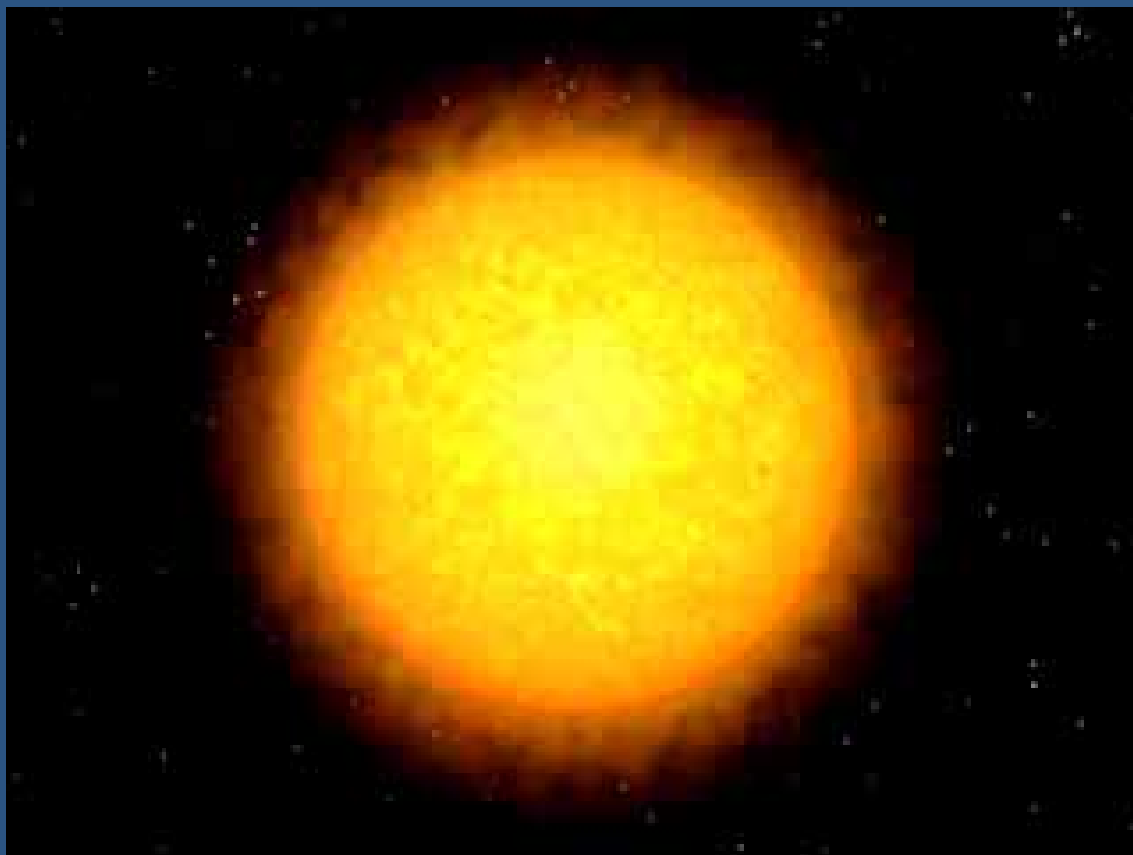


# 太陽系外惑星探査：現状と展望



東京大学  
大学院  
理学系研究科  
須藤 靖

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

2004年3月28日 宇宙線シンポジウム

「宇宙と生命」 第59回日本物理学会@福岡

# 第二の地球はあるか？



Terra衛星のMODIS検出器のデータ  
<http://modarch.gsfc.nasa.gov/>  
<http://www.nasa.gov/home/index.html>

- 地球外生物の科学的証拠は(未だ)存在しない
- 生物が誕生するには
  - 大気存在
  - 適度な温度(水が液体として存在)
  - + 偶然？(必要/十分条件ともに現時点では不明)
  - 太陽のような恒星上では不可能 恒星のまわりの惑星を探せ！

# 太陽系外惑星探査の意義

- “ *Are we alone ?* ”
  - 我々はこの広い宇宙で一人ぼっちなのか？
- *Origins*
  - 地球の起源
  - 太陽系(より一般に惑星系)の起源 井田先生
  - 生命を生み出す環境としての惑星
  - 元素、分子、生体分子の起源 大石先生
  - 生命の起源 小林先生、金子先生
- “ *Where are they ?* ” (Fermi 1950)
  - 地球外知的生命体は存在するか
  - 地球外文明はあるか

# 太陽系外惑星探査の方法

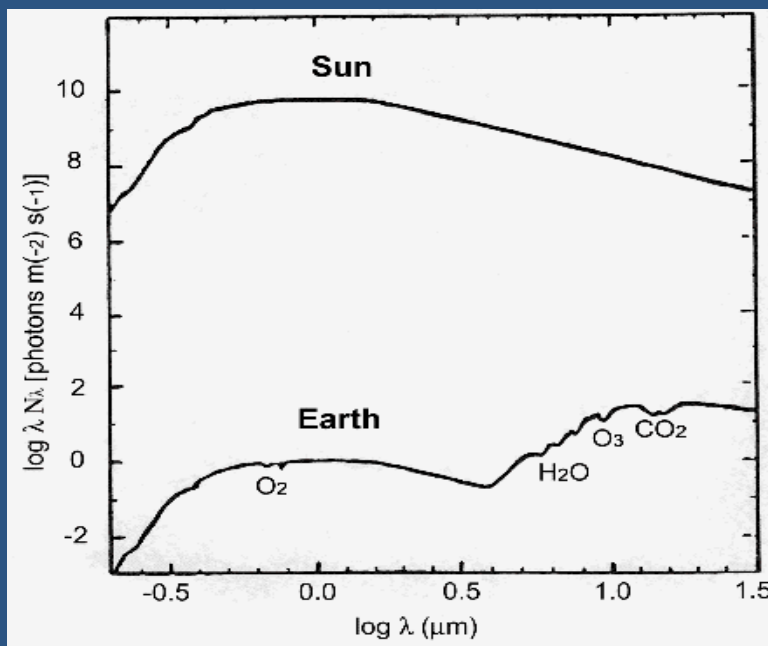
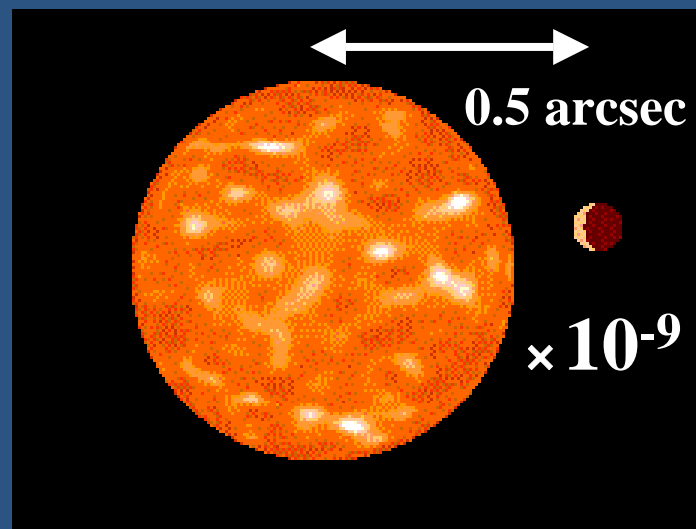
- **直接撮像**：高角度分解能
- **主星の速度変動**：高精度分光
- **主星の位置変動**：高精度位置決定精度
- **主星の光度変動**：高精度測光
- **パルサーの信号到着時刻変動**：  
高時間分解能

いずれも最先端の観測技術を要する

# 惑星は直接見えるか？

## 10pcから観測した木星

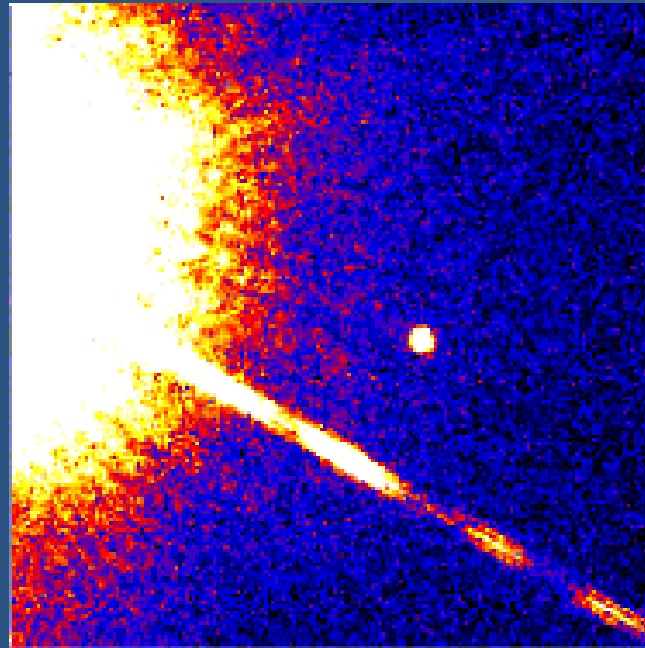
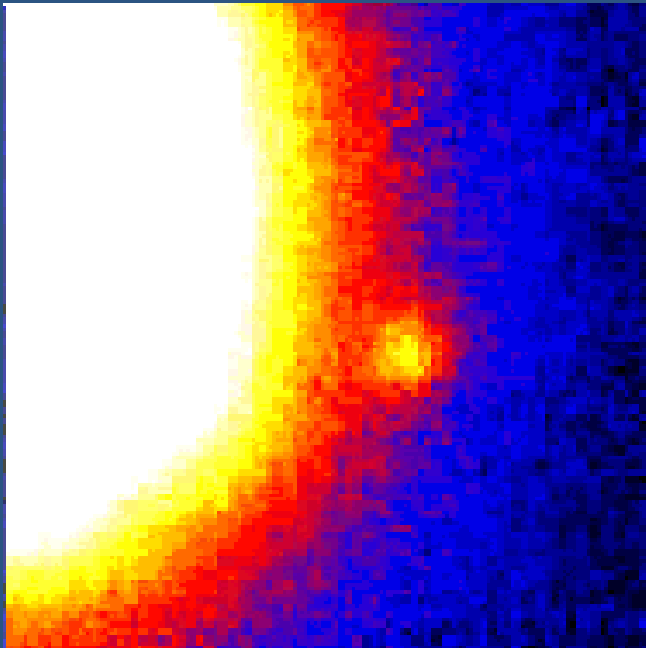
明るさ： 27等級（可視域）  
主星との角距離： 0.5秒角



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



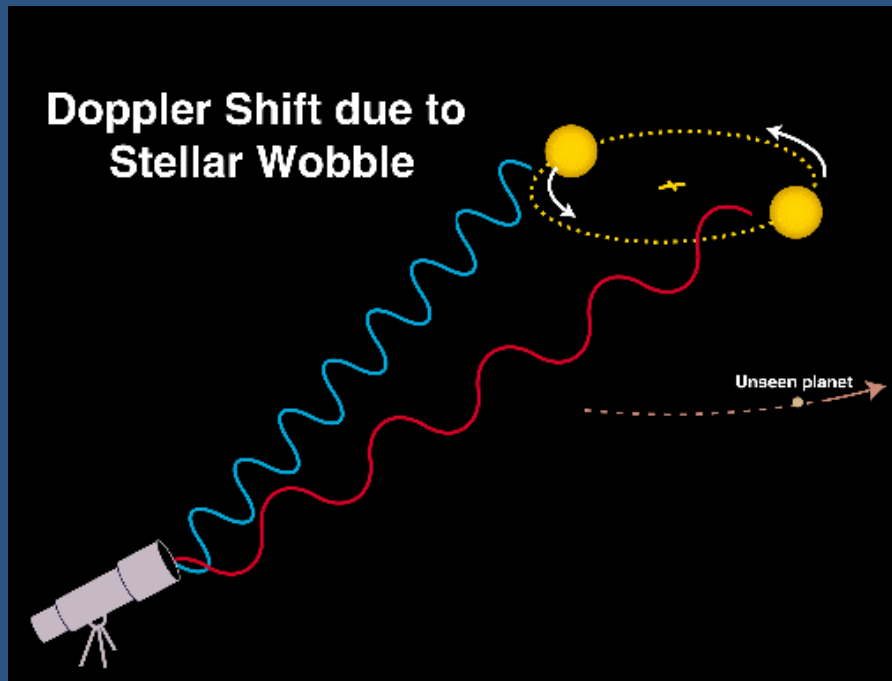
Gliese229 b:  
角距離 7arcsec  
光度比 5000

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」

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



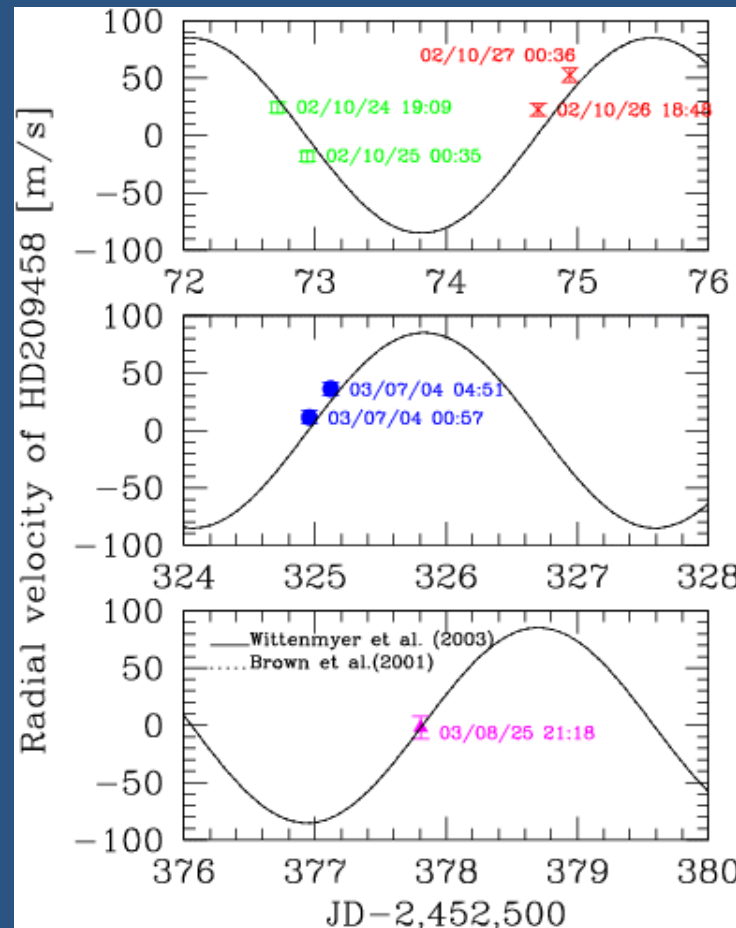
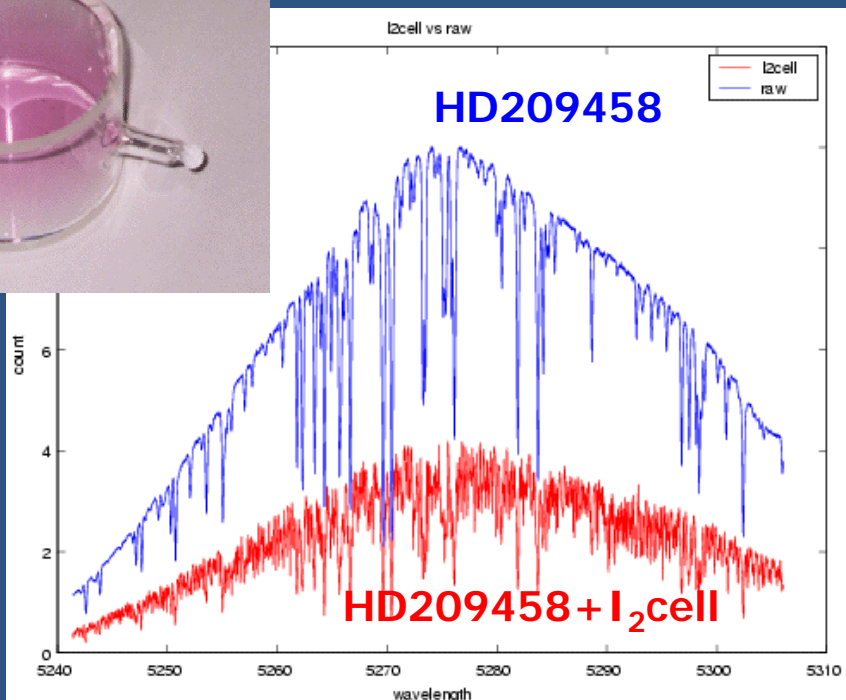
厳密には、太陽も地球のために少しだけいつも運動している

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 (120個@2004年3月15日)

# 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

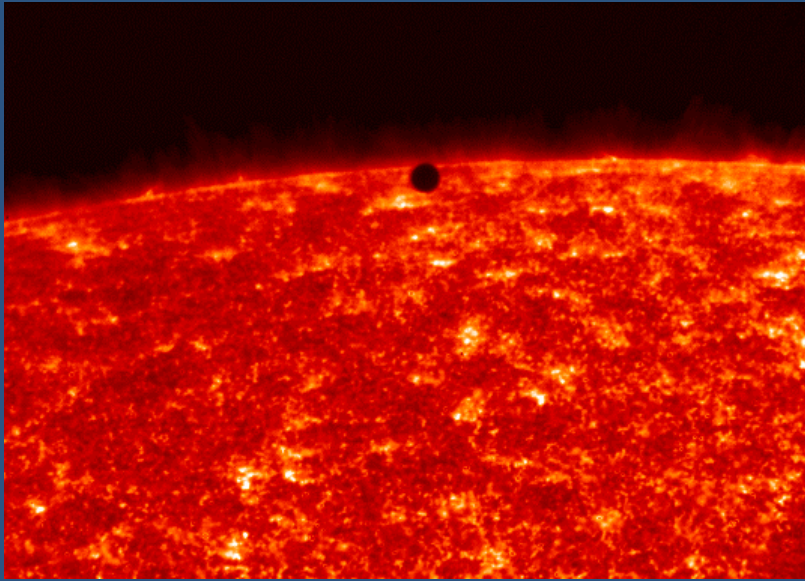


HDS on Subaru

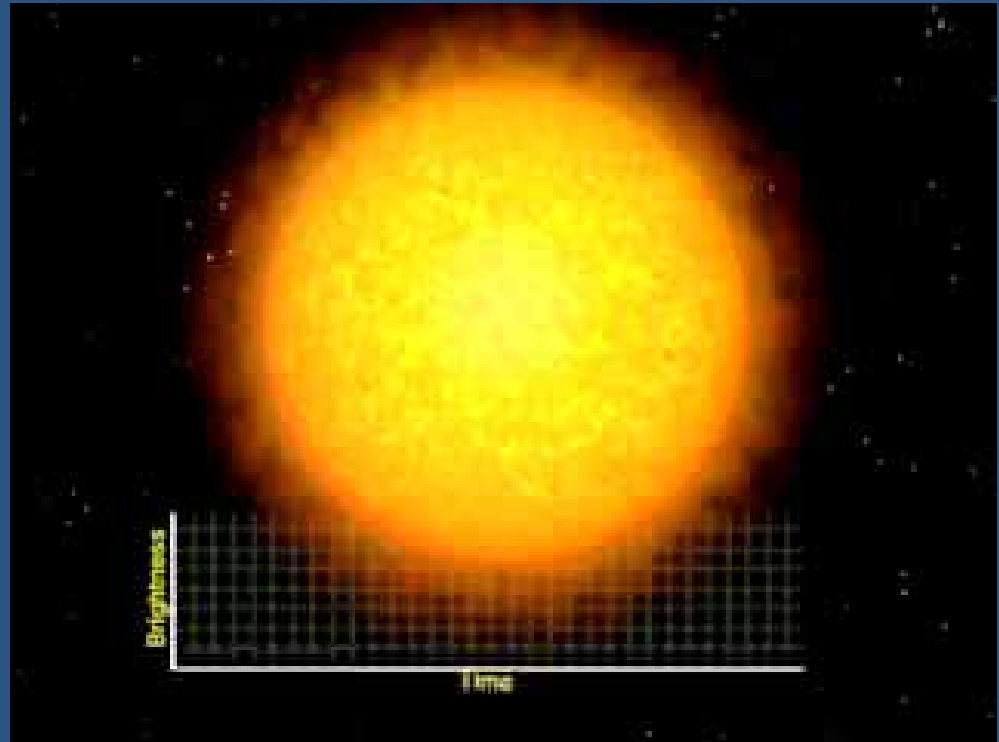
Winn et al. (2004)



# 主星の光度変動：惑星による食



太陽を横切る水星の画像  
(TRACE衛星:1999年11月)



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

食が観測できる確率:  $0.3\% (AU/\text{軌道半径})(R_{\text{主星}}/R_{\text{太陽}})$

主星の光度変動:  $1\% (R_{\text{惑星}}/R_{\text{木星}})^2 (R_{\text{太陽}}/R_{\text{主星}})^2$

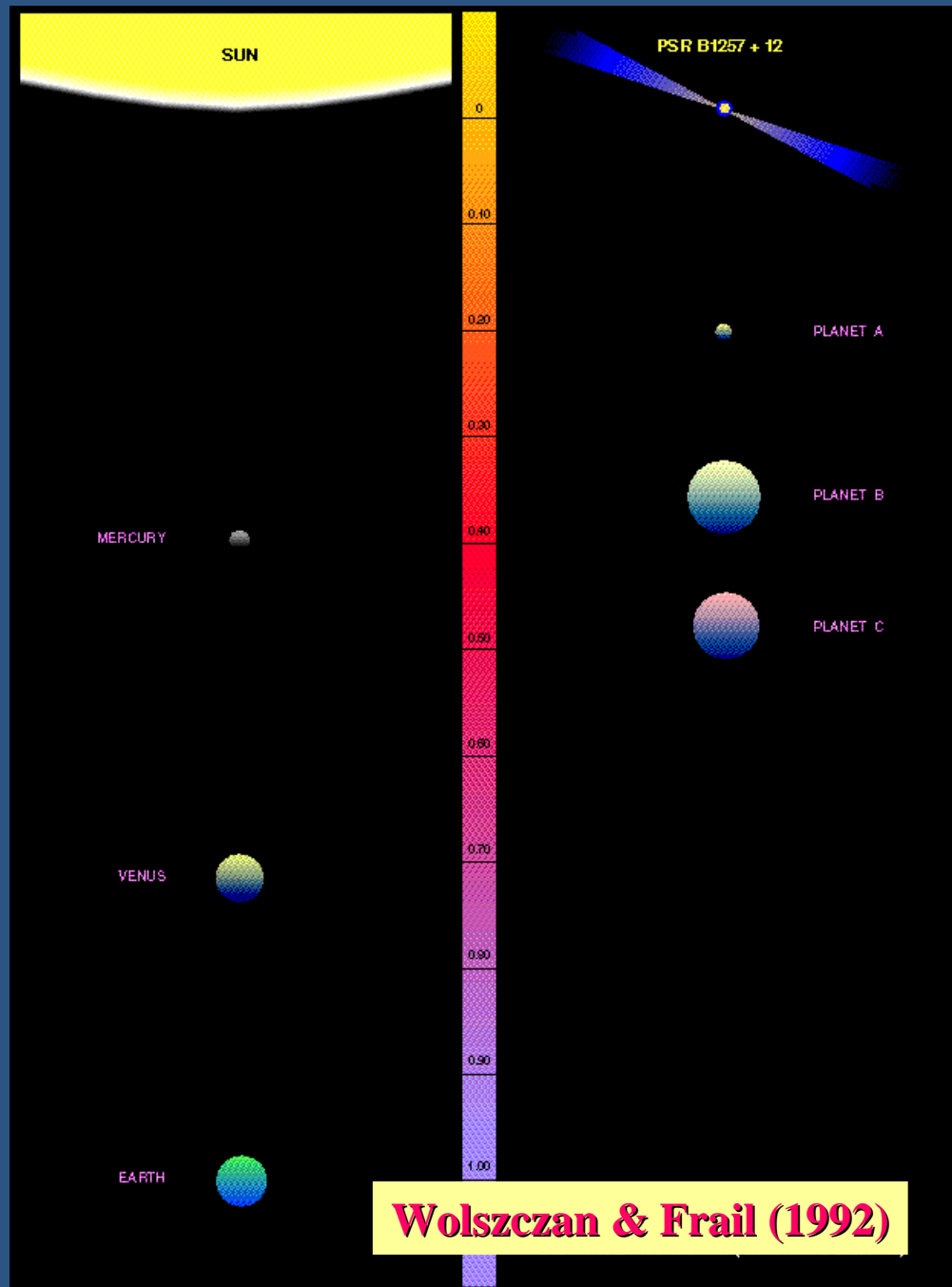
地上での測光精度: 0.1%が限界(木星なら、地球は×)

# 太陽系外惑星発見の歴史

- 1992年：パルサーPSR1257-12の周りに3つの“惑星”を発見
- 1995年：主系列星ペガスス座51番星の周りに惑星を発見
- 1999年：主系列星アンドロメダ座ウプシロン星の周りに3つの惑星を発見
- 2000年：系外惑星による主星の食の初検出
- 2001年：系外惑星大気の初検出
- 2004年3月15日時点で120個の系外惑星

# PSR1257+12: パルサーのまわり りに3つの惑星 の存在

- 初めて発見された系外惑星かつ惑星系 (2つは確実、多分3つ、あるいは4つ?)

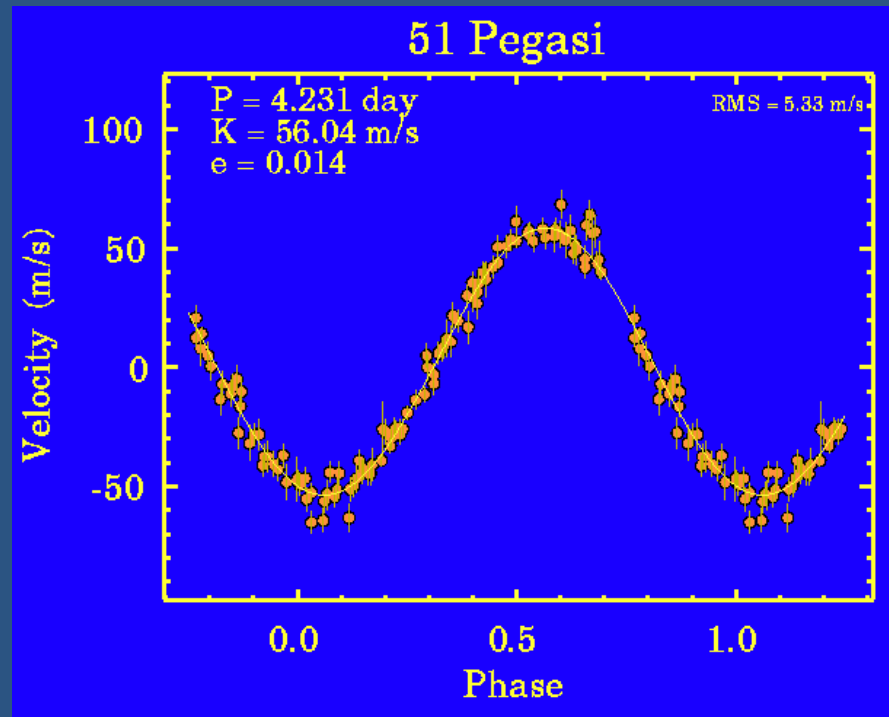
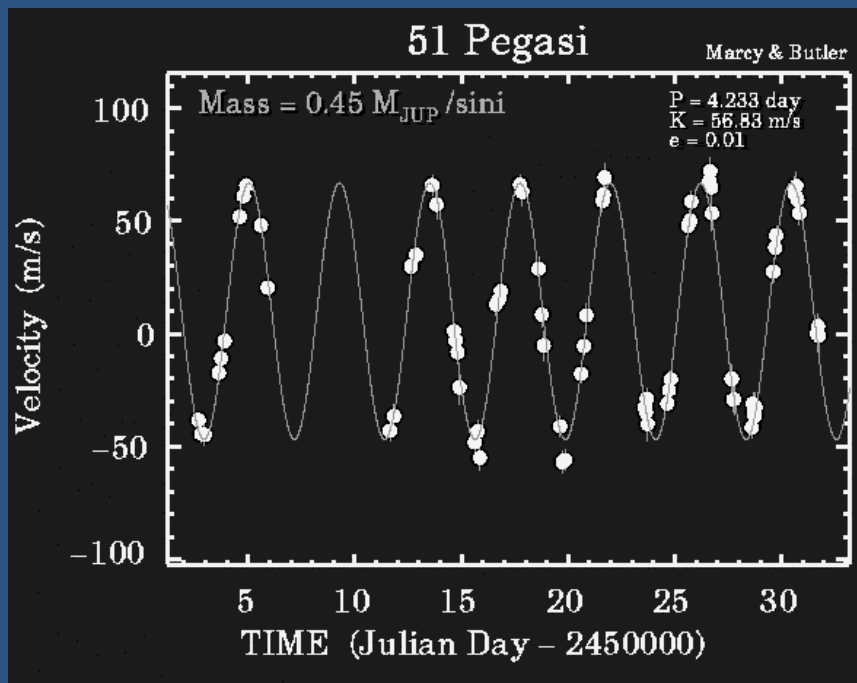


# 太陽系外惑星発見の歴史

- 1992年：パルサーPSR1257-12の周りに3つの“惑星”を発見
- 1995年：主系列星ペガサス座51番星の周りに惑星を発見
- 1999年：主系列星アンドロメダ座ウプシロン星の周りに3つの惑星を発見
- 2000年：系外惑星による主星の食の初検出
- 2001年：系外惑星大気の初検出
- 2004年3月15日時点で120個の系外惑星

# 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)



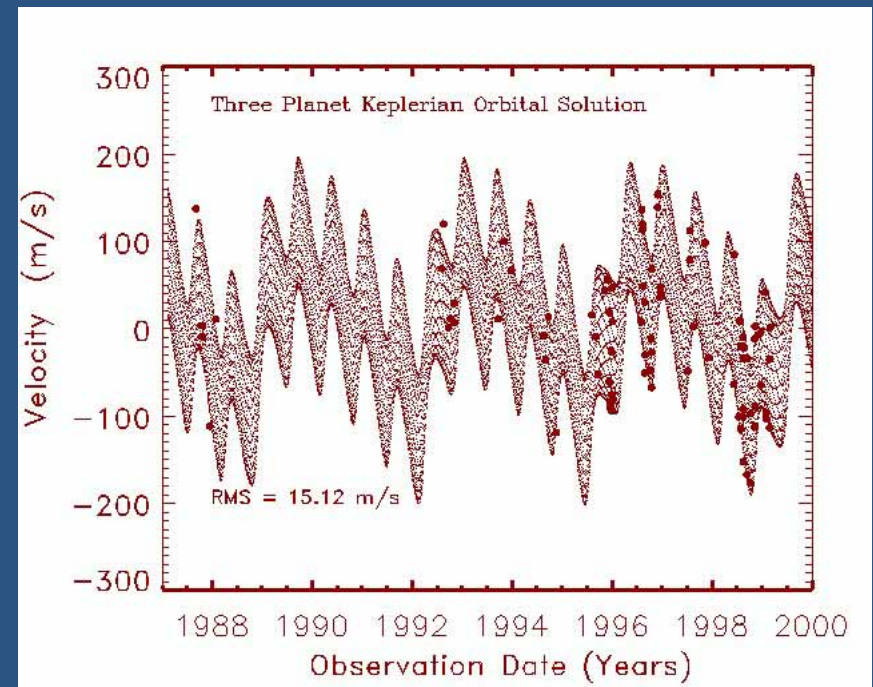
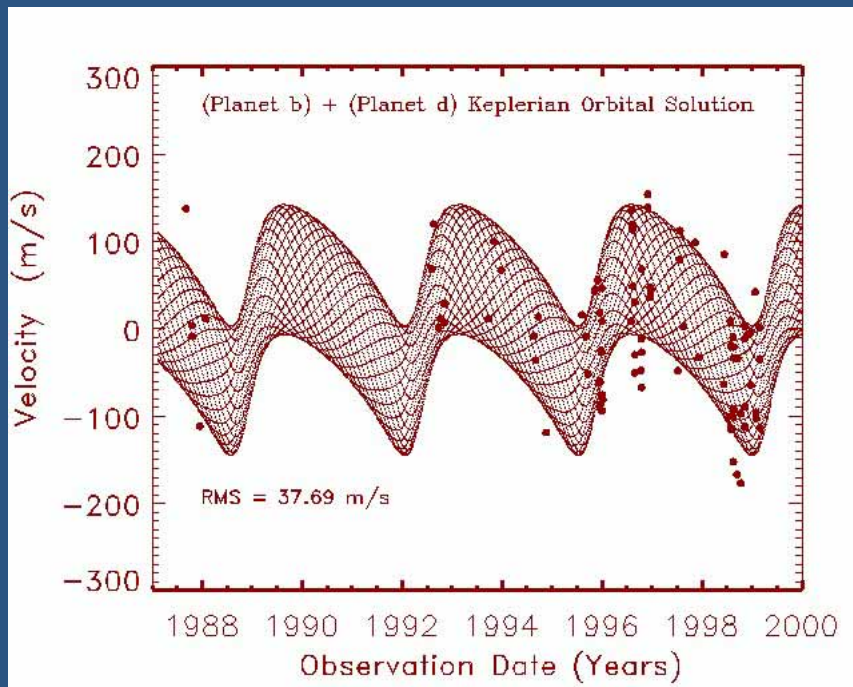
周期がわずか4.2日！

# 太陽系外惑星発見の歴史

- 1992年：パルサーPSR1257-12の周りに3つの“惑星”を発見
- 1995年：主系列星ペガスス座51番星の周りに惑星を発見
- **1999年：主系列星アンドロメダ座ウプシロン星の周りに3つの惑星を発見**
- 2000年：系外惑星による主星の食の初検出
- 2001年：系外惑星大気の初検出
- 2003年：蒸発する惑星の現場 (?)
- 2004年3月15日時点で120個の系外惑星

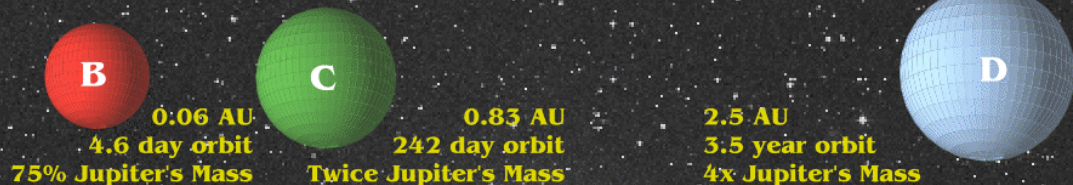
# And: 主系列星のまわりの初めての惑星系の発見

Butler, Marcy & Fischer (1999)

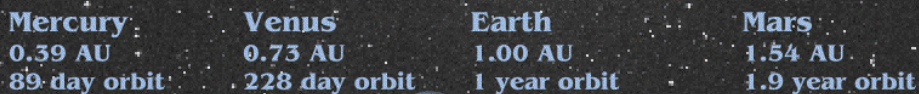


# And: 主系列星のまわりの初めての惑星系の発見

## The Upsilon Andromedae System



## Our Inner Solar System



© Harvard-Smithsonian CfA (A. Conios), 1999



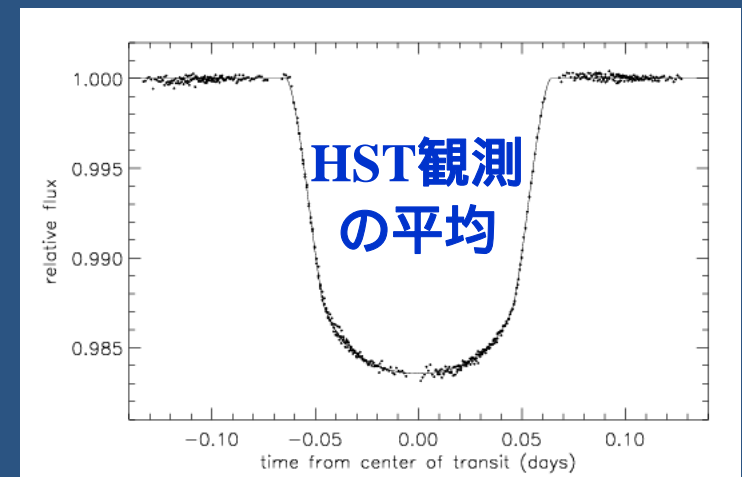
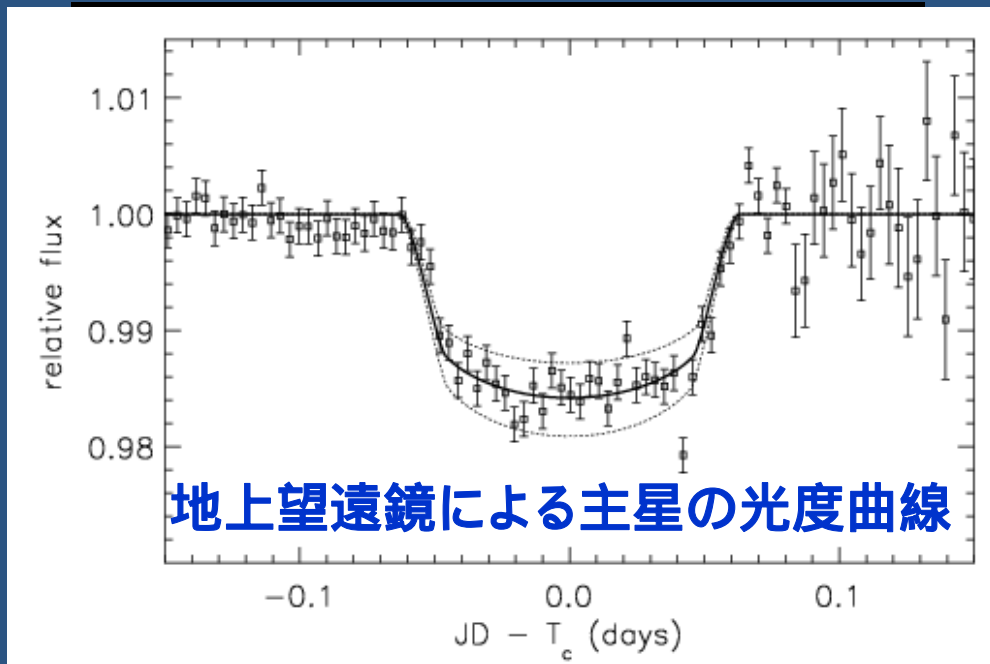
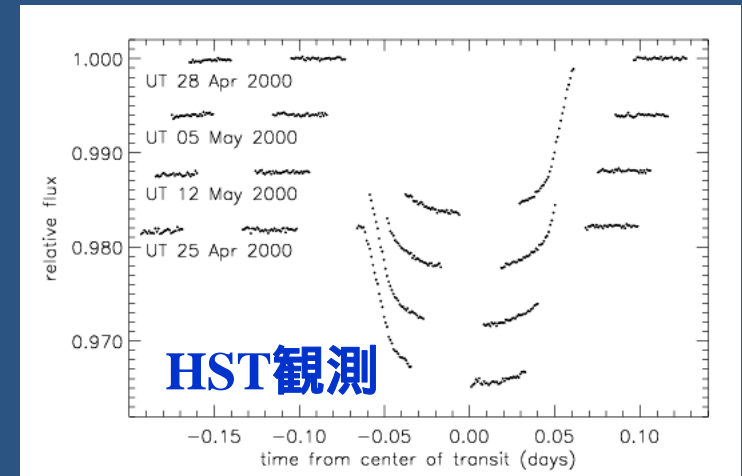


# 太陽系外惑星発見の歴史

- 1992年：パルサーPSR1257-12の周りに3つの“惑星”を発見
- 1995年：主系列星ペガスス座51番星の周りに惑星を発見
- 1999年：主系列星アンドロメダ座ウプシロン星の周りに3つの惑星を発見
- **2000年：系外惑星による主星の食の初検出**
- 2001年：系外惑星大気の初検出
- 2003年：蒸発する惑星の現場 (?)
- 2004年3月15日時点で120個の系外惑星

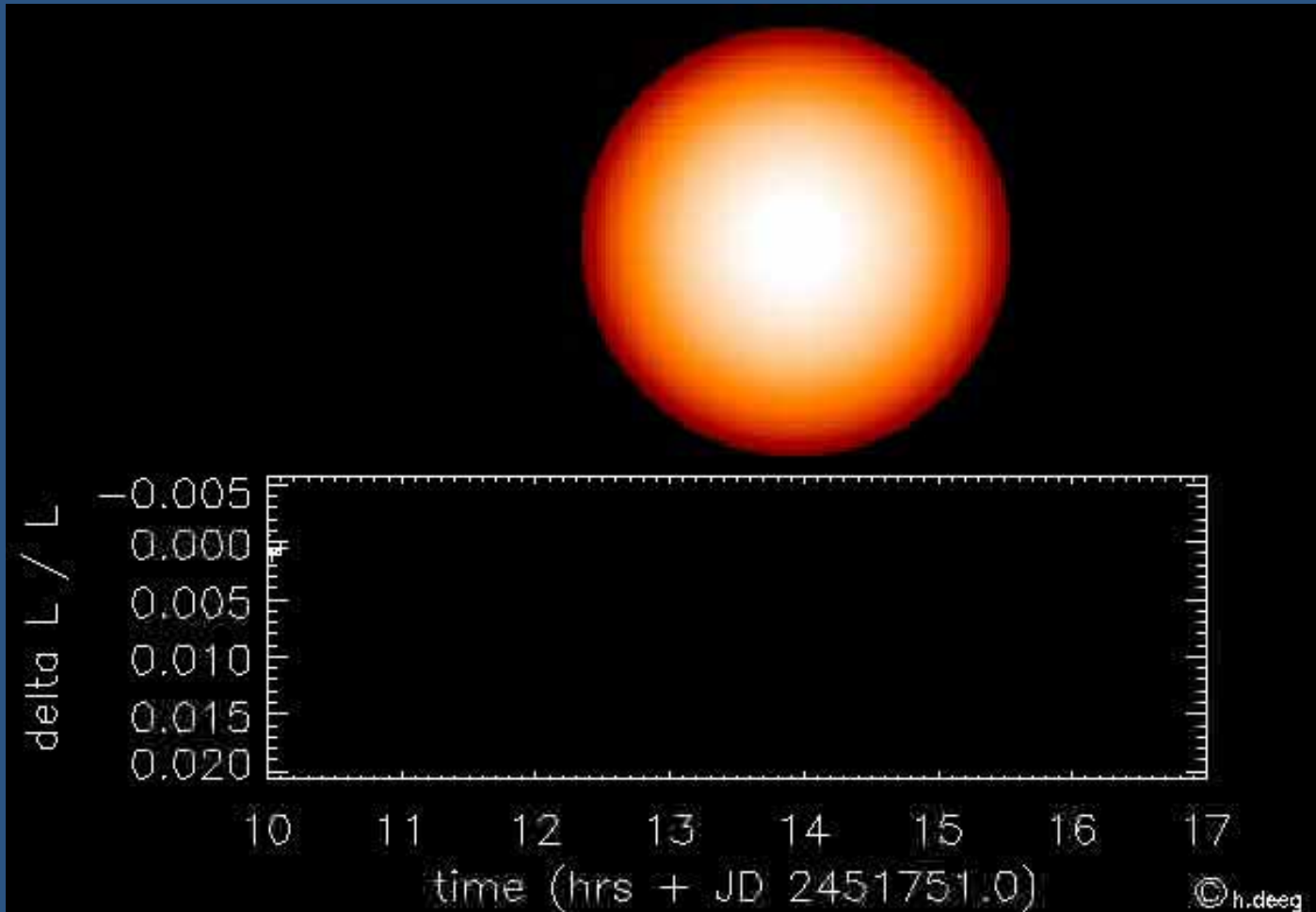
# HD209458の食の観測

- 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



# Transit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
- 主星の自転およびLimb darkening等の情報が得られる
- 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**

# 太陽系外惑星発見の歴史

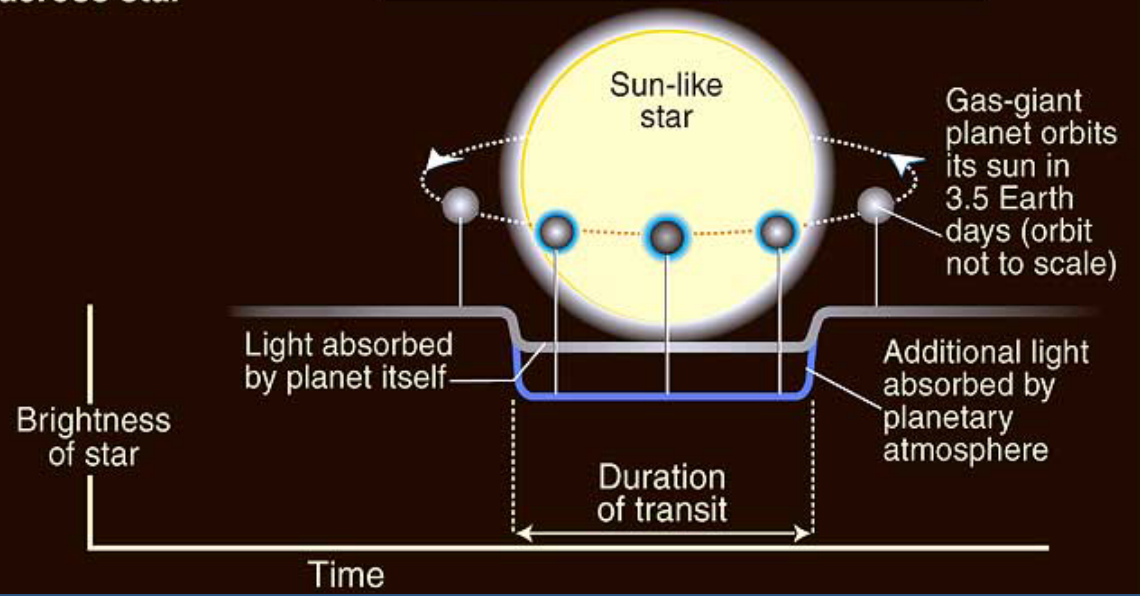
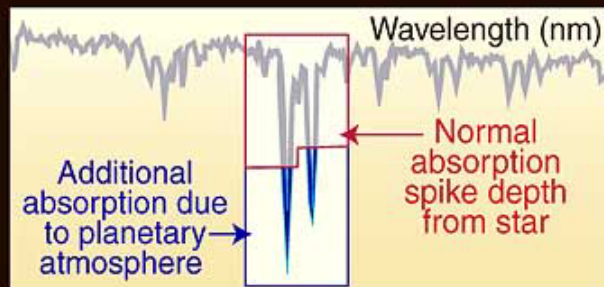
- 1992年：パルサーPSR1257-12の周りに3つの“惑星”を発見
- 1995年：主系列星ペガサス座51番星の周りに惑星を発見
- 1999年：主系列星アンドロメダ座ウプシロン星の周りに3つの惑星を発見
- 2000年：系外惑星による主星の食の初検出
- **2001年：系外惑星大気の初検出**
- 2003年：蒸発する惑星の現場 (?)
- 2004年3月15日時点で120個の系外惑星

# HD209458b

## 惑星大気の初検出

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

HST detects additional sodium absorption due to light passing through planetary atmosphere as planet transits across star



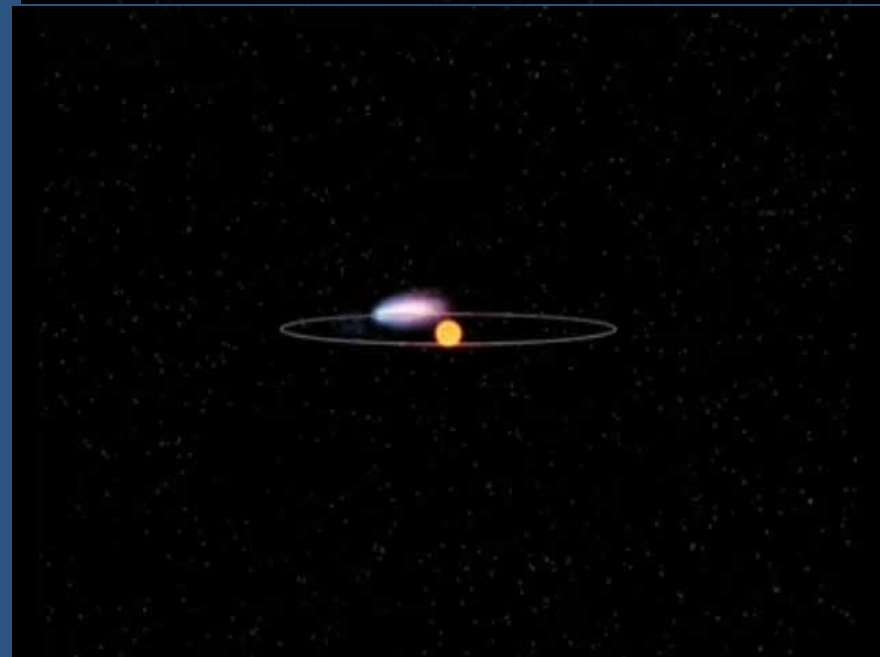
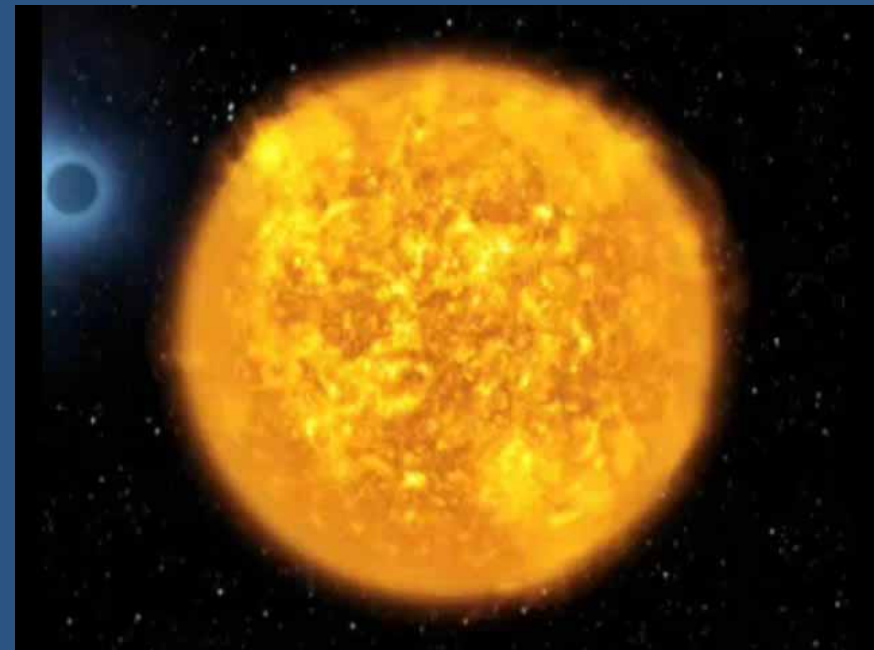
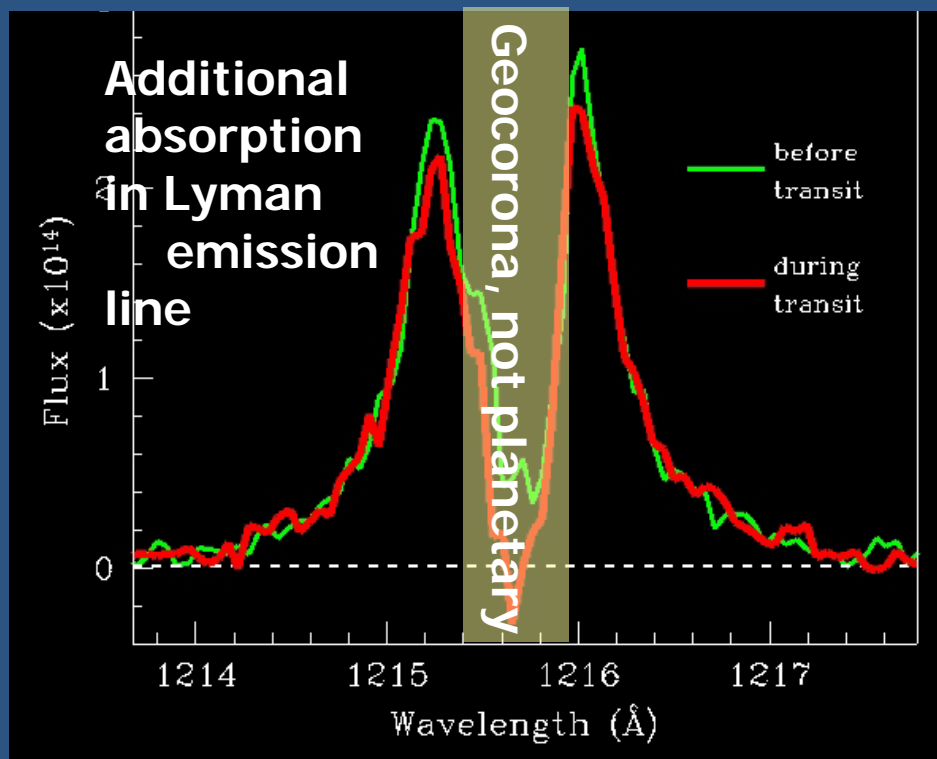
- 2000年 系外惑星の食を初検出
  - 惑星の大きさがわかる
  - 木星程度の質量という観測データとあわせて密度を0.4g/ccと推定
  - 巨大ガス惑星であることの確認
- 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムの存在を発見

# 太陽系外惑星発見の歴史

- 1992年：パルサーPSR1257-12の周りに3つの“惑星”を発見
- 1995年：主系列星ペガスス座51番星の周りに惑星を発見
- 1999年：主系列星アンドロメダ座ウプシロン星の周りに3つの惑星を発見
- 1999年：系外惑星による主星の食の初検出
- 2001年：系外惑星大気の初検出
- **2003年：蒸発する惑星の現場 (?)**
- 2004年3月15日時点で120個の系外惑星

# 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？

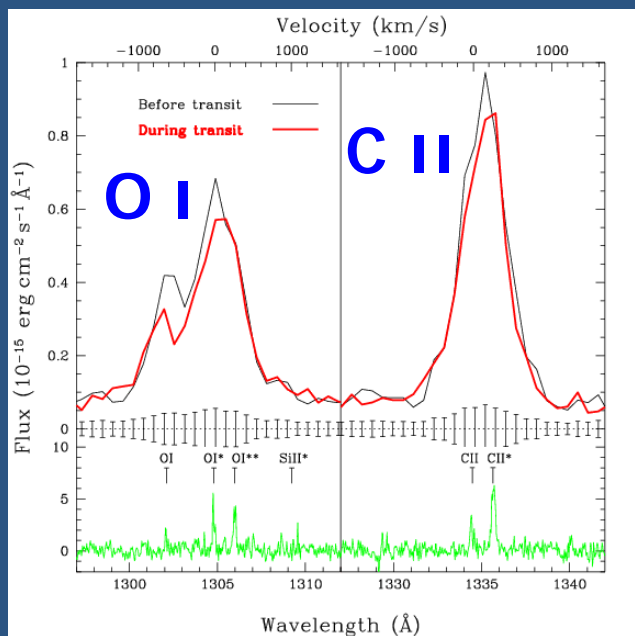


Vidal-Madjar et al. Nature 422(2003)143

太陽系外惑星探査 <http://hubblesite.org/newscenter/archive/2003/08/>



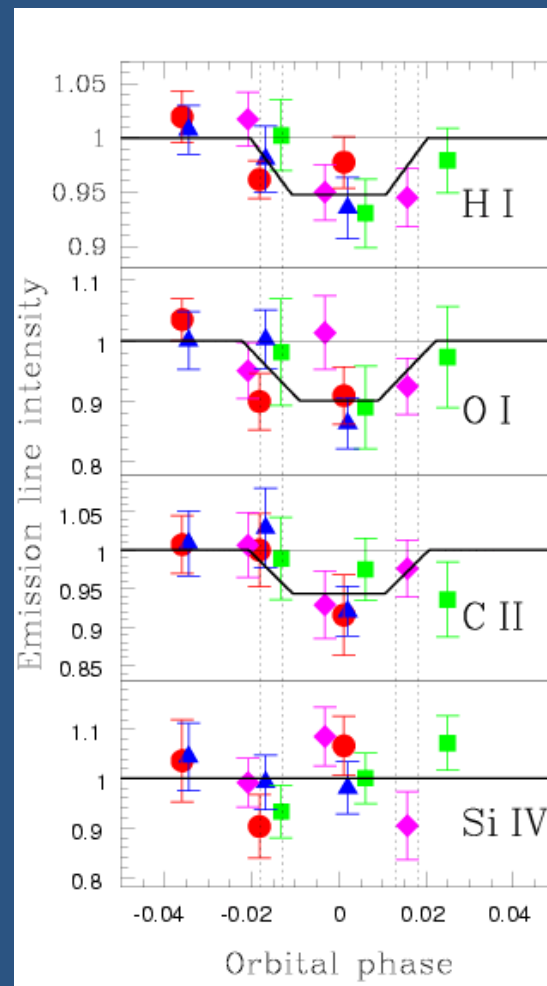
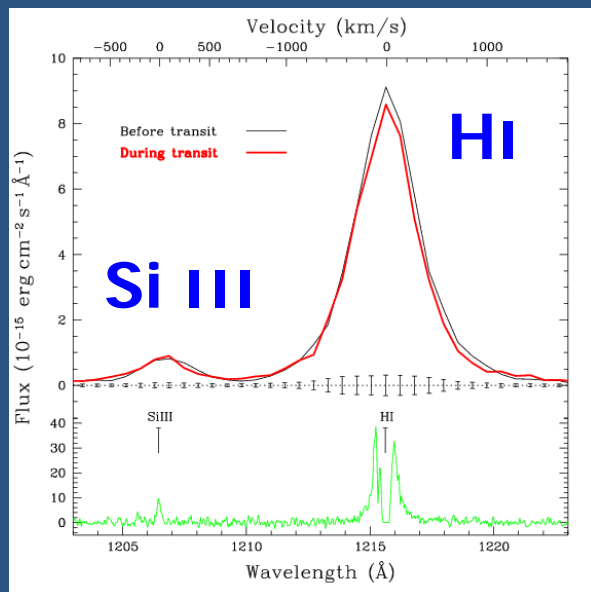
# HD209458b大気に酸素と炭素吸収を発見



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



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)

山田亨、佐藤文衛、青木和光 (国立天文台)

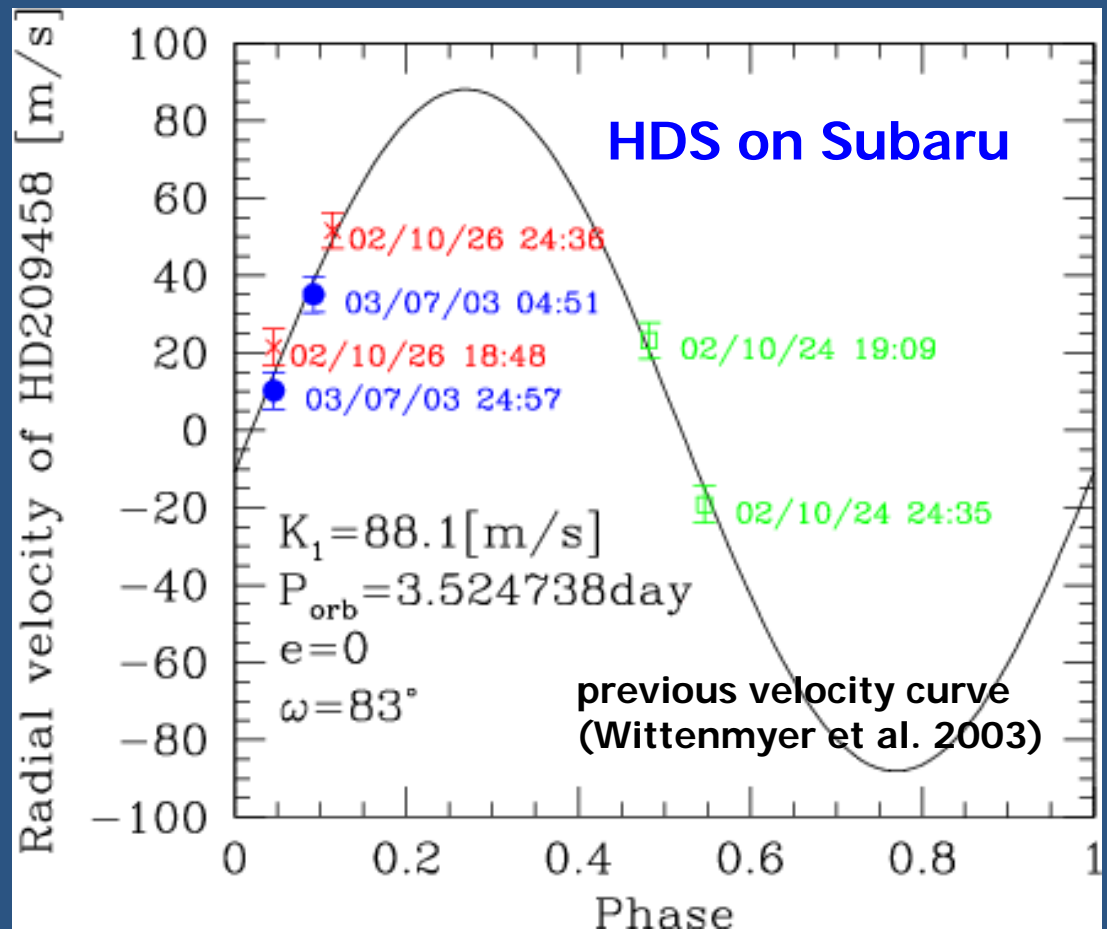
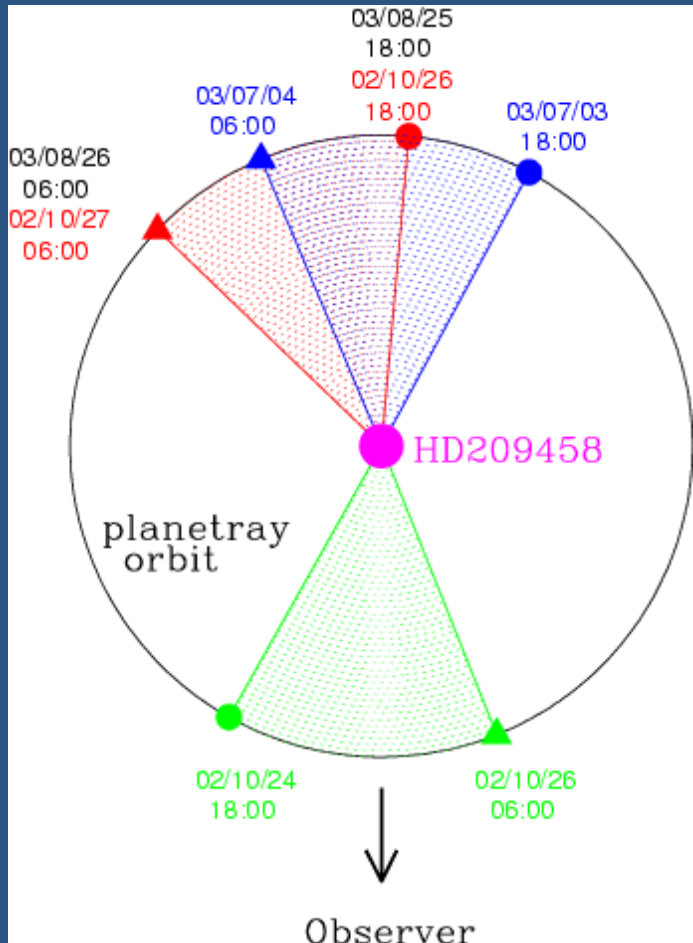
Edwin Turner, Brenda Frye (Princeton Univ.)

Josh Winn (Harvard Univ)

# 現在進行中の3つのプロジェクト

- **地上からの太陽系外惑星大気初検出**を目指す
  - 解析はほぼ終了、現時点では上限値のみ
  - Winn, Suto, Turner et al. (2004)
- 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 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
  - 解析を始めたところ

# HD209458bの位相とradial velocity

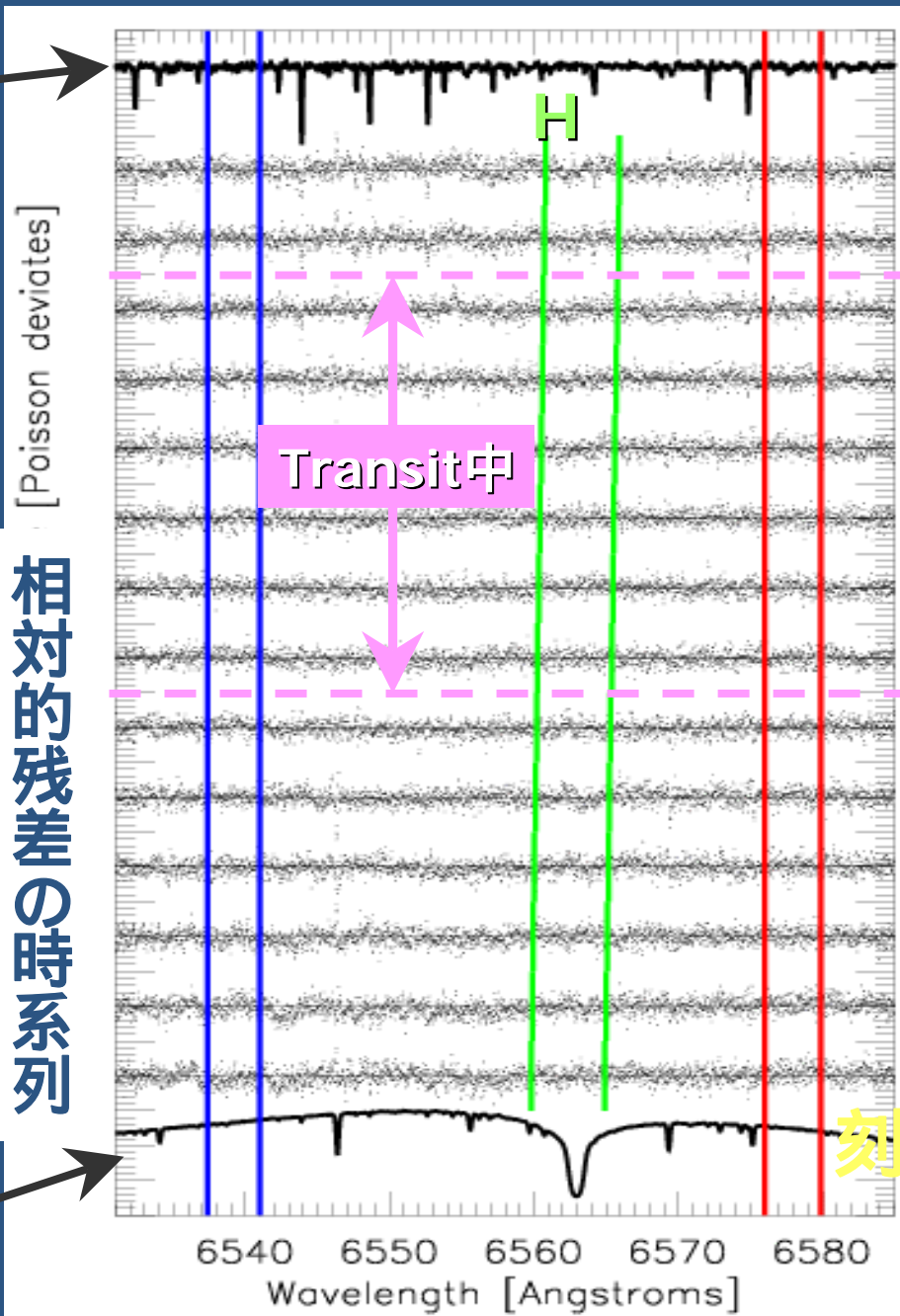


# HD209458b 惑星大気による 吸収の探査

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

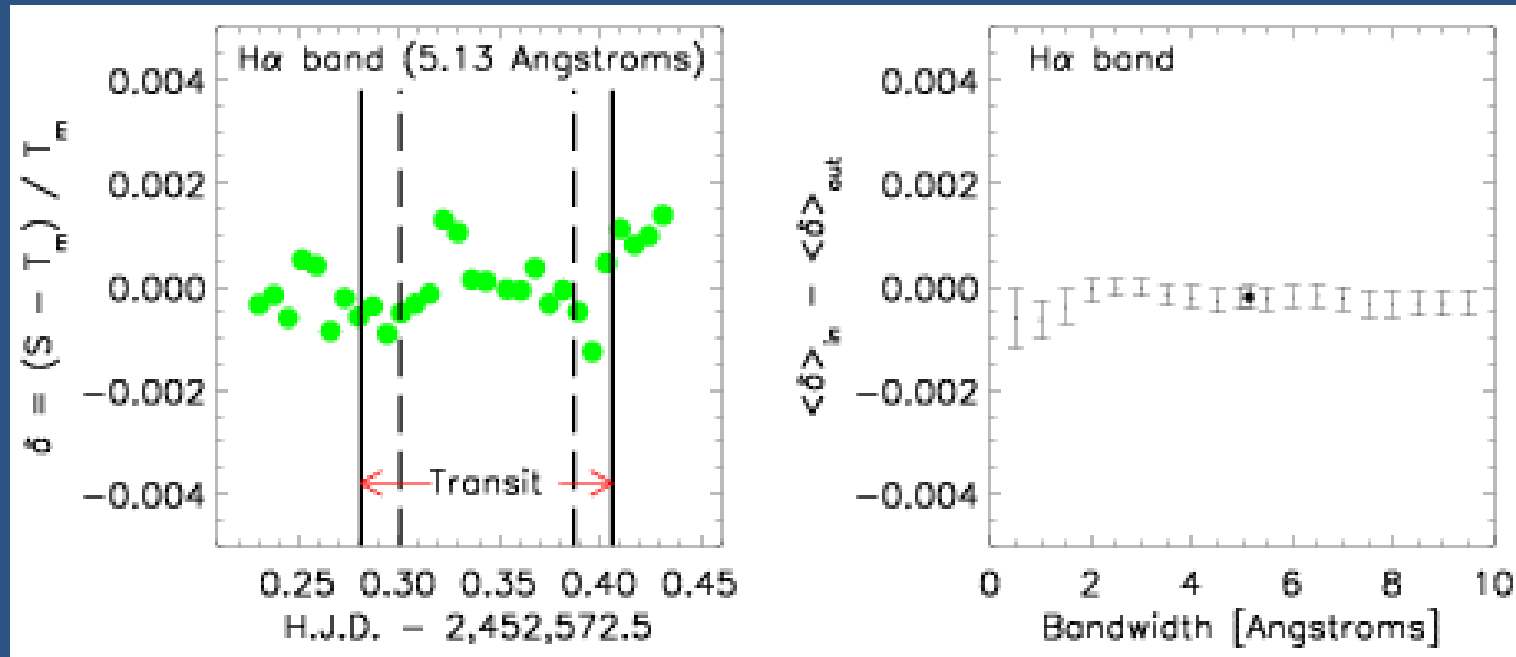
H 付近の  
地球大気スペクトル

Transit でない時期の  
H 付近のスペクトル



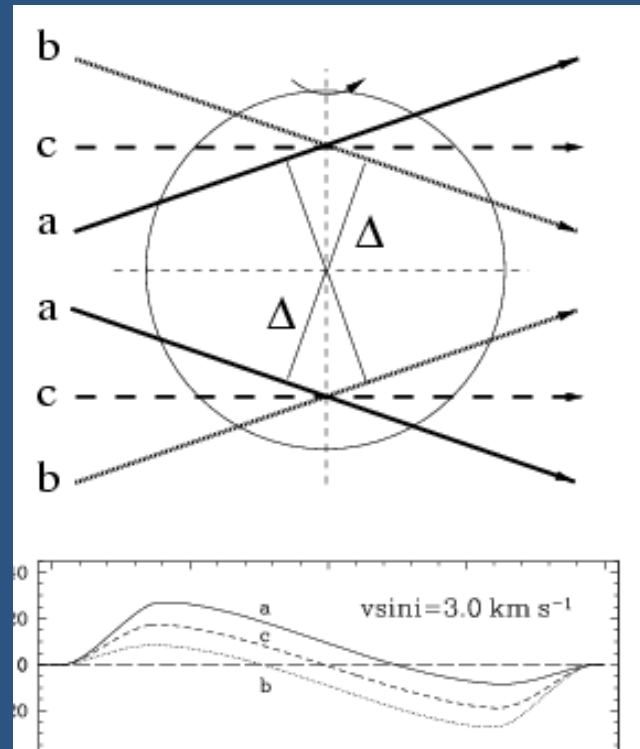
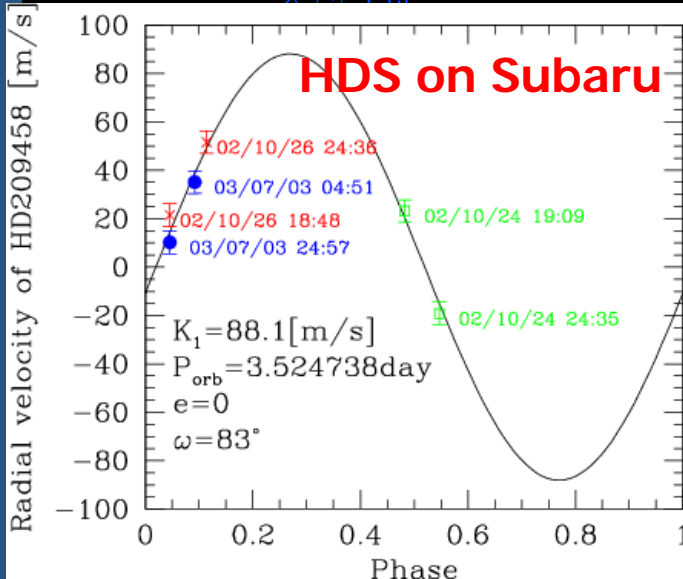
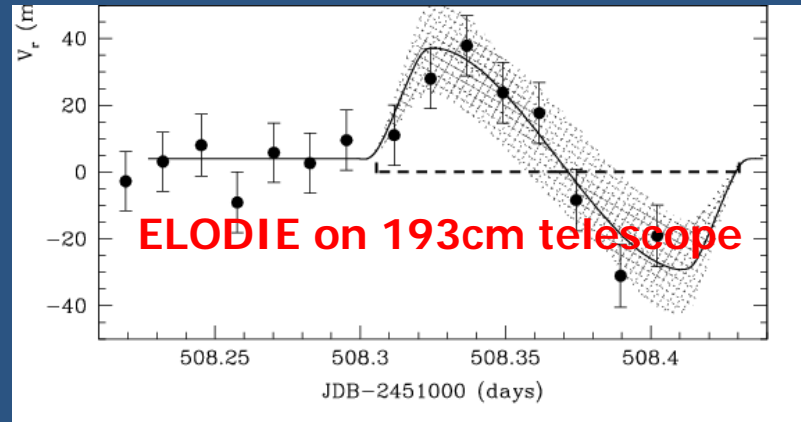
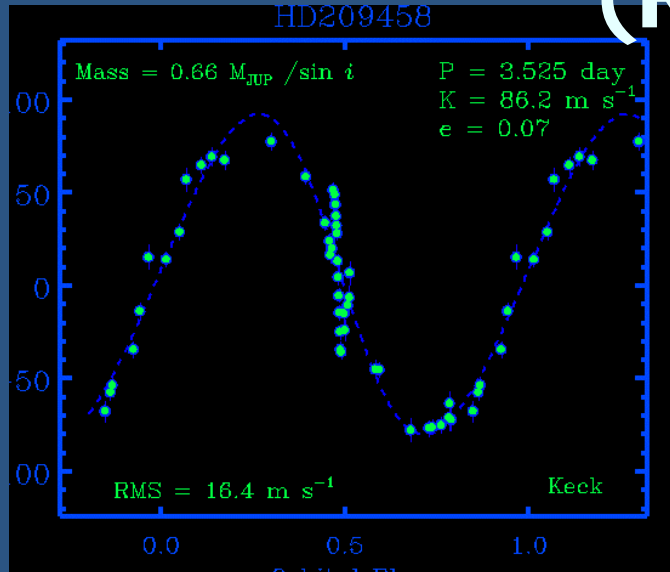
相対的残差の時系列

# 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)
- $T < (0.6-1.3)\text{eV}$  (吸収モデルの仮定に依存)

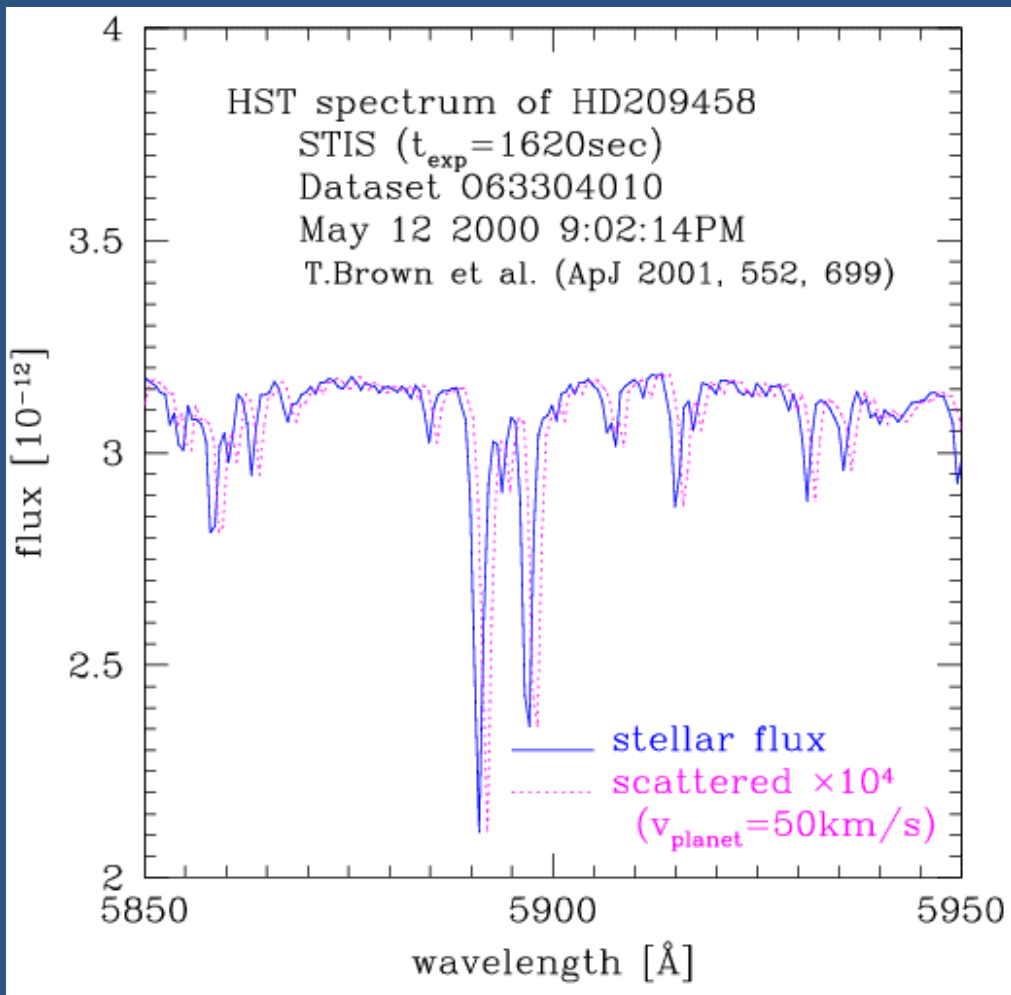
# Transit 中の radial velocity の精密測定 (Rossiter 効果)



主星の自転と惑星の公転が同方向

Queloz et al. (2000)  
A&A 359, L13

# 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  $50\text{km/s}$  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
- 惑星大気の実見
- 惑星大気の高精密分光観測による組成決定
- 惑星反射光の検出
- 地球型惑星の実見
- *Biomarkerの実定* (e.g., extrasolar plant)
- *Habitable planetの実見*
- *Extraterrestrial lifeの実見*

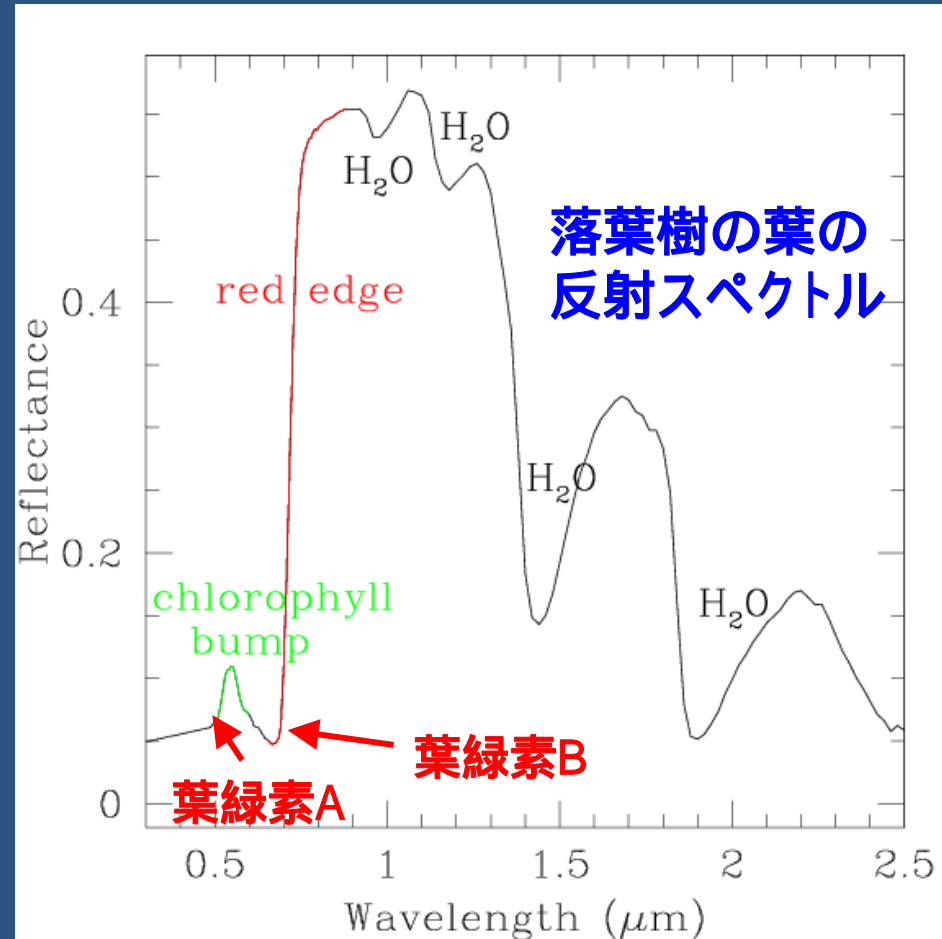


# Biomarkerと地球照： 我が地球を用いて「第2の地球」がどのように見えるかを予測

- 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*)



Seager, Ford & Turner  
astro-ph/0210277 35

# 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,

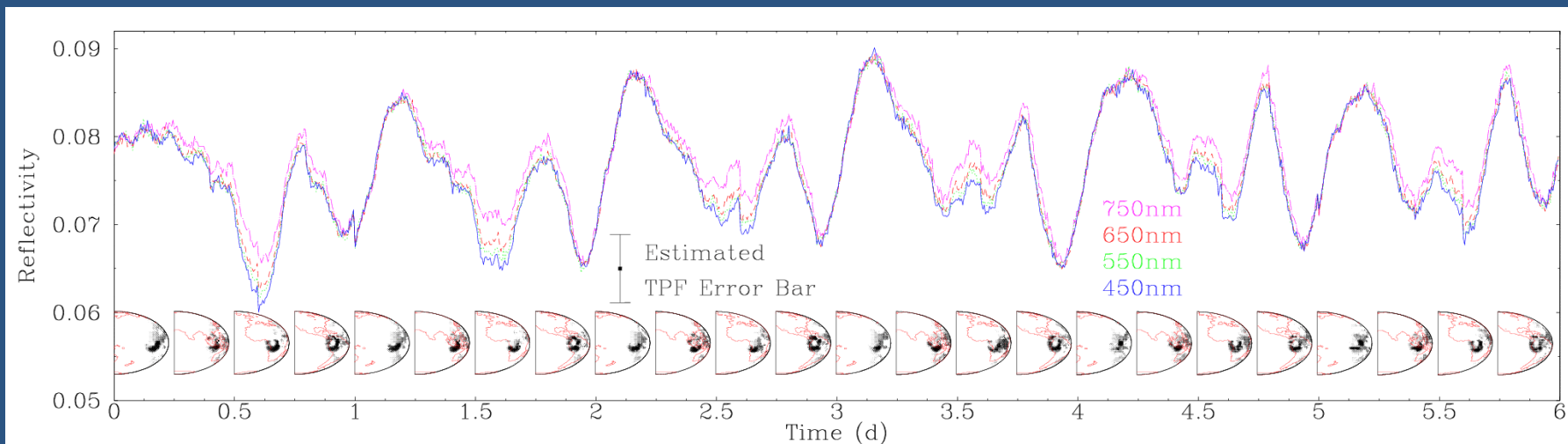
V. M. SLIPHER.

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

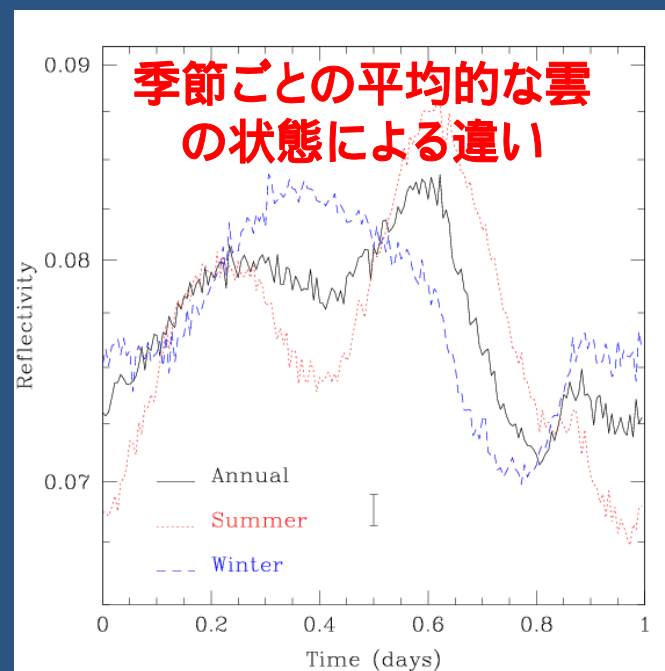
reflection spectrum. The Martian spectra of the dark regions so far do not give any certain evidence of the typical reflection spectrum of chlorophyl. The amount and types of vegetation required to make the effect noticeable is being investigated by suitable terrestrial exposures.

# 地球反射光度の日周変化を検出できるか？



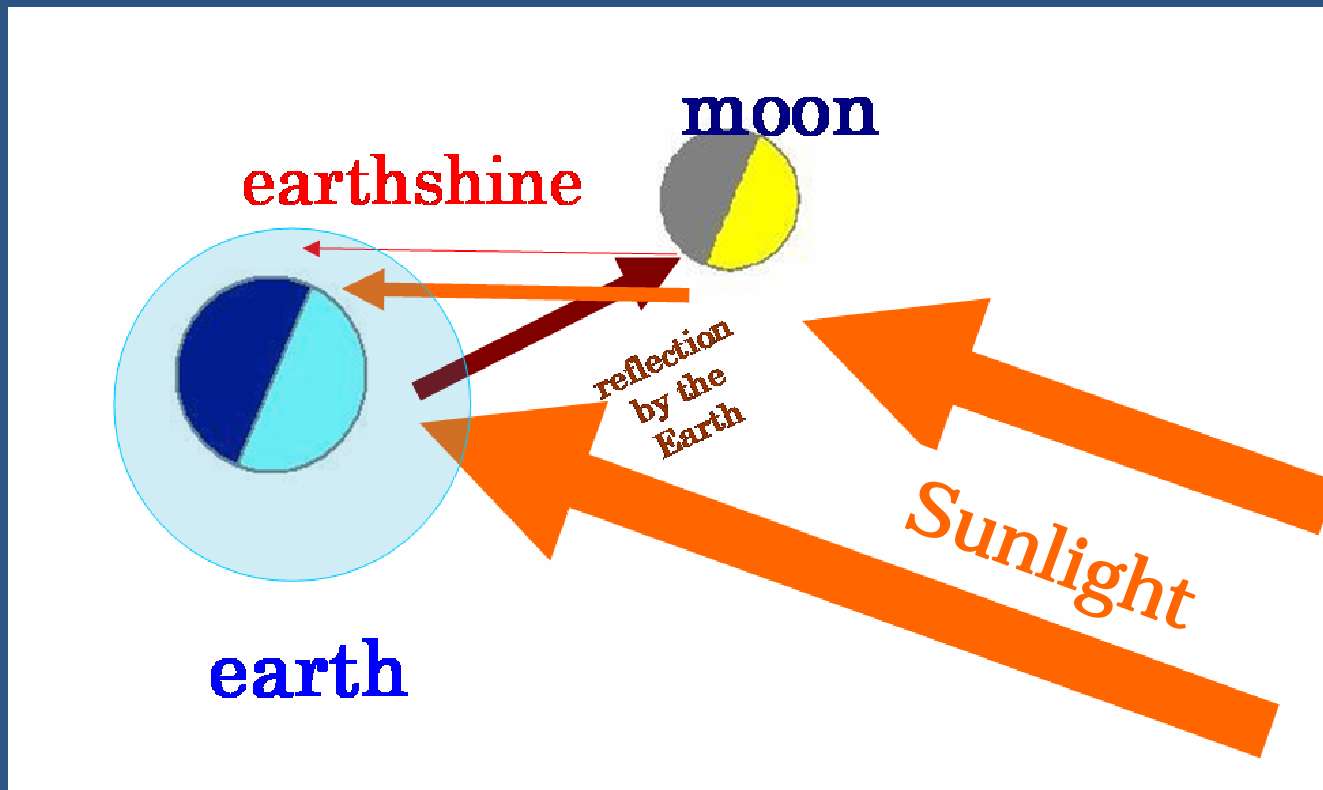
Ford, Seager & Turner  
Nature 412 (2001) 885

- 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

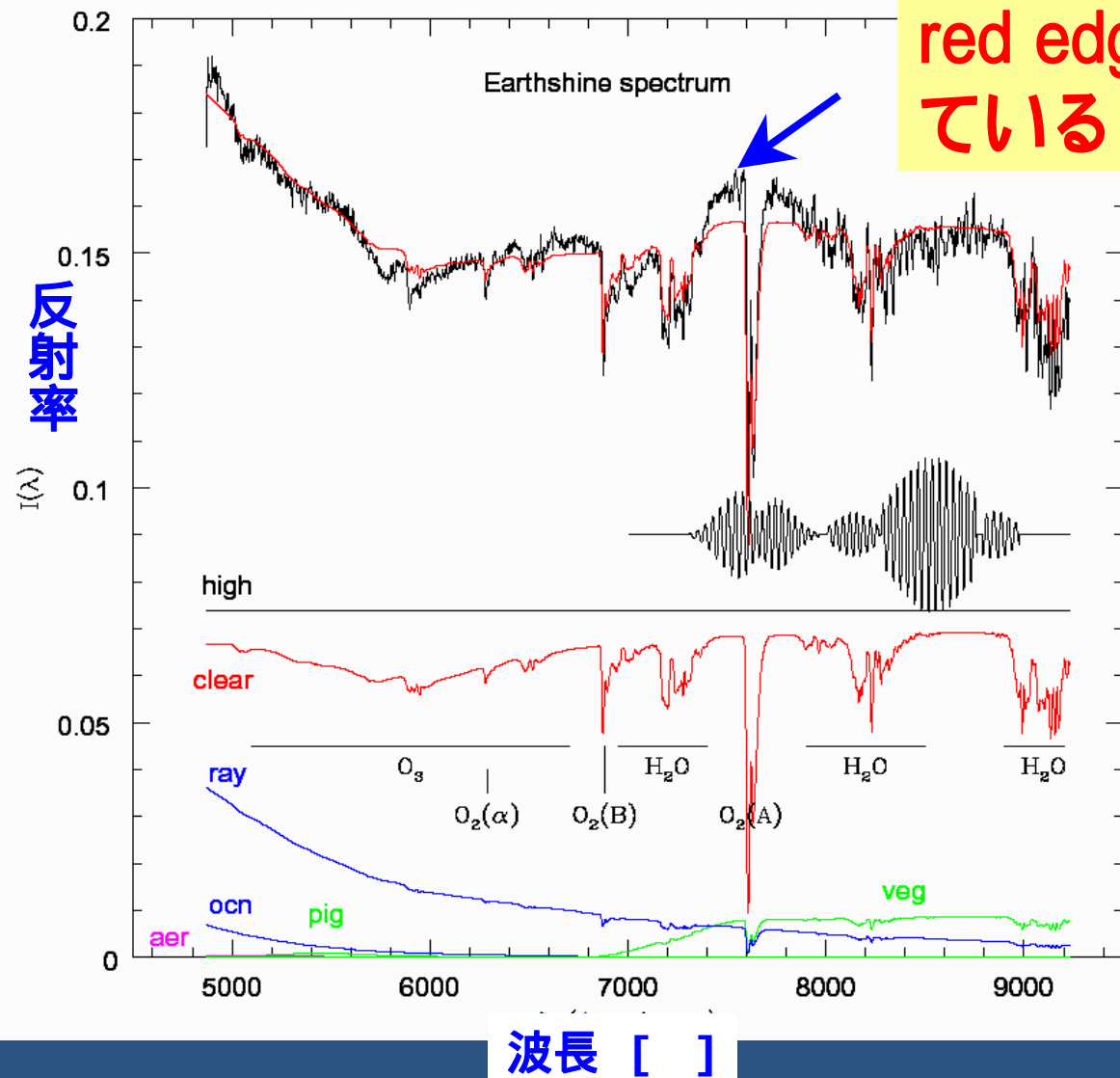


# 地球照観測

- 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



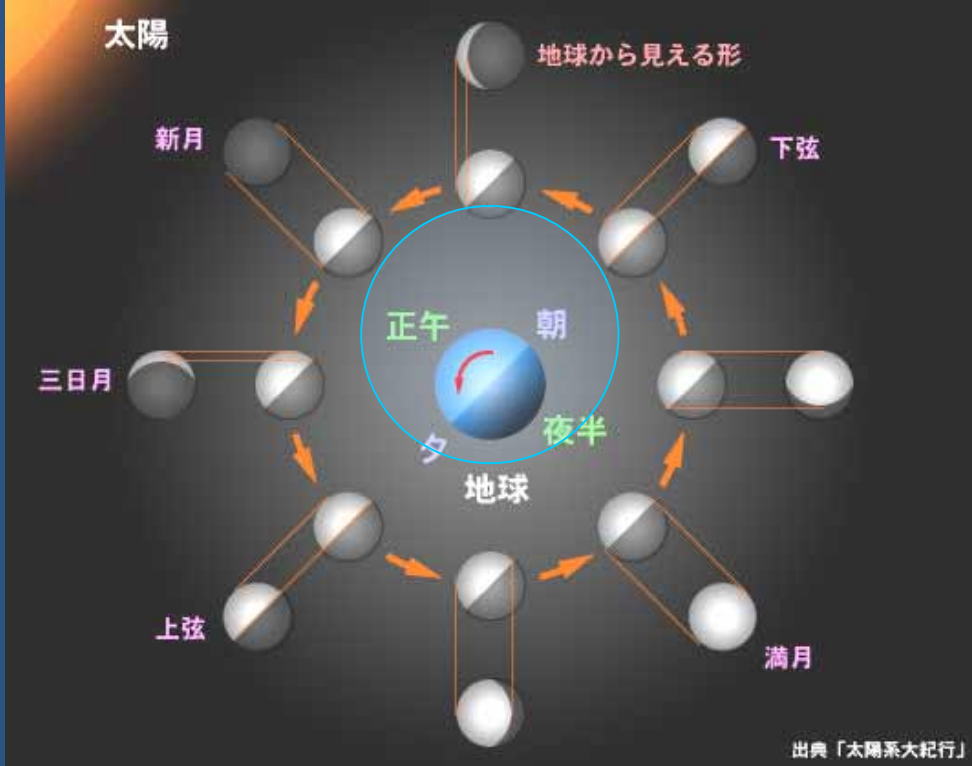
red edgeが見えている???

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

# 地球照の観測地点



朝



夕

主として海洋



水

太陽系外惑星探査

日本はred edgeの有無を調べる観測に最適の場所

海老塚(理研)等が現在トライ中

主として大陸

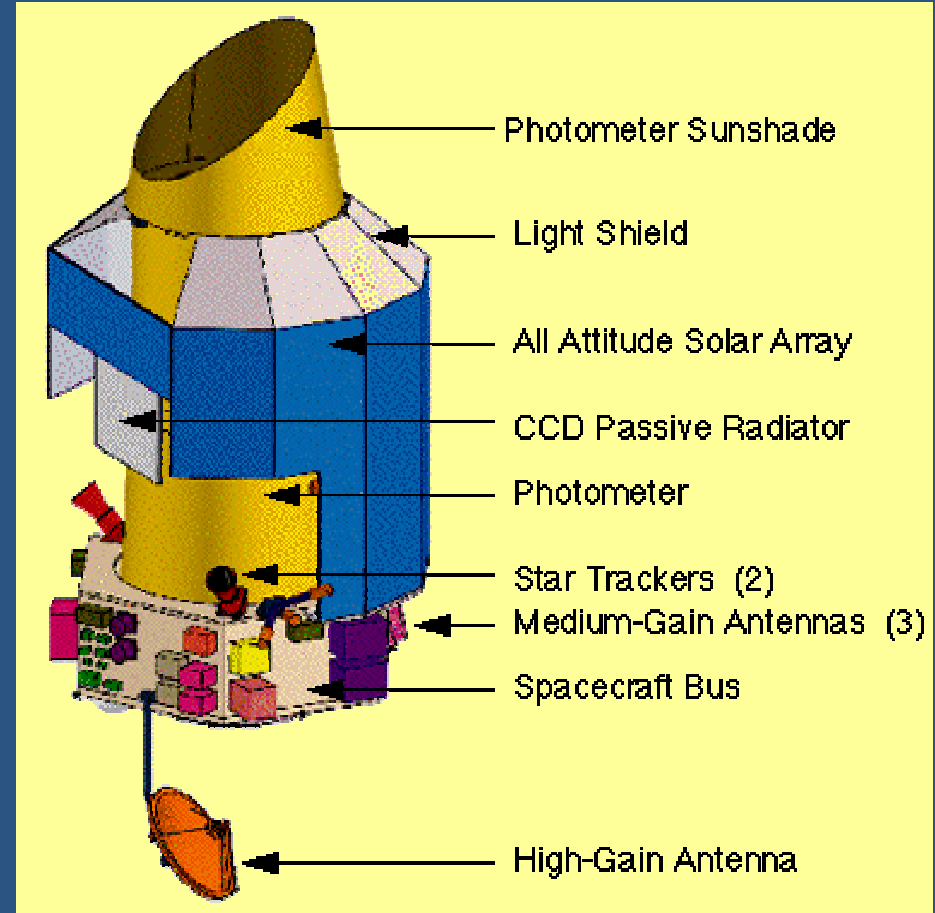
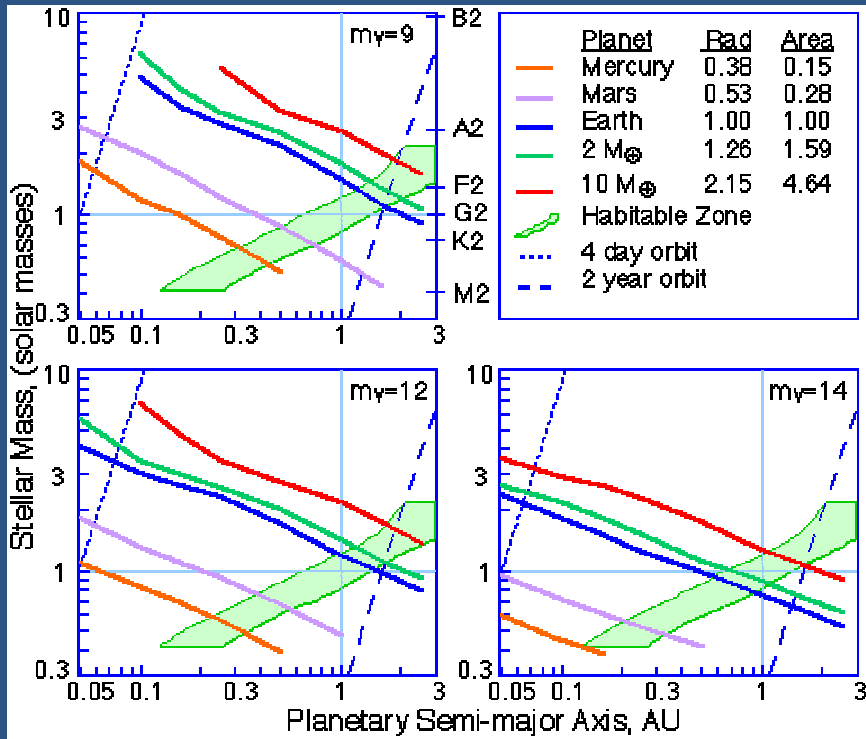


植物



# ケプラー衛星 (米国2007年打ち上げ予定)

## 食惑星の測光サーベイ



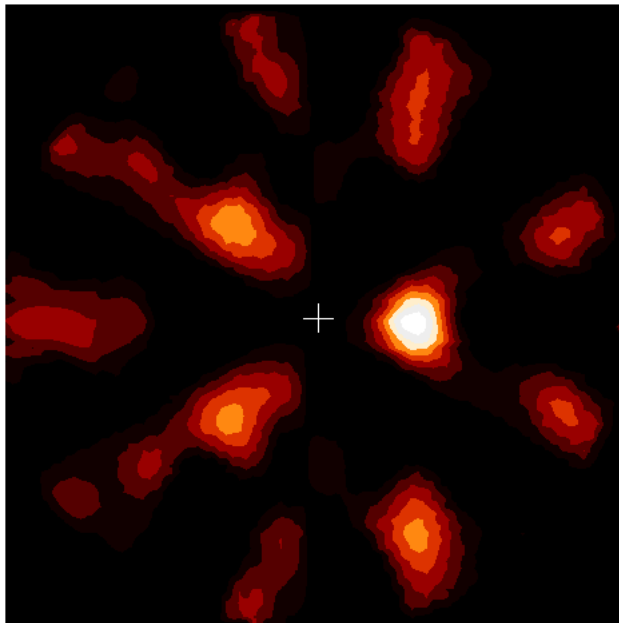
<http://www.kepler.arc.nasa.gov/>

# 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

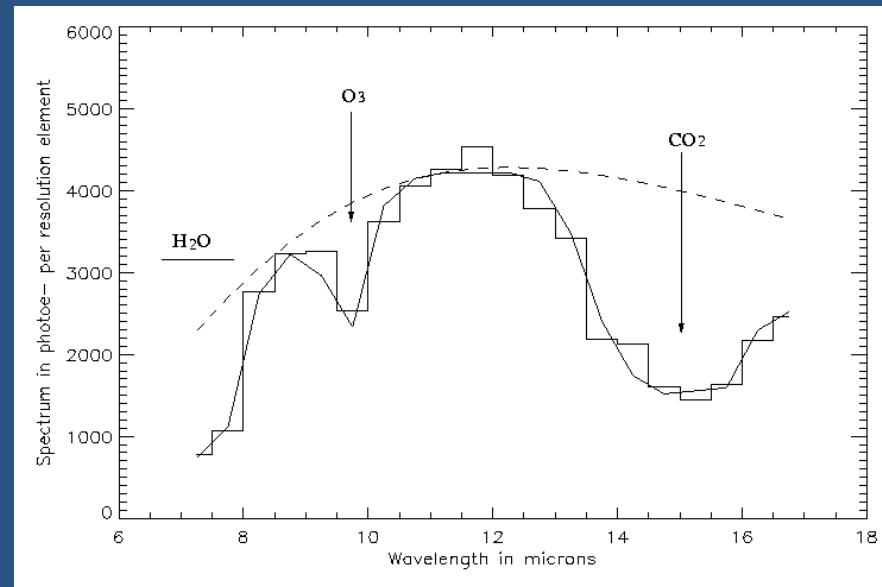


An Earth at 10pc



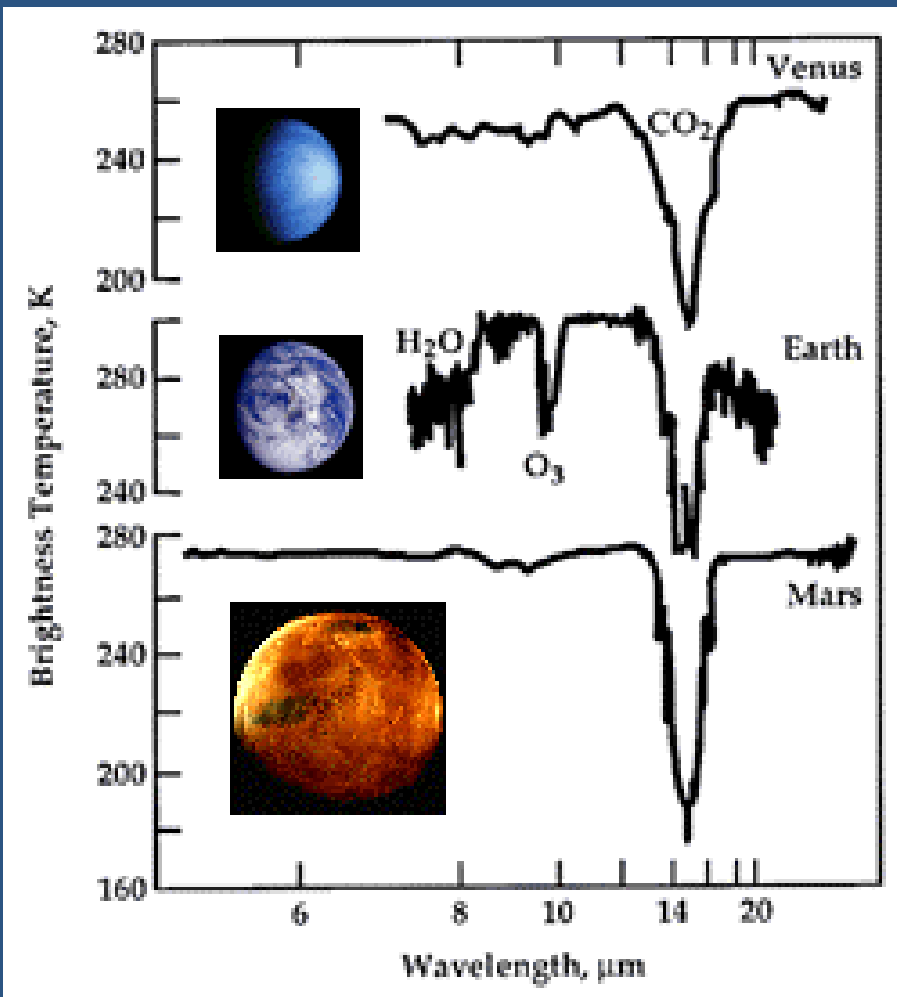
Simulation of IRSI at L2 observing a sun-like star at 10pc, with an Earth-like planet at 1 AU. Inclination of planetary system is 30°, with a Solar System level Zodiacal Light. Observing time is 60 hr.

The star at the position marked by the cross has been nulled out. The artefacts are due to the simple reconstruction algorithm. More powerful algorithms are being developed.



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

# 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
  - 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？

# 21世紀の系外惑星探査



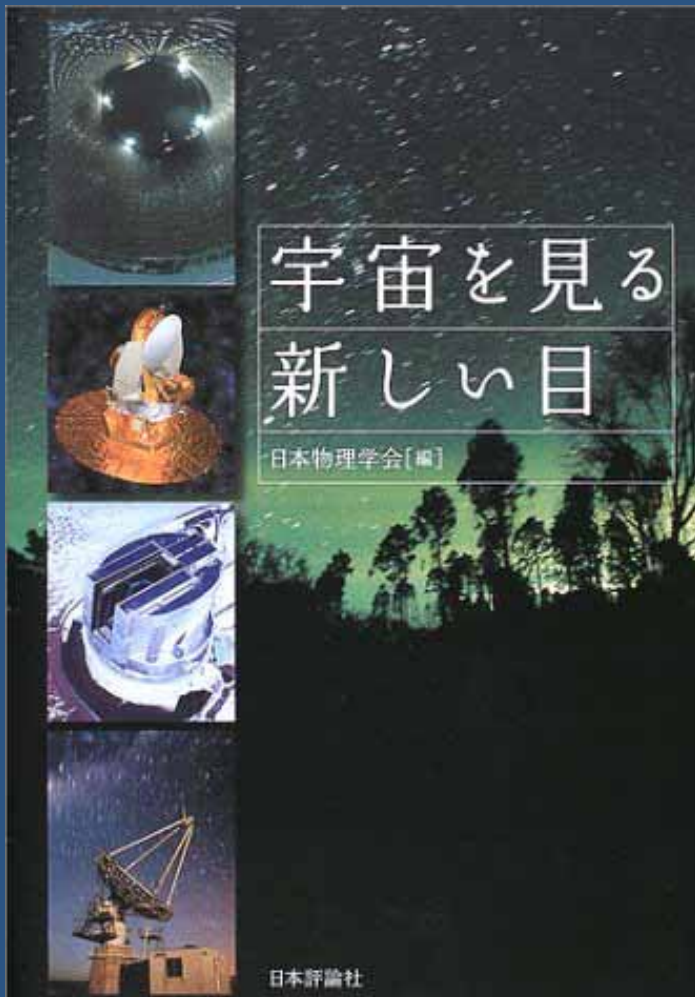
- 地球型惑星の発見
- 水が液体として存在する惑星の発見
- 太陽系外惑星以外に生物が存在することの兆候を探す
- 物理学、化学、天文学、地球惑星学、生物学を総合した新しい研究分野の誕生

地球型惑星の直接検出を目的として、2015年頃にヨーロッパで打ち上げが予定されている赤外線干渉計衛星Darwin. 1.5mの望遠鏡6基を50mから500mの間隔で船隊を組む.

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

# 「宇宙を見る新しい目」

## 日本物理学会編：2004年3月新刊



- 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

# 太陽系外惑星探査 現状と展望

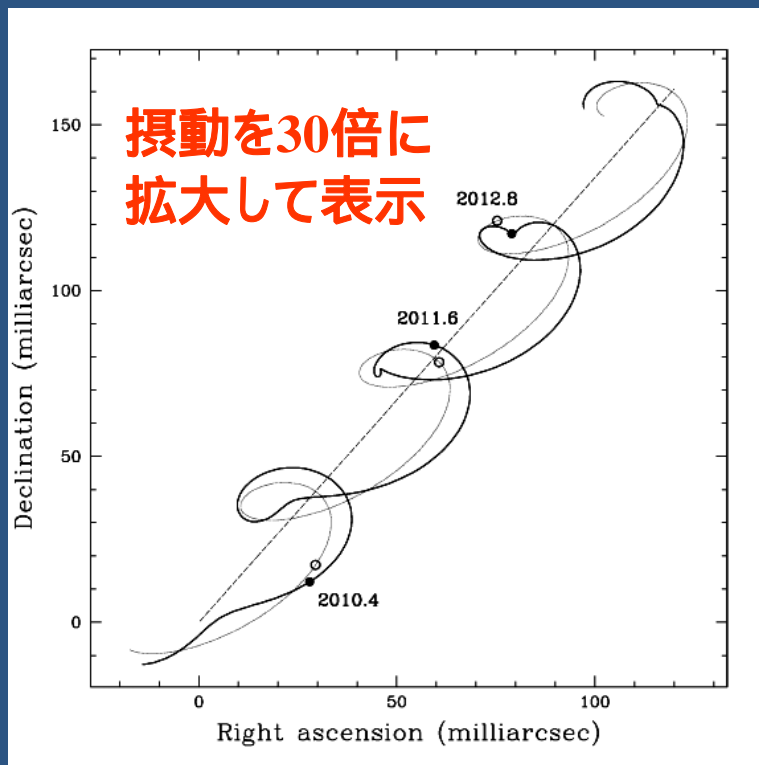


東京大学大学院理学系研究科 須藤 靖

2004年3月28日 宇宙線シンポジウム  
「宇宙と生命」 第59回日本物理学会@福岡

# 主星の位置変動

木星による太陽の位置変動を10pcの距離から観測すると



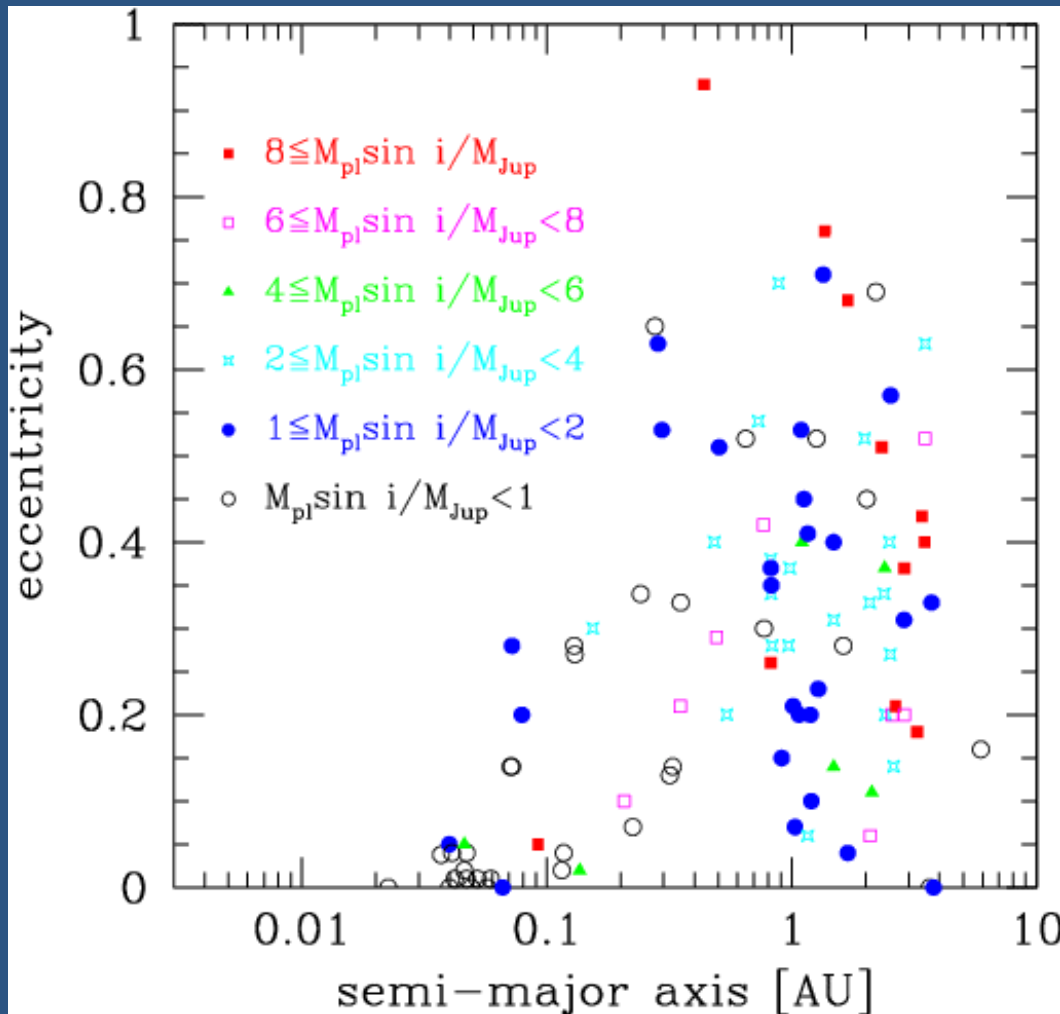
太陽の位置摂動:  
70万km (太陽半径程度)  
0.5 ミリ角秒

電波VLBI: 1ミリ秒角分解能  
ヒッパルコス衛星: 1ミリ秒角  
(12万個の星の固有運動)

GAIA(2009年打ち上げ?):  
10マイクロ秒角 (10<sup>9</sup>stars)  
距離200pc以内の50万個の星  
(if 5%) 25000 Jupiters !

Perryman: Rep.Prog.Phys.  
63(2000)1209

# 系外惑星の軌道



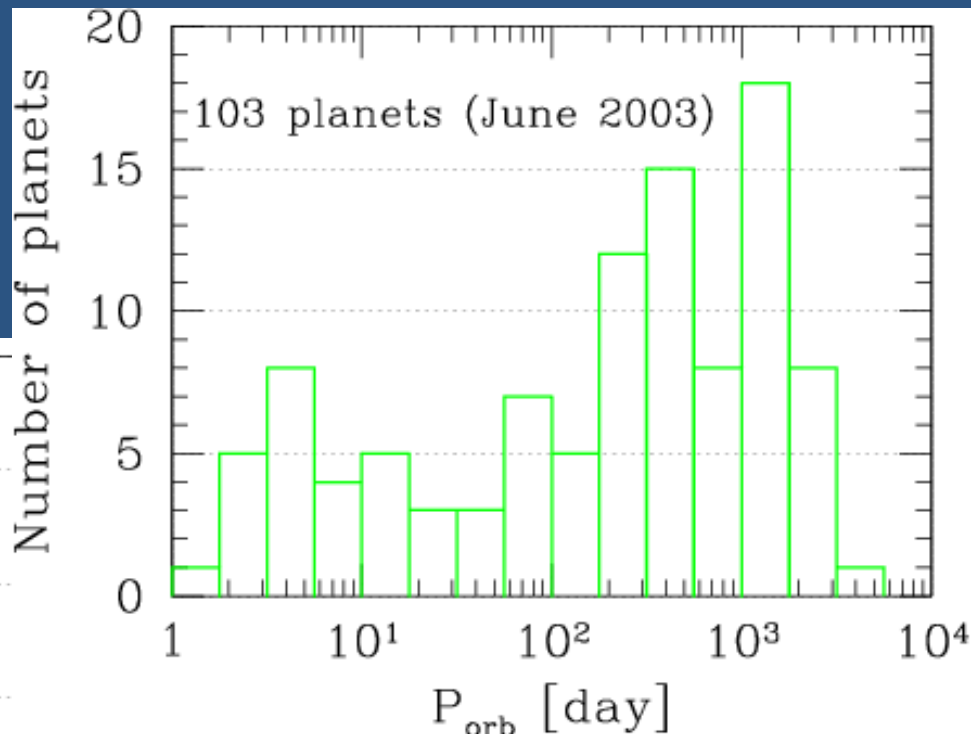
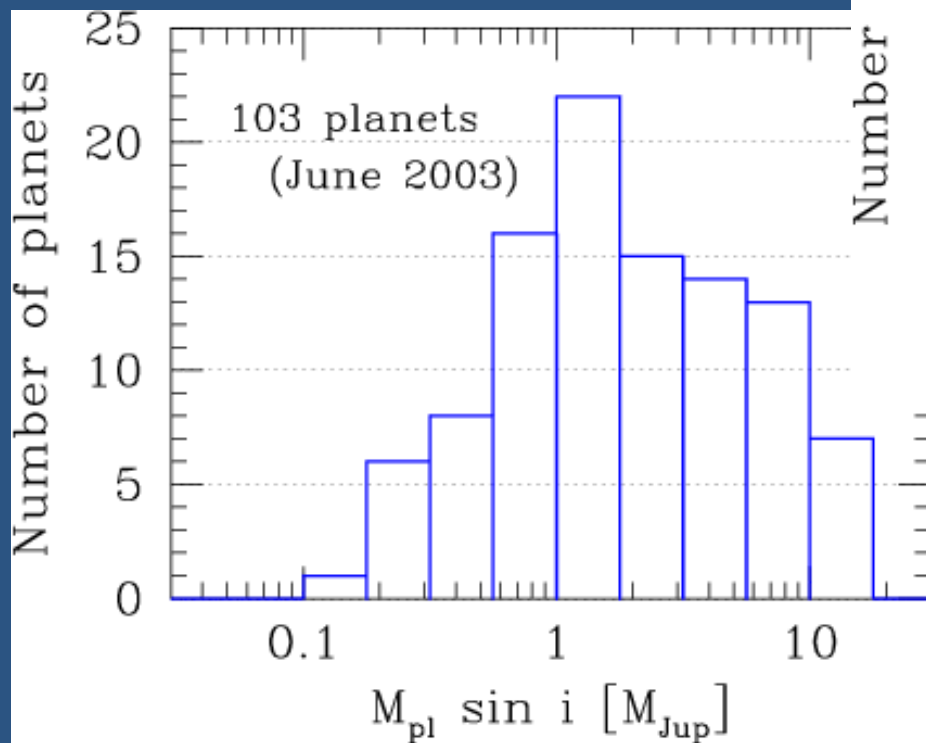
- 円軌道から大きくずれた軌道が多い (ただし、0.1天文単位以下の半径では円軌道に近い)
- 1天文単位以下の半径をもつ木星質量の惑星が大量に存在 (食の観測例から考えるとこれらはガス惑星であろう Hot Jupiter)

我々の太陽系とは全く異なる： 惑星系の多様性



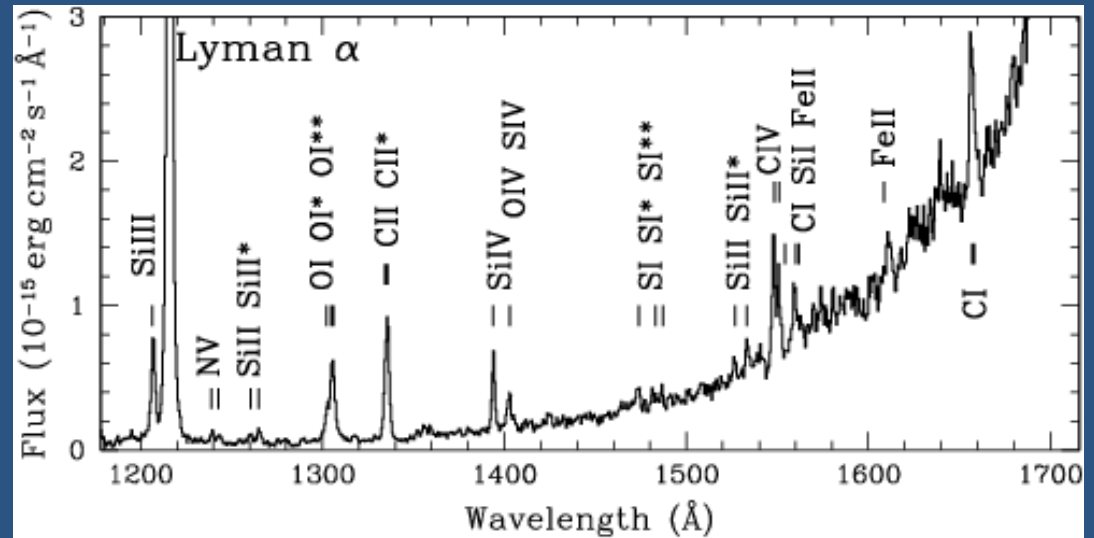
# 系外惑星の分布

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



# 紫外線領域での主な輝線波長

Si III	1206
<b>H I</b>	<b>1216</b>
N V	1239, 1243
<b>O I</b>	<b>1302</b>
<b>C II</b>	<b>1335</b>
Si IV	1394, 1403
S I	1474
Si II	1527
C IV	1548, 1551
C I	1560, 1657
Fe II	1608



Vidal-Madjar et al. (2004)

[astro-ph/0401457](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0401457)

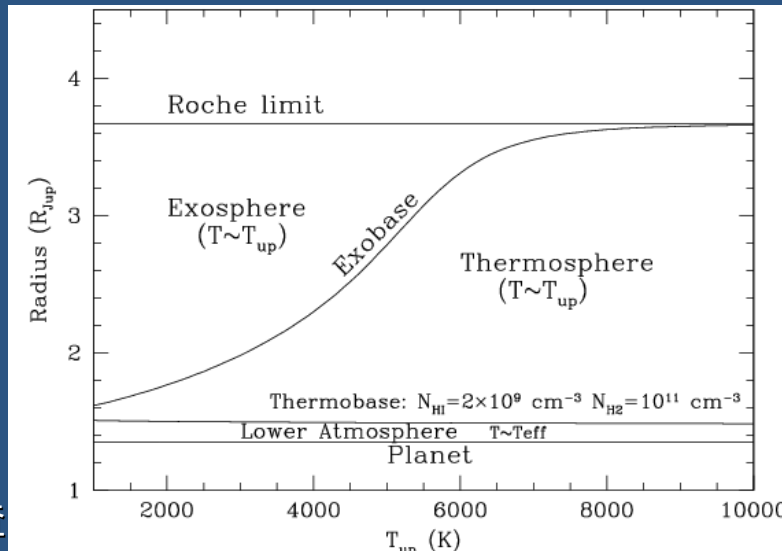
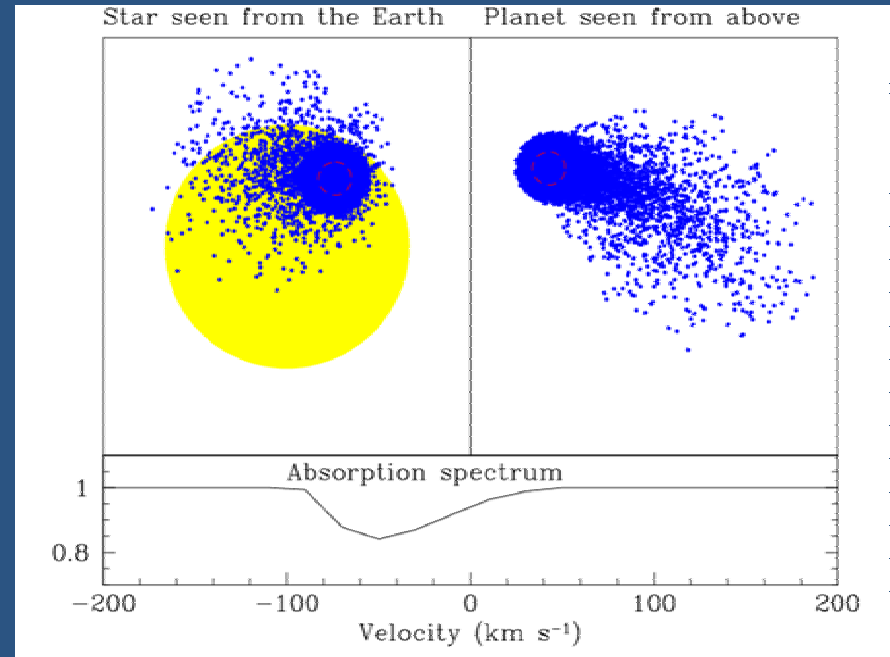
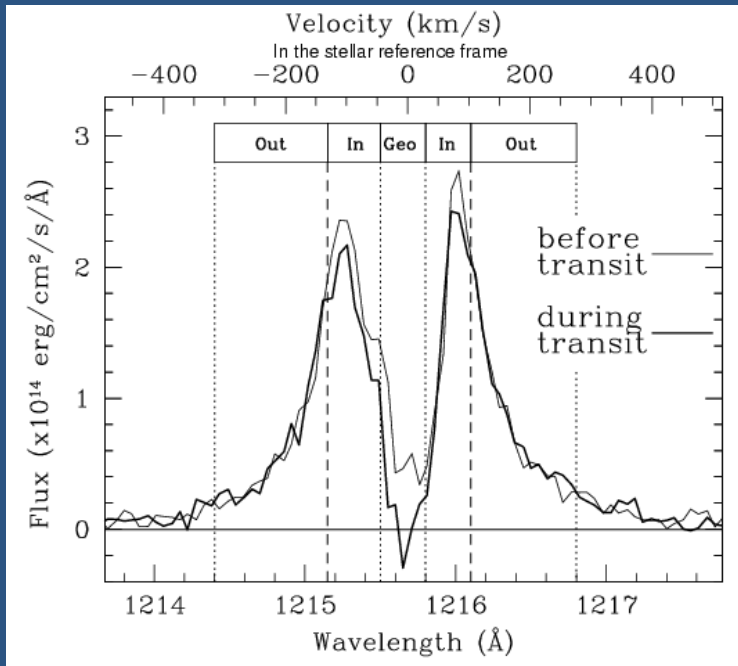
“Detection of oxygen and carbon in the upper atmosphere of the extrasolar planet HD209458b”

# 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
	<i>半径</i>	<i>1.347 ± 0.060 木星半径</i>
	<i>密度</i>	<i>0.4g/cc (&lt; 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大気に Lyman 吸収を発見

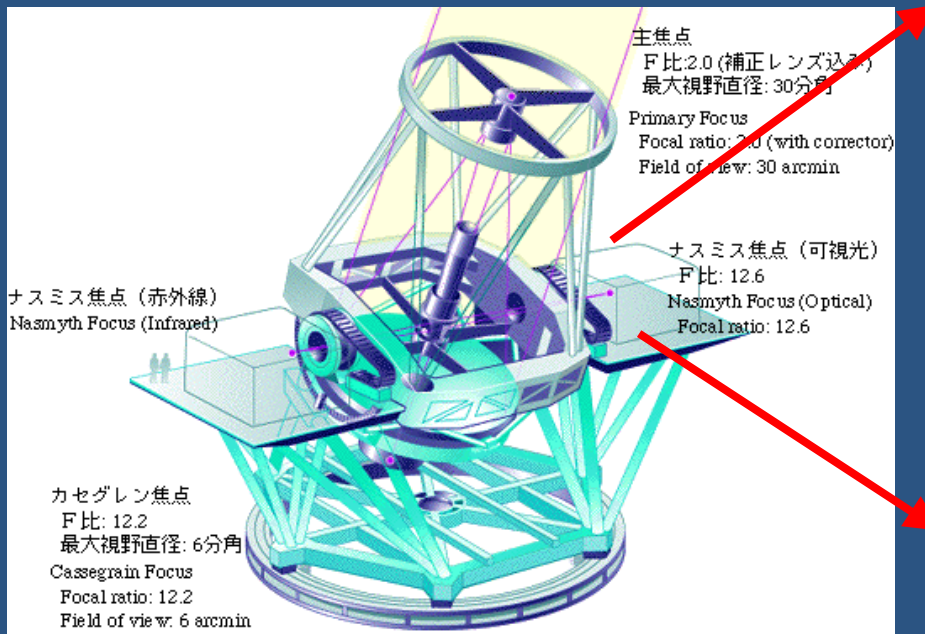


Vidal-Madjar et al.  
Nature 422 (2003) 143

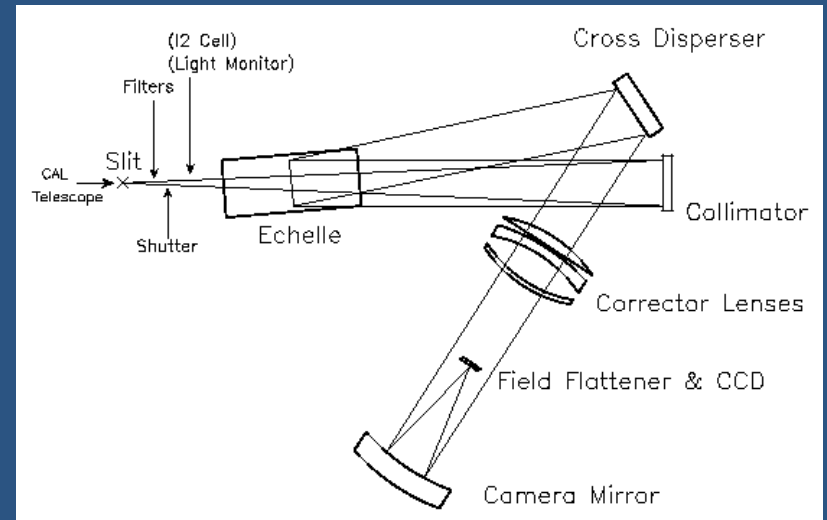
## 吸収量

H I (Ly ) 15 %  
c.f., Na I 0.02 %

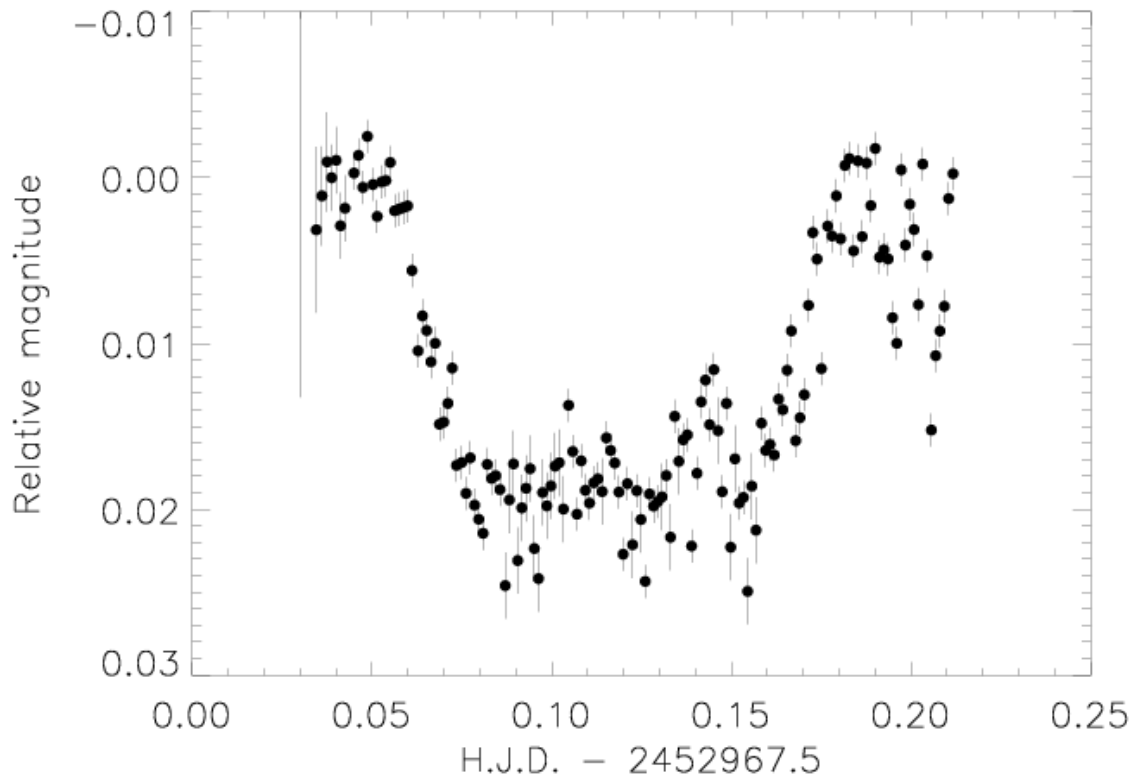
# HDS at Subaru



**CCD: 4.1k x 2k x 2**  
**13.5 $\mu$ m/pixel, 0.12"/pixel**  
**Gain: 1.7e-/ADU**  
**Readout time: 70sec**  
**Saturation level: 50000e-**  
 **$\lambda / \Delta\lambda = 50000$**



# 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