

太陽系外惑星探査： 過去の10年、今後の10年



須藤 靖

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/>

2004年11月19日 東京大学理学部物理教室談話会

惑星と素粒子



日月火水木金土

- 古代ギリシャの4元説
 - 空気、土、火、水 (+ エーテル)
- 中国の五行説
 - (木、火、土、金、水) × (陽、陰)
 - 惑星の名前の由来
- 宇宙(惑星)と物質の起源を対応付けるのは人間の自然な発想？
 - 原子の土星モデル(太陽系モデル)
 - Nagaoka, H. Phil. Mag. 7(1904) 445-455
- 現在の素粒子的宇宙論の中核をなすアイディアは実は遥か古代から存在した！



太陽系外惑星が初めて発見されたのは、わずか10年前！

■ わが太陽系の拡大

- 1781年：天王星の発見
- 1846年：海王星の発見
- 1930年：冥王星の発見

■ 1995年：初めての太陽系外惑星の発見

- 約50光年先のペガサス座51番星の周り
- 一年(公転周期)がわずか4.2日の木星質量惑星
- 太陽系惑星とは全く異なる姿：すべてが予想外

■ 2004年11月18日までに133個の系外惑星

太陽系外惑星探査の方法

- 直接撮像：高角度分解能
- 主星の速度変動：高精度分光
- 主星の位置変動：高精度位置決定精度
- 主星の光度変動：高精度測光
- パルサーの信号到着時刻変動：
高時間分解能

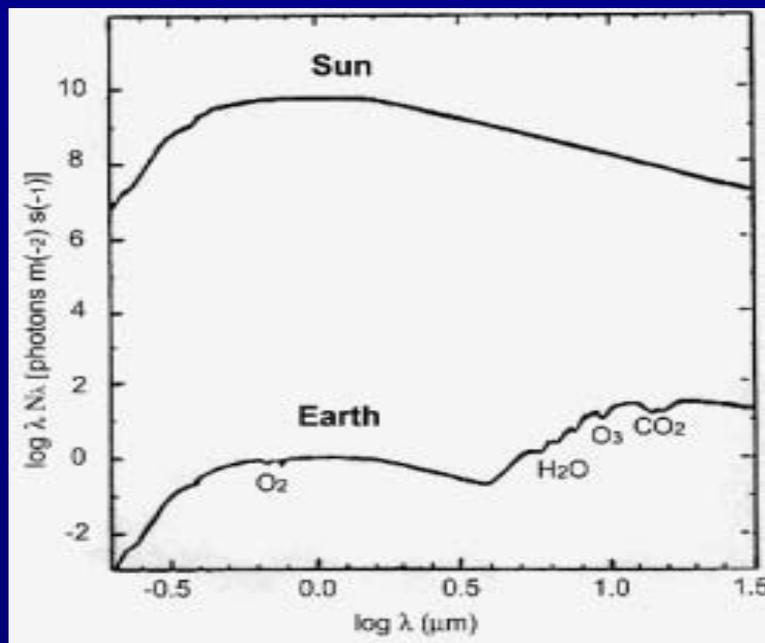
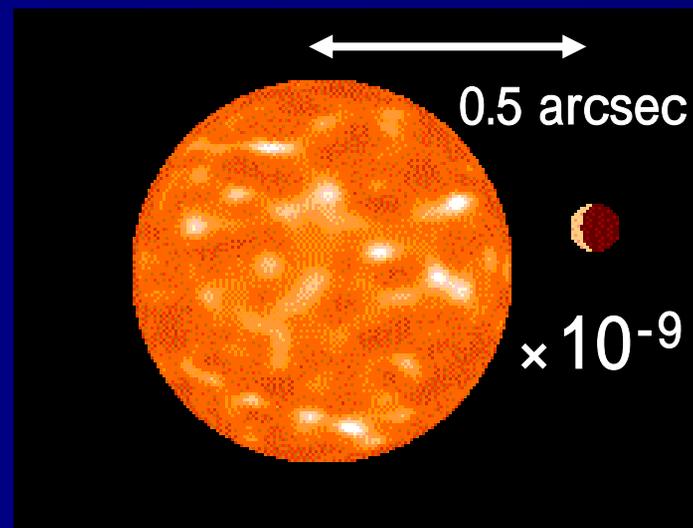
いずれも最先端の観測技術を要する

系外惑星は直接見えるか？

10pcから観測した木星

明るさ: 27等級(可視域)

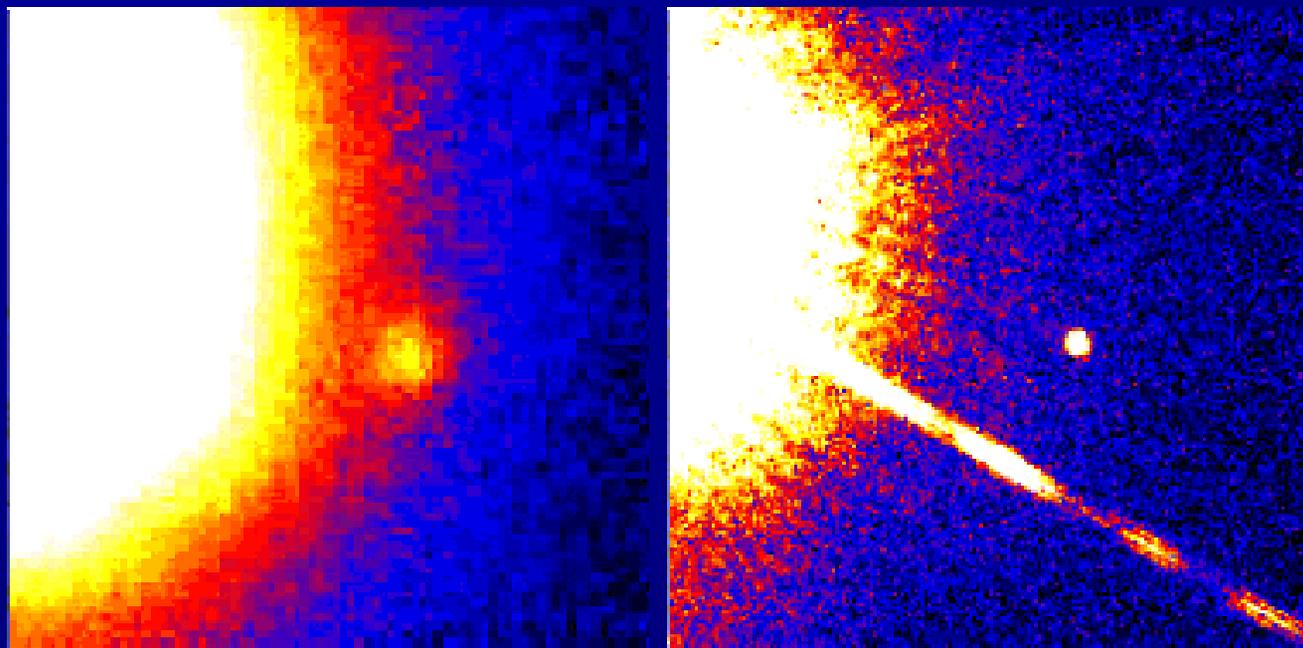
主星との角距離: 0.5秒角



地上観測の典型的な角度分解能の大きさ内で、9桁程度も明るい主星のすぐ隣にある27等級の暗い天体を観測する

ほとんど不可能！

褐色矮星の直接撮像例

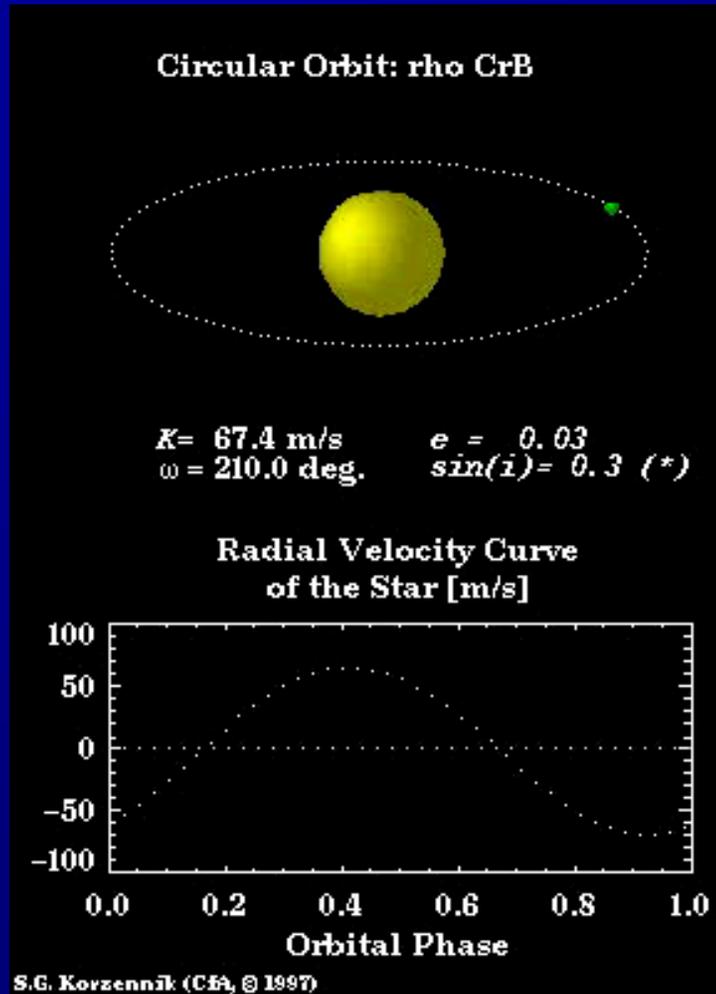


Gliese229 b:
角距離 7arcsec
光度比 5000

左: Palomar
右: HST
(国立天文台:
中島紀氏)

- 木星が10pcの距離にあるとすれば、これよりも14倍主星に近く、20万分の1暗くなる！

惑星を間接的に「見る」



もしも惑星があれば主星の軌道は影響を受ける

太陽の受ける速度摂動:

12.5 m/s (木星)

0.1 m/s (地球)

(参考) 地球の公転速度

3万 m/s

現時点での地上望遠鏡での分解能の記録は1m/s

(HARPS@3.6m ESO望遠鏡)

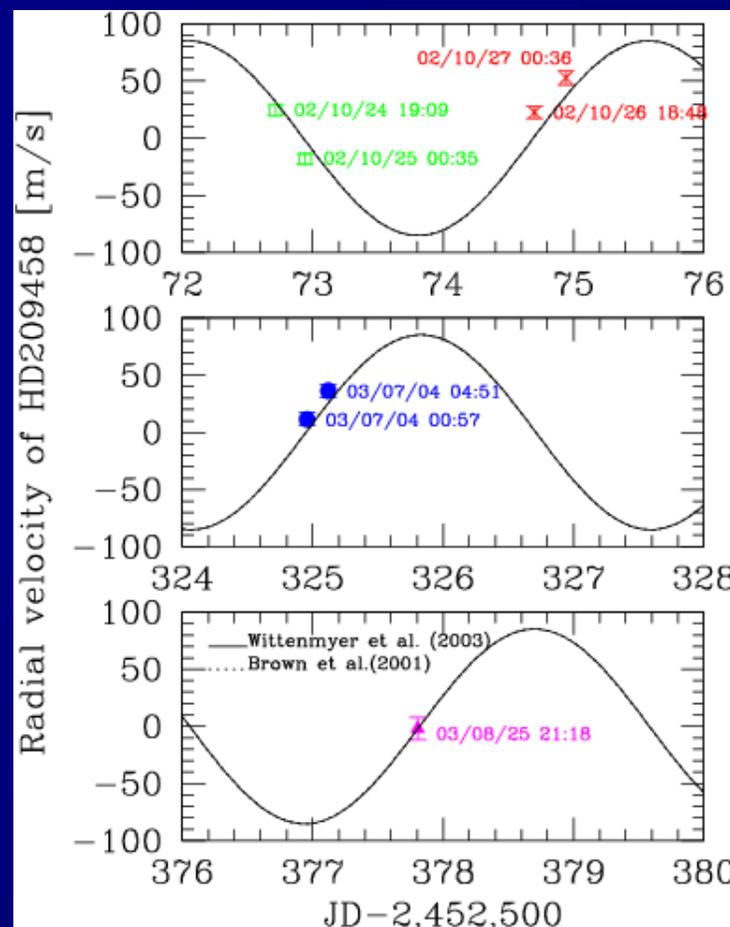
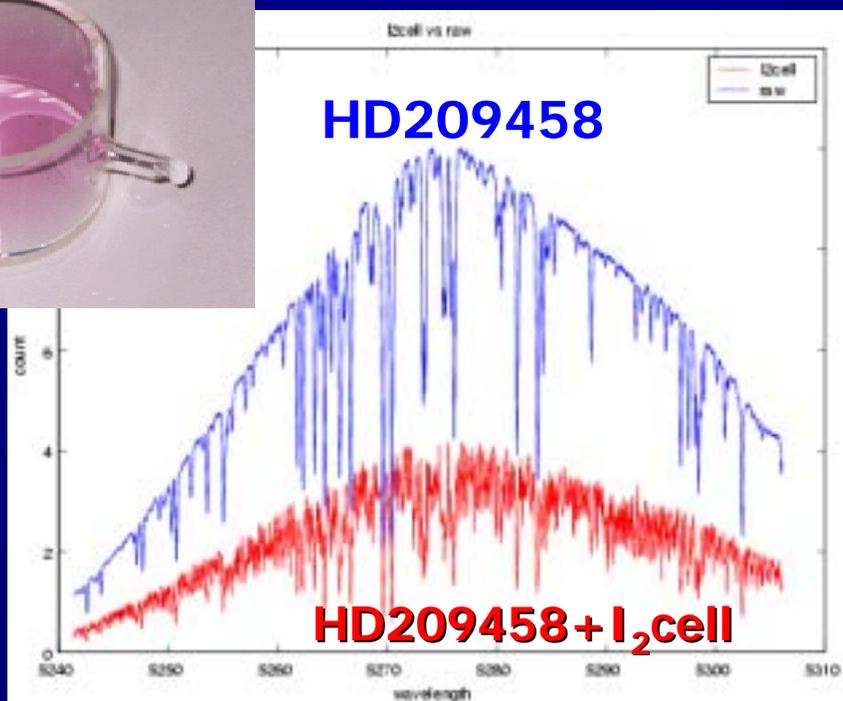
この方法によって、木星程度の質量の太陽系外惑星がすでに133個発見されている (2004年11月18日現在)₇

ヨードセルを用いたradial velocity測定

- 密集したヨウ素分子の吸収線を天体スペクトル中に焼きこんで、(相対的な)目盛りとして用いる
- 現在、すばるHDSでは4m/s 程度の精度が達成されている。

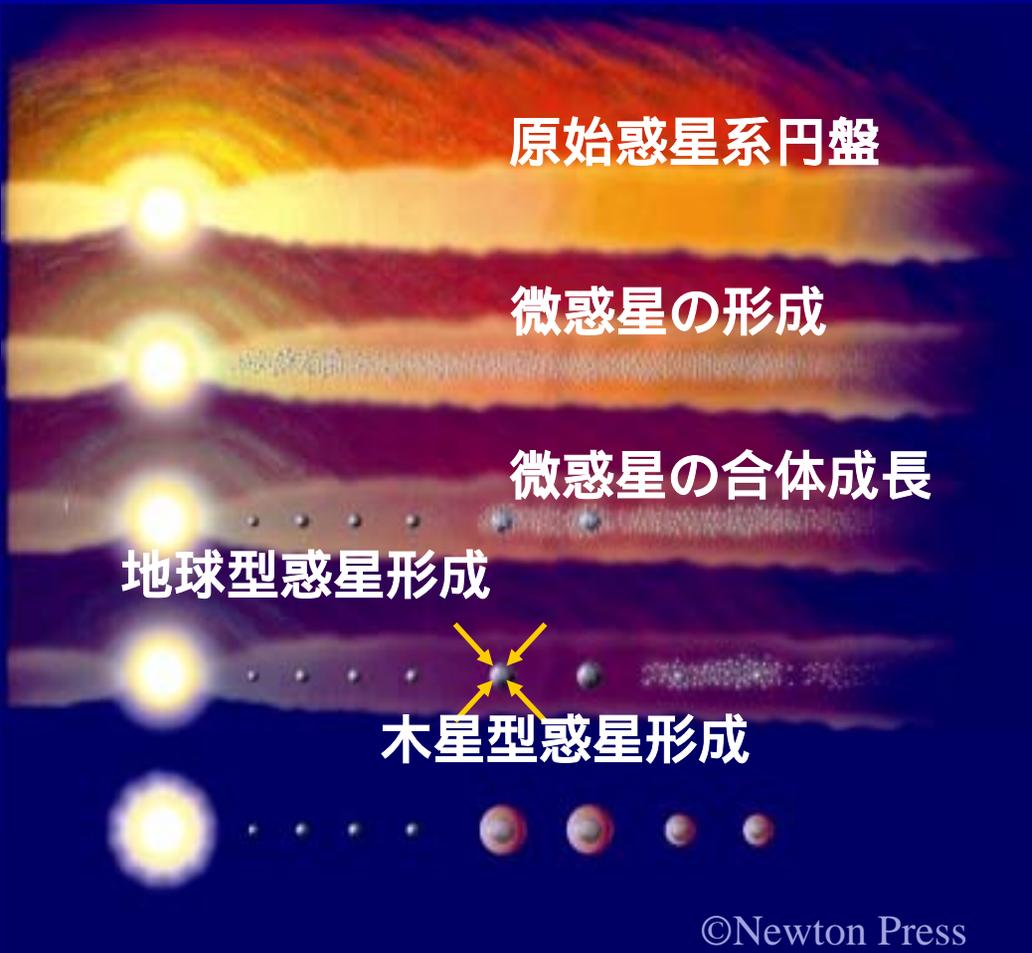


ヨードセル



Subaru/HDS

太陽系形成標準理論



- **京都モデル**
 - 林忠四郎@京都大学
天体核研究室
- **原始惑星系円盤**
 - H, Heガス: 99%質量
 - 固体成分: 1%の質量
- **微惑星仮説**
 - 固体成分がまず凝集
 - その後ガス成分が降着

©ニュートンプレス、井田茂@東工大

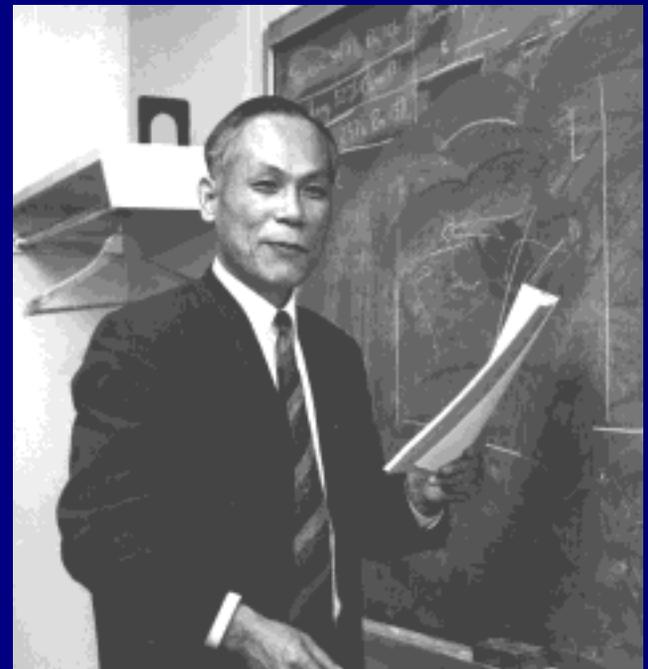
林忠四郎先生

- 1940年 東大物理学科卒業！
- 佐藤勝彦先生の先生
- 宇宙論、星の進化論、太陽系形成論においていずれも偉大な業績を成し遂げられた

■ *H.Kragh “Cosmology and controversy”*

(Princeton Univ. Press, 1996)

- P.126 The assumption that the ylem consisted only of neutrons simplified the picture of the earliest universe, but it was realized that it was merely as an assumption. **In early 1950, Chushiro Hayashi of Nanikawa University in Japan reconsidered the question** and suggested that at the very high temperatures in the initial phase of the expansion, other processes than radioactive neutron decay should also be taken into account... **Hayashi was the first of the rather few physicists who took an interest** in the work of Alpher and Herman, and his contribution was important in indicating a new insight into the isotropic composition of the early universe.



George Gamow

Erratum: Expanding Universe and the Origin of Elements

[Phys. Rev. 70, 572-573 (1946)]

G. Gamow

The George Washington University, Washington, D. C.

THE value of the space curvature entering into the formulae (1) and (3) must be considered to be expressed not in centimeters but in the units of the selected length l . Thus estimating the radius of curvature from the expression (3) we get the value of $1.7 \times 10^{-27} (-1)^{1/2} \times l = 1.7 \times 10^{-27} (-1)^{1/2}$ cm, or about two billion imaginary light years, instead of 0.2 imaginary light year as given in the Letter to the Editor. This does not change, however, the further arguments.

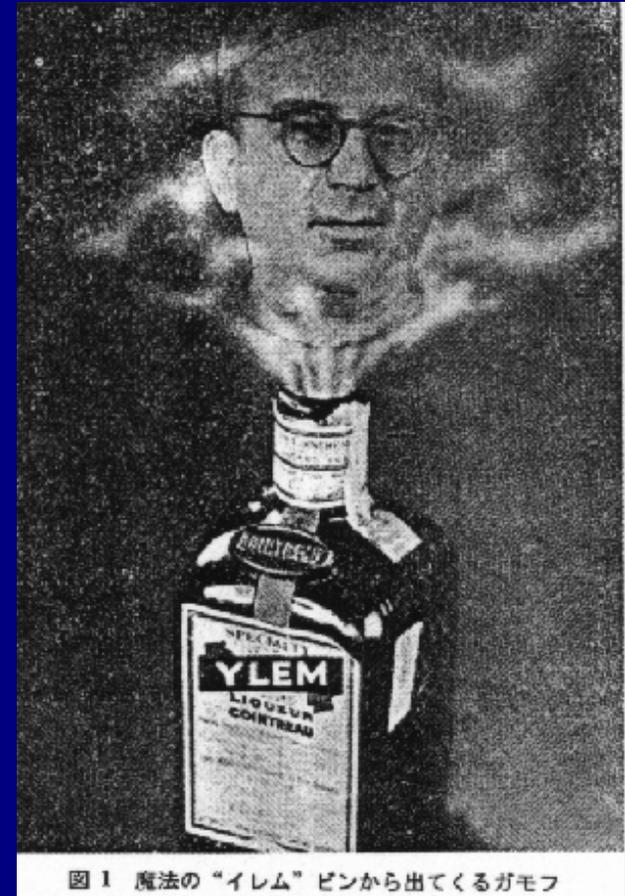


図1 魔法の“イレム”ビンから出てくるガモフ

H. Kragh “Cosmology and controversy”

- P.138 **With the exception of Hayashi, no one outside America contributed to the big-bang theory.**

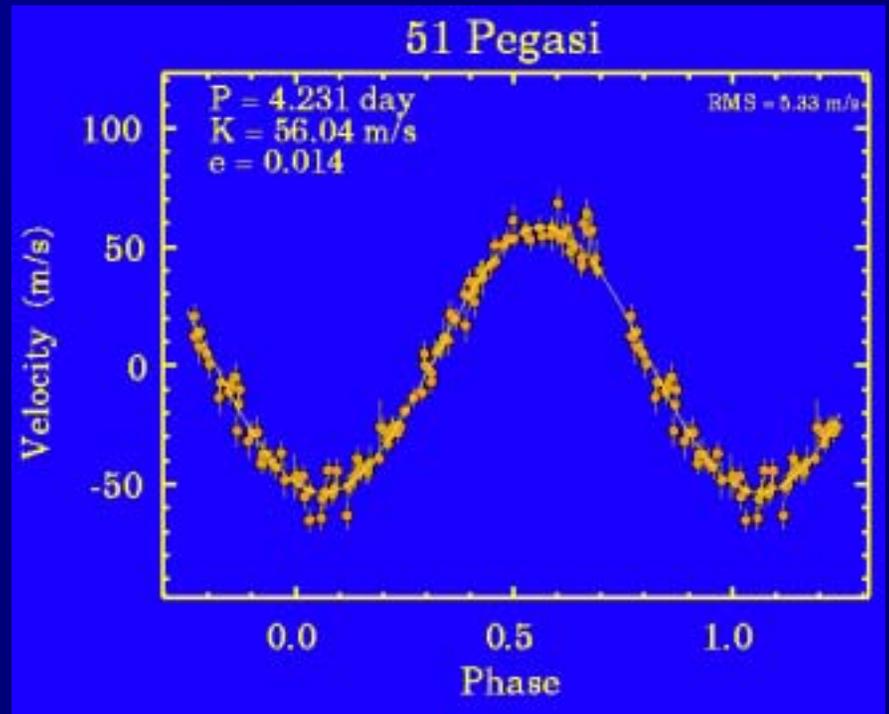
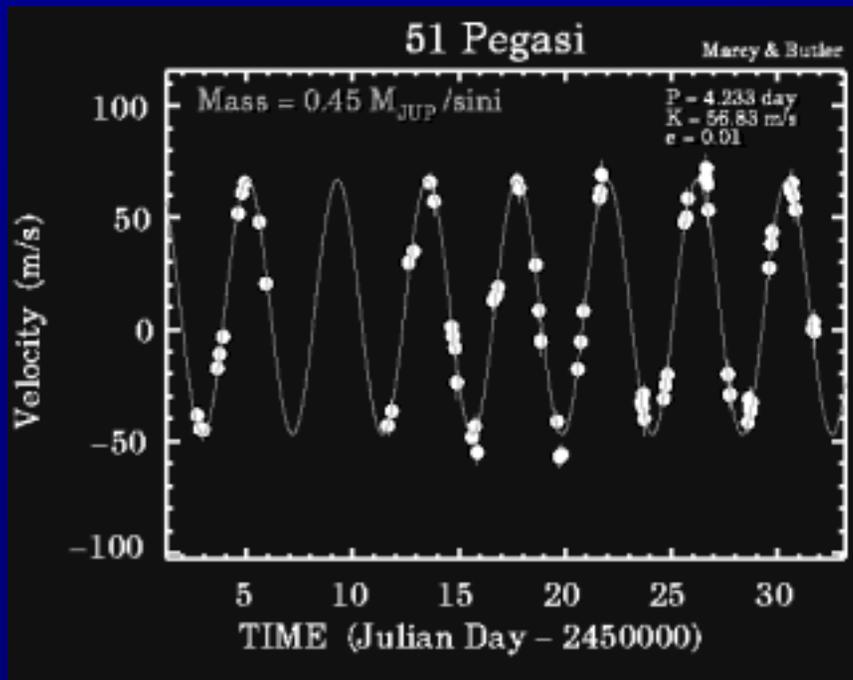
Furthermore, it is noteworthy that the physicists involved in the program were East Coast or Chicago physicists with, in most cases, personal connections to Gamow.

太陽系外惑星：過去の10年

- 1995年：主系列星周りの系外惑星の発見 (51Peg)
- 1999年：系外惑星のトランジット発見(HD209458)
- 2001年：惑星大気の新検出(ナトリウム)
- 2003年：惑星から蒸発する水素大気の新発見
- 2003年：公転周期1.2日のトランジット惑星発見(OGLE)
- 2004年1月：惑星大気中に炭素と酸素を検出
- 2004年4月：周期1.4日、1.7日のトランジット惑星発見
- 2004年8月：14地球質量の惑星発見(氷/岩石惑星?)
- 2004年11月18日時点で133個の系外惑星が報告済み

51 Pegasi b: 太陽と同じような恒星 (主系列星) を周る惑星の初発見

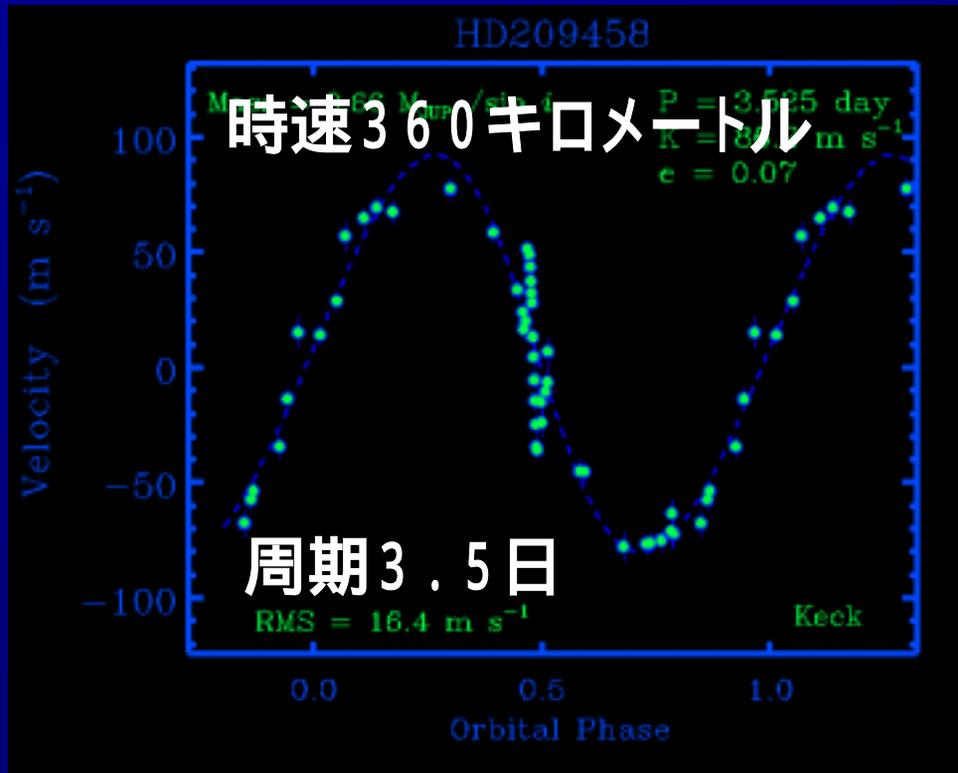
- 主星の速度変動の検出によって初めて発見された惑星 (Mayor & Queloz 1995)



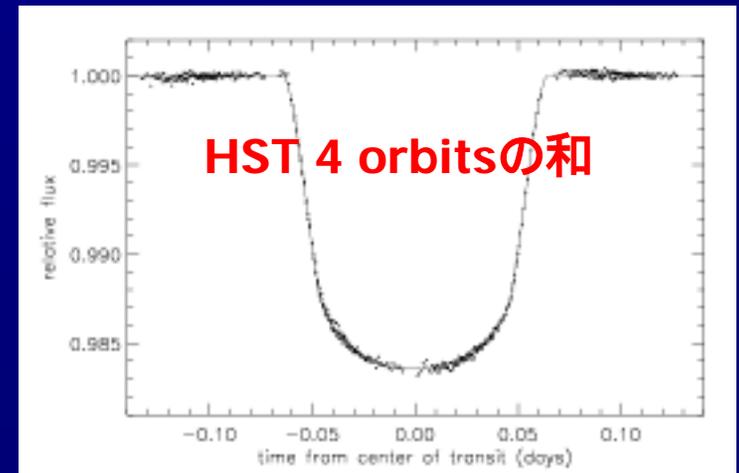
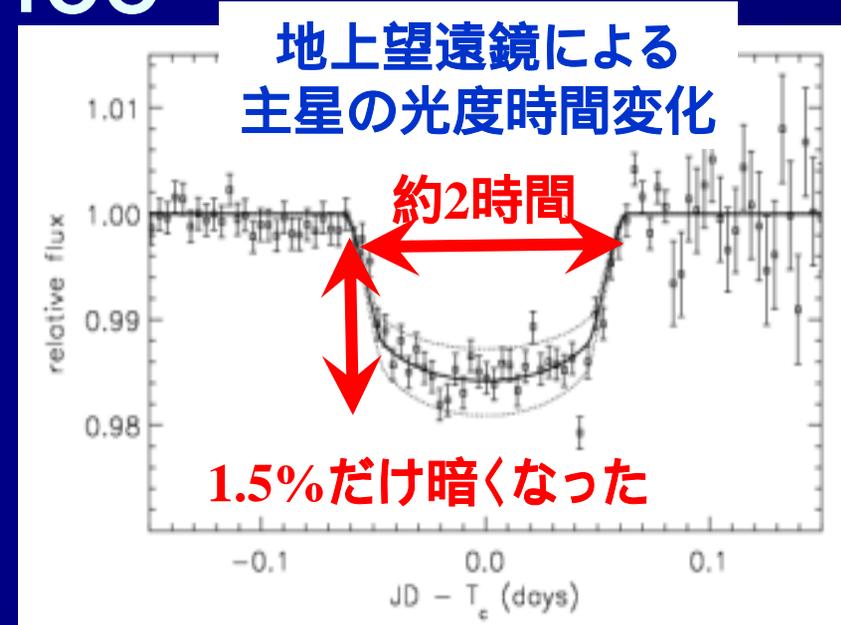
周期がわずか4.2日！

太陽系外トランジット(食)惑星 HD209458

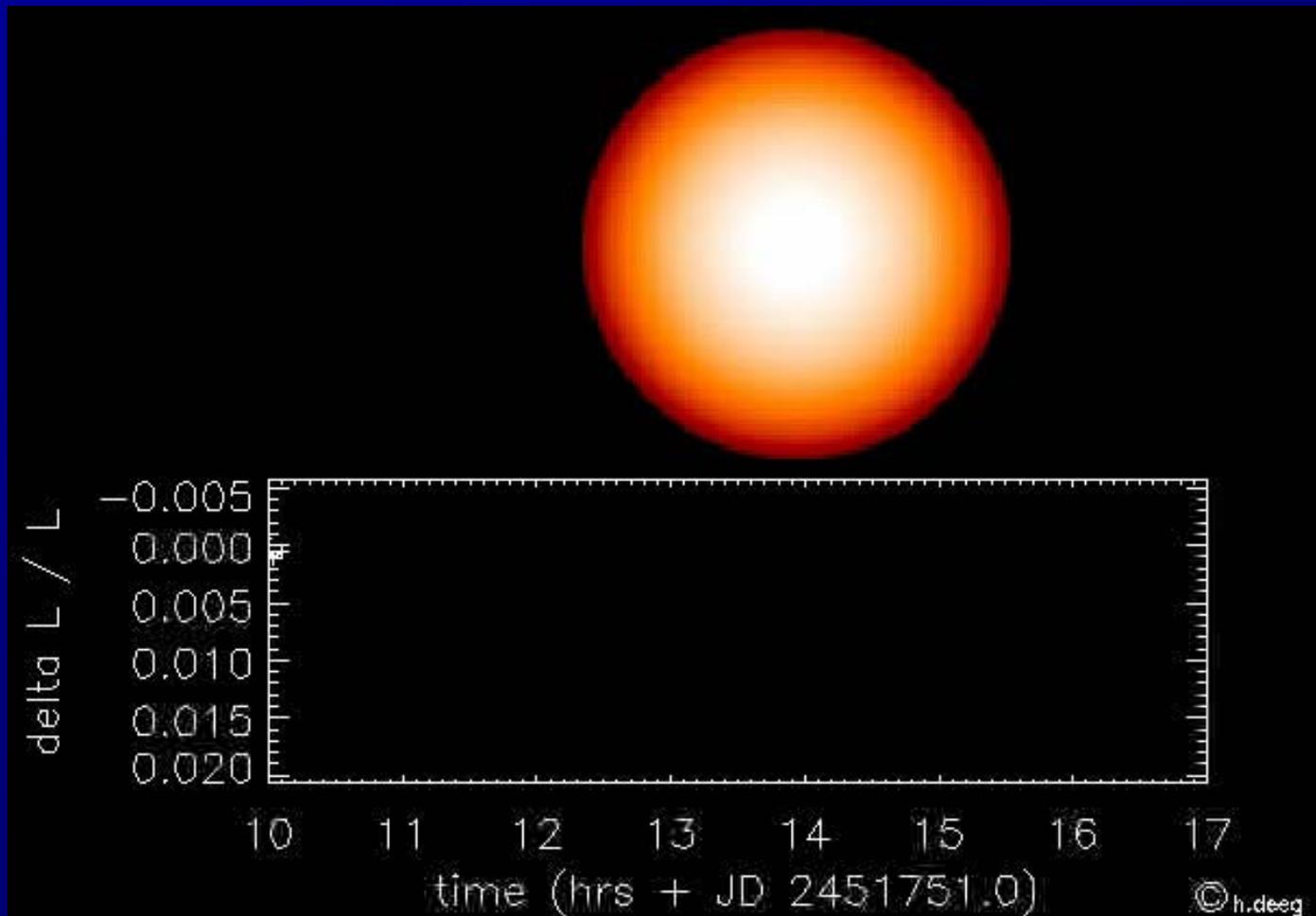
- 速度変動のデータに合わせた惑星食の初検出



地上望遠鏡による
主星の速度時間変化



HD209458の食



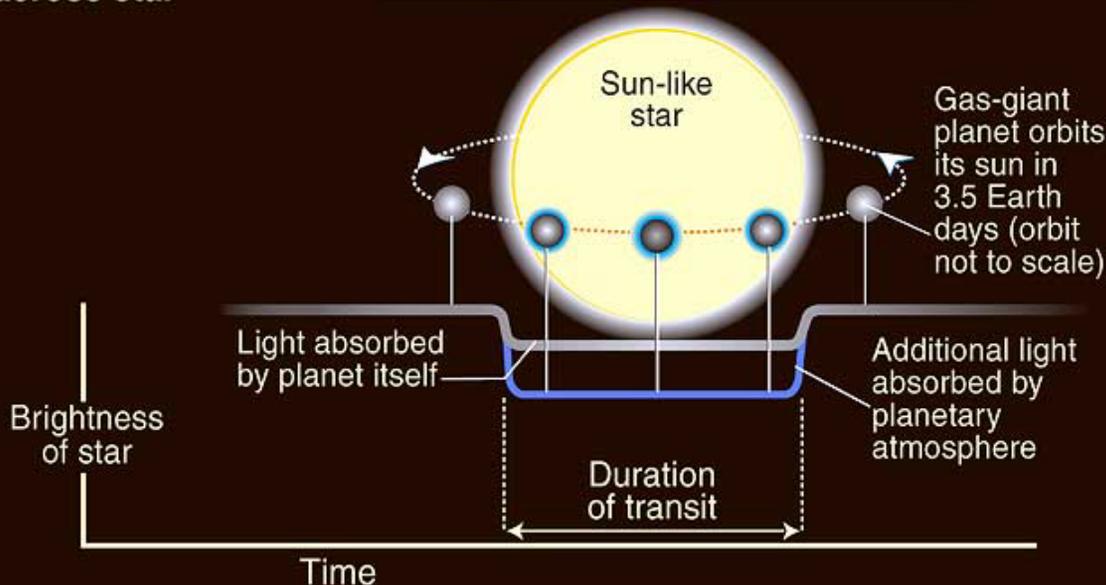
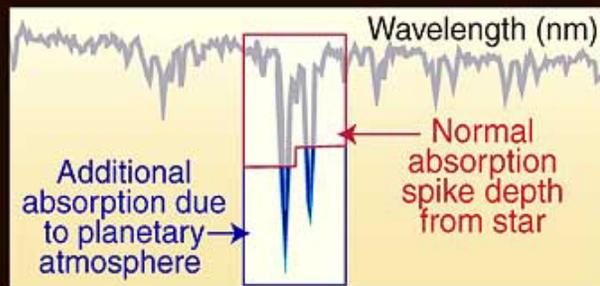
トランジット惑星の重要性

- 速度変動を惑星のためとする**解釈の正当性**
- 食の光度曲線より**惑星のサイズ**がわかる
 - 速度変動データとあわせて惑星の密度がわかる
 - ガス惑星？ 地球型？
- 惑星大気による吸収より**大気組成**がわかる
- 主星の自転軸と惑星の公転軸の関係がわかる(角運動量の起源): **ロシター効果**
- **測光観測だけで系外惑星候補を選ぶことが可能**
 - 今後(より遠方)の惑星探査の有効な手段
 - 速度変動は分光観測を要するため効率が低い
 - アマチュアによる(だからこそ可能な)長期継続モニター観測によって、より外側の惑星の発見につながる可能性も

HD209458b 惑星大気の 初検出

[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



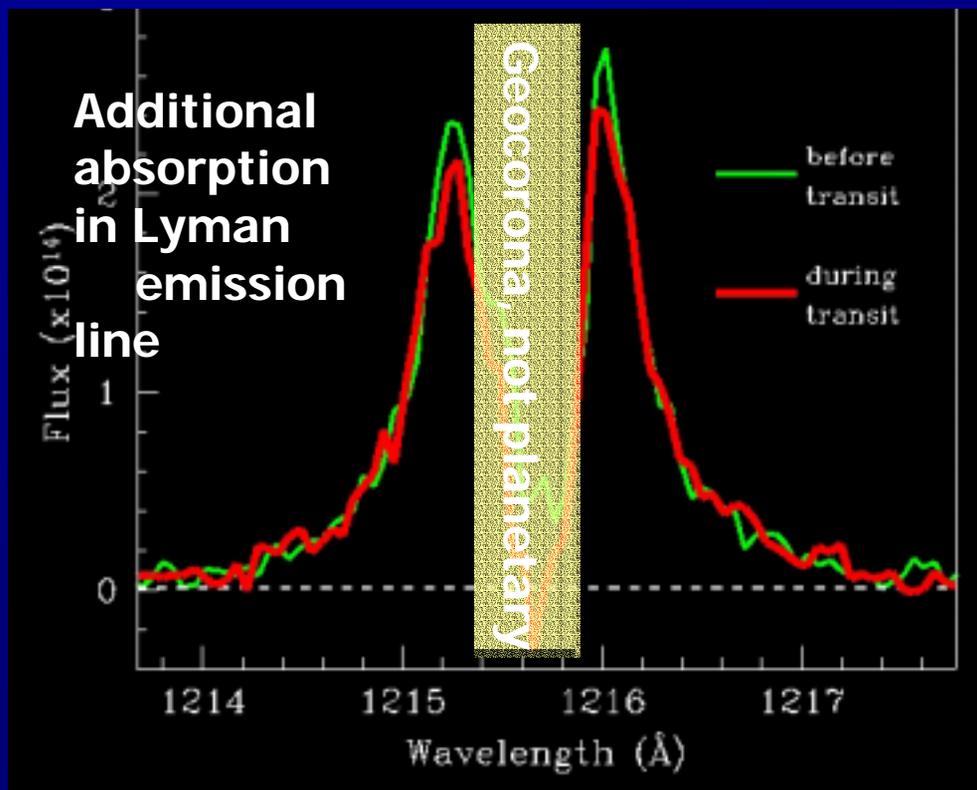
■ 2000年 系外惑星の食を初検出

- 惑星の大きさがわかる
- 木星程度の質量という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の存在を発見

HD209458b : 蒸発 しつつある惑星？

予想以上に大きい水素の吸収(15%)
惑星を広くとりまく中性水素雲？



Vidal-Madjar et al. Nature 422(2003)143

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/2003/08/>

HD209458惑星系のパラメータ推定値

Radial velocity データ + *transit* データ

HD209458 (主星)	スペクトル型 Vバンド等級 表面温度	G0V 7.58 (距離=47pc) 6000度
HD209458b (惑星)	公転周期 <i>軌道面傾斜角</i> 質量 半径 密度 有効温度 <i>大気組成</i>	3.52474 ± 0.00004 日 <i>86.68 ± 0.14 度</i> 0.63 木星質量 <i>1.347 ± 0.060 木星半径</i> <i>0.4g/cc (< 土星密度)</i> 1400度 <i>ナトリウム、水素、 炭素、酸素の存在が報告</i>

系外惑星観測の先駆者たち

fighting spirit



G. Marcy

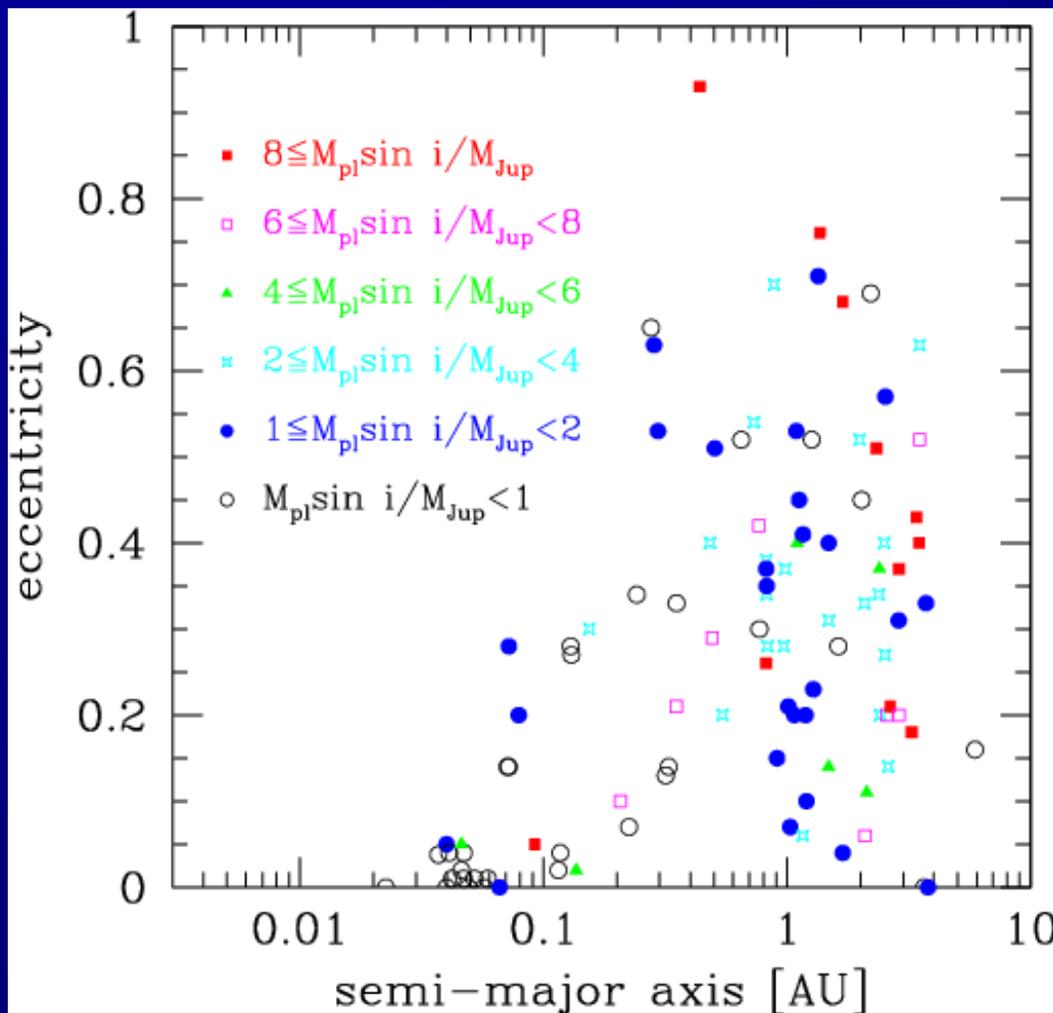
invincible



M. Mayor

Nov. 4, 2004 @ Banquet, post-Nishinomiya-Yukawa symposium

太陽系外惑星の軌道分布関数

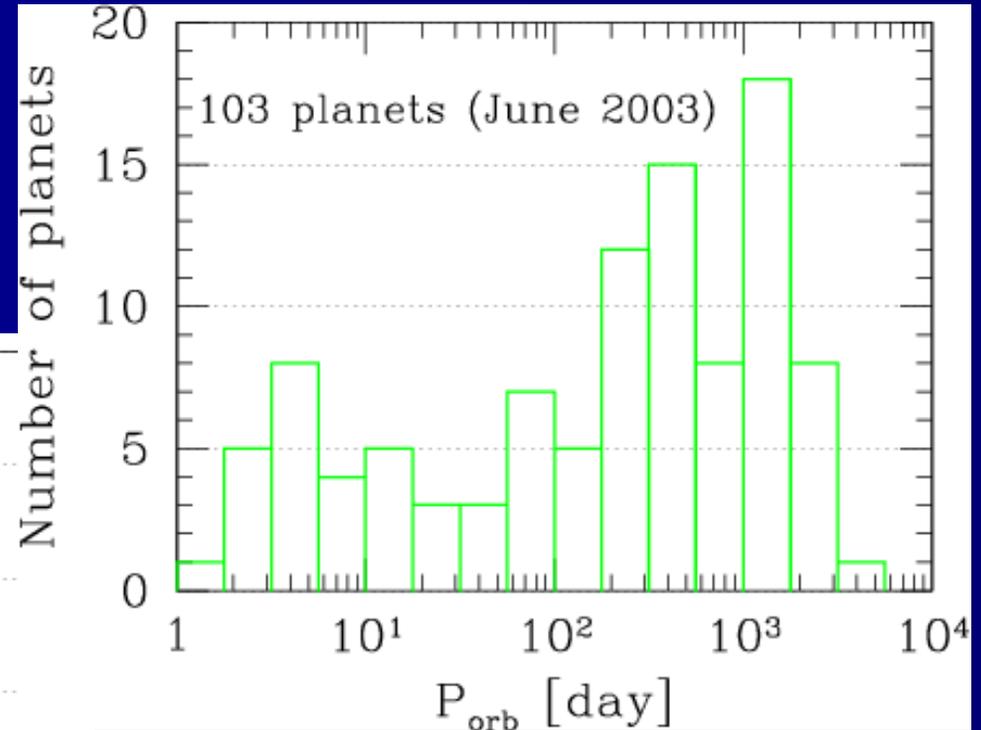
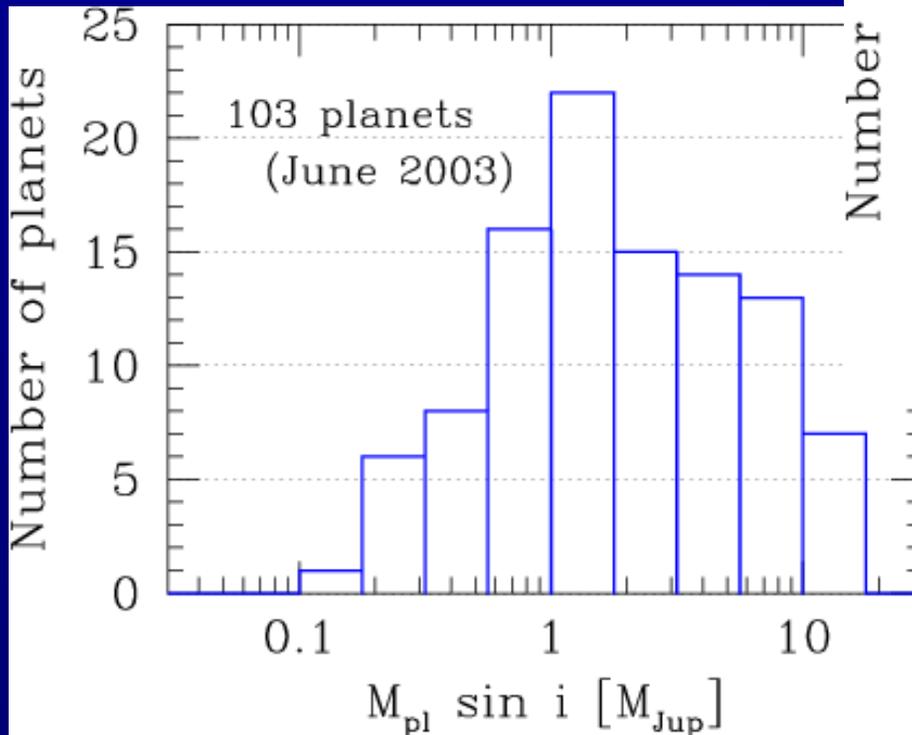


- 円軌道から大きくずれた軌道が多い (ただし、0.1天文単位以下の半径では円軌道に近い)
- 1天文単位以下の半径をもつ木星質量の惑星が大量に存在 (食の観測例から考えるとこれらはガス惑星であろう Hot Jupiter)

我々の太陽系とは全く異なる： 惑星系の多様性

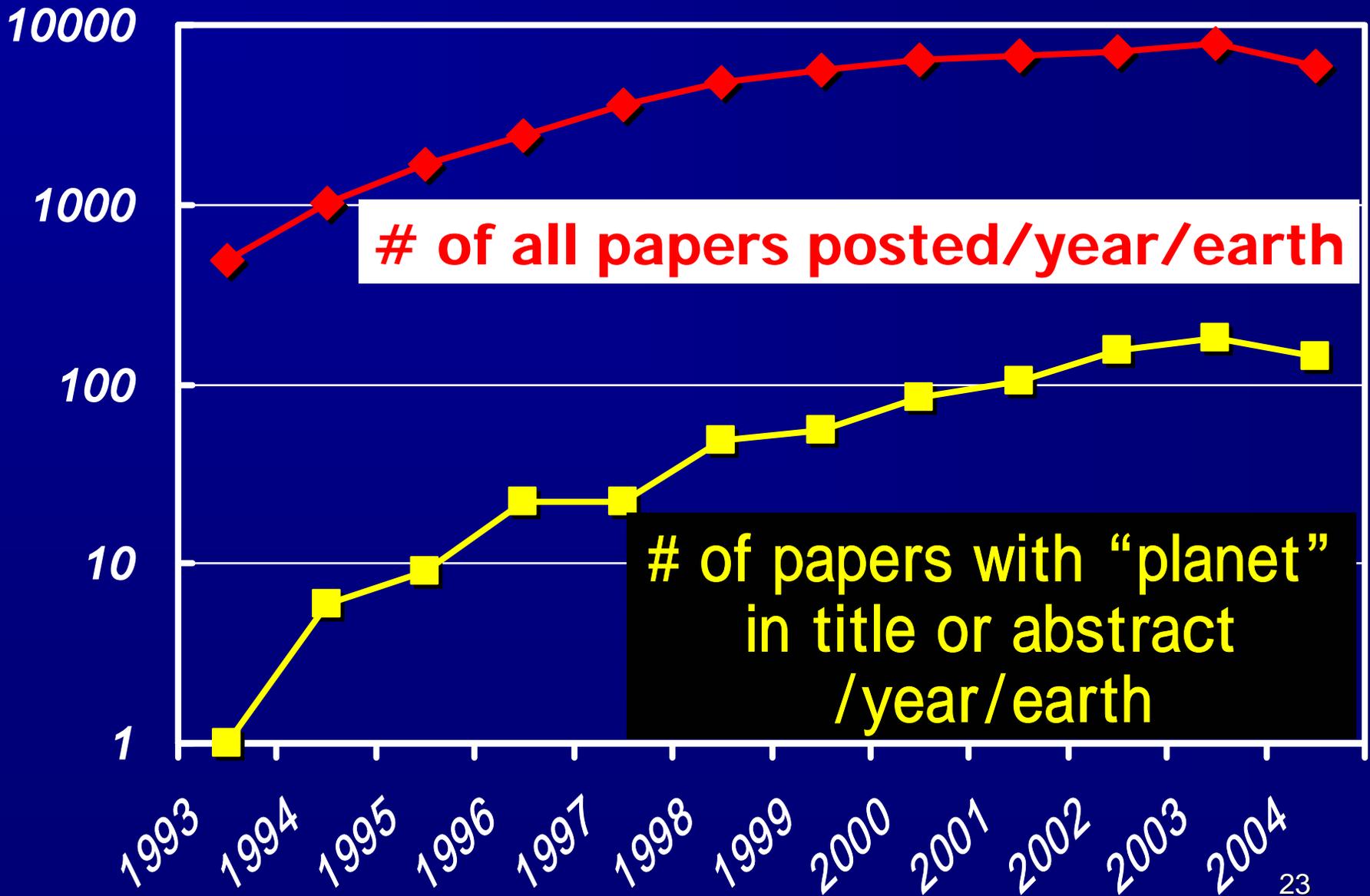
太陽系外惑星の質量・周期分布関数

これらはまだ観測の選
択効果を受けており、真
の分布とは異なる



astro-phにみる太陽系外惑星研究の興隆

Terrestrial paper formation history



2000年11月10日物理教室談話会

THE DETECTION AND CHARACTERIZATION
OF EXTRASOLAR PLANETS

Ed Turner

Princeton University Observatory

すばる望遠鏡 による挑戦



太陽系外食惑星HD209458bからの
反射光の超高分散分光観測
2002年10月、2003年7月、8月

須藤 靖、成田憲保 (東京大学)

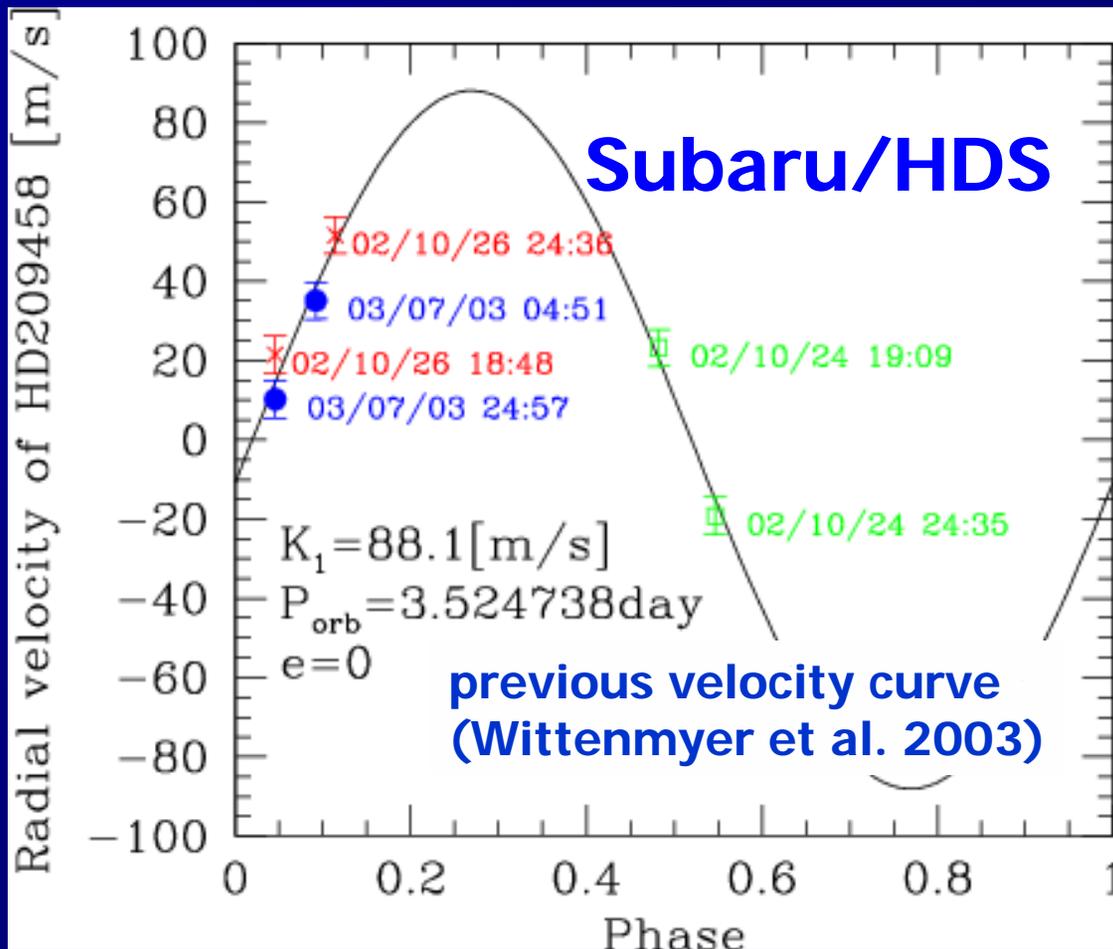
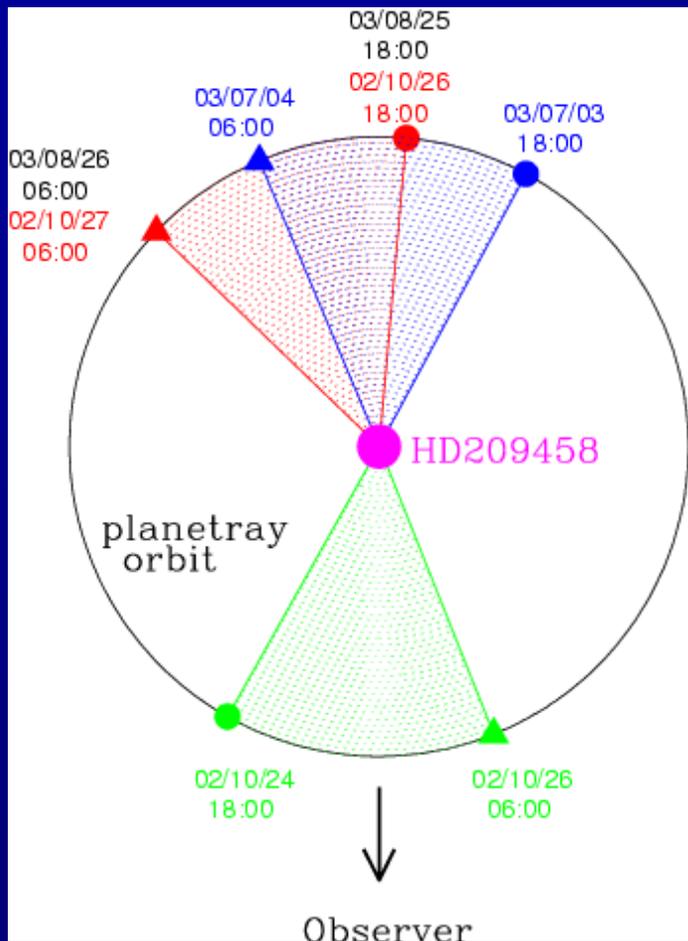
青木和光、山田亨 (国立天文台)

佐藤文衛 (神戸大学)、Josh Winn (Harvard Univ.)

Edwin Turner, Brenda Frye (Princeton Univ.)



HD209458bの位相とradial velocity



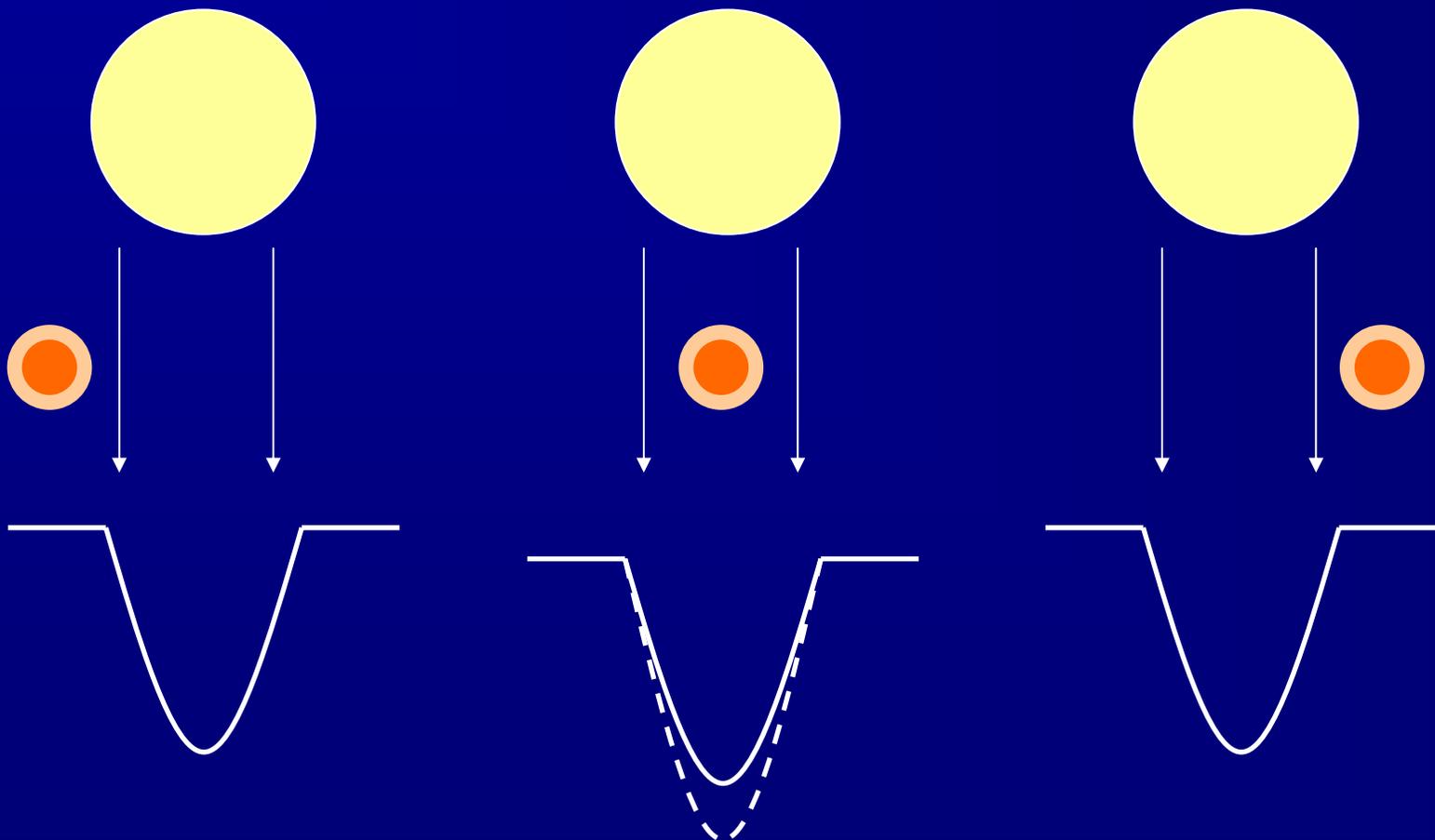
Winn et al. PASJ 56 (2004) 655

現在進行中の3つのHDSプロジェクト

1. 地上からの太陽系外惑星大気初検出を目指す
 - H 吸収の解析は終了、現時点では上限値のみ
 - Winn et al. PASJ 56 (2004) 655
 - 他の吸収線の解析 (成田 修士論文)
2. Transit中の星のradial velocity高精度観測による星の自転パラメータと惑星軌道パラメータの制限 (Rossiter-McLaughlin 効果)
 - 解析的テンプレート公式の導出 (Ohta, Taruya & Suto 2004; [astro-ph/0410499](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0410499))
 - すばる望遠鏡観測提案
3. 太陽系外惑星反射光の初検出を目指す
 - St. Andrews大学のグループと共同で解析中

惑星大気の差分分光解析

Transitをそれぞれの吸収線で見ると



惑星大気中の元素の存在量を探れる

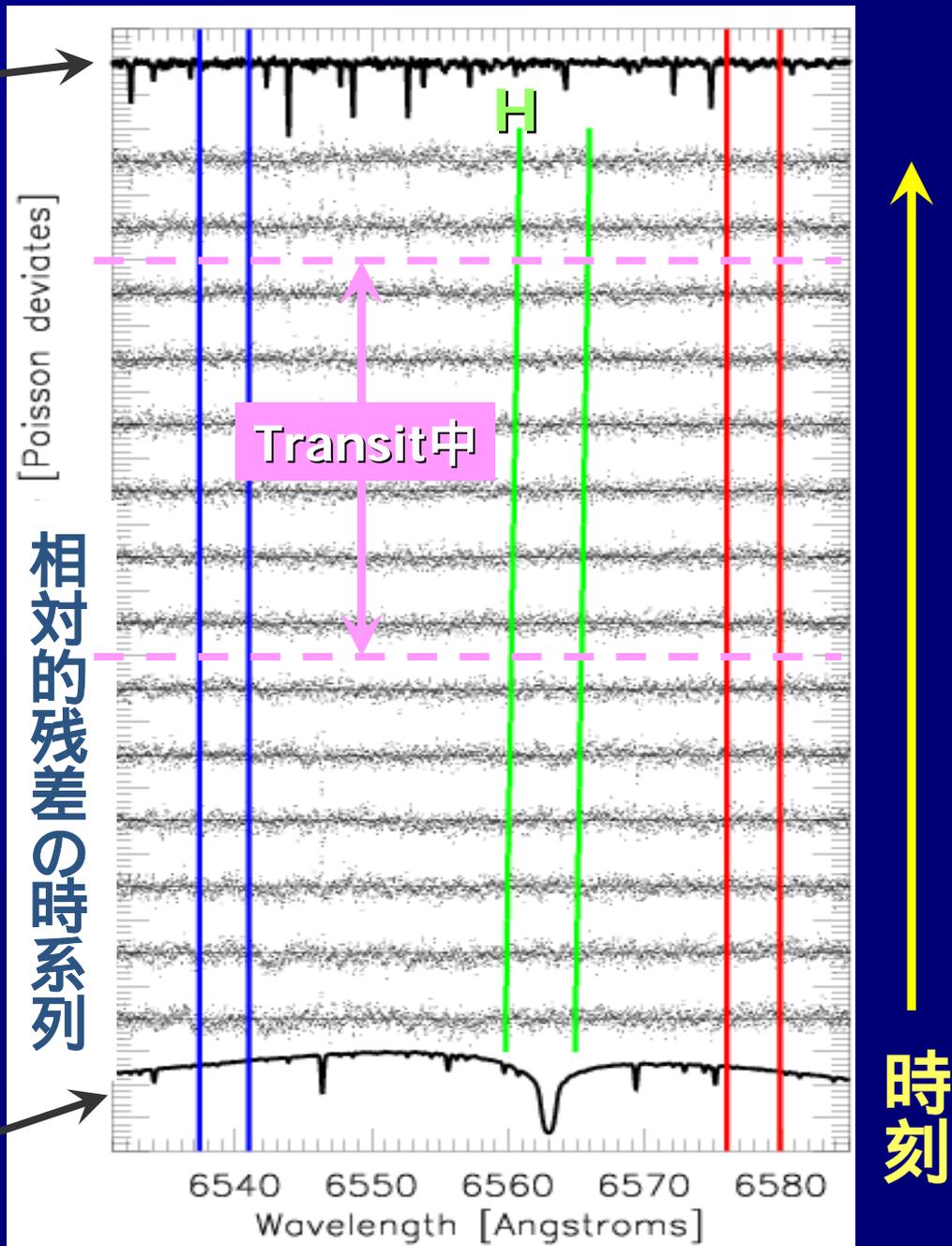
HD209458b 惑星大気による 吸収の探査

H 付近の
地球大気スペクトル

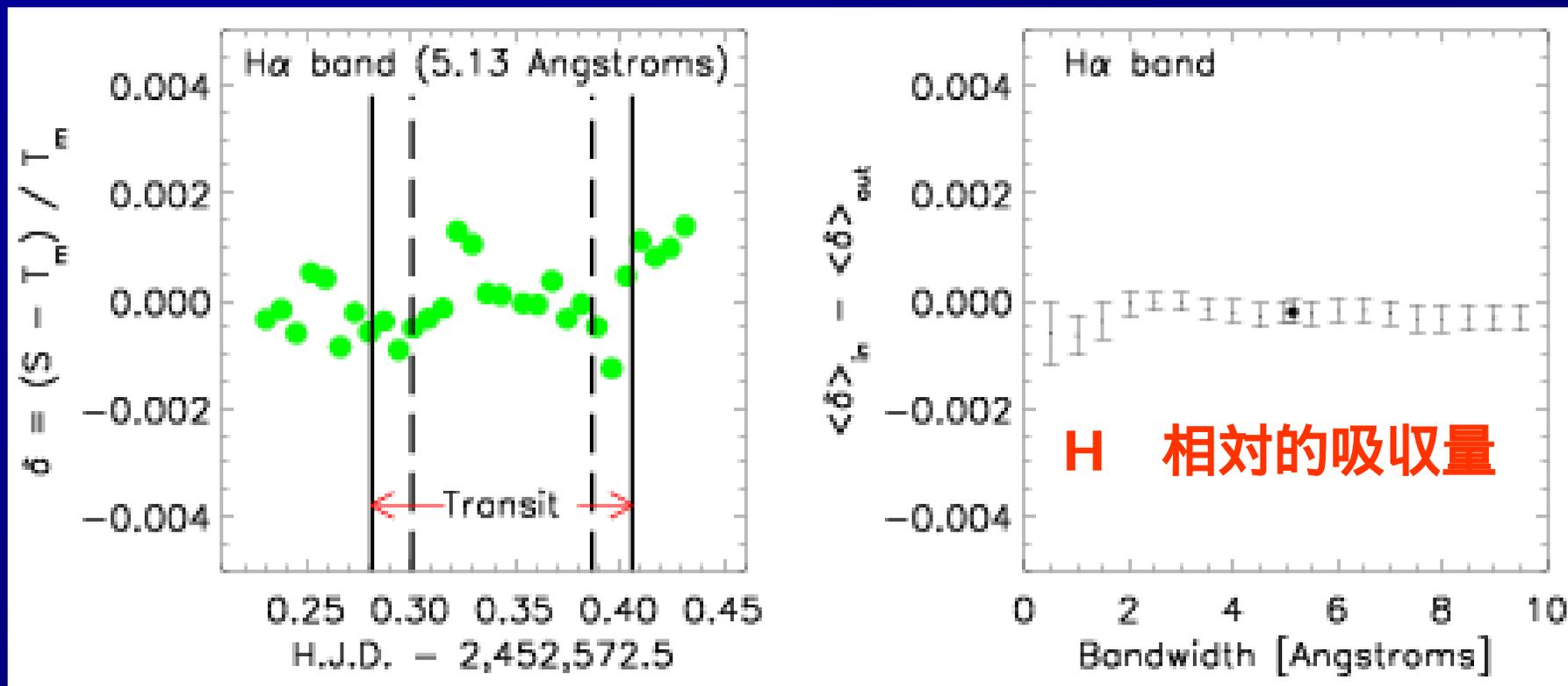
Na I (D2)	5889.97
Na I (D1)	5895.94
H	6562.81
H	4861.34
H	4340.48

Transit でない時期の
H 付近のスペクトル

(Winn et al. 2004)

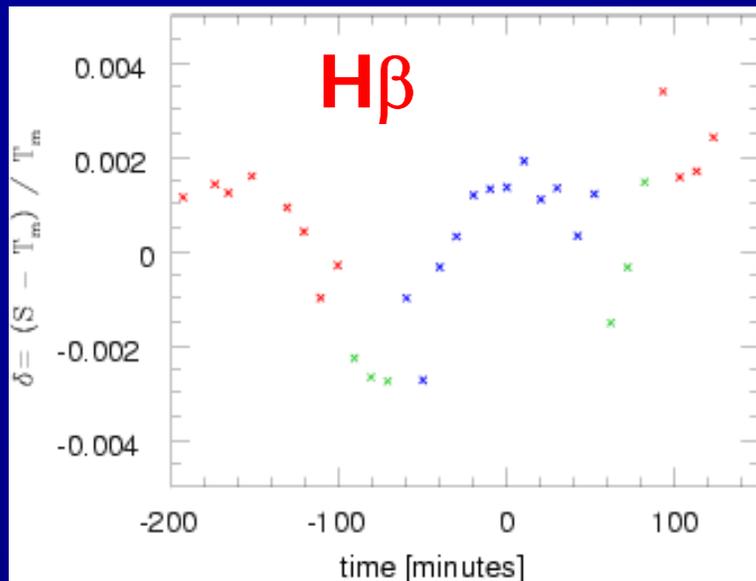


HD209458 b 惑星大気中の中性水素吸収量上限

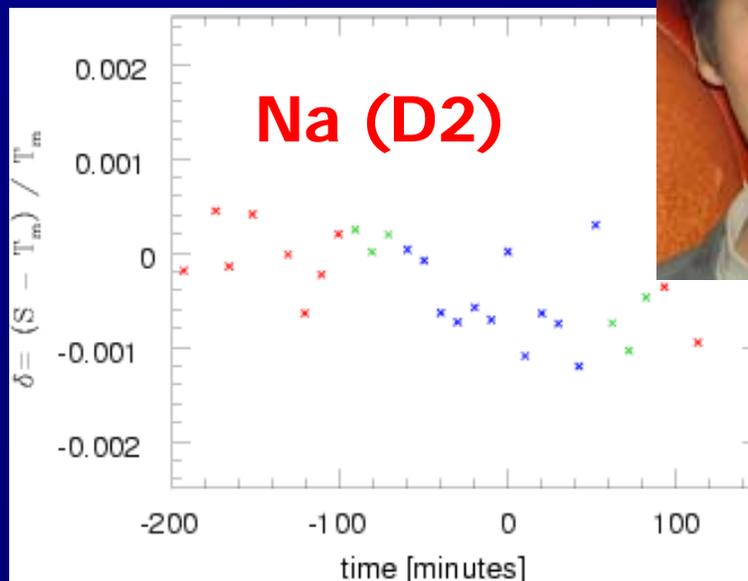
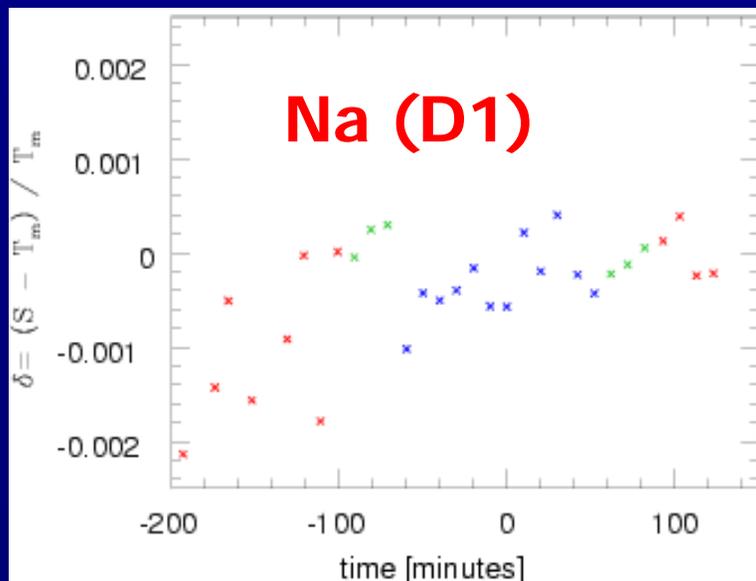


- H 吸収 <math><0.1\%</math> (Winn et al. 2004)
- Ly 吸収15% (Vidal-Madjar et al. 2003)
- $T_{ex} < (0.6-1.3)eV$ (大気モデルに強く依存、不定性大)

他の元素の吸収 (preliminary)

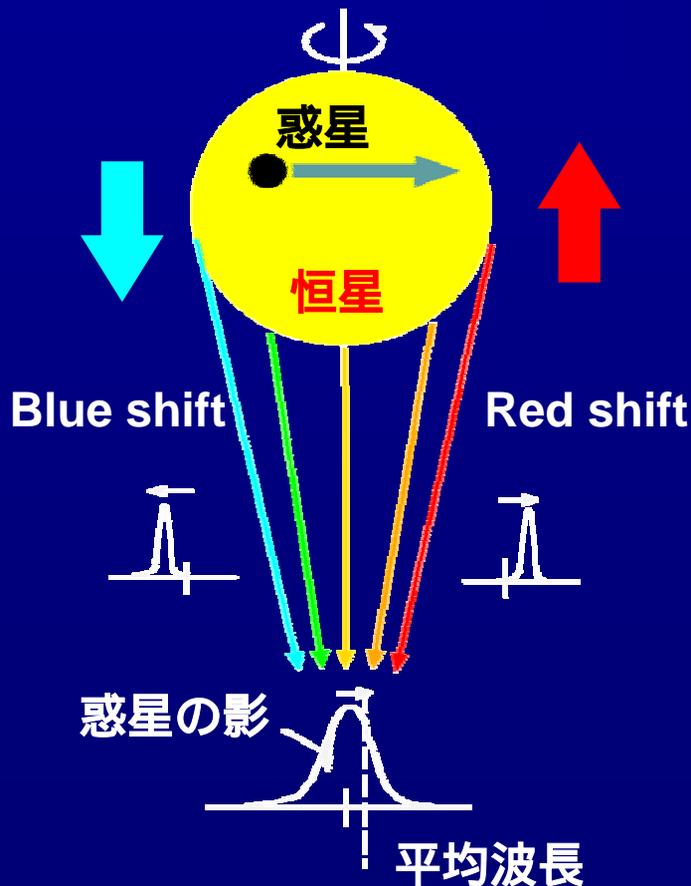


- 現時点では、上限値のみ (<0.1-0.3%)
- 成田憲保、修士論文 (2004) 準備中



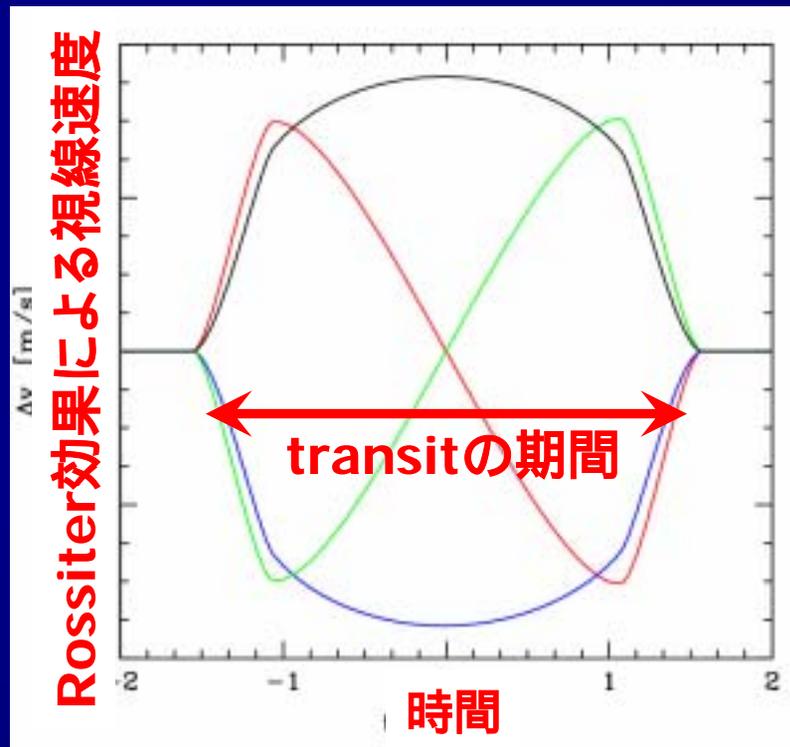
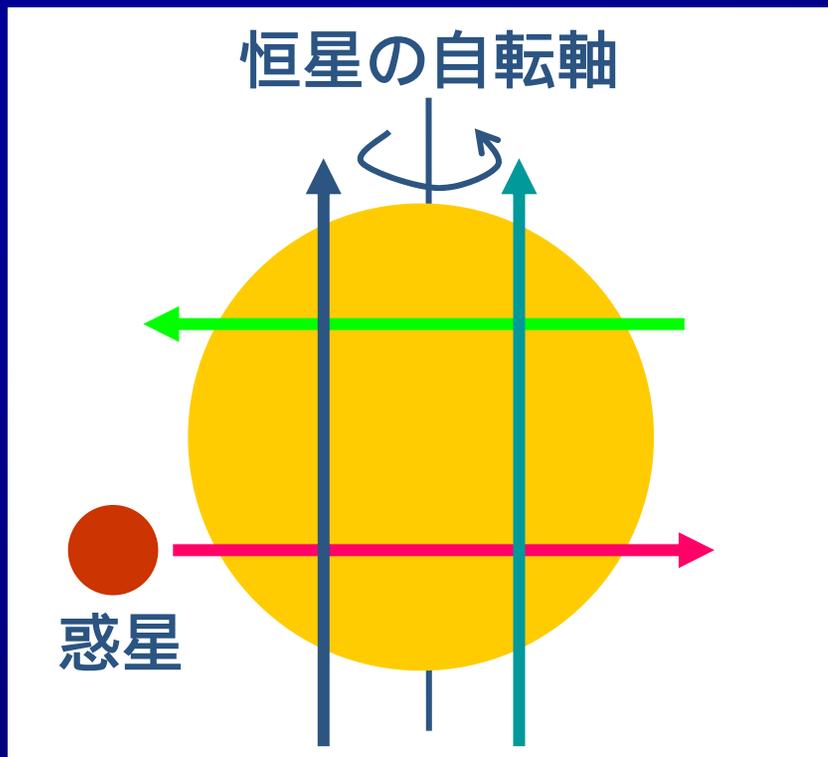
ロシター・マクローリン効果

食連星において、一方の星が他方の星の一部を掩蔽することで、星の自転速度の一部が見かけ上、その星と観測者の相対速度のように見えてしまう現象
(Rossiter 1924; McLaughlin 1924)



1. 恒星の自転によるドップラー効果によって、スペクトル線が広がる
2. 惑星が恒星の一部を隠すと、スペクトル線の対応する部分が欠ける
3. スペクトル線の平均的な波長がずれる

惑星の公転軸と主星の自転軸の関係

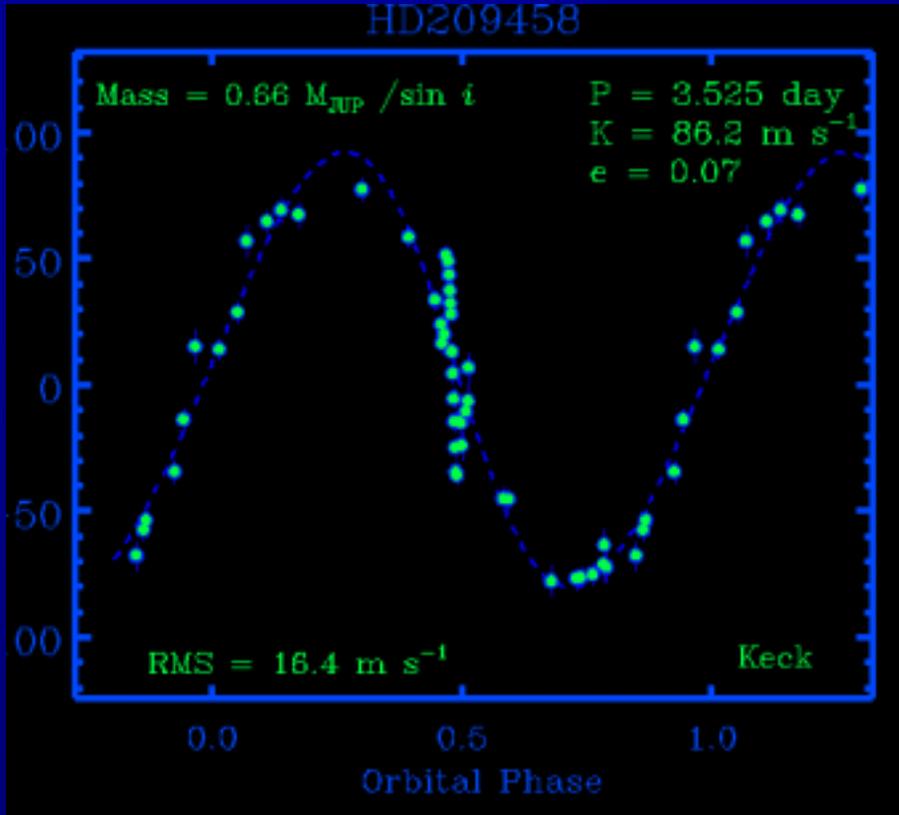


恒星の自転軸に対して惑星が横切った方向がわかる
惑星の公転軸と恒星の自転軸の向きの関係
(HD209458系の場合は揃っている)

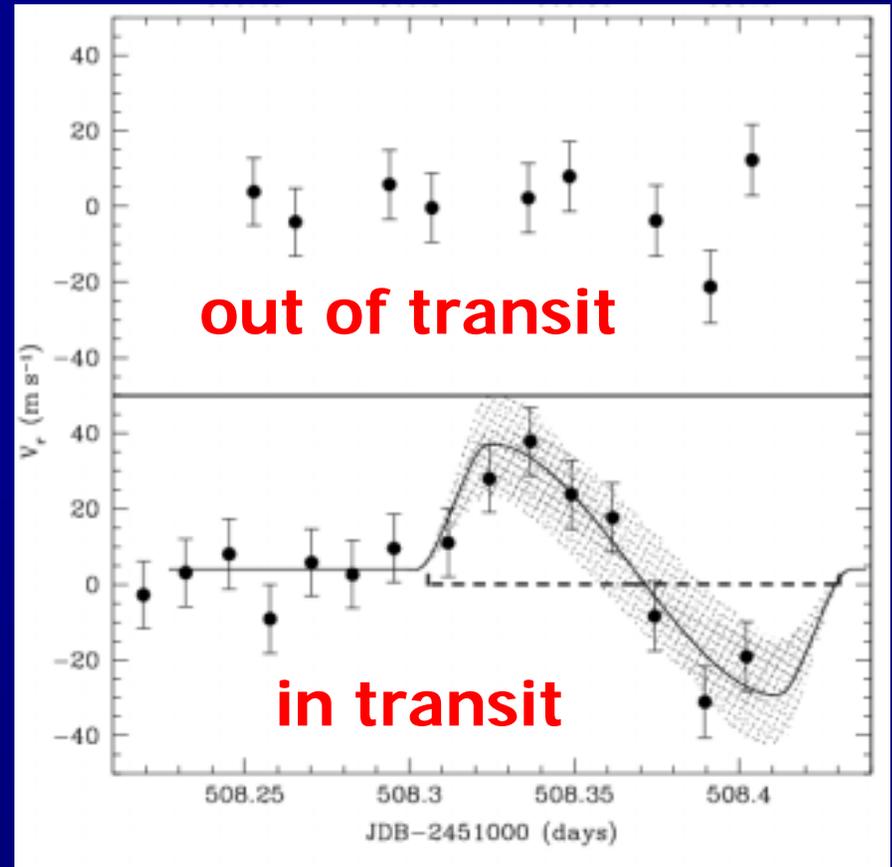
惑星系の形成、進化に関する重要な情報

分光観測による transit信号

(Rossiter-McLaughlin 効果)



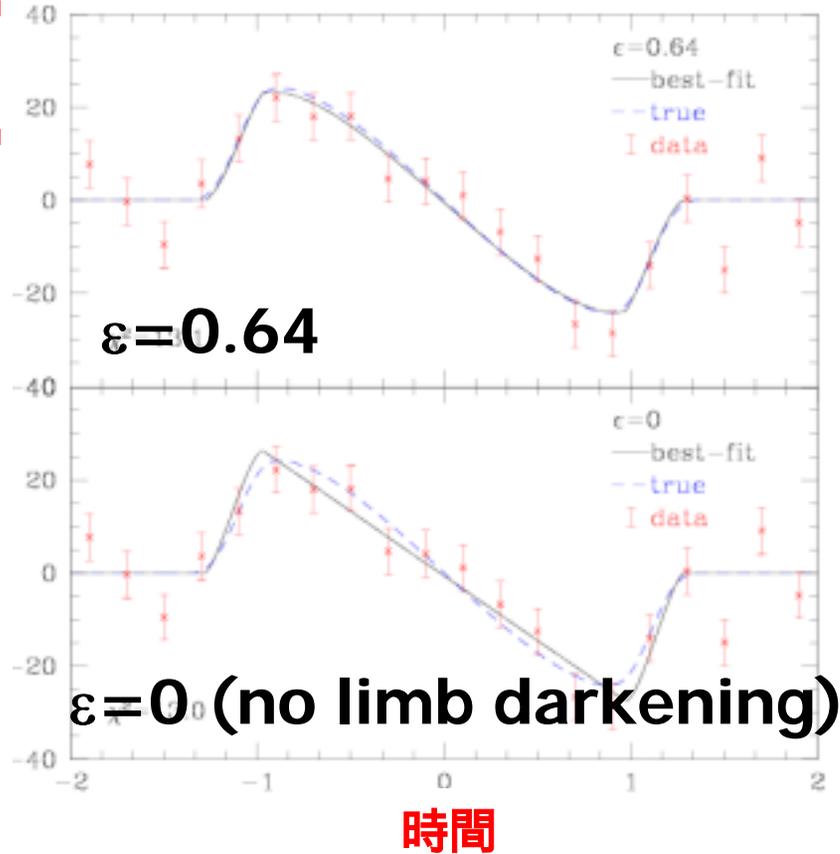
HD209458 radial velocity data
<http://exoplanets.org/>



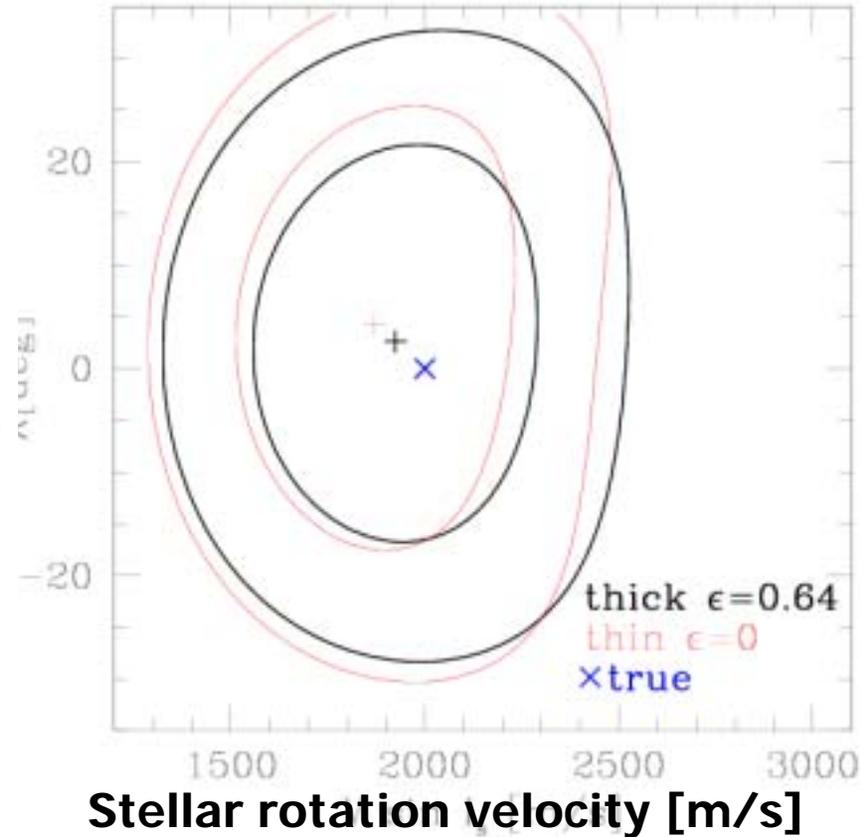
主星の自転と惑星の公転が同方向
Queloz et al. (2000) A&A 359, L13
ELODIE on 193cm telescope

2004年8月に発表されたtransit惑星 TrES-1

Rossiter効果による視線速度[m/s]



Projected misalignment angle [deg]



- Ohta et al. (2004)の解析的速度曲線テンプレートを用いたロシター効果から得られる制限のモンテカルロ予想図
- すばる望遠鏡に観測提案中 (成田、太田、ほか)

共同研究者：太田泰弘、樽家篤史

The Rossiter effect and analytic radial velocity curves for transiting extrasolar planetary systems

Yasuhiro Ohta¹, Atsushi Taruya²,
and Yasushi Suto^{1*}

¹Department of Physics, The University of Tokyo
²RESCEU, School of Science, The University of Tokyo



The planet blocks off the light from the approaching (leading) part of the stellar surface. This produces a dip in the stellar spectrum during the transit, leading to an anomaly of radial velocity curves.

1. Introduction

Characterization and observational method of the planetary systems

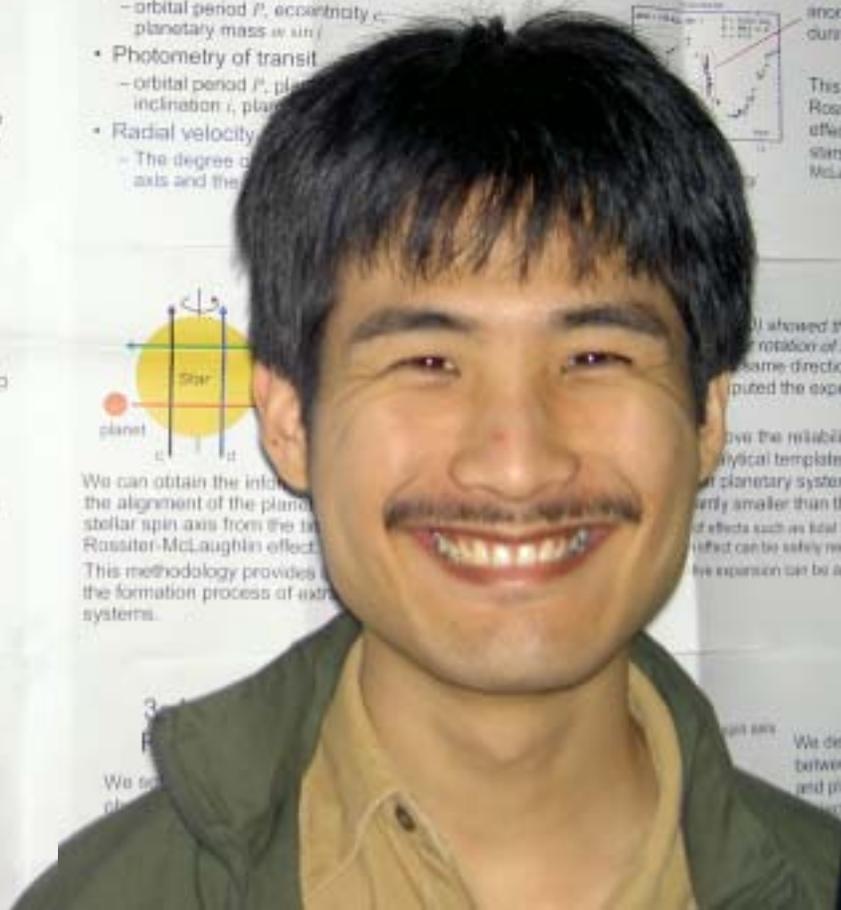
- Radial velocity measurement
 - orbital period P , eccentricity e , planetary mass $M_p \sin i$
- Photometry of transit
 - orbital period P , planetary inclination i , planetary radius R_p
- Radial velocity Rossiter-McLaughlin effect
 - The degree of axial tilt and the spin-orbit angle



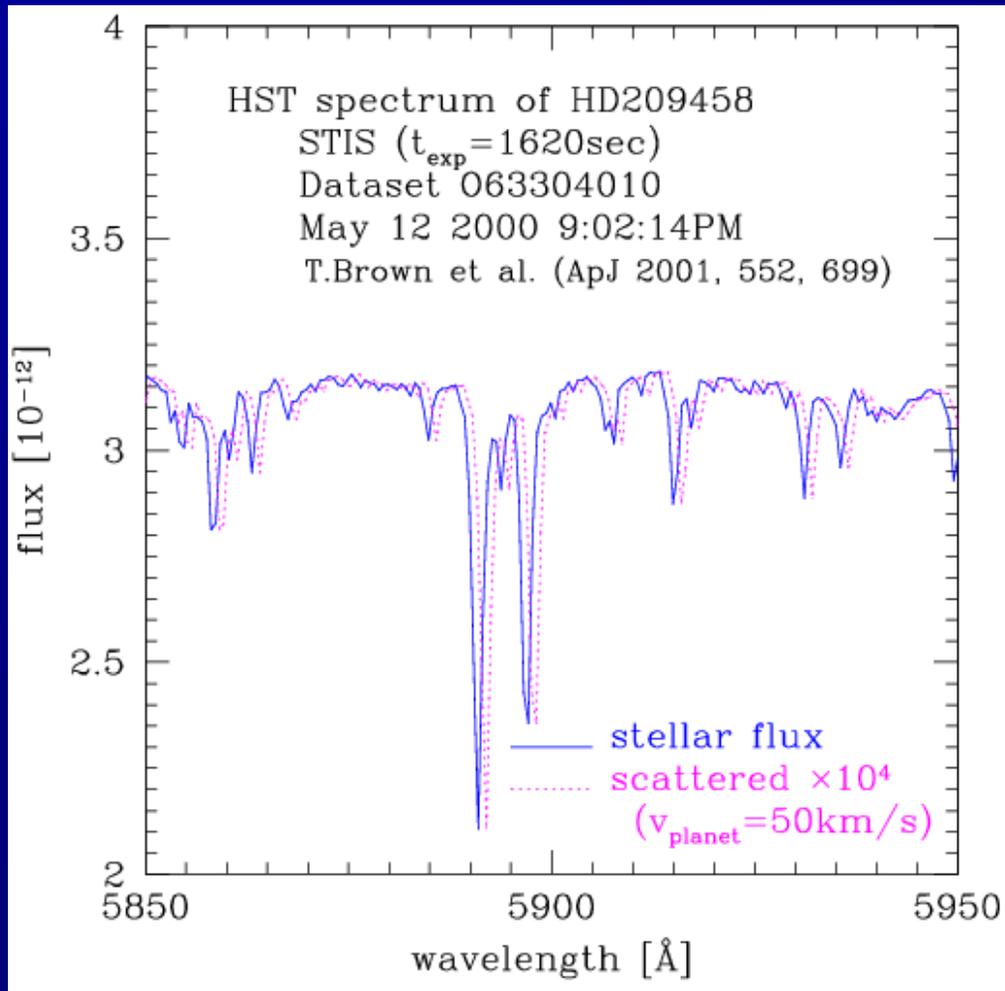
We can obtain the information on the alignment of the planet's orbital plane and the stellar spin axis from the Rossiter-McLaughlin effect. This methodology provides the formation process of extrasolar planetary systems.

2. Purpose

- We show analytic formulae for radial velocities of the transiting extrasolar planetary systems with the stellar limb darkening effect.



食惑星からの反射光の検出原理



- 惑星の反射光スペクトルは主星のコピー
- ただし、公転速度のために、吸収線の位置が 50km/s 程度だけずれたところにする
- この反射吸収線の強度はわずか 0.01%
- 数百本の吸収線を同時に使って反射光の存在を検出したい
- すばるの高分散分光器 HDSの波長分解能 50000 を最大限活用

系外惑星観測のロードマップ

- 巨大ガス惑星発見の時代
- 惑星大気の見
- 惑星大気の精密分光観測による組成決定

- 惑星反射光の検出

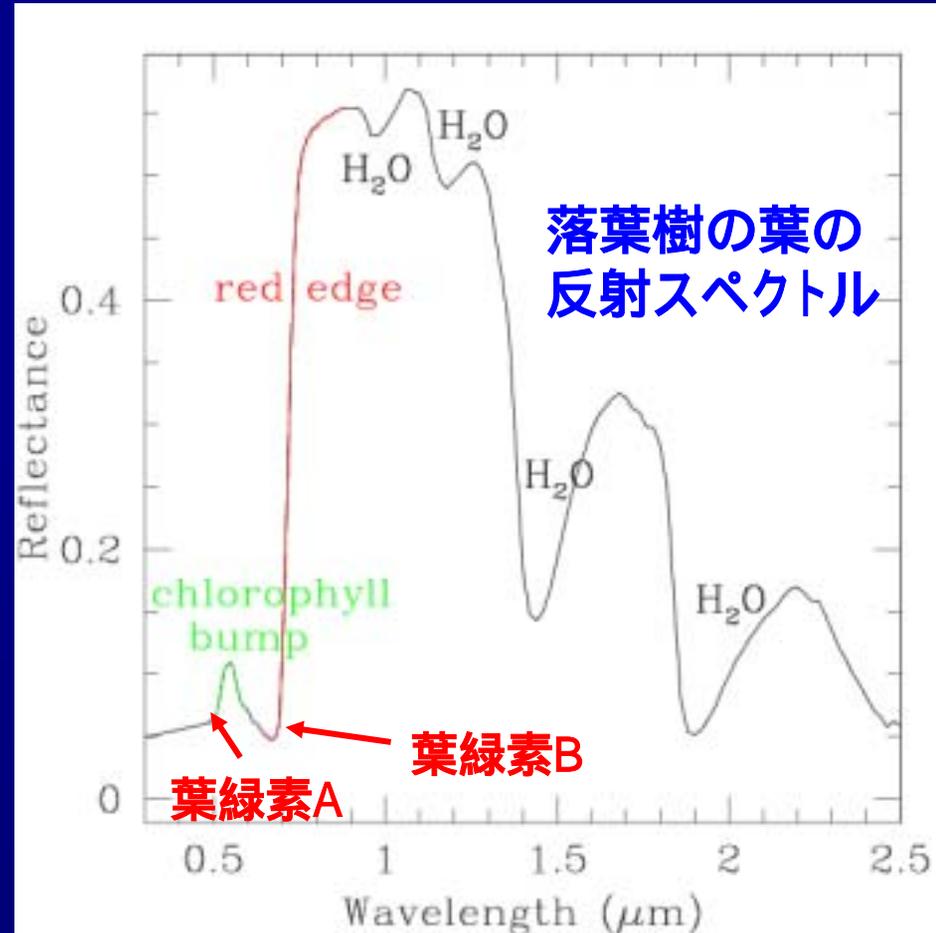
- 地球型惑星の見
- *Biomarker*の同定 (e.g., extrasolar plant)
- *Habitable planet*の見
- *Extraterrestrial life*の見

Biomarkerと地球照：我が地球を用いて「第2の地球」がどのように見えるかを予測

- 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
 - 植物の反射スペクトルに見られる **red edge**
- 遠くに我々の地球をおいたとき、分光観測からその特徴を同定できるか？
 - **地球照**
- 衛星による分光測光観測の可能性を探る

Red edge of (**extrasolar**) plants as a biomarker in **extrasolar planets**

- 植物は7000 よりも長波長側で反射率が急激に増す
- 5000 前後の葉緑素による吸収よりもずっと顕著な特徴
- これをextrasolar planetにおけるbiomarkerとして使えないか？ (**extrasolar plants** as a biomarker in **extrasolar planets**)



Vesto Melvin Slipher (1875-1969)



Red-edge as a biomarker (at least) in 1924 !

- “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”

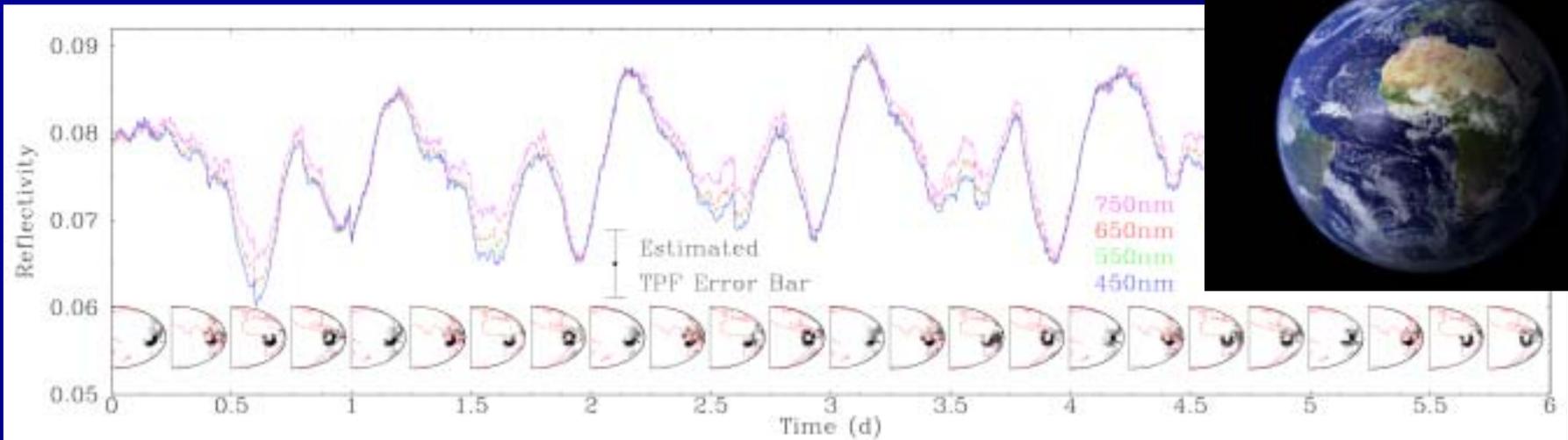
PASP 36(1924)261



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.

Astrobiology indeed in 1924 !

地球反射光度の日周変化を検出できるか？

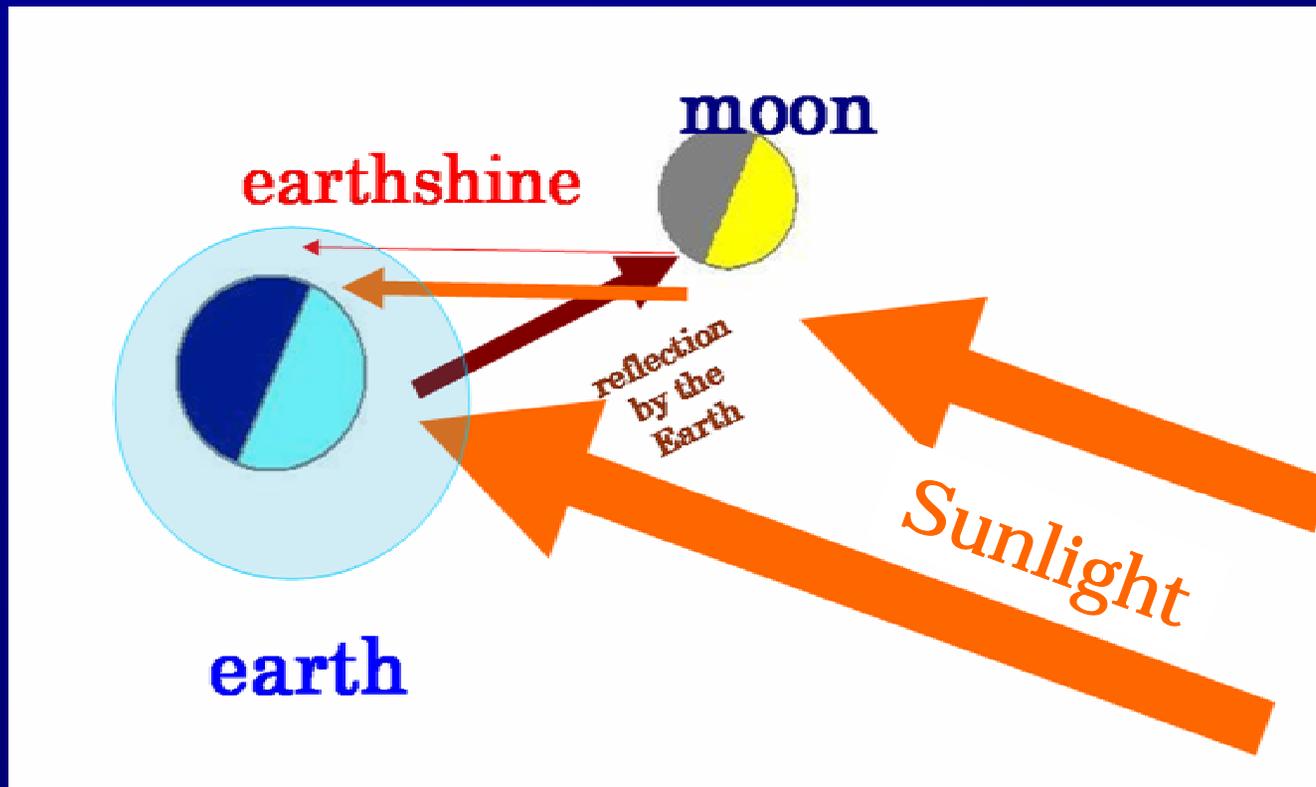


Ford, Seager & Turner: Nature 412 (2001) 885

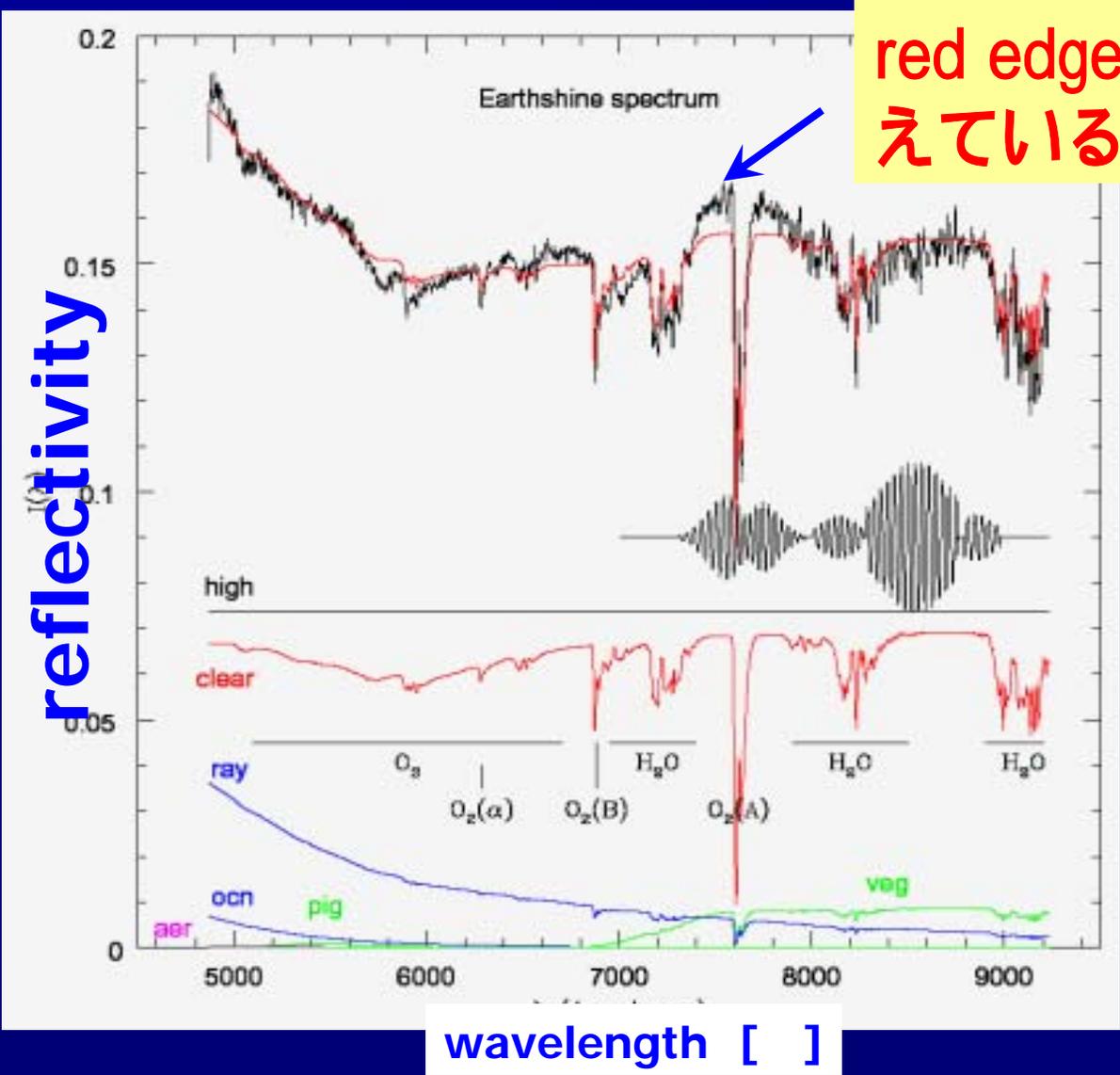
- 地球の反射光が完全に分離できると仮定する
 - TPF (Terrestrial Planet Finder) で 10 ~ 20年後に実現？
- 10%レベルの日変化は検出可能
 - 大陸、海洋、森林などの反射特性の違いを用いる
- 雲の存在が鍵
 - 太陽系外地球型惑星の天気予報の精度が本質的！

地球照観測

- 月の暗い部分の分光観測をして、地球からの反射光中のred edgeが検出できるか？
- 遠方の、第2の地球の分光観測の模擬実験



a previous attempt of earthshine spectroscopy: *red-edge in a pale blue dot ?*

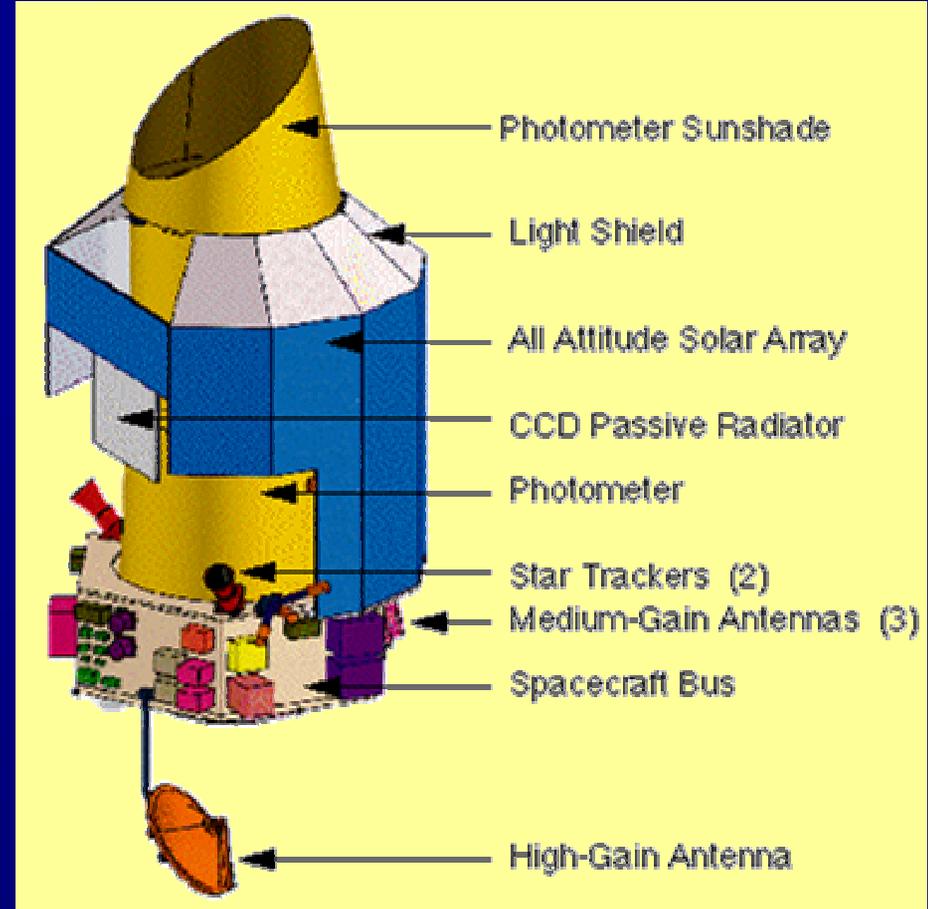
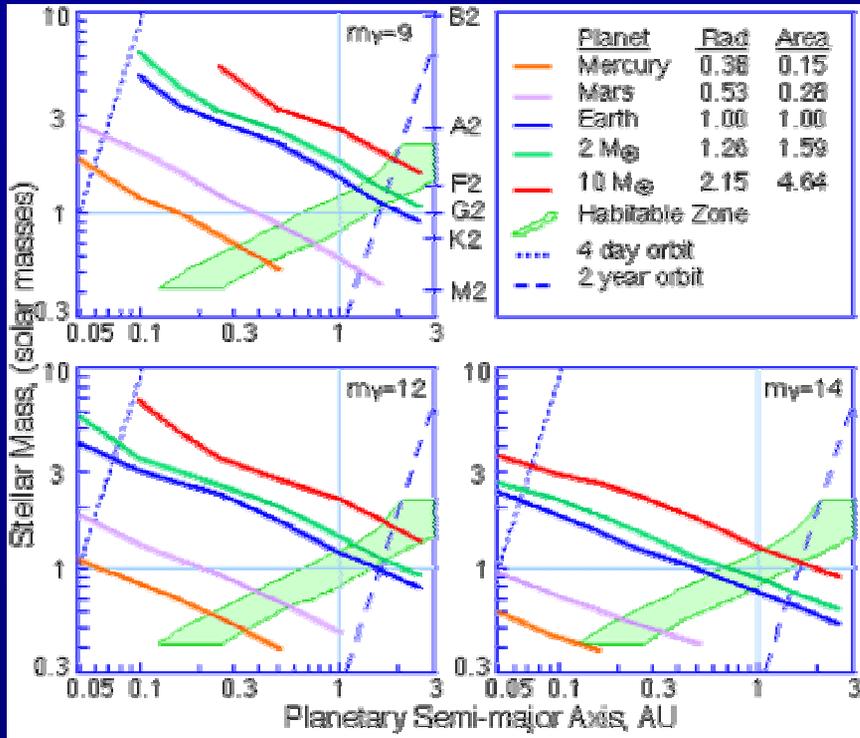


red edge が見えている???

Woolf & Smith
ApJ 574 (2002) 430
"The spectrum of earthshine: A Pale Blue Dot Observed from the Ground"

ケプラー衛星 (米国2008年打ち上げ予定)

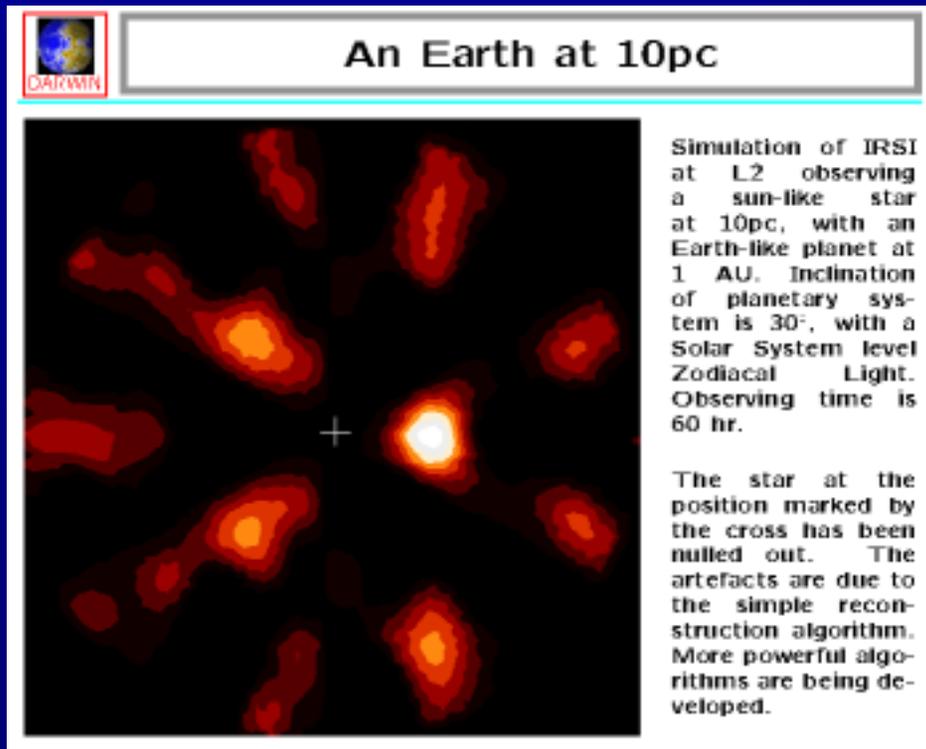
食惑星の測光サーベイ



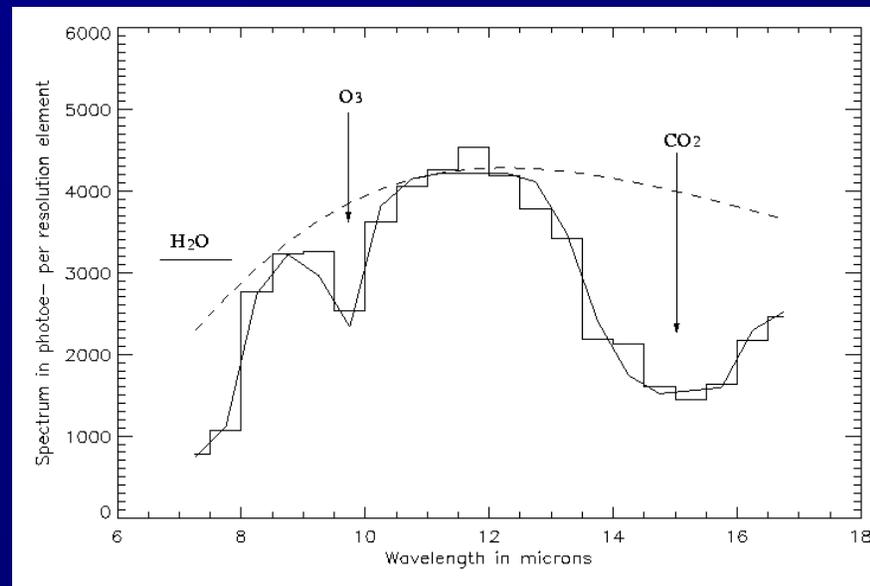
<http://www.kepler.arc.nasa.gov/>

ダーウィン衛星 (欧州：2015年頃打ち上げ?)

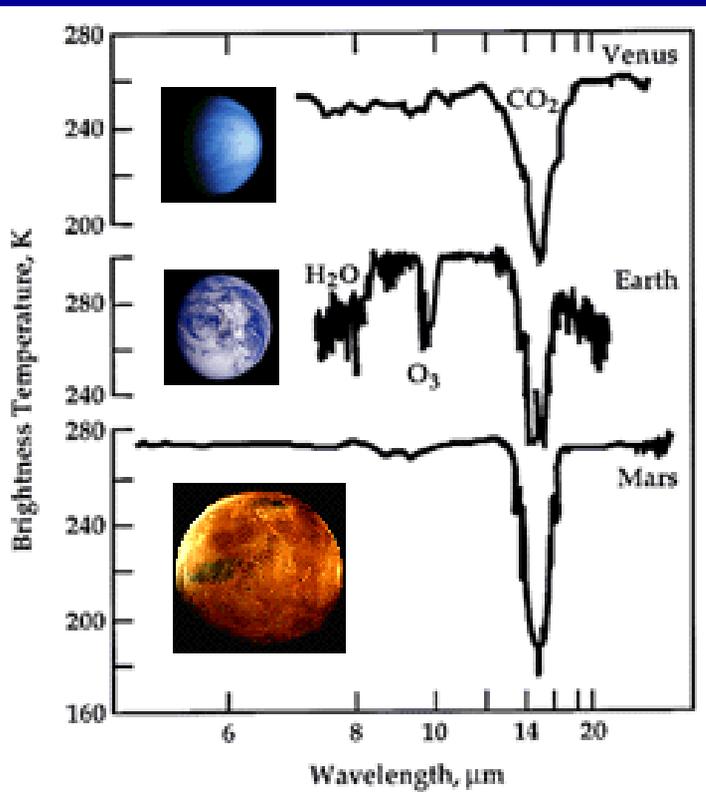
宇宙赤外線干渉計群 測光分光観測



<http://ast.star.rl.ac.uk/darwin/>



太陽系外惑星研究： 今後の10年 “天文学から宇宙生物学へ”



- 木星型ガス惑星： 発見の時代から“characterization”の時代へ
 - 起源、形成、進化の基礎モデル構築
- 地球型惑星の発見へ
- 居住可能惑星の発見へ
 - 水が液体として存在する惑星
- 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検証できるか？ Biomarker を特定できるか？

Fermi's question

- **Where are *they*?**
 - Enrico Fermi during a luncheon conversation at Los Alamos (1950)

「宇宙を見る新しい目」 (日本評論社) 日本物理学会編:2004年3月刊



- 1章 宇宙マイクロ波背景輻射で見る宇宙...小松英一郎
- 2章 X線で見る宇宙...大橋隆哉
- 3章 ガンマ線で見る宇宙...谷森達
- 4章 重力波で見る宇宙...三尾典克
- 5章 最高エネルギー宇宙線...手嶋政廣
- 6章 コンピュータシミュレーションから見る宇宙...吉田直紀
- 7章 超新星で測る宇宙膨張とダークエネルギー...土居守
- 8章 ニュートリノと素粒子物理...梶田隆章
- 9章 超新星ニュートリノで見る宇宙...佐藤勝彦
- 10章 究極の宇宙論:太陽系外惑星探査...須藤靖**