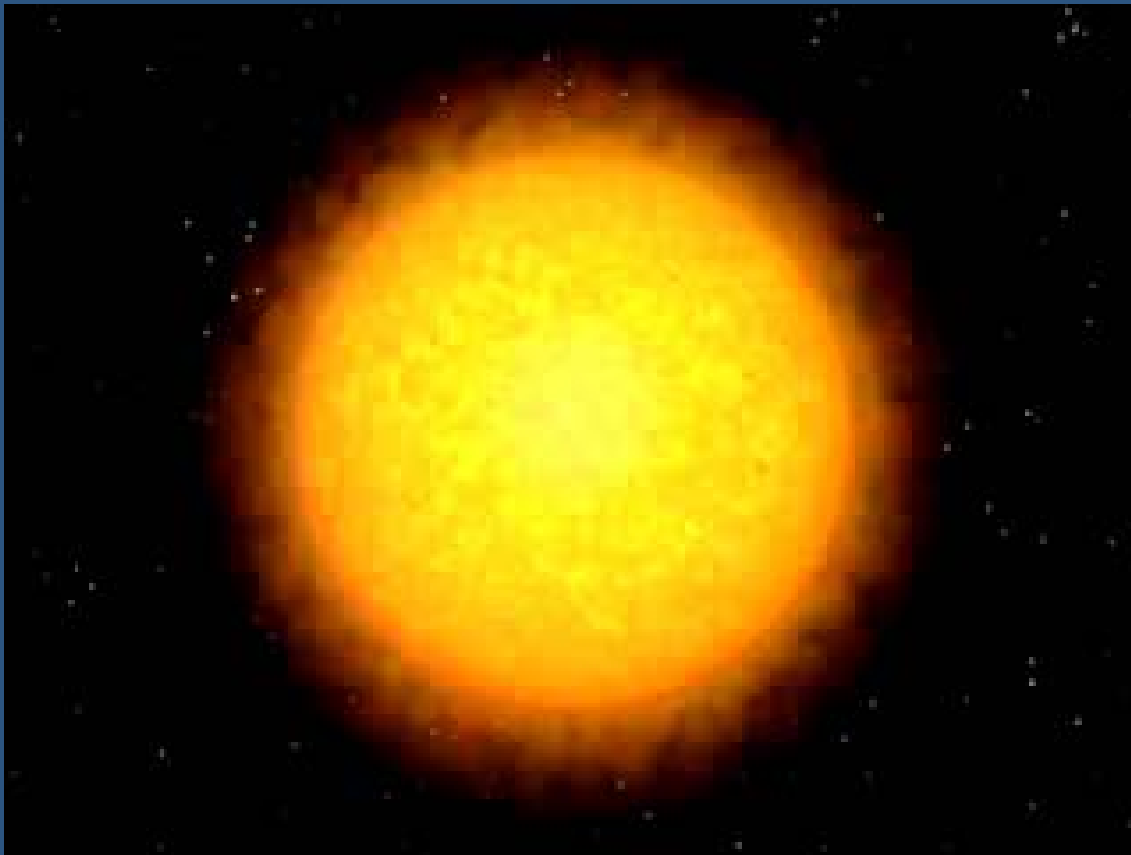


太陽系外惑星の分光観測と transiting planet HD209458b



東京大学
大学院
理学系研究科
物理学専攻
須藤 靖

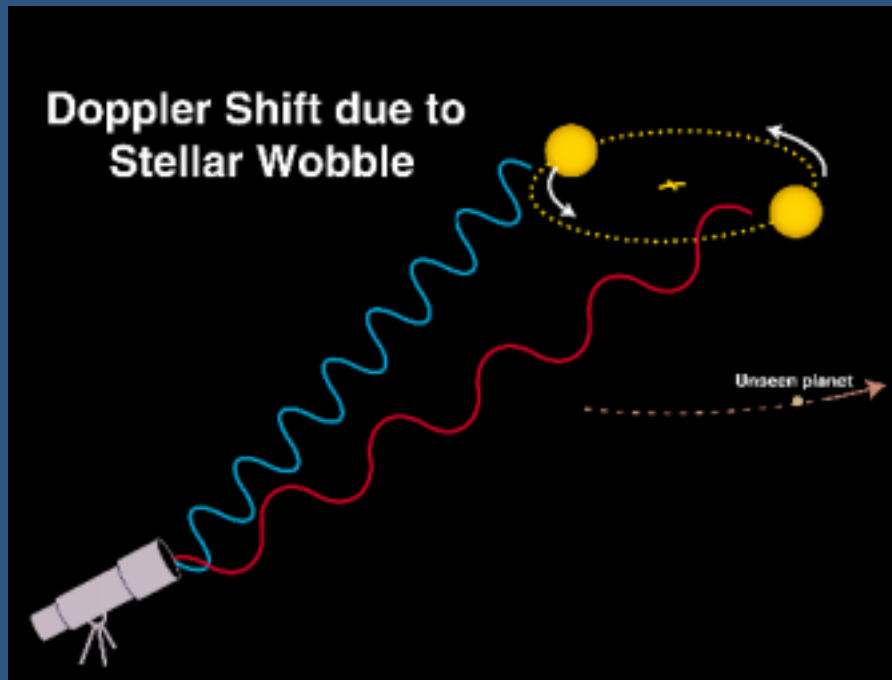
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/>
2004年6月17日 HDSセミナー@国立天文台

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：惑星大気中に炭素と酸素を検出
- 2004年：公転周期1.4日、1.7日のトランジット惑星発見
- 2004年5月15日時点で122個の系外惑星が報告済み

惑星を間接的に「見る」

惑星は直接見えなくても、
主星の軌道はその影響を受ける



ケプラーの法則：
地球は太陽の周りを楕
円運動している

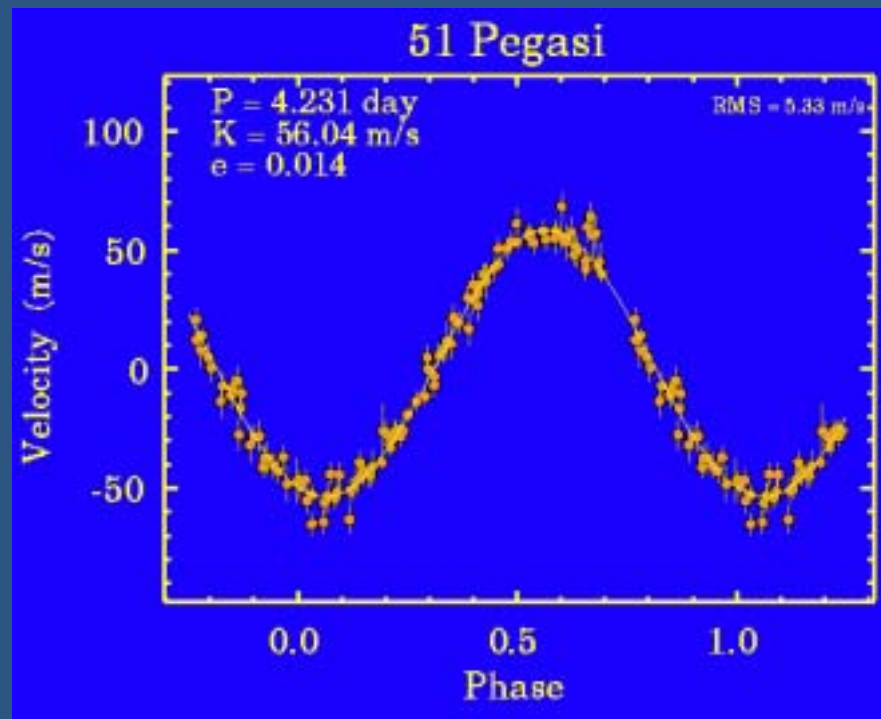
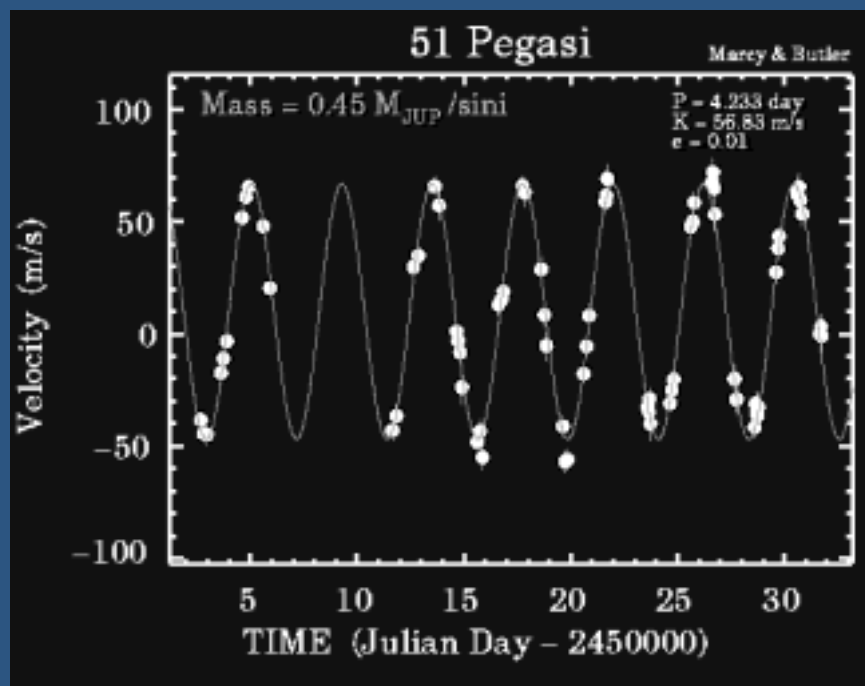


厳密には、太陽も地球
のために少しだけいつ
も運動している

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100個以上発見されている (122個@2004年5月17日)

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

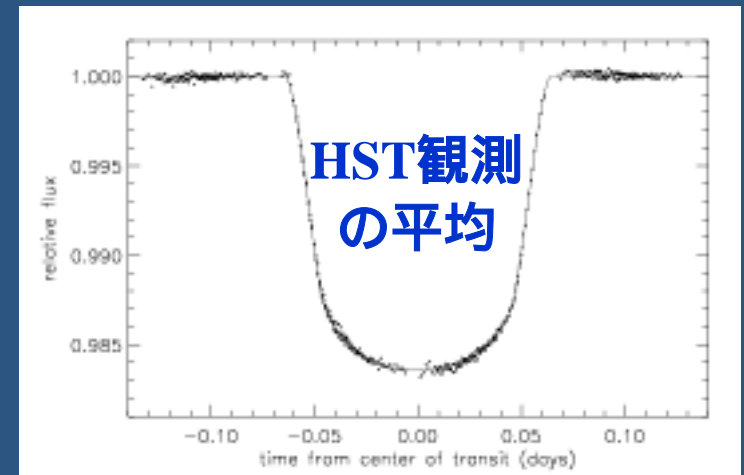
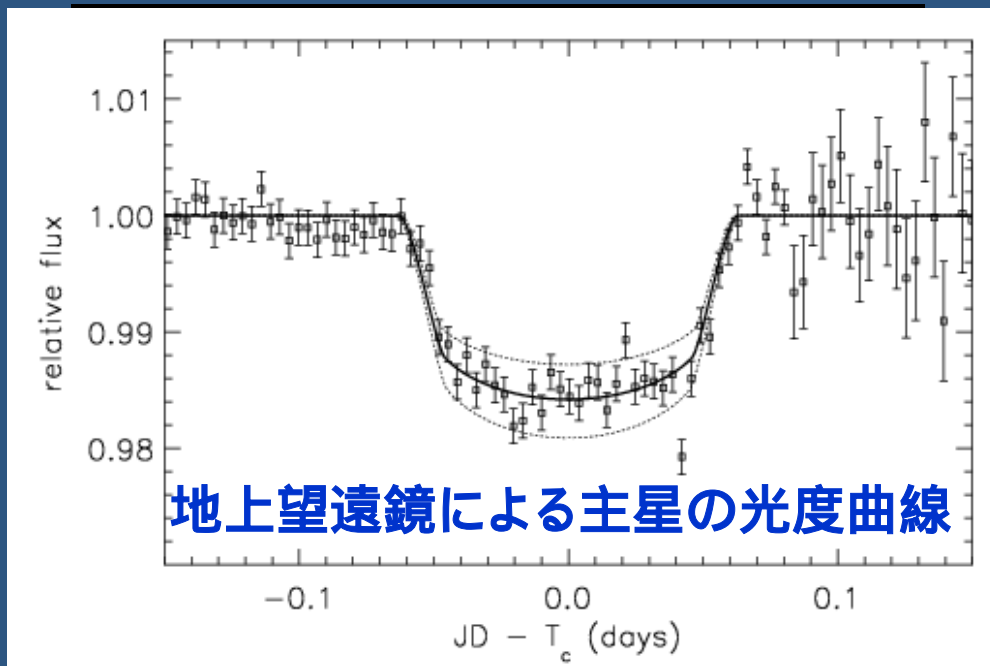
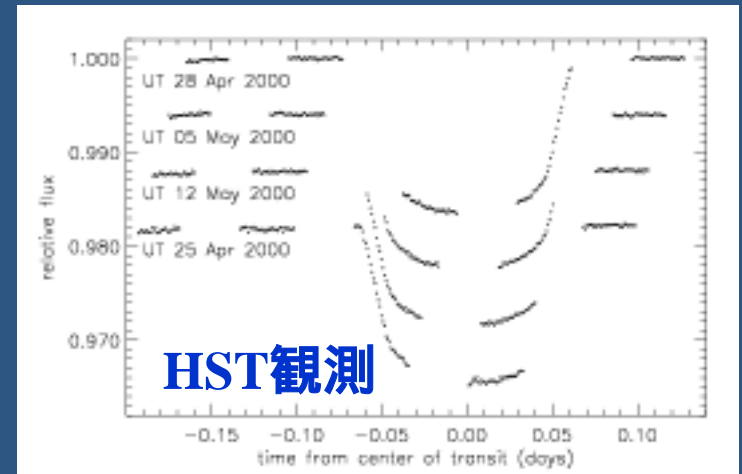
- 主星の速度変動の検出によって初めて発見された惑星 (Mayor & Queloz 1995)



周期がわずか4.2日！

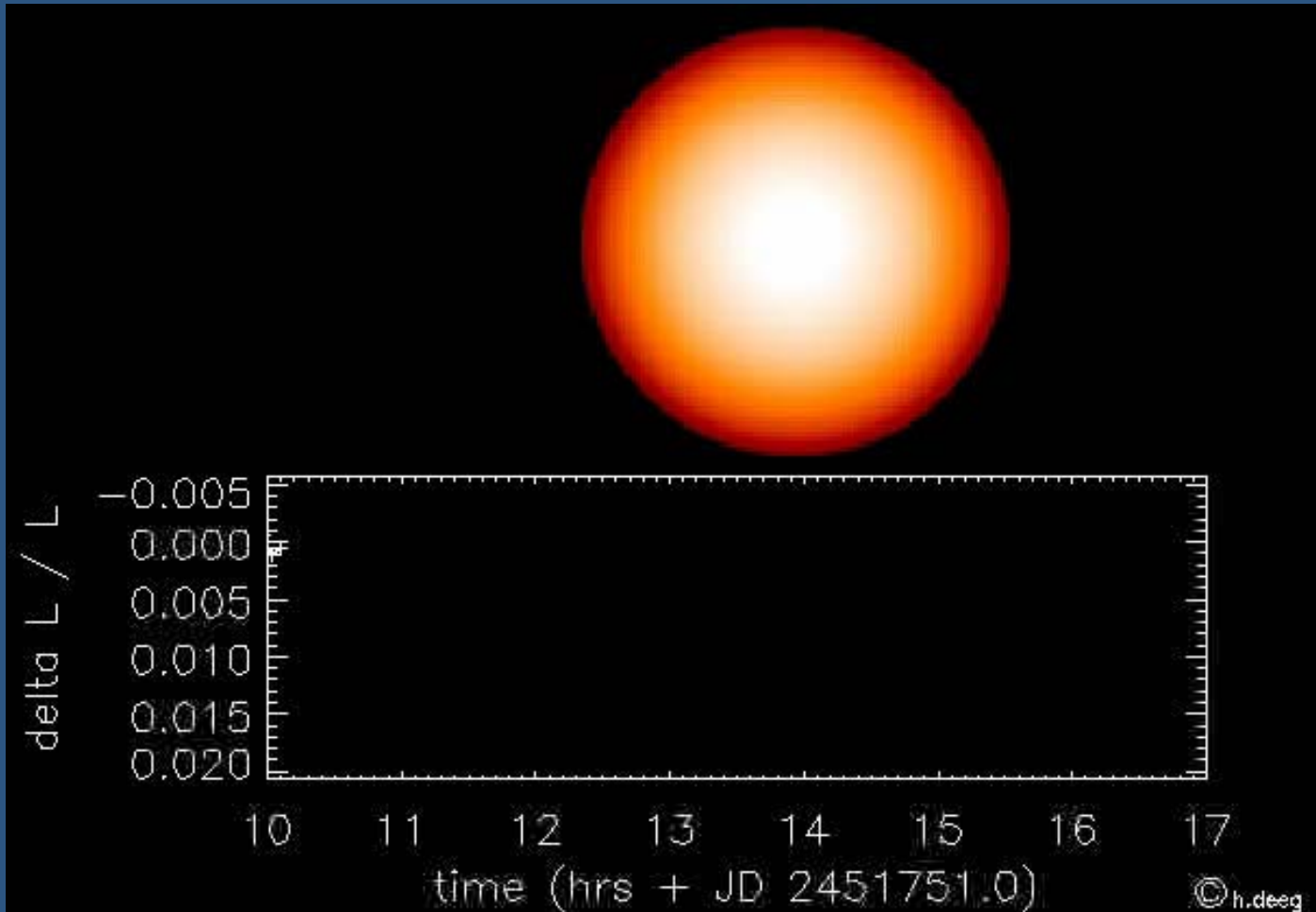
HD209458のトランジット観測

- 速度変動のデータに合わせて惑星の食を初めて検出 (Charbonneau et al. 2000, Henry et al. 2000)



Brown et al. (2001)

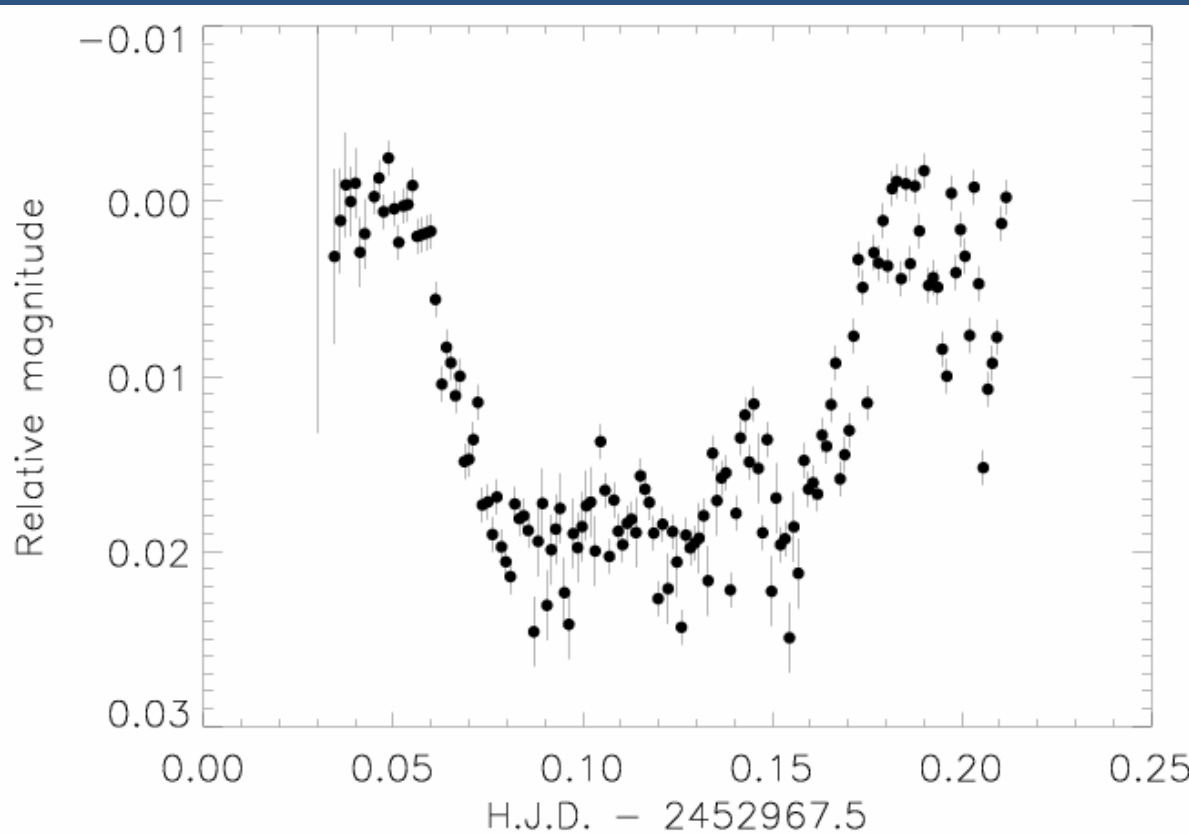
HD209458の食



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



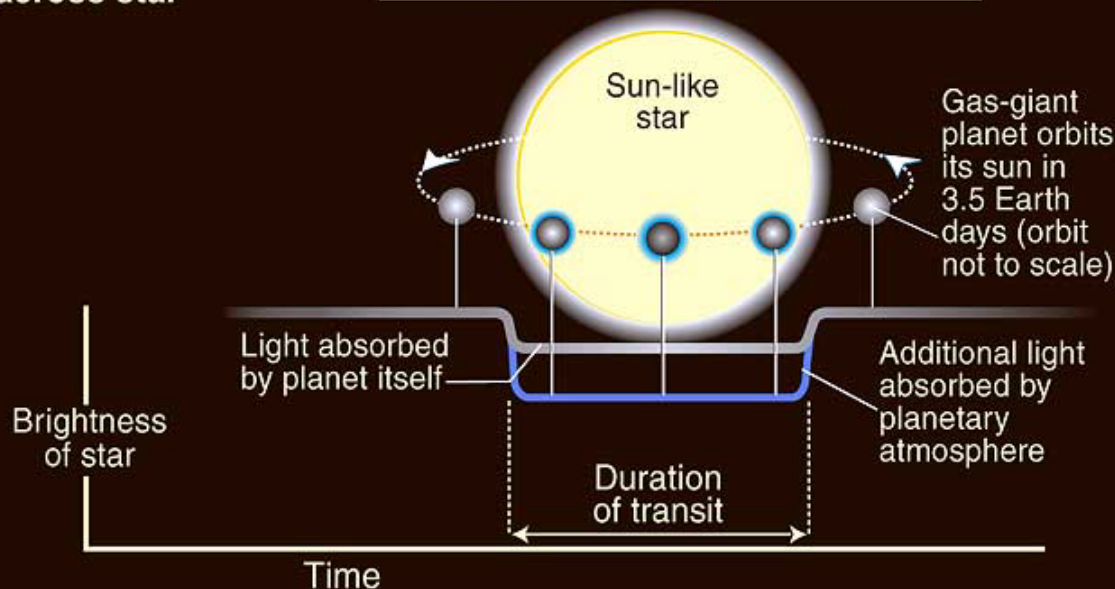
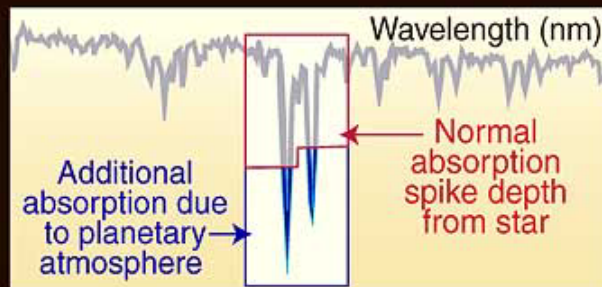
Josh Winn @Whipple Obs (1.2m)
November 24, 2003

- 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

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

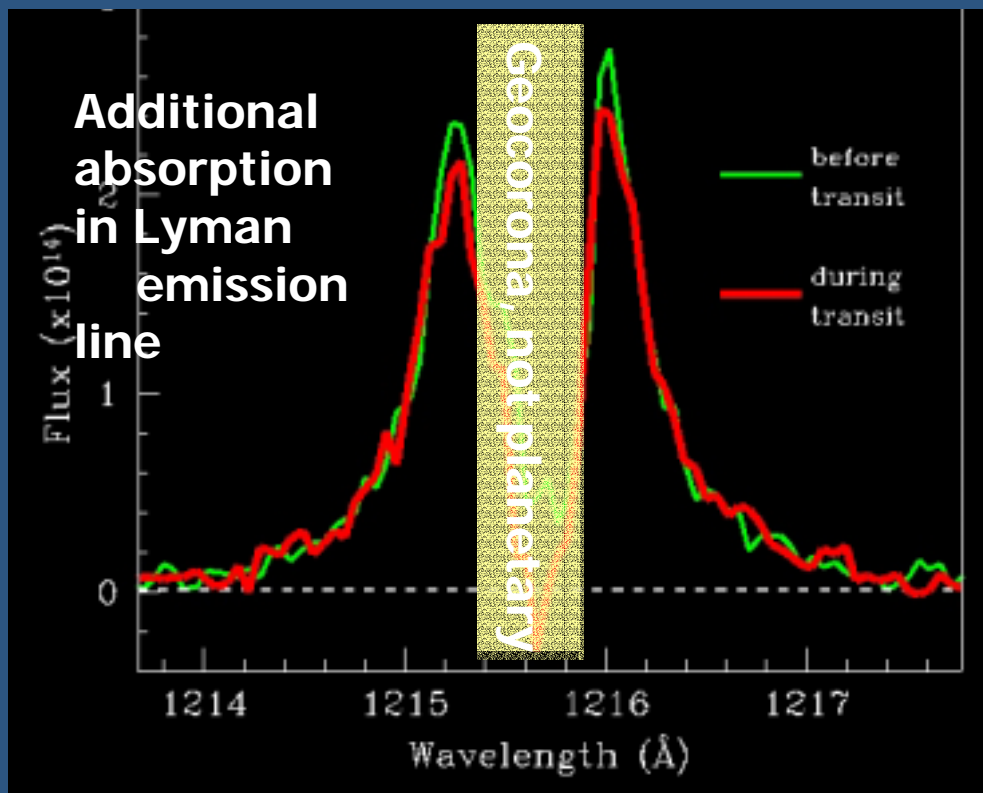
HD209458惑星系のパラメータ推定値

Radial velocity データ + *transit* データ

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

HD209458b: 蒸発 しつつある惑星？

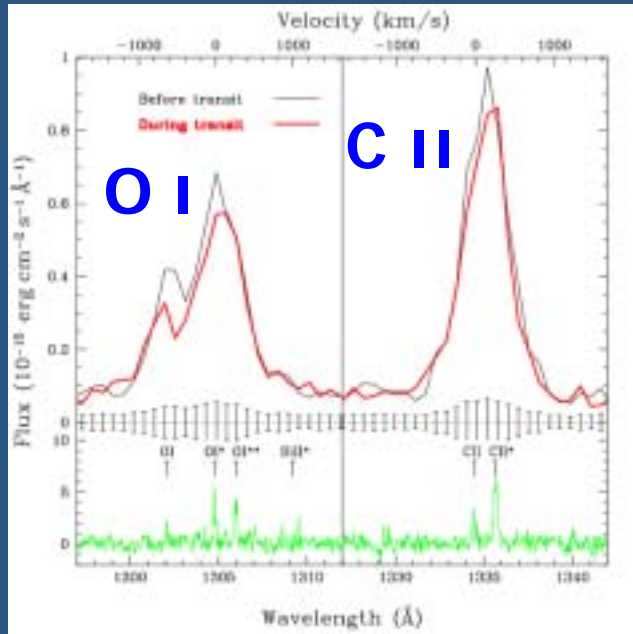
予想以上に大きい水素の吸収(15%)
惑星を広くとりまく中性水素雲？



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

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

HD209458b大気に酸素と炭素吸収を発見



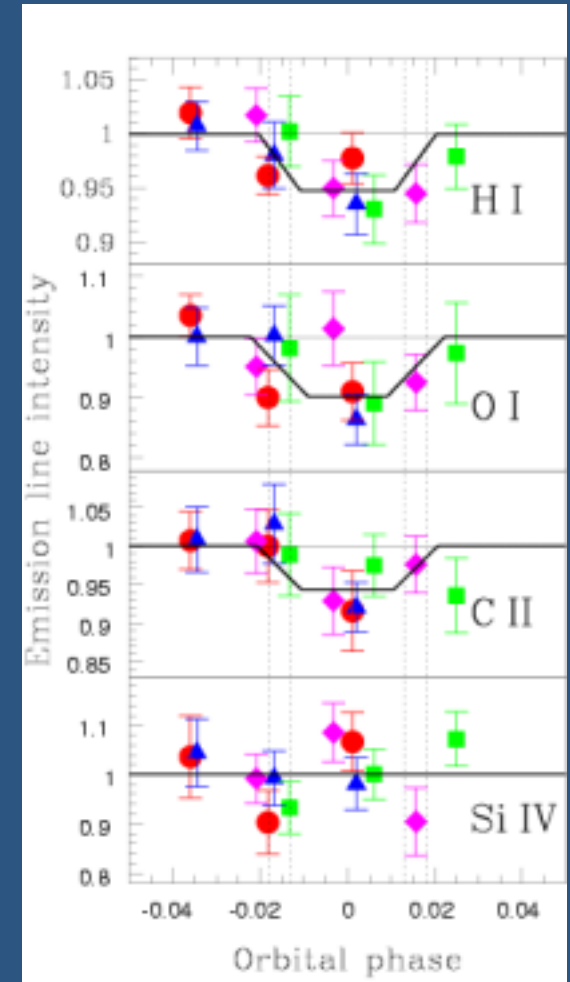
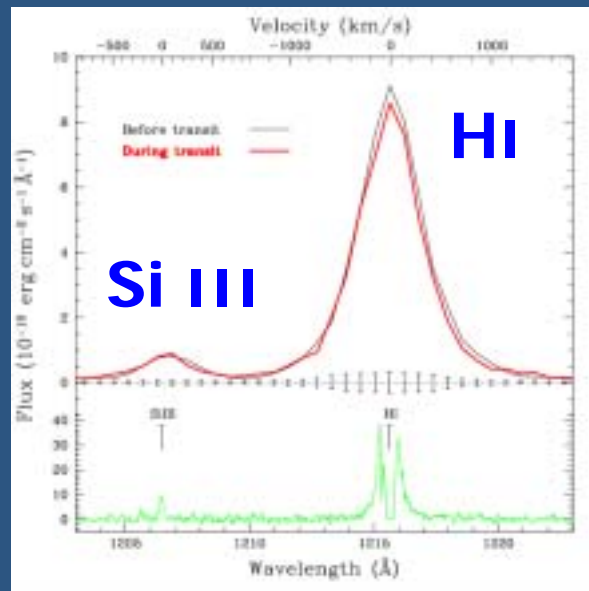
吸収量

連続光	2%
H I	5%
O I	10%
C II	6%

(upper)
low-resolution
HST spectra

(lower)
high-resolution
HST spectra

HD209458b



Vidal-Madjar et al. (2004)
astro-ph/0401457

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)

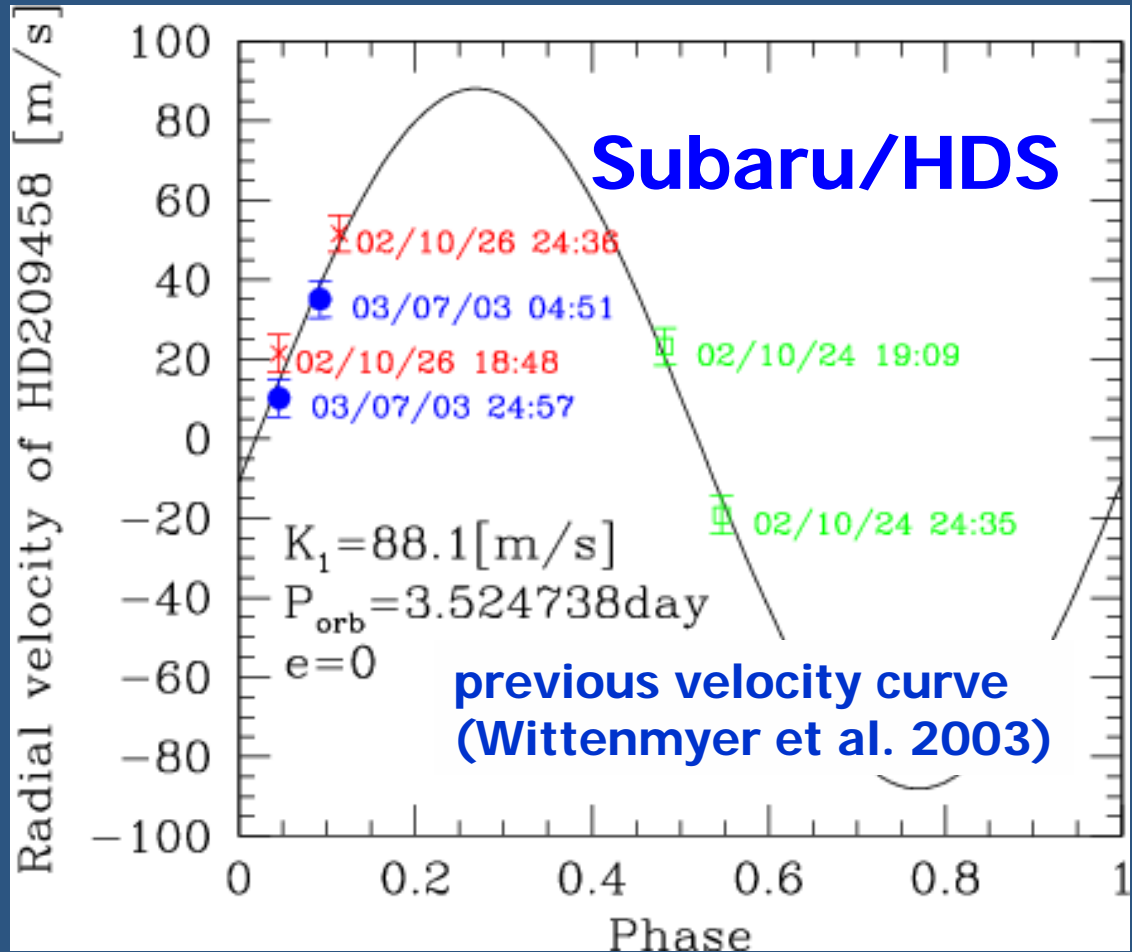
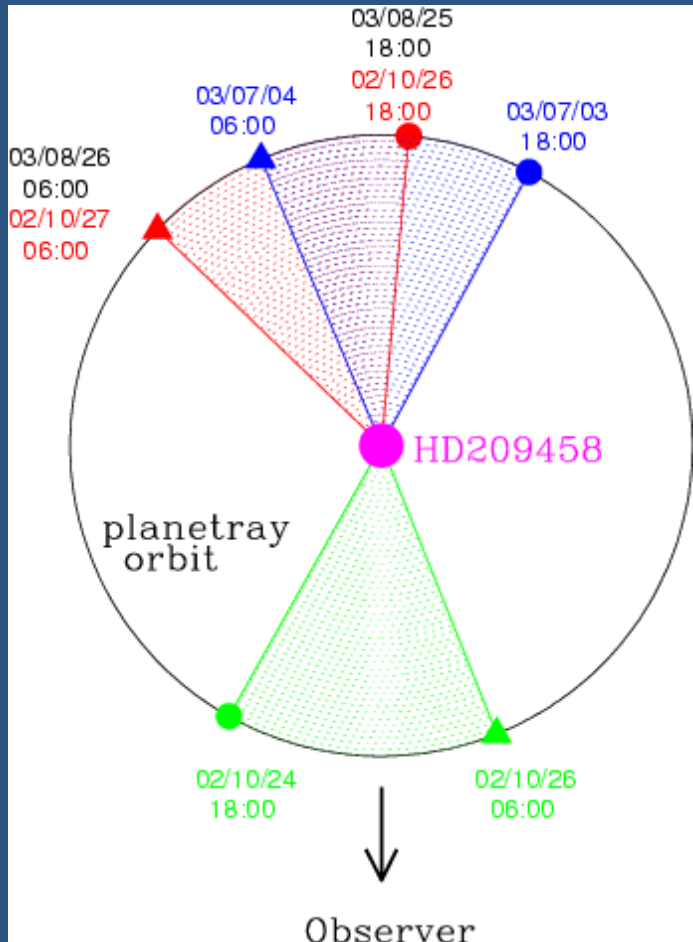
佐藤文衛 (神戸大学)、Josh Winn (Harvard Univ.)

Edwin Turner, Brenda Frye (Princeton Univ.)

HD209458b



HD209458bの位相とradial velocity



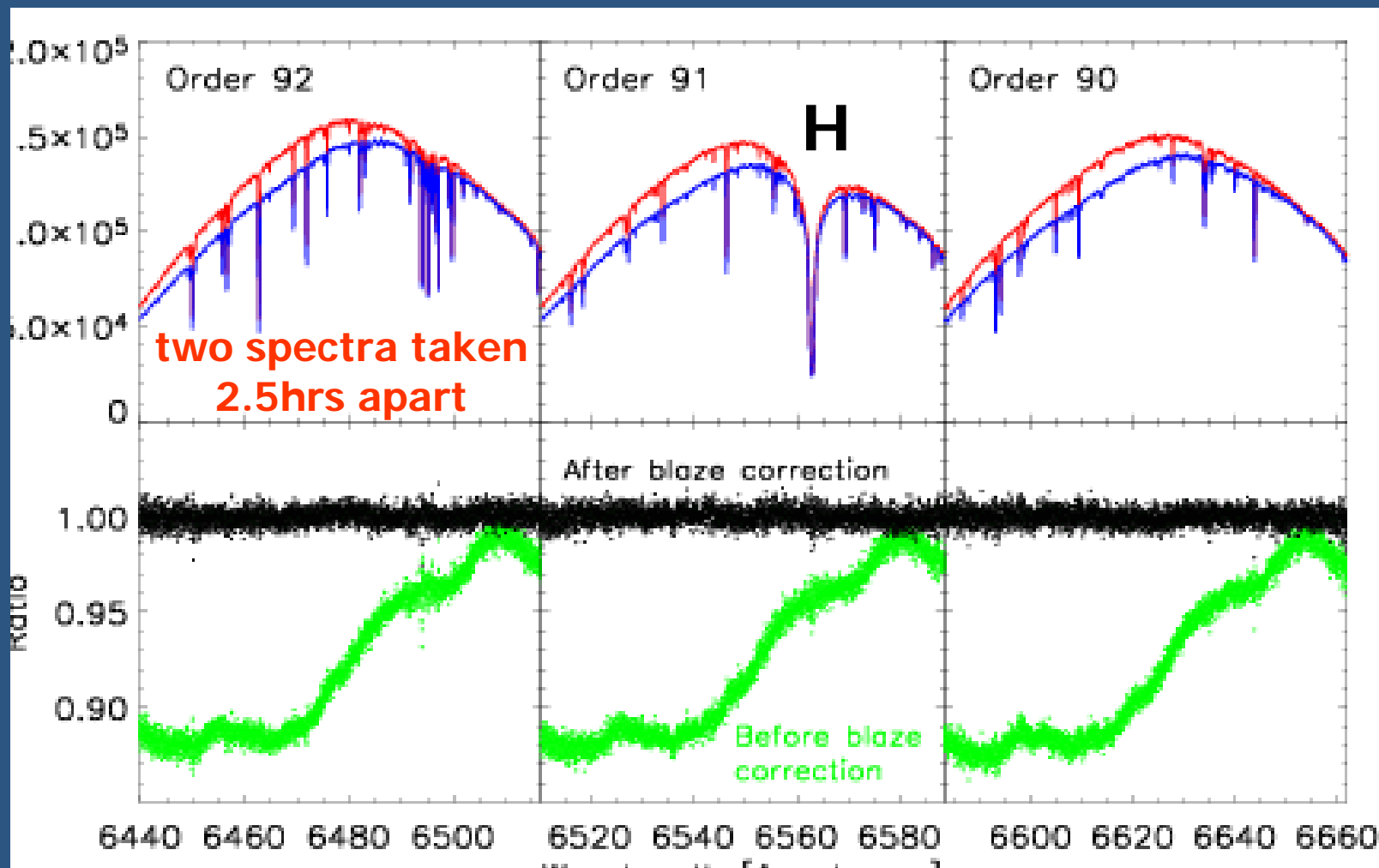
Winn et al. (2004) PASJ, submitted. astro-ph/0404469

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. (2004) PASJ, in press (astro-ph/0404469)
 - 他の吸収線の解析 (成田 修士論文の予定)
- 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中 (S04B0015N)
- **太陽系外惑星反射光の初検出を目指す**
 - 解析を始めるところ(実はもともとの目的だったが、、、)

HD209458 Subaru/HDS spectrum

分光器の応答特性 (blaze function)



Winn et al. (2004)

HDSスペクトル残差の解析方法

- n_j : n 番目のオーダーでの j 番目のビンに対応する波長
- 違う時刻での2つのデータ、 $S_1(n_j)$ と $S_2(n_j)$ は、HDSの応答特性の時間変化の影響を受ける
- この応答特性の変化を補正する（以下は S_2 を S_1 に合わせる例）

■ n 依存性

- $R(n_j) = S_1(n_j) / S_2(n_j)$ を j のまわりの100ピクセルで平均したものを $R(n,j)$
- 注目する吸収線の存在するオーダー n のデータを、その前後、 $n-1$ と $n+1$ の R を用いて補正する： $\sum_j [S_1(n_j) - S_{2b}(n_j)]^2$ が最小となるように $S_{2b}(n_j) = [c_{n+1}R(n+1,j) + c_{n-1}R(n-1,j)] S_2(n_j)$ の係数 c_{n+1} と c_{n-1} を決める（実際にはほぼ1/2）

■ j 依存性

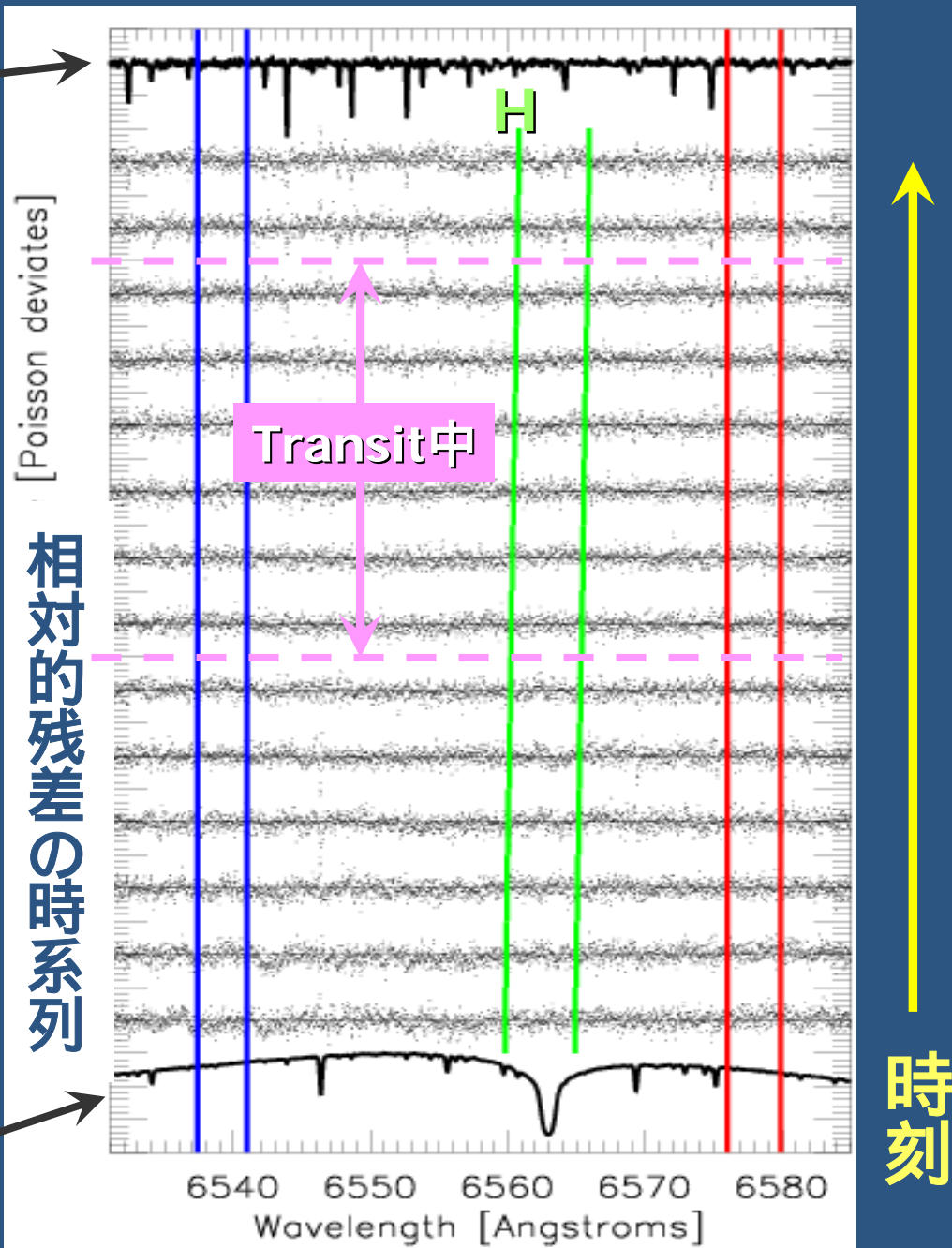
- さらに波長方向にずらして S_1 との一致を向上させる（ c_0 と $\Delta\lambda$ がパラメータ）
- $S_{2m}(n_j) = c_0 S_{2b}(n_j) + \Delta\lambda \frac{dS_{2b}(n_j)}{d\lambda}$

HD209458b 惑星大気による 吸収の探査

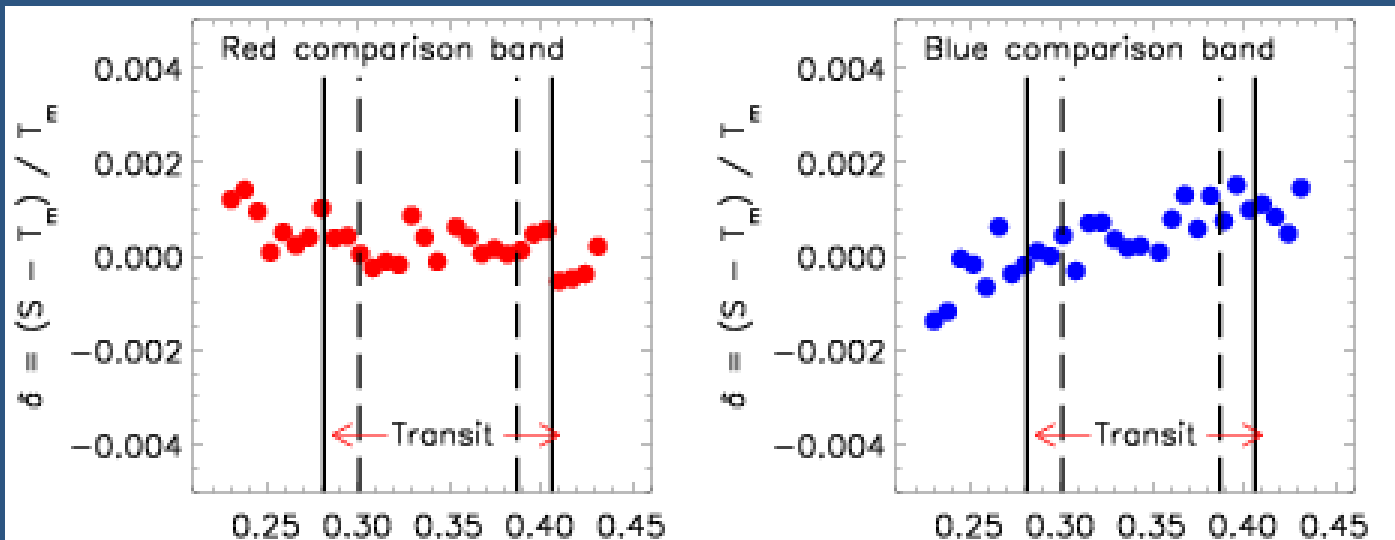
H 付近の
地球大気スペクトル

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

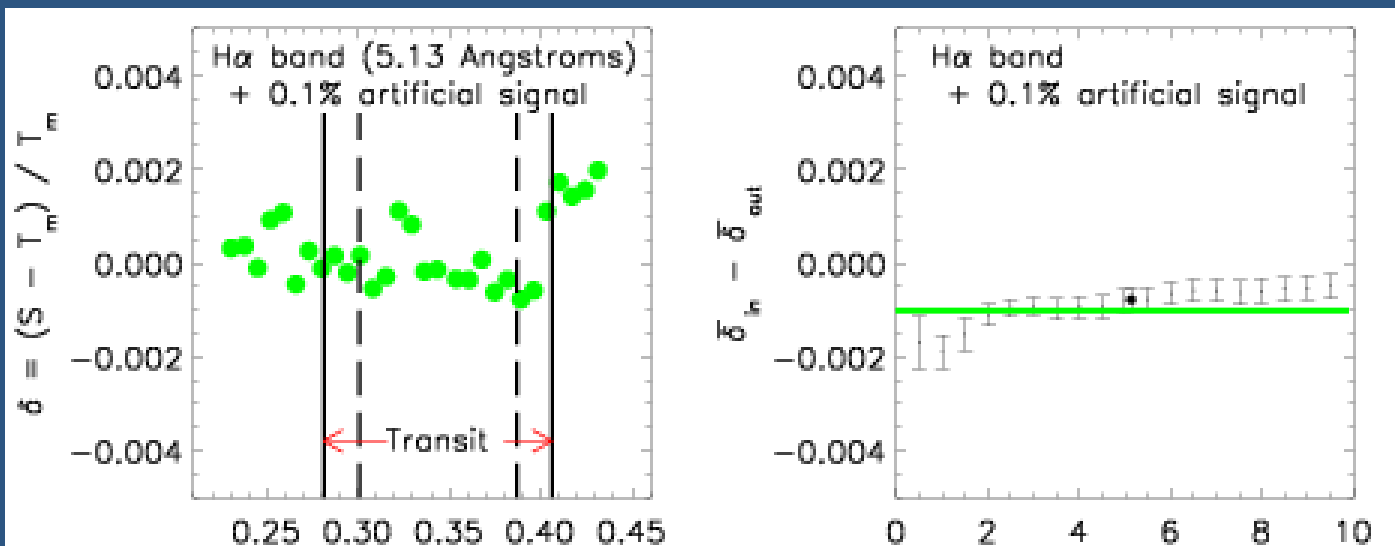
Transit でない時期の
H 付近のスペクトル



系統誤差のチェック

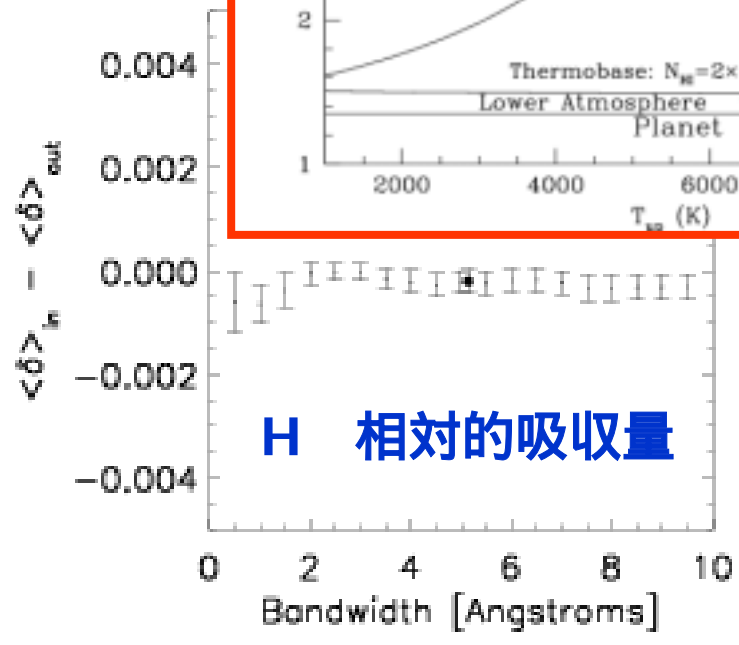
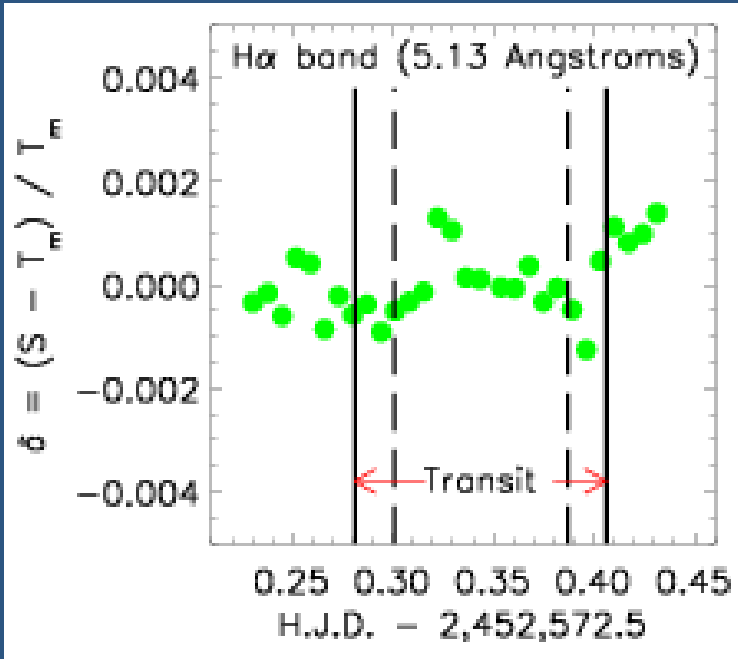
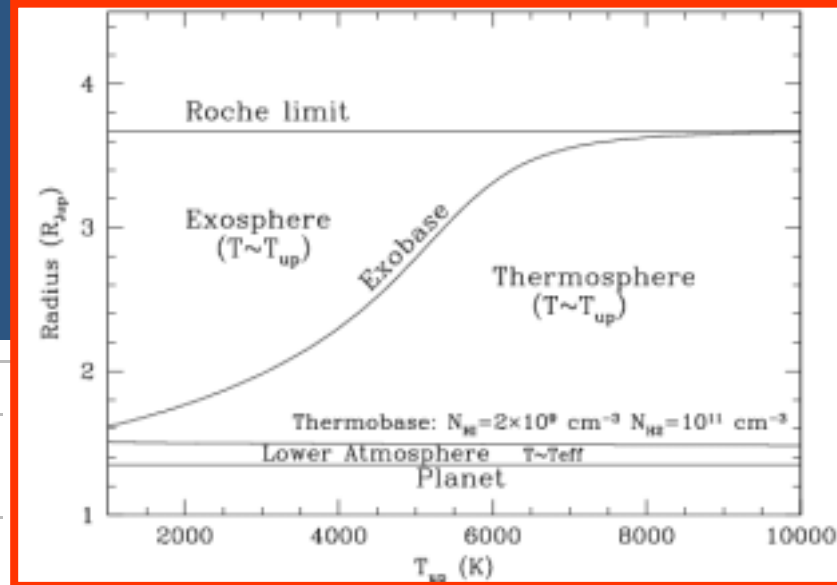


H の波長
を含まない
赤側と青側
での同様の
解析



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

HD209458b 惑星大気中の 中性水素吸収量と励起温度



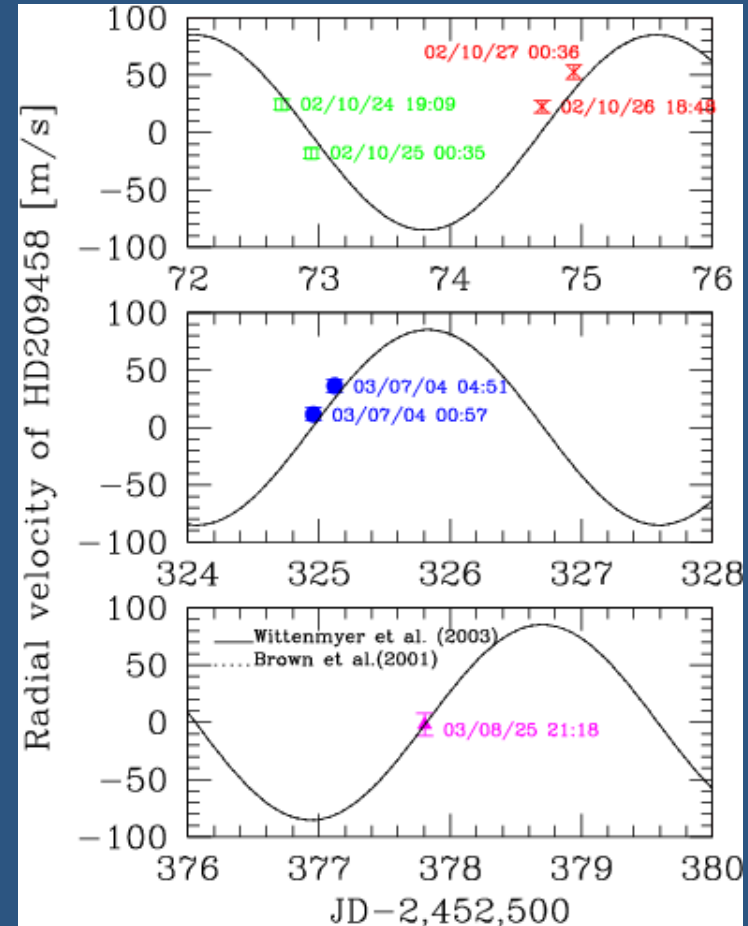
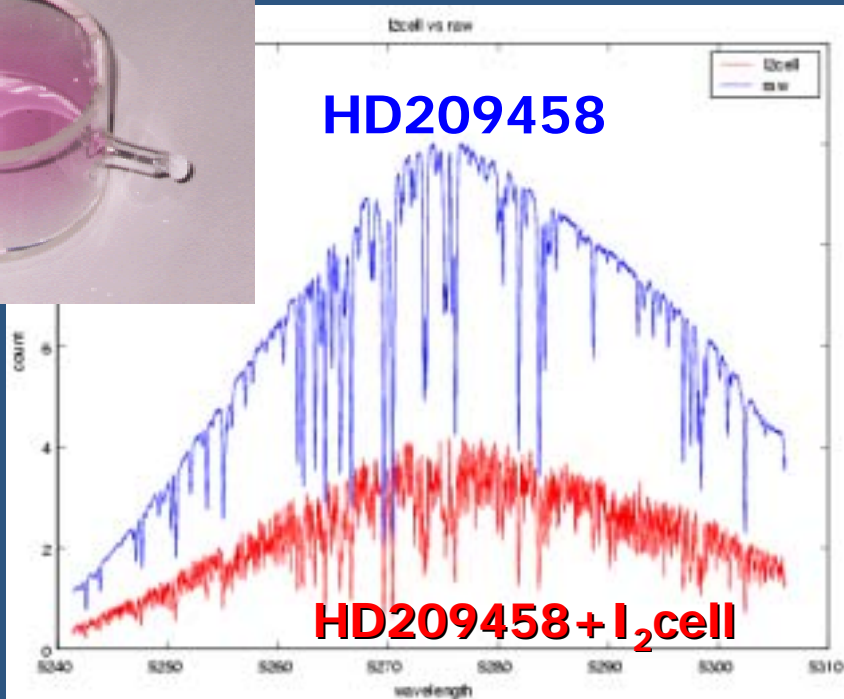
- H 吸収 $< 0.1\%$ (Winn et al. 2004)
- Ly 吸収 15% (Vidal-Madjar et al. 2003)
- $T_{ex} < (0.6-1.3)eV$ (大気モデルに強く依存、不定性大)

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、3m/s 程度の精度が達成されている。



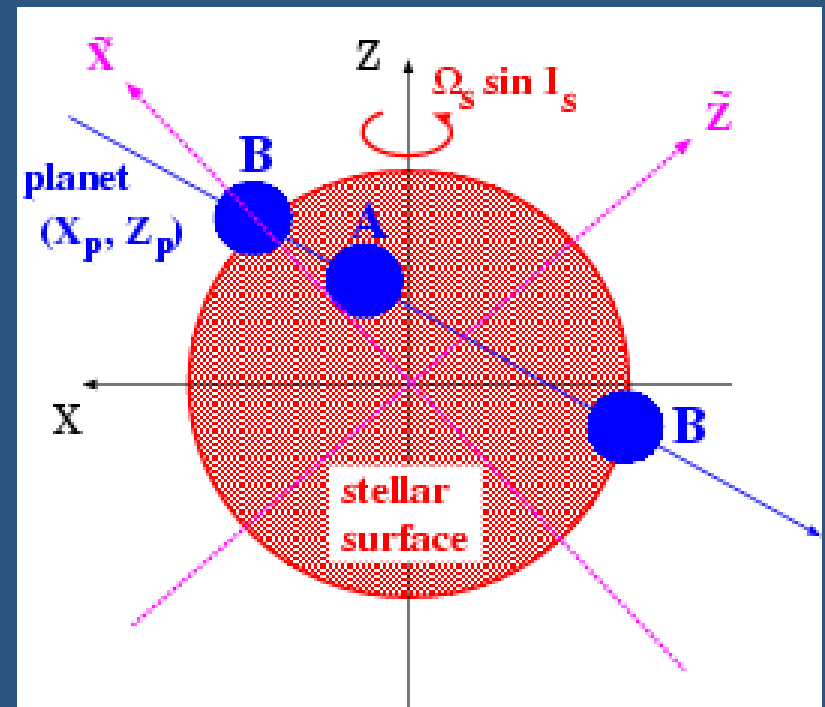
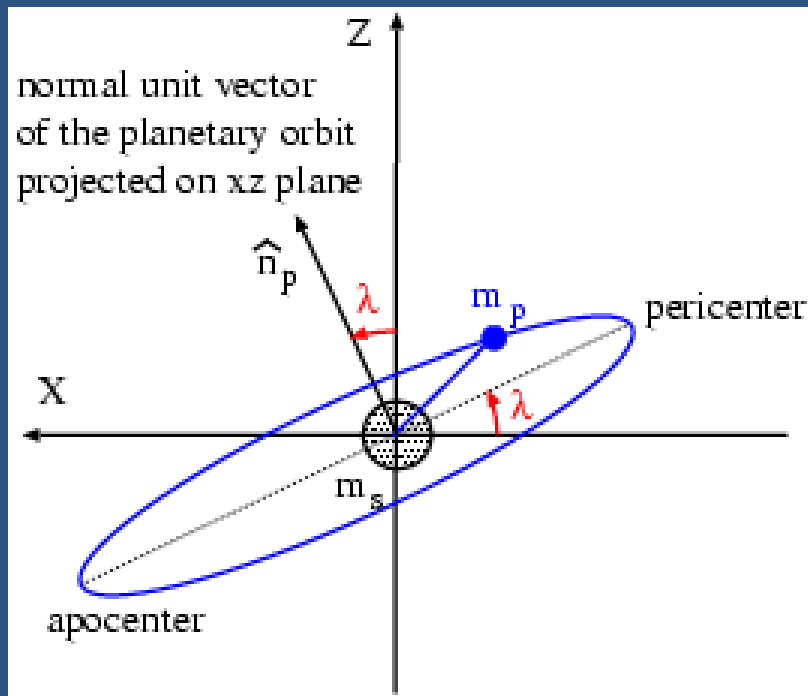
ヨードセル



Subaru/HDS

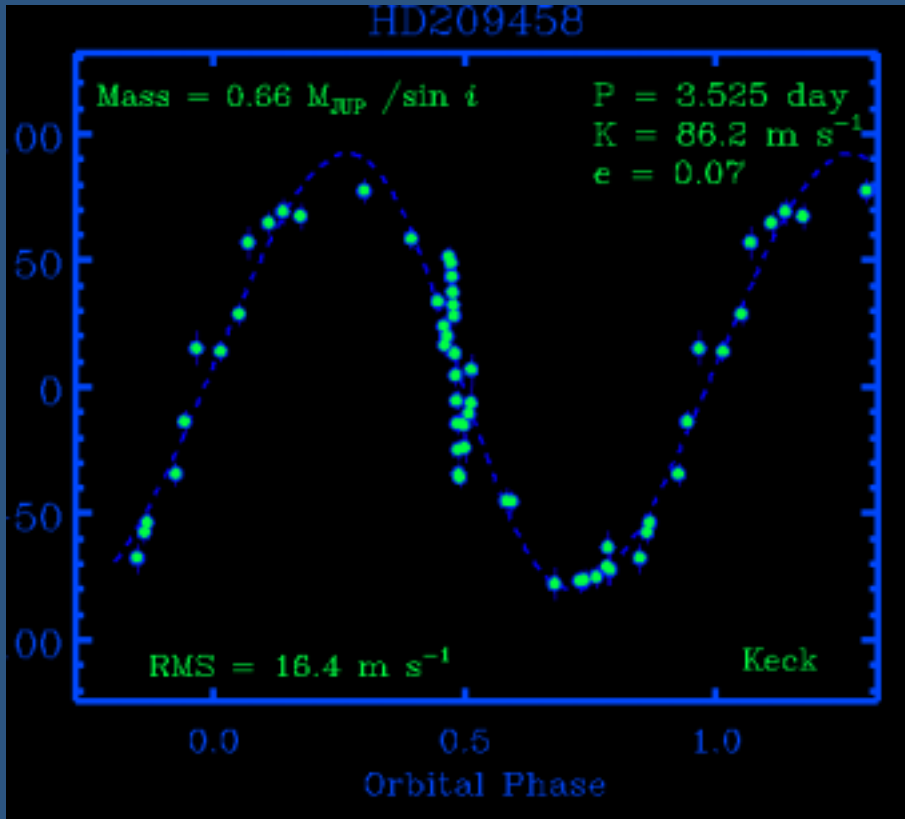
Rossiter-McLaughlin 効果

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)

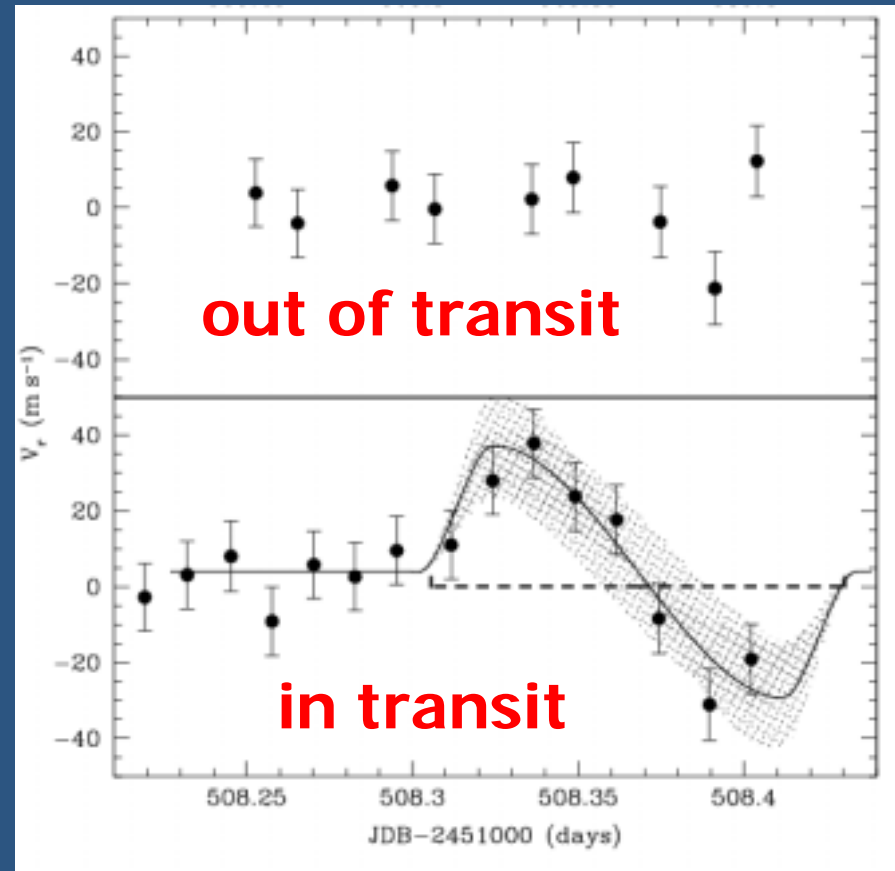


Spectroscopic transit signature

(Rossiter-McLaughlin 効果)



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

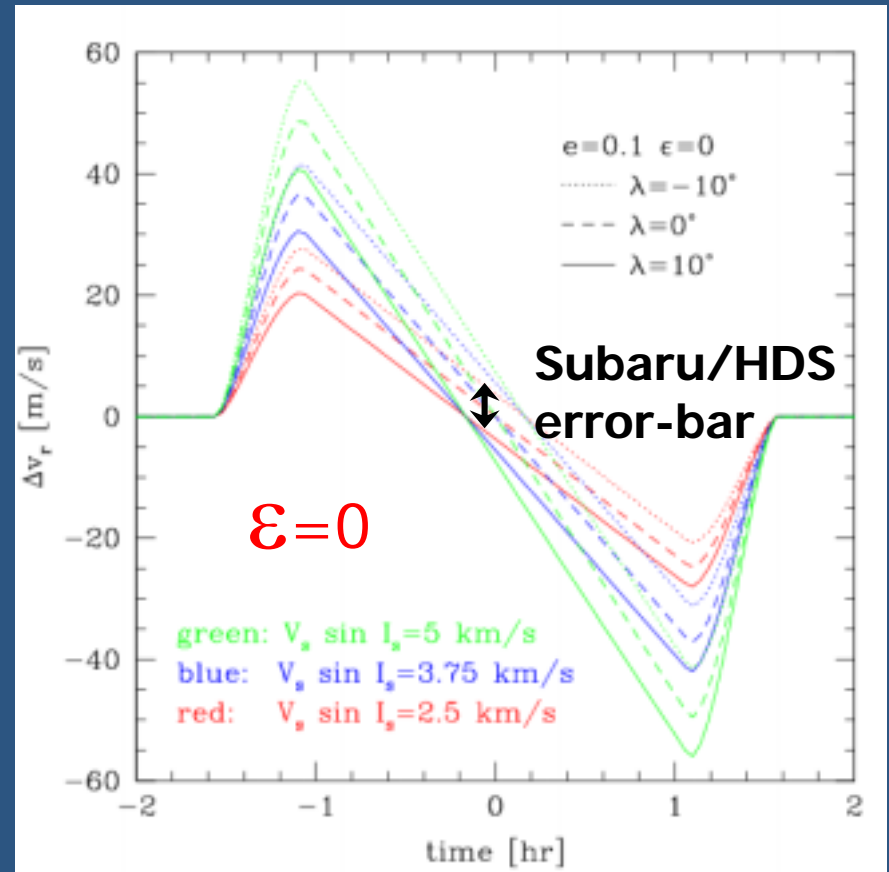
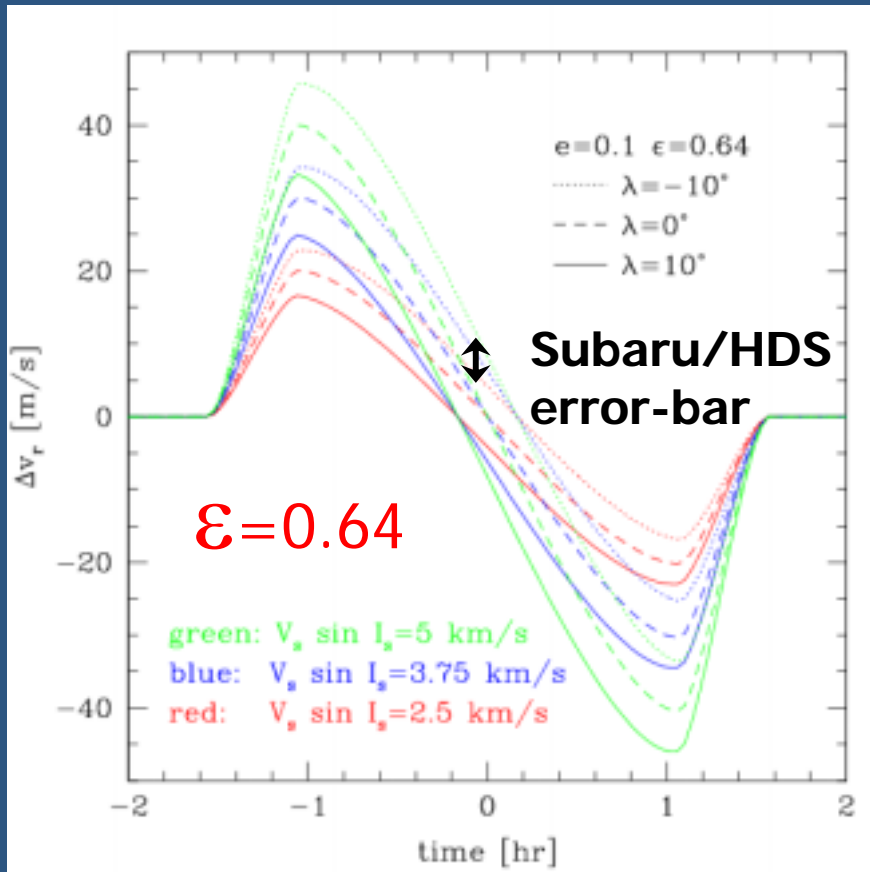


主星の自転と惑星の公転が同方向
Queloz et al. (2000) A&A 359, L13
ELODIE on 193cm telescope

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 (Kopal 1990; Hosokawa 1953)	浅い (1953年生まれの親の息子でも論文が書ける！) Ohta et al. (2004)

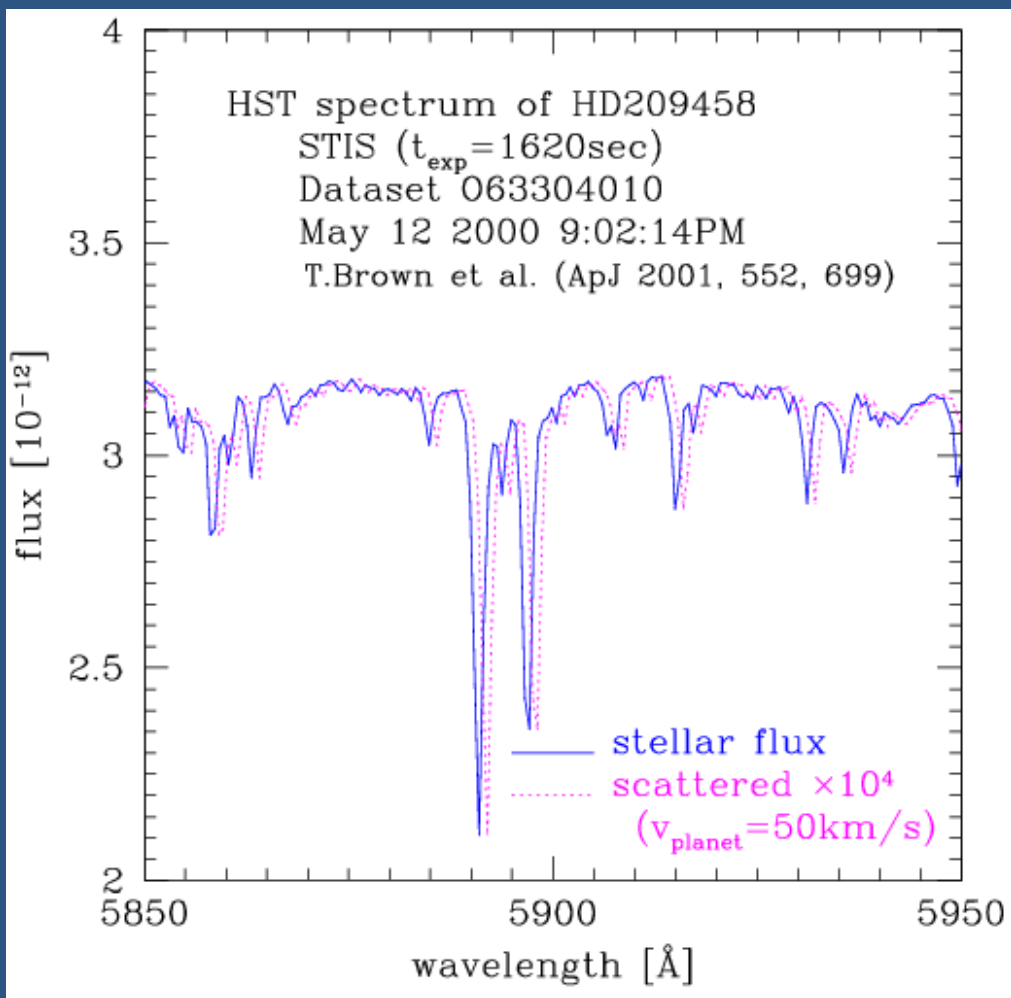
radial velocity の予想曲線



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

(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

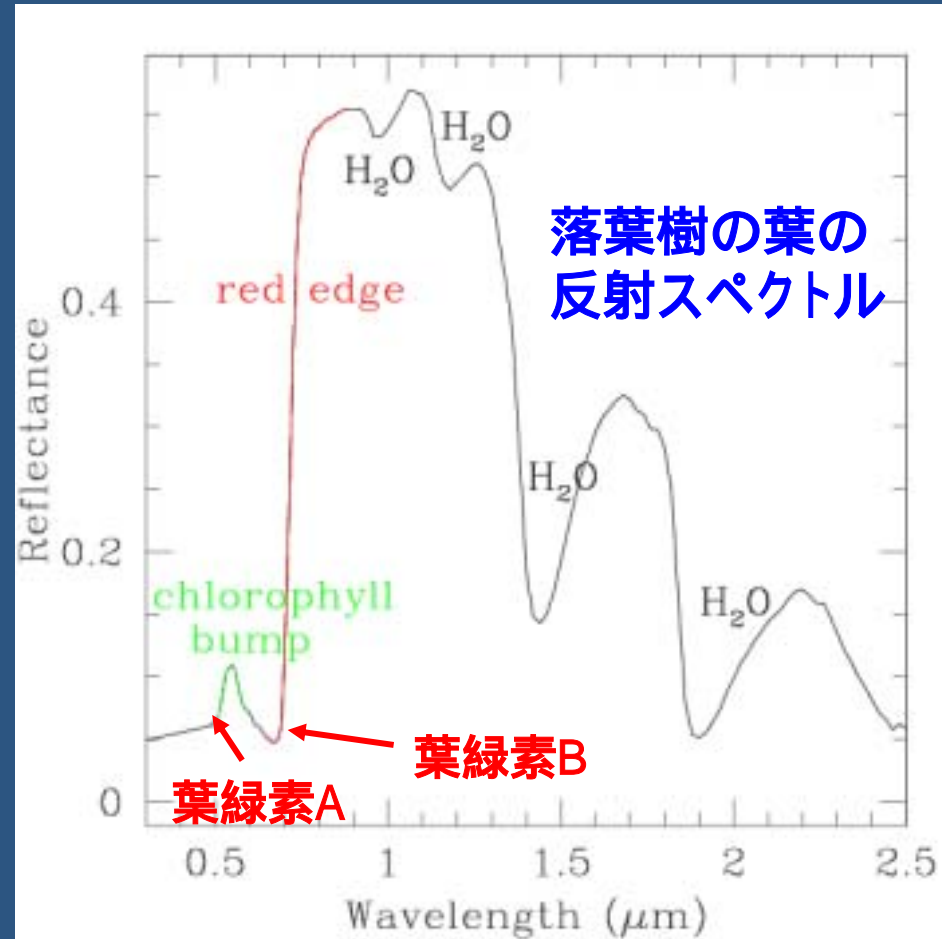
- 地球型惑星の見
- *Biomarker*の同定 (e.g., extrasolar plant)
- *Habitable planet*の見
- *Extraterrestrial life*の見

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 Å よりも長波長側で反射率が急激に増す
- 5000 Å 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*)



Seager, Ford & Turner
astro-ph/0210277 29

Vesto Melvin Slipher (1875-1969)



- (太陽系惑星)分光観測の専門家@Lowell 天文台
- 当時の“spiral nebulae”を観測しそれらがほとんど赤方偏移していることを発見 島宇宙説の支持 ハッブルの法則の重要な基礎



GENTLEMEN,—

Observatory 40(1917)304

In the *Observatory*, No. 511, p. 131, Mr. Reynolds has a letter which I fear might lead the reader to suppose that little confidence should be placed in the velocity-observations of spiral nebulae such as I initiated in 1912 and have had in progress since at the Lowell Observatory, and I beg space for a few remarks



We would, indeed, be fortunate in science if the inaccuracy of observation were never more than a small fraction of the quantity observed.

I am, Gentlemen,

Yours faithfully,

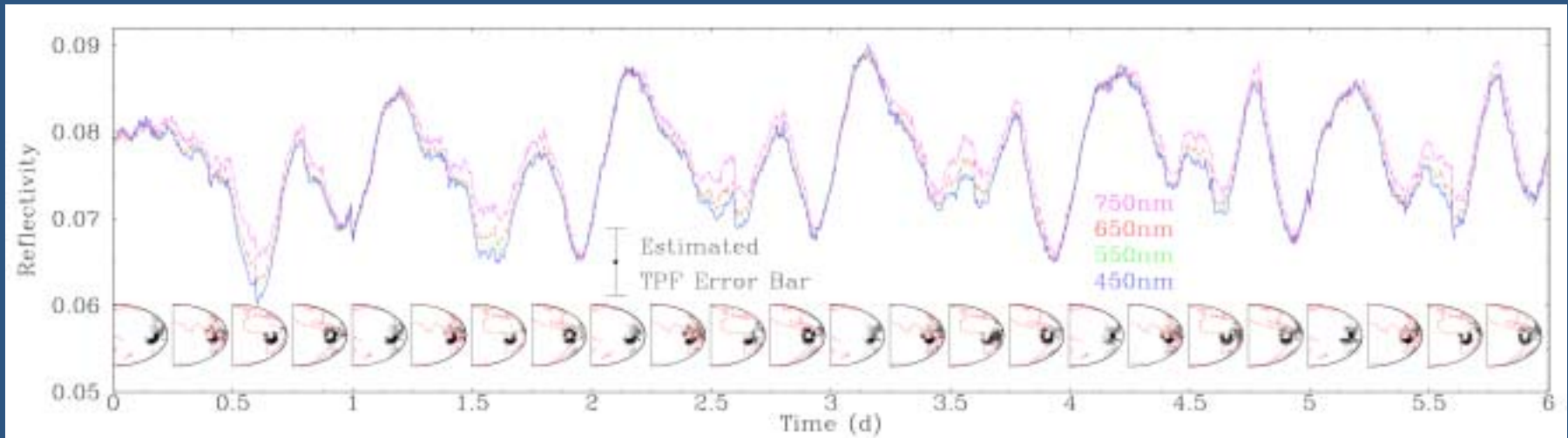
V. M. SLIPHER.

Lowell Observatory,
Flagstaff, Arizona,
1917, June 15.

- “Observations of Mars in 1924 made at the Lowell Observatory: II spectrum observations of Mars” PASP 36(1924)261

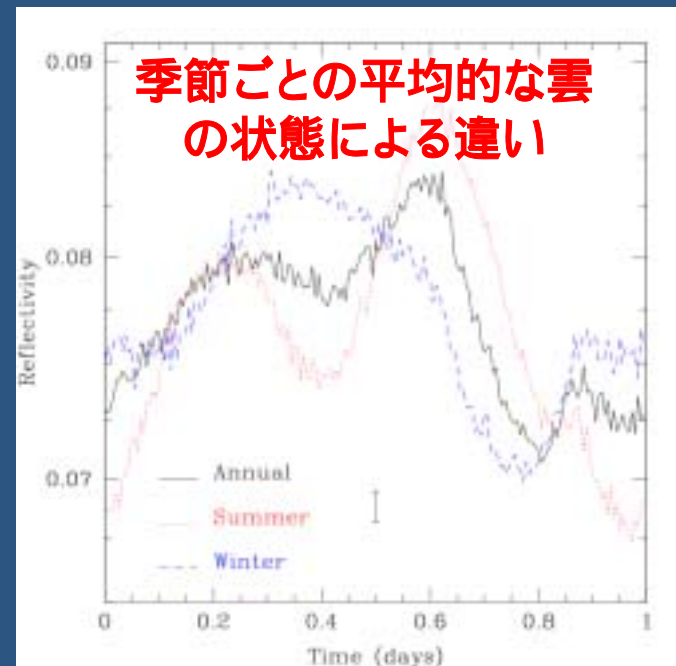
reflection spectrum. The Martian spectra of the dark regions so far do not give any certain evidence of the typical reflection spectrum of chlorophyl. The amount and types of vegetation required to make the effect noticeable is being investigated by suitable terrestrial exposures.

地球反射光度の日周変化を検出できるか？



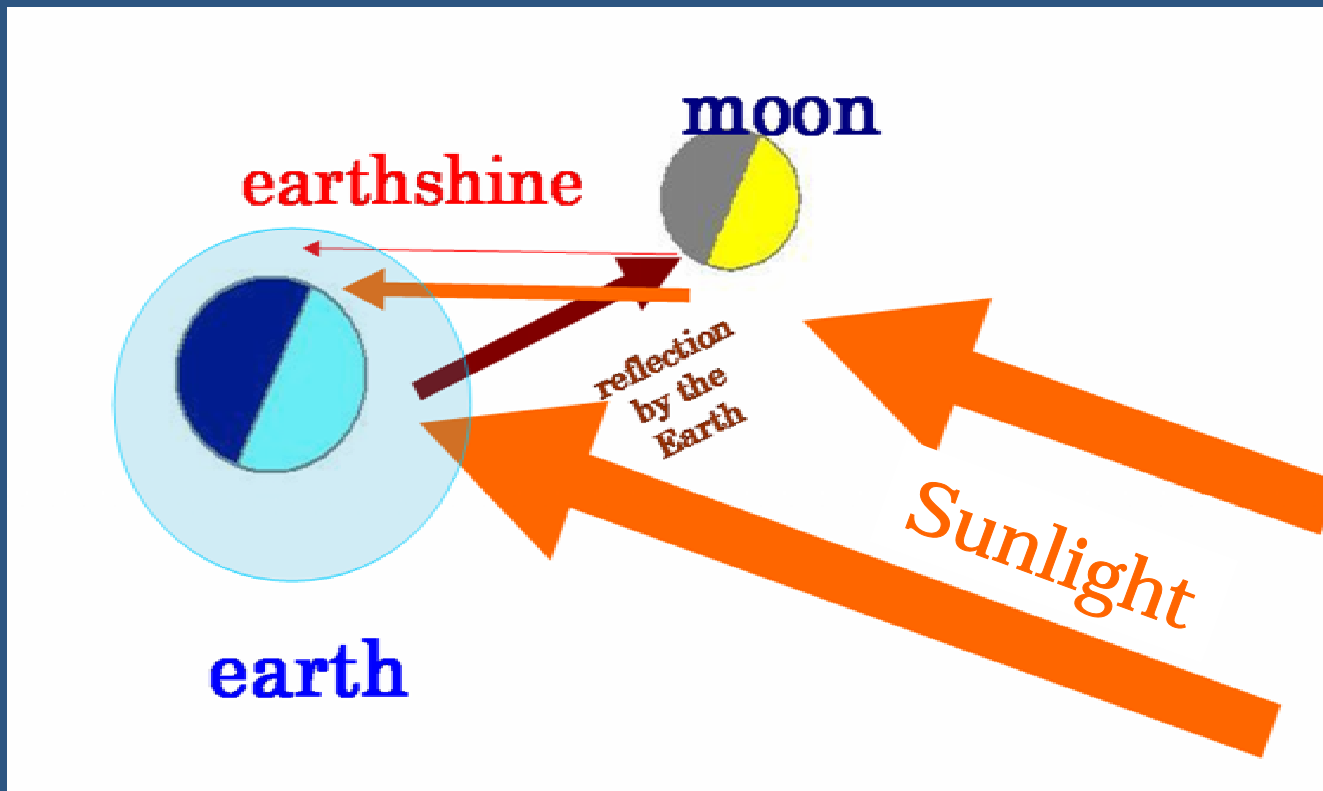
Ford, Seager & Turner
Nature 412 (2001) 885

- 10パーセント程度の変動は期待できる
- ただし、雲の存在が全くの不定要因



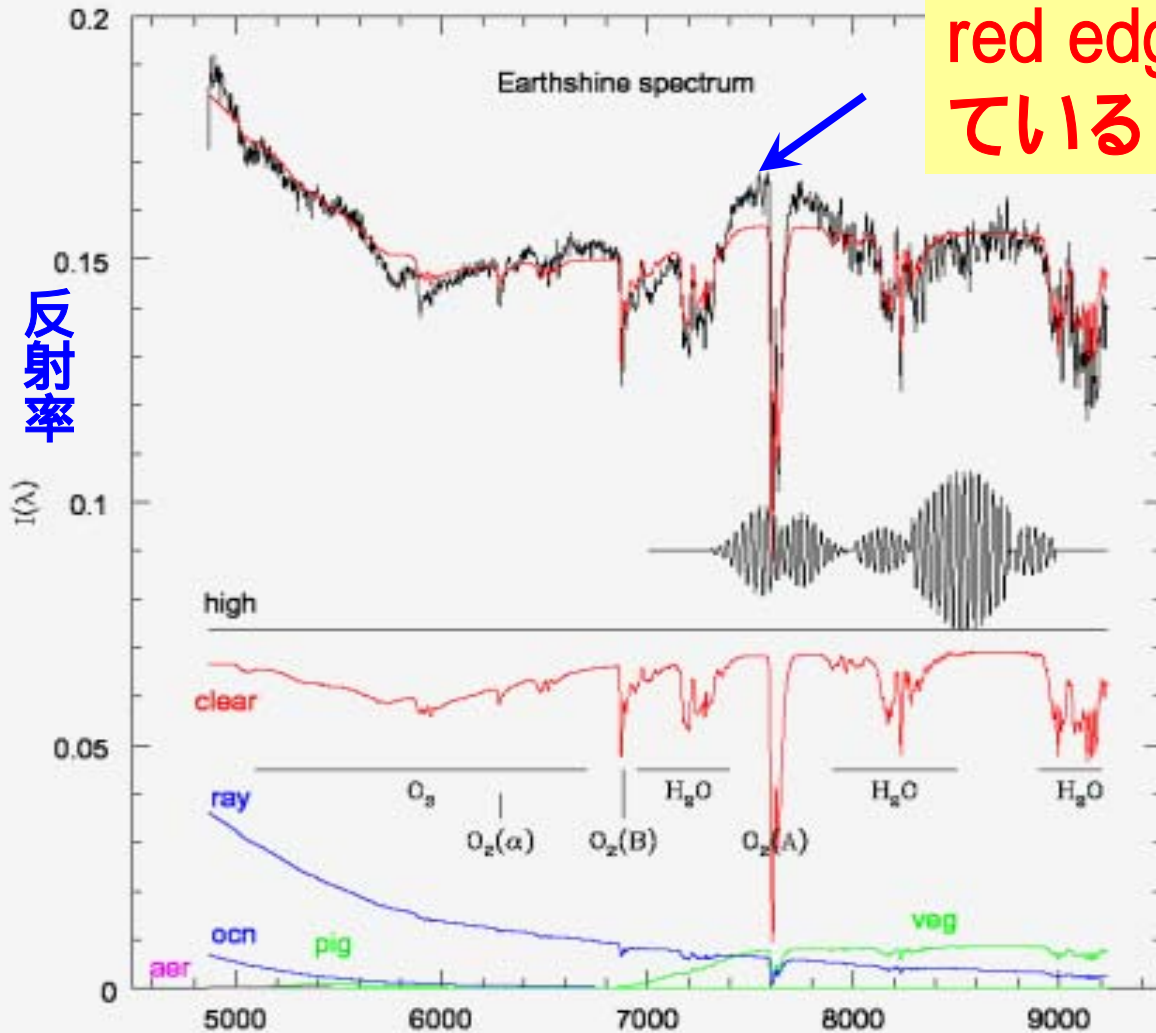
地球照観測

- 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



地球照スペクトル例

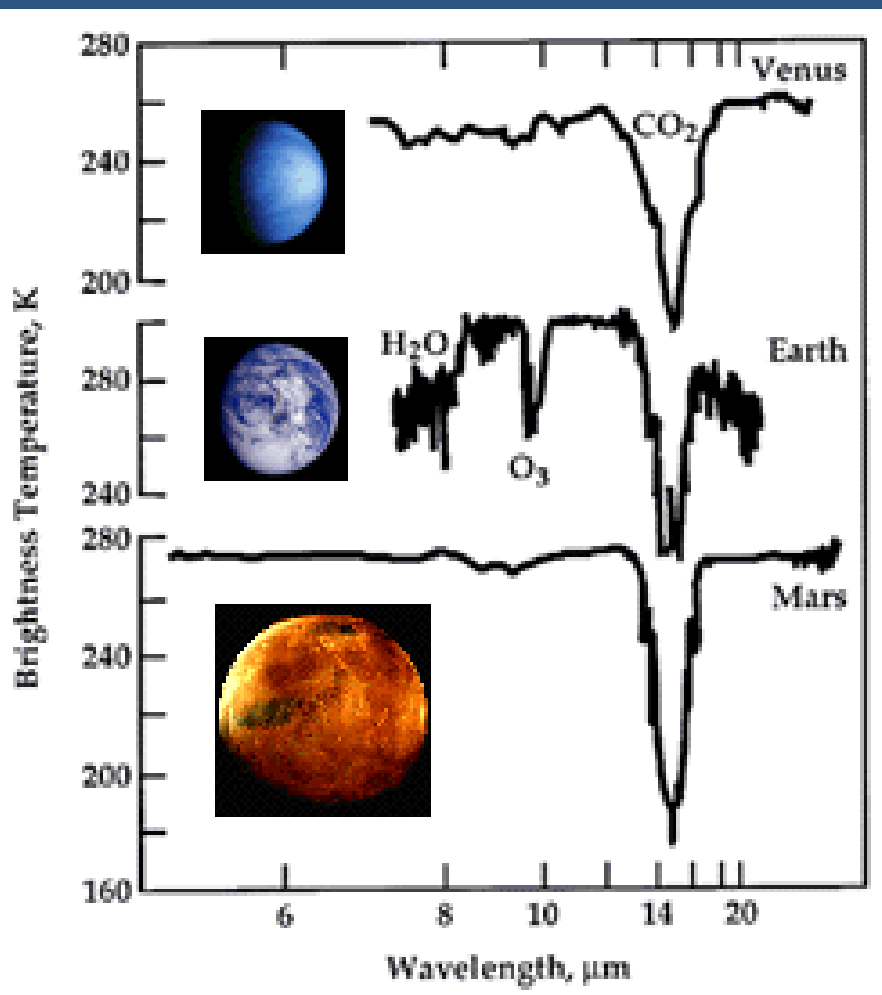
red edgeが見えている???



波長 []

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

太陽系外惑星探査 研究の展望



- 木星型惑星の発見の時代 (1995) から、惑星系 “characterization” へ

- 地球型惑星の発見へ
- habitable planets ?

- search for life

- 分光観測から生命の兆候を探ることができるか？

- スペクトルの形
惑星の温度、水が液体として存在？
- 強い二酸化炭素吸収帯
大気？
- オゾン吸収帯
大量の酸素 生物によって生成？
- 水蒸気吸収帯
海の存在？