

ペイル・ブルー・ドットの本当の色



東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 須藤 靖

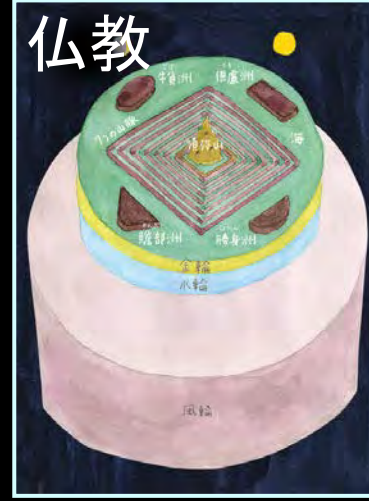
2012年11月26日 14:50-16:20@B106

高知工科大学 現代科学の最先端第11回

天文学の目標： 夜空のムコウの世界を探る

■ 我々の世界はどうなっているのか

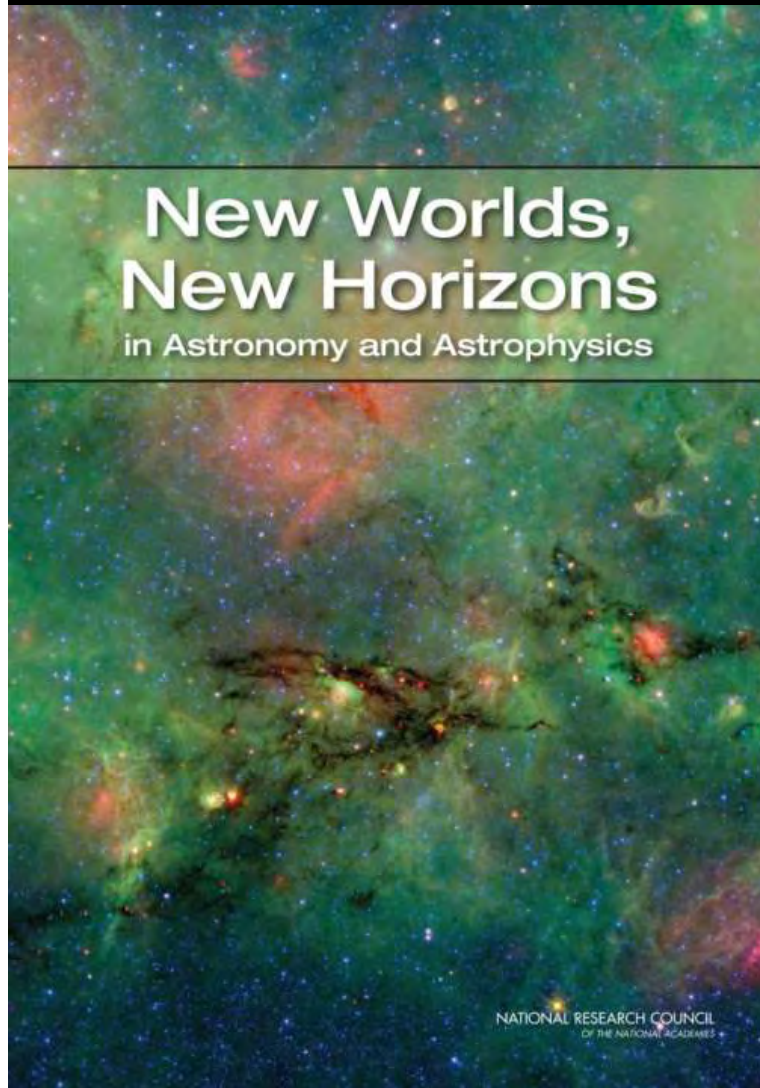
イラスト：羽馬有紗



■ 直接役に立つわけではなくとも人生を豊かにしてくれる“invaluable”な疑問に挑戦する

- 宇宙は何からできているか？（宇宙論）
- もう一つの地球はあるか？（太陽系外惑星）
- 生命はいかにして誕生したのか？（宇宙生物学）

Astro2010: decadal survey



■ *Cosmic Dawn*

- 宇宙の夜明け: 第一世代天体・ブラックホールの探索

■ *New Worlds*

- 新世界: 近傍の居住可能惑星の探索

■ *Physics of the Universe*

- 宇宙の物理: 宇宙を支配する科学法則の理解

August 13, 2010

http://sites.nationalacademies.org/bpa/BPA_049810

もうひとつの宇宙の果て： 銀河系のどこかに生命を宿した惑星はあるのか？

■ 宇宙の果てと太陽系外惑星

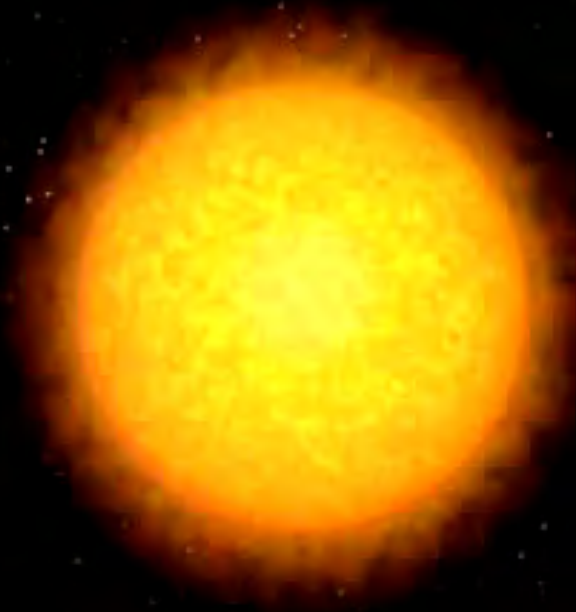
■ 大望遠鏡は「暗い」天体を観測できる

■ 本当は明るいのだが遠く
にあり暗く見える天体

⇒ 宇宙の果てにある銀河

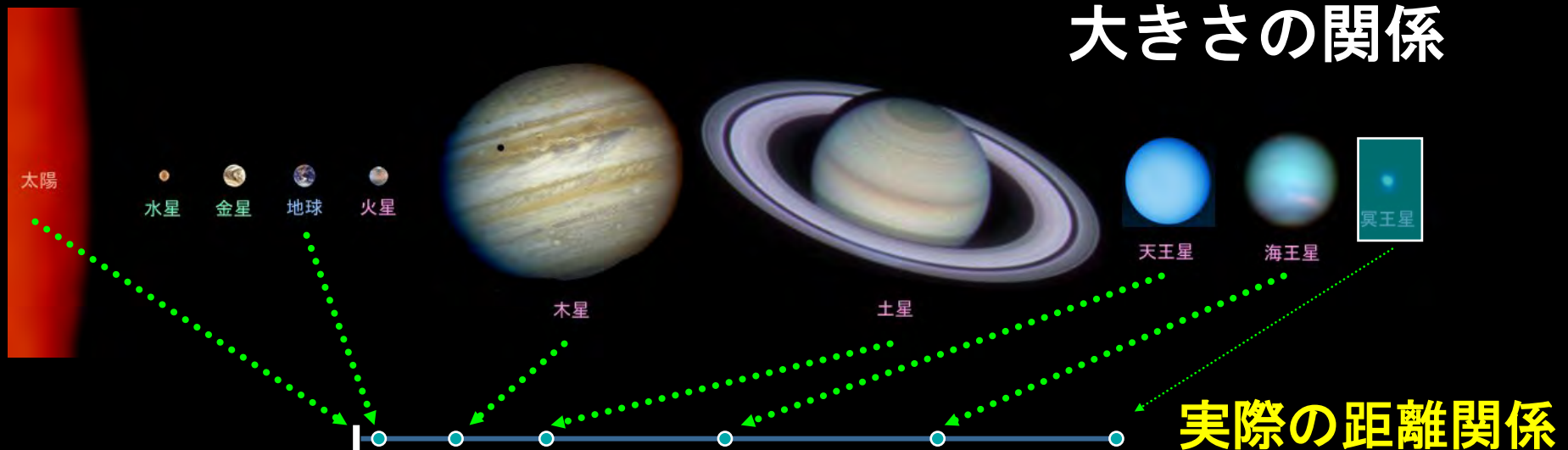
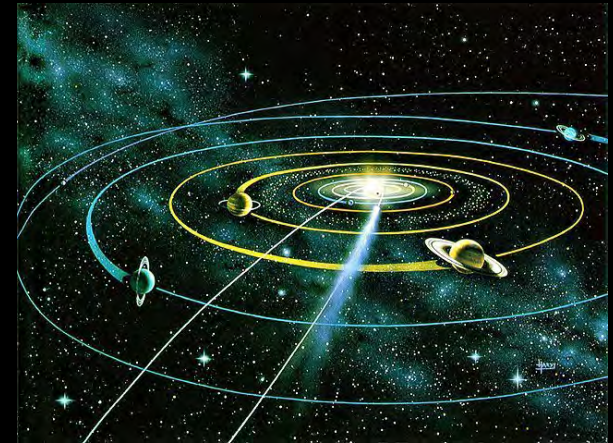
■ すぐ近くにあるのだが本
当に暗い天体

⇒ 銀河内にある系外惑星



太陽系惑星のおさらい

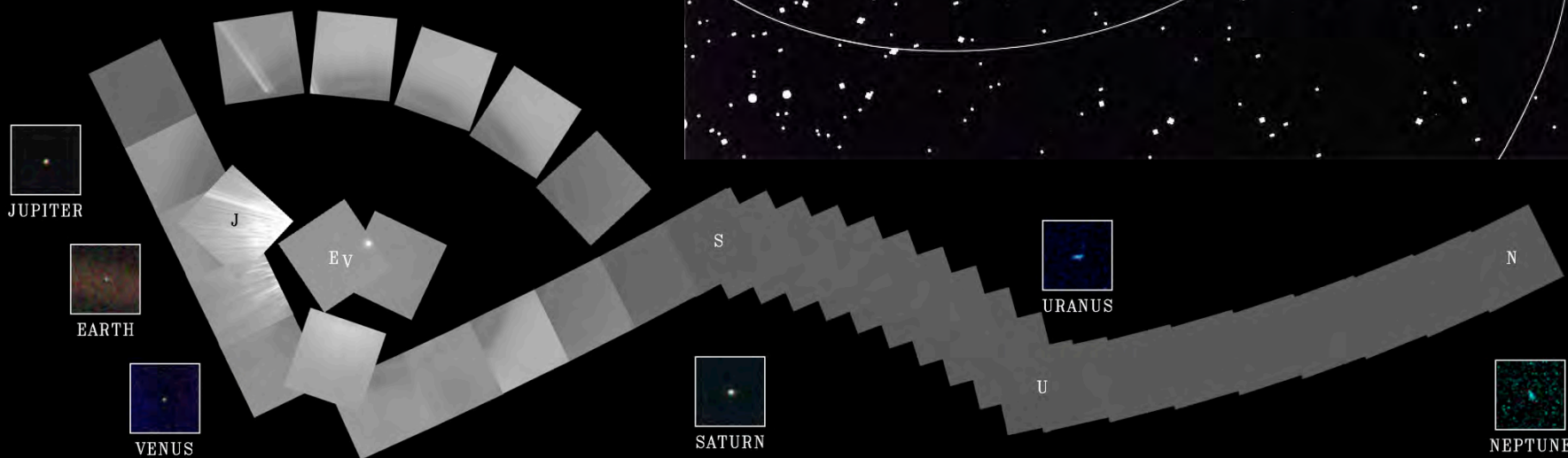
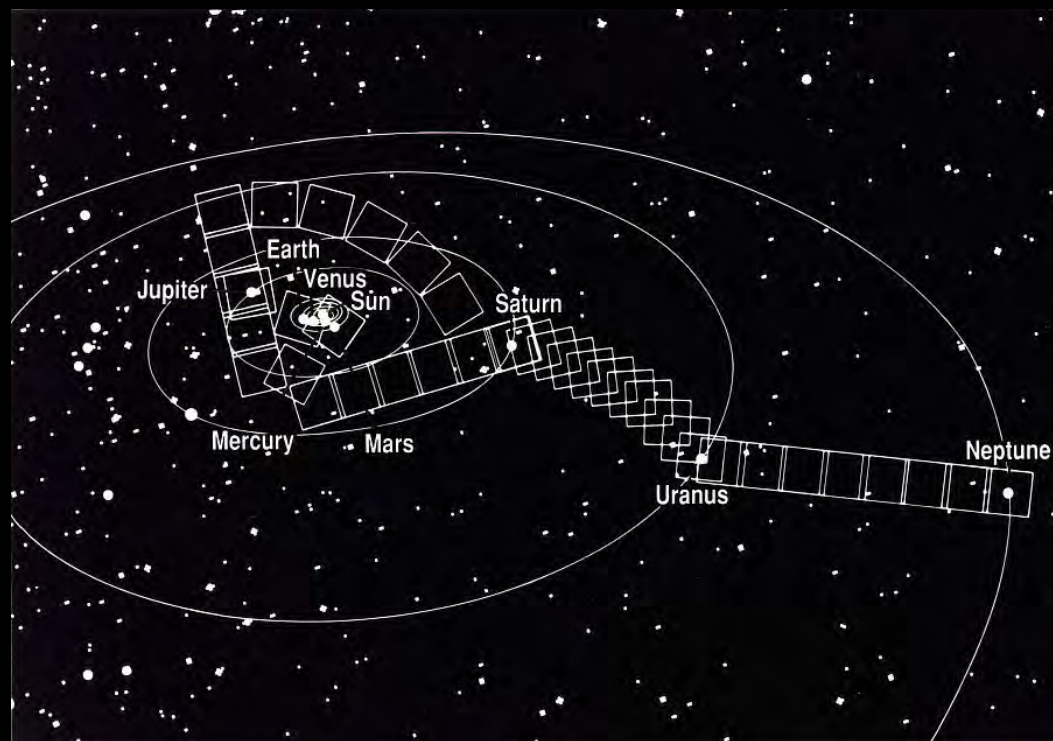
- **岩石惑星**：地球、火星、金星、水星
- **ガス惑星**：木星、土星
- **氷惑星**：天王星、海王星
- **準惑星/太陽系外縁天体**：冥王星など
- **太陽は惑星ではなく恒星(星)**
 - 核融合で自らエネルギーを生成
 - **惑星≠星 (planet ≠ star)**



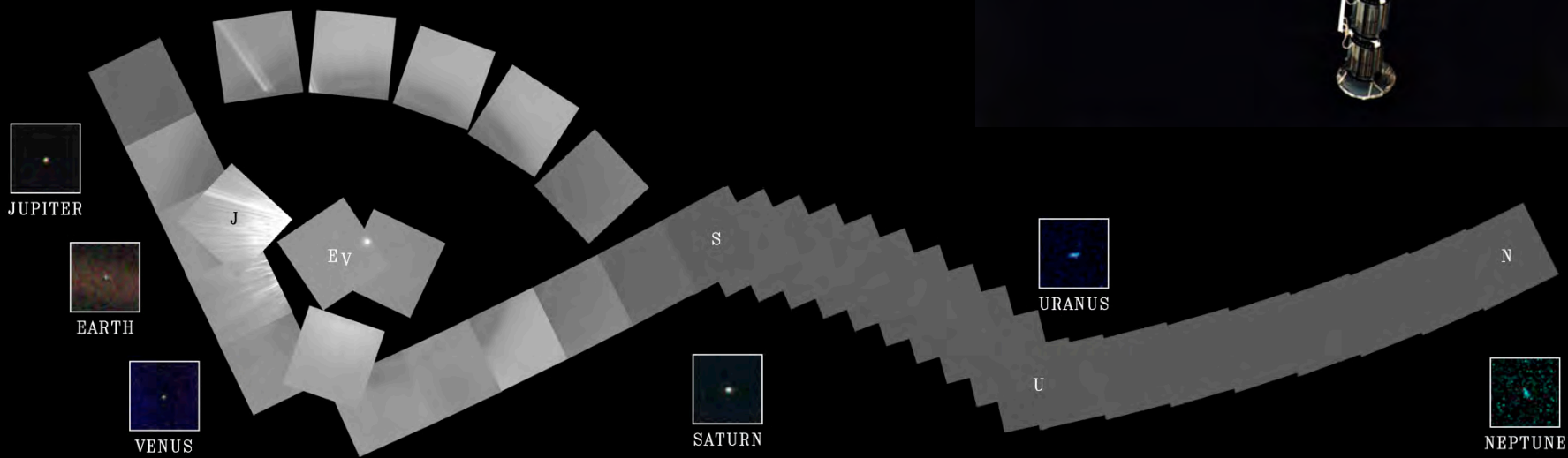
ボイジャー1号による太陽系内惑星撮像

■ 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



ペイル・ブルー・ドット



太陽系惑星から太陽外惑星へ

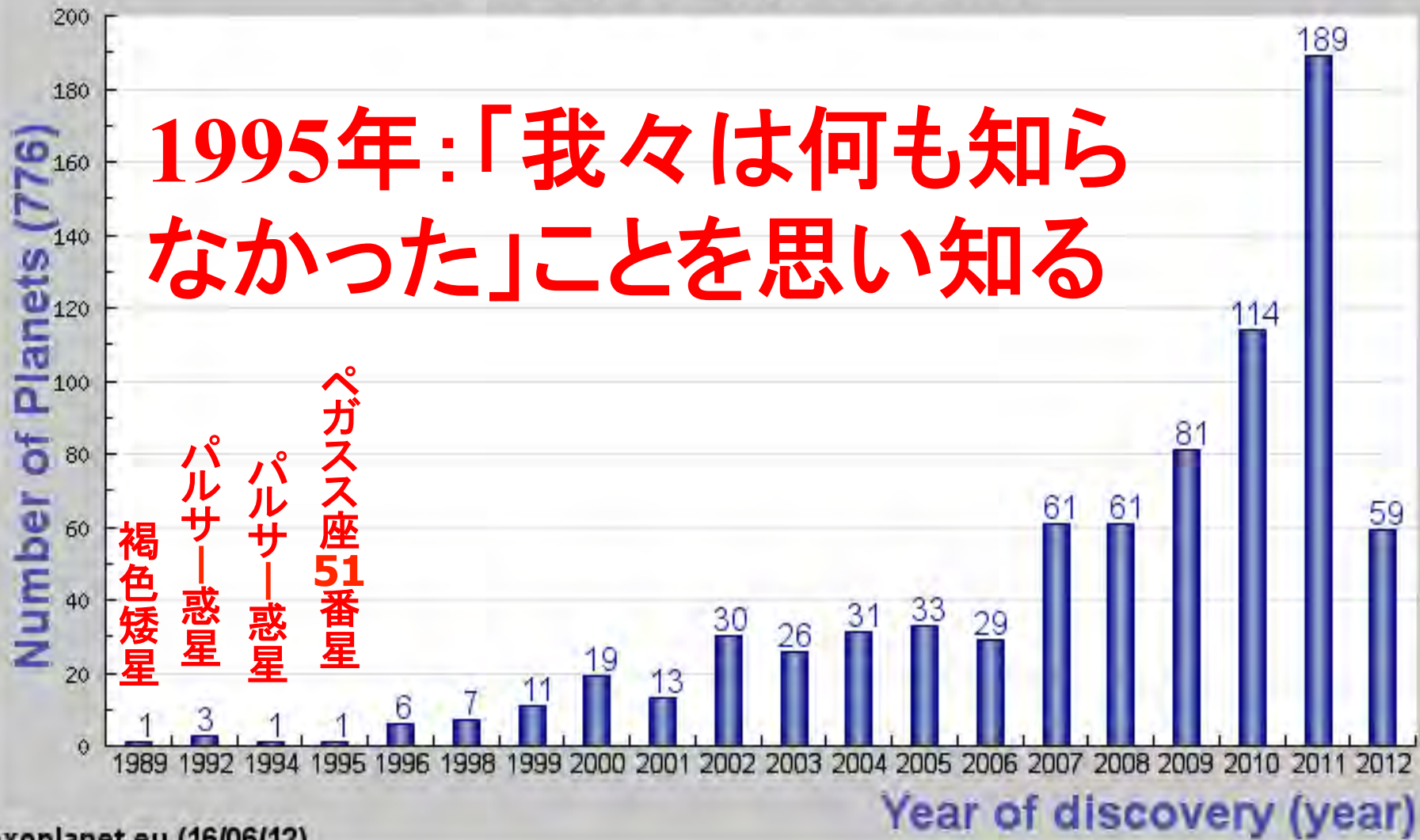
- かつての世界＝太陽系：水金地火木土
- 哲学的世界観
 - この宇宙とよく似た宇宙も全く異なる宇宙も無限に存在
(エピキュラス：紀元前341年～270年)
 - 我々以外の宇宙は存在し得ない(アリストテレス：紀元前384年～322年)
 - 宇宙は無限であり、太陽系以外にも無数の惑星がある
(ジョルダノー・ブルーノ：1548－1600、その『罪』で火刑)
- わが太陽系の拡大
 - 1781年：天王星の発見
 - 1846年：海王星の発見
 - 天王星の観測＋ニュートン力学によって予測され発見
 - 1930年：冥王星の発見
 - 海王星の観測＋ニュートン力学によって予測され発見されたのだが、実は海王星の観測データの解釈が間違っていたため偶然の発見であると考えられているらしい
- 1995年：初めての太陽系外惑星の発見

太陽系外惑星発見史

- 1963年 バーナード星に惑星を発見！（ピーター・バンデキャンプ）と報告したが、後に間違いとわかる
- 1995年8月：カナダのゴードン・ウォーカーのグループが12年にもわたる観測の結果、21個の恒星のまわりに巨大惑星は存在しないことを発表
- 1995年10月：スイスのミシェル・メイヨールとその学生デディエ・ケロズが太陽に似た恒星ペガサス座51番星を周期4日で公転している巨大惑星を発見
 - 前年4月に新装置で探査開始したばかり！
 - 直後に、過去7年惑星探査を続けていた、アメリカのジェフ・マーシーとポール・バトラーらがこのデータを確認
- 2012年6月16日時点で776個の系外惑星

太陽系外惑星の発見年表

Number of planets by year of discovery



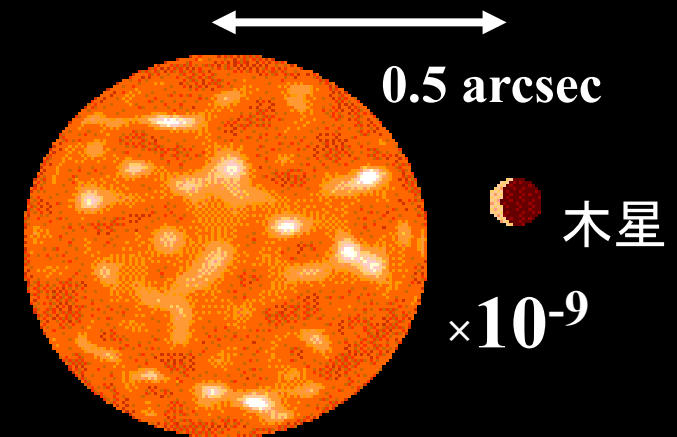
2012年6月16日時点 <http://exoplanet.eu/>

惑星は直接見えるか？

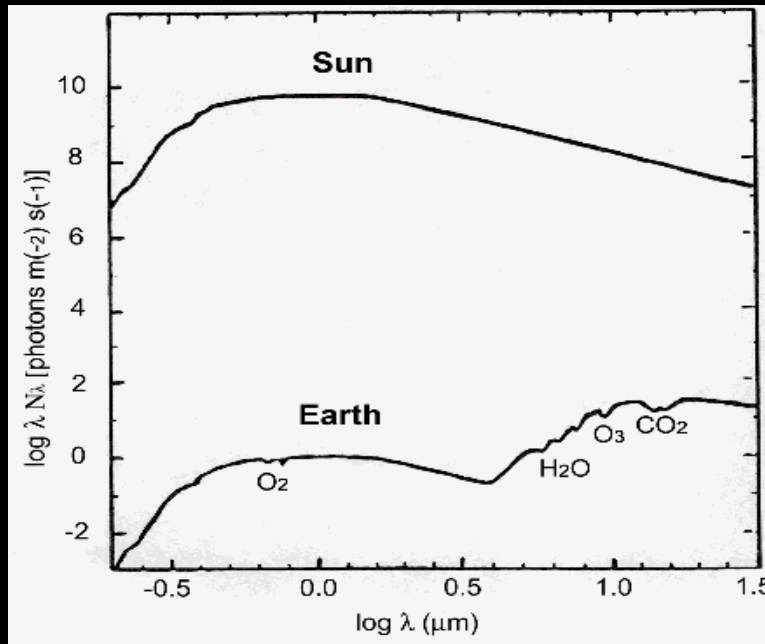
30光年先から観測した木星

明るさ: 27等級 (可視域)

主星との角距離: 0.5秒角



太陽

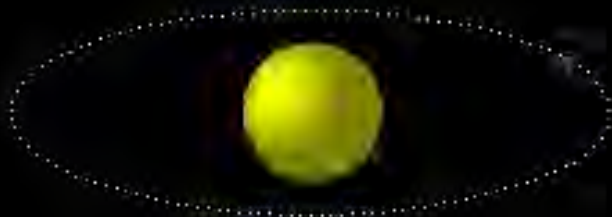


地上から観測できる分解能の大きさ内で、9桁も明るい主星の隣にある27等級の暗い天体を検出する

⇒ ほとんど不可能
(だった: 後述)

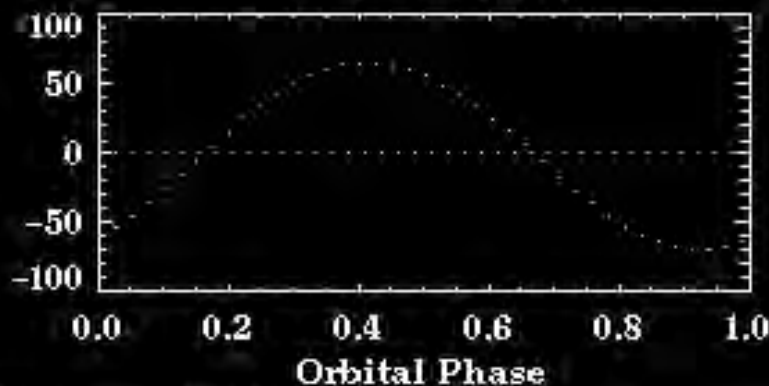
ではどうやって見つけたのか？

Circular Orbit: rho CrB



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

Radial Velocity Curve
of the Star [m/s]



S.G. Korzennik (CfA, © 1997)

■ 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(←ニュートン力学)

■ トランジット法

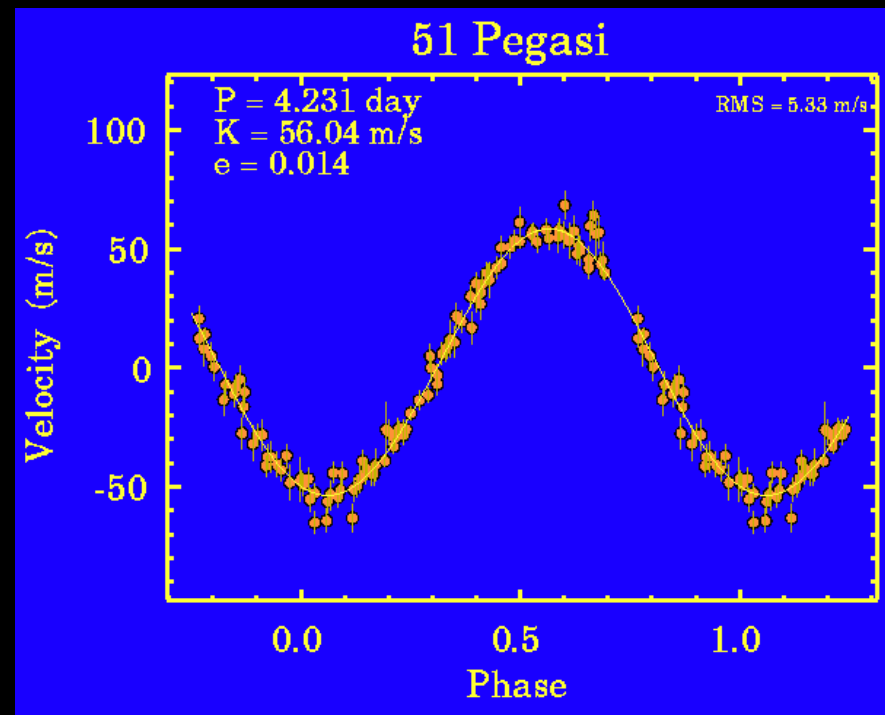
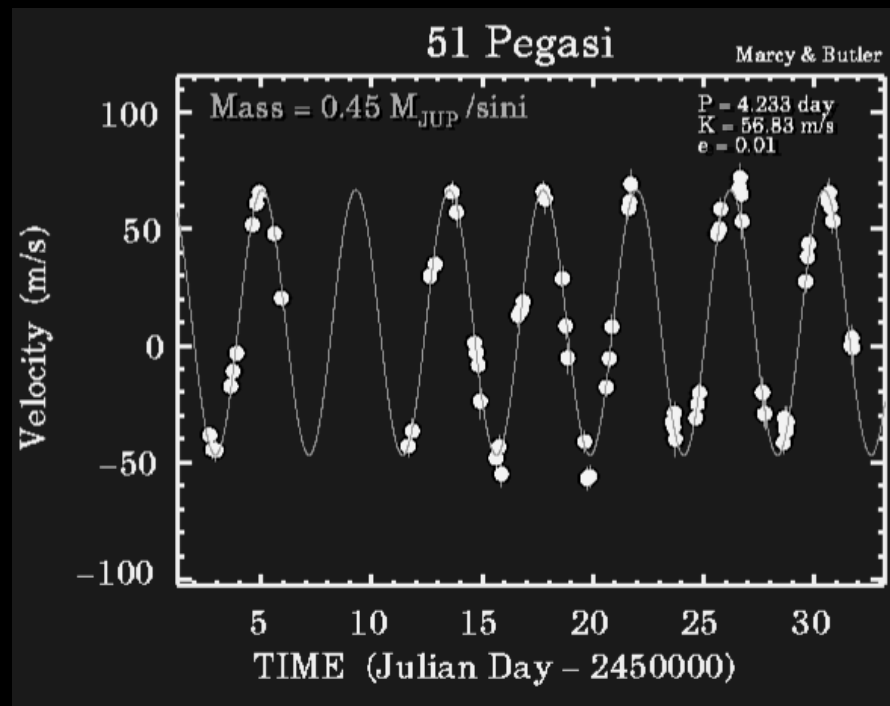
- (運がよければ) 中心星の正面を惑星が横切ることで星の明るさが1パーセント程度周期的に暗くなる

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！

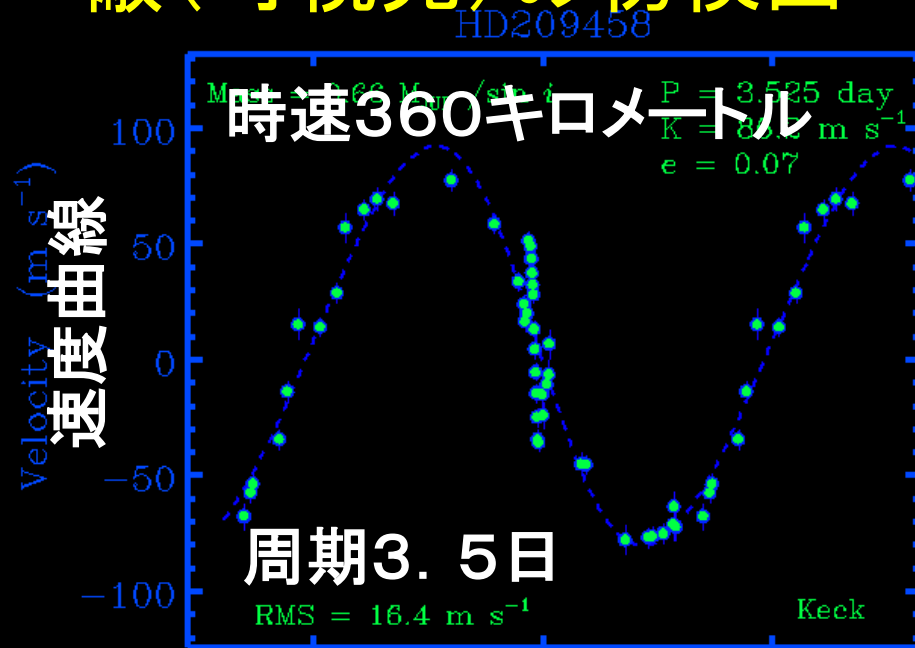


ミッシェル・メイヨール



初めてのトランジット惑星HD209458b

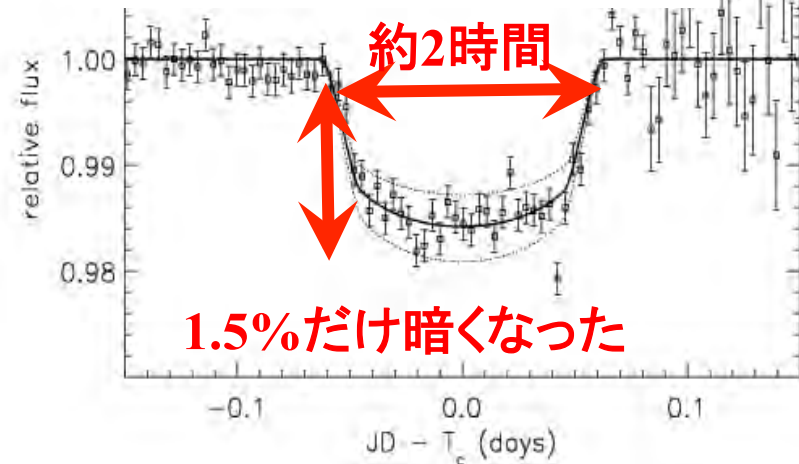
- 速度変動のデータに合わせた惑星による主星の掩蔽(可視光)の初検出



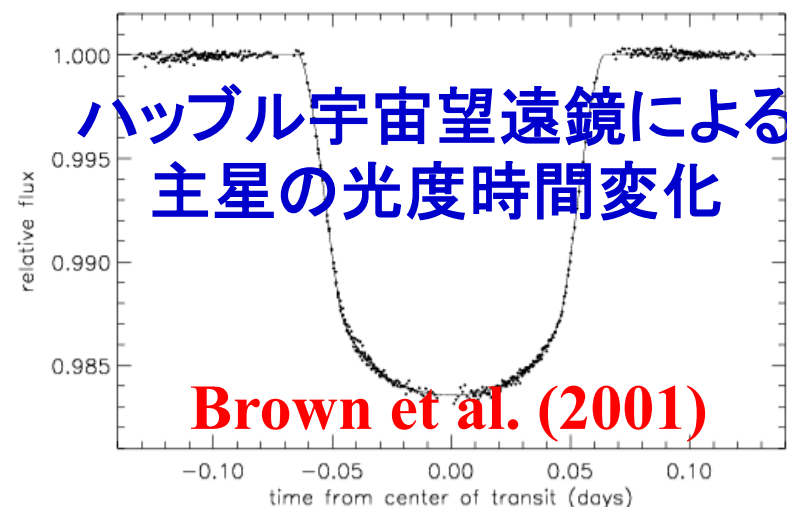
地上望遠鏡による
主星の速度時間変化

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

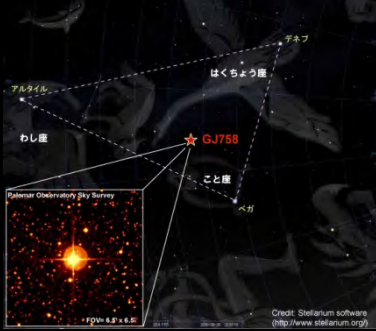
地上望遠鏡による
主星の光度時間変化



ハッブル宇宙望遠鏡による
主星の光度時間変化

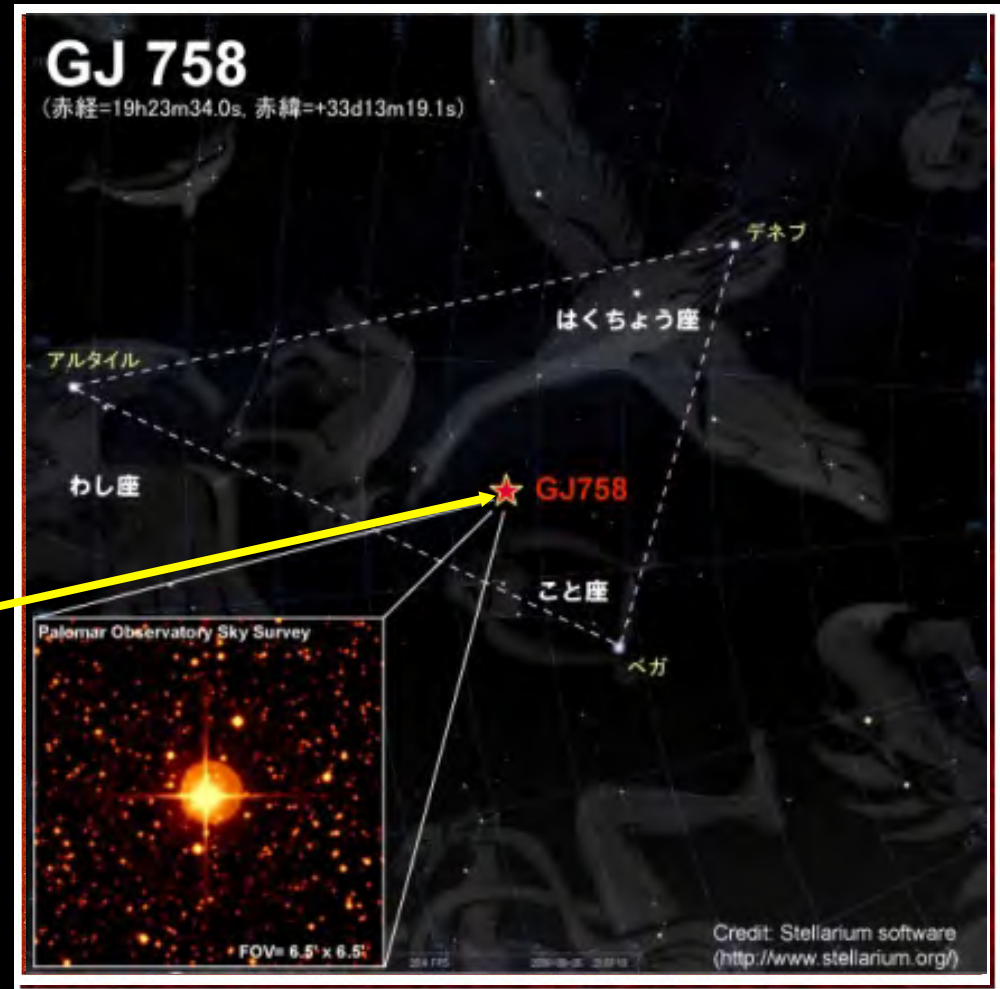


GJ 758
(赤経=19h23m34.0s, 赤緯=+33d13m19.1s)



惑星を直接撮像することも可能になり始めてきた(国立天文台、田村元秀氏ら)

- こと座の方向
- 距離: 50光年
- G9型恒星
 - 可視光で6等星
 - 質量: 0.97太陽質量
- 明るい中心星の影響を抑える観測およびデータ解析法を駆使



中心付近の白黒の斑点は除去しきれないノイズ
(スペckルノイズ)

惑星の放つ熱が波長1.6ミクロンの
赤外線として見えている(反射光ではない)
また、白が明るく、黒が暗い意味の色(実際の色ではない)

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	716	571	96
トランジット法	239	205	30
重力レンズ	16	15	1
直接撮像（褐色矮星）	31	27	2
パルサータイミング	15	12	2
総計	778		

2012年6月16日時点 <http://exoplanet.eu/>

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

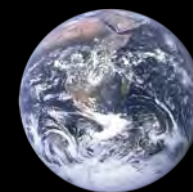
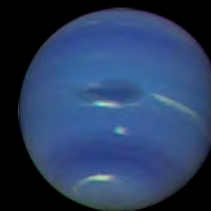
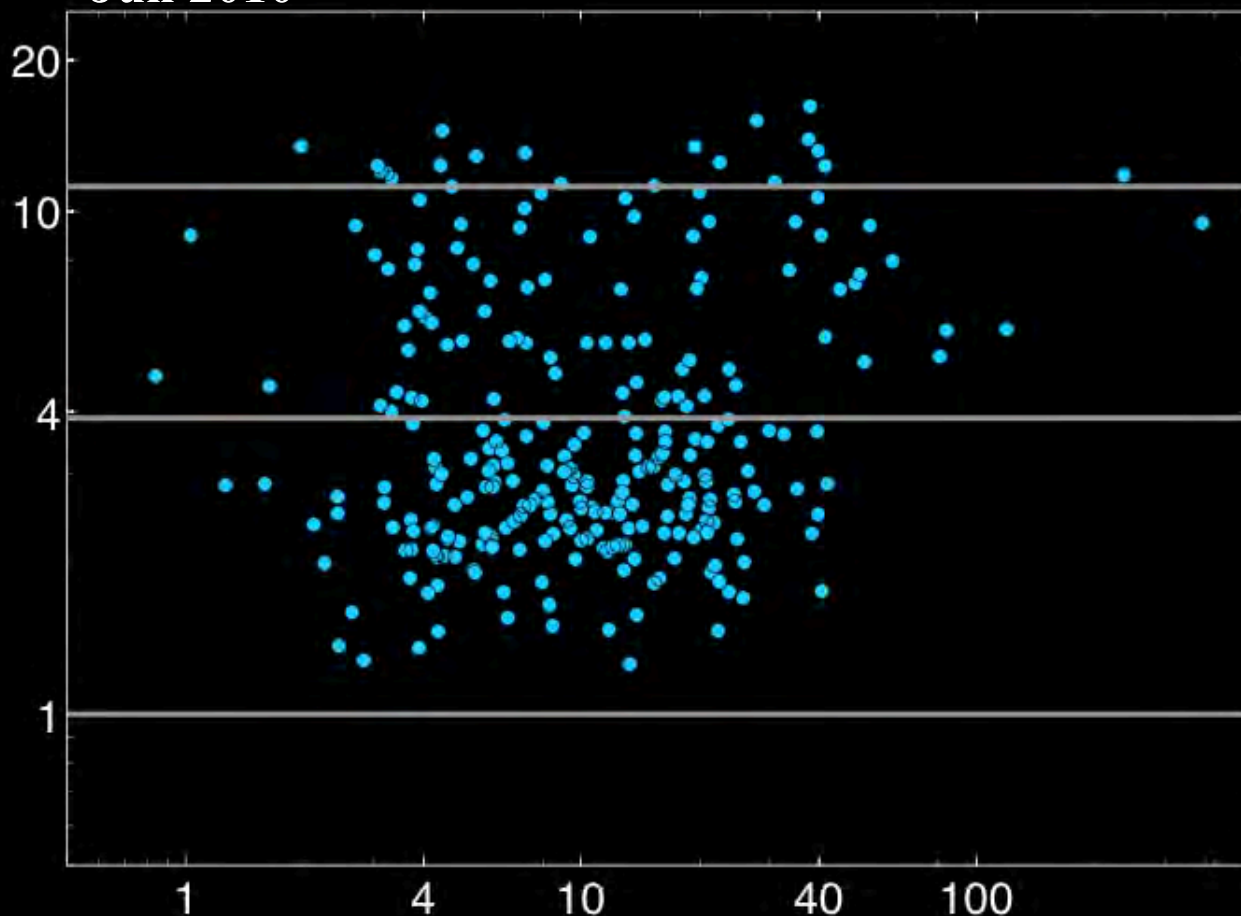


<http://kepler.nasa.gov/>

2010年6月時点での惑星候補

● Jun 2010

惑星半径 / 地球半径



8888

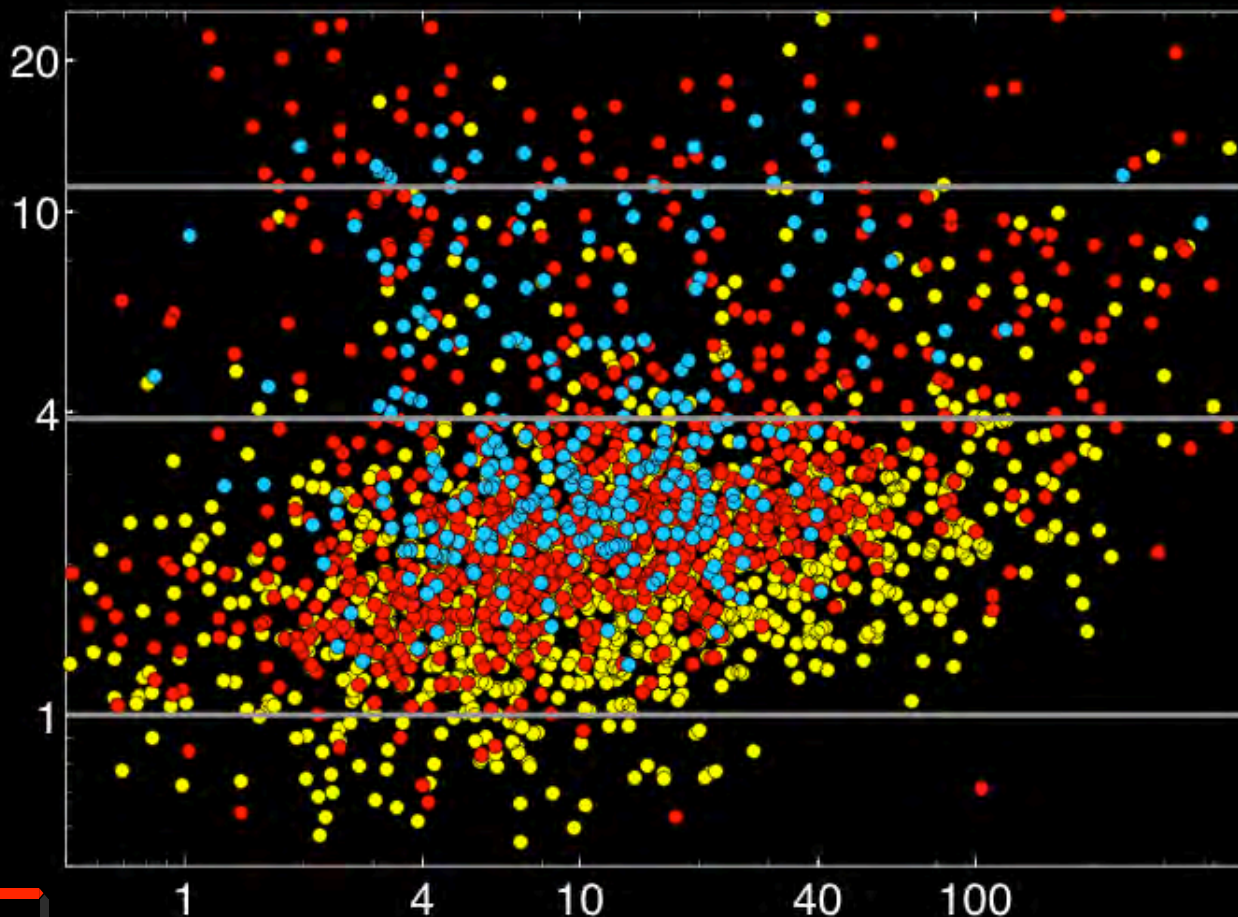
公転周期(日)

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

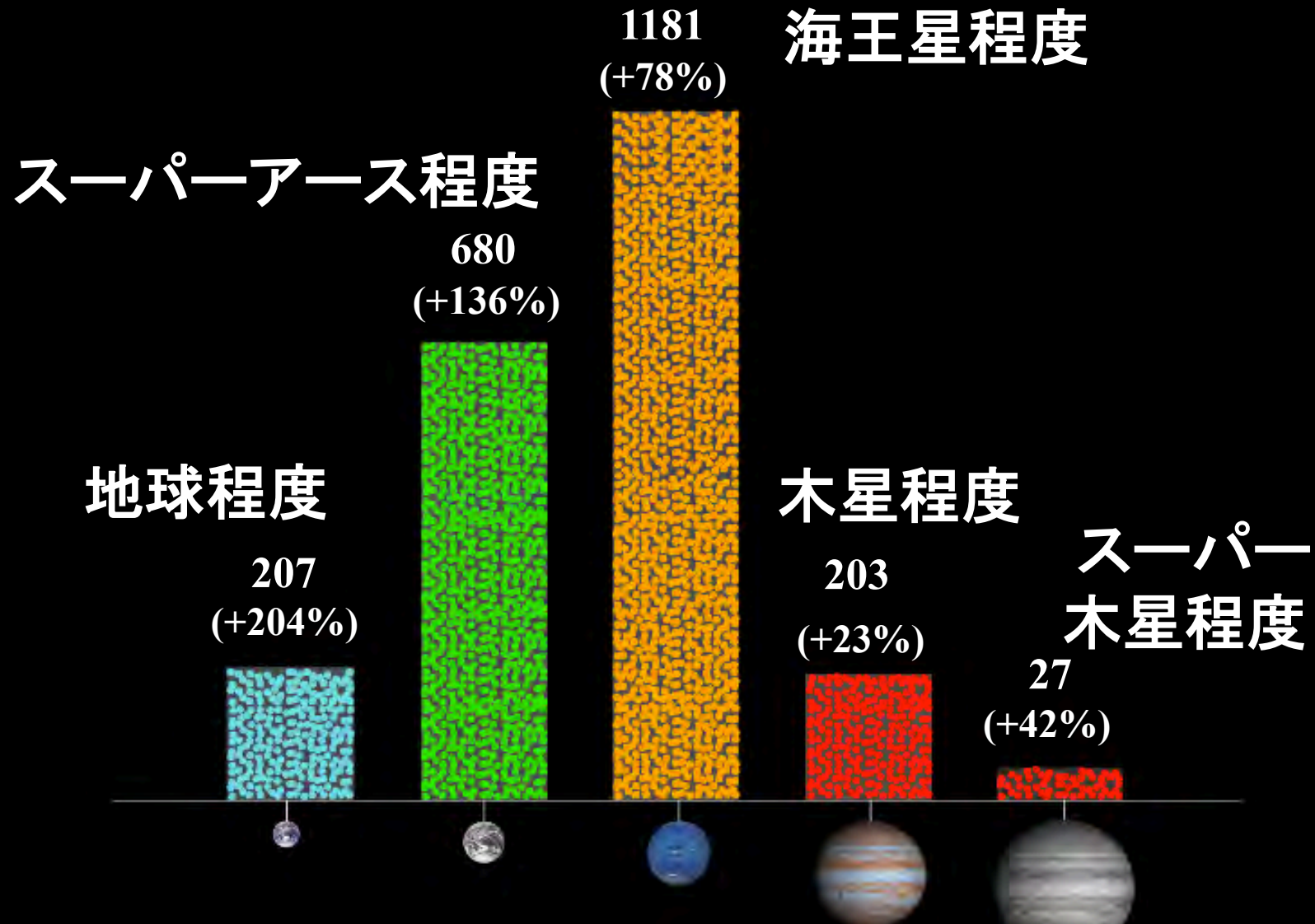
惑星半径 / 地球半径



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



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

太陽系外の複数惑星系における 惑星同士の食を初めて発見

平野 照幸, 増田 賢人, 須藤 靖(東大理),
成田 憲保, 高橋 安大, 竹田 洋一, 青木 和光
田村 元秀(国立天文台),
佐藤 文衛(東工大理)

2012年11月13日 14:00-15:00

記者会見@東京大学理学部一号館338号室

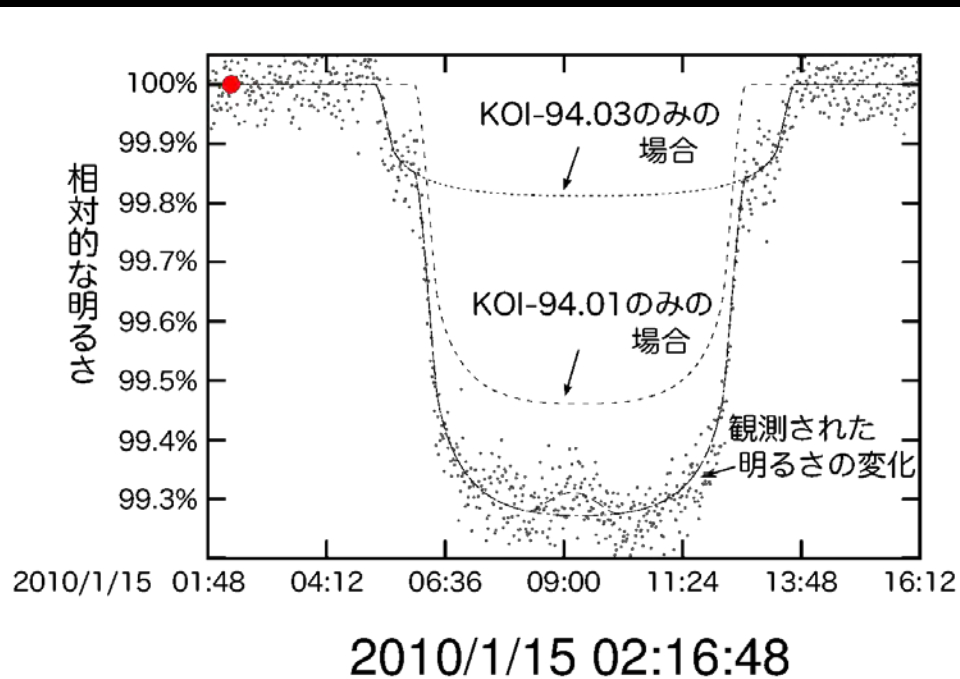
今回観測した複数惑星系

KOI-94 : ケプラー望遠鏡の発見した惑星系候補の94番目
(地球から約2000光年)

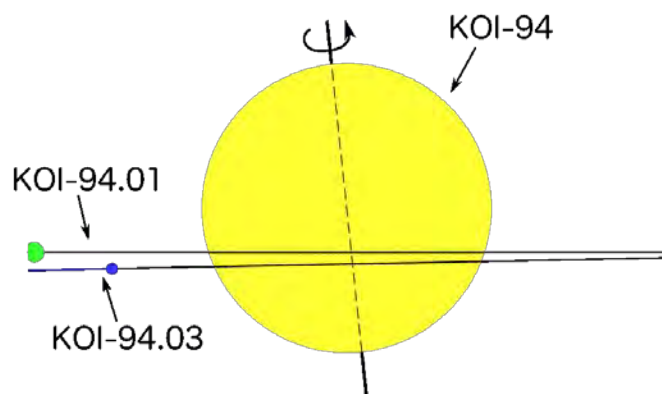
惑星候補	公転周期	惑星半径
★ KOI-94.01	22.3日	0.92 木星半径
KOI-94.02	10.4日	0.34 木星半径
★ KOI-94.03	54.3日	0.54 木星半径
KOI-94.04	3.7日	0.14 木星半径

1. 複数の巨大惑星が短周期で(中心星に近いところを)公転し、かつそれらがトランジットしている珍しい例
↓
2. 太陽系とは全く異なっており、その起源が興味深い
3. 惑星同士の公転面や中心星の自転軸はどのような関係になっているのか？

ダブル・トランジット＋惑星同士の食 データを再現する順行軌道

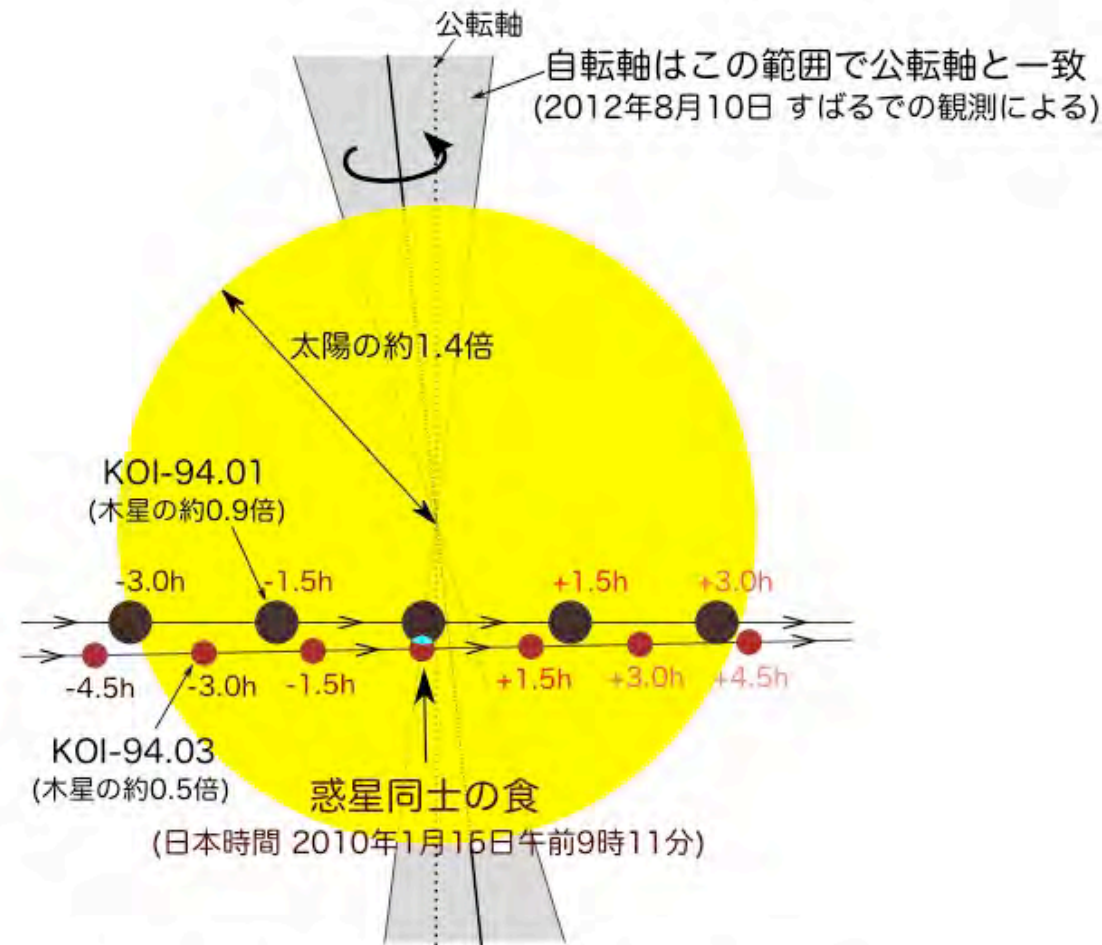


$\delta = -1.15^\circ$ の場合
(2つの公転面が揃っている)



観測結果と
最もよく一致

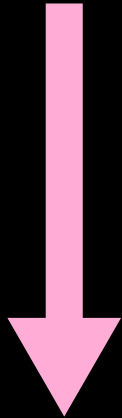
ケプラー公開データと我々のすばる観測データを組み合わせて分かった事



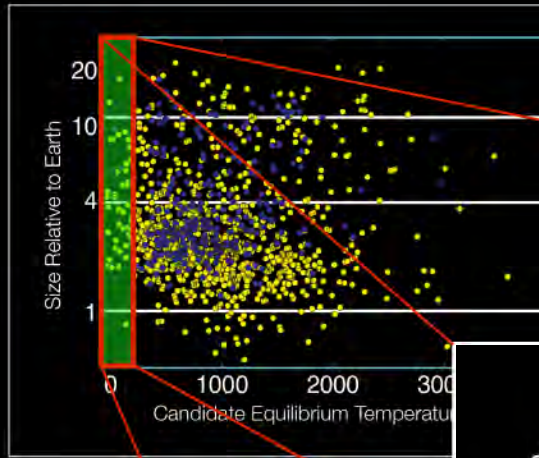
系外惑星：今後の展望

- 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)
-

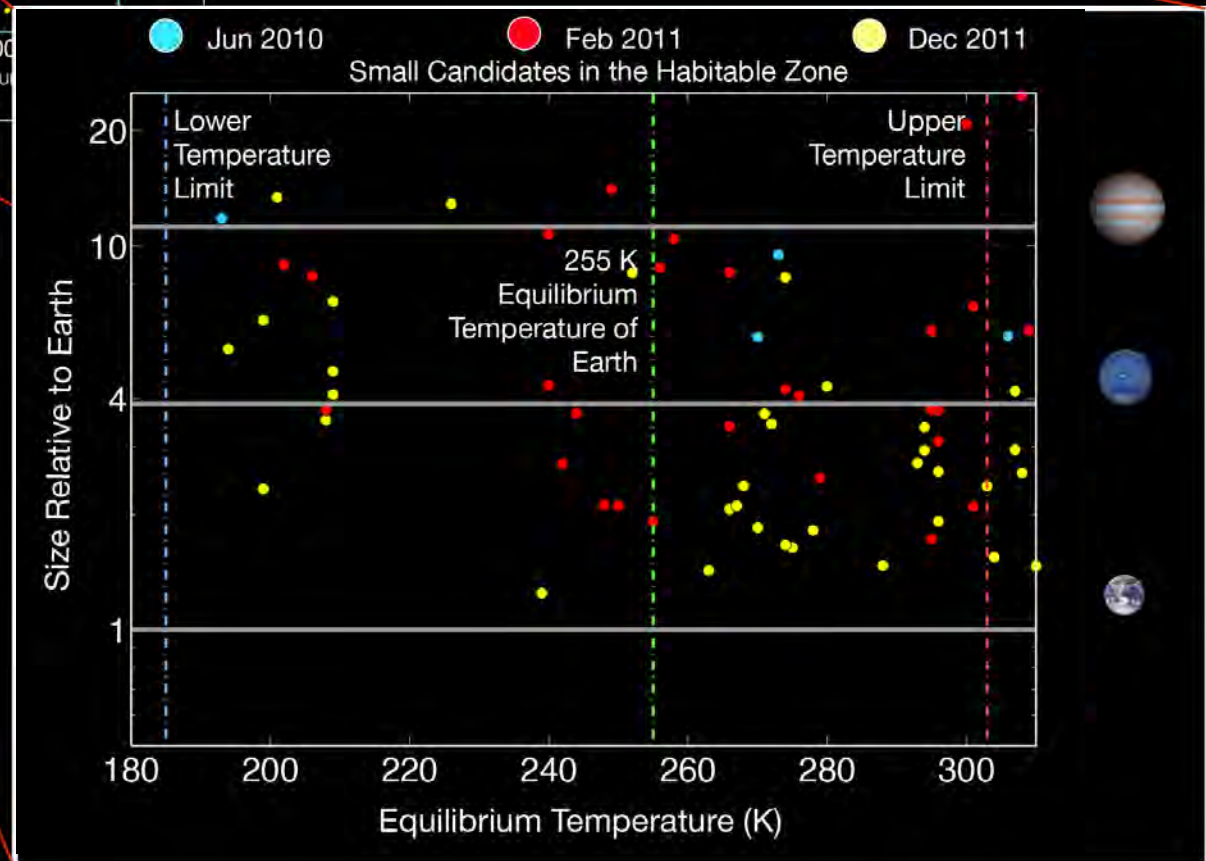
- 地球型居住可能惑星の実見
- 系外惑星リング、衛星の実見
- 地球型惑星の直接検出(測光&分光)
- バイオマーカー(生物存在の証拠)の同定
- 地球外生命の実見



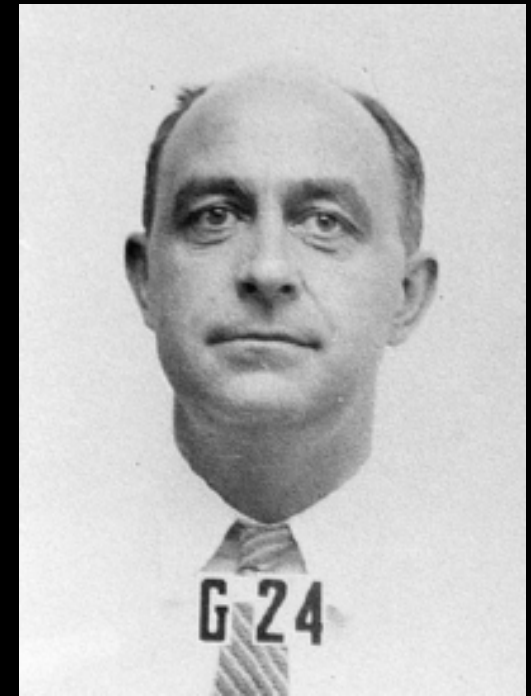
ハビタブルゾーンにある 惑星候補



ハビタブルゾーン:
惑星の温度が適度
で水が液体として
存在できる領域。
主として、中心星の
明るさと距離、惑星
の反射率などで決
まる

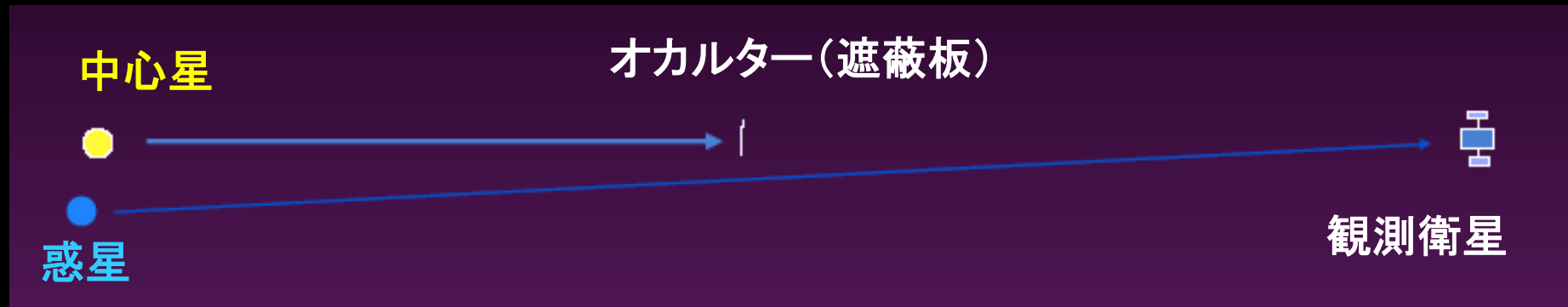


フェルミの疑問 (フェルミのパラドクス)



- **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

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)

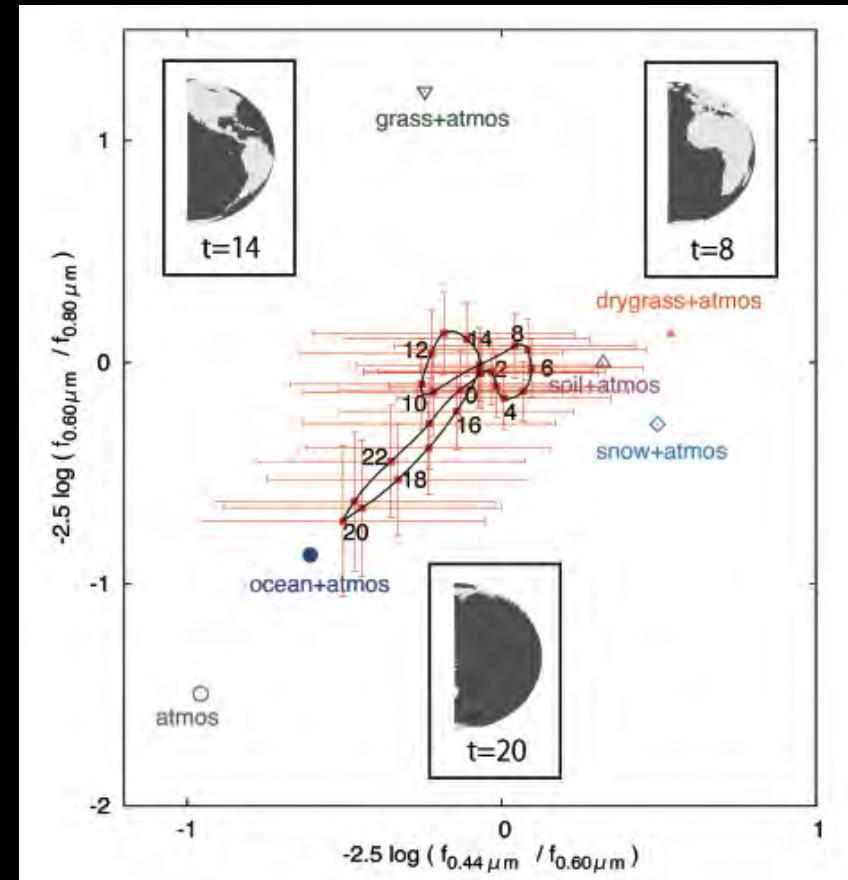
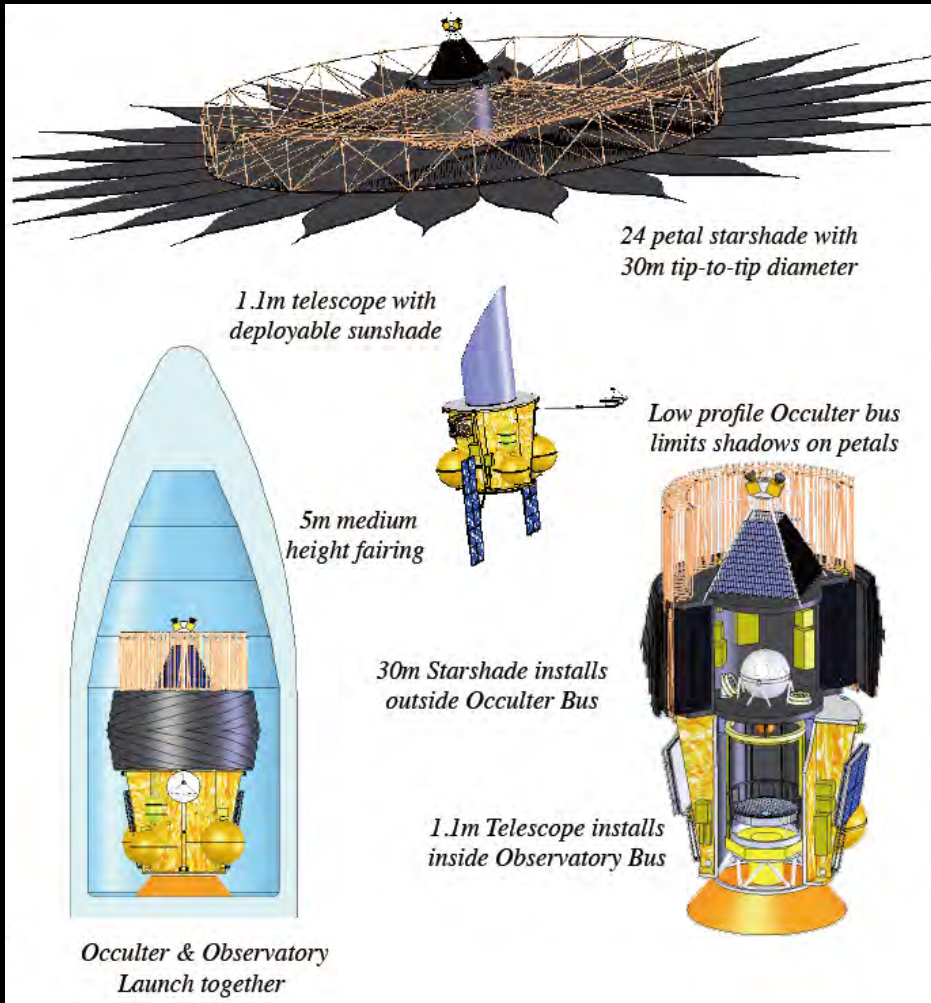
O₃: The Occulting Ozone Observatory



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



■ Princeton+JPL+...

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

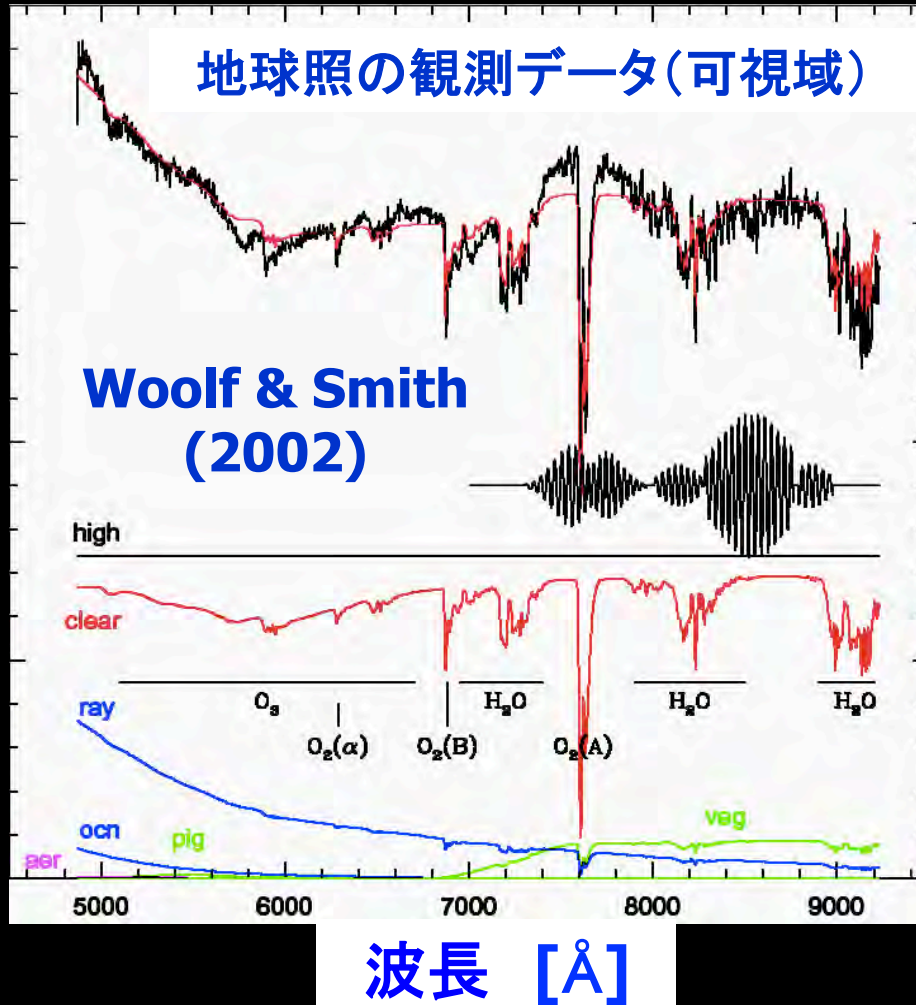
メタンと酸素は、光合成以外では生成されにくい特徴的な組み合わせだ。また、メタン濃度が季節変動を示したら、生命体の存在を示す優れた指標となる。生命の存在しない惑星では、メタン濃度はほぼ一定だが、恒星からの光がメタンを分解するために、長い時間をかけて徐々に低下する。



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。



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”

より過激(保守的?)なバイオマーカー

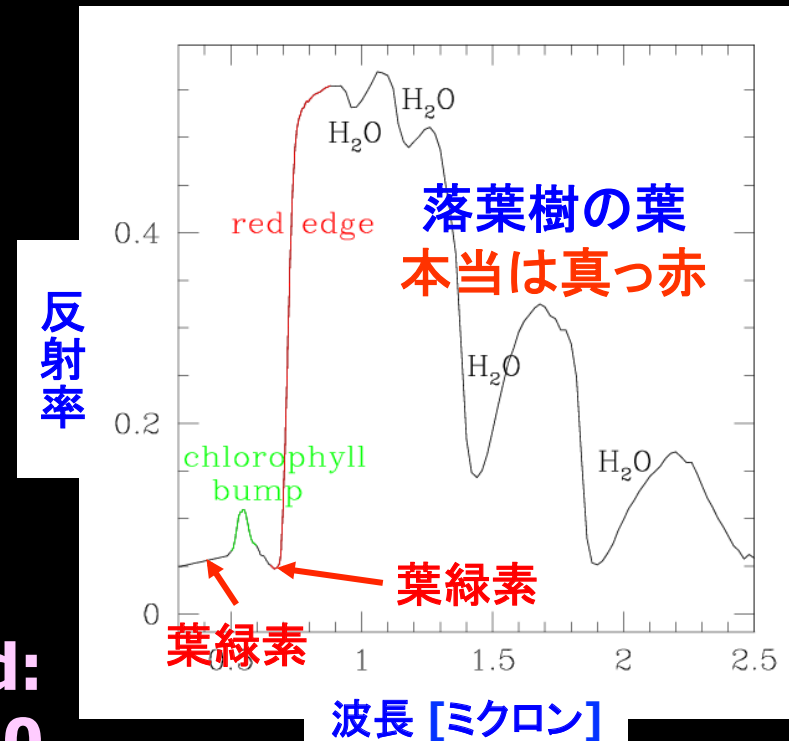
Extrasolar plants on extrasolar planets

- (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



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

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



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

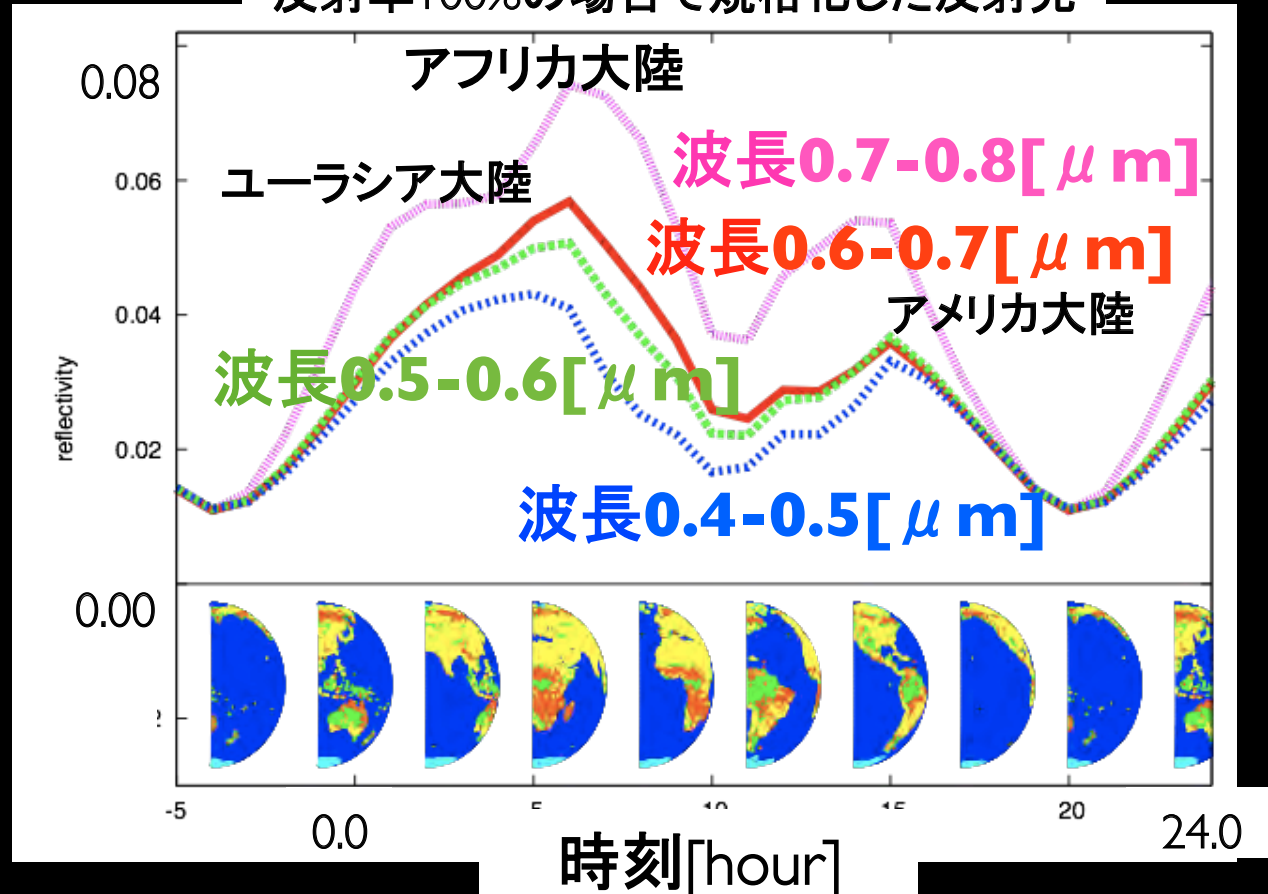


自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション

- 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

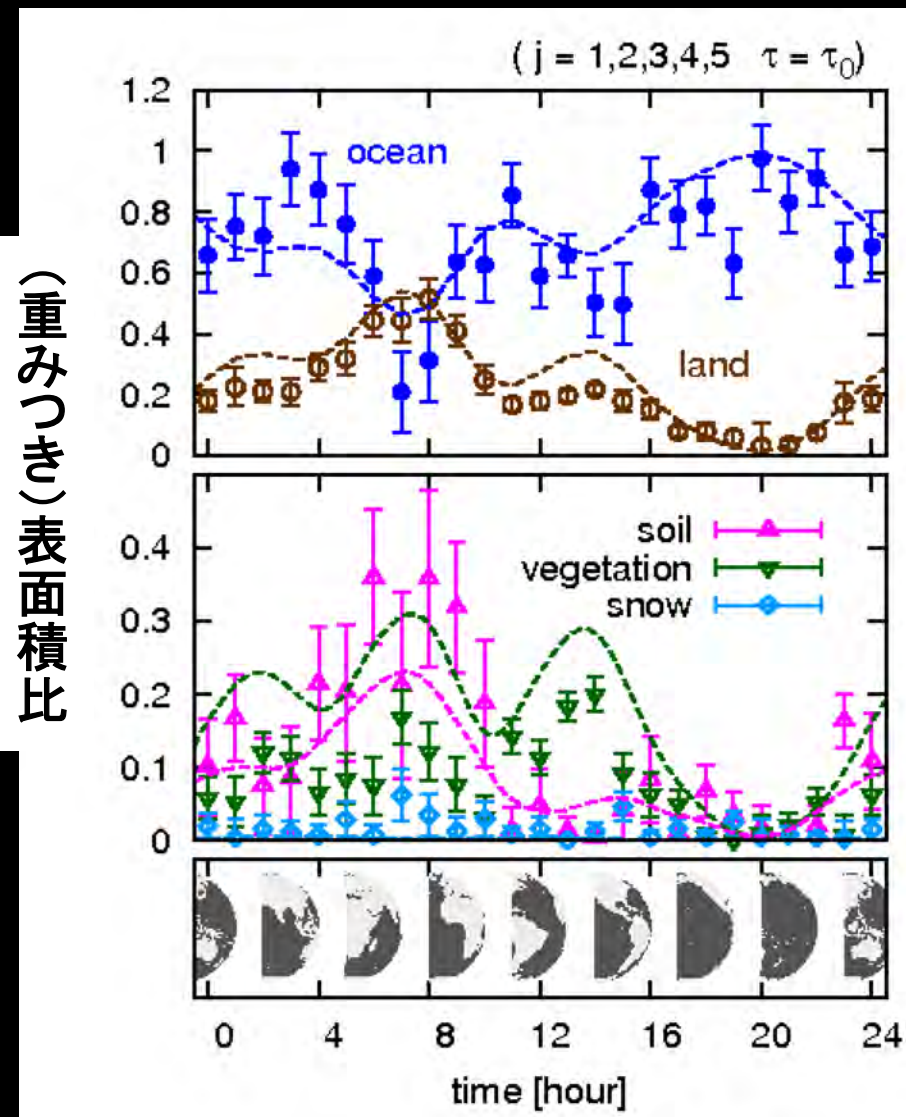
地球は青かった？

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)

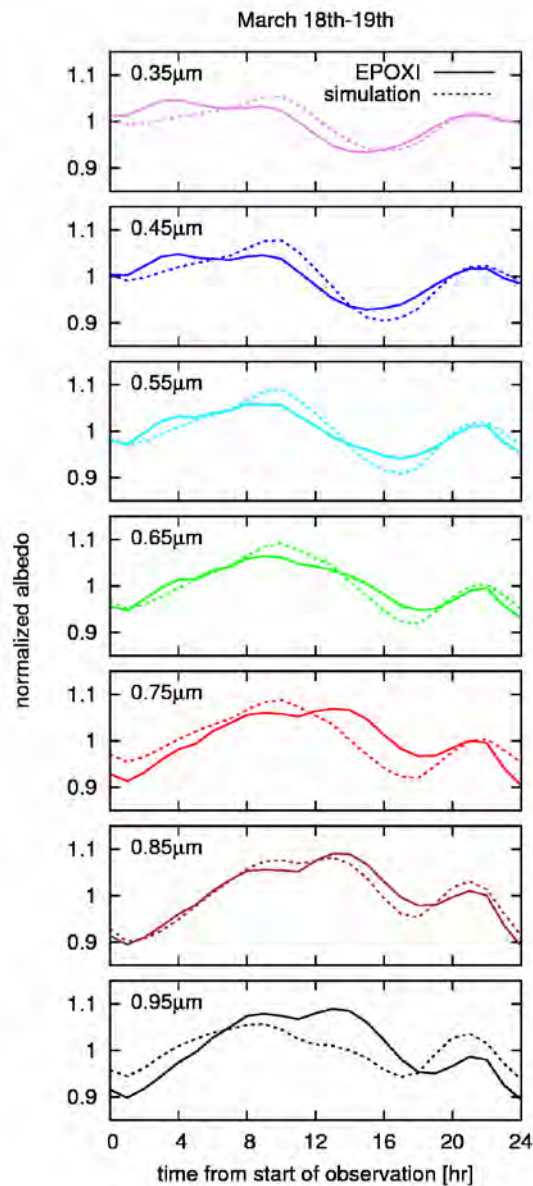
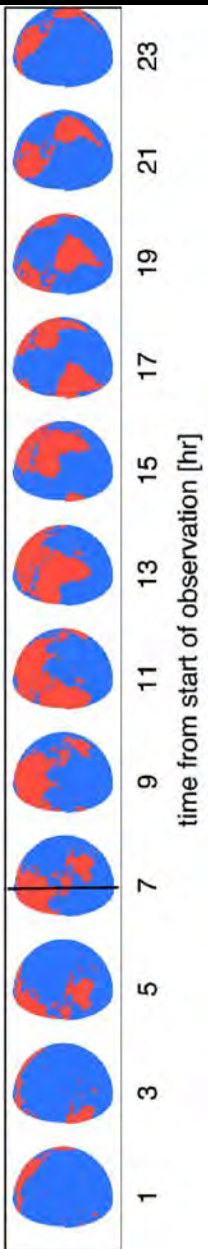
- 雲が存在せず、かつ中心星の光が完全にブロックできた場合
- 10pc先の地球を口径4mの宇宙望遠鏡で1週間観測
- レイリー散乱の一次近似
- 海、土、植物、雪の4つの成分の面積比を推定
- 結構イケテル！

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

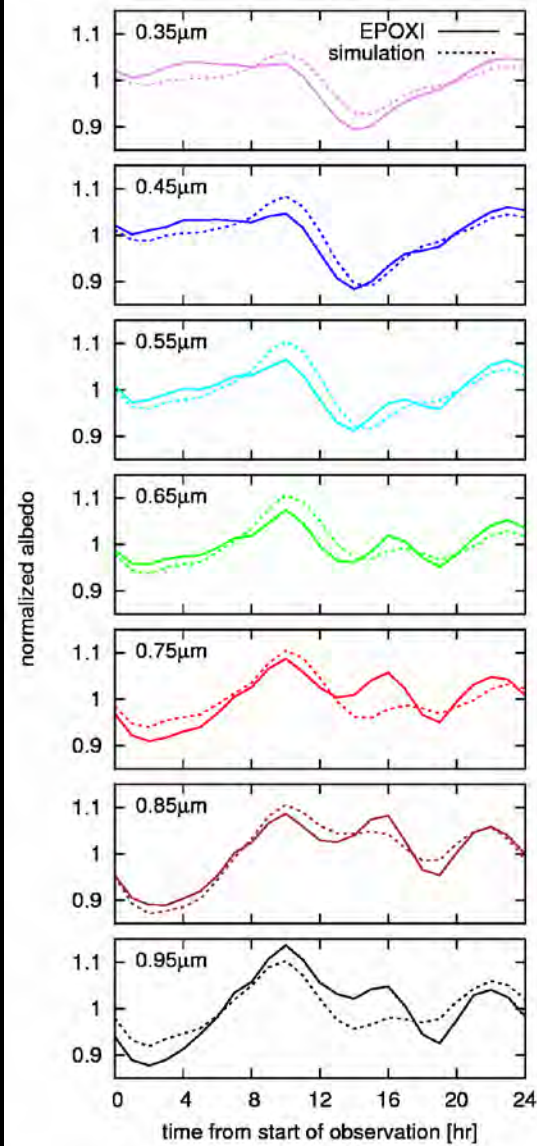


模擬光度曲線と地球観測データの比較(雲あり)

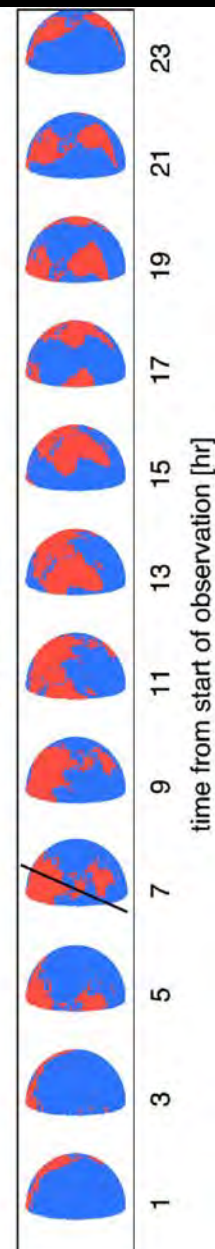
March 18th-19th



June 4th-5th



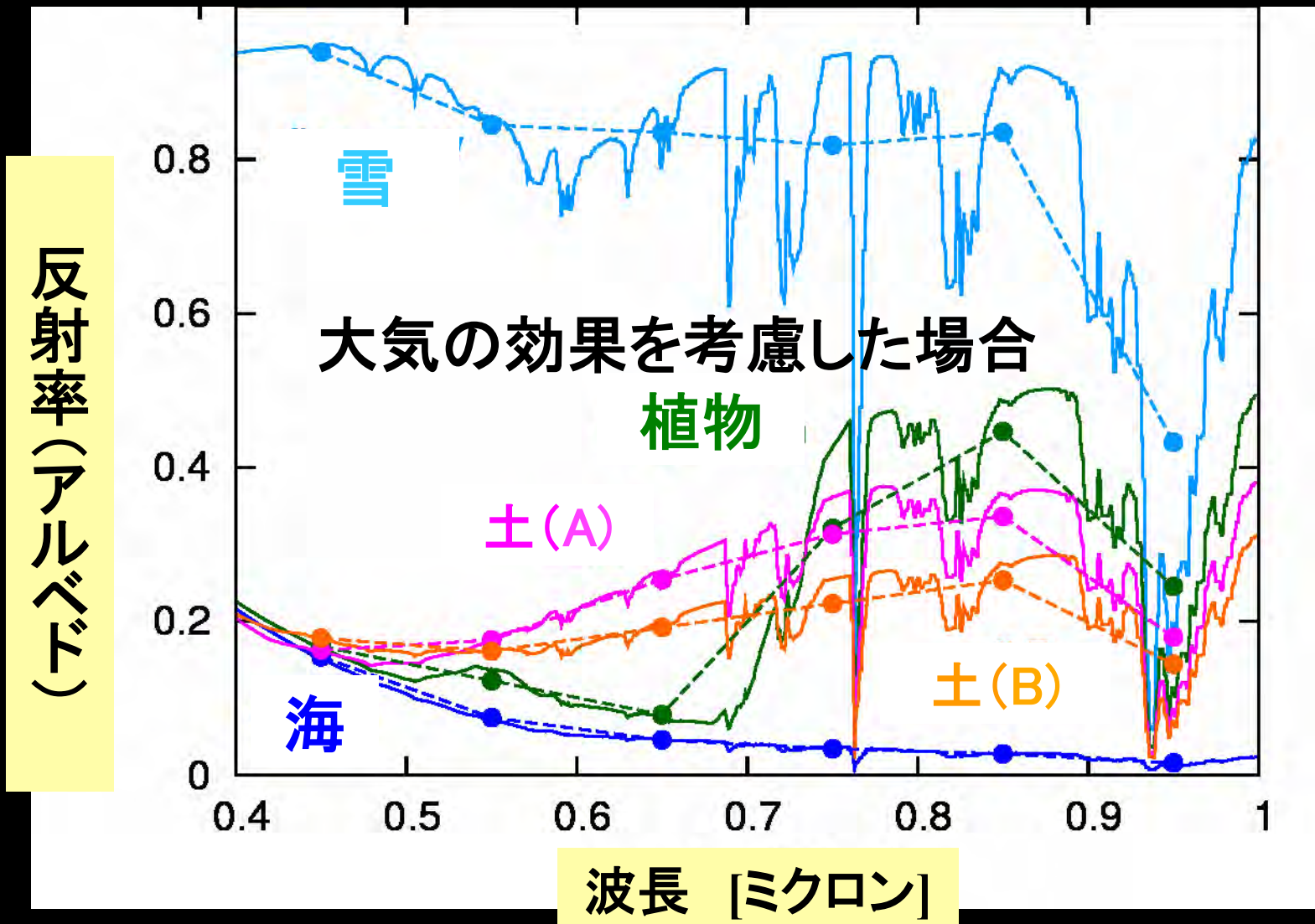
June 4th-5th



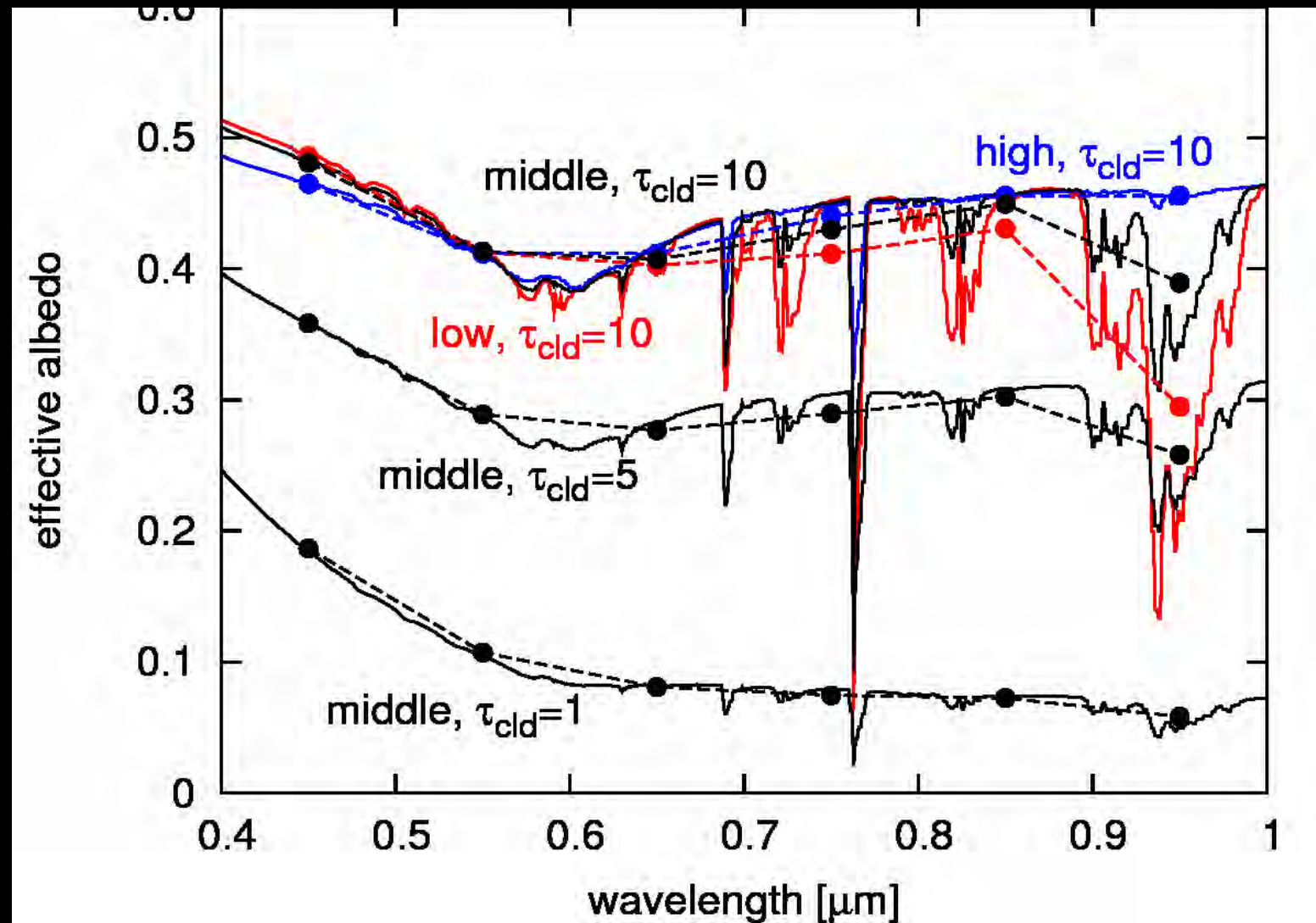
逆問題：地球の成分ごとの面積の推定

- 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

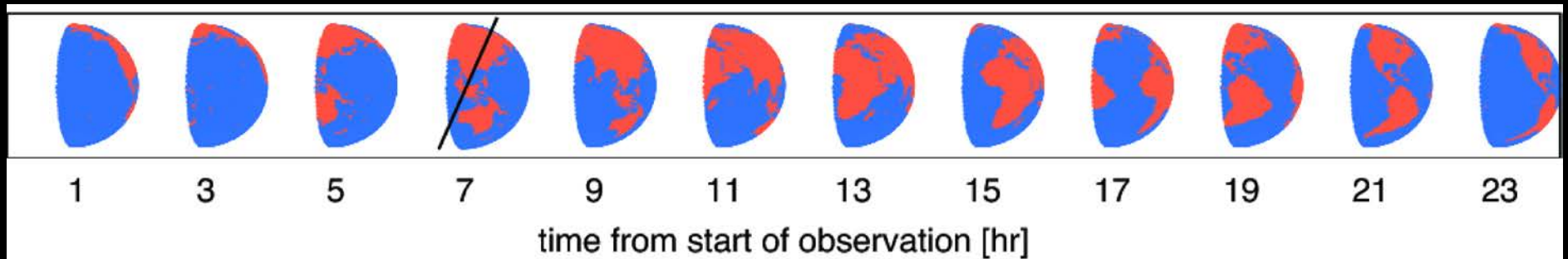
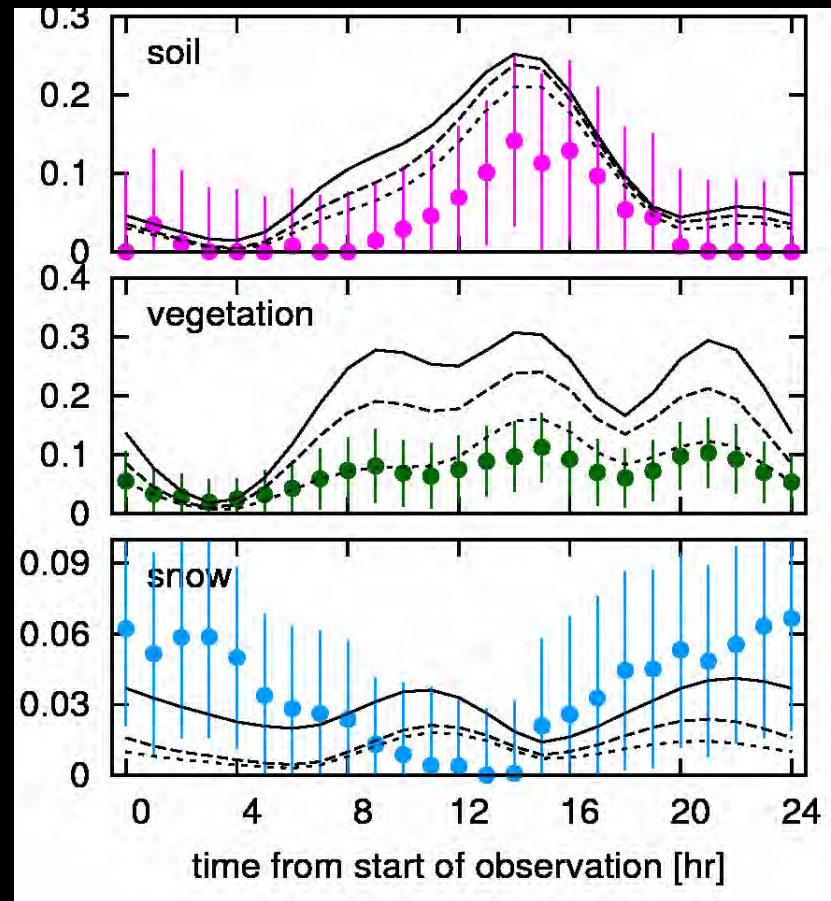
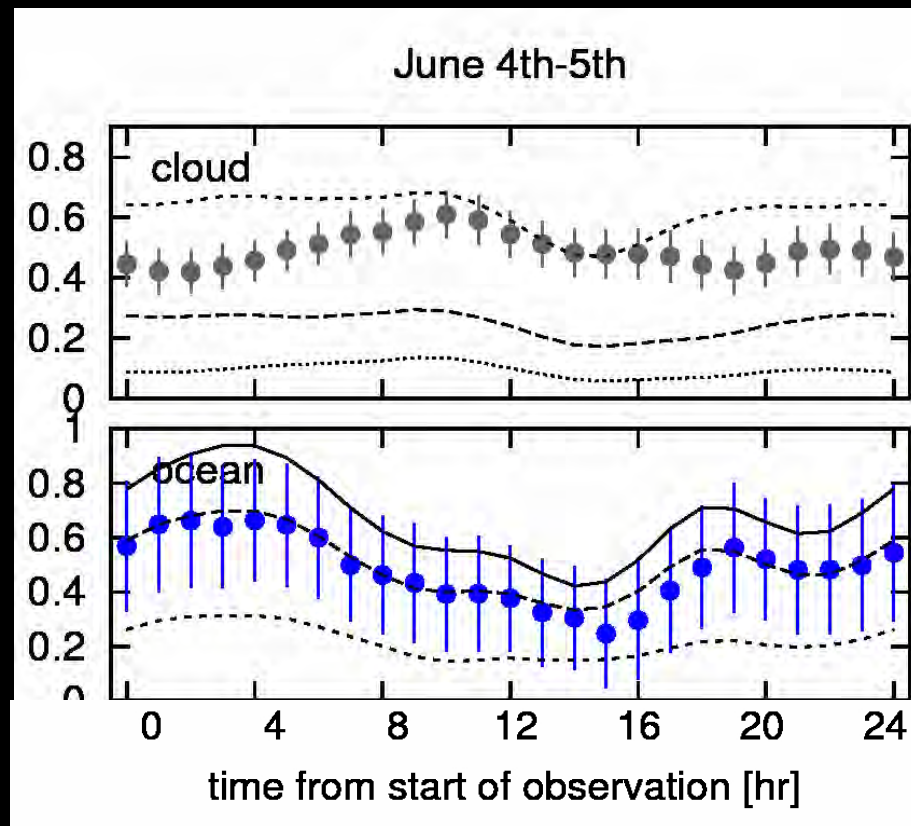
等方散乱近似での反射スペクトル



雲の反射スペクトル: モデル依存性



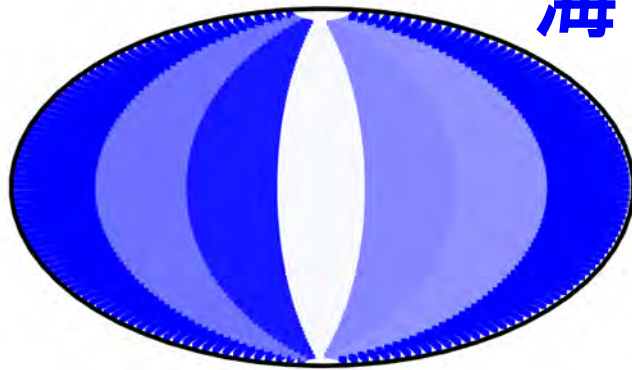
EPOXIデータから推定された面積



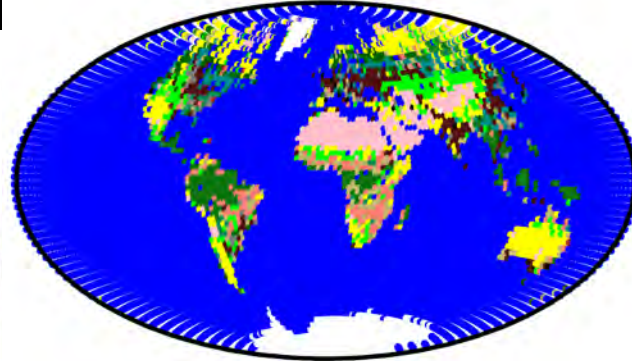
地球測光観測データから推定された 地表面成分の経度分布地図

OCEAN

海

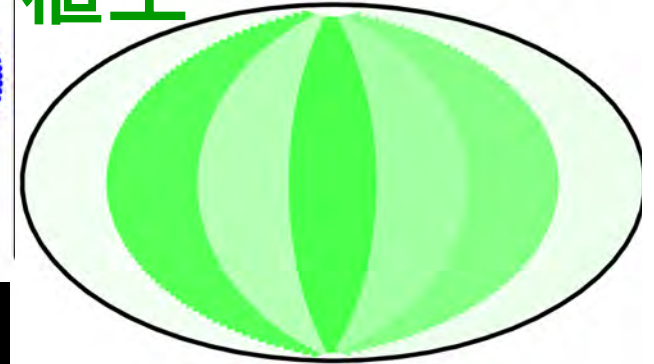


IGBP classification map



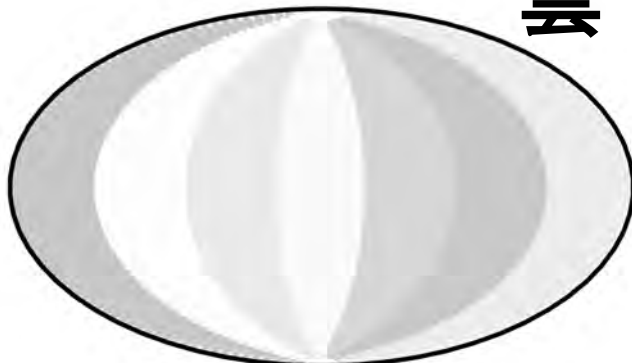
植生

VEGETATION



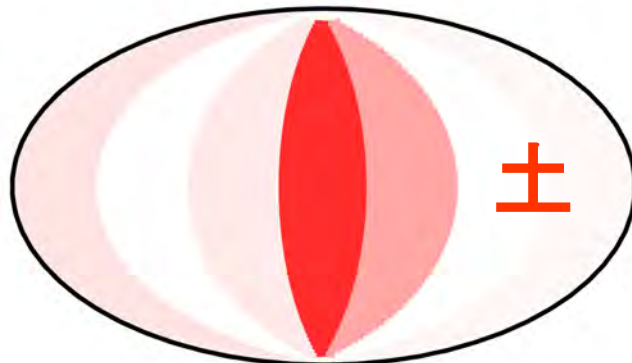
CLOUD

雲



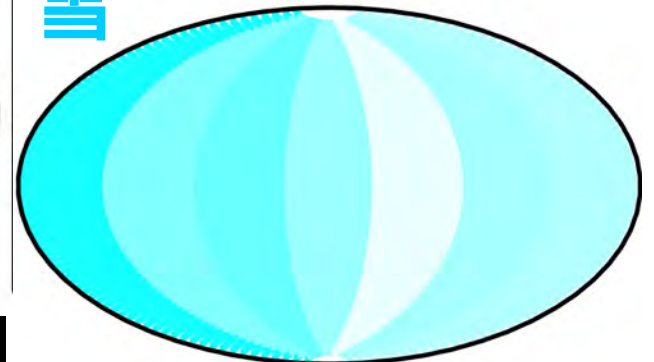
SOIL

土



雪

SNOW



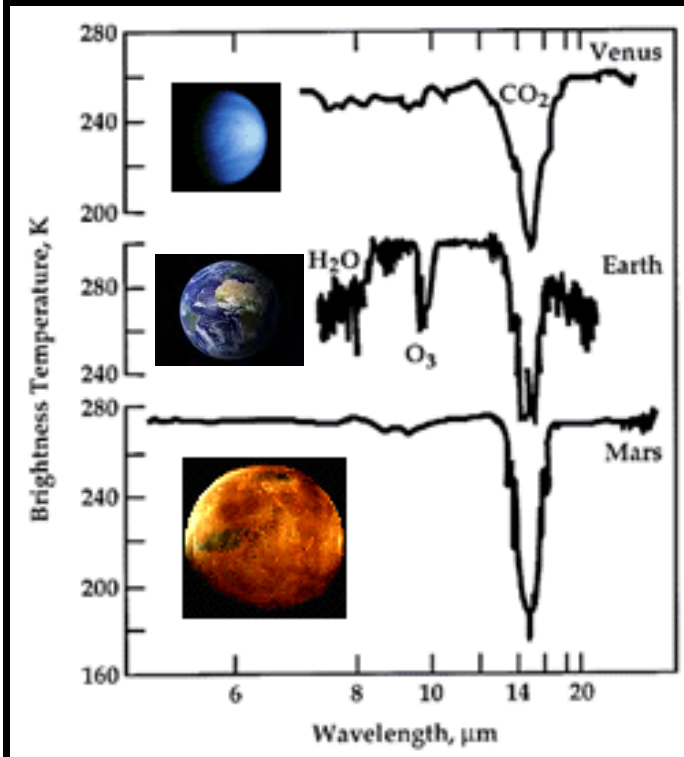
太陽系外惑星：まとめ

- 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

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

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