

視線速度精密測定による G型巨星の惑星サーベイ II.

2008年後期～2009年前期の報告

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

¹東工大, ²東海大, ³OAO, ⁴NAO, ⁵神戸大



内容

- プロジェクトの概要
- 観測実施状況
- これまでの結果
- まとめと今後

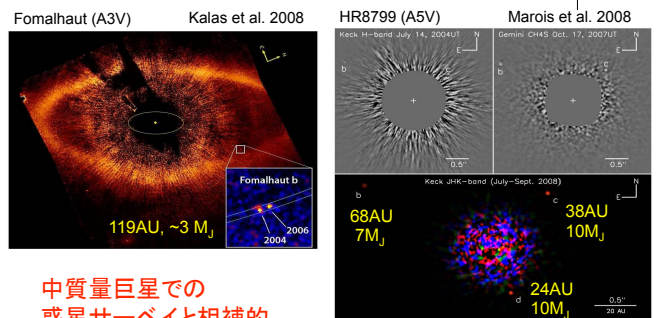


G型巨星惑星探索

- 中質量星 (1.5~5M_☉) 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) は多数見つっている。最近では若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→重い惑星が多い?
 - 中心星光度大→固体物質欠乏? 惑星形成阻害?
 - 原始惑星系円盤の寿命短→惑星系形成のタイムスケールへ制限
- 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



A型矮星での惑星直接検出



巨星の惑星サーベイ

Observatory	Since	Tel. (m)	# of Target	Target	Discovery	Group
Lick	1999	0.6	380	GK Giants	2	Frink et al.
ESO	1999	1.5	80	GK Giants	3	Setiawan et al.
TNG	2004	2	70	GK Giants	5	Dollinger et al.
Okayama	2001	1.88	300	GK Giants	9+2	Sato et al.
Xinglong	2005	2.16	100	GK Giants	2	Liu et al.
Bohyunsan	2005	1.8	190	GK Giants	1	Han et al.
Subaru	2006	8.2	>200	GK Giants	-	Sato et al.
TUBITAK	2008	1.5	50	GK Giants	-	Selam et al.
Lick	2003	3 & 0.6	160	G Subgiants	5	Johnson et al.
McDonald	2004	9.2	~1000	GK Giants	4	Niedzielski et al.
ESO	2003	1.2 & 3.6	115	Open Cluster	2	Lovis et al.
OHP&ESO	2004	1.9&3.6		AF Dwarfs		Galland et al.



第2期プロジェクト観測の目的

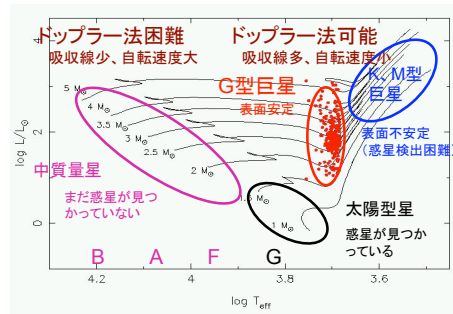
- 第1期プロジェクトで複数の惑星候補検出、その統計的性質は太陽型星の惑星とは違う可能性があることが分かった。これを踏まえて2期目のプロジェクト観測では、
 - **時間軸の延長**
 - 周期の確定していない惑星候補の軌道決定
 - ターゲット全体の時間軸を延ばし(最長9年、10AUの約3分の1)、3~4AU以内の惑星系について均質なサンプルに基づく統計
 - 数AU~10AUの惑星形成効率は太陽型星との比較において重要
 - さらに長周期の惑星、多重惑星系の頻度推定
 - **サンプルの拡大とフォローアップ**
 - 現在日中韓で約600個のターゲットを観測中(目標1000個)
 - 中国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



全体計画

- 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
 - コ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→継続
 - それ以外の継続天体(約270個)・・・年2回程度→継続
 - 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・・・5000-6000Å→完了(Liu et al. in prep.)
 - 惑星をもつ候補・・・6000-8000Å(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・・・CaIHK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)

観測対象: G型巨星



- $0.6 < B - V < 1.0$
星自身が安定
G6~K1III
 - $-3 < M_V < -2$
 $1.5 < M/M_\odot < 5$
 - $\delta > -25^\circ$
岡山から観測可能
 - $V < 6$ 精度10 m/s以下
- Hipparcosカタログから約300個を選択

観測実績

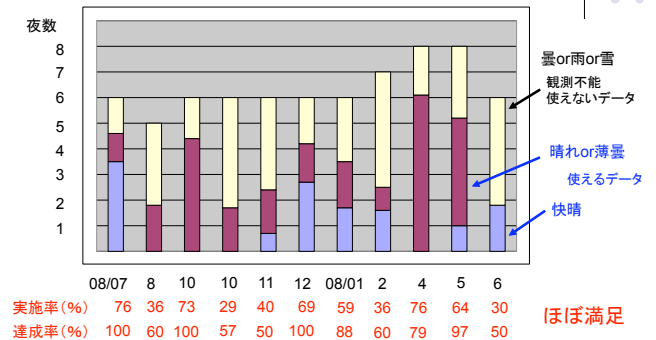
- 2007年前期からスタート。現在は2009年後期の観測中。
- 2007年1月~6月(35夜、実施率63%)
- 2007年7月~12月(35夜、実施率48%)
- 2008年1月~6月(34夜、実施率55%)
- 2008年7月24日~7月29日(6夜、76%)
- 2008年8月22日~8月26日(5夜、36%)
- 2008年9月24日~9月29日(6夜、キャンセル)
- 2008年10月14日~10月19日(6夜、補填、73%)
- 2008年10月20日~10月25日(6夜、29%)
- 2008年11月22日~11月30日(6夜、40%)
- 2008年12月17日~12月22日(6夜、69%)
- 2009年1月23~25日、1月30日~2月1日(6夜、59%)
- 2009年2月20日~2月26日(7夜、36%)
- 2009年4月1日~4月10日(8夜、76%)
- 2009年4月28日~5月6日(8夜、64%)
- 2009年5月27日~6月3日(6夜、30%)

割当状況

- 2007年前期 35夜
- 2007年後期 35夜
- 2008年前期 34夜
- 2008年後期 35夜
- 2009年前期 35夜

2008年後期~2009年前期の平均実施率 53%

観測実施状況



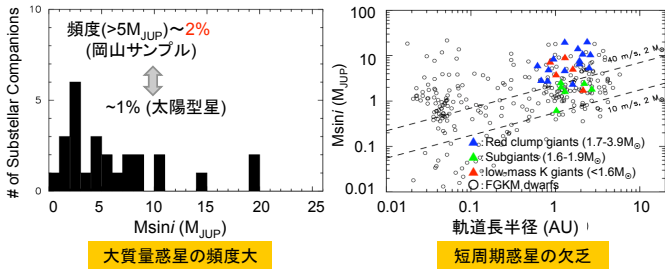
これまでに得られた成果

- 査読論文
 - A Planetary Companion to the Hyades Giant ϵ Tauri
 - Sato et al. 2007, ApJ, 661, 527
 - 散開星団における初の系外惑星発見
 - A Substellar Companion to the Intermediate-Mass Giant 11 Comae
 - Liu, Sato, Zhao, et al. 2008, ApJ, 672, 553
 - 興隆(中国)との共同観測。日中協力の一環。
 - 19Mの褐色矮星候補の発見
 - Planetary Companions around Three Intermediate-Mass G and K Giants: 18 Delphini, ξ Aquilae, and HD 81688
 - Sato et al. 2008, PASJ, 60, 539
 - 3つの新惑星と、惑星の軌道進化
 - Stellar Parameters and Elemental Abundances of Late-G Giants
 - Takeda, Sato, and Murata, 2008, PASJ, 60, 781
 - OAのサンプルの物理パラメータ、化学組成解析
 - Planetary Companions to Evolved Intermediate-Mass Stars: 14 Andromedae, 81 Ceti, 6 Lynx, and HD 167042
 - Sato et al. 2008, PASJ, 60, 1317
 - 4つの新惑星
 - A Planetary Companion Orbiting the Intermediate-mass G Giant HD 173416
 - Liu et al. 2009, RAA, 9, 1
 - 興隆(中国)との共同研究。日中協力の一環。
 - 日中協力初の惑星

岡山プロジェクトでの発見

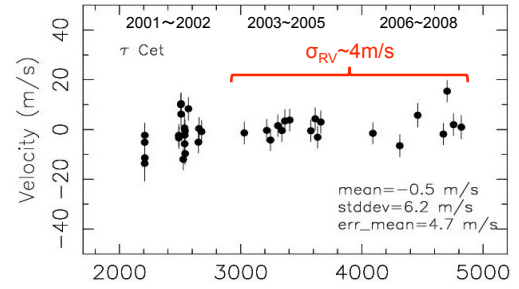
天体名	スペクトル型	主星質量 (M_\odot)	主星半径 (R_\odot)	惑星質量 (M_{Jup})	軌道長半径 (AU)	離心率	[Fe/H] (dex)
ϵ Tau	K0 III	2.7	13.7	7.6	1.93	0.15	+0.13
11 Com	G8 III	2.7	19	19.4	1.29	0.23	-0.28
81 Cet	G5 III	2.4	11	5.3	2.5	0.21	+0.06
18 Del	G6 III	2.3	8.5	10.3	2.6	0.08	-0.05
HD 104985	G9 III	2.3	11	8.3	0.95	0.09	-0.35
ξ Aql	K0 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
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
HD 119445	G6III	3.9	20.5	37.6	1.71	0.08	+0.04

統計的性質



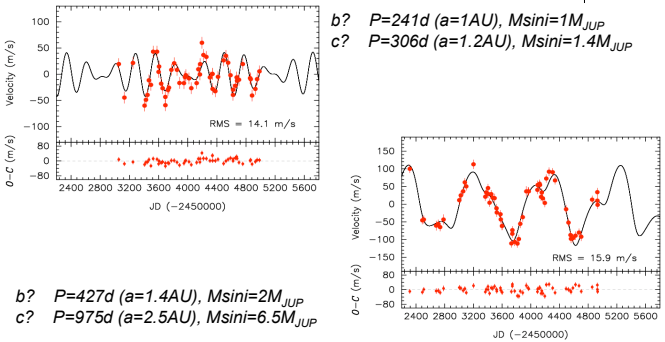
過去5~6年分のデータを統一的に解析して
より正確な統計的性質を明らかにする

測定精度: 視線速度不変星 (τ Cet)



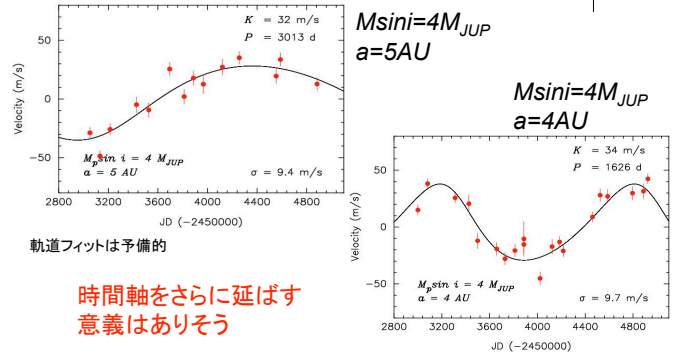
短期的には約2m/sの精度が
達成されている (Kambe et al. 2008) JD (-2450000)

多重惑星系?



b? $P=427\text{d}$ ($a=1.4\text{AU}$), $M_{\text{sin}i}=2M_{JUP}$
c? $P=975\text{d}$ ($a=2.5\text{AU}$), $M_{\text{sin}i}=6.5M_{JUP}$

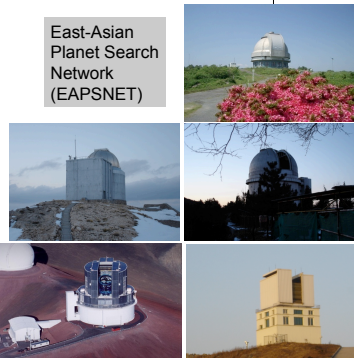
Beyond 4AU



東アジアプラネットサーチ ネットワーク

- 岡山プロジェクト: 岡山1.88m
 - 300 GK giants ($V<6$), since 2001
 - 10 planets and 1 brown dwarf
- 日中協力: 興隆 2.16m (+岡山)
 - 100 GK giants ($V<6$), since 2005
 - (1 planet and 1 brown dwarf)
- 日韓協力: 普賢山 1.8m (+岡山)
 - 190 GK giants ($V<6.5$), since 2005
 - 1 brown dwarf
- すばるプロジェクト: すばる 8.2m (+岡山)
 - >200 GK giants ($6.5<V<7$), since 2006
 - Several candidates
- 日土協力: TUBITAK 1.5m鏡
 - 50 GK giants ($V<6.5$), since 2008

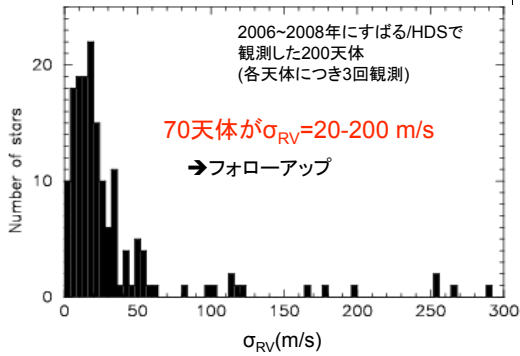
East-Asian
Planet Search
Network
(EAPSNET)



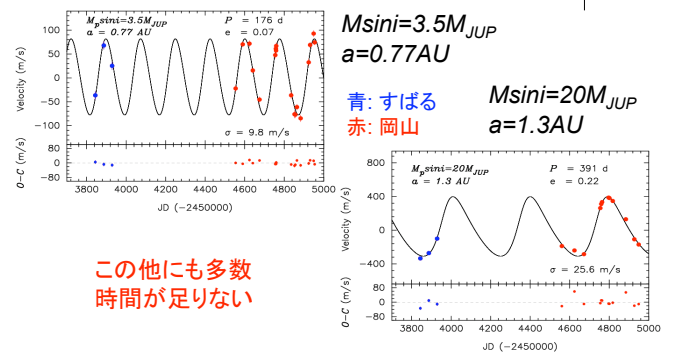
EAPSNET現況

- 中国・興隆
 - 毎年30~40夜の割り当て
 - 2009年3月、CCDをアップグレード (1Kx1K, 24um/pix \rightarrow 2Kx2K, 13.5um/pix)
 - 波長カバーレージはほぼ同じだがサンプリング数が増加したため、IPのより詳細なモデル化が可能になった (実際はフィッティングがきちんと収束するようになったことが大きい)。安定して約15m/sを達成できると期待 (ただし明るい天体に限る)。
 - 化学組成解析はLiu Yajuan氏が精力的に進めている (in prep.)
 - 観測効率が悪いのが最大のネック。戦略の見直しが必要な時期。
- 韓国・普賢山 \rightarrow 東海大・大宮氏が主として実行 (泉浦氏の講演)
- すばる
 - 半年~1年間で数回観測し、視線速度変動の大きい天体をピックアップ
 - 2006~2008年で計約200天体観測。2009年7月にもサービス観測で130天体について追加データ取得に成功。EAPSNETでのフォローアップ待ち
- トルコ
 - 半年7月からRTT1.5mで50星のGK型巨星のサーベイを開始
 - 小ピクセルサイズのCCDにリプレースしたことにより、視線速度測定精度の向上が見込める ($<10\text{m/s}$)。

すばる天体の視線速度変動



すばるで見つかった惑星候補



まとめと今後

- プロジェクトは順調に遂行中
 - 惑星発見数は10個に到達。さらに5~10個の候補あり(多重惑星系含む)。
 - 過去5~6年分のデータをまとめ、より正確な統計的性質を明らかにする。また、長周期惑星の頻度を推定し、次期プロジェクト観測の戦略を練る。
- すばる天体のフォローアップを精力的に進める
 - 約70個の視線速度変動天体を同定。
 - 時間が足りないので、他望遠鏡とうまく分担していきたい。
- 惑星検出以外のテーマも順次進める
 - 恒星活動調査、吸収線輪郭変動解析、視線速度測定精度改善(進展あり)、理論(惑星形成、進化)、その他関連する分野
 - 周辺環境の整備: 解析自動化、データベース、ウェブ、等