

系外惑星とバイオマーカー ～生命の存在を伝える～

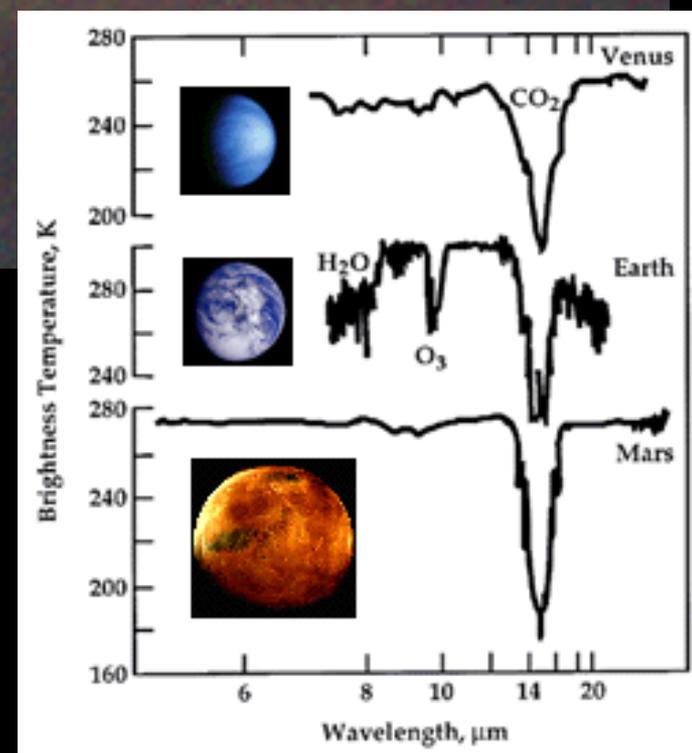


大学院理学系研究科
物理学専攻 須藤 靖

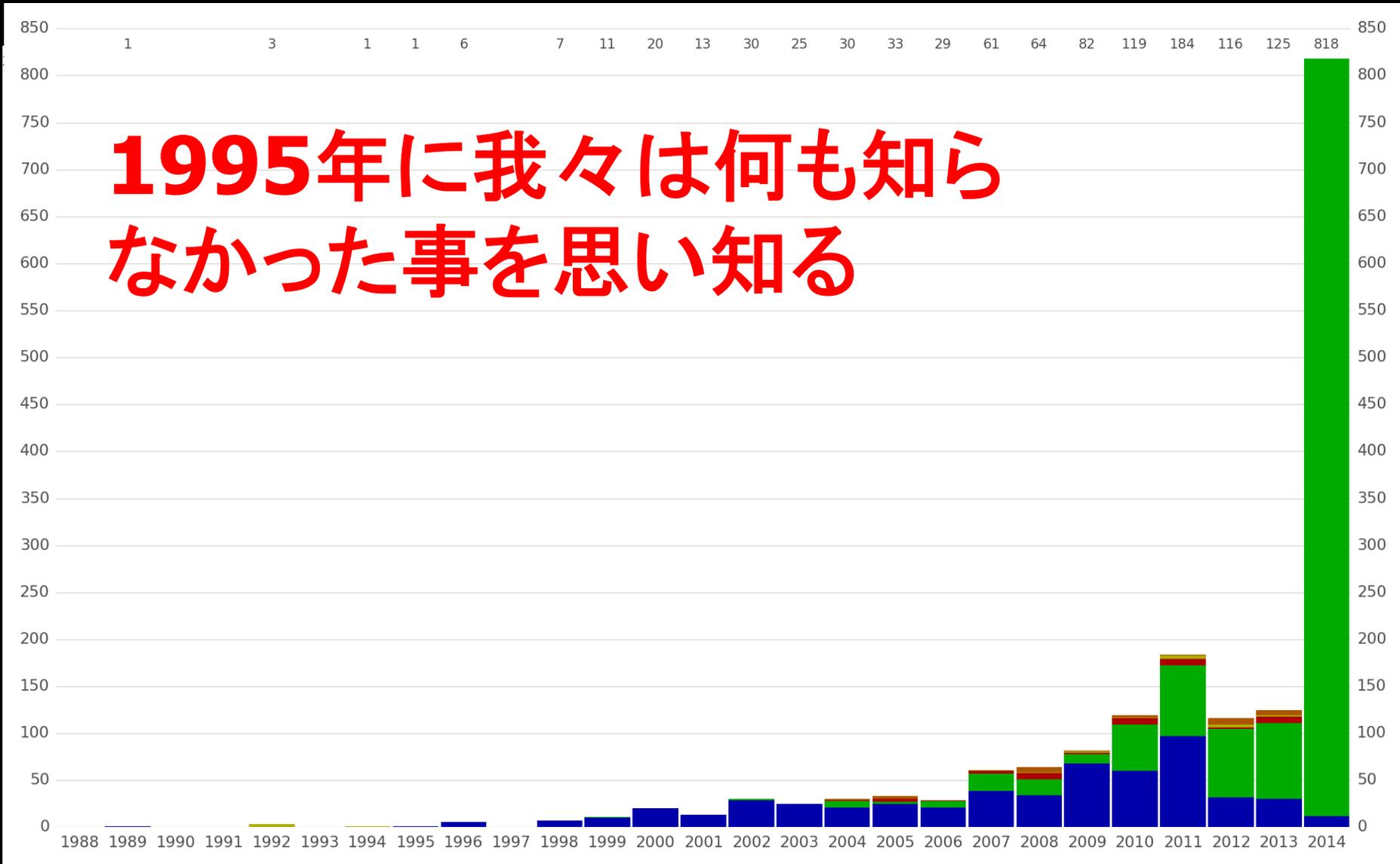
理学クラスター講義Ⅳ 「伝える」

2014年7月22日 13:00-15:00

@小柴ホール



太陽系外惑星発見の歴史年表



系外惑星研究の現在・過去・未来

- 巨大ガス惑星発見の時代 (1995)
 - 惑星大気の実見 (2001)
 - 惑星赤外線輻射の検出 (2005)
 - 惑星可視域反射光の検出 (2009)
-

■ **地球型居住可能惑星の実見**

■ **系外惑星リング、衛星の実見**

■ **地球型惑星の直接検出(測光&分光)**

■ **バイオマーカー(生物存在の証拠)の同定**

■ **地球外生命の実見**



惑星大気成分の 初検出 (2001年)

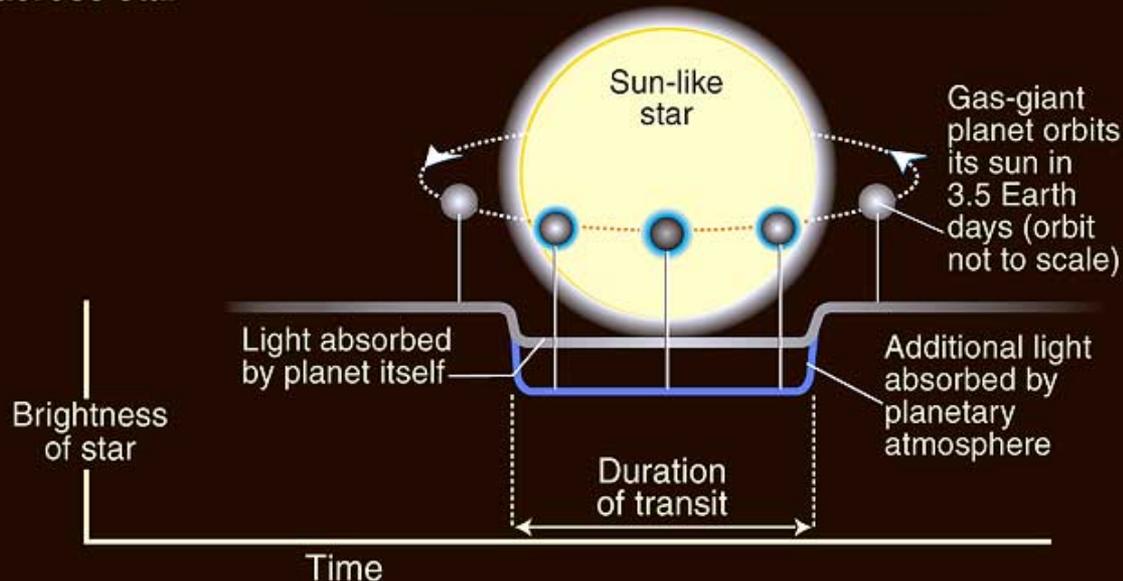
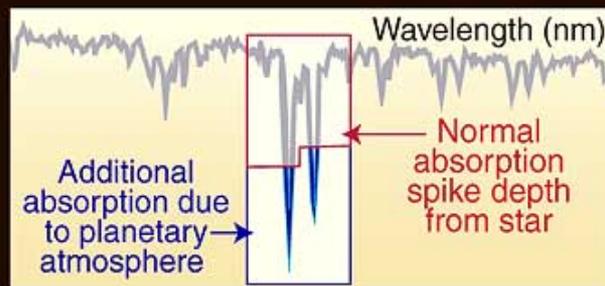
トランジット惑星

HD209458b

+ハッブル望遠鏡

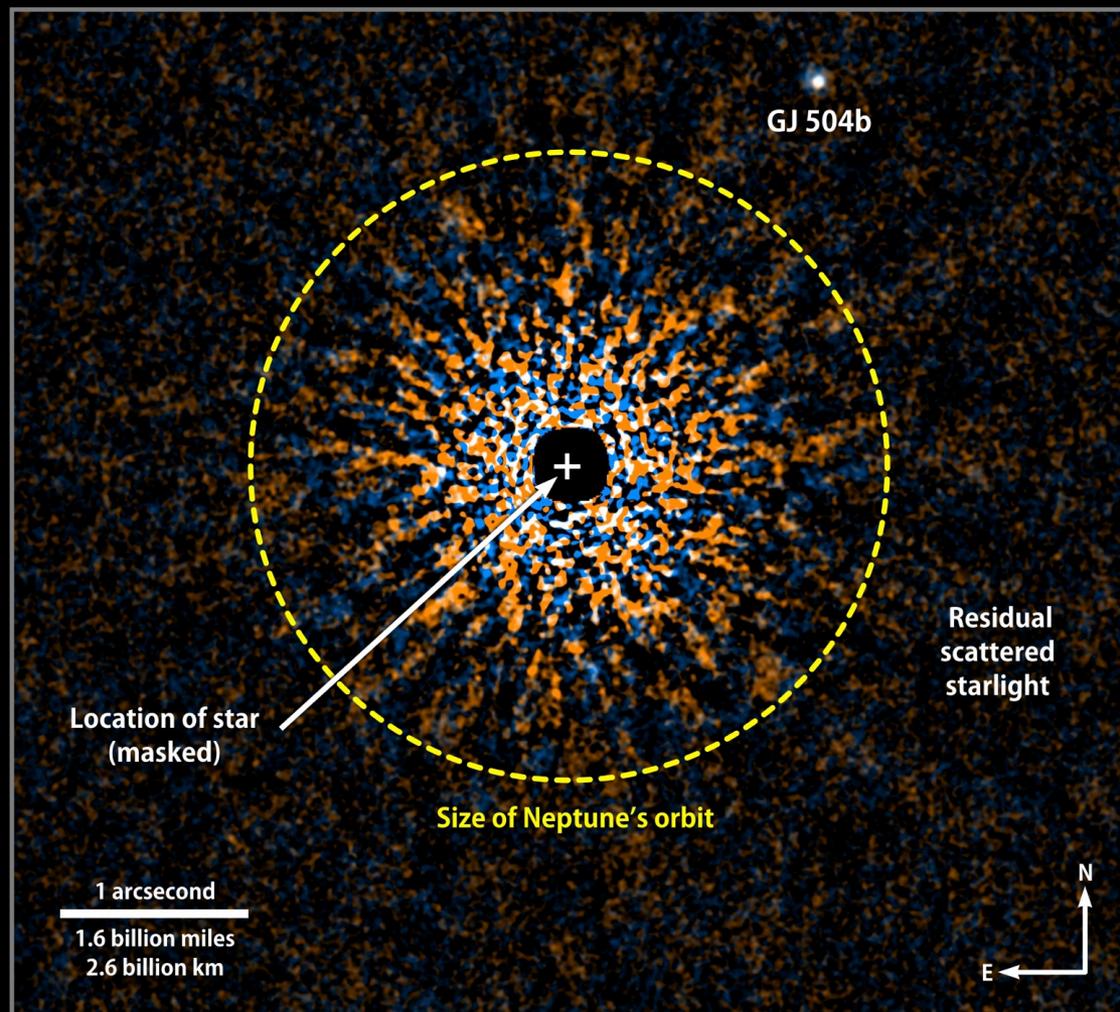
[http://hubblesite.org/
newscenter/archive/2001/38/](http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/)

HST detects additional sodium absorption due to light passing through planetary atmosphere as planet transits across star



- 2000年 系外惑星HD209458bのトランジットを検出
 - 惑星の大きさがわかる
 - 質量の観測データとあわせて密度を0.4g/ccと推定
 - 巨大ガス惑星であることの確認
- 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムを発見 (Charbonneau et al. 2001)

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

すでに学んだこと: 惑星いろいろ

- **惑星(系)は稀なものではなく普遍的**
 - 太陽と似た恒星の34%(以上)が惑星を持ち、17%(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木星型惑星が大量に存在(太陽系の木星の周期は約10年)
 - 太陽系とは違い円軌道というよりもかなりゆがんだ楕円軌道の惑星も多い
 - 地球の2倍程度の質量の惑星候補も複数報告
 - 水が液体として存在する摂氏0度から100度の温度の惑星(ハビタブル惑星)候補も報告

系外惑星に生命の兆候を探る

- 天文学の文脈での生命の定義
 - リモートセンシング
- 生命が存在する可能性の高い惑星
 - ハビタブルゾーン
- 何を観測すべきか／できるか
 - バイオマーカーとしての酸素とレッドエッジ
- いくつかの研究の紹介

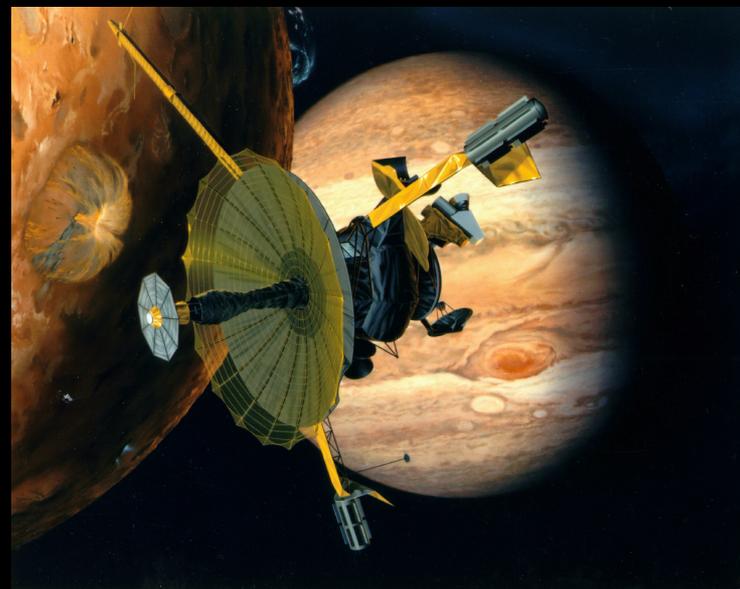
何を観測すれば良いのだろうか？

- **生物学者による生命の定義はかなり原理的**
 - 代謝、自己増殖、外界との隔離(個別の生命)
 - ダーウィンの進化を行う自己維持的化学系
- **天文学者が期待する生命の定義は実用的**
 - 遠方からの観測によって区別できるような実用的なものでないと役に立たない(生命系)
- **(できれば十分条件に近い)生命を宿す環境の必要条件とは何か？**
 - (非生物環境では実現しにくい)熱平衡からの極端なずれ(Lederberg 1965, Lovelock 1965)

地球の観測

ガリレオ探査機による地球上の生命探査

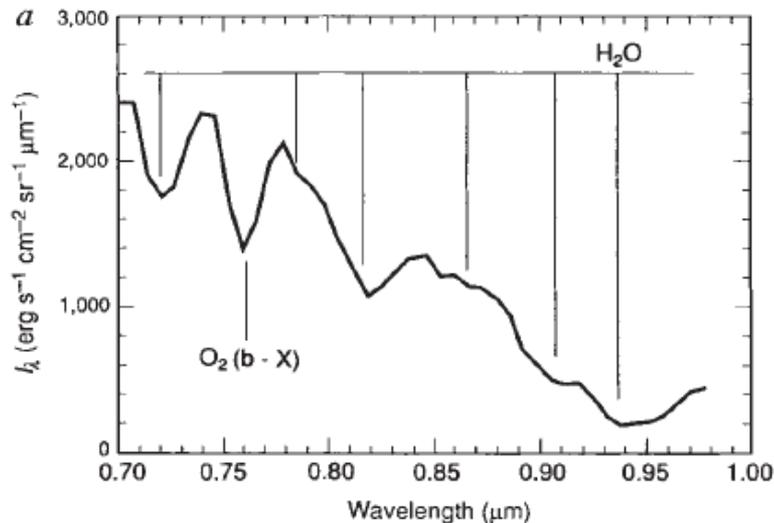
- 1986年5月打ち上げ
- 1990年12月8日一回目の地球スイングバイ時に地球上の“生命探査”
- **地球には生命がいるらしい!**
 - 大量の気体酸素
 - 植物のレッドエッジ
 - 熱平衡から極端にずれた大気中のメタンの存在量
 - 狭帯域で振幅が変化する“不自然な”パルス状電波



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

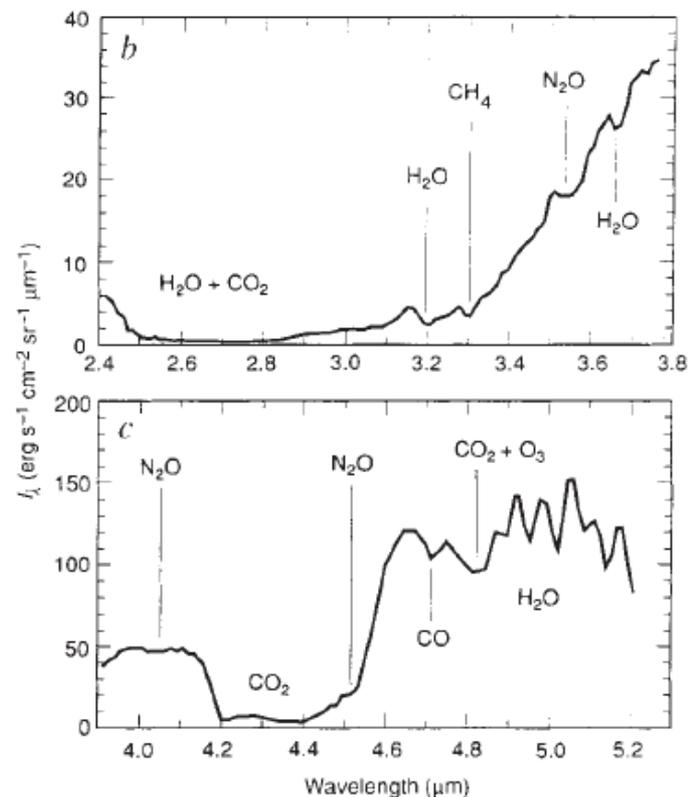
Sagan et al. (1993): 大気分光

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)

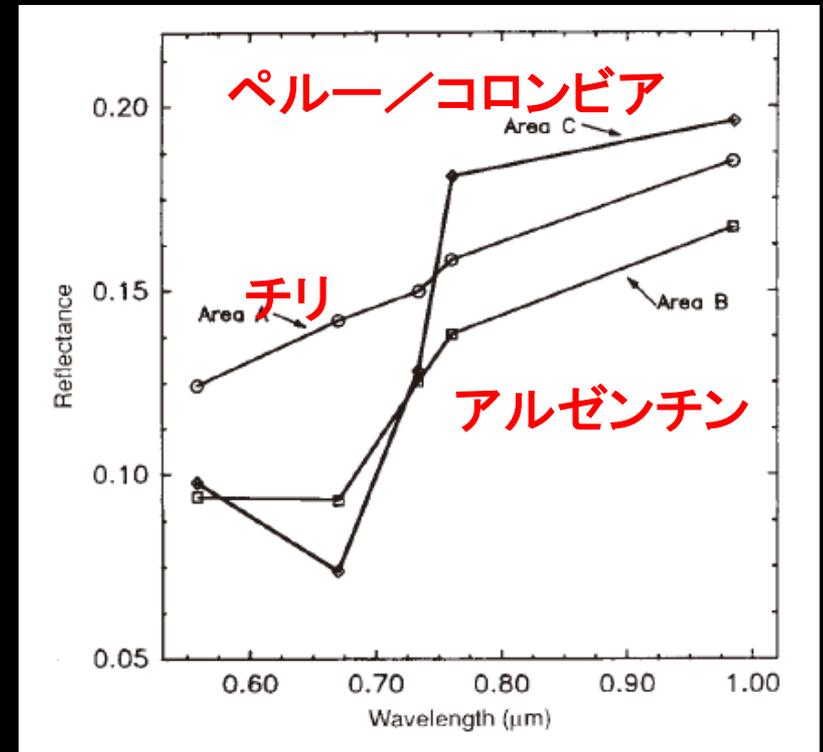
FIG. 1 a, Galileo long-wavelength-visible and near-infrared spectra of the Earth over a relatively cloud-free region of the Pacific Ocean, north of Borneo. The incidence and emission angles are 77° and 57° respectively. The $(b^1\Sigma_g^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-)$ O₂ at $0.76 \mu\text{m}$ is evident,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



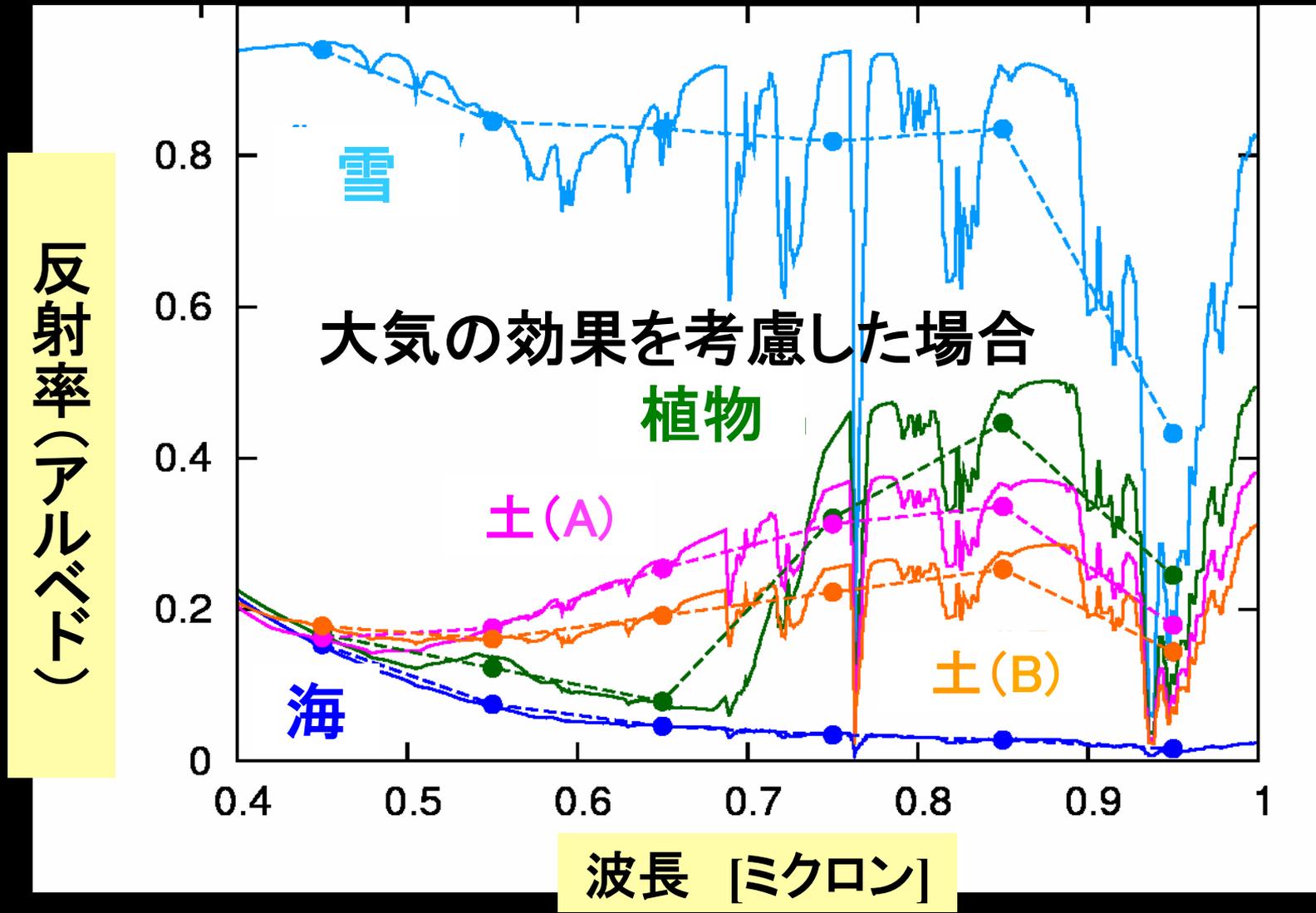
methane (0010) vibrational transition is evident at $3.31 \mu\text{m}$. A crude estimate¹⁰ of the CH₄ and N₂O column abundances is, for both species, of the order of 1 cm-atmag ($\equiv 1 \text{ cm path at STP}$).

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



(参考) 等方散乱近似での反射スペクトル

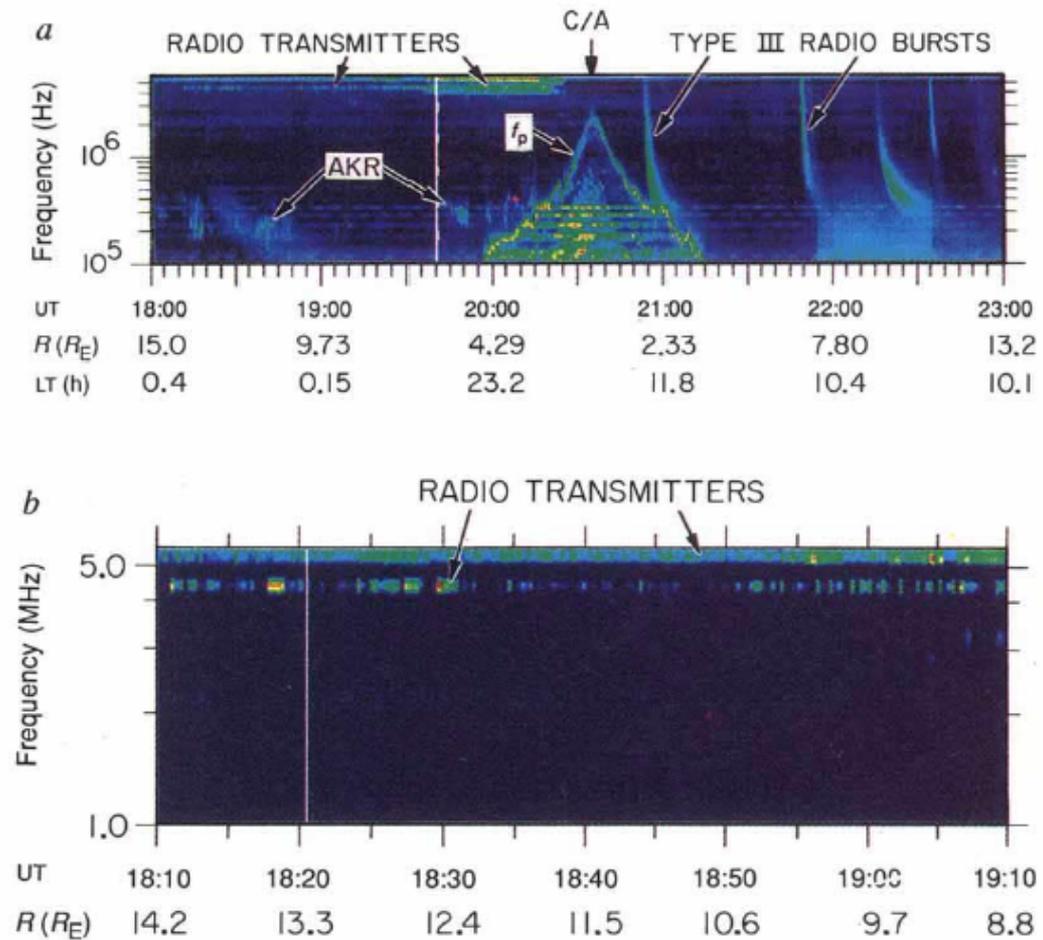


Fujii et al. (2010)

Sagan et al. (1993): 電波観測

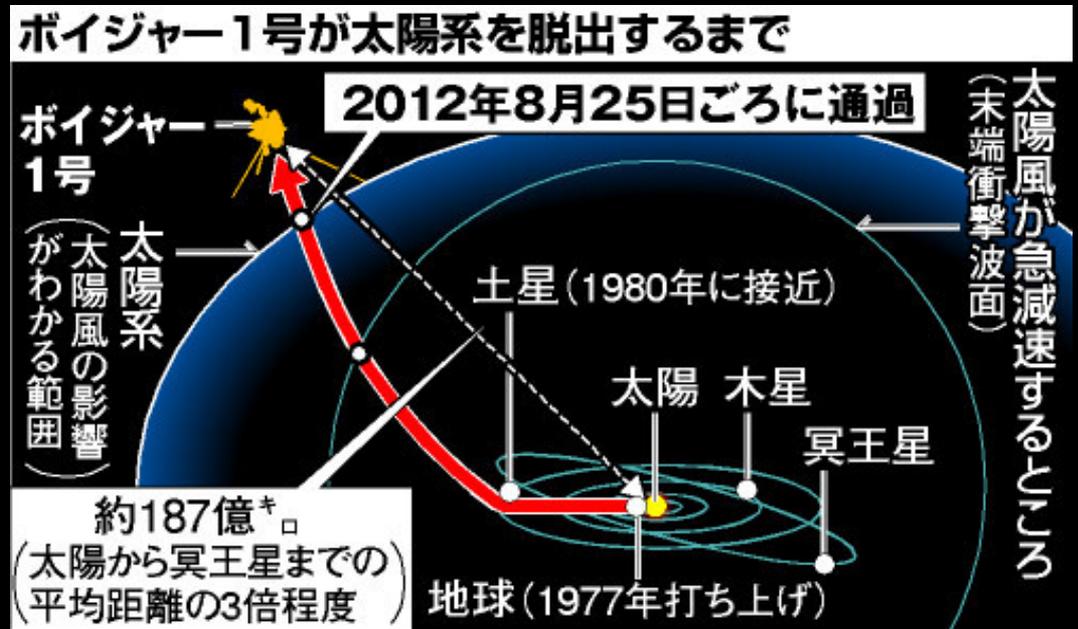
ガリレオ探査機の観測した地球の電波信号の時系列

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.)

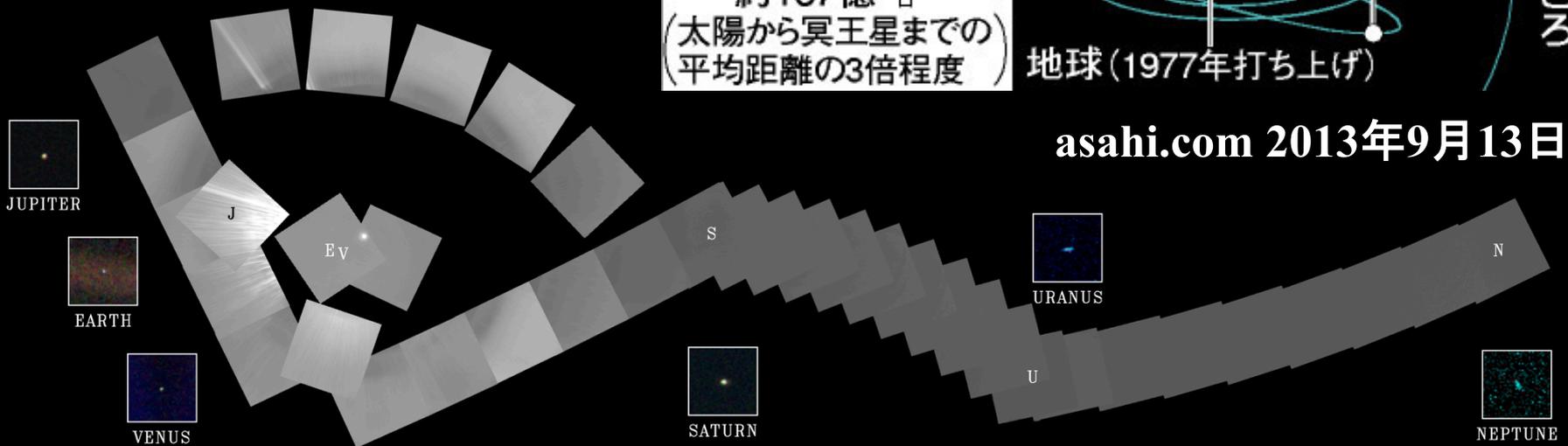


ボイジャー1号による太陽系内惑星撮像

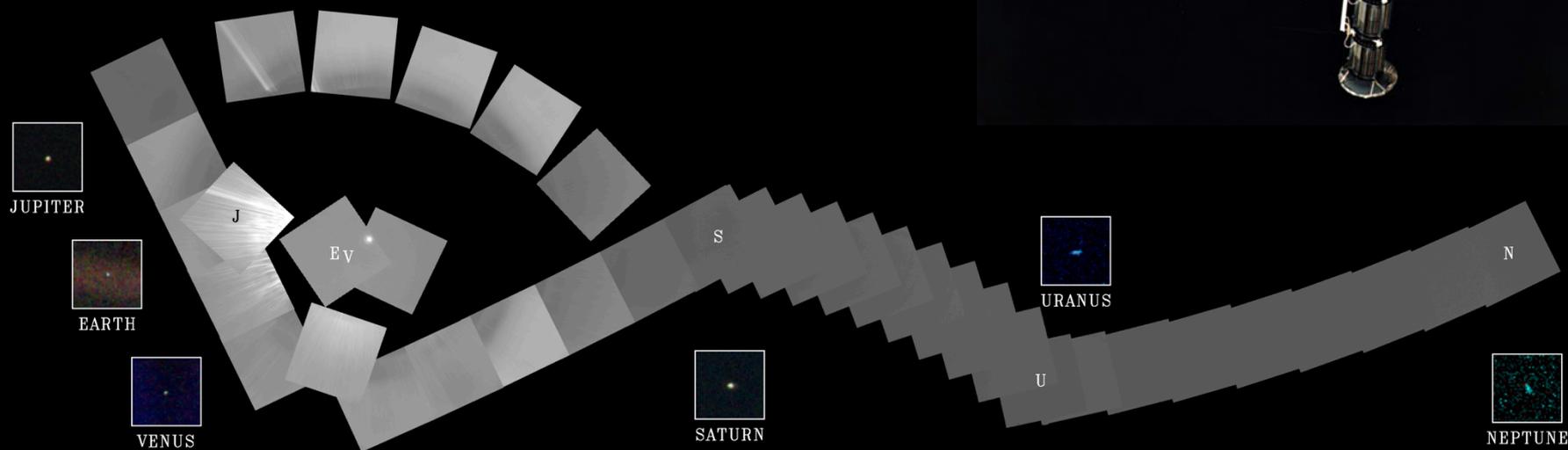
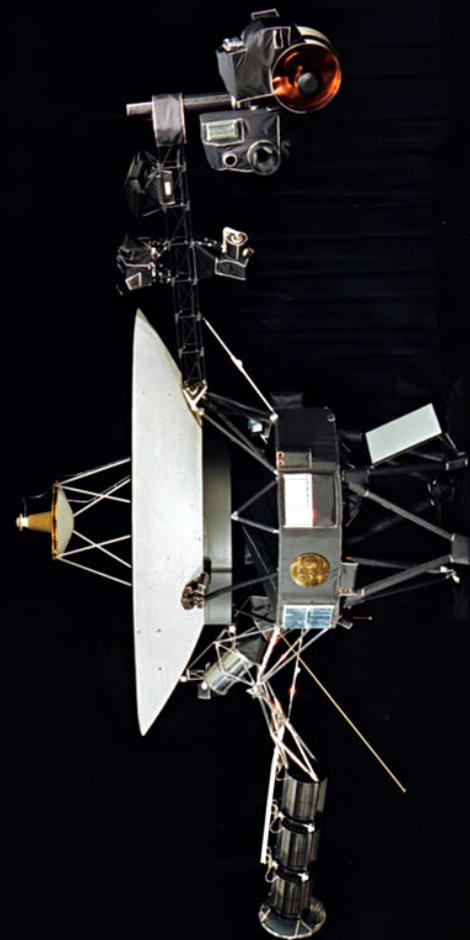
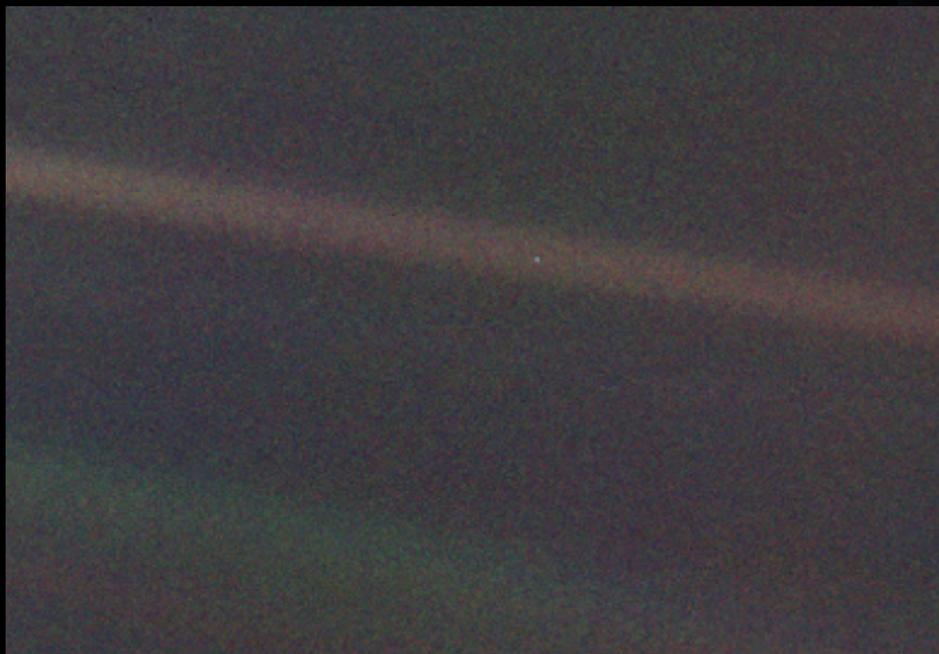
- 1990年2月14日 @40AU
 - カールセーガンが地球の画像を **Pale Blue Dot** と命名



asahi.com 2013年9月13日



ペイル・ブルー・ドット



土星越しに 見る地球



- 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

ハビタブル惑星

ハビタブルゾーン

- 水が液体として存在できる温度領域と言われる事が多いが、実は中心星からのフラックスで定義する(でないと、惑星の反射率が必要)
- 外側の境界⇔最大温室効果
 - CO₂による温室効果が最大となる分圧が存在する。これは、CO₂の温室効果がCO₂によるレイリー散乱による反射率の上昇で相殺されてしまうため。したがって、この時の温室効果を考慮しても地表温度を273K以上にできないような中心星からのフラックス(すなわち距離)が、ハビタブルゾーンの外側境界を決める。

ハビタブルゾーン: 内側の境界

■ 暴走温室効果

- 表面温度が臨界温度(真水なら674K)を越えると、海が完全に蒸発する
- 熱的に赤外線で放出できる最大値以上のフラックスが入射する(事実上、これは上の定義と同じ)

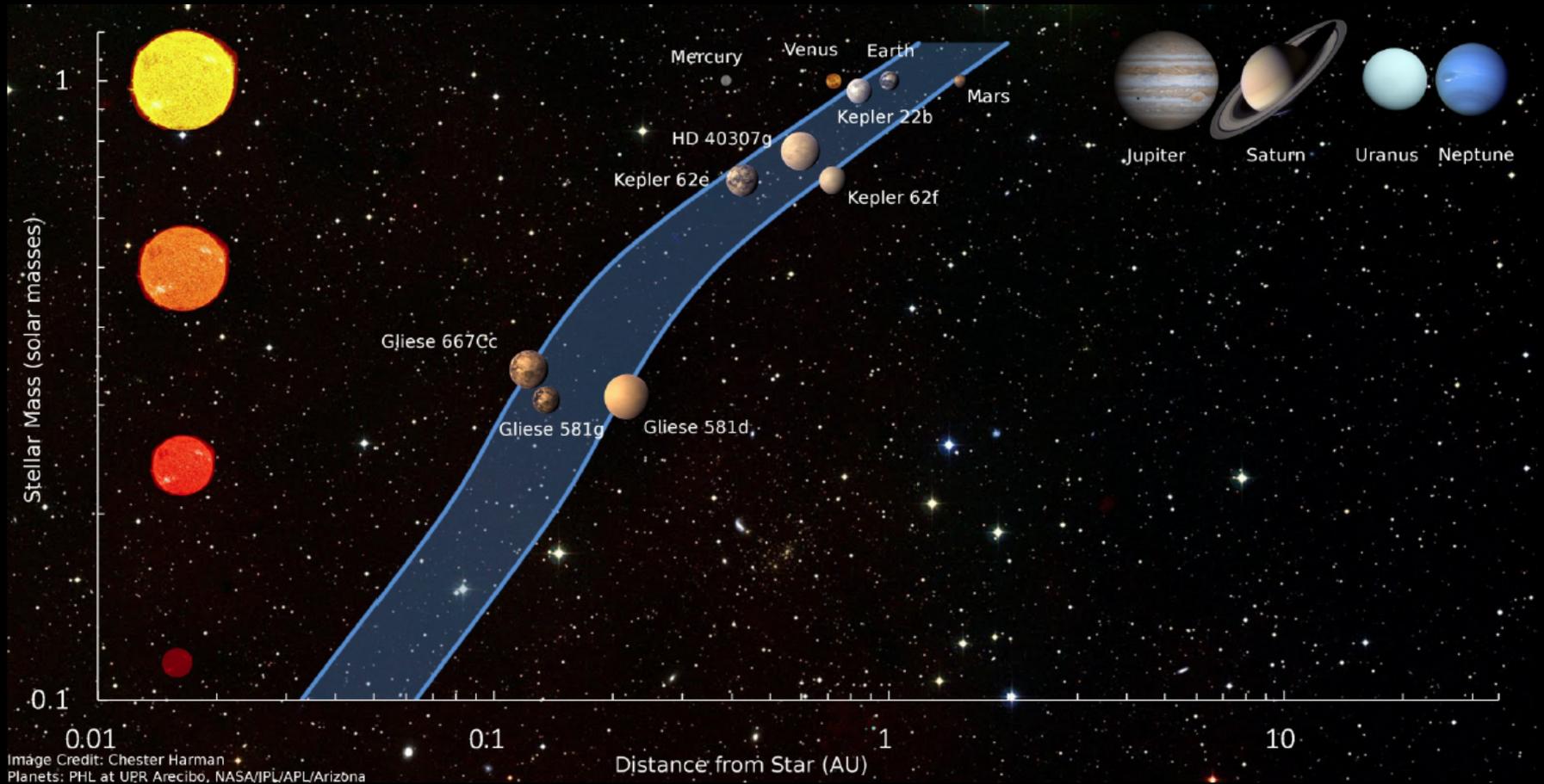
■ 湿潤温室効果

- 地表温度が340Kを超えると対流圏界面が上昇し、成層圏の水蒸気が増える。その水蒸気は光分解し、水素が流出し続けるためやがて水がなくなる。

■ Recent Venus

- 10億年前には金星から水がなくなっているという事実を現在の太陽光度に応用した経験的推定

中心星の距離とハビタブルゾーン



Kasting, Kopparapu, Ramirez & Harman: arXiv:1312.1328

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

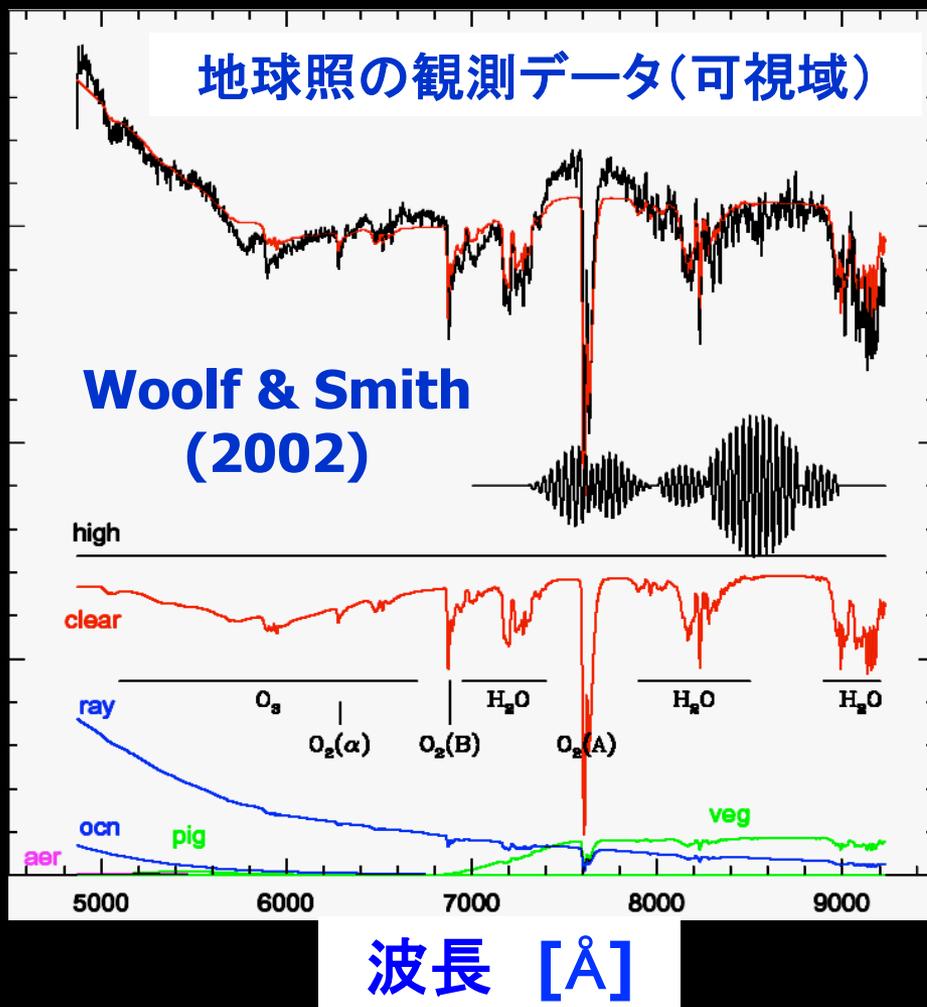
HZ definition	a_{inner}	a_{outer}	$F_{P,\text{inner}}$	$F_{P,\text{outer}}$	f_{HZ} (%)
Simple	0.5	2	4	0.25	22
Kasting (1993)	0.95	1.37	1.11	0.53	5.8
Kopparapu et al. (2013)	0.99	1.70	1.02	0.35	8.6
Zsom et al. (2013)	0.38		6.92		26*
Pierrehumbert and Gaidos (2011)		10		0.01	~50 [†]

バイオマーカー

バイオマーカー

- 何をもってバイオマーカーとするのかは曖昧
 - 生物由来と考えられる大気成分(酸素、オゾン、メタン)の分光観測
 - 植物のレッドエッジの測光観測
 - 知的生命体からの信号の電波観測
 - 地球外での生命を生み出す環境とそれに対応した生物の多様性をどこまで認めるか
- 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

常識的バイオマーカー：大気中の分子



■ 酸素

- Aバンド@0.76 μm
- Bバンド@0.69 μm

■ 水

- 0.72, 0.82, 0.94 μm

■ オゾン

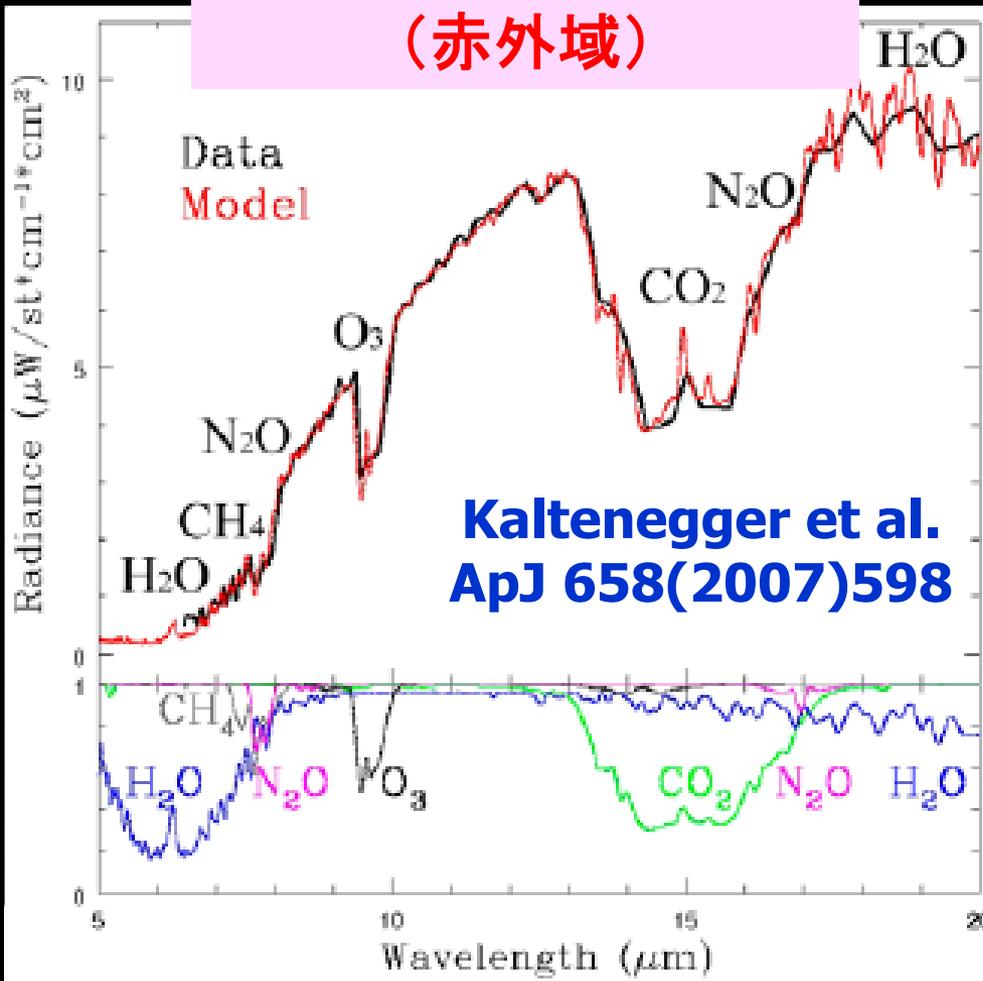
- Chappuis バンド @ (0.5-0.7) μm
- Hartley バンド @ (0.2-0.3) μm

Kasting et al. arXiv:0911.2936

“Exoplanet characterization and the search for life”

地球の赤外スペクトルとバイオマーカー

地球観測衛星データ
(赤外域)



- **オゾン: @9.6 μm**
 - 仮に酸素が少量であっても検出可能なので、酸素の良いトレーサー
- **水: <8 μm , >17 μm**
- **メタン@7.7 μm**
 - 24億年以上前の地球にはまだほとんど酸素がなかったはず
 - メタン生成細菌由来？

Kasting et al. arXiv:0911.2936

“Exoplanet characterization and the search for life”

より過激(保守的?)なバイオマーカー

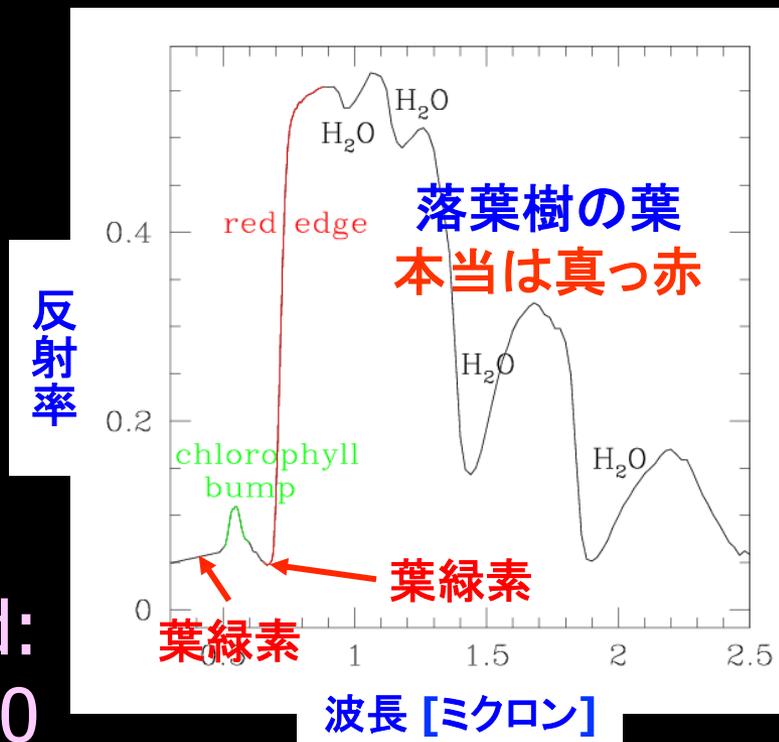
Extrasolar plants on extrasolar planets

- (居住可能)地球型惑星を発見するだけでは、そこに生命があるかどうかはわからない

■ Biomarker の探求

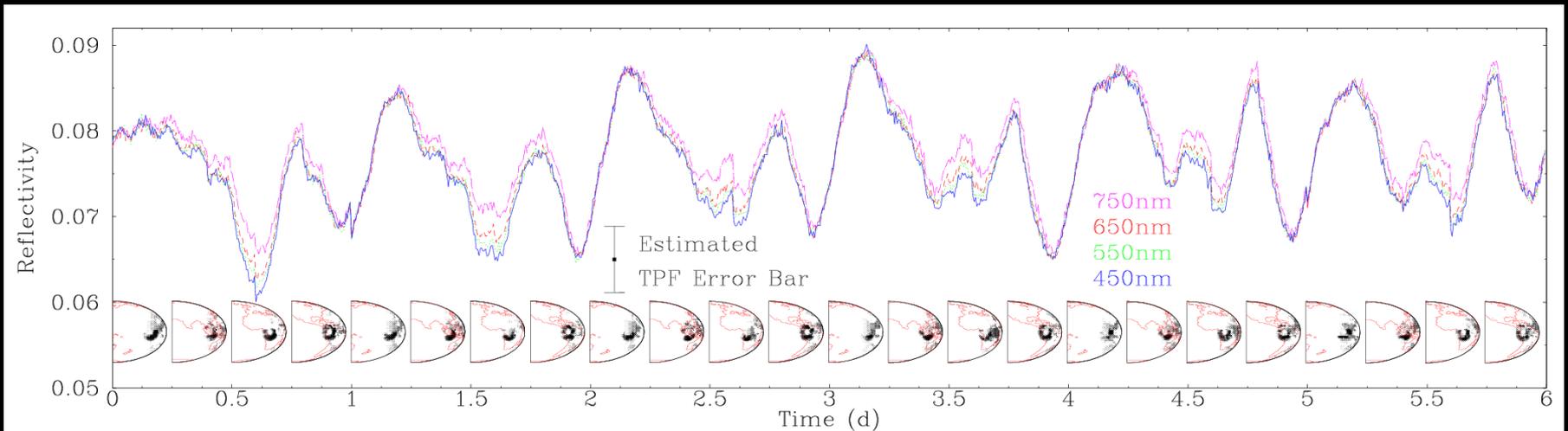
- 酸素、オゾン、水の吸収線
- 植物の **red edge**
- 地球のリモートセンシング
ではすでに確立

Seager, Turner, Schafer & Ford:
astro-ph/050330



地球が30光年先にあるとして何がどこまでわかるか？

系外惑星リモートセンシング



Ford, Seager & Turner : Nature 412 (2001) 885

- **10%レベルの日変化は検出可能**
 - 大陸、海洋、森林などの反射特性の違いを用いる
- **雲の存在が鍵**
 - 太陽系外地球型惑星の天気予報の精度が本質的！

Vesto Melvin Slipher (1875-1969)



レッドエッジをバイオマーカーとして使う先駆的な試み

- “spiral nebulae”（今で言う銀河）の赤方偏移を発見
- ハッブルによる宇宙膨張の発見に本質的寄与
- 天文台長としてPluto(冥王星)という名前を採用し決定

“Observations of Mars in 1924 made at the Lowell Observatory: II spectrum observations of Mars” PASP 36(1924)261



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.

系外惑星の植物の色

■ *The color of plants on other worlds*

- Nancy Y.Kiang

- Scientific American April 2008

- 邦訳：日経サイエンス2008年7月号



- 生物学と学際的な協力が、天文学にとっていかに大切かを示す具体例

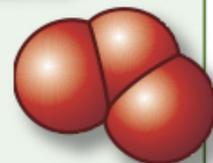
- 以下はこの解説の単なる要約

- 私は専門家ではないため誤解している可能性が高い。あらかじめご容赦を

大気中のバイオマーカー

酸素 (O_2) と水 (H_2O)

生命の存在しない世界でも、中心星からの光による水蒸気の分解で、惑星の大気中に少量の酸素ができる可能性はある。しかし、酸素ガスは雨に溶けたり、岩石の酸化や火山ガスの酸化に使われて減っていく。したがって、もし液体の水のある惑星に酸素が大量に存在すれば、酸素の発生源はほかにもあるはずだ。酸素発生型光合成が有力な候補となる。

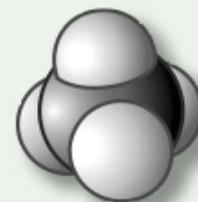


オゾン (O_3)

地球の成層圏では、太陽光のエネルギーで酸素分子が分解され、これが再結合することでオゾンが生じる。液体の水とともにオゾンの存在が確認できれば、生命の強力な証拠となる。酸素は可視光領域で検出可能だし、オゾンも赤外波長域で検出できる。従来の望遠鏡で容易に観測できる。

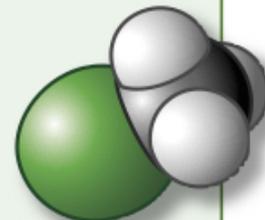
メタン (CH_4) と酸素の組み合わせ、またはメタンの季節変動

メタンと酸素は、光合成以外では生成されにくい特徴的な組み合わせだ。また、メタン濃度が季節変動を示したら、生命体の存在を示す優れた指標となる。生命の存在しない惑星では、メタン濃度はほぼ一定だが、恒星からの光がメタンを分解するために、長い時間をかけて徐々に低下する。



塩化メチル (CH_3Cl)

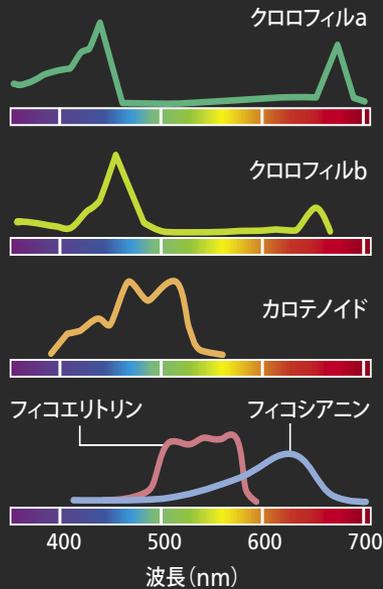
塩化メチルガスが地球上で生じるケースは、植物の燃焼（おもに森林火災）のほか、プランクトンや海水中の塩素に太陽光が作用することなどだ。塩化メチルは酸化されると分解する。しかし、M型星の放射は比較的弱いので、塩化メチルガスが検出可能な量まで蓄積する可能性がある。



惑星表面での光のスペクトル： G型星の場合

光合成色素は、さまざまな波長域の光を吸収する。地球上のすべての陸上植物は、クロロフィルaとクロロフィルb、カロテノイド系色素なしには生存できない。藻類やシアノバクテリアはフィコビリ色素を使用する。

相対吸収度



恒星の光

大気中に入射前の光は明瞭なスペクトルを示す。スペクトルの全体的な形状は、恒星の表面温度によって決まる。曲線上の切れ込みの一部は、恒星そのものの大気が吸収したことによる。

惑星表面

大気中のガスが恒星の放射する光を不均一に吸収し、そのピークの色をずらす。また、特定の波長を吸収するのでスペクトルに吸収帯が生じる。吸収帯は地球(太陽はG型)について最もよく知られている。

水面下

水は青色光は通すが、赤色光や赤外光を吸収する傾向がある。グラフは、水面下5cmおよび60cmにおける値を示す(成熟したM型星については酸素のほとんどない大気を想定した)。

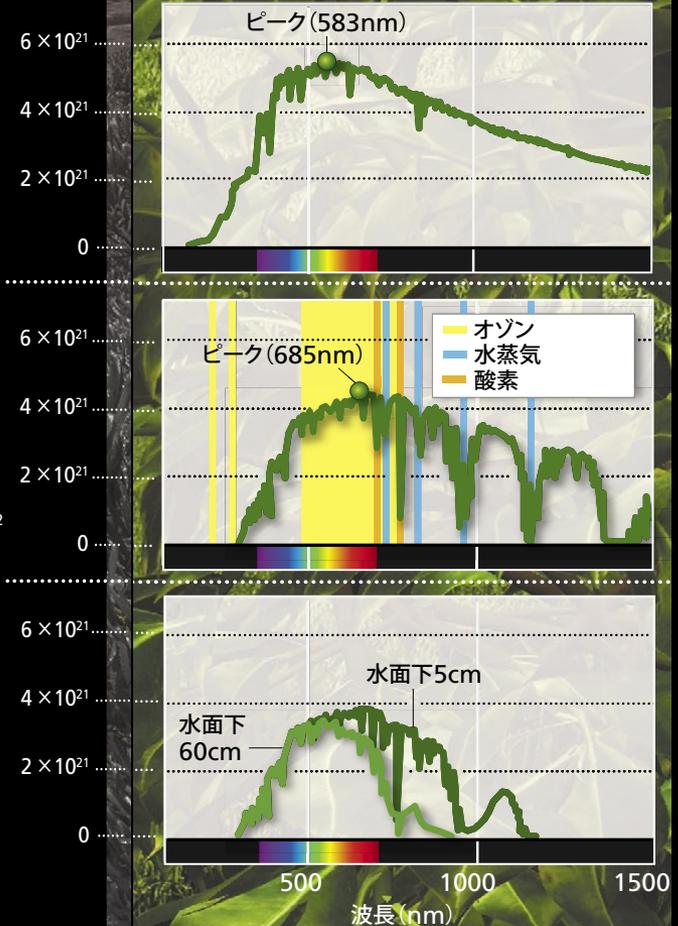
G型星

下の曲線は、地球上に注ぐ太陽光のスペクトルを示す

寿命：100億年

地球の軌道：1天文単位

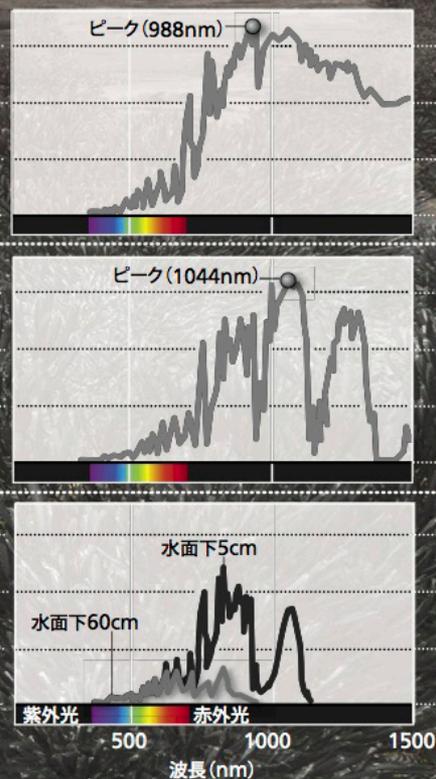
光子束密度(1秒あたり、1m²あたりの光子の数)



異なる環境下での光のスペクトル:

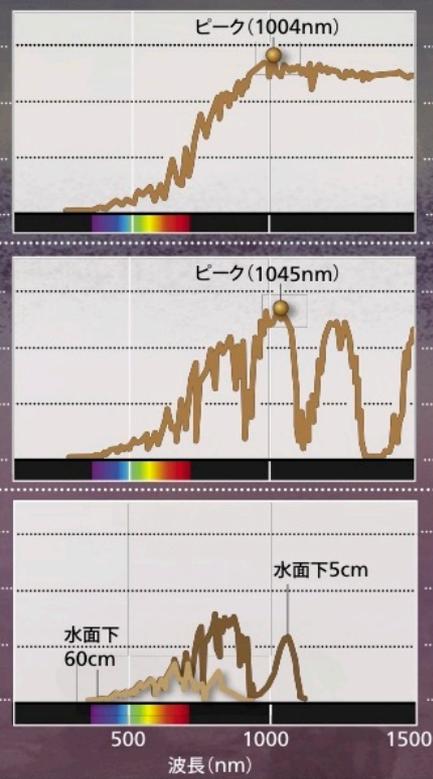
成熟したM型星

質量*: 0.2
 光度*: 0.0044
 寿命: 5000億年
 モデル惑星の軌道: 0.07天文単位
 *太陽に対する相対値, 天文単位は太陽と地球の平均距離



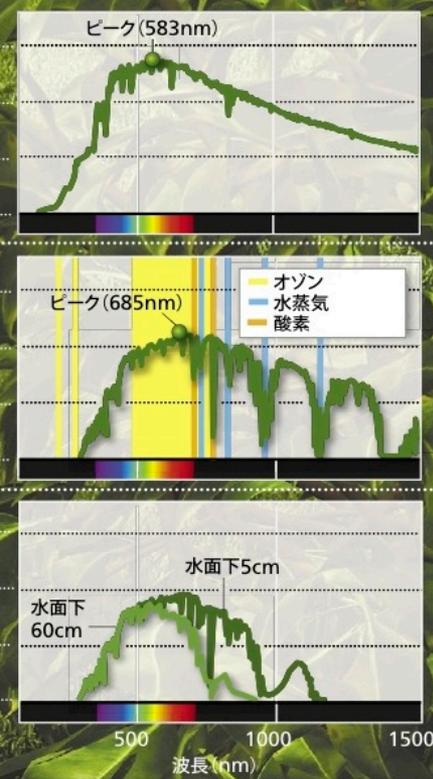
若いM型星

質量*: 0.5
 光度*: 0.023
 寿命: 2000億年 (フレアの発生は星の誕生から10億年後まで続く)
 モデル惑星の軌道: 0.16天文単位



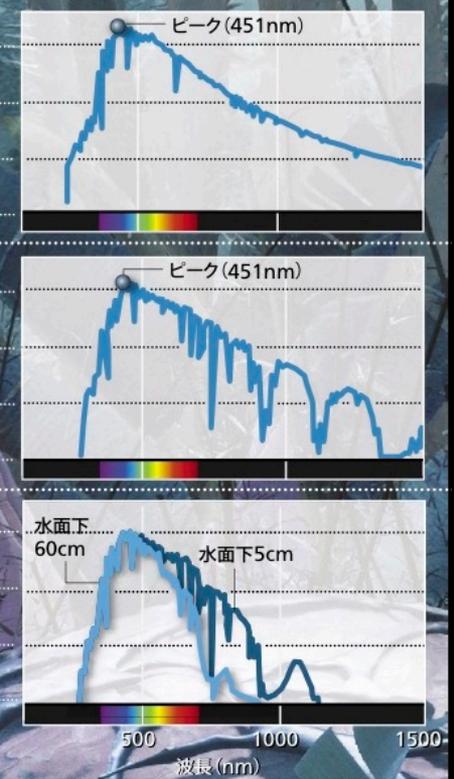
G型星

下の曲線は、地球上に注ぐ太陽光のスペクトルを示す
 太陽光のスペクトルを示す
 寿命: 100億年
 地球の軌道: 1天文単位



F型星

質量*: 1.4
 光度*: 3.6
 寿命: 30億年
 モデル惑星の軌道: 1.69天文単位



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

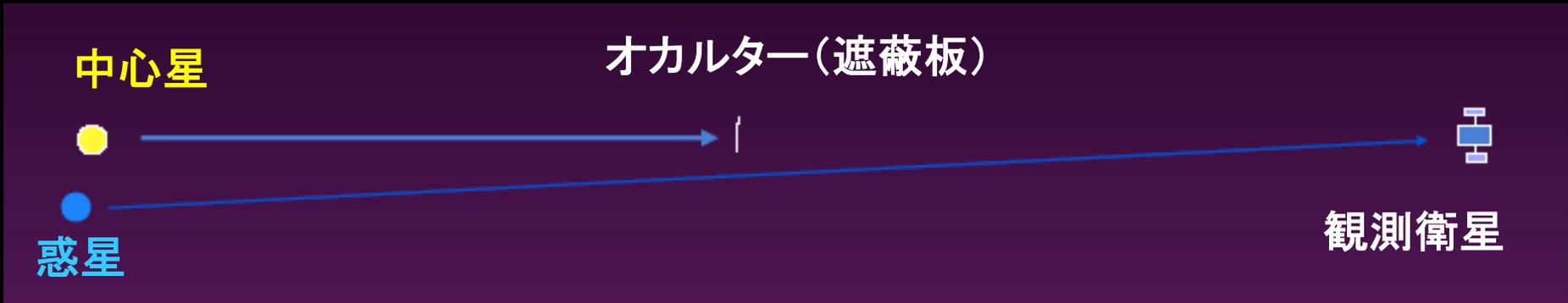


F型星



系外惑星リモートセンシング

地球型惑星探査プロポーザル: *The New Worlds Mission*

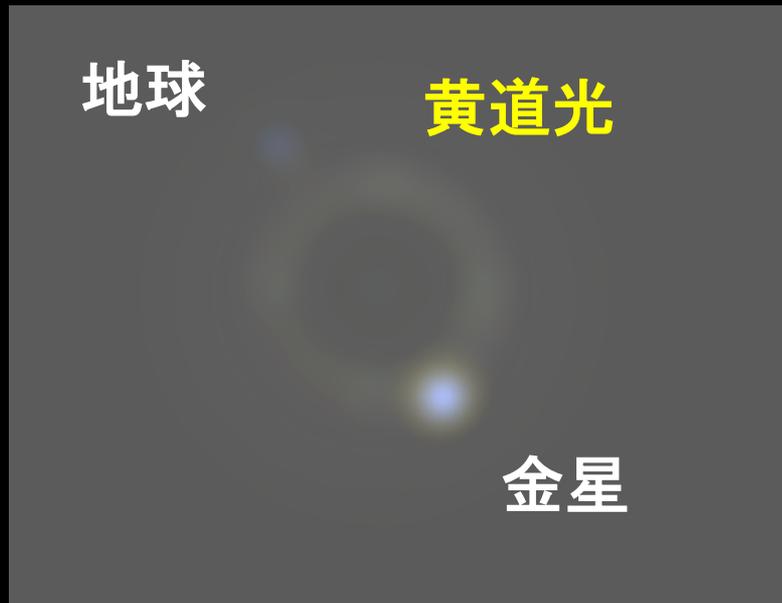


<http://newworlds.colorado.edu/>

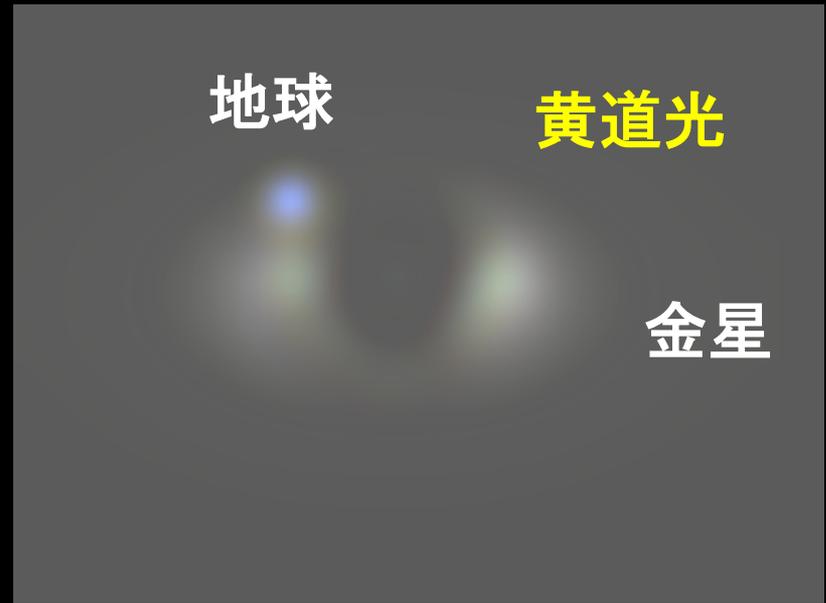
- 口径(2-4)mの可視光望遠鏡@L2点
 - 7万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおく
 - 望遠鏡にはその星の周りの惑星から光のみが届く
 - 惑星の分光・測光モニターからのバイオマーカー検出
 - コロラド大学を中心とした米国と英国の共同計画
 - 同様の計画がプリンストン大学でも検討中(O₃)

New Worlds Mission: simulated image

軌道面傾斜角=0°



軌道面傾斜角=60°



- 我々の太陽系の内惑星を(4m宇宙望遠鏡+オカルター)を用いて30光年先から観測した場合に予想される画像
- このようなミッションが実現した場合、一体何がどこまで分かるのだろうか?

[http://
newworlds.colorado.edu/](http://newworlds.colorado.edu/)

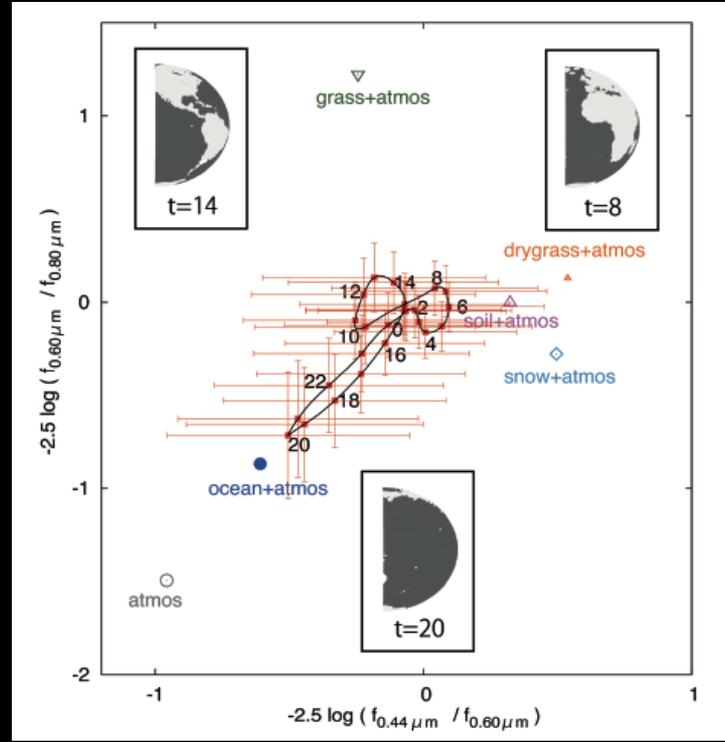
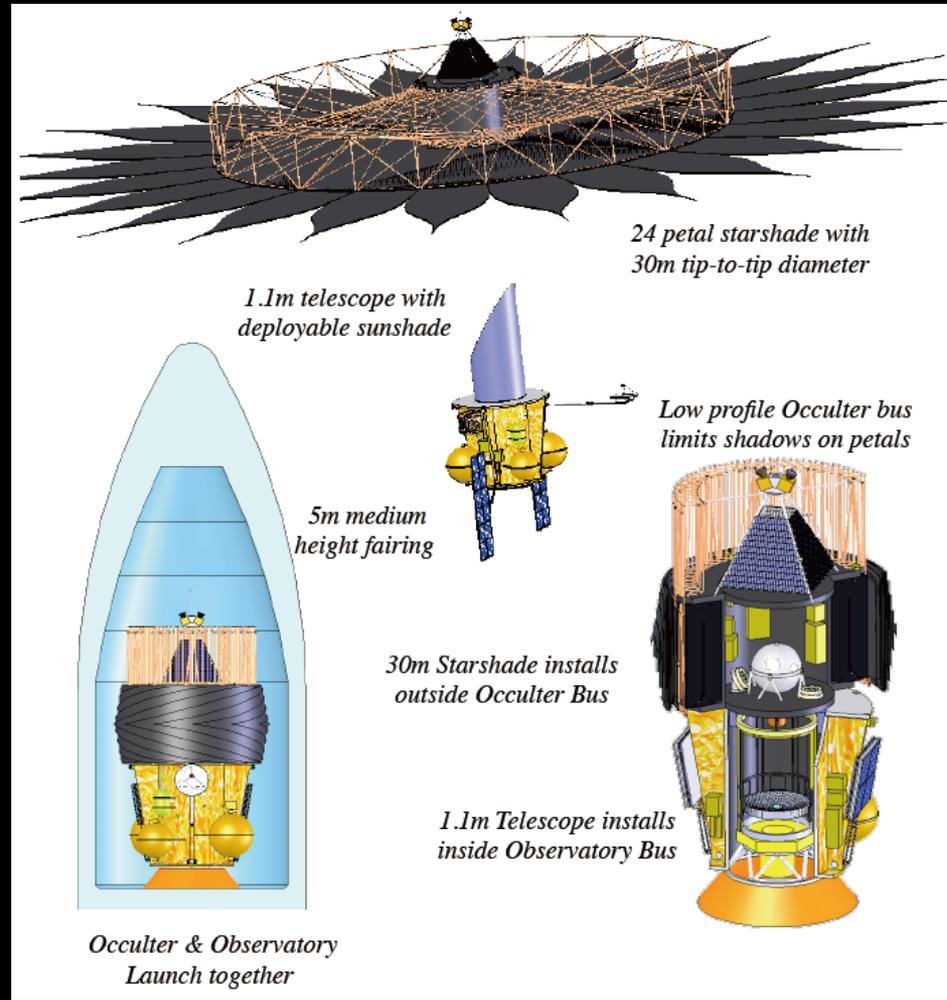
O₃: The Occulting Ozone Observatory



O₃: The Occulting Ozone Observatory

N. Jeremy Kasdin¹, David N. Spergel¹, P. Doug Lisman², Stuart B. Shaklan², Dmitry Savransky¹, Eric Cady¹, Edwin L. Turner¹, Robert Vanderbei¹, Mark W. Thomson², Stefan R. Martin², K. Balasubramanian², Steven H. Pravdo², Yuka Fujii³, Yasushi Suto³

¹Princeton University, ²Jet Propulsion Laboratory, ³University of Tokyo



■ 今回紹介する我々の結果はO₃の観測目標設定に組み込まれている

第二の地球の色から、海、雲、植生の占める面積の割合を推定する

- 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
 - 藤井友香、河原創、樽家篤史、須藤 靖
- 東京大学気候システム研究センター
 - 福田悟、中島映至
- プリンストン大学
 - Edwin Turner

Fujii et al. *Astrophys. J.* 715(2010)866, arXiv:0911.5621
Astrophys. J. 738(2011)184, arXiv:1102.3625

<http://www.space.com/scienceastronomy/color-changing-planets-alien-life-100513.html>

地球は青かった？

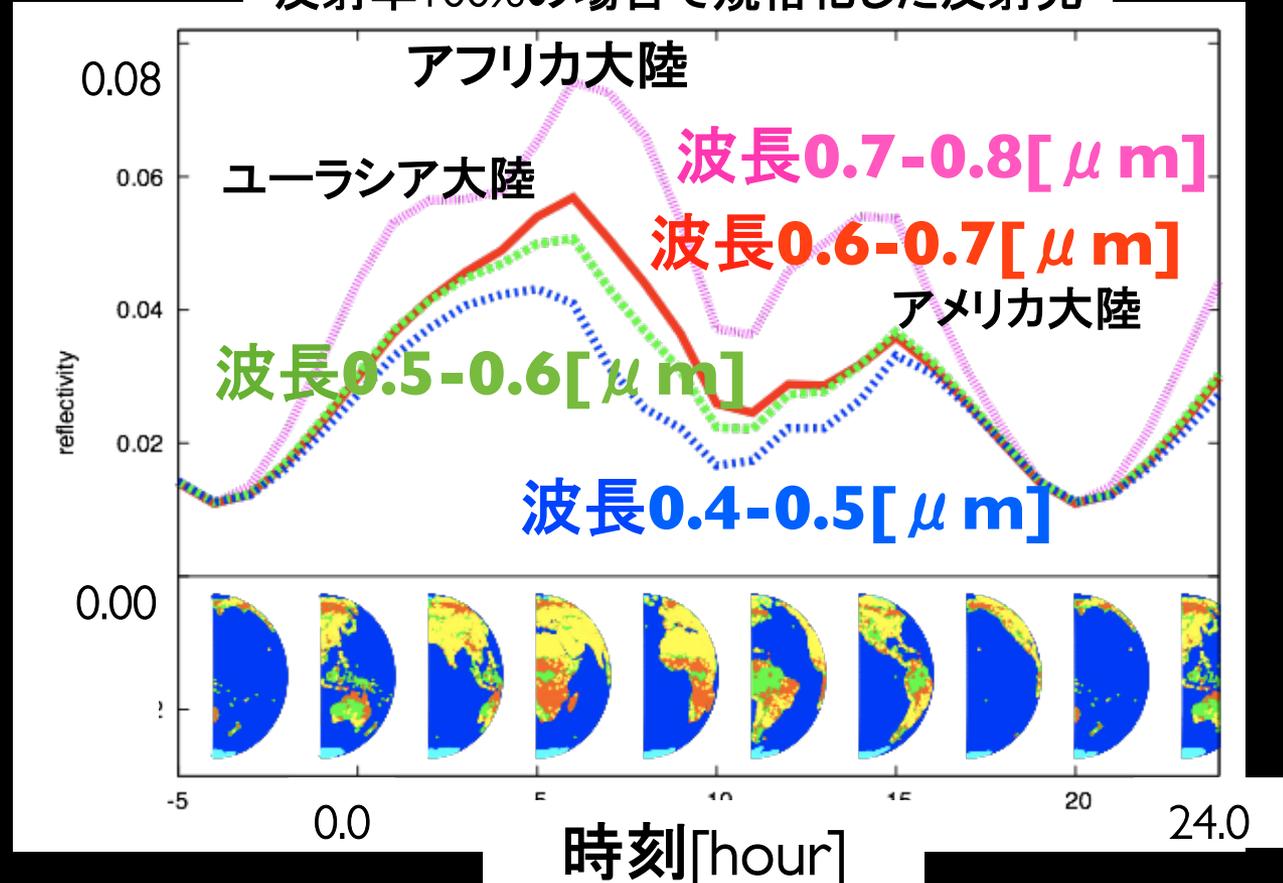
A pale blue dot



自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション

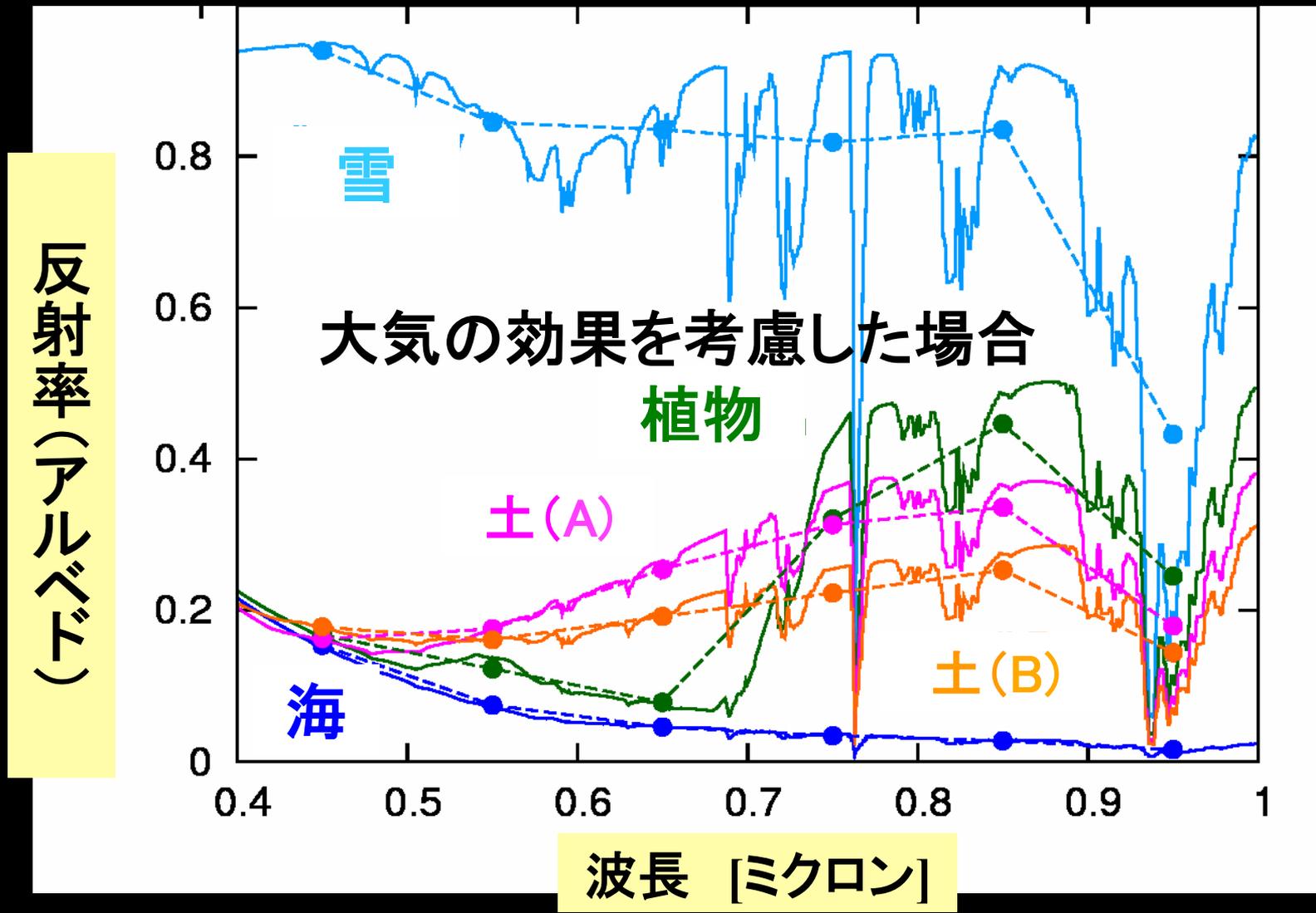
- 春分(3月)
- 自転軸に垂直な方向から観測
- 地球観測衛星のデータを用いて計算

反射率100%の場合で規格化した反射光



Fujii et al. (2010)

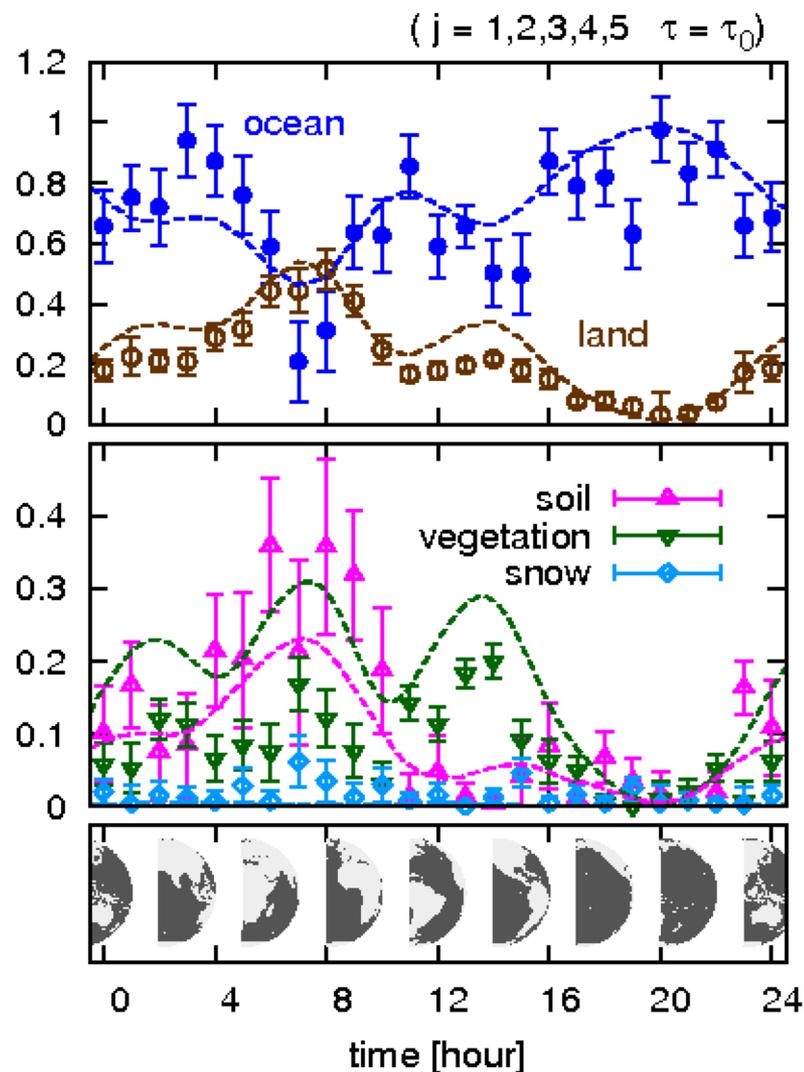
等方散乱近似での反射スペクトル



Fujii et al. (2010)

第二の地球の色から表面積を推定

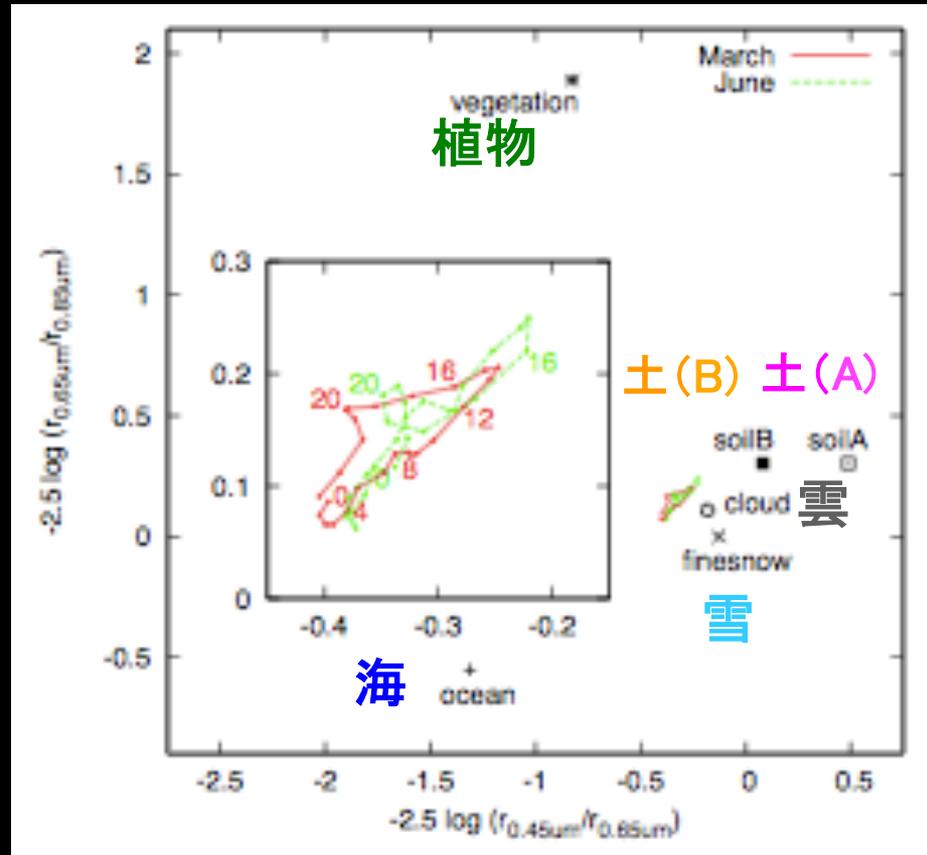
(重みつき)表面積比



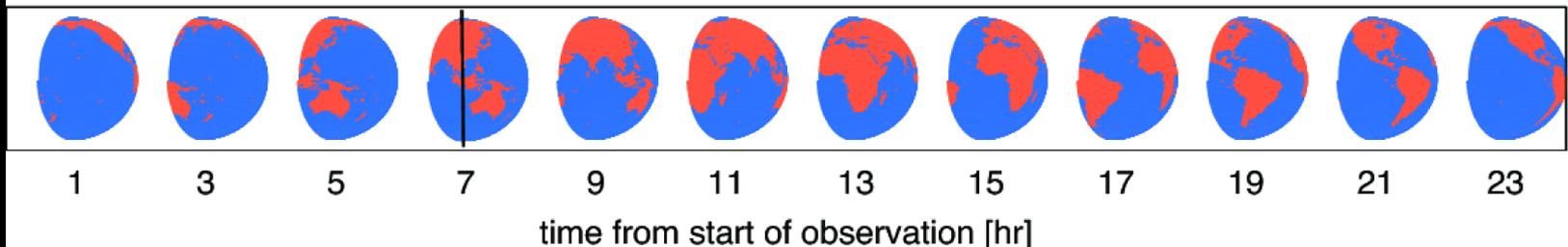
- 雲は無視
- 中心星の光が完全にブロックできた場合
- 10pc先の地球を口径4mの宇宙望遠鏡で1週間観測
- レイリー散乱の一次近似
- 海、土、植物、雪の4つの成分の面積比を推定

Fujii et al. (2010)

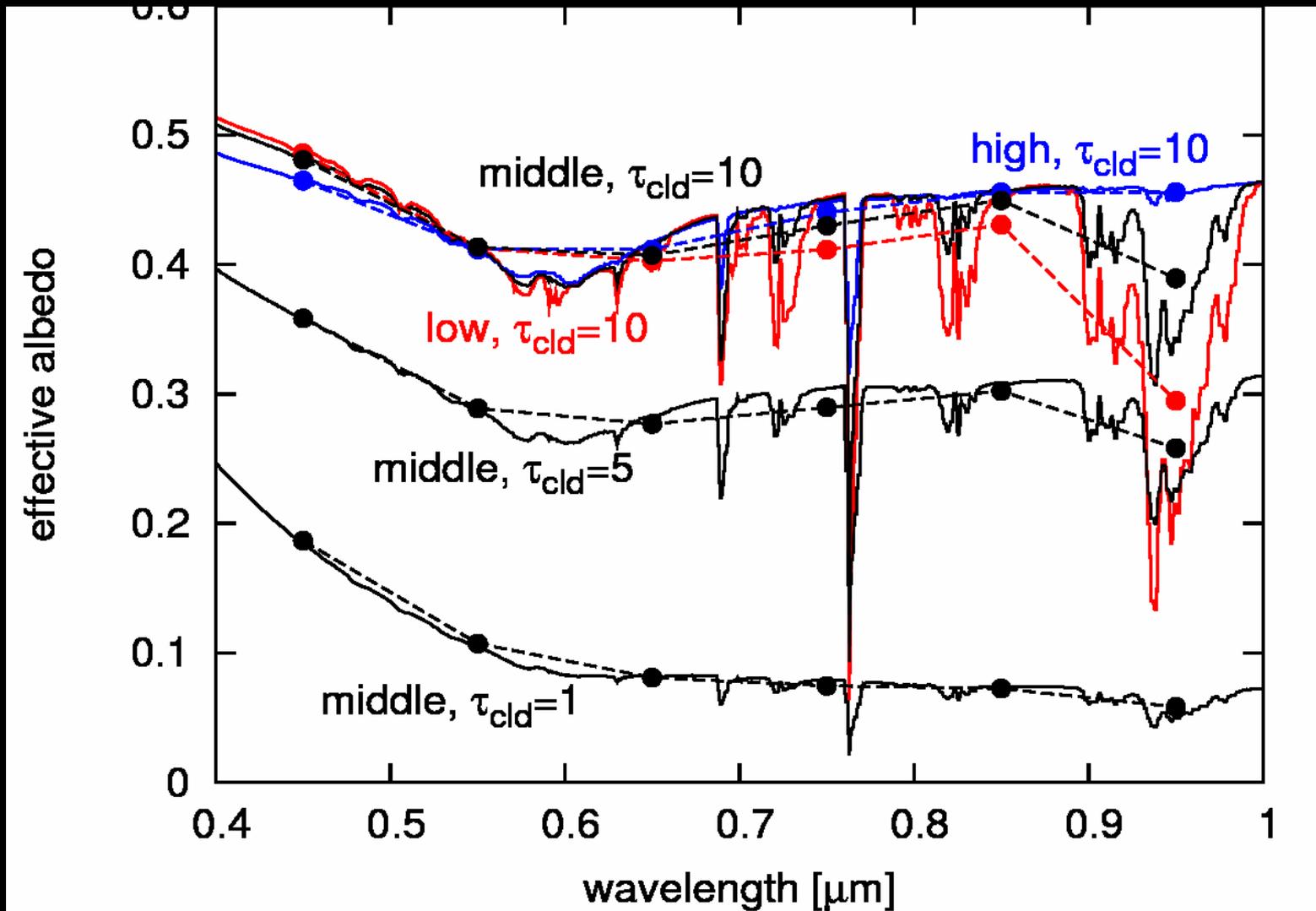
地球の色



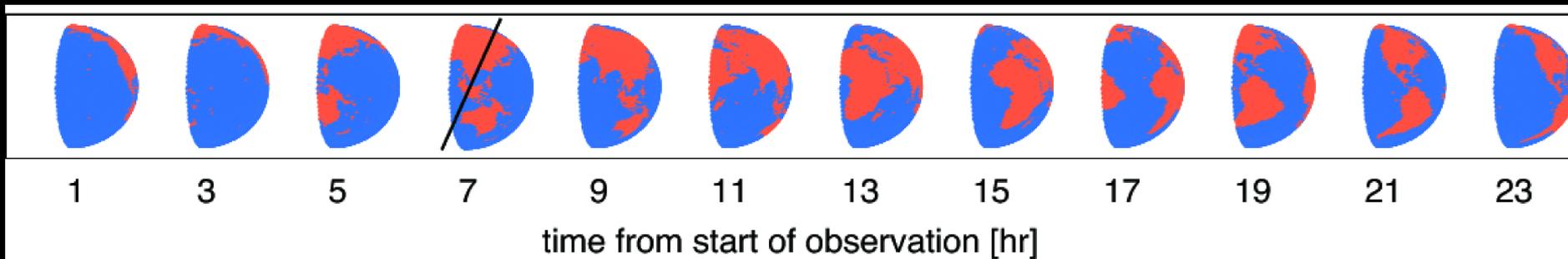
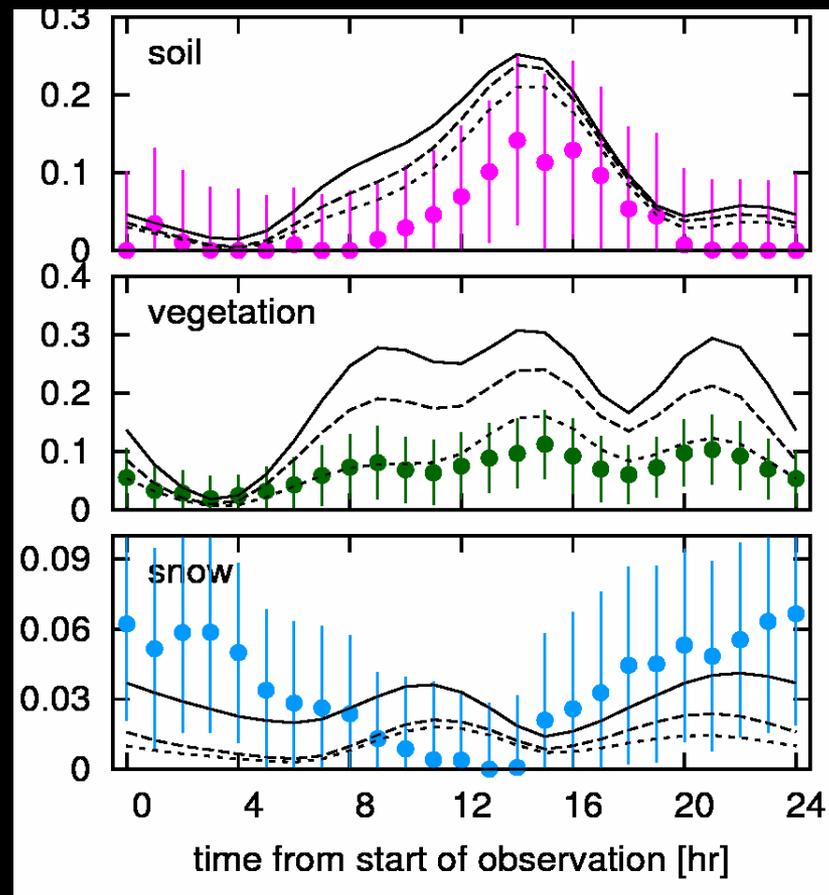
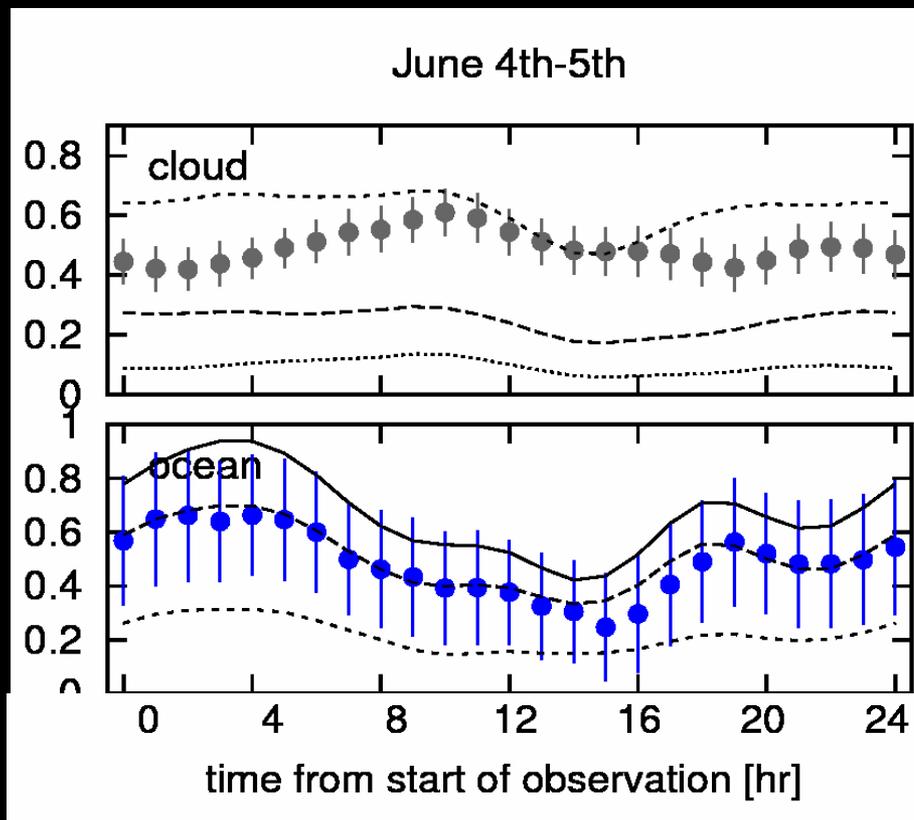
March 18th-19th



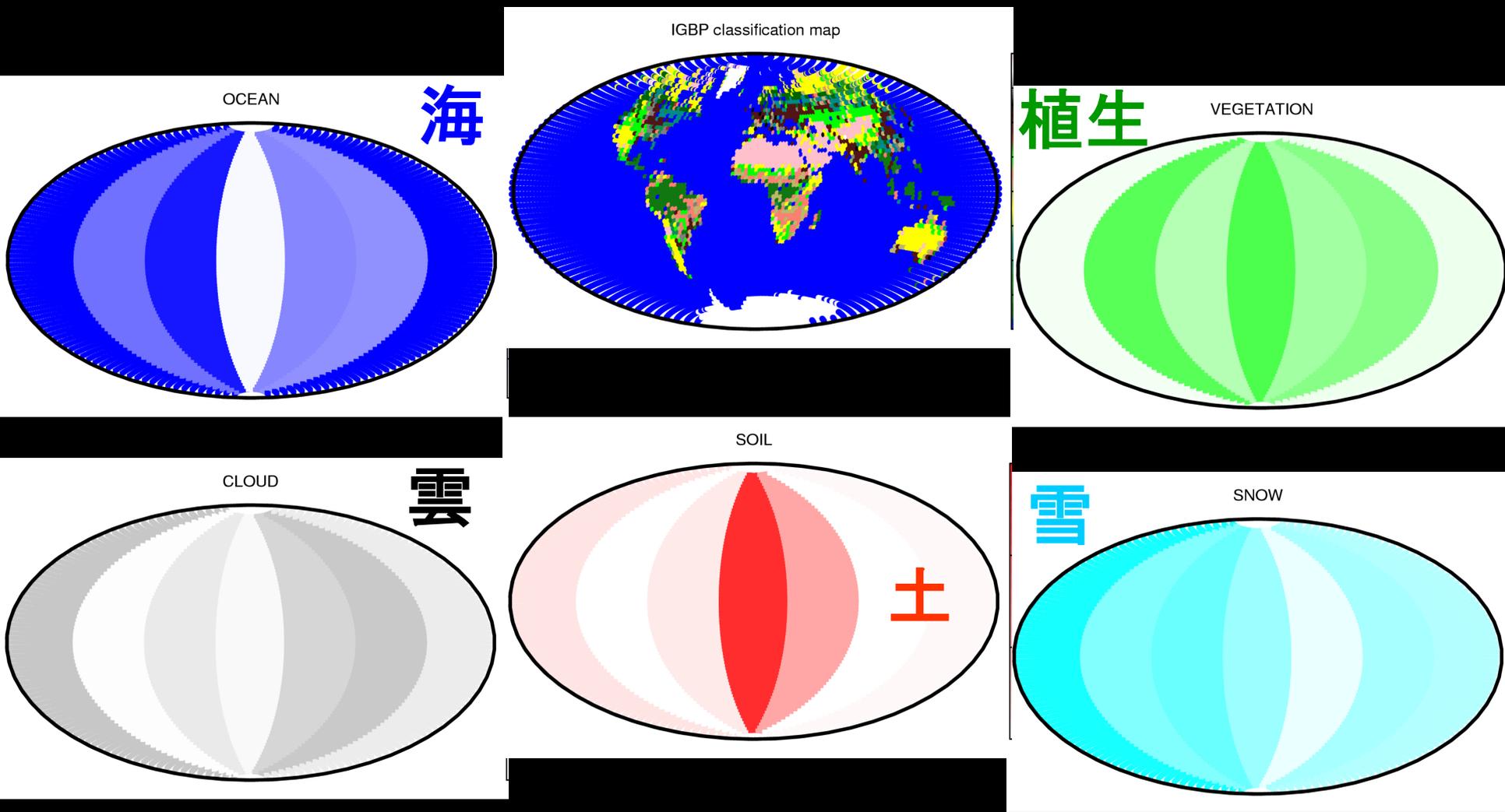
雲の反射スペクトル: モデル依存性



EPOXIデータから推定された面積



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



地球型系外惑星の世界地図：反射光トモグラフィーによる惑星表面マッピング

- 河原創(東大地惑)、藤井友香(東工大ELSI)
 - Kawahara and Fujii (2010) ApJ 720, 1333
- 自転だけでなく公転の効果も取り入れれば、自転傾斜角が大きくとも、地球の全表面を観測できる
 - 地球の全球表面地図が描けるはず
- 雲なし・等方散乱を仮定して模擬データを作成し、それから2次元マップが再構築できるか試した
- 惑星の自転周期、自転軸の傾斜角、季節の有無も同時にわかる

始生代(38~25億年前)の地球

■ バイオマーカー

- 生物由来の気体 (O_2 、 O_3 、 CH_4 など)

- 植物のレッドエッジ

- Slipher (1924), Sagan et al. (1993)

- Seager, Turner & Ford (2001) ; mock simulation

- Tinetti et al. (2006), Kiang et al. (2007)

- Fujii et al. (2010,2011) first inversion (1D mapping)

- Kawahara & Fujii (2010,2011) 2D mapping

■ 植物が陸上に進出する以前の過去の地球でレッドエッジに対応するバイオマーカー？

- 始生代の地球にいた紅色細菌は検出できるか？

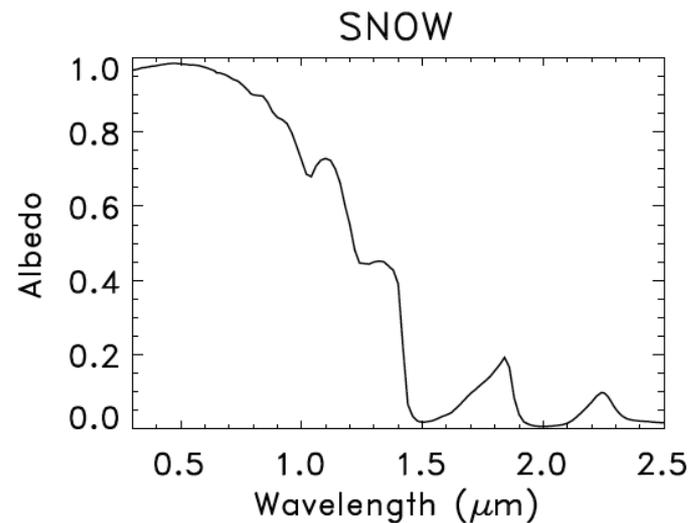
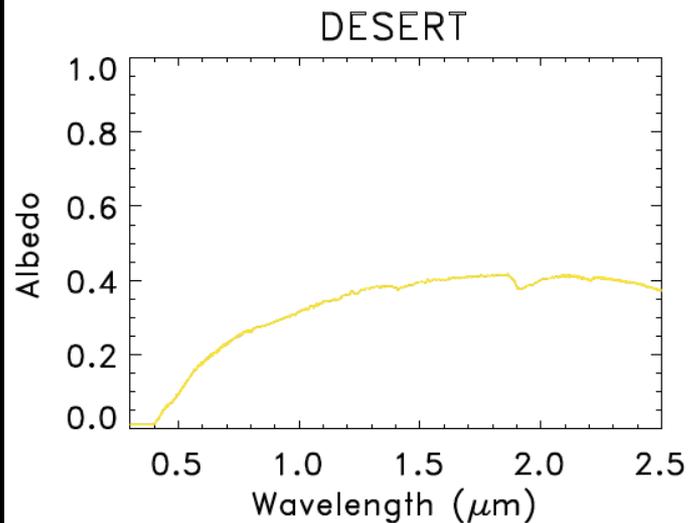
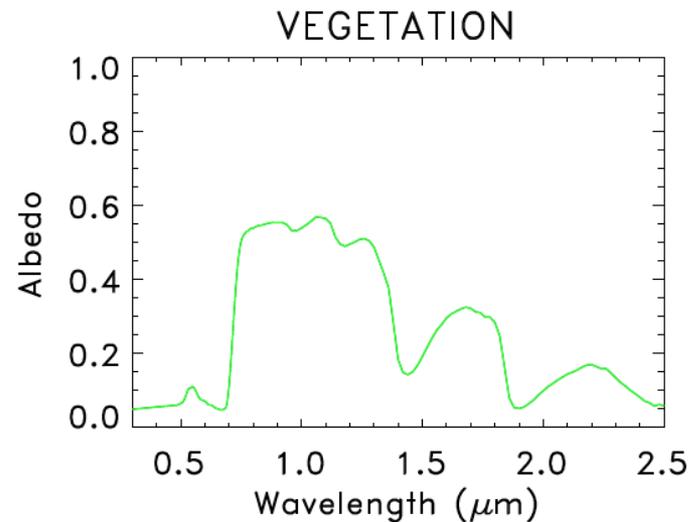
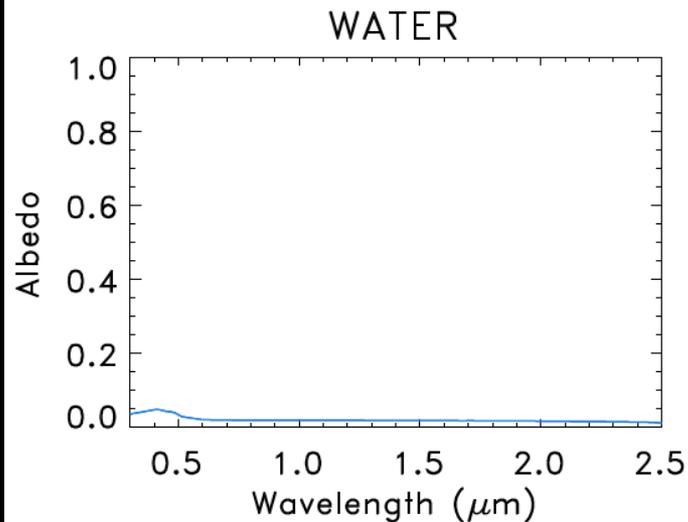
■ Sanroma et al. arXiv:1311.1145

紅色細菌 (purple bacteria)

- 光合成細菌のうち酸素を発生せず、カロテノイドの蓄積により赤色ないし褐色を呈するものの総称

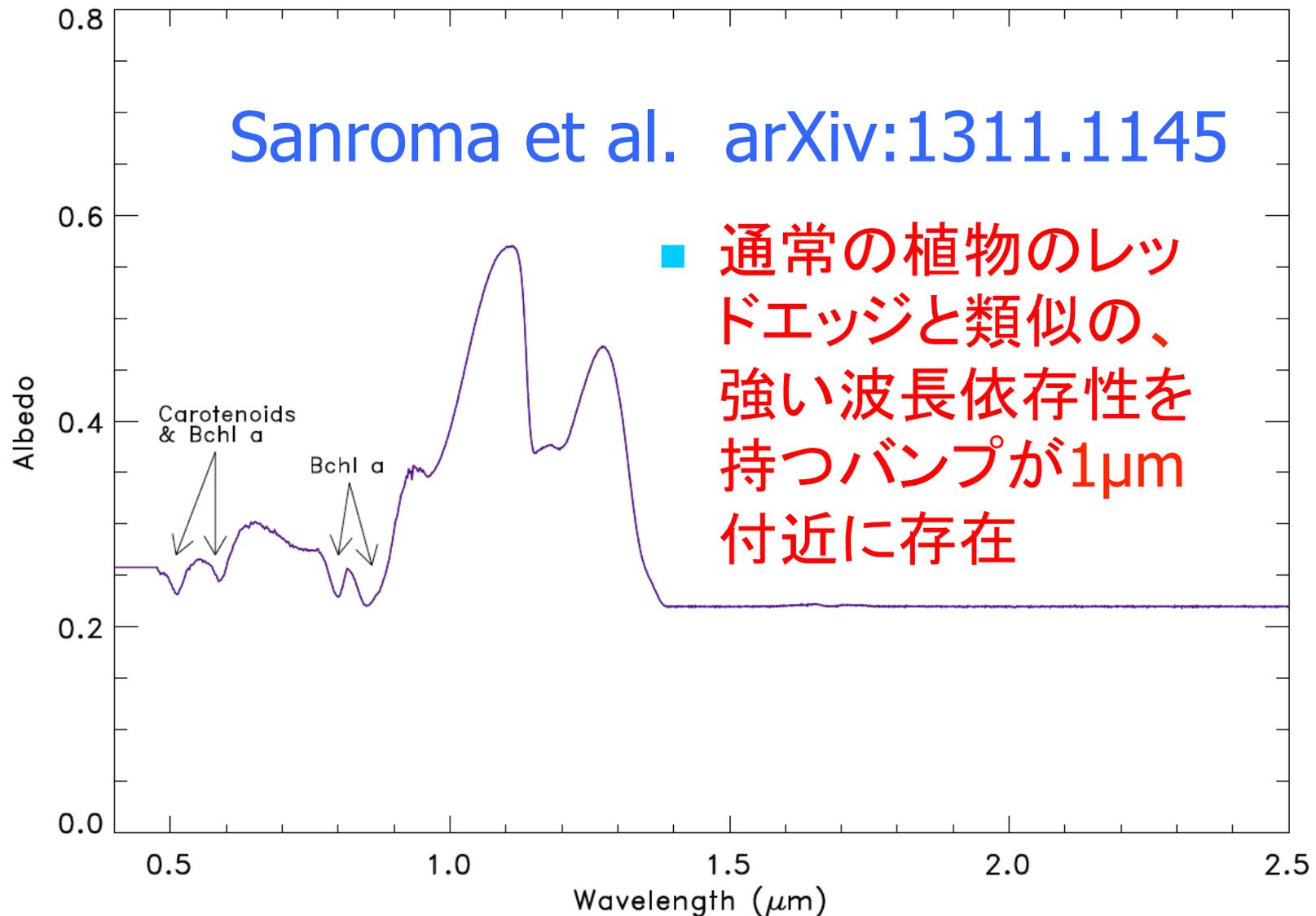


各成分の反射スペクトル



紅色細菌の反射スペクトル

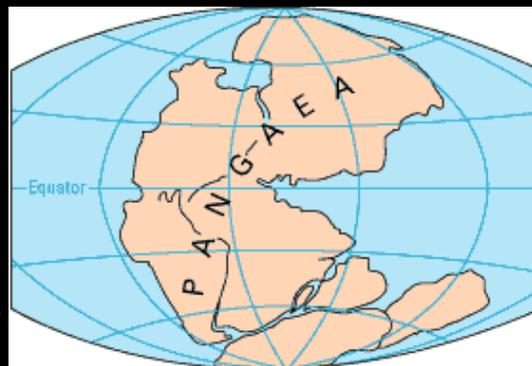
Sanroma et al. arXiv:1311.1145



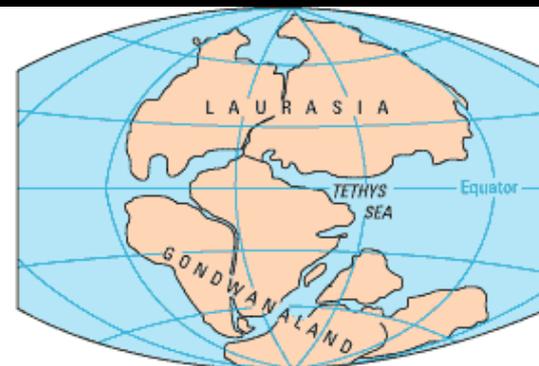
大陸分布

- 陸地の大域的分布、特にその非一様性の度合いは、自転にともなう反射光の時間変化を観測する系外惑星リモートセンシングにおいて、重要な意味を持つ

ペルム紀

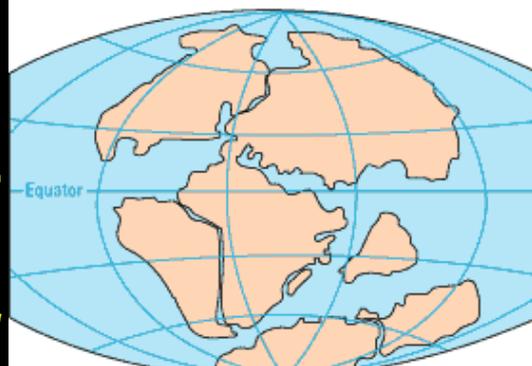


PERMIAN
225 million years ago

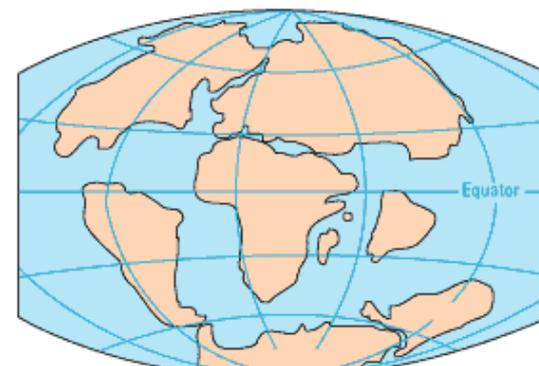


TRIASSIC
200 million years ago

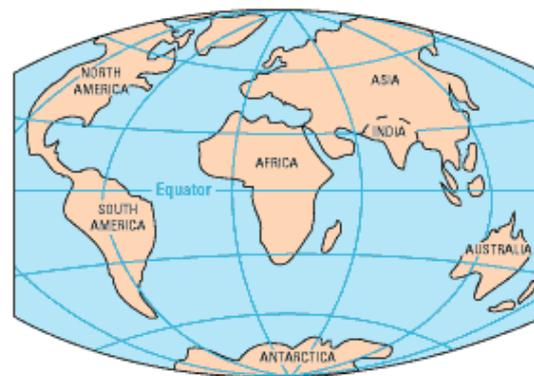
ジュラ紀



JURASSIC
135 million years ago



CRETACEOUS
65 million years ago

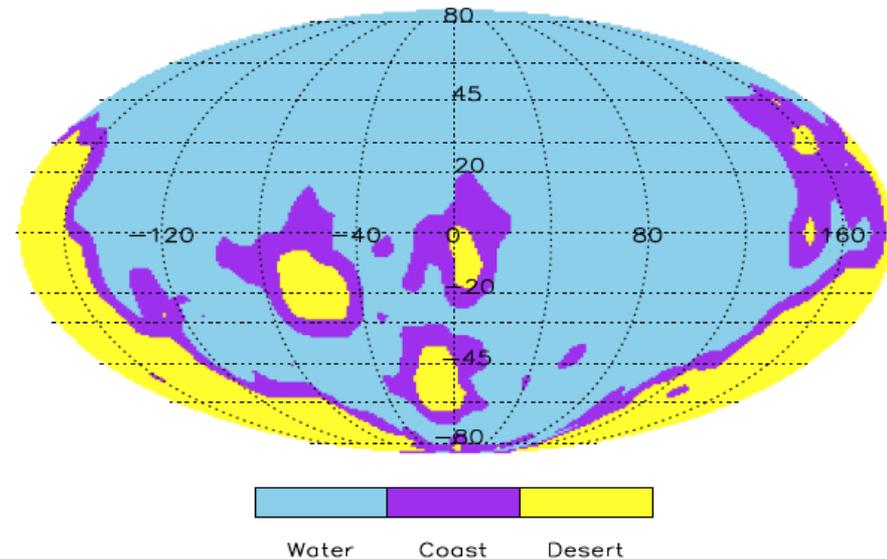
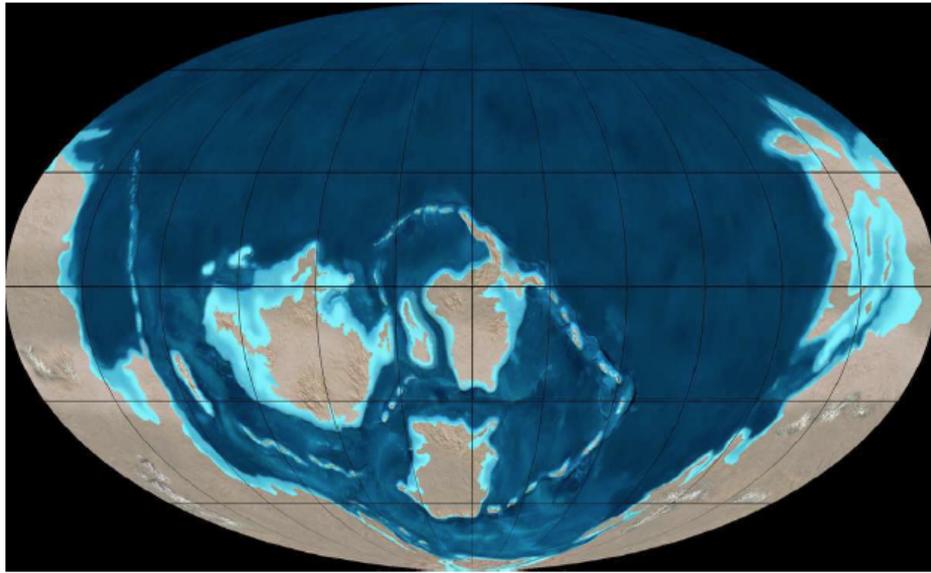


PRESENT DAY

三畳紀

白亜紀

カンブリア後期(5億年前) の大陸分布

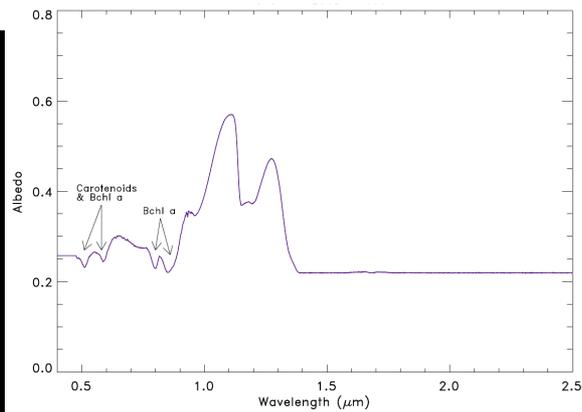
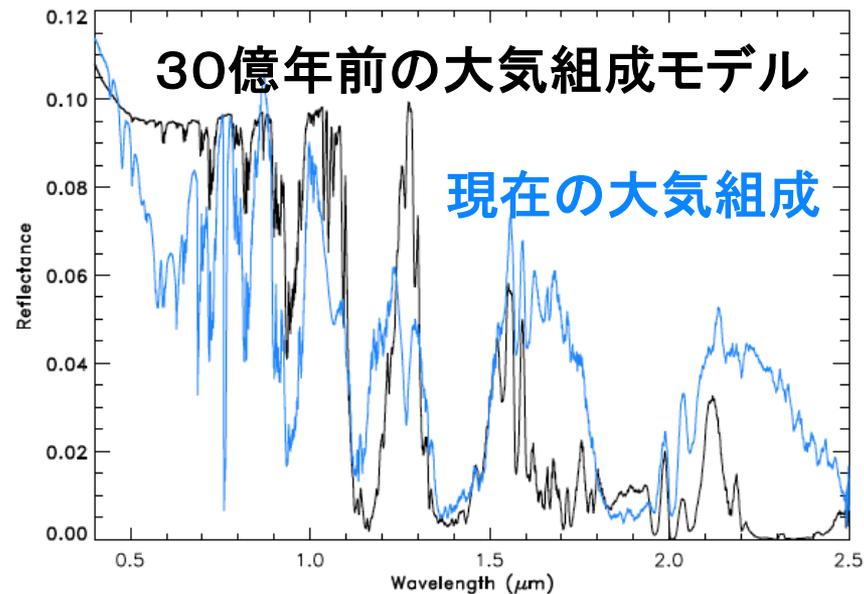
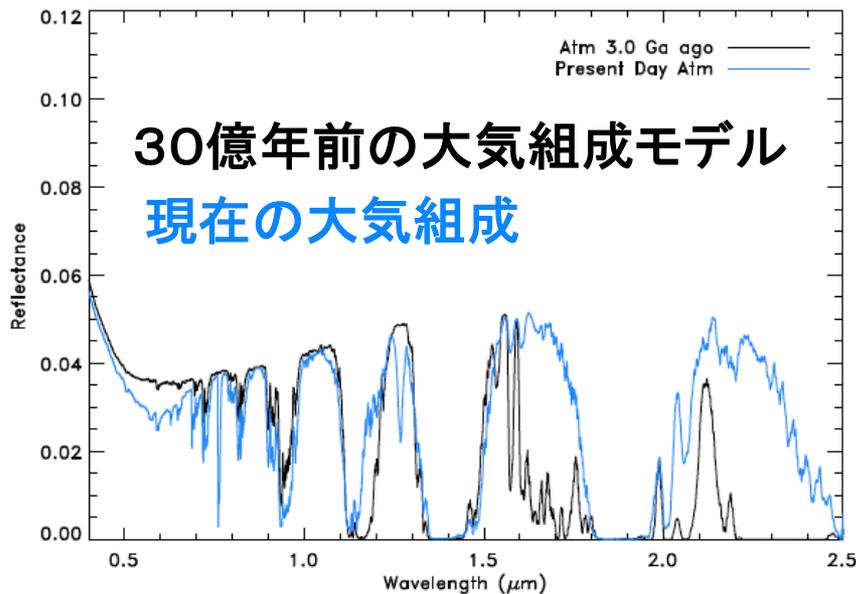


Sanroma et al. arXiv:1311.1145

過去と現在の地球の反射光スペクトル (大陸分布は5億年前のモデルを仮定)

雲を無視した場合

50%が雲に覆われている場合



Sanroma et al.
arXiv:1311.1145

系外地球における酸素、水、クロロフィル の検出可能性： パラメトリックモデル

- 系外地球の表面反射光スペクトルを近似的にモデル化
 - 雲＋分子の吸収線＋レッドエッジ
 - 将来の衛星観測での検出可能性
 - Fujii et al. (2010,2011)の「第二の地球の色」の分光バージョン
- “Prospects for detecting oxygen, water and chlorophyll in an exo-earth” T.D.Brandt & D.S.Spiegel: arXiv:1404.5337

地球型惑星スペクトルモデル(0.5-1.0 μm)

$$\tau_\lambda = \sum_{\text{mol}} \tau_{\lambda, \text{mol}} \quad (\text{光学的厚さ: 酸素、オゾン、水蒸気})$$

Rayleigh scattering above cloud scattering by clouds

$$\begin{aligned} \frac{F_{\text{refl}}}{F_\star} \approx & \frac{\mathcal{R}_\lambda}{2} f_c e^{-\tau/4} + \left(1 - \frac{\mathcal{R}_\lambda}{2}\right) f_c c_\lambda e^{-\tau/2} \\ & + \mathcal{R}_\lambda (1 - f_c) e^{-\tau/2} + (1 - \mathcal{R}_\lambda) (1 - f_c) \alpha_\lambda e^{-\tau} \end{aligned}$$

Rayleigh scattering above surface

scattering by surface

F_{refl} : reflected flux, F_\star : incident stellar flux

\mathcal{R}_λ : Rayleigh scattering optical depth

f_c : cloud fraction, c_λ : cloud albedo, α_λ : surface albedo

Rayleigh scattering assumed to occur below
half the available atmosphere

パラメトリックモデルスペクトル

Absorption lines

$$\frac{F_{\lambda}}{F_{\lambda,*}} \approx \left(\sum_i A_i \lambda^i \right) \left[(1 + bH(\lambda)) \exp \left(- \sum_{\text{mol}} \tau_{\lambda, \text{mol}} \right) + \frac{c}{\lambda^4} \exp \left(- \sum_{\text{mol}} \frac{\tau_{\lambda, \text{mol}}}{2} \right) \right].$$

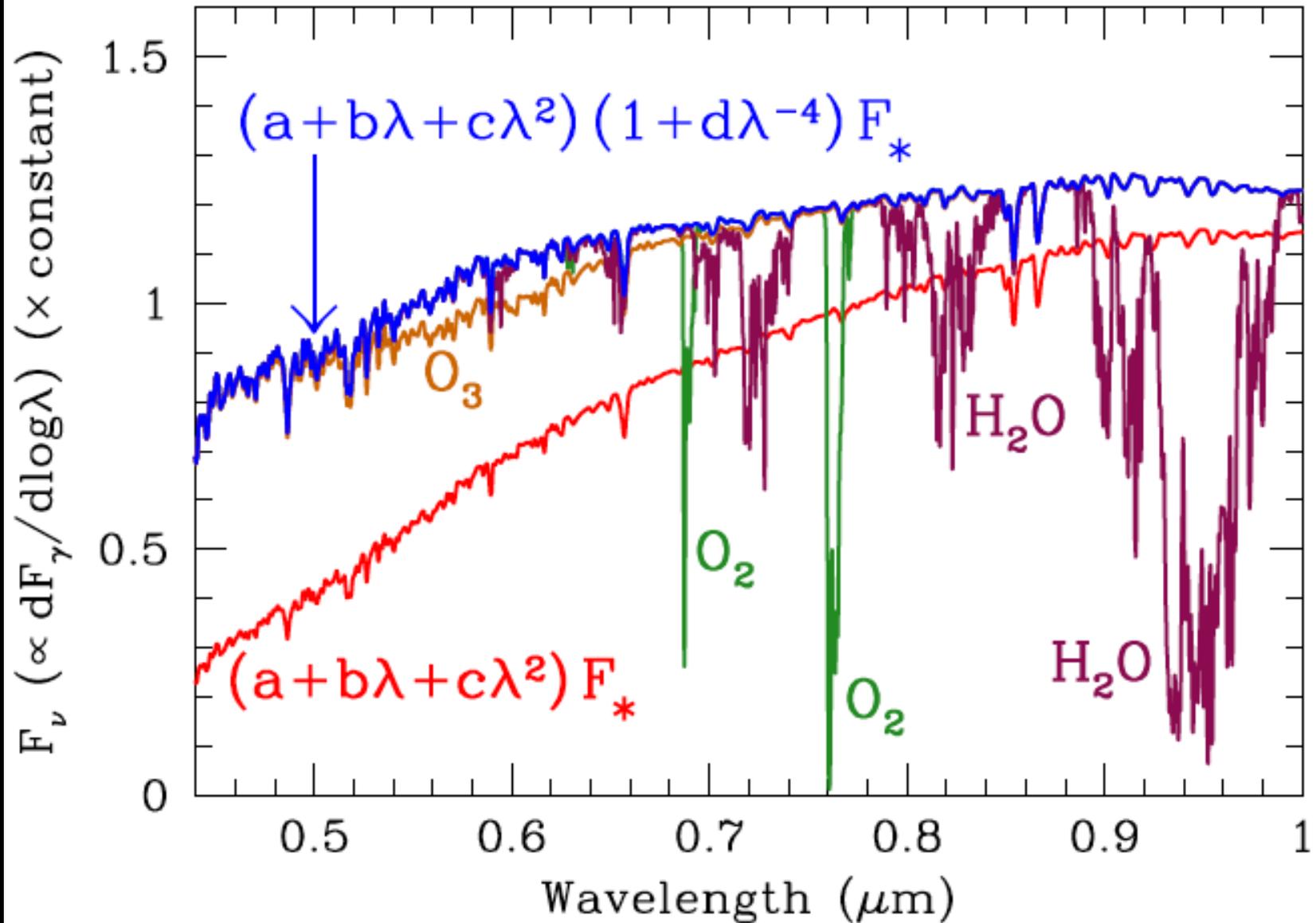
連続スペクトル
(多項式近似)

Rayleigh scattering terms

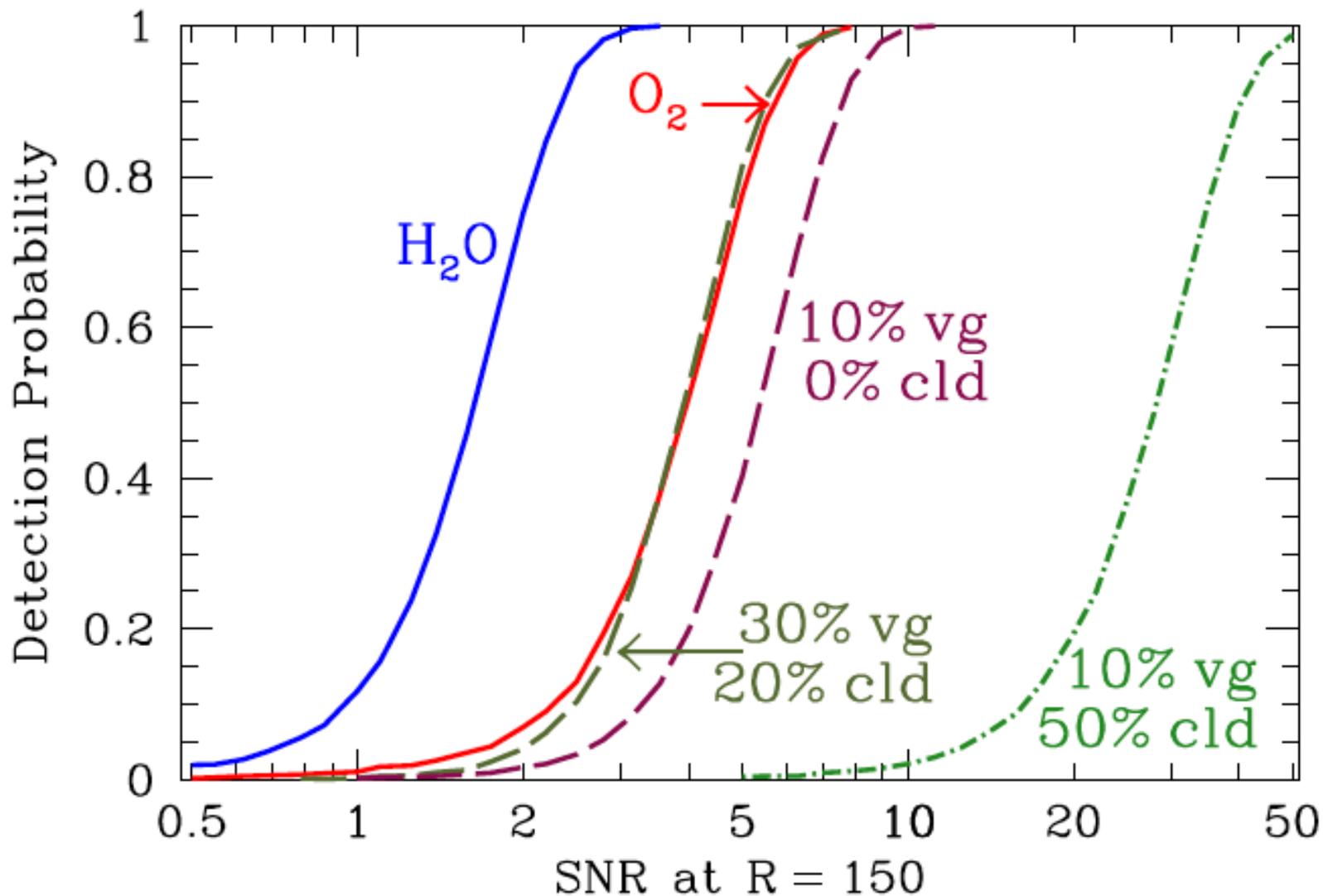
Red-edge due to chlorophyll (softened Heaviside)

$$H(\lambda) = [1 + \exp(80(0.72 - \lambda/\mu\text{m}))]^{-1}$$

R=1000でのベストフィットモデルの例



酸素、水、クロロフィルの検出確率



将来の衛星観測を用いた第二の地球の バイオマーカー検出可能性

■ 水は検出可能

- 波長分解能 $R > 40$ かつ各波長ビンでの $S/N > 5$

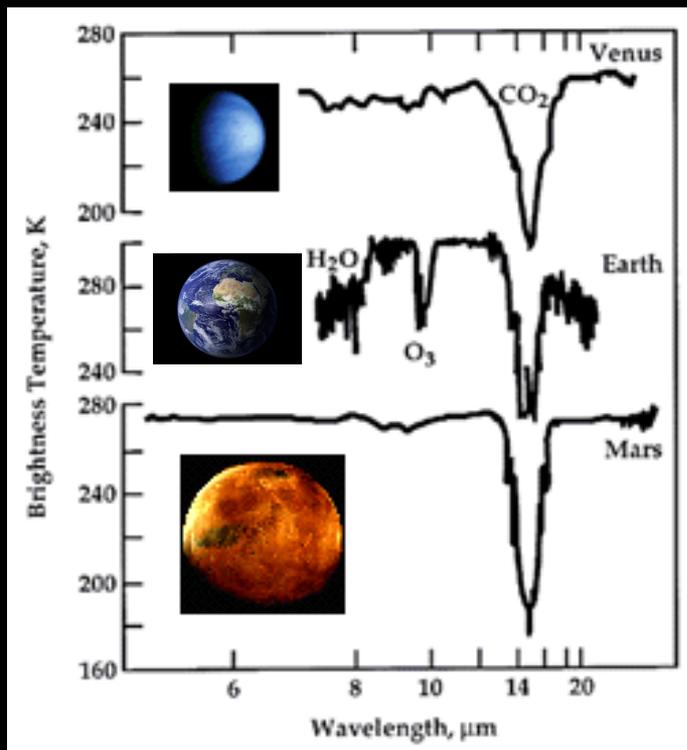
■ 酸素の検出はより難しい

- 波長分解能 $R > 150$ かつ各波長ビンでの $S/N > 6$

■ レッドエッジ検出は極めて困難

- 雲が我々の地球に比べてはるかに少ない、あるいは植物に覆われている面積がはるかに大きい必要がある

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”



- **地球型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
- **バイオマーカーの提案と検出**
 - 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、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と等しい