

視線速度精密測定による G型巨星の惑星サーベイ III.

- 第2期プロジェクト観測(2007～2009年)の概要と実績
- 第3期プロジェクト観測(2009～2012年)の概要

佐藤文衛¹, 原川紘季¹, 大宮正士², Liu Yujuan³,
泉浦秀行⁴, 神戸栄治⁴, 竹田洋一⁵, 吉田道利⁶,
伊藤洋一⁷, 安藤裕康⁵, 小久保英一郎⁵, 井田茂¹

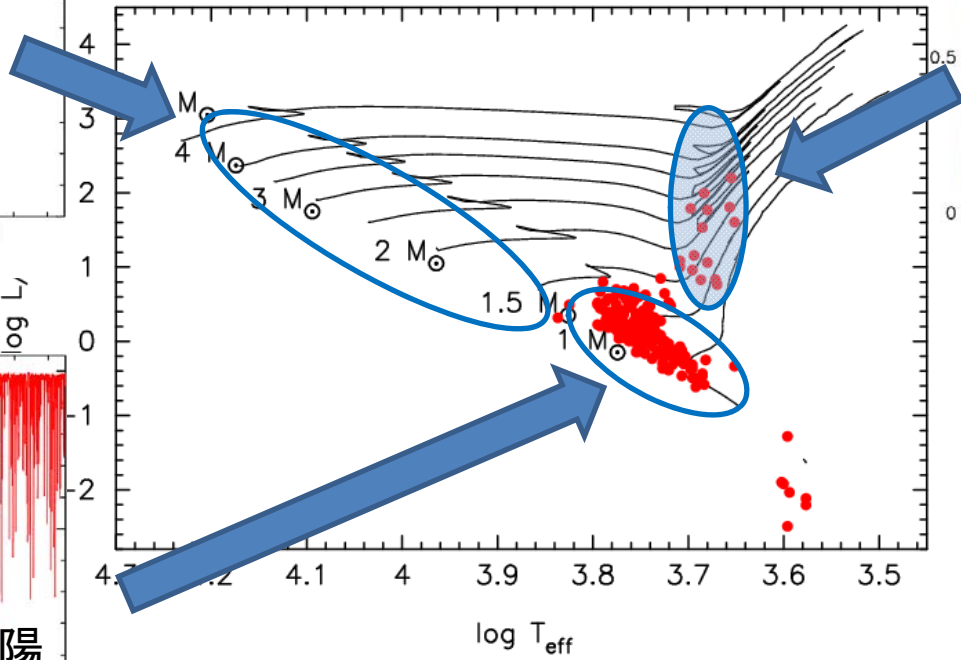
¹東工大, ²KASI, ³NAOC, ⁴OAo, ⁵NAO, ⁶広島大, ⁷神戸大

G型巨星惑星探索

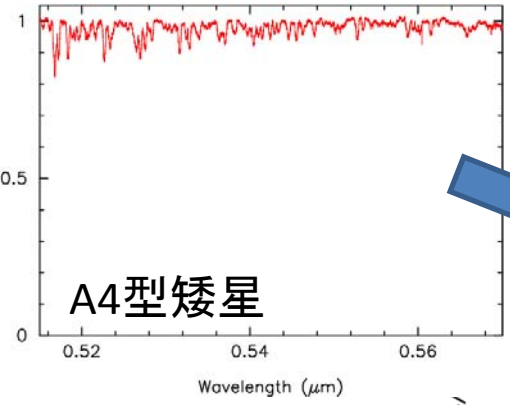
- 中質量星 ($1.5 \sim 5M_{\odot}$) の周りの惑星探索
 - 早期型主系列星ではドップラー法による惑星検出は困難
 - 太陽型星に比べてサーベイが進んでいない
- 惑星形成の普遍性を探る
 - 原始惑星系円盤をもつ若い中質量星 (Herbig Ae/Be星) は多数見つかっている。最近はやい中質量星で惑星の直接検出もあり。
- 惑星形成の中心星依存性を明らかにする
 - 原始惑星系円盤の質量大 \rightarrow 惑星頻度大? 惑星質量大?
 - 中心星光度大 \rightarrow 固体物質欠乏? 惑星形成阻害?
 - 原始惑星系円盤の寿命短 \rightarrow 惑星形成、移動のタイムスケール?
- 中心星の進化と惑星系の進化
 - 潮汐力により惑星が中心星へ落下
 - 恒星進化の理解

Why G-giants ?

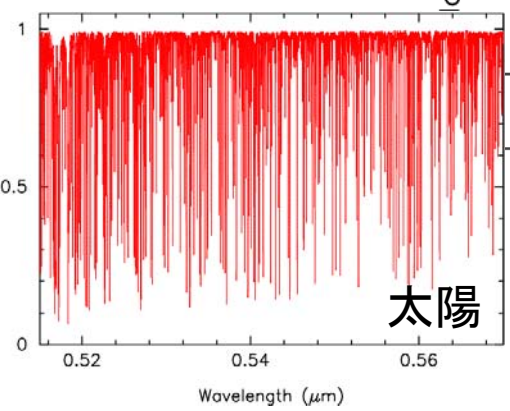
惑星をもつ恒星の分布



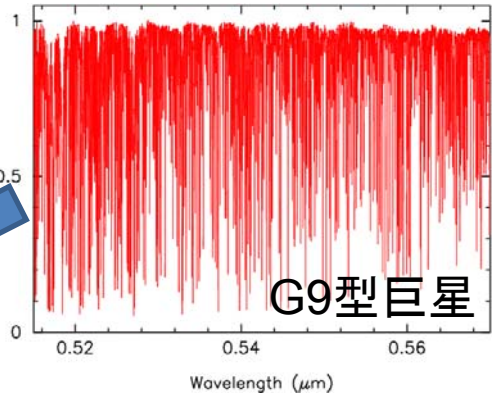
A4型矮星



太陽



G9型巨星



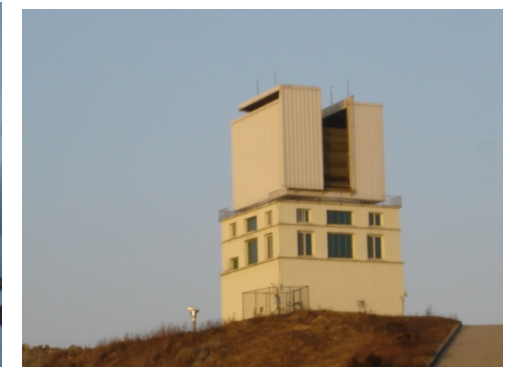
- 我々のターゲット
GK型巨星
- $0.6 < B-V < 1.0$
 - $-3 < M_V < 2.5$
 - $\delta > -25^\circ$
 - $\sigma_{RV} < 10-20 \text{ m/s}$

晩期G型～早期K型の巨星は、視線速度精密測定による中質量星まわりの惑星探索に適している

東アジアプラネットサーチネットワーク

East-Asian Planet Search Network (EAPSNET)

- 岡山プロジェクト:岡山1.88m鏡
 - 300 GK giants ($V < 6$), since 2001
 - 9 planets and 1 brown dwarf
- 日中協力:興隆 2.16m鏡(+岡山)
 - 100 GK giants ($V \sim 6$), since 2005
 - (1 planet and 1 brown dwarf)
 - Liu, Wang, Zhao et al.
- 日韓協力:普賢山1.8m鏡(+岡山)
 - 190 GK giants ($V < 6.5$), since 2005
 - 1 brown dwarf
 - Han, Lee et al.
- すばるプロジェクト:すばる8.2m鏡(+岡山)
 - >200 GK giants ($6.5 < V < 7$), since 2006
 - 1 planet and 1 brown dwarf
- 日土協力:TUBITAK 1.5m鏡
 - 50 GK giants ($V \sim 6.5$), since 2008
 - Selam, Bikmaev, Yilmaz et al.



Goal:
~100 planets
from 1000 stars

第2期プロジェクト観測：目的

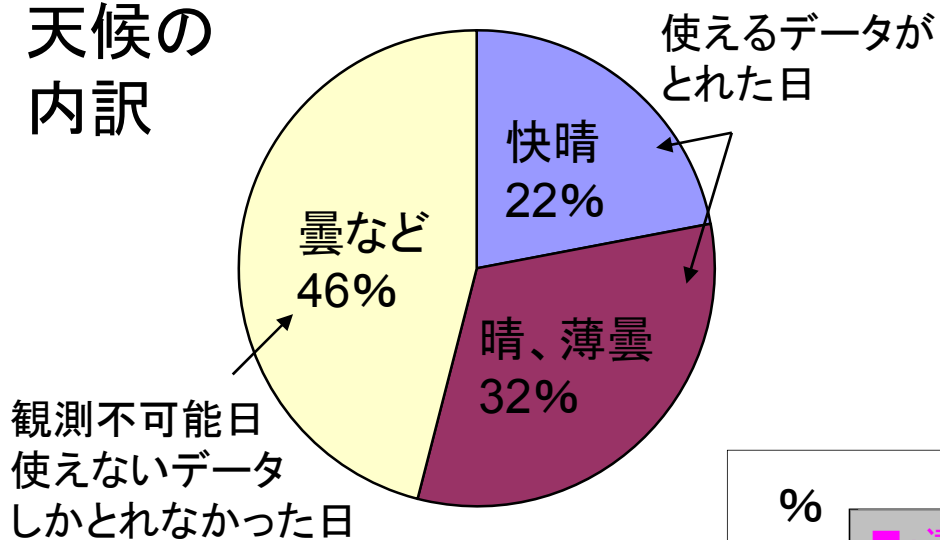
- 第1期プロジェクト(2004～2006年)で複数の惑星候補検出、**その統計的性質は太陽型星の惑星とは違う可能性がある**ことが分かった。これを踏まえて第2期(2007～2009年)のプロジェクト観測では、
 - **時間軸の延長**
 - 周期の確定していない惑星候補の軌道決定
 - ターゲット全体の時間軸を延ばし(最長9年、10AUの約3分の1)、3～4AU以内の惑星系について均質なサンプルに基づく統計
 - 数AU～10AUの惑星形成効率は太陽型星との比較において重要
 - さらに長周期の惑星、多重惑星系の頻度推定
 - **サンプルの拡大とフォローアップ**
 - 現在日中韓で約600個のターゲットを観測中(**目標1000個**)
 - 中国ターゲットのうち未着手の約50個を岡山に移し、サーベイを加速
 - すばるHDSで見つかった候補のフォローアップ

第2期プロジェクト観測：計画

- 申請夜数・・・半期35夜(7夜×5回)×3年
- 観測対象
 - 継続300天体、中国からの移行50天体、すばる他からの重要天体
- 観測内容
 - ヨードセルを用いた視線速度精密測定
 - 惑星をもつ候補(約30個)・・・1~2ヶ月に1回→順調
 - それ以外の継続天体(約270個)・・・年2回程度→順調
 - 中国からの移行分(約50個)・・・まず最初の1年半で3回
 - 現在は視線速度変化を示す天体を中心に定期的なモニターに移行
 - 他のサイトからの重要天体のフォローアップ
 - 現在は特にすばる天体を重点的に観測
 - 大気パラメータ決定、組成解析用スペクトルの取得
 - 中国からの移行分・・・5000–6000 Å →完了(Liu et al. 2010)
 - 惑星をもつ候補・・・6000–8000 Å (余裕があれば。実際はあまりない。)
 - 恒星活動の調査
 - 視線速度の周期的変化を示す天体を中心に・・・CaIIHK線領域
 - HIDESのCCDモザイク化により視線速度データと同時に取得可能(但し効率は低い)

観測実績：2007年1月～2009年12月

天候の内訳



(2004～2006年とほぼ同じ内訳)

観測実施率、達成率

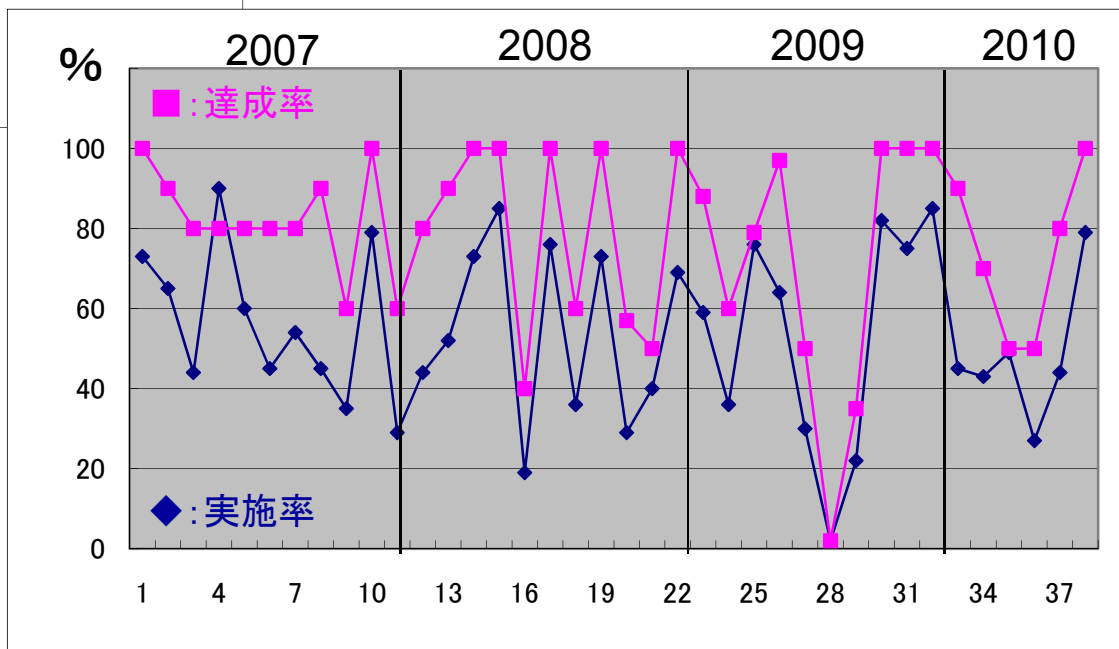
2007年：実56%、達81%
 2008年：実54%、達80%
 2009年：実53%、達71%
 (2010年前：実48%、達73%)

ほぼ満足のいく達成率

割当夜数：合計208夜

2007年：前35夜、後35夜
 2008年：前34夜、後35夜
 2009年：前35夜、後34夜
 (2010年：前36夜、後38夜)

ほぼ希望通りに割り当てて頂いた



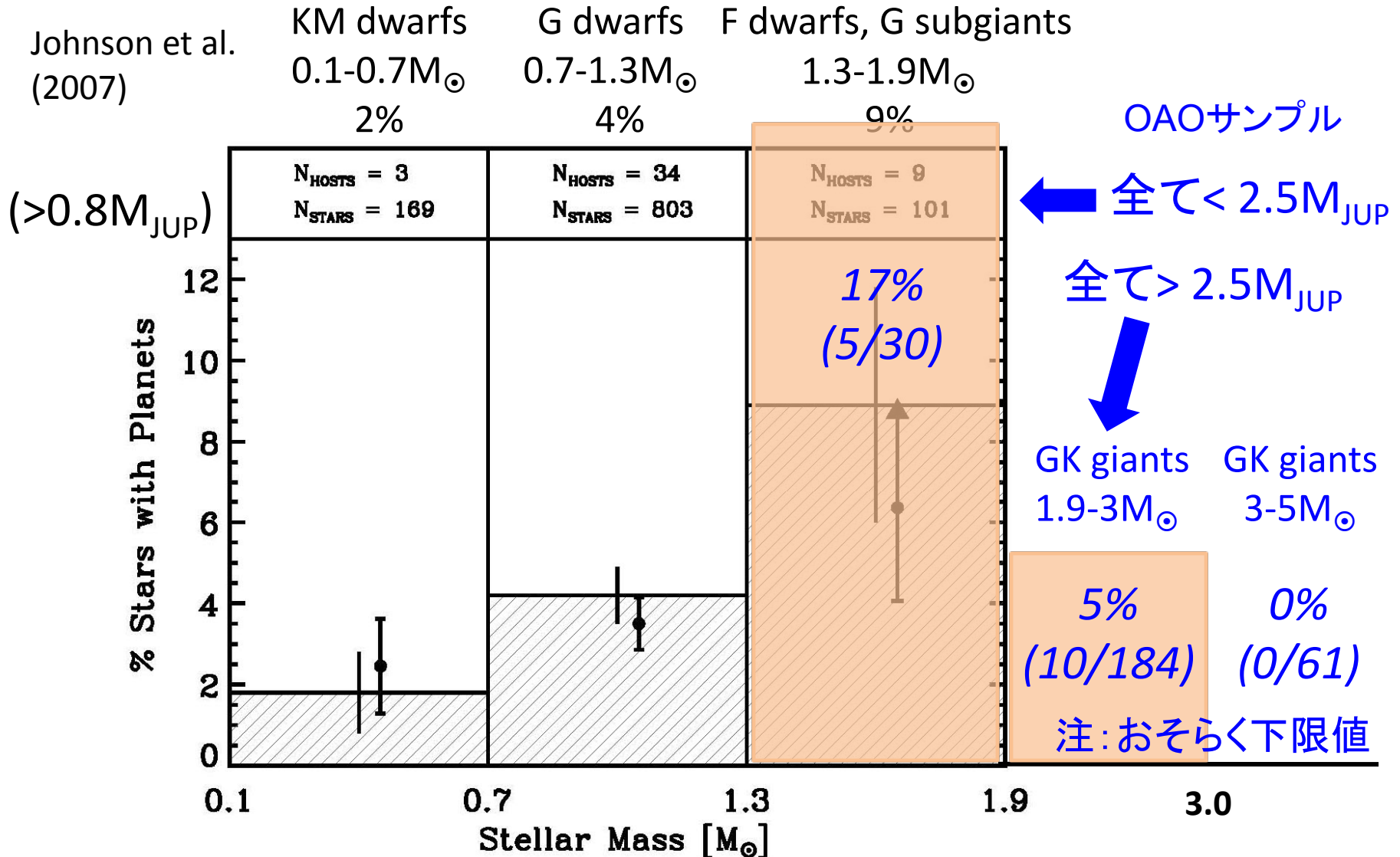
発表された成果

- 査読論文8編(2007年以降。それ以前には関連論文3編あり。)
 - A Planetary Companion to the Hyades Giant ϵ Tauri
 - Sato et al. 2007, ApJ, 661, 527
 - A Substellar Companion to the Intermediate-Mass Giant 11 Comae
 - Liu, Sato, Zhao, et al. 2008, ApJ, 672, 553
 - Planetary Companions around Three Intermediate-Mass G and K Giants: 18 Delphini, ξ Aquilae, and HD 81688
 - Sato et al. 2008, PASJ, 60 539
 - Stellar Parameters and Elemental Abundances of Late-G Giants
 - Takeda, Sato, and Murata, 2008, PASJ, 60, 781
 - Planetary Companions to Evolved Intermediate-Mass Stars: 14 Andromedae, 81 Ceti, 6 Lyncis, and HD 167042
 - Sato et al. 2008, PASJ, 60, 1317
 - A Planetary Companion Orbiting the Intermediate-mass G Giant HD 173416
 - Liu et al. 2009, RAA, 9, 1
- NEW!** • **Substellar Companions to Evolved Intermediate-Mass Stars: HD 145457 and HD 180314**
 - Sato et al. 2010, PASJ, 62, 1063
 - すばると岡山による初の惑星、褐色矮星の発見
- NEW!** • **Stellar Parameters and Abundance Analysis of 58 Late G Giants**
 - Liu et al. 2010, PASJ, 62, 1071
 - 興隆(中国)との共同研究。興隆サンプルの物理パラメータ、化学組成解析
- 記者発表3回(会見2回、ウェブリリース1回)
- さらに、現在3編の論文を準備中(岡山1、日中1、すばる1)

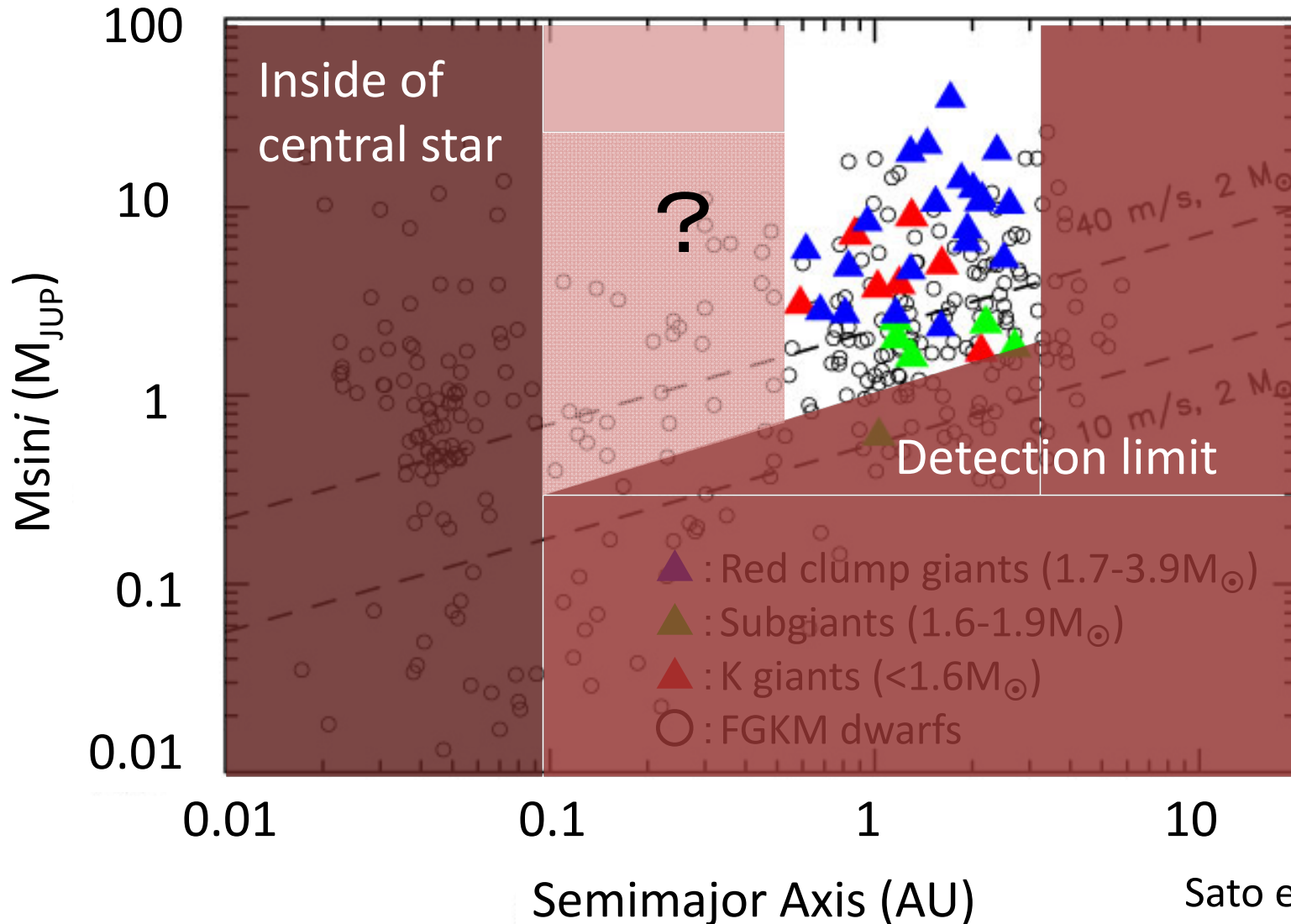
EAPSNETによるこれまでの発見

Star Name	Sp. Type	Stellar Mass (M_{\odot})	Stellar Radius (R_{\odot})	Planetary Mass (M_{JUP})	Semi-major Axis (AU)	Eccentricity	Metallicity ([Fe/H]) (dex)	備考
HD 119445	G6III	3.9	20.5	37.6	1.71	0.08	+0.04	日韓
ϵ Tau	K0 III	2.7	13.7	7.6	1.93	0.15	+0.13	
11 Com	G8 III	2.7	19	19.4	1.29	0.23	-0.28	日中
HD 180314	K0 III	2.6	9.2	22	1.4	0.26	+0.20	すばる
81 Cet	G5 III	2.4	11	5.3	2.5	0.21	+0.06	
18 Del	G6 III	2.3	8.5	10.3	2.6	0.08	-0.05	
HD 104985	G9 III	2.3	11	8.3	0.95	0.09	-0.35	
ξ Aql	K0 III	2.2	12	2.8	0.68	0	-0.18	
14 And	K0 III	2.2	11	4.8	0.83	0	-0.24	
HD 81688	K0 III-IV	2.1	13	2.7	0.81	0	-0.34	
HD 173416	G8 III	2.0	13.5	2.7	1.2	0.21	-0.22	日中
HD145457	K0 III	1.9	9.9	2.9	0.76	0.11	-0.14	すばる
6 Lyn	K0 IV	1.7	5.2	2.4	2.2	0.13	-0.13	
HD 167042	K1 IV	1.5	4.5	1.6	1.3	0.10	+0.00	

惑星頻度 vs. 中心星質量



軌道長半徑



理論予測：惑星頻度、軌道長半径

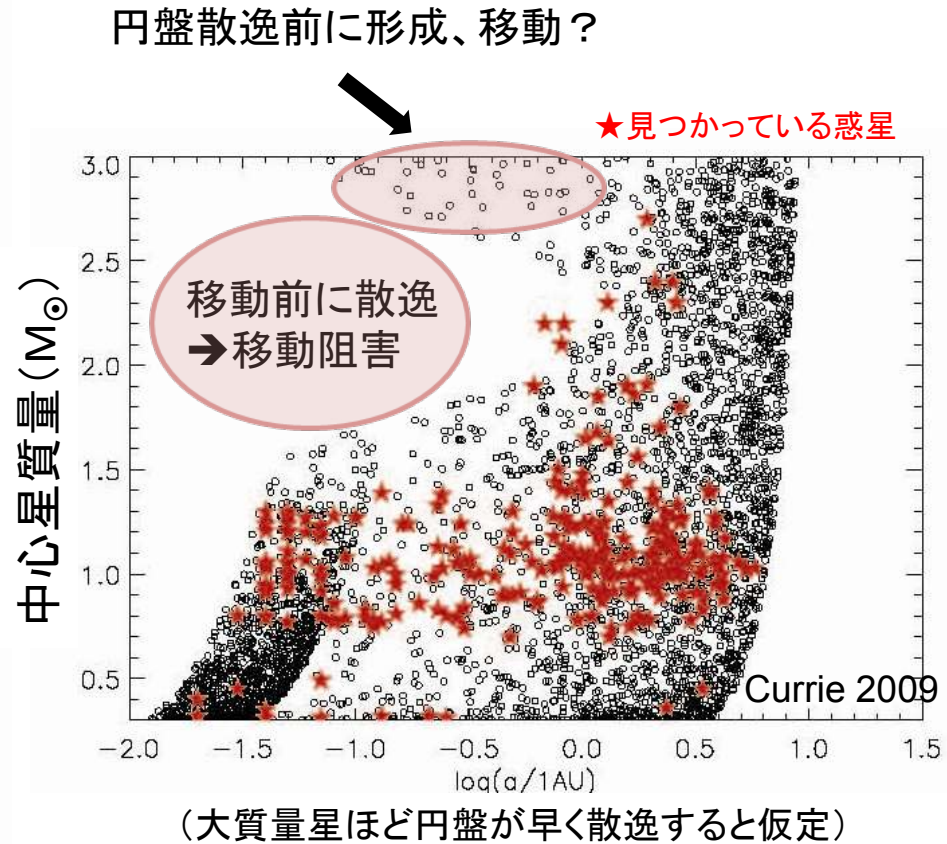
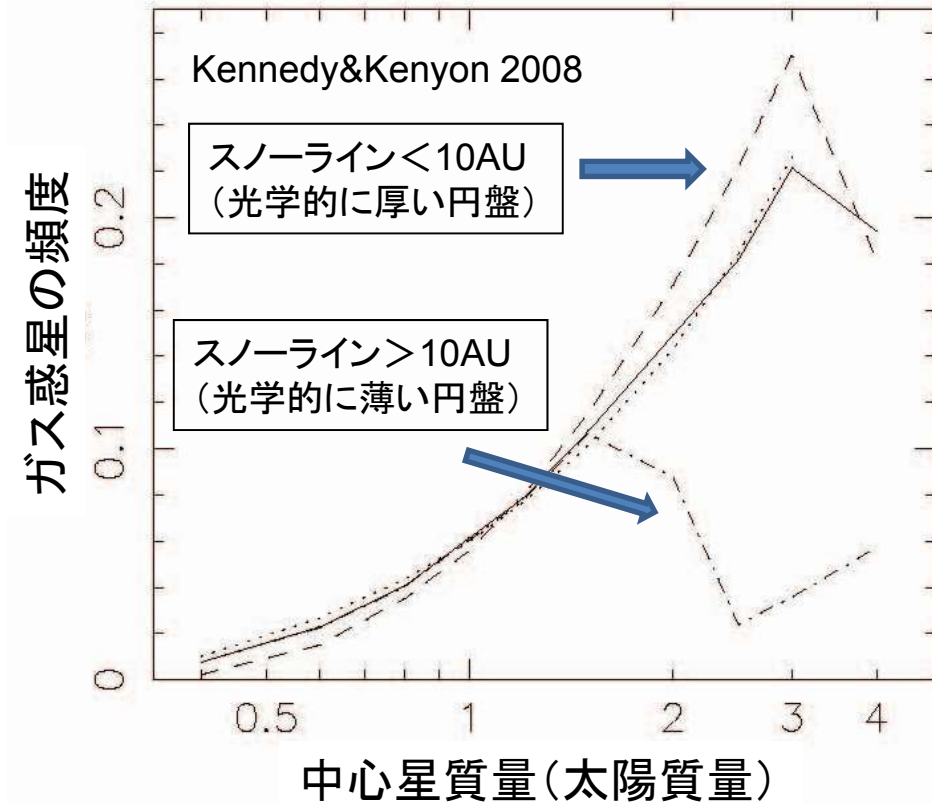


FIG. 7.—Probability of a star harboring at least one gas giant planet as a function of stellar mass for our baseline model (solid line) and $\delta = 1$ and $M_{\text{core}} = 5 M_{\oplus}$ and $P_{M_{\oplus}} = 0.20$ for comparison with a straight line ...

巨大惑星の頻度は惑星形成期のスノーラインの位置に敏感

内側領域の惑星分布は、円盤散逸と惑星形成・移動の時間尺度の兼ね合い

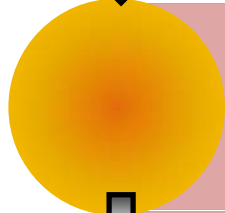
中心星進化の影響

AB dwarf
($\sim 2R_{\odot}$)



理論計算実行中
(國友、生駒@東工大)

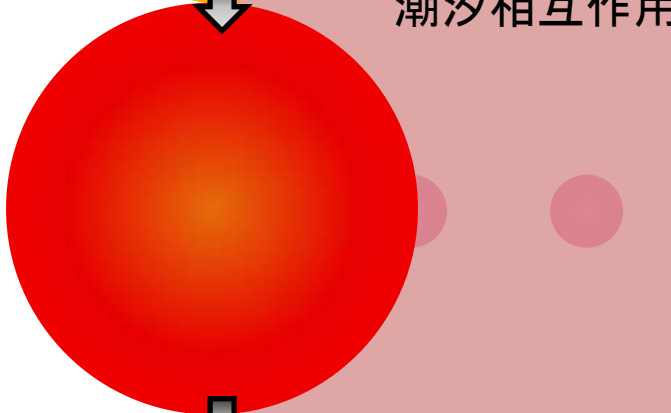
G giant
($10-20R_{\odot}$)



Pre-RGBより
Post-RGBの
滞在時間の方が
圧倒的に長い
(\sim 数10-100倍)

RGB
stars

潮汐相互作用

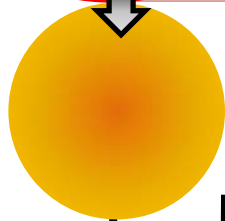


K giant
($\sim 40R_{\odot}$)



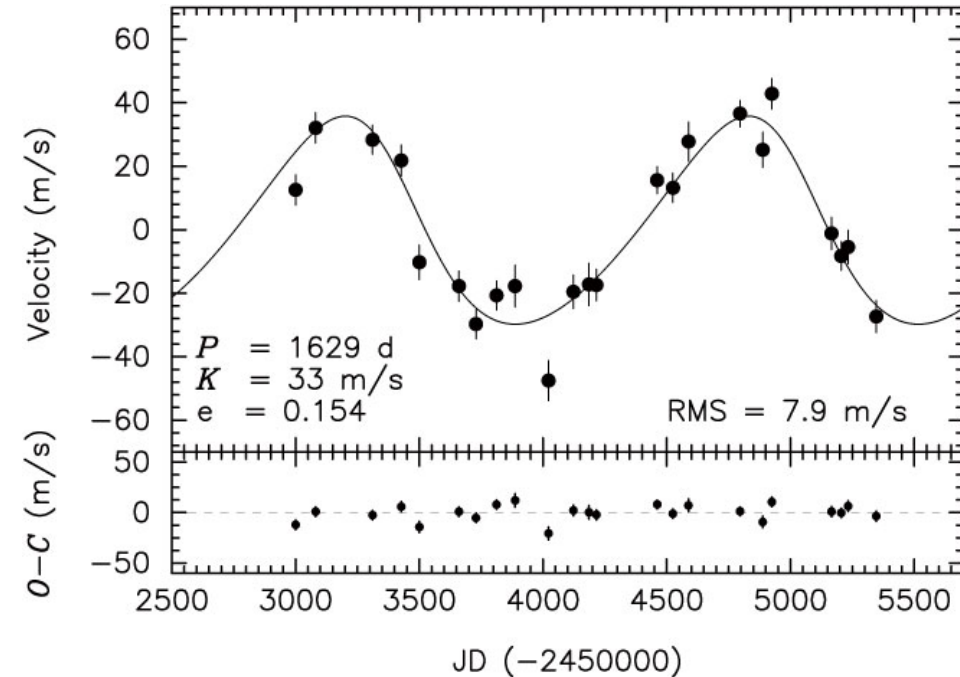
1000天体くらい
観測すれば両者の
統計的な議論が
可能

G giant
(He-burning
star)



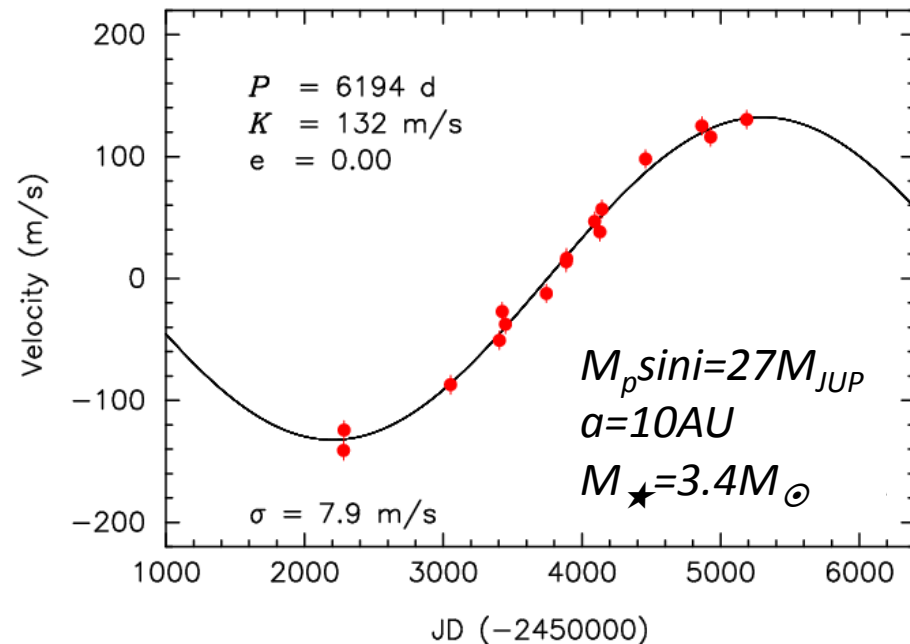
0.5 1 AU

4AU以遠の惑星候補



$$M_p \sin i = 4 M_{\text{JUP}}$$
$$a = 4 \text{ AU}$$
$$M_{\star} = 3 M_{\odot}$$

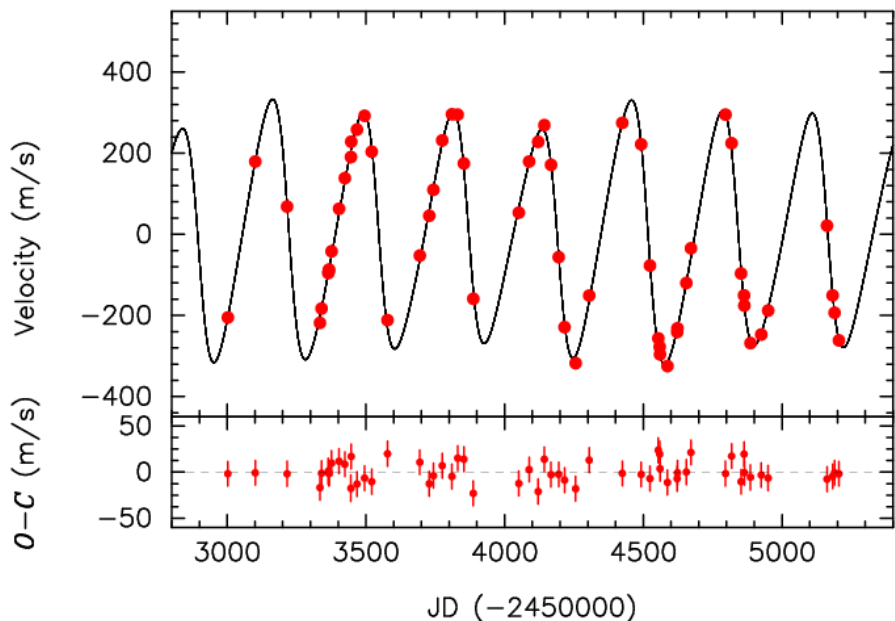
軌道フィットは予備的



約15天体が1000日以上
のタイムスケールの
長期変動を示す

時間軸をさらに延ばす意義がある

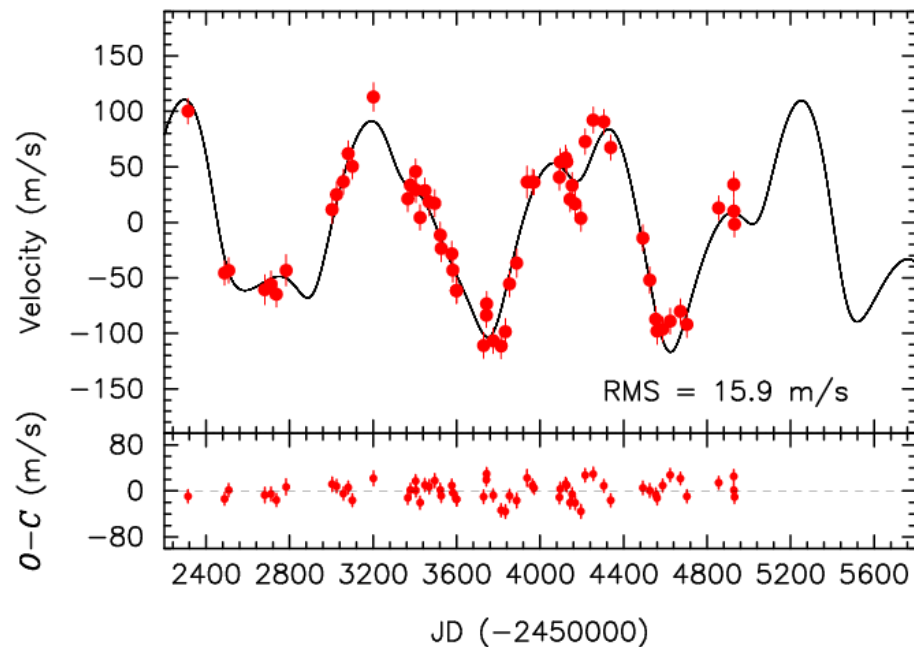
多重惑星系



- b* $P=323d$ ($a=1.3AU$), $M_{sini}=19M_{JUP}$
c $P=428d$ ($a=1.5AU$), $M_{sini}=1.8M_{JUP}$
d? $P=620d$ ($a=2AU$), $M_{sini}=1.3M_{JUP}$

平均運動共鳴？

- b* $P=427d$ ($a=1.4AU$), $M_{sini}=2M_{JUP}$
c $P=975d$ ($a=2.5AU$), $M_{sini}=6.5M_{JUP}$



中国サンプルからの惑星候補

b: $P=367d$ ($a=1.2AU$)

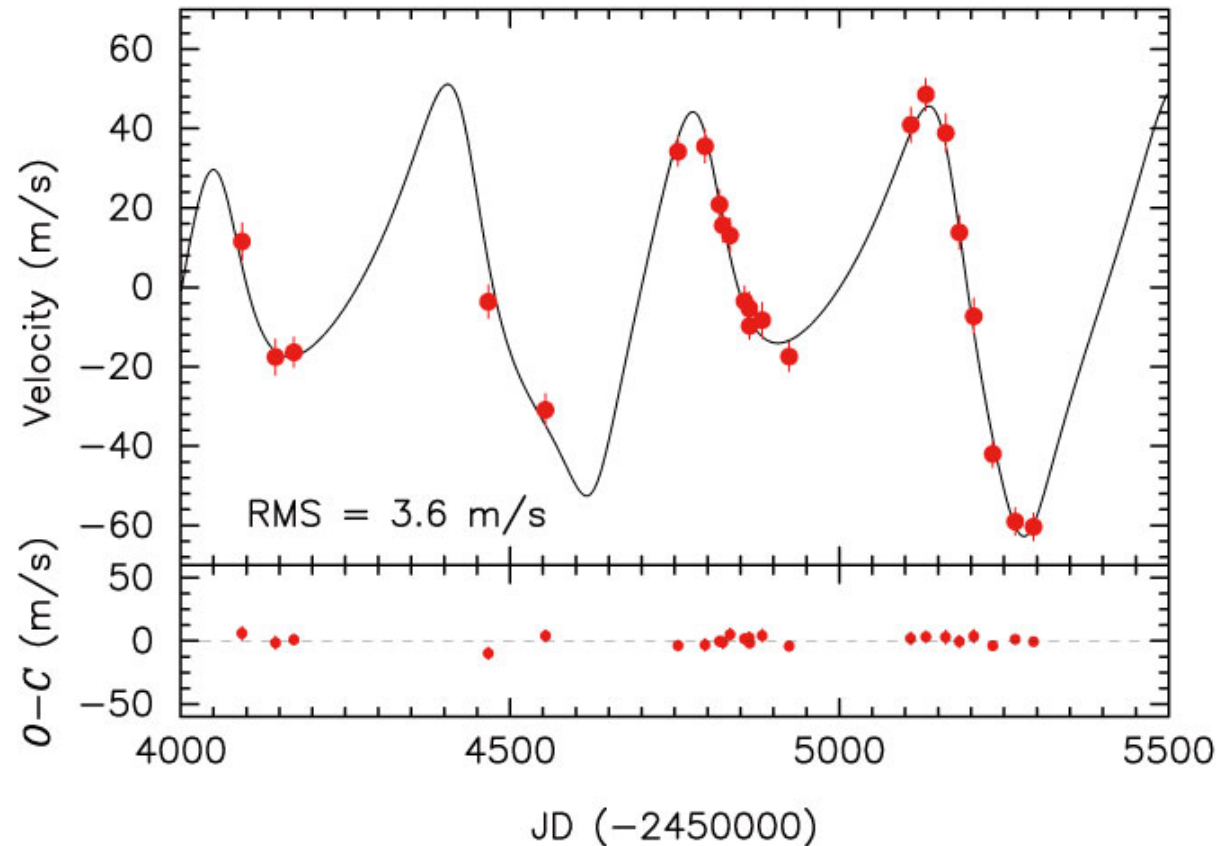
$$M_p \sin i = 1.7 M_{JUP}$$

c: $P=655d$ ($a=1.8AU$)

$$M_p \sin i = 1.4 M_{JUP}$$

Preliminary

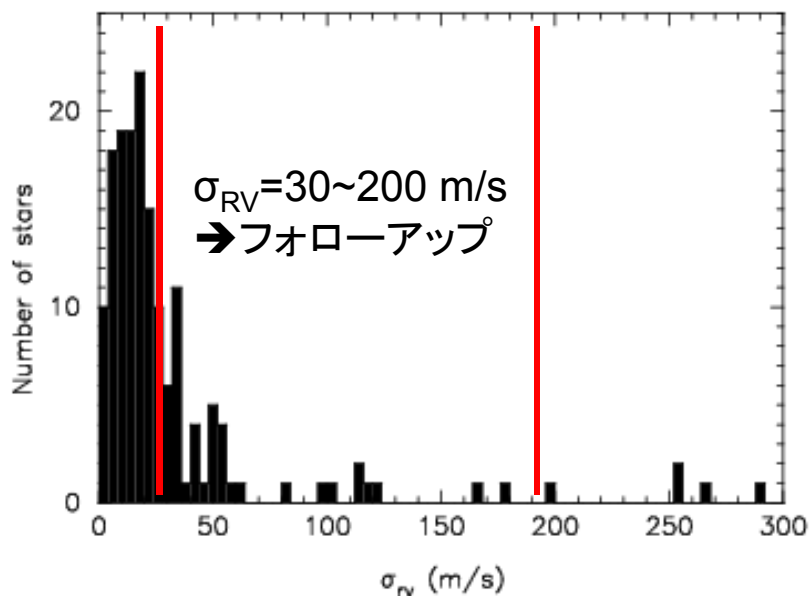
中国から移した50
天体のうち17天体
を岡山で継続観測



すばるサンプルのフォローアップ

2006~2008年にすばる/HDSで
観測した200天体
(各天体につき3回観測)

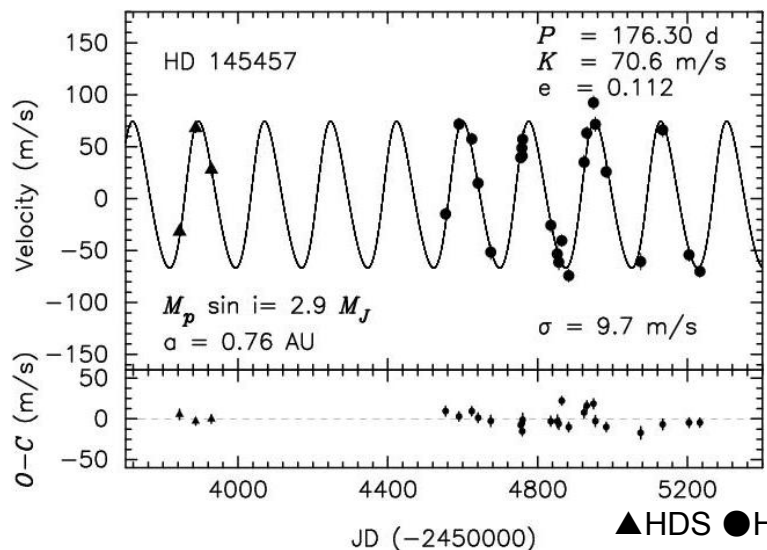
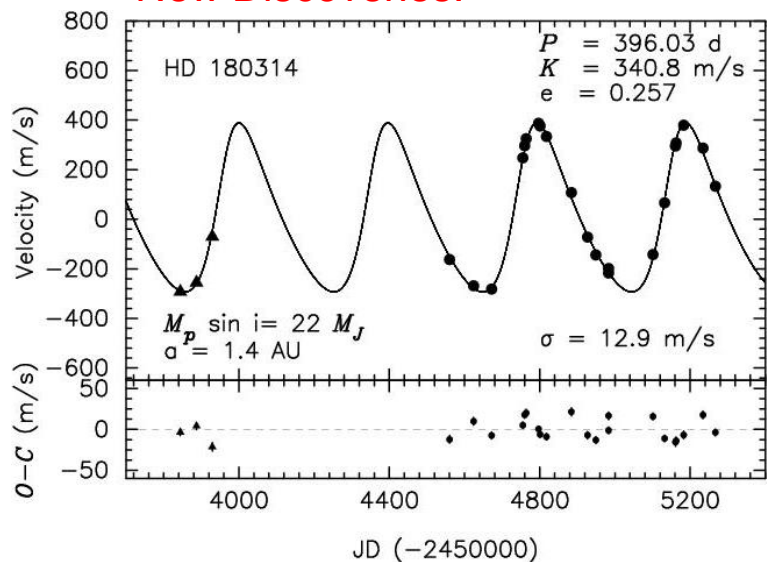
31天体を岡山で継続
フォローアップ



すばるで候補発見、岡山でフォローアップ

New Discoveries!

Sato et al. 2010



▲HDS ●HIDES

第3期プロジェクト観測：目的

■ さらなる時間軸の延長

- 4AU以遠(周期1000日以上)の惑星頻度を明らかにする
- 同時に、低質量惑星($< 2M_{\text{JUP}}$)の検出限界をできるだけ正確に見積もる
- 惑星形成期のスノーラインの位置、惑星形成メカニズムに制限

■ 惑星発見数の増大

- すばる等で発見した多数の候補天体のフォローアップを継続
- 中心星近傍における惑星欠乏の原因を統計的に議論
- 他の望遠鏡時間の獲得も引き続き推進

第3期プロジェクト観測：計画

- 申請夜数・・・半期40夜(6-7夜×6回)×3年
- 観測対象
 - (A)2001年から継続している岡山オリジナル天体300個
 - (B)すばる他からの要フォローアップ天体48個
- 観測内容
 - ヨードセルを用いた視線速度精密測定
 - 上記(A)について・・・すべてについて最低年4-5回(これまでより多め)
 - 上記(B)について・・・年5-8回程度
 - 視線速度標準星も毎回数個観測
 - 組成解析用スペクトル(兼視線速度解析用テンプレート)の取得
 - 上記(B)のうち半数について取得する必要あり
 - 恒星活動の調査
 - 視線速度の周期的変化を示す天体を中心に・・・CaIIHK線領域
 - ➔HIDESのCCDモザイク化により視線速度データと同時に取得可能(但し効率率は低い)

まとめ

- 第2期プロジェクト観測
 - 観測達成率は3年間の平均で77%
 - 実施率、達成率ともに第1期とほぼ同じ。プロジェクト観測のおかげ。
 - 成果は順調に出ている
 - 惑星発見論文、化学組成解析論文
 - 統計的性質に関する論文もなるべく早くまとめたい
 - 理論面での共同研究が進みつつある
 - 積み残しの課題
 - 恒星活動関連、データベース整備、ウェブ等
 - 第1期の頃からあまり進展なし
- 第3期プロジェクト観測
 - 低質量惑星の検出限界をおさえるために各天体の観測頻度を増やす⇒フォローアップ天体の数をこれ以上増やせない
 - **ファイバー化によるスループット向上に期待**
 - **他の望遠鏡時間獲得も引き続き努力するが、十分な実績があり安定した観測が期待できる岡山プロジェクト観測はこの研究の生命線。**