

उदय, उड़ान, कक्षा

सौर ऊर्जा से संचालित इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक एयरशिप सतत अंतरिक्ष पहुंच के लिए दृष्टि और भौतिक आधार

उड़ान का सपना हमेशा धैर्य और शक्ति के बीच एक प्रतियोगिता रहा है। अठारहवीं शताब्दी के प्रारंभिक गुब्बारों वाले धीरे-धीरे आकाश में ऊपर उठे थे हल्के गैसों का उपयोग करके, जबकि बीसवीं शताब्दी के रॉकेट इंजीनियरों ने इसे आग से फाड़ दिया था। दोनों दृष्टिकोणों का एक ही लक्ष्य है - गुरुत्वाकर्षण की तानाशाही से बचना - लेकिन दर्शन में मौलिक रूप से भिन्न हैं। एक हवा को भागीदार के रूप में उपयोग करता है; दूसरा इसे बाधा मानता है। इन दो चरमों के बीच एक तीसरा रास्ता है, जो व्यवहार में अभी तक साकार नहीं हुआ है लेकिन सिद्धांत में अब असंभव नहीं है: एक **सौर ऊर्जा से संचालित एयरशिप जो कक्षा में उड़ सकती है**, पहले उछाल से ऊपर उठती है, फिर वायुगतिकीय लिफ्ट से, और अंत में केन्द्रापसारी समर्थन से, सब कुछ बिना रासायनिक प्रणोदक के।

इस अवधारणा का केंद्र **इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक (EAD) प्रणोदन** है - विद्युत थ्रस्ट का एक रूप जो विद्युत क्षेत्रों का उपयोग करके हवा में आयनों को तेज करता है। तेज आयनों ने तटस्थ अणुओं को गति प्रदान की, एक थोक प्रवाह और इलेक्ट्रोड पर शुद्ध थ्रस्ट उत्पन्न किया। एक रॉकेट के विपरीत, जो प्रतिक्रिया द्रव्यमान ले जाना चाहिए, या प्रोपेलर, जो चलित ब्लेड की आवश्यकता है, इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक प्रणोदन **बिना चलित भागों और बिना बोर्ड पर निकास** संचालित होता है, केवल सूर्य की रोशनी और हवा के साथ। जब उच्च-दक्षता सौर एरे से जुड़ा और एक बड़े, अल्ट्रालाइट लिफ्टिंग बॉडी पर माउंट किया गया, तो यह ऊपरी वायुमंडल में निरंतर त्वरण के लिए लापता घटक प्रदान करता है, जहां ड्रैग छोटा है लेकिन हवा अभी भी मौजूद है।

प्रस्ताव वर्णन करने में सरल है लेकिन निष्पादन में चुनौतीपूर्ण:

1. **उदय** - हाइड्रोजन या हीलियम से भरा एक उछाल-आधारित एयरशिप मौसम और विमानन यातायात से बहुत ऊपर स्ट्रेटोस्फीयर में निष्क्रिय रूप से चढ़ता है।
2. **उड़ान** - एयरशिप EAD थ्रस्ट का उपयोग करके क्षैतिज रूप से त्वरित होता है, धीरे-धीरे वेग बढ़ाते हुए पतले हवा में चढ़ता है ताकि ड्रैग कम हो।
3. **कक्षा** - निरंतर त्वरण के हफ्तों के बाद, केन्द्रापसारी बल गुरुत्वाकर्षण को संतुलित करता है; वाहन को अब लिफ्ट की आवश्यकता नहीं है, जो दृढ़ता से विस्फोट के बजाय एक उपग्रह बन गया है।

विचार कल्पना नहीं है। हर कदम ज्ञात भौतिकी में निहित है: उछाल, सौर ऊर्जा, इलेक्ट्रोस्टैटिक्स, और कक्षीय यांत्रिकी। जो बदलता है वह समय-सीमा है। दहन के मिनटों के बजाय, हम **सूर्य की रोशनी के हफ्तों** पर विचार करते हैं। टन प्रणोदक के बजाय, हम **क्षेत्रों और धैर्य** पर निर्भर हैं।

कक्षा की ऊर्जा

अंतरिक्ष यात्रा की हर चर्चा ऊर्जा से शुरू और समाप्त होती है। पृथ्वी के चारों ओर वृत्ताकार कक्षा बनाए रखने के लिए आवश्यक द्रव्यमान प्रति किलोग्राम गतिज ऊर्जा दी जाती है

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

जहां v कक्षीय गति है। निम्न पृथ्वी कक्षा के लिए, $v \approx 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$, इसलिए $E_k \approx 3.0 \times 10^7 \text{ J/kg}$, या लगभग **30 मेगाजूल प्रति किलोग्राम**। यह कक्षा में रखे गए प्रति किलोग्राम के लिए लगभग एक किलोग्राम पेट्रोल जलाने के ऊर्जा समकक्ष है। यह एक बड़ा संख्या है, लेकिन खगोलीय रूप से बड़ा नहीं।

अब इसे पृथ्वी के वायुमंडल के शीर्ष पर निरंतर सौर फ्लक्स से तुलना करें: लगभग **1,360 वाट प्रति वर्ग मीटर**। यदि हम दिनों या हफ्तों में उसका एक छोटा सा हिस्सा गतिज ऊर्जा में परिवर्तित कर सकें, तो हम सिद्धांत रूप में आवश्यक कक्षीय ऊर्जा प्रदान कर सकते हैं। आधुनिक उच्च-प्रदर्शन फोटोवोल्टेइक ऐरे प्रति किलोग्राम सैकड़ों वाट की विशिष्ट शक्तियां रखते हैं। $P_{sp} = 300 \text{ W/kg}$ पर, एक किलोग्राम ऐरे प्रति सेकंड 300 जूल उत्पन्न करता है। एक दिन (8.64×10^4 सेकंड) पर, यह 2.6×10^7 जूल है - एक किलोग्राम द्रव्यमान की कक्षीय ऊर्जा के समान।

यह सरल तुलना इस दृष्टिकोण की तर्कसंगतता दिखाती है। कक्षा के लिए ऊर्जा सूर्य से लगभग **ऐरे प्रति किलोग्राम एक दिन** में उपलब्ध है, यदि इसे कुशलतापूर्वक थ्रस्ट में परिवर्तित किया जा सके। व्यावहारिक चुनौती यह है कि ड्रैग और अक्षमताएं अधिकांश को अवशोषित कर लेती हैं। समाधान ऊंचाई और धैर्य है: पतली हवा में काम करें जहां ड्रैग कम है, और प्रक्रिया को घंटों के बजाय हफ्तों में फैलाएं।

समय का प्रणोदक के लिए व्यापार

रॉकेट ड्रैग की समस्या को कच्ची शक्ति से हल करते हैं - वे इतनी तेज जाते हैं कि हवा अप्रासंगिक हो जाती है। एयरशिप, इसके विपरीत, हवा के साथ काम करते हैं; वे लिंगर कर सकते हैं। यदि समय को खर्च करने योग्य संसाधन के रूप में माना जाए, तो यह प्रणोदक द्रव्यमान को बदल सकता है। एयरशिप का कार्य लंबी अवधियों में छोटा लेकिन लगातार त्वरण बनाए रखना है, शायद 10^{-3} m/s^2 के क्रम का, जब तक कक्षीय वेग प्राप्त न हो।

यदि कक्षा में चढ़ाई तीन सप्ताह लेती है, या लगभग 1.8×10^6 सेकंड, आवश्यक औसत त्वरण है

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

- पृथ्वी की गुरुत्वाकर्षण का आधा हजारवां से कम। ऐसे त्वरण एयरशिप के लिए आसानी से सहन करने योग्य हैं; वे कोई संरचनात्मक तनाव नहीं थोपते। एकमात्र कठिनाई **इसे बनाए रखना** है, प्रति शक्ति इकाई उपलब्ध थ्रस्ट की छोटी मात्रा को देखते हुए।

यदि वाहन की द्रव्यमान 10^3 kg है, तो $4 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ औसत त्वरण केवल लगभग **4 न्यूटन शुद्ध थ्रस्ट** की आवश्यकता है - एक सेब के वजन से कम। एक सेब के थ्रस्ट से कक्षा तक पहुंचने की प्रतीत होने वाली बेतुकापन तब गायब हो जाती है जब समय को हफ्तों में फैलाने की अनुमति दी जाती है।

उछाल और पतली हवा का रास्ता

एयरशिप अपनी यात्रा किसी भी हवा से हल्के यान की तरह शुरू करता है: हल्के गैस से हवा को विस्थापित करके। उछाल बल दिया जाता है

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

जहां V गैस का आयतन और ρ संबंधित घनत्व हैं। समुद्र तल के पास, $\rho_{\text{air}} \approx 1.2 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{He}} \approx 0.18 \text{ kg/m}^3$, और $\rho_{\text{H}_2} \approx 0.09 \text{ kg/m}^3$ । हाइड्रोजन थोड़ा अधिक लिफ्ट प्रदान करता है, लगभग **1.1 किग्रा प्रति घन मीटर**, हीलियम के **1.0 किग्रा प्रति घन मीटर** की तुलना में। अंतर छोटा लगता है लेकिन हजारों घन मीटर पर संचित होता है।

इस प्रकार हाइड्रोजन एक मापनीय प्रदर्शन बढ़त प्रदान करता है, हालांकि ज्वलनशीलता की कीमत पर। यह सख्त विद्युत जोनिंग और वेंटिंग प्रोटोकॉल की आवश्यकता है, विशेष रूप से क्योंकि वाहन उच्च-वोल्टेज इलेक्ट्रोस्टैटिक सिस्टम भी ले जाता है। हीलियम कम लिफ्ट प्रदान करता है लेकिन पूर्ण निष्क्रियता। दोनों गैसों व्यवहार्य हैं; विकल्प मिशन जोखिम सहनशीलता पर निर्भर करता है। प्रारंभिक सार्वजनिक या आबादी वाले क्षेत्रों के परीक्षणों के लिए, हीलियम वरीय है। दूरस्थ या कक्षीय प्रयासों के लिए, हाइड्रोजन उचित हो सकता है।

जैसे ही वाहन ऊपर उठता है, हवा का घनत्व लगभग घातीय रूप से स्केल ऊंचाई $H \approx 7.5 \text{ km}$ के साथ गिरता है। 30 किमी पर, घनत्व समुद्र तल का लगभग $1/65$ है; 50 किमी पर, $1/300$ । उछाल इसके अनुसार कमजोर होता है, लेकिन ड्रैग भी। यान को न्यूट्रल उछाल तक पहुंचने के लिए डिज़ाइन किया गया है जहां सौर तीव्रता उच्च रहती है लेकिन गतिशील दबाव न्यूनतम है - स्ट्रेटोस्फीयर में लगभग 30-40 किमी। वहां से, क्षैतिज त्वरण शुरू होता है।

लिफ्ट, ड्रैग, और गतिशील दबाव

त्वरण के दौरान ऊंचाई बनाए रखने के लिए, एयरशिप आंशिक रूप से **वायुगतिकीय लिफ्ट** पर निर्भर हो सकता है। लिफ्टिंग-बॉडी हल के लिए, लिफ्ट और ड्रैग बल हैं

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

जहां A संदर्भ क्षेत्र, C_L और C_D लिफ्ट और ड्रैग गुणांक हैं। चूंकि ऊंचाई पर ρ छोटा है, ये बल छोटे हैं; वाहन **बड़े क्षेत्र और कम वजन** से मुआवजा करता है।

अनुपात $L/D = C_L/C_D$ वायुगतिकीय उड़ान की दक्षता निर्धारित करता है। आधुनिक ग्लाइडर घनी हवा में $L/D = 50$ से अधिक हो सकते हैं। अत्यधिक चिकनाई और न्यूनतम परिशिष्टों के साथ डिज़ाइन किया गया अल्ट्रालाइट एयरशिप पतली हवा में भी 10-20 का प्रभावी L/D बनाए रख सकता है। लेकिन जैसे ही हवा और पतली हो जाती है, कक्षीय उड़ान में संक्रमण लिफ्ट द्वारा सीमित नहीं है - यह **ड्रैग पावर** द्वारा शासित है।

ड्रैग पर काबू पाने के लिए आवश्यक शक्ति है

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

और यह वेग के घन के साथ स्केल करता है। यही कारण है कि रॉकेट तेजी से त्वरित होते हैं: यदि वे लिंगर करते हैं, तो ड्रैग उनकी ऊर्जा को घातीय रूप से खपत करता है। एयरशिप विपरीत मार्ग लेता है: यह ρ इतना छोटा जहां त्वरित होता है कि P_D किलोमीटर प्रति सेकंड पर भी सीमित रहता है।

यदि, उदाहरण के लिए, $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ (60 किमी ऊंचाई के पास विशिष्ट), $A = 100 \text{ m}^2$, $C_D = 0.05$, और $v = 1,000 \text{ m/s}$, तो

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

या 25 kW - आसानी से सौर पहुंच में। इसके विपरीत, समुद्र तल पर वही कॉन्फिगरेशन को 25 गीगावाट की आवश्यकता होगी।

नियम सरल है: **पतली हवा समय खरीदती है, और समय प्रणोदक को बदल देती है।**

इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक अवसर

बीसवीं शताब्दी के प्रारंभ में, भौतिकविदों ने देखा कि हवा में तेज इलेक्ट्रोड के पास मजबूत विद्युत क्षेत्र एक हल्के नीले कोरोना और एक सूक्ष्म वायु प्रवाह उत्पन्न करते हैं। यह "इलेक्ट्रिक विंड" आयनों और तटस्थों के बीच गति हस्तांतरण से उत्पन्न होता है। यह मुख्य रूप से एक जिज्ञासा के रूप में व्यवहार किया गया जब तक उच्च-वोल्टेज इलेक्ट्रॉनिक्स परिपक्व नहीं हो गया। जब ठीक से व्यवस्थित किया गया, तो प्रभाव मापनीय थ्रस्ट उत्पन्न कर सकता है।

इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक प्रणोदन एक उच्च वोल्टेज को लागू करके काम करता है **एमिटर** के बीच, एक पतला तार या किनारा जो आयनों उत्पन्न करता है, और एक **कलेक्टर**, एक व्यापक इलेक्ट्रोड जो उन्हें प्राप्त करता है। आयनों विद्युत क्षेत्र में तेज होते हैं, तटस्थ हवा के अणुओं से टकराते हैं, और गैस को आगे की गति प्रदान करते हैं। डिवाइस एक समान और विपरीत थ्रस्ट महसूस करता है।

हालांकि प्रारंभिक प्रदर्शनों विनम्र थे, हाल के प्रयोग - जिसमें 2018 में MIT द्वारा उड़ाया गया एक फिक्स्ड-विंग **आयन प्लेन** शामिल है - ने साबित किया कि स्थिर, मौन उड़ान संभव है। फिर भी विचार उस मील के पत्थर से पहले का है। वर्षों पहले, **मैक्सवेल-टेंसर-आधारित फॉर्मूलेशन** पर शोध ने दिखाया कि समान भौतिकी बड़े ज्यामितियों और पतली हवा में स्केल हो सकती है। उस फॉर्मूलेशन में, थ्रस्ट “विंड” से नहीं बल्कि **इलेक्ट्रोमैग्नेटिक स्ट्रेस** से उत्पन्न होता है, जो डिस्चार्ज क्षेत्र के आयतन पर एकीकृत होता है।

संबंधित समीकरण **मैक्सवेल स्ट्रेस टेंसर \mathbf{T}** से व्युत्पन्न है, जो इलेक्ट्रोस्टैटिक फील्ड के लिए है

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

जहां ϵ माध्यम की परावर्तकता, \mathbf{E} विद्युत क्षेत्र वेक्टर, और \mathbf{I} पहचान टेंसर है। किसी बॉडी पर शुद्ध इलेक्ट्रोमैग्नेटिक फोर्स उसके सतह पर इस टेंसर को एकीकृत करके प्राप्त की जाती है:

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

आयनीकृत क्षेत्र के भीतर, यह एक **वॉल्यूम फोर्स डेंसिटी** को सरलीकृत करता है

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

जहां ρ_e स्थानीय चार्ज डेंसिटी है। लगभग एकसमान परावर्तकता वाले गैस में, दूसरा टर्म गायब हो जाता है, सुंदर **कूलॉम्ब बॉडी फोर्स** छोड़कर

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

यह कॉम्पैक्ट अभिव्यक्ति इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक प्रणोदन का सार है: जहां भी विद्युत क्षेत्र और स्पेस चार्ज सह-अस्तित्व में होते हैं, एक शुद्ध बॉडी फोर्स माध्यम पर कार्य करता है।

आयन स्वयं कम हैं, लेकिन उनका गति तटस्थों को टकराव के माध्यम से रिले किया जाता है। टकरावों के बीच औसत मुक्त पथ λ निर्धारित करता है कि गति कैसे फैलती है; यह दबाव के व्युत्क्रम में स्केल करता है। निचले दबावों पर, आयन प्रति टकराव अधिक यात्रा करते हैं, और गति हस्तांतरण की दक्षता बदल जाती है। एक **अनुकूल दबाव बैंड** मौजूद है जहां आयन अभी भी गैस को धकेलने के लिए पर्याप्त बार-बार टकरा सकते हैं लेकिन इतनी बार-बार नहीं कि वे इसे गर्म करके ऊर्जा बर्बाद करें। पृथ्वी के वायुमंडल के लिए, वह बैंड लगभग कुछ टॉर और कुछ मिलीटॉर के बीच है - ठीक 40 और 80 किलोमीटर ऊंचाई के बीच का रेंज।

एयरशिप का लिफाफा इस प्रकार इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक टाइल्स के लिए आदर्श होस्ट बन जाता है जो अपनी प्राकृतिक वातावरण में संचालित होते हैं। वायुमंडल स्वयं प्रतिक्रिया द्रव्यमान है।

इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक प्रणोदन की भौतिकी

पहली नजर में, इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक प्रणोदन असंभव लगता है। विचार कि एक मौन, गतिहीन इलेक्ट्रोडों का सेट पर्याप्त मजबूत थ्रस्ट उत्पन्न कर सकता है जो एक एयरशिप को ले जाए, रोजमर्रा के अनुभव के विपरीत लगता है। दृश्य प्रतिक्रिया द्रव्यमान या चलित मशीनरी की अनुपस्थिति अंतर्ज्ञान को चुनौती देती है। फिर भी हर आयन जो विद्युत क्षेत्र में बहता है, गति ले जाता है, और गति संरक्षित है। क्षेत्र एक अदृश्य लीवर के रूप में कार्य करता है, और हवा उसके कार्य फ्लूइड के रूप में।

इस घटना के आधार विदेशी प्लाज्मा भौतिकी में नहीं बल्कि **मैक्सवेल के समीकरणों** में और उनकी यांत्रिक अभिव्यक्ति, **मैक्सवेल स्ट्रेस टेंसर** में निहित हैं। यह टेंसरियल फॉर्मूलेशन स्पष्ट करता है कि विद्युत क्षेत्र केवल पोर्टेंशियल पैटर्न नहीं हैं - वे आसपास के माध्यम में यांत्रिक तनाव स्टोर और ट्रांसमिट करते हैं।

फील्ड स्ट्रेस और कूलॉम्ब बॉडी फोर्स

मैक्सवेल स्ट्रेस टेंसर इलेक्ट्रोस्टैटिक्स में है

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

जहां ϵ परावर्तकता, \mathbf{E} विद्युत क्षेत्र, और \mathbf{I} पहचान टेंसर है। पहला टर्म फील्ड लाइनों के साथ दिशात्मक दबाव का प्रतिनिधित्व करता है, और दूसरा टर्म फील्ड डाइवर्जेंस का प्रतिरोध करने वाली आइसोट्रोपिक तनाव।

शुद्ध इलेक्ट्रोमैग्नेटिक फोर्स ऐसे क्षेत्र में डूबे बॉडी पर इस टेंसर का सतह इंटीग्रल है:

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

भौतिक रूप से, यह अभिव्यक्ति बताती है कि विद्युत क्षेत्र किसी भी क्षेत्र की सीमाओं पर तनाव डालता है जो चार्ज या डाइलेक्ट्रिक ग्रेडिएंट्स को शामिल करता है। लेकिन डाइवर्जेंस प्रमेय का उपयोग करके इसे अधिक स्थानीय, वॉल्यूमेट्रिक फॉर्म में फिर से लिखा जा सकता है:

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

पहला टर्म, $\rho_e \mathbf{E}$, परिचित **कूलॉम्ब बॉडी फोर्स** है: एक चार्ज डेंसिटी एक क्षेत्र का अनुभव कर रही है। दूसरा टर्म केवल तब मायने रखता है जहां माध्यम की परावर्तकता तेजी से बदलती है, जैसे सामग्री सीमाओं पर। हवा में, ϵ मूल रूप से एकसमान है, इसलिए $\nabla \epsilon \approx 0$, छोड़ते हुए

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

यह धोखा देने वाली सरल समीकरण इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक प्रणोदन के पूरे सिद्धांत को एन्कोड करता है। यदि गैस का एक आयतन मौजूद है जिसमें आयन (ρ_e के साथ) विद्युत क्षेत्र \mathbf{E} का अनुभव करते हैं, तो **शुद्ध फोर्स डेंसिटी** उस गैस पर कार्य करती है। कुल थ्रस्ट की परिमाण डिस्चार्ज क्षेत्र पर $\rho_e \mathbf{E}$ का वॉल्यूम इंटीग्रल है:

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

इलेक्ट्रोड बराबर और विपरीत प्रतिक्रिया महसूस करते हैं, थ्रस्ट उत्पन्न करते हैं।

गति हस्तांतरण और टकरावों की भूमिका

हवा में आयन शायद ही कभी टकराव से पहले दूर यात्रा करते हैं। **औसत मुक्त पथ λ** गैस दबाव p और क्रॉस-सेक्शन σ के व्युत्क्रम आनुपातिक है:

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

जहां d आणविक व्यास है। समुद्र तल पर, λ छोटा है - दसियों नैनोमीटर के क्रम का। मेसोस्फीयर में (लगभग 70 किमी), λ मिलीमीटर या सेंटीमीटर तक फैल जाता है।

जब एक आयन क्षेत्र के तहत तेज होता है, तो यह टकरावों के माध्यम से तटस्थों को गति प्रदान करता है। प्रत्येक टकराव आयन के निर्देशित गति का एक अंश साझा करता है; संचयी प्रभाव एक **बल्क तटस्थ प्रवाह** है - जो प्रयोगकर्ता **आयनिक विंड** कहते हैं। गैस एमिटर से कलेक्टर तक चलता है, और इलेक्ट्रोड विपरीत प्रतिक्रिया थ्रस्ट का अनुभव करते हैं।

बहुत घनी हवा में, आयन बहुत बार टकराते हैं; उनकी ड्रिफ्ट वेग संतृप्त हो जाती है, और ऊर्जा गर्मी के रूप में खो जाती है। अत्यंत पतली हवा में, टकराव बहुत दुर्लभ हैं; आयन स्वतंत्र रूप से उड़ते हैं लेकिन तटस्थों को प्रभावी ढंग से नहीं खींचते। इन चरमों के बीच एक **स्वीट स्पॉट** है जहां औसत मुक्त पथ कुशल गति हस्तांतरण की अनुमति देता है - ठीक वह क्षेत्र जहां एयरशिप अंतरिक्ष की ओर अपना रास्ता पार करता है।

लगभग 10^{-2} से 10^{-4} बार के दबावों पर (40-80 किमी ऊंचाई के अनुरूप), आयन टकराने से पहले मैक्रोस्कोपिक दूरी पर तेज हो सकते हैं, फिर भी टकराव अभी भी थ्रस्ट उत्पन्न करने के लिए पर्याप्त बार-बार होते हैं। **इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक कपलिंग** क्षेत्र और गैस के बीच सबसे अनुकूल है।

पावर-थ्रस्ट संबंध

एक डिस्चार्ज को वितरित विद्युत शक्ति $P = \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV$ है, जो स्थिर धारा I और वोल्टेज V के लिए लगभग IV है। उपयोगी यांत्रिक आउटपुट तेज हवा द्रव्यमान की वेग से गुणा थ्रस्ट है, लेकिन स्टेडी-स्टेट प्रणोदन में हम मुख्य रूप से **थ्रस्ट-टू-पावर अनुपात**, T/P में रुचि रखते हैं।

अनुभवजन्य अध्ययनों ने T/P मूल्यों की रिपोर्ट की है जो कुछ मिली-न्यूटन प्रति वाट (mN/W) से लेकर अनुकूलित स्थितियों के तहत लगभग 0.1 N/W तक। वायुमंडलीय हवा में मानक दबाव पर, EAD अक्षम है; लेकिन कम दबावों पर, आयन गतिशीलता बढ़ जाती है और चालू घनत्व कम वोल्टेज पर बनाए रखा जा सकता है, T/P में सुधार करते हुए।

एक सरल आयामी तर्क बॉडी-फोर्स डेंसिटी $f = \rho_e E$ को चालू घनत्व $J = \rho_e \mu E$ से जोड़ता है, जहां μ आयन गतिशीलता है। फिर

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

इसलिए एक दिए गए चालू घनत्व के लिए, उच्च गतिशीलता (कम दबाव पर प्राप्त) चालू प्रति अधिक थ्रस्ट उत्पन्न करती है। कुल विद्युत शक्ति $P = JEV$ है, इसलिए **थ्रस्ट-टू-पावर** स्केल करता है

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

यह दर्शाते हुए कि कम विद्युत क्षेत्र या उच्च आयन गतिशीलता दक्षता बढ़ाते हैं। लेकिन कम E चालू और इसलिए कुल थ्रस्ट को भी कम करता है, इसलिए फिर से एक इष्टतम शासन है।

ये संबंध सैद्धांतिक जिज्ञासाएं नहीं हैं - वे प्रत्येक EAD टाइल के डिज़ाइन को निर्धारित करते हैं। एक दिए गए ऊंचाई पर, वोल्टेज, गैप दूरी, और एमिटर ज्यामिति को ठ्ठून किया जाना चाहिए ताकि **पाशेन कर्व** (जो ब्रेकडाउन वोल्टेज को दबाव-दूरी उत्पाद से जोड़ती है) संतुष्ट हो लेकिन अतिरेक न हो।

हवा के लिए पासचेन का नियम लगभग व्यक्त किया जा सकता है

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

जहां A और B अनुभवजन्य स्थिरांक और γ_{se} द्वितीयक इलेक्ट्रॉन उत्सर्जन गुणांक है। एयरशिप की परिवर्तनीय ज्यामिति d , इलेक्ट्रोड स्पेसिंग, को गतिशील रूप से समायोजित करने की अनुमति देती है ताकि चढ़ाई के दौरान आसपास के दबाव के गिरने पर कुशल कोरोना डिस्चार्ज को आर्किंग के बिना बनाए रखा जा सके।

फील्ड ज्यामिति और स्ट्रेस टोपोलॉजी

प्रारंभिक “लिफ्टर” प्रदर्शनों ने एक पतले तार को एमिटर और एक फ्लैट फॉयल को कलेक्टर के रूप में उपयोग किया। फील्ड लाइनें मजबूत वक्र थीं, और अधिकांश ऊर्जा कोरोना को बनाए रखने में चली गई न कि उपयोगी थ्रस्ट उत्पन्न करने में। दक्षता खराब थी क्योंकि **मैक्सवेल स्ट्रेस फील्ड** वांछित थ्रस्ट दिशा के साथ संरेखित नहीं था।

कुंजी अंतर्दृष्टि - MIT के आयनोप्लेन से पहले सैद्धांतिक कार्य में विकसित - विद्युत क्षेत्र को उपज के रूप में नहीं बल्कि प्राथमिक डिज़ाइन चर के रूप में व्यवहार करना था। थ्रस्ट फील्ड लाइनों के साथ इलेक्ट्रोमैग्नेटिक स्ट्रेस का **इंटीग्रल** से उत्पन्न होता है, इसलिए लक्ष्य उन लाइनों को आकार देना है ताकि वे एक व्यापक क्षेत्र में समानांतर और सुसंगत हों। सादृश्य वायुगतिकीय है: चिकना लामिनार प्रवाह ड्रैग को न्यूनतम करता है, चिकनी इलेक्ट्रोस्टैटिक फील्ड टोपोलॉजी निर्देशित स्ट्रेस को अधिकतम करती है।

यह “फील्ड-टोपोलॉजी इंजीनियरिंग” डिवाइस को एक **इलेक्ट्रोस्टैटिक एक्ट्यूएटर** के रूप में पुनः फ्रेम करता है न कि प्लाज्मा खिलौना। इलेक्ट्रोड वक्रता, गार्ड पोर्टेंशियल्स, और डाइलेक्ट्रिक लेयर्स को नियंत्रित करके, **E** को त्वरण पथ पर लगभग एकसमान बनाया जा सकता है, क्वासी-रैखिक स्ट्रेस उत्पन्न करते हुए और आर्किंग का कारण बनने वाले विनाशकारी सेल्फ-फोकस से बचते हुए।

परिणाम स्केलेबिलिटी है। जब इलेक्ट्रोडों को वर्ग-मीटर टाइल्स में टेसलेटेड किया जाता है, प्रत्येक अपने उच्च-वोल्टेज कन्वर्टर और नियंत्रण लॉजिक के साथ, पूर्ण एयरशिप लिफाफा एक विशाल वितरित EAD ऐरे में बदल सकता है। कोई चलित भागों को सिंक्रनाइज़ करने की आवश्यकता नहीं है, केवल क्षेत्रों को समन्वयित करने की।

थ्रस्ट डेंसिटी और स्केलेबिलिटी का रास्ता

वॉल्यूमेट्रिक बॉडी-फोर्स डेंसिटी $f = \rho_e E$ है। वायुमंडलीय दबाव पर एक सामान्य कोरोना डिस्चार्ज में चार्ज डेंसिटी 10^{-5} से 10^{-3} C/m^3 के क्रम की है। कम दबाव पर, यह थोड़ा गिर सकता है, लेकिन विद्युत क्षेत्र E को बिना ब्रेकडाउन के दसियों किलोवोल्ट प्रति सेंटीमीटर तक बढ़ाया जा सकता है।

यदि $\rho_e = 10^{-4} \text{ C/m}^3$ और $E = 10^5 \text{ V/m}$, तो फोर्स डेंसिटी $f = 10 \text{ N/m}^3$ है। 1 मीटर मोटी सक्रिय क्षेत्र पर फैला, यह 10 N/m^2 सतह दबाव देता है - कुछ मिलीपास्कल के बराबर। यह छोटा लग सकता है, लेकिन हजारों वर्ग मीटर पर यह महत्वपूर्ण हो जाता है। 10 N/m^2 स्ट्रेस के साथ 1000 m^2 सतह $10,000 \text{ N}$ थ्रस्ट उत्पन्न करती है, पर्याप्त एक मल्टी-टन वाहन को मिलीजी स्तरों पर त्वरित करने के लिए - ठीक हफ्तों लंबे कक्षा उठाने के लिए आवश्यक शासन।

ऐसी अनुमान बताते हैं कि EAD, अपनी कम पावर डेंसिटी के बावजूद, **बड़े, हल्के संरचनाओं** के लिए पतली हवा में व्यवहार्य हो जाता है। एक रॉकेट नोजल के विपरीत, जो केवल उच्च पावर डेंसिटी पर दक्षता प्राप्त करता है, EAD क्षेत्र से लाभ प्राप्त करता है। एयरशिप का लिफाफा प्रचुर क्षेत्र प्रदान करता है; इसे सक्रिय सतह में बदलना एक प्राकृतिक मैच है।

ऊपरी वायुमंडल की स्वीट जोन

हर भौतिक प्रणाली का एक संचालन निच होता है। EAD प्रणोदन के लिए, सर्वोत्तम शासन वह है जहां गैस दबाव उच्च वोल्टेज और लंबे आयन मुक्त पथों की अनुमति देने के लिए पर्याप्त कम है, लेकिन इतना कम नहीं कि प्लाज्मा टकराव-रहित हो जाए।

लगभग 20 किमी के नीचे, वायुमंडल बहुत घना है: आयन गतिशीलता कम, ब्रेकडाउन वोल्टेज उच्च, और ऊर्जा गैस को गर्म करने में बर्बाद हो जाती है। लगभग 100 किमी के ऊपर, हवा बहुत दुर्लभ हो जाती है: आयनाइजेशन को निरंतर बनाए रखा नहीं जा सकता, और तटस्थ प्रतिक्रिया द्रव्यमान गायब हो जाता है। लगभग 40 और 80 किमी के बीच एक **संक्रमण बैंड** है - निचली मेसोस्फीयर - जहां EAD प्रणोदन अपनी सर्वोत्तम थ्रस्ट-टू-पावर अनुपात उत्पन्न कर सकता है।

सुविधाजनक रूप से, यह वह ऊंचाई रेंज भी है जहां सौर पावर लगभग अपरिवर्तित रहती है और वायुगतिकीय ड्रैग समुद्र तल से आदेशों की परिमाण छोटा है। यह एक संकीर्ण लेकिन क्षमाशील खिड़की है, एक नया प्रकार के वाहन के लिए प्राकृतिक गलियारा: न तो विमान और न ही रॉकेट, बल्कि कुछ जो उनके बीच के ओवरलैप में रहता है।

दक्षता और ऊर्जा प्रवाह

किसी भी क्षण, विद्युत इनपुट पावर P में विभाजित है:

1. **उपयोगी यांत्रिक थ्रस्ट पावर** $P_T = T v_{\text{eff}}$, जहां v_{eff} हवा प्रवाह की प्रभावी निकास वेग है।
2. **आयनाइजेशन हानियां** P_i , प्लाज्मा को बनाए रखने के लिए आवश्यक ऊर्जा।
3. **प्रतिरोधी हानियां** P_r , ओमिक हीटिंग और रिसाव के कारण।
4. **विकिरण हानियां** P_γ , प्रकाश के रूप में उत्सर्जित (परिचित कोरोना चमक)।

कुल दक्षता $\eta = P_T/P$ है। प्रयोग सुझाव देते हैं कि η घनी हवा में कुछ प्रतिशत तक पहुंच सकता है और अनुकूलित निम्न-दबाव संचालन में संभावित रूप से दसियों प्रतिशत। हालांकि विनम्र, ये संख्याएं लंबी अवधियों पर संचालित सौर-संचालित प्रणाली के लिए पर्याप्त हैं, जहां दक्षता को समय के खिलाफ व्यापार किया जा सकता है।

रासायनिक प्रणोदन के विपरीत, जो ईंधन को कम करने के लिए प्रति सेकंड उच्च दक्षता प्राप्त करनी चाहिए, एक सौर EAD एयरशिप अक्षमता वहन कर सकता है यदि यह **अनिश्चित काल तक संचालित** हो सके। सफलता का मेट्रिक विशिष्ट आवेग नहीं बल्कि **विशिष्ट धैर्य** है: दिनों पर संचित जूल।

मैक्सवेल स्ट्रेस से मैक्रोस्कोपिक थ्रस्ट तक

फील्ड थ्योरी और रोजमर्रा के अनुभव के बीच कनेक्शन को चित्रित करने के लिए, वैक्यूम में पैरेलल-प्लेट कैपेसिटर पर विचार करें। प्लेटों के बीच दबाव $p = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$ है। यदि $E = 10^6 \text{ V/m}$, तो $p \approx 4.4 \text{ N/m}^2$ । क्षेत्र से गुणा करें, और आपको प्लेटों को अलग करने के लिए आवश्यक यांत्रिक फोर्स मिलती है। इलेक्ट्रोस्टैटिक स्ट्रेस शाब्दिक रूप से यांत्रिक दबाव है।

EAD प्रणोदन एक प्लेट को वायुमंडल स्वयं से बदल देता है। आयन वे माध्यम हैं जिनके माध्यम से फील्ड का स्ट्रेस ट्रांसमिट होता है। स्थिर दबाव के बजाय, हम दिशात्मक प्रवाह प्राप्त करते हैं। समीकरण $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ उस स्थिर कैपेसिटर दबाव का गतिशील सादृश्य है।

जब एयरशिप की सतह पर योग किया जाता है, तो एकीकृत स्ट्रेस एक शुद्ध थ्रस्ट वेक्टर बन जाता है, ठीक वैसे ही जैसे एक विंग की सतह पर एकीकृत दबाव लिफ्ट उत्पन्न करता है। सादृश्य गहरा है: वायुगतिकीय लिफ्ट एक सतह द्वारा विचलित हवा का गति फ्लक्स है; EAD थ्रस्ट एक क्षेत्र द्वारा तेज आयनों का गति फ्लक्स है।

MIT आयनोप्लेन और प्रयोगात्मक प्रमाण

दशकों के लिए, संशयवादी EAD को प्रयोगशाला जिज्ञासा के रूप में खारिज करते रहे। फिर, 2018 में, MIT द्वारा निर्मित एक छोटा फिक्स्ड-विंग विमान ने **स्थिर, प्रोपेलर रहित उड़ान** को केवल इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक थ्रस्ट से प्रदर्शित किया। “आयनोप्लेन” का वजन लगभग 2.5 किलोग्राम था और बैटरी पावर के तहत दर्जनों मीटर उड़ा। इसका थ्रस्ट-टू-वेट अनुपात छोटा था, लेकिन उपलब्धि ऐतिहासिक थी: पहला हवा से भारी वाहन जो आयनिक प्रणोदन द्वारा उड़ान में बनाए रखा गया।

महत्वपूर्ण रूप से, उस प्रदर्शन का नेतृत्व करने वाली सिद्धांत और वैचारिक आधार पहले से ही स्वतंत्र रूप से विकास में थे। **इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक प्रणोदन** में प्रस्तुत सैद्धांतिक फ्रेमवर्क ने **मैक्सवेल स्ट्रेस** और **कूलॉम्ब बॉडी फोर्स** के शब्दों में समान तंत्र का वर्णन किया था वर्षों पहले, कोरोना रसायन विज्ञान के बजाय फील्ड टोपोलॉजी और स्केलेबिलिटी पर जोर देते हुए।

MIT आयनोप्लेन ने घनी हवा में प्रभाव की व्यावहारिकता साबित की। Rise-Fly-Orbit परियोजना इसे पतली हवा में विस्तारित करने का लक्ष्य रखती है, जहां भौतिकी और भी अनुकूल हो जाती है। यदि एक छोटा विमान 1 बार पर उड़ सकता है, तो एक सौर एयरशिप माइक्रोबार पर कक्षा में उड़ सकता है, पर्याप्त धैर्य और सूर्य की रोशनी दिए गए।

सरलता का गुण

EAD प्रणोदन अवधारणात्मक रूप से सुंदर है: कोई चलित भाग नहीं, कोई दहन नहीं, कोई उच्च-गति निकास नहीं, कोई क्रायोजेनिक्स नहीं। इसके घटक स्वाभाविक रूप से मजबूत हैं - इलेक्ट्रोड, डाइलेक्ट्रिक, पावर कन्वर्टर, और फोटोवोल्टेइक स्किन्स। प्रणाली क्षेत्र के साथ स्वाभाविक रूप से स्केल करती है, द्रव्यमान के साथ नहीं।

तकनीकी चुनौती थर्मोडायनामिक्स से **विद्युत इंजीनियरिंग और सामग्री विज्ञान** में स्थानांतरित हो जाती है: कोरोना क्षरण को रोकना, चार्ज रिसाव प्रबंधन करना, और विभिन्न दबावों में उच्च-वोल्टेज अलगाव बनाए रखना। ये आधुनिक सामग्रियों और माइक्रोइलेक्ट्रॉनिक्स के साथ हल करने योग्य हैं।

चूंकि EAD तंत्र केवल फील्ड ज्यामिति और आयन गतिशीलता पर निर्भर करता है, यह **आंतरिक रूप से मॉड्यूलर** है। एयरशिप की त्वचा का प्रत्येक वर्ग मीटर T/P और वोल्टेज विशेषताओं के साथ ज्ञात एक टाइल के रूप में व्यवहार किया जा सकता है। वाहन का कुल थ्रस्ट हजारों स्वतंत्र टाइल्स का वेक्टर योग है। यह मॉड्यूलरिटी सुंदर गिरावट की अनुमति देती है - कुछ मॉड्यूल्स की विफलता पूरे यान को समझौता नहीं करती।

इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक एयरशिप एक सिस्टम के रूप में

सौर पावर से जुड़े होने पर, EAD प्रणोदन न केवल एक थ्रस्ट स्रोत बन जाता है बल्कि वाहन के लिए एक **जलवायु प्रणाली** भी। वे ही क्षेत्र जो थ्रस्ट उत्पन्न करते हैं वे ट्रेस गैसों को आयनित भी करते हैं, सतह चार्ज को कम करते हैं, और संभावित रूप से सीमा-स्तर गुणों को प्रभावित करते हैं। विद्युत क्षेत्र यहां तक कि एक ट्यूनेबल "इलेक्ट्रोस्टैटिक सेल" के रूप में कार्य कर सकता है, जो पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र या ऊपरी वायुमंडल में आसपास के प्लाज्मा के साथ कमजोर रूप से बातचीत करता है।

दीर्घकालिक रूप से, सतह चार्ज वितरणों को मैनिपुलेट करके ड्रैग का सक्रिय नियंत्रण कल्पना की जा सकती है - एक **इलेक्ट्रोडायनामिक ड्रैग शील्ड** जो स्थानीय फील्ड स्ट्रेस को बदलता है ताकि यांत्रिक नियंत्रण सतहों के बिना उड़ान पथ को ट्रिम किया जा सके।

ये संभावनाएं EAD प्रणोदन को एक जिज्ञासा से आगे बढ़ाती हैं सामान्य-उद्देश्य, ठोस-राज्य उड़ान नियंत्रण प्रौद्योगिकी के क्षेत्र में - जहां भी गैस या प्लाज्मा विद्युत क्षेत्रों द्वारा ध्रुवीकृत और त्वरित हो सकते हैं, लागू।

इंजीनियरिंग आर्किटेक्चर और फ्लाइट डायनामिक्स

Rise-Fly-Orbit अवधारणा का मौलिक लाभ विदेशी सामग्रियों या क्रांतिकारी भौतिकी में नहीं बल्कि **परिचित सिद्धांतों के पुनःक्रमण** में निहित है। उछाल, सौर ऊर्जा, और इलेक्ट्रोस्टैटिक्स सभी अच्छी तरह से समझे जाते हैं। नया है वे एकल निरंतरता में कैसे क्रमबद्ध हैं: **एक चढ़ाई बिना असातत्य के क्षण**।

रॉकेट अलग-अलग शासनों से गुजरते हैं - लॉन्च, बर्नआउट, कोस्ट, कक्षा। इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक एयरशिप, इसके विपरीत, केवल धीरे-धीरे संक्रमणों का अनुभव करता है। यह हल्केपन से ऊपर उठता है, लिफ्ट से उड़ता है, और जड़ता से कक्षा में प्रवेश करता है। हर चरण अगले में मिश्रित हो जाता है, उछाल, वायुगतिकीय, और इलेक्ट्रोस्टैटिक बलों के समान स्थिर अंतर्क्रिया द्वारा शासित।

लिफाफा: संरचना वायुमंडल के रूप में

एयरशिप का लिफाफा विरोधाभासी मांगों को संतुष्ट करना चाहिए: यह **हल्का और मजबूत** दोनों होना चाहिए, **चालक और इन्सुलेटिंग**, **सूर्य की रोशनी के लिए पारदर्शी लेकिन विकिरण प्रतिरोधी**। ये लेयर्ड निर्माण के माध्यम से सुलझाने योग्य हैं।

बाहरी परत एक **धातुयुक्त पॉलीमर** हो सकती है - उदाहरण के लिए, एल्यूमिनाइज्ड कैप्टन या पॉलीएथिलीन टेरेफ्थालेट की पतली फिल्म। यह परत UV शील्डिंग प्रदान करती है और EAD टाइल्स के लिए आंशिक इलेक्ट्रोड सतह के रूप में कार्य करती है। इसके नीचे एक **डाइलेक्ट्रिक परत** है जो अवांछित डिस्चार्ज को रोकती है और आंतरिक कलेक्टर इलेक्ट्रोड के लिए गैप को परिभाषित करती है। आंतरिक संरचना तनावपूर्ण झिल्लियों और स्पार्स का नेटवर्क है जो छोटे आंतरिक ओवरप्रेसर पर समग्र ज्यामिति को बनाए रखता है, $\Delta p \approx 300 \text{ Pa}$ के क्रम का - वायुमंडलीय दबाव के केवल कुछ हजारवें।

यह ओवरप्रेसर लिफाफे को तनावपूर्ण रखने के लिए पर्याप्त है लेकिन महत्वपूर्ण संरचनात्मक द्रव्यमान का कारण नहीं बनता। प्रभावी रूप से, पूरा वाहन एक विशाल, हल्का कैपेसिटर है, इसकी त्वचा चार्ज्ड और फील्ड लाइनों से जीवंत।

आंतरिक आयतन एक लिफ्टिंग गैस से भरा है - हाइड्रोजन या हीलियम। चूंकि आवश्यक ओवरप्रेसर छोटा है, सामग्री पर लोड-बेयरिंग मांगें विनम्र हैं। मुख्य चुनौती लंबी मिशनों पर गैस पारगम्यता और UV अपघटन है, दोनों आधुनिक कोटिंग्स और लेयर्ड फिल्मों से संबोधनीय।

हाइड्रोजन या हीलियम

गैस का चयन वाहन के व्यक्तित्व को आकार देता है।

हाइड्रोजन सबसे अधिक लिफ्ट प्रदान करता है, हीलियम से लगभग 10% अधिक उछाल। जब कुल आयतन लाखों घन मीटर तक पहुंचता है तो यह अंतर महत्वपूर्ण हो जाता है। हाइड्रोजन स्रोत करने में भी आसान है और यहां तक कि सौर-संचालित जल के इलेक्ट्रोलिसिस द्वारा इन सिटू उत्पन्न किया जा सकता है। इसका नुकसान, निश्चित रूप से, ज्वलनशीलता है।

उच्च-वोल्टेज इलेक्ट्रोस्टैटिक्स की उपस्थिति हाइड्रोजन प्रबंधन को गैर-ट्रिवियल बनाती है। सुरक्षा सावधानीपूर्वक कम्पार्टमेंटलाइजेशन, इलेक्ट्रोस्टैटिक शील्डिंग, और वेंटिलेशन पर निर्भर करती है। EAD मॉड्यूल स्वयं सील्ड हैं और डाइलेक्ट्रिक बैरियर्स द्वारा गैस सेल्स से अलग हैं, और हल पर पोर्टेशियल अंतर सममित चार्ज वितरण द्वारा न्यूनतम किए जाते हैं।

हीलियम, इसके विपरीत, निष्क्रिय और सुरक्षित है लेकिन कम लिफ्ट और उच्च लागत प्रदान करता है। इसका मुख्य दोष कमी है; बड़े पैमाने पर उपयोग आपूर्ति को तनाव दे सकता है। प्रारंभिक परीक्षण वाहनों और सार्वजनिक प्रदर्शन उड़ानों के लिए, हीलियम विवेकपूर्ण विकल्प है। दूरस्थ गलियारों में परिचालन कक्षीय प्रयासों के लिए, हाइड्रोजन प्रदर्शन और लागत द्वारा उचित हो सकता है।

किसी भी तरह, लिफाफा डिज़ाइन बड़े पैमाने पर संगत है; केवल गैस-हैंडलिंग और सुरक्षा प्रणालियां भिन्न हैं।

सौर ऊर्जा और ऊर्जा प्रबंधन

सूर्य यान का इंजन है। प्रत्येक वाट विद्युत ऊर्जा फोटोवोल्टेइक स्किन द्वारा अवशोषित सूर्य की रोशनी के रूप में शुरू होता है।

उच्च-दक्षता, अल्ट्रालाइट फोटोवोल्टेइक - एयरशिप सतह पर लैमिनेटेड पतली-फिल्म गैलियम-आर्सेनाइड या पेरोव्स्काइट कंपोजिट्स - प्रति किलोग्राम 300-400 W की विशिष्ट शक्तियां प्राप्त कर सकते हैं। एरे एयरोडायनामिक चिकनाई बनाए रखने के लिए कन्फॉर्मली व्यवस्थित हैं। पावर मैनेजमेंट वितरित है: प्रत्येक पैनल सेक्शन एक स्थानीय अधिकतम पावर पॉइंट ट्रैकर (MPPT) को खिलाता है जो EAD टाइल्स को आपूर्ति करने वाले उच्च-वोल्टेज बस को वोल्टेज विनियमित करता है।

चूंकि वाहन दिन-रात चक्रों का अनुभव करता है, यह एक विनम्र **ऊर्जा बफर** ले जाता है - हल्की बैटरी या सुपरकैपेसिटर्स - अंधेरे के माध्यम से निम्न-स्तर संचालन को बनाए रखने के लिए। लेकिन ये बड़े नहीं हैं; प्रणाली का डिज़ाइन दर्शन **प्रत्यक्ष सौर ड्राइव** है, न कि संग्रहीत ऊर्जा। कक्षीय ऊंचाइयों पर, यान लगभग निरंतर सूर्य की रोशनी का पीछा कर सकता है, केवल संक्षेप में इक्लिप्स में डुबकी लगाते हुए।

थर्मल कंट्रोल विकिरणात्मक रूप से संभाला जाता है। उच्च ऊंचाई पर नगण्य संवहन के साथ, गर्मी अस्वीकृति **उच्च-एमिसिविटी सतहों** और रेडिएटर्स को चालन पथों पर निर्भर करती है। सौभाग्य से, EAD प्रक्रिया अपेक्षाकृत ठंडी है - कोई दहन नहीं - और मुख्य थर्मल लोड अवशोषित सूर्य की रोशनी से है।

इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक टाइल्स

लिफाफे का प्रत्येक वर्ग मीटर एक **EAD टाइल** के रूप में कार्य करता है - एक स्व-निहित प्रणोदन सेल जिसमें एक एमिटर, एक कलेक्टर, और एक छोटा नियंत्रण सर्किट शामिल है। एमिटर तेज बिंदुओं या तारों का एक महीन ग्रिड उच्च सकारात्मक पोर्टेशियल पर हो सकता है, जबकि कलेक्टर ग्राउंड या नकारात्मक पोर्टेशियल पर आयोजित एक व्यापक जाल है। बीच का स्थान एक नियंत्रित डिस्चार्ज क्षेत्र है।

जब ऊर्जावान किया गया, टाइल एक विद्युत क्षेत्र E स्थापित करती है, एक चार्ज डेंसिटी ρ_e उत्पन्न करती है, और सतह के साथ स्पर्शी दिशा में एक स्थानीय थ्रस्ट $f = \rho_e E$ उत्पन्न करती है। विभिन्न टाइल्स पर वोल्टेज को मॉड्युलेट करके, एयरशिप बिना चलित भागों के स्टीयर, पिच, और रोल कर सकता है।

अनुकूली ज्यामिति कुंजी है। आसपास के दबाव के साथ ऊंचाई के साथ गिरने पर, मुक्त पथ औसत बढ़ जाता है। कुशल डिस्चार्ज बनाए रखने के लिए, एमिटर और कलेक्टर के बीच प्रभावी गैप दूरी d लगभग $1/p$ के अनुपात में बढ़नी चाहिए।

यह लचीली, फुलाने योग्य डाइलेक्ट्रिक स्पेसर्स द्वारा प्राप्त किया जा सकता है जो बाहरी दबाव गिरने पर थोड़ा विस्तार करते हैं, या इलेक्ट्रॉनिक मॉड्युलेशन द्वारा पोटेंशियल ग्रेडिएंट्स को बड़े गैप्स का अनुकरण करने के लिए।

हर टाइल टेलीमेट्री रिपोर्ट करती है - चालू, वोल्टेज, आर्क काउंट्स - एक केंद्रीय नियंत्रक को। यदि एक टाइल आर्किंग या गिरावट का अनुभव करती है, तो इसे बंद कर दिया जाता है और बायपास किया जाता है। मॉड्यूलर डिज़ाइन का मतलब है कि व्यक्तिगत टाइल्स का नुकसान कुल थ्रस्ट को मुश्किल से प्रभावित करता है।

उछाल से थ्रस्ट तक

उड़ान धीरे से शुरू होती है। लॉन्च पर, एयरशिप स्ट्रेटोस्फीयर में उछाल से ऊपर उठता है। चढ़ाई के दौरान, EAD सिस्टम कम-शक्ति मोड में संचालित होता है, स्थिरीकरण और ड्रिफ्ट नियंत्रण के लिए मामूली थ्रस्ट प्रदान करता है।

लगभग 30-40 किमी ऊंचाई पर, जहां हवा पतली लेकिन अभी भी टकरावपूर्ण है, मुख्य त्वरण शुरू होता है। एयरशिप धीरे-धीरे क्षैतिज उड़ान की ओर मुड़ता है, अपनी लंबी अक्ष को इच्छित कक्षीय गति की दिशा में उन्मुख करता है।

प्रारंभ में, थ्रस्ट क्षैतिज त्वरण और लिफ्ट वृद्धि के बीच संतुलित होता है। वाहन का शेष उछाल उसके वजन का अधिकांश ऑफसेट करता है; EAD थ्रस्ट आगे और थोड़ा ऊपर की दोनों घटक प्रदान करता है। जैसे ही वेग बढ़ता है, गतिशील लिफ्ट बढ़ती है और उछाल नगण्य हो जाती है। संक्रमण चिकना है - कोई “टेकऑफ मोमेंट” नहीं है क्योंकि एयरशिप कभी रनवे पर बैठा ही नहीं था।

तीन-सप्ताह की चढ़ाई

एक प्रतिनिधि वाहन द्रव्यमान $m = 2000 \text{ kg}$ पर विचार करें। $t = 1.8 \times 10^6 \text{ s}$ (तीन सप्ताह) में $v = 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$ कक्षीय वेग प्राप्त करने के लिए, आवश्यक औसत थ्रस्ट है

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

आठ न्यूटन - एक छोटे संतरे का वजन - कक्षा तक पहुंचने के लिए आवश्यक कुल थ्रस्ट है यदि तीन सप्ताह तक लगातार लागू किया जाए।

यदि सिस्टम का T/P 0.03 N/W है, कम दबाव पर कुशल EAD संचालन का विशिष्ट, तो 8.7 N उत्पन्न करने के लिए केवल लगभग 290 W शक्ति की आवश्यकता है। यह आश्चर्यजनक रूप से छोटा लगता है, और व्यवहार में, अतिरिक्त ड्रैग हानियां आवश्यकता को दसियों किलोवाट तक बढ़ा देंगी। लेकिन कुछ सौ वर्ग मीटर को कवर करने वाले सौर पैनल इसे आसानी से प्रदान कर सकते हैं।

अक्षमताओं और ड्रैग के लिए 100 का सुरक्षा कारक शामिल करें: लगभग 30 kW विद्युत शक्ति। सूर्य की रोशनी से थ्रस्ट तक 15% समग्र दक्षता के साथ, वाहन को लगभग 200 kW सौर पावर कटाई करनी चाहिए। यह 300 W/m² आउटपुट पर लगभग 700 वर्ग मीटर सक्रिय सौर क्षेत्र के अनुरूप है - एक फुटबॉल फील्ड से छोटा क्षेत्र, 100 मीटर लंबे एयरशिप पर आसानी से एकीकृत।

यह सरल अंकगणित दर्शाता है कि ऊर्जा प्रवाह संभव है। रॉकेट जो पावर डेंसिटी से प्राप्त करते हैं, एयरशिप धैर्य और क्षेत्र से प्राप्त करता है।

ड्रैग और उच्च-ऊंचाई गलियारा

ड्रैग मुख्य ऊर्जा सिंक बना रहता है। ड्रैग फोर्स $F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D$ है, और संबंधित पावर $P_D = F_D v = \frac{1}{2} \rho v^3 A C_D$ ।

50 किमी पर, $\rho \approx 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ । यदि $A = 100 \text{ m}^2$, $C_D = 0.05$, और $v = 1000 \text{ m/s}$, तो

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

यह 2.5 मेगावाट है - बहुत अधिक। लेकिन 70 किमी पर, जहां $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$, वही कॉन्फिगरेशन केवल 25 kW ड्रैग पावर उत्पन्न करता है। इसलिए रणनीति: **त्वरित करते हुए चढ़ें**, एक ऐसी ट्रेजेक्टरी पर रहें जहां ρv^3 लगभग स्थिर रहे।

इष्टतम गलियारा धीरे-धीरे पतली हवा का है, शायद 40-80 किमी ऊंचाई, जहां वायुमंडल EAD कार्य करने के लिए पर्याप्त तटस्थ घनत्व प्रदान करता है लेकिन ड्रैग प्रबंधनीय रखने के लिए पर्याप्त कम।

वाहन नियंत्रण और स्थिरता

बिना प्रोपेलर या फिन्स के, स्थिरता फील्ड सममिति से आती है। टाइल्स की डिफरेंशियल सक्रियण टॉर्क प्रदान करती है। यदि बाएं सामने की टाइल्स दाएं से थोड़ा अधिक थ्रस्ट उत्पन्न करती हैं, तो यान धीरे से यॉव करता है। पिच नियंत्रण ऊपरी और निचली टाइल्स को पूर्वाग्रह देकर प्राप्त किया जाता है। चूंकि प्रति टाइल थ्रस्ट छोटा है, प्रतिक्रिया धीमी है, लेकिन यान एक ऐसे शासन में संचालित होता है जहां चपलता अनावश्यक है।

अटिट्यूड सेंसर - जायरोस्कोप, एक्सेलेरोमीटर, स्टार ट्रैकर्स - एक डिजिटल नियंत्रण प्रणाली को खिलाते हैं जो अधिकतम सौर घटना और सही उड़ान पथ के लिए अभिविन्यास बनाए रखता है। वाहन का विशाल आकार और धीमा उड़ान शासन इसे उल्लेखनीय रूप से स्थिर बनाता है।

थर्मल और विद्युत सुरक्षा

EAD संचालन दर्जों से सैकड़ों किलोवोल्ट कम चालू पर शामिल है। स्ट्रेटोस्फीयर की पतली, शुष्क हवा में, इन्सुलेशन अलग व्यवहार करता है: आर्क सतहों पर लंबी दूरी पर प्रचारित हो सकते हैं। एयरशिप का विद्युत डिज़ाइन इसलिए पूरी संरचना को एक नियंत्रित पोटेंशियल सिस्टम के रूप में मानता है। चालक पथ अतिरिक्त हैं, गैस सेल्स को HV लाइनों से अलग करने वाली इन्सुलेशन लेयर्स के साथ।

आर्क विनाशकारी नहीं हैं - वे स्थानीय और स्व-बुझाने वाले होने का झुकाव रखते हैं - लेकिन वे इलेक्ट्रोड को नुकसान पहुंचा सकते हैं। प्रत्येक टाइल अपनी चालू वेवफॉर्म की निगरानी करती है; यदि एक डिस्चार्ज स्पाइक, नियंत्रक वोल्टेज को कम करता है या प्रभावित मॉड्यूल को कई सेकंड के लिए स्विच ऑफ करता है।

थर्मली, उच्च ऊंचाई पर संवहन की अनुपस्थिति का मतलब है कि कोई भी स्थानीय हीटिंग को चालकता द्वारा रेडिएटिव पैनल्स को फैलाना चाहिए। सामग्रियां उच्च एमिसिविटी और इन्फ्रारेड में कम अवशोषण के लिए चुनी जाती हैं, अतिरिक्त गर्मी को अंतरिक्ष में विकिरण करने की अनुमति देती हैं।

स्केलिंग और मॉड्यूलरिटी

सिस्टम टाइलिंग द्वारा स्केल होता है, न कि वोल्टेज बढ़ाकर। टाइल्स की संख्या दोगुनी करने से थ्रस्ट दोगुना हो जाता है; बड़े डिस्चार्ज की कोई आवश्यकता नहीं है। यह आर्किटेक्चर को **रैखिक रूप से स्केलेबल** बनाता है प्रयोगशाला मॉडलों से कक्षीय वाहनों तक।

एक व्यावहारिक प्रोटोटाइप एक छोटे, हीलियम-भरे प्लेटफॉर्म के रूप में शुरू हो सकता है जिसमें दर्जन वर्ग मीटर EAD सतह है, घंटों पर मापे गए मिली-न्यूटन थ्रस्ट उत्पन्न करता है। बड़े प्रदर्शक अनुसरण कर सकते हैं, प्रत्येक क्षेत्र और शक्ति में विस्तारित। अंतिम कक्षीय संस्करण सैकड़ों मीटर फैल सकता है, हजारों स्वतंत्र रूप से नियंत्रित टाइल्स के साथ, पूर्ण सौर पावर के तहत महीनों तक संचालित।

चूंकि सभी घटक ठोस-राज्य हैं, प्रणाली में अंतर्निहित लंबा सेवा जीवन है। कोई टरबाइन बेयरिंग या दहन चक्र घिसाव के लिए नहीं हैं - केवल धीमी इलेक्ट्रोड क्षरण और सामग्री उम्र बढ़ना। सावधानीपूर्वक डिज़ाइन के साथ, विफलताओं के बीच औसत समय वर्षों तक पहुंच सकता है।

चढ़ाई प्रोफाइल और ऊंचाई संक्रमण

पूर्ण मिशन को (v, ρ) विमान में एक चिकनी सर्पिल के रूप में कल्पना की जा सकती है: वेग बढ़ने के साथ, घनत्व घटता है। पथ ऐसा चुना जाता है कि उत्पाद ρv^3 - जो ड्रैग पावर निर्धारित करता है - सौर प्रणाली द्वारा आपूर्ति की जा सकने योग्य थ्रेशोल्ड के नीचे रहे।

1. **उछाल चढ़ाई** 30-40 किमी तक।
2. **त्वरण चरण:** पिच और ऊंचाई समायोजित करके लगभग $P_D \approx 20-50 \text{ kW}$ बनाए रखें।
3. **कक्षीय शासन में संक्रमण:** 70 किमी से ऊपर, लिफ्ट और उछाल गायब हो जाते हैं, और एयरशिप प्रभावी रूप से एक उपग्रह बन जाता है जो अभी भी वायुमंडल को चराता है।

“उड़ान” से “कक्षा” में संक्रमण एक तेज सीमा नहीं है। वायुमंडल धीरे-धीरे फीका पड़ता है; थ्रस्ट ड्रैग के लिए मुआवजा करता है जब तक ड्रैग मायने न रखे। वाहन का पथ बैलिस्टिक के बजाय वृत्ताकार हो जाता है, और यह अनिश्चित काल तक ऊपर रहता है।

ऊर्जा संतुलन और सहनशीलता

पूर्ण चढ़ाई पर एकीकृत, सूर्य से कुल ऊर्जा इनपुट आवश्यक से विशाल है। यहां तक कि 100 kW के विनम्र संग्रह दर पर, तीन सप्ताह निरंतर संचालन संचित करता है

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

2000 किग्रा वाहन के लिए, यह **90 MJ/kg** है - कक्षीय गतिज ऊर्जा आवश्यकता का तीन गुना। इस ऊर्जा का अधिकांश ड्रैग और अक्षमताओं को खो जाएगा, लेकिन मार्जिन उदार है।

यह सौर धैर्य का शांत जादू है: जब समय को फैलाने की अनुमति दी जाती है, तो ऊर्जा प्रचुरता पावर की कमी को बदल देती है।

रखरखाव, रिटर्न, और पुनः उपयोग

अपनी कक्षीय मिशन को पूरा करने के बाद, एयरशिप धीरे-धीरे अपने EAD फील्ड पोलैरिटी को उलटकर डीसेलेरेट कर सकता है। यह उतरते समय ड्रैग बढ़ता है; जो तंत्र ने इसे उठाया वह अब ब्रेक के रूप में कार्य करता है। वाहन स्ट्रेटोस्फीयर में पुनः प्रवेश कर सकता है और शेष उछाल के तहत तैर सकता है।

चूंकि कोई खर्च करने योग्य चरण फेंके नहीं जाते, प्रणाली **पूरी तरह से पुनः उपयोग योग्य** है। लिफाफे को सर्विस किया जा सकता है, फिर से गैस भरा जा सकता है, और फिर से लॉन्च किया जा सकता है। रखरखाव में गिरावट टाइल्स या फिल्मों को बदलना शामिल है न कि इंजनों को पुनः निर्माण करना।

रासायनिक रॉकेटों के विपरीत, जहां हर लॉन्च टैंक्स और प्रणोदक खपत करता है, EAD एयरशिप एक **ऊर्जा-रीसाइक्लिंग स्पेसक्राफ्ट** है। सूर्य इसे निरंतर रिफ्यूल करता है; केवल घिसाव और आंसू मानव हस्तक्षेप की आवश्यकता है।

व्यापक इंजीनियरिंग महत्व

एक सौर EAD एयरशिप को सक्षम करने वाली समान प्रौद्योगिकियां - हल्के फोटोवोल्टेइक, उच्च-वोल्टेज पावर इलेक्ट्रॉनिक्स, पतली-फिल्म डाइलेक्ट्रिक - तत्काल स्थलीय अनुप्रयोगों की हैं। स्ट्रेटोस्फेरिक संचार प्लेटफॉर्म, उच्च-ऊंचाई जलवायु सेंसर, और लंबी-धैर्य ड्रोन सभी समान विकासों से लाभान्वित होते हैं।

एक ईंधन-रहित कक्षा तक पहुंचने में सक्षम प्रणाली का पीछा करके, हम एक नई कक्षा के **ठोस-राज्य हवाई वाहनों** का आविष्कार भी करते हैं - मशीनें जो दहन से नहीं बल्कि फील्ड मैनिपुलेशन से उड़ती हैं।

इस अर्थ में, Rise-Fly-Orbit परियोजना Wright Flyer और पहली तरल-ईंधन रॉकेट्स की एक वंशावली में बैठती है: न तो एक परिपूर्ण प्रौद्योगिकी, बल्कि एक **सिद्धांत का प्रमाण** जो “उड़ान” का अर्थ बदल देता है।

विनियमन, रणनीति, और धीमी चढ़ाई की दर्शन

एक सौर इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक एयरशिप की भौतिकी अनुमतिप्रद है; कानून नहीं है। आज की उड़ान नियम आकाश को साफ-साफ बंधे डोमेन में विभाजित करते हैं: **वायु क्षेत्र** विमानन कानून द्वारा शासित, और **बाहरी अंतरिक्ष** अंतरिक्ष कानून द्वारा शासित। उनके बीच एक ग्रे क्षेत्र है - विमान प्रमाणीकरण के लिए बहुत ऊंचा, कक्षीय पंजीकरण के लिए बहुत नीचा। कक्षा के लिए एयरशिप ठीक उस ग्रे में रहता है, उन ऊंचाइयों के माध्यम से निरंतर चलता है जो, कागज पर, किसी भी श्रेणी से संबंधित नहीं हैं।

क्यों यह “असंभव” है

वायु क्षेत्र कायदे घंटों में टेकऑफ और लैंडिंग करने वाले वाहनों को मानते हैं। वे प्रमाणित इंजन, वायुगतिकीय नियंत्रण सतहें, और ट्रेफिक को देने की क्षमता की आवश्यकता है। इनमें से कोई भी धारणा एक स्वायत्त, सौर-संचालित गुब्बारे के अनुरूप नहीं है जो 60 किमी से ऊपर हफ्तों तक लिंगर कर सकता है।

लॉन्च-वाहन विनियम रॉकेट फायरिंग जहां शुरू होते हैं: एक विवेकपूर्ण इग्निशन, एक लॉन्च साइट, और एक फ्लाइट-टर्मिनेशन सिस्टम जो विस्फोटों को शामिल करने के लिए डिज़ाइन किया गया है। हमारा एयरशिप इनमें से कोई नहीं है। यह बादल की तरह धीरे से चढ़ता है; कोई “लॉन्च मोमेंट” नहीं है। फिर भी क्योंकि यह अंततः Mach 1 से अधिक हो जाएगा और कक्षीय वेग प्राप्त करेगा, यह अंतरिक्ष उड़ान क्षेत्राधिकार के तहत आता है। परिणाम विरोधाभासी है: यह कानूनी रूप से विमान के रूप में उड़ नहीं सकता, फिर भी इसे उस रॉकेट के रूप में लाइसेंस प्राप्त करना चाहिए जिससे यह मिलता-जुलता नहीं है।

एक हाइब्रिड एटमॉस्फेरिक-ऑर्बिटल वाहन वर्ग

उपचार एक नई श्रेणी को मान्यता देना है - एक **हाइब्रिड एटमॉस्फेरिक-ऑर्बिटल वाहन (HAOV)**। इसकी परिभाषित विशेषताएं होंगी:

- **निरंतर डोमेन क्रॉसिंग:** सतह से निकट-अंतरिक्ष तक चढ़ाई बिना विवेकपूर्ण स्टेजिंग के।
- **कम गतिज ऊर्जा फ्लक्स:** वायुमंडल के साथ कुल गति विनियम रॉकेट्स के उससे कई आदेशों की परिमाण नीचे।
- **निष्क्रिय फेल-सेफ व्यवहार:** पावर हानि पर, क्राफ्ट ड्रिफ्ट और उतरता है; यह बैलिस्टिक रूप से नहीं गिरता।
- **सहयोगी ट्रेकिंग:** हमेशा रडार और सैटेलाइट सेंसरों के लिए दृश्यमान, अपना स्टेट वेक्टर प्रसारित करता है जैसे विमानों के लिए ADS-B ट्रांसपॉन्डर करते हैं।

HAOV फ्रेमवर्क इस तरह के क्राफ्ट की प्रमाणीकरण **प्रदर्शन-आधारित** मानदंडों के तहत अनुमति देगा न कि **हार्डवेयर-आधारित** - इंजनों या ईंधन की उपस्थिति के बजाय ऊर्जा रिलीज, ग्राउंड फुटप्रिंट, और स्वायत्त उतराई क्षमता के संदर्भ में सुरक्षा को परिभाषित करना।

महासागरीय या रेगिस्तानी **गलियारों** को नामित किया जा सकता है जहां HAOV निरंतर संचालित हो सकते हैं, मौजूदा स्पेस-ट्रेफिक नेटवर्क द्वारा निगरानी की जाती है। उनकी चढ़ाई एक मौसम गुब्बारे से कम खतरा विमानन को पैदा करेगी, फिर भी वर्तमान नियम उन्हें कोई पथ नहीं देते।

धैर्य की राजनीति

विनियमन संस्कृति का अनुसरण करता है, और संस्कृति गति की आदी है। एयरोस्पेस माइलस्टोन थ्रस्ट-टू-वेट अनुपातों और कक्षा तक मिनटों में मापे जाते हैं। एक वाहन के **तीन सप्ताह** लेने का विचार कक्षा तक पहुंचने के लिए, पहली सुनने पर, प्रतिगमन लगता है। लेकिन धैर्य स्थिरता की कीमत है। एयरशिप एक अलग मेट्रिक प्रस्तावित करता है: न कि “हम ऊर्जा को कितनी तेजी से जला सकते हैं” बल्कि “हम इसे कितनी लगातार जमा कर सकते हैं।”

लॉन्च विंडो और काउंटडाउन के आदी स्पेस एजेंसियों के लिए, ऐसा क्राफ्ट संचालन में बदलाव की मांग करता है: सेकंड के बजाय मौसमों द्वारा मिशन प्लानिंग; पैड उपलब्धता के बजाय सूर्य ज्यामिति पर निर्भर कक्षीय डाल। फिर भी यह परिवर्तन

स्थिर-राज्य इंफ्रास्ट्रक्चर की ओर व्यापक मोड़ से संरेखित होता है - सौर-इलेक्ट्रिक स्पेसक्राफ्ट, पुनः उपयोग योग्य स्टेशन, लगातार जलवायु प्लेटफॉर्म।

रणनीतिक मूल्य

एक पुनः उपयोग योग्य सौर-EAD वाहन क्षमताएं प्रदान करता है जो कोई रॉकेट या विमान मैच नहीं कर सकता:

- **लगातार उच्च-ऊंचाई अवलोकन और संचार:** पूर्ण कक्षा से पहले, एयरशिप ऊपरी स्ट्रेटोस्फीयर में महीनों तक मंडरा सकता है, डेटा रिले या पृथ्वी इमेजिंग।
- **अंकगणितीय कार्गो डिलीवरी:** छोटे पेलोड धीरे-धीरे लॉन्च के ध्वनि और थर्मल शॉक्स के बिना उठाए जा सकते हैं।
- **ग्रहीय एनालॉग:** मंगल पर, जहां कक्षीय गति केवल 3.6 किमी/सेकंड है और वायुमंडलीय दबाव लंबे-पथ आयन त्वरण को अनुकूल बनाता है, समान आर्किटेक्चर और बेहतर कार्य कर सकता है।
- **पर्यावरणीय संरक्षण:** कोई निकास नहीं, कोई प्रणोदक रिसाव नहीं, नगण्य ध्वनि प्रभाव।

आर्थिक रूप से, पहले परिचालन HAOV रॉकेट को बदलने के बजाय उन्हें पूरक करेंगे, उन निशों की सेवा करेंगे जहां पेलोड धैर्य तात्कालिकता पर भारी पड़ता है। रणनीतिक रूप से, वे निकट-अंतरिक्ष पहुंच को प्रणोदक आपूर्ति श्रृंखलाओं से डिक्पल करेंगे - स्थिर इंफ्रास्ट्रक्चर की तलाश में स्पेस एजेंसियों के लिए एक आकर्षक विशेषता।

नियम पुस्तिका इंजीनियरिंग

एक HAOV श्रेणी बनाना लॉबिंग से कम है **मापन** से। नियामक डेटा पर भरोसा करते हैं। आगे का पथ प्रयोगात्मक पारदर्शिता है:

1. **हीलियम-आधारित प्रदर्शक** दूरस्थ गलियारों में, ट्रेजेक्टरी, ऊर्जा उपयोग, और फॉल्ट व्यवहार को रिकॉर्ड करने के लिए उपकरणित।
2. **निरंतर टेलीमेट्री** नागरिक-विमानन और स्पेस-ट्रैकिंग नेटवर्क के साथ साझा की गई पूर्वानुमानित उड़ान गतिशीलता साबित करने के लिए।
3. **सिमुलेशन और जोखिम मॉडल** जो दिखाते हैं कि बसे हुए क्षेत्रों पर सबसे खराब-केस गतिज-ऊर्जा फ्लक्स नगण्य है।

एक बार एजेंसियां देख लें कि HAOV विमान या ग्राउंड आबादी को नुकसान नहीं पहुंचा सकता, तो कानूनी आर्किटेक्चर का पालन करेगा - जैसे कि उच्च-ऊंचाई गुब्बारों और ड्रोन्स के लिए पहले किया गया था।

नैतिक आयाम

धीमी उड़ान का नैतिक वजन है। रासायनिक लॉन्चर इंजीनियरों के लापरवाह होने के कारण प्रदूषित नहीं करते बल्कि क्योंकि भौतिकी उनकी गर्मी को रीसायकल करने का समय नहीं देती। एक सौर एयरशिप, इसके विपरीत, कुछ भी अपरिवर्तनीय उपभोग नहीं करता। यह शोर को मौन से बदल देता है, फ्लैश को चमक से। इसका उदय जमीन से एक चमकीला, बिना जल्दबाजी का बिंदु के रूप में दृश्यमान होगा, एक मानव कलाकृति जो हिंसा के बिना चढ़ती है।

एक तात्कालिकता की उम्र में, ऐसा जानबूझकर गति एक बयान है: कि तकनीकी महत्वाकांक्षा गहरी होने के लिए विस्फोटक होने की आवश्यकता नहीं है।

प्रकाश की धैर्य

जब एक रॉकेट कक्षा तक पहुंचता है, तो वह कच्चे त्वरण से करता है: दहन के सेकंड जो आकाश को कांपने देते हैं। इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक एयरशिप अलग तरीके से पहुंचता है। इसकी त्वचा को मारने वाला प्रत्येक फोटॉन गति का एक फुसफुसाहट योगदान देता है, इलेक्ट्रॉनों, आयनों, और मैक्सवेल के समीकरणों की शांत गणित द्वारा मध्यस्थता। तीन सप्ताह में ये फुसफुसाहट कक्षा में संचित हो जाते हैं।

वही अभिव्यक्ति - $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ - जो प्रयोगशाला में एक माइक्रोएम्पियर आयन ड्रिफ्ट का वर्णन करती है एक हजार-टन लिफ्टिंग बॉडी को भी नियंत्रित करती है जो ऊपरी वायुमंडल के माध्यम से फिसलता है। स्केल बदलता है; सिद्धांत नहीं। मैक्सवेल का टेंसर, कूलॉम्ब का नियम, और सूर्य की रोशनी की धैर्य सार्वभौमिक हैं।

यदि मानवता उस धैर्य का शोषण करना सीख लेती है, तो हम पृथ्वी छोड़ने का एक नया तरीका प्राप्त करते हैं - एक जो अनिश्चित काल तक दोहराया जा सकता है, उसी तारे द्वारा संचालित जो हमें बनाए रखता है।

उलटने योग्य उड़ान की एक युग की ओर

रासायनिक रॉकेटरी एक-तरफा इशारा है: कक्षा तक पहुंचने के लिए अपार प्रयास, और पुनः प्रवेश पर अचानक अंत। इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक एयरशिप एक **उलटने योग्य पथ** सुझाता है। यह इच्छा पर चढ़ सकता है और उतर सकता है, ट्रोपोस्फीयर से कक्षा तक कहीं भी रह सकता है। यह स्पेसक्राफ्ट और आवास दोनों है, वाहन और स्टेशन।

उस निरंतरता में एक दार्शनिक उलट है: अंतरिक्ष उड़ान प्रस्थान के रूप में नहीं बल्कि वायुमंडल का विस्तार के रूप में। हवा से वैक्यूम तक का ग्रेडिएंट नेविगेबल इलाके में बदल जाता है। ऐसे क्राफ्ट मौसम विज्ञान और अंतरिक्ष विज्ञान के बीच की रेखा को धुंधला कर देंगे, “अंतरिक्ष का किनारा” को एक बाधा के बजाय एक जीवित कार्यस्थल में बदल देंगे।

समापन चिंतन

कोई नई भौतिकी की आवश्यकता नहीं है - केवल सहनशक्ति, सटीकता, और पुनः कल्पित विनियमन। कक्षीय ऊर्जा बजट सूर्य की रोशनी में भुगतान किया जा सकता है; थ्रस्ट विद्युत क्षेत्रों से उत्पन्न हो सकता है जो आयनों पर कार्य करते हैं; समय इंजीनियरों की धैर्य से उधार लिया जा सकता है।

बाधाएं सांस्कृतिक और नौकरशाही हैं: एजेंसियों को यह विश्वास दिलाना कि गुब्बारे जैसा कुछ गणित और दृढ़ता के माध्यम से एक उपग्रह बन सकता है। फिर भी हर परिवर्तनकारी प्रौद्योगिकी कागजी कार्रवाई में एक विसंगति के रूप में शुरू हुई।

जब इन सौर इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक वेसल्स का पहला ऊपर उठता है, तो इसका प्रगति घंटे से घंटे लगभग अपरceptible होगी। लेकिन दिन-ब-दिन यह गति इकट्ठा करेगा, जब तक कि अंत में यह मौसम की पहुंच से परे सरक न जाए। कोई गर्जना नहीं होगी - केवल क्षेत्रों का हल्का, निरंतर गुनगुनाहट और सूर्य की रोशनी का स्थिर संचय गति में।

यह **पुनः उपयोग योग्य, सतत, और कोमल कक्षा पहुंच** की शुरुआत को चिह्नित करेगा: एक तरीका ऊपर उठने का, उड़ने का, और - कभी माचिस न जलाकर - कक्षा में प्रवेश करने का।

संदर्भ और आगे पढ़ना

- **Rise Fly Orbit परियोजना:** <https://riseflyorbit.org/> - सौर-संचालित एयरशिप-टू-ऑर्बिट अवधारणा और संबंधित अनुसंधान का अवलोकन।
- **इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक प्रणोदन निबंध:** https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html - मैक्सवेल स्ट्रेस टेंसर और कूलॉम्ब बॉडी-फोर्स फॉर्मूलेशन का उपयोग करके इलेक्ट्रोएयरोडायनामिक थ्रस्ट का गहन सैद्धांतिक उपचार।
- Barrett, S. et al., **Nature** (2018). “Flight of an Aeroplane with Solid-State Ionic Propulsion.” - एक फिक्स्ड-विंग आयन-संचालित विमान का पहला प्रदर्शन।
- 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. - ऊर्जा बजटों और Δv विचारों में विपरीत के लिए।
- NASA Glenn Research Center, “Solar Electric Propulsion Basics.” - उच्च-दक्षता विद्युत थ्रस्ट सिस्टमों पर पृष्ठभूमि।