

# 系外惑星探索と恒星の性質

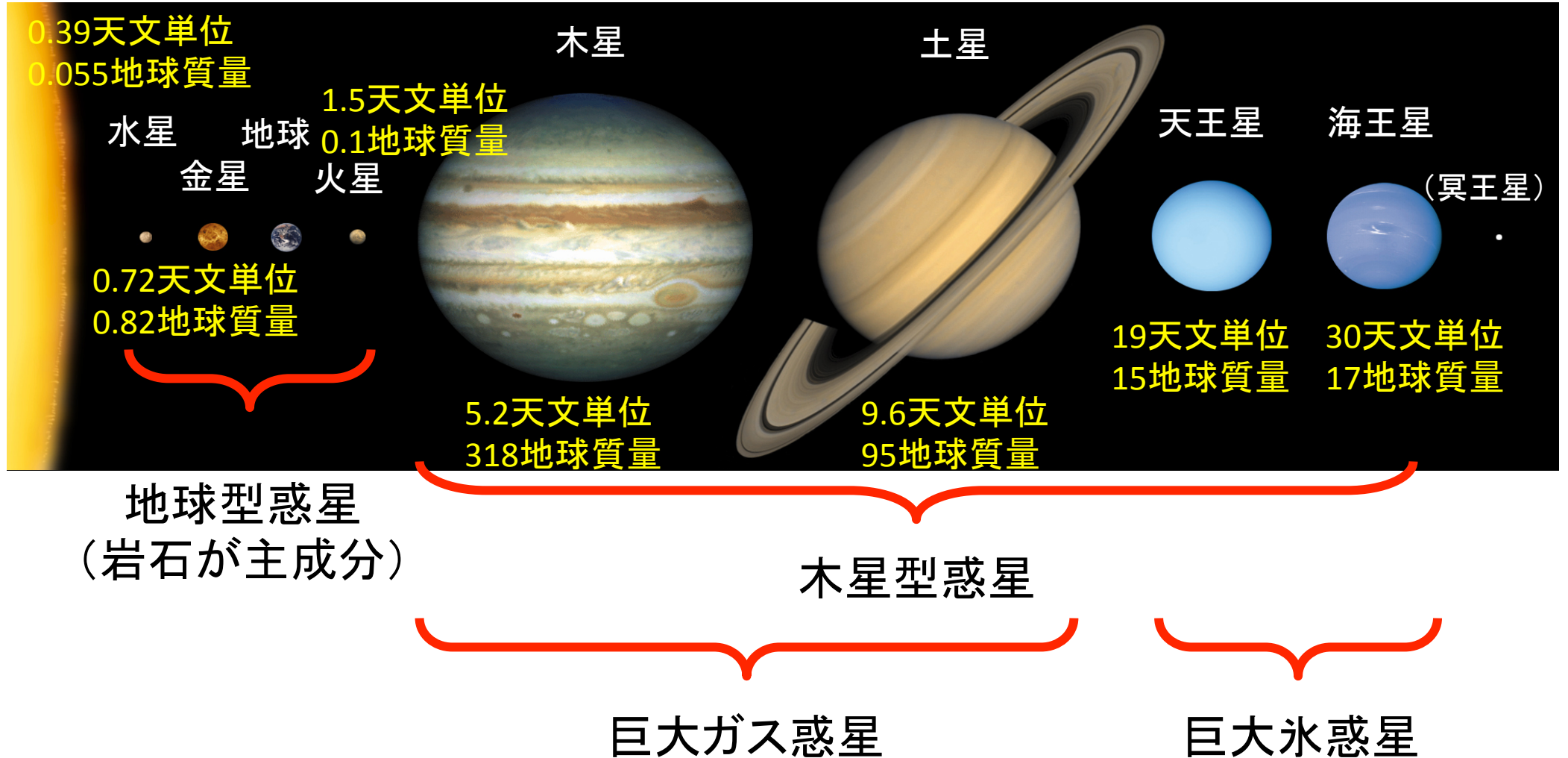
- 太陽系と系外惑星系
- 惑星探しの対象としての太陽

佐藤文衛  
東京工業大学

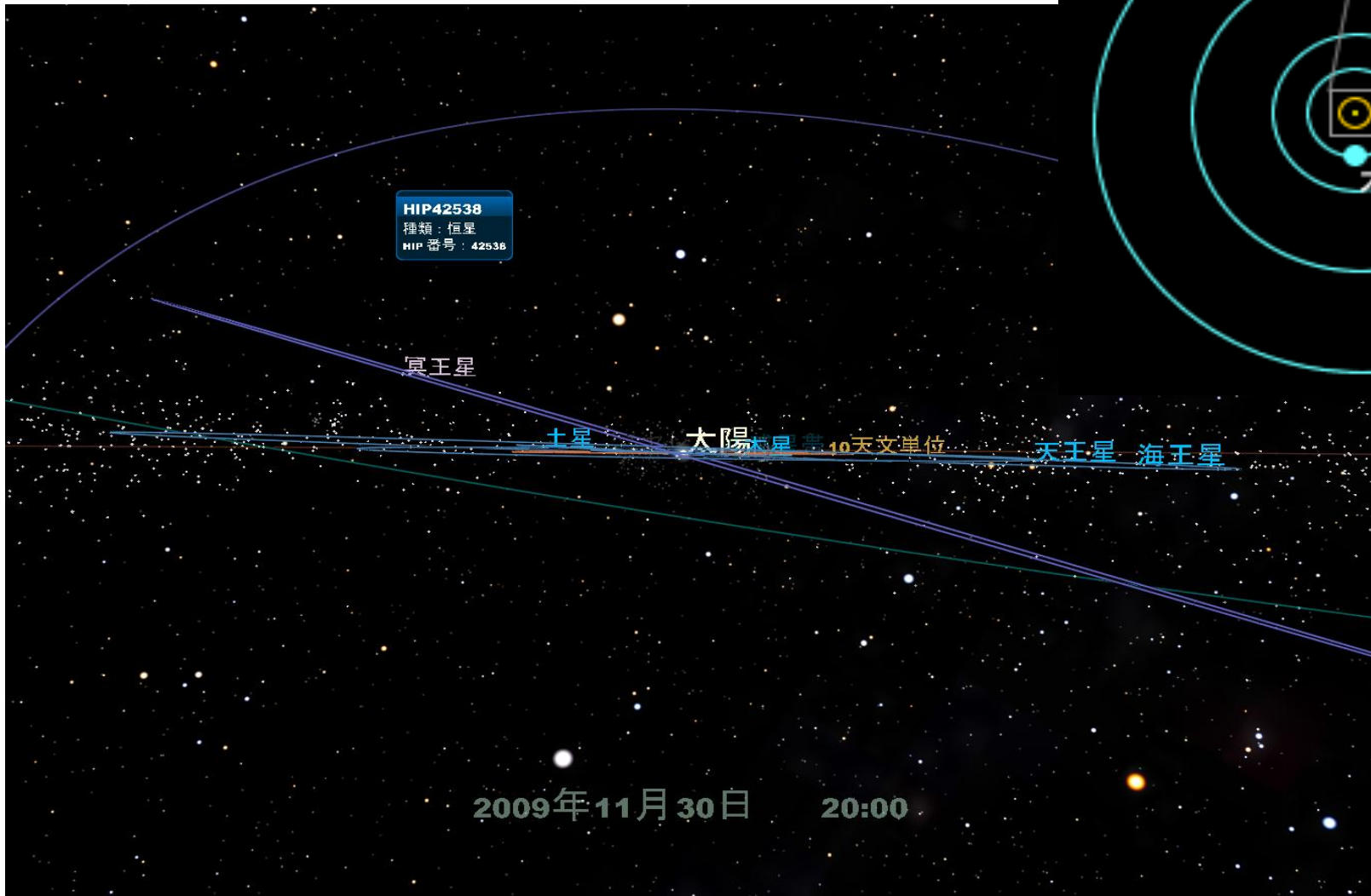
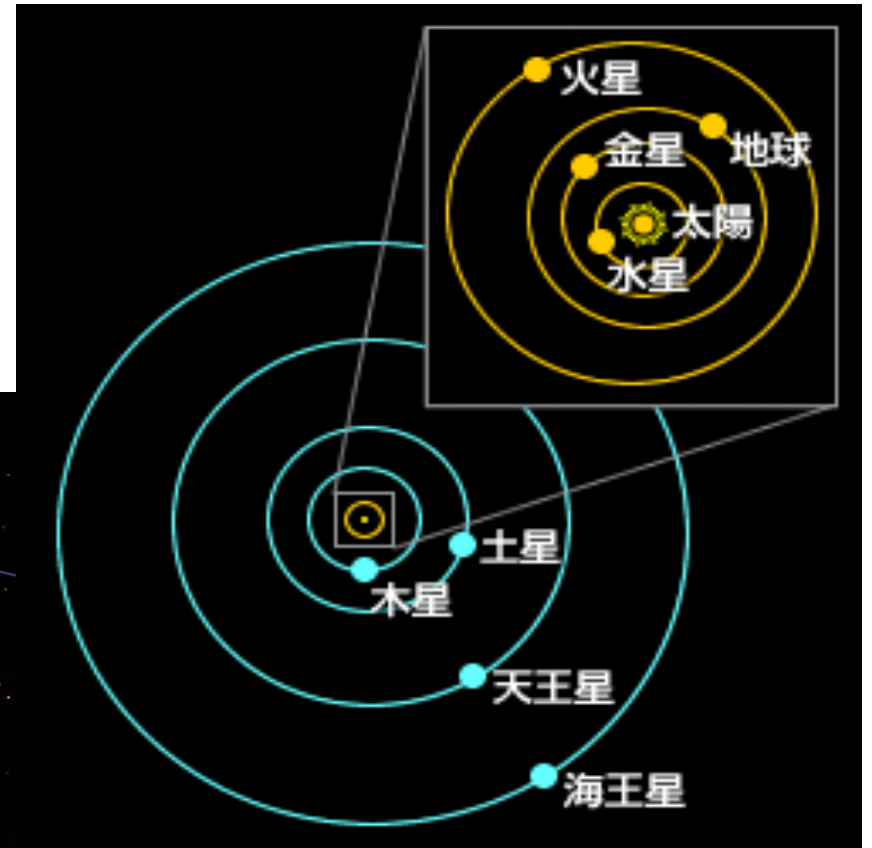
太陽系は多数派？少数派？

# 太陽系と系外惑星系

# 太陽系



- ✓ ほぼ円軌道
- ✓ 公転軸が太陽の自転軸とほぼそろっている



# 太陽系形成論

□1980年代 林忠四郎(京都大学)、サフロノフ(旧ソ連)らが中心となって構築(林ほか 1985)

## ■円盤仮説

太陽に比べて小質量(約1%)のガスと塵からなる回転円盤から形成される

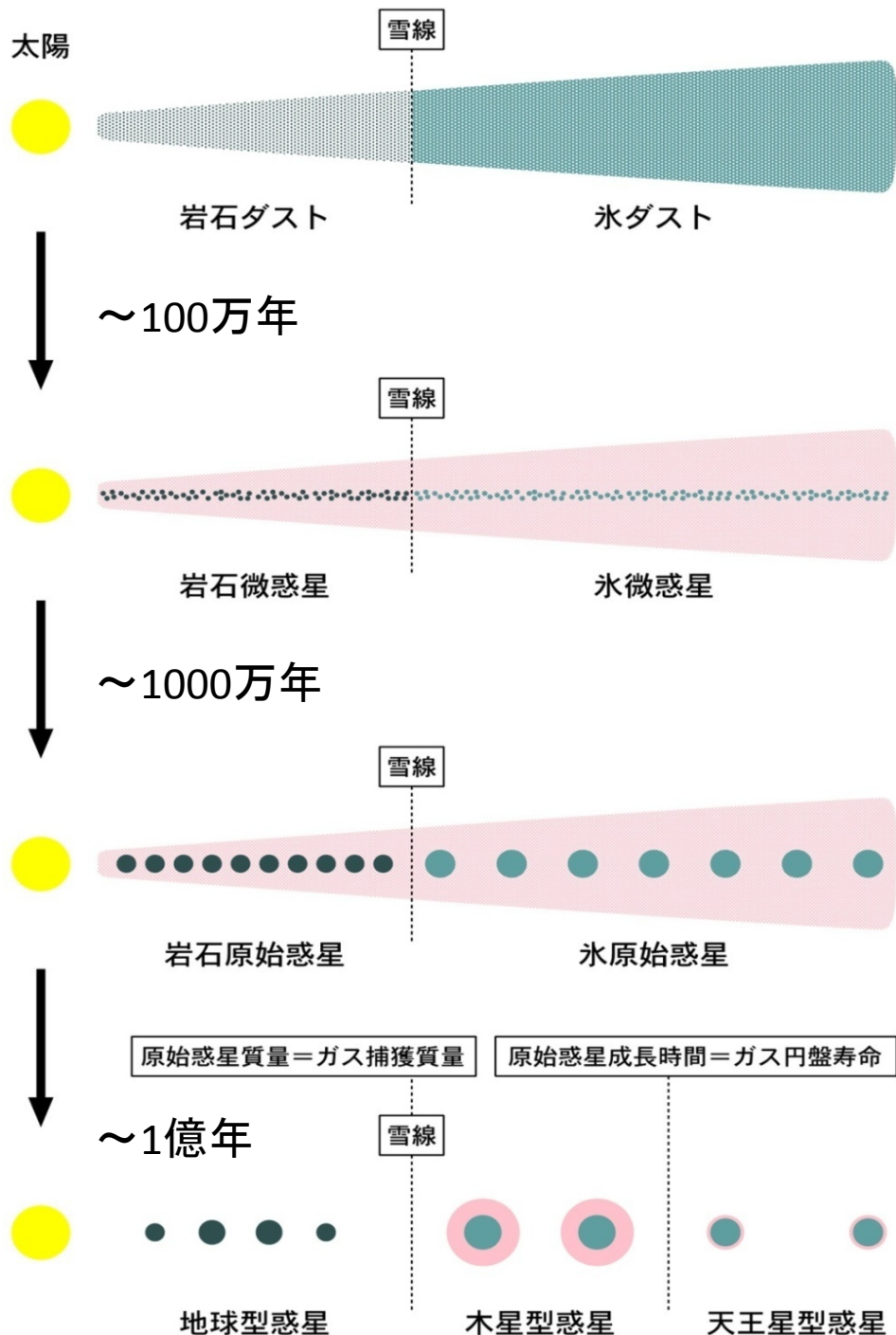
## ※最小質量円盤

現在の太陽系の惑星の固体物質と、太陽系組成のガス・塵比(100対1)から、太陽系を作るのに最小限必要な円盤質量を推測。観測される円盤質量も大体このくらい。

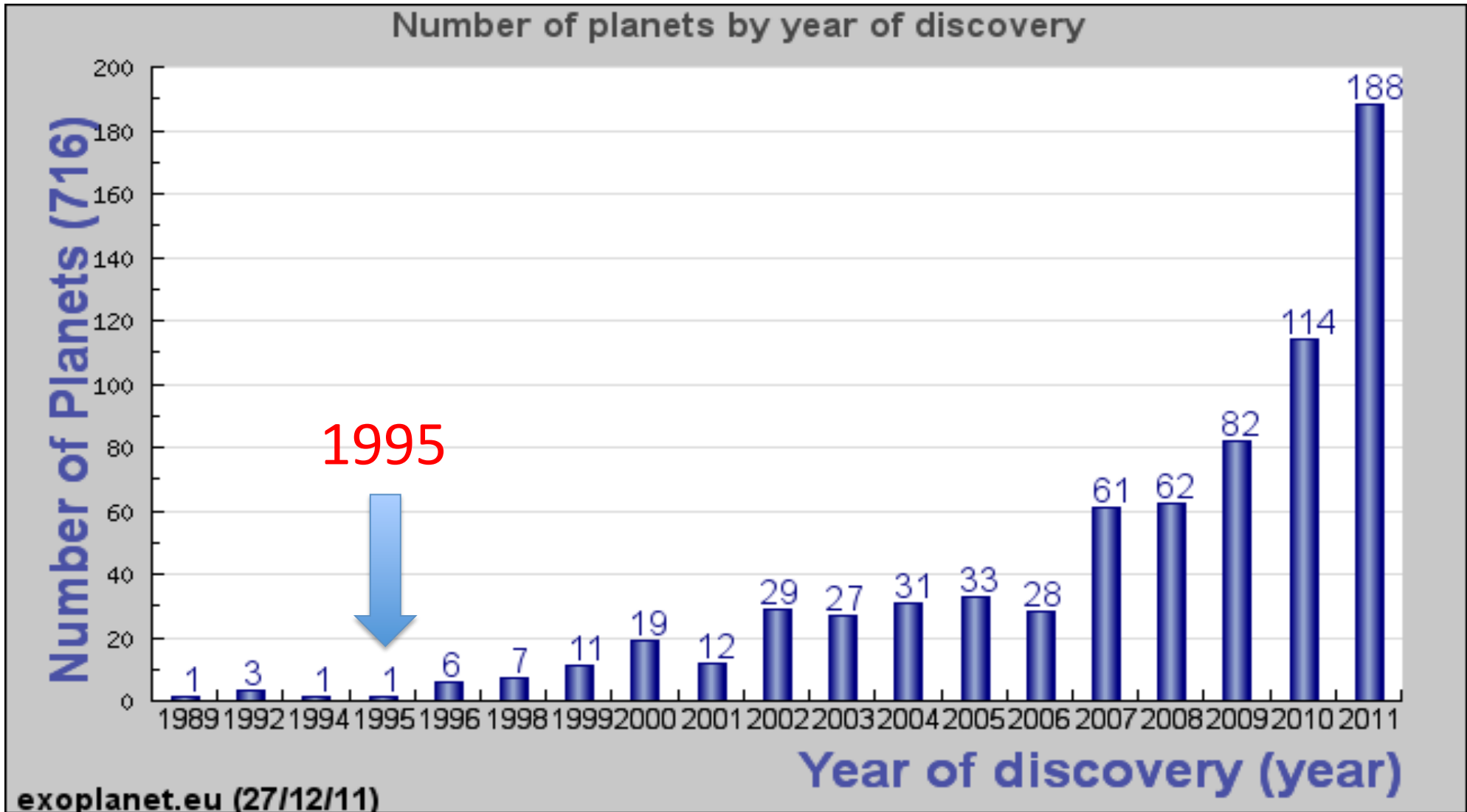
## ■微惑星仮説

塵から微惑星と呼ばれる小天体が形成され、それを材料にして固体惑星が形成される。さらに固体惑星がガスを捕獲することによってガス惑星が形成される(コア集積モデル)。

左図:理科年表オフィシャルサイトより

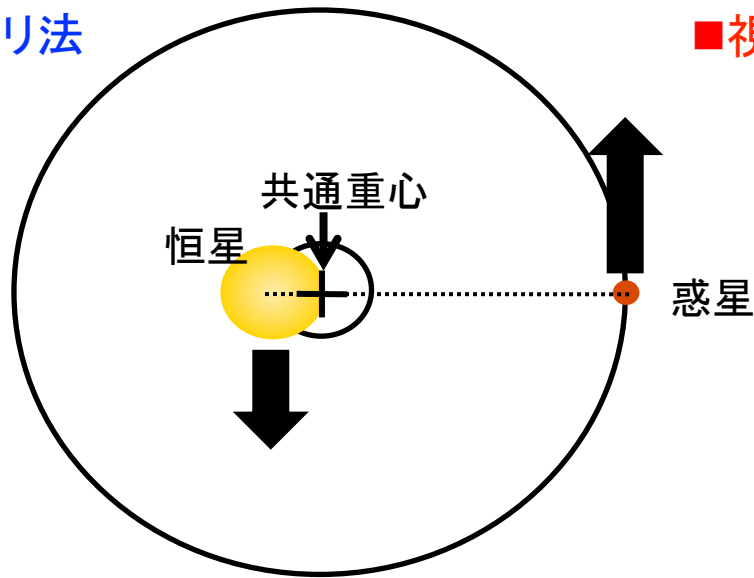


# 系外惑星発見数

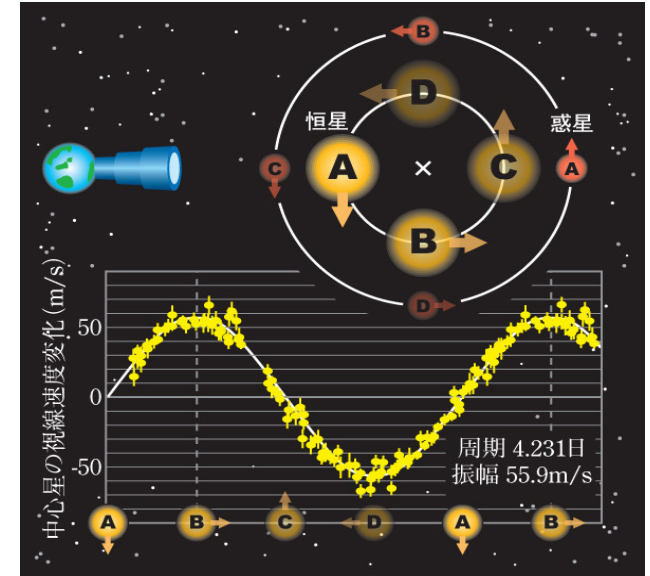


# 系外惑星の間接的検出法

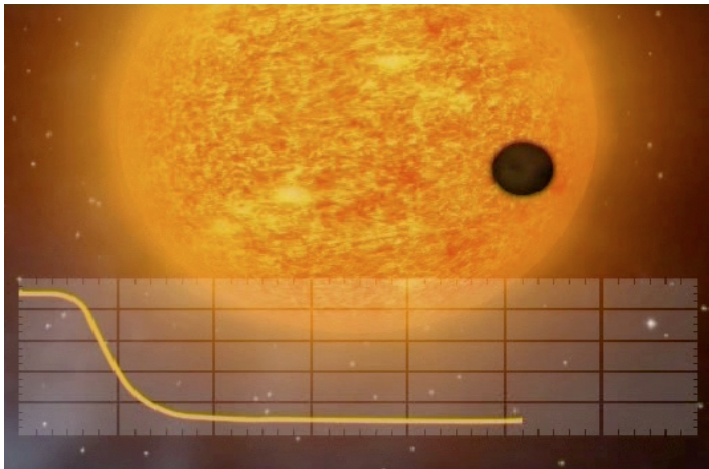
## ■アストロメトリ法



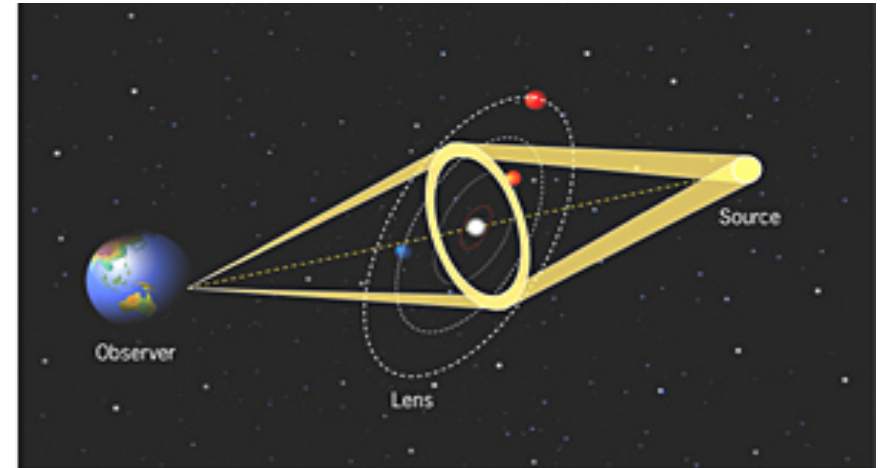
## ■視線速度法



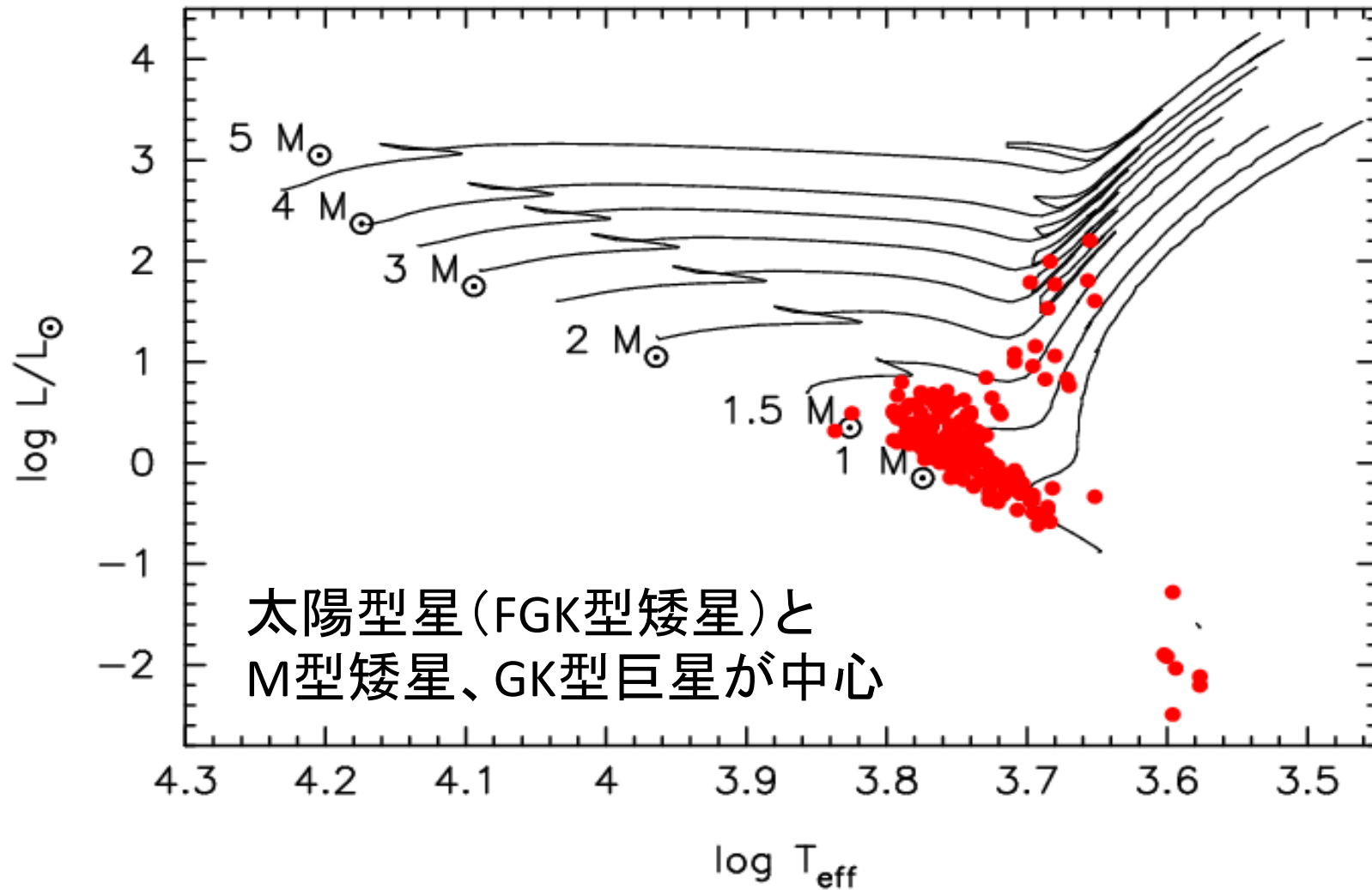
## ■トランジット法



## ■重力マイクロレンズ法

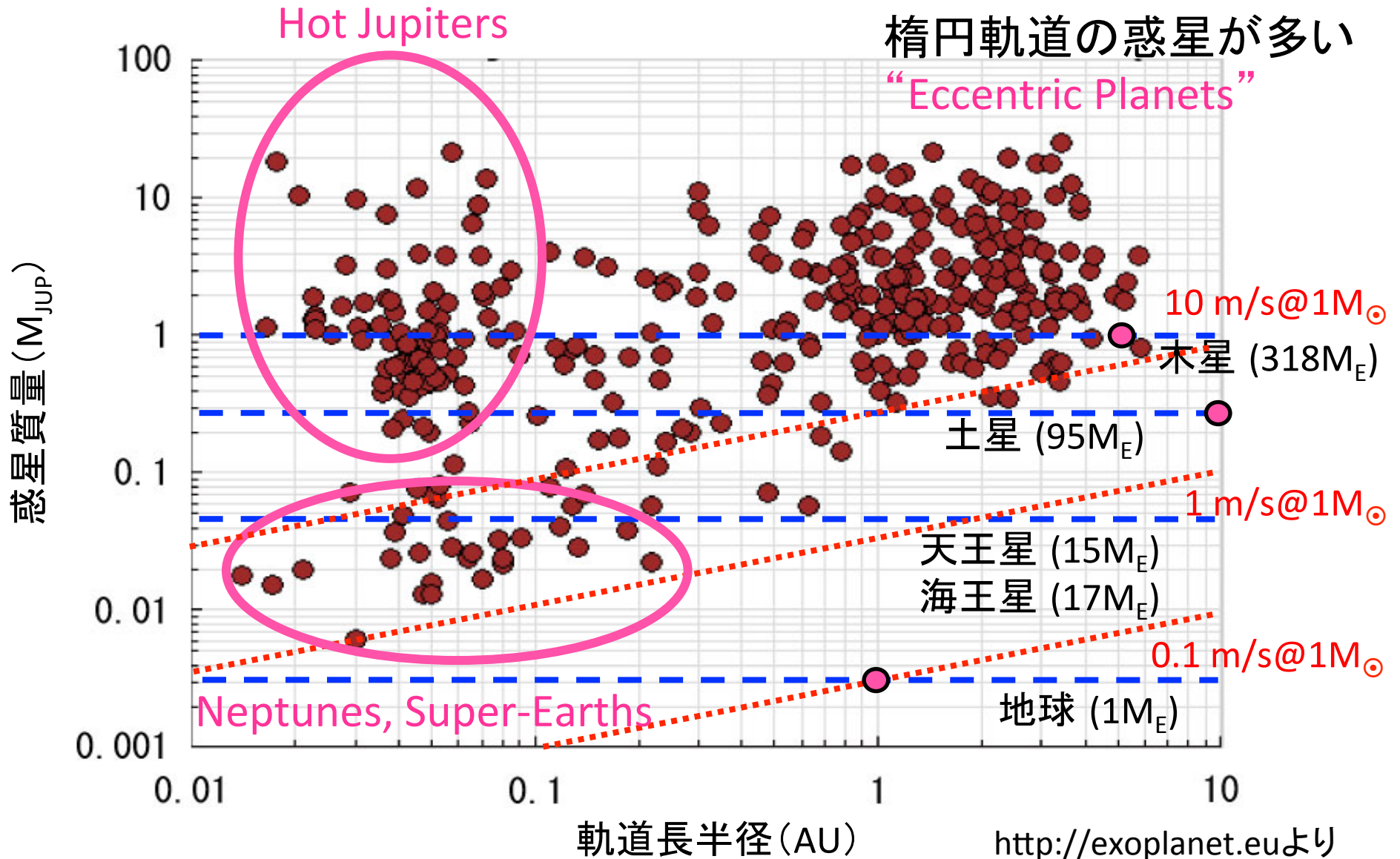


# 惑星をもつ(惑星探索が行われている)恒星の分布





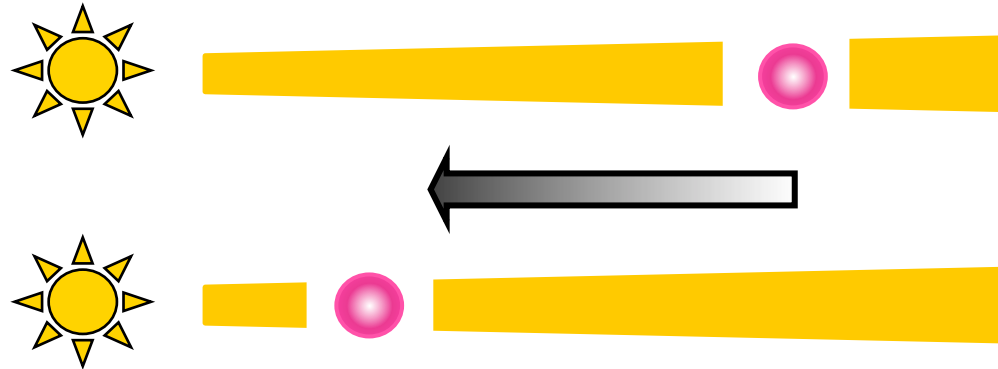
# 多様な系外惑星



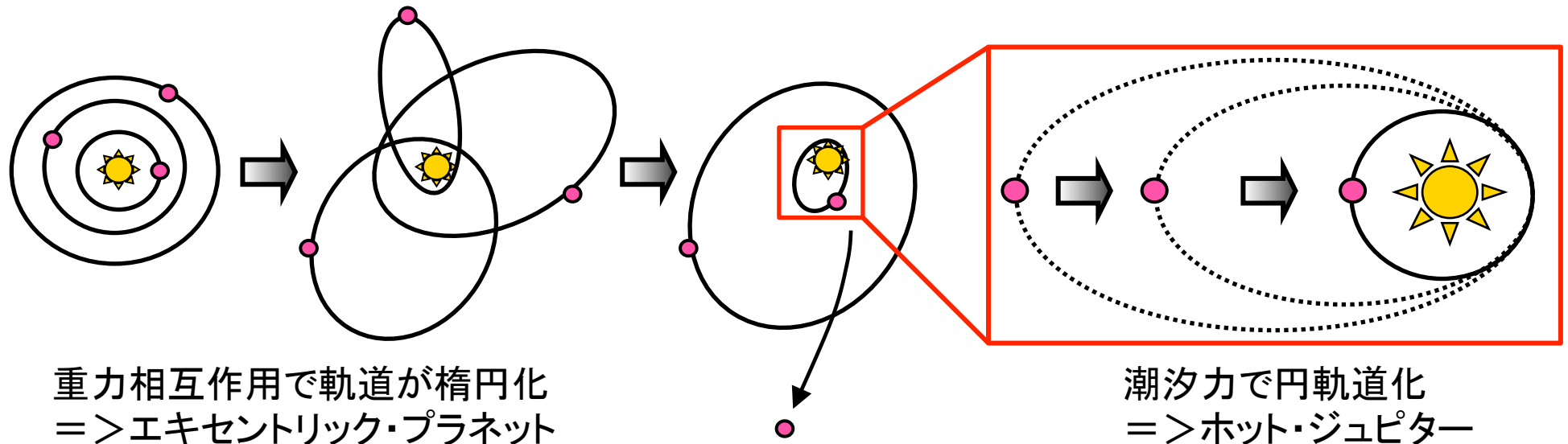
# 系外惑星の多様性の起源

## ■惑星落下

円盤ガスの降着とともに  
内側に落下  
=>ホット・ジュピター



## ■ジャンピング・ジュピター



重力相互作用で軌道が楕円化  
=>エキセントリック・プラネット

潮汐力で円軌道化  
=>ホット・ジュピター

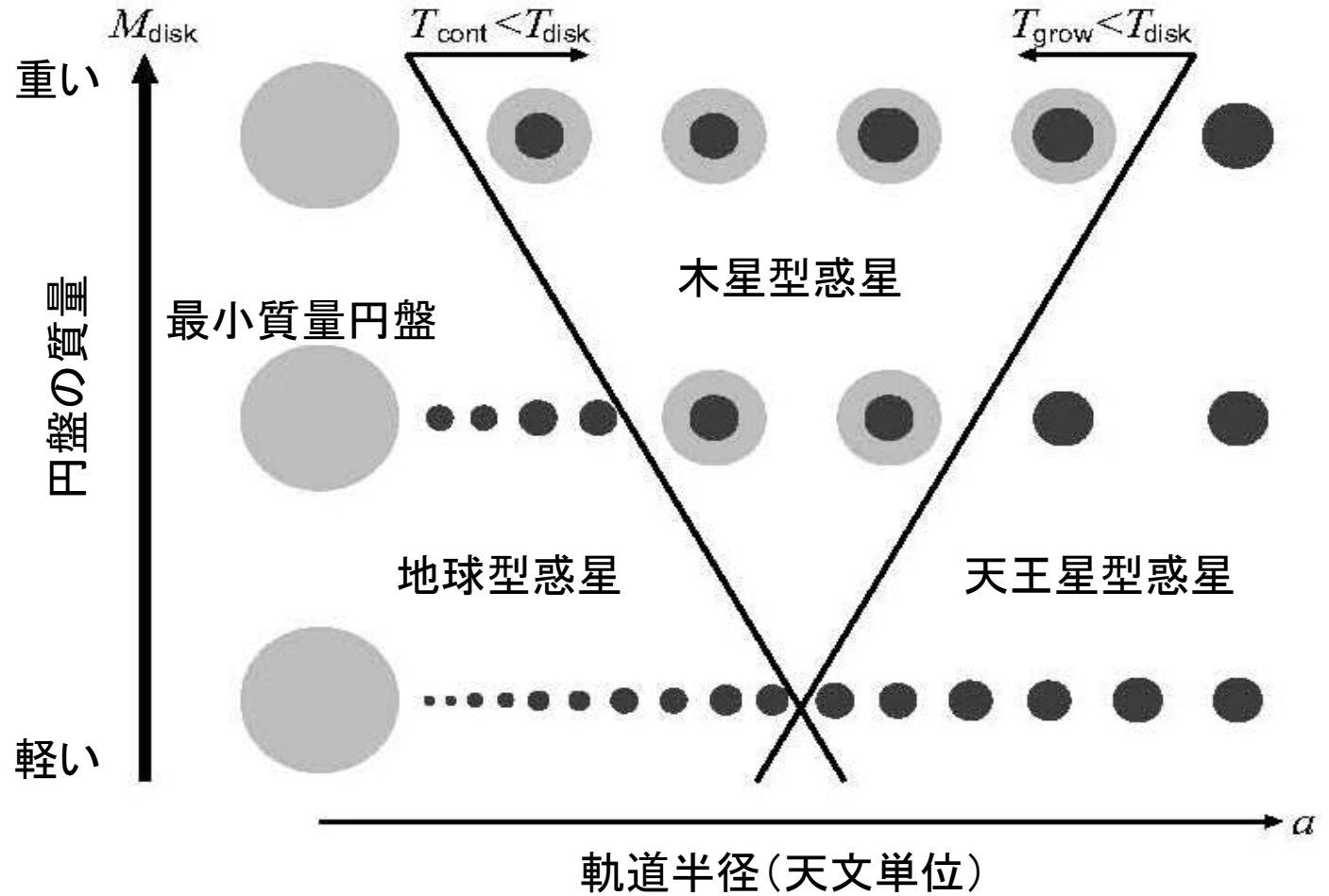
# 系外惑星の多様性の起源

観測される円盤質量は  
 $10^{-4} \sim 10^{-1} M_{\odot}$   
(e.g. Andrews&Williams 2007)

円盤の質量大  
↓  
巨大惑星が幅広い  
領域に複数形成される

内側に移動  
=>ホット・ジュピター

重力相互作用  
=>エキセントリック  
・プラネット



# 視線速度法による統計



## □ CORALIE

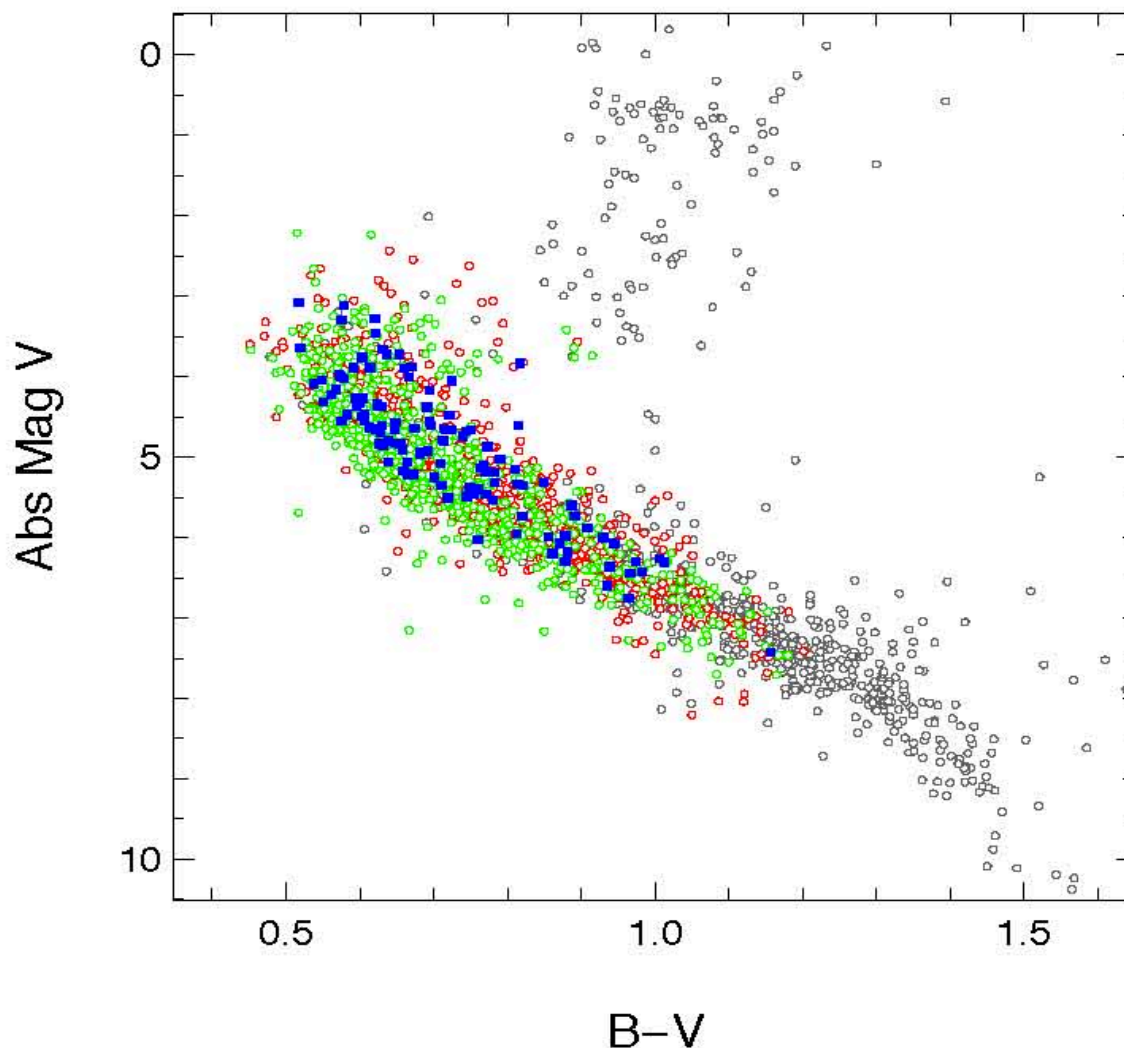
- ✓ 1.2m tel. @La Silla
- ✓ Since 1998
- ✓ 1650 late-F -- early-M
- ✓ RV precision  $\sim 5\text{m/s}$

## □ HARPS

- ✓ 3.6m tel. @La Silla
- ✓ Since 2003
- ✓ 376 late-F -- late-K  
(non-active stars selected from CORALIE's sample)
- ✓ RV precision  $\sim 1\text{m/s}$

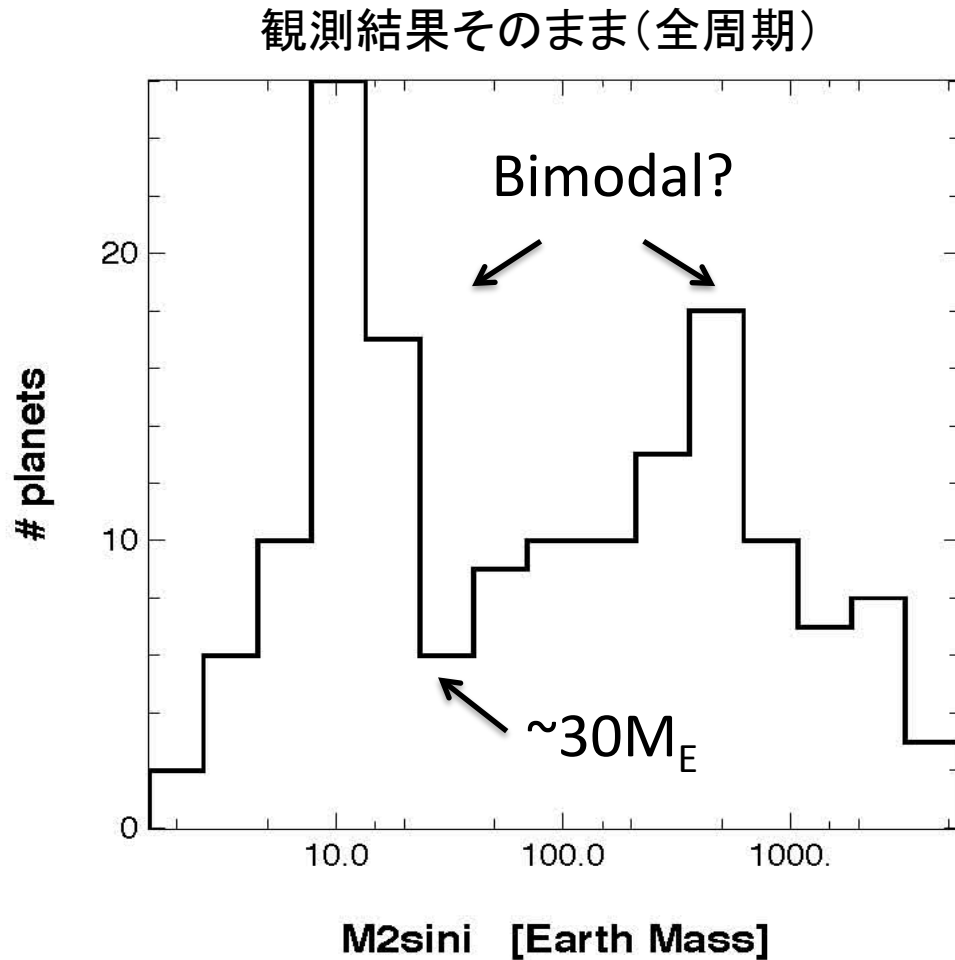
このうち、合わせて822星について統計的議論

Mayor et al. 2011

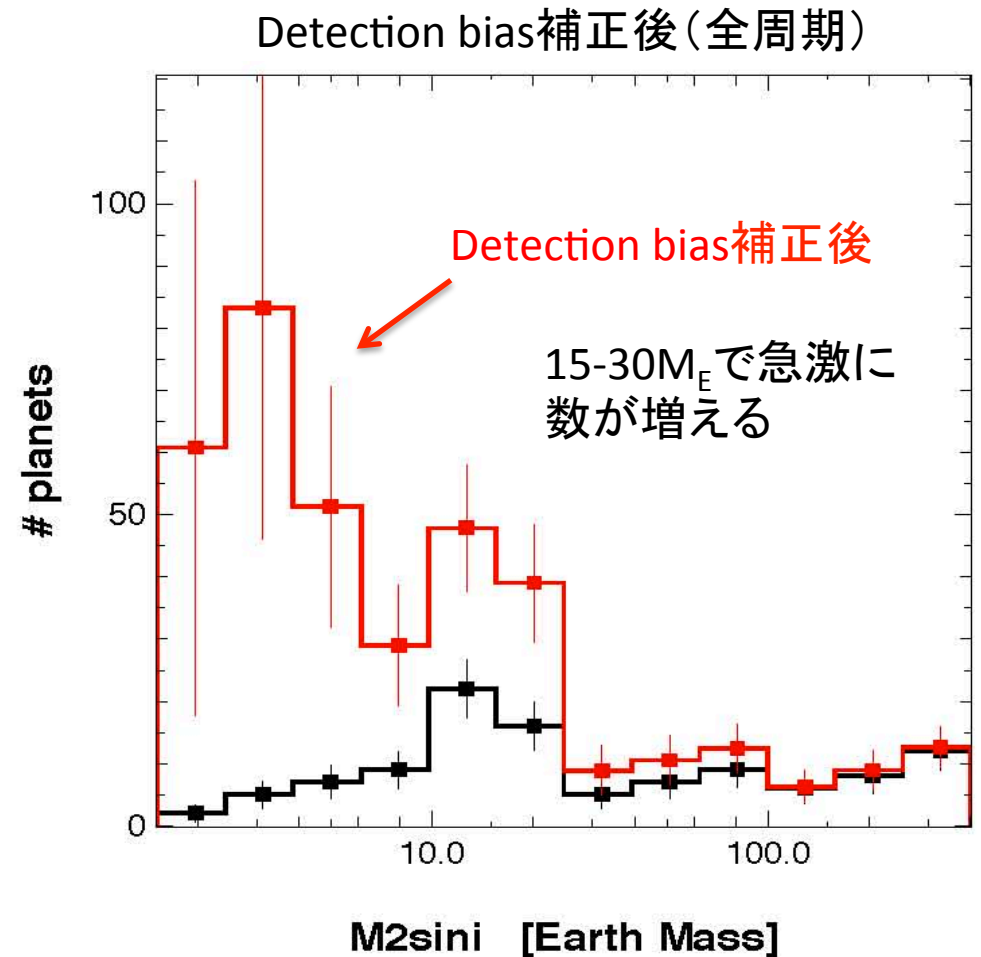


# 惑星質量分布

Mayor et al. 2011



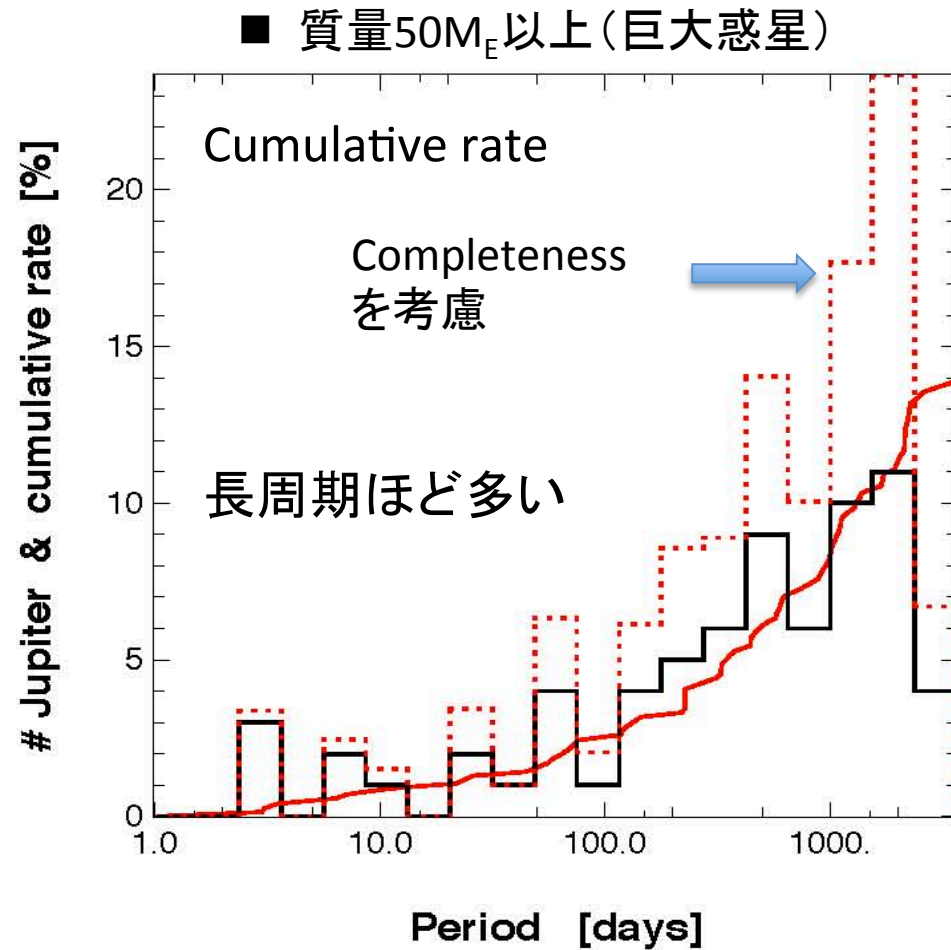
**Fig. 10.** Observed mass histogram for the planets in the combined sample. Before any bias correction, we can already notice the importance of the sub-population of low-mass planets. We



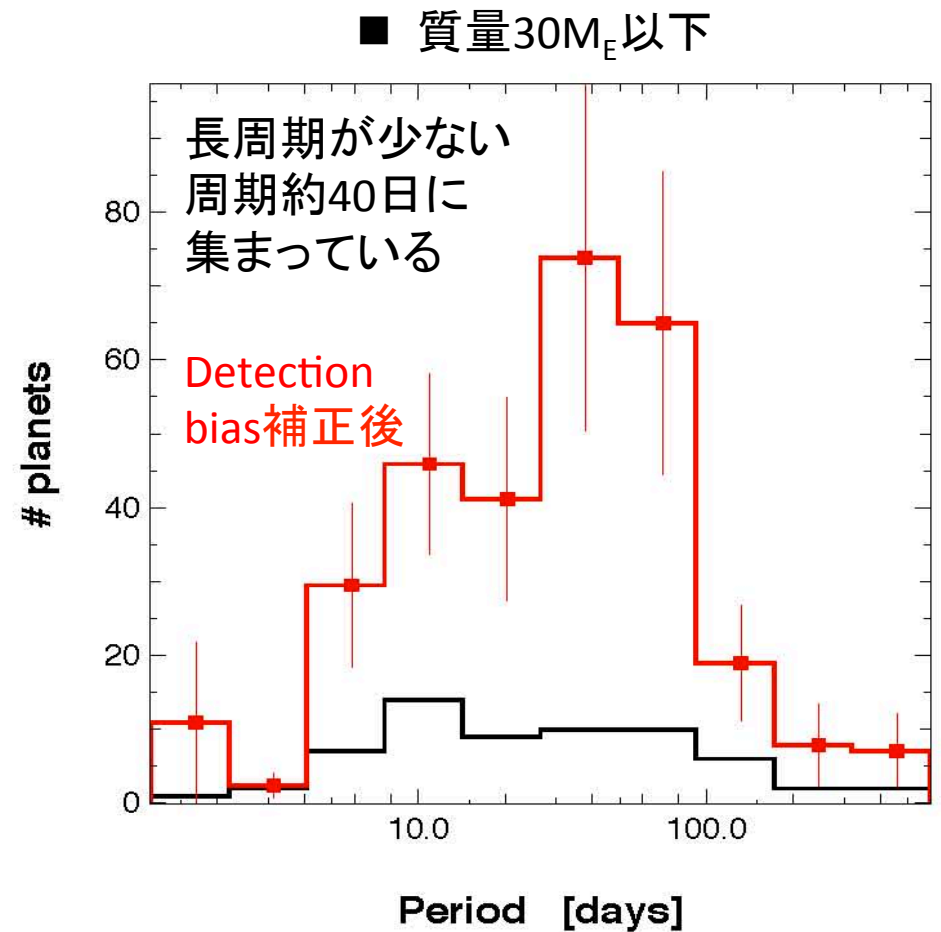
**Fig. 12.** Histograms of planetary masses, comparing the observed histogram (black line) and the equivalent histogram after correction for the detection bias (red line).

# 周期分布

Mayor et al. 2011

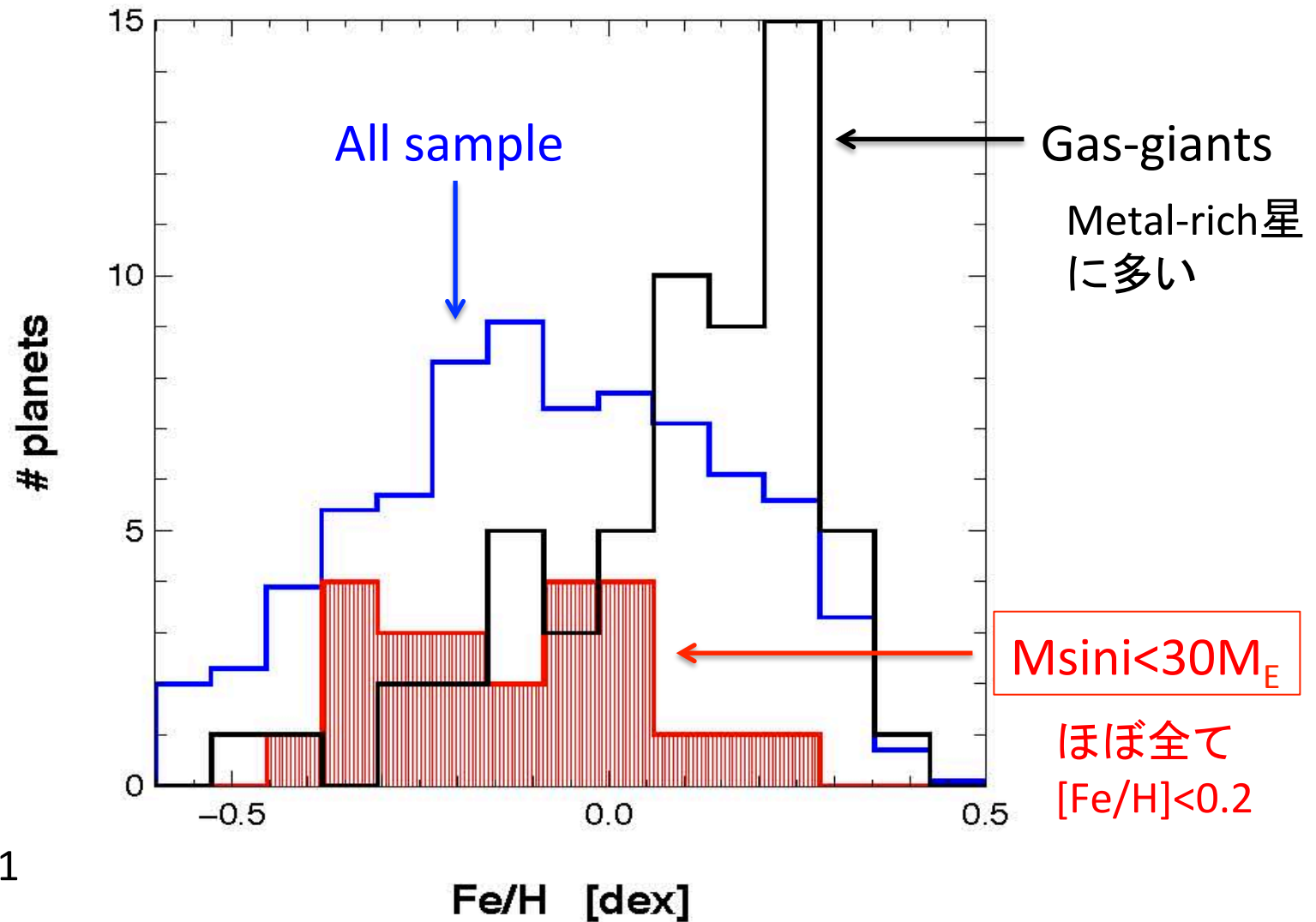


**Fig. 8.** Histogram of the planet frequency for planets with masses ( $m_2 \sin i > 50 M_{\oplus}$ ). The occurrence rate for gaseous giant planets is strongly increasing with the logarithm of the period  $\log P$ .

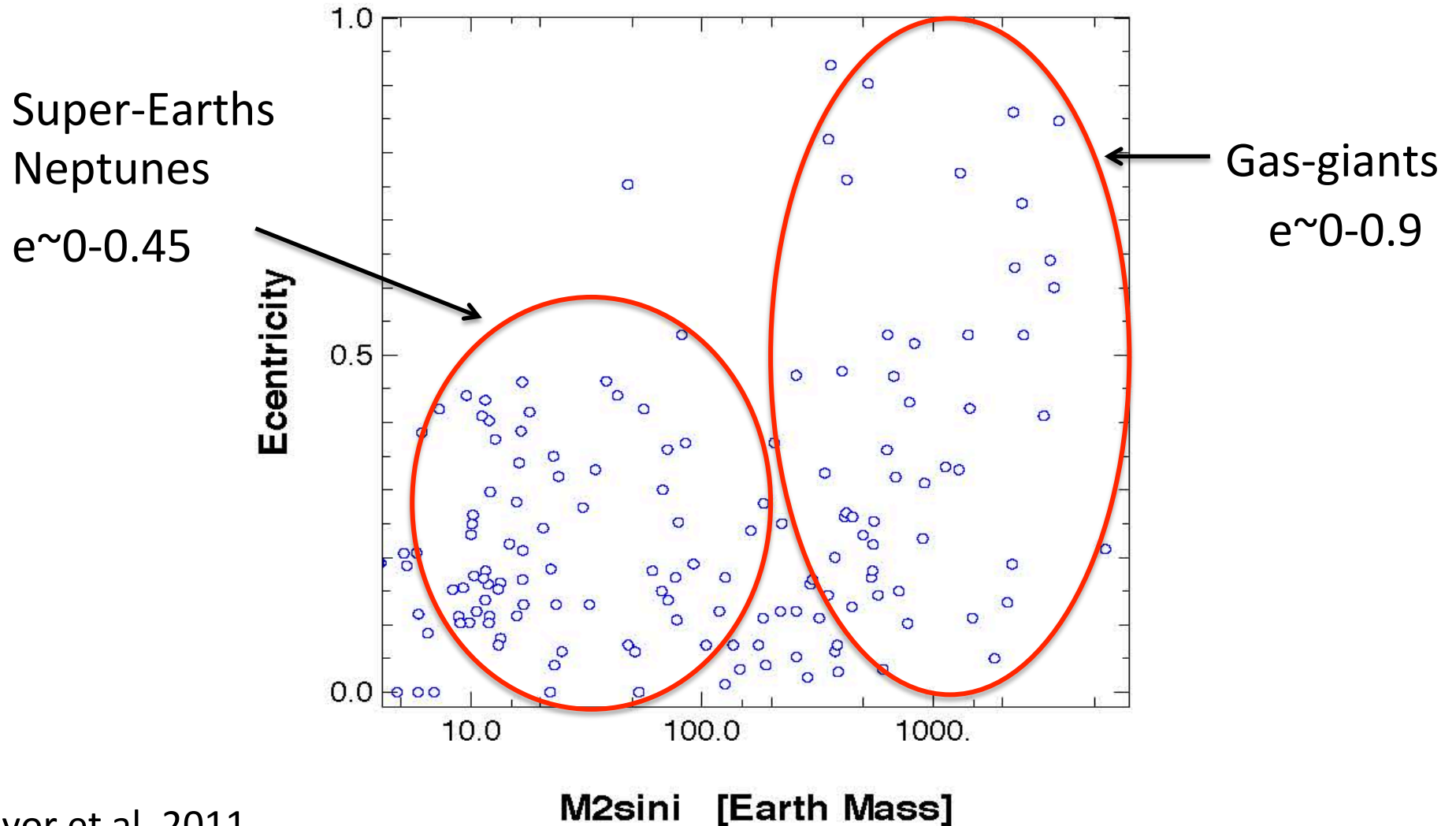


**Fig. 14.** Observed period distributions for low-mass planets ( $m_2 \sin i < 30 M_{\oplus}$ ) before (black histogram) and after (red histogram) correction for the detection bias. Most of the low-mass planets are confined on short period orbits. The mode of the distribution appears just over 40 days.

# metallicity



# 離心率



Mayor et al. 2011

Fig. 15. Mass-eccentricity diagram for the planets in the com-



# 惑星頻度

**Table 1.** Occurrence frequency of stars with at least one planet in the defined region. The results for various regions of the  $m_2 \sin i - \log P$  plane are given.

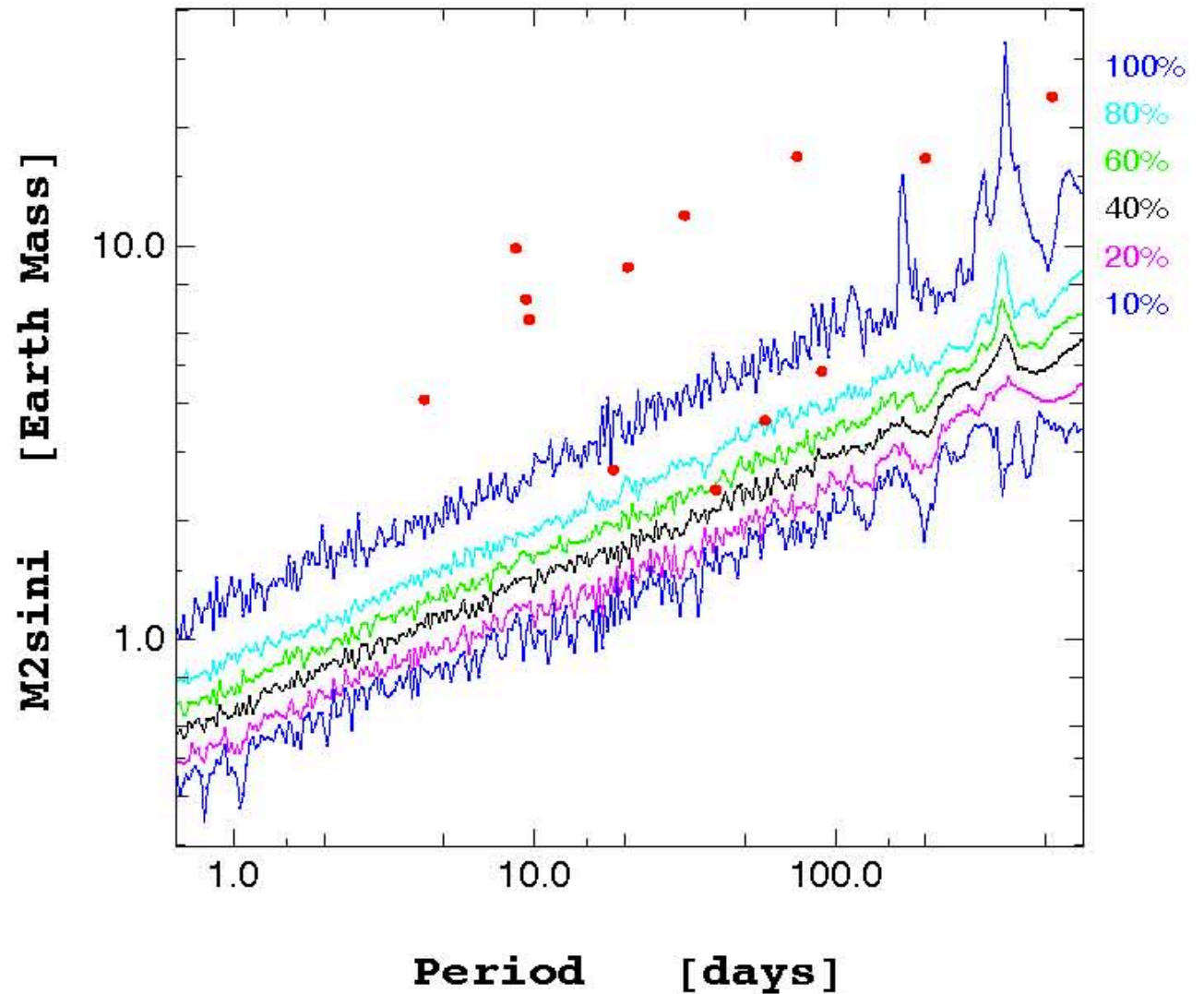
Mayor et al. 2011

Mass limits	Period limit	Planetary rate based on published planets	Planetary rate including candidates	Comments
$> 50 M_{\oplus}$	$< 10$ years	$13.9 \pm 1.7 \%$	$13.9 \pm 1.7 \%$	Gaseous giant planets
$> 100 M_{\oplus}$	$< 10$ years	$9.7 \pm 1.3 \%$	$9.7 \pm 1.3 \%$	Gaseous giant planets
$> 50 M_{\oplus}$	$< 11$ days	$0.89 \pm 0.36 \%$	$0.89 \pm 0.36 \%$	Hot gaseous giant planets
Any masses	$< 10$ years	$65.2 \pm 6.6 \%$	$75.1 \pm 7.4 \%$	All "detectable" planets with $P < 10$ years
Any masses	$< 100$ days	$50.6 \pm 7.4 \%$	$57.1 \pm 8.0 \%$	At least 1 planet with $P < 100$ days
Any masses	$< 100$ days	$68.0 \pm 11.7 \%$	$68.9 \pm 11.6 \%$	F and G stars only
Any masses	$< 100$ days	$41.1 \pm 11.4 \%$	$52.7 \pm 13.2 \%$	K stars only
$< 30 M_{\oplus}$	$< 100$ days	$47.9 \pm 8.5 \%$	$54.1 \pm 9.1 \%$	Super-Earths and Neptune-mass planets on tight orbits
$< 30 M_{\oplus}$	$< 50$ days	$38.8 \pm 7.1 \%$	$45.0 \pm 7.8 \%$	As defined in Lovis et al. (2009)

- 約75%の恒星は周期10年以内に少なくとも一つ惑星をもっている
  - 周期10年以内に巨大惑星をもつ恒星は約14%
  - 短周期(<100日)の低質量惑星(3-30 $M_E$ )をもつ恒星は約55%
- 約30 $M_E$ 以下の惑星は巨大惑星と性質(軌道分布等)が異なる
  - 複数惑星系が多い(70%以上; 巨大惑星をもつ系は目下26%)

# Habitable Zoneの惑星

- ✓ 10個の太陽型星を集中的に観測
- ✓ 29個の惑星発見
- ✓  $10M_E$ の検出感度はほぼ100%
- ✓  $3M_E$ は20%程度

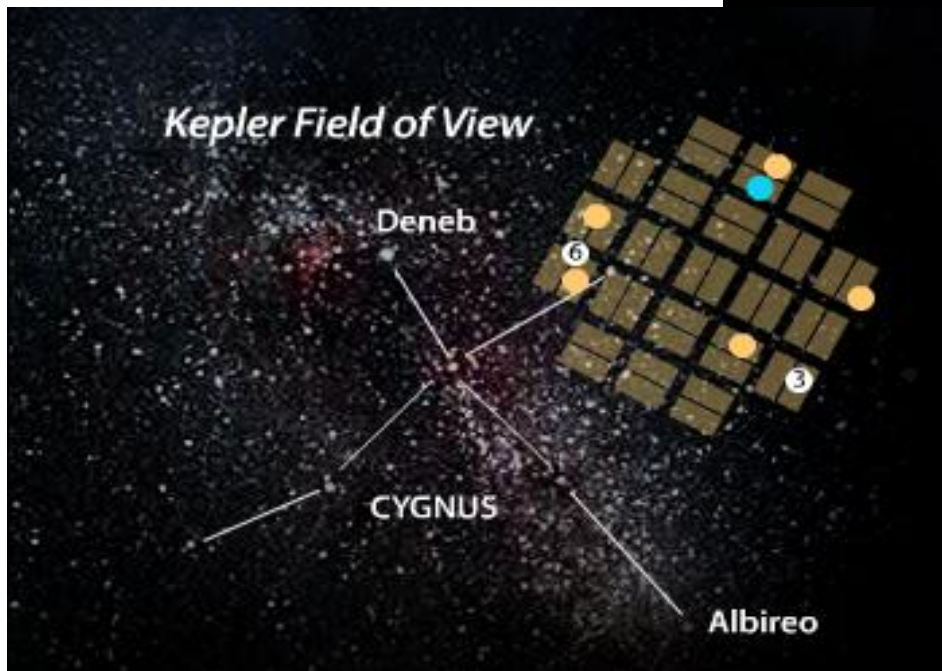
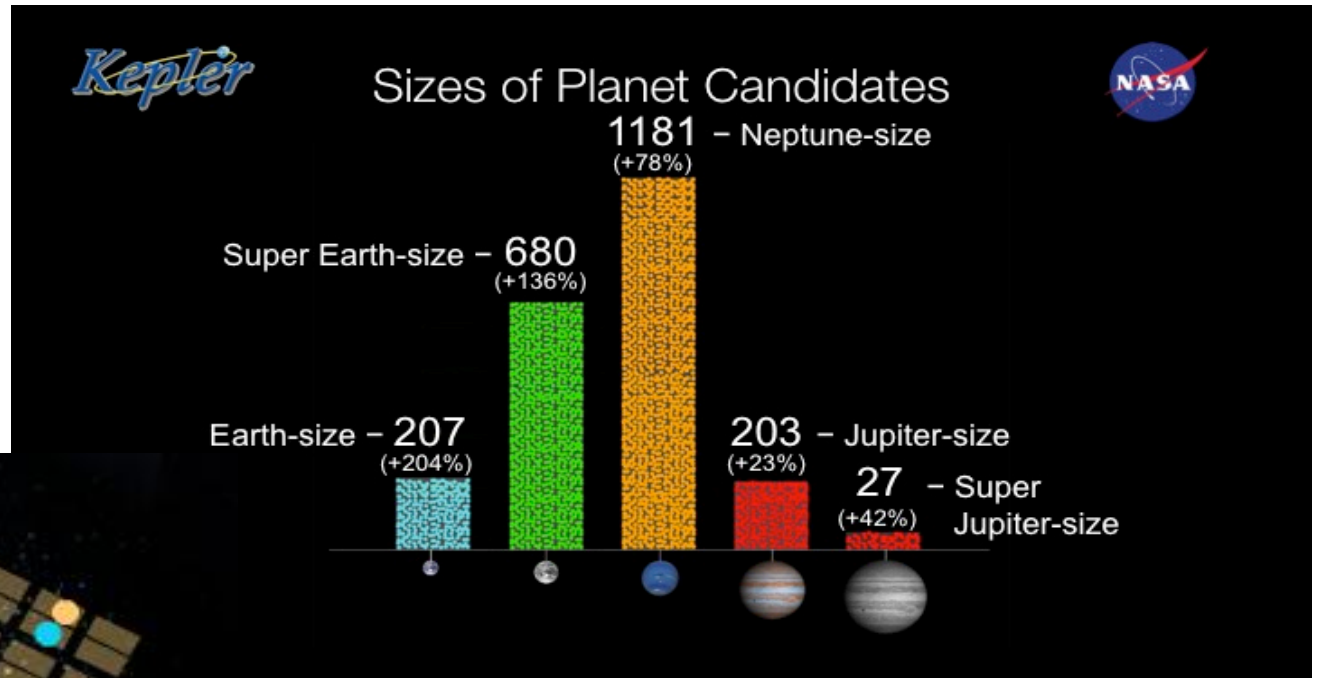


**Fig. 18.** The figure illustrates the limits of detection for very low-mass planets based on only the 10 stars of the HARPS sample with more than 165 HARPS measurements per star. Note that 29 planets have been discovered orbiting these ten stars!

Mayor et al. 2011

# Kepler

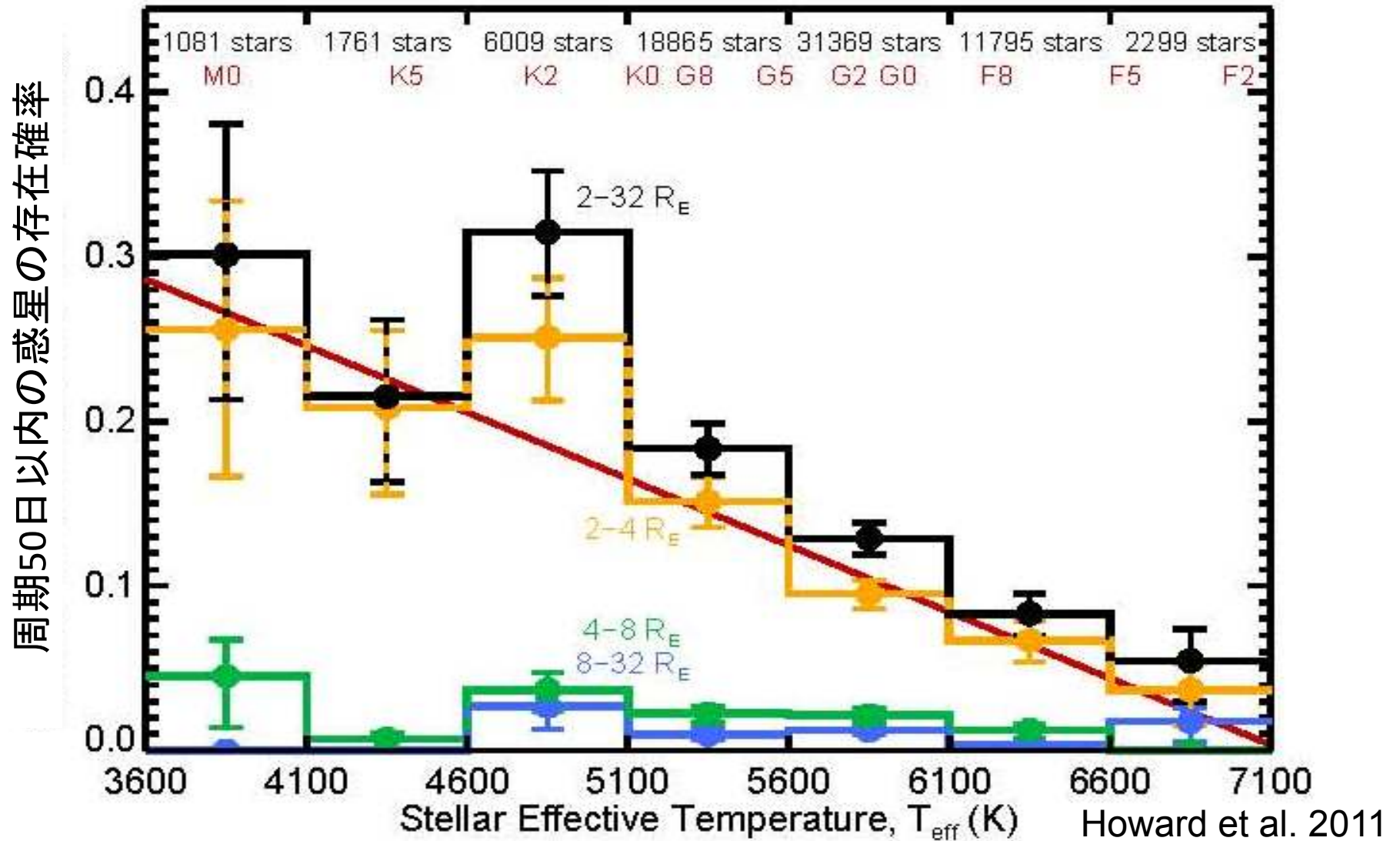
- 2009年打ち上げ
- 十万個以上の恒星をモニター観測
- 相対測光精度  $\sim 2 \times 10^{-5}$



現在までに2000個以上の惑星候補を発見

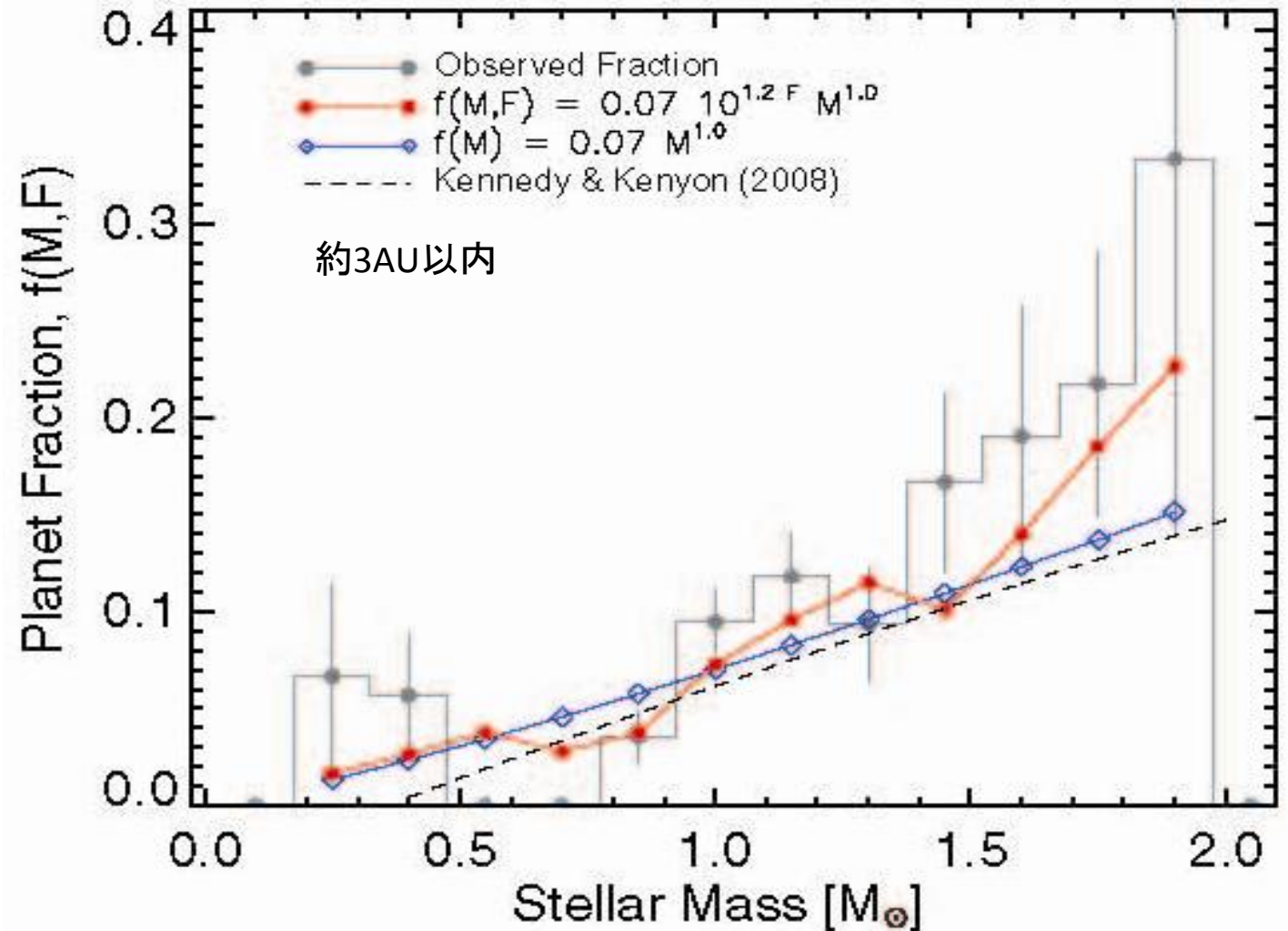
<http://www.kepler.arc.nasa.gov/>

# 惑星サイズ vs. スペクトル型



# 中心星質量 vs. 巨大惑星頻度

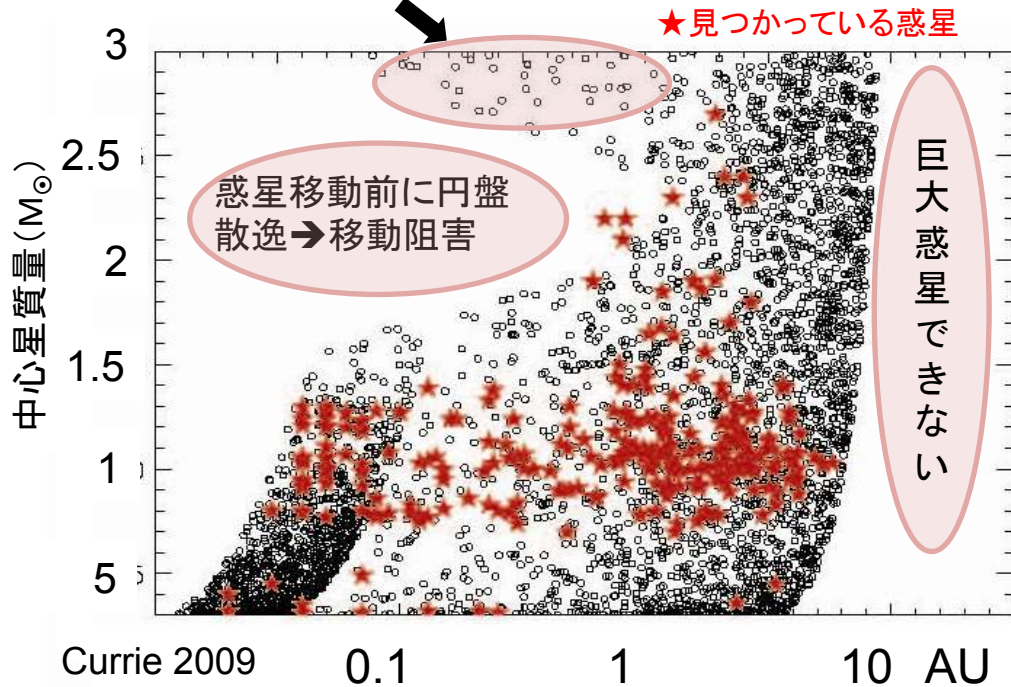
重い星ほど巨大惑星  
をもつ確率が高い



# 中質量星周りの短周期惑星欠乏

□先天説(もともと惑星がない)

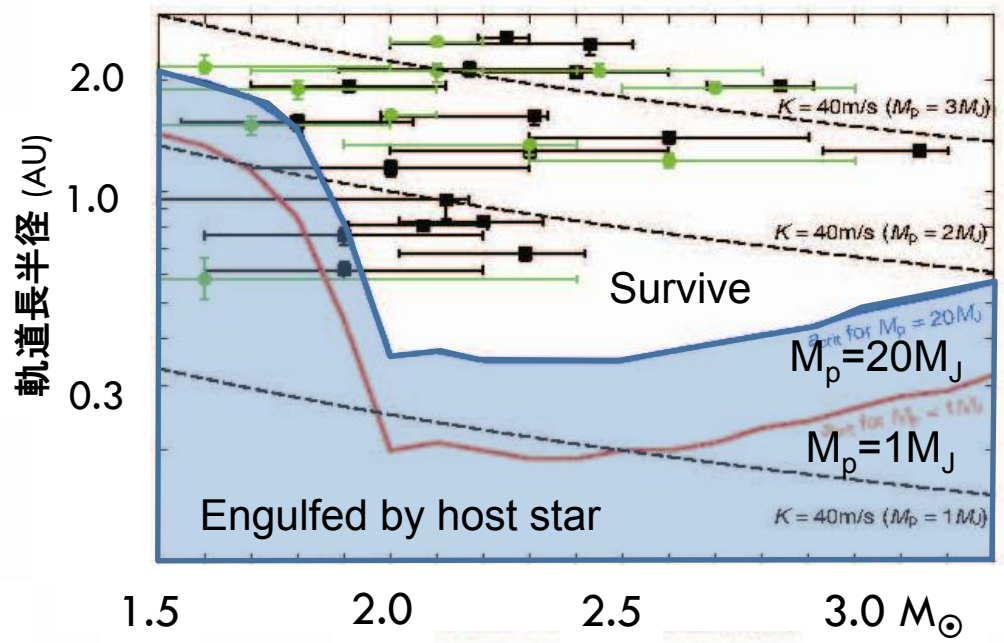
円盤散逸前に惑星形成、移動？



(大質量星ほど円盤が早く散逸すると仮定)

□後天説(惑星があったが飲み込まれた)

中心星の進化・膨張に伴う潮汐力で惑星が落下



Kunitomo et al. 2011

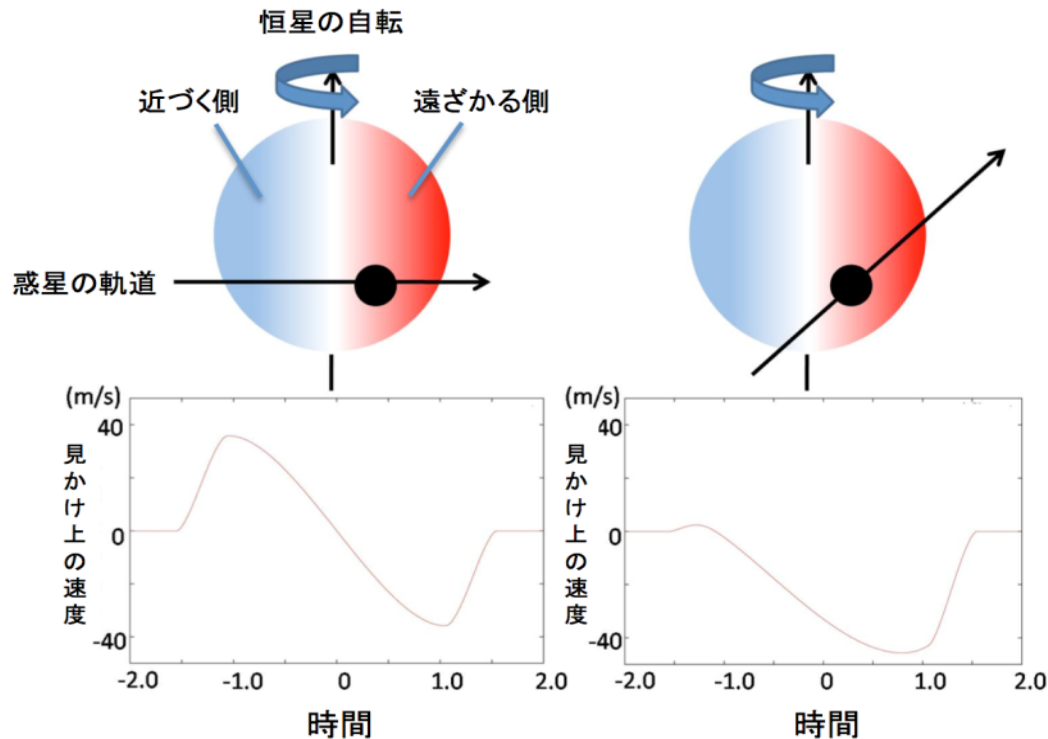
- 内側領域の惑星の分布は、円盤散逸と惑星形成・移動の時間尺度の兼ね合いによる
- コア集積では  $> 10\text{AU}$  に巨大惑星できにくい

- $2M_{\odot}$  以下ではRGB段階で  $2\text{AU}$  まで中心星に飲み込まれる
- $2.5-3M_{\odot}$  では飲み込みの影響が小さい

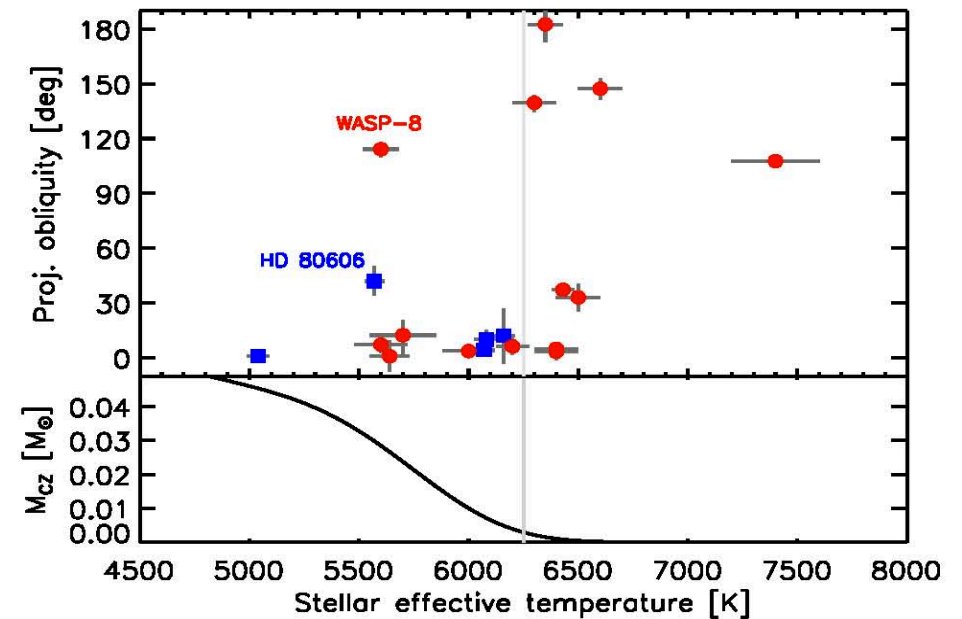
# 恒星自転軸と惑星公転軸の傾き

## □ Rossiter-Mclaughlin効果

[http://subarutelescope.org/Pressrelease/2010/12/20/j\\_index.html](http://subarutelescope.org/Pressrelease/2010/12/20/j_index.html)



## □ 中心星有効温度との関係



Winn et al. 2010

晩期型星(対流層発達)では恒星自転軸と惑星公転軸が揃っている傾向

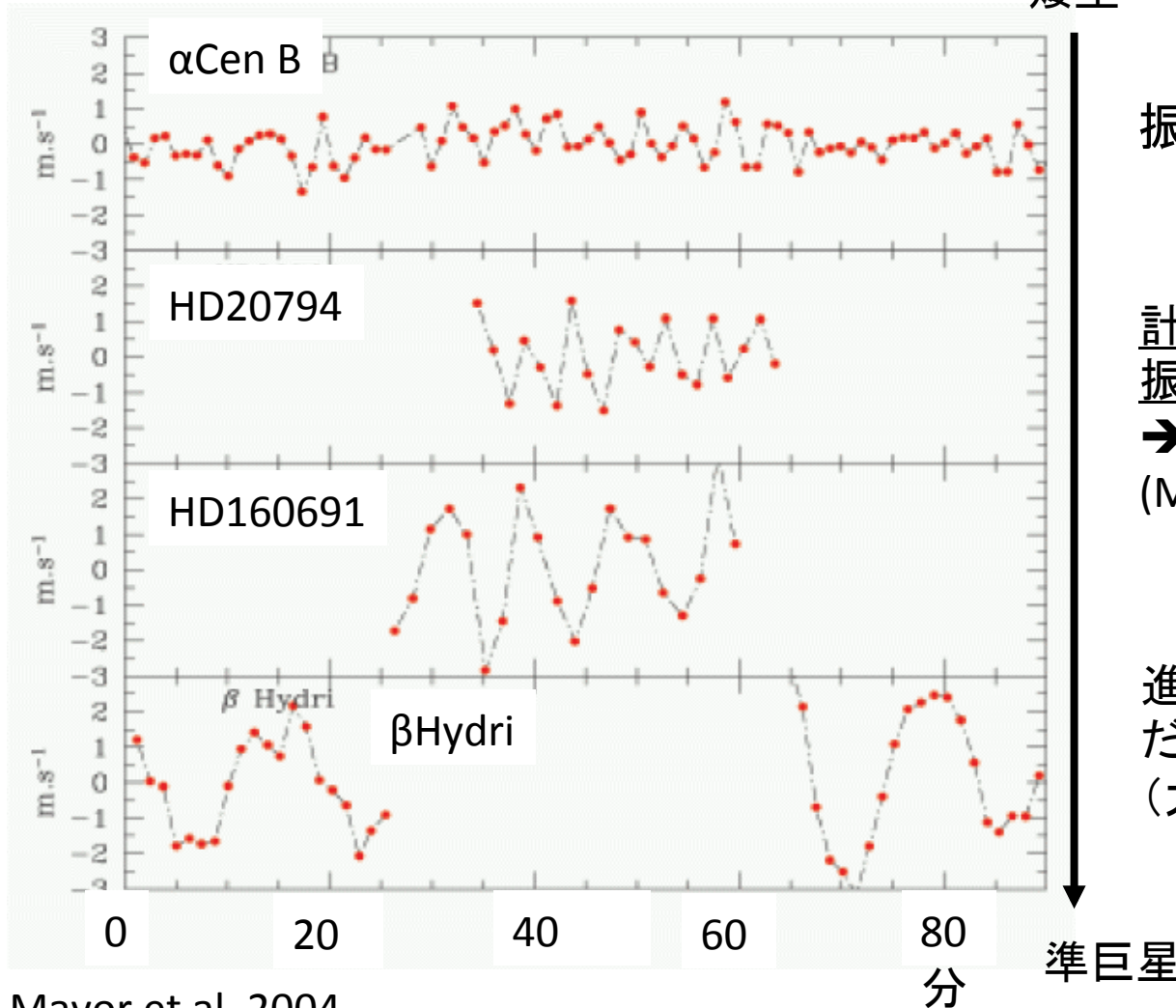
地球、木星は発見できるか

# 惑星探しの対象としての太陽



# 恒星の表面現象：p-mode

矮星



振幅  $\sim 1\text{-}3\text{m/s}$ , 周期  $\sim 5\text{-}10$ 分



計15分程度露出をかければ  
振動成分は平均化できる

$\rightarrow <0.2\text{m/s}$  (RMS)  
(Mayor, Udry 2008)

進化した星でも原理的に可能  
だが、より難しくなる  
(大振幅、長周期)

# 恒星の表面現象：granulation

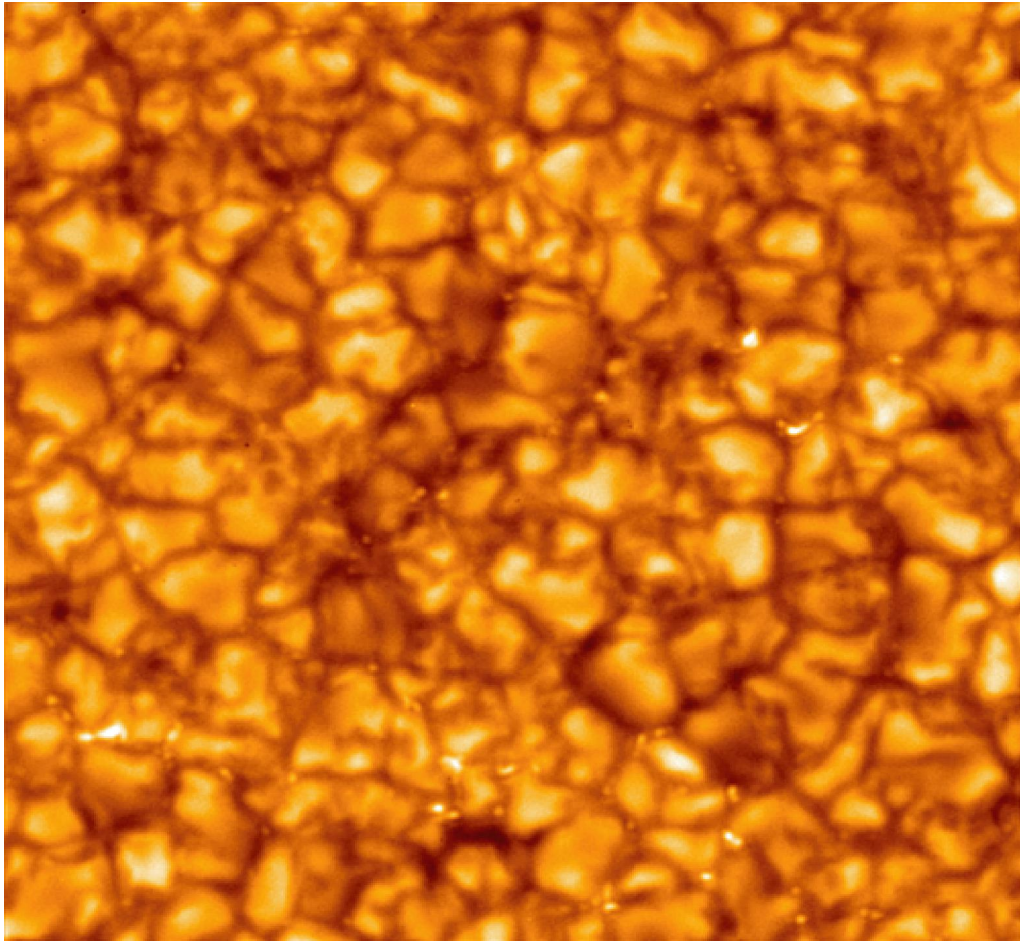
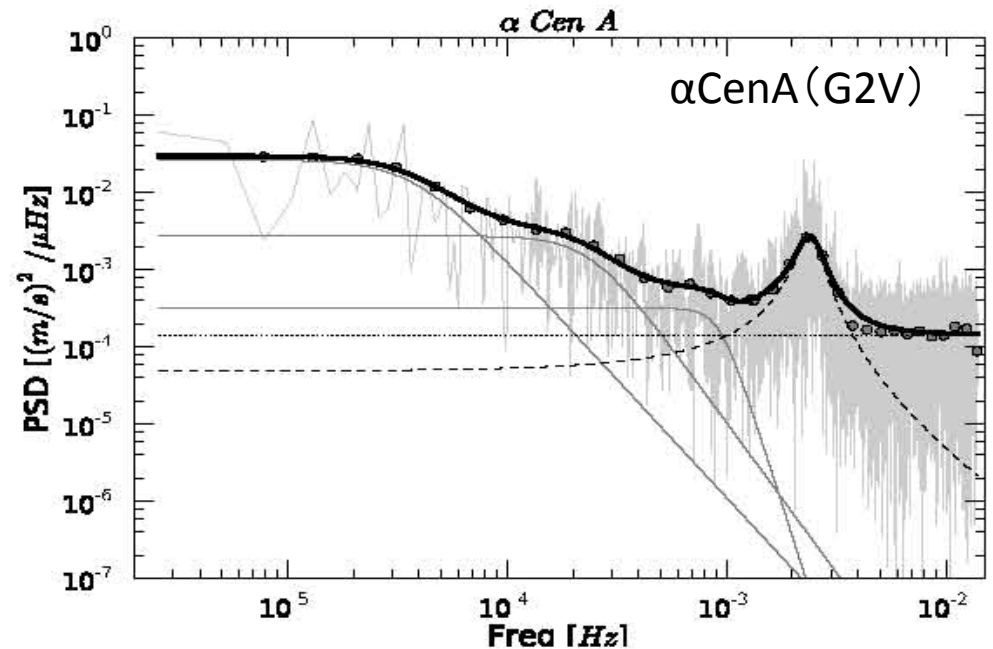


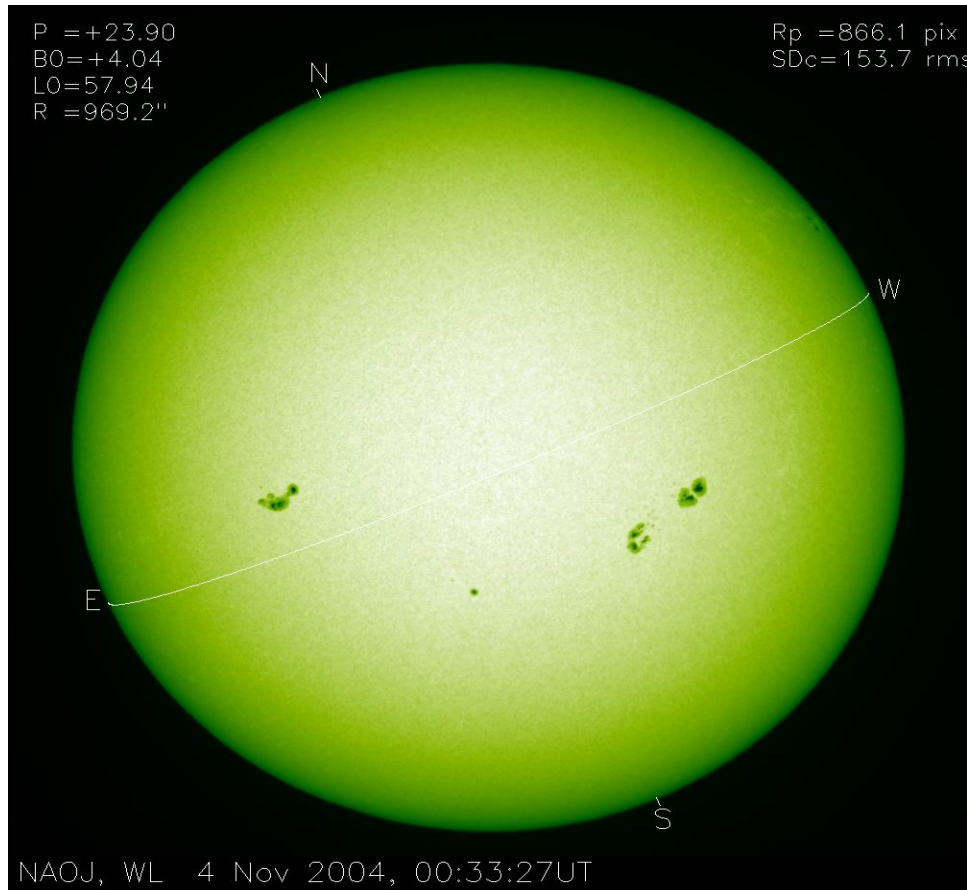
Image by Hinode

Granulationによるノイズ  
→より長い時間尺度(~30min-1day)で  
>1m/s (Kjeldsen et al. 2005)



時間尺度に応じた時間間隔でデータを  
取得・平均化することで<1m/sに低減可能  
(Dumusque et al. 2011)

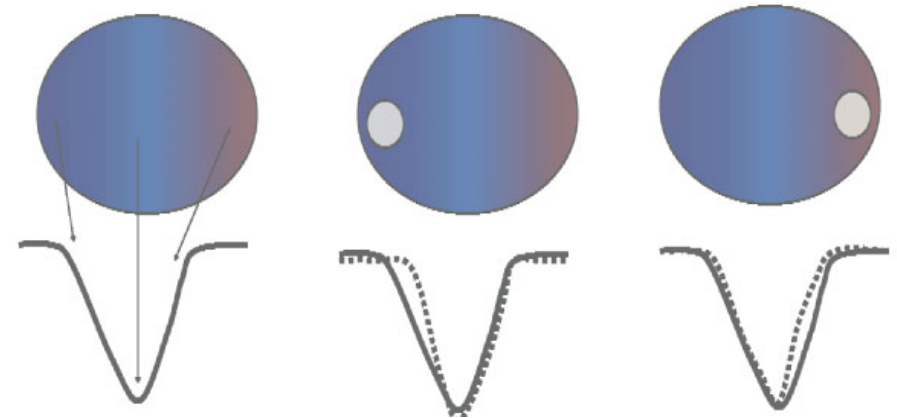
# 恒星の表面現象: spots



NAOJ

## 黒点の移動と吸収線のゆがみ

Fischer, D. (<http://exoplanets.astro.psu.edu/workshop/>)



見かけの視線速度変動は黒点の  
大きさ(カバー率)、自転速度に依る

太陽の場合、活動度最大のときで  
 $\sigma_{RV} \sim 50 \text{ cm/s}$  (Dumusque et al. 2011)

# 長期変動

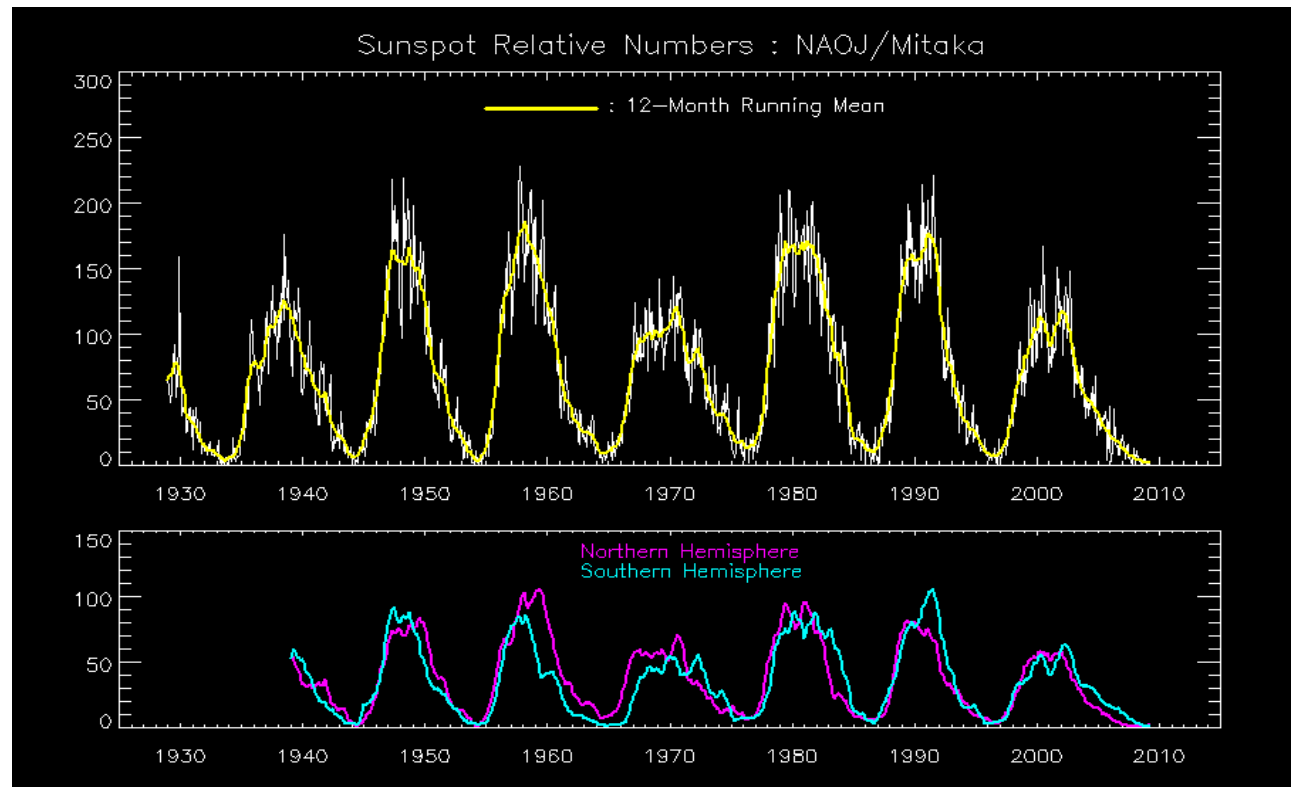
## □ Granule

熱い上昇流は冷たい  
下降流に比べて大きな  
面積を占める  
=> blue shift

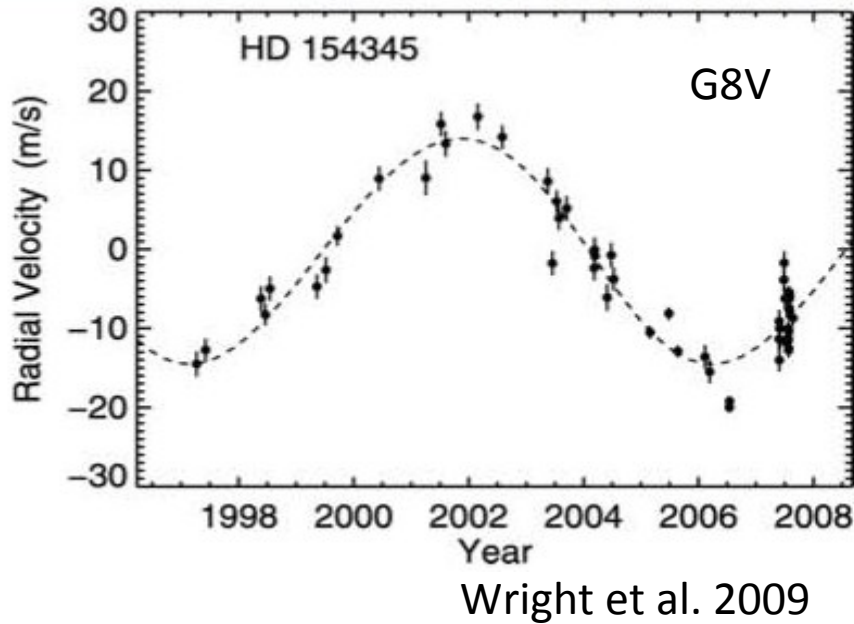
黒点のあるところでは  
対流が抑制  
=> 相対的に red shift

活動性(黒点数)と  
視線速度は正の相関

## 太陽の黒点数の変化(11年周期)



# 恒星活動との相関？



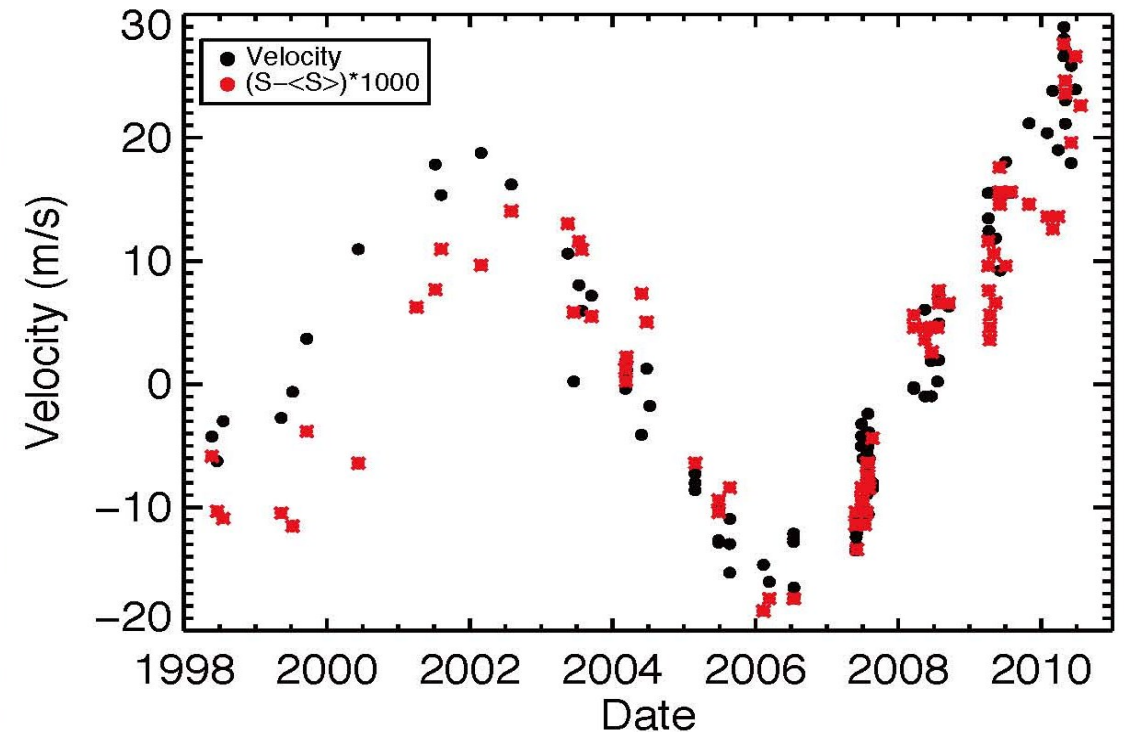
$M \sin i = 0.95 M_{\text{JUP}}$

$a = 4.2 \text{ AU}$

$P = 9.2 \text{ yr}$

黒: 視線速度

赤: 彩層輝線 (Ca I HK) 強度



惑星ではなく恒星活動の  
変化による見かけ上の  
視線速度変化か？

# まとめ

- 太陽系と系外惑星系
  - 系外惑星は多様
  - 約75%の恒星が何らかの惑星をもつ(検出限界以下のものも含めるとほぼ100%か?)
    - 巨大惑星をもつ恒星は約14%(太陽は少数派?)
    - 低質量惑星( $<30M_E$ )は巨大惑星より豊富に存在
- 惑星探しの対象としての太陽
  - 表面活動(振動、granule、黒点等)に起因する視線速度変動が惑星検出(観測結果の解釈)を難しくする
  - 活動性の特徴(タイムスケール、変動の大きさ)をよく理解し、適切な観測戦略(頻度、回数)を立てる必要がある