

ลอยขึ้น, บิน, โคจร

เรืออากาศไฟฟ้าแอโรไดนามิกที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับการเข้าถึงอวกาศอย่างยั่งยืน

วิสัยทัศน์และพื้นฐานทางฟิสิกส์

ความฝันในการบินคือการแข่งขันระหว่างความอดทนและพลังเสมอ นักบินบอลลูนยุคแรกของศตวรรษที่ 18 ลอยขึ้นสู่ท้องฟ้าอย่างนุ่มนวลด้วยก๊าซลอยตัว ในขณะที่วิศวกรจรวดของศตวรรษที่ 20 ฉีกมันด้วยไฟ ทั้งสองแนวทางมีเป้าหมายเดียวกัน – หลุดพ้นจากอำนาจของแรงโน้มถ่วง – แต่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงในปรัชญา หนึ่งในใช้อากาศเป็นพันธมิตร อีกหนึ่งมองมันเป็นอุปสรรค ระหว่างสองขั้วสุดโต่งนี้ มีทางเลือกที่สาม ซึ่งยังไม่เคยถูกนำไปปฏิบัติ แต่ในหลักการแล้วไม่ใช่เรื่องเป็นไปไม่ได้อีกต่อไป: **เรืออากาศที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งสามารถบินไปยังวงโคจร** โดยลอยตัวขึ้นก่อนด้วยแรงลอยตัว จากนั้นด้วยแรงยกทางอากาศไดนามิกส์ และสุดท้ายด้วยการรอรบแบบกึ่งกลาง โดยทั้งหมดนี้โดยไม่ใช้เชื้อเพลิงเคมี

ในหัวใจของแนวคิดนี้คือ **การขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแอโรไดนามิก (EAD)** – รูปแบบของแรงผลักดันทางไฟฟ้าที่ใช้สนามไฟฟ้าเพื่อเร่งไอออนในอากาศ ไอออนที่ถูกเร่งจะถ่ายโอนโมเมนตัมไปยังโมเลกุลที่เป็นกลาง สร้างกระแสหลักและแรงผลักดันสุทธิบนขั้วที่ต่างจากจรวดที่ต้องบรรทุกมวลปฏิกิริยา หรือใบพัดที่ต้องการใบมีดเคลื่อนไหว การขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแอโรไดนามิกทำงาน **โดยไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหวและไม่มีไอเสียบนเรือ** เพียงแสงอาทิตย์และอากาศ เมื่อเชื่อมต่อกับอาร์เรย์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงและติดตั้งบนร่างกายขนาดใหญ่ที่เบามาก มันให้ส่วนผสมที่ขาดหายไปสำหรับการเร่งความเร็วอย่างต่อเนื่องในชั้นบรรยากาศบน ซึ่งแรงต้านทานต่ำแต่ยังคงมีอากาศ

ข้อเสนอนี้เรียบง่ายในการอธิบาย แต่ท้าทายในการดำเนินการ:

1. **ลอยขึ้น** – เรืออากาศลอยตัวที่เต็มไปด้วยไฮโดรเจนหรือฮีเลียมลอยขึ้นอย่างอัตโนมัติสู่สตราโตสเฟียร์ โกลจากสภาพอากาศและการจราจรทางอากาศ
2. **บิน** – เรืออากาศเร่งความเร็วในแนวนอนโดยใช้แรงผลักดัน EAD ค่อยๆ เพิ่มความเร็วขณะบินขึ้นสู่ชั้นอากาศที่บางลงเพื่อลดแรงต้าน
3. **โคจร** – หลังจากหลายสัปดาห์ของการเร่งความเร็วต่อเนื่อง แรงกึ่งกลางจะสมดุลกับแรงโน้มถ่วง; ยานพาหนะไม่จำเป็นต้องยกอีกต่อไป และกลายเป็นดาวเทียมด้วยความเพียรแทนการระเบิด

แนวคิดนี้ไม่ใช่เรื่องเพ้อฝัน แต่ละขั้นตอนมีรากฐานในฟิสิกส์ที่รู้จักกันดี: แรงลอยตัว พลังงานแสงอาทิตย์ ไฟฟ้าสถิต และกลศาสตร์วงโคจร สิ่งที่เปลี่ยนคือสเกลเวลา แทนที่จะเป็นนาทของการเผาไหม้ เราให้ความสำคัญกับ **สัปดาห์ของแสงอาทิตย์** แทนที่จะเป็นต้นของเชื้อเพลิง เราเชื่อมั่นใน **สนามและความอดทน**

พลังงานของวงโคจร

การสนทนาทุกครั้งเกี่ยวกับการบินอวกาศเริ่มต้นและสิ้นสุดด้วยพลังงาน พลังงานจลน์ต่อกิโลกรัมมวลที่จำเป็นสำหรับการรักษาวงโคจรกลมรอบโลกให้โดย

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

ซึ่ง v คือความเร็ววงโคจร สำหรับวงโคจรต่ำของโลก $v \approx 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$ ดังนั้น

$E_k \approx 3.0 \times 10^7 \text{ J/kg}$ หรือประมาณ **30 เมกะจูลต่อกิโลกรัม** นั่นคือพลังงานเทียบเท่ากับการเผาไหม้ประมาณหนึ่งกิโลกรัมของน้ำมันเบนซินสำหรับทุกกิโลกรัมที่วางบนวงโคจร มันเป็นตัวเลขใหญ่ แต่ไม่ใช่ตัวเลขดาราศาสตร์

ตอนนี้เปรียบเทียบกับกระแสพลังงานแสงอาทิตย์ต่อเนื่องที่ยอดของชั้นบรรยากาศโลก: ประมาณ **1.360 วัตต์ต่อตารางเมตร** หากเราสามารถแปลงแม้แต่เศษเสี้ยวเล็กๆ ของมันเป็นพลังงานจลน์ในช่วงวันหรือสัปดาห์ เราสามารถในหลักการจัดหาพลังงานวงโคจรที่จำเป็นได้ อาร์เรย์โฟโตโวลตาอิกสมัยใหม่ประสิทธิภาพสูงมีกำลังเฉพาะในระดับหลายร้อยวัตต์ต่อกิโลกรัม ที่ $P_{sp} = 300 \text{ W/kg}$ กิโลกรัมหนึ่งของอาร์เรย์ผลิต 300 จูลต่อวินาที ในหนึ่งวัน (8.64×10^4 วินาที) นั่นคือ 2.6×10^7 จูล - เทียบเท่ากับพลังงานวงโคจรของมวลหนึ่งกิโลกรัม

การเปรียบเทียบง่ายๆ นี้แสดงให้เห็นตรรกะของแนวทางนี้ พลังงานสำหรับวงโคจรมีให้จากดวงอาทิตย์ประมาณ **หนึ่งวันต่อกิโลกรัมของอาร์เรย์** หากสามารถแปลงเป็นแรงผลักดันอย่างมีประสิทธิภาพได้ ความท้าทายในทางปฏิบัติคือแรงต้านและความไร้ประสิทธิภาพดูดซับส่วนใหญ่ของมัน คำตอบคือความสูงและความอดทน: ทำงานในอากาศบางที่แรงต้านต่ำ และยึดกระบวนการเป็นสัปดาห์แทนชั่วโมง

การแลกเปลี่ยนเวลากับเชื้อเพลิง

จรวดแก้ปัญหาแรงต้านด้วยกำลังดิบ - พวกมันไปเร็วมากจนอากาศไม่เกี่ยวข้อง เรืออากาศในทางตรงกันข้ามทำงานกับอากาศ; พวกมันสามารถล่าช้าได้ หากเวลาถูกมองว่าเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วทิ้ง มันสามารถแทนที่มวลเชื้อเพลิงได้ หน้าที่ของเรืออากาศคือรักษาการเร่งความเร็วเล็กน้อยแต่ต่อเนื่องในช่วงเวลายาวนาน อาจจะ **ในระดับ 10^{-3} m/s^2** จนกว่าจะบรรลุความเร็ววงโคจร

หากการลอยขึ้นสู่วงโคจรใช้เวลาสามสัปดาห์ หรือประมาณ 1.8×10^6 วินาที การเร่งความเร็วเฉลี่ยที่จำเป็นคือ

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

- น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของแรงโน้มถ่วงของโลก การเร่งความเร็วเช่นนี้ทนได้ง่ายสำหรับเรืออากาศ; พวกมันไม่ก่อให้เกิดความเครียดโครงสร้าง ปัญหาเดียวคือ **การรักษามัน** โดยคำนึงถึงปริมาณแรงผลักดันที่ใช้ต่อหน่วยกำลังที่น้อย

หากยานมีมวล 10^3 kg การเร่งความเร็วเฉลี่ย $4 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ ต้องการเพียงประมาณ **4 นิวตันของแรงผลักดันสุทธิ** - น้อยกว่าน้ำหนักของแอปเปิ้ล ความไม่สมเหตุสมผลที่เห็นได้ชัดในการไปถึงวงโคจรด้วยแรงผลักดันของแอปเปิ้ลหายไปเมื่อเวลายืดออกเป็นสัปดาห์

แรงลอยตัวและทางสู่ชั้นอากาศบาง

เรืออากาศเริ่มต้นการเดินทางของมันเหมือนอุปกรณ์ลอยตัวใดๆ: โดยการแทนที่อากาศด้วยก๊าซที่เบากว่า แรงลอยตัวให้โดย

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

ซึ่ง V คือปริมาตรของก๊าซ และ ρ คือความหนาแน่นที่เกี่ยวข้อง ใกล้เคียงระดับน้ำทะเล $\rho_{\text{air}} \approx 1.2 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{\text{He}} \approx 0.18 \text{ kg/m}^3$ และ $\rho_{\text{H}_2} \approx 0.09 \text{ kg/m}^3$ ไฮโดรเจนให้แรงยกที่มากกว่าเล็กน้อย ประมาณ 1.1 กก.ต่อลูกบาศก์เมตร เทียบกับ 1.0 กก.ต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับฮีเลียม ความแตกต่างดูเหมือนเล็กน้อย แต่สะสมในหลายพันลูกบาศก์เมตร

ไฮโดรเจนจึงนำเสนอข้อได้เปรียบประสิทธิภาพที่วัดได้ แม้ว่าจะมีค่าใช้จ่ายในการติดไฟ มันต้องการโซลาร์ไฟฟ้าที่เข้มงวดและโปรโตคอลระบายอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพราะยานยังบรรทุกระบบไฟฟ้าสถิตแรงดันสูง ฮีเลียมนำเสนอแรงยกที่ต่ำกว่าแต่ความเฉื่อยสมบูรณ์ ทั้งสองก๊าซมีชีวิต; การเลือกขึ้นอยู่กับความอดทนต่อความเสี่ยงของภารกิจ สำหรับการทดสอบสาธารณะหรือพื้นที่ที่มีประชากรในระยะแรก ฮีเลียมเป็นที่ต้องการ สำหรับความพยายามห่างไกลหรือวงโคจร ไฮโดรเจนอาจเหมาะสมผล

เมื่อยานลอยขึ้น ความหนาแน่นของอากาศลดลงโดยประมาณแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับความสูงทะเล $H \approx 7.5 \text{ km}$ ที่ 30 กม. ความหนาแน่นประมาณ $1/65$ ระดับน้ำทะเล; ที่ 50 กม. $1/300$ แรงลอยตัวอ่อนลงตามนั้น แต่แรงต้านก็เช่นกัน อุปกรณ์ถูกออกแบบให้ถึง **แรงลอยตัวเป็นกลาง** ที่ความสูงที่ความเข้มข้นของแสงอาทิตย์ยังสูง แต่ความดันไดนามิกขึ้นต่ำ - ประมาณ 30-40 กม. ในสตราโตสเฟียร์ จากนั้นการเร่งแวนอนเริ่มต้น

แรงยก, แรงต้าน และความดันไดนามิก

เพื่อรักษาสูงในระหว่างการเร่ง เรืออากาศอาจพึ่งพา **แรงยกทางอากาศไดนามิก** บางส่วน สำหรับตัวเรือนยก กำลังยกและแรงต้านคือ

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

ซึ่ง A คือพื้นที่อ้างอิง C_L และ C_D คือสัมประสิทธิ์ยกและแรงต้าน เนื่องจาก ρ เล็กที่ความสูง กำลังเหล่านี้เล็ก; ยานชดเชยด้วย **พื้นที่ใหญ่** และ **น้ำหนักต่ำ**

อัตราส่วน $L/D = C_L/C_D$ กำหนดประสิทธิภาพการบินทางอากาศไดนามิก กลายเดอร์สมัยใหม่สามารถเกิน $L/D = 50$ ในอากาศหนาแน่น เรืออากาศอัลตราเบาที่ออกแบบด้วยความเรียบเนียนสุดขีดและส่วนเสริมขั้นต่ำสามารถรักษา L/D 10-20 ที่มีประสิทธิภาพแม้ในอากาศบางได้อย่างเหมาะสมผล แต่เมื่ออากาศบางลงต่อแบบการเปลี่ยนผ่านไปสู่การบินวงโคจรไม่ถูกจำกัดโดยแรงยก - มันถูกควบคุมโดย **กำลังต้านทาน**

กำลังที่จำเป็นเพื่อเอาชนะแรงต้านคือ

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

และสเกลกับกำลังสามของความเร็ว นี่คือเหตุผลที่จรวดเร่งเร็ว: ถ้าพวกมันล่าช้า แรงต้านจะบริโภคพลังงานของพวกมันแบบเอกซ์โพเนนเชียล เรืออากาศใช้เส้นทางตรงกันข้าม: มันเร่งที่ ρ เล็กมากที่ P_D ยังคงจำกัดแม้ที่กิโลเมตรต่อวินาที

ถ้าเช่น $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ (ปกติใกล้ 60 กม. สูง) $A = 100 \text{ m}^2$ $C_D = 0.05$ และ $v = 1.000 \text{ m/s}$ แล้ว

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

หรือ 25 kW – จ่ายต่อการเข้าถึงด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ในทางตรงกันข้าม ที่ระดับน้ำทะเลการกำหนดค่าดังกล่าวจะต้องการ 25 กิโลวัตต์

กฎคือเรียบง่าย: **อากาศบางชื่อเวลา และ เวลาทดแทนเชื้อเพลิง**

โอกาสทางไฟฟ้าแอโรไดนามิก

ในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 นักฟิสิกส์สังเกตเห็นว่าสนามไฟฟ้าที่เข้มข้นใกล้ขั้วตัดในอากาศสร้างมงกุฎสีน้ำเงินอ่อนและการไหลของอากาศที่ละเอียดอ่อน “ลมไฟฟ้า” นี้เกิดจากการถ่ายโอนโมเมนตัมระหว่างไอออนและกลางๆ มันถูกมองว่าเป็นความอยากรู้อยากเห็นเป็นหลัก จนกระทั่งอิเล็กทรอนิกส์แรงดันสูงโต เมื่อจัดวางอย่างถูกต้อง เอฟเฟกต์สามารถผลิตแรงผลักดันที่วัดได้

การขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแอโรไดนามิกทำงานโดยใช้แรงดันสูงระหว่าง **เอมิเตอร์** ลวดบางหรือขอบที่ผลิตไอออน และ **ผู้รวบรวม** ขั้วที่กว้างกว่าที่รับมัน ไอออนถูกเร่งในสนามไฟฟ้า ชนกับโมเลกุลอากาศกลางๆ และถ่ายโอนโมเมนตัมไปข้างหน้าให้ก๊าซ อุปกรณ์รู้สึกถึงปฏิกิริยาที่เท่ากันและตรงกันข้าม สร้างแรงผลักดัน

ในขณะที่การสาธิต ง่าย การทดลองล่าสุด – รวมถึง **เครื่องบินไอออน** ปีกคงที่ที่บินโดย MIT ในปี 2018 – พิสูจน์ว่าการบินที่มั่นคงและเงียบสงบเป็นไปได้ อย่างไรก็ตาม แนวคิดนี้เกิดขึ้นก่อนจุดนั้น หลายปีก่อน การวิจัยใน **สูตรที่อิงจากเทนเซอร์แมกซ์เวลล์** ของแรงผลักดันทางไฟฟ้าแอโรไดนามิกแสดงให้เห็นว่าฟิสิกส์เดียวกันสามารถสเกลไปยังเรขาคณิตที่ใหญ่กว่าและอากาศที่บางลงได้ ในรูปแบบนั้น แรงผลักดันไม่ได้มาจาก “ลม” แต่จาก **ความเครียดทางแม่เหล็กไฟฟ้า** ที่รวมกันเหนือปริมาตรของพื้นที่การปล่อย

สมการที่เกี่ยวข้องถูกอนุมานจาก **เทนเซอร์ความเครียดแมกซ์เวลล์ $\mathbf{T}$** ซึ่งสำหรับสนามไฟฟ้าสถิตคือ

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

ซึ่ง ϵ คือค่าคงที่ของสื่อ $\mathbf{E}$ คือเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และ $\mathbf{I}$ คือเทนเซอร์เอกลักษณ์ แรงแม่เหล็กไฟฟ้าสุทธิบนวัตถุได้จากการรวมเทนเซอร์นี้เหนือพื้นผิวของมัน:

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

ในพื้นที่ที่ถูกไอออไนซ์ มันถูกทำให้ง่ายเป็น **ความหนาแน่นของแรงปริมาตร**

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

ซึ่ง ρ_e คือความหนาแน่นของประจุท้องถิ่น ในก๊าซที่มีค่าคงที่โดยประมาณสม่ำเสมอ วรรคที่สองหายไป ทิ้งไว้ให้ **แรงตัวของคูลอมบ์** ที่สวยงาม

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

การแสดงผลที่กระชับนี้คือแก่นของการขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแอโรไดนามิก: ทุกที่ที่สนามไฟฟ้าและประจุอากาศอยู่ร่วมกัน แรงตัวสุทธิจะกระทำต่อสื่อ

ไอออนเองมีน้อย แต่โมเมนตัมของพวกมันถูกส่งต่อไปยังกลางๆ ผ่านการชน เส้นทางการอิสระเฉลี่ย λ ระหว่างการชนกำหนดว่ามันจะแพร่กระจายอย่างไร; มันสเกลย้อนกลับกับแรงดัน ที่แรงดันต่ำกว่า ไอออนเดินทางไกลกว่าต่อการชน และประสิทธิภาพการถ่ายโอนโมเมนตัมเปลี่ยนแปลง มี **ช่วงแรงดันที่เหมาะสม** ที่ไอออนยังสามารถชน

กันบ่อยพอที่จะผลึกก๊าซ แต่ไม่บ่อยมากจนเสียพลังงานในการให้ความร้อนแก่它 สำหรับชั้นบรรยากาศของโลก ช่วงนั้นอยู่ระหว่างไม่กี่เมตรและไม่กี่มิลลิเมตร – ช่วงที่พบระหว่าง 40 และ 80 กิโลเมตร

โครงสร้างของเรื่ออากาศจึงเป็นโอสต์ที่เหมาะสมสำหรับกระเบื้องทางไฟฟ้าแอโรไดนามิกที่ทำงานในสภาพแวดล้อมธรรมชาติของพวกมัน ชั้นบรรยากาศเองคือมวลปฏิกิริยา

ฟิสิกส์ของการขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแอโรไดนามิก

ในมุมมองแรก การขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแอโรไดนามิกดูไม่น่าจะเป็นไปได้ แนวคิดที่ชุดขั้นที่เจียบและนี่จะสามารถสร้างแรงผลักดันที่แข็งแกร่งพอที่จะขับเรื่ออากาศดูเหมือนขัดแย้งกับประสบการณ์ประจำวัน การขาดมวลปฏิกิริยาที่มองเห็นได้หรือเครื่องจักรที่เคลื่อนไหวทำกายสัทธาญาณ อย่างไรก็ตาม ไอออนแต่ละตัวที่ลอยในสนามไฟฟ้าพหุโมเมนต์ และโมเมนต์ถูกอนุรักษ์ สนามทำหน้าที่เป็นคันโยกที่มองไม่เห็น และอากาศคือของเหลวทำงานของมัน

พื้นฐานของปรากฏการณ์นี้ไม่ได้อยู่ในฟิสิกส์พลาสมาแปลกประหลาด แต่ใน **สมการแมกซ์เวลล์** และการแสดงออกเชิงกลของพวกมัน **เทนเซอร์ความเครียดแมกซ์เวลล์** การกำหนดแบบเทนเซอร์นี้ทำให้ชัดเจนว่าสนามไฟฟ้าไม่ใช่แค่รูปแบบของศักย์ – พวกมันเก็บและถ่ายโอนความเครียดเชิงกลในสื่อรอบข้าง

ความเครียดของสนามและแรงตัวของคูลอมบ์

เทนเซอร์ความเครียดแมกซ์เวลล์ ในไฟฟ้าสถิตคือ

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

ซึ่ง ϵ คือค่าคงที่ $\mathbf{E}$ คือสนามไฟฟ้า และ $\mathbf{I}$ คือเทนเซอร์เอกลักษณ์ วรรคแรกแทนความดันทิศทางตามเส้นสนาม และวรรคที่สองคือความตึงที่ต้านทานการกระจายของสนาม

แรงแม่เหล็กไฟฟ้าสุทธิ บนวัตถุที่จมในสนามเช่นนี้คืออินทิกรัลพื้นผิวของเทนเซอร์นี้:

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

ทางกายภาพ การแสดงออกนี้บอกเราว่าสนามไฟฟ้าสร้างความเครียดบนขอบเขตของพื้นที่ใดๆ ที่มีประจุหรือกระเดียนต์ของไดอิเล็กทริก แต่สามารถเขียนใหม่ในรูปแบบปริมาตรที่เป็นท้องถิ่นมากขึ้นโดยใช้ทฤษฎีการกระจาย:

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

วรรคแรก $\rho_e \mathbf{E}$ คือ **แรงตัวของคูลอมบ์** ที่คุ้นเคย: ความหนาแน่นของประจุที่สัมผัสสนาม วรรคที่สองสำคัญเฉพาะที่ค่าคงที่ของสื่อเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่นที่ขอบวัสดุ ในอากาศ ϵ เป็นพื้นฐานที่สม่ำเสมอ ดังนั้น $\nabla \epsilon \approx 0$ ทั้งไว้

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

สมการที่ดูเหมือนเรียบง่ายนี้เข้ารหัสหลักการทั้งหมดของการขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแอโรไดนามิก หากมีปริมาตรของก๊าซที่ไอออน (ด้วยความหนาแน่น ρ_e) สัมผัสสนามไฟฟ้า $\mathbf{E}$ แล้ว **ความหนาแน่นของแรงสุทธิ** จะกระทำต่อก๊าซนั้น ขนาดของแรงผลักดันรวมคืออินทิกรัลปริมาตรของ $\rho_e \mathbf{E}$ เหนือพื้นที่การปล่อย:

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

ข้าพเจ้ารู้สึกถึงปฏิกิริยาที่เท่ากันและตรงกันข้าม สร้างแรงผลักดัน

การถ่ายโอนโมเมนตัมและบทบาทของการชน

ไอออนในอากาศเดินทางไกลก่อนชนกับโมเลกุลกลางๆ น้อยมาก **เส้นทางอิสระเฉลี่ย λ** สัมพันธ์ผกผันกับความดันก๊าซ p และพื้นที่ตัด σ :

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

ซึ่ง d คือเส้นผ่านศูนย์กลางโมเลกุล ที่ระดับน้ำทะเล λ เล็กมาก – ในระดับสิบๆ นาโนเมตร ในเมโซสเฟียร์ (ประมาณ 70 กม.) λ ยืดถึงมิลลิเมตรหรือเซนติเมตร

เมื่อไอออนถูกเร่งภายใต้สนาม มันถ่ายโอนโมเมนตัมไปยังกลางๆ ผ่านการชน แต่ละการชนแบ่งส่วนของโมเมนตัมที่กำหนดทิศทางของไอออน; เอฟเฟกต์สะสมคือ **กระแสมากกลางหลัก** – ที่นักทดลองเรียกว่า **ลมไอออน** ก๊าซเคลื่อนจากเอมิเตอร์ไปยังผู้รวบรวม และข้าพเจ้าสัมผัสกับแรงผลักดันปฏิกิริยาตรงกันข้าม

ในอากาศหนาแน่นมาก ไอออนชนกันบ่อยเกินไป; ความเร็วลอยของพวกมันอึดตัว และพลังงานสูญเสียเป็นความร้อน ในอากาศบางมาก การชนหายากเกินไป; ไอออนบินอิสระแต่ไม่ลากกลางๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระหว่างสองขั้วสุดโต่งนี้คือ **จุดหวาน** ที่เส้นทางอิสระเฉลี่ยนุญาตให้ถ่ายโอนโมเมนตัมที่มีประสิทธิภาพ – พื้นที่ที่เรืออากาศผ่านในทางสู่จักรวาล

ที่ความดันประมาณ 10^{-2} ถึง 10^{-4} บาร์ (ตรงกับ 40–80 กม. สูง) ไอออนสามารถเร่งเหนือระยะทางมาโครก่อนชน แต่การชนยังเกิดขึ้นบ่อยพอที่จะสร้างแรงผลักดัน **การคู่ไฟฟ้าแอโรไดนามิก** ระหว่างสนามและก๊าซอยู่ในสถานะที่ดีที่สุด

ความสัมพันธ์กำลัง-แรงผลักดัน

กำลังไฟฟ้าที่ส่งไปยังการปล่อย $P = \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV$ ซึ่งประมาณ IV สำหรับกระแสคงที่ I และแรงดัน V เอาต์พุตเชิงกลที่เป็นประโยชน์คือแรงผลักดันคูณด้วยความเร็วของมวลอากาศที่ถูกเร่ง แต่ในสถานะคงที่ที่เราสนใจหลักๆ ใน **อัตราส่วนแรงผลักดันต่อกำลัง T/P**

การศึกษากดลองรายงานค่า T/P จากไม่กี่มิลลินิวตันต่อวัตต์ (**mN/W**) เกือบ **0.1 N/W** ในสภาวะที่ปรับปรุงแล้ว ในอากาศบรรยากาศที่ความดันมาตรฐาน EAD ไม่มีประสิทธิภาพ; แต่ที่ความดันลดลง ความเคลื่อนไหวของไอออนเพิ่มขึ้นและความหนาแน่นของกระแสสามารถรักษาได้ที่แรงดันต่ำกว่า ปรับปรุง T/P

ข้อโต้แย้งมีต้ง่ายๆ เชื่อมโยงความหนาแน่นของแรงตัว $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ กับความหนาแน่นของกระแส $\mathbf{J} = \rho_e \mu \mathbf{E}$ ซึ่ง μ คือความเคลื่อนไหวของไอออน แล้ว

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

ดังนั้นสำหรับความหนาแน่นของกระแสที่กำหนด ความเคลื่อนไหวที่สูงกว่า (บรรลุที่ความดันต่ำกว่า) ให้แรงผลักดันมากกว่าต่อกระแส กำลังไฟฟ้าทั้งหมดคือ $P = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} V$ ดังนั้น **อัตราส่วนแรงผลักดันต่อกำลัง** สเกลเป็น

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

บ่งชี้ว่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำกว่าหรือความเคลื่อนไหวของไอออนที่สูงกว่าปรับปรุงประสิทธิภาพ แต่ E ต่ำกว่าก็ลดกระแสและดังนั้นแรงผลักดันรวม ดังนั้นอีกครั้งมีระบอบที่เหมาะสม

ความสัมพันธ์เหล่านี้ไม่ใช่ความอยากรู้ทางทฤษฎี – พวกมันกำหนดการออกแบบของแต่ละกระเบื้อง EAD ที่ความสูงที่กำหนด แรงดัน ช่องว่าง และเรขาคณิตของเอมิเตอร์ต้องถูกปรับแต่งเพื่อให้ **เส้นโค้งพาเซน** (ที่เชื่อมโยงแรงดันทะลุกับผลคูณความดัน-ระยะทาง) ถูกพอใจแต่ไม่เกิน

กฎของพาเซนสำหรับอากาศสามารถแสดงประมาณได้เป็น

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

ซึ่ง A และ B คือค่าคงที่ทางทดลอง และ γ_{se} คือสัมประสิทธิ์การปล่อยอิเล็กตรอนรอง จีโอเมทรีที่เปลี่ยนแปลงของเรื่ออากาศอนุญาตให้ d ระยะห่างของขั้วถูกปรับแบบไดนามิกเพื่อรักษาการปล่อยโคโรนาที่มีประสิทธิภาพโดยไม่มีอาร์คขณะที่ความดันโดยรอบลดลงระหว่างการลอยขึ้น

เรขาคณิตของสนามและทอพอโลยีของความเครียด

การสาธิต “ลิฟเตอร์” ต้นๆ ใช้ลวดบางเป็นเอมิเตอร์และฟอยล์แบนเป็นผู้รวบรวม เส้นสนามโค้งอย่างแรง และส่วนใหญ่ของพลังงานไปที่การรักษาโคโรนาแทนที่จะผลิตแรงผลักดันที่เป็นประโยชน์ ประสิทธิภาพต่ำเพราะ **สนามความเครียดแมกซ์เวลล์** ไม่ตรงกับทิศทางของแรงผลักดันที่ต้องการ

ข้อมูลสำคัญ – พัฒนาในงานทฤษฎีก่อนไอออนเพลนของ MIT – คือการรักษาสนามไฟฟ้าไม่ใช่ผลิตภัณฑ์รอง แต่เป็นตัวแปรการออกแบบหลัก แรงผลักดันเกิดจาก **อินทิกรัลความเครียดทางแม่เหล็กไฟฟ้า** ตามเส้นสนาม ดังนั้นเป้าหมายคือการกำหนดเส้นเหล่านั้นให้ขนานและสอดคล้องกันในพื้นที่กว้าง การเปรียบเทียบคือทางอากาศไดนามิก: เช่นเดียวกับการไหลแบบลามินาร์ที่เรียบที่ลดแรงต้าน ทอพอโลยีสนามไฟฟ้าสถิตที่เรียบปรับปรุงความเครียดที่กำหนดทิศทางสูงสุด

“วิศวกรรมทอพอโลยีสนาม” นี้กำหนดอุปกรณ์ใหม่เป็น **ตัวกระตุ้นไฟฟ้าสถิต** แทนของเล่นพลาสมา โดยการควบคุมความโค้งของขั้ว ฟังก์ชันยกไฟฟ้า และชั้นไดอิเล็กทริก สามารถทำให้ E เกือบสม่ำเสมอเหนือเส้นทางเร่งสร้างความเครียดแบบกึ่งเชิงเส้นและหลีกเลี่ยงการโฟกัสตัวเองที่ทำลายล้างที่ทำให้เกิดอาร์ค

ผลลัพธ์คือความสามารถในการสเกล เมื่อขั้วถูกเกสเซลเลตเป็นกระเบื้องตารางเมตร แต่ละอันมีตัวแปลงแรงดันสูงและตรรกะการควบคุมของตัวเอง โครงสร้างทั้งหมดของเรื่ออากาศสามารถเปลี่ยนเป็นอาร์เรย์ EAD กระจายขนาดยักษ์ ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหวเพื่อชิงโครโนซ์ เพียงสนามเพื่อประสานงาน

ความหนาแน่นของแรงผลักดันและทางสู่ความสามารถในการสเกล

ความหนาแน่นของแรงตัวปริมาตรคือ $f = \rho_e E$ ความหนาแน่นของประจุในปล่อยโคโรนาตัวอย่างที่ความดันบรรยากาศอยู่ในระดับ 10^{-5} ถึง 10^{-3} C/m³ ที่ความดันลดลง มันสามารถลดลงเล็กน้อย แต่สนามไฟฟ้า E สามารถเพิ่มขึ้นอย่างปลอดภัยถึงสิบลวัตต์ต่อเซนติเมตรโดยไม่มีทะลุ

หาก $\rho_e = 10^{-4}$ C/m³ และ $E = 10^5$ V/m ความหนาแน่นของแรงคือ $f = 10$ N/m³ กระจายเหนือพื้นที่ใช้งานหนา 1 m มันให้ความดันพื้นผิว 10 N/m² – เทียบเท่ากับไม้กึ่งลิฟต์สกาล มันอาจดูเล็ก แต่เหนือหลายพันตารางเมตรมันกลายเป็นสำคัญ พื้นผิว 1000 m² กับความเครียด 10 N/m² ผลิต 10 000 N

แรงผลักดัน พอสำหรับการเร่งยานหลายตันที่ระดับมิลลิ-g – ตรงกับระบอบที่จำเป็นสำหรับการยกวงโคจรหลายสัปดาห์

การประมาณการเช่นนี้แสดงว่าทำไม EAD แม้จะมีความหนาแน่นของกำลังต่ำ กลายเป็นไปได้สำหรับ **โครงสร้างใหญ่และเบา** ในอากาศบาง ต่างจากหัวจรวดที่ได้ประสิทธิภาพเฉพาะเมื่อความหนาแน่นของกำลังสูง EAD ได้รับประโยชน์จากพื้นที่ ตัวเรือนของเรืออากาศให้พื้นที่อุดมสมบูรณ์; การเปลี่ยนมันเป็นพื้นผิวใช้งานคือการจับคู่ทางธรรมชาติ

โซนหวานของชั้นบรรยากาศบน

ระบบฟิสิกส์ทุกตัวมีช่องปฏิบัติการ สำหรับการขับเคลื่อน EAD ระบอบที่ดีที่สุดคือที่ซึ่งความดันก๊าซต่ำพอที่จะอนุญาตให้แรงดันสูงและเส้นทางอิสระไอออนยาว แต่ไม่ต่ำมากจนพลาสมาไร้การชน

ต่ำกว่า 20 กม. ชั้นบรรยากาศหนาแน่นเกินไป: ความเคลื่อนไหวของไอออนต่ำ แรงดันทะลุสูง และพลังงานสูญเปล่าในการให้ความร้อนก๊าซ สูงกว่า 100 กม. อากาศบางเกินไป: การไอออไนซ์ไม่สามารถรักษาได้ต่อเนื่อง และมวลปฏิริยากลางๆ หายไป ระหว่าง 40 ถึง 80 กม. คือ **ช่วงเปลี่ยนผ่าน** – เมโซสเฟียร์ล่าง – ที่การขับเคลื่อน EAD สามารถผลิตอัตราส่วนแรงผลักดันต่อกำลังที่ดีที่สุด

สะดวก นี่คือช่วงความสูงที่พลังงานแสงอาทิตย์ยังคงไม่ลดลง และแรงต้านทางอากาศไดนามิกมีขนาดเล็กกว่าหลายระดับที่ระดับน้ำทะเล มันเป็นหน้าต่างแคบแต่ให้อภัย คอรัลเดอร์ธรรมชาติสำหรับยานพาหนะชนิดใหม่: ไม่ใช่เครื่องบินหรือจรวด แต่สิ่งที่อาศัยอยู่ในส่วนกับช่องระหว่างพวกมัน

ประสิทธิภาพและการไหลของพลังงาน

ในทุกขณะ กำลังไฟฟ้าที่ป้อน P ถูกแบ่งระหว่าง:

1. กำลังผลักดันเชิงกลที่เป็นประโยชน์ $P_T = T v_{\text{eff}}$ ซึ่ง v_{eff} คือความเร็วไอเสียที่มีประสิทธิภาพของการไหลอากาศ
2. การสูญเสียไอออไนซ์ P_i พลังงานที่จำเป็นสำหรับการรักษาพลาสมา
3. การสูญเสียต้านทาน P_r เนื่องจากการให้ความร้อนโอมและการรั่วไหล
4. การสูญเสียรังสี P_γ ที่ปล่อยออกมาเป็นแสง (ปรมาณูโคโรนาที่คุ้นเคย)

ประสิทธิภาพรวมคือ $\eta = P_T/P$ การทดลองแนะนำว่า η สามารถถึงไม่กี่เปอร์เซ็นต์ในอากาศหนาแน่นและอาจหลายสิบเปอร์เซ็นต์ในการดำเนินงานแรงดันต่ำที่ปรับปรุงแล้ว แม้จะ *хорошо* แต่ตัวเลขเหล่านี้เพียงพอสำหรับระบบที่ขับเคลื่อนด้วยแสงอาทิตย์ที่ทำงานในช่วงเวลายาว ซึ่งประสิทธิภาพสามารถแลกเปลี่ยนกับเวลา

ต่างจากระบบขับเคลื่อนเคมีที่ต้องถึงประสิทธิภาพสูงต่อวินาทีเพื่อลดเชื้อเพลิง เรืออากาศ EAD แสงอาทิตย์สามารถยอมรับความไร้ประสิทธิภาพได้หากสามารถ **ทำงานไม่สิ้นสุด** ตัวชี้วัดความสำเร็จไม่ใช่แรงกระตุ้นเฉพาะ แต่ **ความอดทนเฉพาะ**: จุลที่สะสมในช่วงวัน

จากความเครียดแม่เหล็กเวลล์สู่แรงผลักดันมาโครสโคปิก

เพื่อแสดงการเชื่อมต่อระหว่างทฤษฎีสถานะและประสบการณ์ประจำวัน พิจารณาคอนเดนเซอร์แผ่นขนานในสุญญากาศ แรงดันระหว่างแผ่นคือ $p = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$ หาก $E = 10^6 \text{ V/m}$ แล้ว $p \approx 4.4 \text{ N/m}^2$ คูณด้วยพื้นที่ และคุณได้แรงเชิงกลที่จำเป็นสำหรับการแยกแผ่น ความเครียดไฟฟ้าสถิตคือแรงดันเชิงกลอย่างแท้จริง

การขับเคลื่อน EAD แทนที่แผ่นหนึ่งด้วยบรรยากาศเอง ไอออนคือสื่อที่สนามความเครียดถูกส่งผ่าน แทนแรงดันคงที่ เราได้การไหลที่กำหนดทิศทาง สมการ $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ คืออนุกรมแบบไดนามิกของแรงดันคอนเดนเซอร์คงที่นั้น

เมื่อรวมเหนือพื้นผิวของเรืออากาศ ความเครียดที่รวมกันกลายเป็นเวกเตอร์แรงผลักดันสุทธิ เช่นเดียวกับแรงดันที่รวมกันเหนือพื้นผิวปีกให้แรงยก อะนาล็อกที่ลึก: แรงยกทางอากาศไดนามิกคือการไหลของโมเมนตัมอากาศที่เบี่ยงเบนโดยพื้นผิว; แรงผลักดัน EAD คือการไหลของโมเมนตัมไอออนที่ถูกเร่งโดยสนาม

Ionoplane ของ MIT และหลักฐานทางทดลอง

เป็นเวลาหลายทศวรรษ ผู้สงสัยปฏิเสธ EAD เป็นความอยากรู้ในห้องปฏิบัติการ จากนั้นในปี 2018 เครื่องบินปีกคงที่ขนาดเล็กที่สร้างโดย MIT แสดง **การบินที่มั่นคงโดยไม่มีใบพัด** ที่ขับเคลื่อนด้วยแรงผลักดันทางไฟฟ้าแอโรไดนามิกเท่านั้น “Ionoplane” ชั่งน้ำหนักประมาณ 2.5 กก. และบินหลายสิบลเมตรด้วยพลังงานจากแบตเตอรี่อัตราส่วนแรงผลักดันต่อน้ำหนักของมันเล็ก แต่ความสำเร็จเป็นประวัติศาสตร์: ยานพาหนะที่หนักกว่าน้ำหนักอากาศตัวแรกที่ได้รับการสนับสนุนในการบินด้วยระบบขับเคลื่อนไอออน

สำคัญคือ ทฤษฎีและพื้นฐานแนวคิดที่นำไปสู่การสาธิตนั้นถูกพัฒนาอย่างอิสระแล้ว กรอบทฤษฎีที่นำเสนอใน **การขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแอโรไดนามิก** (https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html) ได้อธิบายกลไกเดียวกันในแง่ของ **ความเครียดแมกซ์เวลล์** และ **แรงตัวของคูลอมบ์** หลายปีก่อน เน้นทอพอโลยีสนามและความสามารถในการสเกลแทนเคมีของโคโรนา

Ionoplane ของ MIT พิสูจน์ความเป็นจริงของเอฟเฟกต์ในอากาศหนาแน่น โครงการ Rise-Fly-Orbit มุ่งขยายมันไปสู่อากาศบาง ที่ซึ่งฟลักส์กลายเป็นยิ่งเจือจางกว่า หากเครื่องบินเล็กสามารถบินที่ 1 บาร์ เรืออากาศแสงอาทิตย์สามารถบินสู่วงโคจรที่ไม่โครบาร์ ด้วยความอดทนและแสงอาทิตย์ที่พอ

คุณธรรมของความเรียบง่าย

การขับเคลื่อน EAD เป็นแนวคิดที่สง่างาม: ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหว ไม่มีการเผาไหม้ ไม่มีไอเสียความเร็วสูง ไม่มีครายโอเจนิคส์ องค์ประกอบของมันแข็งแกร่งตามธรรมชาติ – ขั้ว ใดอิเล็กทริก ตัวแปลงกำลัง และผิวโฟโตโวลตาอิก ระบบสเกลตามธรรมชาติกับพื้นที่ ไม่ใช่มวล

ความท้าทายทางเทคนิคย้ายจากอุณหพลศาสตร์ไปยัง **วิศวกรรมไฟฟ้าและวิทยาศาสตร์วัสดุ**: การป้องกันการกัดกร่อนของโคโรนา การจัดการการรั่วไหลของประจุ และการรักษาการแยกแรงดันสูงในความดันที่เปลี่ยนแปลง สิ่งเหล่านี้แก้ไขได้ด้วยวัสดุสมัยใหม่และไมโครอิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากกลไก EAD ขึ้นอยู่เฉพาะกับเรขาคณิตของสนามและความเคลื่อนไหวของไอออน มันจึง **เป็นโมดูลาร์โดยกำเนิด** แต่ละตารางเมตรของผิวเรืออากาศสามารถถือเป็นกระเบื้องที่มี T/P และลักษณะแรงดันที่รู้จักกันดี แรงผลักดันรวมของยานคือผลรวมเวกเตอร์ของหลายพื้นกระเบื้องอิสระ โมดูลาร์นี้ช่วยให้การเชื่อมสภาพที่สง่างาม – ความล้มเหลวของโมดูลไม่ก่ตัวไม่กระทบต่อทั้งหมด

เรืออากาศทางไฟฟ้าแอโรไดนามิกเป็นระบบ

เมื่อเชื่อมต่อกับพลังงานแสงอาทิตย์ การขับเคลื่อน EAD กลายเป็นไม่ใช่แหล่งแรงผลักดันเท่านั้น แต่เป็น **ระบบสภาพภูมิอากาศ** สำหรับยาน สนามเดียวกันที่สร้างแรงผลักดันยังไอออนโซลาร์ร่อนลอย ลดการชาร์จพื้นผิว และ

อาจส่งผลต่อคุณสมบัติของชั้นขอบเขต สนามไฟฟ้าสามารถทำหน้าที่เป็น “ใบเรือไฟฟ้าสถิต” ที่ปรับได้ ซึ่งโต้ตอบอ่อนๆ กับสนามแม่เหล็กของโลกหรือพลาสมาโดยรอบในชั้นบรรยากาศบน

ในระยะยาว สามารถจินตนาการการควบคุมแอกทิฟของแรงต้านโดยการจัดการการกระจายประจุพื้นผิว – **ไล่ต้านทานทางไฟฟ้าไดนามิก** ที่เปลี่ยนความเครียดสนามท้องถิ่นเพื่อปรับเส้นทางการบินโดยไม่มีพื้นผิวควบคุมเชิงกล

ความเป็นไปได้เหล่านี้ย้ายการขับเคลื่อน EAD เกินความอยากรู้ไปสู่ขอบเขตของเทคโนโลยีควบคุมการบินสถานะของแข็งหลายวัตถุประสงค์ – ใช้ได้ทุกที่ที่ก๊าซหรือพลาสมาสามารถถูกโฟลาร์ไรซ์และเร่งด้วยสนามไฟฟ้า

สถาปัตยกรรมทางวิศวกรรมและไดนามิกการบิน

ข้อดีพื้นฐานของแนวคิด Rise-Fly-Orbit ไม่ใช่ในวัสดุแปลกประหลาดหรือฟิสิกส์ปฏิกิริยา แต่ใน **การจัดเรียงใหม่ของหลักการที่คุ้นเคย** แรงลอยตัว พลังงานแสงอาทิตย์ และไฟฟ้าสถิตทั้งหมดเข้าใจดี สิ่งใหม่คือวิธีที่พวกมันถูกเรียงลำดับเป็นหนึ่งในคอนติเนียม: **การลอยขึ้นโดยไม่มีช่วงเวลาของความไม่ต่อเนื่อง**

จรวดผ่านระบอบที่แตกต่างกัน – การปล่อย การไหม้ การลอย และวงโคจร เรืออากาศทางไฟฟ้าแอโรไดนามิก ในทางตรงกันข้าม 经历เพียงการเปลี่ยนผ่านแบบค่อยเป็นค่อยไป มันลอยขึ้นด้วยความเบา บินด้วยแรงยก และโคจรด้วยความเฉื่อย แต่ละขั้นตอนหลอมรวมเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป ควบคุมโดยการโต้ตอบที่มั่นคงเดียวกันของแรงลอยตัว แอโรไดนามิก และไฟฟ้าสถิต

เปลือก: โครงสร้างเป็นชั้นบรรยากาศ

เปลือกของเรืออากาศต้องตอบสนองความต้องการที่ขัดแย้ง: มันต้องเป็นทั้ง **เบาและแข็งแรง นำไฟฟ้าและแยก โปร่งใสต่อแสงอาทิตย์แต่ต้านทานรังสี** สิ่งเหล่านี้สามารถปรับสมดุลได้ผ่านการก่อสร้างแบบชั้น

ชั้นนอกสุดสามารถเป็น **โพลีเมอร์ที่โลหะ** – ตัวอย่างเช่น ฟิล์มบางของคาปตันที่เคลือบอะลูมิเนียมหรือโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต ชั้นนี้ให้การป้องกัน UV และทำหน้าที่เป็นพื้นผิวขั้วบางส่วนสำหรับกระเบื้อง EAD ได้ **โซลาร์ ชั้นไดอิเล็กทริก** ที่ป้องกันการปล่อยที่ไม่ต้องการและกำหนดช่องว่างไปยังขั้วผู้รวบรวมภายใน โครงสร้างภายในคือเครือข่ายของเมมเบรนที่ตึงและค้ำยันที่รักษาเรขาคณิตโดยรวมที่ความดันเกินภายในเล็กน้อย ในระดับ $\Delta p \approx 300 \text{ Pa}$ – เพียงไม่กี่พันของความดันบรรยากาศ

ความดันเกินนี้พอที่จะรักษาเปลือกให้ตึง แต่ไม่พอที่จะทำให้มวลโครงสร้างสำคัญ ในทางปฏิบัติ ยานทั้งหมดคือคอนเดนเซอร์ขนาดใหญ่และเบา ผิวของมันถูกชาร์จและมีชีวิตด้วยเส้นสนาม

ปริมาตรภายในถูกเติมด้วยก๊าซเฉื่อย – ไฮโดรเจนหรือฮีเลียม เนื่องจากความดันเกินที่จำเป็นเล็กน้อย ข้อกำหนดการรับน้ำหนักของวัสดุจึง **ครบถ้วน** เป็นหลัก ปัญหาหลักคือการซึมผ่านของก๊าซและการเสื่อมสภาพ UV ระหว่างภารกิจยาว ซึ่งทั้งสองแก้ไขได้ด้วยการเคลือบสมัยใหม่และฟิล์มชั้น

ไฮโดรเจนหรือฮีเลียม

การเลือกก๊าซกำหนดบุคลิกภาพของยาน

ไฮโดรเจน นำเสนอแรงยกสูงสุด ให้แรงลอยตัวประมาณ 10% มากกว่าไฮโดรเจน ความแตกต่างนี้กลายเป็นสำคัญเมื่อปริมาตรรวมถึงล้านลูกบาศก์เมตร ไฮโดรเจนยังหาได้ง่ายและสามารถผลิตในสถานที่ด้วยการอิเล็กโทร

ลิชชีด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ของน้ำ ข้อเสียของมัน แน่นอน คือความไวไฟ

การมีอยู่ของไฟฟ้าสถิตแรงดันสูงทำให้การจัดการไฮโดรเจนไม่ใช่เรื่องง่าย ความปลอดภัยขึ้นอยู่กับ การแบ่งส่วนที่ละเอียดอ่อน การคัดกรองไฟฟ้าสถิต และการระบายอากาศ โมดูล EAD เองถูกปิดผนึกและแยกจากเซลล์ก๊าซด้วยบาเรียไดอิเล็กทริก และความแตกต่างของศักย์ผ่านโครงสร้างถูกลดลงด้วยการกระจายประจุที่เหมาะสม

อีเลียม ในทางตรงกันข้าม เป็นกลางและปลอดภัยแต่ให้แรงยกต่ำกว่าและต้นทุนสูงกว่า ข้อเสียหลักของมันคือความขาดแคลน; การใช้ในระดับใหญ่สามารถกีดกันอุปทาน สำหรับยานทดสอบ初期และการบินแสดงสาธารณะอีเลียมคือตัวเลือกที่รอบคอบ สำหรับความพยายาม軌道操作ในคอรีดอร์ห่างไกล ไฮโดรเจนอาจสมเหตุสมผลด้วยประสิทธิภาพและต้นทุน

ไม่ว่าจะอย่างไร การออกแบบเปลือกก็เข้ากันได้ในระดับใหญ่; ระบบจัดการก๊าซและความปลอดภัยต่างกันเท่านั้น

พลังงานแสงอาทิตย์และการจัดการพลังงาน

ดวงอาทิตย์คือเครื่องยนต์ของยาน แต่ละวัตต์ของพลังงานไฟฟ้าเริ่มต้นด้วยแสงอาทิตย์ที่ถูกดูดซับโดยผิวโฟโตโวลตาอิก

โฟโตโวลตาอิกที่มีประสิทธิภาพสูงและอัลตราเบา – คอมโพสิตฟิล์มบางของกัลเลียม-อาร์เซไนด์หรือเพอร์อฟสไกต์ที่ลามิเนตบนพื้นผิวเรืออากาศ – สามารถบรรลุกำลังเฉพาะใกล้ **300–400 W/kg** อาร์เรย์ถูกจัดวางแบบคอนฟอร์มอลเพื่อรักษาความเรียบทางอากาศไดนามิก การจัดการกำลังถูกกระจาย: แต่ละส่วนของแผงให้อาหารตัวติดตามจุดกำลังสูงสุดท้องถิ่น (MPPT) ที่ควบคุมแรงดันไปยังบัลลัสแรงดันสูงที่จ่ายกระเบื้อง EAD

เนื่องจากยานสัมผัสกับวัฏจักรกลางวันกลางคืน มันบรรทุก **บัลลัสพลังงานที่ ckrpom** – แบตเตอรี่เบาหรือซูเปอร์คาปาซิเตอร์ – เพื่อรักษาการดำเนินงานระดับต่ำผ่านความมืด แต่เหล่านี้ไม่ใหญ่; ปริมาณการออกแบบระบบคือ **ขับเคลื่อนโดยตรงด้วยแสงอาทิตย์** ไม่ใช่พลังงานที่เก็บไว้ ที่ความสูงวงโคจร ยานสามารถไล่ตามแสงอาทิตย์เกือบต่อเนื่อง จุ่มลงในจันทร์ครีเพียงชั่วคราว

การควบคุมความร้อนถูกจัดการด้วยรังสี ด้วยการพาความร้อนที่ละเอียดได้ที่ความสูงสูง การปฏิเสธความร้อนขึ้นอยู่กับ **พื้นผิวที่มี emissivity สูง** และเส้นทางนำไปยังรังสี โชคดี กระบวนการ EAD 相对เย็น – ไม่มีการเผาไหม้ – และโหลดความร้อนหลักมาจากแสงอาทิตย์ที่ถูกดูดซับ

กระเบื้องทางไฟฟ้าแอโรไดนามิก

แต่ละตารางเมตรของโครงสร้างทำงานเป็น **กระเบื้อง EAD** – เซลล์ขับเคลื่อนที่เป็นอิสระประกอบด้วยเอมิเตอร์ผู้รวบรวม และวงจรควบคุมขนาดเล็ก เอมิเตอร์อาจเป็นตาข่ายละเอียดของจุดแหลมหรือลวดที่ศักย์บวกสูง ในขณะที่ผู้รวบรวมคือตาข่ายกว้างที่ถูกกักใกล้กราวด์หรือศักย์ลบ พื้นที่ระหว่างกันคือพื้นที่ปล่อยที่ควบคุม

เมื่อถูกกระตุ้น กระเบื้องตั้งสนามไฟฟ้า E สร้างความหนาแน่นของประจุ ρ_e และผลิตแรงผลักดันท้องถิ่น $f = \rho_e E$ ที่กำหนดทิศทางแบบสัมผัสตามพื้นผิว โดยการปรับโมดูลแรงดันบนกระเบื้องต่าง ๆ เรืออากาศสามารถนำทาง เอียง และหมุนโดยไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหว

เรขาคณิตปรับตัวคือกุญแจ เมื่อความดันโดยรอบลดลงกับความสูง เส้นทางอิสระเฉลี่ยเพิ่มขึ้น เพื่อรักษาการปล่อยที่มีประสิทธิภาพ ระยะห่างช่องว่างที่มีประสิทธิภาพ d ระหว่างเอมิเตอร์และผู้รวบรวมต้องเพิ่มขึ้นโดย

ประมาณตาม $1/p$ นี้สามารถทำได้ด้วย **ตัวคั่นไดโอิเล็กทริกที่ยืดหยุ่นและพองตัว** ที่ขยายตัวเล็กน้อยเมื่อความดันภายนอกลดลง หรือด้วย **การปรับโมดูลีเล็กรอนิกส์** ของเกรเดียนต์ศักย์เพื่อเลียนแบบช่องว่างที่ใหญ่กว่า

กระเบื้องแต่ละอันรายงานเทเลเมทรี – กระแส แรงดัน นับบาร์ค – ไปยังตัวควบคุมกลาง หากกระเบื้องสัมผัสสารหรือการเสื่อมสภาพ มันถูกปิดและข้าม การออกแบบโมดูลีหมายความว่า การสูญเสียกระเบื้องเดี่ยวแทบไม่ส่งผลกระทบต่อแรงผลักดันรวม

จากแรงลอยตัวไปยังแรงผลักดัน

การบินเริ่มต้นอย่างนุ่มนวล ในการปล่อย เรืออากาศลอยขึ้นด้วยแรงลอยตัวสู่สตราโตสเฟียร์ ในระหว่างการลอยขึ้น ระบบ EAD ทำงานในโหมดกำลังต่ำ ให้แรงผลักดันน้อยสำหรับการคงตัวและควบคุมการลอย

ที่ความสูงประมาณ 30–40 กม. ที่ซึ่งอากาศบางแต่ยังชนกัน การเร่งหลักเริ่มต้น เรืออากาศค่อยๆ หันไปสู่การบินแนวนอน กำหนดแกนยาวของมันในทิศทางของการเคลื่อนไหวยวโคจรที่ตึงใจ

ในตอนแรก แรงผลักดันถูกสมดุลระหว่างการเร่งแนวนอนและการเพิ่มแรงยก แรงลอยตัวที่เหลือของยานชดเชยส่วนใหญ่ของน้ำหนักของมัน; แรงผลักดัน EAD ให้ทั้งส่วนประกอบข้างหน้าและขึ้นเล็กน้อย เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น แรงยกไดนามิกเติบโตและแรงลอยตัวกลายเป็นไม่สำคัญ การเปลี่ยนผ่านเรียบ – ไม่มี “ช่วงเวลาการทะยาน” เพราะเรืออากาศไม่เคยนั่งบนรันเวย์

การลอยขึ้นสามสัปดาห์

พิจารณามวลยานตัวแกน $m = 2000 \text{ kg}$ เพื่อบรรลุความเร็ววงโคจร $v = 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$ ใน $t = 1.8 \times 10^6 \text{ s}$ (สามสัปดาห์) แรงผลักดันเฉลี่ยที่จำเป็นคือ

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

8.7 N – น้ำหนักส้มเล็ก – คือแรงผลักดันรวมที่จำเป็นสำหรับการไปถึงวงโคจรหากใช้ต่อเนื่องสามสัปดาห์

หาก T/P ของระบบคือ **0.03 N/W** ตัวอย่างของการทำงาน EAD ที่มีประสิทธิภาพที่ความดันต่ำ การผลิต 8.7 N ต้องการเพียงประมาณ **290 W** ของกำลัง มันดูน่าประหลาดใจเล็กน้อย และในทางปฏิบัติ การสูญเสียต้านทานเพิ่มเติมจะยกข้อกำหนดเป็นสิบกิโลวัตต์ แต่แผงแสงอาทิตย์ที่ครอบคลุมหลายร้อยตารางเมตรสามารถให้ได้ อย่างง่ายดาย

รวมตัวคุณความปลอดภัย 100 สำหรับความไร้ประสิทธิภาพและแรงต้าน: ประมาณ **30 kW** ของกำลังไฟฟ้า ด้วยประสิทธิภาพรวม 15% จากแสงอาทิตย์ไปยังแรงผลักดัน ยานต้องเก็บเกี่ยวประมาณ **200 kW** ของพลังงานแสงอาทิตย์ นั่นคือประมาณ 700 ตารางเมตรของพื้นที่แสงอาทิตย์ที่ใช้งานที่เอาต์พุต 300 W/m^2 – พื้นที่เล็กกว่าสนามฟุตบอล ง่ายต่อการรวมเข้าในเรืออากาศยาว 100 เมตร

เลขคณิตศาสตร์ง่ายๆ นี้แสดงว่าการไหลของพลังงาน **เป็นไปได้** สิ่งที่จะรวบรัดด้วยความหนาแน่นของกำลังเรืออากาศบรรลุด้วยความอดทนและพื้นที่

แรงต้านและคอร์ริเดอร์ความสูงสูง

แรงต้านยังคงเป็นหลักของการดูดซับพลังงาน แรงต้านคือ $F_D = \frac{1}{2}\rho v^2 AC_D$ และกำลังที่สอดคล้องคือ $P_D = F_D v = \frac{1}{2}\rho v^3 AC_D$

ที่ 50 กม. $\rho \approx 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ หาก $A = 100 \text{ m}^2$ $C_D = 0.05$ และ $v = 1000 \text{ m/s}$ แล้ว

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

นั่นคือ 2.5 เมกะวัตต์ - สูงเกินไป แต่ที่ 70 กม. ที่ $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ การกำหนดค่าดังกล่าวให้เพียง 25 kW ของกำลังต้านทาน ดังนั้นกลยุทธ์: **บินขณะเร่ง** อยู่บนเส้นทางที่ ρv^3 ยังคงคงที่โดยประมาณ

คอร์ริเดอร์ที่เหมาะสมคือที่ซึ่งอากาศบางลงทีละน้อย อาจ 40–80 กม. สูง ที่ซึ่งชั้นบรรยากาศให้ความหนาแน่นกลางพอสำหรับการทำงาน EAD แต่พอที่จะรักษาแรงต้านที่จัดการได้

การควบคุมยานและความมั่นคง

ไม่มีใบพัดหรือครีบ ความมั่นคงมาจากความสมมาตรของสนาม การกระตุ้นต่างของกระเบื้องให้โมเมนต์ หากกระเบื้องด้านหน้าทิ้งซ้ายผลิตแรงผลักดันมากกว่าเล็กน้อยทางด้านขวา ยาน yaw อย่างนุ่มนวล การควบคุม pitch ถูกบรรลุโดยการเบี่ยงเบนกระเบื้องบนและล่าง เนื่องจากแรงผลักดันต่อกระเบื้องเล็ก การตอบสนองช้า แต่ยานทำงานในระบอบที่ความคล่องตัวไม่จำเป็น

เซ็นเซอร์ท่าทาง - ไจโรสโคป อักเซลิโรมิเตอร์ แทร็กเกอร์ดาว - ให้หาระบบควบคุมดิจิทัลที่รักษาทิศทางสำหรับการตกกระทบแสงอาทิตย์สูงสุดและเส้นทางการบินที่ต้องการ ขนาดมหาศาลของยานและระบอบการบินช้าทำให้มันมั่นคงอย่างน่าประหลาดใจ

ความปลอดภัยทางความร้อนและไฟฟ้า

การทำงาน EAD รวมถึงสับถึงร้อยกิโลวัตต์ที่กระแสน้ำ ในอากาศบางและแห้งของสตราโตสเฟียร์ การแยกต่างหากทำงานต่างกัน: อาร์คสามารถแพร่กระจายระยะทางไกลบนพื้นผิว การออกแบบไฟฟ้าของเรืออากาศจึงถือโครงสร้างทั้งหมดเป็นระบบศักย์ควบคุม เส้นทางนำไฟฟ้าเป็นแบบสำรอง ด้วยชั้นแยกที่แยกเซลล์ก๊าซจากสาย HV

อาร์คไม่ใช่หายนะ - มันมีแนวโน้มเป็นท้องถิ่นและดับตัวเอง - แต่สามารถทำลายขั้วได้ แต่ละกระเบื้องตรวจสอบรูปคลื่นกระแสของมัน; หากการปล่อย spike ตัวควบคุมลดแรงดันหรือปิดโมดูลที่ได้รับผลกระทบเป็นวินาทีหลายตัว

ทางความร้อน การขาดการพาความร้อนหมายความว่าให้ความร้อนท้องถิ่นใดๆ ต้องถูกกระจายโดยการนำไปยังแผงรังสี วัสดุถูกเลือกสำหรับ emissivity สูงและการดูดซับต่ำในอินฟราเรด อนุญาตให้ความร้อนส่วนเกินรังสีสู่จักรวาล

ความสามารถในการสเกลและโมดูลาร์

ระบบสเกลด้วยการเทสเซลเลชัน ไม่ใช่การเพิ่มแรงดัน การเพิ่มจำนวนกระเบื้องสองเท่าจะเพิ่มแรงผลักดันสองเท่า; ไม่จำเป็นต้องปล่อยที่ใหญ่กว่า นี่ทำให้สถาปัตยกรรม **สเกลเชิงเส้น** จากแบบจำลองห้องปฏิบัติการไปยังยาน軌道

ต้นแบบที่เป็นจริงอาจเริ่มจากแพลตฟอร์มเล็กที่เต็มไปด้วยฮิลล์กับโหลตารางเมตรของพื้นผิว EAD สร้างแรงผลักดันมีลิวตันที่วัดในชั่วโมง ผู้แสดงที่ใหญ่กว่าสามารถตามมา แต่ละตัวขยายพื้นที่และกำลัง เวอร์ชัน軌道สุดท้ายอาจครอบคลุมหลายร้อยเมตร ด้วยกระเบื้องหลายพันที่ควบคุมอย่างอิสระ ทำงานภายใต้พลังงานแสงอาทิตย์เต็มเดือนต่อเดือน

เนื่องจากองค์ประกอบทั้งหมดเป็นสถานะของแข็ง ระบบมีอายุการใช้งานยาวโดยกำเนิด ไม่มีแบตเตอรี่หรือวัฏจักรการเผาไหม้ที่สึกหรอ – เพียงการกัดกร่อนจำกัดที่น้อยและการเสื่อมอายุของวัสดุ ด้วยการออกแบบที่ระมัดระวัง เวลาเฉลี่ยระหว่างความล้มเหลวสามารถถึงปี

โปรไฟล์การลอยขึ้นและการเปลี่ยนผ่านความสูง

ภารกิจทั้งหมดสามารถจินตนาการเป็นเกลียวเรียบในระนาบ (v, ρ) : ขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นลดลงเส้นทางถูกเลือกเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ ρv^3 – ที่กำหนดกำลังต้านทาน – อยู่ต่ำกว่าค่าขาดที่ระบบแสงอาทิตย์สามารถจัดหาได้

1. **การลอยขึ้นด้วยแรงลอยตัว** ไปยัง 30–40 กม.
2. **เฟสเร่ง:** รักษา $P_D \approx 20\text{--}50\text{ kW}$ โดยประมาณคงที่โดยปรับ pitch และความสูง
3. **การเปลี่ยนผ่านไปยังระบอบวงโคจร:** เหนือ 70 กม. แรงยกและแรงลอยตัวหายไป และเรืออากาศกลายเป็นดาวเทียมที่ยังคงอยู่ในบรรยากาศ

การเปลี่ยนผ่านจาก “การบิน” ไป “วงโคจร” ไม่ใช่ขอบเขตที่ชัดเจน ชั้นบรรยากาศค่อยๆ จางลง; แรงผลักดันชดเชยแรงต้านจนแรงต้านหยุดมีความหมาย เส้นทางของยานกลายเป็นวงกลมแทนแบบบอลิสติก และมันคงที่สูงโดยไม่มีที่สิ้นสุด

สมดุลพลังงานและความทนทาน

การรวมเหนือการลอยขึ้นทั้งหมด การป้อนพลังงานรวมจากดวงอาทิตย์กว้างใหญ่เมื่อเทียบกับที่จำเป็น แม้ที่อัตราการเก็บเกี่ยวที่ $\approx 100\text{ kW}$ สามสัปดาห์ของการทำงานต่อเนื่องสะสม

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

สำหรับยาน 2000 กก. นั่นคือ **90 MJ/kg** – สามเท่าของข้อกำหนดพลังงานจลน์วงโคจร ส่วนใหญ่ของพลังงานนี้จะสูญเสียไปกับแรงต้านและความไร้ประสิทธิภาพ แต่ขอบเขตนั้นใจกว้าง

นี่คือเวกเตอร์เจียบของความอดทนแสงอาทิตย์: เมื่อเวลาถูกอนุญาตให้ยืด พลังงานอุดมสมบูรณ์แทนที่การขาดแคลนของกำลัง

การบำรุงรักษา การกลับ และการใช้งานซ้ำ

หลังจากเสร็จสิ้นภารกิจวงโคจร เรืออากาศสามารถชะลอตัวลงทีละน้อยโดยการย้อนขั้วสนาม EAD แรงต้านเพิ่มขึ้นขณะลง; กลไกเดียวกันที่ยกมันตอนนี้ทำหน้าที่เป็นเบรก ยานสามารถกลับสู่สตราโตสเฟียร์และลอยลงภายใต้แรงลอยตัวที่เหลือ

เนื่องจากไม่มีขั้นตอนที่ใช้แล้วทิ้งที่ถูกทิ้ง ระบบ **ใช้งานซ้ำได้เต็มรูปแบบ** เปลือกสามารถบำรุงรักษา ใหม่ และปล่อยใหม่ การบำรุงรักษา รวมถึงการแทนที่กระเบื้องหรือฟิล์มที่เสื่อมสภาพแทนการสร้างใหม่ของเครื่องยนต์

ในทางตรงกันข้ามกับจรวดเคมี ที่การปล่อยแต่ละครั้งใช้ถังและเชื้อเพลิง เรืออากาศ EAD คือ **ยานอวกาศไร้เชื้อเพลิง** ดวงอาทิตย์เติมมันต่อเนื่อง; เพียงการสีกหรือที่ต้องการการแทรกแซงมนุษย์

ความสำคัญทางวิศวกรรมที่กว้างขึ้น

เทคโนโลยีเดียวกันที่ทำให้เรืออากาศ EAD แสงอาทิตย์เป็นไปไม่ได้ – โฟโตโวลตาอิกเบา อิเล็กทรอนิกส์กำลังแรงดันสูง ไดอิเล็กทริกฟิล์มบาง – มีการใช้งานบนพื้นดินกันที่ แพลตฟอร์มสื่อสารสตราโตสเฟียร์ เซ็นเซอร์สภาพภูมิอากาศความสูงสูง และโดรนที่ทนทานยาวนานทุกตัวได้รับประโยชน์จากการพัฒนาเดียวกัน

โดยการไล่ตามระบบที่สามารถถึงวงโคจรโดยไม่ใช้เชื้อเพลิง เรา还发明了 **ยานอวกาศสถานะของแข็ง** ขึ้นใหม่ – เครื่องจักรที่บินไม่ใช่ด้วยการเผาไหม้ แต่ด้วยการจัดการสนาม

ในความหมายนี้ โครงการ Rise-Fly-Orbit ยืนอยู่ในสายที่รวม Wright Flyer และจรวดเชื้อเพลิงของเหลวตัวแรก: ไม่ใช่เทคโนโลยีที่สมบูรณ์แบบ แต่ **หลักฐานของหลักการ** ที่เปลี่ยนแปลงความหมายของ “การบิน”

กฎระเบียบ กลยุทธ์ และปรัชญาของการลอยขึ้นช้า

ฟิสิกส์ของเรืออากาศทางไฟฟ้าแอโรไดนามิกแสงอาทิตย์เป็นแบบอนุญาต; กฎหมายไม่ใช่ กฎการบินในปัจจุบันแบ่งท้องฟ้าเป็นโดเมนที่จำกัดอย่างเรียบร้อย: **พื้นที่อากาศ** ที่ควบคุมโดยกฎหมายการบิน และ **อวกาศภายนอก** ที่ควบคุมโดยกฎหมายอวกาศ ระหว่างพวกมันคือพื้นที่สีเทา – สูงเกินไปสำหรับการรับรองเครื่องบิน ต่ำเกินไปสำหรับการลงทะเบียนวงโคจร เรืออากาศไปยังวงโคจรอาศัยอยู่ตรงในสีเทา เปลี่ยนผ่านความสูงต่อเนื่องที่ ซึ่งบนกระดาษ ไม่ принадлежит к категориямใดๆ

ทำไมมัน “เป็นไปไม่ได้”

กฎหมายพื้นที่อากาศ สมมติยานพาหนะที่ทะยานและลงจอดภายในชั่วโมง พวกมันต้องการเครื่องยนต์ที่รับรองพื้นผิวควบคุมทางอากาศไดนามิก และความสามารถในการยอมให้อากาศ ไม่มีสมมติฐานเหล่านี้ที่เหมาะสมกับลูกโป่งอัตโนมัติที่ขับเคลื่อนด้วยแสงอาทิตย์ที่อาจล่าช้าสัปดาห์เหนือ 60 กม.

กฎระเบียบยานพาหนะปล่อย เริ่มต้นที่จรวดจุดไฟ: จุดระเบิดแยก สถานที่ปล่อย และระบบสิ้นสุดการบินที่ออกแบบมาเพื่อกักกันการระเบิด เรืออากาศของเราไม่มีอะไรจากนี้ มันลอยขึ้นช้าเหมือนเมฆ; ไม่มี “ช่วงเวลาการปล่อย” อย่างไรก็ตาม เพราะมันสุดท้ายจะเกิน Mach 1 และถึงความเร็ววงโคจร มันตกอยู่ภายใต้เขตอำนาจศาลการบินอวกาศ ผลลัพธ์คือแบบพาราโดกซ์: มันไม่สามารถบินตามกฎหมายเป็นเครื่องบิน แต่ต้องได้รับใบอนุญาตเป็นจรวดที่มันไม่เหมือน

ขึ้นยานพาหนะไฮบริดบรรยากาศ-วงโคจร

การรักษาคือการยอมรับหมวดหมู่ใหม่ – **ยานพาหนะไฮบริดบรรยากาศ-วงโคจร (HAOV)** ลักษณะกำหนดของมันจะเป็น:

- **การข้ามโดเมนต่อเนื่อง:** การลอยขึ้นจากพื้นผิวสู่อวกาศใกล้โดยไม่มีขั้นตอนแยก
- **กระแสพลังงานจลน์ต่ำ:** การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมรวมกับบรรยากาศต่ำกว่าหลายระดับจากจรวด
- **พฤติกรรมปลอดภัยแบบพาสซีฟ:** เมื่อสูญเสียกำลัง ยานลอยและลง; มันไม่ตกแบบบอลิสติก
- **การติดตามร่วม:** มองเห็นเสมอสำหรับเรดาร์และเซ็นเซอร์ดาวเทียม ส่งสัญญาณเวกเตอร์สถานะเช่น ADS-B transponder สำหรับเครื่องบิน

กรอบ HAOV จะอนุญาตให้รับร่อนยานดังกล่าวภายใต้ **เกณฑ์ที่อิงตามประสิทธิภาพ** แทน **ที่อิงตามฮาร์ดแวร์** – กำหนดความปลอดภัยในแง่การปล่อยพลังงาน รอยเท้าพื้นดิน และความสามารถในการลงแบบอัตโนมัติแทนการมีอยู่ของเครื่องยนต์หรือเชื้อเพลิง

คอร์ริเดอร์ มหาสมุทรหรือทะเลทรายสามารถถูกกำหนดที่ซึ่ง HAOV สามารถทำงานต่อเนื่อง ถูกตรวจสอบโดยเครือข่ายการจราจรอวกาศที่มีอยู่ การลอยขึ้นของพวกมันจะก่อให้เกิดอันตรายน้อยกว่าลูกโป่งสภาพอากาศเดี่ยว แต่กฎปัจจุบันไม่นำเสนอเส้นทางสำหรับพวกมัน

การเมืองของความอดทน

กฎระเบียบตามวัฒนธรรม และวัฒนธรรมติดยาเสพติดความเร็ว จุดสำคัญทางอากาศและอวกาศวัดด้วยอัตราส่วนแรงผลักดันต่อน้ำหนักและนาทิสู่วงโคจร แนวคิดที่ยานพาหนะอาจใช้เวลา **สามสัปดาห์** เพื่อถึงวงโคจรฟังดูเหมือนถดถอยในการไต่ขึ้นครั้งแรก แต่ความอดทนคือราคาของความยั่งยืน เรืออากาศเสนอเมตริกที่แตกต่าง: ไม่ใช่ “เราสามารถเผาพลังงานได้เร็วแค่ไหน” แต่ “เราสามารถสะสมมันต่อเนื่องแค่ไหน”

สำหรับหน่วยงานอวกาศที่คุ้นเคยกับหน้าต่างปล่อยและการนับถอยหลัง ยานดังกล่าวต้องการการเปลี่ยนแปลงในการดำเนินงาน: การวางแผนภารกิจตามฤดูกาลแทนวินาที; การแทรกวงโคจรที่ขึ้นอยู่กับเรขาคณิตของแสงอาทิตย์ ไม่ใช่ความพร้อมใช้งานของแพลตฟอร์ม แต่การเปลี่ยนแปลงนี้สอดคล้องกับการหันที่กว้างขึ้นสู่ **โครงสร้างพื้นฐานสถานะคงที่** – ยานอวกาศแสงอาทิตย์-ไฟฟ้า สถานีที่ใช้งานซ้ำได้ แพลตฟอร์มสภาพอากาศที่ยั่งยืน

คุณค่าทางยุทธศาสตร์

ยานพาหนะแสงอาทิตย์-EAD ที่ใช้งานซ้ำได้นำเสนอความสามารถที่ไม่มีจรวดหรือเครื่องบินสามารถจับคู่ได้:

- **การสังเกตและสื่อสารความสูงสูงที่ยั่งยืน:** ก่อนวงโคจรเต็ม เรืออากาศสามารถลอยหลายเดือนในสตราโตสเฟียร์บน ส่งข้อมูลหรือถ่ายภาพโลก
- **การส่งสินค้าที่ละน้อย:** เพย์โหลดเล็กสามารถทยอยอย่างนุ่มนวลโดยไม่มีข้อกทางเสียงและความร้อนของการปล่อย
- **อนุกรมดาวเคราะห์:** บนดาวอังคาร ที่ความเร็ววงโคจรเพียง 3.6 กม./วินาที และความดันบรรยากาศชั้นขอบการเร่งไอออนเส้นทางยาว สถาปัตยกรรมเดียวกันสามารถทำงานได้ดีกว่า
- **การดูแลสิ่งแวดล้อม:** ไม่มีไอเสีย ไม่มีการรั่วไหลของเชื้อเพลิง ผลกระทบทางเสียงที่ละเอียด

ทางเศรษฐกิจ HAOV ใช้งานแรกจะไม่แทนที่จรวดแต่เสริมพวกมัน บริการนิชที่ซึ่งความอดทนของเพย์โหลดเกินความเร่งด่วน ทางยุทธศาสตร์ พวกมันจะแยกการเข้าถึงอวกาศไกลจากห่วงโซ่อุปทานเชื้อเพลิง – ลักษณะนำดึงดูดสำหรับหน่วยงานอวกาศที่มองหาโครงสร้างพื้นฐานที่ยั่งยืน

วิศวกรรมหนังสือกฎ

การสร้างหมวดหมู่ HAOV น้อยกว่าสิบปีมากกว่าคือ **การวัด** ผู้กำหนดกฎเชื่อข้อมูล เส้นทางไปข้างหน้าคือความโปร่งใสทางทดลอง:

1. **ผู้แสดงที่อิงฮิลียม** ในคอร์ริเดอร์ห่างไกล ที่ติดตั้งเพื่อบันทึกเส้นทาง การใช้พลังงาน และพฤติกรรมความผิดพลาด

2. **เทเลเมทรีต่อเนื่อง** ที่แบ่งปันกับการบินพลเรือนและเครือข่ายการติดตามอวกาศเพื่อพิสูจน์ไดนามิกการบินที่คาดเดาได้
3. **การจำลองและแบบจำลองความเสี่ยง** ที่แสดงว่ากระแสพลังงานจลน์กรณีเลวร้ายที่สุดเหนือพื้นที่ที่มีประชากรละเลยได้

เมื่อหน่วยงานเห็นหลักฐานที่วัดได้ว่า HAOV ไม่สามารถทำลายเครื่องบินหรือประชากรพื้นดิน สถาปัตยกรรมทางกฎหมายจะตามมา – อย่างที่กำกับลูกโป่งความสูงสูงและโดรนก่อนหน้า

นิติทางจริยธรรม

การบินข้าคือนักทางศีลธรรม ผู้ปล่อยเคมีทำให้มลพิษไม่ใช่เพราะวิศวกรไม่ระวัง แต่เพราะฟิสิกส์ไม่นำเสนอเวลาสำหรับการรีไซเคิลความร้อนของพวกมัน เรืออากาศแสงอาทิตย์ ในทางตรงกันข้าม ไม่บริโภคอะไรที่ไม่สามารถกู้คืนได้ มันแทนที่เสียงรบกวนด้วยความเงียบ แพลตฟอร์มประกาย การลอยขึ้นของมันจะมองเห็นได้จากพื้นดินเป็นจุดสว่างที่ไม่ร้อน ผลงานมนุษย์ที่ลอยขึ้นโดยไม่มี ความรุนแรง

ในยุคเร่งด่วน การเคลื่อนไหวที่ตึงใจเช่นนี้คือการประกาศ: ว่าคุณจะเยือกเยียนทางเทคโนโลยีไม่จำเป็นต้องระเบิดเพื่อให้ลึกซึ้ง

ความอดทนของแสง

เมื่อจรวดถึงวงโคจร มันทำการด้วยการเร่งแบบดิบ: วินาทีของการเผาไหม้ที่ทิ้งท้องฟ้าให้สิ้นสะท้าน เรืออากาศทางไฟฟ้าแอโรไดนามิกมาถึงต่างออกไป แต่ละโฟตอนที่กระทบผิวหนังของมันช่วยโมเมนตัมกระซิบ สื่อโดยอิเล็กทรอนิกส์ ไอออน และคณิตศาสตร์เจียบของสมการแม็กซ์เวลล์ ในสามสัปดาห์กระซิบเหล่านี้สะสมเป็นวงโคจร

การแสดงผลออกเดียวกัน – $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ – ที่อธิบายไมโครแอมป์ของการลอยไอออนในห้องปฏิบัติการ ยังปกครองร่างกายยกพันตันที่ลื่นไถลผ่านชั้นบรรยากาศบน สเกลเปลี่ยน; หลักการไม่ แทนเซอร์แม็กซ์เวลล์ กฎของคูลอมบ์ และความอดทนของแสงอาทิตย์เป็นสากล

หากมนุษยชาติเรียนรู้ที่จะใช้ประโยชน์จากความอดทนนั้น เราได้รับวิธีใหม่ในการออกจากโลก – หนึ่งในที่สามารถทำซ้ำได้ไม่สิ้นสุด ขับเคลื่อนโดยดาวเดียวกันที่รักษาเรา

สู่ยุคการบินที่ย้อนกลับได้

วิศวกรรมจรวดเคมีคือทางทางเดียว: ความพยายามมหาศาลเพื่อถึงวงโคจร และจุดจบกะทันหันในการกลับเข้า เรืออากาศทางไฟฟ้าแอโรไดนามิกแนะนำ **เส้นทางที่ย้อนกลับได้** มันสามารถลอยขึ้นและลงตามใจชอบ อาศัยอยู่ที่ไหนก็ได้จากโทรโพสเฟียร์สู่วงโคจร มันคือยานอวกาศและที่อยู่อาศัย ยานพาหนะและสถานี

ในความต่อเนื่องนั้นคือการย้อนกลับทางปรัชญา: การบินอวกาศไม่ใช่การจากไป แต่เป็นการขยายชั้นบรรยากาศ เกระดับจากอากาศสู่สุญญากาศกลายเป็นพื้นที่นำทางได้ ยานดังกล่าวจะเบลอเส้นระหว่างอุตุนิยมวิทยาและนักบินอวกาศ เปลี่ยน “ขอบอวกาศ” เป็นพื้นที่ทำงานที่มีชีวิตแทนบาเรีย

สะท้อนท้าย

ไม่จำเป็นต้องมีฟิสิกส์ใหม่ – เพียงความทนทาน ความแม่นยำ และกฎระเบียบที่จินตนาการใหม่ งบประมาณพลังงานวงโคจรสามารถชำระด้วยแสงอาทิตย์; แรงผลักดันสามารถเกิดจากสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อไอออน; เวลา

สามารถยืมจากความอดทนของวิศวกร

อุปสรรคคือวัฒนธรรมและราชการ: โน้มน้าวหน่วยงานว่าสิ่งที่ดูเหมือนลูกโป่งสามารถ ผ่านคณิตศาสตร์และความเพียร กลายเป็นดาวเทียม อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงทุกตัวเริ่มต้นเป็นความผิดพลาดในเอกสาร

เมื่อตัวแรกของเรืออากาศทางไฟฟ้าแอโรไดนามิกแสงอาทิตย์เหล่านี้ลอยขึ้น ความก้าวหน้าของมันจะแทบไม่สังเกตได้ชั่วโมงต่อชั่วโมง แต่ต่อวันต่อวันมันจะรวบรวมความเร็ว จนในที่สุดมันลื่นไถลเกินขอบเขตของสภาพอากาศ ไม่มีเสียงคำราม – เพียงเสียงหึ่งเบาๆ ต่อเนื่องของสนามและการสะสมที่มั่นคงของแสงอาทิตย์สู่การเคลื่อนไหว

นั่นจะ標記จุดเริ่มต้นของ **การเข้าถึงที่ใช้งานซ้ำได้ ยั่งยืน และอ่อนโยนสู่วงโคจร**: วิธีลอยขึ้น บิน และ – โดยไม่เคຍจุดไฟ – โคจร

อ้างอิง & การอ่านเพิ่มเติม

- **โครงการ Rise Fly Orbit**: <https://riseflyorbit.org/> – ภาพรวมของแนวคิดเรืออากาศแสงอาทิตย์-สู่วงโคจรและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- **เรียงความการขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแอโรไดนามิก**: https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html – การจัดการทางทฤษฎีหลักของแรงผลักดันทางไฟฟ้าแอโรไดนามิกโดยใช้เทนเซอร์ความเครียดแมกซ์เวลล์และการกำหนดแรงตัวของคูลอมบ์
- Barrett, S. et al., **Nature** (2018). “Flight of an Aeroplane with Solid-State Ionic Propulsion.” – การสาธิตครั้งแรกของเครื่องบินปีกคงที่ด้วยระบบขับเคลื่อนไอออนสถานะของแข็ง
- 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. – สำหรับความแตกต่างในงบประมาณพลังงานและการพิจารณา Δv
- NASA Glenn Research Center, “Solar Electric Propulsion Basics.” – พื้นหลังสำหรับระบบผลักดันไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูง