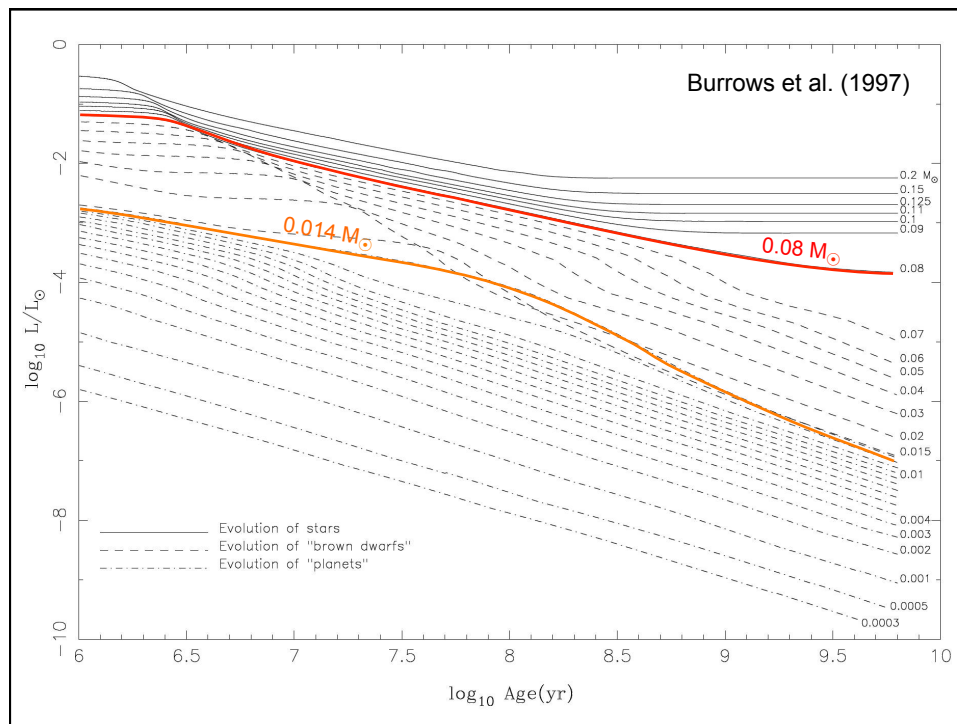


# 太陽系外惑星の観測

## 惑星とは何か？

単独の星	質 量	中心核での核融合反応
恒星	太陽の8%以上 木星の80倍以上	水素の熱核融合反応が起こる (中心温度が1千万度以上になる)
褐色矮星	太陽の1.3%から8% 木星の13倍以上80 倍以下	水素の熱核融合反応は起こらない。 重水素の熱核融合反応は起こる (中心温度が100万度以上になる)
準褐色矮星 (惑星質量天体)	太陽の1.3%以下 木星の13倍以下	いかなる熱核融合反応も起きない



## 惑星とは何か？

質量が木星の13倍以下

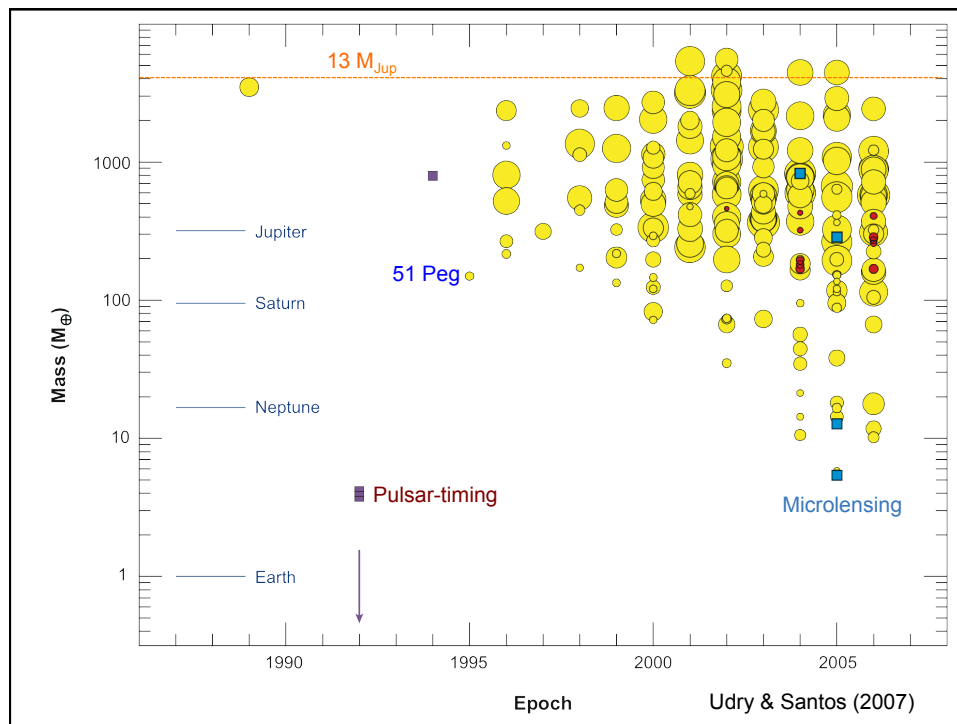
他の(恒)星のまわりを公転している

原始惑星系円盤からできる

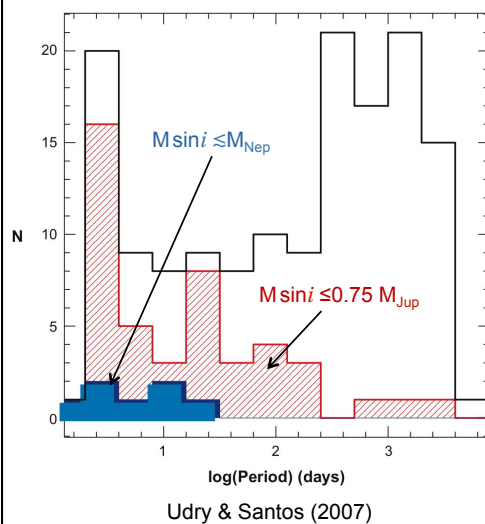
岩石の核を持つ

惑星質量天体 (浮遊惑星)

現状では、このあたりの線より上の条件を満足すれば、「惑星」と言われる

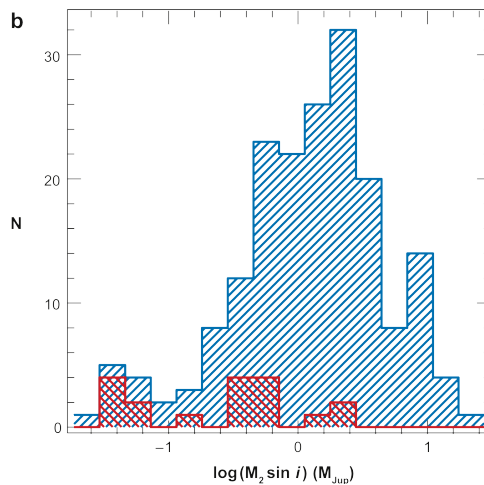


## 多様な惑星系



- 検出率: 数パーセント  
軌道半径5AU以内に $\geq 0.5 M_{\text{Jup}}$ の惑星を持つ太陽型星(FGK)の割合
- Hot Jupiter  
主星のすぐ近くを公転する熱い木星型惑星  
 $P \sim 3 \text{ days} \Rightarrow a \sim 0.05 \text{ AU} \sim 10 R_{\odot}$   
円盤外部で誕生して主星近くまで移動 (migration) し、そこで止まった?
- 多重惑星系も発見されている

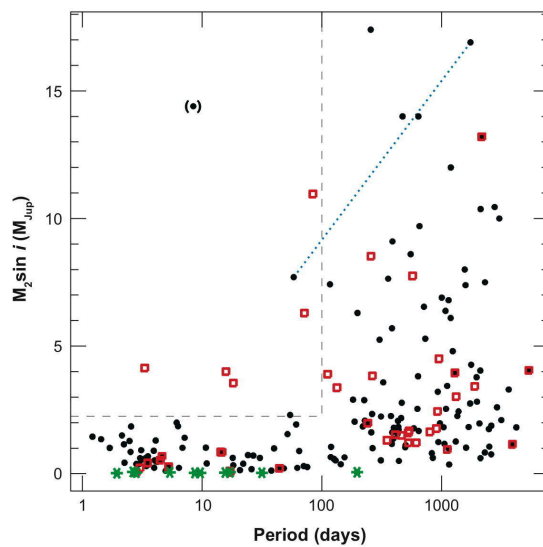
## 惑星の質量分布



Udry & Santos (2007)

- $M \sin i \geq 10 M_{\text{Jup}}$  で数が減少 => Brown Dwarf Desert  
(ただし、 $a \geq 5 \text{ AU}$  での低質量伴天体(惑星または褐色矮星)探索は、まだ十分ではない)
- 小さいMでの減少は視線速度法の検出感度による

## 質量の軌道依存性



Udry & Santos (2007)

$P \leq 100 \text{ days}$  には  $M \sin i \geq 2 M_{\text{Jup}}$  の惑星がほとんどない

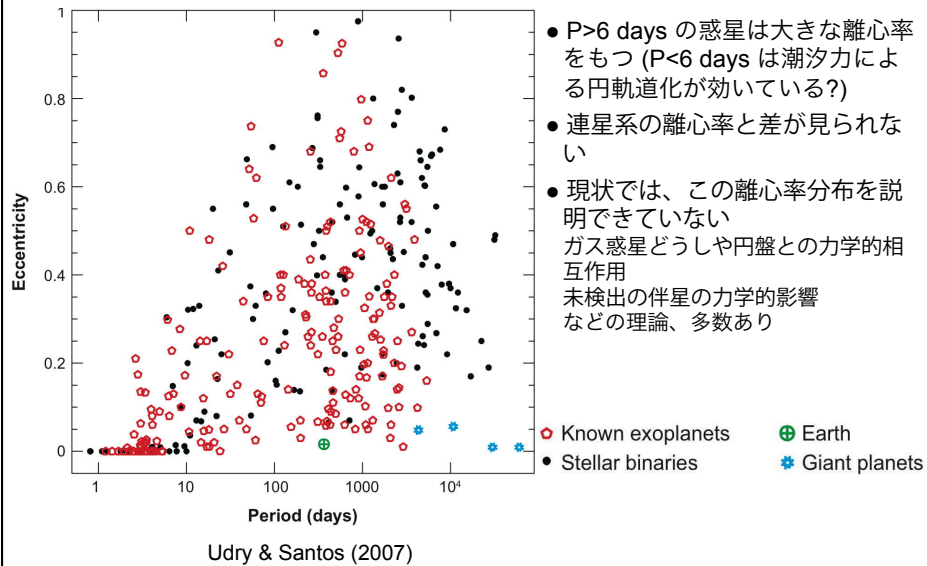
惑星移動 (Migration) の結果か?

重い惑星ほど移動しにくい。

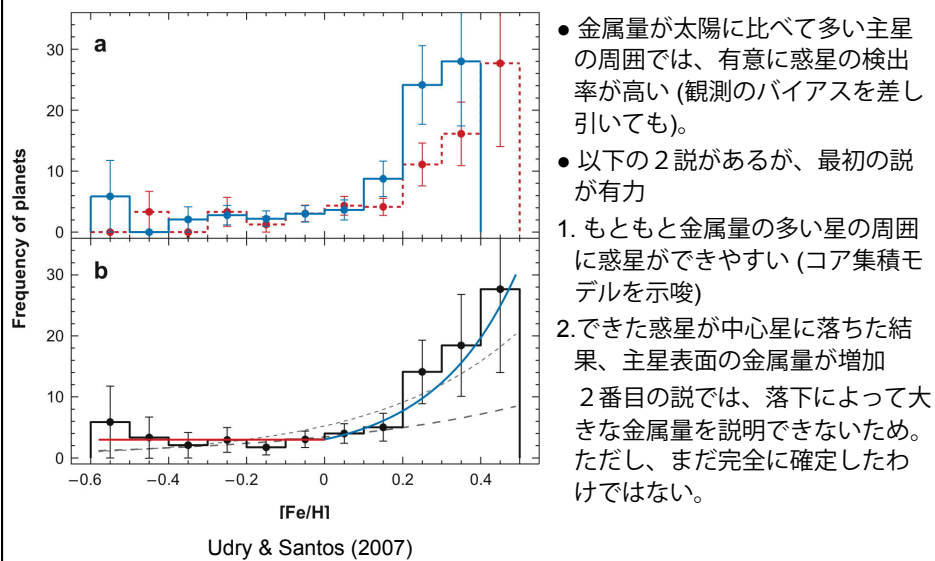
星近傍では、惑星から星への質量落下や、ガス蒸発の可能性はある。

- Planets around single stars
- Planets in binaries
- Solid planets

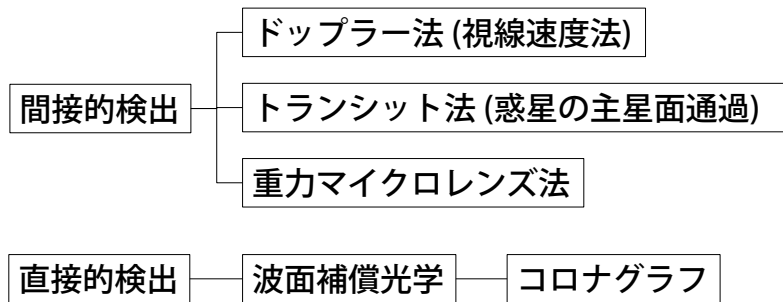
## 離心率



## 主星の金属量との関係

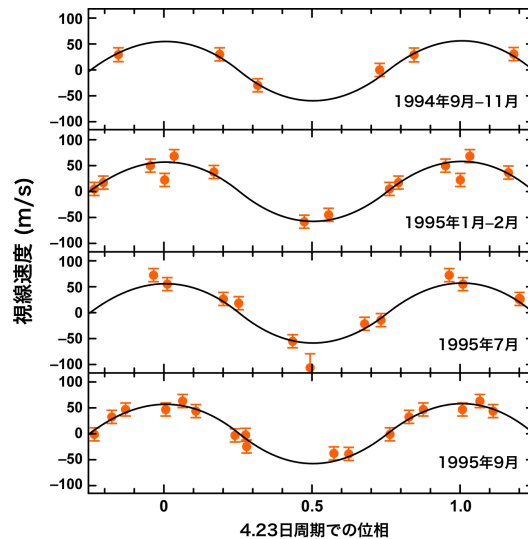


## 観測手法

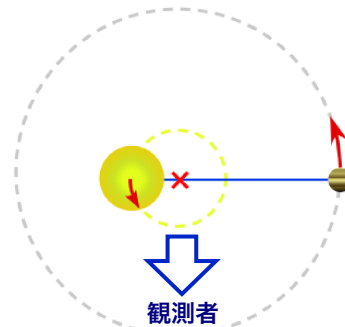


## 間接検出

## ドップラー法



51 Peg (G2IV) 方向での視線速度変化を検出



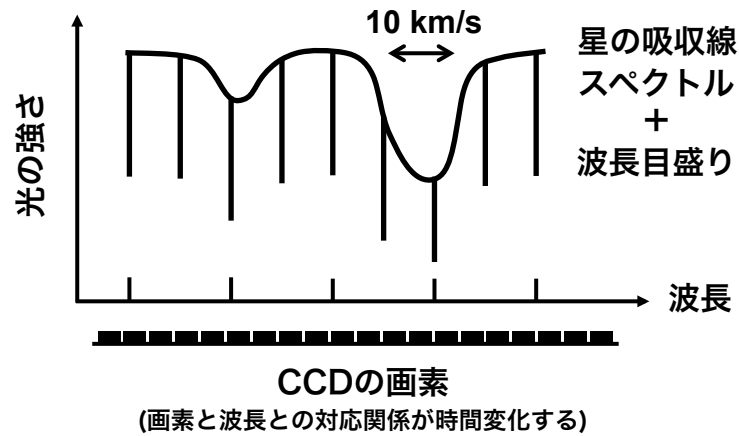
$V=56 \text{ m/s}$ ,  $M \sin i = 0.47 M_{\text{Jup}}$ ,  
 $P=4.23 \text{ d}$ ,  $a=0.05 \text{ AU}$ ,  $e=0.01$

Mayor & Queloz (1995)

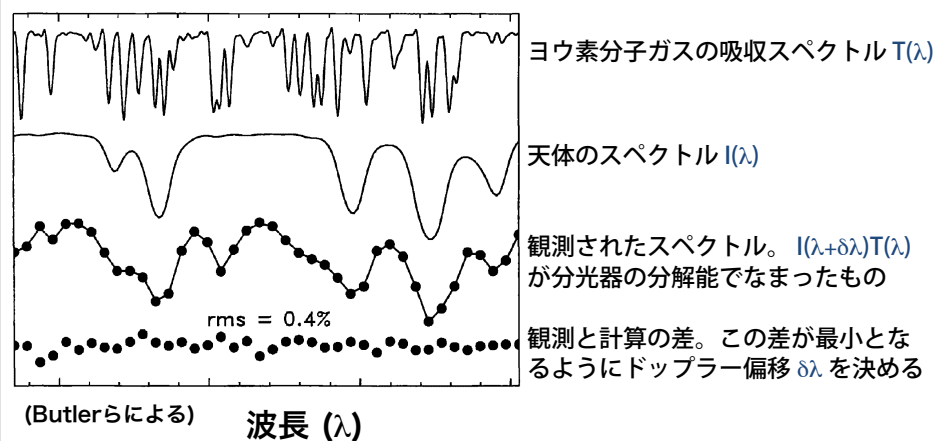
## ドップラー法

- 質量の下限( $M \sin i$ )と軌道要素(半長径 $a$ , 周期 $P$ , 離心率 $e$ , ...)が分かる
- 木星が引き起こす太陽の速度変化:  
 $13 \text{ m/s}$  ( $45 \text{ km/h}$ ) ~ 人が走るよりちょっと速いくらい  
 星のスペクトル線の幅:  $\geq 1\text{--}10 \text{ km/s}$  (数千度のガス原子の速度)  
 可視・近赤外分光器で達成可能なスペクトル分解能:  $\geq 3 \text{ km/s}$
- 波長分解能の1/1000の精度で速度変化を測定する必要がある  
 もともののスペクトル線の速度幅や、分光器の波長分解能に比べて、1000分の1程度の速度変化を、どうしたら捉えられるか?  
 SN比が非常に大きければ、波長分解能を超えて、小さな波長変化を測定できる  
 => 明るい星を観測対象とする  
 観測装置内で生じる波長目盛の時間変動は、天体のスペクトルに波長目盛そのものを埋め込むことで較正する => ヨードセル法など

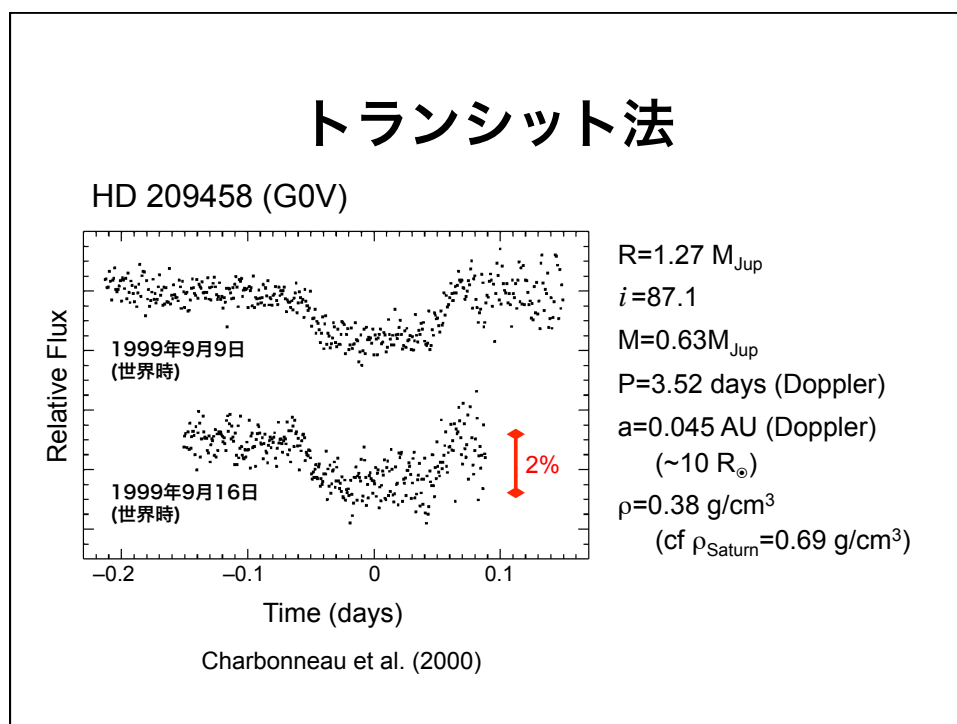
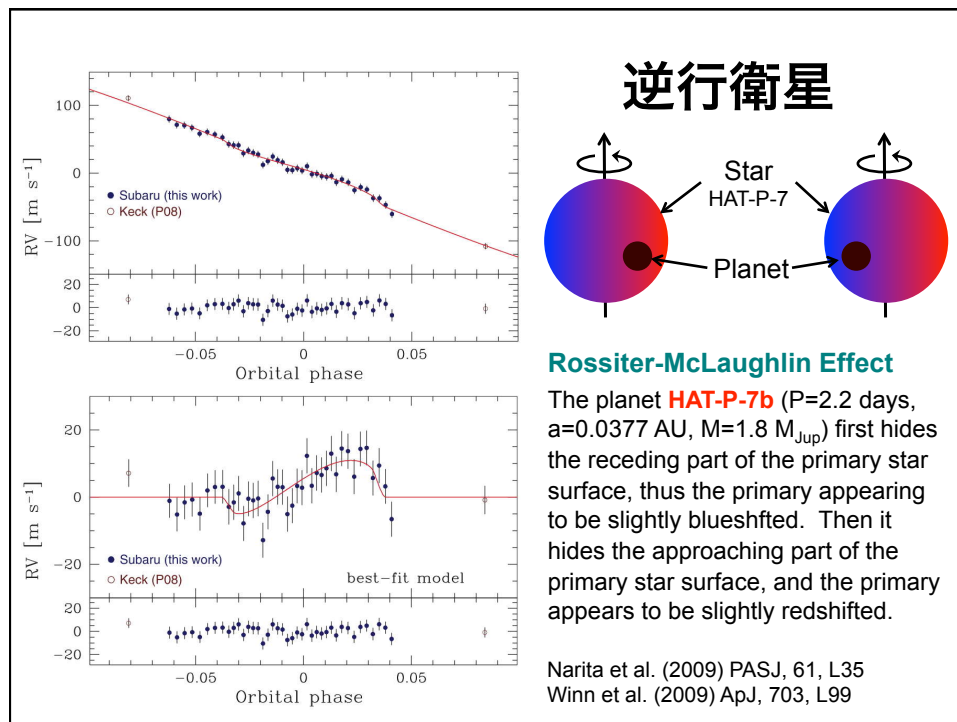
## ドップラー法（ヨードセル法）



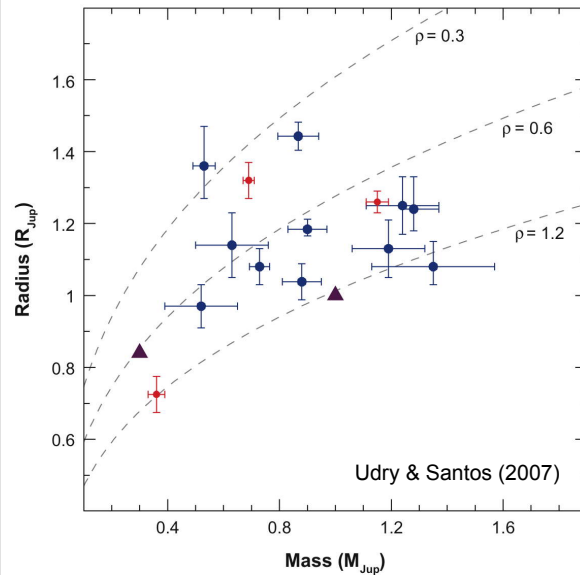
## ドップラー法（ヨードセル法）







## トランシット法



- ドップラー法と合わせれば、質量 (下限ではない) と半径が分かり、平均密度も分かる
- 半径が大きく異なる恒星どうしの連星系を検出する確率が高く、注意が必要  
=> ドップラー法による確認が必須
- ドップラー法のhot jupiters (P~3 days) に比べて、周期 (P=1-2 days) が、短いものが多い(謎)

## 重力マイクロレンズ法

$$t_E = R_E / v_t \sim \sqrt{M / M_{\text{Jup}}} \text{ (days)}$$

$$\text{where } R_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{\text{lens}}(D_{\text{source}} - D_{\text{lens}})}{D_{\text{source}}}}$$

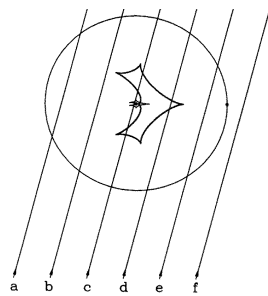


FIG. 1.—Geometry of microlensing by a binary, as seen in the sky. The primary star of  $1 M_{\odot}$  is located at the center of the figure, and the secondary of  $0.1 M_{\odot}$  or  $0.001 M_{\odot}$  is located on the right, on the Einstein ring of the primary. The radius of the ring is 1.0 mas for a source located at a distance of 8 kpc and the lens at 4 kpc. The two complicated shapes around the primary are the caustics: the larger and the smaller corresponding to the  $0.1 M_{\odot}$  and  $0.001 M_{odot}$  companions, respectively. If a source is located outside these regions, then only three microimages are formed, while a source inside them forms five microimages. The parallel straight lines indicate the trajectories of sources for which the light variations are shown in Fig. 2.

Mao & Paczyński (1991)

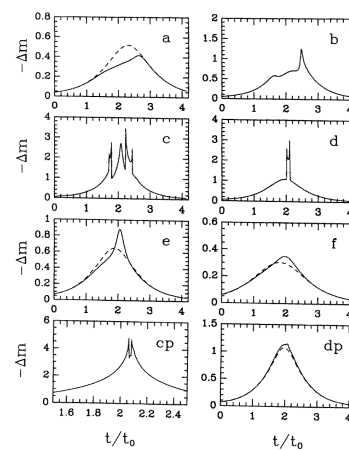
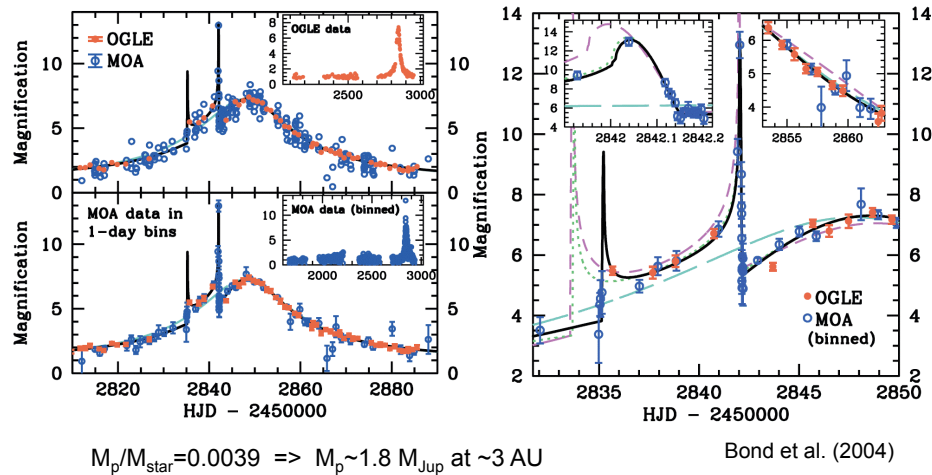


FIG. 2.—The light curves shown correspond to the six source trajectories in Fig. 1. The source is modeled as a uniform disk of radius  $R_{\text{src}} = 10^{11}$  cm. The first six light curves, a-f, correspond to the case with a  $0.1 M_{\odot}$  companion; the last two, cp and dp, correspond to the case with a  $0.001 M_{\odot}$  companion. Notice very high spikes when a source crosses a caustic, or approaches a cusp, as in the light curves c, d, and cp. The low-amplitude light curves a, e, f, and dp, are shown together with the dashed light curves expected for single-mass microlenses matching the wings.

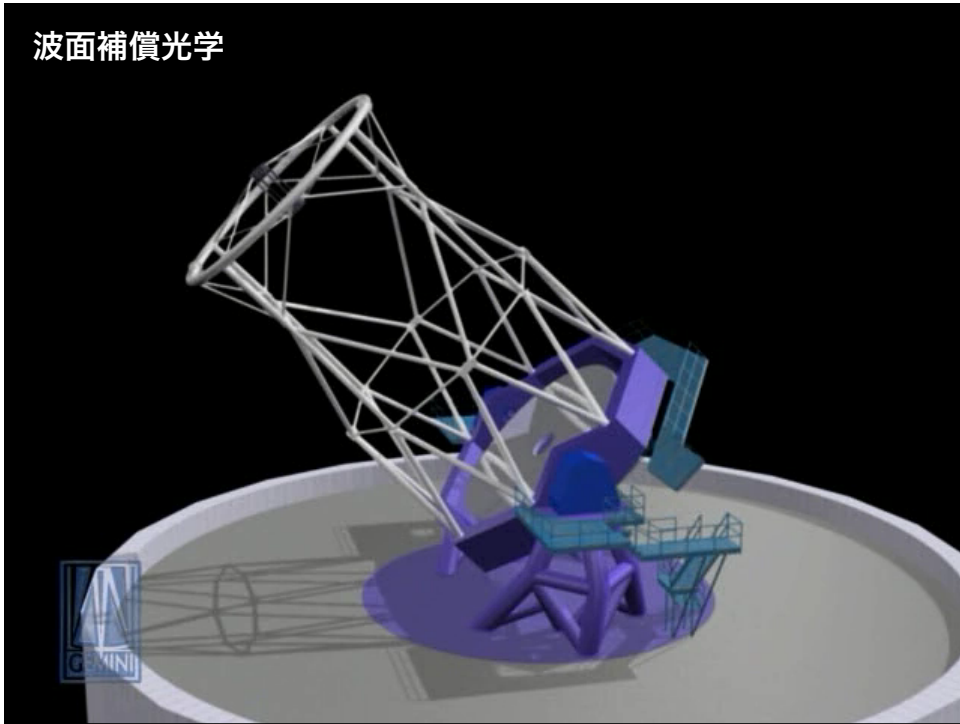
## 重力マイクロレンズ法



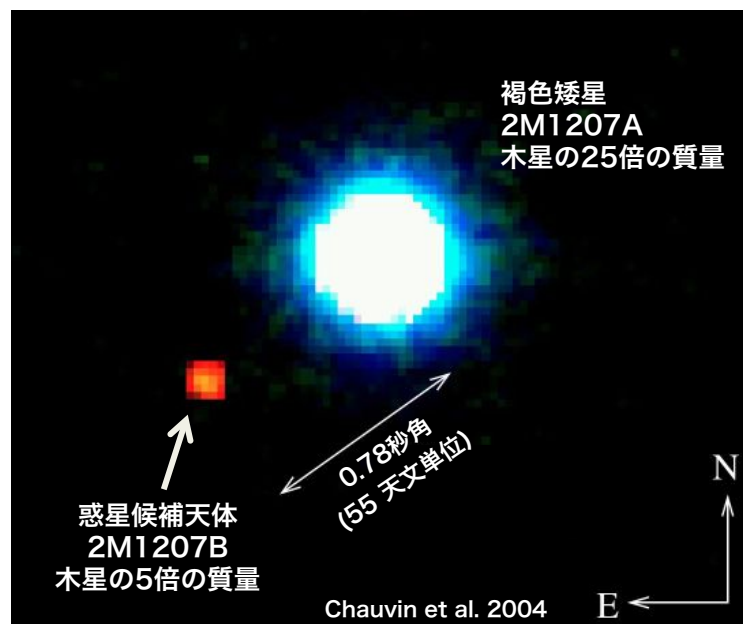
小質量 (地球質量程度も) の惑星を検出可能。追観測はできないが。

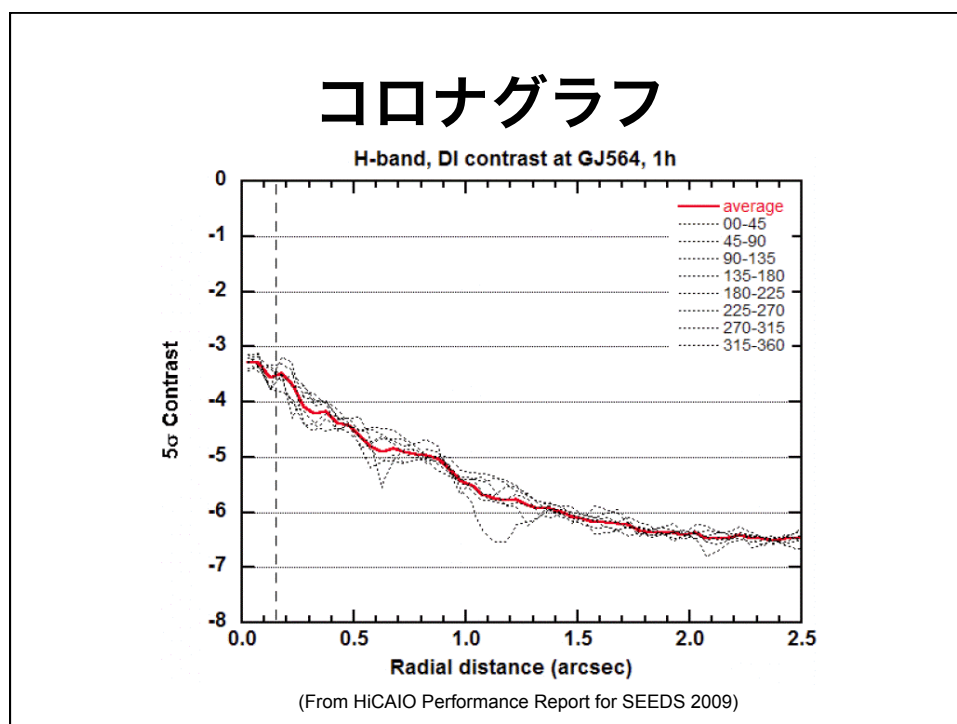
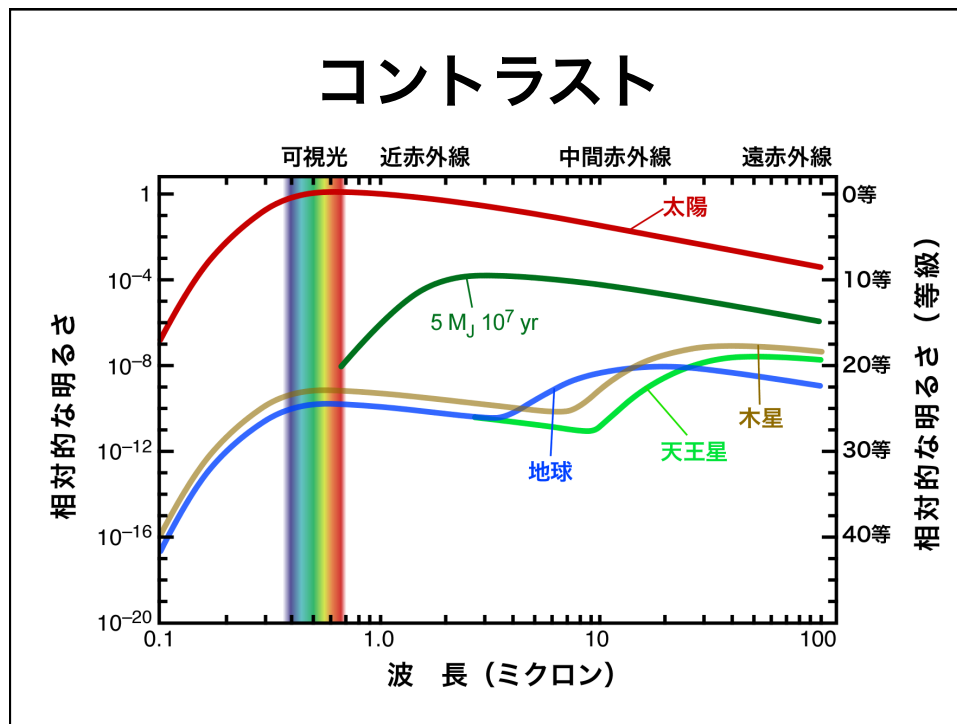
## 直接検出

## 波面補償光学

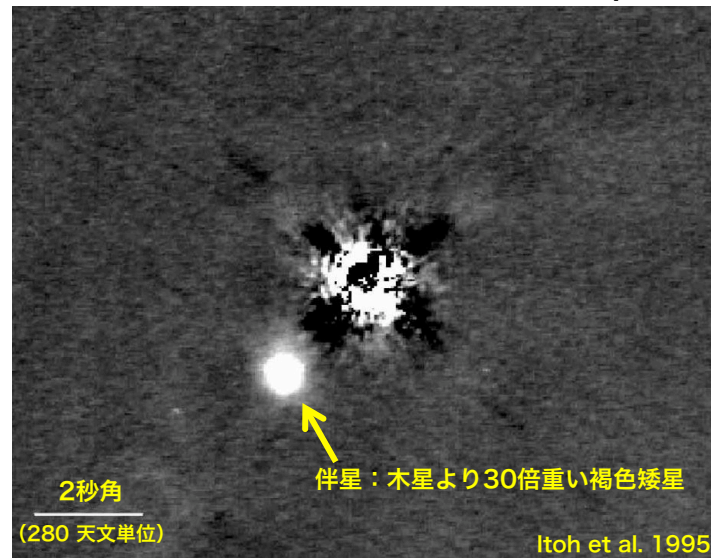


## 2M1207B (褐色矮星と惑星質量星の連星)



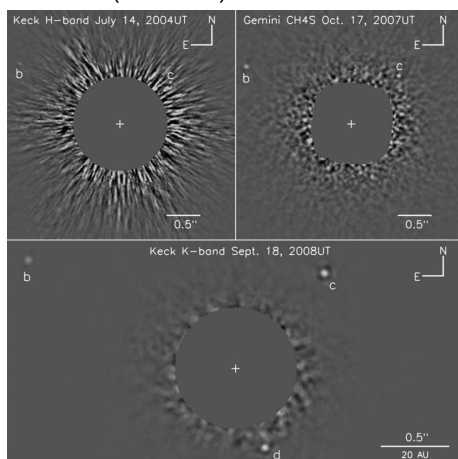


## DH Tau B ( $10\text{--}40\ M_{\text{Jup}}$ )



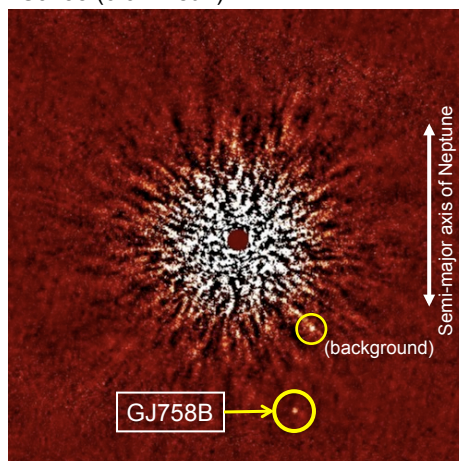
## 直接撮像 ( $\sim 10\ M_{\text{Jup}}$ )

HR8799 ( $1.5\ M_{\text{sun}}$ )



Marois et al. (2008)

GJ758 ( $0.97\ M_{\text{sun}}$ )



Thalman et al. (2009)