

太陽系外惑星から宇宙生物学へ

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2012j.html

物理教室ガイダンス A5 須藤研

2012年6月1日 11:40-12:00



須藤 靖（観測的宇宙論、太陽系外惑星）

樽家篤史（宇宙論、重力波）

物理教室の吉田直紀教授、およびビッグバンセンターの横山順一教授のグループと連携しつつ研究室活動を行っている

**All truths are easy to understand
once they are discovered;
the point is to discover them.**

Hale Telescope at the Palomar Observatory

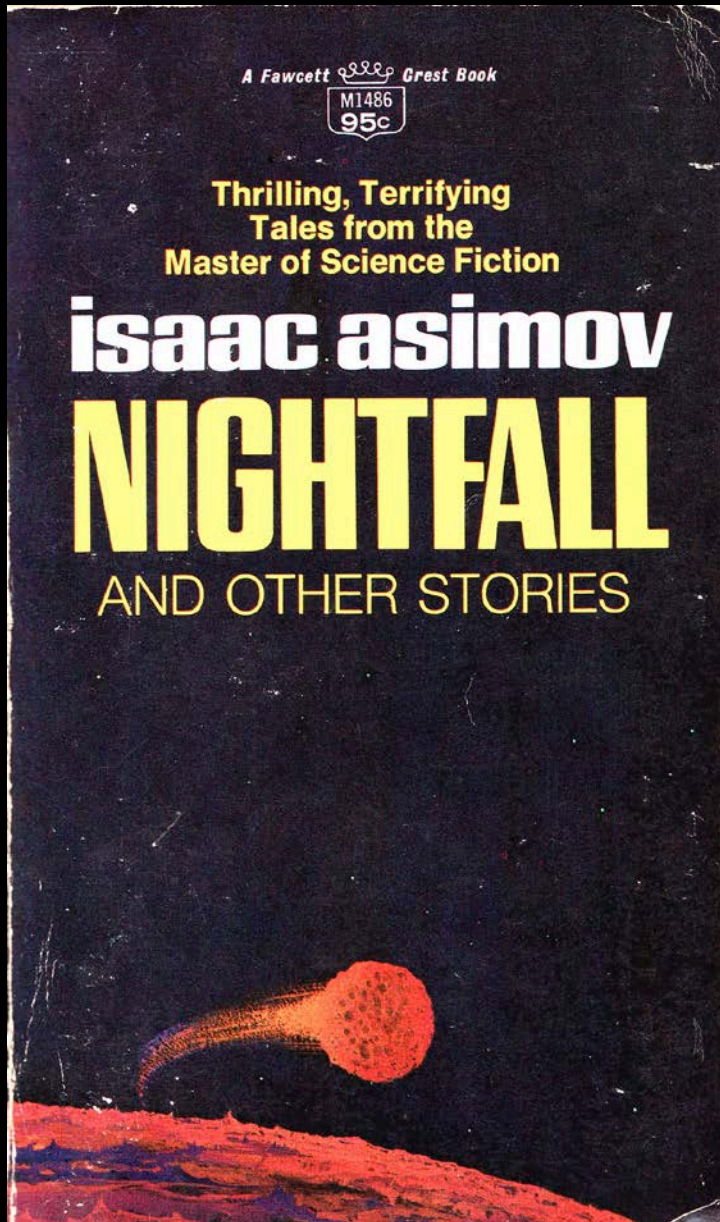
Photograph of 200-inch Hale telescope and dome.

Image Credits: Peter Savel and Charles H. Cahill

- Galileo Galilei

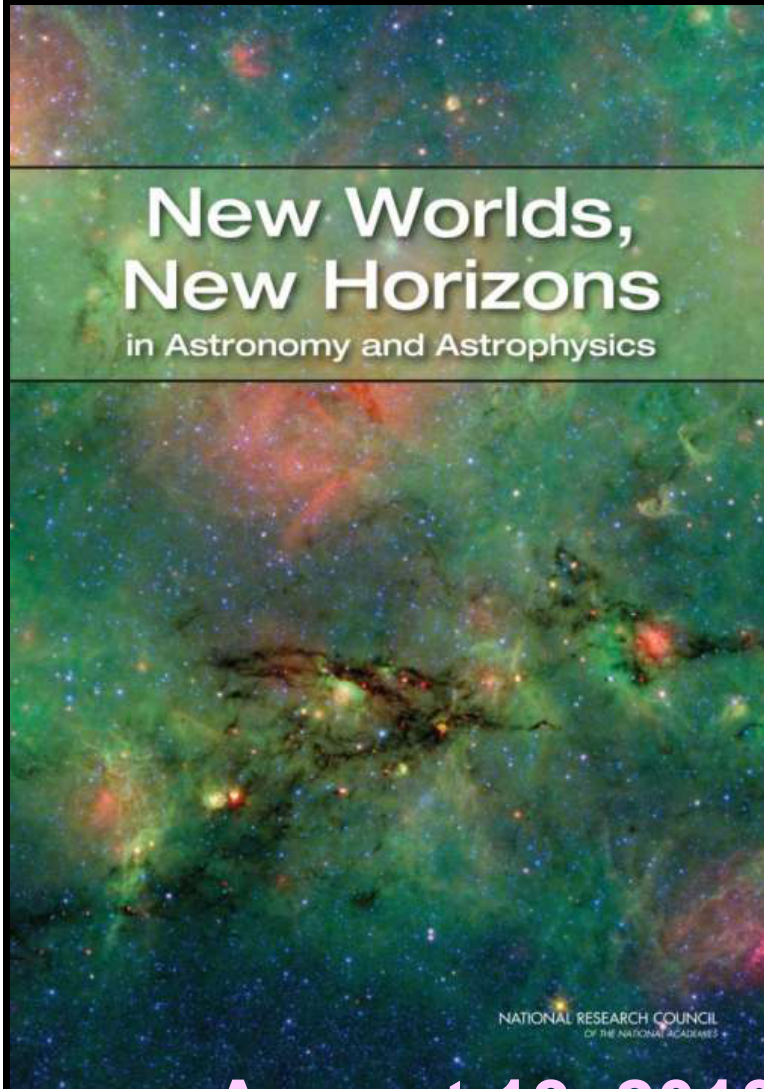
2010年10月7日@カリフォルニア工科大学天文学教室講堂

アイザック アシモフ: Nightfall(夜来たる)



- “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.”*

Astro2010: decadal survey



August 13, 2010

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

■ *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

宇宙もいろいろ・残された謎

- **宇宙の起源**
 - 素粒子物理学・量子重力理論の進展に依存
- **ダークマターの直接検出**
 - 天文学から高エネルギー物理学実験へ
- **ダークエネルギーの性質の解明**
 - 宇宙の加速膨張の起源
- **重力波の直接検出**
 - 一般相対論の検証から新しい天文学の窓へ
- **高エネルギー宇宙線の起源**
 - 粒子加速機構の解明、粒子線天文学の開拓
- **超新星爆発・ガンマ線バーストのメカニズム**
 - 大質量星進化の最終段階の理解
- **第一世代天体の発見・起源・進化**
 - 宇宙の果てを見通す、天体の起源、元素の起源
- **恒星・惑星の起源**
 - 星・惑星・コンパクト天体の形成と進化
- **地球型系外惑星の発見から宇宙生物学へ**
 - 第二の地球、生命・文明の起源、生物の普遍性

I 宇宙のダークエネルギー

- 摂動論による精密モデル構築、シミュレーション、観測データ解析
- すばる望遠鏡に搭載する撮像、分光装置を用いた観測プロジェクトの立案と実行 (SuMIRe)
 - 東大数物連携機構、東大相原研、国立天文台、東北大学、名古屋大学、広島大学、プリンストン大学、カリフォルニア工科大学、エジンバラ大学、ポーツマス大学などとの共同研究

Ⅱ 星間・銀河間物質

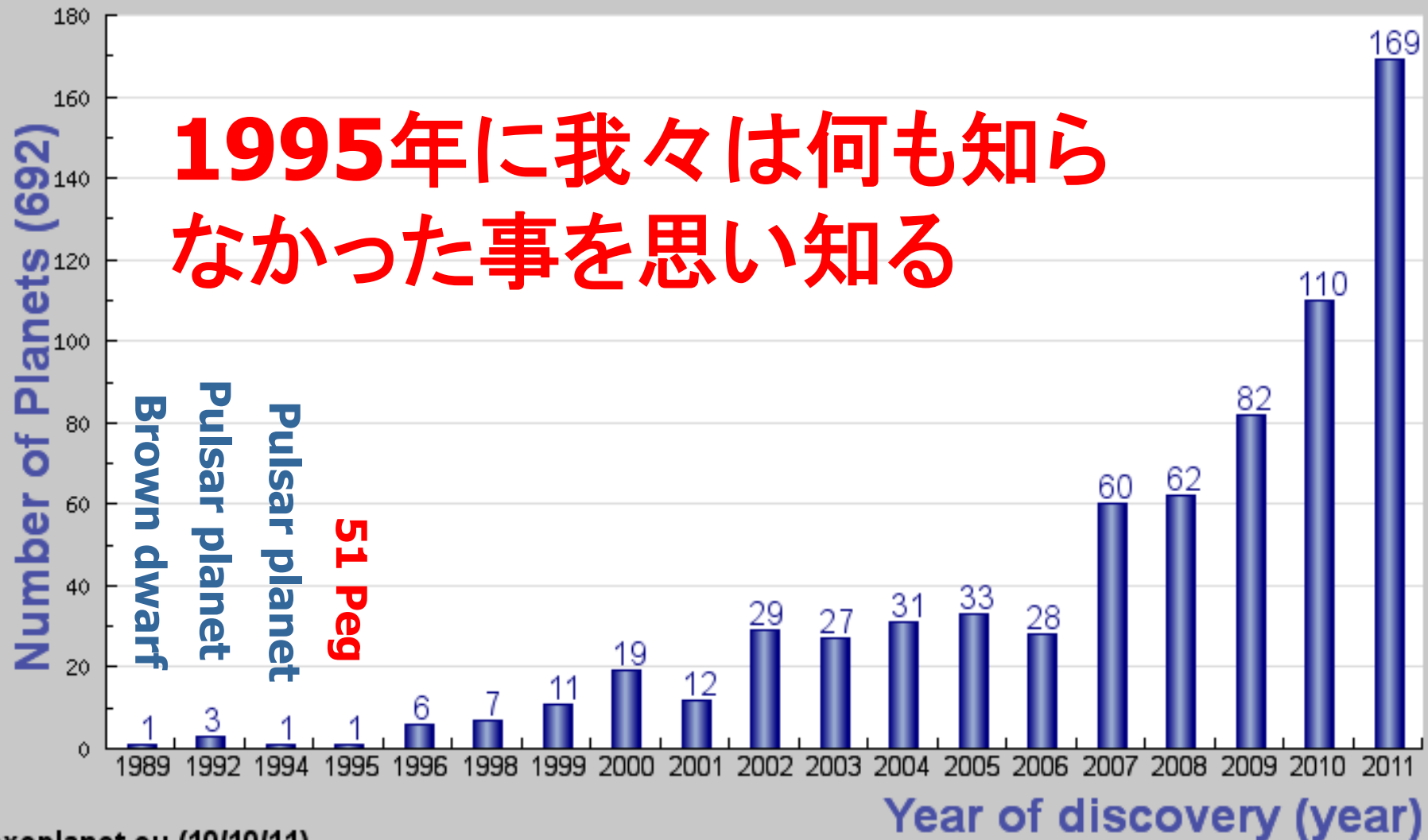
- 銀河系ダスト減光地図と遠方銀河の遠赤外線輻射
- astro-H, HSC, ACTなどのX線、電波、重力レンズによる銀河団サーベイに向けた銀河団の理論モデル構築
- 首都大学東京、宇宙研、筑波大、金沢大、ローマ大、ボローニャ大、オランダSRON、プリンストン大などとの共同研究

Ⅲ 太陽系外惑星

- 太陽系外惑星の観測・理論的研究
 - 系外惑星の角運動量の決定とその起源
 - 系外惑星系軌道進化の天体力学シミュレーション
 - 系外惑星の大気組成の決定
 - 系外惑星のリングと衛星の兆候
 - 地球型惑星の反射光の時間変化と表面地図
 - 地球型惑星のバイオマーカー同定
 - 国立天文台、プリンストン大学、マサチューセッツ工科大学、との共同研究

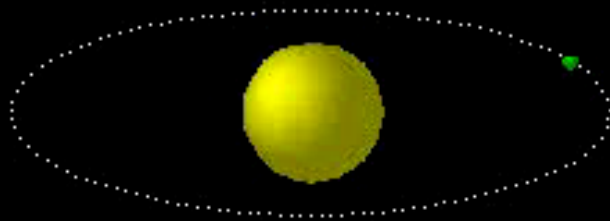
太陽系外惑星発見の歴史年表

Number of planets by year of discovery



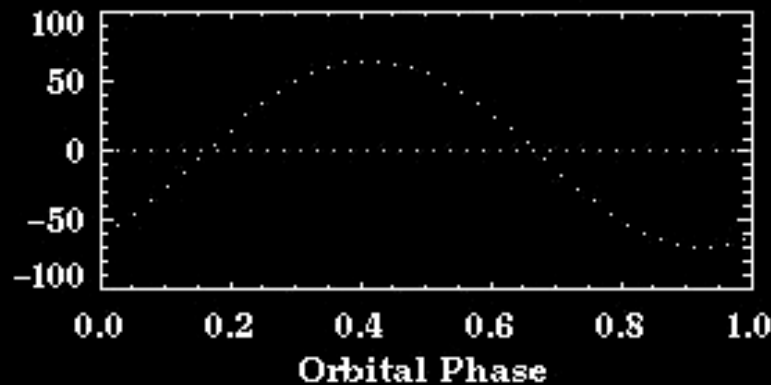
どうやって見つけたのか？

Circular Orbit: rho CrB



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

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

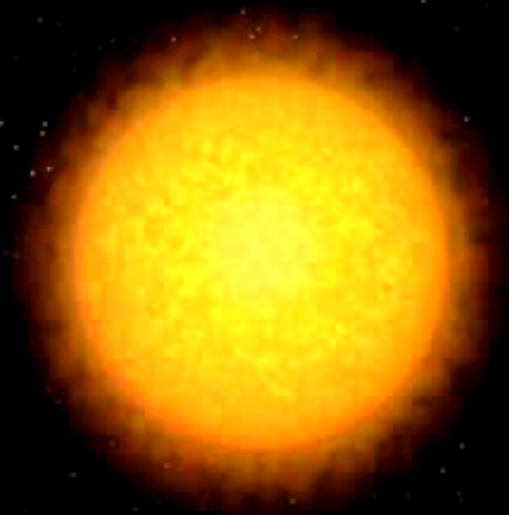
■ トランジット法

- (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

初めてのトランジット惑星HD209458b

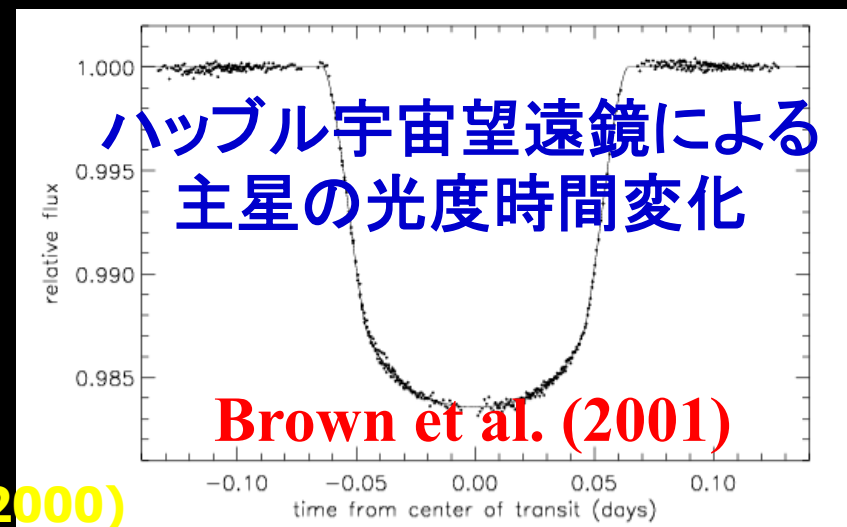
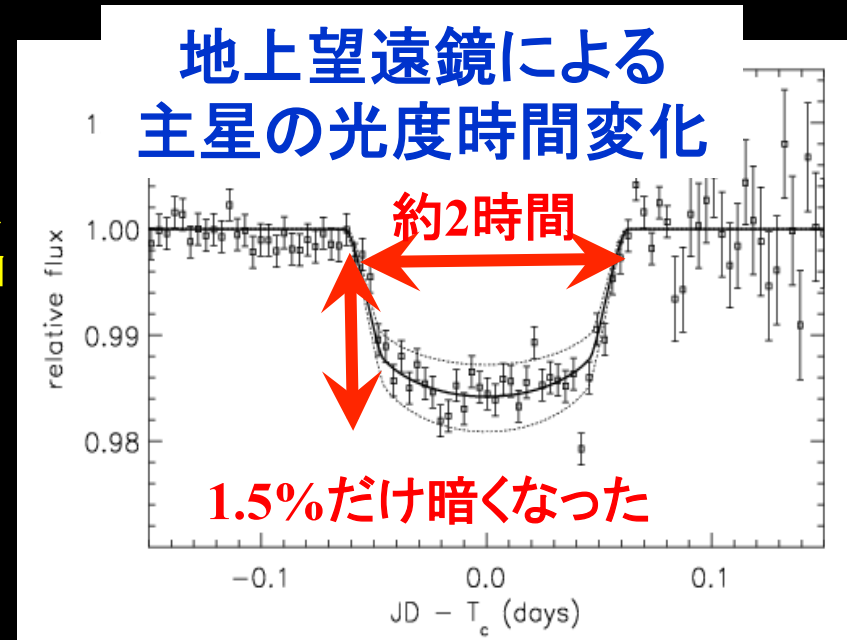
- 速度変動のデータに合わせた惑星による主星の掩蔽(可視光)の初検出

周期3.5日



想像図

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



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

■ Borucki et al. NASA press release (2011年2月1日)

- 1235 のトランジット惑星候補
- 54 個がハビタブルゾーン?
- うち5個が2倍の地球半径以下
- 2重、3重、4重、5重、6重惑星系はそれぞれ、115、45、8、1、1個
- 太陽と似た恒星の約34%が惑星を持ち、17%は多重惑星を持つ

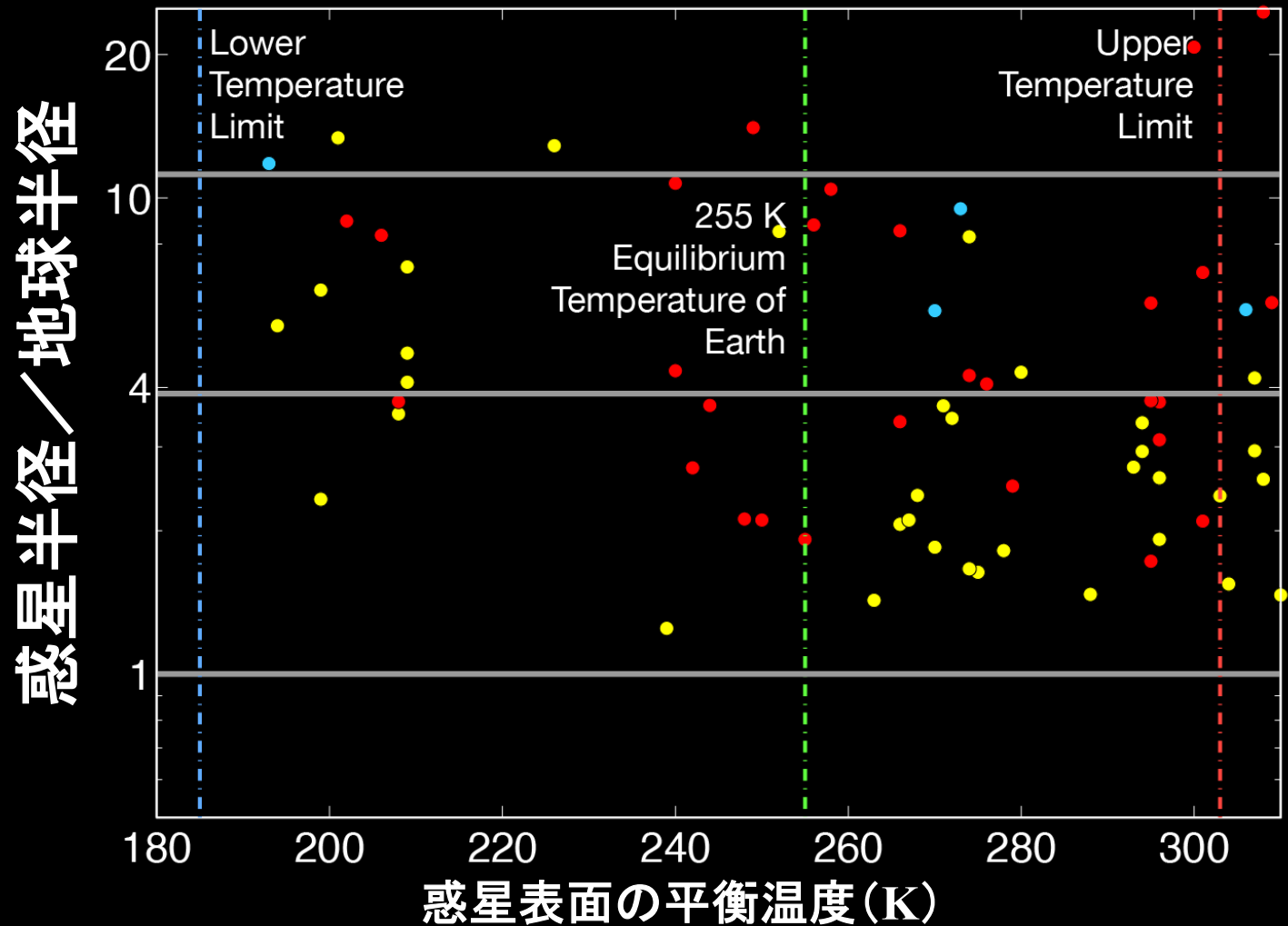


<http://kepler.nasa.gov/>

ケプラー衛星による居住可能域に存在する惑星の発見(?)

● Jun 2010 ● Feb 2011 ● Dec 2011

Small Candidates in the Habitable Zone



Presentation by Natalie Batalha, Kepler Deputy Science Team Lead

最初の居住可能地球型惑星？

Kepler-22 System

もう一つの地球？ 生命は存在するのか？

Habitable Zone

Solar System

我々は何も知らなかった



Mercury



Venus



Earth



Mars

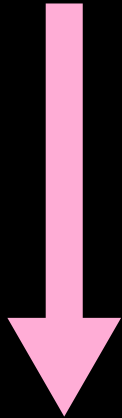
Kepler-22b

Presentation by Natalie Batalha, Kepler Deputy Science Team Lead

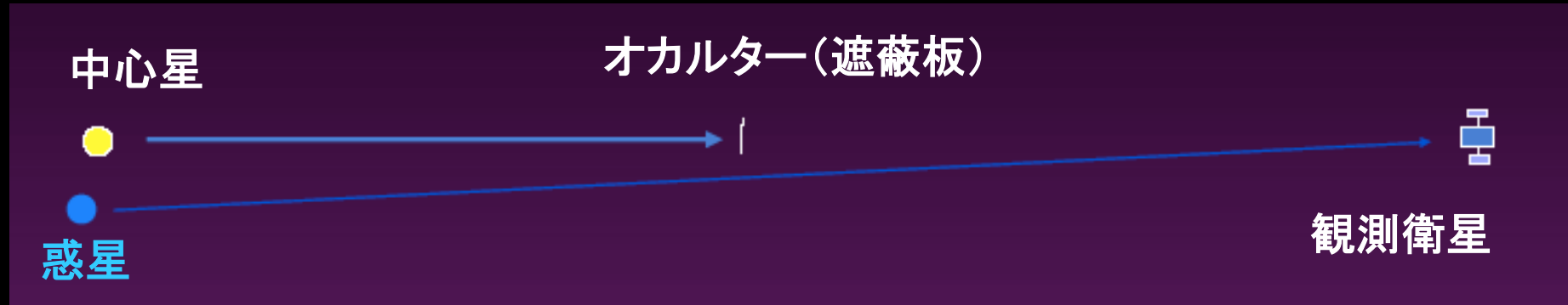
Planets and orbits to scale

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



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)

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

より過激(保守的?)なバイオマーカー

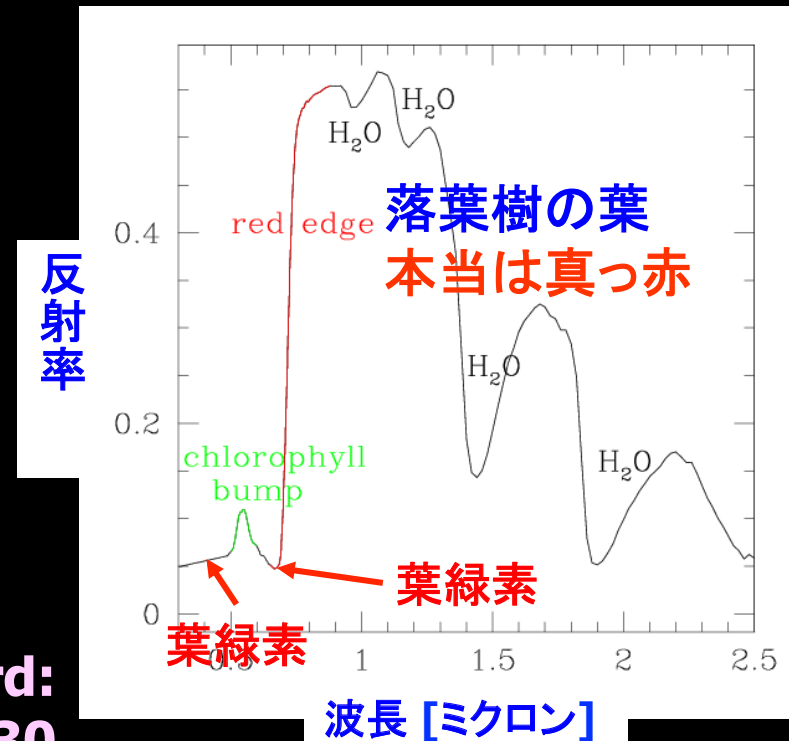
Extrasolar plants on extrasolar planets

- (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



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



■ Nancy Y.Kiang *"The color of plants on other worlds"*

■ Scientific American April 2008

■ 邦訳：日経サイエンス2008年7月号

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

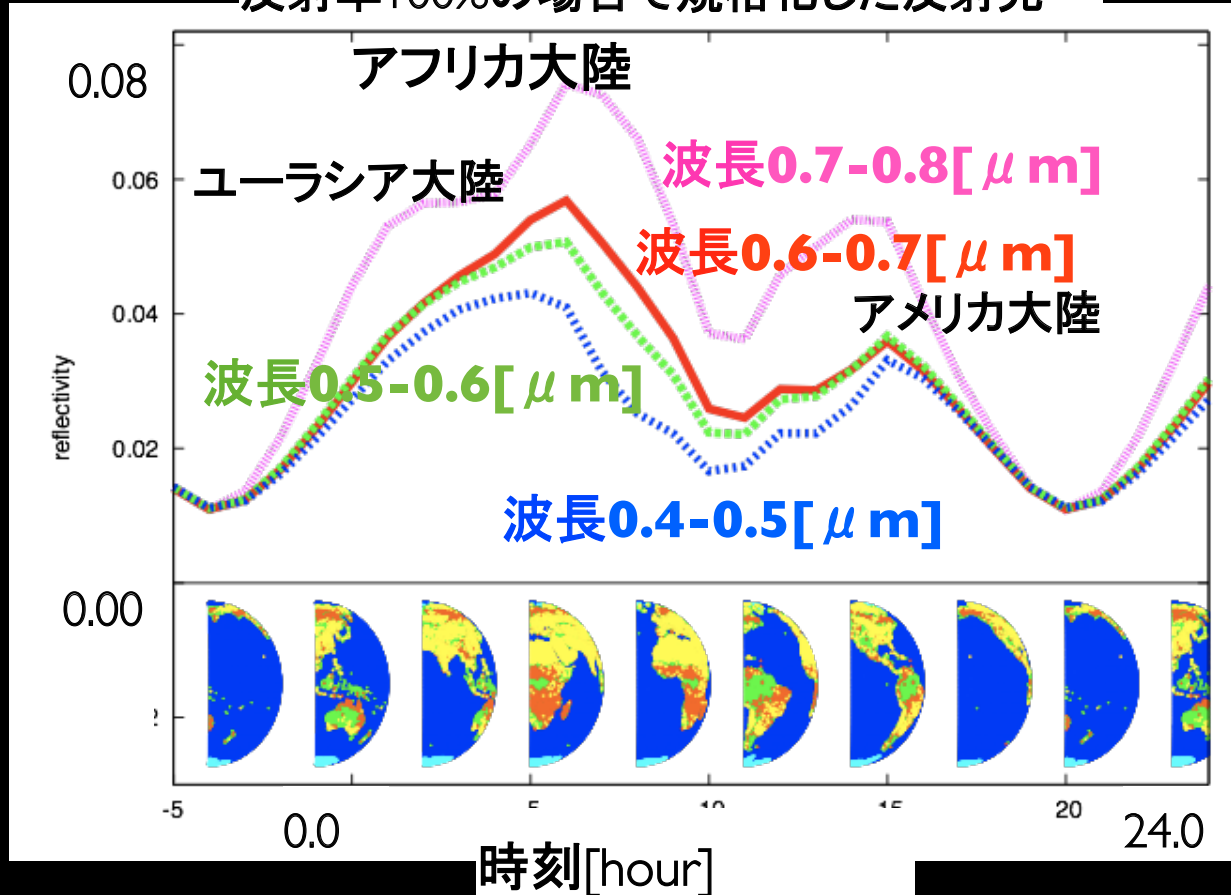


自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション

- 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

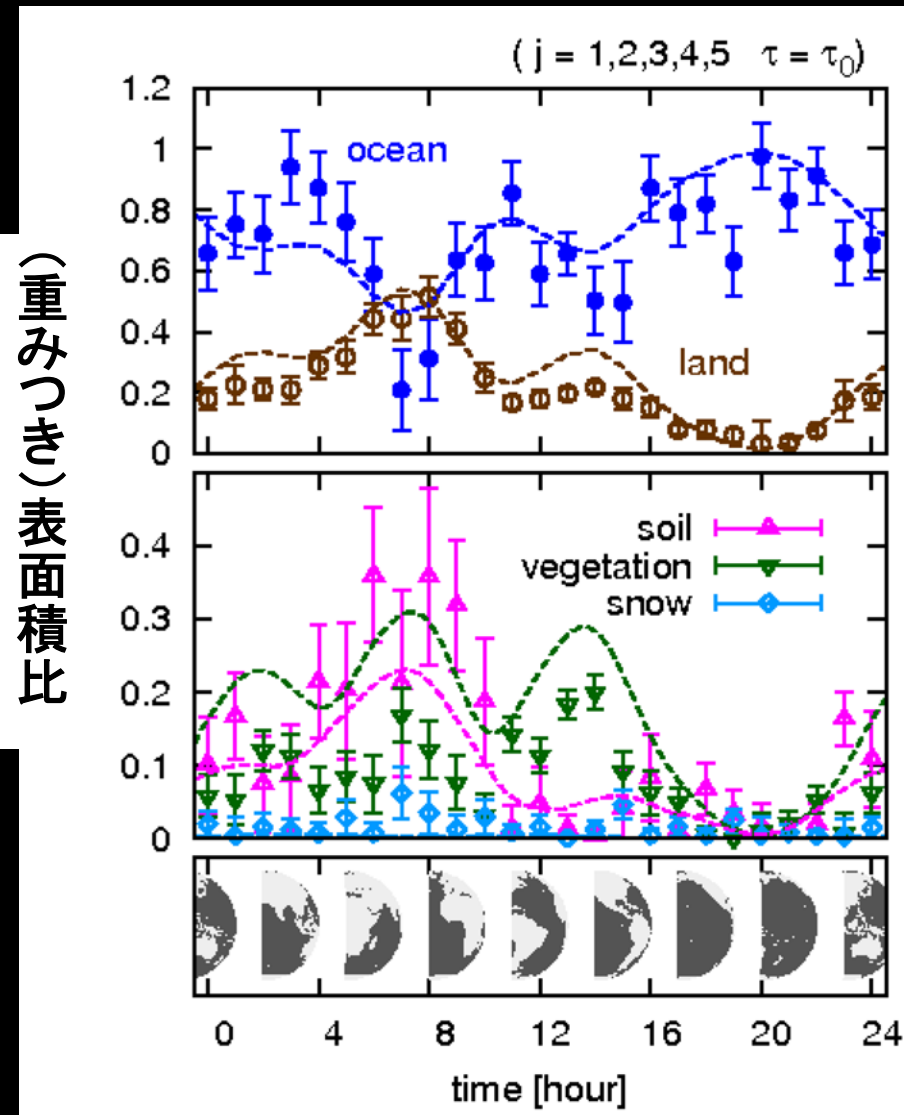
地球は青かった？

反射率100%の場合で規格化した反射光



Fujii et al. (2010)

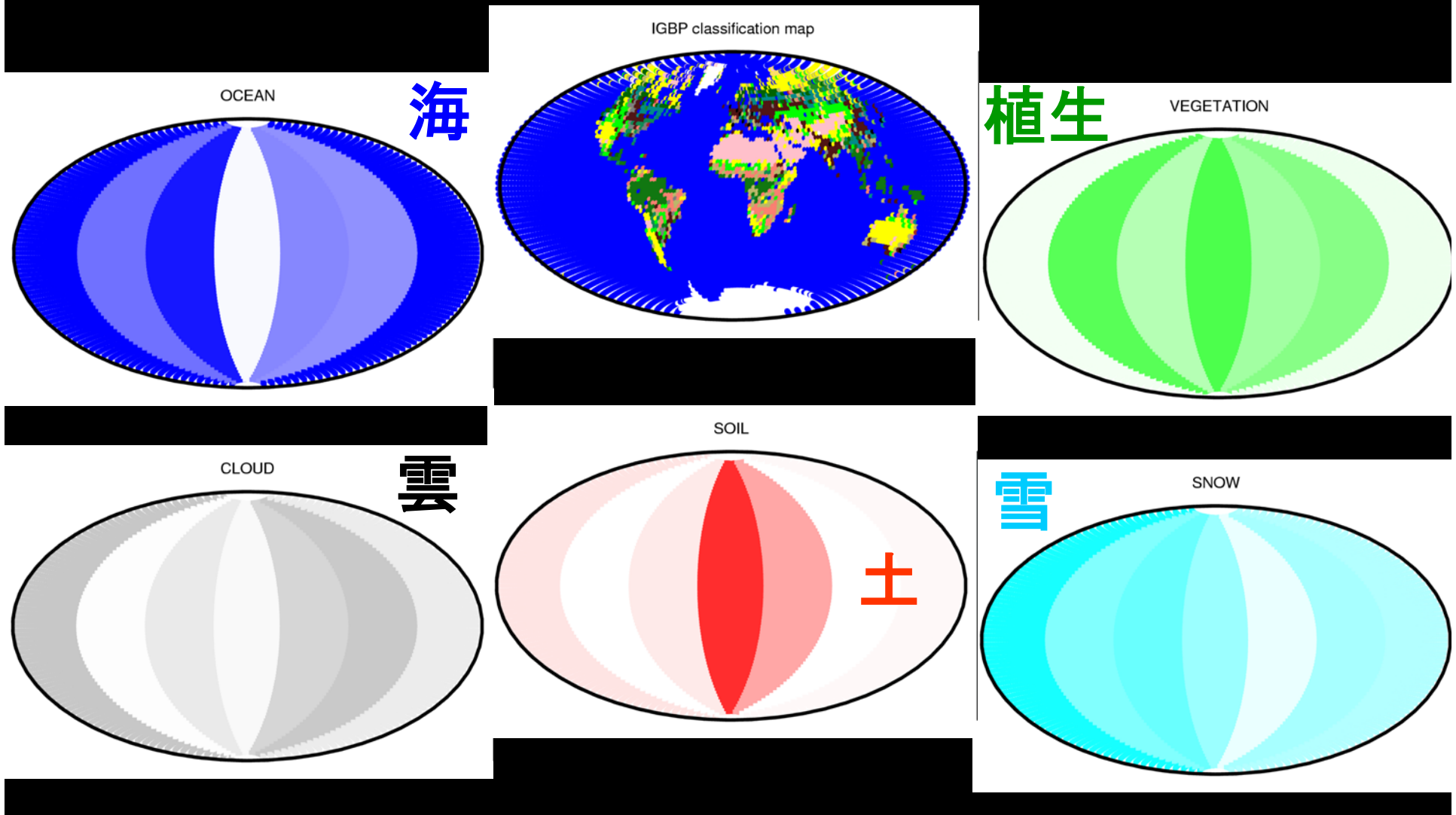
第二の地球の色から表面積を推定



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！

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



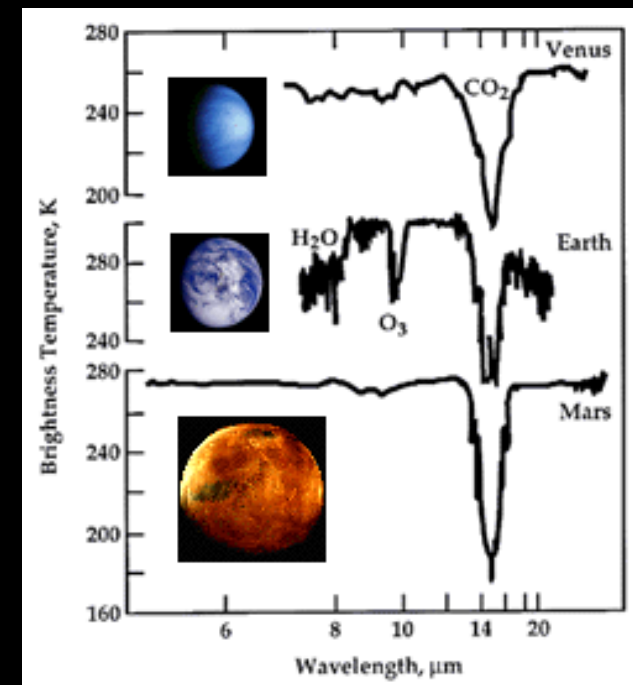
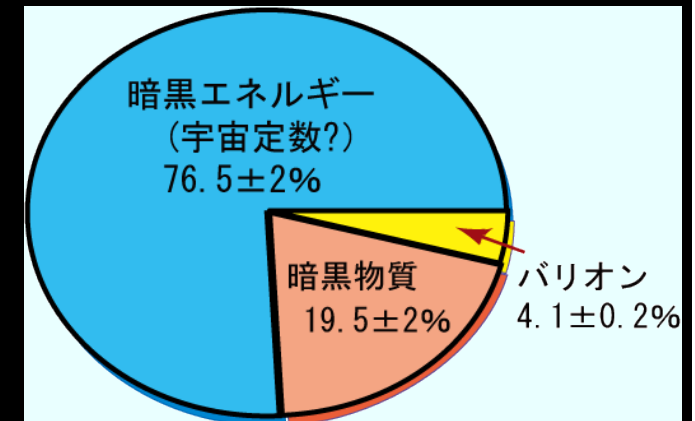
「夜空のむこう」を探ることで、従来全く予想されていなかった新しい科学が発展しつつある

■ 宇宙の果ての観測から微視的世界の新しい階層が発見された

- 宇宙の96%の正体は理解されていない
- 暗黒物質と暗黒エネルギーの解明は新しい自然法則を探る本質的な鍵

■ 天文学から宇宙生物学へ

- 1995年初めての系外惑星発見
- 地球型居住可能(水が液体として存在する)惑星の発見へ
- 遠くの惑星に生物の兆候を探る天文学的試み



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

知的好奇心

- 果物がたわわに実り、真ん中には高い山がそびえる美しい島に流れ着いた3人の兄弟。夢にでた神様が「とてつもなく重く大きな岩が3つあるはず。それを好きなところまで転がして行け、どこまで行くかはお前達の自由である。高い場所に行けば行くほど世界を遠くまで見渡すことができる」と教えてくれる。

- 三男：海岸の近く、とても美しいし、魚も捕れる
- 次男：山の中腹、果物が豊富に実っている
- 長男：山のとっぺん、霜をなめ苔を食べることで水分と栄養をとるしかない、でも世界は見渡せる

村上春樹『アフターダーク』より