

視線速度精密測定による G型巨星の惑星サーベイIV.

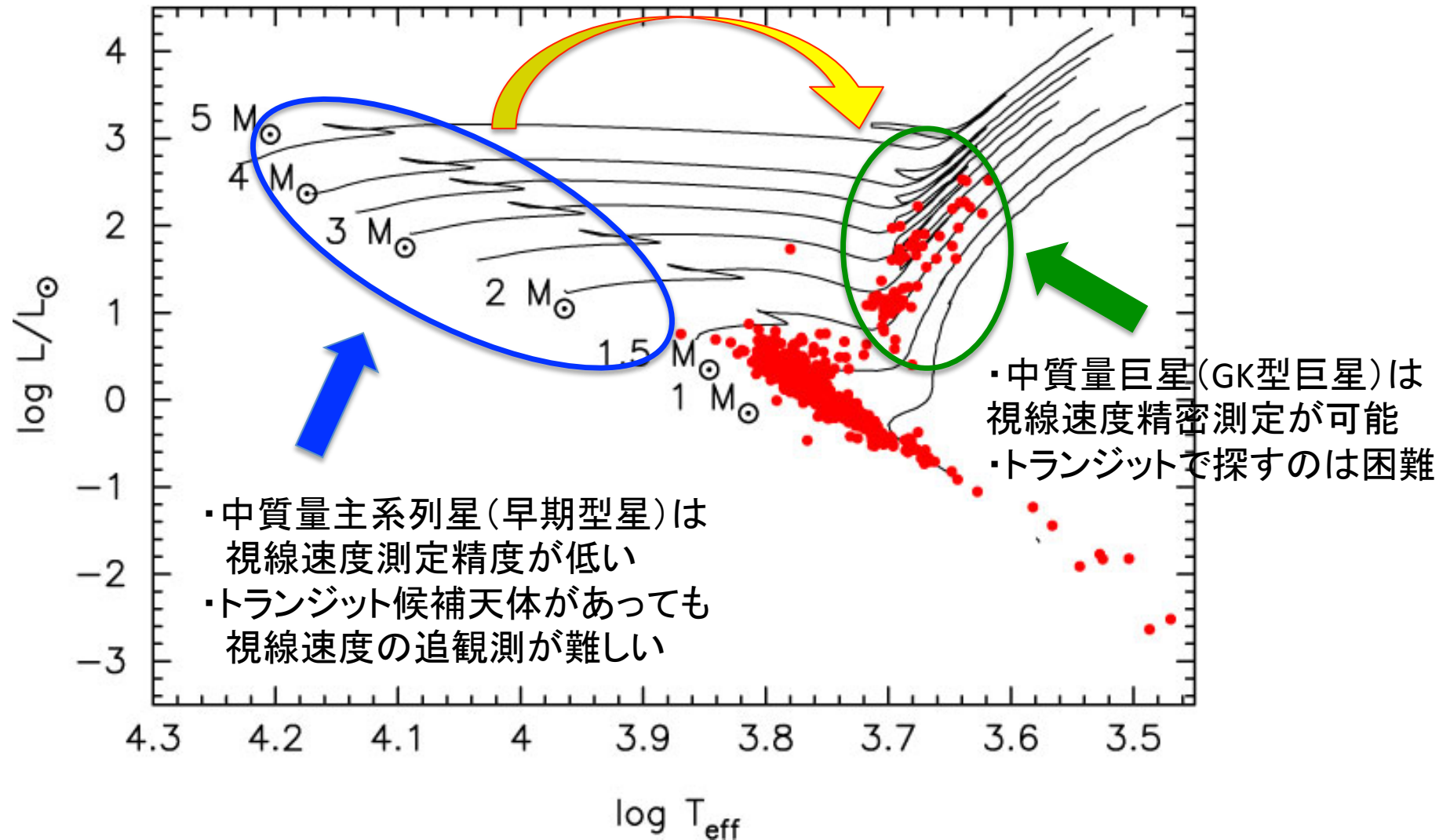
■第4期プロジェクト観測一年目(2013年後期～2014年前期)の報告

佐藤文衛¹, 原川紘季², 大宮正士²,
泉浦秀行³, 神戸栄治³, 竹田洋一², 吉田道利⁴,
伊藤洋一⁵, 安藤裕康², 小久保英一郎², 井田茂¹

¹東工大, ²NAO, ³OAO, ⁴広島大, ⁵兵庫県立大

中質量GK型巨星の視線速度サーベイ

視線速度観測で見つかった惑星をもつ恒星の分布



これまでに分かっている 中質量巨星周りの惑星の性質

□ 巨大惑星の頻度

- 少なくとも $M \sim 1.9M_{\odot}$ までは増加 ($\sim 10\text{--}20\%$; e.g. Johnson+ 2007; Bowler+ 2010)
- $M > 3M_{\odot}$ 以上では減少? (Sato+ in prep.)

□ 惑星質量分布

- 大質量惑星 ($> 5M_J$) は質量の大きな ($> 2M_{\odot}$) 巨星の周りに多く存在する傾向 (e.g. Lovis & Mayor 2007)

□ 軌道長半径分布

- ほぼ全ての惑星が $a > 0.6$ AU に見つかっている (e.g. Sato+ 2008; Johnson+ 2007)

□ 中心星金属量との相関

- はっきりしないが、金属量が少なめでも巨大惑星が存在する (e.g. Pasquini+ 2007; Takeda+ 2008; Mortier+ 2013)

理論的予測

■ 巨大惑星頻度

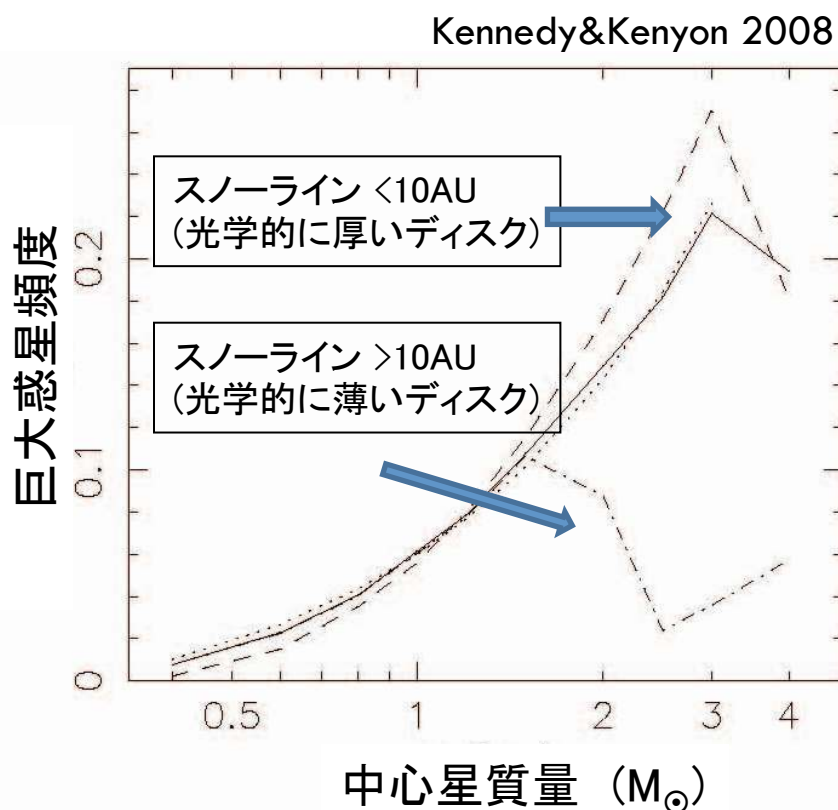
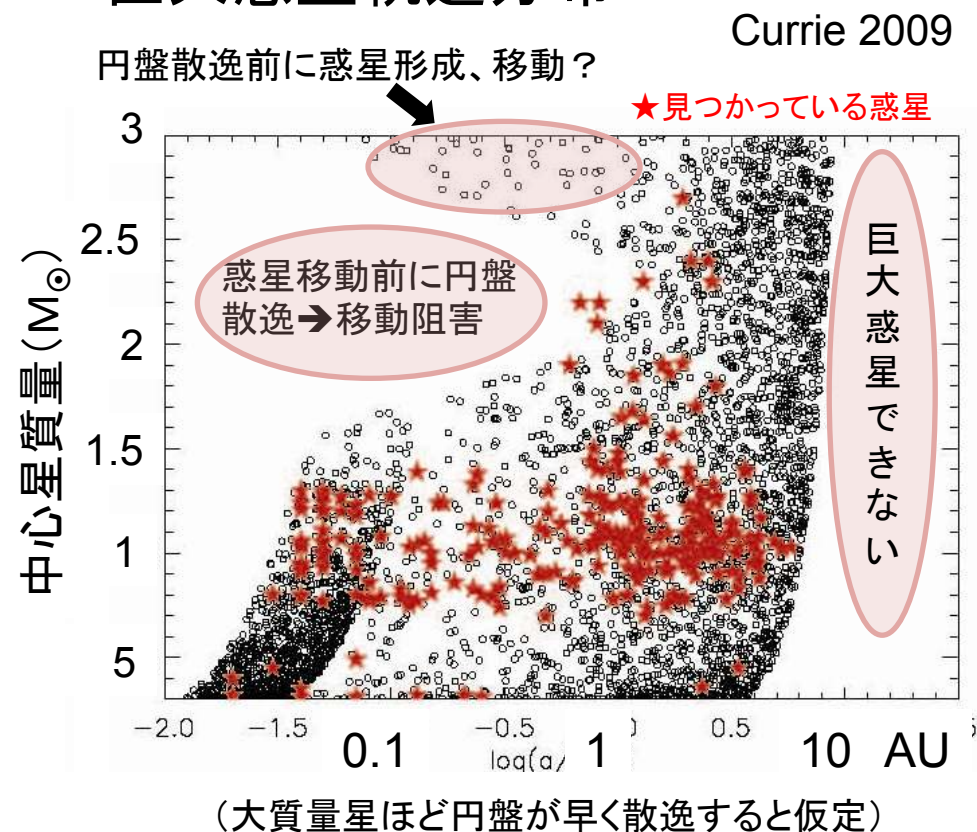


FIG. 7.—Probability of a star harboring at least one gas giant planet as a function of stellar mass for our baseline model (solid line), and $\delta = 1$ and $M_{\text{core}} = 5 M_{\oplus}$ (dashed line). The thin dotted line is a fitted line of constant slope $P_{M_*} = 0.20M_* - 0.06$. The dot-dashed line has $a_{\text{snow}} \propto 2.7M_*^2$ AU for comparison with Ida & Lin (2005). All curves are normalized to 6% at $1 M_{\odot}$ via a straight line fit.

■ 巨大惑星軌道分布



- 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 > 10AU に巨大惑星できにくい

第4期プロジェクト観測：目的

- **低質量惑星**
 - 5AU以内、 $\sim 1-2M_{\text{JUP}}$ の惑星候補の確認、軌道決定
 - 5AU以内の巨大惑星の統計を確立
- **複数惑星系**
 - 軌道間隔が近い複数惑星系の確認、軌道決定
 - 軌道安定性、形成・進化過程
- **短周期惑星（→個別課題へ）**
 - 短周期惑星候補の確認、軌道決定
 - 周期約30日以内、 $\sim 40M_{\text{E}}-2M_{\text{JUP}}$ の惑星頻度に初めて制限
- **遠方惑星（→個別課題へ）**
 - $\sim 5-10\text{AU}$ にある巨大惑星、褐色矮星の頻度推定
 - 惑星形成の外側限界への示唆

惑星の探索範囲(質量、周期)を拡大し、新たな発見を目指す
上記惑星は現状では視線速度観測によってのみ検出可能

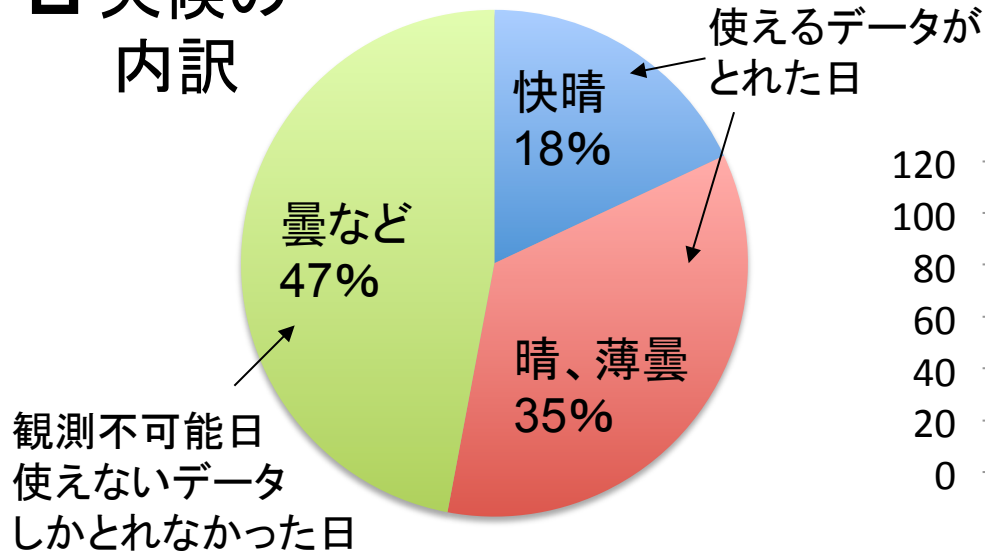
観測対象、観測内容、採択夜数

- 期間: 2013年後期～2016年前期
- 対象: 合計300個 ($V < 6.5$) のGK型巨星
 - 2001年の研究開始以降、岡山で観測したことのある天体
 - 中国・興隆、すばるサンプルだったものも含む
 - 観測期間6年以上
 - 遠方惑星探索に適
 - 単独星、かつ活動性(CaIIHK線強度から推定)が低い
 - 低質量惑星探索に適
 - 上記条件を満たすものから300個を再構成
- 内容: ヨードセルを用いた視線速度精密測定
 - これまでのデータとの連続性を担保しつつ、データ点数を稼ぐため、HIDES-SlitとHIDES-Fiberを併用
- 夜数: 年間50夜
 - 低質量惑星及び複数惑星系の軌道決定が主目的
 - 計約50天体に対し、今後それぞれ数十点のデータが必要
 - 各天体毎回3点以上、1～2ヶ月おきに年間計20点以上

 - 短周期惑星の集中探索・・・年間30夜 => 個別課題へ
 - 遠方惑星の探索・・・年間15夜 => 個別課題へ

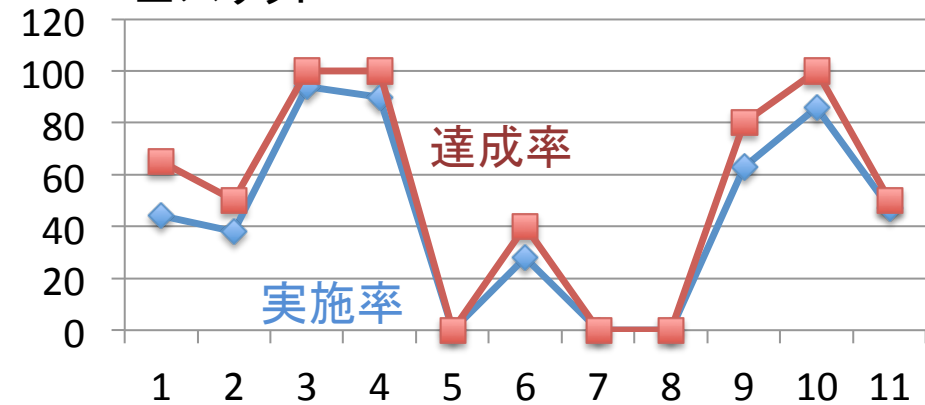
観測実績：2013年7月～2014年6月

□ 天候の内訳



□ 割当夜数：合計53夜

■ スリット



□ 観測実施率、達成率

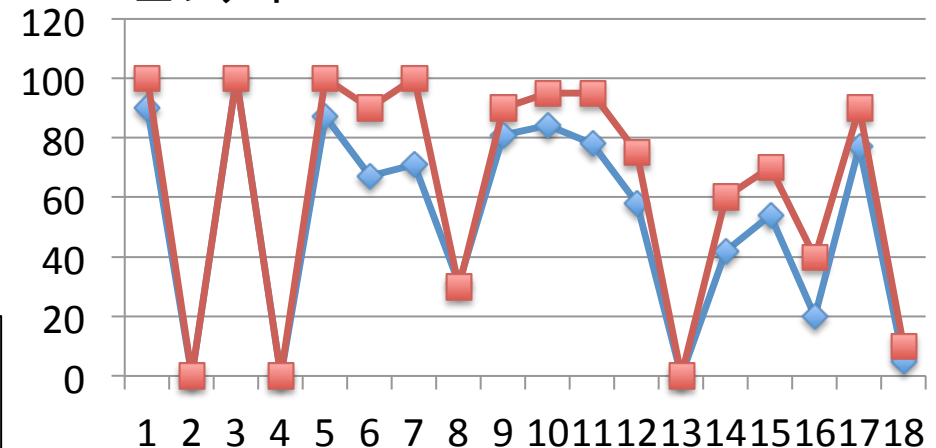
実施率**49%**、達成率**60%**

スリット(23夜)：実**45%**、達**53%**

ファイバー(31夜)：実**53%**、達**64%**

短期間(3日間以下)のランが増えたので
ラン毎の実施率に大きなばらつき

■ ファイバー



実施状況

- 重要天体(惑星をもつ候補星)については継続的にデータがとれている
- 連続3日以上ランが少ないので、毎回3点以上ではなく毎月3点以上を目標にしている
 - 1ヶ月程度の周期を追いかけるには適しているが、短周期成分を抑えるのは難しい
- スリットのデータはあまり取れていない
 - 天候に恵まれない、効率が低い
 - ファイバーと期間を重ねて取るのは現実的にはなかなか厳しい
 - ファイバーの**高分解能モード**でテンプレートをとり直す方向で考え直す
 - スリットとファイバーのデータ間にオフセットが乗らない(はず)

発表された成果（昨年のUM以降）

□ 査読論文

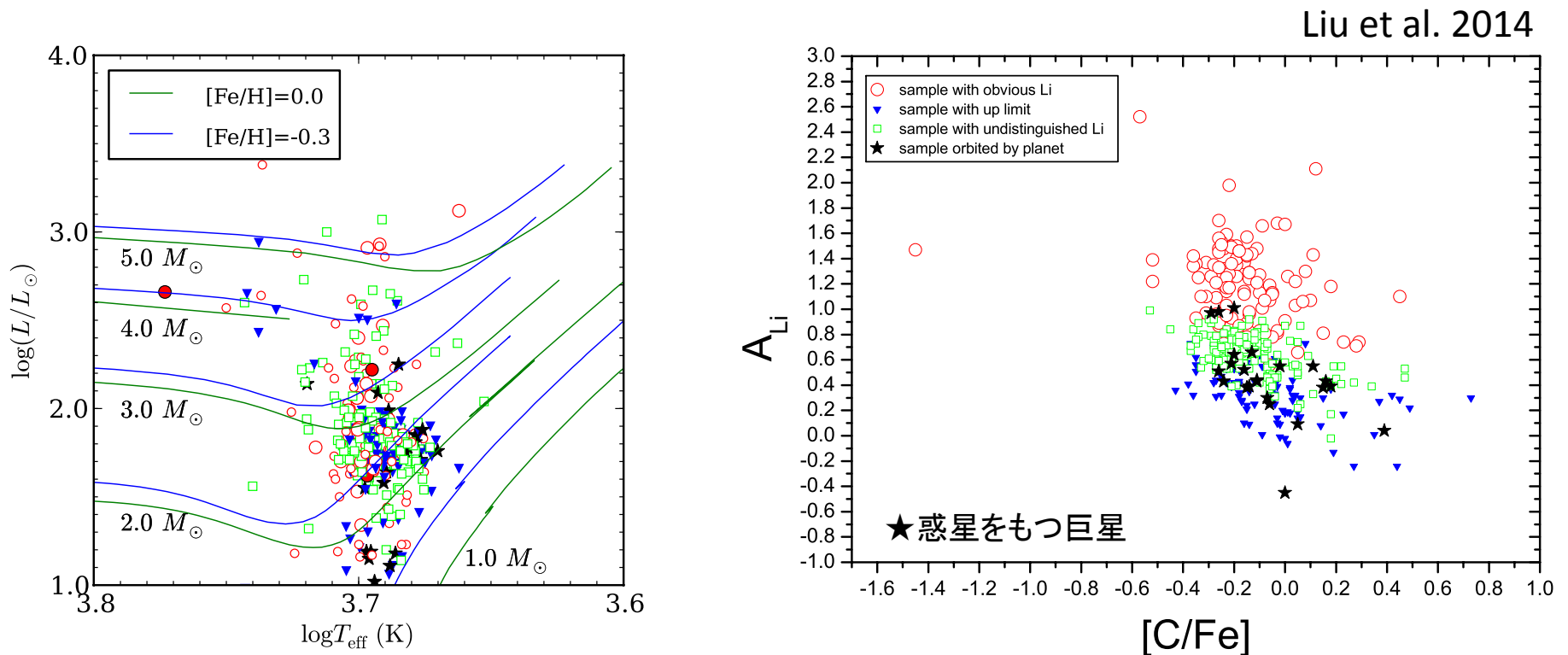
- ✓ **The Lithium Abundances of a Large Sample of Red Giants**
 - Liu et al. 2014, ApJ, 785, 94
 - 岡山&興隆サンプル(GK型巨星378個)に対するLi組成の系統的な解析
- ✓ **A Long-period Eccentric Substellar Companion to the Evolved Intermediate-Mass Star HD14067**
 - Wang et al. 2014, PASJ submitted
 - すばるプロジェクト二本目の論文。岡山、興隆でフォローアップ。
 - 長周期大離心率巨大惑星+長期RVトレンド
 - 岡山、興隆、普賢山、すばる合わせて通算30個目の惑星or褐色矮星

□ 関連論文

- ✓ **Low mass stellar companions around four giant stars**
 - Yilmaz et al. 2015, New Astronomy, 34, 108
 - 日土協力二本目の論文。巨星を主星とする分光連星の軌道決定。
- ✓ **Spectroscopic Study on the Beryllium Abundances of Red Giant Stars**
 - Takeda & Tajitsu, 2014, PASJ in press
 - 岡山サンプルの中の200星に対するBe組成の系統的な解析
 - すばる/HDSによる観測

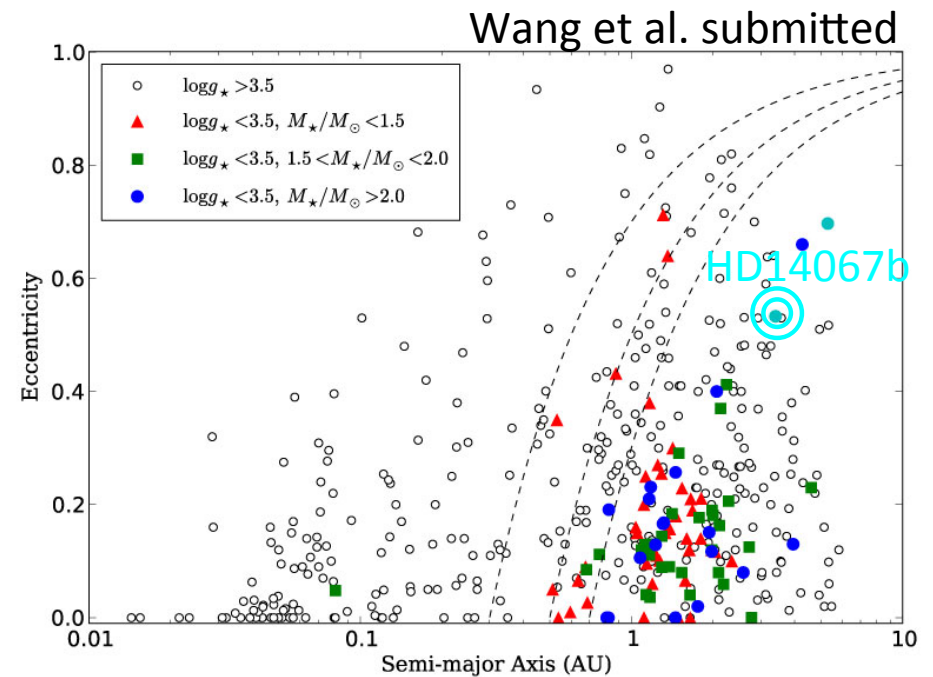
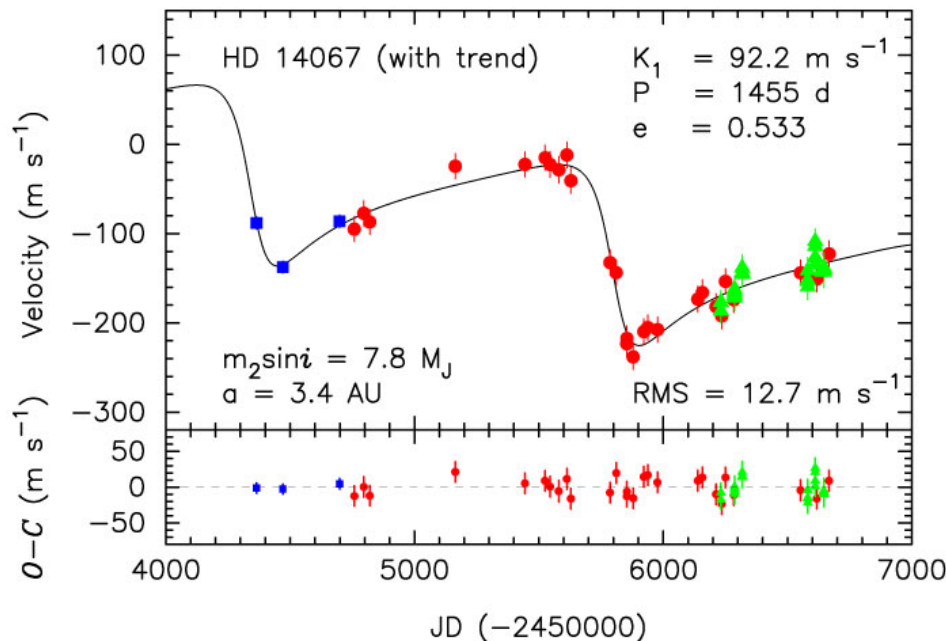
巨星のLi組成

- 378個のGK型巨星:
 - Li rich ($A_{\text{Li}} > 1.7$)・・・3個, Li normal ($A_{\text{Li}} = 1.3 - 1.7$)・・・36個, Li poor ($A_{\text{Li}} < 1.3$)・・・339個
- Li poor ($A_{\text{Li}} < 1.3$)星では恒星進化による予想より大幅にLiが欠乏している。進化の指標である[C/Fe]との相関なし。→主系列段階で既に表面のLiが減少か
- 惑星をもつ巨星の約65%はLi欠乏星。一方、同じような大気パラメータで惑星が見つかっていない巨星でのLi欠乏星の割合は約25%。



長周期大離心率巨大惑星: HD14067b

- すばるサンプルの天体を岡山、興隆(新分光器)でフォローアップ
- 中心星HD14067: G9III, $M=2.4M_{\odot}$, $[Fe/H]=-0.1$
- 惑星HD14067b: $M_{\text{J}}=7.8M_{\text{J}}$, $a=3.4\text{AU}$, $e=0.5$
→ 中質量巨星周りで見つかった最も大離心率の惑星の一つ
- 長期RVトレンド($dv/dt=-22.4\text{m/s/yr}$) → 遠方天体の存在を示唆。大離心率の原因?



予備的結果： 2:1MMR or 相互逆行惑星系？

Sato et al. in prep.

□ 独立なケプラー軌道の重ね合わせ (右上図)

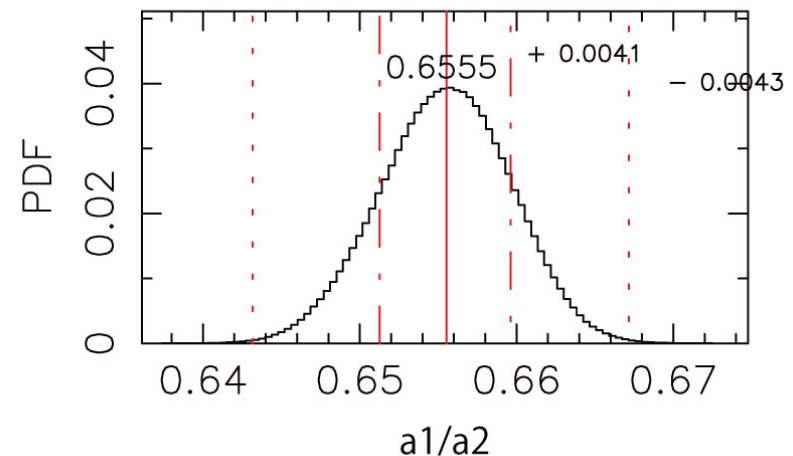
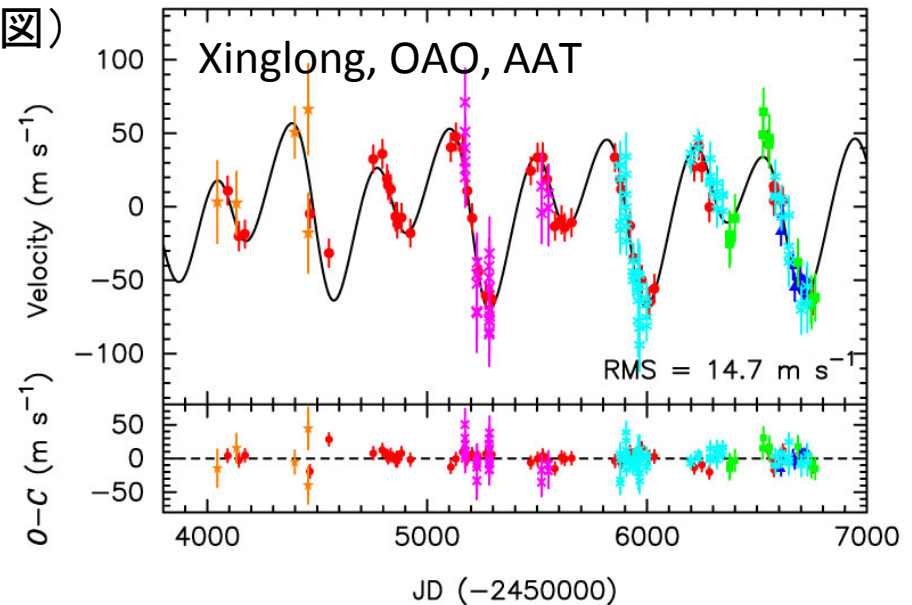
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Planet b: P=363 d a=1.2 AU e=0.09 Msini=1.75M_J 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Planet c: P=685 d a=1.9 AU e=0.28 Msini=1.86M_J
---	---

□ RVにベストフィットの軌道は不安定 (軌道が接近している)

□ ベストフィットからは3σくらい離れているが、 $a_1/a_2 \sim 0.64$ なら2:1共鳴で安定な軌道があり得る (右下図)

□ もしくは、お互いに逆向きに公転していればベストフィットの軌道で安定

□ 実は、このような系は巨星周りでは他にも見つかっている (BD+20 2457)



まとめ

- 実施状況
 - 重要天体のデータは確実に取得している
 - 実施率にばらつきがあるが、平均すると50%程度
 - 各天体毎月(当初は毎回)3回以上の観測という方針
 - スリット観測であまりデータが取れていない
 - ファイバーのデータとの接続のため、ファイバーの高分解能モードでテンプレートを再取得する方向で検討
- 成果
 - この1年間は今のところ査読論文2編(出版済1、投稿中1)
 - 他にも関連論文や準備中の論文あり