銀河系の厚い円盤に属する巨星における系外惑星探索：低金属量環境下での巨大惑星形成

佐藤文衛（東工大）、本田敏志（兵庫県立大）、大宮正士、堀安範（ABC）、國友正信（久留米大）、泉浦秀行（国立天文台）、寶田拓也（ABC）、原川紘季、神戸栄治、田實晃人（国立天文台）、松林和也（東京大）、成田憲保（東京大）、TENG Huanyu（東工大）、橋本修（ぐんま天文台）、清田朋和（京都大）

巨大惑星の形成メカニズム

コア集積

- 固体コアの集積➔ガス降着
- 小質量円盤（M_d/M_*~0.01）
- 長い形成時間（～1千万年）
- 中心星の近傍（数au）
- 金属量への強い依存性

(e.g. Hayashi et al. 1985)

重力不安定

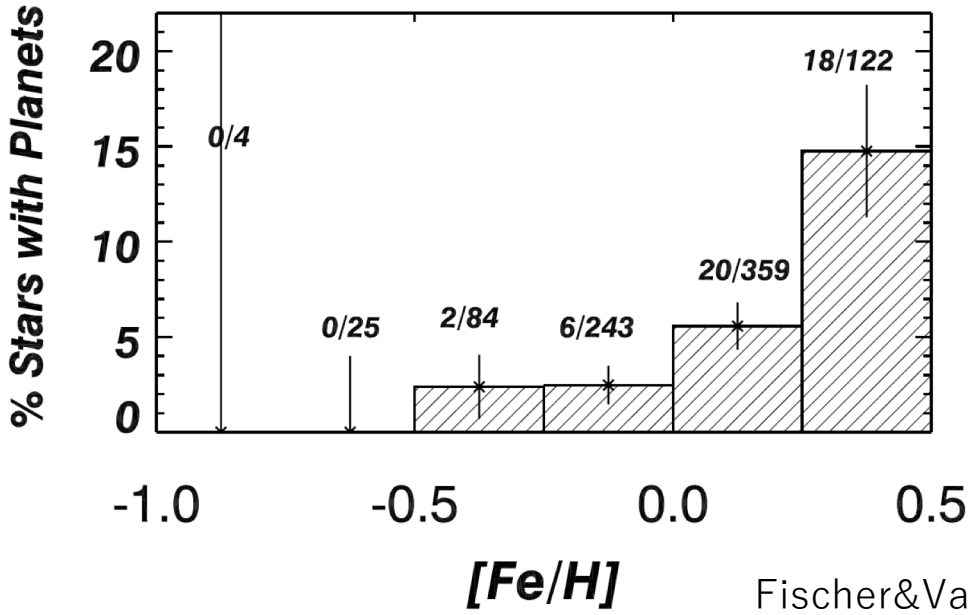
- 円盤の自己重力不安定➔ガス塊
- 大質量円盤（M_d/M_*~0.1）
- 短い形成時間（～1千年）
- 中心星から遠方（～10-100au）
- 金属量への弱い依存性

(e.g. Cameron 1978)

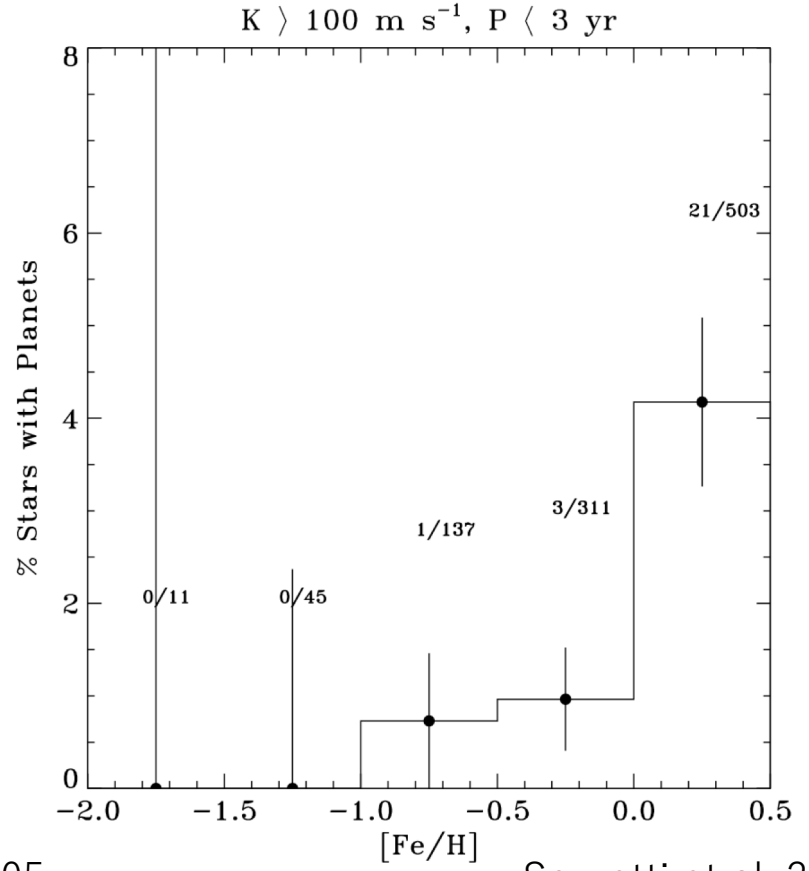
巨大惑星頻度 vs. 中心星金属量（@主系列星）

- 中心星金属量と強い相関
- [Fe/H]<-0.5ではほとんど見つからない

➔コア集積



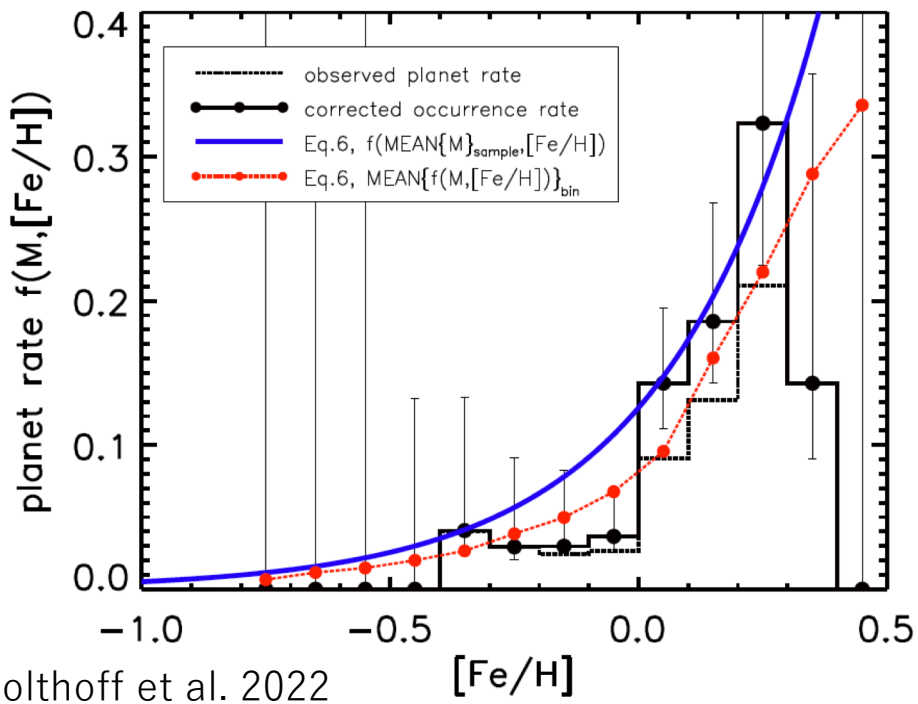
Fischer&Valenti 2005



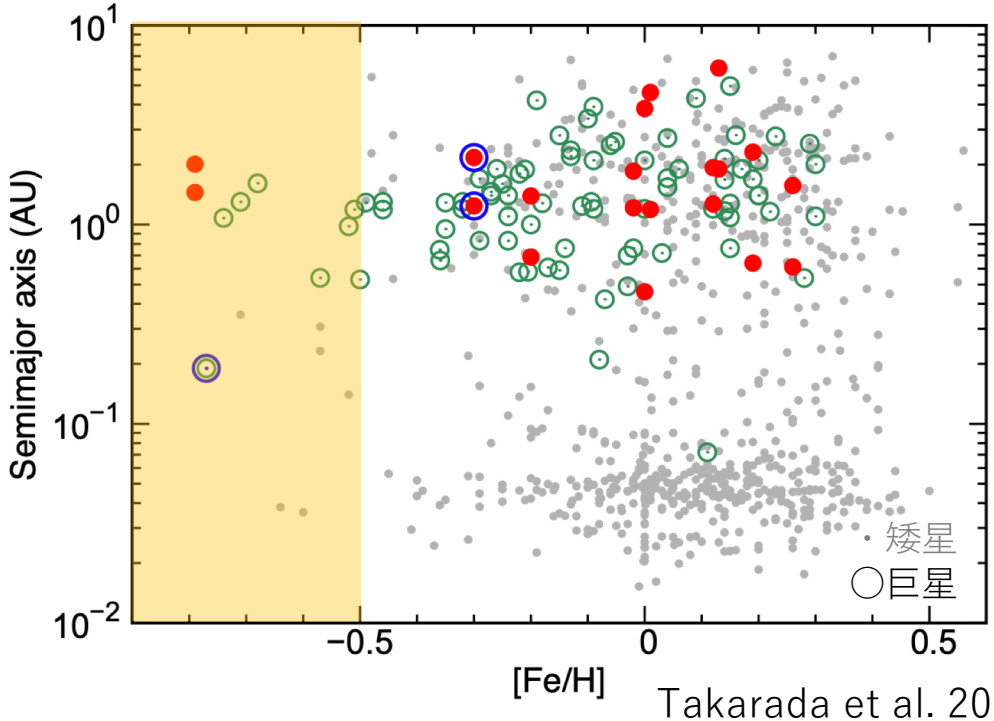
Sozzetti et al. 2009

巨大惑星頻度 vs. 中心星金属量（@巨星）

- 金属量と正の相関がある一方で、[Fe/H]<-0.5でも見つかっている

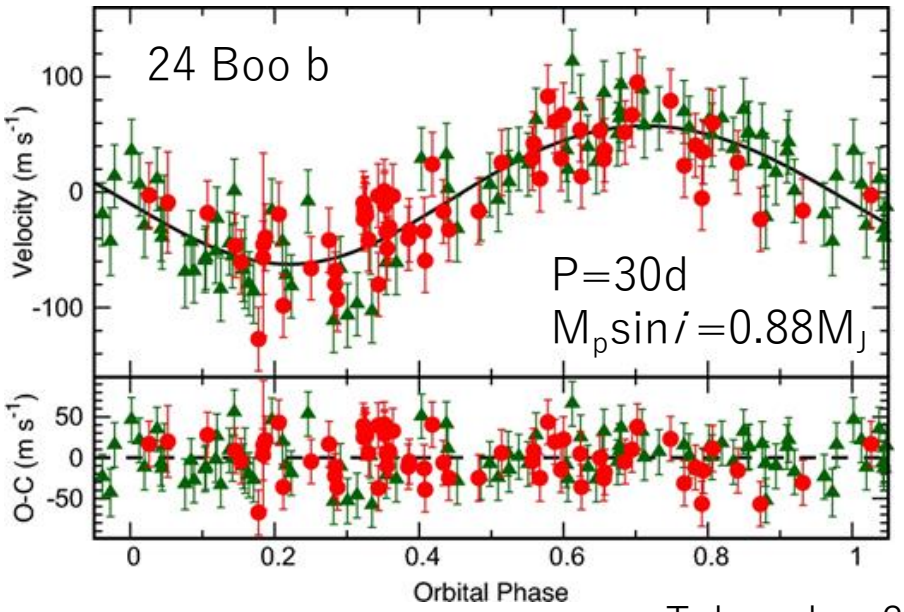


Wolthoff et al. 2022



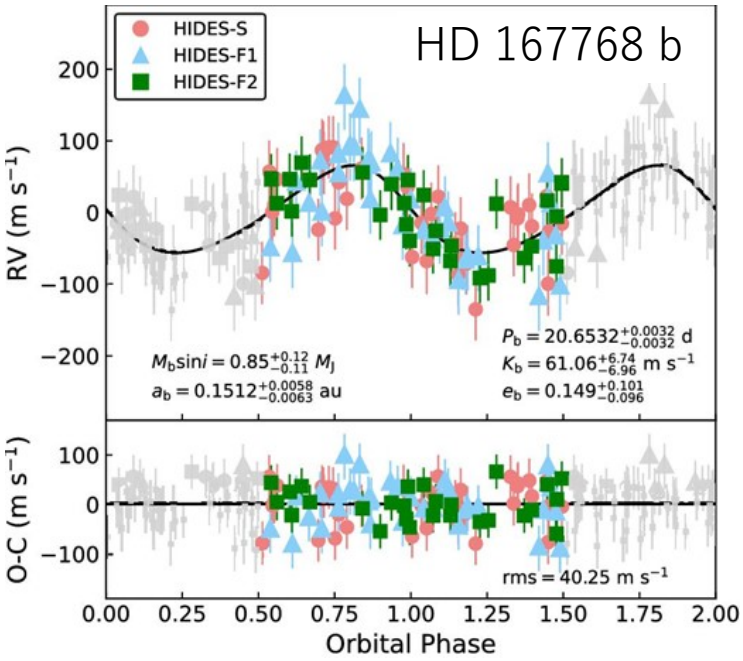
Takarada et al. 2018

低金属量星周りの巨大惑星(岡山188cm鏡/HIDES)



Takarada+ 2018

M=1.1M$_\odot$, [Fe/H]=-0.77



P=20d
$M_p \sin i = 0.85 M_J$

Teng+ 2023

M=1.1M$_\odot$, [Fe/H]=-0.67

低金属量巨星の周りの巨大惑星

従来よく言われていたのは

- 巨星は典型的に質量が大きい（$>1.5M_{\odot}$）ので、低金属量でも巨大惑星ができるのでは？
- 超巨大惑星（$>5M_{J}$）が多いので、重力不安定でできたのでは？

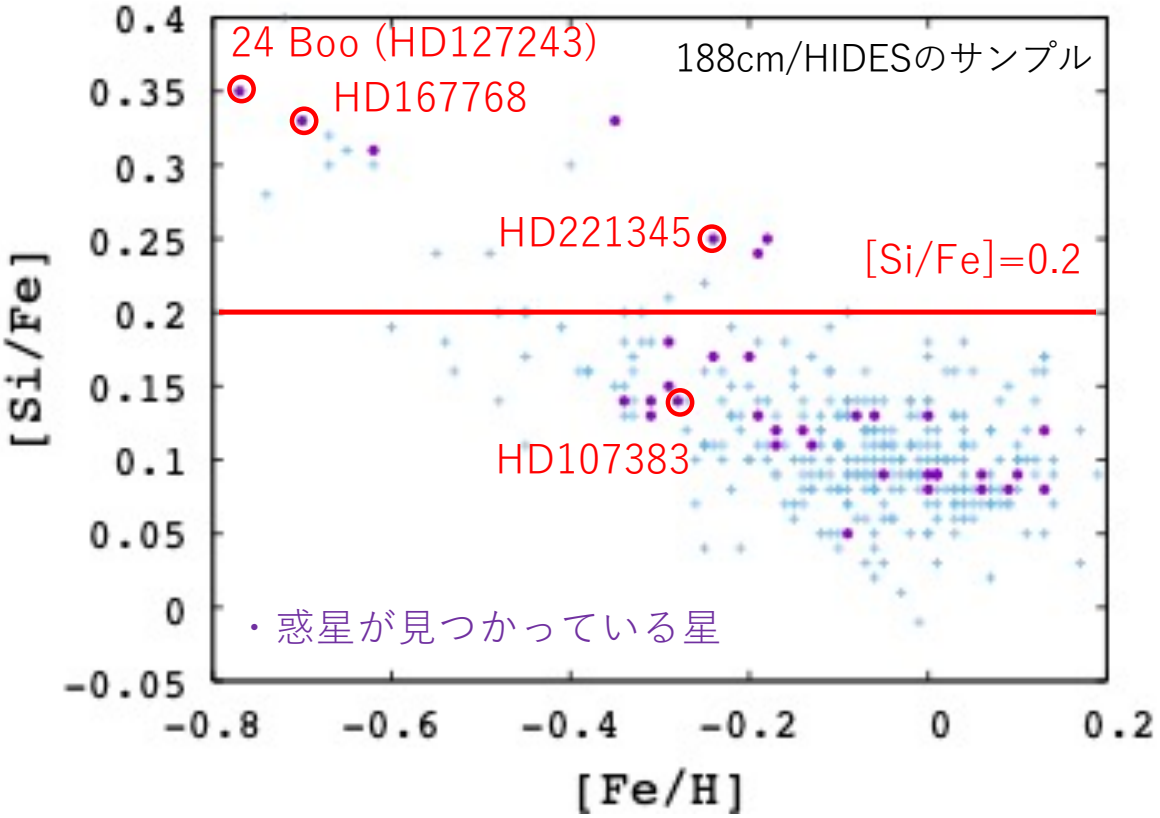
ところが、岡山188cm/HIDESで新たに見つかった 24 Boo (Takarada+ 2018) & HD 167768 (Teng+ 2023) 系は

- 主星はほぼ太陽質量
- 惑星はほぼ木星質量

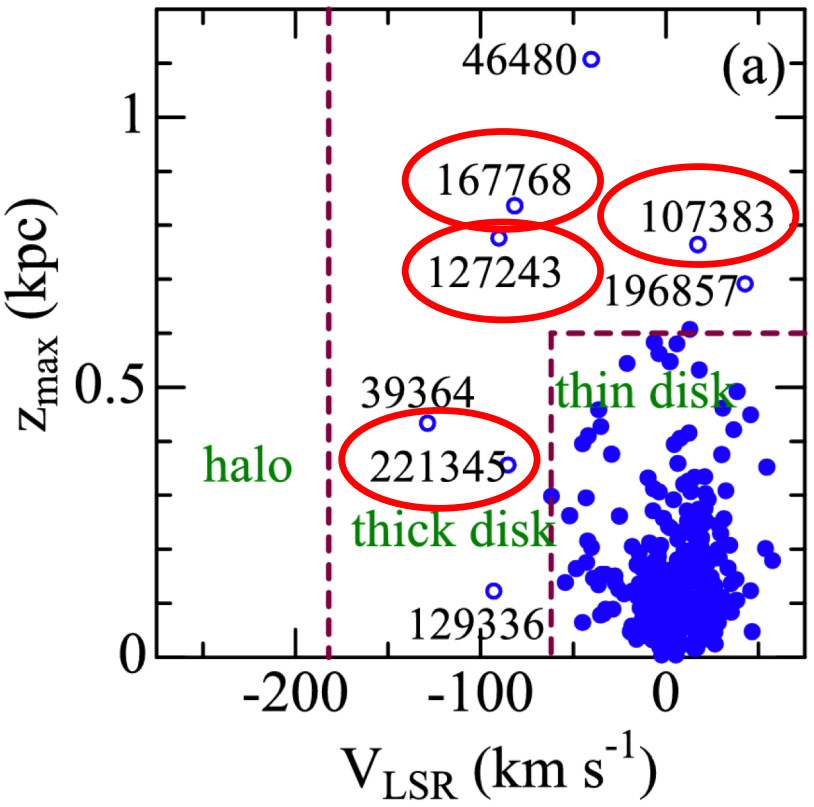
であり、上の説はいずれもあてはまらない

α元素が巨大惑星形成に寄与？

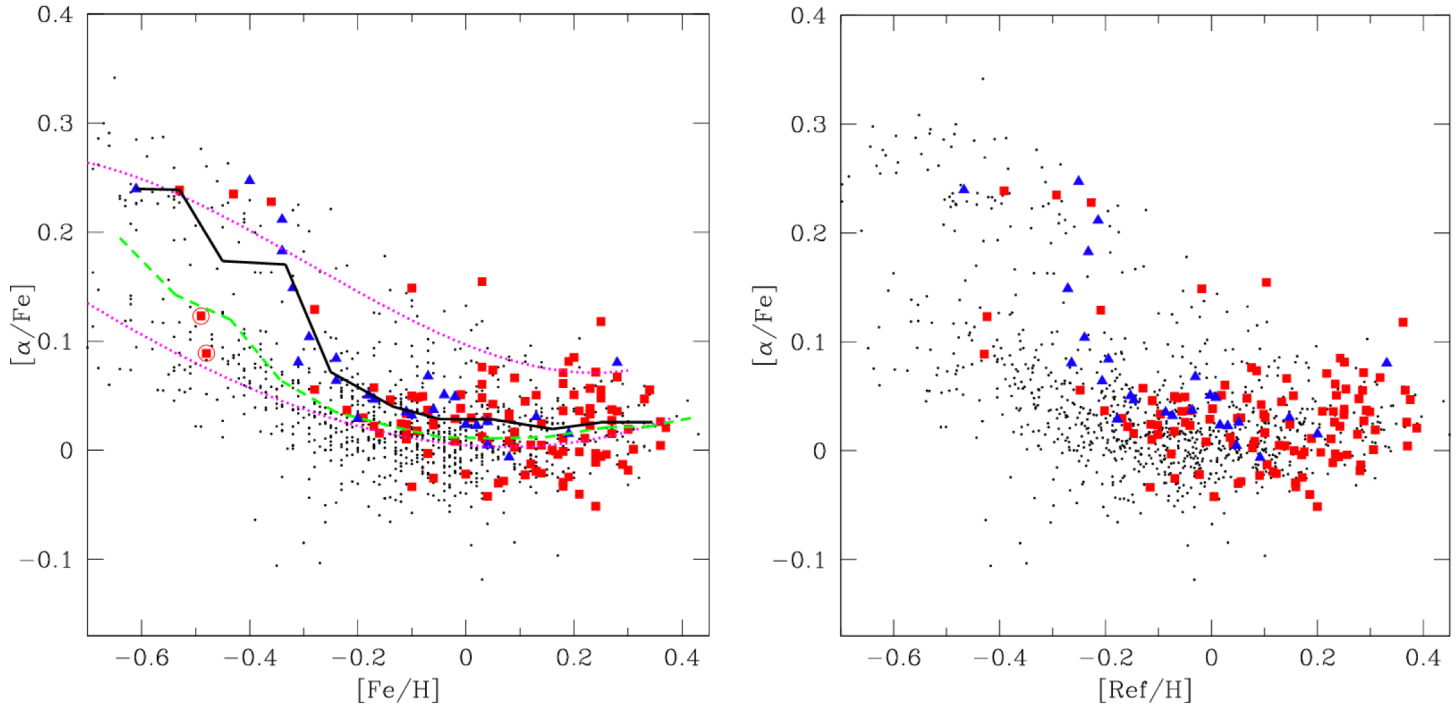
- 低金属量巨星では厚い円盤星（[α/Fe]が過剰）における惑星検出率が高いようにみえる



Takeda et al. 2008



α元素過剰と巨大惑星の分布（主に主系列星）



[Fe/H]<-0.2で、α元素過剰星に惑星がシフトしているように見える

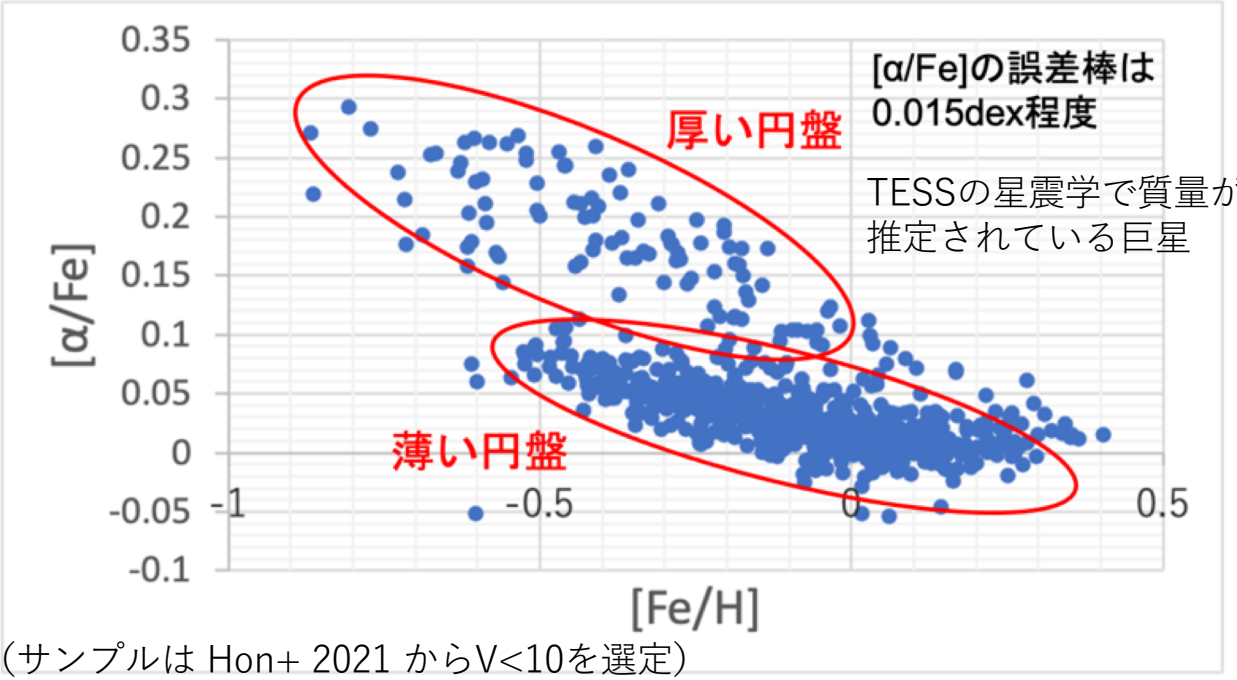
α元素がコア形成をサポート？

より低金属量星では？
巨大惑星形成が可能な最少金属量はあるか？

Fig. 5. [α/Fe] versus [Fe/H] (*left*) and [α/Fe] versus [Ref/Fe] (*right*) for the total sample. The red squares refer to the Jovian hosts and the blue triangles refer to the stars hosting exclusively Neptunians and super-Earths. The black dots represent the stars without planets. The black solid and green dashed lines represent the mean distributions of the planet host and non-host samples, respectively. The magenta dotted lines are the cubic fits for the low-α (thin disc) and the high-α (thick disk + high-α metal-rich) stars. The two metal-poor Jovian hosts in the red circles are the stars with low log g values discussed in Sect. 3.2.

Adibekyan et al. 2012

せいめい/GAOES-RVによる銀河系の厚い円盤に属する巨星における系外惑星探索



（サンプルは Hon+ 2021 からV<10を選定）

- 厚い円盤の矮星
  - 500 pc, 1 $L_\odot$, V=13.5
  - ➢ 8-10m級望遠鏡でもRVサーベイには暗すぎる

- 厚い円盤の巨星
  - 500 pc, 60 $L_\odot$, V=9
  - ➢ 従来の2m級望遠鏡によるRVサーベイでは暗くて対象外

➔4m級（せいめい望遠鏡）でRVサーベイ可能

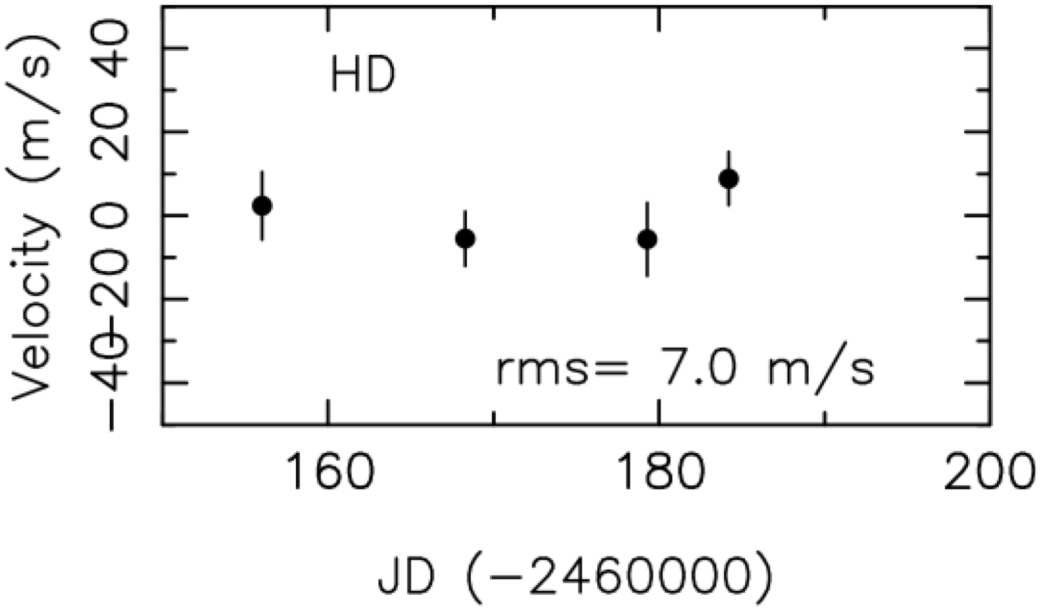
-1.0<[Fe/H]<0.0 の厚い円盤に属する巨星100個(V<10)に対し4年間で惑星探索
低金属環境下における巨大惑星形成、特に α 元素の寄与を調べる

観測計画＆進捗状況

- 観測計画
  - 目標：共同利用時間と京大時間を合わせて半期30夜程度を4年間
    - 2023Bは当初割当計22夜（共同利用15夜＋京大時間7夜）＋ α
  - 数週間～2ヶ月に1回くらいの頻度で定期的に視線速度モニター
  - 公転周期1000日以内程度の惑星を探索
- 進捗状況
  - 7月下旬～9月上旬に、述べ130天体について視線速度データ（I_2セルあり）、20天体についてテンプレートスペクトル（I_2セルなし）を取得
  - V～10に対し、25分露出（S/N～70）で約15m/sの測定精度を確認（概ね想定通り）
  - その中の12天体については3～4点の視線速度データを取得
    - すべてRMS＜17m/s ➔ 恒星自身は概ね想定通りの視線速度安定性（変動性）を示す。24 Boo bやHD167768 bのような惑星（K_1～60m/s）を検出可能。

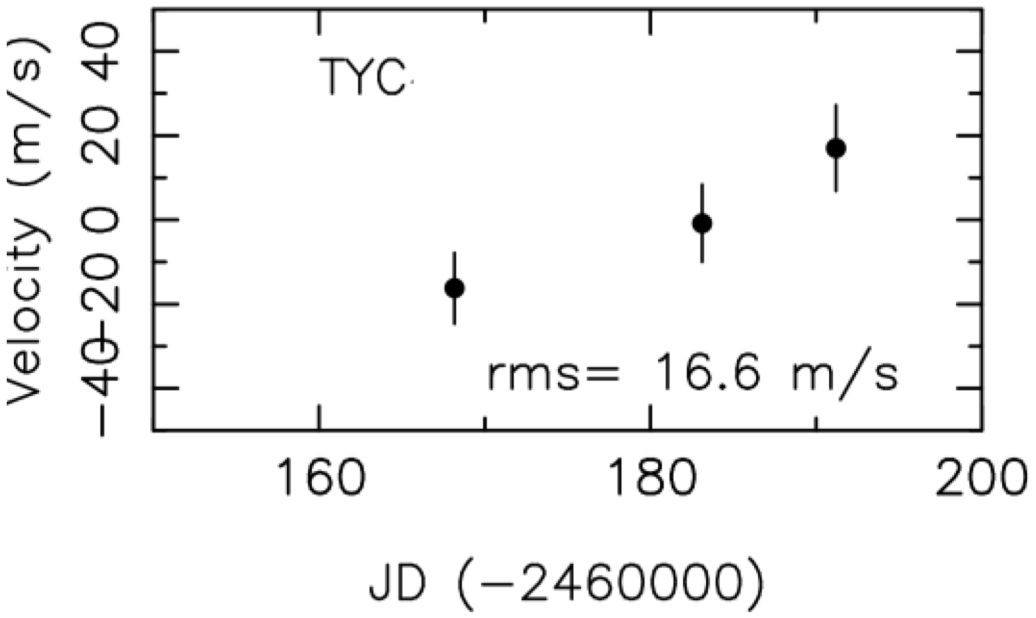
予備的結果：巨星のRV変動の例

Stable



[Fe/H]=-0.44, [α/Fe]=0.21

Variable?



[Fe/H]=-0.28, [α/Fe]=0.16

まとめ

- 銀河系の厚い円盤に属する低金属量巨星で相次ぐ巨大惑星の発見
  - 24 Boo b (Takarada+ 2018), HD 167768 b (Teng+ 2013)
  - コア集積？重力不安定？
  - [α/Fe]が過剰な傾向➔α元素が固体コア形成をサポート？

- せいめい/GAOES-RVでの新しい系外惑星探索を開始
  - 低金属量環境下での巨大惑星頻度、α元素の寄与を明らかにする
  - 厚い円盤に属する巨星100個（V<10; -1.0<[Fe/H]<0）を対象
  - 半期30夜程度で4年間、数週間〜2ヶ月に一回程度の頻度での視線速度モニター観測が目標
  - 予備的結果
    - 測定精度：V〜10に対して25分積分（S/N〜70）で約15m/s（想定通り）
    - 対象星のRV安定性（変動性）：ここまでの12天体は全てRMS<17m/s（想定通り）