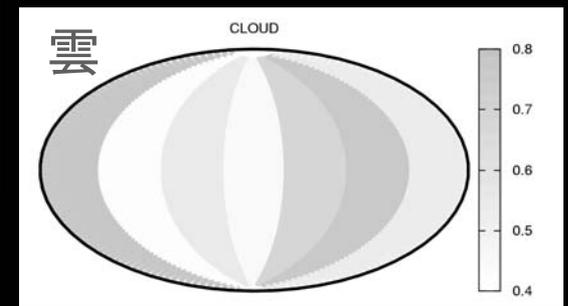
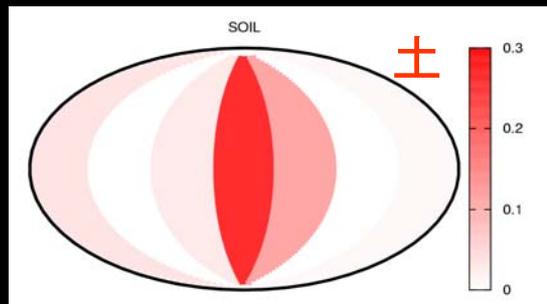
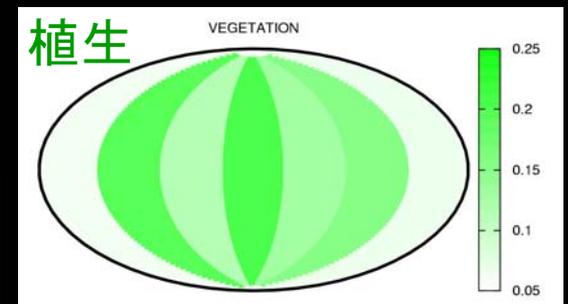
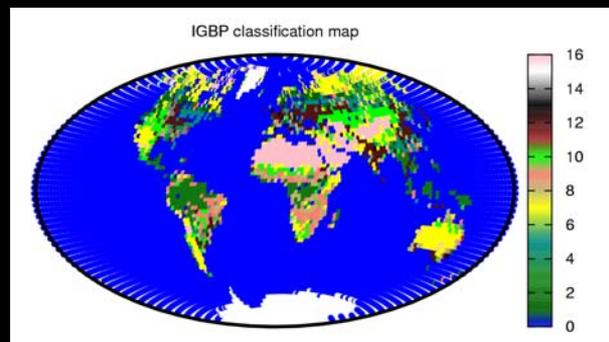
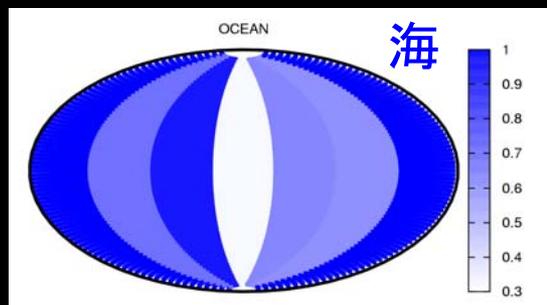


惑星いろいろ、地球も色々 ～第二の地球の色から 表面地図を推測する～



東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 須藤靖

GCOE「地球から地球たちへ」駒場シンポジウム
科学方法論の開拓@2011年1月22日

青空のムコウにもう一つの地球はあるか

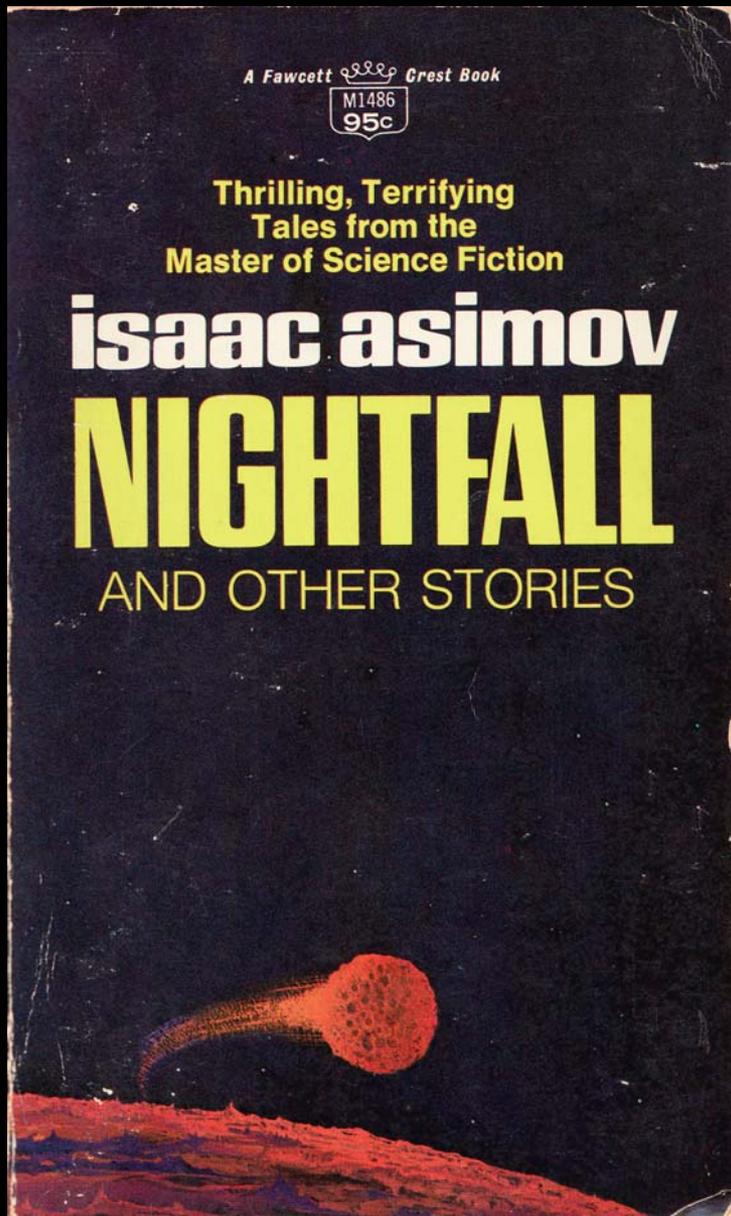
アイザック・アシモフ著 「夜来たる」



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？

Issac Asimov: Nightfall



- “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.”

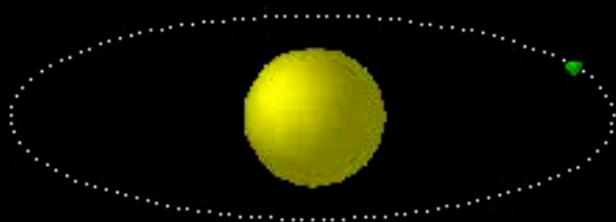
太陽系外惑星（候補）の発見年表

Number of planets by year of discovery



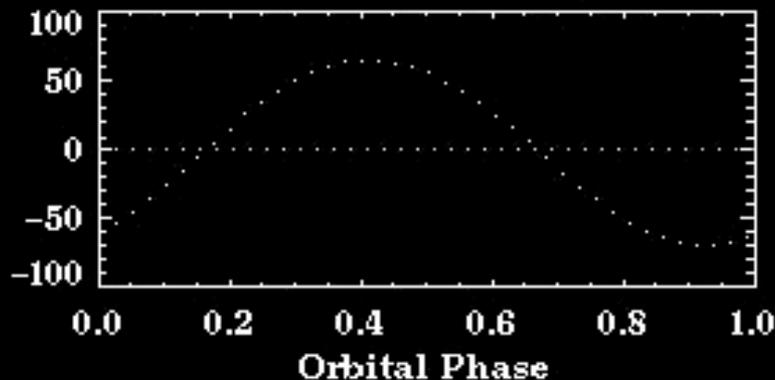
どうやって見つけたのか？

Circular Orbit: rho CrB



$$K = 67.4 \text{ m/s} \quad e = 0.03$$
$$\omega = 210.0 \text{ deg.} \quad \sin(i) = 0.3 \text{ (*)}$$

Radial Velocity Curve
of the Star [m/s]



■ ドップラー法

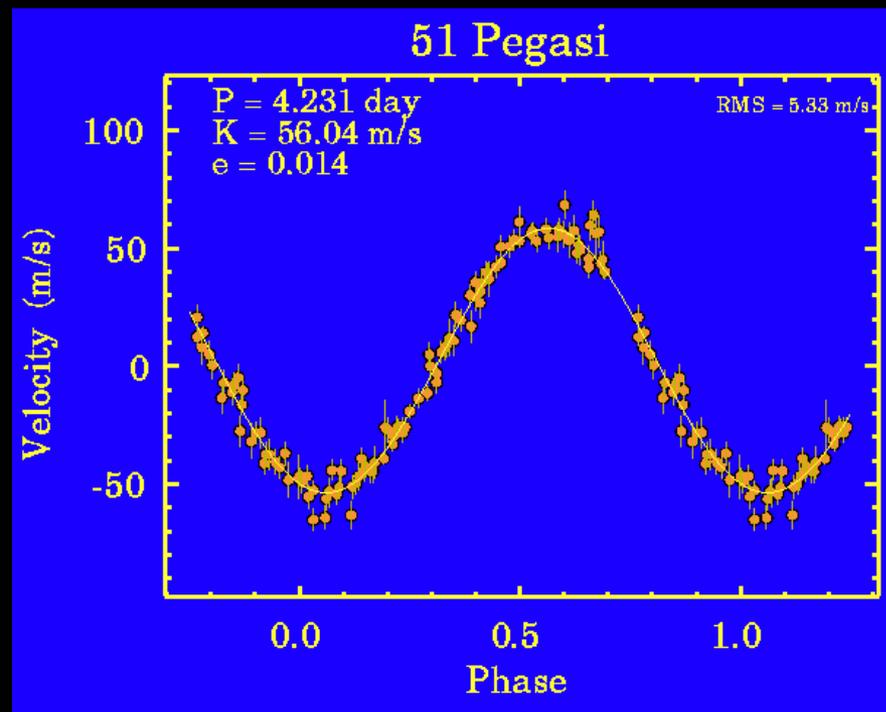
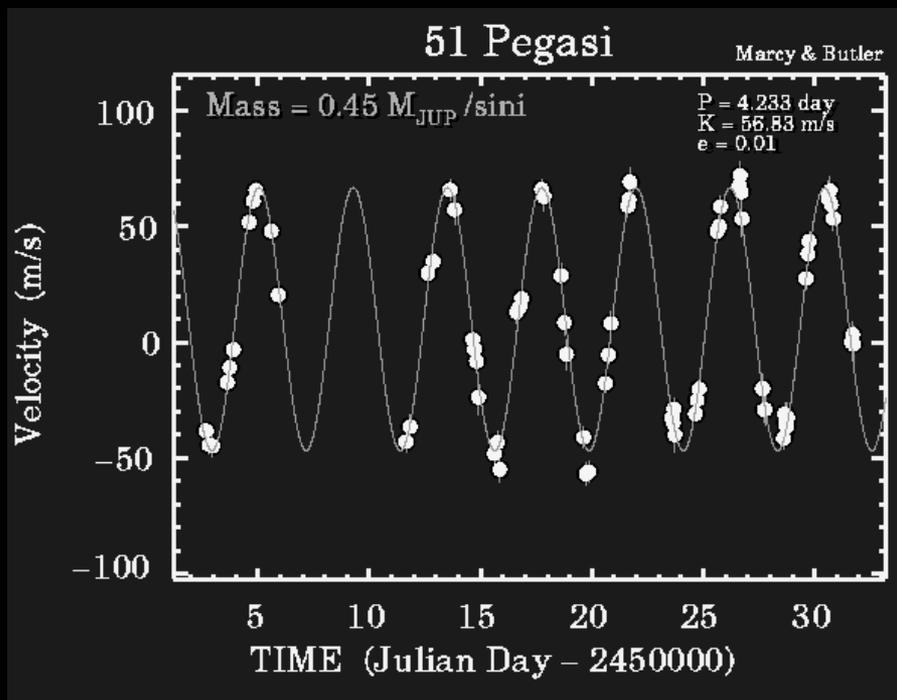
- 中心星の速度が毎秒数十メートル程度、周期的に変動

■ トランジット法

- (運がよければ) 中心星の正面を惑星が横切ることによって星の明るさが1パーセント程度周期的に暗くなる

ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年発表)

わずか4.2日で一周！

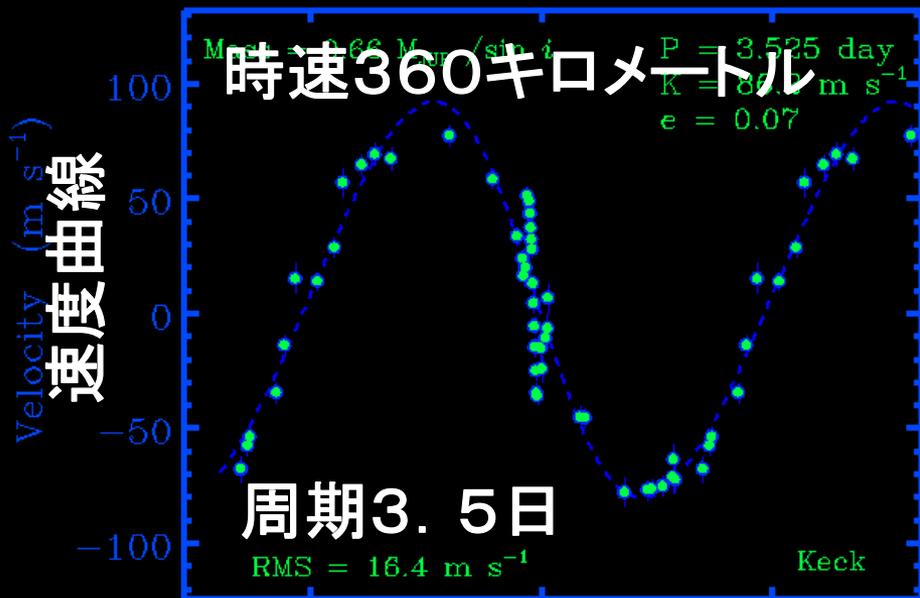


初めてのトランジット惑星HD209458b

- 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

HD209458

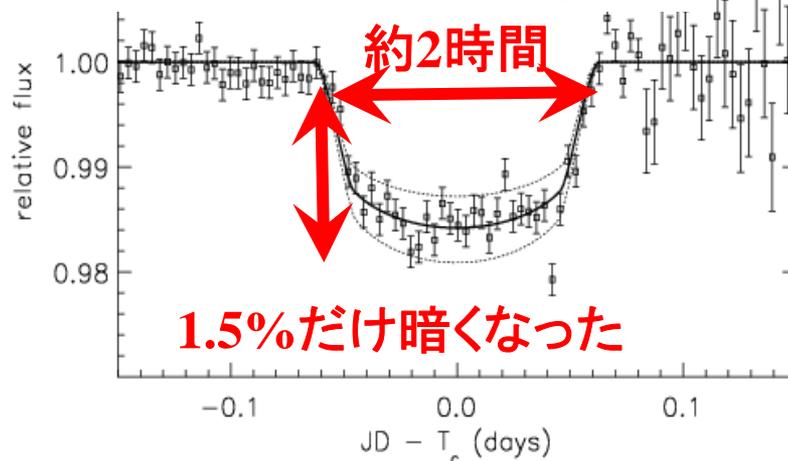
時速360キロメートル



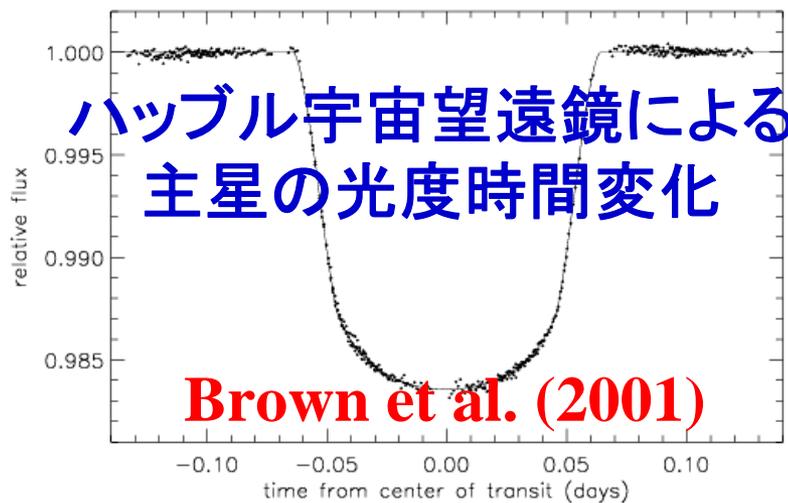
地上望遠鏡による
主星の速度時間変化

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

地上望遠鏡による
主星の光度時間変化



ハッブル宇宙望遠鏡による
主星の光度時間変化



発見された系外惑星（候補）の統計

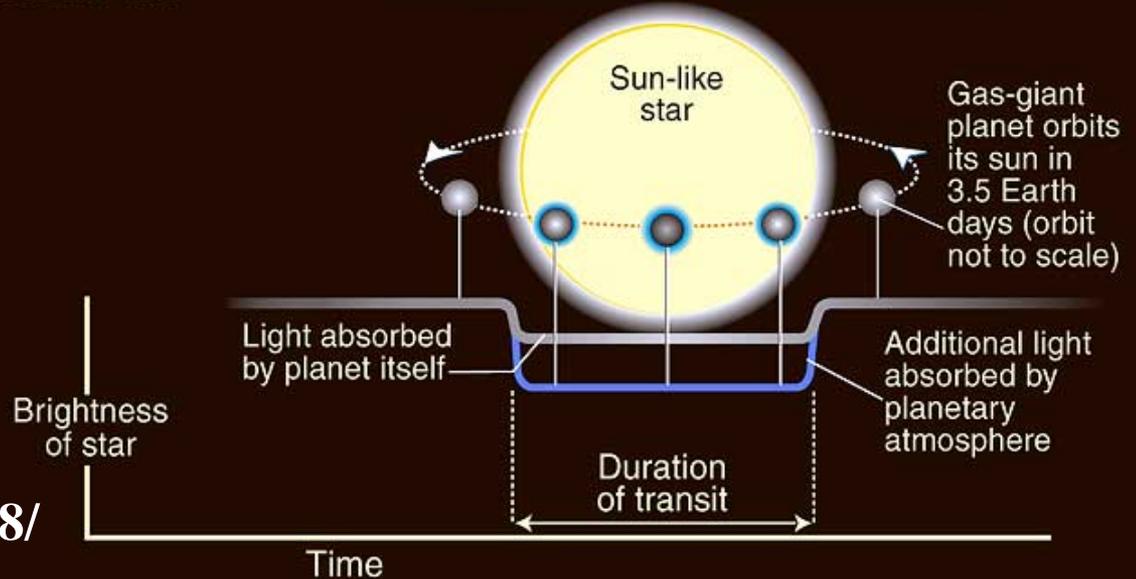
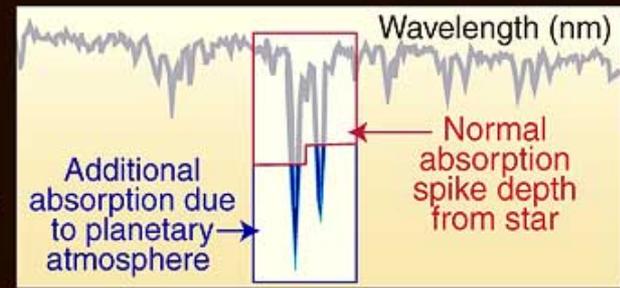
検出法	惑星	惑星系	多重惑星系
ドップラー法	483	407	49
トランジット法	113	111	8
重力レンズ	11	10	1
直接撮像（褐色矮星）	14	11	1
パルサータイミング	10	6	3
総計	518	434	54

2011年1月14日時点 <http://exoplanet.eu/>

惑星大気初検出 (2001年)

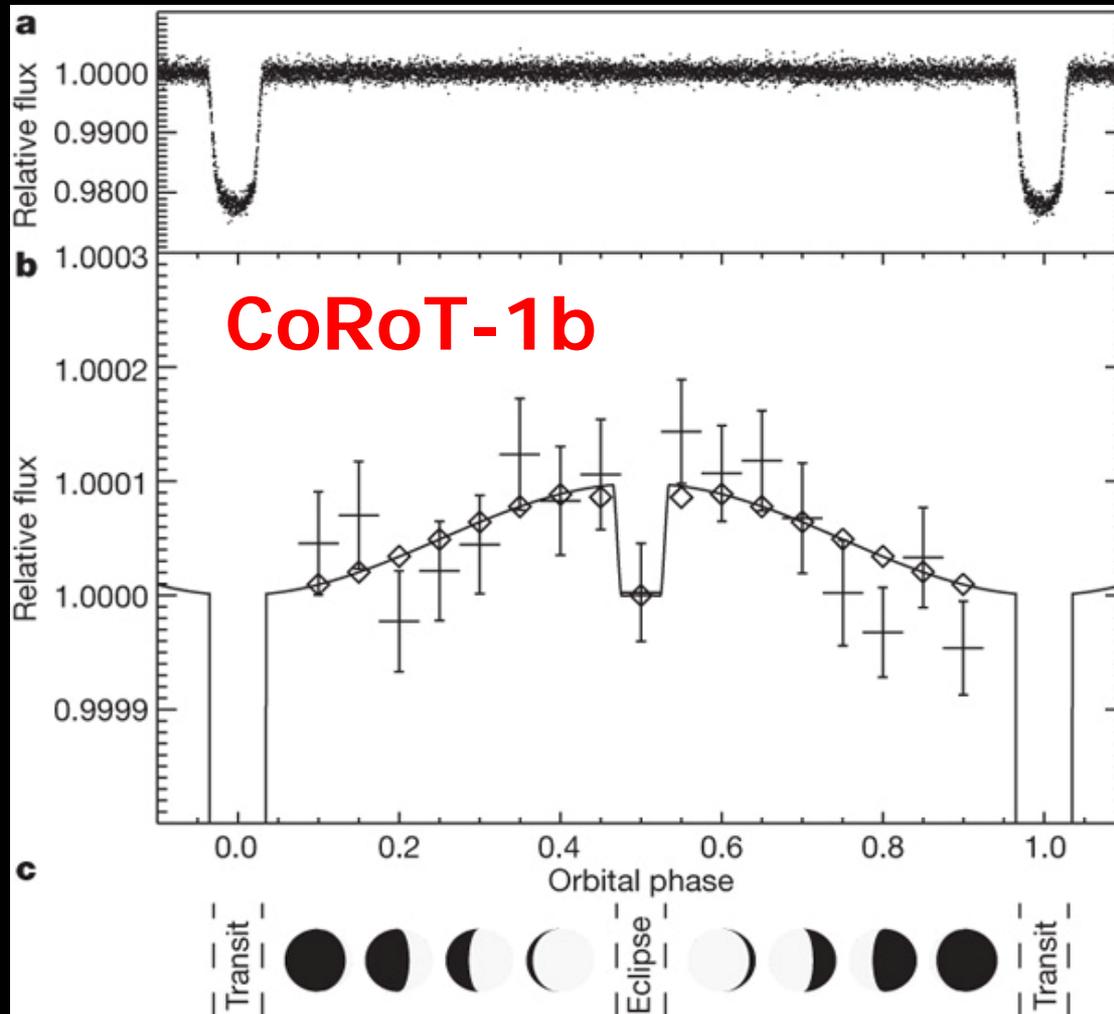
[http://hubblesite.org/
newscenter/archive/2001/38/](http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/)

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



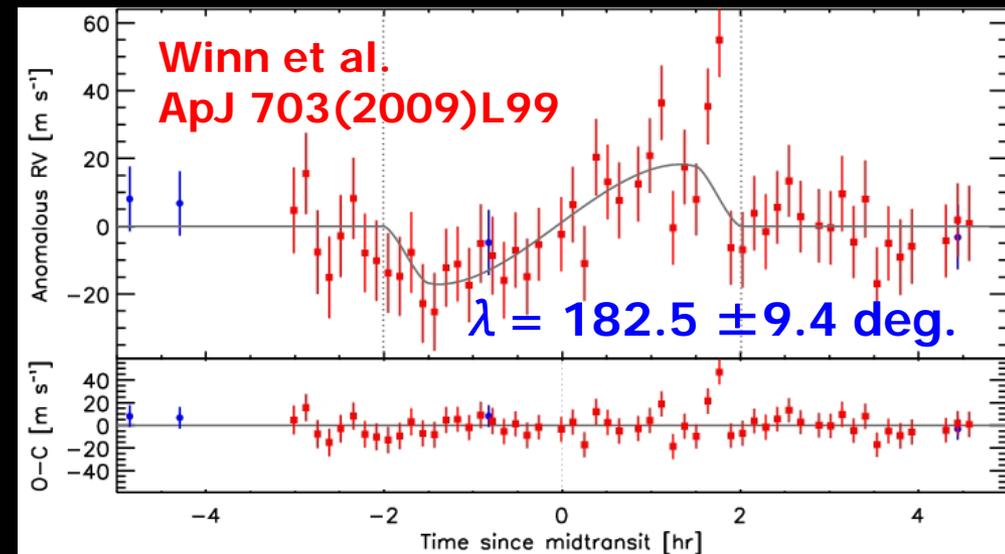
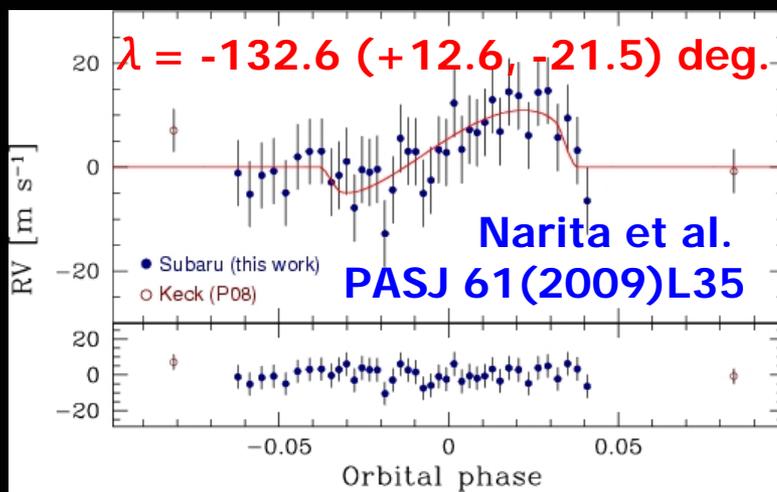
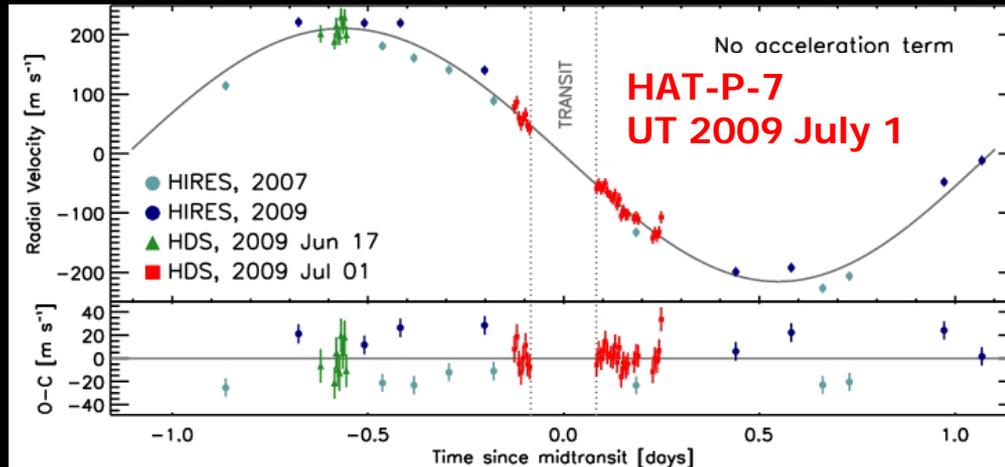
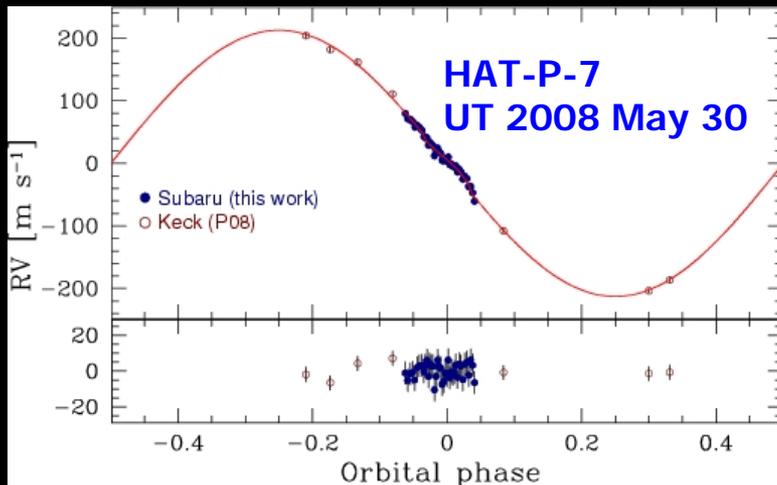
- 2000年 系外惑星HD209458bの食を検出
 - 惑星の大きさがわかる
 - 質量の観測データとあわせて密度を0.4g/ccと推定
 - 巨大ガス惑星であることの確認
- 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムを発見 (Charbonneau et al.)

惑星の反射光の検出



- 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(7100 Å)検出
 - 表面温度 2430K
 - $0.02 < \text{albedo} < 0.2$

逆行(?)系外惑星の発見



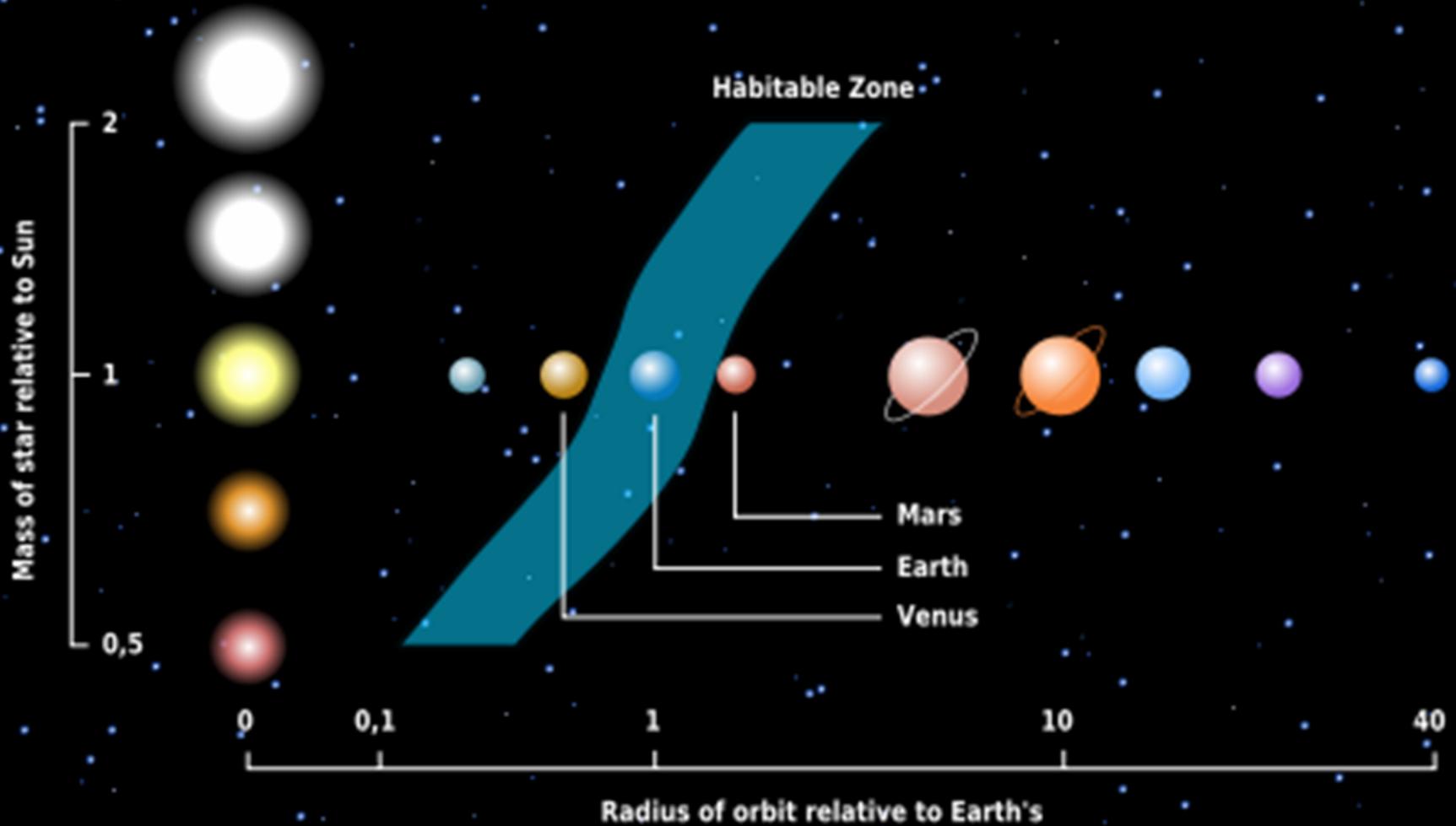
- ともにすばる望遠鏡の成果
- 起源は謎、惑星形成・進化モデルに大きなインパクト

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)

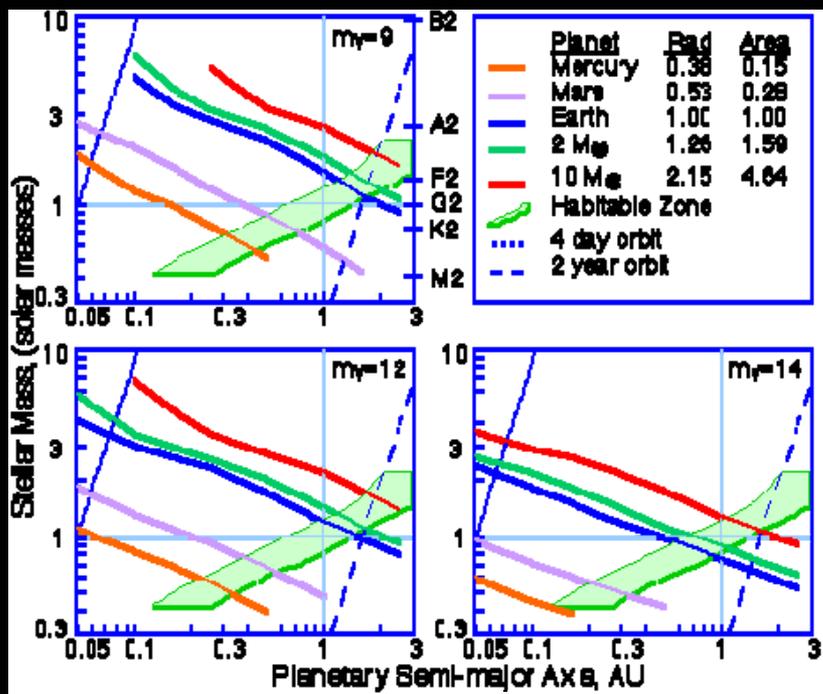
ハビタブル惑星(居住可能惑星)?

- Gliese581g: 3.1x地球質量、公転周期 36.6日



ケプラー衛星 (米国2009年3月6日打ち上げ)

トランジット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



第一回公開データ
706個のトランジット惑星候補
(Borucki et al. arXiv:1006.2799)

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

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存在
 - 太陽に似た恒星の10パーセント以上は惑星を持つ
- 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
 - 主星スピンと惑星軌道軸とのずれ: 逆行惑星
- 様々な観測手法での相補的アプローチ
 - ドップラー法(精密分光)、トランジット法(精密測光)、重カレンズ(高時間分解能測光)、直接撮像

では次はどうする?

さらにもっと将来の展望

- 巨大ガス惑星発見の時代 (1995)
 - 惑星大気の実見 (2002)
 - 惑星赤外線輻射の検出 (2005)
 - 惑星可視域反射光の検出 (2009)
-

■ 系外惑星リング、衛星の実見

■ 地球型惑星、居住可能惑星の実見

■ 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



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>

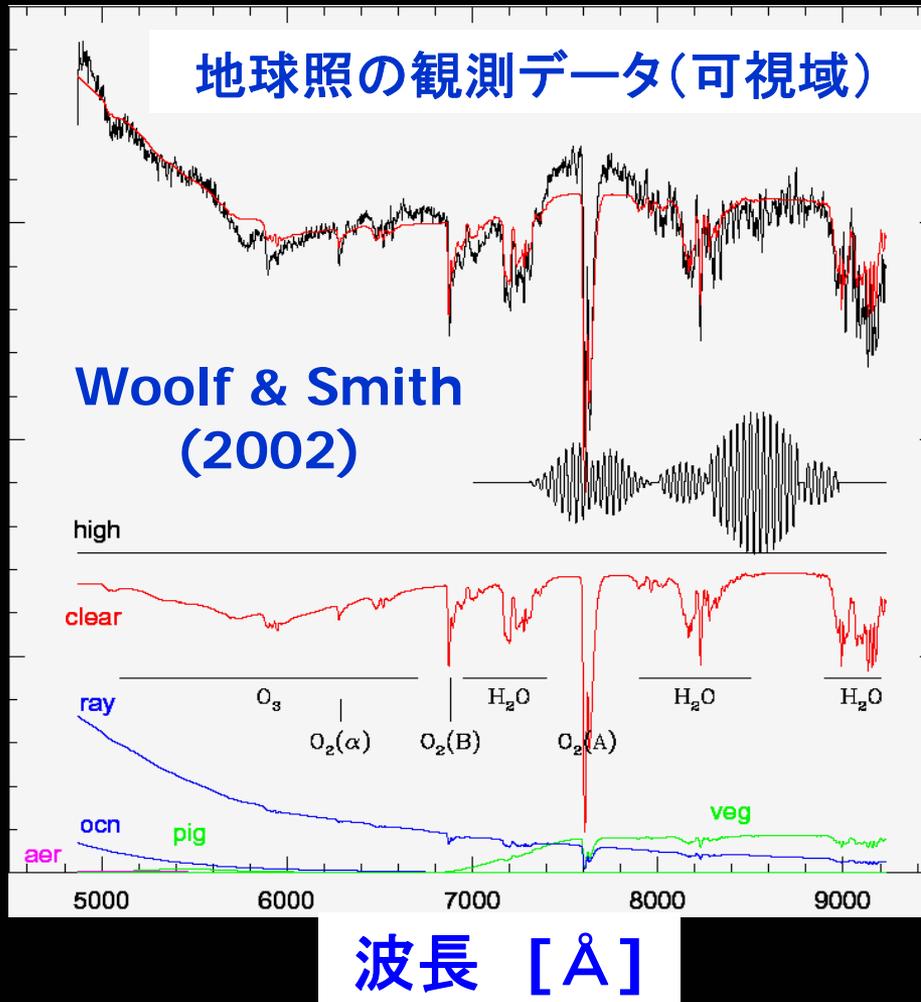
地球型惑星探査プロポーザル: *The New Worlds Mission*



<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)

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

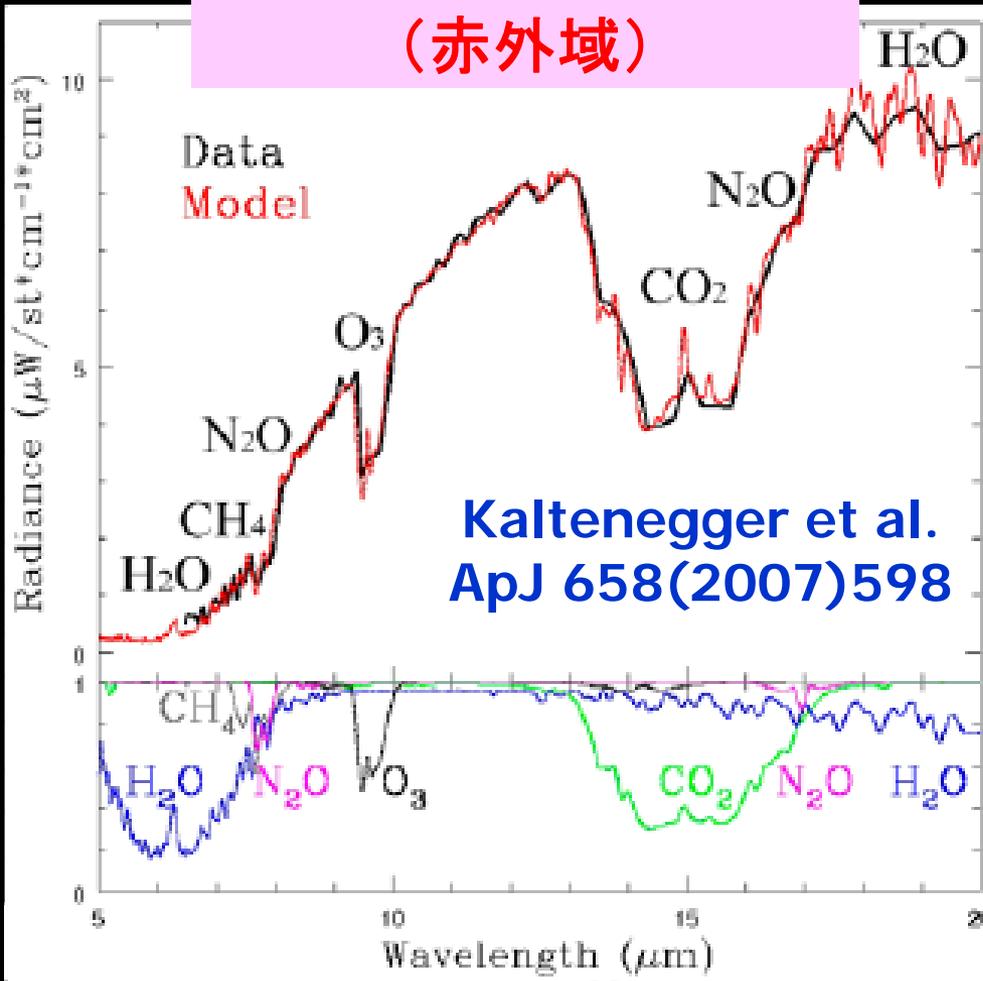
- Chappuis バンド
@ $(0.5-0.7) \mu\text{m}$
- Hartley バンド
@ $(0.2-0.3) \mu\text{m}$

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

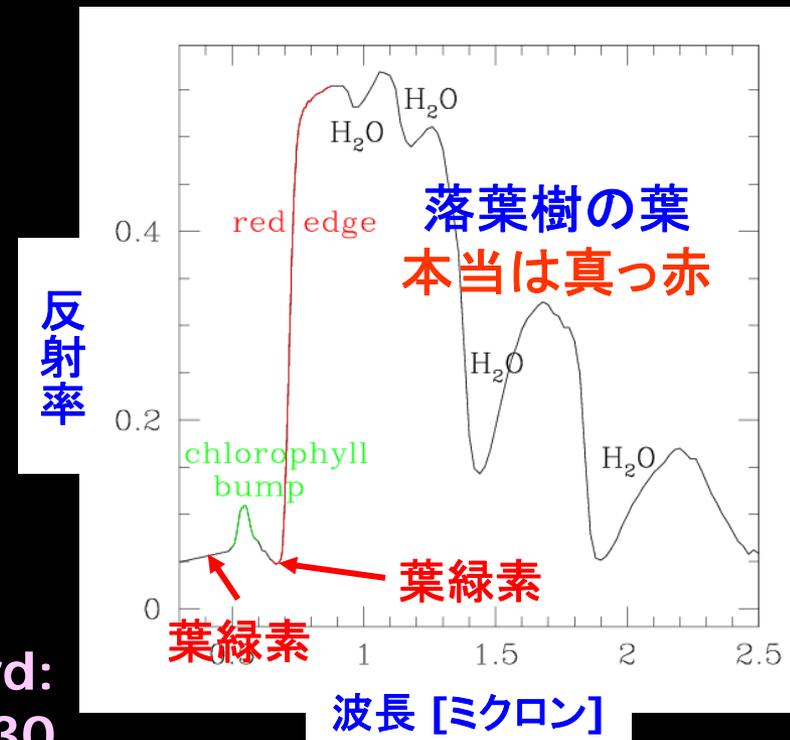
“Exoplanet characterization and the search for life”

より過激(保守的?)なバイオマーカー

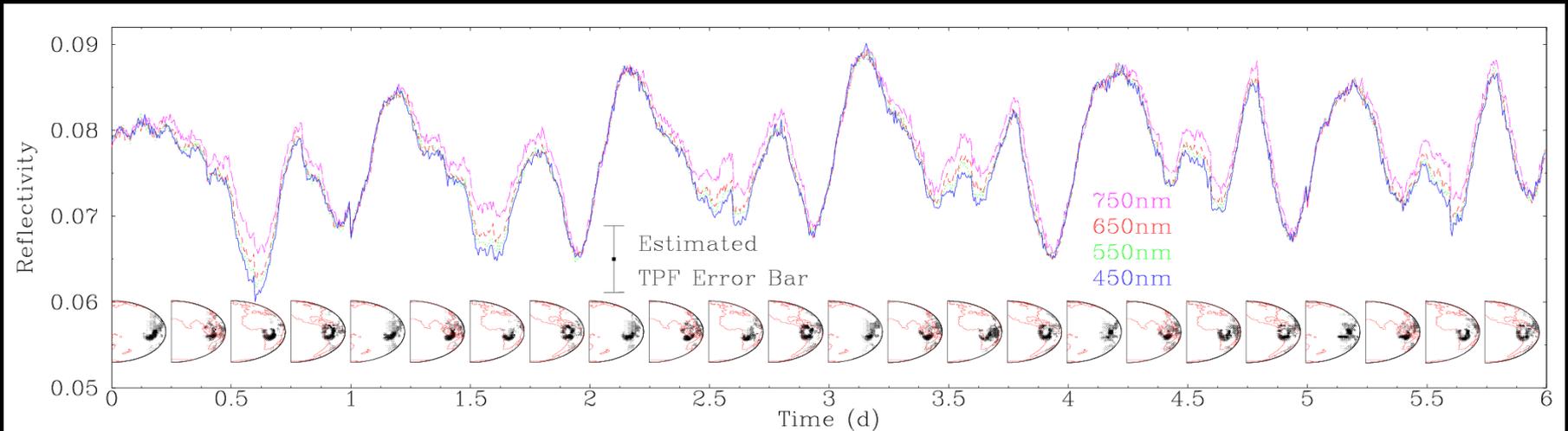
Extrasolar plants on extrasolar planets

- (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

“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.

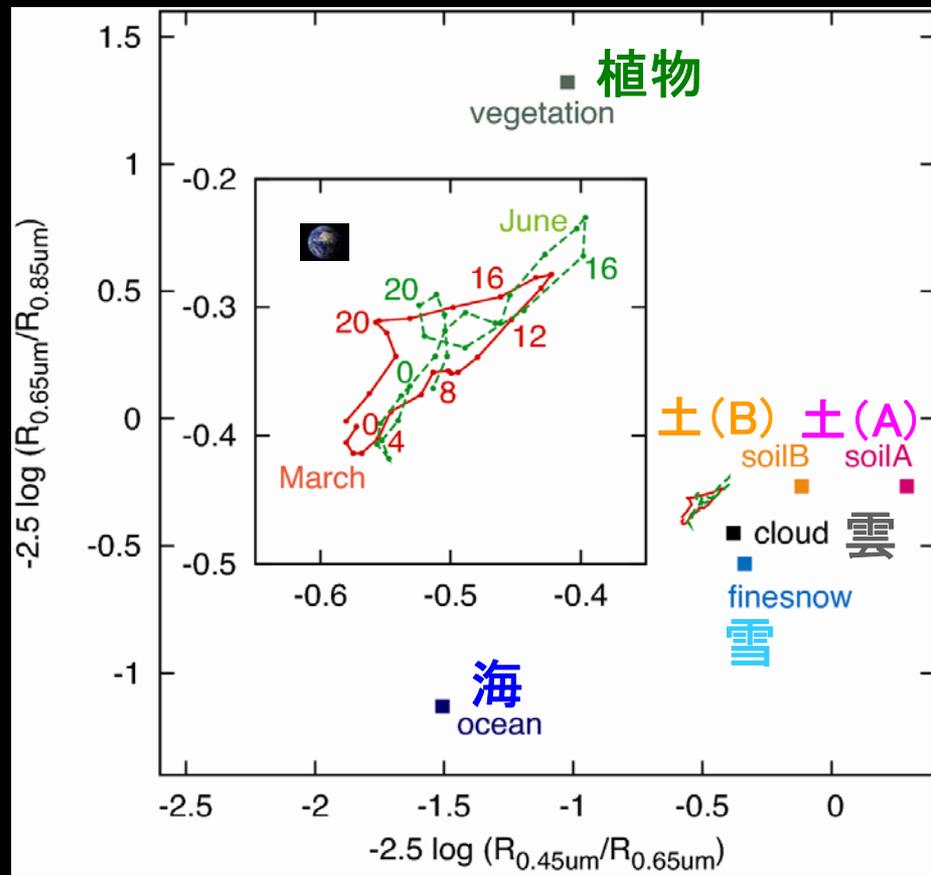
第二の地球の色から、海、陸、植生の占める面積の割合を推定する

- 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

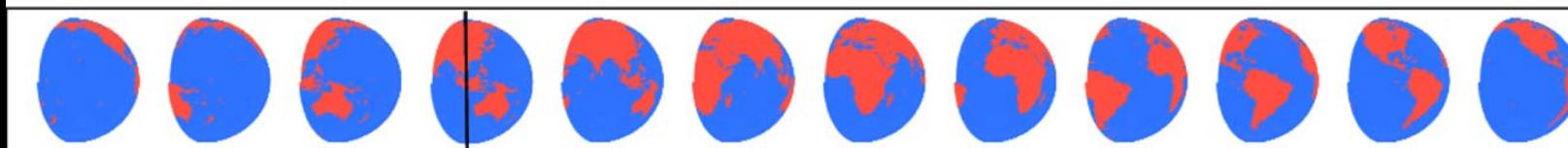
Fujii et al. *Astrophys. J.* 715(2010)866, arXiv:0911.5621
Astrophys. J. (2011) to be submitted

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

地球も色々



March 18th-19th



1

3

5

7

9

11

13

15

17

19

21

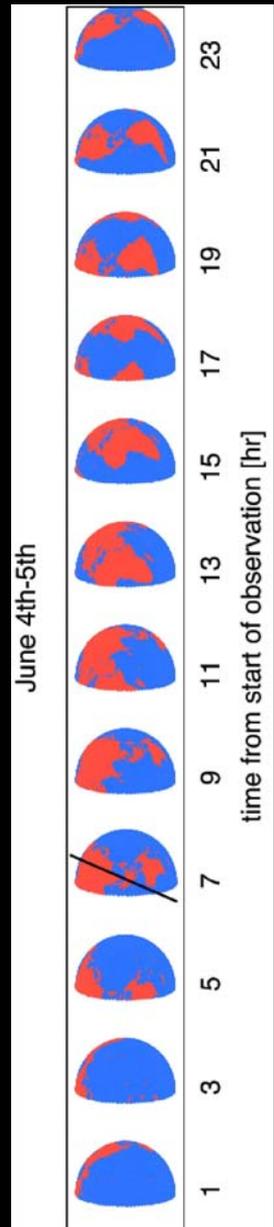
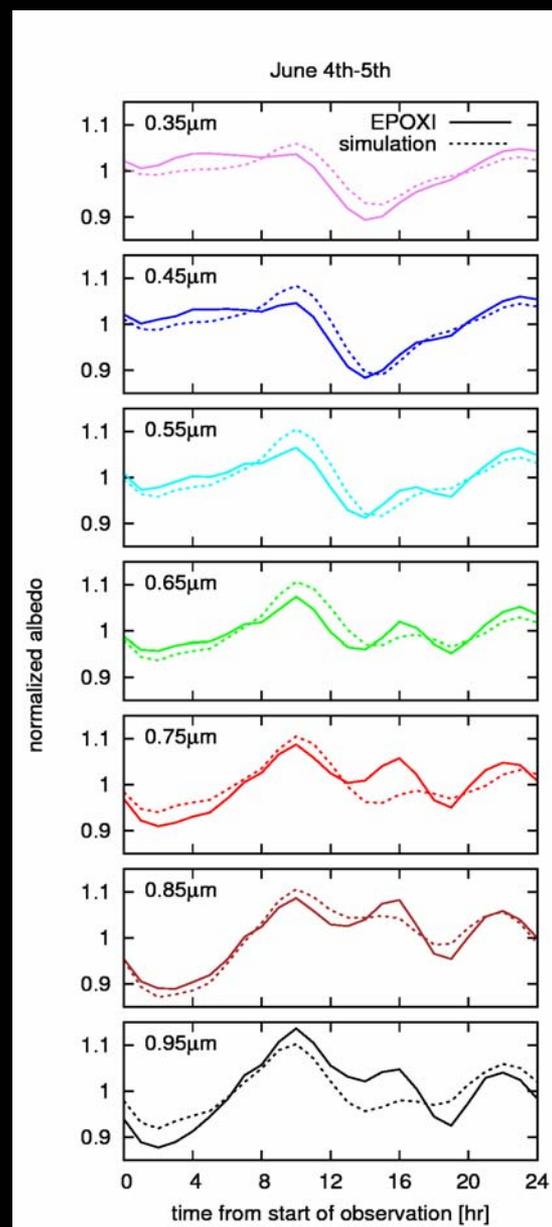
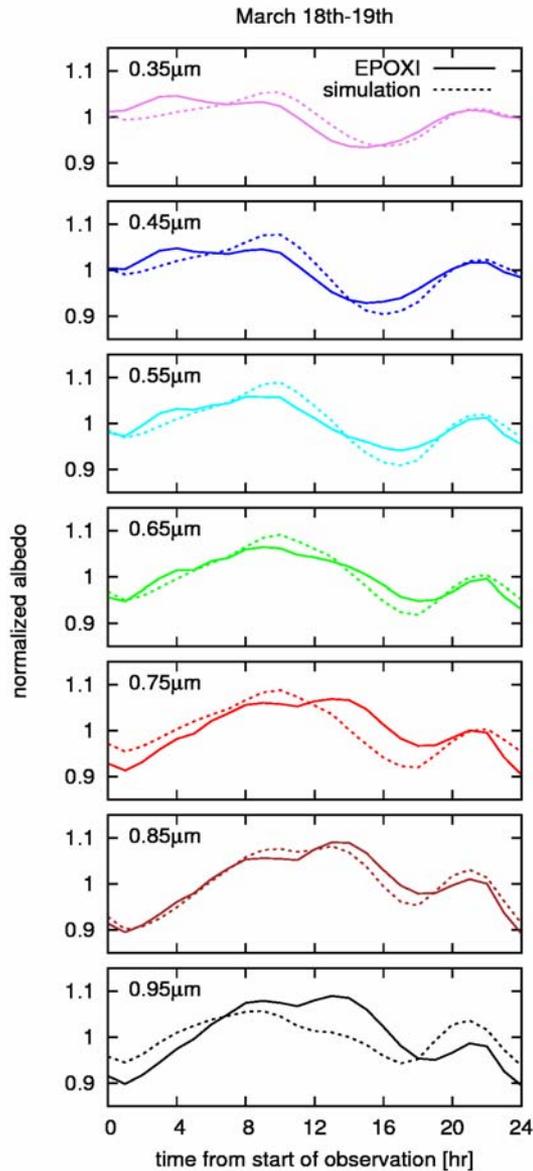
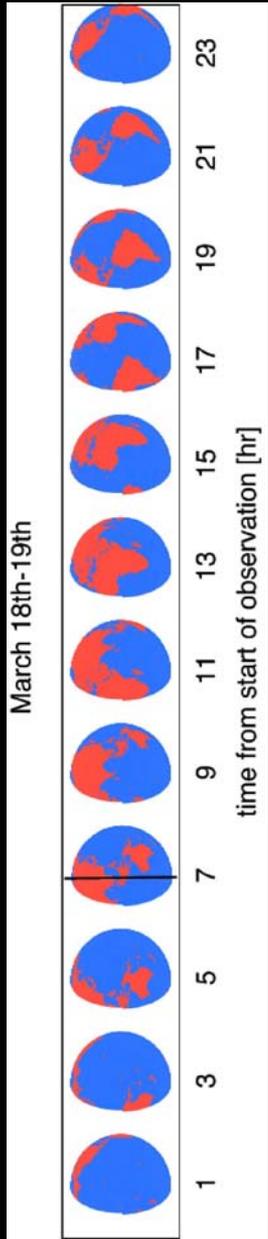
23

time from start of observation [hr]

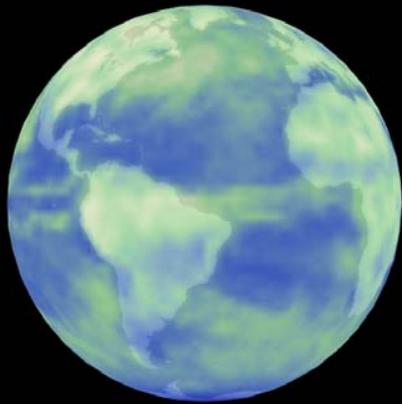
順問題：地球の反射光計算

- 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： $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 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

模擬光度曲線と観測データの比較



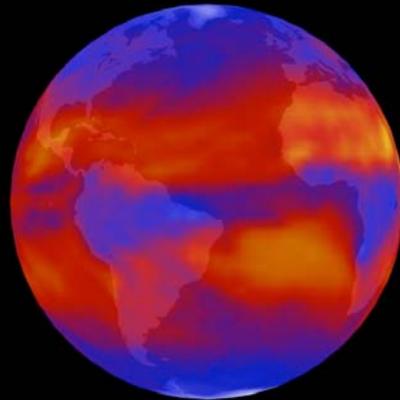
反射光を用いて地球型惑星表面を知る



反射光

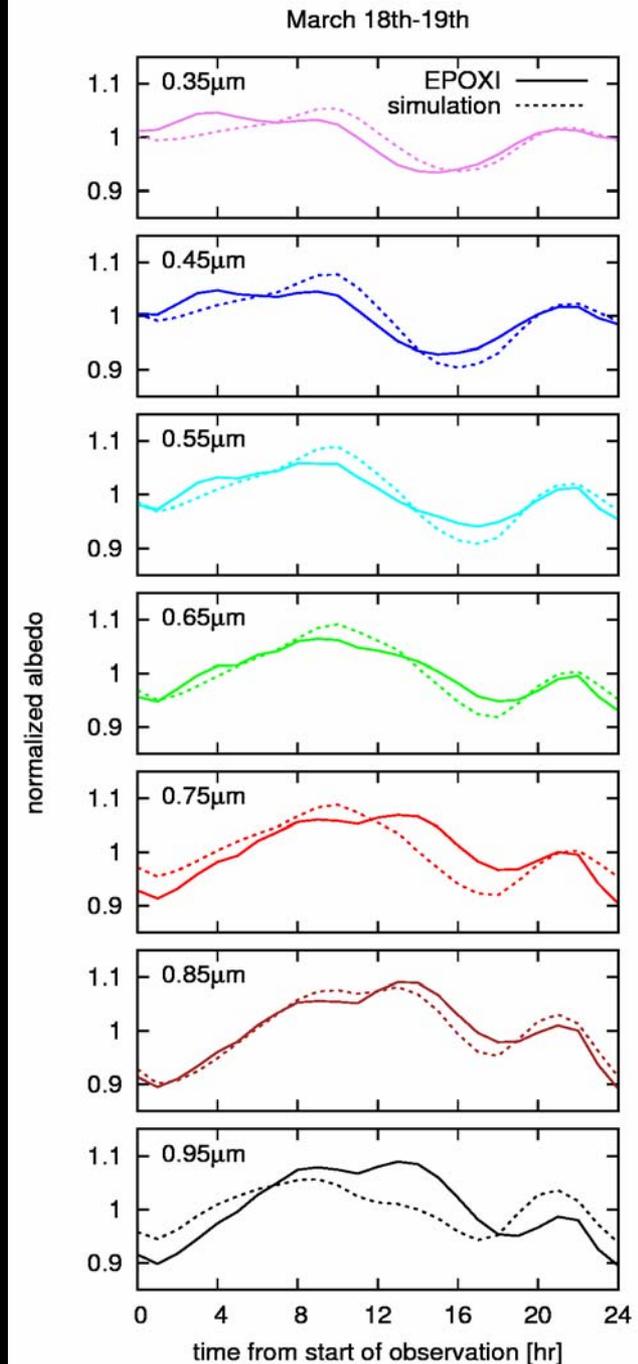


輻射光



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)

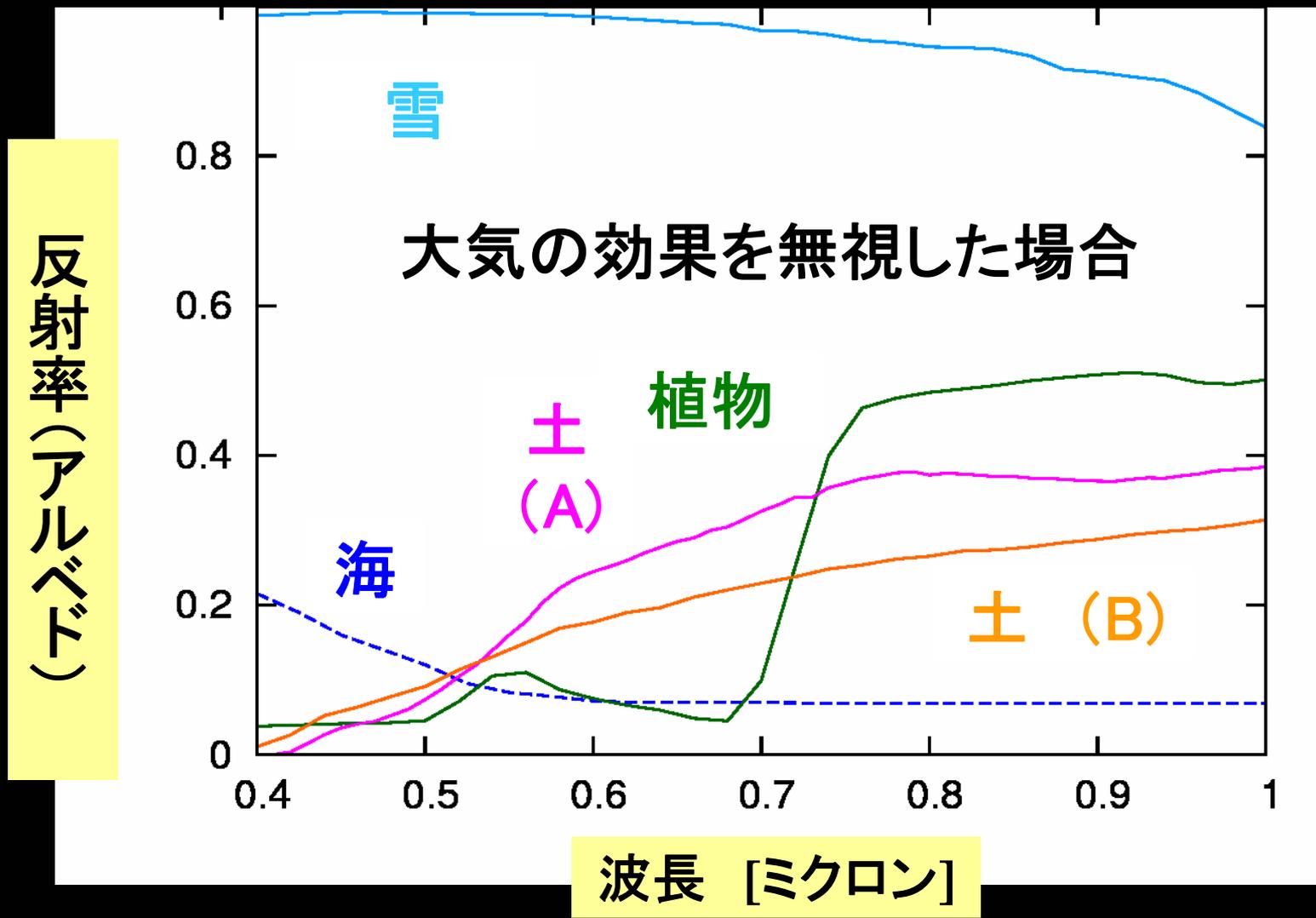


Fujii et al. (2010)

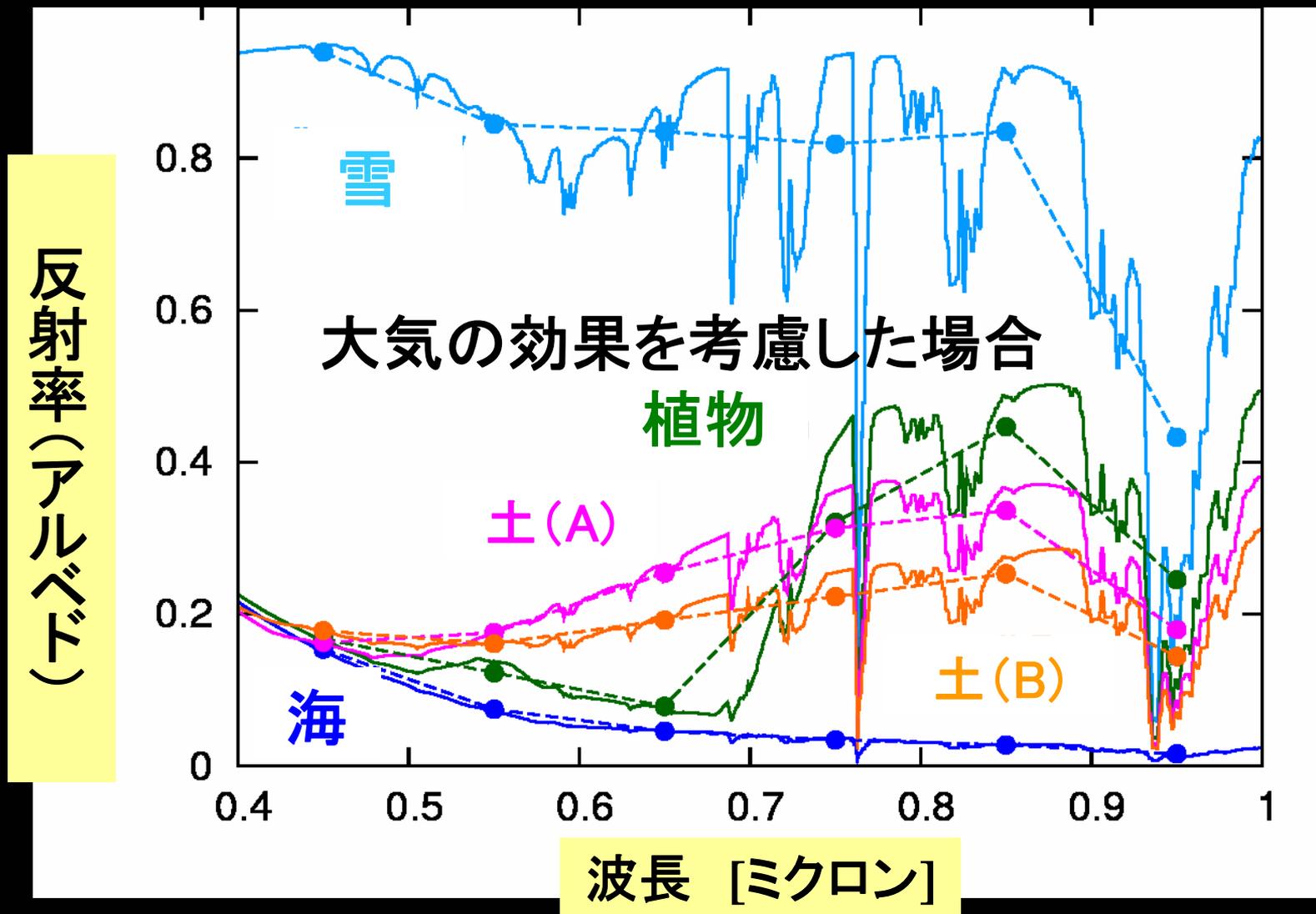
逆問題：地球の成分ごとの面積の推定

- 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

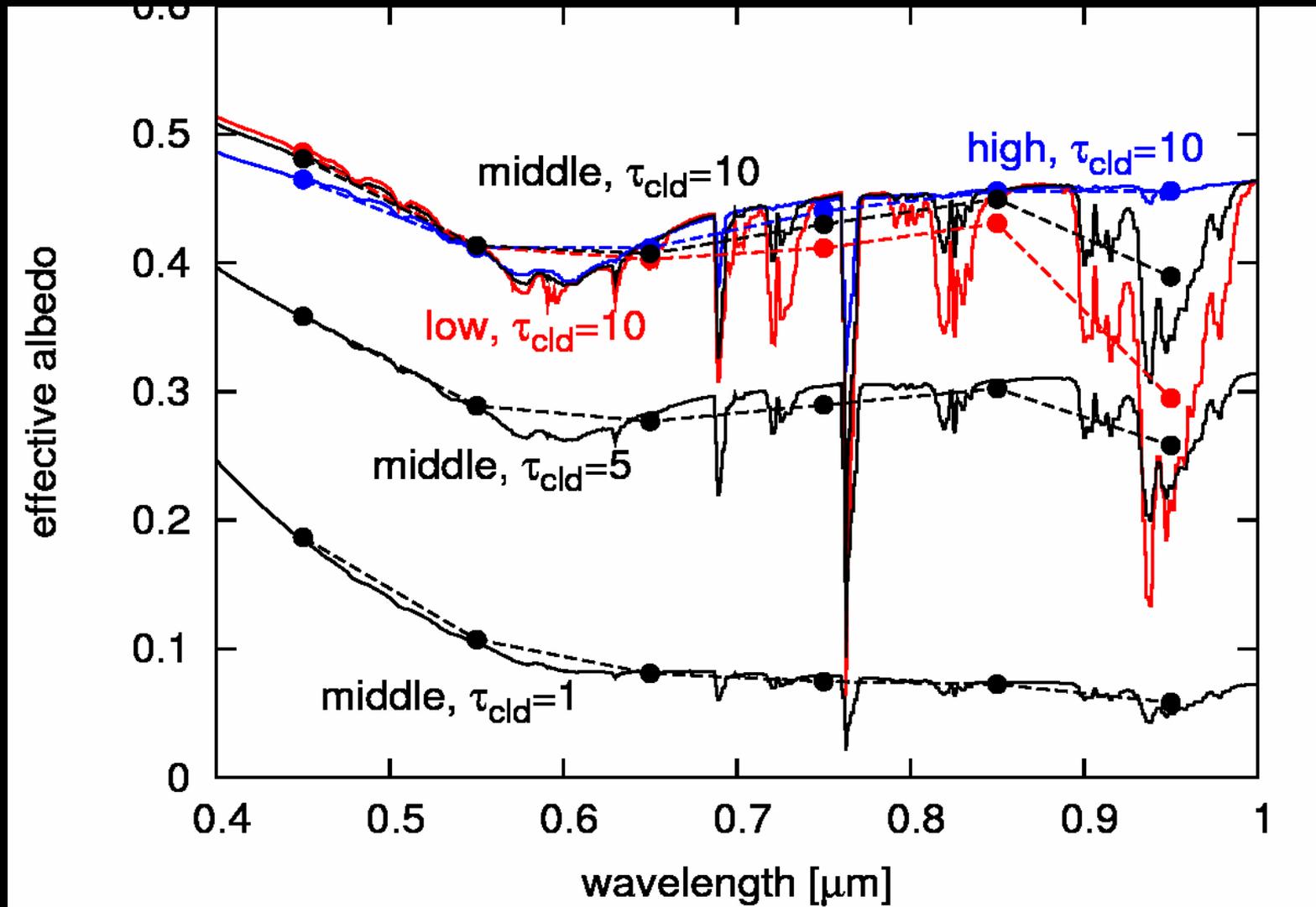
等方散乱近似での反射スペクトル



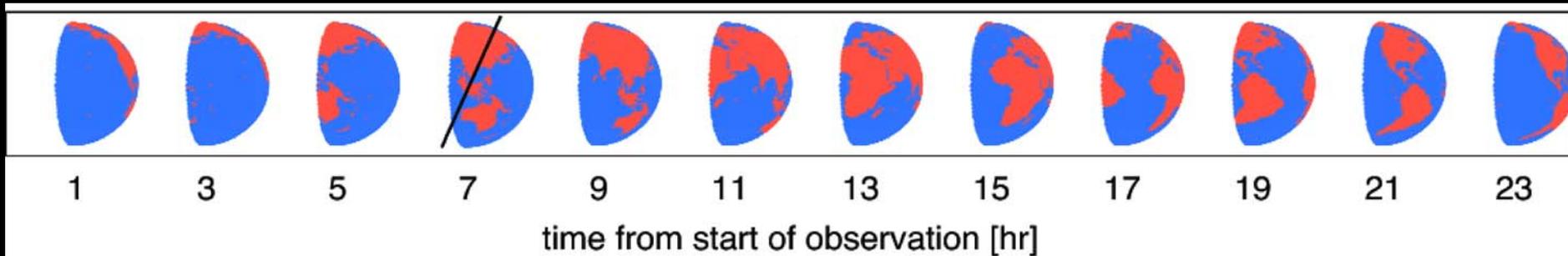
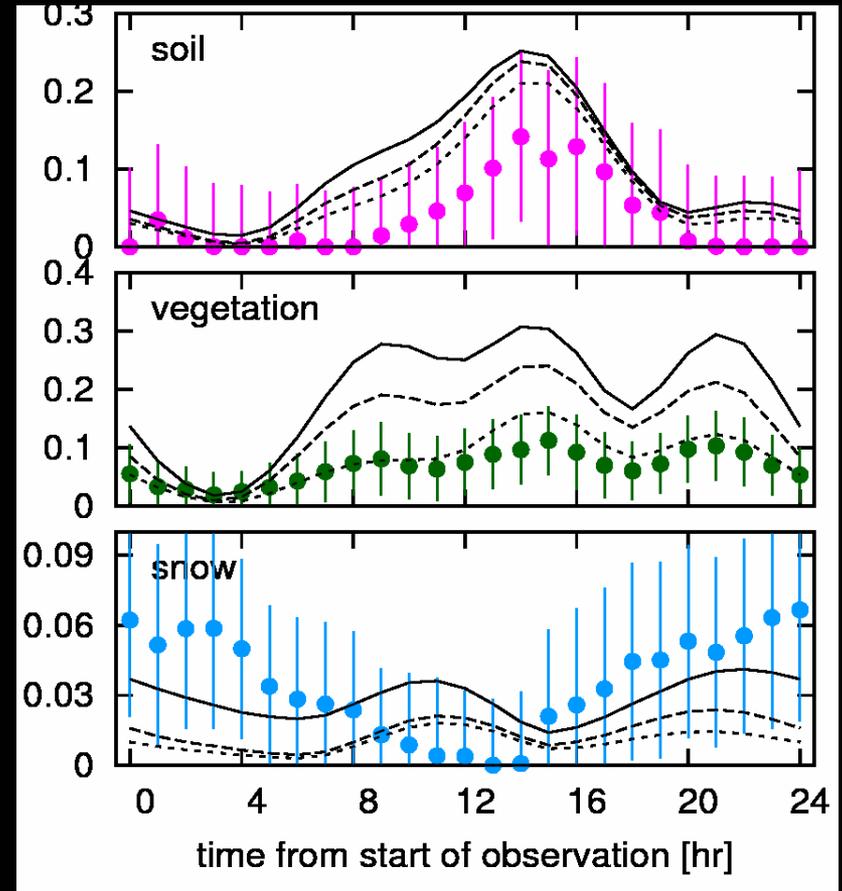
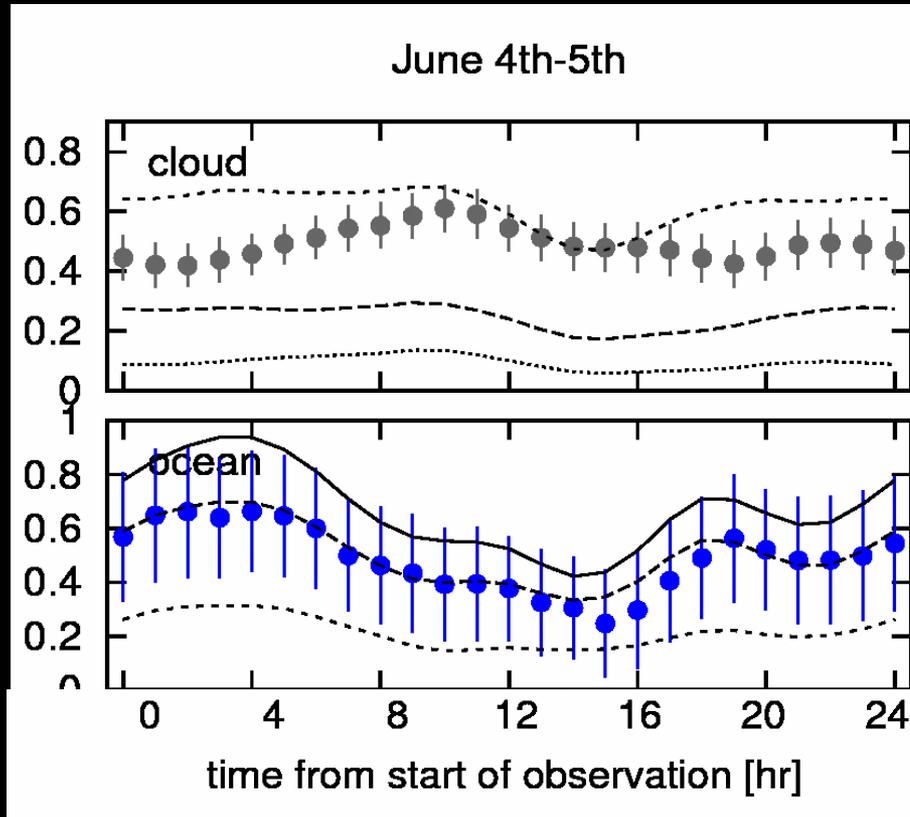
等方散乱近似での反射スペクトル



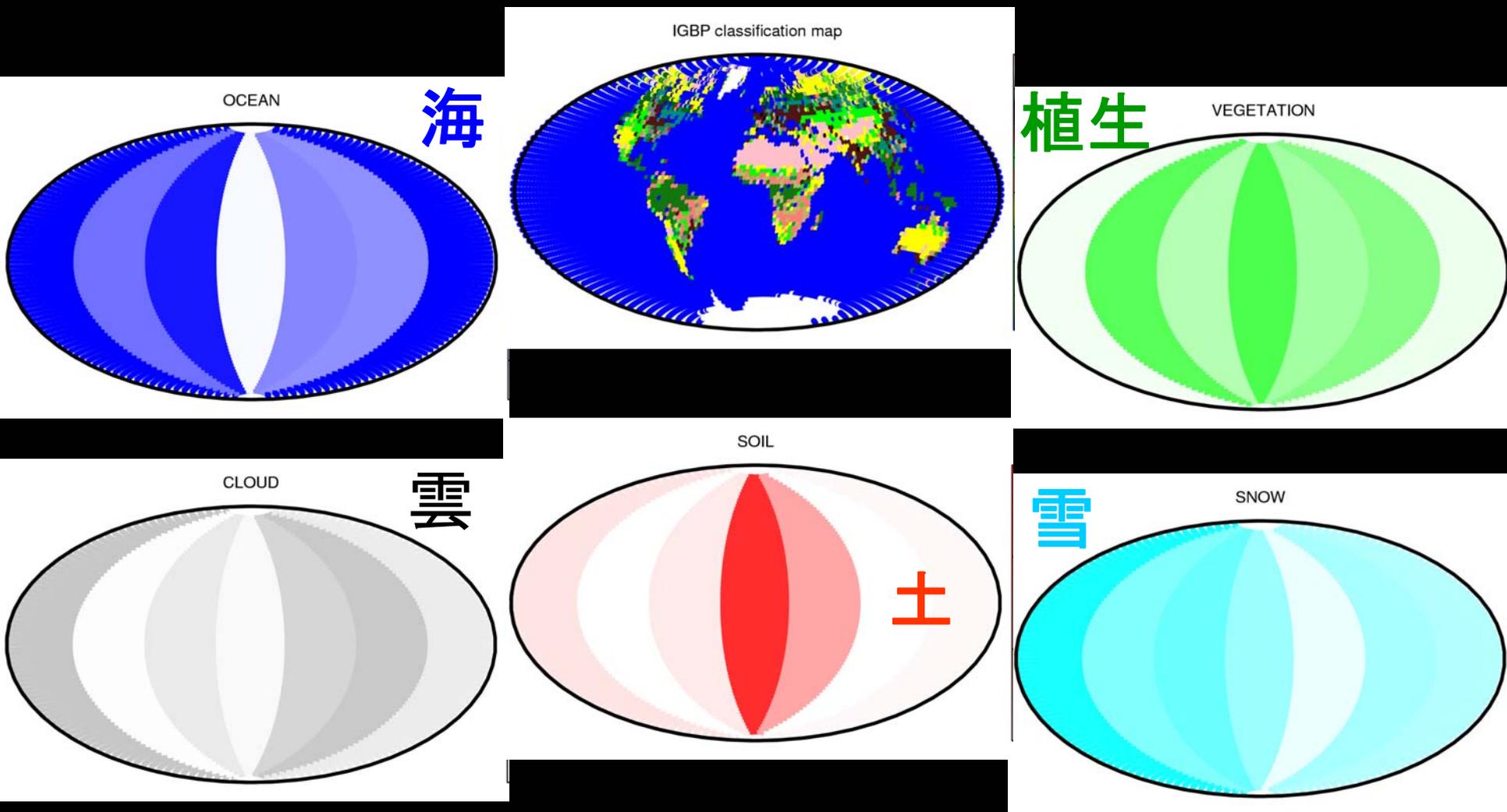
雲の反射スペクトル: モデル依存性



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



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

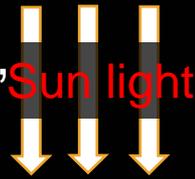
Here comes the Sun

日周変化

Visible line

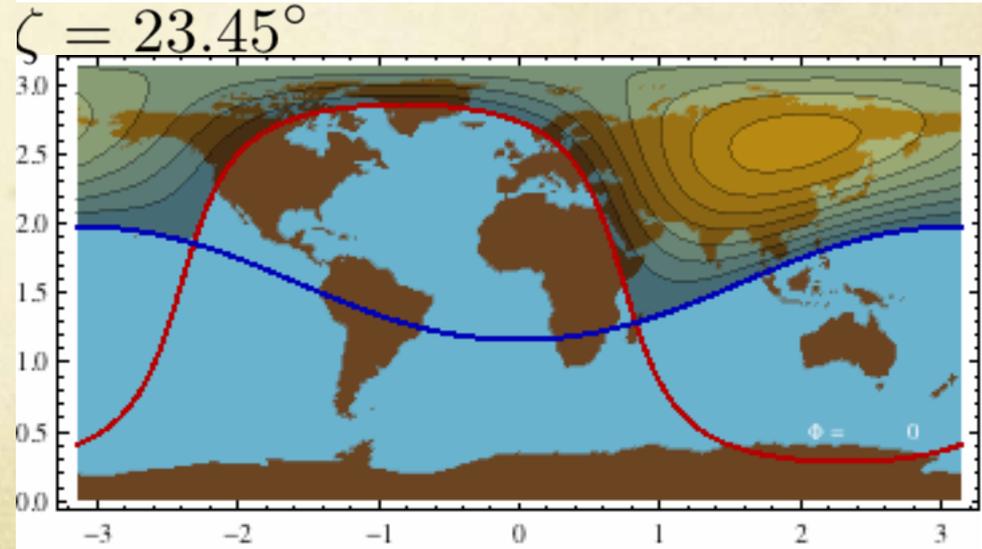
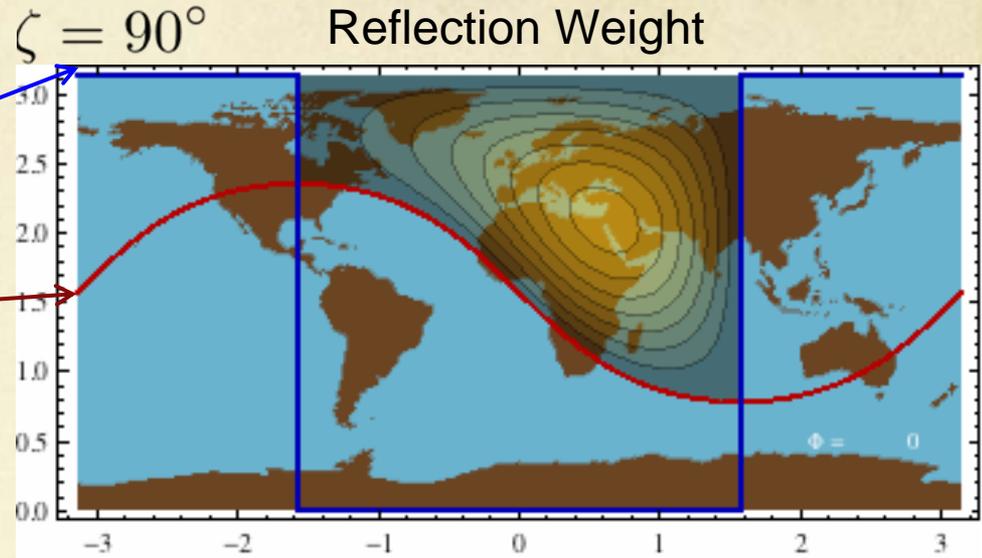
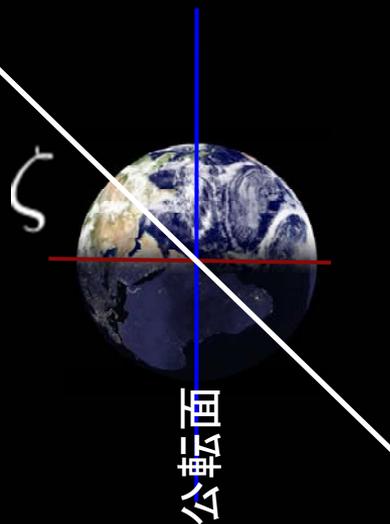
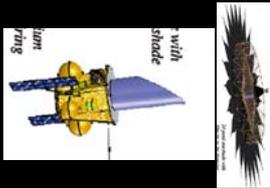
Illuminated line

Assumptions : Face on and spherical orbit, Lambert reflectance



自転軸

observer



(河原創氏のプレゼンより)

Here comes the Sun

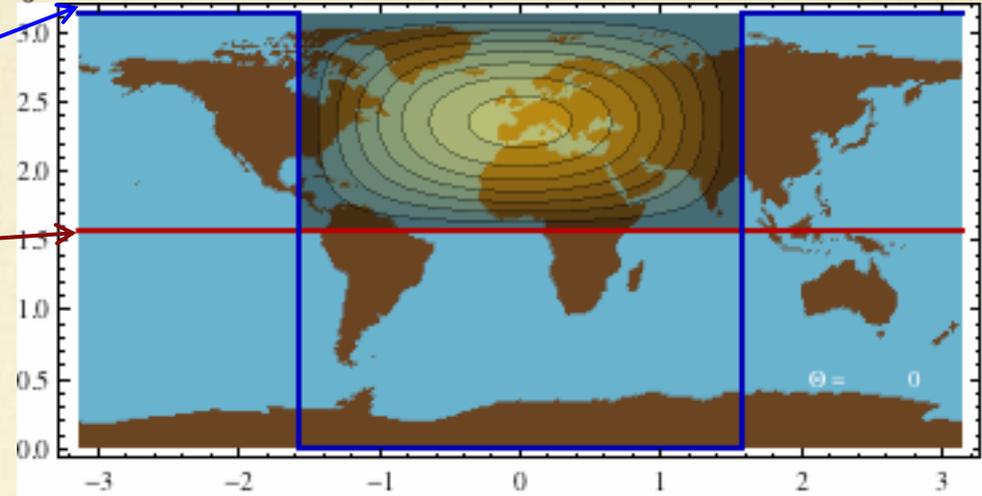
年間変化

Visible line

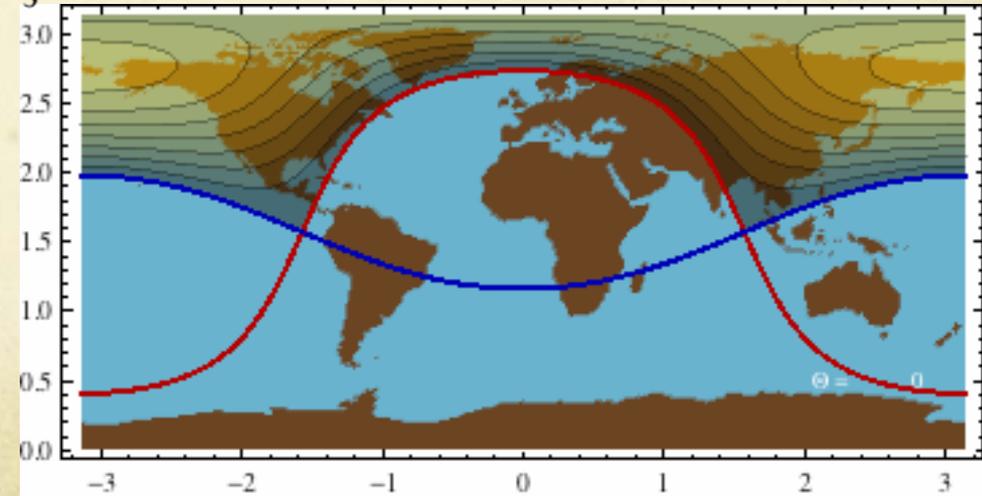
Illuminated line

$\zeta = 90^\circ$

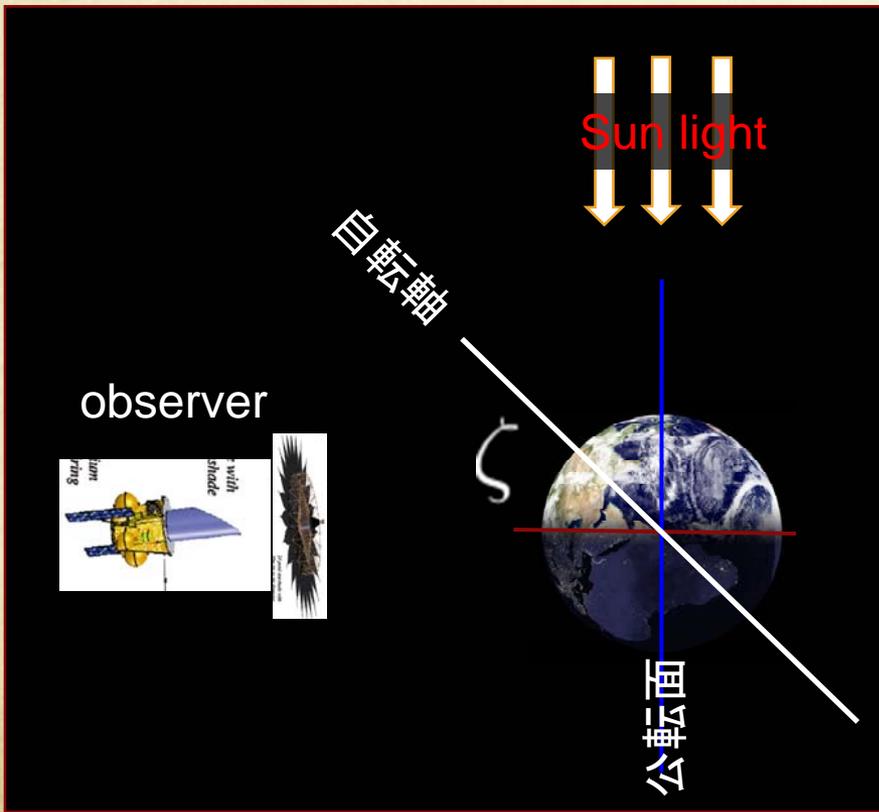
Reflection Weight



$\zeta = 23.45^\circ$



(河原創氏のプレゼンより)



“反射光トモグラフィ”

Kawahara and Fujii (2010)

Weighted Area (観測値)

陸地率

$$\begin{aligned} A(\Phi(t_i), \Theta(t_i); \zeta) &= \sum_{j: (s_j \cap S_V) \neq \emptyset} \int_{s_j} W(\phi, \theta; \Theta(t_i); \Phi(t_i); \zeta) m(\phi, \theta) d\Omega \\ &= \sum_{j: (s_j \cap S_V) \neq \emptyset} \langle m \rangle_{ij} \int_{s_j} W(\phi, \theta; \Theta(t_i); \Phi(t_i); \zeta) d\Omega, \\ &\approx \sum_j \bar{m}_j \int_{s_j} W(\phi, \theta; \Theta(t_i); \Phi(t_i); \zeta) d\Omega \quad \rightarrow \quad A_i = \sum_j D_{ij} \bar{m}_j \end{aligned}$$

◆ ピクセル平均された陸地率

$$\bar{m}_j \equiv \frac{\int_{s_j} m(\phi, \theta) d\Omega}{\int_{s_j} d\Omega}$$

◆ ピクセル上でReflection Weightedな陸地率

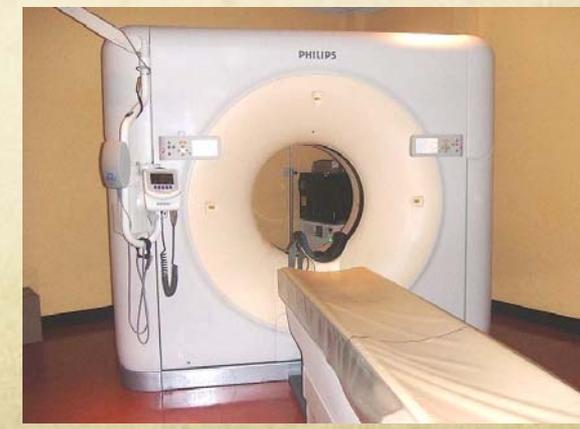
$$\langle m \rangle_{ij} \equiv \frac{\int_{s_j} W(\phi, \theta; \Theta(t_i); \Phi(t_i); \zeta) m(\phi, \theta) d\Omega}{\int_{s_j} W(\phi, \theta; \Theta(t_i); \Phi(t_i); \zeta) d\Omega}$$

これを \bar{m}_j について解く

Constraint : $0 \leq \bar{m}_j \leq 1$

Bounded Variable Least Square
(BVLS; Lawson & Hanson 1995)

(河原創氏のプレゼンより)



動作テスト

(河原創氏のプレゼンより)

陸地のReflection-Weighted Area

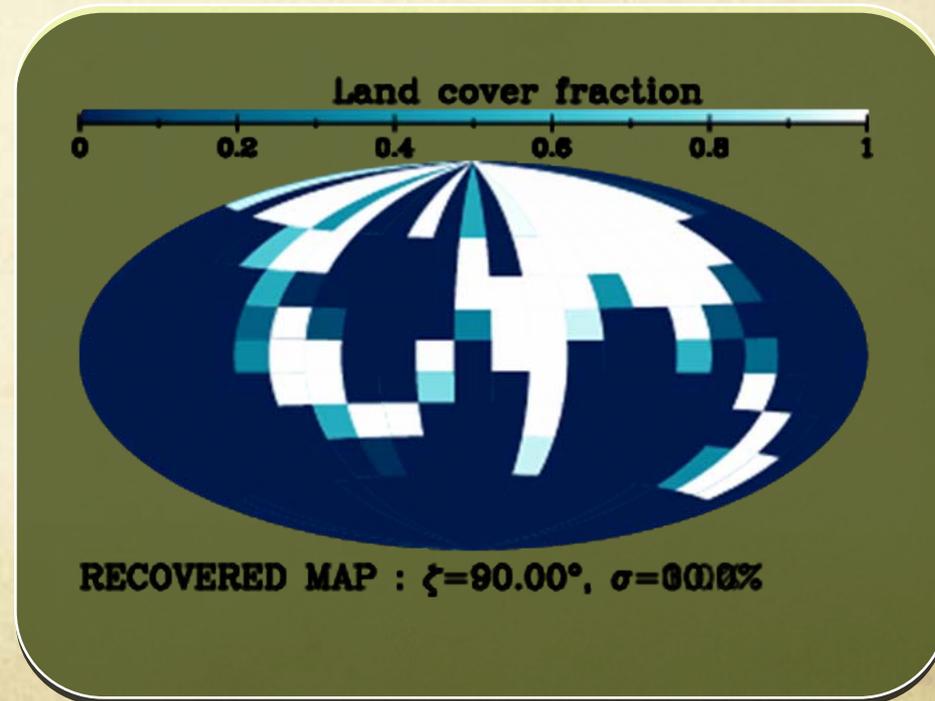
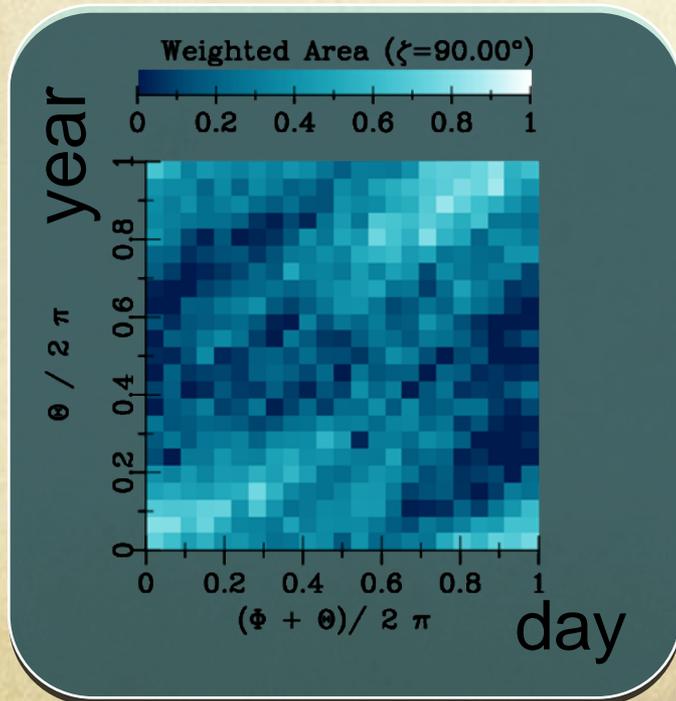
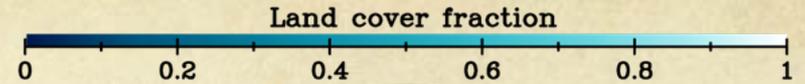
日変化・年周変化をINPUTに

Obliquity = 90°
INPUT

INPUT

Noise = 30 %

OUTPUT



動作テスト

(河原創氏のプレゼンより)

陸地のReflection-Weighted Area

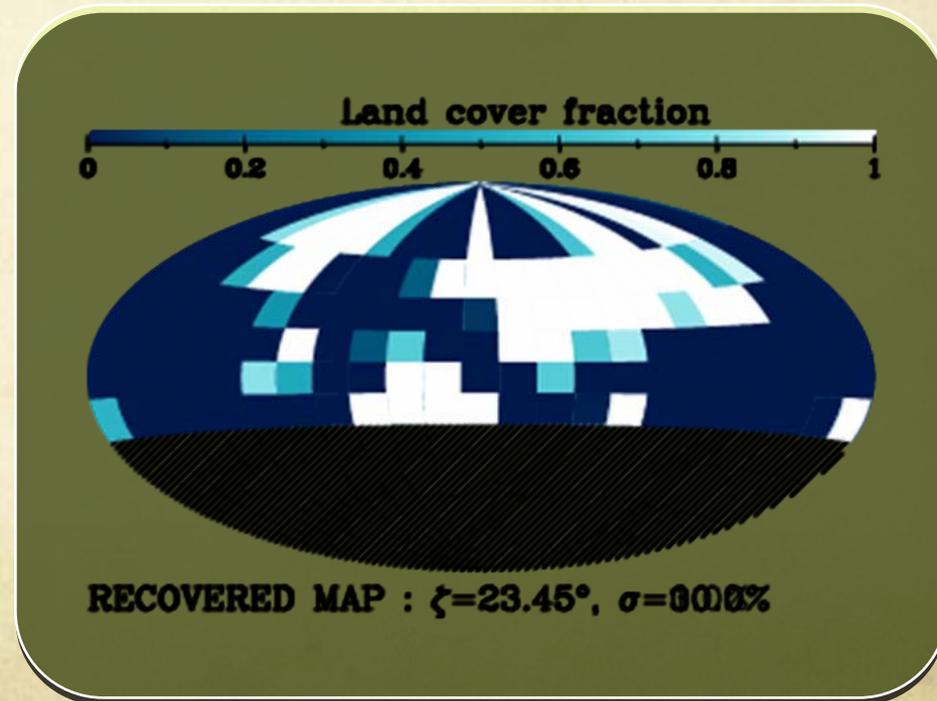
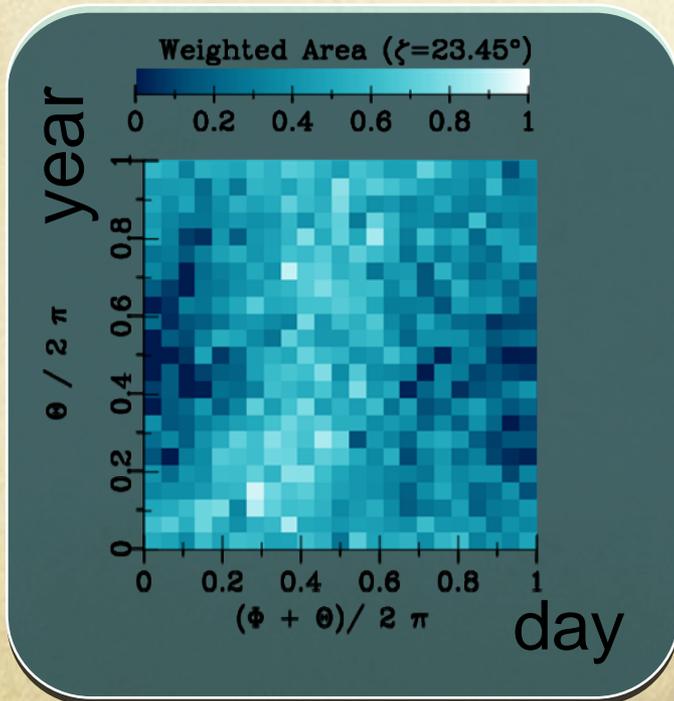
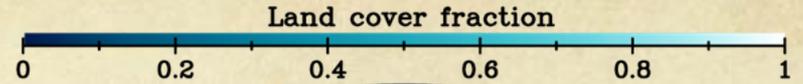
日変化・年周変化をINPUTに

Obliquity = 23.5°

INPUT

Noise = 30 %

OUTPUT



模擬観測

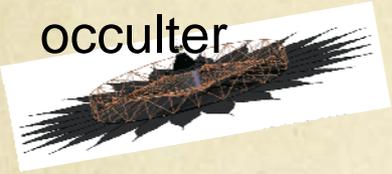
Ozone Occulting Observatory

5 & 10 pc先から太陽-地球系を一年間観測

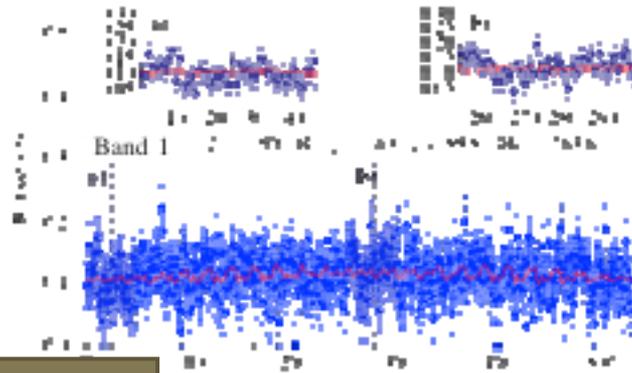
◆ read noise, dark noise, zodi & exozodi noise

◆ 雲なし、月なし、Obliquity=90° circular face-on

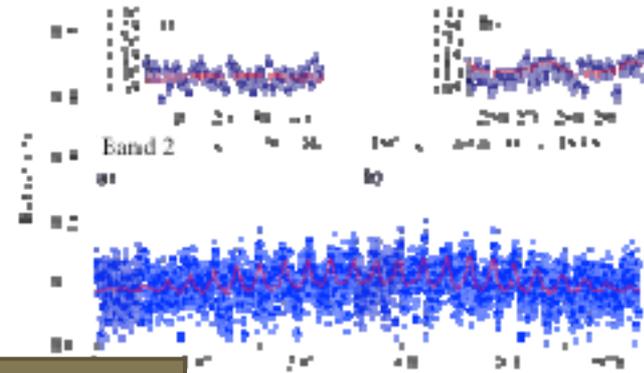
30m
occulter



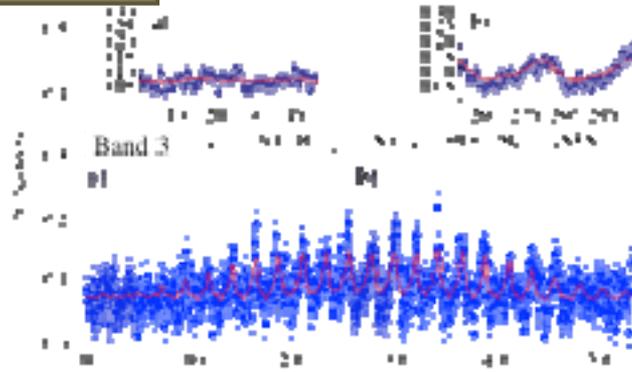
0.47um



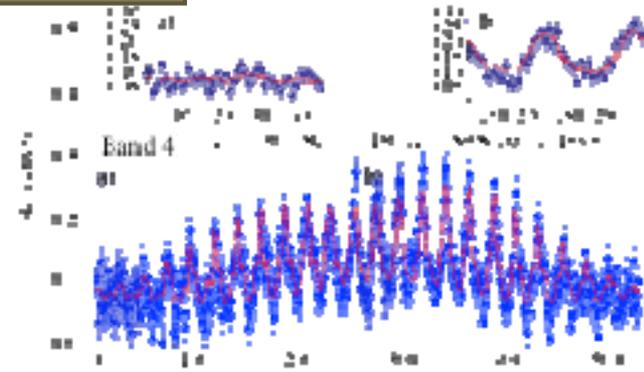
0.56um



0.65u



0.86um



1.1m望遠鏡



23 (year) x 23 (day) 赤線はトモグラフィーによるPredicted curves

北米

ユーラシア

日本は分解できず

オーストラリア??

アフリカ
(おもにサハラ砂漠)

ラテンアメリカ
(熱帯雨林)

(5 pc), $\zeta=90.00^\circ$, Band 1-

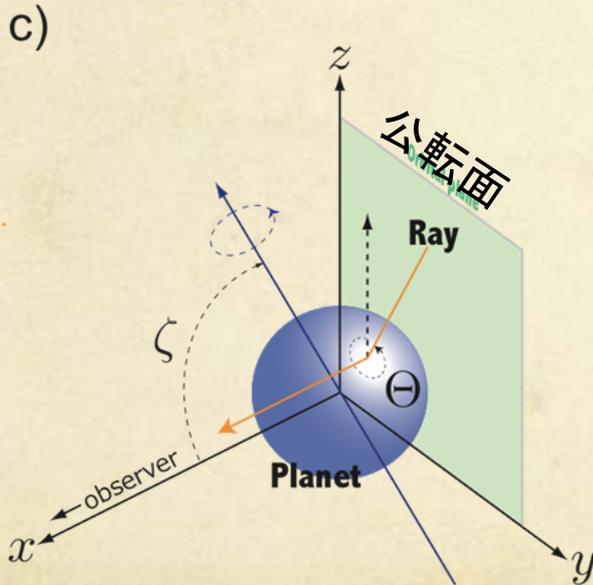


CLASSIFICATION BASED ON GBD and 1-4

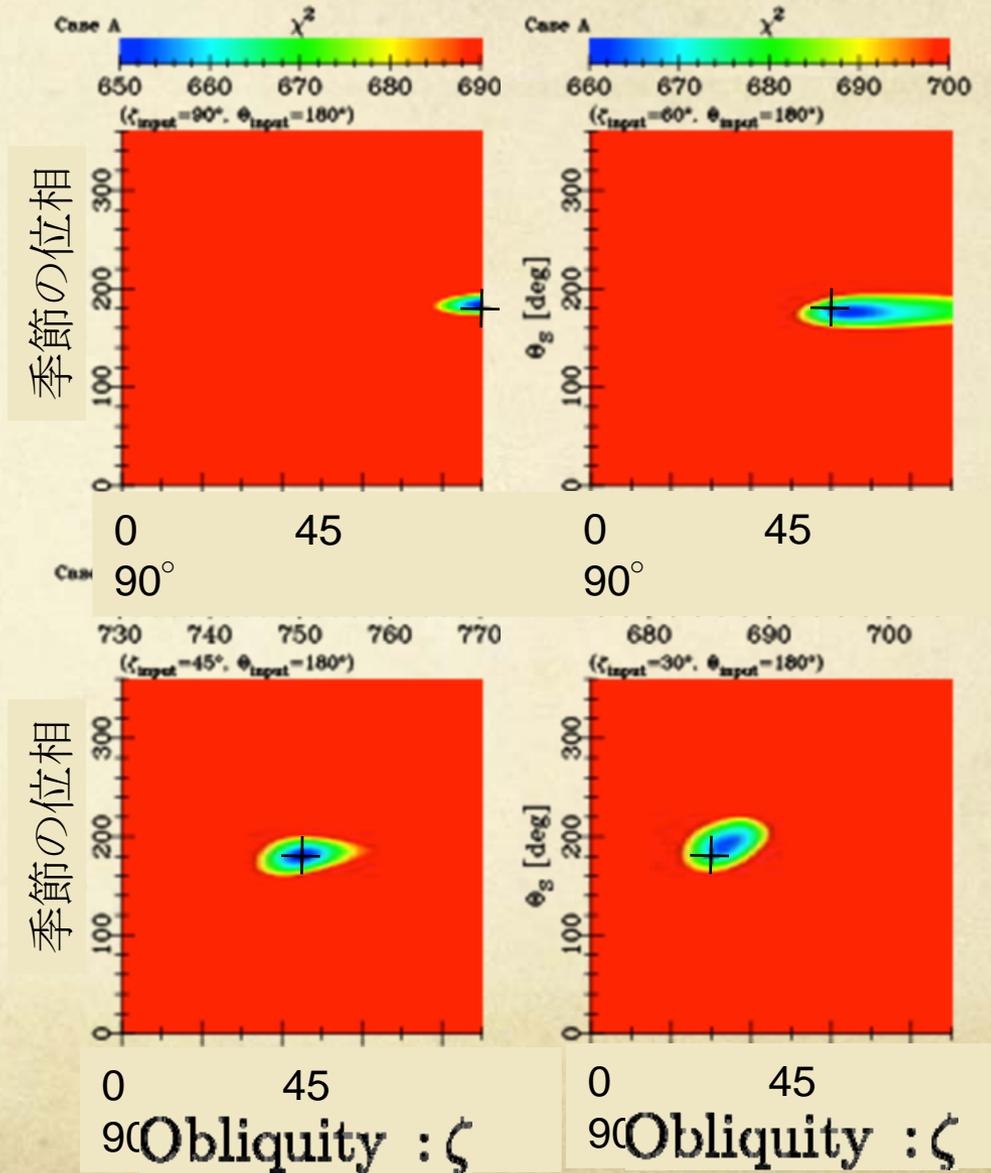
(河原創氏のプレゼンより)

赤道傾斜角と季節の推定

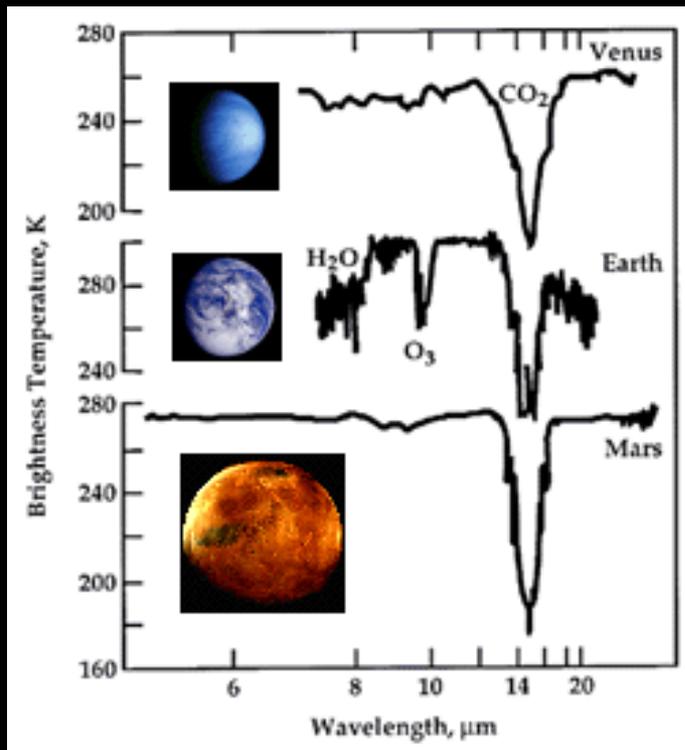
◆ chi-square最小をさがすことで、この方法論をだけから **Obliquity**と**季節の位相**を推定することができる



(河原創氏のプレゼンより)



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、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