalda samanburður sýnir röksemdafærsluna í þessu nálgun. Orkan til brautar er tiltæk frá sólinni á um **einum degi á kílógramm af array**, ef hún getur verið breytt skilvirkt í þrýsting. Hagnýta áskorunin er að tog og óskýrleiki gleypa það mesta. Lausnin er hæð og þolinmæði: vinna í þunnu lofti þar sem tog er lágt, og teygja ferlið yfir vikur frekar en klukkustundir.

Að skipta tíma fyrir eldsneyti

Eldflaugar leysa vandamálið með togi með hráum krafti - þær fara svo hratt að loftið er óviðkomandi. Loftskip, hins vegar, vinna með loftinu; þau geta dvalist. Ef tími er meðhöndlaður sem neyslurannsókn, getur hann komið í stað eldsneyti. Verkefni loftskiptsins er að viðhalda litlum en stöðugum hraðaaukningu yfir langar tímabil, kannski **á röðinni af 10^{-3} m/s^2** , þar til brautarhraði er náð.

Ef hækkun í braut tekur þrjár vikur, eða um 1.8×10^6 sekúndur, er meðalhraðaaukningin sem þarf

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

- minna en helmingur þúsundshluti jarðarþyngdarkraftarins. Slík hraðaaukning er auðveldlega þolandi fyrir loftskip; þau leggja ekki á sig neina uppbyggingarspennu. Eina erfiðleikinn er að **halda því**, miðað við litla magn þrýstingsins sem er tiltækt á hverja einingu af orku.

Ef farartækið hefur massa 10^3 kg , krefst meðalhraðaaukning $4 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ aðeins um **4 newton af hreinni þrýstingu** - minna en þyngd eplis. Augljós fjarstæðukenndin að ná braut með þrýstingi eplis hverfur þegar tíma er leyft að teygja sig yfir vikur.

Svífun og leiðin að þunnu lofti

Loftskiptið byrjar ferðina sína eins og hvert annað yfirborðsfljúgandi farartæki: með því að ýta lofti út með léttara gasi. Svífandi krafturinn er gefinn með

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

þar sem V er gasmagnið og ρ viðeigandi þéttir. Nálægt sjávarborði er $\rho_{\text{air}} \approx 1.2 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{He}} \approx 0.18 \text{ kg/m}^3$, og $\rho_{\text{H}_2} \approx 0.09 \text{ kg/m}^3$. Vatnsgas veitir örlítið meiri lyftingu, um **1.1 kg á rúmmetra**, samanborið við **1.0 kg á rúmmetra** fyrir helium. Munurinn virðist lítill en safnast upp yfir þúsundir rúmmetra.

Vatnsgas býður þannig mælanlegan frammistöðukosti, þótt á kostnað við brennileika. Það krefst ströngra rafmagnssvæða og loftgáttaprotokolla, sérstaklega þar sem farartækið ber líka háspenna rafmagnsstatísk kerfi. Helium býður minni lyftingu en fulla óvirkni. Bæði gasin eru lífvænleg; valið fer eftir þolmagni áhættu missjónarinnar. Fyrir snemma opinberar eða þéttbýliskrár prófanir er helium æskilegt. Fyrir einangraðar eða brautarprófanir getur vatnsgas verið réttlætt.

Þegar farartækið hækkar, fellur loftþéttinn nánast veldisvísulega með skalahæð **$H \approx 7.5 \text{ km}$** . Á 30 km er þéttinn um **1/65** sjávarborðs; á 50 km **1/300**. Svífun veikist sambærilega, en tog líka. Farartækið er hannað til að ná **hlutlausri svífun** á hæð þar sem sólargeislun er enn há en hreyfanlegur þrýstingur er lítill - um 30–40 km í stratósferinu. Þarfra byrjar lárétt hraðaaukningin.

Lyfting, tog og hreyfanlegur þrýstingur

Til að viðhalda hæðinni meðan á hraðaaukningu stendur gæti loftskiptið stuðst að hluta við **loftfræðilega lyftingu**. Fyrir lyftibotns-húll er lyfting- og togin

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

þar sem A er tilvísunarsvæðið, C_L og C_D lyftingar- og togsviðarnir. Þar sem ρ er lítill á hæð er þessi kraftar litlir; farartækið bætir upp með **stóru svæði** og **lítill þyngd**.

Hlutfallið $L/D = C_L/C_D$ ákvarðar skilvirkni loftfræðilegrar flugs. Núverandi nútíma gliding geta umfram $L/D = 50$ í þéttu lofti. Óþyngt loftskip hannað með mikilli sléttleika og lágmarksviðhengjum gæti plausíblt haldið virku L/D af 10–20 jafnvel í þunnu lofti. En þegar loftið þynnist enn frekar er brautarflugsferlinn ekki takmarkaður af lyftingu - það er stjórnað af **togsorku**.

Orkan sem þarf til að vinna gegn togi er

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

og það skalar með þriðja veldi hraðans. Þetta er ástæða þess að eldflaugar hröðast hratt: ef þær dvelja, neytir tog orðan sinn veldisvísulega. Loftskiptið tekur andstæðan leið: það hröðast þar sem ρ er svo lítið að P_D heldur sig innan marka jafnvel á kílómetrum á sekúndu.

Ef, til dæmis, $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ (venjulegt nálægt 60 km hæð), $A = 100 \text{ m}^2$, $C_D = 0.05$, og $v = 1.000 \text{ m/s}$, þá

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

eða 25 kW - auðveldlega innan sólarreach. Í samanburði myndi sömu uppsetning á sjávarborði þurfa 25 gigawatta.

Reglan er einföld: **Þunnt loft kaupir tíma, og tími kemur í stað eldsneytis.**

Rafmagnsloftknúnunartækifærið

Í byrjun 20. aldar athugðu eðlisfræðingar að sterk rafmagnssvið nálægt skörpum rafhlöðum í lofti framleiða daufan bláan kórónu og fínlegan loftstreymingu. Þessi "rafmagnsvindur" stafar af hreyfingarumflutningi milli jóna og hlutlausra. Það var meðhöndlað aðallega sem forvitni þar til háspenna rafeindatækni þroskaðist. Þegar rétt raðað getur áhrifunum framleitt mælanlegan þrýsting.

Rafmagnsloftknúning virkar með því að beita háu spennu milli **geislara**, þunnrar víra eða brúnar sem framleiðir jónir, og **safnara**, breiðari rafhlöðu sem tekur við þeim. Jónarnir hröðast í rafmagnssviðinu, steypast á hlutlaus loftmólekúlum og veita gasinu framgöngu. Tækið finnur jafngildan og andstæðan þrýsting.

Þótt snemma sýni væru hófleg, höfum nýleg tilraunir - þar á meðal fastvinga **jónflugvél** flogið af MIT árið 2018 - sannað að stöðugt, hljóðlaust flug er hægt. En hugmyndin er eldri en sá mílustaður. Árum fyrr höfðu rannsóknir á **Maxwell-tensor-bundnum formum** rafmagnsloftknúning sýnt hvernig sömu eðlisfræðin gætu skalað upp í stærri rúmfræði og þynnra lofti. Í þeim formum kemur þrýstingurinn ekki frá "vindi" heldur frá **rafmagnsspennu** sem er heilduð yfir rúmmál losunar svæðisins.

Viðeigandi jafnvægið er dregið af **Maxwell-spennutensornum $\mathbf{T}$** , sem fyrir rafmagnsstatískt svið er

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

þar sem ϵ er leyfanleiki miðilsins, $\mathbf{E}$ er rafmagnssviðsvektorinn, og $\mathbf{I}$ er sjálfsaginn tensor. Nettó rafmagnsöflun á líkama er fengið með því að heilda þennan tensor yfir yfirborðið:

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

Í jónuðu svæðinu einfaldist þetta í **rúmorkudensitet**

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

þar sem ρ_e er staðbundin hleðslutíðni. Í gas með tiltölulega jafnri leyfanleika hverfur annar liðurinn, og eftir er sú fallegi **Coulomb líkamorkan**

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

Þessi þjappaða tjáning er kjarna rafmagnsloftknúningar: þar sem rafmagnssvið og rýmishleðsla eru saman, virkar nettó líkamorkan á miðlinum.

Jónarnir sjálfir eru fáir, en hreyfing þeirra er miðlað til hlutlausra með árekstrum. Meðalfjálsvegurinn λ milli árekstra ákvarðar hvernig hreyfing dreifist; það skalar öfugt við þrýsting. Á lægri þrýstingum fer jónir lengra á árekstri, og skilvirkni hreyfingarumflutnings breytist. Það er **hámarksþrýstingssvið** þar sem jónir geta enn steipt sér oft nóg til að ýta gasinu en ekki svo oft að þær slösaðu orku í að hitta það. Fyrir jörðens gufuhvolf liggur það svið um milli nokkurra torr og nokkurra millitorr - nákvæmlega svæðið sem finnst milli 40 og 80 km hæð.

Loftskiptsins umslagið verður þannig hið hugsanlega hýsil fyrir rafmagnsloftknúðarkostum sem starfa í sínu náttúrulega umhverfi. Guðuhvolfið sjálft er viðbragðsþyngdin.

Eðlisfræði rafmagnsloftknúningar

Í fyrstu sýn virðist rafmagnsloftknúning ómöguleg. Hugmyndin um að hljóðlaus, kyrrstæð sett af rafhlöðum geti myndað þrýsting nógu sterkan til að hreyfa loftskip virðist í mótsögn við daglegt reynslu. Fjarvera sýnilegrar viðbragðsþyngdar eða hreyfanlegra véla áskorar skilning. En hver jón sem dreifist í rafmagnssviði ber hreyfingu, og hreyfing er varðveitt. Sviðið virkar sem ósýnilegur stífari, og loftið sem vinnuflúiðinu.

Grundvöllur þessarar atburðar liggur ekki í óvenjulegri plötu-eðlisfræði heldur í **Maxwell-jöfnum** og þeirri vélrænni tjáningu, **Maxwell-spennutensornum**. Þessi tensor-tjáning gerir ljóst að rafmagnssvið eru ekki bara mynstur af pottum - þau geyma og flytja vélrænan stress í umhverfis miðlinum.

Sviðsstress og Coulomb líkamorkan

Maxwell-spennutensorinn í rafmagnsstatík er

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

þar sem ϵ er leyfanleiki, $\mathbf{E}$ rafmagnssviðið, og $\mathbf{I}$ sjálfsginn tensor. Fyrsti liðurinn táknar stefnulegan þrýsting meðfram sviðslínunum, og annar liðurinn jafnstreymt spennu sem andstæðir sviðsskiptingu.

Nettó rafmagnsöflun á líkama í slíku sviði er yfirborðsinntegralið af þessum tensor:

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

Eðlisfræðilega segir þessi tjáning okkur að rafmagnssviðið leggur stress á mörk hvernar svæðis sem inniheldur hleðslu eða díelektrískum gráðum. En það getur verið endurskrifað í meira staðbundna, rúmfræðilega form með notkun dreifingarsetningar:

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

Fyrsti liðurinn, $\rho_e \mathbf{E}$, er þekkt **Coulomb líkamorkan**: hleðslutíðni sem er undir áhrifum sviðs. Annar liðurinn skiptir máli aðeins þar sem leyfanleiki miðilsins breytist hratt, eins og á efni-mörkum. Í lofti er ϵ grundvallarlega jafn, svo $\nabla \epsilon \approx 0$, eftir

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

Þessi blekkjandi einfalda jafnvægið kóðar heildarsreglu rafmagnsloftknúningar. Ef rúmmál gas er til staðar þar sem jónir (með tíðni ρ_e) verða fyrir rafmagnssviði $\mathbf{E}$, þá virkar **nettó kraftatíðni** á þann gas. Stærð heildarþrýstingsins er rúmmálsinntegralið af $\rho_e \mathbf{E}$ yfir losunarsvæðið:

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

Rafhlöðunin finnur jafngilda og andstæðan viðbrögð, framleiðir þrýsting.

Hreyfingarumflutningur og hlutverk árekstra

Jónir í lofti ferðast sjaldan langt áður en þær steypast á hlutlausum sameindum.

Meðalfrjálsvegurinn λ er um öfugt við gasþrýstinginn p og þverskurðinn σ :

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

þar sem d er sameindastærð. Á sjávarborði er λ lítið - á röðinni af tugum nanómetra. Í mesósférenni (um 70 km) lengist λ í millimetrar eða sentimetrar.

Þegar jón hröðast undir sviðinu flytur það hreyfingu til hlutlausra með árekstrum. Hver árekstur deilir hluta af stefnulegri jónhreyfing; heildaráhrifin eru **stór hlutlaus straumur** - það sem tilraunamenn kalla *jónavind*. Gasinn fer frá geislara til safnara, og rafhlöðurnar upplifa andstæðan viðbragðsþrýsting.

Í mjög þéttu lofti steypast jónir of oft; hraðahreyfingin þeirra mettarist, og orka er týnd sem hiti. Í ótrúlega þunnu lofti eru árekstrar of sjaldgæfir; jónir fljúga frjálsar en draga ekki hlutlaus áhrif. Milli þessara öfganna er **sæt punktur** þar sem meðalfrjálsvegurinn leyfir skilvirkan hreyfingarumflutning - nákvæmlega svæðið sem loftskiptið fer yfir á leiðinni til geimsins.

Á þrýstingi um 10^{-2} til 10^{-4} bar (sem svarar 40–80 km hæð) geta jónir hröðast yfir makróskópískar vegalengdir áður en þær steypast, en árekstrar eiga enn sér stað nógu oft til að mynda þrýsting. **Rafmagnsloftknúning** milli sviðs og gases er á besta sínum.

Samband orku-þrýstings

Rafmagnsorðan sem er afhent losun er $P = \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV$, sem er um IV fyrir stöðug straum I og spennu V . Nýtileg vélræn úttan er þrýstingurinn sinn gangur á hraða hraðaðs loftmassa, en í stöðugri vélknúning er um við mest áhuga á **þrýstingur-til-orku hlutfallinu**, T/P .

Reynslurannsóknir hafa skýrt T/P gildi frá nokkrum millinewtonum á watt (mN/W) til næstum 0.1 N/W undir bestu skilyrðunum. Í andrúmsloftinu við staðlaðan þrýsting er EAD óhagkvæmt; en á minni þrýstingum eykst jónahreyfigluk, og straumpéttni getur verið haldin við lægri spennu, sem bætir T/P

Einföld víddarrök tengja líkamsorkudensítuna $f = \rho_e E$ við straumpéttnina $J = \rho_e \mu E$, þar sem μ er jónahreyfigluk. Þá

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

svo fyrir gefna straumpéttni gefur hærri hreyfigluk (náð við lægri þrýsting) meiri þrýsting á straum. Heildin rafmagnsorðan er $P = JEV$, svo **þrýstingur-til-orku** skalar sem

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

sem bendir til þess að lægri rafmagnssvið eða hærri jónahreyfigluk auki skilvirkni. En lægri E minnkar líka strauminn og því heildarþrýstinginn, svo það er aftur eitt optimum svæði.

Þessar tengingar eru ekki kenningalegar forvitni - þær ákvarða hönnun hverrar EAD flís. Á gefinni hæð verður spenna, bilfjarlægð og geislarjamonster að stilla svo að **Paschen-kúran** (sem tengir brotspennu við þrýstings-fjarlægðarafurð) sé uppfyllt en ekki yfirlenging.

Paschens lög fyrir loft geta verið lýst nálgunarlega sem

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

þar sem A og B eru reynslulaga og γ_{se} er annarrar kynslóðar rafeindalosunargildið. Breyta jörð loftskiptsins leyfir d , bil rafhlöðunnar, að vera stillt dynamic til að viðhalda skilvirkri kórónulosun án geislagangs þegar umhverfishrýstingurinn fellur á hækkun.

Sviðsjörð og stress-topology

Snemma "lifter" sýni notuðu þunnt vír sem geislara og flata fólíu sem safnara. Sviðslínurnar voru sterkt bogin, og flest orkan fór í að viðhalda kórónunni frekar en að framleiða gagnlegan þrýsting. Skilvirknin var léleg vegna þess að **Maxwell-spennusviðið** var ekki í réttu þrýstingstefnu.

Lykilinnskilningurinn - þróaðir í kenningarlegu vinnu á undan MIT jónoflugvél - var að meðhöndla rafmagnssviðið ekki sem aukaprodukt heldur sem frumstæðu hönnunarbreytu. Þrýstingurinn kemur frá **heildun rafmagnsstress** meðfram sviðslínum, svo markmiðið er að móta þær línur til að vera samhliða og samræmdar yfir breitt svæði. Sögnin er loftfræðileg: eins og slétt laminarkraftur minnkar tog, slétt rafmagnsstatísk sviðstopology maksimerar stefnulegan stress.

Þessi "sviðstopology-verkfræði" endurskipar tækinu sem *rafmagnsstatískan virkja* frekar en plötu-leikfang. Með stjórn á krómingu rafhlöðu, vörðu pottum og díelektrískum lögum,

getur **E** gert næstum einn yfir hraðaaukningarstígnina, framleiðir kvasi-línulegan stress og forðast eyðilegan sjálf-fókus sem veldur geislagangi.

Afleiðingin er skalanleiki. Þegar rafhlöðunum eru tessellated í fermetra flísar, hver með eigin háspennu umbreytanda og stýringu, getur heildin loftskiptumslagið breytt í risavaxinn dreifðan EAD-fylki. Það eru engar hreyfanlegar hlutir til að samstillast, bara svið til að samræma.

Þrýstingsþéttleiki og leiðin að skalanleika

Rúmorkudensítanin er $f = \rho_e E$. Hleðslutíðnin í venjulegri kórónulosun við andrúmsloftstíðni er á röðinni af 10^{-5} til 10^{-3} C/m^3 . Á minni þrýstingum getur það fallið nokkuð, en rafmagnssviðið **E** getur verið öruggt aukið upp í tugir kilovolt á sentímetra án brotunnar.

Ef $\rho_e = 10^{-4} \text{ C/m}^3$ og $E = 10^5 \text{ V/m}$, er kraftadensítin $f = 10 \text{ N/m}^3$. Dreift yfir 1 m þykkt virk svæði gefur það yfirborðsprýsting af 10 N/m^2 - jafngilt nokkrum millipascals. Það gæti hljómað lítið, en yfir þúsundir fermetra verður það merkilegt. 1000 m² yfirborð með 10 N/m^2 stress framleiðir 10.000 N af þrýstingi, nóg til að hröðast margtonna farartæki á millig-nivói - nákvæmlega það sem þarf fyrir vikulanga brautarhækkun.

Slík áætlanir lýsa af hverju EAD, þrátt fyrir lága orkuþéttni, verður fýsilegt fyrir **stór, létt mannvirki** í þunnu lofti. Ólíkt eldflaugarósa, sem öðlast skilvirkni aðeins þegar orkuþéttni er há, öðlast EAD kosti frá svæði. Loftskiptisins umslagið býður upp á ríkulegt svæði; að gera það að virkri yfirborði er náttúrulegt par.

Efri gufuhvolfsins sæta svæði

Hver líkamlegur kerfi hefur rekstrarniche. Fyrir EAD vélknúning er besti rekstrarstíllinn þar sem gasþrýstingurinn er nógu lítill til að leyfa háspennu og langa jón-meðalfrjálsvegi, en ekki svo lítill að platan verður árekstralaus.

Undir um 20 km er gufuhvolfið of þétt: jónahreyfigluk lág, brotspennur háar, og orka er sóun í að hita gasið. Yfir um 100 km verður loftið of þunnt: jónun getur ekki haldist stöðugt, og hlutlaus viðbragðsþyngdin hverfur. Milli um 40 og 80 km liggur **millibreytingarsvæði** - neðri mesósféren - þar sem EAD vélknúning getur framleitt bestu þrýstingur-til-orku hlutföllin.

Þægilega er þetta líka hæðarsvæðið þar sem sólorkan er næstum óbreytt og loftfræðilegt tog er stærðaröð minna en á sjávarborði. Það er þröng en náðsamleg gluggi, náttúrulegur gangur fyrir nýja tegund farartækis: hvorki flugvél né eldflaug, heldur eitthvað sem býr í yfirlögninni milli þeirra.

Skilvirkni og orkuflæði

Á hverjum augnabliki er rafmagnsinngangurinn **P** deild í:

1. **Nýtileg vélræn þrýstingur-orka** $P_T = T v_{\text{eff}}$, þar sem v_{eff} er virk útblásturhraði loftflæðisins
2. **Jónunartap** P_i , orkan sem þarf til að viðhalda plötunni
3. **Mótstöðutap** P_r , vegna ómíssks hita og leka
4. **Geislatap** P_γ , gefin út sem ljós (þekkt kórónaglóð)

Heildarskilvirknin er $\eta = P_T/P$. Tilraunir benda til að η geti náð nokkrum prósentum í þéttu lofti og hugsanlega tugum prósentu í bestu lágþrýstingsskiptum. Þótt hófleg, eru þessar tölur nægilegar fyrir sólknúð kerfi sem starfar yfir langar tímabil, þar sem skilvirkni getur verið skipt fyrir tíma.

Ólíkt efnafræðilegri vélknúning, sem verður að ná háum skilvirkni á sekúndu til að lágmarka eldsneyti, getur sólknúð EAD loftskip leyft sér óhagkvæmni ef það getur **starfað ótakmarkað**. Mælikvarðinn á velgengni er ekki sérstakur hraðahreyfing heldur **sérstakur þolinmæði**: júl sem safnast upp yfir daga.

Frá Maxwell stress til stórmálas þrýstings

Til að lýsa tengingunni milli sviðsfræði og daglegrar reynslu, íhugaðu $\vec{p}$ plötukondensatorinn í tómi. Þrýstingurinn milli plötunnar er $\vec{p} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \vec{E}^2$. Ef $\vec{E} = 10^6 \text{ V/m}$, þá $\vec{p} \approx 4.4 \text{ N/m}^2$. Margfalda með svæði, og þú færð vélræna kraftinn sem þarf til að aðskilja plötur. Rafmagnsstatískur stress er bókstaflega vélrænn þrýstingur.

EAD vélknúning kemur í stað einnar plötu með gufuhvolfinu sjálfu. Jónarnir eru miðillinn þar sem sviðsstress er fluttur. Í stað stöðugra þrýstings færðu stefnulegan straum. Samhengið $\vec{f} = \rho_e \vec{E}$ er hreyfanlegi analogi við þann stöðuga þrýsting kondensatorsins.

Þegar summað yfir yfirborð loftskiptsins verður heilduð stress netvinnuvektor, rétt eins og heilduð þrýstingur yfir yfirborð vængs gefur lyftingu. Sögnin er djúp: loftfræðileg lyfting er hreyfingurflæði lofts sem er afleidd af yfirborði; EAD þrýstingur er hreyfingurflæði jóna sem eru hröðuð af sviði.

MIT jónoflugvél og tilraunakenning

Í áratugi höfðu skeptískir EAD sem rannsóknarstofuforvitni afgreidd. Síðan, árið 2018, sýndi lítið fastvingaflugvél smíðuð af MIT **stöðugt, skráfalaus flug** knúð eingöngu af rafmagnsloftknúning. "Jónoflugvél" vegði um 2,5 kílógrömmum og flaug tugir metra undir batteríorku. Þrýstingur-þyngdarhlutfallið var lítið, en afrekðin söguleg: fyrsta þyngra-en-loft farartækið sem var haldið í flugi af jónískri vélknúning.

Mikilvægt er að kenningin og hugtökavinnan sem leiddu til þessarar sýningar höfðu þegar verið þróuð óháð. Kenningarlegur ramma sem kynntur er í *Rafmagnsloftknúning* (sjá https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html) hafði lýst sama vinnslu í **Maxwell stress** og **Coulomb líkamorku** orðum árum á undan, með áherslu á sviðstopology og skalanleika frekar en kóróna-chemíu.

MIT jónoflugvél sannaði áhrifanna hagnýtni í þéttnu lofti. Rise-Fly-Orbit verkefnið miðar að að ýta því í þunnt loft, þar sem eðlisfræðin verða enn hagkvæmari. Ef lítið flugvél getur flogið á 1 bar, getur sólknúið loftskip flogið í braut á míkróbarum, gefið nógu þolinmæði og sólarljósi

Dygð einfaldleikans

EAD vélknúningur er hugtakalega fínlegur: engir hreyfanlegir hlutir, engin brennsla, enginn háhraða útblástur, engin kryógeník. Þessir hlutir eru náttúrulega endingargóðir - rafhlöður, díelektríkur, orkuumbreytendur og ljósbúnaðarhúðir. Kerfið skalar náttúrulega með svæði, ekki massa

Tæknilegi áskorunin færir frá hitagagnsemi til **rafmagnsverkfræði og efnisvísindi**: að koma í veg fyrir kóróna-erosjón, stjórna hleðsluleika og viðhalda háspennu einangrun í breytilegum þrýstingum. Þessir eru lausnir með nútímaefnum og örtölum.

Þar sem EAD vinnslan fer bara eftir sviðsjörð og jónahreyfigluk er hún **innbyggð modulær**. Hvert fermetra af loftskiptishúð getur verið meðhöndlað sem flís með þekktum T/P og spennueiginleikum. Heildarþrýstingur farartækisins er vektorsumman af þúsundum óháðra flísa. Þessi modulærið leyfir náðsamlega niðurbrot - bilun nokkurra eininga comprometar ekki heildina.

Rafmagnsloftknúið loftskip sem kerfi

Þegar tengt við sólorku verður EAD vélknúningur ekki bara þrýstingsuppsprettu heldur **veðurskerfi** fyrir farartækið. Söndu sviðin sem mynda þrýsting í óháðum líka merkingargögn, minnka yfirborðshleðslu og hugsanlega hafa áhrif á mörku-lagseiginleika. Rafmagnssviðið getur jafnvel þjónað sem stillanlegur "rafmagnsstatískur segl", sem tengist veikt við jarðmagnetíska sviðið eða umhverfis plötuna í efra gufuhvolfinu

Langtímum getum við hugsað okkur virkan stjórn á togi með því að stjórna yfirborðshleðsludreifingum - **rafmagnsdynamískt togskjöldur** sem breytir staðbundnum sviðsstress til að klippa flugleið án vélrænna stýrisyfirlýðna

Þessar möguleikar færa EAD vélknúning yfir forvitni inn í ríki almennt notaðs, fasts-stöðu flugstýringartækni - sem er beitt þar sem gasar eða plötur geta verið polariseruð og hröðað með rafmagnssviðum

Verkfræðilegt arkitektúr og flugdynamík

Meginkosti Rise-Fly-Orbit hugmyndarinnar liggur ekki í óvenjulegum efnum eða byltingarkenndri eðlisfræði, heldur í **enduruppbyggingu þekktra meginreglna**. Svífun, sólorka og rafmagnsstatík eru öll vel skildu. Nýtt er hvernig þau eru raðað í eina samfellt: *hækkun án augnabliks af óstöðugleika*

Eldflaugar fara í gegnum mismunandi stjórnun - hleypt, brennt út, strönd, braut. Rafmagnsloftknúið loftskip, hins vegar, upplifir aðeins smám saman breytingar. Það hækkar með léttleika, flýgur með lyftingu og fer í braut með tregðu. Hvert skref blandast

inn í næsta, stjórnað af sömu stöðugu samleiki svífunar, loftfræðilegrar og rafmagnsstatískrar krafta.

Umslagið: Mannvirki sem gufuhvolf

Umslagið loftskiptsins verður að uppfylla mótsagnakenndar kröfur: það verður að vera **létt og sterkt, leiðandi og einangrandi, gegnsætt fyrir sólarljósi en ónæmt fyrir geislun**. Þessar eru lausnir með lagskiptri byggingu.

Ytri lagið getur verið **málmúð pólýmer** - til dæmis þunnt lag af áklæddum Kapton eða pólýetýlen terephthalate. Þetta lag veitir UV skjól og þjónar sem hluti rafhlöðuyfirborðs fyrir EAD flísana. Þar undir liggur **díelektrískt lag** sem kemur í veg fyrir óæskilegar losanir og skilgreinir bil til innri safnararafhlöðunnar. Innri mannvirkið er net af spenntum himnum og stefnum sem viðhalda heildarjörðinni við lítið innri yfirþrýsting, á röðinni af $\Delta p \approx 300 \text{ Pa}$ - aðeins nokkur þúsundshlutar andrúmsloftstíðinnar.

Þessi yfirþrýstingur er nóg til að halda umslaginu spenntu en ekki nóg til að valda mikilvægri uppbyggingarþyngd. Í raun er heilt farartækið risavaxinn, léttur kondensator, húðin hans hlaðin og lífleg með sviðslínum.

Inniheldur rúmmálið er lyftigasi - vetni eða helium. Þar sem nauðsynlegi yfirþrýstingurinn er lítill eru álagsbærandi kröfur á efnið hógværar. Aðaláskorunin er gasgegndur og UV niðurbrot yfir langar missjónir, báðir eru leysanlegir með nútíma húðun og lagskiptum filmum.

Vetni eða helium

Gasvalið mótar persónuleika farartækisins.

Vetnsgas býður upp á hæstu lyftinguna, um 10% meiri svífun en helium. Þessi munur verður verulegur þegar heildar rúmmálið nær milljónum rúmmetra. Vetnsgas er líka auðveldara að fá og getur jafnvel verið framleitt á staðnum með sólarorku-elektrolýsi vatns. Ókosturinn, auðvitað, er brennileiki.

Tilvist háspennu rafmagnsstatíkur gerir vetnisstjórnun ekki einfalda. Öryggi fer eftir nákvæmri deilingu, rafmagnsstatískri skjöldun og loftgáttum. EAD einingarnar sjálfar eru innsiglaðar og aðskildar frá gasfrumum með díelektrískum hindrunum, og mögulegar munur á möguleikum yfir skropið eru lágmörkuð með samhverfri hleðsludreifingu.

Helium, hins vegar, er óvirkt og öruggt en býður minni lyftingu og hærri kostnað. Aðalvanturinn er skorturinn; stórskalaaðferð gæti þrýtt á birgðirnar. Fyrir snemma prófunarfarartæki og almenna sýningaflugs er helium vitrænt val. Fyrir rekstrarbrautarprófanir í einangruðum gangum gæti vatnsgas verið réttlætt af frammistöðu og kostnaði.

Hvort sem er er umslagsins hönnun að miklu leyti samhæf; bara gasmeðhöndlun og öryggiskerfi mismunast.

Sólorka og orkumál

Sól er vél farartækisins. Hvert watt af rafmagni byrjar sem sólarljós sem er sogað upp af ljósbúnaðarhúðinni

Hárvirkni, óþyngdar ljósbúnaður - þunnfilmur gallium-arseníðs eða perovskít samsetningar límdu á yfirborð loftskiptsins - getur náð sérstökum orkum nálægt **300–400 W/kg**. Fylkin eru raðað samhliða til að viðhalda loftfræðilegri sléttleika. Orkumál eru dreifð: hver panelhluti fæðir staðbundinn hámarksorkupunktsöfnu (MPPT) sem stýrir spennu til háspennubuses sem veitir EAD flísunum

Þar sem farartækið upplifir dag-nótt lotur ber það lítið **orkupúð** - léttar batteríur eða ofurhaldarar - til að viðhalda lágstigsstarfsemi í myrkri. En þetta eru ekki stór; hönnunarfilosofía kerfisins er **beint sólarakstur**, ekki geymd orka. Á brautarhæðum getur farartækið elti sólarljósið næstum stöðugt, dýfandi í skugga aðeins stutt.

Hitaeftirfylgni er meðhöndluð geislunarsvið. Með lítilsháttar samruna á mikilli hæð fer hitafrávísun á **há emissivity yfirborð** og leiðir til geislunarsviða. Því miður er EAD ferlið tiltölulega svalt - engin brennsla - og aðalhitabyrðin er frá sogaðri sólarljósi

Rafmagnsloftknúði flísar

Hvert fermetra af umslaginu virkar sem **EAD flís** - sjálfstæða vélknúningarsell sem samanstendur af geislara, safnara og litlum stýrikerfi. Geislarinn getur verið fínn grid af skörpum punktum eða vírum á háu jákvæðu möguleika, á meðan safnarinn er breitt net haldið nálægt jörðu eða neikvæðum möguleika. Rýmið milli er stjórnað losunarsvæði

Þegar energað er stofnar flísin rafmagnssviðið **E** , framleiðir hleðslutíðni **ρ_e** , og framleiðir staðbundinn þrýsting **$f = \rho_e E$** stefnt spássíu á yfirborðið. Með að mótuleika spennuna á mismunandi flísum getur loftskiptið stýrt, halla og veltast án hreyfanlegra hluta

Breytileg jörð er lykill. Með umhverfishrýstingnum sem fellur með hæð lengist meðalfrjálsvegurinn. Til að viðhalda skilvirkri losun verður virka bilfjarlægðin **d** milli geislara og safnara að aukast um **$1/p$** hlutfall. Þetta getur verið náð með **breytilegum, uppblásnum díelektrískum bilum** sem stækka lítið þegar ytri þrýstingurinn fellur, eða með **rafeindamótuleikanum** af möguleikagráðum til að líkja eftir stærri bilum

Hver flís skýrir télmælingu - straum, spennu, boga tal - til miðlægs stýrikerfis. Ef flís upplifir boga eða niðurbrot er hún slökkt og umgengin. Módelhönnunin þýðir að missir einstakra flísa hefur varla áhrif á heildarþrýstinginn

Frá svífun til þrýstings

Flugið byrjar hægt. Á útsendingu hækkar loftskiptið svífulaust upp í stratósferið. Á hækkun starfar EAD kerfið í lágorkumóði, veitir lítil þrýstingur til stöðugleika og straumstýringar

Um 30–40 km hæð, þar sem loftið er þunnt en enn árekstrameðvinið, byrjar aðalhraðaaukningin. Loftskiptið snýst hægt til láréttis flugs, beinir sínum löngum öxli í áætlaða brautarröskun.

Upphaflega er þrýstingurinn jafnvægi milli láréttar hraðaaukningar og lyftingaraukningar. Leifar svífandi farartækisins vega upp mikið af þyngd sinni; EAD þrýstingurinn veitir bæði fram og lítið upp komponent. Þegar hraði eykst vex hreyfanleg lyfting og svífun verður ómerkileg. Breytingin er slétt - engin “tökuflug stund” vegna þess að loftskiptið sat aldrei á rútu.

Þriggja vikna hækkun

Hugsanlegt farartæki massa $m = 2000 \text{ kg}$ íhugað. Til að ná brautarhraða $v = 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$ í $t = 1.8 \times 10^6 \text{ s}$ (þrjár vikur), er nauðsynlegur meðalþrýstingur

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

Átta newton - þyngd lítils appelsínu - er heildarþrýstingurinn sem þarf til að ná braut ef beitt er stöðugt í þrjár vikur!

Ef kerfisins T/P er 0.03 N/W , dæmigert fyrir skilvirka EAD starf við lágþrýsting, þarf framleiðsla 8,7 N aðeins um **290 W** af orku. Þetta virðist ótrúlega lítið, og í raun mun aukin togmissir krefjast tugum kílowatta. En sólarlóðir sem þekja nokkur hundruð fermetra geta auðveldlega veitt það!

Látið okkur innifela öryggisþátt af 100 fyrir óhagkvæmni og tog: um **30 kW** af rafmagni. Með 15% heildarskilvirkni frá sólarljósi til þrýstings verður farartækið að safna um **200 kW af sólorku**! Þetta svarar til um 700 fermetra virks sólar svæða við 300 W/m² úttak - svæði minna en fótboltavöllur, auðveldlega innbyggt á 100 metra langt loftskip!

Þessi einfalda reikningur sýnir að **orkuflæðið er líklegt**! Það sem eldflaugar ná með orkupéttni, loftskiptið náir með þolinmæði og svæði!

Tog og háhæðargangur

Tog er ennþá aðal orkusafnið. Togkrafturinn er $F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D$, og viðeigandi orkan $P_D = F_D v = \frac{1}{2} \rho v^3 A C_D$!

Á 50 km er $\rho \approx 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Ef $A = 100 \text{ m}^2$, $C_D = 0.05$, og $v = 1000 \text{ m/s}$, þá

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

Það eru 2,5 megavatta - of hátt. En á 70 km, þar sem $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$, gefur sömu uppsetningin aðeins 25 kW af togsorku. Því er stefnan: **klifra á meðan þú hröðast**, vera á slóð þar sem ρv^3 er um **20–50 kW** með aðlaga halla og hæð!

Hagkvæmasti gangurinn er einn með stöðugt þynnandi lofti, kannski 40–80 km hæð, þar sem gufuhvolfið veitir rétt nógu hlutlausu þéttni fyrir EAD að starfa en nógu lítið til að halda toginu stjórnanlegu!

Farartækjastýring og stöðugleiki

Án skrufna eða fjaðra kemur stöðugleiki frá sviðssamstillingu. Diftingu virkjun flísa veitir snúning. Ef framflísar vinstri framleiða lítið meira þrýsting en hægri, yawar farartækið hægt. Halla stýring er náð með að biasa efri og neðri flísar. Þar sem þrýstingur á flís er lítill er svörun hæg, en farartækið starfar í kerfi þar sem fíkn er óþarfi.

Haltasensorar - gyroskóp, hröðunarmælar, stjörnusporar - fæða stafrænt stýriskerfi sem heldur stefnu fyrir hámarks sólarinnfellingu og réttri flugleið. Gríðarstærð farartækisins og hæg flugstíll gera það athyglisvert stöðugt.

Hita og rafmagnsöryggi

EAD starf felur í sér tugir til hundraða kílovolta við lágstraum. Í þunnu, þurru lofti stratósfaersins hegðar einangrun öðruvísi: boga geta dreift langt yfir yfirborð. Rafmagnshönnun loftskiptsins meðhöndlar því alla uppbyggingu sem stjórnaðan möguleikastofnun. Leiðandi slóðir eru auknar, með einangrunarlagum sem aðskilja gasfrumur frá HV línum.

Boganir eru ekki hörmulegar - þær hafa tilhneigingu til að vera staðbundnar og sjálfslökkandi - en þær geta skemmt rafhlöður. Hver flís eftirlít straumform sínu; ef losun spikes, minnkar stýrið spennuna eða slökkvar á áhrifna einingunni í nokkrar sekúndur.

Hitafræðilega þýðir fjarvera samruna að hvert staðbundið hita verður að dreift með leiðslu til geislunarpönnanna. Efni eru valin fyrir háa emissivity og lágmarksaðsog í innrauðu, leyfa umframhita að geisla í geiminn.

Skalanleiki og modulær

Kerfið skalar með flísun, ekki með aukningu á spennu. Að tvöfalda fjölda flísa tvöfalda þrýsting; það er engin þörf á stærri losunum. Þetta gerir arkitektúrinn **línulega skalanlegan** frá rannsóknarstofumódelum til brautarfarartækja.

Hagnýtt prótótýp getur byrjað sem lítið, helium fyllt pallur með tugum fermetra EAD yfirborðs, framleiðir millinewton þrýsting mæld yfir klukkustundir. Stærri sýnendur gætu fylgt, hver stækkaði í svæði og orku. Endanleg brautarsköpun getur spannað hundruð metra, með þúsundum óháðra stýrðra flísa, starfandi undir fullum sólarorku í mánuði í senn.

Þar sem allir hlutir eru fastastöðugir hefur kerfið innbyggt langt þjónustulíf. Það eru engar turbínubæringar eða brennslulotur til að slíta - bara smám saman rafhlöðu-erosjon og efnaverkun. Með varkárri hönnun gæti meðaltími milli bilunar náð árum.

Hækkunarprófilar og hæðarsmit

Heildarmissjónin getur verið hugsað sem slétt spirál í (v, ρ) planinu: með aukningu á hraða minnkar þéttin. Slóðin er valin svo að vörpun ρv^3 - sem ákvarðar togsorku - haldist undir þröskuldinum sem sólarkerfið getur veitt.

1. **Svífunarhækkun** upp í 30–40 km
2. **Hraðaaukningarfasa:** viðhalda um $P_D \approx 20\text{--}50 \text{ kW}$ með aðlaga halla og hæð
3. **Smit í brautarstjórnun:** yfir 70 km hverfa lyfting og svífun, og loftskiptið verður raunverulega gervitungl sem enn grazar gufuhvolfinu

Smitið frá “flugi” til “brautar” er ekki skarp mörk. Gufuhvolfið hverfur smám saman; þrýstingur bætir upp fyrir tog þar til tog er óviðkomandi. Slóð farartækisins verður hringrönd frekar en ballísk, og það heldur sig uppi ótakmarkað

Orkusamsetning og þol

Með heildarhækkuninni er heildarinngangurinn frá sólinni mikill samanbórið við það sem þarf. Jafnvel við hógværa söfnun 100 kW safnast upp í þrjár vikur stöðugs starfs

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

Fyrir 2000 kg farartæki er það **90 MJ/kg** - þrisvar sinnum krafan um brautargagnslíkan orku. Meira af þessari orku mun týnast í tog og óhagkvæmni, en marginin er gjafmild

Þetta er hljóðláta galdur sólarþolinmæðinnar: þegar tíma er leyft að teygja sig kemur orkuríkidæmi í stað orkuskorts

Viðhald, endurhvarf og endurnýting

Eftir að hafa lokið brautarmissjóninni getur loftskiptið hægjað á sig hægt með því að snúa pólheitum sínum EAD sviðs. Tog eykst þegar það lækkar; sama vinnslan sem lyfti því virkar nú sem bremsa. Farartækið getur endurinnflogið stratósferið og flot þénað niður undir leifasvífun

Þar sem engar neysluhlutar eru hent er kerfið **fullkomlega endurnýjanlegt**. Umslagið getur verið þjónað, endurfyllt og endurhleypt. Viðhald felur í sér að skipta út niðurbrotna flísum eða filmum frekar en að endurbyggja vélarnar

Í samanburði við efnafræðilegar eldflaugar, þar sem hvert hleypt neytir tanka og eldsneytis, er EAD loftskiptið **orku-endurunninn geimfar**. Sólinn fyllir á það stöðugt; eingöngu slit og tæringu krefjast mannlegra inngrips

Breiðari verkfræðileg merkingu

Samar gildi tækni sem gerir sólknúið EAD loftskip - léttar ljósbúnaðar, háspennuorkuelektróník, þunnfilmdíelektríkur - hafa strax jarðneskar notkunir. Stratósferísk samskiptaplatforms, háhæðarklimasensorar og langvarandi drónar njóta allir sömu þróunar

Með því að stunda kerfi sem getur náð braut án eldsneytis, finnum við líka nýja flokk af **faststöðu loftfarum** - vélum sem fljúga ekki með brennslu heldur með sviðsmanipulering

Í þessu tilliti situr Rise-Fly-Orbit verkefnið í ættarleið sem felur í sér Wright Flyer og fyrstu vökvaeldflaugar: ekki fullkomna tækni, heldur **sönnun á meginreglu** sem breytir því hvað “flug” þýðir!

Reglugerð, stefna og heimspeki hægfara hækkunar

Eðlisfræði sólknúíðs rafmagnsloftknúíðs loftskipts er leyfileg; lögin eru það ekki. Núverandi flugsreglur skipta himininn í snyrtilega afmarkaða dæmi: **loftsambandið** stjórnað af flugsreglum, og **ytri geimurinn** stjórnað af geimreglum. Milli þeirra liggur grár svæðið - of hátt fyrir flugvélavottun, of lágt fyrir brautarskráningu. Loftskiptið til brautar býr beint í þeim gráa, hreyfast stöðugt í gegnum hæðir sem, á pappír, tilheyra engri flokki yfirleitt!

Af hverju það er “ómögulegt”

Loftsambandislög gera ráð fyrir farartækjum sem taka af og lenda innan klukkustunda. Þau krefjast vottuðra véla, loftfræðilegra stýrisyfirborða og getu til að víkja fyrir umferð. Engin af þessum forsendum passar við sjálfstætt, sólknúíð loftskip sem gæti dvalist vikur yfir 60 km!

Hleyptarfarartækjareglur byrja þar sem eldflaugar kveikja: óskiptur kveikningur, hleyptarstaður og flugenda kerfi hannað til að halda inne í sprengingum. Loftskiptið okkar hefur ekkert af þessu. Það hækkar hægt eins og ský; það er engin “hleyptarstund”! Þótt það muni að lokum yfirgegn Mach 1 og ná brautarhraða fellur það undir geimflugs lögsögn. Niðurstaðan er paradoxísk: það getur ekki flogið lögmætlega sem flugvél, en verður að vera leyft sem eldflaug sem það lítur ekki út eins og!

Hybríð loft-orbítarfarartækjaflokkur

Lækningin er að þekkja nýjan flokk - **Hybríð loft-orbítarfarartæki (HAOV)**! Einkennandi eiginleikar þess væru:

- **Stöðug yfirferð dæma:** hækkun frá yfirborði til nálægs geims án óskiptar stiga!
- **Lágur hreyfigagnsorkuflæði:** heildar hreyfingarumflutningur með gufuhvolfinu margar stærðaröð minna en eldflaugar!
- **Passive fall-síkeri hegðun:** á orkuskerðingu dreifist og lækkar farartækið; það fellur ekki ballístíkt!
- **Samstarfs rannsókn:** alltaf sýnilegt fyrir radara og gervitungla-sensurum, sendir sína stöðuvexti eins og ADS-B sendar fyrir flugvélar!

HAOV rammað myndi leyfa vottun slíkra farartækja undir **árangursbundnum** frekar en **tæknibundnum** viðmiðum - að skilgreina öryggi í orkuútsendingu, jörðarfótspor og sjálfstæðri lækkun getu í stað tilvistar véla eða eldsneytis!

Haf- eða eyðimörk **gangur** gætu verið skilgreind þar sem HAOV geta starfað stöðugt, eftirlit af núverandi geimumferðanetum. Hækkun þeirra myndi vera minna hættu fyrir flug en einn veðraballoon, en núverandi reglur bjóða þeim enga leið!

Stjórnsmál þolinmæðinnar

Reglugerð fylgir menningu, og menningin er háð hraða. Flugsaga mælist í þrýstingurþyngdarhlutföllum og mínútum til brautar. Hugmyndin um að farartæki taki **þrjár vikur** til að ná braut hljómar, í fyrstu heyrn, eins og afturför. En þolinmæði er verðmæti sjálfbærni. Loftskiptið leggur til annan mælikvarða: ekki "hversu hratt getum við brennt orku" heldur "hversu stöðugt getum við safnað henni."

Fyrir geimstofnanir vanar hleyptar gluggum og niðurteljningum krefst slíkt farartæki breytingar í rekstri: missjónar áætlun eftir árstíðum frekar en sekúndum; brautarinntök sem byggjast á sólargeometrí, ekki pallaraukningu. En þessi breyting fellur saman við víðari snúninginn að **stöðugri innvið** - sól-rafnúnum geimfarum, endurnýjanlegum stöðvum, stöðugum loftslagsplötum.

Stefnumörkum gildi

Endurnýjanlegt sól-EAD farartæki býður upp á möguleika sem engin eldflaug eða flugvél getur mælt:

- **Stöðug háhæðarathugun og samskipti:** áður en full braut getur loftskiptið flot yfir mánuðum í efri stratósferi, miðlað gögnum eða myndað jörðina.
- **Aukningarmæld sending:** litlar sendingar geta verið hækkaðar hægt án hljóð- og hitaáþekkja hleyptar.
- **Plánetulegar analogar:** á Mars, þar sem brautarhraði er aðeins 3,6 km/s og gufuhvolfsþrýstingur mælir langa jónhraðaaukningu, gæti sama arkitektúrinn starfað enn betur.
- **Umhverfisstjórnun:** enginn útblástur, engar eldsneytisleki, neglanleg hljóðáhrif.

Efnahagslega myndu fyrstu rekstrar HAOV ekki skipta eldflaugum heldur bæta þeim, þjóna nishum þar sem sendingar þolinmæði vegur þyngra en neyð. Stefnumarkaðlega myndu þau losa aðgang að nálægum geim frá eldsneytisfjölskyldum - aðlaðandi eiginleiki fyrir geimstofnanir sem leita að sjálfbærri innvið.

Reglubókaverkfræði

Að búa til HAOV flokk er minna um lóbbíngu en **mælingu**. Reglusetar treysta gögnum. Leiðin fram er tilraunarparhagsmunir:

1. **Helium-bundnar sýnendur** í einangruðum gangum, búin til að taka upp slóð, orkunotkun og bilunarhegðun.
2. **Stöðug télmæling** deilt með borgaralegum flugs- og geimrannsóknanetum til að sanna fyrirsjáanleg flugdynamíki.
3. **Hermun og áhættumódel** sem sýna að verstu tilfelli gagnaorkuflæði yfir byggð svæði er neglanlegt.

Þegar stofnanir sjá kvantíserað sönnun þess að HAOV getur ekki skaðað flugvélar eða jarðbúum, fylgir lögleg arkitektúr - eins og það gerði fyrir háhæðarbölonna og dróna á undan.

Siðferðisleg vídd

Hægfara flug hefur siðferðislegt vægi. Efnafræðilegir hleyptar menga ekki vegna þess að verkfræðingar eru óvarir heldur vegna þess að eðlisfræði býður ekki tíma til að endurvinnna hita sinn. Sólknúið loftskip, hins vegar, neytir einskis óafturkræfs. Það skiptir hávaða út fyrir þögn, blikk út fyrir glóð. Hækkun þess væri sýnileg frá jörðinni sem bjartur, óseðjandi punktur, mannlegur gripur sem klífur án ofbeldis.

Í tíma neyðar er slík hugsuð hreyfing yfirlýsing: að tæknileg metnaður þurfi ekki að vera sprengjandi til að vera djúpi.

Polinmæði ljóssins

Þegar eldflaug nær braut gerir hún það með hráum hraðaaukningu: sekúndum brennslu sem skilja eftir sig skjálíandi himininn. Rafmagnsloftknúið loftskip kemur á annan hátt. Hvert ljóssins sem slær húðina leggur af mörgu hreyfingu, miðlað með rafeindum, jónum og rólegri stærðfræði Maxwell-jafnvægisins. Yfir þrjár vikur safnast þessi hvísl í braut.

Sama tjáningin - $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ - sem lýsir míkroampere jónadreifingu í rannsóknarstofu stýrir líka þúsund-tonna lyftibotni sem renur í gegnum efra gufuhvolfið. Skalan breytist; meginreglan gerir það ekki. Maxwell tensorinn, Coulomb lögin og polinmæði sólarljóssins eru alheimsk.

Ef mannkynið lærir að nýta þessa polinmæði fáum við nýjan leið til að yfirgefa jörðina - ein sem getur endurtekið ótakmarkað, knúið af sömu stjörnu sem heldur okkur uppi.

Mot tíma afturkræft flugs

Efnafræðilegt eldflaugar er ein-vegis merki: mikill kostnaður til að ná braut, og skyndilegur endir við endurkomu. Rafmagnsloftknúið loftskip leggur til **afturkræft slóð**. Það getur klifið og lækkað eftir vilja, búið hvar sem er frá troposféri til brautar. Það er bæði geimfar og búsvæði, farartæki og stöð.

Í þessari stöðugleika liggur heimspekileg umbreyting: geimflugið ekki sem brottför heldur sem framlengingu gufuhvolfsins. Gráðið frá lofti til tóms verður farvegur. Slík farartæki myndu mörk línu milli veðurfars og geimvísinda, breyta "brún geimsins" í lifandi vinnusvæði frekar en hindrun.

Lokandi hugleiðingar

Engin ný eðlisfræði er þörf - bara þol, nákvæmni og endurhugsuð reglugerð. Brautaroðubyrðið getur verið greitt með sólarljósi; þrýstingurinn getur stafað af rafmagnssviðum sem virka á jónum; tíminn getur verið lánaður af polinmæði verkfræðinganna.

Hinir hindrunin eru menningarlegar og skrifstofulegar: að sannfæra stofnanir um að eitthvað sem lítur út eins og loftballon geti, í gegnum stærðfræði og seiglu, orðið gervitungli. En hvert umbreytandi tækni byrjaði sem óvenjuleiki í pappírsvinnunni.

Þegar fyrsta þessara sólknúðu rafmagnsloftknúðu skipanna hækkar verður framrásin næstum óskýr klukkustund af klukkustundi. En dag af degi mun það safna hraða, þar til það gliðst loksins út fyrir náð veðursins. Það mun ekki vera öskur - bara dauði, stöðugi suð sviðanna og stöðuga safnun sólarljóssins í hreyfingu.

Það mun merki byrjun **endurnýjanlegs, sjálfbærs og milds aðgangs að braut**: leið til að hækka, fljúga og - án þess að slá nokkurn tíma eld - til að fara í braut.

Heimildir & frekari lestur

- **Rise Fly Orbit verkefnið:** <https://riseflyorbit.org/> - yfirlit yfir hugmyndina um sólknúði loftskip til brautar og tengdar rannsóknir.
- **Greining um rafmagnsloftknúning:** https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html - djúpstæð kenningaleg meðferð á rafmagnsloftknúning með notkun Maxwell-spennutensorsins og Coulomb líkamorku-formans.
- Barrett, S. et al., *Nature* (2018). "Flight of an Aeroplane with Solid-State Ionic Propulsion." - fyrsta sýning á fastvingaflugvél með faststöðu jónískri vélknúningi.
- Paschen, F. (1889). "Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure erforderliche Potentialdifferenz." *Annalen der Physik*, 273(5).
- Sutton & Biblarz, *Rocket Propulsion Elements*, 9. útg. - til samanburðar í orðubyrðingum og Δv íhugun.
- NASA Glenn Research Center, "Solar Electric Propulsion Basics." - grunnur um háhæfni rafmagnsprýstingskerfi.