

21世紀の物理 第9回

- 究極の宇宙論：太陽系外惑星探査 -



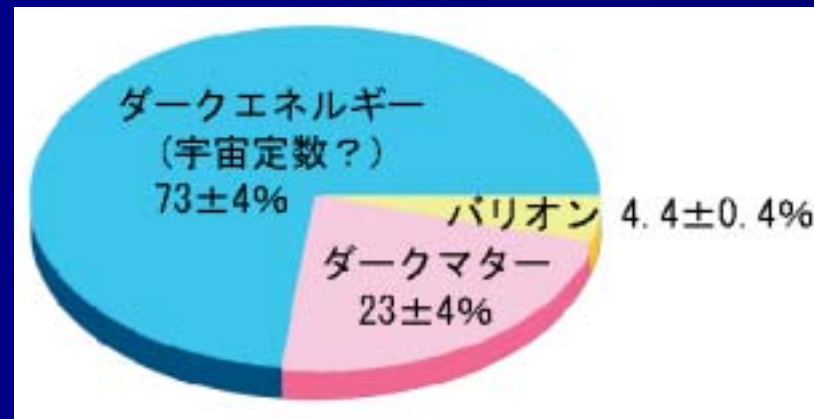
東京大学大学院
理学系研究科
物理学専攻
須藤 靖

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

全学自由研究ゼミナール「21世紀の物理」

2004年12月2日 16:20-17:50 @東大駒場1322教室

宇宙の組成



- 20世紀物理学の飛躍的進展は、「通常の物質」の構成要素については極めて深い理解をもたらした
- 一方、21世紀最後の数年間の宇宙観測によって、この「通常の物質」は、宇宙全体のわずか4%でしかないことが判明
 - **宇宙の果てを見ることで微視的世界の新しい階層が明らかとなった**
 - 宇宙全体の約23%は暗黒物質、約73%は暗黒エネルギー
- **我々は宇宙の96%の部分を全く理解していなかった**
- 暗黒物質の直接検出、暗黒エネルギーの正体の理解は、21世紀科学の単なる一課題にとどまらず、新しい自然法則を探り当てる上での本質的な鍵

20世紀宇宙論の総括

- 1980年代以降、宇宙論は急速に進歩
 - 暗黒物質の存在が決定的
 - マイクロ波背景輻射の温度ゆらぎ発見
 - ハッブル定数が10%の精度で決定される
 - 銀河系内MACHOの検出
 - 宇宙定数(暗黒エネルギー)の可能性
 - 素粒子論的宇宙論による初期条件
- 物理学として十分成熟・発展を遂げた
- 次はどう進むべきであろう？

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

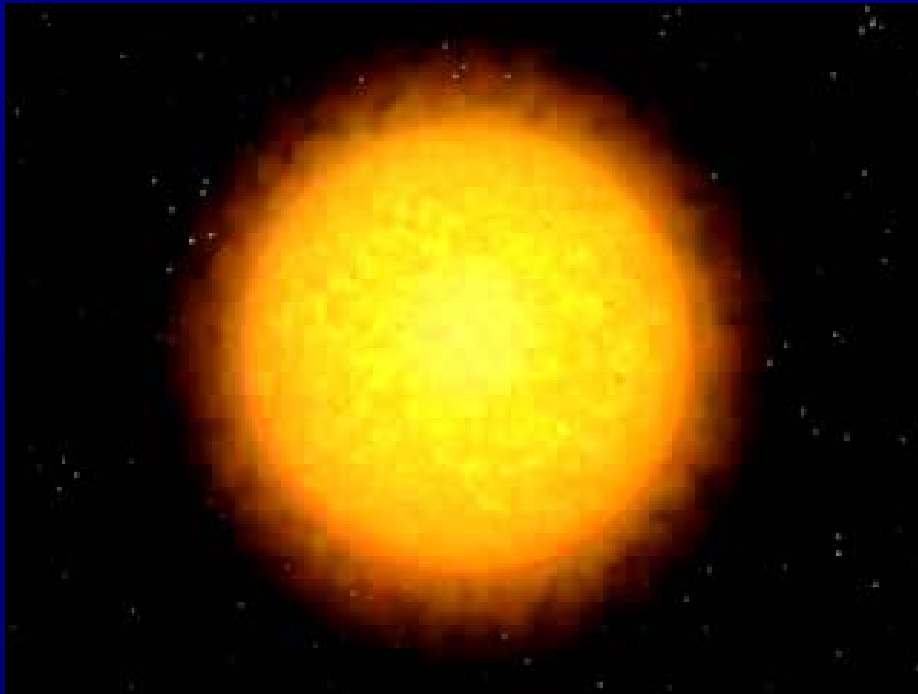
生命誕生の環境としての宇宙

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、今見ている遠く天体は、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天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？

もうひとつの宇宙の果て： 銀河系のどこかに生命を宿した惑星はあるのか？

■ 宇宙の果ての観測と系外惑星の観測



- 大望遠鏡は暗い天体を観測できる
 - 本当は明るいのだが遠いために暗い天体
宇宙の果てにある銀河
 - すぐ近くにあるのだが本当に暗い天体 銀河内にある系外惑星

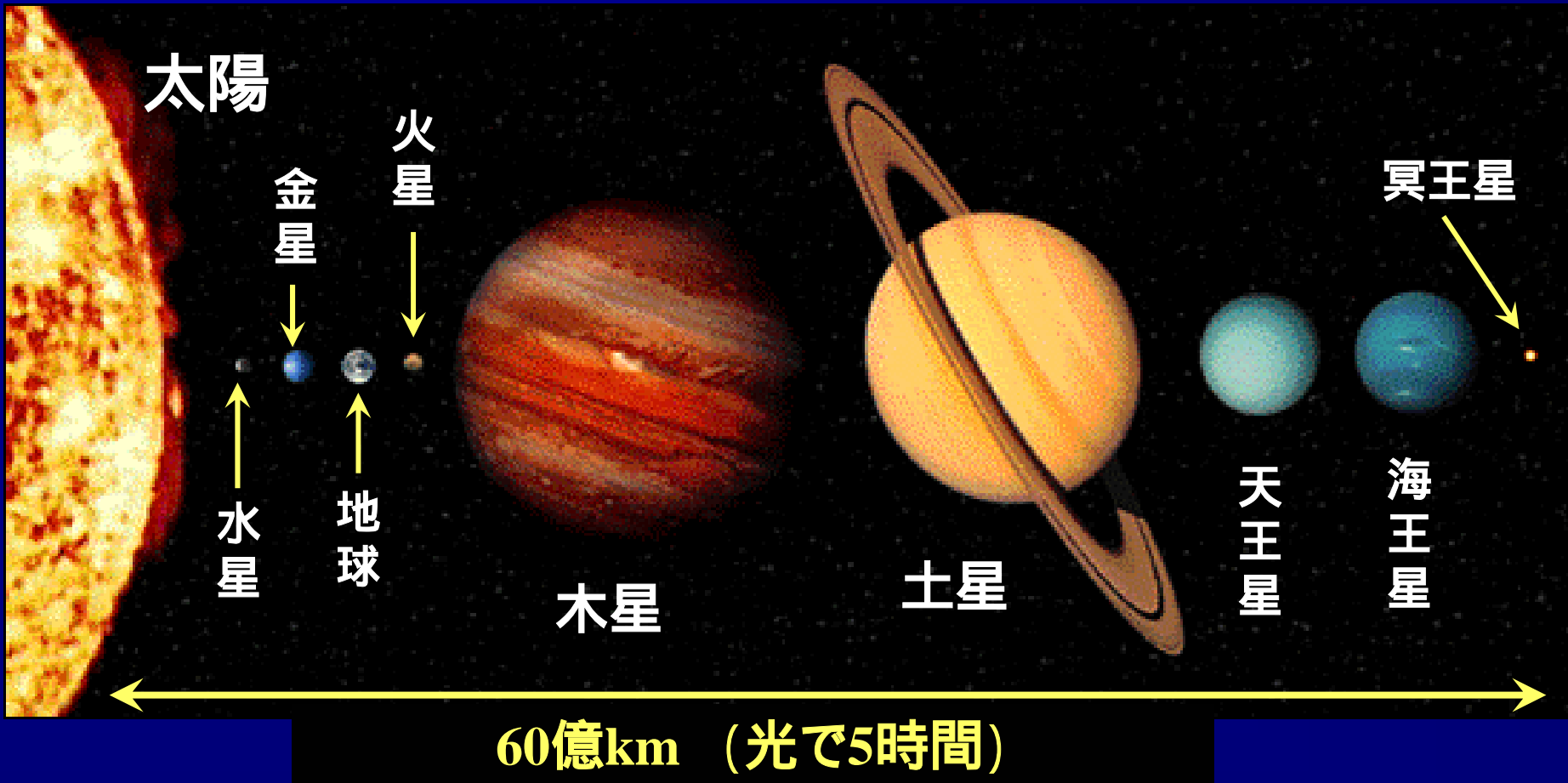
第二の地球はあるか？

- 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！



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

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

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！



哲学から科学へ

There are infinite worlds both like and unlike this world of ours.

-Epicurus (341-270 BC)

There cannot be more worlds than one.

-Aristotle (384-322 BC)

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

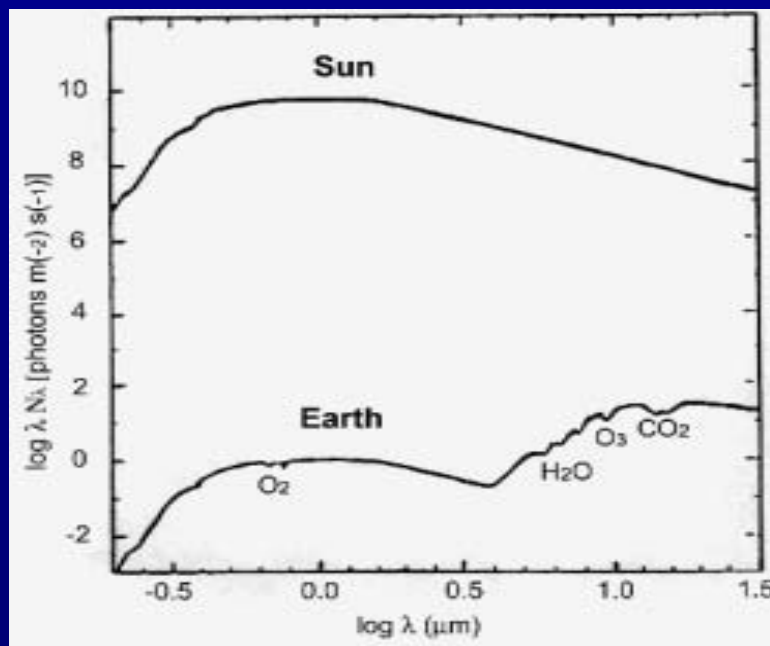
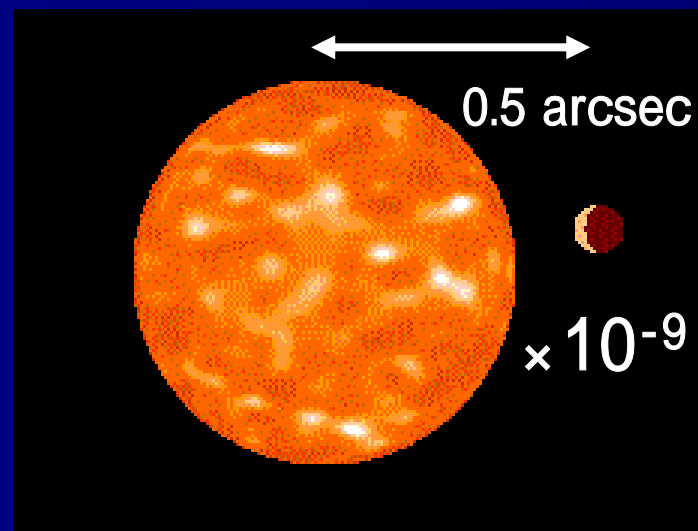
いずれも最先端の観測技術を要する

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)

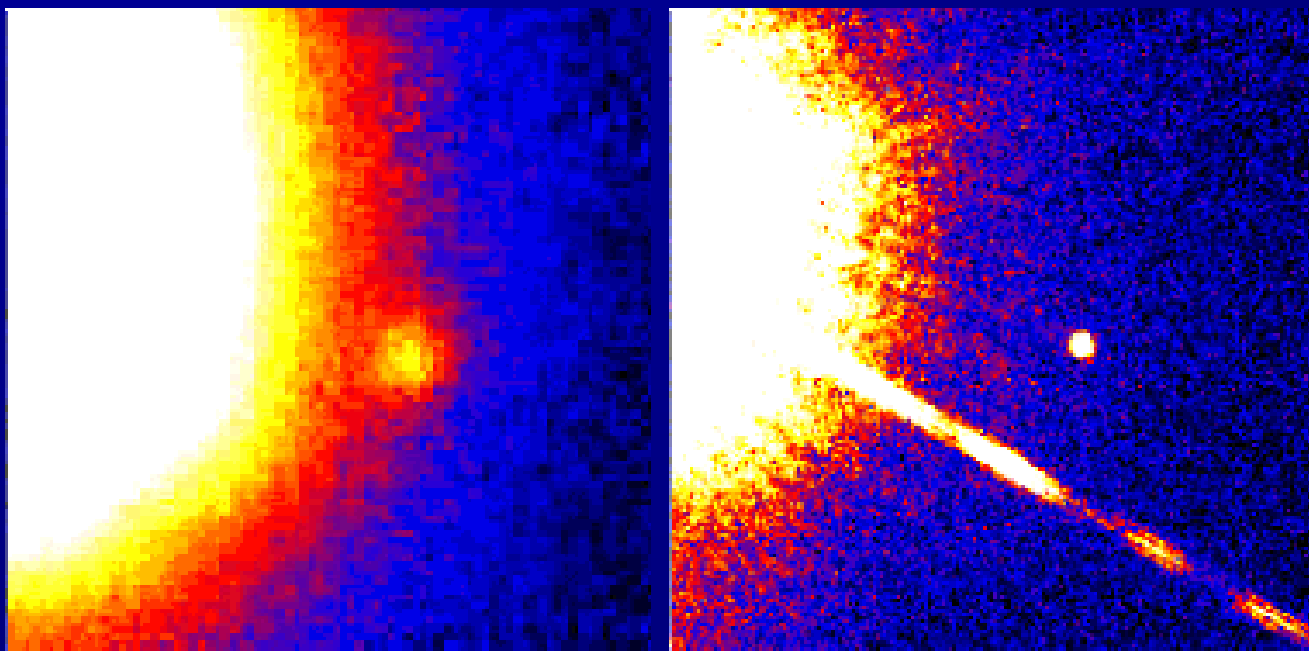
主星との角距離: 0.5秒角



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



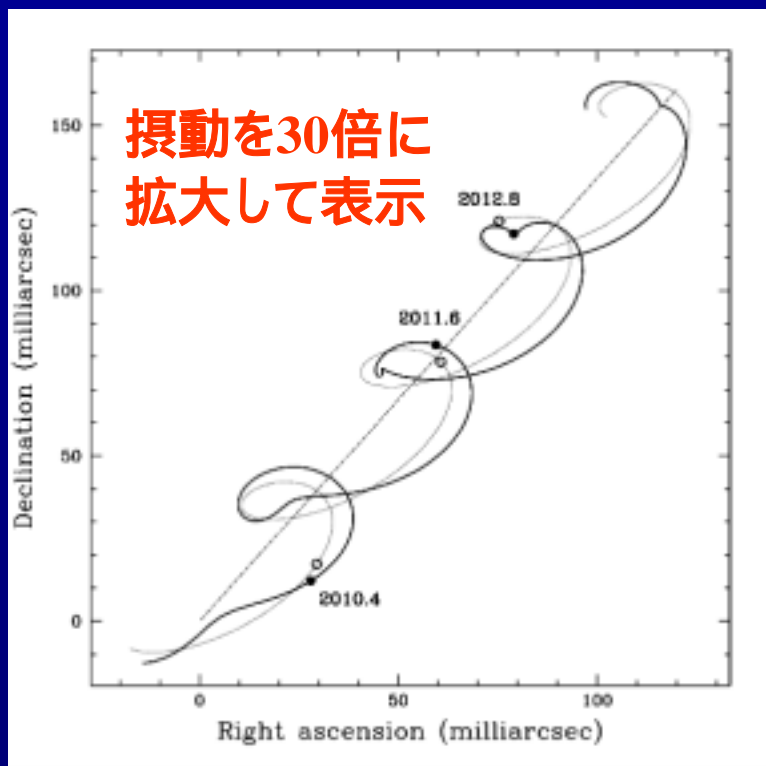
Gliese229 b:
角距離 7arcsec
光度比 5000

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！

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



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

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)

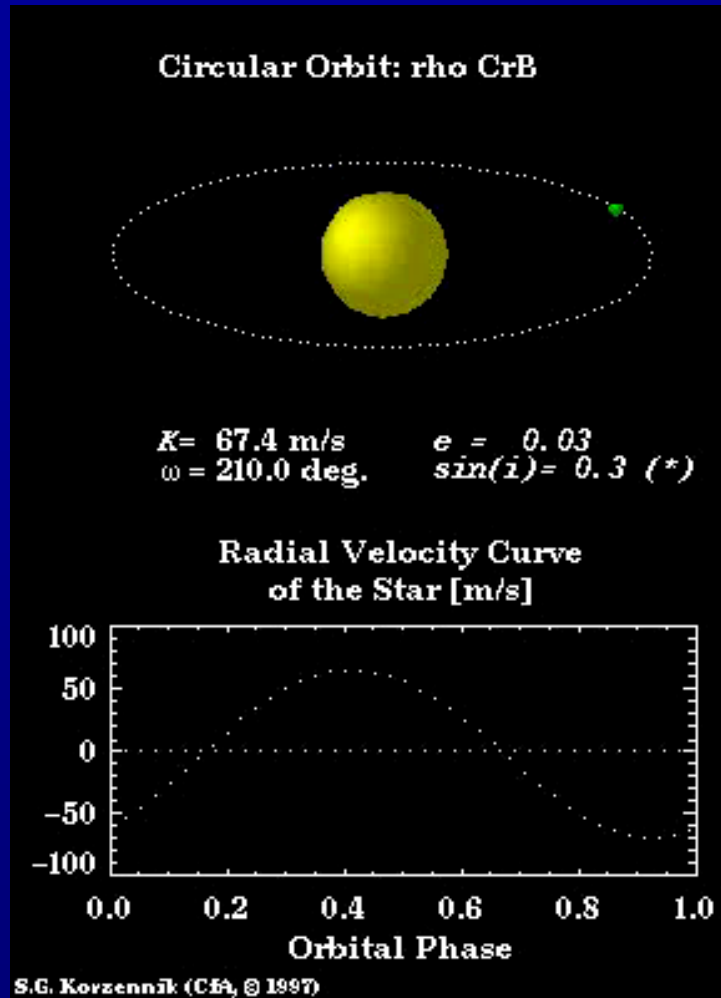
GAIA(2009年打ち上げ?):

10マイクロ秒角 (10⁹恒星)

距離200pc以内の50万個の星

5%が惑星を持てば25000木星!

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

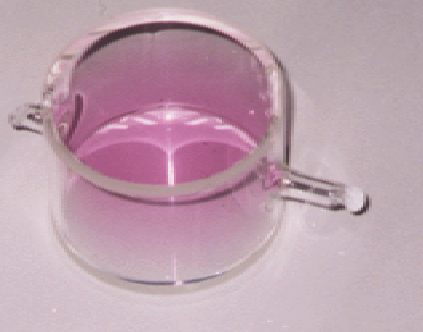
現時点での地上望遠鏡での分解能の記録は1m/s

(HARPS@3.6m ESO望遠鏡)

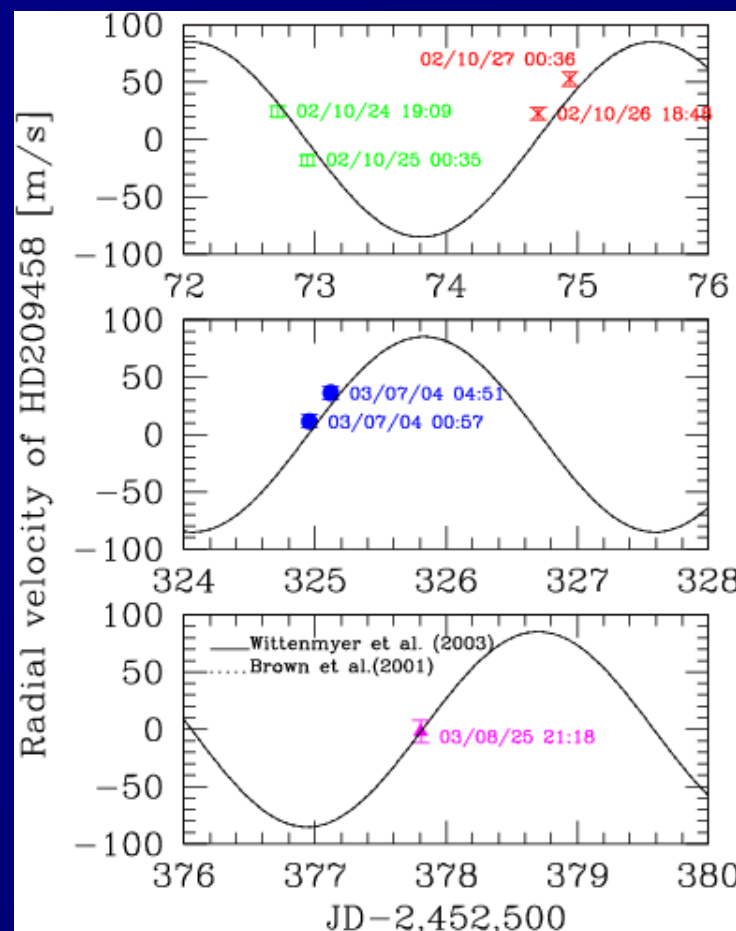
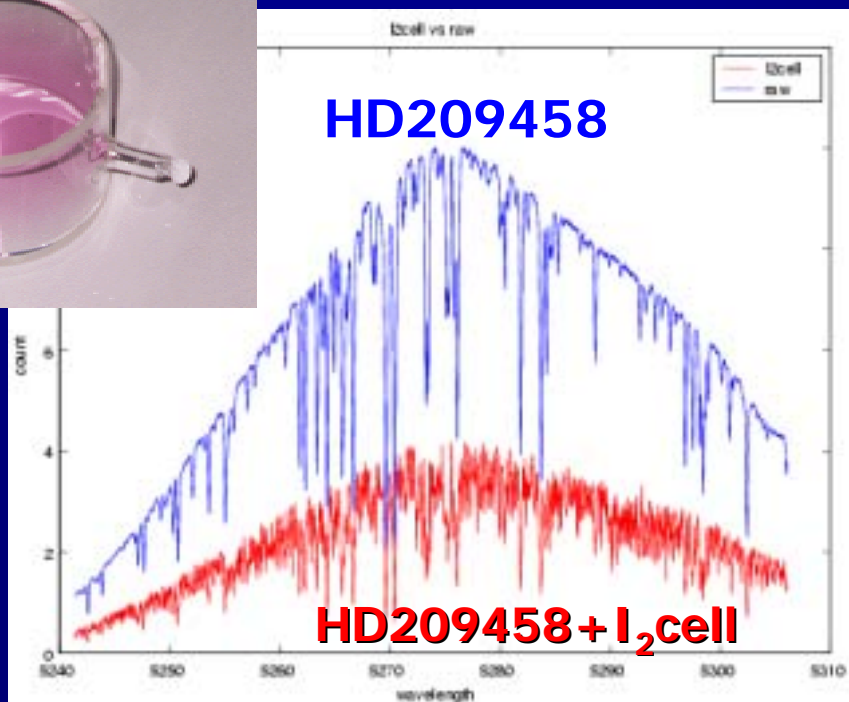
この方法によって、木星程度の質量の太陽系外惑星がすでに136個発見されている (2004年11月18日現在)。₆

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。

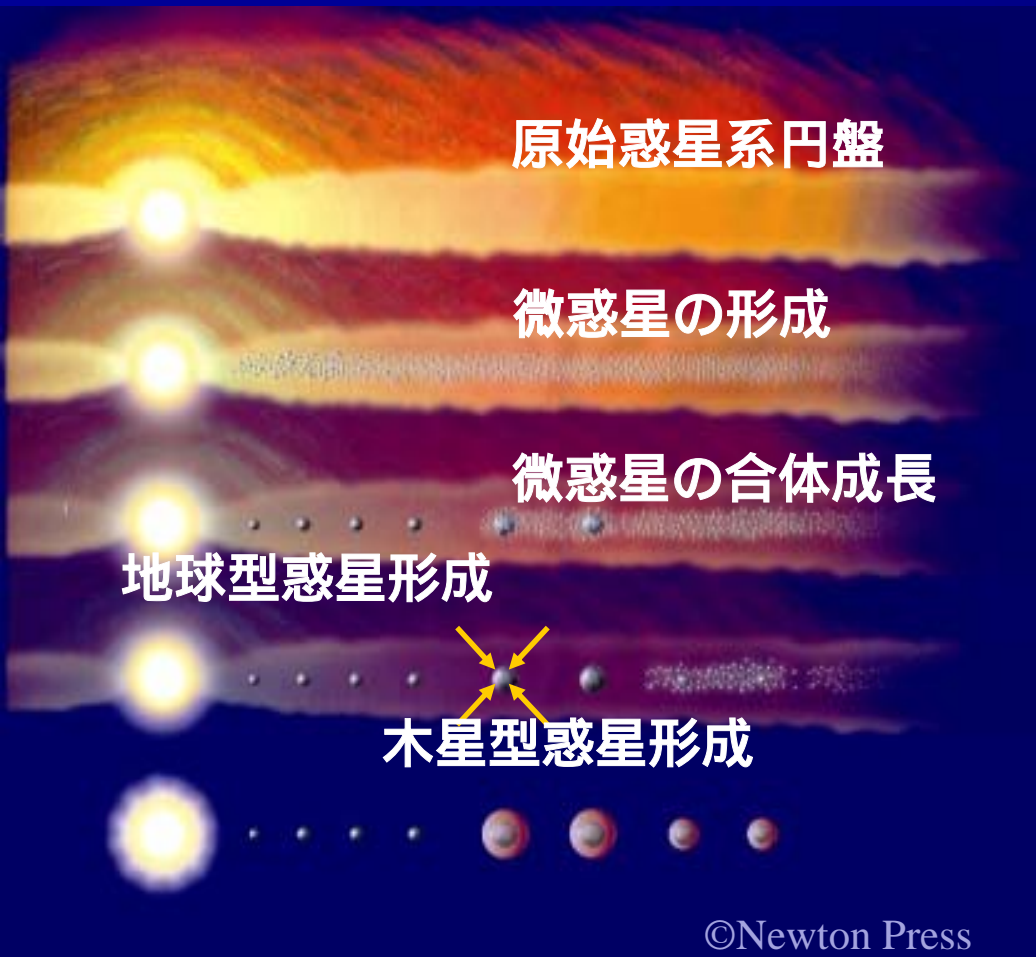


ヨードセル



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

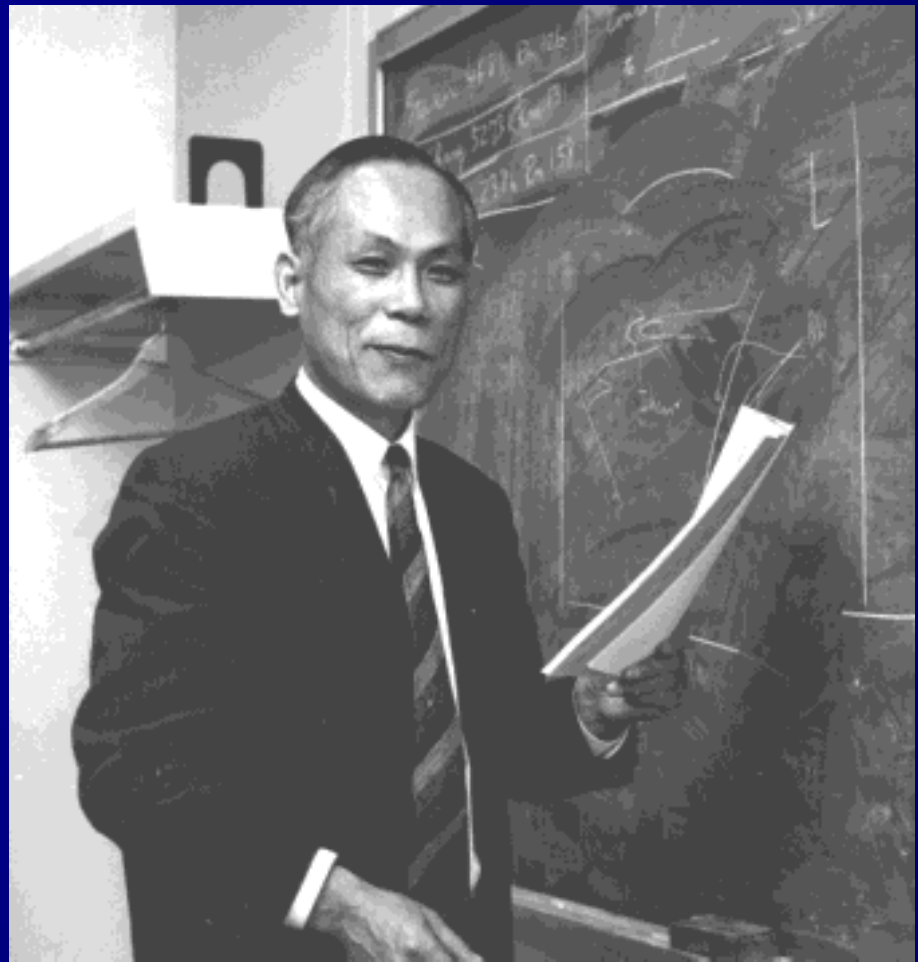
- H, Heガス: 99%質量
- 固体成分: 1%の質量

■ 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！
- 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

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

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

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

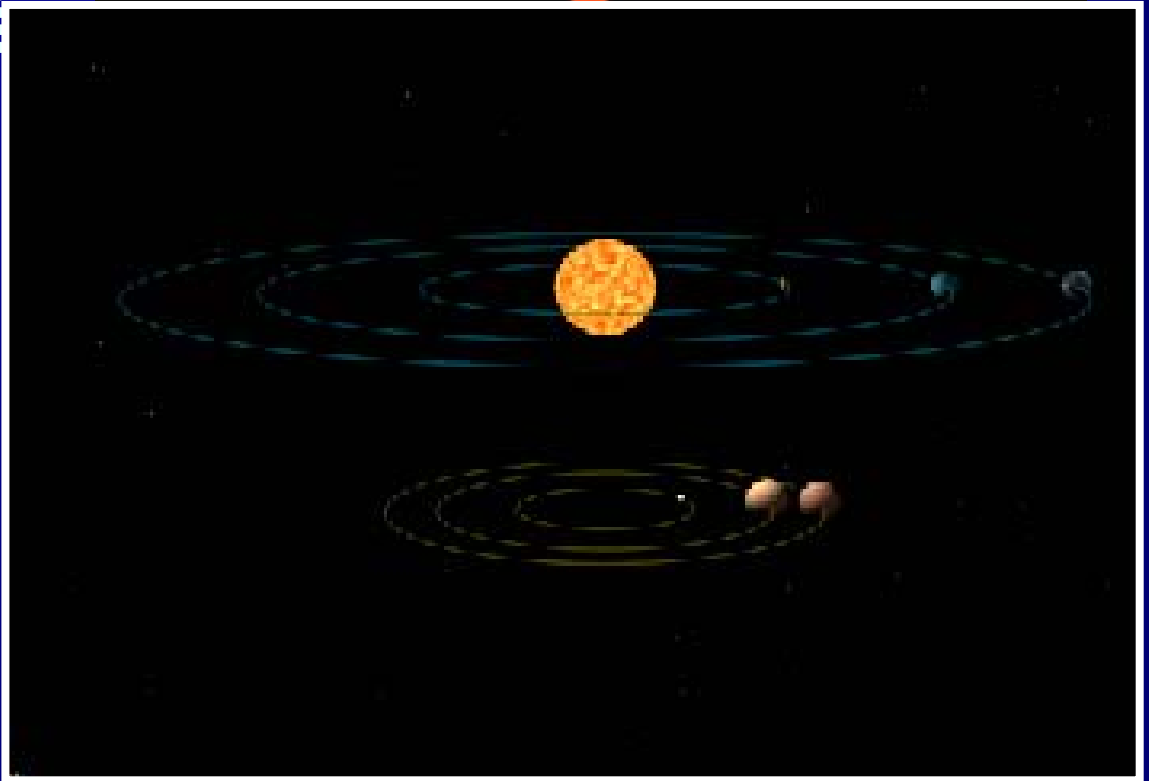
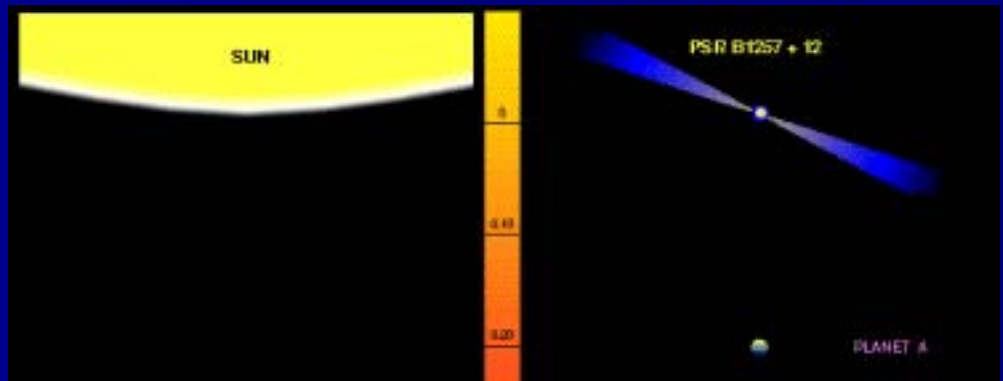
このような到着時間の変動がモニターできるような定期的な信号を出すような天体？

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、、、

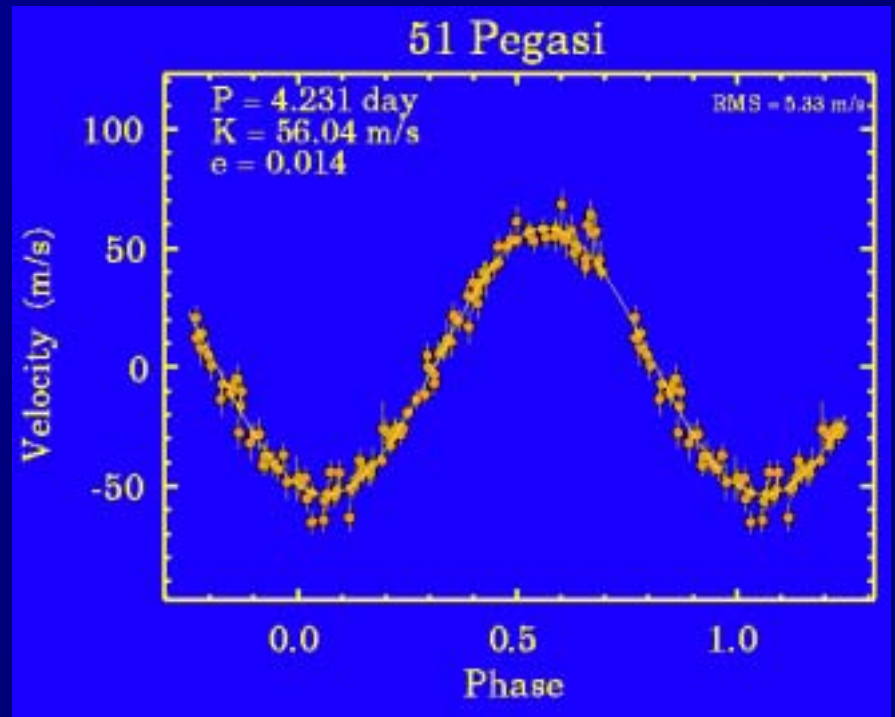
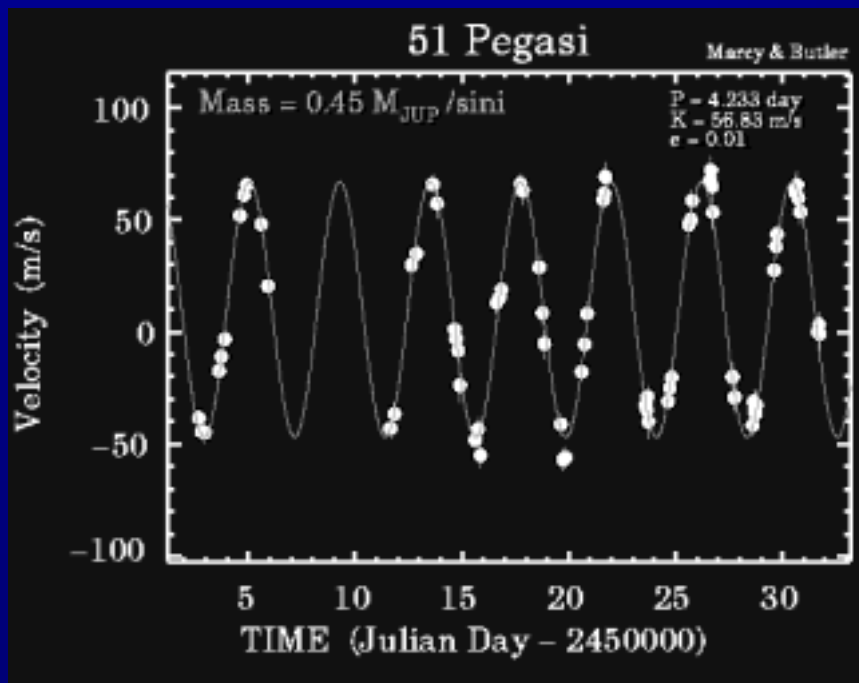
PSR1257+12: パルサーのまわ りに3つの惑星 の存在

- 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?)



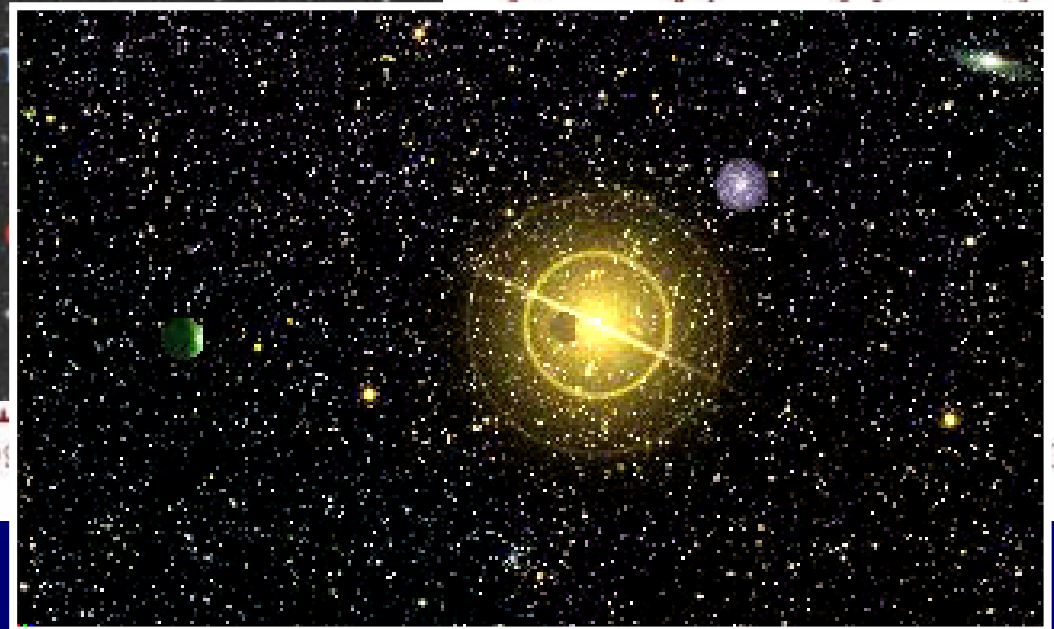
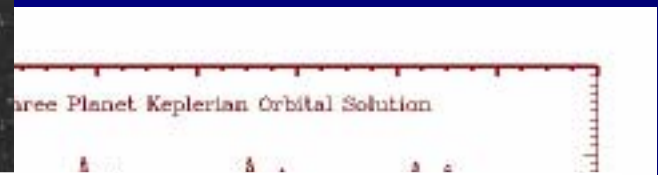
51 Pegasi b: 太陽と同じような恒星 (主系列星) を周る惑星の初発見

- 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)

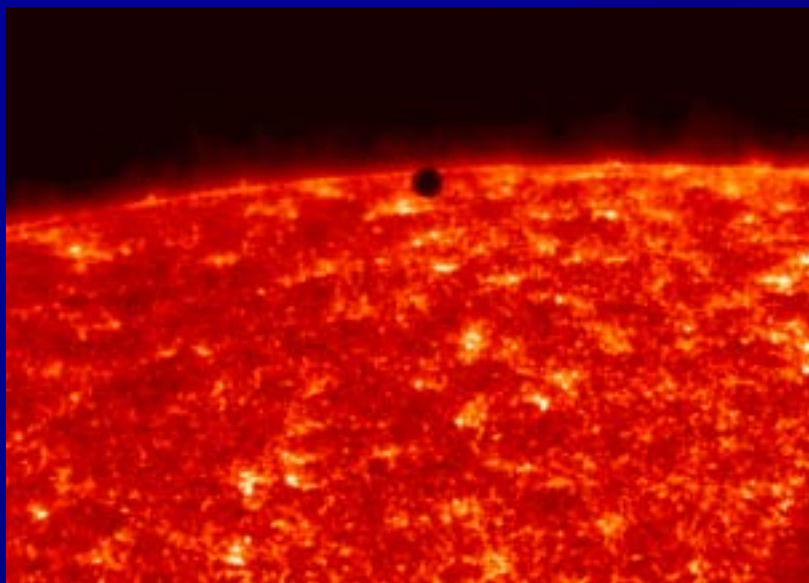


周期がわずか4.2日！

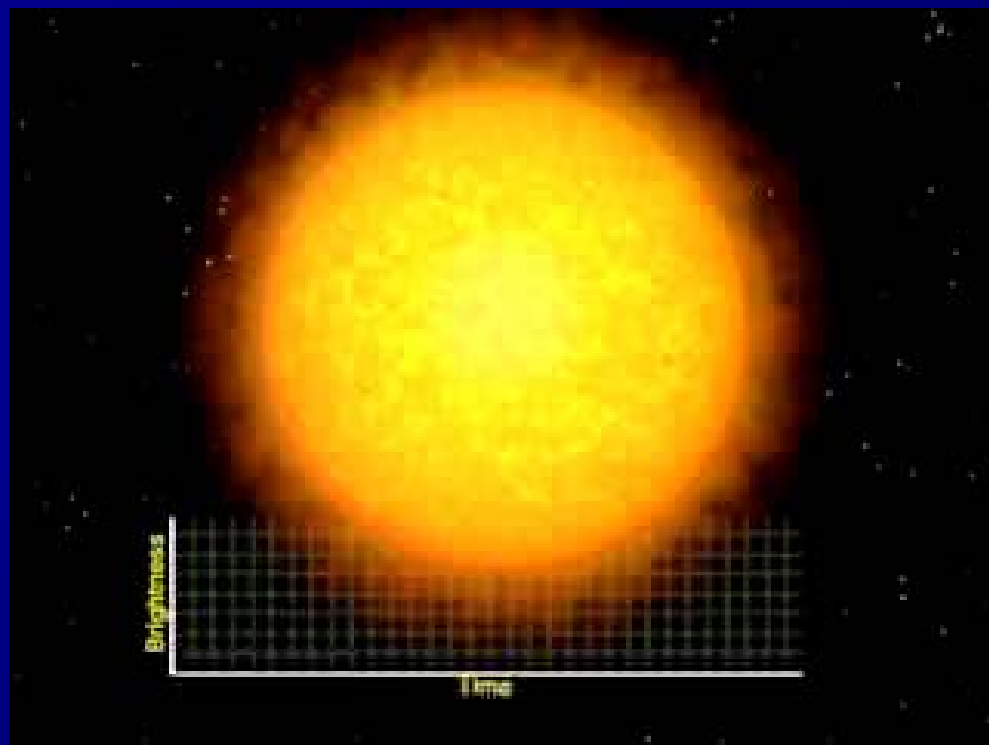
And: 主系列星のまわりの初め での惑星系の発見



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/>

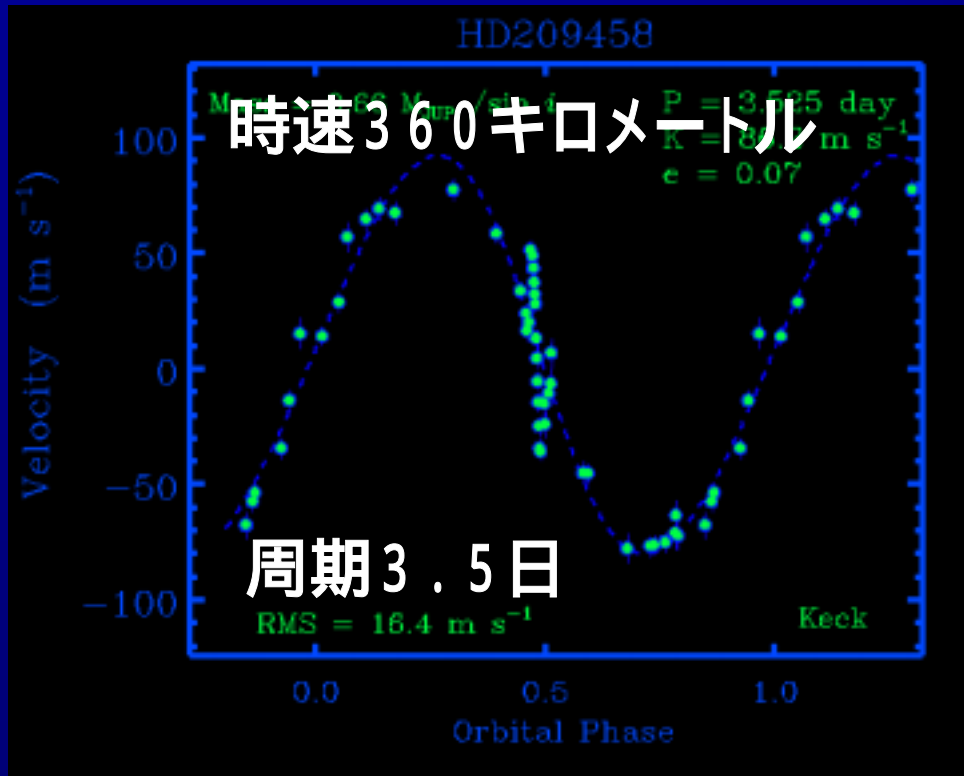
食が観測できる確率: $0.3\% (AU/\text{軌道半径})(R_{\text{主星}}/R_{\text{太陽}})$

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

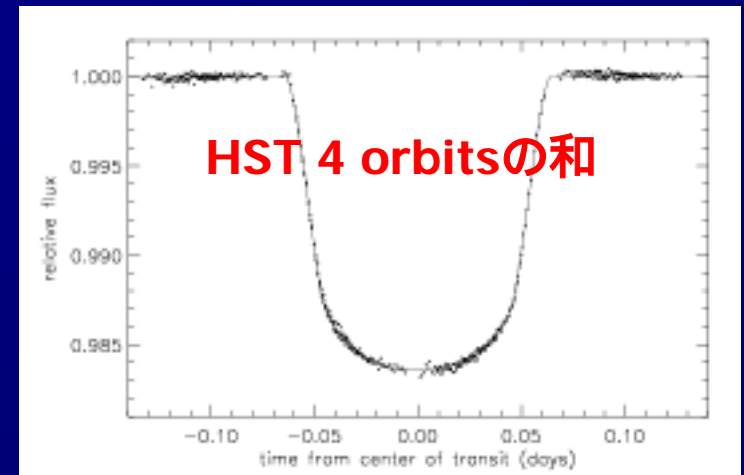
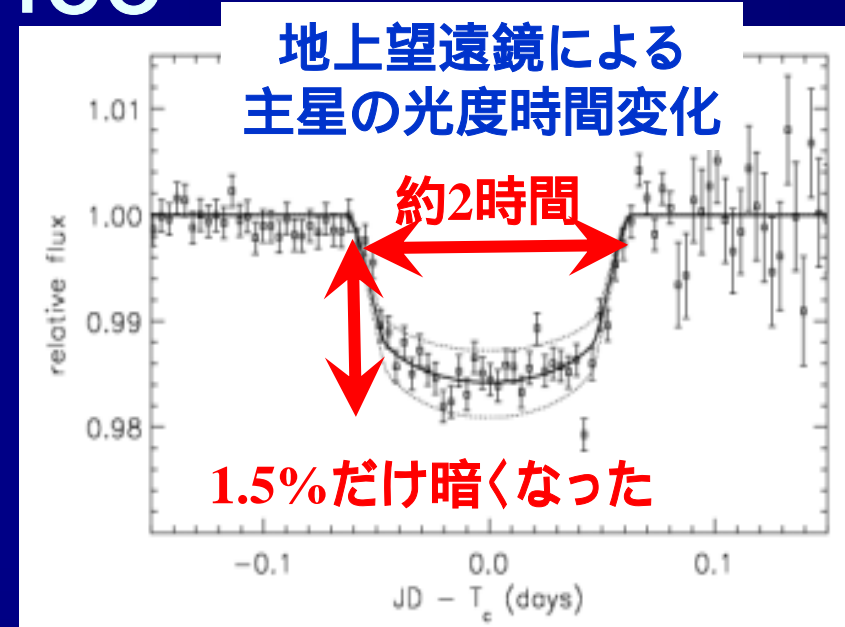
地上での測光精度: 0.1%が限界(木星なら、地球は×)

太陽系外トランジット(食)惑星 HD209458

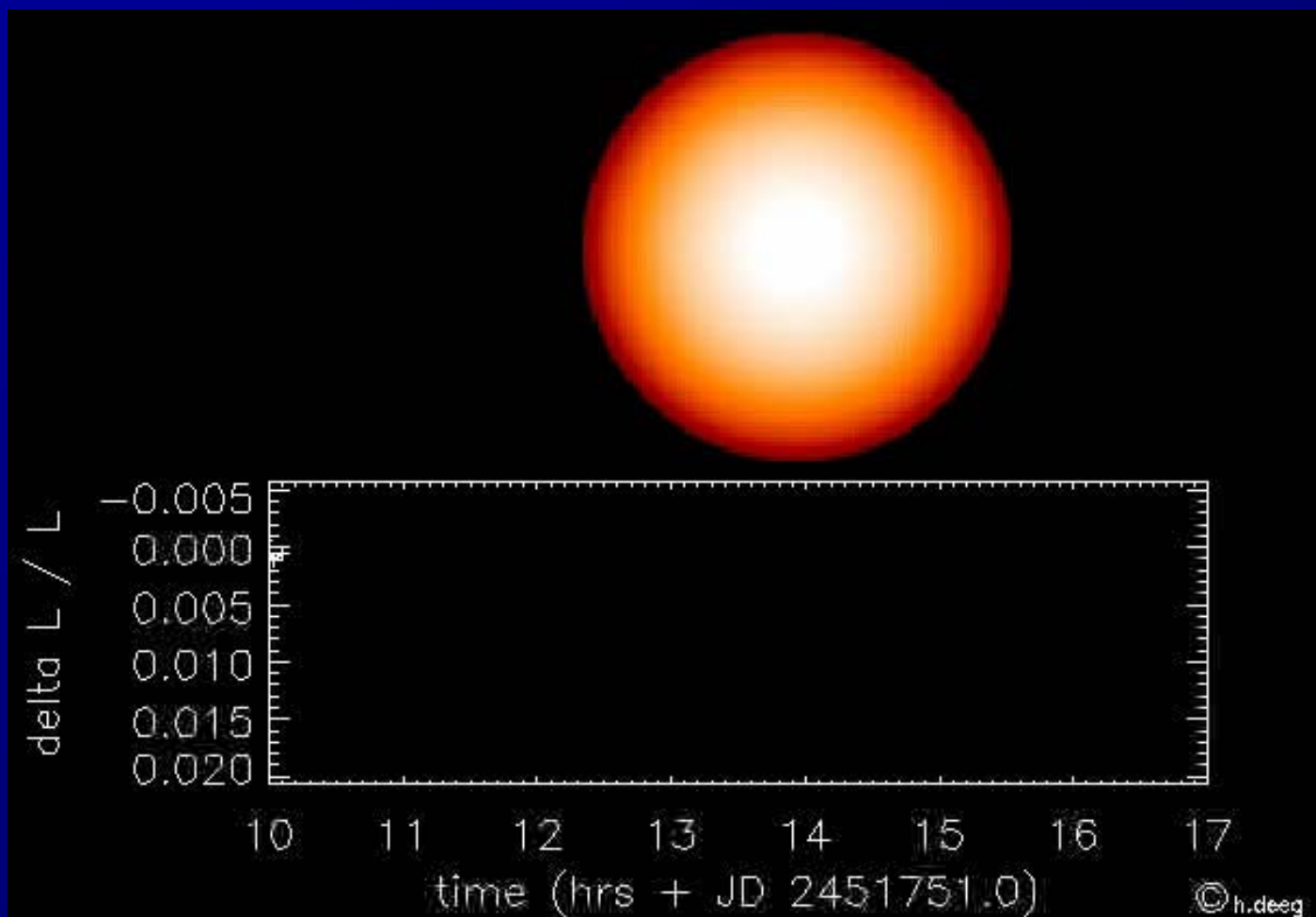
- 速度変動のデータに合わせた惑星食の初検出



地上望遠鏡による
主星の速度時間変化



HD209458の食



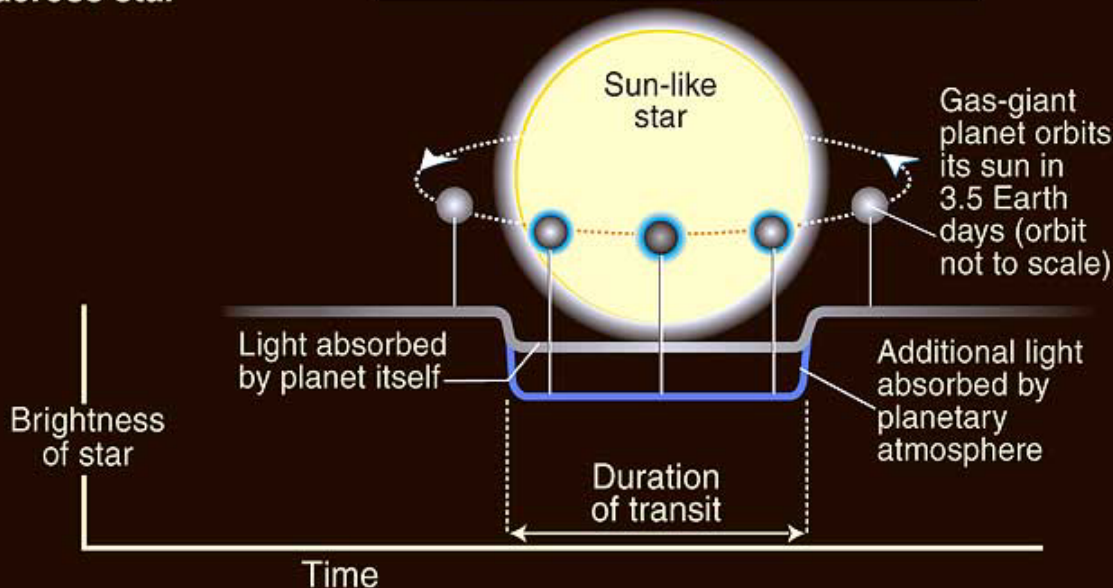
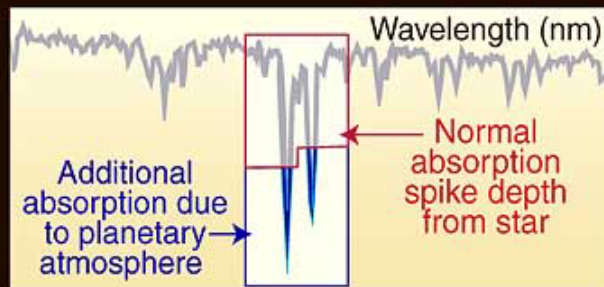
トランジット惑星の重要性

- 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): **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**
 - 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**

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

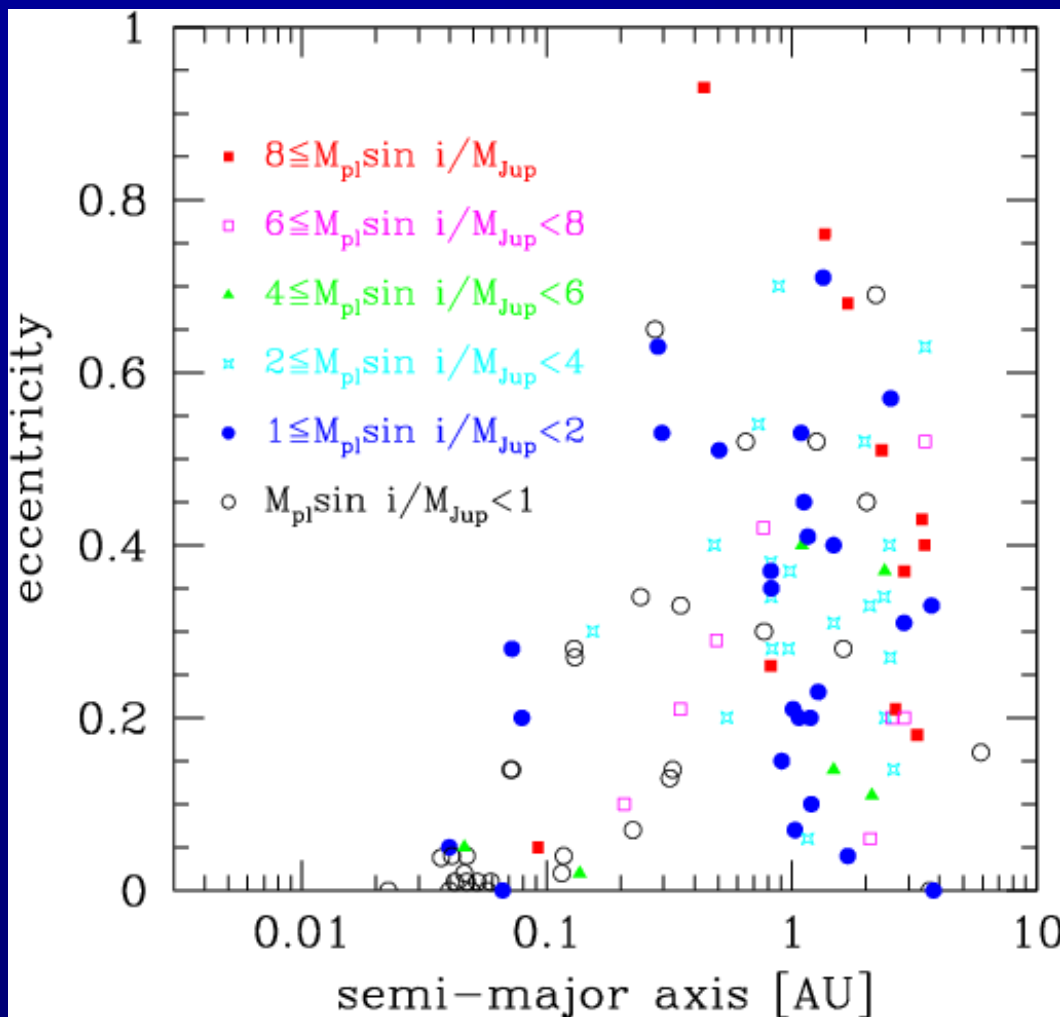
■ 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムの存在を発見

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

太陽系外惑星の軌道分布関数

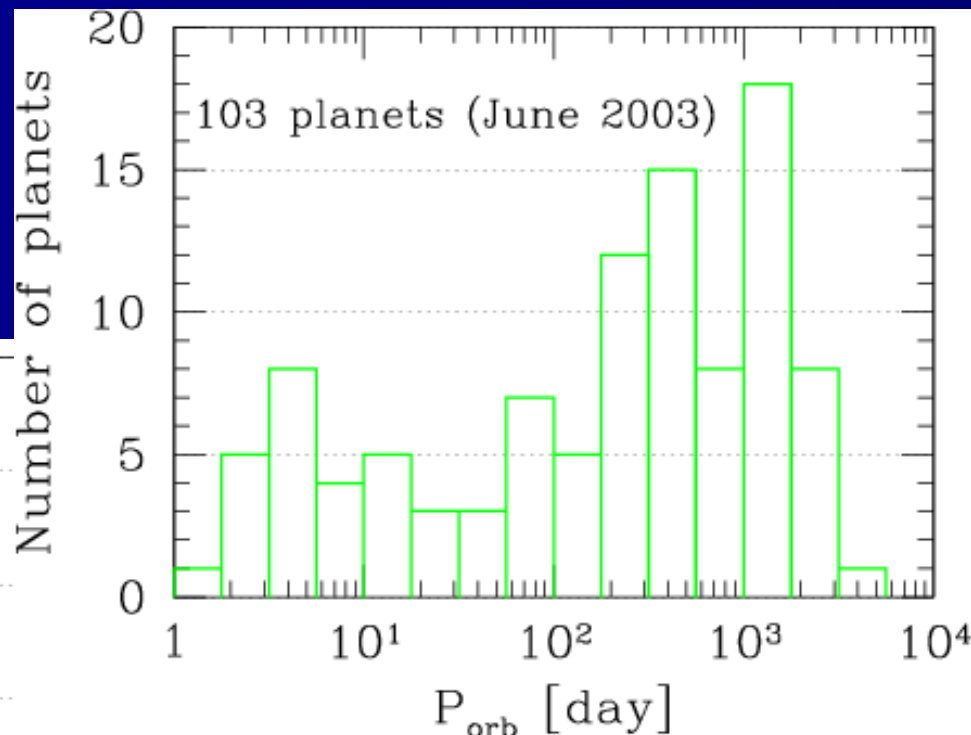
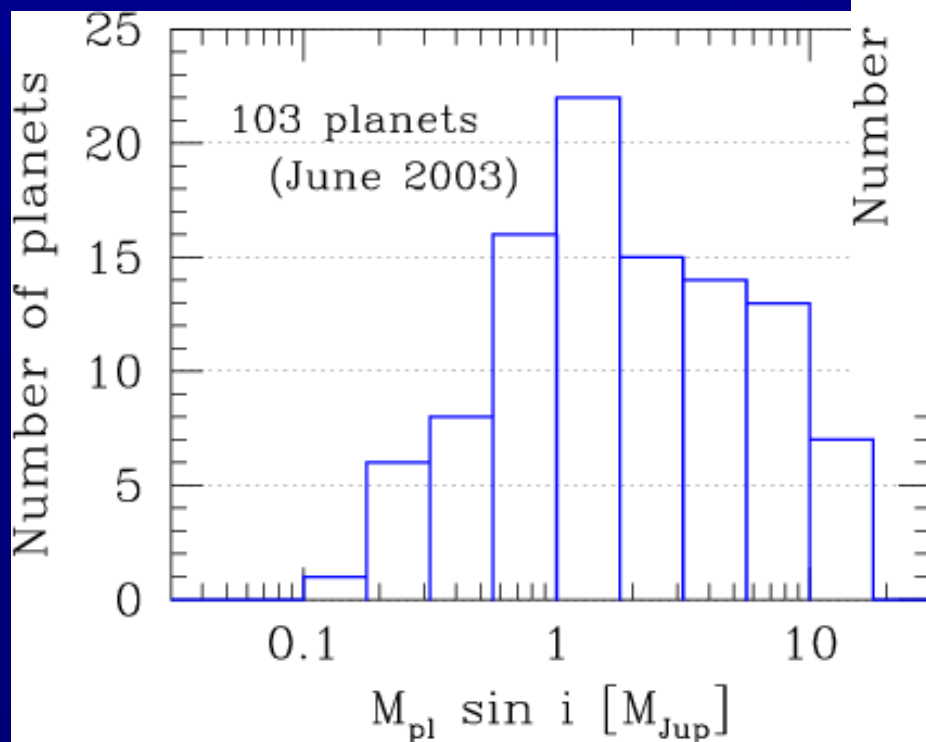


- 円軌道から大きくずれた軌道が多い (ただし、0.1天文単位以下の半径では円軌道に近い)
- 1天文単位以下の半径をもつ木星質量の惑星が大量に存在 (食の観測例から考えるとこれらはガス惑星であろう Hot Jupiter)

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



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

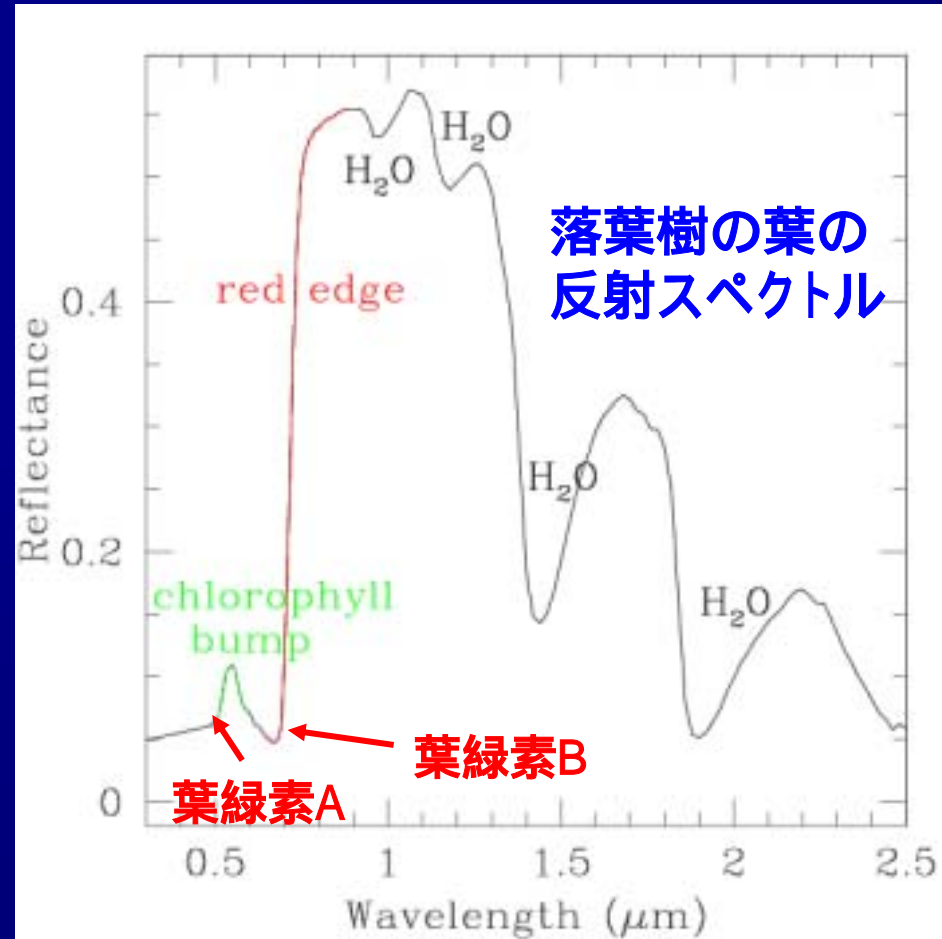
- 地球型惑星の見
- *Biomarkerの同定* (e.g., extrasolar plant)
- *Habitable planetの見*
- *Extraterrestrial lifeの見*

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



Vesto Melvin Slipher (1875-1969)

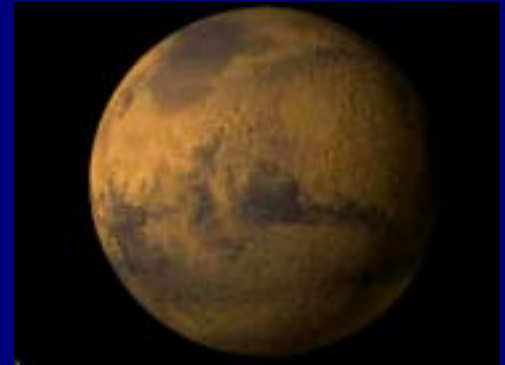


Red-edge as a biomarker (at least) in 1924 !

- “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”

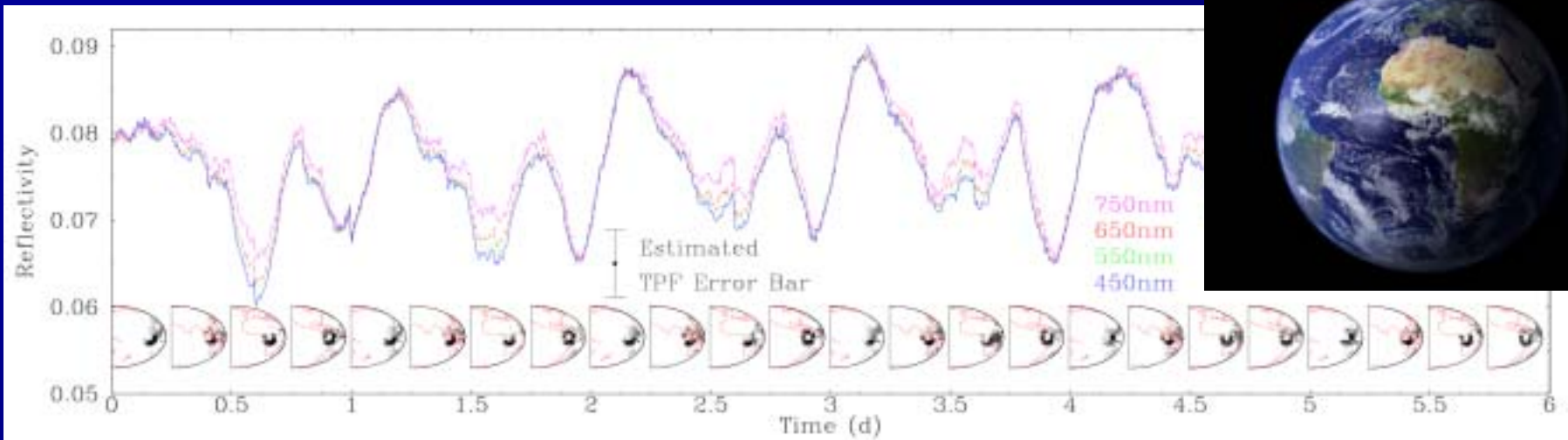
PASP 36(1924)261



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？

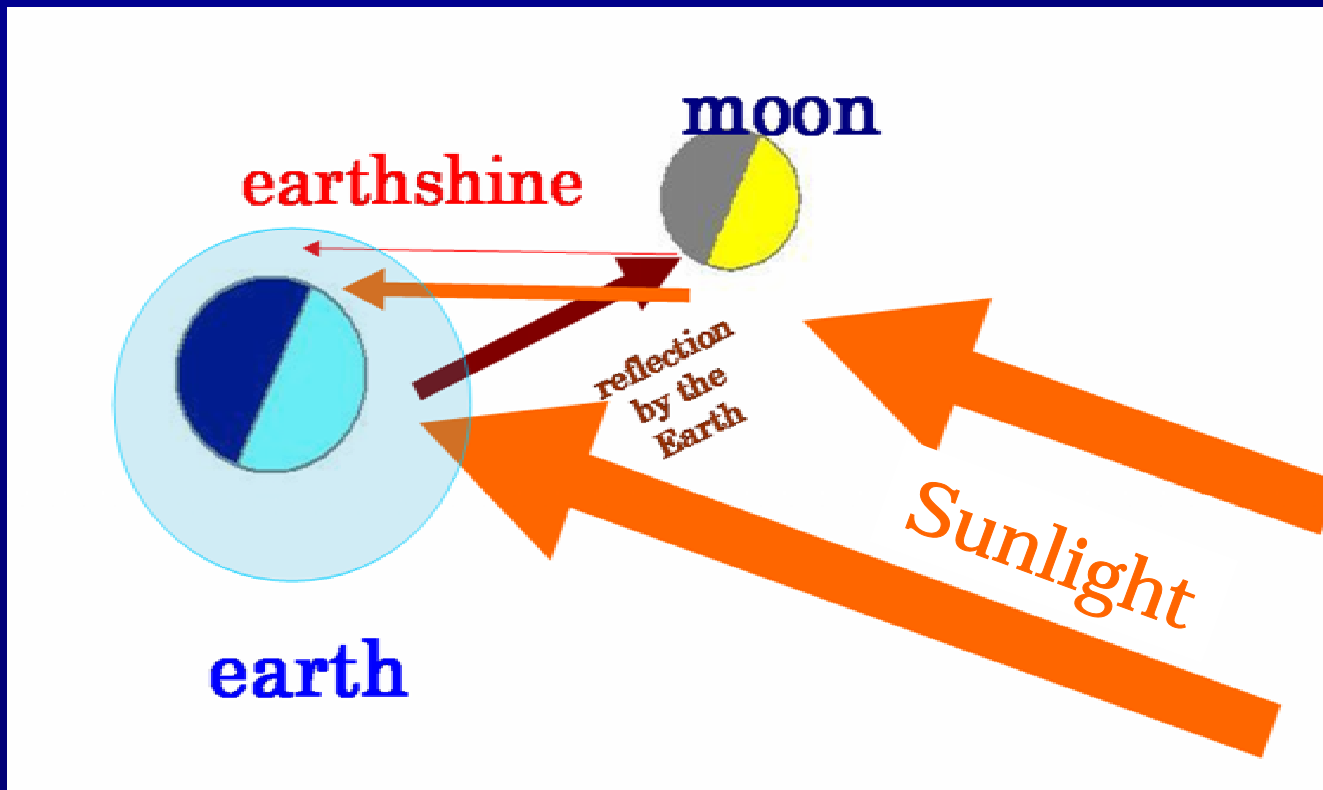


Ford, Seager & Turner: Nature 412 (2001) 885

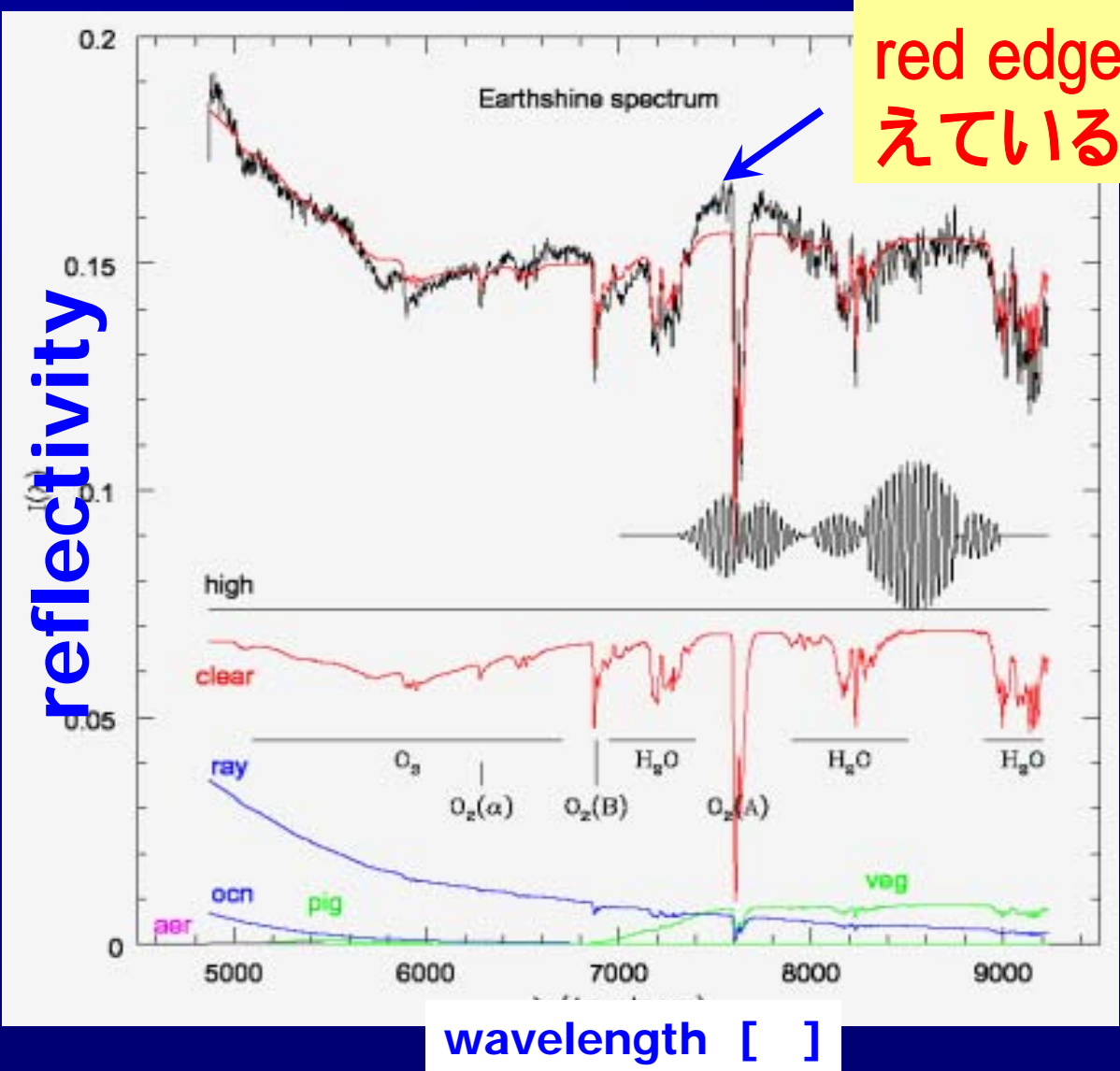
- 地球の反射光が完全に分離できると仮定する
 - TPF (Terrestrial Planet Finder) で 10 ~ 20年後に実現？
- 10%レベルの日変化は検出可能
 - 大陸、海洋、森林などの反射特性の違いを用いる
- 雲の存在が鍵
 - 太陽系外地球型惑星の天気予報の精度が本質的！

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???

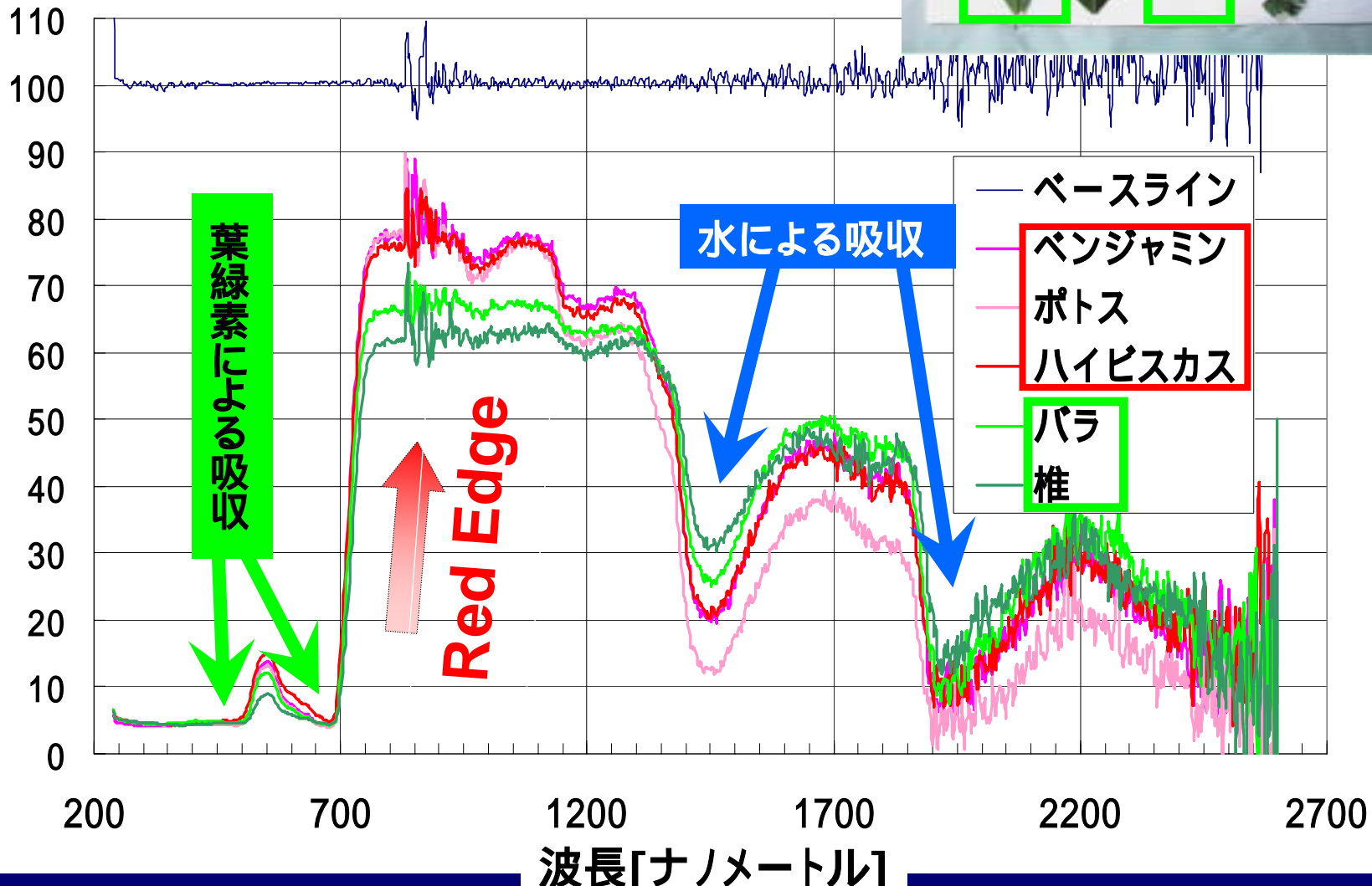
Woolf & Smith
ApJ 574 (2002) 430
"The spectrum of earthshine: A Pale Blue Dot Observed from the Ground"

植物の葉の反射スペクトル

海老塚 昇(理研)らによる実測データ

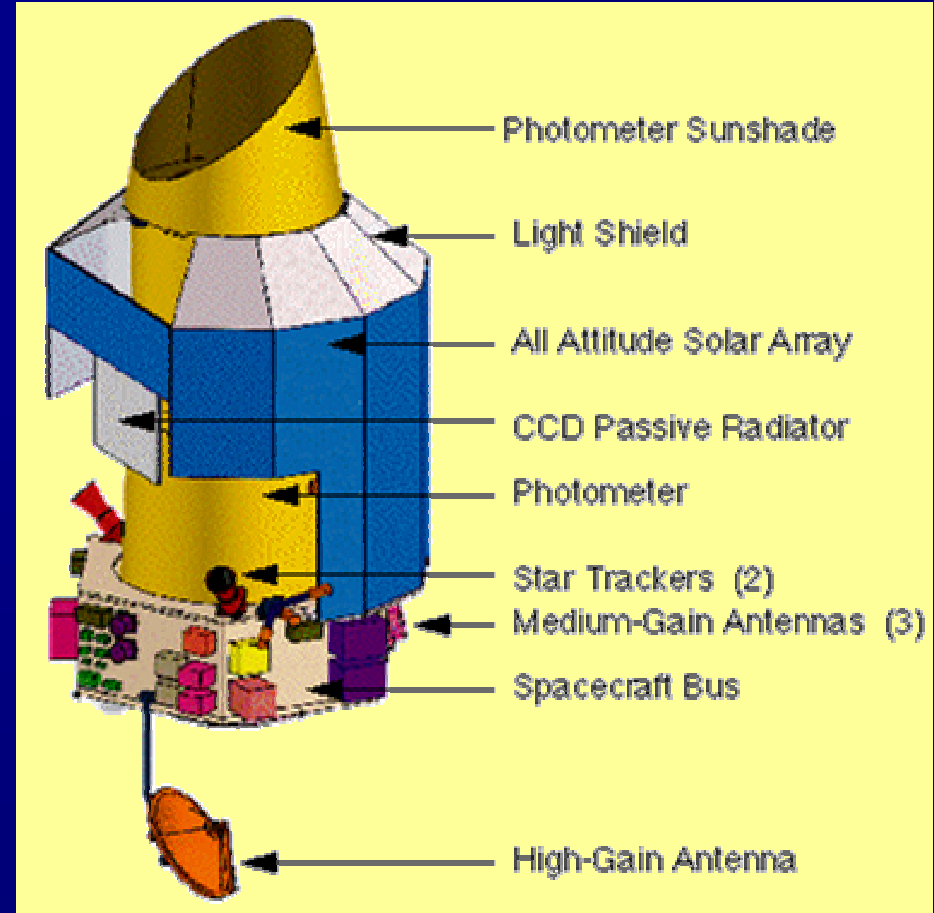
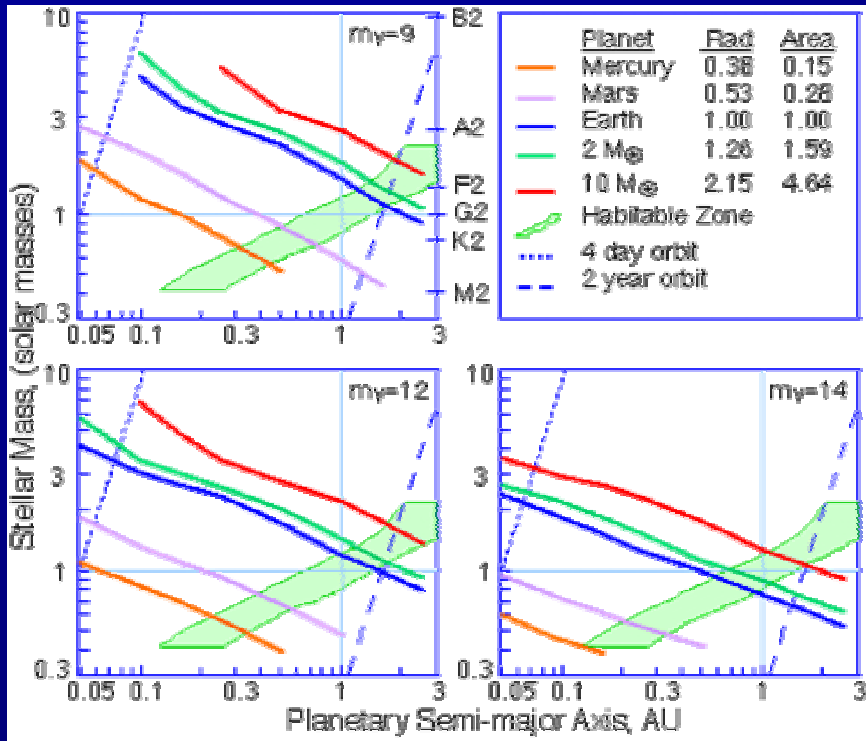


反射率[パーセント]



ケプラー衛星 (米国2008年打ち上げ予定)

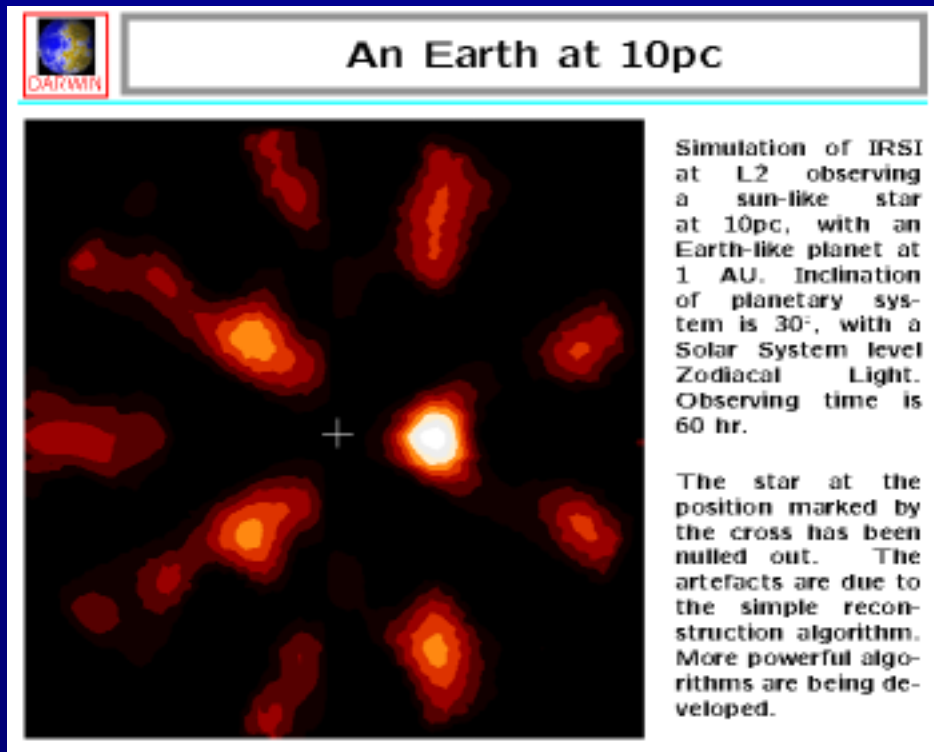
食惑星の測光サーベイ



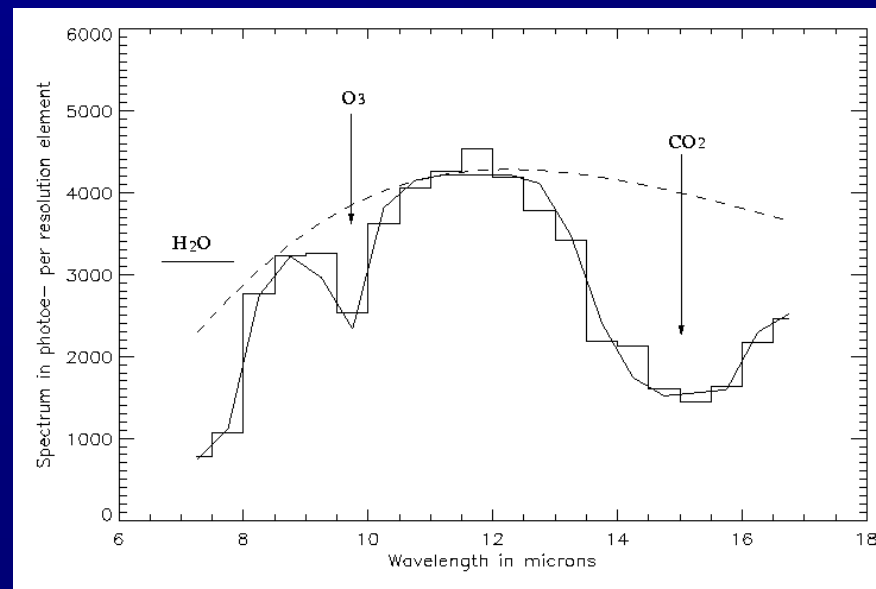
<http://www.kepler.arc.nasa.gov/>

ダーウィン衛星 (欧州：2015年頃打ち上げ?)

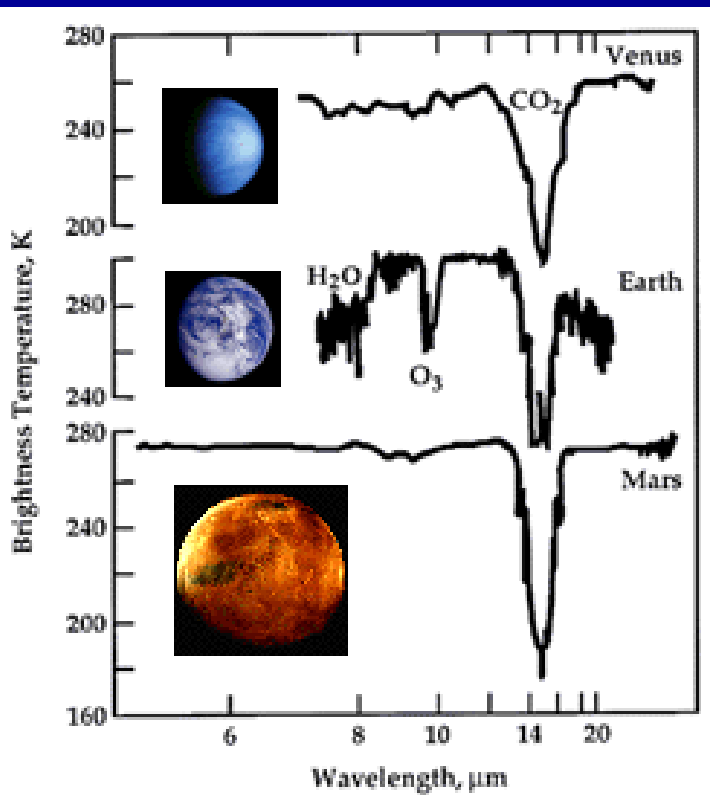
宇宙赤外線干渉計群 測光分光観測



<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？

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/>

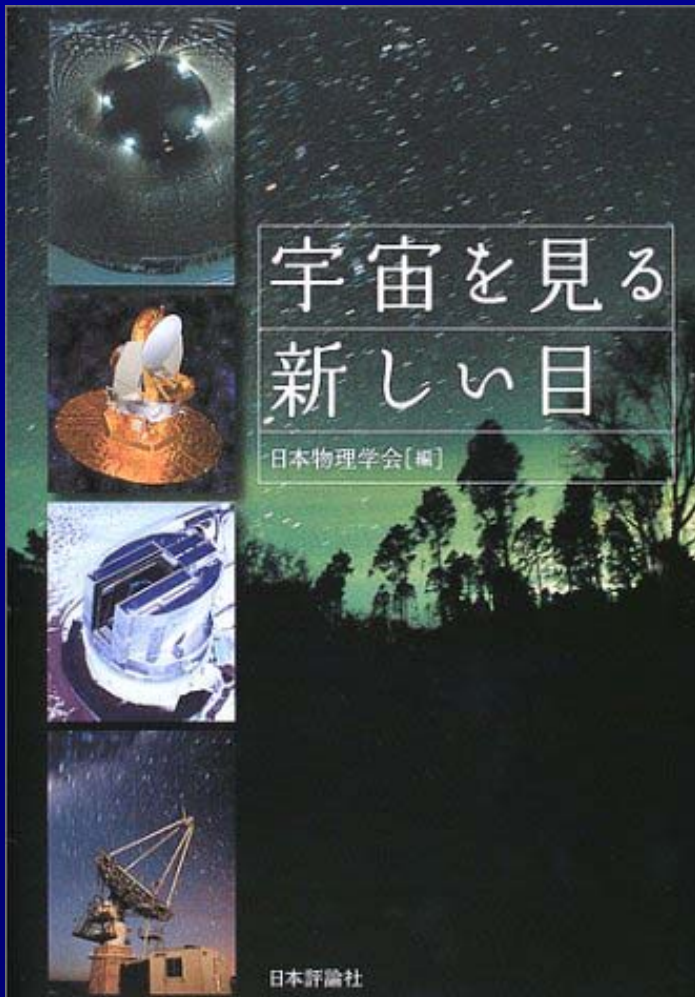
謎解きはまだまだこれから

- **宇宙の果てをみることで自然界の新たな物質階層が明らかとなった**
 - 宇宙の約23%は暗黒物質、約73%は暗黒エネルギー
 - 我々は宇宙の96%の部分を全く理解していなかった
 - 暗黒物質、暗黒エネルギーの解明は21世紀科学の大目標
- **10年足らず前に初めて太陽系以外に惑星が存在することが発見された(ただしまだガス惑星のみ)。**
 - 第二の地球はあるのか？
 - 地球外生物、地球外知的文明は存在するか？
 - 我々の存在は偶然か、必然か？
 - これらが単なる夢物語やSFではなく、科学的に議論できる時代になってきた！

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**

レポートのテーマ例

- 以下に限る必要はなく、自分の興味に応じて適宜テーマを設定し、調べたことを簡潔にまとめて提出すること(できれば電子メールで)
 - SDSSとは何か
 - WMAPとは何か
 - 宇宙の暗黒物質
 - 宇宙の暗黒エネルギー
 - 太陽系外惑星探査の現状
 - 地球外生命探査 (SETI)とは何か

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2004j.html