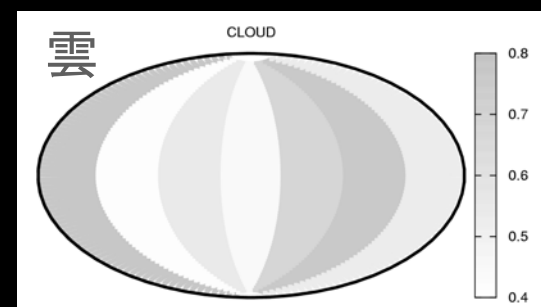
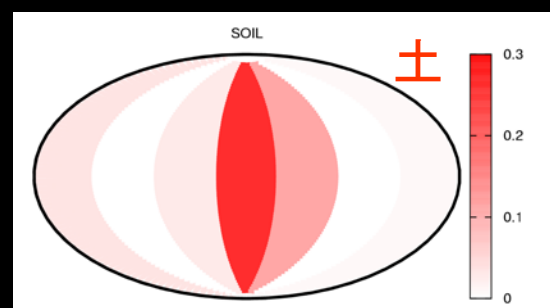
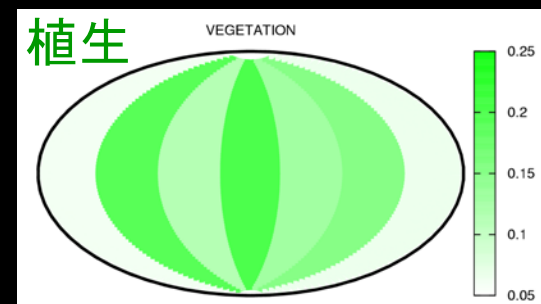
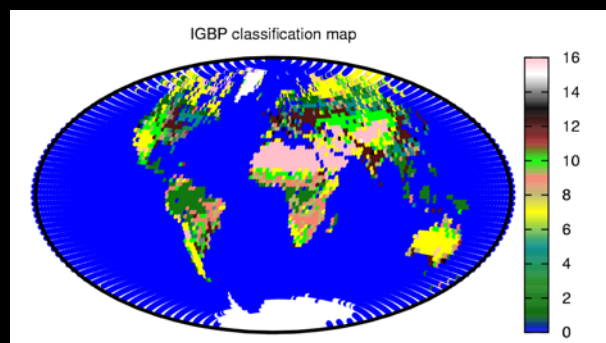
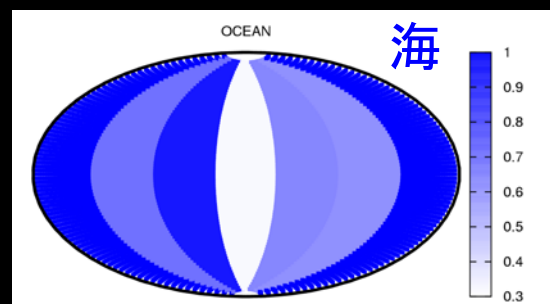


太陽系外惑星から宇宙生物学へ



東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 須藤靖

第12回 林忠四郎記念講演会

2012年1月17日 15:45-16:45@筑波大学

ロサンゼルスの青空

- この青空は世界の果てではないのか
- この先に別の世界が広がっているのか

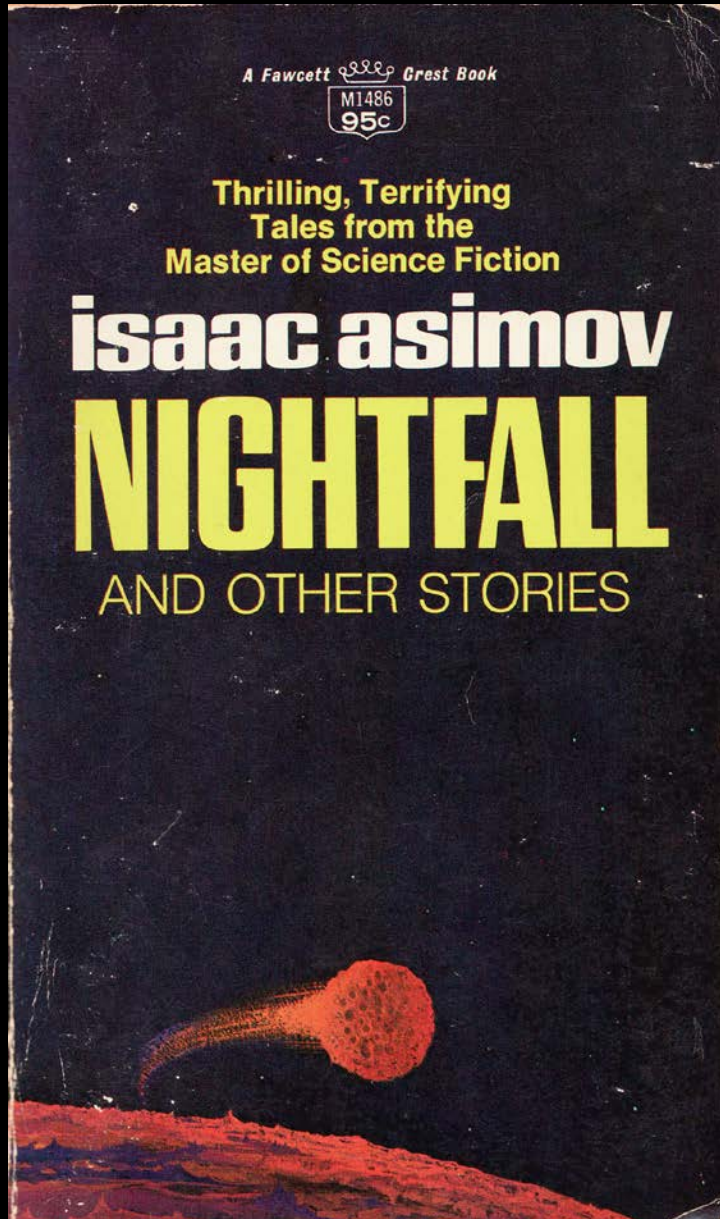
アイザック・アシモフ著 「夜来たる」



イラスト：羽馬有紗

- 2000年に一度しか夜が来ない“地球”の人たち
- 自分たちの“地球”と宇宙との関係は？

アシモフの教え：我々は何も知らなかった

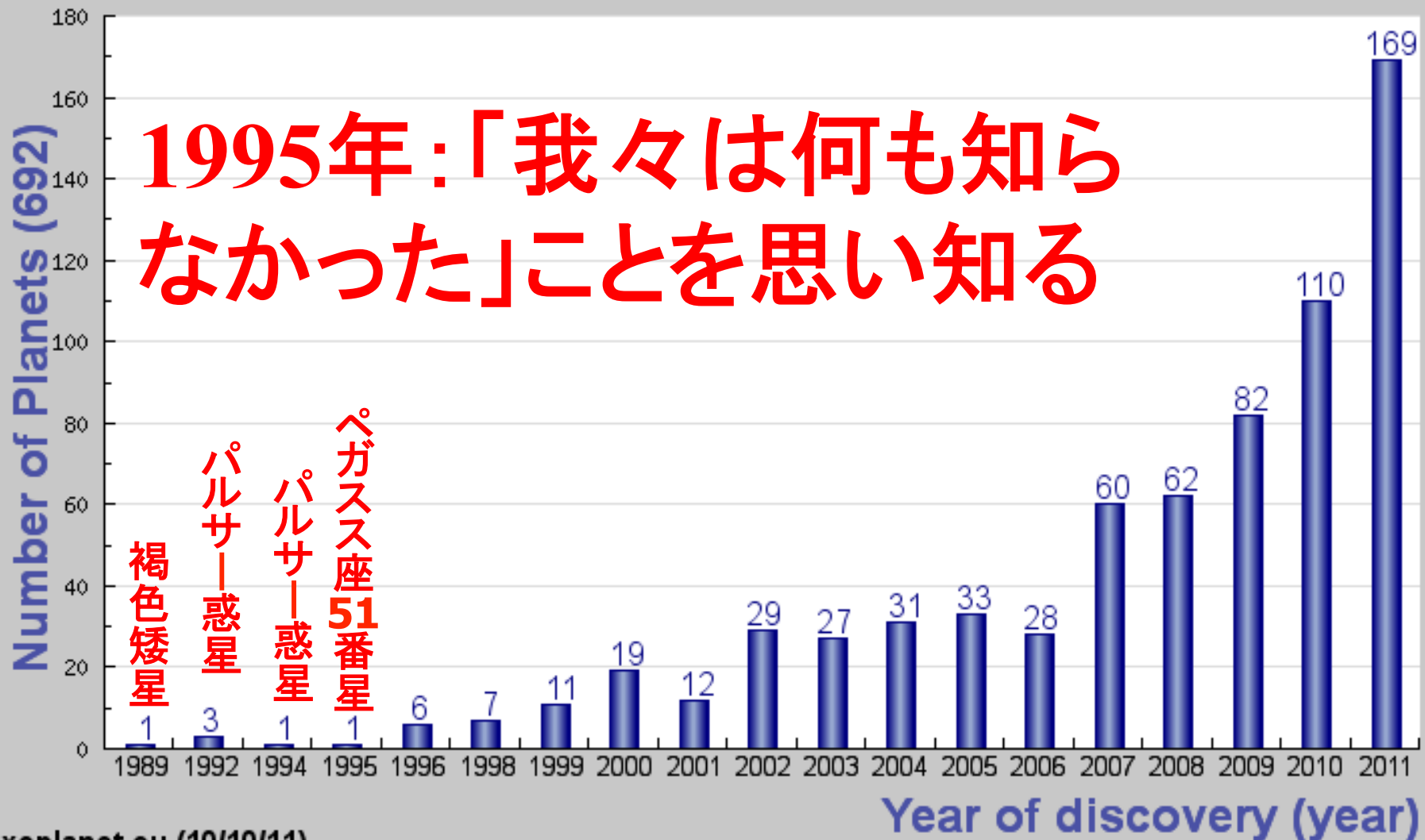


- 夜の存在が外の世界の存在を教えてくれる秀逸な名作
- “Light !” he screamed. Aton, somewhere, was crying, whimpering horribly like a terribly frightened child. *“Stars -- all the Stars -- we didn't know at all. We didn't know anything.”*

天文学の立場からの
系外惑星観測成果の要約と展望

太陽系外惑星（候補）の発見年表

Number of planets by year of discovery



第二の地球はあるか？



- 生命が誕生するには
 - 適度な温度
 - 大気存在
 - 液体の水(ハビタブル:居住可能性条件)
 - +偶然？
- 恒星の周りの地球型惑星を探せ！

Terra衛星のMODIS検出器のデータ

<http://modarch.gsfc.nasa.gov/>

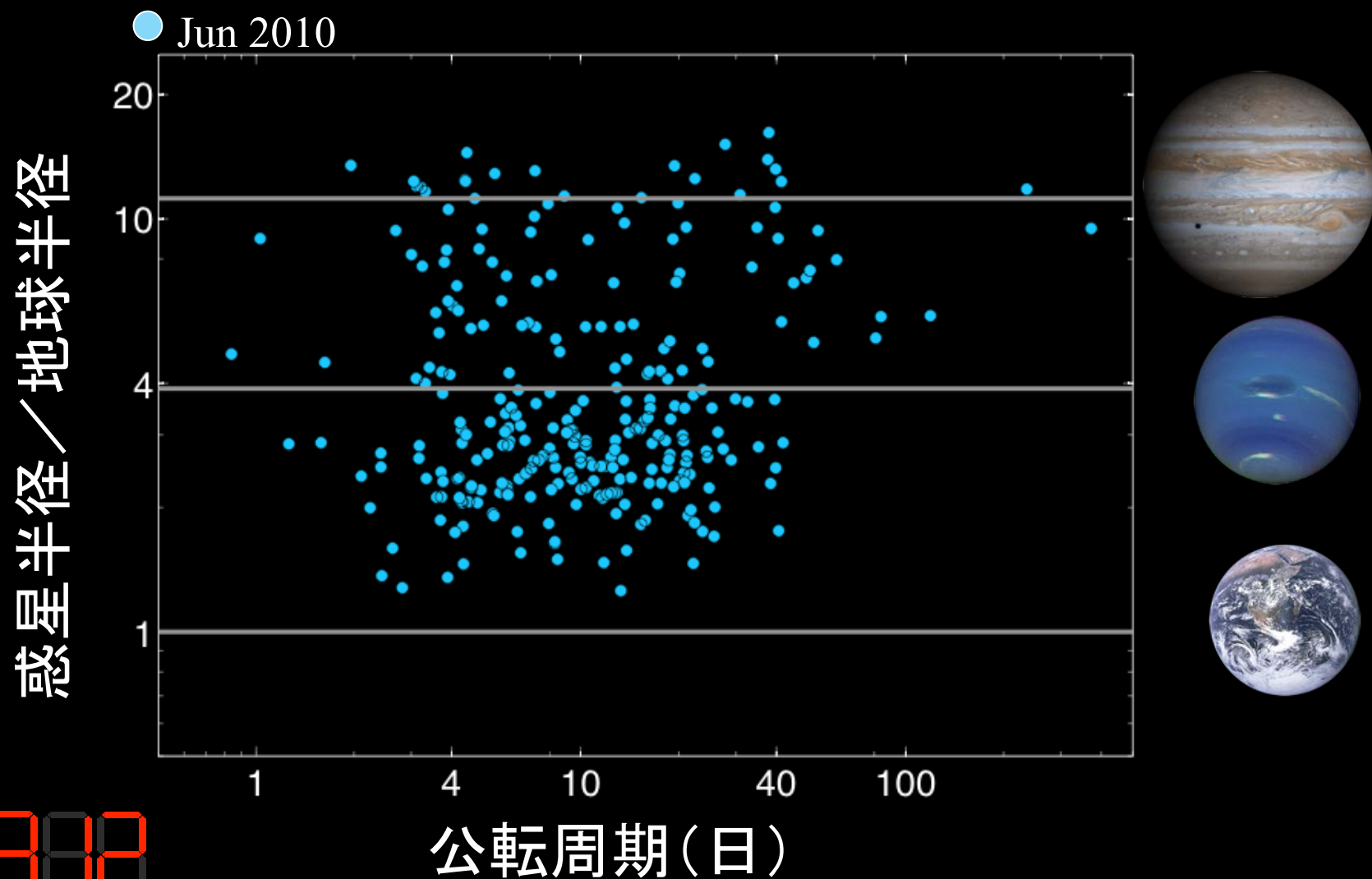
<http://www.nasa.gov/home/index.html>

ケプラー衛星 (米国2009年3月6日打ち上げ)
トランジット(食を起こす)惑星の測光サーベイ
地球型ハビタブル惑星の発見をめざす



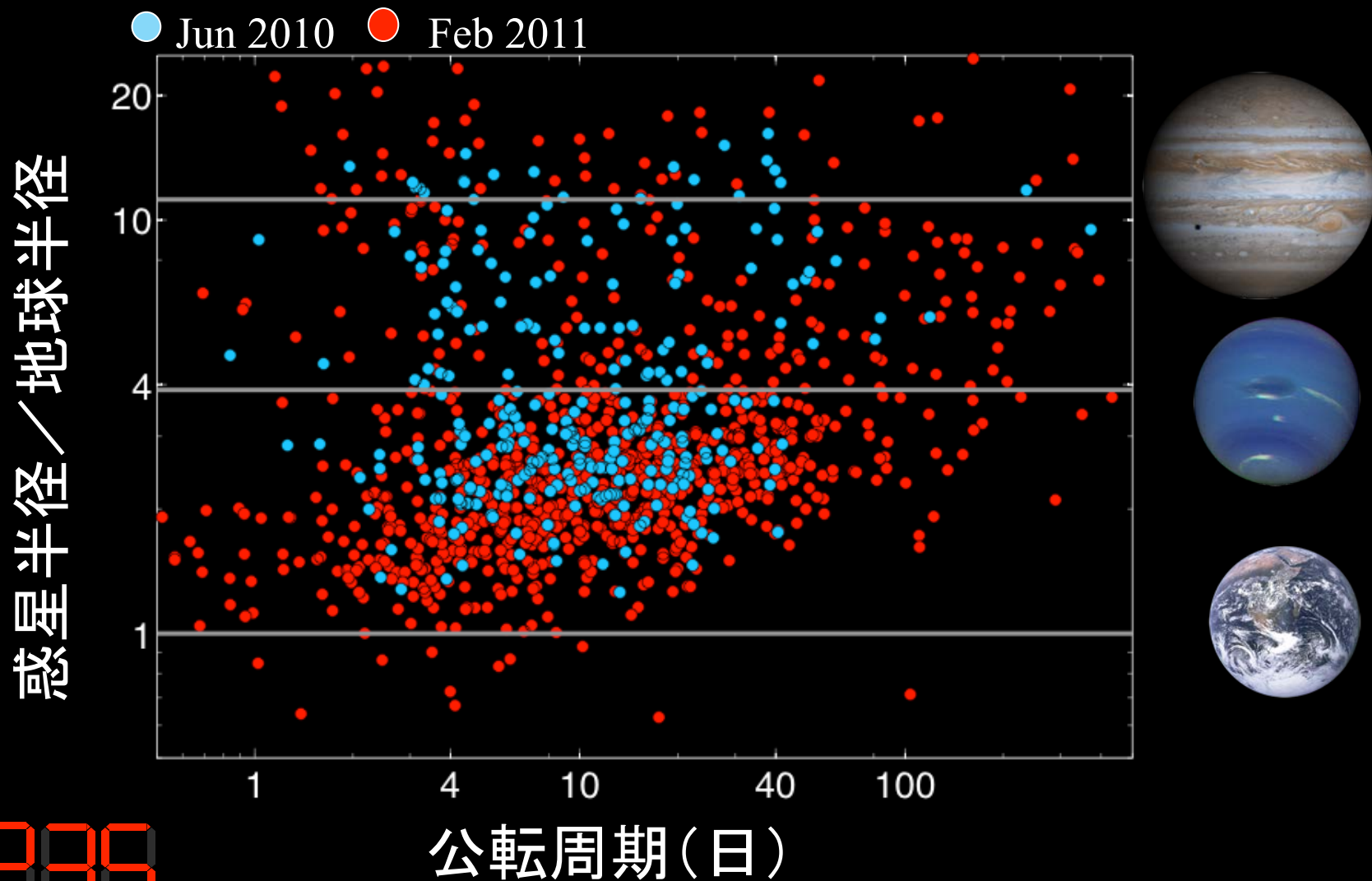
<http://kepler.nasa.gov/>

2010年6月時点での惑星候補



Presentation by Natalie Batalha, Kepler Deputy Science Team Lead

2011年2月時点での惑星候補

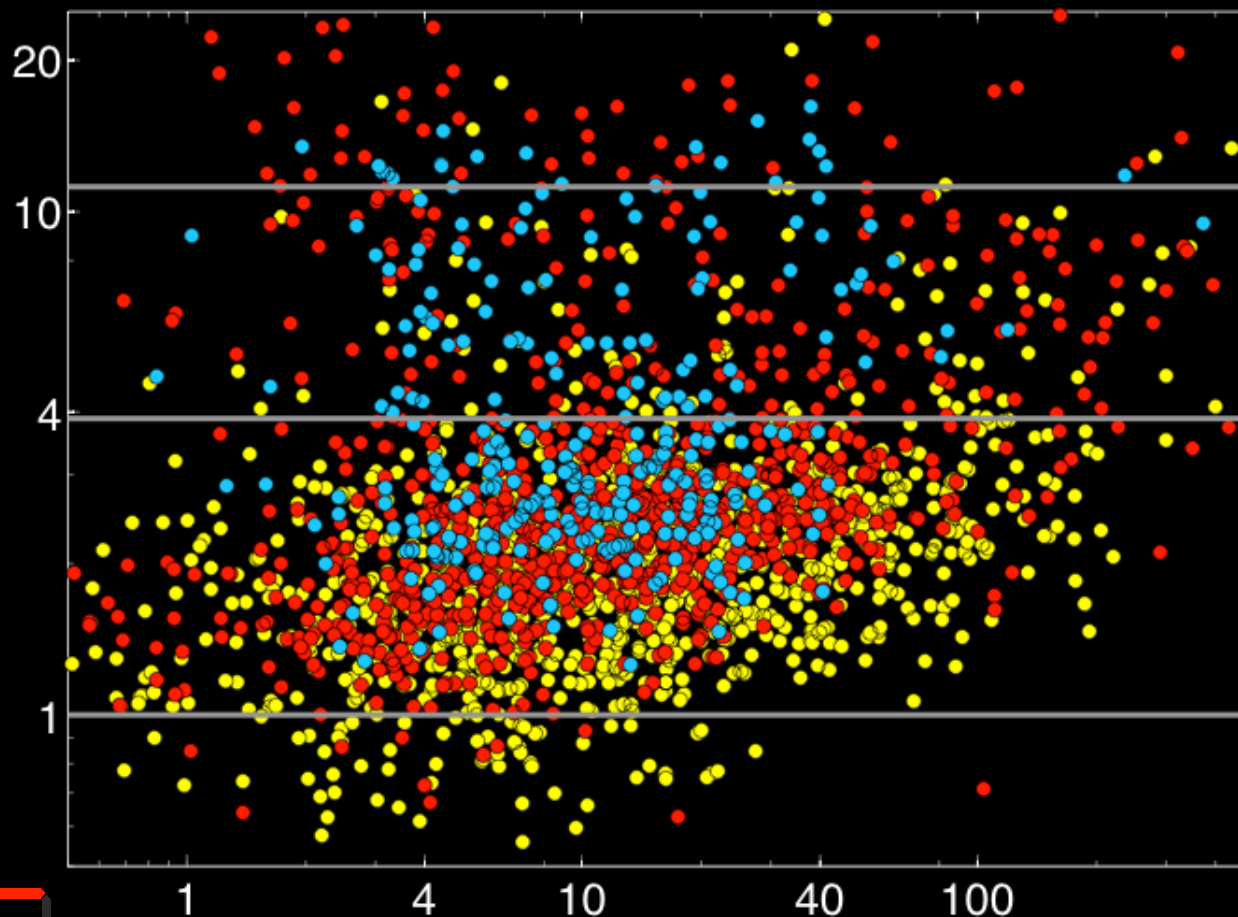


Presentation by Natalie Batalha, Kepler Deputy Science Team Lead

2011年12月時点での惑星候補

● Jun 2010 ● Feb 2011 ● Dec 2011

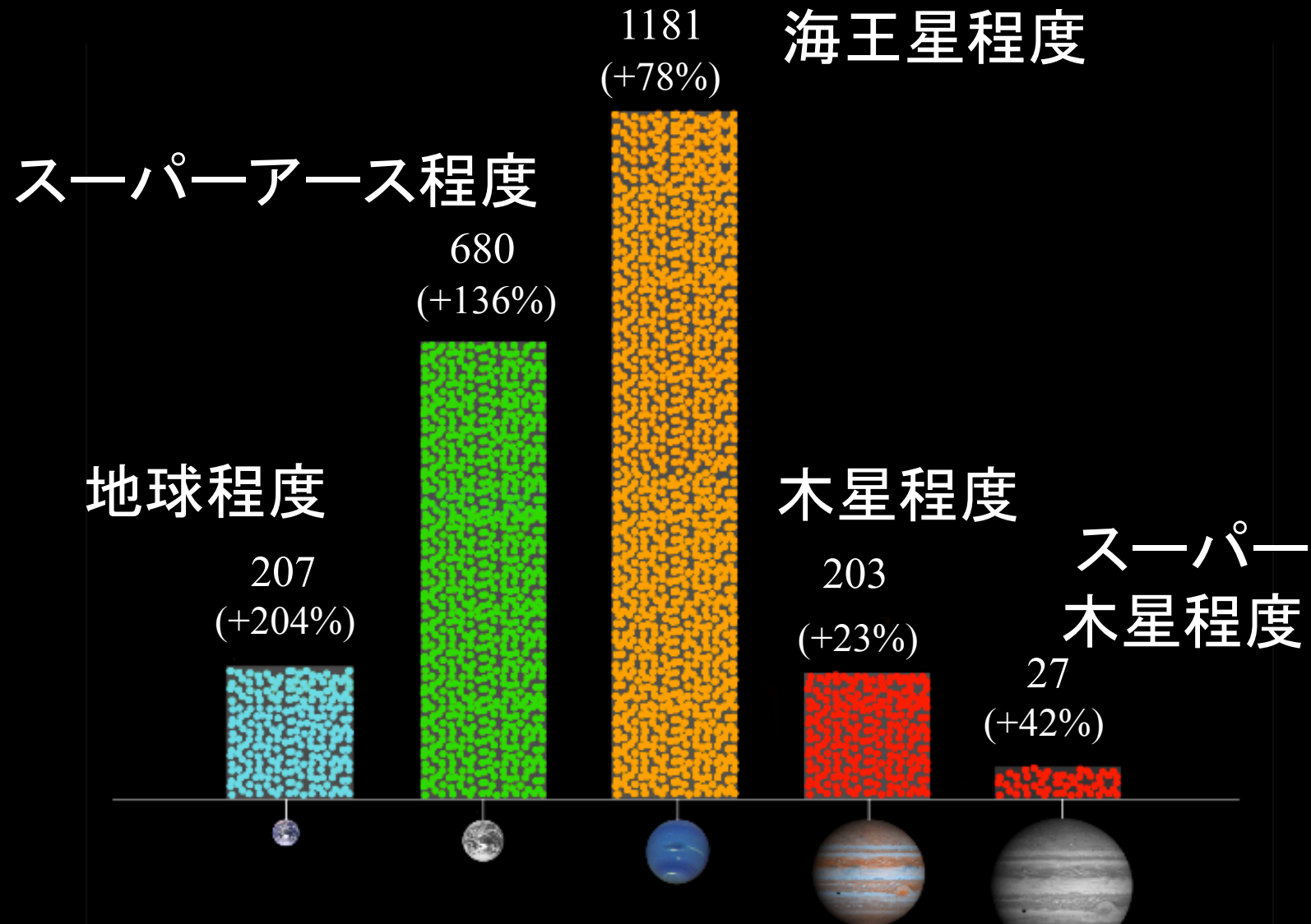
惑星半径 / 地球半径



公転周期 (日)

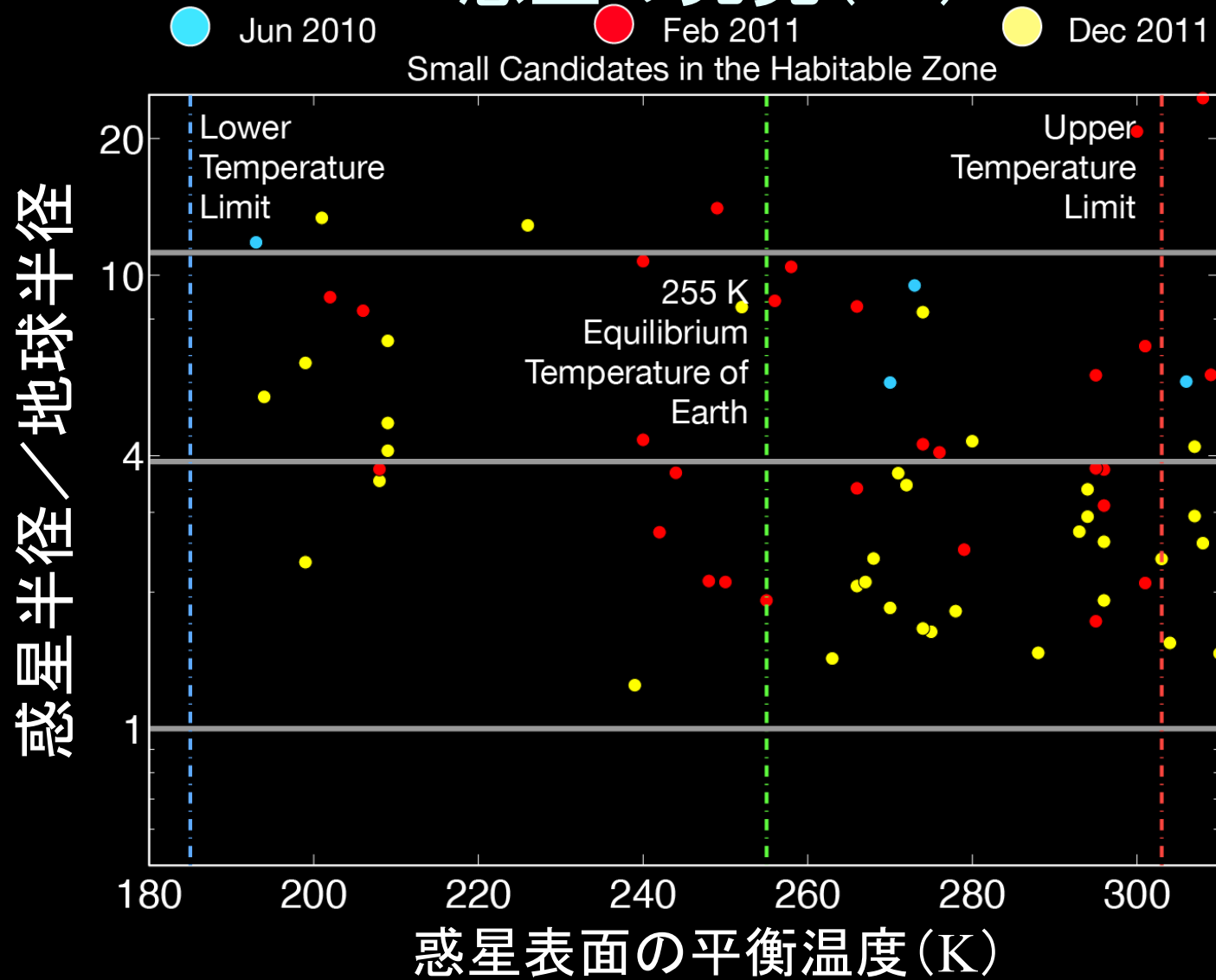
Presentation by Natalie Batalha, Kepler Deputy Science Team Lead

惑星候補の大きさのヒストグラム



Presentation by Natalie Batalha, Kepler Deputy Science Team Lead

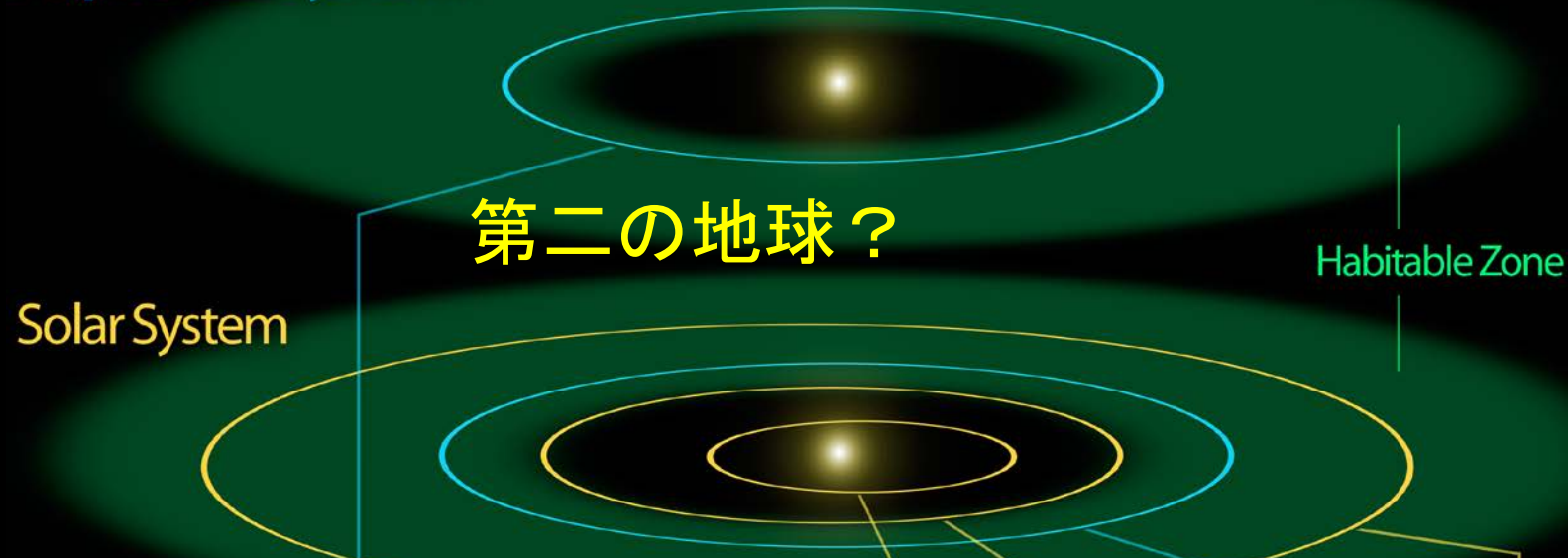
ケプラー衛星による居住可能域に存在する惑星の発見(?)



Presentation by Natalie Batalha, Kepler Deputy Science Team Lead

最初の地球型居住可能惑星の発見？ ケプラー22

Kepler-22 System



やっぱり「我々は何も知らなかった！」



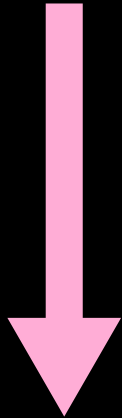
Kepler-22b

Presentation by Natalie Batalha, Kepler Deputy Science Team Lead
Planets and orbits to scale

系外惑星：今後の展望

- 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**



太陽系外惑星研究の歴史と展望

	地上からの系外惑星探査	スペースからの系外惑星探査	系外惑星上の生命探査
紀元前 ~1995年	山師、先駆者 ハイリスク ・ノーリターン	荒唐無稽 ハイリスク ・ノーリターン	論外: 危ない人々、十分成功して失うものがない人
1995年 ~2009年	ゴールドラッシュ ハイリスク ・ハイリターン	立案 ハイリスク ・ハイリターン	荒唐無稽 ハイリスク ・ノーリターン
2009年 ~ 20xx年	定着 ローリスク ・ハイリターン	実現 ローリスク ・ハイリターン	立案 ハイリスク ・ハイリターン
20xx年~	統計を稼ぐ ローリスク ・ローリターン	定着 ローリスク ・ローリターン	実現? ローリスク ・ハイリターン?

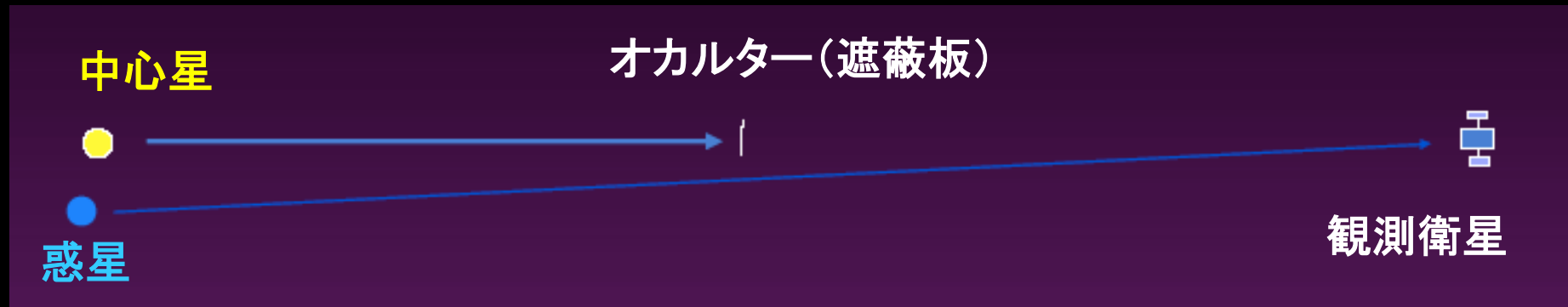
ブレイクスルー

1995年
系外惑星発見

2009年
系外惑星専用
衛星Kepler
打ち上げ

20XX年
ハビタブル惑星
発見???

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

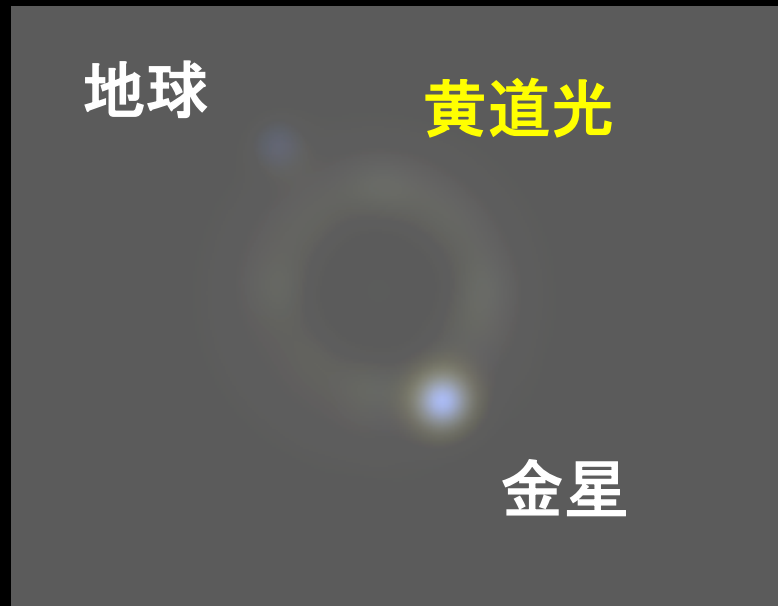


<http://newworlds.colorado.edu/>

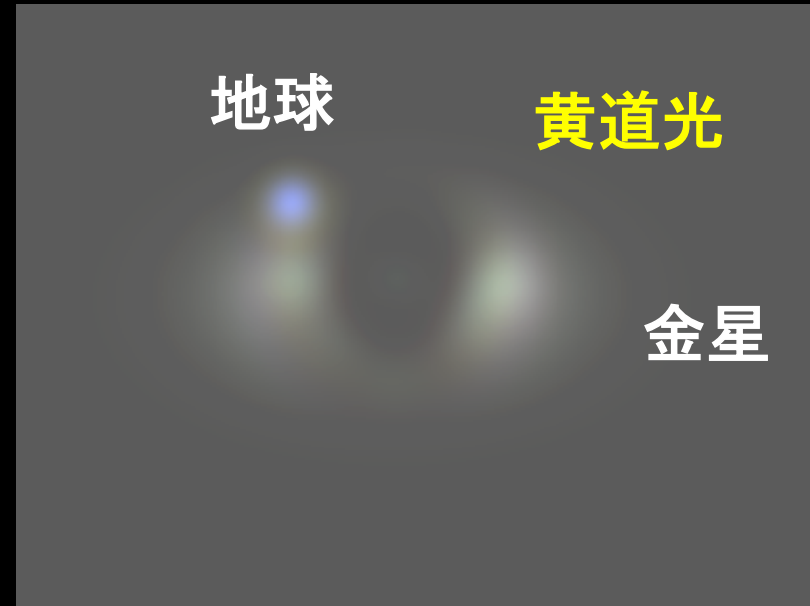
- 口径(2-4)mの可視光望遠鏡@L2点
 - 7万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおく
 - 望遠鏡にはその星の周りの惑星から光のみが届く
 - 惑星の分光・測光モニターからのバイオマーカー検出
 - コロラド大学を中心とした米国と英国の共同計画
 - 同様の計画がプリンストン大学でも検討中(O₃)

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/>

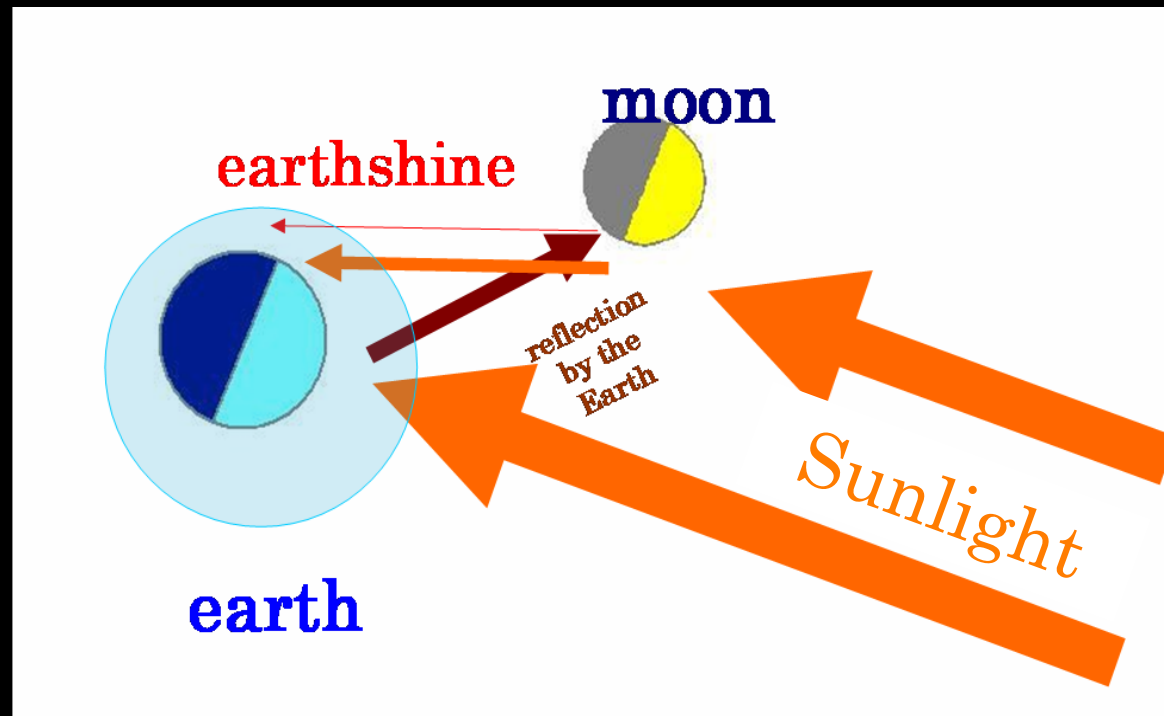
バイオマーカー

バイオマーカー

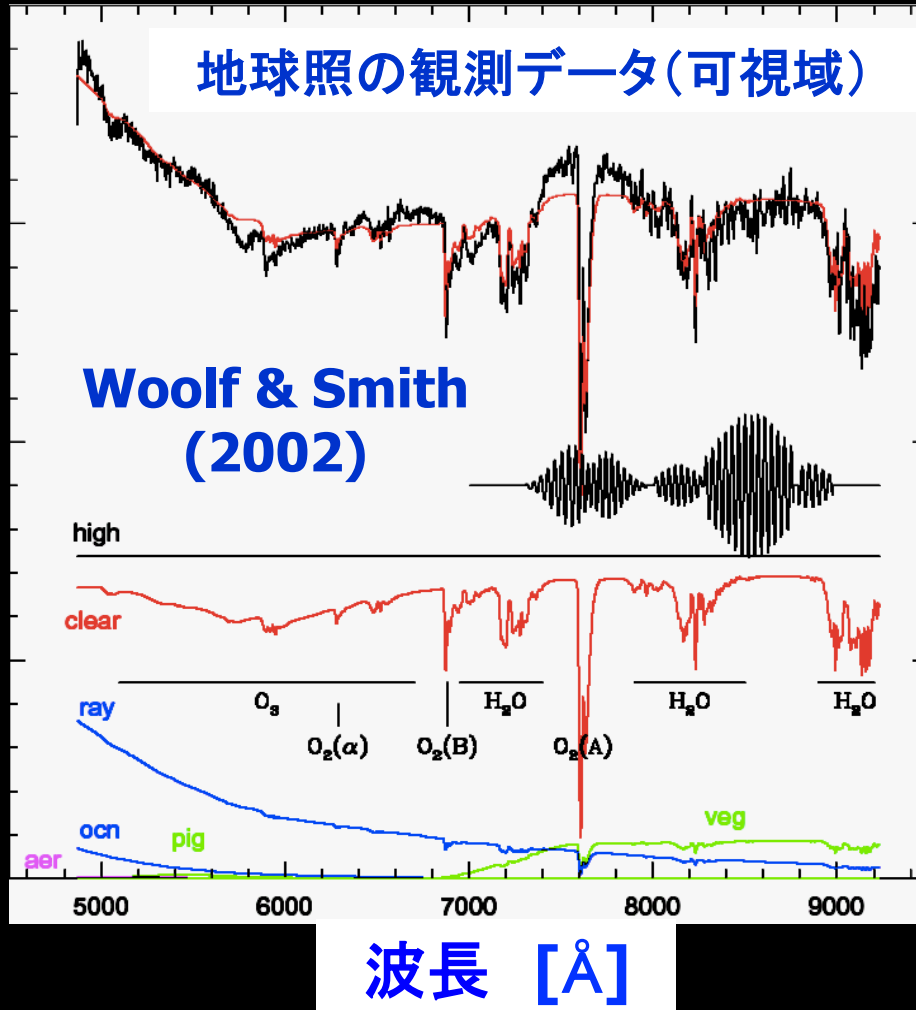
- **何ををもってバイオマーカーとするのかは曖昧**
 - 生物由来と考えられる大気成分（酸素、オゾン、メタン）の分光観測
 - 植物のレッドエッジの測光観測
 - 知的生命体からの信号の電波観測
 - 地球外での生命を生み出す環境とそれに対応した生物の多様性をどこまで認めるか
- **いずれにせよ、検出は天文学観測しかない**
 - 天文学で検出可能な限界は何か
 - どのような検出器・望遠鏡を作るべきか

地球照：バイオマーカーの模擬観測

- 月の暗い部分(地球反射光 \gg 太陽光)の分光観測をして、月の明るい部分(地球反射光 \ll 太陽光)との比をとることで、地球からの反射光成分を検出する
- 遠方の第2の地球の分光観測の模擬実験



常識的バイオマーカー（生物存在の証拠）



■ 酸素

- Aバンド@ $0.76 \mu\text{m}$
- Bバンド@ $0.69 \mu\text{m}$

■ 水

- $0.72, 0.82, 0.94 \mu\text{m}$

■ オゾン

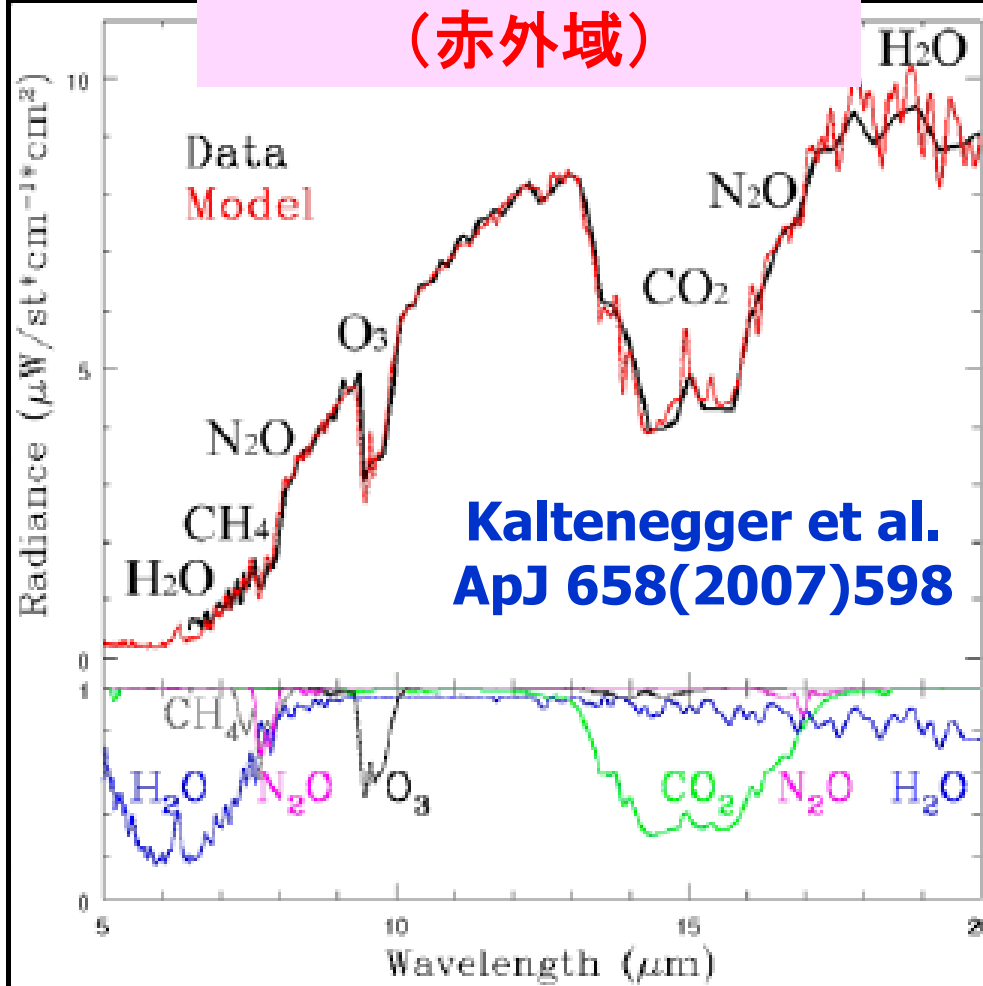
- Chappuis バンド
@ $(0.5-0.7) \mu\text{m}$
- Hartley バンド
@ $(0.2-0.3) \mu\text{m}$

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

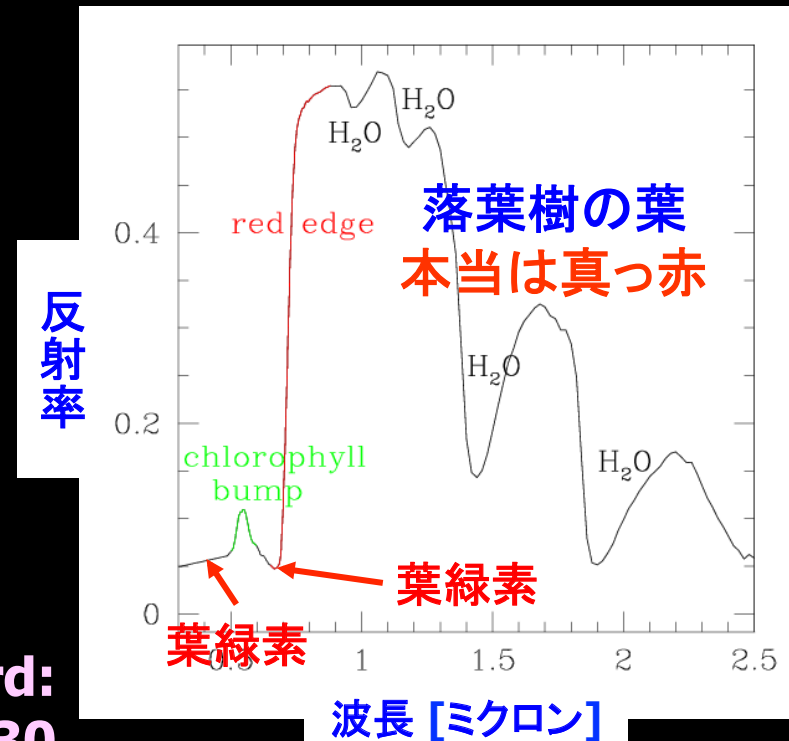
Extrasolar plants on extrasolar planets

- (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

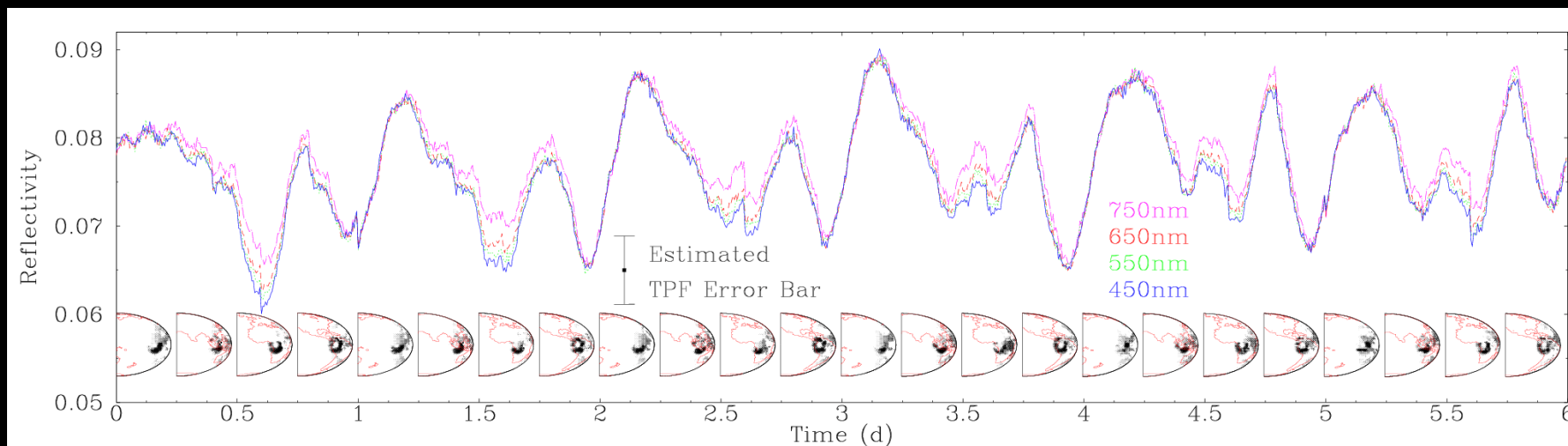
- **Biomarker** の探求

- 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？



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！

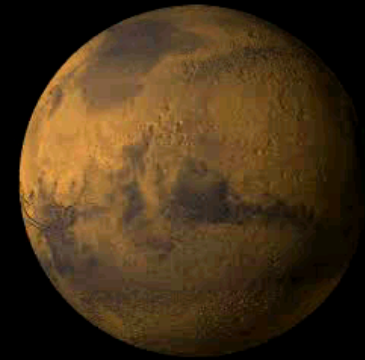
Vesto Melvin Slipher (1875-1969)



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

- ほとんどは以下の解説記事に基づいている
- お断り: 私は生物学の専門家ではないので誤解がある可能性が高い。しかし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伝えてみたい
- *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



地球上での光合成の歴史

- 34億年前： 最初の光合成細菌
 - 近赤外線を吸収し硫化物や硫酸塩化合物を放出
- 27億年前： シアノバクテリア
 - 可視光を吸収する最初の酸素発生生物
- 12億年前： 紅藻類および褐藻類
- 7.5億年前： 緑藻類
- 4.8億年前： 最初の陸上植物
- 4.2億年前： 維管束植物

大気中のバイオマーカー

酸素 (O₂) と水 (H₂O) 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。

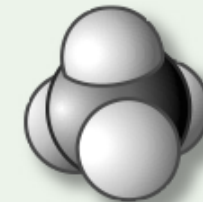


オゾン (O₃) 地球の成層圏では、太陽光のエネルギーで酸素分子が分解され、これが再結合することでオゾンが生じる。液体の水とともにオゾンの存在が確認できれば、生命の強力な証拠となる。酸素は可視光領域で検出可能だし、オゾンも赤外波長域で検出できる。従来の望遠鏡で容易に観測できる。

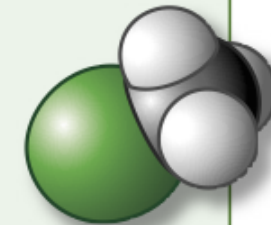


メタン (CH₄) と酸素の組み合わせ、またはメタンの季節変動

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。



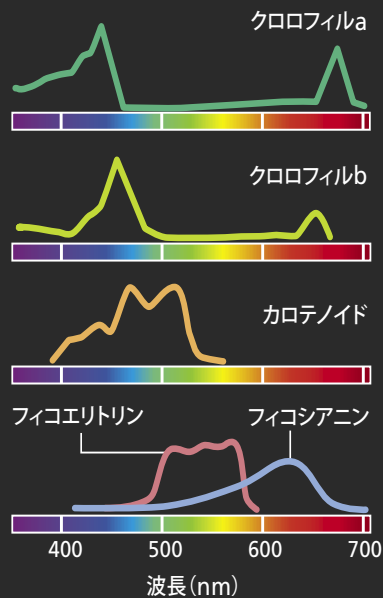
塩化メチル (CH₃Cl) 塩化メチルガスが地球上で生じるケースは、植物の燃焼（おもに森林火災）のほか、プランクトンや海水中の塩素に太陽光が作用することなどだ。塩化メチルは酸化されると分解する。しかし、M型星の放射は比較的弱いので、塩化メチルガスが検出可能な量まで蓄積する可能性がある。



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)。

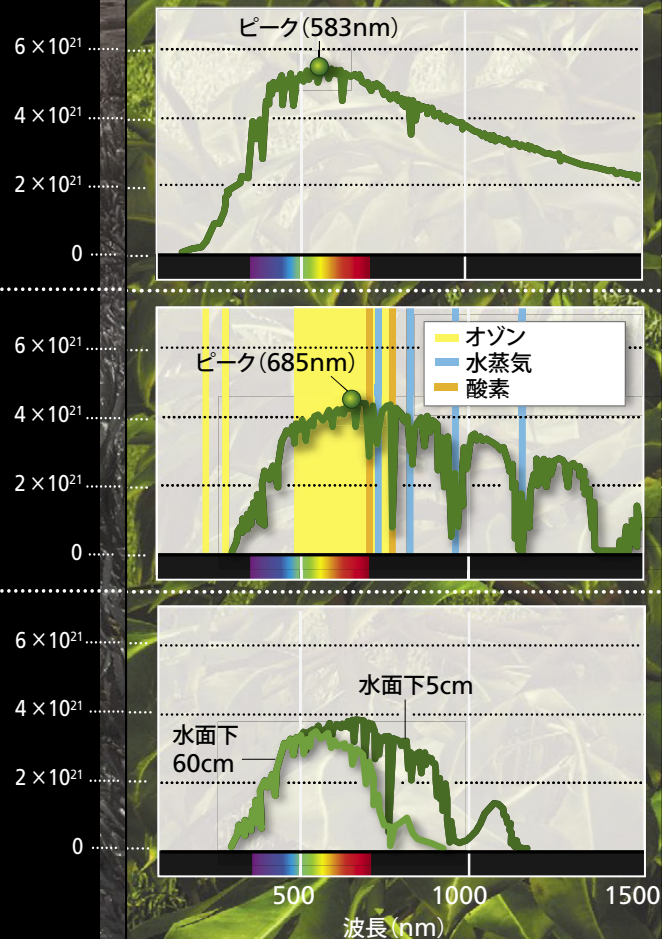
G型星

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

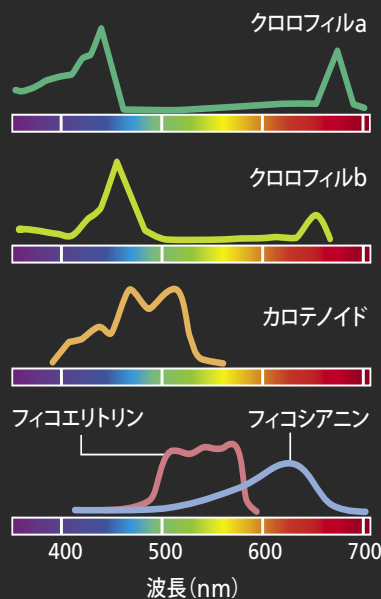
光量子束密度(1秒あたり、 1m^2 あたりの光子の数)



惑星表面での光のスペクトル： 古いM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)。

成熟したM型星

質量*: 0.2

光度*: 0.0044

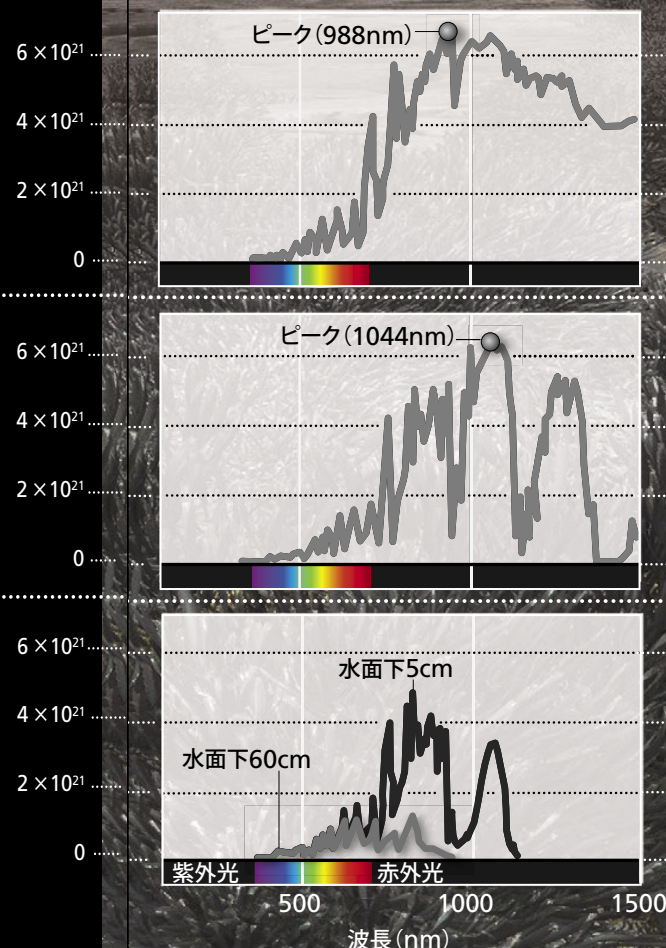
寿命: 5000 億年

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

光子束密度 (1秒あたり、1m²あたりの光子の数)



惑星表面での光のスペクトル： 若いM型星の場合

若いM型星

質量*：0.5

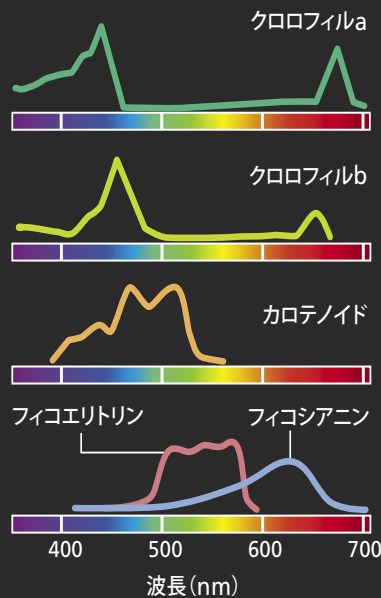
光度*：0.023

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

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。

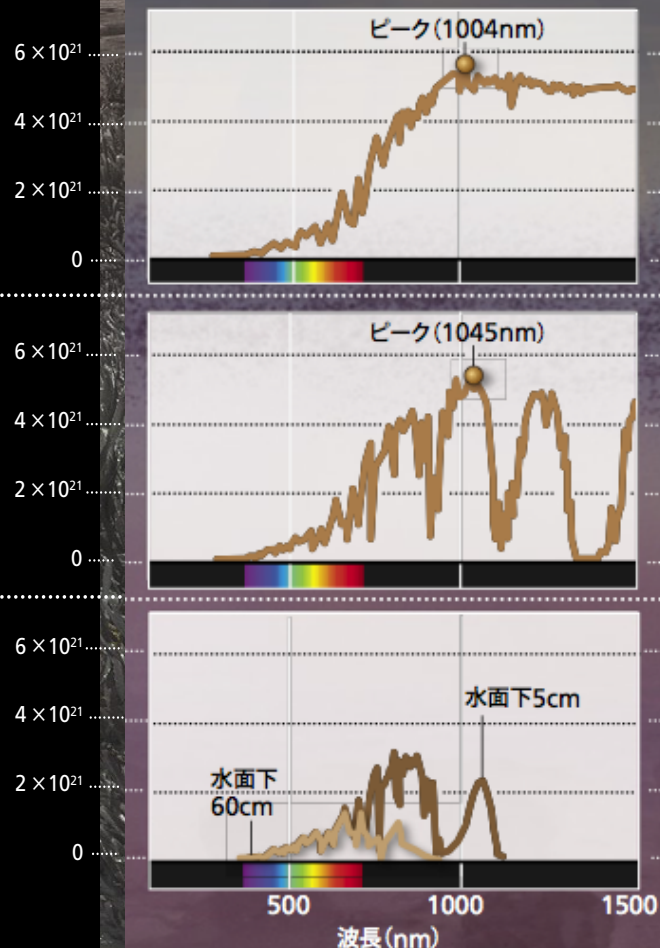
惑星表面

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）。

光量子束密度（1秒あたり、1m²あたりの光子の数）



惑星表面での光のスペクトル： F型星の場合

F型星

質量*：1.4

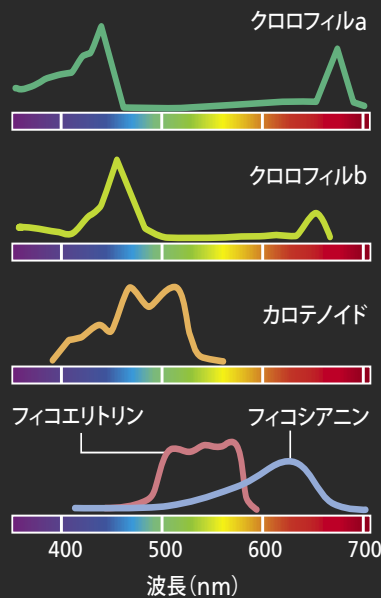
光度*：3.6

寿命：30億年

モデル惑星の軌道：1.69天文単位

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。

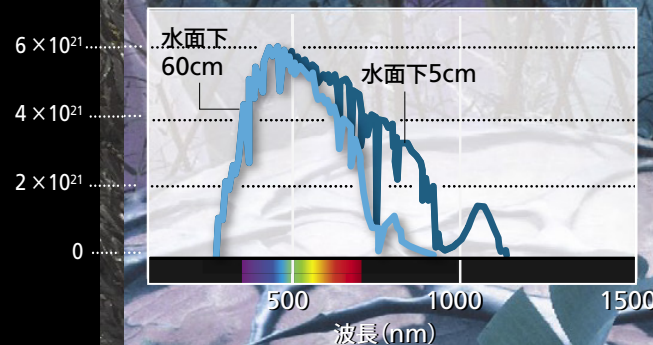
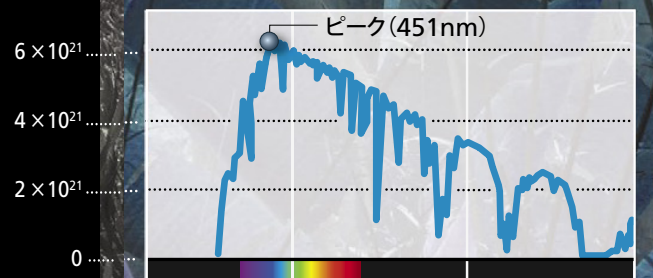
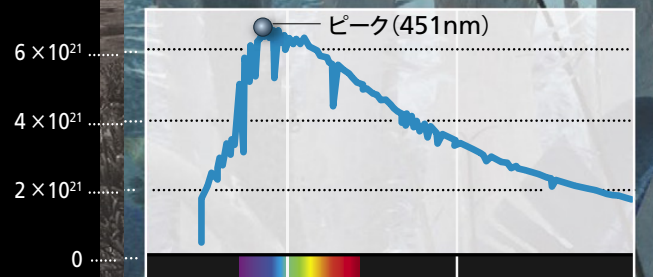
惑星表面

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)。

光子束密度(1秒あたり、1m²あたりの光子の数)



系外惑星上の植物の色？

古いM型星



若いM型星



G型星



F型星



我々の研究の紹介

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>

A pale blue dot

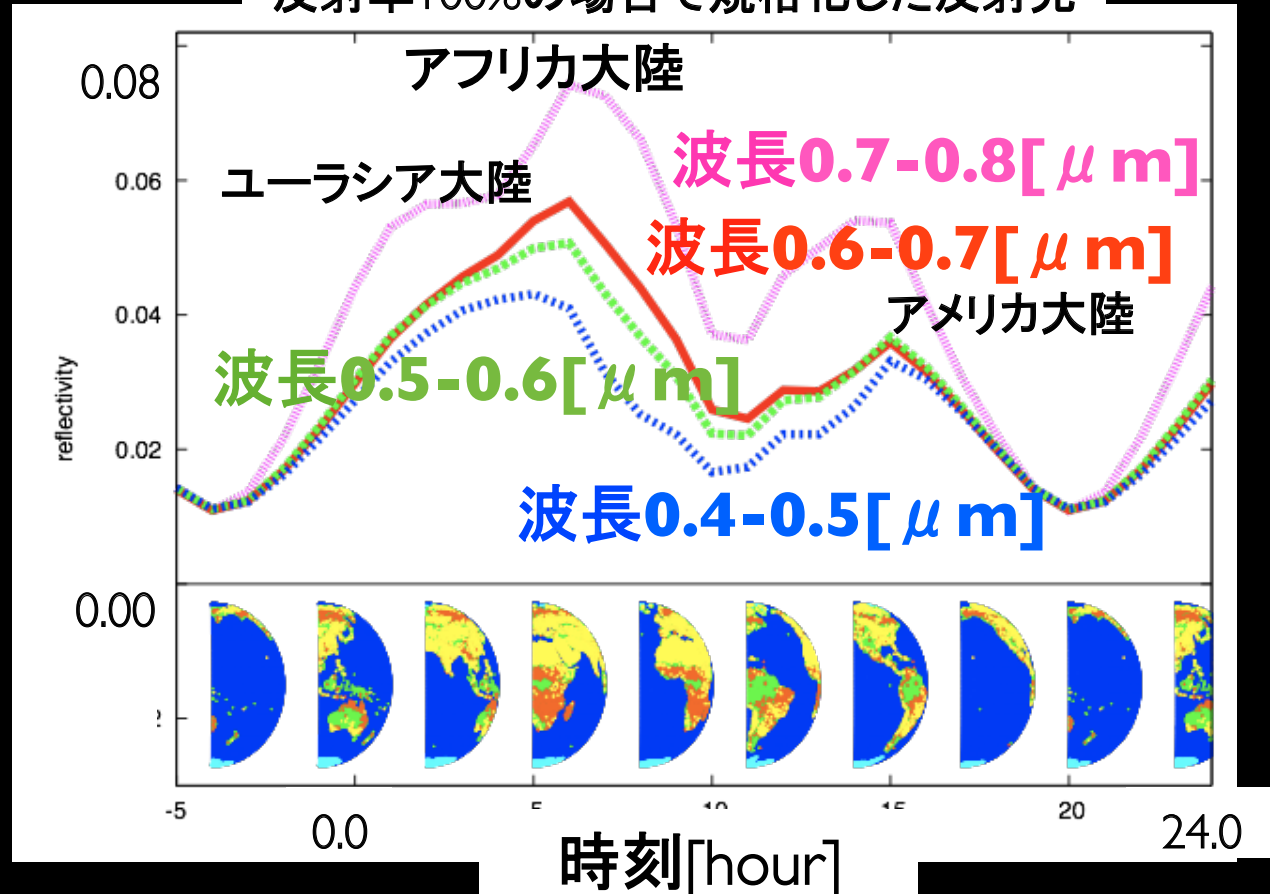


自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション

- 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

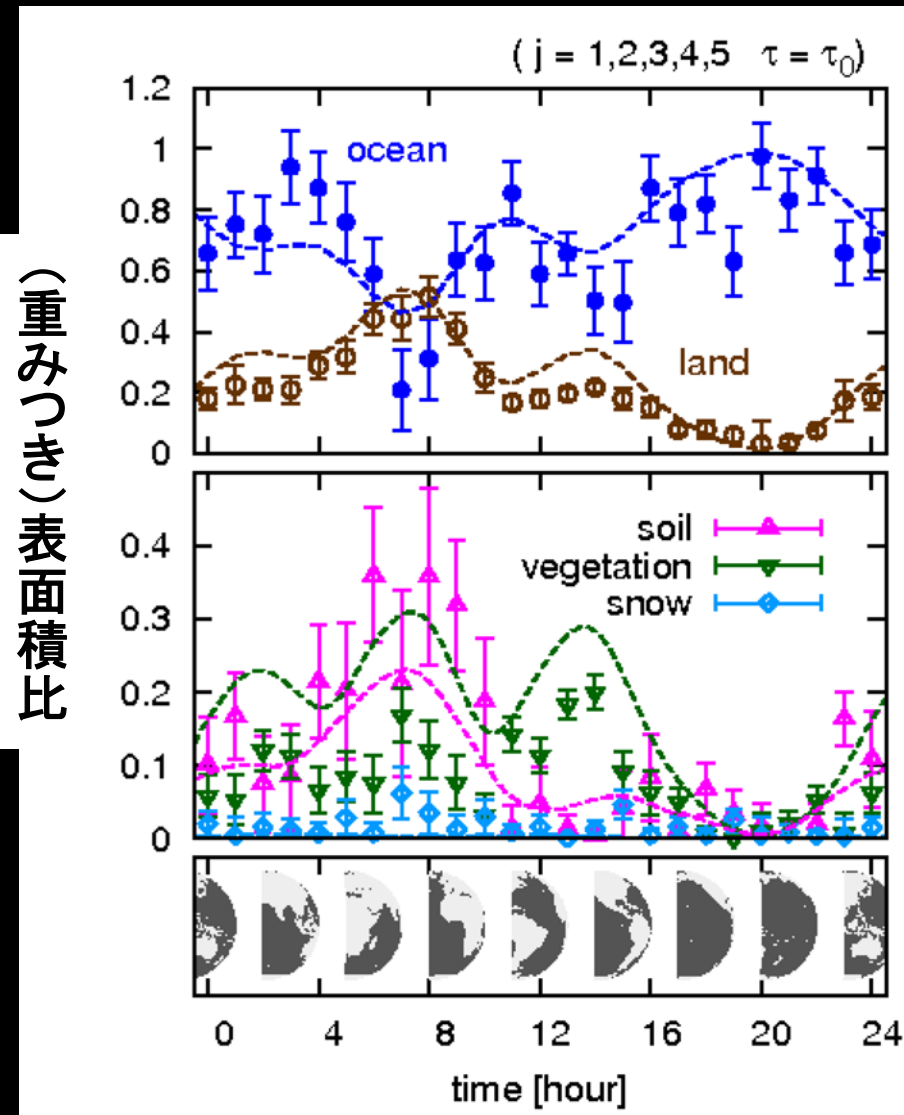
地球は青かった？

反射率100%の場合で規格化した反射光



Fujii et al. (2010)

第二の地球の色から表面積を推定



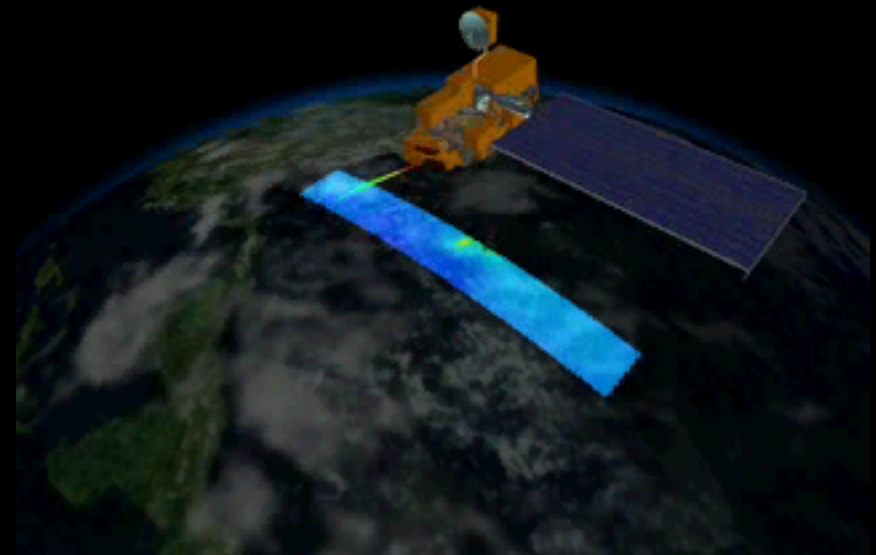
Fujii et al. (2010)

- 雲が存在しない場合の例
- 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
 - 我が地球、悲しからずや空の青、海のをあをにも染まずただよふ
- 海、土、植物、雪の4つの成分の面積比を推定
- 結構イケテル！

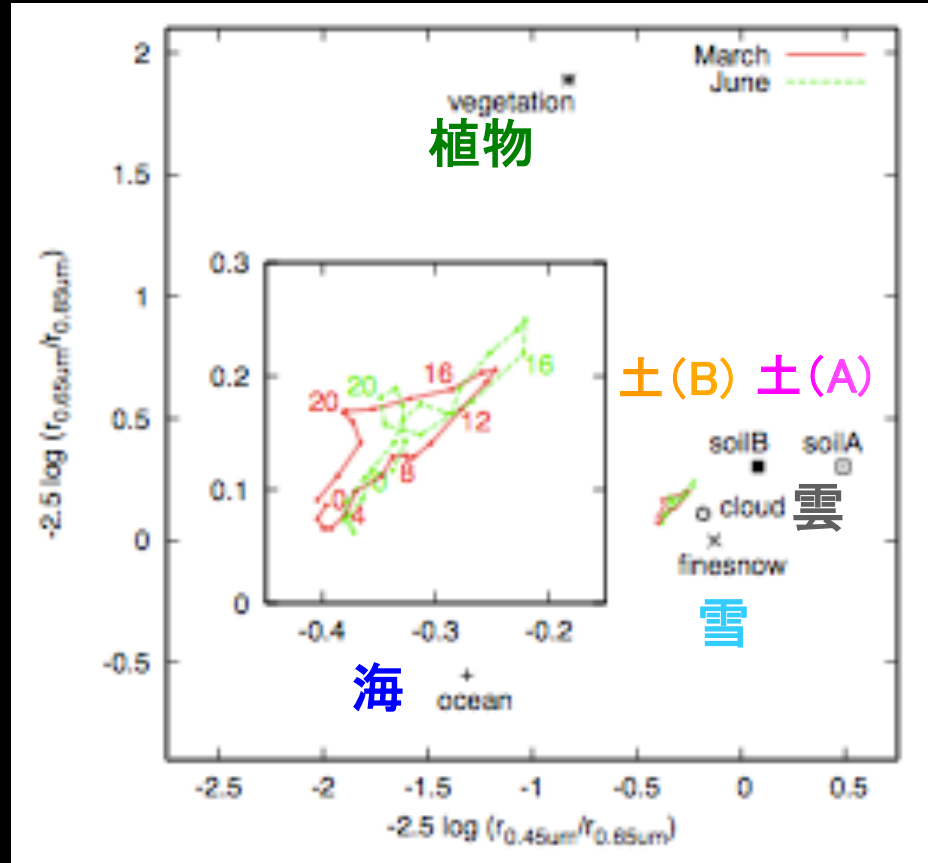
順問題：地球の反射光計算

- 地球観測衛星TerraのMODIS検出器から作成された経験的反射モデルを用いて、ある日時地球の7バンドの模擬光度曲線を作成。それを実際のEPOXI衛星の観測データと比較
 - 陸地： $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ のピクセル毎に決められた反射特性のパラメータ(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)を用いて足し合わせる
 - 海：MODISデータにない海に対してはNakajima & Tanaka (1983)のBRDFモデルを用いて計算
 - 雪：その月の平均的雪分布データを用いる
 - 雲：その日の雲分布データを(時刻には関係なく)用いる
 - 大気と雲の輻射輸送数値コードrstar6bで計算

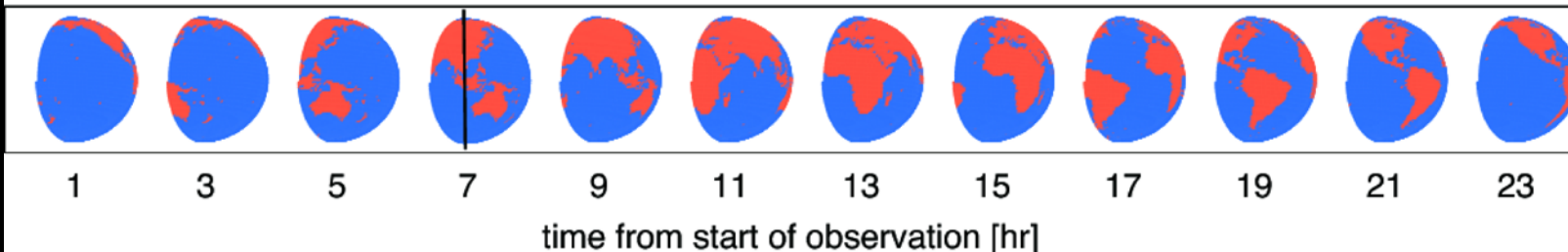
Earth observing satellite **Trace** (Transition
Region and Coronal Explorer)
+ detector **Modis** (Moderate Resolution
Imaging Spectroradiometer)



地球の色

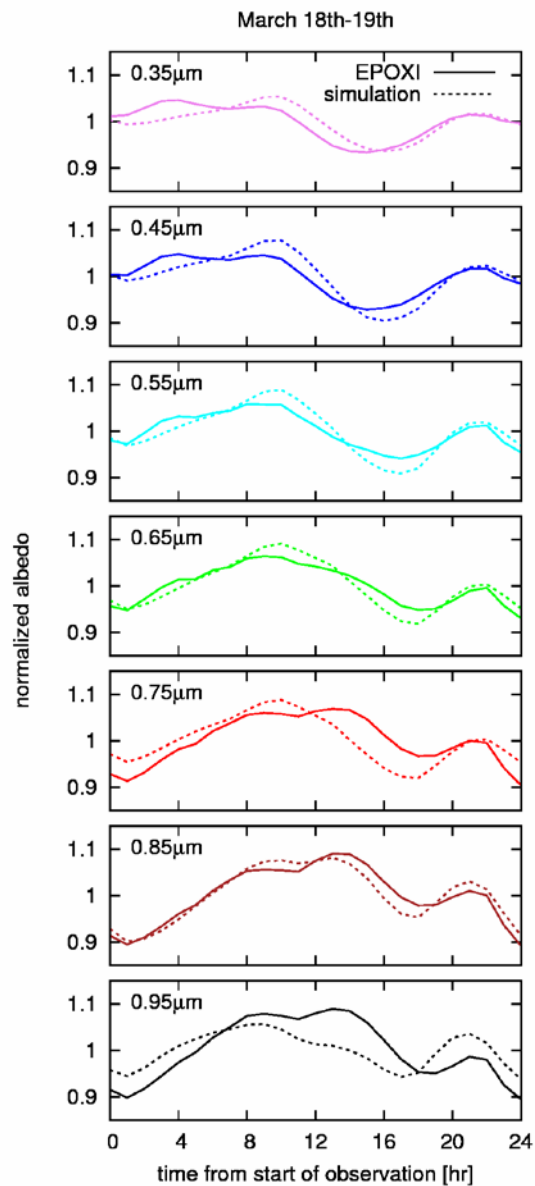
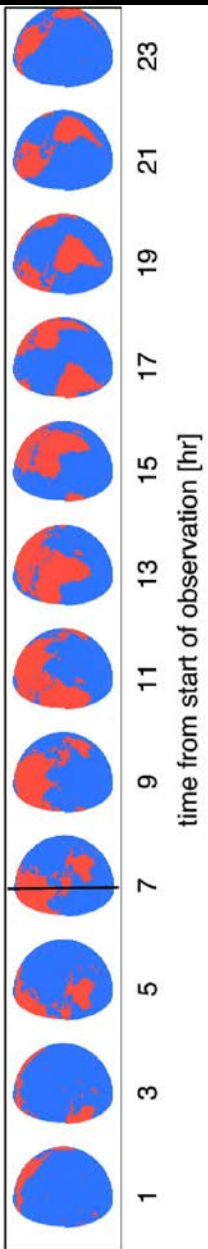


March 18th-19th

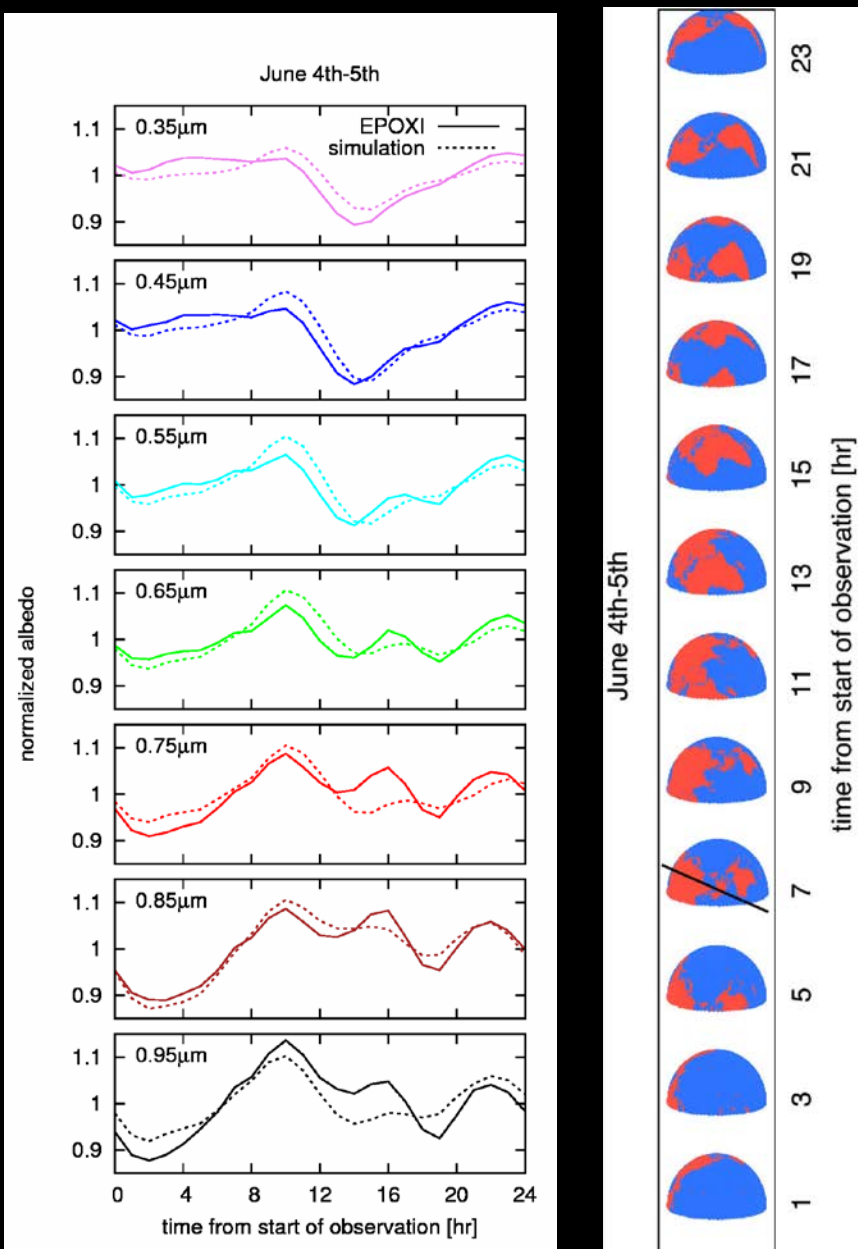


模擬光度曲線と地球観測データの比較 (雲あり)

March 18th-19th



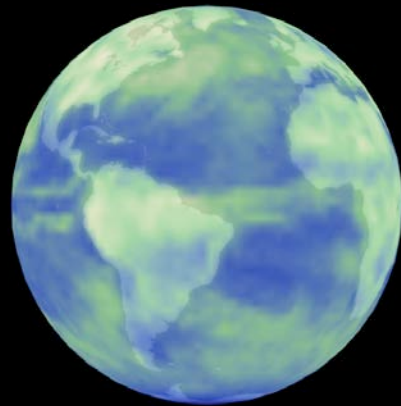
June 4th-5th



逆問題：地球の成分ごとの面積の推定

- EPOXIデータを、単純化されたモデル(等方散乱で近似した海、土、植物、雪、雲の5成分)でフィットして、成分ごとの面積を推定する
 - 系外惑星の場合には、中心星の光がブロックされた極度に理想的な観測に対応(可能性の限界)
 - 各観測中の自転や公転の効果は無視
 - 雲については、ある光学的厚さ τ (今回は10とする)の単一モデルを想定
 - 大気も「米国標準大気」と呼ばれる組成、圧力・温度プロファイルを仮定

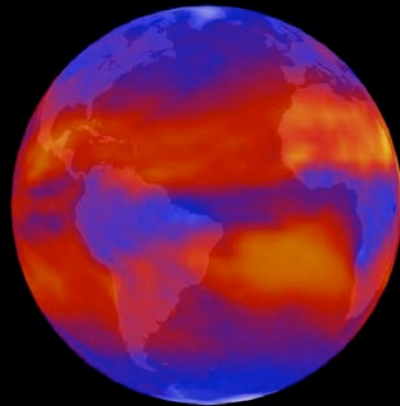
反射光を用いて地球型惑星表面を知る



反射光



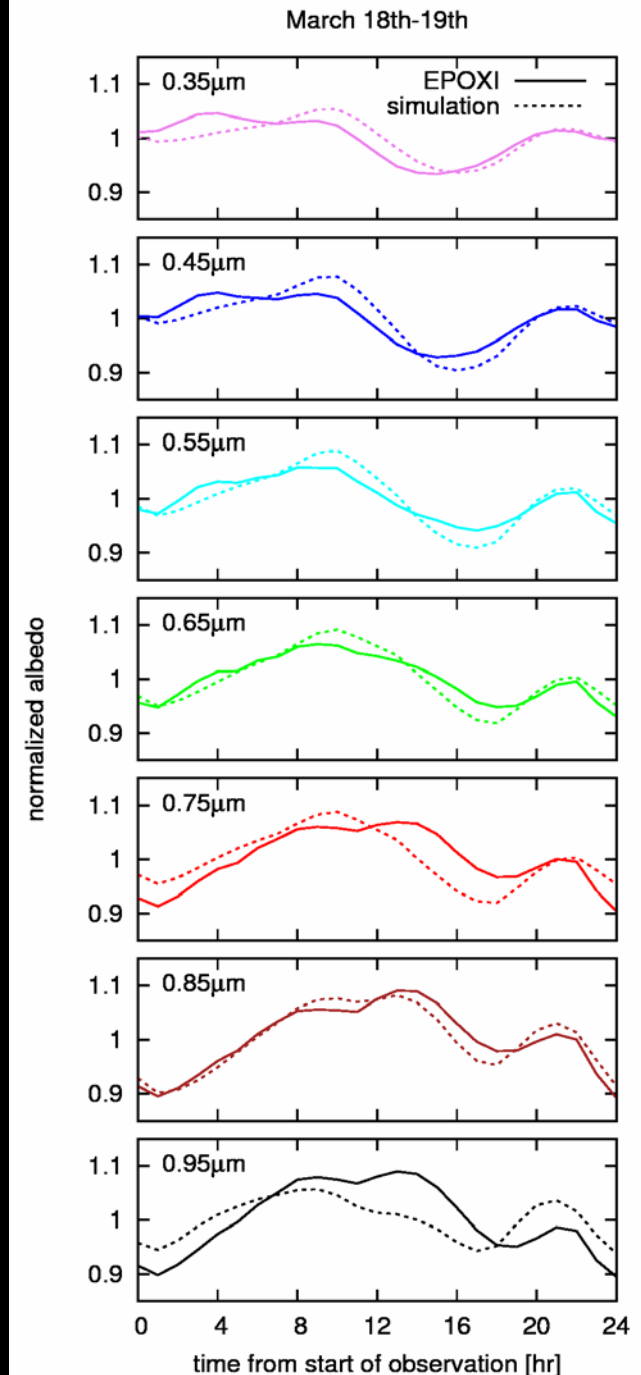
輻射光



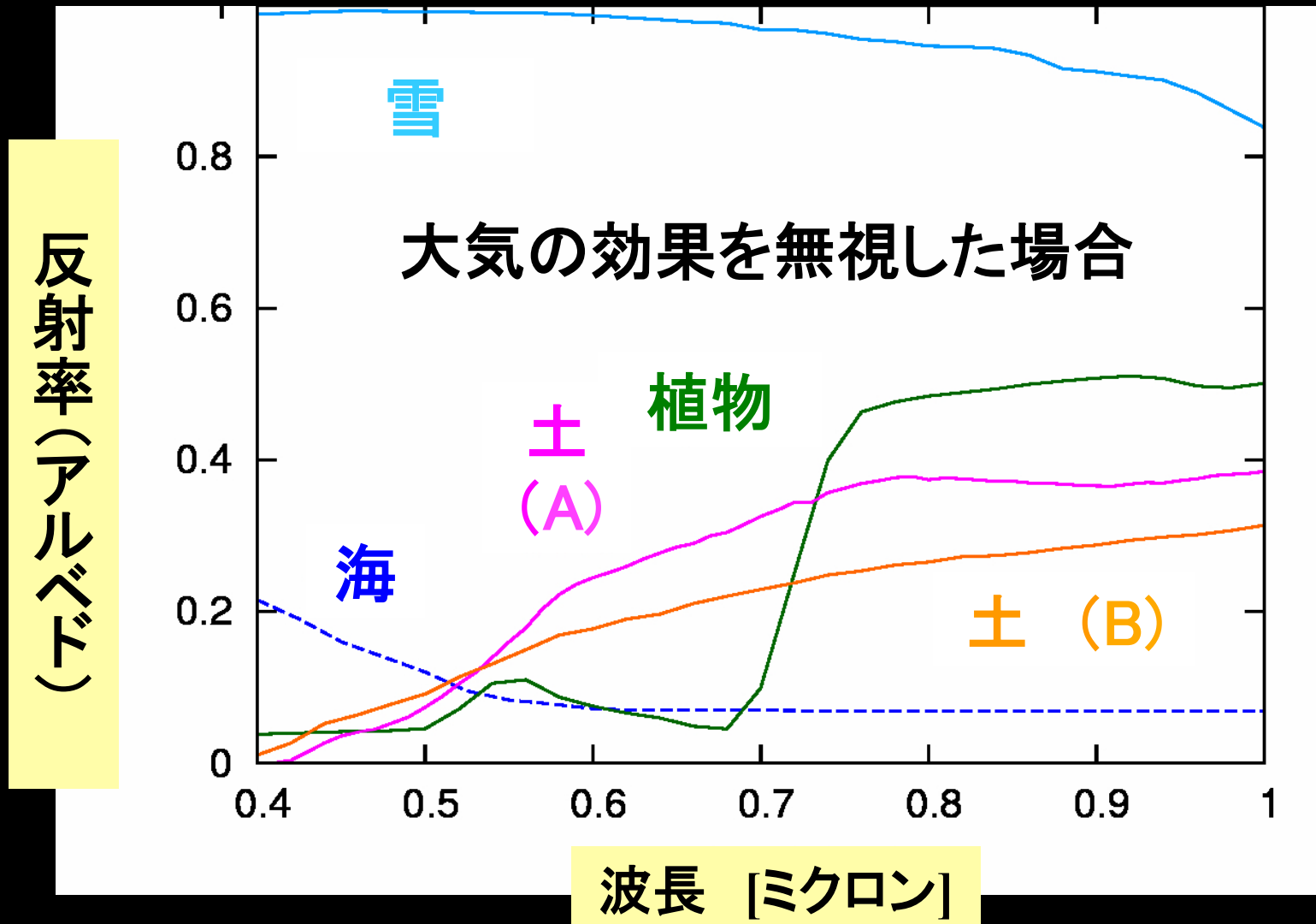
Vazquez et al. (2010)

- 表面非一様性の情報は反射光の光度曲線に現れる(Ford et al. 2001)

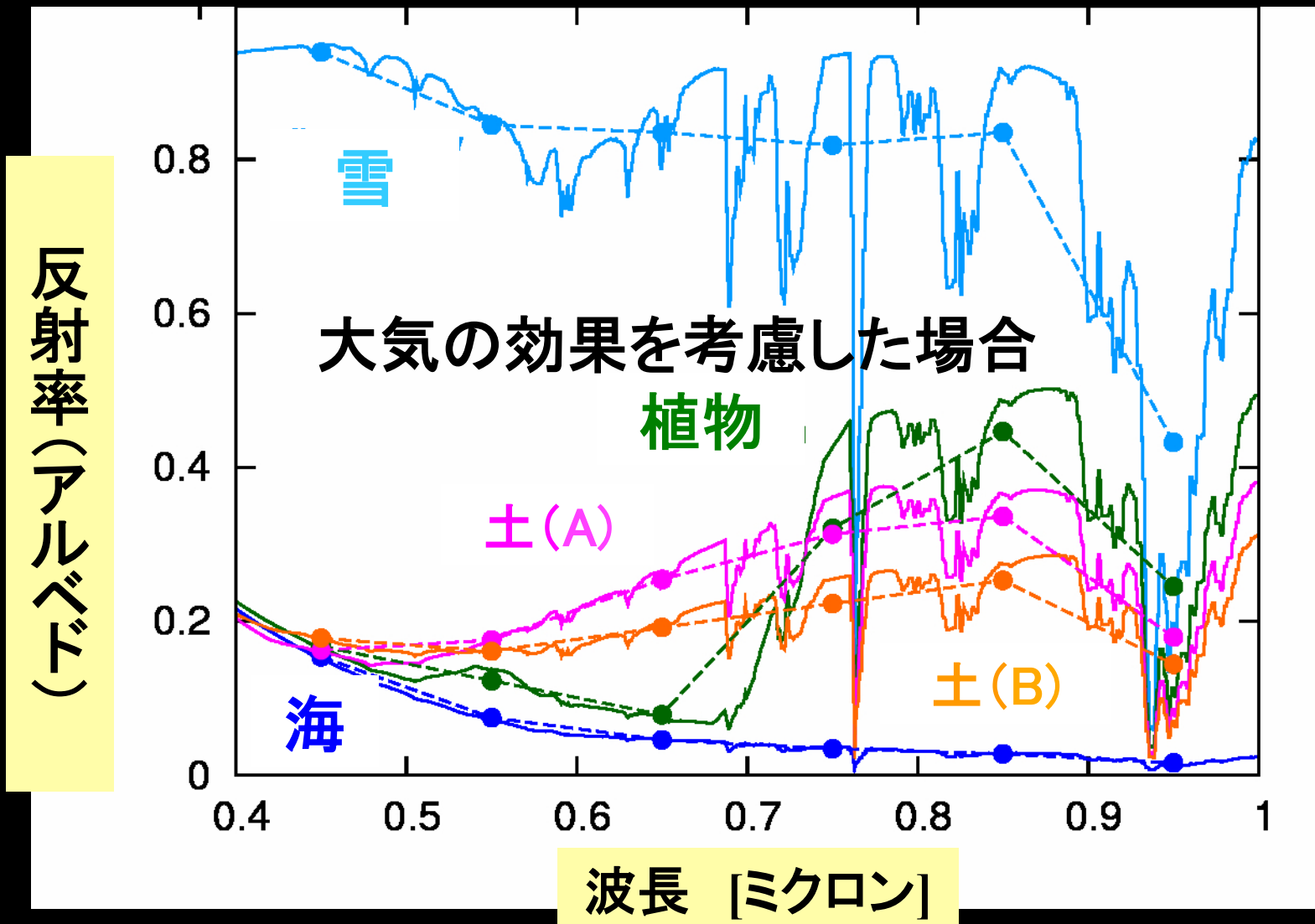
Fujii et al. (2010)



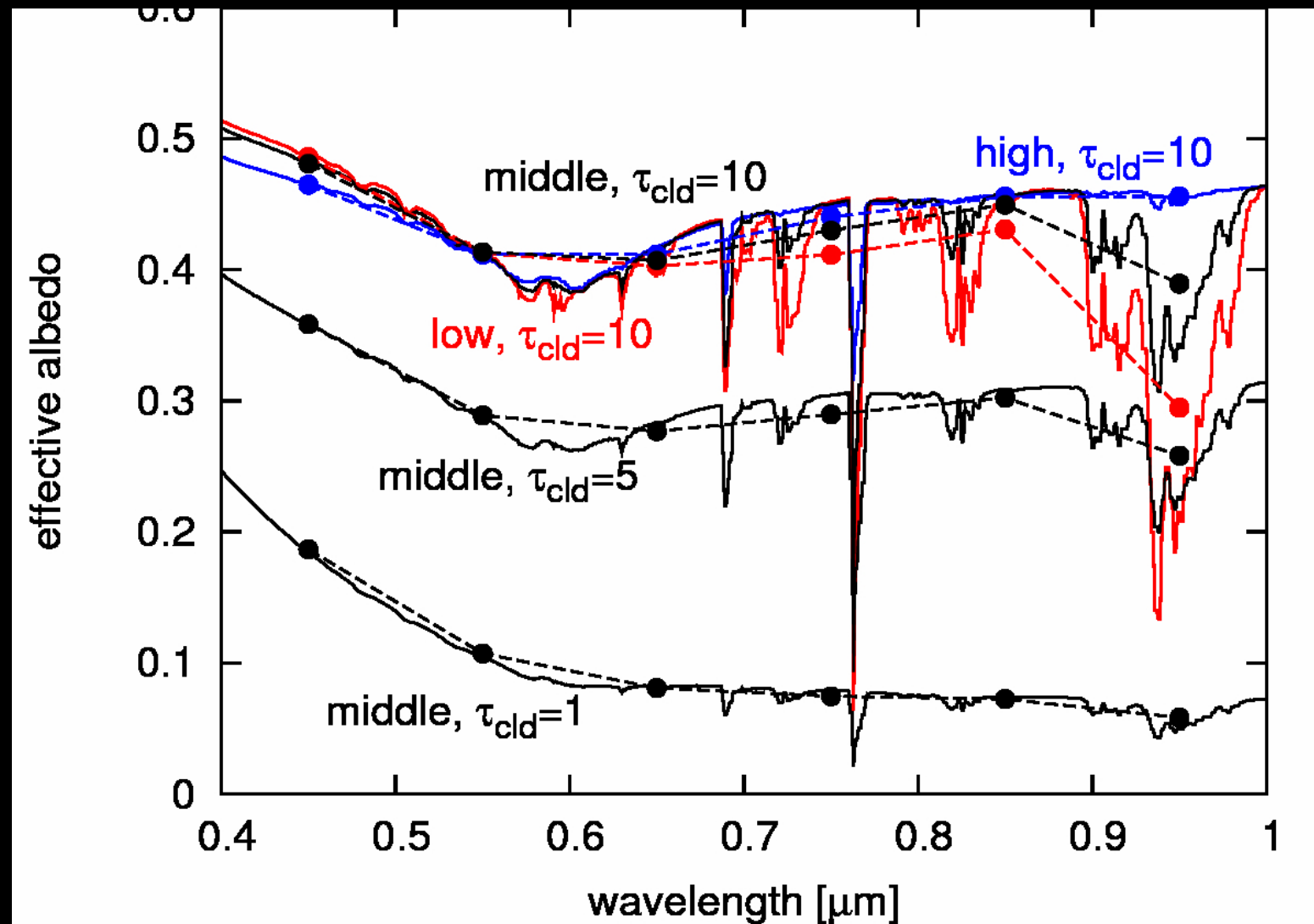
等方散乱近似での反射スペクトル



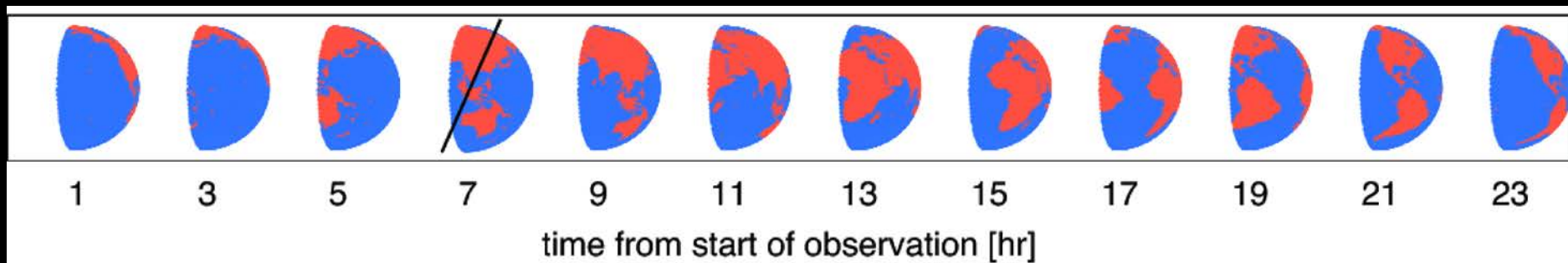
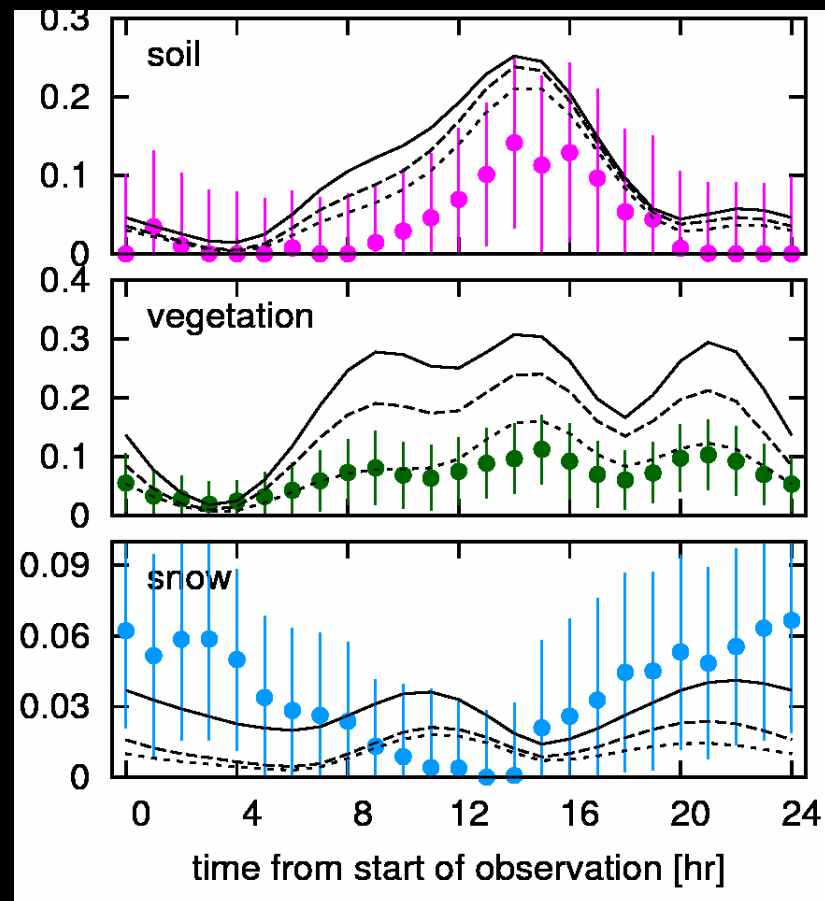
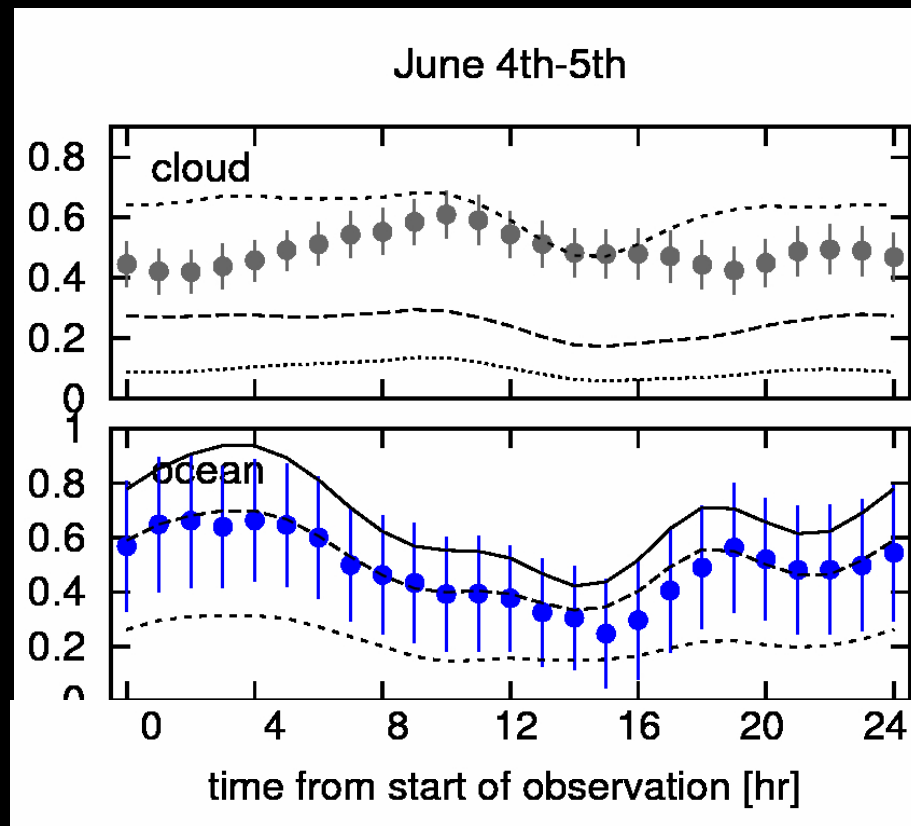
等方散乱近似での反射スペクトル



雲の反射スペクトル: モデル依存性



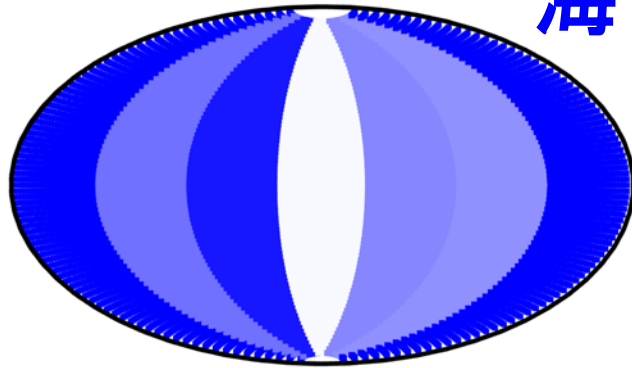
EPOXIデータから推定された面積



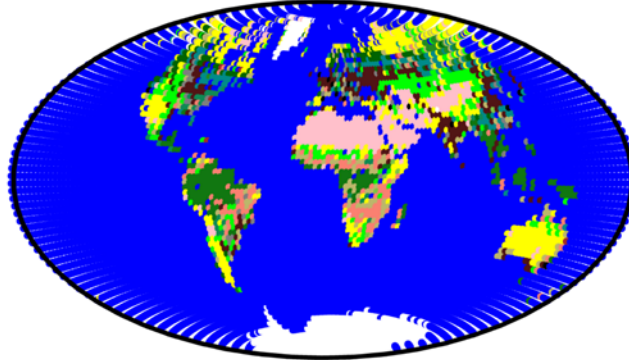
地球測光観測データから推定された 地表面成分の経度分布地図

OCEAN

海

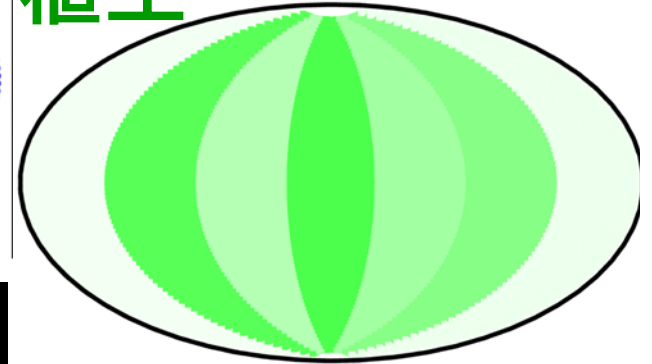


IGBP classification map



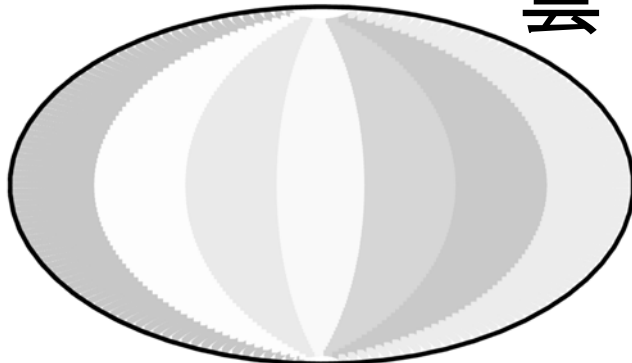
植生

VEGETATION



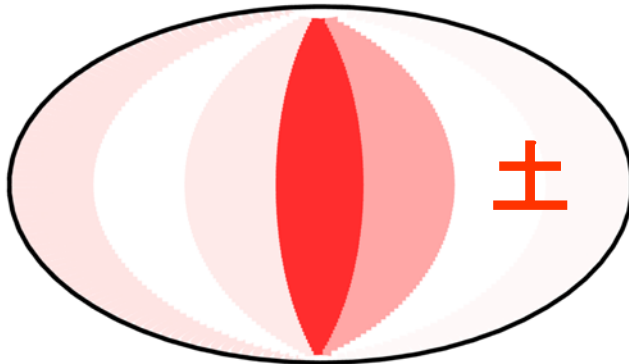
CLOUD

雲



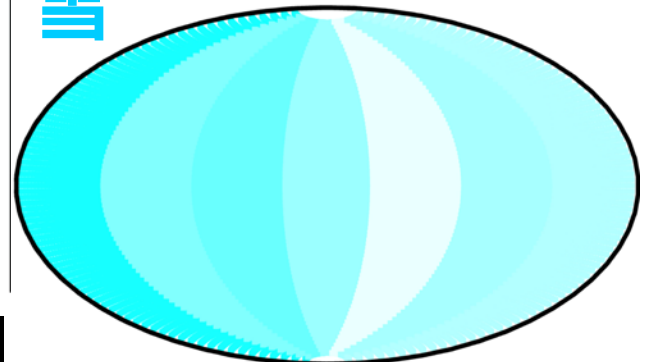
SOIL

土



雪

SNOW



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

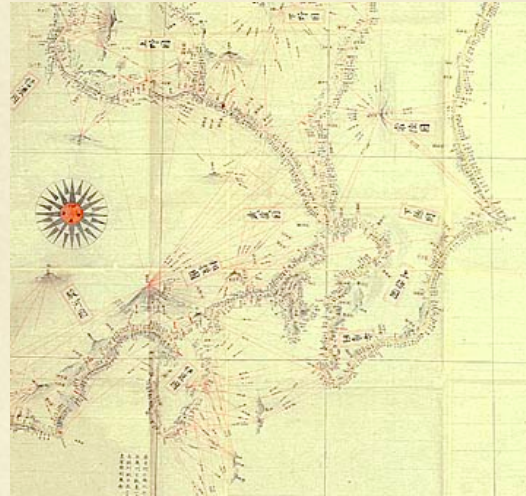
- 河原創(首都大学東京)、藤井友香(東京大学)
 - Kawahara and Fujii (2010) ApJ 720, 1333
- 自転だけでなく公転の効果も取り入れれば、自転傾斜角が大きくとも、地球の全表面を観測できる
 - 地球の全球表面地図が描けるはず
- 雲なし・等方散乱を仮定して模擬データを作成し、それから2次元マップが再構築できるか試した
- 惑星の自転周期、自転軸の傾斜角、季節の有無も同時にわかる

Stellar world mapの作成法

地球の場合

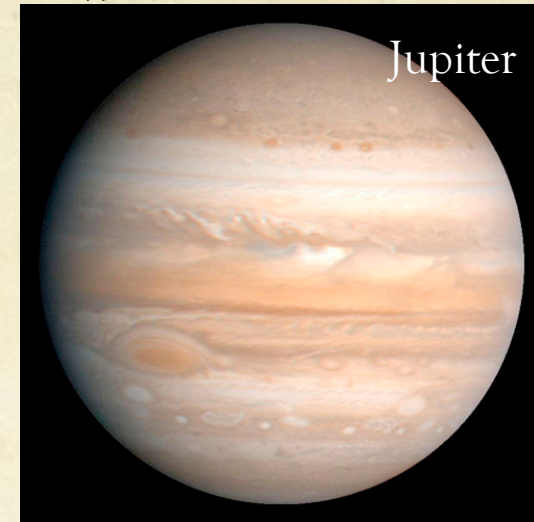


航海 : Fra Mauro Map (1459)



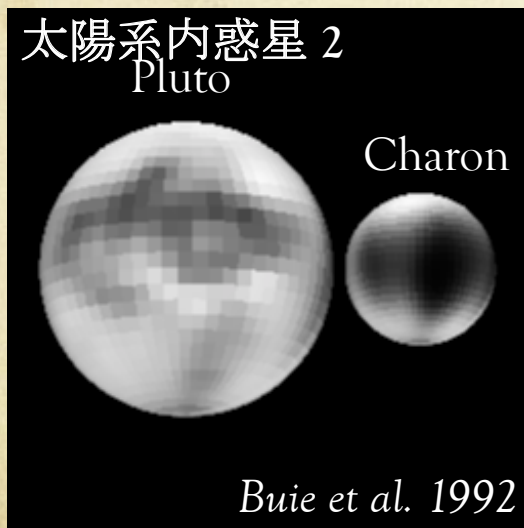
徒歩 : 伊能忠敬 (1800's)

太陽系内惑星



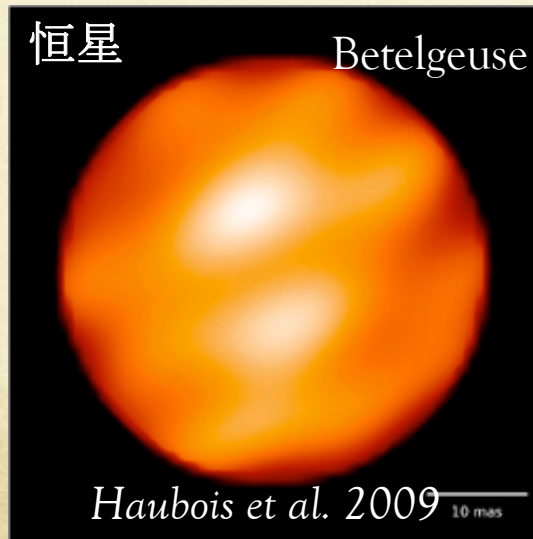
接近撮影 : ボイジャー

太陽系内惑星 2
Pluto



衛星の食を利用

恒星
Betelgeuse



干渉計 : IOTA



How ?

北米

ユーラシア

日本は分解できず

オーストラリア??

ラテンアメリカ
(熱帯雨林)

アフリカ
(おもにサハラ砂漠)

南極は模擬データ
に入っていない

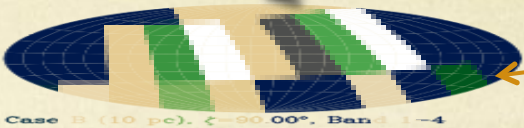


Fig. 9.— Recovered color maps of soil and vegetation from the mock observations. Soil and vegetation are blended by yellow and green on the land recovered maps shown in the middle panels of Figure 8. Top left and right panels indicate the case A and case B, respectively. Snow is replaced to ocean in this simulation. Bottom panel is a classification map of ocean (blue), snow (pink), vegetation (green), and soil (yellow) based on the IGBP classification. Our classification of soil and vegetation is listed in Table 2 of F10.

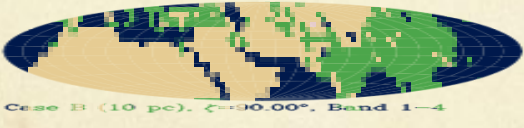
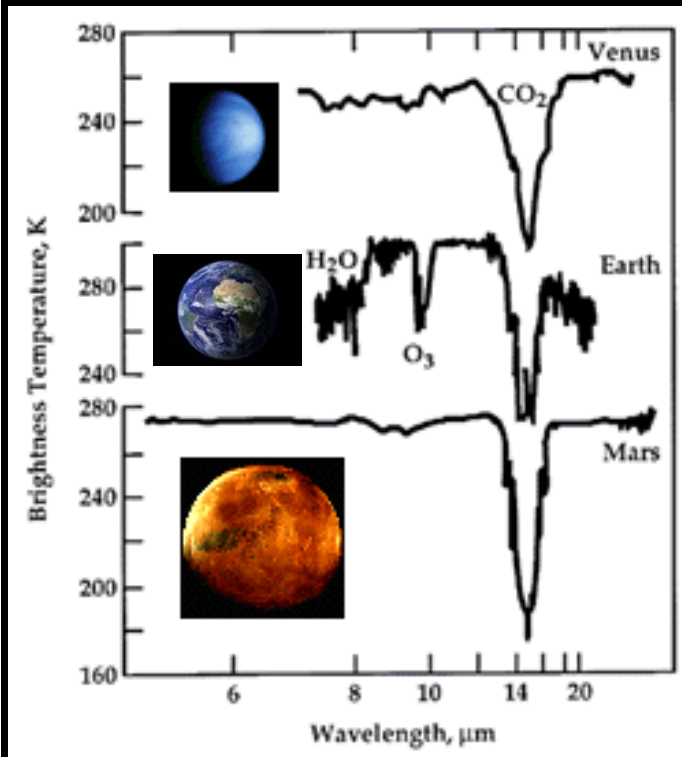


Fig. 9.— Recovered color maps of soil and vegetation from the mock observations. Soil and vegetation are blended by yellow and green on the land recovered maps shown in the middle panels of Figure 8. Top left and right panels indicate the case A and case B, respectively. Snow is replaced to ocean in this simulation. Bottom panel is a classification map of ocean (blue), snow (pink), vegetation (green), and soil (yellow) based on the IGBP classification. Our classification of soil and vegetation is listed in Table 2 of F10.

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”



- 地球型惑星の発見
- 居住可能(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、、
- 超精密分光観測の成否が鍵！
 - 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
- 植物の有無を通じて宇宙生物学に至る一つの道

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に等しい

Le Petit Prince: (par Antoine de Saint Exupéry)



Si quelqu'un aime une fleur qui n'existe qu'à un exemplaire dans les millions et les millions d'étoiles, ça suffit pour qu'il soit heureux quand il les regarde. Il se dit: "Ma fleur est là quelque part . . ."

宇宙生物学の心 「星の王子様」



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