

究極の宇宙論

太陽系外惑星探査



東京大学大学院理学系研究科 須藤 靖

2003年度 日本物理学会

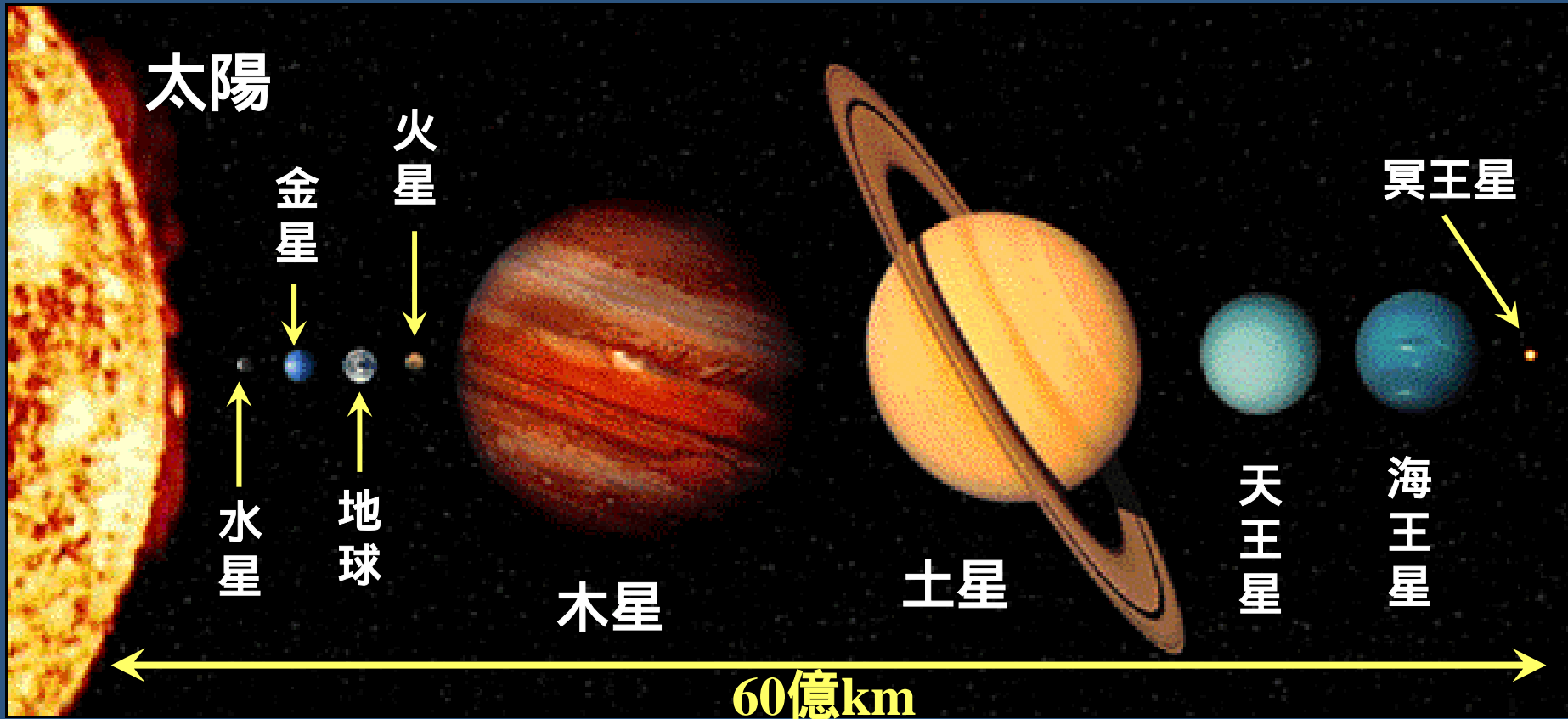
科学セミナー「宇宙を見る新しい目」

2003年8月23日 東京大学弥生講堂一条ホール

宇宙論の心：遠くには何があるのだろうか

- 宇宙はどうなっているのか：宇宙の階層
 - 月、太陽、太陽系、恒星、星団、銀河系(天の川)、銀河、銀河団、宇宙の大構造
- 遠くの宇宙の研究は考古学
 - 光は有限の速度をもつ。つまり、今見ている遠くの日体は、実はずっと昔の姿。
 - 毎日見ている太陽は、実は約8分遅れの姿。天文学者は、100億年以上前の昔の日体からやっと届いた光を、今、観測して研究している。
 - 遠くを見れば宇宙の過去がわかる。
- 我々人類は広い宇宙でひとりぼっちなのか？
- 第二の地球はあるか？

九つの惑星：我が太陽系



(太陽からの距離は別として、惑星の相対的な大きさはほぼ実際の比の通り)

<http://www.solarviews.com/eng/homepage.htm> © Calvin J. Hamilton

曜日の名前と素粒子的宇宙論

- ものは何からできているのか？
 - 分子、原子、原子核、素粒子
- 古代ギリシャの4元説： 空気、土、火、水
- 中国の五行説：（木、火、土、金、水） × （陽、陰）
 - 甲乙 丙丁 戊己 庚辛 壬癸
- 結果的に、中国の人々は、宇宙(惑星)に物質の起源を対応付けていた
 - 宇宙の起源 物質の起源 という考え方は、現在の素粒子的宇宙論においてもっとも基本的なもの
- これに、太陽と月を加えて、現在の曜日の名前となっている。
 - つまり、気がつかないうちに、宇宙の起源・物質の起源は、曜日の名前という形で、日本人の日常に入り込んでいる

21世紀「宇宙論」の展望

- 20世紀最後の数年間で急速に進展した宇宙を特徴付けるパラメータの値をさらに確定

精密宇宙論の時代へ

- 宇宙の起源の理論的解明

量子宇宙論の完成へ

(素粒子論の進展の度合いに大いに依存する)

- さらなる謎・未知の領域を探る

第一世代の原始天体

生命誕生の環境としての宇宙

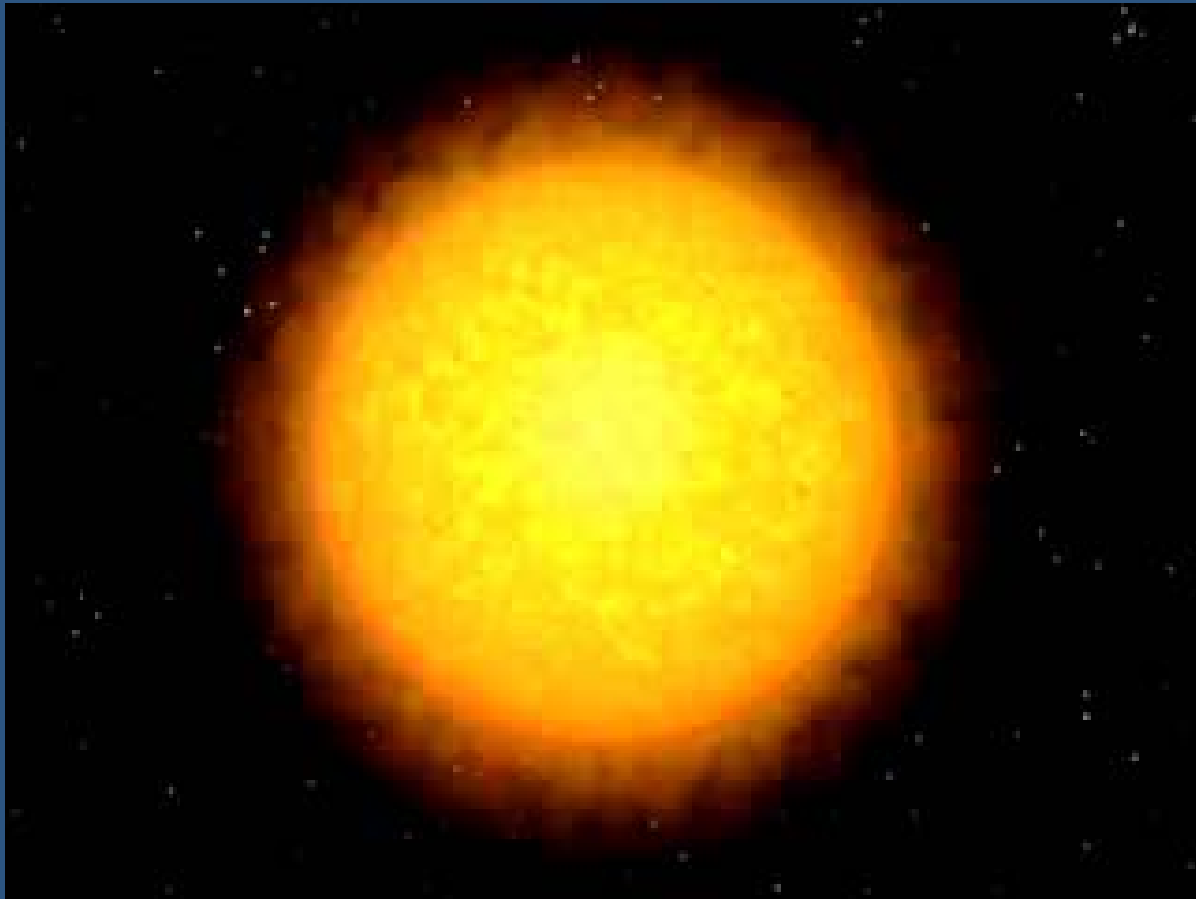
第二の地球はあるか？



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

- 地球以外に生物がいる証拠は存在しない
- 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！

太陽系外惑星探查



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

太陽系外惑星探査の意義

- 我々はこの広い宇宙で一人ぼっちなのか？

- 地球の起源
- 太陽系(惑星系)の起源
- 生命の起源

生命を生み出す環境としての惑星

- 地球外知的生命体は存在するか
- 地球外文明はあるか

太陽系外惑星発見の歴史

- 1781年：天王星、1846年：海王星、1930年：冥王星の発見（わが太陽系の拡大）
- 1995年：約50光年先のペガサス座51番星の周りを4.2日で公転している惑星の発見（初めて発見された太陽系外惑星は一年がわずか4.2日だった！）
- 1999年：アンドロメダ座ウプシロン星（約40光年先）に3つの惑星（太陽系外惑星系の発見）
- 2003年8月18日までに117個の系外惑星

太陽系外惑星探査の方法

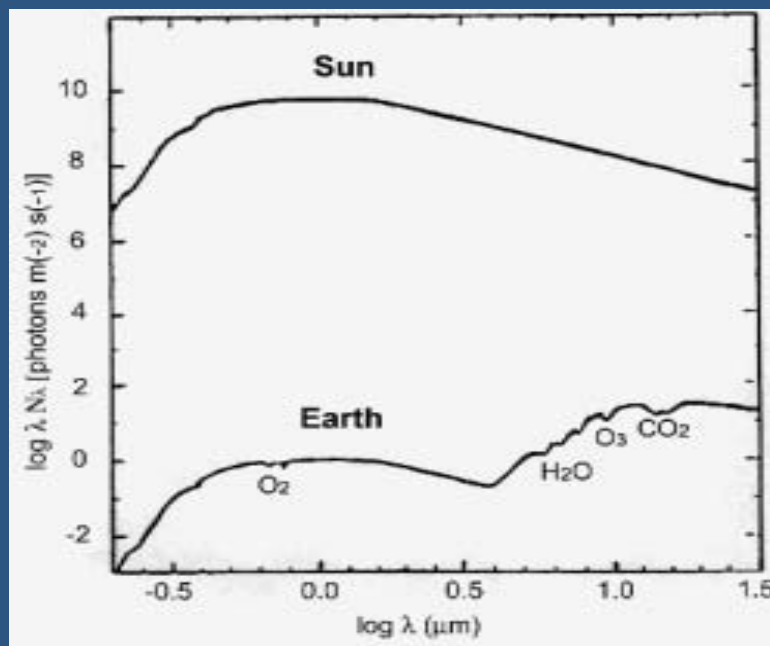
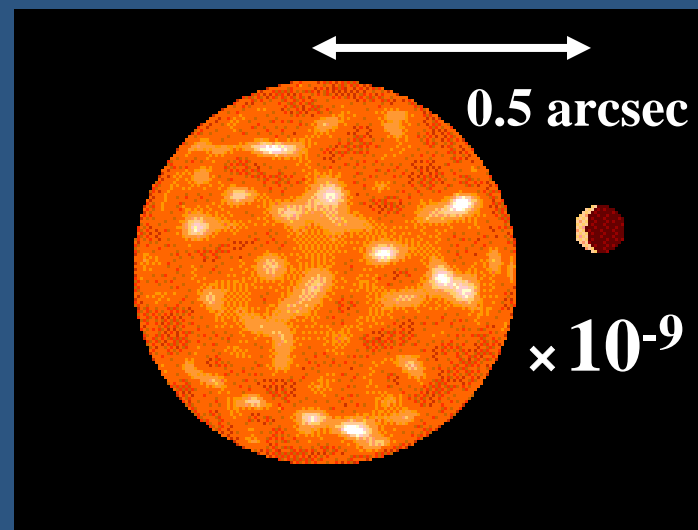
- 直接撮像：高角度分解能
- 主星の速度変動：高精度分光
- 主星の位置変動：高精度位置決定精度
- 主星の光度変動：高精度測光
- パルサーの信号到着時刻変動：
高時間分解能

いずれも最先端の観測技術を要する

惑星は直接見えるか？

10pcから観測した木星

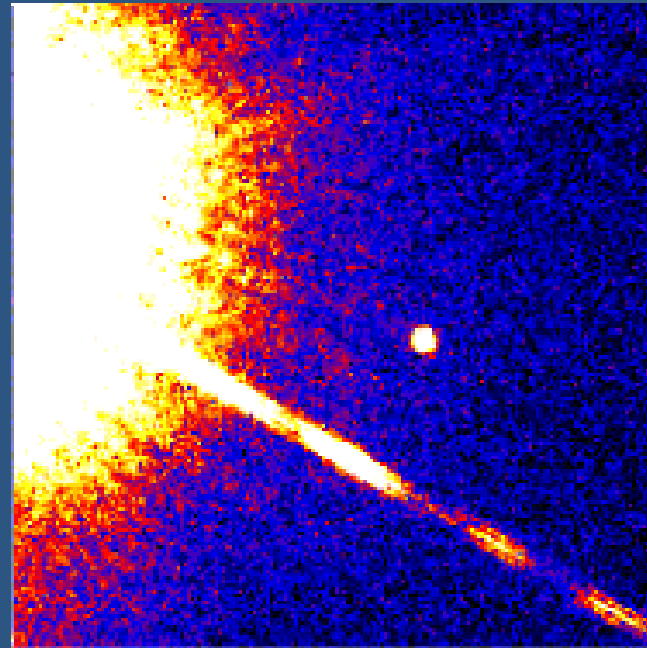
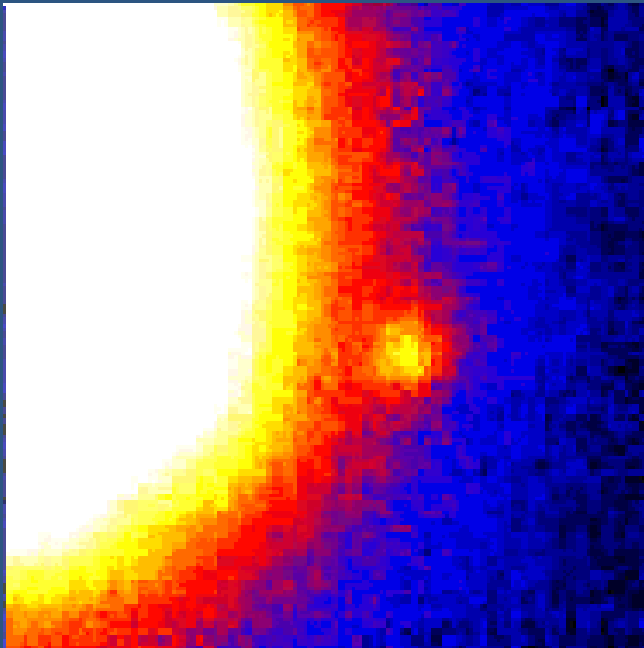
明るさ： 27等級（可視域）
主星との角距離： 0.5秒角



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



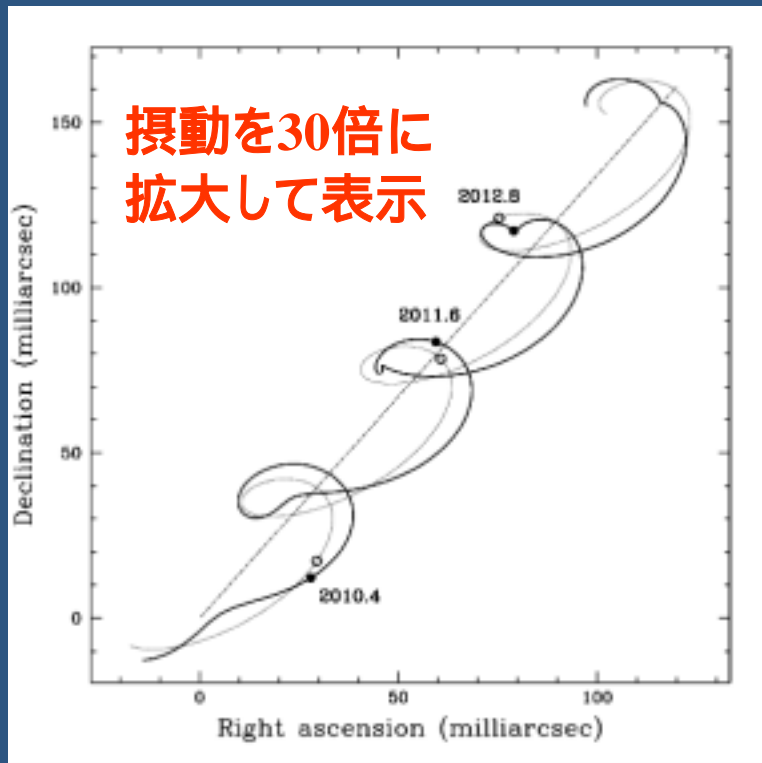
Gliese229 b:
角距離 7arcsec
光度比 5000

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！

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

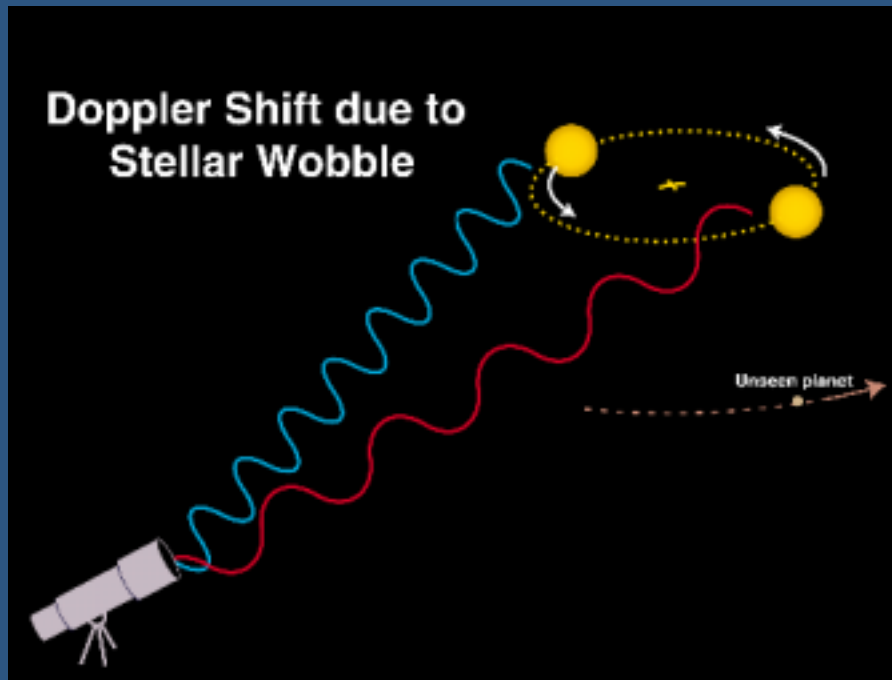
電波VLBI: 1ミリ秒角分解能
ヒッパルコス衛星: 1ミリ秒角
(12万個の星の固有運動)

GAIA(2009年打ち上げ?):
10マイクロ秒角 (10⁹stars)
距離200pc以内の50万個の星
(if 5%) 25000 Jupiters !

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

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



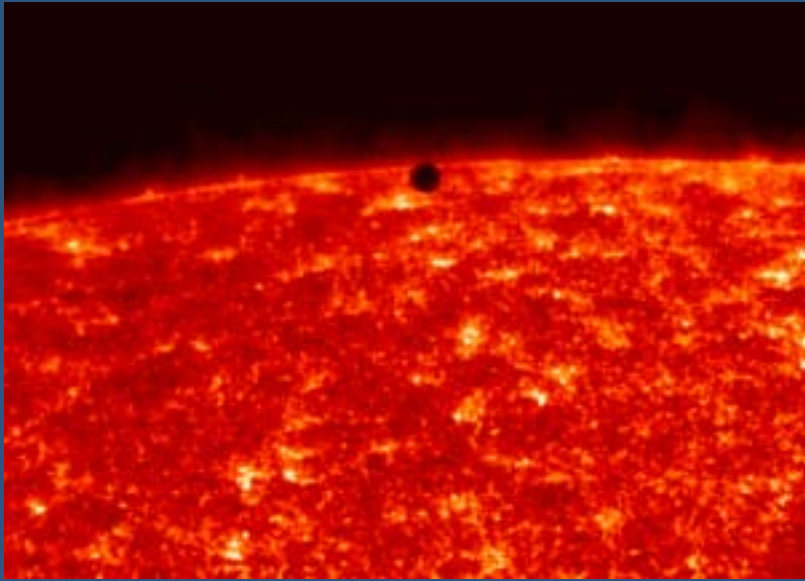
ケプラーの法則：
地球は太陽の周りを楕
円運動している



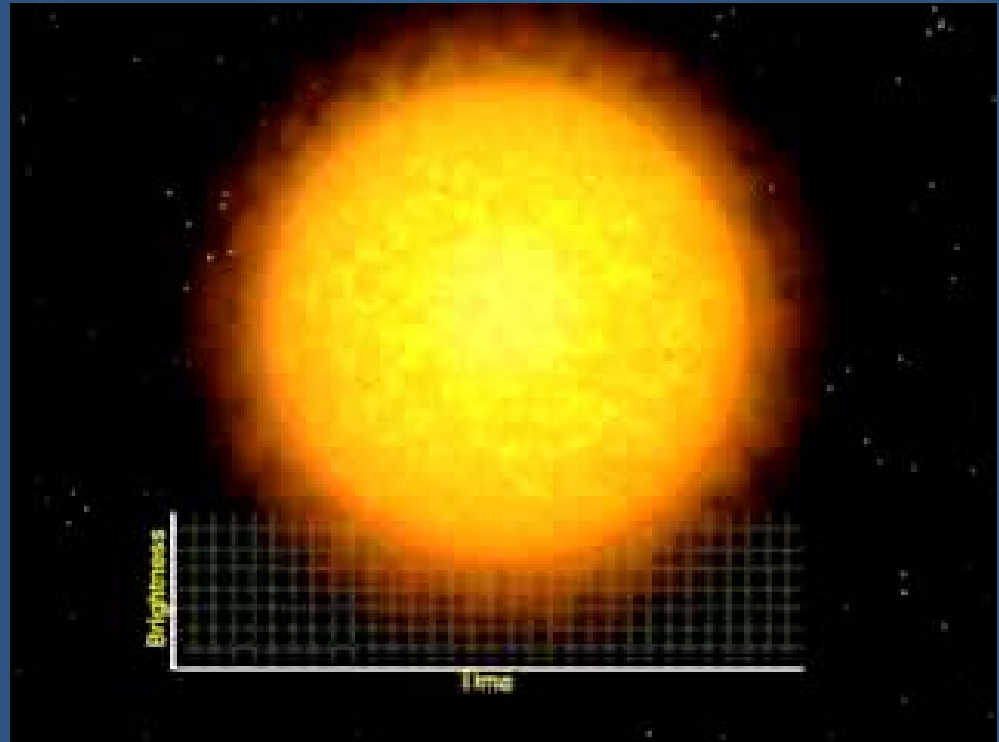
厳密には、太陽も地球
のために少しだけいつ
も運動している

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！

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×)

パルサー信号到着時刻変動

主星の位置変動を、信号到着時間に換算すれば

$$\Delta t = 0.5 \text{ 秒} \left(\frac{M_{\text{planet}}}{M_{\text{Jupiter}}} \right) \left(\frac{M_{\text{sun}}}{M_{\text{star}}} \right)^{1/3} \left(\frac{P}{1 \text{ 年}} \right)^{2/3}$$

このような到着時間の変動がモニターできるような定期的な信号を出すような天体？

パルサー（自転周期の安定性 $\sim 10^{-19} \text{s/s}$ ）

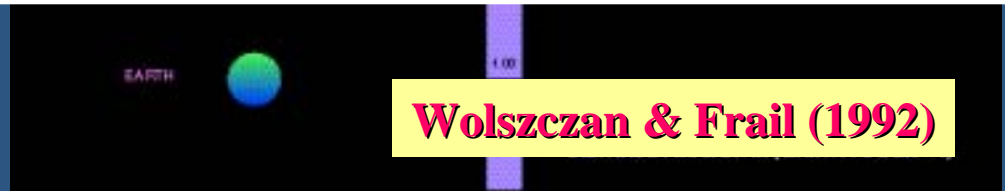
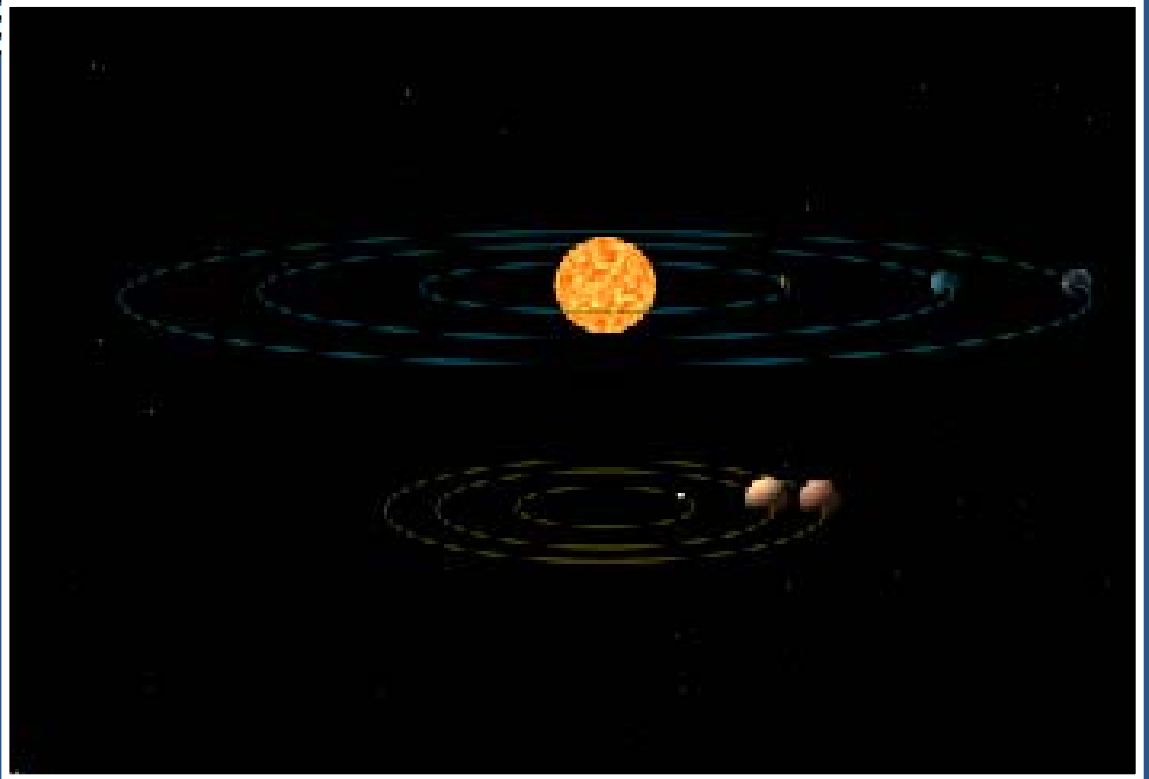
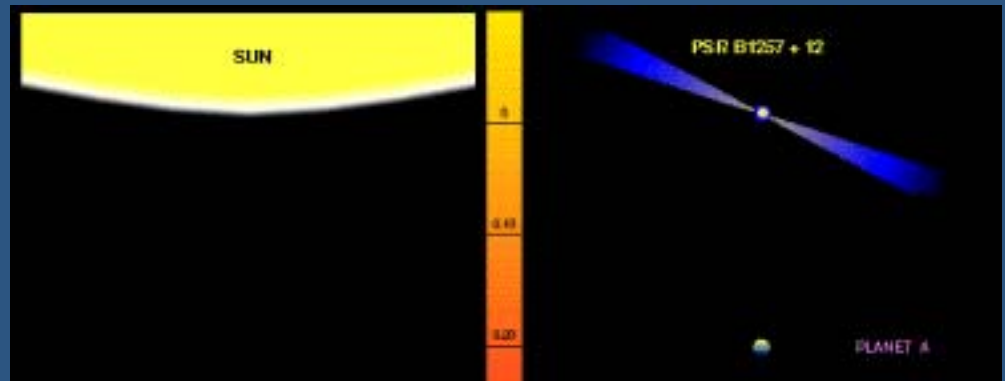
しかし、超新星爆発によって誕生したとされるパルサーがその後も惑星系を伴っているとは考えがたい、、、

太陽系外惑星発見の歴史

- 1992年: P S R 1 2 5 7 - 1 2 の周りに3つの“惑星”を発見
- 1995年: 主系列星 5 1 P e g asi の周りに惑星を発見
- 1999年: 主系列星 A n d 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8月18日時点で117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?)

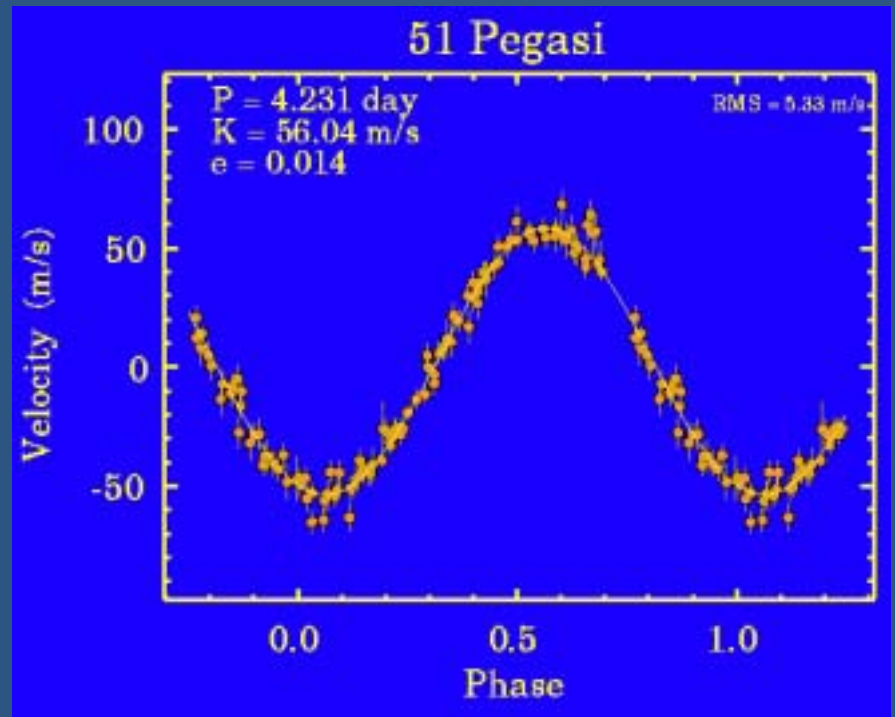
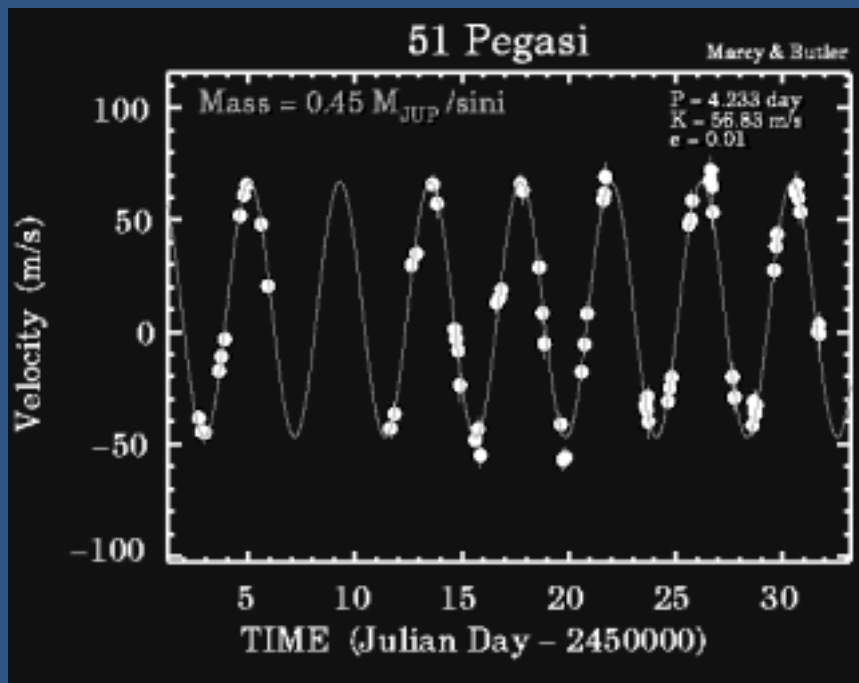


太陽系外惑星発見の歴史

- 1992年: P S R 1 2 5 7 - 1 2の周りに3つの“惑星”を発見
- 1995年: 主系列星 5 1 P e g a s iの周りに惑星を発見
- 1999年: 主系列星 A n d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8月18日時点で117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)

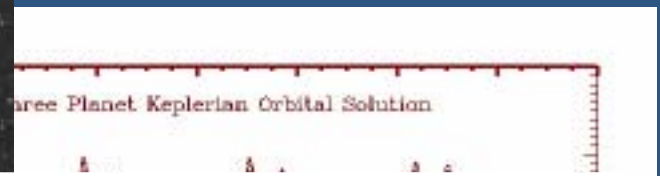
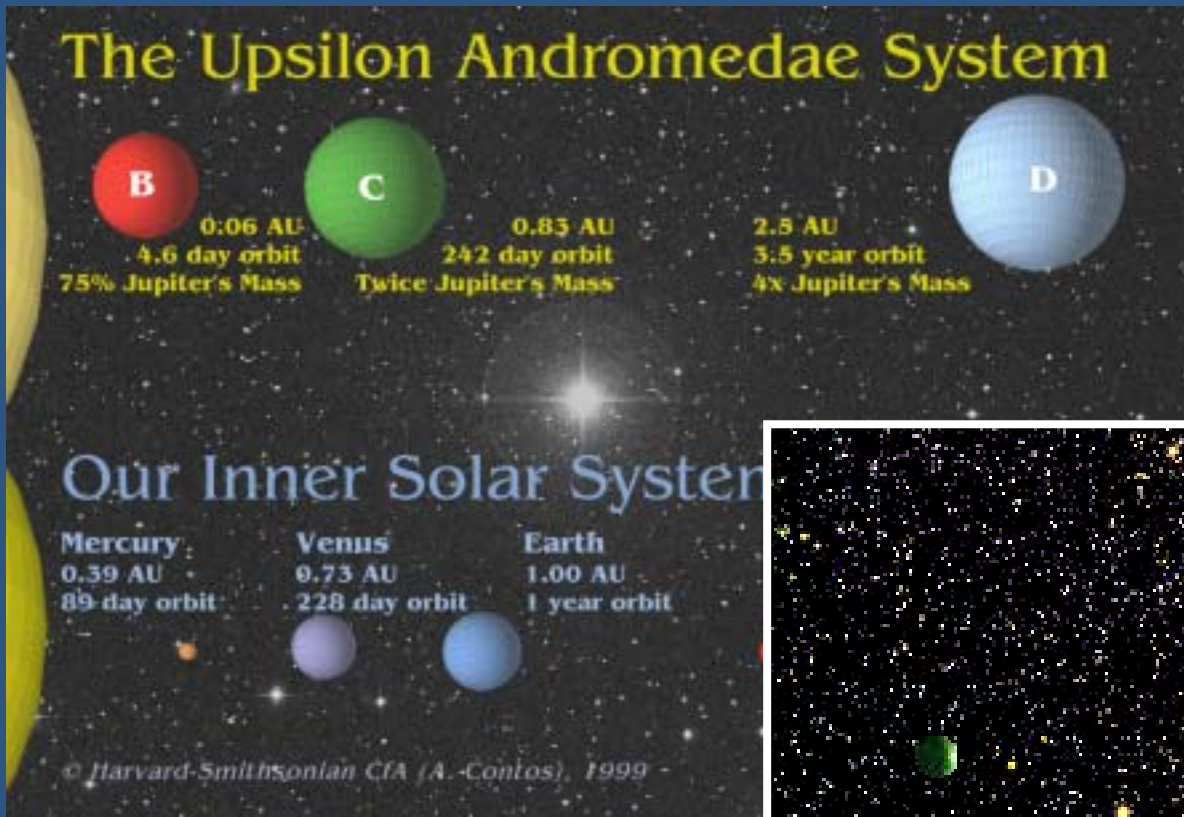


周期がわずか4.2日！

太陽系外惑星発見の歴史

- 1992年: P S R 1 2 5 7 - 1 2 の周りに3つの“惑星”を発見
- 1995年: 主系列星 5 1 P e g a s i の周りに惑星を発見
- **1999年: 主系列星 And 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 (?)
- 2003年8月18日時点で117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

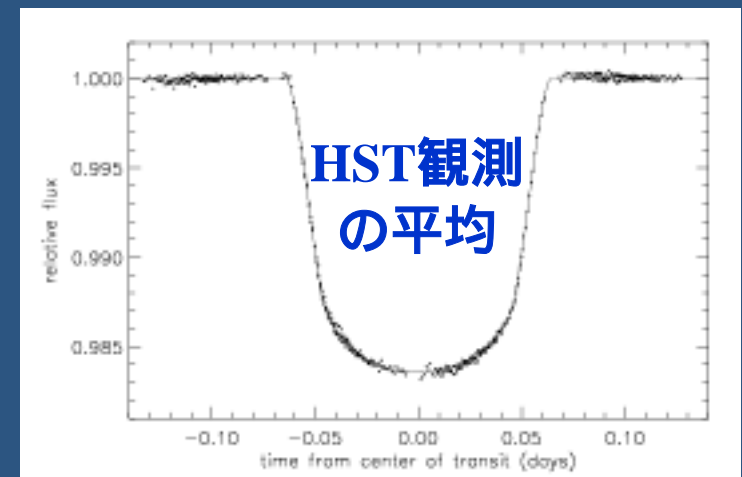
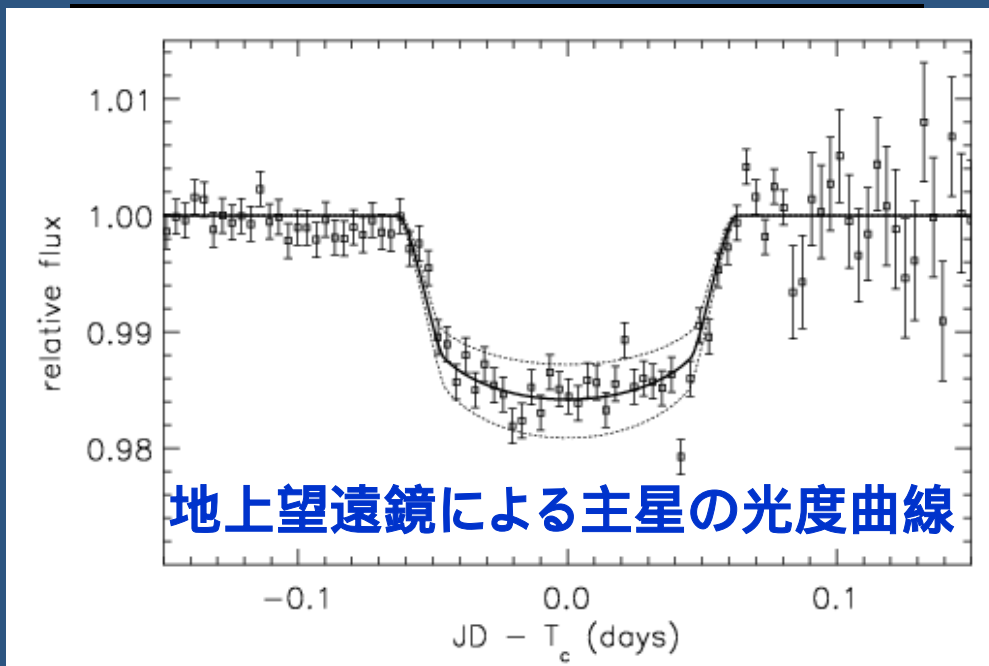
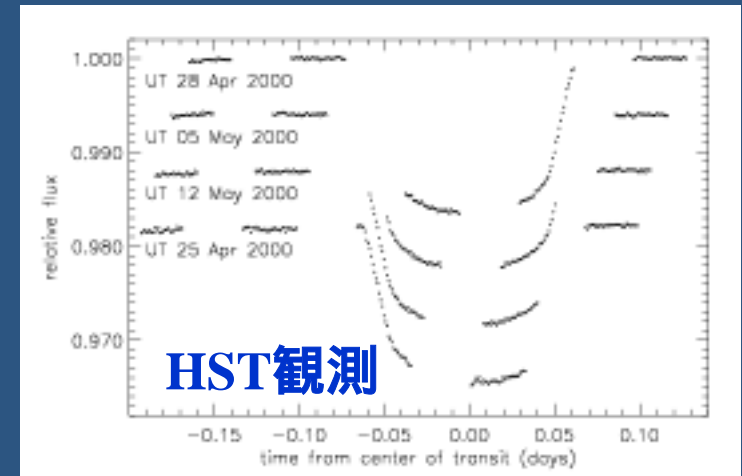


太陽系外惑星発見の歴史

- 1992年: P S R 1 2 5 7 - 1 2 の周りに3つの“惑星”を発見
- 1995年: 主系列星 5 1 P e g a s i の周りに惑星を発見
- 1999年: 主系列星 A n d 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 of 初検出
- 2003年: 蒸発する惑星の現場 (?)
- 2003年8月18日時点で117個の系外惑星

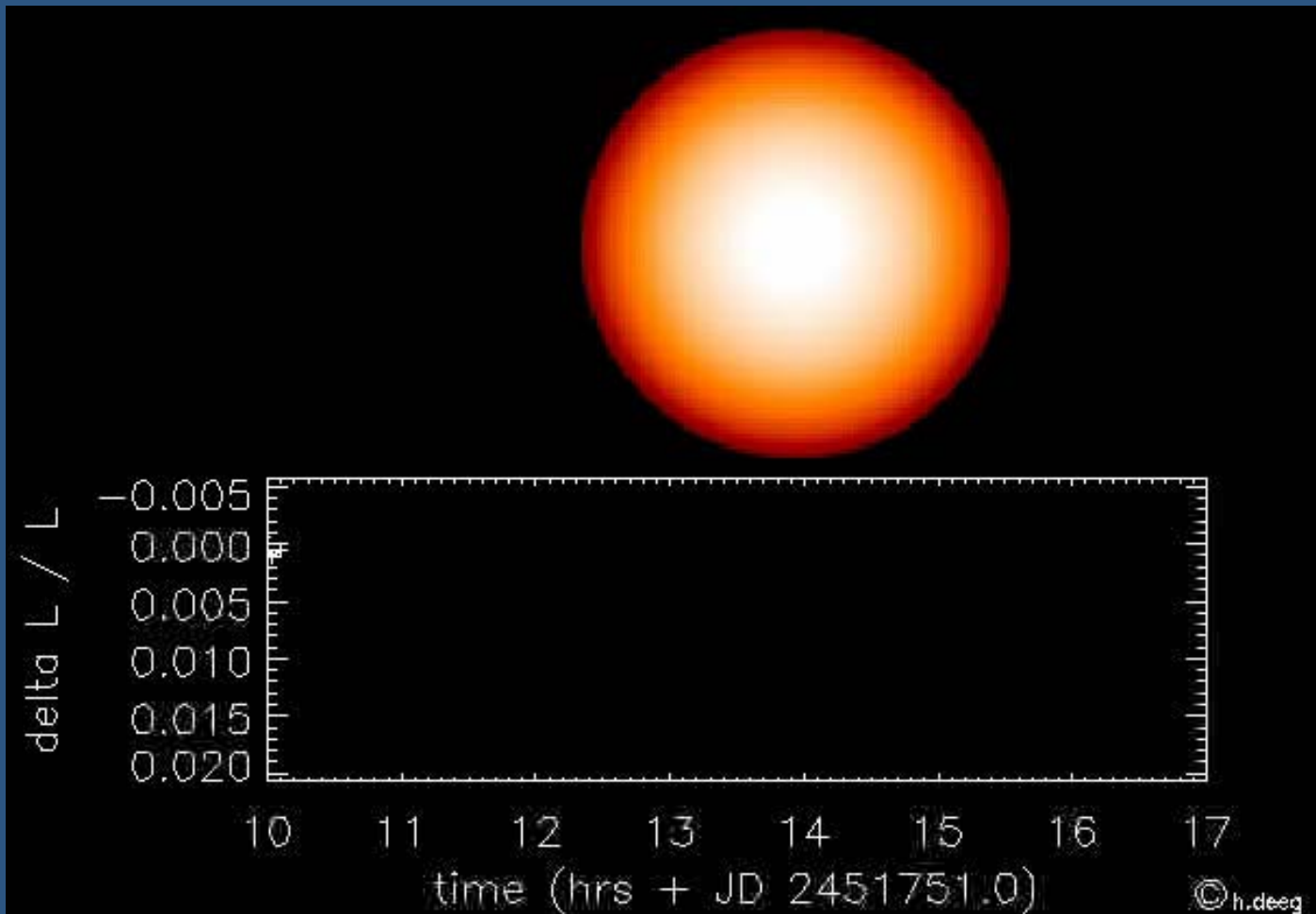
HD209458の食の観測

- 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



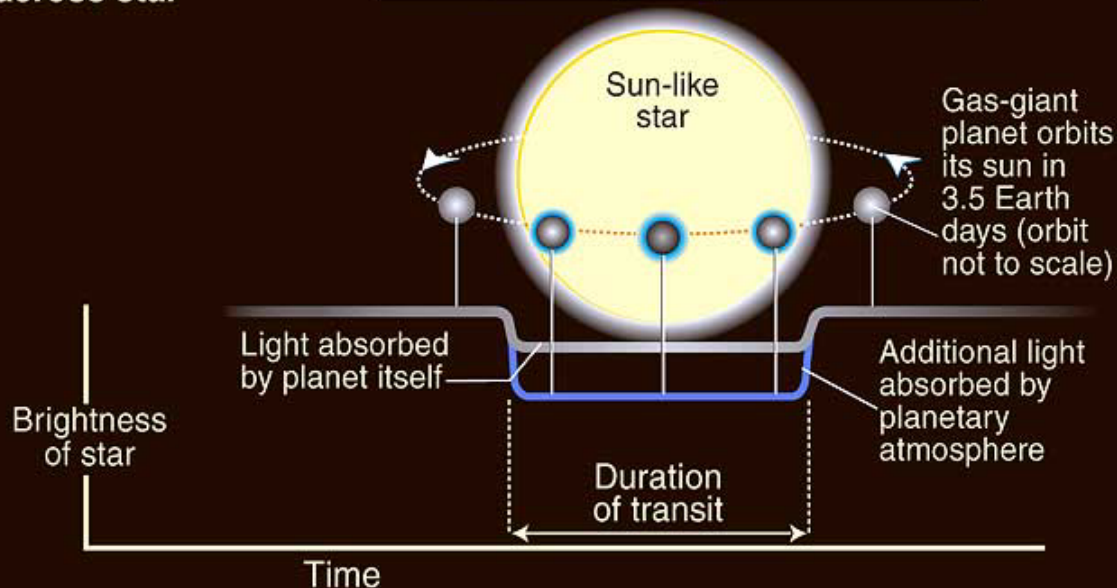
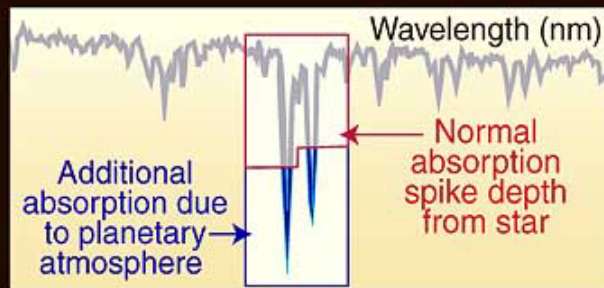
太陽系外惑星発見の歴史

- 1992年: P S R 1 2 5 7 - 1 2 の周りに3つの“惑星”を発見
- 1995年: 主系列星 5 1 P e g a s i の周りに惑星を発見
- 1999年: 主系列星 A n d 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 (?)
- 2003年8月18日時点で117個の系外惑星

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



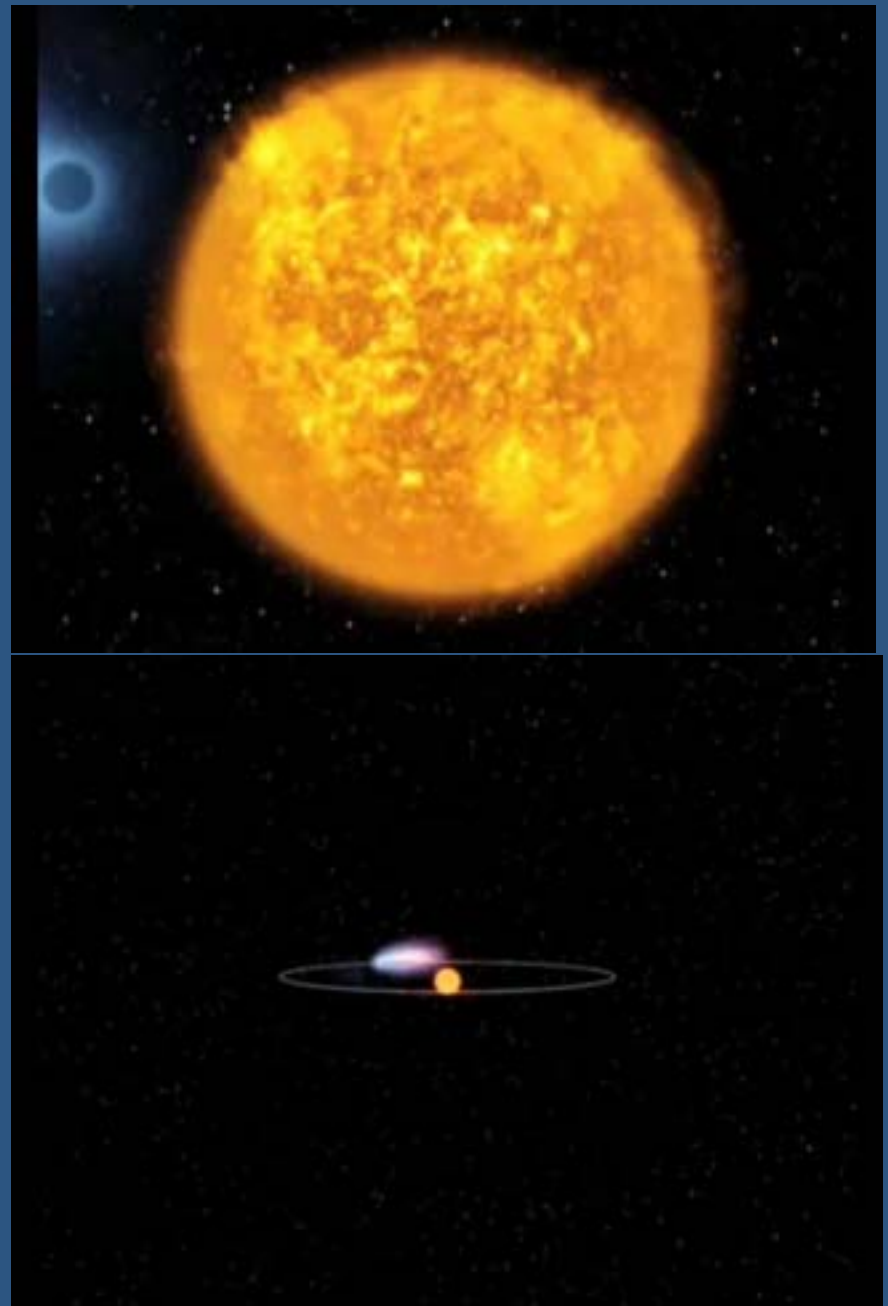
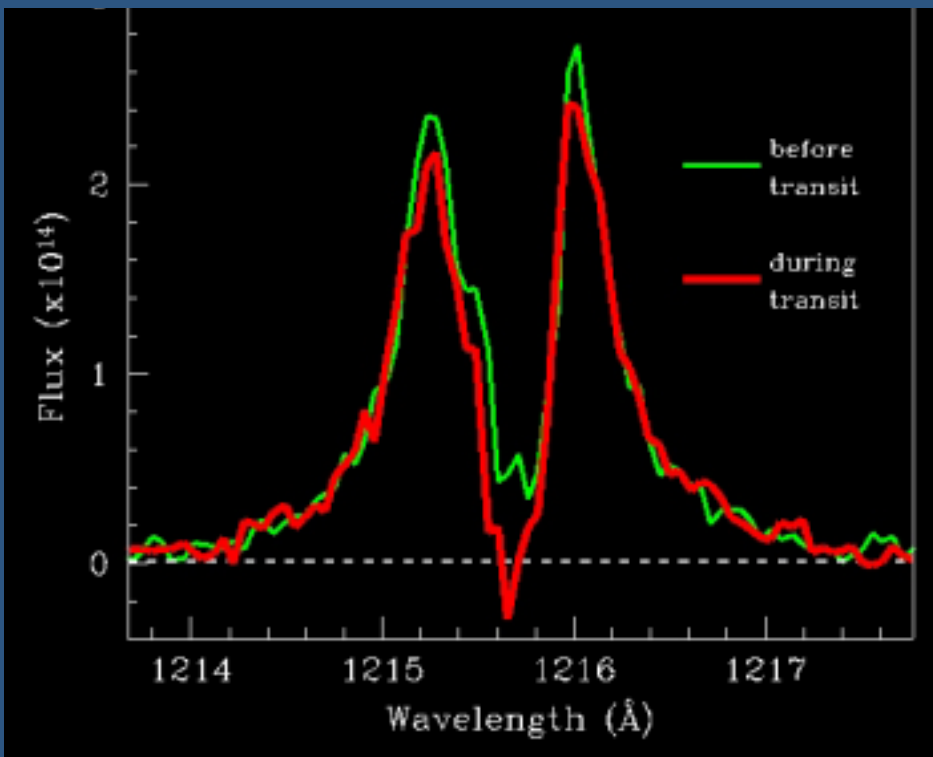
- 2000年 系外惑星の食を初検出
 - 惑星の大きさがわかる
 - 木星程度の質量という観測データとあわせて密度を0.4g/ccと推定
 - 巨大ガス惑星であることの確認
- 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムの存在を発見

太陽系外惑星発見の歴史

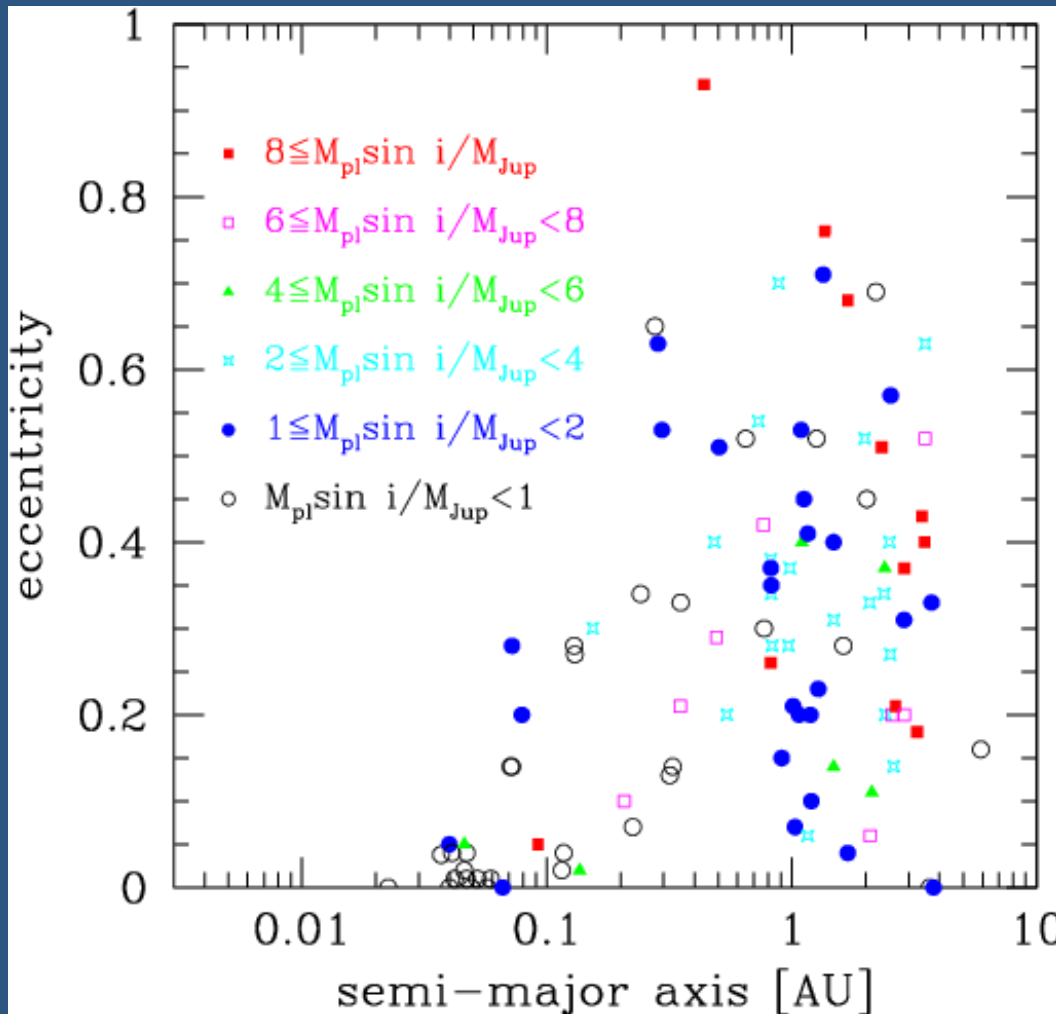
- 1992年: P S R 1 2 5 7 - 1 2 の周りに3つの“惑星”を発見
- 1995年: 主系列星 5 1 P e g a s i の周りに惑星を発見
- 1999年: 主系列星 A n d の周りに3つの惑星を発見
- 1999年: 系外惑星による主星の食の初検出
- 2001年: 系外惑星大気の初検出
- **2003年: 蒸発する惑星の現場 (?)**
- 2003年8月18日時点で117個の系外惑星

HD209458b: 蒸発しつつある惑星？

予想以上に大きい水素の吸収
惑星を広くとりまく水素雲？



系外惑星の軌道

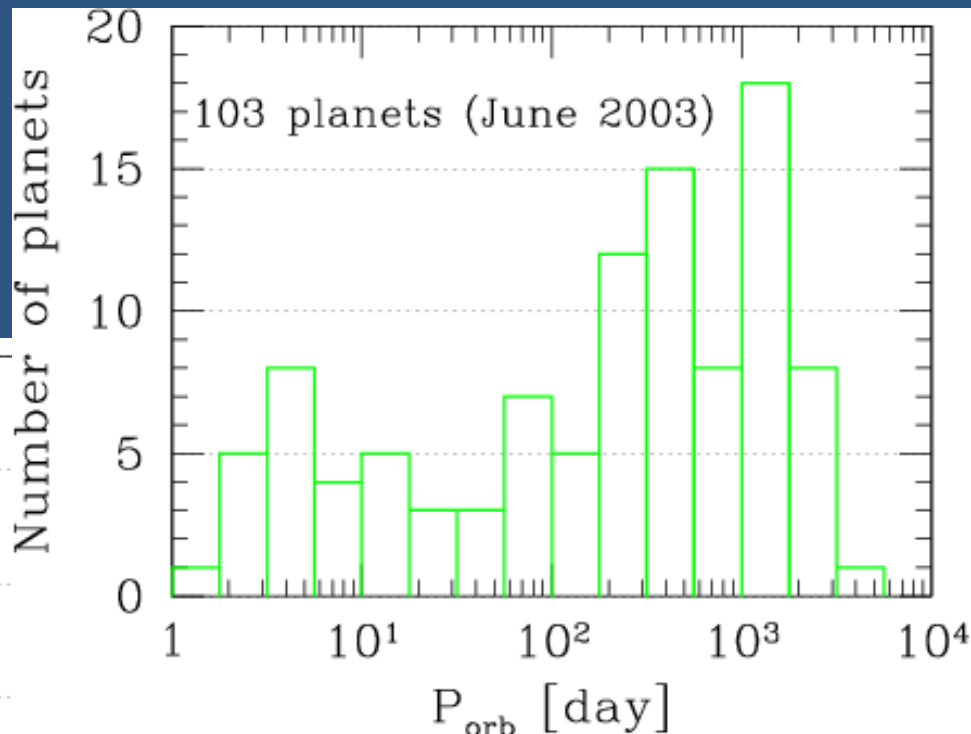
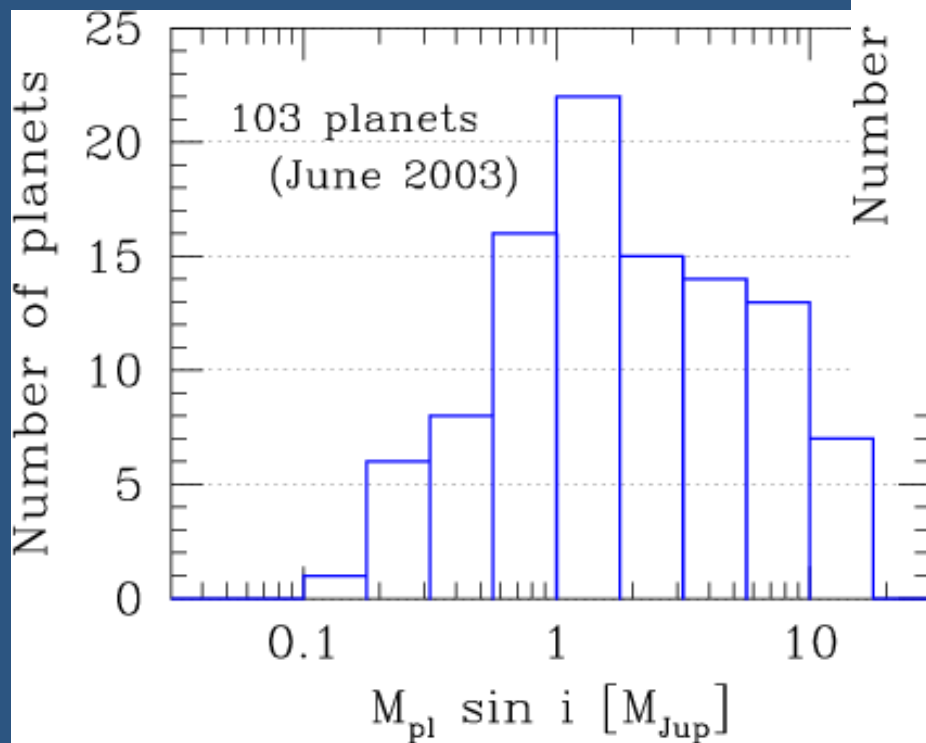


- 円軌道から大きくずれた軌道が多い (ただし、0.1天文単位以下の半径では円軌道に近い)
- 1天文単位以下の半径をもつ木星質量の惑星が大量に存在 (食の観測例から考えるとこれらはガス惑星であろう Hot Jupiter)

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



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)

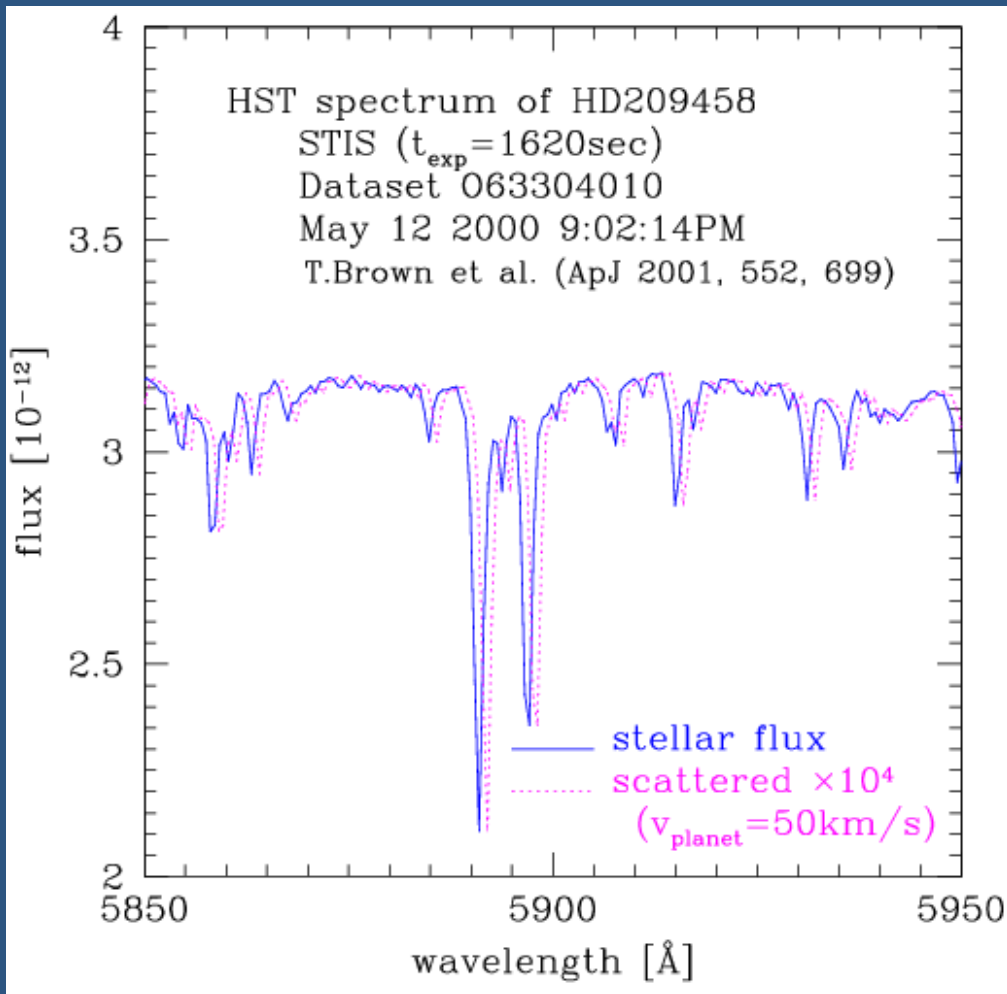
エドウィン ターナー、ブレンダ フライ (プリンストン大学)

他

太陽系外惑星探査



食惑星からの反射光の検出原理

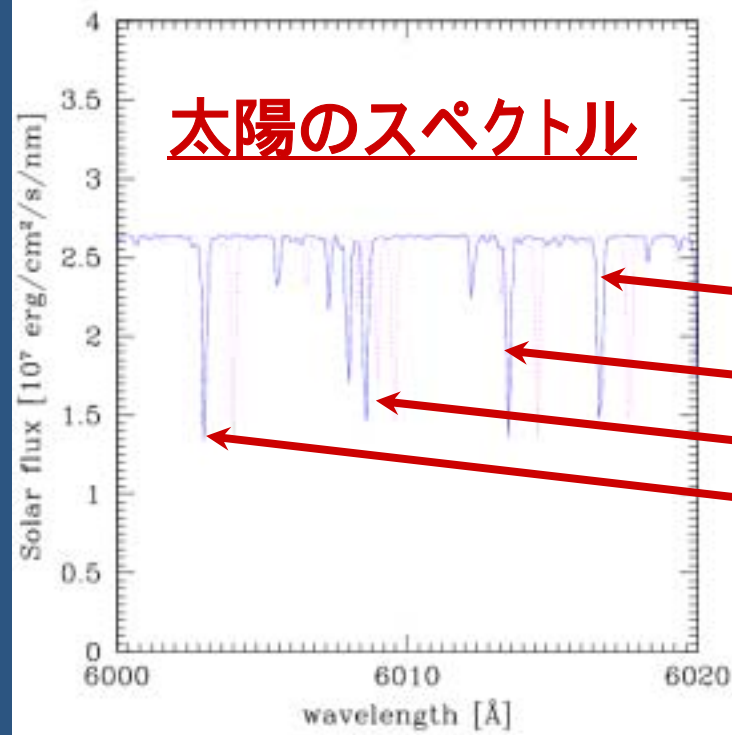


- 惑星の反射光スペクトルは主星のコピー
- ただし、公転速度のために、吸収線の位置が 50km/s 程度だけずれたところにする
- この反射吸収線の強度はわずか 0.01%
- 数百本の吸収線を同時に使って反射光の存在を検出したい
- すばるの高分散分光器 HDSの波長分解能 50000 を最大限活用

現在データを
解析中
(乞御期待！)



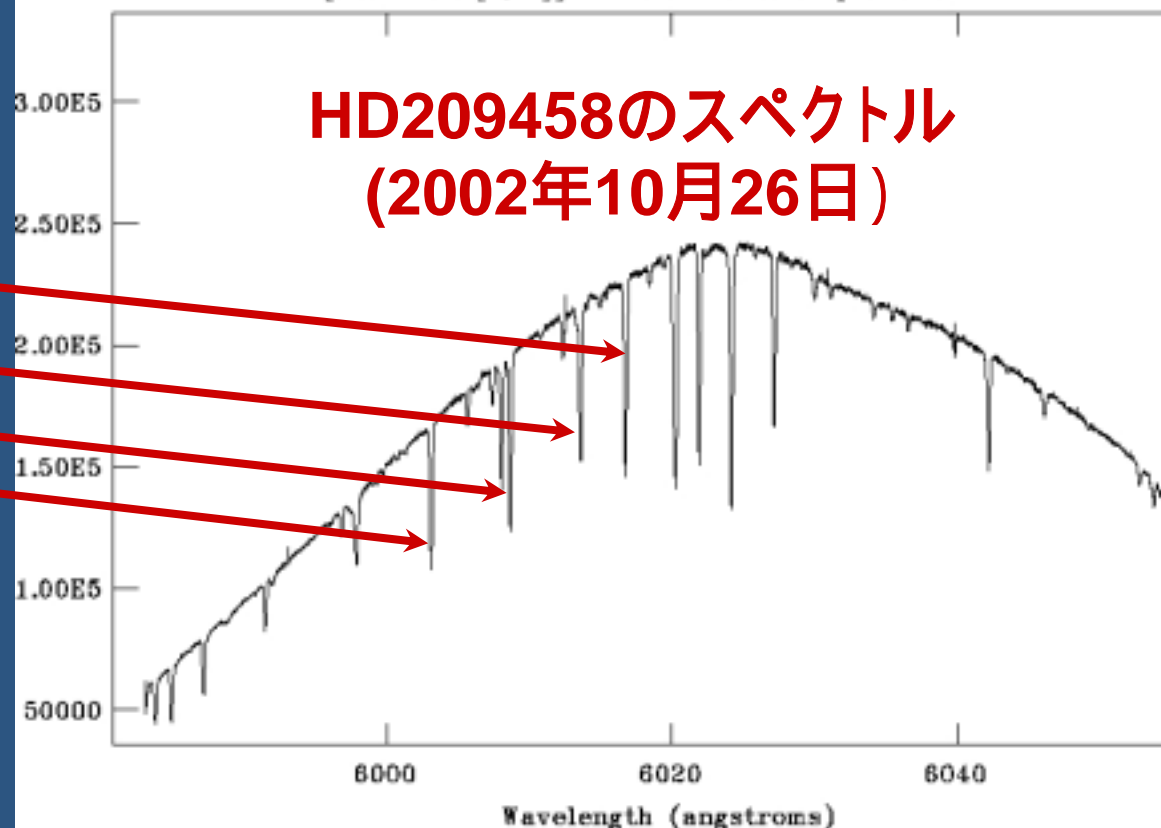
太陽のスペクトル



太陽系外惑星探査

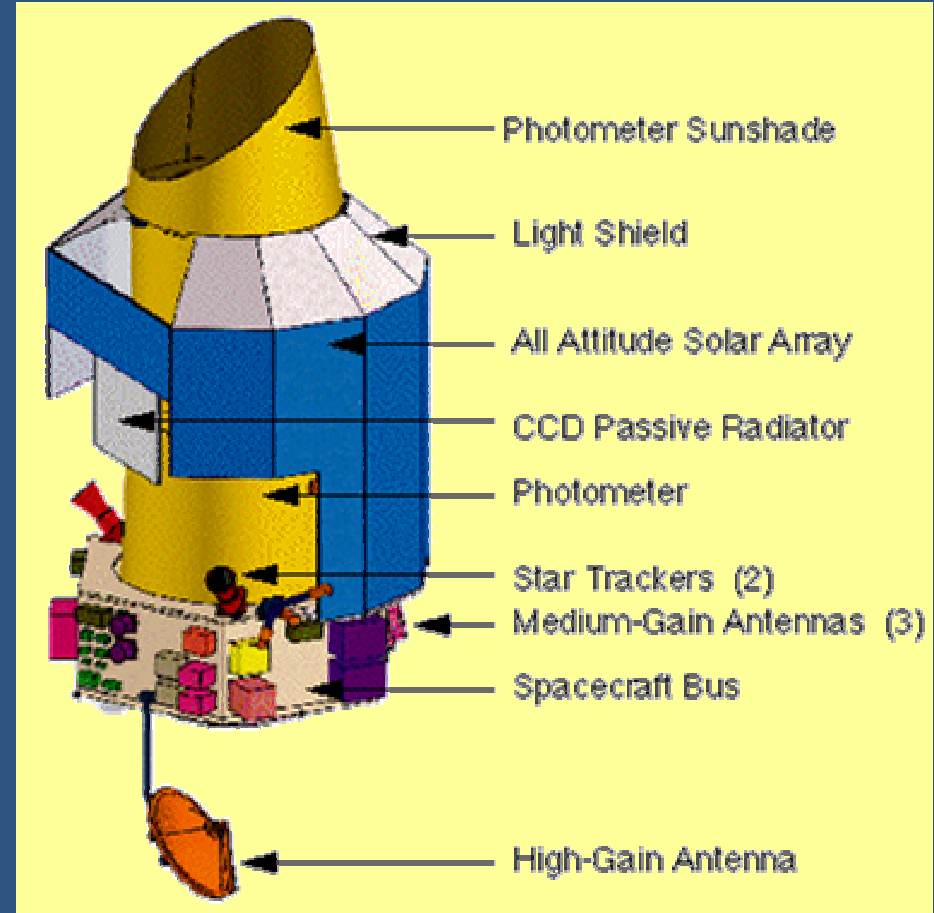
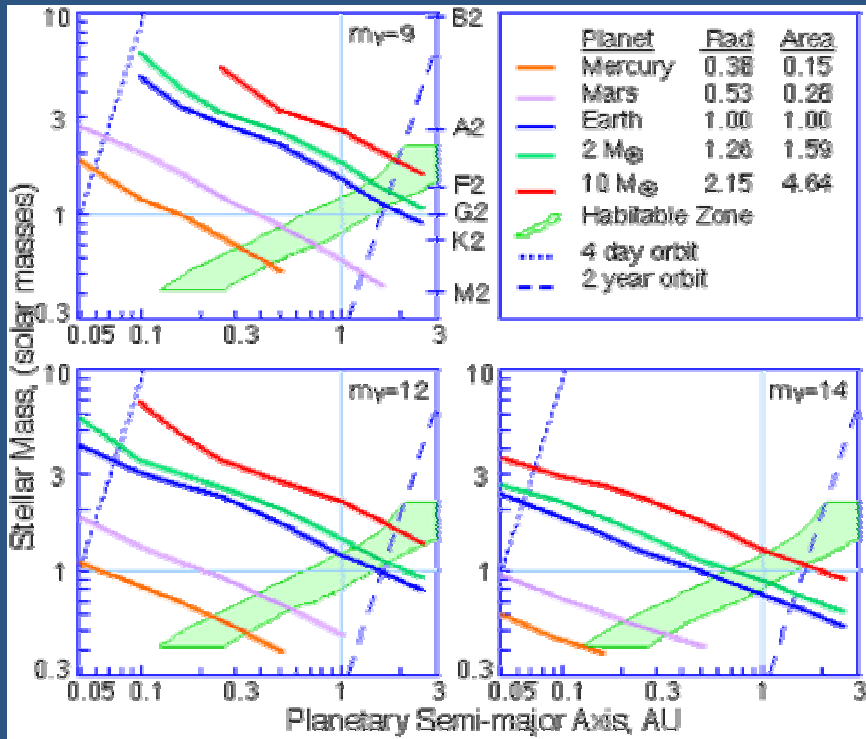
NOAO/IRAF V2.11.3EXPORT u02204@ana Sat 21:03:54 26-Oct-2002
[H9161_ecw[*],13]: HD209458 500. ap:13 beam:99

HD209458のスペクトル
(2002年10月26日)



ケプラー衛星 (米国 2007年打ち上げ予定)

differential photometry

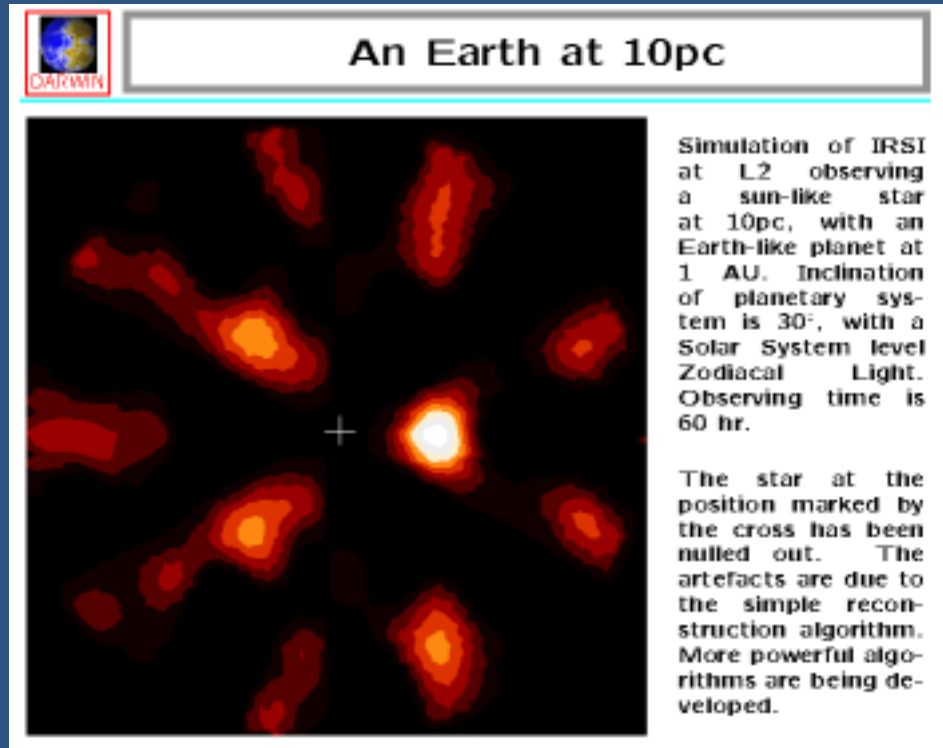


<http://www.kepler.arc.nasa.gov/>

ダーウィン

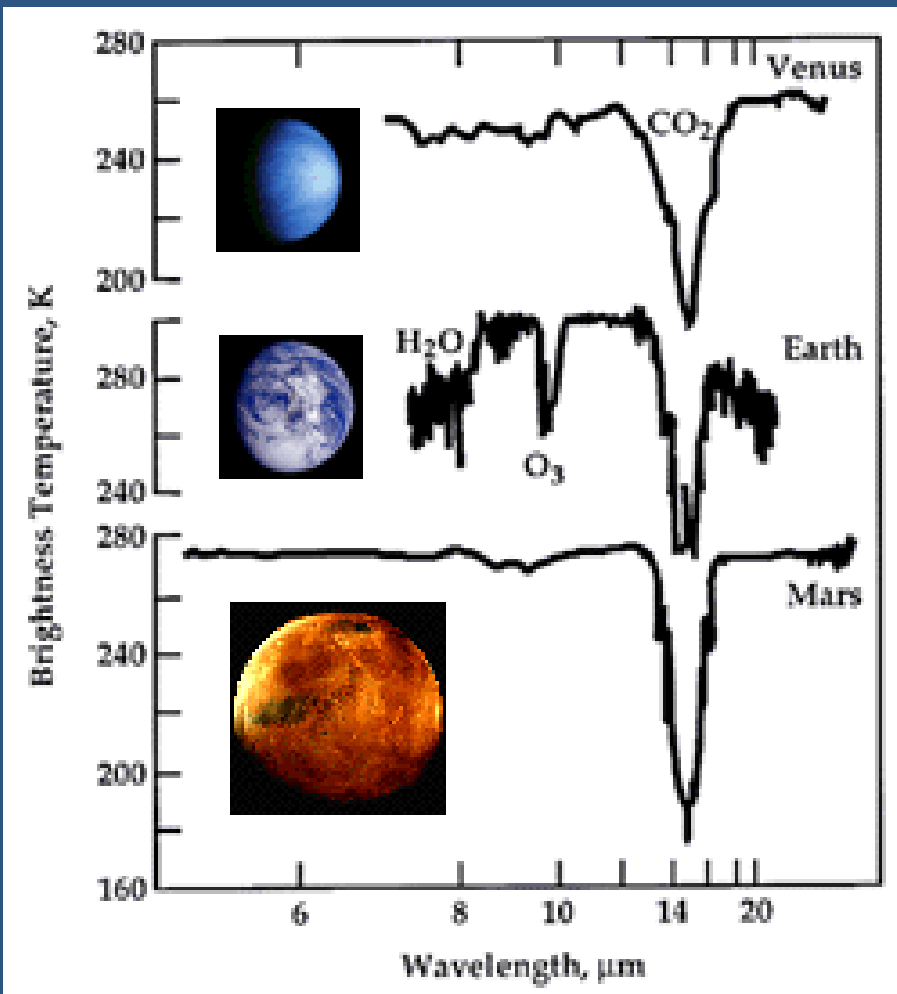
(欧州：2015年頃の打ち上げを計画)

赤外線宇宙干涉計衛星団
imaging and spectroscopy



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

究極の宇宙論： 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/>

Expanding the *expanding* universe

0th order	一様等方宇宙モデル	宇宙論パラメータ
1st order	密度揺らぎの線形摂動論	宇宙の大構造 マイクロ波背景輻射
2nd order	非線型重力進化	ダークマターの構造形成
3rd order	バリオンガスの進化	第一世代天体と元素の起源
4th order	銀河、星、惑星の形成進化	光り輝く銀河宇宙の誕生
...		
L-th order	生命の起源・進化	宇宙論的生物発生学
M-th order	知的生命体への進化	宇宙論的生物進化学
N-th order	文化・文明・宗教	宇宙論的社会学
...		

宇宙論研究の極

WMAP



本当の宇宙論研究はいよいよこれから!

論語 卷第一 學而第一章

中国の大思想家、教育家、孔子様は紀元前551年(今から約2550年前)山東省曲阜でお生まれになりました。その教えである孔子学は、中国の皇帝及び国民に大きな影響を与え、中国以外のアジア全体に広まりました。

子曰、學而時習之、不亦樂乎、有朋自遠方來、不亦君子乎。

孔子が言われた、「学んだことをおさらいするのは楽しいことだね。 友達¹が遠くから訪ねてくる、これも楽しいことだね。 人が理解してくれなくても気にしない、君子だからだね。」