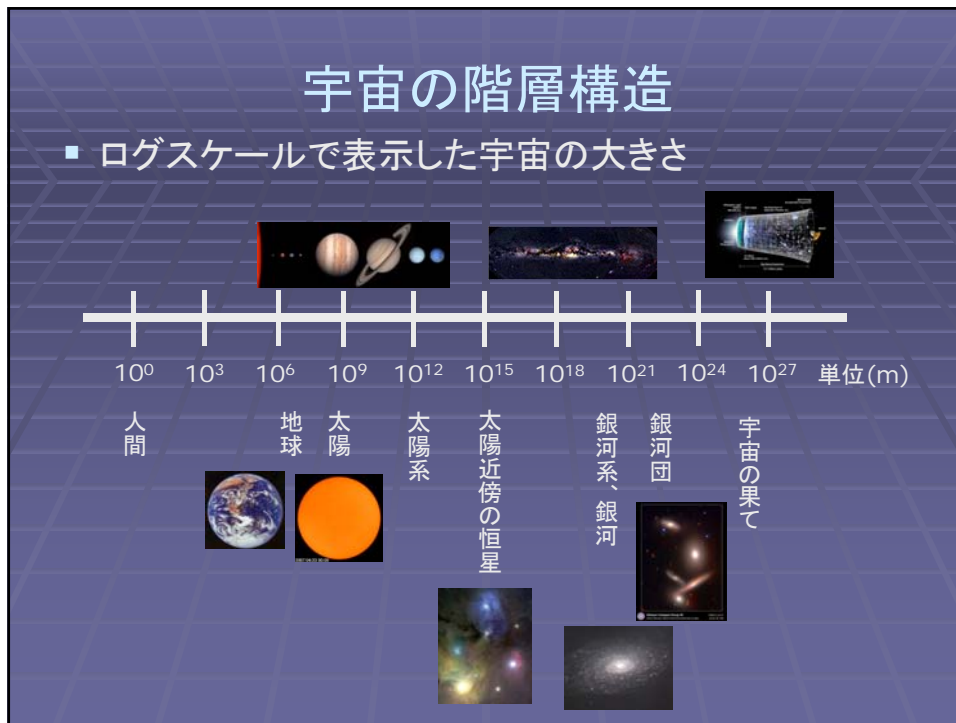


宇宙科学II（電波天文学？）  
第9回

太陽系外惑星

前回の復習



## 白色矮星

■ 太陽質量の8倍程度までの星は、最後に炭素のコアが残り、惑星状星雲を経て白色矮星となる

■ シリウスBの例

恒星の光度と等級

$$m = -2.5 \log (f / f_0)$$

$f_0$  : ベガの光度 (0等級の基準)

$\Delta m = +5$  等級で明るさ100分の1

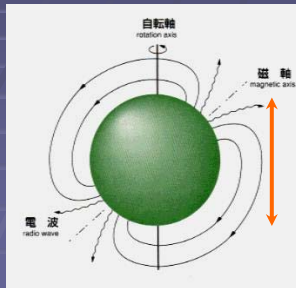
シリウスA	-1.5 等星
シリウスB	8.4 等星



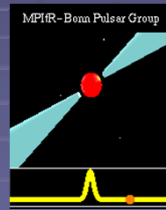
シリウスとその伴星シリウスB  
後者はシリウスより温度が高いが100万分の1の明るさしかない。シュテファンボルツマン則から半径が極めて小さく、超高密度の天体であることがわかる。

## 中性子星とパルサー

- パルサー 定期的なパルスを発する星
- 高速回転する中性子星で、超新星爆発で形成される



パルサー(中性子星)の模式図



かに星雲 : 1054年に出現した超新星の残骸。この中心にもパルサーが見つかっている

## 連星パルサーと重力波

- 連星パルサーPSR1913+16の発見(ハルス、テイラー)
- 公転周期がわずか7.7時間
- 公転周期の変動から重力波放出を間接的に確認。

PSR 1913+16の模式図



公転周期はたったの7.7時間  
2天体間は70万~350万km



アレシボ望遠鏡

## 太陽系外惑星

### 太陽系外惑星探査

- 太陽系のような惑星系は普遍的に存在するか？
  - 人類の根源にかかわる現代天文学の重要課題
- 1990年代に最初の系外惑星が発見され、2011年までに500個を超える系外惑星が知られている。さらに候補は数千個ある。
- その多くは、太陽系とかけ離れた惑星系！



太陽系

## 太陽系のおさらい

- 太陽系の惑星は、様々な種類がある
  - 岩石惑星(水、金、地、火)
  - 巨大ガス惑星(木、土)
  - 氷惑星(天、海)



生命誕生に必要な条件 — 海の存在

- 岩石惑星
- 液体の水が存在する温度にある (主星からの適度な距離)

## 最初の惑星検出: パルサー一周惑星!

- 最初に見つかった太陽系外惑星
- PSR 1257+12, 周期 6 msのパルサー (Wolszczan et al.1992)

### A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+12

A. Wolszczan\* & D. A. Frail†

\* National Astronomy and Ionosphere Center, Arecibo Observatory, Arecibo, Puerto Rico 00613, USA

† National Radio Astronomy Observatory, Socorro, New Mexico 87801, USA

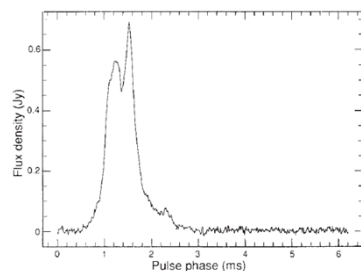
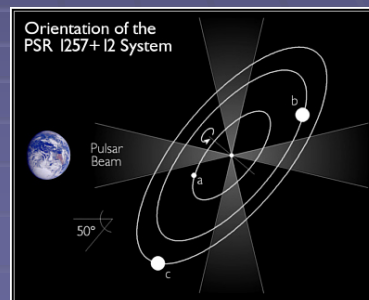
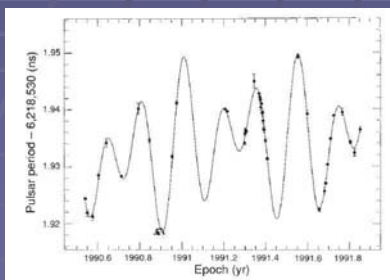


FIG. 1. The average pulse profile of PSR1257+12 at 430 MHz. The effective time resolution is  $\sim 12 \mu\text{s}$ .

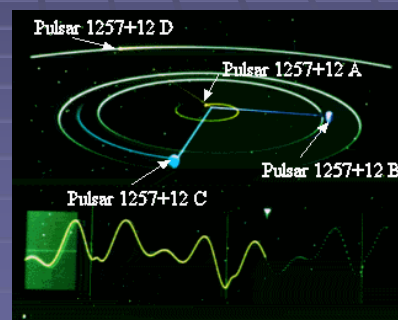
## PSR1257+12

- パルスタイミングの残差が2惑星モデルでフィットできる
- パルサーの周りに地球の3倍程度の惑星が2個存在！主星からの距離0.4 AU、周期67, 98 day
- パルサーの回転変化から光度を求め、惑星の黒体輻射温度を求めると $T \sim 670 \text{ K}$
- とても生命が存在できない(いたとしても超新星爆発でほろんだ?)



## PSR1257+12

- その後、さらに小さい3つ目の惑星(地球の2%)、彗星相当?の微小天体(地球の2000分の1)も発見されている!!



## 51 Pegasi

ペガサス座51番星

- 太陽から51光年離れた5等星(普通の星)
- Mayor & Queloz (1995) が恒星周囲の初の惑星を発見(引用回数~1400!)

### ARTICLES

#### A Jupiter-mass companion to a solar-type star

Michel Mayor & Didier Queloz

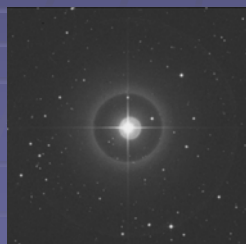
Geneva Observatory, 51 Chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

The presence of a Jupiter-mass companion to the star 51 Pegasi is inferred from observations of periodic variations in the star's radial velocity. The companion lies only about eight million kilometres from the star, which would be well inside the orbit of Mercury in our Solar System. This object might be a gas-giant planet that has migrated to this location through orbital evolution, or from the radiative stripping of a brown dwarf.

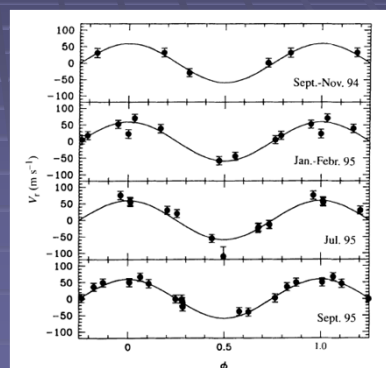


## 51 Peg a & b

- 主星は太陽と同様な恒星  
質量~1 Msun、温度~5600 K
- ドップラー法で主星のふらつきを検出
- 惑星は木星の0.5倍程度  
周期4.2日、軌道半径~0.05 AU  
太陽系と全然違う!



51 Peg



視線速度変化

## 51 Peg b : ホットジュピター

- 主星のすぐそばを回る巨大惑星(重さ~ 0.5木星質量程度)

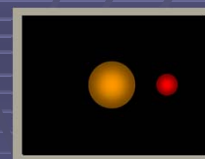
推定表面温度 ~1300 K > ホットジュピター

### 太陽系と51 Peg との比較



## 太陽系外惑星の観測手法

- パルサータイミング  
最初の系外惑星発見 (1992年~)
- ドップラー法 (主星の視線速度変化)  
恒星周囲の最初の惑星発見 (1995年~)
- トランジット法 (惑星による食、1999年~)
- 直接撮像法 (2004年~)
- 重力マイクロレンズ法 (2005年~)



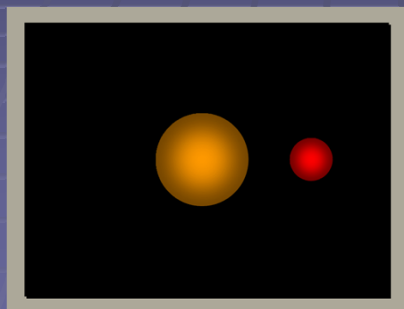
これまでは、ドップラー法による発見が最も多かった(数100個超)が、ケプラー衛星によってトランジット法が格段に増加。それ以外は合計数10例程度



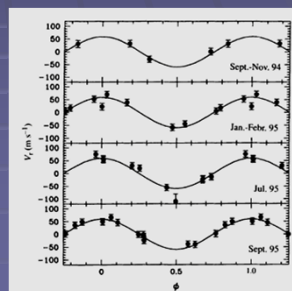
## ドップラー法

- 最も発見数が多いのは、視線速度法  
惑星の公転の影響による、主星のふらつきを観測  
(ドップラー効果)

51 Pegをはじめ、多くの惑星はこの方法による



惑星の公転による主星のふらつき



51 Pegの視線速度の変化

## ドップラー速度の期待値

- 主星は主星と惑星の重心のまわりを動く  
円軌道を考え、 $M_p \ll M_*$ とすると主星のふらつき

速度 $V^*$ は

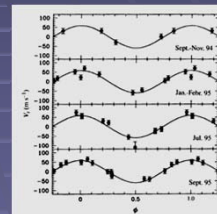
$$V_* \sim M_p/M_* \times V_p$$

$$V_p \sim (GM_*/r)^{1/2}$$

- 太陽系の場合、

木星： $V_p \sim 13 \text{ km/s}$ ,  $V^* \sim 13 \text{ m/s}$

地球： $V_p \sim 30 \text{ km/s}$ ,  $V^* \sim 0.1 \text{ m/s}$

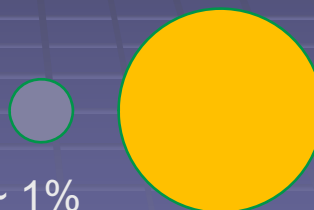


1 m/s(光速比 3億分の1)を切る超高精度が必要  
c.f. 人間が歩く速さ  $\sim 1 \text{ m/s}$  !!

## トランジット法

- 恒星の前を惑星が横切る「食」を利用。
- 主星と惑星の面積比で主星の減光割合が決まる。

- $\Delta F/F \sim R_p^2/R_s^2$



- 太陽—木星なら  $\Delta F/F \sim 1\%$
- 太陽—地球なら  $\Delta F/F \sim 0.01\%$   
観測は単純、精密な測光が必要

## 金星の日面通過

- 地球から見える太陽系内天体のトランジットの例
- 2012年6月6日に発生
- その次は2117年, 2125年
- 前回は2004年6月8日
- 前々回は1874年、1882年  
(当時、1天文単位の測定に利用された)




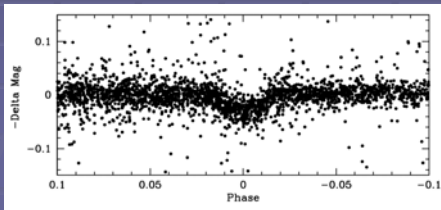
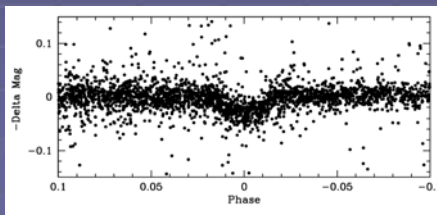
昨年5月の  
金環日食



これもトランジットの一種といえる

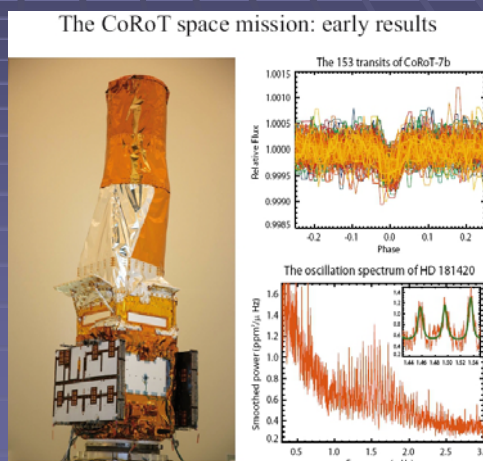
## WASP

- Wide Angle Search for Planets  
2000年～
- 11 cmのカメラ×8台で  
トランジット探査
- 50個程度の惑星を検出

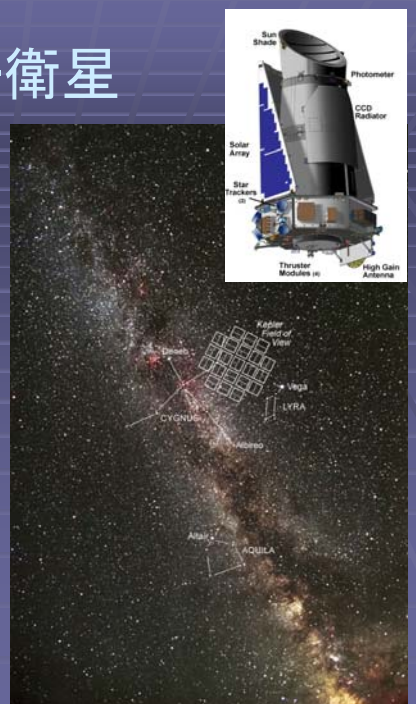
## Corot(コロー)衛星

- 欧州宇宙機関(ESA)の惑星探査衛星
- 口径30cmの光学衛星
- 惑星探査(transit)と星振学の研究
- 2006年12月打ち上げ  
2013年まで運用予定
- 現在までに~15個の惑星を発見



## ケプラー衛星

- NASAの惑星探査衛星
- 2009年3月打ち上げ  
計画寿命~3.5年
- 口径0.9m光学望遠鏡搭載
- 白鳥座方向で約15万個の星で惑星探査(transit法)
- 現在までに~数千個の惑星候補を発見



## 直接撮像法

- 天体写真上で主星と惑星をとらえる。
- 高いコントラストと解像度を必要とし、極めて難しい

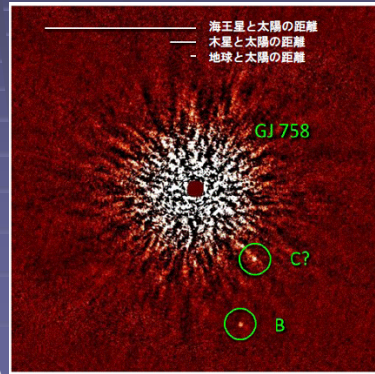
- 太陽系を10 pcの距離に置いた場合

$$m_{\text{sun}} = 4.8 \text{ mag}$$

$$m_{\text{jup}} \sim 23 \text{ mag}, \theta \sim 0.5''$$

$$m_{\text{ear}} \sim 30 \text{ mag}, \theta \sim 0.1''$$

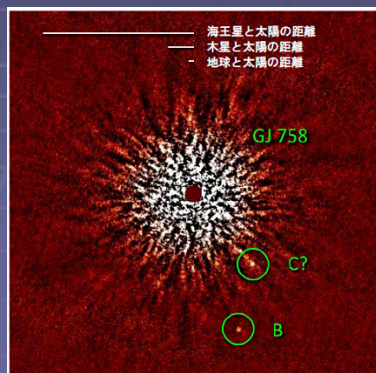
主星から離れた惑星が見やすい



すばるが見たGJ758の惑星

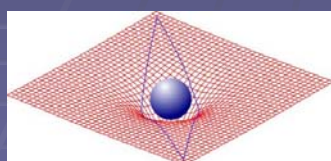
## GJ758

- 主星から30AU程度の距離に木星の数十倍の惑星(?)



## 重力マイクロレンズ法

- 星による重力レンズ  
背景の星の前を重力源が横切るとレンズとして働き、多重像が発生  
ただし、多重像の離角が小さく分解不可能  
➢ マイクロレンズ（増光が見える）

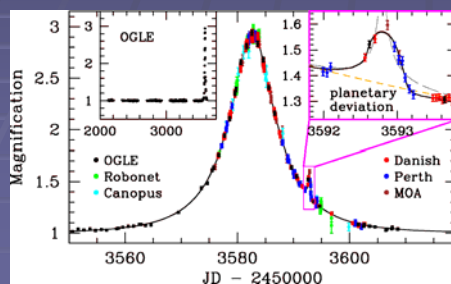


※レンズ天体(通常は恒星)の周囲に惑星があると、増光に異常がでる。

## マイクロレンズによる惑星探査例

- 長所: 太陽から遠い星で、主星から離れた惑星も探せる。
- 短所: まったくの偶然で起こる現象なので、周期性なし。追観測ができない。

OGLE-2005-BLG-390: 太陽からの距離 2万光年  
地球の5倍、主星からの距離~3 AU (2006年発見)



OGLE-2005-BLG-390の光度変化



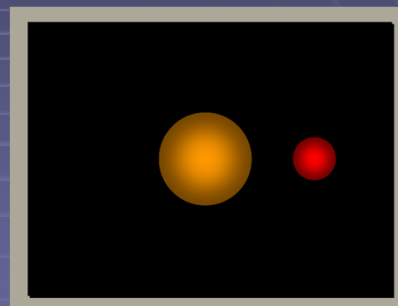
OGLE-2005-BLG-390の想像図

## 位置天文法

- 主星の揺らぎを、位置変化を使って求める方法。
- 主星から離れた惑星に感度がある。
- 太陽の場合、木星によるふらつき量 $\Delta r$ は、  

$$\Delta r \sim r \times M_p / M_*$$

$$\sim 1/200 \text{ AU}$$
- 年周視差の数百分の1の測定精度が必要。
- 位置天文法による惑星探査は今後の課題

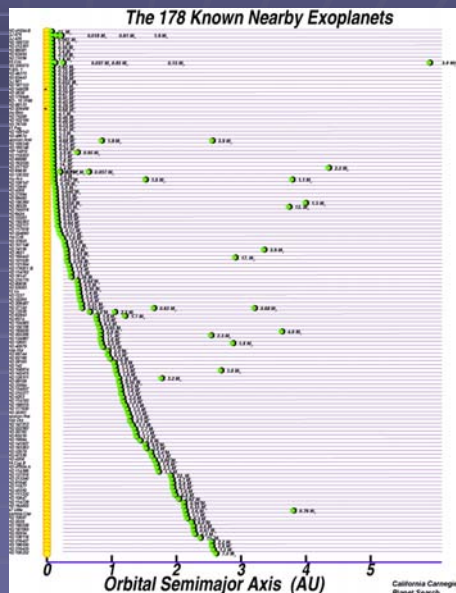


## 観測手法のまとめ

- パルサータイミング  
 数個、ただし超高精度
- ドップラー法  
 ~400個、主星に近い惑星
- トランジット法  
 ~100個、主星に近い惑星(他に数千個の候補)
- 直接撮像法(2004年~)  
 ~20個、主星から遠い惑星
- 重力マイクロレンズ法  
 ~10個、主星から数AU前後に感度
- 位置天文法 (今後)

## 系外惑星の現状

- これまでに見つかった惑星系は、太陽系と大きく異なるシステムが多い
- 木星型が主星の近傍を回るものが多い(ホットジュピター)  
ただし観測手法によるバイアスもある
- 地球型惑星の検出はまだ(あともう一步)



## 興味深い系外惑星たち

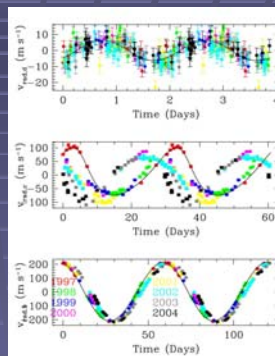


## グリーゼ 876: 3重惑星系

- GI 876 (グリーゼ876)

みずがめ座、距離15光年  
複数の惑星が存在

周期60日、木星サイズ  
周期30日、木星サイズ  
周期2日、地球の6倍、  
岩石型、ただし、約300°C !



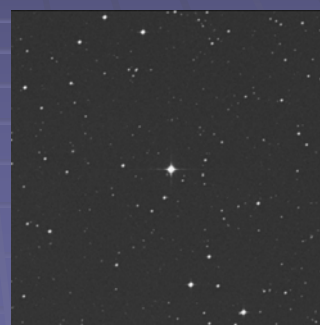
GI 876cの視線速度変化



GI 876d の想像図

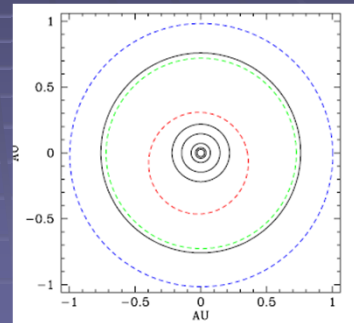
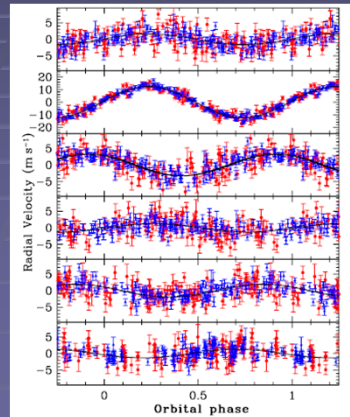
## グリーゼ 581

- 太陽から20光年にある10.5等星
- 質量  $\sim 0.3 M_{\text{sun}}$ 、半径  $\sim 0.3 R_{\text{sun}}$
- 表面温度 3500 K
- 太陽よりも軽くて暗い星



## Gl581の観測

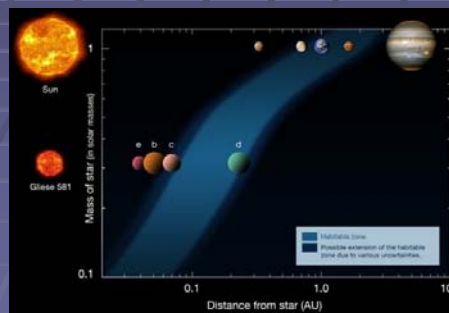
- ドップラー法により、周期5日～430日の惑星を6個確認(多重惑星の最多記録)



太陽系との軌道比較  
(Vogt+2010)

## グリーゼ581

- 質量は地球の数倍から20倍の質量
- 一部はハビタブルゾーンに？



GJ581のハビタブルゾーン  
と惑星配置

### Gliese 581 Planetary System



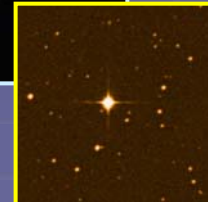
惑星の模式図

## GI 581c — 生命が誕生可能な惑星？

- GI 581cは生命の誕生可能な条件を有する？

質量 地球の5倍程度  
 軌道 0.073 AU  
 公転周期 13 日  
 表面重力 地球の約2倍  
 表面温度 0°C~100°C？

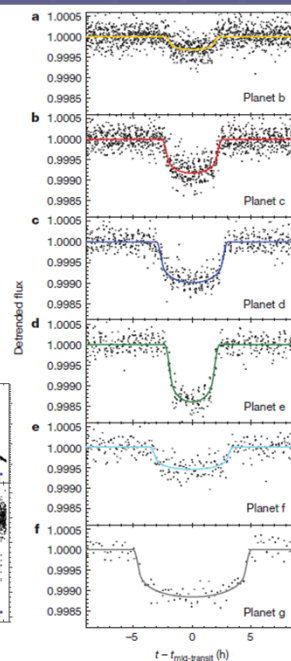
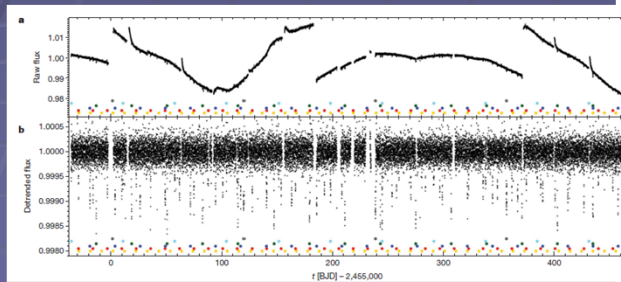
ただし、詳細はまだ未確定



GI 581の想像図(上)  
と写真(左)

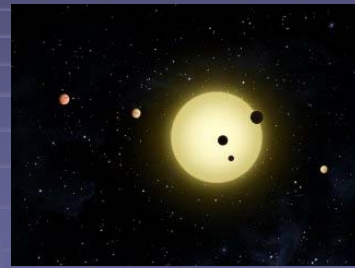
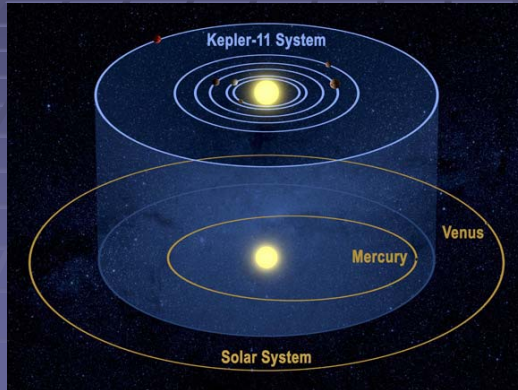
## Kepler-11

- トランジットで見つかった  
多重惑星系(2011年2月)
- 惑星数6個！(GI581と  
ならんで現在最多)



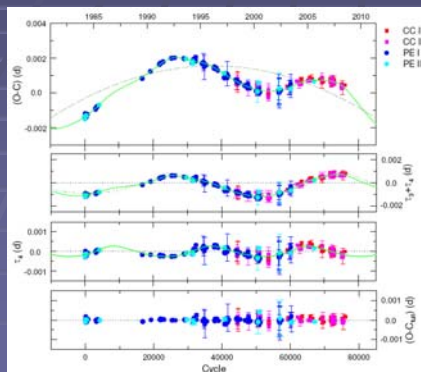
## Kepler 11

- コンパクトな領域に多数の惑星が存在!!
- 太陽系と大きく異なる多重惑星系を提示



## HW Vir

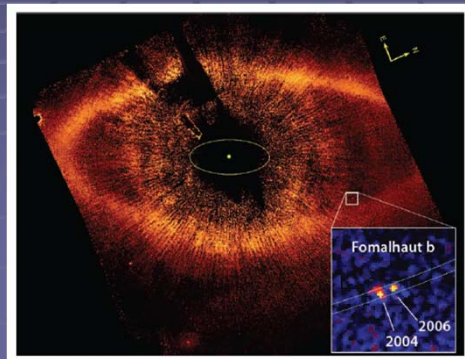
- 連星(2つの太陽)を巡る惑星系(2個)
- 食連星のタイミング観測で検出



Lee+(2010)

## フォーマルハウト b

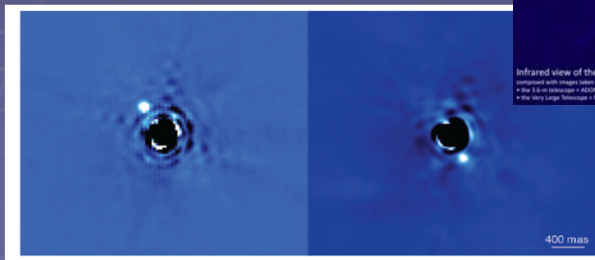
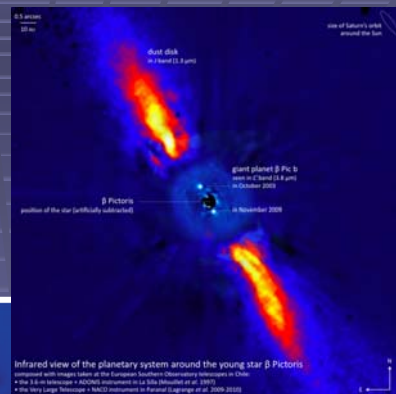
- みなみのうお座の1等星、距離25光年
- 質量は太陽の約2倍
- 主星から115AUに木星の数倍の惑星(直接撮像)。
- 周期~870年



HSTの画像  
Kalas+2007

## がが座ベータ星

- がが座ベータ星  
恒星周囲のガス円盤で有名  
(星形成の名残、惑星の材料)
- 惑星あり、周期17年
- 直近の惑星形成を見ている？



Lagrange  
2010

2003

2009

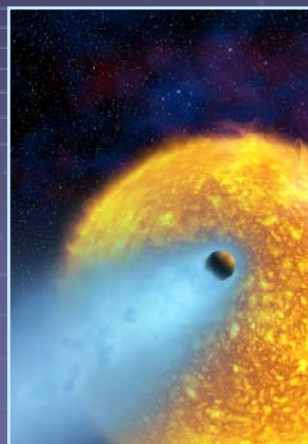
## HD209458 と惑星オシリス

- HD209458 (ペガサス座) にあるホットジュピター

質量 0.7 木星質量  
公転半径 0.045 AU  
周期 3.5日  
表面温度 約1200°C

大気が存在が初めて確認された。  
(ナトリウム、酸素、炭素etc)

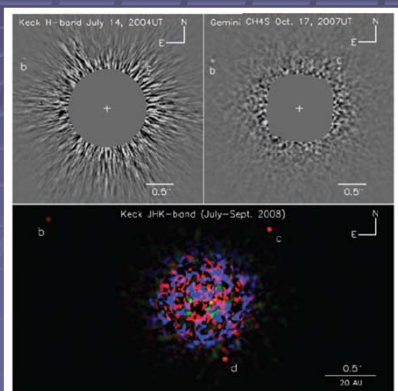
しかし、温度が高いため  
生命の存在は難しい。



HD209458とオシリスの想像図

## HR8799

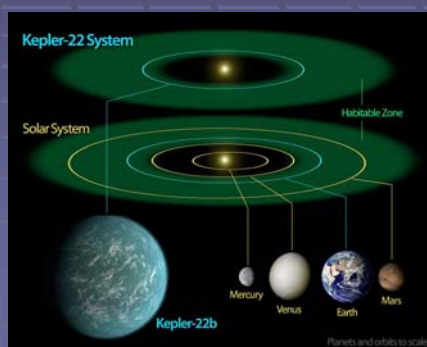
- 直接撮像による複数の惑星系
- 2010年、VLTによって初めて惑星の光が分光された。惑星の性質を直接調べる第一歩!



## ケプラー22b

- 地球の2.4倍程度の半径を持つ惑星
- 主星は太陽程度の恒星
- ハビタブルゾーン内にある(推定温度~295K)
- 2011年12月確認

海があるかも？  
 生命があるかも？  
 宇宙人がいるかも？  
 (可能性は0でない)



## 金属量と惑星の関係

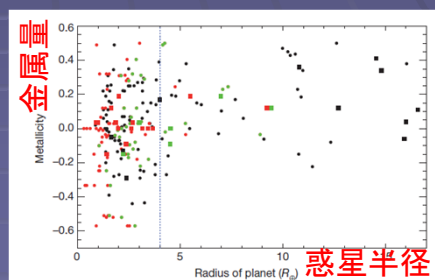
### LETTER

doi:10.1038/nature11121

#### An abundance of small exoplanets around stars with a wide range of metallicities

Lars A. Buchhave<sup>1,2</sup>, David W. Latham<sup>3</sup>, Anders Johansen<sup>4</sup>, Martin Bizzarro<sup>2</sup>, Guillermo Torres<sup>3</sup>, Jason F. Rowe<sup>5</sup>,

- Kepler衛星で見つけた226個の惑星の主星の金属量を計測
- 木星型惑星は金属量大きい星に多い
- 地球型惑星は場所に寄らない  
 → 銀河系の場所によっても惑星系の様子がことなる



## ケンタウルス座アルファ

地球から最も近い恒星系(3重連星系)

B星に惑星の存在を確認



Nature (October 2012)

### ARTICLE

doi:10.1038/nature11572

### An Earth-mass planet orbiting $\alpha$ Centauri B

Xavier Dumusque<sup>1,2</sup>, Francesco Pepe<sup>1</sup>, Christophe Lovis<sup>3</sup>, Damien Ségransan<sup>1</sup>, Johannes Sahlmann<sup>1</sup>, Willy Benz<sup>3</sup>, François Bouchy<sup>1,4</sup>, Michel Mayor<sup>1</sup>, Didier Queloz<sup>2</sup>, Nuno Santos<sup>2,5</sup> & Stéphane Udry<sup>1</sup>

## 系外惑星研究の将来

- 地球型惑星の検出
- ハビタブルゾーンの惑星検出
- 惑星大気検出
- バイオマーカー検出

...

そして、

宇宙生物学？

SETI? ...



## SETIの例: ATA (Allen Telescope Array)

- SETI (地球外知的生命体探査)用の望遠鏡
- 米国のSETI研究所とUCバークレーが運用主体
- 口径6mのアンテナを350台建設し、地球外知的生命体からの電波を捉えることを目的とする  
(現在建設中、一部稼動中)
- 名前は寄付者のPaul Allen (Microsoft設立者)にちなむ



成果はもちろんまだ。しかし、本気でSETIをやっている！