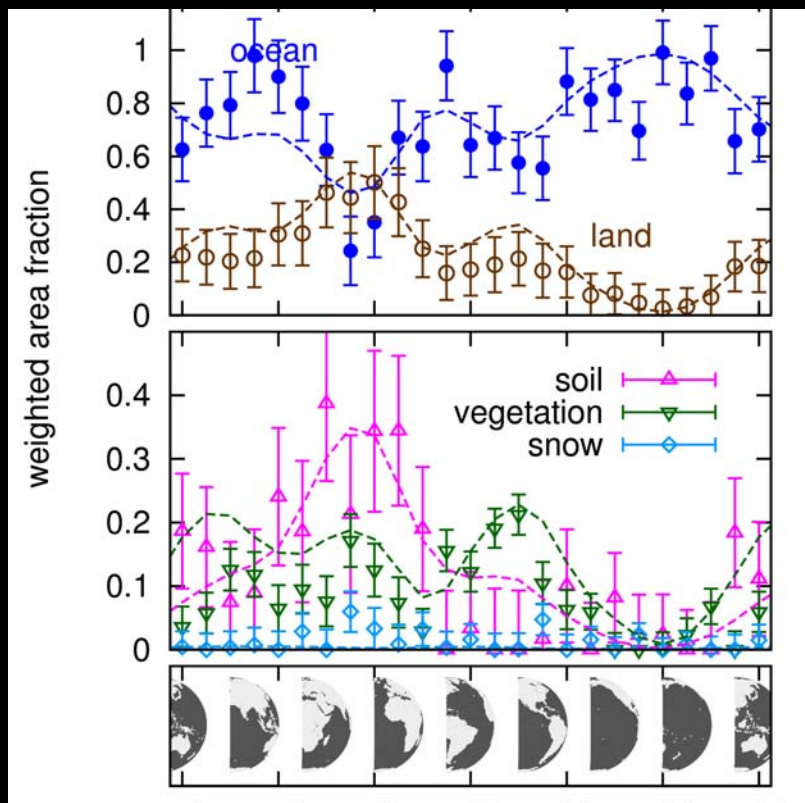


太陽系外惑星：影から光へ



東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

須藤 靖

すばる望遠鏡10周年記念シンポジウム

2009年10月5日@一橋記念講堂

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？

皆既日食 2009年 7月22日 硫黄島沖(ぱしふいっく びいなす 船上)にて

国立天文台ホームページより



撮影時刻:2009年7月22日, 11時31分 [JST] 地球照による月面の模様が見えている

口径10.1cm屈折望遠鏡 (BORG 101ED F6.3, $f=640\text{mm}$), 赤道儀:ビクセン GP

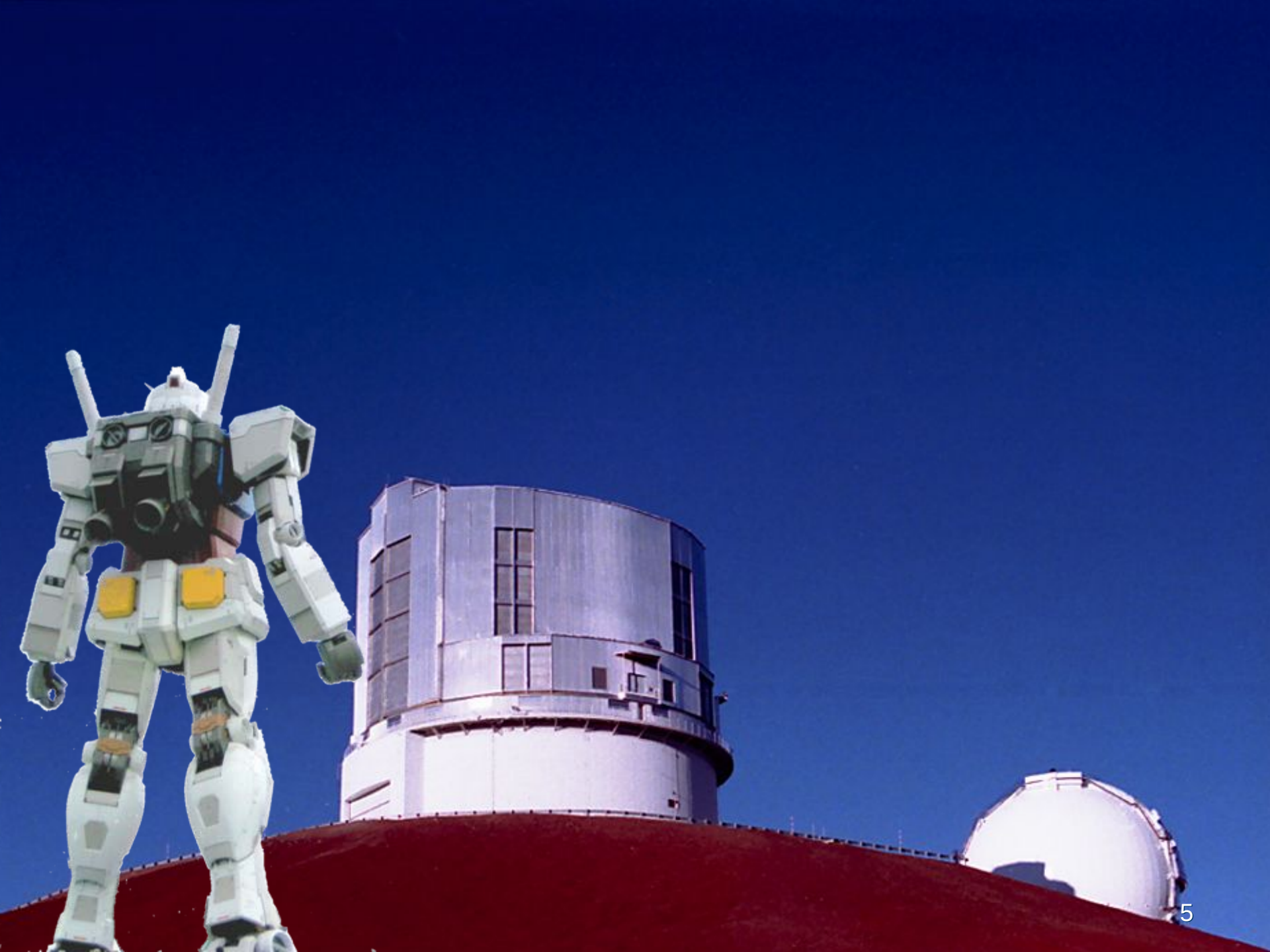
カメラ:ニコン D700 (ISO800), 露出時間:1/2000~1/8秒

画像処理:9フレームを加算合成, ローテーション・グラディエント処理, その他

撮影場所:硫黄島近海

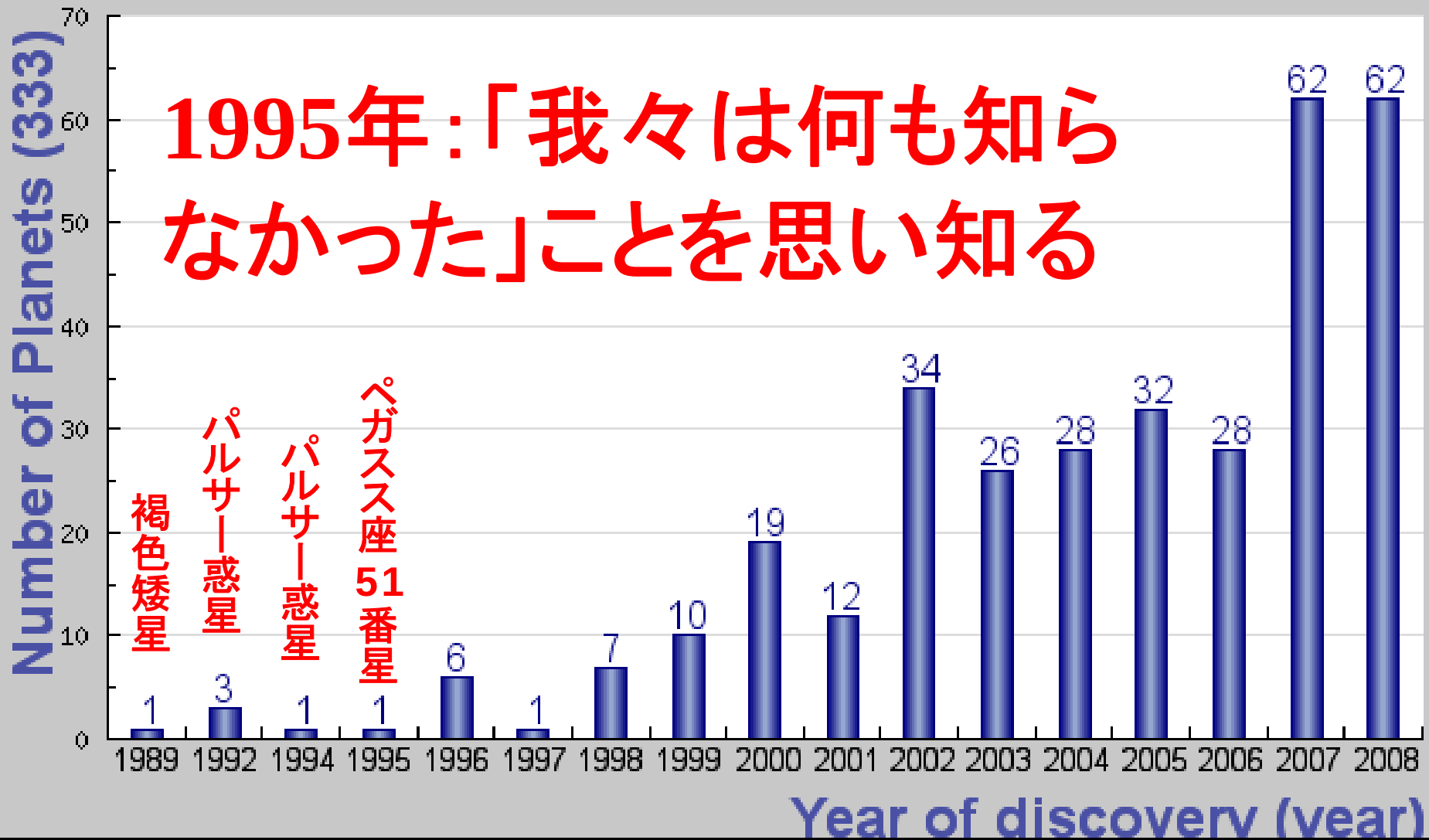
撮影:福島英雄, 宮地晃平, 片山真人 画像処理:福島英雄

Hideo Fukushima, A. Miyachi and M. Katayama



太陽系外惑星(候補)の発見年表

Number of planets by year of discovery



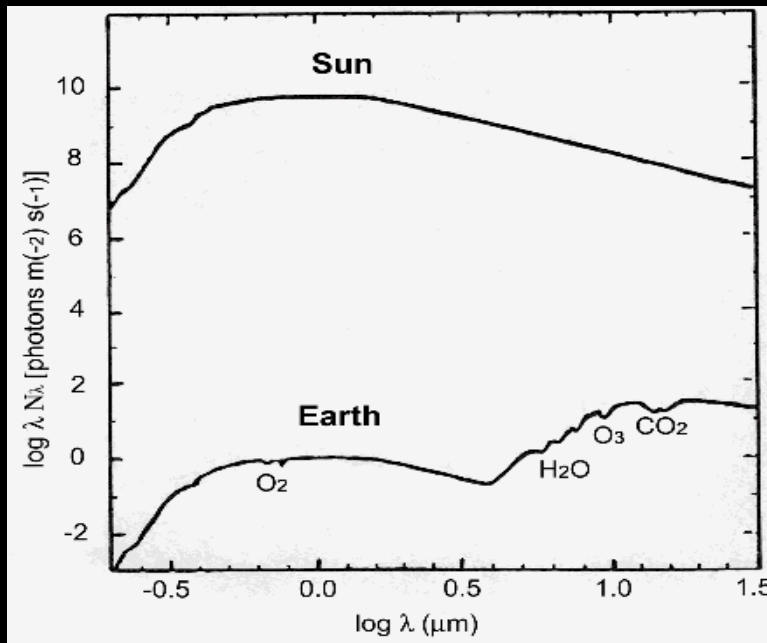
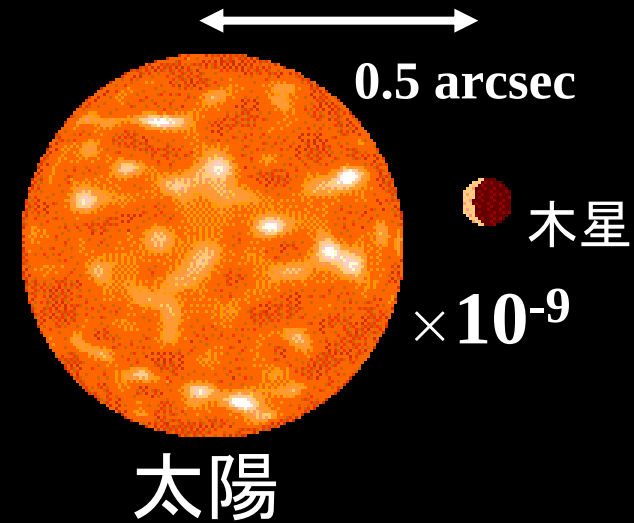
知られていなかった太陽系外惑星の世界

- 我々以外の世界は存在するのだろうか？
 - 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する
 - 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）
- 1995年：初めての太陽系外惑星の発見
 - 世界観の革命： 哲学から科学へ
- 第二の地球は？
 - 天文学から宇宙生物学へ
 - SF、とんでも系から実証科学へ

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

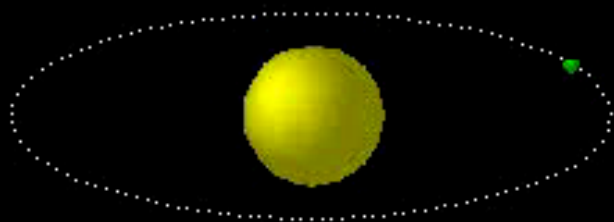


地上から観測できる分解能の大きさ内で、9桁も明るい主星の隣にある27等級の暗い天体を検出する

⇒ ほとんど不可能！

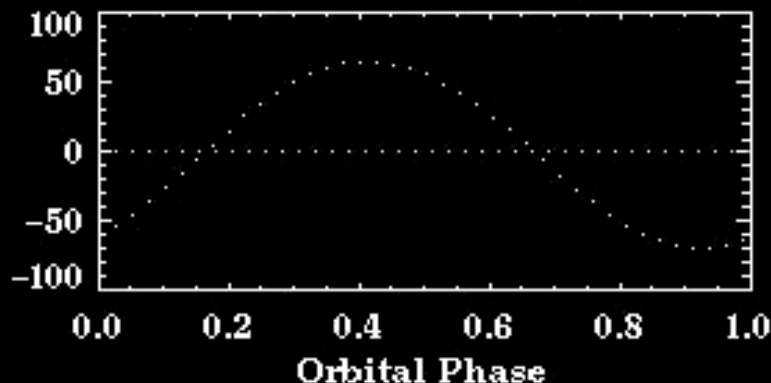
どうやって見つけたのか？

Circular Orbit: rho CrB



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

Radial Velocity Curve
of the Star [m/s]



S.G. Korzennik (CfA, © 1997)

■ ドップラー法

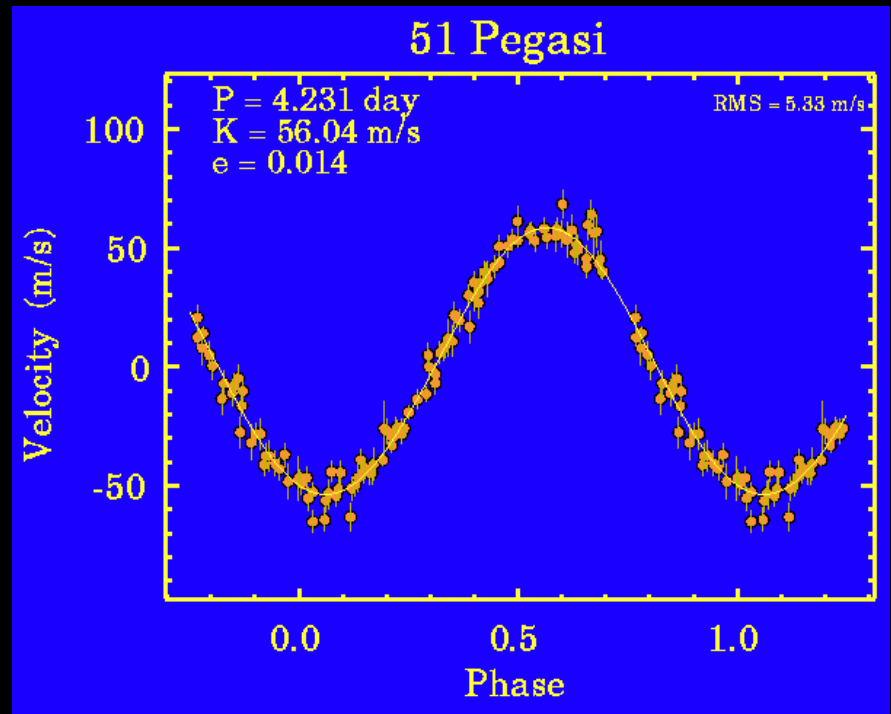
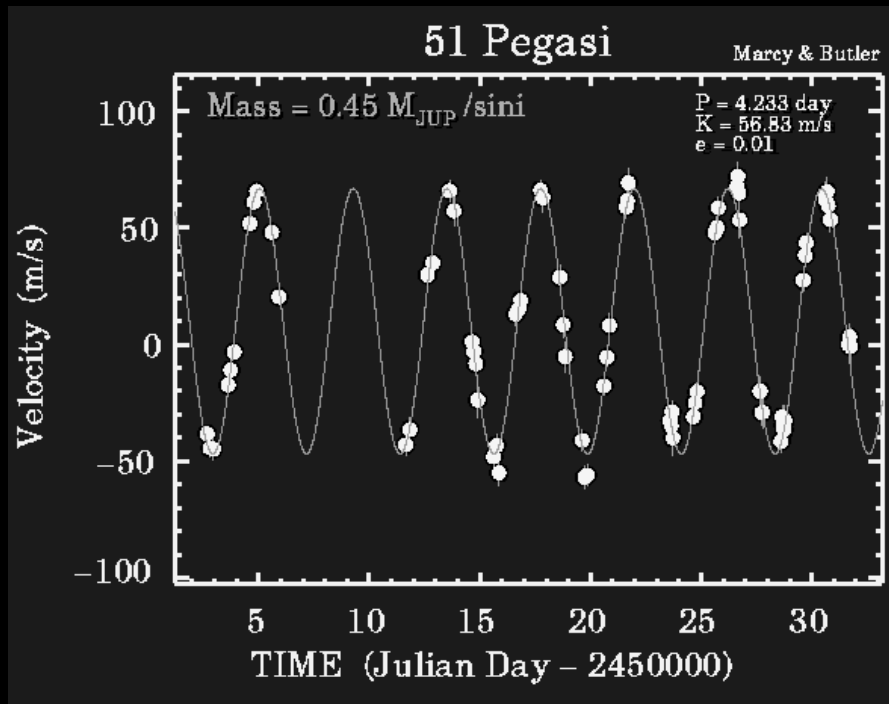
- 中心星の速度が毎秒数十メートル周期的に変動

■ 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

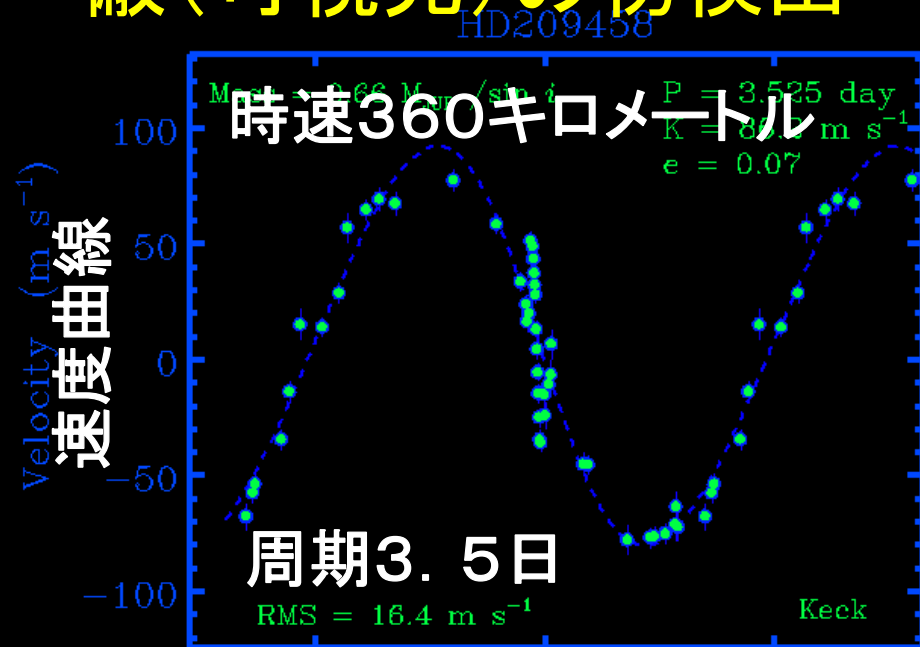
ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年発表)

わずか4.2日で一周！



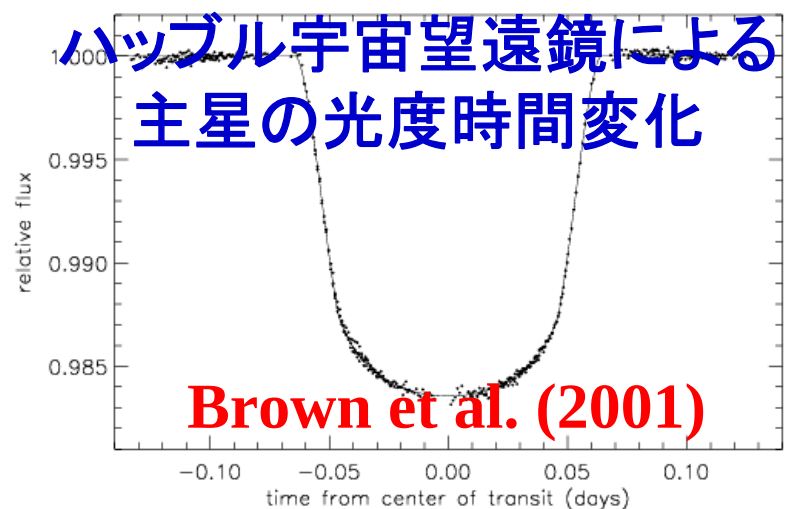
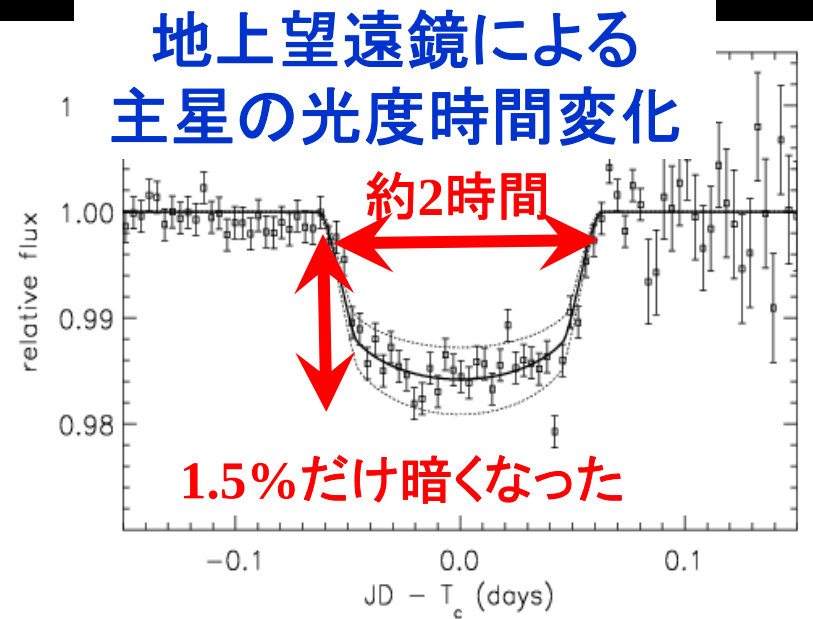
初めてのトランジット惑星HD209458b

- 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)



すでに学んだこと

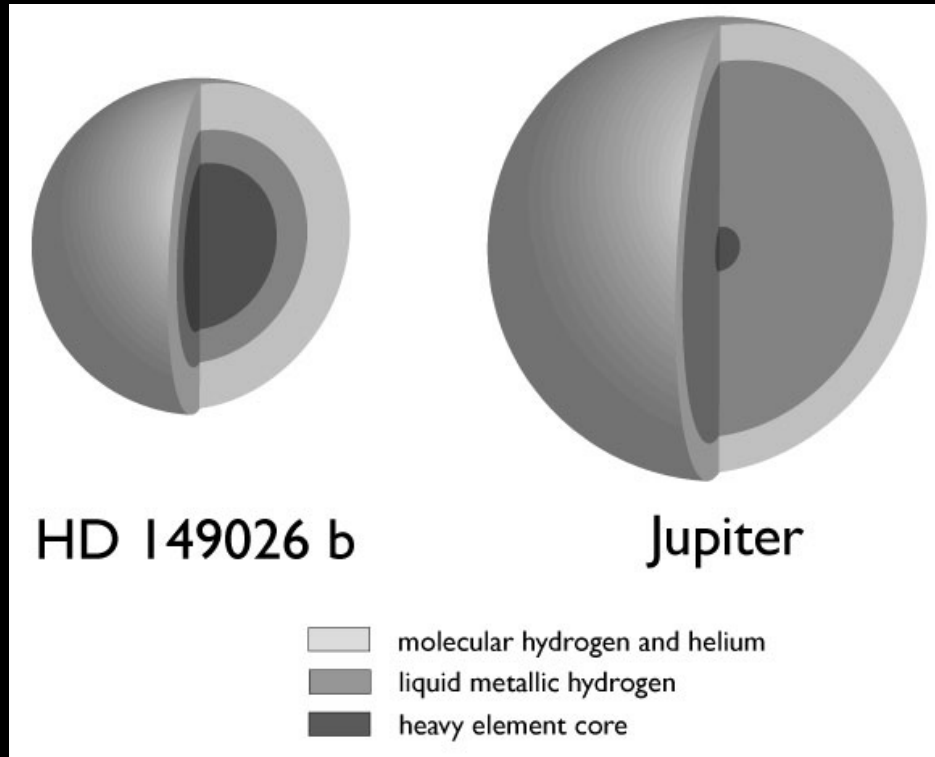
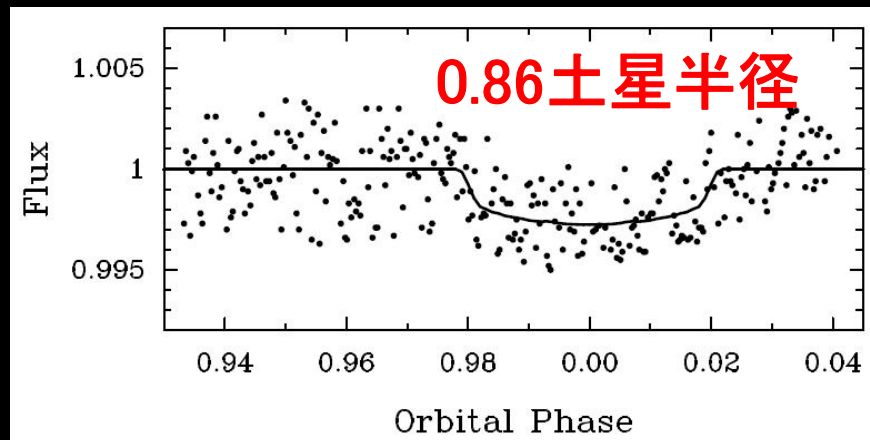
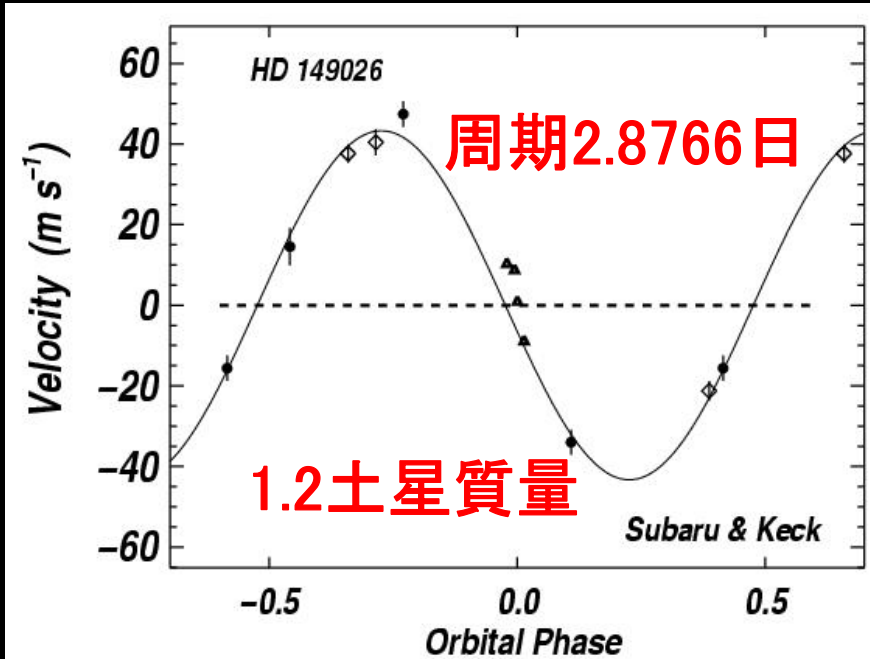
- 惑星(系)は稀なものではなく普遍的存在
 - 太陽に似た恒星の10パーセント程度は惑星を持つ
- 惑星系の性質は多種多様
 - 太陽系と似た系もかけ離れた系も存在する
 - 惑星大気の見つけ
 - 惑星反射光の検出
 - 主星スピンと惑星軌道軸とのずれ: 逆行惑星
- 様々な間接的観測手法での相補的アプローチ
 - ドップラー法(精密分光)、トランジット法(精密測光)、重力レンズ(高時間分解能測光)

すばるの成果(影) その1

新たな太陽系外惑星の発見

(東京工業大学:佐藤文衛氏)

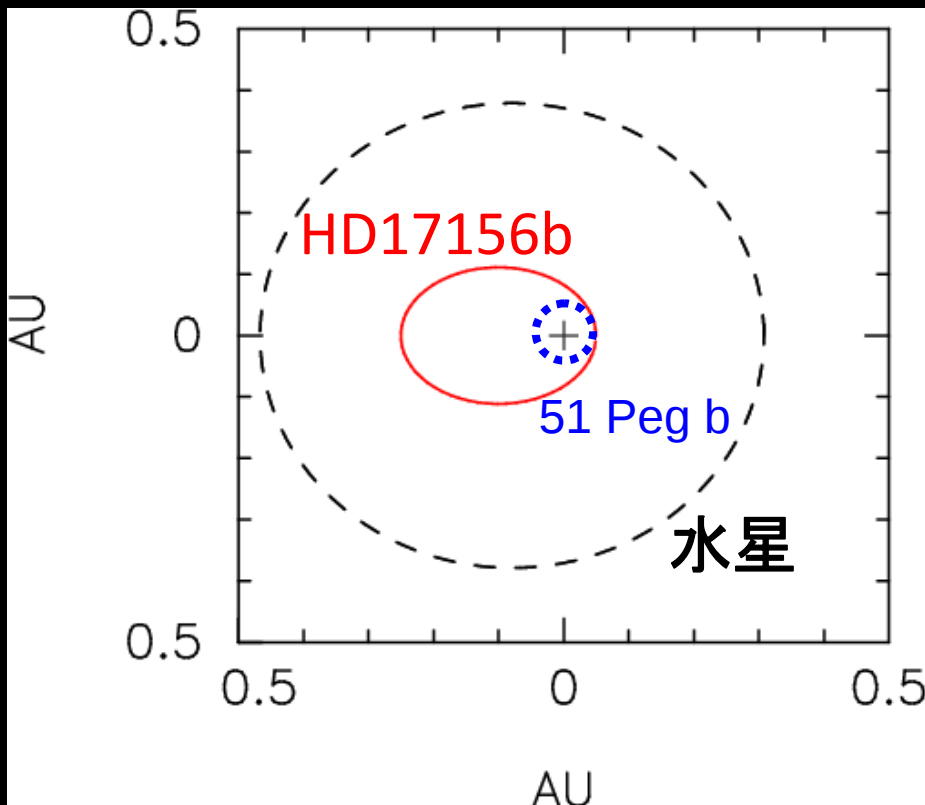
超巨大コアをもつ惑星: HD149026b



- 地球質量の約70倍の超巨大コアが存在する
- 惑星形成の標準理論のコア集積モデル(まずコアができ、そのまわりにガスが集まる)を支持

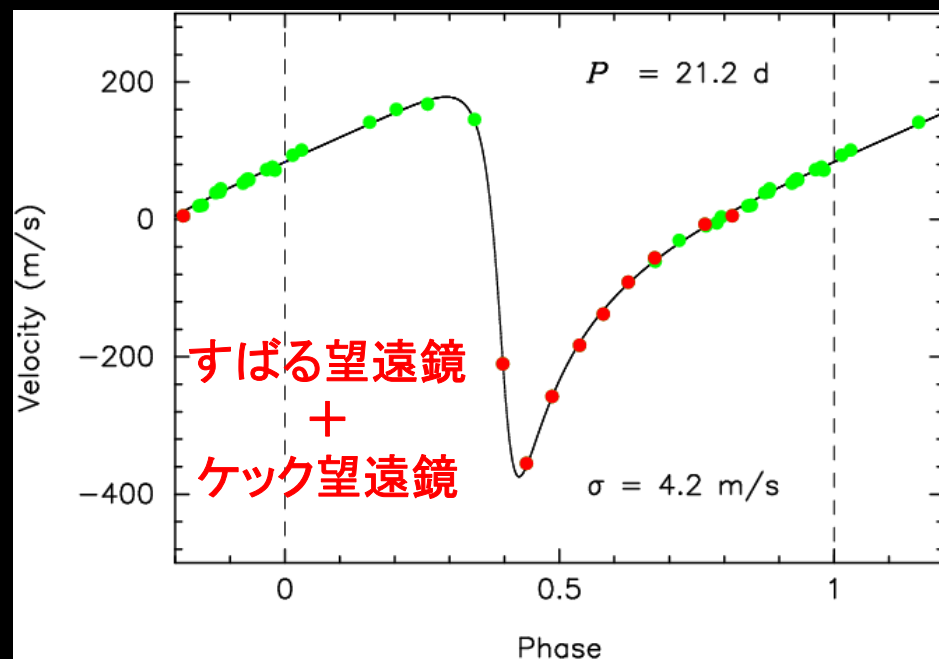
佐藤文衛 ほか(2005)

ゆがんだ軌道の惑星: HD17156b

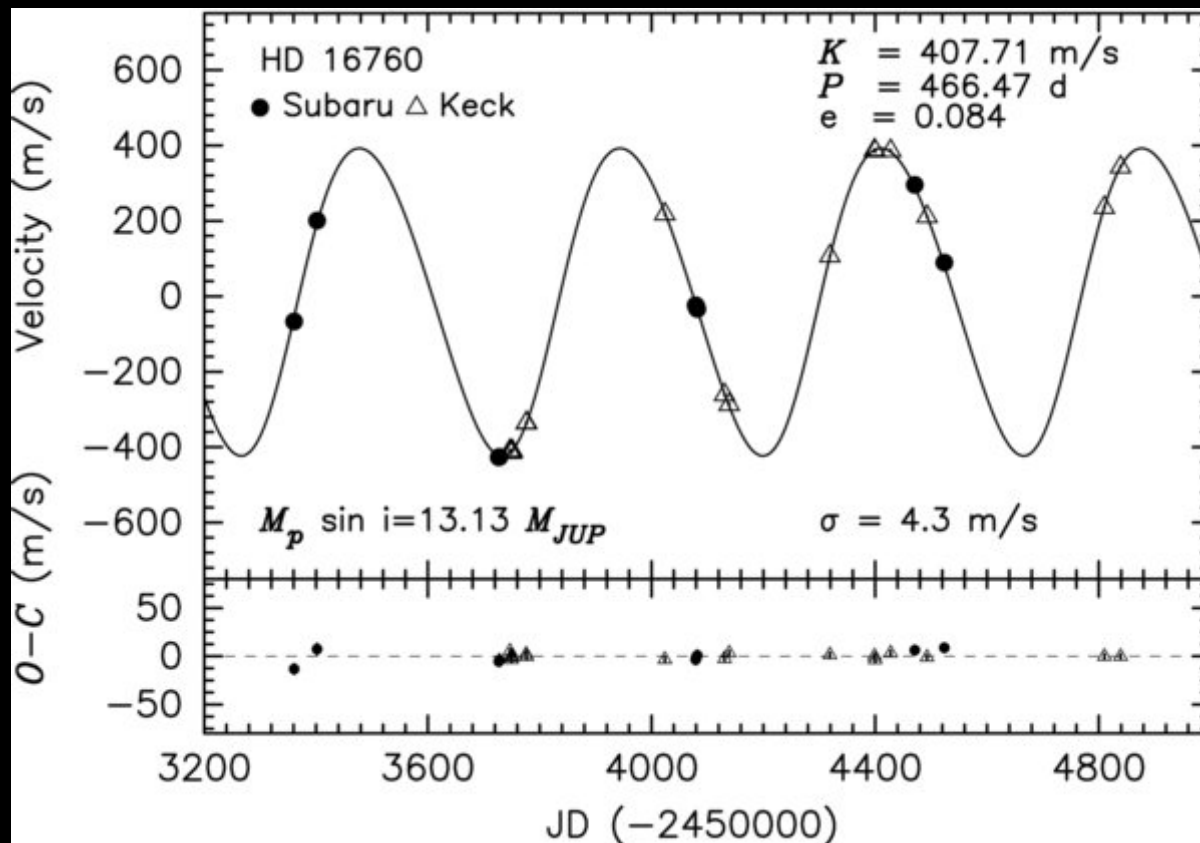


- 3.1倍木星質量
- 軌道半径 0.15天文単位
- 周期 21.2日
- 離心率0.67

Fischer et al. (2007)



超巨大惑星？褐色矮星？:HD16760b



- 13倍木星質量
- 軌道半径1.1AU
- 周期466日
- 離心率0.08
- 褐色矮星と惑星の境界付近の天体

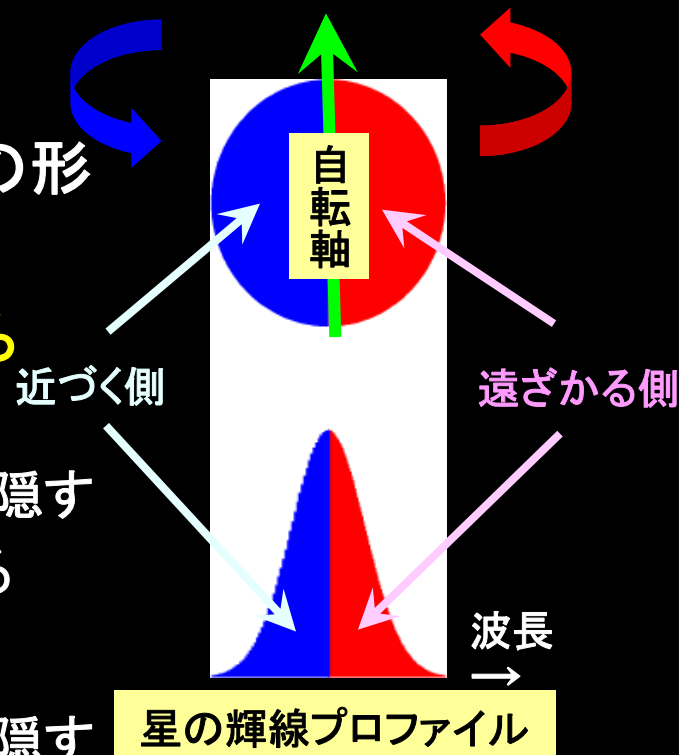
佐藤文衛 ほか(2009)

すばるの成果(影) その2

ロシター効果と逆行惑星の発見

ロシター効果と惑星公転軸

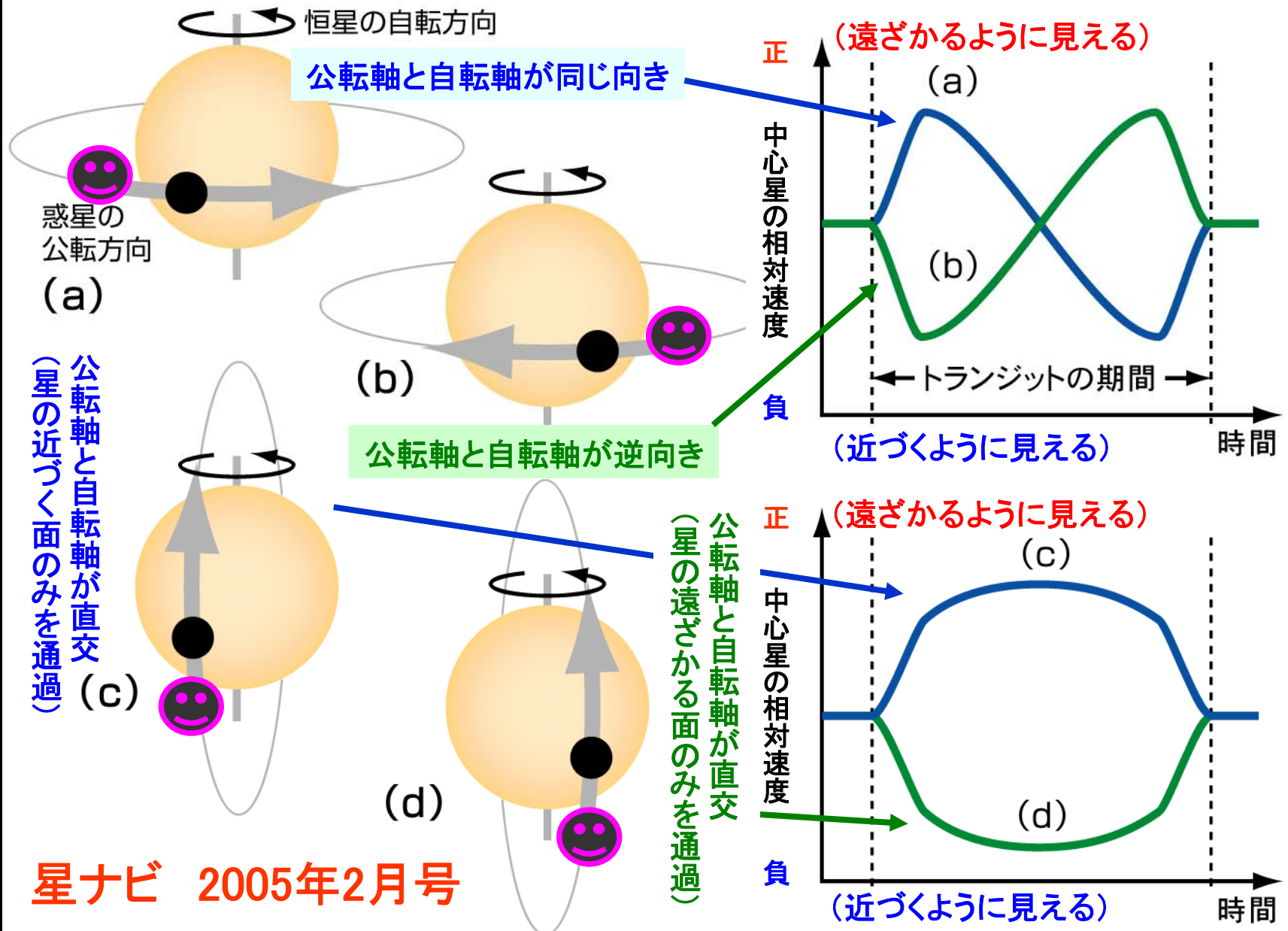
- 中心星の自転のため、星の線スペクトルの形は波長に関して左右対称に広がっている
- しかし、**トランジット惑星が同じ向き(左から右)に通過すると**
 - 中心星の近づく面を隠してから遠ざかる面を隠す
 - 星は、まず遠ざかりその後近づくように見える
- 一方、**逆周り(右から左)の場合には**
 - 中心星の遠ざかる面を隠してから近づく面を隠す
 - 星は、まず近づきその後遠ざかるように見える
- **この結果、線スペクトルの形に非対称性が生まれる**
 - この波長のズレを精密に観測すれば、惑星が右回りか左回りかがわかる
 - さらに詳しく解析すると、惑星の公転面の傾きの角度までわかる！



1924年、食連星 こと座ベータ星の速度データの解析に際してロシターが発見した

R.A. Rossiter:
ApJ 60(1924)15

惑星の公転方向とロシター効果の関係予想図



Ohta, Taruya & Suto: ApJ 622(2005)1118

THE ROSSITER-McLAUGHLIN EFFECT AND ANALYTIC RADIAL VELOCITY CURVES FOR TRANSITING EXTRASOLAR PLANETARY SYSTEMS

YASUHIRO OHTA, ATSUSHI TARUYA,¹ AND YASUSHI SUTO¹

Department of Physics, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan; ohta@utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp,
ataruya@utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp, suto@phys.s.u-tokyo.ac.jp

Received 2004 October 13; accepted 2004 December 10

Among the recently discovered transiting extrasolar planetary systems, i.e., TrES-1 by the Trans-Atlantic Exoplanet Survey (Alonso et al. 2004) and OGLE-TR 10, 56, 111, 113, 132 by the Optically Gravitational Lens Event survey (e.g., Udalski et al. 2002c, 2002b, 2002a, 2003; Konacki et al. 2003; Bouchy et al. 2004; Pont et al. 2004), TrES-1 has similar orbital period and mass to those of HD 209458b, but its radius is smaller. Thus, it is an interesting target to determine the spin parameters via the RM effect; if its planetary orbit and the stellar rotation share the same direction as discovered for the HD 209458 system, it would be an important confirmation of the current view of planet formation out of the protoplanetary disk surrounding the protostar. If not, the result would be more exciting and even challenge the standard view, depending on the value of the misalignment angle λ .

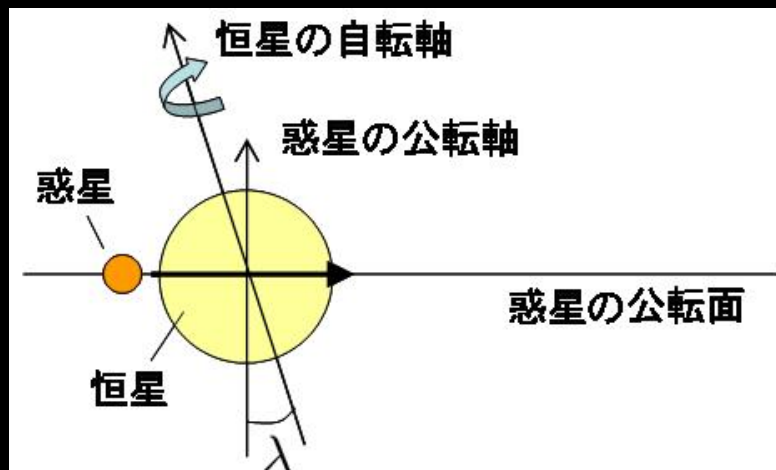
We also note that the future satellites *COROT* and *Kepler* will detect numerous transiting planetary systems, most of which will be important targets for the RM effect in 8–10 m class ground-based telescopes. We hope that our analytic formulae presented here will be a useful template in estimating parameters for those stellar and planetary systems.

In conclusion, we have demonstrated that the radial velocity anomaly due to the RM effect provides a reliable estimation of spin parameters. Combining data with the analytic formulae for radial velocity shift Δv_r , this methodology becomes a powerful tool in extracting information on the formation and the evolution of extrasolar planetary systems, especially the origin of their angular momentum. Although it is unlikely, we may even speculate that a future RM observation may discover an extrasolar planetary system in which the stellar spin and the planetary orbital axes are antiparallel or orthogonal. This would have a great impact on the planetary formation scenario, which would have to invoke an additional effect from possible other planets in the system during the migration or the capture of a free-floating planet. While it is premature to discuss such extreme possibilities at this point, the observational exploration of transiting systems using the RM effect is one of the most important probes for a better understanding of the origin of extrasolar planets.

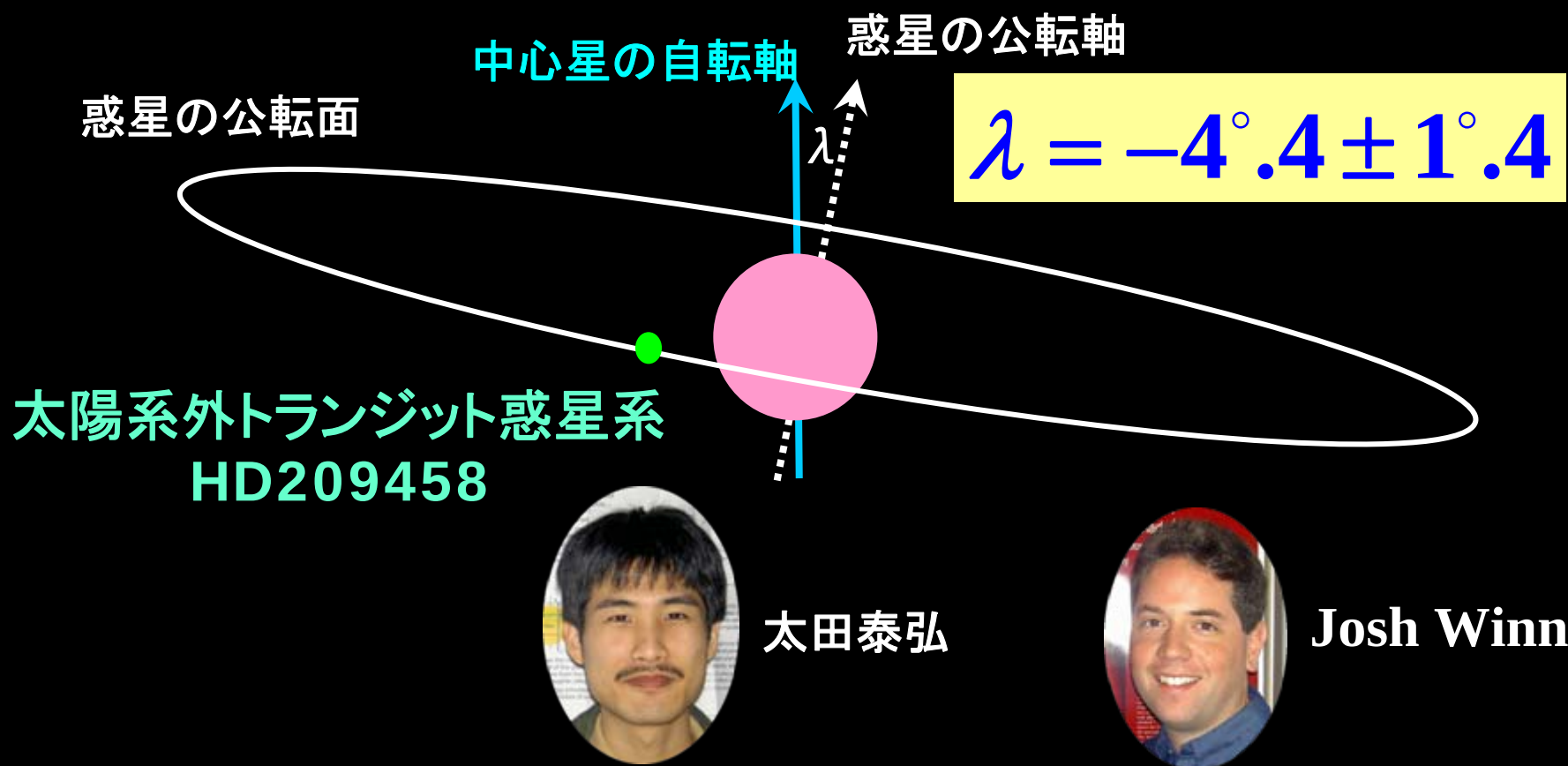
ロシター効果による速度変動の摂動論的解析表式の導出

Measurement of Spin-Orbit Alignment in an Extrasolar Planetary System (太陽系外惑星系における自転軸と公転軸の向きの測定)

- Joshua N. Winn¹, Robert W. Noyes¹, Matthew J. Holman¹, David B. Charbonneau¹, 太田泰弘²、樽家篤史²、須藤靖²、成田憲保², Edwin L. Turner^{2,3}, John A. Johnson⁴, Geoffrey W. Marcy⁴, R. Paul Butler⁵, & Steven S. Vogt⁶
 - ¹ハーバード大学、²東京大学、³プリンストン大学、⁴カリフォルニア大学バークレー校、⁵ワシントン カーネギー研究所、⁶カリフォルニア大学サンタクルス校
- The Astrophysical Journal 631(2005)1215 (10月1日号)

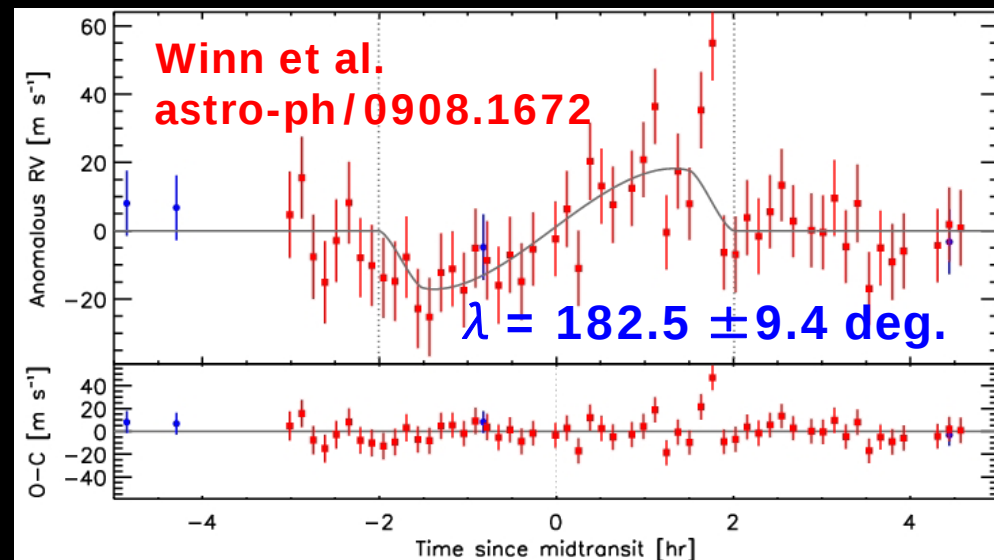
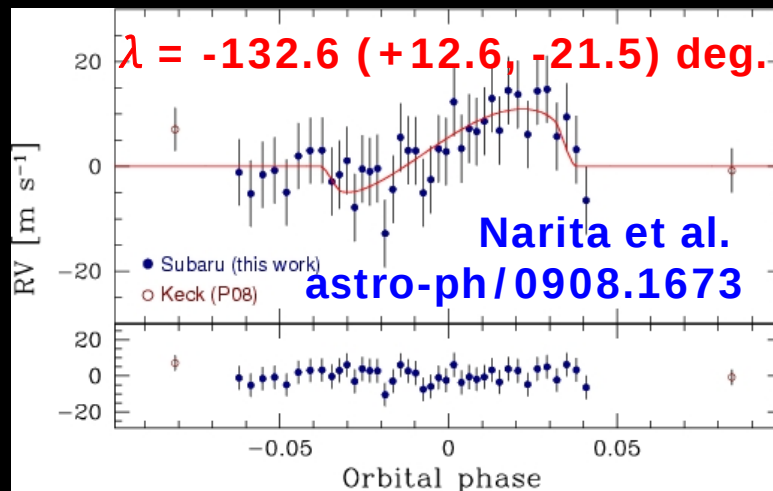
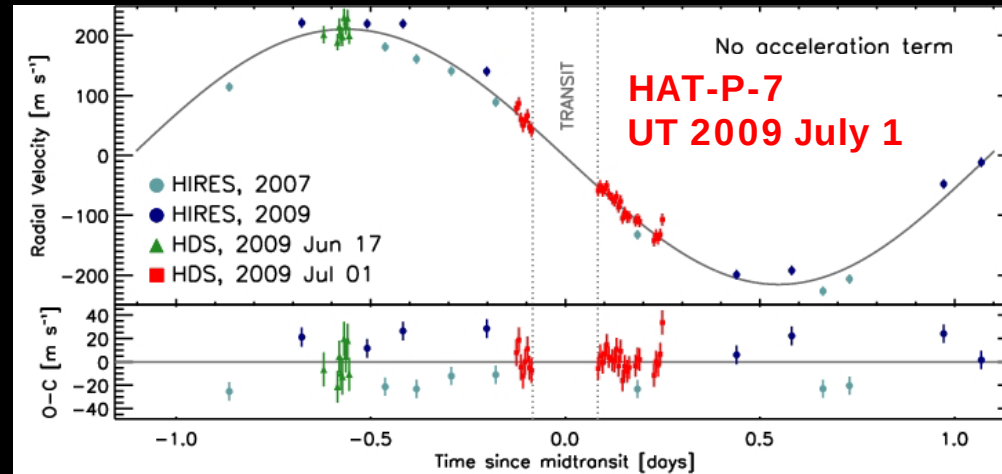
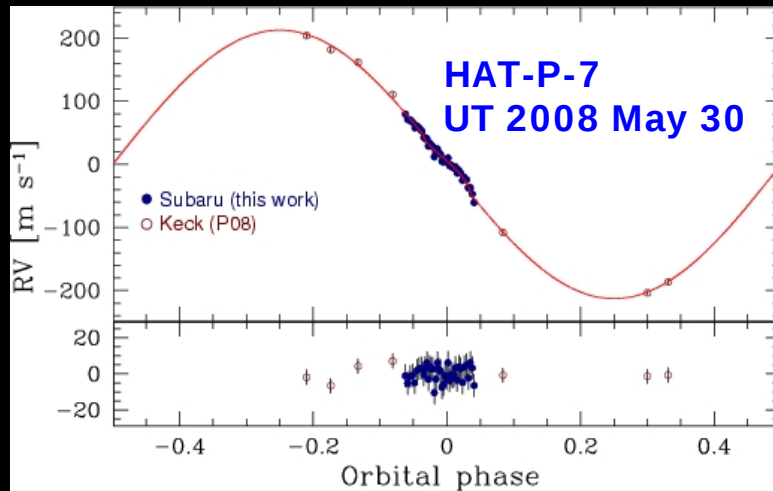


ロシター効果を利用したHD209458の中心星 自転軸と惑星公転軸のずれの発見



太陽系外惑星の公転軸はちょっぴり傾いていた₂₂

逆行する系外惑星(HAT-P-7)の発見



- と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

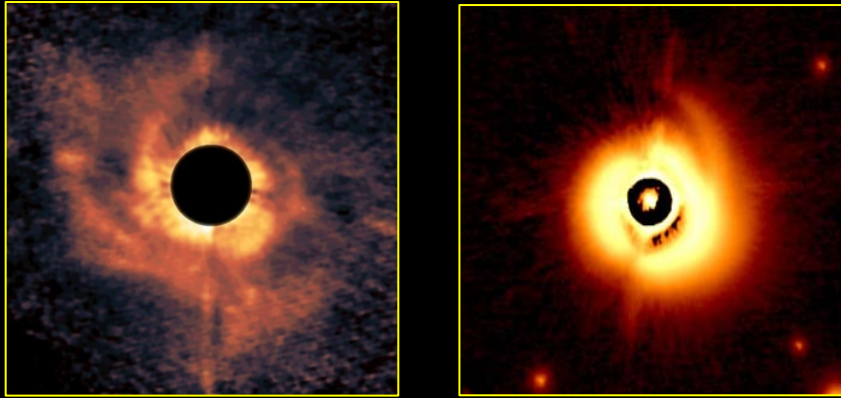
すばるの成果(光) その3

SEEDS: 直接観測への道

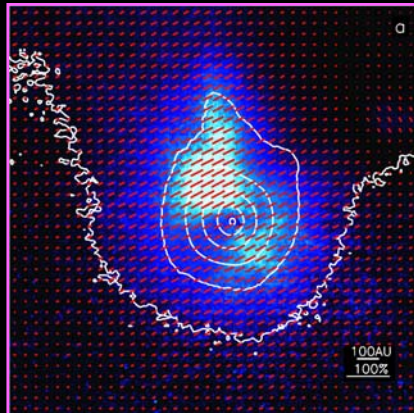
(国立天文台: 田村元秀氏)

すばる望遠鏡CIAO(チャオ)の成果： 円盤の形

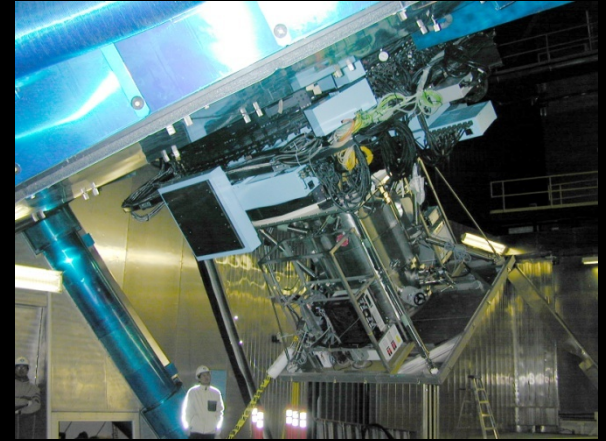
- ◆ 8m級望遠鏡で唯一の専用コロナグラフとして活躍
- ◆ シャープな画像で明るい天体の近くの暗い天体や構造を撮像



ぎょしゃ座AB星とHD142527星の円盤

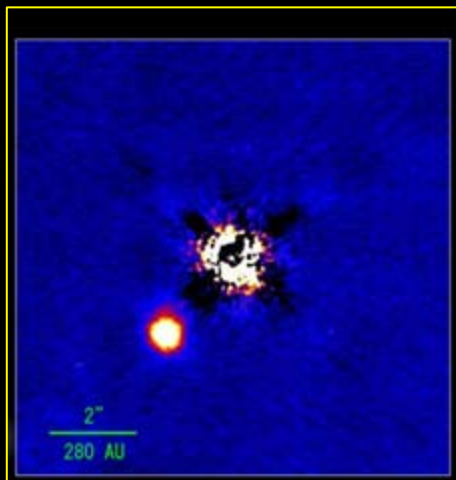


オリオンBN天体の赤外線のパolarizationの画像



- 惑星系形成の母体である円盤の形態の多様性を直接撮像で初めて解明
 - うずまき型, バナナ型, アームなど
- 標準的な惑星形成シナリオではない惑星形成(重力不安定性)の可能性？
- さまざまな質量(約0.1-10太陽質量)の若い星に星周円盤が存在することを偏光撮像で初めて示した

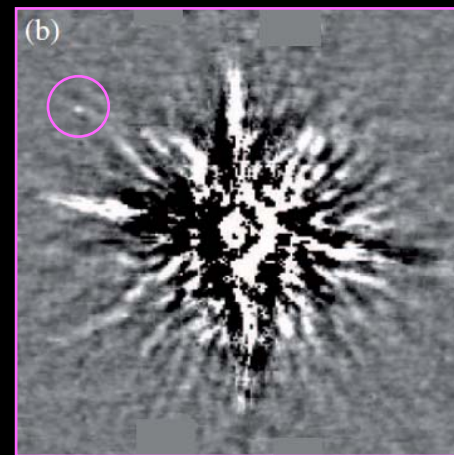
すばる望遠鏡CIAOの成果： 惑星の直接撮像



おうし座DH星の伴星



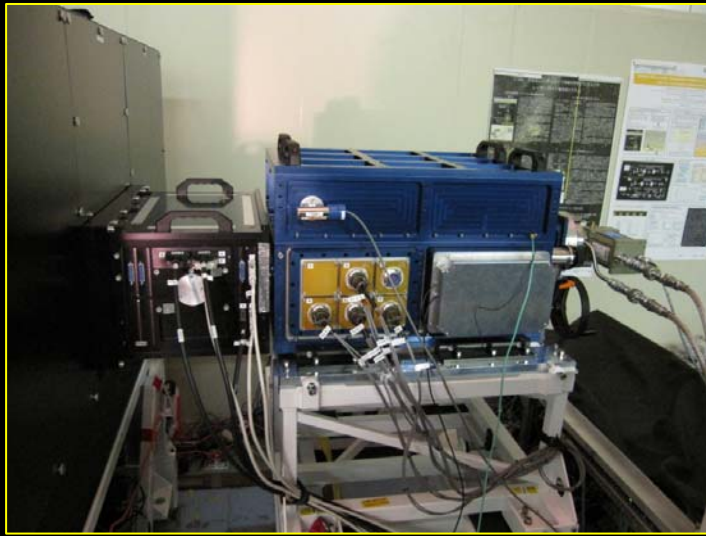
おおかみ座GQ星の伴星



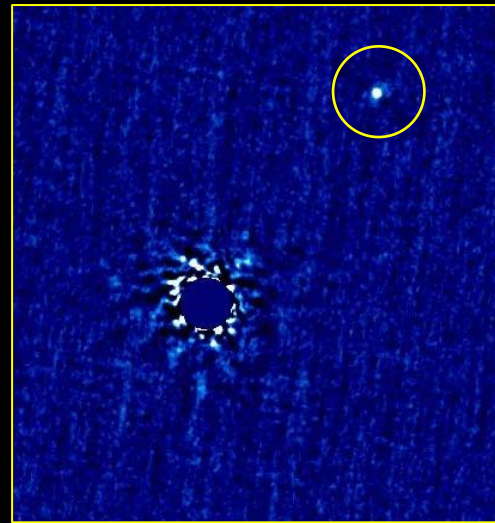
HR8799星の伴星（7木星質量の惑星候補）

- **2005年**: 主星から100–300AUの距離にある約10–20木星質量の伴星天体を直接撮像により発見
 - 惑星と褐色矮星の中間的な性質をもつ天体
- **2009年**: 過去(2002年)のデータに基づき、約7木星質量(68AU)の惑星候補を直接撮像で確認

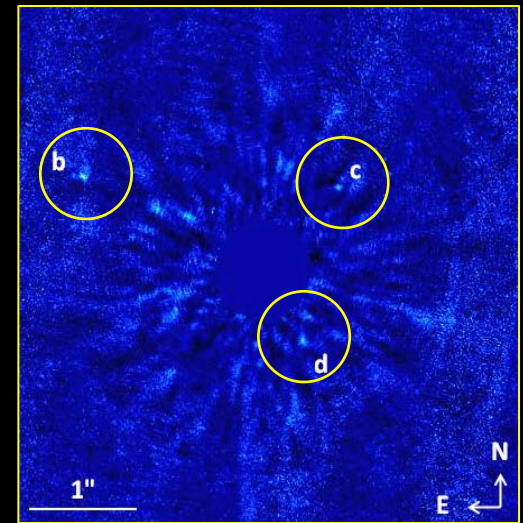
SEEDS(シーズ)プロジェクト: すばる望遠鏡の新装置 HiCIAO (ハイチャオ)による惑星の直接撮像



すばる望遠鏡のナスミス焦点に設置された
新規コリメータHiCIAOと補償光学AO188



左: 1RXS J160929星の伴星 (8木星質量)

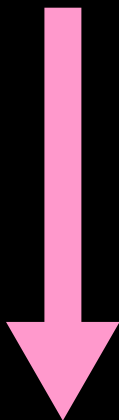


右: HR8799星の伴星 (7, 10, 10木星質量、9分積分)

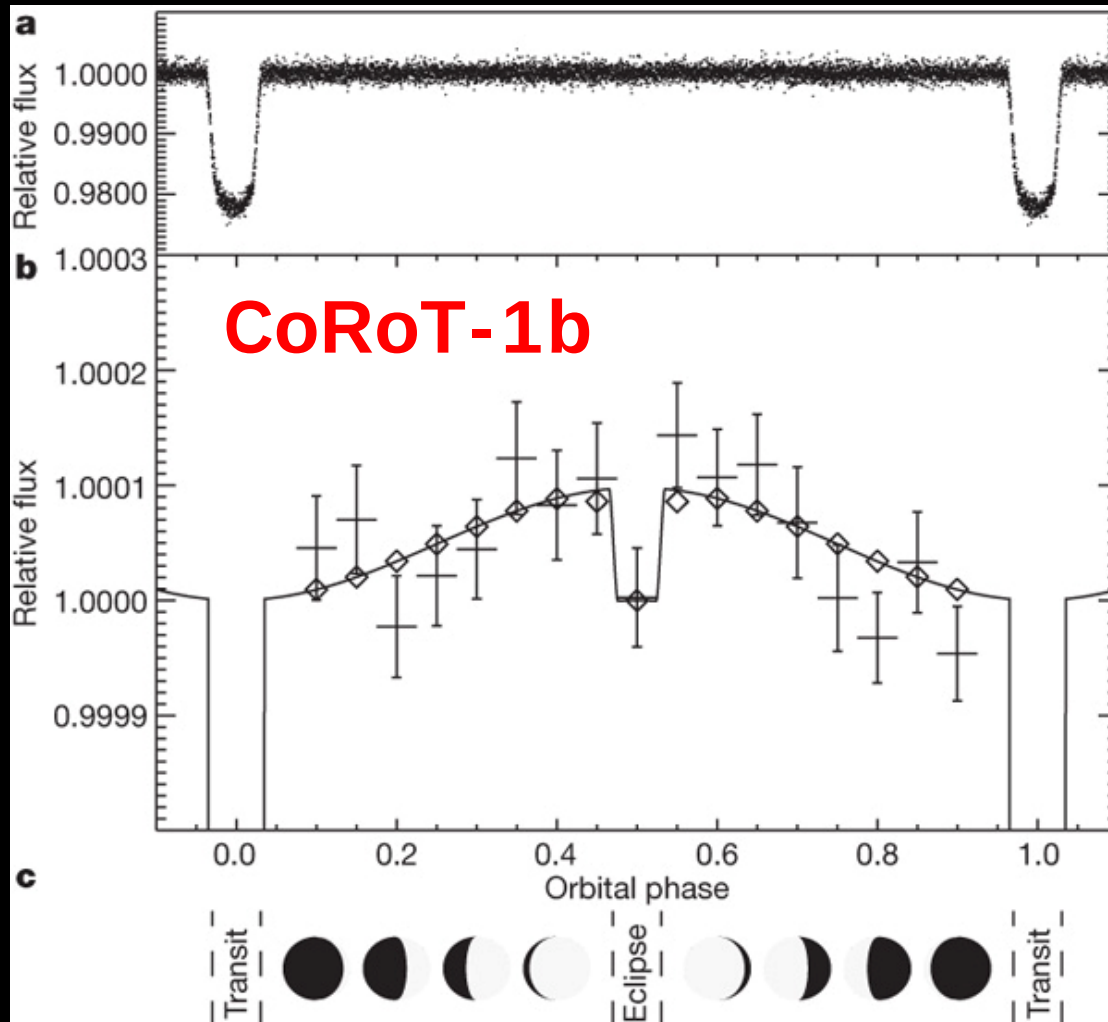
- CIAOの10倍以上の性能
- 惑星候補天体を(HR8799の3惑星も含め)わずか数分で検出
- 今後5年間で集中的に、直接観測により惑星・円盤を探索

系外惑星研究：影から光へ

- 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
 - 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



CoRoT-1bの反射光の検出

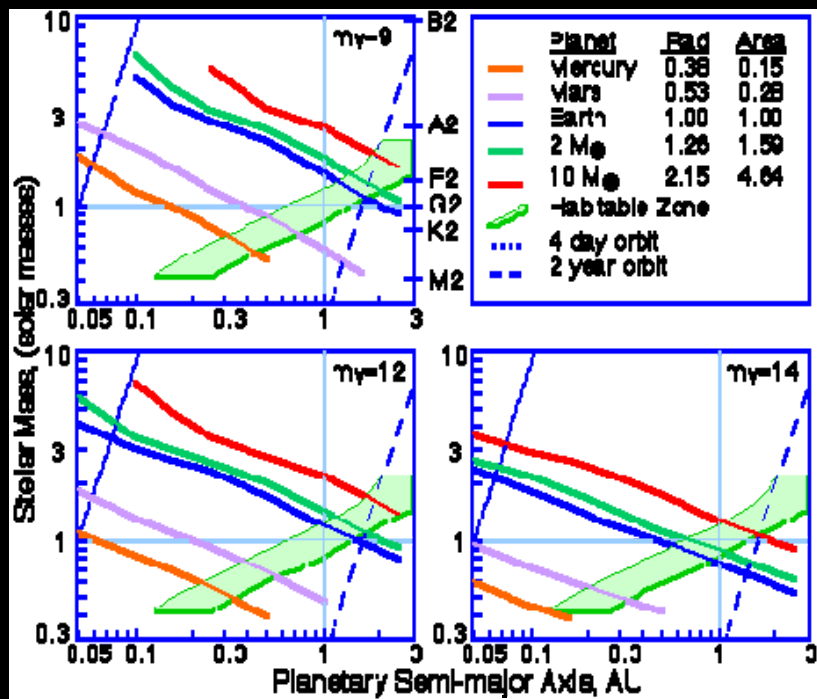


- CoRoT-1b: トランジット惑星(周期=1.5日)
- Convection, Rotation and planetary Transit (2006年12月27日打ち上げ)
- 55日間測光モニター
 - 反射光(7100 Å)検出
 - 表面温度 2430K
 - $0.02 < \text{albedo} < 0.2$

Snellen, de Mooji & Albrecht: Nature 459(2009)543

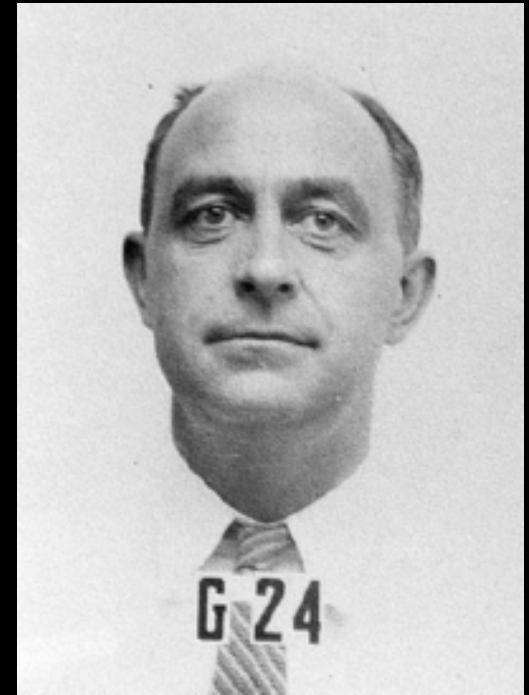
ケプラー衛星 (米国2009年3月6日打ち上げ)

トランジット惑星の測光サーベイ:
3.5年かけて地球型(±ハビタブル)惑星の発見をめざす



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

フェルミの疑問 (フェルミのパラドクス)



■ Where are *they*?

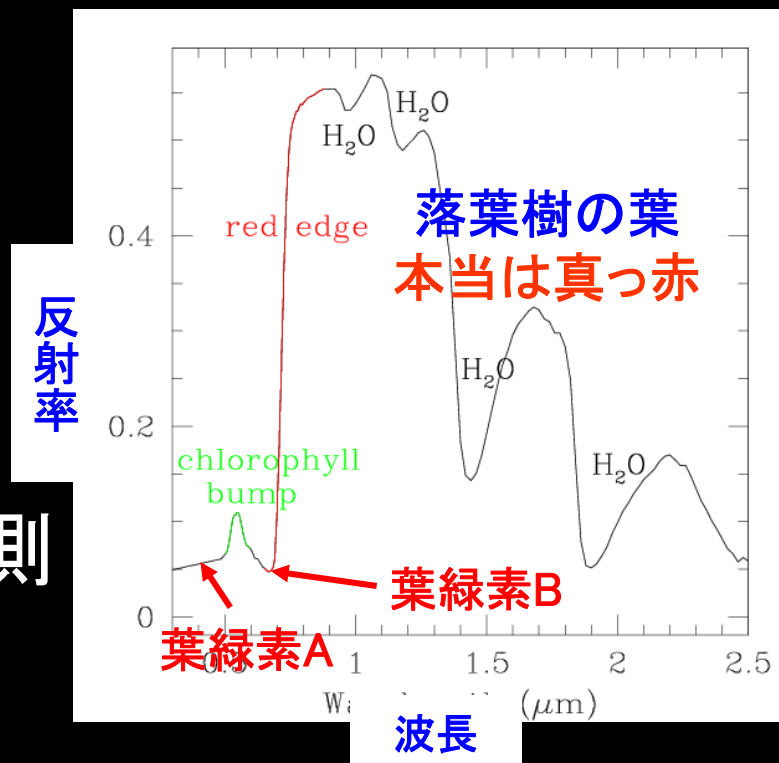
- 1950年、ロスアラモス研究所の
昼食時にエンリコ・フェルミが問い
かけたとされている

バイオマーカー（生物存在の証拠）の同定

- （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

■ バイオマーカーの探求

- 酸素、オゾン、水の吸収線
- 植物の **red edge**
- とにかく精密測光・分光観測



Seager, Turner, Schafer & Ford: astro-ph/050330

第2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

A pale blue dot

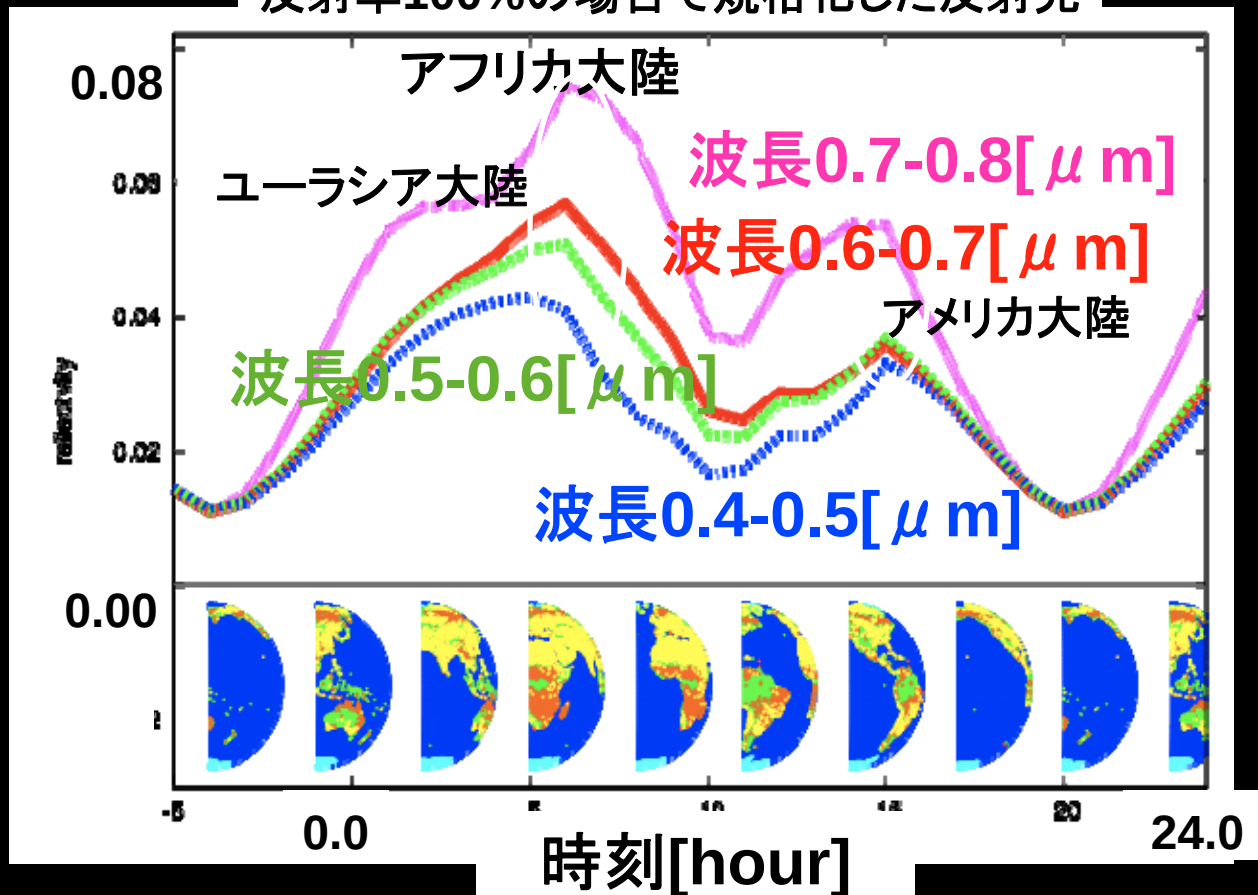


自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション

- 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

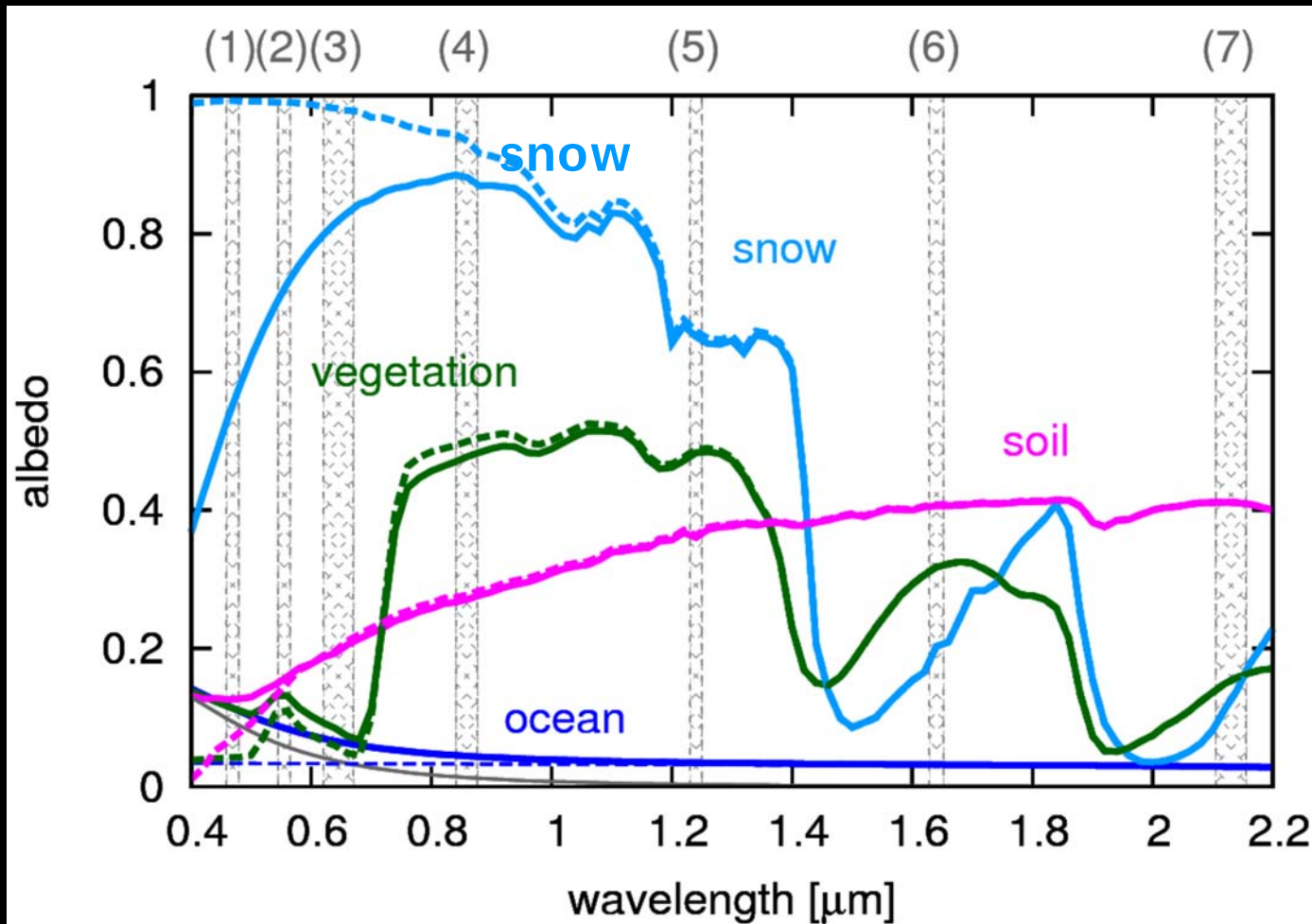
地球は青かった？

反射率100%の場合で規格化した反射光



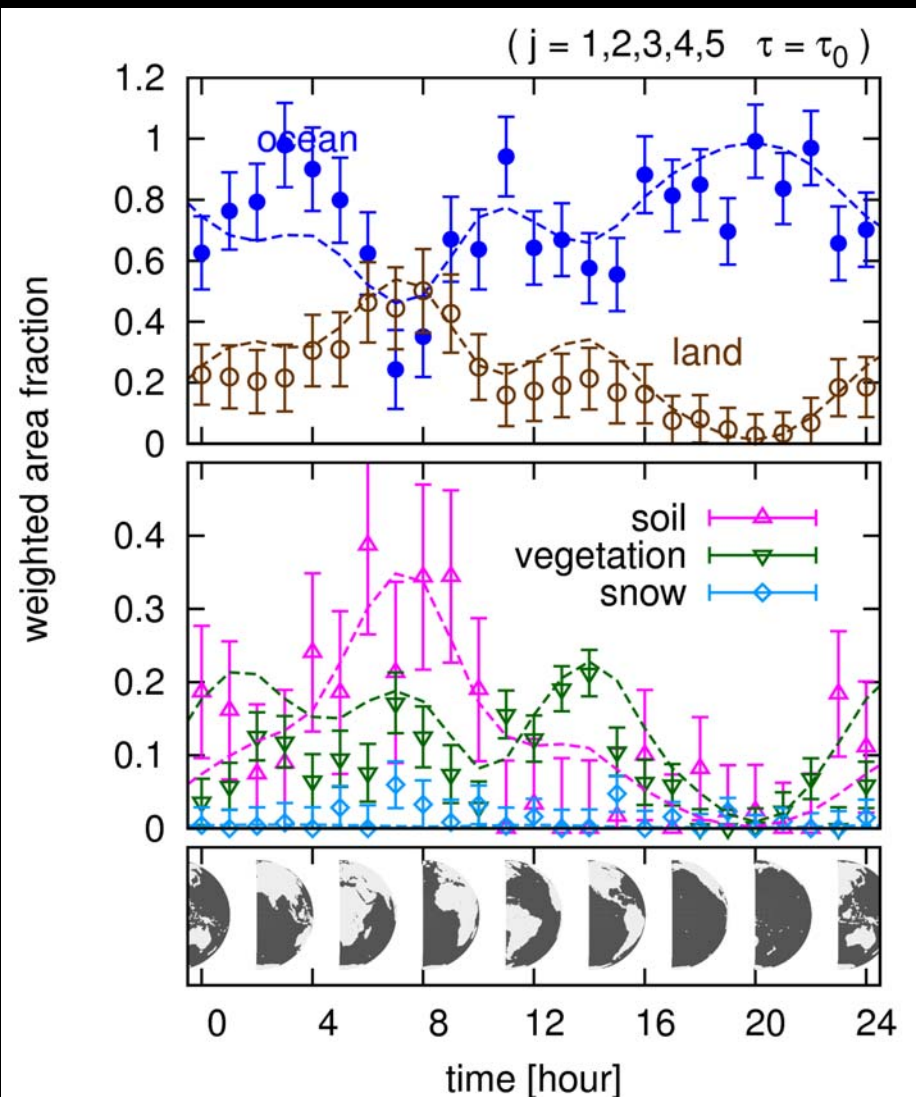
Fujii et al. (2009)

表面成分の反射率の波長依存性



- 空の青、海の色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

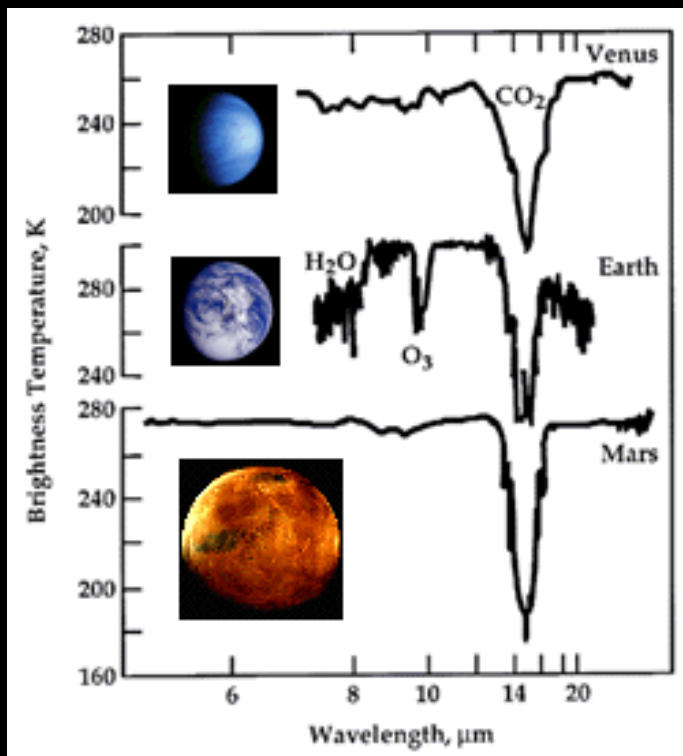
第2の地球の色から表面積を推定



Fujii et al. (2009)

- 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2mの宇宙望遠鏡で2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、海のをあに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
- 10年スケールで可能となる観測的ゴール

太陽系外惑星から宇宙生物学へ



- 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、植物、、、
- 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

今まで知らなかった世界をやがて発見できるのだろうか？
「やはり我々は何も知らなかった」とつぶやく日を夢見る

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

- 地球外植生の天文学的検出
- 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

文学部が存在する意義？

- 「文学部か、いいなあ」
- 「え、どうしてです」
- 「思い残すことがないでしょう」

私は《文学部しかない》と決めていて、それが何のためとは思わなかった。しかし、勉強が、それ自体のためというより、ステップであるということも当然あるわけだ。いや大学という存在の《機能》を考えたら、そちらの方が自然なのかもしれない。

北村薫『六の宮の姫君』(東京創元社)

- 「天文学か、いいなあ」
- 「え、どうしてです」
- 「思い残すことがないでしょう」

