

NASA - The Tyranny of the Rocket Equation

Die Tyrannei der Raketengleichung

05.01.12

Von Expedition 30/31 Flugingenieur Don Pettit

Tyrannei ist eine menschliche Eigenschaft, die wir manchmal auf die Natur projizieren. Diese Projektion ist eine Form der Rationalisierung, vielleicht ein Mittel, um mit Dingen umzugehen, die wir nicht kontrollieren können. Dies ist der Fall, wenn wir Maschinen erfinden, die uns von den Grenzen der Erde befreien und so unsere Flucht in den Weltraum beeinflussen. Wenn wir in das Sonnensystem expandieren wollen, muss diese Tyrannei irgendwie abgesetzt werden.

Raketen sind Impulsmaschinen. Sie stoßen mit hoher Geschwindigkeit Gas aus einer Düse aus, wodurch sich die Düse und die daran befestigte Rakete in die entgegengesetzte Richtung bewegen. Isaac Newton hat die Mathematik für diesen Impulsaustausch im Jahr 1687 richtig definiert. Die Impulserhaltung einer Rakete wurde erstmals 1903 vom russischen Visionär und Wissenschaftler Konstantin Ziolkowski durchgeführt. Alle unsere Raketen unterliegen der Raketengleichung von Ziolkowski.

Die Raketengleichung enthält drei Variablen. Wenn man zwei davon hat, wird das dritte in Stein gemeißelt. Hoffnung, Wünsche oder Wutanfälle können dieses Ergebnis nicht ändern. Obwohl es sich um eine Impulsbilanz handelt, können diese Variablen als Energien dargestellt werden. Dabei handelt es sich um den Energieaufwand gegen die Schwerkraft (oft Delta V oder Änderung der Raketengeschwindigkeit genannt), die in Ihrem Raketentreibstoff verfügbare Energie (oft Abgasgeschwindigkeit oder spezifischer Impuls genannt) und der Treibstoffmassenanteil (wie viel Treibstoff Sie im Vergleich dazu benötigen). die gesamte Raketenmasse).

Der Energieaufwand gegen die Schwerkraft hängt davon ab, wohin Sie wollen. Für die menschliche Erkundung gibt es derzeit nur eine Handvoll Orte, die wir realistischerweise in Betracht ziehen können. Die wahrscheinlichsten Kandidaten sind: von der Erdoberfläche zur Erdumlaufbahn, von der Erdumlaufbahn zur Mondoberfläche, von der Erdumlaufbahn zur Marsoberfläche, von der Erdumlaufbahn zum cis-lunaren Raum (der Region zwischen Erde und Mond, einschließlich einer Vielzahl). von Orten wie Lagrange-Punkten, geostationärer Umlaufbahn und mehr). Natürlich gibt es Abwandlungen dieser Routen, aber angesichts unseres aktuellen Stands der Technik sind sie die wahrscheinlichsten.

Bei der Planung einer Expedition ins All müssen wir zunächst auswählen, wohin wir wollen. Der Energieaufwand gegen die Schwerkraft wird dann durch den Start- und Endpunkt unserer Reise vorgegeben. Als Menschen sind wir machtlos, diese Zahl zu ändern. Wir müssen die Konsequenzen einfach akzeptieren. Ich stelle mir das gerne als Reisekosten vor.

Als nächstes müssen wir die Art des Raketentreibstoffs auswählen und so die verfügbare Energie festlegen. Derzeit nutzen alle unsere für Menschen geeigneten Raketentriebwerke chemische Reaktionen (Verbrennung eines Treibstoffs und eines Oxidationsmittels), um Energie zu erzeugen. Es gibt Grenzen für die Energiemenge, die aus der Chemie gewonnen werden kann, und damit für die Energie, die wir in eine Rakete packen können, außerhalb der menschlichen Kontrolle liegende Grenzen. Einige der energiereichsten bekannten chemischen Reaktionen werden für den Raketenantrieb ausgewählt (z. B. die Wasserstoff-Sauerstoff-Verbrennung) und daher wird nun die zweite Variable spezifiziert. Auch hier müssen wir einfach die Grenzen dessen akzeptieren, was die Chemie zu bieten hat (es sei denn, wir entscheiden uns dafür).

andere Energiequellen, z. B. Kernkraft). Ich stelle mir diese Auswahl gerne als den Betrag vor, den Sie für die Reisekosten bezahlen müssen.

Wenn diese beiden Variablen festgelegt sind, wird der Raketenmassenanteil nun durch die Raketengleichung bestimmt. Wir müssen unsere Rakete innerhalb dieses Massenanteils bauen, sonst erreicht sie ihr Ziel nicht. Dies gilt auch für bestehende Raketen, wenn über neue Einsatzmöglichkeiten nachgedacht wird. An diesem Ergebnis können wir kaum etwas ändern. Mit etwas cleverer Technik können wir den Bruchteil vielleicht um ein paar Prozentpunkte einsparen, aber das grundlegende Ergebnis wird durch die Gravitationsumgebung unseres Sonnensystems (die Wahl, wohin wir gehen wollen) und die Chemie der energetischen Bindungen unseres Sonnensystems bestimmt ausgewählte chemische Komponenten (Wahl des Treibmittels).

Es ist sinnvoll, ein paar Zahlen zusammenzustellen, um den Einfluss zu veranschaulichen, den die einfache Impulsbilanz auf unsere Raketen ausübt. Hier wurden die ungefähren Energiekosten in Form der Geschwindigkeit (Kilometer pro Sekunde, km/s) angegeben, ein gängiger Trick von Ingenieuren, um die Diskussion zu vereinfachen. Diese Zahlen gehen von idealen Bedingungen aus, z. B. ohne Verluste durch Luftwiderstand oder Verbrennung, liegen aber für diese Veranschaulichung nah genug beieinander.

| Ziel | Energiekosten (km/s) |
|--|--|
| _____ | _____ |
| Erdoberfläche zur Erdumlaufbahn: | 8 |
| _____ | _____ |
| Erdumlaufbahn zu cis-lunaren Standorten: | |
| <ul style="list-style-type: none"> ● Lagrange-Punkte: ● Niedrige Mondumlaufbahn: | <ul style="list-style-type: none"> ● 3.5 ● 4.1 |
| _____ | _____ |
| Erdumlaufbahn zu erdnahen Asteroiden: > 4 | |
| _____ | _____ |
| Erdumlaufbahn zur Mondoberfläche: | 6 |
| _____ | _____ |
| Erdumlaufbahn zur Marsoberfläche: | 8 |

Aus dieser einfachen Tabelle lassen sich einige Schlussfolgerungen ziehen. Die Reise von der Erdoberfläche in die Erdumlaufbahn ist einer der energieintensivsten Schritte, wenn man irgendwo anders hinget. Dieser erste Schritt, etwa 400 Kilometer von der Erde entfernt, erfordert die Hälfte der gesamten Energie, die benötigt wird, um zur Marsoberfläche zu gelangen. Die Ziele zwischen der Erde und dem Mond betragen nur einen Bruchteil dessen, was erforderlich ist, um einfach in die Erdumlaufbahn zu gelangen. Die Kosten für diesen ersten Schritt sind auf die Stärke der Erdanziehung zurückzuführen. Und die Physik schreibt vor, dass die Zahlung eines Pennys weniger als die vollen Kosten dazu führt, dass die Erde Ihr Raumschiff auf nicht so sanfte Weise wieder in Besitz nimmt. Der große Sprung für die Menschheit ist nicht der erste Schritt auf dem Mond, sondern das Erreichen der Erdumlaufbahn.

Nachfolgend sind die Hauptkategorien unserer chemischen Raketentreibstoffe und deren Produkte aufgeführt

Energieinhalt, der zur Bezahlung der Gravitationskosten der Reise verwendet wird. Diese werden ausgewählt aus Treibstoffen mit einer Einsatzgeschichte in bemannten Raumfahrzeugen. „Hypergole“ sind kontaktgezündete Treibstoffe, die in der Aufstiegsphase des Mondlandemoduls verwendet werden, um das zu vereinfachen Triebwerksdesign und Methan-Sauerstoff wurden bisher noch nicht im Weltraum eingesetzt, befinden sich jedoch in der Entwicklung Überlegungen für zukünftige bemannte Missionen zum Mond und Mars. Das erste Gesetz von Die Thermodynamik wurde genutzt, um die Energie der Verbrennung in ein Äquivalent umzuwandeln Abgasgeschwindigkeit, sodass diese Zahlungseinheiten mit den angezeigten Kosten übereinstimmen über.

| Treibmittel | Zahlungsenergie (km/s) |
|---|------------------------|
| | |
| Solide Rakete | 3,0 |
| | |
| Kerosin-Sauerstoff | 3.1 |
| | |
| Hypergole | 3.2 |
| | |
| Erdumlaufbahn zu erdnahen Asteroiden: 3.4 | |
| | |
| Methan-Sauerstoff | 4.5 |

Wasserstoff-Sauerstoff ist die energiereichste chemische Reaktion, die beim Menschen bekannt ist bewertete Rakete. Mehr kann uns die Chemie nicht geben. In den 1970er Jahren ein Experiment Der nukleare thermische Raketenmotor lieferte ein Energieäquivalent von 8,3 km/s. Dieser Motor nutzte einen Kernreaktor als Energiequelle und Wasserstoff als Treibstoff.

Da der Riesensprung für die Menschheit der erste Schritt von der Erde ist, ist unsere Illustration davon Die Raketengleichung verwendet die Erdumlaufbahn als Ziel mit Kosten von 8 Kilometern pro zweite. Um diese Kosten zu decken, werden die oben genannten chemischen Treibstoffe verwendet Raketengleichung, die zu den folgenden Massenanteilen führt (angegeben als Prozent der Gesamtraketenmasse):

| Treibmittel | Raketenprozentsatz an Treibstoff für die Erdumlaufbahn |
|-----------------------|--|
| | |
| Solide Rakete | 96 |
| | |
| Kerosin-Sauerstoff 94 | |
| | |
| Hypergole | 93 |
| | |

| | |
|---------------------------|--|
| Methan-Sauerstoff 90 | |
| | |
| Wasserstoff-Sauerstoff 83 | |

Dabei handelt es sich um ideale Zahlen ohne Verluste aufgrund von Luftwiderstand, unvollständiger Verbrennung und anderen Faktoren, die die Effizienz einer Rakete verringern. Solche Verluste machen diese Zahlen noch schlimmer (wodurch der Massenanteil näher an eine Rakete heranrückt, die zu 100 % aus Treibstoff besteht). Allerdings können clevere technische Konstrukte wie Raketentufen, mehrere Arten von Treibstoffen (Feststoffe der ersten Stufe oder Kerosin, Wasserstoff der oberen Stufen) und Gravitationskraft (wandelt Radialgeschwindigkeit in Tangentialgeschwindigkeit um) zum Ausgleich beitragen. Bei der Herstellung einer Rakete, die zu fast 90 % aus Treibstoff besteht (was bedeutet, dass sie nur zu 10 % aus Rakete besteht), sind kleine technische Fortschritte buchstäblich mehr wert als ihr Gegengewicht in Gold.

Die realen Massenanteile realer Raketen berücksichtigen die Auswirkung vieler technischer Details. Im Grunde sind diese Maschinen jedoch das Ergebnis der einfachen Anwendung von Tsiolkovskys Raketengleichung. Die hier vorgestellten idealen Ergebnisse sind nicht weit von tatsächlichen Raketen entfernt. Die Saturn-V-Rakete auf der Startrampe bestand zu 85 % aus Treibstoff. Es hatte drei Phasen; Die erste Stufe nutzt Kerosin-Sauerstoff und die zweite und dritte Stufe nutzen Wasserstoff-Sauerstoff. Das Space Shuttle bestand ebenfalls zu 85 Masse-% aus Treibstoff und nutzte eine Mischung aus Feststoffen und Wasserstoff-Sauerstoff für die erste Stufe und Wasserstoff-Sauerstoff für die zweite Stufe. Die Sojus-Rakete besteht zu 91 % aus Treibstoff und verwendet in allen drei Stufen Kerosin-Sauerstoff. Die Verwendung von Wasserstoff-Sauerstoff als Hochleistungstreibstoff hat einen Vorteil; Allerdings ist es technisch aufwändiger. Kerosin bietet weniger Leistung, ergibt aber eine einfachere, robustere und leichter herzustellende Rakete. Diese Zahlen stellen das Beste dar, was unsere Technik leisten kann, wenn sie der Schwerkraft der Erde und der Energie chemischer Bindungen entgegenwirkt.

Welche technischen Auswirkungen hat die Herstellung einer Rakete, die zu 85 % aus Treibstoff und zu 15 % aus Raketen besteht? Die Rakete muss über Motoren, Tanks und Rohrleitungen verfügen. Sie braucht eine Struktur, ein Rückgrat, um all dies zu unterstützen, und sie muss die hochdynamische Umgebung des Starts überstehen (es sind Feuer, Erschütterungen und Kräfte am Werk). Die Rakete muss sowohl in der Atmosphäre als auch im Vakuum fliegen können. Flügel sind im Weltraum nutzlos; Zur Steuerung der Fluglage werden kleine Raketentriebwerke eingesetzt. Dann gibt es Menschen mit ihrem kleinen Finger und ihren lebenserhaltenden Maschinen. Lebenserhaltende Ausrüstung ist komplex, problematisch und schwer. Sie können die Fenster nicht herunterlassen, wenn die Kabine etwas abgestanden ist. Wenn Sie zur Erde zurückkehren möchten (was die meisten Besatzungen tun), muss eine Struktur vorhanden sein, die die Besatzung durch einen feurigen Eintritt schützt und dann eine sanfte Landung ermöglicht. Die Flügel sind schwer, ermöglichen aber sanfte Landungen auf gut ausgestatteten Flugplätzen. Fallschirme sind leicht und sorgen für ein großes Finale. Die Sojus rollt, rollt, rollt, rollt; Von einem meiner Kollegen treffend beschrieben als eine Reihe von Explosionen, gefolgt von einem Autounfall. Und schließlich möchten Sie etwas Nutzlast mitbringen – Ausrüstung, mit der Sie etwas anderes tun können, als nur im Weltraum zu sein. „Weil es da ist“ (oder möglicherweise weil es nicht da ist, abhängig von Ihrer Definition eines Vakuums) trifft zum ersten Mal zu, aber nachfolgende Missionen benötigen eine stärkere Begründung. Missionen in den Weltraum zur sinnvollen Erkundung erfordern die Mitnahme einer erheblichen Nutzlast.

Die tatsächlichen Nutzlastanteile echter Raketen sind eher enttäuschend. Die Nutzlast der Saturn V in die Erdumlaufbahn betrug beim Start etwa 4 % ihrer Gesamtmasse. Das Space Shuttle war nur etwa 1 % groß. Sowohl die Saturn V als auch das Space Shuttle brachten etwa 120 Tonnen in die Erdumlaufbahn. Der wiederverwendbare Teil des Space Shuttles war jedoch 100 metrisch

Tonnen, sodass die lieferbare Nutzlast auf etwa 20 Tonnen reduziert wurde.

Es ist aufschlussreich, die Massenanteile von Raketen mit denen anderer alltäglicher Erdfahrzeuge zu vergleichen. Hier werden die ungefähren Zahlen für Treibmittel (oder Kraftstoff, wenn Luft als Oxidationsmittel verwendet wird) angegeben, um die allgemeinen Kategorien von Massenanteilen zu veranschaulichen:

| Fahrzeug | Prozent Treibstoff (Kraftstoff) |
|----------------|---------------------------------|
| | |
| Großes Schiff | 3 |
| | |
| Pickup-Truck 3 | |
| | |
| Auto | 4 |
| | |
| Lokomotive 7 | |
| | |
| Kampffjet 30 | |
| | |
| Frachtjet | 40 |
| | |
| Rakete | 85 |

Der Prozentsatz des Treibstoffs hat enorme Auswirkungen auf die einfache Herstellung und Robustheit bei der Erreichung des technischen Designs (und der Kosten). Wenn ein Fahrzeug weniger als 10 % Treibstoff enthält, wird es normalerweise aus Stahlblöcken hergestellt. Änderungen an der Struktur können problemlos ohne technische Analyse durchgeführt werden. Sie schweißen einfach ein weiteres Stück Stahl an, um den Rahmen entsprechend Ihrer Intuition zu verstärken. Ich kann meinen ¾-Tonnen-Pickup problemlos um den Faktor zwei überlasten. Es bewegt sich vielleicht langsam, aber es transportiert die Last.

Sobald die Fahrzeuge in der Luft sind, wird die Technik ernster. Leichtbaukonstruktionen aus Aluminium-, Magnesium-, Titan- und Epoxid-Graphit-Verbundwerkstoffen sind die Norm. Um die Struktur zu ändern, ist ein erheblicher technischer Aufwand erforderlich. Man schweißt nicht einfach ein weiteres Stück an die Flugzeugzelle, wenn man leben möchte (oder bohrt ein Loch durch einen geeigneten Abschnitt). Diese Fahrzeuge können nicht weit außerhalb ihrer vorgesehenen Grenzen betrieben werden; Eine Überladung eines Flugzeugs um den Faktor zwei führt zu einer Katastrophe. Auch wenn diese Fahrzeuge zu 30 bis 40 % aus Treibstoff bestehen (60 bis 70 % Struktur und Nutzlast), gibt es Spielraum für einen komfortablen Betrieb der Technik und somit eine robuste, sichere und kostengünstige Luftfahrtindustrie.

Raketen mit 85 % Treibstoff und 15 % Struktur und Nutzlast liegen am äußersten Rand unserer technischen Möglichkeiten, sie überhaupt herzustellen (und zu bezahlen!). Um weiter fliegen zu können, ist eine kontinuierliche technische Entwicklung erforderlich. Die scheinbar kleinsten Modifikationen erfordern

monumentale Analyse und Tests von Prototypen in Vakuumkammern, Schütteltischen und manchmal Teststarts in Wüstenregionen. Typische Spielräume bei der Tragwerksplanung liegen bei 40 %. Häufig werden Tests und Analysen nur bis zu 10 % über dem vorgesehenen Grenzwert durchgeführt. Für einen Space-Shuttle-Start sind 3 g die vorgesehene Beschleunigungsgrenze. Der Stack wurde auf 3,3 g zertifiziert (d. h. so weit getestet, dass wir wissen, dass er weiterhin funktioniert). Dieser Vorgang hat eine Fehlergrenze von 10 %. Stellen Sie sich vor, Sie fahren Ihr Auto mit 60 Meilen pro Stunde und driften dann auf 66 Meilen pro Stunde ab, nur um dann zur Selbstzerstörung zu kommen. Das ist das Leben auf Raketen, Komplimente der Raketengleichung.

Hier sind einige weitere interessante Beispiele aus der Containertechnik, um die extreme Natur des Raketendesigns weiter zu veranschaulichen:

| Anteil des nützlichen Inhalts anderer Behälter | |
|---|----|
| Getränkedose | 94 |
| Shuttle-Außentank 96 | |
| Molotowcocktail | 52 |

Die gewöhnliche Getränkedose, ein Wunder der Massenproduktion, besteht zu 94 % aus Limonade und zu 6 % aus der Dose. Vergleichen Sie das mit dem Außentank für das Space Shuttle mit 96 % Treibstoff und somit 4 % Struktur. Der externe Tank, der innen groß genug ist, um einen Scheunentanz zu veranstalten, enthält kryogene Flüssigkeiten bei 20 Grad über dem absoluten Nullpunkt (0 Kelvin), die unter einem Druck von 60 Pfund pro Quadratzoll stehen (bei einem Tank dieser Größe bedeutet dieser Druck eine riesige gespeicherte Menge). Energie) und hält 3 g stand, während sie Treibstoff mit einer Geschwindigkeit von 1,5 Tonnen pro Sekunde abpumpt. Der Grad des technischen Wissens, das in unserer Zeit hinter einem solchen Gerät steckt, ist genauso erstaunlich und hochmodern wie der Bau der Pyramiden zu ihrer Zeit.

Ein erfahrener Astronaut, der auf dem Mond war, sagte mir einmal: „Auf einer Rakete zu sitzen ist wie auf einem Molotowcocktail zu sitzen.“ Ich nahm mir seinen Kommentar zu Herzen, indem ich zunächst eine Flasche Wein wog, die Flasche leerte und sie erneut wog. Durch einfache technische Analysen konnte ich den Dichteunterschied zwischen Wein und Benzin abschätzen und ausgleichen (der bei diesem bestimmten Jahrgang sicher nicht viel anders war). Es wurde festgestellt, dass ein Molotowcocktail zu 52 % aus Treibstoff bestand. Auf einer Rakete zu sitzen ist also gefährlicher als auf einer Benzinflasche!

Ein weiterer, weniger bekannter Nebeneffekt der Raketengleichung ist die Sensibilität des Abschlusses des Raketenabschlusses für das Erreichen Ihres Ziels. Um dies zu veranschaulichen, werde ich einige Zahlen von meinem Shuttle-Flug STS 126 im November 2008 verwenden. Unsere Zielgeschwindigkeit bei abgeschaltetem Haupttriebwerk betrug 7824 m/s (25819 ft/s). Wenn unsere Triebwerke bei 7806 m/s (25760 ft/s) abschalten würden, also nur 18 m/s (59 ft/s) unter dem Zielwert, würden wir eine Umlaufbahn erreichen, aber nicht unsere vorgesehene Zielumlaufbahn. Wir könnten kein Rendezvous mit der Raumstation erreichen und würden unser Missionsziel verlieren. Das ist, als wären zwei Pennys weniger als ein Zehn-Dollar-Einkauf, also nur 0,2 % weniger als der Preis für den Eintritt ins All. In diesem Fall haben wir einige Optionen. Wir könnten unseren Orbitalmanöviertreibstoff verbrennen und diesen Unterschied ausgleichen. Wenn wir 3 % von unserem Ziel entfernt wären, würden wir 7596 (25067 ft/s)

Wir hätten nicht genügend Treibstoff für Orbitalmanöver und würden keine Umlaufbahn erreichen. Wir wären zu einem transatlantischen Abbruch gezwungen, würden auf die Erde zurückfallen und in Spanien landen. Diese letzten 3 % unserer erforderlichen Geschwindigkeit kommen während der letzten 8 Sekunden unserer Verbrennung. Für Astronauten und Bullenreiter sind 8 Sekunden eine lange Zeit.

Wenn der Radius unseres Planeten größer wäre, könnte es einen Punkt geben, an dem eine Erdfluchttrakete nicht gebaut werden könnte. Nehmen wir an, dass der Bau einer Rakete mit 96 % Treibstoff (4 % Rakete), derzeit nur für den externen Tank des Shuttles, die praktische Grenze für die Trägerraketentechnik darstellt. Wählen wir auch Wasserstoff-Sauerstoff, den energiereichsten bekannten chemischen Treibstoff, der derzeit in einem für Menschen geeigneten Raketentriebwerk eingesetzt werden kann. Indem wir diese Zahlen in die Raketengleichung einsetzen, können wir die berechnete Fluchtgeschwindigkeit in den entsprechenden Planetenradius umwandeln. Dieser Radius würde etwa 9680 Kilometer betragen (die Erde ist 6670 km groß). Wenn unser Planet einen um 50 % größeren Durchmesser hätte, könnten wir nicht in den Weltraum vordringen, zumindest nicht mit Raketen als Transportmittel.

Der Aufstand gegen die Tyrannei ist eine wiederkehrende menschliche Eigenschaft, und vielleicht finden wir einen Weg, die Raketengleichung aufzugeben und uns auf bedeutende Weise von unserem Planeten zu entfernen. Ich beziehe mich auf Erkundungen mit kontinuierlicher menschlicher Präsenz, wobei der erste Schritt etwa antarktische Stützpunkte (die mehrere Tausend Menschen beherbergen) sind und schließlich zur Kolonisierung führen, ein Muster, das mit der Ausbreitung der westlichen Zivilisation rund um den Globus im 17. und 18. Jahrhundert vergleichbar ist. Sich damals als Seefahrernation zu bezeichnen, bedeutete, dass man jederzeit zu einer Vielzahl von Missionen auf verschiedenen Schiffstypen zu unzähligen Zielen aufbrechen konnte. Wir haben noch einen langen Weg vor uns, bevor irgendjemand behaupten kann, eine Raumfahrtnation zu sein.

Der große Sprung für die Menschheit ist nicht der erste Schritt auf dem Mond, sondern das Erreichen der Erdumlaufbahn. Wenn wir die Tyrannei der Raketengleichung brechen wollen, sind neue Betriebsparadigmen und neue Technologien erforderlich. Wenn wir bei unseren Raketen bleiben, müssen sie so routinemäßig, sicher und erschwinglich werden wie Flugzeuge. Eine der rudimentärsten und grundlegendsten Fähigkeiten, die es zu beherrschen gilt, ist das Erlernen des Umgangs mit Rohstoffen aus Quellen außerhalb der Erde. Unser nächster planetarischer Nachbar, der Mond, ist nah, nützlich und interessant. Die Gewinnung und Herstellung nützlicher Produkte aus den Rohstoffen des Mondes würde uns von der Notwendigkeit befreien, alles, was im Weltraum benötigt wird, vom Boden der tiefen Schwerkraftquelle der Erde herbeizuholen, was die Konsequenzen der Raketengleichung deutlich zu unseren Gunsten verändern würde. Die Entdeckung eines neuen physikalischen Prinzips könnte die Tyrannei brechen und es der Erde ermöglichen, sich der Herrschaft des Raketenparadigmas zu entziehen.

Der Bedarf an neuen Lebensräumen und neuen Ressourcen wird die Menschheit irgendwann von diesem Planeten vertreiben. Durch den Zugang zum Weltraum wird der Deckel von der Petrischale der Erde entfernt. Und wir alle wissen, was letztendlich passiert, wenn der Deckel nicht entfernt wird.