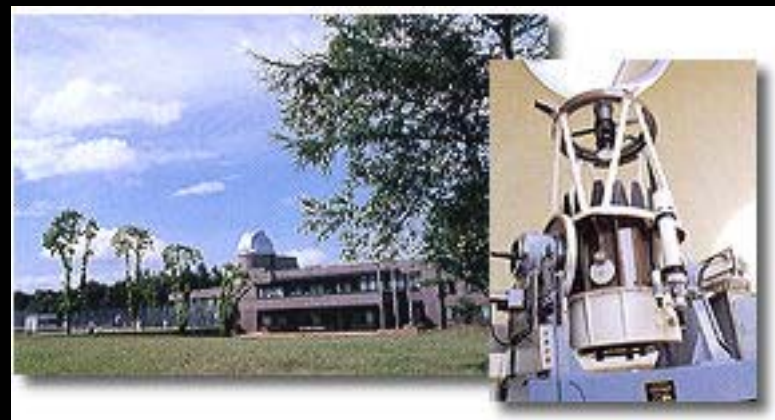


第27回 北軽井沢 駿台天文講座



天文講座 ① 8月6日16:00-17:00

夜空のムコウの世界を探る

天文講座 ④ 8月7日10:00-11:00

宇宙の組成と宇宙の未来

天文講座 ⑥ 8月8日 9:00-10:00

宇宙における必然と偶然

天文講座 ⑧ 8月8日20:00-21:00

太陽系外惑星とバイオマーカー

東京大学大学院

理学系研究科

物理学専攻

須藤 靖

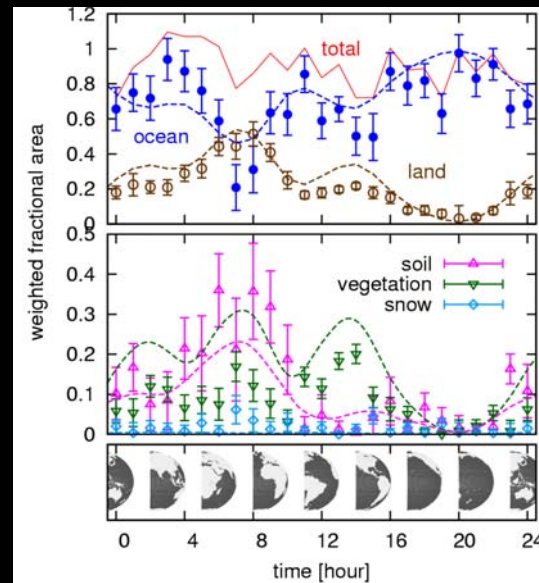
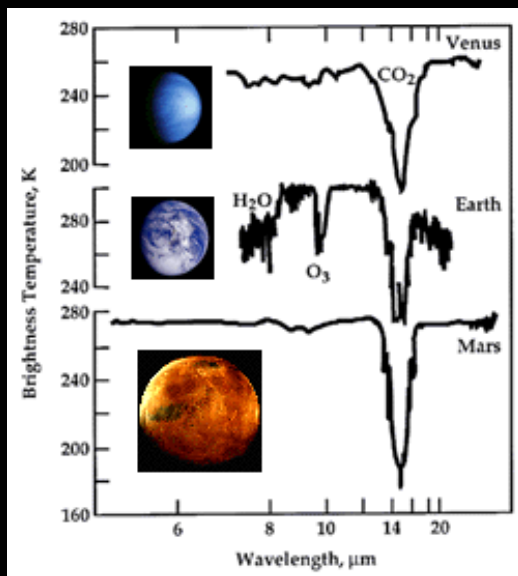
2010年8月6日(金)~9日(月)

北軽井沢駿台天文台(北軽井沢「一心荘」)

天文講座⑧

8月8日 20:00-21:00

太陽系外惑星とバイオマーカー



太陽系外惑星発見の歴史

わかってきたことの要約

近未来に観測できること・すべきこと

バイオマーカー

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

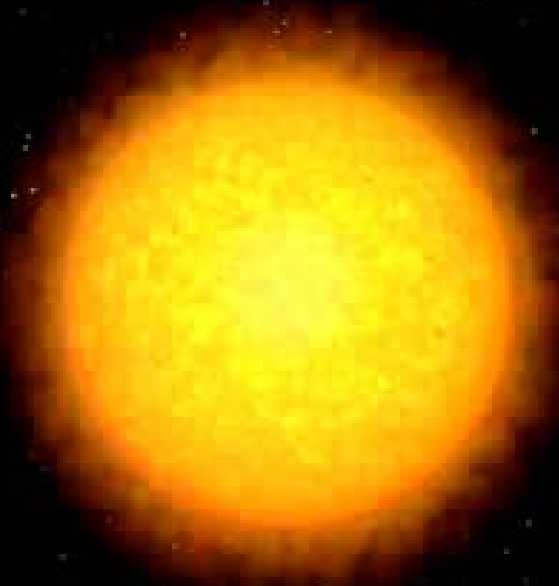
■ 大望遠鏡は「暗い」天体を観測できる

■ 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



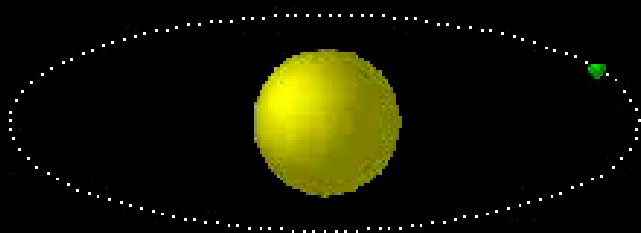
太陽系外惑星（候補）の発見年表

Number of planets by year of discovery



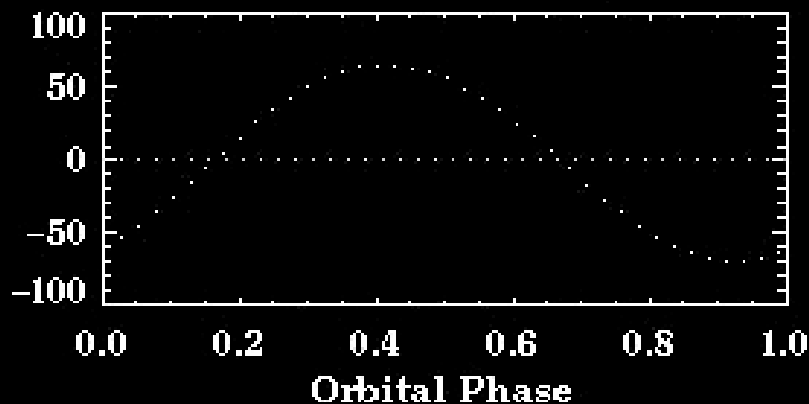
どうやって見つけたのか？

Circular Orbit: rho CrB



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

Radial Velocity Curve
of the Star [m/s]



S.G. Korzennik (CfA), © 1997

■ ドップラー法

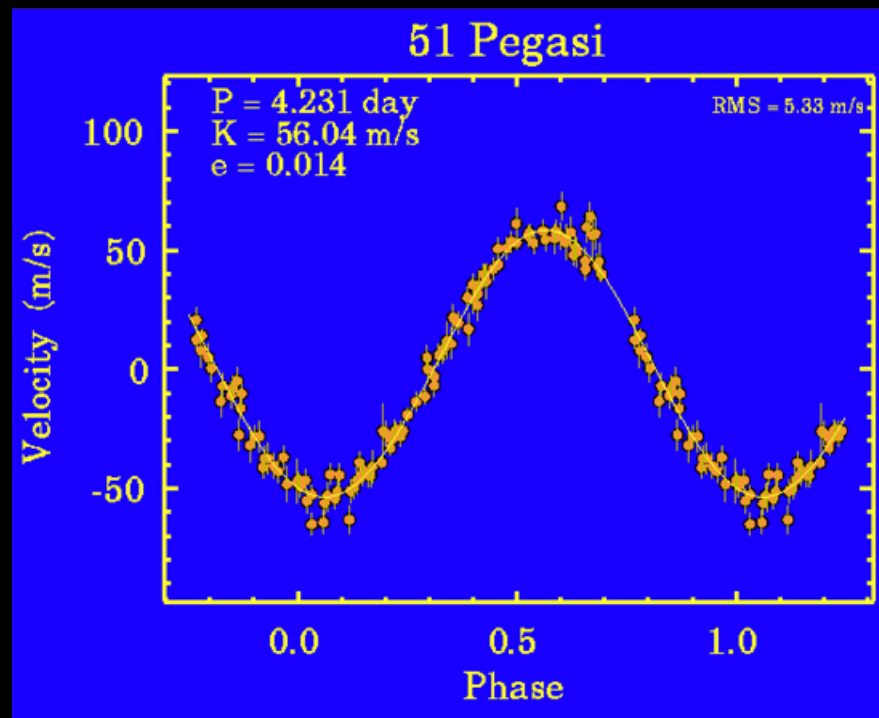
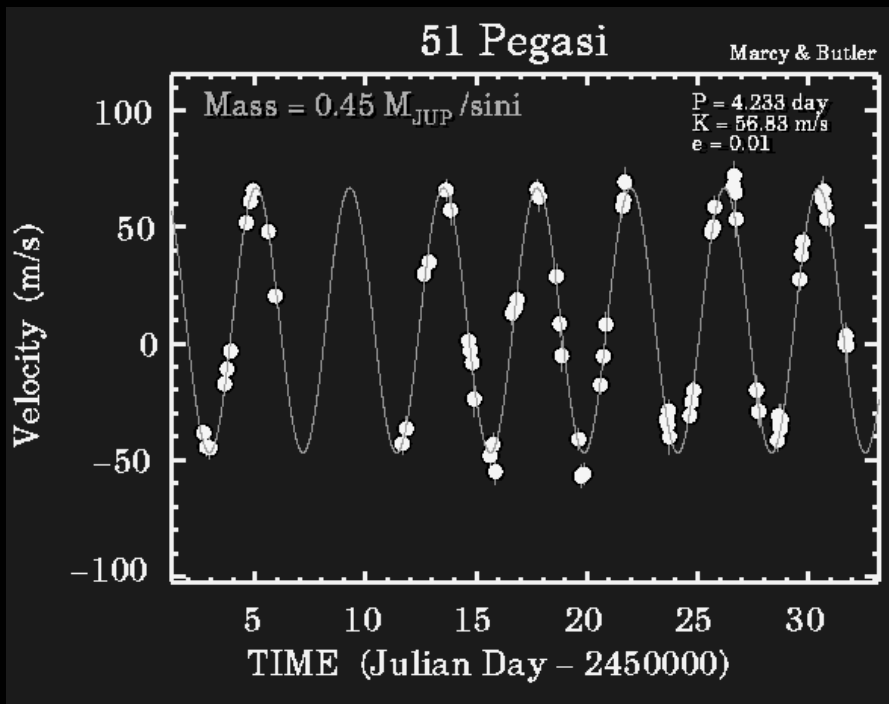
- 中心星の速度が毎秒数十メートル周期的に変動

■ 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

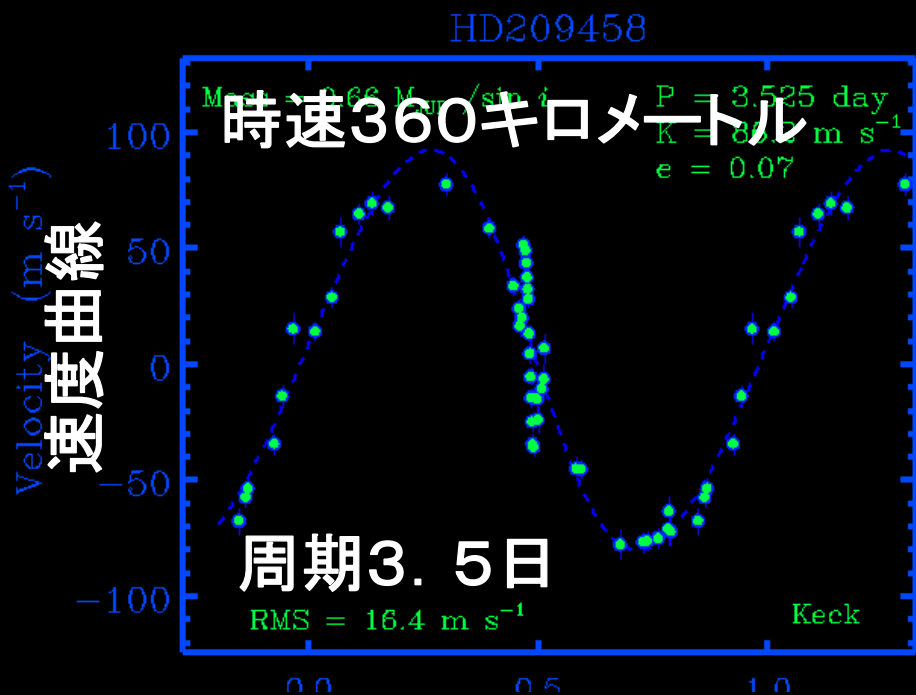
ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年発表)

わずか4.2日で一周！

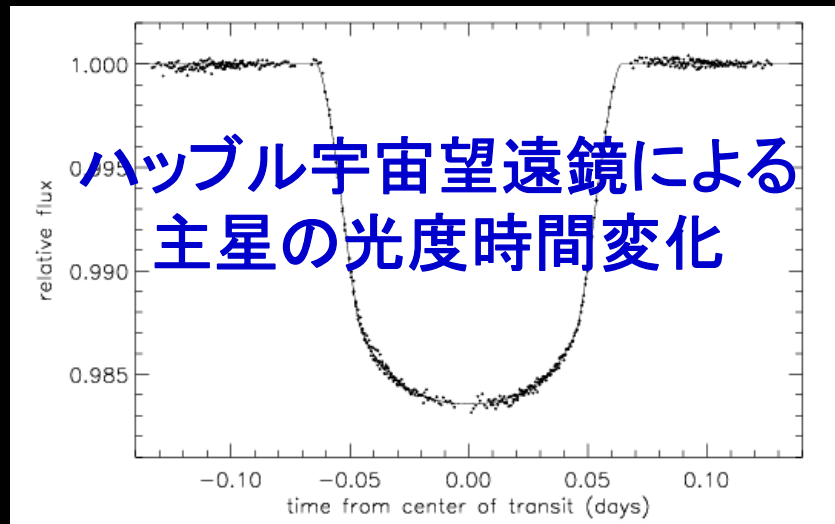
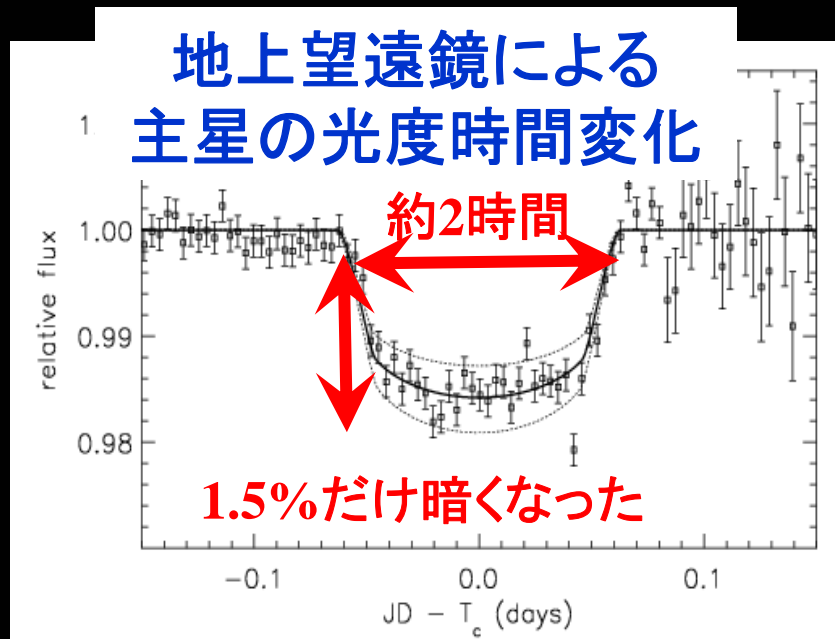


初めてのトランジット惑星HD209458b (2000年発表)

- 速度変動のデータに合わせた惑星食の初検出



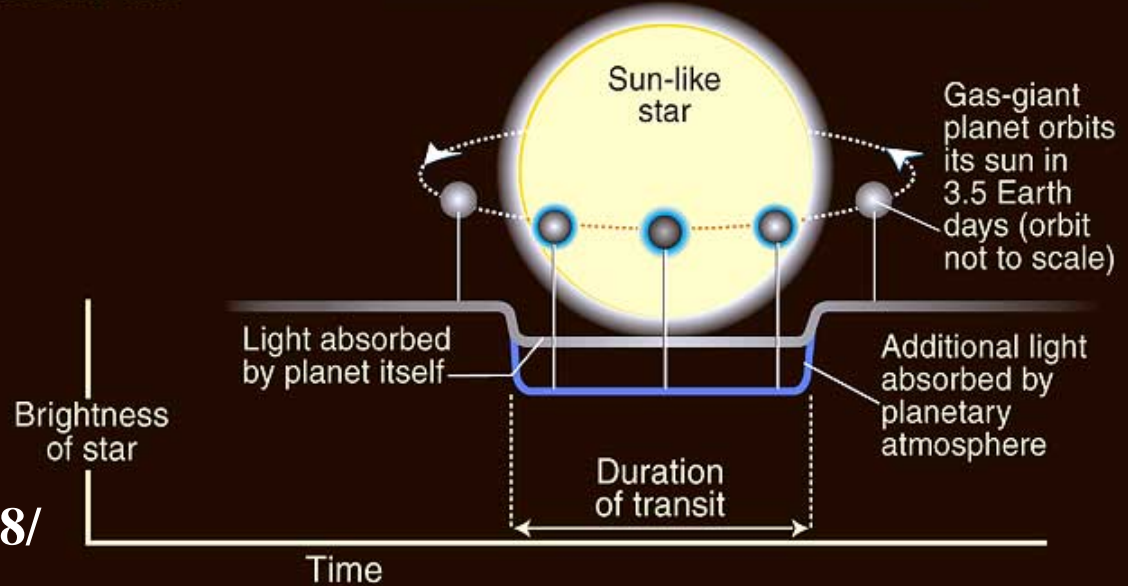
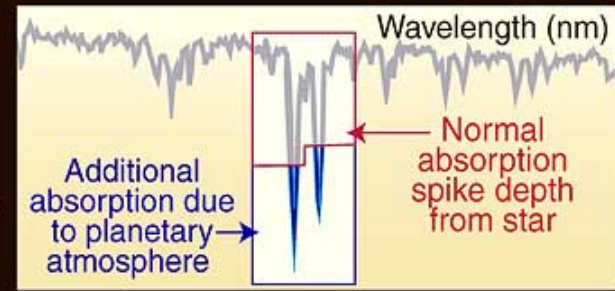
地上望遠鏡による
主星の速度時間変化



HD209458bの 惑星大気初検出 (2001年)

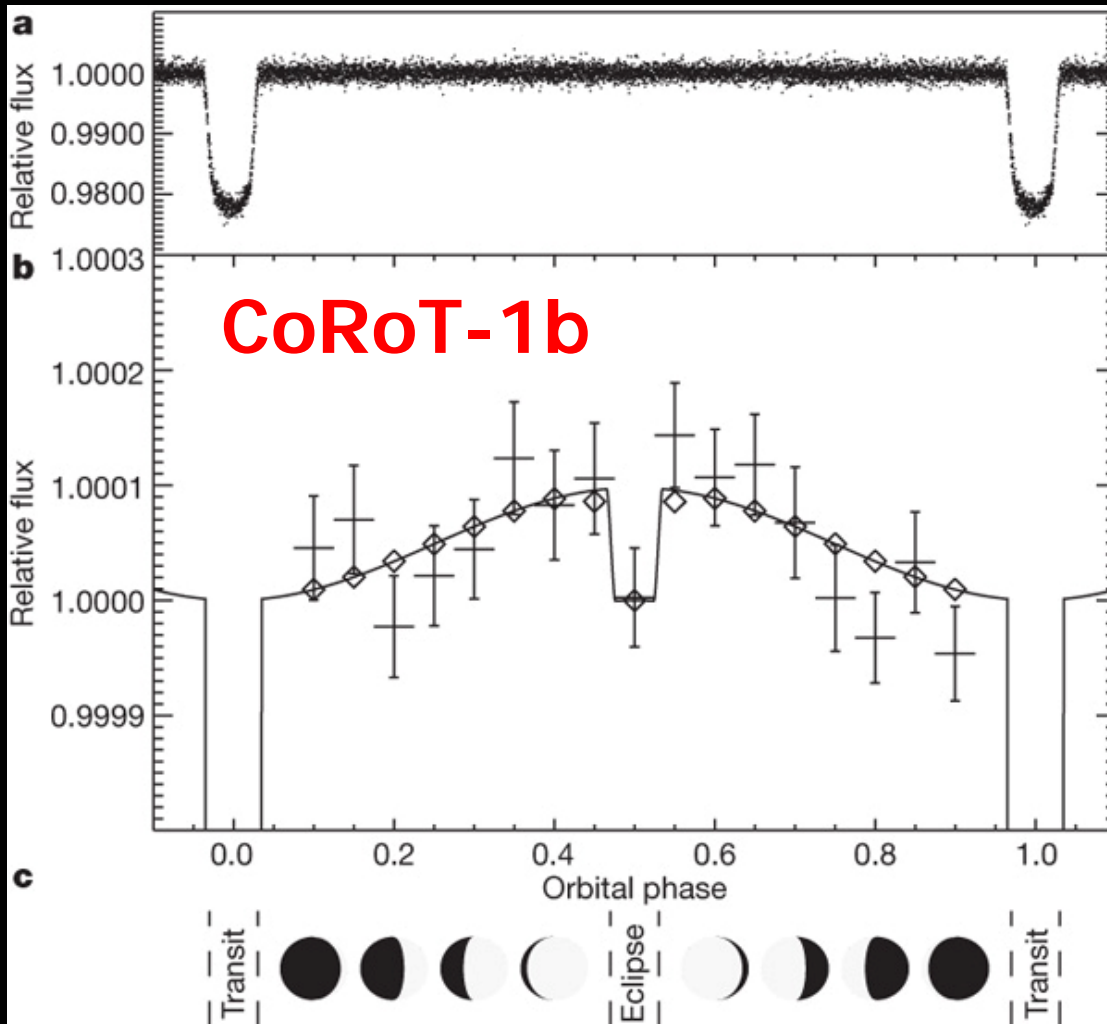
[http://hubblesite.org/
newscenter/archive/2001/38/](http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/)

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



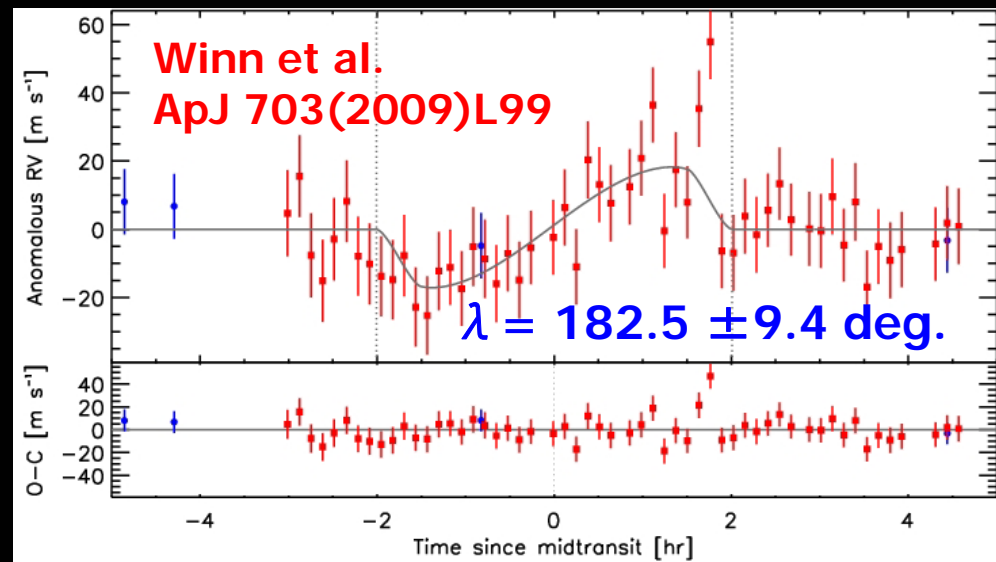
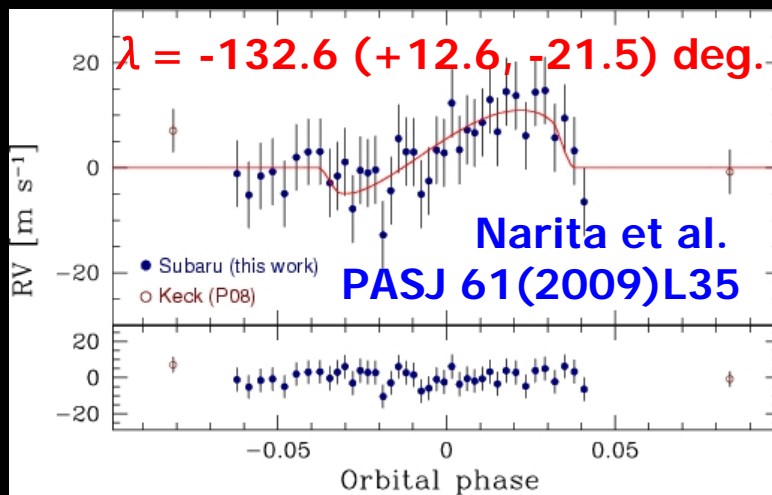
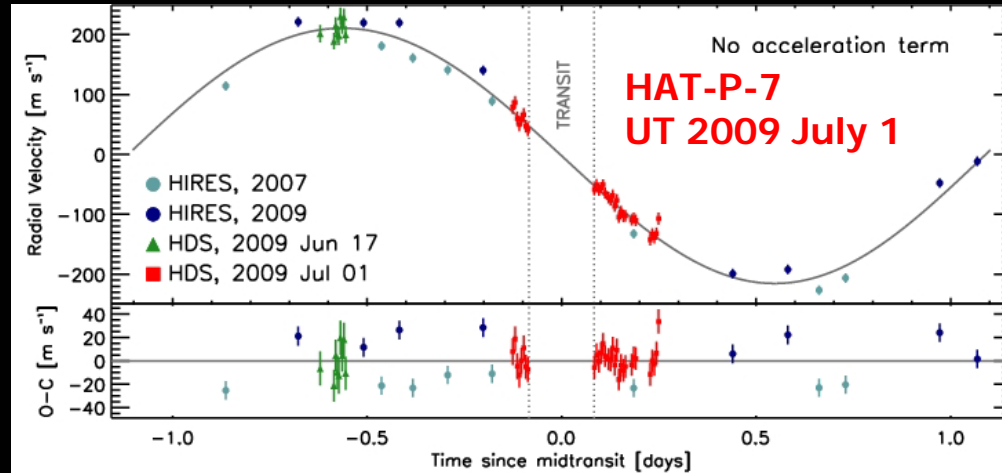
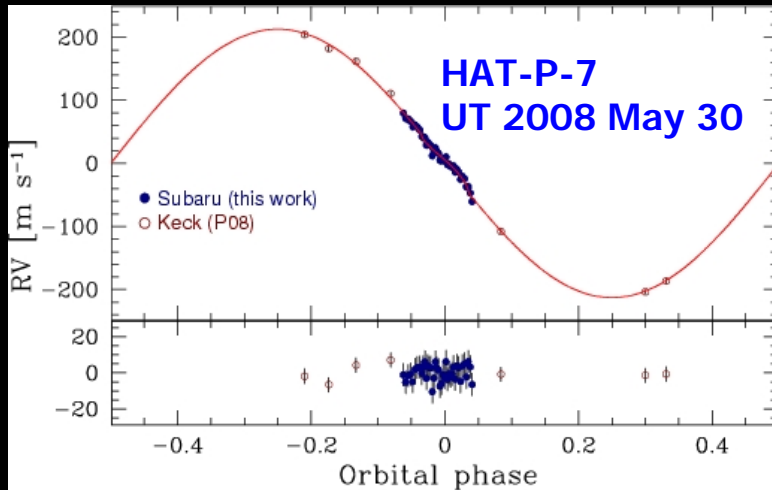
- 2000年 系外惑星の食を検出
 - 惑星の大きさがわかる
 - 質量の観測データとあわせて密度を 0.4g/cc と推定
 - 巨大ガス惑星であることの確認
- 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムを発見 (Charbonneau et al.)

トランジット惑星CoRoT-1bからの 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
 - $0.02 < \text{albedo} < 0.2$

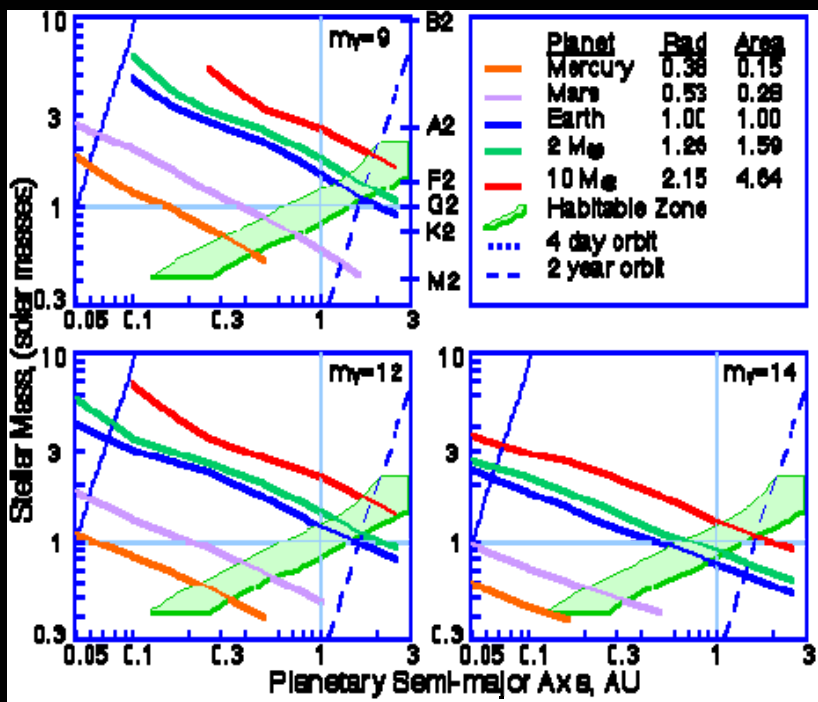
逆行(?)系外惑星(HAT-P-7)の発見



- 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

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)

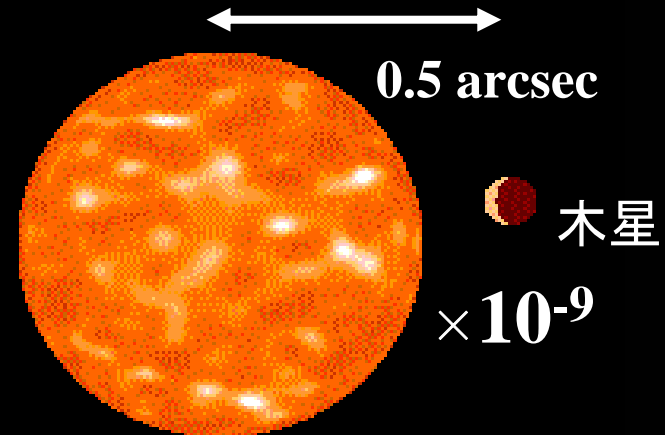
<http://kepler.nasa.gov/>

惑星は直接見えるか？

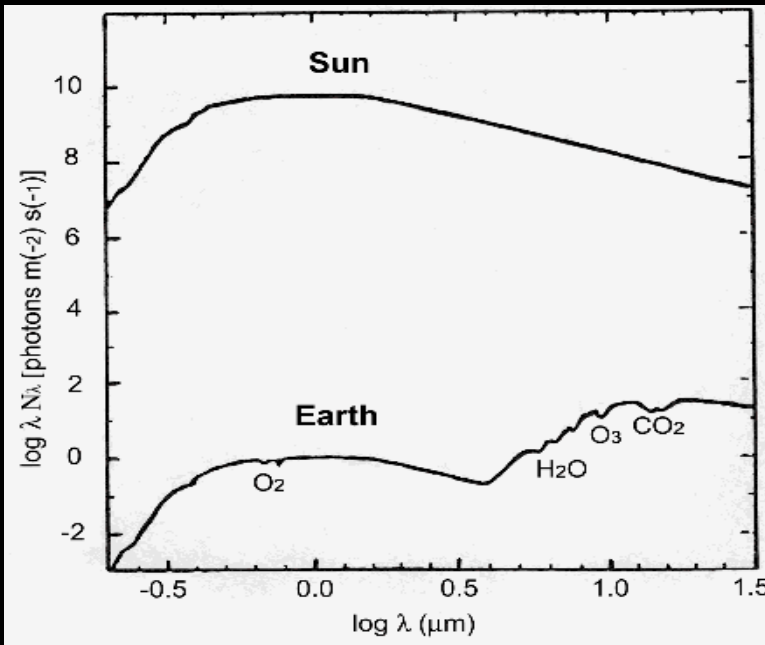
30光年先から観測した木星

明るさ: 27等級 (可視域)

主星との角距離: 0.5秒角

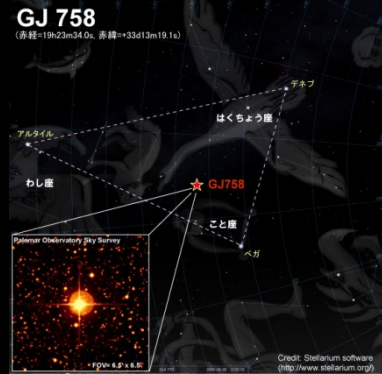


太陽

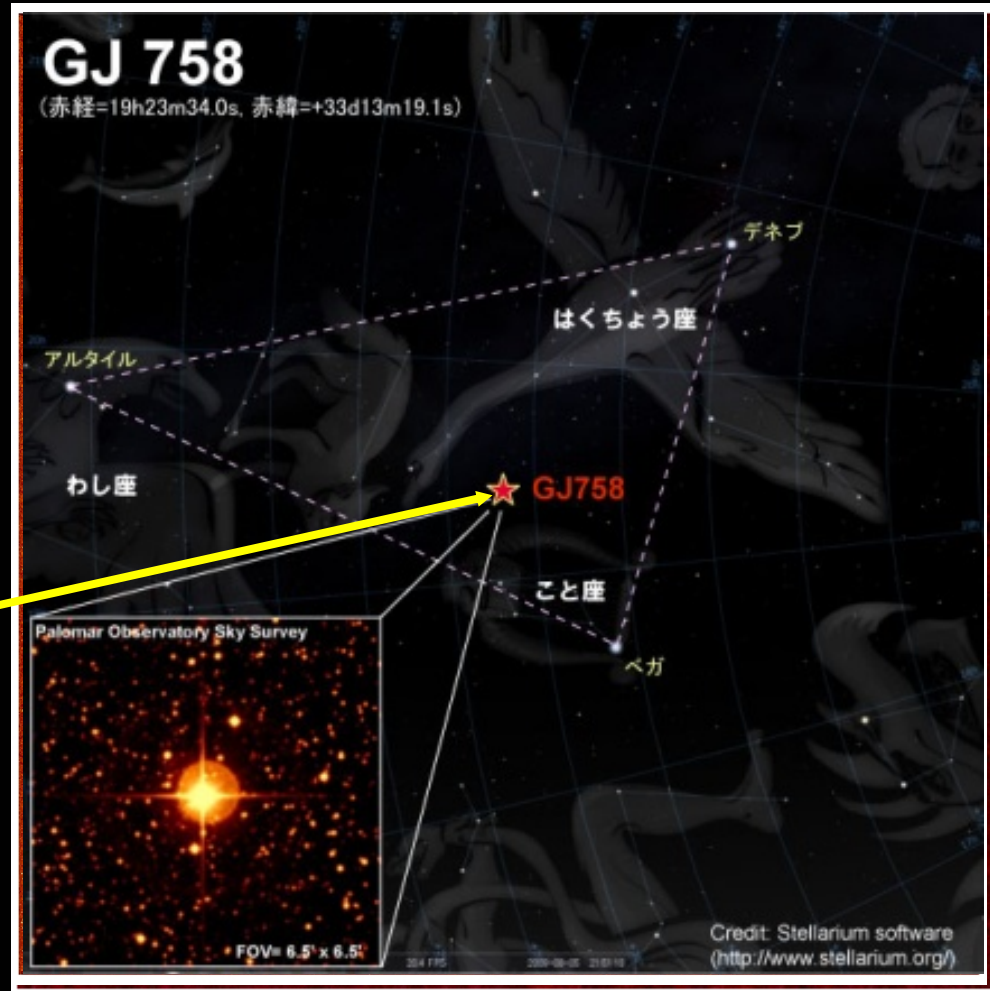


地上から観測できる分解能の大きさ内で、9桁も明るい主星の隣にある27等級の暗い天体を検出する

⇒ ほとんど不可能
(だった)



世界初、太陽型の星をめぐる惑星を撮像 (国立天文台、田村元秀氏のグループ)



- 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

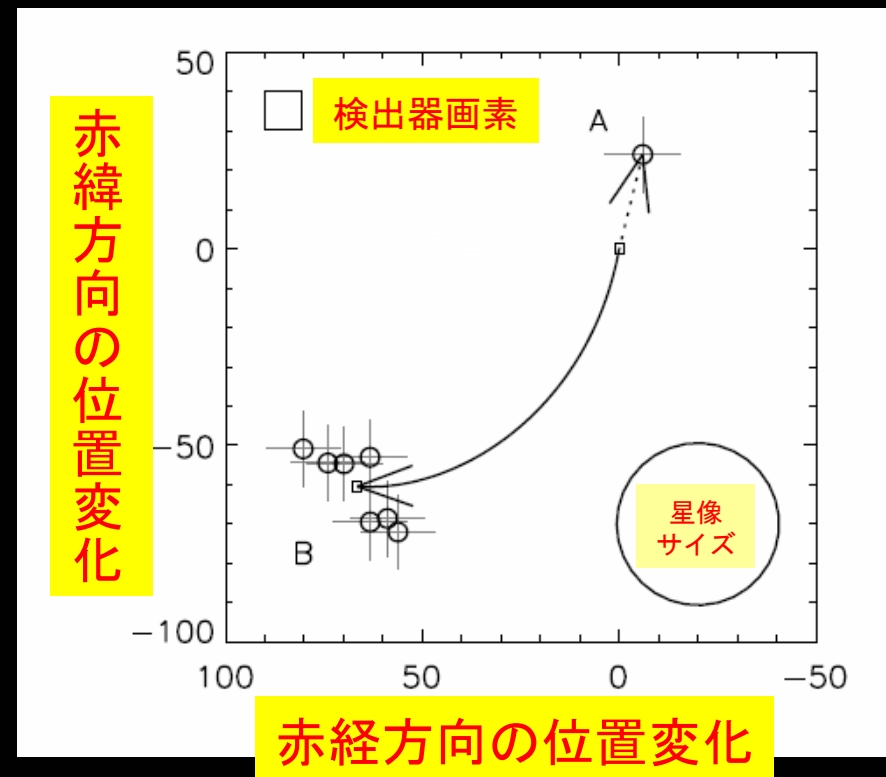
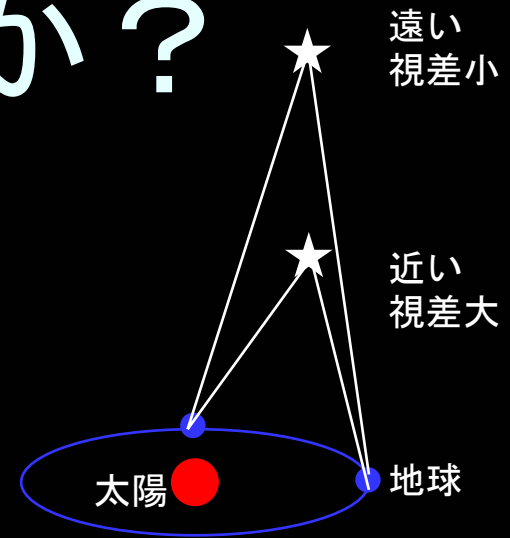
中心付近の白黒の斑点は除去しきれないノイズ
(スペックルノイズ)

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)

なぜ惑星と言えるか？

- 背景星ではない
 - 3ヶ月間の2回の観測で視差を検出(約0.1秒角)
 - 富士山頂にあるテニスボール一個分のズレを東京から検出
 - 視野内の7個の背景星と明確に異なる位置変動
 - 主星と同じ位置関係

(国立天文台、田村元秀氏提供)



すでに学んだこと

- 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パーセント程度は惑星を持つ
- 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?

第二の地球はあるか？



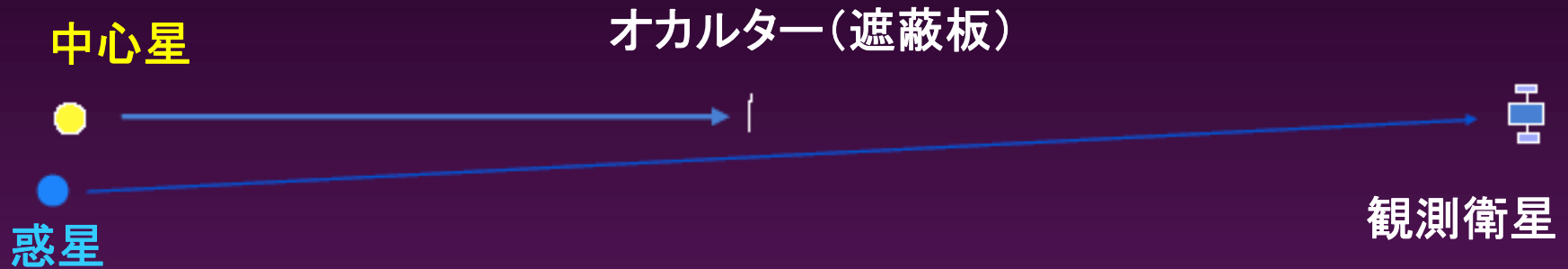
- 生命が誕生するには
 - 適度な温度
 - 大気存在
 - 液体の水(ハビタブル: 居住可能性条件)
 - + 偶然？
- 恒星の周りの地球型惑星を探せ！

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*

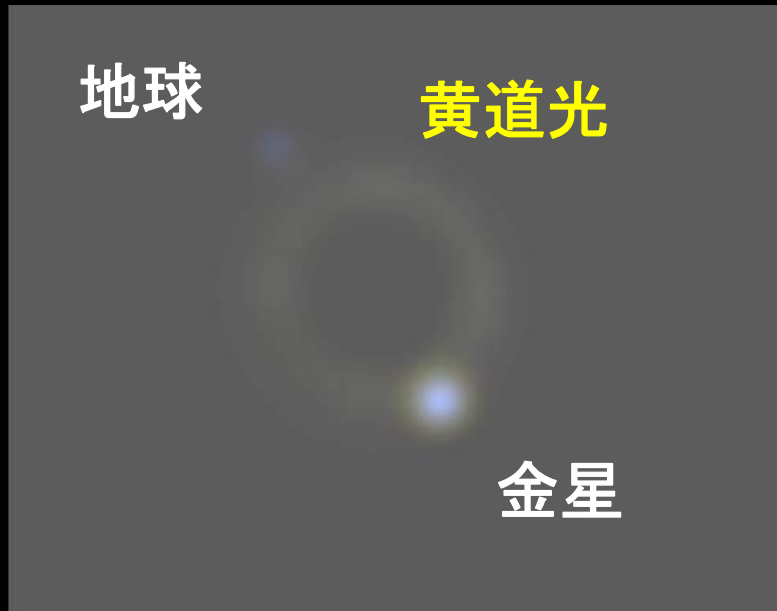


<http://newworlds.colorado.edu/>

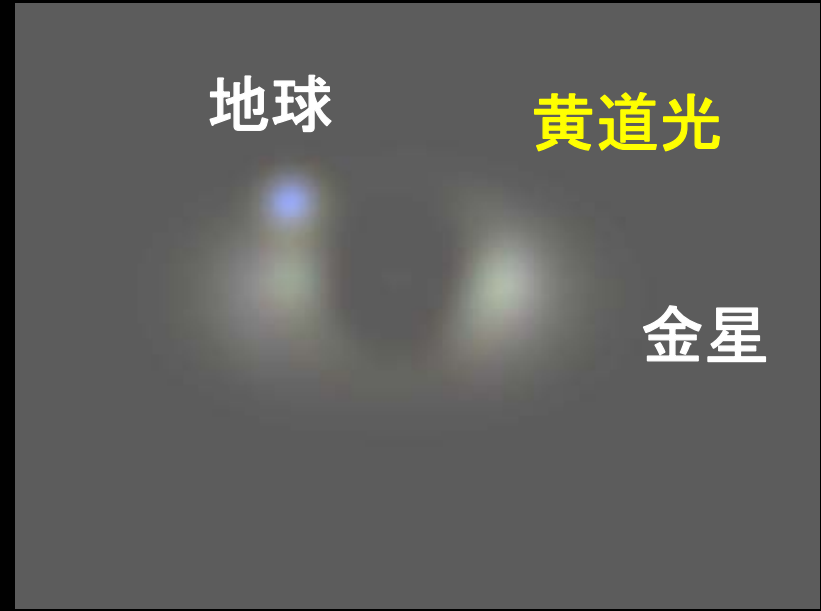
- 口径(2-4)mの可視光望遠鏡@L2点
 - 7万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおく
 - 望遠鏡にはその星の周りの惑星から光のみが届く
 - 惑星の分光・測光モニターからのバイオマーカー検出
 - コロラド大学を中心とした米国と英国の共同計画
 - 同様の計画はプリンストン大学でも検討中(O₃)

New Worlds Mission: simulated image

軌道面傾斜角=0°



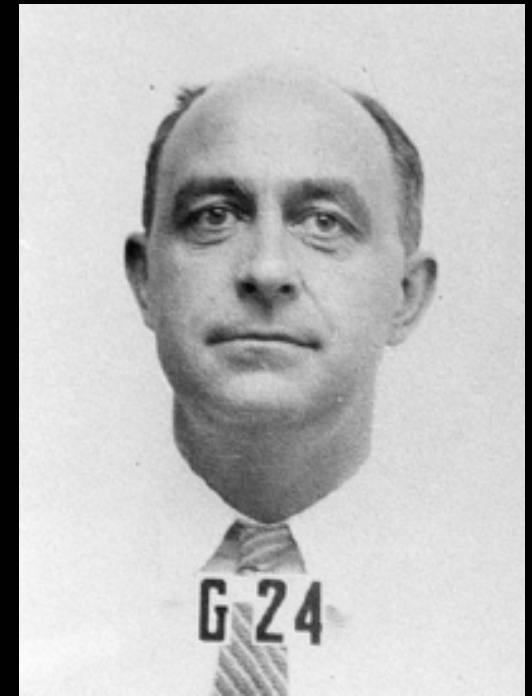
軌道面傾斜角=60°



- 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/>

フェルミの疑問 (フェルミのパラドクス)

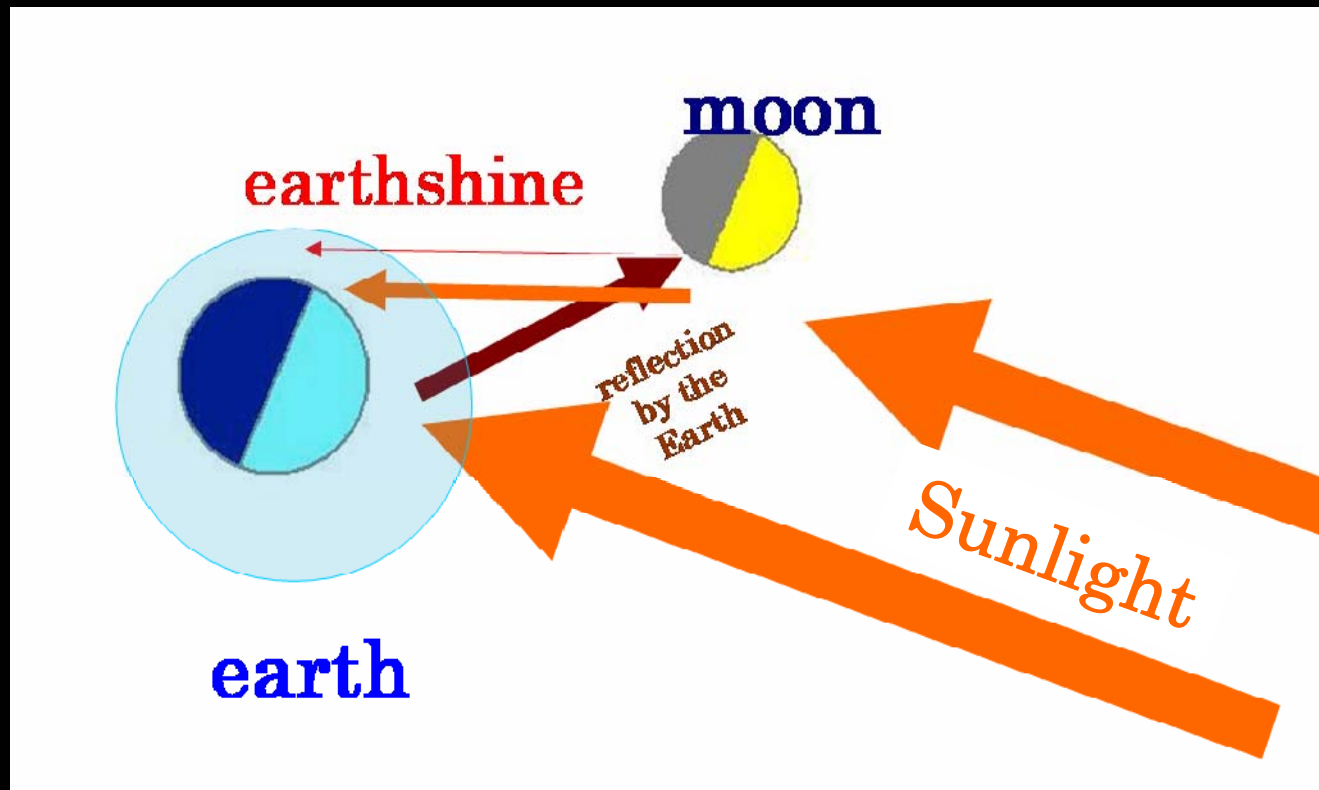


■ Where are *they*?

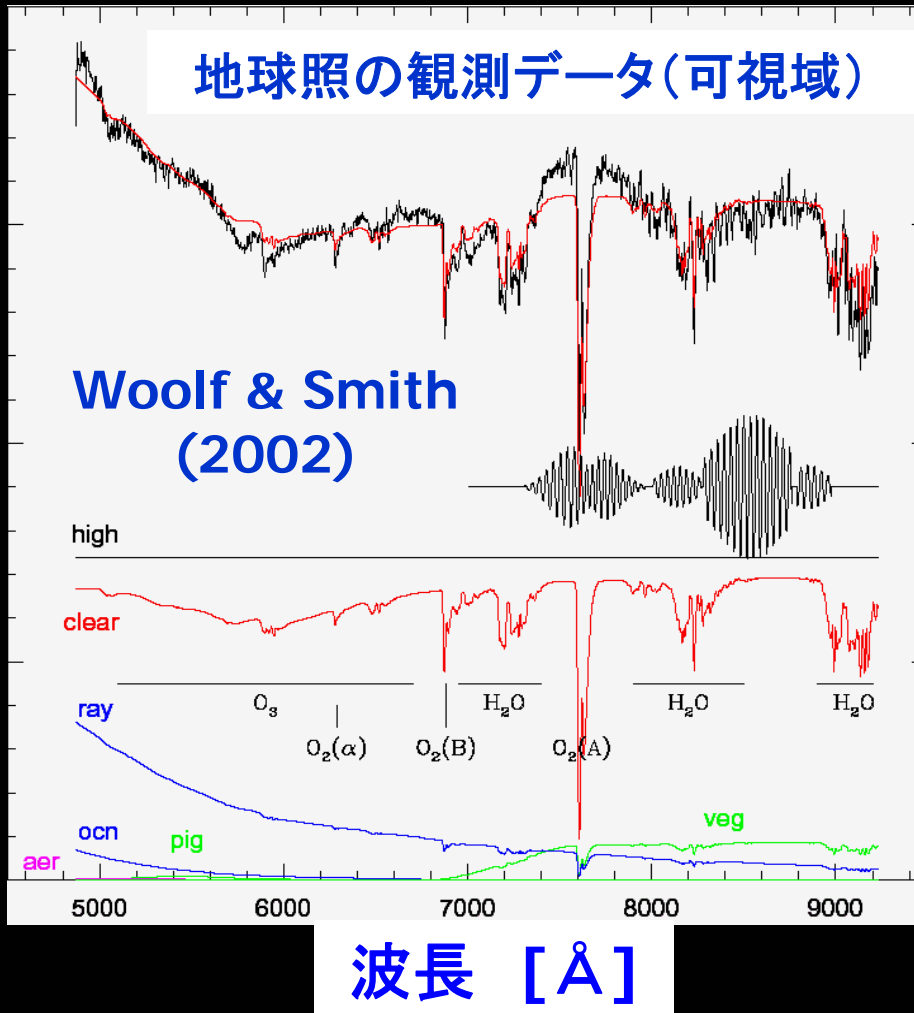
- 1950年、ロスアラモス研究所の
昼食時にエンリコ・フェルミが問い
かけたとされている

地球照観測

- 月の暗い部分(地球反射光 \gg 太陽光)の分光観測をして、月の明るい部分(地球反射光 \ll 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@ $0.76 \mu\text{m}$
- Bバンド@ $0.69 \mu\text{m}$

■ 水

- $0.72, 0.82, 0.94 \mu\text{m}$

■ オゾン

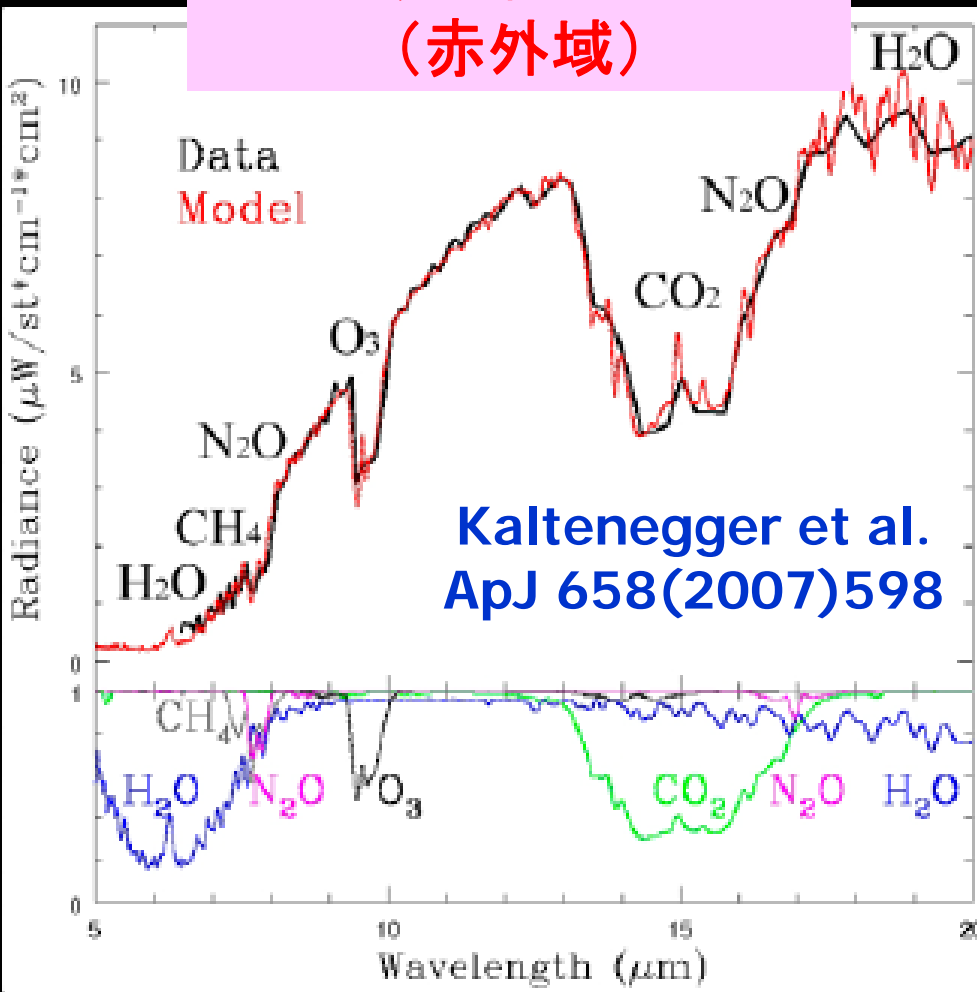
- Chappuis バンド @ $(0.5-0.7) \mu\text{m}$
- Hartley バンド @ $(0.2-0.3) \mu\text{m}$

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”

Vesto Melvin Slipher (1875-1969)

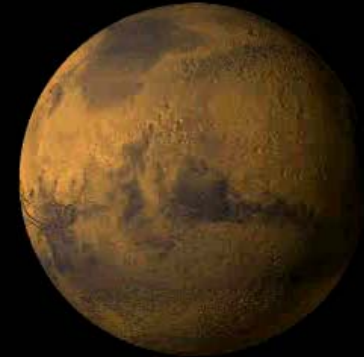


レッドエッジをバイオマーカーとして使う先駆的な試み

- “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

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

A pale blue dot

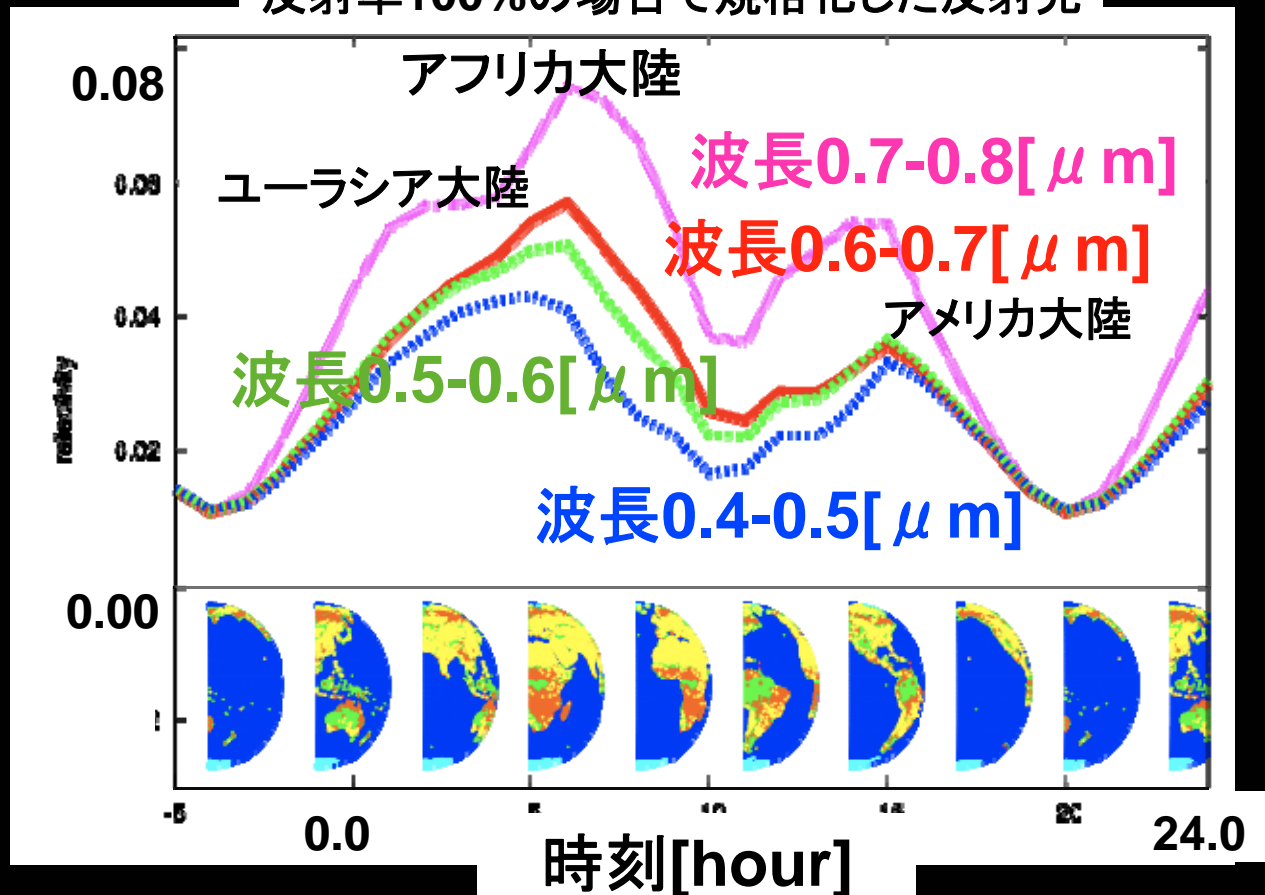
地球は青かった？



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

反射率100%の場合で規格化した反射光

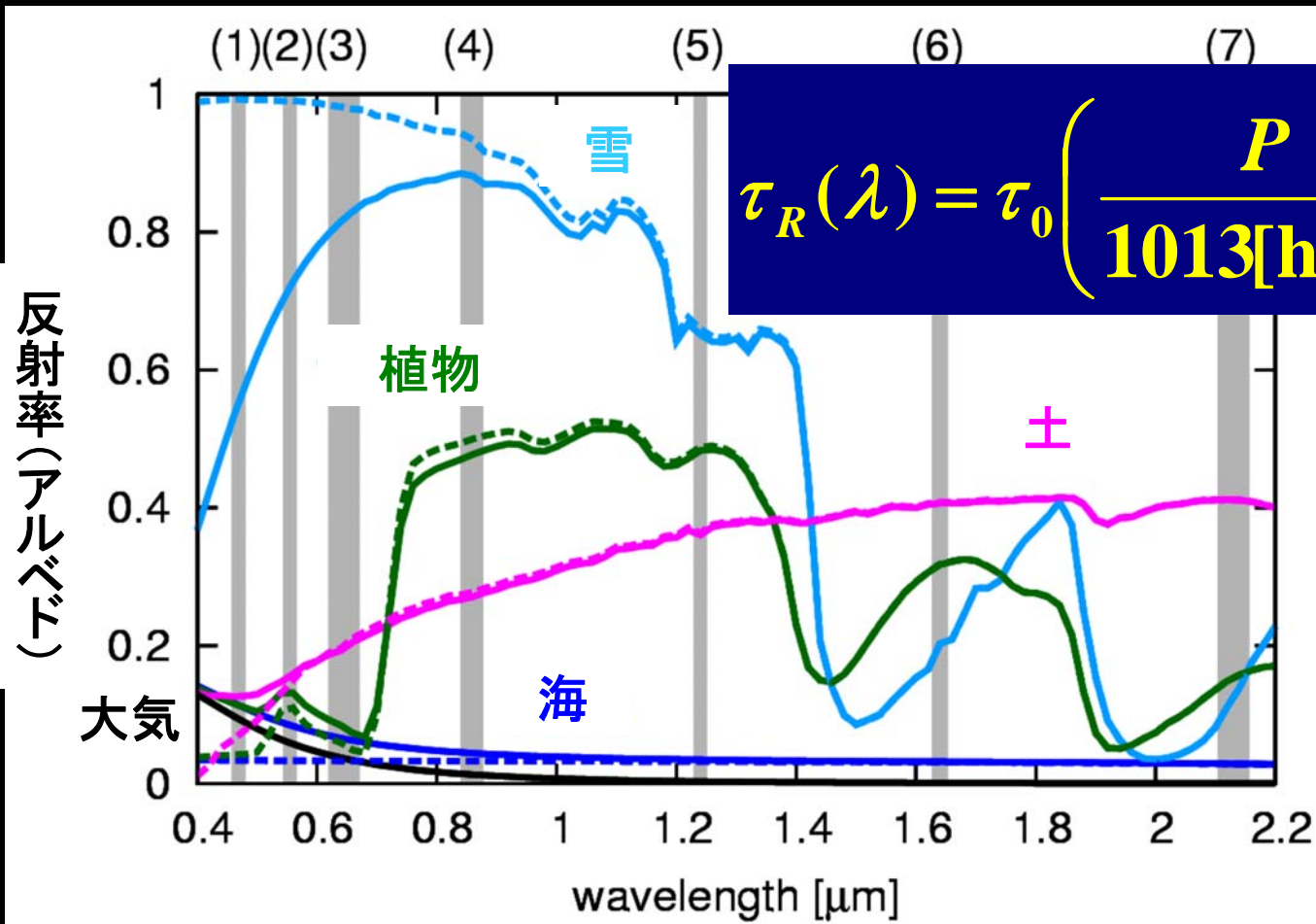


Fujii et al. (2010)

第二の地球の色：表面積の推定

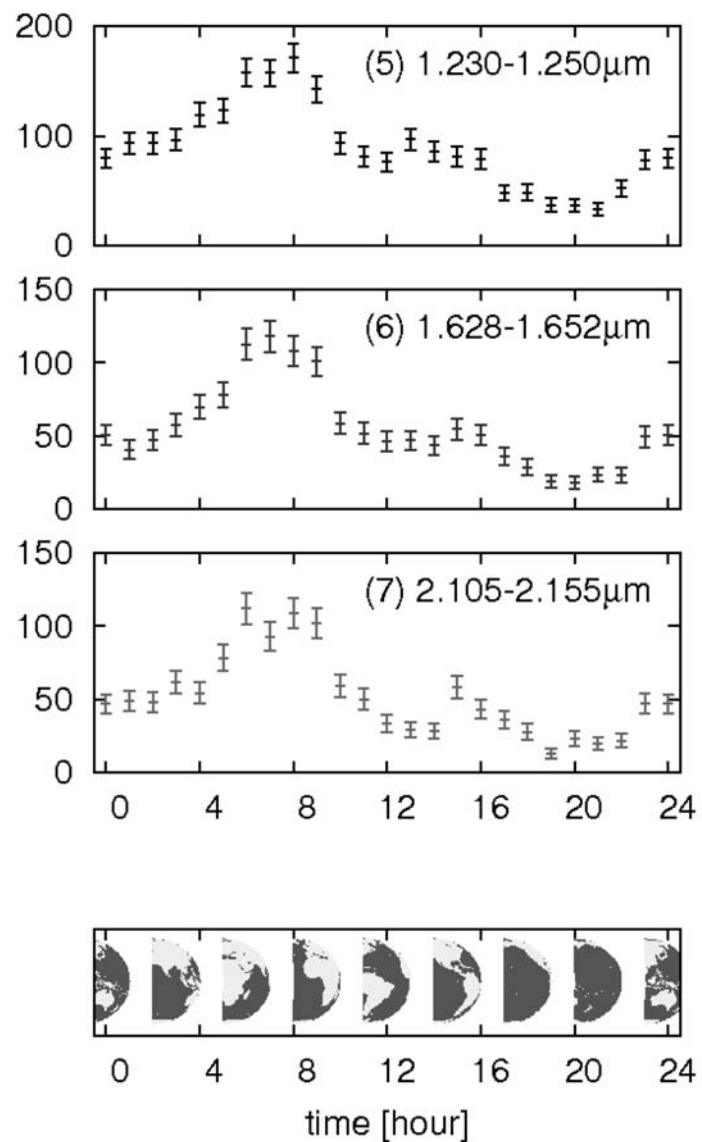
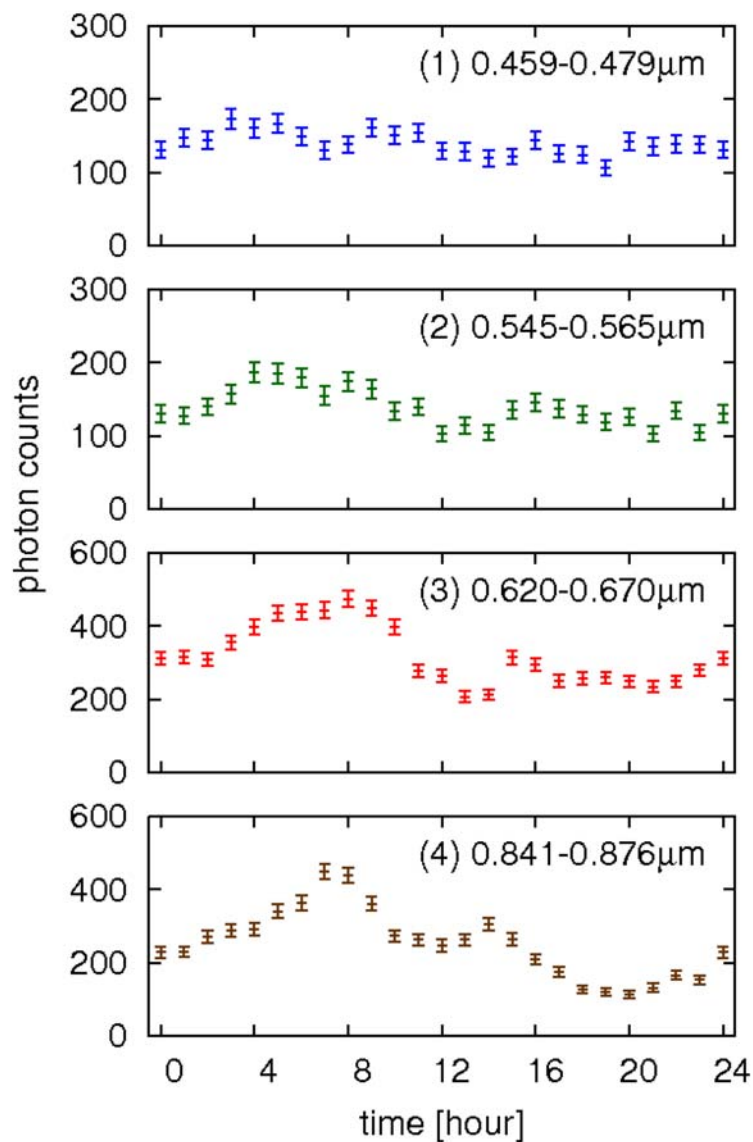
- 得られた5バンドの模擬光度曲線を、等方散乱を仮定した4成分(海、土、植物、雪)だけでフィットして、それらの表面積の割合を推定する
 - 10pc先の地球を口径4mの宇宙望遠鏡で1週間観測(各位相で1時間露出×7回)
 - 中心星の光がブロックされた理想的観測
 - 光子のポワソンノイズだけを考慮
 - 1週間の観測期間での公転の効果は無視
 - 1時間露出中の自転の効果も無視
 - 雲の存在も無視

4成分の反射率と大気の効果

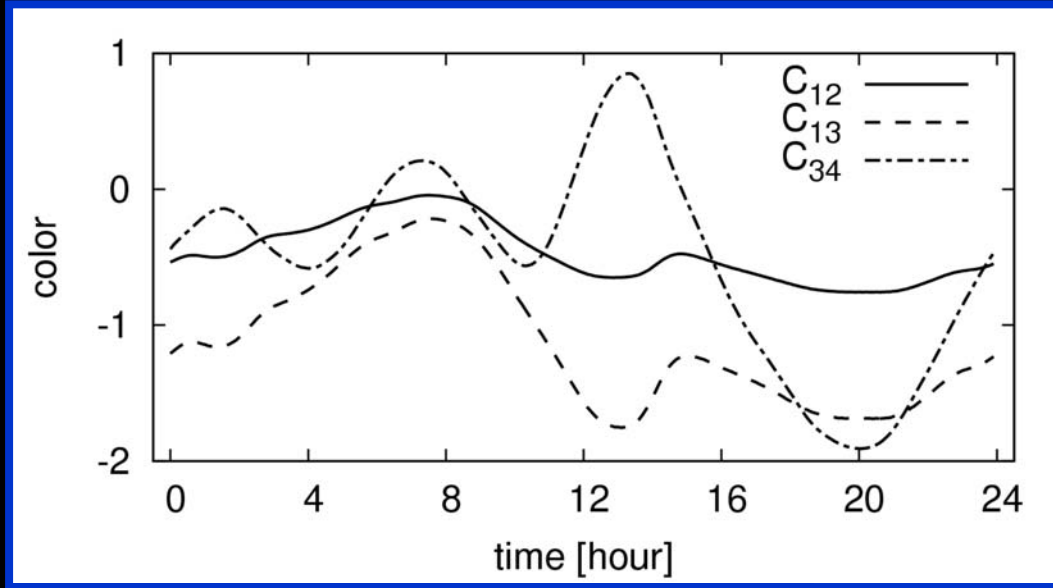


- 「空の青、海をあをにも染まずただよふ」
- 大気によるアルベドの波長依存性が重要

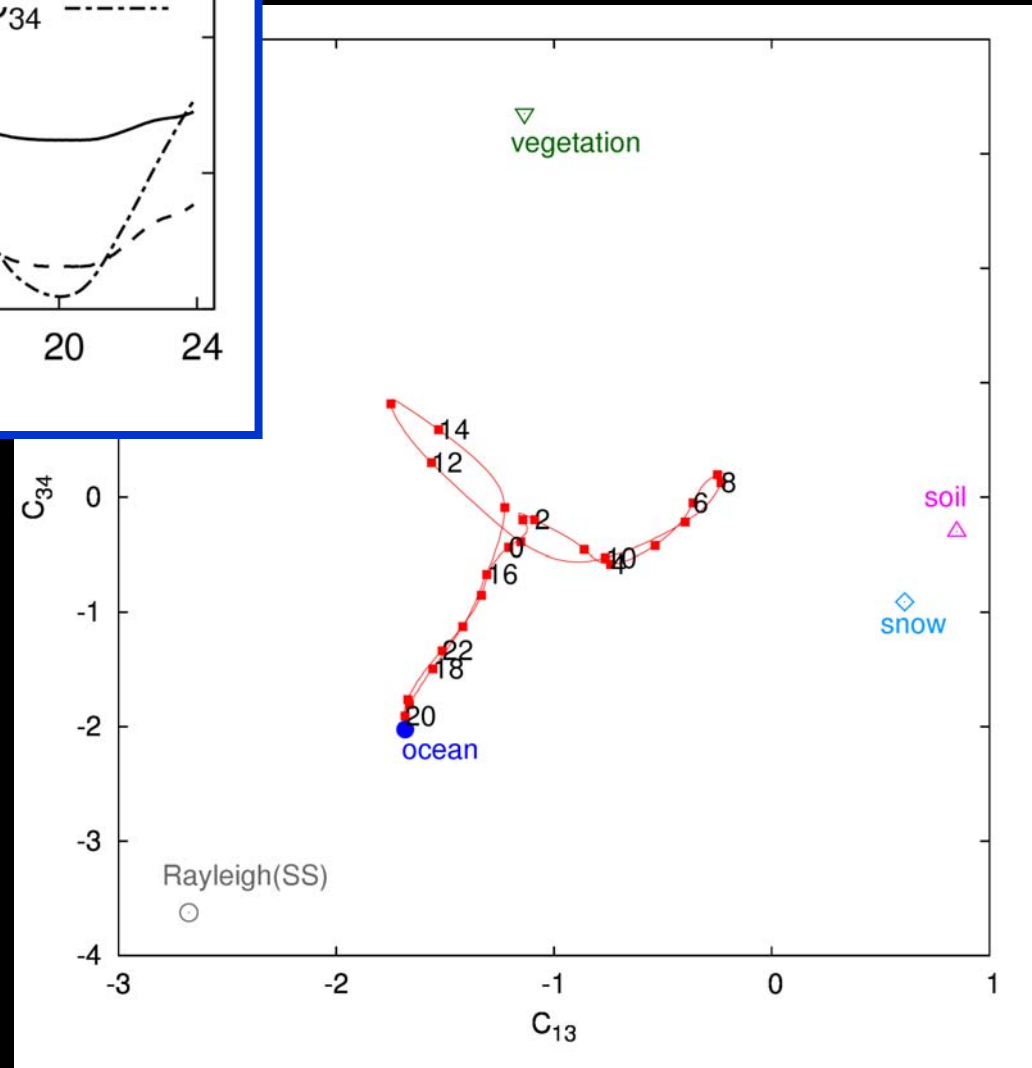
模擬光度曲線



自転に伴う色の変化



$$C_{ij} = -2.5 \log(f_i/f_j)$$

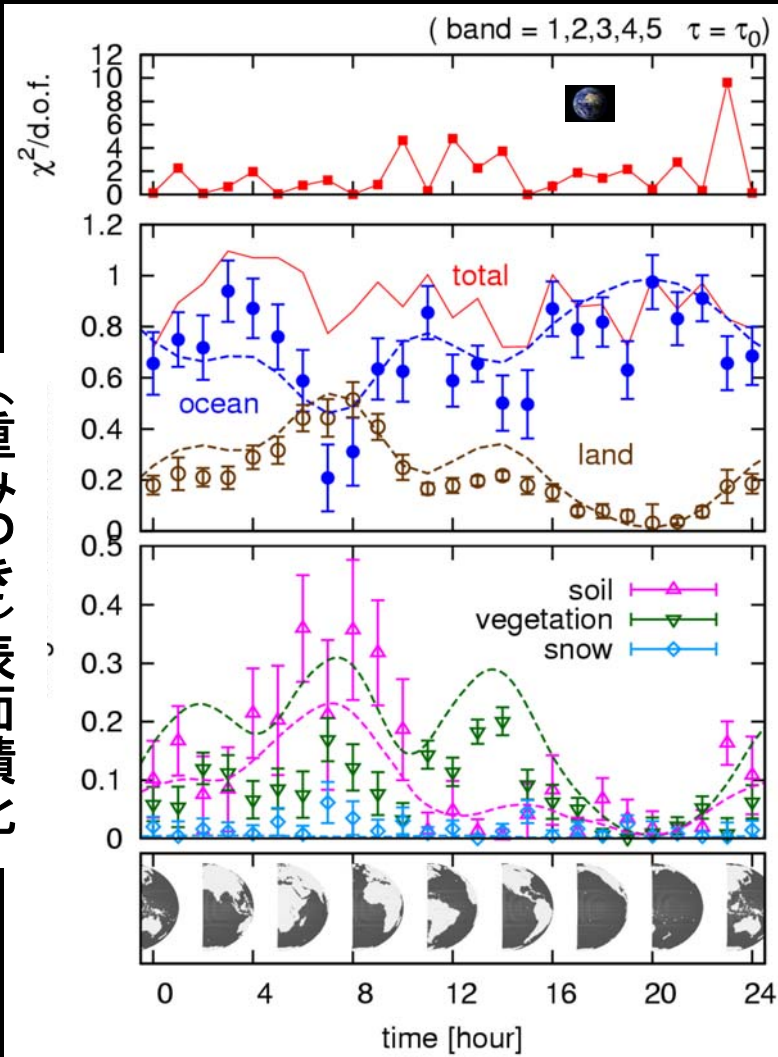


第二の地球の色から表面積を推定

系外惑星リモートセンシング

- 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
- 光子のポワソンノイズだけを考慮(雲を無視)
- 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！
- space.comでとりあげられる

(重みつき)表面積比

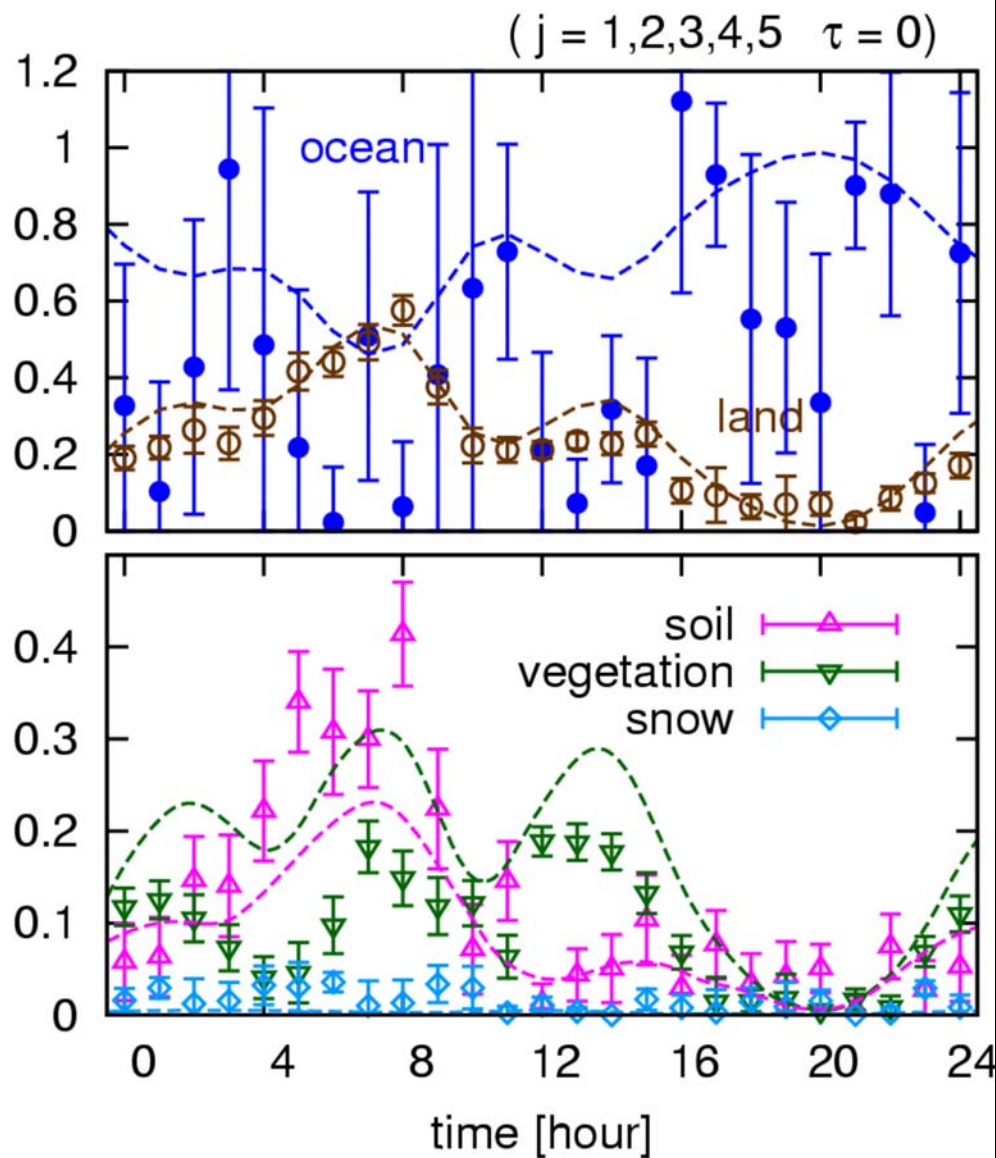


Fujii et al. (2010)

海の推定： 大気がないと絶望的

大気なし

(重みつき)表面積比



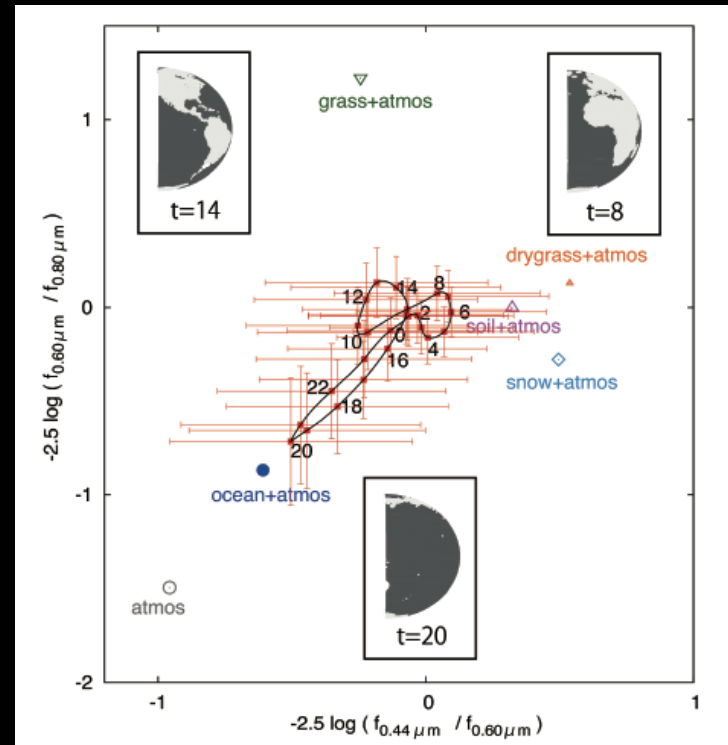
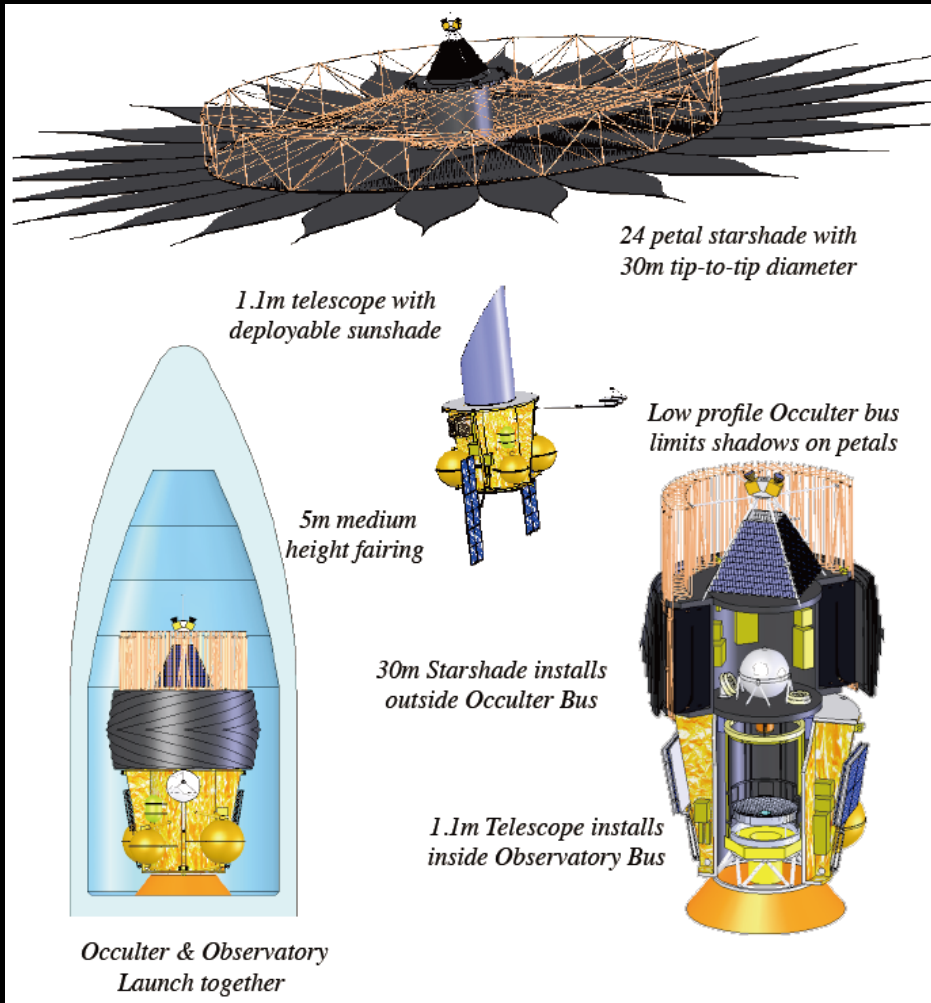
O₃: The Occulting Ozone Observatory



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



- 今回の結果はプリンストン大学で検討中の衛星計画において注目されている

改善・応用すべき問題が山積！

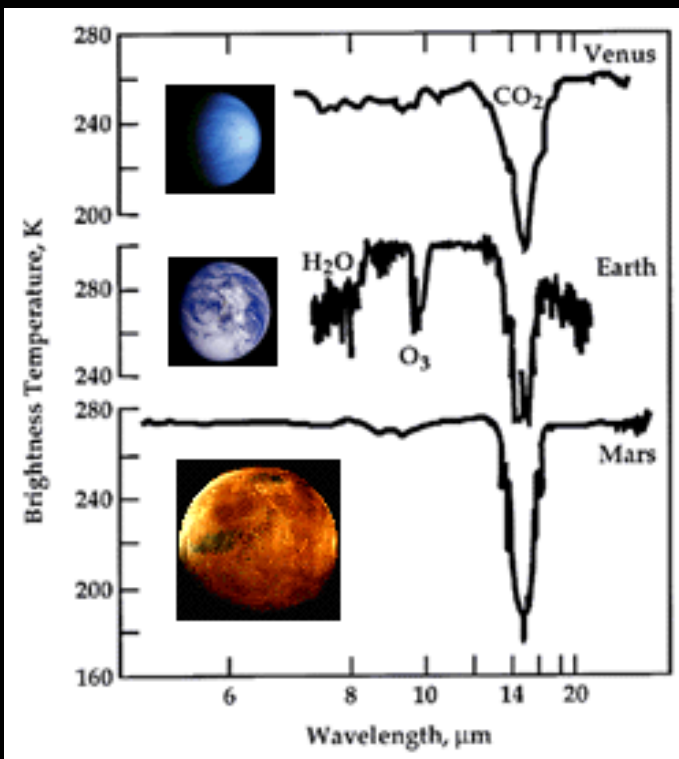
■ シミュレーションモデルの改善

- 雲の効果
- レイリー散乱の高次効果
- 大気中の分子の吸収線
- 波長域を赤外まで拡張

■ 観測対象・目的の拡大

- 実際の地球や太陽系惑星の観測データに適用
- 季節変動や自転周期の精密解析から自転軸傾斜角を推定
- 過去の地球のシミュレーションデータ
- スノーボールアース・海惑星・陸惑星は検出できるか
- 中心星のスペクトル型や公転半径に対する植物のレッドエッジの波長依存性を検出できるか

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

直接見てくることができない距離にある惑星に
生物が存在するかどうかを天文観測だけで説得
できるか？ Biomarker を特定できるか？

予想もできない展開が待っているはず

■ 最初にかかるのはどれだろう

- 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

地球外比較文明論

- 毎日あたりまえであると考えていたことも、実は奇妙な習慣なのかもしれない
 - なぜお箸で食べるのか、なぜ納豆を食べるのか
 - 外国人との交流を通じて初めて不思議であることに気づく
- いくつかの例
 - 言語は存在するか、また音を用いてコミュニケーションするか
 - π という概念はあるか、その数値を知っているか
 - 男女の違いはあるか
 - 芸術が存在するか、それらに感動するか
 - 生きていて楽しいと思うか
 - 死という概念が存在するか
- 交信は非現実的(片道100年?)であるにしても、考えてみるのは面白い



*L'essentiel est invisible
pour les yeux*

大切なものは目にはみえない



*Le Petit Prince:
Antoine de Saint Exupéry*

週間新潮 2010年7月29日号

BOOK OF THE WEEK

評者 ● 渡邊十絲子 詩人

愛いっぱいの「天文学者の生活と意見」

東大の物理の先生(専門

は宇宙論)って、どんな人

だろうと想像してみる。身

なりにかまわずオタク的。

いわゆるカタアツで、冗談

がふうじない。

わたしの思いえがくそん

な貧しいイメージは、この

一冊でこなごなになった。

それどころか、激しい共感

に胸がゆさぶられた。東大

の物理の先生は詩人とおん

なじだ。世間から「雰囲気

だけは立派だけど、それっ

てなにかの役に立つの？」

とうさんくさそうに見られ

それでも自分の信念をつら

ぬき、ちまちまと安い仕事

をこなして生活しているの

だった。

いてもたってもいられず

に都内の大書店をめぐり、

本書の状況を調査する。た

いがいは科学・理工のフロ

アにある「物理」の棚、そ

のなかでも「相対論」の場

所に置かれている。でもそ

れは大間違いだ。書店のみ

なさん、この本は相対論の

ことなんかちつとも教えて

くれません。版元の名前に

惑わされなくて、いますぐ

に「爆笑エッセイ」の棚に

移してください。

「海底人の世界観」「外耳炎

が誘う宇宙観の変遷」「物理

とカラオケ」などの章タイ

トルを見れば、この本がい

かに斬新な「天文学者の生

活と意見」であるかがわか

るだろう。学
者が自分の研

究分野のことや教員生活に
ついて書いたエッセイは多
いが、ここまで自分を遠く
から(望遠鏡で。さすが天文

学者)冷徹に見ているもの

はなかなかない。笑い優先

自己愛はあとまわし。愛娘

や学生の写真もふんだんに

使った(周囲の人は気の毒

だ)、リアルな生活感満載の

エッセイなのだ。しかしす

っかり笑わされながらも、

著者の研究対象が、宇宙の

なかみの4分の3を占めて

いるにもかかわらず得体の

知れない「ダークエネルギー

」だということもすんな

り頭に入る。凄腕である。

自分の仕事をおもしろく

書き、人に伝える。それは

深い愛(仕事に対しても、読

者に対しても)なくしては

不可能なことだ。愛の人を

発見してうれしい。

人生一般二相対論

●須藤 靖 東京大学出版会 / 255200円

人生一般二相対論

須藤 靖

東京大学出版会