

もう一つの地球が見つかる日

Mars • 2001 Opposition



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

宇宙への夢を現実へと紡ぐ

「ヒルズ×金沢大学 宇宙航空人材育成プログラム」

2021年3月21日 10:30-11:30

@サイエンスヒルズこまつ ひとつものづくり科学館

今日の話の内容

1. はじめに：もう一つの地球とは何か？
2. 太陽系の外にある惑星
3. もう一つの地球は存在するか？
4. 火星探査の歴史
5. 地球外文明探査
6. ブレイクスルースターショット計画
7. 未来へ：もう一つの地球がみつかったら？

1 はじめに

もう一つの地球とは何か？



地球の特徴



- 太陽系第3惑星
- 自転周期1日、公転周期1年
- 岩石惑星（木星や土星はガスが主成分なので表面に立つことは出来ない）
 - 表面の約7割が海
 - 平均温度が摂氏20度程度なので、ほとんどの水が液体として存在する（地球生命にとって本質的）
 - 大きな月をもち、気候が安定
- この宇宙で生命が確認されている唯一の天体

もう一つの地球とは？

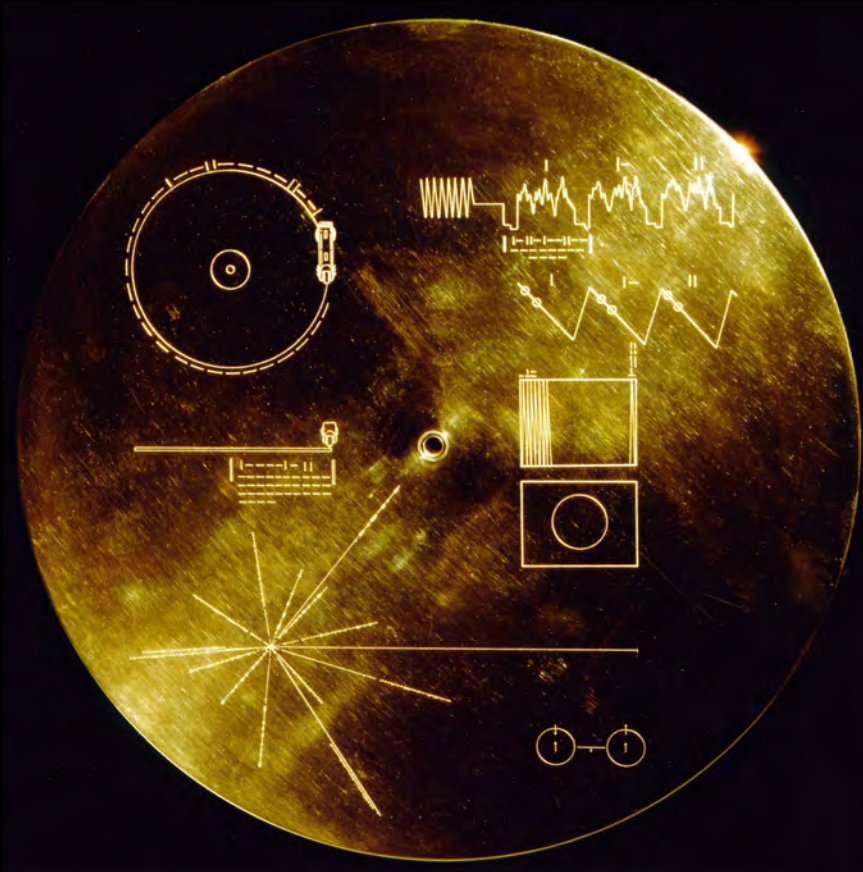
- 意味が明確に定義されているわけではない
- 多くの研究者が、生命が存在する惑星程度のあいまいな意味で用いている
- 「生命とは何か」は未解決の大難問
 - 我々が知っているのは、地球上の生命のみ
 - 「宇宙の生命＝地球の生命」とは限らない（というか、おそらく似ても似つかぬはず）
 - まずできるのは、地球と似た温度で大量の水を持つ岩石惑星に生命が存在するかを調べること
- つまり宇宙における生命を発見し理解することが、もう一つの地球探しの最大の目的

地球外生命はどこにいる？

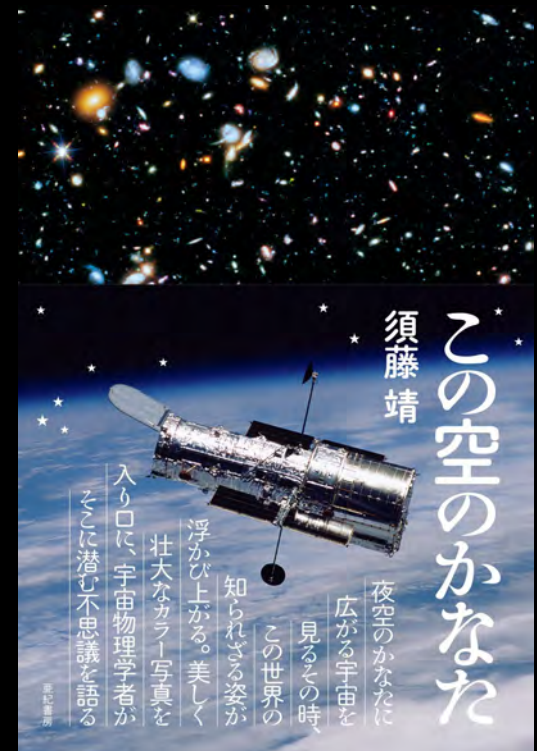
- もちろん答えは誰も知らない！（知っていたら、ノーベル賞10個分程度の大業績）
- 火星？
 - 地球によく似た岩石惑星（1.027日で自転、1.88年で公転、平均温度は摂氏マイナス60度）
 - かつては水が存在したとされている
 - 近いので直接探査が可能(2021年2月18日 Perseverance)
- エンケラドス？
 - 土星の第二衛星、地下に液体の海があると思われる
- アルファケンタウルス？
 - 太陽からもっとも近い恒星、なんとか直接探査可能？
- もっと遠くの太陽系外惑星（には必ずあるはず）？

2 太陽系の外にある惑星

1977年打ち上げのボイジャー探査機に搭載された
ゴールデンプレート(アナログレコード盤)



宣伝！ 須藤靖 『この空の彼方』
(亜紀書房 2018年)



我々の世界の外にも世界はあるのか？

- 哲学的に考えればすべては1あるいは ∞ のどちらか
 - この宇宙とよく似た宇宙も全く異なる宇宙も無限に存在
(エピキュラス：紀元前341年～270年)
 - 我々以外の宇宙は存在し得ない
(アリストテレス：紀元前384年～322年)
 - 宇宙は無限であり、太陽系以外にも無数の惑星がある（
ジョルダノー・ブルーノ：1548－1600）



ブルーノは異端審問で死刑判決を受け公開火刑
(1600年)

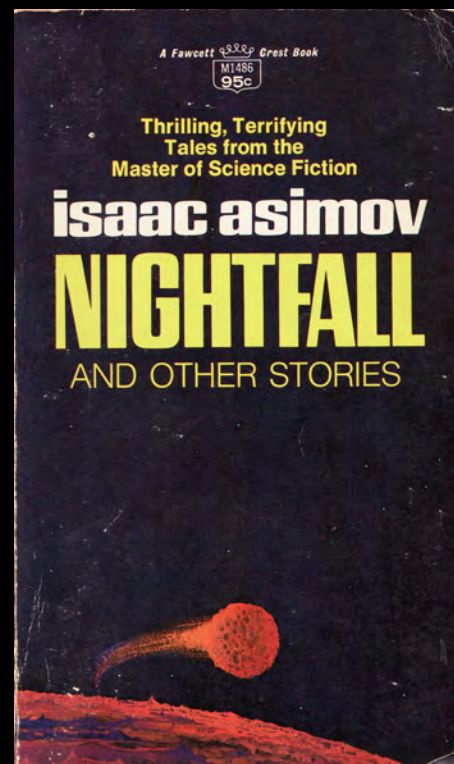


世が世なら、現在の宇宙論研究者はノーベル賞どころか、間違いなくほぼ全員公開処刑されている

Bronze relief by Ettore Ferrari (Wikipedia)

アイザック・アシモフ 「Nightfall (夜来たる)」

- 6つの太陽を持つ惑星ラガッシュには「夜」がない
 - 空にいつも一つ以上の太陽が昇っているためいつも「昼」のまま
- 古来からの伝説によると、2049年に一度だけラガッシュに「夜」が訪れる
 - これは、たまたま空に一つしか太陽が昇っていない時に、ラガッシュの内側の惑星が起こす皆既日食
 - 物語はこれから数時間で「夜」が訪れる時から始まる
 - 初めて「夜」を見た瞬間、ラガッシュの住民は何を知ったのか



「我々は何も知らなかった」



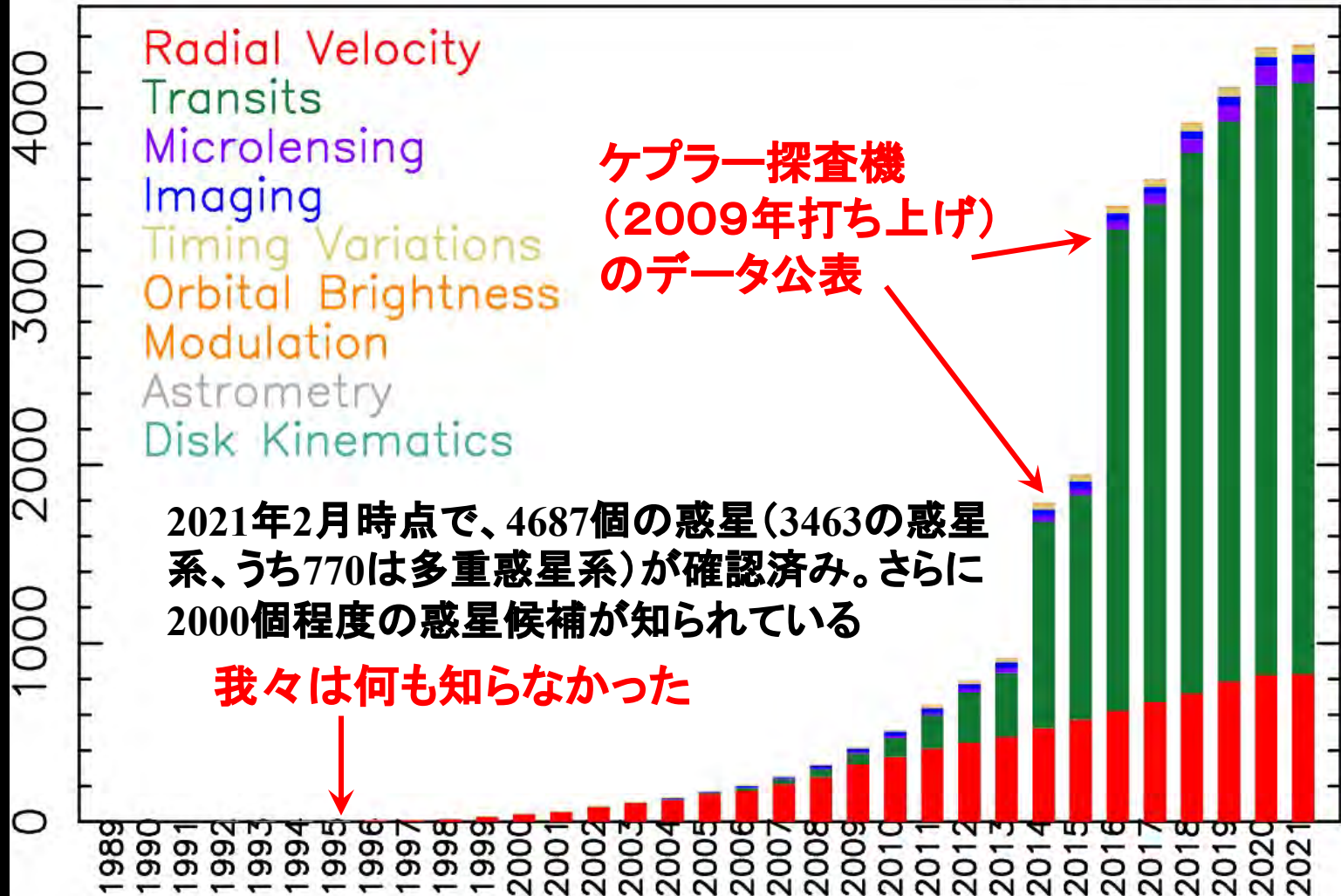
イラスト：羽馬有紗

- その瞬間に彼らの世界観が一変した
- ホライズンの先を見て、自分の住む「世界」を知る

系外惑星の発見年表

18 Feb 2021
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

発見総数



ケプラー探査機
(2009年打ち上げ)
のデータ公表

2021年2月時点で、4687個の惑星(3463の惑星系、うち770は多重惑星系)が確認済み。さらに2000個程度の惑星候補が知られている

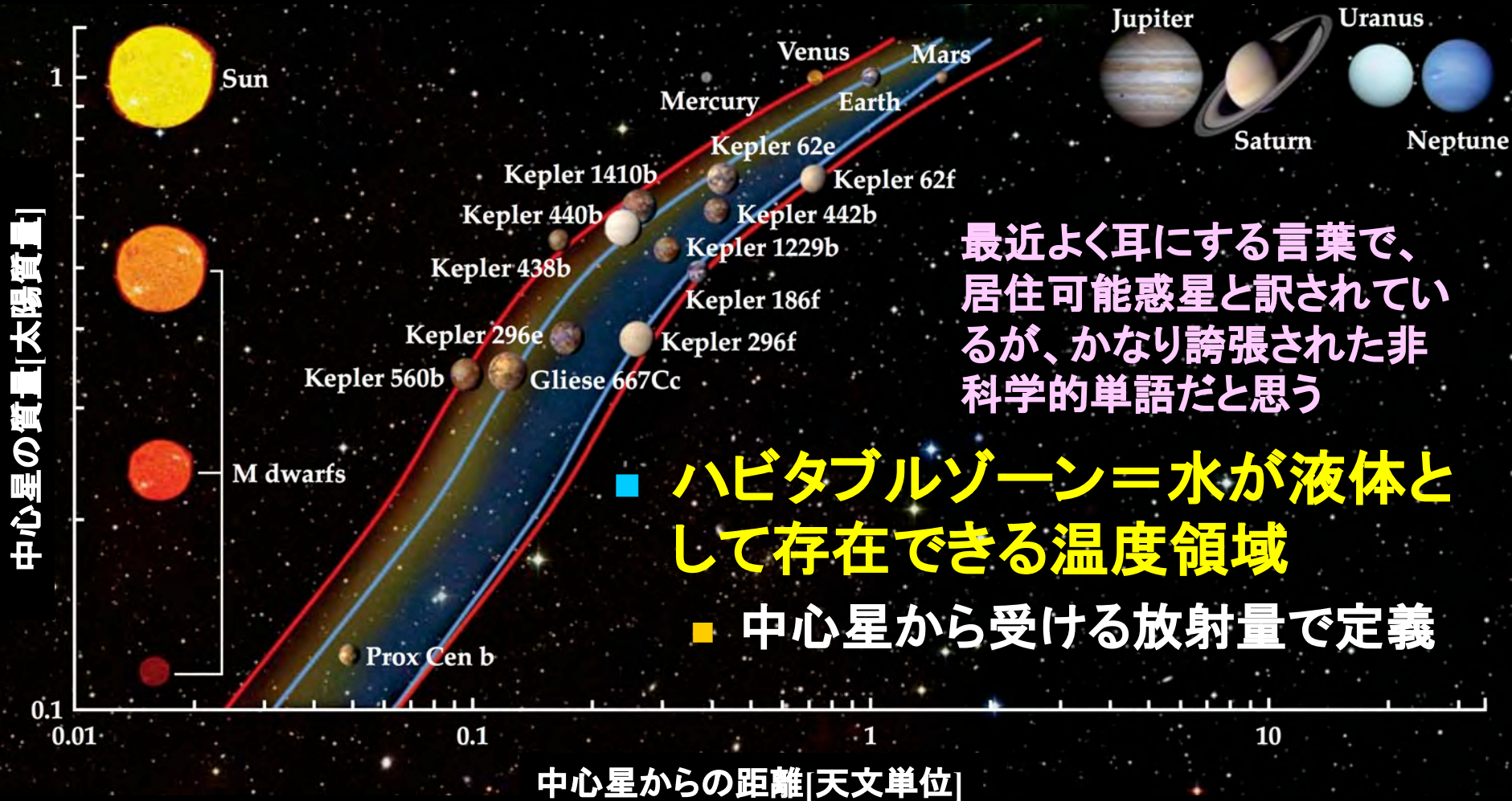
我々は何も知らなかった

西暦

3 もう一つの地球は 存在するか？



ハビタブル惑星候補

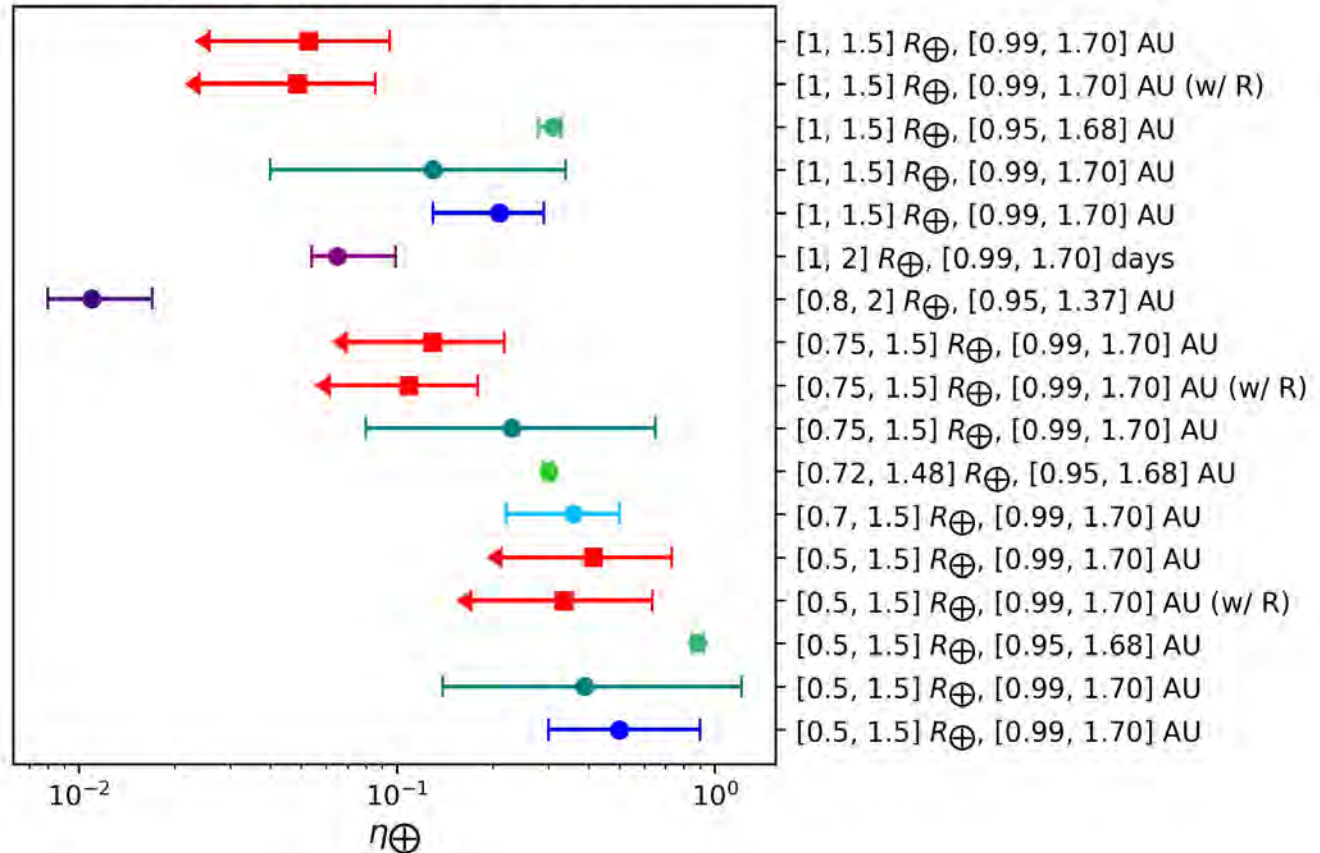


もう一つの地球の存在率

Conservative HZ Estimates

- This Work
- Zink & Hansen (2019)
- Garret et al. (2018)
- ExoPAG SAG13
- Mulders et al. (2018)
- Burke et al. (2015)
- Silburt et al. (2015)
- Catanzarite & Shao (2011)

定義にもよるが、
太陽と似た恒星の
数割程度は、観測
データから「もう一
つの地球」をもつ
(可能性がある)こ
とがわかっている



Kunimoto and Matthews, AJ 159, 2020, 248

G 型星 ($5300 < T_{\text{eff}} [\text{K}] < 6000$) 39,173 個
(惑星 1276 個)の Kepler サンプルより

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
 - 科学者ではない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

4 火星探査の歴史

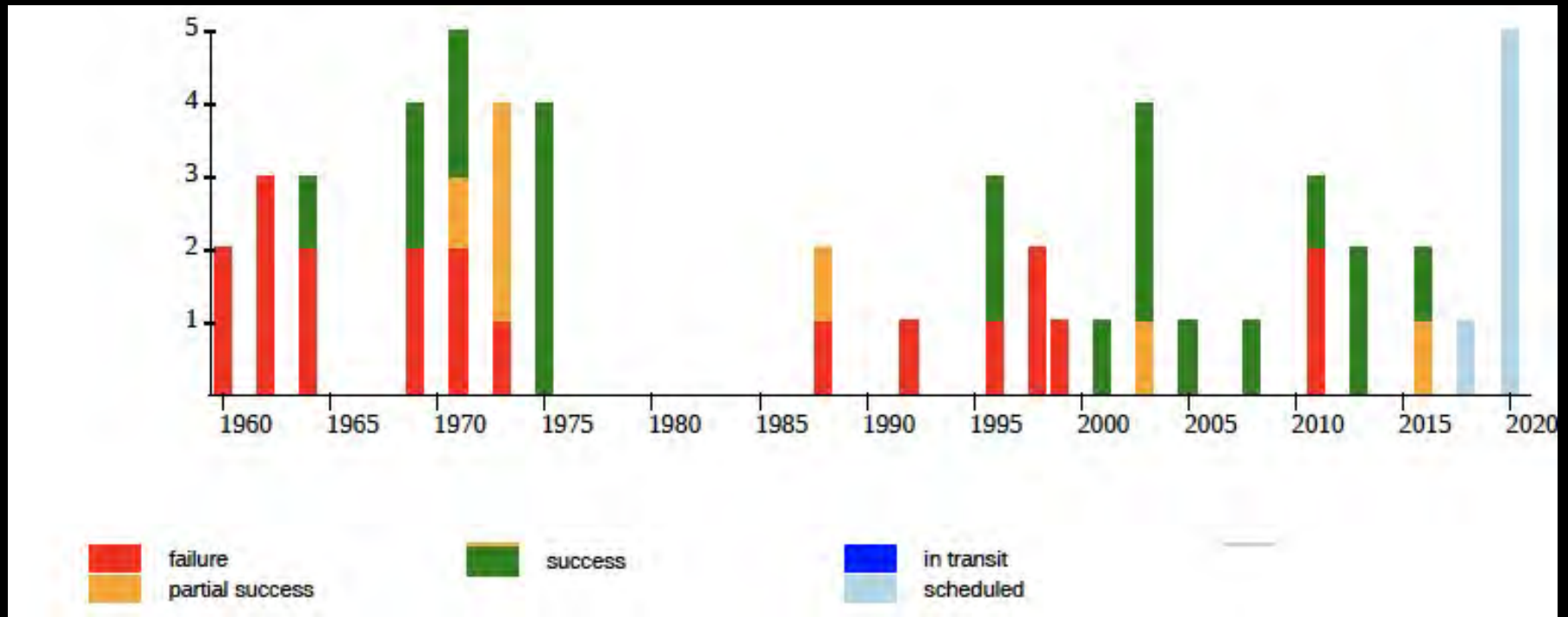


火星に生物はいるか？

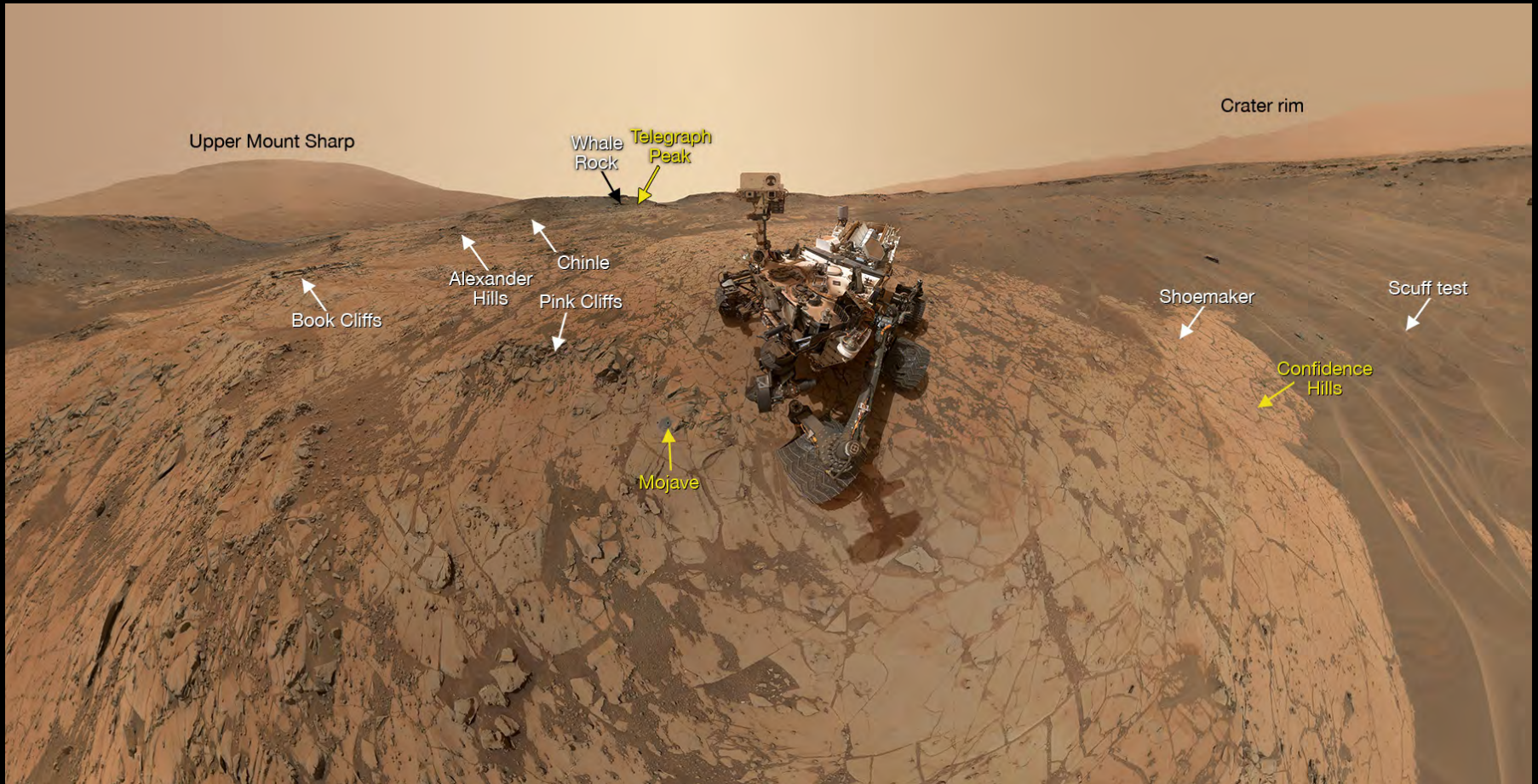
- 1895年 P.L.ローウェル 火星人の存在を主張（大富豪であり、私財でローウェル天文台を設立）
- 1897年 H.G.ウェルズ SF小説『宇宙戦争』
- 1914年 G.A.チコフ 宇宙から見た地球はレイリー散乱のためにpale-blueに見えることを示唆
- 1924年 スライファー（ローウェル天文台長）
 - 火星の表面に葉緑素がある証拠は見出せなかった
- 1938年 オーソン・ウェルズ 『宇宙戦争』
- 1945年 G.A.チコフ 火星表面上の植物探査、地上の植物の反射スペクトルを研究、astrobotanyと呼ぶ
- 1957年 W.シントン 火星の赤外線観測より植物の存在を主張

火星探査史: 火星の呪い

- 1960年代以降、多くの無人探査機が火星をめざした
- 約3分の2が任務完了後・開始前に何らかのトラブル
- 明確な原因が不明なまま失敗したり通信を絶ったものも多く、「火星の呪い」として知られている



火星着陸探査機 キュリオシティ

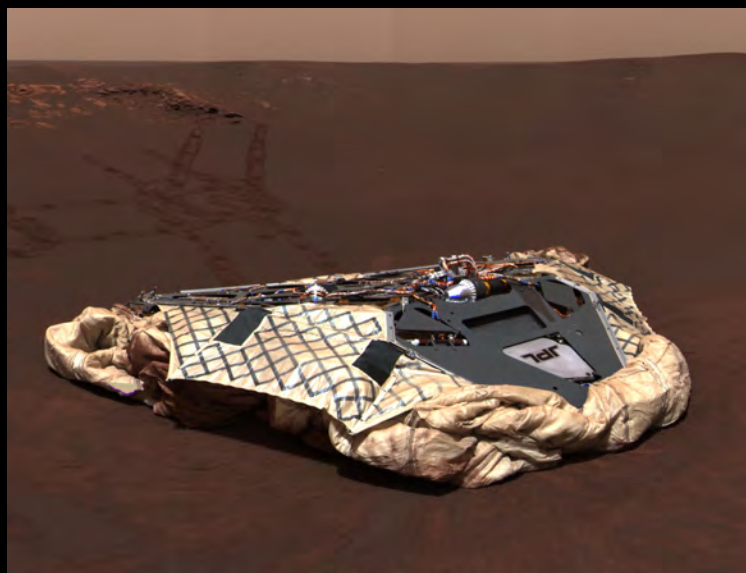


Curiosity (Mars Science Laboratory) 2011年11月26日 打ち上げ
2012年8月6日 火星軟着陸 <https://mars.jpl.nasa.gov/msl/>

火星の表面

<https://eyes.nasa.gov/curiosity/>





火星と地球は似過ぎている！



アイオリス山(標高5500m) 2015年9月



チコ山（標高5150m）とオナール山
（標高5400m） 2003年



アイオリス山麓の盆地 2015年10月

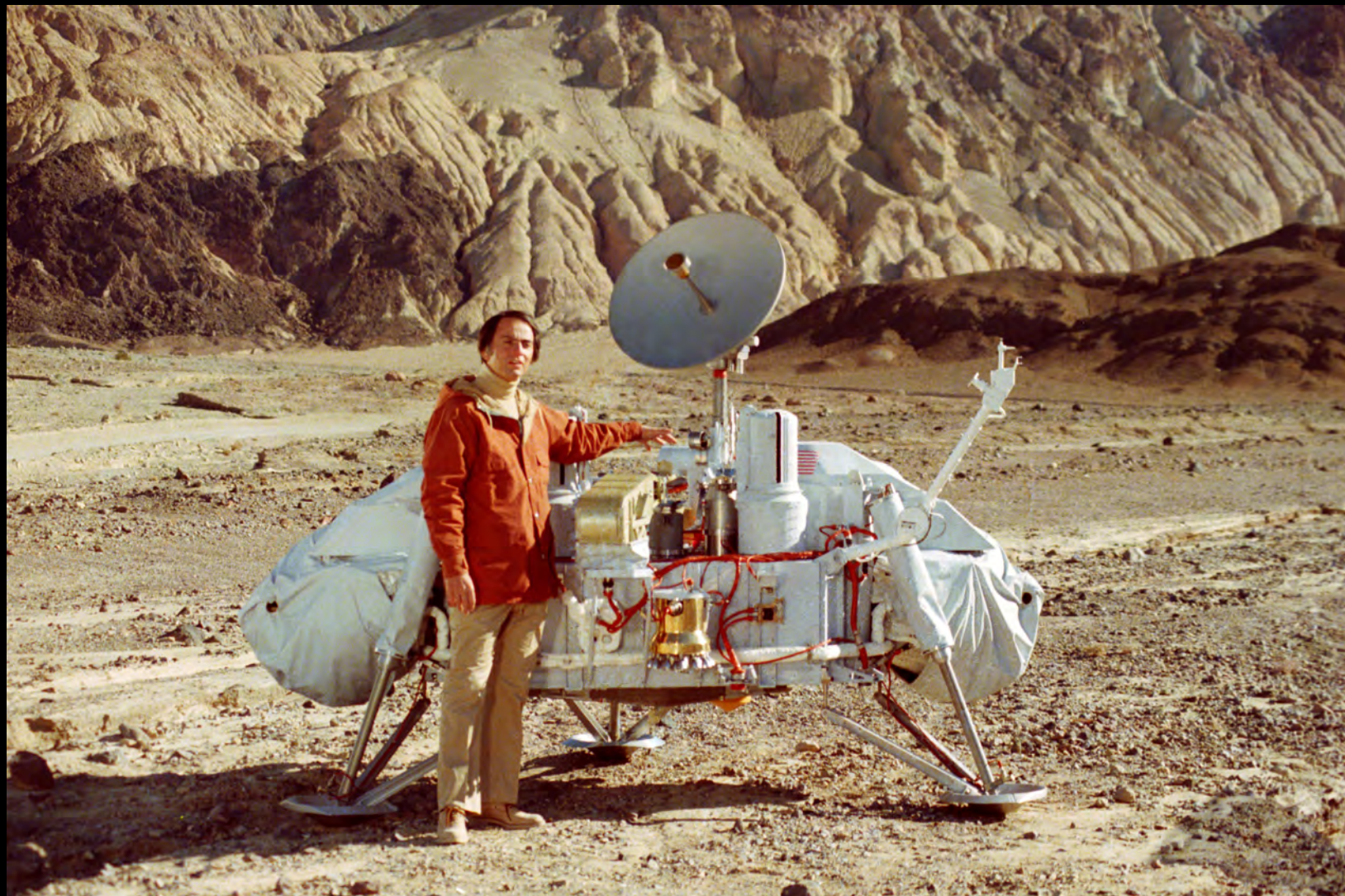


アスペロ山（標高5262m） 2002年2月

<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA19912> 土居守・河野孝太郎氏撮影
<https://mars.nasa.gov/resources/7505/strata-at-base-of-mountain-sharp/>

カール・セーガンとバイキング1号のランダー模型

この写真を見ると、火星表面の写真もまた地球のどこかで撮影されたのではないかという疑惑を与えてしまうほど、火星は地球と似ている



5 地球外文明探査

■ カール・セーガン

(1934-1996)

- NASAの惑星探査プロジェクトの多くを主導
- 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”



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

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

今、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

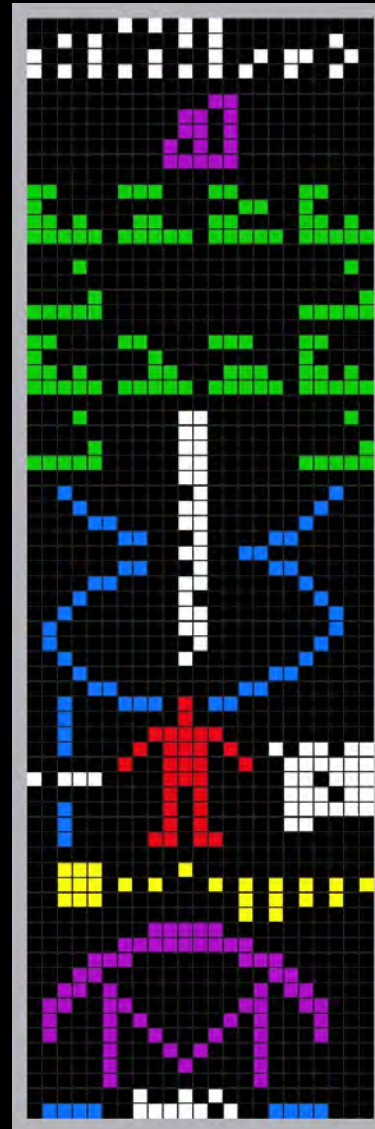
その文明の継続時間

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

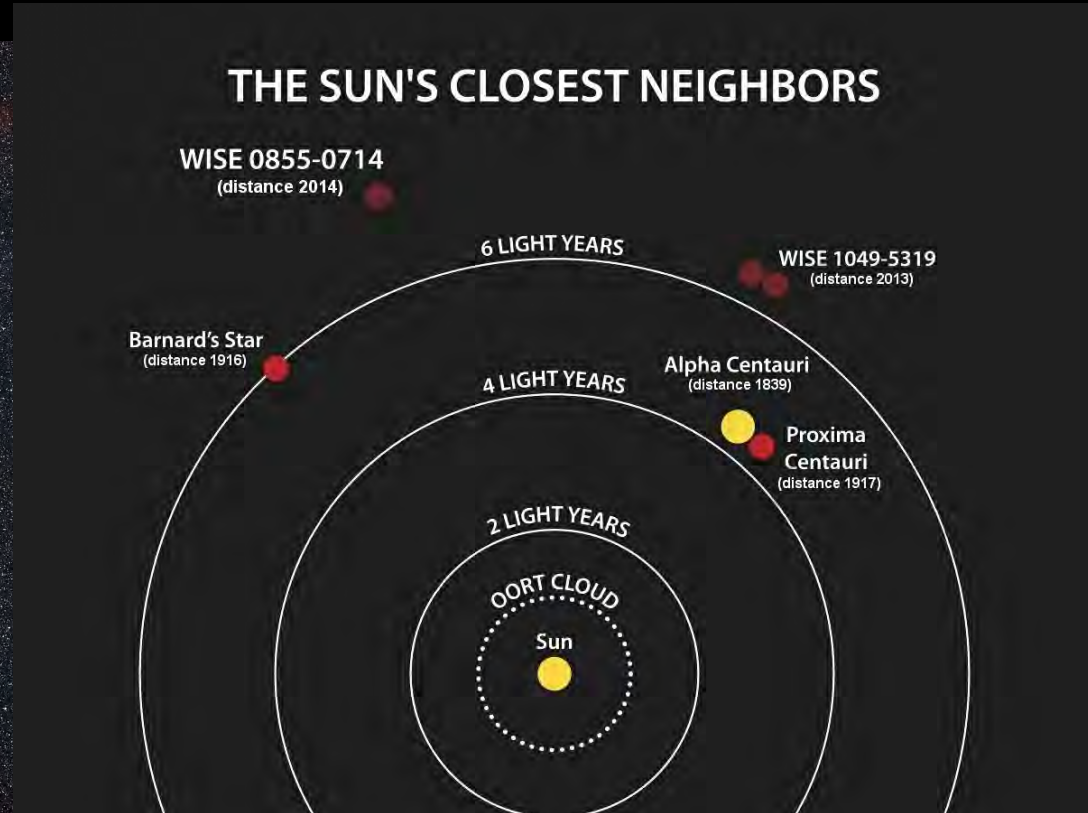
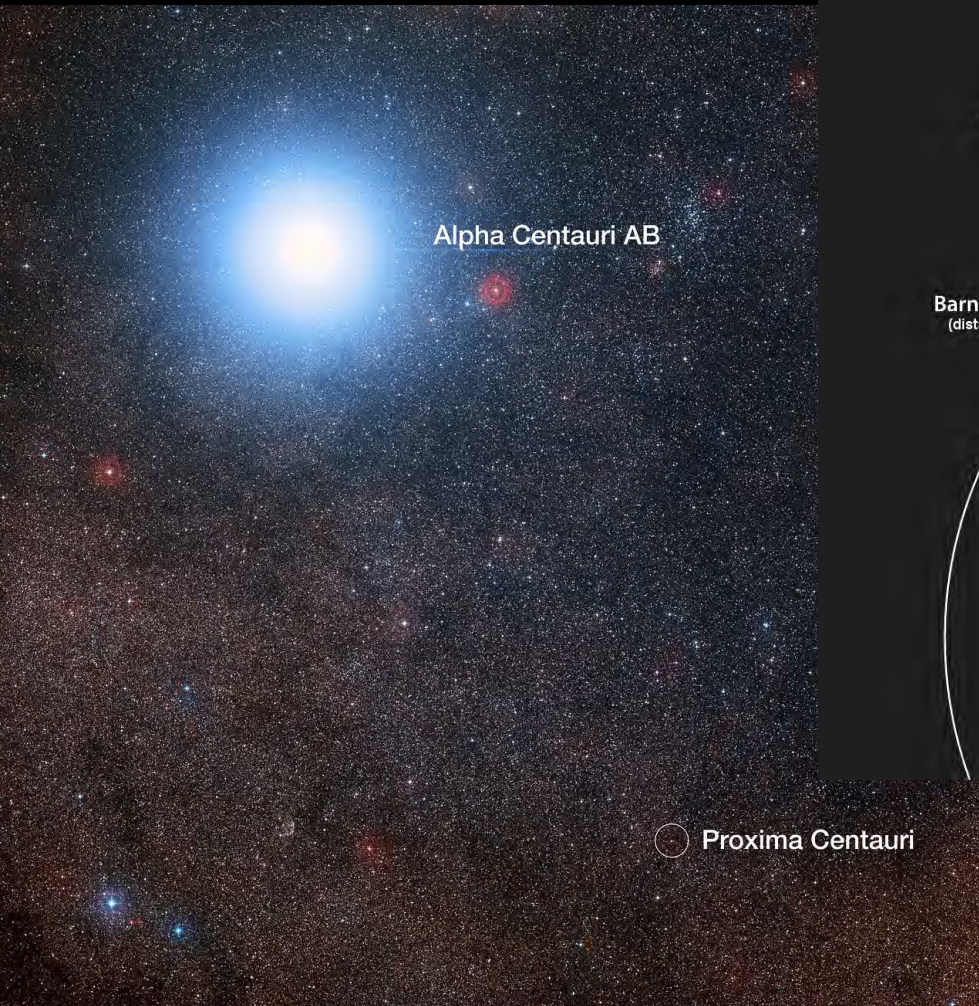
DNAの二重螺旋

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

6 ブレイクスルー スターショット計画



ケンタウルス座
 α 星

プロキシマ ケンタウリb

- 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

Alpha Centauri AB

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

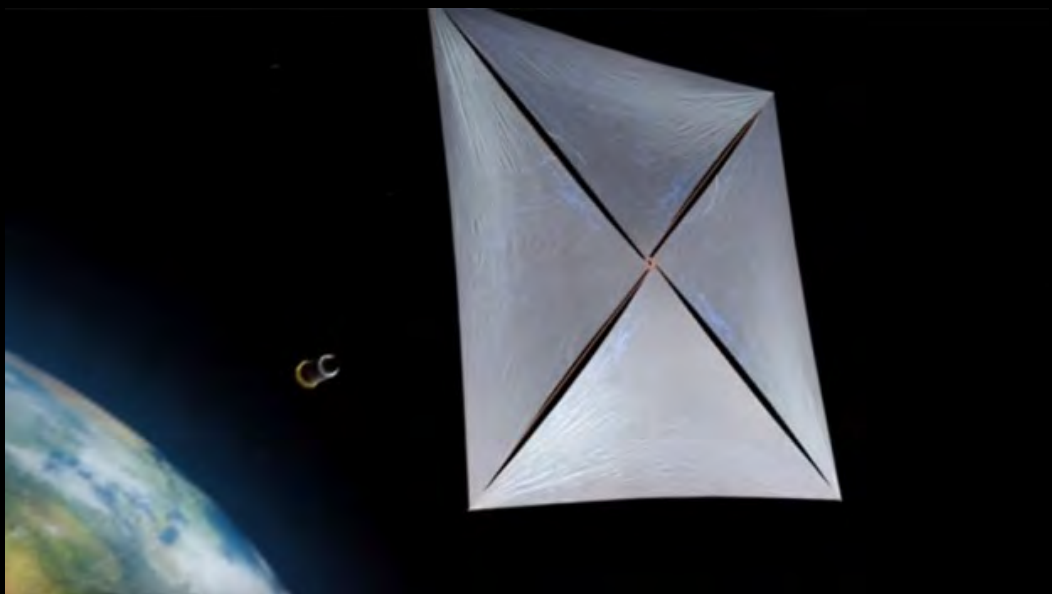
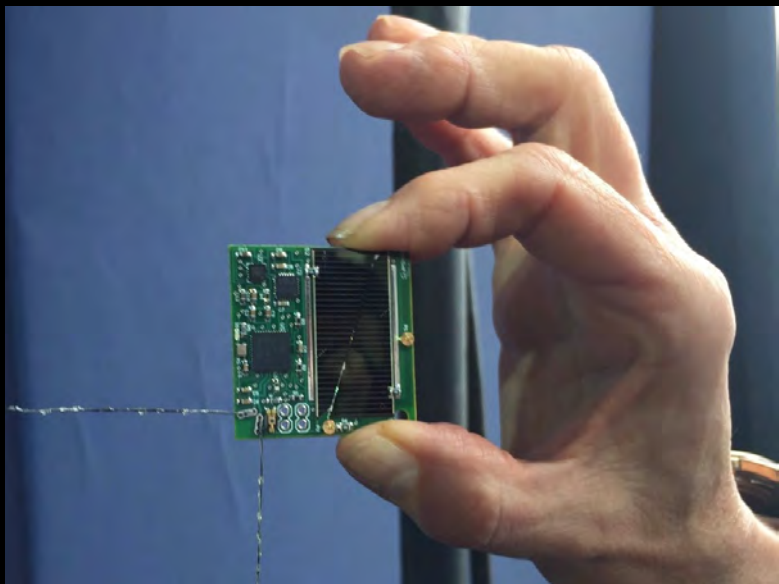
<http://breakthroughinitiatives.org/Initiative/3>

■ スターチップ

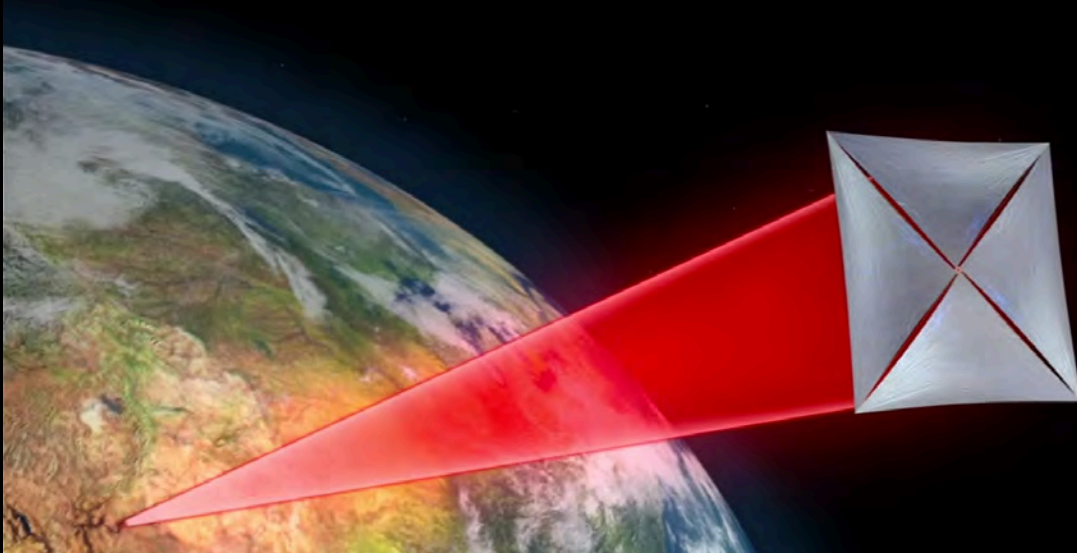
- 2cm x 2cm、数グラムで、カメラ、コンピュータ、通信用レーザー、燃料装置を搭載したチップ
- 4m x 4m の帆に結びつけられ、それが地上からのレーザー光を受けて、約10分で光の20%の速度にまで加速される
- プロキシマ ケンタウリに1000個のスターチップを次々と飛ばす。約20年で到着する
- ただしこの技術はまだ存在しておらず、完成までに少なくとも今後20年の研究開発が必要

宇宙への夢を現実へと紡ぐ「ヒルズ×金沢大学 宇宙航空人材育成プログラム」の観点からは、この計画に積極的に参加する若者が期待されている(のかも?)

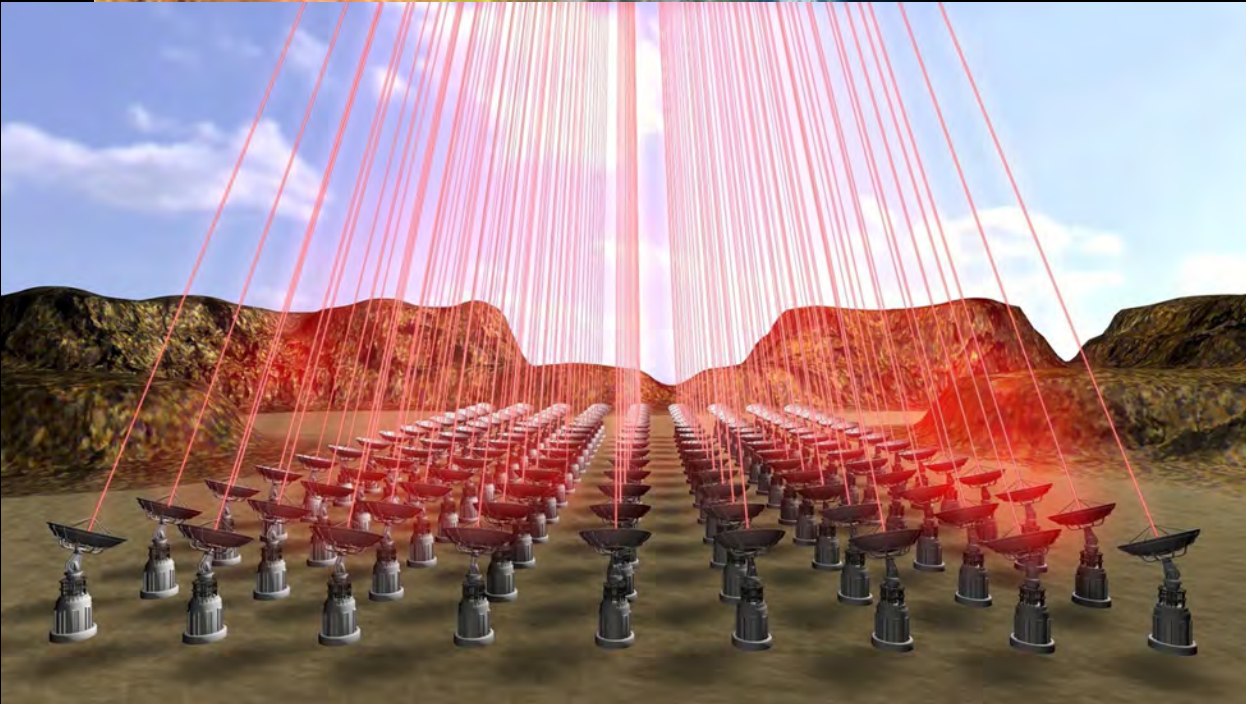
スターチップ



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？



7 未来へ 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の発見
 - プロキシマケンタウリ（4光年先）
 - いずれは「もう一つの地球」候補が見つかるだろう
- その先には宇宙の生命探査という究極の目標が！
 - 天文学的観測から生命存在の証拠を探る
 - 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

今後50年で起こり得ること

- 科学・技術は驚くべきスピードで世界を変える
 - わたしが子供の頃には、スマホ、インターネット、ロボットペットなどはSFどころか、想像すらできなかった
- 今から50年後には、今の我々が決して予想できない世界が確実に実現する
 - 自動翻訳（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
 - 地方消滅、核戦争や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
 - 交信できるレベルまで安定に持続した地球外文明の有無を知ることは、我々の未来を知ることでもある