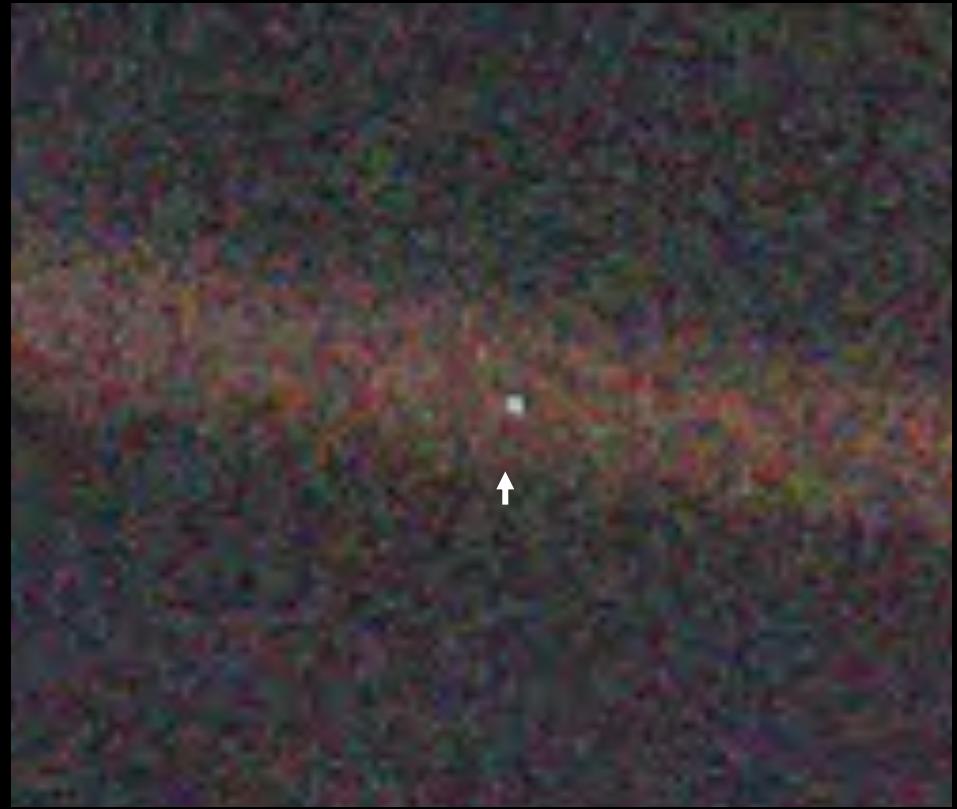
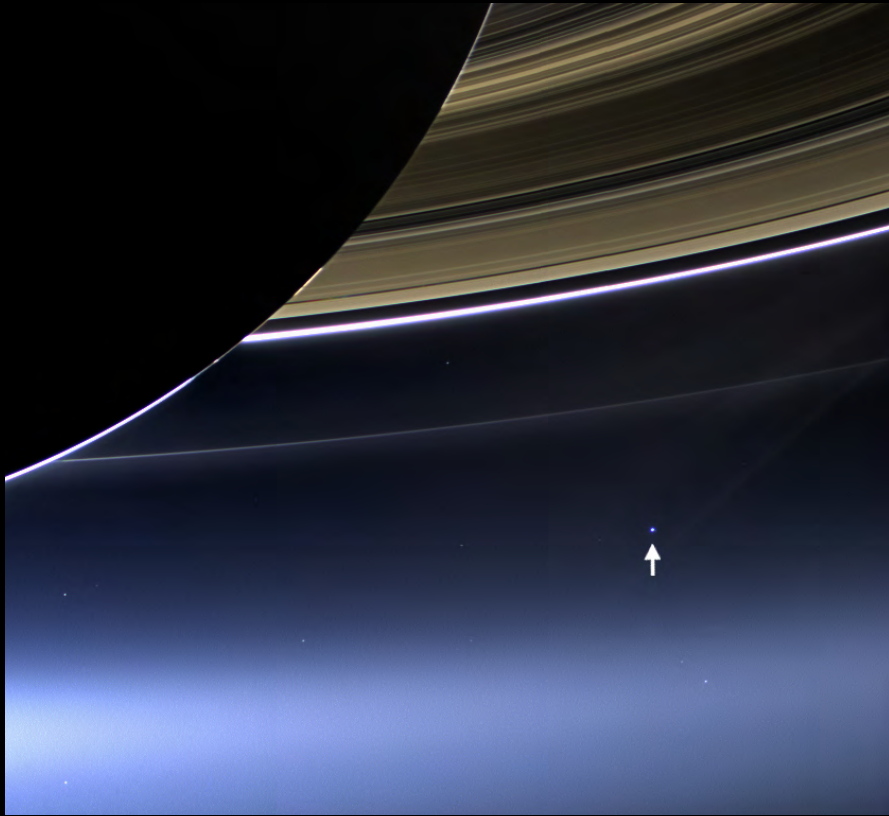


# 地球外生命の探し方



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

丸善市民大学 第9回講義

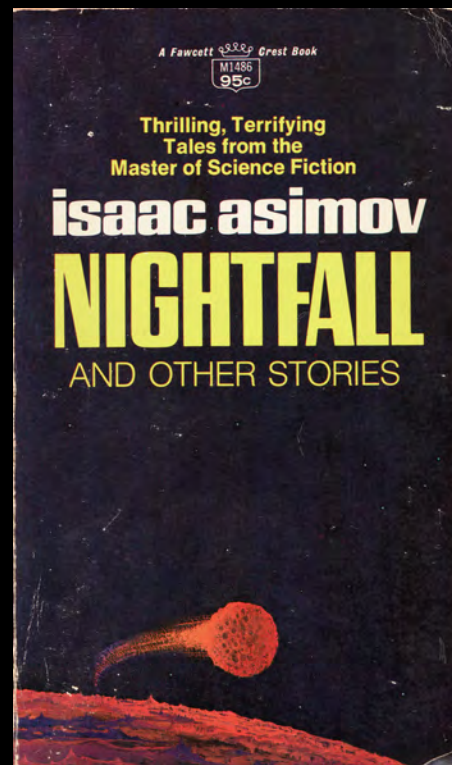
2019年12月18日 19:00-20:00@丸善池袋店

# 1 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*

# 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」



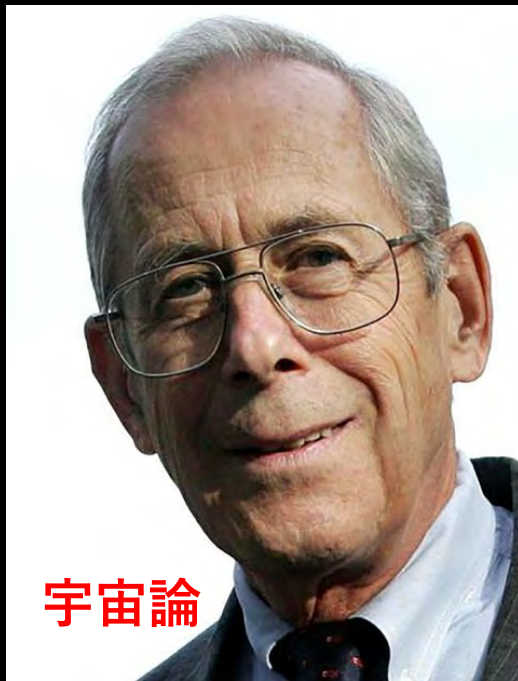
- その瞬間に彼らの世界観が一変した
- 宇宙を見る=自分自身の住む「世界」を知る

イラスト:羽馬有紗

# 2019年ノーベル物理学賞

- 宇宙の進化と宇宙におけるこの地球の立ち位置に関する人類の理解への貢献

(Contributions to our understanding of the evolution of the universe and Earth's place in the cosmos)



宇宙論



太陽系外惑星

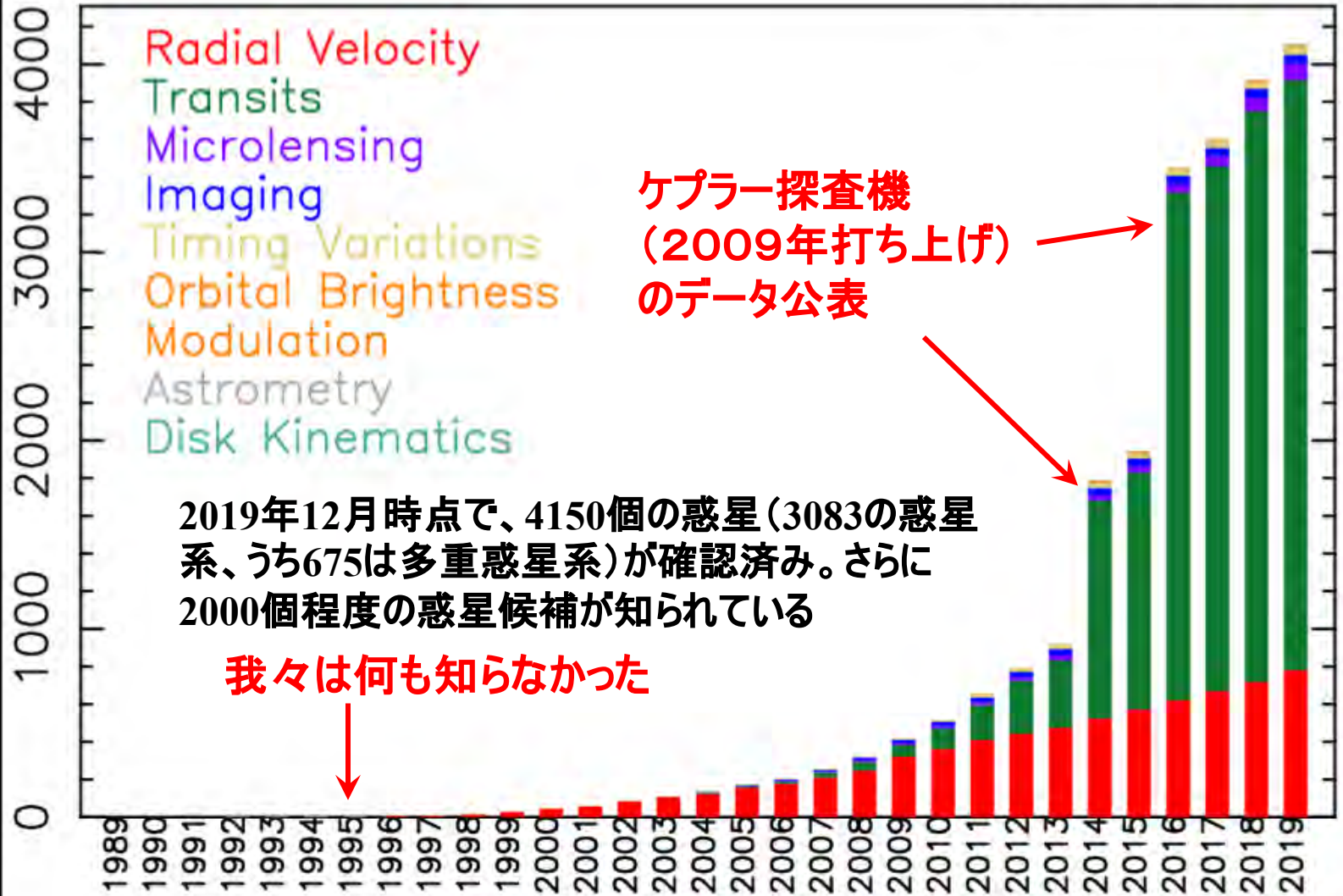


ジェームズ・ピーブルズ ミシェル・マイヨール ディディエ・ケロー

# 系外惑星の発見年表

05 Dec 2019  
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

発見総数



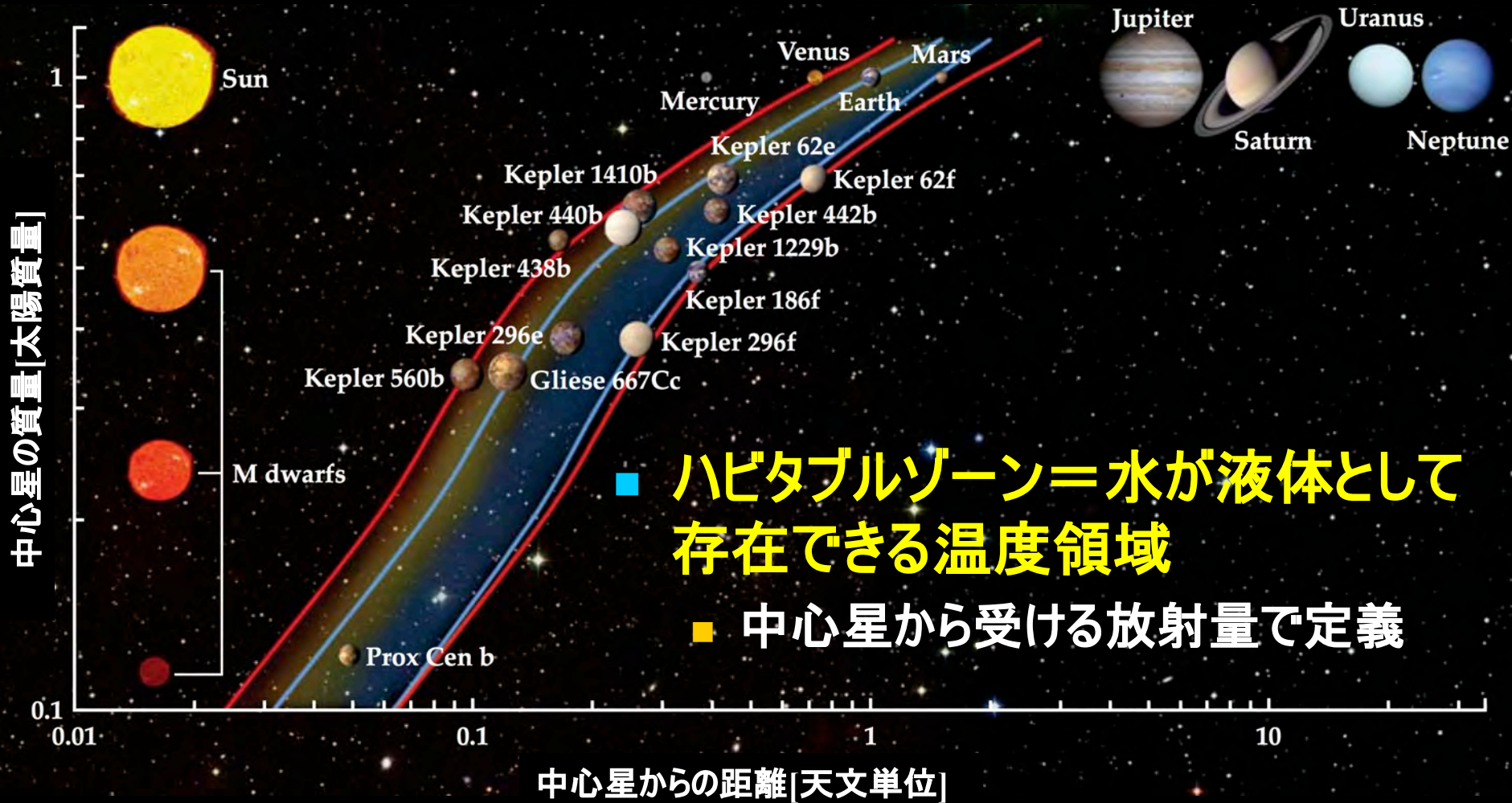
ケプラー探査機  
(2009年打ち上げ)  
のデータ公表

2019年12月時点で、4150個の惑星(3083の惑星系、うち675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

# 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

## 2 宇宙植物学と火星

*the origin of life now seemed to be so easy--and there were so many planetary systems, so many worlds and so many billions of years available for biological evolution--that it was hard to believe the Galaxy was not teeming with life and intelligence.*

*— Carl Sagan, Contact*

# 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.Tikhov 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）
  - 火星の表面にクロロフィル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.Tikhov 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

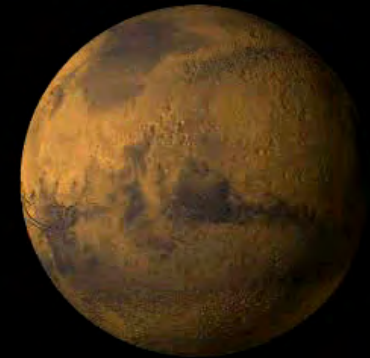
# ヴェスト・スライファー



- 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・スライファース (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.

# 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/>

# 3 リモートセンシング

## わが地球の観測

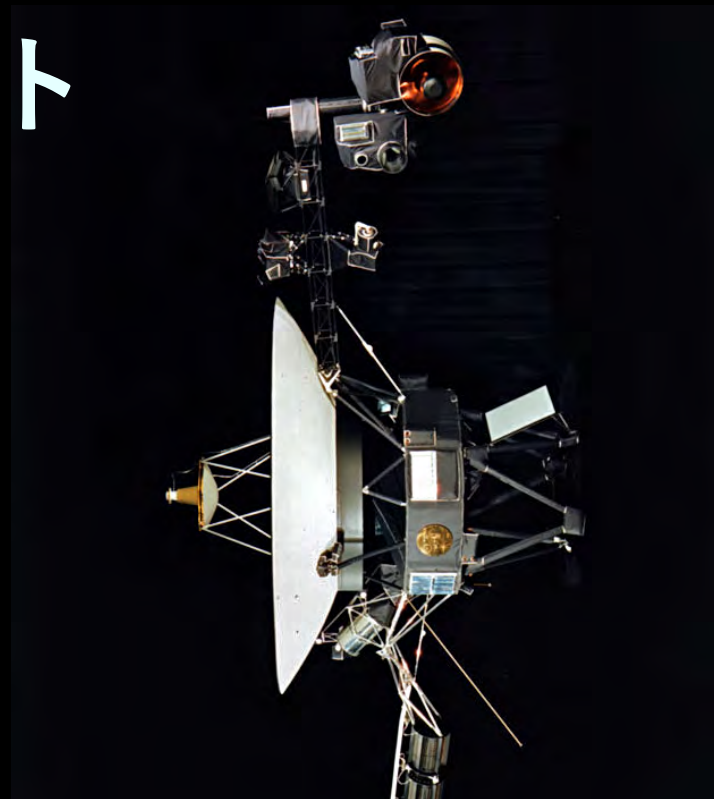
# カール・セーガン (1934-1996)



- 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”



# ペイル・ブルー・ドット



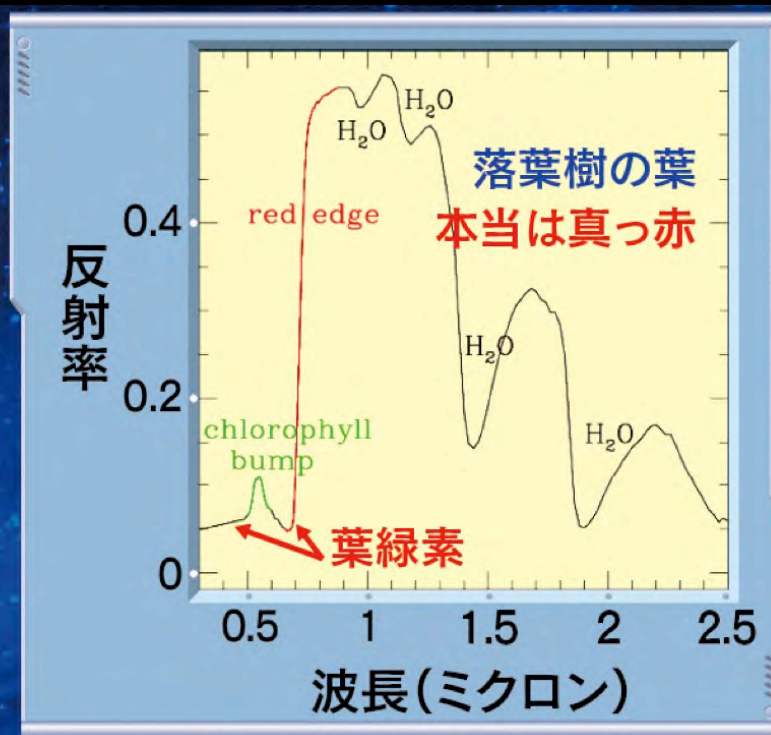
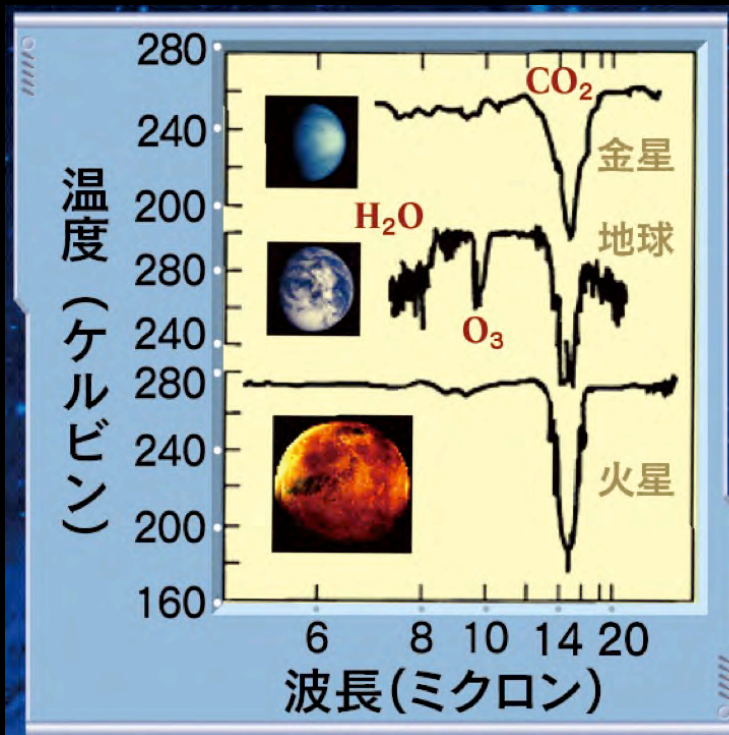


# 土星から 見た地球

- 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

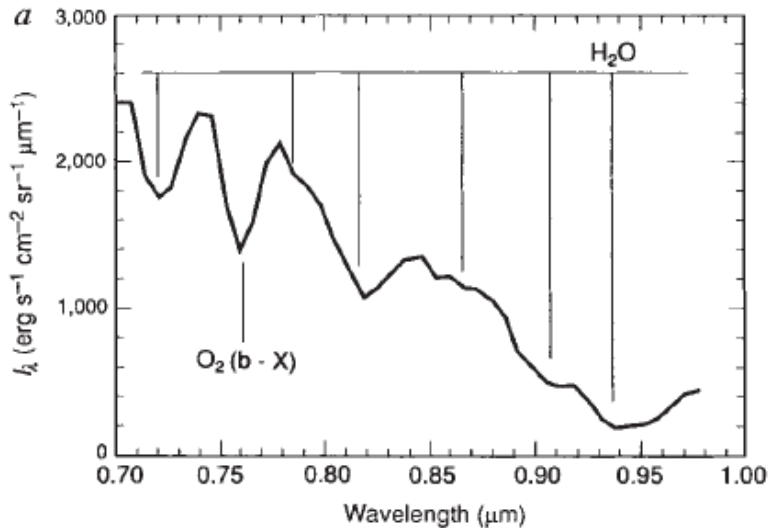
- 1986年5月打ち上げ
- 1990年12月8日一回目の地球スイングバイ時に地球上の“生命探査”
- 地球には生命がいるらしい!
  - 大量の気体酸素
  - 植物のレッドエッジ
  - 熱平衡から極端にずれた大気中のメタンの存在量
  - 狭帯域で振幅が変化する”不自然な”パルス状電波(通信信号)



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

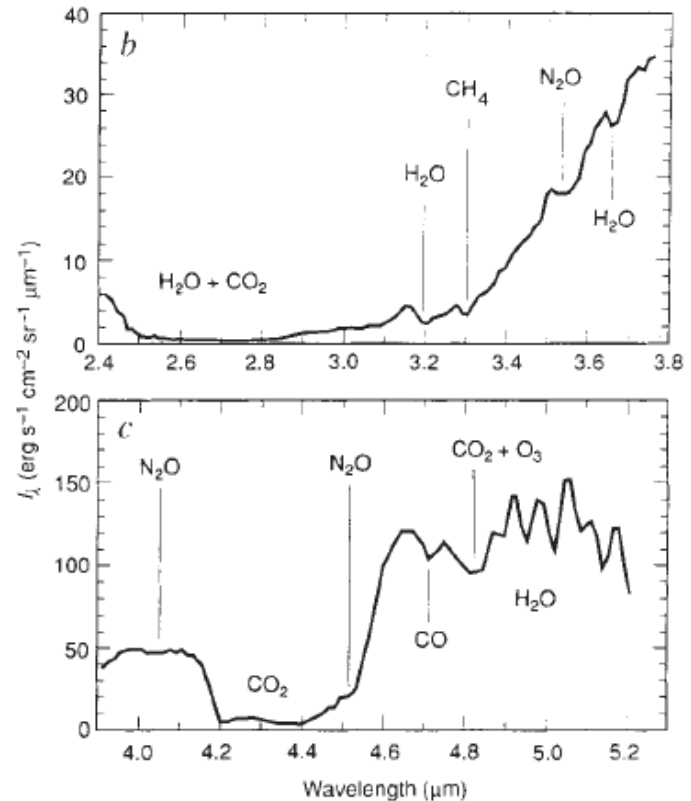
# Sagan et al. (1993): 大気分光

## 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)

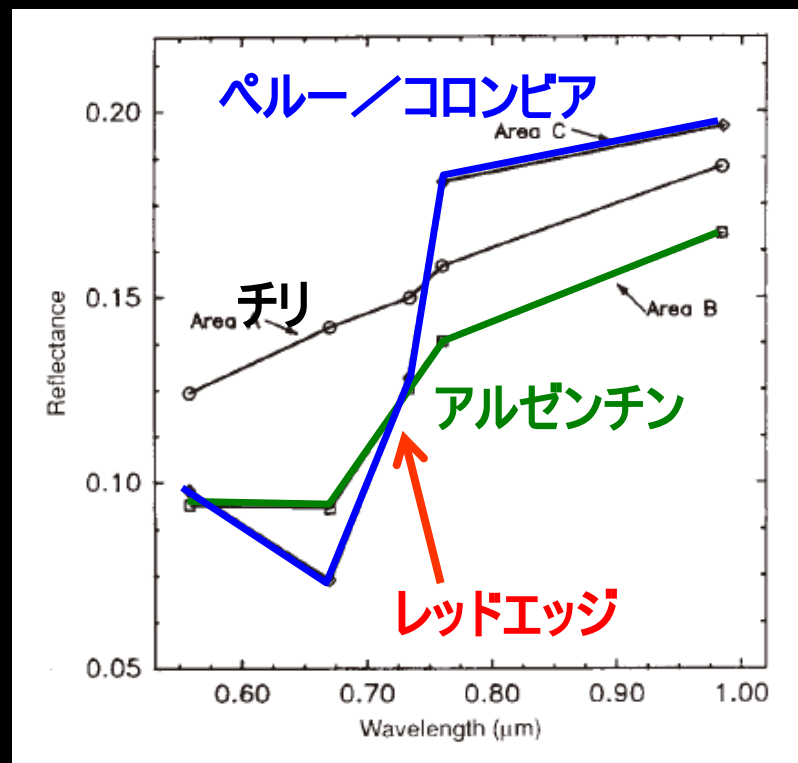
FIG. 1 a, Galileo long-wavelength-visible and near-infrared spectra of the Earth over a relatively cloud-free region of the Pacific Ocean, north of Borneo. The incidence and emission angles are  $77^\circ$  and  $57^\circ$  respectively. The  $(b^1\Sigma_g^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-)$  O<sub>2</sub> at  $0.76 \mu\text{m}$  is evident, along with a number of H<sub>2</sub>O features. Using several cloud-free regions of varying airmass, we estimate an O<sub>2</sub> vertical column density of  $1.5 \text{ km-amagat} \pm 25\%$ . b and c, Infrared spectra of the Earth in the  $2.4\text{--}5.2 \mu\text{m}$  region. The strong  $\nu_3$  CO<sub>2</sub> 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  $\nu_3$  band of nitrous oxide, N<sub>2</sub>O, is apparent at the edge of the CO<sub>2</sub> band near  $4.5 \mu\text{m}$ , and N<sub>2</sub>O 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 estimate<sup>10</sup> of the CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O column abundances is, for both species, of the order of  $1 \text{ cm-amagat}$  ( $\equiv 1 \text{ cm path at STP}$ ).

# Sagan et al. (1993): 撮像

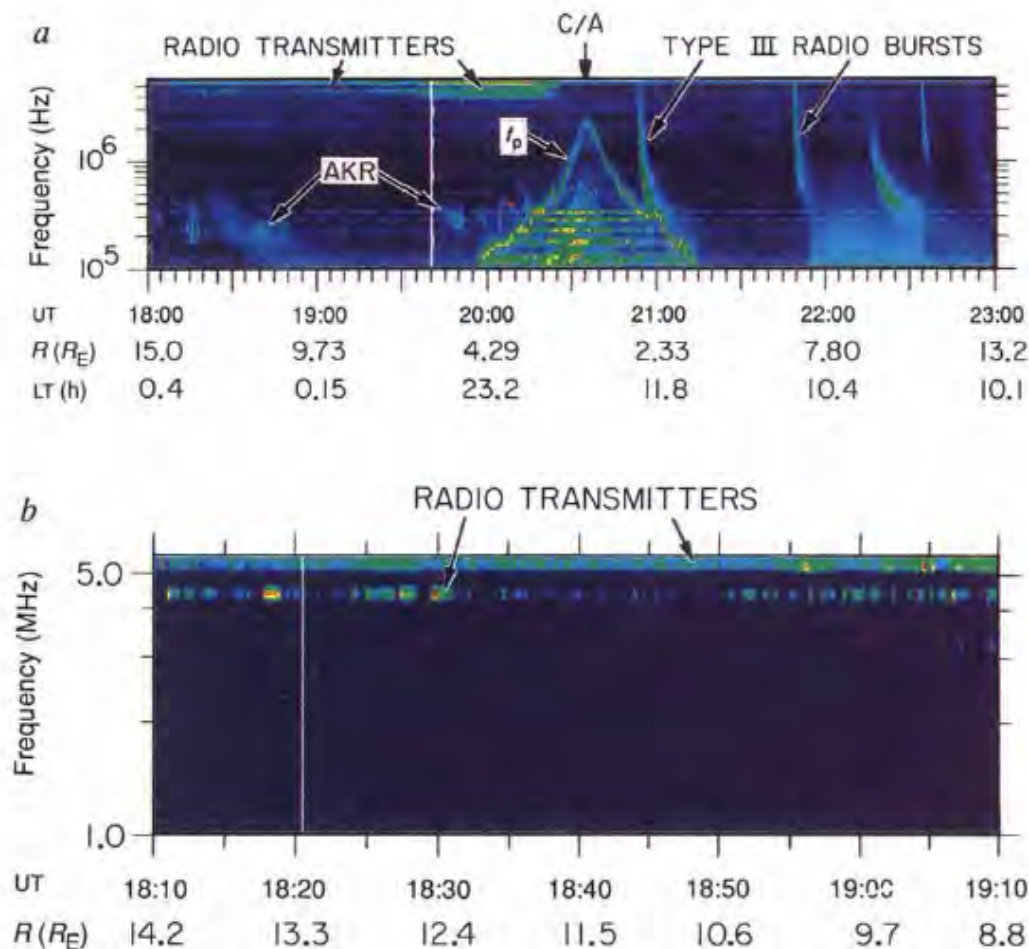
ガリレオ探査機の観測した地球のレッドエッジ



# 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.)

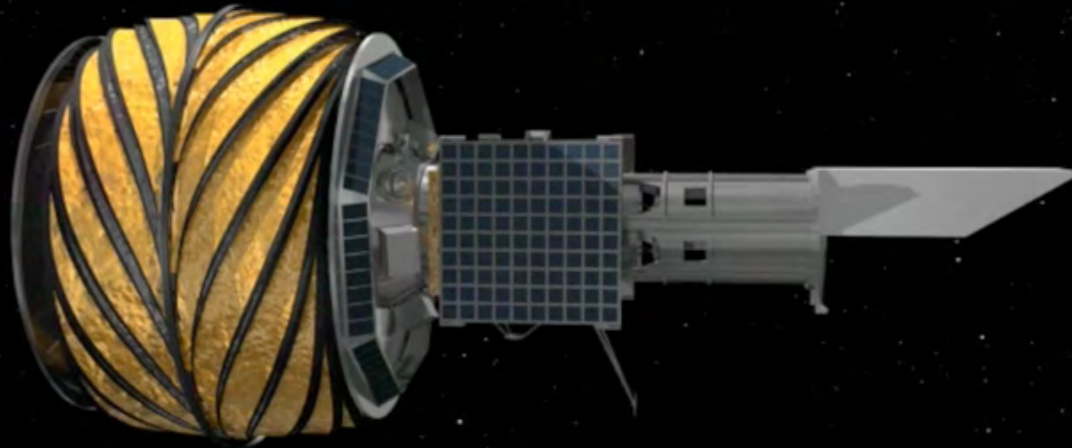


# 4 リモートセンシング

## 第二の地球の模擬観測



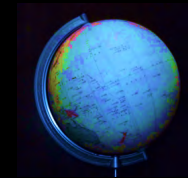
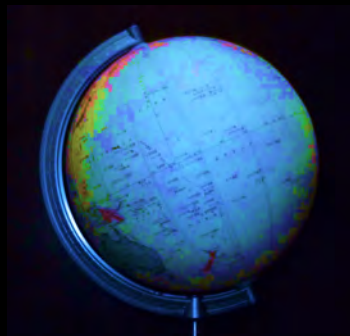
# Starshade project : 地球型惑星を直接見る



- 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）

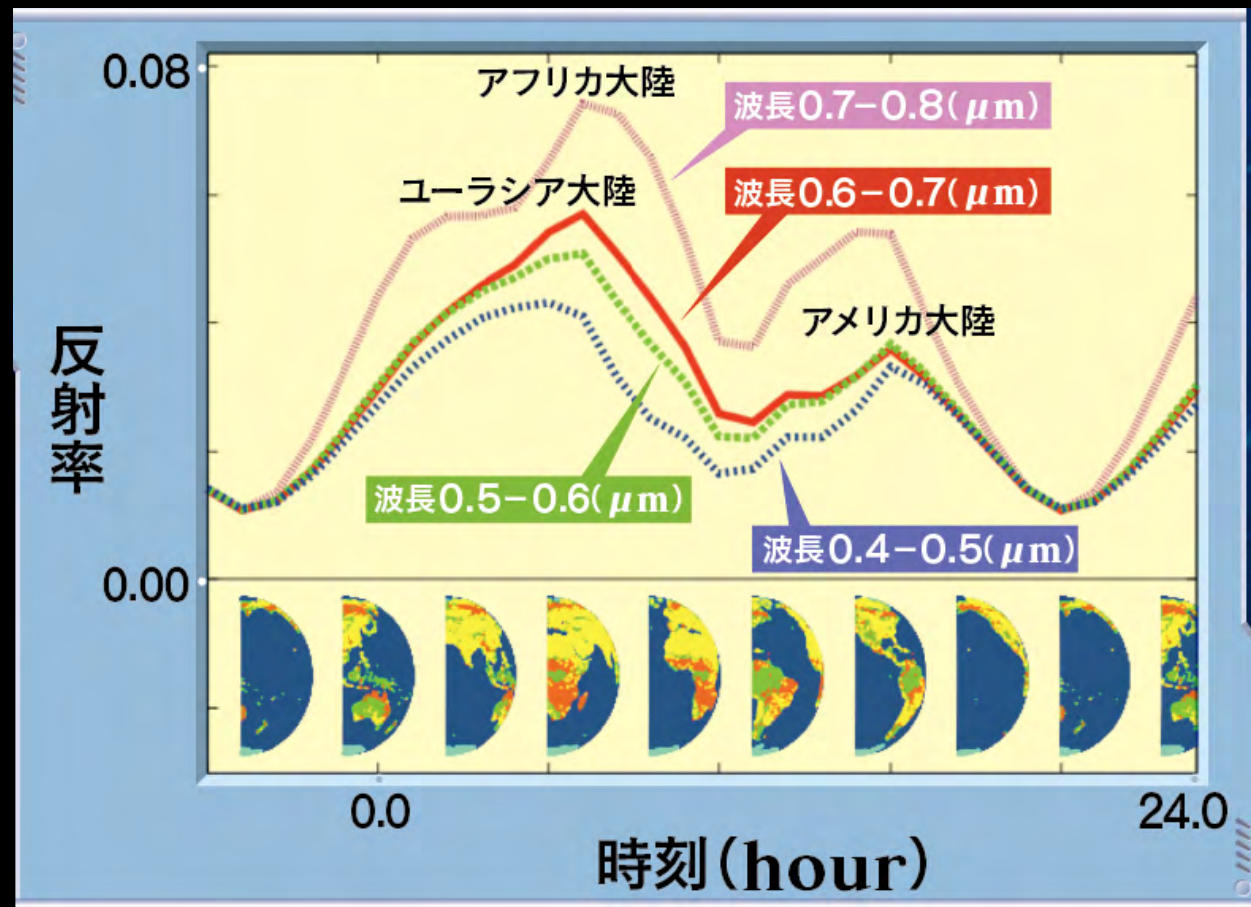
# ペイルブルードットを超えて

- 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



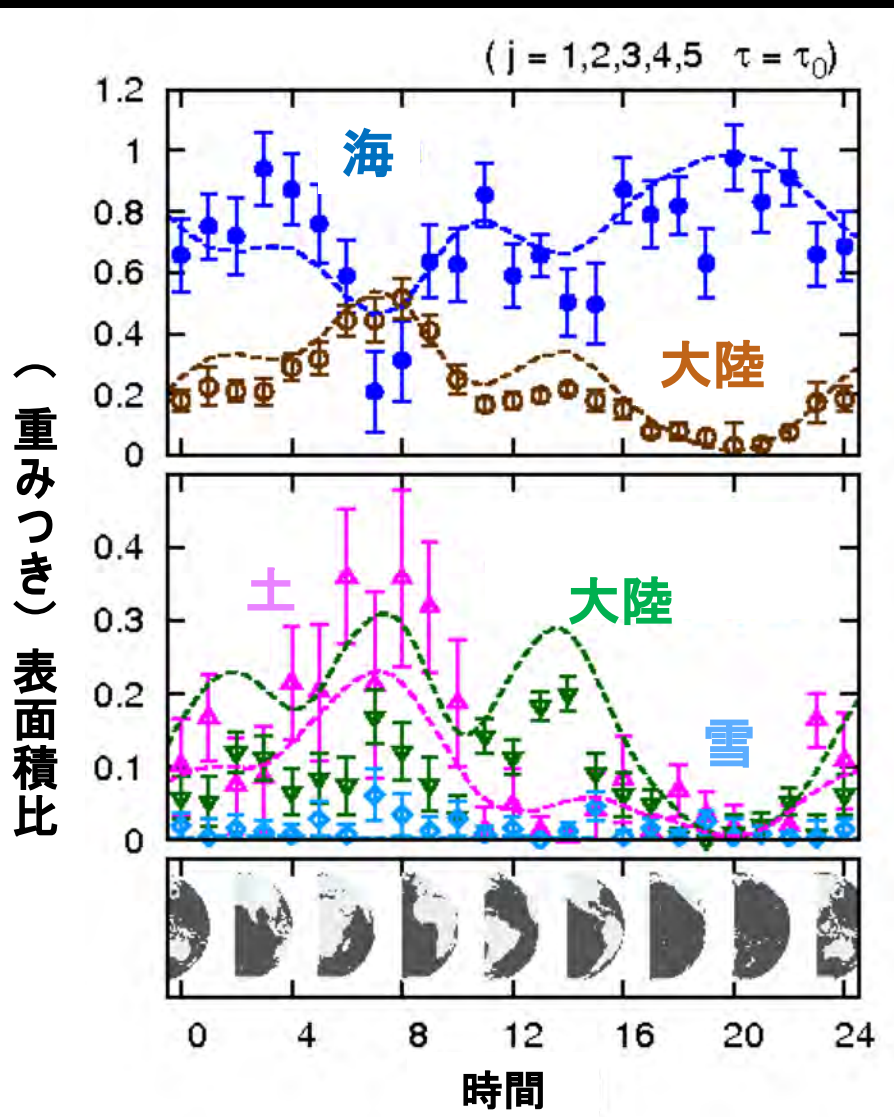
# もうひとつの地球の色

- 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

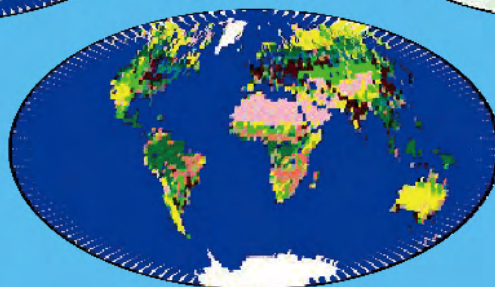
海



植生



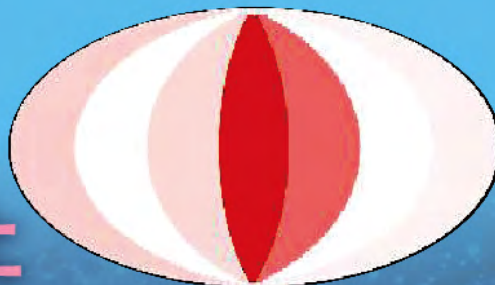
雲



雪



土



藤井友香 他(2011)

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

# 5 知的文明探查

**SETI:**

## **Search for Extra-Terrestrial Intelligence**

*"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*

# 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

数 銀河系内の（生命に適した）恒星の

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

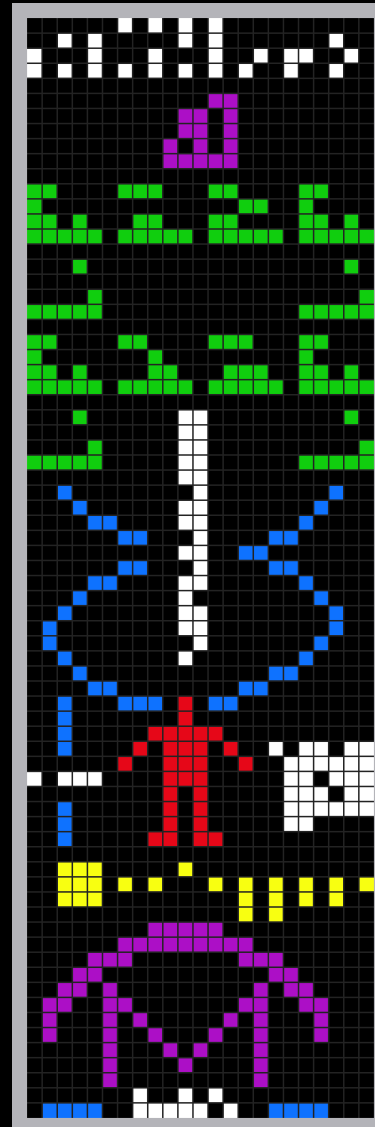
率 その知的生命が他の文明と交信を行う確率

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数Wのレーザーを放射してつくっている
  - 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

# 6 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*



# 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 $\alpha$  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>

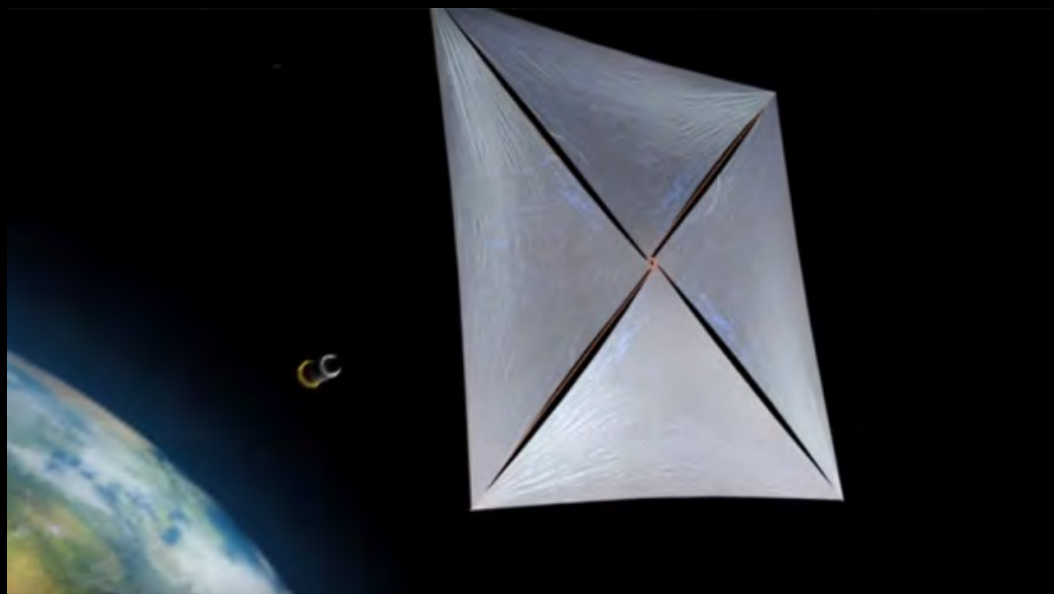
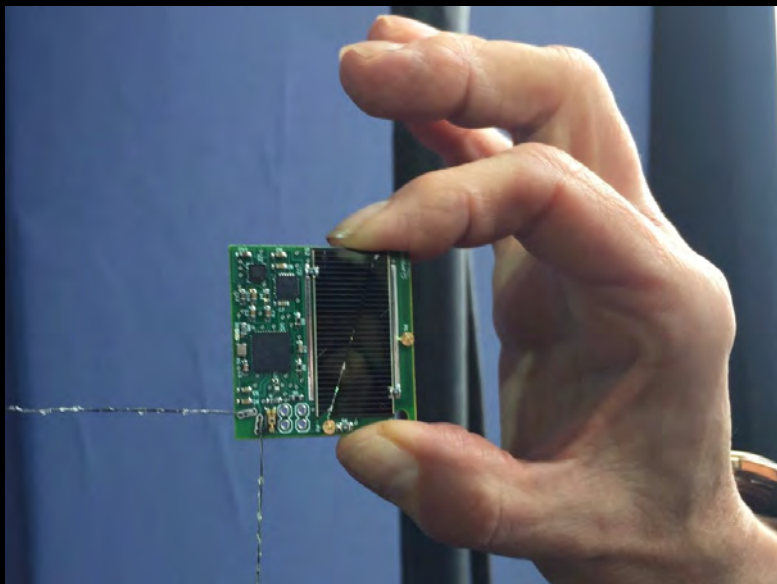
- **IT投資家ユリ・ミルナー**（素粒子理論で学位取得、資産4000億円）が地球外知的生命探査のため、2015年7月20日設立
  - **ブレイクスルーリッスン**：地球外文明の電波あるいはレーザーによる信号を受信
  - **ブレイクスルーメッセージ**：宇宙空間へ送るメッセージとして最適なものを提案するとともにその行為の哲学的倫理的妥当性を検討
  - **ブレイクスルースターショット**：ケンタウルス座アルファ星へ探査機群を送るための概念設計

# ブレイクスルースターショット

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

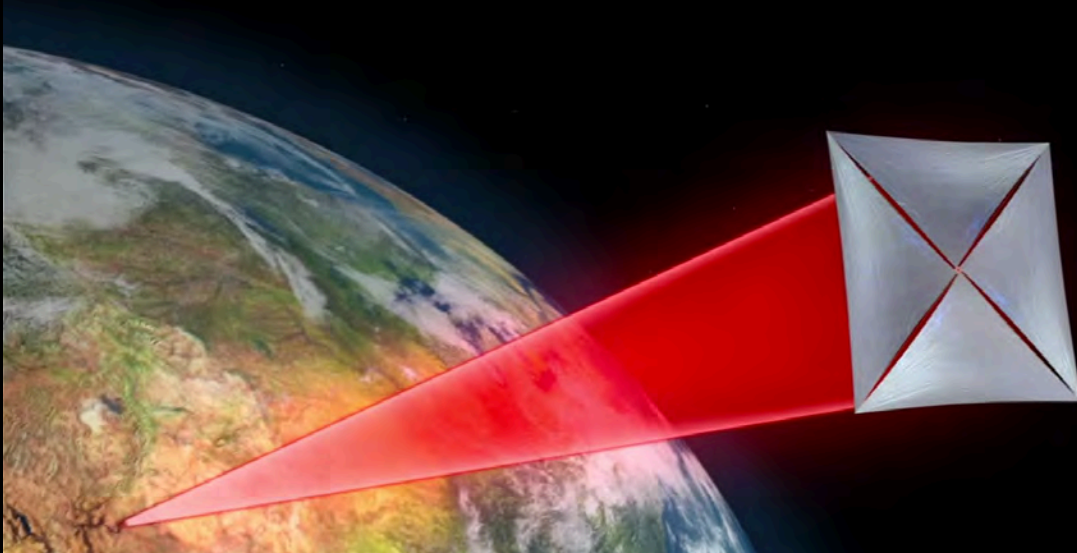
- スターチップ
  - 2cm x 2cm、数グラムで、カメラ、コンピュータ、通信用レーザー、燃料装置を搭載したチップ
  - 4m x 4m の帆に結びつけられ、それが地上からのレーザー光を受けて、約10分で光の20%の速度にまで加速される
- プロキシマ ケンタウリに1000個のスターチップを次々と飛ばす。約20年で到着する
- ただしこの技術はまだ存在しておらず、完成までに少なくとも今後20年の研究開発が必要

# スターチップ

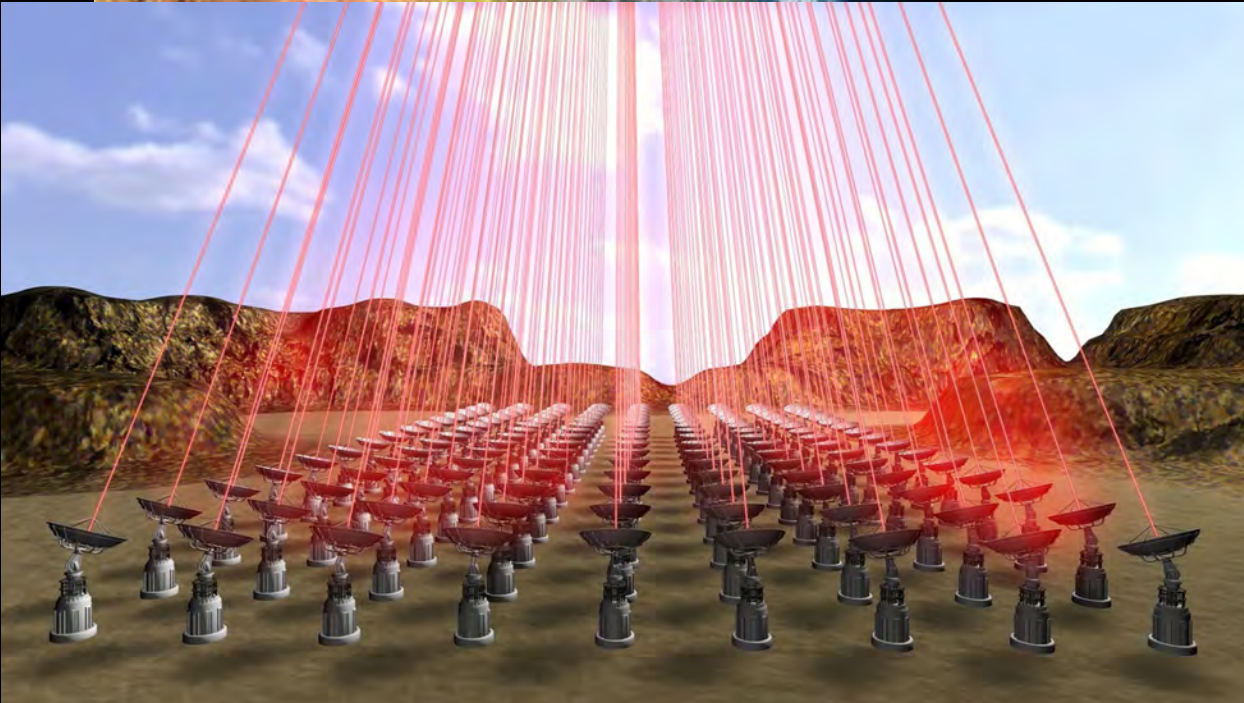




# 地上のレーザーで光速の20%に加速



- 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 今後の展望

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

# 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
  - 子供の頃には、スマホ、インターネット、ロボットペット、自動運転などは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

# 50年後の 世界？



# Carl Sagan, Contact

*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.*

*This is the first time when anybody's been able to look for extraterrestrial intelligence.*

*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?*