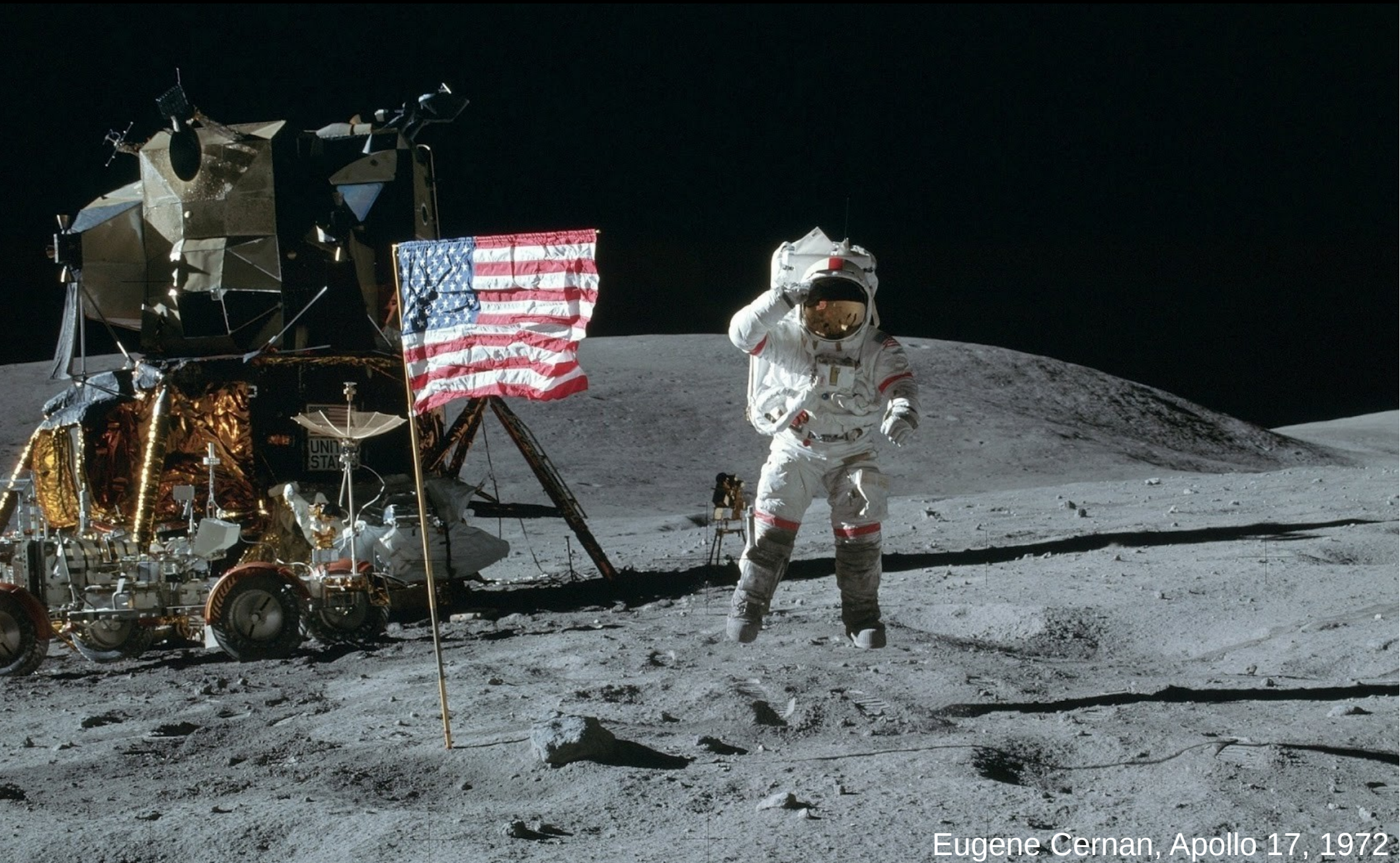
Relativistische Raketen

Fabian Herrmann

$$\Delta v = v_0 * \ln\left(\frac{M_{voll}}{M_{leer}}\right)$$

$$\Delta v = c * \tanh\left(\frac{v_0}{c} \ln\frac{M_{voll}}{M_{leer}}\right)$$

Der Weltraum – das „Große Andere“



Eugene Cernan, Apollo 17, 1972

Der Weltraum – das „Große Andere“

Das All beginnt definitionsgemäß 100 km über unseren Köpfen.

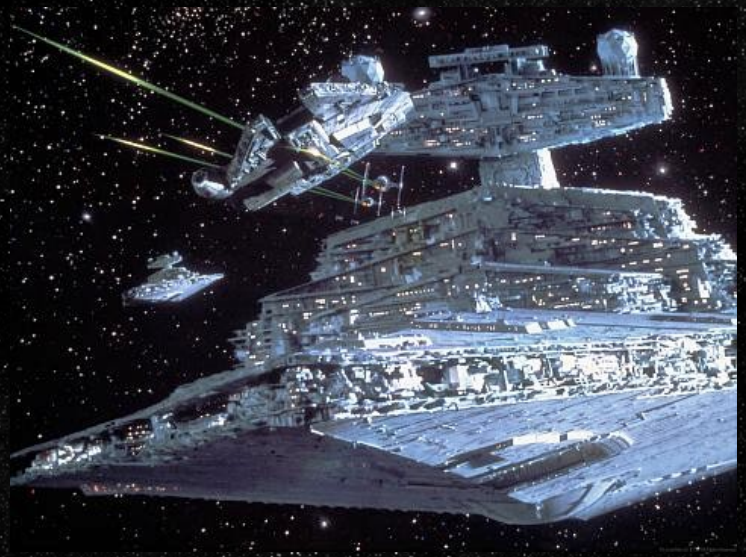
Aber für die meisten Menschen ist es der Inbegriff des Fremden, Weitentfernten, das im Alltag bedeutungslos ist.

Bisher waren Astronauten nur in der Erdumlaufbahn und auf dem Mond, Roboter im ganzen Sonnensystem. Es waren kurze Besuche, vergleichbar einem kurzen Eintauchen der Füße im kosmischen Ozean.

Eugene Cernan, Apollo 17, 1972

SF-Autoren und andere Propheten liegen so gut wie immer falsch.

In der Science Fiction verhalten Raumschiffe sich wie Schiffe auf dem irdischen Ozean:

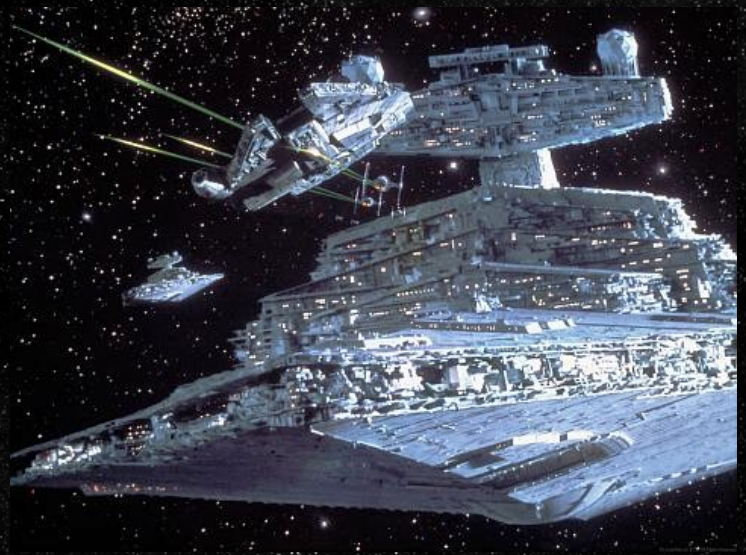


Wie Flugzeugträger im 2. WK...

...oder wie Segelschiffe des 18. Jahrhunderts.

SF-Autoren und andere Propheten liegen so gut wie immer falsch.

In der Science Fiction verhalten Raumschiffe sich wie Schiffe auf dem irdischen Ozean:



Wie Flugzeugträger im 2. WK...

...oder wie Segelschiffe des 18. Jahrhunderts.

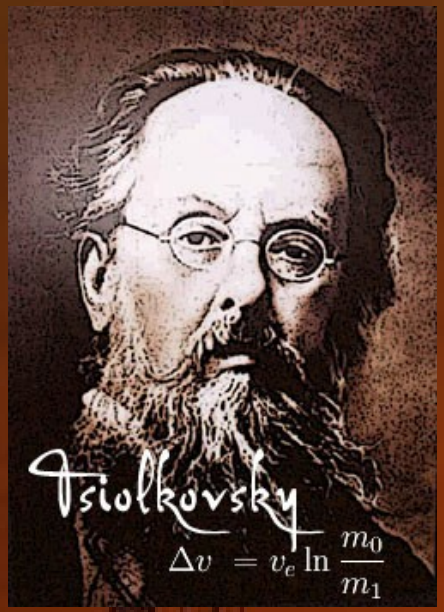
Doch sie sind physikalisch betrachtet weder Schiffe noch Flugzeuge!
(unabhängig vom Erscheinungsbild des Shuttles)

Was sind Raketen?

Was sind Raketen?

- Soll irgendein Körper in eine bestimmte Richtung beschleunigt werden, muss eine andere Masse eine Beschleunigung in die Gegenrichtung erfahren (Impulserhaltung).
- Solange man außen ein Medium um sich herum hat (Luft, Wasser, Erdboden) kann dieses als Reaktionsmasse dienen.
- Laufende Lebewesen und Bodenfahrzeuge stoßen den Erdboden nach hinten und bewegen sich dadurch vorwärts.
- Analog: Schiffe stoßen Wasser, Flugzeuge Luft nach hinten.
- **Im Weltall existiert kein Medium, das sich nach hinten beschleunigen ließe!**
- Daher braucht man einen **Motor, der Rückstoßmasse mitführt: eine Rakete**.

Ein Schluck Mathematik mit Konstantin Ziolkowski



Raketenformel:

$$\Delta v = v_0 * \ln\left(\frac{M_{voll}}{M_{leer}}\right)$$

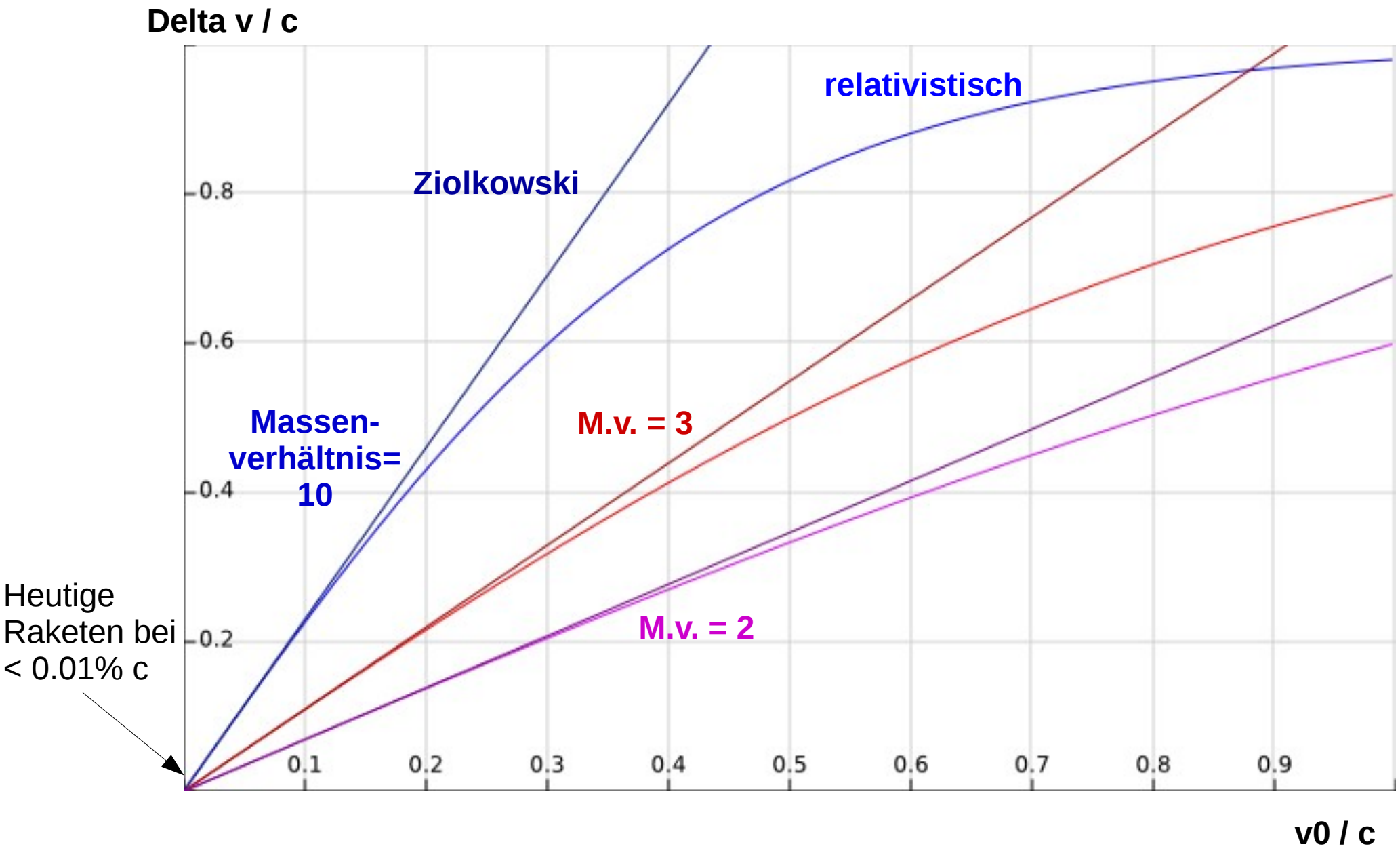
Die Geschwindigkeitsänderung „Delta V“ ist die wichtigste Kenngröße der Rakete.
Die Reichweite ist bei allen Raumfahrzeugen unendlich da es im Weltraum keine Reibung gibt.

In Worten: Die von einer Rakete erzielbare Geschwindigkeitsänderung („Delta V“) ist gleich der Geschwindigkeit mit der sie die Reaktionsmasse ausstößt mal dem natürlichen Logarithmus des Verhältnisses der Masse der betankten Rakete zu der der leeren.

Relativistische Form für Delta v nahe Lichtgeschw. c:

$$\frac{\Delta v}{c} = \tanh\left(\frac{v_0}{c} \ln \frac{M_{voll}}{M_{leer}}\right)$$

Delta v als Funktion von Rückstoßstrahlgeschwindigkeit v0



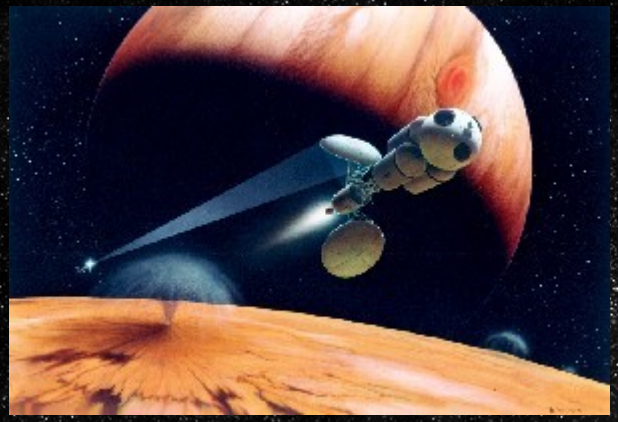
Sehr häufiger populärer Irrtum:

„Raketen können die Lichtgeschwindigkeit nicht überschreiten, weil ihre Masse bei Annäherung an sie gegen Unendlich geht“.

Dies gilt nur wenn der Rakete die Energie irgendwie von außen zugeführt wird (Lichtsegel, Laser…).

„Normale“ Raketen, die ihre Energiequelle mitführen, werden bei Beschleunigung nicht massereicher (wegen Reaktionsmassenausstoß werden sie sogar leichter), da ihr Energiegehalt konstant bleibt, es wird lediglich die innere Energie des Antriebs-systems in eine andere Form (Bewegungsenergie) umgewandelt. Sie können die Lichtgeschwindigkeit nicht überschreiten, da sie um sie zu erreichen ihre gesamte Masse (einschließlich Nutzlast, Astronauten, Koch und Katze) in Antriebsenergie umwandeln müssten.

Energiezufuhr von außen



Mitfliegender Energievorrat

$E = m c^2$

Einsteins bekannteste Formel: Energie ist gleich Masse mal Lichgeschwindigkeit hoch 2.

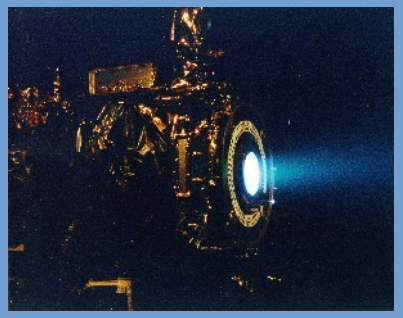
Sie bedeutet: Die von außen(!) wahrnehmbare Masse eines Objektes ist seinem kompletten Energiegehalt proportional.

Die in Materie enthaltene Energie (und damit ihre Masse) stammt überwiegend aus dem Gluonenfeld, das Protonen und Neutronen innerlich zusammenhält und in den Atomkernen aneinander bindet. *Die Formel gilt jedoch auch für alle anderen Energieformen.*

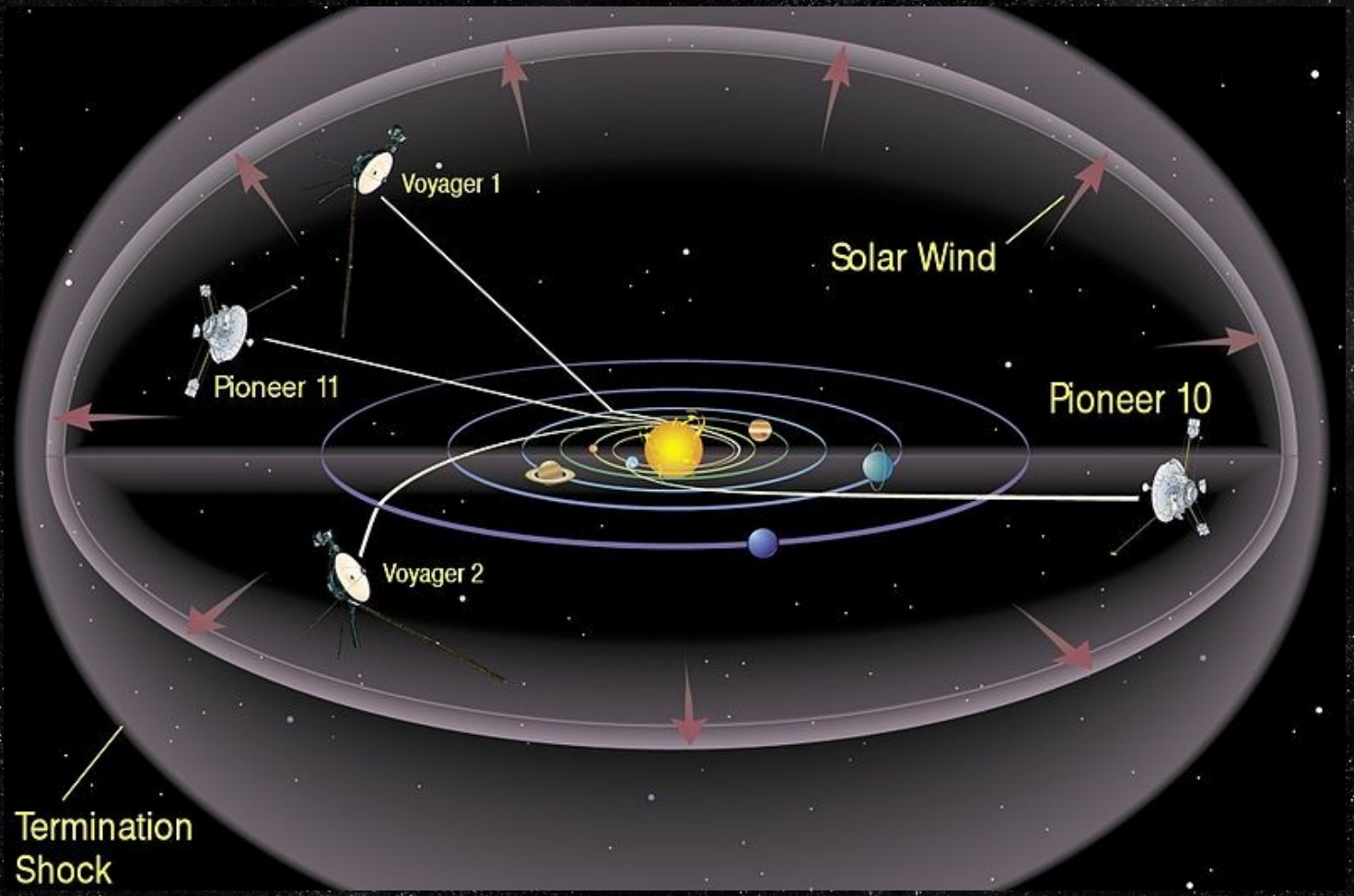
Der gesamte Energieverbrauch aller Deutschen in einem Jahr entspricht einer Masse von 154 kg.

Raketen heutzutage

- Zwei Haupttypen:
- **Chemische Raketen**: Niedrige Rückstoßgeschwindigkeit (einige km/s) aber hohe Schubkraft (hoher Massendurchfluss). Delta v kann durch Stufenbauweise auf bis über 10 km/s gesteigert werden.
- **Elektrische Raketen (Ionenrakete)**: Höhere Rückstoßgeschwindigkeit (einige 10 bis 100 km/s) aber extrem niedrige Schubkräfte (geringer Massendurchfluss).



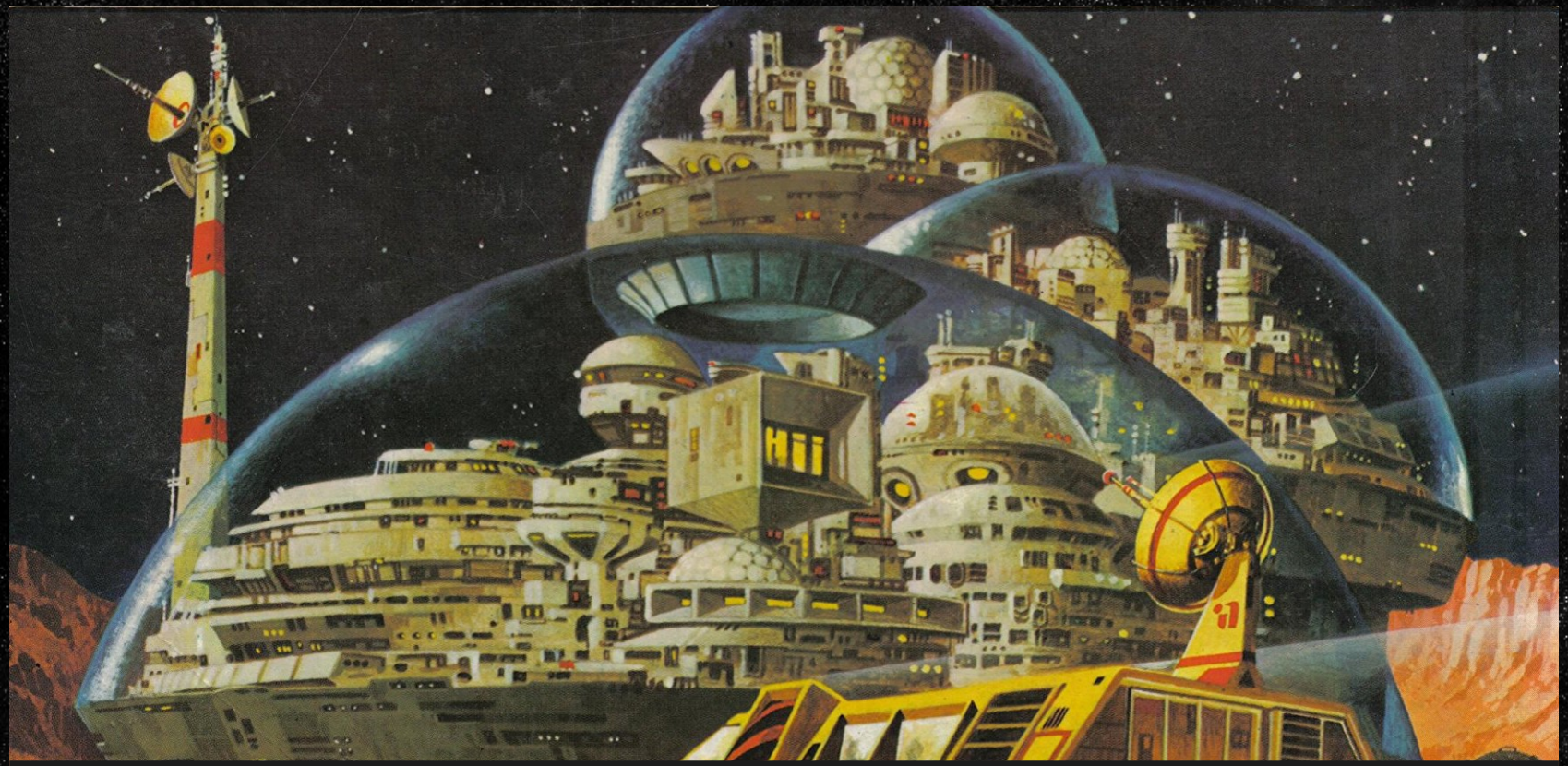
Momentane interstellare Missionen



Voyager 1 ist das am weitesten von der Erde entfernte von Menschen erschaffene Objekt (133 AU @ 2015).
Er bewegt sich mit ca. 17 km/s in Richtung des Sterns Gliese 445, den er in 40.000 Jahren erreichen wird.

Was ist nötig, damit sich die Menschheit im All etablieren kann?

Was ist nötig, damit sich die Menschheit im All etablieren kann?



Damit sich die Menschheit von einer planetogenen zu einer interstellaren Zivilisation entwickeln kann, muss die Raumfahrt ein integraler Bestandteil ihrer Kultur werden.
Wir sollten das All nicht mehr als das „Große Andere“ wahrnehmen sondern als unbegrenzten Raum zur Entfaltung menschlicher Kreativität.

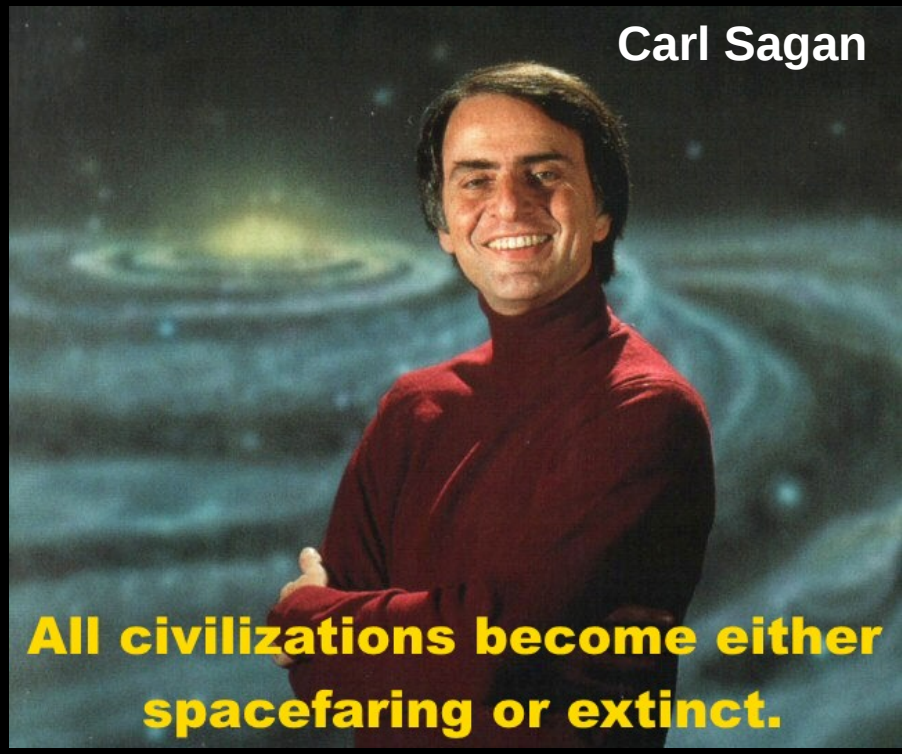
„Sonnenaufgang im All“ von Alexej Leonov, 1965.
Erstes außerhalb der Erde von Menschen erschaffenes Kunstwerk (auf Woschod 2).

Gesetze der Astronautik

Erstes Gesetz: Unter dem Naturrecht dieses Universums erlegt nichts und niemand dem Menschen irgendwelche Beschränkungen auf außer er sich selbst.

Zweites Gesetz: Das rechtmäßige Betätigungsfeld des Menschen ist nicht nur die Erde, sondern das ganze Sonnensystem und soviel vom Universum, wie er unter den Naturgesetzen erreichen kann.

Drittes Gesetz: Indem er sich im Universum ausbreitet, erfüllt der Mensch seine Bestimmung als Element des Lebens - ausgestattet mit der Macht der Vernunft und der Weisheit des Moralgesetzes in sich.



Mit Reisegeschwindigkeiten im Bereich 10...100 km/s ist die Besiedlung der Galaxis nicht realistisch möglich.
Was tun?!

Wie stark müssen relativistische Triebwerke sein?

1. Schwach relativistisch: Delta V = 10% c = 30.000 km/s

Massenverhältnis sei 10 (z. B. 1000 t Trockenmasse, 9000 t Reaktionsmasse).

$$30.000\ km/s = v_0 * \ln(10)$$

$$v_0 = \frac{30.000\ km/s}{\ln(10)} \approx 13.000\, km/s$$

2. Hochrelativistisch: Delta V = 90% c = 270.000 km/s

Massenverhältnis sei 10 (z. B. 1000 t Nutzlast, 9000 t Reaktionsmasse).

$$0.9 = \tanh\left(\frac{v_0}{c} \ln 10\right)$$

$$\frac{v_0}{c} = \operatorname{artanh}(0.9) / \ln 10 \approx 0.64 \qquad v_0 \approx 190.000\, km/s$$

Wie stark müssen relativistische Triebwerke sein?

1. Schwach relativistisch: Delta V = 10% c = 30.000 km/s

Ma

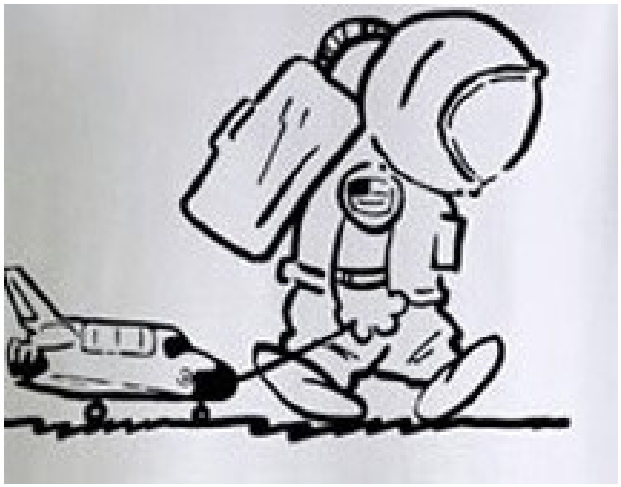
v_0

2.

Ma

$0.$

$\frac{v_0}{c} = \operatorname{artanh}(0.9) / \ln 10 \approx 0.64 \qquad v_0 \approx 190.000\, km/s$



Die Rückstoßgeschwindigkeit erreicht bei chemischen Raketen maximal 4.5 km/s (H2 / O2), bei Ionenraketen um 100 km/s.

Kennen wir Prozesse, die Materie auf mehrere 1000 km/s beschleunigen?!

Naheliegendste Lösung: Keine Materie als Rückstoßmedium sondern Licht!

Kann denn Licht mechanischen Impuls übertragen?

JA. Nach Einstein trägt alles, was Energie enthält, auch eine (Impuls-)Masse:

$$E = mc^2 \quad \rightarrow m = E/c^2$$

$$p_{Licht} = mc = E/c$$

Naheliegendste Lösung: Keine Materie als Rückstoßmedium sondern Licht!

Druck: $D = \frac{S}{c}$

Einstrahlung (W/m²) durch Lichtgeschwindigkeit.

Beispiel Sonneneinstrahlung in Erdnähe (Solarkonstante):
S = 1380 W/m²
D = 1380 / 3 * 10^8 N/m² = 4,6 10^{-6} Pa.

Entspricht einem Gewicht von ca. einem halben Milligramm (Ameise) pro Quadratmeter.
(Doppelt so hoch bei Reflexion!)

Kein Wunder dass man dies normalerweise nicht bemerkt!

Naheliegendste Lösung: Keine Materie als Rückstoßmedium sondern Licht!

Kraft: $$F = \frac{P}{c}$$

Strahlungsleistung (W) durch Lichtgeschwindigkeit.

Pro Newton Schub wird eine Strahlungsleistung von 300 MW benötigt.

Bsp.: 1. Stufe Soyuz – bis 10^6 N: Strahlungsleistung 300.000 GW, d.h. **20 mal momentaner Weltenergieverbrauch!**

Könnte man ein Lichttriebwerk mit solcher Leistung wirklich bauen?

Naheliegendste Lösung: Keine Materie als Rückstoßmedium sondern Licht!

Kraft: $$F = \frac{P}{c}$$

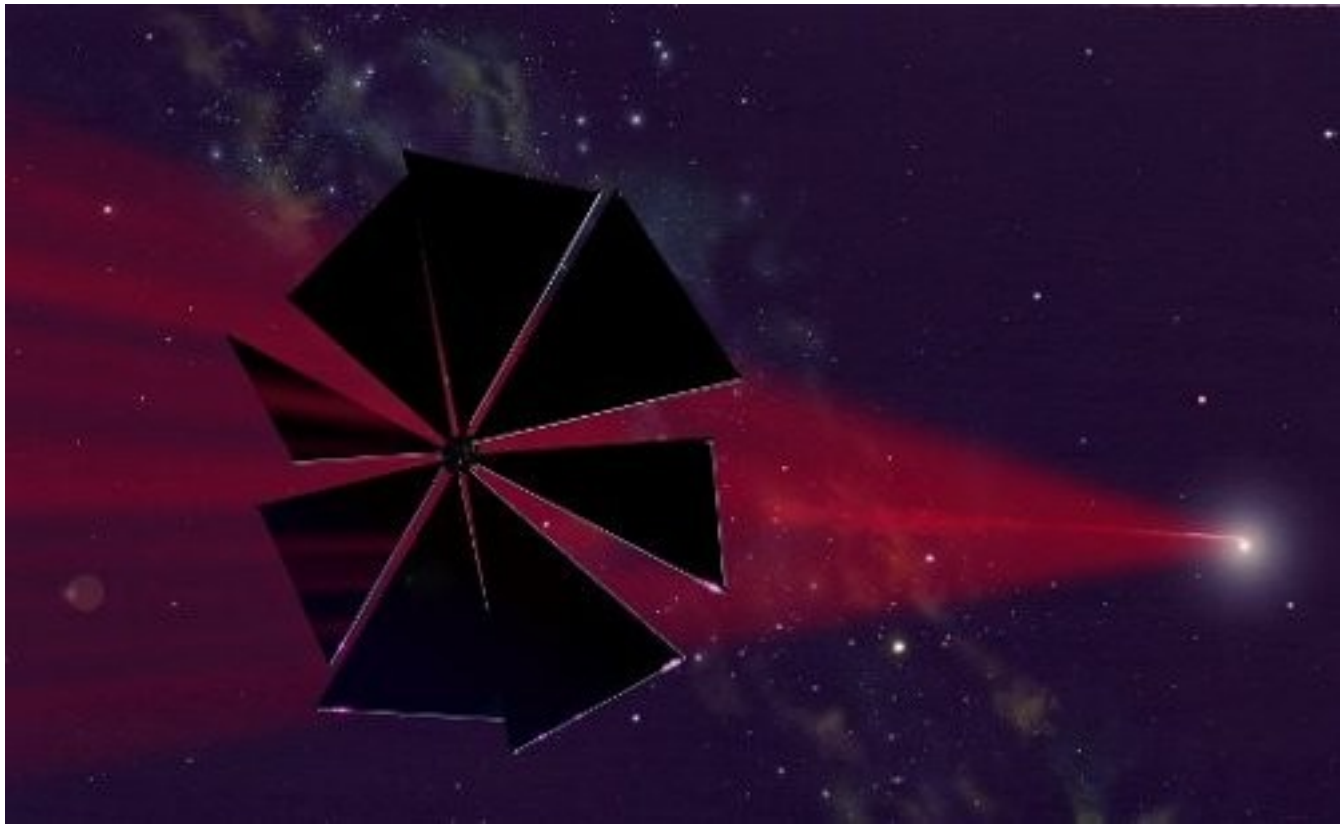
Strahlungsleistung (W) durch Lichtgeschwindigkeit.

Pro Newton Schub wird eine Strahlungsleistung von 300 MW benötigt.

Bsp.: 1. Stufe Soyuz – bis 10^6 N: Strahlungsleistung 300.000 GW, d.h. **20 mal momentaner Weltenergieverbrauch!**

Dazu bräuchte es ein **Lichtsegel von 260 km Radius!**

Lichtsegel



Riesige Segel werden von Sternstrahlung oder Lasern getroffen, Lichtimpuls schiebt das Schiff.
Vorteile: Energiequelle kann stationär an einem Ort bleiben (z. B. Raumstation), prinzipiell unendliches Massenverhältnis.
Nachteile: Wird mit wachsender Entfernung ineffizienter, kleine Beschleunigungen und Nutzlasten, von zurückbleibender Station (oder Stern) abhängig.

Lichtsegel: für kleine unbemannte Sonden – aber bemannte Schiffe?!

Lichtsegel: für kleine unbemannte Sonden – aber bemannte Schiffe?!

Wir brauchen: Triebwerk mit höherer Schubkraft als Lichttriebwerk und viel höheren Ausstrom-geschwindigkeiten als chemischer Antrieb!

Die Rakete mit hoher Schubkraft UND hoher Ausstromgeschwindigkeit ist Hochziel der Raumfahrttechnik!

Wozu Raumfahrt?

Wozu Raumfahrt?

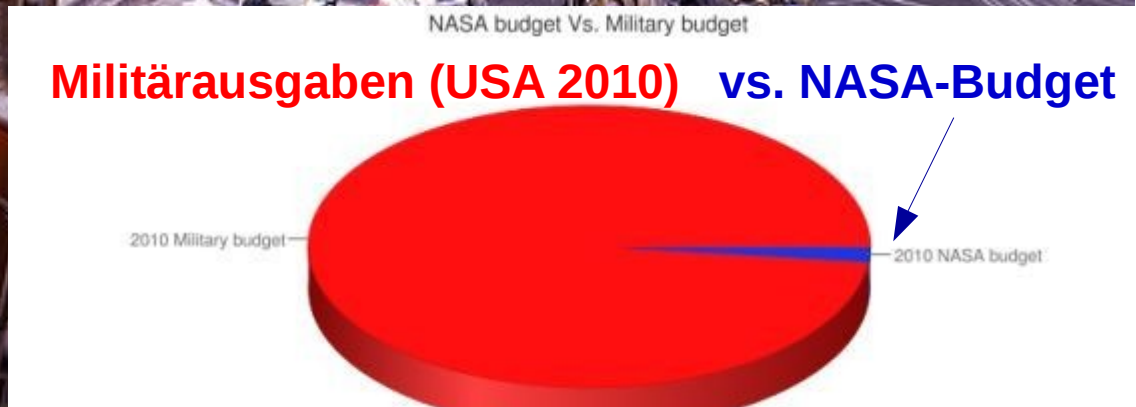
„Sollten wir nich lieber erst die Armut auf der Erde bekämpfen?“
→ Die Kosten der Raumfahrt verschwinden nicht im All.
Sie werden auf der Erde ausgegeben: Löhne und Gehälter. Die Raumfahrt bekämpft dadurch selbst die Armut – und für jeden in sie investierten € bekommt man bis zu 100 € zurück: in Form von technischen Innovationen, neuen Erkenntnissen, Patenten u.v.a.

Auf der „Blauen Murmel“ sieht man keine Landesgrenzen.

Raumfahrt kann die Menschheit zusammenschweißen.

...später könnten wir auch Rohstoffe auf anderen Himmelskörpern abbauen und im All Energie gewinnen.

Die Industrie ließe sich auf Mond und Asteroiden verlegen zum Schutz der Natur und menschlichen Gesundheit auf der Erde!



Wozu Raumfahrt?

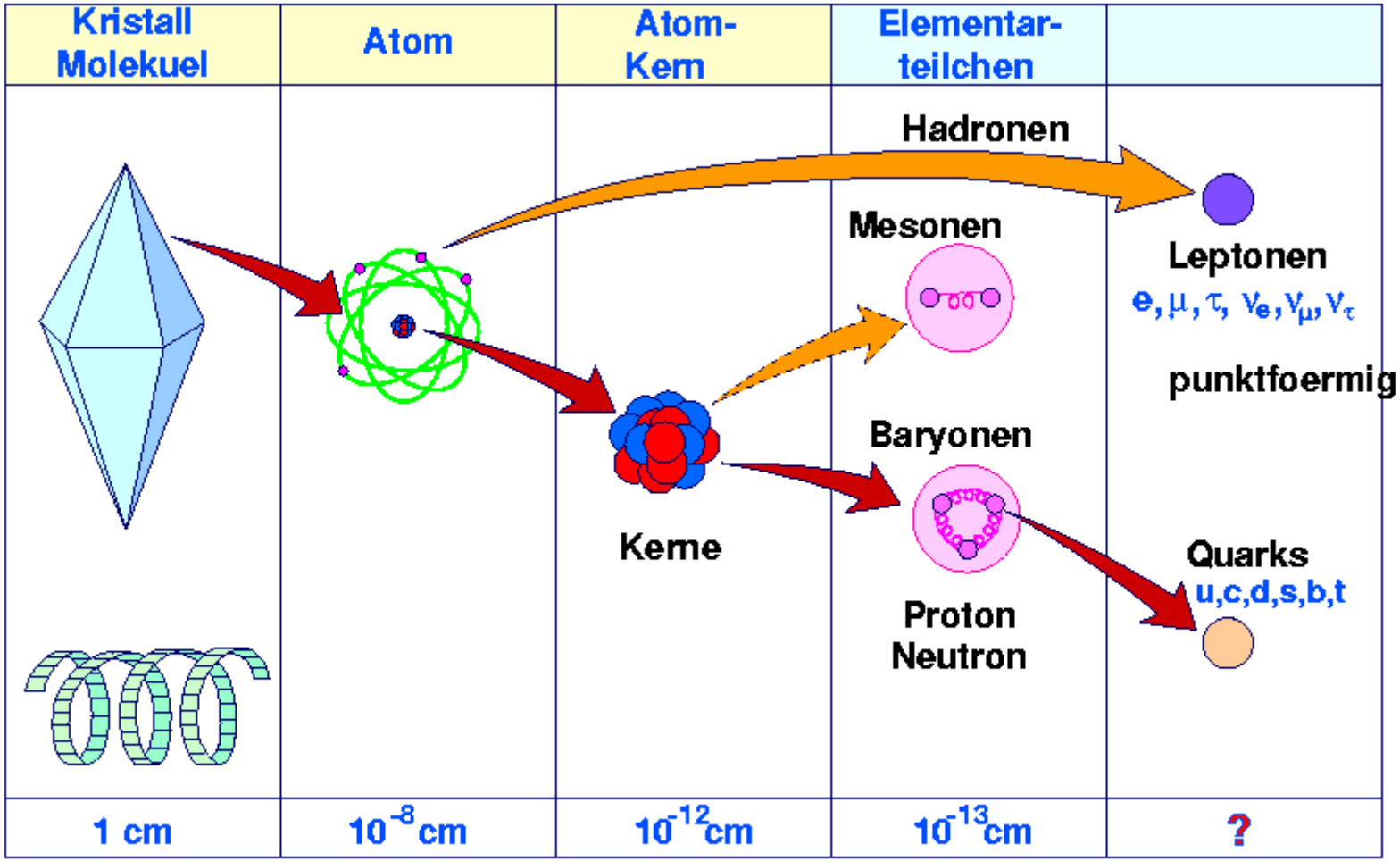
SMIILE = Space Migration, Intelligence Increase, Lifespan Extension.
(Timothy Leary)

Solange die Menschheit auf einen Planeten beschränkt bleibt, ist sie stets vom Aussterben bedroht (ähnlich Dinosaurier).

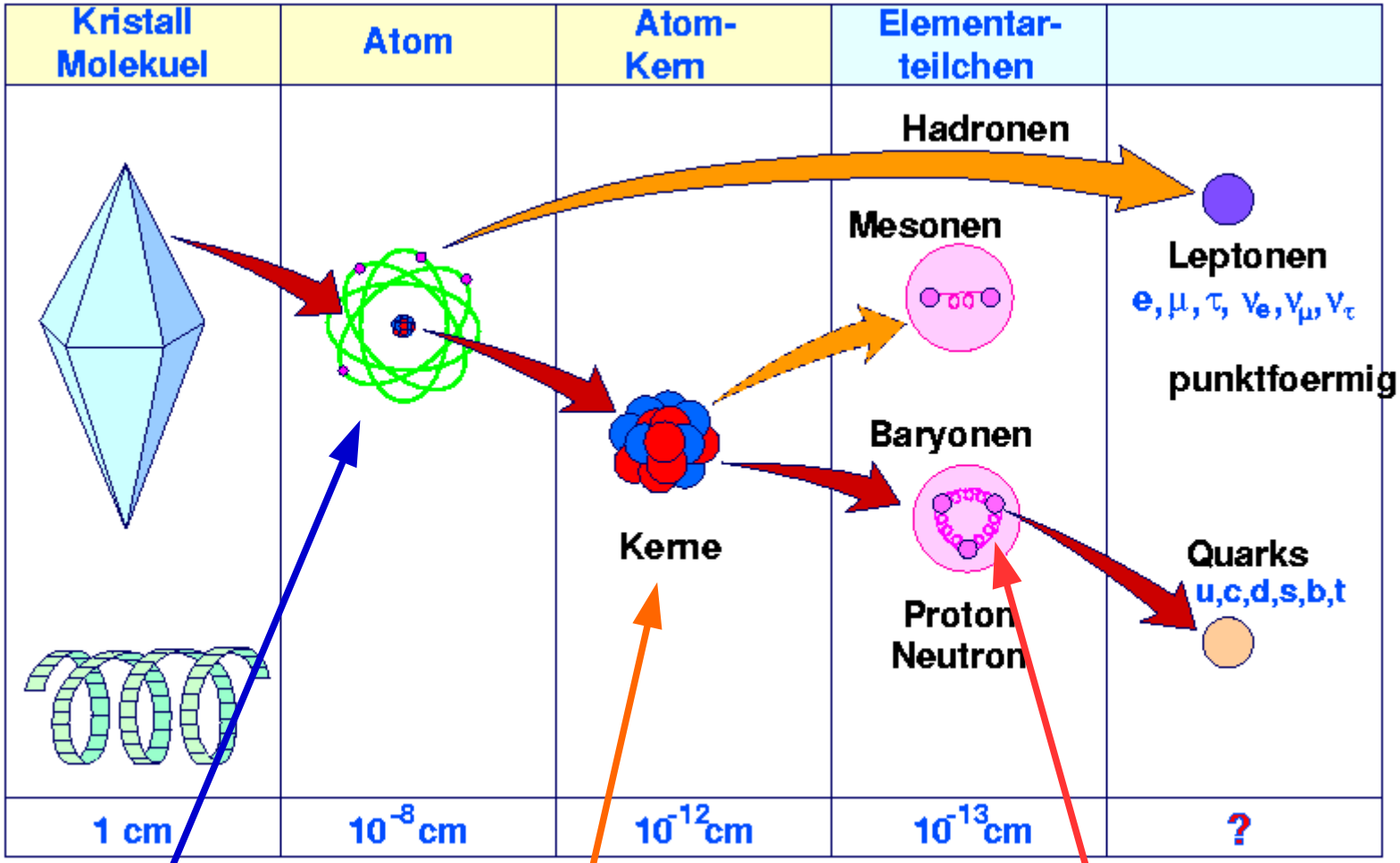
Falls es gelingt, Unsterblichkeit zu realisieren, wird die Besiedlung mehrerer Planeten unumgänglich.

...und das größte Abenteuer steht uns noch bevor: Kontakt mit einer außerirdischen Zivilisation!

Verschiedene Naturkräfte



Verschiedene Naturkräfte

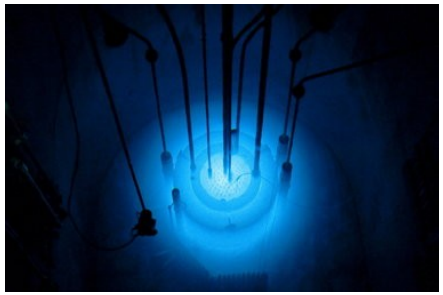


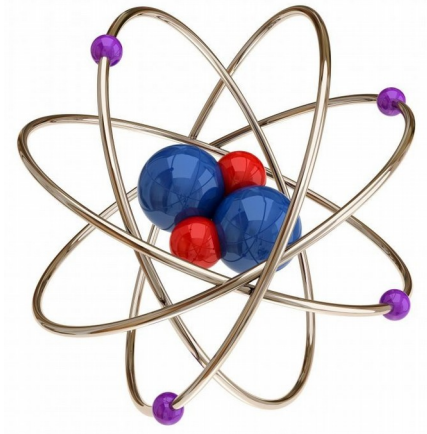
Elektromagnetismus:
Kräfte der Chemie.
Energie: ~ 1 eV/Teilchen,
entspricht 14 km/s

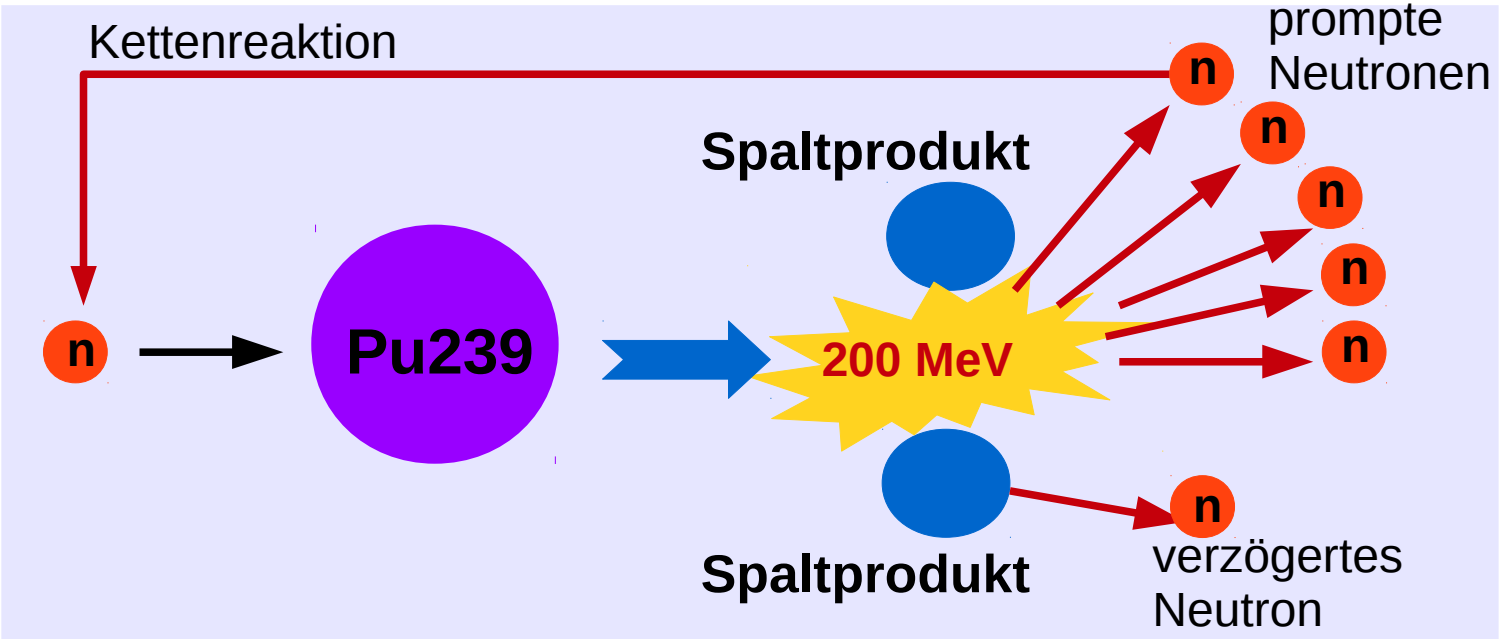
Gluonenfeld
Randbereich:
Kernkraft.
Energie:
~ 1 MeV/Teilchen,
entspricht 14.000 km/s

Gluonenfeld
Innenbereich:
Energie der
Ruhemasse: $E = mc^2$
~ 1 GeV/Teilchen,
entspr. Lichtgeschwindigkeit!

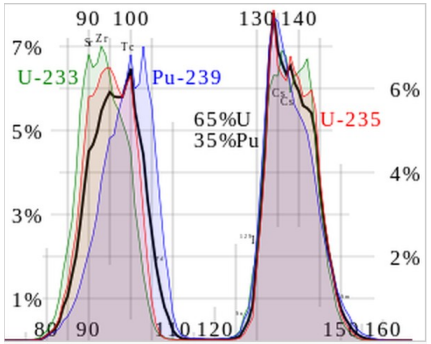
Kernspaltung





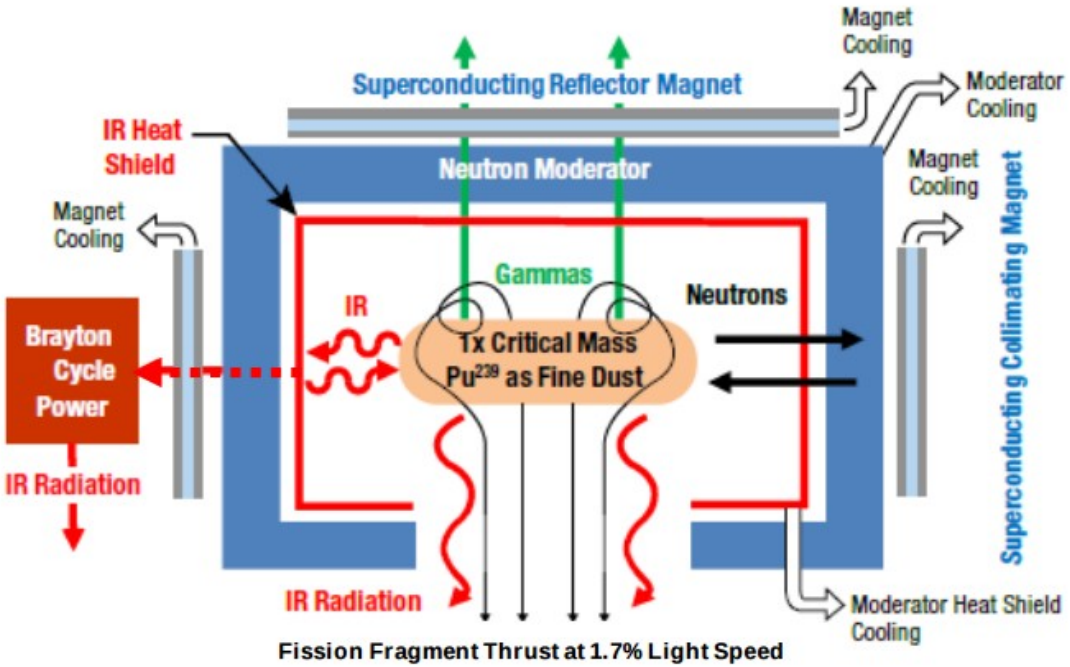


Der größte Anteil der Reaktionsenergie steckt in den Spaltprodukten: Atomkerne (i. allg. radioaktiv) mittleren Gewichts, die mit ca. 14.000 km/s davonfliegen. Normalerweise werden sie im Reaktor abgebremst, ihre Energie wird zu Wärme. Kann man sie auch als Raketen-Rückstoßmasse einsetzen?!



Fission product yields by mass for thermal neutron fission of U-235, Pu-239, a combination of the two typical of current nuclear power reactors, and U-233 used in the thorium cycle.

Spaltprodukte-Rakete



Spaltprodukte werden ausgestoßen, direkte Nutzung der Kernenergie ohne zwischengeschalteten Kühlkreislauf.

Schubkraft: 1.7 * 10^{-7} N / W (thermische Leistung).
Großer Leistungsreaktor: 3 GW → 512 N.

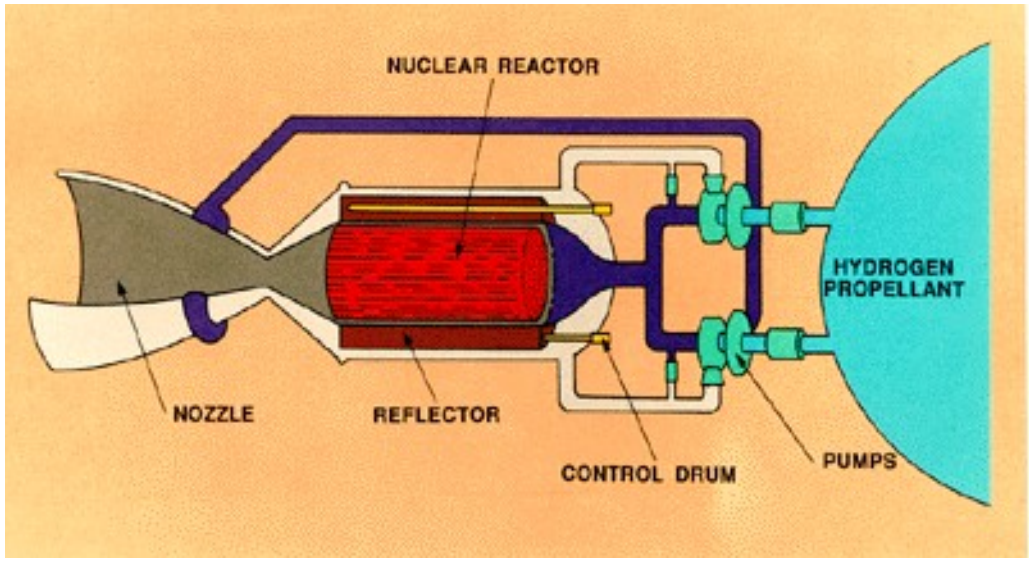
Z. B. Massenverhältnis 1.1: $\Delta v = 14.000 \frac{km}{s} \times \ln(1{,}1) \approx 1330 \frac{km}{s}$

Dauer Beschleunigung/Abbremsen: 100 t bei 500 N → je 4 Jahre bis 650 km/s.

Geht etwas mehr Schubkraft?

Wir können – gewissermaßen wie bei einer Gangschaltung – die Schubkraft erhöhen, indem wir die Energie der Spaltprodukte auf eine größere Materieportion übertragen. Die Rückstoßgeschwindigkeit sinkt entsprechend!

Prinzip der nuklear-thermischen Rakete:



Ein Gas (Bsp. Wasserstoff) wird als Kühlmittel durch einen Kernreaktor geleitet, wodurch es erhitzt wird und sich stark ausdehnt.

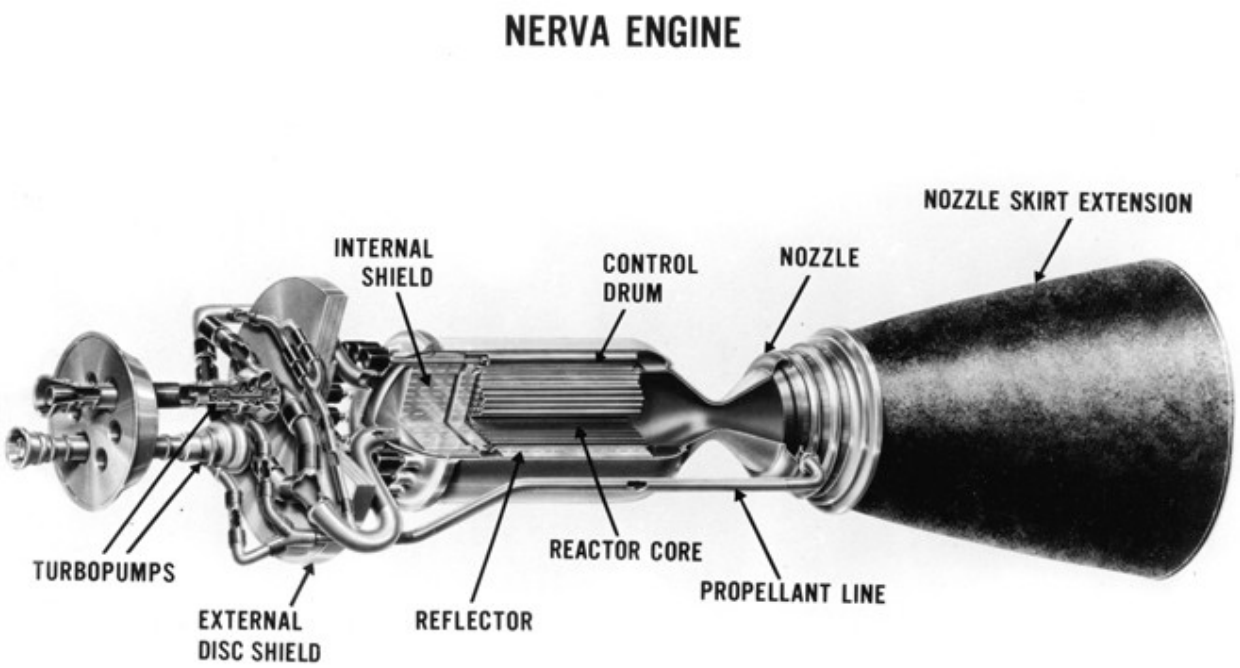
Als Rückstoßmasse strömt es aus der Düse.

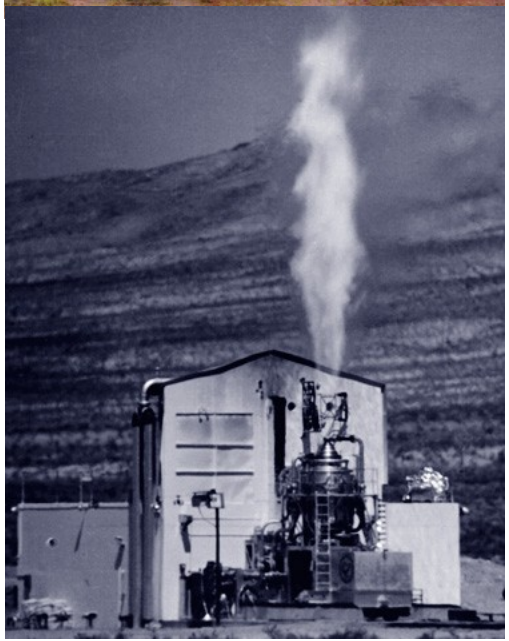
Rückstoßgeschwindigkeit: $v_0 = \sqrt{\frac{f\ T}{A}} \times 90\ \frac{m}{s}$

Bsp. H2: f = 5, A =2,
T = 3000 K → v0 = 7800 m/s

wobei T = Reaktortemperatur in Kelvin, A = Atomgewicht der Gasmoleküle,
f = Freiheitsgrade der Moleküle: 3 bei Einzelatomen, 5 bei zweiatomigem Molekül mit Symmetrieachse...

NASA-Projekte Rover und NERVA
(Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application)





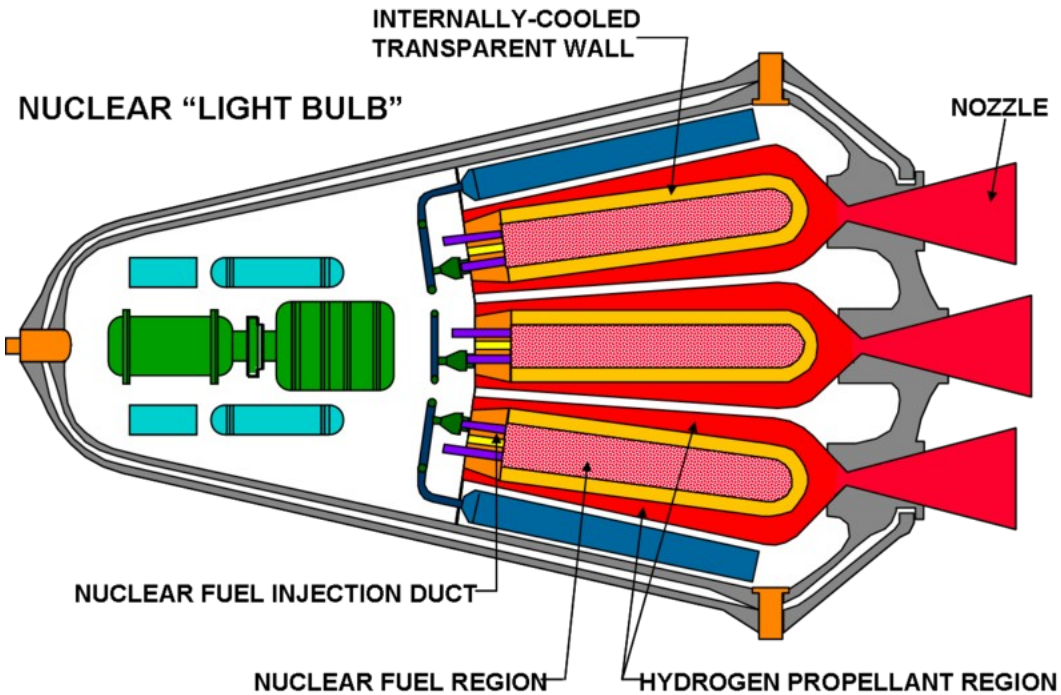
Bodengebundene Experimente der NASA mit Festkern-Nuklearraketentriebwerken von 1952 – 72.

Unten rechts: Statischer Triebwerkstest.

Ergebnisse der Experimente waren vielversprechend.

Mehr als T = 4000 K / v0 = 10 km/s scheint mit dieser Technik aber nicht möglich! → Andere Möglichkeiten?

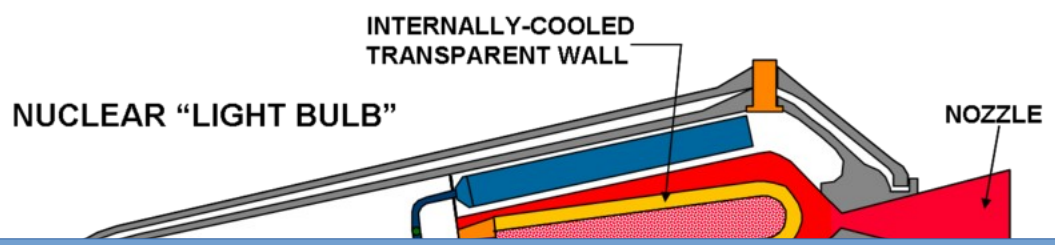
Gaskernreaktor



Visionärer Entwurf: „Liberty Ship“
1000 t Nutzlast in niedrige Kreisbahn,
mit einstufiger Rakete.

„Nukleare Glühbirne“: Gas- oder plasmaförmiges Uran- oder Plutonium in Quarzglaskolben.
Rückstoß- und Kühlungsmedium: Wasserstoff mit bis zu v0 = 50 km/s. Schubkraft ähnlich chemische Raketen.
Für interplanetare Missionen geeignet, nicht interstellar.

Gaskernreaktor



Raketen mit Kernspaltungsreaktor-Antrieb sind „muskulösere“ Geschwister der chemischen Raketen.

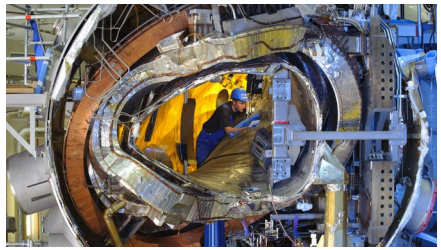
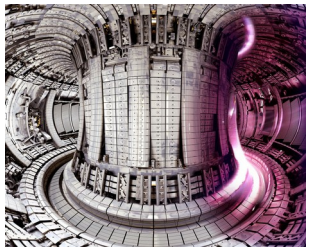
Von unserem Ziel, nahezu Lichtgeschwindigkeit zu erreichen haben wir uns scheinbar ein wenig entfernt….

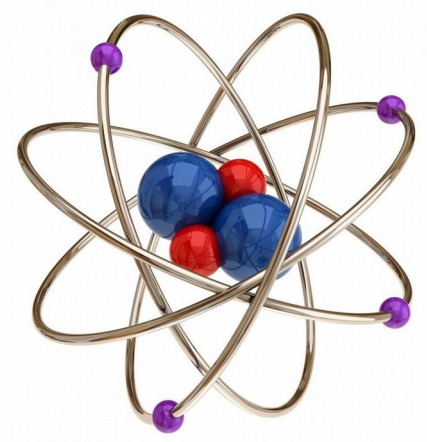
Wie können wir uns ihm wieder nähern?!

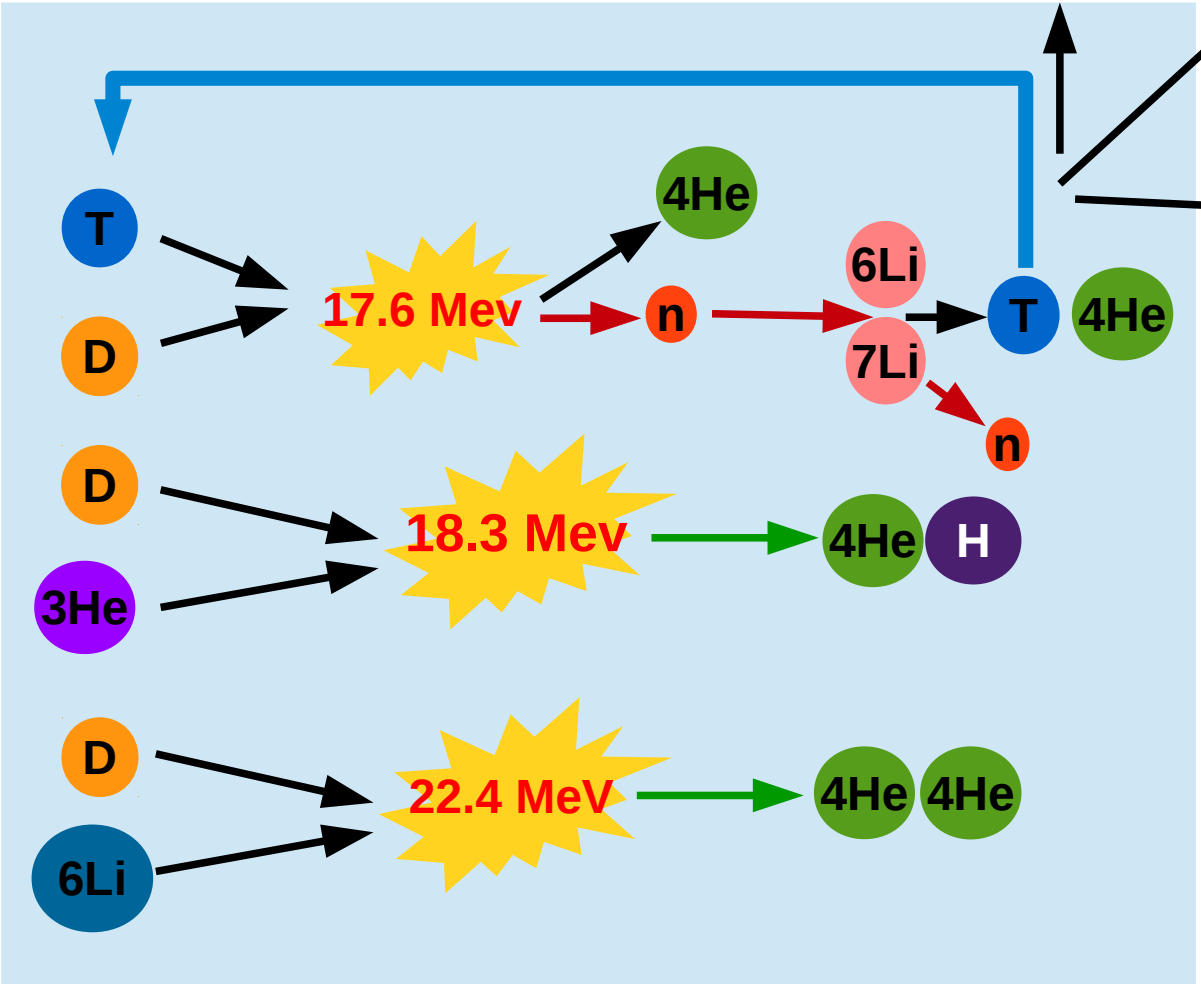
nn,

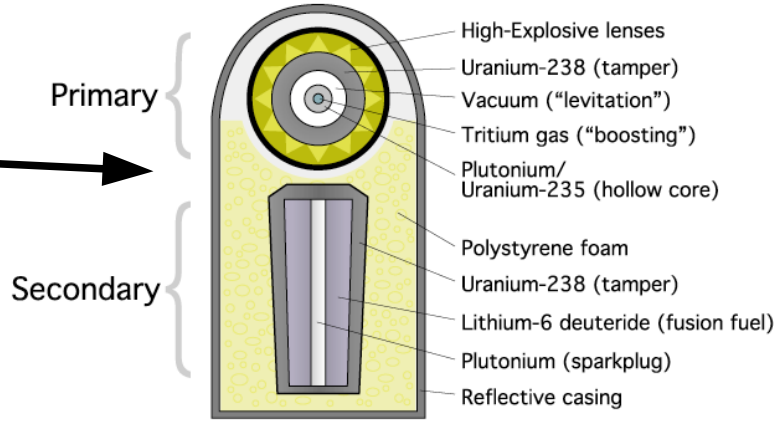
„
Plutonium in Quarzglaskolben.
Rückstoß- und Kühlungsmedium: Wasserstoff mit bis zu v0 = 50 km/s. Schubkraft ähnlich chemische Raketen.
Für interplanetare Missionen geeignet, nicht interstellar.

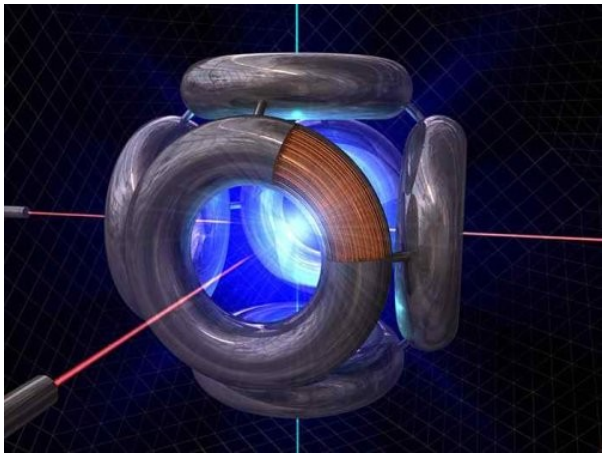
Kernfusion









Es gibt viele Kernfusionstechniken – Energieüberschuss lässt sich momentan nur bei explosivem Abbrennen erzielen. Könnten uns also Explosionen helfen?!

Gepulster Nuklearantrieb: Orion

Antrieb durch Fusionsexplosionen hinter dem Schiff (ca. 1 / Sekunde).

Prallplatte und Stoßdämpfersystem verwandeln Stöße in gleichförmige Beschleunigung.

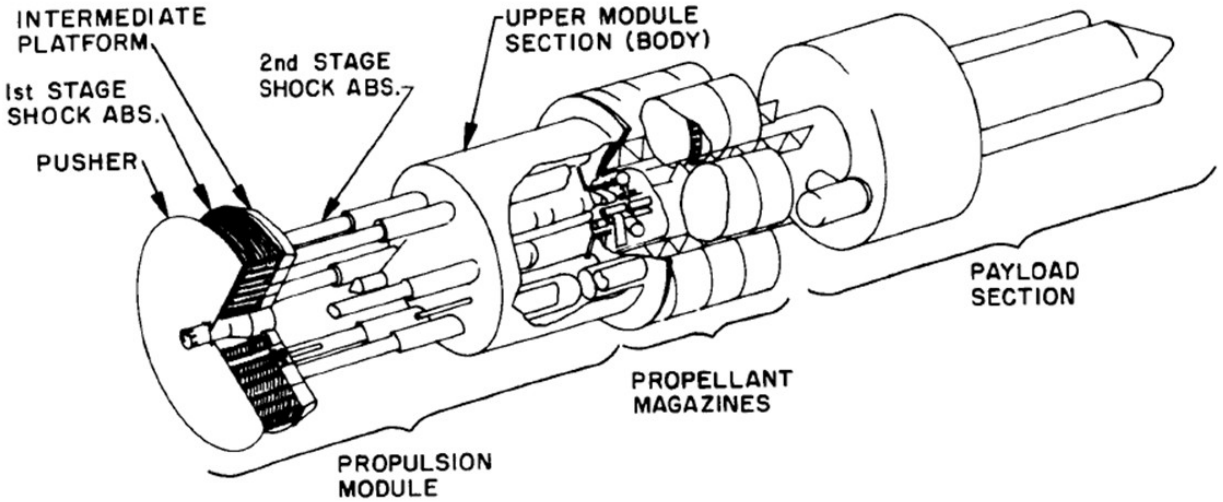
Möglichkeit, ein großes beinahe-interstellares Schiff mit vorhandener(!!) Technik zu bauen.

Orion-Pulsantrieb

ermöglicht riesige, schnelle Raketen.

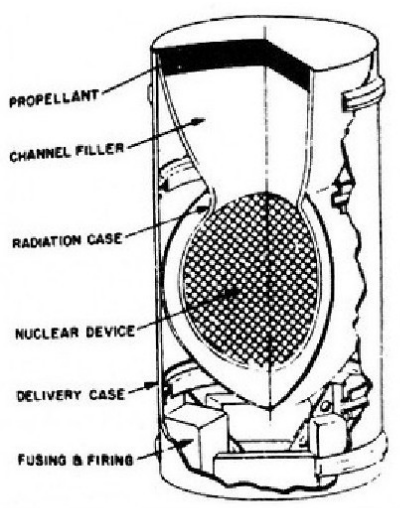
Wie schnell, wie riesig?

Energiedichte Lithiumdeuterit: 50 kt TNT / kg



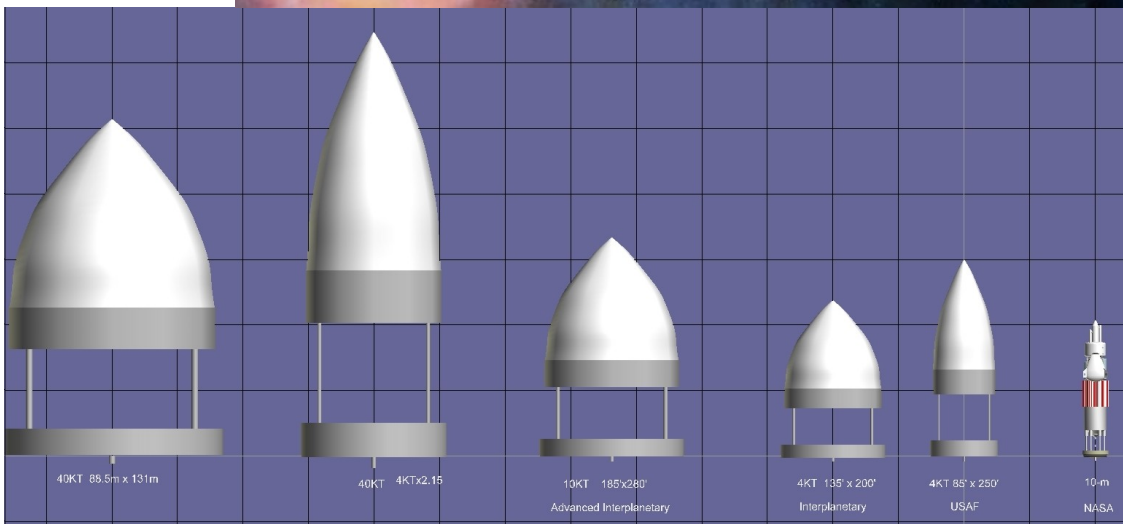
$$F_{Schub} = 300 \sqrt{\frac{W_{spreng}}{kt} \times \frac{m_{spreng}}{kg}} \quad t \text{ bei } 1\ g$$

$$\Delta v = 3000 \sqrt{\frac{W_{spreng}/kt}{m_{spreng}/kg}} \ \ln \frac{M_{voll}}{M_{leer}} \ \frac{km}{s}$$



Fuel Element

Airforce Design

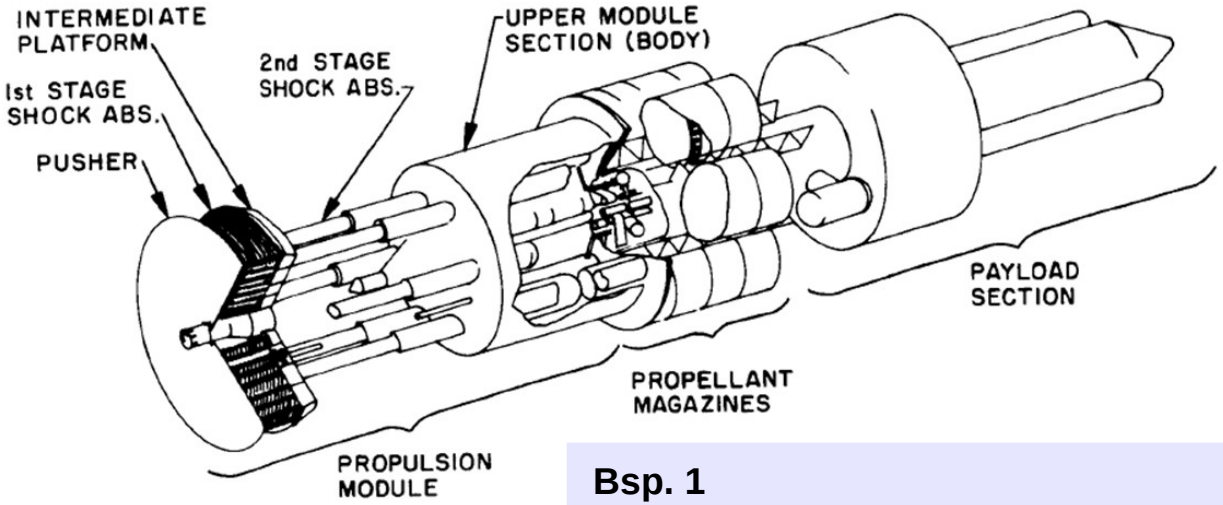


Orion-Pulsantrieb

ermöglicht riesige, schnelle Raketen.

Wie schnell, wie riesig?

Energiedichte Lithiumdeuterit: 50 kt TNT / kg



$$F_{Schub} = 300 \sqrt{\frac{W_{spreng}}{kt} \times \frac{m_{spreng}}{kg}} \; t \text{ bei } 1\,g$$

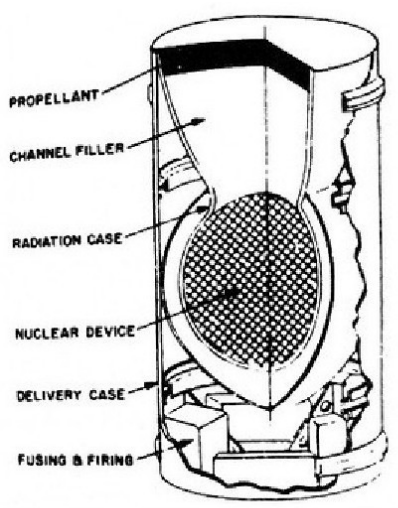
$$\Delta v = 3000 \sqrt{\frac{W_{spreng}/kt}{m_{spreng}/kg}} \; \ln \frac{M_{voll}}{M_{leer}} \; \frac{km}{s}$$

Bsp. 1

W_spr = 10 kt, m_spr = 50 kg
Massenverhältnis = 2
→ F ~ 6700 t @ 1 g
→ Delta v ~ 900 km / s

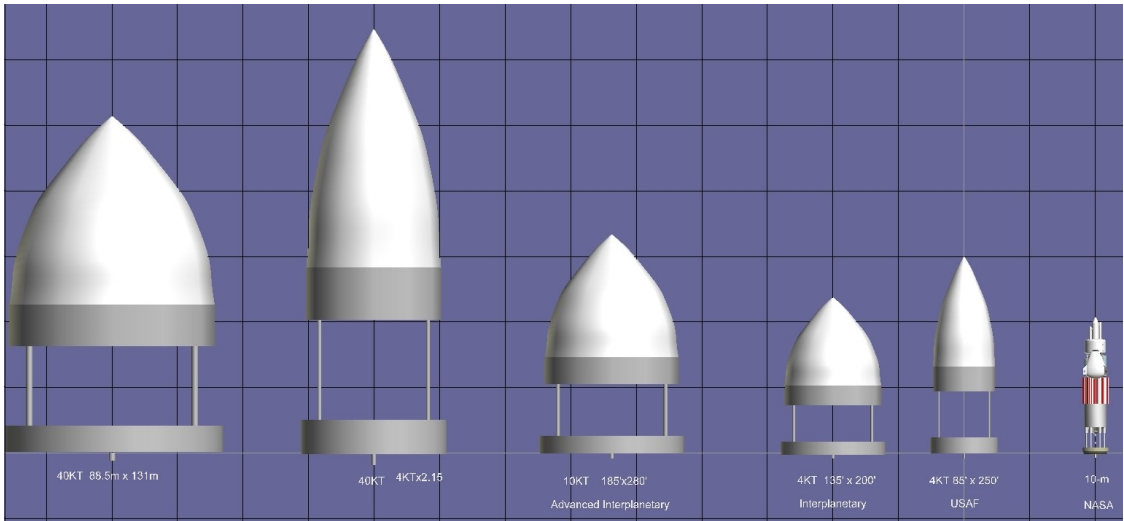
Bsp. 2

W_spr = 1.5 Mt, m_spr = 1000 kg
Massenverhältnis = 10
→ F ~ 370,000 t @ 1 g
→ Delta v ~ 8500 km / s



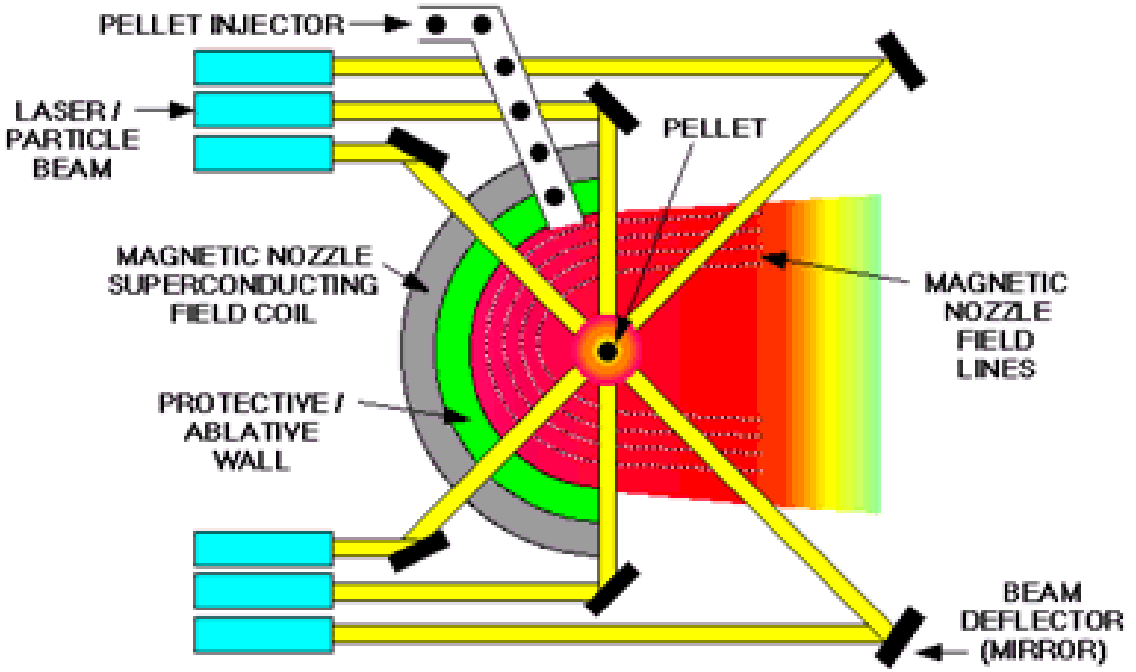
Fuel Element

Airforce Design



Verbesserungen des Orion-Antriebs?

Verkleinerung der Sprengsätze und Eliminierung des Spaltzünders.



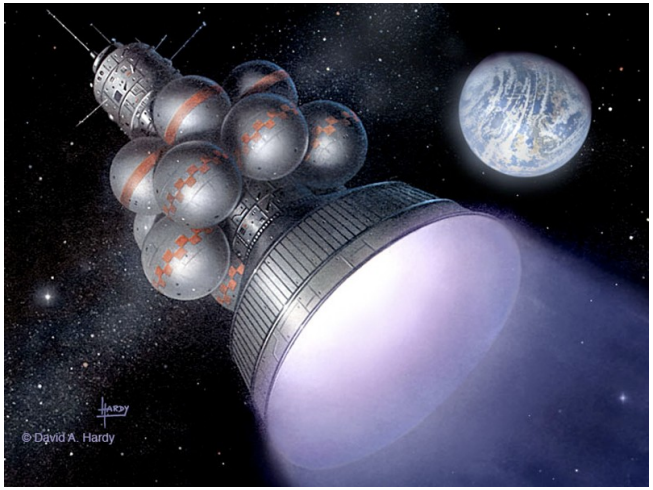
- Statt kompletter Wasserstoffbomben: **Kleine Kapseln mit Fusionsbrennstoff (D+T, D+D, D+3He, D+6Li...)**
- Zündung mit Laser- oder Teilchenstrahlen.
- Bündelung des Plasmas mit Magnetfeld.
- Ähnlich einseitig offener Trägheitsfusionsreaktor (Bsp. National Ignition Facility)

Rückstoßgeschw. max (D+3He): 9% c (!!)

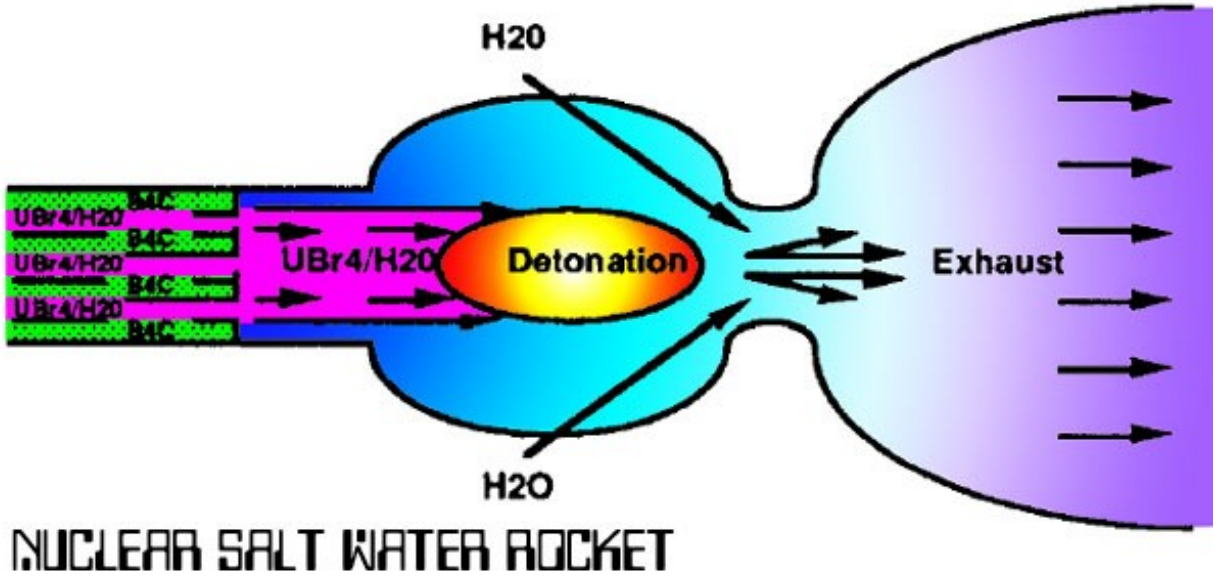
$$\frac{\Delta v}{c} = \tanh\left(0.09 \ln \frac{m_{voll}}{m_{leer}}\right) \qquad \frac{m_{voll}}{m_{leer}} = 4 \rightarrow \frac{\Delta v}{c} = 0.12$$

1 Mio t. Schiff, Beschleunigung mit 1 g:
370 kg Fusionstreibstoff / s.
→ 650 Mio GW ~ 40.000 x Weltenergieverbrauch (2016)

Projekt Daedalus/Icarus

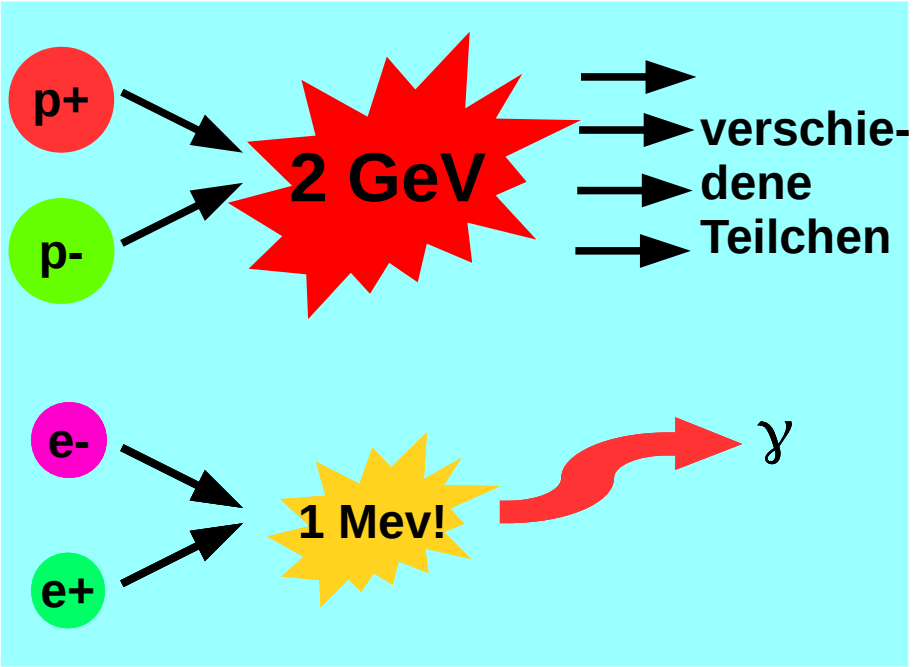


Gleichförmig abbrennender Orion ohne Fusionsstufe: Nukleare Salzwasserrakete nach Zubrin



- Brennstoff: Uran- oder Plutoniumsalz in wässriger Lösung.
- Brennkammer ummantelt mit Neutronenreflektoren.
- Konstant brennende nukleare Detonation.
- Schub und Rückstoßgeschwindigkeit ähnlich Orion, aber kontinuierlich.
- Viele Physiker stellen in Frage, ob dieses Triebwerk eingeschaltet werden kann, ohne das ganze Schiff in 1 Mikrosekunde in eine Plasmawolke zu verwandeln.

Photonenantrieb reloaded: Antimaterie



Gleicht „gewöhnlicher“ Materie bis auf Ladung:
Antiprotonen – negativ
Antielektroen (Positronen) – positiv.

Kontakt mit Materie:
Nach bekannter Physik stärkste mögliche Energiefreisetzung nach der Formel

$$E = (m1 + m2)\, c^2$$

(m1 = Masse Antimaterie, m2 = Masse Materie.)

Probleme:

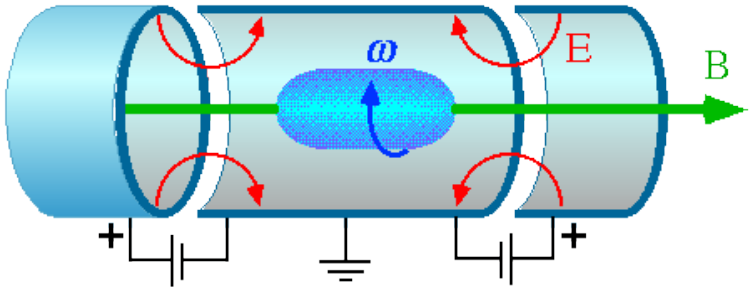
- Antimaterie wird nicht in großer Menge in der Natur gefunden – muß unter Energieaufwand hergestellt werden. **Energiespeicher, keine Energiequelle**.
- Sehr schwierig zu lagern. Kontakt mit Behälterwand → Explosion in Kernbombenstärke oder stärker **(1 g = Hiroshima, 1 kg = Tsar Bomba, 50 Mt.)**

Antriebsmöglichkeiten:

- Reaktionsprodukte M+AM als Rückstoßmedium. **Nur geladene Teilchen aus p+/p- sind lenkbar (60%der Reaktionsprodukte).**
- Mithilfe von M+AM-Reaktion Rückstoßmedium erhitzen und ausstoßen.
- AM zur Katalyse anderer Kernreaktionen nutzen, z. B. **AM-katalysierte Fusion.**

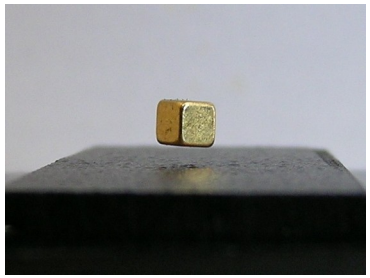
Antimateriespeicher

Penning-Falle



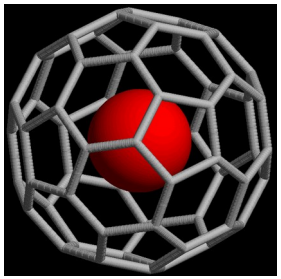
- Speicherung geladener Teilchen in überlagerten elektrischen und magnetischen Feldern.
- Wird heute genutzt um geringe Mengen an Antiprotoen (einige 1000) einzuschließen.
- Nur geringe Speicherdichte möglich, für Raumfahrt wahrscheinlich ungenügend.

Diamagnetisches Schweben



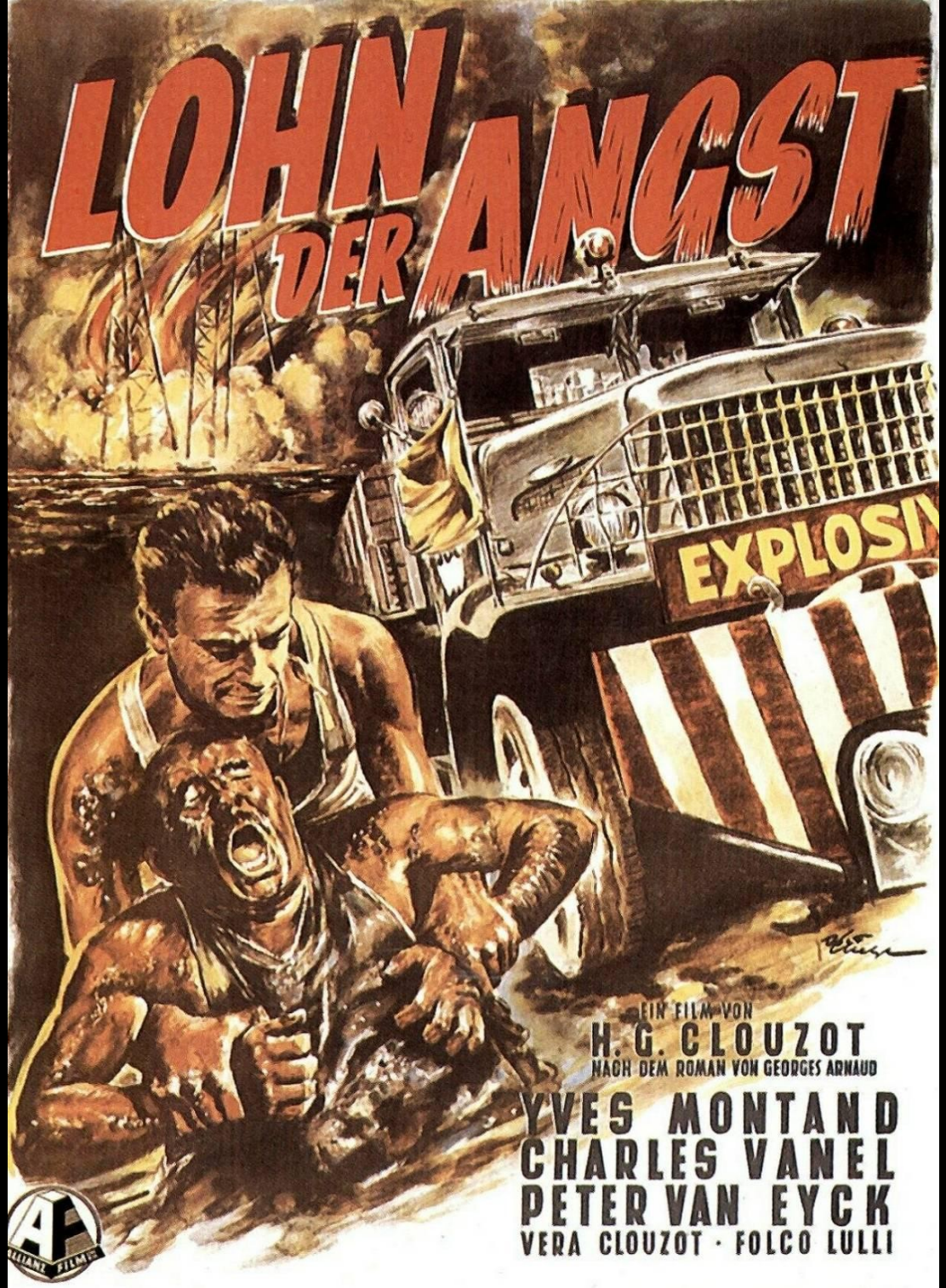
- Schneeball aus gefrorenem Antiwasserstoff wird von inhomogenem Magnetfeld abgestoßen, kann dadurch zum Schweben gebracht werden.
- Entnahme von Antimaterie durch Abdampfen mittels Laser.

Einsperren in Fullerene



- Antiteilchen werden in Fußballmoleküle gesperrt.
- Bei 1 Positron in jedem 10. Fulleren: Energiedichte ~ 6000x TNT.

LOHN DER ANGST

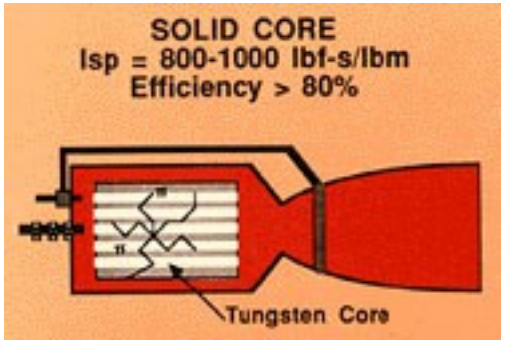


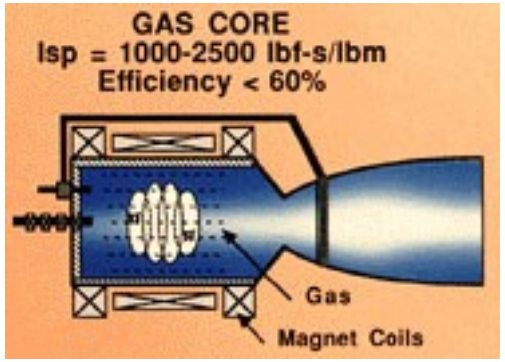
EIN FILM VON
H. G. CLOUZOT
NACH DEM ROMAN VON GEORGES ARNAUD

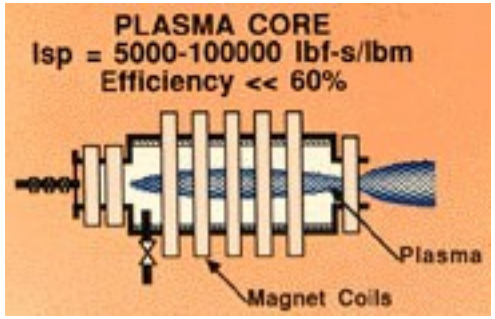
YVES MONTAND
CHARLES VANEL
PETER VAN EYCK
VERA CLOUZOT · FOLCO LULLI

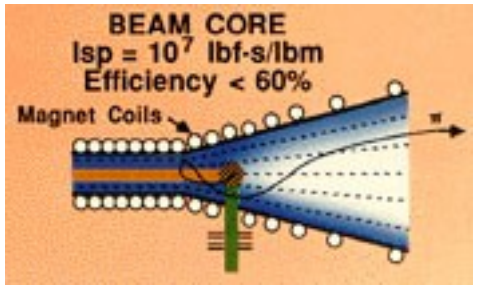
EINE CO-PRODUKTION FILMSONOR – C.I.C.C. VERA FILM – FONO ROMA

Antimaterierakete







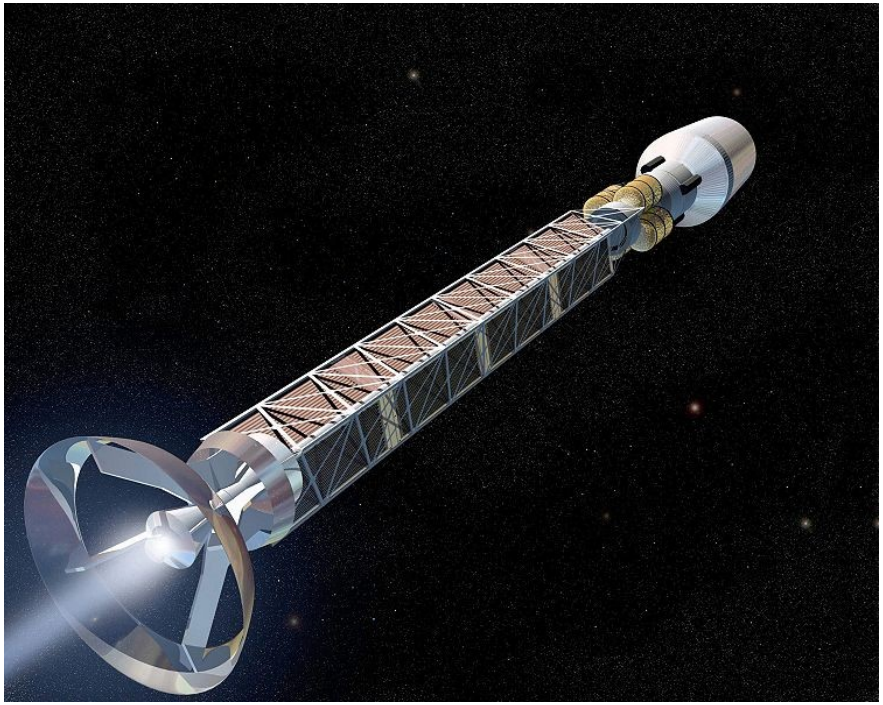


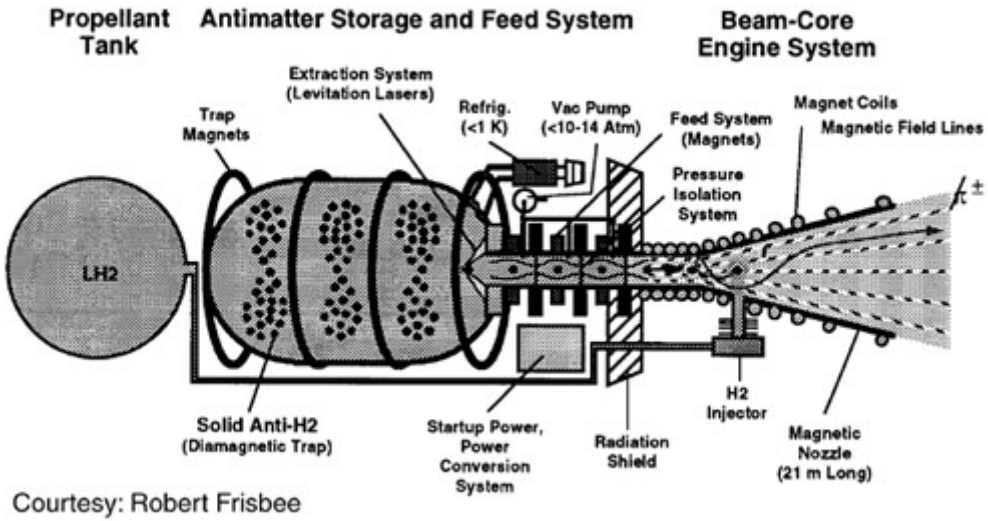
v0 ~ 10 km/s

v0 bis 25 km/s

v0 bis 1000 km/s

v0 bis nahe c





Bussard-Ramjet

Riesiger Magnettrichter saugt dünnes interstellares Wasserstoffgas an, das als Fusionsbrennstoff dient

Geschwindigkeiten beliebig nahe c möglich.

Dank RT kann Mannschaft während ihrer Lebenszeit jeden(!) Ort im beobachtbaren Universum erreichen.

Arbeitet umso effizienter, je schneller das Schiff fliegt.

Sehr hypothetische Technologie.

Wann und Wie…?

Nationale Alleingänge und kurzfristige Vorstöße im Stil von Apollo sind nicht mehr zielführend.

Die Raumfahrt muss internationalisiert und systematisch ausgebaut werden.

Als erstes ist eine ultrabillige Startmethode ins Erdorbit erforderlich, z. B. ein elektromagnetisches Katapult.

Damit kann die Konstruktion großer rotierender Raumstationen im geostationären Orbit erfolgen: als Hafen, Werft und Treibstofflager (sowie eventuell als orbitales Solarkraftwerk).
Von dort aus beginnt die bemannte Erforschung und Besiedlung des Sonnensystems: Mond, Mars, Asteroide und Gasriesenmonde…
...und irgendwann auch Alpha Centauri und darüber hinaus...

Vielen Dank!

Slides zum Download und Links zu Weiterlesen auf:

http://nuklearia.de/2016/03/04/vortrag-relativistische-raketen/