

2015年度岡山ユースミーティング
2015年8月17日（月）-18日（火）
@国立天文台三鷹 すばる棟 大セミナー室

大宮正士

太陽系外惑星探査プロジェクト室, 国立天文台 & ABC

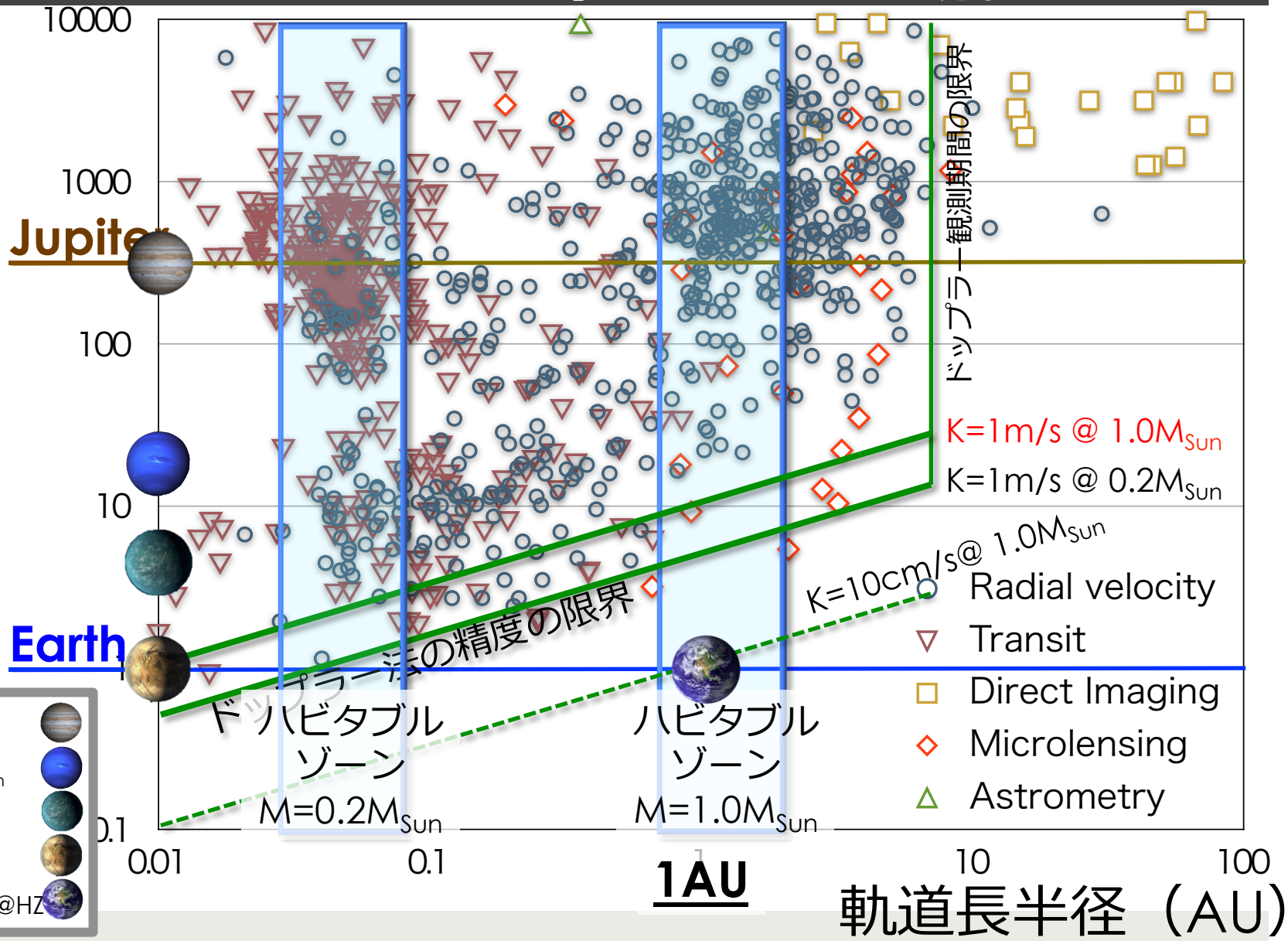
晩期 M 型矮星の H α 線観測 による IRD 地球型惑星探索 サンプルの選定

1. イントロ：地球型惑星検出に向けた戦略
2. 地球型惑星探索のサンプルの選定
3. KOOLS/188cm望遠鏡での観測と現状

晩期M型矮星 → H α 線の観測 → 地球型惑星探索

系外惑星サイエンスの次のステップ： ハビタブルな地球型惑星の理解

惑星質量 (M_{Earth})



$>30M_{\text{Earth}}$	
$10-30M_{\text{Earth}}$	
$3-10M_{\text{Earth}}$	
$0.5-3M_{\text{Earth}}$	
$0.5-5M_{\text{Earth}} @ \text{HZ}$	

Infrared Doppler instrument (IRD) for the Subaru telescope

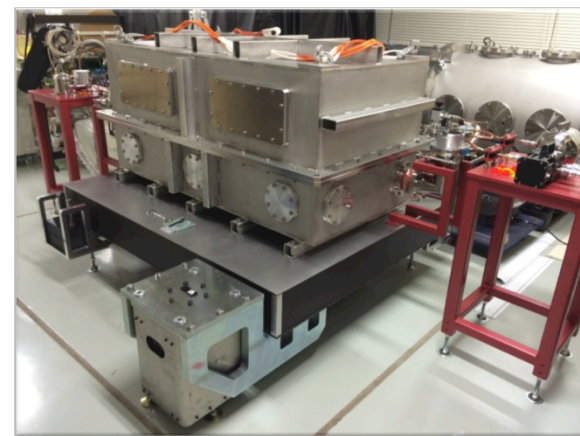
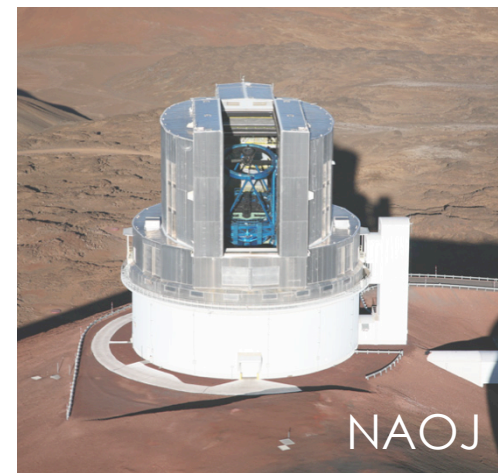
□ IRD : InfraRed Doppler instrument, 2016年春ファーストライト予定

- 望遠鏡 : すばる望遠鏡 (IRナスミス焦点)
 - 観測波長域 : 0.97-1.75 μm (Y, J, H-band)
 - 波長分解能 : 70,000
 - 波長校正 : レーザー周波数コム
 - 安定性 : 真空チャンバー、セラミック光学ベンチ等
- 1m/sの精度で視線速度測定を可能にする

= 近赤外ドップラー法で地球型惑星を狙える

□ *IRD/Subaru planet search*

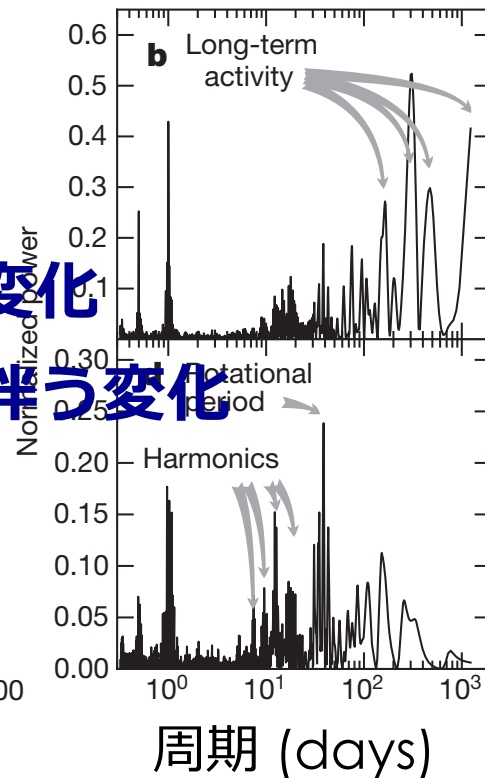
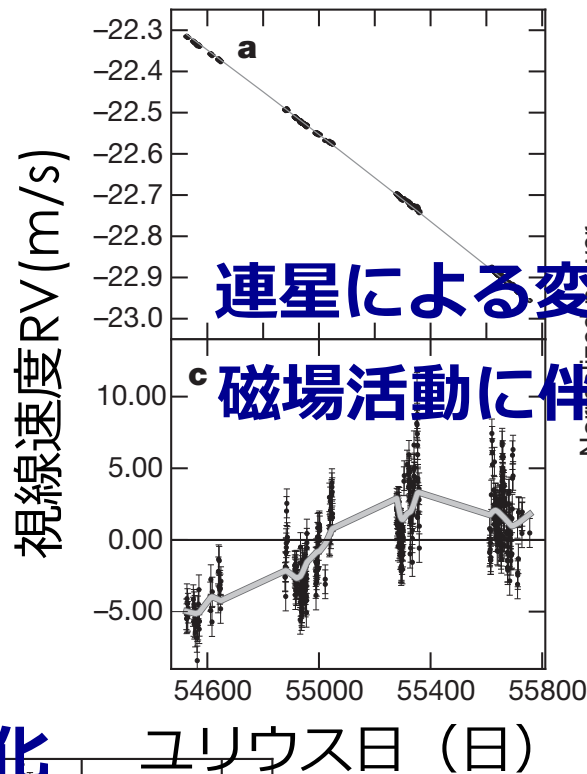
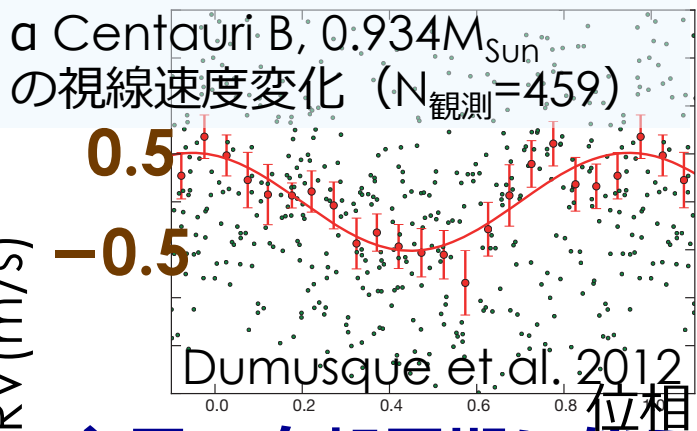
- ターゲット : 晩期M型矮星 (M4-M9)
 - 可視/近赤外3m級望遠鏡では難しい
- ゴール : ~50惑星 & ~10地球型惑星@HZ
 - 1地球質量の惑星をハビタブルゾーンに検出する
 - 低質量星周りの地球型-木星型惑星形成の理解
- 日本の系外惑星の装置、観測、理論の連携



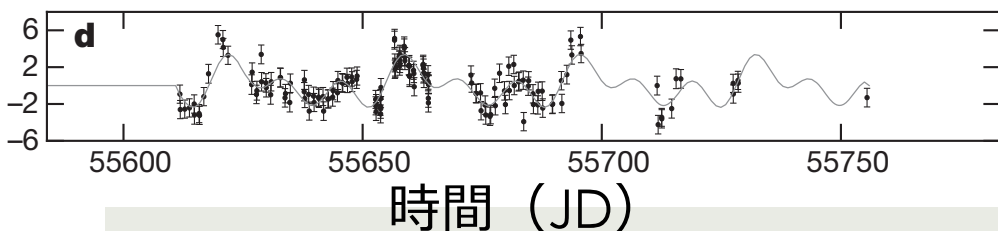
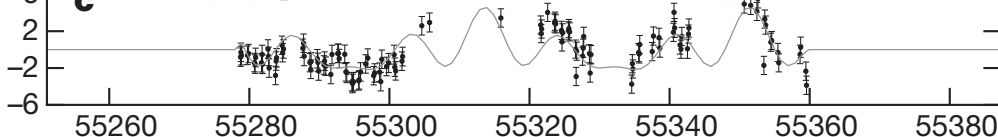
世界で初めて系外地球型惑星の特徴と形成とハビタビリティに迫る

低質量星惑星検出の難題：星の活動

- アルファケンタウリB
 - 1.16地球質量惑星の報告
 - Dumusque et al. 2012
 - 振幅 $K \sim 0.5$ m/s、周期3日
 - 星固有の変化に埋もれる



主星の自転周期に伴う変化



- 自転、磁場周期による変化
- 惑星偽検出の可能性はある
- Hatzes 2013
- ➔ 活動度が小さい星を選び
- ➔ ジッターの影響を除去する

地球質量惑星の検出に向けた戦略

□ 戦略1: 観測ターゲットの選定

- 徹底的に、表面活動度が低く、自転速度が遅い late-M型矮星 を選ぶ

□ 戦略2: 高頻度多回数観測

- 表面活動、装置変化に伴う変化を小さくするために 短期間に多数回の視線速度モニター観測を行う

□ 戦略3: 視線速度 & 表面活動同時観測

- ターゲット毎の表面活動調査を視線速度モニター観測と同時に進める

戦略1: 観測ターゲットの選定

- ◆基本パラメータがわかっている天体
 - ◆年周視差、実視等級、etc.
- ◆長期間の超精密視線速度モニターに適する天体
 - ◆十分な視線速度精度を達成可能
 - 射影自転速度 $v\sin i$ が遅い晩期M型矮星
 - 自転周期、 $V\sin i$ 、Ha線、スペクトル型
 - ◆表面活動による視線速度ジッターが小さい
 - 活動度が低い天体
 - XUV、Ha線、自転周期
- ◆目指すサイエンスからの要請
 - ◆低質量星、単独星 etc.

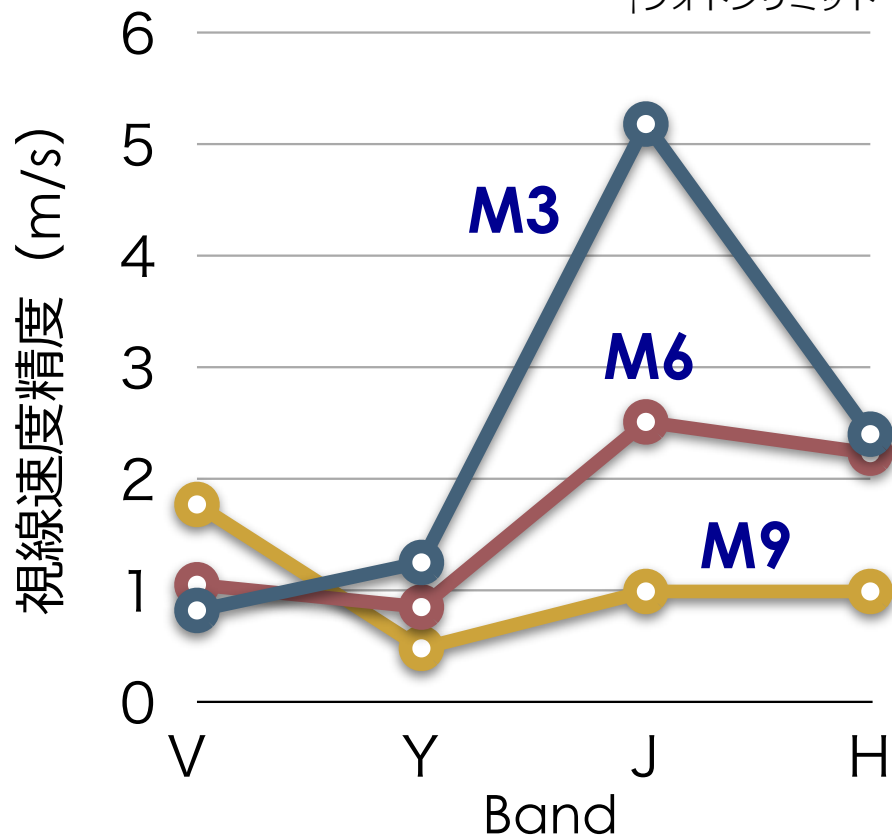
M型矮星で期待される精度と活動度

星スペクトルのみ[†]から期待される精度
の見積もり M3(●), M6(●), M9(○)

SN~300@Y-band, $V_{\text{ sini}}=0\text{ km/s}$, $R=80,000$

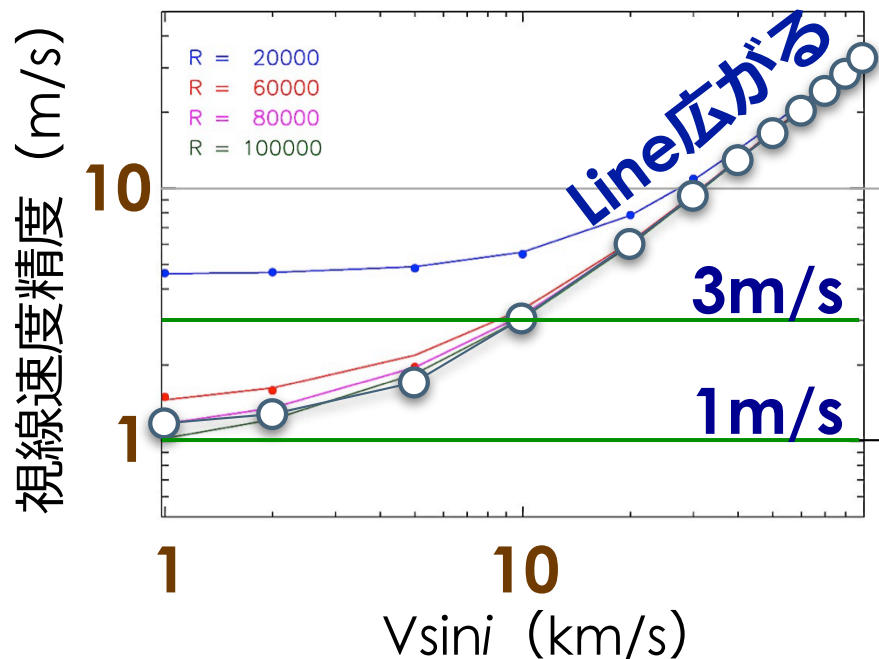
Ref. Reiners+2010

[†]フォトンリミット



自転速度と期待される精度

SN~100, M5, Y-band, Reiners+2010



Reiners et al. 2010によると、

M4-M6 $V_{\text{ sini}} > 10\text{ km/s}$: 20%

M7-M9 $V_{\text{ sini}} > 10\text{ km/s}$: 50%

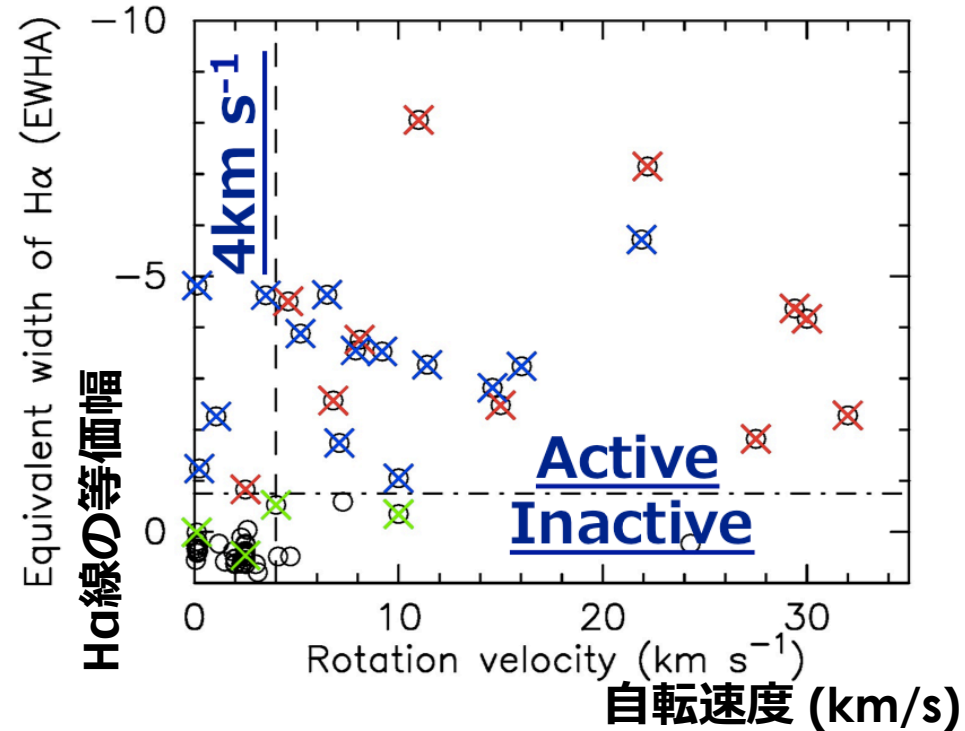
West et al. 2011によると、

活動度が高い星 (M4-M6) : 10-50%

活動度が高い星 (M7-M9) : 60-80%

KOOLS/OAO1.88m望遠鏡での観測

- Ha輝線周囲の中分散分光観測
 - Ha輝線の有無と強度を確認
 - スペクトル型、金属量など
- 観測方針
 - 活動度が低くて自転速度が遅い晩期M型矮星を探す
 - Ha線のEWHAが小さくXUVの放射が弱い星であれば、自転速度が遅い星が大半を占める
 - ジッターが小さくて、表面活動が安定している星を選ぶ
 - M4~M9の近傍晩期M型矮星の性質を明らかにする
 - 太陽近傍 (25pc以内) の晩期M型矮星の統計
 - スペクトル型、金属量、活動性、表面重力の決定



Ha線の強度(EWHA)と自転速度の関係

inactive (EWHA > -0.75 & No strong XUV)なM型矮星の内、9割は $v \sin i < 4 \text{ km s}^{-1}$ である

○ : 低質量星のプロット ($0.08 \sim 0.3 M_{\text{Sun}}$)

× : Haでの活動度 (EWHA, West+11) が高い星

× : XUV (ROSAT, GALEX)での活動度が高い星

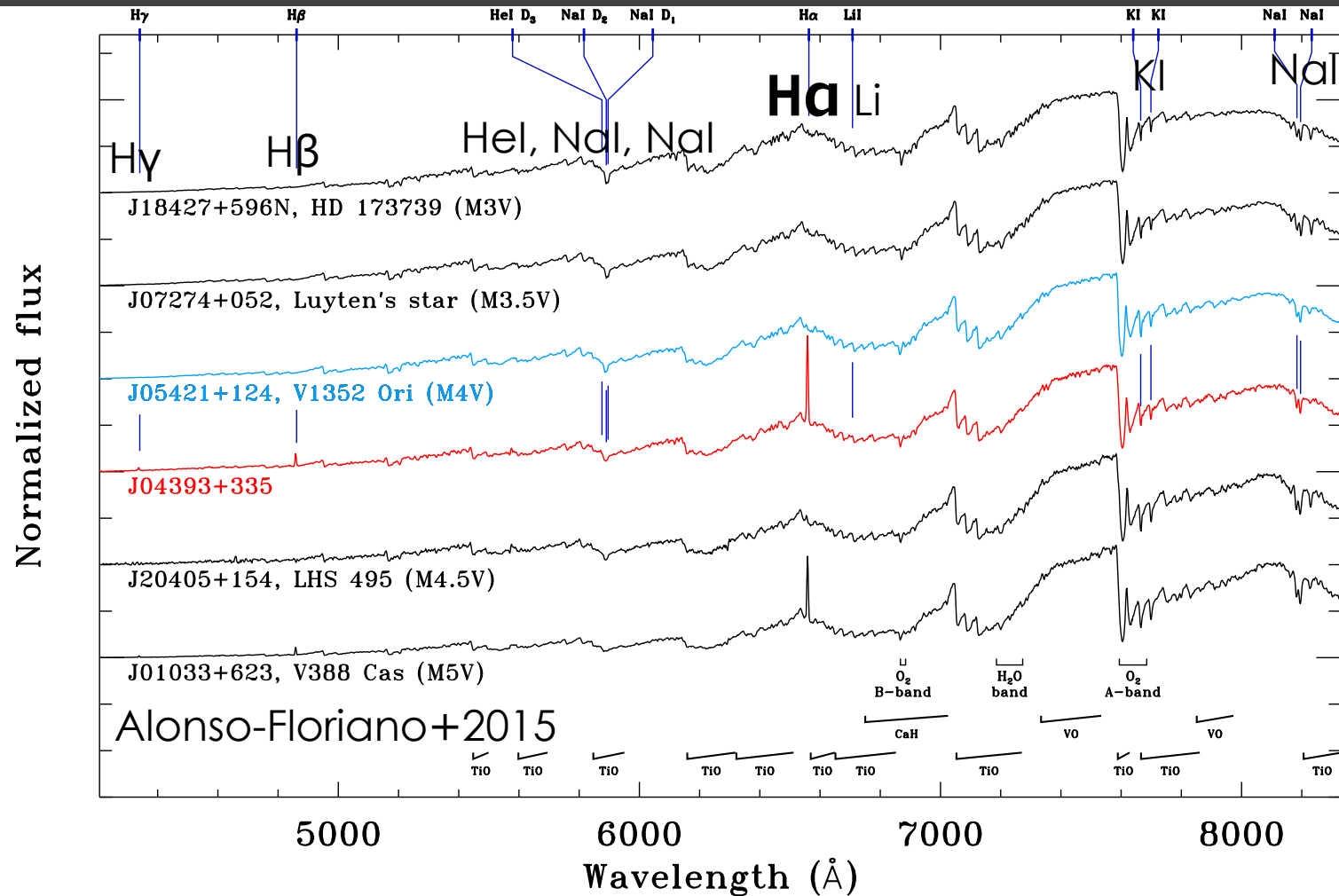
× : HaとXUVで活動度が高いと分かっている星

Ha, UV, X線指標 : Lepine+13, AJ, 145, 102

自転速度 $V (\sin i)$: e.g. Jenkins+09, ApJ, 704, 975

破線: 5 km s^{-1} , 一点破線: EWHA = -0.75

先行研究



- West+2011 : SDSSで受かったM型矮星70,841個のカタログ (天体が暗すぎる)
- Lepine+2013 : 固有運動カタログの中で明るい星1408個の分光カタログ (J < 9の明るい星のみ)
- Alonso-Floriano+2015 : CARMENESカタログのM型矮星753個の観測 (>M5のM型矮星が大多数)

観測ターゲットとなる晩期M型矮星

□ ターゲット候補：約200星 (既知の情報から選定)

□ J~7-11.5 mag

□ Mass~0.1-0.3 M_{Sun}

□ Sp. type : M4-M8

□ 既知の下記天体を除く

□ 実視連星

□ 活動度が高い天体

□ XUV輝線星

□ H α 輝線星

□ フレア星

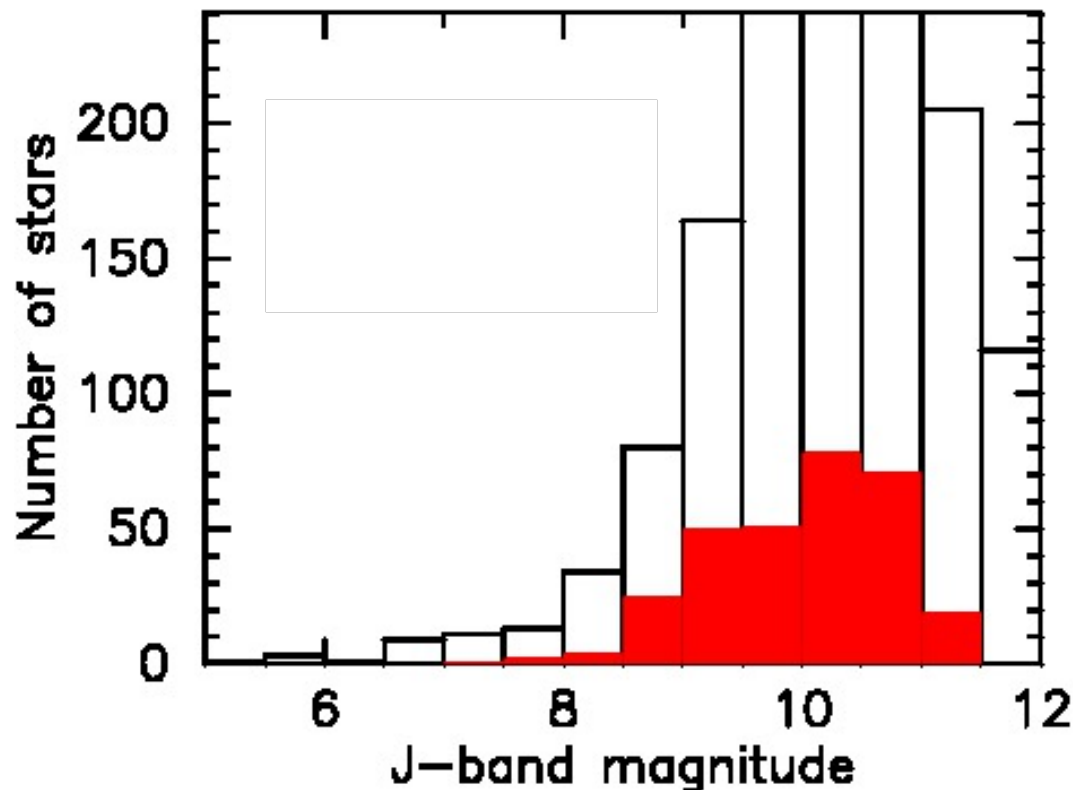
□ 回転変光星

□ vsini>4km/sの星

□ 追加条件

□ 太陽からの距離 (<25pc)

□ 主星質量によりバイアス



本観測などにより約100星に絞る

0.2-0.3 M_{Sun} の星：約?0星

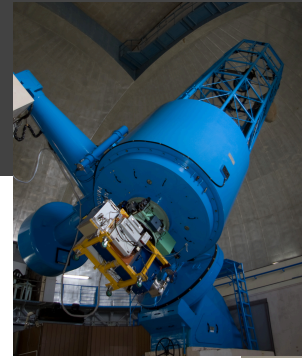
0.1-0.2 M_{Sun} の星：約?0星

観測 & 解析

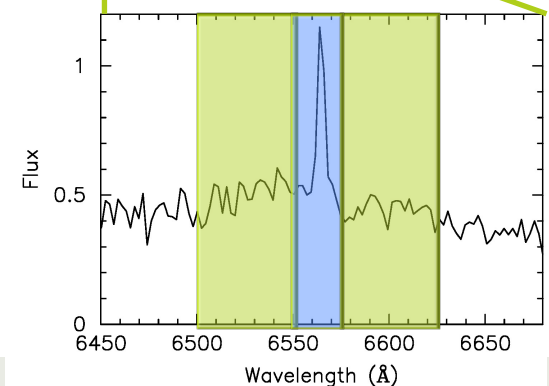
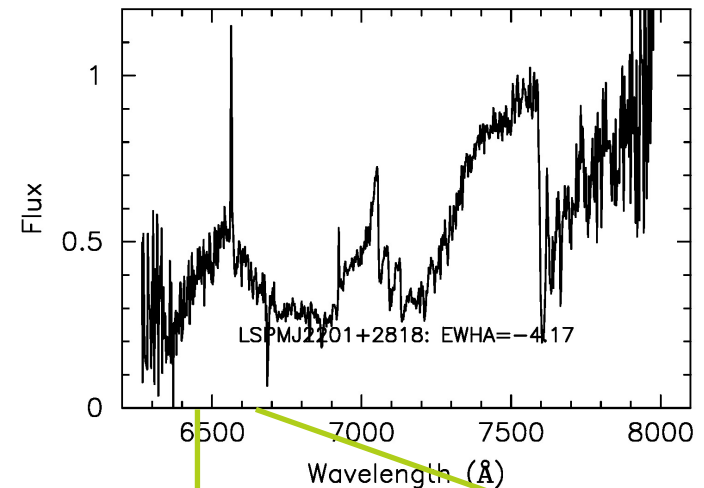
- 装置： KOOLS/188cm望遠鏡
 - グリズム： VPH 683
 - スリット幅 = 1.0" ~ R=2,000
 - 露出時間 ~ 200-1200 s ~ SN>30
- 観測： 88星/22夜の割り当て
 - 2014年： 実施率 = 36% (望遠鏡稼働率)
 - 8月 (4夜)、9月 (6夜)、10月 (3夜)
 - 2015年： 実施率 = 45% (望遠鏡稼働率)
 - 3月 (4夜)、5月 (5夜)
 - 先行研究による観測がある星： 5星
- 解析： H α 線の等価幅の測定

- 一次元化： IRAF
- H α 線と擬似コンティニュームとの比較
 - Equivalent width of H α (EAHA)
 - EWHA < -0.75Å であれば活動的

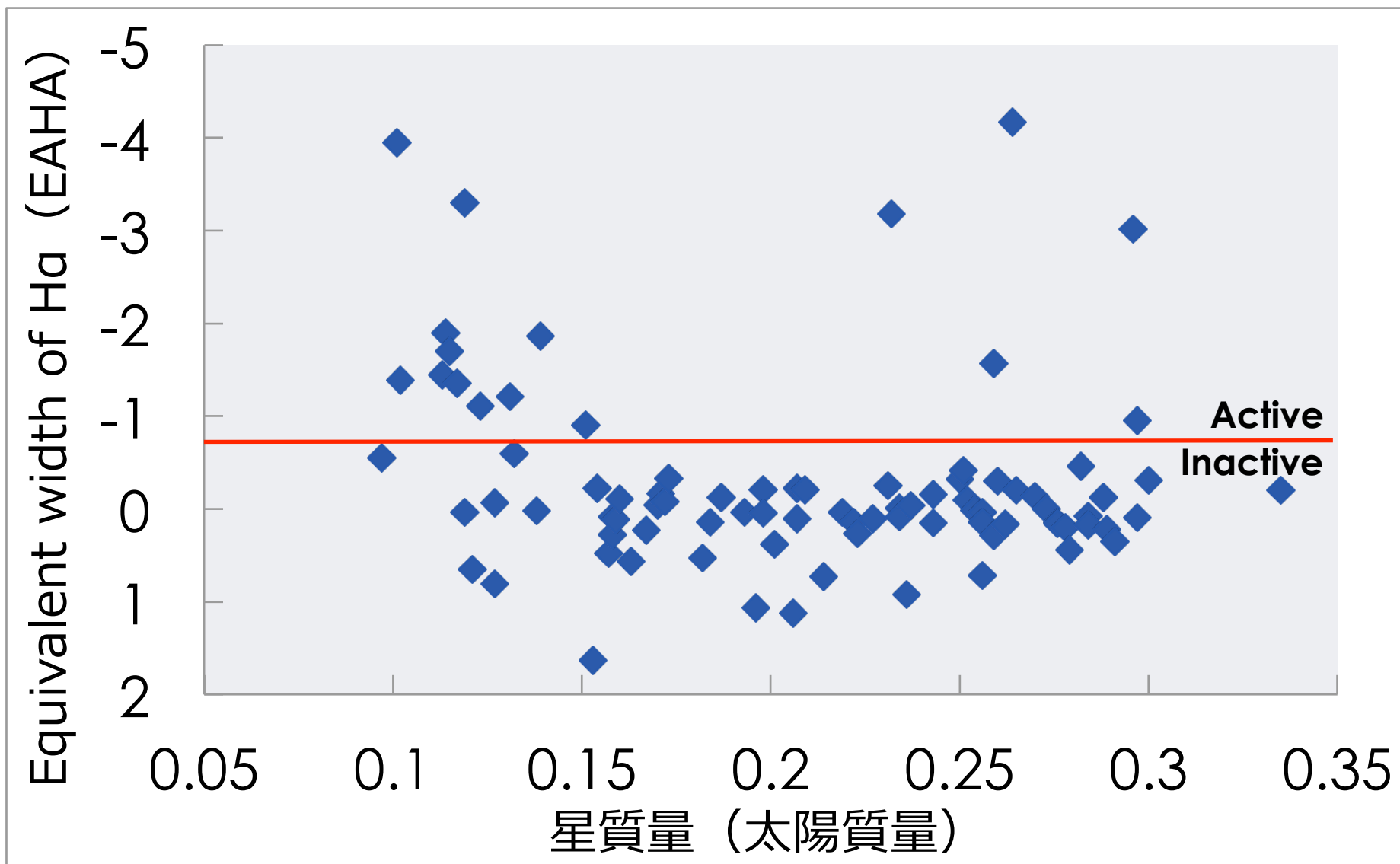
$$\text{EWHA} = 100 \text{ \AA} \left[1 - \frac{14 \text{ \AA} \int_{6557.61}^{6571.61} S(\lambda) d\lambda}{100 \text{ \AA} \left(\int_{6500}^{6550} S(\lambda) d\lambda + \int_{6575}^{6625} S(\lambda) d\lambda \right)} \right]$$



M4V型星のKOOLSスペクトル



結果 ～EWHAと恒星質量の関係～



サンプル中の活動的なM型矮星

- ターゲット候補： **約200星** （既知の情報から選定）
 - X線： ROSAT All-Sky Bright Source Catalogue (Voges+ 1999)
 - UV： GALEX-DR5 (GR5) sources from AIS and MIS (Bianchi+ 2011)
- これまでのH α 観測： 計115星
 - 先行研究による観測： 30星程度
 - CARMENES input catalogue of M dwarfs (Alonso-Floriano+2015)
 - A Spectroscopic Catalog of the Brightest (J<9) M Dwarfs in the Northern Sky (Lepine+2013)
 - 本研究によるKOOLS観測： 85星
 - ただし、RAが18~24hに固まっている。。
- 活動度が高い星 (EWHA > -0.75)： 計13星
 - Mass > 0.15 M_{sun}の星： 3星 (68星) → 4.4%
 - Mass < 0.15 M_{sun}の星： 10星 (17星) → 59%

まとめと今後

- IRD/Subaruによる地球型惑星探索
 - 厳選した晩期M型矮星を対象としたハビタブル地球型惑星探索
 - **目標とするサイエンス**
 - 近傍M型矮星周りのハビタブル地球型惑星の発見 (✓惑星質量決定)
 - 晩期M型矮星における地球型惑星の統計理解 (✓発見数の増大)
- 地球型惑星検出が可能な、表面活動の弱い晩期M型矮星の選定
 - 本研究：KOOOLS/OAO1.88m望遠鏡での中分散分光観測 ($R \sim 2,000$, $SN \sim 50$)
 - 活動度が低くて自転速度が遅い晩期M型矮星を探す
 - H α のEWHAが > -0.75 であれば、活動度が低く自転速度が遅い天体
 - 観測：22晩/1年（平均稼働率：40%） → 85星の観測
 - 結果：活動度が高い星を13星同定した
 - $Mass > 0.15 M_{\text{sun}}$ の星：4.4%; $Mass > 0.15 M_{\text{sun}}$ の星：59%
- 今後：観測を継続したい
 - できるだけ明るくて、質量が低い星（特に $M < 0.15 M_{\text{sun}}$ ）を観測したい
 - RAの分布の偏りがないようにする