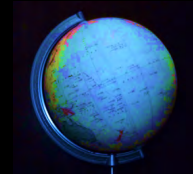


ペイルブルードットを超えて

東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖
立教大学理論物理学コロキウム @ 16:40-18:10、2016年9月28日



アイザック・アシモフ「Nightfall (夜来たる)」

- 4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
 - 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

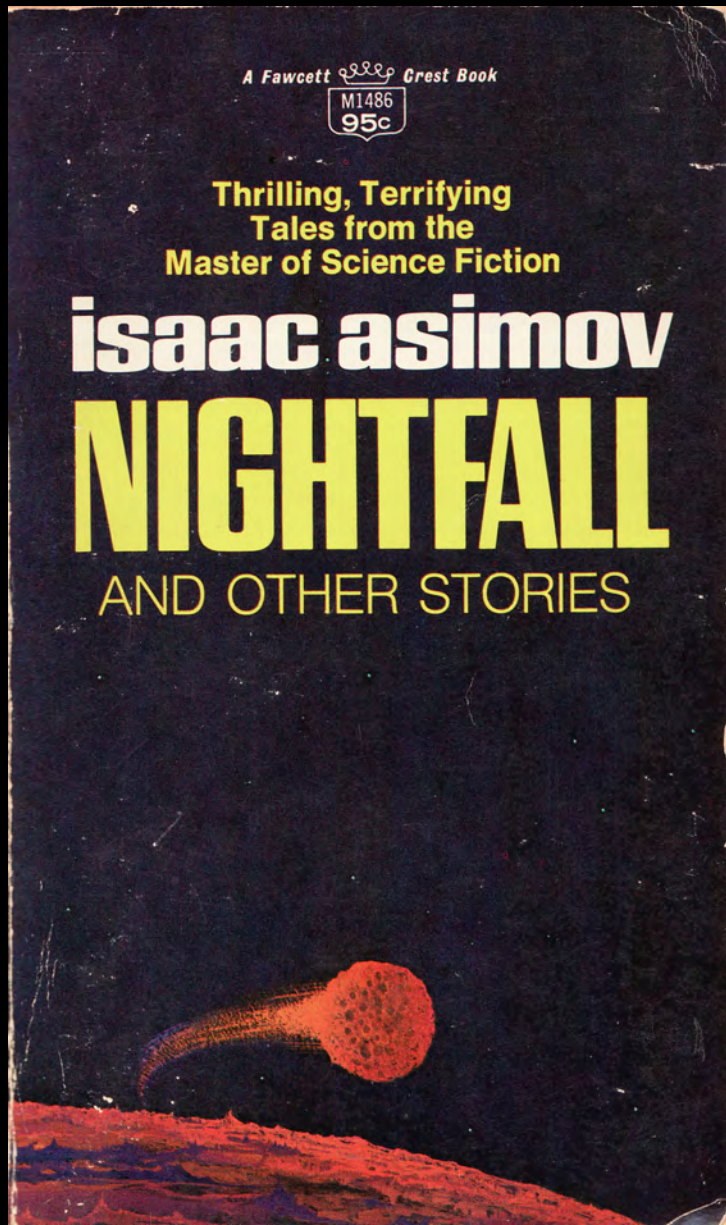
「我々は何も知らなかった」



イラスト：羽馬有紗

「我々は何も知らなかった」に気づくことこそが科学

Issac Asimov: Nightfall



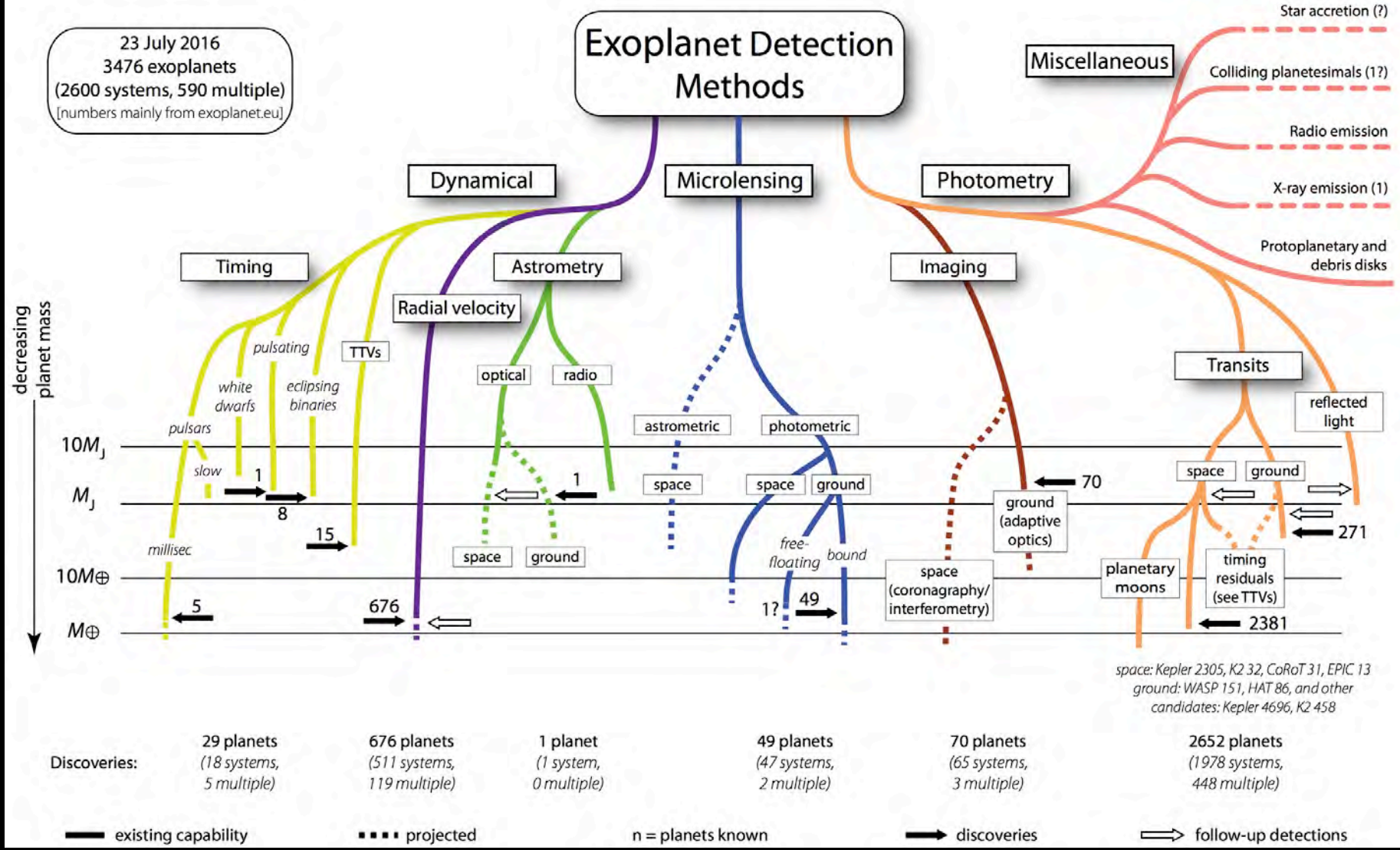
- “Light !” he screamed. Aton, somewhere, was crying, whimpering horribly like a terribly frightened child.

“Stars -- all the Stars -- we didn't know at all. We didn't know anything.”

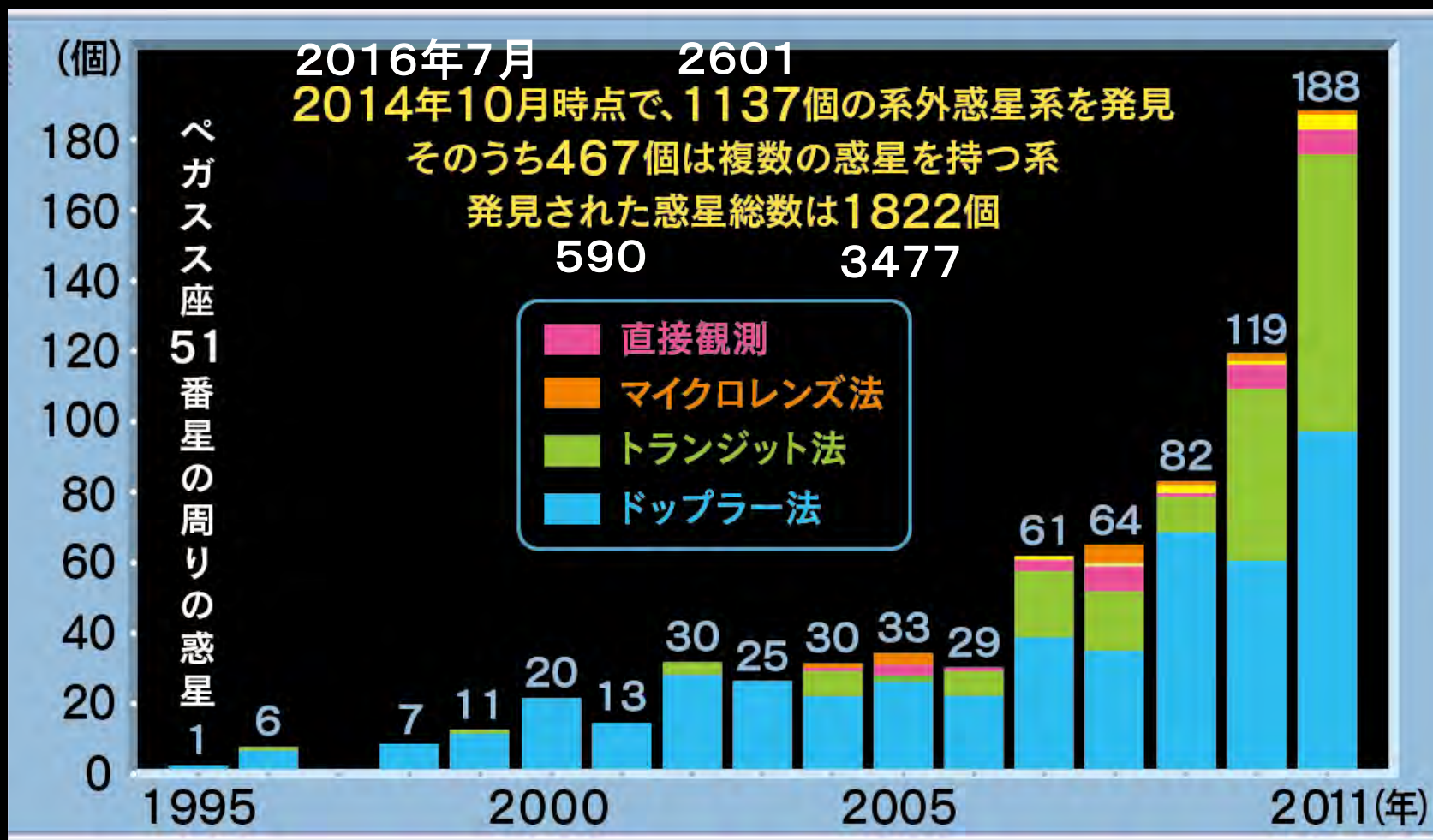
太陽系外惑星の発見

太陽系外惑星検出法一覽

23 July 2016
 3476 exoplanets
 (2600 systems, 590 multiple)
 [numbers mainly from exoplanet.eu]



太陽系外惑星発見史



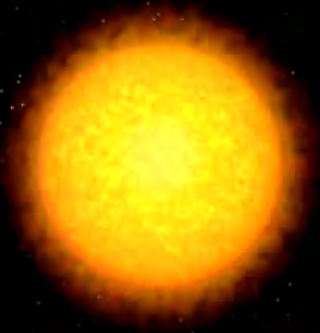
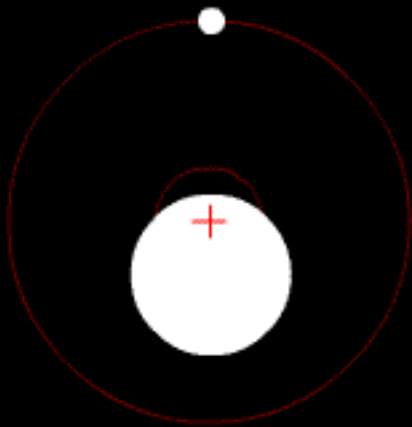
2016年6月時点では

8重惑星系:太陽系のみ、7重惑星系:3、6重惑星系:2、5重惑星系:15、
 4重惑星系:49、3重惑星系:99、2重惑星系 300個以上

系外惑星発見数 (2016年7月)

検出方法	惑星系数	多重惑星系数	惑星総数
時刻変動	18	5	29
視線速度	511	119	676
位置天文	1	0	1
マイクロレンズ	47	2	49
直接撮像	65	3	70
トランジット	1978	448	2652
総計	2600	590	3476

系外惑星検出方法



■ ドップラー法

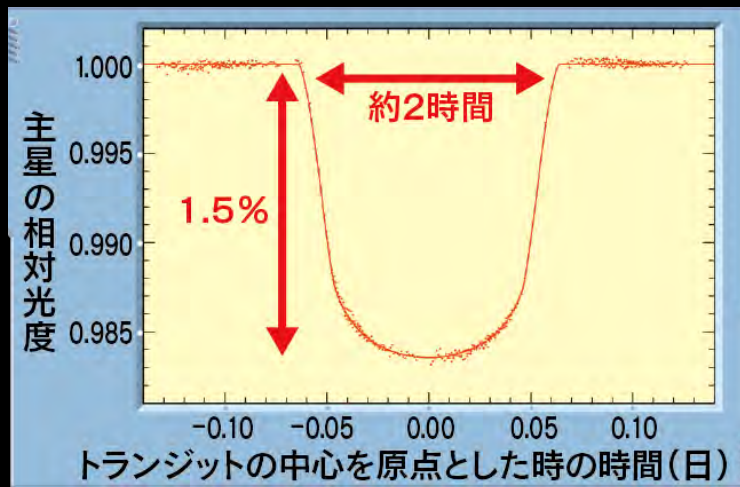
- 惑星の公転に同期して中心星の速度が毎秒数十メートル程度、周期的に変動

■ 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

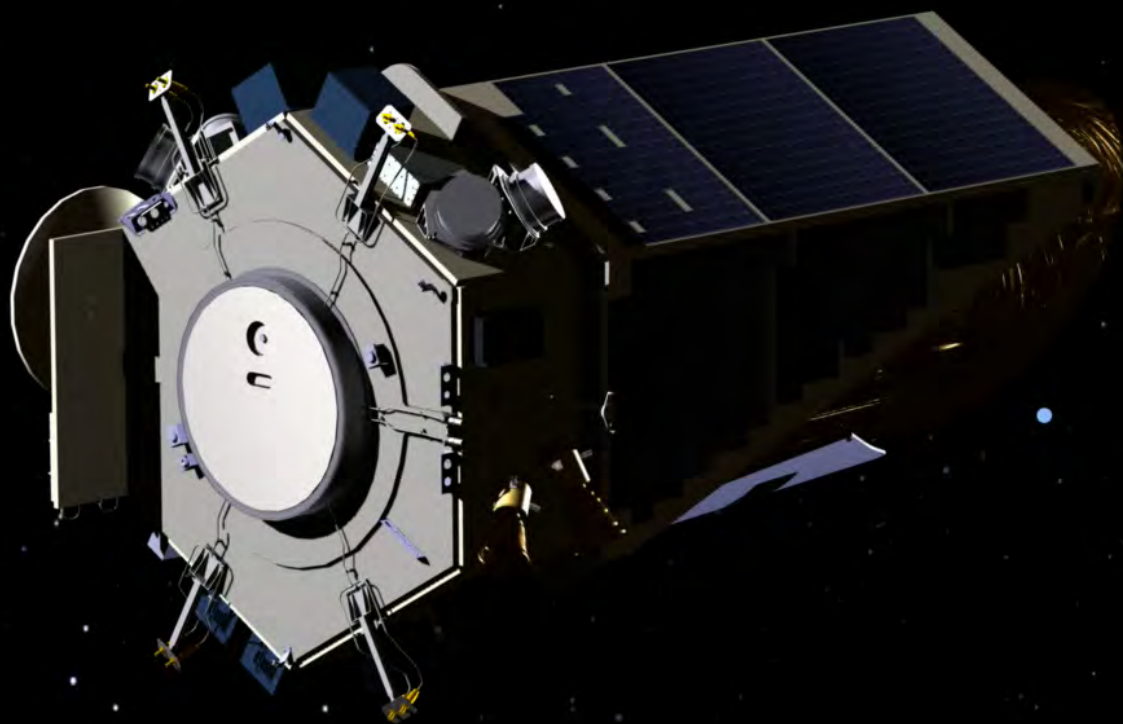
■ 直接撮像

- 中心星の光を隠して惑星の光を分離



ケプラー探査機 (2009年3月6日打ち上げ)

トランジット惑星専用測光モニター観測
地球型ハビタブル惑星を探す

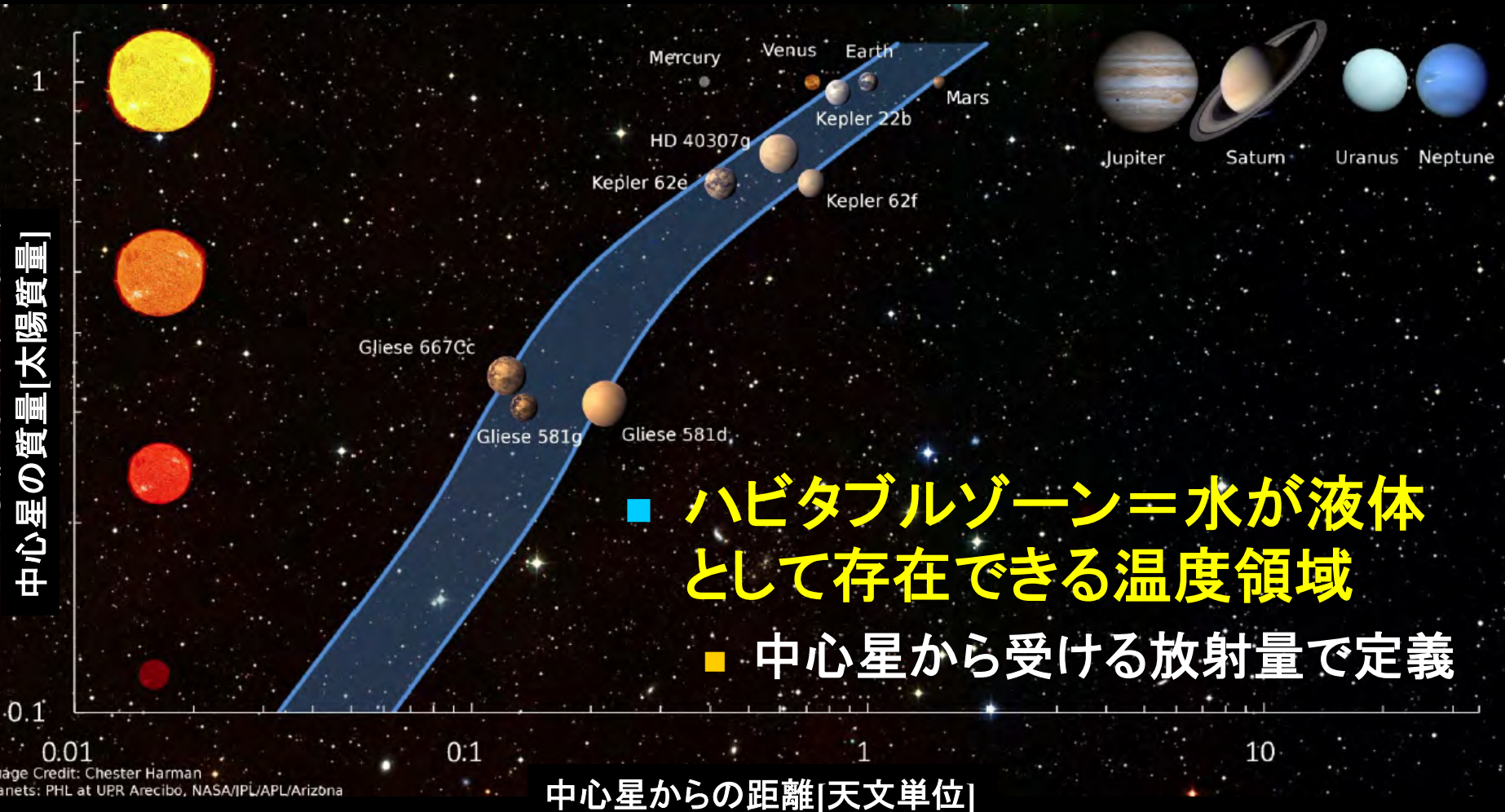


<http://kepler.nasa.gov/>

系外惑星系についてわかってきたこと

- **惑星系はまれではなくあたりまえの存在**
 - 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の存在?(スーパーアース)
- **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



Kasting, Kopparapu, Raminetz & Harman (2013)

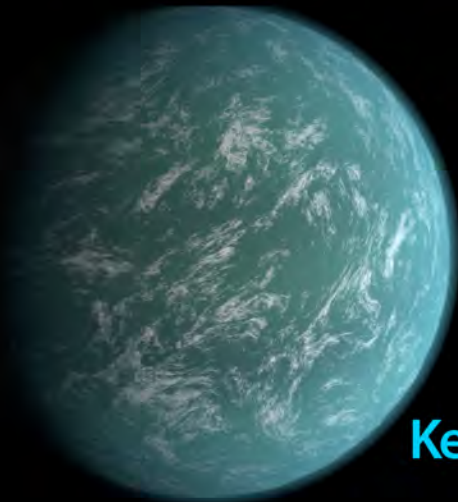
ハビタブル惑星候補の例

Kepler-22 System

もう一つの地球？ 生命は存在するのか？

Solar System

Habitable Zone



Kepler-22b

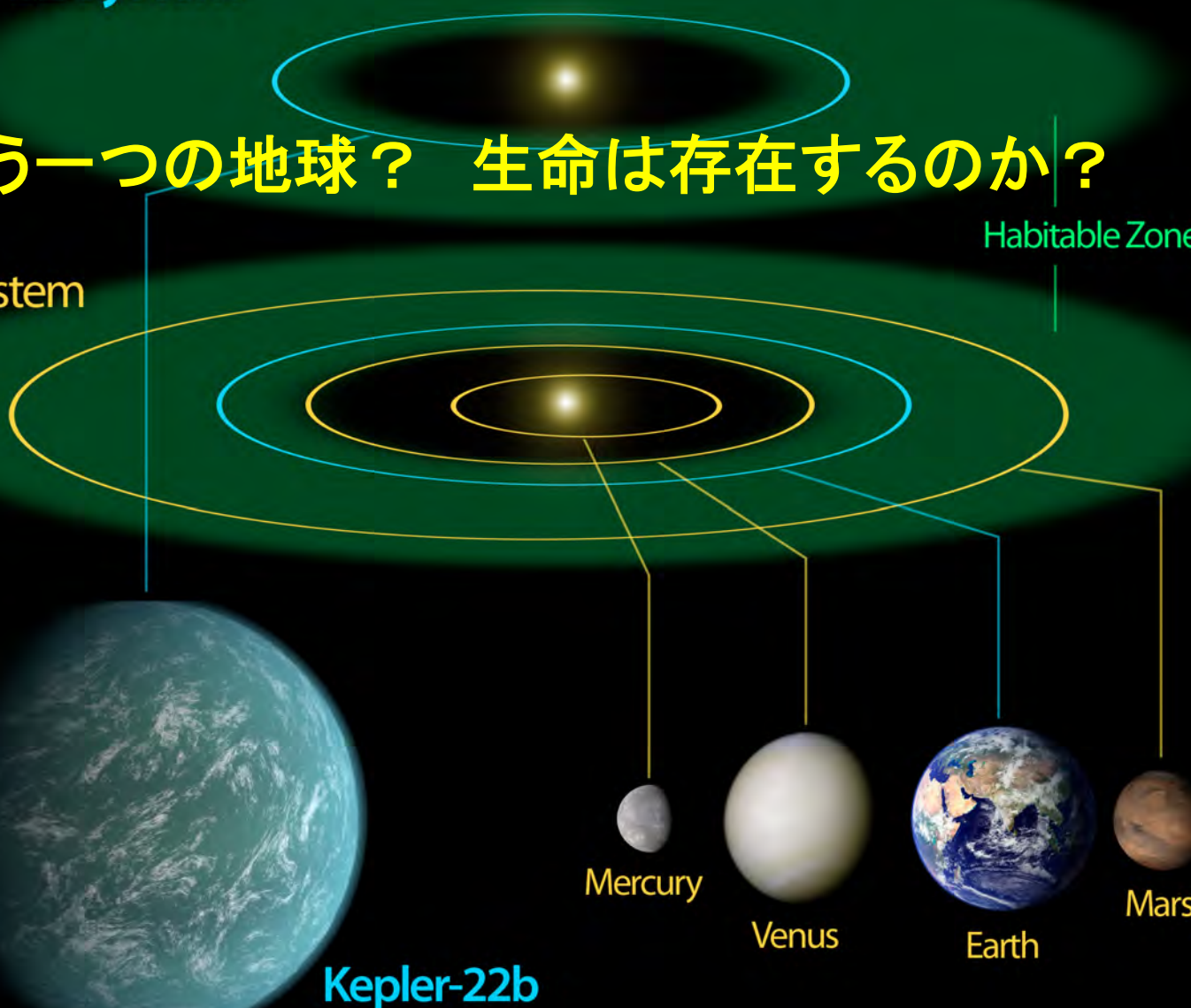
Mercury

Venus

Earth

Mars

Planets and orbits to scale



地球サイズのハビタブル惑星の存在確率

- **GK型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

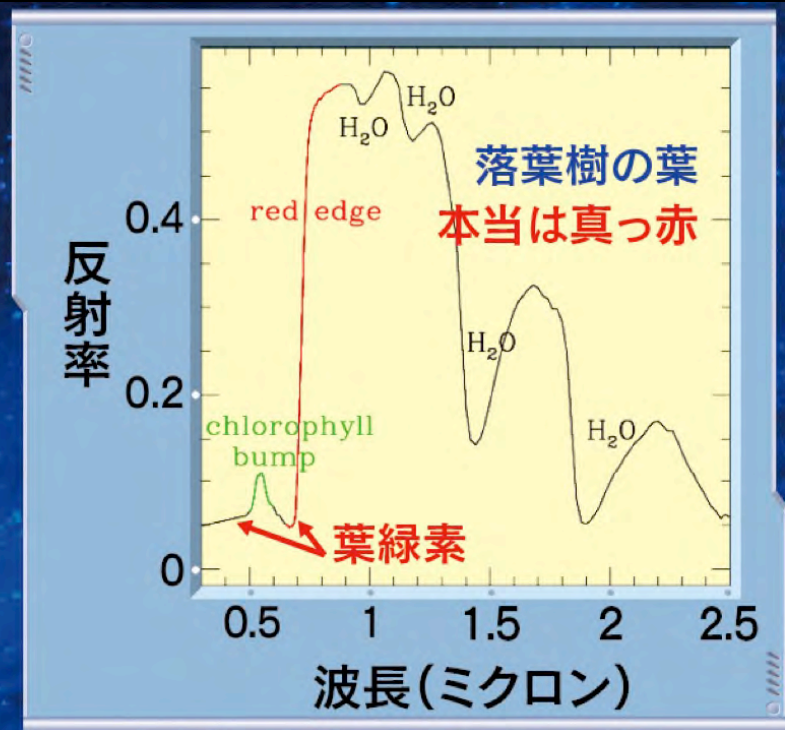
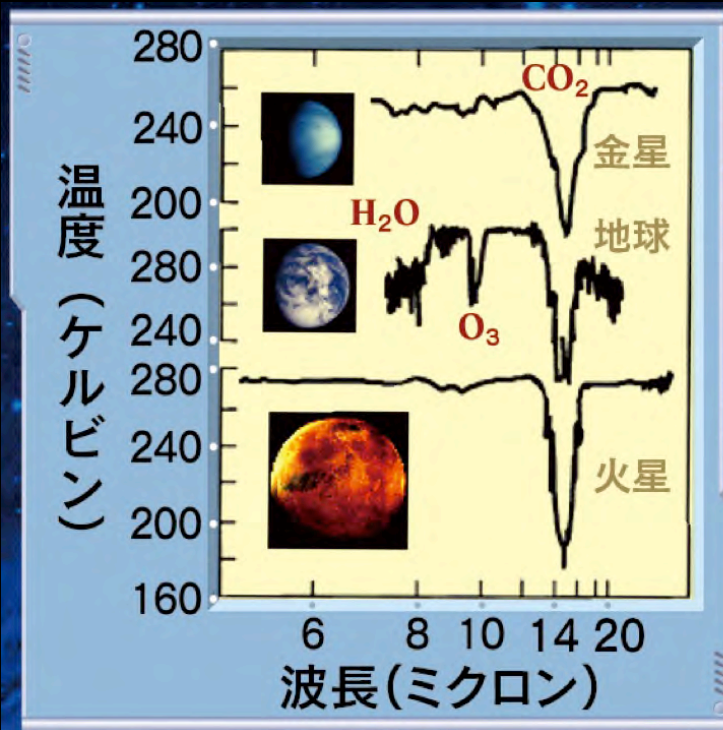
HZ definition	a_{inner}	a_{outer}	$F_{P,\text{inner}}$	$F_{P,\text{outer}}$	f_{HZ} (%)
Simple	0.5	2	4	0.25	22
Kasting (1993)	0.95	1.37	1.11	0.53	5.8
Kopparapu et al. (2013)	0.99	1.70	1.02	0.35	8.6
Zsom et al. (2013)	0.38		6.92		26*
Pierrehumbert and Gaidos (2011)		10		0.01	~50 [†]

リモートセンシング

我が地球の観測

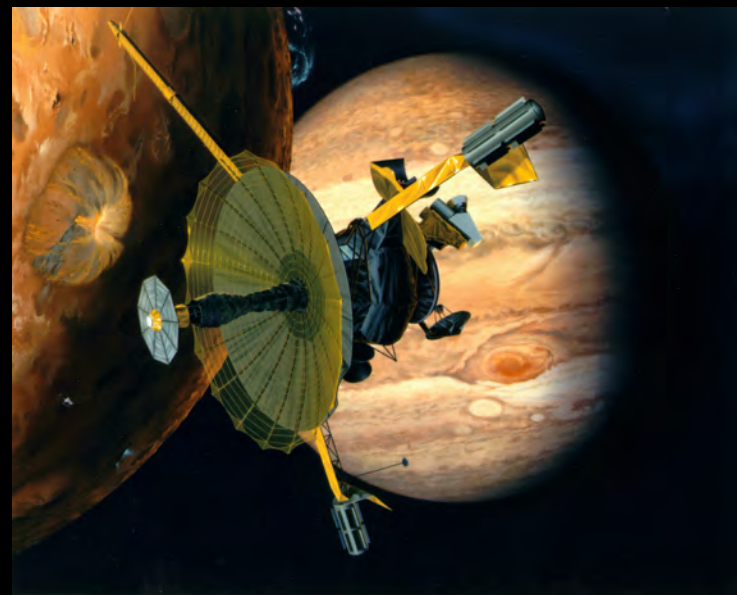
バイオシグニチャー: 生物が存在する兆候

- 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

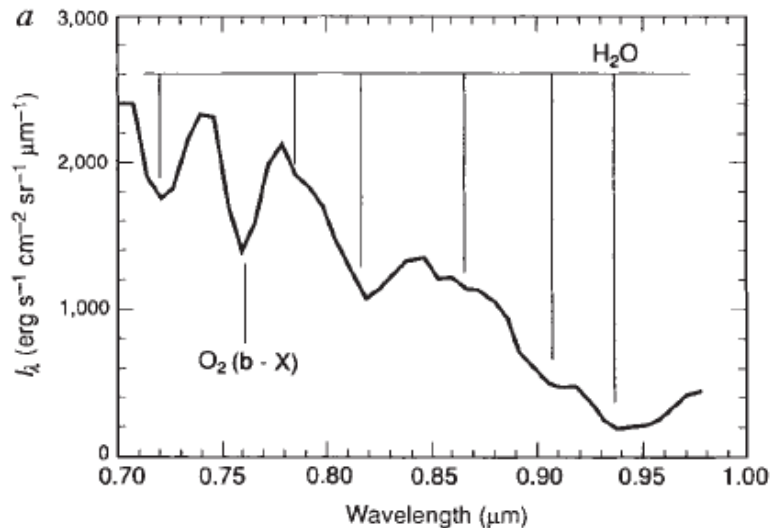
- 1986年5月打ち上げ
- 1990年12月8日一回目の地球スイングバイ時に地球上の“生命探査”
- **地球には生命がいるらしい!**
 - 大量の気体酸素
 - 植物のレッドエッジ
 - 熱平衡から極端にずれた大気中のメタンの存在量
 - 狭帯域で振幅が変化する“不自然な”パルス状電波



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

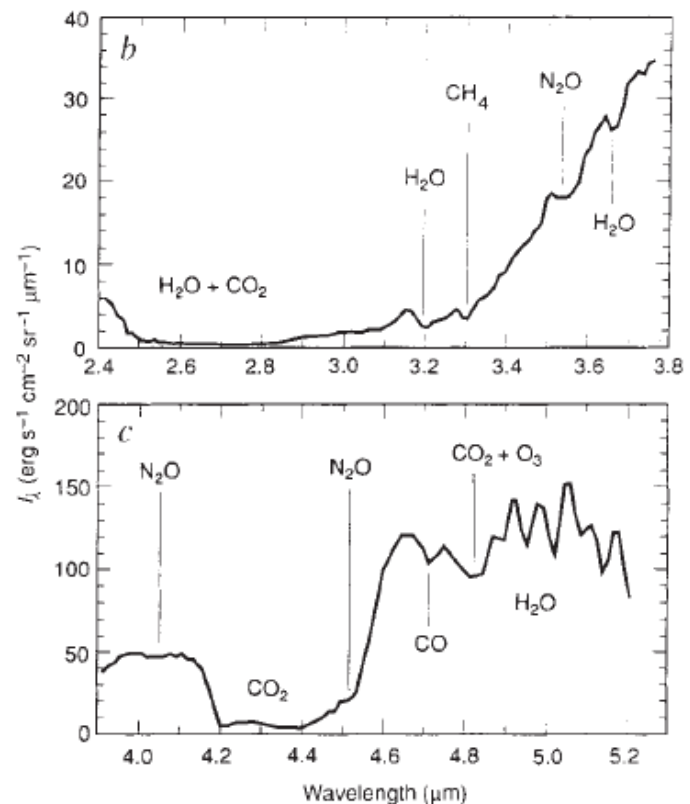
Sagan et al. (1993): 大気分光

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)

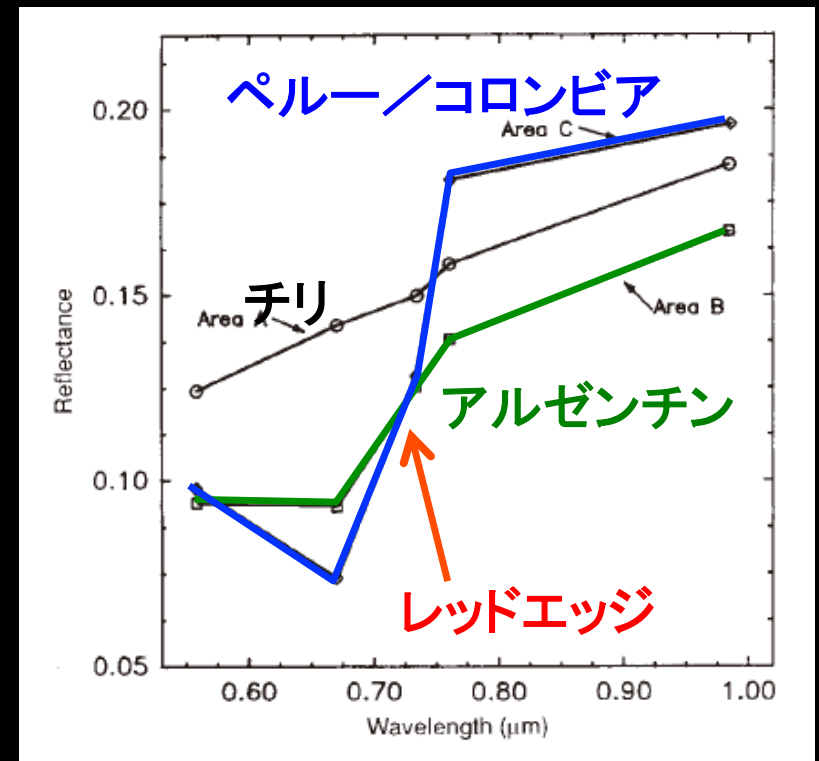
FIG. 1 a, Galileo long-wavelength-visible and near-infrared spectra of the Earth over a relatively cloud-free region of the Pacific Ocean, north of Borneo. The incidence and emission angles are 77° and 57° respectively. The $(b^1\Sigma_g^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-)$ 0-0 band of O_2 at $0.76 \mu\text{m}$ is evident, along with a number of H_2O features. Using several cloud-free regions of varying airmass, we estimate an O_2 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 CO_2 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, N_2O , is apparent at the edge of the CO_2 band near $4.5 \mu\text{m}$, and N_2O 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 CH_4 and N_2O 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

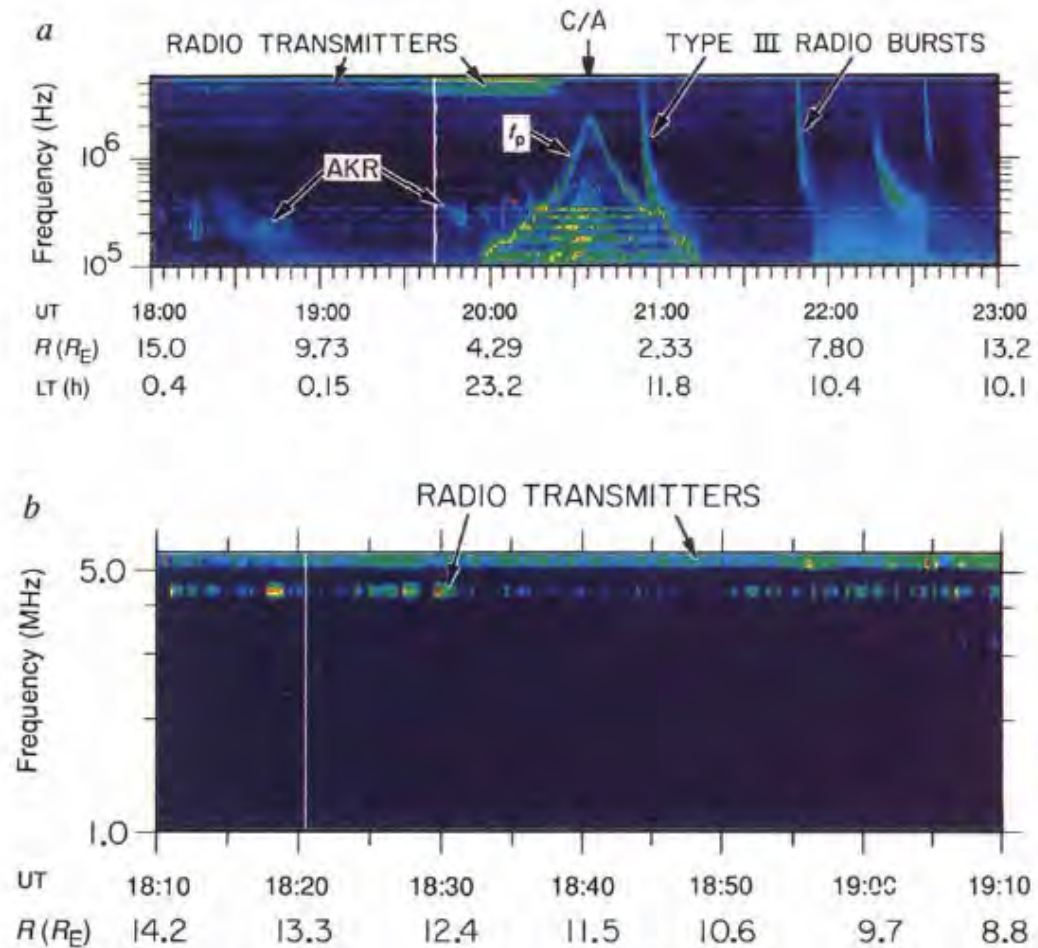
ガリレオ探査機の観測した地球のレッドエッジ



Sagan et al. (1993): 電波観測

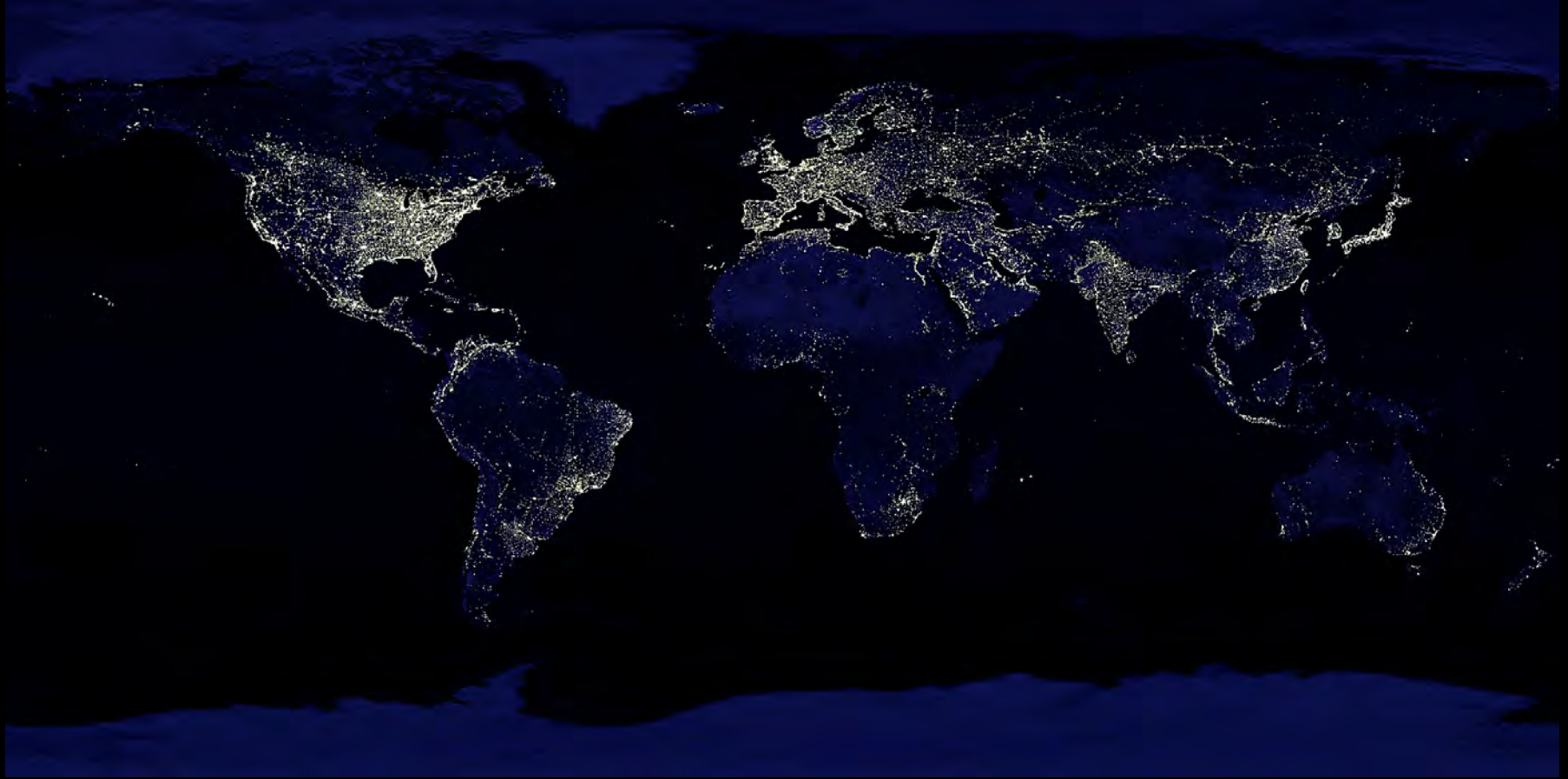
ガリレオ探査機の観測した地球の電波信号の時系列

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.)



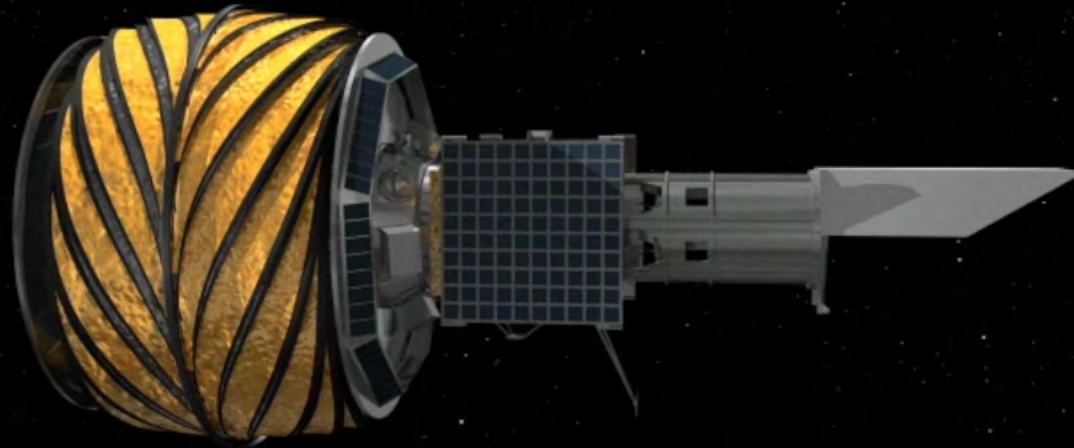
もうひとつの地球の観測

Earth at Night 2012



<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/NightLights/page3.php>

Starshade project: 地球型惑星を直接見る

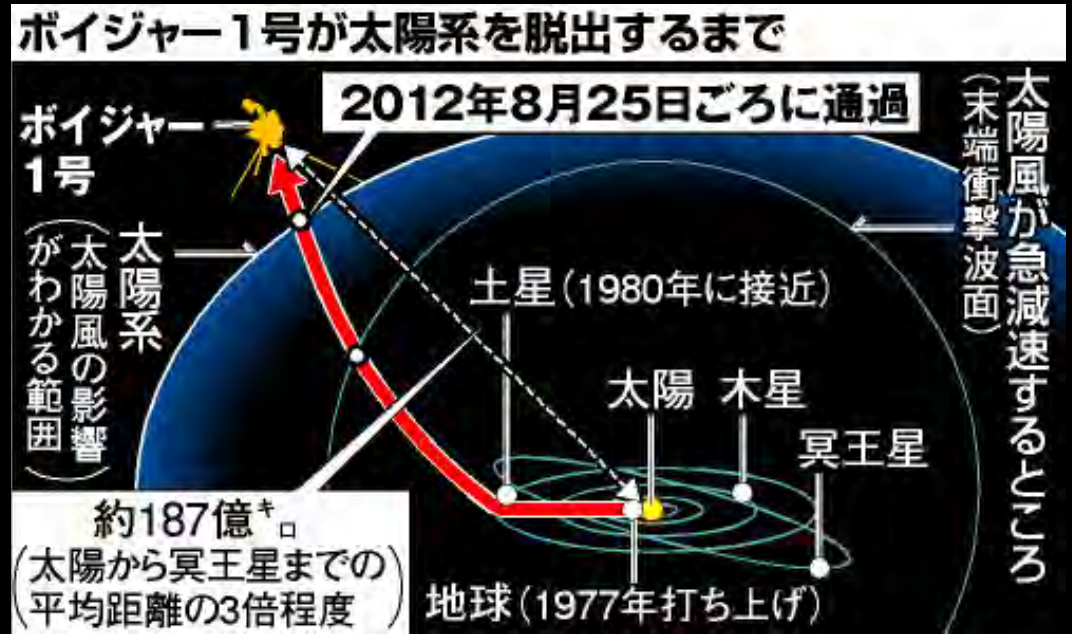


- 宇宙望遠鏡の5万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおき、惑星を直接撮像(プリンストン大学 J.Kasdinらのグループ)

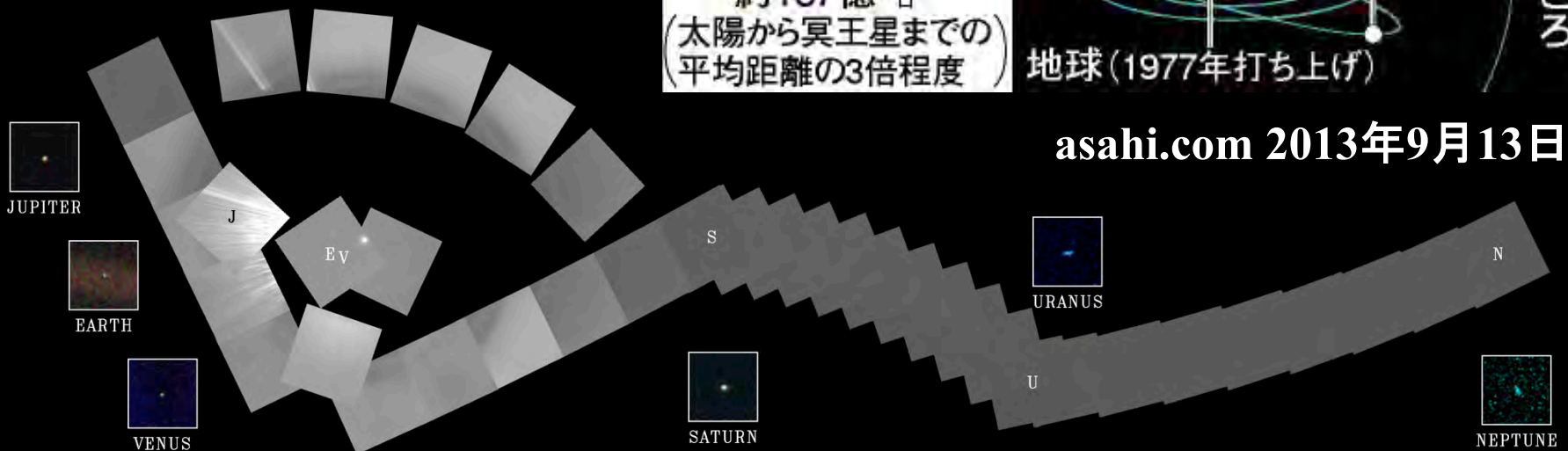
ボイジャー1号による太陽系内惑星撮像

■ 1990年2月14日
@40AU

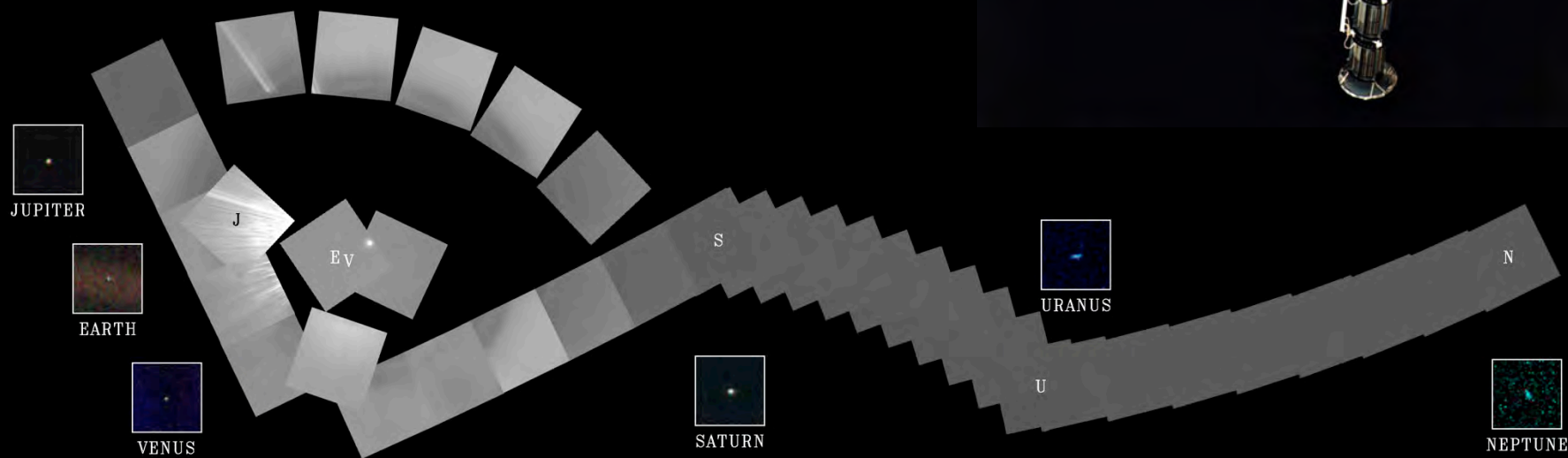
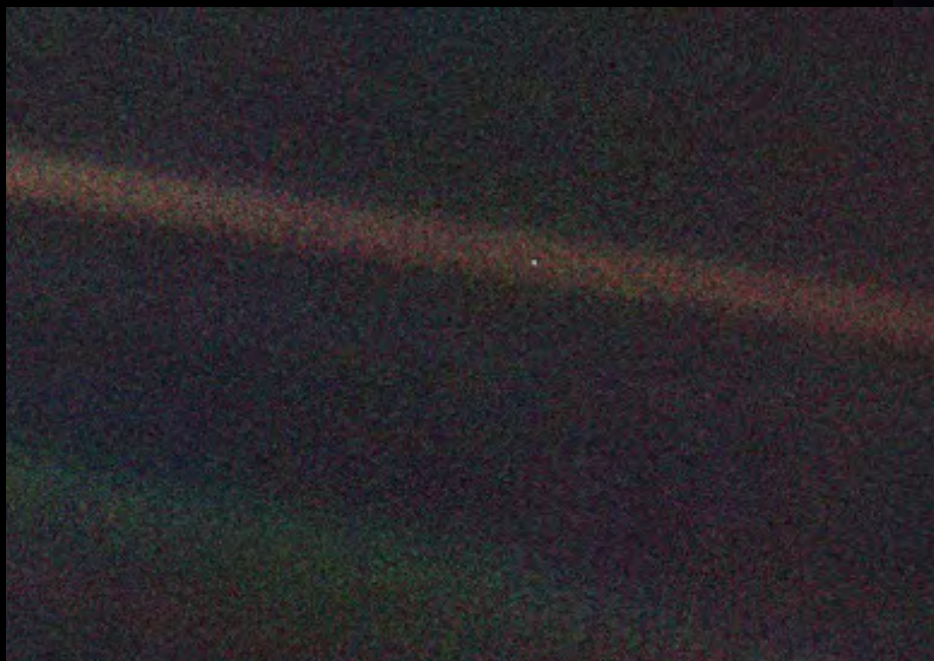
■ カールセーガンが地球の画像を
Pale Blue Dot
と命名



asahi.com 2013年9月13日



ペイル・ブルー・ドット



須藤 靖

私が宇宙に関する議論をした後で、しばしば聞かれるのが「宇宙人はいまいますか」。残念ながら今のところ、この質問の正解は誰も知りませんが、私を含めて、実際には誰も知りません。宇宙人がいるとしても、それを実際に確認できるかどうかは別の話です。

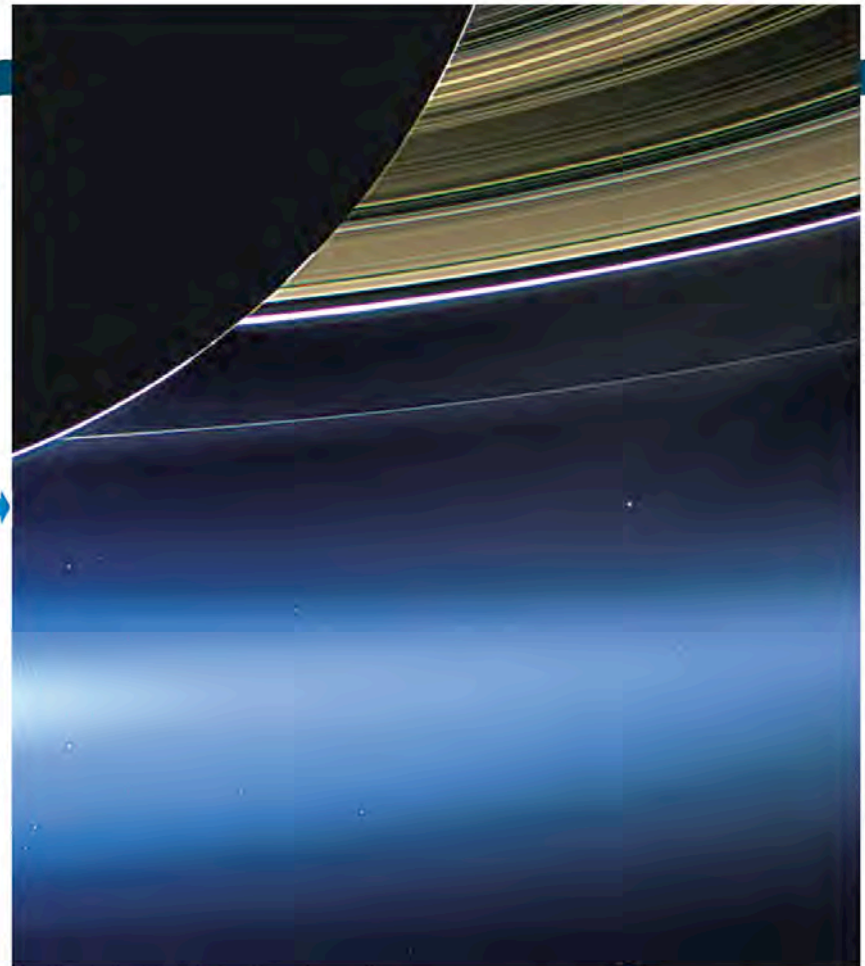
一方これに対して、宇宙人（すなわち、自分の星から出て宇宙に舞出ることができる高度な文明を持つ知的生命体の存在自体は科学的にはおかしな事ではない、少なくともわれわれ人類がその一例なのだから、たまたま宇宙に宇宙人がいるとしても、それを実際に確認できるかどうかは別の話です。

わが地球は、太陽とほろから約46億年前に生まれ、地球で最初の原始的生命が生まれたのはそれから約10億年後と推定されています。しかしそれらが絶し、人類、あるいはその祖先が誕生したのは今から約万年年前、さらには宇宙へ探検を飛ばすことができたのは高度な科学文明を築いたのは、わずか100年以内のことです。

しかもこの現代文明が、これからの高度な生命を育むられるのかもまだわかりません。地球も資源の枯渇（石油は今から約50年以内）に陥り、くさ

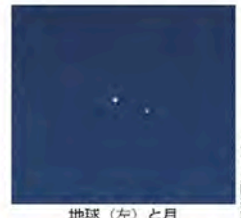
きないというわけですが、ところが多岐の科学的な解釈が可能です。われわれが住むこの地球は、約10億年の歴史があります。仮にそれらがすべて地球の主な感度要素だとすれば、10億年の1万分の1、すなわち1万個の高度文明が発達した惑星があってもよいことになります。したがってこの推定が100%の確率で正しいとしても、この惑星の100%の確率で、われわれが観測できる距離の1、すなわち1万個の惑星が1個存在していることになるのです。さらに、われわれが観測できる距離の1、すなわち1万個の惑星が1個存在しているという仮定が、光年以内の宇宙には、天の川と同じような銀河が約10億個と推定されています。したがって、われわれが観測できる距離の1、すなわち1万個の惑星が1個存在しているという仮定が、光年以内の宇宙には、天の川と同じような銀河が約10億個と推定されています。したがって、われわれが観測できる距離の1、すなわち1万個の惑星が1個存在しているという仮定が、光年以内の宇宙には、天の川と同じような銀河が約10億個と推定されています。

土星から見た地球



カッシーニ探査機が撮影した土星の輪と地球 ©NASA/JPL-Caltech ※写真左辺と下辺の矢印延長線が交差するあたりが地球

出典…http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2013-229 http://www.jpl.nasa.gov/spacemages/details.php?id=PIA1171



地球（左）と月

（宇宙物理学者、東京大学教授） 非難と土曜掲載 といえ、「困難」は不可能とは言えません。多くの天文学者が、生物として文明が存在する「宇宙人」の地球一を発見するために探査機を飛ばしています。しかし、これはあくまで科学的な推定です。科学的には、生物が存在する可能性は非常に高いです。自由な想像を巡らなければならない十分な理由があるでしょう。と、おっしゃる。

高知新聞二〇一六年五月十三日

土星から 見た地球

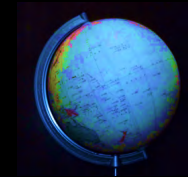
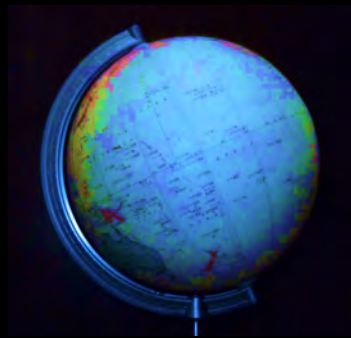


- 土星探査機カッシーニが撮影した地球と月
 - 2013年7月20日(日本時間): 2万人がこちらに手を振っている

View from Saturn (Cassini)
900 million miles away

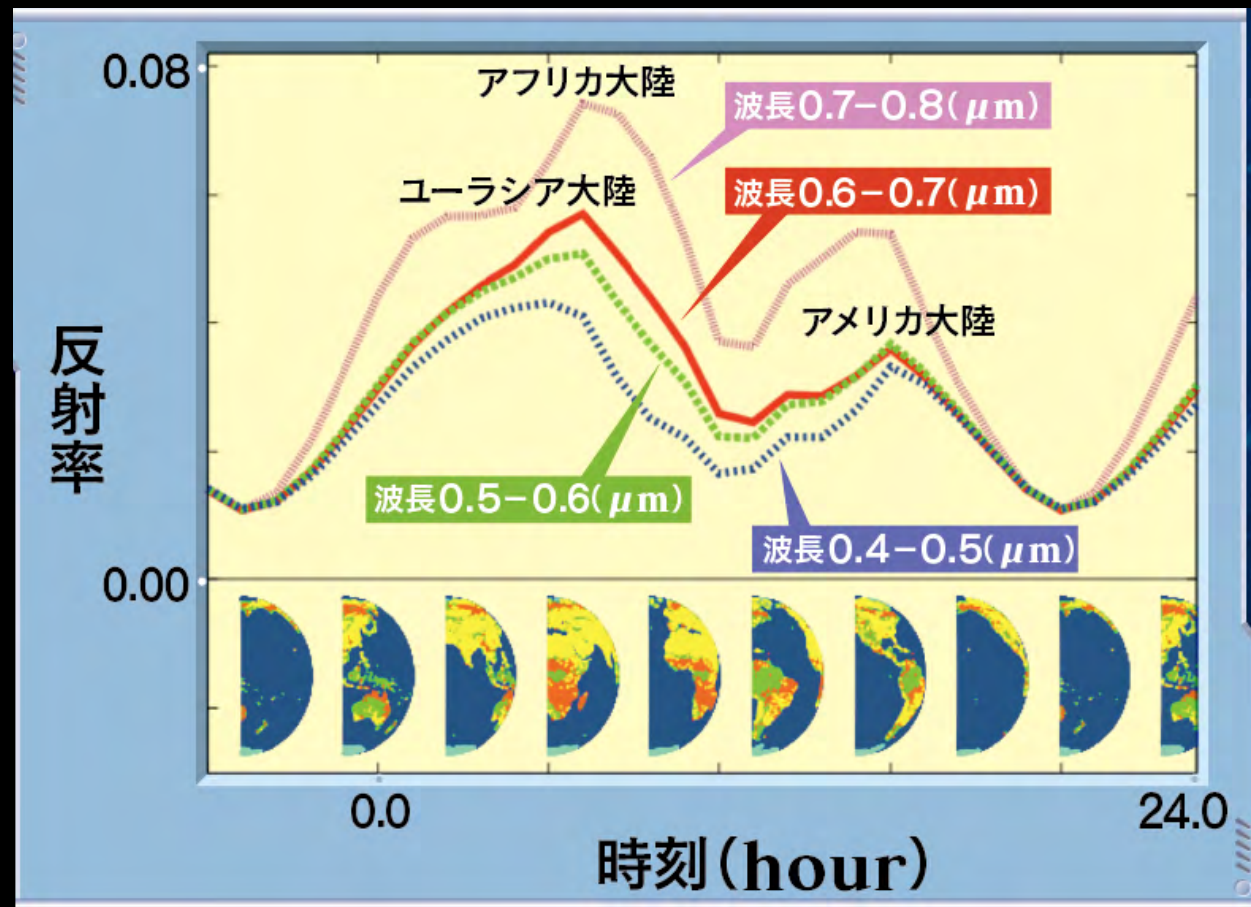
ペイルブルードットを超えて

- 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



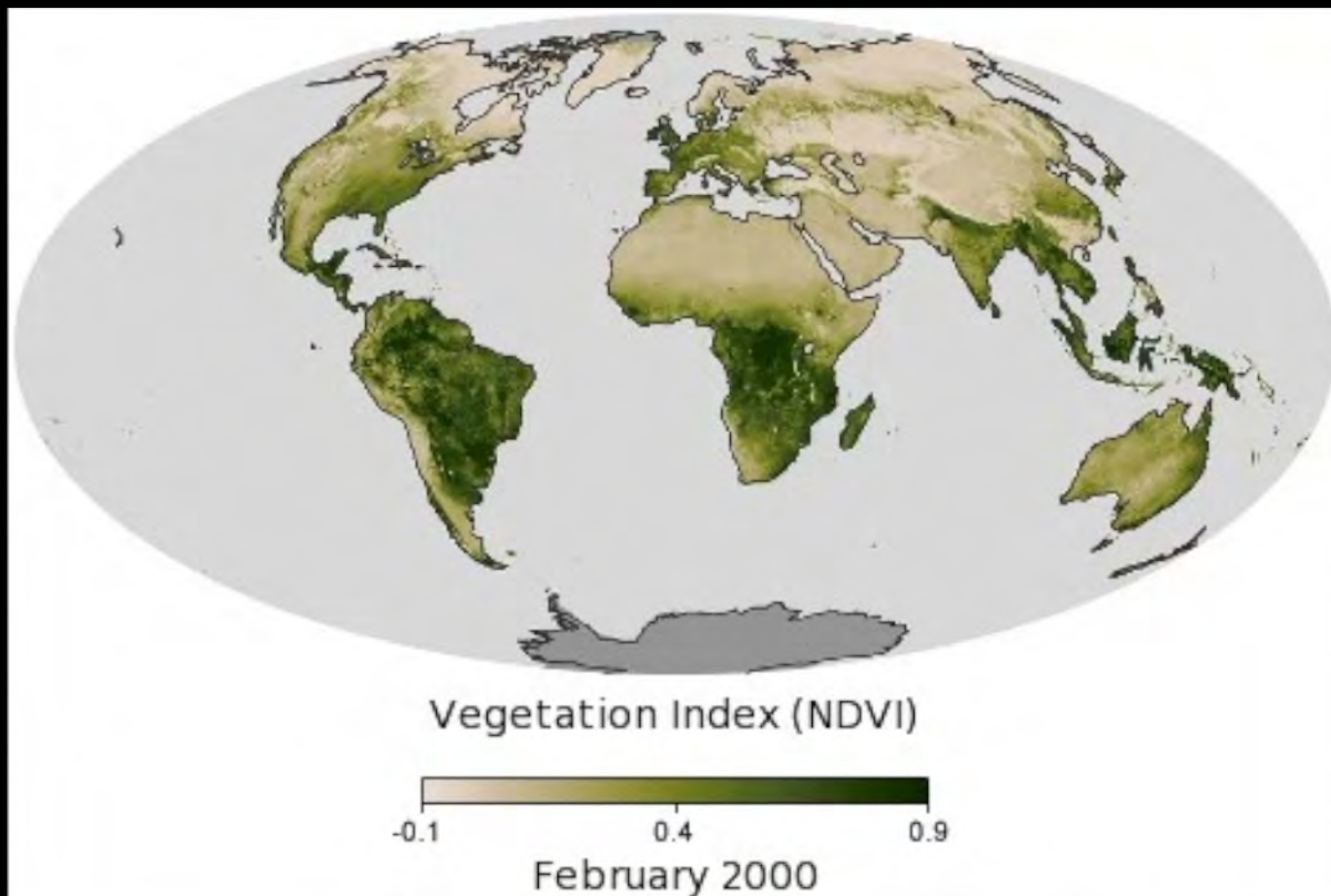
もうひとつの地球の色

- 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)

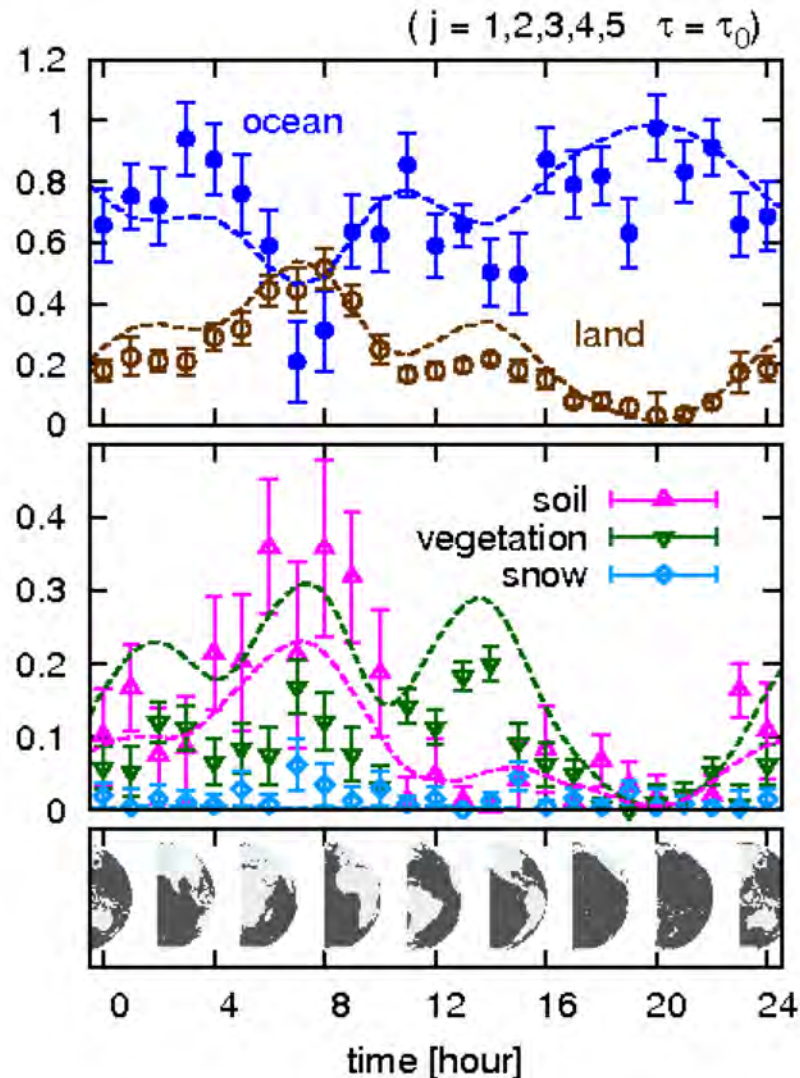
地球観測衛星Terraによる 植生分布地図の年次変化



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

もう一つの地球の色を解読する

(重みつき)表面積比



- 雲は無視
- 中心星の光が完全にブロックできた場合
- 10pc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

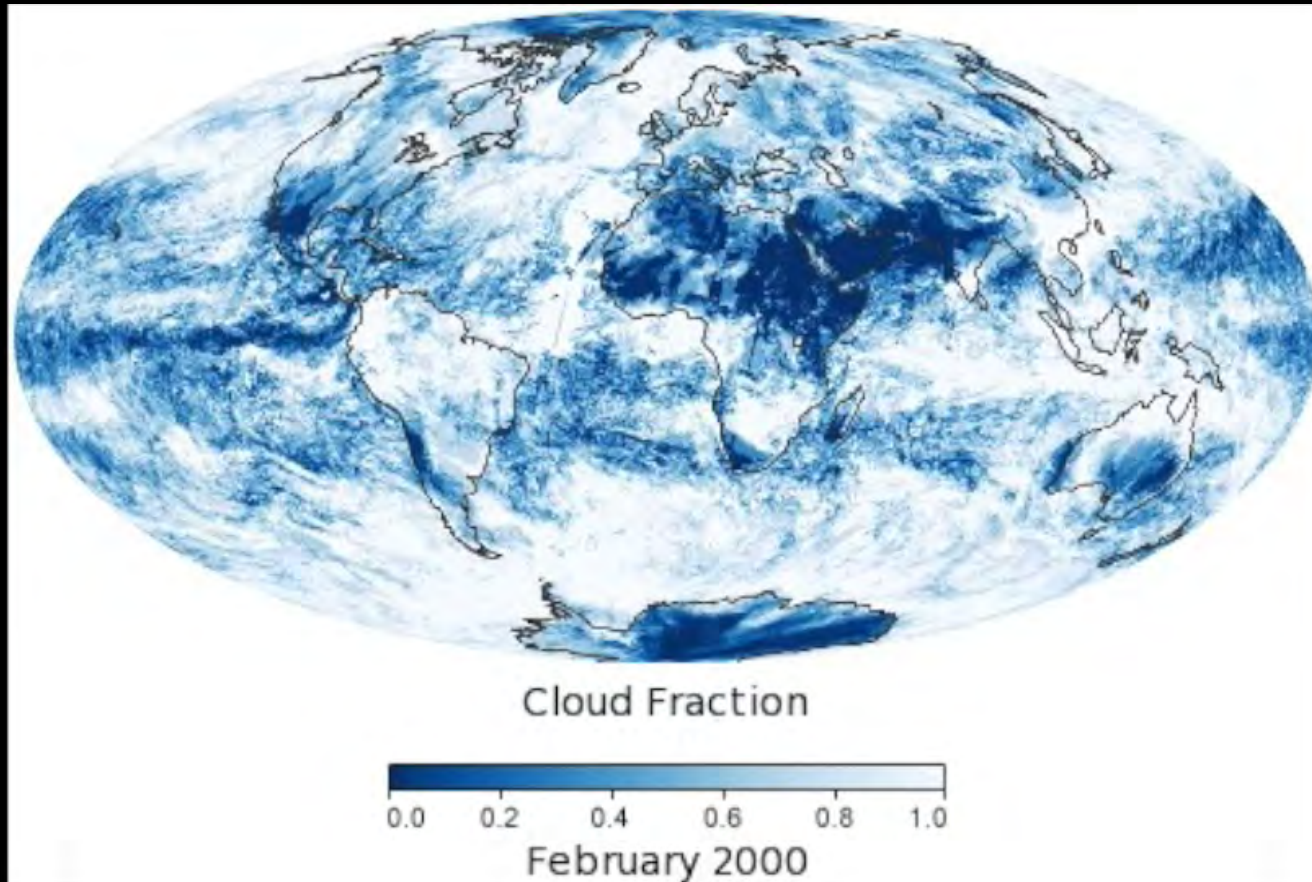


F型星



日経サイエンス2008年7月号
Nancy Y.Kiang

さらに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

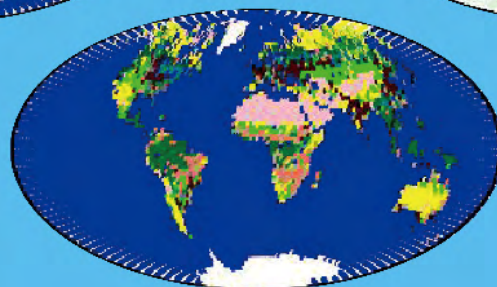
海



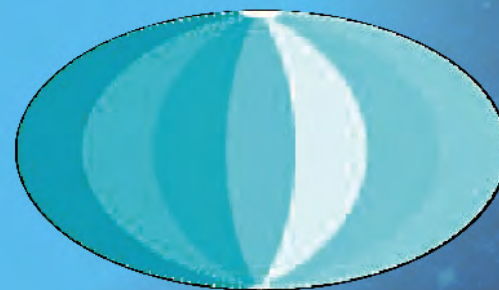
植生



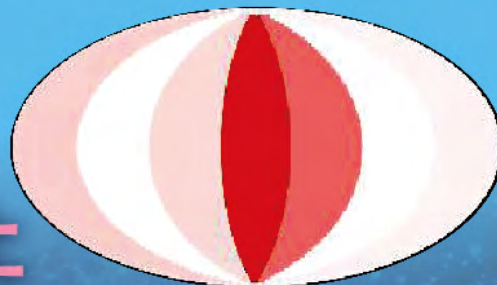
雲



雪



土



藤井友香 他(2011)

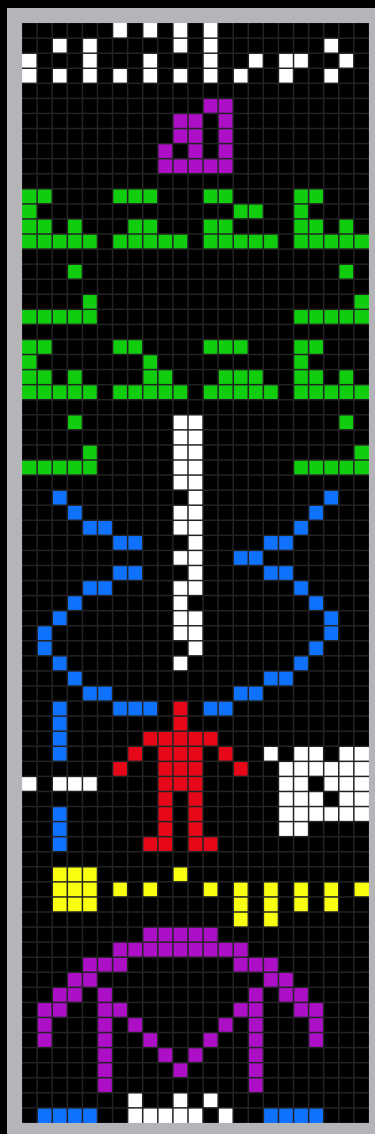
知的生命体探查

SETI: Search for Extra-Terrestrial Intelligence

- バイオマーカーとして最も確実なのは、知的文明からの信号
- 1GHzから20GHzの電波（低周波数では銀河系のシンクロトロン放射、高周波数では地球大気が雑音）
- 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

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)

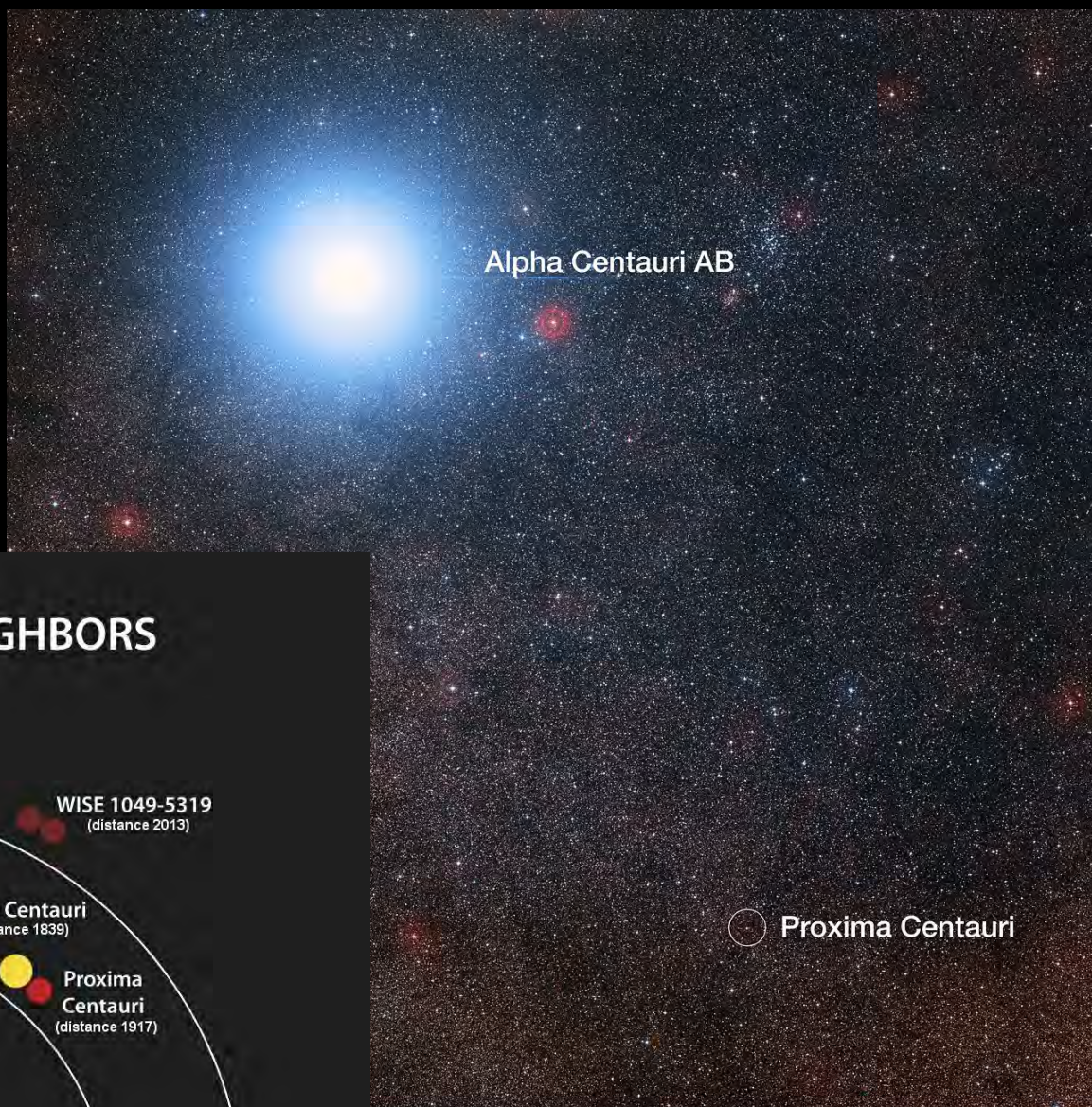
アレシボ電波望遠鏡

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



THE SUN'S CLOSEST NEIGHBORS



Proxima Centauri

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

プロキシマ ケンタウリ

- ケンタウルス座アルファ星
 - 太陽に最も近い恒星 (3重連星系)
 - α Cen A, B, C (=プロキシマ ケンタウリ)
- プロキシマ ケンタウリ
 - 距離: 4.25光年、M型星 (赤色矮星)
 - 表面温度 $(3042 \pm 117) \text{K}$
 - 絶対光度 $0.0017 L_{\odot}$
 - 半径 $(0.141 \pm 0.007) R_{\odot}$
 - 質量 $(0.123 \pm 0.006) M_{\odot}$
 - 自転周期 83.5 days、年齢 48.5 億年

A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri

- G.Anglada-Escude et al.

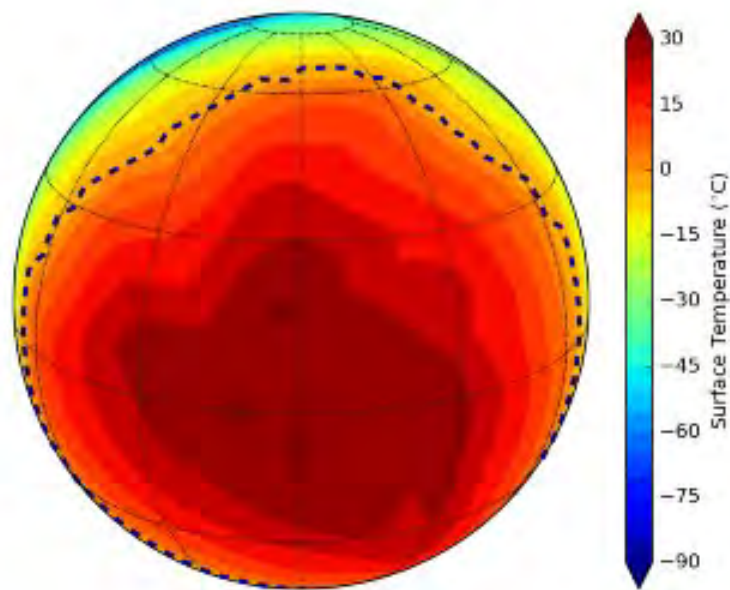
Nature 25 August 2016 issue, 536(2016)437

■ プロキシマ ケンタウリ b

- 公転周期 11.186 (11.184-11.187) days
- 質量 $M_p \sin i = 1.27$ (1.10-1.46) M_{earth}
- 離心率 < 0.35
- 軌道長半径 0.0485 (0.0434-0.0526) AU
- 平衡温度 234 (220-240) K

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

表面温度シミュレーション (潮汐ロックを仮定した場合)



<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>

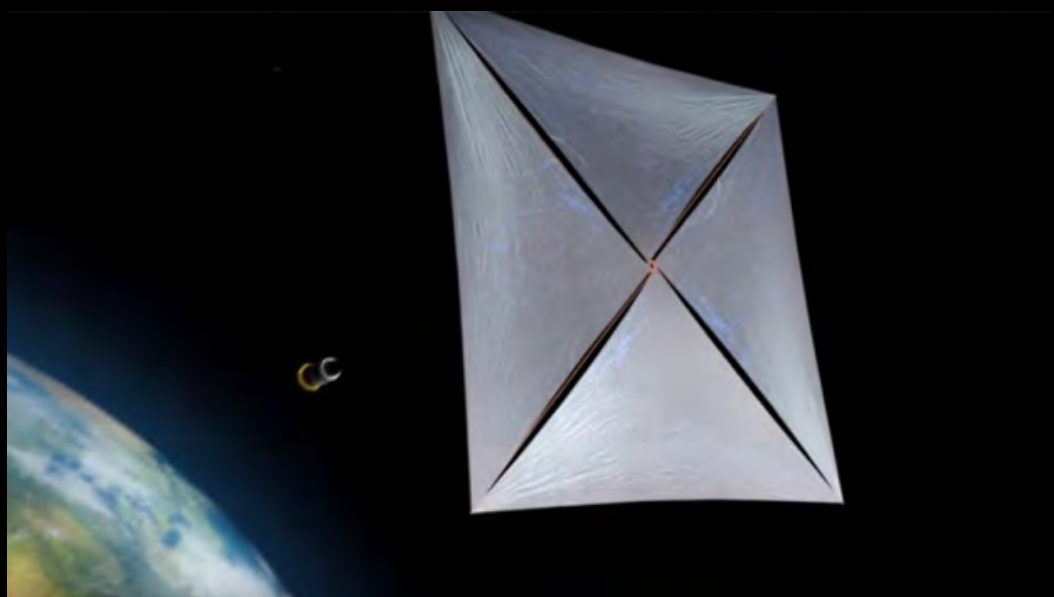
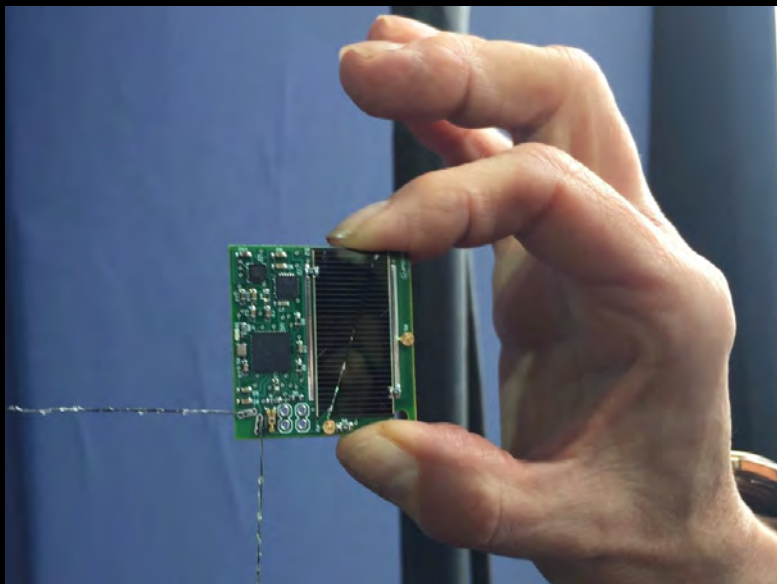
- ロシア出身のIT投資家ユリ・ミルナー(素粒子理論が学位取得)が地球外知的生命を探查するために、2015年7月20日に立ち上げた
 - **ブレイクスルーリッスン**: 地球外文明の電波あるいはレーザーによる信号を受信
 - **ブレイクスルーメッセージ**: 宇宙空間へ送るメッセージとして最適なものを提案するとともに、その行為の哲学的倫理的妥当性を検討
 - **ブレイクスルースターショット**: ケンタウルス座アルファ星へ探查機群を送るための概念設計検討

ブレイクスルースターショット

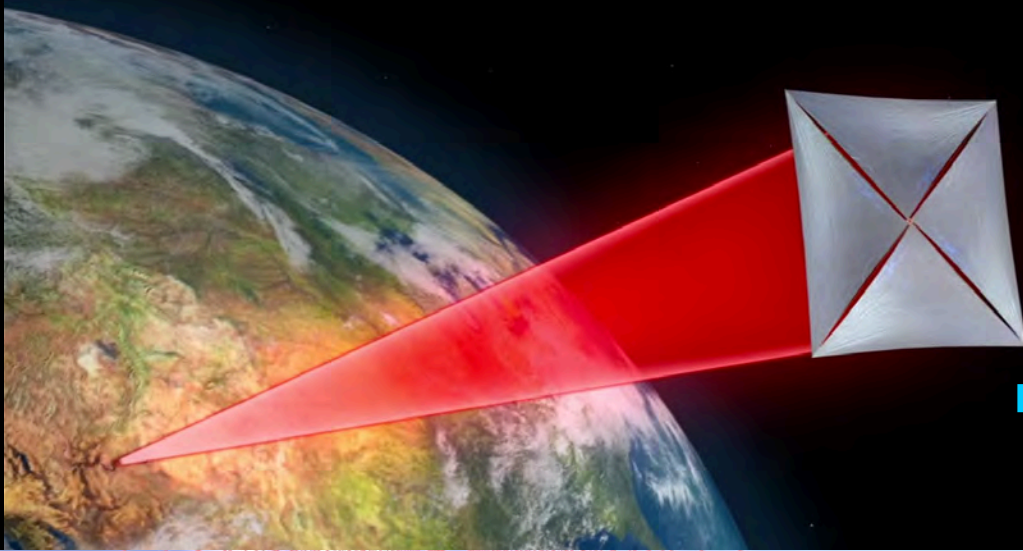
<http://breakthroughinitiatives.org/Initiative/3>

- 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×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

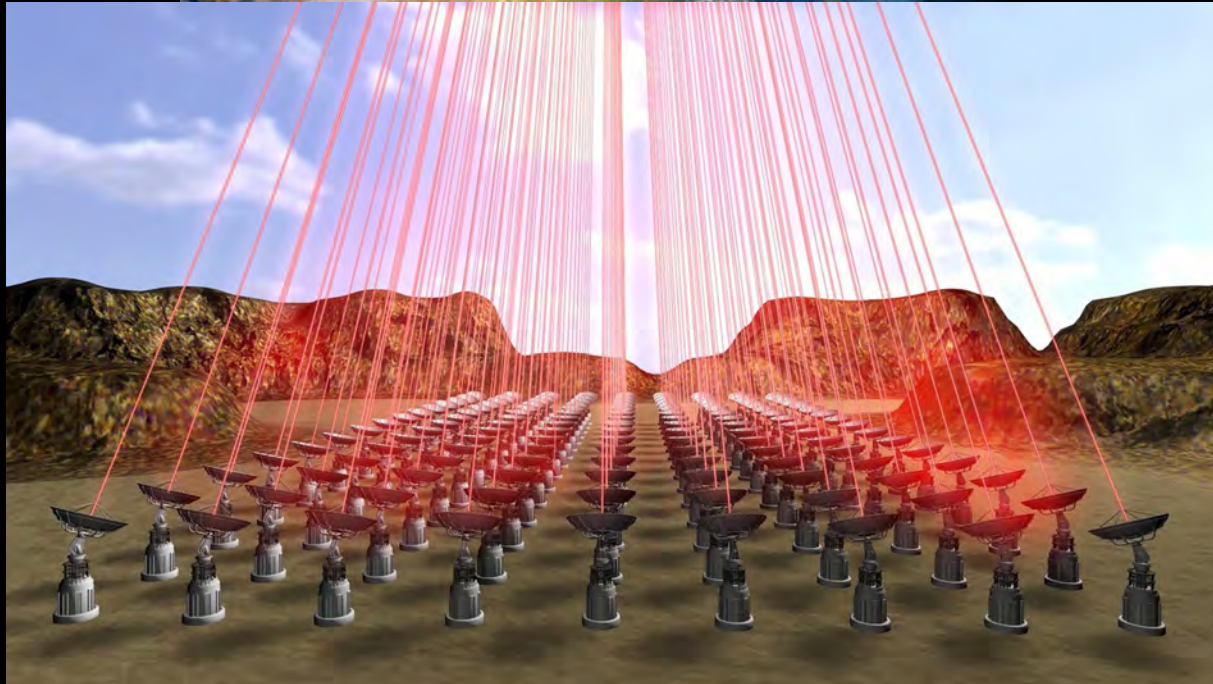
スターチップ



地上のレーザーで光速の20%に加速

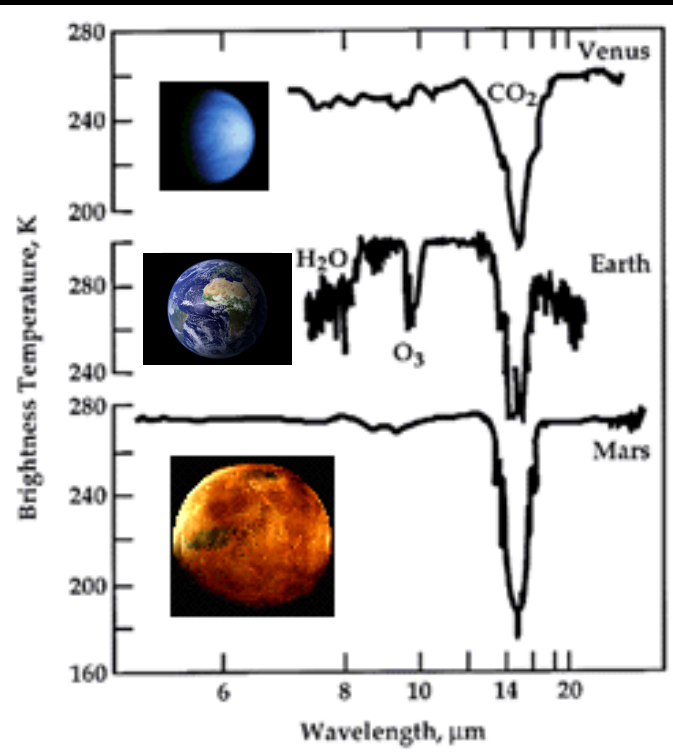


- 20年後に打ち上げ、さらに20年かけてでプロキシマケンタウリに到達しデータを取得。その4年後には地球にデータが届く。そこには何が写っているのか？



まとめ

太陽系外惑星： そのさきにあるもの —天文学から宇宙生物学へ—



- **ハビタブル惑星の発見**
 - 水が液体として存在する地球型惑星
 - **バイオシグニチャーの提案と検出**
 - 酸素、水、オゾン、植物、核爆発、、
 - **リモートセンシングの成否が鍵！**
 - 惑星の放射・反射・吸収スペクトルを中心星から分離する
-
- **直接見に行くことができない系外惑星の表面組成・分布を天文観測だけでどこまで推定できるか**
 - レッドエッジは宇宙生物学に至る一つの道か？

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