

系外惑星とバイオシグニチャー



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

青山学院大学 物理学科コロキウム

@ 相模原キャンパス

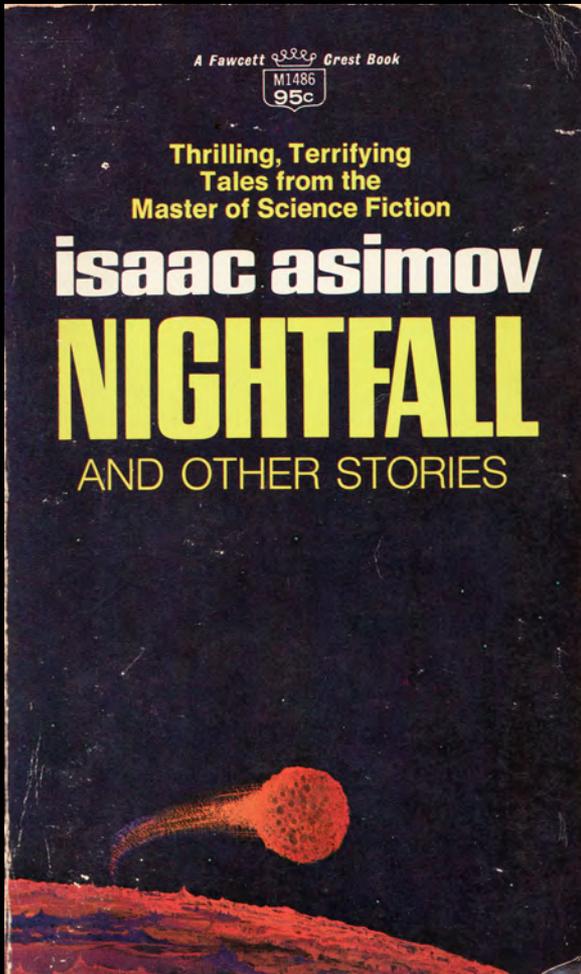
16:50-18:20 2018年10月11日

本日の話の概略

- 1995年、太陽以外の恒星に惑星があることが初めて観測的に証明された
 - それ以来、すでに約4000個もの太陽系外惑星系が発見されてきた
- つまり、この地球は宇宙においてとりたてて特別な存在ではない
 - とすれば、この地球以外にも、生物、さらには知的文明を宿す惑星が、しかも無数、存在するのではないだろうか
- 生命の兆候を科学的に検証できるか？

天文学と世界観

アイザック・アシモフ 著 「Nightfall (夜来たる)」



***Stars -- all the Stars –
we didn't know at all.
We didn't know anything.***

「Nightfall (夜来たる)」の設定

- 6つの太陽を持つ惑星ラガッシュには「夜」がない
 - 空にはいつも一つ以上の太陽が昇っているため、いつも「昼」の明るさ
- 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」が訪れるという
 - 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のためであることがわかる
 - これから数時間で「夜」が訪れる時から物語が始まる
 - 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

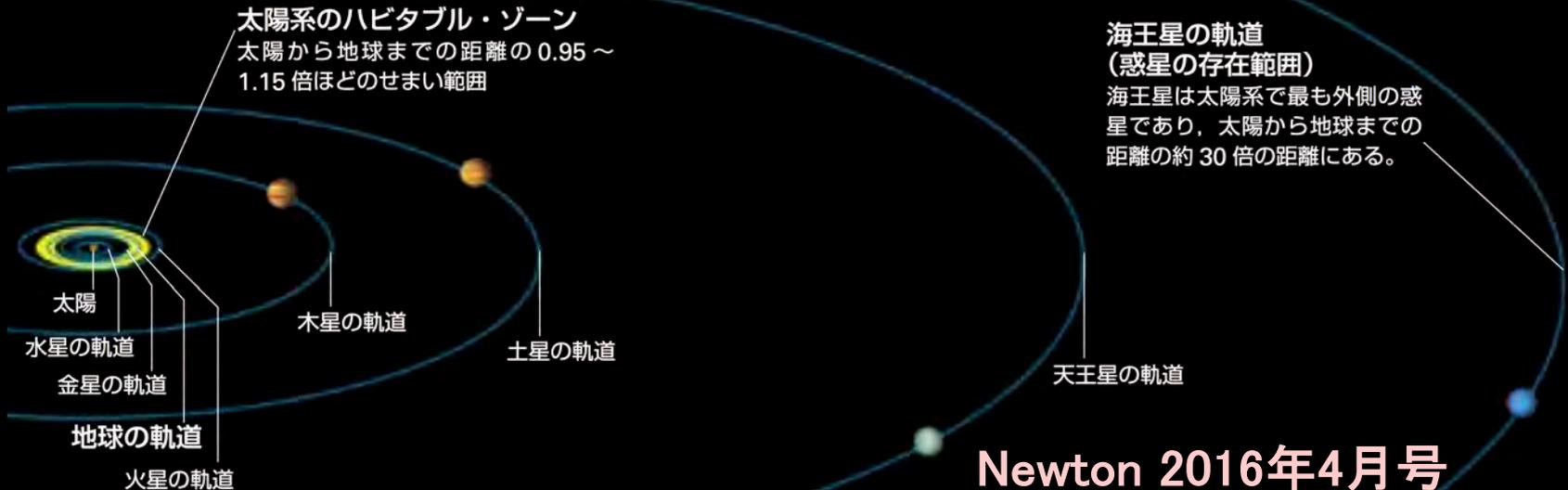
イラスト：羽馬有紗

「我々は何も知らなかった」に気づくことこそ科学の本質

太陽系外惑星の発見

物事には必ず理由があるのか

地球がハビタブル・ゾーンに入っているのは幸運



水星・金星・地球、火星のイラストは省略した。

太陽系の各惑星の軌道と、ハビタブルゾーンをえがいた。惑星の存在範囲にくらべて、ハビタブルゾーンが非常にせまい範囲であることがわかる。地球が幸運にもハビタブルゾーンにあるため、私たち人類が誕生できた。なお、ハビタブル・ゾーンの範囲については諸説ある。ただしいずれにせよ、その範囲は広くない。

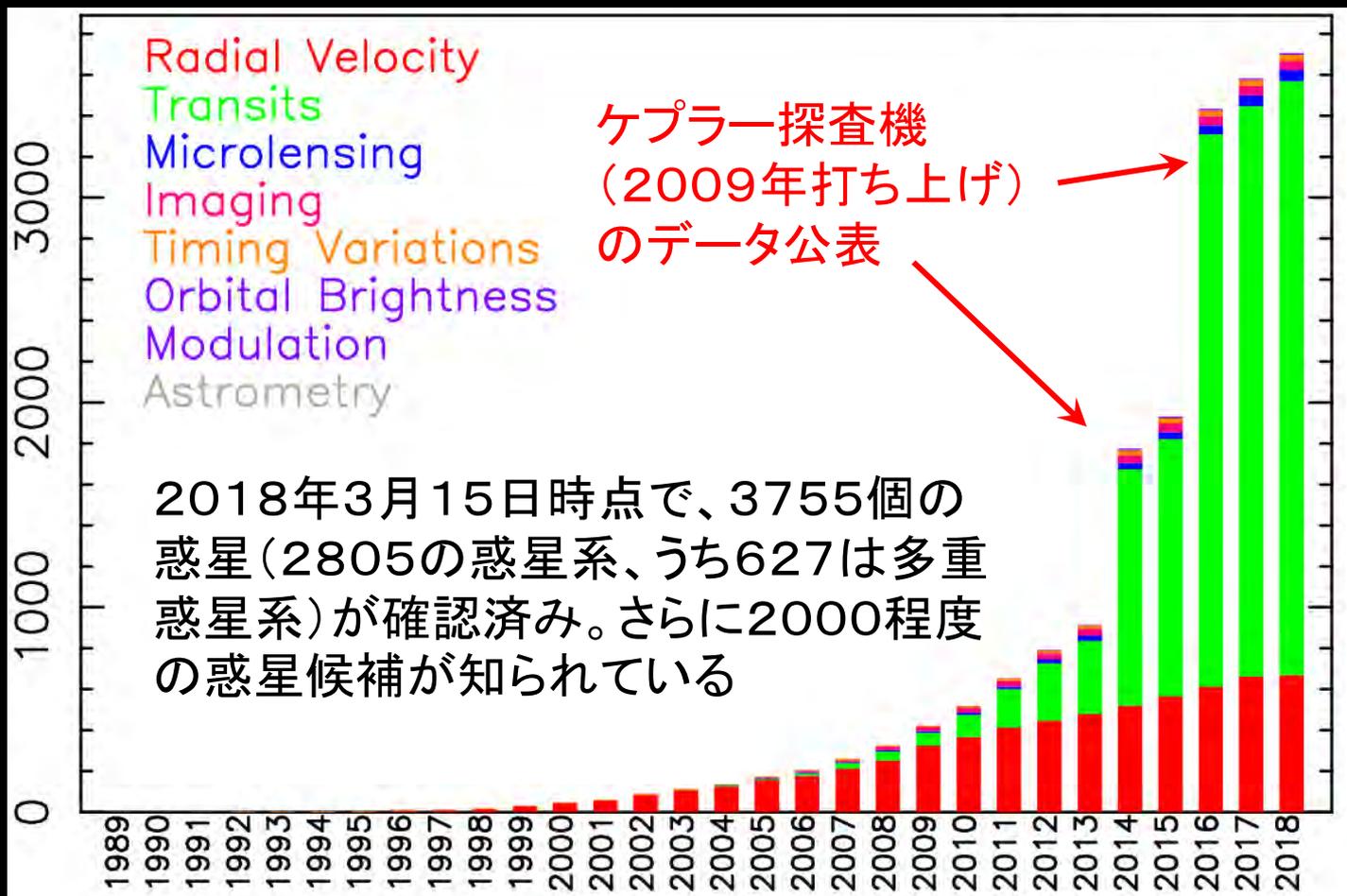
- **例題:** 地球上に液体の水が存在するには、太陽との距離が現在の値と $\pm 10\%$ 以内の狭い範囲になくってはならない (ハビタブルゾーン)。これからわかることは何?

偶然に意味を見い出す

- 回答例 1: 無意味な質問である
 - 地球と太陽の距離は単に偶然決まっただけ。偶然には意味などない
- 回答例 2: 実は深い意味を持つ
 - 偶然そのような微調整された系が実在するためには、地球が唯一ではなく、中心星と異なる距離にある無数の惑星が存在すると考える方がはるかに自然。つまり、この地球が微調整された(不自然な)性質を持っているのならば、それ以外に無数の惑星が存在していることを示唆する

この問いの正解は別として、太陽系 以外に惑星系は普遍的に存在

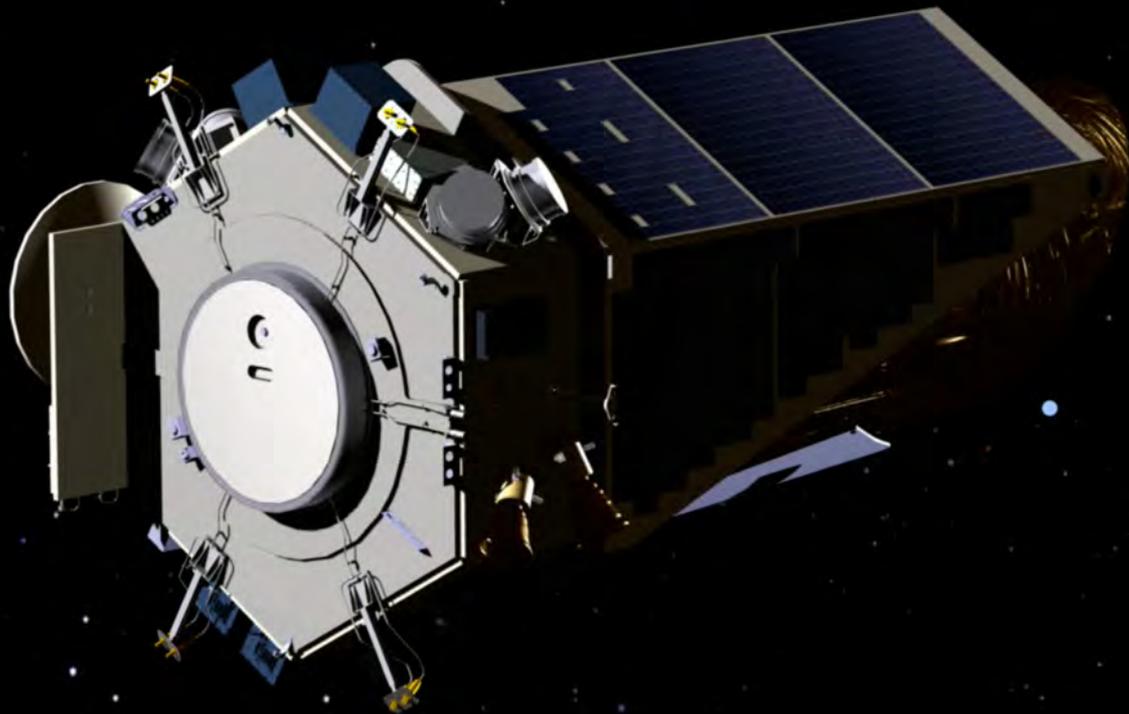
発見総数



西暦

ケプラー 探査機 (2009年打ち上げ)

恒星の前を惑星が通過(トランジット)する際の
光度変化を検出する専用探査機

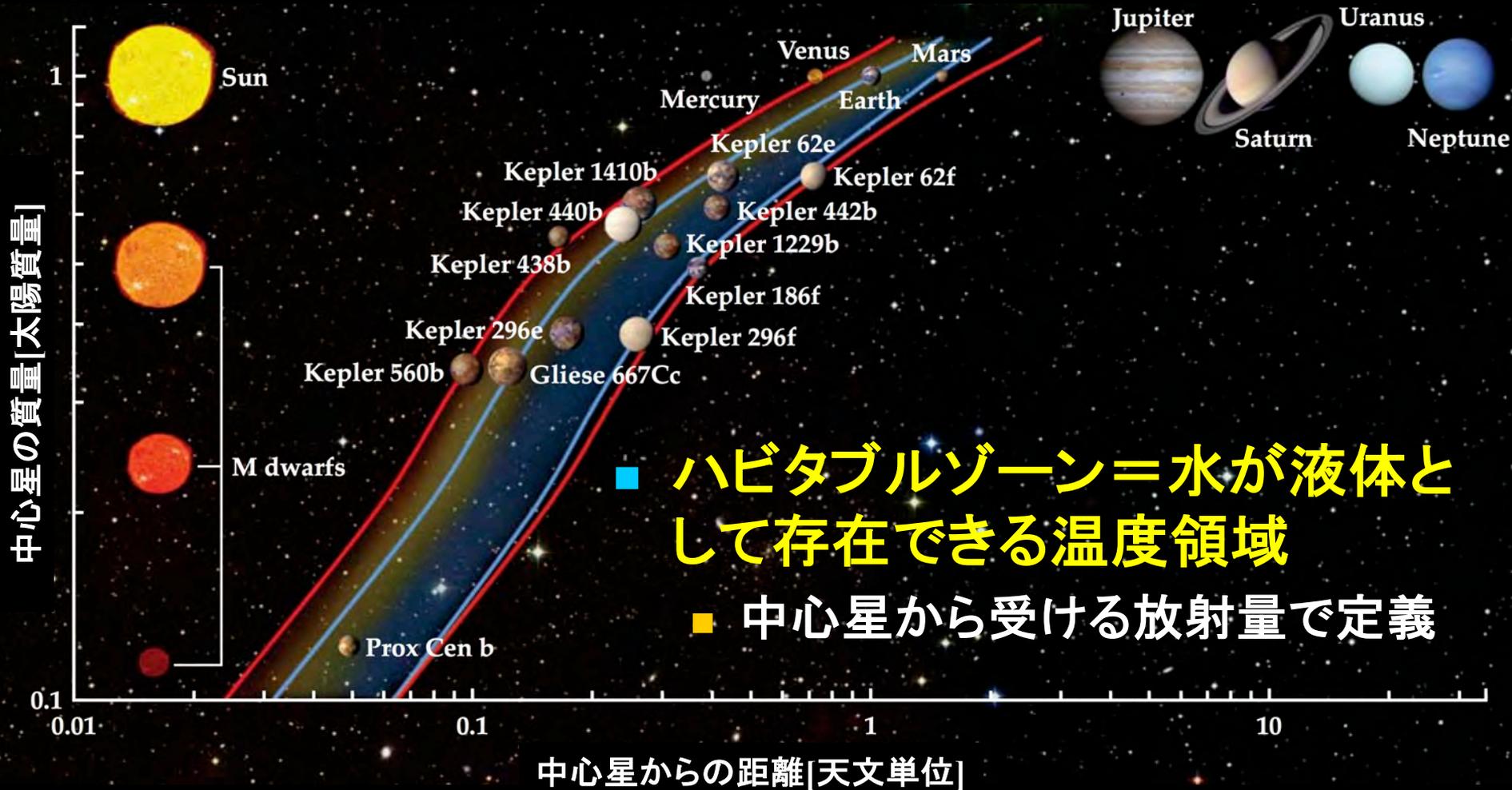


<http://kepler.nasa.gov/>

系外惑星系についてわかってきたこと

- **宇宙に惑星系は普遍的に存在する**
 - 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
- **太陽系と良く似た系もかけ離れた系も存在**
 - 太陽の周りを数日で公転する巨大ガス惑星(ホットジュピター)
 - 大きな離心率を持つ楕円軌道の惑星
 - ハビタブル惑星候補(水が液体として存在できる温度)
 - 地球よりやや大きい岩石惑星(スーパーアース)が多数
- **我々の地球以外に生命が存在するか？**

ハビタブル惑星候補



地球サイズのハビタブル惑星の存在確率

- 太陽と似た星を公転する地球半径の1~2倍の惑星
 - ケプラーのトランジット惑星検出数から、観測的選択効果を補正して推定
 - 11 ± 4 % (地球上での太陽フラックスの1~4倍のもの)
 - $5.7^{+2.2}_{-1.7}$ % (公転周期が200~400日のもの)

Table 1. Occurrence of small planets in the habitable zone

| HZ definition | a_{inner} | a_{outer} | $F_{P,\text{inner}}$ | $F_{P,\text{outer}}$ | f_{HZ} (%) |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Simple | 0.5 | 2 | 4 | 0.25 | 22 |
| Kasting (1993) | 0.95 | 1.37 | 1.11 | 0.53 | 5.8 |
| Kopparapu et al. (2013) | 0.99 | 1.70 | 1.02 | 0.35 | 8.6 |
| Zsom et al. (2013) | 0.38 | | 6.92 | | 26* |
| Pierrehumbert and Gaidos (2011) | | 10 | | 0.01 | ~50 [†] |

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)
 - G型星の10%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
 - 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
 - 科学者よりも一般人が興味をもつ
- 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

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)

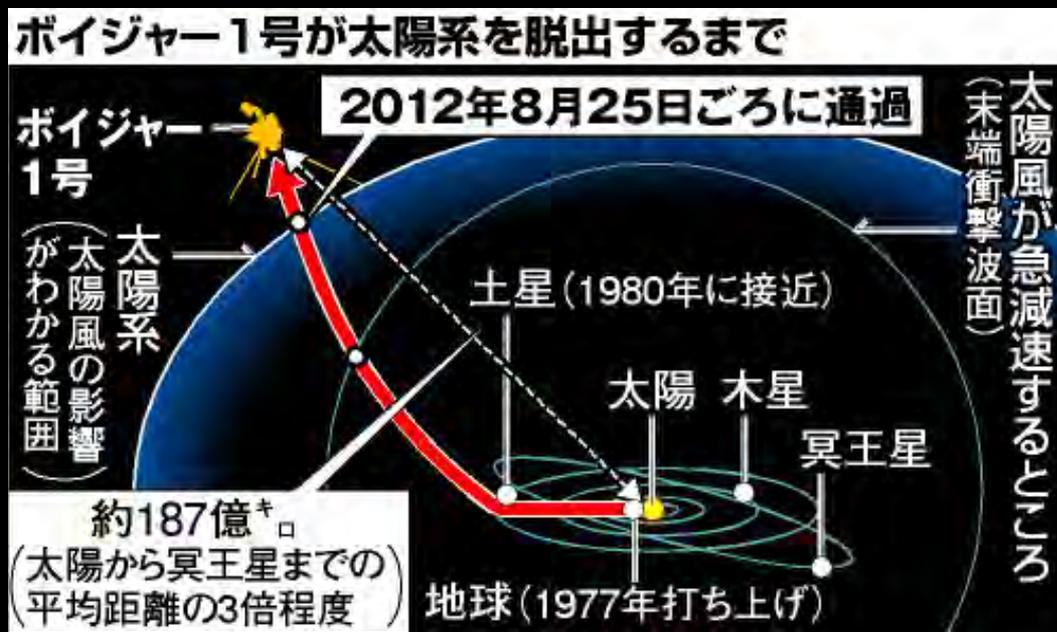


- 米国の惑星科学者
 - NASAの惑星探査プロジェクトの多くを主導
 - 「核の冬」、「われわれは星くずからできた星の子供」など多くの言葉を残し、社会に大きな影響を与えた
 - TVシリーズコスモス(1980)
 - 映画コンタクト(1997)
「地球人だけじゃこの広い宇宙がもったいない」

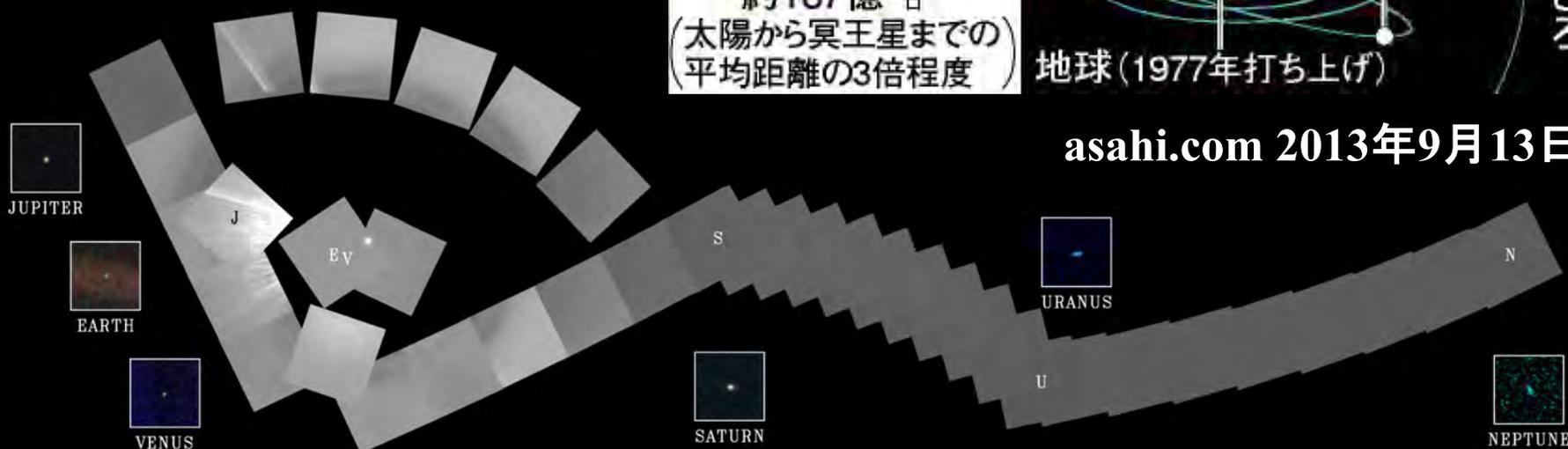
ボイジャー1号による太陽系内惑星撮像

■ 1990年2月14日
@40AU

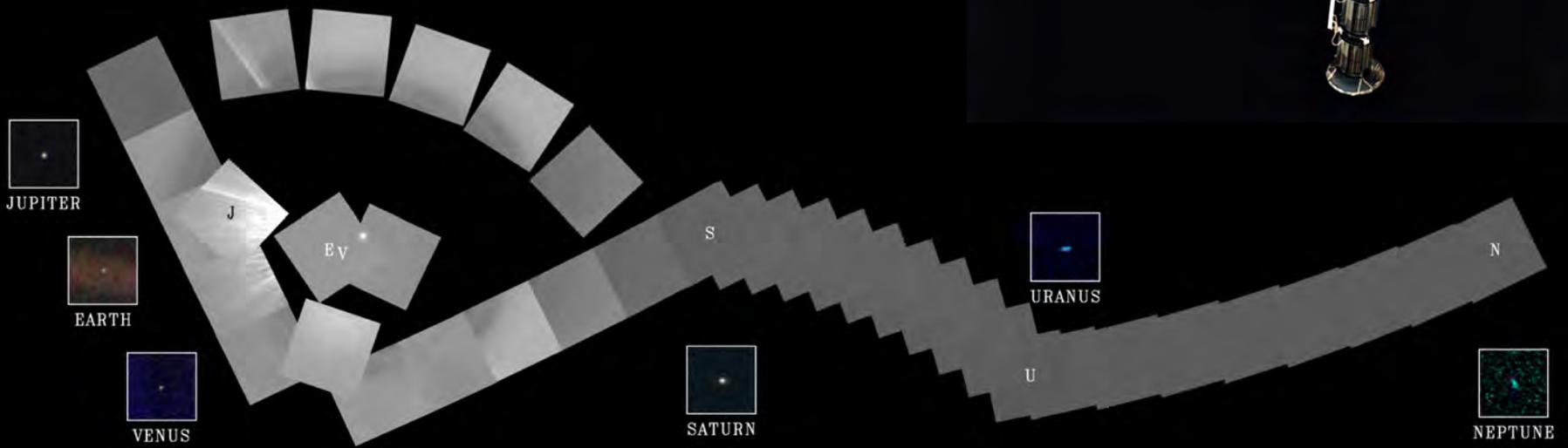
■ カール・セーガン
が地球の画像を
Pale Blue Dot
と命名



asahi.com 2013年9月13日



ペイル・ブルー・ドット



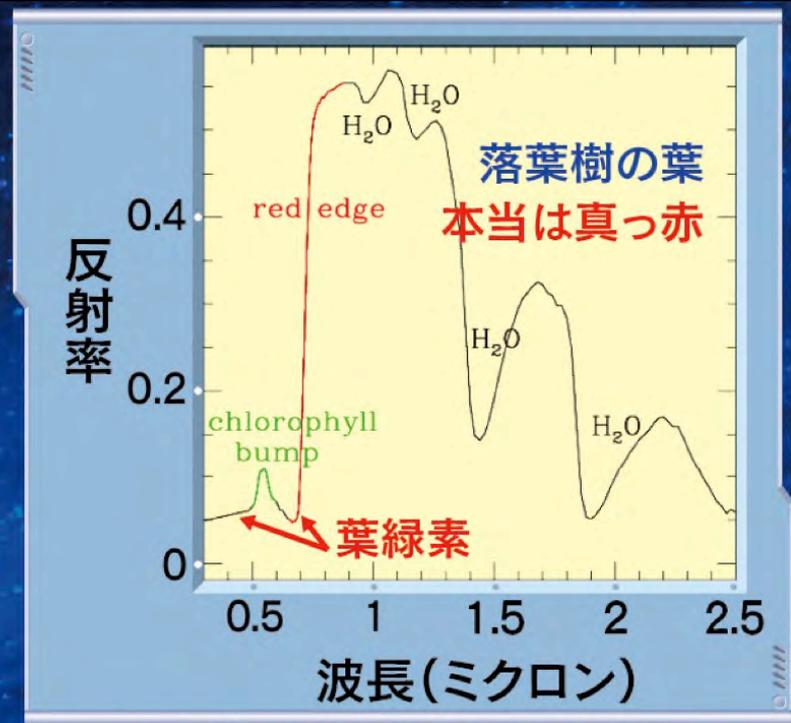
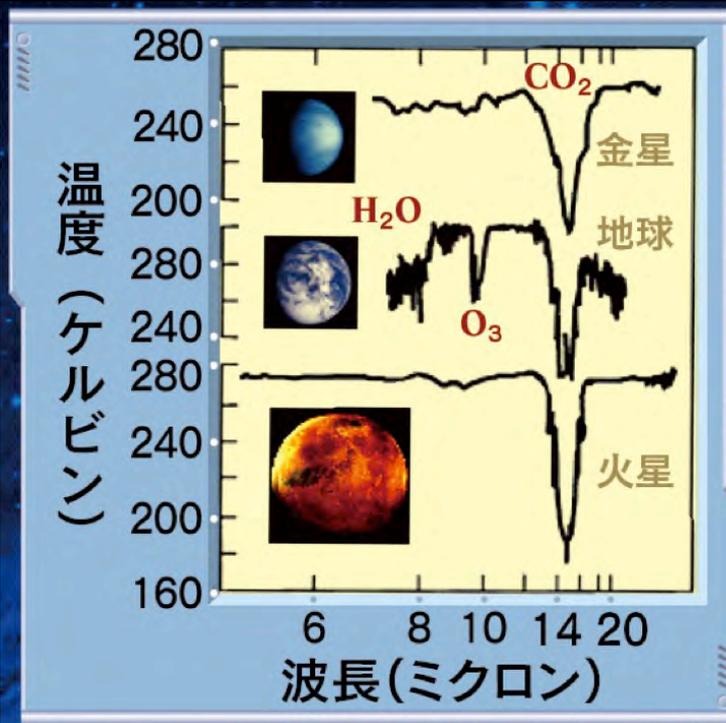
土星から 見た地球



- 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):2万人がこちらに手を振っている

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
 - 知的生命体からの電磁波
- いずれにせよ検出は天文学観測しかない



ガリレオ探査機による地球上の生命探査

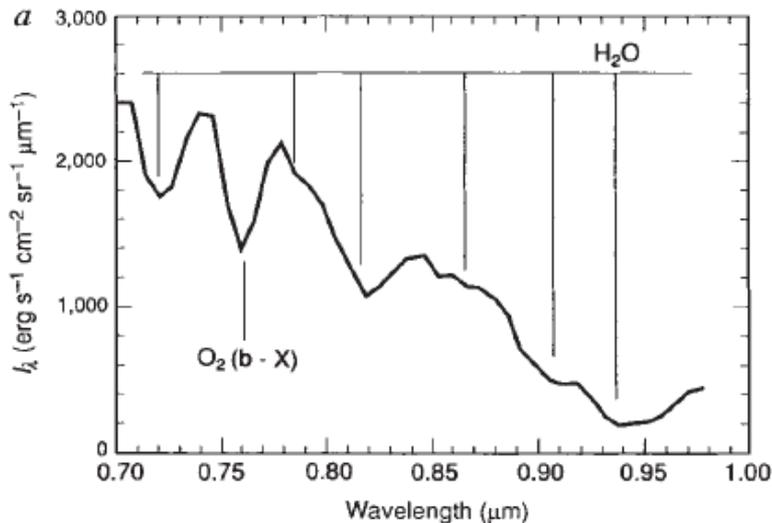
- 1986年5月打ち上げ
- 1990年12月8日一回目の地球スイングバイ時に地球上の“生命探査”
- **地球には生命がいるらしい!**
 - 大量の気体酸素
 - 植物のレッドエッジ
 - 熱平衡から極端にずれた大気中のメタンの存在量
 - 狭帯域で振幅が変化する“不自然な”パルス状電波



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

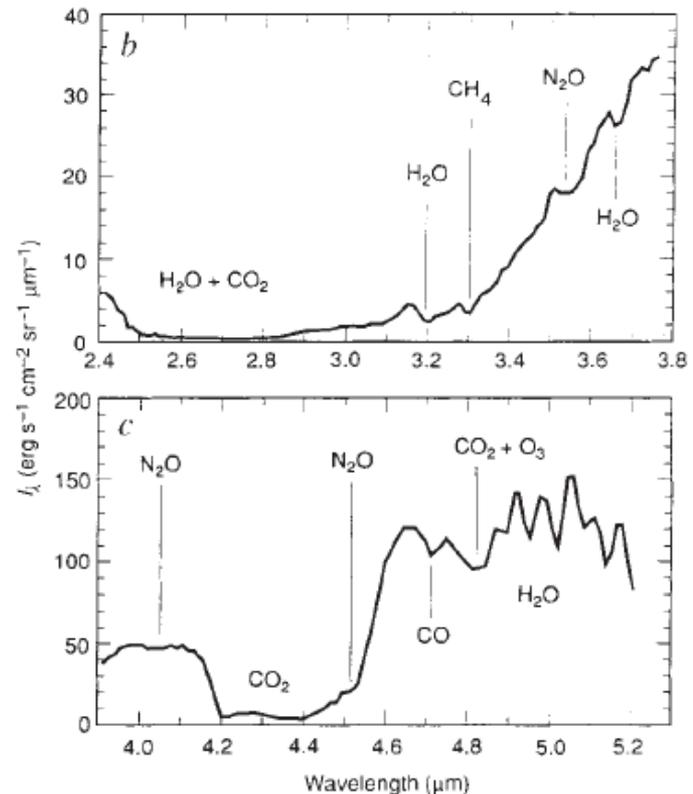
Sagan et al. (1993): 大気分光

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)

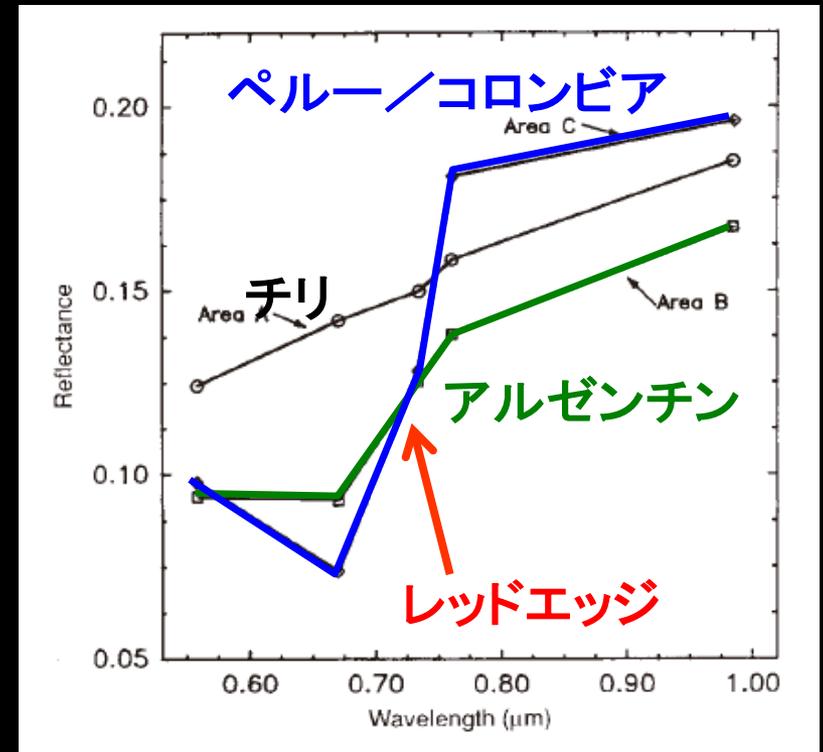
FIG. 1 a, Galileo long-wavelength-visible and near-infrared spectra of the Earth over a relatively cloud-free region of the Pacific Ocean, north of Borneo. The incidence and emission angles are 77° and 57° respectively. The $(b^1\Sigma_g^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-)$ O₂ at $0.76 \mu\text{m}$ is evident, along with a number of H₂O features. Using several cloud-free regions of varying airmass, we estimate an O₂ vertical column density of $1.5 \text{ km-amagat} \pm 25\%$. 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 cm-amagat ($\equiv 1 \text{ cm path at STP}$).

Sagan et al. (1993): 撮像

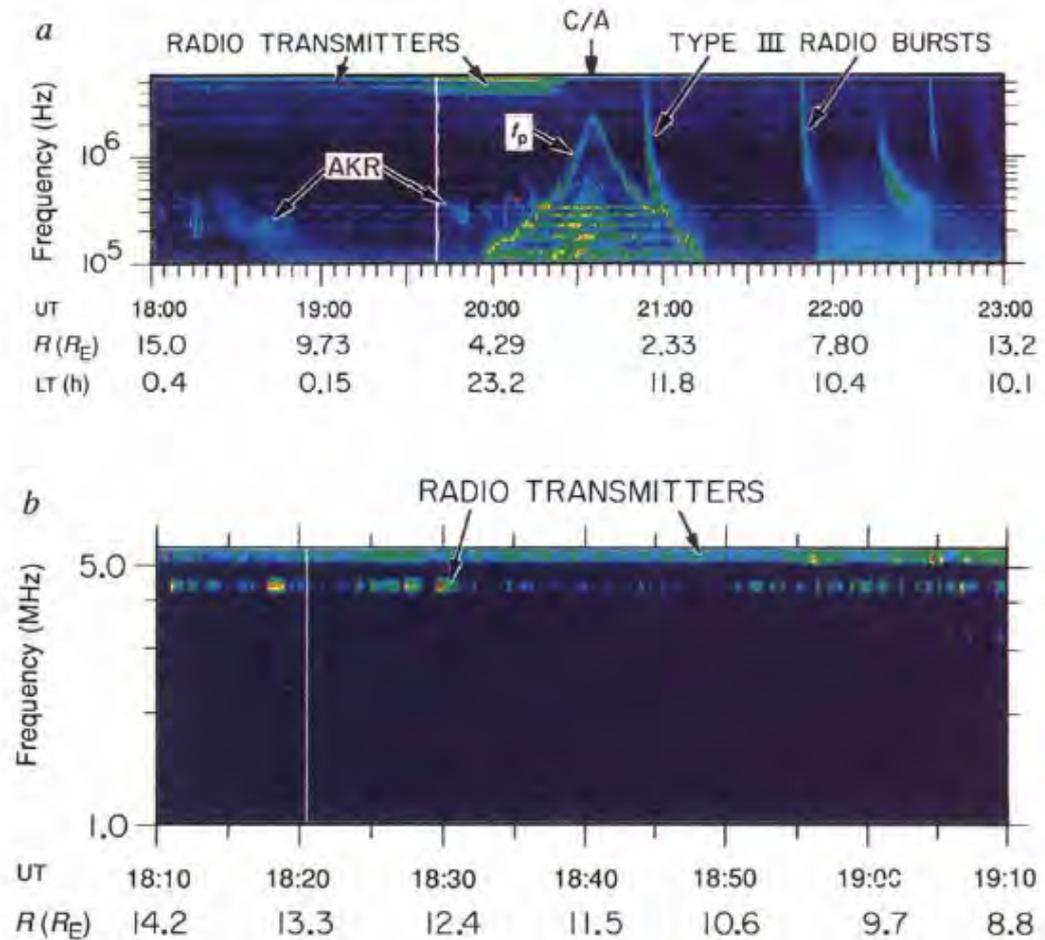
ガリレオ探査機の観測した地球のレッドエッジ



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

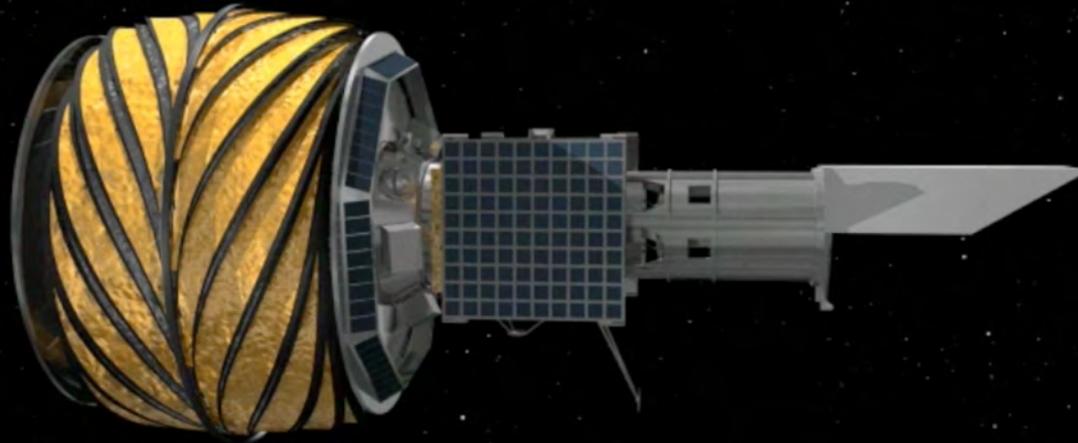
FIG. 4 A frequency–time spectrogram of the radio signals detected by the Galileo plasma wave instrument. The intensities are coded in the sequence blue–green–yellow–red, with blue lowest and red highest. Several natural sources of radio emission are shown in *a*, including auroral kilometric radiation (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.)



リモートセンシング

もうひとつの地球の観測

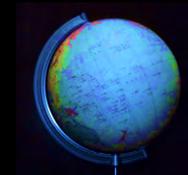
Starshade project: 地球型惑星を直接見る



- 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)

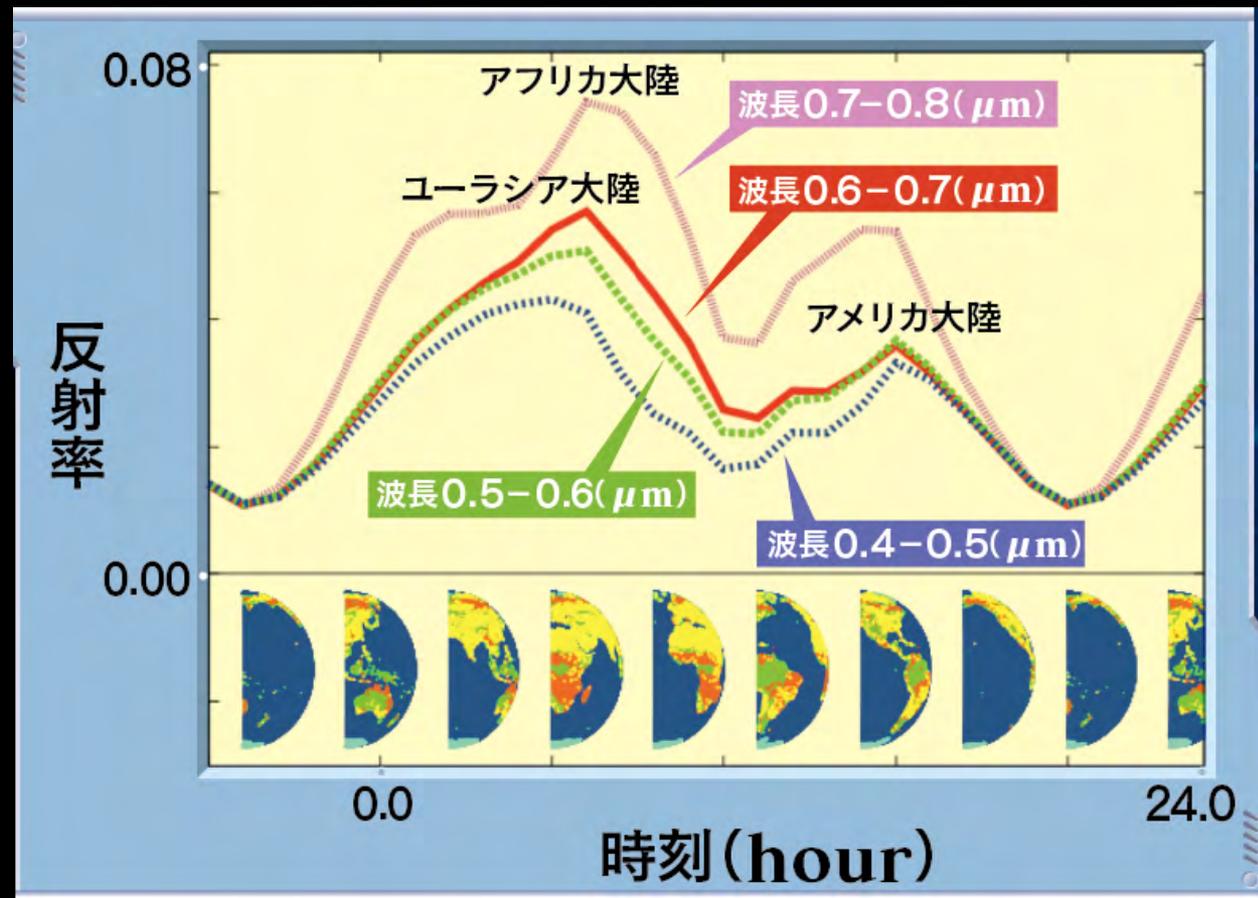
ペイルブルードットを超えて

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



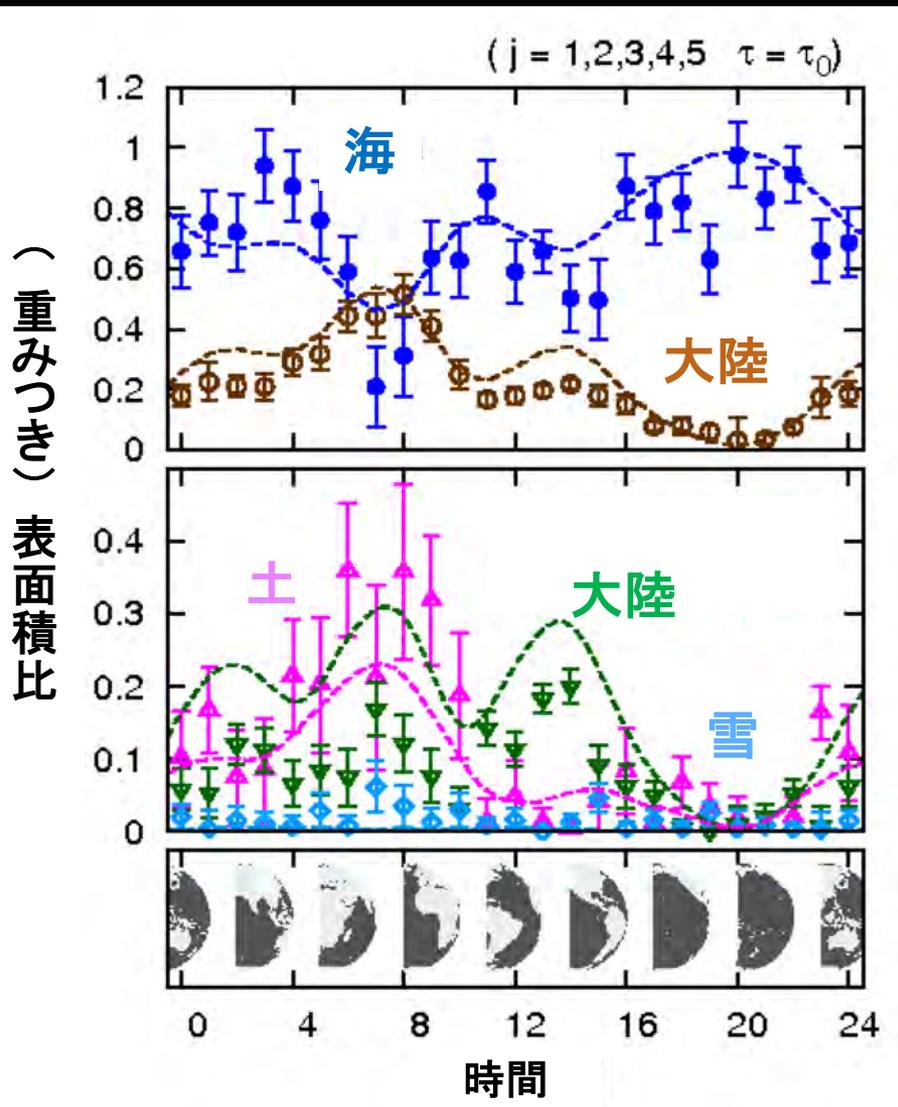
もうひとつの地球の色

- 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



- 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

藤井友香ほか(2010)

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

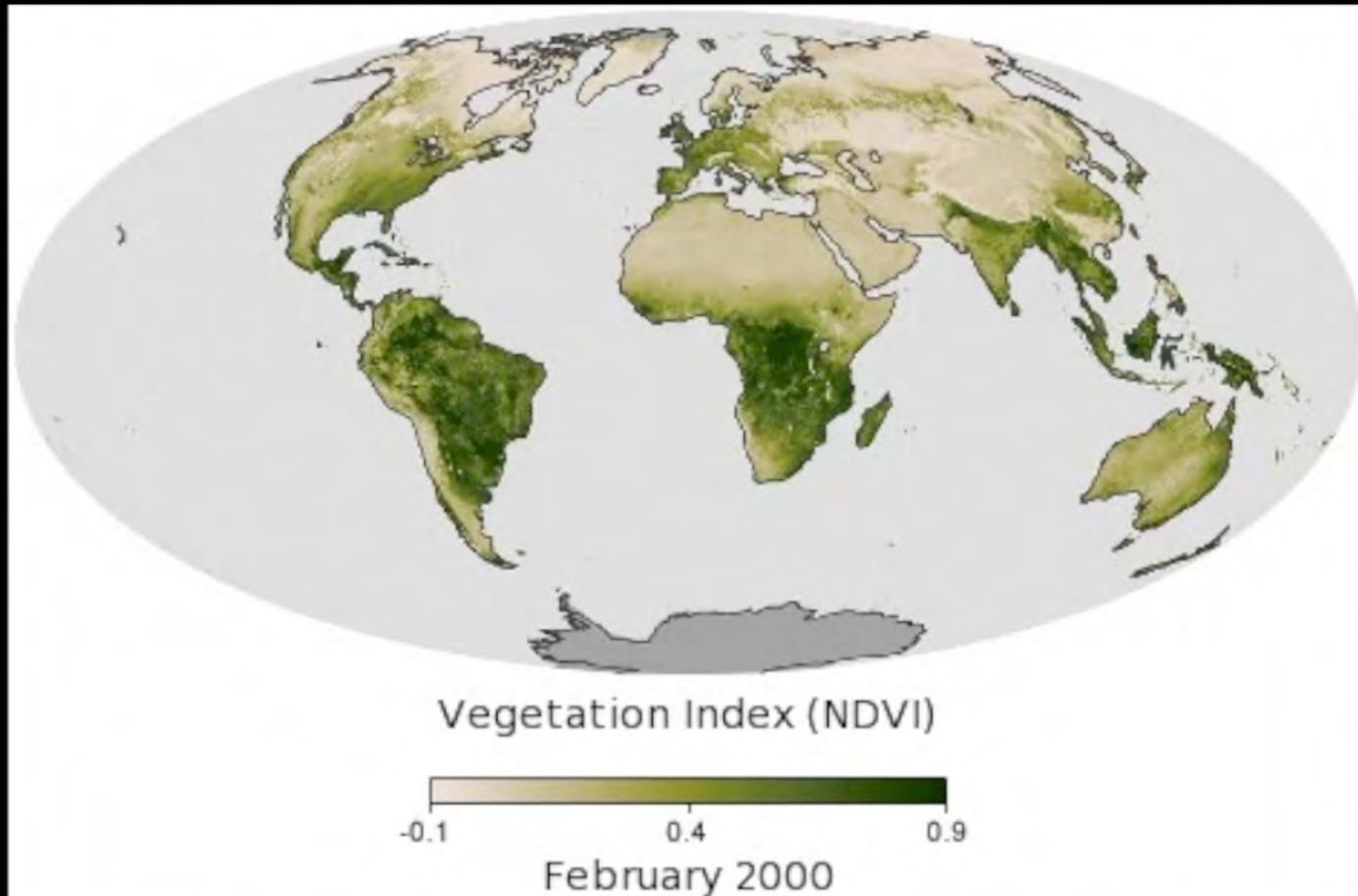


F型星



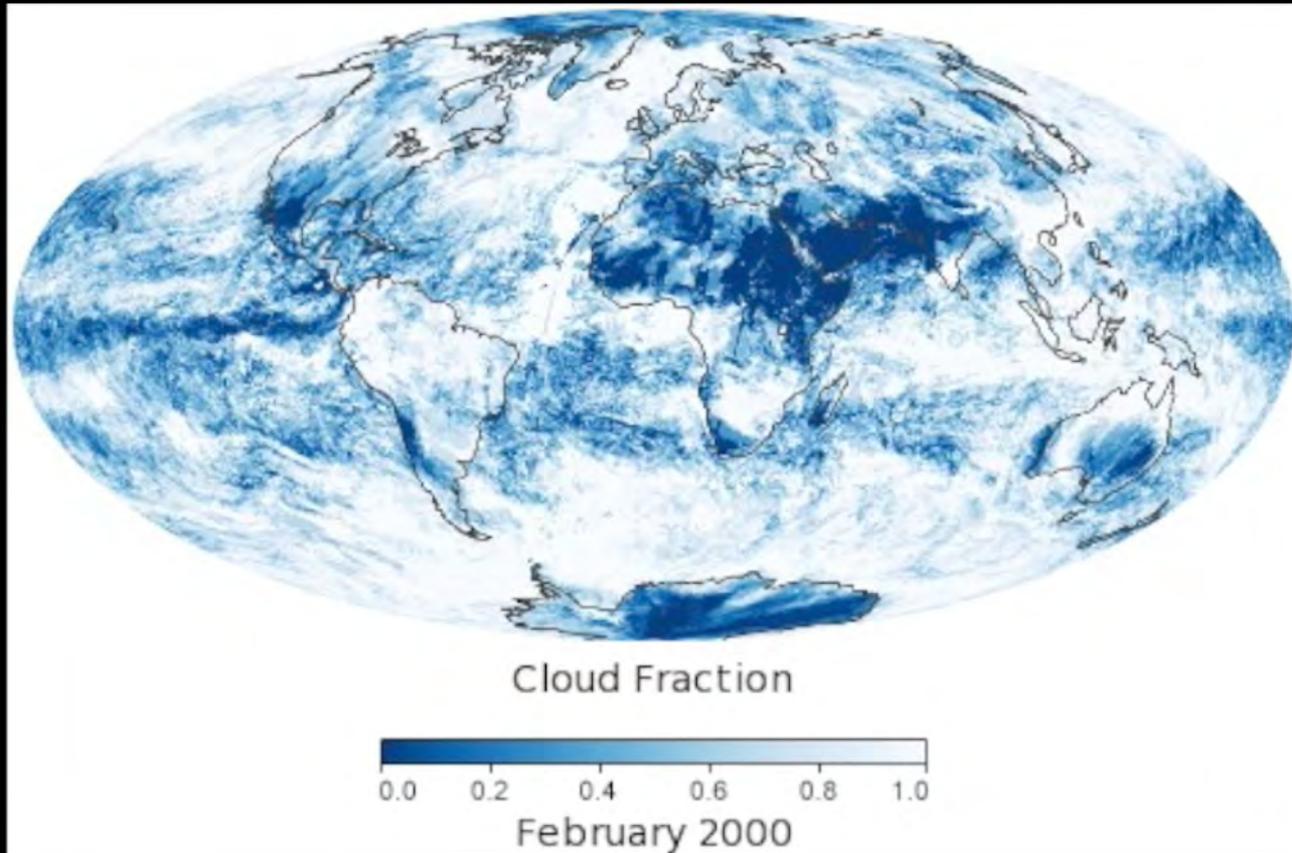
日経サイエンス2008年7月号
Nancy Y.Kiang

地球観測衛星Terraによる 植生分布地図の年次変化



<http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/>

厄介なことに雲の存在が 地表面の情報を分かりにくくする



<http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/>

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

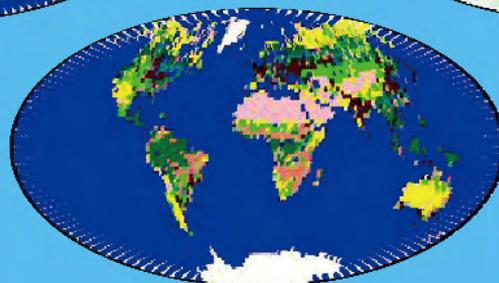
海



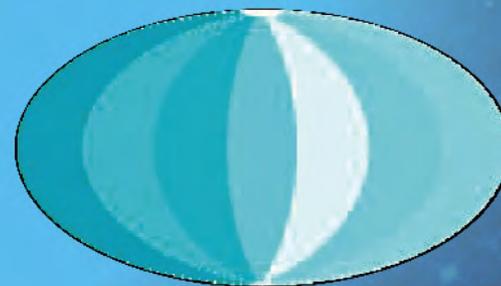
植生



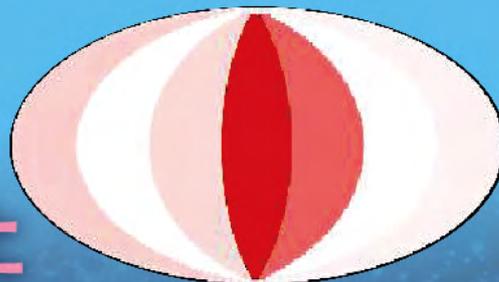
雲



雪



土



藤井友香 他(2011)

知的文明探查

SETI:

Search for Extra-
Terrestrial Intelligence

SETI: Search for Extra-Terrestrial Intelligence

- 実は、バイオシグニチャーとして最も決定的なのは、知的文明からの信号
- 1GHzから20GHzの電波（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）
- オズマ計画
 - 1960年、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

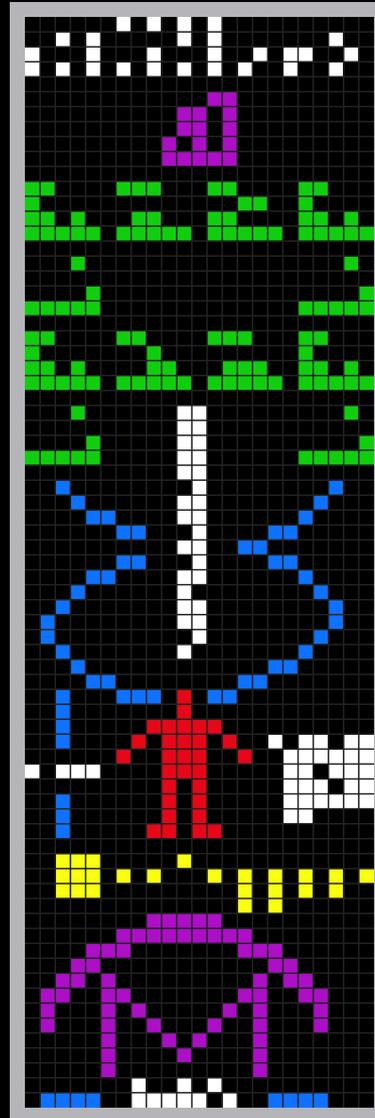
その文明の継続時間

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)

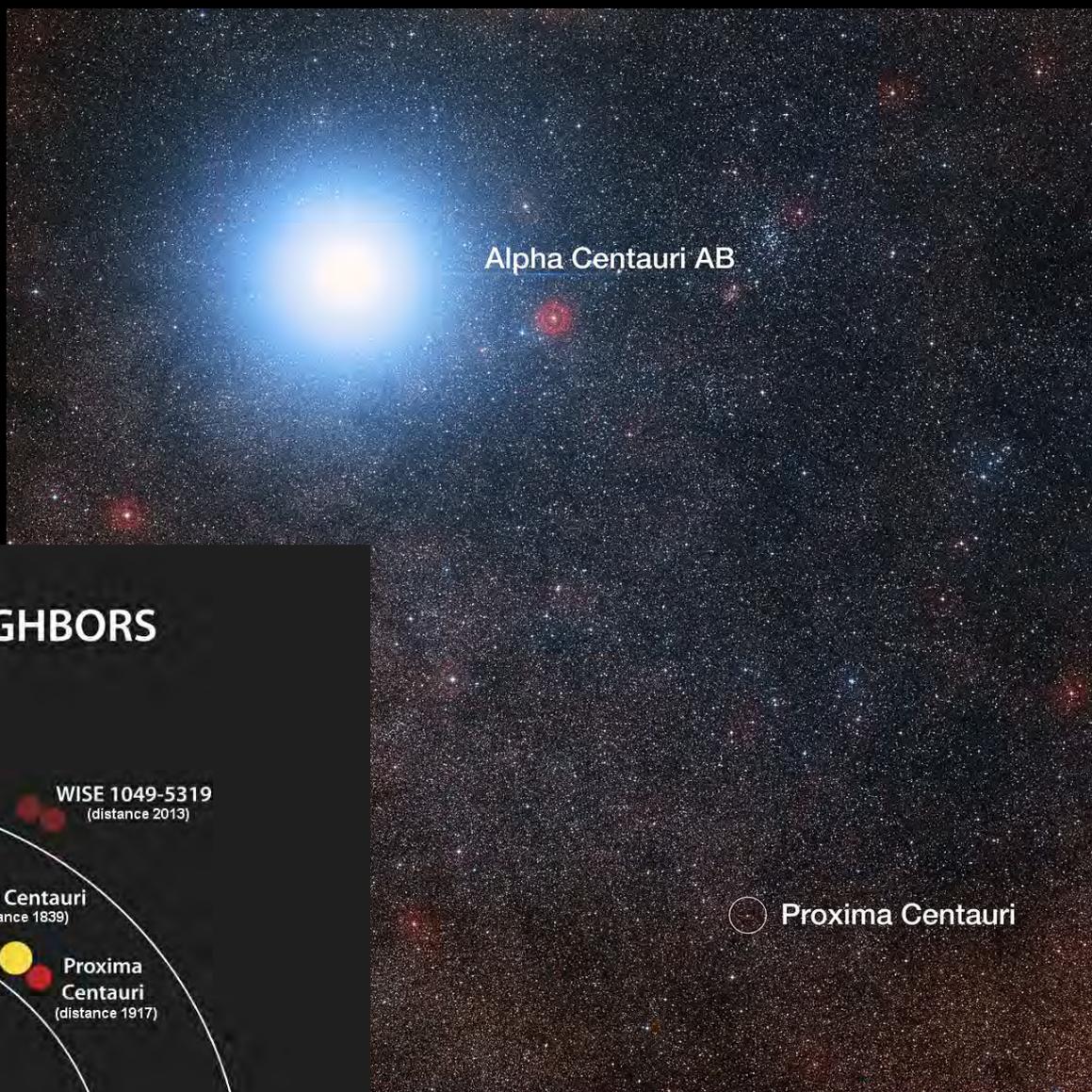
アレシボ電波望遠鏡

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、「もしあれば十分検出可能」な時代になっている

プロキシマ ケンタウリ b

プロキシマ ケンタウリ



Alpha Centauri AB

Proxima Centauri

THE SUN'S CLOSEST NEIGHBORS



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

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>

- ロシア出身のIT投資家ユリ・ミルナー(素粒子理論で学位取得)が地球外知的生命を探查するために、2015年7月20日に立ち上げた
 - **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查機群を送るための概念設計検討

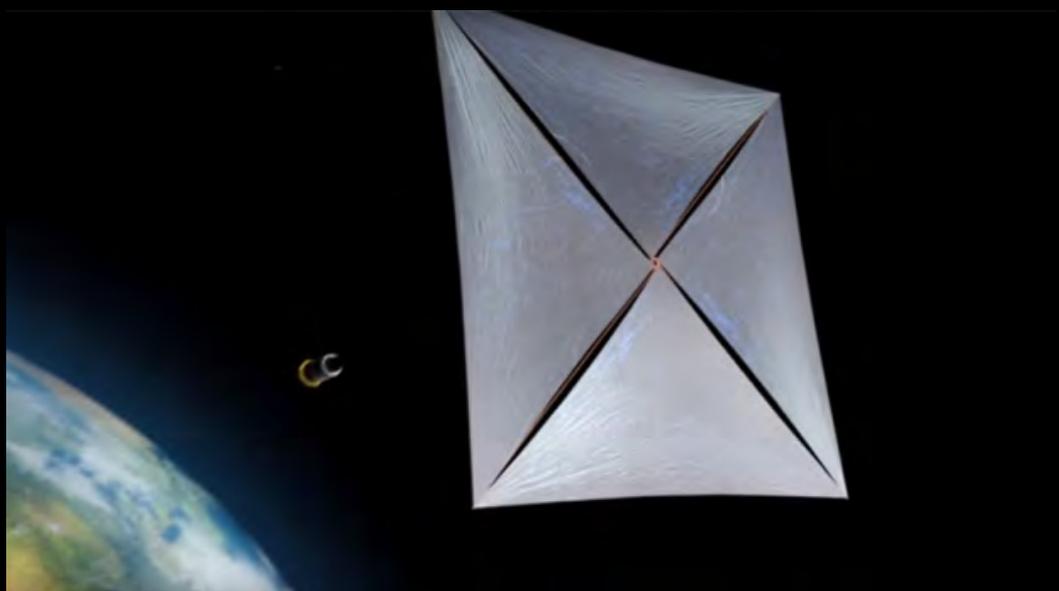
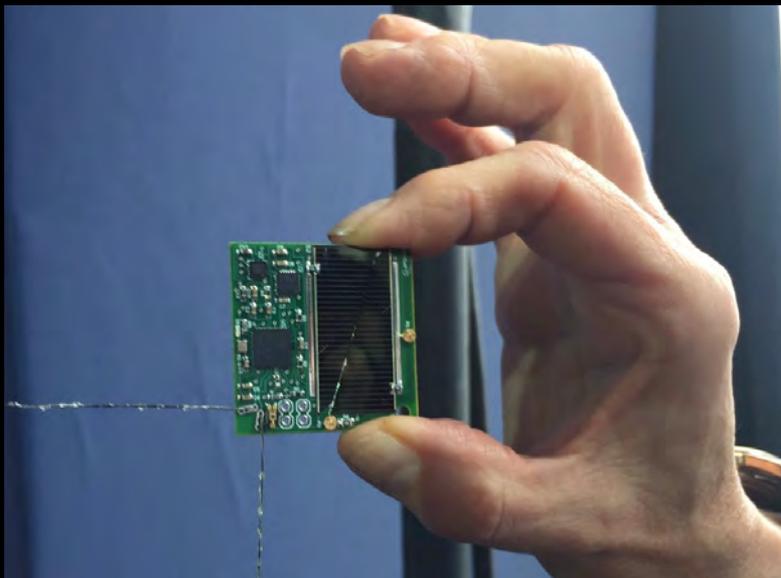
ブレイクスルースターショット

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

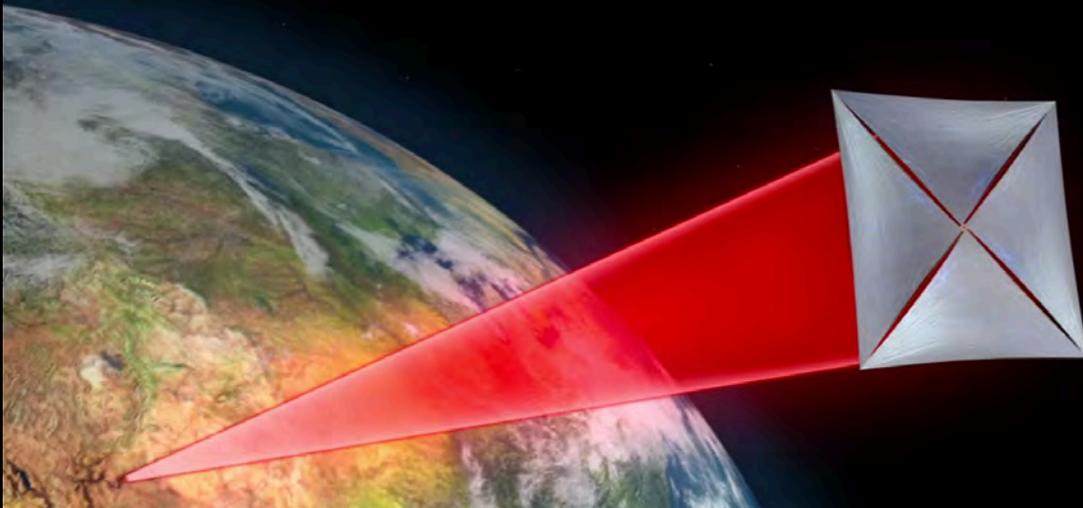
■ スターチップ

- 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、完成までに今から20年の研究開発が必要

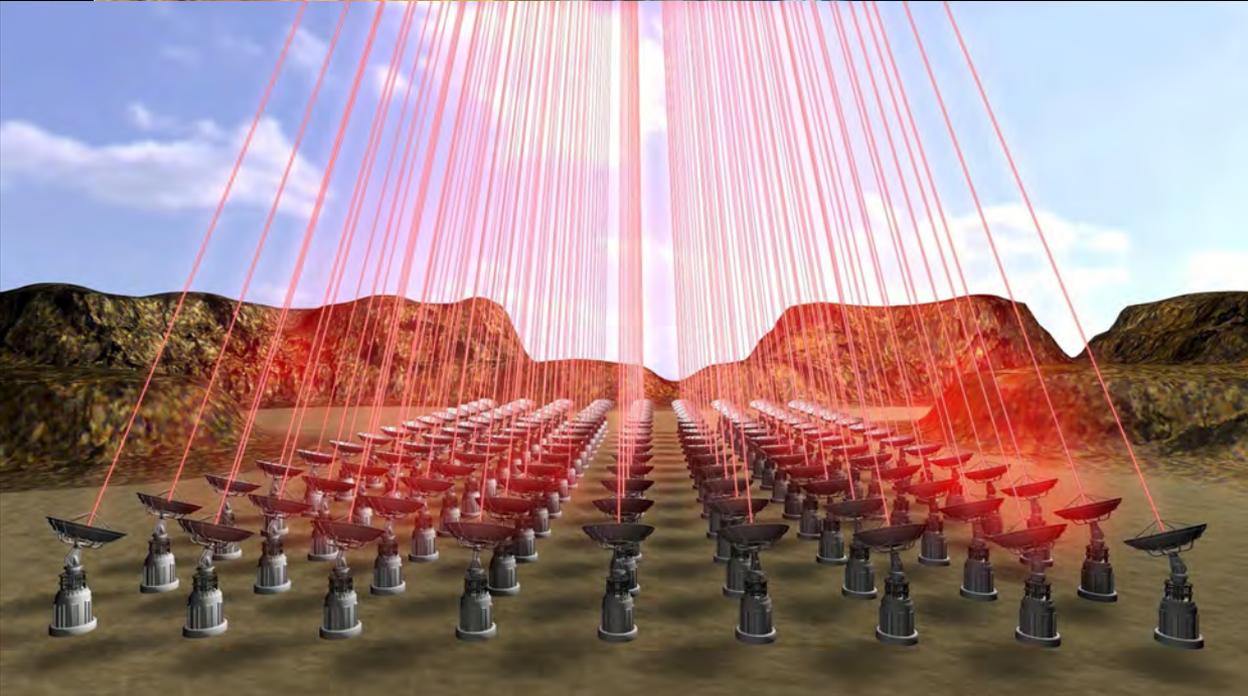
スターチップ



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？



まとめ

今から50年で起こること？

- 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

予想もできない展開が待っているはず

■ 最初にかかるのはどれだろう

- 地球外生物の痕跡の天文学的検出
 - 実験室での人工生物の誕生
 - 地球外文明からの交信の検出
 - 地球文明の破滅（いったん発達した文明は、自然災害、疫病、核戦争、資源の枯渇などの要因で不安定）
- 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に等しい

50年後
の世界?

