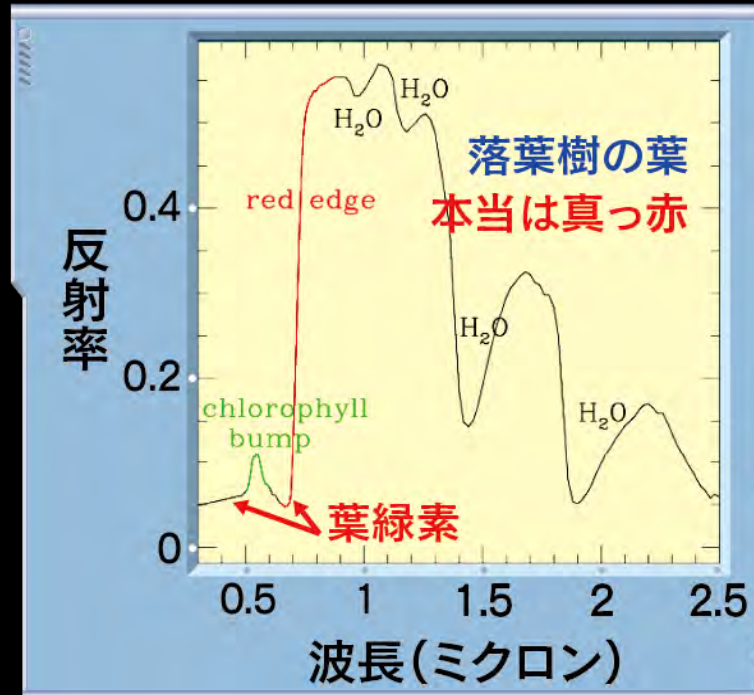
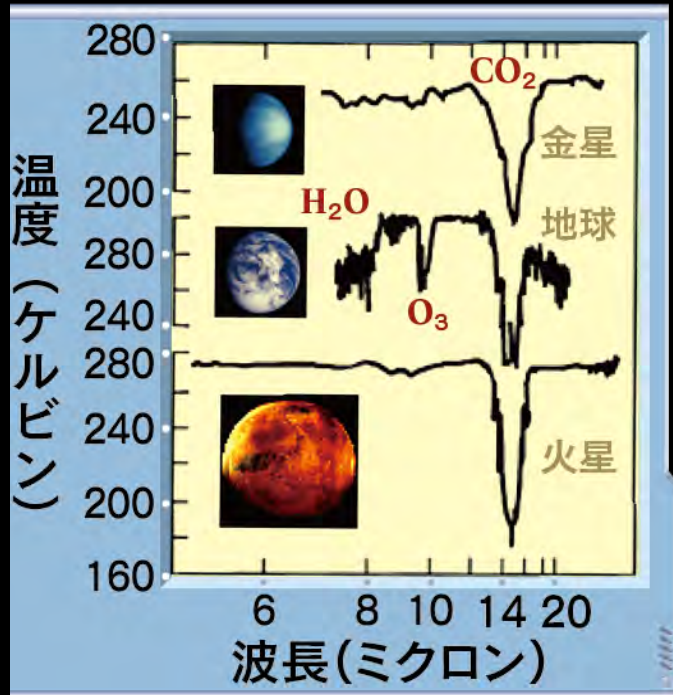


# 太陽系外惑星の世界

[http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation\\_2016j.html](http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2016j.html)



東京大学大学院理学系研究科

物理学専攻 須藤 靖

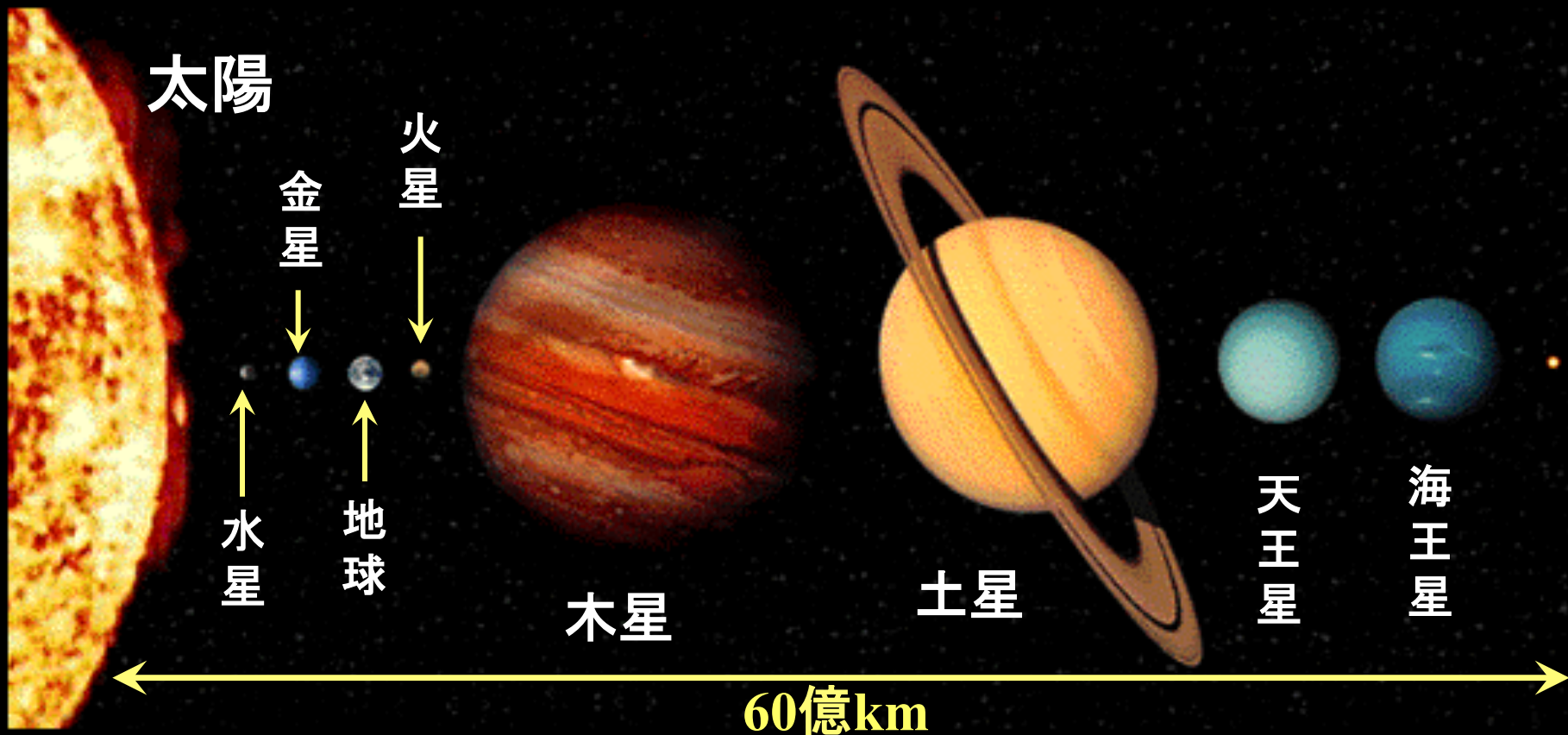
東京大学理学部オープンキャンパス

2016年8月4日



# 太陽系外惑星の発見

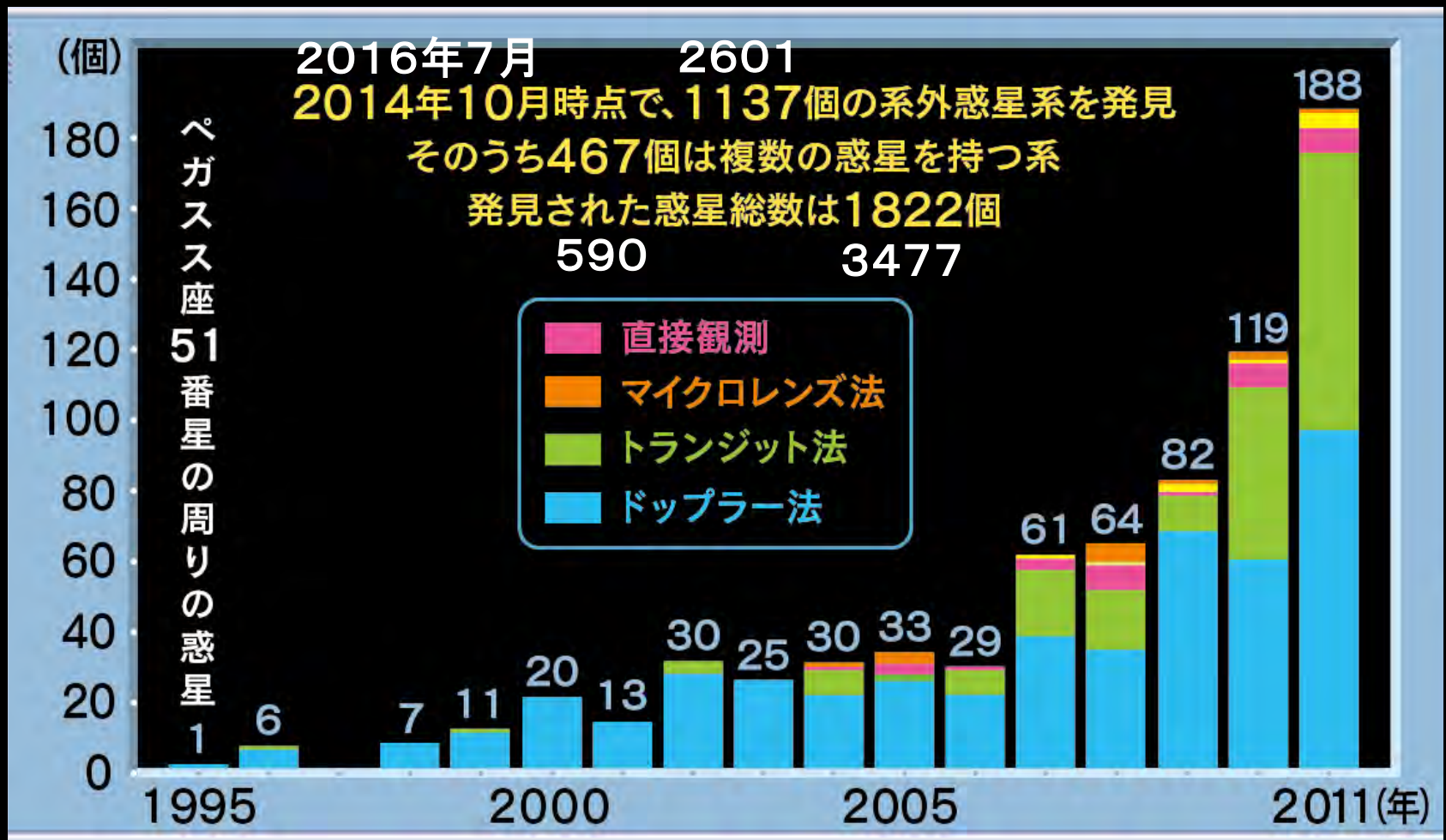
# 八つの惑星：我が太陽系



(太陽からの距離は別として、惑星の相対的な大きさはほぼ実際の比の通り)

<http://www.solarviews.com/eng/homepage.htm> © Calvin J. Hamilton

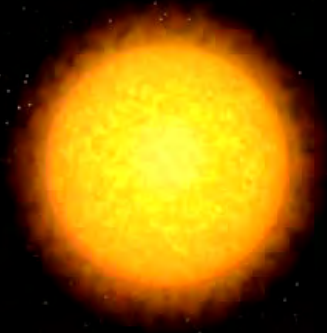
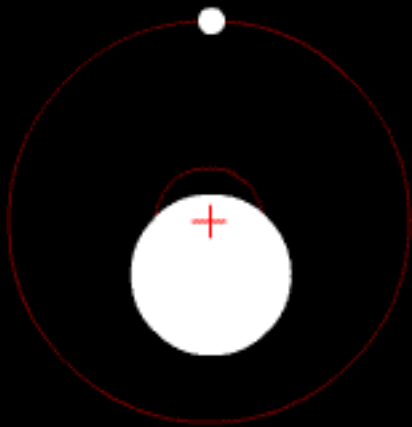
# 太陽系外惑星発見史



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

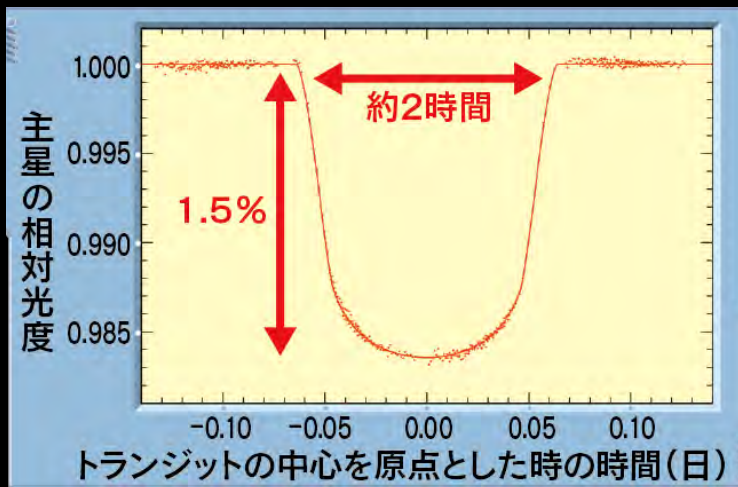
- 惑星の公転に同期して中心星の速度が毎秒数十メートル程度、周期的に変動

## ■ 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

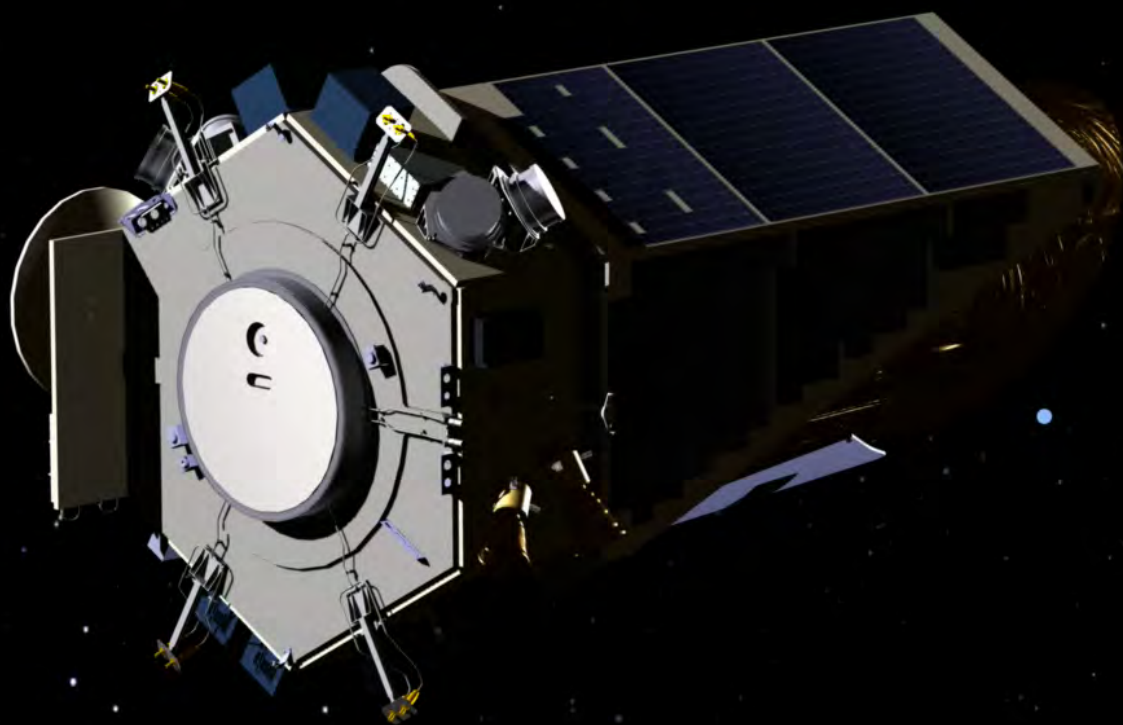
## ■ 直接撮像

- 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

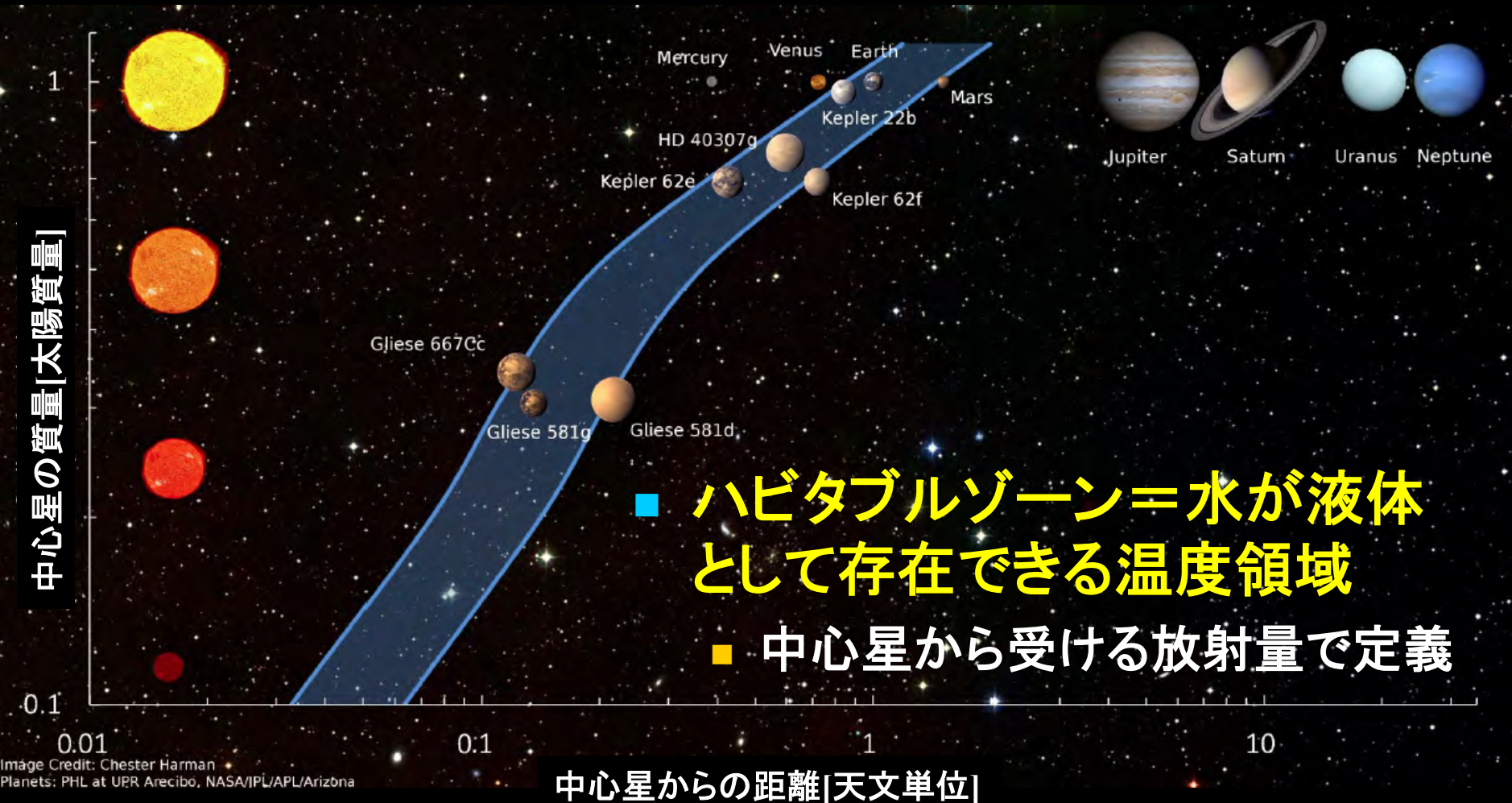


<http://kepler.nasa.gov/>

# 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3割以上が惑星を持ち、2割以上は複数の惑星を持つ
- **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(水が液体として存在する適温の)惑星候補
  - (2-3)地球質量の岩石惑星?(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

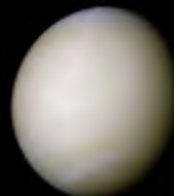
Habitable Zone



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<sup>+2.2</sup><sub>-1.7</sub> % (公転周期が200~400日のもの)**

Table 1. Occurrence of small planets in the habitable zone

HZ definition	$a_{\text{inner}}$	$a_{\text{outer}}$	$F_{P,\text{inner}}$	$F_{P,\text{outer}}$	$f_{\text{HZ}}$ (%)
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 <sup>†</sup>

リモートセンシング

我が地球の観測

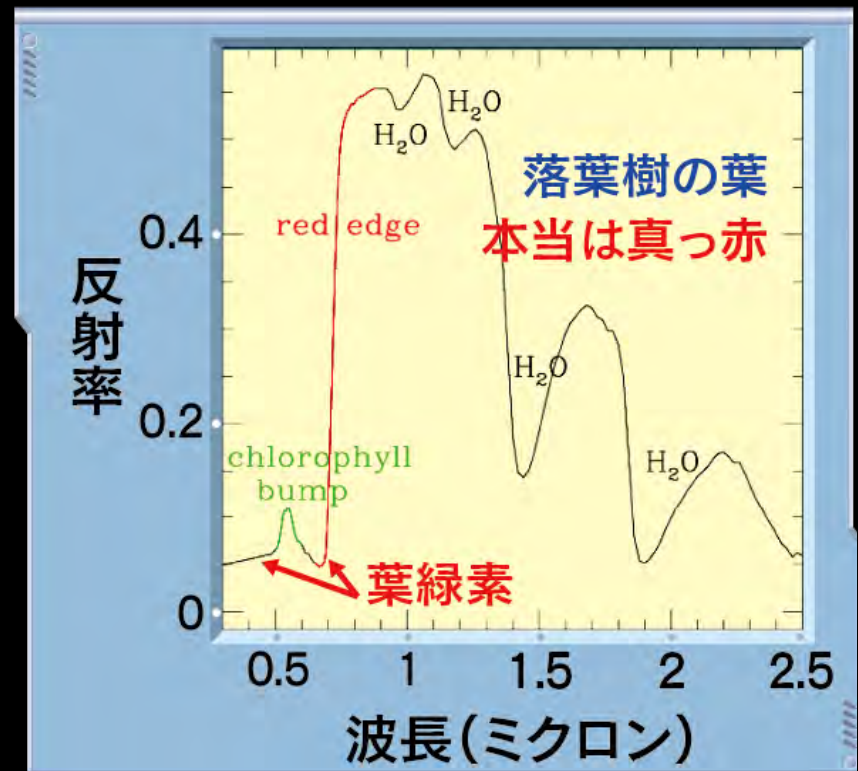
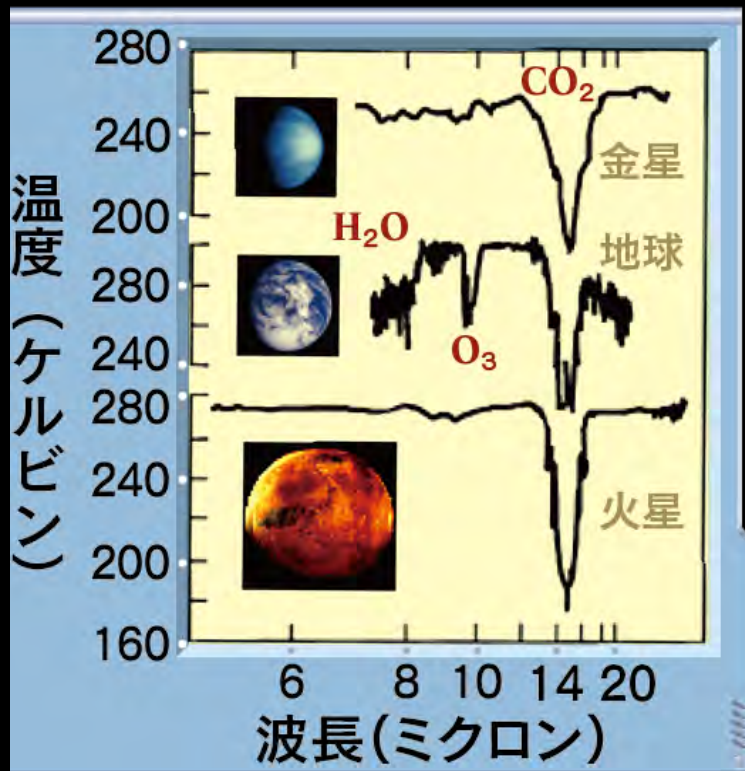
# バイオシグニチャー：生物が存在する兆候

- 何が決定的バイオシグニチャーなのかは不明
  - 地球外での生命の定義？
  - 地球上での生命の指標
    - 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
    - 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
  - 天文学で検出可能な限界は何か
  - どのような検出器・望遠鏡を作るべきか

# 天文学から宇宙生物学へ

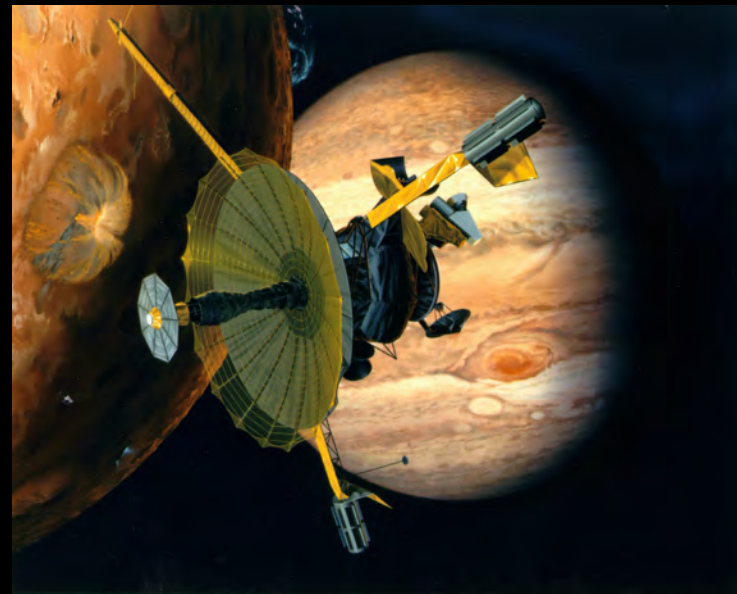
## ハビタブル惑星に生命の兆候を探す

- 水とオゾンの吸収が観測されるのは地球のみ
- 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(レッドエッジ)



# ガリレオ探査機による地球上の生命探査

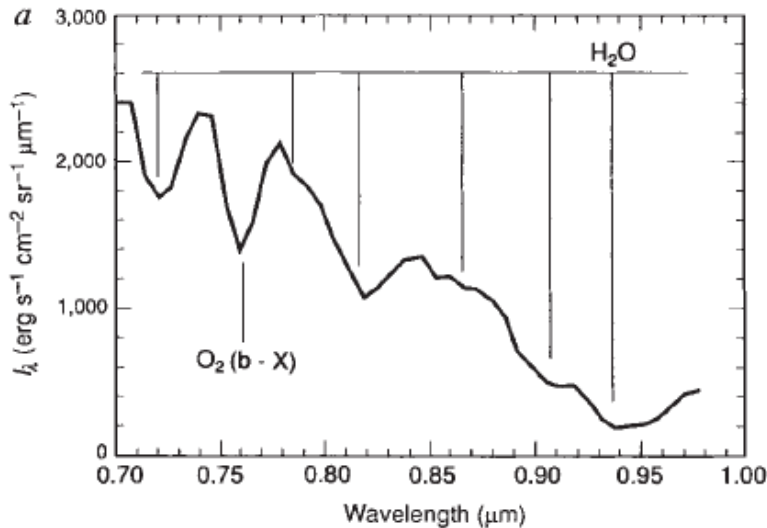
- 1986年5月打ち上げ
- 1990年12月8日一回目の地球スイングバイ時に地球上の“生命探査”
- **地球には生命がいるらしい!**
  - 大量の気体酸素
  - 植物のレッドエッジ
  - 熱平衡から極端にずれた大気中のメタンの存在量
  - 狭帯域で振幅が変化する“不自然な”パルス状電波



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

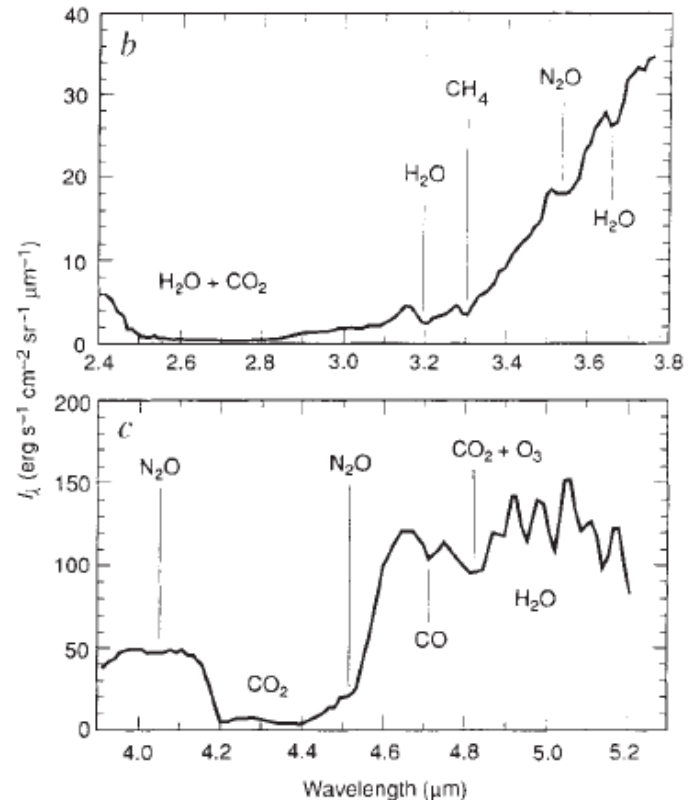
# Sagan et al. (1993): 大気分光

## 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)

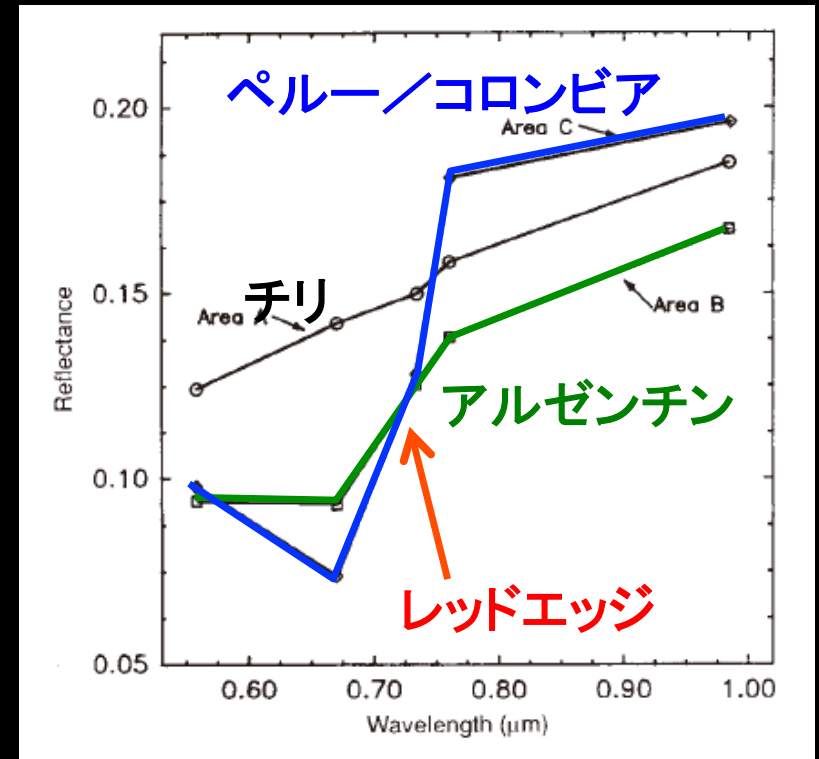
FIG. 1 a, Galileo long-wavelength-visible and near-infrared spectra of the Earth over a relatively cloud-free region of the Pacific Ocean, north of Borneo. The incidence and emission angles are  $77^\circ$  and  $57^\circ$  respectively. The  $(b^1\Sigma_g^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-)$  0-0 band of  $O_2$  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  $1.5 \text{ km-atmag} \pm 25\%$ . b and c, Infrared spectra of the Earth in the  $2.4\text{--}5.2 \mu\text{m}$  region. The strong  $\nu_3$   $CO_2$  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  $\nu_3$  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 estimate<sup>10</sup> of the  $CH_4$  and  $N_2O$  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

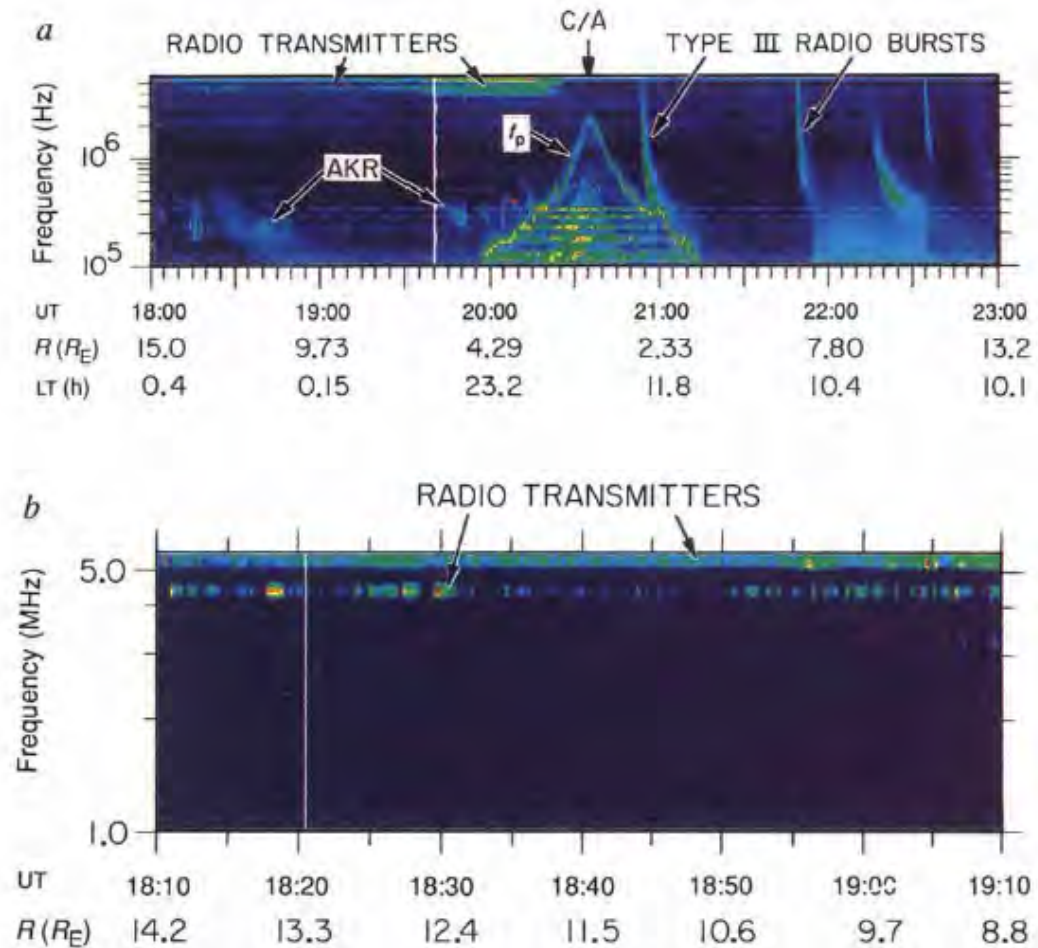




# Sagan et al. (1993): 電波観測

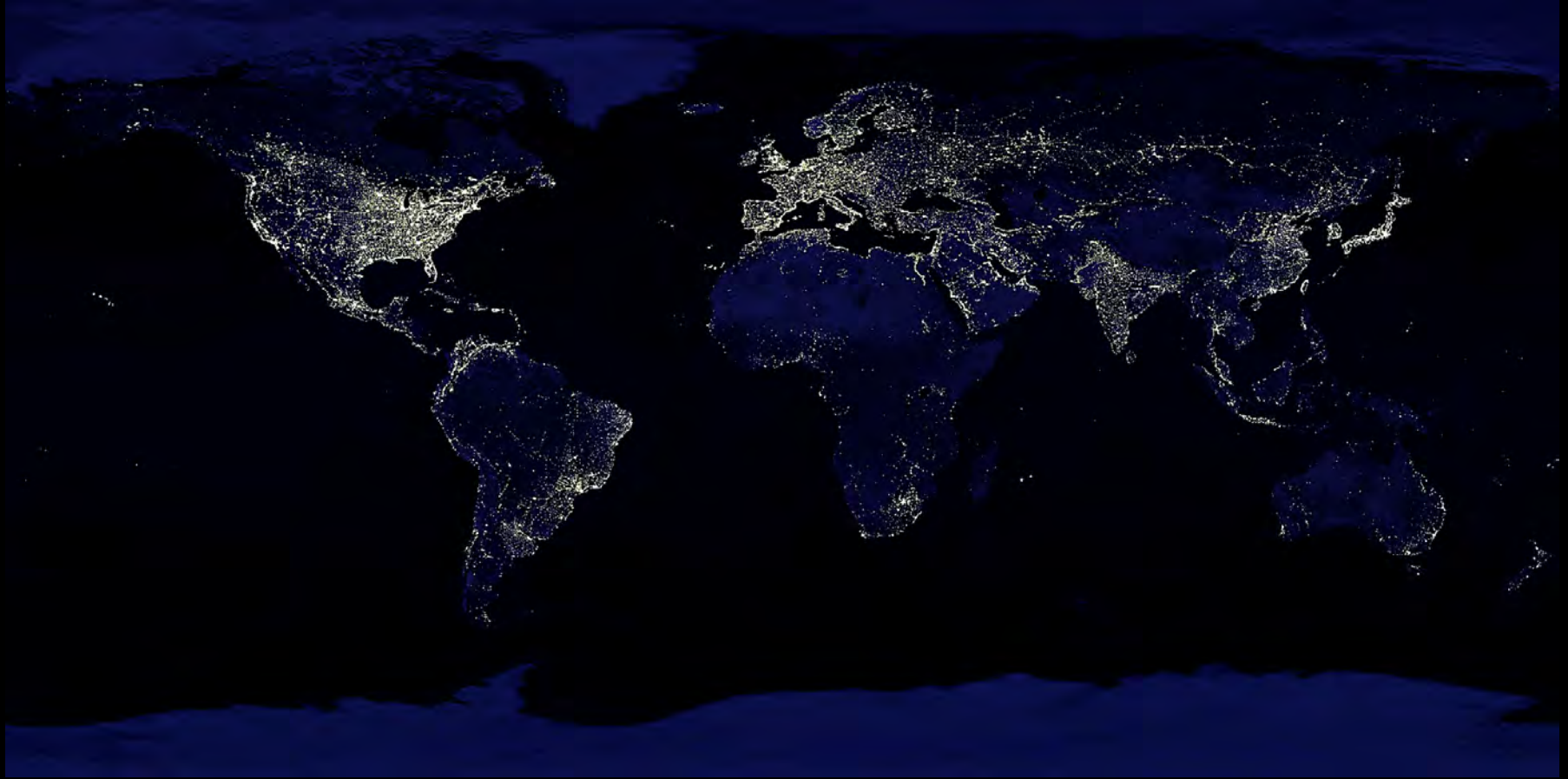
## ガリレオ探査機の観測した地球の電波信号の時系列

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.)



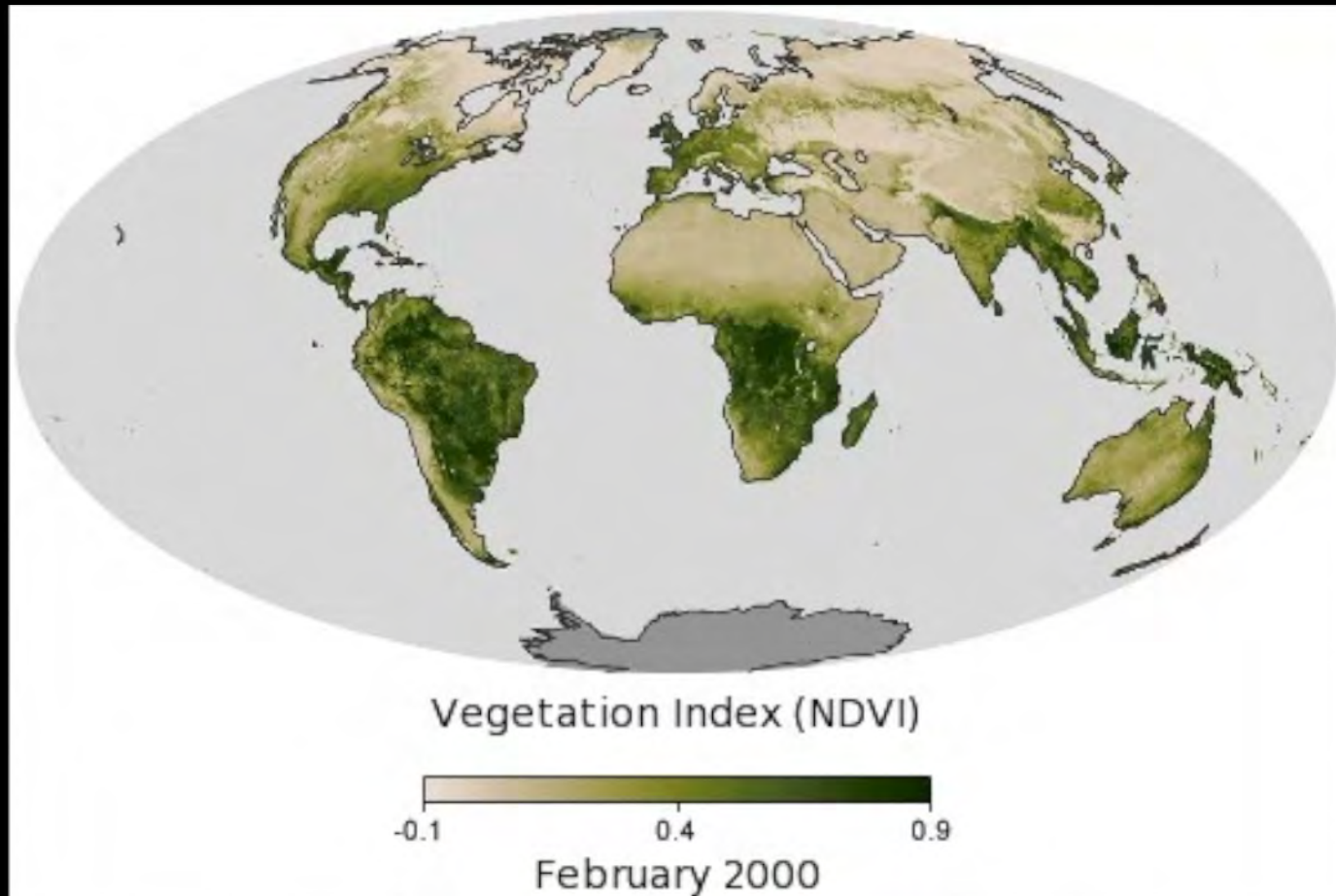
# もうひとつの地球の観測

# Earth at Night 2012



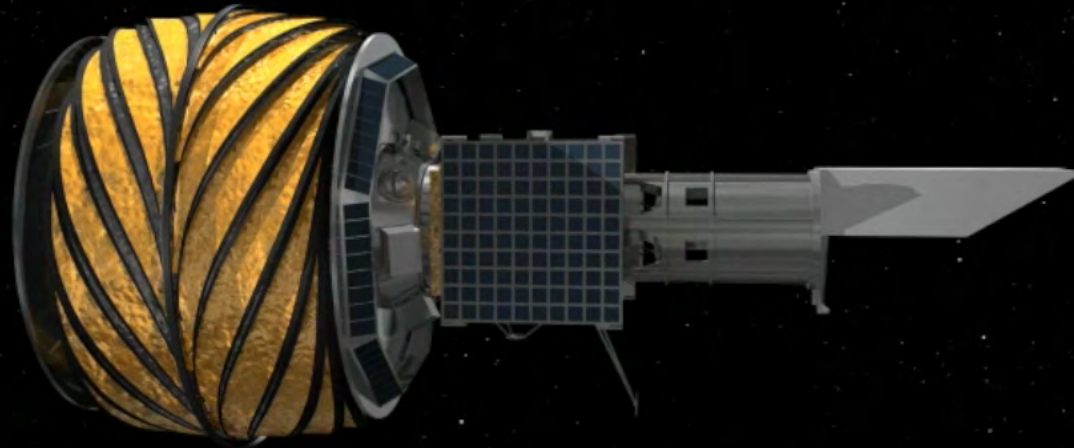
<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/NightLights/page3.php>

# 地球観測衛星Terraによる 植生分布地図の年次変化



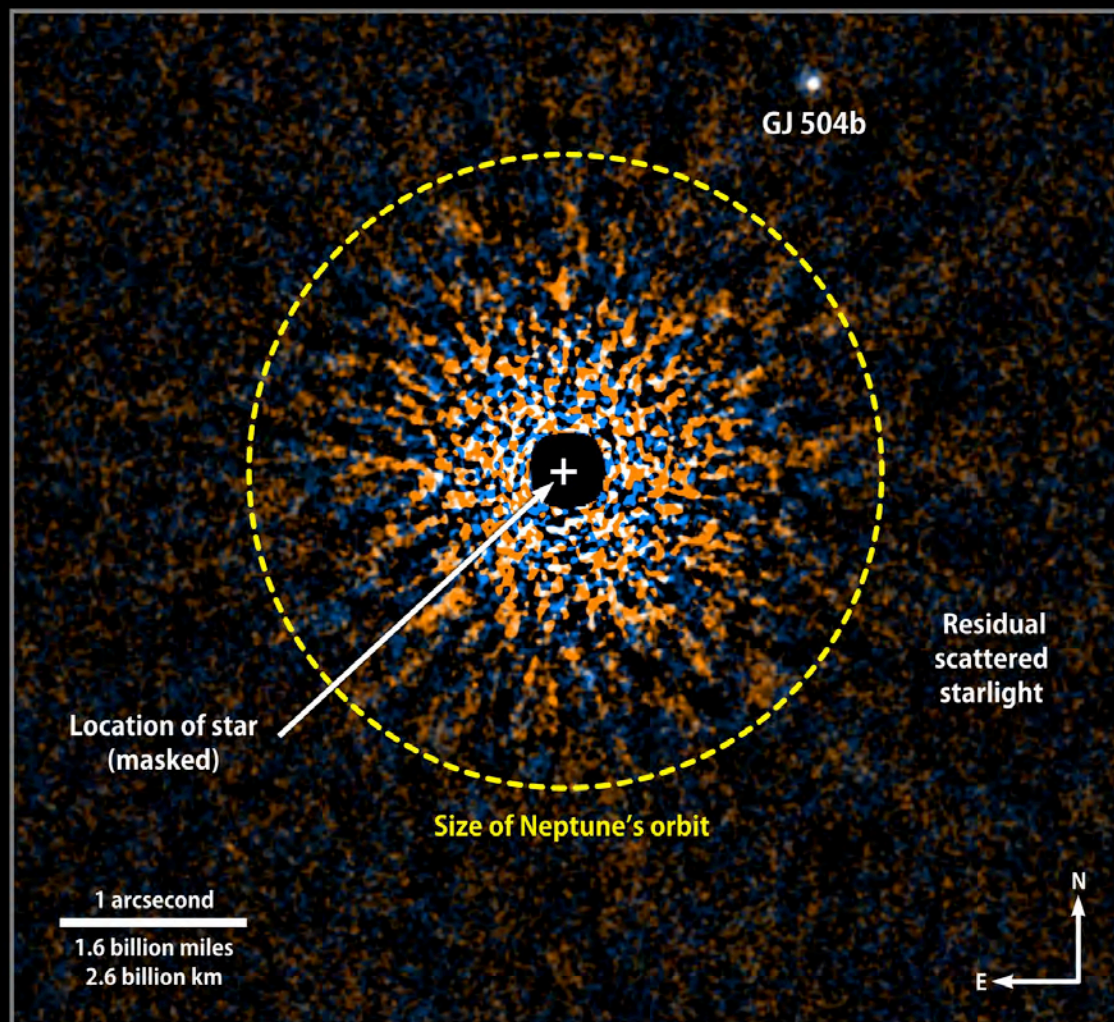
<http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/>

# 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)

# すばる望遠鏡によるガス惑星GJ504b の直接撮像：コロナグラフ技術の進歩

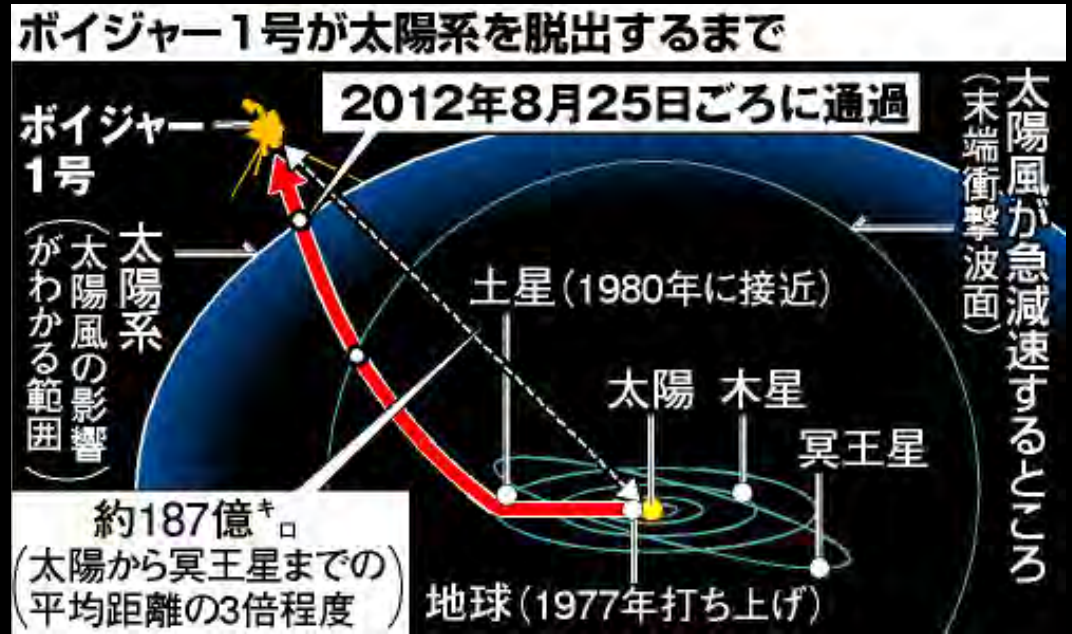


- 57光年先にある4木星質量の惑星の初直接撮像
- Kuzuhara et al. ApJ 774(2013)11
- すばる望遠鏡 SEEDSサーベイの成果
- 地球型惑星直接撮像への第一歩

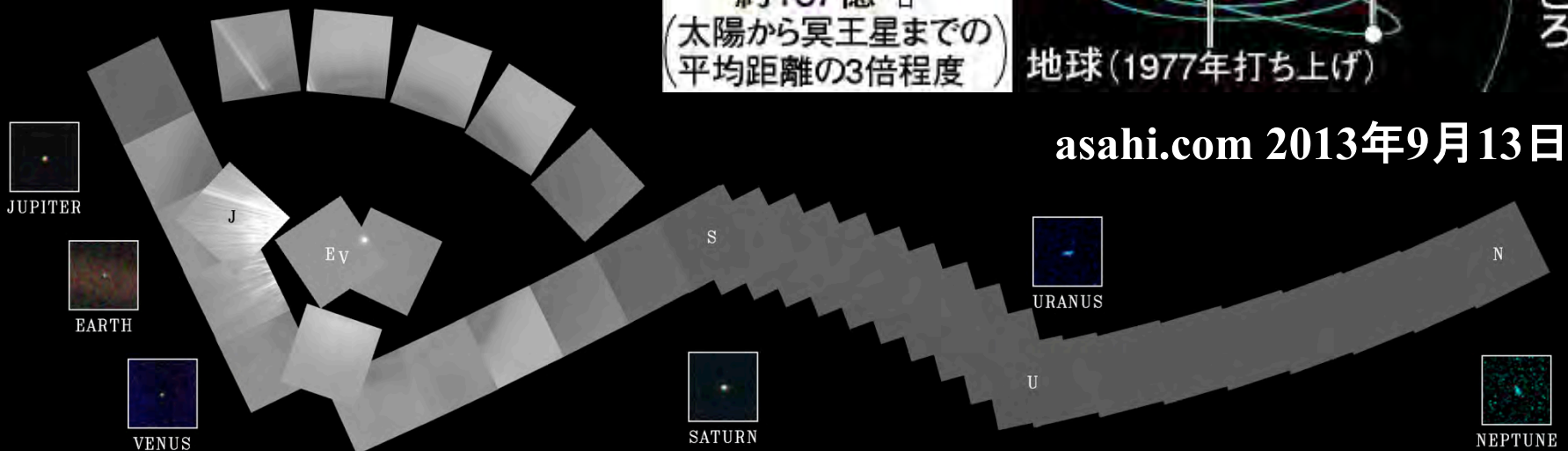
# ボイジャー1号による太陽系内惑星撮像

■ 1990年2月14日  
@40AU

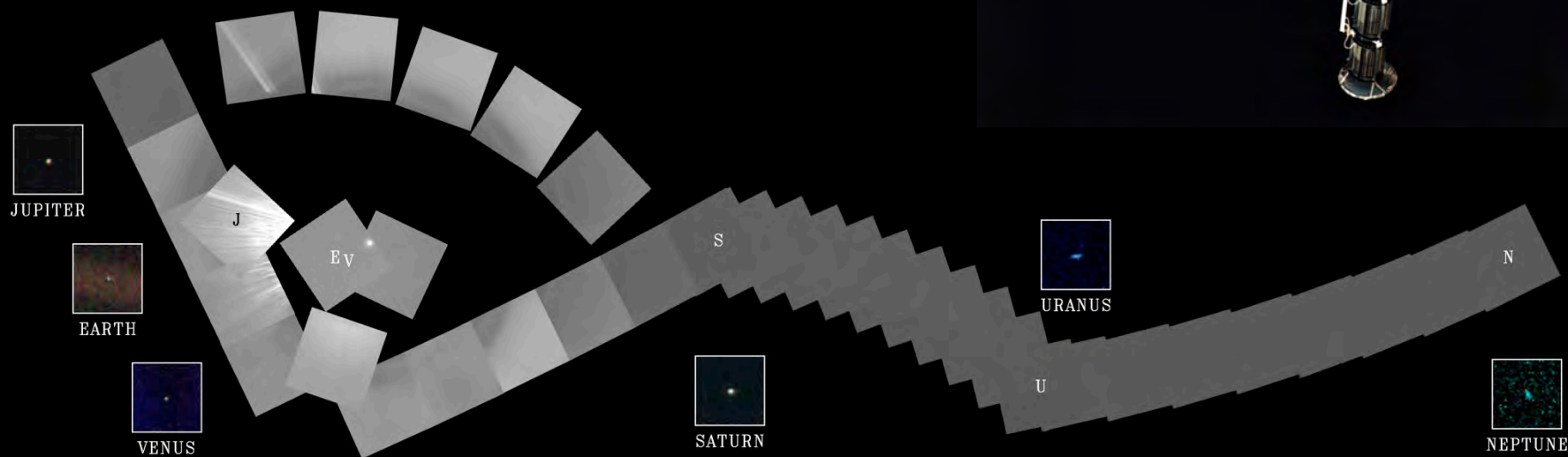
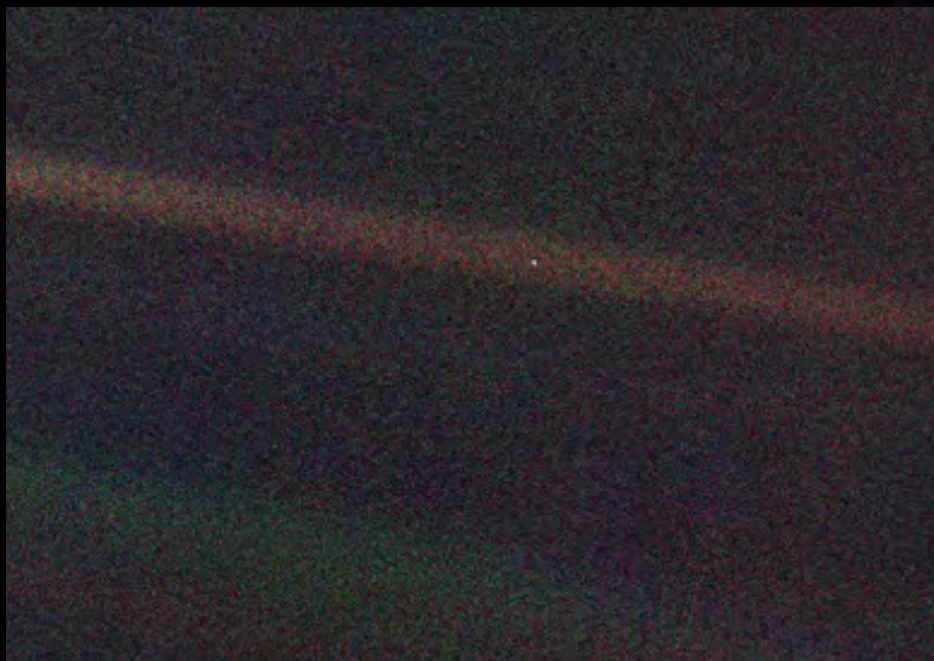
■ カールセーガンが地球の画像を  
**Pale Blue Dot**  
と命名



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は、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、でも、私を含めて、実際に光年数千億がそこを飛んでいると想像すると、等々文学や文芸がなりやすいこととしよう。

我、自分の星雲の中に宇宙に灌出できるだけの高度な文明を持つ知的生命体の存在自体は、科学的にはおかしらありません。そもそもわれわれ人類がその一例なのですから、たまたま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話です。

わが地球は、太陽を中心から約46億年前に生まれ、地球で最初の原始的な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。しかしそれが殆どし、人類、あるいはその祖先が誕生したのはそれから約万年年前。さらに宇宙へ探検を飛ばすことができるだけの高度な科学文明を手にしたのは、わずかに100年以内のことです。

土星から見た地球

わが地球は、太陽を中心から約46億年前に生まれ、地球で最初の原始的な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。しかしそれが殆どし、人類、あるいはその祖先が誕生したのはそれから約万年年前。さらに宇宙へ探検を飛ばすことができるだけの高度な科学文明を手にしたのは、わずかに100年以内のことです。

わが地球は、太陽を中心から約46億年前に生まれ、地球で最初の原始的な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。しかしそれが殆どし、人類、あるいはその祖先が誕生したのはそれから約万年年前。さらに宇宙へ探検を飛ばすことができるだけの高度な科学文明を手にしたのは、わずかに100年以内のことです。



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=PIA11717



地球(左)と月

高知新聞二〇一六年五月十三日

「宇宙物理学者、東京大学教授」 須藤靖

「宇宙物理学者、東京大学教授」 須藤靖

# 土星から 見た地球

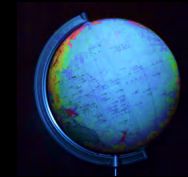
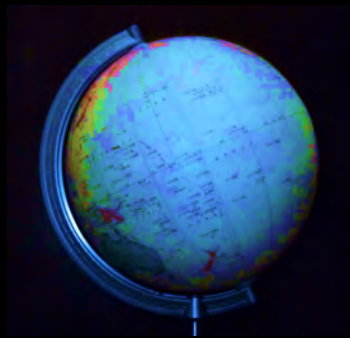


- 土星探査機カッシーニが撮影した地球と月
  - 2013年7月20日(日本時間): 2万人がこちらに手を振っている

View from Saturn (Cassini)  
900 million miles away

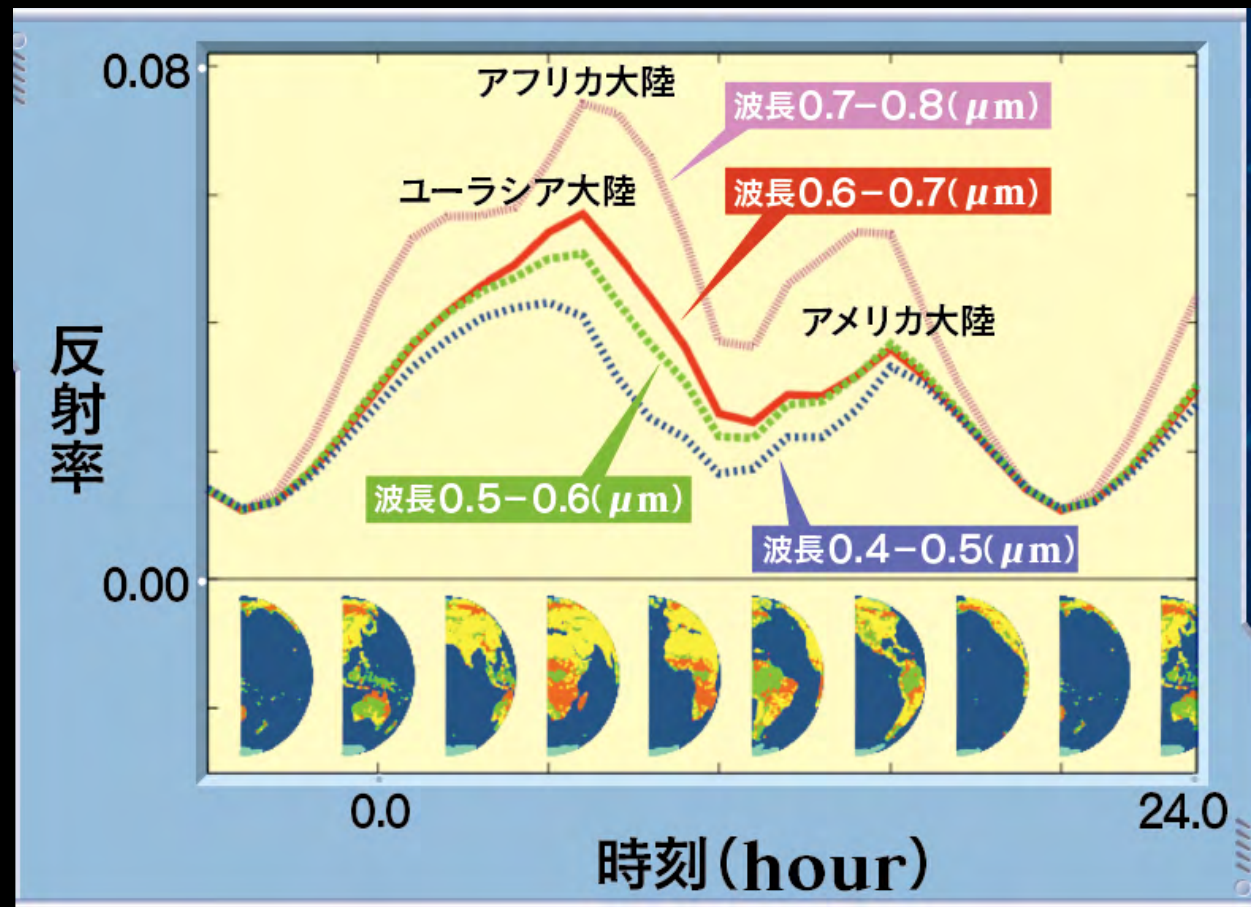
# ペイルブルードットを超えて

- 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)

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

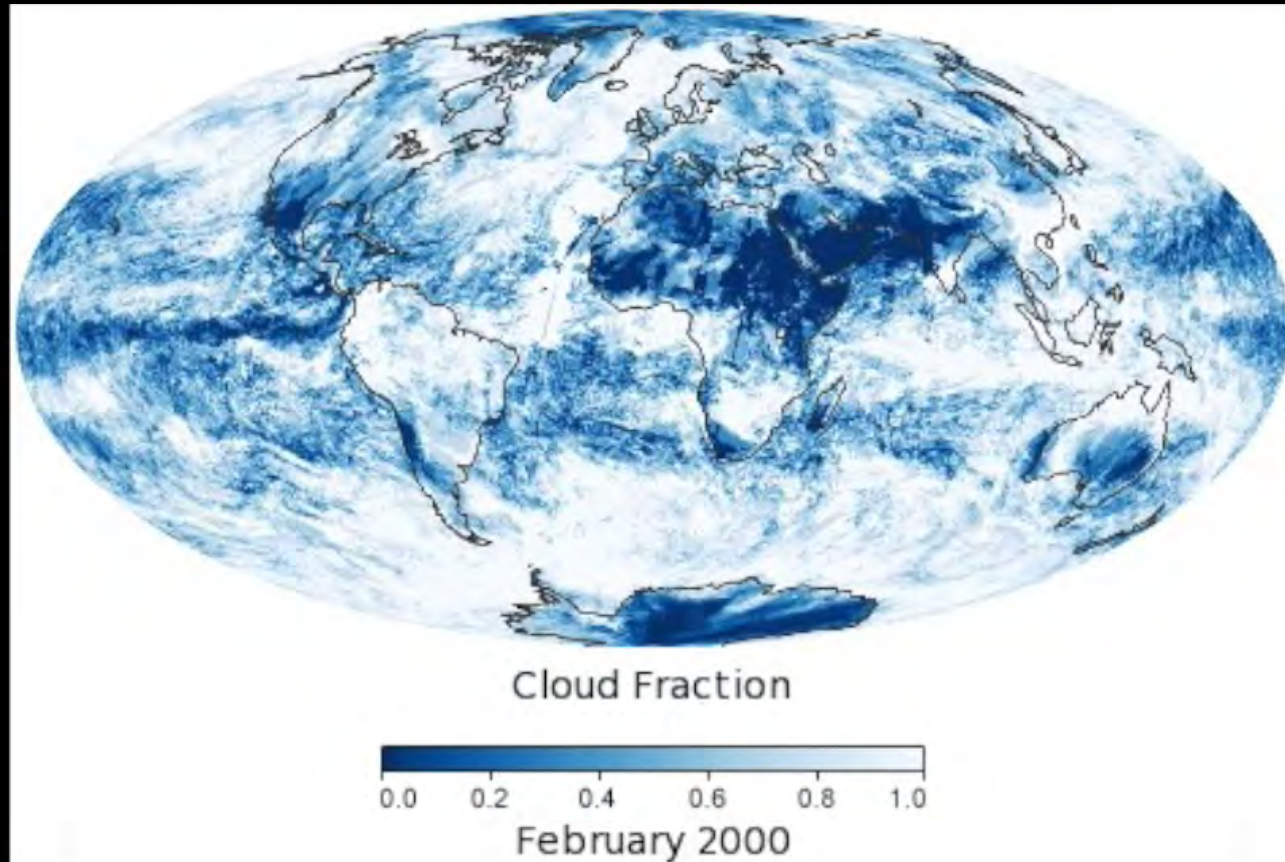


F型星



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

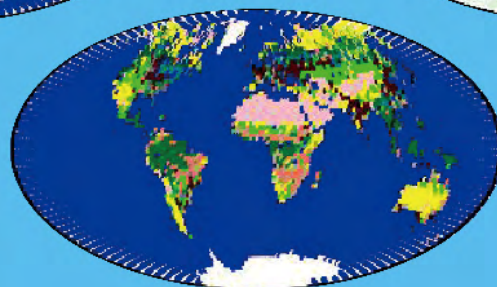
海



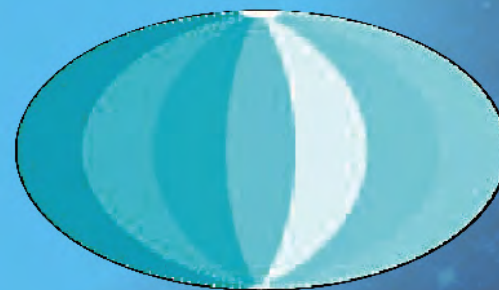
植生



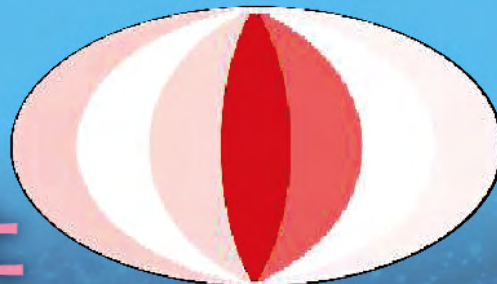
雲



雪



土



藤井友香 他(2011)

# 地球外文明はあるのか？：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

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



フランク ドレイク博士

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。



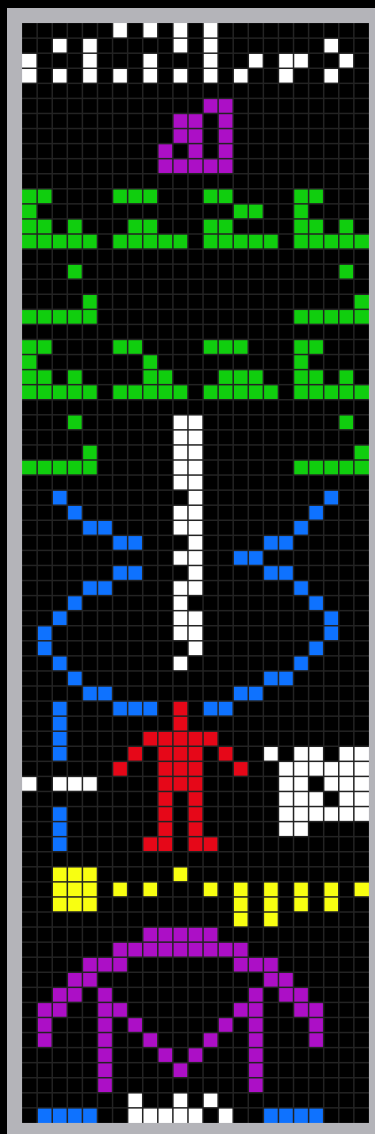
# SETI: Search for Extra-Terrestrial Intelligence

- 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

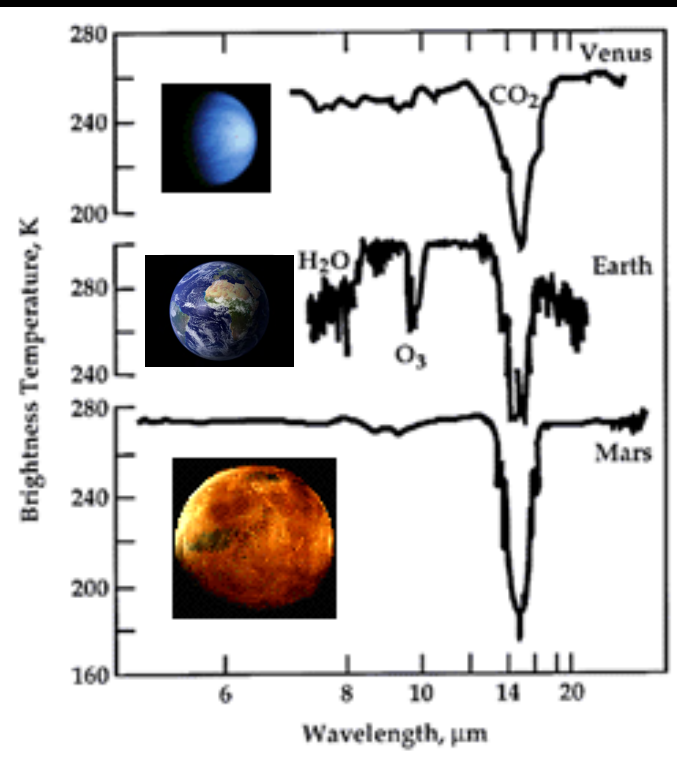
人間

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

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

## ■ 最初に起こるのはどれだろう

- 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

# 宇宙生物学の心 「星の王子様」より



夜空を埋め尽くす無数の星々のどれかに咲く  
たった一つの花が好きになれたなら  
夜空を見上げるだけで  
とっても幸せな気持ちになれる  
「僕の花がこの夜空のどこかにあるんだ」  
と信じられるだけで