

天文学者の「宇宙生物学」と 生物学者の「普遍生物学」との 乖離と接点



物理学専攻・ビッグバン宇宙国際研究センター 須藤 靖

第2回 宇宙普遍生物学セミナー（オンライン）

2021年12月14日16:00-17:30

目次

- 1 はじめに
- 2 US decadal survey “Astro2020”
- 3 カール・セーガンに学ぶ
- 4 リモートセンシング：もう一つの地球の模擬観測
- 5 やっぱり王道？ サンプルリターン
- 6 もし見つければ一番確実なSETI
- 7 放談：生物学者へのお願い

1 はじめに



D'où Venons Nous / Que Sommes Nous / Où Allons Nous

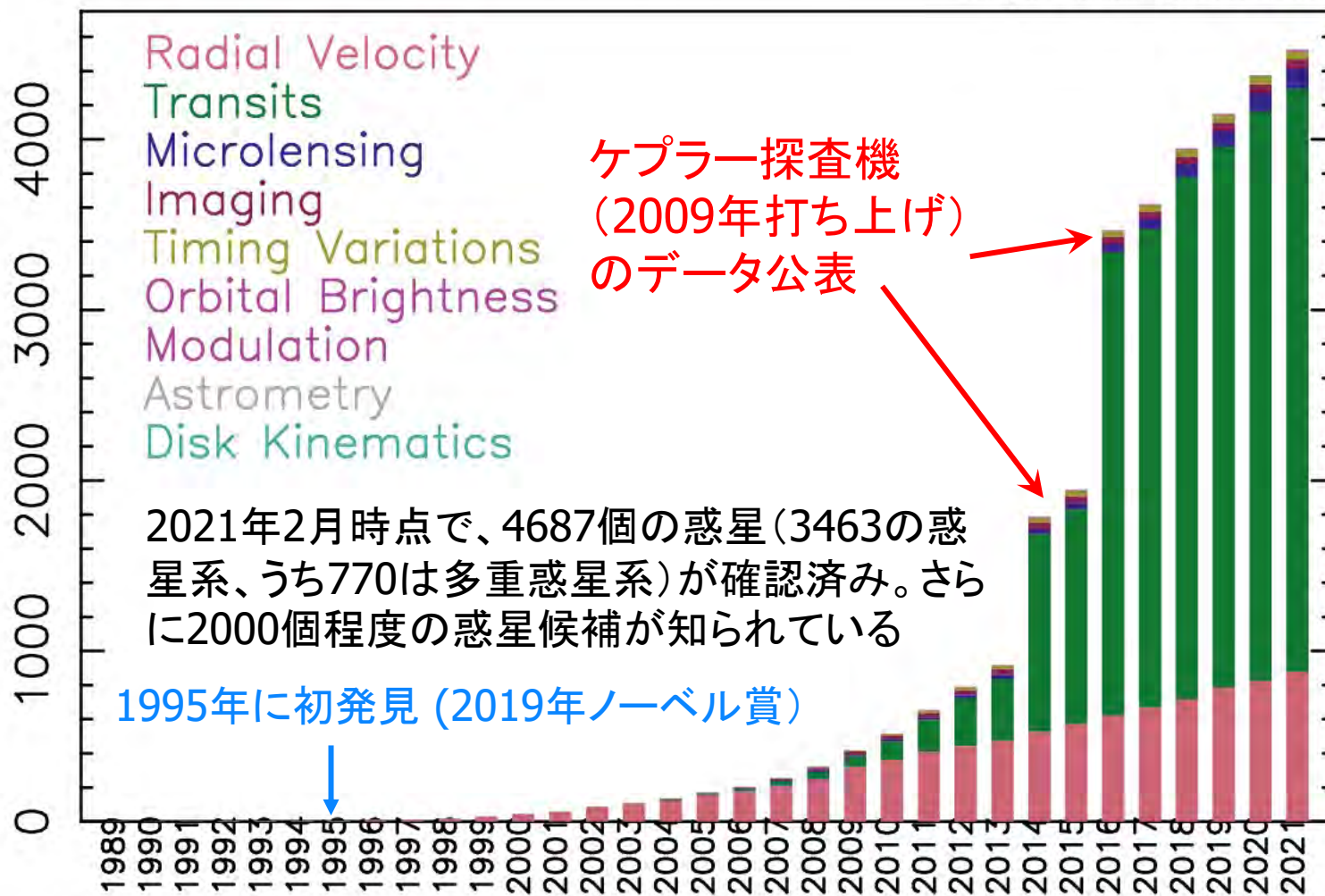
天文学と生物学が念頭におく「生命」のズレ

- (普遍)生物学における生命の定義は微視的あるいは原理的
 - 代謝、自己増殖、外界との隔離(生命の個別性)
 - ダーウィンの進化を行う自己維持的化学系
- 天文学が探査を目指す生命は巨視的あるいは現実的
 - 遠方からの観測(リモートセンシング)によって検出可能なほど天体の性質を変化させるようなものでないと役に立たない(大規模生命システム)
 - ただし太陽系内サンプルリターン探査は除く
- (なるだけ十分条件に近い)生命を宿す環境の証拠とは?
 - (非生物環境では実現しにくい)熱平衡からの極端なずれ (Lederberg 1965, Lovelock 1965)

太陽系外惑星の発見年表

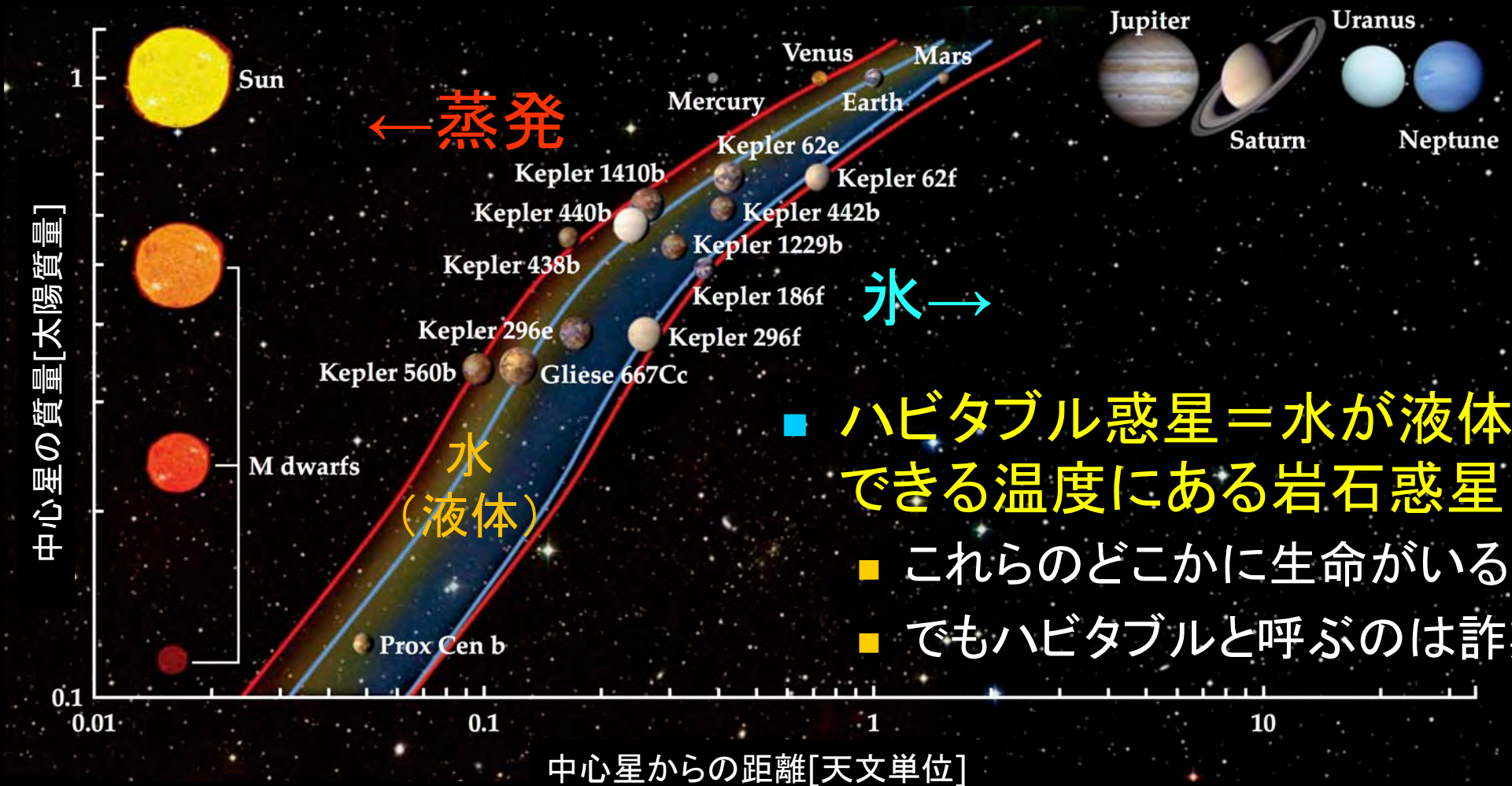
30 Sep 2021
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

発見総数



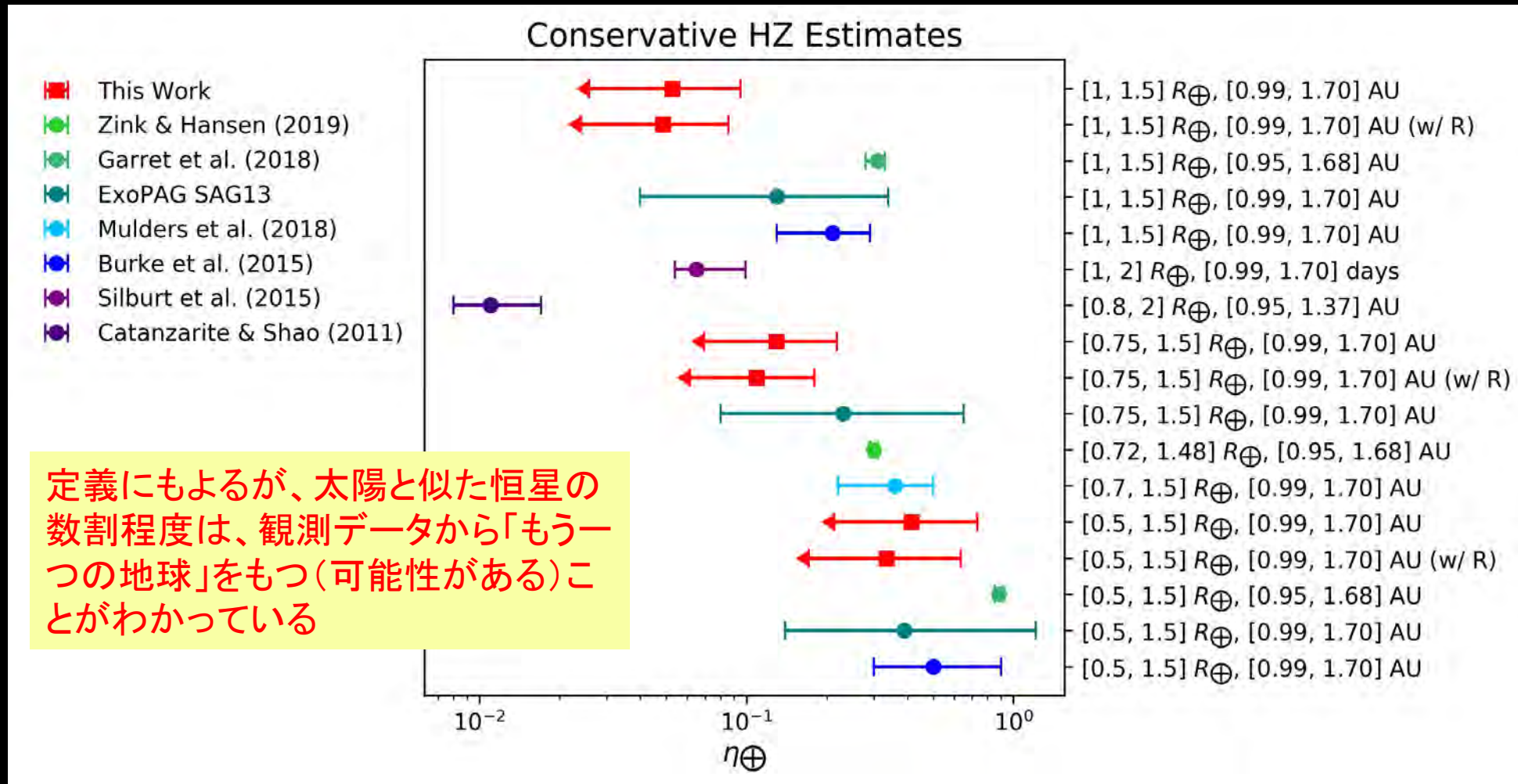
西暦

生命がいるかもしれない惑星候補



- **ハビタブル惑星 = 水が液体として存在できる温度にある岩石惑星**
 - これらのどこかに生命がいるかも？
 - でもハビタブルと呼ぶのは詐欺に近い

ハビタブル惑星(もう一つの地球)の存在率



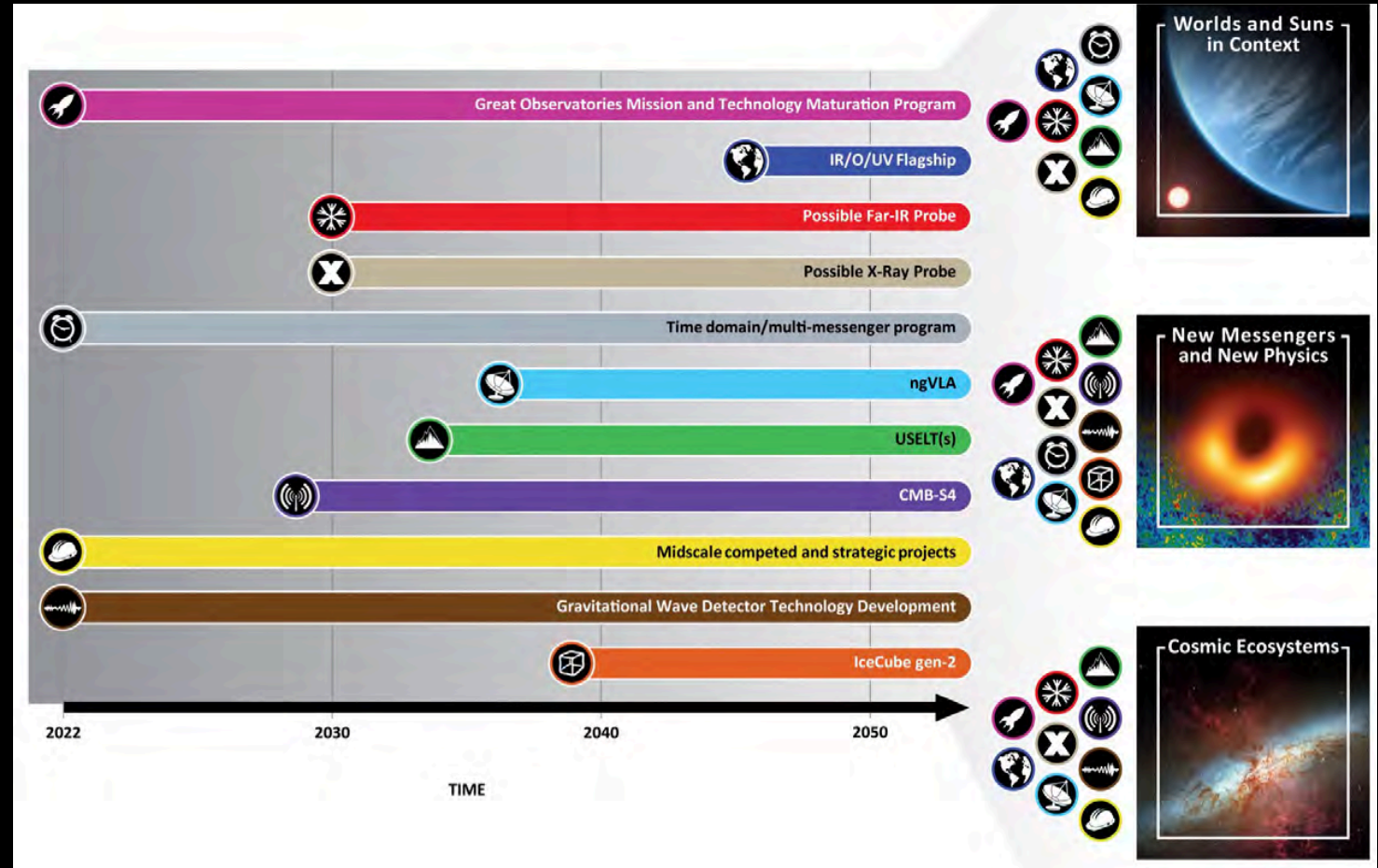
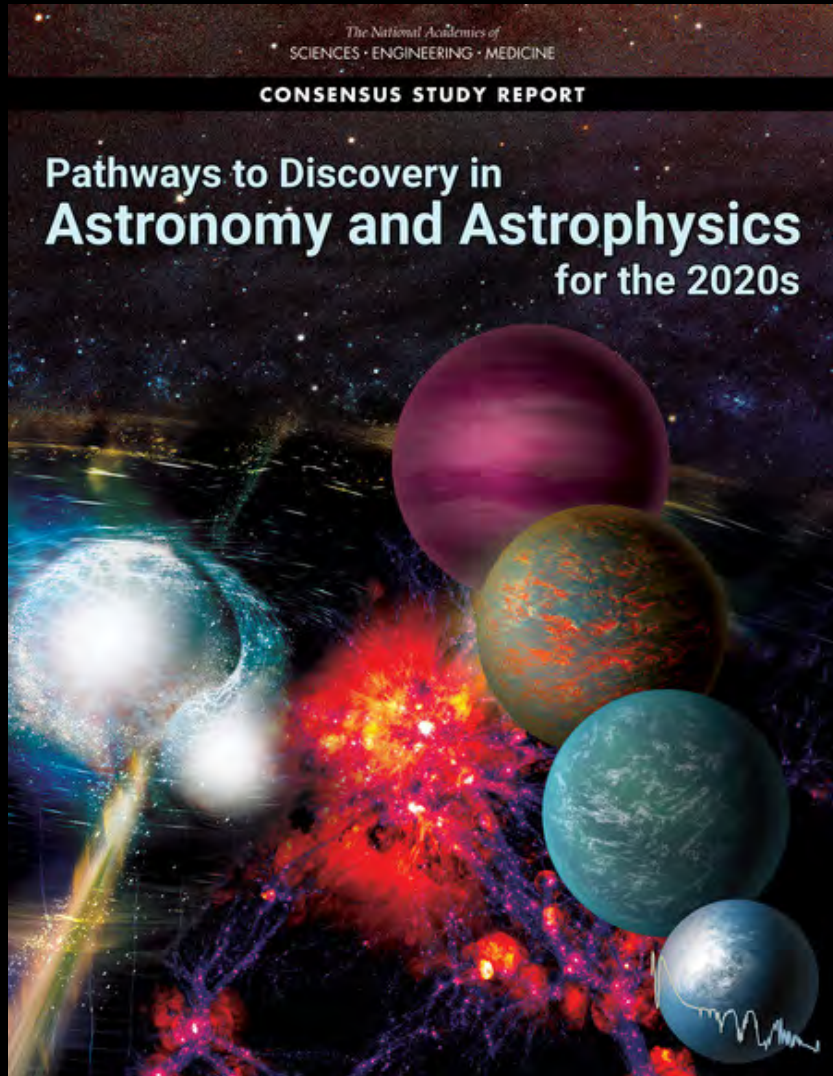
Kunimoto and Matthews, AJ 159, 2020, 248

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

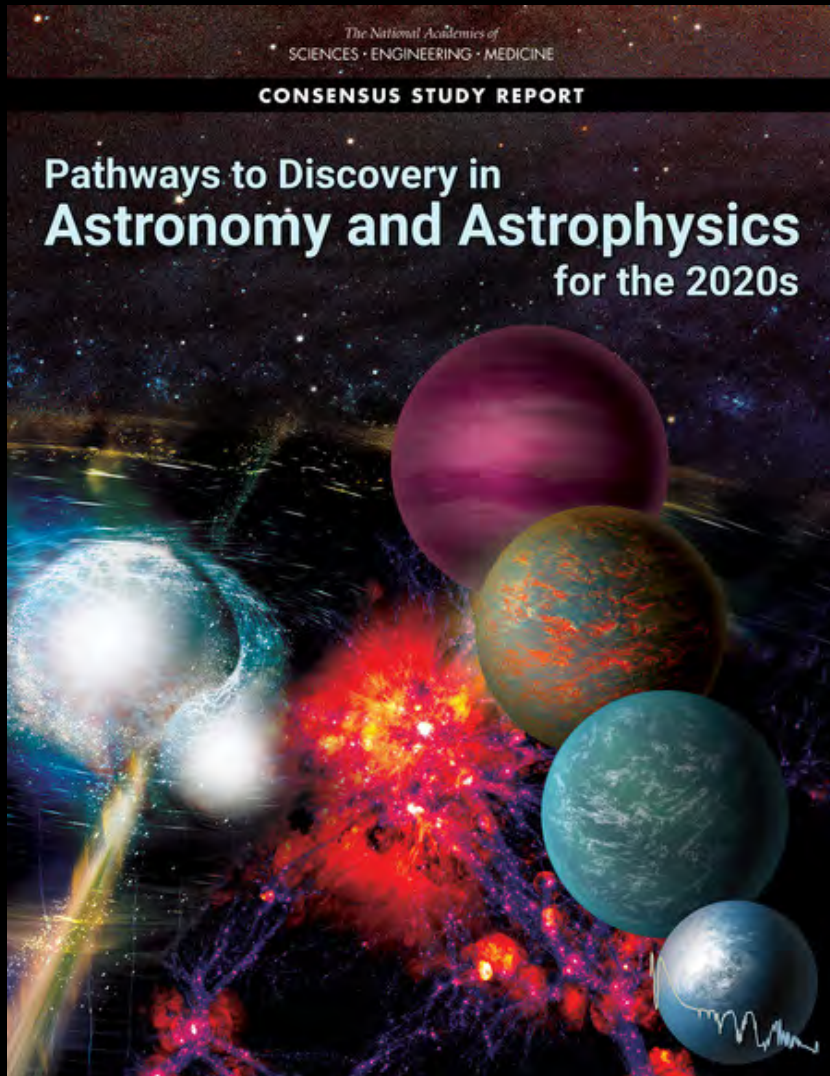
宇宙は「地球」で満ちている？

- 天の川銀河系内の恒星の数= 10^{11} 個（千億個）
 - その1割の 10^{10} 個が太陽と似た恒星
 - さらに太陽に似た恒星の1割がハビタブル惑星を持つ
- 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（1垓個）
 - ハビタブル惑星に生命が存在する保証は全くない
 - 本当に生命が生まれるための条件は知られていない（適度な割合の海と陸+数多くの偶然？）
 - しかしこれほど膨大な数の惑星がある以上、この地球だけに生命がある考えるのはかなり不自然では？

2 US decadal survey "Astro2020"



Astro2020: Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s



- **Worlds and Suns in Context**
 - Pathways to Habitable Worlds
- **New Messengers and New Physics**
 - New Windows on the Dynamic Universe
- **Cosmic Ecosystems**
 - Unveiling the Drivers of Galaxy Growth

<https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020>

Exoplanet spectroscopy and evolution of the reflectivity spectrum of Earth

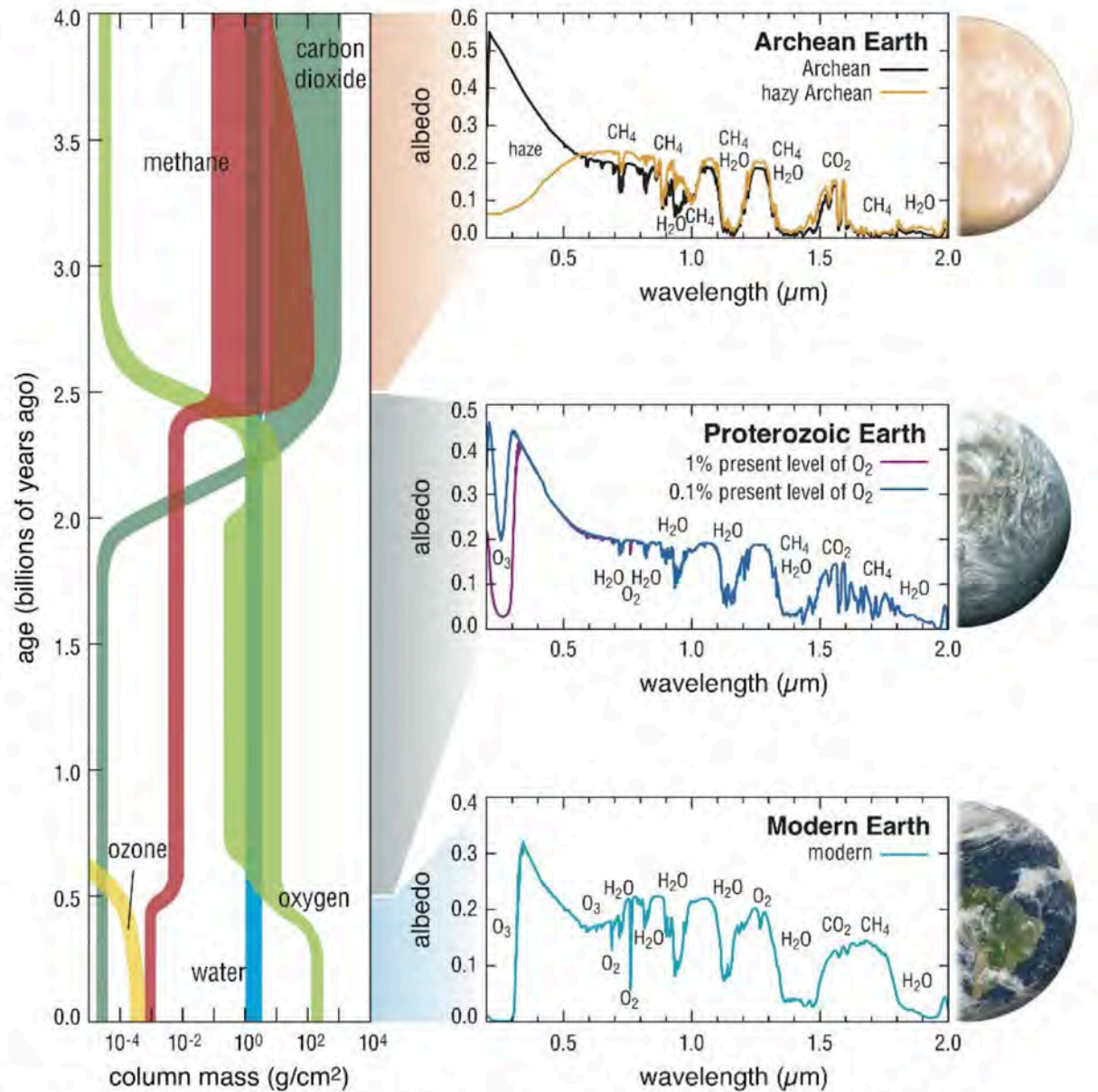
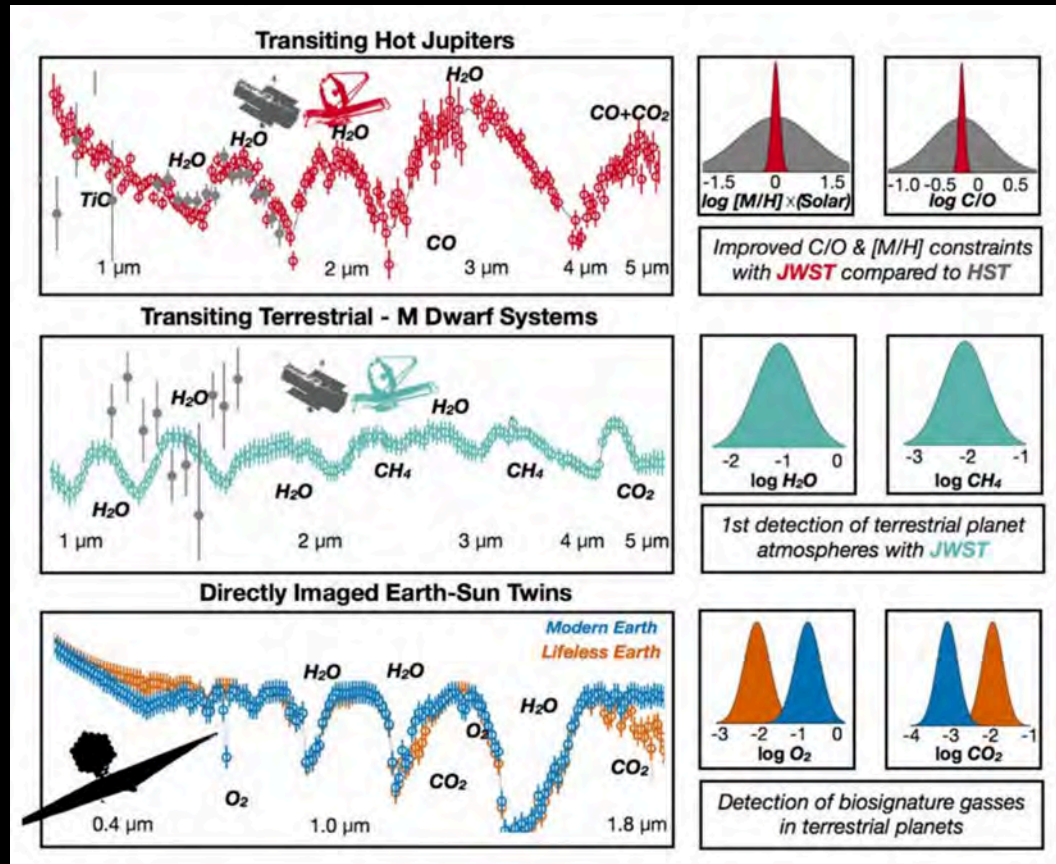
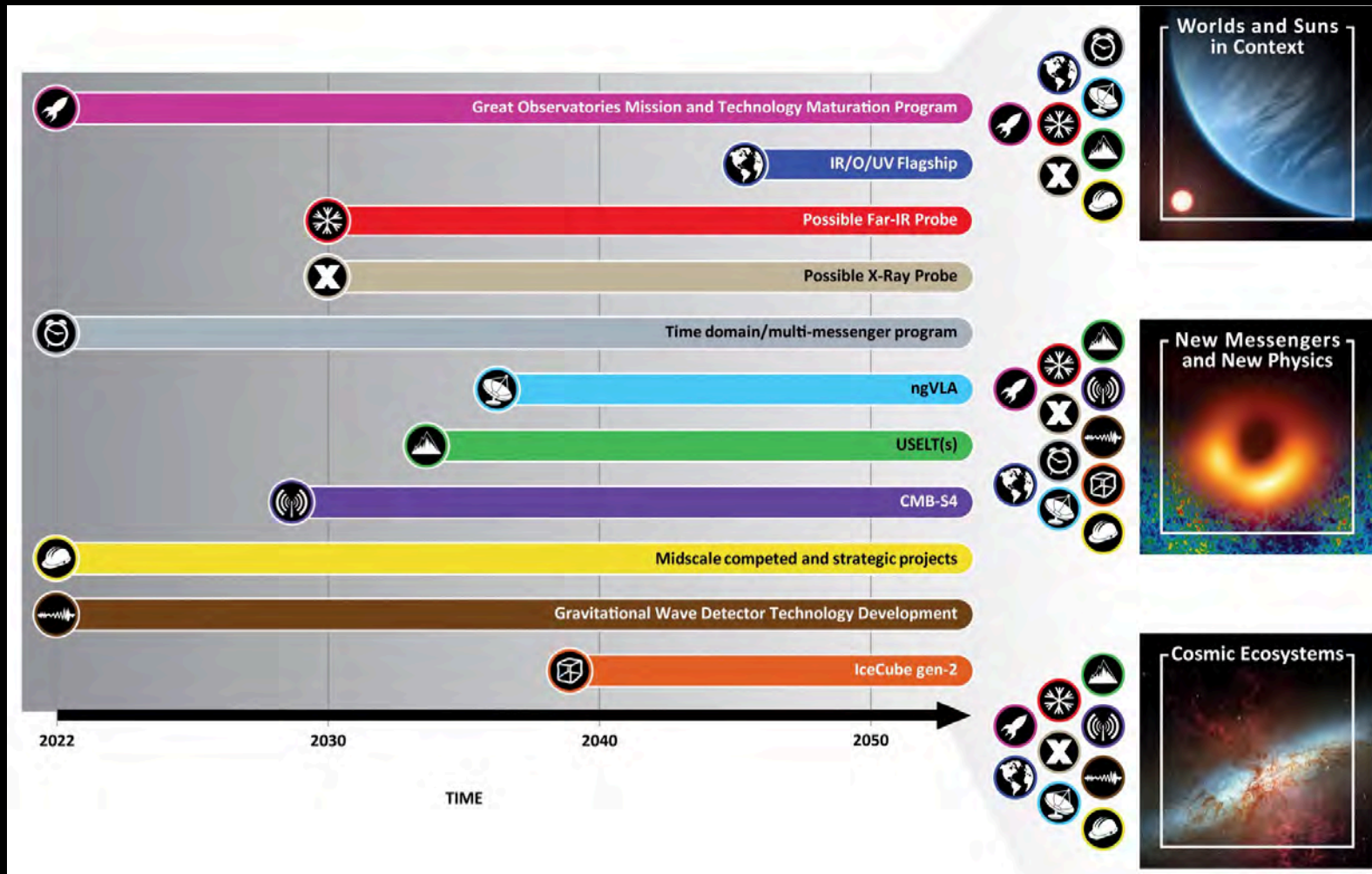


FIGURE 1.1 Evolution of the reflectivity spectrum of Earth. Simulated spectra of Earth before life had significantly altered its atmosphere (top, Archean era 2.5 to 5 Gyr ago), before the development of complex life (middle, Proterozoic era from 0.54 to 2.5 Gyr ago), and the modern oxygen-bearing Earth (bottom). SOURCE: LUVUOIR Report; G. Arney, S. Domagal-Goldman, T. B. Griswold (NASA GSFC).

Highest Priority: an IR/Optical/UV space telescope optimized for observing habitable exoplanets and general astrophysics

- **Recommendation:** After a successful mission and technology maturation program, NASA should embark on a program to realize a mission to **search for biosignatures from a robust number of about ~25 habitable zone planets** and to be a transformative facility for general astrophysics. If mission and technology maturation are successful, as determined by an independent review, implementation should start in the latter part of the decade, **with a target launch in the first half of the 2040's**

Timeline for the recommended medium and large programs and projects



■ Priority Area: Pathways to Habitable Worlds

We are on a path to exploring worlds resembling Earth and answering the question: "Are we alone?" The task for the next decades will be finding the easiest of such planets to characterize, and then studying them in detail, searching for signatures of life.

3 カール・セーガンに学ぶ



- 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”
 - *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?*

ペイル・ブルー・ドット



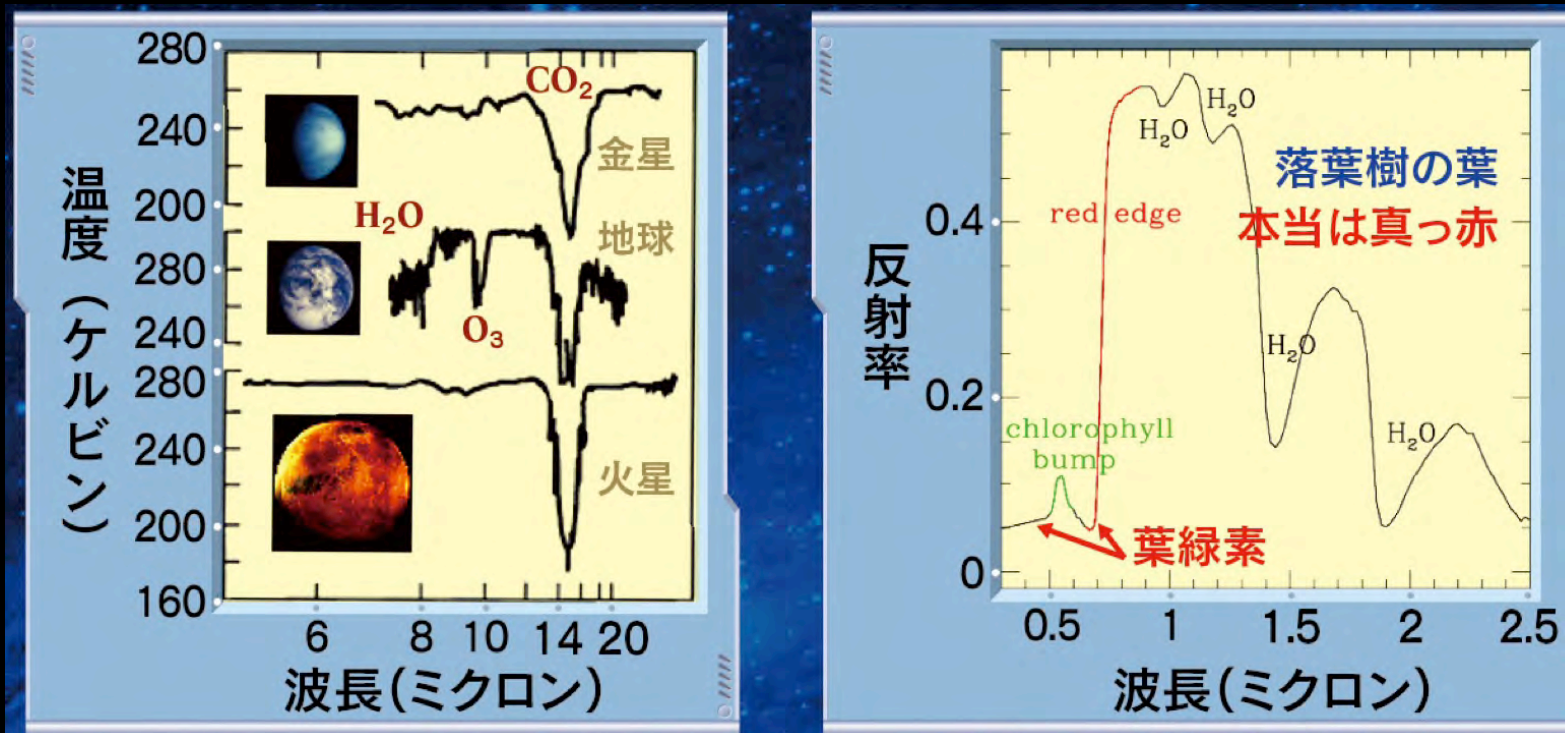


土星から 見た地球

- 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 (astrobotany)
 - 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

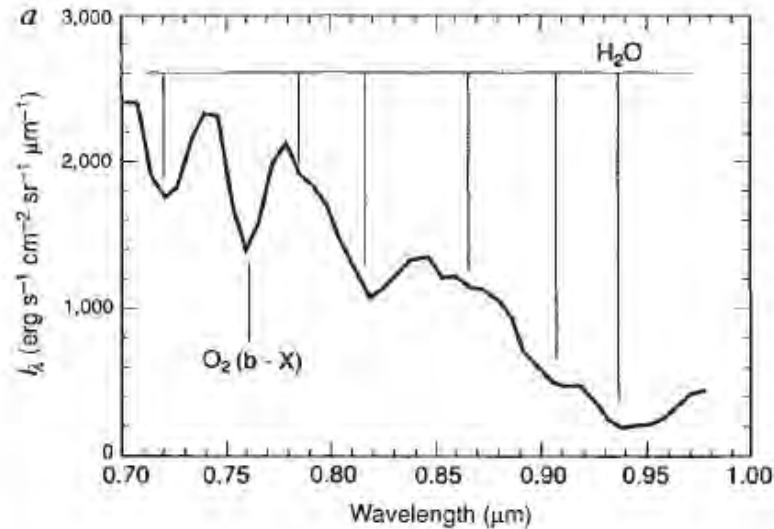
- 1986年5月打ち上げ
- 1990年12月8日一回目の地球スイングバイ時に地球上の“生命探査”
- **地球には生命がいるらしい!**
 - 大量の気体酸素
 - 植物のレッドエッジ
 - 熱平衡から極端にずれた大気中のメタンの存在量
 - 狭帯域で振幅が変化する“不自然な”パルス状電波(通信信号)



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

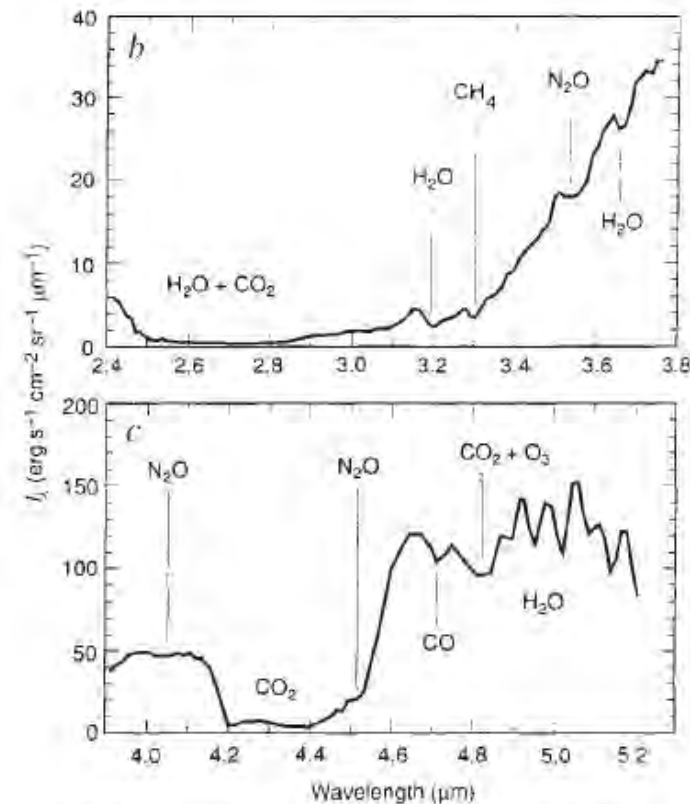
Sagan et al. (1993): 大気分光

ガリレオ探査機の観測した地球の可視光-近赤外スペクトル



酸素分子の吸収@Aバンド(0.76μm)

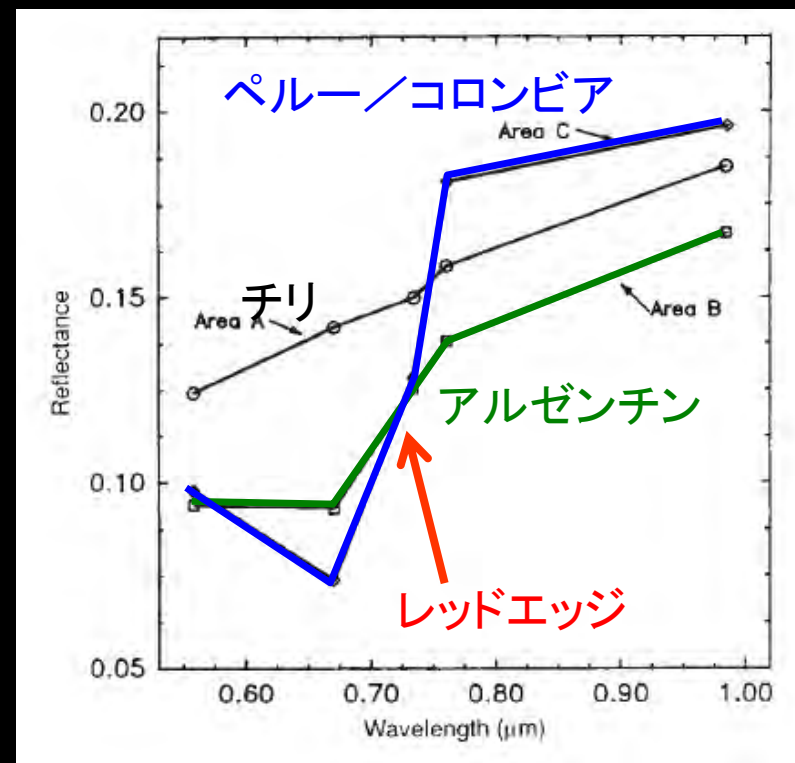
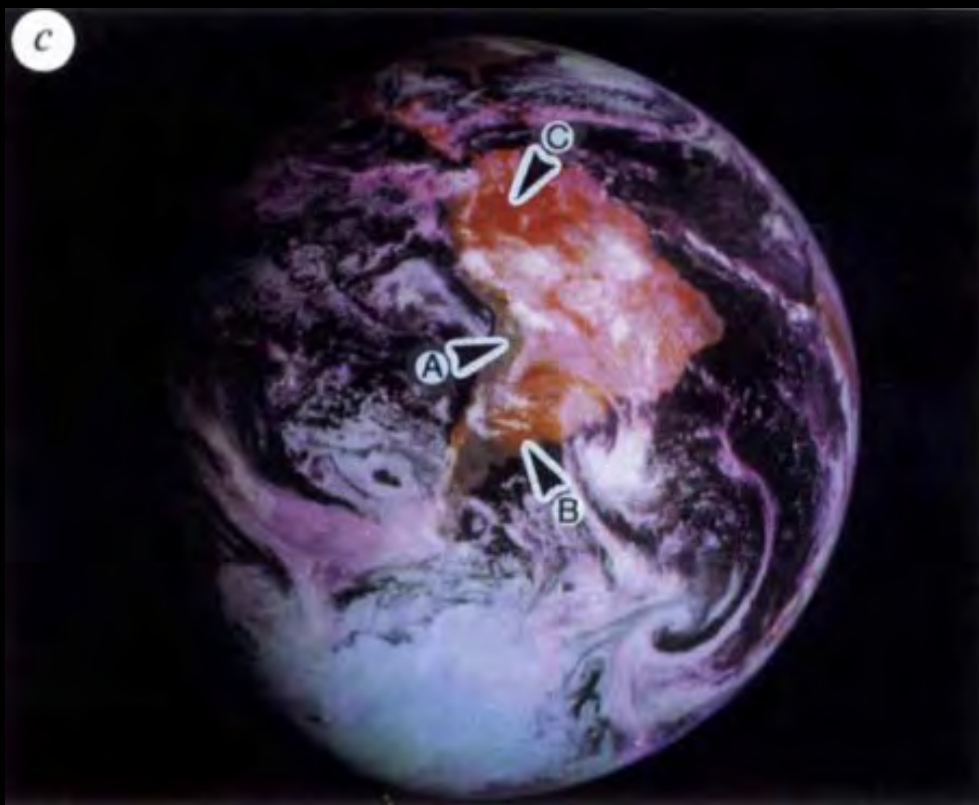
FIG. 1 a, Galileo long-wavelength-visible and near-infrared spectra of the Earth over a relatively cloud-free region of the Pacific Ocean, north of Borneo. The incidence and emission angles are 77° and 57° respectively. The $(b^1\Sigma_g^+ - X^3\Sigma_g^-)$ O₂ at $0.76\ \mu\text{m}$ is evident, along with a number of H₂O features. Using several cloud-free regions of varying airmass, we estimate an O₂ vertical column density of $1.5\ \text{km-atmag} \pm 25\%$. b and c, Infrared spectra of the Earth in the $2.4\text{--}5.2\ \mu\text{m}$ region. The strong ν_3 CO₂ band is seen at the $4.3\ \mu\text{m}$, and water vapour bands are found, but not indicated, in the $3.0\ \mu\text{m}$ region. The ν_3 band of nitrous oxide, N₂O, is apparent at the edge of the CO₂ band near $4.5\ \mu\text{m}$, and N₂O combination bands are also seen near $4.0\ \mu\text{m}$. The



methane (0010) vibrational transition is evident at $3.31\ \mu\text{m}$. A crude estimate¹⁰ of the CH₄ and N₂O column abundances is, for both species, of the order of $1\ \text{cm-atmag}$ ($\equiv 1\ \text{cm path at STP}$).

Sagan et al. (1993): 撮像

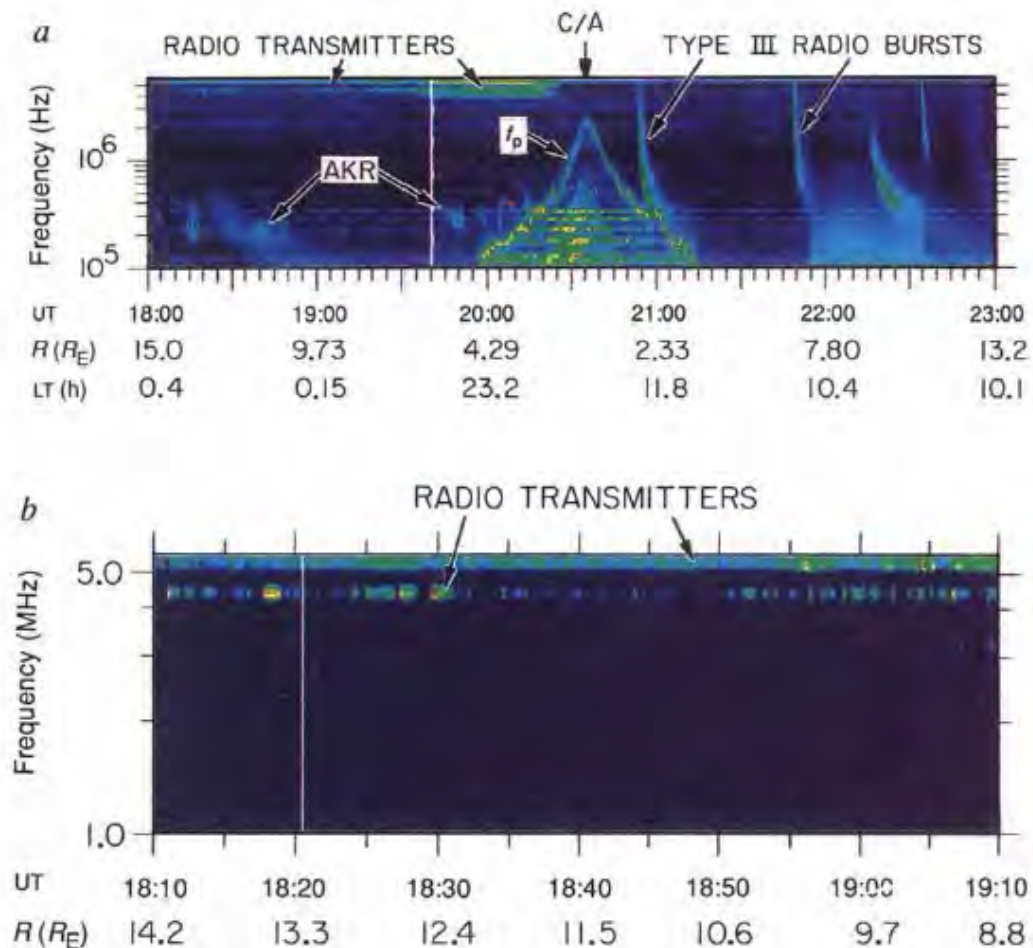
ガリレオ探査機の観測した地球のレッドエッジ



Sagan et al. (1993): 電波観測

ガリレオ探査機の観測した地球の電波信号の時系列

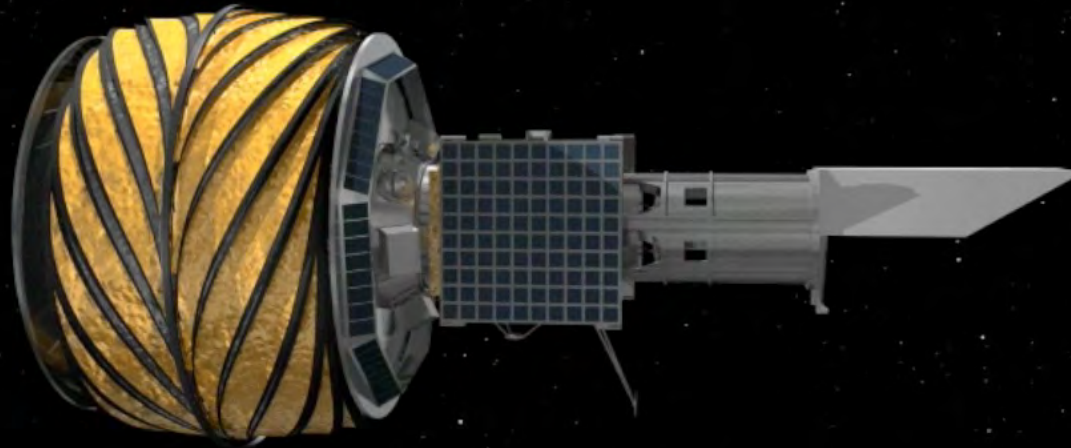
FIG. 4 A frequency–time spectrogram of the radio signals detected by the Galileo plasma wave instrument. The intensities are coded in the sequence blue–green–yellow–red, with blue lowest and red highest. Several natural sources of radio emission are shown in *a*, including auroral kilometric radiation (AKR). Modulated emission at $f > 4$ MHz is shown with an expanded time scale in *b*. Modulated patterns of this type are characteristic of the transmission of information, and would be highly unusual for a naturally occurring radio source. (UT, universal time; R is distance of Galileo from Earth in units of Earth's radius, R_E ; LT, local time.)



4 リモートセンシング もう一つの地球の模擬観測



Starshade project: 地球型惑星を直接見る



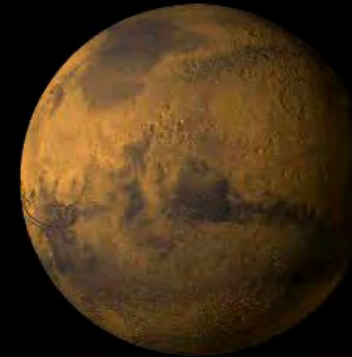
- 宇宙望遠鏡の5万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおき惑星を直接撮像(プリンストン大学 J.Kasdinらのグループ)

ヴェスト・スライファー



- 遠方の“spiral nebulae”（今で言う銀河）の大半が我々から遠ざかっていることを発見
- ハッブルもルメートルも、スライファーの観測した速度データから宇宙膨張を発見した

“Observations of Mars in 1924 made at the Lowell Observatory: II spectrum observations of Mars” PASP 36(1924)261



In the case of *Mars*, of course, we are dealing with the reflection spectrum. The Martian spectra of the dark regions so far do not give any certain evidence of the typical reflection spectrum of chlorophyl. The amount and types of vegetation required to make the effect noticeable is being investigated by suitable terrestrial exposures.

アール・スライファー(弟)

OBSERVATIONS OF MARS IN 1924 MADE AT THE LOWELL OBSERVATORY

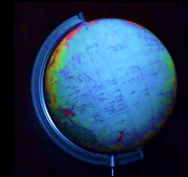
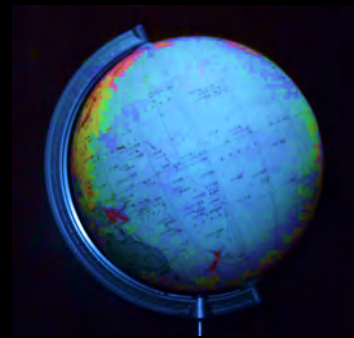
I. VISUAL AND PHOTOGRAPHIC OBSERVATIONS OF THE SURFACE

By E. C. SLIPHER

From the long series of observations made here, both visual and photographic, it is strongly evidenced that the dark markings of the planet, except the dark border that accompanies the melting cap, are due to the same cause and obey the same law of change. The seasonal date that these dark markings make their appearance, the rate and behavior in their development, the seasonal date at which they mount to the highest intensity which is the summer solstice and thereafter, their color and appearance, and in turn the time of their fading out again, all obey the law of change that we should expect of vegetation.

ペイルブルードットを超えて

- 系外惑星は「点＝ドット」としか見えない
- 表面を直接分解する解像度はない
- 自転周期による微妙な色の変化は観測可能

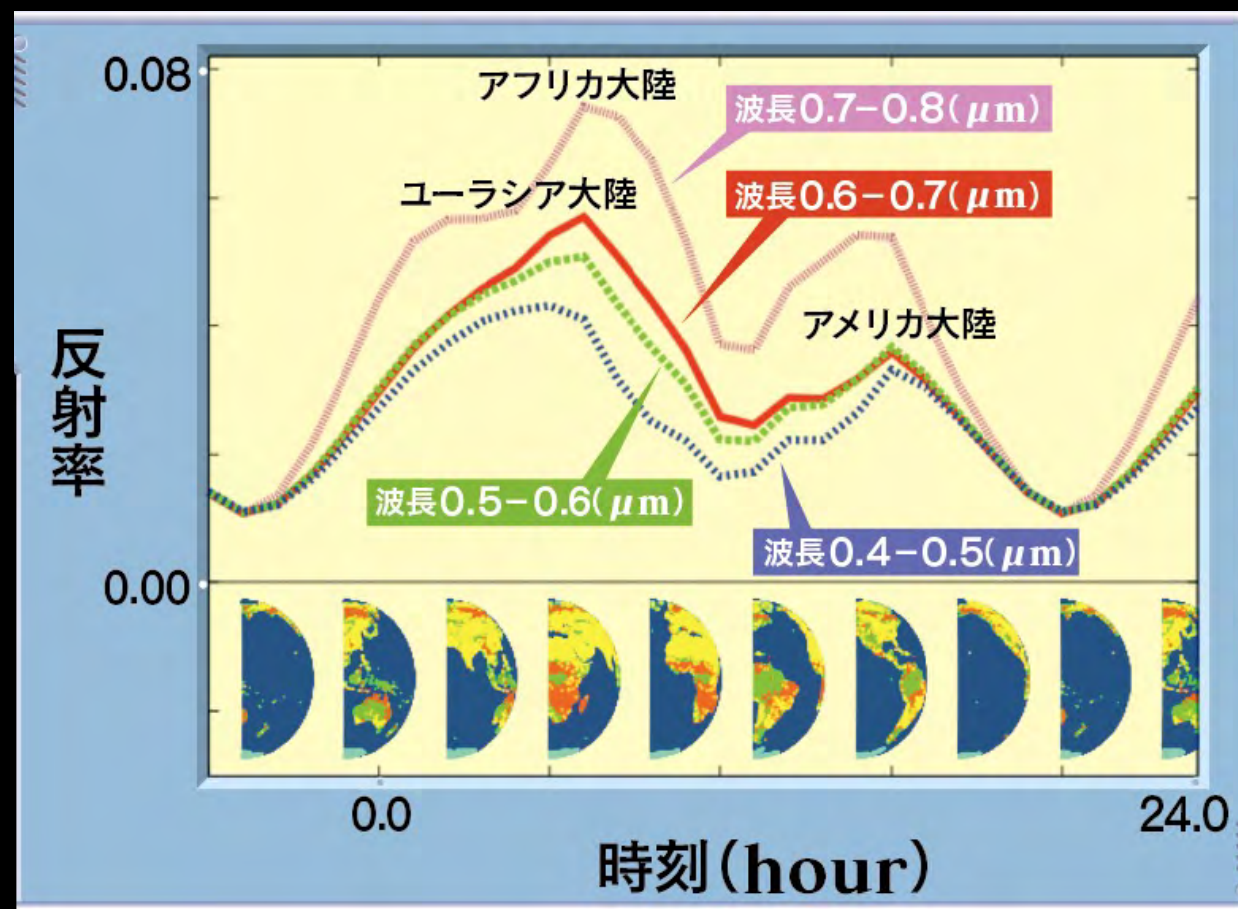


もうひとつの地球の色

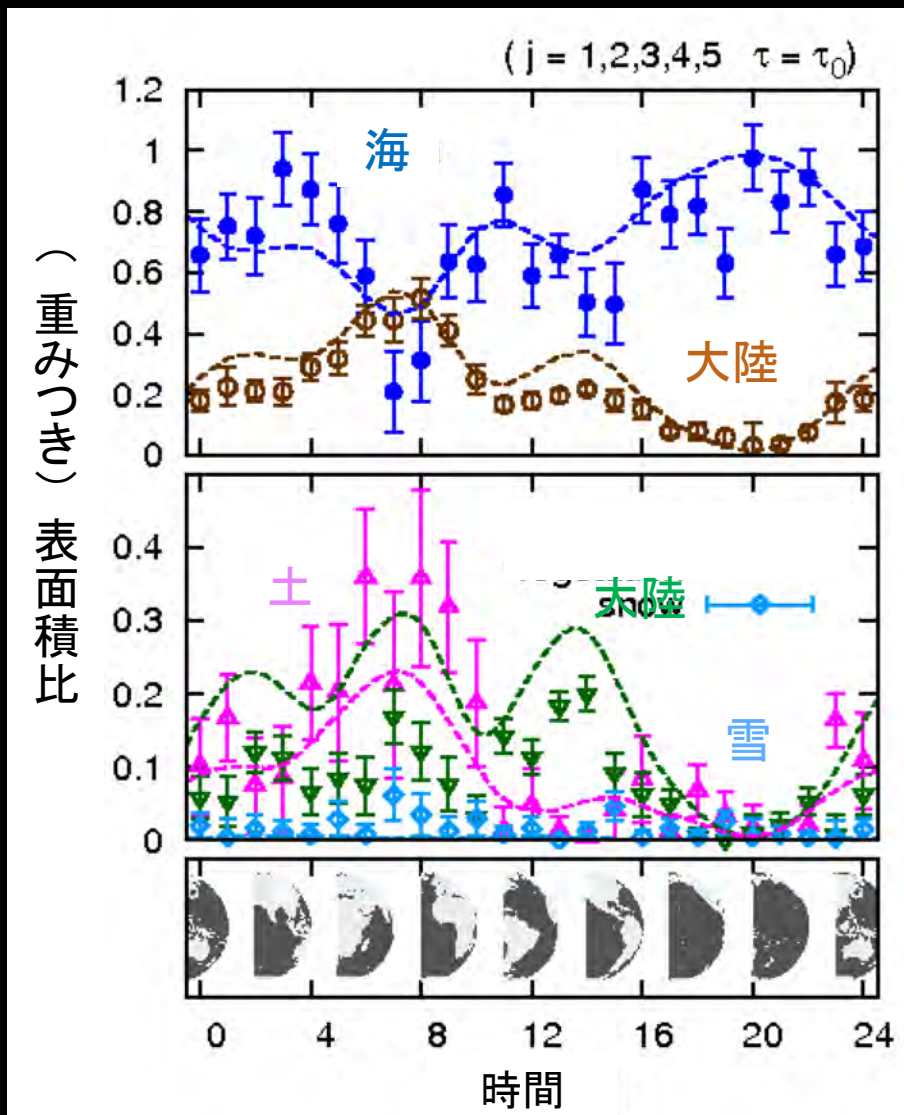
- 自転にともなう地球の反射光の色の時間変化のシミュレーション



藤井友香 他(2010)



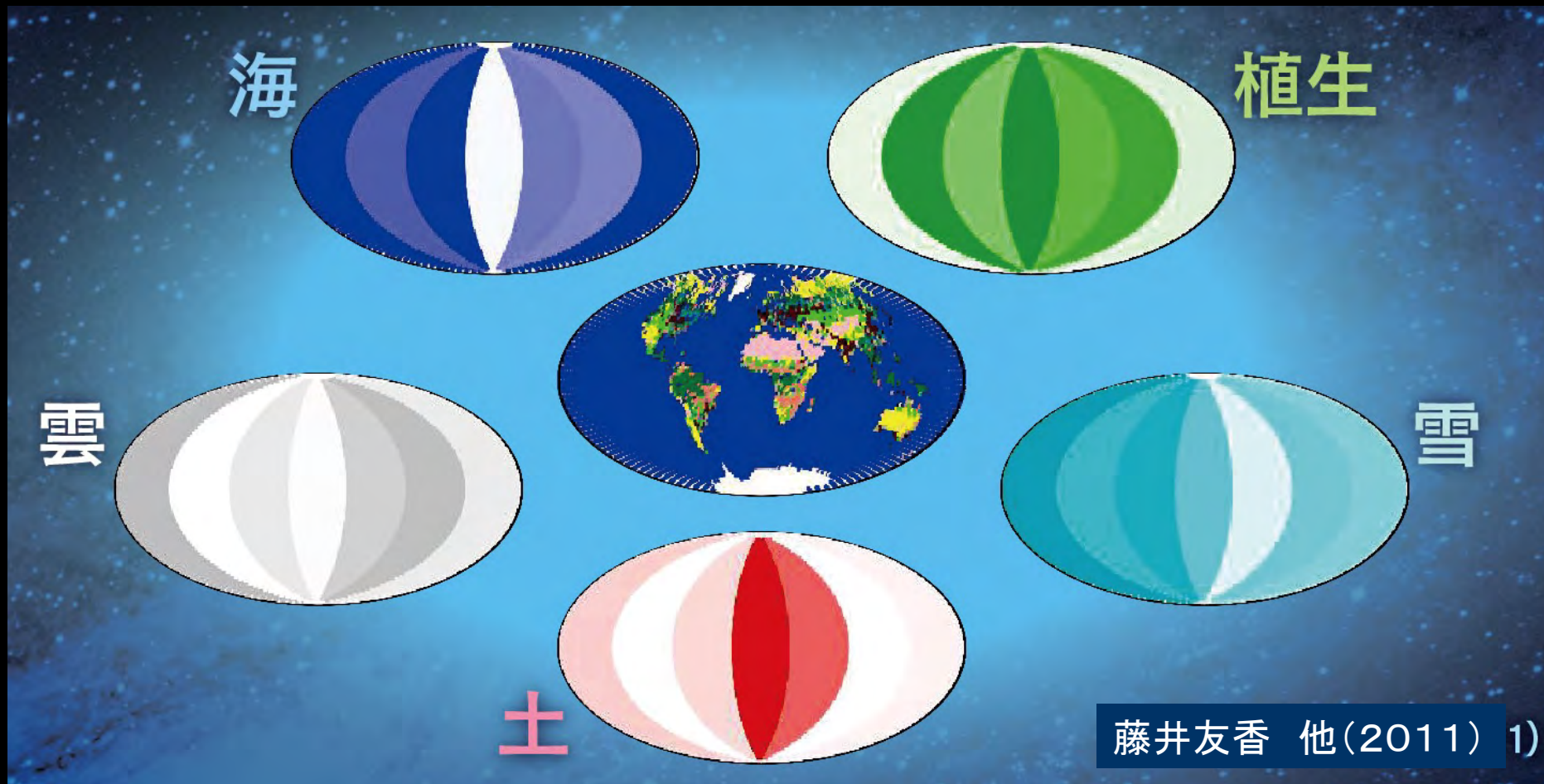
もう一つの地球の色を解読する



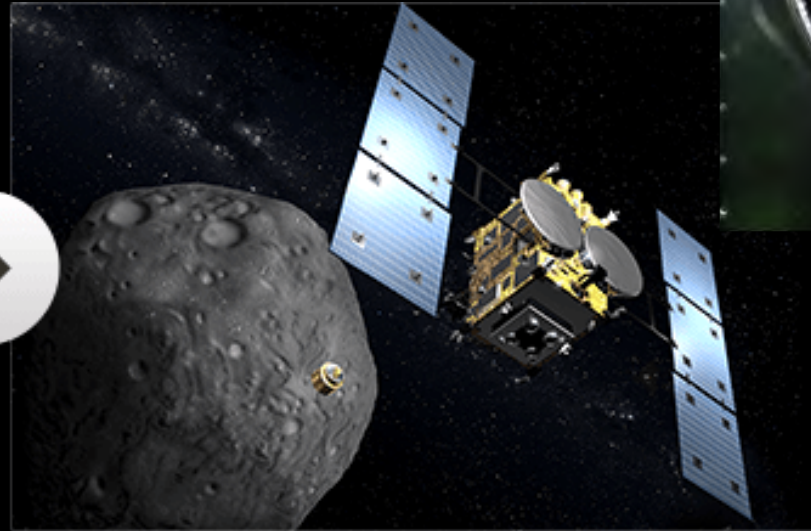
藤井友香ほか(2010)

- 雲は無視
- 中心星の光が完全にブロックできた場合
- 30光年先の地球を口径4mの宇宙望遠鏡で1週間観測
- 海、土、植物、雪の4つの成分の面積比を推定
- 雲がなければ、海や植物の存在が検出可能！
 - 雲を考慮した計算では、海や雲は検出できるが、植物の検出までは難しいという結論

地球測光観測データから推定された地 表面成分の経度分布地図



5 やっぱり王道？ サンプルリターン



© JAXA

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

火星と地球はあまりに似過ぎている



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

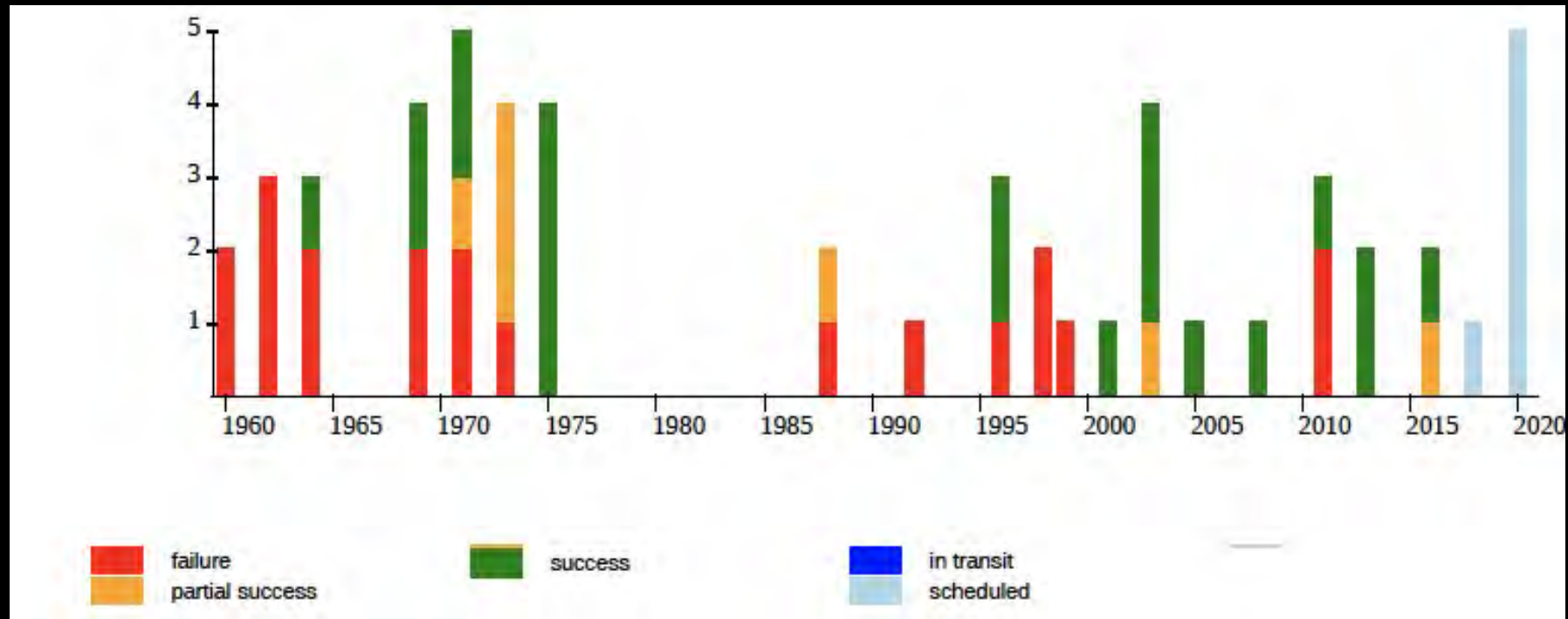
<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA19912>

土居守・河野孝太郎氏撮影

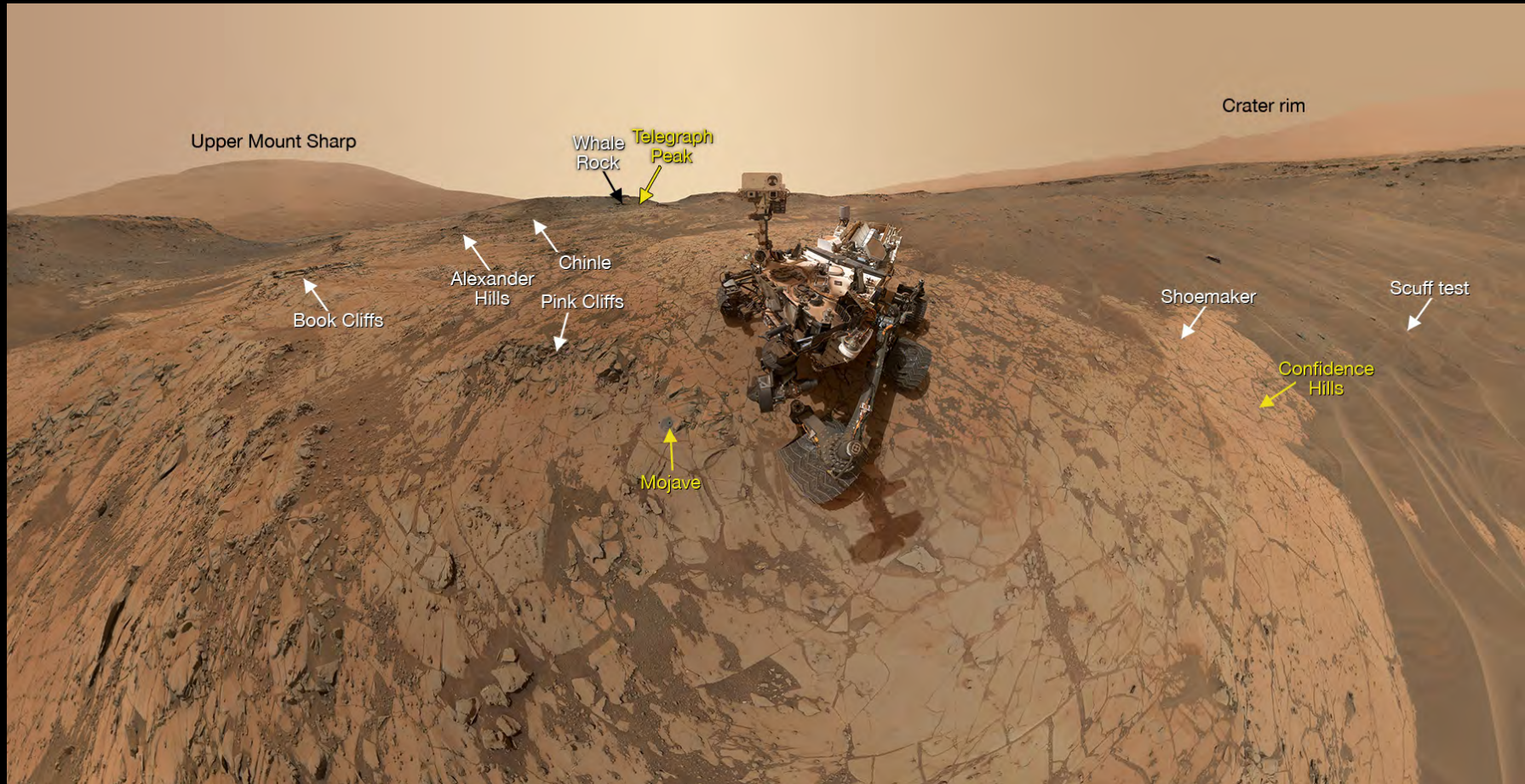
<https://mars.nasa.gov/resources/7505/strata-at-base-of-mountain-sharp/>

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



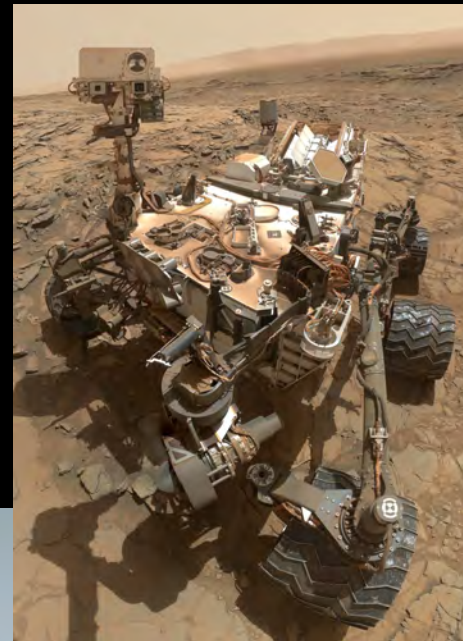
火星着陸探査機 キュリオシティ

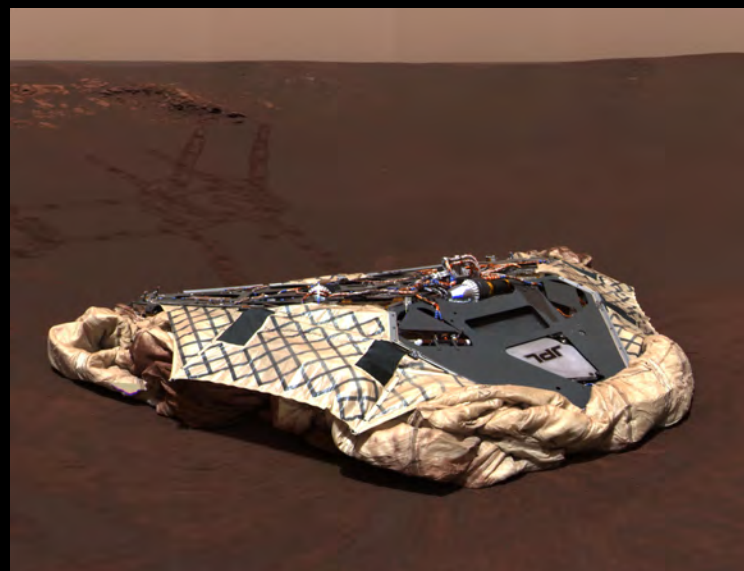


Curiosity (Mars Science Laboratory) 2011年11月26日 打ち上げ
2012年8月6日 火星軟着陸 <https://mars.jpl.nasa.gov/msl/>

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

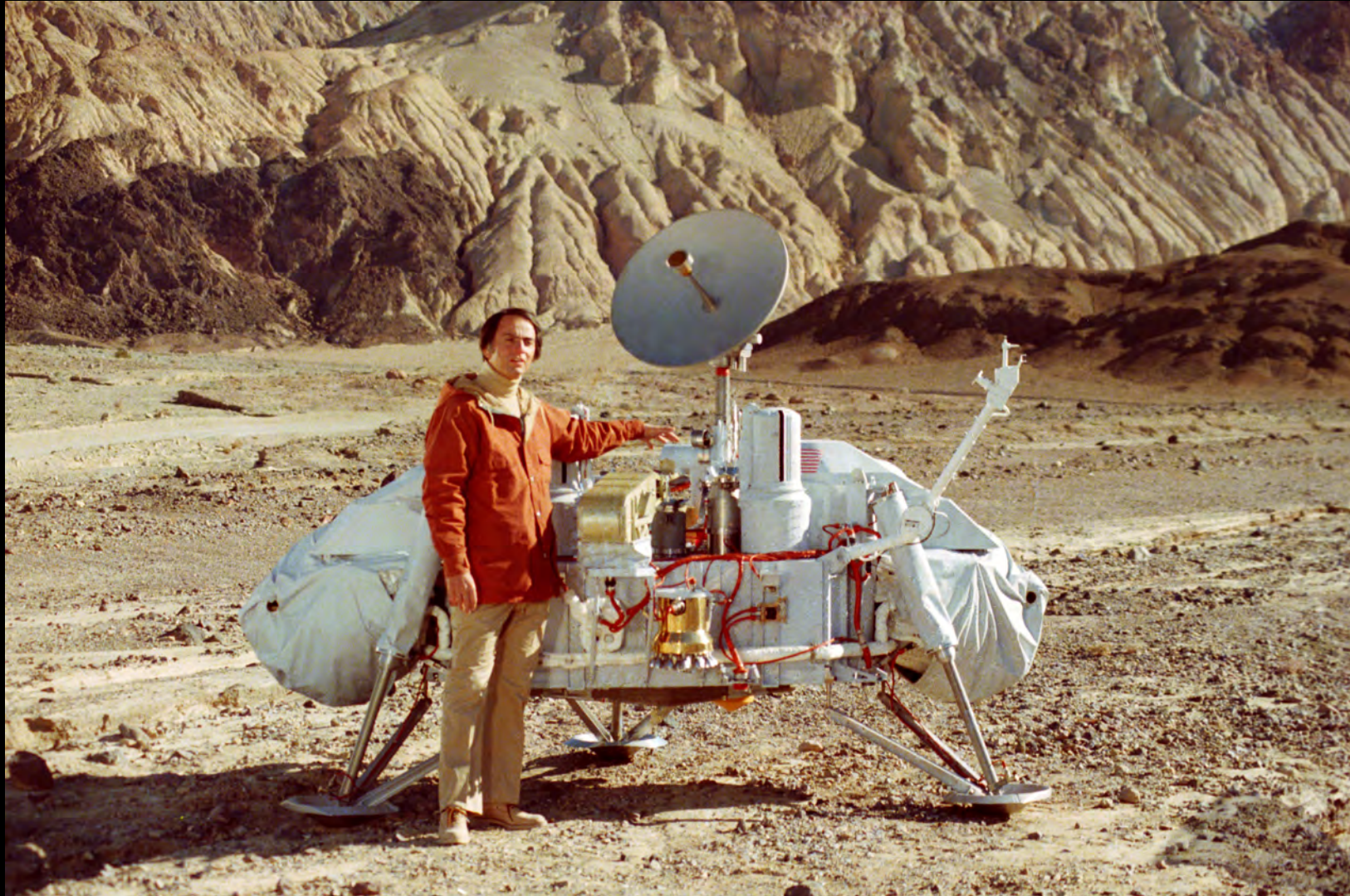
<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA19912>

土居守・河野孝太郎氏撮影

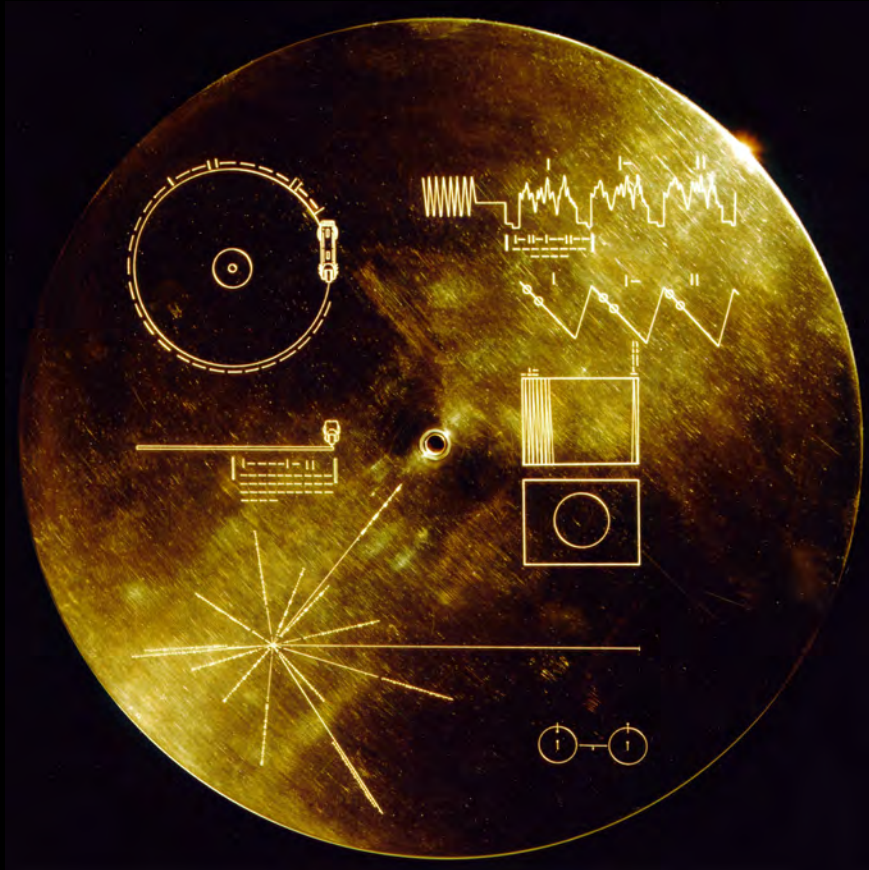
<https://mars.nasa.gov/resources/7505/strata-at-base-of-mountain-sharp/>

カール・セーガンとバイキング1号のランダー模型

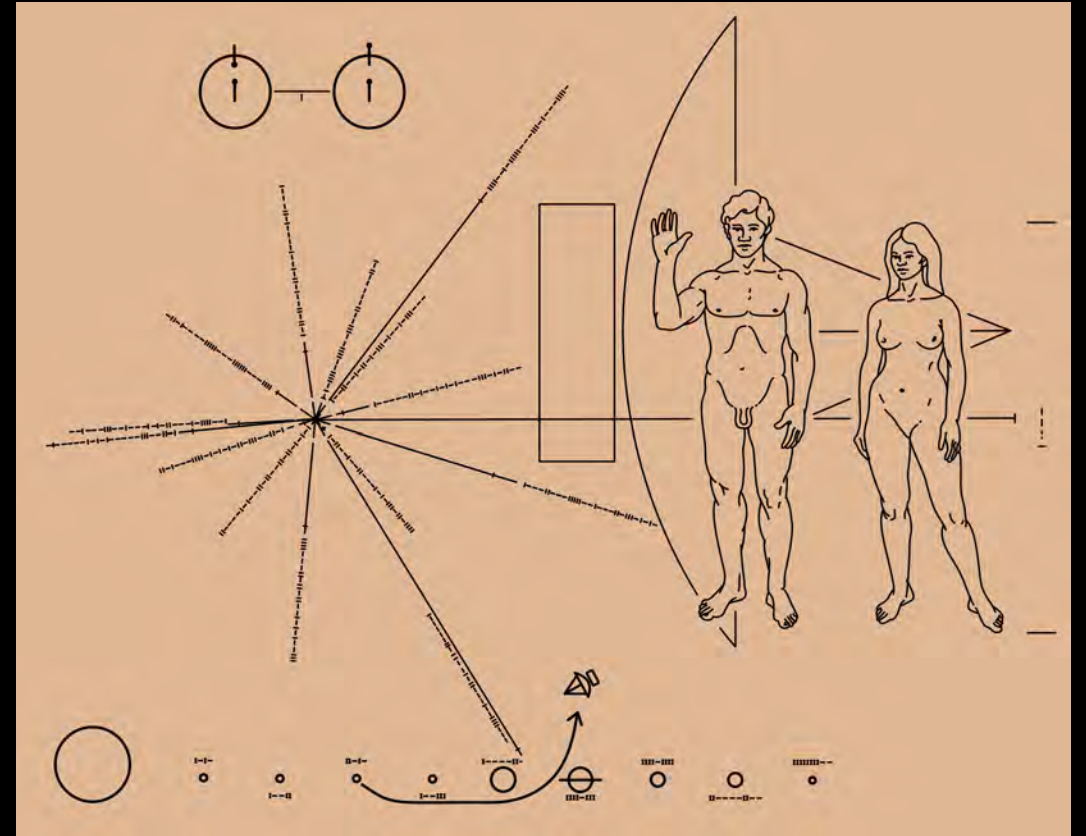
この写真を見ると、火星表面の写真もまた地球のどこかで撮影されたのではないかという疑惑を与えてしまうほど、火星は地球と似ている



6 もし見つければ一番確実なSETI



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)



1972年打ち上げのパイオニア探査機に
搭載された金属板

SETI: Search for Extra-Terrestrial Intelligence

- **バイオシグニチャーとして最も決定的なのは知的文明からの電磁波信号**
 - 1GHzから20GHzの電波が適している(低周波数は銀河系のシンクロトロン放射、高周波数は地球大気が雑音となるため)
- **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

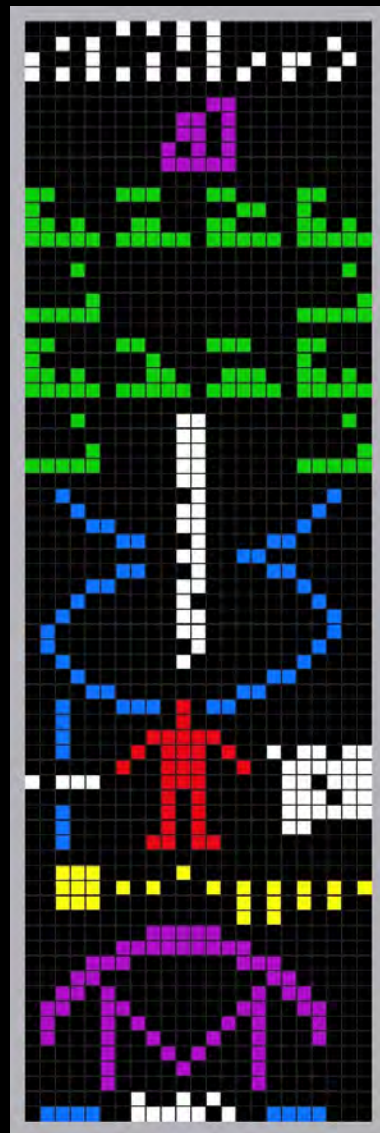
その知的生命が他の文明と交信を行う確率

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

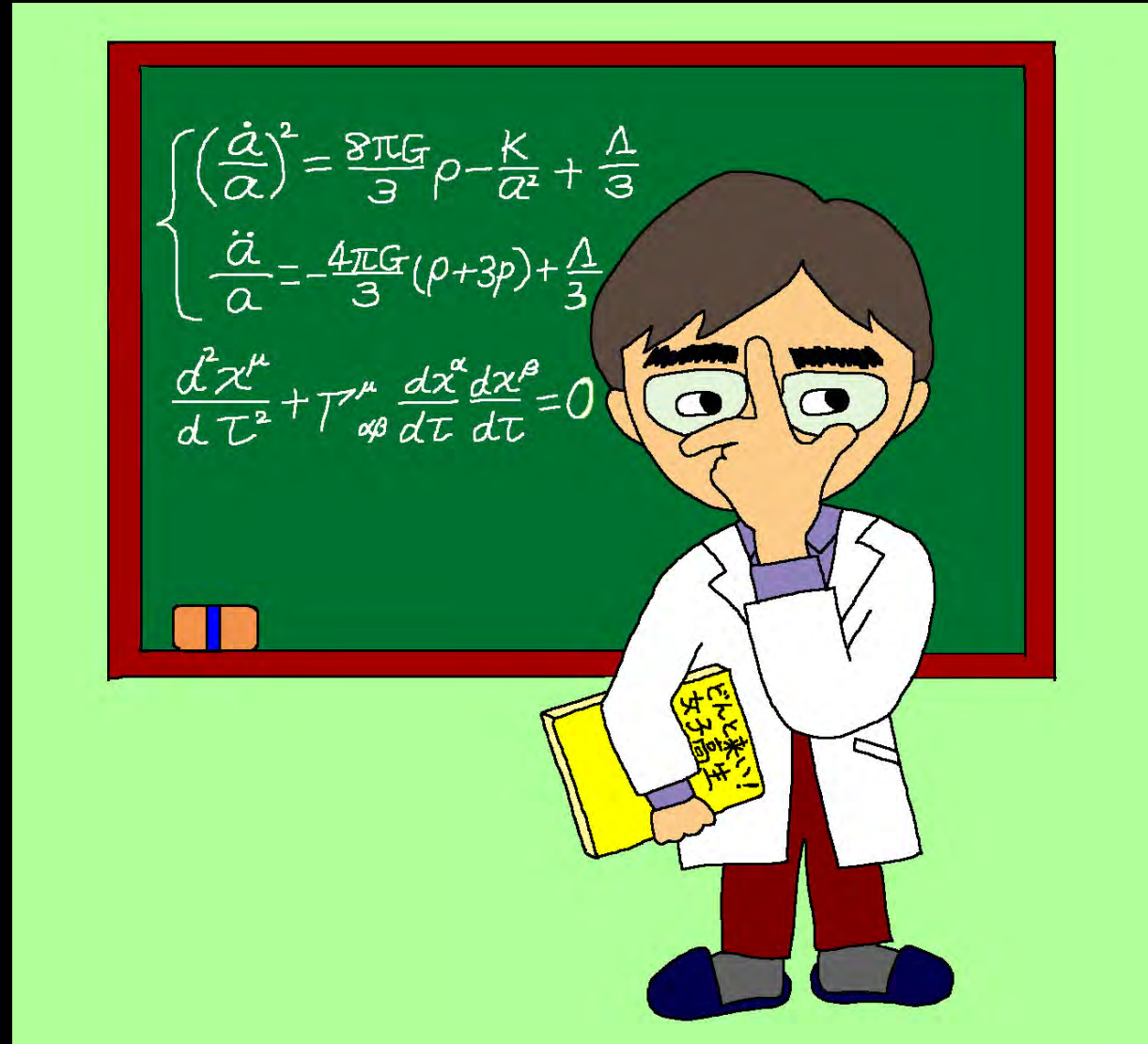
太陽系(左端が太陽で、一行上になっているのが地球)

アレシボ電波望遠鏡

可視光SETI

- 100光年先の惑星の住人が地球を狙って100Wのレーザーを発していたら検出可能
 - レーザーポインターは1mW
 - 天文観測の補償光学用のレーザーガイド星は高度100kmに存在するナトリウム層に数Wのレーザーを放射することで実現している（補償光学を用いている文明なら人工レーザー星を利用しているかも）
 - 機械加工用レーザーは数10kWのものがある
- もちろん今のところ検出されていないが、「もしあちらが我々に向けて発信しているならば」十分検出可能な時代になっている

7 放談： 生物学者へのお願い



この地球と生命の歴史：偶然か必然？

大まかな宇宙年齢	現在からの時間	出来事
0	138億年前	宇宙の誕生
92億年	46億年前	太陽系の誕生
96億年	42億年前	海の形成
98億年	40億年前	原始生命の誕生
115億年?	23億年前?	全球凍結
122億年	6億年前	カンブリア紀大爆発
135億年	2.5億年前	ペルム紀—三畳紀 生物大量絶滅
136億年	2.3億年前	恐竜の出現
137億年	6500万年前	白亜紀—第三紀 恐竜絶滅
138億年	20万年前	ホモサピエンスの出現

生命誕生のタイムスケールは予言できるか

- 「一を聞いて十を知る」しかないことの危険性は不可避
- とはいえ、作業仮説として理論的に生命誕生のタイムスケールを推定することは、有意な検出ができない状況がどのような意味を持つかを理解するためにも本質的
 - 原始生命が生まれるまでの時間は数億年もあれば十分なのか
 - 一旦生まれた原始生命が、多細胞あるいは生物に進化する時間
 - 光合成を起こして、惑星大気あるいは表層を改変する時間
 - 知性が生まれるまでの時間
 - 高度文明を形成するまでの時間
 - 文明が絶滅するまでの時間

系外惑星上の植物の色を予想する

古いM型星



若いM型星



G型星



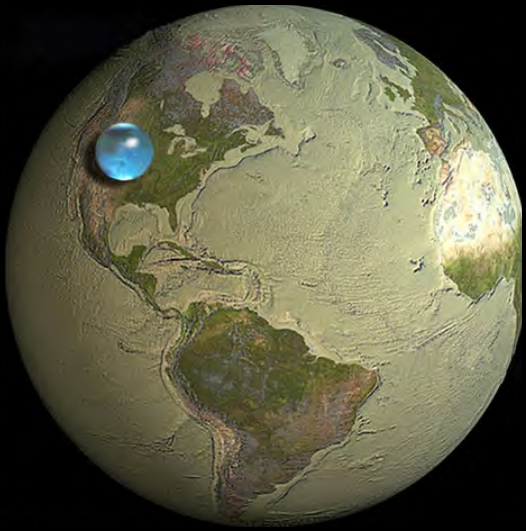
F型星



日経サイエンス2008年7月号
Nancy Y. Kiang

水は必要か？ ハビタブル惑星の誤解

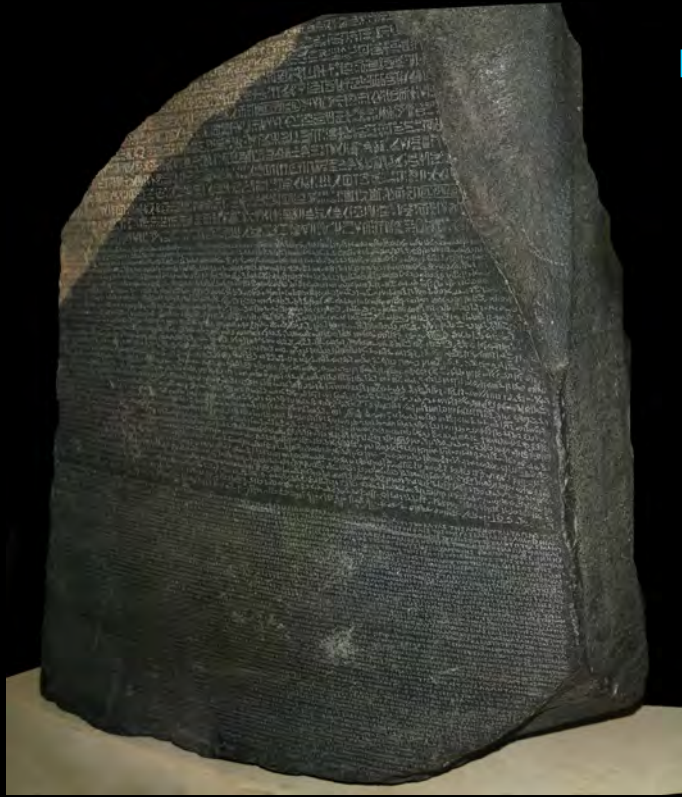
- 地球の生命誕生に水は必須であったらしいが、、、
 - 水が他の天体でも必須である理由はない
 - しかもそれが表面に存在していなくてもはならないわけではない
 - にもかかわらず、(大量の水が存在しているとわかっているわけでもないのに) 表面温度が(0-100) °Cだと推定される惑星をハビタブル惑星と呼んでその発見を喧伝する業界関係者の科学者倫理観は糾弾されるべき
 - とはいうものの、水という条件を外してしまうと、その瞬間に何でもあり(バーリト우드)になってしまうのもまた事実
- 何がバイオシグニチャーなのかは全く不明



本当はいるのに気づいていないだけ？

- 地球が誕生してから数億年後に原始生命が誕生した
 - 条件さえ満たすと、生命誕生は実は極めて容易(必然的)？
 - だとすれば、地球外生命が存在する可能性も高いはず
 - ではなぜ、地球上での生命誕生は一回きり(一種類のコドン)なのか？
- 地球のどこかで検出されないままひっそりと存在している？
 - 否定はできないが不自然では？
 - いずれにせよ、宇宙生物学にとっては、惑星システムを改変するほどの変化を伴わない生物は、いないも同然

天文学的ロゼッタ・ストーンとチューリングテスト



- 明らかな人工信号を受信したとして、我々はそれを解読できるか
 - 地球上の異なる言語が理解できるのは対面して意思疎通できたおかげ
 - ロゼッタストーンなしに古代エジプト文字を解読できたのか？
 - 日本語以外のみで訓練されたAIに、突然膨大な量の日本語文書を与えたとして、やがて解読できるようになるのか？
 - 原理的にであれ、相互理解を可能とする方法論は存在するのか？
- 地球外文明との交信は不可能だと思うべき
 - もっとも近い地球外文明までの距離が例えば数千光年だとすれば(天の川銀河のサイズは数万光年程度)、返信したときには文明が滅亡している可能性も高い
 - 生命同士ではなくAI同士の交信が主流かも(天文学的チューリングテスト)

勇気ある「普遍」生物学者の協力が必須

- 今や天文学では「地球外生命探査をめざしている」と公言しても職を失う危険性はない（成熟した学界と褒めるべきかもしれないが、それはそれで問題だとも思う）
 - 結構いろんなことが理解され尽くしつつあり、地球外生命探査が最後のフロンティア（ハイリスク・ハイリターン）との認識が共有されている
- 一方、生物学では「地球外生命探査をめざしている」とカムアウトするのはかなり危険なはず
 - 地球上の生物、特に起源と進化について、まだ理解されていない重要な問題が山積しており、あえて怪しい宇宙生物学に新天地を求める危険（ハイリスク・ノーリターン）をおかす必要は皆無
 - しかし、普遍生物学と宇宙生物学の親和性は極めて高い（というか同じ穴のムジナ？）