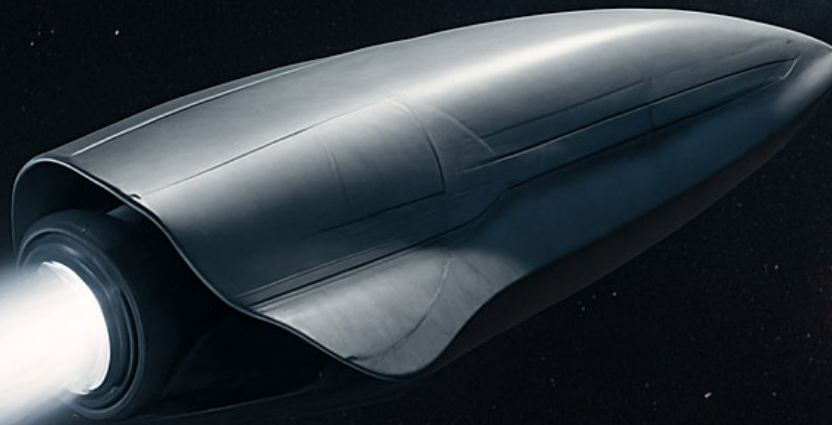


恒星間航行の時代は来るか？

宇宙船の推進方式と加速の限界



2025年 7月 7日

時枝 幸伸

Drawn by Chat GPT

人類は50年以上前に月面に降り立ち、
現在では、地球の周囲に数々の通信衛星、観測衛星、測位衛星が
周回している。

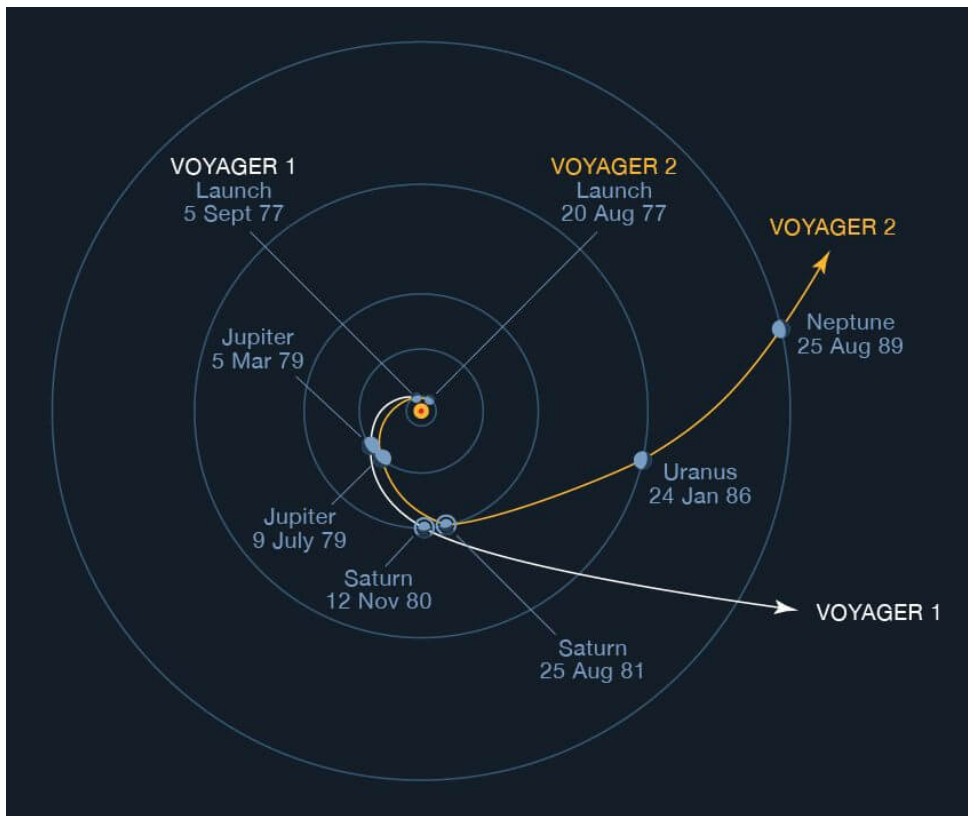
近い将来、月面にデータ
センターが建設され、
月面での資源採掘が進む。
さらに、火星移住への動き
が起きるかもしれない。

遠い将来、
太陽系からも飛び出し、
人類の移動の範囲は
恒星間まで拡大するだろうか？



無人探査機であれば
太陽系を脱出した実績あり。

木星・土星・天王星を
スイングバイし、太陽の重力を振り切る。



ボイジャー1号

1977年9月5日打ち上げ



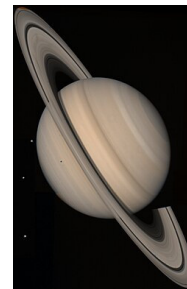
木星 1979年1月 土星 1980年11月

2025年6月1日時点

太陽から250.32億km, 17.0km/s

ボイジャー2号

1977年8月20日打ち上げ



土星 1981年8月 天王星 1986年1月 海王星 1989年11月

2025年3月8日時点

太陽から210.58億km

宇宙は広大である。光の速さでさえ遅く感じる。

プロキシマ・ケンタウリ 距離 4.25光年

ボイジャー 1号 16km/s で 約8万年



プロキシマ・ケンタウリ 11.13等級 赤色矮星

リゲル (オリオン β) 距離 860光年

ボイジャー 1号 16km/s で 約1600万年
光の速さでも 860年

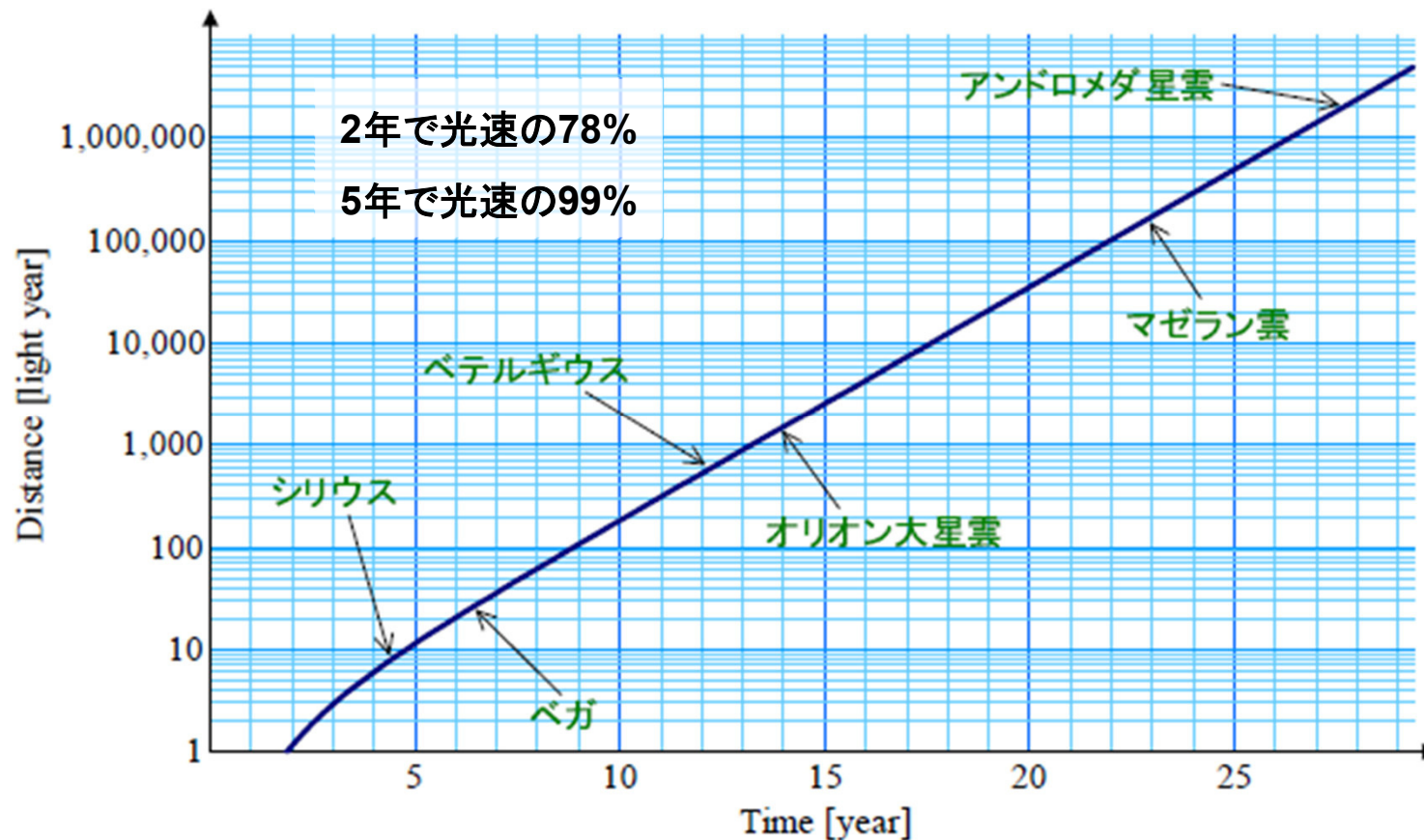


リゲル 0.12等級

相対論的効果を期待すると, 恒星間航行は可能か?

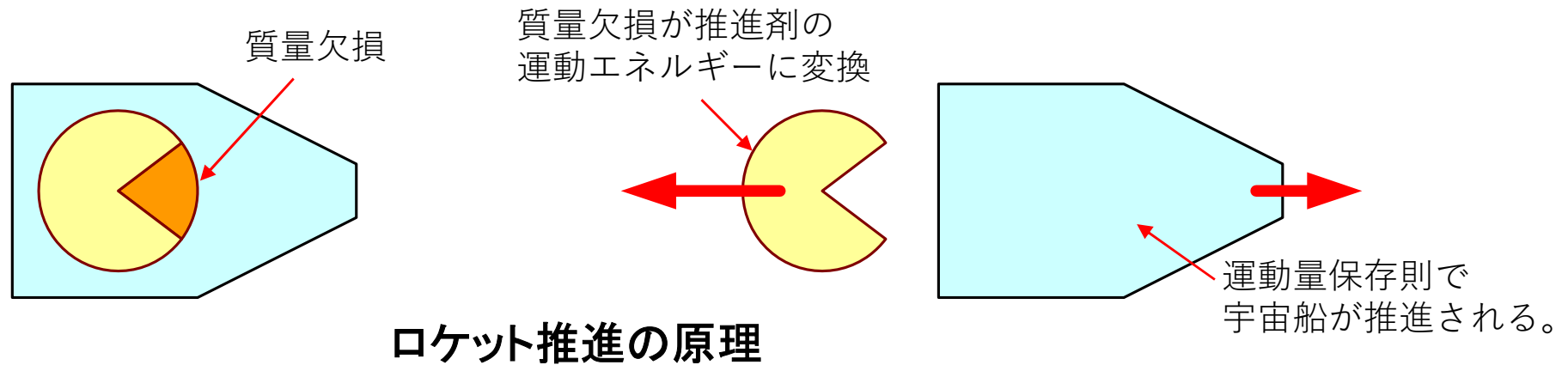
光速に近い速度で運動する者にとって, 時間はゆっくりと経過する。
光速の99%で, 時間経過の速さは7分の1。

銀河系脱出も夢ではないように見えるが...???



5m/s² を持続した場合の到達距離

そもそも, 光速の90%を超える速度域まで加速できるのか?



運動量保存則 (相対論的效果含む)

$$d\left(\frac{M\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}\right) = -\frac{\beta - \beta_u}{1 - \beta\beta_u} d\left(\frac{M}{\sqrt{1-\beta^2}}\right)$$



$$\frac{dM}{M} = -\frac{d\beta}{\beta_u(1-\beta^2)}$$



解:

$$\beta = \tanh\left(\beta_u \log \frac{M_0}{M}\right)$$

加速可能速度

初期質量

推進剤噴出速度

推進剤噴出後 質量

燃料種別	質量欠損	例
化学燃料	10^{-10}	水素の燃焼
原子核分裂	7×10^{-4}	U, Pu 核分裂
原子核融合	4×10^{-3}	D-T 反応
反物質	1	「天使と悪魔」

スペースシャトルの推進速度

打上時質量の95%は捨てられる。



スペースシャトルの質量内訳

パーツ	質量
オービタ (本体)	103トン
外部燃料タンク	26トン
外部燃料	730トン
固体ロケットブースター	126トン
ブースター燃料	1054トン
合計	2039トン

$$\text{質量欠損} = 0.9 \times 10^{-10}$$

$$\text{エネルギー効率} = 46\%$$

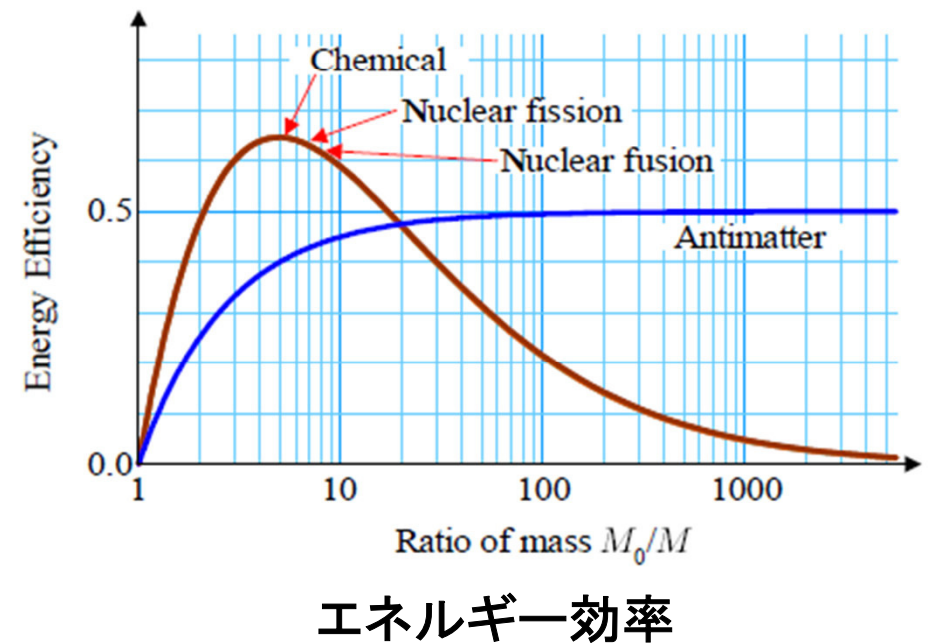
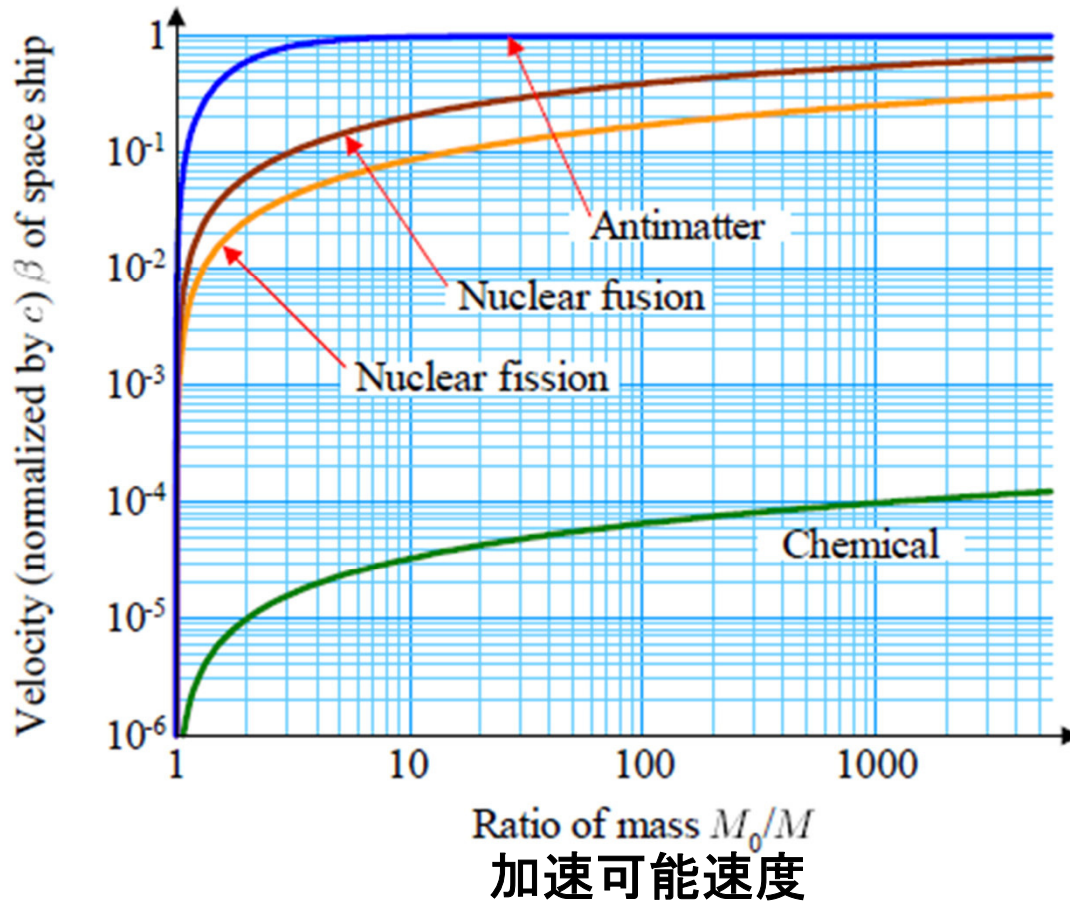
$$\text{推進剤噴出速度} = 2726 \text{ m/s}$$

$$M_0/M = 2039/103 = 19.8$$

$$\text{加速可能速度} = 8.14 \text{ km/s}$$

$$\begin{cases} \text{軌道周回速度 } 7.66 \text{ km/s} \\ \text{高度 } 410 \text{ km} \quad \text{位置エネルギー} \end{cases}$$

化学燃料では現在の到達速度が限界。
原子核分裂で光速の6%, 原子核融合で光速の15% は狙える。
反物質ならば, 光速の90%超えを狙える。



現実的には, 核分裂は環境面 (宇宙のサステナビリティ) でNG.
反物質は生成に費やすエネルギー, 貯蔵の安全性からNG.
となると, 水素核融合か...

大量に燃料を積載しなければならない問題を解消する方式

宇宙空間には $1\text{個}/\text{cm}^3$ の密度で水素原子が漂っている。
電磁レンズで水素原子をかき集め、核融合の燃料として使う。

初期加速は搭載燃料で核融合推進を適用する。
光速の数%程度の加速が完了したら、推進方式をラムジェットに切り替える。

水素取り込み用 電磁レンズの大きさを計算

宇宙船の質量: 10,000トン

(数名の長期間生活が可能な環境)

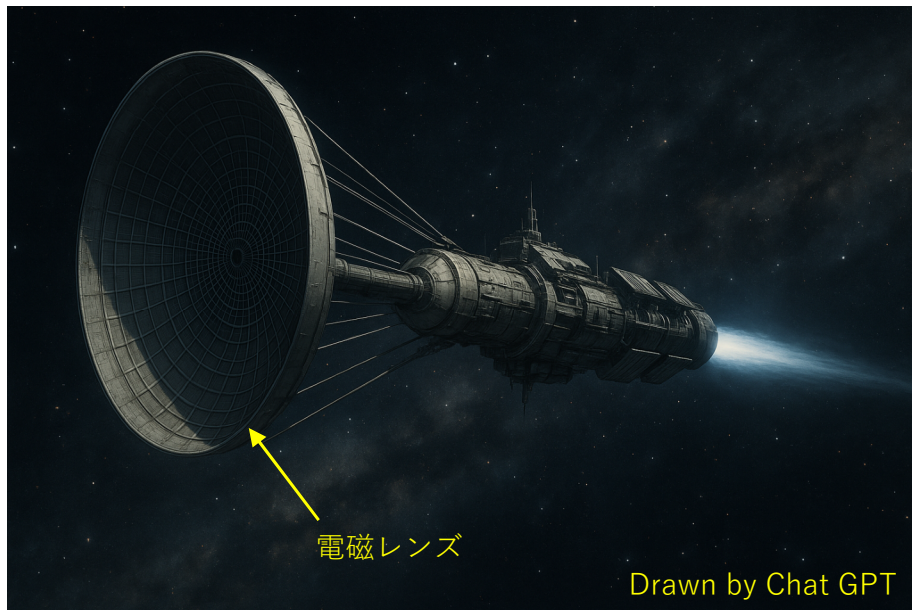
標準速度: 光速の10%

加速度: 5 m/s^2

出力: $1.5 \times 10^{15}\text{ W}$ (= 2兆馬力)

電磁レンズ半径 = 5140 km

実現不可能なレベル



恒星間航行は様々な推進方式が提案されているが、
どの方式も光速の90%を超える速度を得るには実現性が乏しい。

光速の90%超えは、星間物質 (水素原子) の衝突で機体が (致命的に) 損傷するレベルである。

推進方式	到達速度	実現性	備考
光子ロケット	0.999c	×	高エネルギー供給のメカニズムと、排熱処理が主要な課題である。
反物質推進	0.9c	×	反物質の生成と貯蔵が大きな課題。貯蔵だけでなく、事故時の安全確保も大きな問題 (容易に対消滅する) である。
核融合推進	0.3c	△	生成される高温プラズマの制御が課題となる。排熱処理が課題であることはほかの方式と同じ。
ビーム推進 (光帆)	0.9c	○	高出力レーダを帆に照射し続けるためのインフラが必要。軽量の無人プローブの推進用途に限る。
バサード・ラムジェット	0.8c	×	星間物質 (水素) の密度が低く、十分な推力を得るには数万kmの水素取り込み電磁レンズが必要。

現実的なレベルとしては、
核融合推進を太陽系内での高速移動に使うくらいかもしれない。

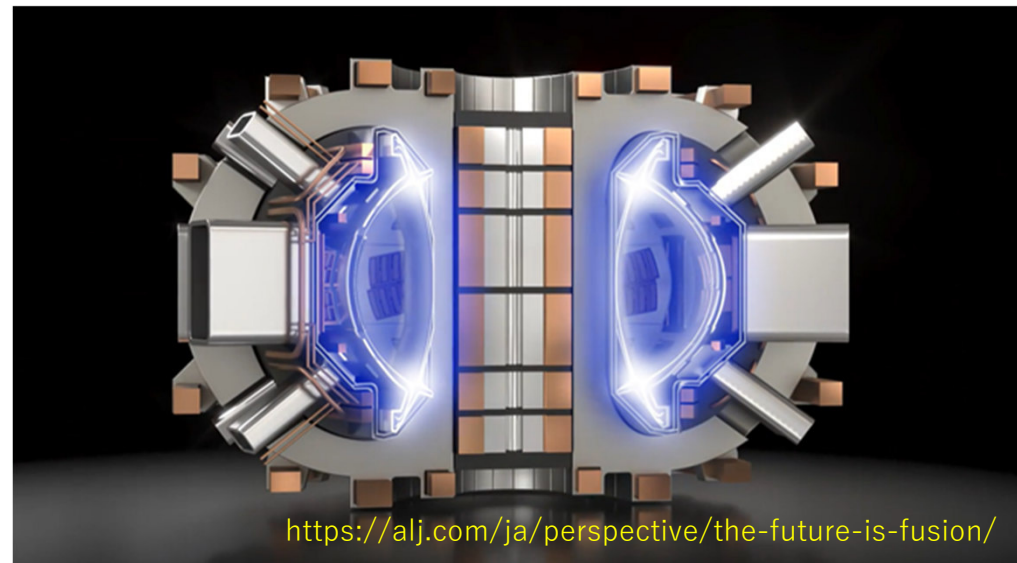
相対論的效果は非常に頼もしい。

実際に、数百年、数千年を要する航路でも、
移動している本人にとっては数十年で銀河系から飛び出せる。

しかし、実現性は極めて厳しい。

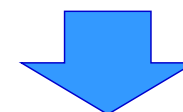
ほぼ高速まで加速するには
膨大なエネルギーが必要。
燃料を搭載する方式では、
燃料の質量が非効率的。
外部からエネルギーを
供給する方式も非現実的。

恒星間航行の実現性は
かなり低い。



核融合炉が小型化できれば、太陽系内を高速航行する時代は期待できる。

ご静聴 ありがとうございました。
物理・数学解説サイトを運営しています。
ご興味がありましたら訪問ください。



**Scientific
Doggie**

Scientific Doggie 数理の楽しみ
<http://www.wannyan.net/scidog>

