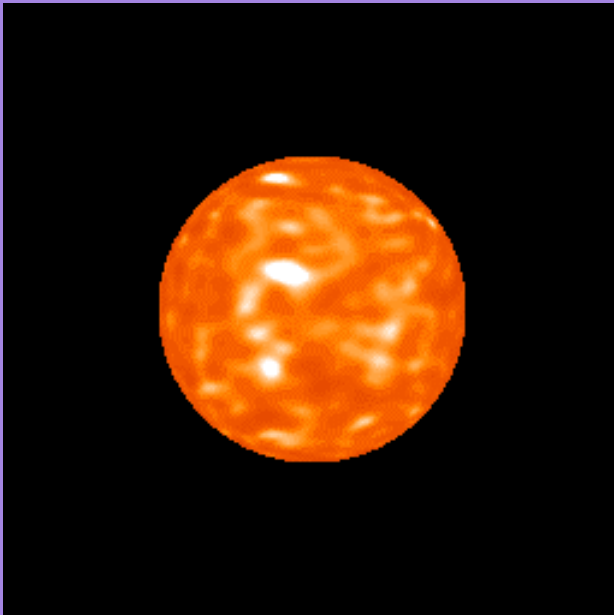


太陽系外惑星探査

東京大学 大学院理学系研究科

須藤 靖



2001年6月29日

甲南大学物理学教室

コロキウム

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
 - 宇宙定数が存在する可能性
 - 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

精密宇宙論 (Precision Cosmology) ?

--- Since people have been working on the problem for more than sixty years, perhaps the most surprising result would be that in the next decade a consistent and believable picture for the values of the cosmological parameters is at last established. ---

P.J.E.Peebles (1993) ``Principles of Physical Cosmology'' p.677

驚くべきことに、21世紀を待つまでもなく、宇宙論パラメータの値はすでにかかなり収束しつつあると言える



21世紀は、**精密宇宙論 (Precision Cosmology)** だ！
という人もいる(多い?)が、それでは結局、宇宙論は
low risk, low returnの学問になりさがるのではないか？

太陽系外惑星探査の意義

■ *Are we alone ?*

- 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

やや危ない
↓

太陽系外惑星探査の方法

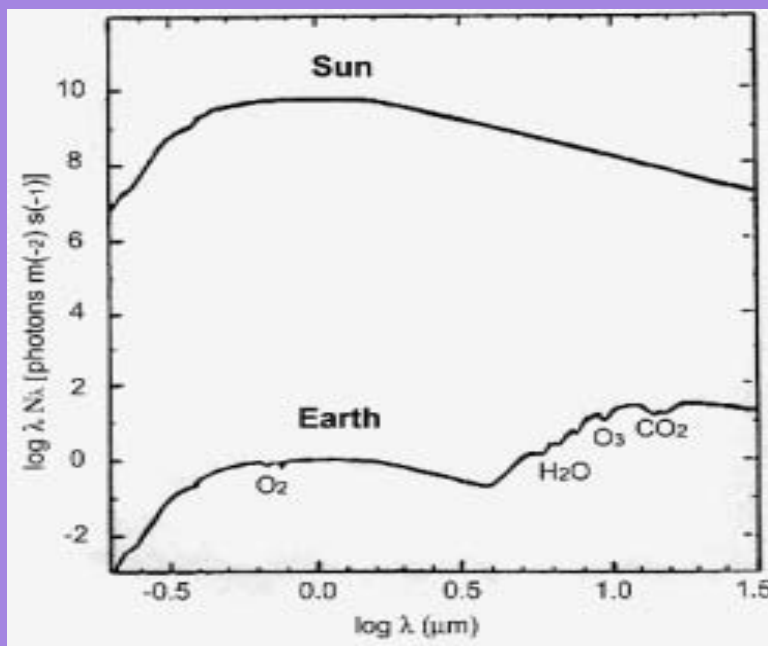
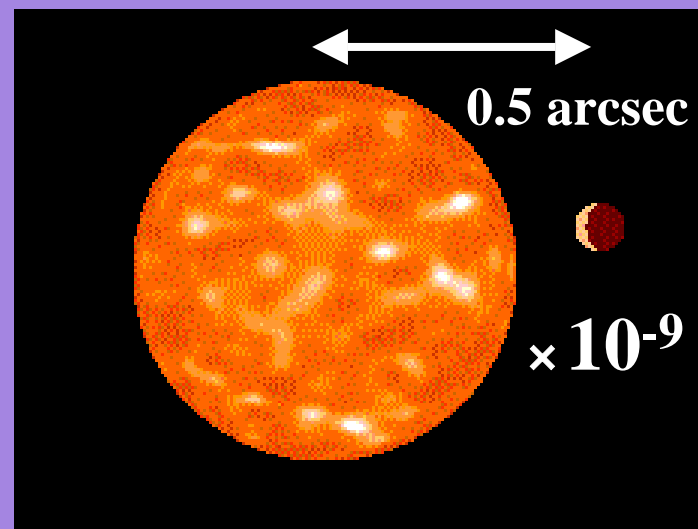
- 直接撮像：高角度分解能
- 主星の速度変動：高精度分光
- 主星の位置変動：高精度astrometry
- 主星の光度変動：高精度測光
- パルサーの信号到着時刻変動：
高時間分解能

いずれも最先端の観測技術を要する

惑星の直接撮像

10pcから観測した木星

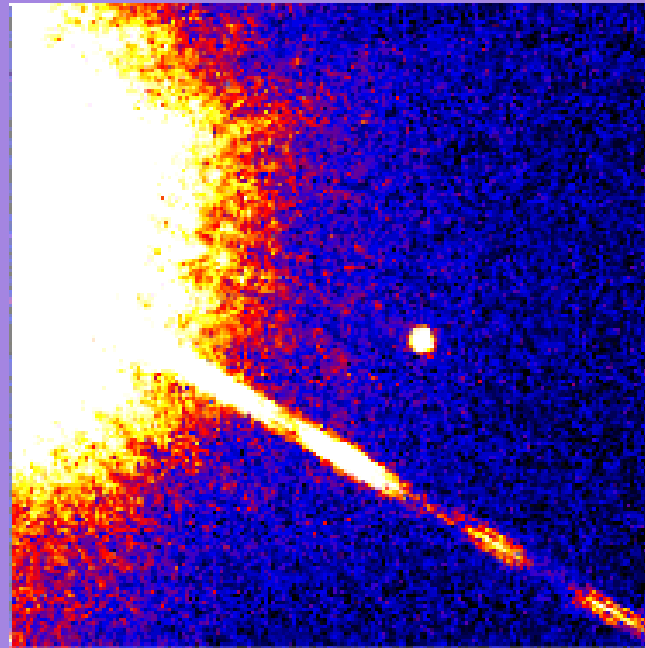
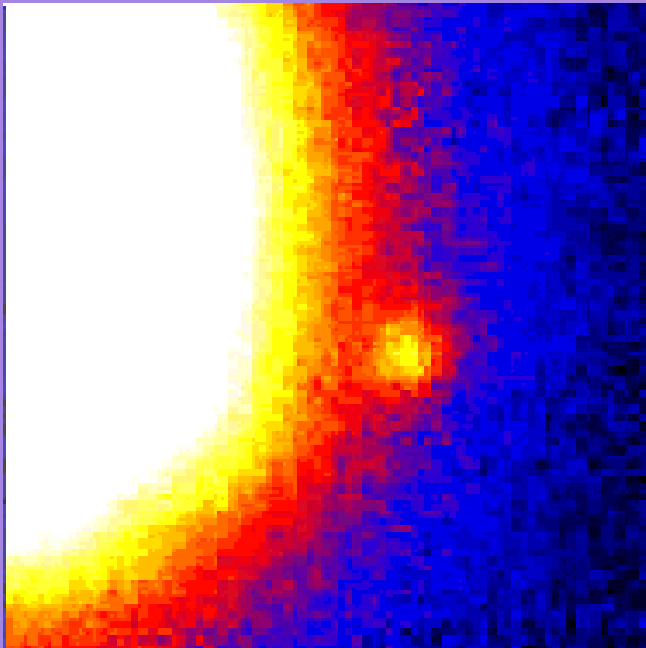
明るさ： 27等級（可視域）
主星との角距離： 0.5秒角



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



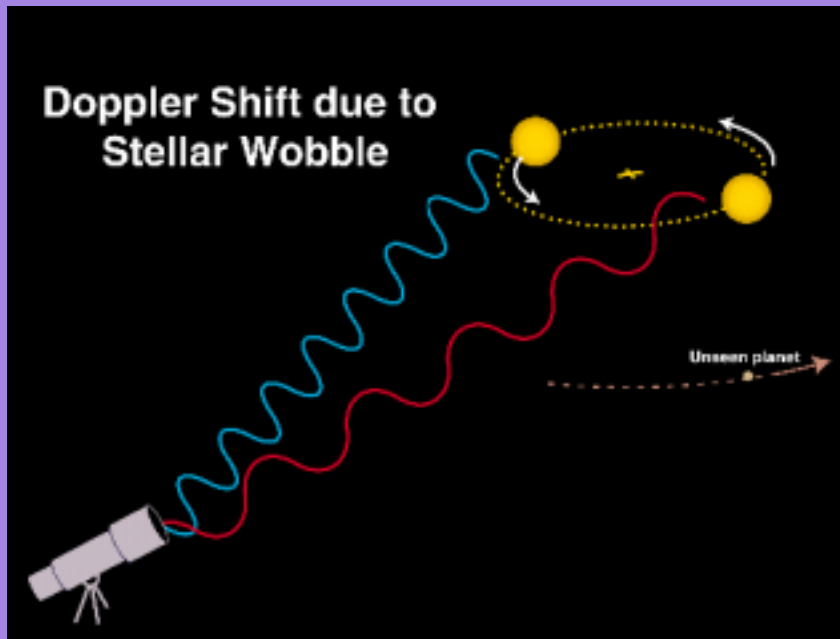
Gliese229 b:
角距離 7arcsec
光度比 5000

左 : Palomar
右 : HST
(T.Nakajima)

■ 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！

主星の速度変動

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

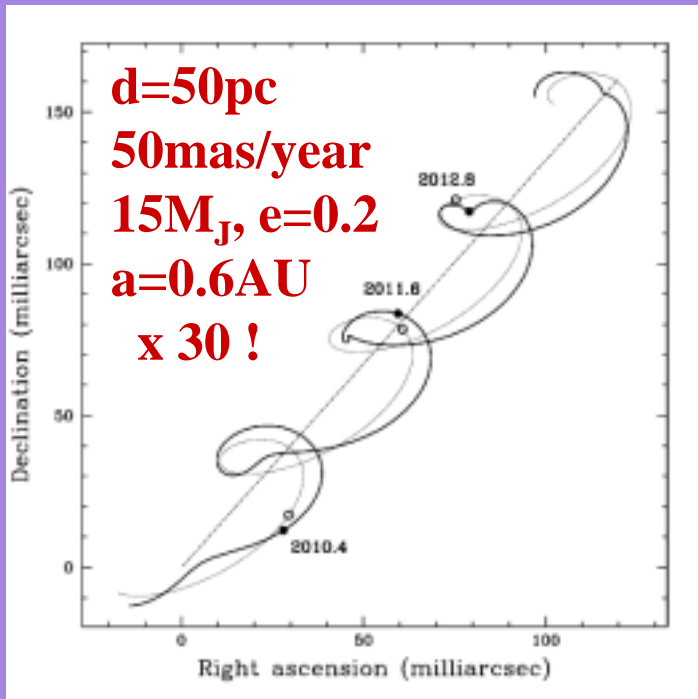


太陽の受ける速度摂動：
12.5 m/s (木星)
0.1 m/s (地球)
(参考) 地球の公転速度
3万 m/s

地上の分光観測で、3m/s
程度の精度が実現済み
現在、木星規模の
惑星探査の主方法

主星の位置変動

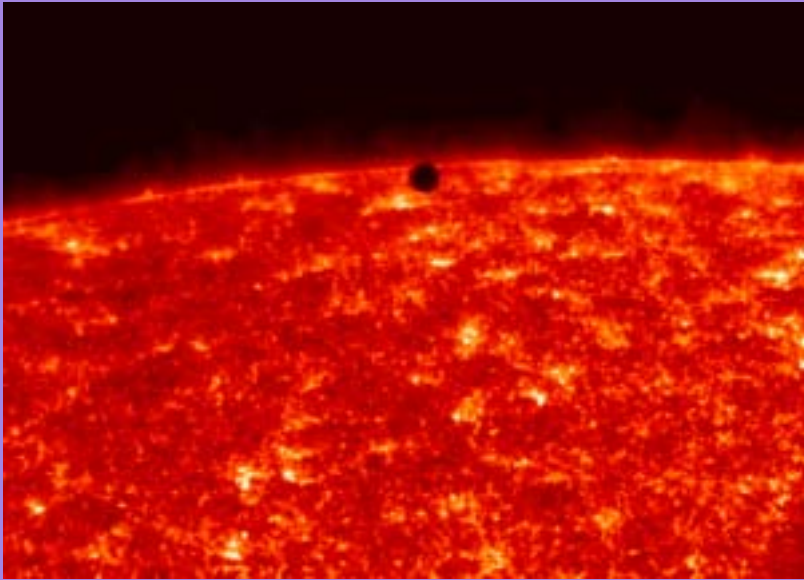
木星による太陽の位置変動を10pcの距離から観測すると



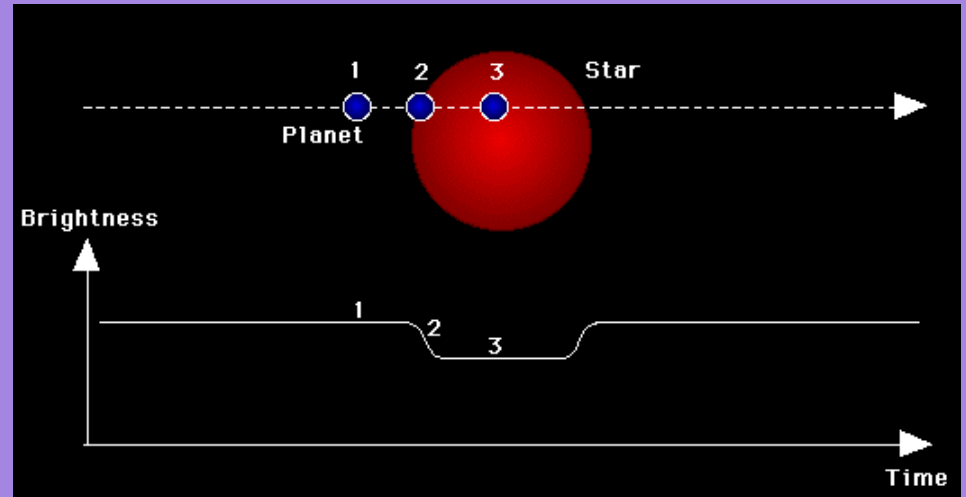
太陽の位置摂動:
70万km (太陽半径程度)
0.5 ミリ角秒

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 !

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)



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 $\sim 10^{-19} \text{s/s}$ ）

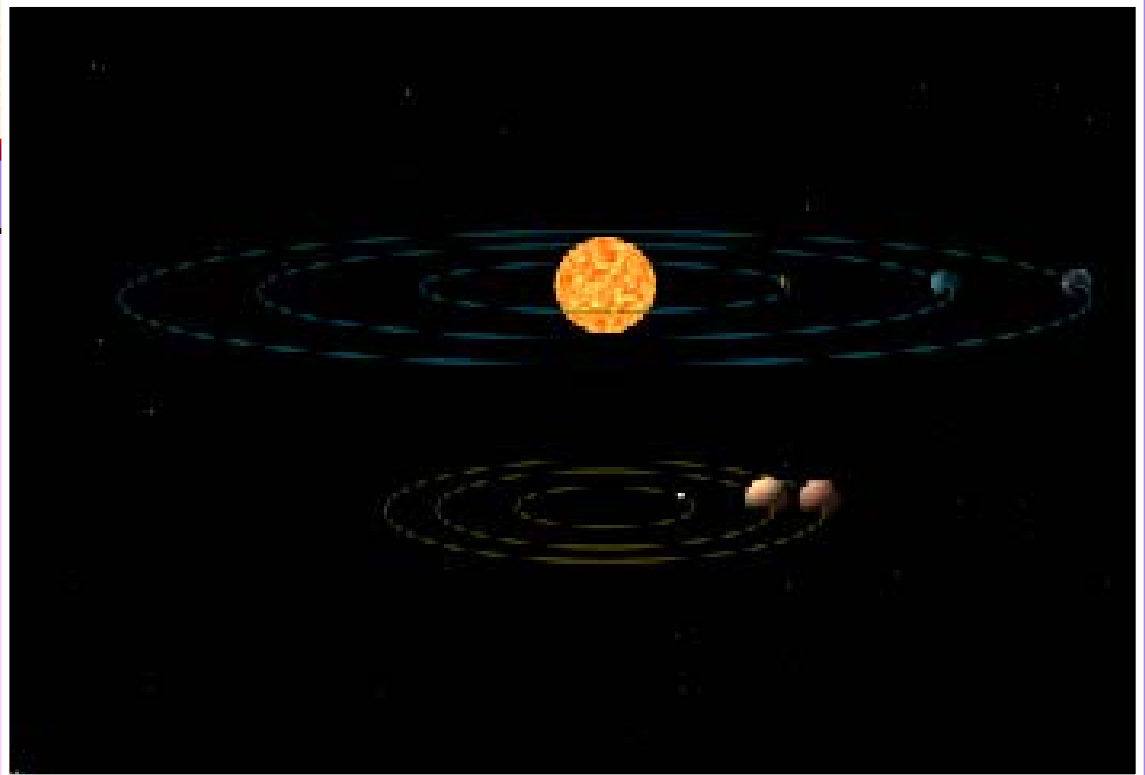
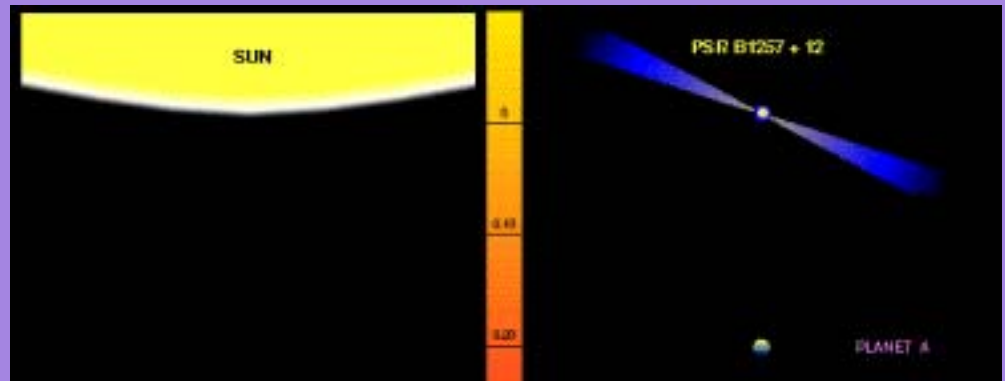
しかし、超新星爆発によって誕生したとされるパルサーがその後も惑星系を伴っているとは考えがたい、、、

太陽系外惑星発見の歴史

- 1992年: PSR 1257 - 12の周りに3つの“惑星”を発見 (Wolszczan & Frail)
- 1995年: 主系列星 51 Pegasiの周りに惑星を発見 (Mayor & Quelos)
- 1999年: 主系列星 Andの周りに3つの惑星を発見 (Butler, Marcy & Fisher)
- 1999年: 系外惑星による食の観測に成功 (Charbonneau et al., Henry et al.)
- 2001年5月10日時点で67個の系外惑星

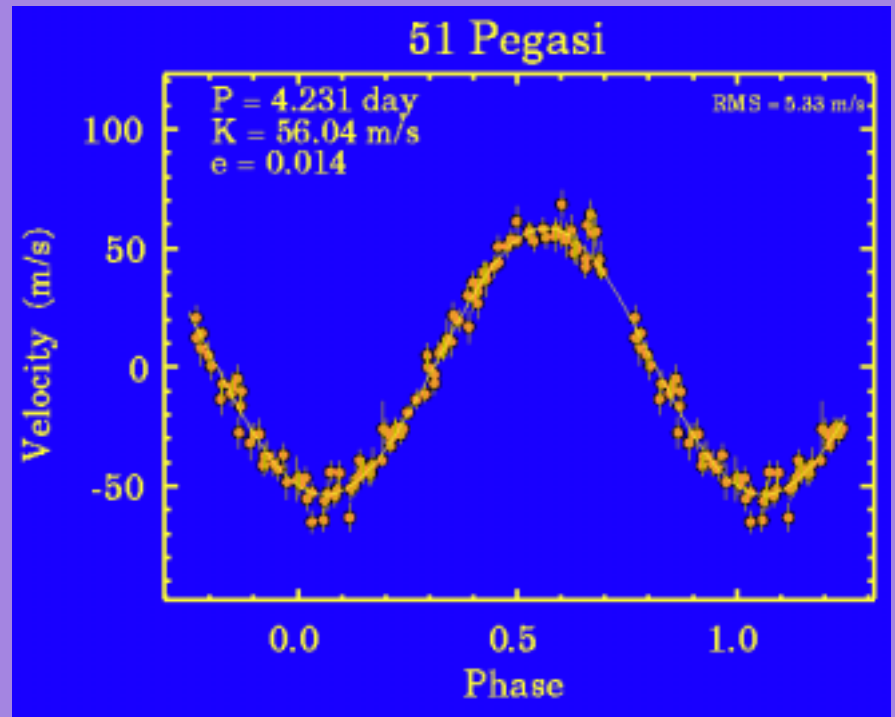
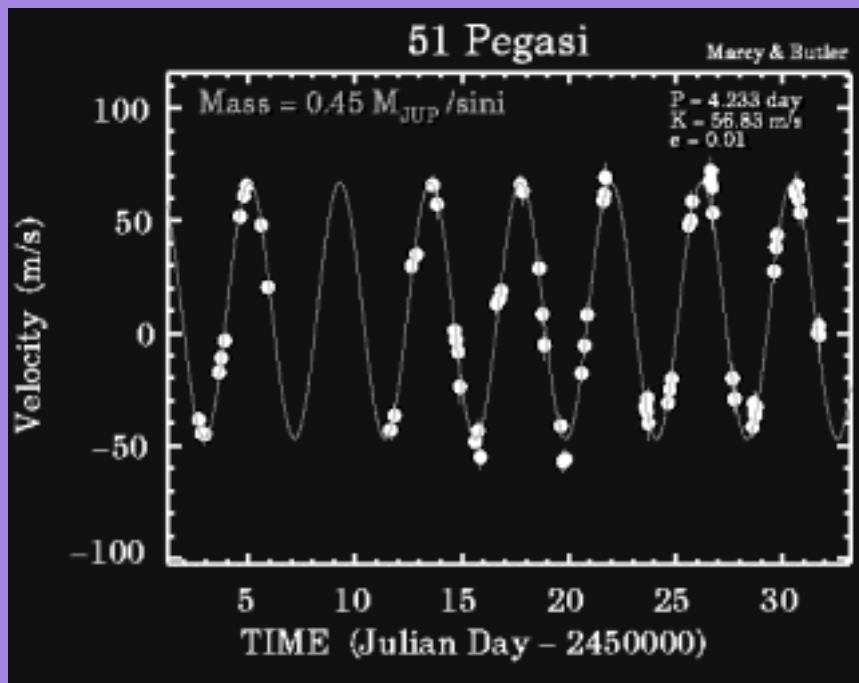
PSR1257+12: 3 planets around the pulsar

- 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?)



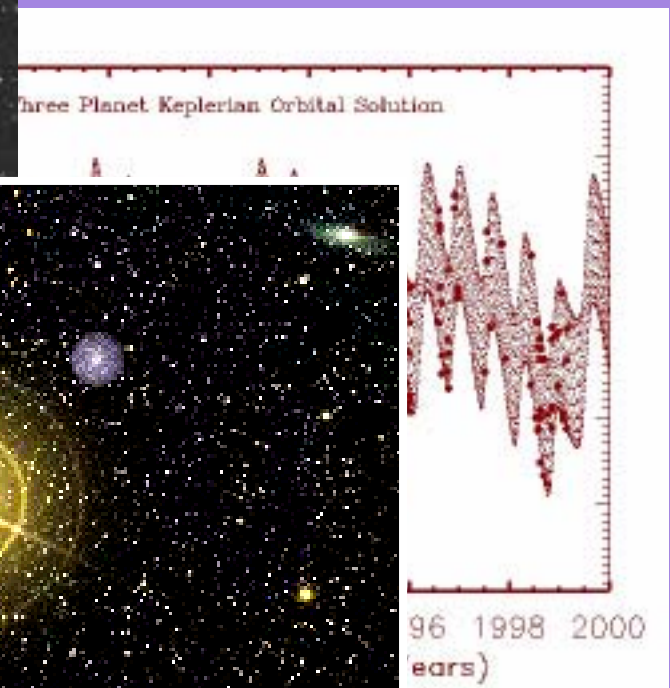
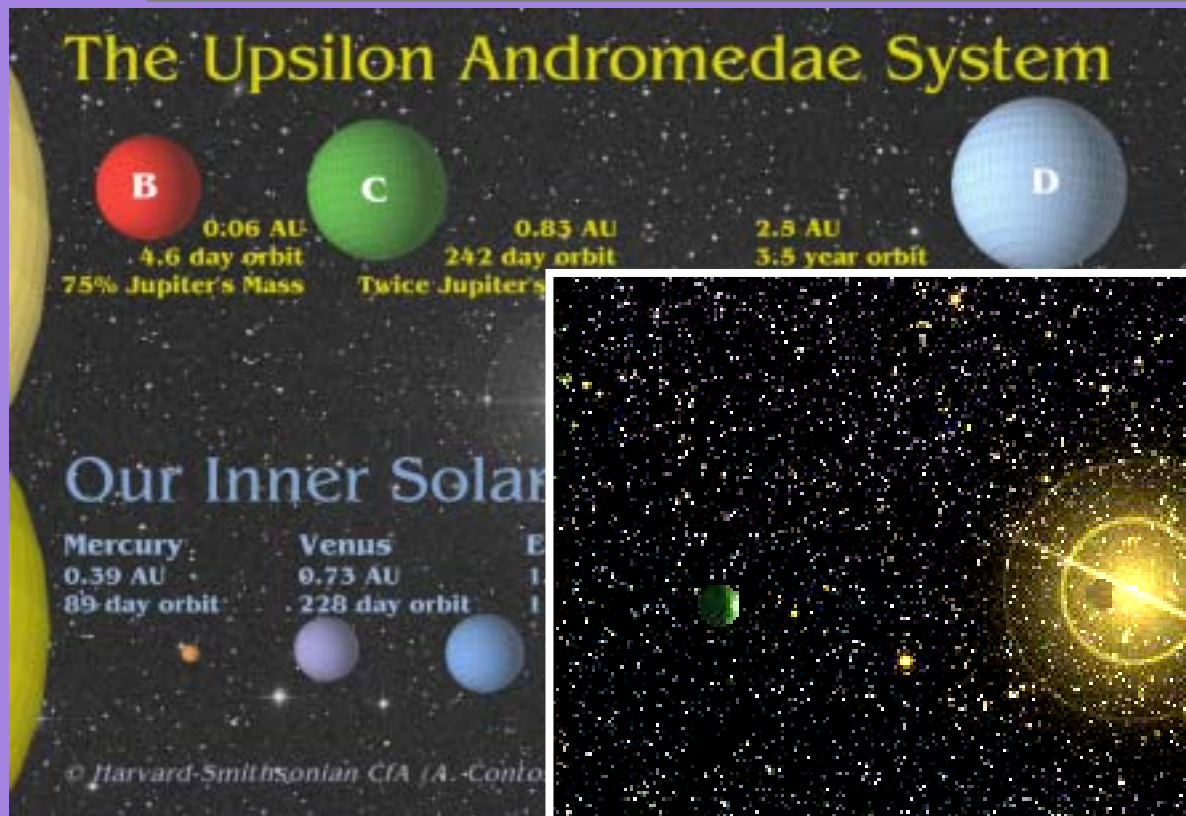
51 Pegasi b: 主系列星の周りの惑星

- 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)



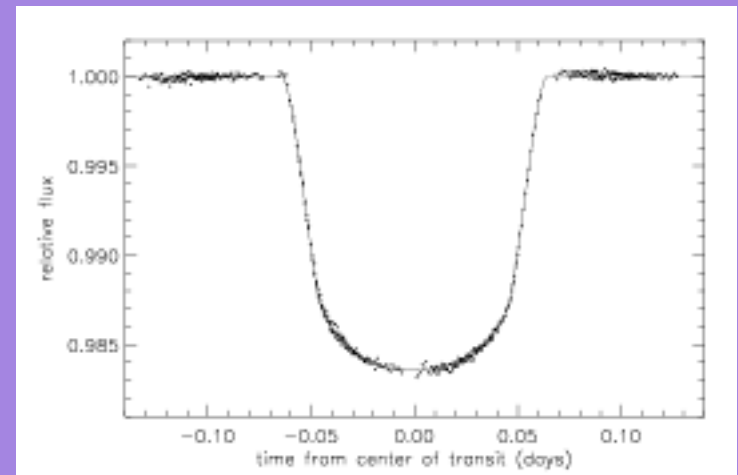
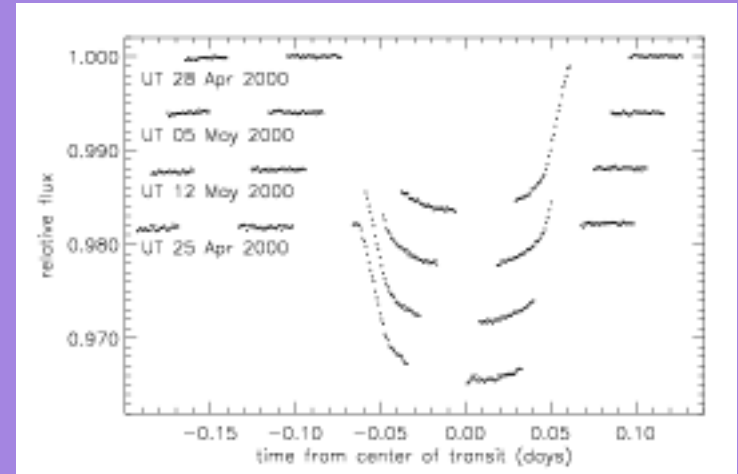
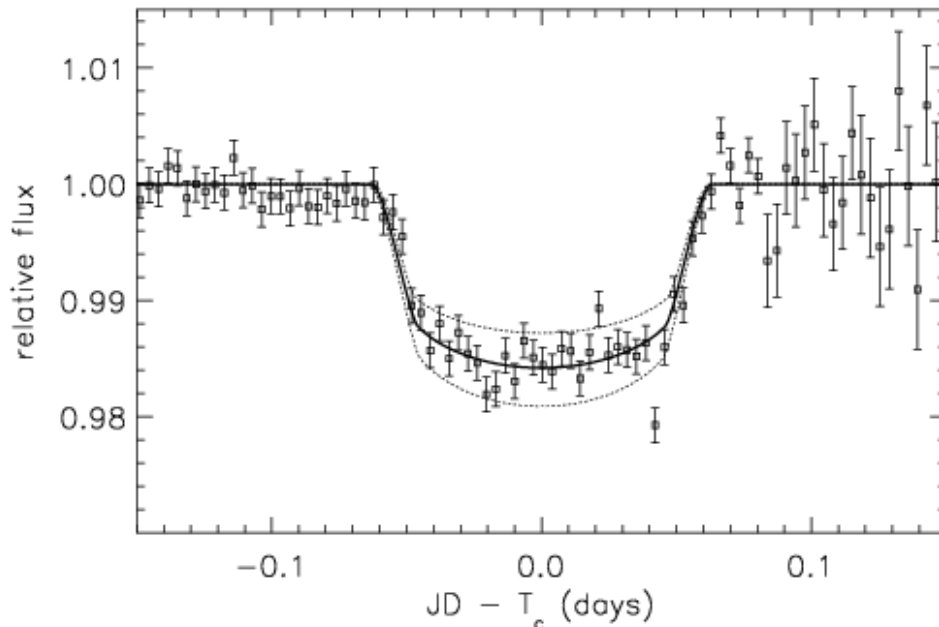
And: 3 planets around the star

- 主系列星に対して初めての惑星系の発見
(Butler, Marcy & Fischer 1999)



HD209458の食の観測

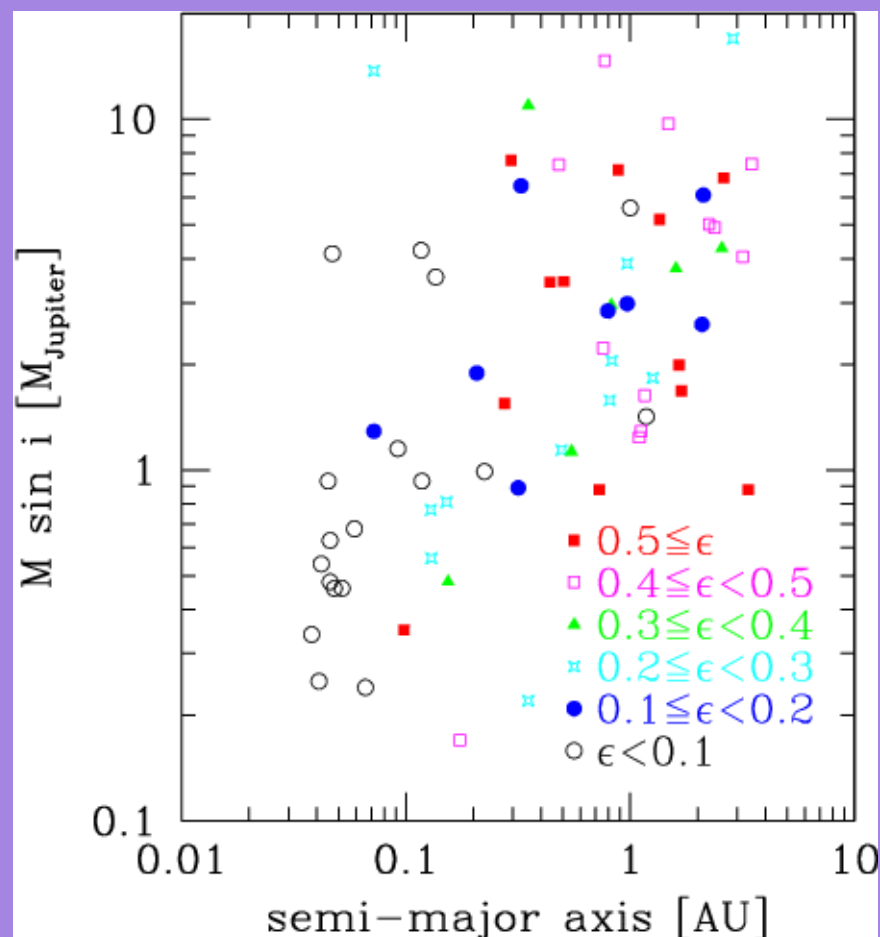
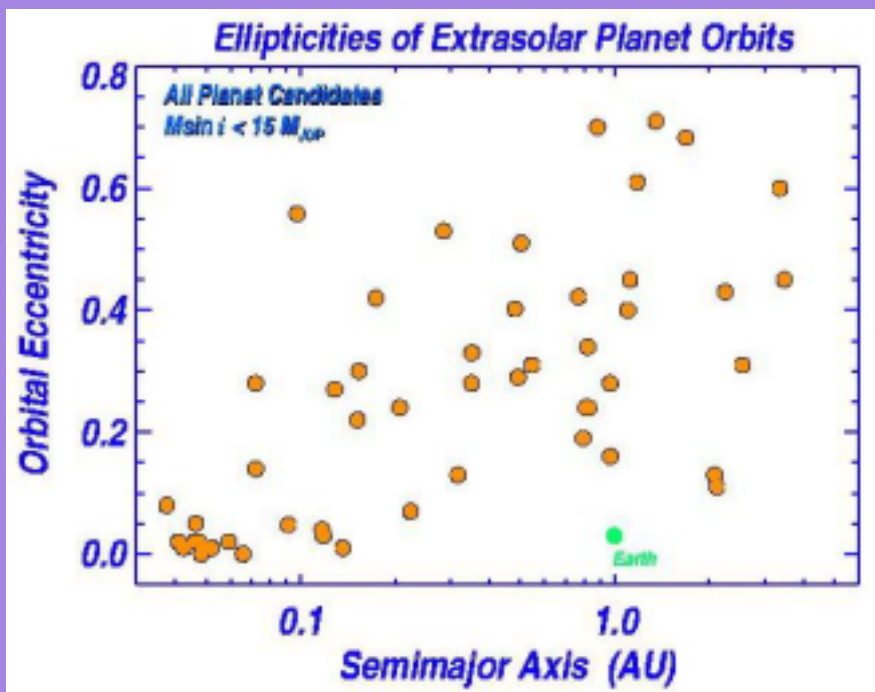
- 速度変動のデータに合わせて惑星の食を初めて検出 (Charbonneau et al. 2000, Henry et al. 2000)



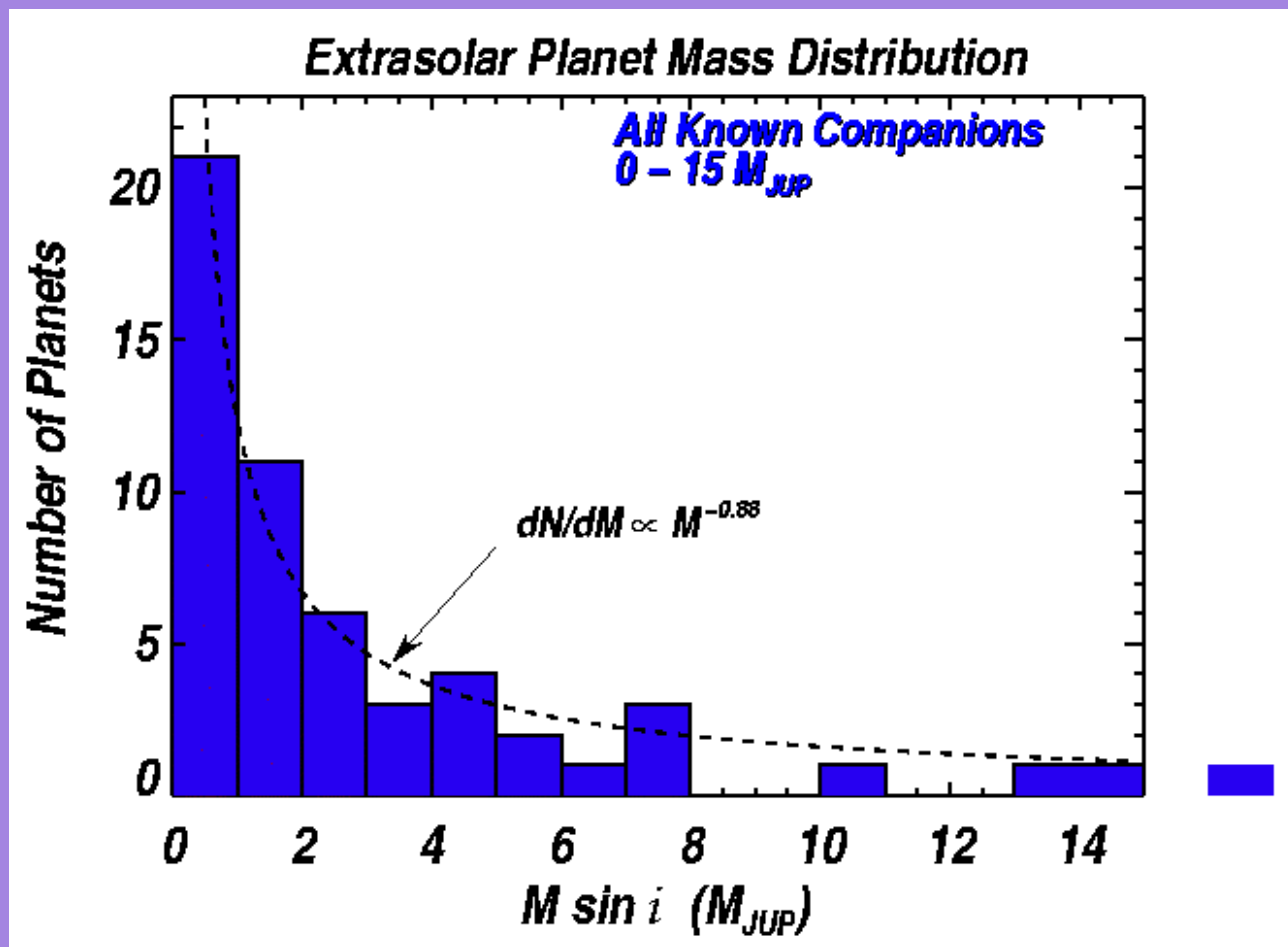
Brown et al. (2001)

発見された 系外惑星 一覧

- 発見ラッシュ(2001年4月末で67個)
- 軌道半径が小さく、離心率が大きいものが多い
- ほぼ木星程度の質量



検出された惑星の質量関数

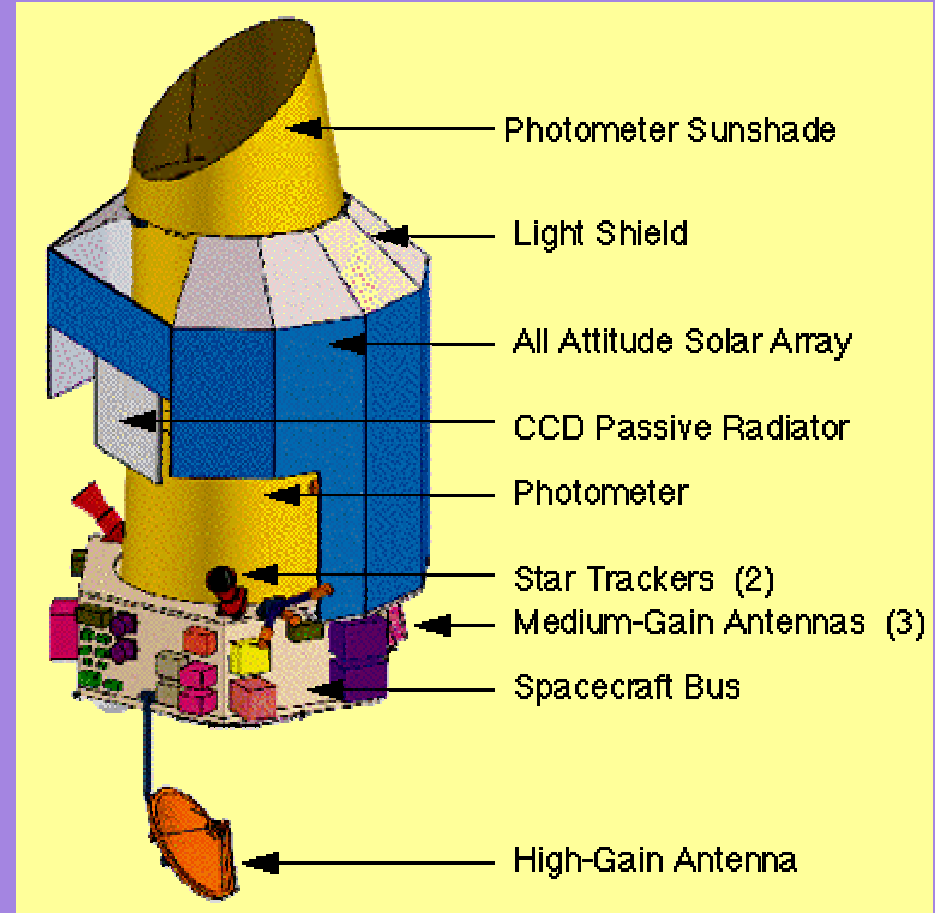
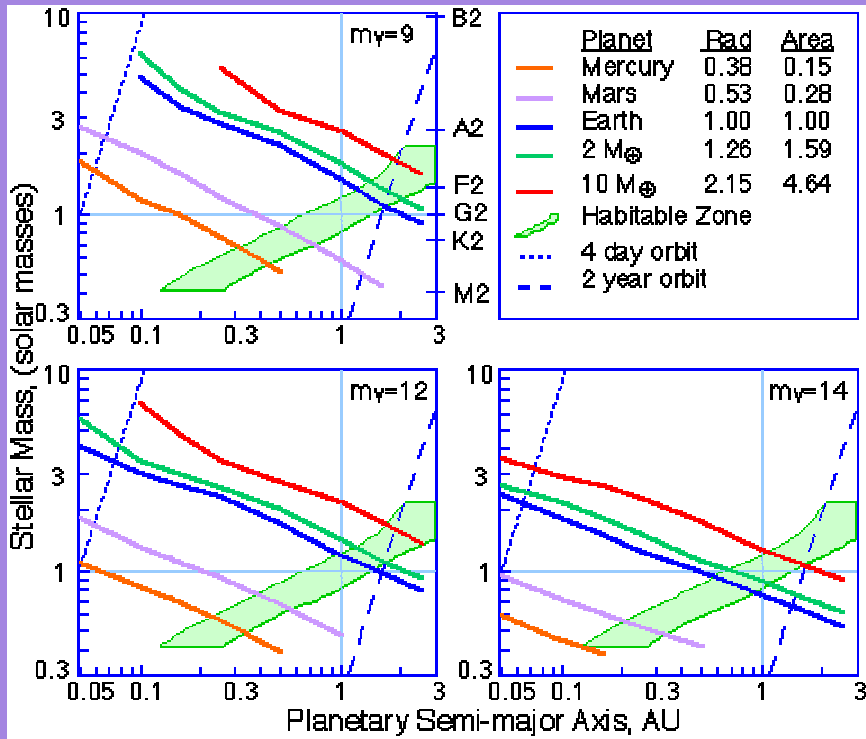


<http://exoplanets.org/>

Marcy, Butler, Fischer & Vogt (2000)

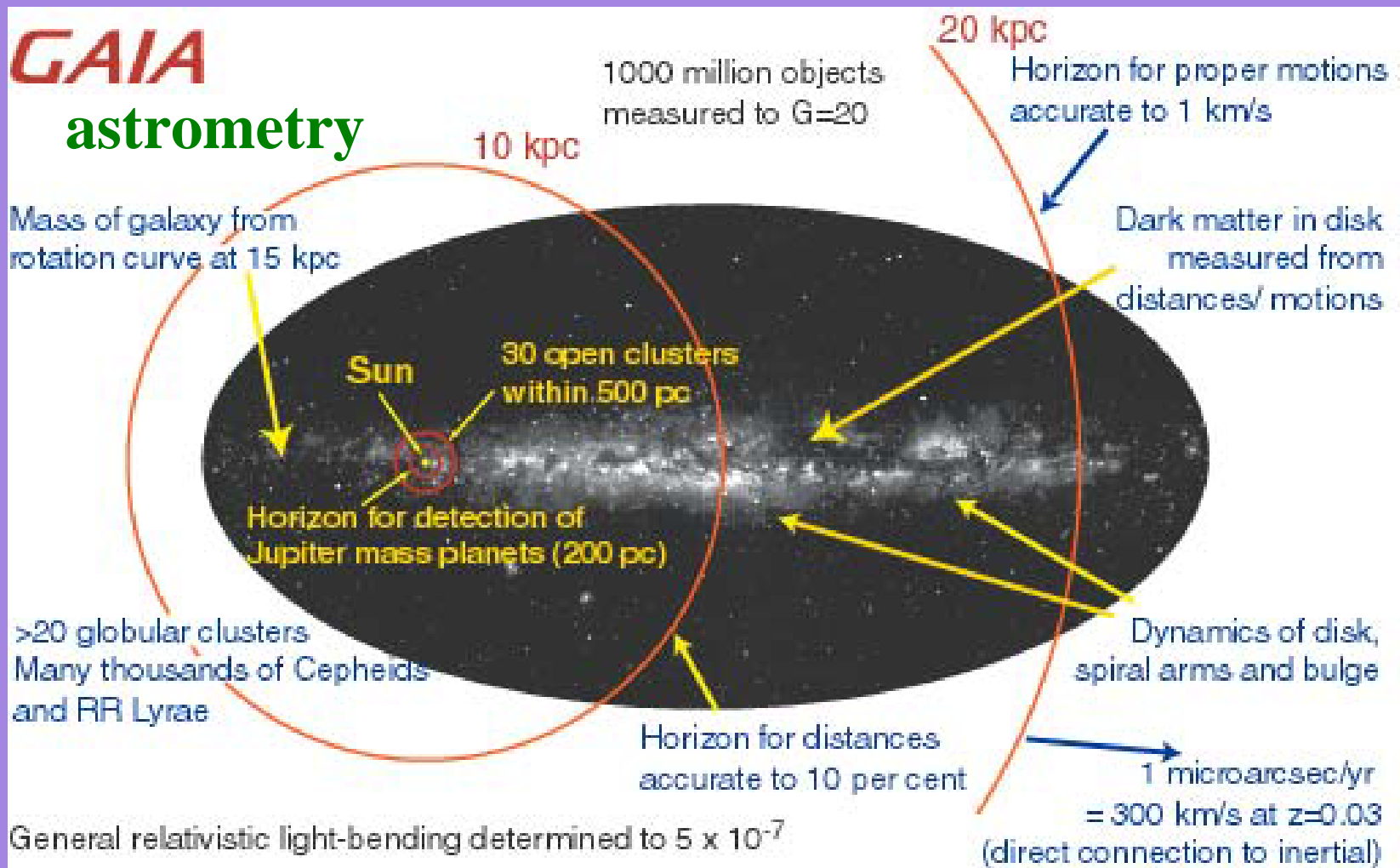
Kepler (NASA:launch 2005)

differential photometry



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

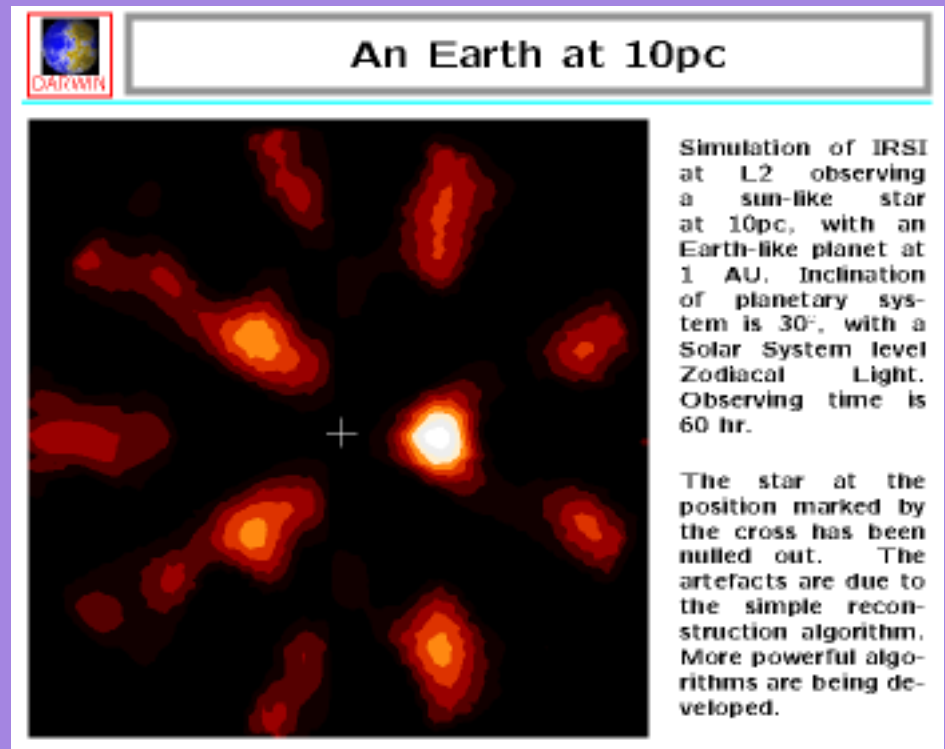
GAIA (ESA: launch 2008-2013)



Darwin(ESA:launch after 2015)

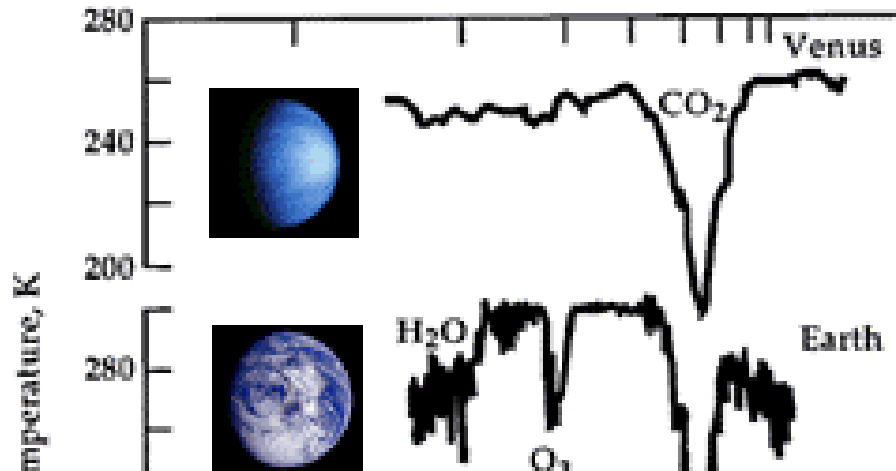


infra-red space interferometry:
imaging and spectroscopy



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

まとめと展望



見の時代はすでに終

“characterization”
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CO₂吸収帯 大気？
- O₃吸収帯 大量の酸素 生物によって生成？
- H₂O吸収帯 海の存在？

論語 卷第一 學而第一章

中国の大思想家・大教育家、孔子様は紀元前551年(今から約2550年前)に、中国山東省曲阜でお生まれになりました。その教えである儒教は、歴代の中国の皇帝及び国民に大きな影響を与え、中国のみならず、広くアジア全体に広まりました。

子曰、學而時習之、不亦說乎、有朋自遠方來、不亦樂乎、人不知而不愠、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」。

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
...		

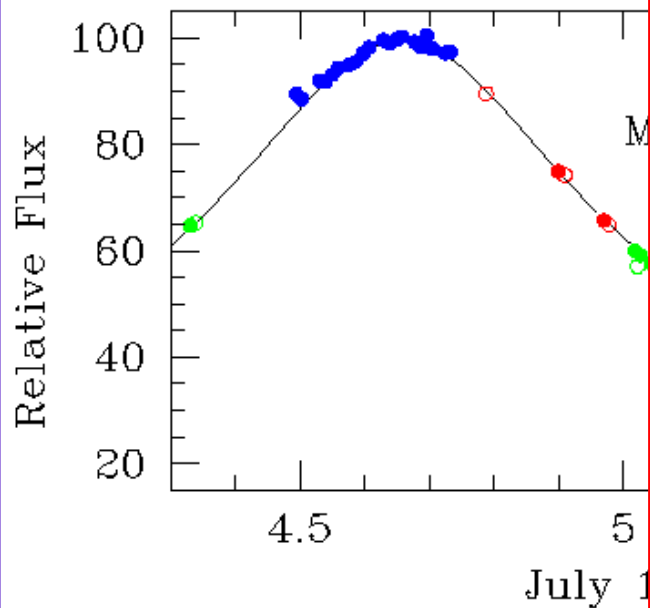
宇宙論研究はまだ始まったばかり！

重力マイクロレンズ光度曲線

- マイクロレンズの光度曲線のanomalyを惑星による摂動として解釈する
- 軌道要素は決まらない
- 繰り返し観測できず、再現性が不明

候補	質量	軌道長半径
94-BLG-4	$5M_{\text{木星}}$	1 AU
95-BLG-3	$5M_{\text{木星}}$	(5-10) AU
97-BLG-41	$3M_{\text{木星}}$	7 AU
98-BLG-35	$(0.4-1.5) M_{\text{地球}}$	1.5 or 2.3 AU

98-BLG-35 の例



現在のところ、マイクロレンズ光度曲線から惑星を示唆すると主張されているデータの解釈は微妙

