

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二年目(2014年後期～2015年前期)の報告

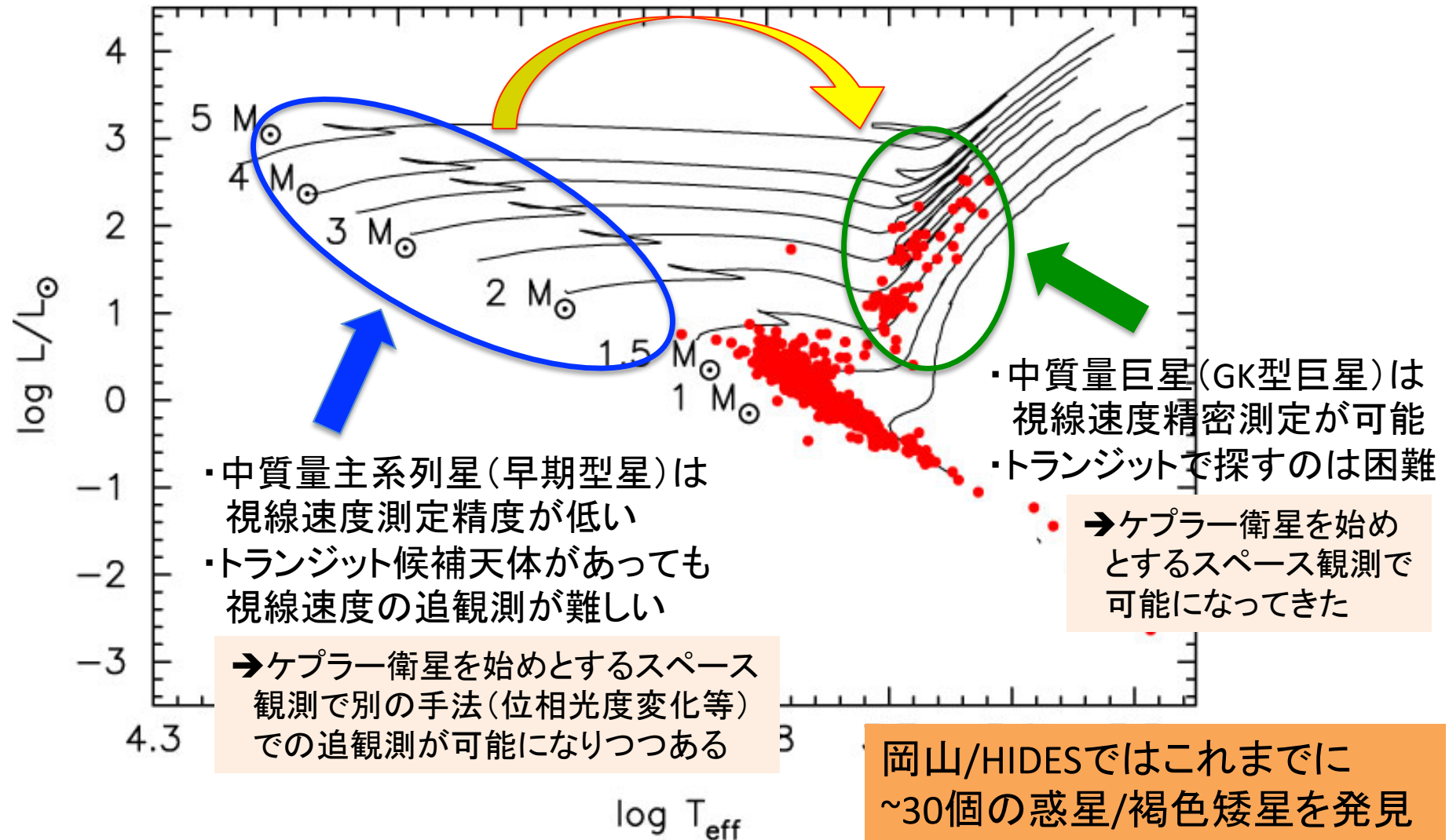
佐藤文衛¹, 原川紘季², 大宮正士²,
泉浦秀行³, 神戸栄治³, 竹田洋一², 吉田道利⁴,
伊藤洋一⁵, 安藤裕康², 小久保英一郎², 井田茂¹

共同研究者: 長沢真樹子⁶, 宝田拓也¹

¹東工大, ²NAO, ³OAO, ⁴広島大, ⁵兵庫県立大, ⁶久留米大

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)

第4期プロジェクト観測：目的

- **低質量惑星**
 - 5AU以内、 $\sim 1\text{-}2M_{\text{JUP}}$ 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、 $\sim 40M_{\text{E}}\text{-}2M_{\text{JUP}}$ の惑星頻度に初めて制限
- **遠方惑星（→個別課題へ）**
 - $\sim 5\text{-}10\text{AU}$ 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

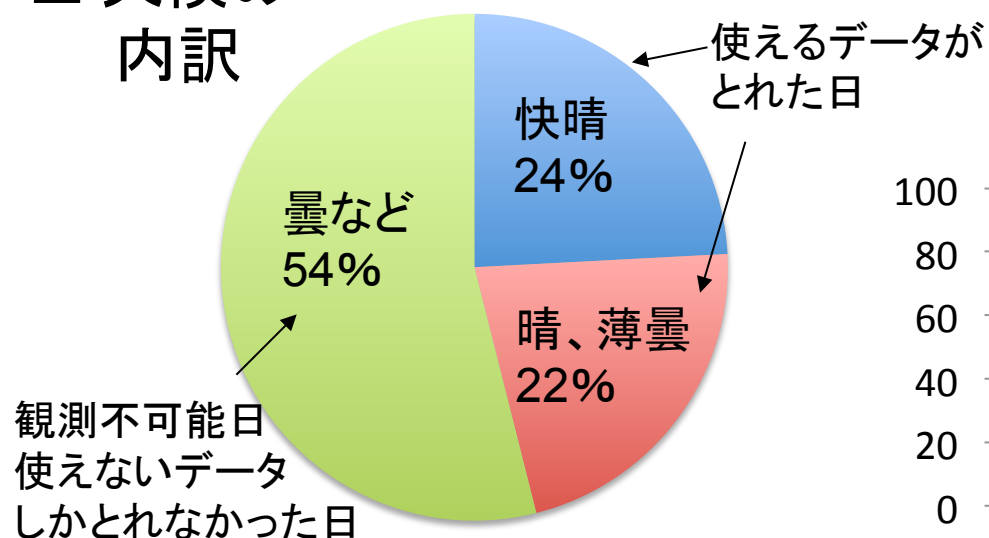
惑星の探索範囲（質量、周期）を拡大し、新たな発見を目指す
上記惑星については現状では**視線速度観測**が有効

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：2014年7月～2015年6月

□ 天候の内訳



□ 観測実施率、達成率

実施率**44%**、達成率**59%**

スリット：実**32%**、達**46%**

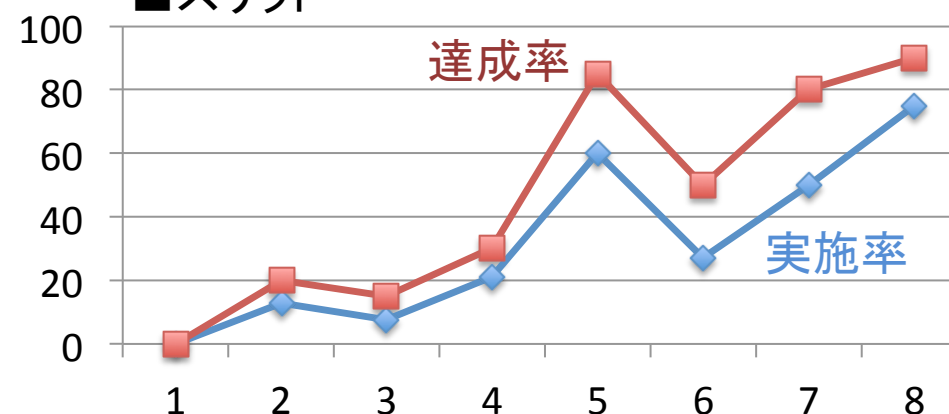
ファイバー：実**51%**、達**66%**

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

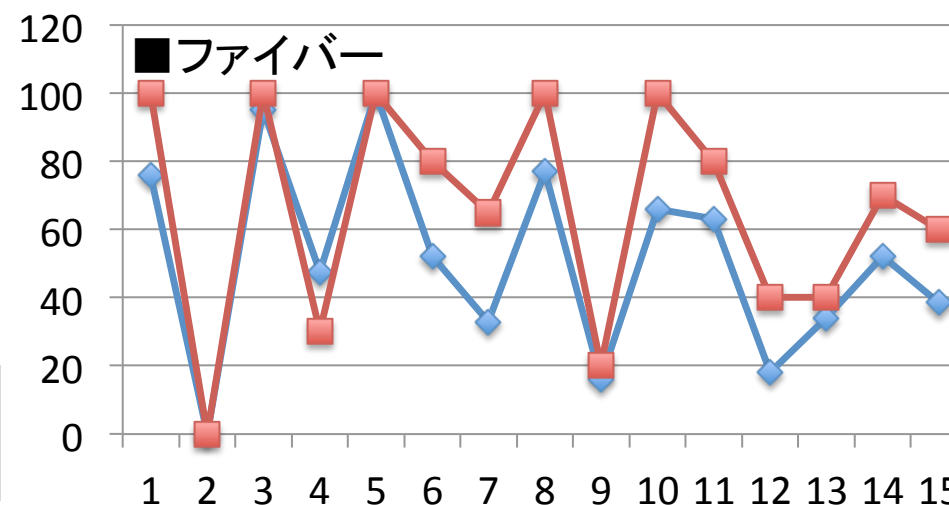
□ 割当夜数：合計**50(+α)**夜

※α：HIDES-F高分解能
モードの試験観測など

■ スリット



■ ファイバー



データ取得状況

- 重要天体(惑星をもつ候補星)については継続的に視線速度データがとれている。
 - ✓ 一回のラン当たりの夜数が3夜以下になると天候の影響を受けやすくなるので、それ以上の夜数をまとめて割り当てて頂きたい。
- 毎月約20天体について最低2点以上、また、約30天体については半年間で10点以上の視線速度データが取れている。
 - ✓ 当初目標は「50天体について年間20点以上」だが、実施率を考えればまずまずの達成度
 - ✓ HIDES-Fによる効率向上＋望遠鏡の性能向上により、一晩に観測できる天体数が増加。晴れるととても忙しい。
 - スケジュール観測ができるようになるとありがたい
- 恒星活動が活発な星のスペクトルも定期的に取得
 - ✓ 活動性を評価するための指標を確立するため
 - ←今後の低質量惑星検出には不可欠
- HIDES-Fiberの高分解能モードによるデータ取得
 - ✓ 近い将来のSlitからFiberモードへの完全移行を念頭におき、試験観測を兼ねて28天体の視線速度解析用テンプレートスペクトルを取得
 - ✓ 14天体については2～4回の観測(Fiberの安定性、線輪郭変化の調査用)

出版状況(昨年のUM以降)

□ 査読論文

- ✓ なし(執筆中の論文が1-2編あり)

□ 関連論文

- ✓ **Can surface oxygen abundances of red giants be explained by the canonical mixing theory?**

- Takeda et al. 2015, PASJ, 67, 24
- 岡山巨星サンプルの酸素組成に関する論文

□ 学位論文

- ✓ 岡山惑星探索用巨星サンプルに対するベイズ推定を用いた物理パラメータの検証

- 南雲暉(M1; 東工大2014年度卒論)
- ベイズ推定の枠組みを用いて岡山巨星サンプルの質量を再評価。いくつかの惑星をもつ恒星の質量に大きな不定性あり→星震学による独立な質量推定を試みる(15Bで採択・9月に実施:PI南雲)

□ 参考論文

- ✓ **Precise Radial Velocity Measurements for *Kepler* Giants Hosting Planetary Candidates: Kepler-91 and KOI-1894**

- Sato et al. 2015, ApJ, 802, 57
- ケプラー衛星で発見された巨星を回るトランジット惑星に対するすばる/HDSでの確認観測

解析状況

□ 視線速度解析

- ✓ 問題なく進めている

□ HIDES-Fiberの高分解能モード

- ✓ 効率、スペクトルの安定性、視線速度解析への適用等について現在評価中

□ 吸収線輪郭解析

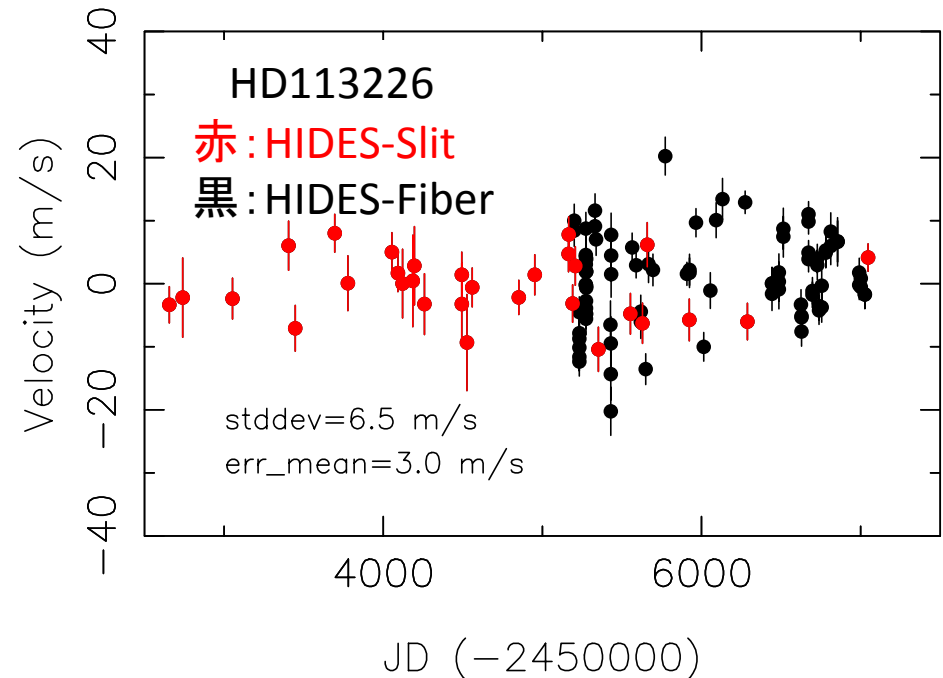
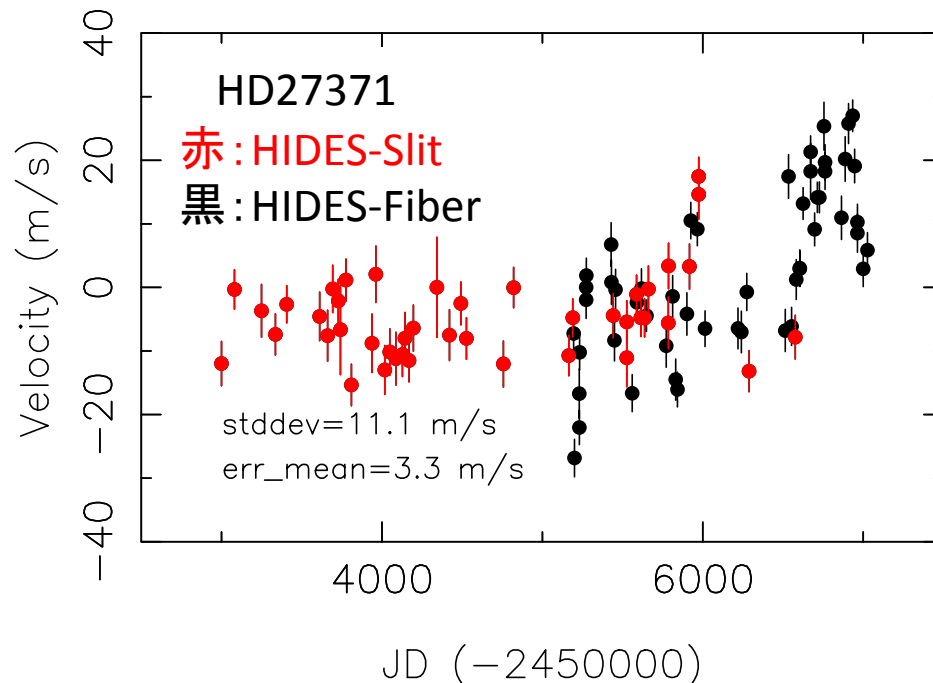
- ✓ 脈動や活動性の影響を調べるために不可欠
- ✓ numerical maskに対してスペクトル全体のcross-correlationをとり、平均的な吸収線輪郭を求める手法(HARPSなどで用いられている手法)を開発中

□ CaIIHK線の解析

- ✓ 彩層活動の影響を調べるために不可欠
- ✓ Fiberで取得したデータは410nmより短波長でオーダーの重なりが生じるため、このようなデータに対して様々な整約を試み、CaIIHK線強度の測定に及ぼす影響を調査中。

予備的結果： HIDES-Fiber高分解能モードで取得した テンプレートを用いた視線速度解析

- 高分解能($R=10^5$)スペクトルを共通のテンプレートとしてSlitとFiberのデータを統一的に視線速度解析した結果、精度の悪化や、両者の間の有意なオフセットは見られない
→ SlitとFiberのデータ接続に光明
- HD27371(左下図)で、最近のFiberのデータにオフセットが乗っているように見えるのは、器機的なものというよりは実際に天体の視線速度が変動しているためと考えられる。
→ 伴天体？活動性の長期的な変化？



予備的結果： 巨星を周回する比較的短周期の惑星

- 巨星周りの短周期 ($a < 0.6 \text{ AU}$) 惑星は、これまで視線速度サーベイでは見つかっていない
(※近年ケプラー衛星による短周期トランジット惑星の発見例がいくつか報告されている)
- 岡山サンプルから、短周期(約30日)の低質量惑星候補($1.3 M_{\text{JUP}}$)を発見(左下図)
(中心星質量 $1.9 M_{\odot}$ 、半径 $10 R_{\odot}$) → 視線速度サーベイで見つかった惑星では最短周期
→ トランジット確率約20% (将来のトランジット観測衛星のよいターゲット)
- 視線速度変化と相関する吸収線輪郭変動も見られない(右下図; バイセクター変化)
→ 恒星の活動性によるものとは考えにくい、さらなる調査が必要

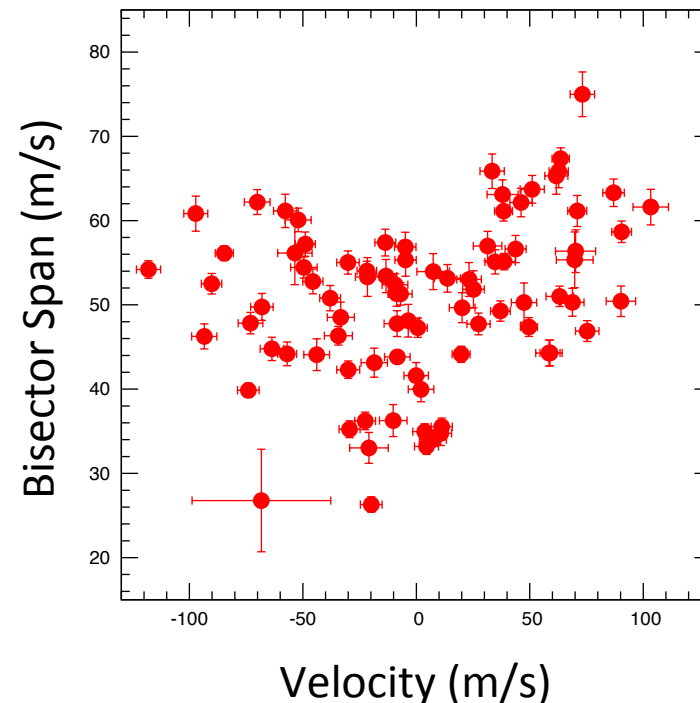
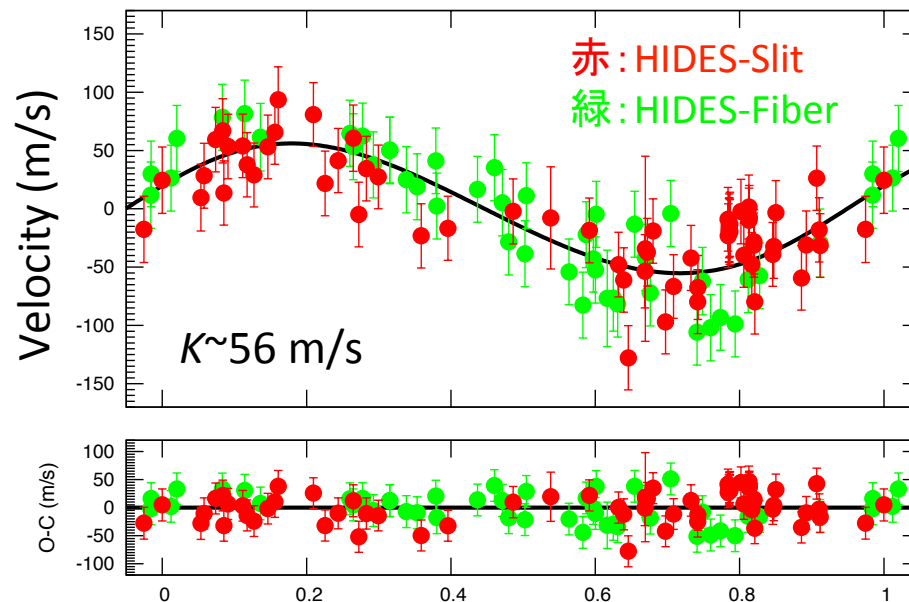


図: 宝田拓也(東工大M2) Orbital Phase

予備的結果： 2:1MMR or 相互逆行惑星系？

(昨年集録から)

Sato et al. in prep.

□ 独立なケプラー軌道の重ね合わせ(右上図)

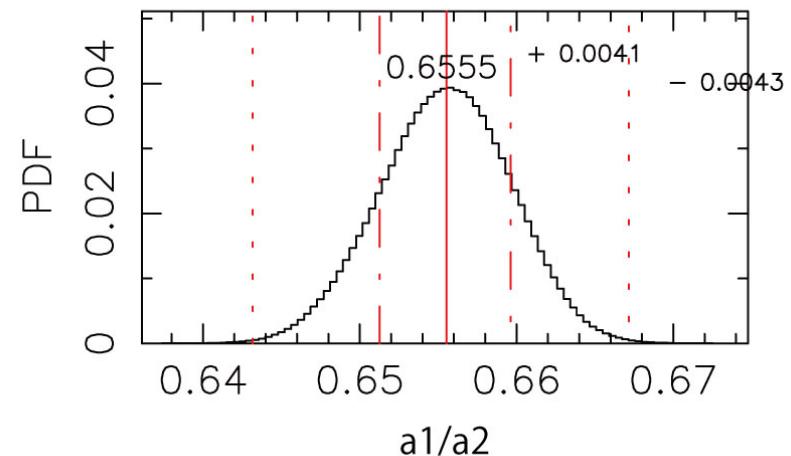
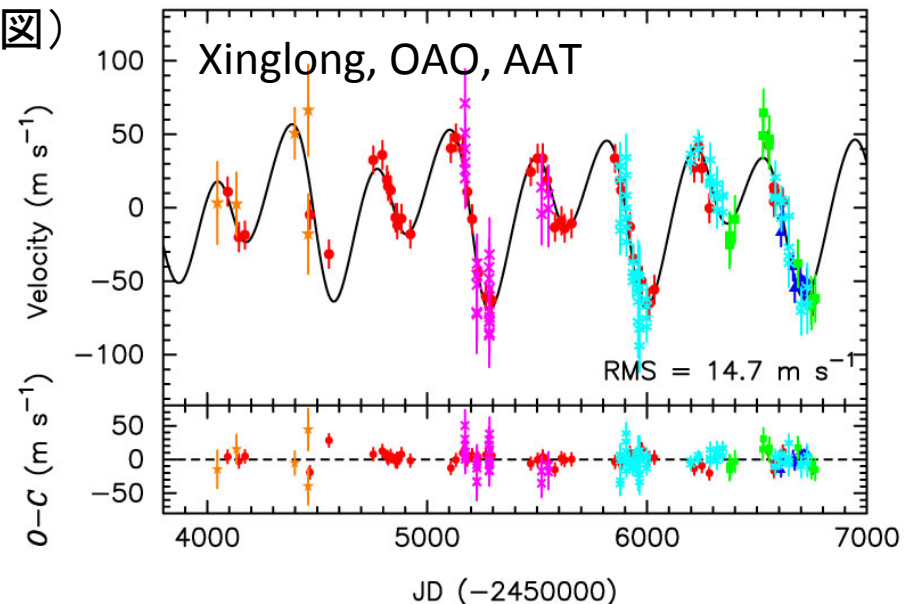
▪ Planet b:	▪ Planet c:
P=363 d	P=685 d
a=1.2 AU	a=1.9 AU
e=0.09	e=0.28
Msini=1.75M _J	Msini=1.86M _J

□ 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3 σ 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)



惑星系の安定性

どちらかの惑星の軌道
長半径が初期値から
10%ずれるまでの時間

+は、視線速度データに
ベストフィットな軌道

色が濃い方が安定

**ベストフィット軌道は
不安定**

<安定な軌道>

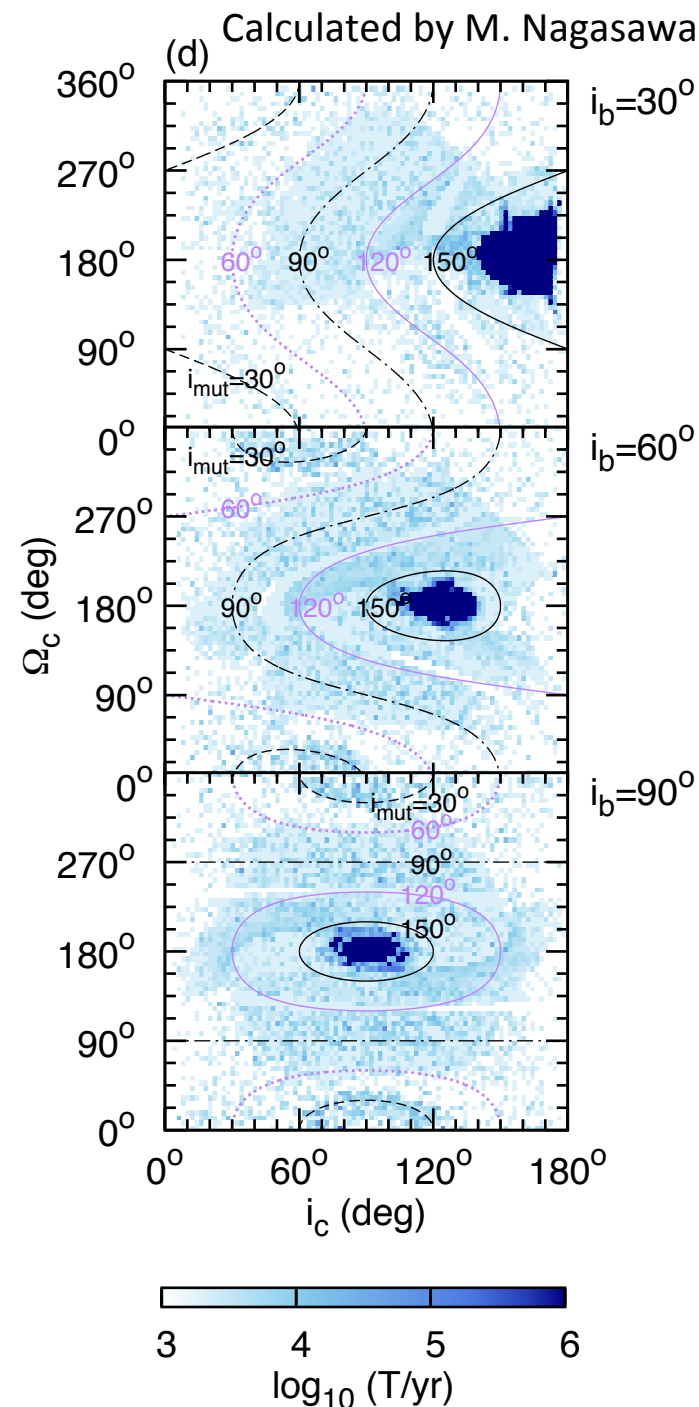
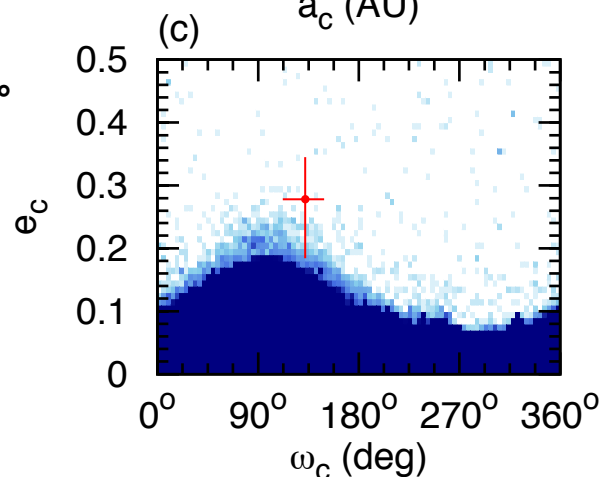
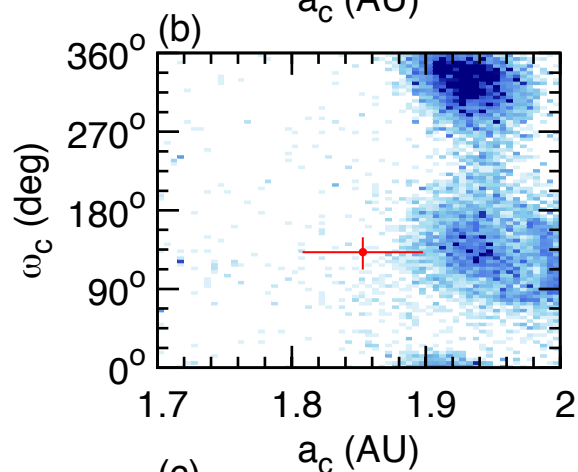
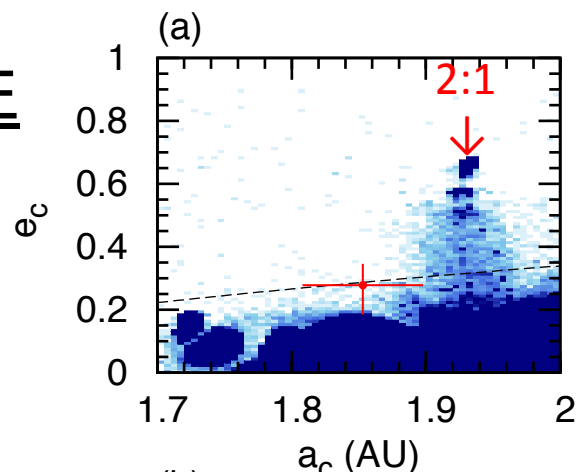
- ① 2:1共鳴 ($a_b/a_c \sim 0.63$)
- ② $e_c < 0.15$
- ③ 相互軌道傾斜角 $> 160^\circ$
(つまり逆行)

視線速度データからは

- ①の可能性は低い

←観測からは

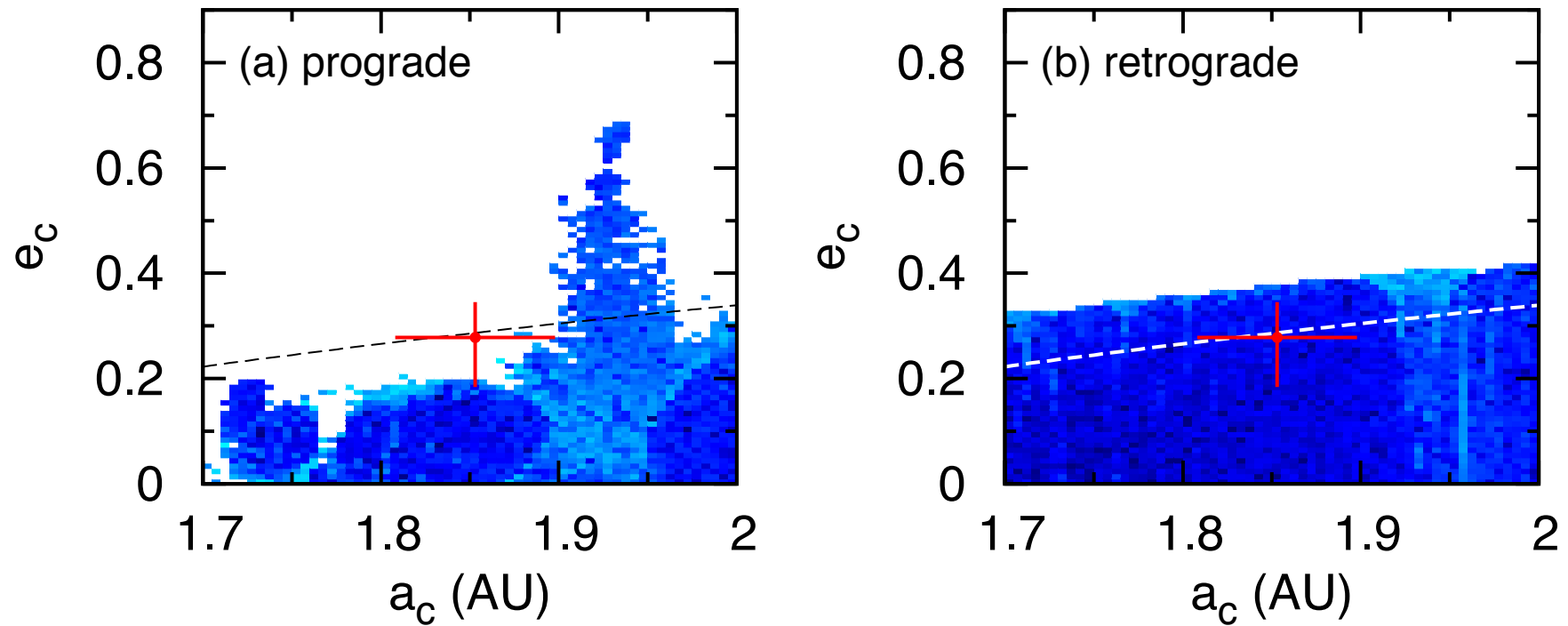
$$a_b/a_c = 0.6555 \pm 0.0042$$



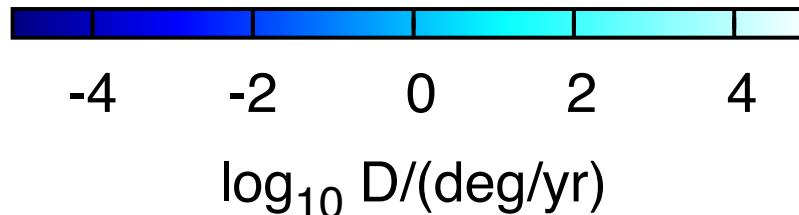
軌道の安定性

5000yrsの平均運動の平均値から次の5000yrsのそれを差し引いた値

Calculated by M. Nagasawa



破線は内側の惑星の遠点距離
と外側の惑星の近点距離が
等しくなるところを示す。この線
より上はすぐに不安定になる。



青い所ほど安定

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44%程度
 - 各天体毎月(当初は毎回)3回以上の観測という方針
 - 試験的にHIDES-F高分解能モードでのデータ取得
 - スリットとファイバーでの視線速度データに有意なオフセット無し
- 成果(論文準備中)
 - 巨星まわりの比較的短周期(～30日)の惑星
 - 複数惑星系の軌道安定性解析