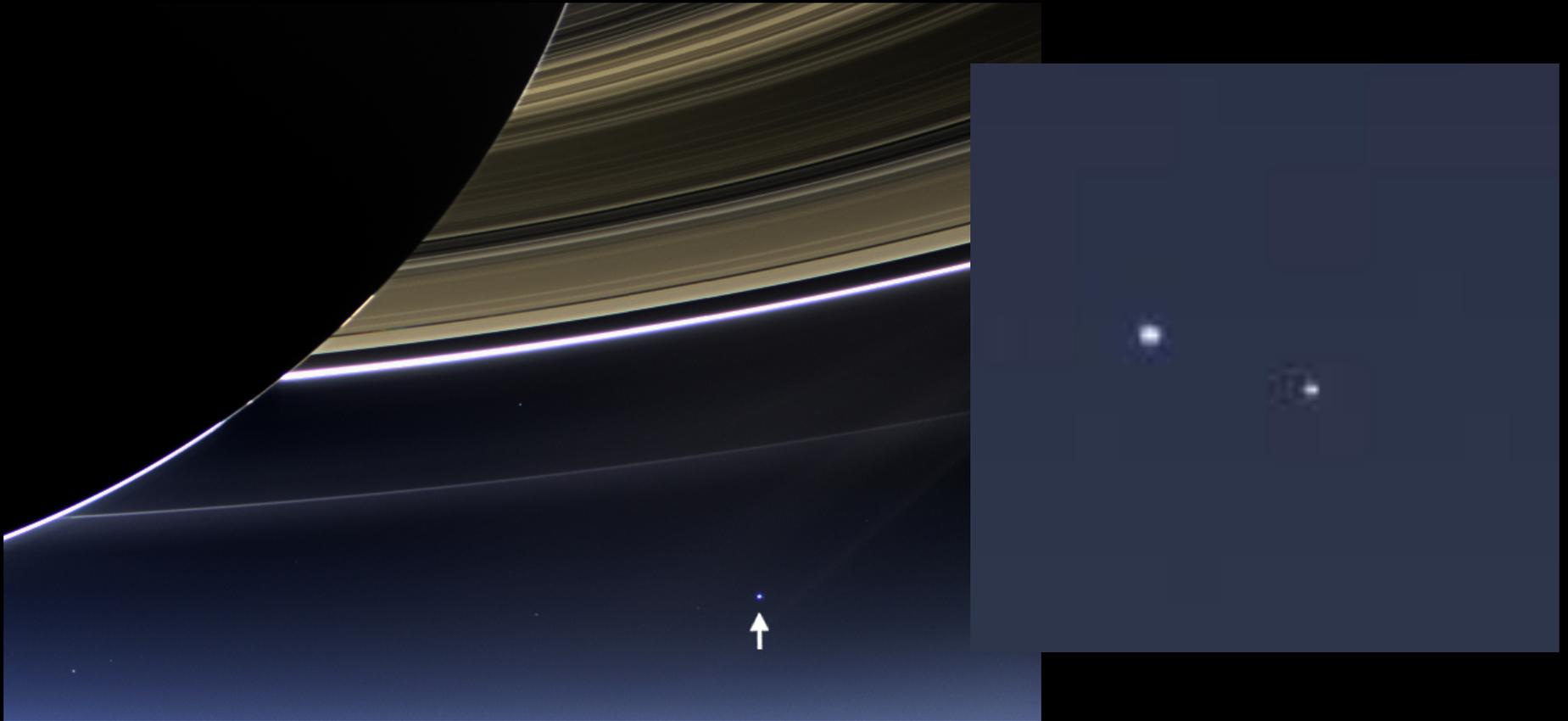


もうひとつの地球の色は何色？



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

日本学会東北地区会議公開学術講演会

サイエンストーク「宇宙ファミリー」

2013年9月14日14:25-15:10@八戸、ユートリー

村上春樹

アフターダーク

ハワイに流れ着いた3人の兄弟

- 果物がたわわに実り、真ん中には高い山がそびえるハワイのあ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遠くを見ることができる」と告げる。
 - 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

マ리는質問する

- 「その話には教訓みたいなものはあるの？」
- 「教訓はたぶんふたつある。ひとつは」と彼は指を一本立てる。「人はそれぞれに違うということ。たとえば兄弟であつてもね。
- もうひとつは」と二本目の指を立てる。「何かを本当に知りたいたいと思ったら、人はそれに応じた代価を支払わなくてはならないということ。」

知的好奇心

- 「ハワイにまで来て、霜をなめて、苔を食べて暮らしたいとは誰も思わないよな。たしかに。でも長男には、世界を少しでも遠くまで見たいという好奇心があったし、それを押さえることができなかったんだよ。そのために支払わなくちゃいけないものがどんなに大きかったとしてもさ」

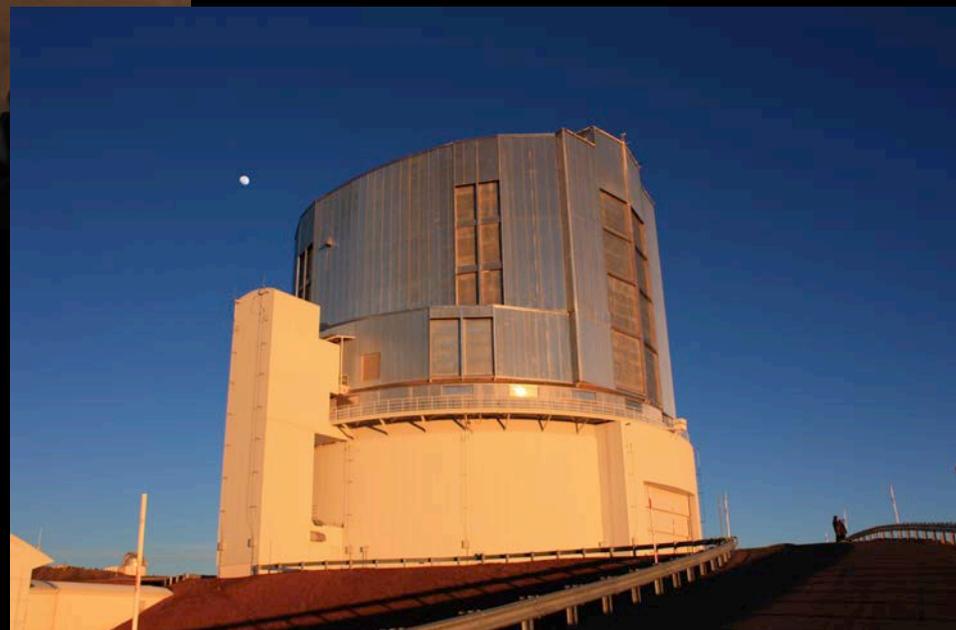
- 「知的好奇心」

- 「まさに」

長男＝天文学者の人生！



すばる望遠鏡



ハワイ島マウナケア山頂上の
3つの大きな岩

(以下のハワイの写真はすべて
柏木俊哉氏撮影)



三男@ハワイ島ヒロ(海拔0m)

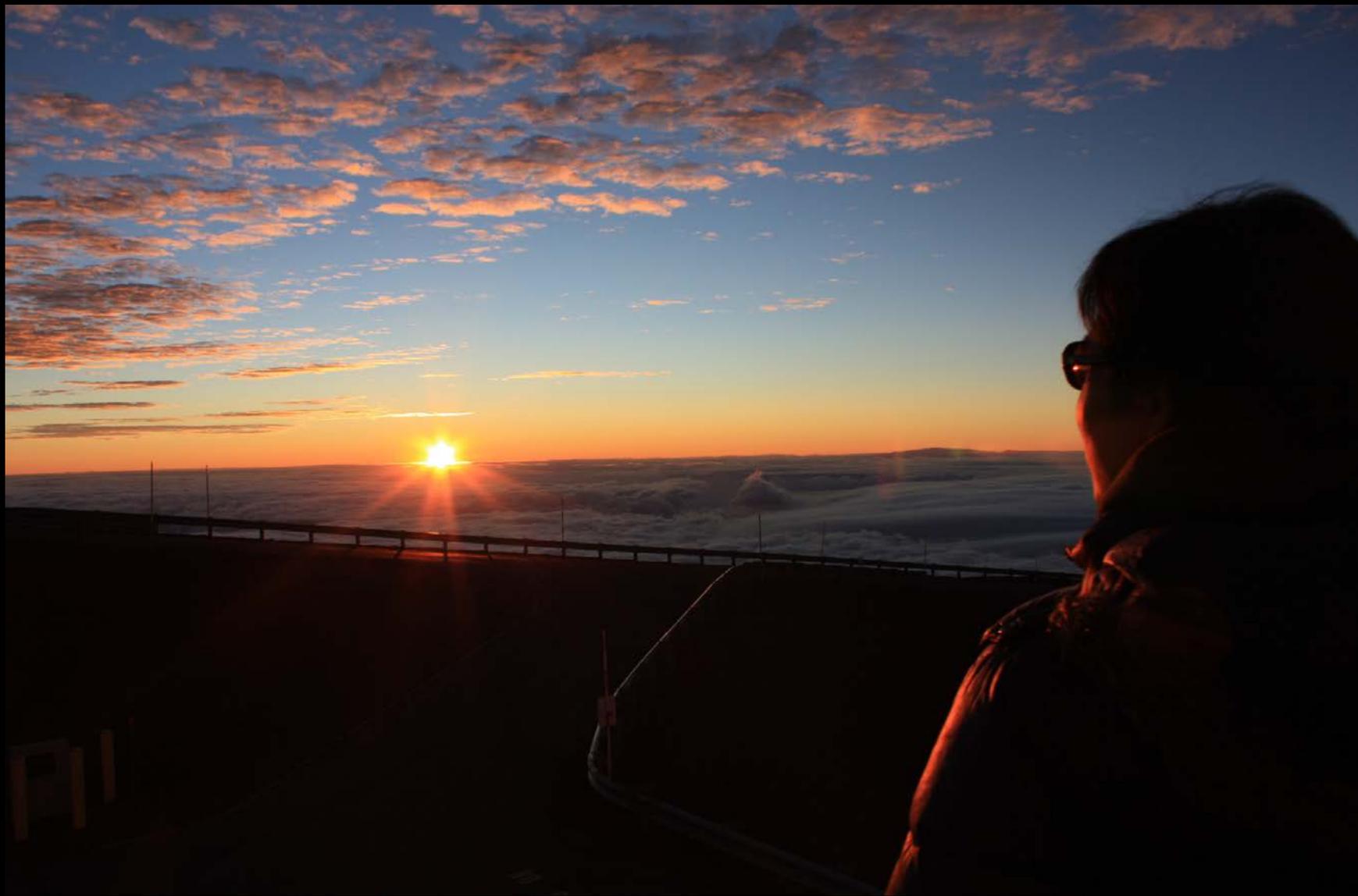
次男@中間宿泊所ハレポハク (海拔2,800m)



長男@すばる望遠鏡(海拔4,200m)



でも世界は見渡せる



でも世界は見渡せる



でも世界は見渡せる



でも世界は見渡せる



アイザック アシモフ

夜来たる

Nightfall

アイザック・アシモフ著 「Nightfall (夜来たる)」



イラスト：羽馬有紗

- 2049年に一度しか夜が来ない“地球”の世界観
- 自分たちの“地球”以外に宇宙はあるか？

この青空は宇宙の果てなのか



「我々は何も知らなかった」
でもこれですべて？

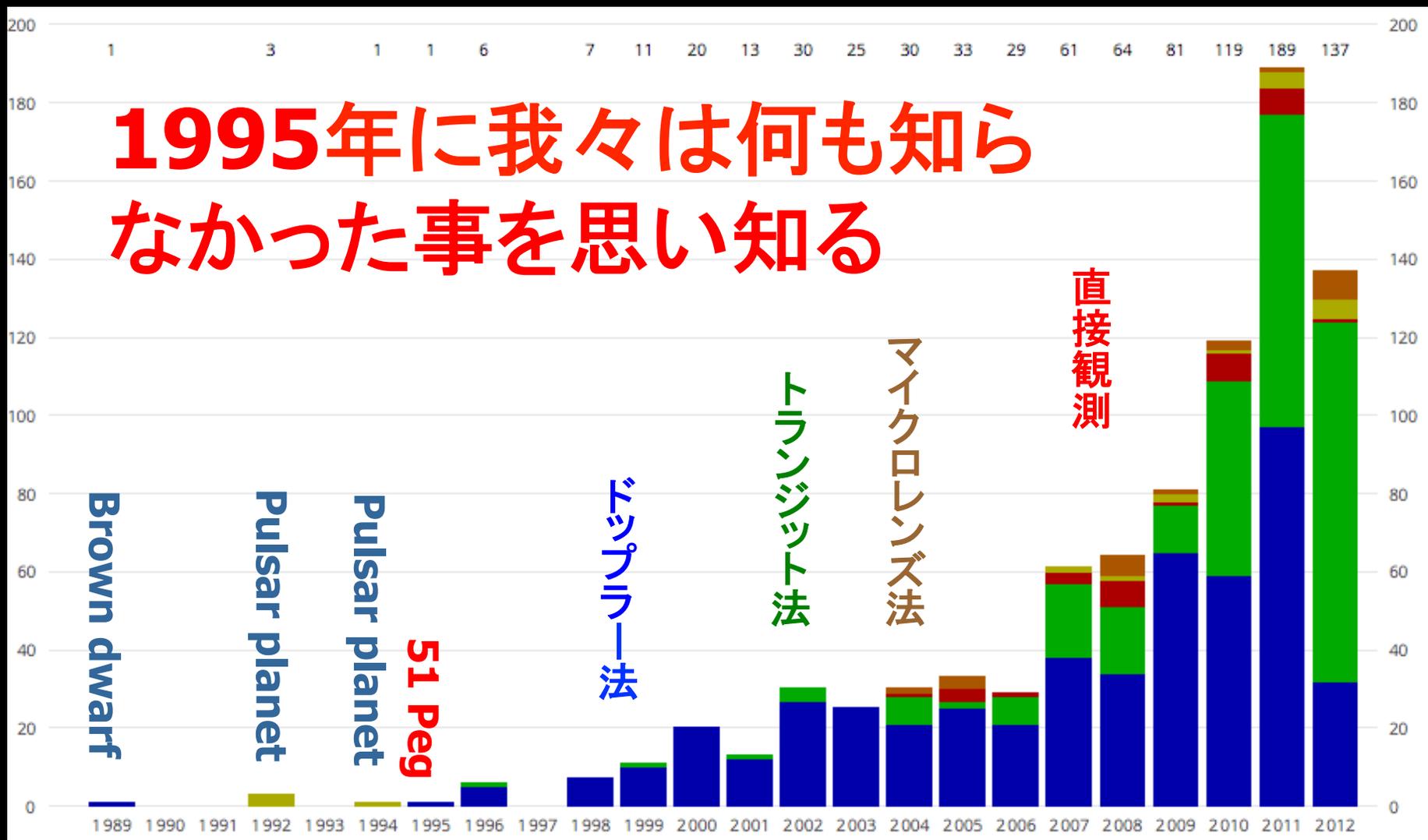
(すばる観測所、田中壺氏撮影)

太陽系外惑星の世界

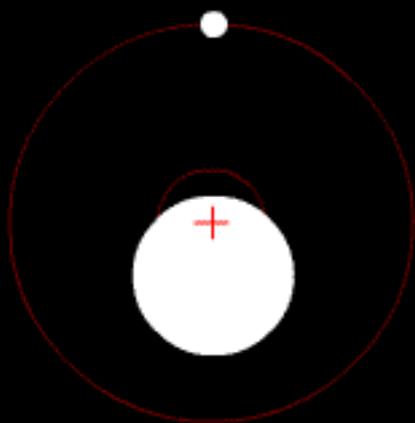
太陽系外惑星発見史

- 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スス座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
- 2013年8月17日時点で726個の惑星系（940個の惑星）

太陽系外惑星発見の歴史年表



どうやって見つけたのか？



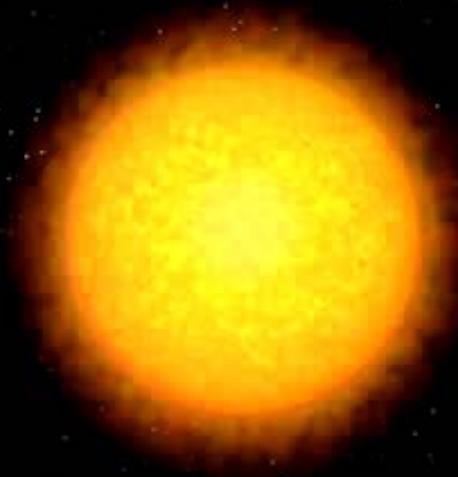
■ ドップラー法

- 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

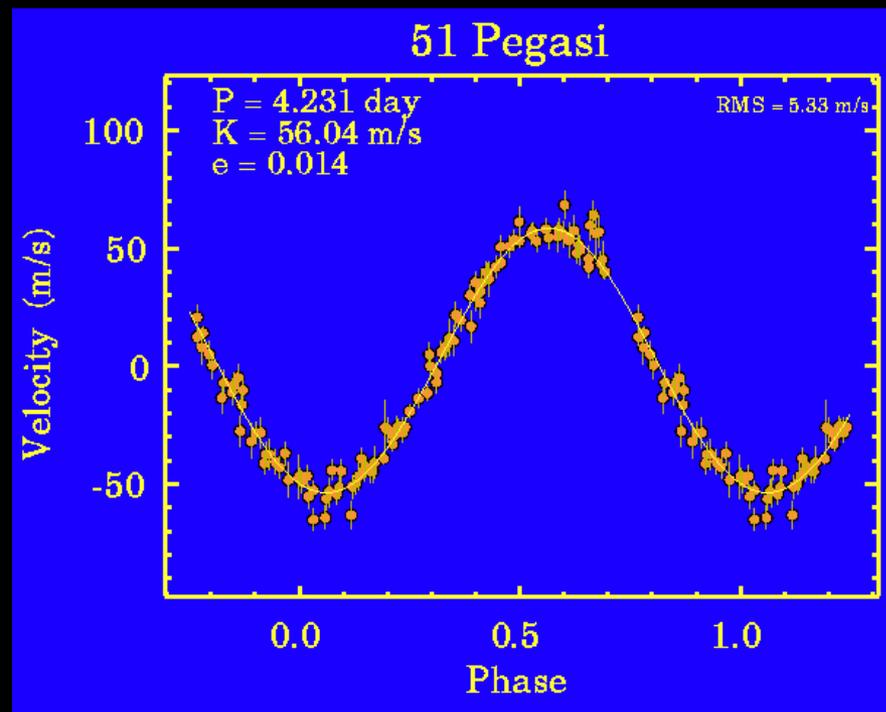
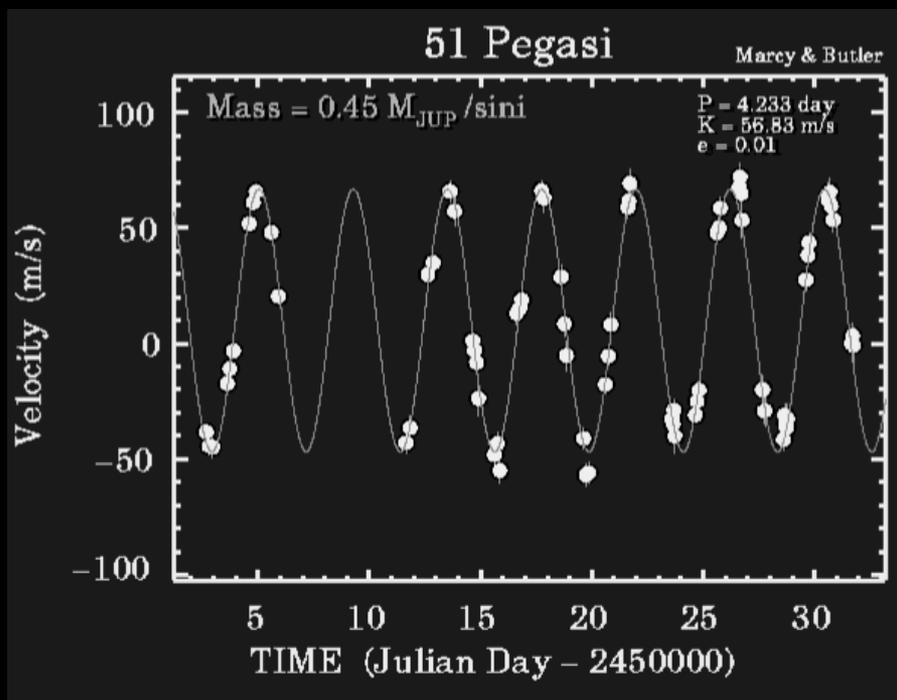
- (運がよければ) 中心星の正面を惑星が横切ることによって星の明るさが1パーセント程度周期的に暗くなる

■ 重力レンズ、直接撮像



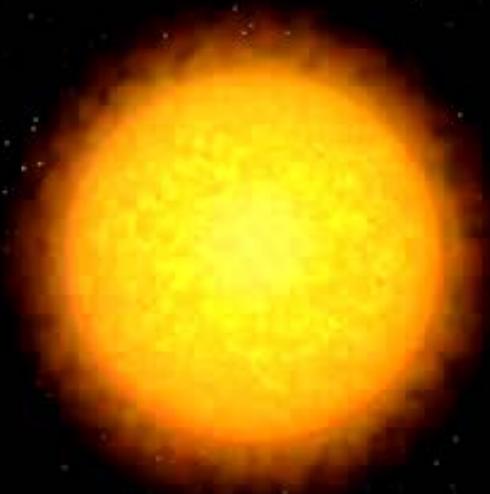
ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年、ドップラー法)

わずか4.2日で一周！



初めてのトランジット惑星HD209458b

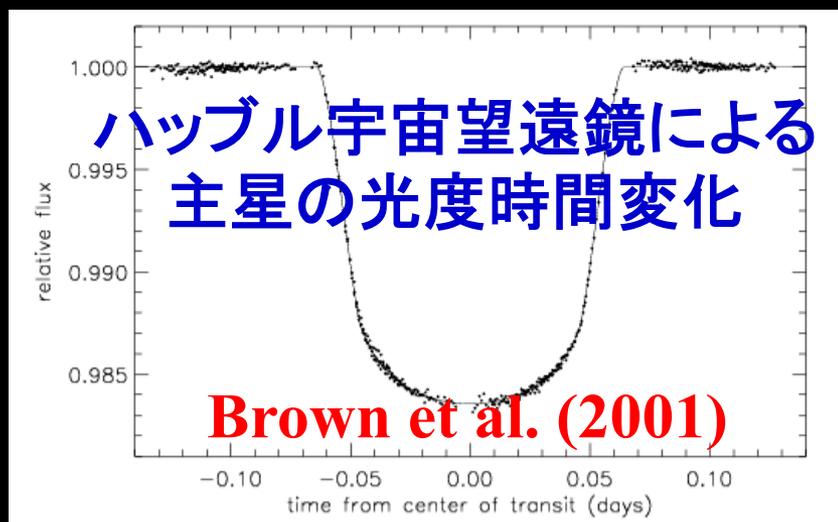
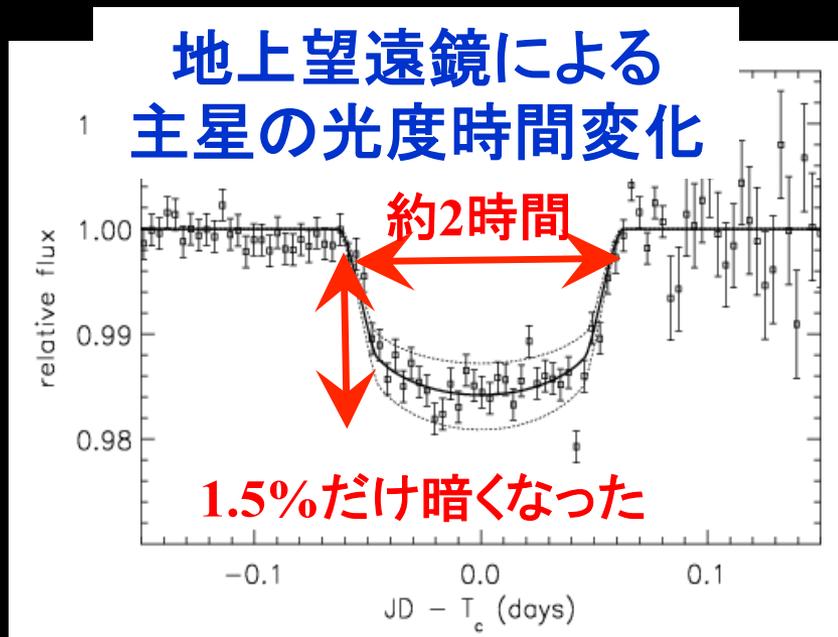
- 速度変動のデータに同期した惑星による中心星の掩蔽の初検出
周期3.5日のホットジュピター



想像図

Henry et al. (1999)

Charbonneau et al (2000)



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**
 - 太陽と似た恒星の34%(以上)が惑星を持ち、17%(以上)は複数の惑星を持つ
- **太陽系と良く似た系もかけ離れた系も存在**
 - 太陽の周りを数日で公転する木星型惑星(ホットジュピター)が大量に存在(太陽系の木星の周期は約10年)
 - かなりゆがんだ楕円軌道を運動する惑星も多い
 - 水が液体として存在する摂氏0度から100度の温度の惑星(ハビタブル惑星)候補も報告
- **我々の地球以外に生命が存在するか?**

ペイルブルードット

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



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

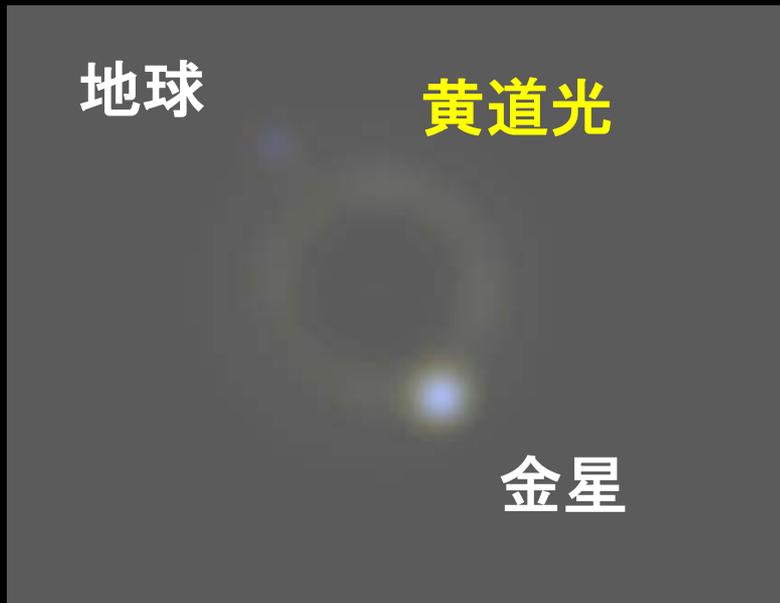
- 口径(2-4)mの可視光望遠鏡@L2点
 - 7万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおく
 - 望遠鏡にはその星の周りの惑星からの光だけが届く
 - 惑星の分光・測光モニターからのバイオマーカー検出
 - コロラド大学を中心とした米国と英国の共同計画
 - 同様の計画はプリンストン大学でも検討中(O₃)

New Worlds Mission:

“太陽系”を観測したらどう見える？

軌道面傾斜角=0°

軌道面傾斜角=60°

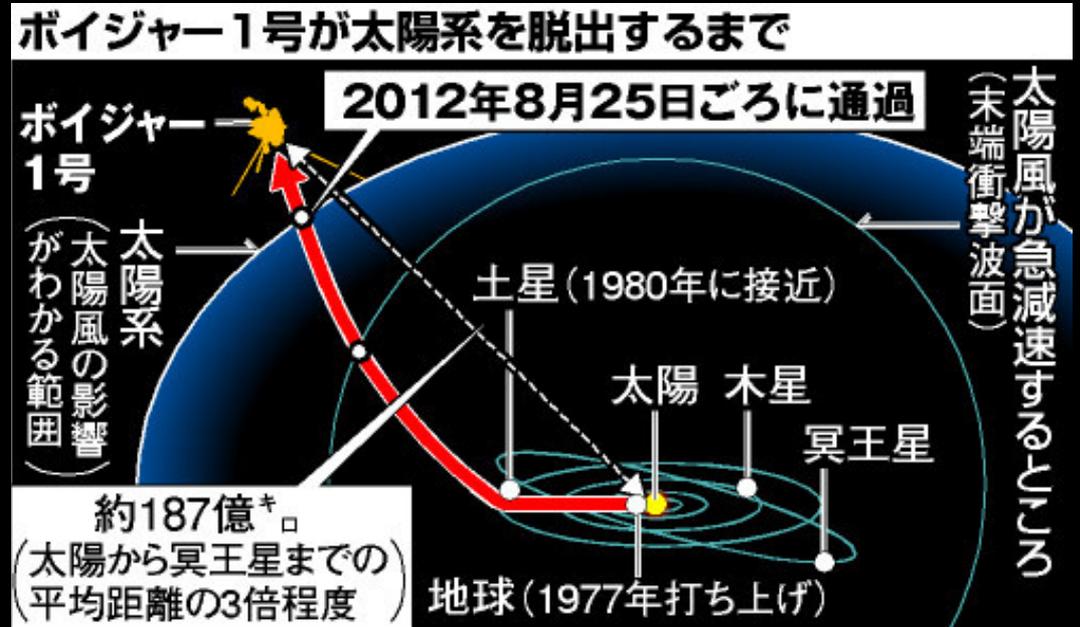


- 我々の太陽系の内惑星を(4m宇宙望遠鏡+オカルター)を用いて30光年先から観測した場合に予想される画像
- このようなミッションが実現した場合、一体何がどこまで分かるのだろうか？

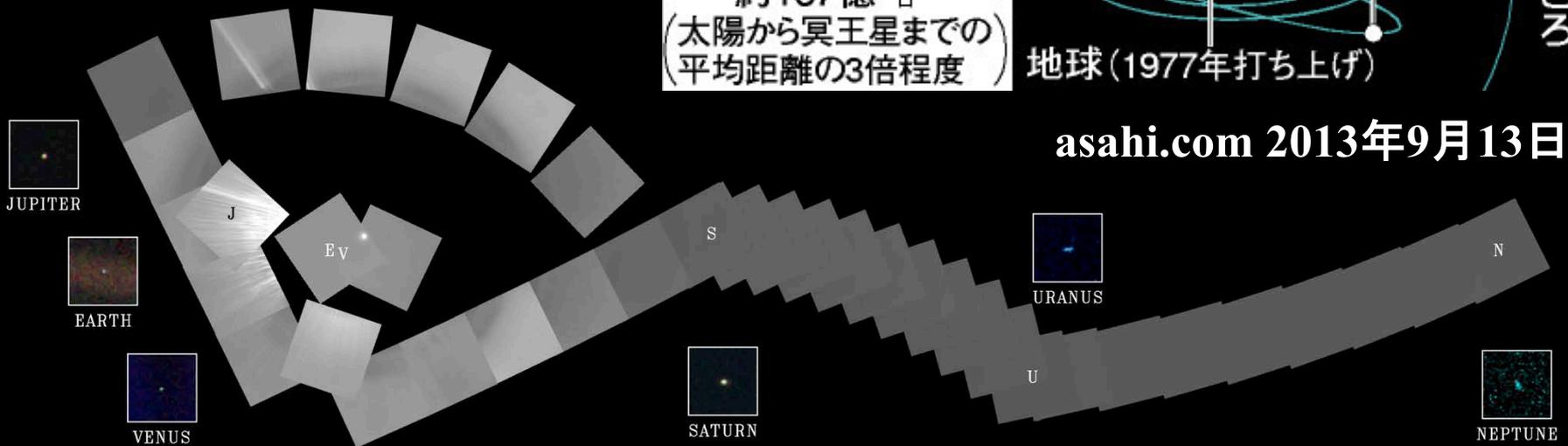
<http://newworlds.colorado.edu/>

ボイジャー1号による太陽系内惑星撮像

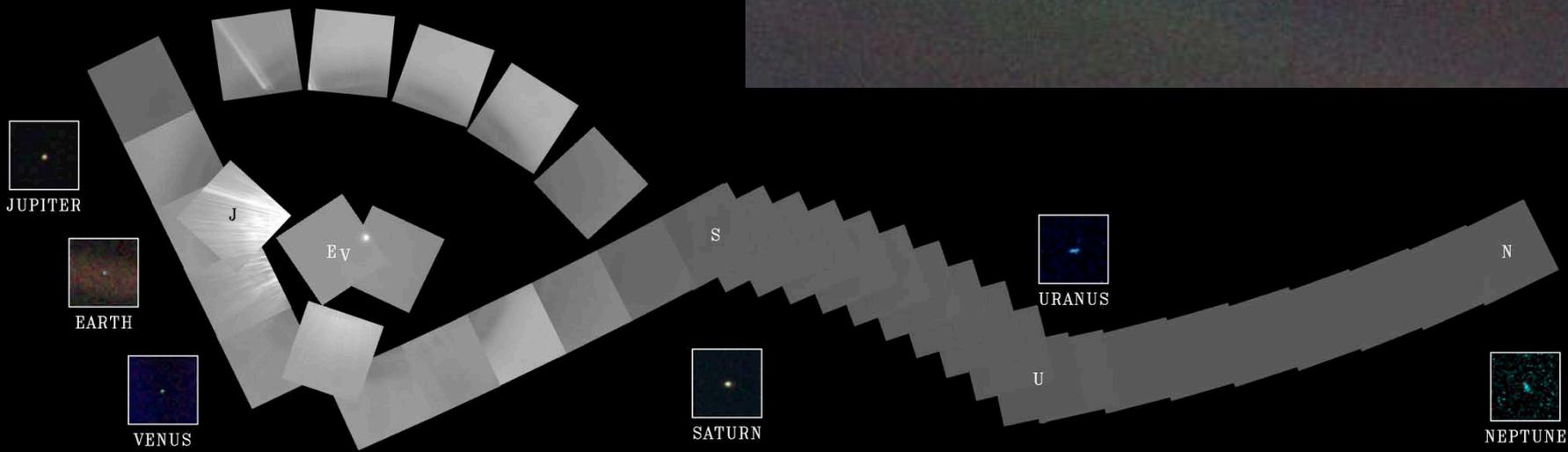
- 1990年2月14日 @40AU
 - カールセーガンが地球の画像を **Pale Blue Dot** と命名



asahi.com 2013年9月13日



ペイル・ブルー・ドット



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

View from Saturn (Cassini)
900 million miles away

水星軌道から 見た地球

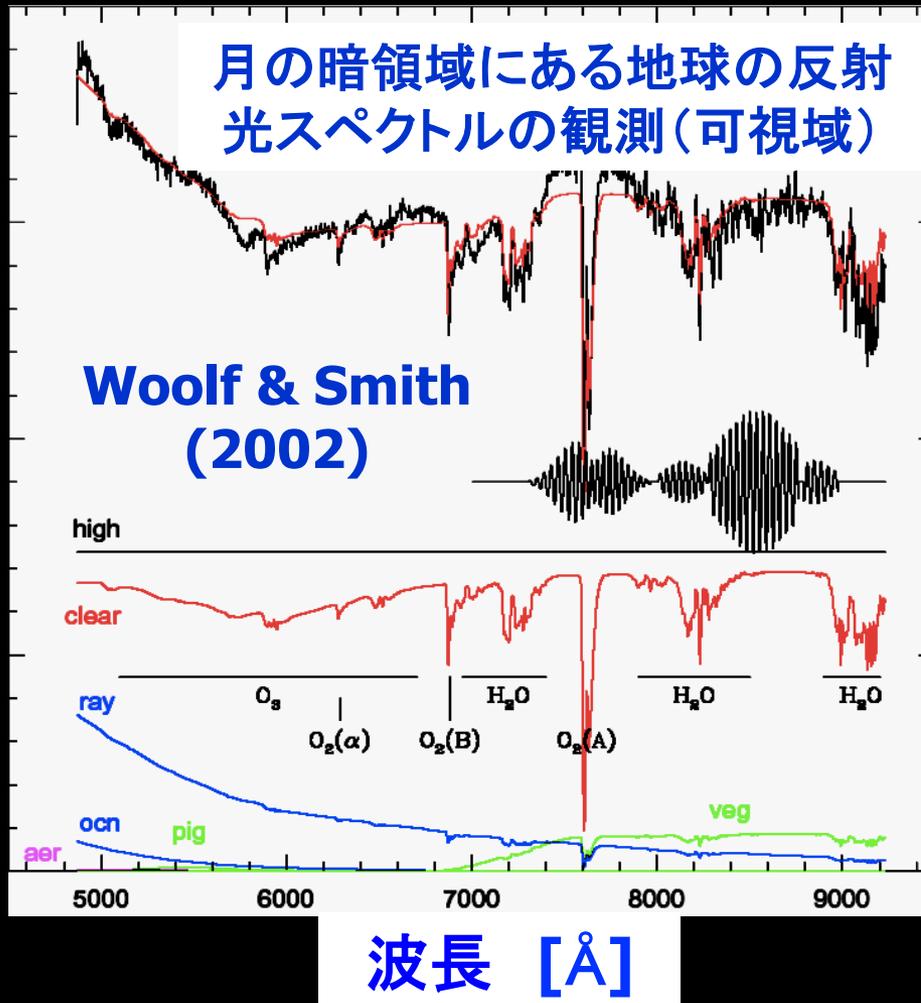
- 水星探査機メッセンジャーが撮影
 - 2013年7月20日
(日本時間)



バイオマーカー

もうひとつの地球に
生命の兆候を探す

常識的バイオマーカー（生物存在の証拠）



■ 酸素

- Aバンド@ $0.76 \mu m$
- Bバンド@ $0.69 \mu m$

■ 水

- $0.72, 0.82, 0.94 \mu m$

■ オゾン

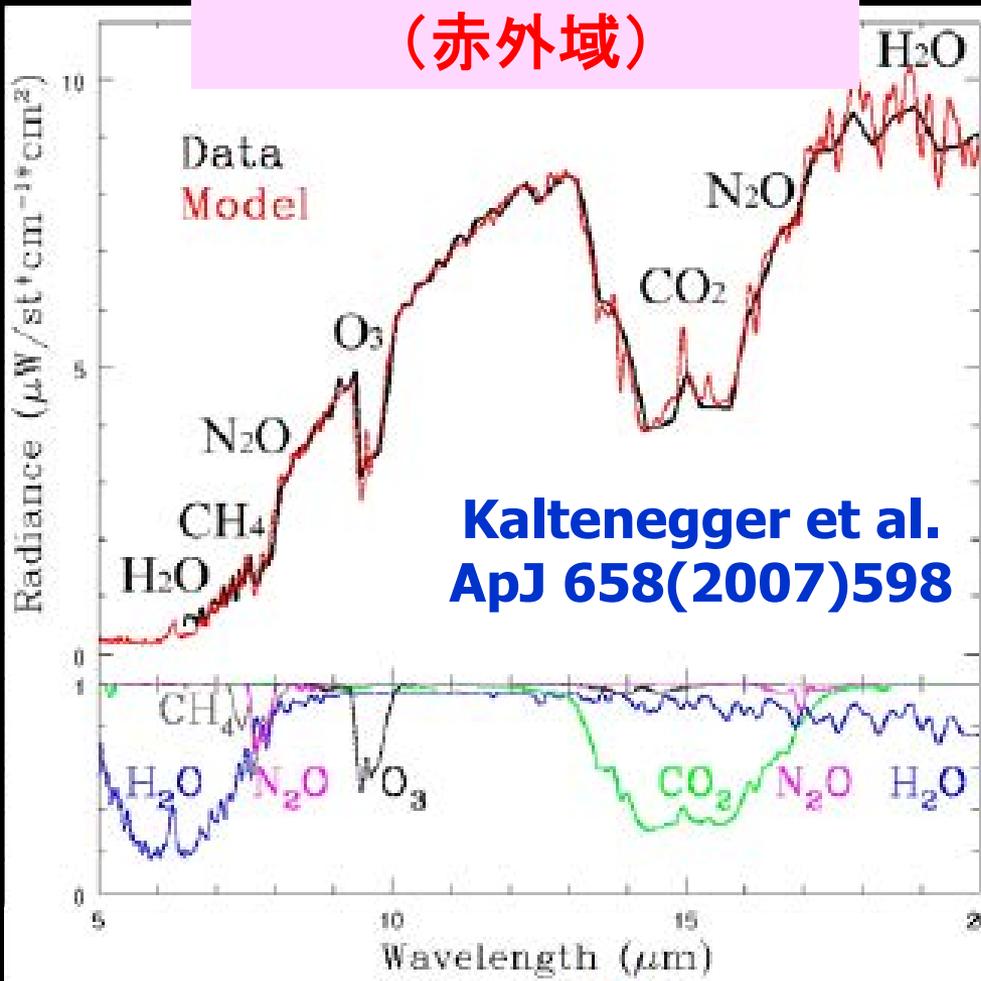
- Chappuis バンド @ $(0.5-0.7) \mu m$
- Hartley バンド @ $(0.2-0.3) \mu m$

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

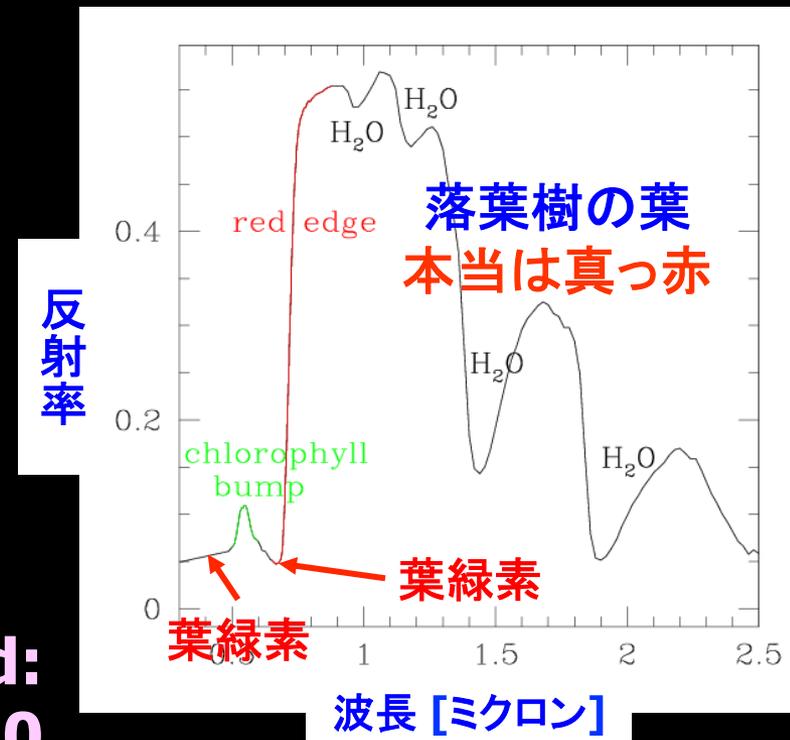
“Exoplanet characterization and the search for life”

より過激(保守的?)なバイオマーカー 系外惑星に系外植物はあるか?

- (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

もうひとつの地球の色

もうひとつの地球の色から、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>

地球は青かった？

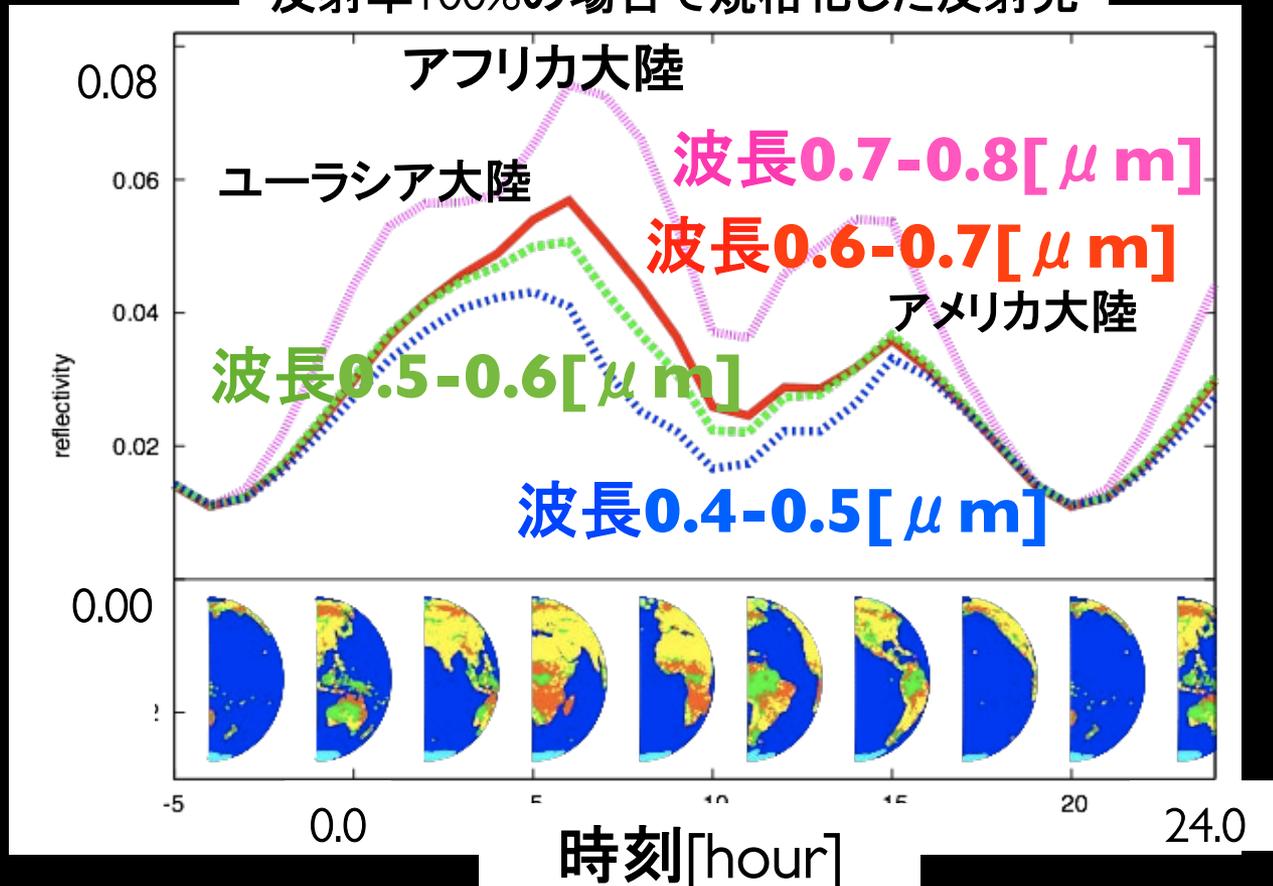
A pale blue dot



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

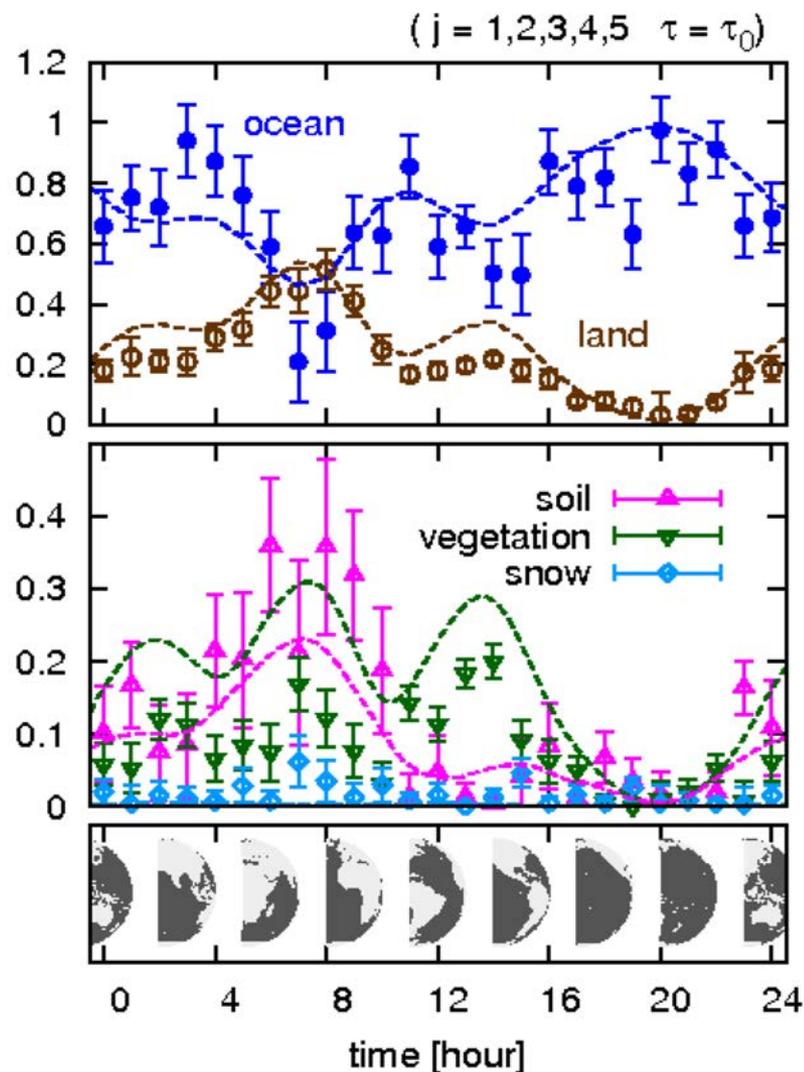
反射率100%の場合で規格化した反射光



Fujii et al. (2010)

もうひとつの地球の色から表面積を推定

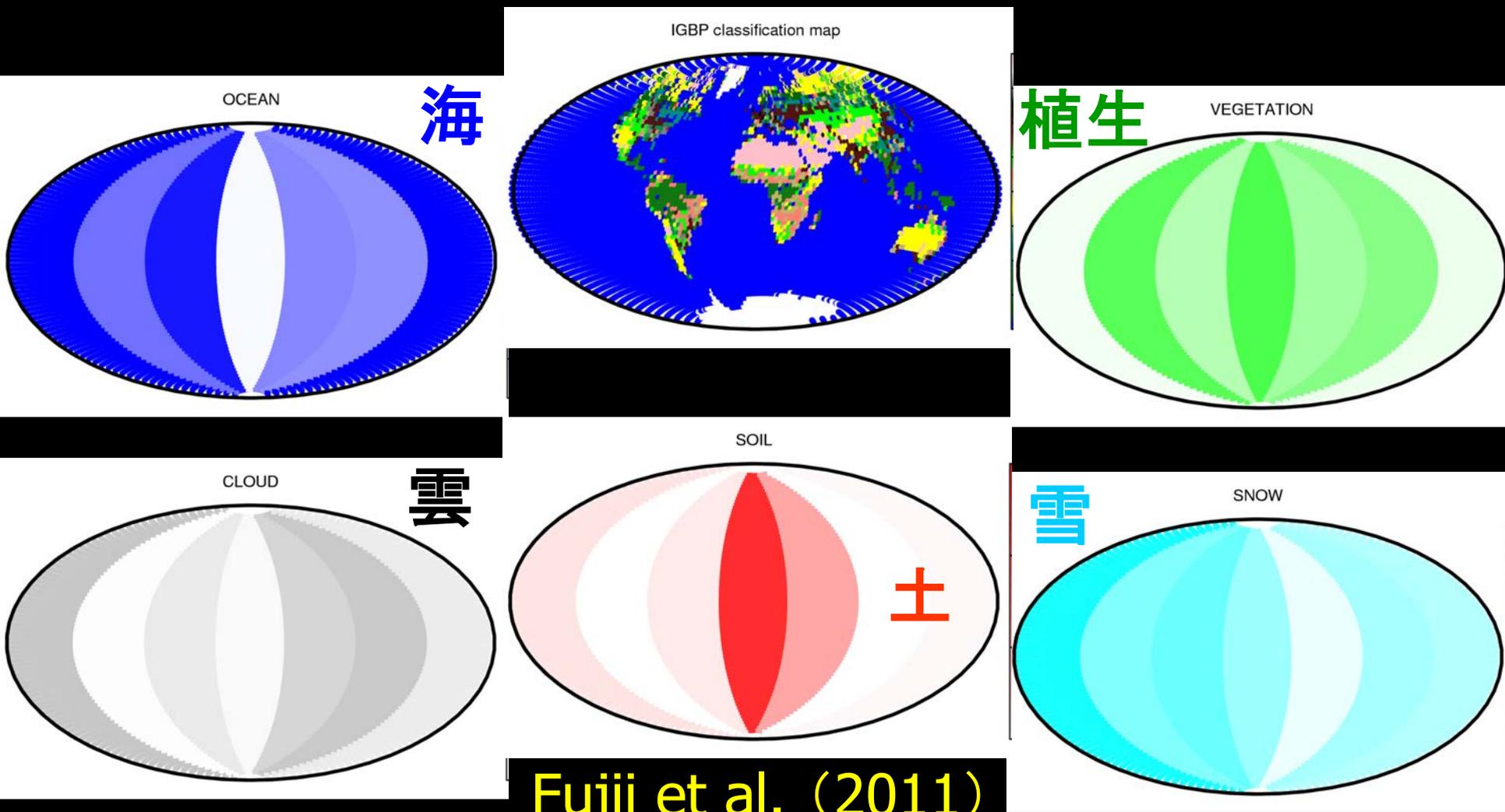
(重みつき)表面積比



- 系外惑星リモートセンシング
- 10pc先の地球を口径4mの宇宙望遠鏡で1週間観測したと仮定
 - 雲が存在せず、かつ中心星の光が完全にブロックできたとする
- 微妙な色の変化から、表面の海・土・植物・雪の4成分の面積の割合が推定できる
 - 地球は単なるペイルブルードットではない

Fujii et al. (2010)

実際の地球観測データ(EPOXI)から推定された地表面成分の経度分布地図



Fujii et al. (2011)

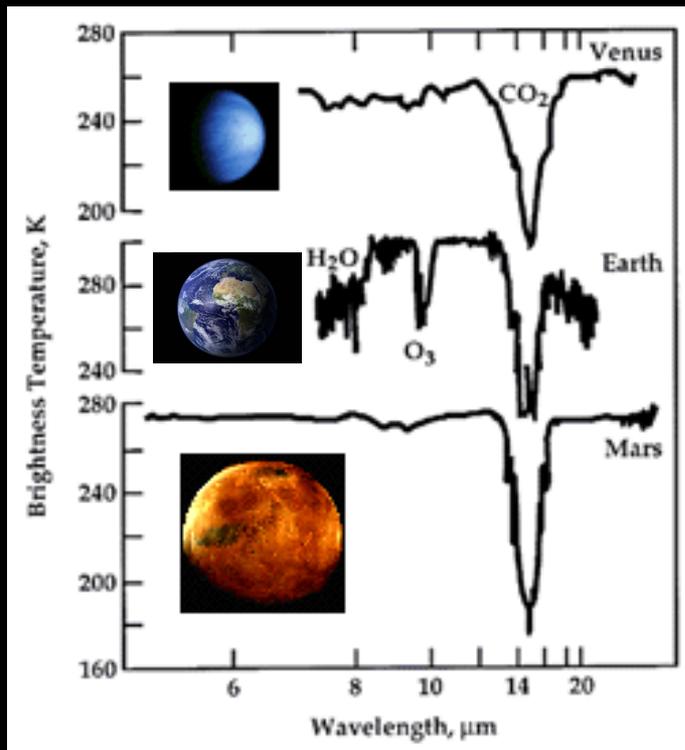
まとめ

ペイルブルードットを超えて

太陽系外惑星の世界

- 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
 - 「もうひとつの地球」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と等しい

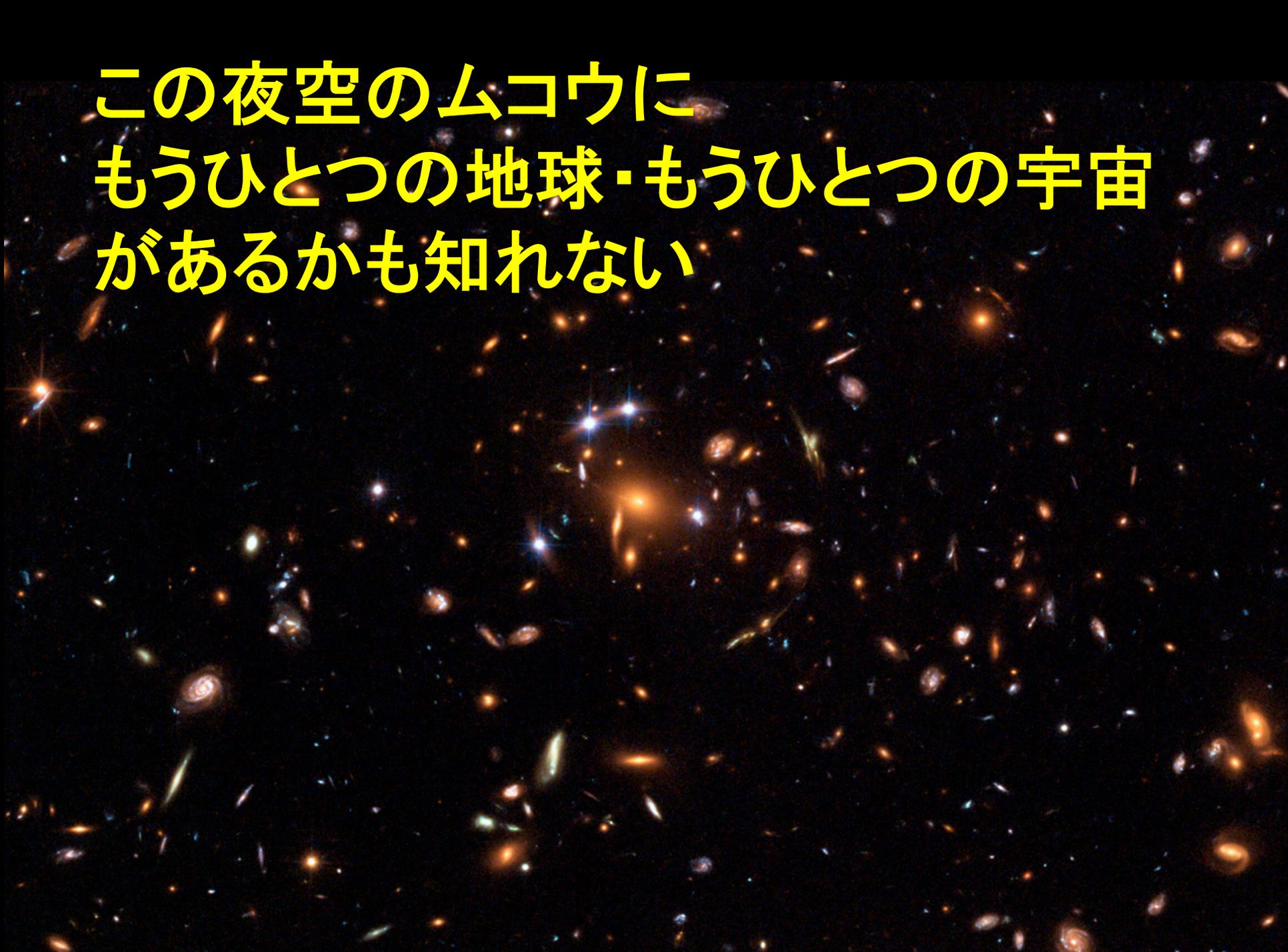
この青空の向こうに何かがあるはず



この星空の向こうにも何かがあるはず



この夜空のムコウに
もうひとつの地球・もうひとつの宇宙
があるかも知れない



我がペイルブルードット から もうひとつのペイルブルードット へ

