

地球外に生命は存在するのか

「子供の頃、海を見て育っちょらん人間は信用できん」(西原理恵子)



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖
追手前ゼミナール 2021年6月26日

1 なんのために生まれて なにをして生きるのか



皆さんの現在の目標 ≠ 人生の最終目的

- 好きな部活動を頑張りたい
- いい点数をとって成績を上げたい
- 有名な大学へ入りたい
 - 自慢したい
 - 異性(同性でも良い)にもてたい
 - やりたい仕事をして高い給料が欲しい
- ではその先は？その後どうする？
 - と考えてみれば、何かに役に立つための勉強という意味での(中間)目標は、決して人生の最終目的になり得ないことに気づく

高校で習う物理は面白いのか

$$m\vec{a} = \vec{F}$$

$$\frac{1}{2}mv^2 - G\frac{Mm}{r} = E$$

$$H = \frac{i}{2\pi r}$$

$$f' = f \frac{v - u'}{v - u}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$$y = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi k_0 d}$$

- **結論**：高校の物理の教科書は全くイケテナイ
- できなくてもつまらなくても気にしないで良い
- 「本当」の物理学（=世界）は面白さに満ちている

謎解きはジュケンの後で

『東大ing 2014』（東京大学新聞社）

物理



すとう やすし
須藤 靖 教授
(理学系研究科)

30年以上も前のことなのであまり良く覚えていないのだが、高校の物理を面白と思った記憶がない。一方で、数学の難しい問題を考えている時間は楽しくて仕方なかったし、美しい解き方を思いつくとある種の感動を抱いたりもした。なぜだろう。

高校数学はある意味では自己完結しているのに対して、高校物理はそれだけでは結局理解できない事実が多すぎるからそう考えればつじつまがあいそうだ。この世界の物質すべては少数の素粒子

に還元できる。それらを支配する相互作用と対称性が、原理的にはこの世界の振る舞いを決めていく。一方で、分割するだけでは到底説明できない多体現象がこの世界の多様性を保証する。

ミクロな世界とマクロな世界は何によって区別されるのか、真空と何か、宇宙には始まりはあるか、宇宙は見えている物質だけでできているのか、この空間は本当に3次元なのか、物理「定数」は時間変化しない定数なのか。

高校物理の先にこれほど魅力的で、哲学的とすら形容すべき問題が待ち構えており、しかもそれらが先人達による科学の蓄積によって解き明かされつつあることなど、ほとんど想像不可能ではあるまいか。

どう考えても面白いとは思いたい斜面上の物体の運動、高校物理の範囲では意味が分かるはずのない交流回路のリアクタンス、数学で習っていないがなぜか

決して面白いとは言いがたい高校物理は通過儀礼でしかない。大学でなぜそうなるのかを学ばずっきりする。さらに、この世界が少数の単純な摂理に支配されているという驚くべき事実

に感動すらしてしまうかも。その先には膨大な謎とさらなる摂理の探求の地平が広がっている。長い時間がかかろうと、科学を学ぶことで初めて解明できる無数の謎が残っている。それにチャレンジする人生も悪くない。

謎解きはジュケンの後で

何を学んでおくべきなのか？

- 受験のために「学ばされる」科目は役に立つか？
- 私のやっている専門の研究だけに限定すれば
 - 数学と物理（と地学の一部）は不可欠
 - 英語と現代国語は文献を読み、共同研究者と議論し、研究結果を発表するために極めて重要
 - 化学と生物はあまり要らない
 - 歴史と地理、古文・漢文などは全く不要
- しかし、「必要」あるいは「狭い意味で役に立つ」事だけを学んでおけばそれで良いのか？
- 何のために学ぶのか？

理学部と文学部の接点

- 「文学部か、いいなあ」
- 「え、どうしてです」
- 「思い残すことがないでしょう」



私は《文学部しかない》と決めていて、それが何のためとは思わなかった。しかし、勉強が、それ自体のためというより、ステップであるということも当然あるわけだ。いや大学という存在の《機能》を考えたら、そちらの方が自然なのかもしれない。

北村薫 『六の宮の姫君』 (東京創元社)

invaluable > valuable

- 「役に立たない」 ≠ 「価値がない」
 - 芸術、音楽、文学、恋愛は役に立つのか？
 - でもそれらは生きる理由を与えてくれる
 - **valuable** は、「価値を判断できる」ほど大切、意義深いという意味
 - **Invaluable** は、「もはや価値を判断する事すらできない」ほど重要であるという意味
 - 科学にも **useful** ではなく **useless** だが **invaluable** な分野があって良いはず ⇒ 天文学はその典型

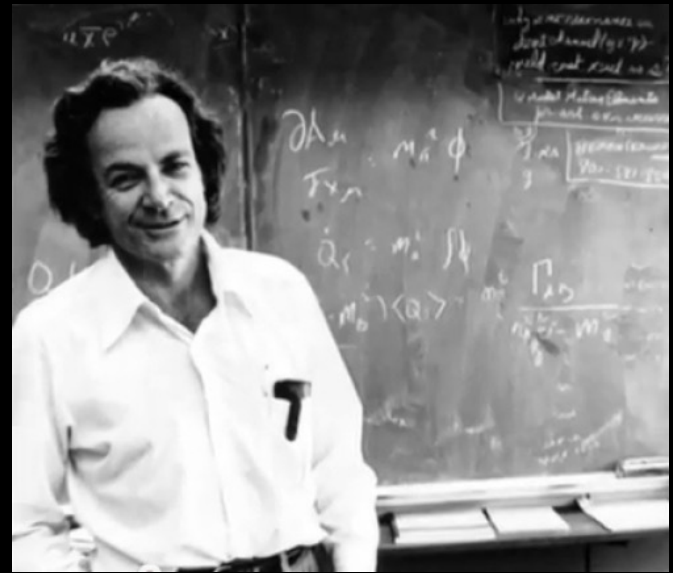
試験が得意な人 ≠ 新しいことを開拓する人

- 大学入学までに行われる「試験」での評価基準
 - 正解が存在することがわかっている問題を
 - 決められた時間内に
 - 一人だけで何も見ず
 - すべての科目を万遍なく解答することが求められている
- これらは社会の現場とはすべて「矛盾する」
 - 試験での秀才は必ずしも優れた研究者・社会人ではない
- 人間の才能は1次元に数値化できるものではなく、多次元空間で表現すべきもの
 - 必ずしも（とびぬけて）優秀である必要はない
 - 何でも良いから余人をもって代えがたい度合いが重要
- 何よりも自分が好き・楽しめることを見つけるべき

科学を学ぶ意味

- 世の中は不思議なことに満ち満ちている
 - 楽しみながら世界を徐々に理解する
- 「みんなが言っているから正しい」ではなく、自分の頭でじっくり考えて判断する
 - 当たり前とされていることでも一度は疑ってみる
- 本物と偽物を見極める力をつける
 - 変な人（TVに出過ぎる有名人・肩書きだけで中身のない人・詐欺師・政治家・官僚・大学教授）に騙されない
 - 健全な懐疑心を持ち善悪を自分で判断する
- 科学的「考え方」（≠「知識」）は、狭い意味の科学に限らず、すべての人生において不可欠

リチャード・ファインマン 『科学とは何か： ファインマンさんベストエッセイ』 (大貫・江沢 訳 岩波書店)



- 僕はみなさんが専門家を、たまにどころか、必ず疑ってかかるべきだということ、科学から学んで頂きたいと思います。事実、僕は科学をもっと別な言い方でも定義できます。科学とは専門家の無知を信じることです。

答えを知るより疑問に思う心が大切



眼は、いつでも思った時にすぐ閉じることができるようにできている。しかし、耳のほうは、自分では自分を閉じることができないようにできている。 **なぜだろう。**

(大正十年三月、渋柿)

寺田寅彦

1878年11月28日～1935年12月31日

高知県出身

東京帝国大学物理学教授

夏目漱石 『野分』

■ 学問は綱渡りや皿廻しとは違う。芸を覚えるのは末の事である。人間が出来上るのが目的である。大小の区別のつく、軽重の等差を知る、好悪の判然する、善悪の分界を呑み込んだ、賢愚、真偽、正邪の批判を謬まらざる大丈夫が出来上がるのが目的である。



やなせたかしの教え： アンパンマン オープニングテーマ



- 作詞：やなせたかし
なんのために生まれて
なにをして生きるのか
こたえられないなんて
そんなのは いやだ！



2 宇宙は「地球」で満ちている

There's hundreds of billions of stars in the Galaxy. You've looked at only a handful. Wouldn't you say it's a little premature to give up? You've done one-billionth of the problem. Probably much less than that, if you consider other frequencies

— Carl Sagan, "Contact"

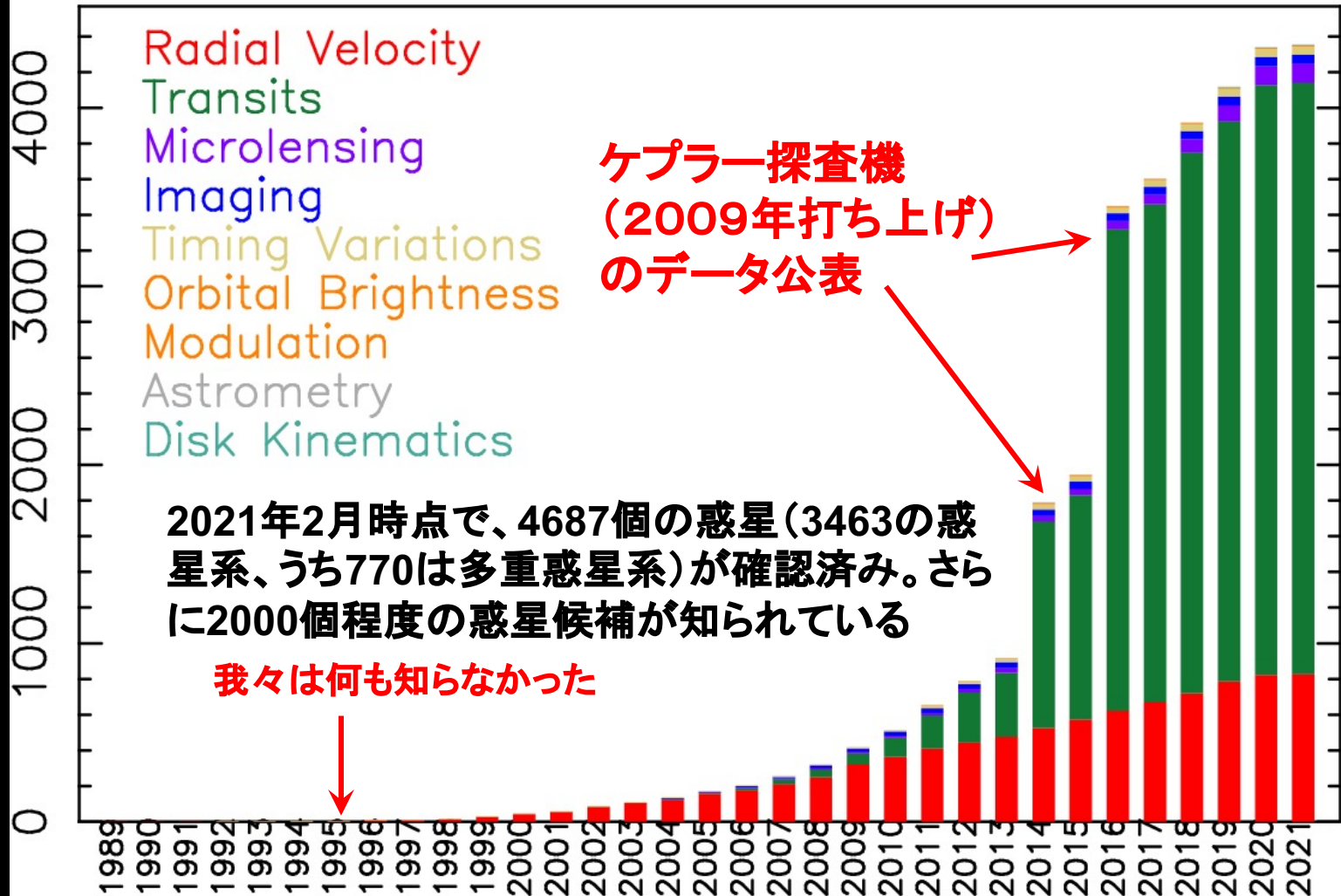
地球外生命はどこにいる？

- もちろん答えは誰も知らない！
(知っていたら、ノーベル賞10個分以上の大業績)
- 火星？
 - 地球によく似た岩石惑星 (1.027日で自転、1.88年で公転
平均温度は摂氏マイナス60度)
 - かつては水が存在したとされている
 - 近いので直接探査が可能(2021年2月18日 Perseverance)
- エンケラドス？
 - 土星の第二衛星、地下に液体の海があると思われる
- アルファケンタウルス？
 - 太陽からもっとも近い恒星、なんとか直接探査可能？
- もっと遠くの太陽系外惑星のどこかには必ずある？

太陽系外惑星の発見年表

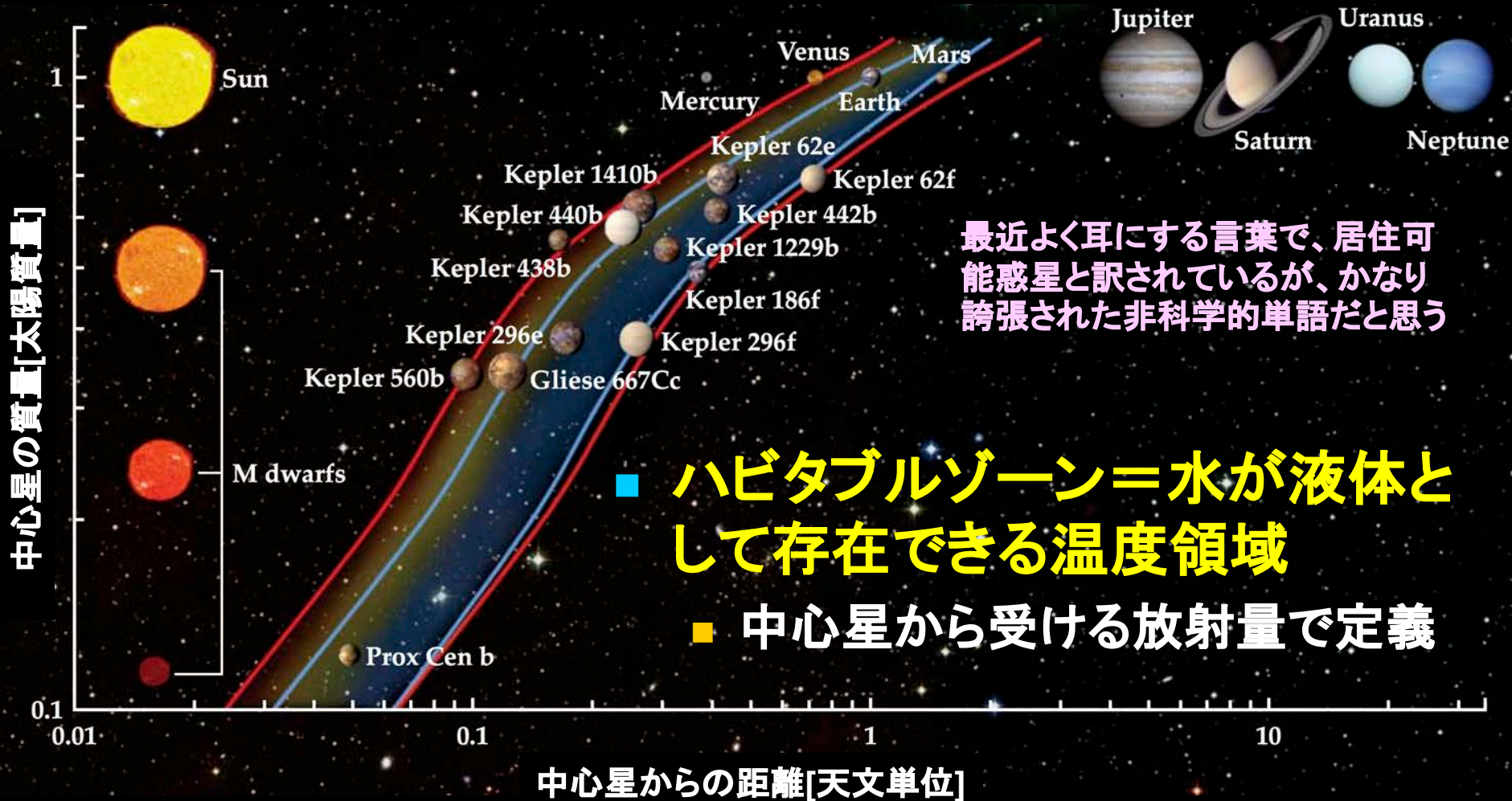
18 Feb 2021
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

発見総数



西暦

ハビタブル惑星候補



宇宙は「地球」で満ちている？

- 天の川銀河系内の恒星の数= 10^{11} 個
 - その10%の 10^{10} 個が太陽と似た恒星（G型星）
 - さらにG型星の10%がハビタブル惑星を持つと仮定
- 天の川銀河系内のハビタブル惑星の数= 10^9 個
 - 観測できる範囲の宇宙内の銀河の数= 10^{11} 個
- 宇宙内のハビタブル惑星の数= 10^{20} 個
 - ハビタブル惑星に生命が存在する保証は全くない
 - 本当に生命を宿すための条件は未だ知られていない（適度な割合の海と陸＋偶然？）
 - しかしこの膨大な数のなかで「この地球」だけが生命をもつと考える方がはるかに不自然では？

宇宙における生命探査

- 30年前まではSFでしかなかった
 - 科学者以外の一般人がむしろ強い興味をもつ
- 今では科学の一分野として認められつつある
 - サンプルリターン（小天体、火星、木星の衛星に直接探査機を送る）
 - リモートセンシング（遠方の太陽系外惑星を望遠鏡で観測）
 - SETI（地球外知的文明からの信号を検出）
- 人類の究極の科学目標であることは確実
 - ただし少なくとも今後10年から100年は必要

3 リモートセンシング

-わが地球の観測-

Adolf Hitler! It makes me furious. Forty million people die to defeat that megalomaniac, and he's the star of the first broadcast to another civilization? He's representing us. And them. It's that madman's dream come true

— Carl Sagan, "Contact"

カール・セーガン (1934-1996)

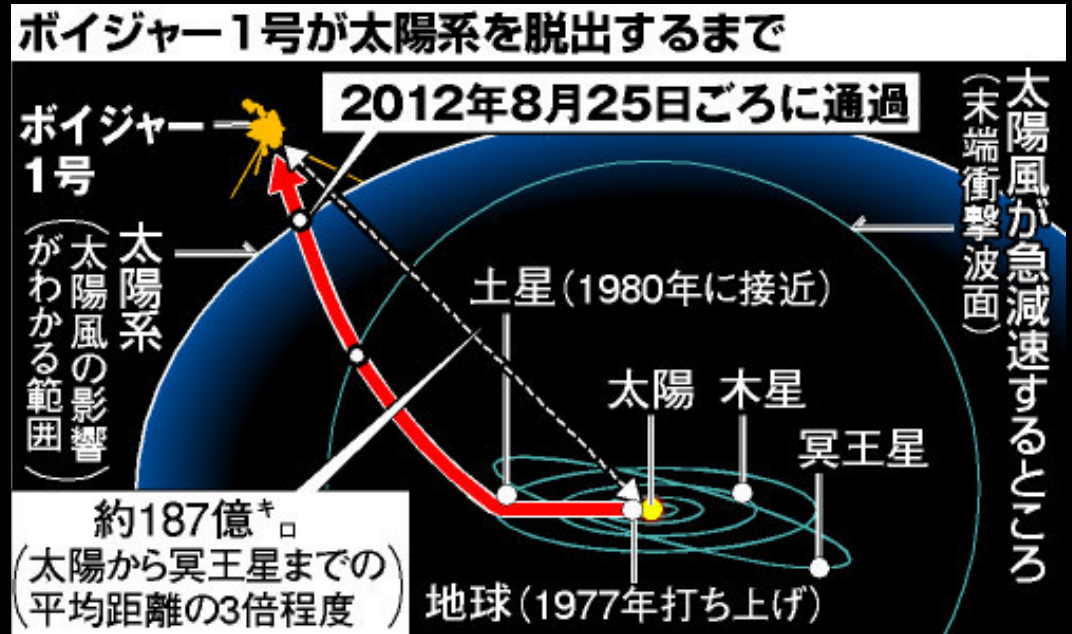


- 米国の惑星科学者
 - NASAの惑星探査プロジェクトの多くを主導
 - 「核の冬」、「われわれは星くずからできた星の子供」など多くの言葉を残し、社会に大きな影響を与えた
 - TVシリーズコスモス(1980)
 - 映画コンタクト(1997)
 - 「地球人だけじゃこの広い宇宙がもったいない」 “The universe is a pretty big place. If it's just us, seems like an awful waste of space”

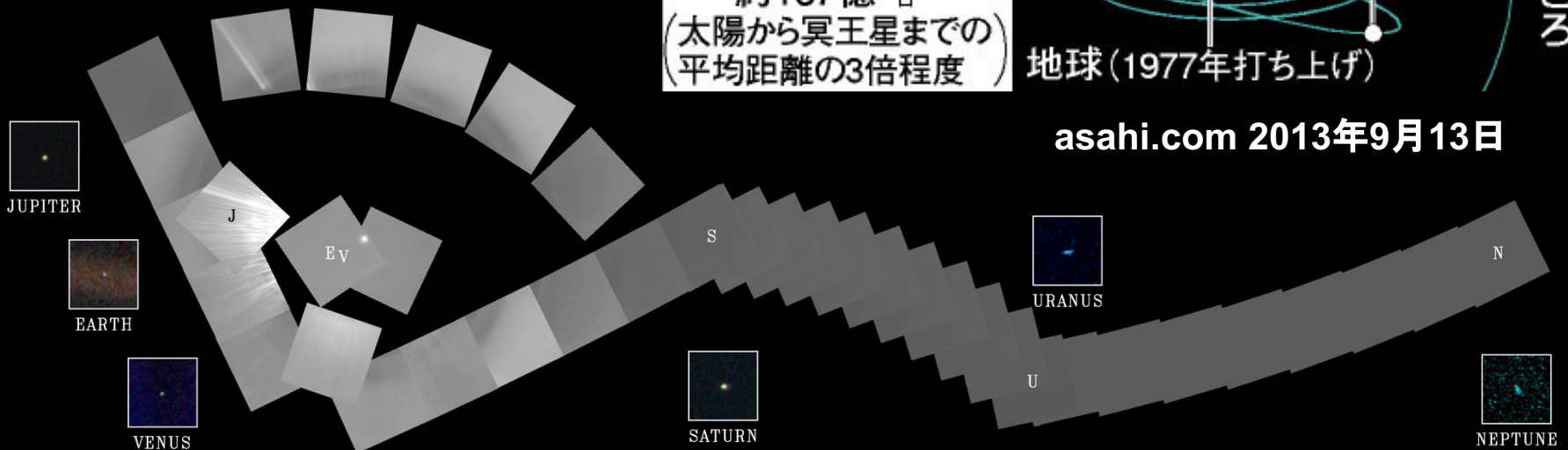
ボイジャー1号による太陽系内惑星撮像

■ 1990年2月14日
@40AU

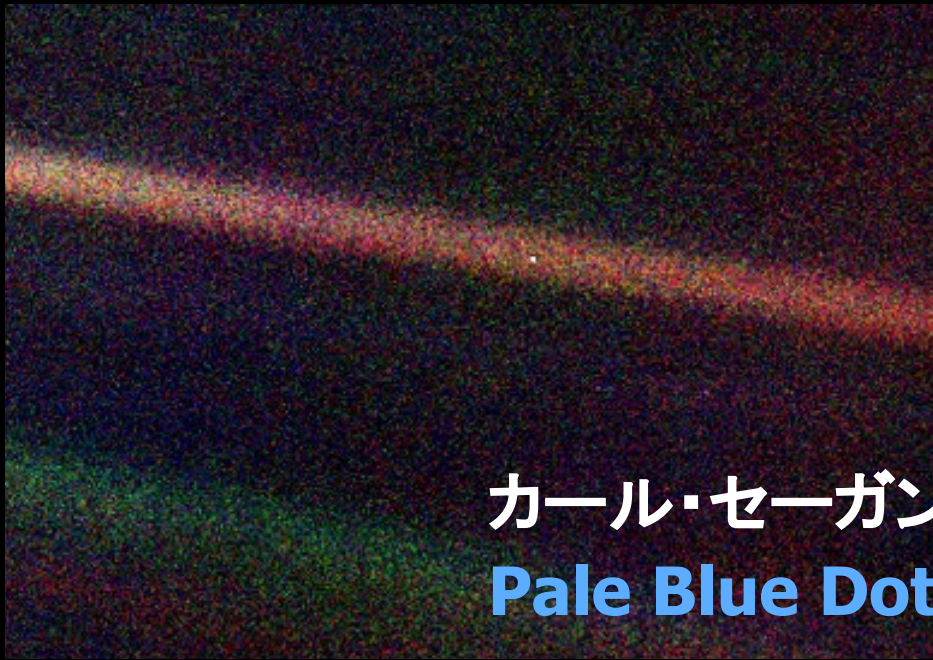
■ カール・セーガン
が地球の画像を
Pale Blue Dot
と命名



asahi.com 2013年9月13日



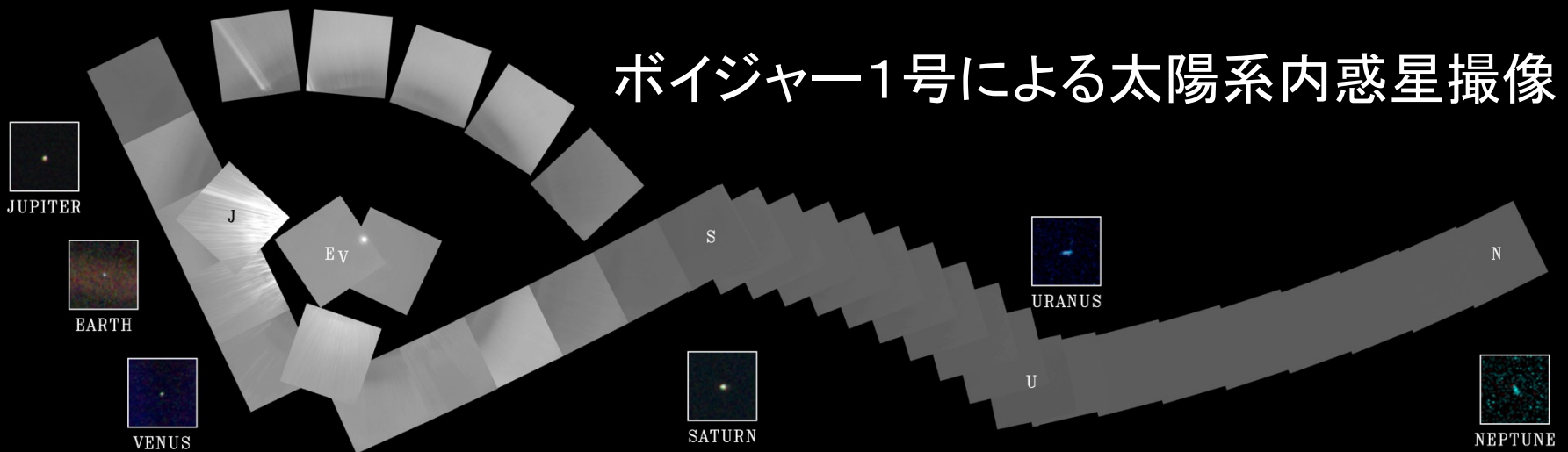
ペイル・ブルー・ドット



カール・セーガンが
Pale Blue Dot と命名



ボイジャー1号による太陽系内惑星撮像



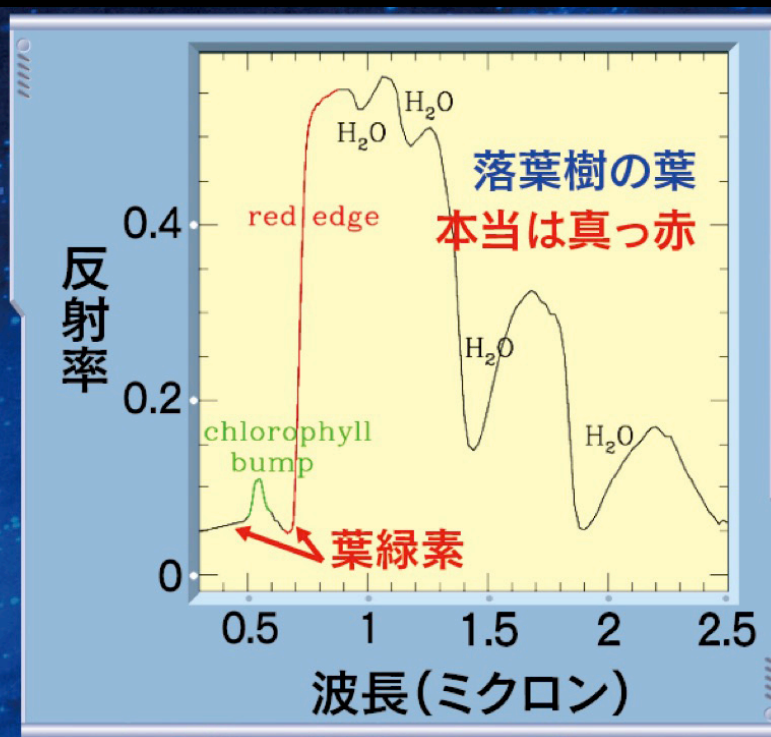
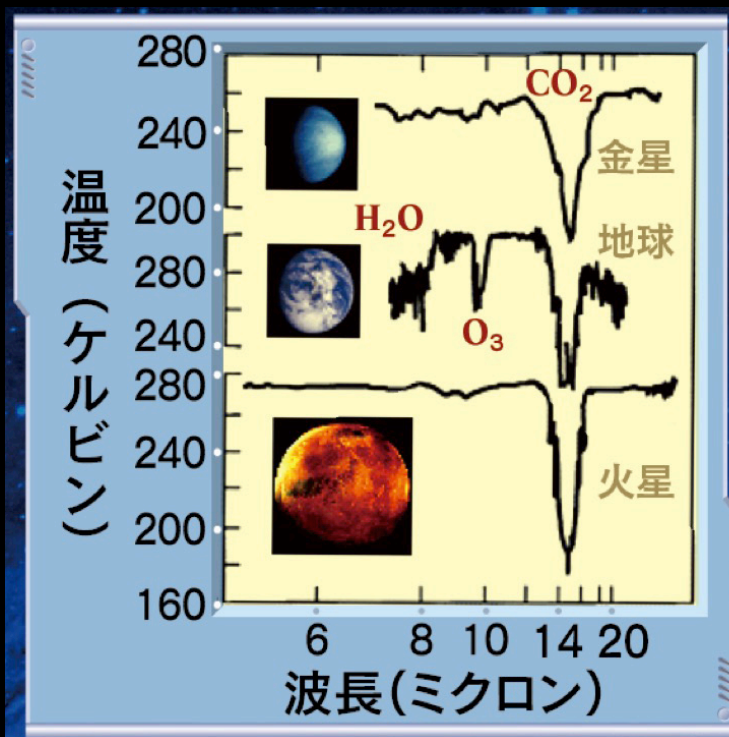


土星から 見た地球

- 土星探査機カッシーニが撮影した地球と月
 - 2013年7月20日(日本時間): 米国の2万人が手を振っている

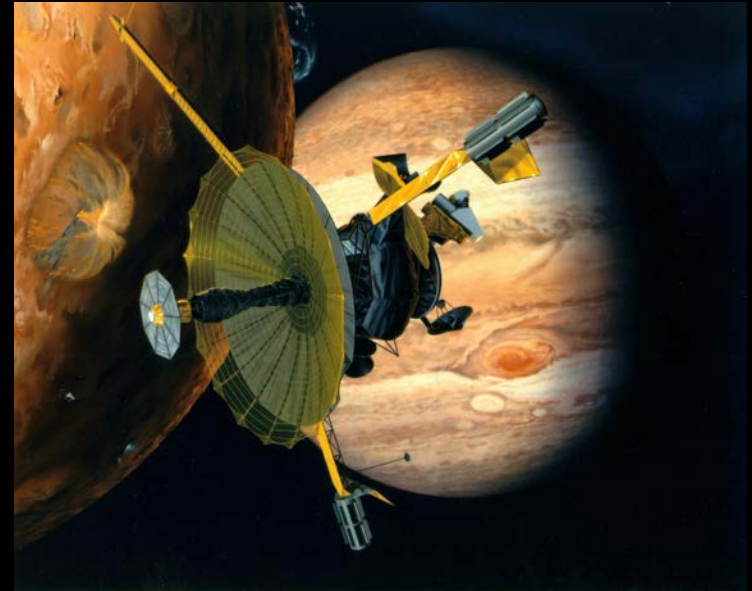
バイオシグニチャー: 生物が存在する兆候

- 何を見れば生命があると考えられるのか？
 - 生物由来の大気成分(酸素、オゾン、メタン)
 - 植物のレッドエッジ(宇宙植物学)
 - 知的生命体からの電磁波
- 天文学観測(リモートセンシング)が唯一の手段



ガリレオ探査機による地球上の生命探査

- 1986年5月打ち上げ
- 1990年12月8日一回目の地球スイングバイ時に地球上の“生命探査”
- 地球には生命がいるらしい!
 - 大量の気体酸素
 - 植物のレッドエッジ
 - 熱平衡から極端にずれた大気中のメタンの存在量
 - 狭帯域で振幅が変化する”不自然な”パルス状電波(通信信号)



Sagan, Thompson,
Carlson, Gurnett & Hord:
Nature 365(1993)715

4 知的文明探查

SETI:

**Search for Extra-Terrestrial
Intelligence**

*We're just beginning SETI. You know
how many possibilities there are. This
is the time to leave every option open.
This is the time to be optimistic.*

— Carl Sagan, "Contact"

SETI: Search for Extra-Terrestrial Intelligence

- 生命が存在する最も決定的な証拠は知的文明からの電磁波信号
- オズマ計画 (1960)
 - フランク・ドレイクは、4ヶ月間にわたり毎日6時間、口径26mの電波望遠鏡を、くじら座タウ星とエリダヌス座イプシロン星の方向に向け、中性水素の放射する波長21cm(周波数1.42GHz)帯に、文明の証拠となりうる規則的な電波信号の探査を試みた



地球外知的文明はあるか？：ドレイクの式

$$N = (N_s / L_s) \times f_p \times n_e \times f_L \times f_I \times f_C \times L$$

銀河系内にある
交信可能な
知的文明の数



フランク ドレイク博士

銀河系内の（生命に適した）恒星の数

その恒星の寿命

その恒星が惑星を伴っている確率

その惑星の中で、生物が存在可能な環境にある地球型惑星の期待値

その惑星に生物が発生する確率

その生物が知的生命に進化する確率

その知的生命が他の文明と交信を行う確率

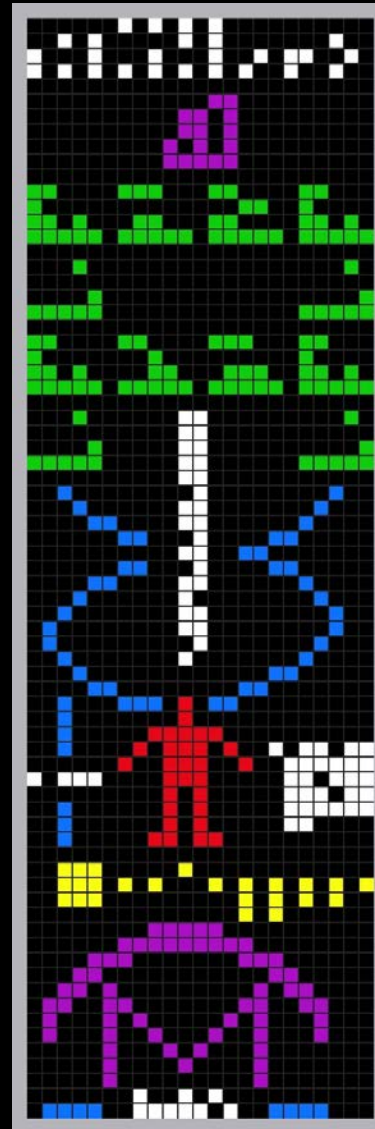
その文明の継続時間

Nの値は良くわかっていない。0.003個（つまり、我々の地球以外には存在し得ない！）と推定する研究者から200万個と推定する研究者までいる。ドレイク博士自身は1万個程度であると考えた。

アレシボ・メッセージ

■ ドレイクは、1974年11月16日にプエルトリコにあるアレシボ電波望遠鏡から、約2万5千光年離れた球状星団M13に向けて電波信号を送った

■ それを解読して並べたとすれば0と1の信号列が右図のようになる



1から10までの数(2進法)

DNAを構成する水素、炭素、窒素、酸素、リンの原子番号(2進法)

DNAのヌクレオチドに含まれる糖と塩基、計12種の化学式

DNAの二重螺旋

人間

太陽系(左端が太陽で、一行上になっているのが地球)

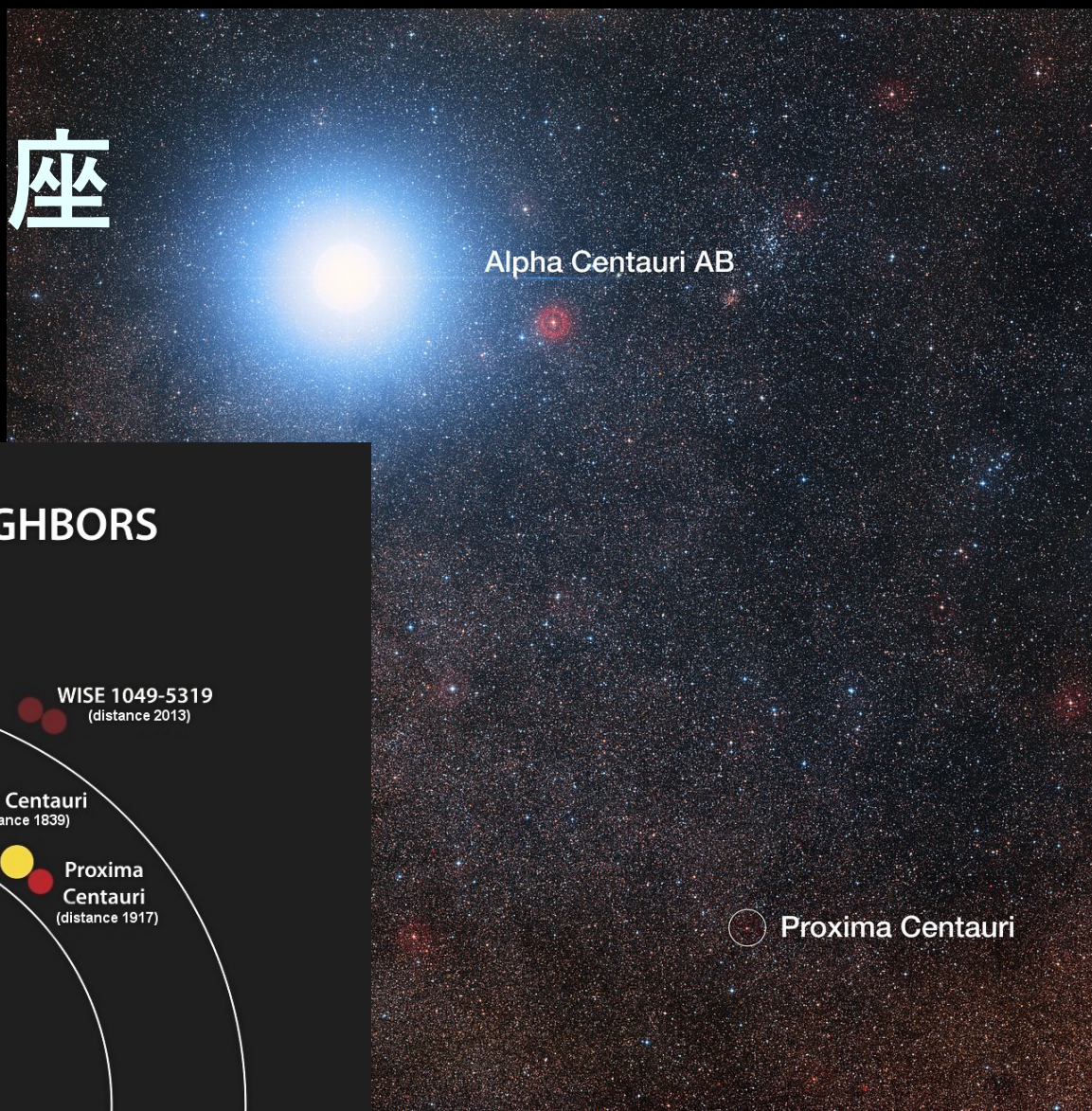
アレシボ電波望遠鏡

5 プロキシマ ケンタウリ b

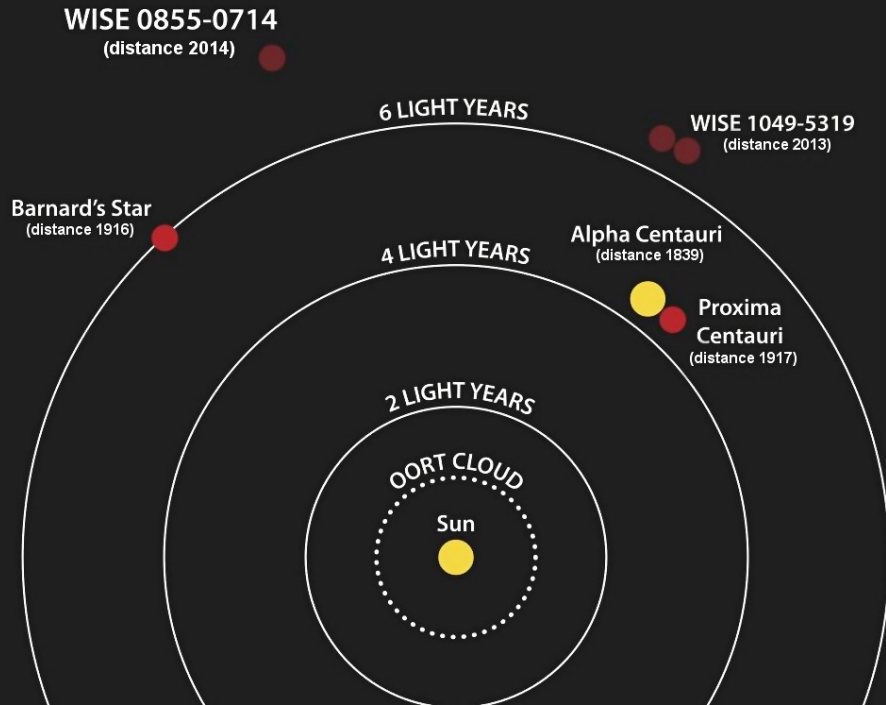
*Alpha Centauri was a triple system, two
suns tightly orbiting one another, and a
third, more remote, circling them both.
What would it be like to live on a world
with three suns in the sky?*

— Carl Sagan, "Contact"

ケンタウルス座 α 星



THE SUN'S CLOSEST NEIGHBORS



<http://www.eso.org/public/usa/news/eso1629/>

プロキシマ ケンタウリb

Alpha Centauri AB

- ケンタウルス座アルファ星は、太陽に最も近い3重連星系で、その一つが α Cen C = プロキシマ ケンタウリ (4光年先)
- その周りに、水が液体として存在できる可能性のある惑星 (プロキシマ ケンタウリb) が発見された (2016年8月26日)
- そこへ直接超ミニ探査機を送るスターショット計画が検討されている

○ Proxima Centauri

<http://www.eso.org/public/usa/news/eso1629/>

ブレイクスルー イニシャティブ

<http://breakthroughinitiatives.org/Initiative>

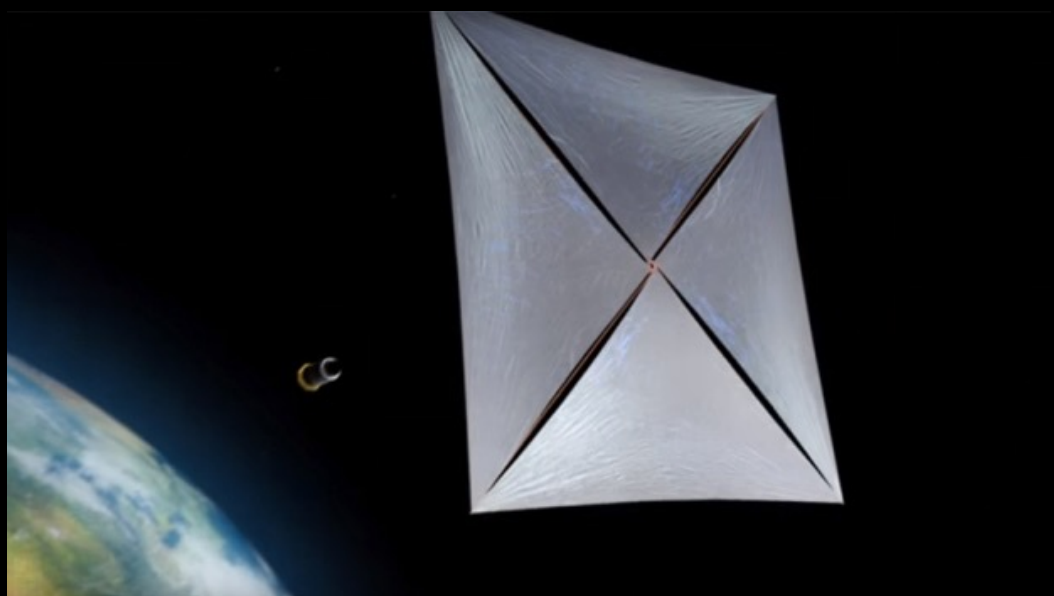
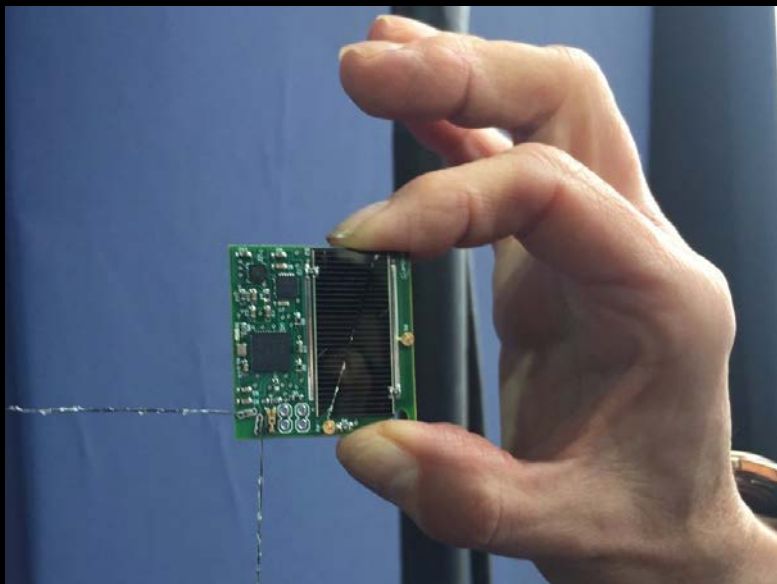
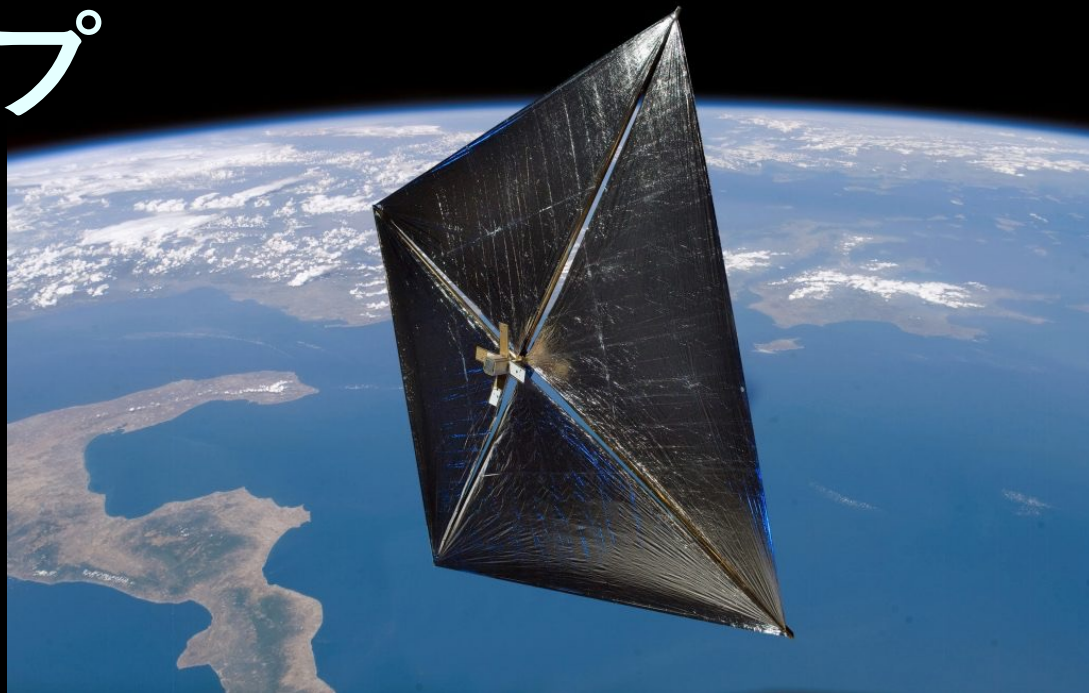
- **IT投資家ユリ・ミルナー**（素粒子理論で学位取得、資産4000億円）が地球外知的生命探査のため、2015年7月20日設立
 - **ブレイクスルーリッスン**：地球外文明の電波あるいはレーザーによる信号を受信
 - **ブレイクスルーメッセージ**：宇宙空間へ送るメッセージとして最適なものを提案するとともにその行為の哲学的倫理的妥当性を検討
 - **ブレイクスルースターショット**：ケンタウルス座アルファ星へ探査機群を送るための概念設計

ブレイクスルースターショット

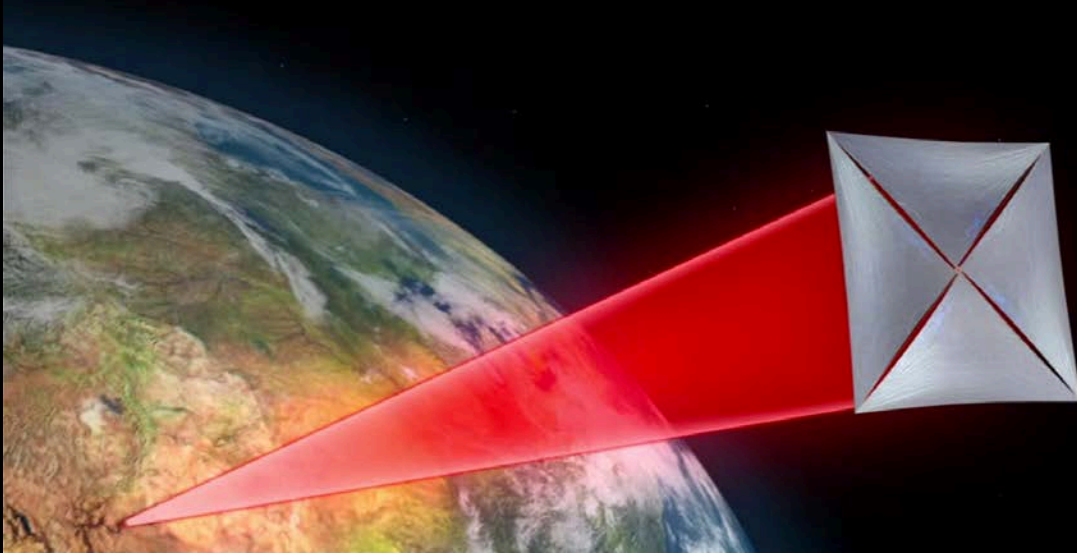
<http://breakthroughinitiatives.org/Initiative/3>

- スターチップ
 - 2cm x 2cm、数グラムで、カメラ、コンピュータ、通信用レーザー、燃料装置を搭載したチップ
 - 4m x 4m の帆に結びつけられ、それが地上からのレーザー光を受けて、約10分で光の20%の速度にまで加速される
- プロキシマ ケンタウリに1000個のスターチップを次々と飛ばす。約20年で到着する
- ただしこの技術はまだ存在しておらず、完成までに少なくとも今後20年の研究開発が必要

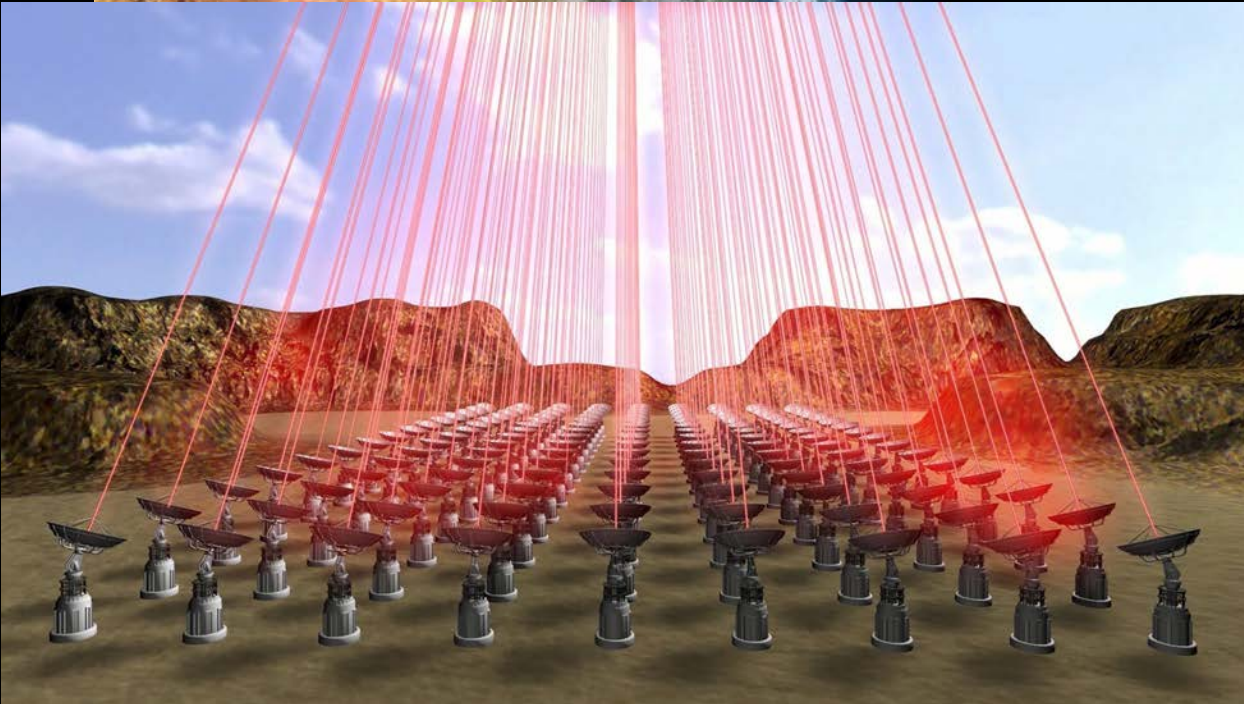
スターチップ



地上のレーザーで光速の20%に加速



- 今から20年後に打ち上げ、さらに20年かけてプロキシマケンタウリに到達しデータを取得。その4年後には地球にデータが届く。そこには何が写っているのか？



6 まとめ

もう一つの地球がみつかったら？



地球文明の存在を知った三体人

- 高度知的文明は友好的か排他的か
- 光速の1%で航行する宇宙艦隊を地球に派遣
- 400年後に3体艦隊が来ることを知った地球人はどうするか



天文学から宇宙生物学へ

- 太陽系外惑星研究の革命的進歩
 - 水が液体として存在し得る地球型惑星
 - プロキシマケンタウリ（4光年先）
 - 稼働中・計画中の系外惑星探査機がさらなる候補を
 - いずれハビタブル惑星の直接撮像・分光が可能となる
- その先には宇宙の生命探査という究極の目標が！
 - リモートセンシングによる検出可能性から考えるバイオシグニチャーの同定（酸素、水、オゾン、メタン、植物、核爆発）
 - ただし最も確実なのは高度文明からの（電磁波）信号
- 本当に受信したときどうするか考慮しておくべき

今から50年後の世界？

- 科学・技術は驚くべきスピードで世界を変える
- 今から50年後には、おそらく今の我々が決して予想できない世界が実現しているはず
 - 自動翻訳（単なる会話のための外国語教育は不要）、労働の完全AI/機械化、天災の制圧、脳とコンピュータの完全接続、不老不死、地球外知的文明との遭遇
 - 地方の消滅、核戦争や未知のウイルスによる人類絶滅、ホモサピエンスに代わる新人類の台頭
- 現在の倫理観、価値観、世界観が一変する
- 何れにせよ、暗い未来ではなく明るい未来を実現して欲しい

Sagan's conclusion

Nobody's guaranteeing success. But can you think of a more important question? Imagine them out there sending us signals, and nobody on Earth is listening. That would be a joke, a travesty. Wouldn't you be ashamed of your civilization if we were able to listen and didn't have the gumption to do it?

— Carl Sagan “Contact”

**7 今日皆さんに
本当に伝えたかったこと**

その世界の先を探る = 「学」 + 「問」

- 果てのないホライズンの拡大
 - 高いところに登る = 「学」
 - 遠くを眺めてその先を考える = 「問」
- 学問とは常に問い続ける営み
- 謎を解明する(問題に答える)以上に、新たな謎を発見(世界の不思議さを認識)することがそれ以上に重要
- 競争のための競争はやめよう：勝ち負けという価値観は科学とは本来相容れない

学びて問い続けるべき理由

- 幸せで楽しい人生を送るため！
 - 有名な会社に入り、安定した収入を得るためではない
 - 人より優れている必要はない（そもそも比較は無意味）
 - 自分がうちこめること、興味を持てるものを見つけられればそれ以上の幸せはない
 - 生きる真の目的を見つける
- 学び知る事で、以前は見えなかったものが見える
 - 自分の世界、人生の可能性が広がる
 - 自分が嫌な事を無理やり強制されてやる必要はない
 - 一方で、何もせず無駄に時間を過ごしているだけでは、せっかく生まれてきたのにもったいない

湯川学の人生観

東野圭吾 『真夏の方程式』 文藝春秋社 p.412



- **どんな問題にも答えは必ずある。** だけどそれをすぐに導き出せるとはかぎらない。人生においてもそうだ。今すぐには答えを出せない問題なんて、これから先、いくつも現れるだろう。そのたびに悩むことには価値がある。しかし焦る必要はない。答えを出すためには、自分自身の成長が求められている場合も少なくない。だから人間は学び、努力し、自分を磨かなきゃいけないんだ。



石井洋二郎・藤垣裕子 『大人になるためのリベラルアーツ』 (東京大学出版会)

- 第1回 コピペは不正か
- 第2回 グローバル人材は本当に必要か
- 第3回 福島原発事故は日本固有の問題か
- 第4回 芸術作品に客観的価値はあるか
- 第5回 代理母出産は許されるか
- 第6回 飢えた子どもを前に文学は役に立つか
- 第7回 真理は1つか
- 第8回 国民はすべてを知る権利があるか
- 第9回 学問は社会にたいして責任を負わねばならないか
- 第10回 絶対に人を殺してはいけないか
- 番外篇 議論によって合意に達することは可能か
- 最終回 差異を乗り越えることは可能か

大人になるための
リベラルアーツ

思考演習12題

石井洋二郎/藤垣裕子 著



本当の「教養」とはなにか？

「絶対に人を殺してはいけないか」「真理は1つか」など、
簡単に答えの出ない問題と格闘し、
異なる専門や価値観をもつ他者との対話をおして
真の「大人」になるための思考力を鍛える。

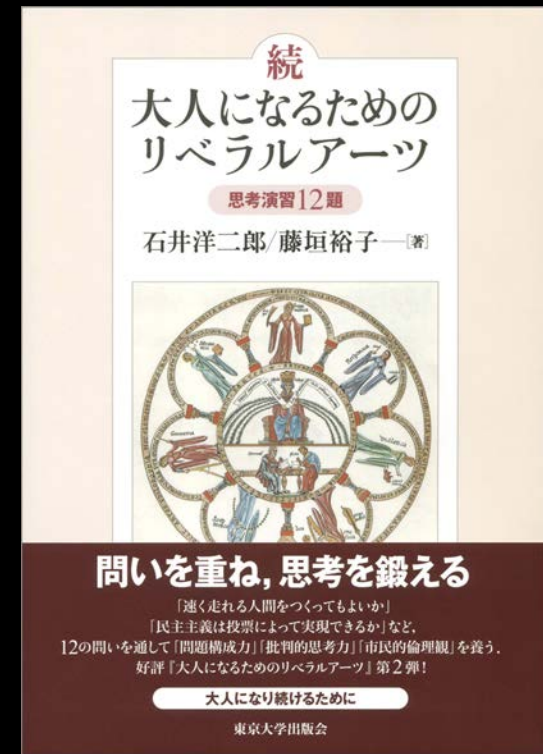
東京大学による新しい教養教育の試み

東京大学出版会

石井洋二郎・藤垣裕子

『続 大人になるためのリベラルアーツ』
(東京大学出版会)

- 第1章 気候工学は倫理的に許されるか
- 第2章 成人年齢は引き下げるべきか
- 第3章 速く走れる人間をつくってもよいか
- 第4章 芸術に進歩はあるか
- 第5章 人工知能研究は人為的にコントロールすべきか
- 第6章 民主主義は投票によって実現できるか
- 第7章 軍事的安全保障研究予算をもらってもよいか
- 第8章 絶対に人を殺してはいけないか
- 第9章 学問は社会にたいして責任を負わねばならないか
- 第10章 自由と公共性は両立するか
- 番外篇 議論によって合意に達することは可能か
- 最終章 プライバシーと治安は両立できるか



アンパンマン エンディングテーマ

- 作詞：やなせたかし
もし自信をなくして
くじけそうになったら
いいことだけ
いいことだけ
思い出せ



事前課題：追手前ゼミナール

「地球外に生命は存在するのか」

今回の講義のプレゼン資料、「宇宙人の見る地球」「火星と宇宙植物学」「我々は宇宙人をどこまで理解できるか」を読み（さらに可能であれば、さらに、カール・セーガン『コンタクト』、レイ・ブラッドベリ『火星年代記』なども参考にして）、以下について考察したことをA4で1枚程度にまとめよ

1. 地球外文明に向けて、こちらから伝えたいメッセージ(例えば、地球、日本あるいは高知県の素晴らしさを伝えるために、自分が今までの人生で、最も感動したこと、最も美しいと思ったこと、最も不思議だと思ったことなど。もちろんこれらに限る必要はない)
2. 地球と相手の文化的共通点あるいは相違点を知るために、地球外文明に聞いてみたい質問(例えば、芸術、学問、自然、社会、宗教、食生活など。もちろんこれらに限る必要はない)

これらとは別に、どんな質問でも大歓迎なので、気軽に聞いてください