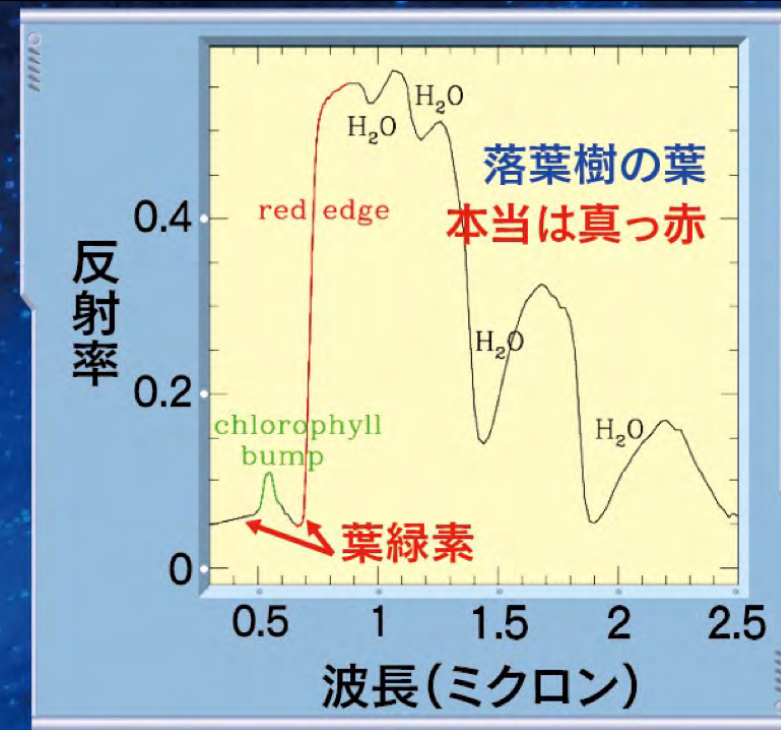
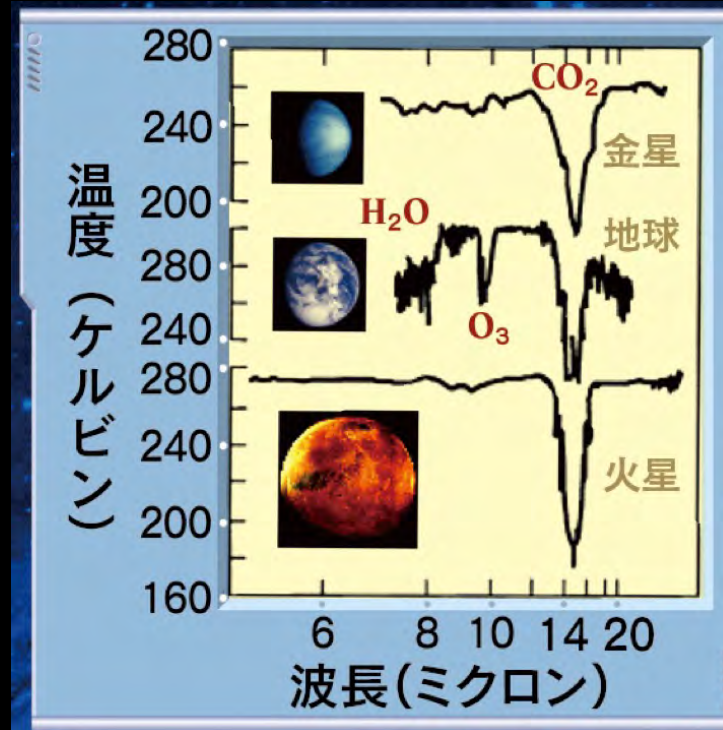


# 宇宙物理学から宇宙生物学へ： 必然と偶然の間



東京大学大学院理学系研究科

物理学専攻・ビッグバン宇宙国際研究センター 須藤 靖

オムニバスセミナー@千葉大学先進科学センター 2022年4月22日16:10-17:40

# 今回の内容

- 1 はじめに：科学の心
- 2 138億年の宇宙史における必然と偶然
- 3 太陽系外惑星発見史
- 4 リモートセンシングとバイオシグニチャー
- 5 地球外文明探査
- 6 まとめ

# 1 はじめに：科学の心

# 謎解きはジュケンの後で 『東大ing 2014』 (東京大学新聞社)

- 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すっきりする。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。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

## 物理



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、高校の物理を面白い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

謎解きはジュケンの後で

# (高校)物理を学んで覚えておくべきたった一つの結論

- 物理学者リチャード・ファインマンは、「この科学文明が滅亡するとした場合、次の世代に伝えたいたった一つの知識は何か」という問いに対して、「**すべての物質は原子からできていること**」だと答えたと言われている
  - これは「世界は粒でできている」、あるいは「この世界の多様性は、少数の基本構成要素の組み合わせで説明尽くされる」と言い換えられる
- 私なら「**この世界が（数学で記述された）物理法則に支配されていること**」と答えたい
  - どの問題に対してどの公式（物理法則）を用いるべきかなどは些細なこと。**科学（法則）を用いれば原理的には世界を理解できる、**という経験的事実以上に驚くべき発見はないのでは？

# 物理学とは何だろうか

## ■ 朝永振一郎

- 『物理学とは何だろうか』（岩波新書）
- われわれをとりかこむ自然界に生起するもろもろの現象 — ただし主として無生物にかんするもの — の奥に存在する法則を、観察事実に拠りどころを求めつつ追求すること

## ■ 佐藤文隆

- 『科学と幸福』（岩波現代文庫）
- 宇宙がビッグバンでできたなどという知識は二束三文の価値しかない。問題はなぜそう考えられているのかだ

# 科学とは何か

## ■ 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』(岩波書店)
- 今まで引き継がれてきたことがみな真実だという考えに疑いを抱き、過去の経験を伝えられてきたままの形で鵜呑みにせず、実際の経験をとおしてまったくのはじめから、実際はどうなのかを発見し直すということです。これこそが科学です。つまり、過去から継承されてきた種族としての経験を必ずしも信用せず、もっと直接の新しい経験からそれを調べ直す価値を発見した結果が、科学なのです。これが僕の科学観で、僕にできる最上の定義はこれ以外にありません。
- 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を、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。

# 物理学の方法論

- 複雑な現象を要素に分割し、観察・実験を通じてその素過程の背後にある法則を探るのが伝統的物理学の方法論（要素還元的な方法論）
  - 素粒子物理学を筆頭に、この方法論が20世紀の物理学を飛躍的に進歩させた
  - 4つの基本相互作用に帰着する普遍的物理法則の発見
- しかし、異なる要素間の相互作用の結果として出現する現象は、細かい要素に分解してしまうとその本質が失われてしまう（複雑系）
  - 統計物理学や物性物理学における多様性と秩序：More is different
  - 生物はその端的な例である。生物と無生物は要素に分解すると、結局同じ原子（素粒子）の集まりに還元されるだけで、生物と無生物は区別できない
- 法則の普遍性に支えられた再現可能な現象の探求
  - 宇宙で一例しか知られていない偶然に支配された現象（地球上での生命の誕生？）の解明には不向き



# 2 138億年の宇宙史における 必然と偶然

# 科学に残された3つの究極の謎

## ■ 宇宙の起源

- 宇宙はなぜ誕生したのか
- 宇宙は一つだけなのか

## ■ 生命の起源

- 生命はなぜ誕生した
- 地球外にも生命は普遍的に存在するのか

## ■ 意識（知性）の起源

- 意識はなぜ誕生した
- 生命は必然的に意識をもつ方向に進化するのか
- 地球外に知的文明は存在するのか
- 知性はどこまで進化可能なのか

現在、未解明なだけでなく、そもそも答えが存在するのか、仮にあるにせよ我々地球人ごときの知性で答えを得る(理解する)ことができるかすらわからないほどの魅力的な問い

# 必然と偶然の狭間

- 私が必然だと信じていること（必然的帰結）
  - 誕生した宇宙は物理法則に支配されて進化する
  - 宇宙のなかの物質は多様な元素と分子を合成し、やがて生命をうみだす
  - 誕生した生物は進化しやがて知性（意識）をもつ
- 私が必然だとは思えないこと（一回しか起こらない事象であり、偶然に強く支配された結果）
  - この宇宙が誕生したこと
  - この宇宙を支配する物理法則の存在
  - この地球における生命の誕生
  - この地球における知的生命体の存在

# 宇宙・物質史（物理法則による必然的帰結）

宇宙年齢	現在からの時間	出来事
0	138億年前	宇宙の誕生
$\sim 10^{-36}$ 秒	138億年前	宇宙の指数関数的膨張（インフレーション）と、それにとまなう宇宙の熱化（ビッグバン宇宙）
$10^{-6}$ 秒	138億年前	陽子と反陽子の対消滅
1秒	138億年前	電子と陽電子の対消滅
3分	138億年前	ヘリウムの合成（ビッグバン軽元素合成）
38万年	138億年前	宇宙の中性化（陽子と電子が結合して荷電中性の水素原子になる）、宇宙の晴れ上がり
$\sim 4$ 億年?	$\sim 134$ 億年前?	最初の星の誕生、それ以降で星の中心で重元素が合成され、最期に空間にばら撒かれる（元素循環）
10億年	128億年前	知られている最古の銀河、中性化した宇宙が再び電離
70億年	168億年前	ダークエネルギーが宇宙を支配し、それ以降、宇宙膨張が減速から加速に転ずる

# 地球・生命史 (かなり偶然に左右されている)

宇宙年齢	現在からの時間	出来事
82億年	46億年前	地球および月の誕生
96億年	42億年前	海の形成
98億年	40億年前	原始生命 (プロゲノート) の誕生
100億年	38億年前	最古の光合成の痕跡?
115億年?	23億年前?	全球凍結
117億年	21億年前	大気中酸素の急激な増加
122億年	6億年前	カンブリア紀大爆発 (生物種の爆発的多様化)
134億年	2.5億年前	生物大量絶滅 (P/T境界事件: ペルム紀-三畳紀)
136億年	2.3億年前	恐竜の出現
137億年	6500万年前	恐竜絶滅 (K/T境界事件: 白亜紀-第三紀)
138億年	20万年前	新人型ホモサピエンスの出現

宇宙生物学入門-惑星・生命・文明の起源-(2008)より

# 生命と宇宙の誕生・進化における必然と偶然

- 生命の誕生と進化を議論する場合、必然と偶性（物理法則と初期条件あるいは外的環境と言い換えても良い）はある程度容易に分離できる

↑

必然

- 星内部での元素合成と超新星爆発による元素循環
- それを材料とし化学進化から生命の材料物質が生成
- これらから（具体的な過程は不明だが）生命が誕生

偶然

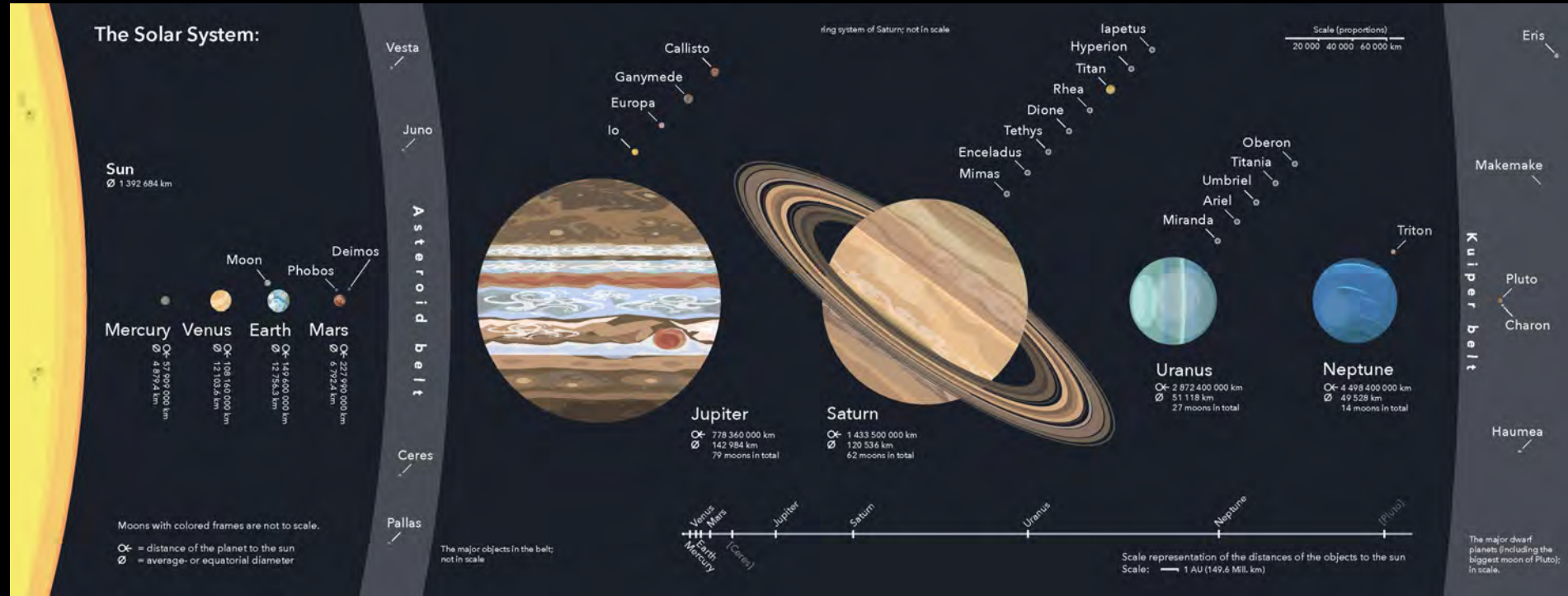
- 深海熱水噴出孔？地球外宇宙塵上？
- 自然淘汰・適者生存
- 地球の存在、小天体大衝突、気候変動

↓

- 宇宙の進化は完全に必然的だが、その誕生においては、何が偶然で何が必然か、分離することは困難
  - 初期条件と物理法則の区別が困難。宇宙が先、あるいは法則が先？

# 3 太陽系外惑星発見史

# 太陽系は必然か偶然か



[https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_System)

## ■ 太陽系は平凡なのか、それとも例外なのか？

- ほぼ同一平面上の円軌道をなす 8 重惑星系
- 内側に岩石惑星、外側に巨大ガス惑星
- 力学的に極めて安定（約100億年程度は安定）
- ハビタブル惑星（地球）を持つ
- 惑星の多くは複数の衛星と環を持つ



# 太陽系以外に惑星は存在しない(1991)？

## Multiplicity among solar type stars in the solar neighbourhood. I. CORAVEL radial velocity observations of 291 stars\*

A. Duquennoy<sup>1</sup>, M. Mayor<sup>1</sup> and J.-L. Halbwachs<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Observatoire de Genève, 51 chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

<sup>2</sup> Observatoire de Strasbourg, URA 1280, 11 rue de l'Université, F67000 Strasbourg, France

Received October 3; accepted November 15, 1990

Duquennoy, Mayor & Halbwachs  
Astronomy & Astrophysics  
Supplement  
88 (1991) 281-324

1977年から13年間モニ  
ターし続けて発見なし

## Multiplicity among solar-type stars in the solar neighbourhood★

### II. Distribution of the orbital elements in an unbiased sample

A. Duquennoy and M. Mayor

Geneva Observatory, 51 chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

Received December 4, 1990; accepted January 30, 1991

Duquennoy & Mayor  
Astronomy & Astrophysics  
248 (1991) 485-524

Finally, we ask the question if orbits of companions in the mass range  $0.001-0.010 M_{\odot}$  can be found around G-dwarf primaries, and if yes, whether their eccentricities are different from zero. The latter could be information about their formation process and could become a test to distinguish if we deal with stars (or brown dwarfs) or real extra solar system planets.

# 「我々は何も知らなかった」ホットジュピターの発見 (1995)

## A Jupiter-mass companion to a solar-type star

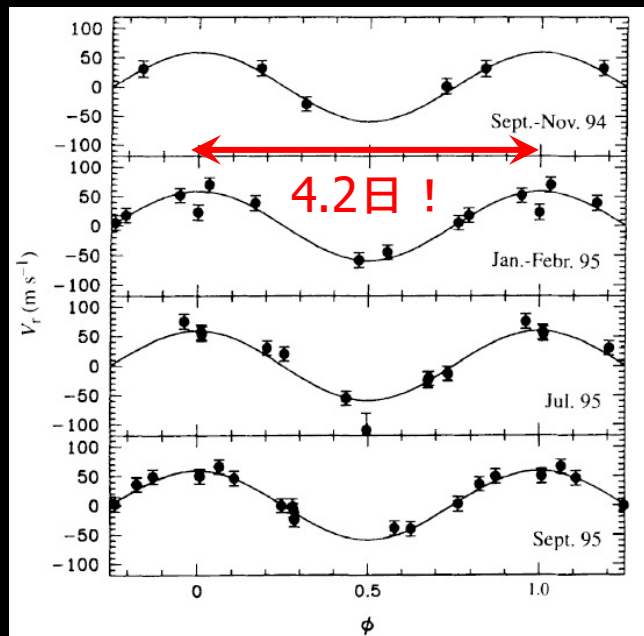
Michel Mayor & Didier Queloz

Nature 378(1995)355

Geneva Observatory, 51. Chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

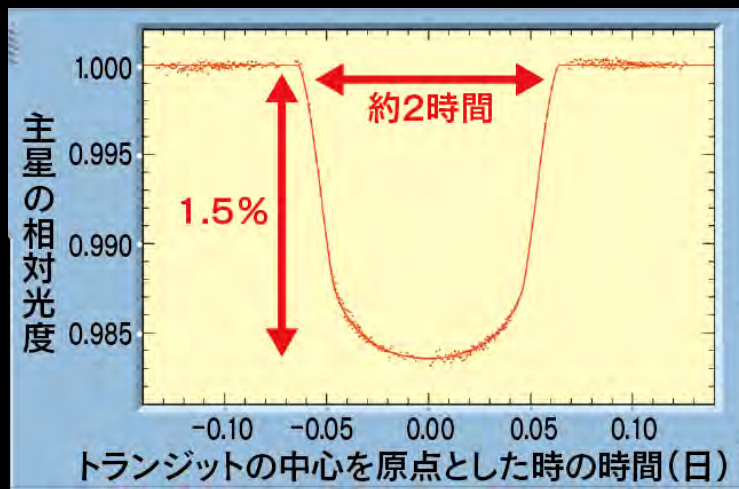
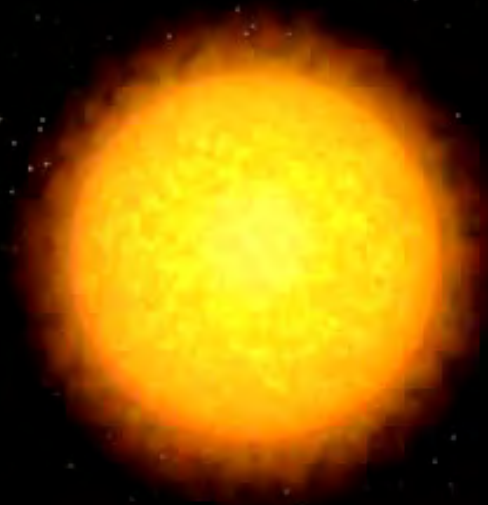
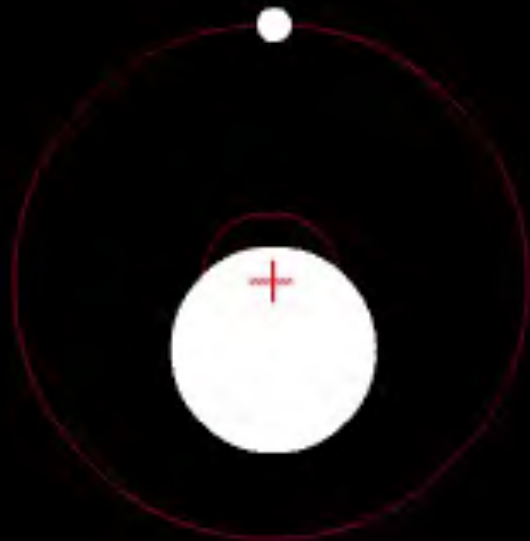
The presence of a Jupiter-mass companion to the star 51 Pegasi is inferred from observations of periodic variations in the star's radial velocity. The companion lies only about eight million kilometres from the star, which would be well inside the orbit of Mercury in our Solar System. This object might be a gas-giant planet that has migrated to this location through orbital evolution, or from the radiative stripping of a brown dwarf.

(太陽に似た恒星の周りの) 系外惑星の初発見：51Peg b  
4.2日というとんでもない短周期で公転していた！ (ホットジュピター)



2019年ノーベル物理学賞受賞  
ディディエ・ケローとミシェル・マイヨール

# 系外惑星検出方法



## ■ 視線速度法

- 惑星の公転に同期して中心星の速度が毎秒数十メートル程度、周期的に変動

## ■ トランジット法

- 中心星の正面を惑星が横切ることによって星の明るさが1パーセント程度周期的に暗くなる

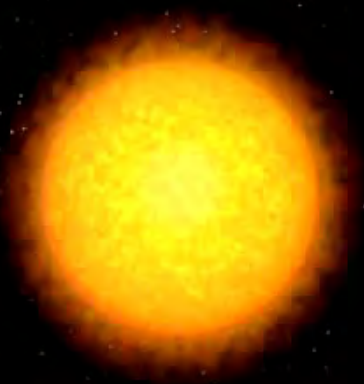
## ■ 直接撮像

- 中心星の光を隠して惑星の光を分離

## ■ 重力レンズ

# 宇宙は惑星で満ちていた

トランジット専用観測衛星ケプラー (2009年打ち上げ)が、系外惑星観測データに革命をもたらした

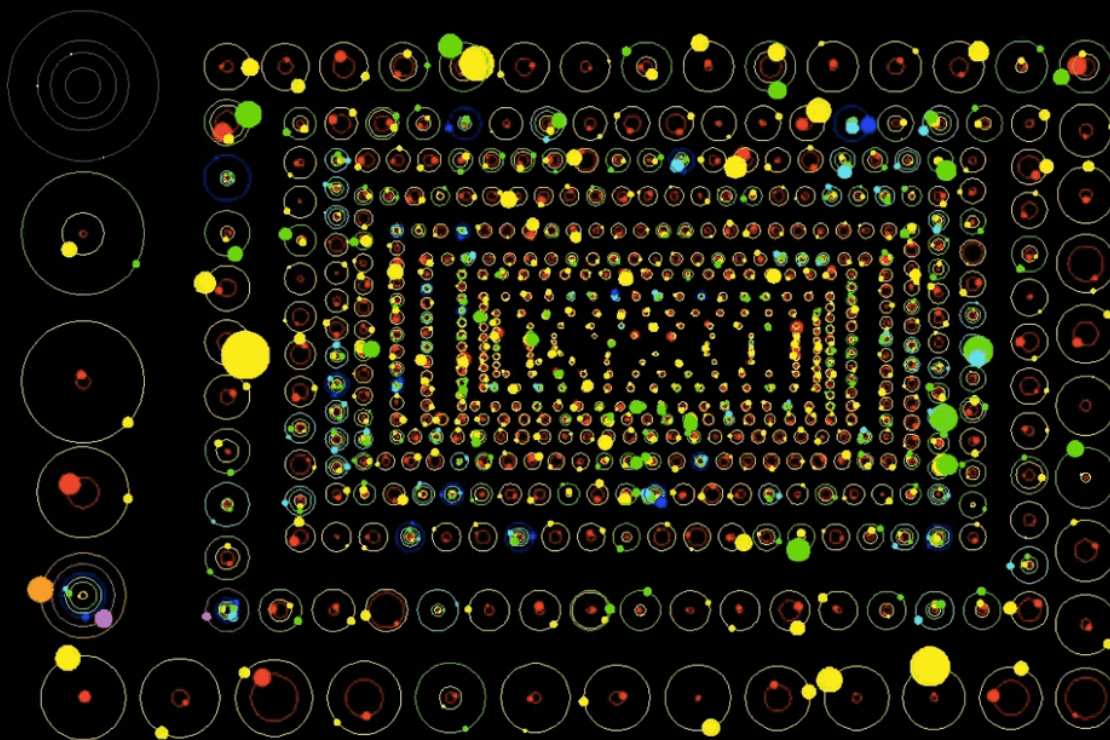


Kepler planets (August 3, 2015)

©NASA/Daniel Fabrycky

The Kepler Orrery III

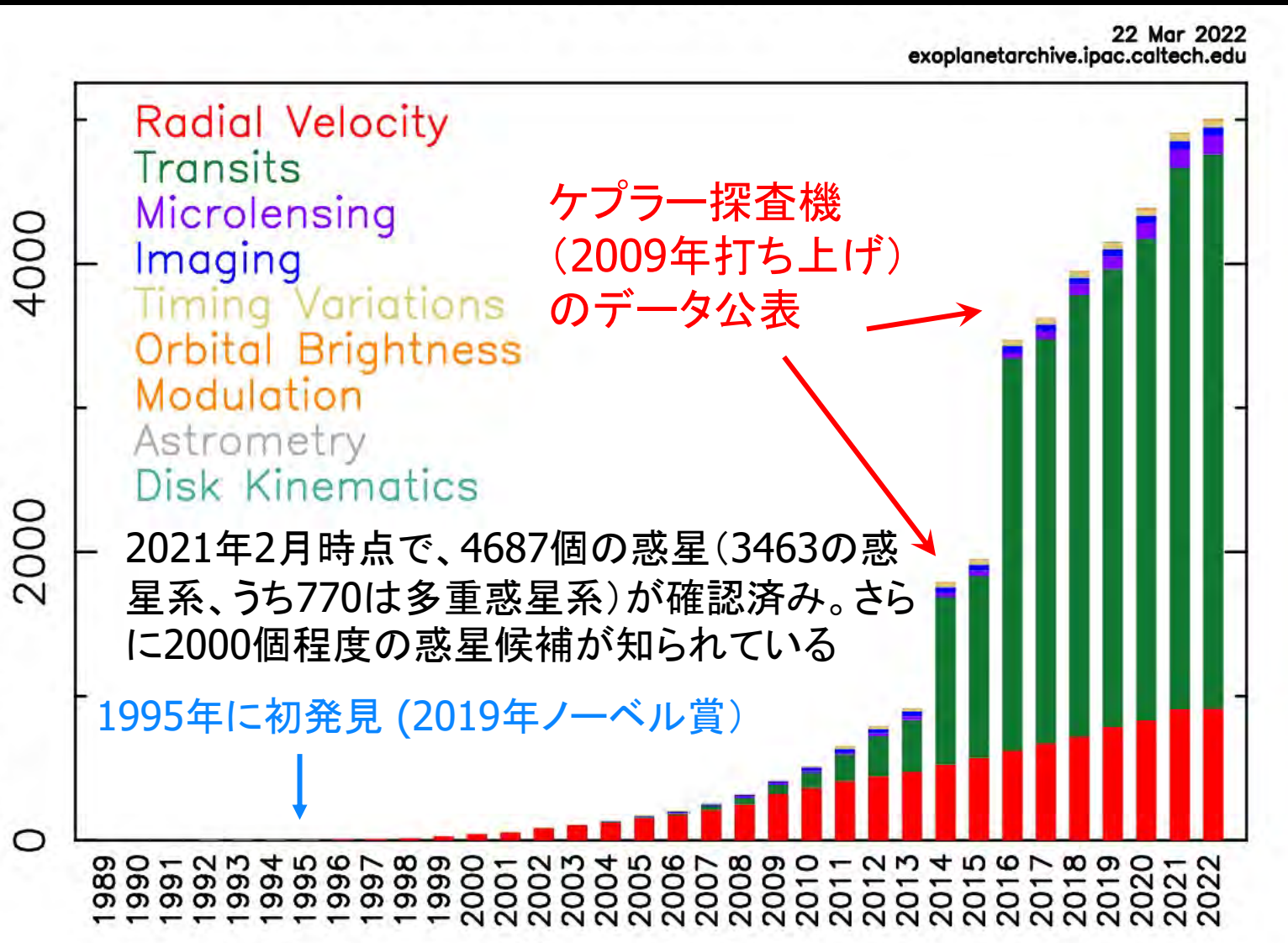
t[BJD] = 2455215



<https://solarsystem.nasa.gov/resources/311/kepler-orrery-iii/>

# 太陽系外惑星の発見年表

発見総数

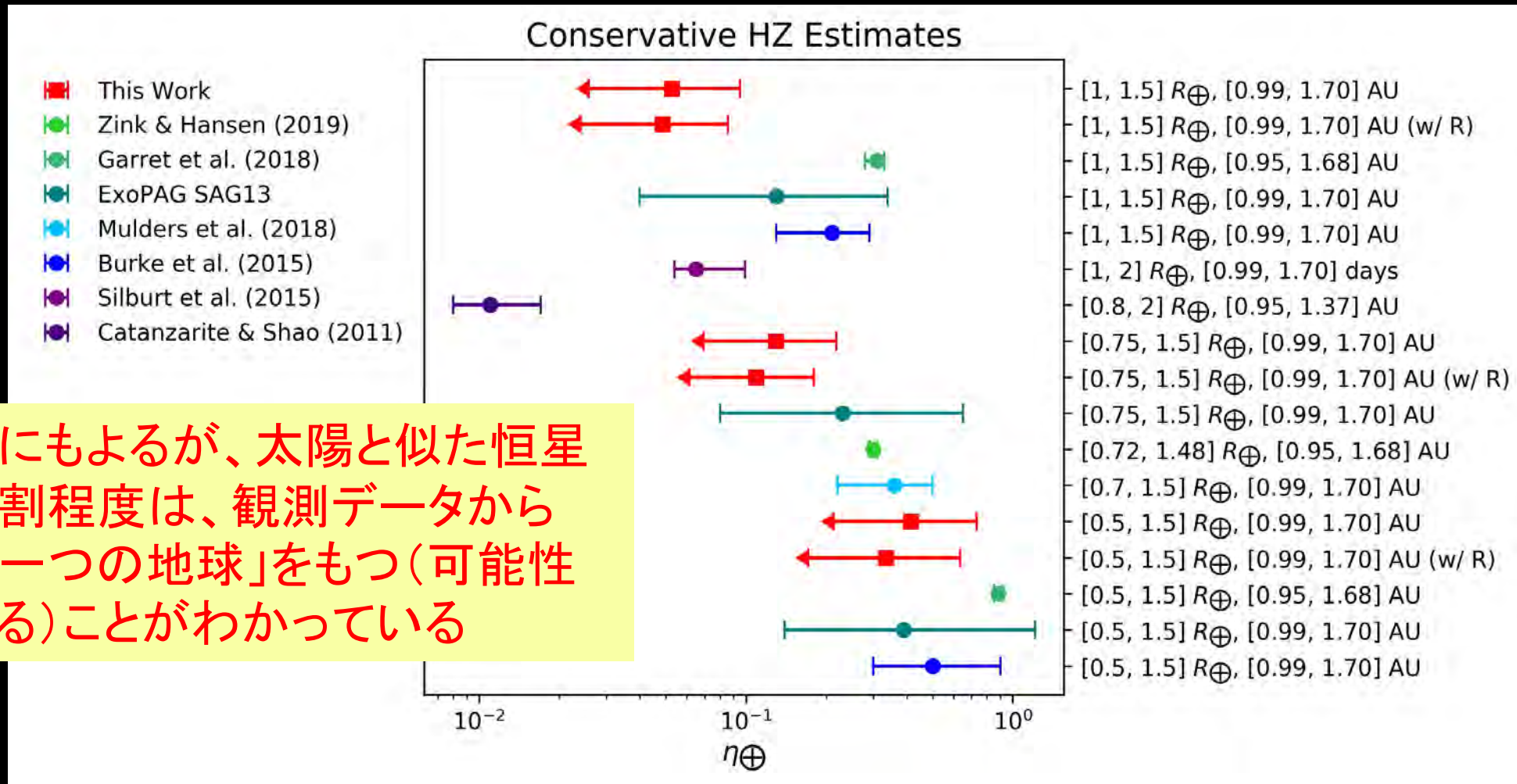


西暦

# 生命がいるかもしれない惑星候補



# ハビタブル惑星（定義は曖昧）の存在率



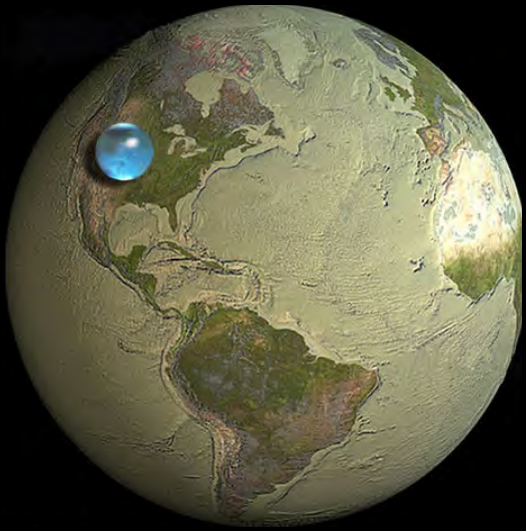
定義にもよるが、太陽と似た恒星の数割程度は、観測データから「もう一つの地球」をもつ(可能性がある)ことがわかっている

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

# バイオシグニチャーの同定が鍵： 水は必須なのか？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はならないわけでもない
  - 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
  - とはいえ、水という条件を外してしまうと、何でもあり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、宇宙における生命の普遍性とその定義に依存する（つまりわからない）





# 宇宙は「地球」で満ちている？

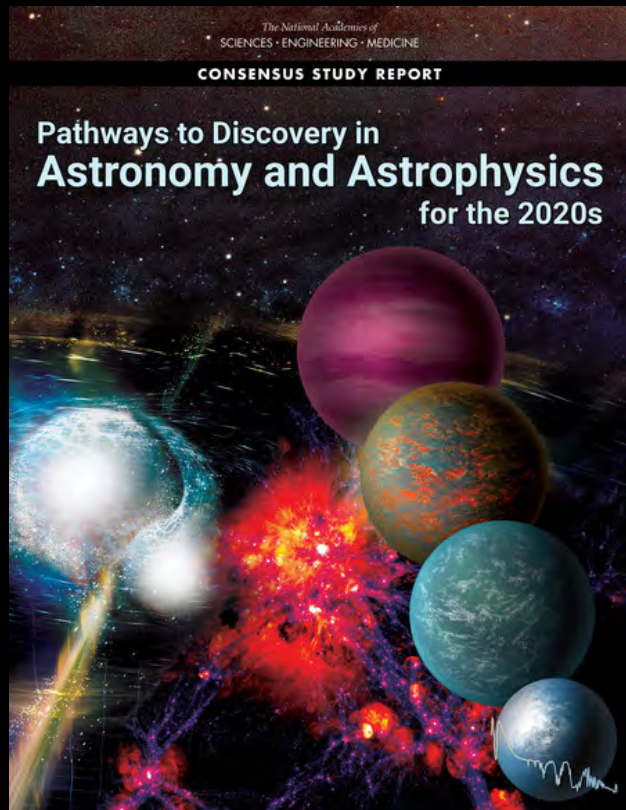
- 天の川銀河系内の恒星の数= $10^{11}$ 個（千億個）
  - その1割の $10^{10}$ 個が太陽と似た恒星
  - さらに太陽に似た恒星の1割がハビタブル惑星を持つ
- 天の川銀河系内のハビタブル惑星の数= $10^9$ 個
  - 観測できる範囲の宇宙内の銀河の数= $10^{11}$ 個
- 宇宙内のハビタブル惑星の数= $10^{20}$ 個（1垓個）
  - ハビタブル惑星に生命が存在する保証は全くない
  - 本当に生命が生まれるための条件は知られていない（適度な割合の海と陸＋数多くの偶然？）
  - しかしこれほど膨大な数の惑星がある以上、この地球だけに生命がある考えるのはかなり不自然(傲慢)では？

# 4 リモートセンシングと バイオシグニチャー

# 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

# 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

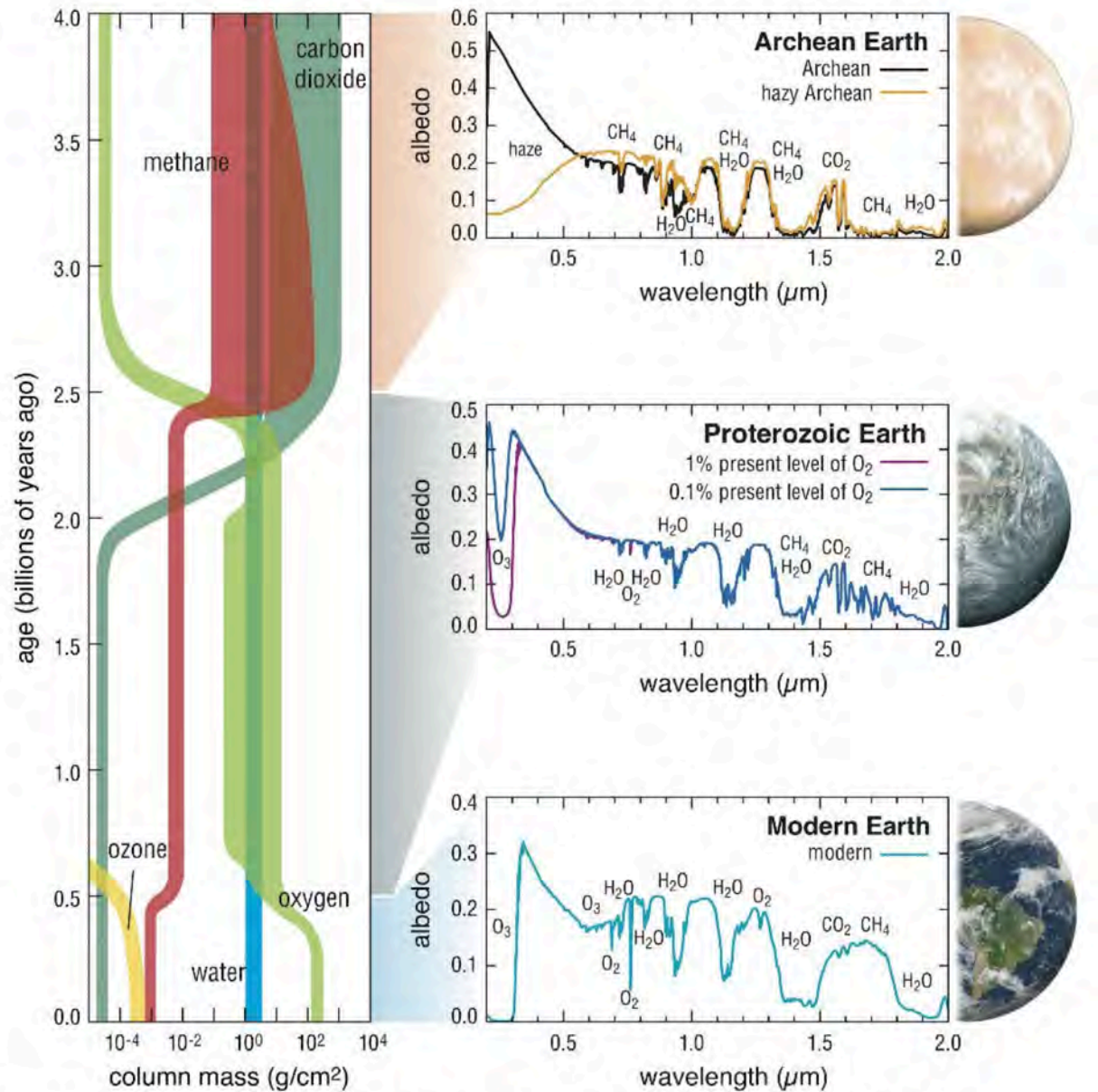
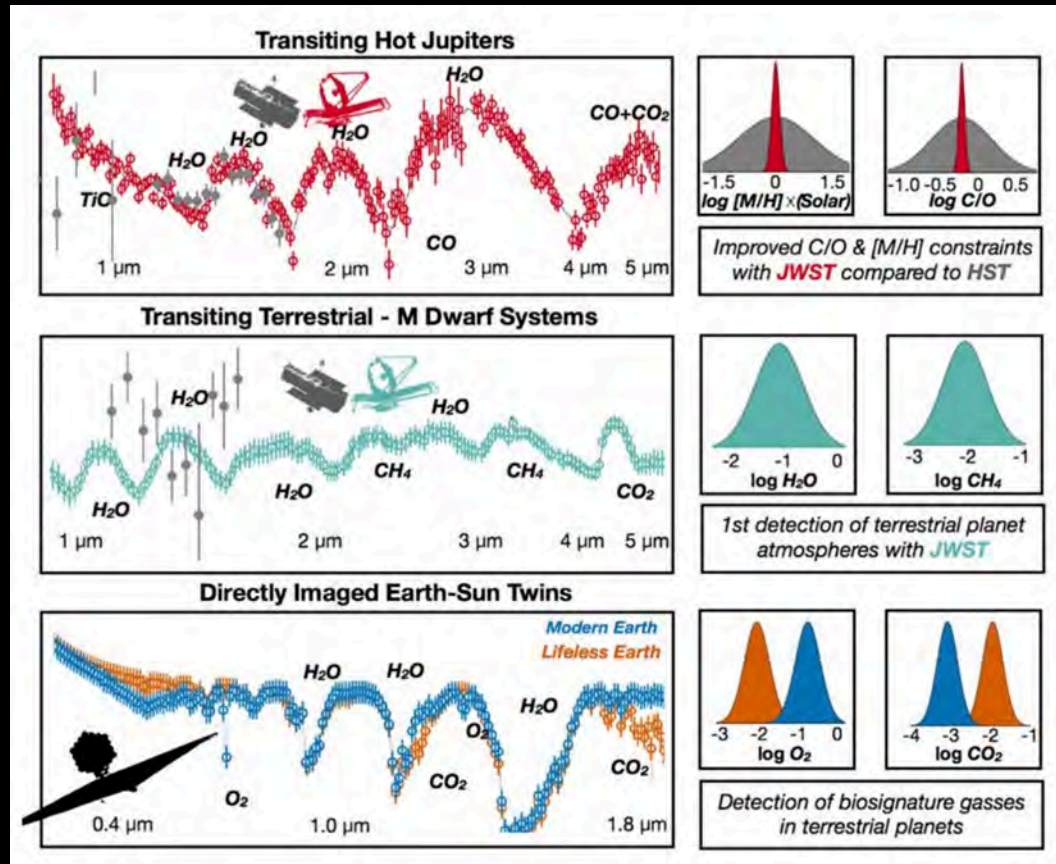
<https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020>

# 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**

# Exoplanet spectroscopy and evolution of the reflectivity spectrum of Earth



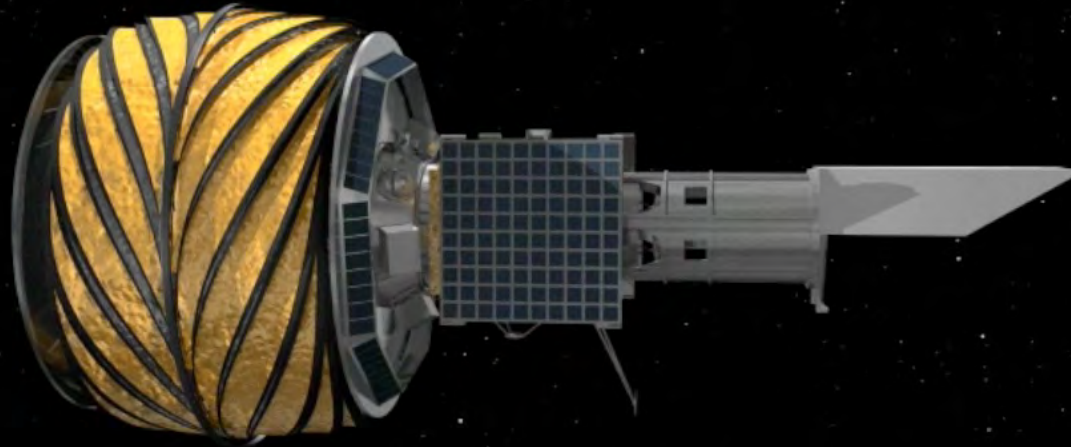
**FIGURE 1.1** Evolution of the reflectivity spectrum of Earth. Simulated spectra of Earth before life had significantly altered its atmosphere (top, Archean era 2.5 to 5 Gyr ago), before the development of complex life (middle, Proterozoic era from 0.54 to 2.5 Gyr ago), and the modern oxygen-bearing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

# 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

# Starshade project : 地球型惑星を直接見る



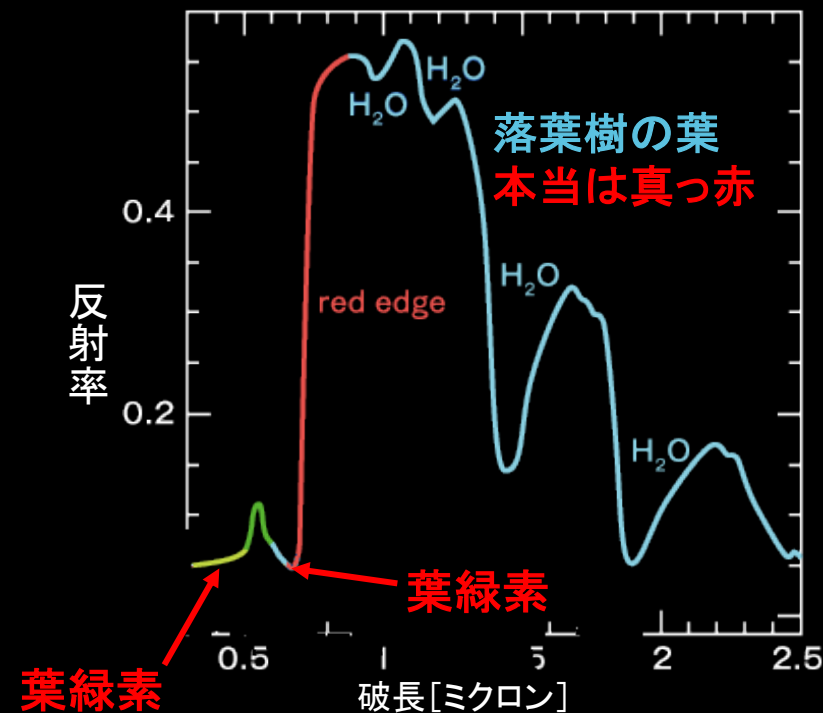
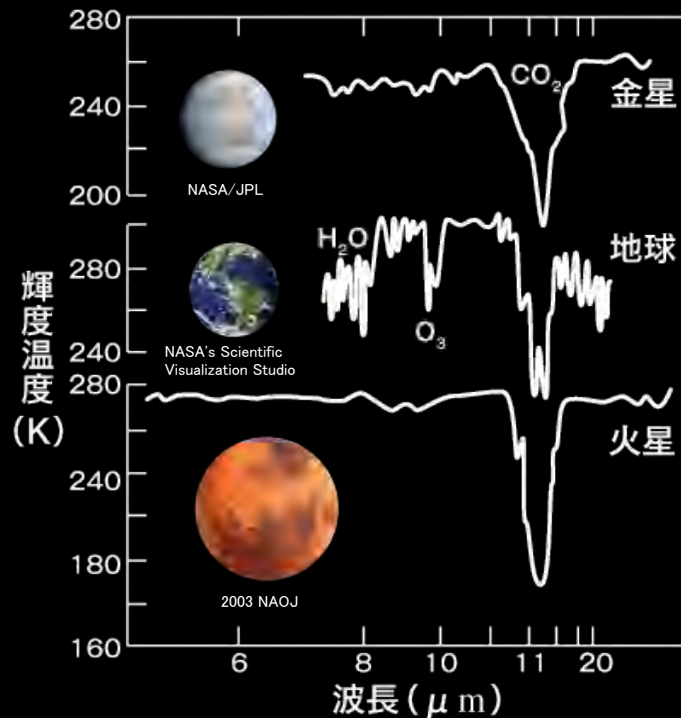
- 宇宙望遠鏡の5万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおき惑星を直接撮像 (プリンストン大学 J.Kasdin)



# バイオシグニチャー：生物が存在する兆候

## ■ 地球上生命の指標

- 生物由来と考えられる大気成分（酸素、オゾン、メタン）
- 植物のレッドエッジ地上の植物のほとんどは700nmより長波長で反射率が急激に増加する



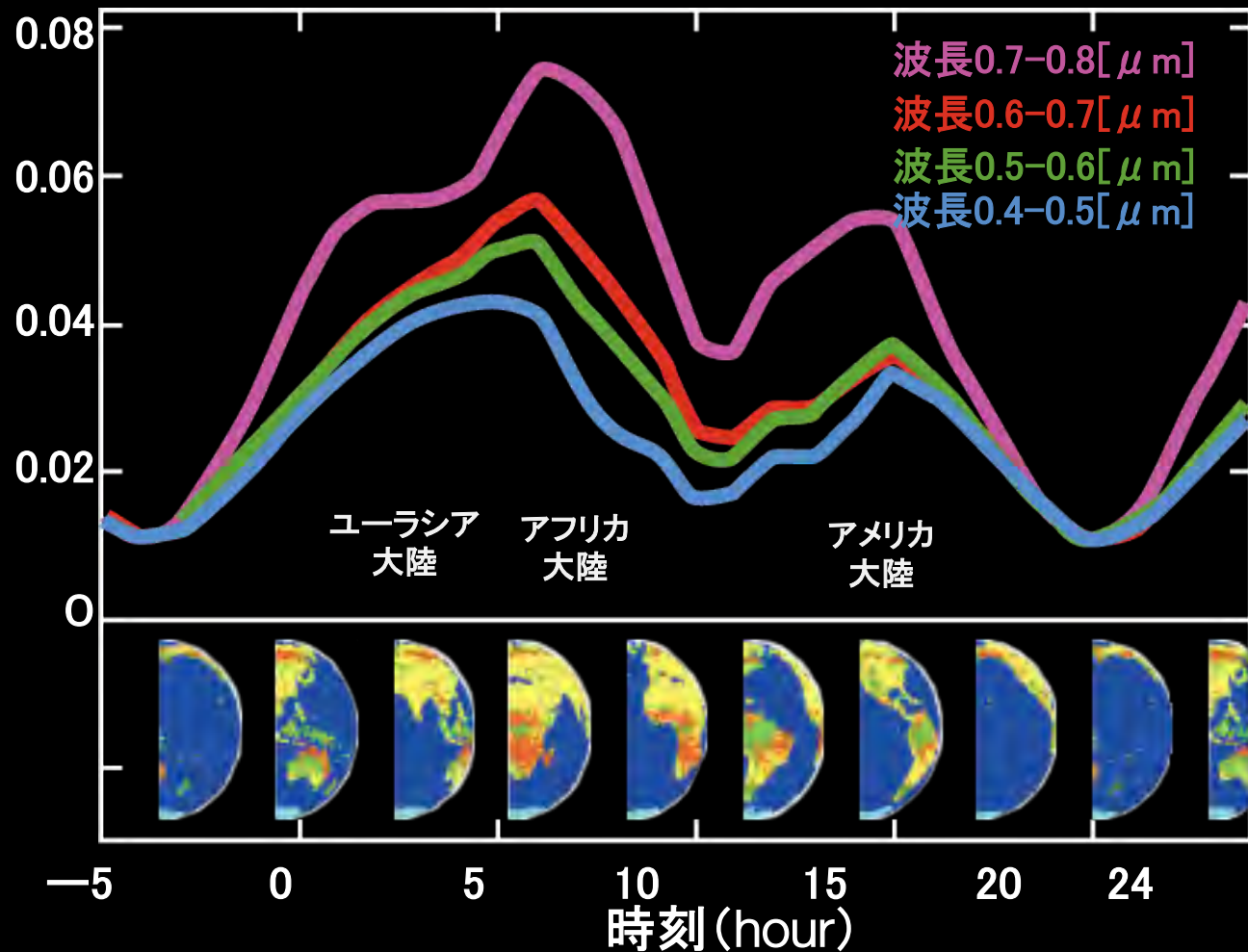
# もうひとつの地球の色

地球の自転にともなう反射光の色変化シミュレーション

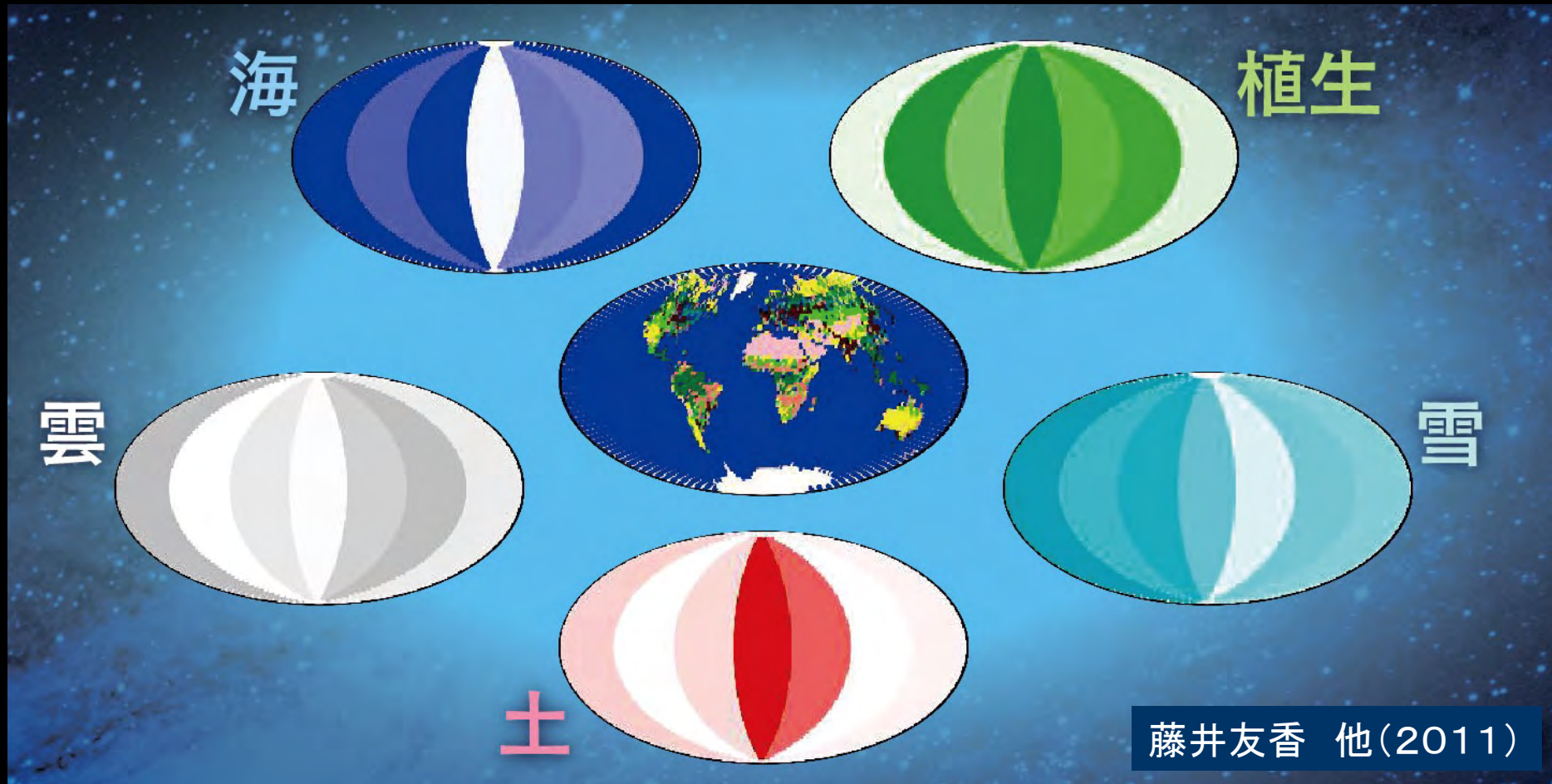
藤井友香 他 (2010)



反射率



# 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 地球外文明探查

# 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（低周波数側は銀河系のシンクロトロン放射、高周波数側では地球大気が雑音となる）
- 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



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

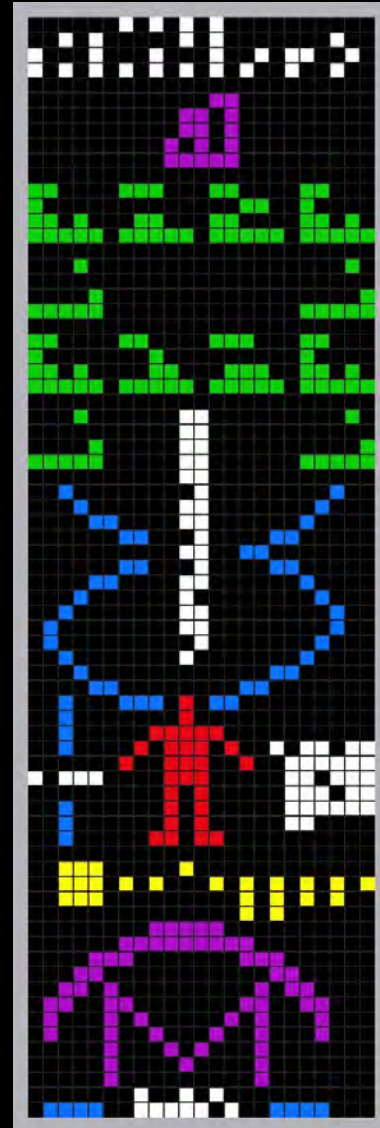
その知的生命が他の文明と交信を行う確率

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

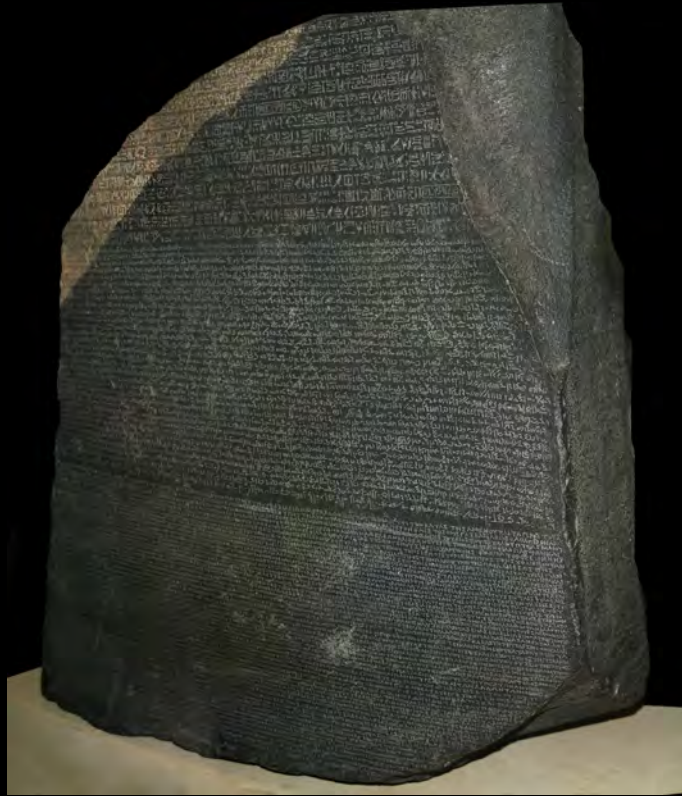
# 地球文明の存在を知った三体人

- 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、膨大な量の日本語文書を与えたとして、解読できるようになるのか？
  - 原理的にであれ、遠隔で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
  - もっとも近い地球外文明までの距離であれ（天の川銀河のサイズは数万光年程度）、返信したときには生命や文明が滅亡している可能性が高い
  - 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）

# 6 まとめ

# 天文学の進歩：惑星系の多様性と普遍性

- 惑星系はフツーに存在する
  - 太陽と似た恒星の7割以上が惑星を持ち、2割以上は複数の惑星を持つと推定されている
- 太陽系と似た系もちょーかけ離れた系も存在
  - 恒星を数日で公転する巨大ガス惑星（ホットジュピター）
  - 大きな離心率の惑星（エキセントリックプラネット）
  - 地球程度の岩石惑星（スーパーアース）
  - 水が液体として存在できる温度のハビタブル惑星
- 普遍性と多様性の起源と進化 ⇒ 物理学
- 我々の地球以外に生命が存在するか？ ⇒ 宇宙生物学

# 宇宙物理学発、系外惑星経由、宇宙生物学着の旅

- 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）信号かもしれない
- 本当に受信したときどうするか考慮しておくべき
  - ビッグデータから言語を抽出する非学習的アルゴリズム

# 宇宙を**学**び世界を**問**う

- 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」
- 天文学・宇宙物理学の**進歩** ⇔ **新たな世界観**
  - 宇宙と生命の誕生・進化
- **偶然と必然の間**
  - 世界は普遍性と多様性をあわせもつ

*Everything not forbidden by the laws of nature is mandatory*  
— Carl Sagan, *Contact*

# 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。



# 参考文献



朝日新書 2022年



東京大学出版会  
初版 2006年 第2版 2021年



講談社ブルーバックス 2019年