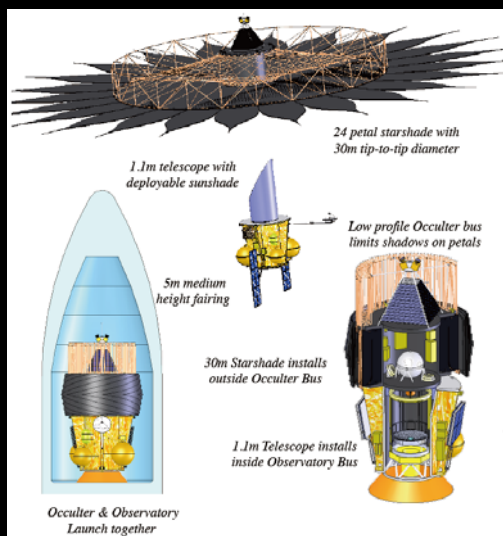


太陽系外惑星から宇宙生物学へ



大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

ビッグバン宇宙国際研究センタークリスマス講演会

2009年12月25日@小柴ホール

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2009j.html

青空のムコウに別の世界はあるのか



アイザック・アシモフ著 「夜来る」



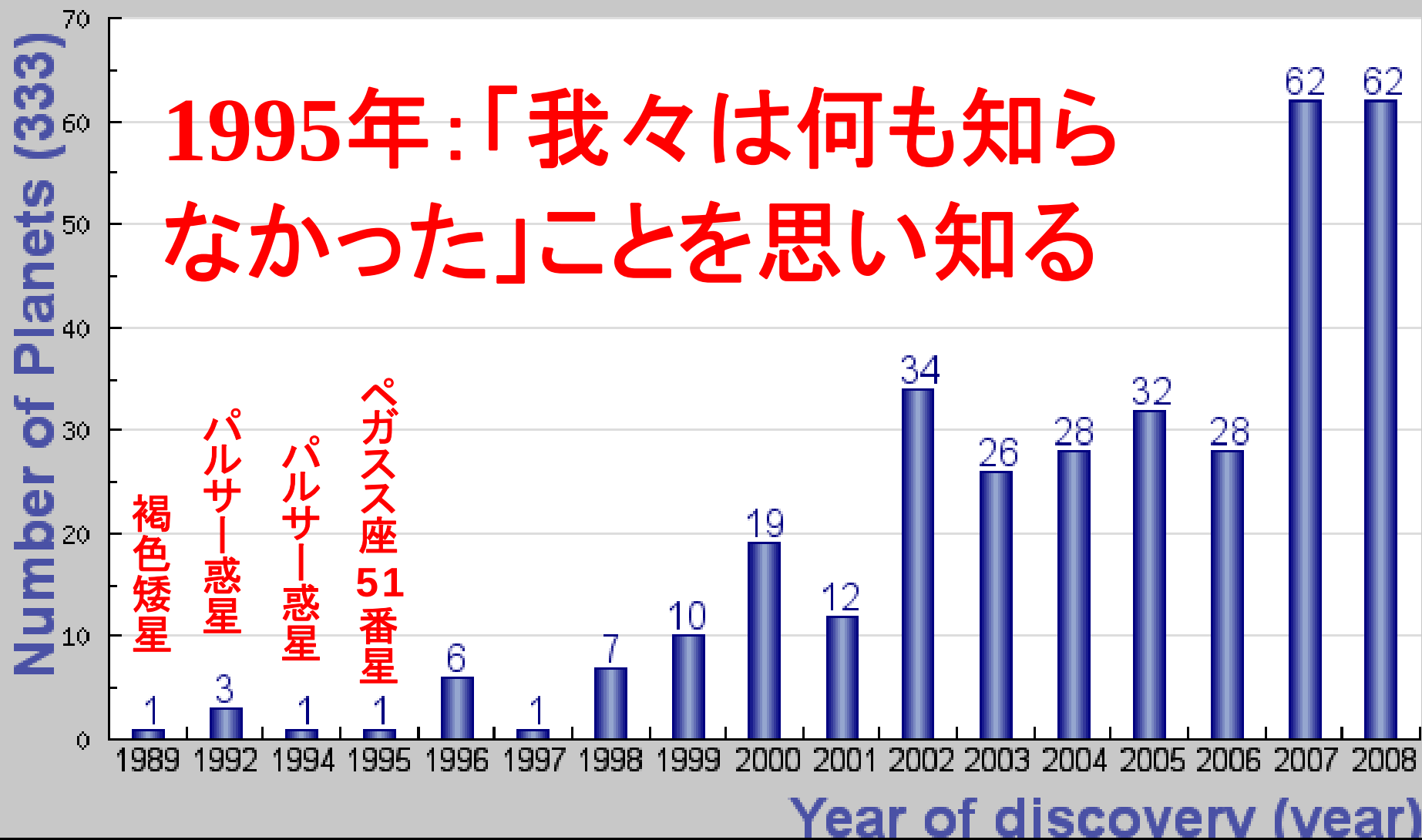
イラスト：羽馬有紗

- 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？

太陽系外惑星(候補)の発見年表

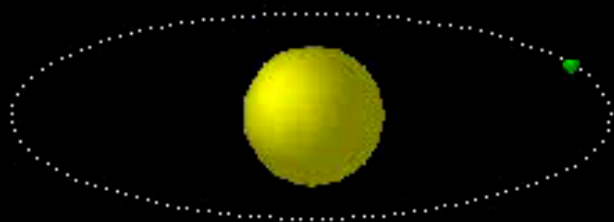
Number of planets by year of discovery

1995年:「我々は何も知らなかった」ことを思い知る



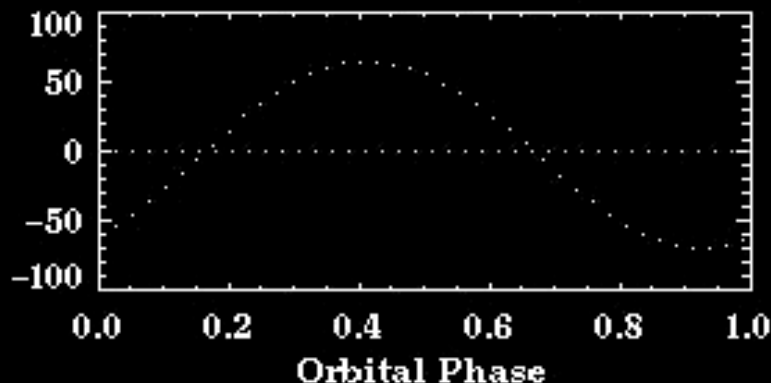
どうやって見つけたのか？

Circular Orbit: rho CrB



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

Radial Velocity Curve
of the Star [m/s]



S.G. Korzennik (CfA, © 1997)

■ ドップラー法

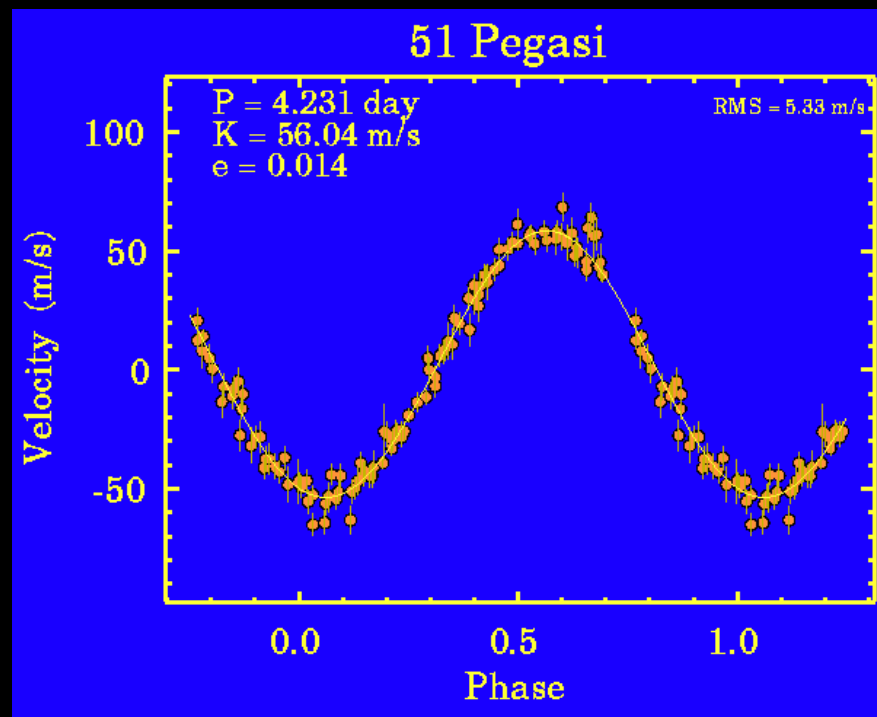
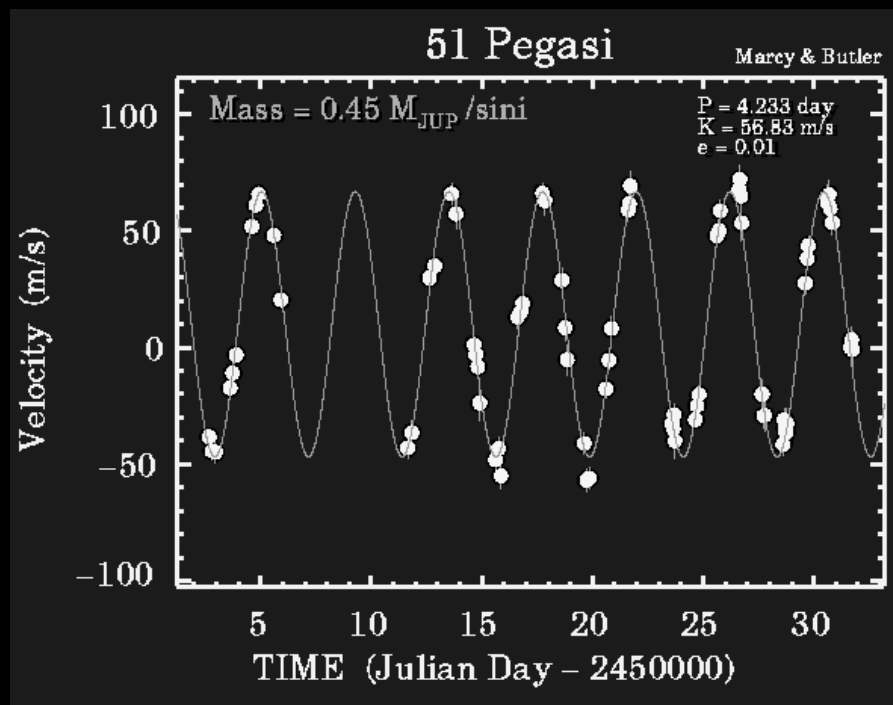
- 中心星の速度が毎秒数十メートル程度、周期的に変動

■ 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

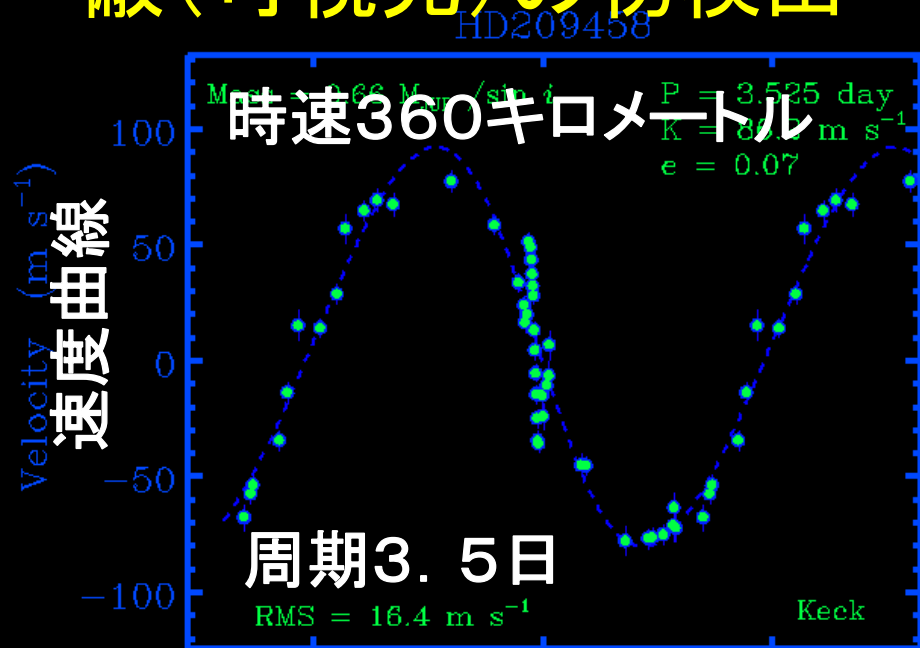
ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年発表)

わずか4.2日で一周！



初めてのトランジット惑星HD209458b

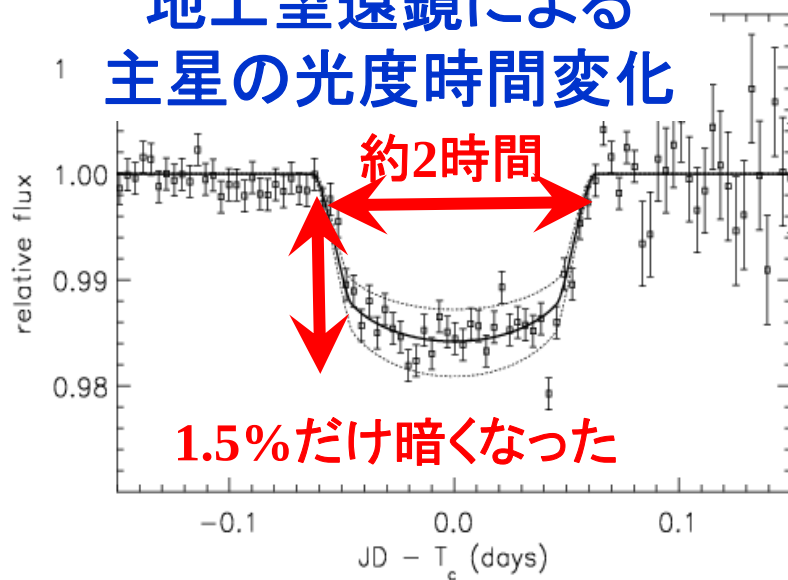
- 速度変動のデータに合わせた惑星による主星の掩蔽(可視光)の初検出



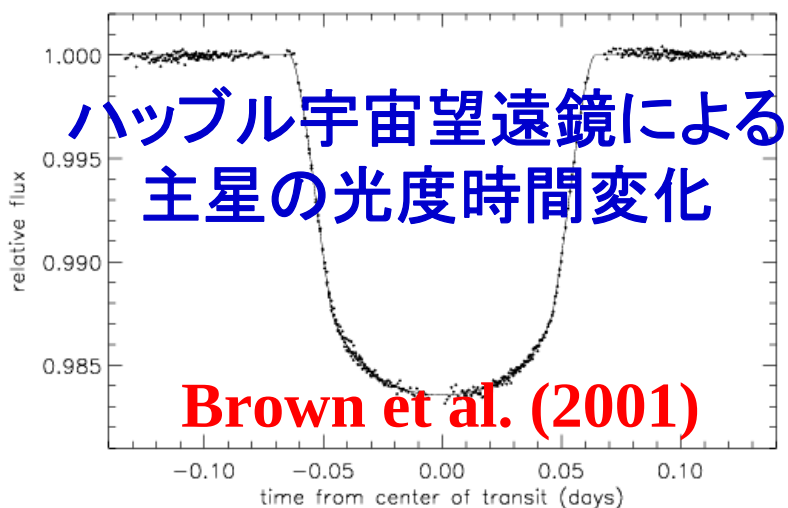
地上望遠鏡による
主星の速度時間変化

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

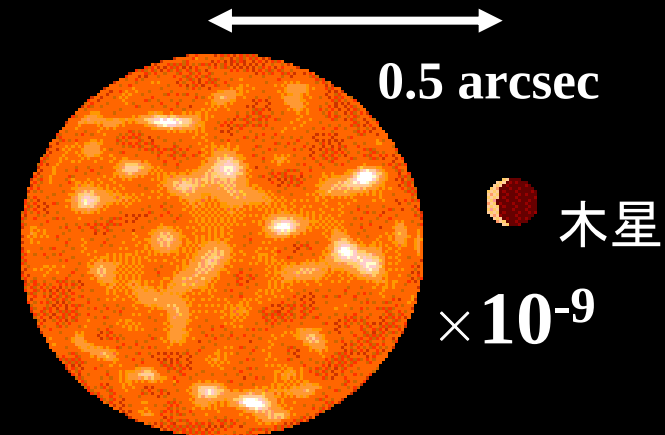


惑星は直接見えるか？

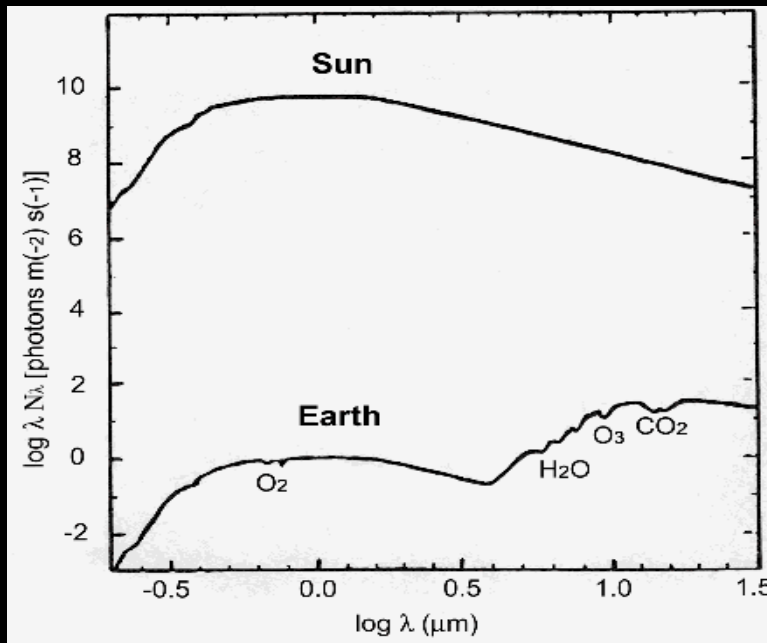
30光年先から観測した木星

明るさ: 27等級(可視域)

主星との角距離: 0.5秒角

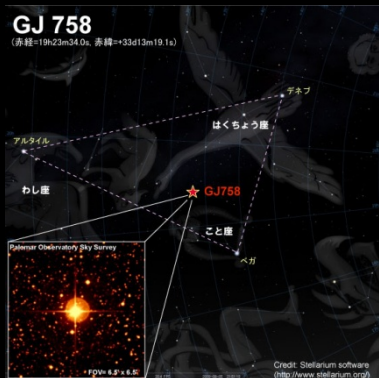


太陽



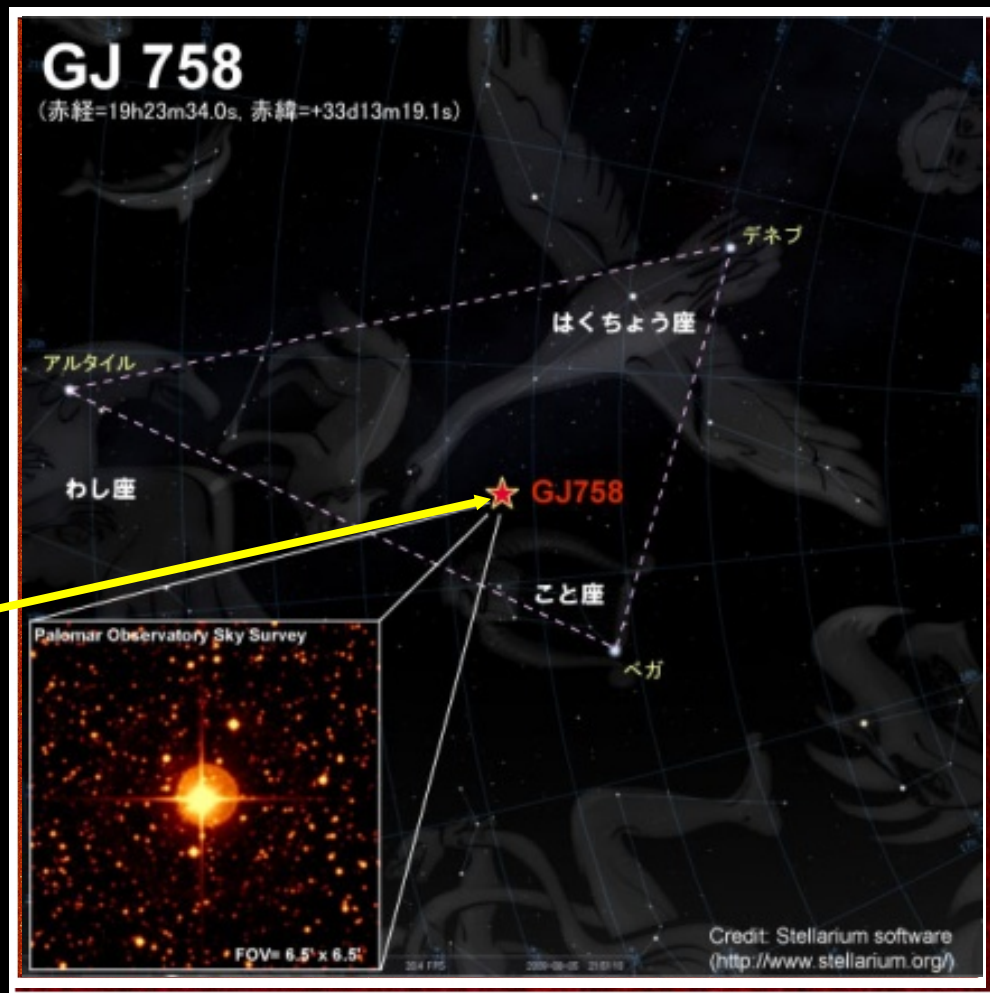
地上から観測できる分解能の大きさ内で、9桁も明るい主星の隣にある27等級の暗い天体を検出する

⇒ 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



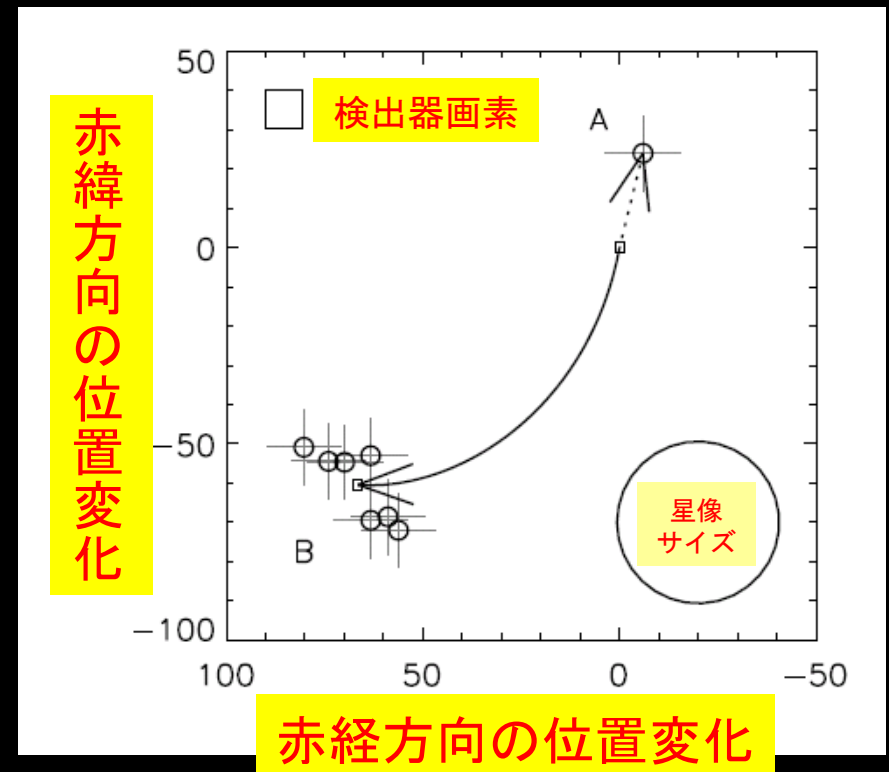
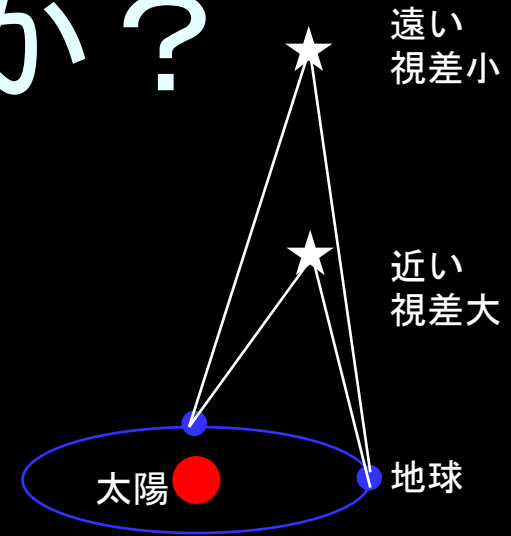
中心付近の白黒の斑点は除去しきれないノイズ
(スペックルノイズ)

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)



太陽系天体との比較

TIME

IN PARTNERSHIP WITH **ON.**

SEARCH TIME.COM



Best & Worst Lists

Special Reports Best Websites Worst Cars Time 100 Time 100 Roundtable Desig
Best TV Shows Top 10 ALL Time 100

タイム誌が選ぶ2009年科学発見Top10の一つ

The Top 10 Everything of 2009

TIME charts the highs and lows of the past year in 50 wide-ranging lists

地球

GJ758A(主星)は太陽とほぼ同じ大きさ
GJ758B(惑星)は惑星の放つ熱が赤外線として光っている
(田村元秀氏提供) 惑星サイズは木星とほぼ同じと推定される

Time The Top 10 Everything of 2009

■ **Top 10 Scientific Discoveries**

- 1. Our Oldest Ancestor, "Ardi"
- 2. The Human Epigenome, Decoded
- 3. Gene Therapy Cures Color Blindness
- 4. A Robot Performs Science
- 5. Breeding Tuna on Land
- 6. Water on the Moon
- 7. The Fundamental Lemma, Solved
- 8. Teleportation!
- 9. The Large Hadron Collider, Revived
- **10. A New Planet (or Brown Dwarf?) Discovered**

<http://www.time.com/time/specials/packages/0,28757,1945379,00.html>

10. A New Planet (or Brown Dwarf?) Discovered

- In December, an international team of astronomers announced it had spotted a planetlike object orbiting a star much like our sun. The star lies 300 trillion miles, or about 50 light-years, from Earth; the planetlike object is estimated to be 10 to 40 times the size of Jupiter. **Using a new planet-hunting instrument on the Subaru telescope in Hawaii, scientists were able to get direct images of this new object — which may or may not be a brown dwarf (a failed star).**
- Although direct images of other solar systems have been taken before, **this is the first time astronomers have captured a star this similar to the sun in size and temperature.** Scientists say the real surprise is the location of the orbit of GJ 758 B, as the newly identified object was dubbed: it was previously thought that large planets form either closer to or farther from their stars, but not in the location of GJ 758 B, which is about as far from its star as Neptune is from the sun.
- Alan Boss, an astronomer at the Carnegie Institute for Science who was not involved in the research, said the **"beautiful detection of a very low-mass companion to a sunlike star reminds us again how little we truly know" about the planets** around nearby stars.

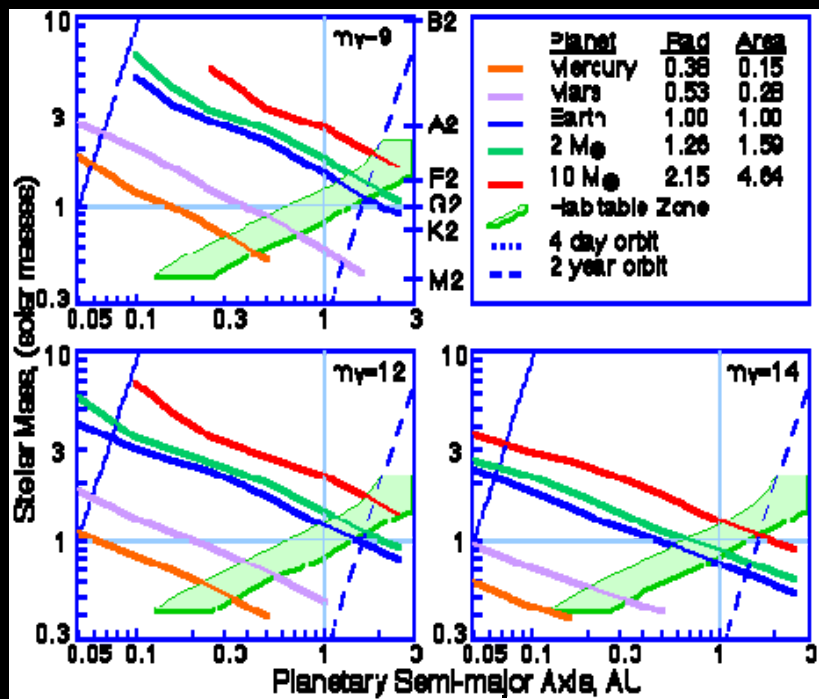
すでに学んだこと

- 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)、重力レンズ(高時間分解能測光)、直接撮像

では次はどうする?

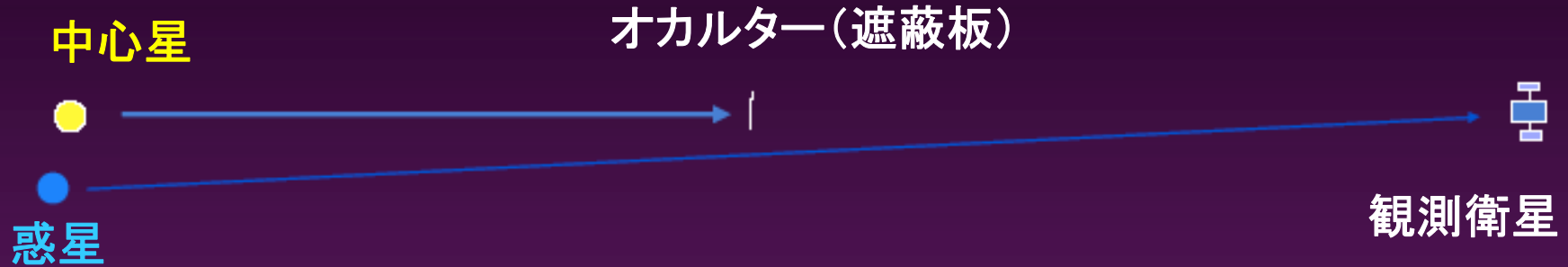
ケプラー衛星 (米国2009年3月6日打ち上げ)

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



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

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

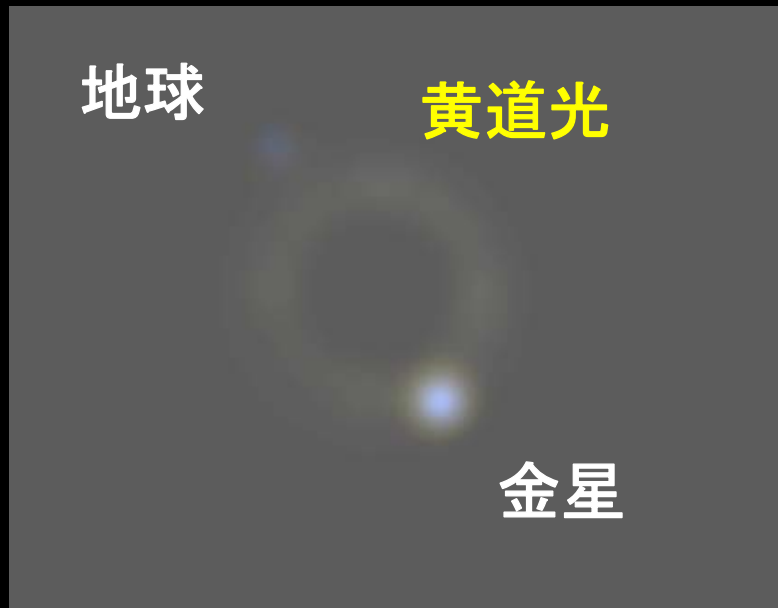


<http://newworlds.colorado.edu/>

- 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°



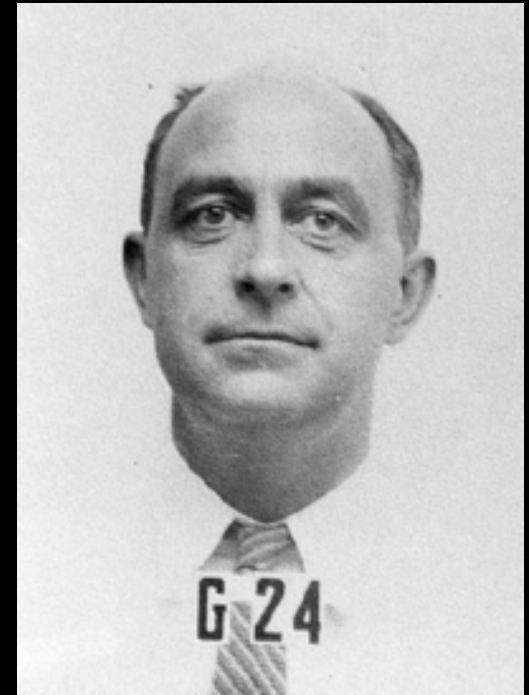
軌道面傾斜角=60°



- 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)

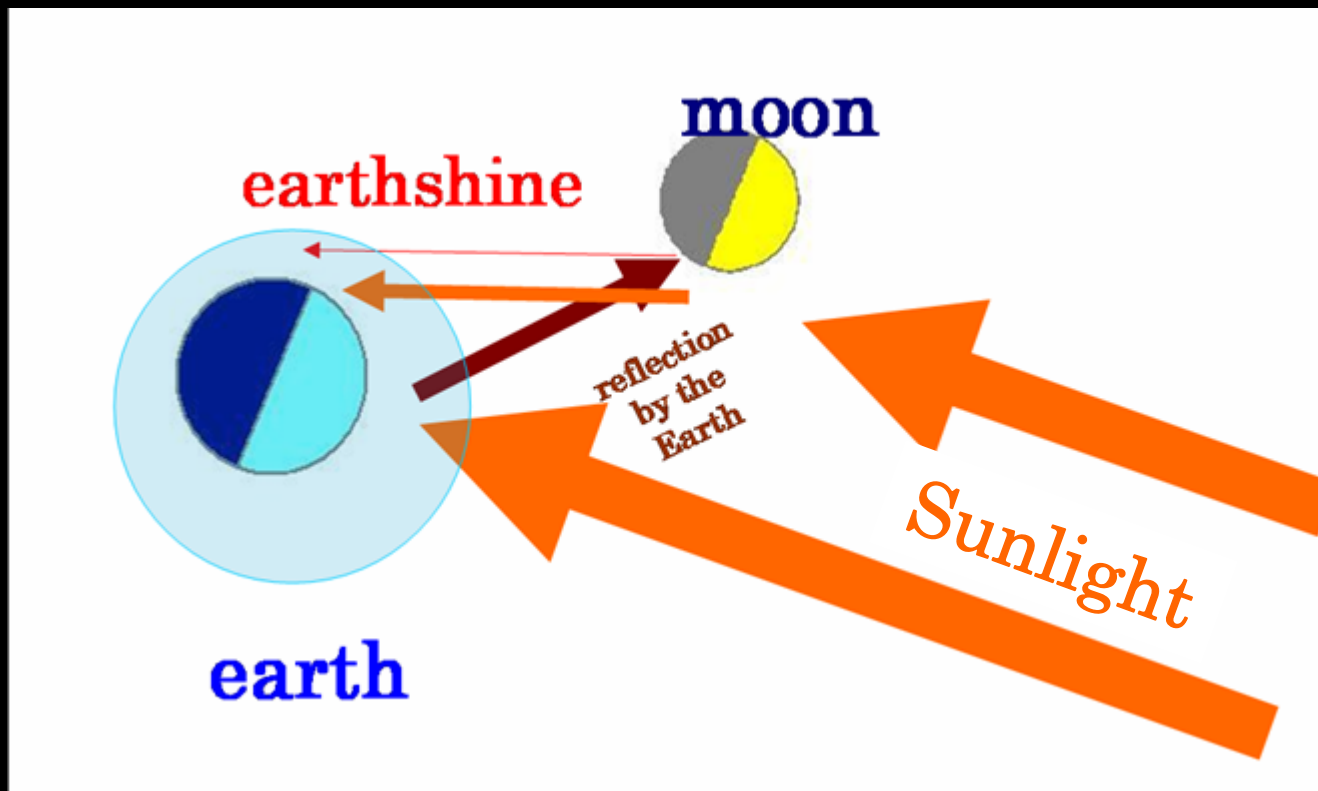


■ Where are *they*?

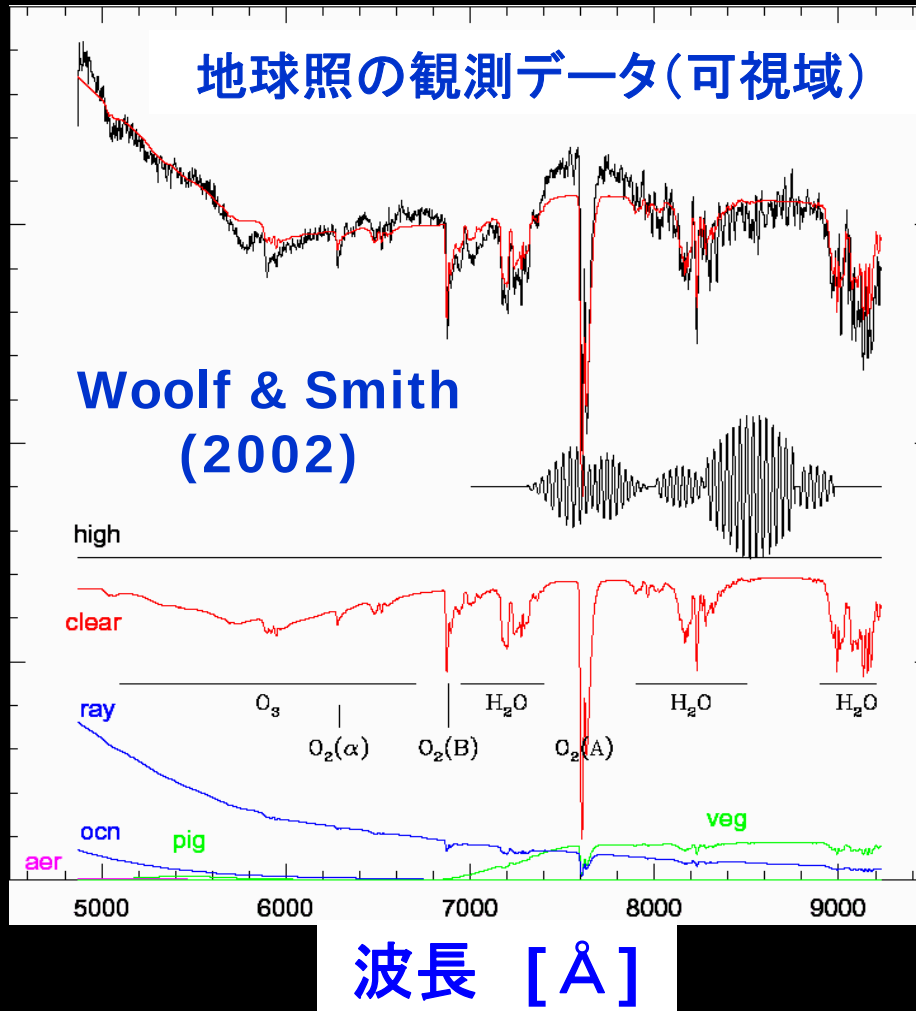
- 1950年、ロスアラモス研究所の
昼食時にエンリコ・フェルミが問い
かけたとされている

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

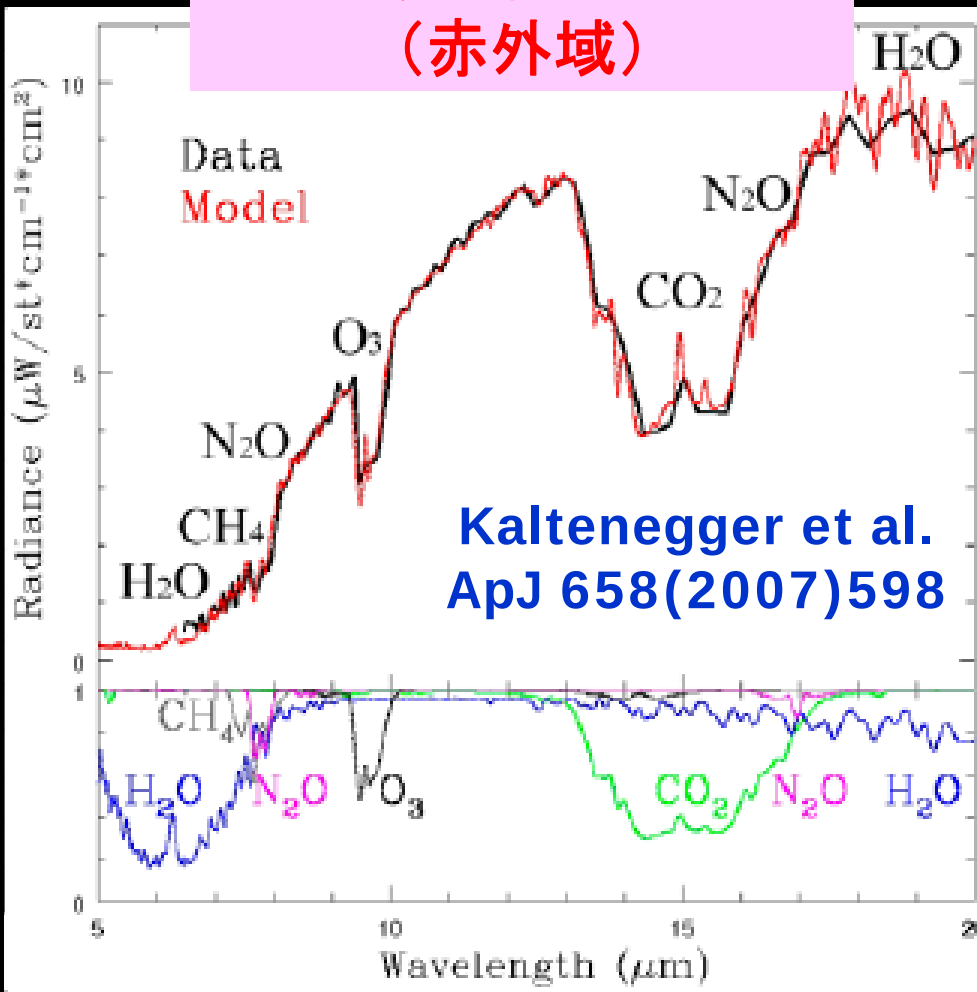
- Chappuis バンド
@ $(0.5-0.7) \mu\text{m}$
- Hartley バンド
@ $(0.2-0.3) \mu\text{m}$

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？

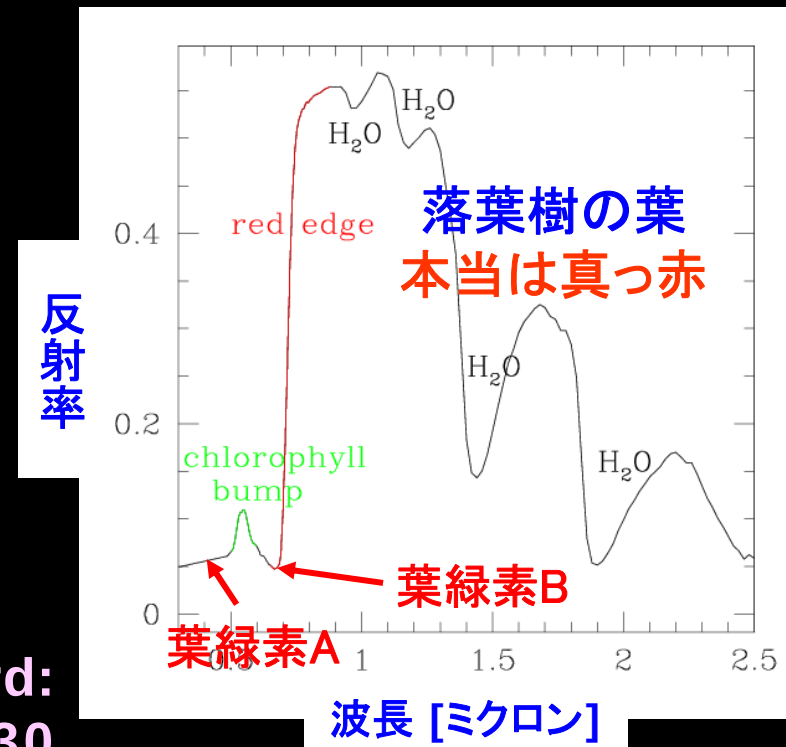
Kasting et al. arXiv:0911.2936

“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



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. (2009) submitted to ApJ, arXiv:0911.5621

A pale blue dot

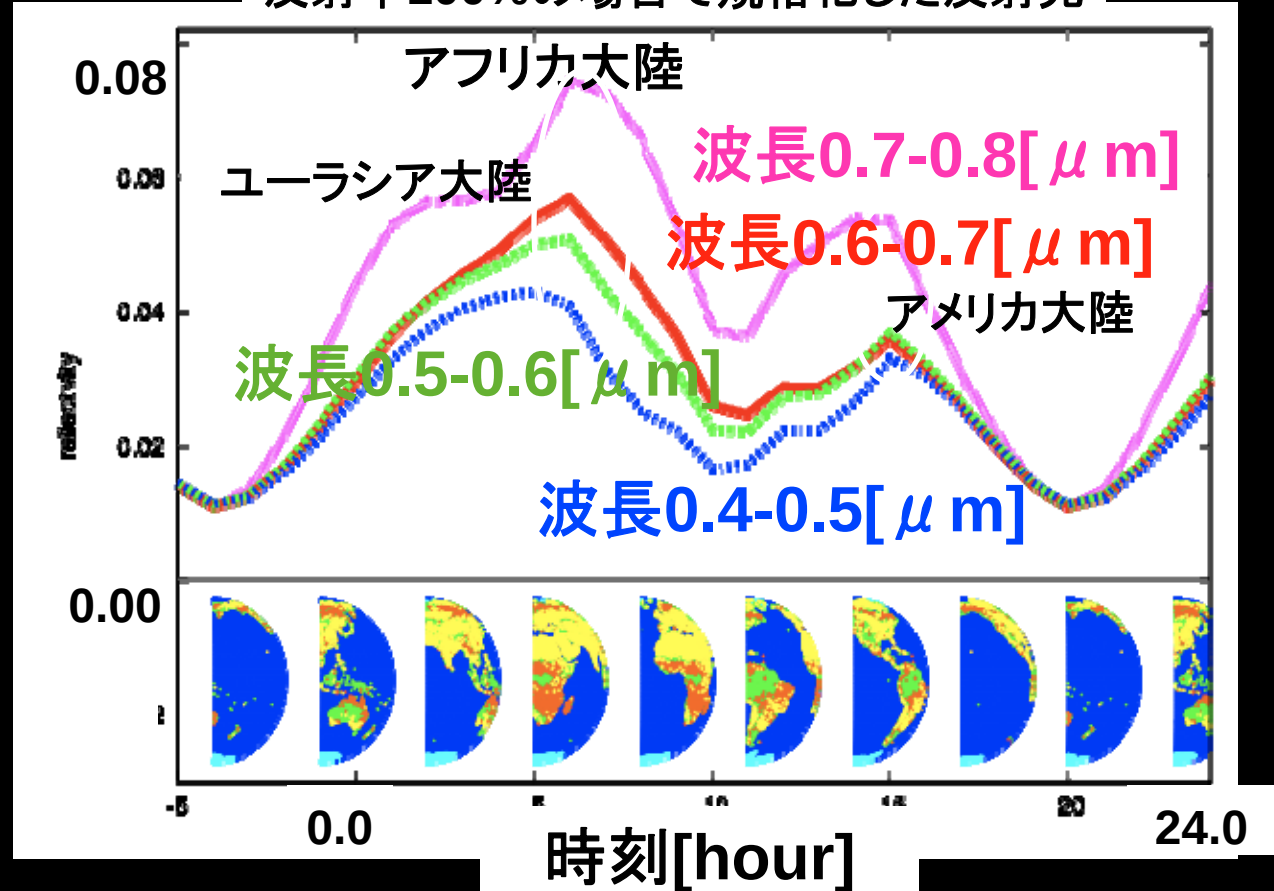


自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション

- 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. (2009)

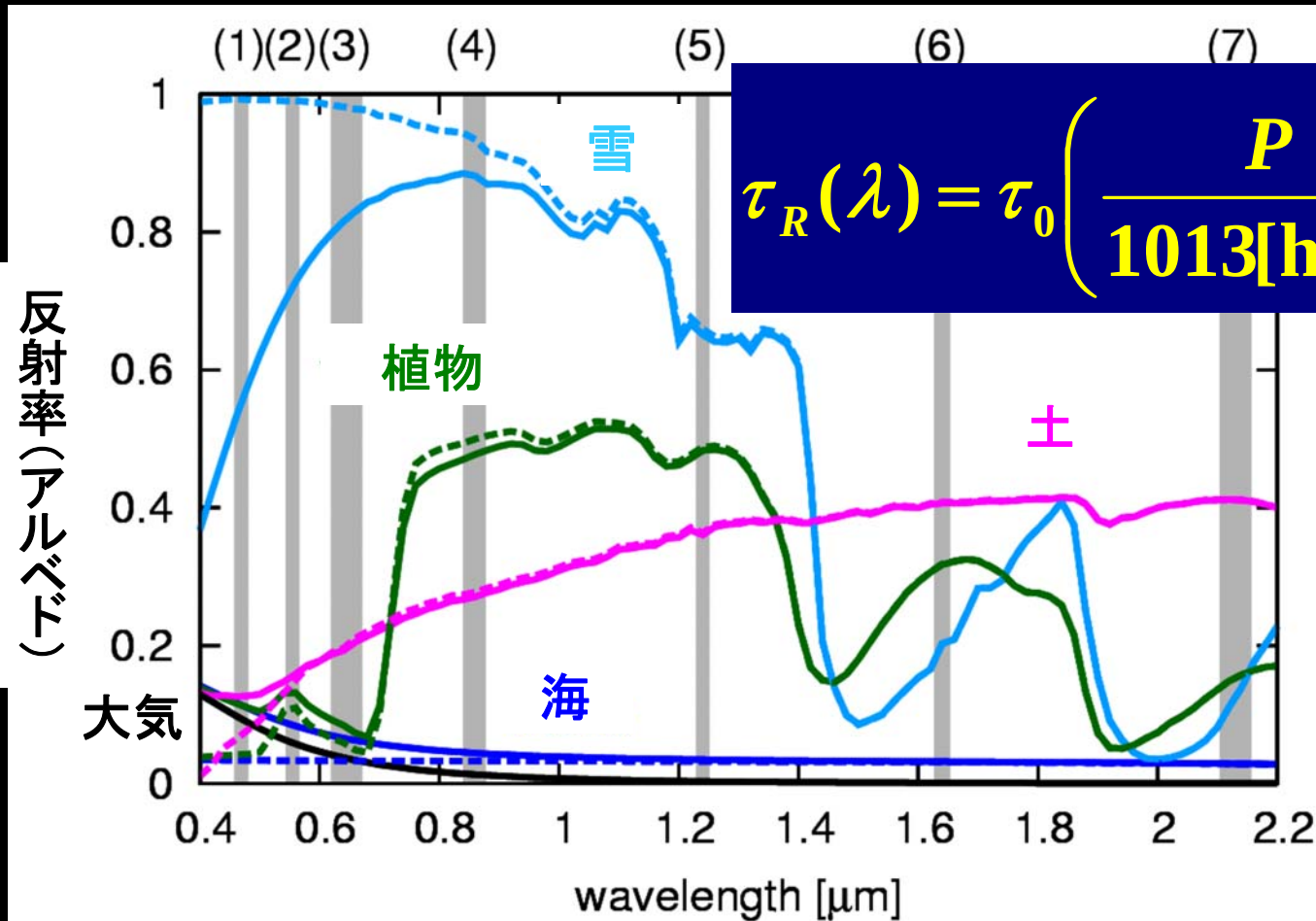
第二の地球の色：反射光計算の概略

- 地球観測衛星TerraのMODIS検出器の実際のデータを利用して5バンドの模擬光度曲線を作成
 - 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
 - 大気の効果としてレイリー散乱の1次までを考慮
 - 24時間周期で自転させる

第二の地球の色：表面積の推定

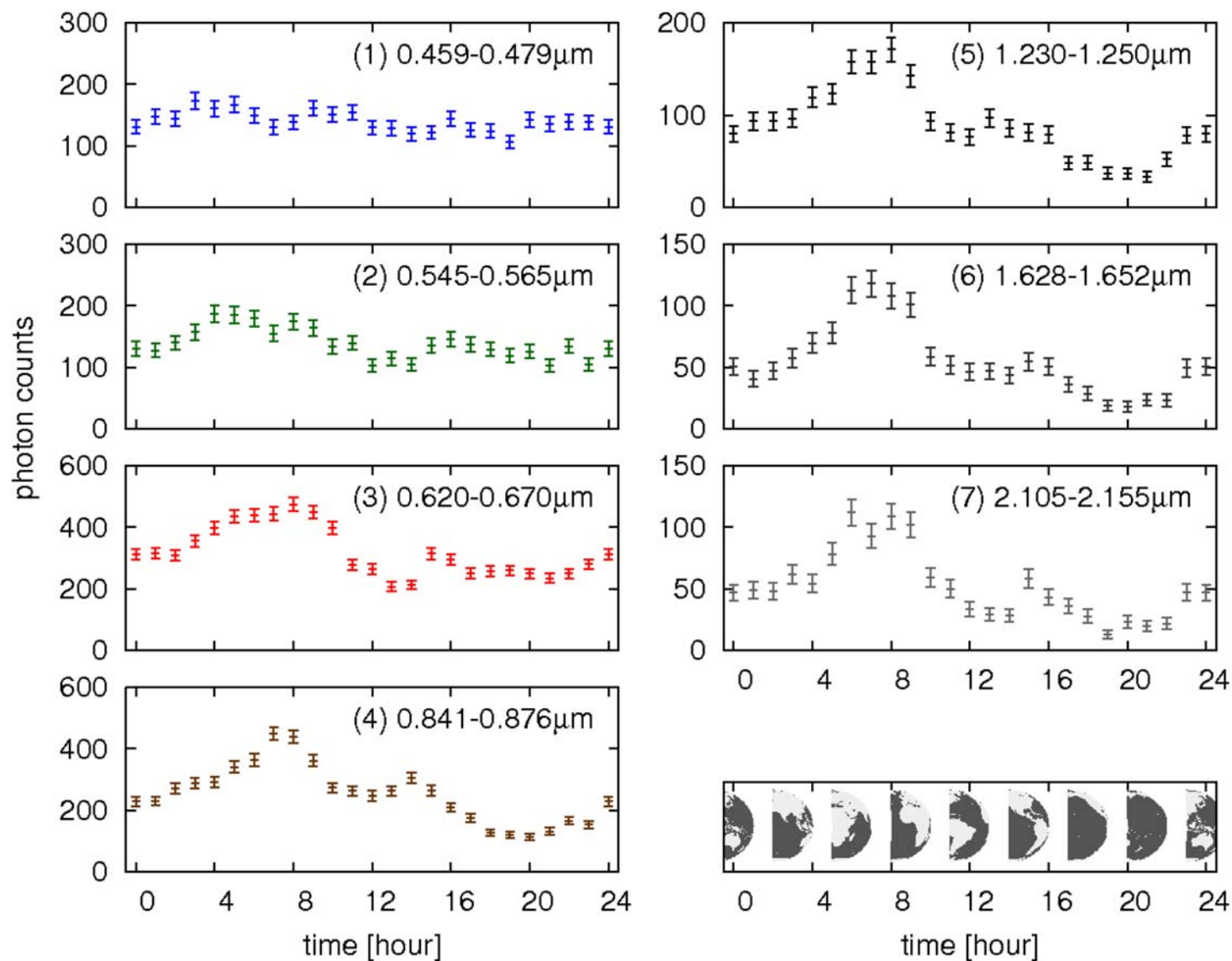
- 得られた5バンドの模擬光度曲線を、等方散乱を仮定した4成分(海、土、植物、雪)だけでフィットして、それらの表面積の割合を推定する
 - 10pc先の地球を口径4mの宇宙望遠鏡で1週間観測(各位相で1時間露出×7回)
 - 中心星の光がブロックされた理想的観測
 - 光子のポワソンノイズだけを考慮
 - 1週間の観測期間での公転の効果は無視
 - 1時間露出中の自転の効果も無視
 - 雲の存在も無視

4成分の反射率と大気の効果

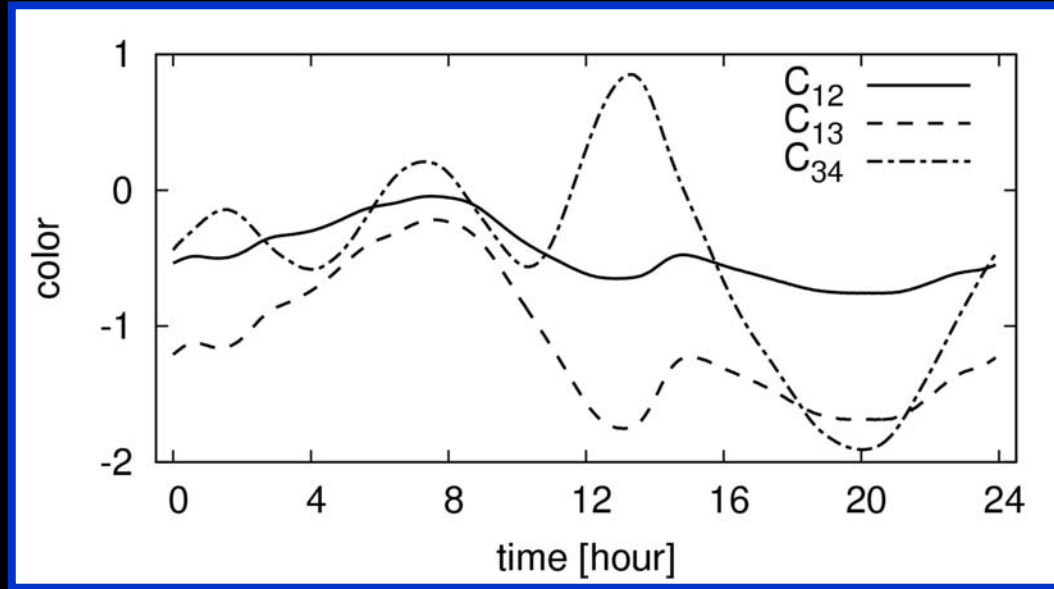


- 「空の青、海のをにも染まずただよふ」
- 大気によるアルベドの波長依存性が重要

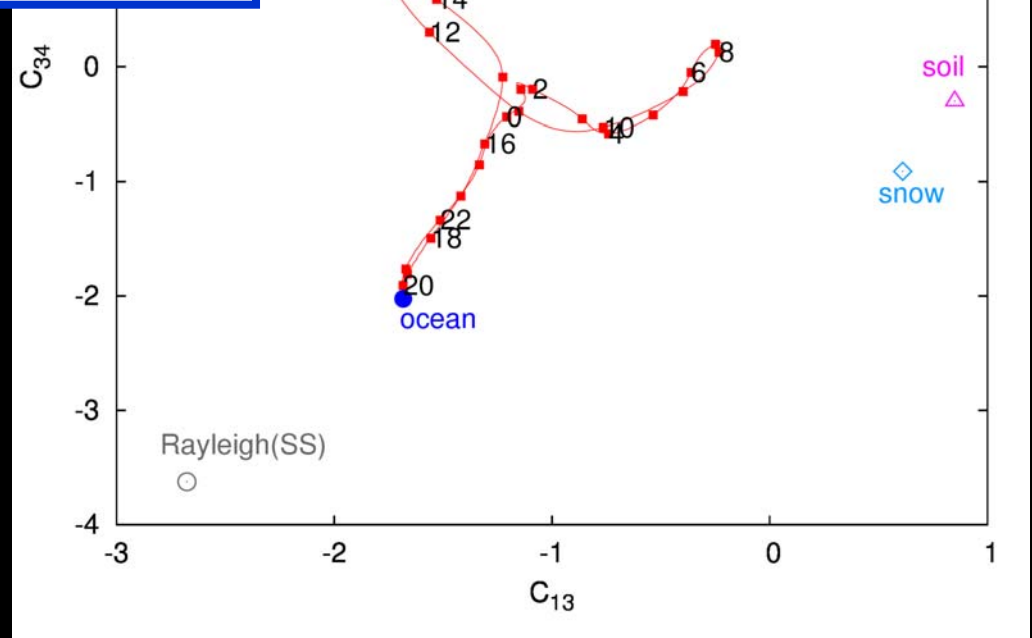
模擬光度曲線



自転に伴う色の変化

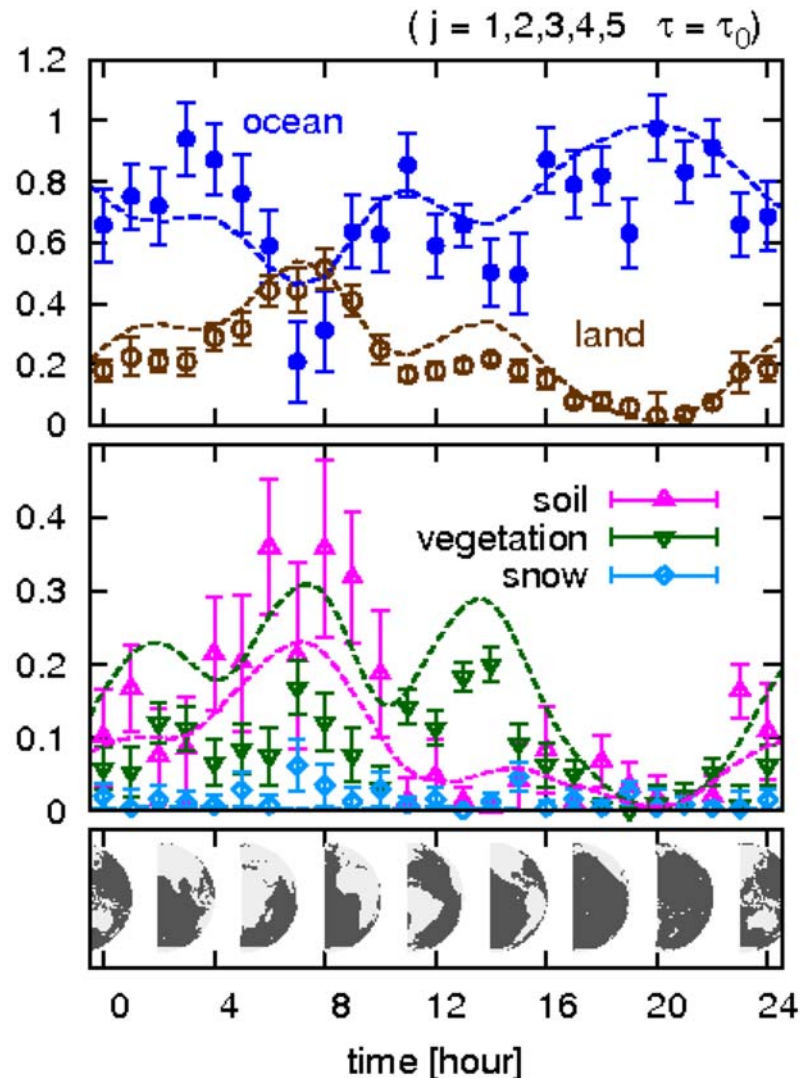


$$C_{ij} = -2.5 \log(f_i/f_j)$$



第二の地球の色から表面積を推定

(重みつき)表面積比



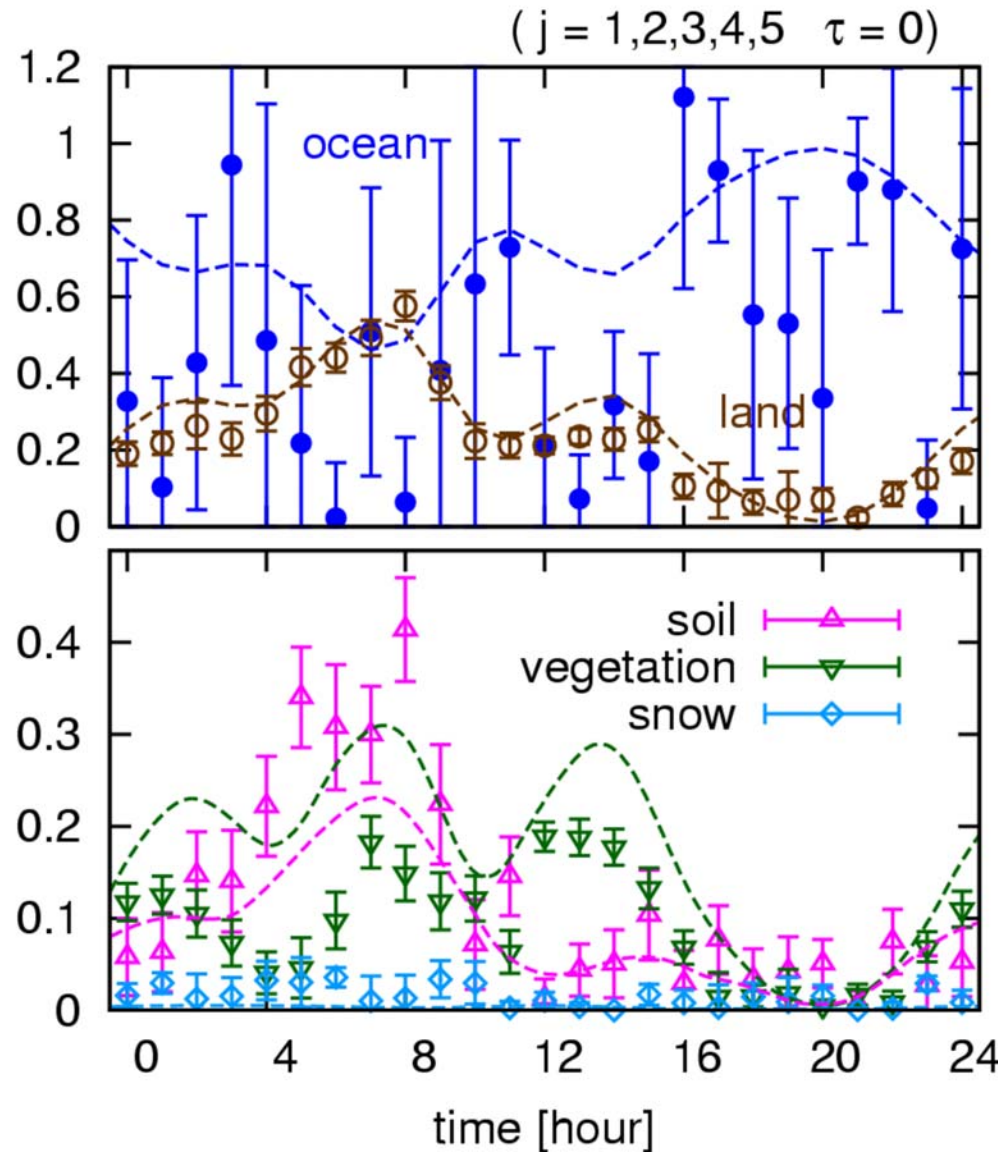
- 中心星の光が完全にブロックできた場合
- 10pc先の地球を口径4mの宇宙望遠鏡で1週間観測
- 光子のポワソンノイズだけを考慮(雲を無視)
- レイリー散乱の一次近似
 - 我が地球、悲しからずや空の青、海のをあをにも染まずただよふ
- 海、土、植物、雪の4つの成分の面積比を推定
- 結構イケテル！

Fujii et al. (2009)

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

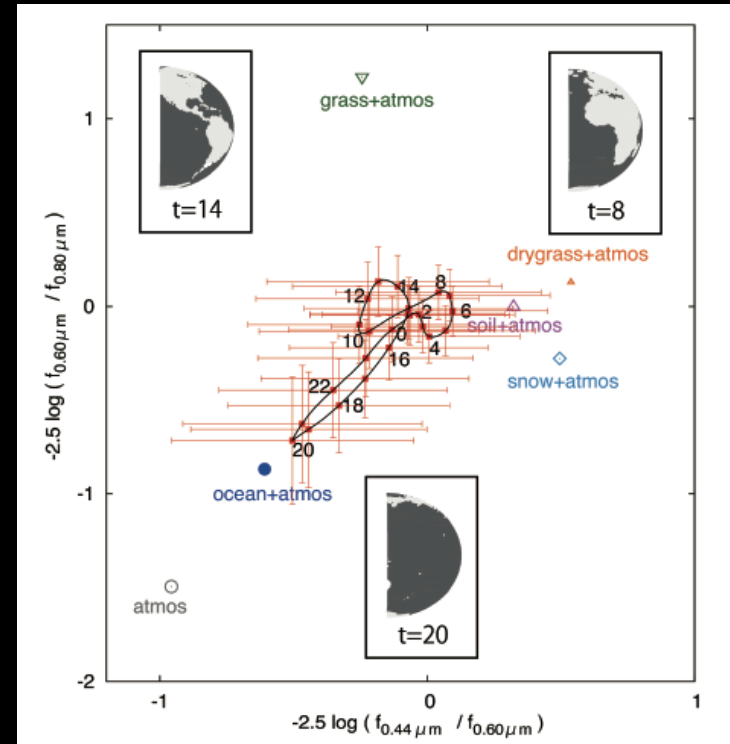
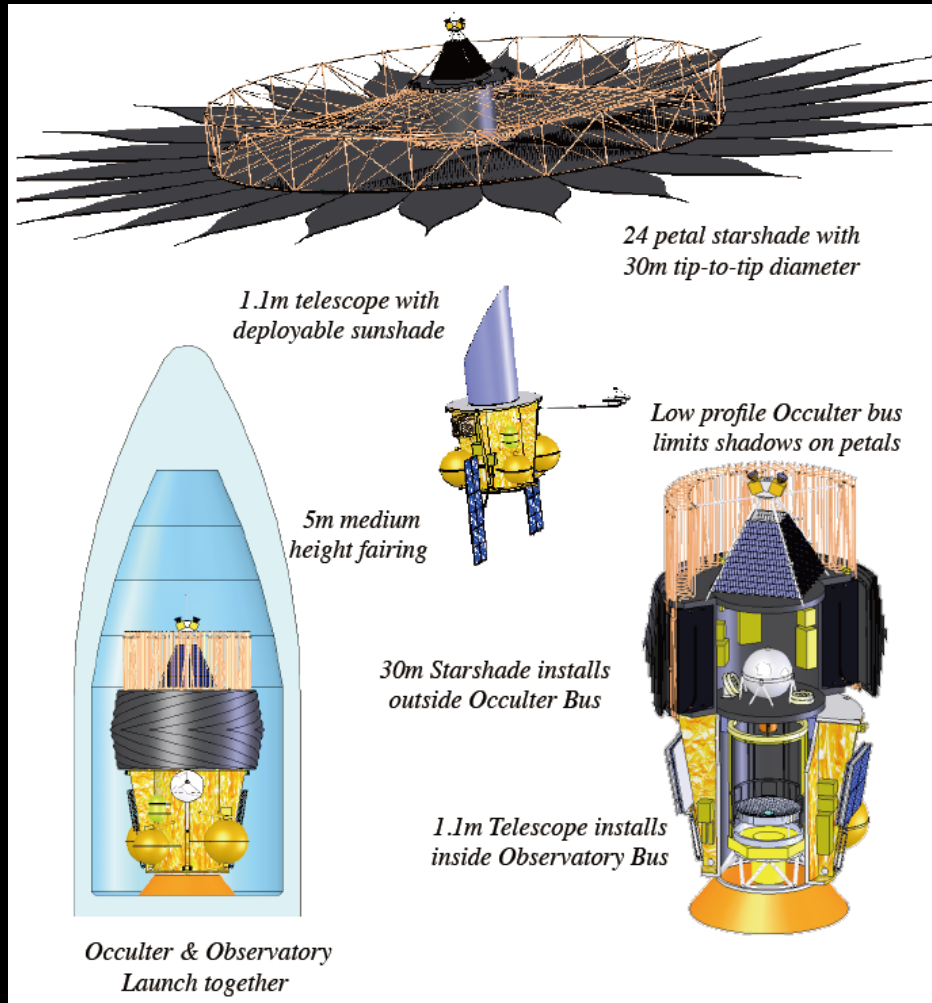
JPL



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！

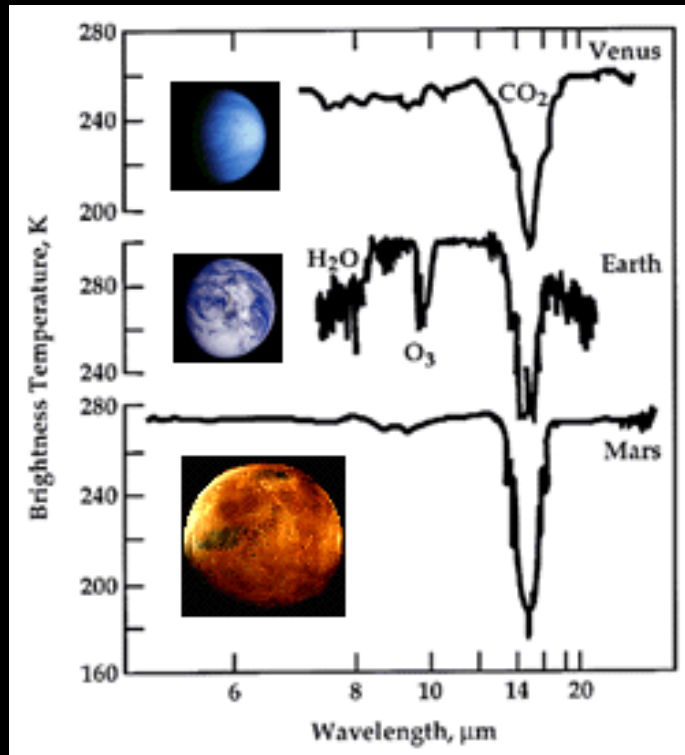
■ シミュレーションモデルの改善

- 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

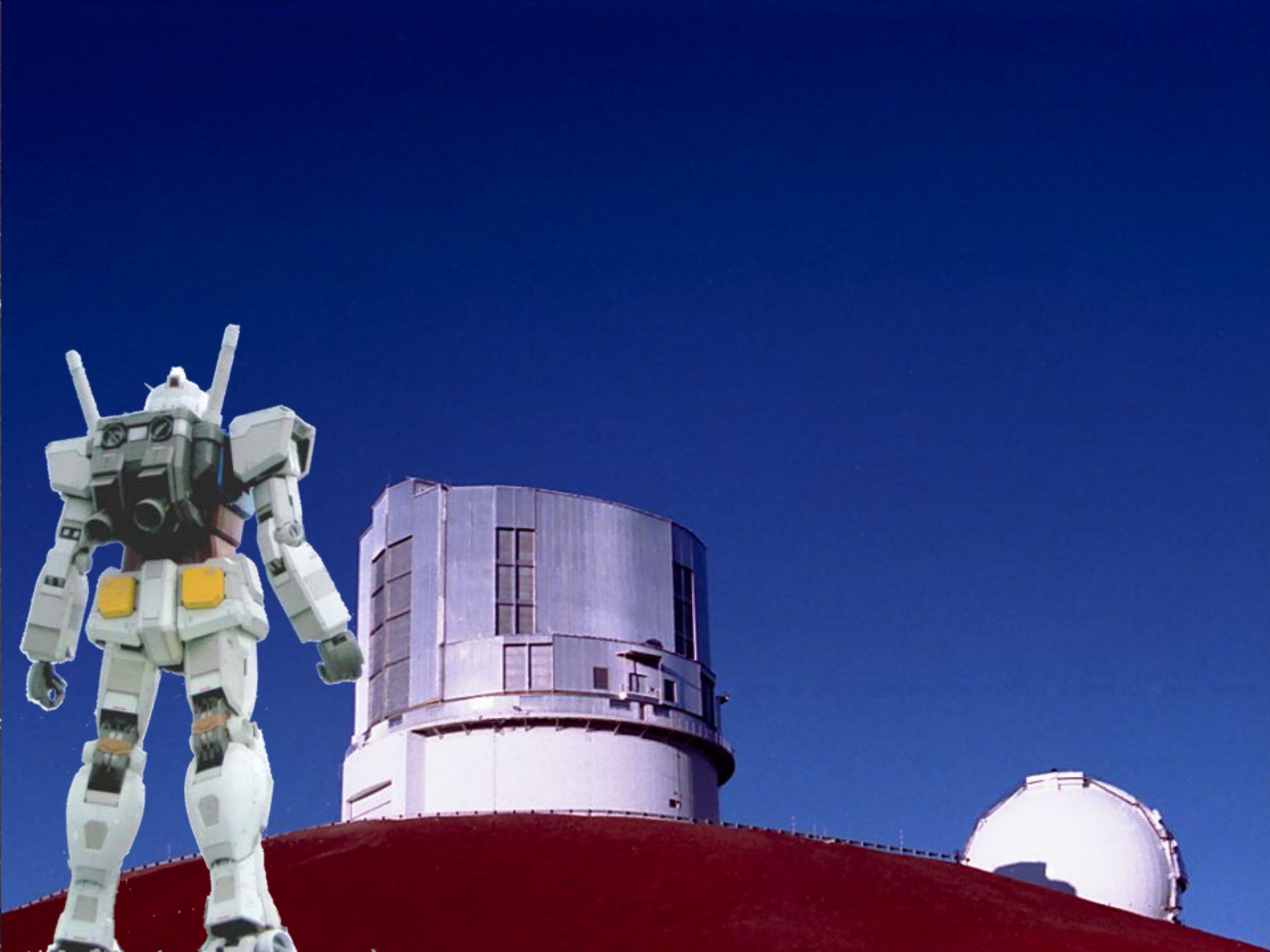
- 実際の地球や太陽系惑星の観測データに適用
- 季節変動や自転周期の精密解析から自転軸傾斜角を推定
- 過去の地球のシミュレーションデータ
- スノーボールアース・海惑星・陸惑星は検出できるか
- 中心星のスペクトル型や公転半径に対する植物のレッドエッジの波長依存性を検出できるか

太陽系外惑星から宇宙生物学へ: (トンデモ・SFから真面目な科学へ)



- 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、植物、、
- 超精密測光・分光観測が鍵！
 - 惑星の放射・反射・吸収スペクトルを
中心星から分離する
- もはやトンデモでもSFでもない！

今まで知らなかった世界をやがて発見してしまうのか？
「やはり我々は何も知らなかった」とつぶやくことになるか？



オカルターごしに見る夜空のムコウにもう一つの地球があるかも知れない

UT UNIVERSITY OF TOKYO
Physics・1

ものの大きさ

自然の階層・宇宙の階層

須藤 靖 ―[著]



宇宙の存在は必然なのか?

自然や宇宙に関心のあるすべての人へ
物理学の魅力を伝える新シリーズ

UT UNIVERSITY OF TOKYO
Physics・4

銀河進化の謎

宇宙の果てに何をみるか

嶋作一大 ―[著]



140億年の旅によろこ

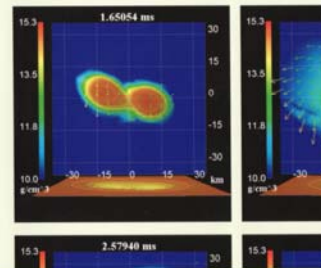
宇宙の歴史の95%がたどれるようになった今、
明らかになる銀河の姿とは？
その謎と魅力に迫る

UT UNIVERSITY OF TOKYO
Physics・3

一般相対論の世界を探る

重力波と数値相対論

柴田 大 ―[著]



ブラックホールを

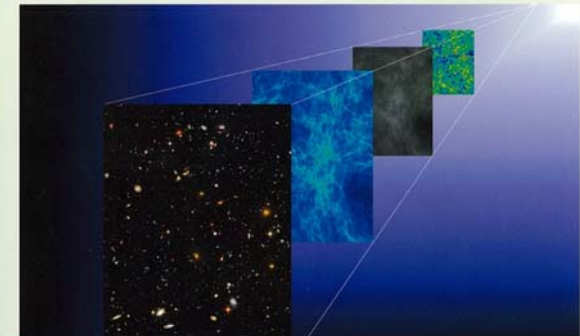
観測と理論をつなぎ、宇宙の謎にせまる
物理学の魅力を伝える好評シリーズ第

UT UNIVERSITY OF TOKYO
Physics・6

宇宙137億年解読

コンピューターで探る歴史と進化

吉田直紀 ―[著]



ファーストスターから 宇宙の未来へ

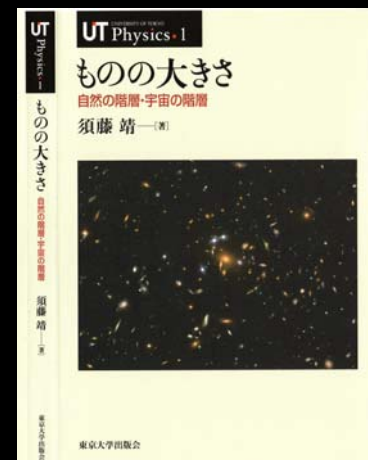
暗黒宇宙に生まれた星、銀河、大規模構造、
天の川銀河から「ミルコメダ」への変貌——
シミュレーションが宇宙の歴史を解き明かす

東京大学出版会

東京大学出版会

ブック売りの少女

今日は特別に2割引
なのに、世の中のほとん
どが冷たくてダーク
だという坂井先生
のお話は、やっぱり
本当なのかしら...



今日はクリスマス。でも本はまだ売れ残っています。外はすっかり暗く冷たくなってきたけれど、このまま**東大出版会**に帰るなんてことはできません。あの怖い会長から「**全部売り切るまで帰ってくるな**」と言い渡されているのです。少女は世の中の温かさを信じて小柴ホール
のホワイエでずっと待ちつづけています...

Merry Christmas!

