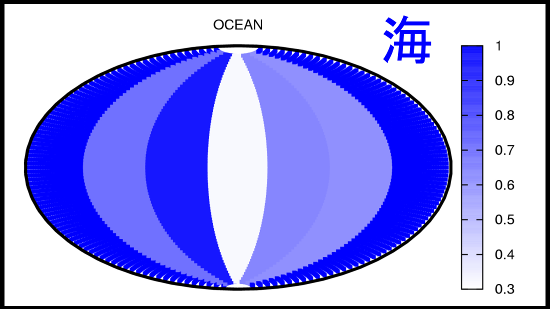
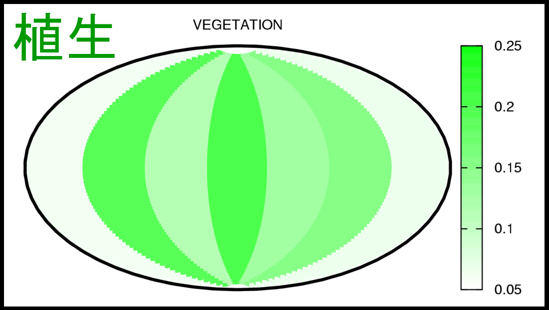
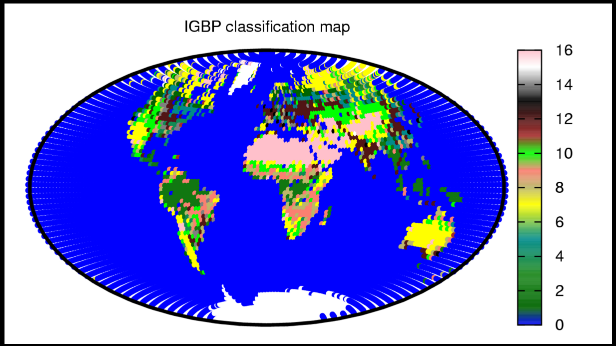
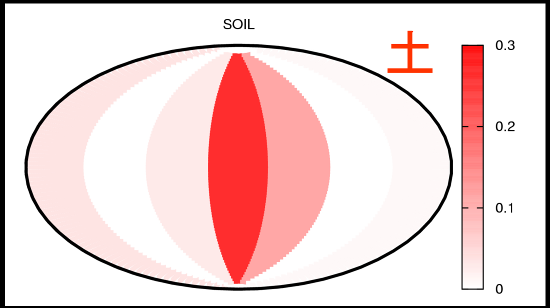
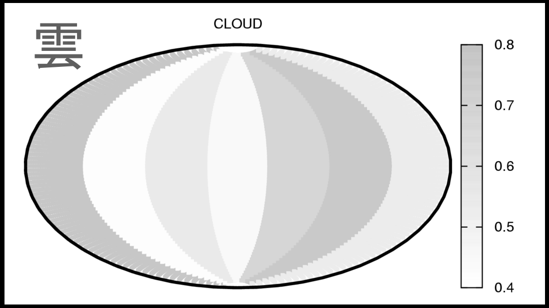
系外惑星研究から
宇宙生物学へのロードマップ











東京大学大学院理学系研究科物理学専攻　須藤靖

最新の天文学の普及をめざすワークショップ

「宇宙論」

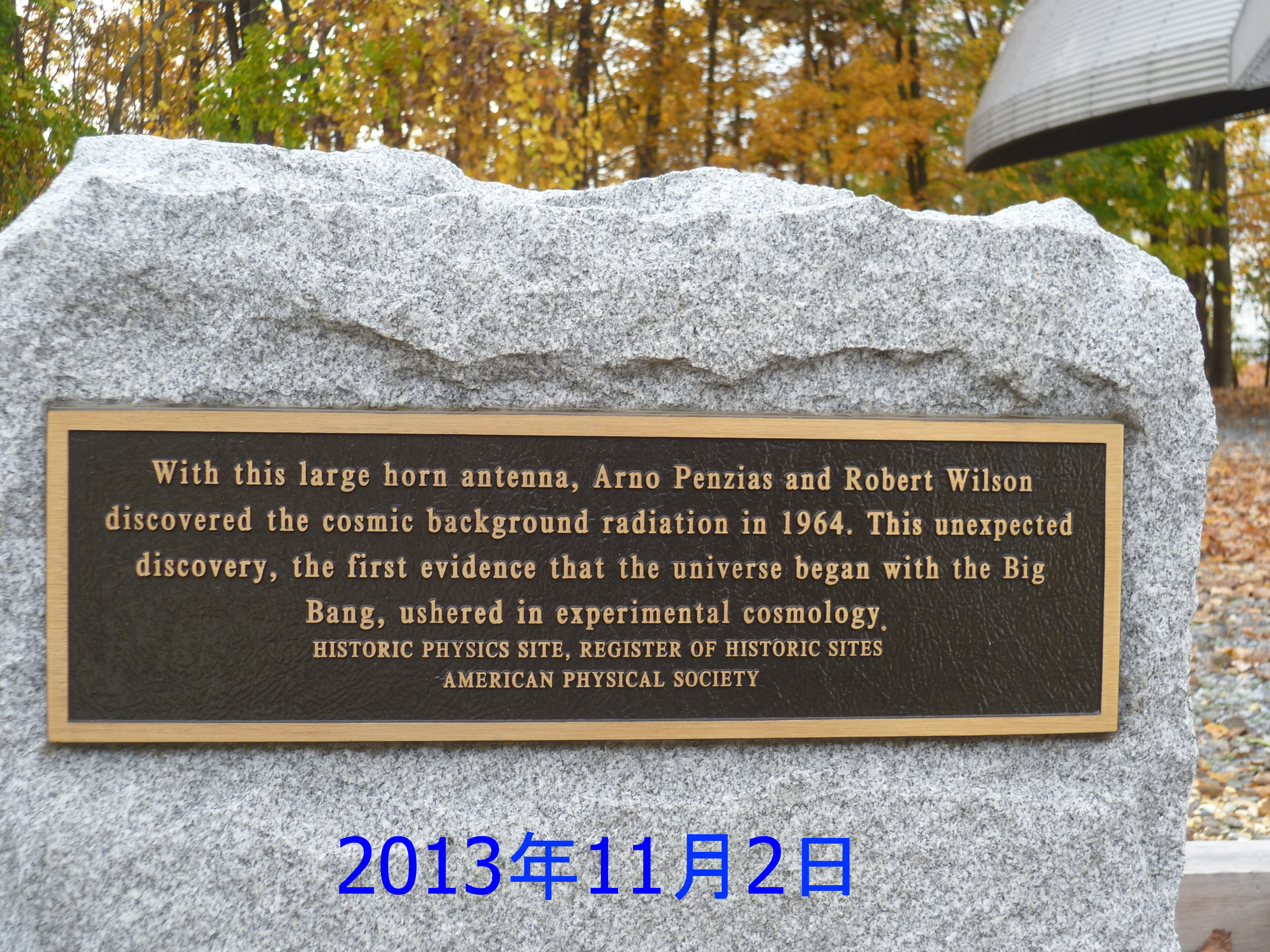
2013年11月19日12:40〜13:55@Kavli IPMU

なぜ宇宙論ワークショップで私が惑星の話をするのか？

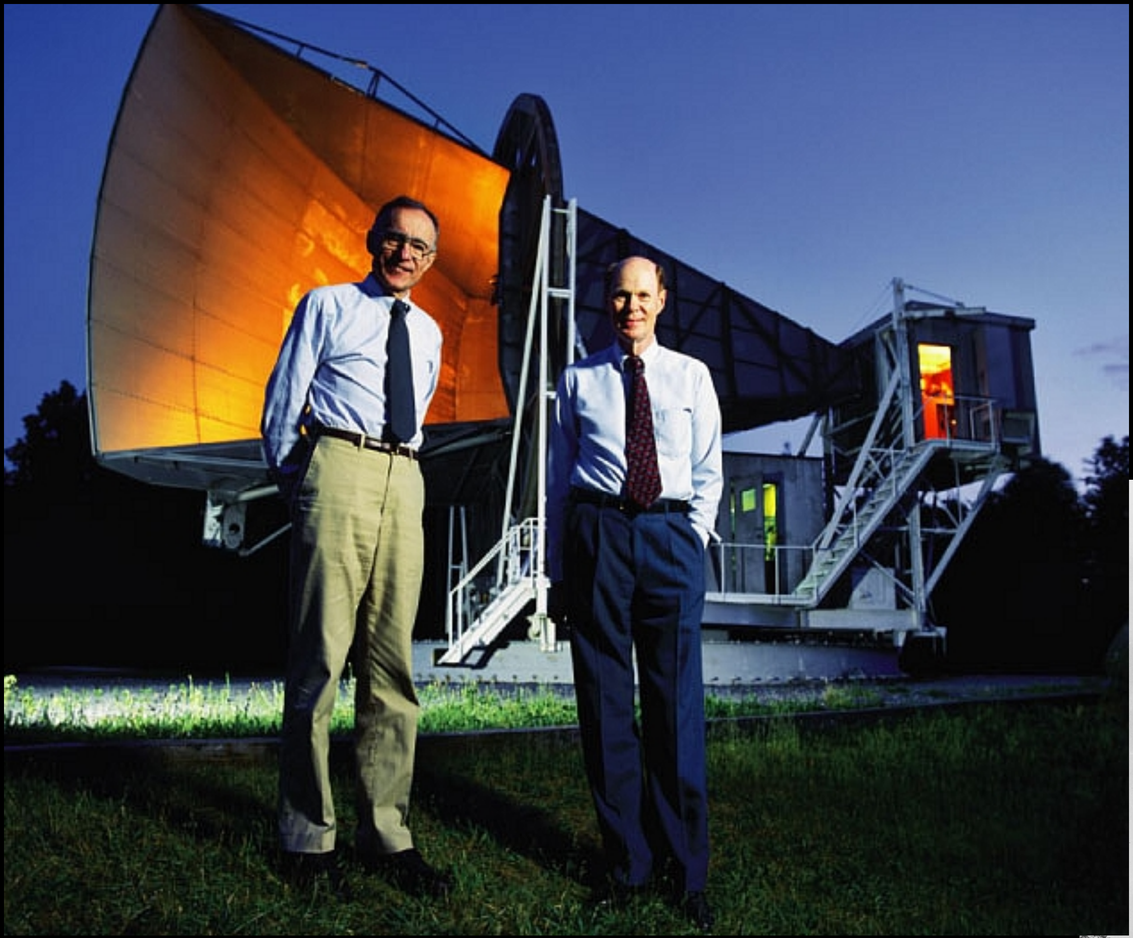
- わかりません、、、
- でも、宇宙の起源、生命の起源、意識の起源が、この世界の最も重要な謎だとすれば、それらは宇宙の誕生⇒宇宙の進化⇒星・惑星形成⇒生命の誕生⇒生物進化⇒知的生命の誕生という一連の流れで、宇宙史に組み込まれています

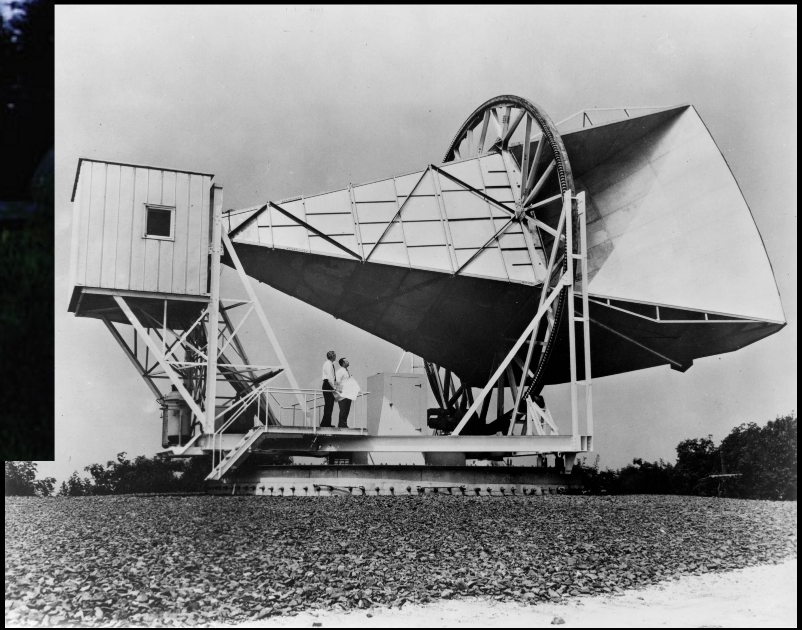
でもせっかくなので、
宇宙論に関するお宝
写真をお見せします

2013年11月2日@Crawford Hill, NJ


With this large horn antenna, Arno Penzias and Robert Wilson discovered the cosmic background radiation in 1964. This unexpected discovery, the first evidence that the universe began with the Big Bang, ushered in experimental cosmology.
HISTORIC PHYSICS SITE, REGISTER OF HISTORIC SITES
AMERICAN PHYSICAL SOCIETY
2013年11月2日

ビッグバン宇宙論を科学にしたアンテナ





天文学の立場からの
系外惑星観測成果の要約と展望

系外惑星：すでに学んだこと

- 惑星系は稀なものでなく普遍的存在
  - 太陽に似た恒星の約3割以上は惑星を持つ
- 惑星系の性質は多種多様：太陽系と似た系もかけ離れた系も存在する
  - 惑星大気の発見
  - 惑星反射光の検出
  - 主星自転軸と惑星公転軸とのずれ（逆行惑星）
- 様々な観測手法で相補的アプローチが実現
  - ドップラー法（精密分光）、トランジット法（精密測光）、重力レンズ（高時間分解能測光）、直接撮像

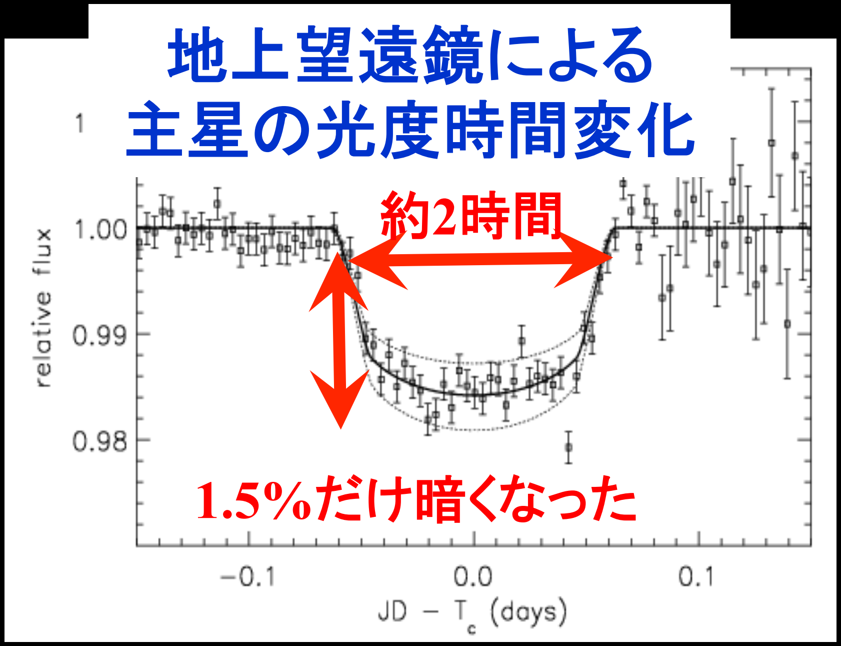
その次に何をめざす？

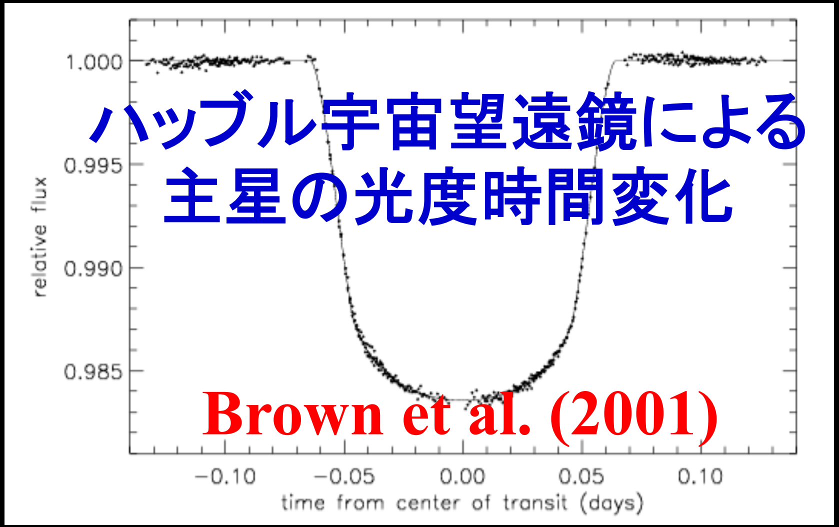
初めてのトランジット惑星HD209458b

- 速度変動のデータに合わせた惑星による主星の掩蔽（可視光）の初検出

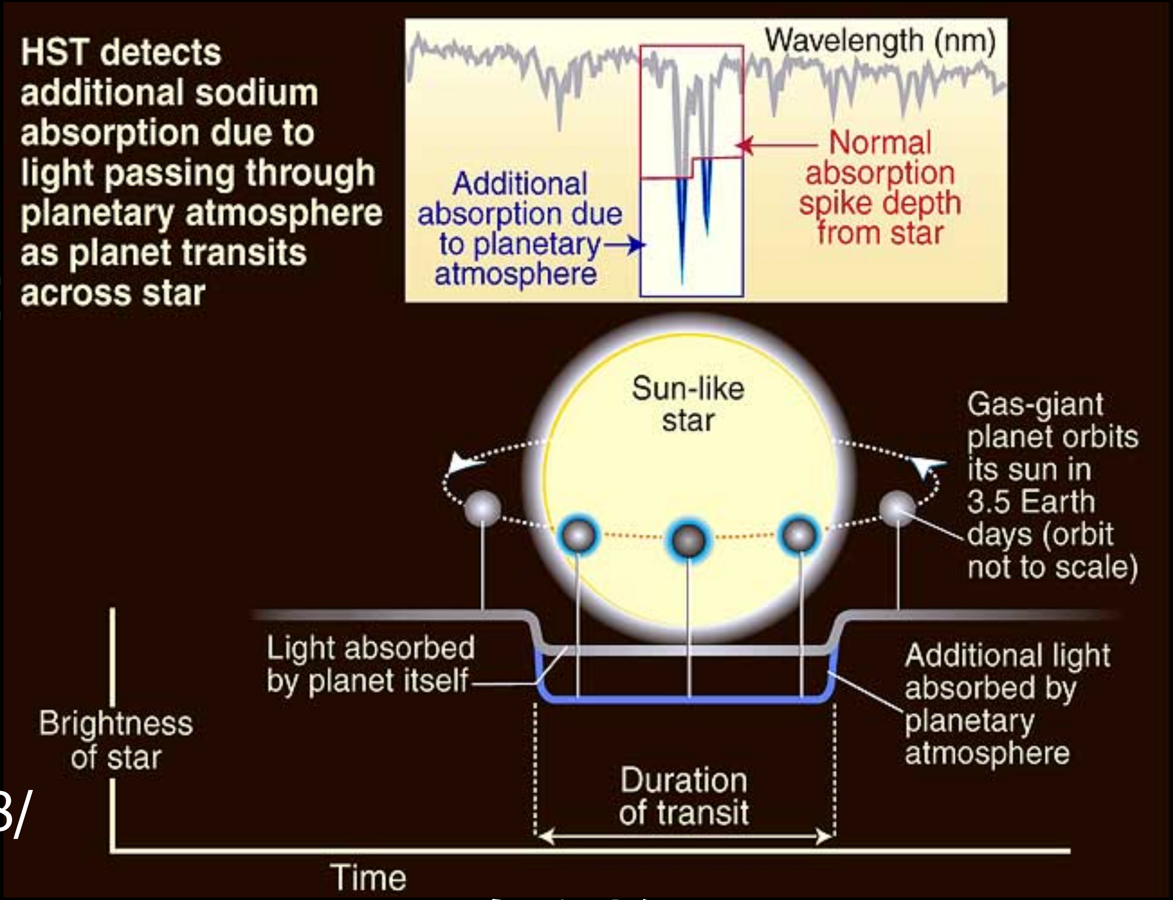
地上望遠鏡による
主星の速度時間変化

Henry et al. (1999), Charbonneau et al (2000)





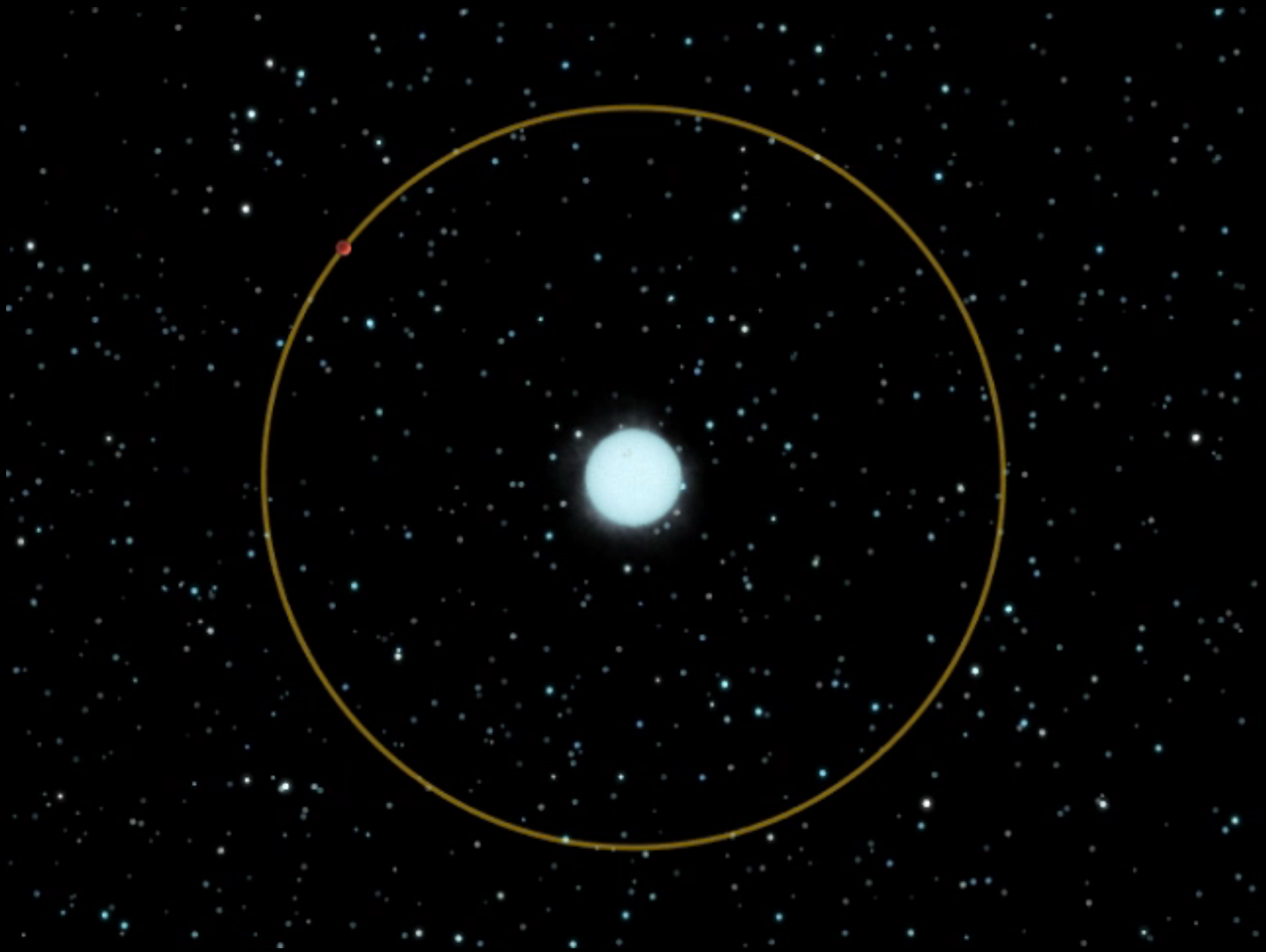
惑星大気成分の初検出 (2001年): トランジット惑星 HD209458b +ハッブル望遠鏡



http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/

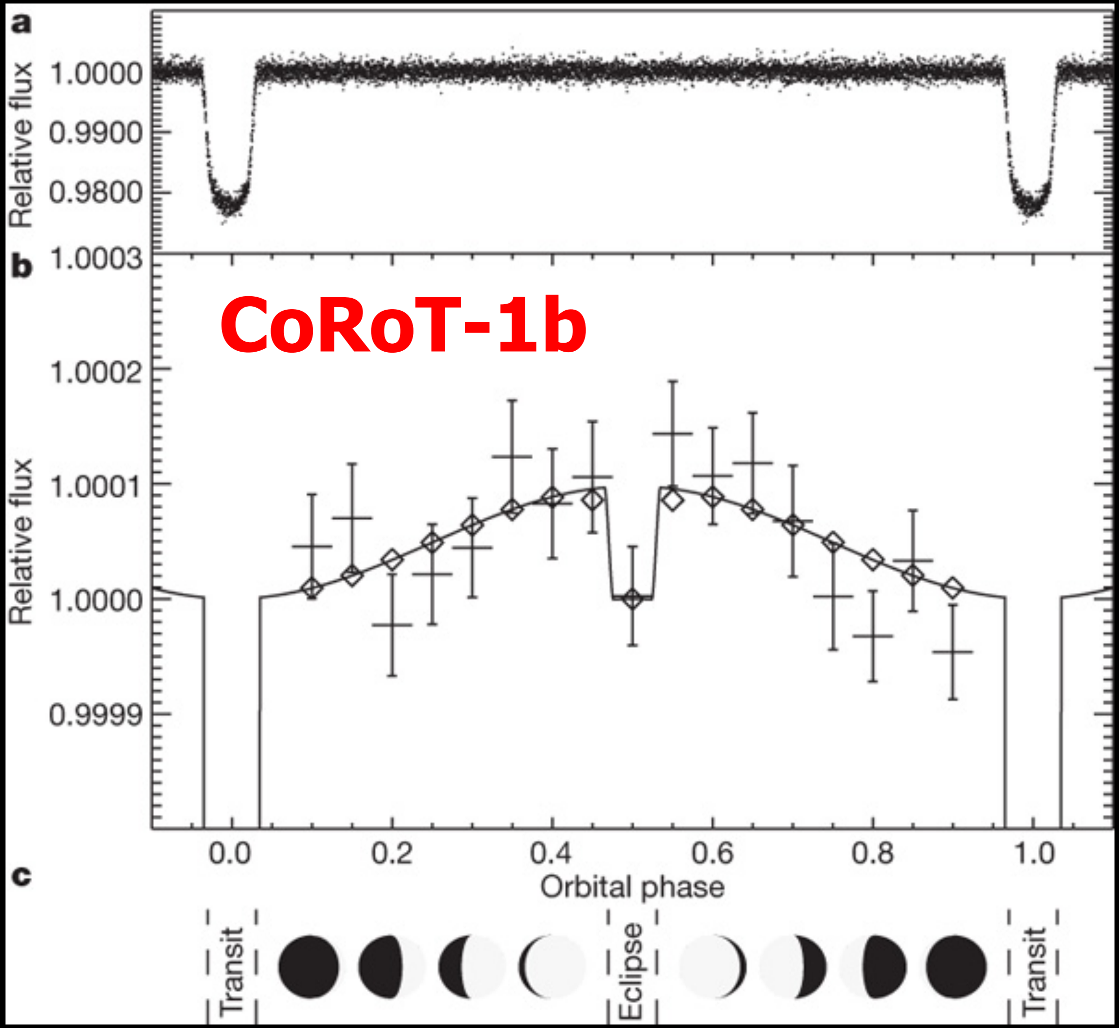
- 2000年　系外惑星HD209458bの食を検出
  - 惑星の大きさがわかる
  - 質量の観測データとあわせて密度を0.4g/ccと推定
  - 巨大ガス惑星であることの確認
- 2001年11月　この惑星大気中にナトリウムを発見 (Charbonneau et al. 2001)

惑星からの赤外線輻射検出（スピッツァー衛星）
Secondary eclipse of HD209458b



http://www.spitzer.caltech.edu/Media/releases/ssc2005-09/release.shtml

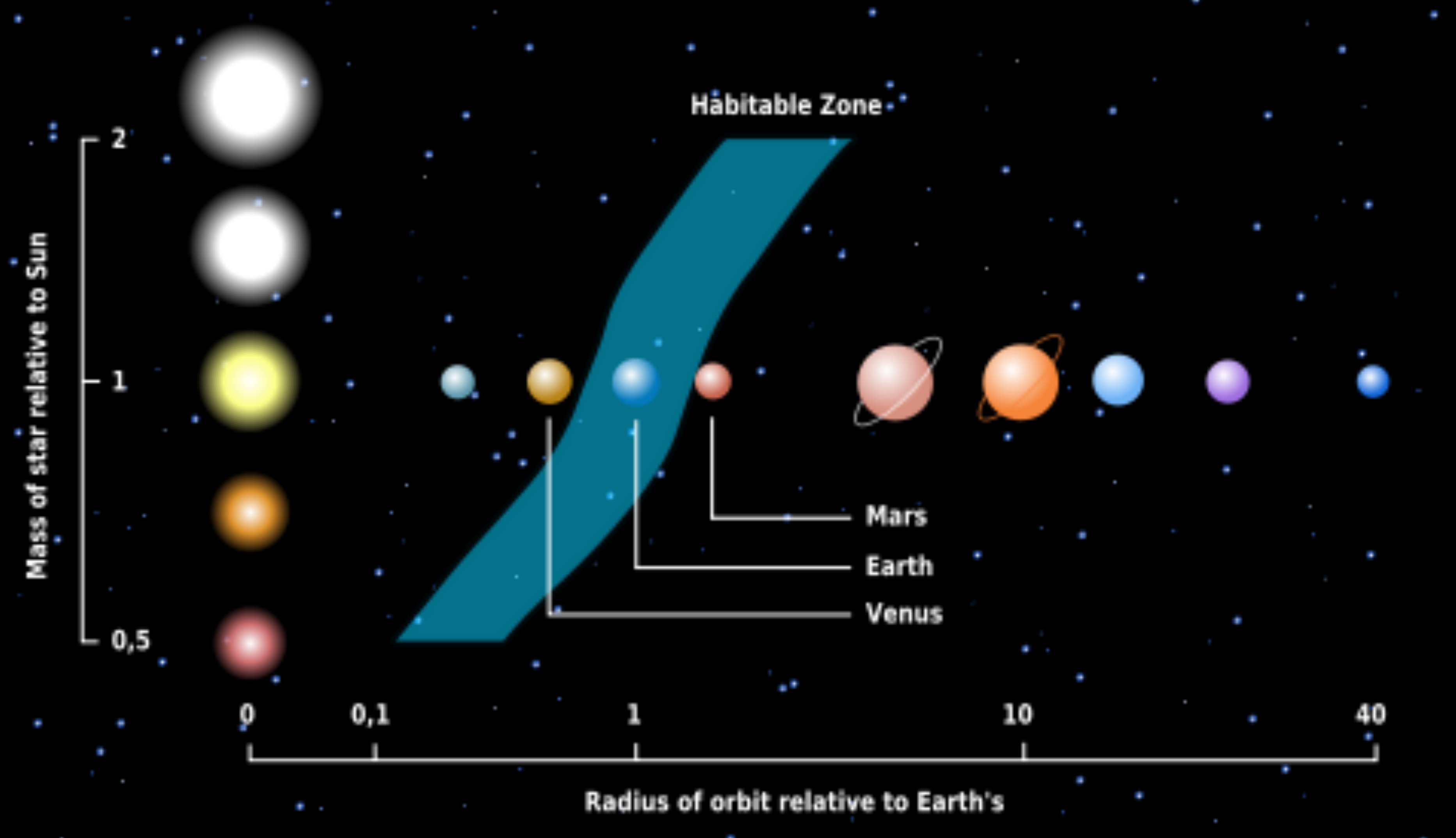
惑星の反射光（可視）の検出



- CoRoT-1b: トランジット惑星(周期＝1.5日)
- Convection, Rotation and planetary Transit (2006年12月27日打ち上げ)
- 55日間測光モニター
  - 反射光（7100Å）検出
  - 表面温度　2430K
  - 0.02<albedo<0.2

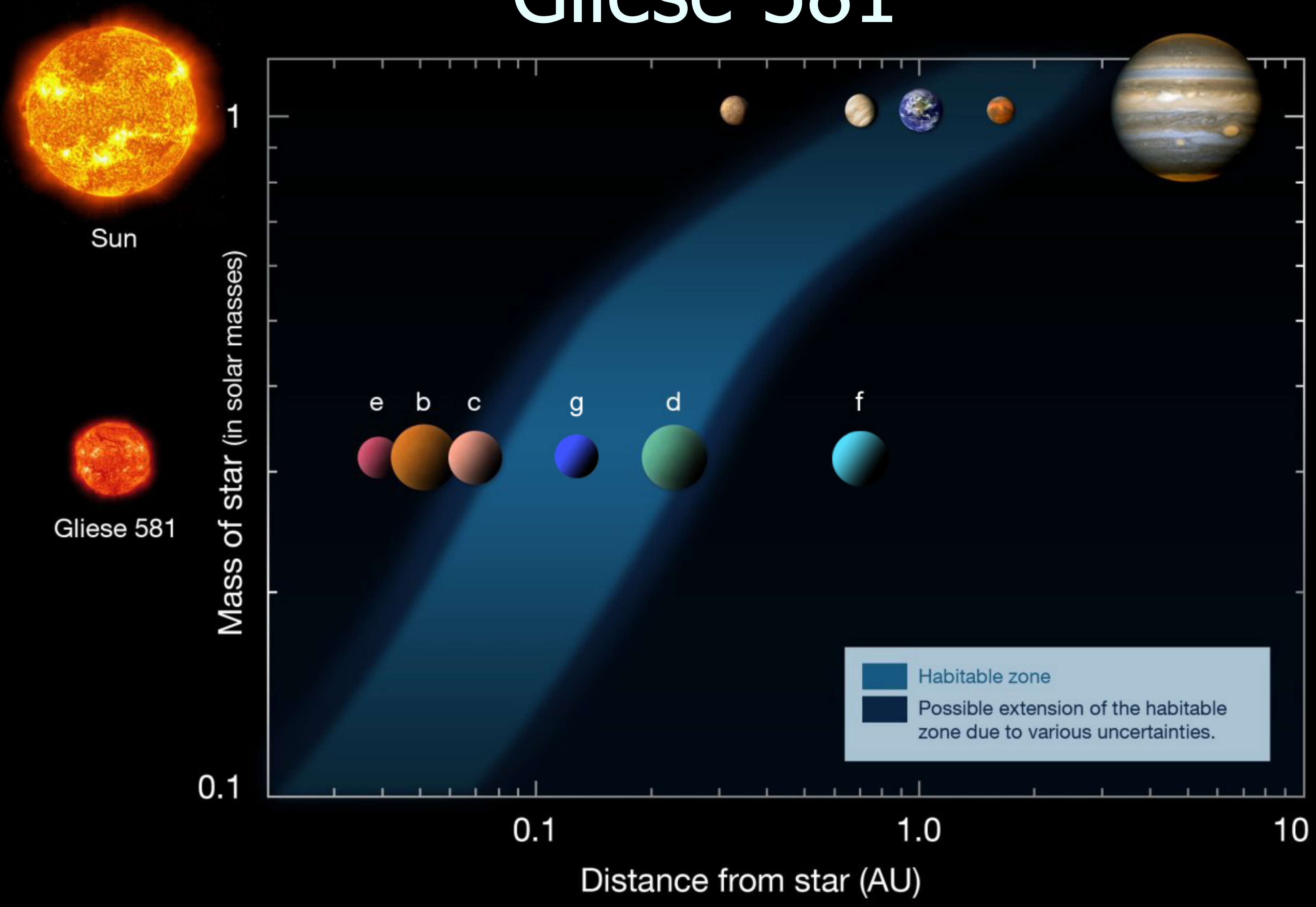
Snellen, de Mooji & Albrecht: Nature 459(2009)543

ハビタブルゾーン



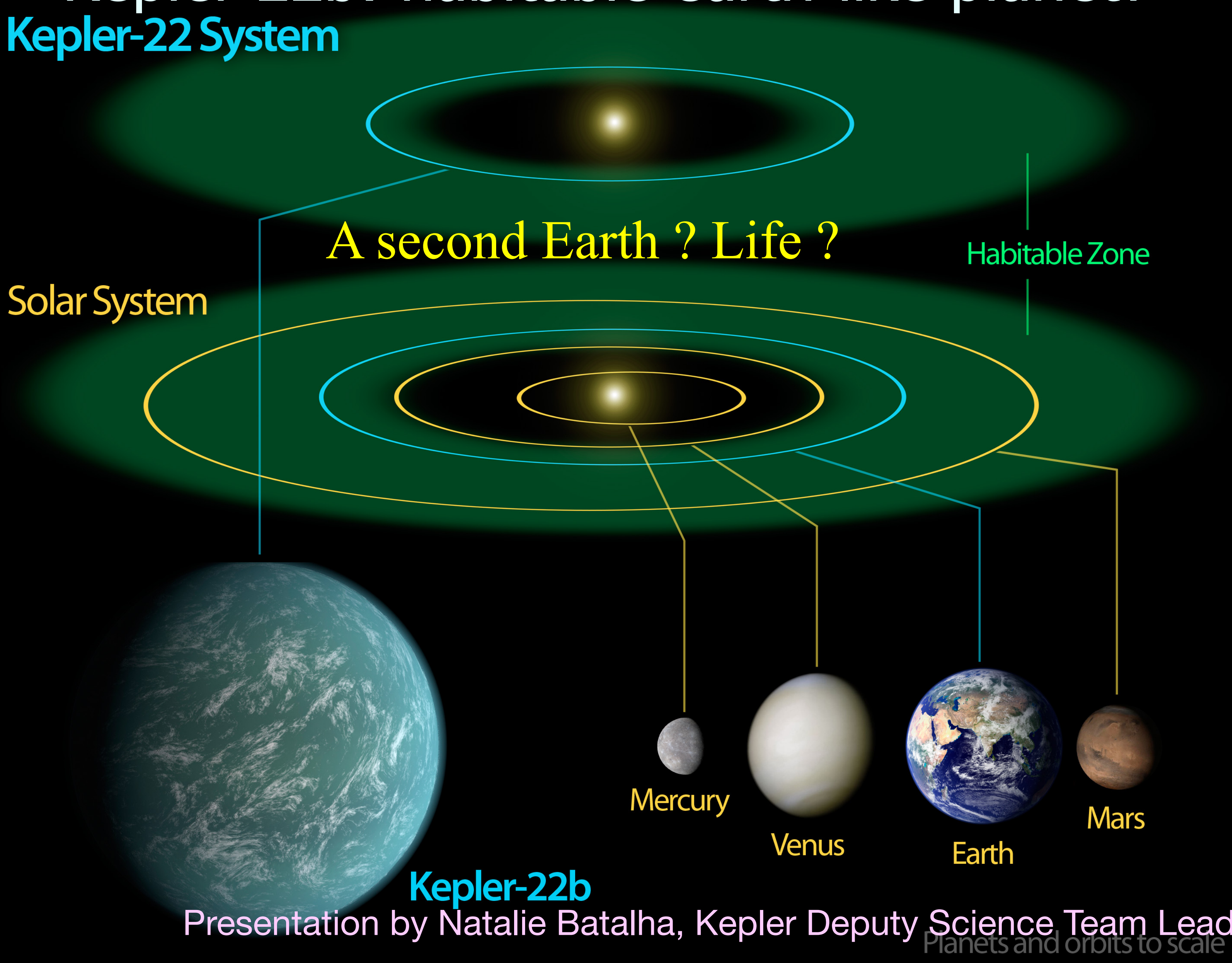
Habitable Zone
Mass of star relative to Sun
2
1
0,5
Mars
Earth
Venus
0
0,1
1
10
40
Radius of orbit relative to Earth's

Gliese 581



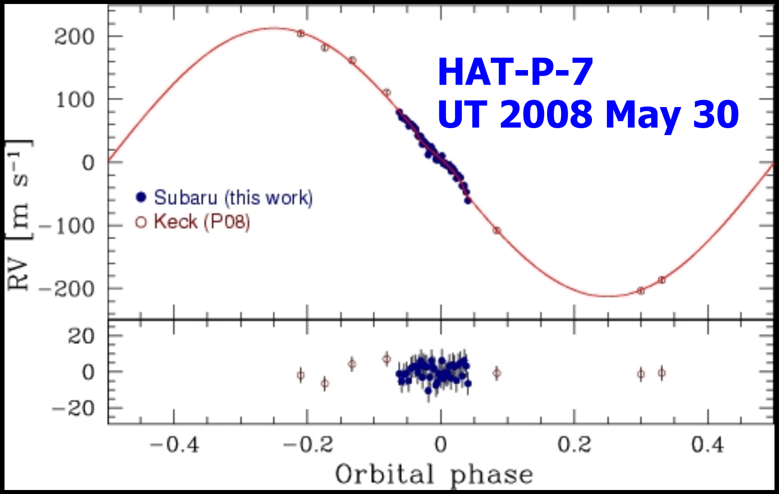
Sun
Gliese 581
1
0.1
Mass of star (in solar masses)
e
b
c
g
d
f
Habitable zone
Possible extension of the habitable zone due to various uncertainties.
0.1
1.0
10
Distance from star (AU)

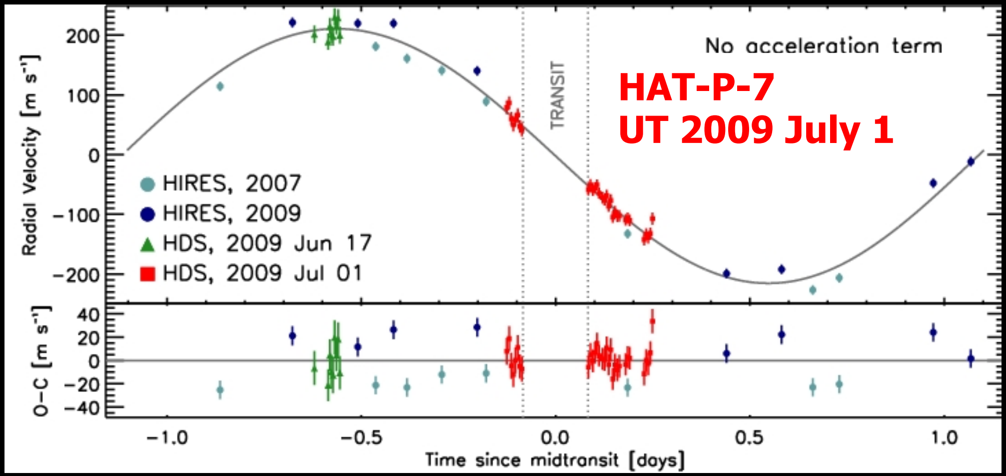
Kepler 22b: habitable earth-like planet?

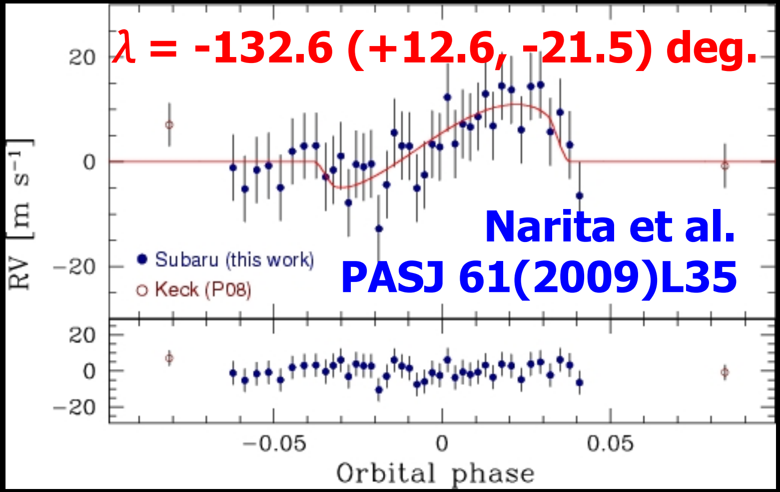


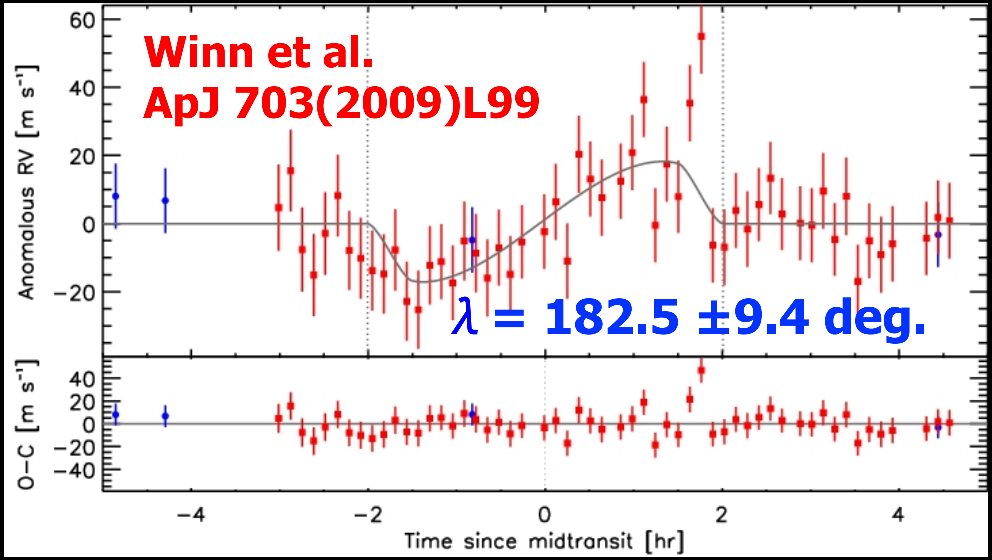
Presentation by Natalie Batalha, Kepler Deputy Science Team Lead

逆行(?)系外惑星の発見



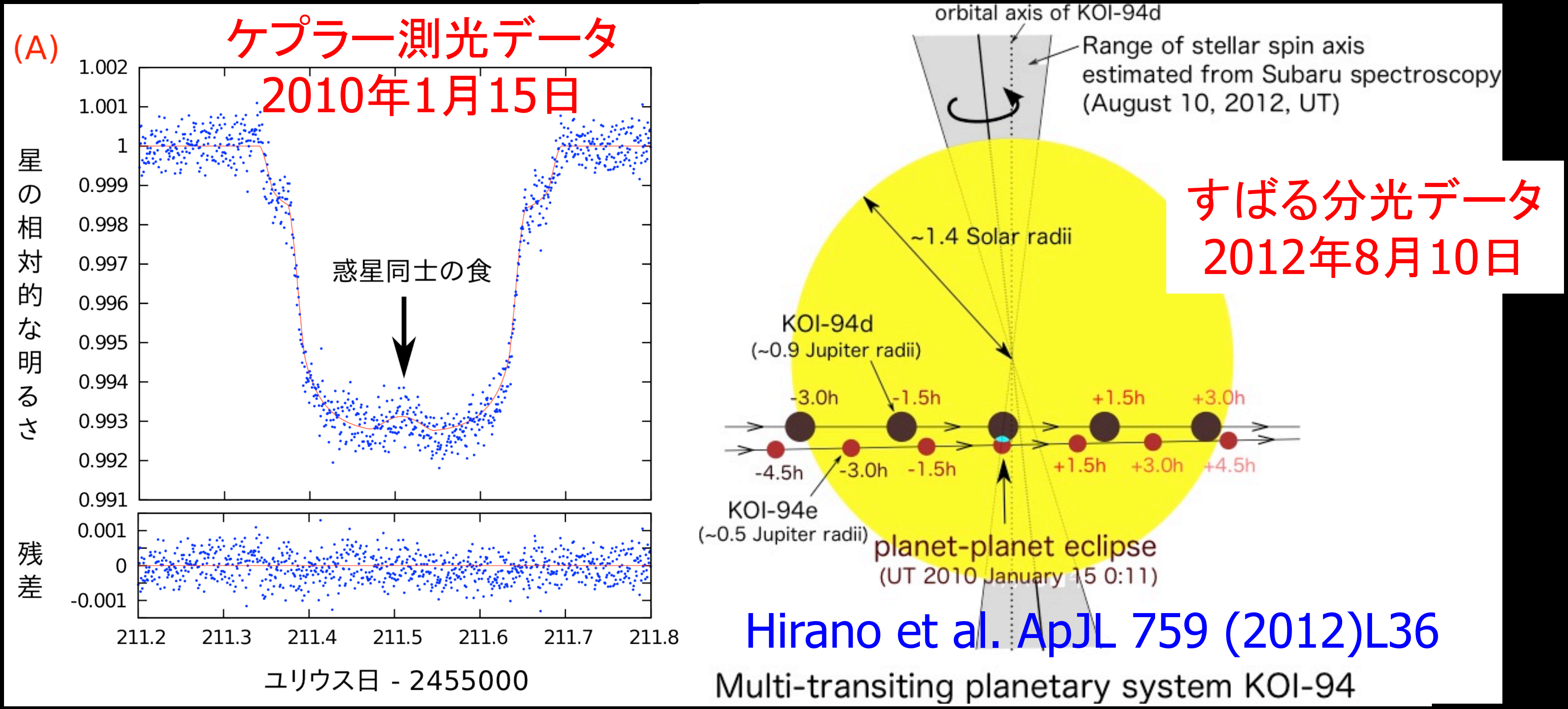






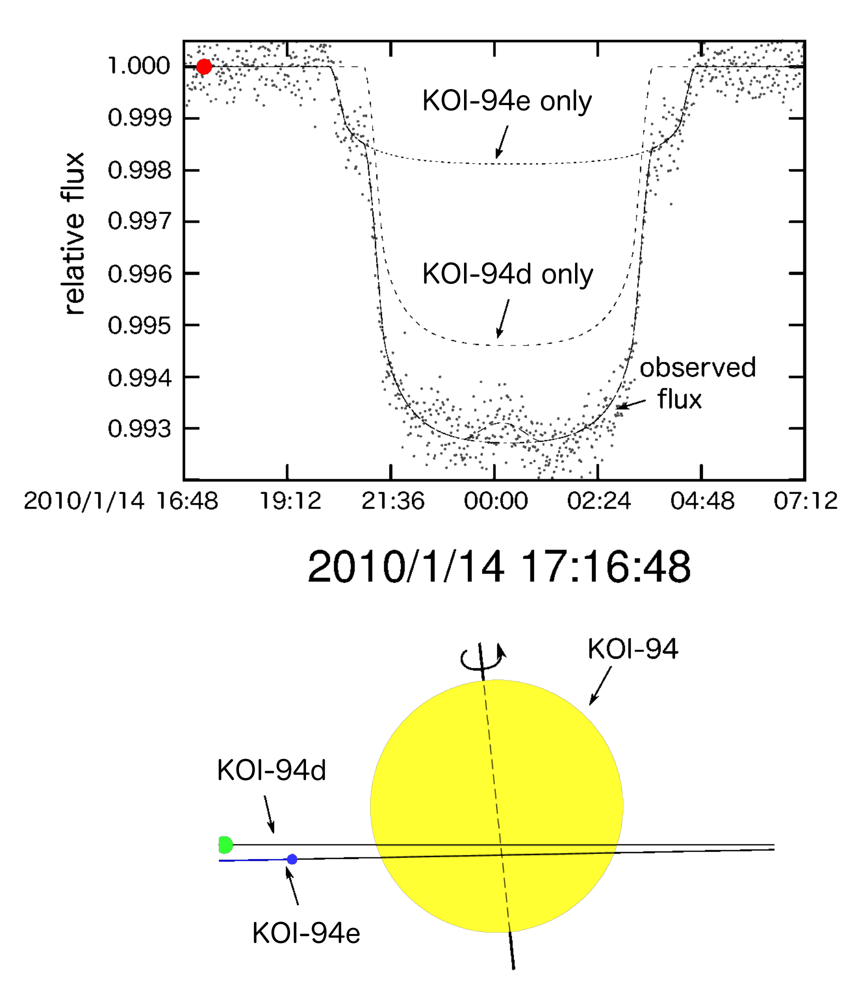
- ともにすばる望遠鏡の成果
- 起源は謎、惑星形成・進化モデルに大きなインパクト

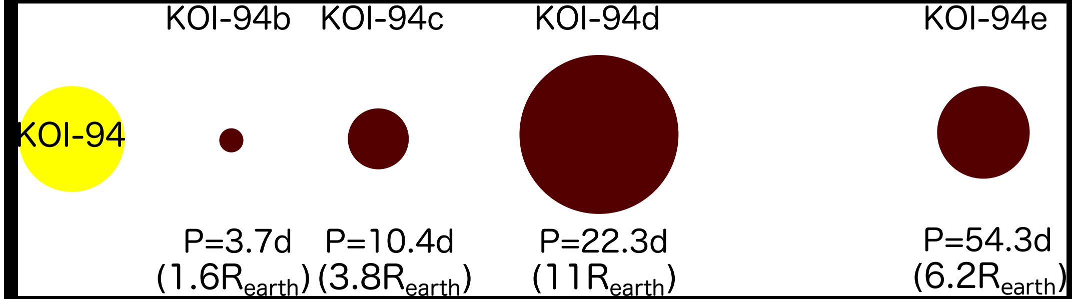
太陽系外4重惑星系の惑星食の発見



- 惑星食の確率は極めて低いため、これが最初で最後の例かも？
- 地球からみて金星と水星が同時に太陽面を通過する（トランジット）のは、西暦69163年7月26日と西暦224508年3月27日だけらしい。しかもこれは単なる同時トランジットで、惑星食ではない。

多重トランジット惑星系KOI-94:
惑星食の初検出





- すばる観測前にケプラー衛星測光データを確認中、初めての惑星食を偶然発見
- すばる望遠鏡のロシター効果観測で、主星自転軸と惑星公転軸がほぼ揃っている事を発見
- 従来の惑星移動モデルでは説明不可！

Hirano et al. ApJL 759 (2012)L36

The Astrophysical Journal, 622:1118–1135, 2005 April 1
© 2005. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

Ohta, Taruya & Suto: ApJ 622(2005)1118

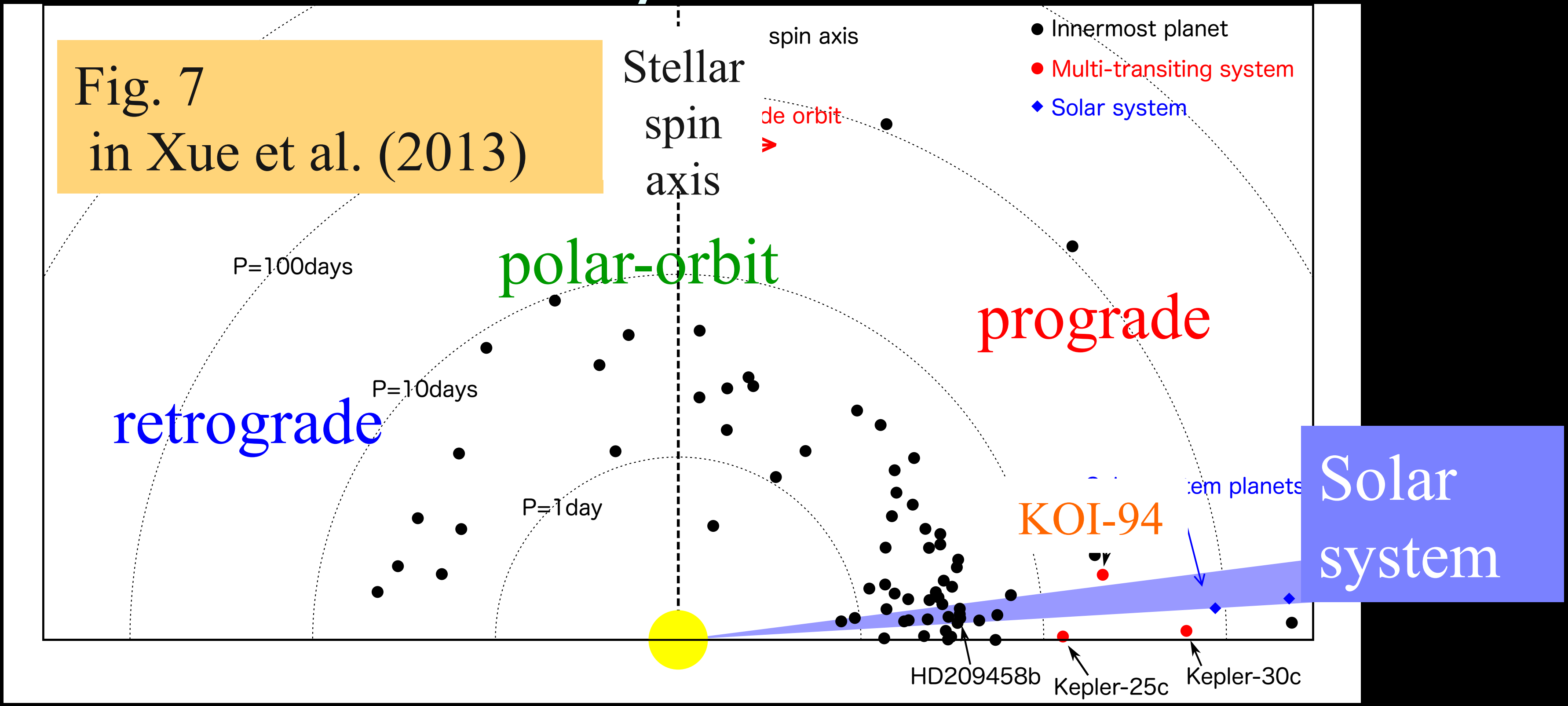
THE ROSSITER-McLAUGHLIN EFFECT AND ANALYTIC RADIAL VELOCITY CURVES FOR TRANSITING EXTRASOLAR PLANETARY SYSTEMS

Yasuhiro Ohta, Atsushi Taruya,[1] and Yasushi Suto[1]

- In the final section of the paper, I wrote
  - Although it is unlikely, we may even speculate that a future RM observation may discover an extrasolar planetary system in which the stellar spin and the planetary orbital axes are antiparallel or orthogonal.
  - While it is premature to discuss such extreme possibilities at this point, the observational exploration of transiting systems using the RM effect is one of the most important probes for a better understanding of the origin of extrasolar planets.

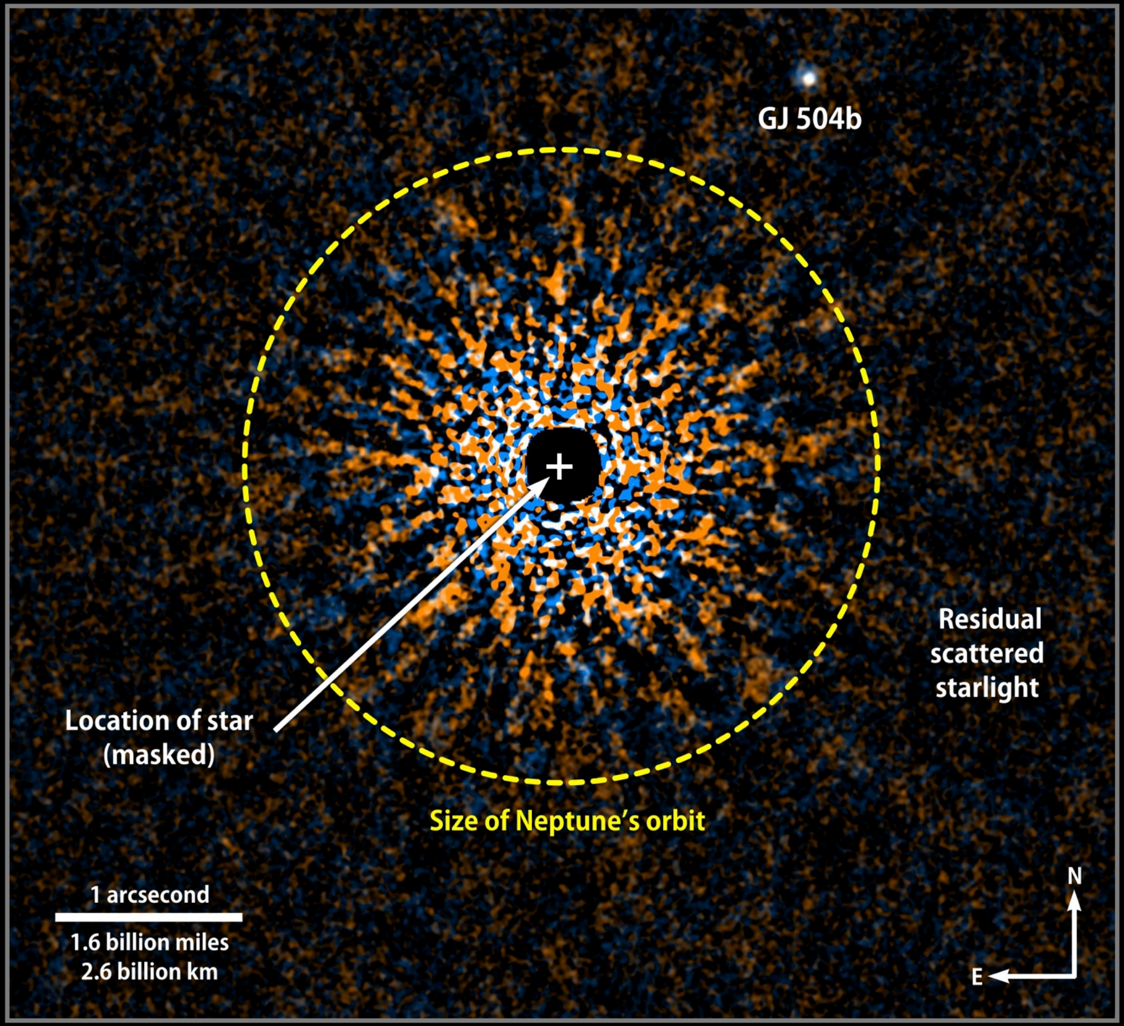
I was totally wrong !

spin-orbit misalignment turned out to be fairly common



- We were able to see a bit more of the world
  - **Unsolved problems**: formation, evolution, and migration mechanism of planets

すばる望遠鏡によるガス惑星GJ504bの直接撮像



- 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(10213)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

系外惑星：今後の展望

- 巨大ガス惑星発見の時代（1995）
- 惑星大気の発見（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発見*
- *系外惑星リング、衛星の発見*
- *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*
- *地球外生命の発見*

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？

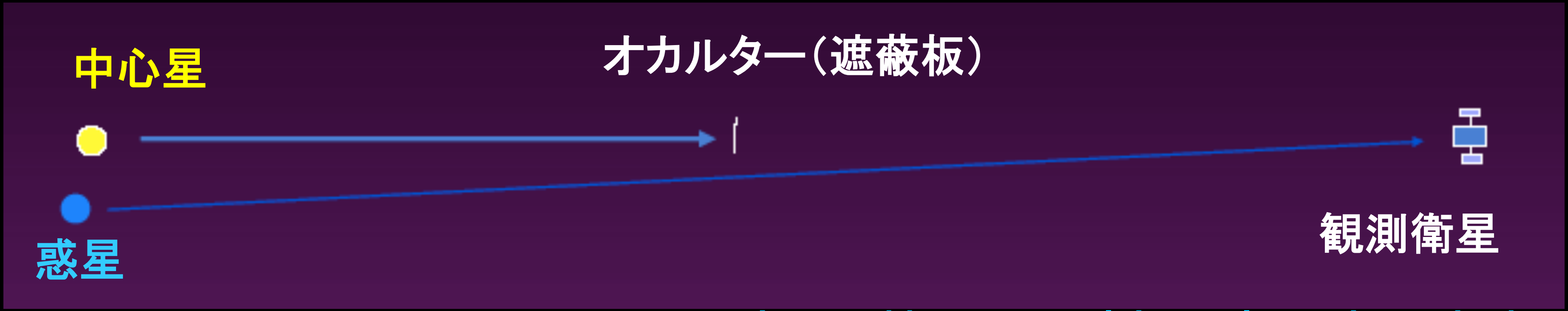
ブレイクスルー

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*

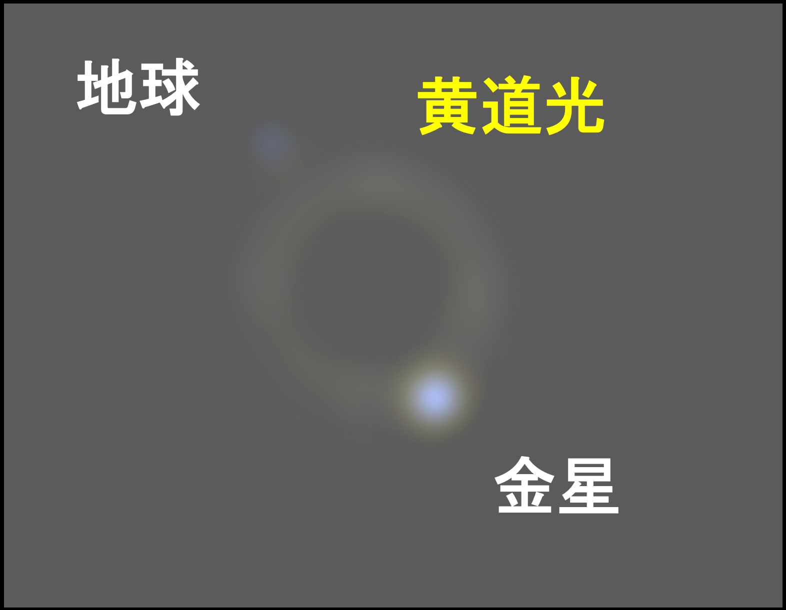


http://newworlds.colorado.edu/

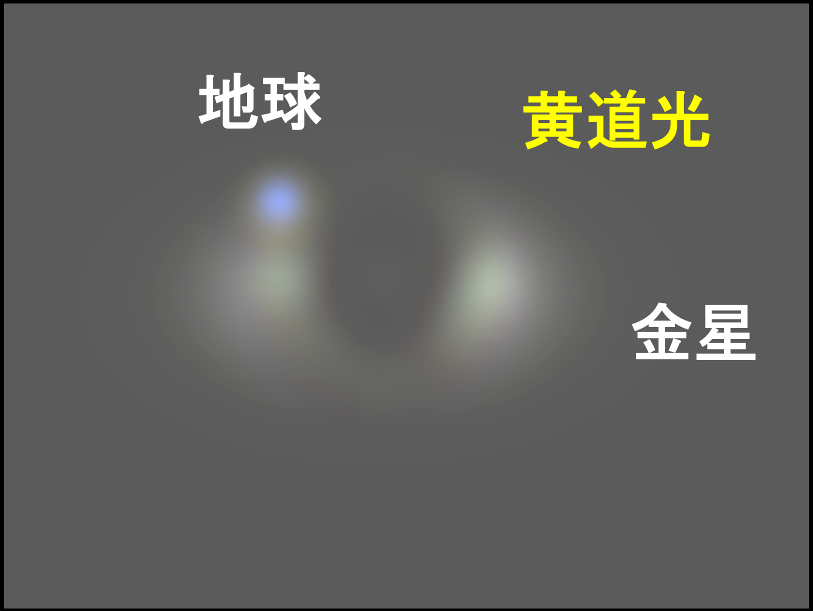
- 口径(2−4)mの可視光望遠鏡@L2点
  - 7万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおく
  - 望遠鏡にはその星の周りの惑星からに光のみが届く
  - 惑星の分光・測光モニターからのバイオマーカー検出
  - コロラド大学を中心とした米国と英国の共同計画
  - 同様の計画がプリンストン大学でも検討中（O_3）

New Worlds Mission: simulated image

軌道面傾斜角=0°



軌道面傾斜角=60°



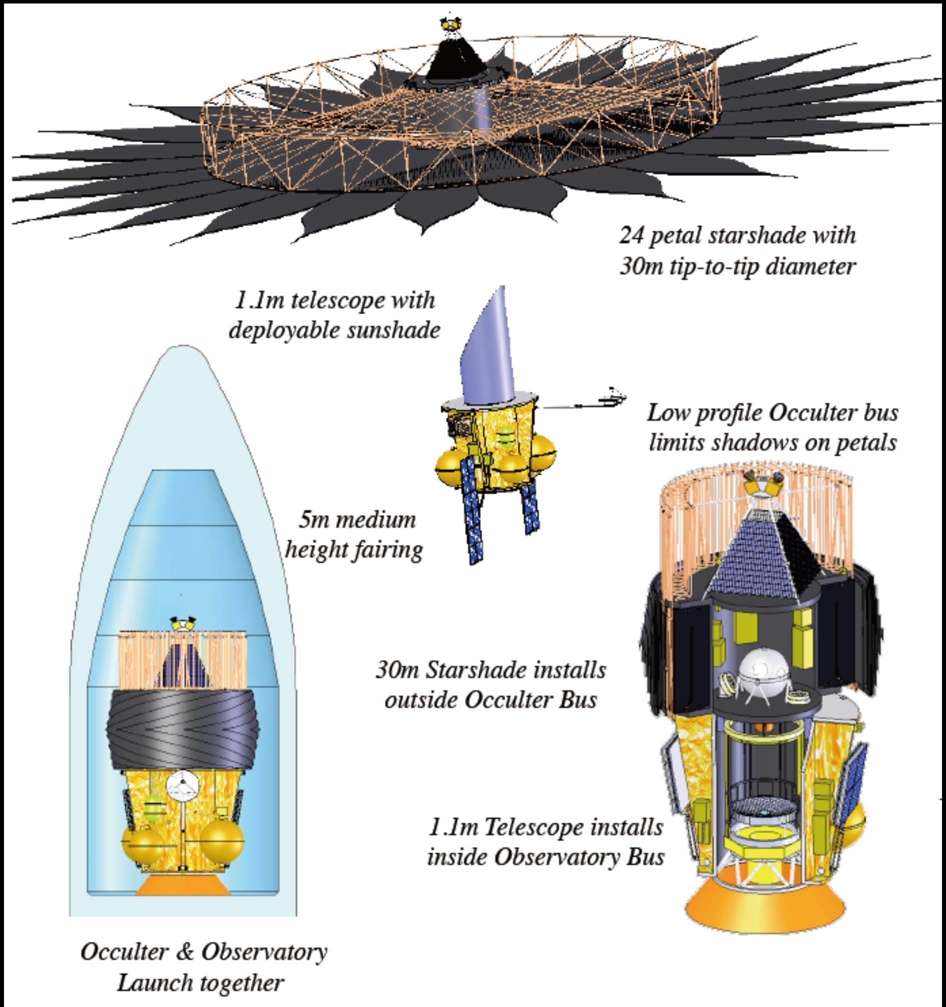
- 我々の太陽系の内惑星を(4m宇宙望遠鏡＋オカルター)を用いて30光年先から観測した場合に予想される画像
- このようなミッションが実現した場合、一体何がどこまで分かるのだろうか?

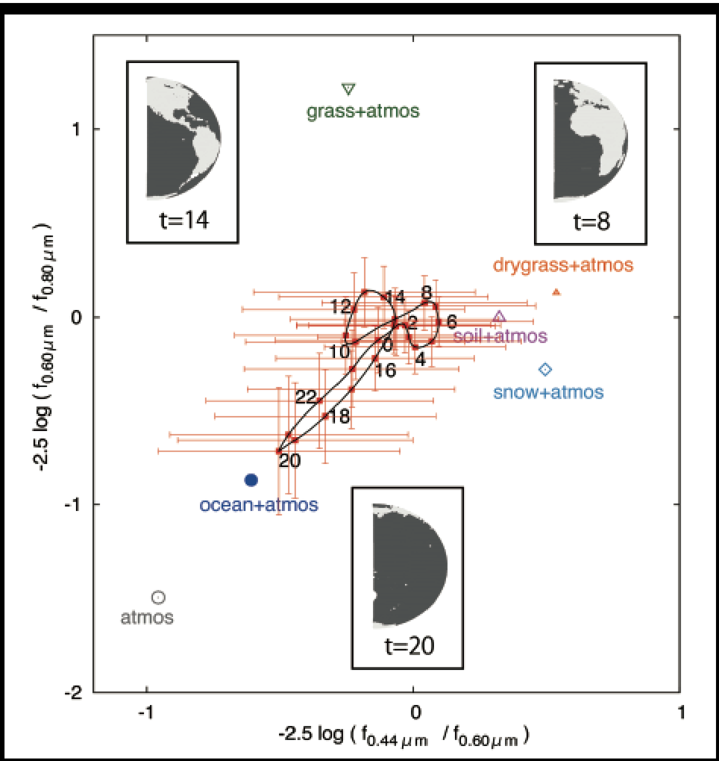
http://newworlds.colorado.edu/

O_3: The Occulting Ozone Observatory

O_3: The Occulting Ozone Observatory

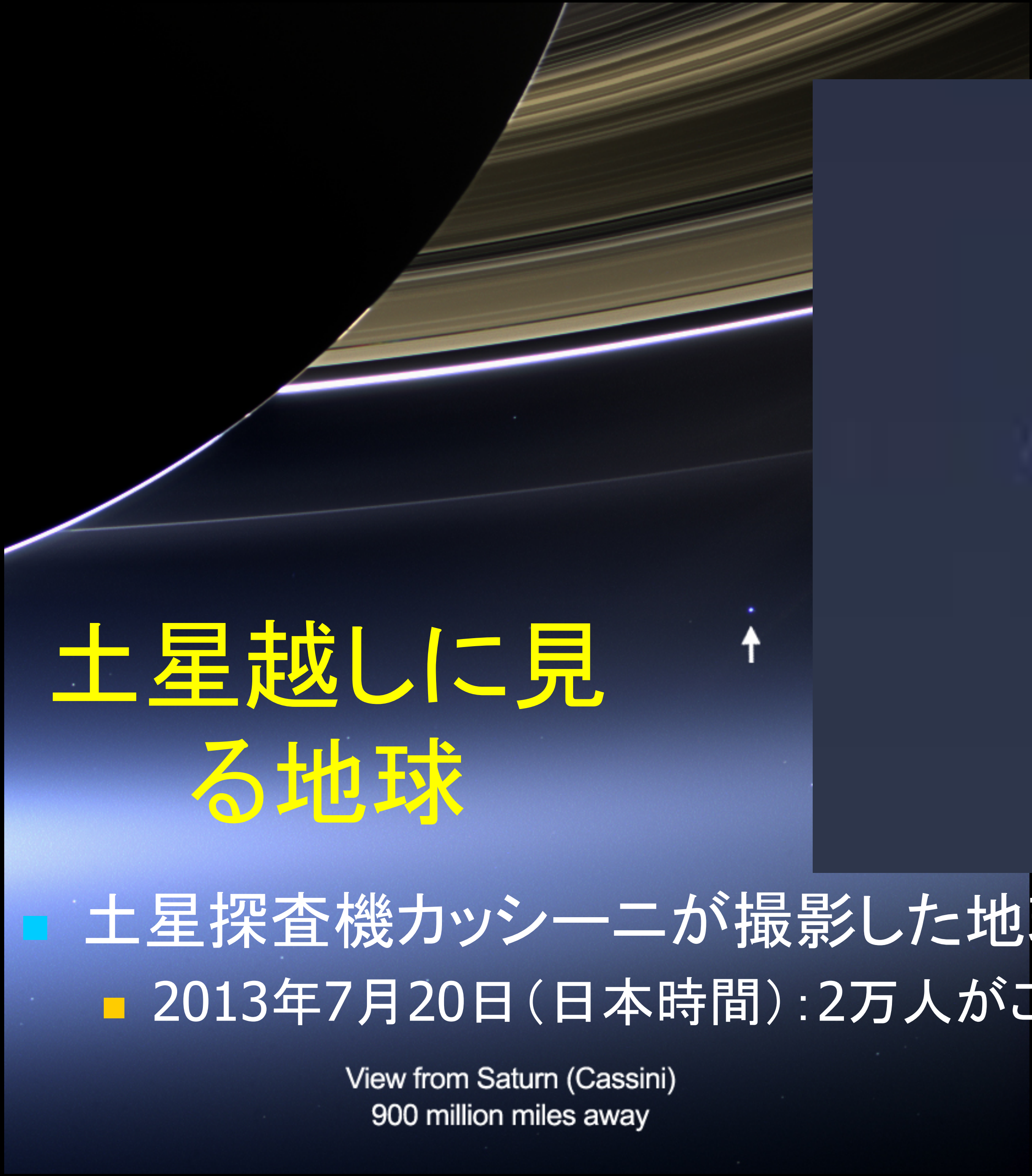
N. Jeremy Kasdin[1], David N. Spergel[1], P. Doug Lisman[2], Stuart B. Shaklan[2], Dmitry Savransky[1], Eric Cady[1], Edwin L. Turner[1], Robert Vanderbei[1], Mark W. Thomson[2], Stefan R. Martin[2], K. Balasubramamian[2], Steven H. Pravdo[2], Yuka Fujii[3], Yasushi Suto[3]
[1]Princeton University, [2]Jet Propulsion Laboratory, [3]University of Tokyo





- 今回紹介する我々の結果はO_3の観測目標設定に組みこまれている

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

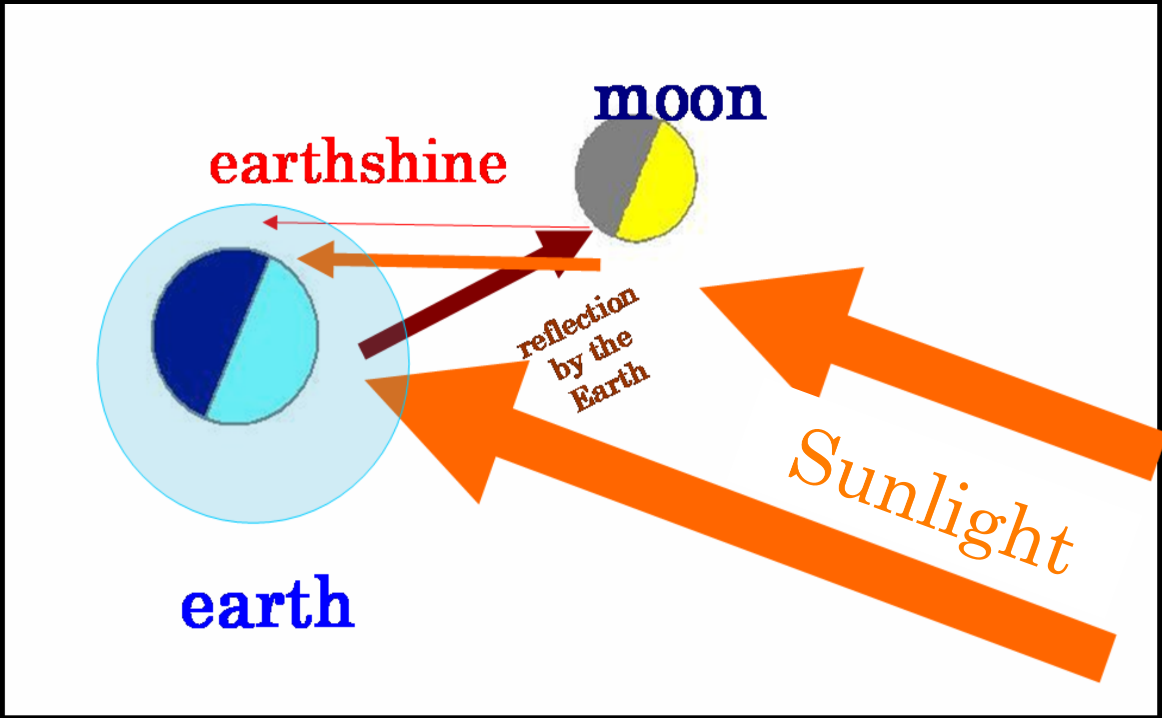
バイオマーカー

バイオマーカー

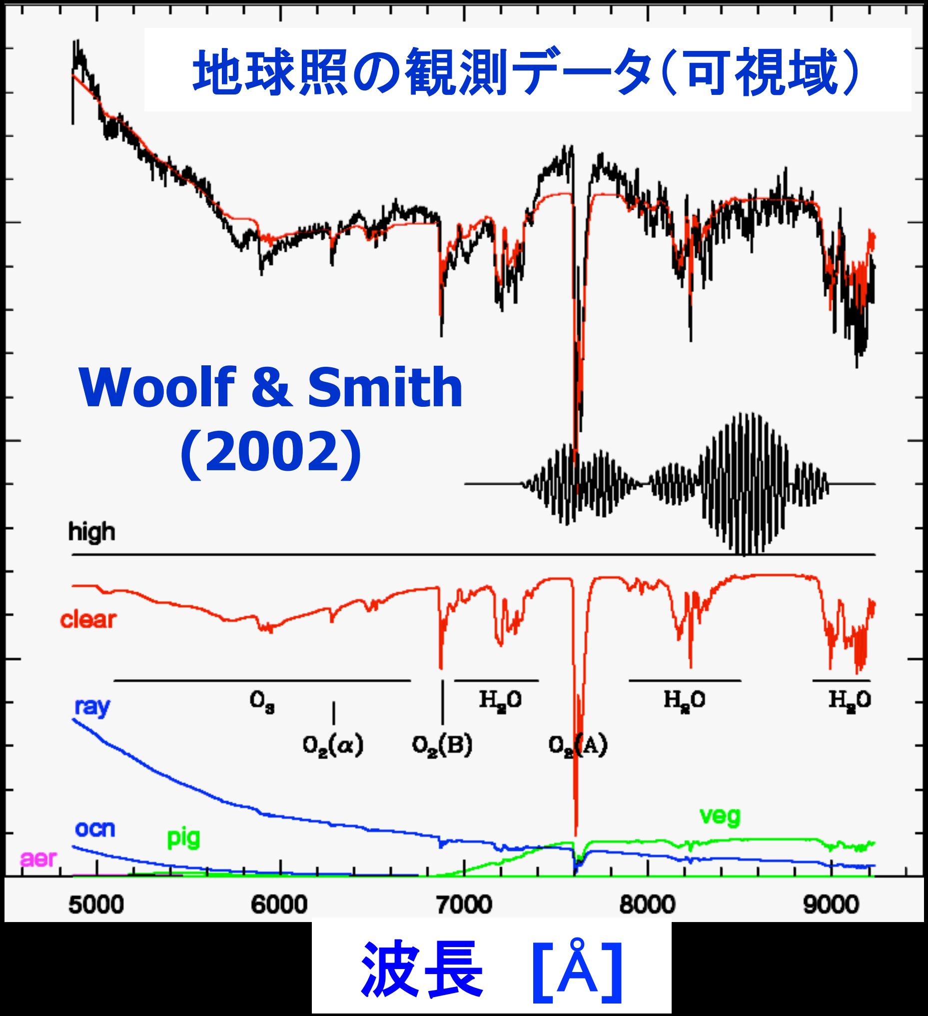
- 何をもってバイオマーカーとするのかは曖昧
  - 生物由来と考えられる大気成分（酸素、オゾン、メタン）の分光観測
  - 植物のレッドエッジの測光観測
  - 知的生命体からの信号の電波観測
  - 地球外での生命を生み出す環境とそれに対応した生物の多様性をどこまで認めるか
- いずれにせよ、検出は天文学観測しかない
  - 天文学で検出可能な限界は何か
  - どのような検出器・望遠鏡を作るべきか

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）

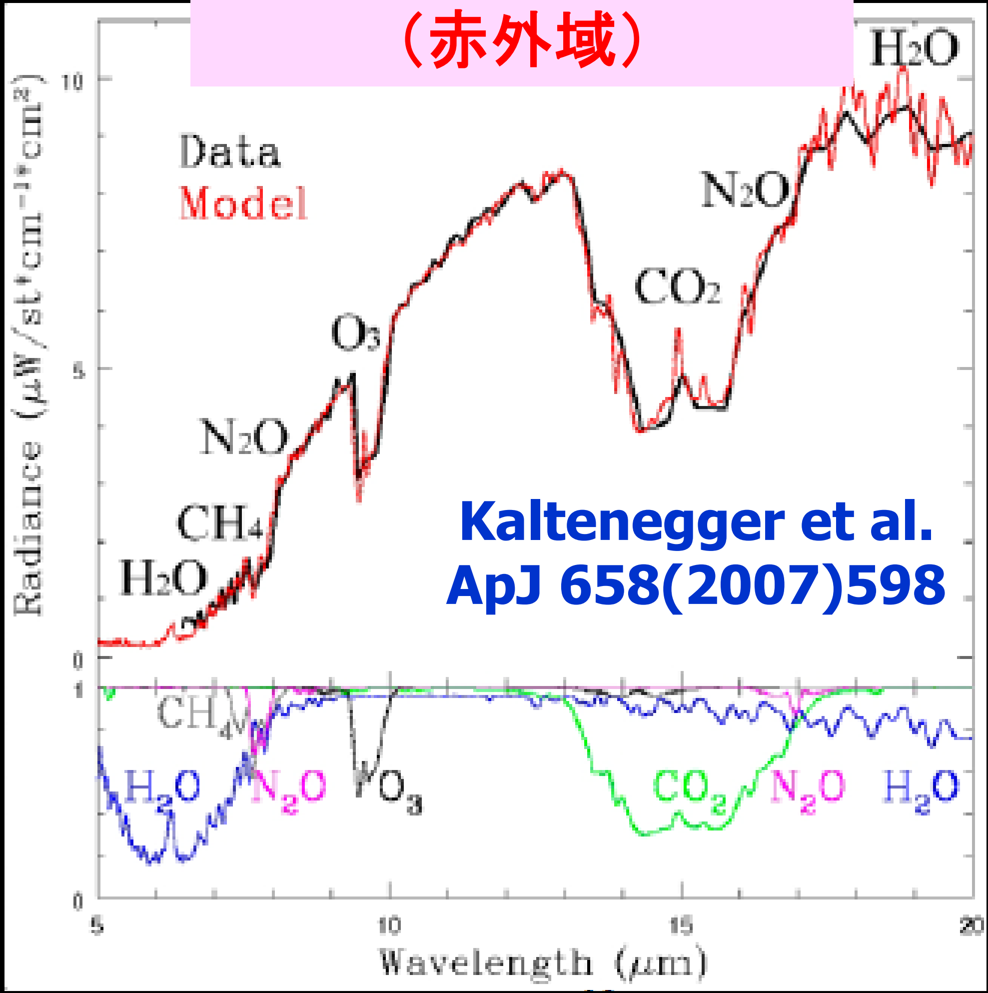


- 酸素
  - Aバンド@0.76 μ m
  - Bバンド@0.69 μ m
- 水
  - 0.72, 0.82, 0.94 μ m
- オゾン
  - Chappuis バンド @(0.5-0.7) μ m
  - Hartley バンド @(0.2-0.3) μ m

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）



Kaltenegger et al.
ApJ 658(2007)598

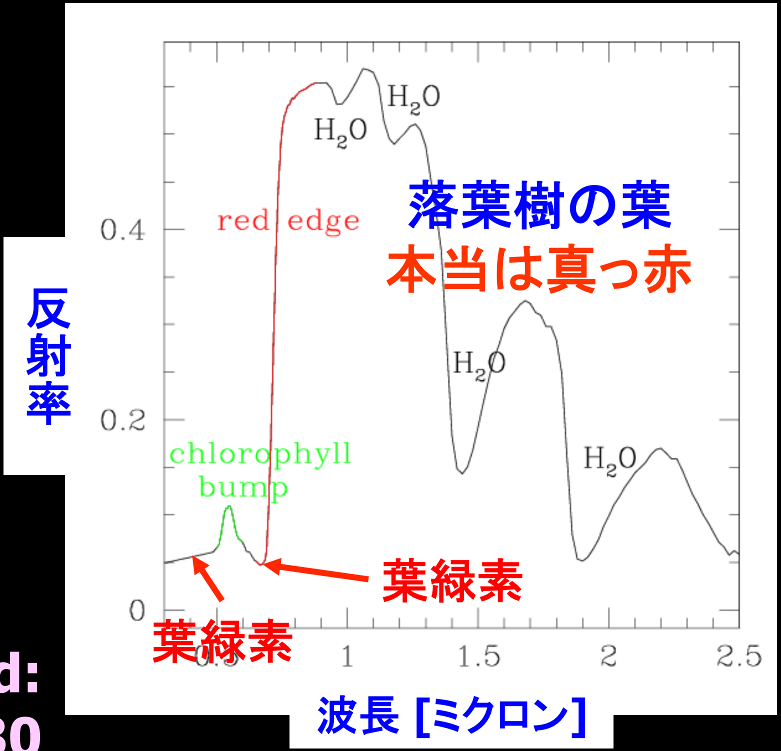
- オゾン：@9.6μm
  - 仮に酸素が少量であっても検出可能なので、酸素の良いトレーサー
- 水：<8μm, >17μm
- メタン@7.7μm
  - 24億年以上前の地球にはまだほとんど酸素がなかったはず
  - メタン生成細菌由来？

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

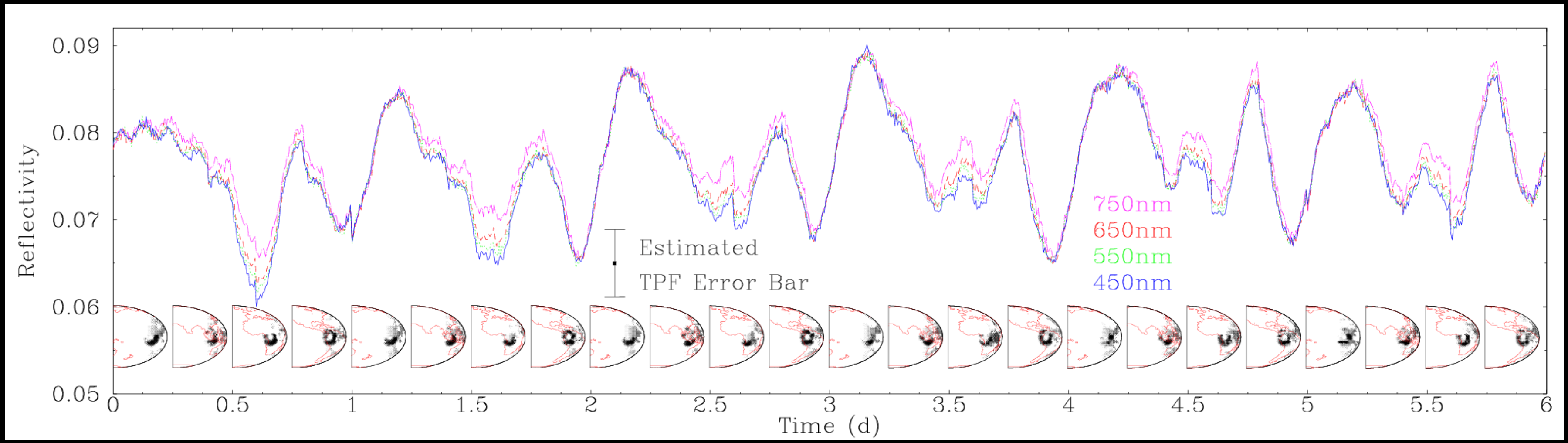
Extrasolar plants on extrasolar planets

- (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

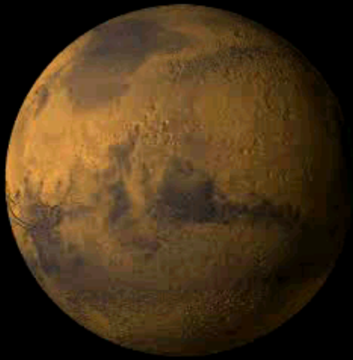
- 10%レベルの日変化は検出可能
  - 大陸、海洋、森林などの反射特性の違いを用いる
- 雲の存在が鍵
  - 太陽系外地球型惑星の天気予報の精度が本質的！

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

- *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

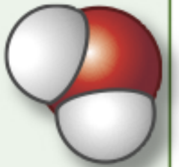
- 生物学と学際的な協力が、天文学にとっていかに大切かを示す具体例なので詳しく紹介
- 私は専門家ではないので誤解している可能性が高いのであらかじめ注意してほしい

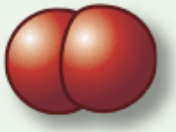
地球上での光合成の歴史

- 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（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。

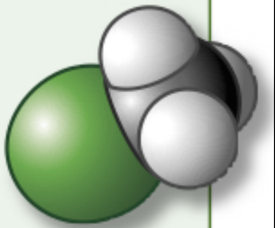




オゾン（O_3）　地球の成層圏では，太陽光のエネルギーで酸素分子が分解され，これが再結合することでオゾンが生じる。液体の水とともにオゾンの存在が確認できれば，生命の強力な証拠となる。酸素は可視光領域で検出可能だし，オゾンも赤外波長域で検出できる。従来の望遠鏡で容易に観測できる。

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

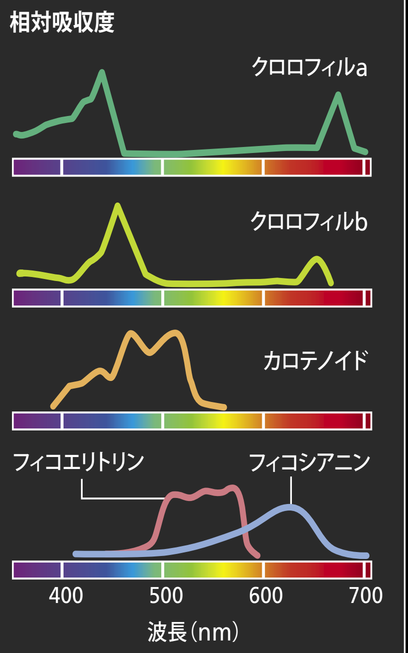
G型星

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ン色素を使用する。



恒星の光

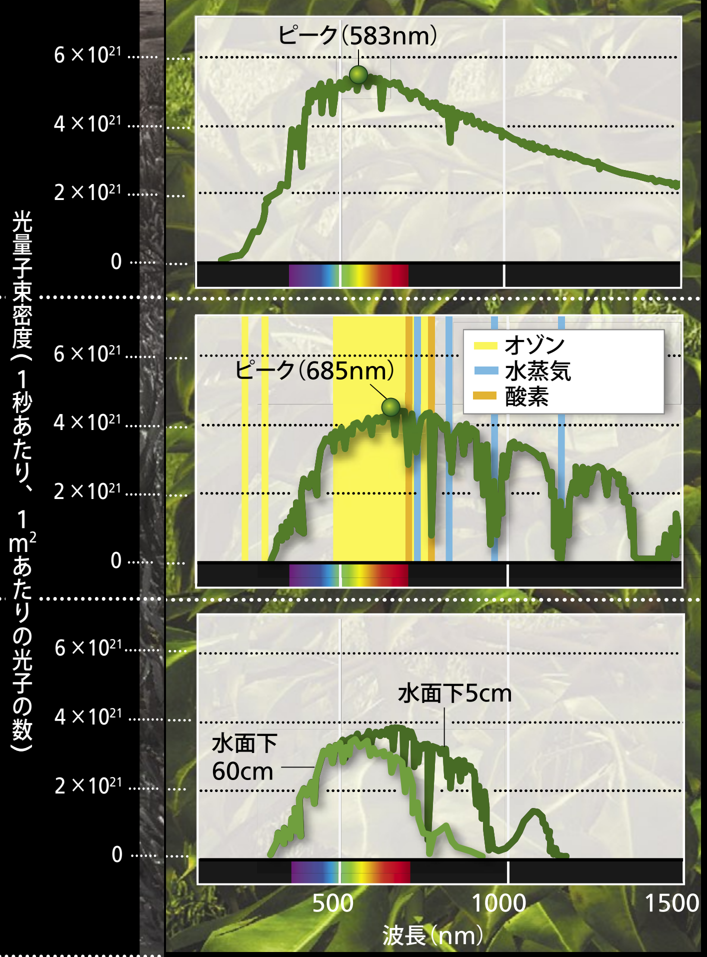
大気中に入射前の光は明瞭なスペクトルを示す。スペクトルの全体的な形状は，恒星の表面温度によって決まる。曲線上の切れ込みの一部は，恒星そのものの大気が吸収したことによる。

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

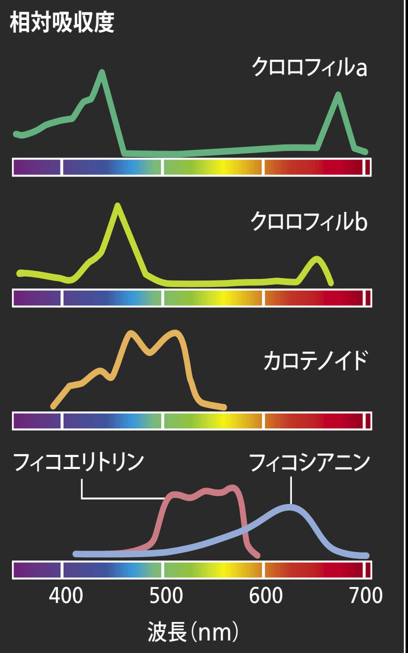
水は青色光は通すが，赤色光や赤外光を吸収する傾向がある。グラフは，水面下5cmおよび60cmにおける値を示す（成熟したM型星については酸素のほとんどない大気を想定した）。



惑星表面での光のスペクトル：古いM型星の場合

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

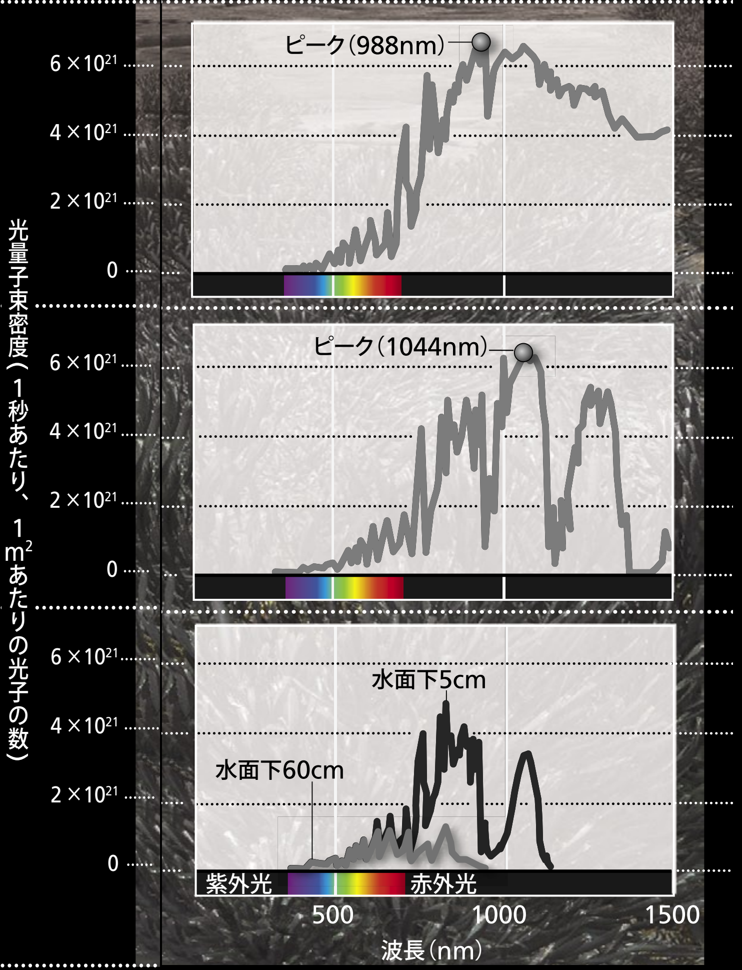
光合成色素は，さまざまな波長域の光を吸収する。地球上のすべての陸上植物は，クロロフィルaとクロロフィルb，カロテノイド系色素なしには生存できない。藻類やシアノバクテリアはフィコビリン色素を使用する。



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。

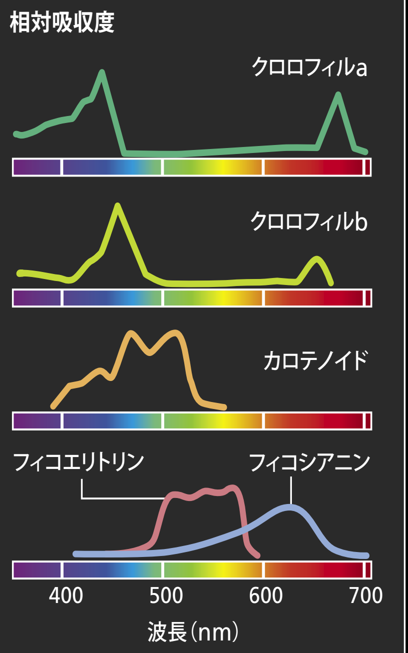
水面下
水は青色光は通すが，赤色光や赤外光を吸収する傾向がある。グラフは，水面下5cmおよび60cmにおける値を示す（成熟したM型星については酸素のほとんどない大気を想定した）。



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

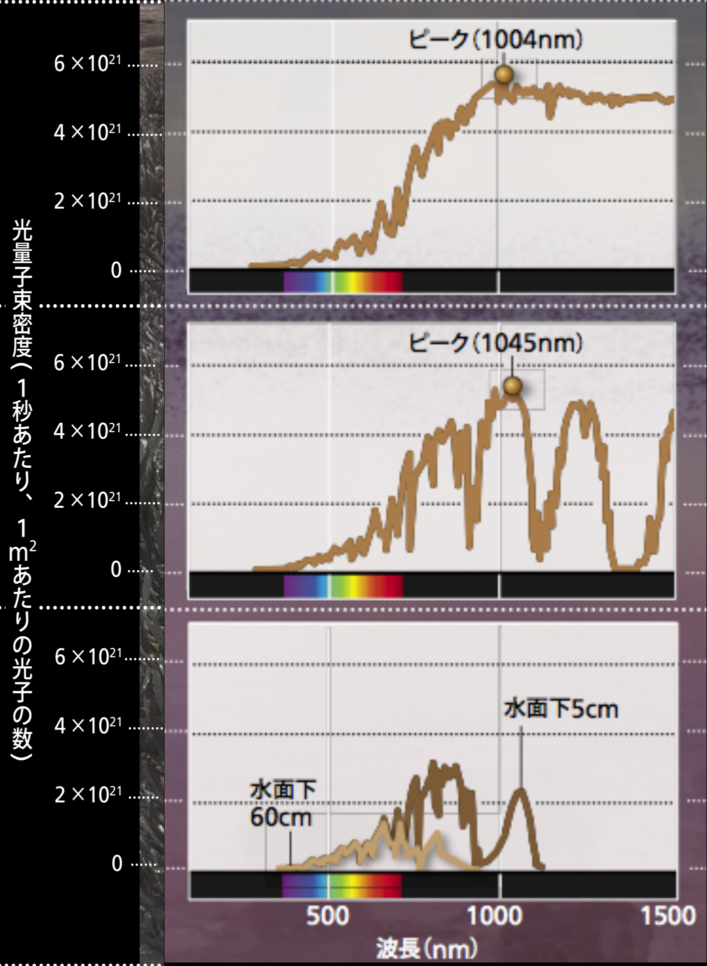
光合成色素は，さまざまな波長域の光を吸収する。地球上のすべての陸上植物は，クロロフィルaとクロロフィルb，カロテノイド系色素なしには生存できない。藻類やシアノバクテリアはフィコビリン色素を使用する。



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。

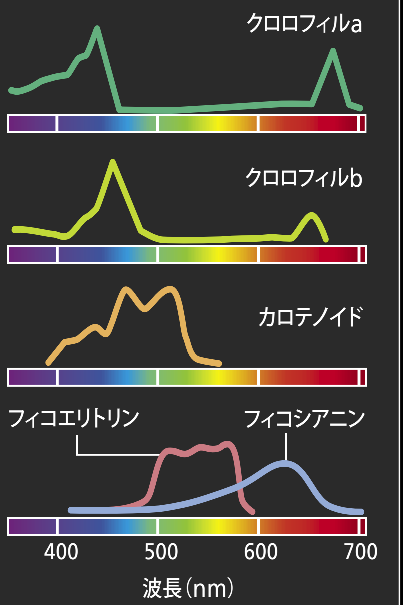
水面下
水は青色光は通すが，赤色光や赤外光を吸収する傾向がある。グラフは，水面下5cmおよび60cmにおける値を示す（成熟したM型星については酸素のほとんどない大気を想定した）。



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

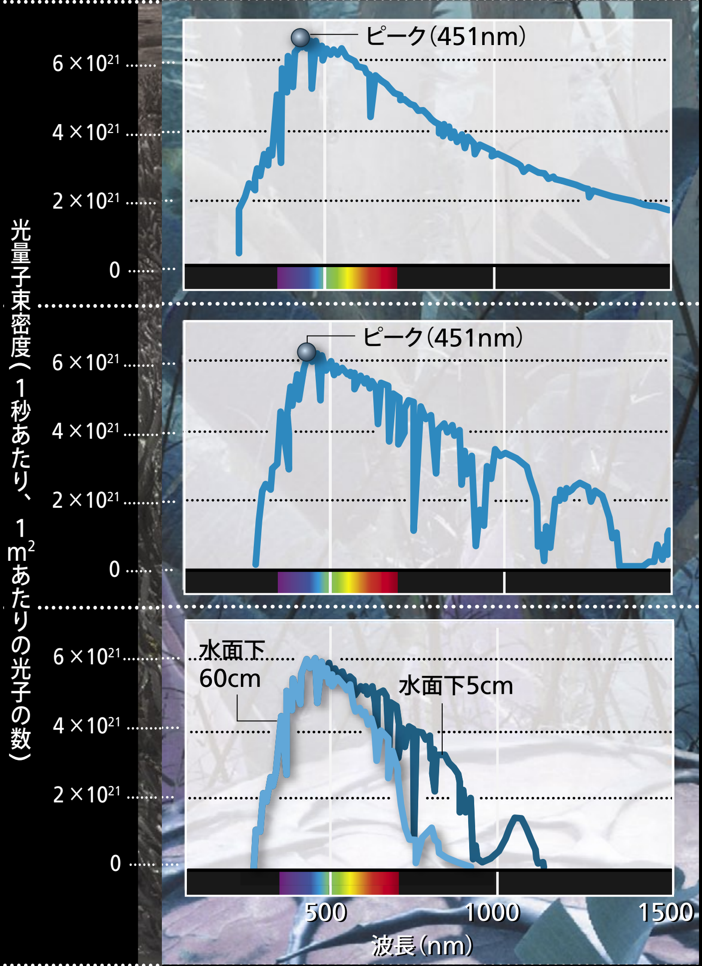
光合成色素は，さまざまな波長域の光を吸収する。地球上のすべての陸上植物は，クロロフィルaとクロロフィルb，カロテノイド系色素なしには生存できない。藻類やシアノバクテリアはフィコビリン色素を使用する。



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。

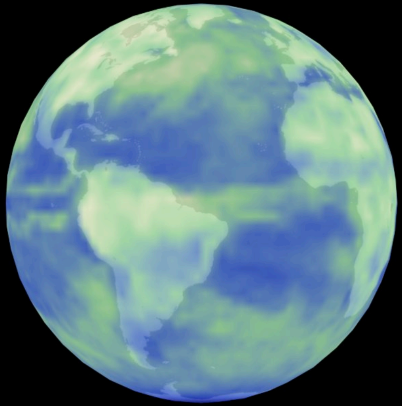
水面下
水は青色光は通すが，赤色光や赤外光を吸収する傾向がある。グラフは，水面下5cmおよび60cmにおける値を示す（成熟したM型星については酸素のほとんどない大気を想定した）。



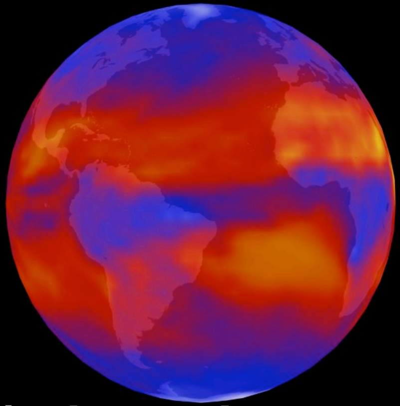
系外惑星上の植物の色？

我々の研究の紹介

反射光を用いて地球型惑星表面を知る



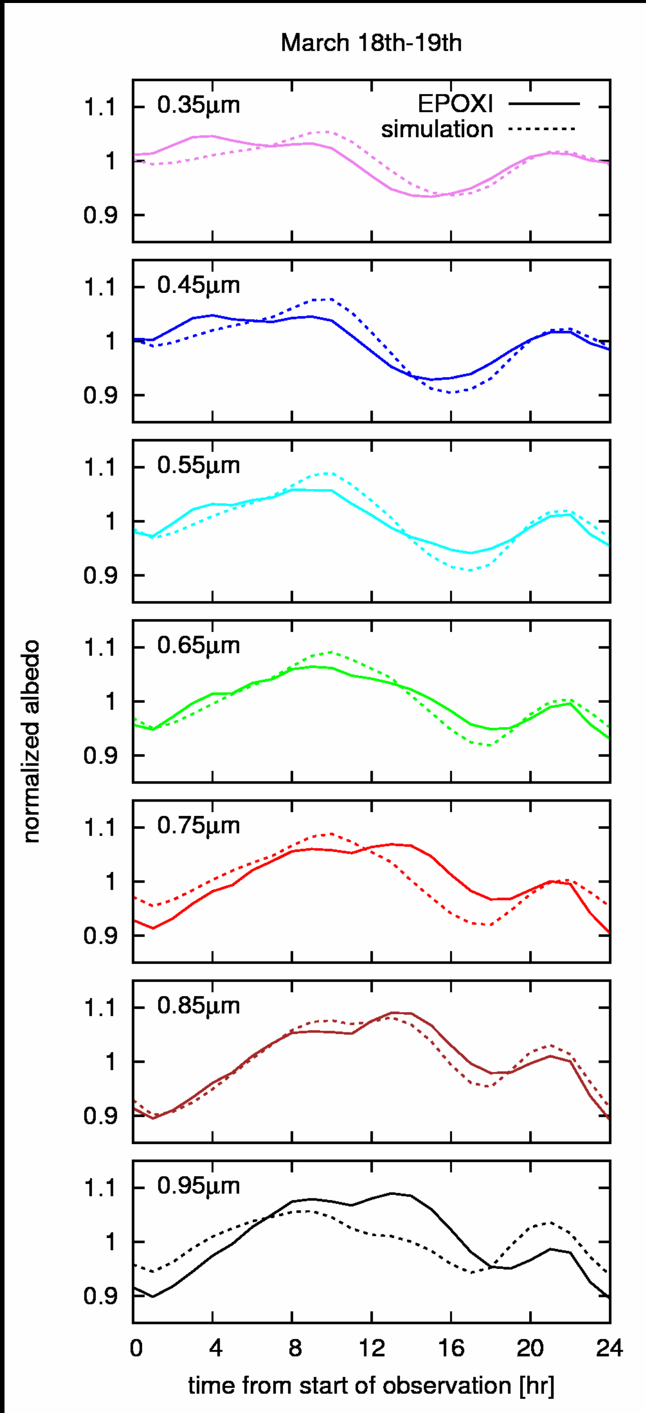
反射光



輻射光

Vazquez et al. (2010)

Fujii 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)

反射光を使って表面を知る

◆直接撮像できてやっと点源

(D=5 pcにおける地球半径 〜 10 μ秒)

→ 表面非一様性は反射スペクトルの時間変化に現れる *(Ford +2001)*

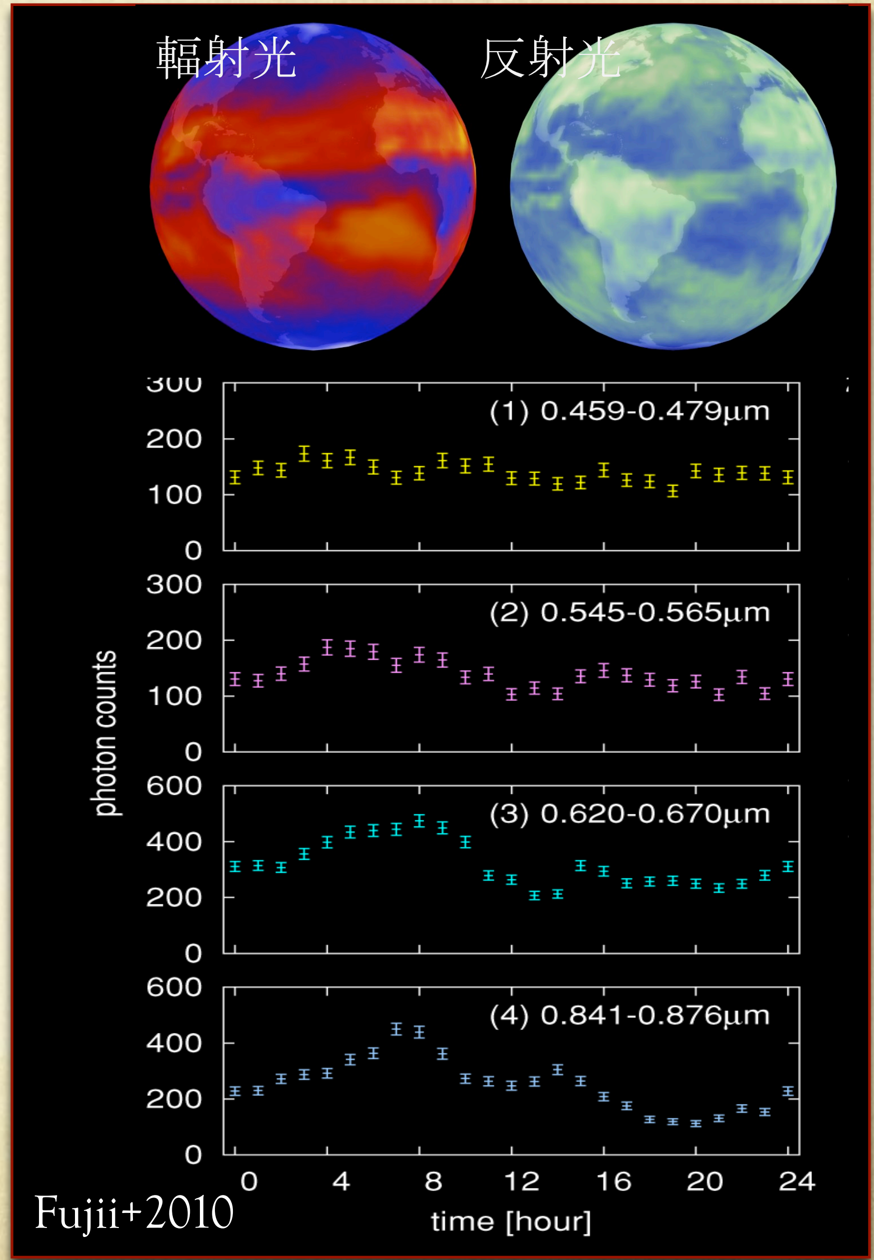
◆時間ごとに見えている部分の陸とか海の *reflection-weighted* な面積和を求めることは可能

- PCAを利用 *(Cowan+2010)*
- Albedoモデル *(Fujii+2010)*

反射光を用いて

第二の地球の世界地図

を描くことは可能だろうか?



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

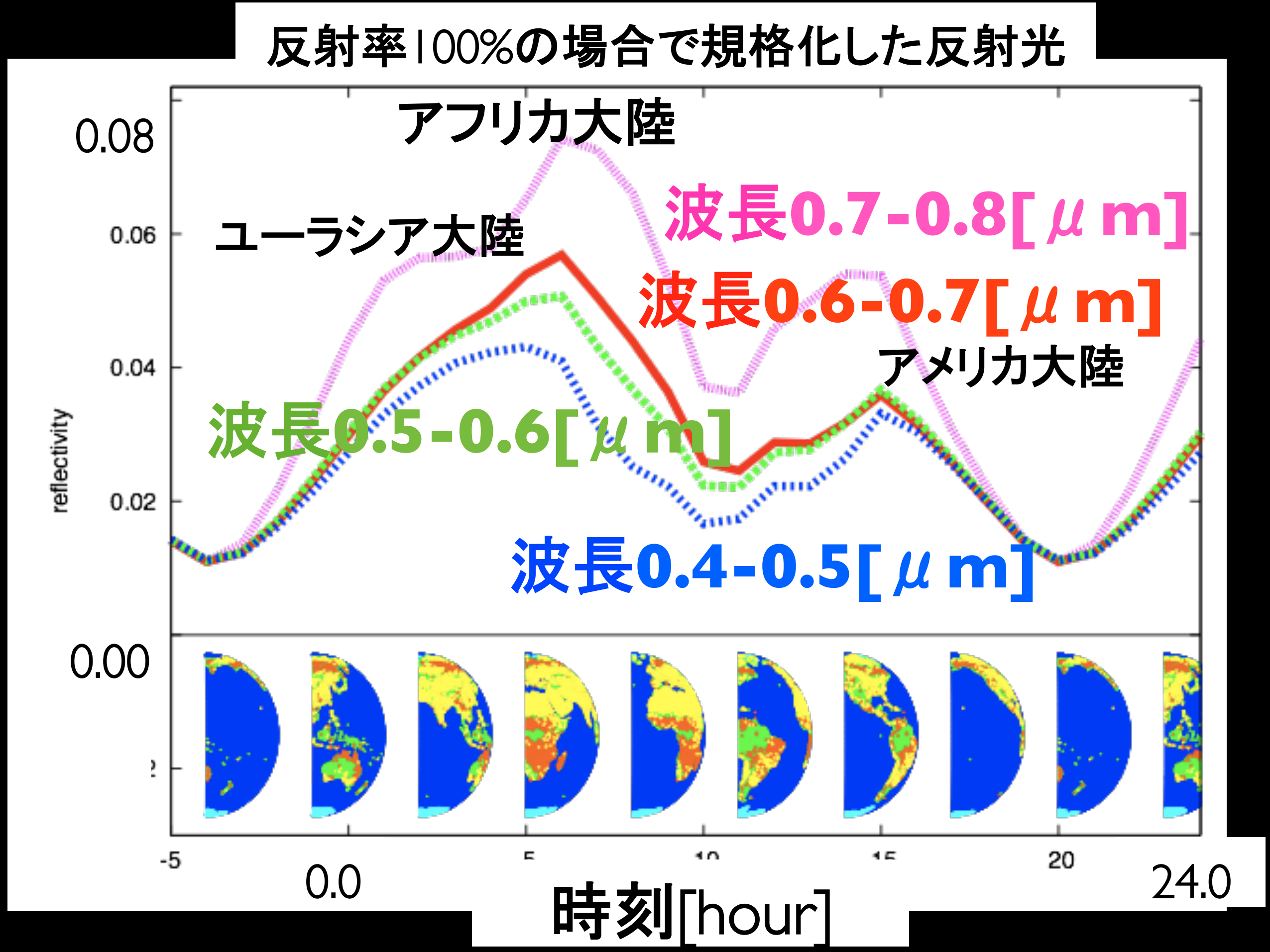
Fujii et al.　Astrophys. J. 715(2010)866, arXiv:0911.5621
Astrophys. J. 738(2011)184, arXiv:1102.3625

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

A pale blue dot

地球は青かった？

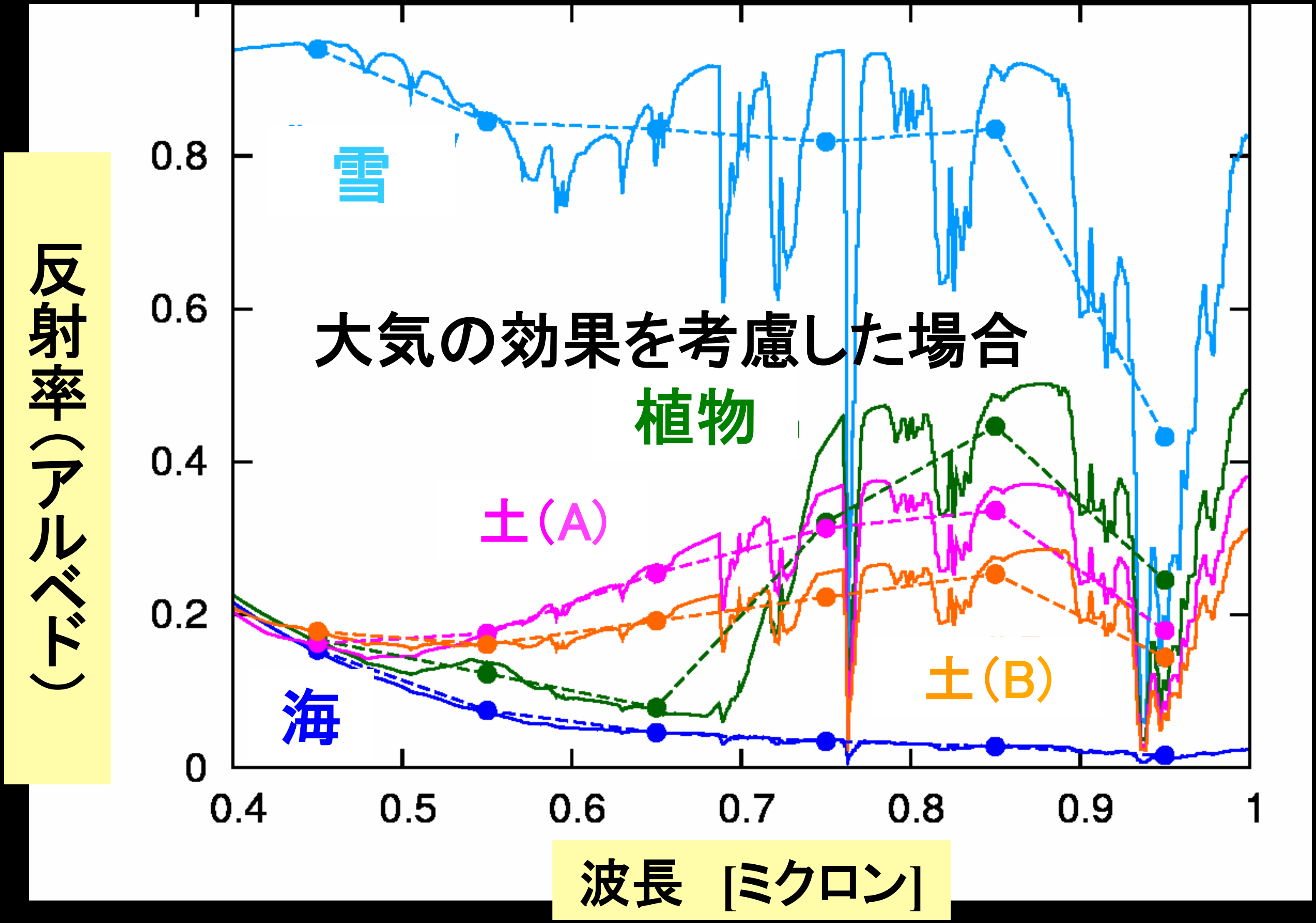
自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション



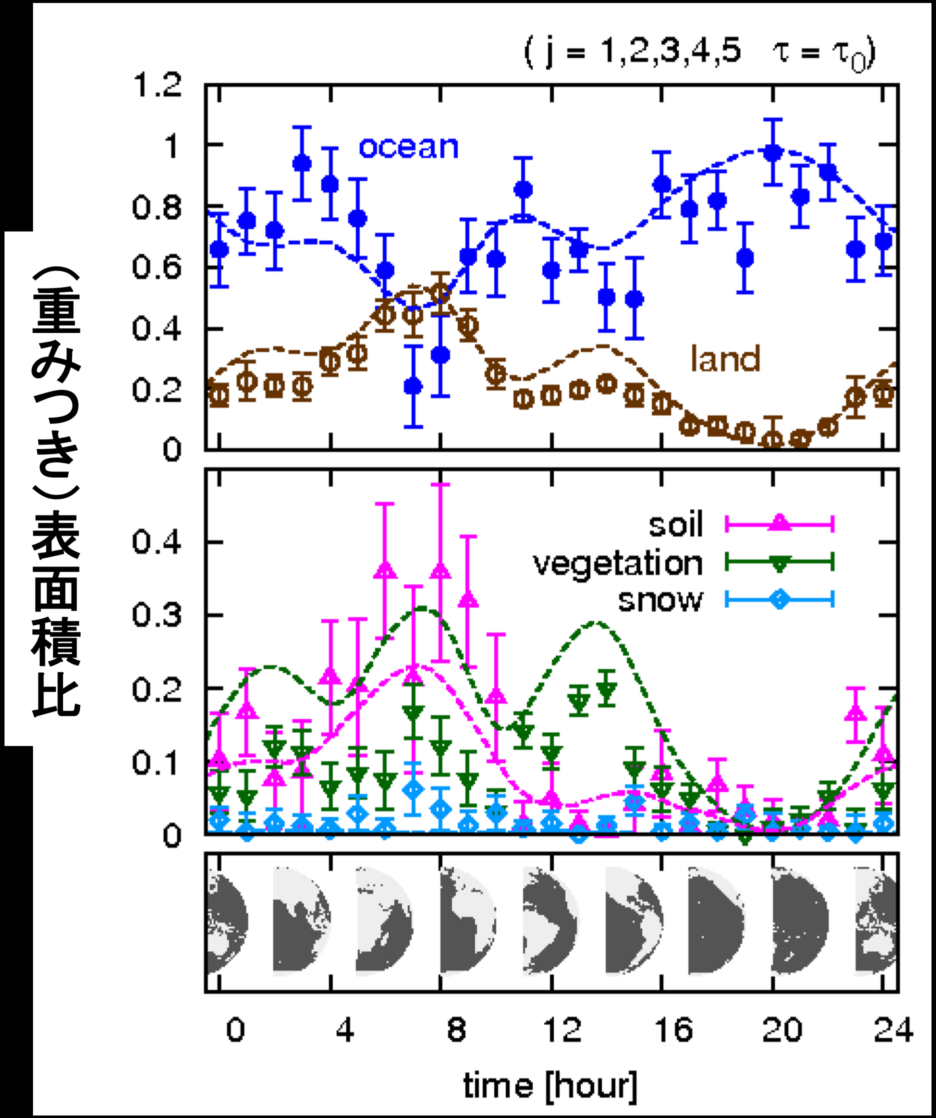
- 春分（3月）
- 自転軸に垂直な方向から観測
- 地球観測衛星のデータを用いて計算

Fujii et al. (2010)

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



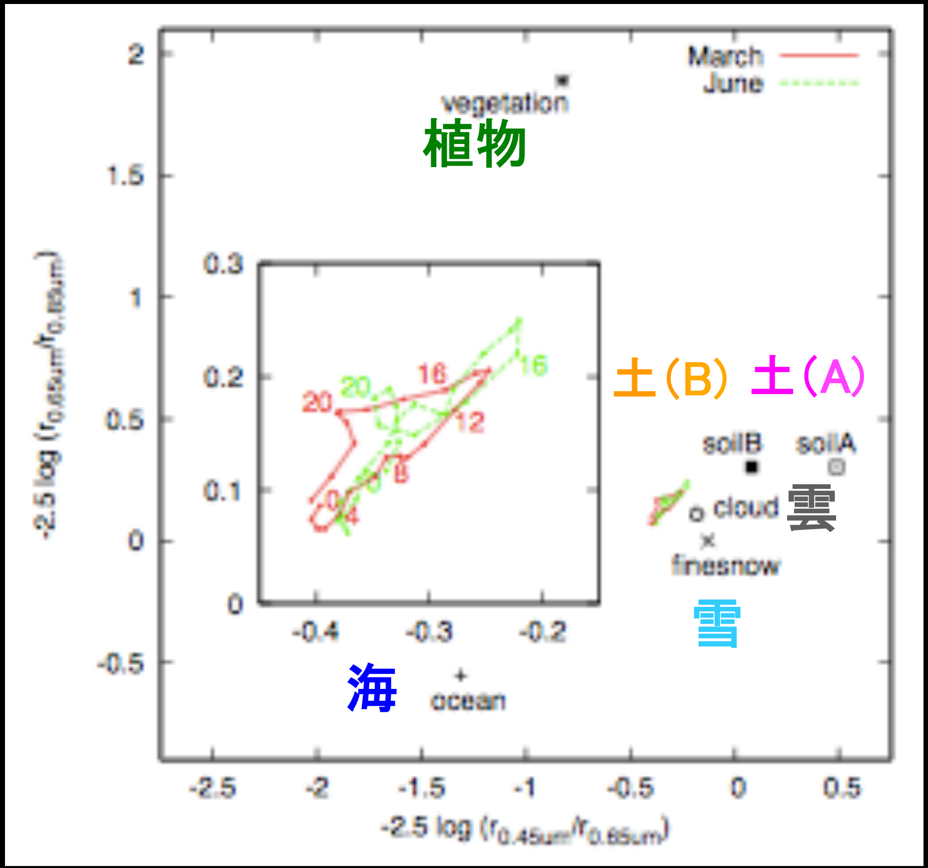
Fujii et al. (2010)

- 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！

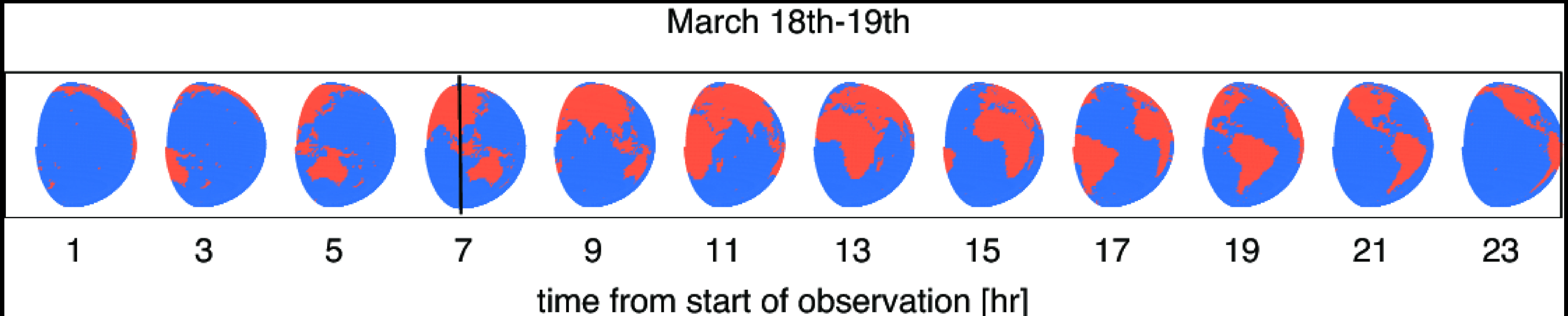
順問題:地球の反射光計算

- 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、ある日時の地球の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°×2.5°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

地球の色

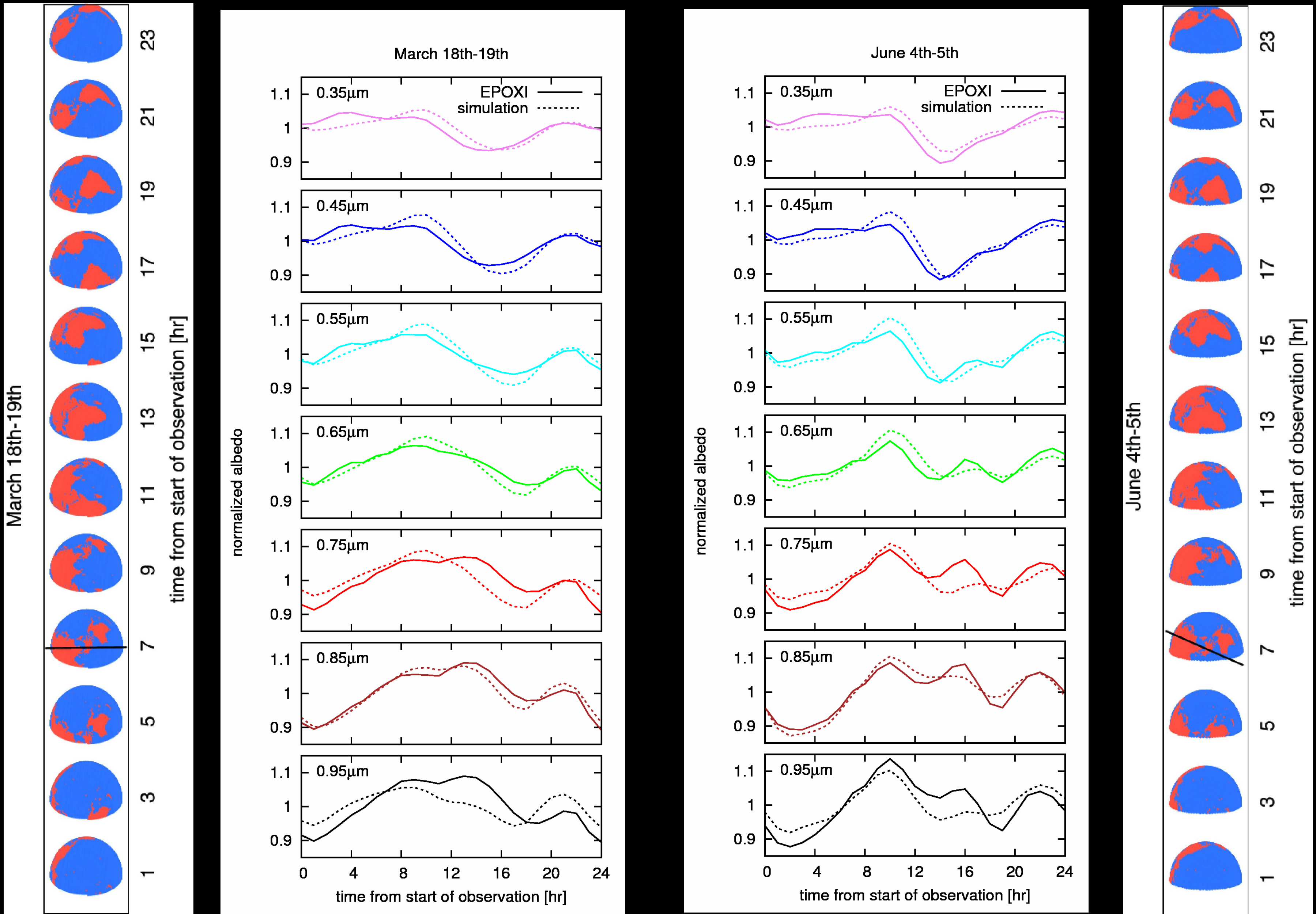


March
June
vegetation
植物
土(B)
土(A)
soilB
soilA
cloud
雲
finesnow
雪
海
ocean
-2.5 log ($r_{0.65um}/r_{0.85um}$)
-2.5 log ($r_{0.45um}/r_{0.65um}$)

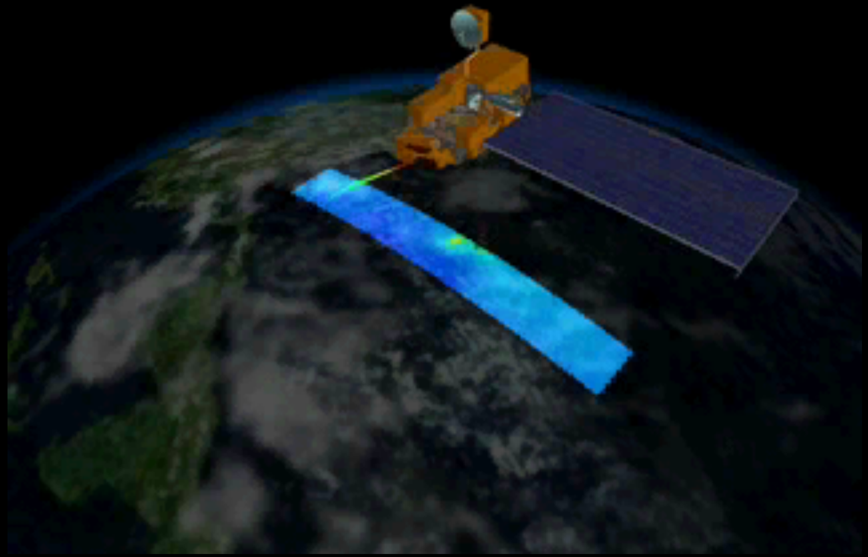


March 18th-19th
1
3
5
7
9
11
13
15
17
19
21
23
time from start of observation [hr]

模擬光度曲線と地球観測データの比較（雲あり）



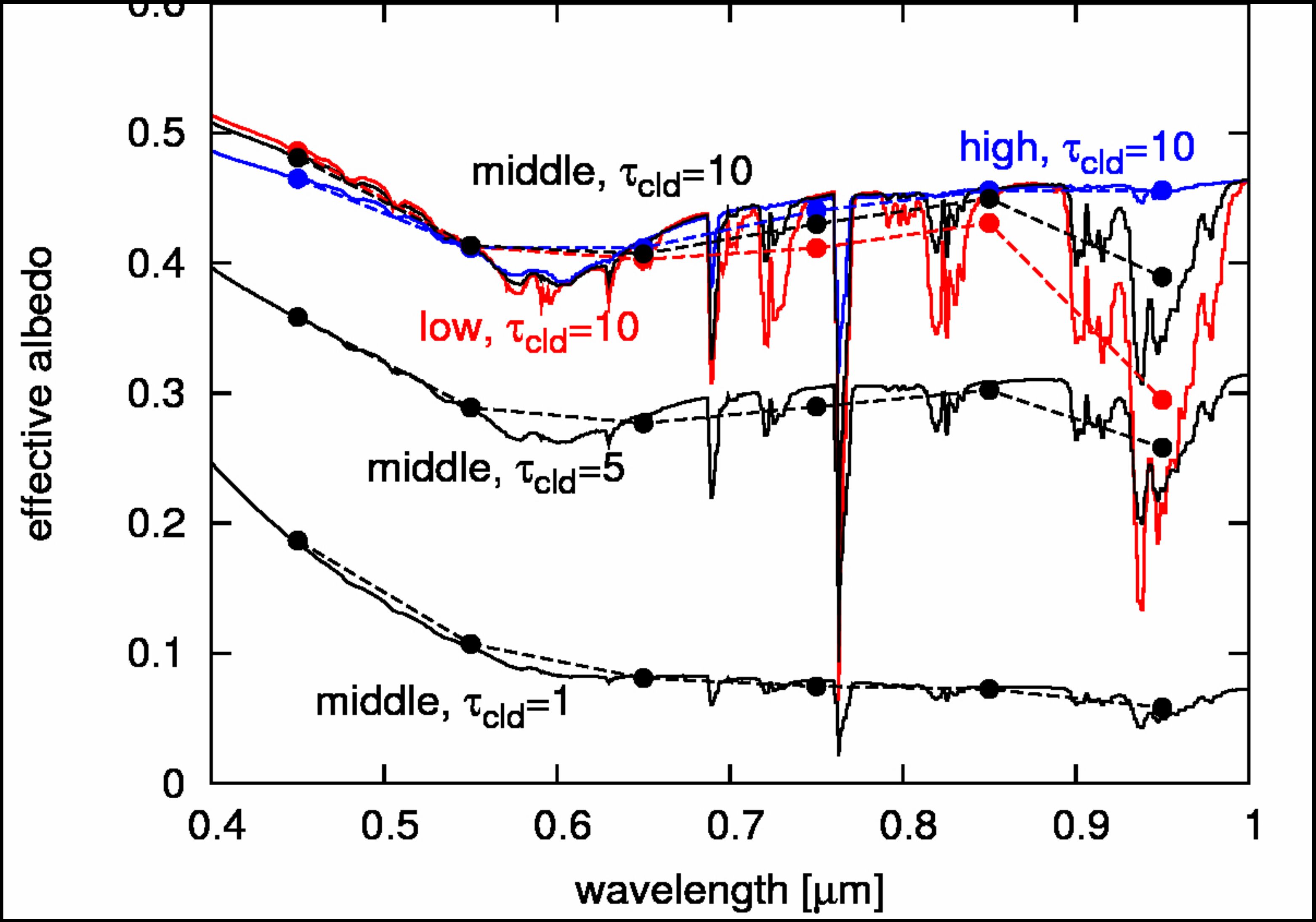
Earth observing satellite Trace (Transition Region and Coronal Explorer) + detector Modis (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)



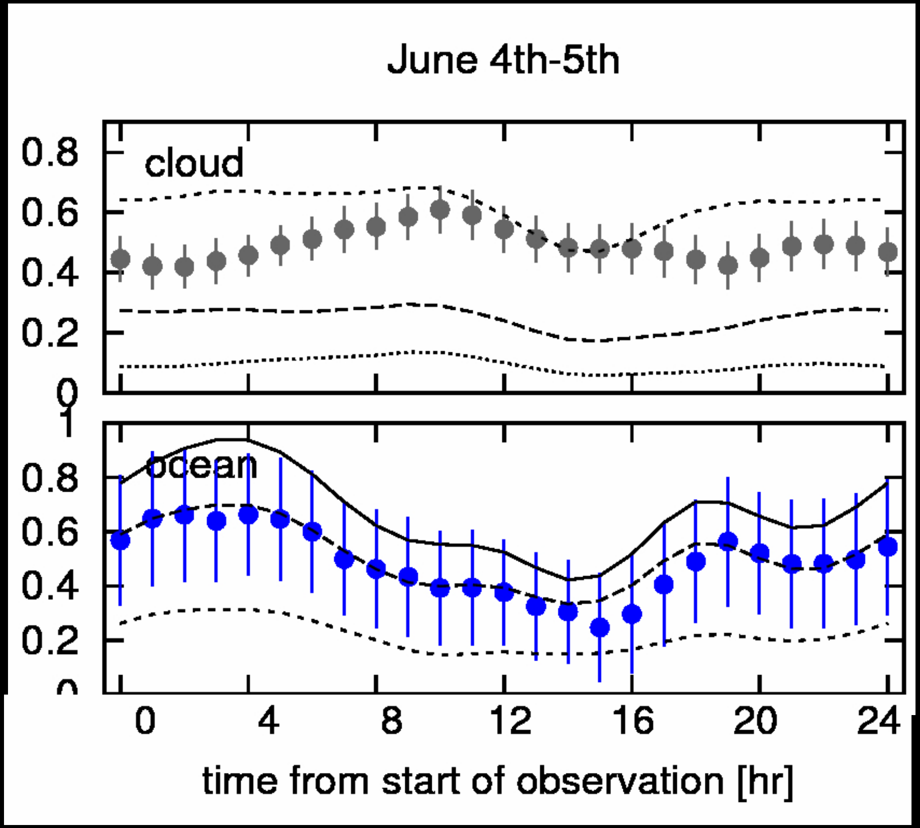
逆問題：地球の成分ごとの面積の推定

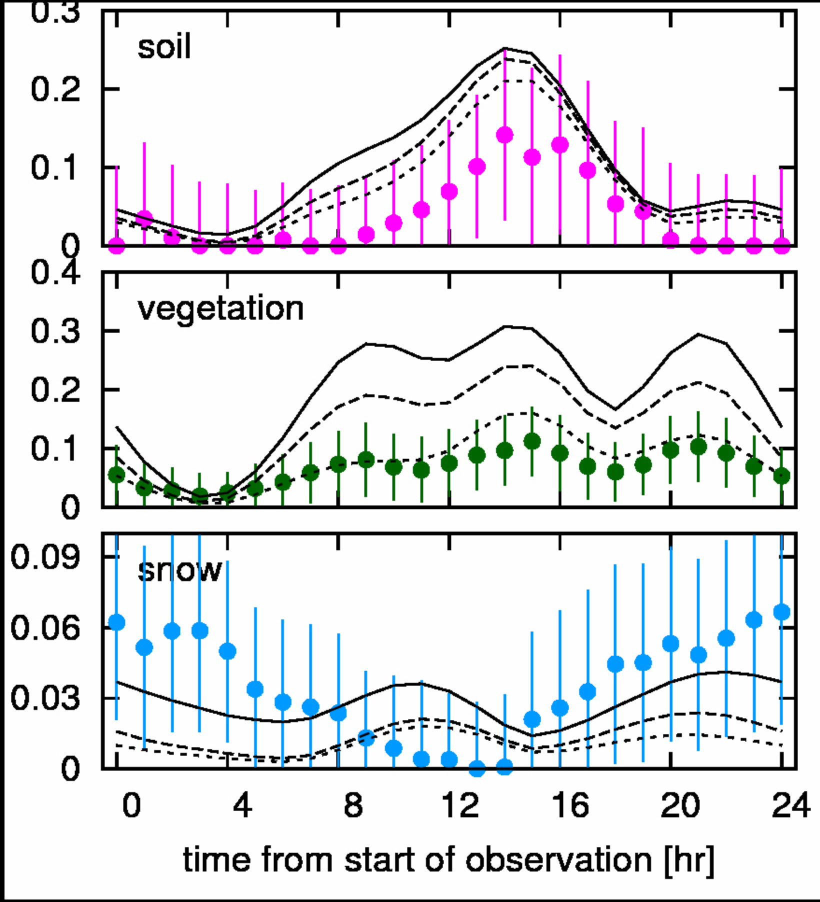
- 地球観測衛星(EPOXI)データを、簡単化されたモデル（等方散乱近似で海、土、植物、雪、雲の5成分）でフィットし、各成分の面積を推定
  - 系外惑星の場合には、中心星の光がブロックされた極度に理想的な観測に対応（可能性の限界）
  - 各観測中の自転や公転の効果は無視
  - 雲については、ある光学的厚さτ（今回は10とする）の単一モデルを想定
  - 大気も「米国標準大気」と呼ばれる組成、圧力・温度プロファイルを仮定

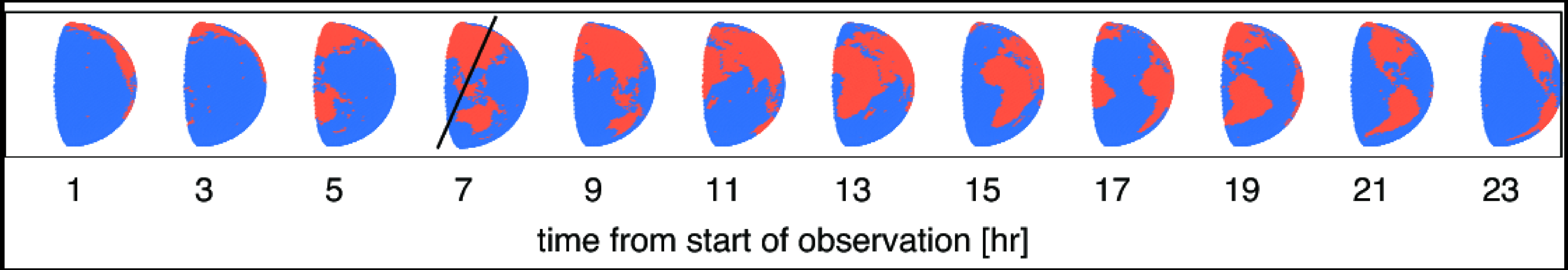
雲の反射スペクトル：モデル依存性



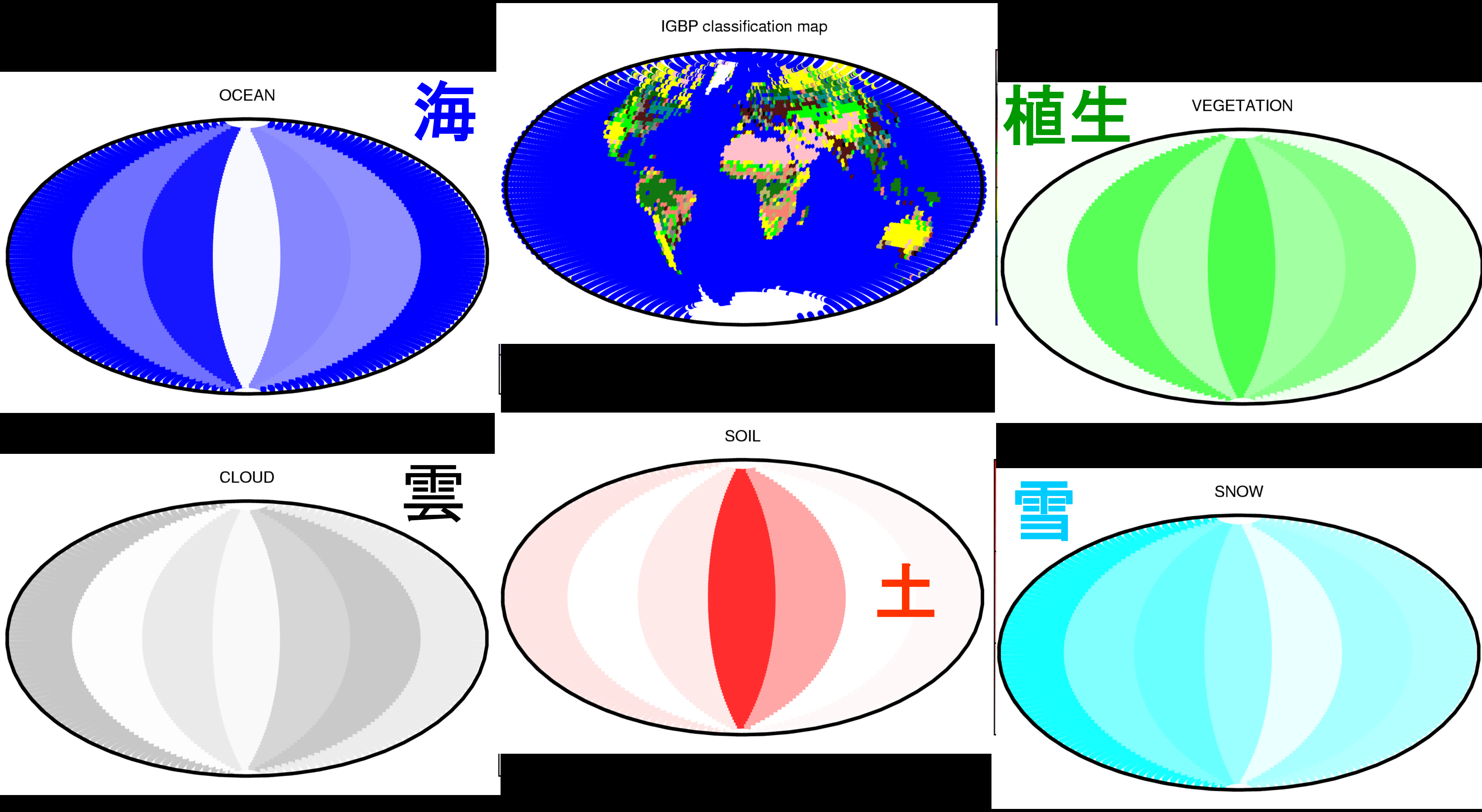
EPOXIデータから推定された面積







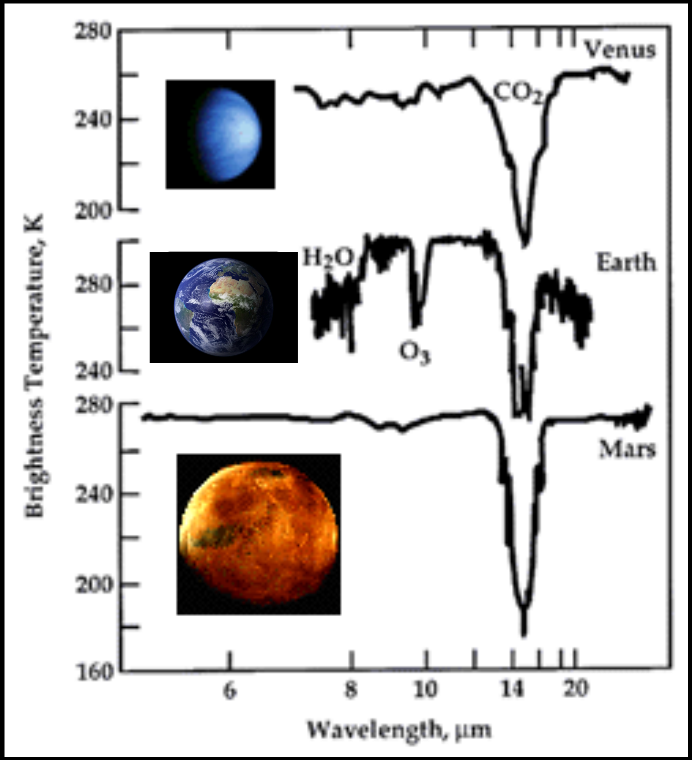
地球測光観測データから推定された地表面成分の経度分布地図



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

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”



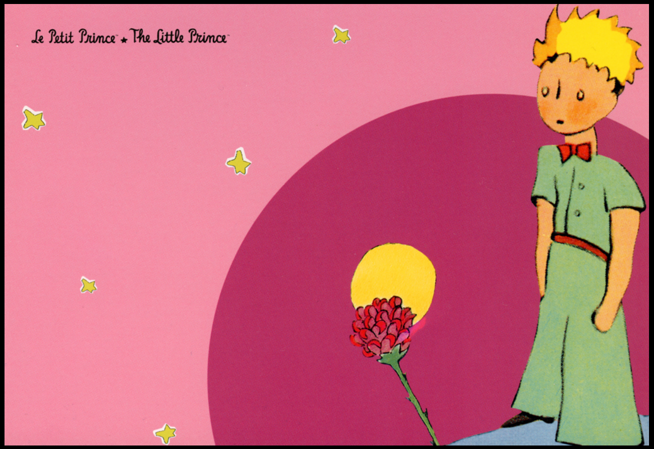
- 地球型惑星の発見
- 居住可能（ハビタブル）惑星の発見
  - 水が液体として存在する地球型惑星
- バイオマーカーの提案と検出
  - 酸素、水、オゾン、植物、核爆発、、
- 超精密分光観測の成否が鍵！
  - 惑星の放射・反射・吸収スペクトルを中心星から分離する

- 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

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