

# 視線速度精密測定による G型巨星の惑星サーベイIV. & V.

■第4期プロジェクト観測三年目(2015年後期～2016年前期)の報告

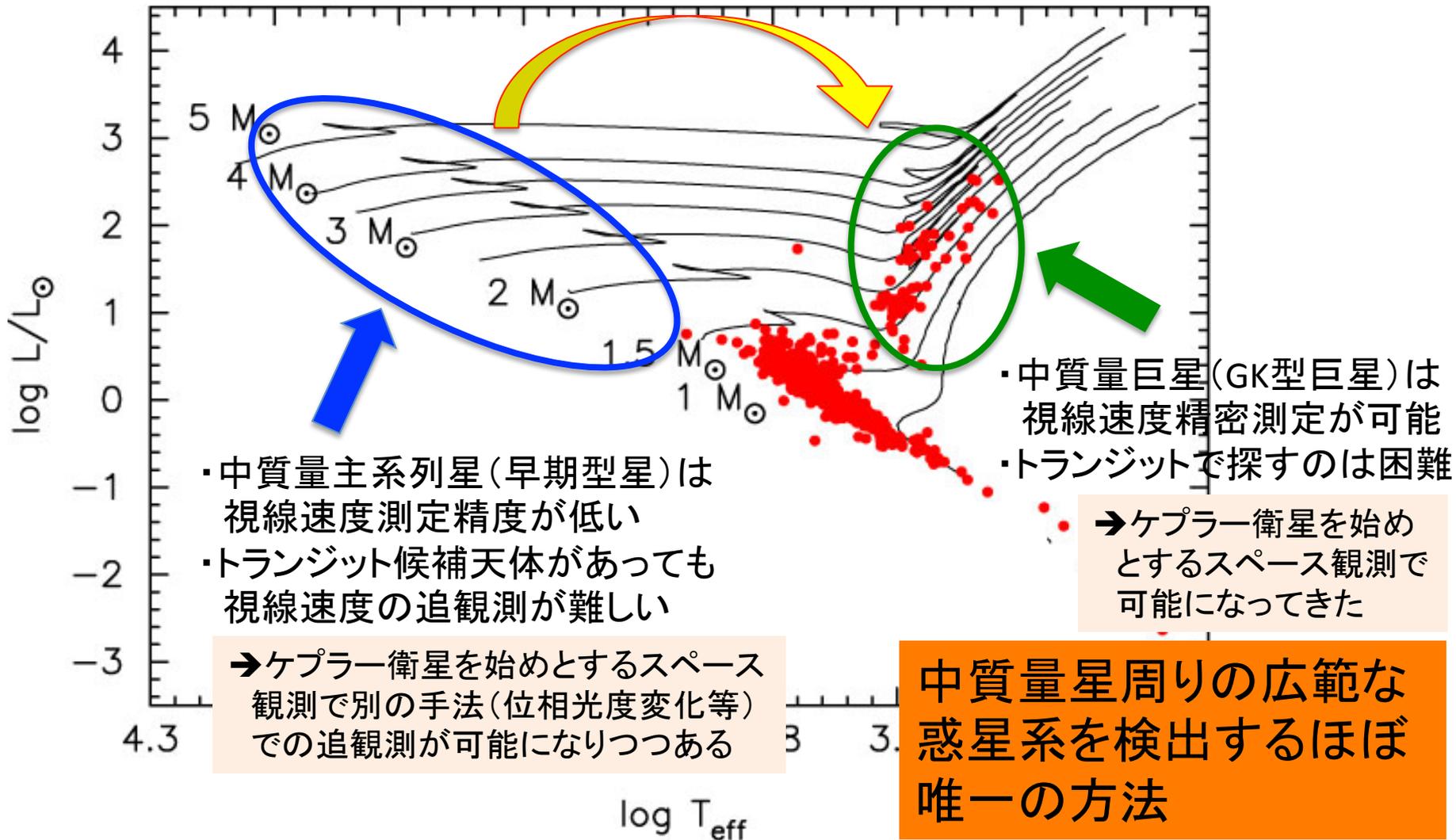
■第5期プロジェクト観測(2016年後期～2017年後期)の計画

佐藤文衛<sup>1</sup>, 原川紘季<sup>2</sup>, 大宮正士<sup>2</sup>,  
泉浦秀行<sup>3</sup>, 神戸栄治<sup>3</sup>, 竹田洋一<sup>2</sup>, 吉田道利<sup>4</sup>,  
伊藤洋一<sup>5</sup>, 安藤裕康<sup>2</sup>, 小久保英一郎<sup>2</sup>, 井田茂<sup>1</sup>  
十宝田拓也<sup>1</sup>, 長谷川棕<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東工大, <sup>2</sup>NAO, <sup>3</sup>OAO, <sup>4</sup>広島大, <sup>5</sup>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



# 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

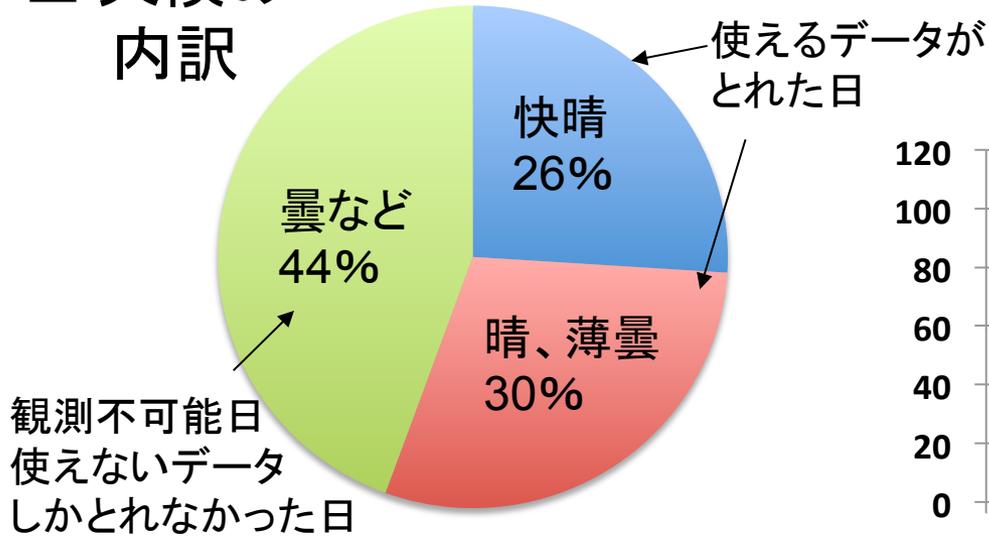
惑星の探索範囲(質量、周期)を拡大し、新たな発見を目指す  
上記惑星については現状では視線速度観測が有効

# 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がある天体
    - 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：2015年7月～2016年6月

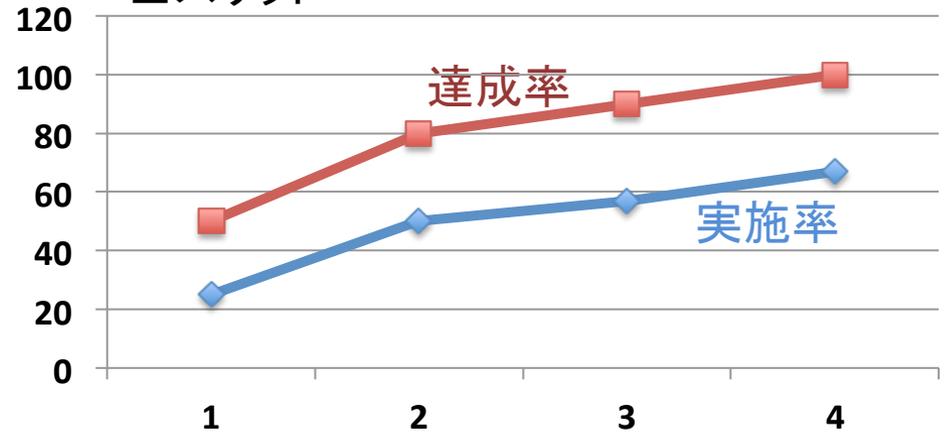
## □ 天候の内訳



## □ 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



## □ 観測実施率、達成率

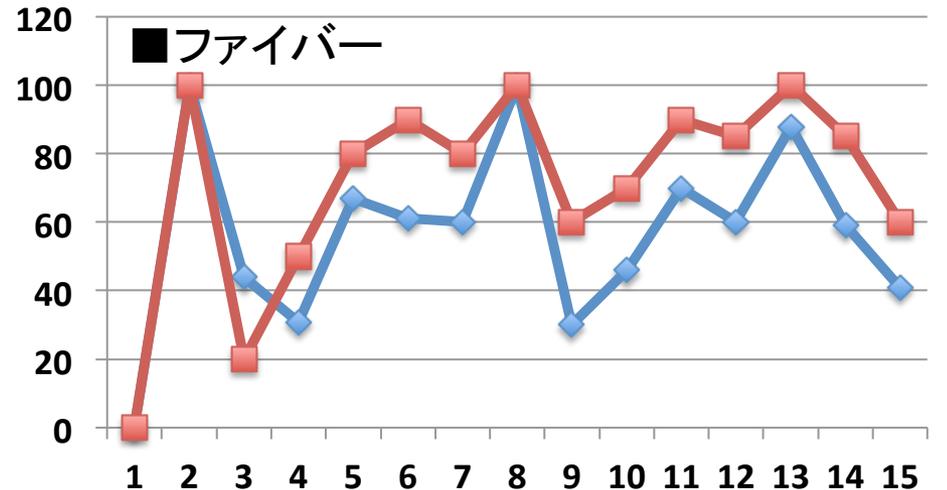
実施率**55%**、達成率**73%**

スリット：実**50%**、達**80%**

ファイバー：実**57%**、達**71%**

実施率、達成率とも比較的よかった

### ■ 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、なるべくそれ以上の夜数をまとめて割り当てて頂くようお願いしている。
- 約30天体について年間15点以上、また、約15天体については年間20点以上の視線速度データが取れた。
  - ✓ 当初目標は「50天体について年間20点以上」だったが、達成率を考えればまずまずの結果か
  - ✓ 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。→自動観測に期待
- HIDES-Fiberの高分解能モードによるデータ取得
  - ✓ SlitからFiberモードへの移行を念頭におき、試験観測を兼ねてこれまでに105天体のテンプレートスペクトルを取得

# 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継続評価中→slitデータとの接続については問題なさそう(前回報告済)
- 吸収線輪郭解析
  - ✓ (特に低質量惑星探索については)脈動や活動性の影響を調べるために必須
  - ✓ 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(宝田@東工大)→着実に進展(予備的結果参照)
- CallHK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、CallHK線強度の測定に及ぼす影響を継続調査中。

# 出版状況(今年のUM以降)

## □ 査読論文

- ✓ **A Pair of Giant Planets around the Evolved Intermediate-Mass Star HD 47366: Multiple Circular Orbits or a Mutually Retrograde Configuration**

- Sato et al. 2016, ApJ, 819, 59
- 互いに逆行している可能性のある2惑星系の発見(今年の集録参照)

## □ 関連論文

- ✓ **High-Contrast Imaging for Intermediate-Mass Giants with Long-Term Radial Velocity Trends**

- Ryu et al. 2016, ApJ, 825, 127
- 岡山巨星サンプル中の長期視線速度変動を示す天体に対する直接撮像観測

## □ 学位論文

- ✓ **Detection of new exoplanets around evolved intermediate-mass stars and investigation of the effect of stellar activity on radial velocity variations**

- 宝田拓也(D1; 東工大2015年度修論)
- HIDESデータを用いた巨星の線輪郭解析と新たな惑星の検出

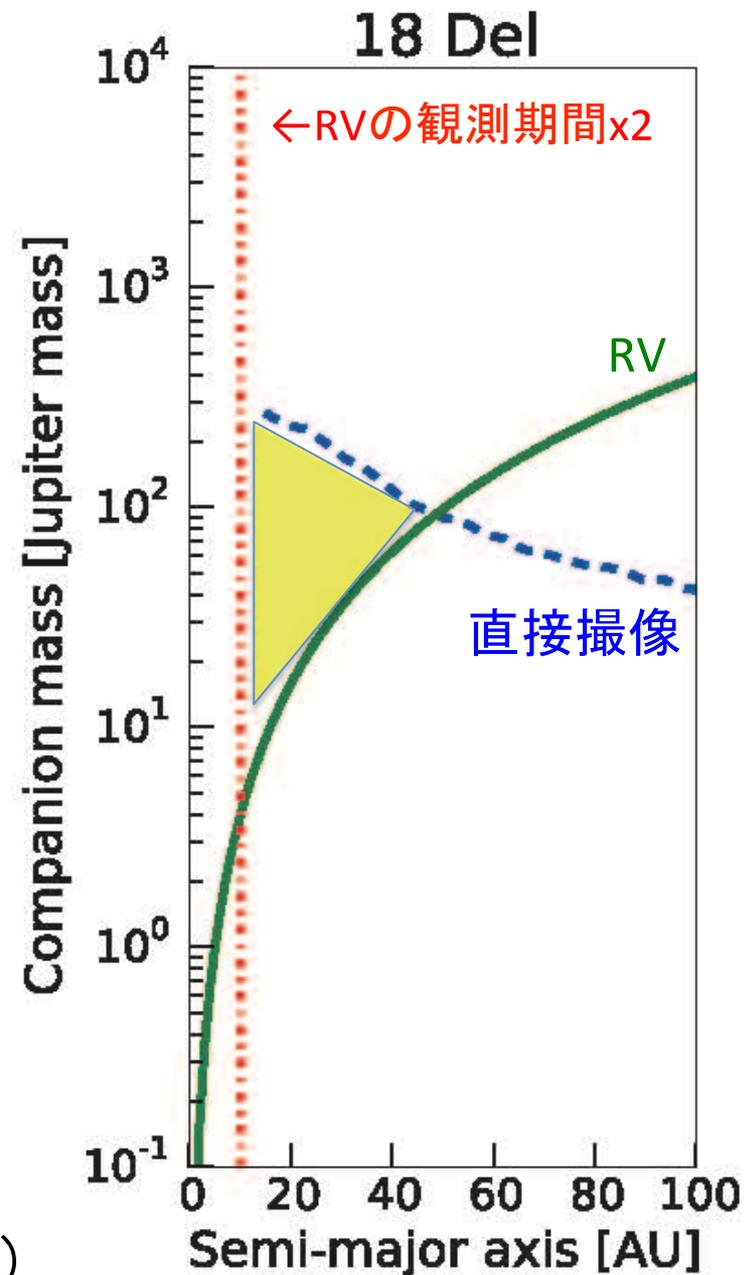
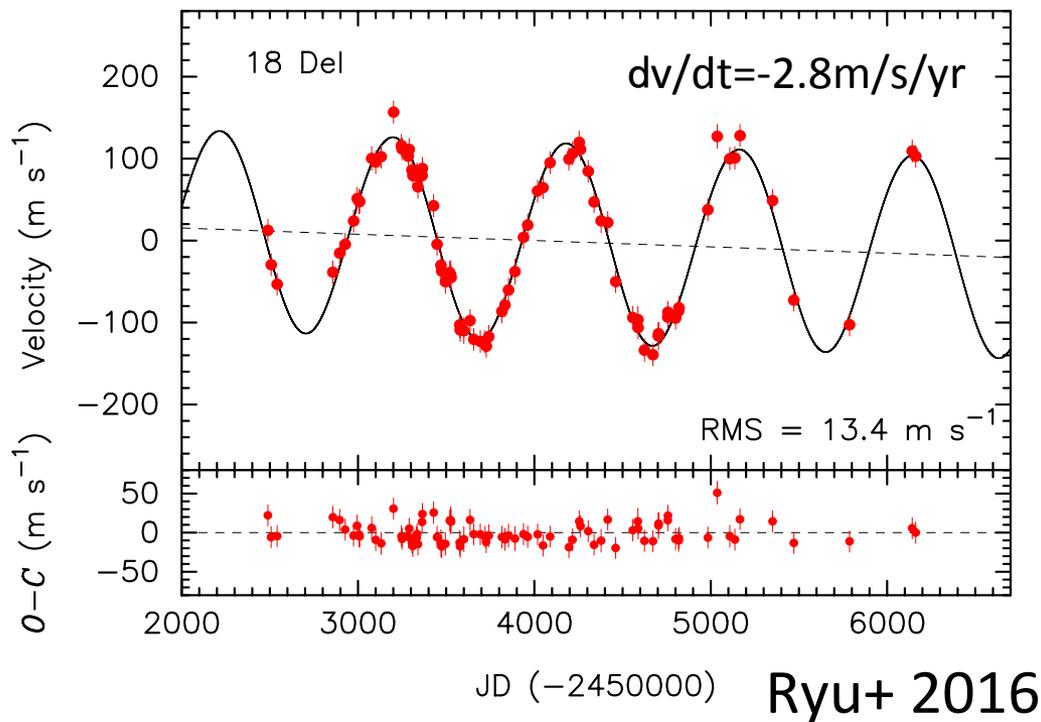
## □ 参考論文

- ✓ **Fundamental stellar parameters and age-metallicity relation of *Kepler* red giants in comparison with theoretical evolutionary tracks**

- Takeda et al. 2016, MNRAS, 457, 4454
- 星震学で決定された巨星パラメータと進化トラックから求めたパラメータの比較
- →今後のターゲット選定に対して有用な示唆

New

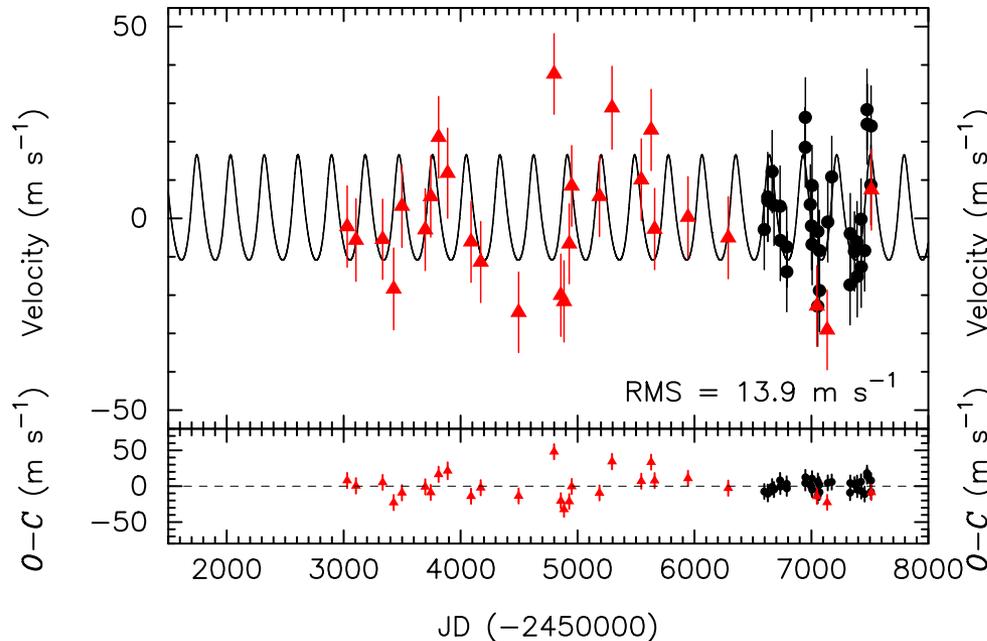
# RV+直接撮像



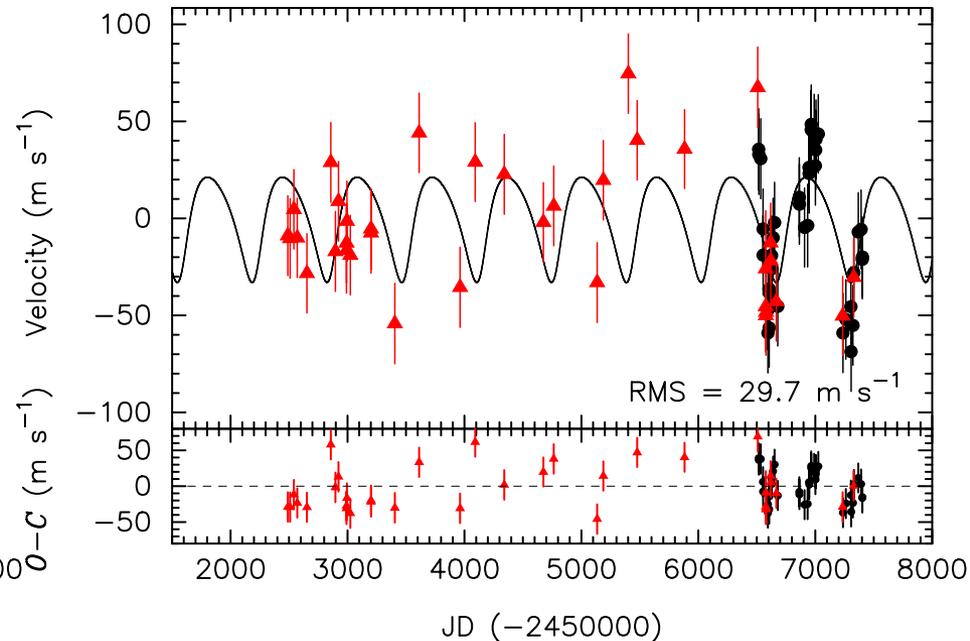
- ✓ 長期RV観測と直接撮像観測の組み合わせで遠方惑星に制限
- ✓ 他にも約10天体観測済(継続提案中)

# 予備的結果： 低質量惑星 ( $<2M_{\text{JUP}}$ ) 候補例

P~250d



P~640d



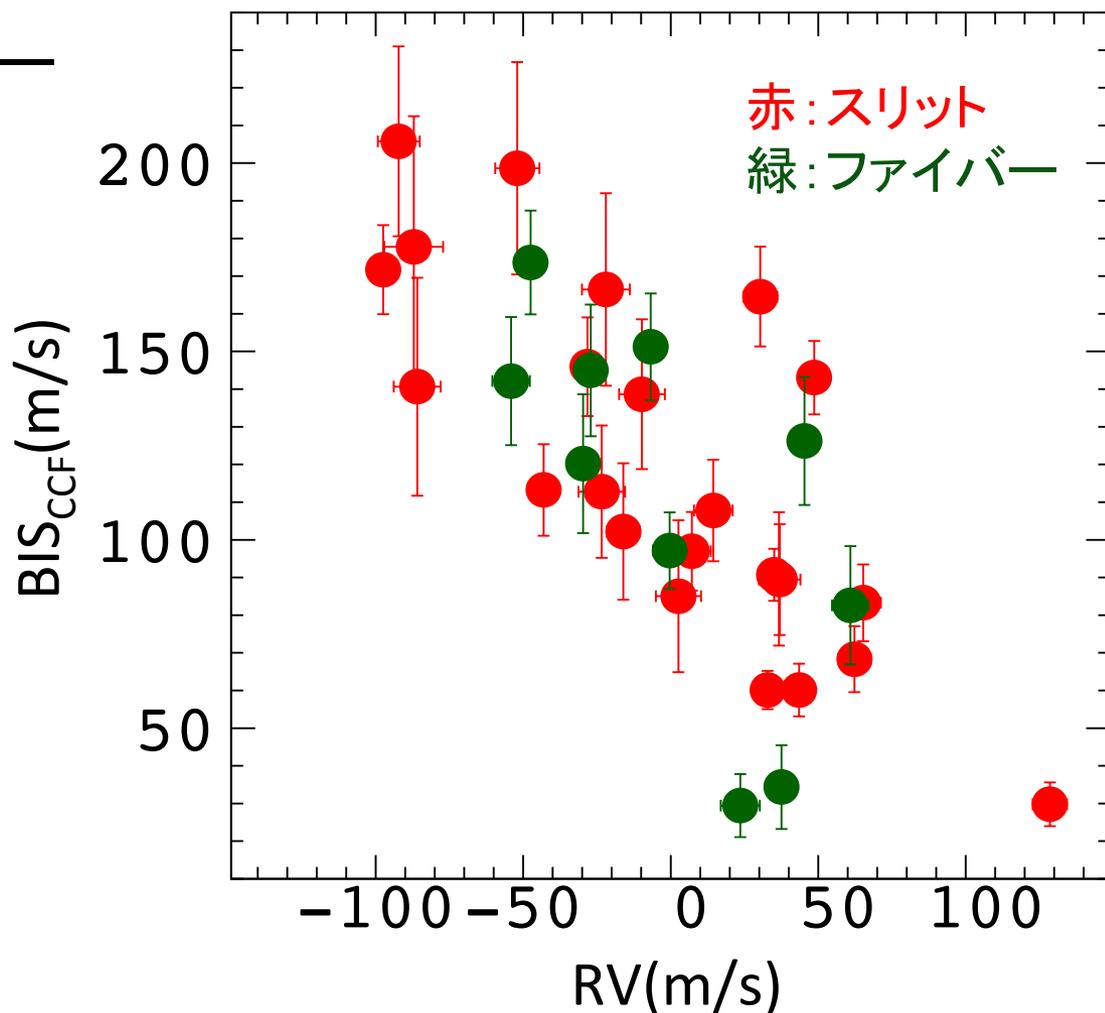
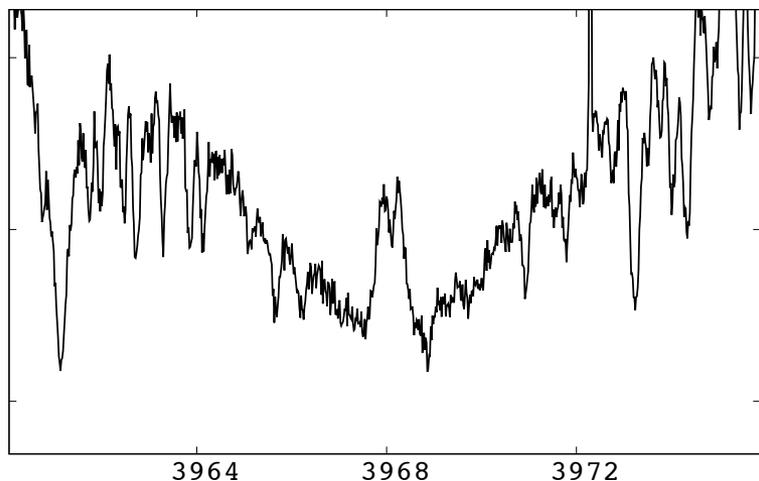
- ✓ Fiber(黒)による**密な観測**で周期性が見えてきた  
→ 低質量惑星に対する集中観測の重要性
- ✓ 吸収線輪郭、活動性等の解析を進めている

# 予備的結果： 活動度の高い巨星の線輪郭解析

宝田(東工大D1)

視線速度変動とバイセクター  
変動の相関を検出

Call H線

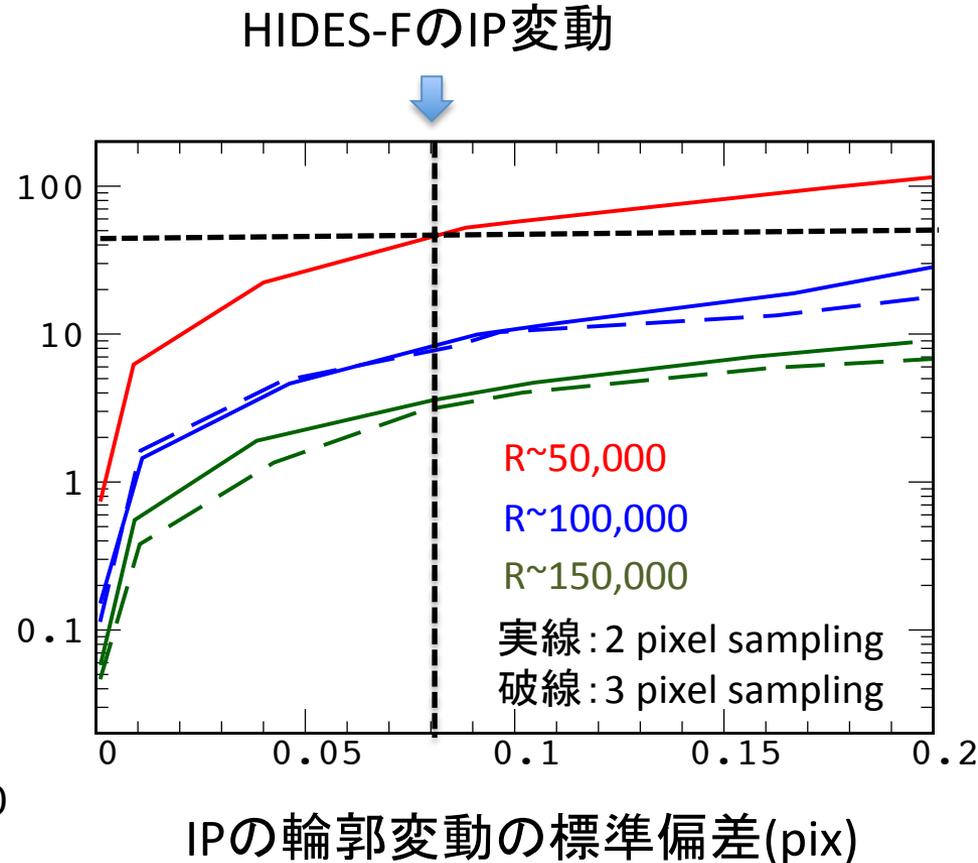
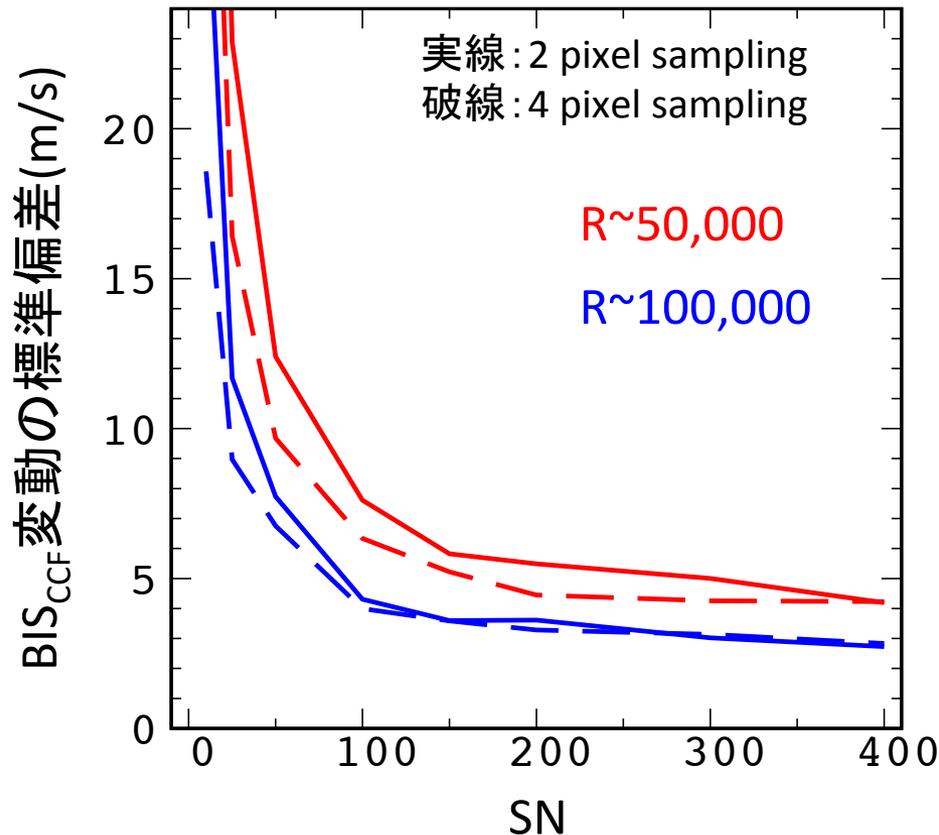


# 予備的結果:

## 線輪郭変動の検出可能性(シミュレーション)

宝田(東工大D1)

線輪郭変動の検出可能性はIPの安定性に大きく依存



# 第5期プロジェクト観測で目指すこと

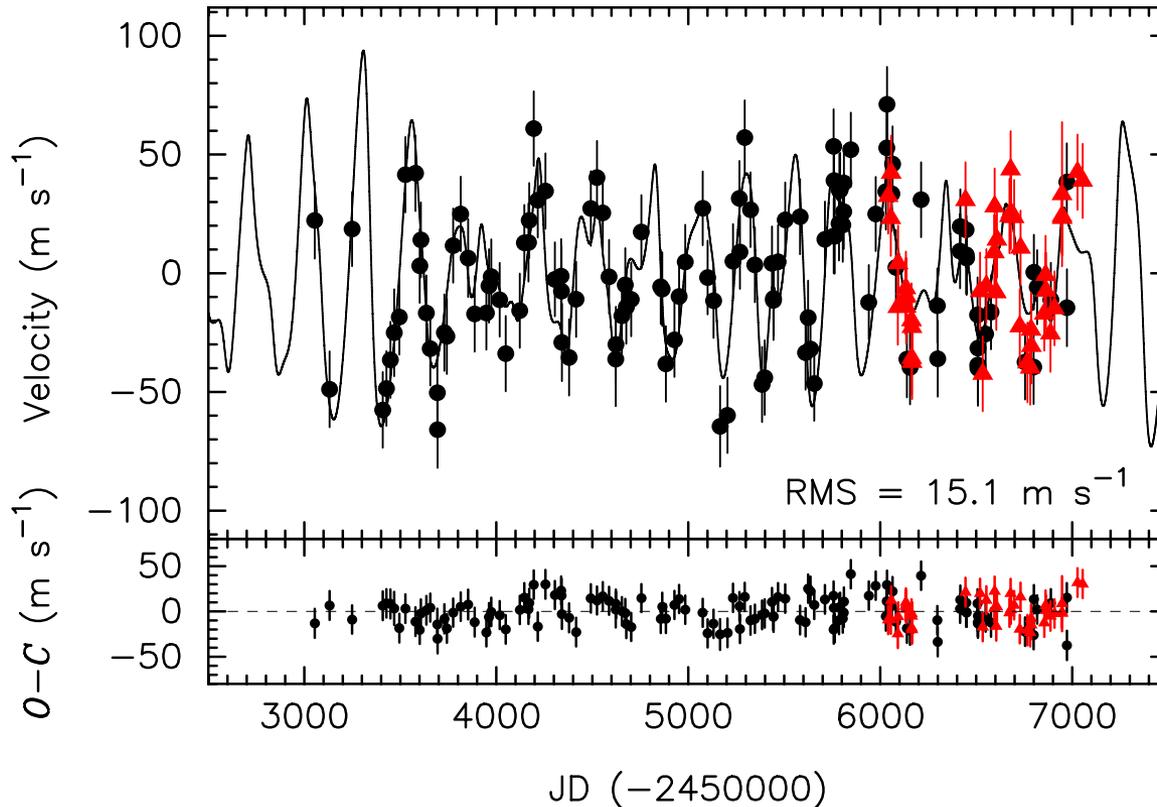
## ➤ 複数惑星系

- 軌道間隔が近いコンパクトな複数惑星系の軌道決定
- 既知の惑星系のフォローアップ
- 軌道安定性、形成・進化過程

## ➤ 遠方惑星

- $> 10\text{AU}$ 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

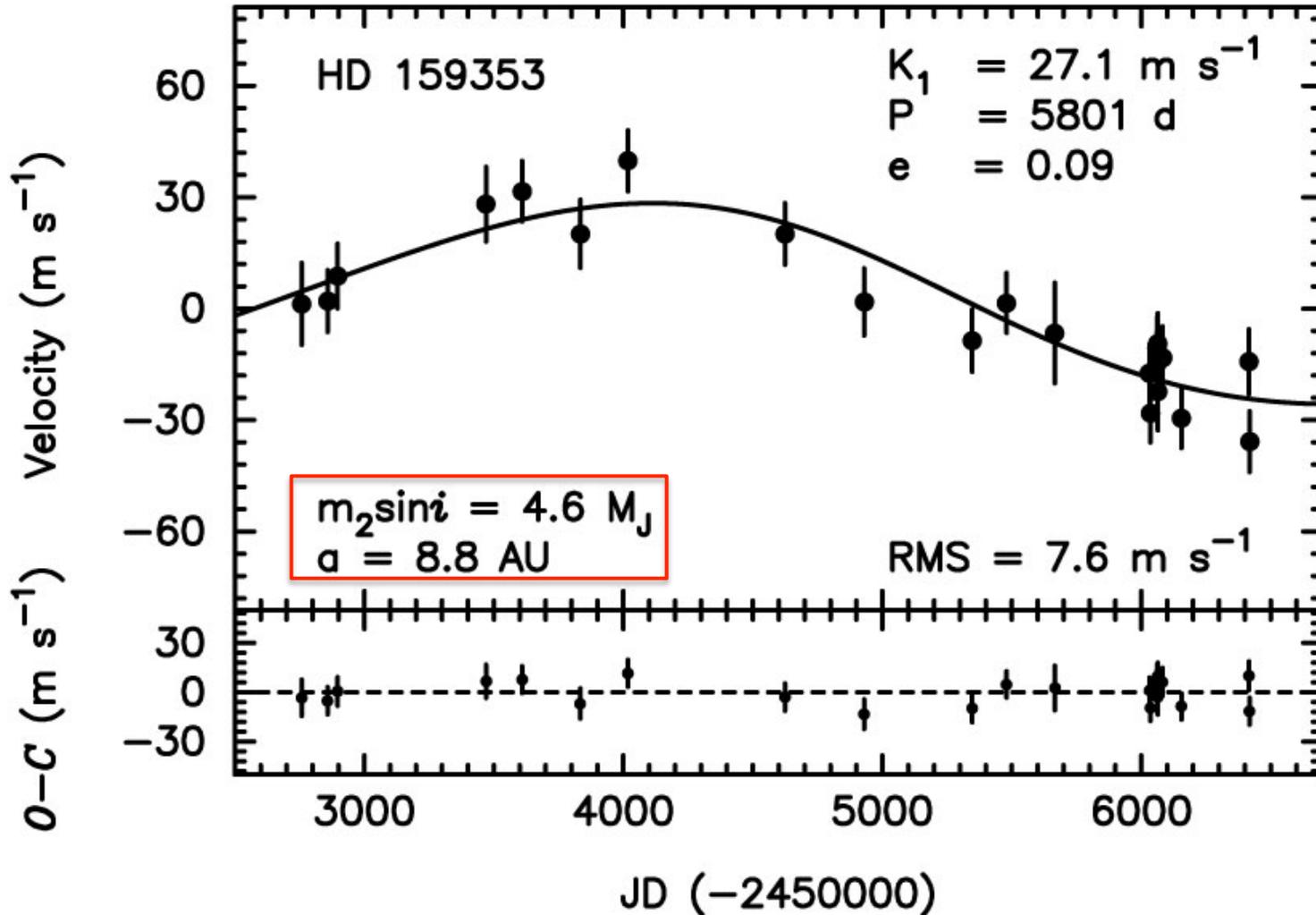
# 複数惑星系候補例



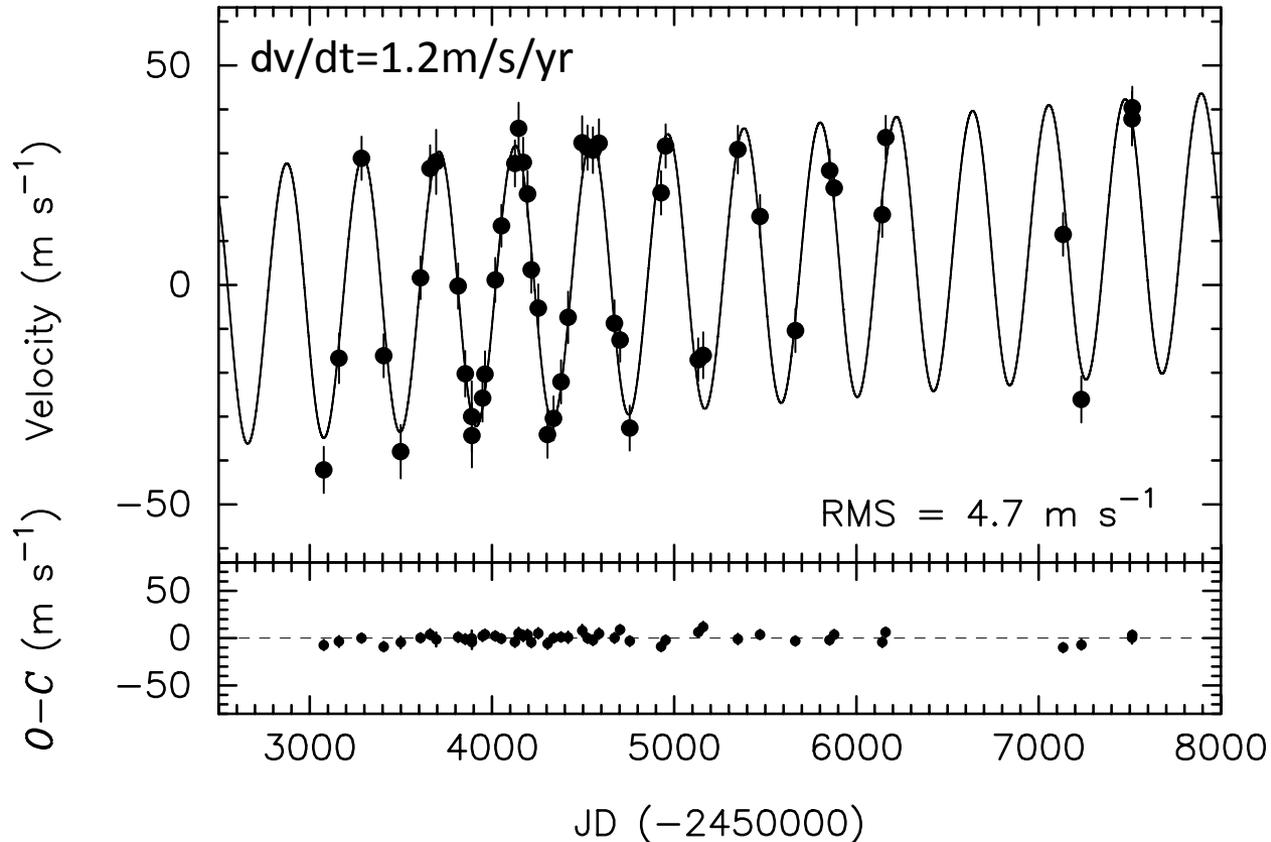
P=220-310 dの  
4つの周期

軌道間隔が狭い複数巨大惑星系(太陽型星では見つからない)  
→ 振幅の微妙な変化をとらえるため、密な観測を継続

# 遠方惑星候補例



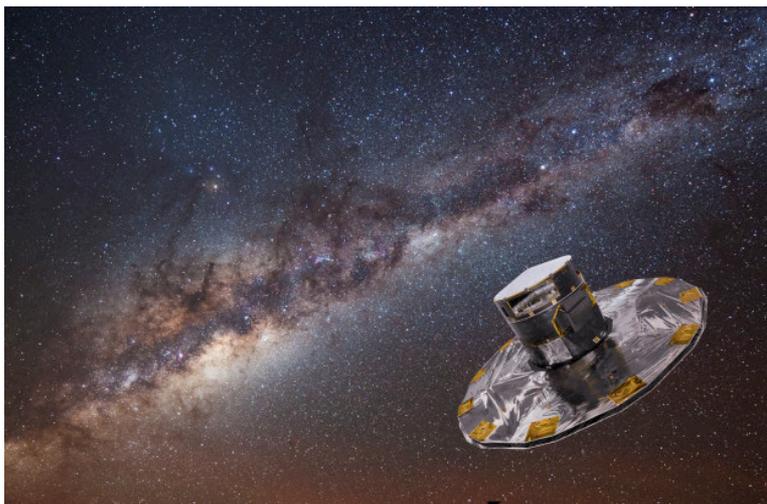
# 複数惑星系候補例 (既知惑星+トレンド)



既知の惑星に長期トレンド、あるいは第2、第3の周期があるかも調査

# アストロメトリ

## GAIA (2013-2018)

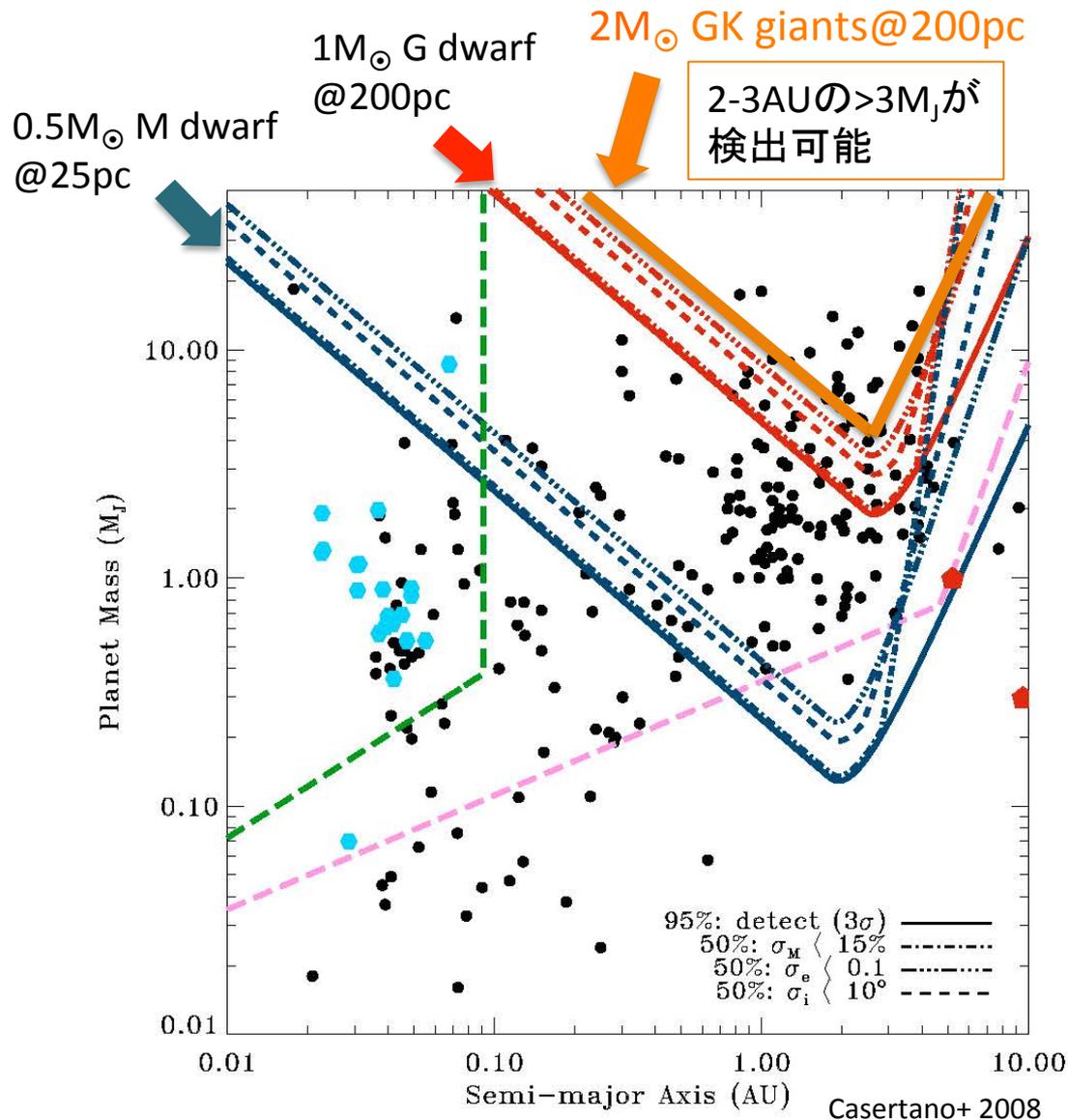


(6<)V<13について~10 $\mu$ asの精度

現在の巨星RVサーベイのターゲットは典型的にはV~6 (d~100pc)

→ V<7.5 (d<200pc) がちょうど狙い目  
アストロメトリ+RVで検出限界が下がる  
(e.g. Neveu+ 2012)

岡山プロジェクトのサンプルはちょうどよい対象となる



# 観測対象と観測内容

- 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
  - 上記条件を満たすものから300個
  - 基本的には第4期と同じ
- 内容: ヨードセルを用いた視線速度精密測定
  - HIDES-Fiberを使用

# 観測計画と必要夜数

- 複数惑星系を含む惑星候補の軌道決定、既知の惑星系のフォローアップ・・・半期12.5夜
  - 計約50天体に対し、年間15点以上のデータ取得を目標
  - 1-2ヶ月おきに数回ずつ観測
- 遠方惑星の探索・・・半期12.5夜
  - 中心星の脈動による変動と同程度のRV変化の検出
  - 全天体に対し、今後1.5年間で各天体最低3回程度

# 実施体制

- 全体統括・・・佐藤
- 観測、データ整約・・・宝田、長谷川、原川、大宮、佐藤、他
- 視線速度解析・・・佐藤他
- 化学組成解析(必要に応じて)・・・竹田他
- 理論などサイエンス・・・小久保、井田、伊藤、吉田
- 発表、論文化・・・佐藤他、東工大メンバーが中心
- 観測機器の整備、改良・・・泉浦他、岡山メンバーが中心

赤字:大学院生(東工大)、青字:PD

# まとめ

- 第4期プロジェクト観測は無事終了
  - 逆行の可能性のある巨大惑星系の発見
  - 長期RVと直接撮像を組み合わせた伴天体探索
  - 線輪郭解析に著しい進展
- 第5期プロジェクト観測
  - 低質量惑星、複数惑星系の発見にさらに注力
  - 遠方(~10AU)惑星に迫りたい