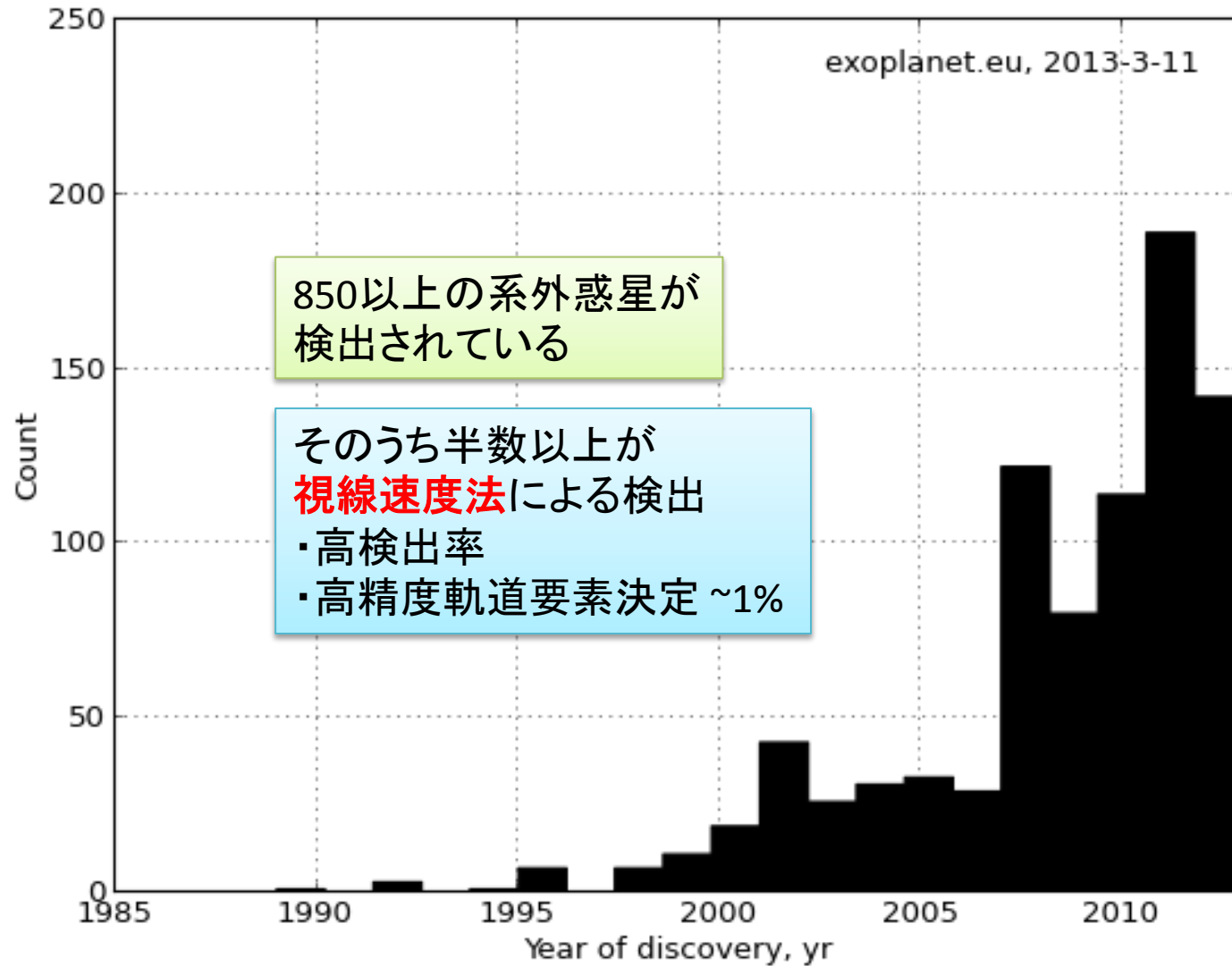


可視高分散分光による 系外惑星探索

東工大 原川 紘季

系外惑星検出数



太陽型(FGK-dwarf)星周りの 系外惑星探索

HARPS statistics

精度

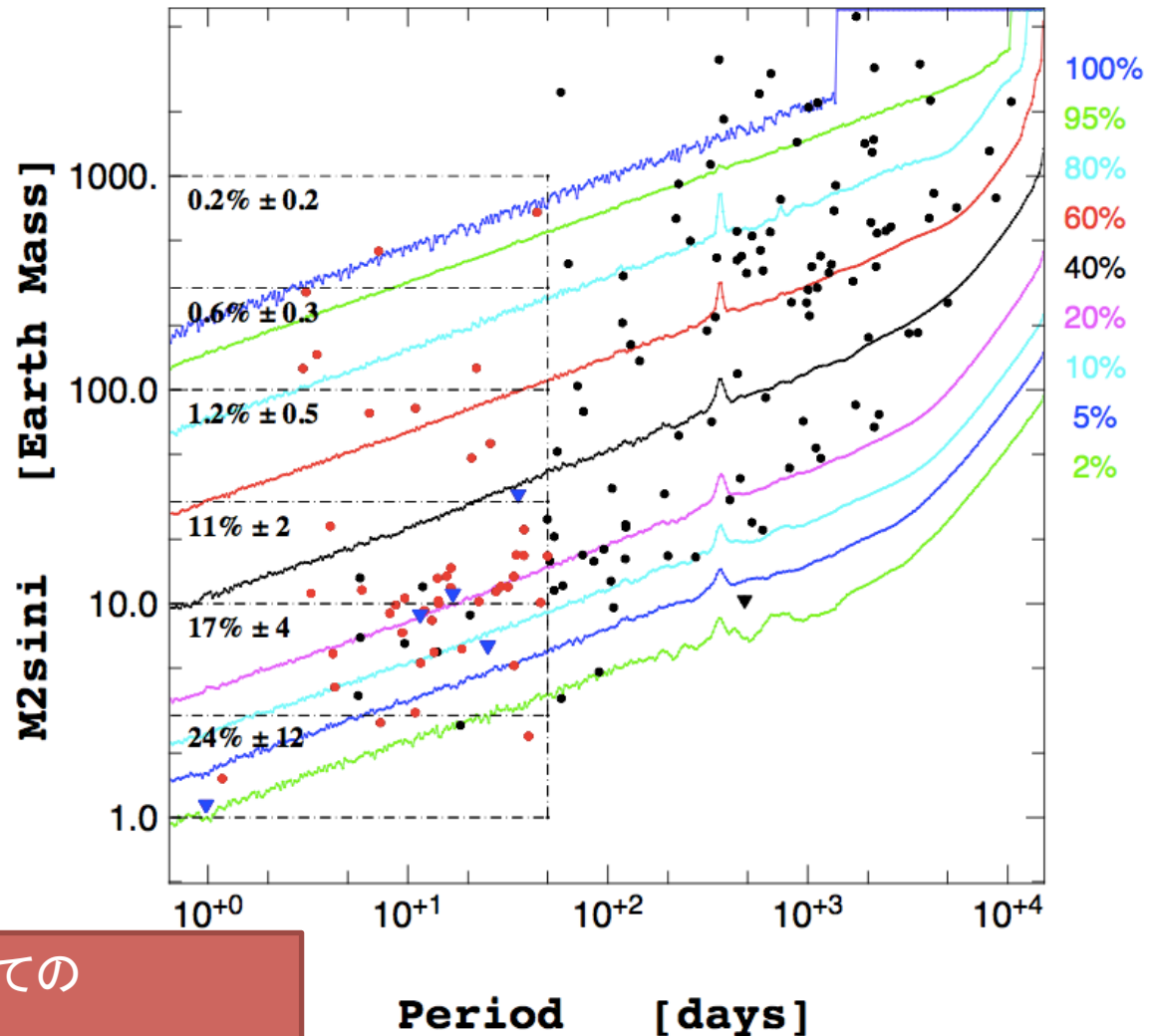
2003年以前 $\sim 5\text{m/s}$
以降 $\sim 1\text{m/s}$

Gas-giants

$P < 10\text{yr}$, $100\text{ME} > \text{Mp}$
 $\sim 10\%$

SuperEarth,

Neptune-mass
 $P < 100\text{d}$, $30\text{ME} < \text{Mp}$
 $\sim 50\%$



比較的近傍の惑星系についての
統計的性質については
10地球質量程度まではよく議論されている

太陽型星周りの系外惑星探索

Exoplanet statistics

精度

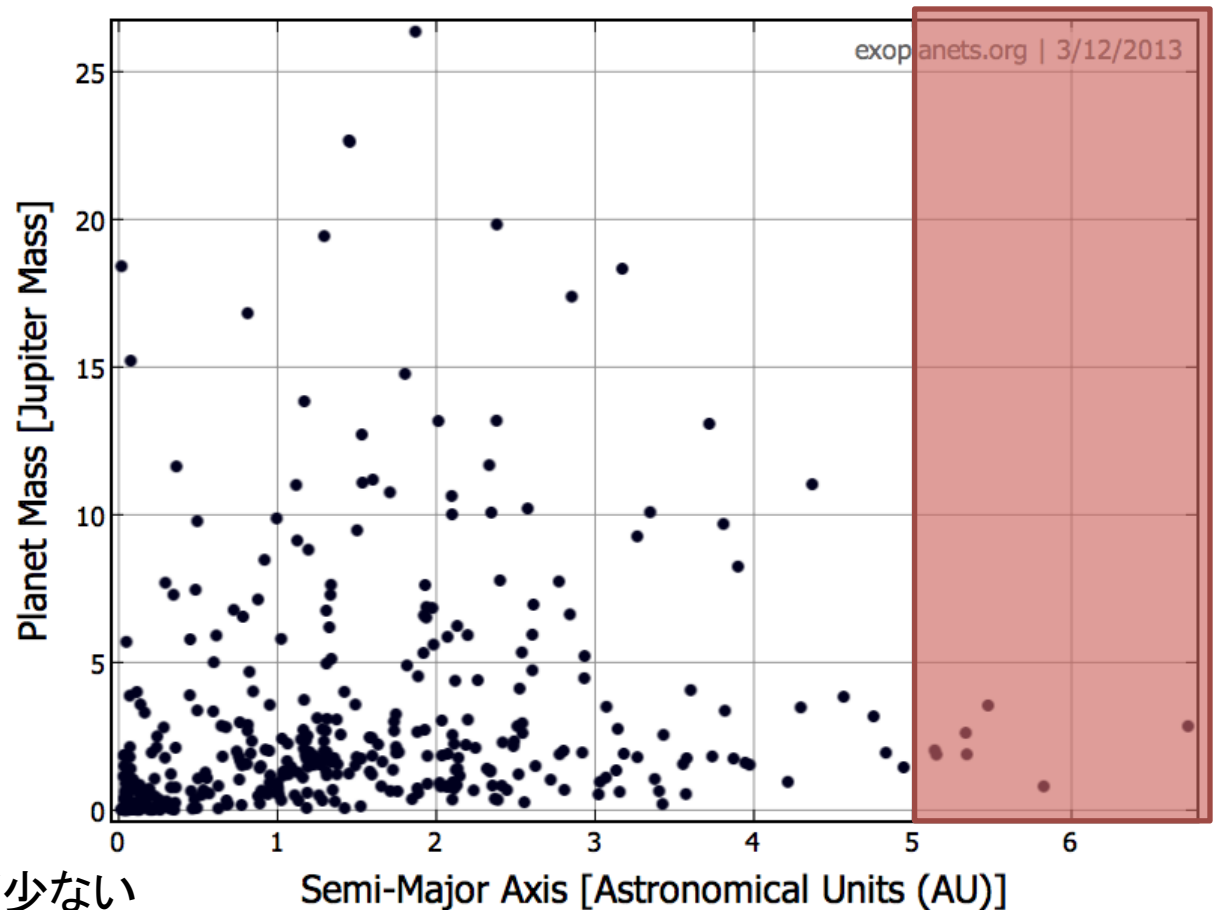
2003年以前 $\sim 5\text{m/s}$

以降 $\sim 1\text{m/s}$

$P > 10\text{yr}$, $100M_E > M_p$

$\sim ??\%$

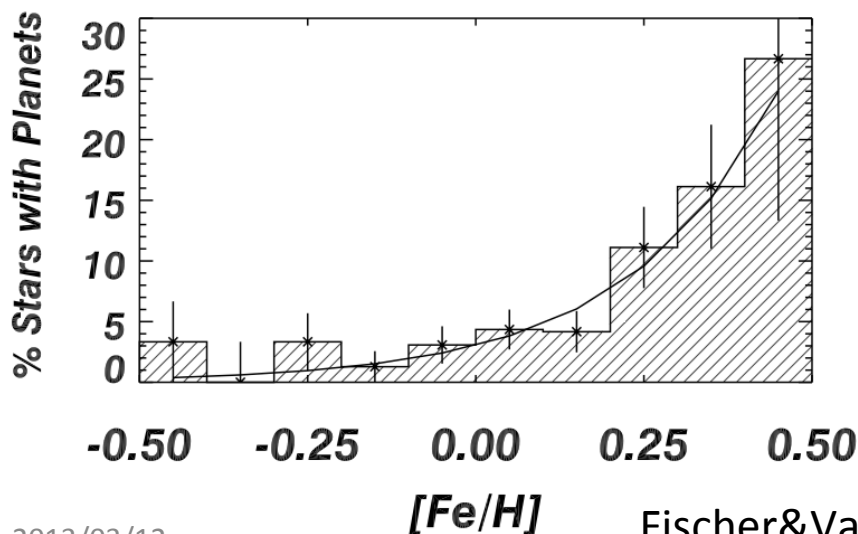
ただし、5AU以上の
周期の系外惑星は
視線速度での検出は未だ少ない
詳細な統計的議論もされていない



太陽型星周りの系外惑星形成

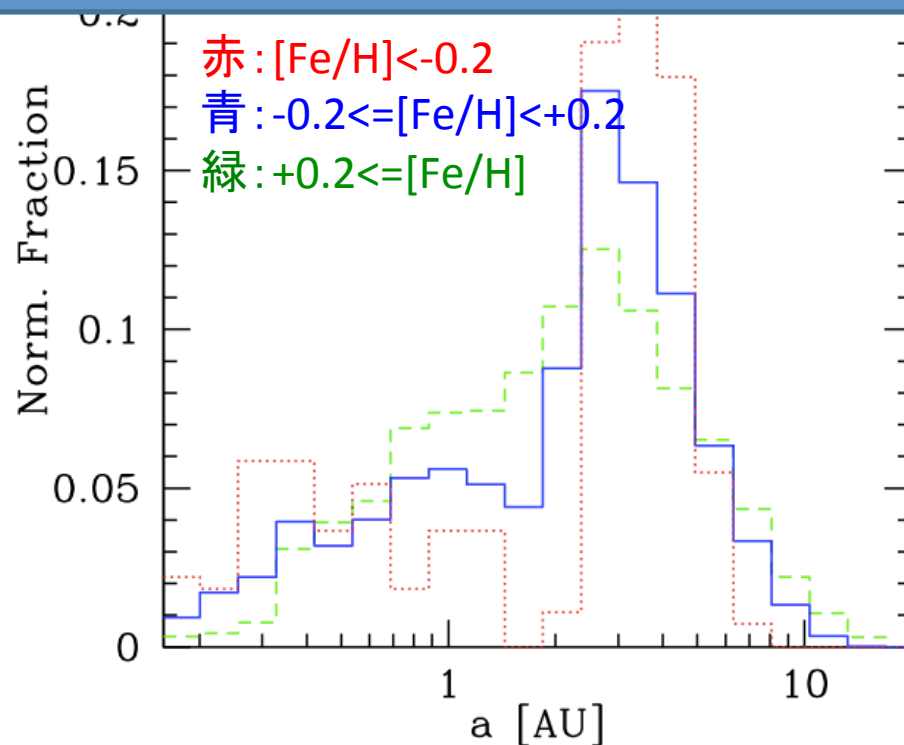
- コア集積モデルの示唆より
木星型惑星の形成過程は、
(Ida&Lin 2004--, Mordasini+ 2012)
- ・コア形成のタイムスケールと
円盤散逸タイムスケールとの兼合い
 - ・金属量(ダスト量)の増減はガス惑星
形成の頻度を決めうる重要なパラメータ

↓観測でも惑星頻度と正の相関 $P < 4\text{yr}$



理論モデルからの示唆では
3AU以遠の惑星頻度については徐々に下がる

- ・10AU付近ではほぼ形成されない??
- ・金属量による惑星確率の差異がなくなる??



すばる/HDSを用いた高金属量星周りの惑星 サーベイによる統計解析結果(Preliminary)

Selection Criteria:

- $S_{\text{HK, Subaru}} < 0.03$
($M^* = 1M_{\odot}$ を仮定)
- $N_{\text{obs}} > 3$

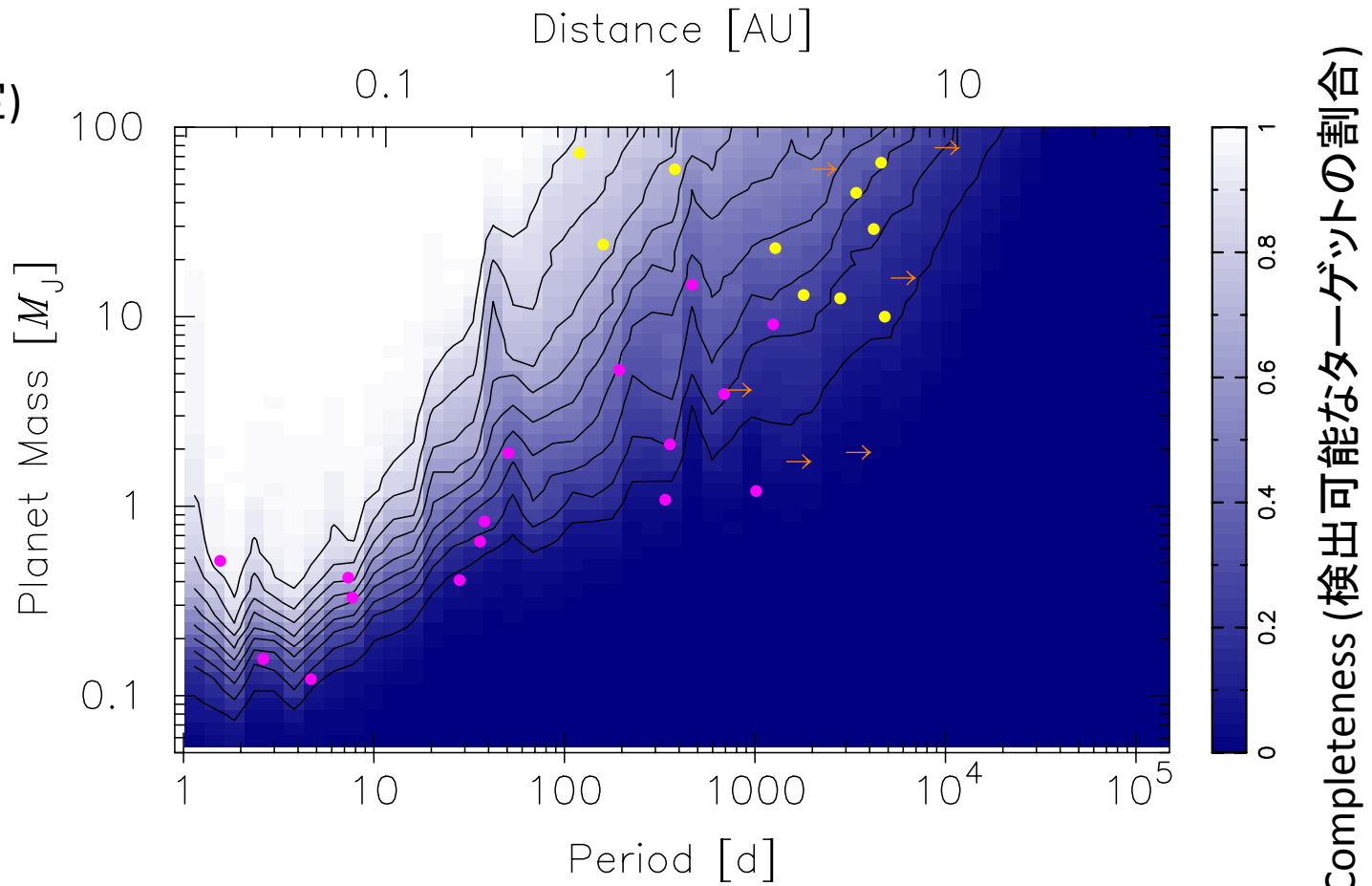
252 stars in total

Candidate:

- $N_{\text{obs}} > 6$
- $\text{FAP} < 1\%$
- 16 stars in total

Long term trends:

- $N_{\text{obs}} > 6$
- $\text{FAP}(f\text{-test}) < 1\%$
- 16 stars in total



- : 周期を有意に検出
- : 長期RVトレンドから周期性を有意に検出
- : 長期RVトレンドから周期の最小値を検出

すばる/HDSを用いた高金属量星周りの惑星 サーベイによる統計解析結果(Preliminary)

Selection Criteria:

- $S_{\text{HK, Subaru}} < 0.03$
($M^* = 1M_{\odot}$ を仮定)
- $N_{\text{obs}} > 3$

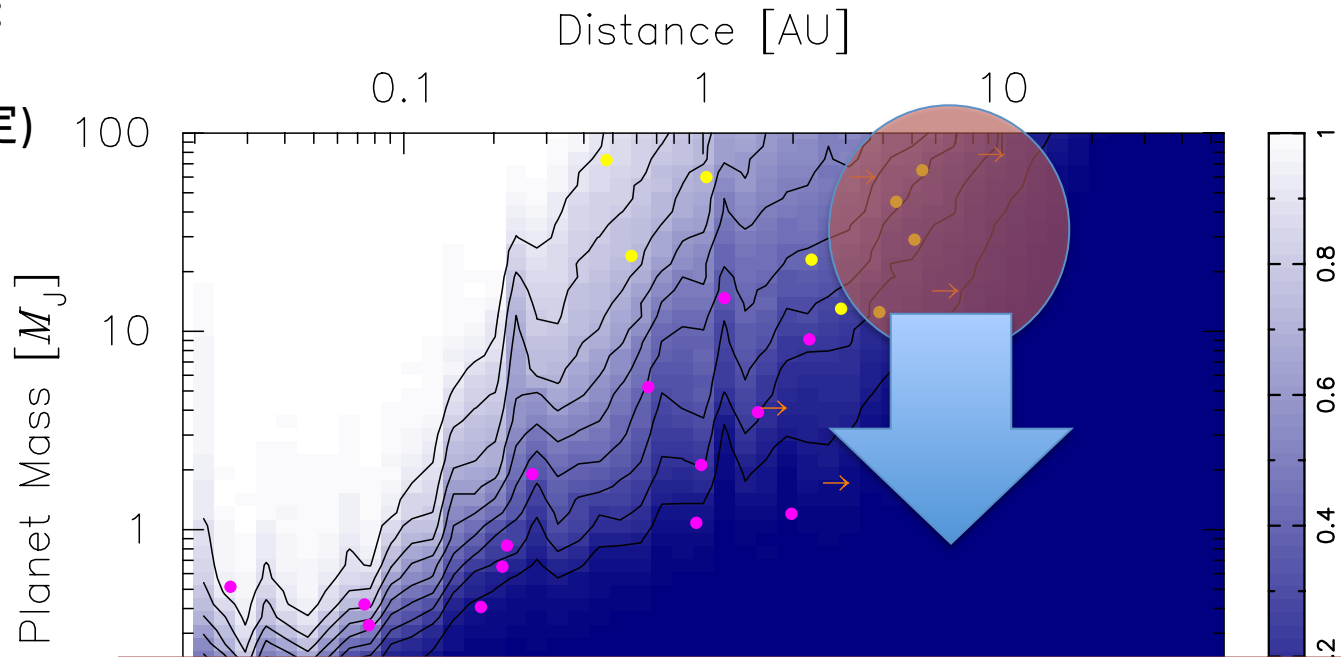
252 stars in total

Candidate:

- $N_{\text{obs}} > 6$
- $\text{FAP} < 1\%$
- 16 stars in total

Long term trends:

- $N_{\text{obs}} > 6$
- $\text{FAP}(\text{f-test}) < 1\%$
- 16 stars in total



高金属量では遠方に褐色矮星(>13MJ)が多い？

→ 理論(コア集積モデル)による予測と異なる描像

⇒ 重力不安定モデルが卓越？

検出限界以下はどうなっている？

→ 惑星形成モデルの違いによって質量の分布に違いができるのか
(コア集積モデルでは数倍の木星質量程度までが
形成できる妥当な質量)

すばる/HDSを用いた高金属量星周りの惑星 サーベイによる統計解析結果(Preliminary)

Selection Criteria:

- $S_{\text{HK, Subaru}} < 0.03$
($M^* = 1M_{\odot}$ を仮定)
- $N_{\text{obs}} > 3$

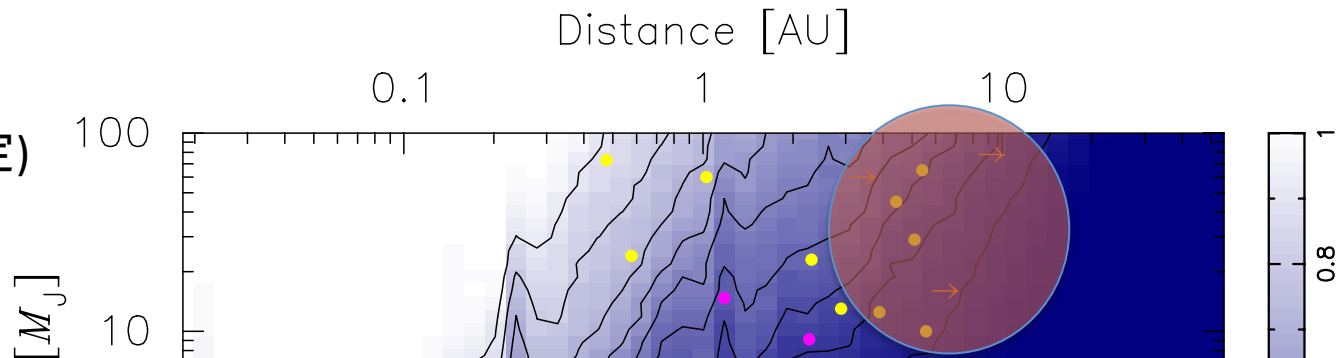
252 stars in total

Candidate:

- $N_{\text{obs}} > 6$
- $\text{FAP} < 1\%$
- 16 stars in total

Long term trends:

- $N_{\text{obs}} > 6$
- $\text{FAP}(f\text{-test}) < 1\%$
- 16 stars in total



戦略:

離心率が制限できれば周期も制限可能
⇒RVカーブを部分的に捉えられればよい
(精度が十分ならば)周期を完全に追う必要はない

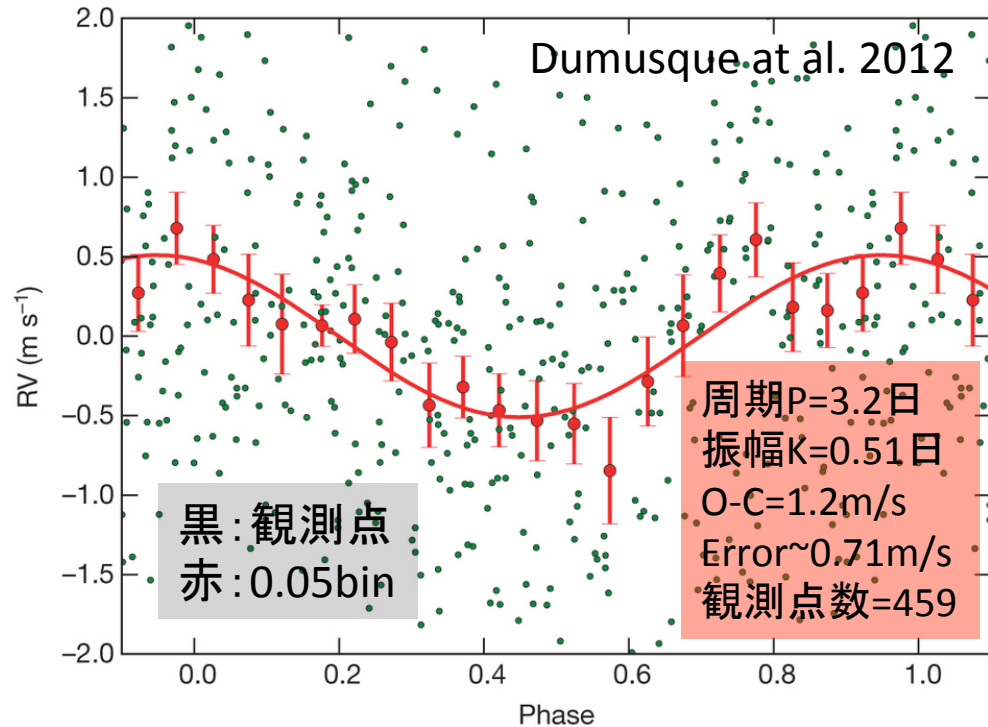
木星(5.5AU)でRV変動は12m/s
⇒長期安定 & 5m/s以下の精度が必須

3.8mの集光力は、650個のターゲット($V \sim 9$)の
高精度フォローアップについてとても魅力的
※188cm: HIDES-Fと組み合わせたフォローアップにより
大量のターゲットについて継続的なフォローアップが不可欠

視線速度測定精度1m/sで目指す 太陽類似星周りの地球質量惑星探索

- 超高頻度観測による、地球質量の惑星の探索
 - 第2の地球の発見へ
 - 太陽類似星の惑星系と太陽系の比較
 - 中心星への惑星落下の理解
- 惑星探索の目標
 - $K=0.3\text{m/s}$ 以上の惑星の検出
 - $>1\sim 3M_{\text{earth}}$ @ $0.1\sim 1\text{AU}$
 - RV固有変動 $\sigma\sim 1\text{ m/s}$

Alfa Centauri Bの視線速度変化



- 観測戦略: 188cmと3.8mで、可能な限り毎日観測する
 - サンプルは2~3個($V<8$)にして、見える時はどちらかの望遠鏡で観測
 - ~5年のタイムスケールで、500~1000回以上の観測を行う => $1M_e$ の惑星の検出

Kepler星震学を取り入れた 中質量巨星周りの系外惑星探索

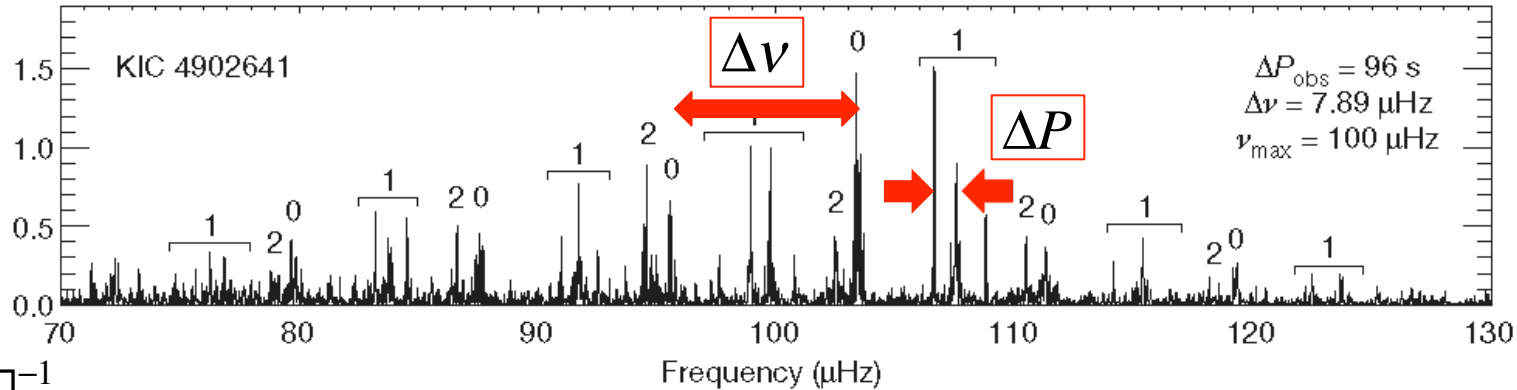
- 惑星系の性質は中心星の性質に依存
 - 巨大惑星頻度は中心星質量とともに増加するとの示唆 (Bowler+ 2010)
 - 中質量巨星周りの短周期惑星欠乏 (形成過程? 進化した中心星による飲み込み? ; e.g., Currie 2009, Sato+ 2008)
- 岡山188cm鏡+HIDESによる中質量 ($1.5-5M_{\odot}$) GK型巨星惑星探索
 - これまでに約30個の惑星・褐色矮星を発見 (e.g., Sato+ 2013)
 - 巨星の質量・進化段階の決定はHR図上で進化トラックが混んでいるため難しい
→ 惑星系の中心星依存性を知る上での大きな不確定要素
- 星震学: 恒星の脈動から内部構造を調べる手法
 - これまでは、惑星をもつ恒星に対し地上視線速度観測が行われてきた
 - しかし、地上では連続観測の困難さから詳細なモード同定が難しい
- Kepler衛星
 - 2009年打ち上げ、 $\sim 2 \times 10^{-5}$ の超高精度測光観測
 - 巨星まわりの巨大惑星のトランジットをも検出できる精度
 - トランジットだけでなく星震学でも大きな成果

Kepler星震学により質量・進化段階が決まっている
巨星に対するドップラー系外惑星探索

Kepler による巨星の星震学

Bedding et al. 2011

$$\Delta\nu \sim \sqrt{\frac{GM}{R^3}}$$

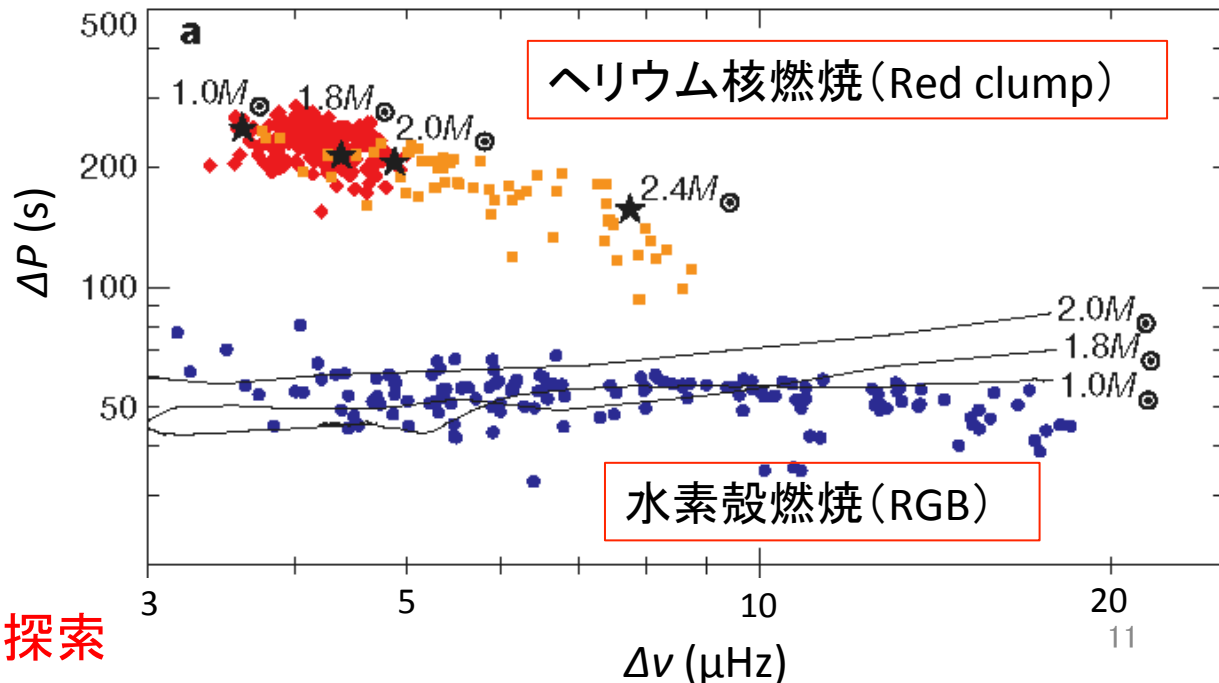


$$\Delta P \propto \left[\int \frac{N}{r} dr \right]^{-1}$$

N : 浮力 (Brunt-Vaisala)
周波数

中心集中度が大きい
(N が大きい)ほど ΔP は小さい

巨星の進化段階を区別
Clump 巨星の質量を決定

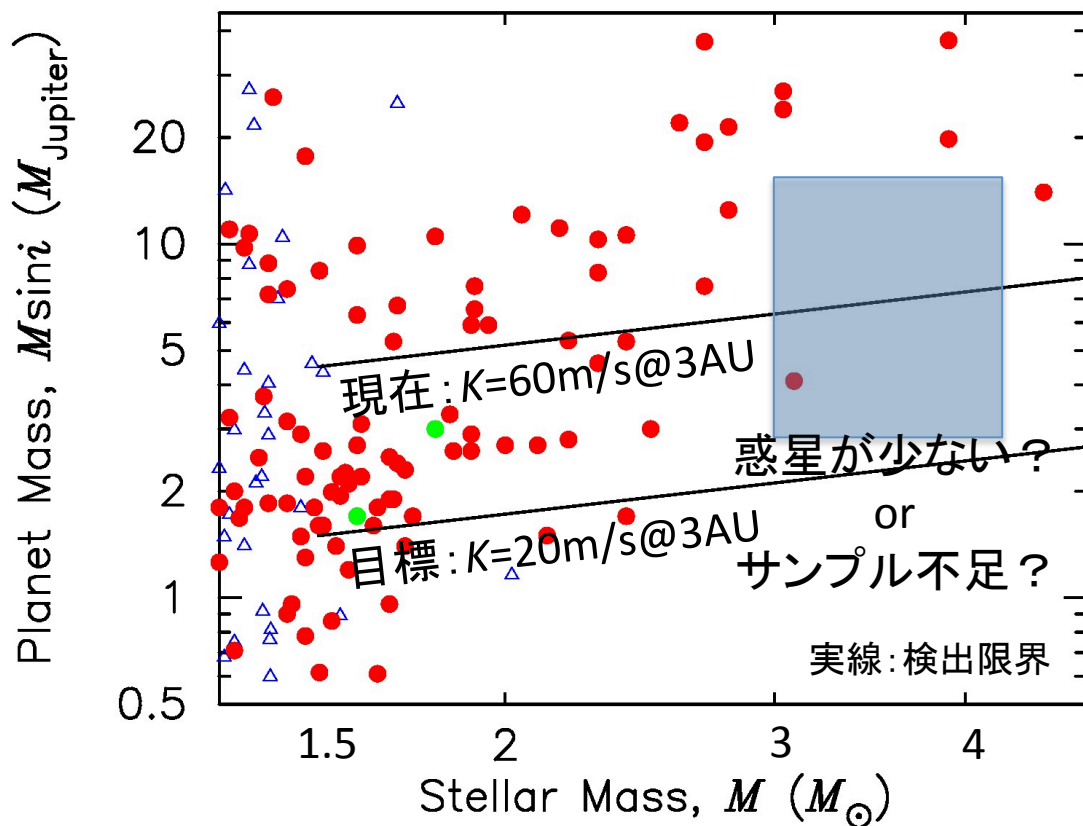


Kepler天体に対する視線速度精密測定

- Kepler天体は可視で9～14等程度
- 巨星周りの巨大惑星検出に必要な視線速度測定精度は数m/s (<10m/s)
- 3.8m鏡用可視高分散分光器の視線速度測定法
 - ヨードセル法 (波長域狭い; HIDES等)
 - ぎりぎり10等くらいまでは可能だろう
 - 天体数が限られる
 - 比較光源光同時取得法 (波長域広い; HARPS等)
 - 13等くらいまで可能
 - 多くの天体が探索対象になりうる

重い中質量巨星の惑星探索

- 重い星で唯一の惑星探索
 - 巨大惑星形成の限界
 - 短い円盤寿命、遠い雪線？
 - 惑星系の主星質量依存
 - これまでの惑星探索では
 - $2\sim 4M_{\text{Jupiter}}$ 低質量巨大惑星は存在する？
- 惑星探索の目標
 - $K=20\text{m/s}$ の惑星の検出
 - $1\sim 3M_{\text{Jupiter}}$ @ $1\sim 4\text{AU}$
 - RV固有変動 $\sigma > 20\text{ m/s}$



- 観測戦略: 188cm望遠鏡と協力して、300個の星の惑星探索へ
 - サンプルを増やす: 現在: 100個 ($V < 7$) => 目標: 300個 ($V < 8$)
 - 精度 $\sim 10\text{m/s}$ で十分だが、これまでより観測頻度を上げ、観測回数を増やす
- 2013/03/15 5年のタイムスケールで、1星について30回を目標

まとめ

- 太陽型星周りの系外惑星探索
 - 5AU以遠の惑星については未探索
 - 直接撮像を組み合わせた迅速な軌道確定→統計的議論へ
 - 特に、中心星金属量との相関について詳しく知りたい
 - 第2の地球の検出を目指す(恒星活動の補正)
- 星震を利用した巨星の高精度質量決定 w/ Kepler
 - 巨星段階にある恒星の、より高精度な中心星質量VS惑星パラメータ相関の決定
- $3M_{\odot}$ 以上の巨星:集光力によるターゲット数増大
 - ナナヨンも活用した高頻度観測

高効率かつ長期間安定化した高分散分光器を！

比較光源法などを用いた超高精度(1m/s以下)を目指したものが理想的