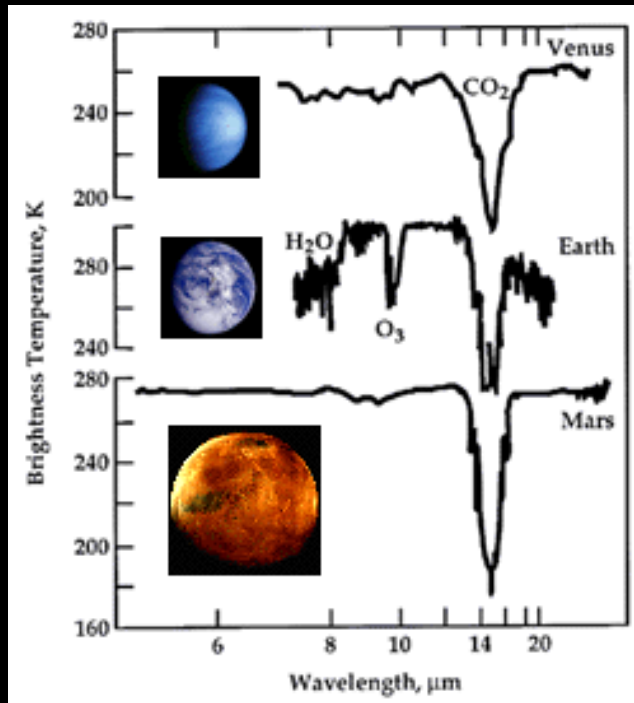


太陽系外惑星 II

バイオマーカー



理学系研究科物理学専攻 須藤 靖

2012年7月5日 16:30-18:00@1322教室

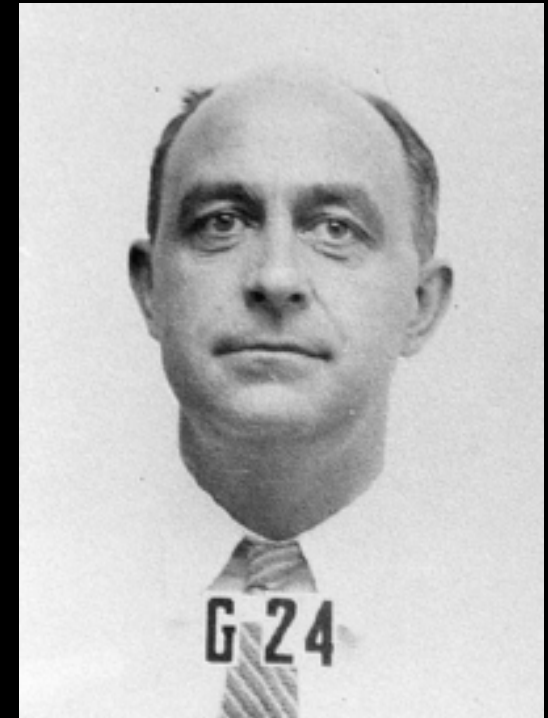
駒場総合科目「宇宙・惑星科学の最前線」第12回

講義内容

1. 雑談的序
2. 天文学・宇宙物理学に残された課題
3. 太陽系外惑星探査の歴史と現状
4. トランジット惑星専用探査機ケプラーの成果
5. バイオマーカー
6. 我々の研究の紹介
7. まとめと展望
8. レポート課題

5 バイオマーカー

フェルミの疑問 (フェルミのパラドクス)



- **Where are *they* ?**
 - 1950年、ロスアラモス研究所の昼食時にエンリコ・フェルミが問いかけたとされている

第二の地球はあるか？



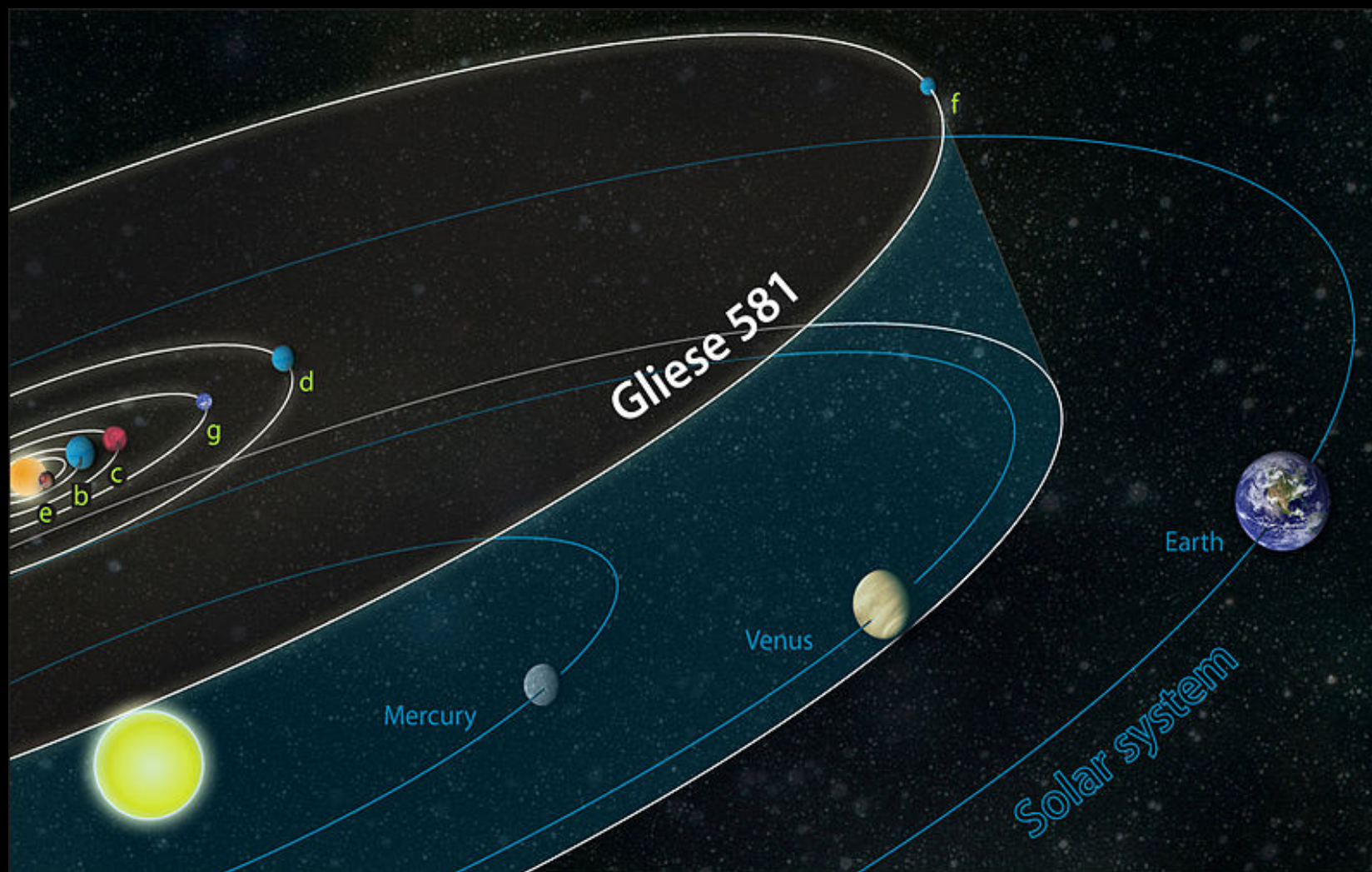
- 生命が誕生するには
 - 適度な温度
 - 大気存在
 - 液体の水(ハビタブル:居住可能性条件)
 - +偶然?
- 恒星の周りの**地球型惑星**を探せ！

Terra衛星のMODIS検出器のデータ

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

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

M型星Gliese 581の周りの6惑星



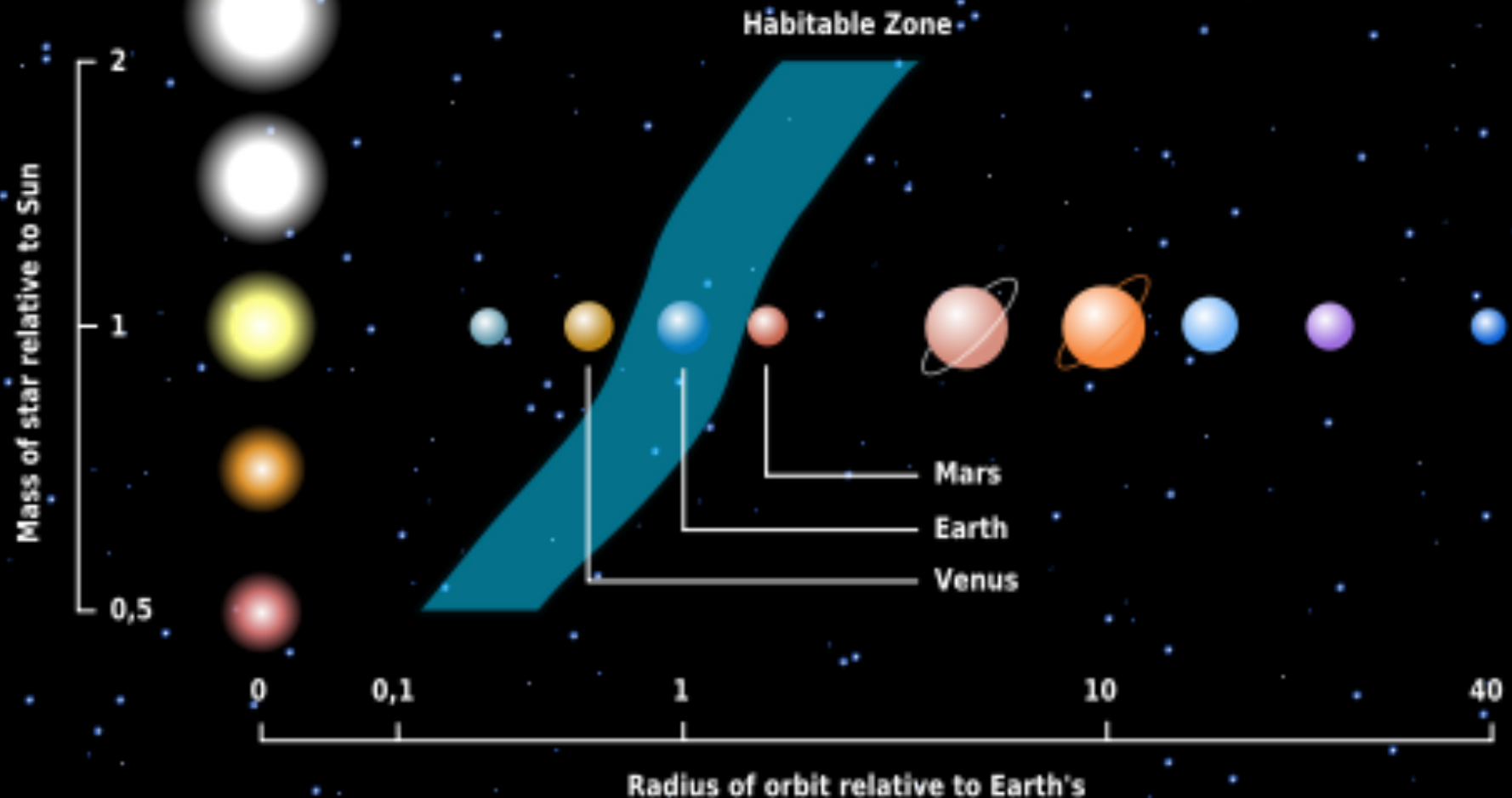
(Credit: Zina Deretsky, [アメリカ国立科学財団](#))

Gliese 581

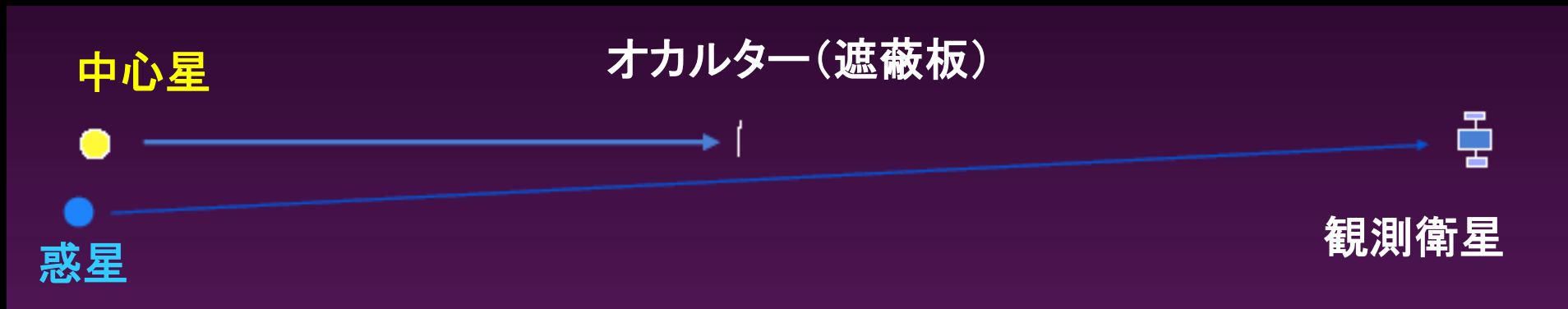
- 地球から約20光年離れたM型星
 - 0.31x太陽質量、0.29x太陽半径、表面温度3500K
- 現時点で6つの惑星の存在が知られている
 - 581e : 1.9x地球質量、公転周期 3.1日
 - 581b : 15.7x地球質量、公転周期 5.4日
 - 581c : 5.4x地球質量、公転周期 12.9日
 - 581g : 3.1x地球質量、公転周期 36.6日
 - 581d : 7.1x地球質量、公転周期 66.8日
 - 581f : 7.0x地球質量、公転周期 433日
- 2010年9月29日 Gliese 581gがハビタブル惑星(水が液体として存在できる温度の領域)ではないかという報告がなされた(ただし、まだ議論がある)

ハビタブル惑星（居住可能惑星）？

- **Gliese581g**: 3.1x地球質量、公転周期 36.6日



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

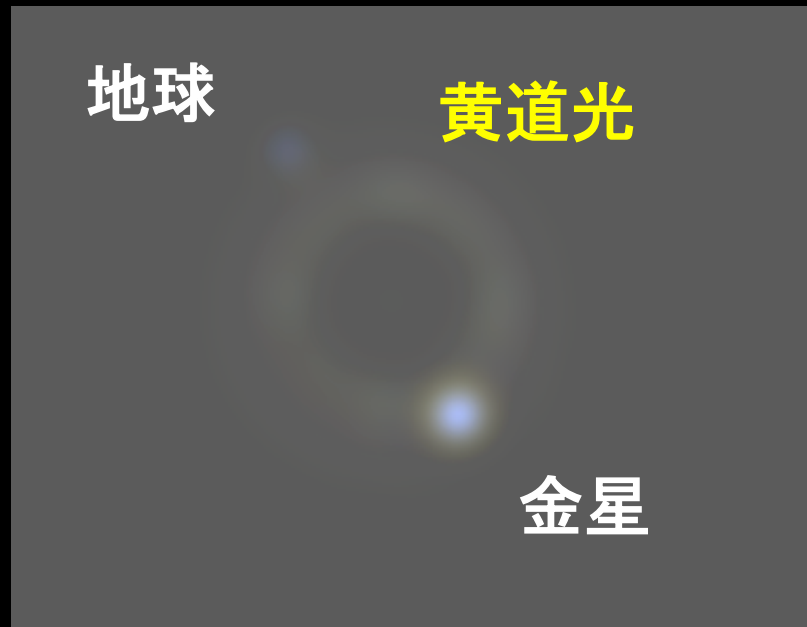


<http://newworlds.colorado.edu/>

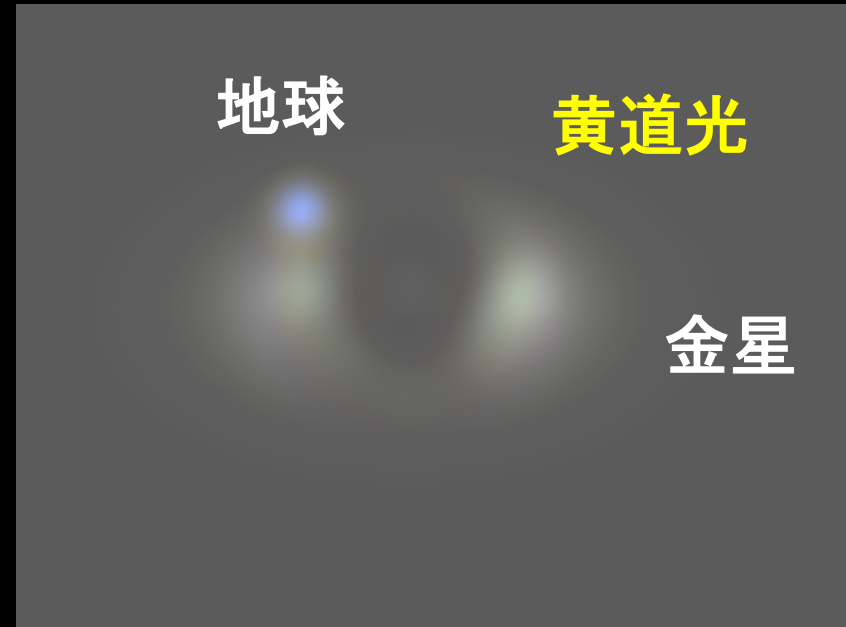
- 口径(2-4)mの可視光望遠鏡@L2点
 - 7万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおく
 - 望遠鏡にはその星の周りの惑星から光のみが届く
 - 惑星の分光・測光モニターからのバイオマーカー検出
 - コロラド大学を中心とした米国と英国の共同計画
 - 同様の計画はプリンストン大学でも検討中(O₃)

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/>

O₃: The Occulting Ozone Observatory

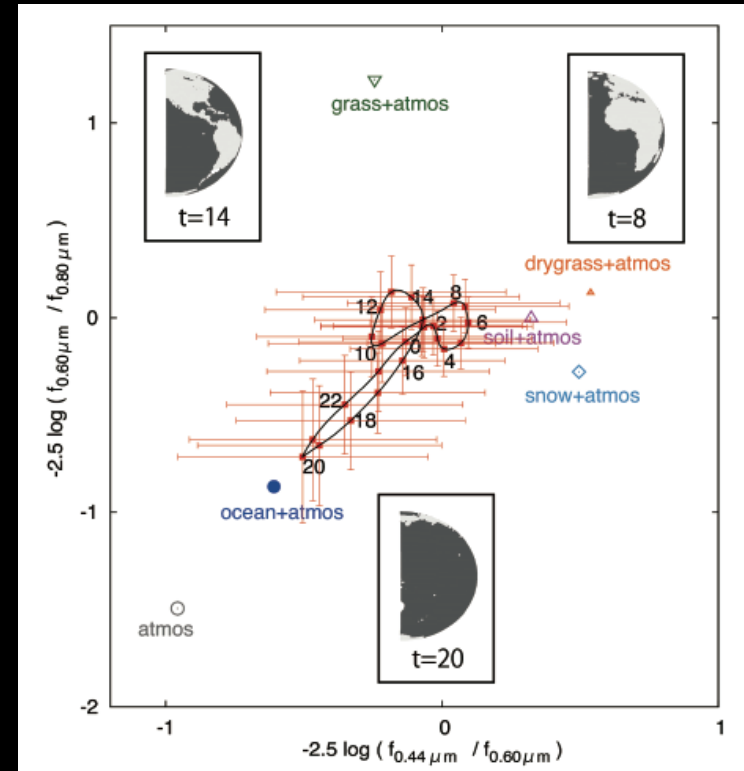
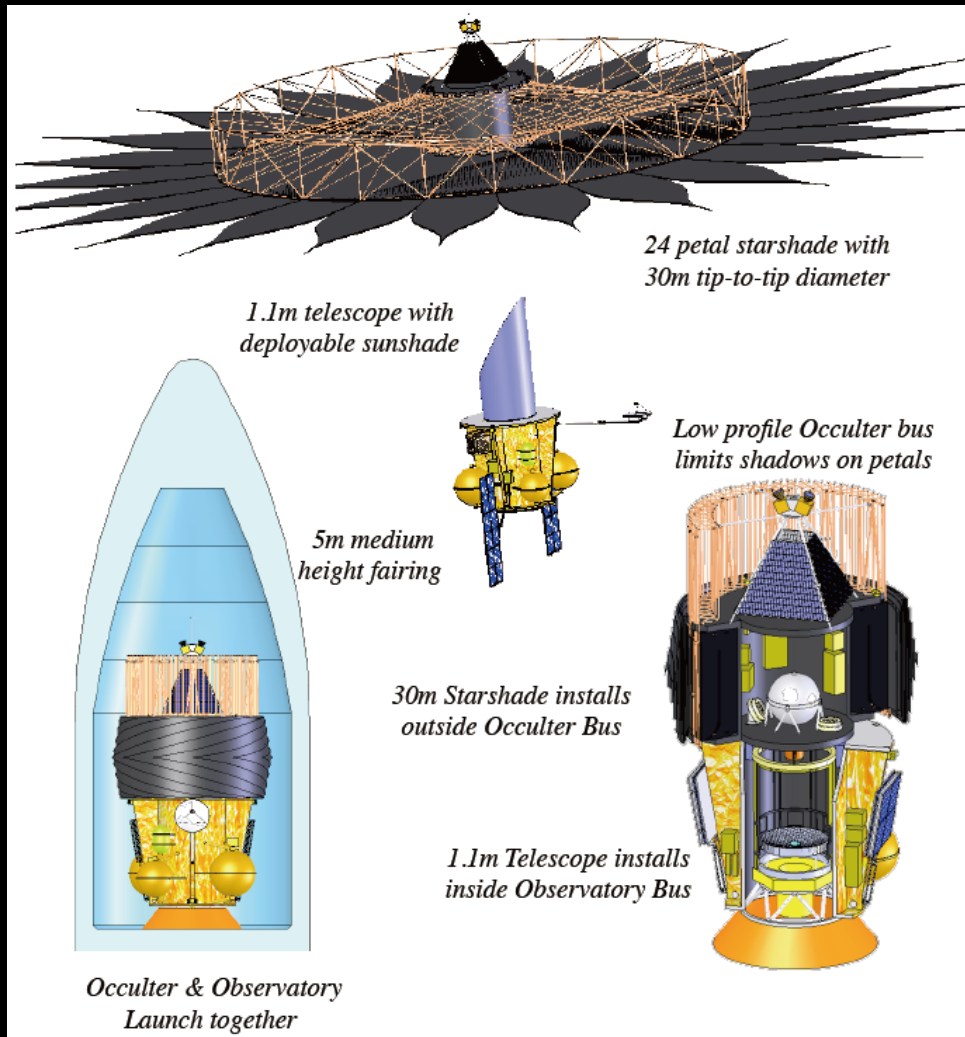
JPL



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

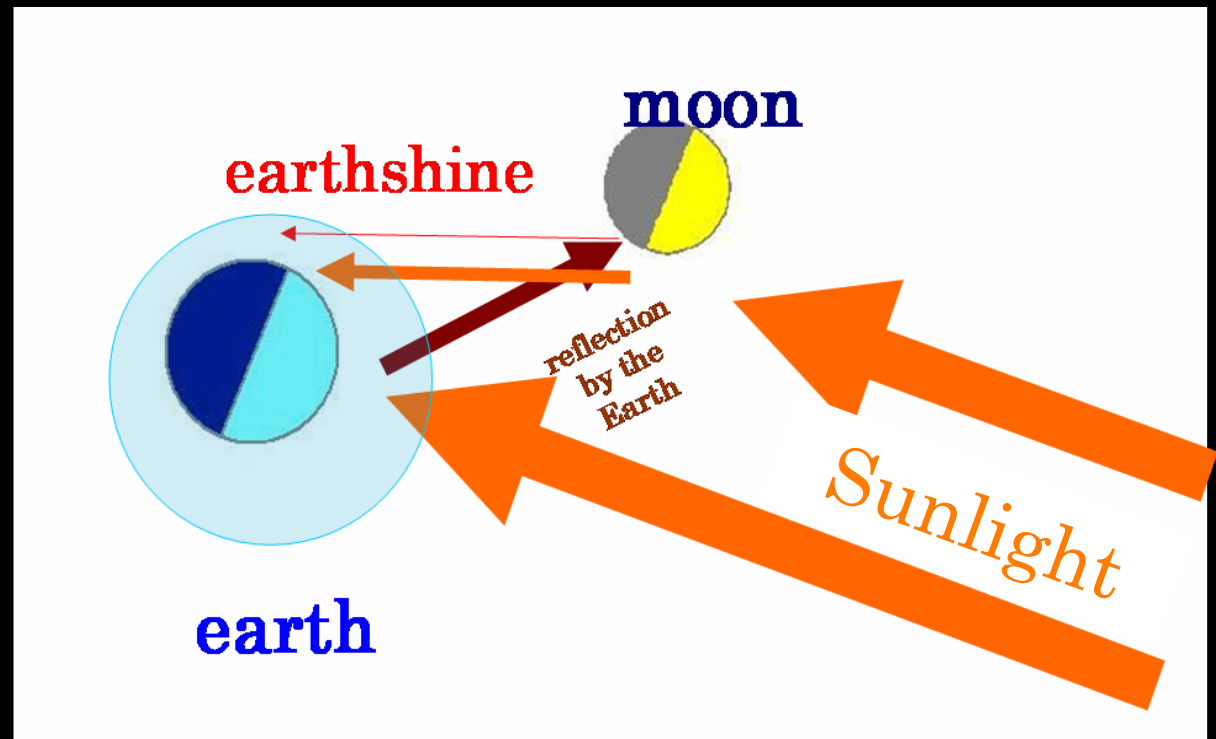
¹Princeton University, ²Jet Propulsion Laboratory, ³University of Tokyo



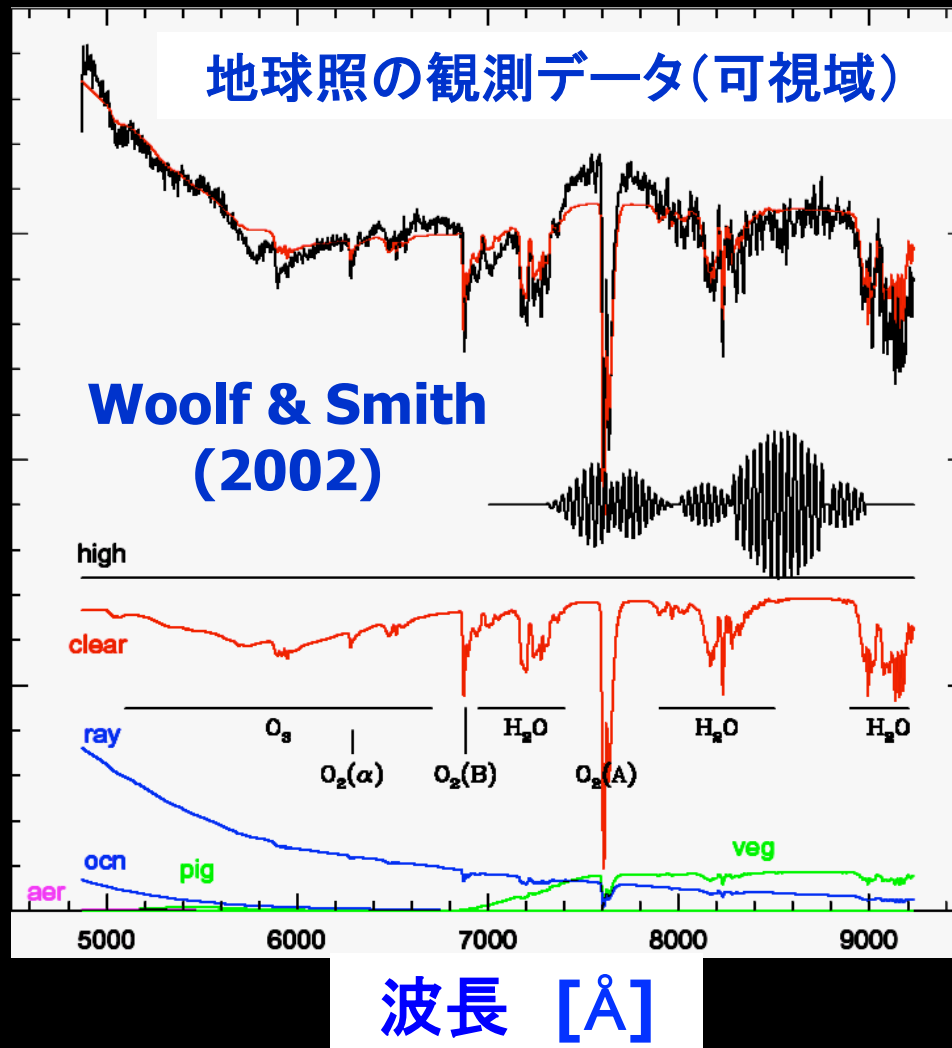
- 今回紹介する我々の結果はO₃の観測目標設定に組み込まれている

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 ≧ 太陽光）の分光観測をして、月の明るい部分（地球反射光 ≪ 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

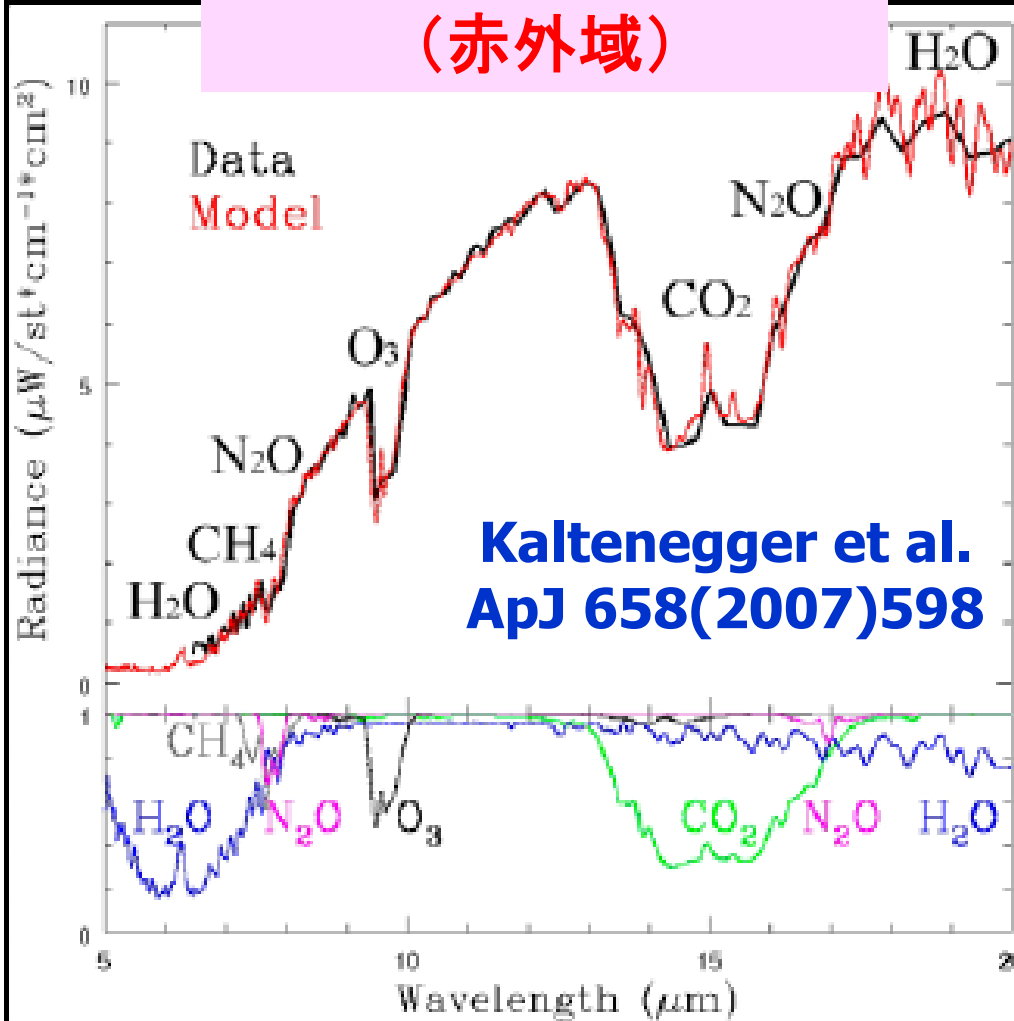
- Chappuis バンド
@ $(0.5-0.7) \mu\text{m}$
- Hartley バンド
@ $(0.2-0.3) \mu\text{m}$

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

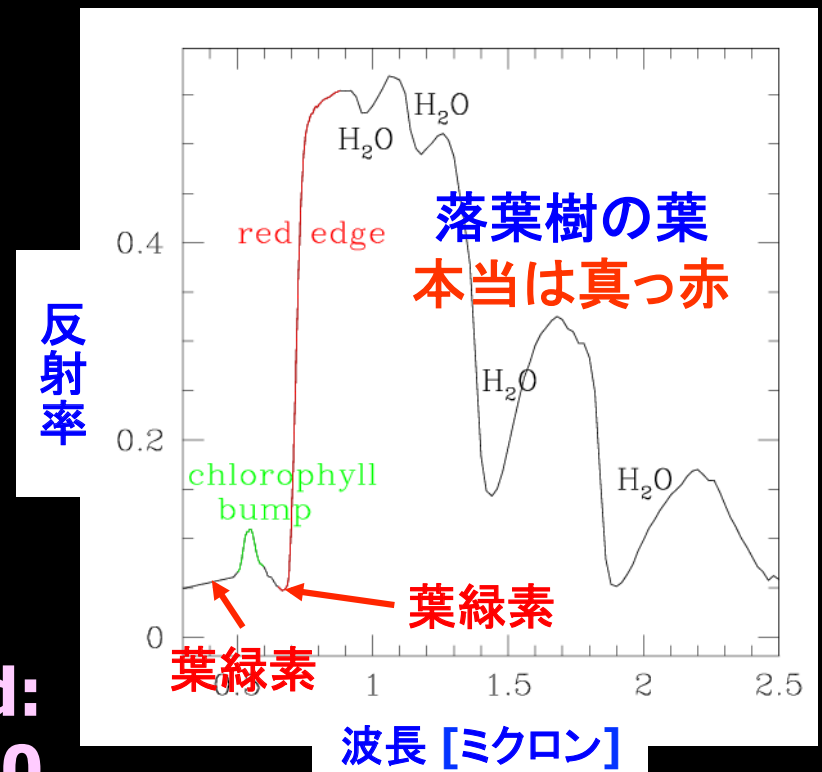
Extrasolar plants on extrasolar planets

- (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



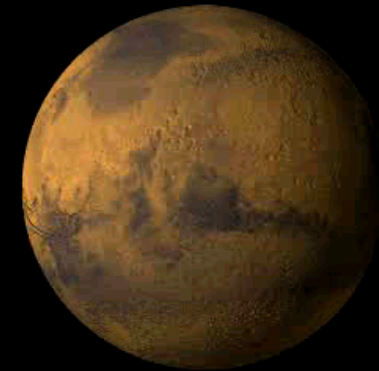
Vesto Melvin Slipher (1875-1969)



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
- Plutoという名前を採択した

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

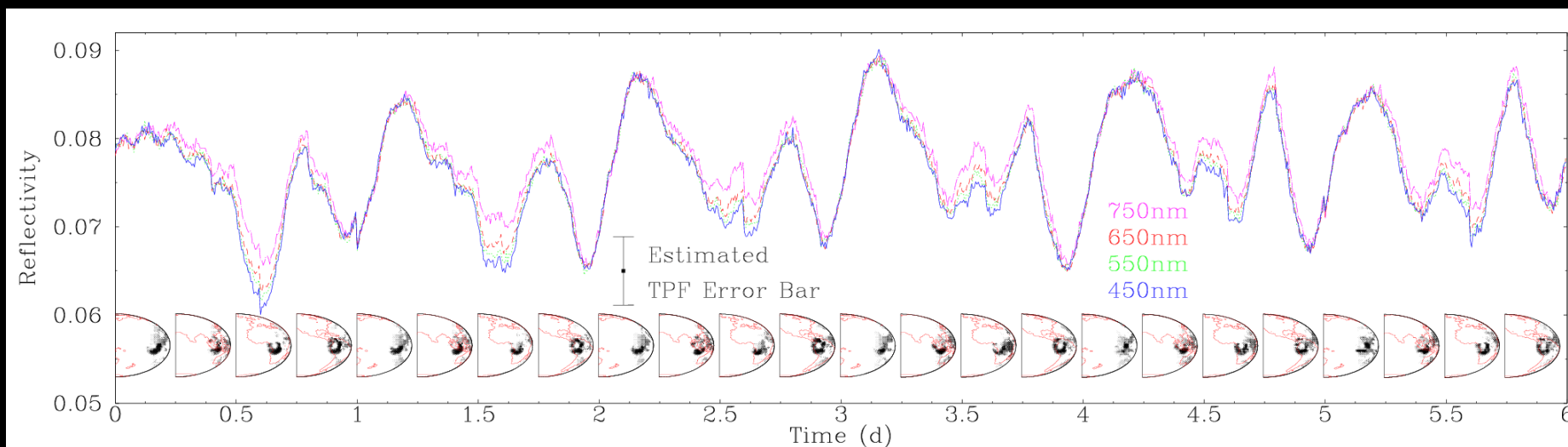


reflection spectrum. The Martian spectra of the dark regions so far do not give any certain evidence of the typical reflection spectrum of chlorophyl. The amount and types of vegetation required to make the effect noticeable is being investigated by suitable terrestrial exposures.

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

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！

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



- 誤解・理解不足がある可能性が高いのであらかじめご容赦頂きたい

- 生物学との学際的な協力が、天文学にとっていかに大切かを示す具体例なので詳しく紹介

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。

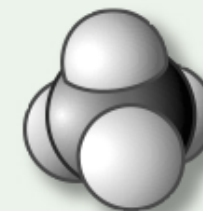


オゾン (O₃) 地球の成層圏では、太陽光のエネルギーで酸素分子が分解され、これが再結合することでオゾンが生じる。液体の水とともにオゾンの存在が確認できれば、生命の強力な証拠となる。酸素は可視光領域で検出可能だし、オゾンも赤外波長域で検出できる。従来の望遠鏡で容易に観測できる。



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。



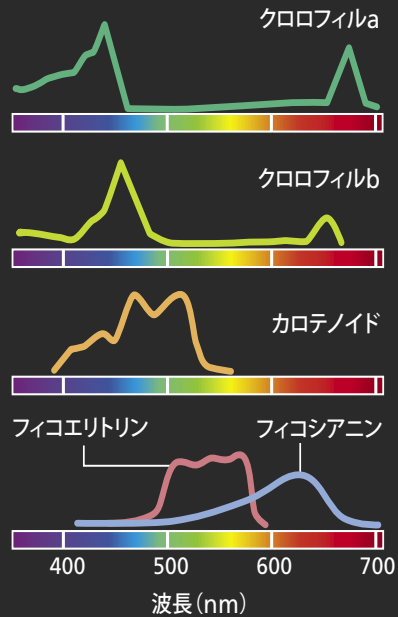
塩化メチル (CH₃Cl) 塩化メチルガスが地球上で生じるケースは、植物の燃焼（おもに森林火災）のほか、プランクトンや海水中の塩素に太陽光が作用することなどだ。塩化メチルは酸化されると分解する。しかし、M型星の放射は比較的弱いので、塩化メチルガスが検出可能な量まで蓄積する可能性がある。



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)。

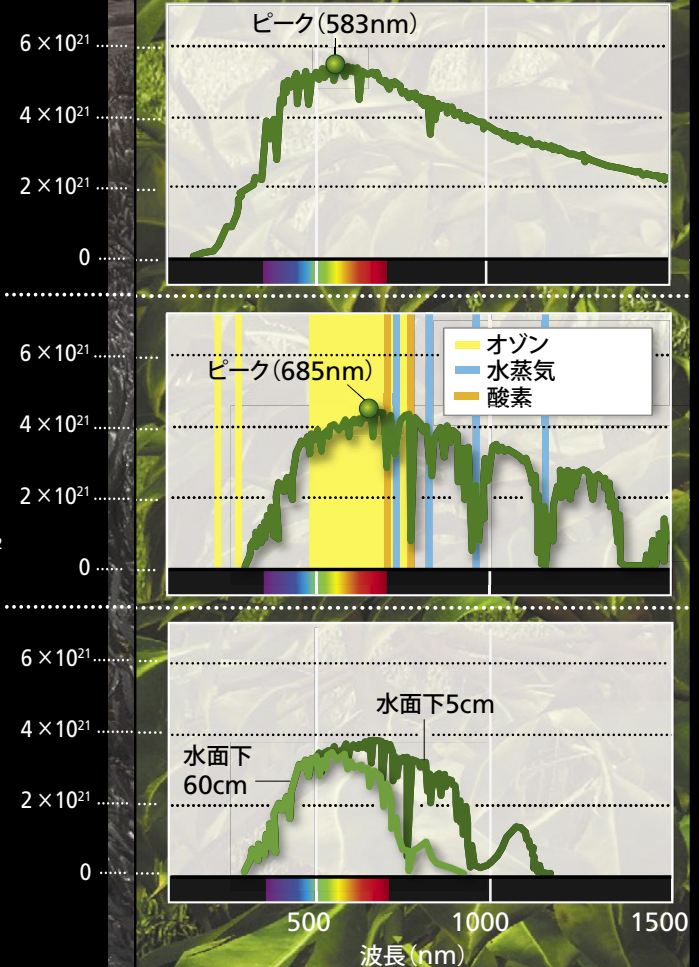
G型星

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

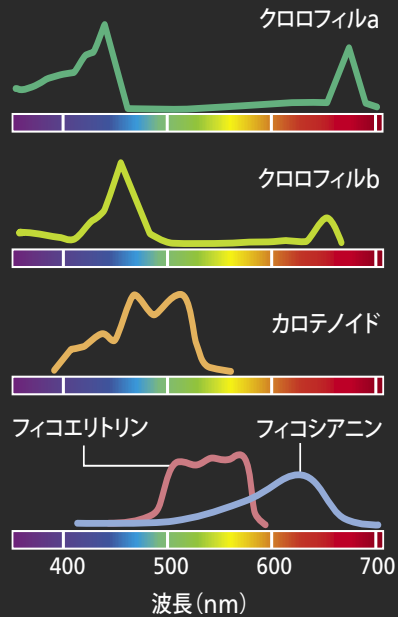
光量子束密度(1秒あたり、 1m^2 あたりの光子の数)



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

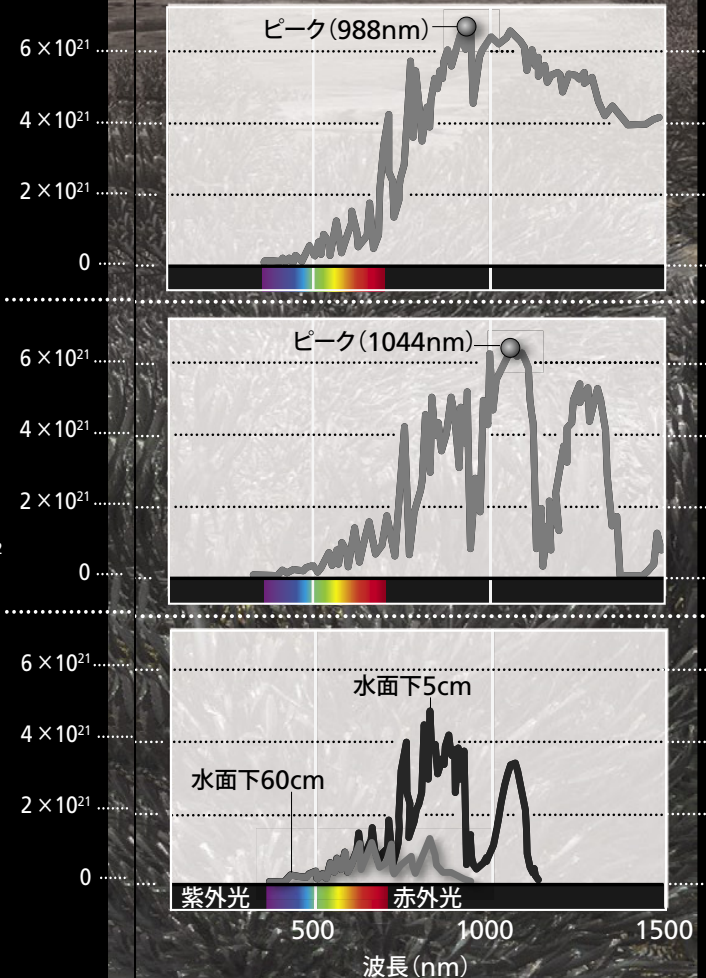
光度*: 0.0044

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

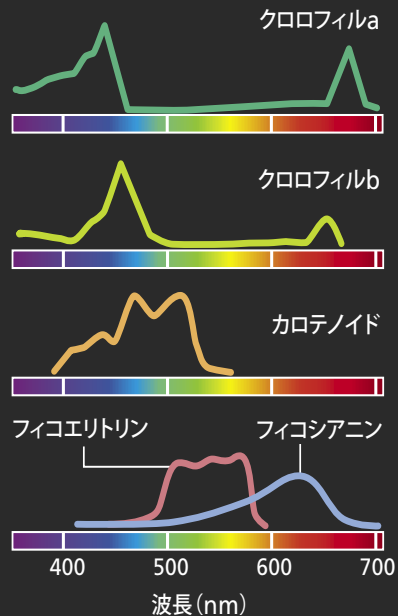
光度*：0.023

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）

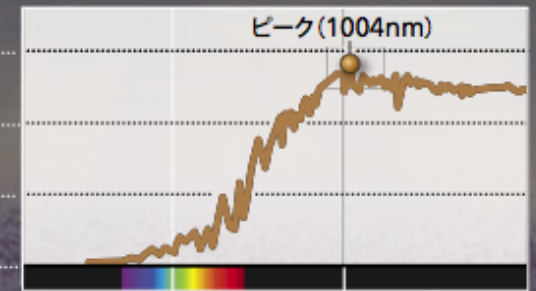
6 × 10²¹

4 × 10²¹

2 × 10²¹

0

ピーク(1004nm)



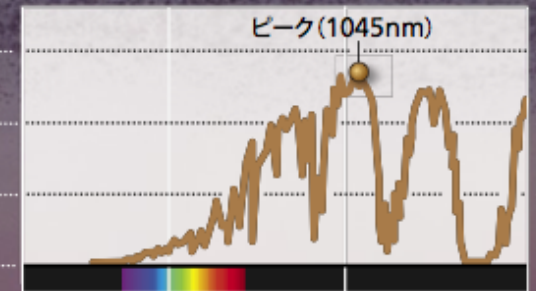
6 × 10²¹

4 × 10²¹

2 × 10²¹

0

ピーク(1045nm)



6 × 10²¹

4 × 10²¹

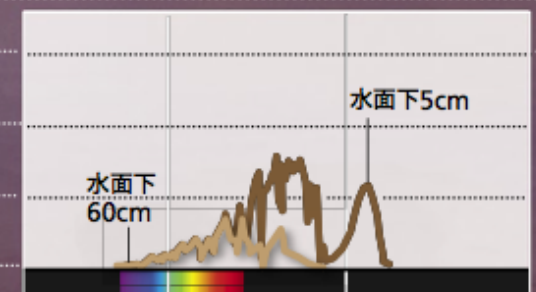
2 × 10²¹

0

水面下5cm

水面下

60cm



波長 (nm)

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

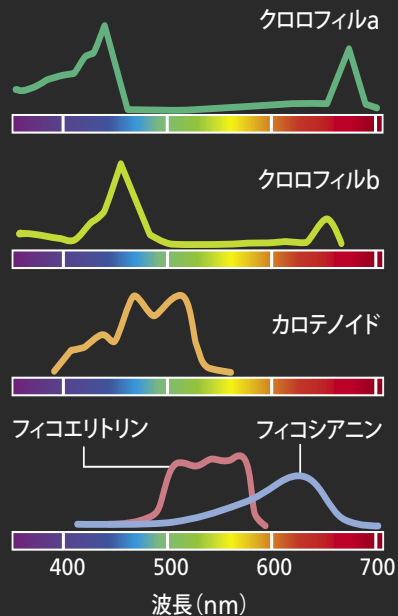
光度*：3.6

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。

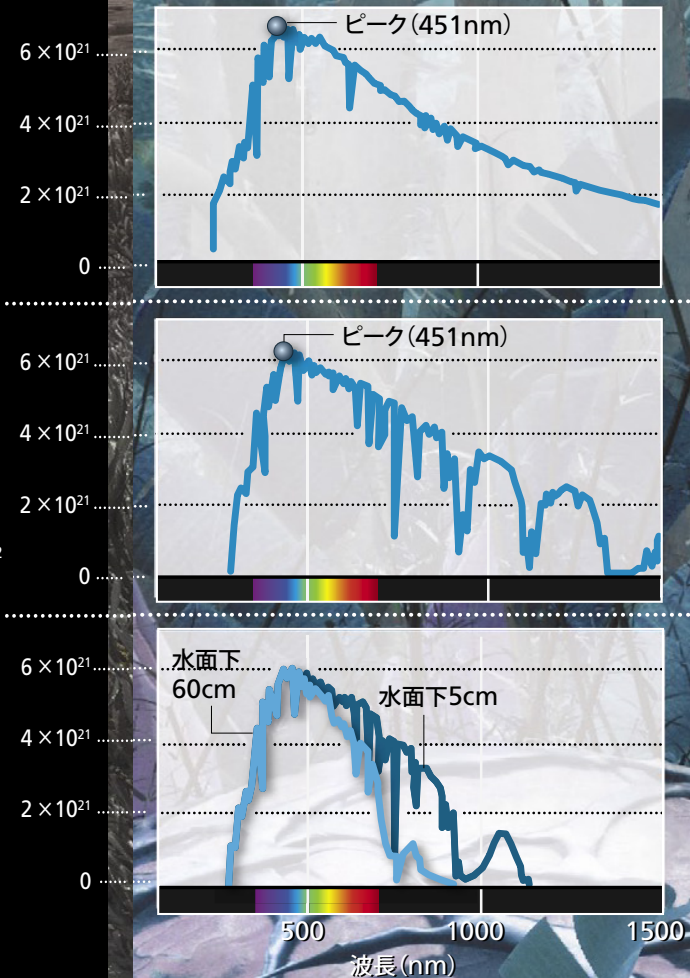
惑星表面

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)



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



6 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:0911.1102
Astrophys. J. 738(2011)184, arXiv:1102.1102

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

A pale blue dot

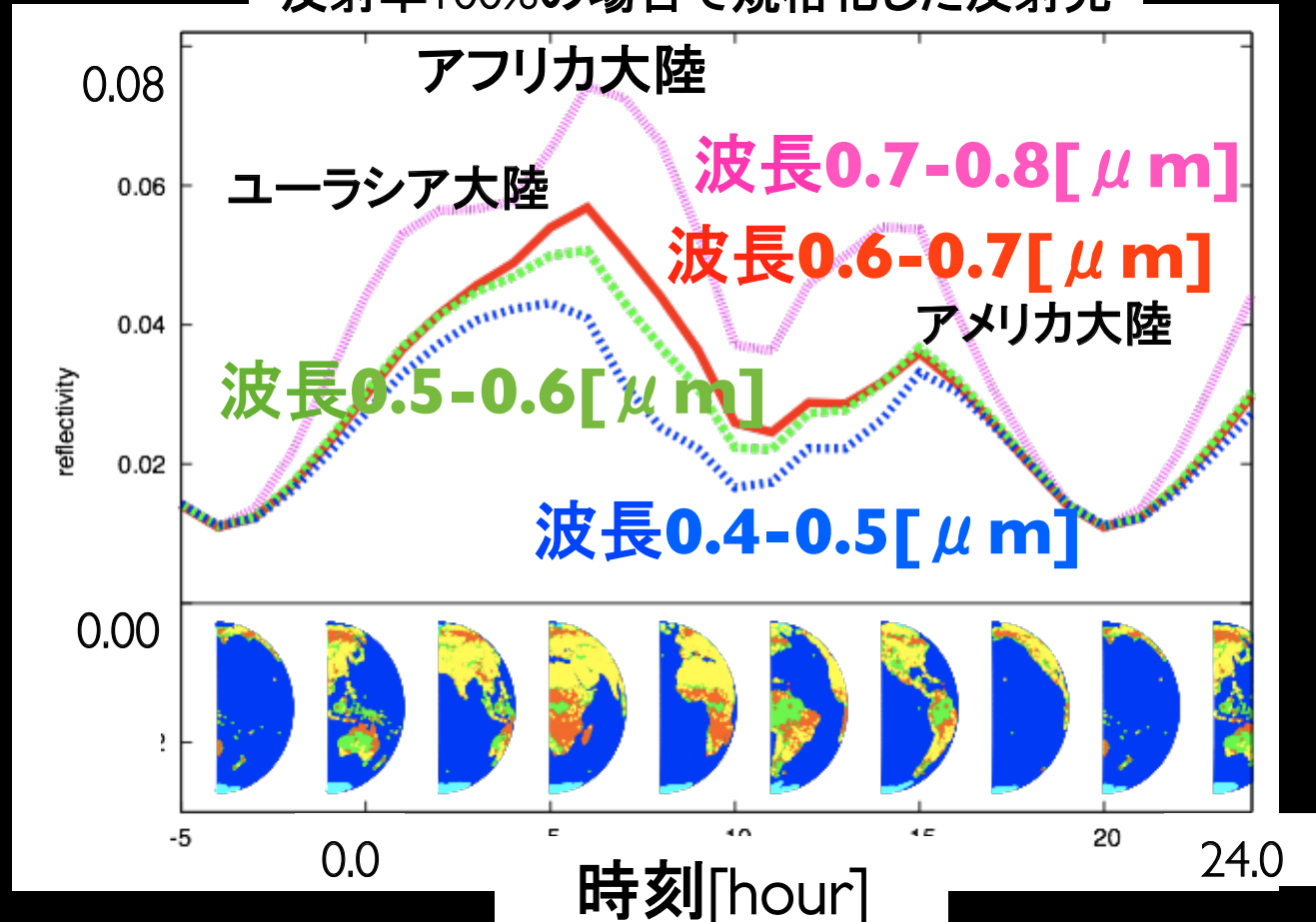


地球は青かった？

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

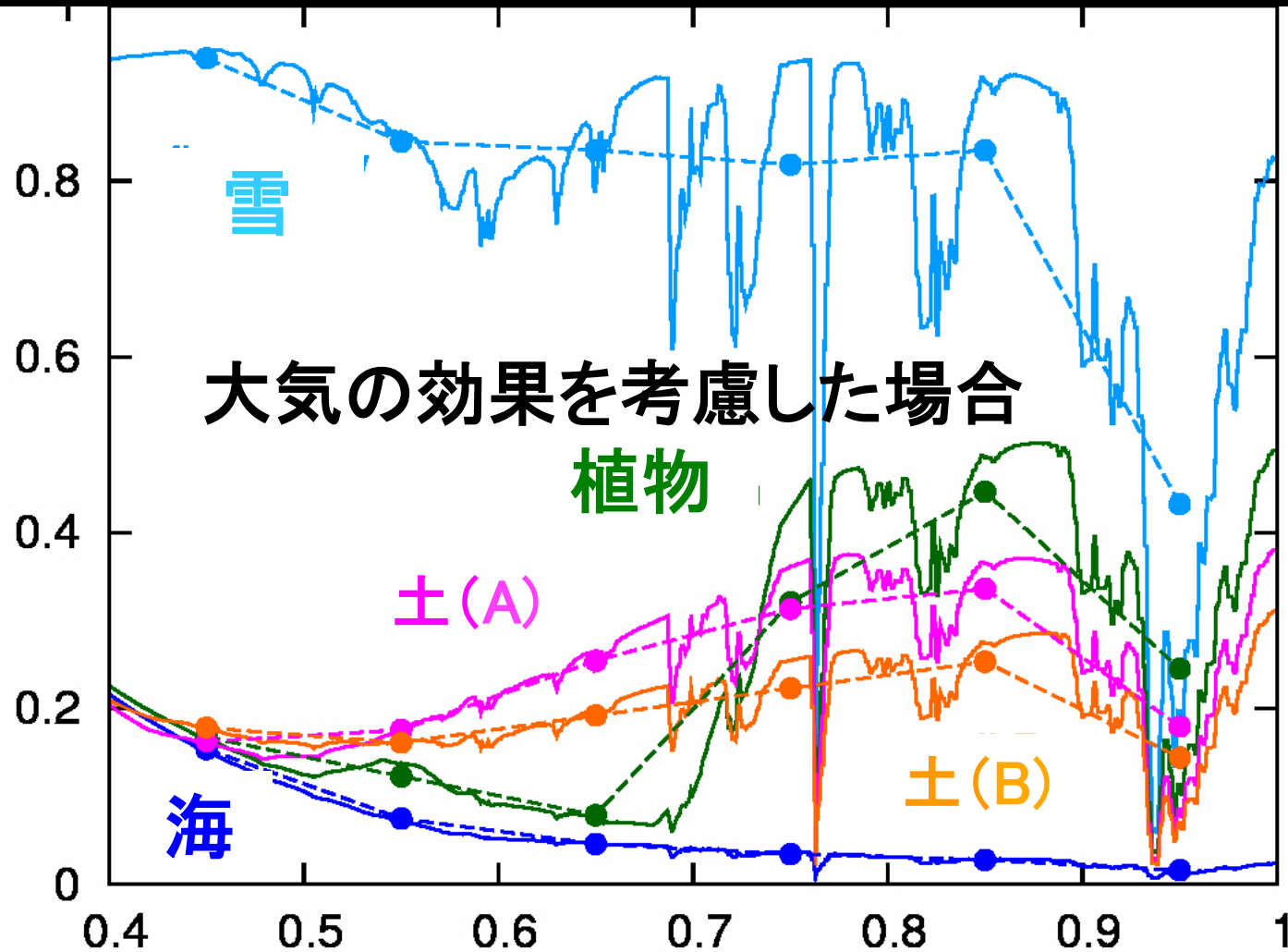
反射率100%の場合で規格化した反射光



Fujii et al. (2010)

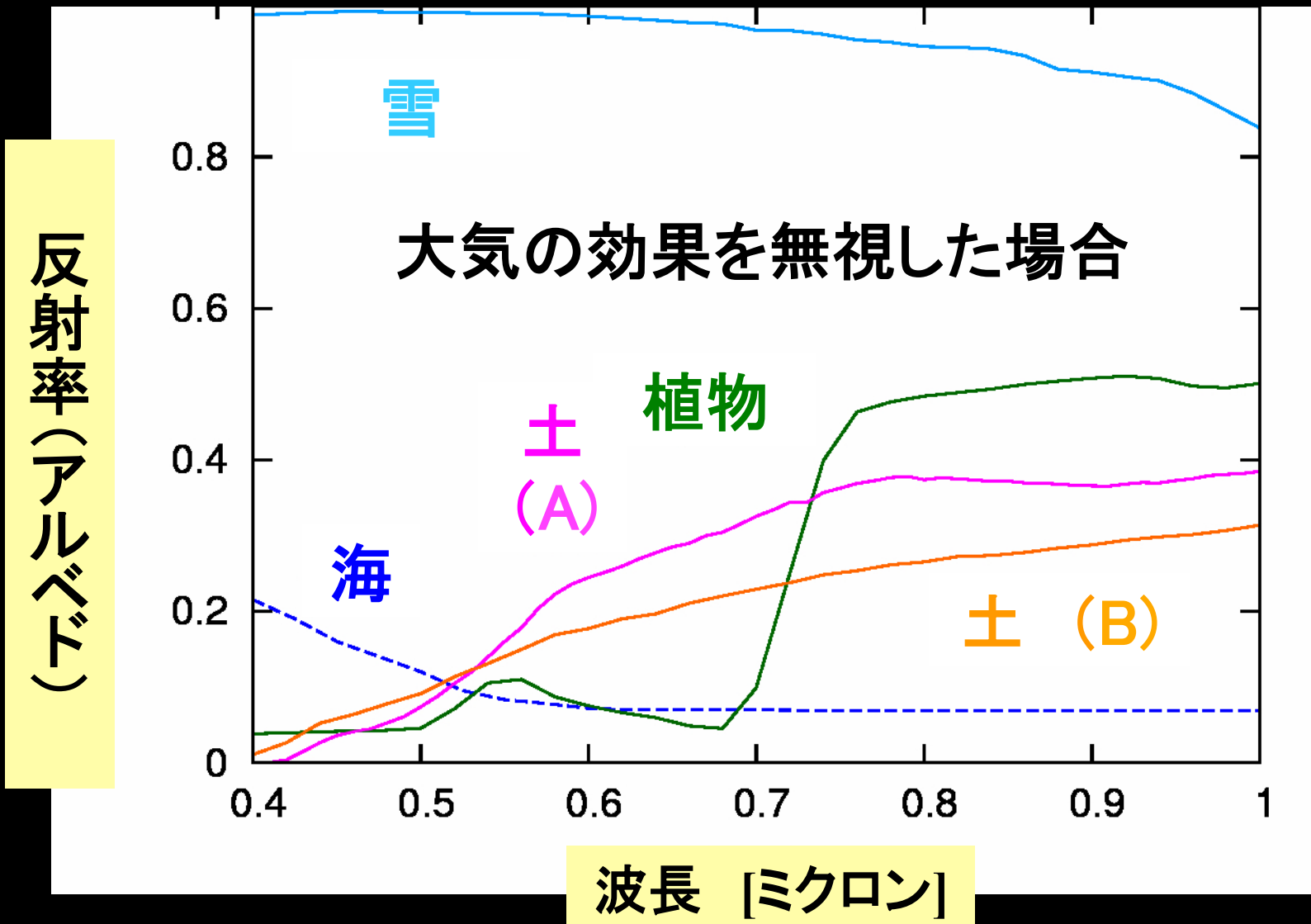
等方散乱近似での反射スペクトル

反射率(アルベド)



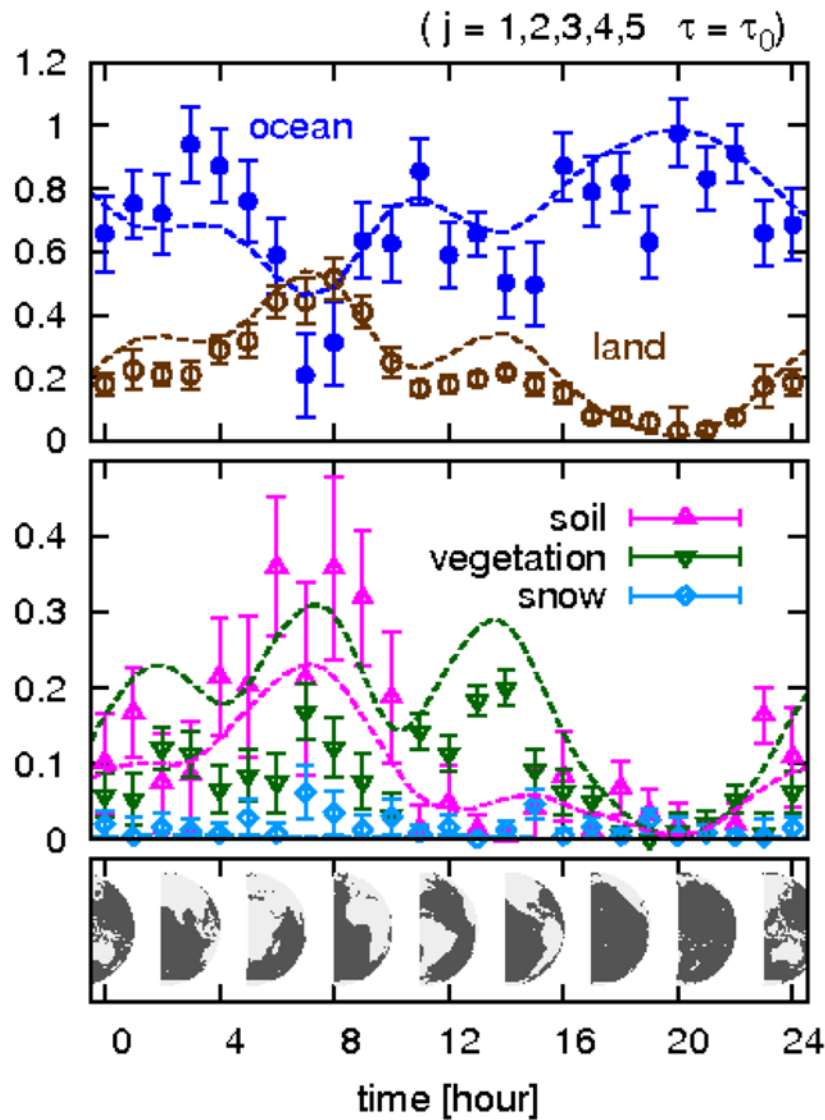
波長 [ミクロン]

等方散乱近似での反射スペクトル



第二の地球の色から表面積を推定

(重みつき)表面積比



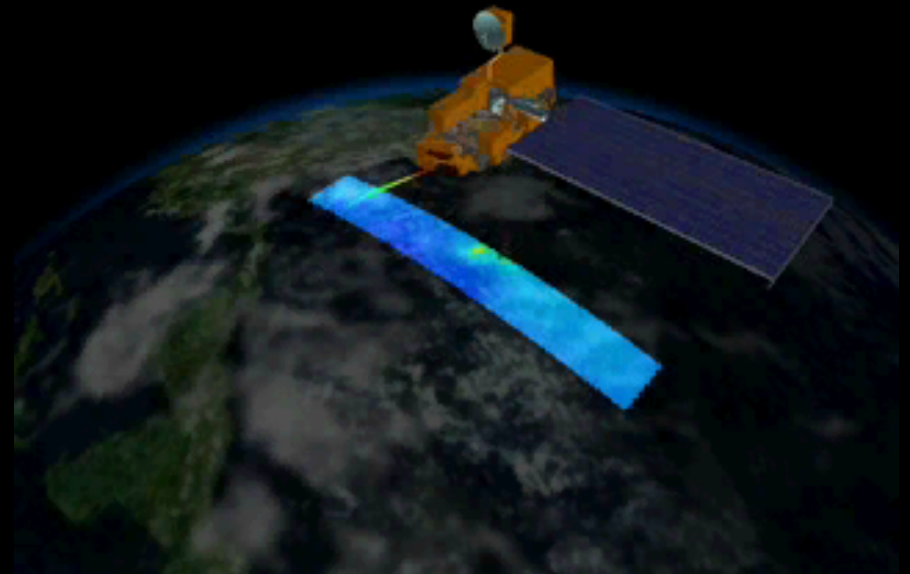
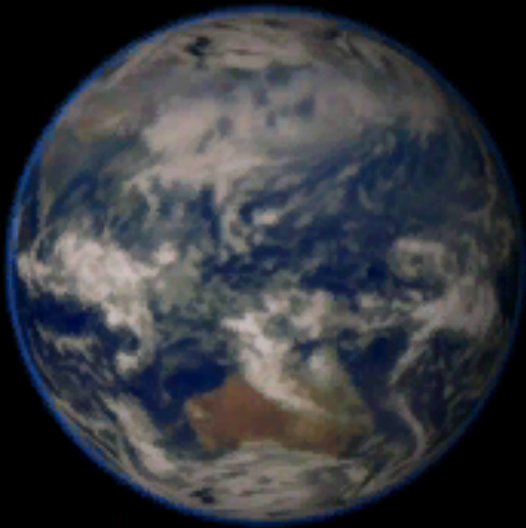
Fujii et al. (2010)

- 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！

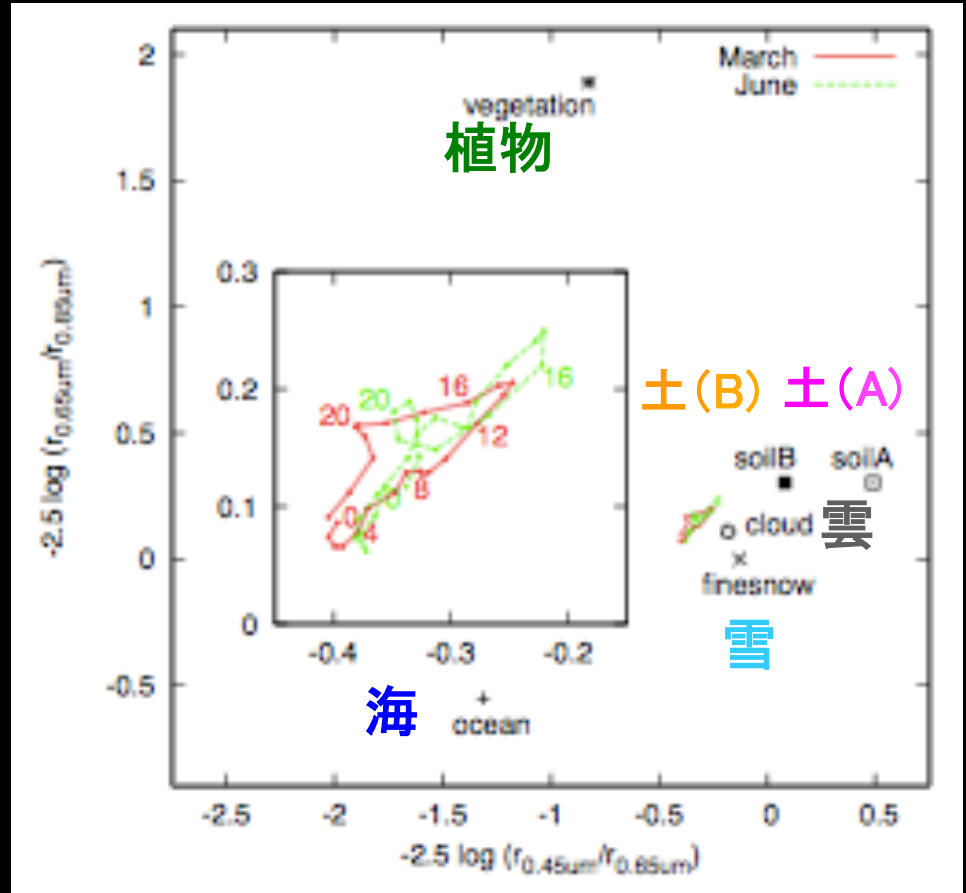
順問題：地球の反射光計算

- 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

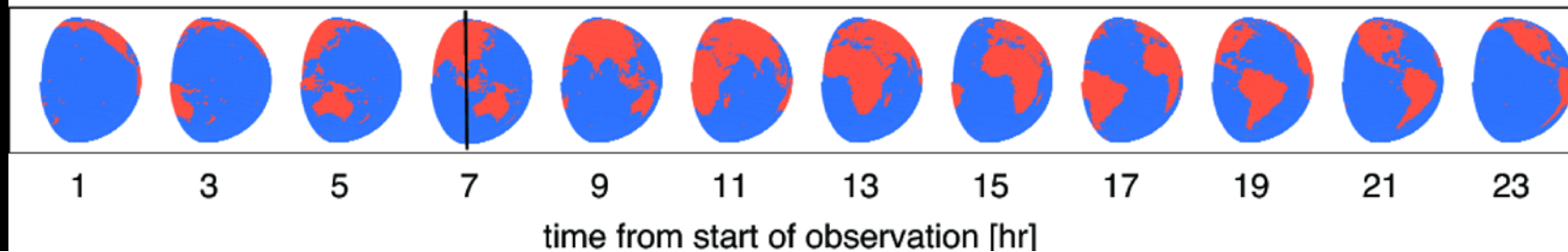
Earth observing satellite **Trace** (Transition
Region and Coronal Explorer)
+ detector **Modis** (Moderate Resolution
Imaging Spectroradiometer)



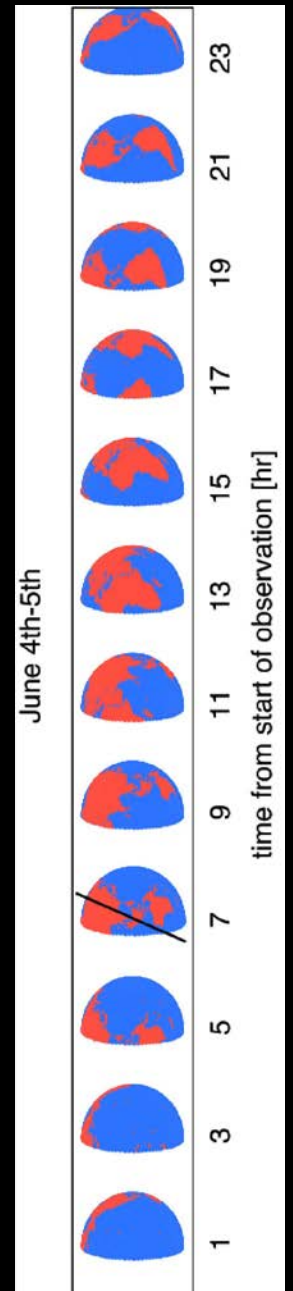
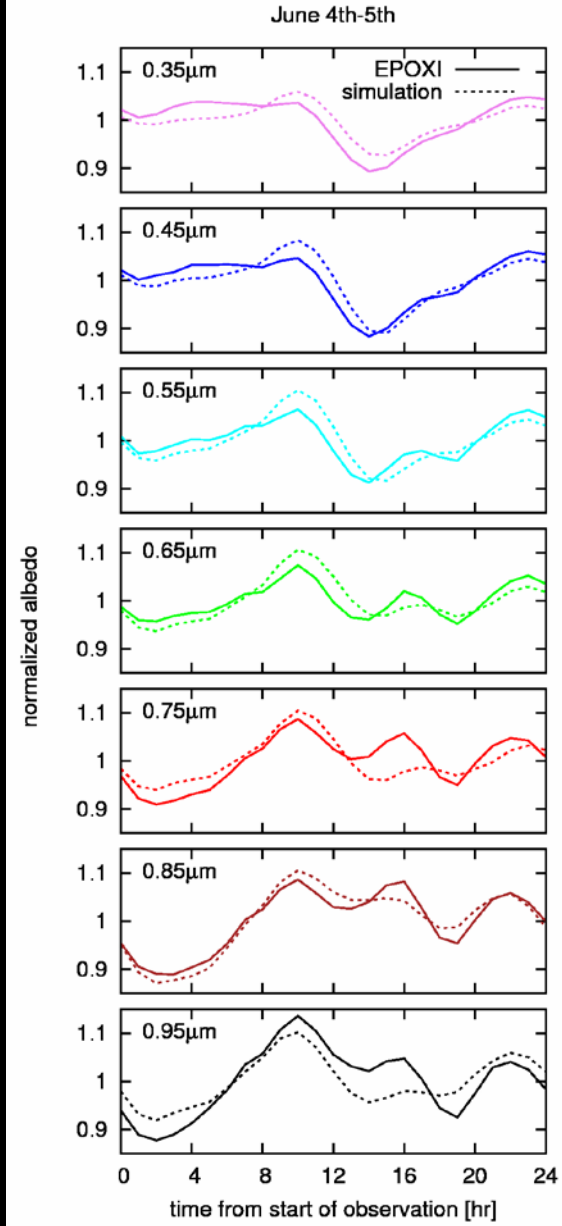
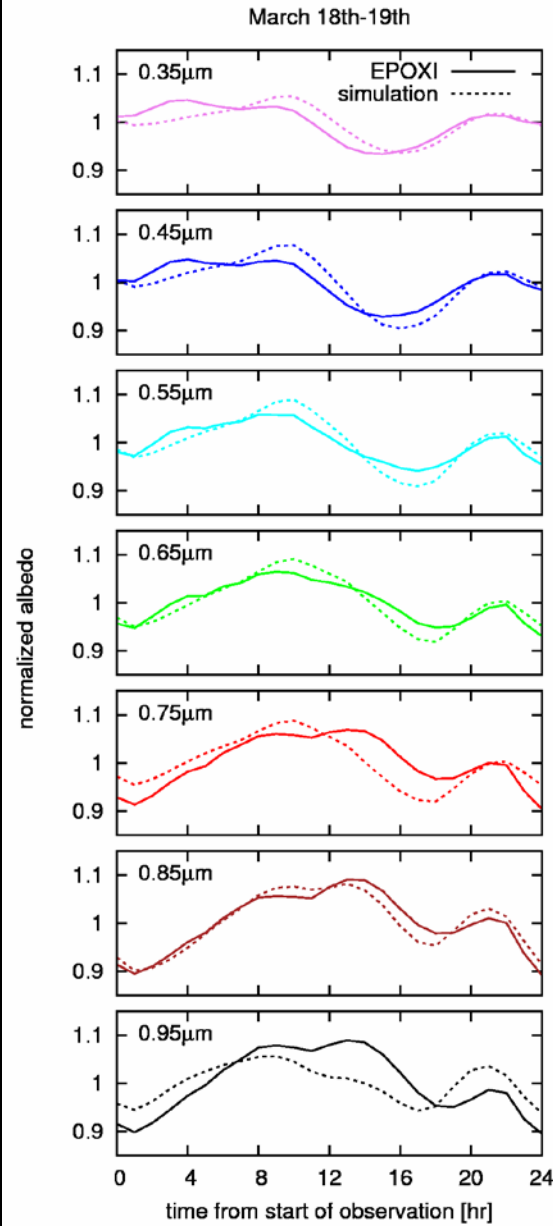
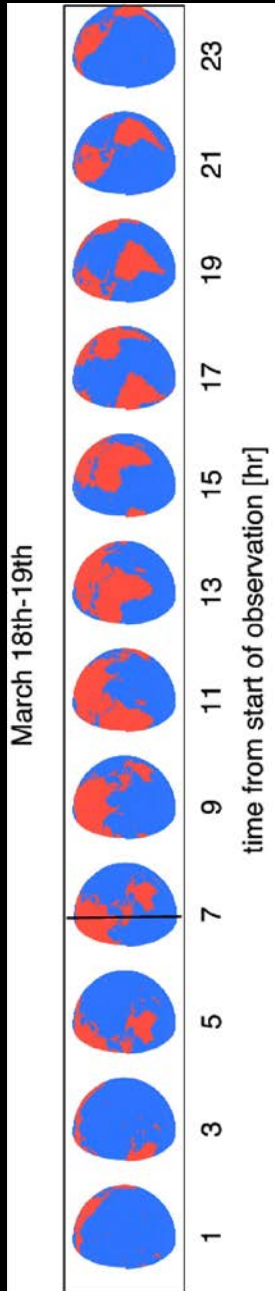
地球の色



March 18th-19th



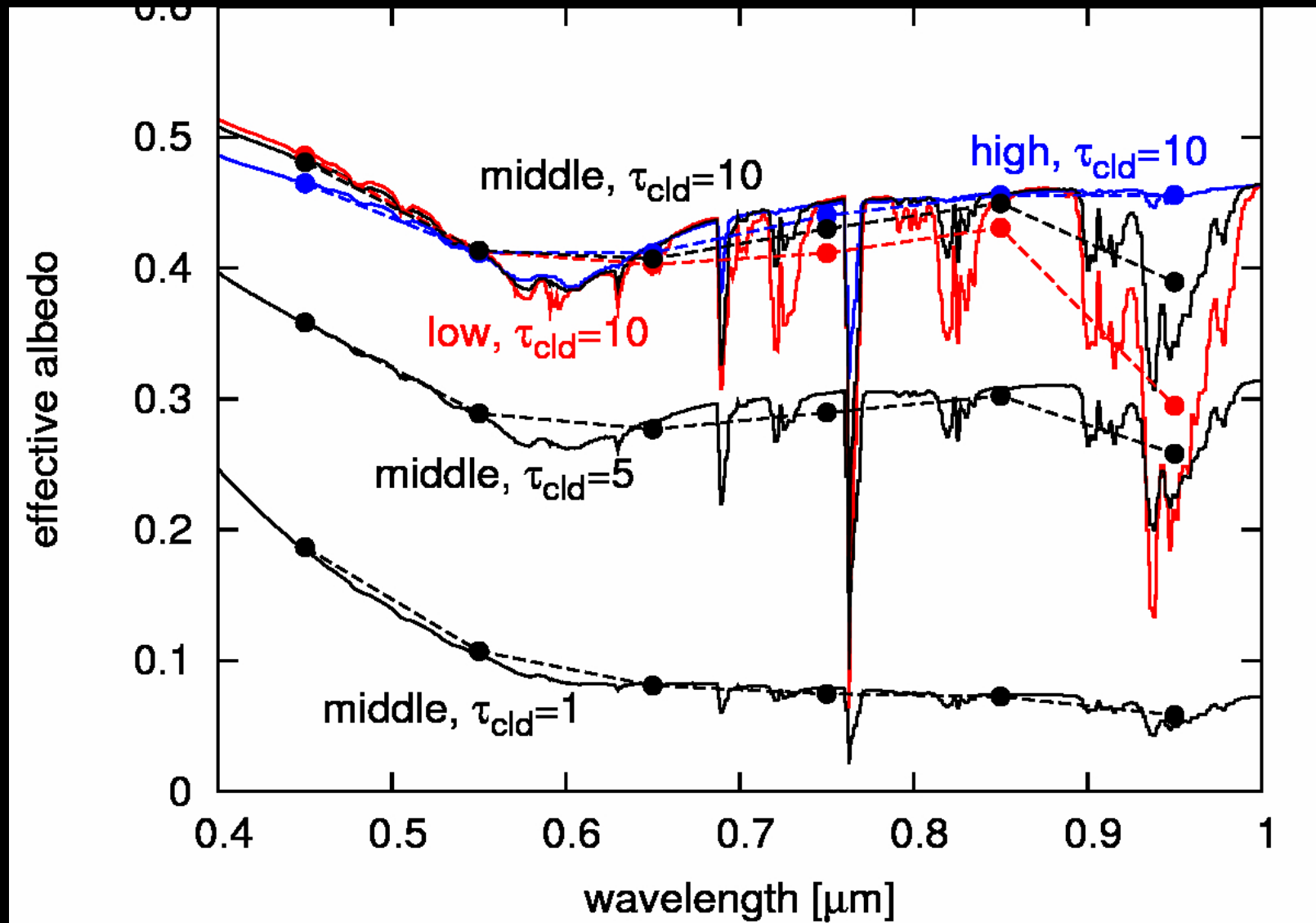
模擬光度曲線と地球観測データの比較(雲あり)



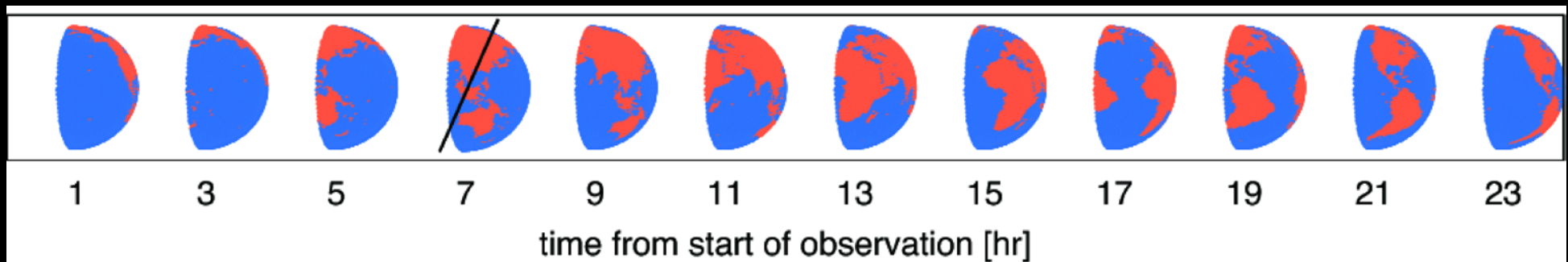
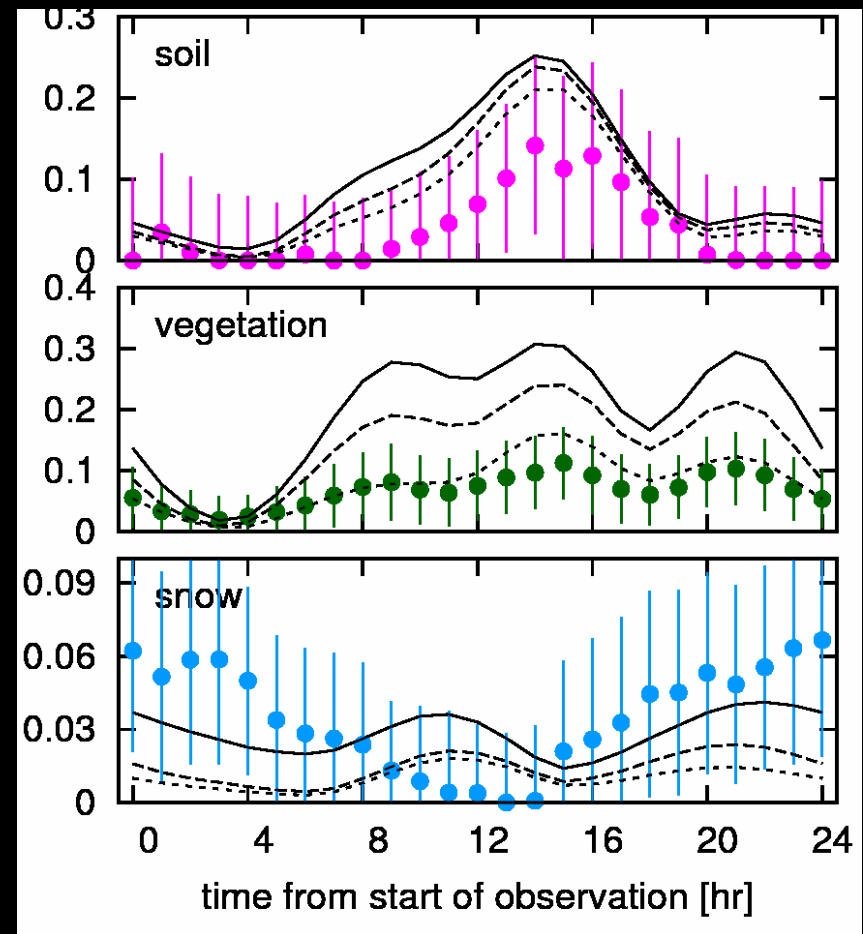
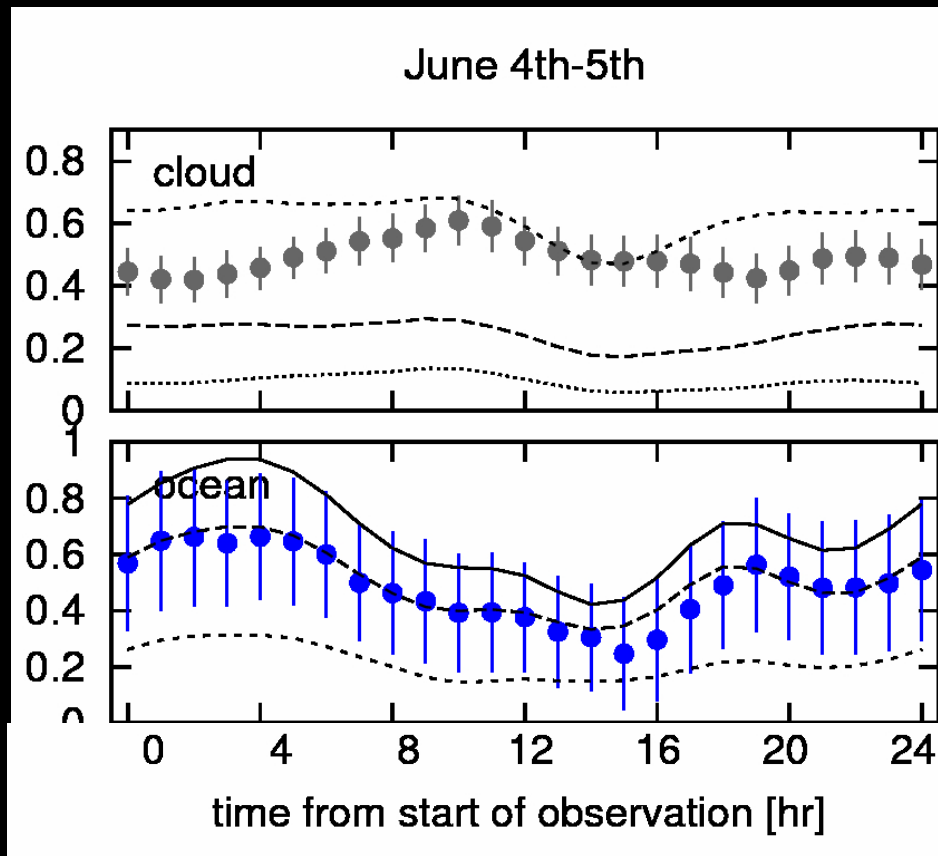
逆問題：地球の成分ごとの面積の推定

- 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

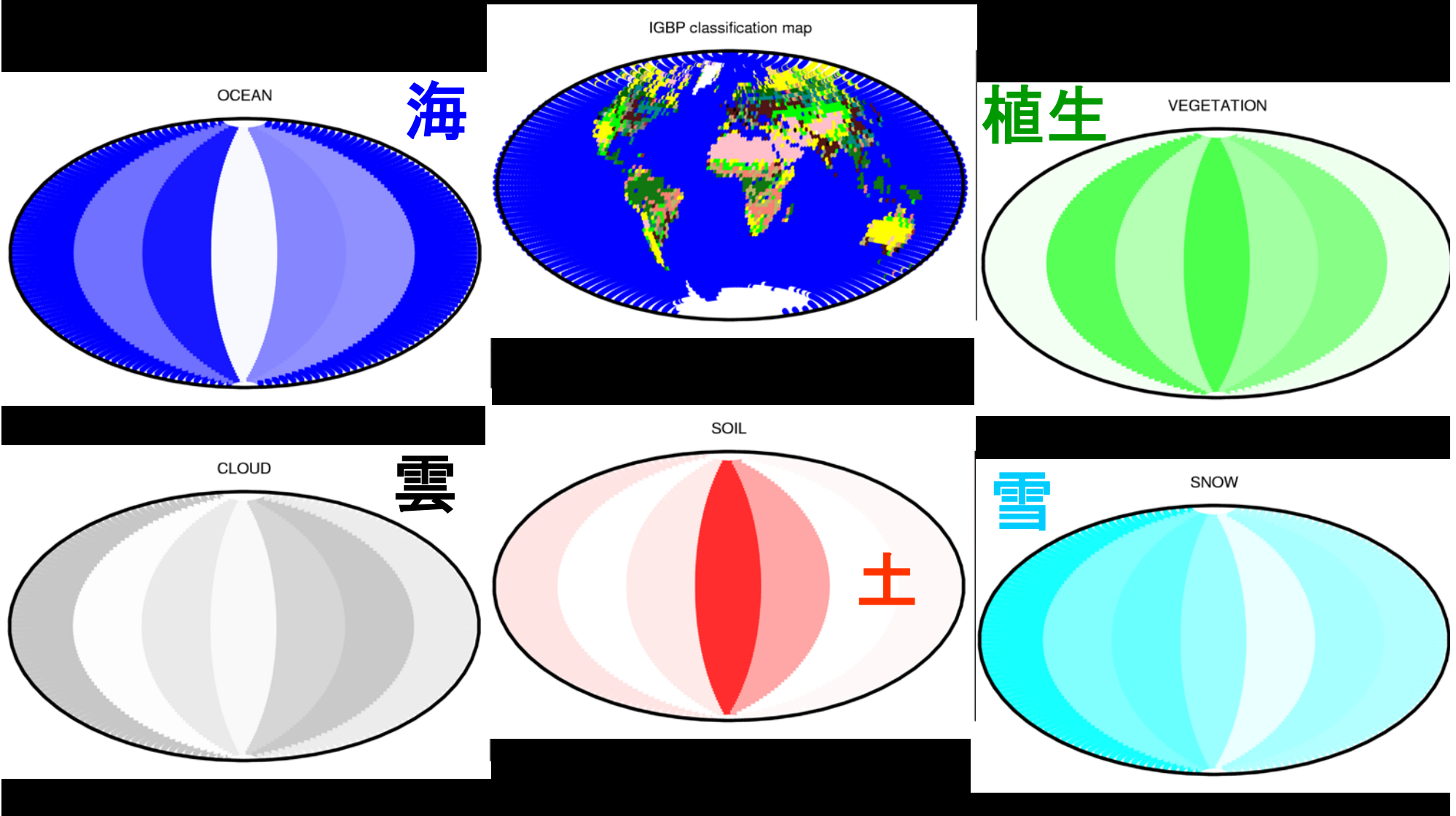
雲の反射スペクトル:モデル依存性



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

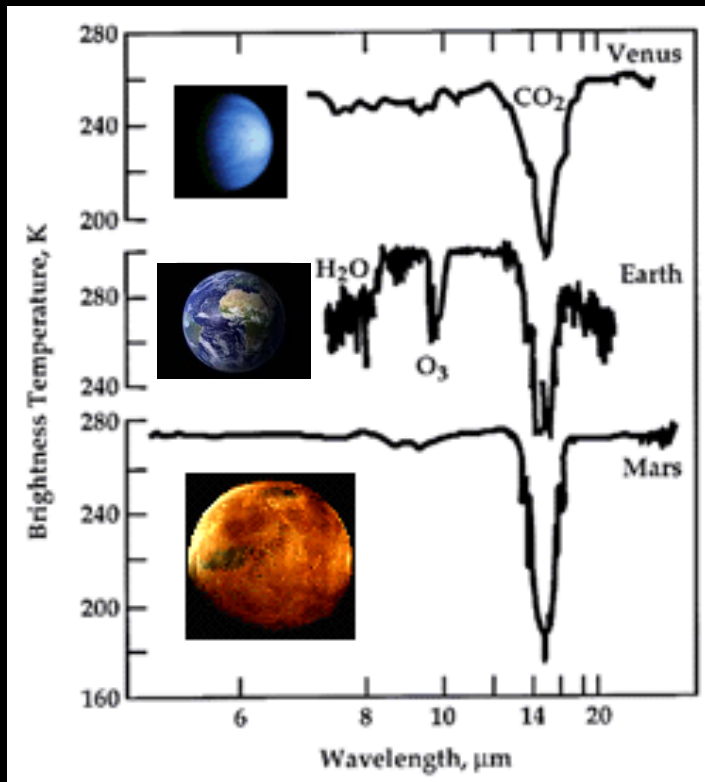


7 まとめと展望

太陽系外惑星：まとめ

- 1995年に天文学が「世界観」を大きく広げた
 - 今や惑星系は固有名詞ではなく、普通名詞
- 惑星系の存在は普遍的だが、性質は多種多様
 - 太陽に似た恒星の30パーセント以上は惑星を持つ
 - 太陽系と似た系もかけ離れた系も存在する
- 宇宙における生命の起源とその普遍性という究極の問いに、科学的立場から答えられる日が来る可能性もある
 - 「第2の地球」の発見をめざして、数多くの観測が実行中・計画中

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、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

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???

*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 . . . "

「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

8 レポート課題

例1) 地球外文明との交信可能性

- 地球外文明が存在したと仮定して、どうやれば相手と意志の疎通が可能になるのだろうか？
 - その交信は電磁波を用いて行うしかない(片道100年はかかるであろうが、その遅延はとりあえず無視する)
 - 言語が存在するとして、金田一京助は、アイヌ語を理解するのにまず「これは何？」という言葉を知って後はそれを利用して逆に次々と語彙を獲得したと言われている
 - ジョン万次郎のように、直接面談できれば言語は習得できる(そもそも赤ちゃんはそうしているはず)
 - 相手が直接見えず、そもそも目や口に対応する感覚器官の波長域もわからない相手にデジタル信号のやり取りのみで相手の言語を習得する方法論は存在するのか？

例2) 地球外比較文化論

- 「第2の地球」の存在は「我々の世界」の理解に本質的
 - 外国で生活して学ぶのはその国のことばかりではなく、日本がどのような国なのかという視点
 - 何が当たり前で何が不思議なのかを理解する
- 地球外文明と交信が可能になった場合、我々の世界を知るために本質的だと思われる質問は何かを考え、その答えが我々に与える影響について考察してみる
 - 数学の普遍性： π の数値を認識しているか？
 - 自然法則の理解の普遍性：素粒子や4つの相互作用という概念はあるか、 G , c , h などの定数を認識しているか？
 - 音楽・芸術の普遍性：それらを愛でる気持ちがあるか？
 - 哲学の普遍性：生死という概念はあるか、生きていて楽しいのか、死は恐ろしいのか、自殺はあるのか、物理学者と仲が良いか？
 - 宗教の普遍性：宗教は存在するか、あるならばその役割は？

例3) 我々の世界の不思議さ

- 「第2の地球」に対して質問するのではなく、逆に「我々の地球」の誇るべき点として紹介したいこと
- それを通じて、今まで考えていなかった視点から「我々が認識している世界」の非自明さを再認識する
 - 今まで経験したなかでもっとも美しいと感じたものをひとつ挙げ（自然、芸術、文学、科学技術、映画、音楽、写真、人間、など何でも良い）、なぜそれが美しいのかを説明する
 - 今まで自分が学んだことのなかでもっとも不思議だと思ったことを一つ選び、なぜそれを不思議だと考えるのかを説明する
 - 今は理解できないがこれから自分が理解したいと思っているこの世界の謎（自然科学、人文科学、社会科学、哲学、宗教など、何でも良い）を挙げて、その「謎」の魅力を説明する