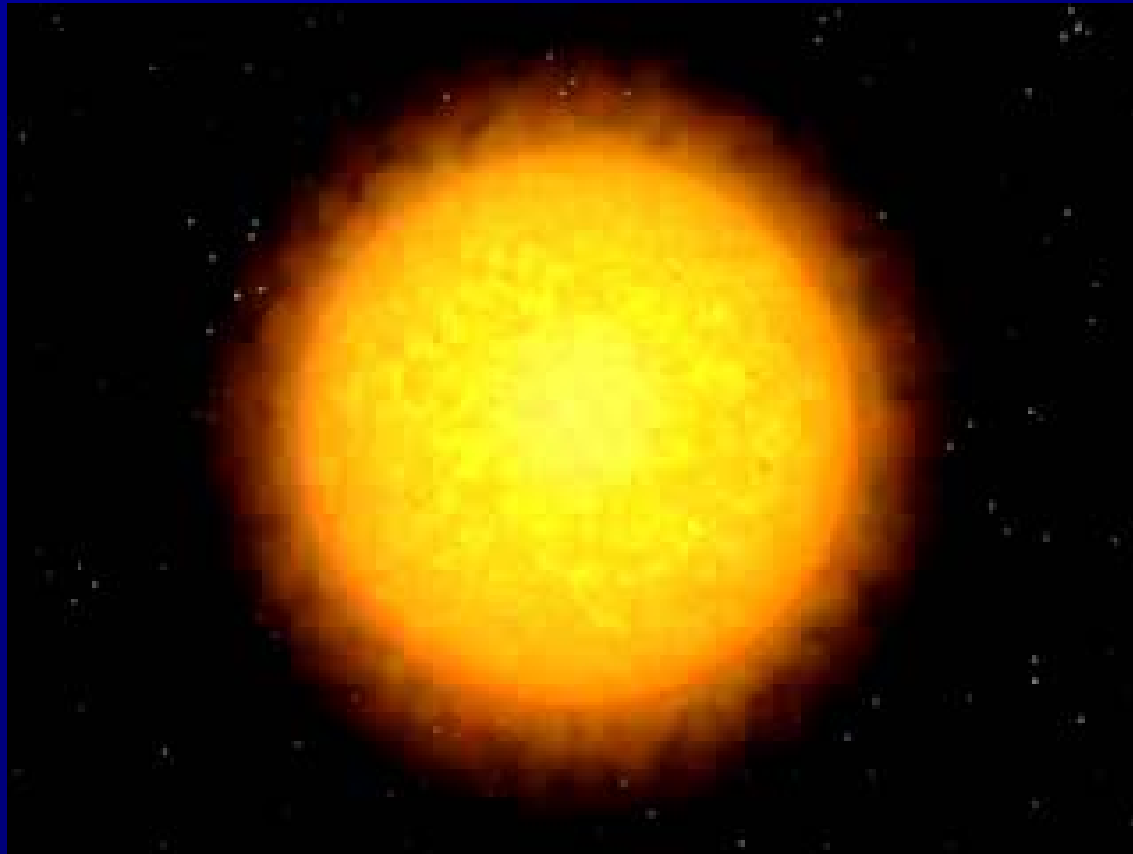


太陽系外惑星大気分光観測



東京大学
大学院
理学系研究科
物理学専攻
須藤 靖

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

2004年9月30日 東京大学天文センター談話会

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

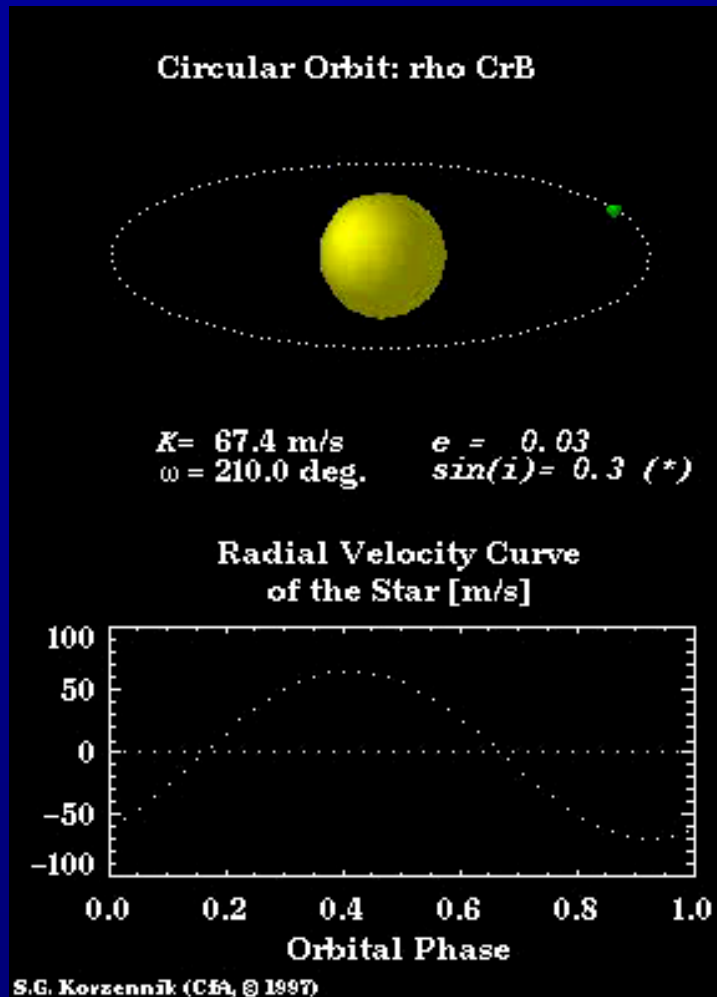
- 1781年：天王星の発見
- 1846年：海王星の発見
- 1930年：冥王星の発見

■ 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

■ 2004年9月28日までに136個の系外惑星

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)

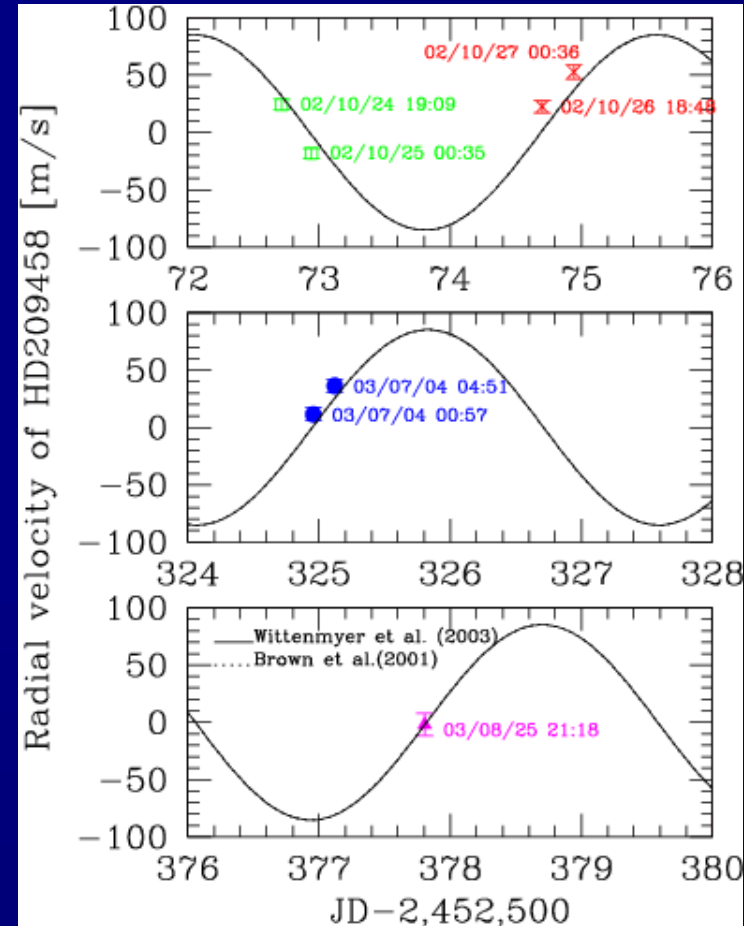
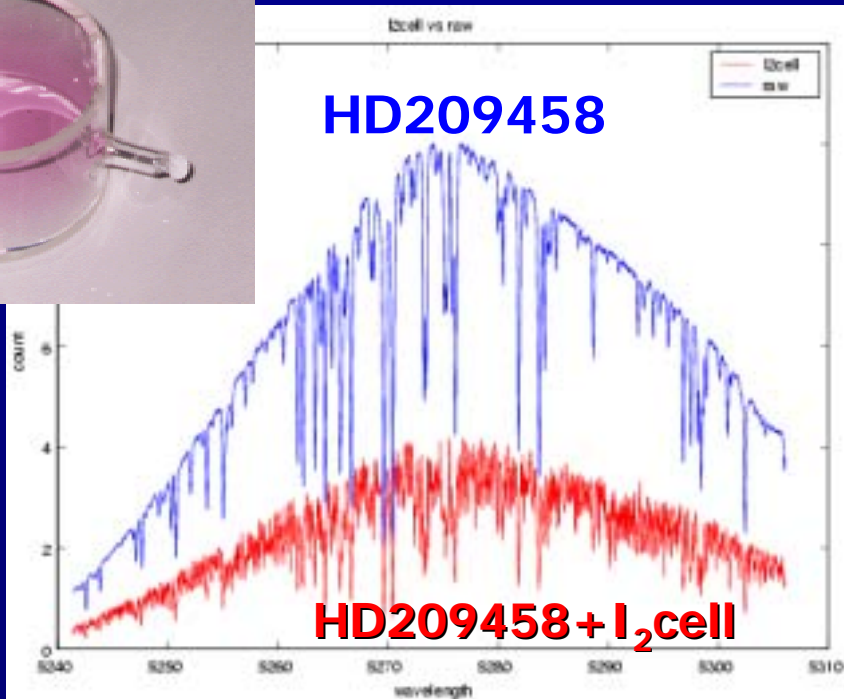
この方法によって、木星程度の質量の太陽系外惑星がすでに136個発見されている (2004年9月28日現在)

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5m/s 程度の精度が達成されている。



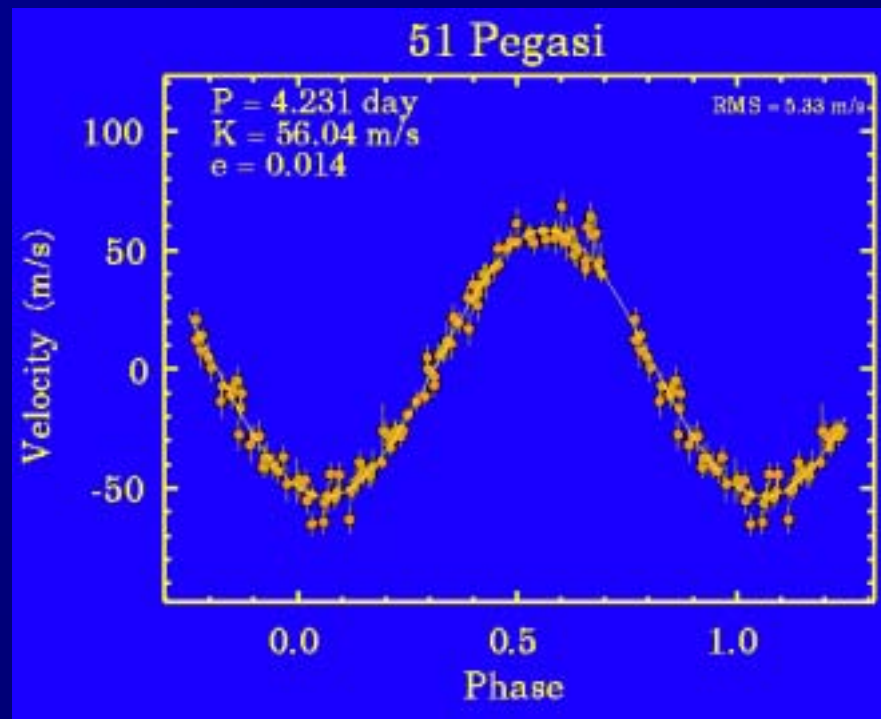
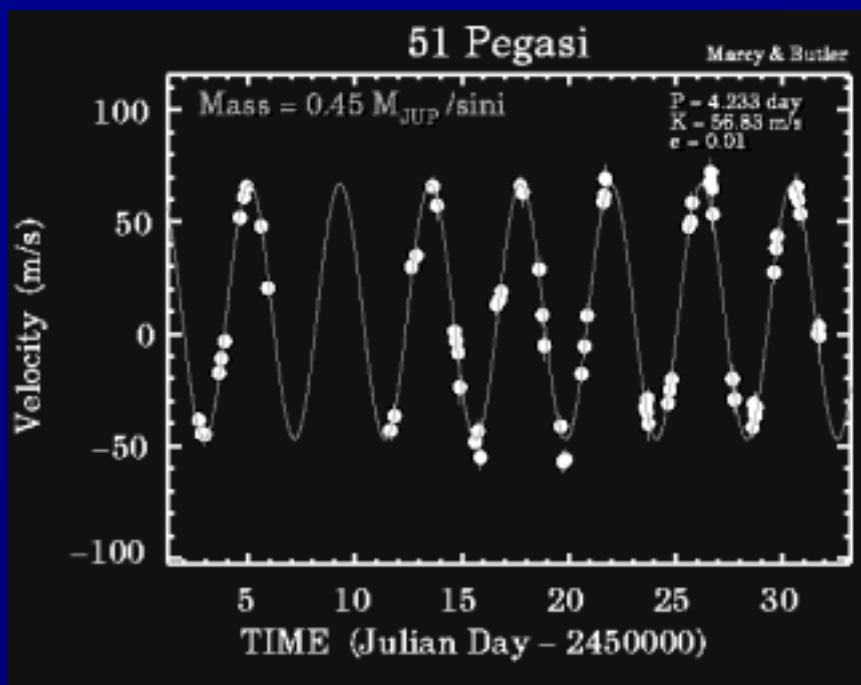
ヨードセル



Subaru/HDS

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

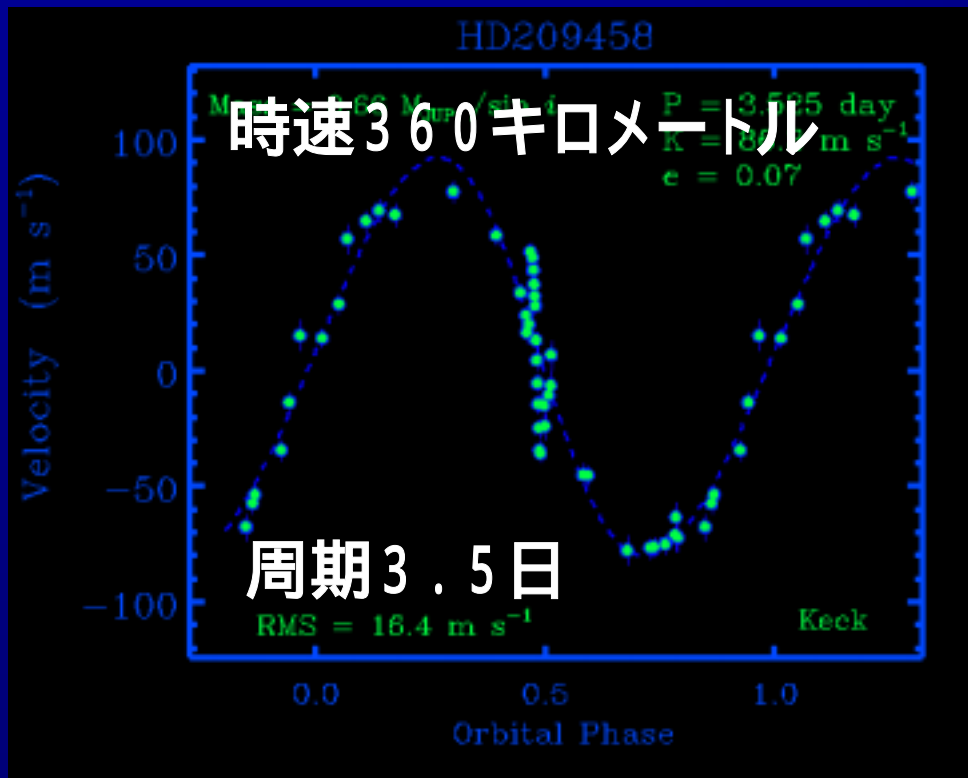
- 主星の速度変動の検出によって初めて発見された惑星 (Mayor & Queloz 1995)



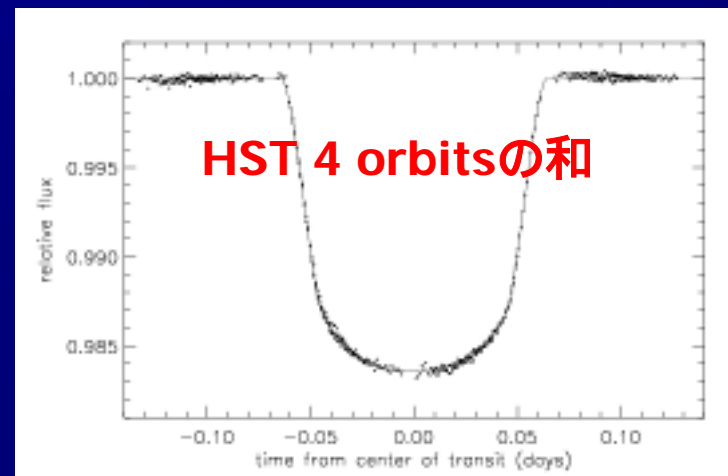
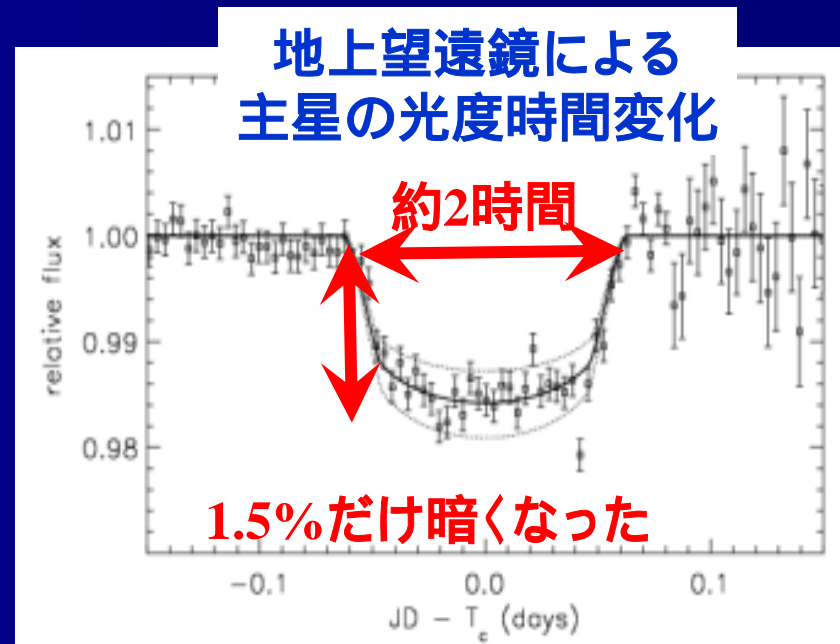
周期がわずか4.2日！

太陽系外食惑星 HD209458

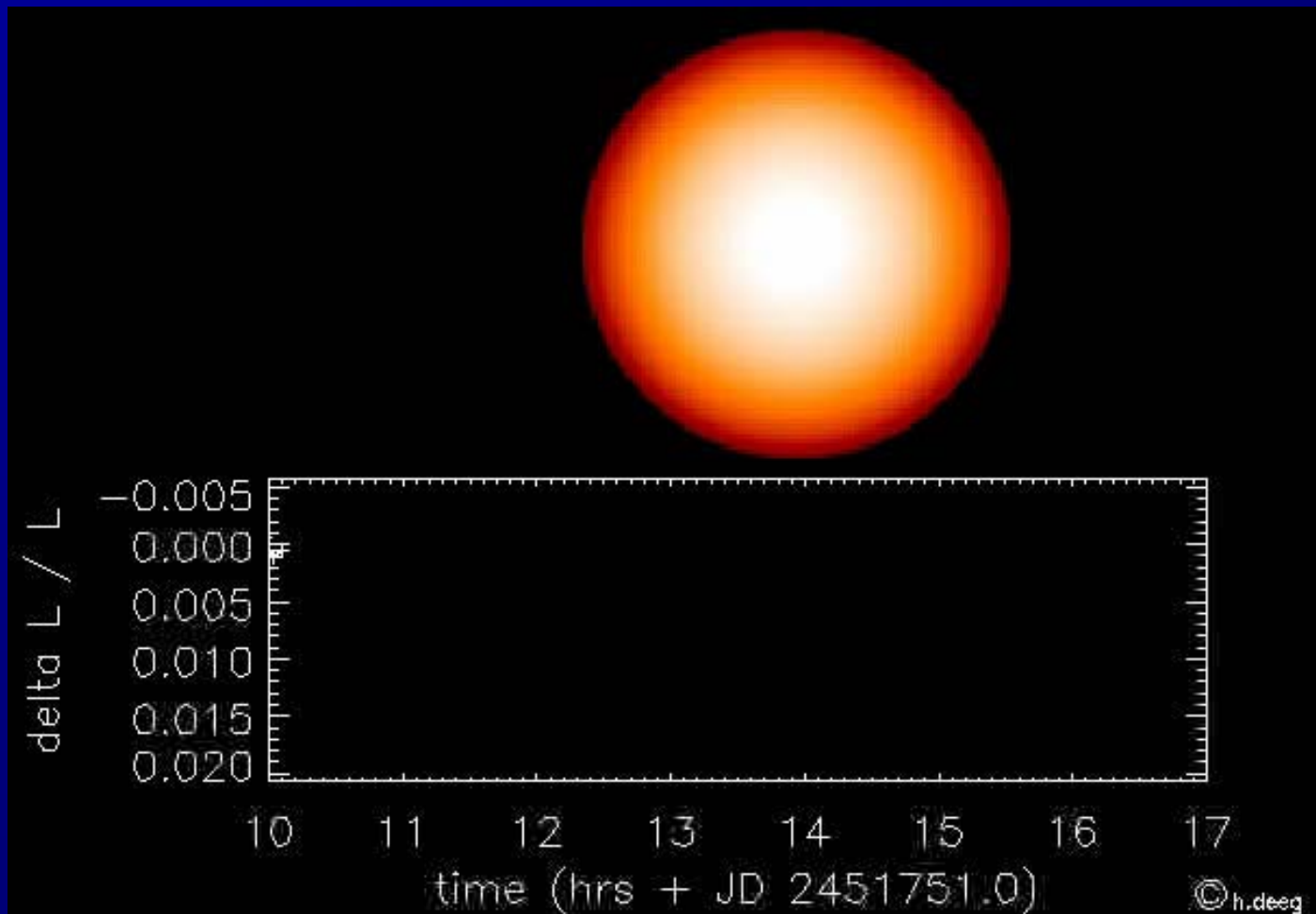
- 速度変動のデータに合わせた惑星食の初検出



地上望遠鏡による
主星の速度時間変化



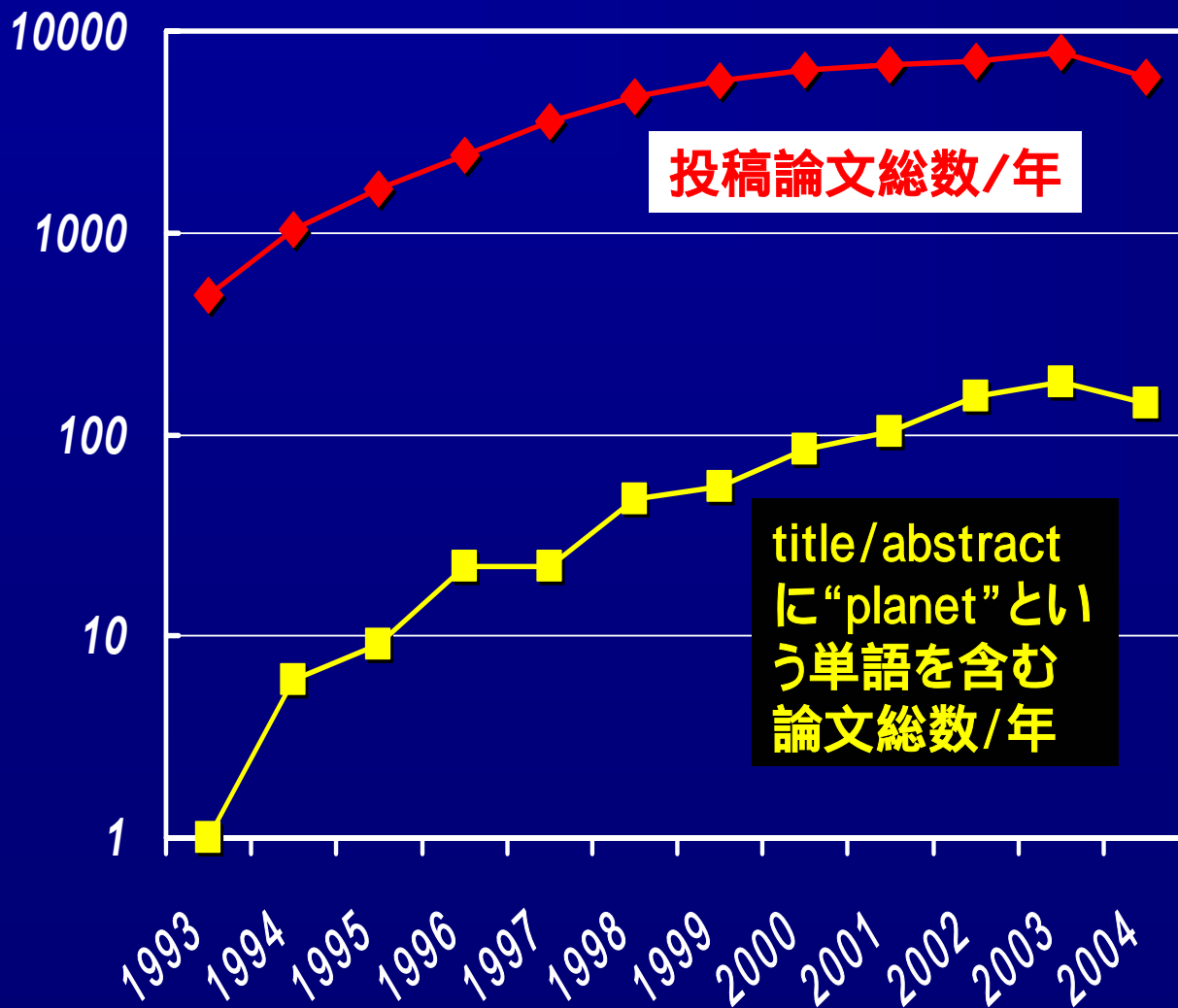
HD209458の食



太陽系外惑星発見の歴史

- 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：惑星大気初の検出(ナトリウム)
- 2003年：惑星から蒸発する水素大気発見
- 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：公転周期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9月28日時点で136個の系外惑星が報告済み

太陽系外惑星研究の興隆

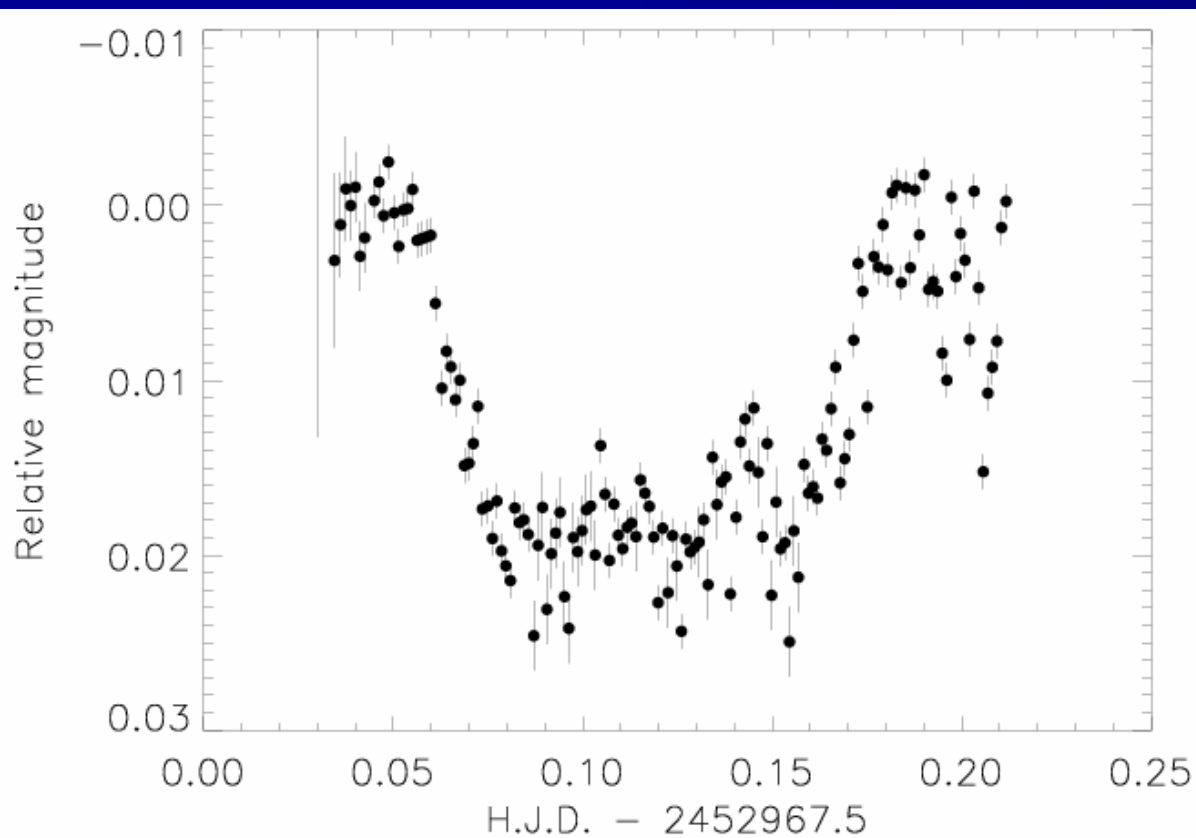


■ 1993年から
2004年9月まで
にastro-phに投
稿された論文を
調査

トランジット惑星の重要性

- Radial velocity dataの**解釈の正当性**
- 食の光度曲線より**惑星のサイズ**がわかる
 - Radial velocity data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)
- 測光観測だけで系外惑星候補を選ぶことが可能となり、**探査の有効な手段**となり得る
 - Radial velocityは分光観測であるので効率が低い
 - 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

小さな望遠鏡でも(でこそ)観測できる



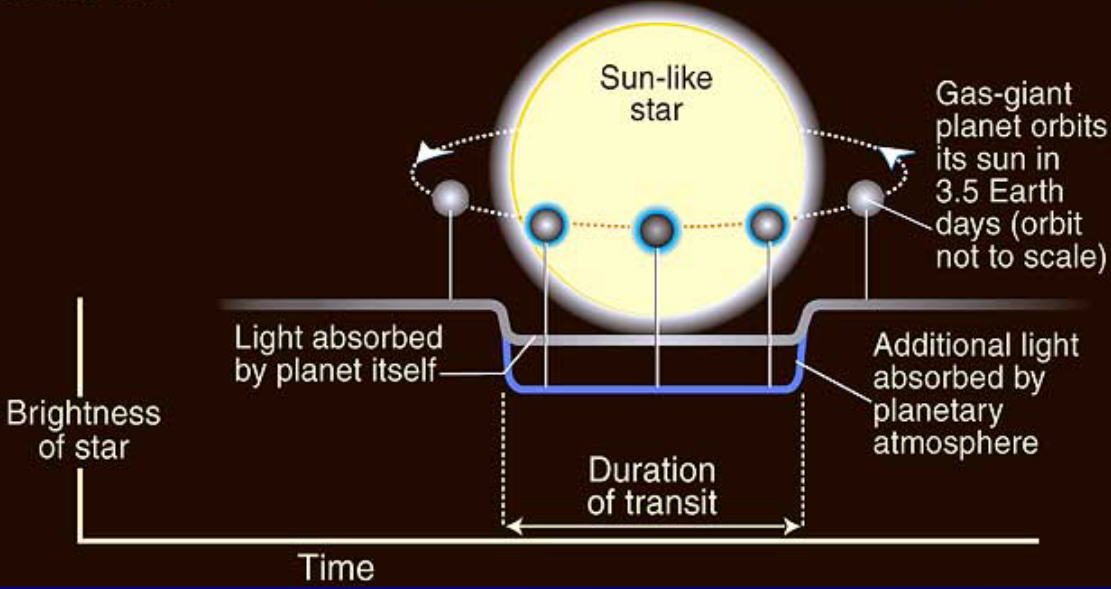
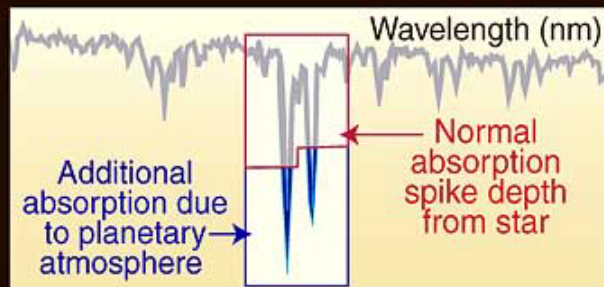
- 観測天体があがるまでの時間を利用して、たまたま transit中だった HD209458をHで観測
- 長期間のモニター観測によって、より長周期・小質量の外側の惑星発見も可能
- 大望遠鏡をこのような用途に使うことは不可能

Josh Winn @Whipple Obs (1.2m)
November 24, 2003

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

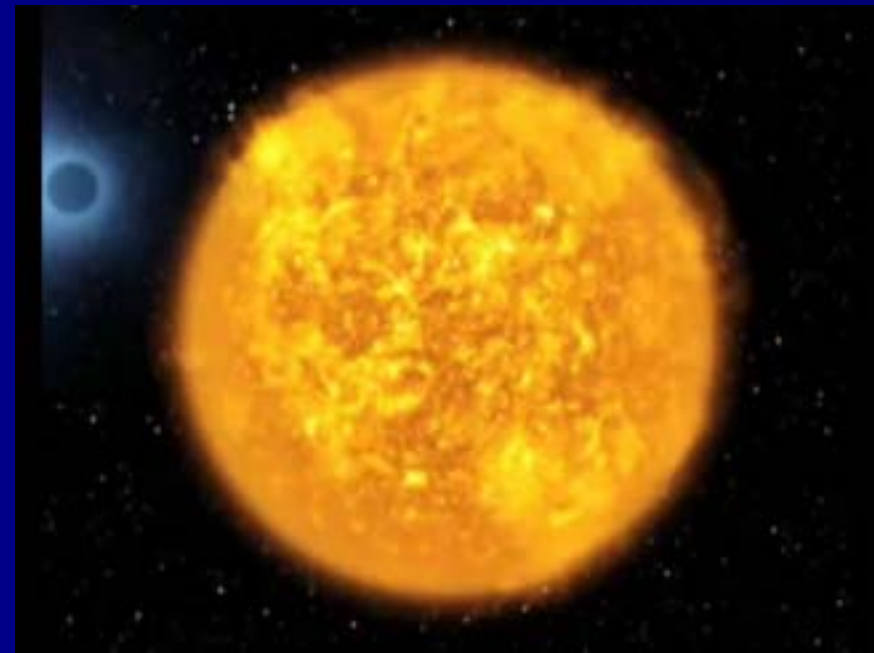
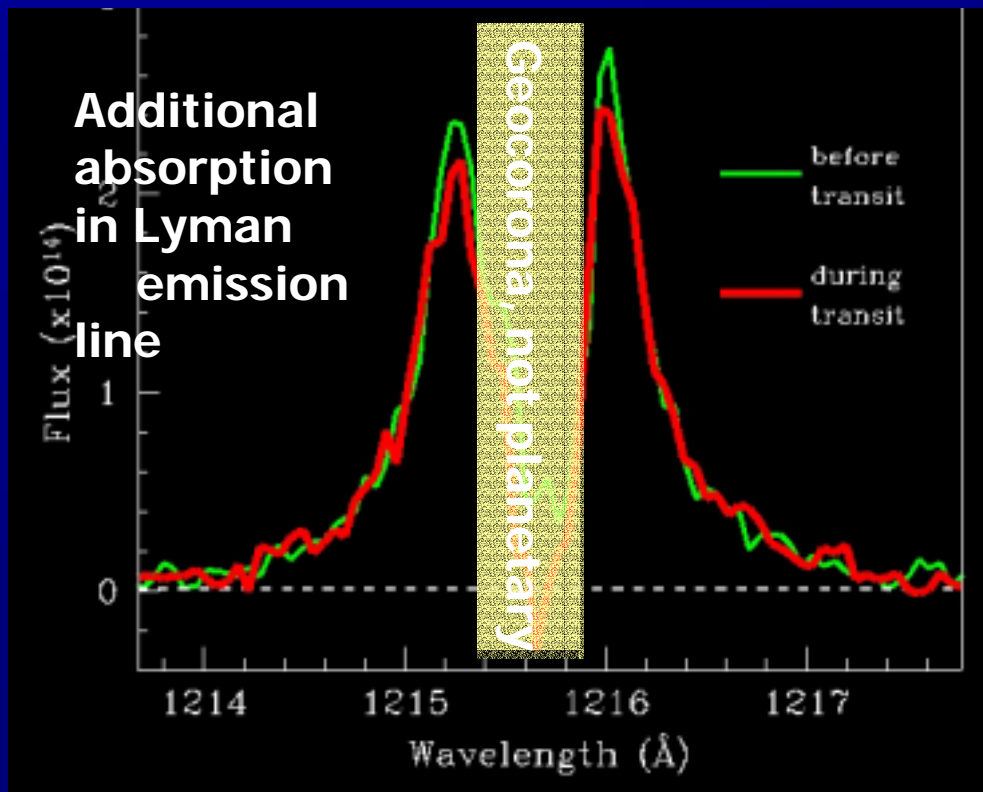
HD209458惑星系のパラメータ推定値

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 軌道面傾斜角 質量 半径 密度 有効温度 大気組成	3.52474 ± 0.00004 日 86.68 ± 0.14 度 0.63 木星質量 1.347 ± 0.060 木星半径 0.4g/cc (< 土星密度) 1400度 ナトリウム、水素、 炭素、酸素の存在が報告

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/>₁₄

すばる望遠鏡 による挑戦

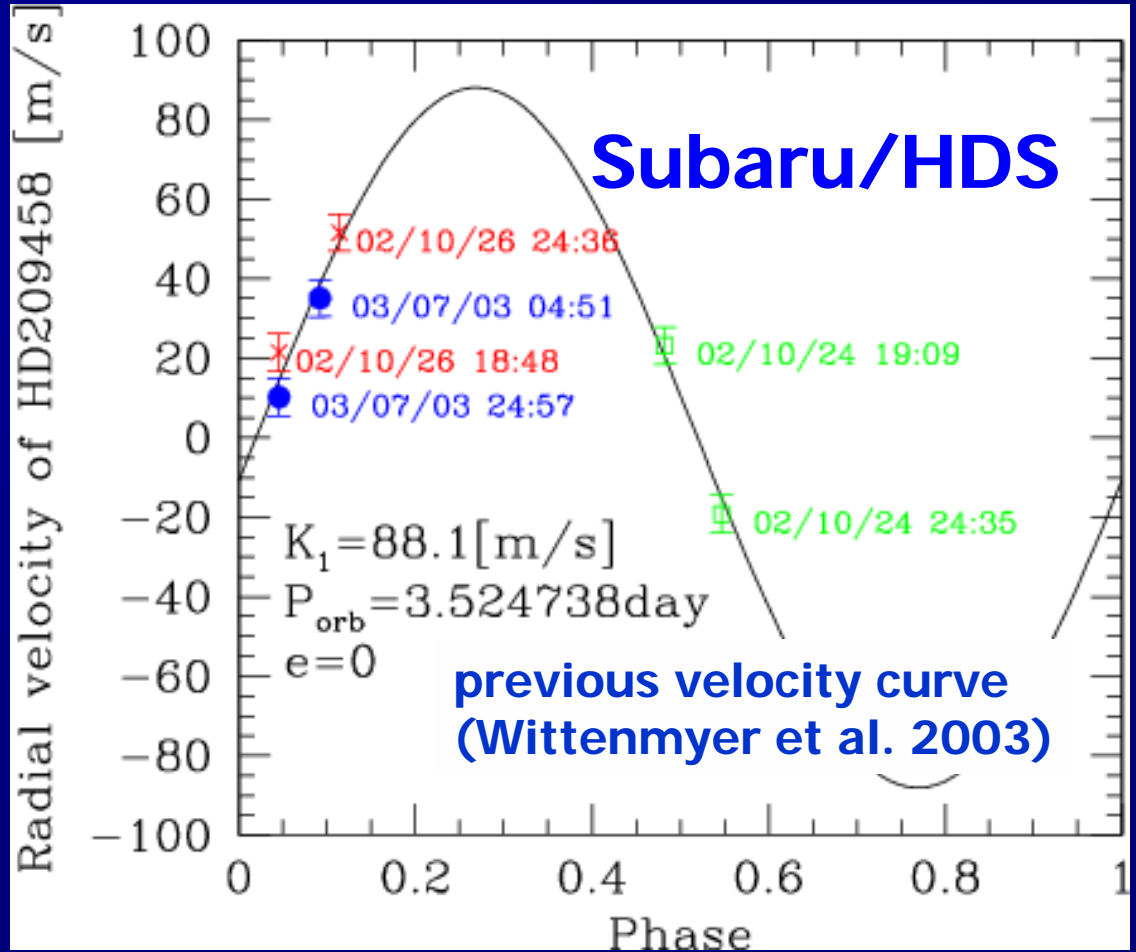
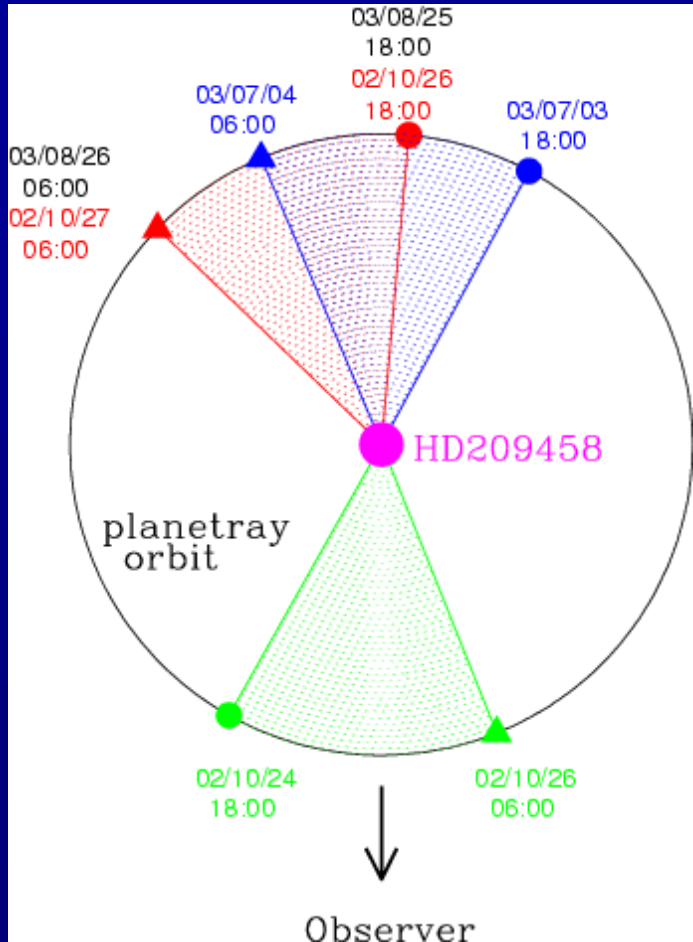


太陽系外食惑星HD209458bからの
反射光の超高分散分光観測
2002年10月、2003年7月、8月

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



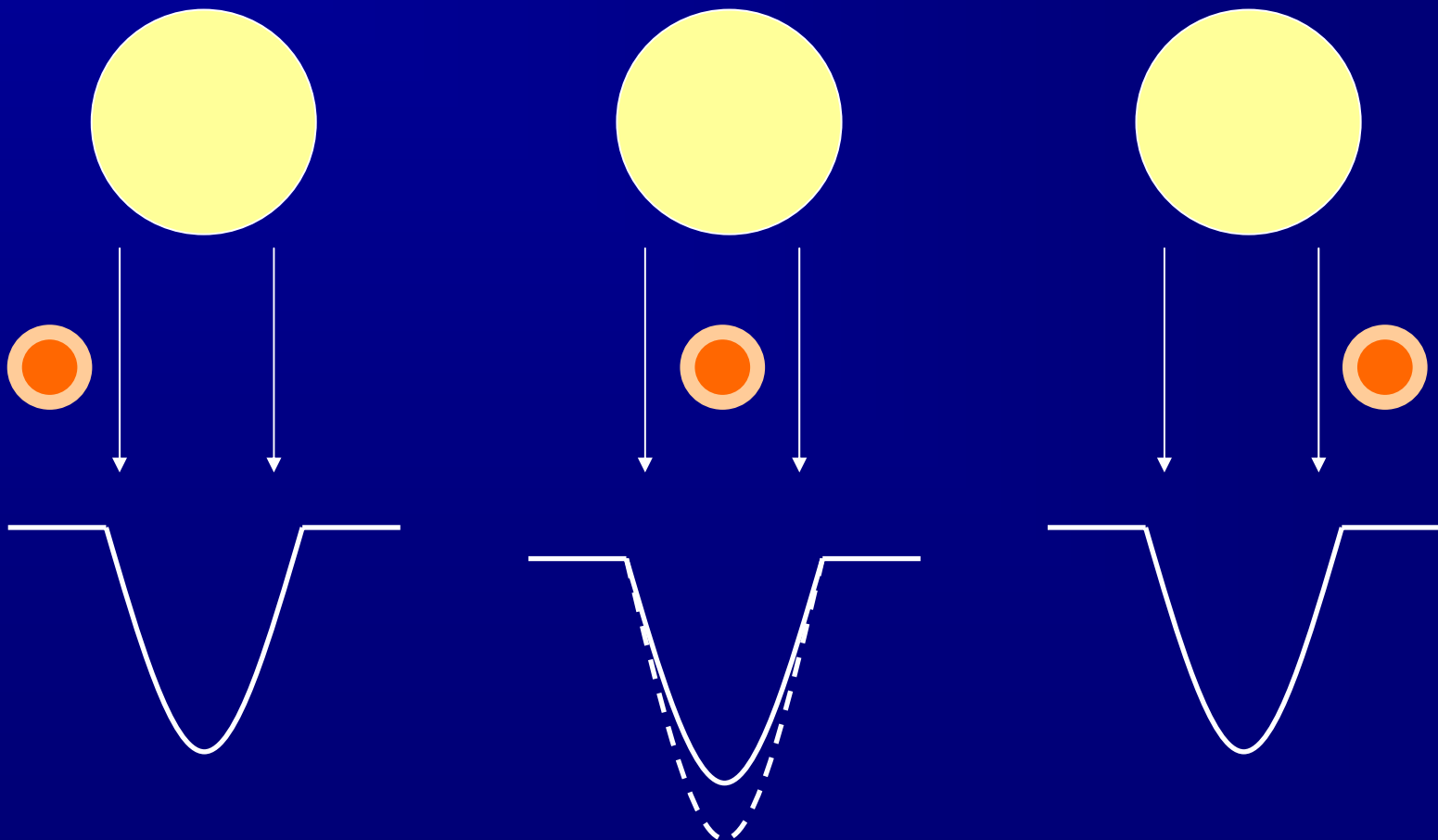
Winn et al. PASJ 56 (2004) 655

現在進行中の3つのHDSプロジェクト

- **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)
- **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への制限 (Rossiter-McLaughlin 効果)**
 - 解析的テンプレート公式の導出 (Ohta, Taruya & Suto 2004)
 - すばる望遠鏡観測提案予定
- **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

Transmission Spectroscopy

Transitをそれぞれの吸収線で見ると



原理的には惑星大気中の元素を検出できる

これまでのHD209458可視域観測結果

地上からの観測

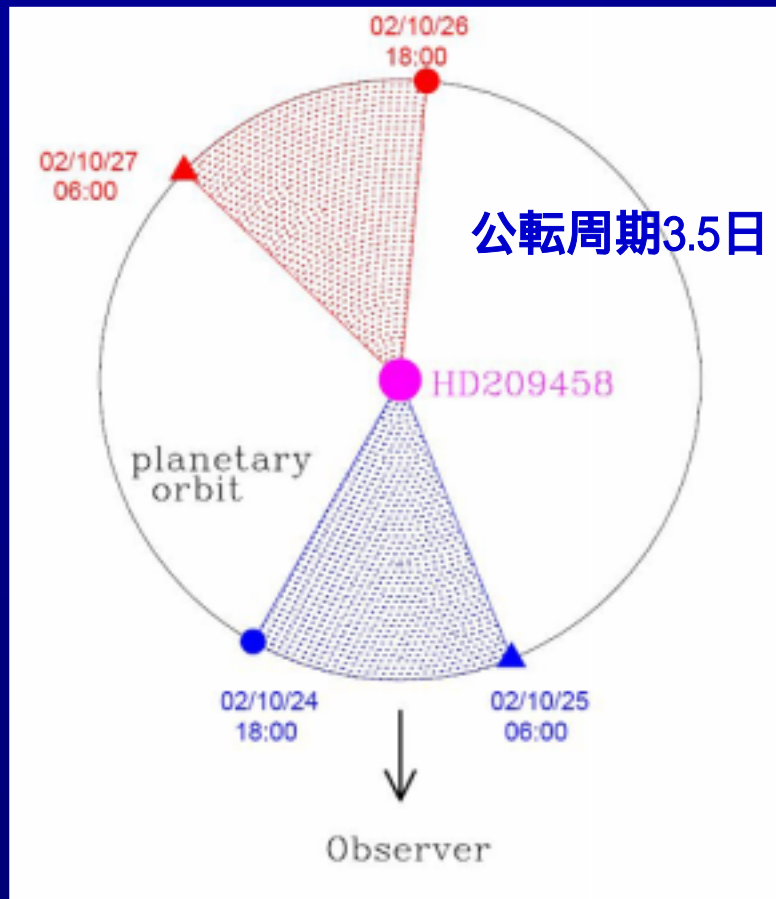
- Bundy & Marcy (2000) Keck I /HIRES $< 3 \%$
- Moutou et al. (2001) VLT /UVES $< 1 \%$
- Winn et al. (2004) Subaru /HDS $< 0.1 \%$ (H)

宇宙からの観測

- Charbonneau et al. (2002) HST /STIS

Na D線を含む5887 ~ 5899 の積分結果で、
- $0.023 \pm 0.006 \%$ の追加吸収が報告された

すばる /HDS による高分散分光観測



観測位相

2002年10月の1晩でTransitを含む

30フレームのデータを取得

内訳: in 12 out 12 half 6

観測パラメータ

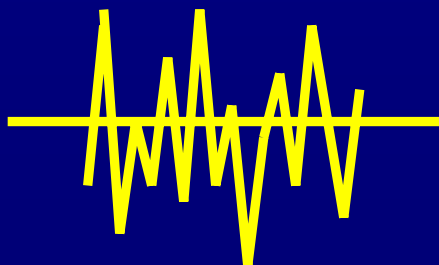
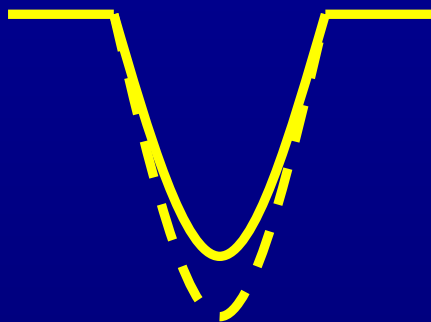
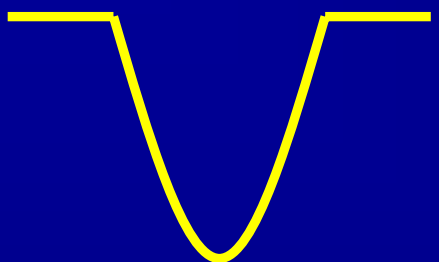
観測波長領域 4100 ~ 6800

波長分解能 45000

平均露光時間 500 sec

SN / pix ~ 350

解析方法



1. 取得した全てのフレームを足し合わせてテンプレートを作成
2. 時系列ごとのそれぞれのフレームにtotal fluxおよびline shiftが合うようテンプレートを較正
3. 引き算後の残差を積分し較正したテンプレートに対する変化の割合を求める

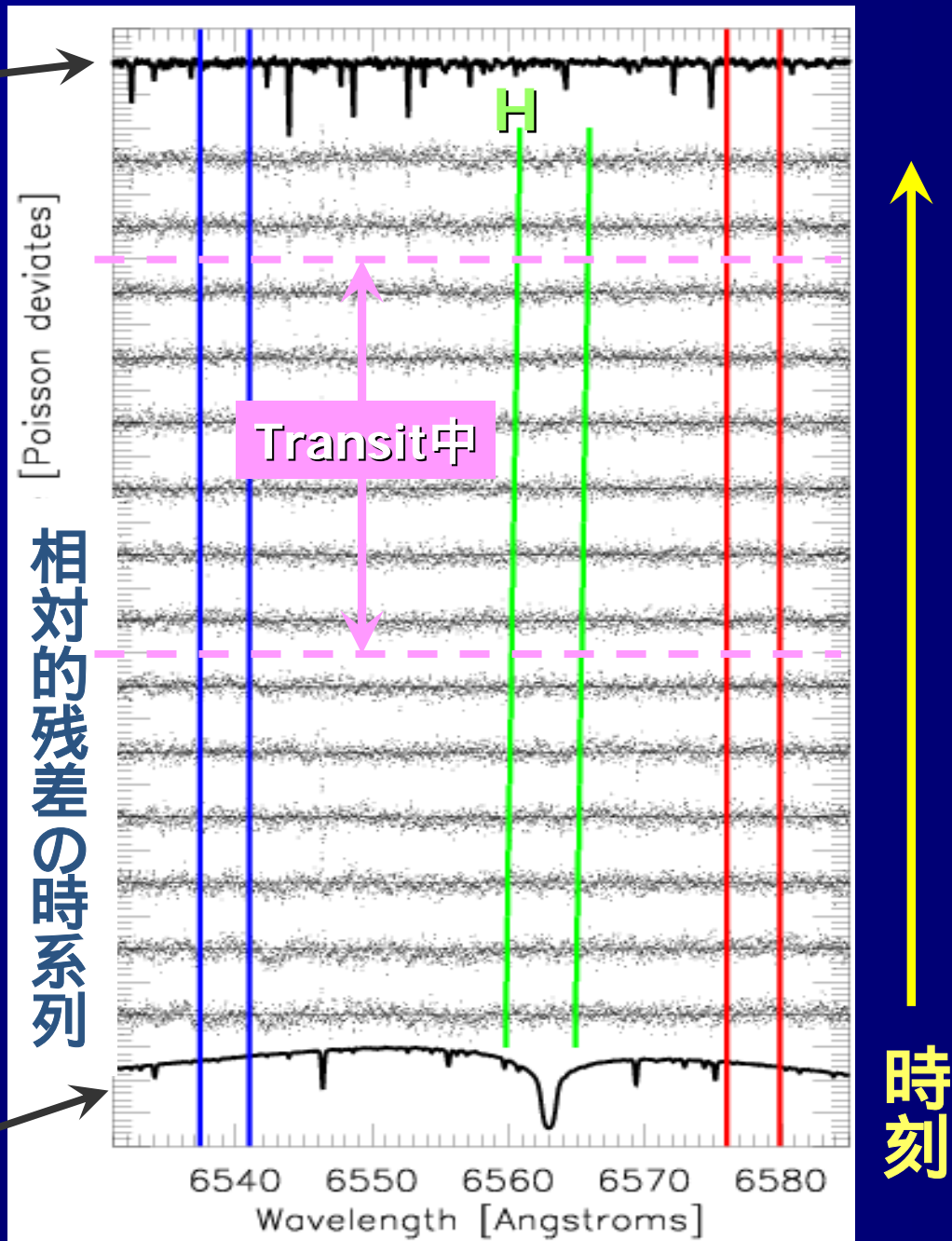
HD209458b 惑星大気による 吸収の探査

H 付近の
地球大気スペクトル

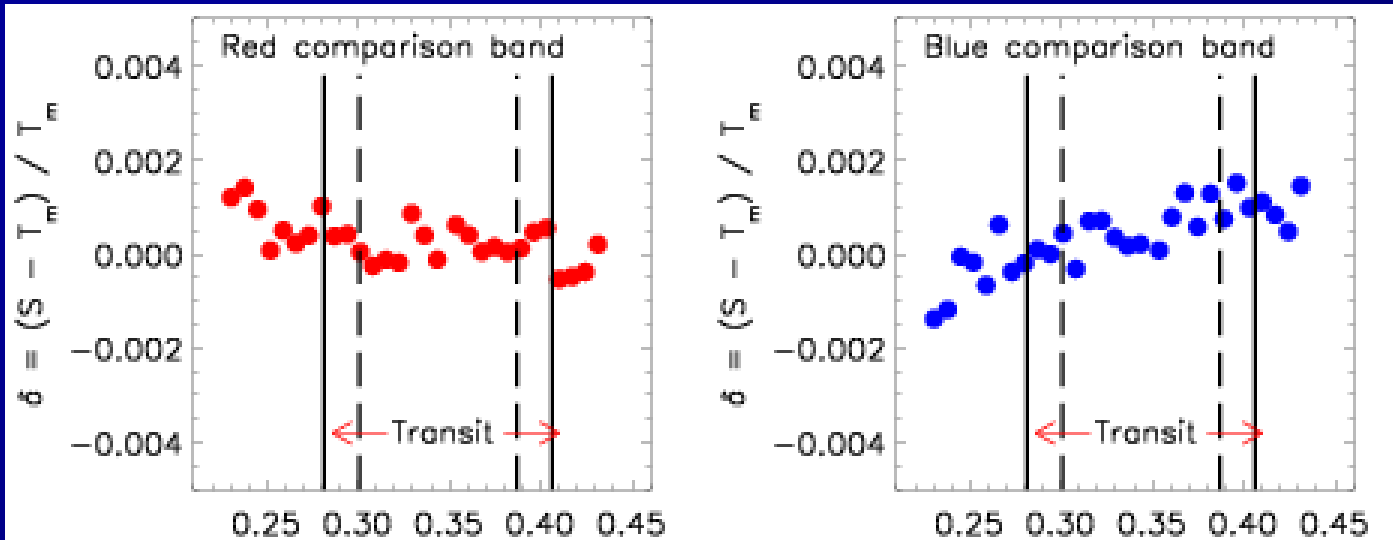
Na I (D2)	5889.97
Na I (D1)	5895.94
H	6562.81
H	4861.34
H	4340.48

Transit でない時期の
H 付近のスペクトル

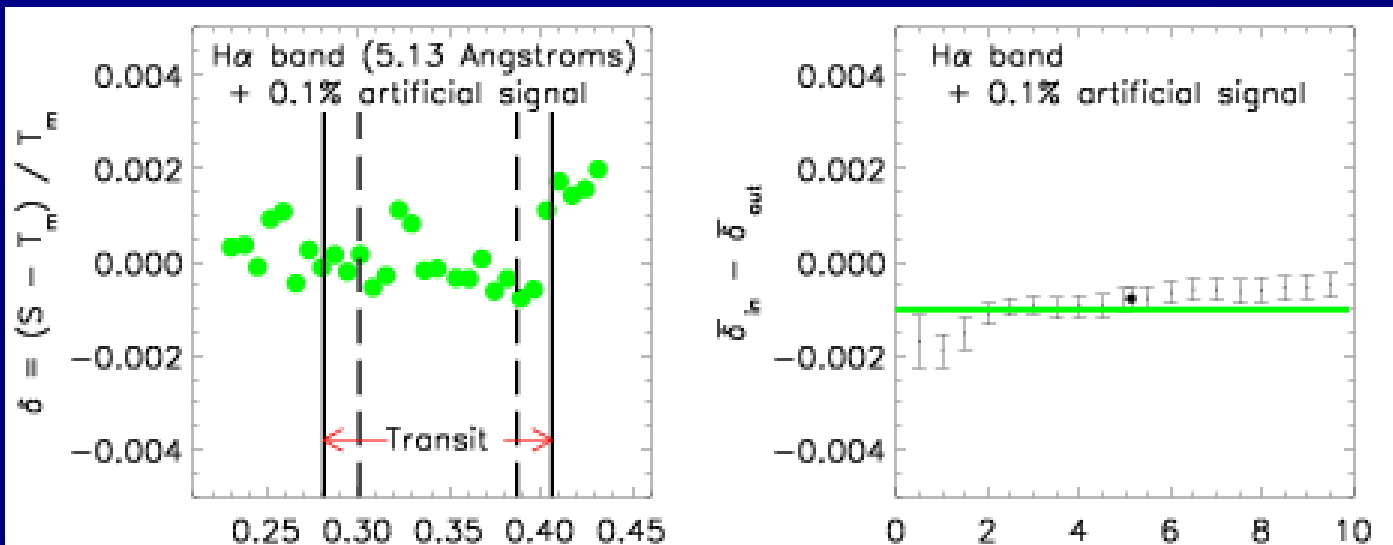
(Winn et al. 2004)



系統誤差のチェック



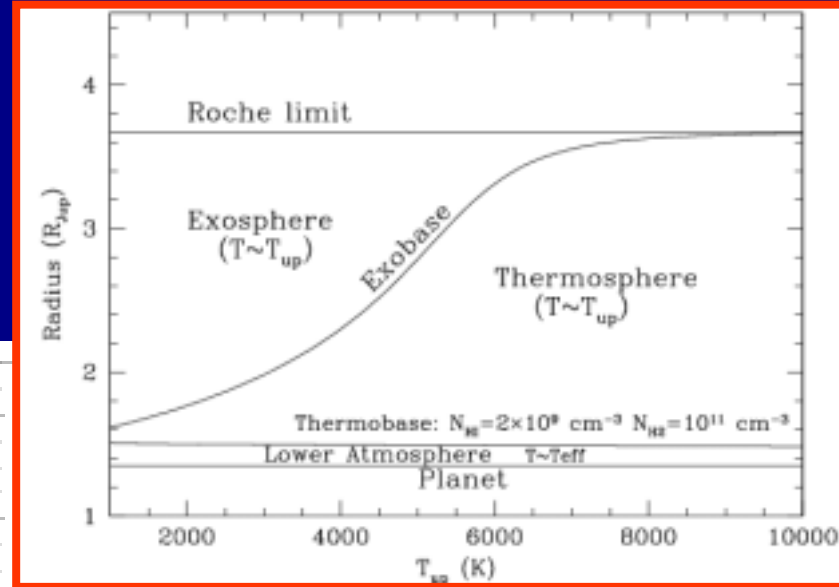
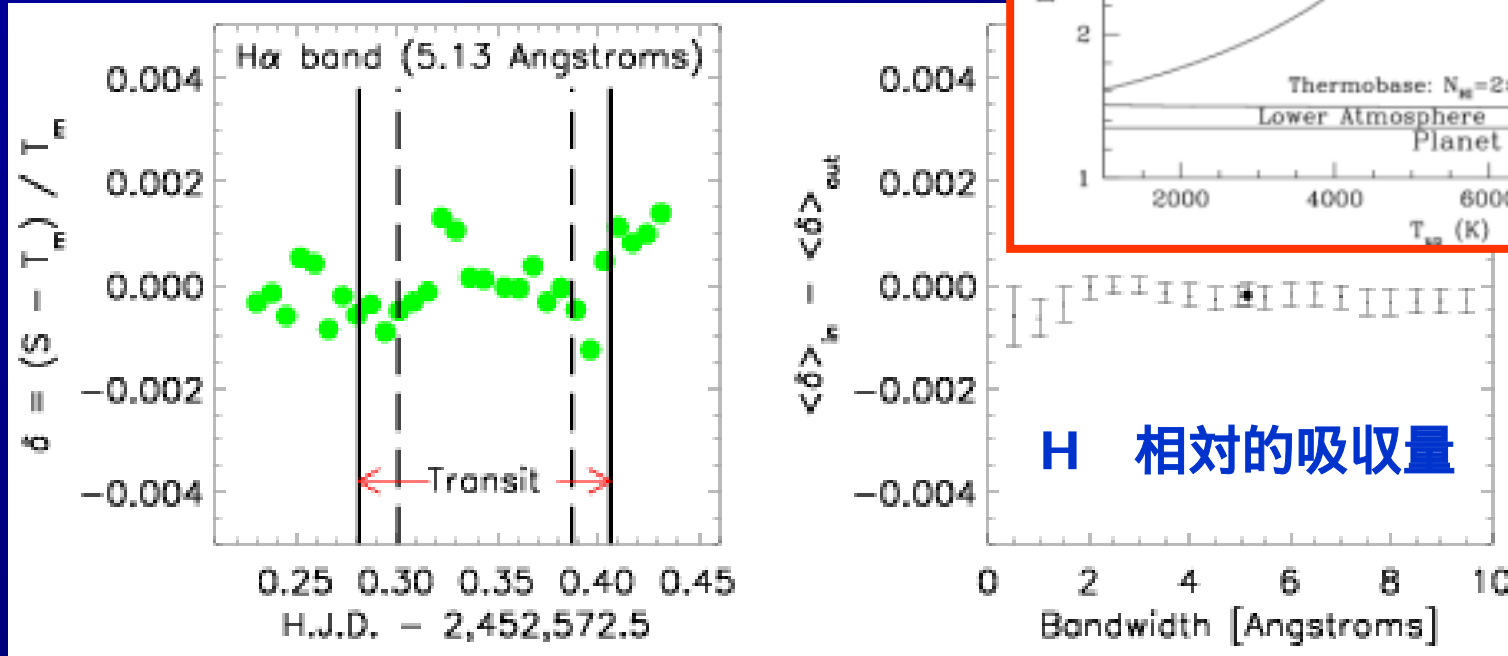
H の波長
を含まない
赤側と青側
での同様の
解析



人工的に
0.1パーセ
ントの吸収
を追加した
場合の検
出度

(Winn et al. 2004)

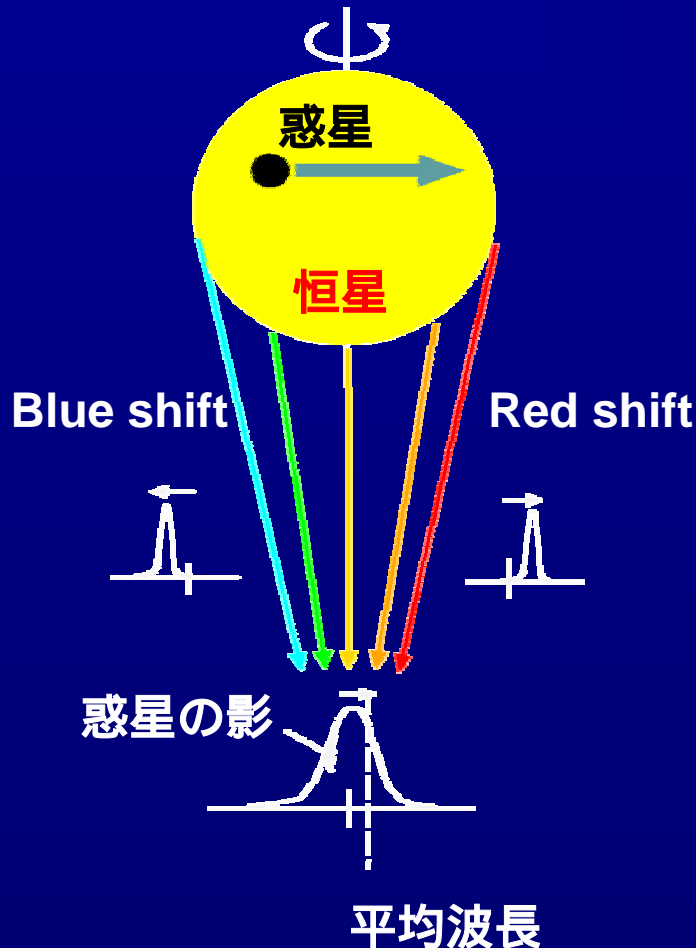
HD209458b 惑星大気中の 中性水素吸収量と励起温度



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

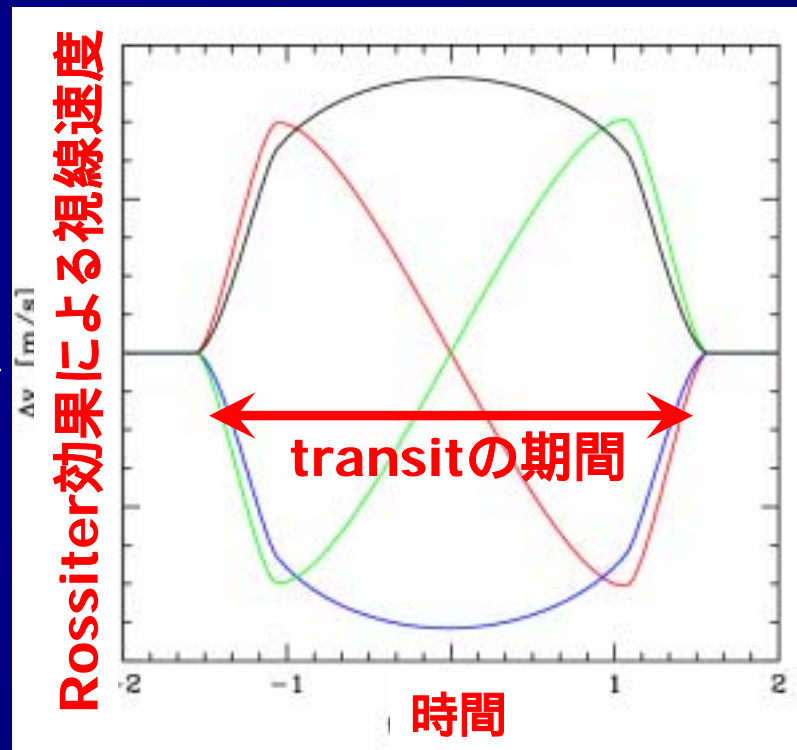
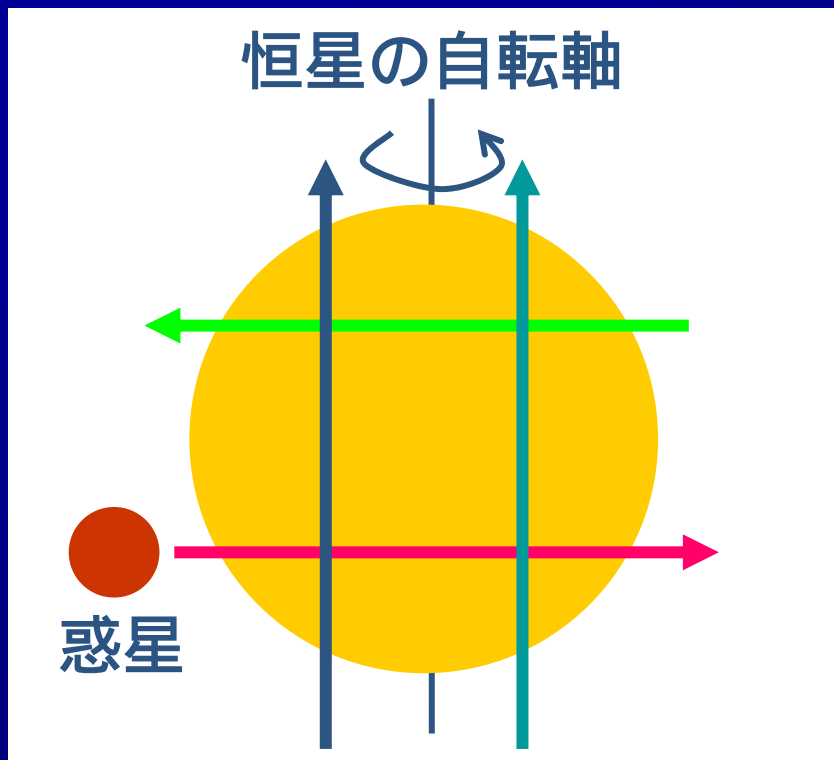
Rossiter-McLaughlin 効果とは

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 Doppler 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

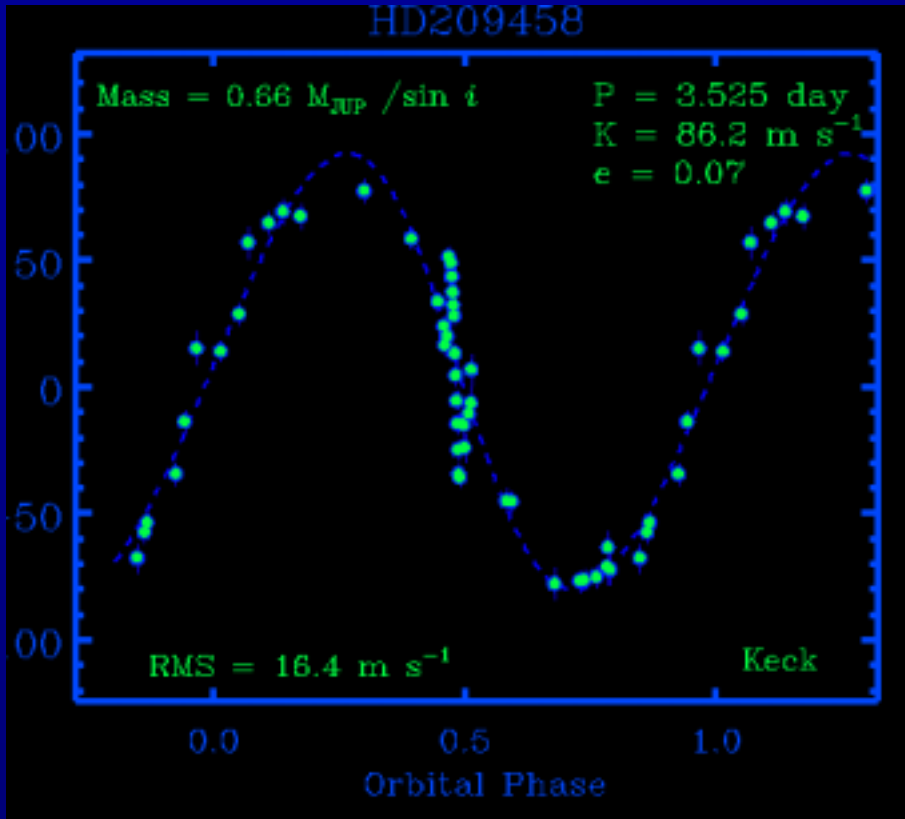


恒星の自転軸に対して惑星が横切った方向がわかる
惑星の公転軸と恒星の自転軸の向きの関係
(HD209458系の場合は揃っている)

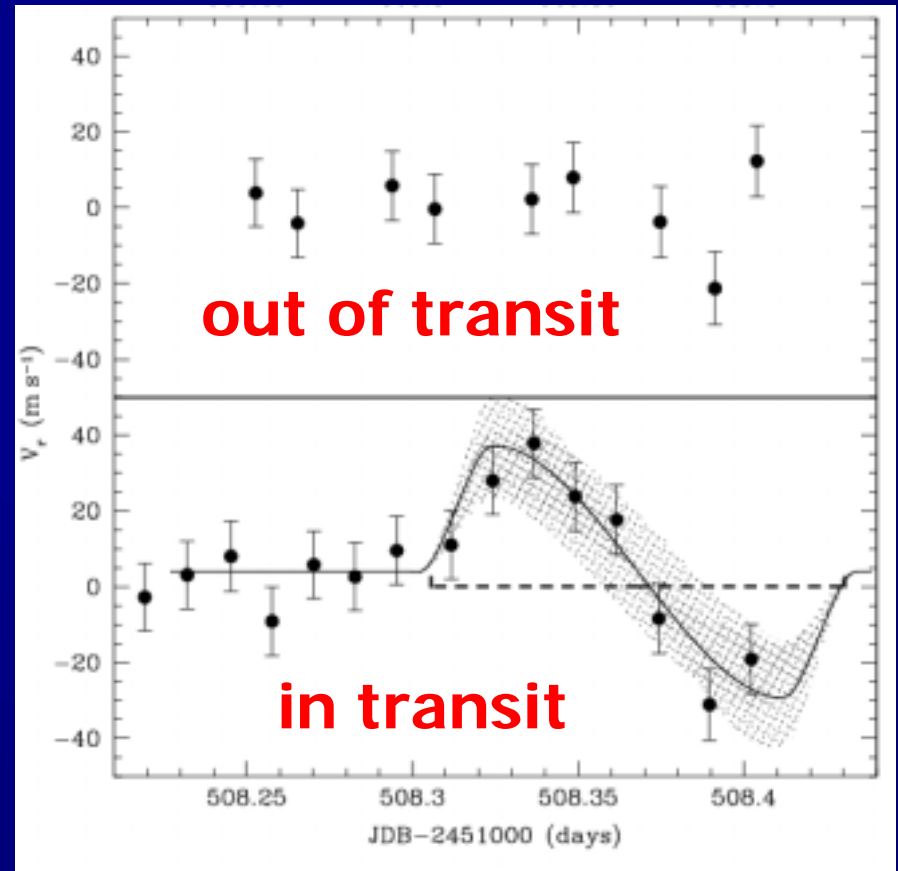
惑星系の形成、進化に関する重要な情報

Spectroscopic transit signature

(Rossiter-McLaughlin 効果)



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

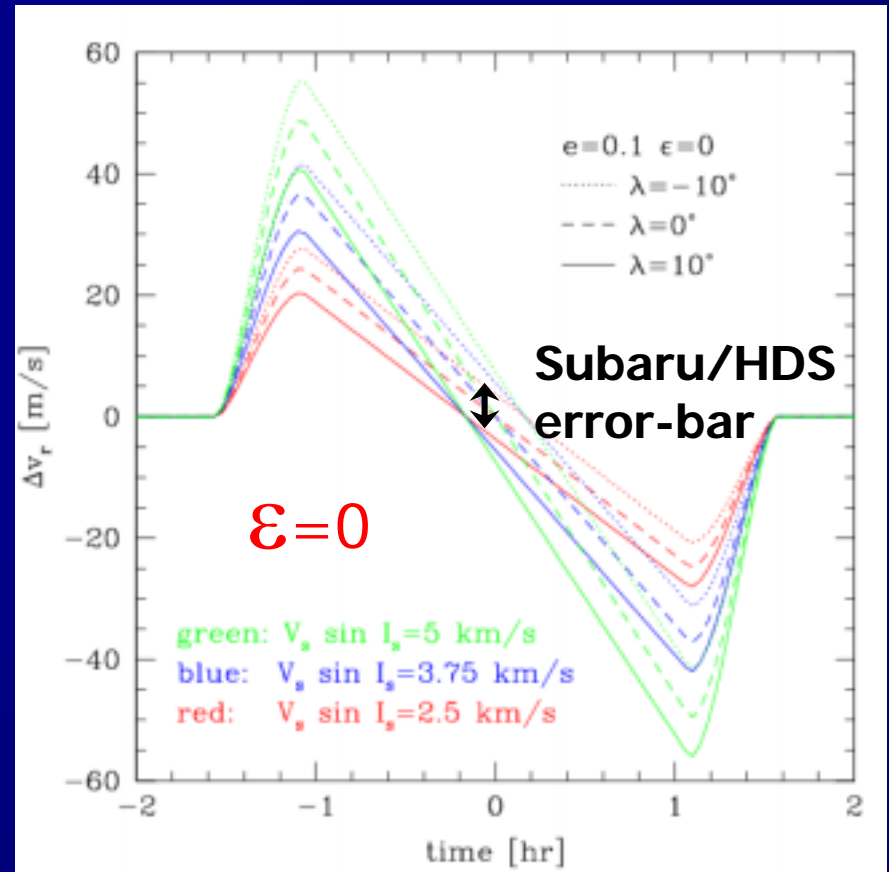
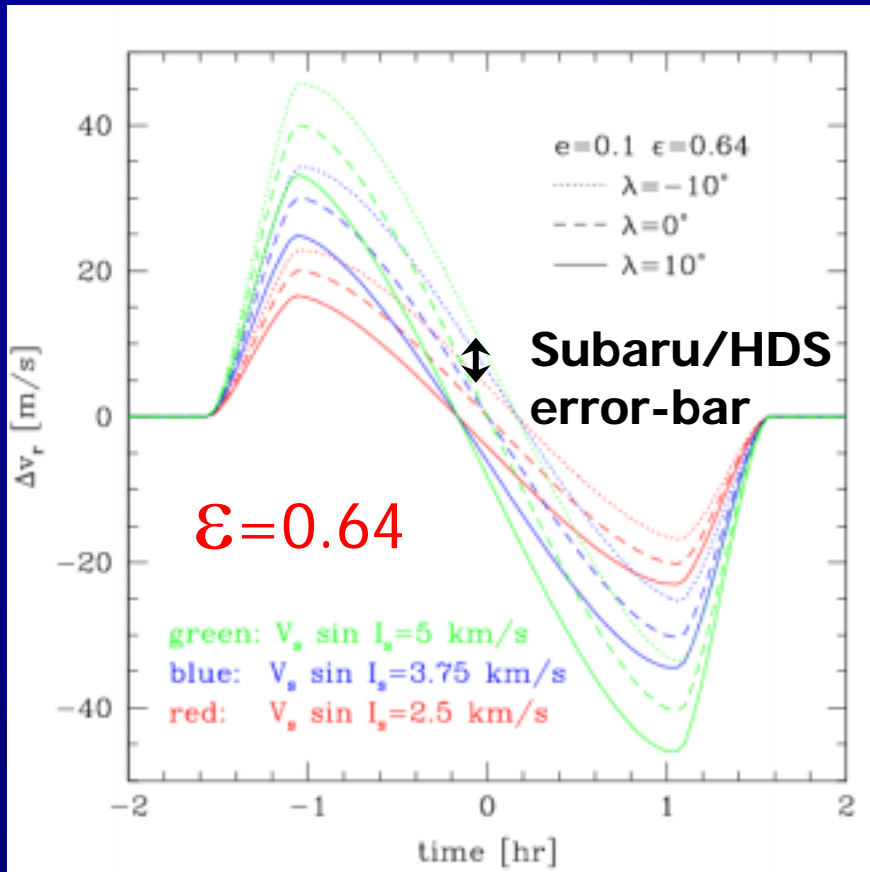


主星の自転と惑星の公転が同方向
Queloz et al. (2000) A&A 359, L13
ELODIE on 193cm telescope

HD209458はRossiter効果の研究に理想的

	連星系	系外惑星系
掩蔽天体	星	惑星
雑音	掩蔽する星自身	惑星は掩蔽するのみ
モデル	困難、数值的 (極度に非線形)	容易、解析的 (摂動論が良い近似)
候補天体	無数	実質的にHD209458のみ
科学的興味	連星系の性質	惑星系の起源と進化 (特に、主星の自転軸と惑星の公転軸の一致の度合い)
歴史	深すぎる (Rossiter 1924; Hosokawa 1953; Kopal 1990)	浅い (1953年生まれの親の息子でも論文が書ける！) Ohta et al. (2004)

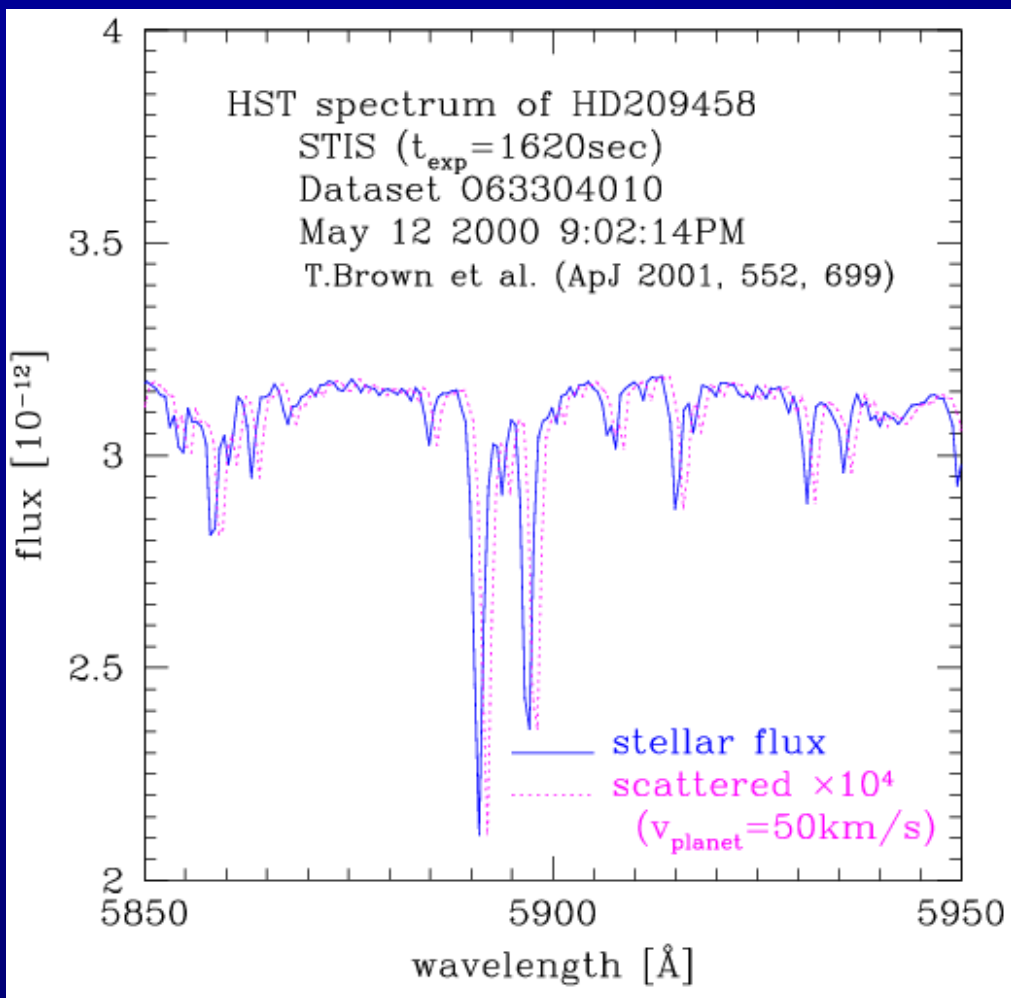
radial velocity の予想曲線



$$\text{Limb darkening: } B = 1 - \epsilon (1 - \cos \theta)$$

(Semi)-analytic template curves (Ohta, Taruya & Suto 2004)

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

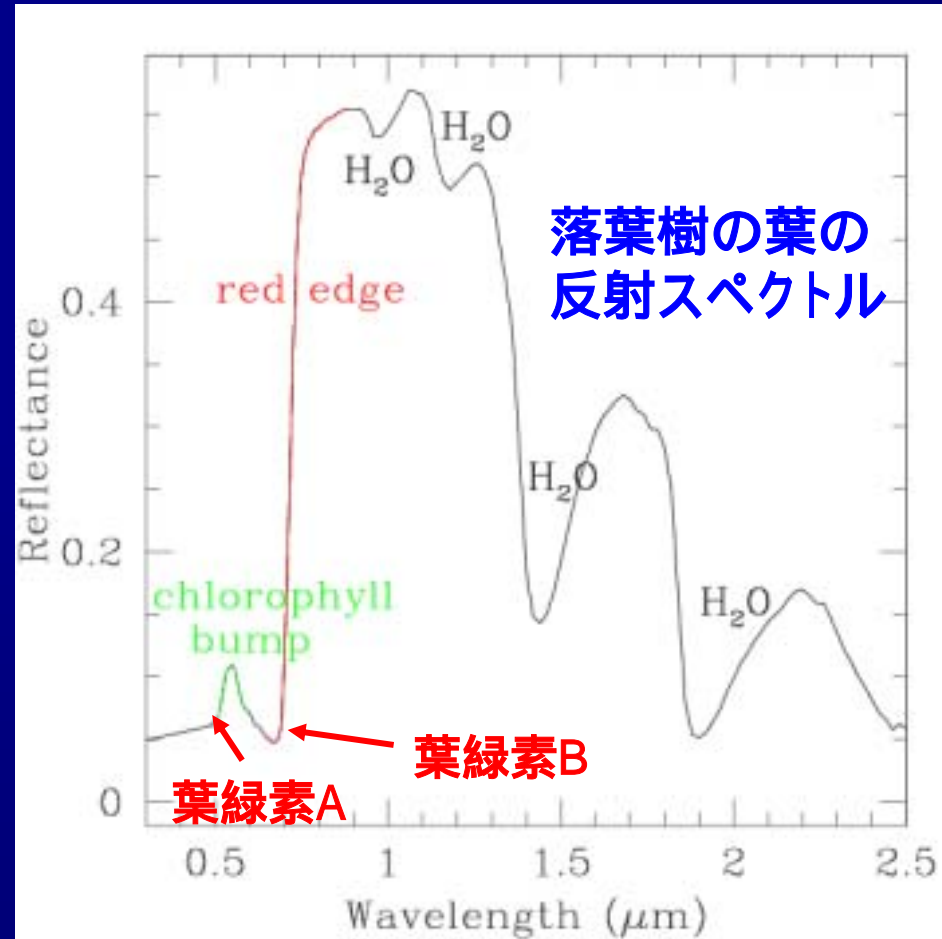
- 地球型惑星の見
- *Biomarker*の同定 (e.g., extrasolar plant)
- *Habitable planet*の見
- *Extraterrestrial life*の見

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 plant** as a biomarker in **extrasolar planets**)



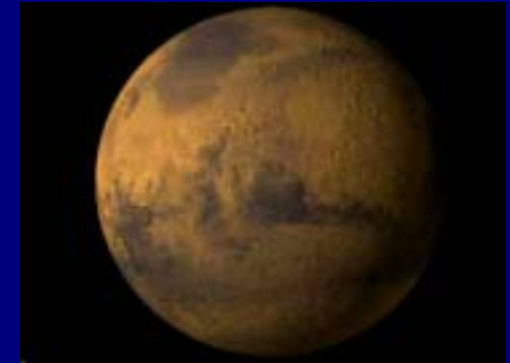
Vesto Melvin Slipher (1875-1969)



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

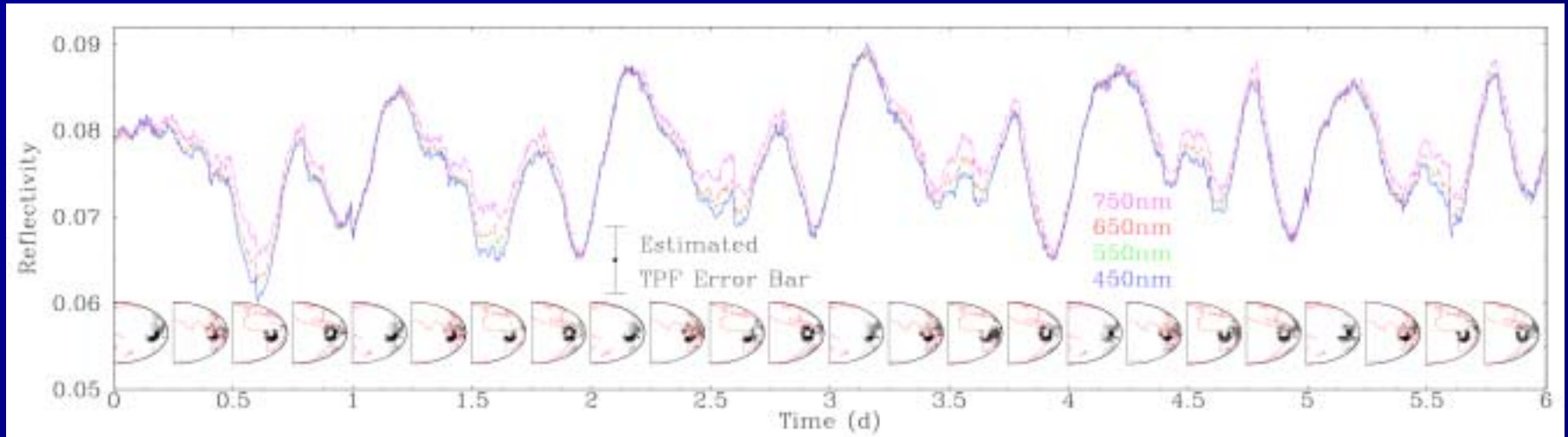
- Discovered redshifts of “spiral nebulae” now known as galaxies
- Essential contribution for Hubble’s discovery of expanding universe

“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？

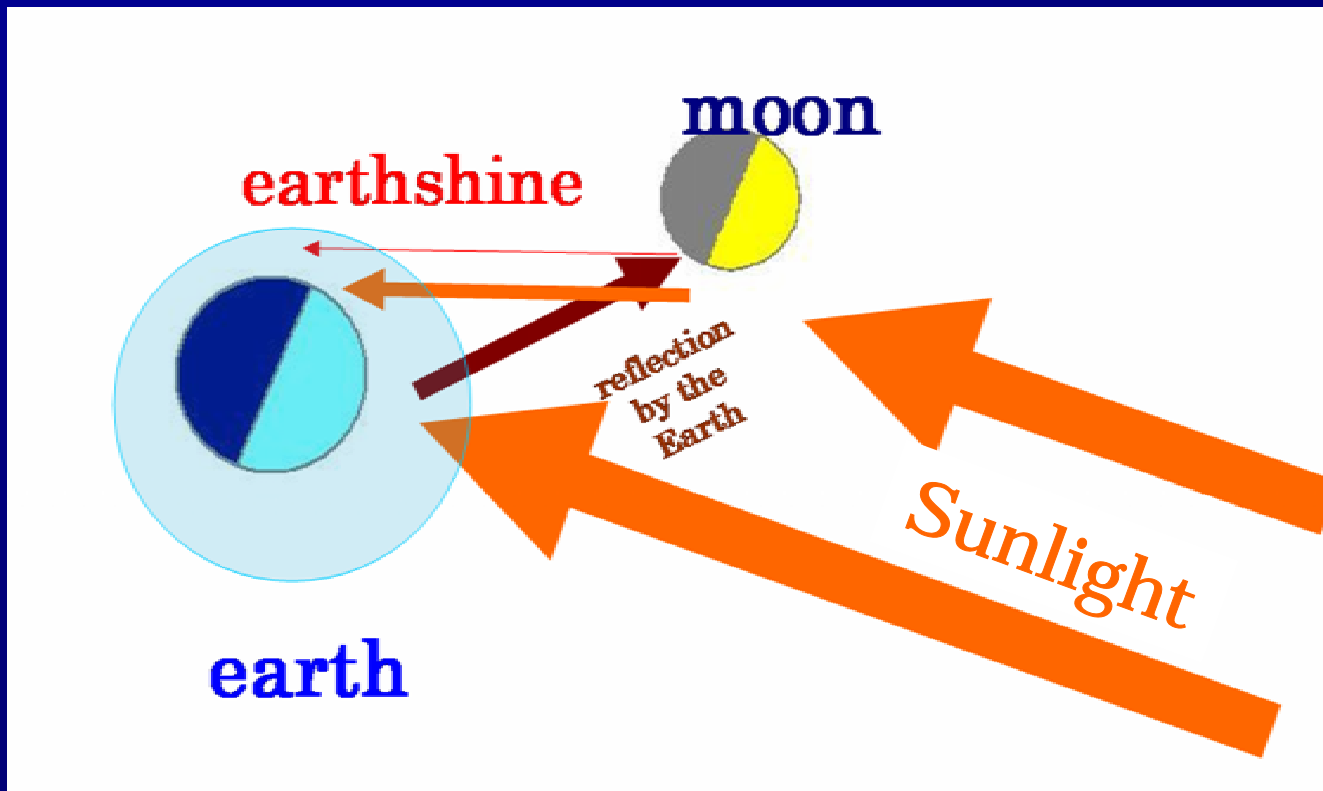


Ford, Seager & Turner: Nature 412 (2001) 885

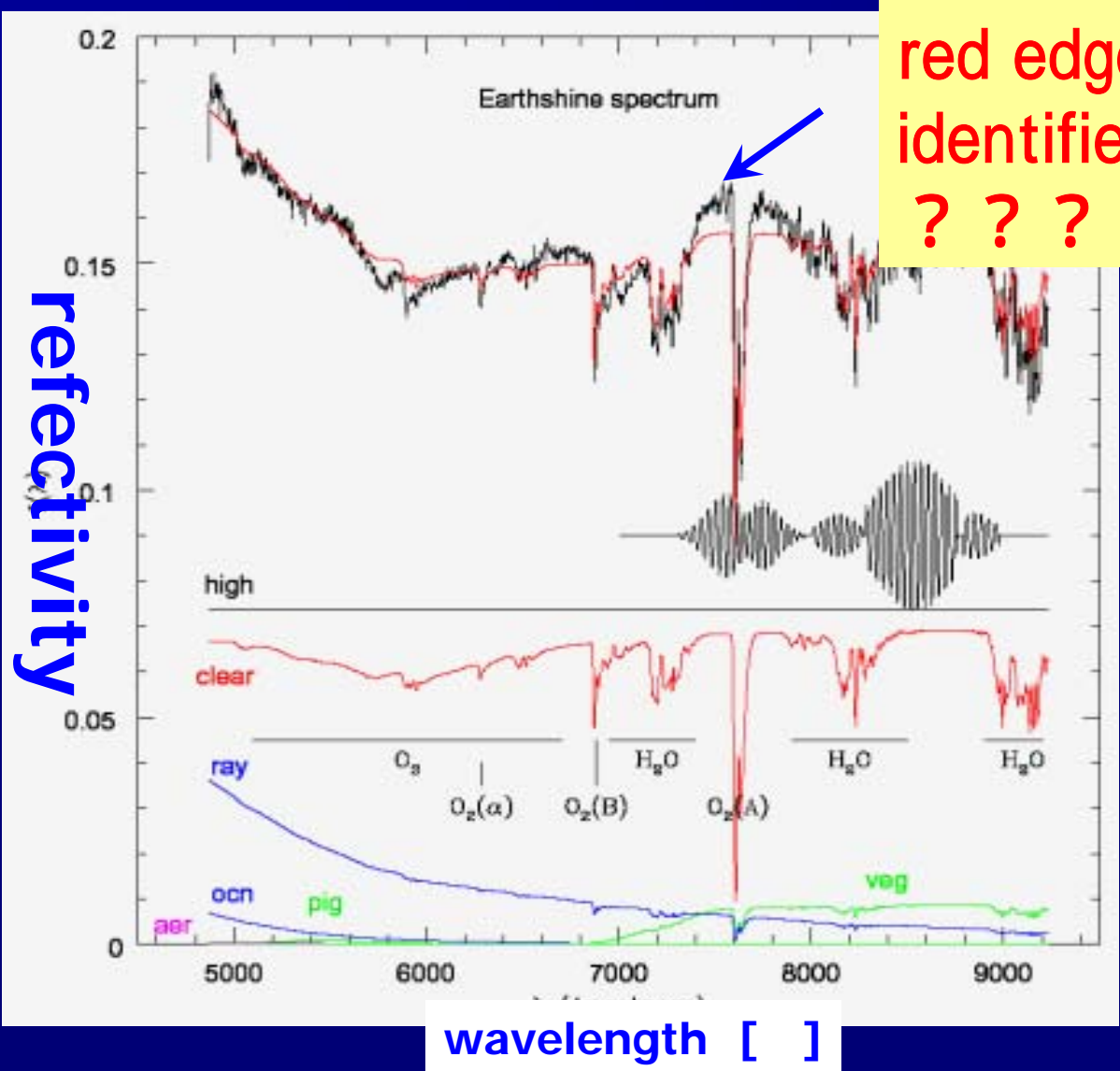
- **Assume** that the earth's reflected light is completely separated from the Sun's flux !
 - TPF (Terrestrial Planet Finder) in (10 ~ 20) years from now ?
- **Periodic change of 10% level** due to different reflectivity of land, ocean, forest, and so on
- Cloud is the most uncertain factor: **weather forecast !**

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 ?*

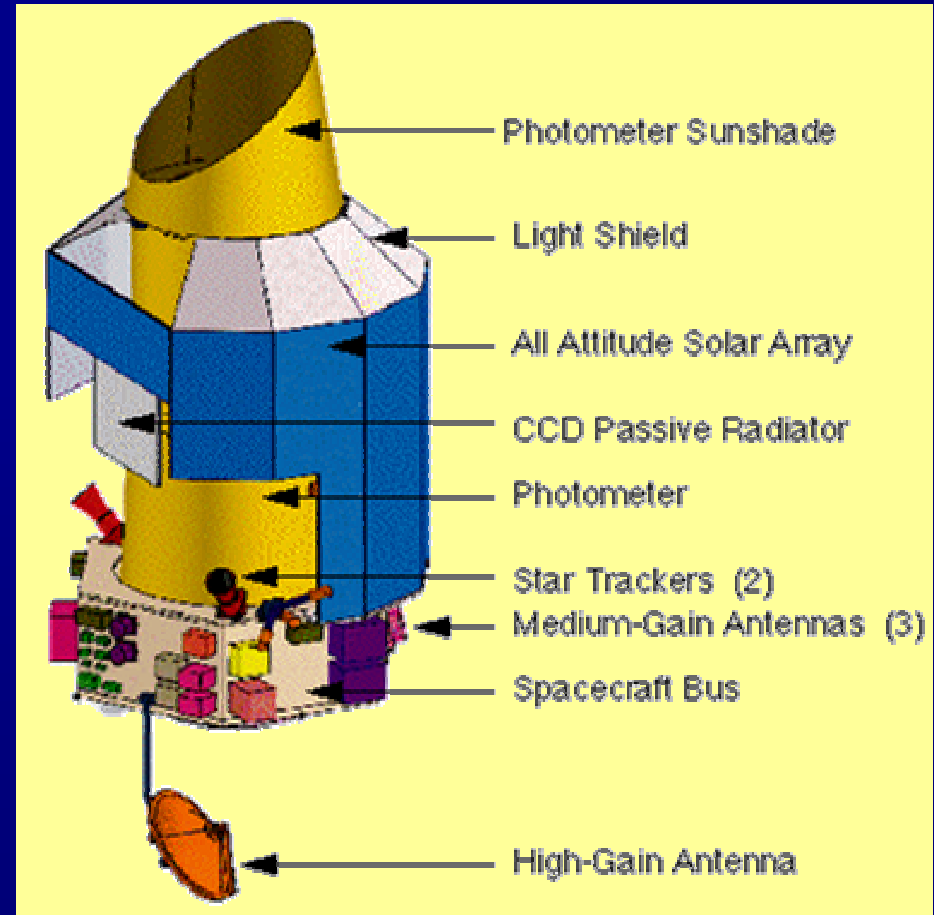
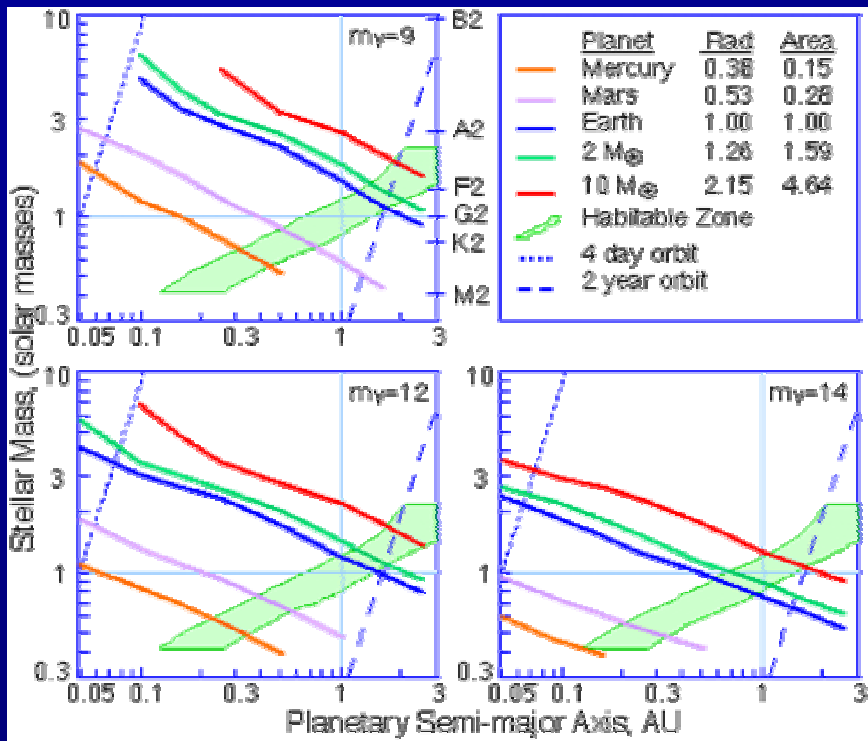


red edge
identified
? ? ?

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

Kepler (NASA: launch 2008?)

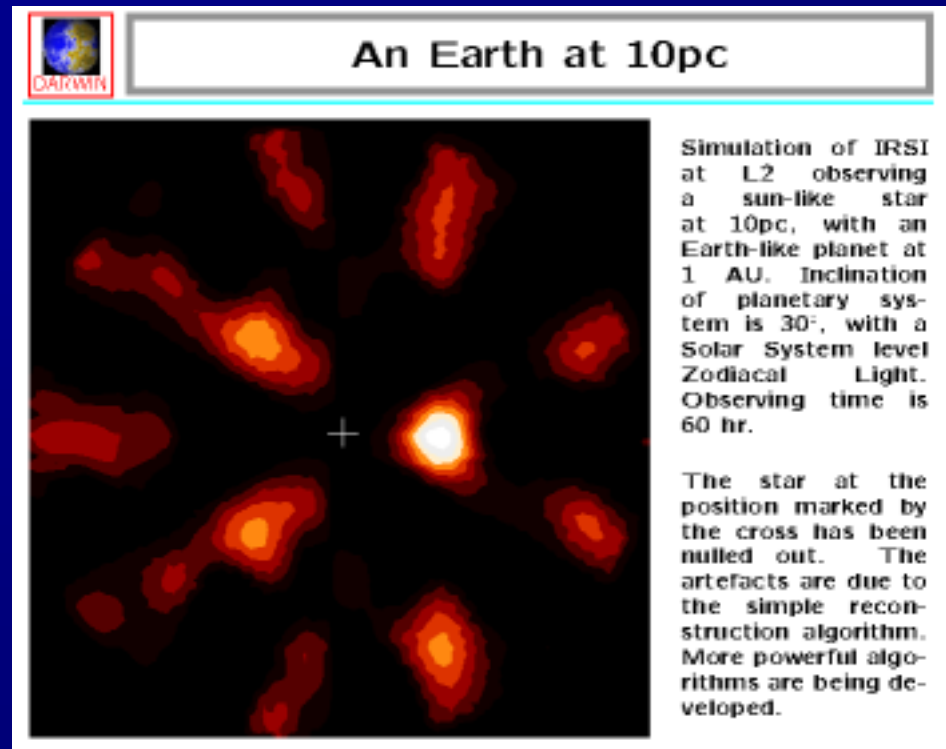
differential photometry



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

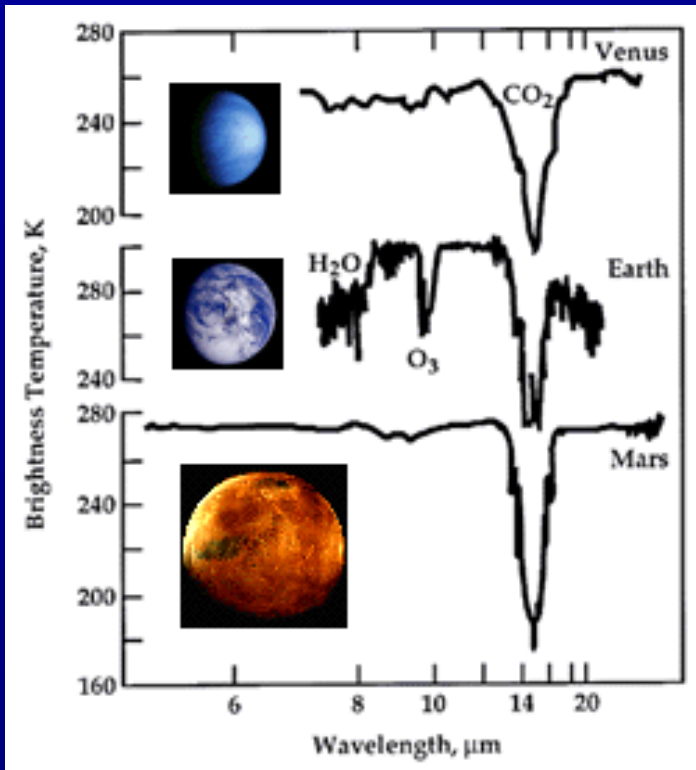
Darwin (ESA: launch after 2015)

**infra-red space interferometry:
imaging and spectroscopy**



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

Prospects in the 21st century: from astronomy to astrobiology



- Gas planets: from discovery phase to “characterization” phase
 - Understand origin, formation and evolution
- **Discovery of terrestrial planets**
- Discovery of habitable planets
 - Liquid water
- **Ultra-precise spectroscopy**
 - Separate the planetary emission/reflection/absorption spectra from those of stars

How to convince ourselves of the presence of extra-terrestrial life simply from remote observations ? Biomarker !!!