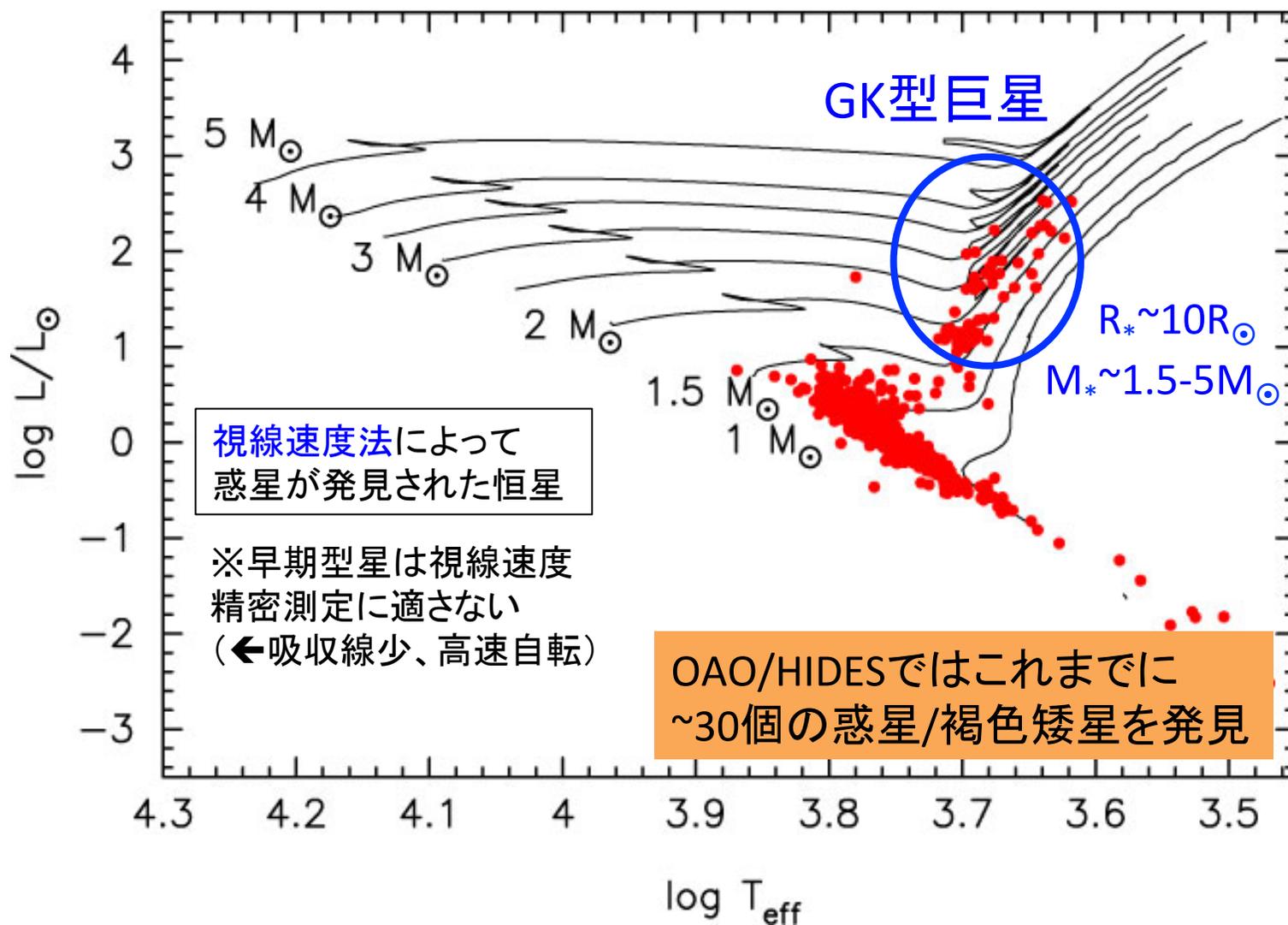


可視高分散分光観測による 系外惑星探索—巨星編

佐藤文衛(東工大)

巨星周りの惑星探索 ＝中質量星周りの惑星探索



中質量(準)巨星周りの惑星の特徴

- 巨大惑星頻度
 - $M \sim 1.9M_{\odot}$ 程度までは増加 ($\sim 10\text{--}20\%$; e.g. Johnson+ 2007; Bowler+ 2010)
 - $M > 3M_{\odot}$ では減少 (Sato+ in prep.)
- 質量
 - 大質量($>5M_J$)惑星は重い($>2M_{\odot}$)巨星の周りに多い (e.g. Lovis & Mayor 2007)
- 軌道長半径
 - ほとんどは $a \sim 0.6$ AUより遠方に存在 (e.g. Sato+ 2008; Johnson+ 2007)
- 離心率
 - 太陽型星周りの惑星に比べて、小さい($e < 0.4$)ものが比較的多い
- 中心星金属量との相関
 - 巨星の場合ははっきりしない (e.g. Pasquini+ 2007; Takeda+ 2008; Mortier+ 2013)

太陽型星周りの惑星系とは異なる特徴

巨星周りの惑星探索に付いて回る問題

- 中心星パラメータの不定性

- 特に質量、進化段階

- HR図上で進化トラックが混んでいるため

➡ パラメータがよく決まっている恒星 (by 星震学) を対象

- 惑星以外の可能性

- 矮星に比べて巨星の性質はよく分かっていない

- 非動径振動？ 表面活動？

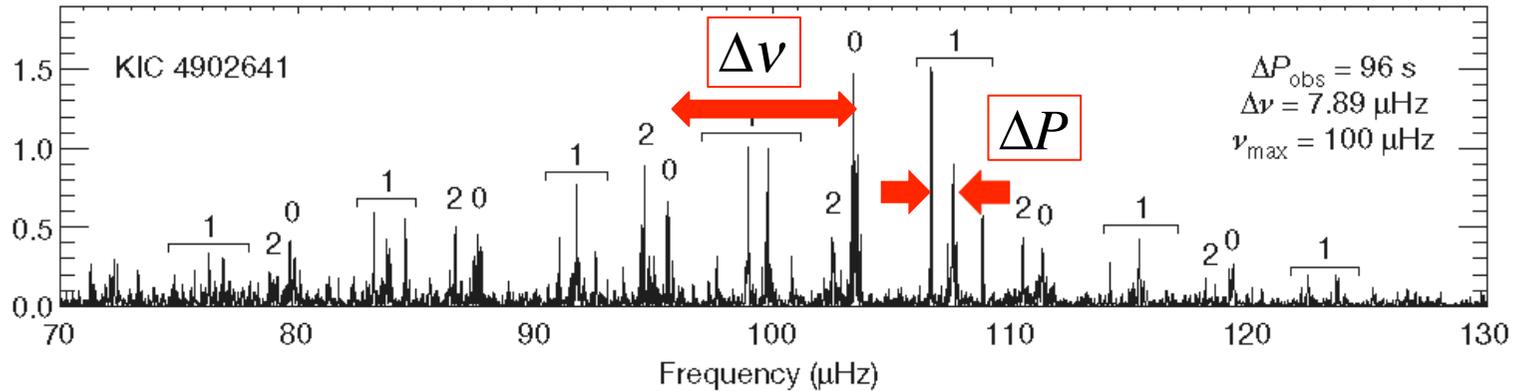
➡ 複数の検出手法 (トランジット、アストロメトリ
可視 & 近赤RV) の組み合わせ

Kepler 巨星周りの惑星探索

Bedding et al. 2011

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

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

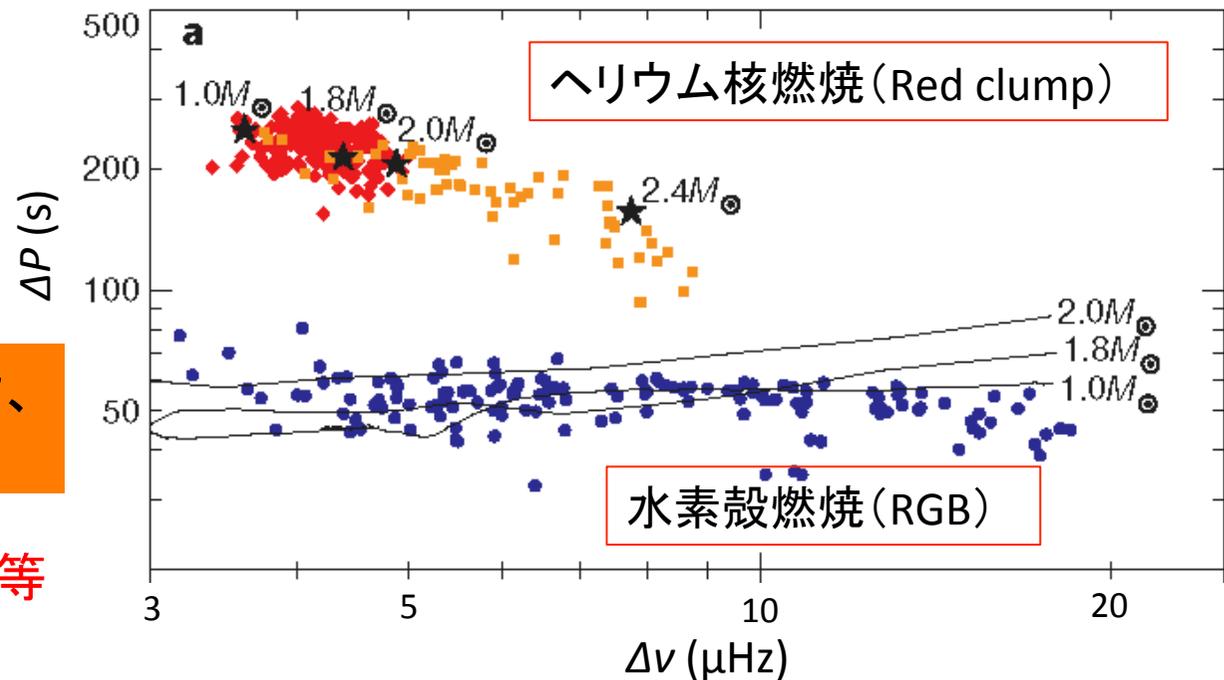


N :浮力(Brunt-Vaisala)
周波数

中心集中度が大きい
(N が大きい)ほど ΔP は小さい

星震学によって進化段階、
質量がよく決まっている

Kepler天体は可視で9~14等



トランジット

□ トランジットの深さ $(R_p / R_*)^2 \sim 10^{-4}$ R_p :惑星半径, R_* :恒星半径

□ トランジットを起こす確率 R_* / a R_* :恒星半径, a :軌道長半径

□ トランジット継続時間 $\tau \sim PR_* / \pi a \sim 14 R_* a^{0.5} M^{-0.5} (hr)$

➤ $a=0.05\text{AU}$, $R=1R_\odot=0.005\text{AU}$ (太陽型星周りのホットジュピター) → 10%
 $\tau \sim 3\text{h}$ ($M=1M_\odot$)

➤ $a=0.05\text{AU}$, $R=10R_\odot=0.05\text{AU}$ (巨星の表面スレスレ) → 100%
 $\tau \sim 22\text{h}$ ($M=2M_\odot$)

➤ $a=0.1\text{AU}$, $R=10R_\odot=0.05\text{AU}$ → 50%
 $\tau \sim 31\text{h}$ ($M=2M_\odot$)

➤ $a=0.2\text{AU}$, $R=10R_\odot=0.05\text{AU}$ → 25%
 $\tau \sim 44\text{h}$ ($M=2M_\odot$)

➤ $a=0.5\text{AU}$, $R=10R_\odot=0.05\text{AU}$ → 10%
 $\tau \sim 70\text{h}$ ($M=2M_\odot$)

太陽周りの地球と
同じトランジットの深さ

高いトランジット確率

巨星周りのトランジット惑星候補

Keplerの測光精度 ($\sim 2 \times 10^{-5}$) は巨星周りの木星サイズ惑星のトランジット ($\sim 10^{-4}$) を検出可能

KOI	K_p (mag)	T_{eff} (K)	$\log g$	R_* (R_{\odot})	Mass (M_{\odot})	Duration (h)	Depth (ppm)	Period (d)	a (AU)	R_p (R_E)
338	13.4	4104	1.87	19.2	1.00	3.0819	340	7.01	0.072	37.4
						2.1081	66	3.11	0.042	17.5
977	10.5	4204	1.99	16.5	0.21	4.7394	1262	1.354	0.024	63.5
1054	11.9	5235	2.46	16.61	0.99	4.11	124	3.32	0.062	18.5
1894	13.4	4998	2.87	9.00	2.02	8.798	343	5.288	0.077	17.1
2133	12.5	4837	2.85	7.60	2.25	11.2577	426	6.247	0.076	14.9
2481	13.6	4982	3.02	6.80	1.21	14.9456	793	33.84	0.25	20.6

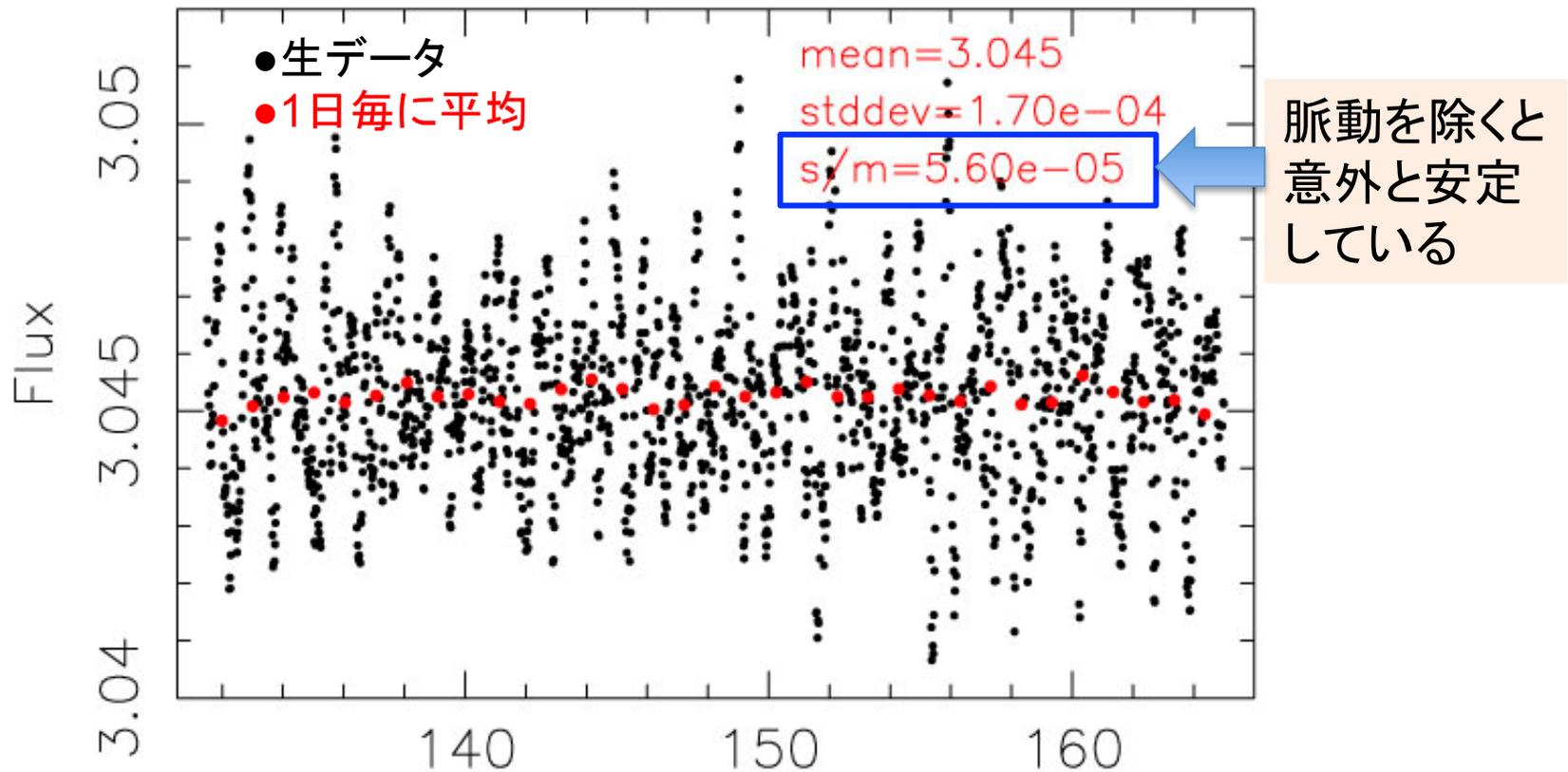
Batalha et al. 2013, ApJS, 204, 24

from NASA Exoplanet Archive

※視線速度サーベイで多く見つかった惑星 ($a > 0.6 \text{ AU}$) に相当するものではない

巨星の脈動

- 振幅 $\sim a \text{ few } \times 10^{-4} - 10^{-3}$ (トランジットの深さより大きい)
- 周期 \sim 数時間から1日くらい (トランジット継続時間の数分の一程度)



光度曲線のみから有意なトランジットのシグナルを見つけるのは難しい
視線速度法で先に惑星を見つけて、その後トランジットを探すのがよい

Kepler 巨星周りの惑星探索

星震学により恒星パラメータがよく決まった天体をサンプルに選ぶ
(同時に光度曲線を見て活動性が低い星を選ぶこともできるか)



視線速度サーベイで惑星探索

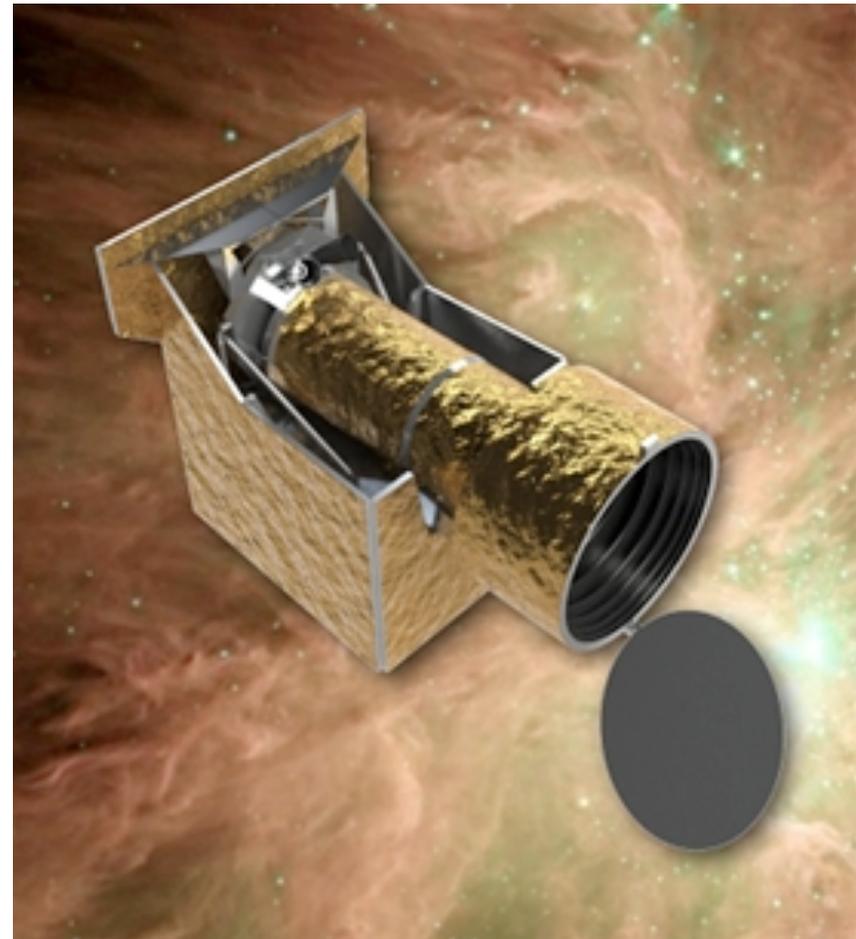


光度曲線に対応するトランジットを(遡って)探索

CHEOPS

CHaracterizing ExOPlanet Satellite

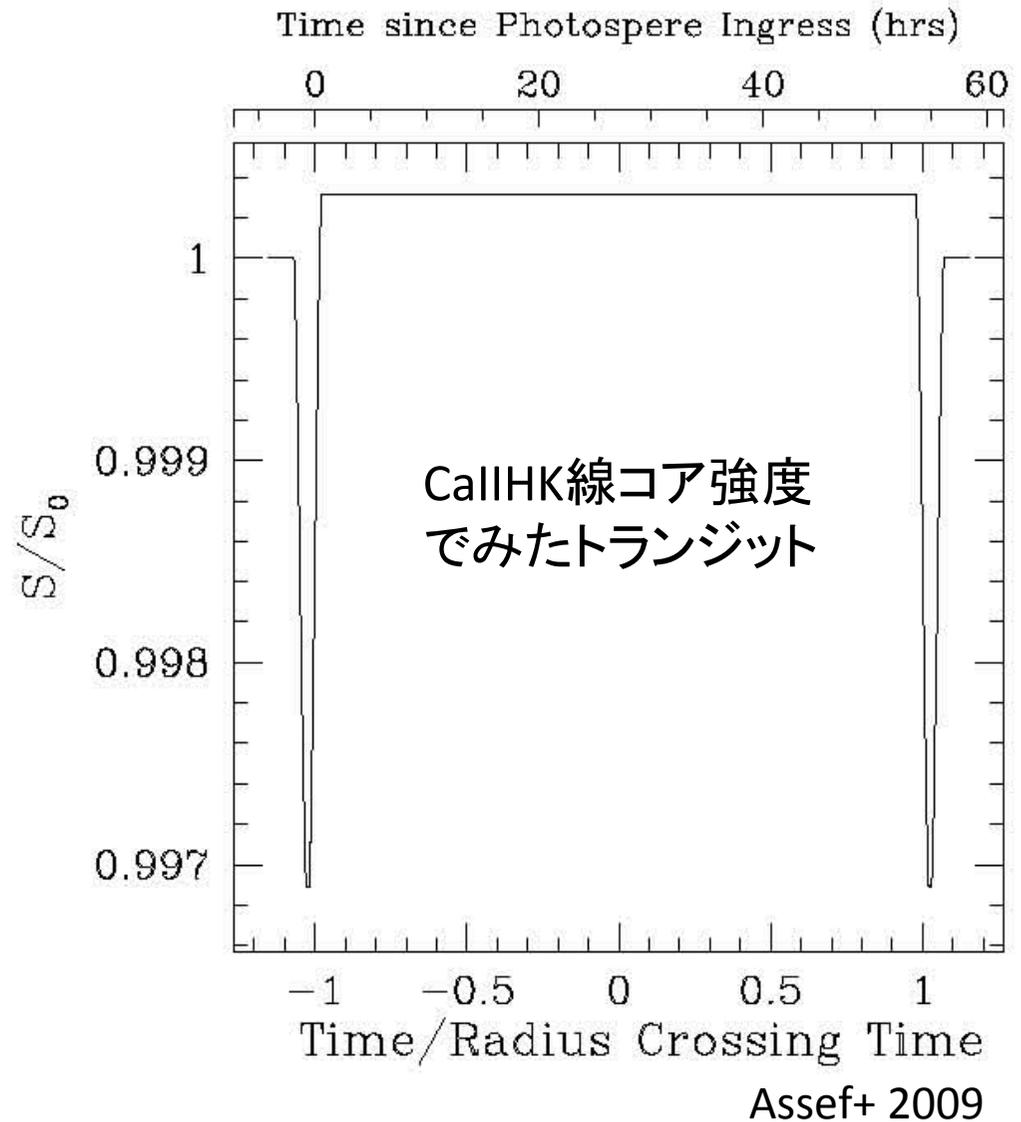
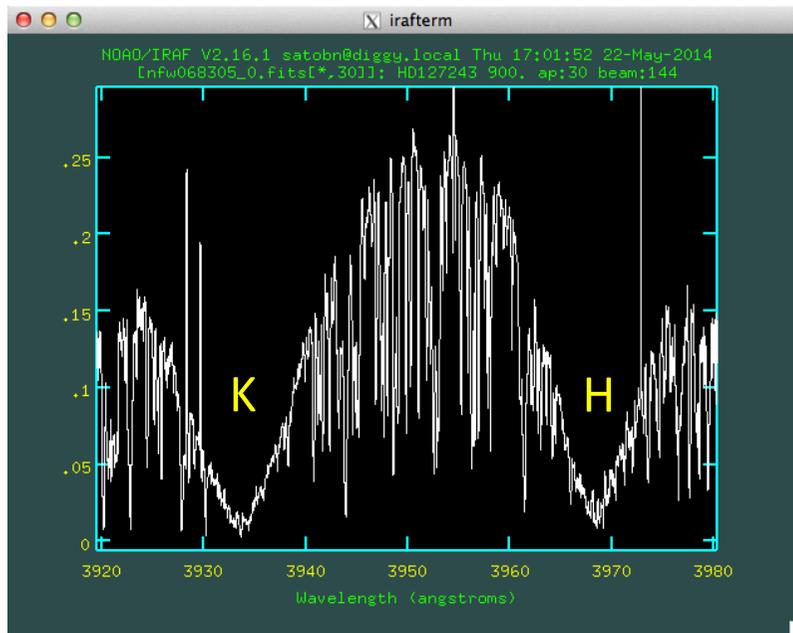
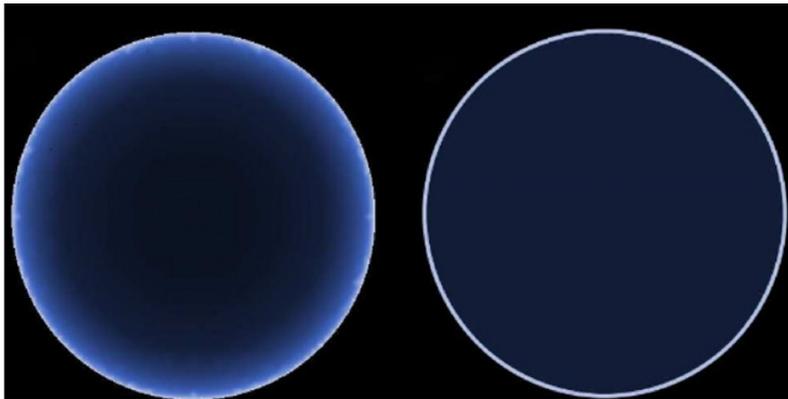
- 視線速度法で見つかった惑星の測光フォローアップ
- 20ppm G-star $V < 9$
- 85ppm K-star $V < 12$
- $6 < V < 12$ がターゲットとして適
- 打ち上げ: 2017年(予定)
- 運用: 3.5年間
- 20%はopen time



<http://sci.esa.int/cosmic-vision/49469-cheops/>

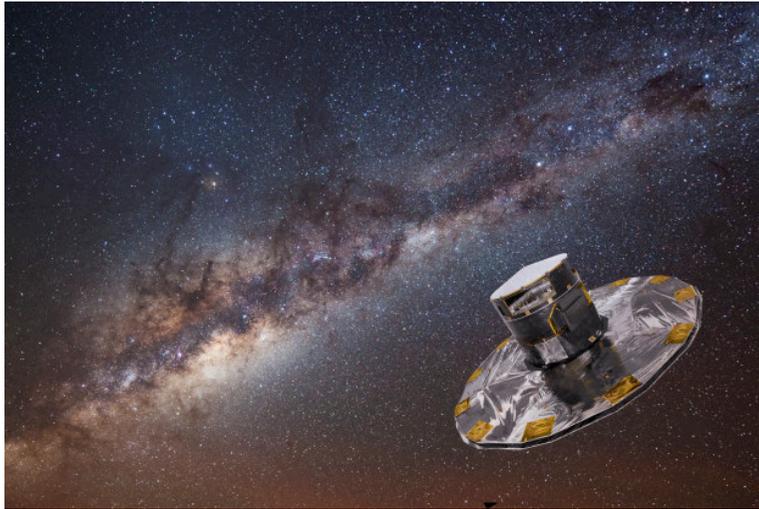
Bright-limb transit

Schlawin+ 2010



アストロメトリ

GAIA (2013-2018)

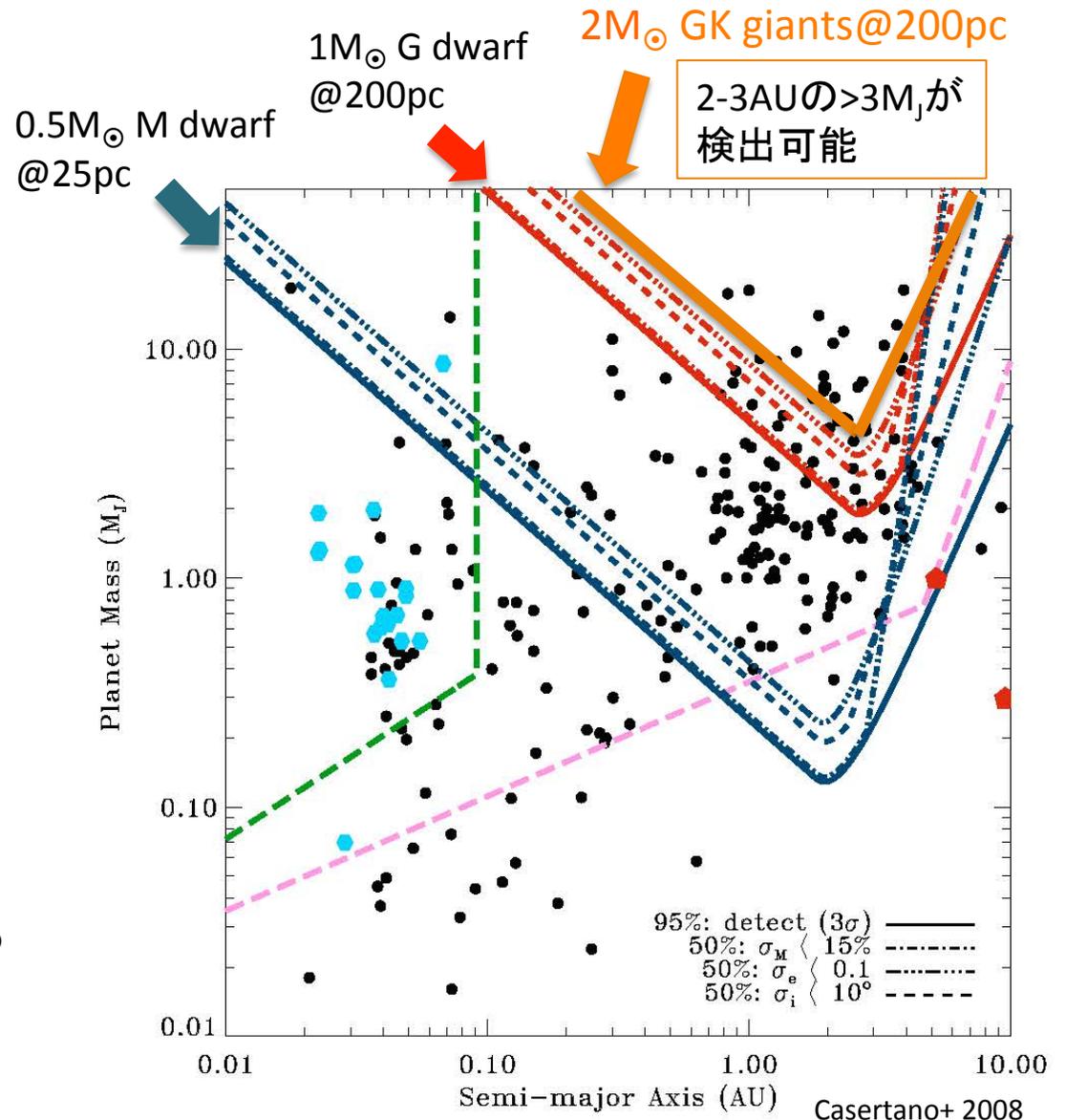


(6<)V<13について~10 μ asの精度

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)

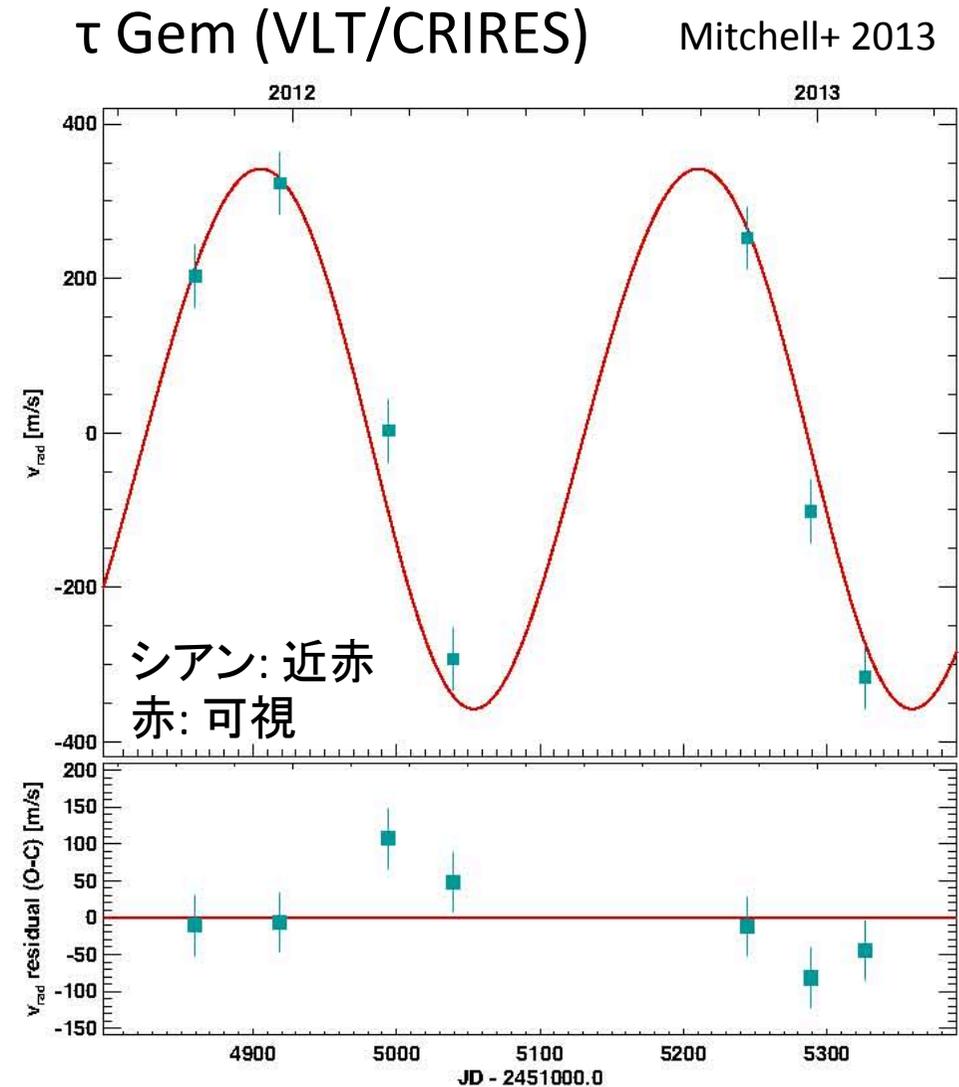
→ V~7.5 (d~200pc) 辺りがちょうど狙い目
アストロメトリ+RVで検出限界が下がる
(e.g. Neveu+ 2012)

※ただし、恒星の活動性はアストロメトリに影響する



可視＋近赤外視線速度観測

- 異なる波長での視線速度変動の一致は軌道運動を支持
- 可視と同程度の精度で近赤外で視線速度測定ができると理想的
- 活動性の高い星を敢えて観測し、先述の bright-limb transit を狙うのも面白いかも



まとめ

- 従来の巨星周りの惑星探索の問題点
 - 中心星パラメータの不定性
 - 惑星以外の可能性
- *Kepler* 巨星周りの惑星探索
 - 星震学で質量、進化段階がよく決まっている
 - 活動性も光度曲線からある程度分かる
 - トランジットも検出可能
 - ターゲットは $V(R)=9-14$
- 他の検出手法との組み合わせ
 - トランジット(CHEOPS) + アstrometri(GAIA)
 - ターゲットは $V=7-8$