



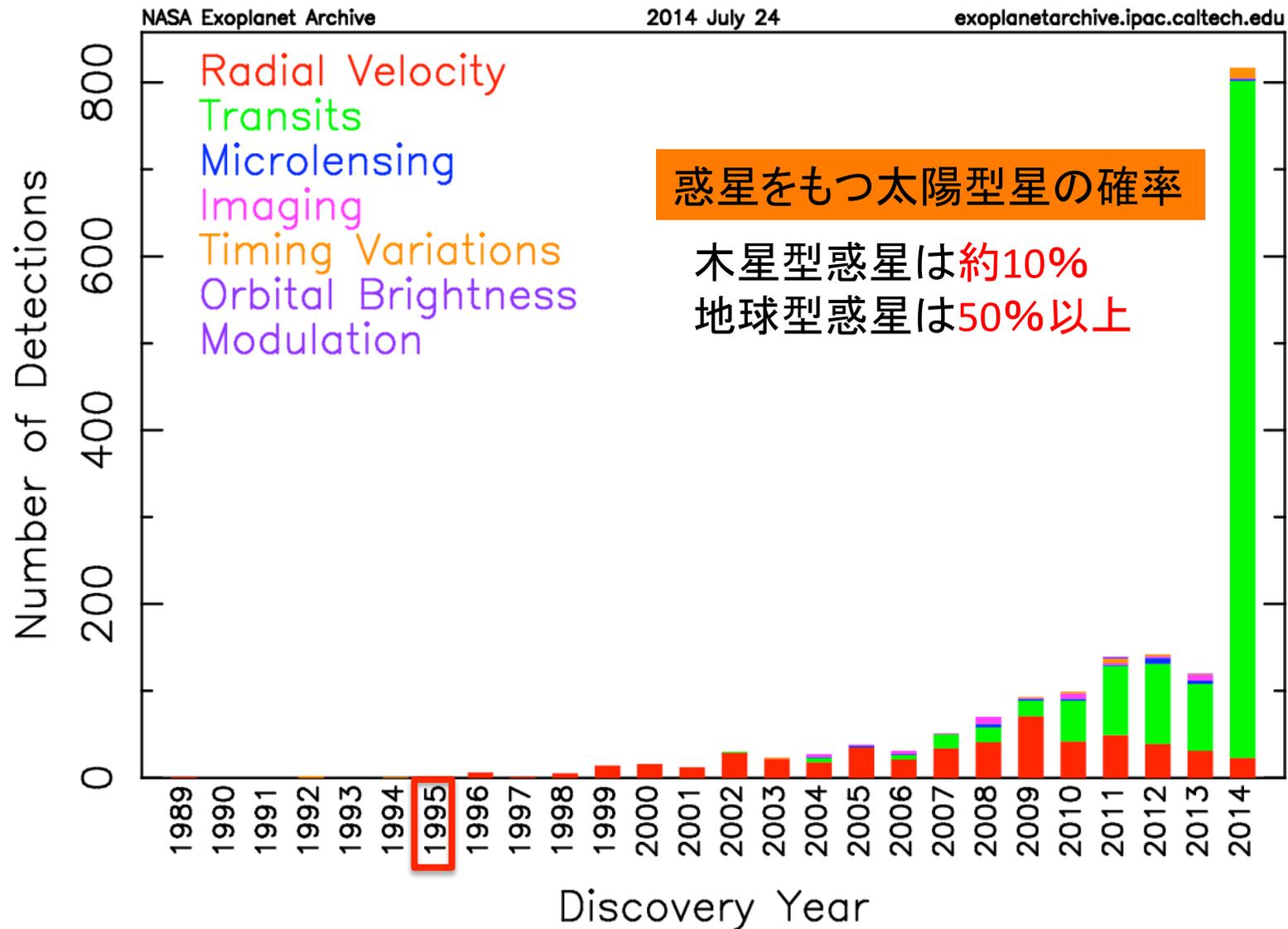
系外惑星を見つけるには

佐藤文衛

東京工業大学

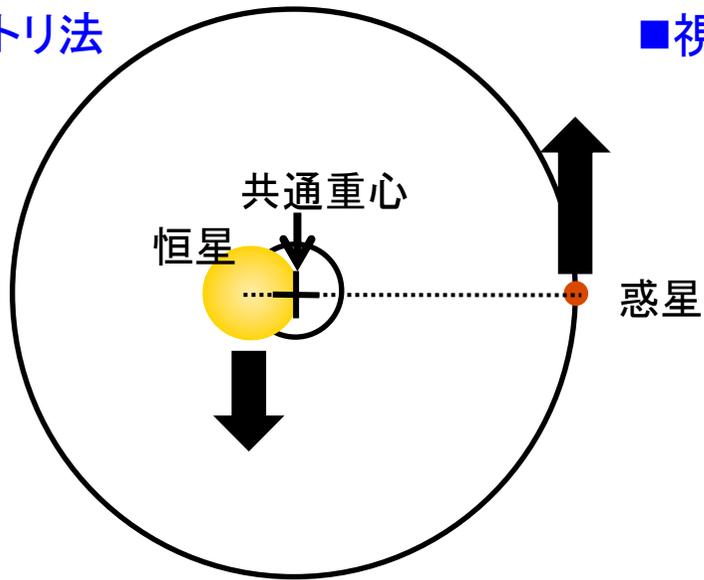
地球惑星科学専攻

系外惑星発見数: 約1800個 (2014/7/24現在)

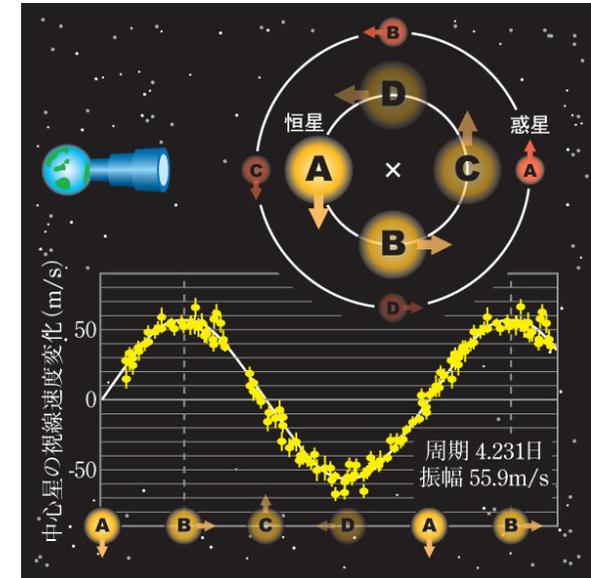


系外惑星の主な間接的検出法

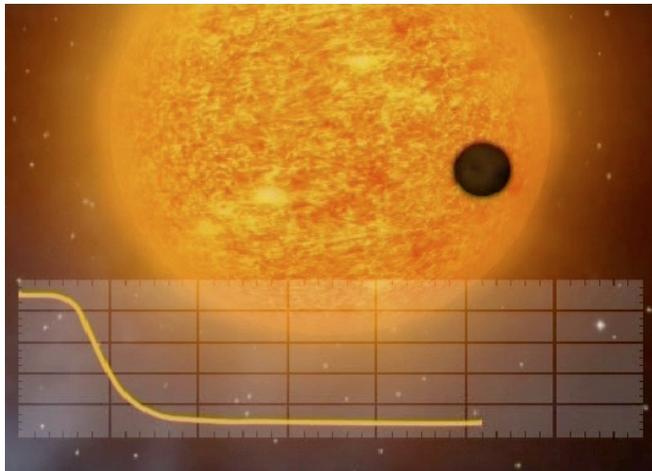
■ アstrometry法



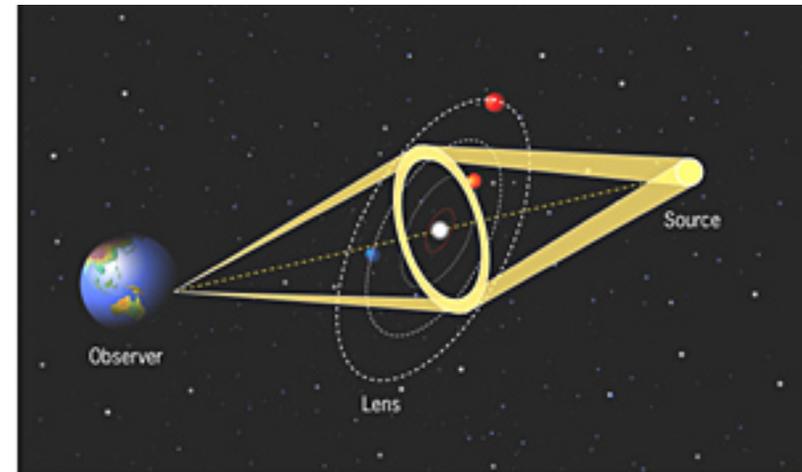
■ 視線速度法



■ トランジット法



■ 重力マイクロレンズ法

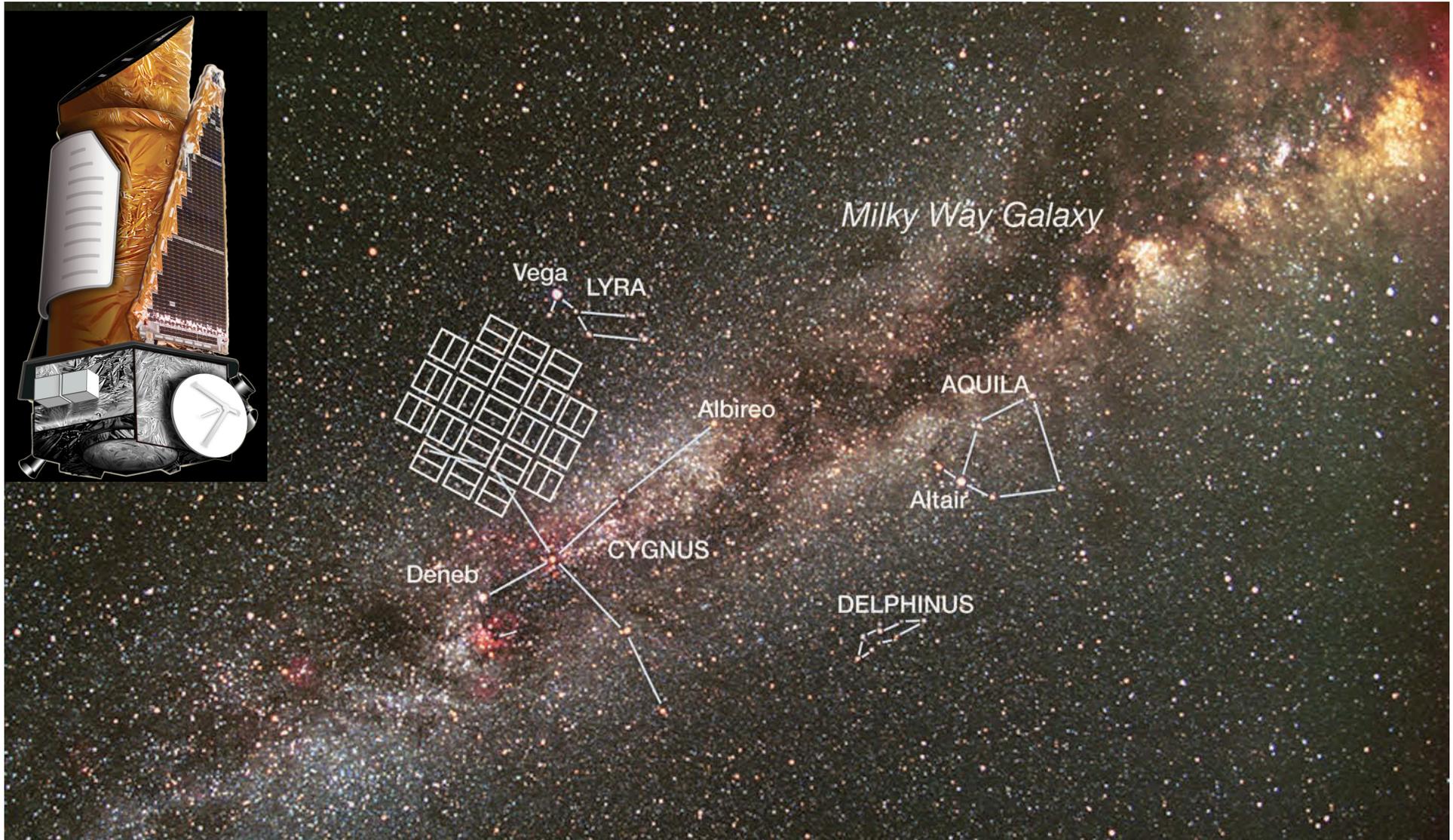


Kepler宇宙望遠鏡

□2009年打ち上げ

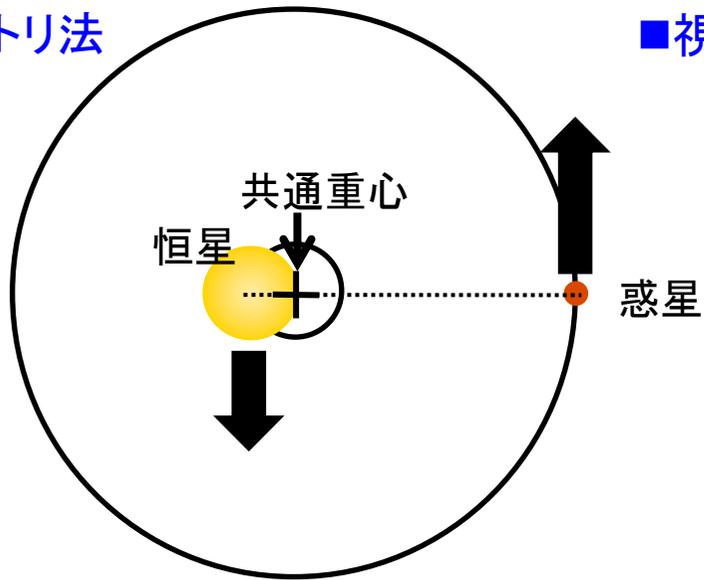
□十萬個以上の恒星をモニター観測

□相対測光精度 $\sim 2 \times 10^{-5}$

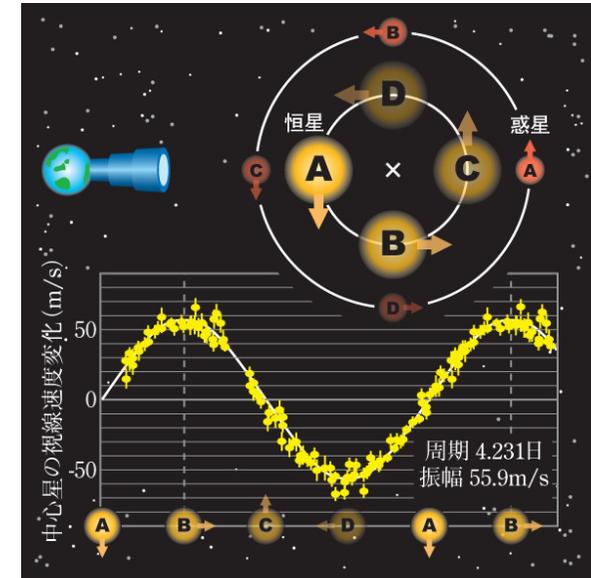


系外惑星の主な間接的検出法

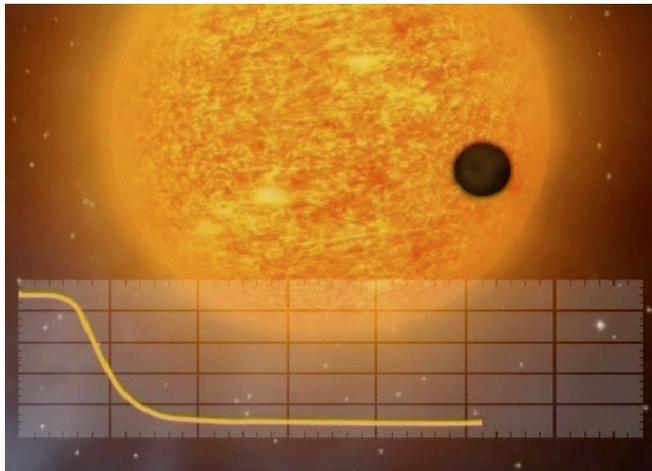
■ アstrometry法



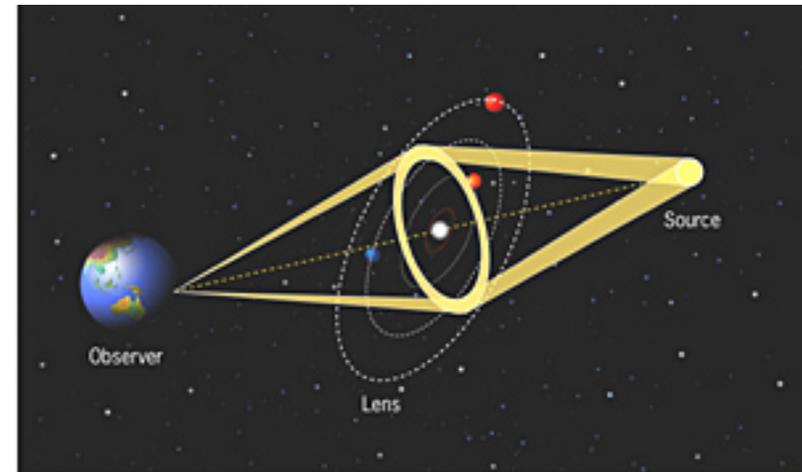
■ 視線速度法



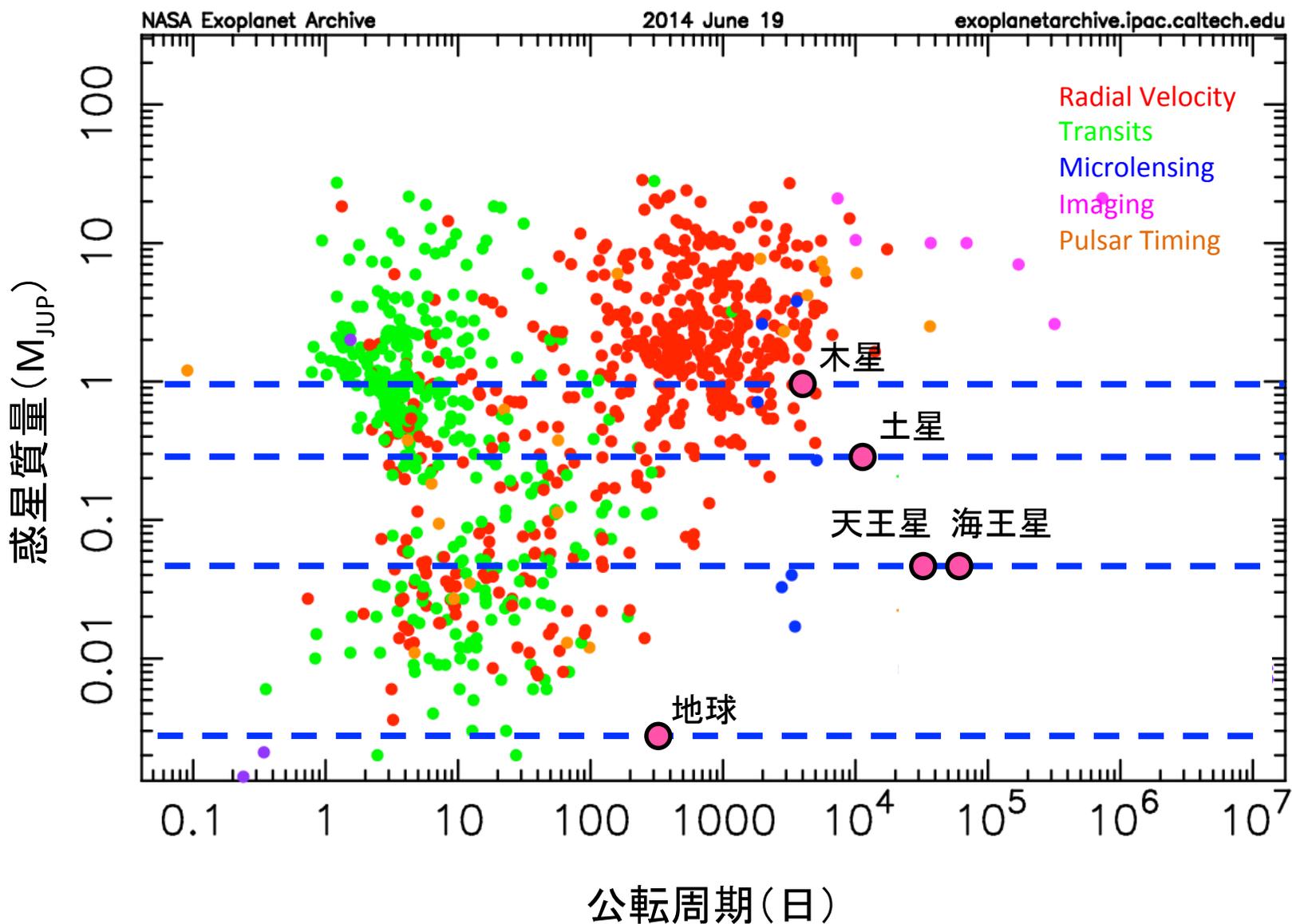
■ トランジット法



■ 重力マイクロレンズ法



系外惑星の公転周期、質量

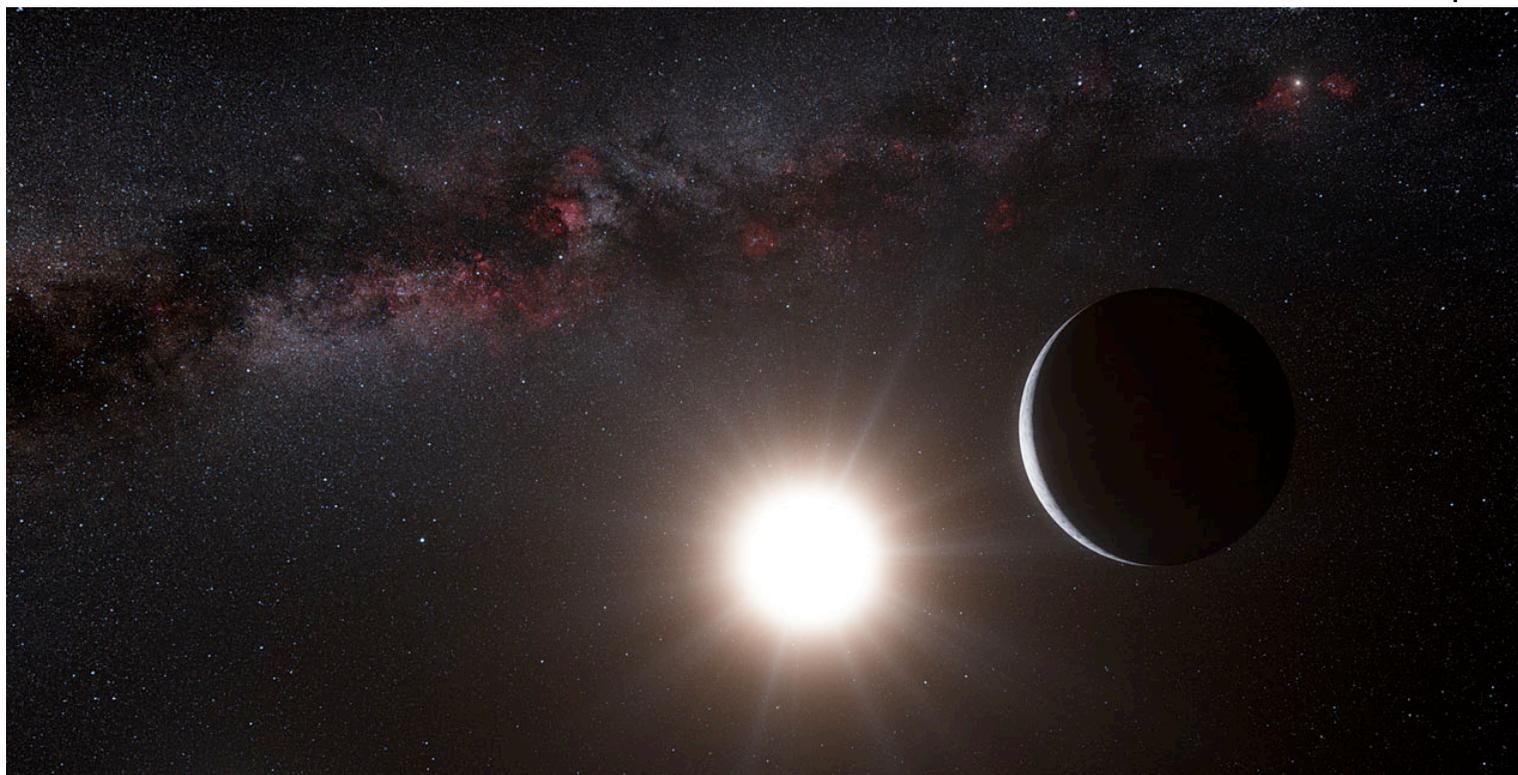
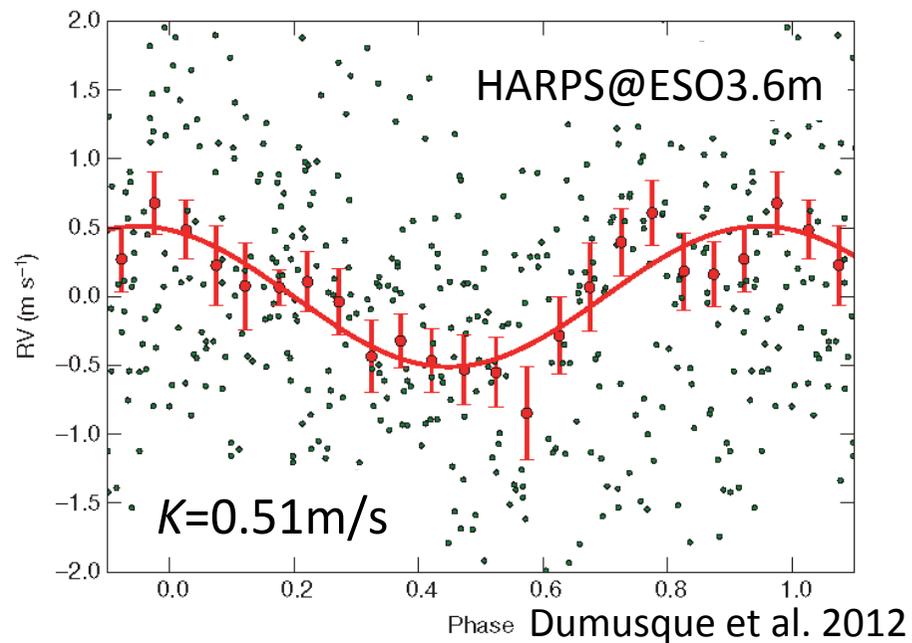


地球型惑星

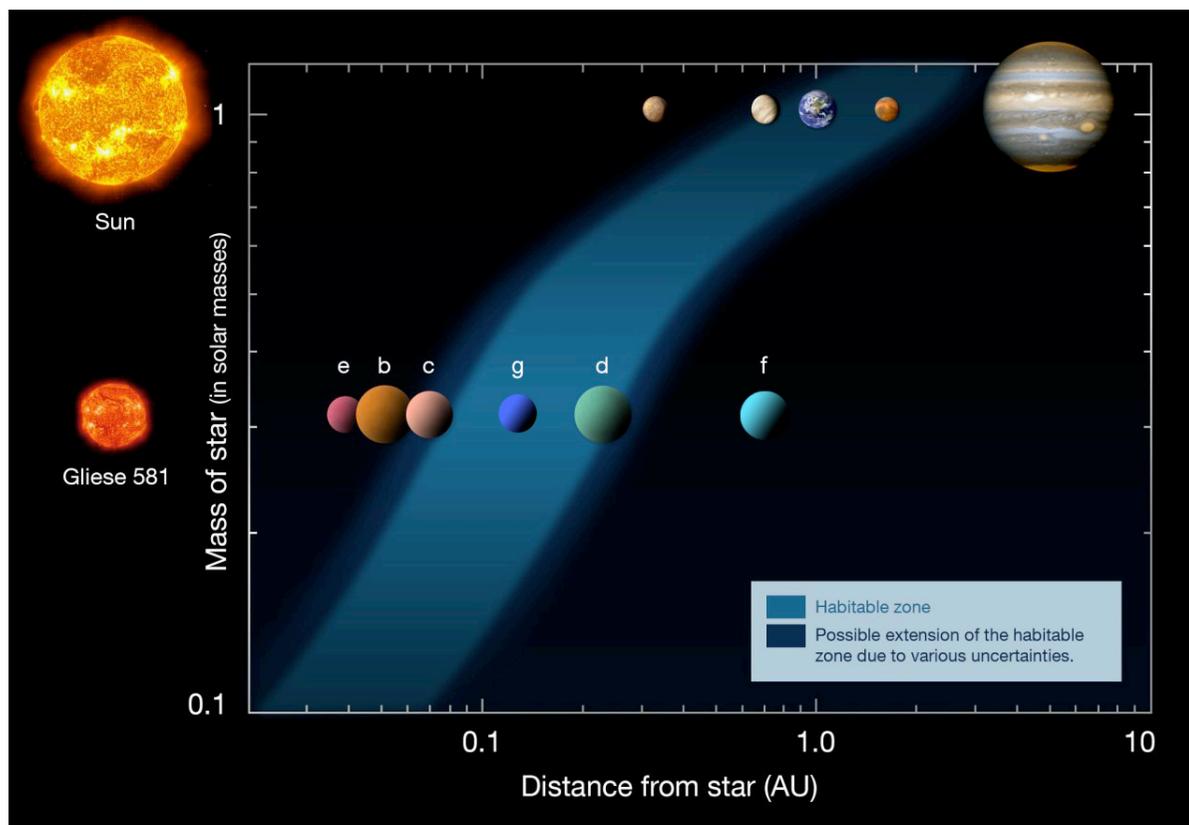
■ α Cen B

✓ 中心星 K1V, $0.9M_{\odot}$

✓ 惑星 $P=3.2d$, $M\sin i=1.13M_E$



ハビタブルゾーン惑星：GJ581



Wikipedia

Vogt et al. 2010

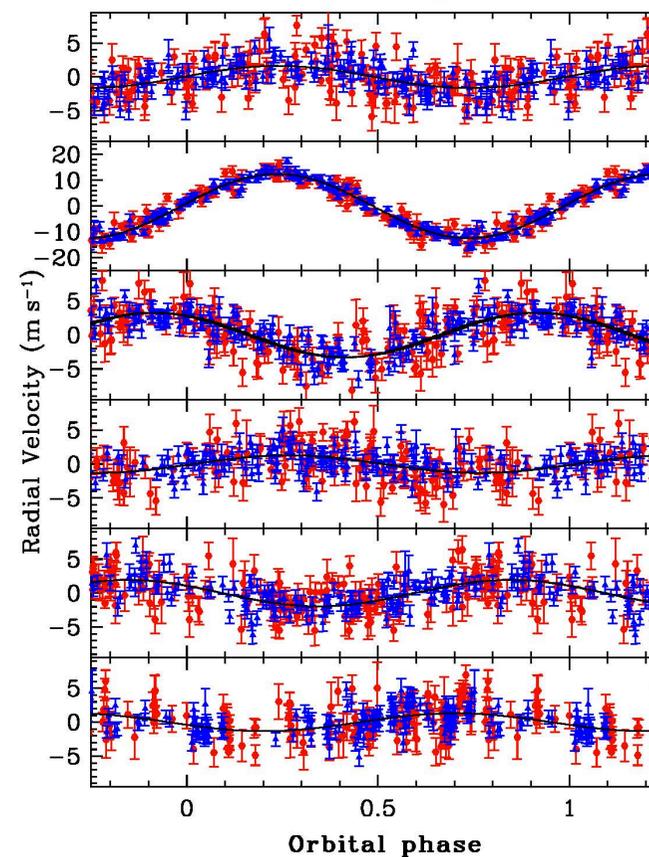


Fig. 5.— Phased reflex barycentric velocities of the host star due individually to the ρ at 3.15 days, 5.37 days, 12.9 days, 37 days, 67 days, and 433 days from the all-circlet of Table 2. Filled (red) hexagon points are from Keck while filled (blue) triangles are HARPS.

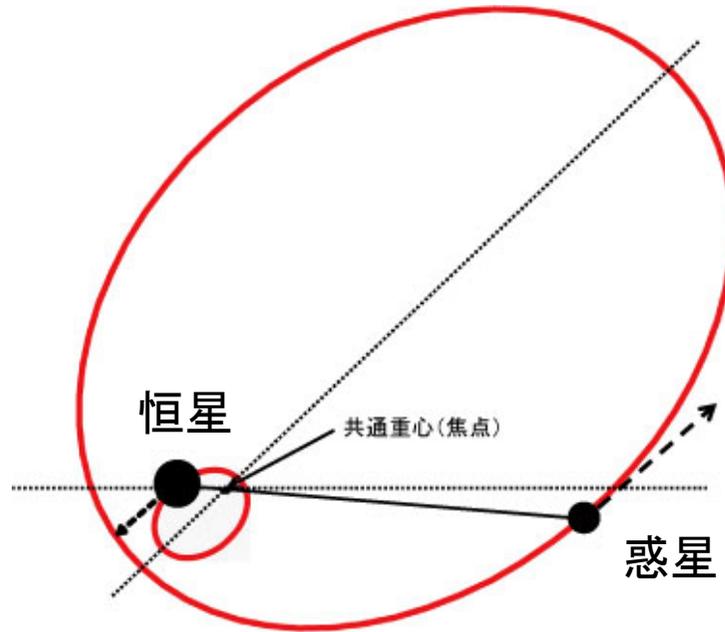
Topics

- 恒星の視線速度変化を測る
- 見かけの視線速度変化
- 惑星系の安定性

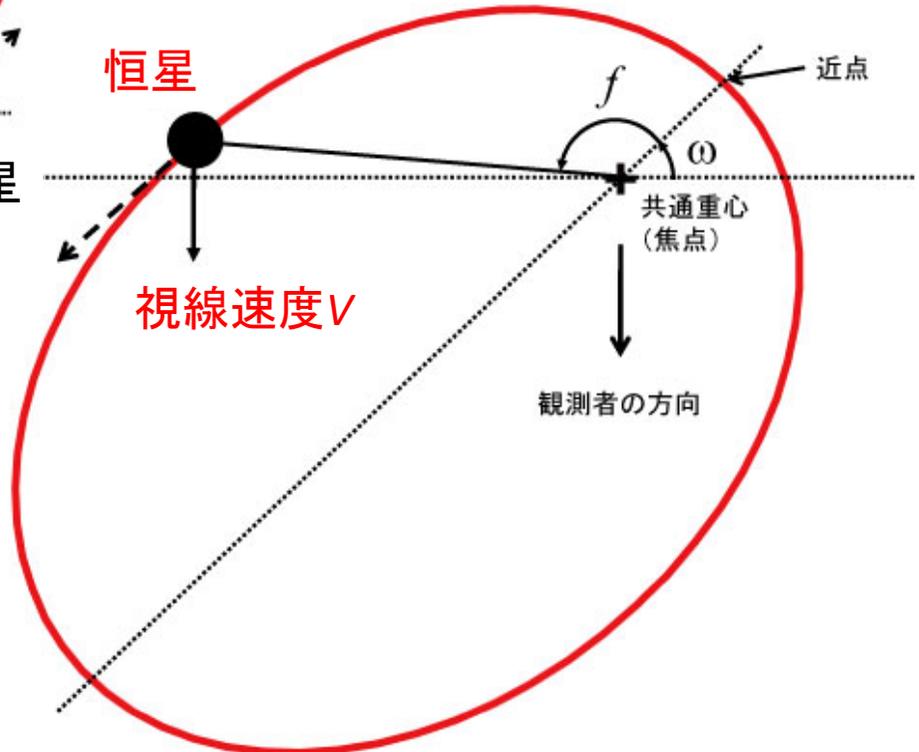
恒星の“歩み”をとらえる

恒星の視線速度変化を測る

惑星をもつ恒星の運動



惑星との共通重心を
焦点とする楕円軌道

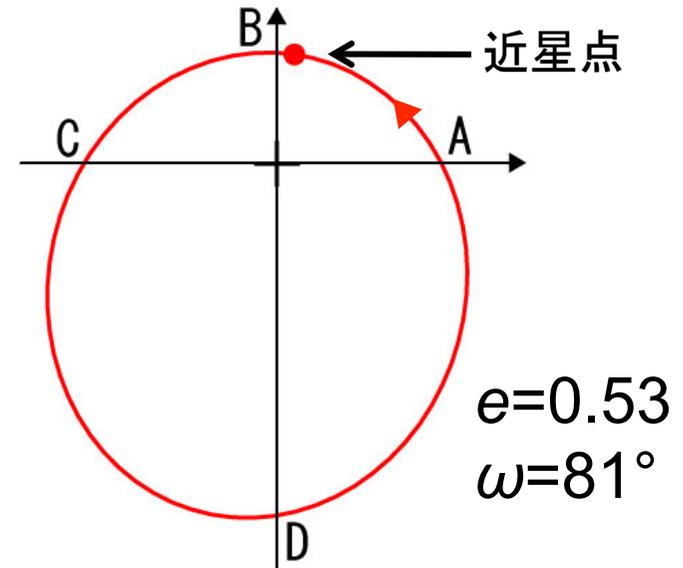
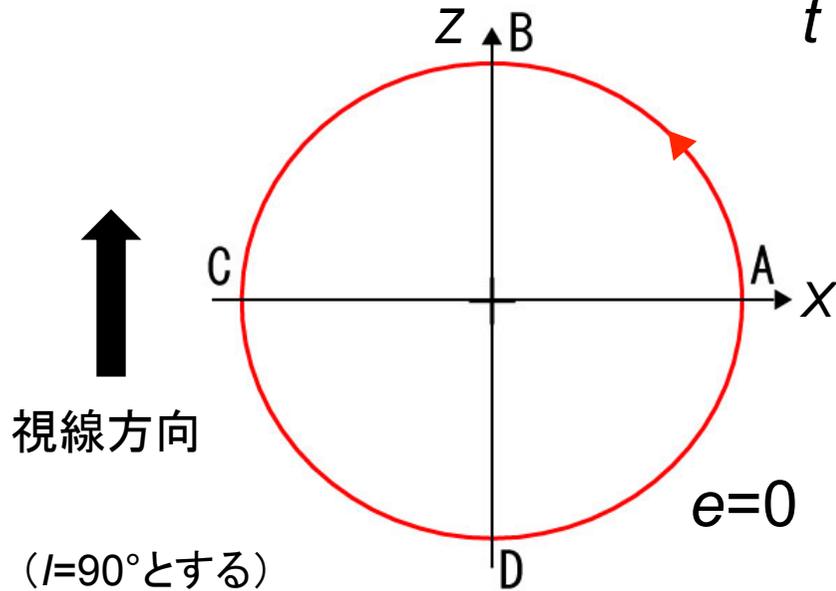
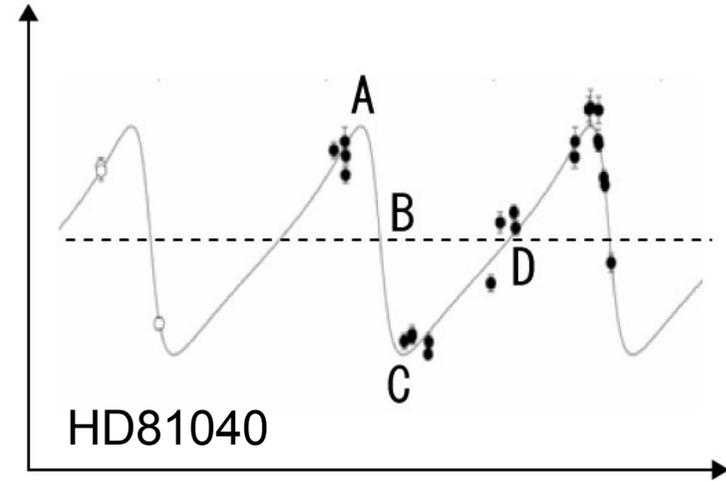
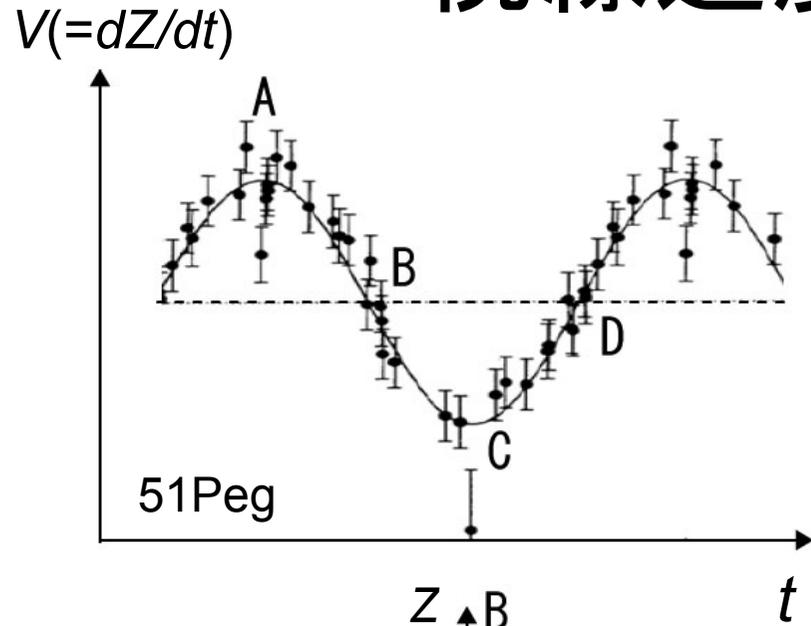


$$V = K \{ \cos(f + \omega) + e \cos \omega \}$$

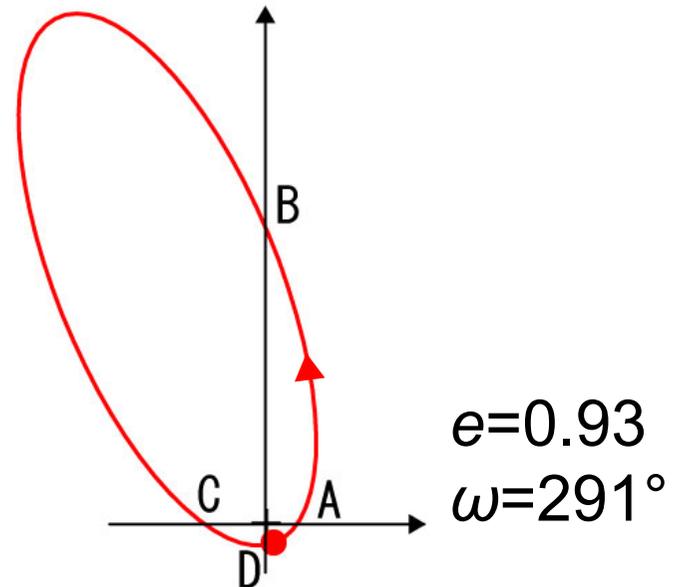
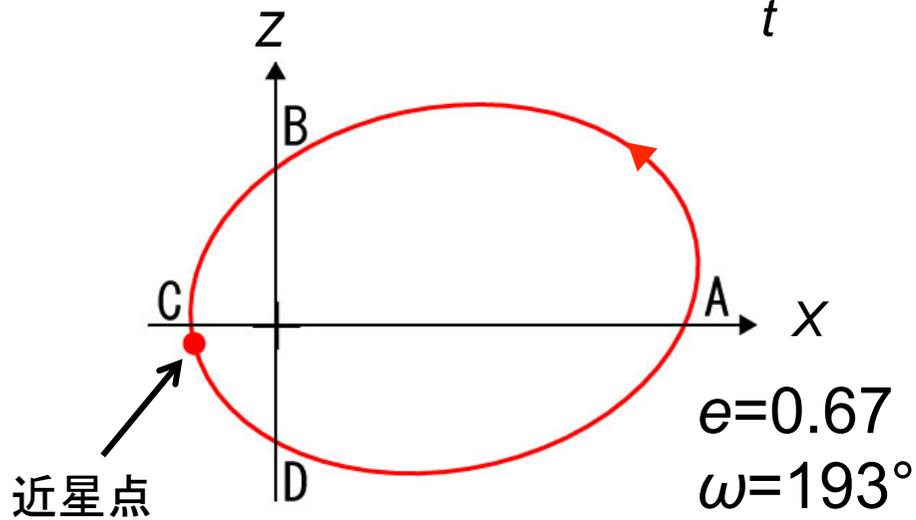
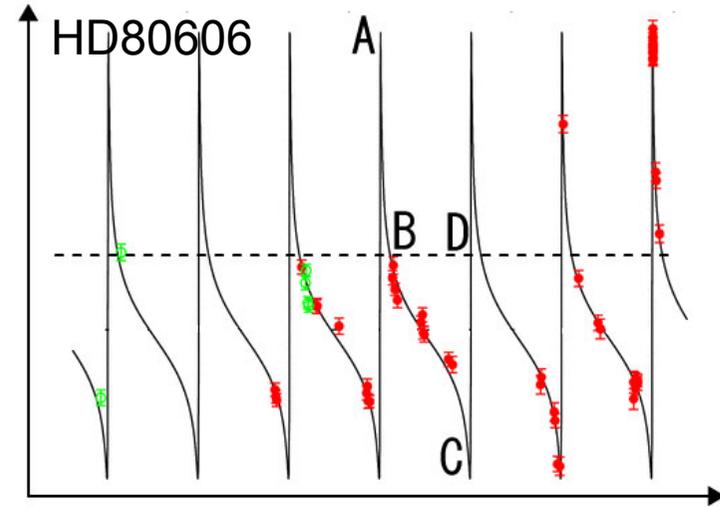
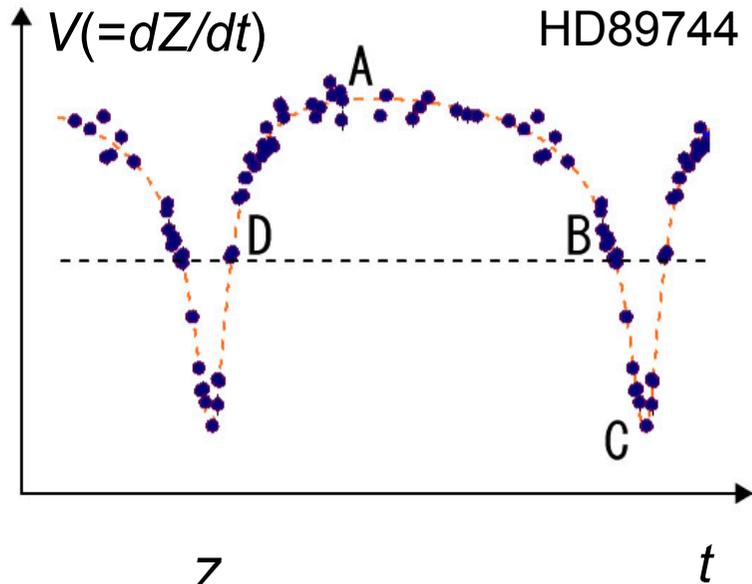
$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{m_p \sin i}{(M_* + m_p)^{2/3}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}}$$

例: 太陽一木星 $K \sim 12 \text{m/s}$
 太陽一地球 $K \sim 10 \text{cm/s}$

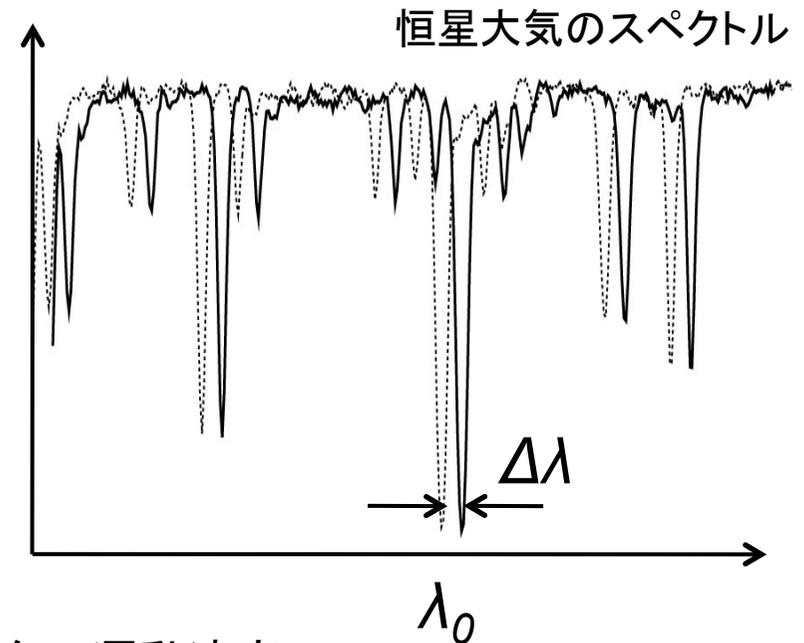
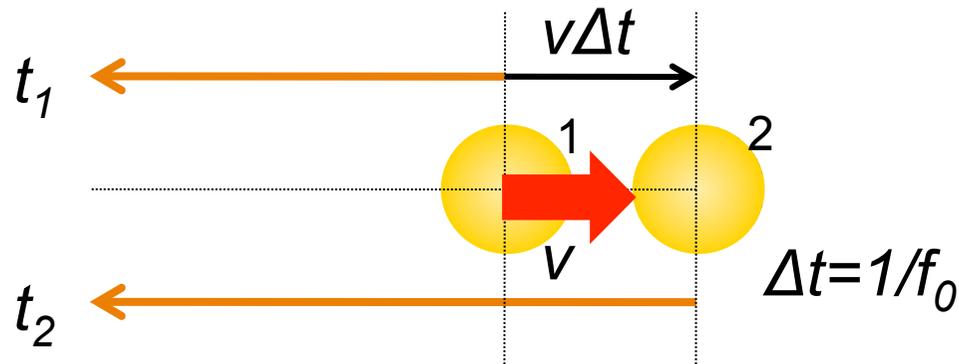
視線速度変化の例



視線速度変化の例



視線速度：ドップラー効果



■ t_1, t_2 : 1, 2で発した光が観測者に届く時刻

■ f_0 : 本来の周波数(= c/λ_0) ■ c : 光速

■ f : 観測される周波数

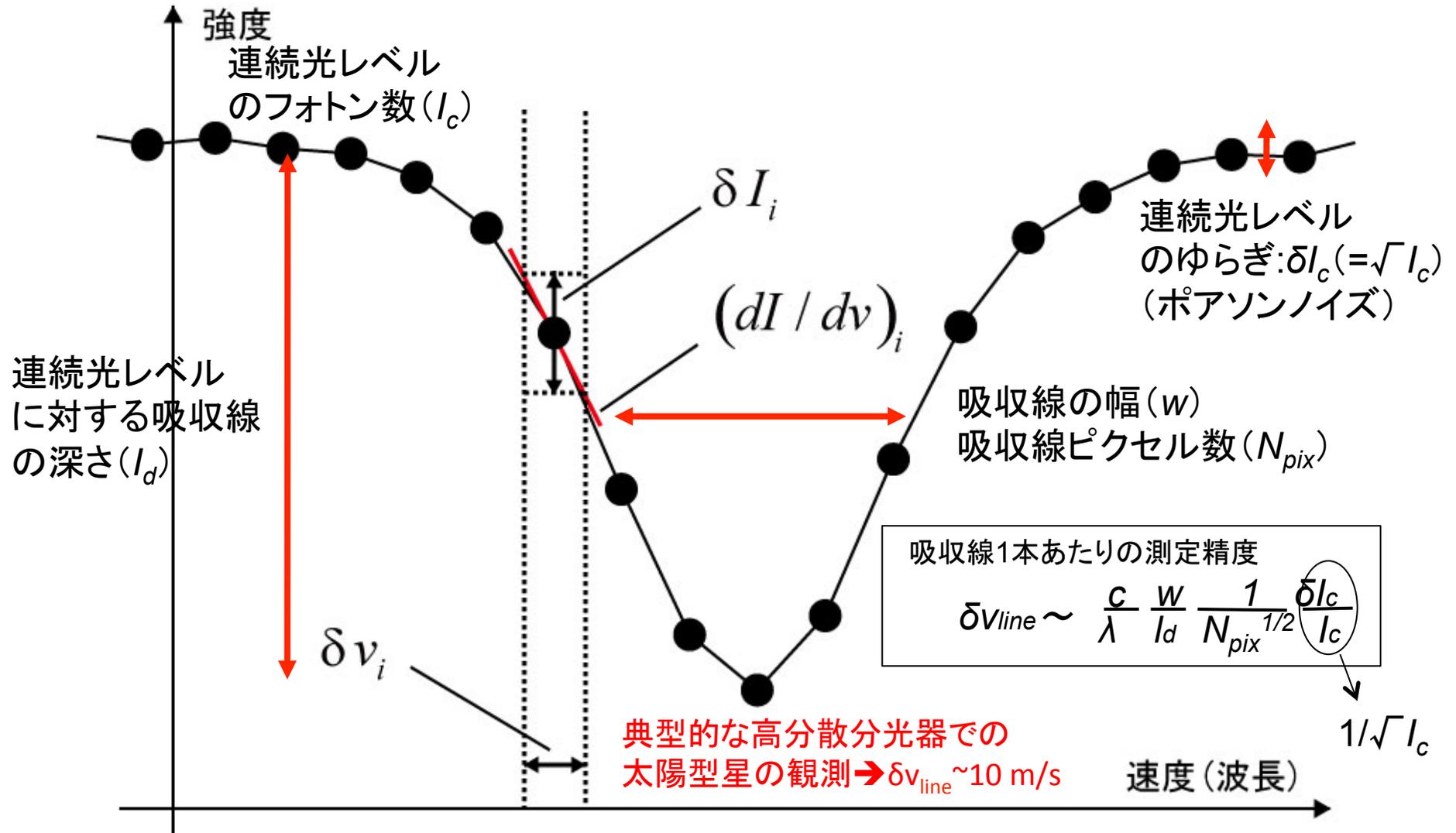
■ v : 天体の視線方向の運動速度

$$f = \frac{1}{t_2 - t_1} = \frac{1}{\Delta t(1 + v/c)} = \frac{f_0}{1 + v/c} \quad \left(v \text{ が } c \text{ に比べて十分小さく、特殊相対論の効果が無視できる場合} \right)$$

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

$$v = 10 \text{ m/s} \rightarrow \Delta \lambda / \lambda = 3 \times 10^{-8}$$

視線速度決定精度： 光子量とスペクトルの形



高分散エシエル分光器で撮られた 恒星のスペクトル

(長波長)

垂直分散格子 ↑
の分散方向



(短波長)

エシエル格子の分散方向 →

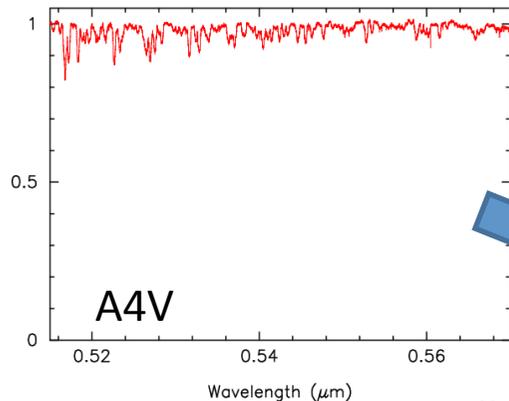
一本一本の光の帯は、回折の次数に対応
光の帯中の黒い筋は、恒星大気中の元素
による吸収線

多数のラインを使って統計的に
精度を上げる

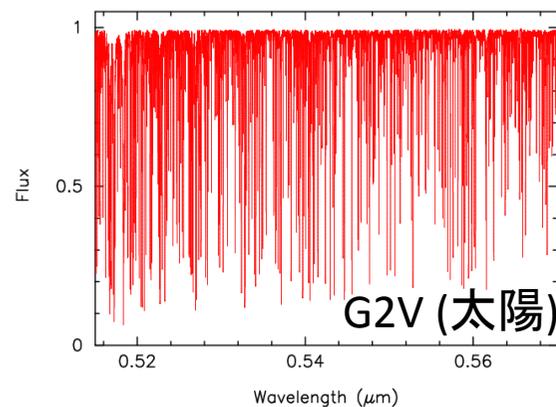
$$\delta v = \delta v_{line} / \sqrt{N_{line}} = 10 / \sqrt{100} = 1 \text{ m/s}$$

恒星のスペクトルの違い:

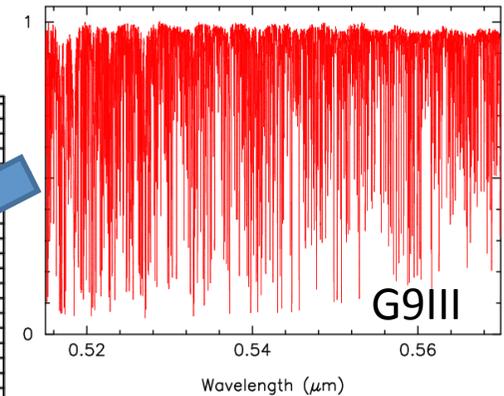
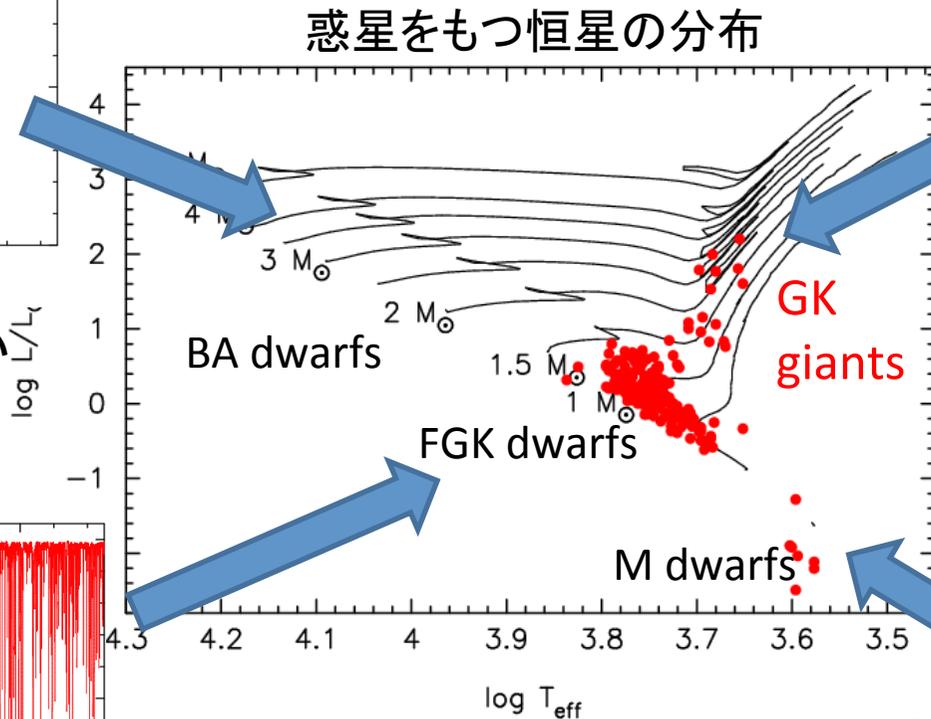
細くて深い吸収線がたくさんある明るい星ほど高精度



吸収線の数が少ない
線幅広い
→ 精度悪い

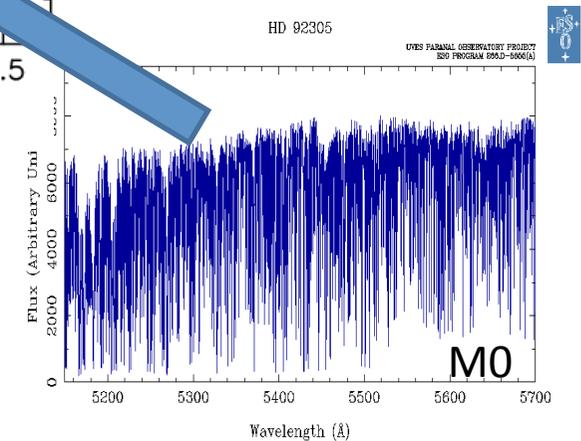


多数の細くて深い吸収線
→ 高精度が可能



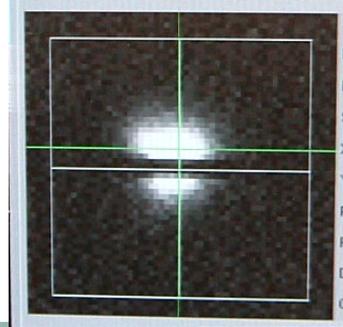
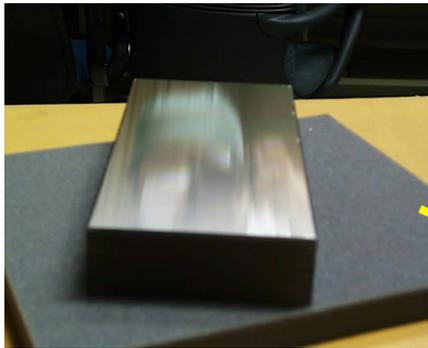
高精度が可能だが、
恒星自身の変動大

可視光で暗い
→ 赤外域での
観測

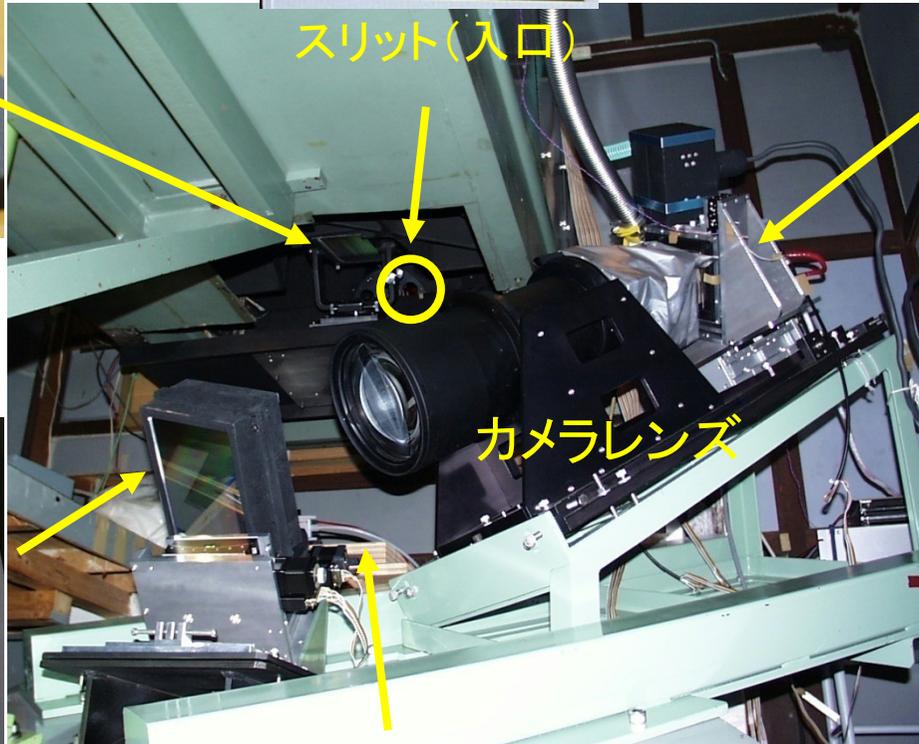
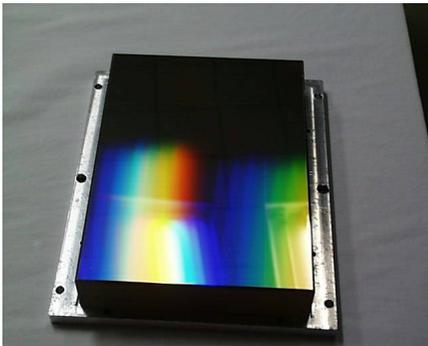


測定機器：高分散エシェル分光器

エシェル格子



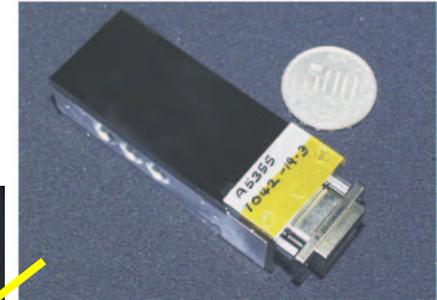
垂直分散格子



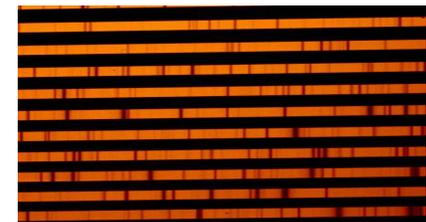
スリット(入口)

カメラレンズ

コリメータ(平行光に)



CCD検出器
(スペクトルを撮像)



HIDES@
国立天文台岡山
天体物理観測所

視線速度測定 of 誤差

ガイドエラー等による分光器スリット上での星像の位置変化、照射パターンの変化

～数100 m/s

温度変化等による分光器のゆがみ (スペクトルフォーマットの変化)

～数100 m/s/0.1K

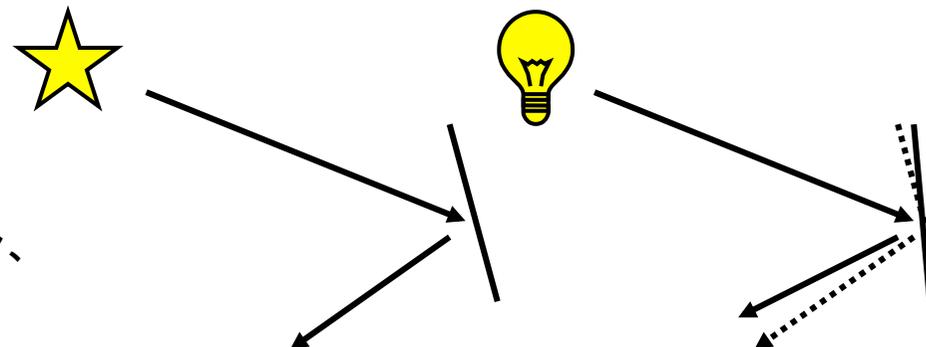
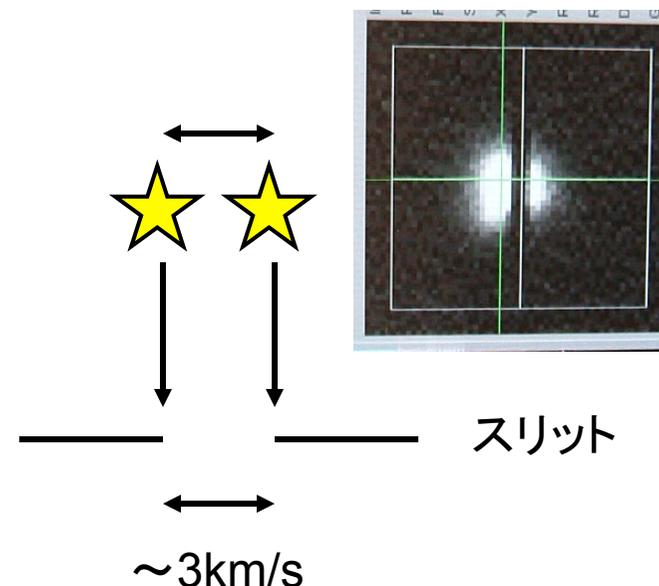
分光器の器械輪郭(IP)の変化

CCD上の位置、温度、気圧、照射パターン、フォーカス等の変化

～数%/night (1%～10-25m/s)

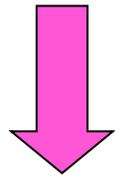
CCDの膨張 ～1 m/s (CCDの0.02Kの温度変化; HARPS) など

検出器上における時々刻々の精度の良い波長目盛りが必要

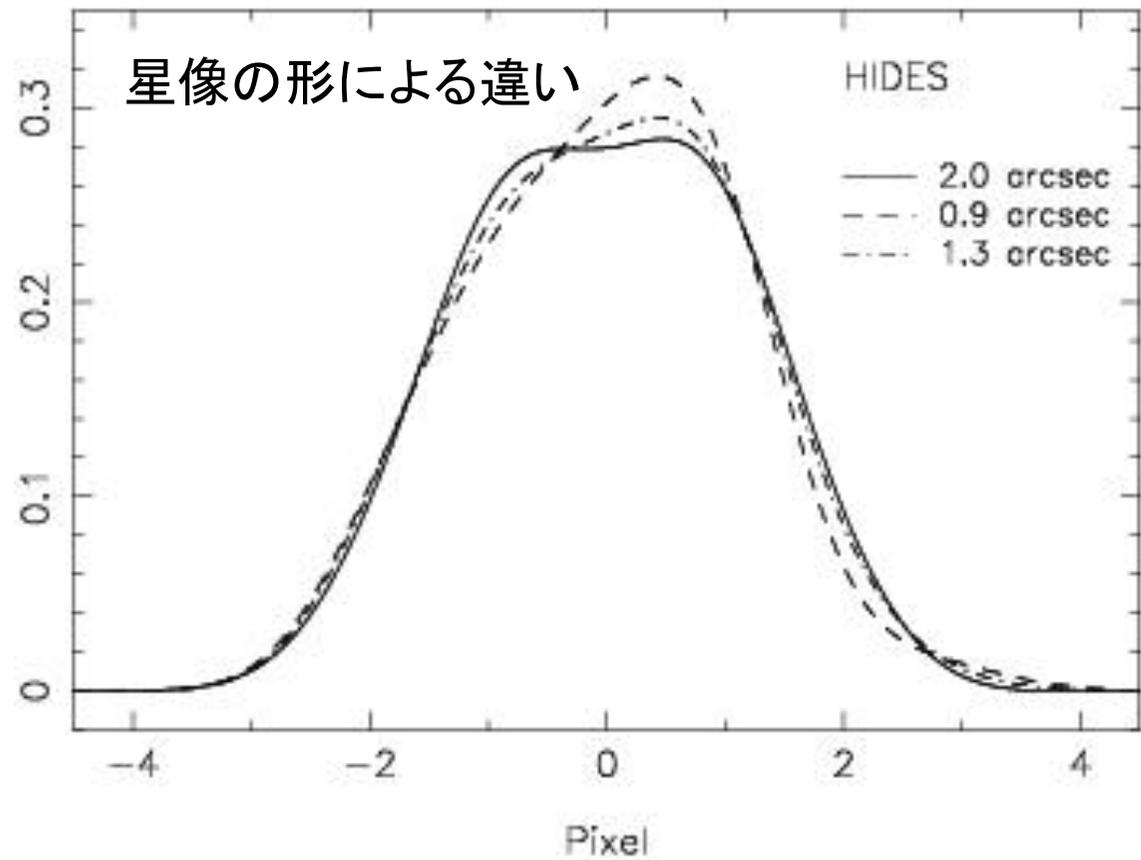


器械輪郭(IP)の変化

IPの重心のずれ



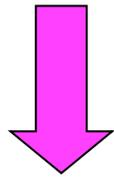
視線速度の系統誤差



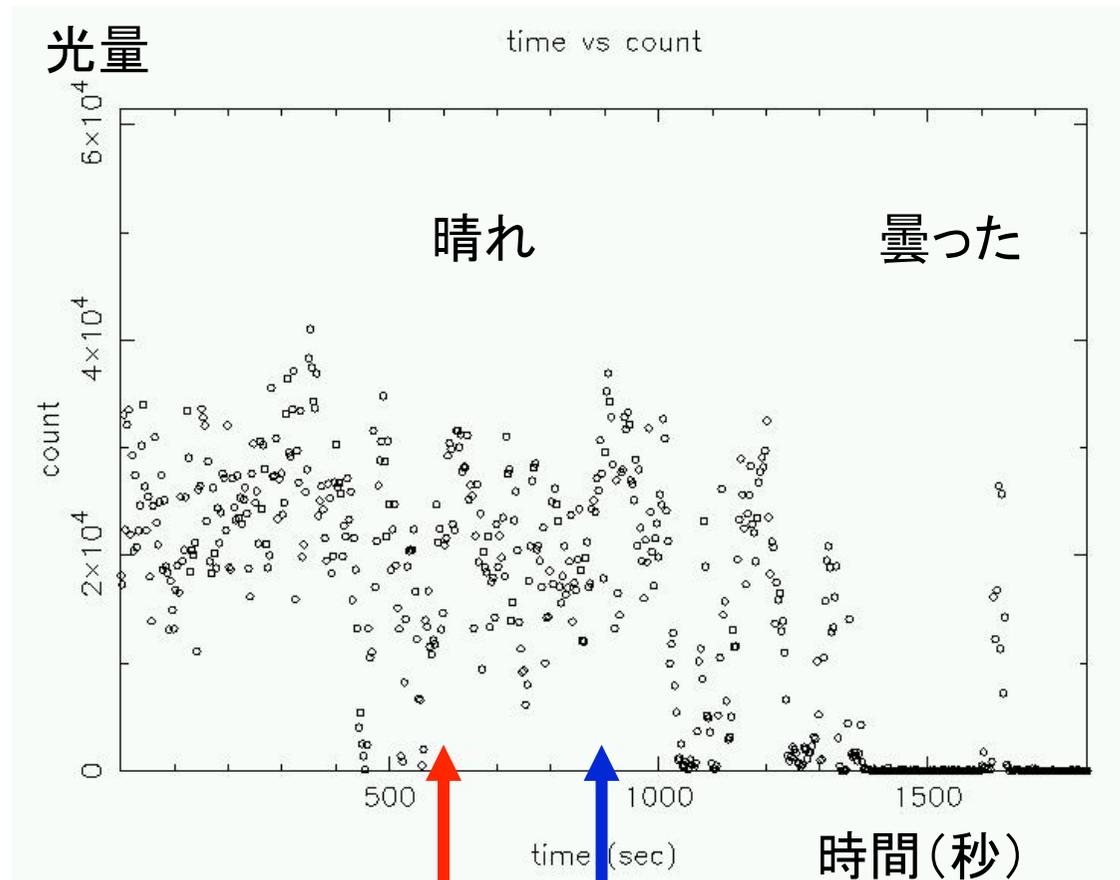
地球運動の補正

ある星の露出中の光量変化(30分)

約5分のずれ



地球運動の補正量
に約3m/sの違い



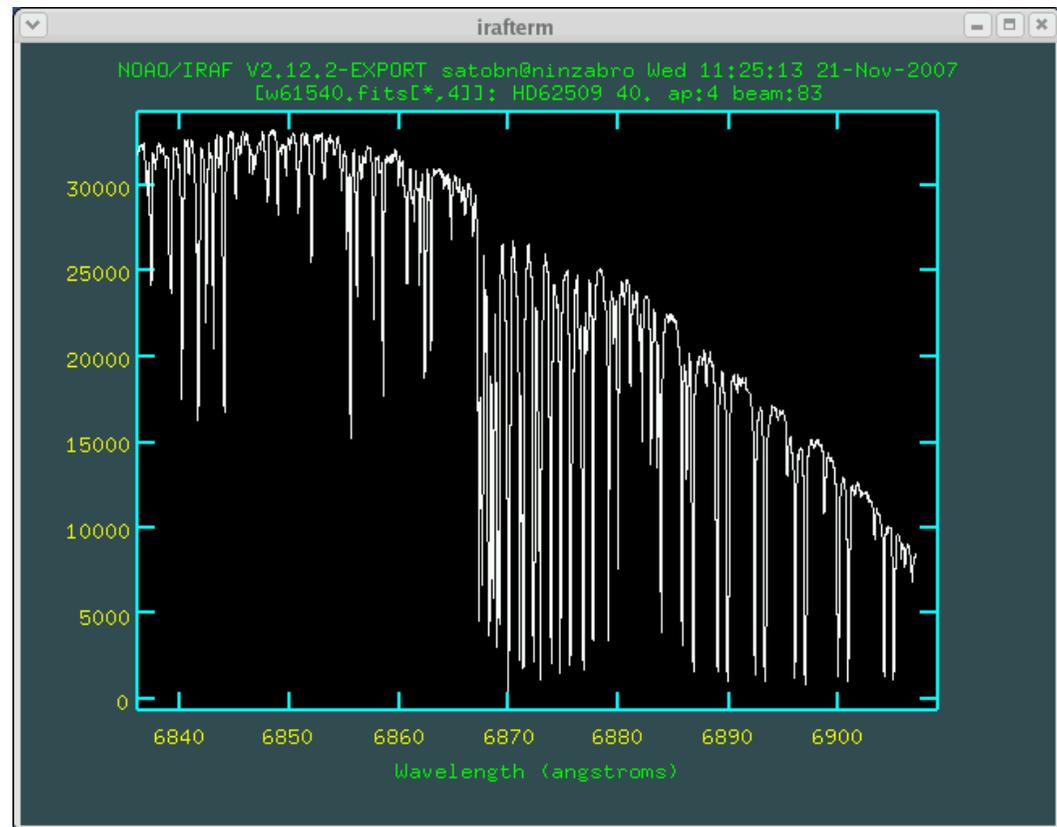
実質的な露出
中心時刻

露出の真ん中
の時刻

波長の物差し

地球大気の吸収線を
波長目盛りとして利用
(Griffin and Griffin 1973)

しかし、地球大気吸収線は
変動するのであまりよい
目盛りではない。
典型的な測定精度は
数10~数100m/s

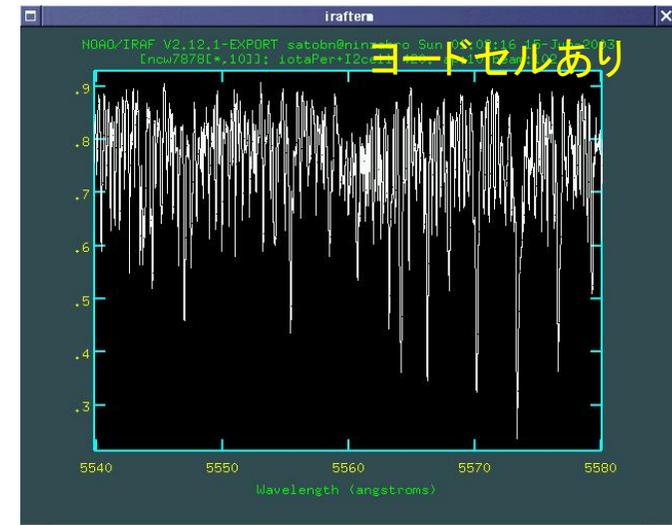
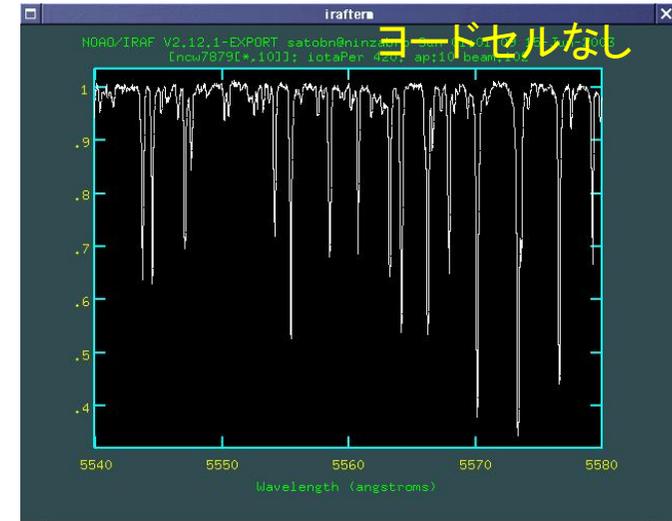


ヨウ素ガス (I_2) 吸収セル



- Koch and Wohl (1984) 太陽で
- Butler (1987), Marcy and Butler (1992)
5000-6000Åに無数(～10000本)の吸収線、安定
→ I_2 の吸収線の位置決定精度 < 1 m/s
- Butler et al. (1996), Valenti et al. (1995)
解析手法の確立 星+ I_2 スペクトル、IPのモデル化
→ 星の視線速度測定精度 ~ 3 m/s (long-term)

器械輪郭の変動も補正

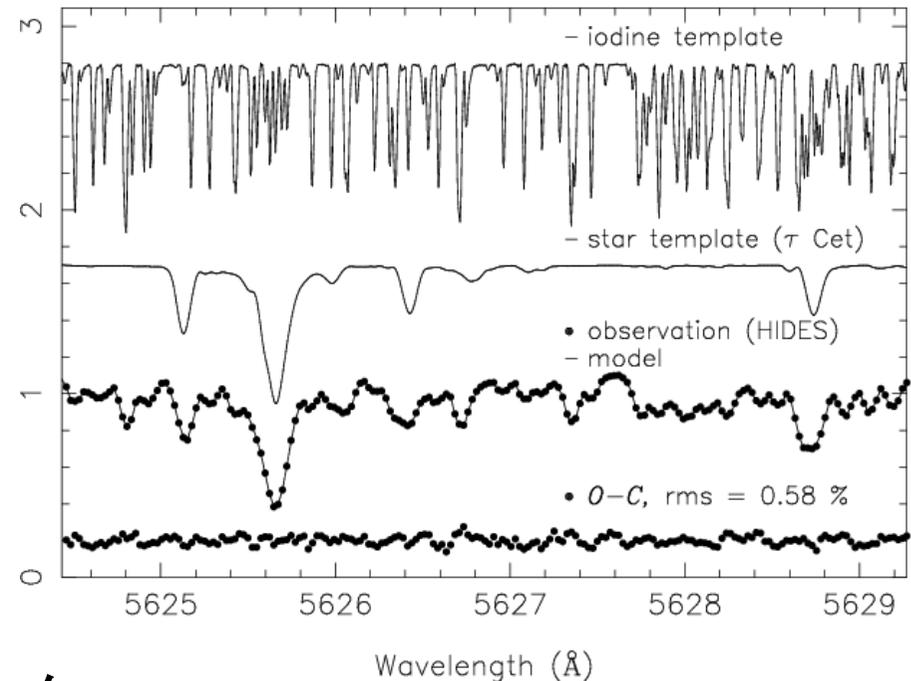


ヨードセル観測データの解析

$$I(\lambda) = k[A(\lambda)S(\lambda + \Delta\lambda)] * IP \quad (\text{Butler et al. 1996})$$

- $A(\lambda)$: ヨウ素のテンプレート
- $S(\lambda)$: 星のテンプレート
(高分解能スペクトル)
- $I(\lambda)$: 星+ヨウ素のスペクトル
- IP : Instrumental Profile

$$\rightarrow v = c\Delta\lambda/\lambda$$



- ドップラーシフトと IP がパラメータ
- IP は5~10個のガウシアンを組み合わせてモデル化
- スペクトルを数Å程度の数100個のセグメントに区切って解析

最先端の測定精度

Keck望遠鏡(アメリカ)

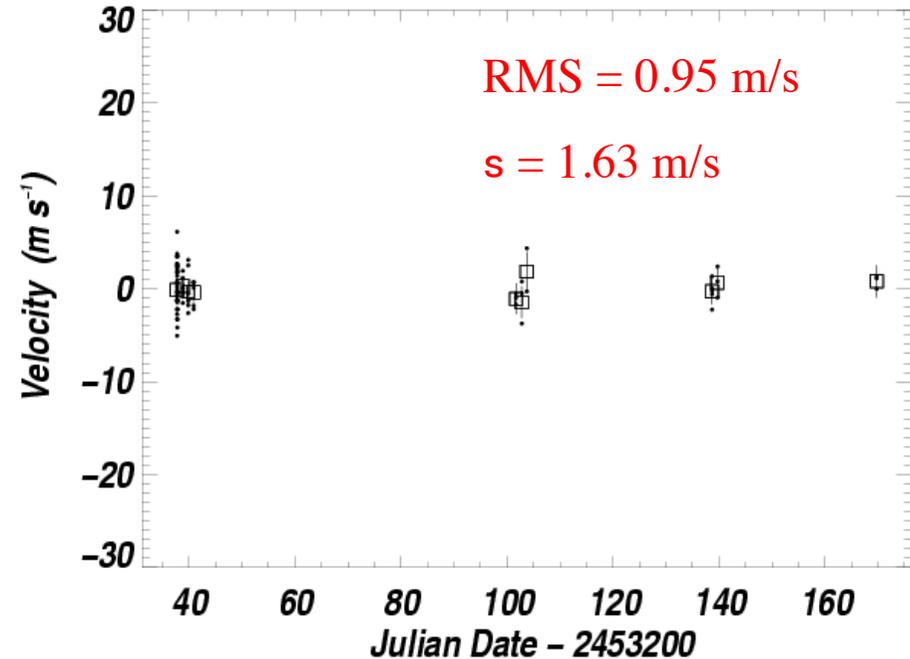
精度 $\sim 1\text{m/s}$

メリット:

- ・波長の基準を直接スペクトルに埋め込む(絶対的な基準になる。しかし、スペクトルが汚れるのはデメリットでもある。)
- ・ヨードセルは簡単、安い(後付が容易)

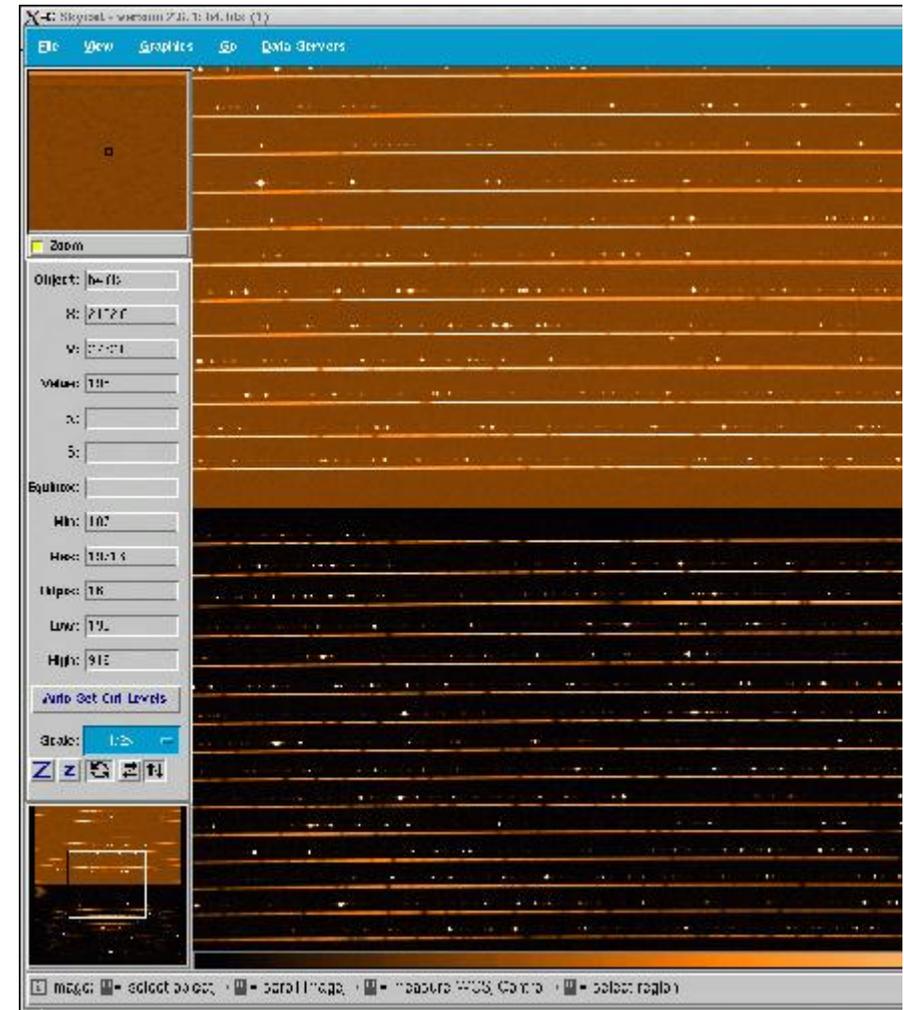
デメリット:

- ・波長域に限られる(5000~6000Å)
- ・高SN(~ 200)が必要
- ・IPの変化、波長スケールの変化、視線速度変化を分離するのが難しい



同時比較光源光取得法 (Simultaneous reference method)

- ELODIE、CORALIE、HARPS (Mayor et al; スイスのグループ)
 - 2つの光ファイバー(星用、比較光源ThAr用)で同時に分光器に光を導く→入射光パターン安定化
 - 分光器は厳密な温度管理
 - $\sim 0.001\text{K}$ (~ 1 日、HARPS)
 - cross-correlationで、相対的な位置変化を導出
 - HARPS
 - short-term
 - Th-Ar同士 $\dots 0.1\text{ m/s}$
 - 星 $\dots 0.26\text{ m/s}$ (0.2 m/s 未同定)
 - long-term
 - 星 $\dots 1\text{ m/s}$



HARPS (ESO 3.6m)

メリット:

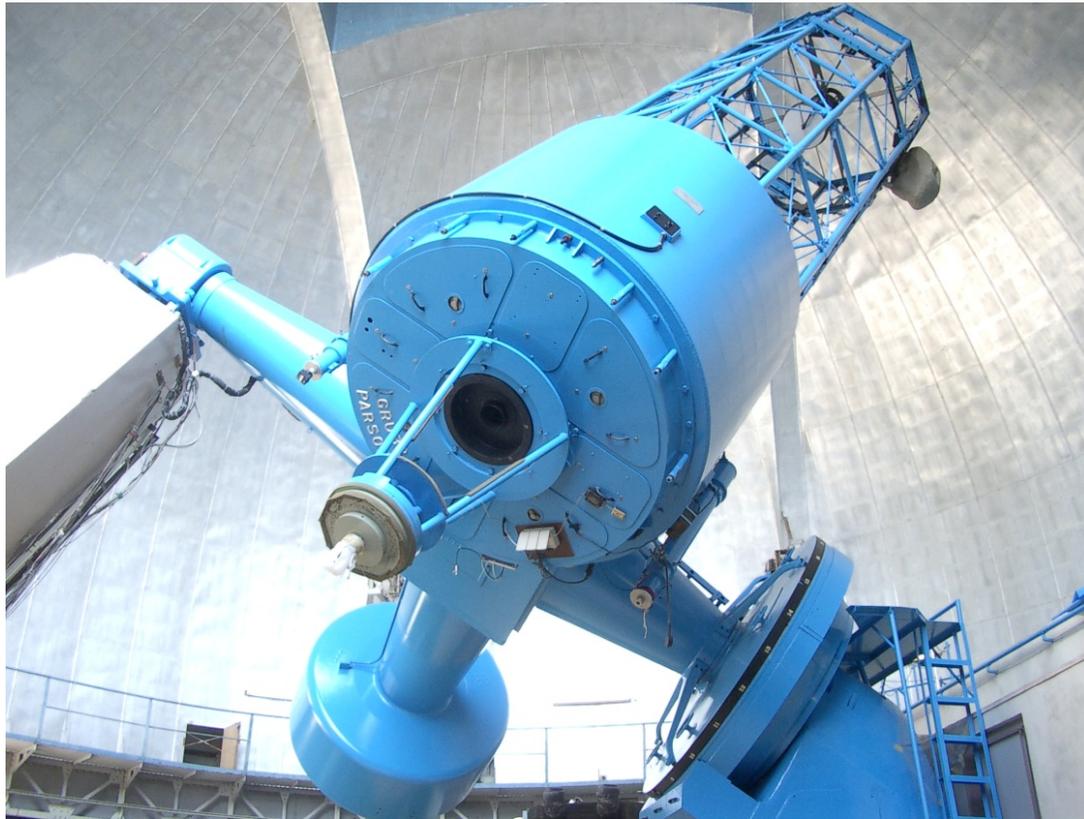
- ・可視域全体が使える
- ・低SN(~ 50)でよい

デメリット:

- ・波長の基準を直接
スペクトルに埋め込まない
(スペクトルが汚れないのは
メリットでもある)
- ・高価な分光器
- ・高い技術が必要



Th-Arに代わる超高精度な波長基準(例:レーザー周波数コム)も開発されている



国立天文台岡山天体物理観測所
(Okayama Astrophysical Observatory; OAO)
188cm反射望遠鏡

可視高分散分光器 (HIDES)
測定精度 $\sim 2\text{m/s}$ (ヨウ素ガスセル)

国立天文台ハワイ観測所
8.2m反射望遠鏡 (すばる望遠鏡)

可視高分散分光器 (HDS)
測定精度 $\sim 2\text{m/s}$ (ヨウ素ガスセル)

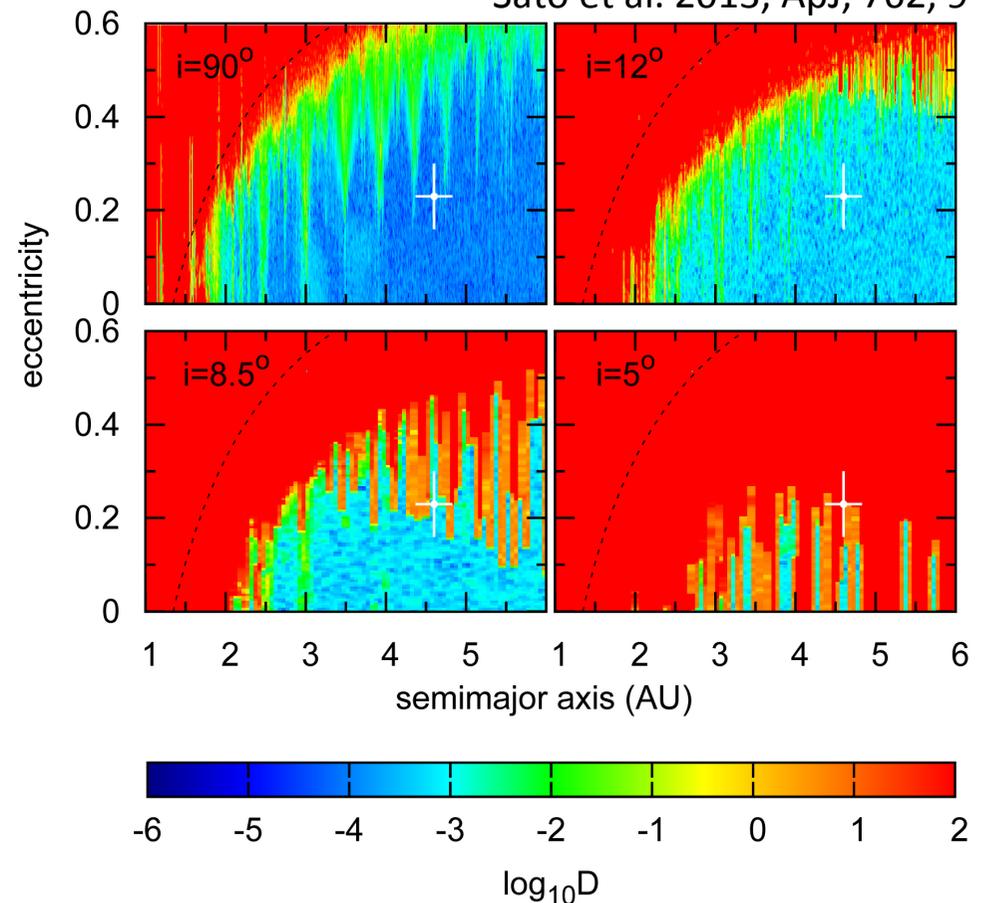
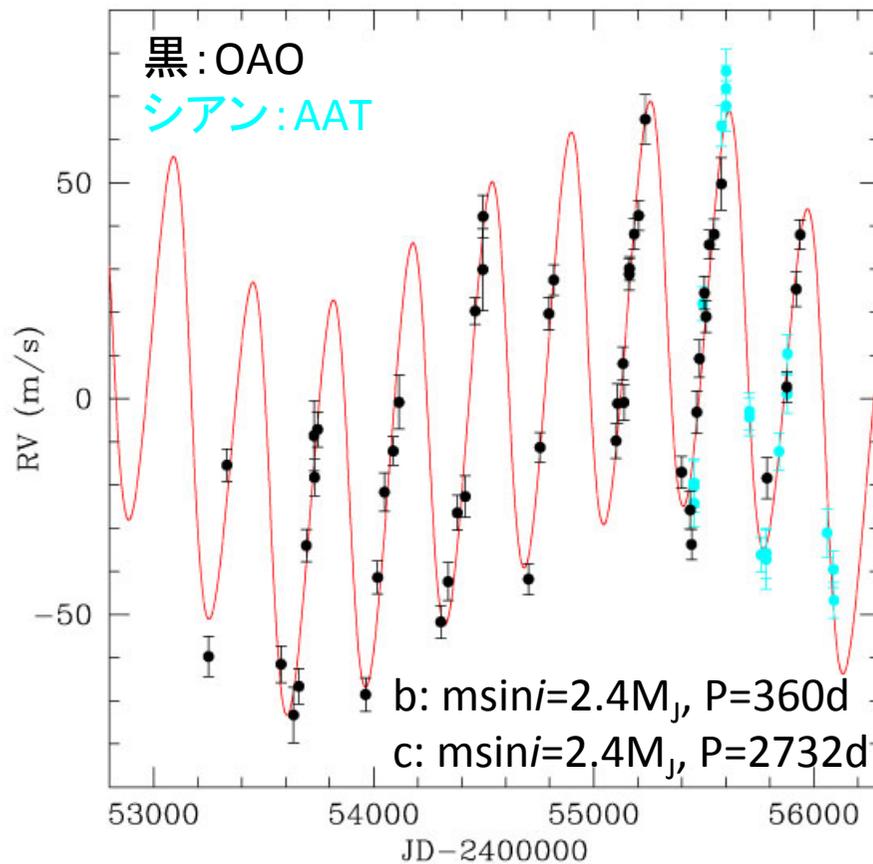
近赤外高分散分光器 (IRD; 開発中)
測定精度 $\sim 1\text{m/s}$ (レーザーコム)



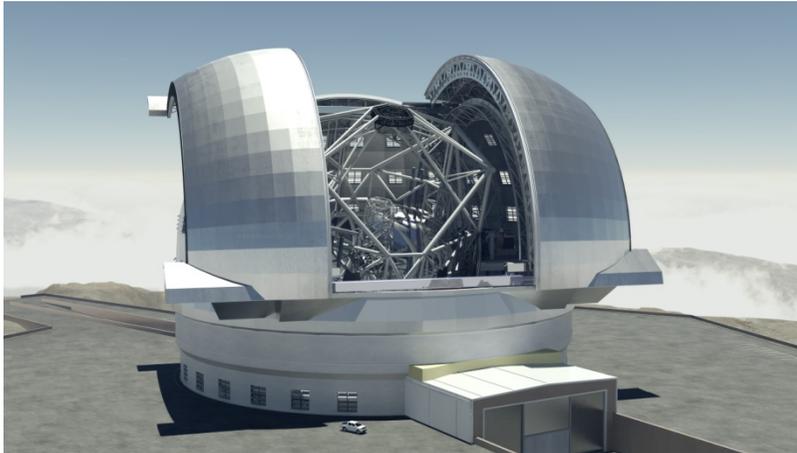
岡山で発見した惑星系の例： 複数惑星系 HD4732

- $\delta = -25^\circ$ のためOAOからは限られた時期しか観測できず → AATとの協力
- HD4732cはこれまでに進化した中質量星周りで見つかった最も外側(4.6AU)の惑星
- 軌道安定性解析から惑星質量(軌道傾斜角)に上限(下限) → $m_{b,c} < 28M_{JUP}$ ($i > 5^\circ$)

Sato et al. 2013, ApJ, 762, 9

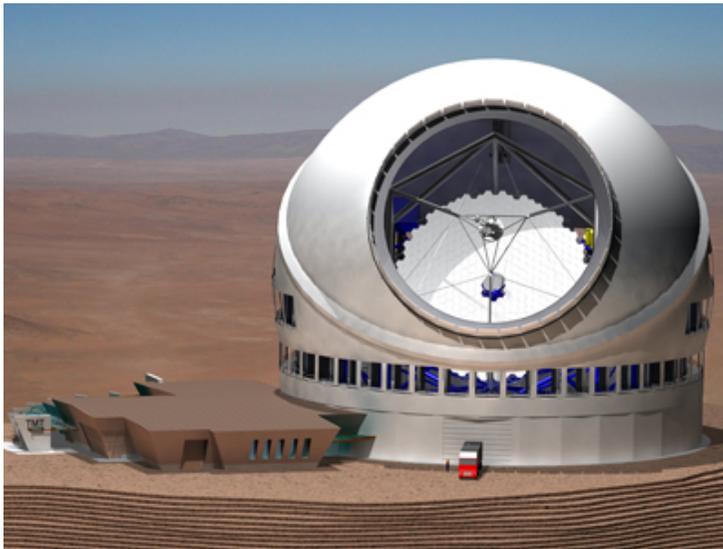


次世代大型計画



CODEX@E-ELT
Real Earth Twins
Target: 2 cm/s

ESPRESSO@VLT
Rocky Planets in HZ
Target: 10 cm/s



TMT

地球型惑星探索用の超高精度
高分散分光器が計画・検討中

惑星検出を妨げる

見かけの視線速度変化

太陽表面の 速度場

周期約5分、振幅数m/sの
細かな振動



地球の軌道運動による
視線速度変化 (~10cm/s)
より大きい

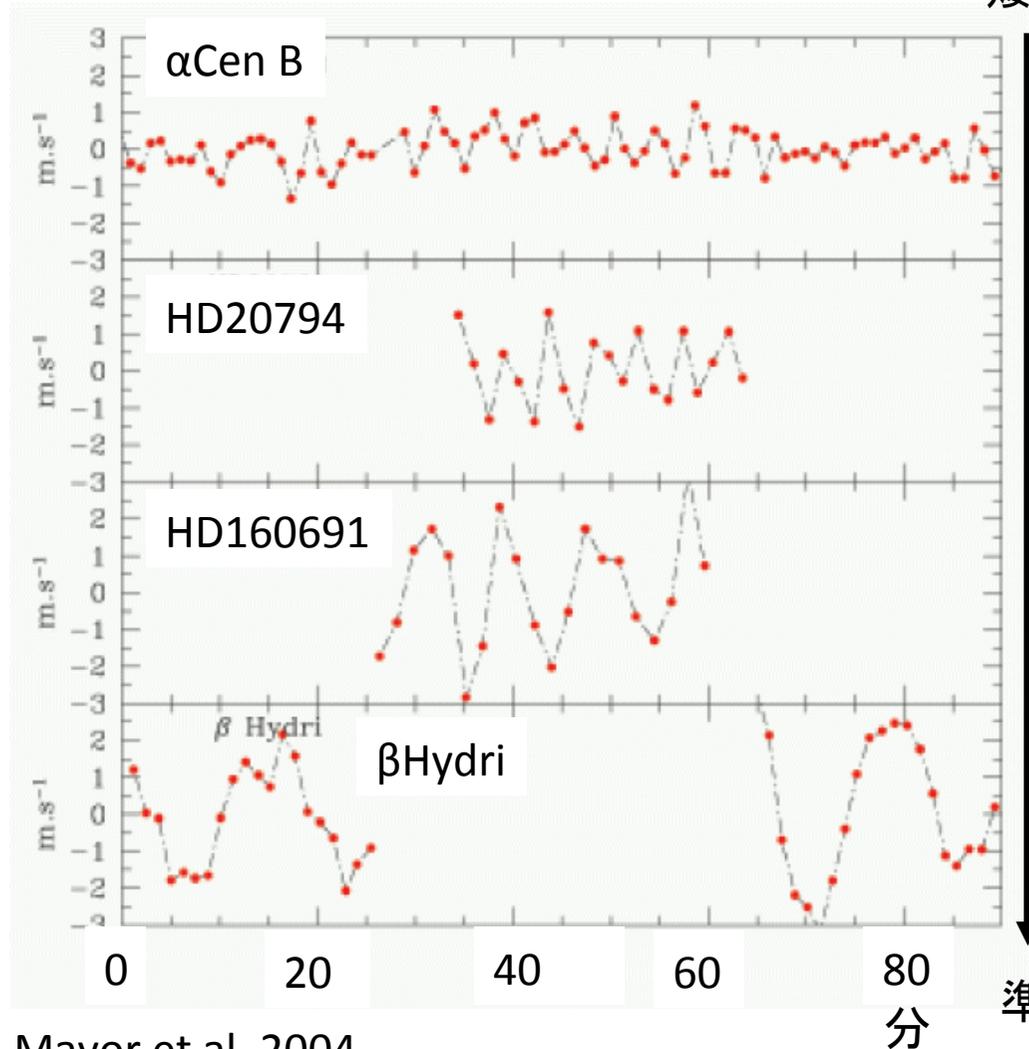
惑星検出にとっては“ノイズ”
(恒星内部の情報を得る上
では有用; 星震学)



<http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/MDI/mdi002.gif>

恒星の表面現象：p-mode

矮星



Mayor et al. 2004

準巨星

振幅 $\sim 1-3\text{m/s}$, 周期 $\sim 5-10\text{分}$



計15分程度露出をかければ
振動成分は平均化できる

→ $<0.2\text{m/s}$ (RMS)
(Mayor, Udry 2008)

進化した星でも原理的に可能
だが、より難しくなる
(大振幅、長周期)

恒星の表面現象：granulation

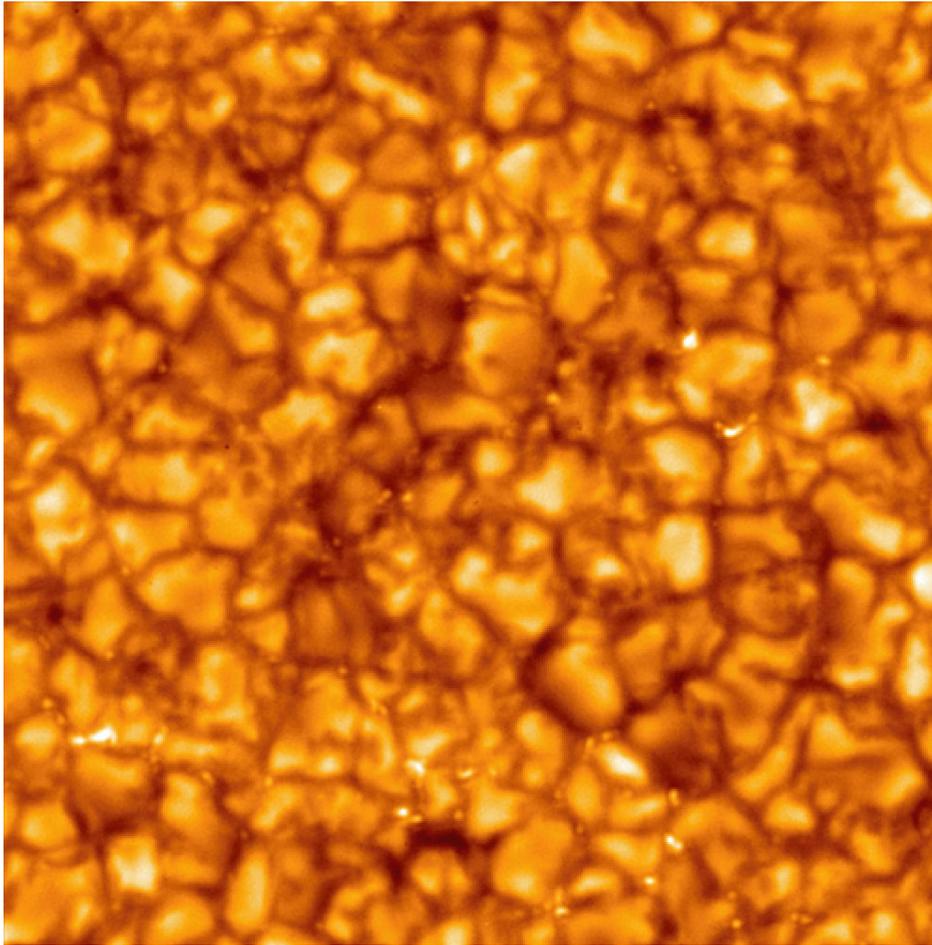
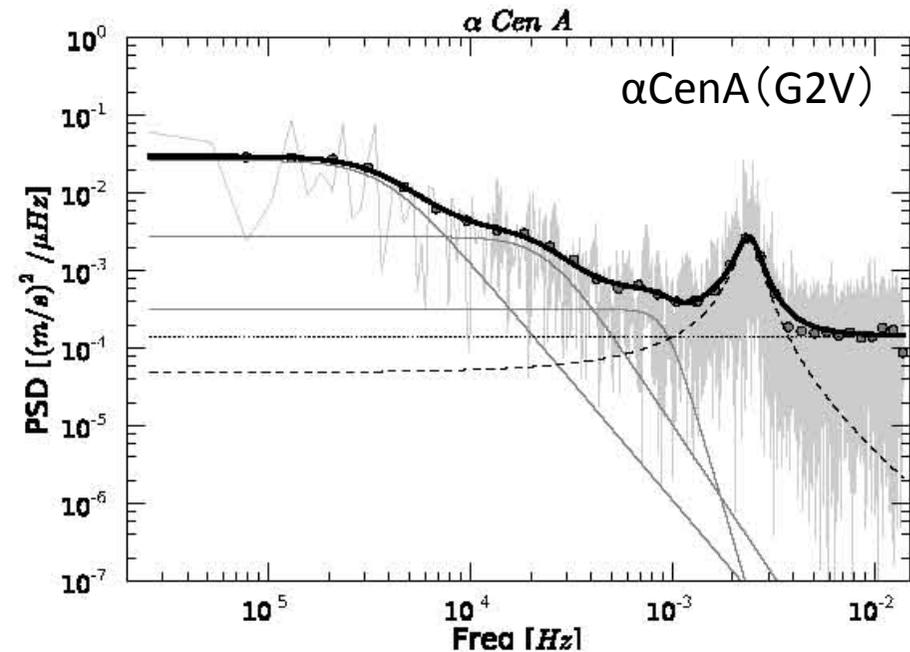


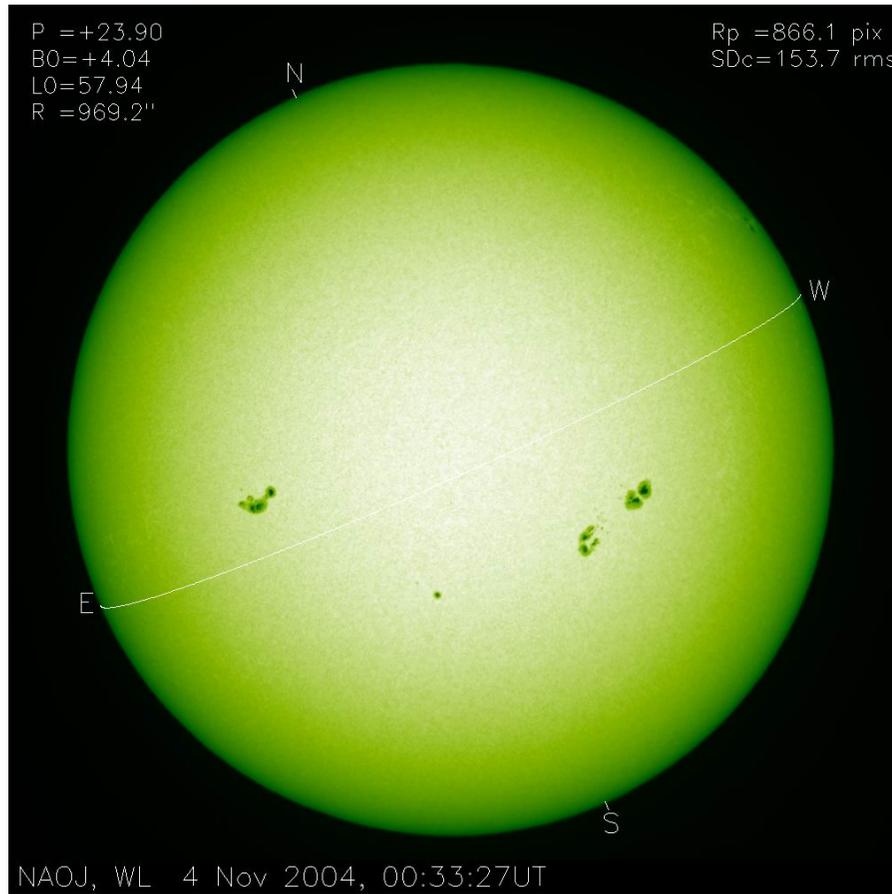
Image by Hinode

Granulationによるノイズ
→より長い時間尺度(~30min-1day)で
>1m/s (Kjeldsen et al. 2005)



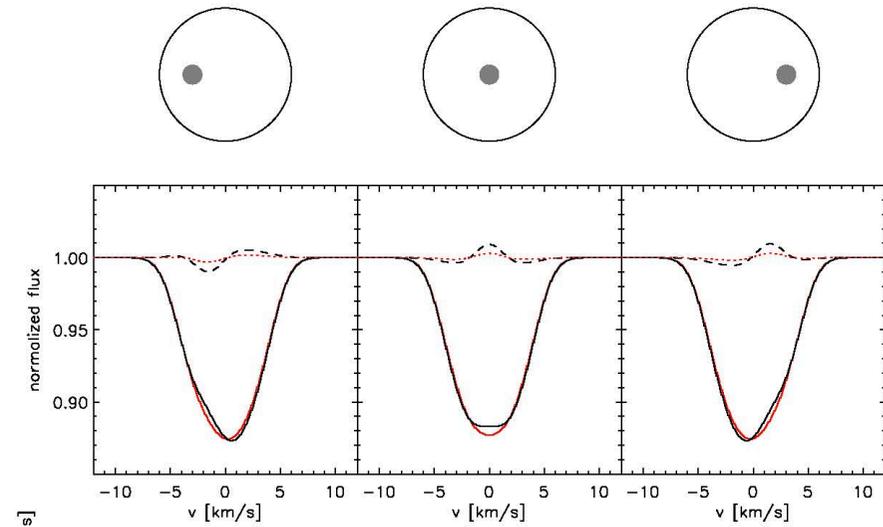
時間尺度に応じた時間間隔でデータを
取得・平均化することで<1m/sに低減可能
(Dumusque et al. 2011)

恒星の表面現象: spots



NAOJ

黒点の移動と吸収線のゆがみ



Reiners+ 2009

見かけの視線速度変動は黒点の
大きさ(カバー率)、自転速度に依る

太陽の場合、活動度最大のときで
 $\sigma_{RV} \sim 50 \text{ cm/s}$ (Dumusque et al. 2011)

長期変動

□ Granule

熱い上昇流は冷たい
下降流に比べて大きな
面積を占める

→ blue shift

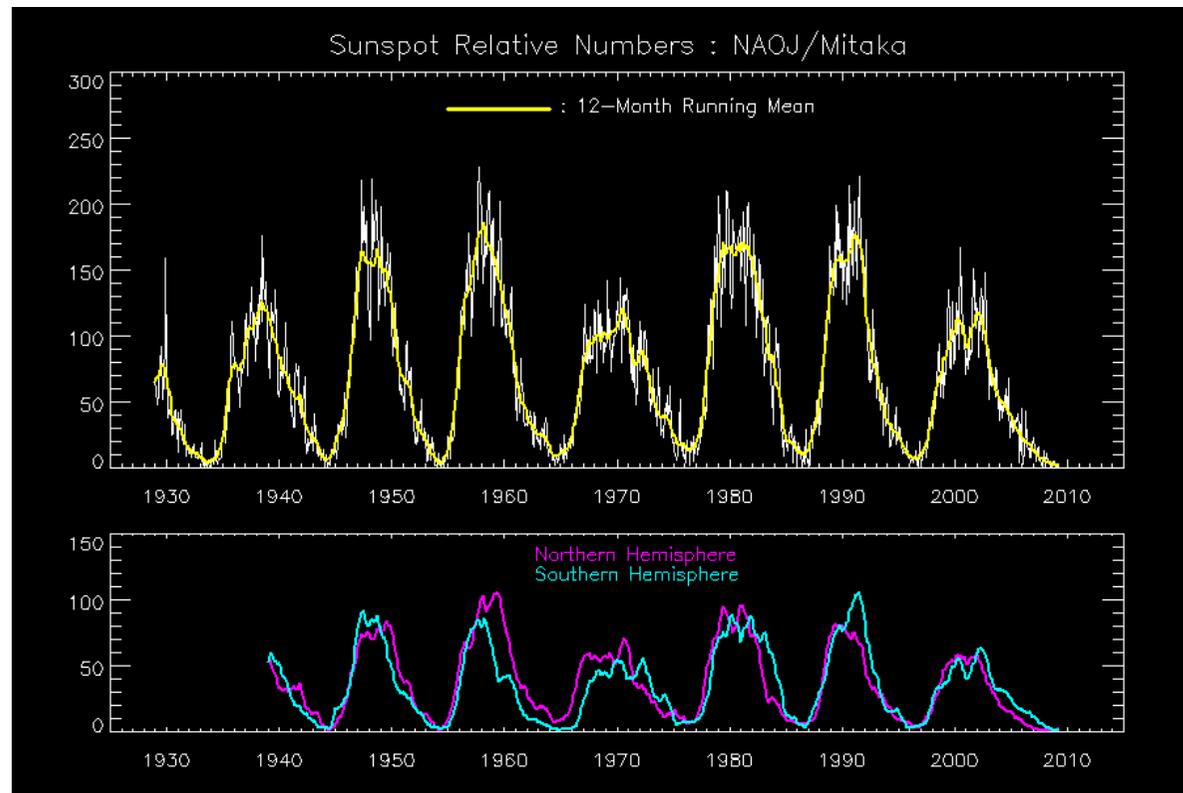
黒点のあるところでは
対流が抑制

→ 相対的に red shift

(e.g., Meunier+ 2010)

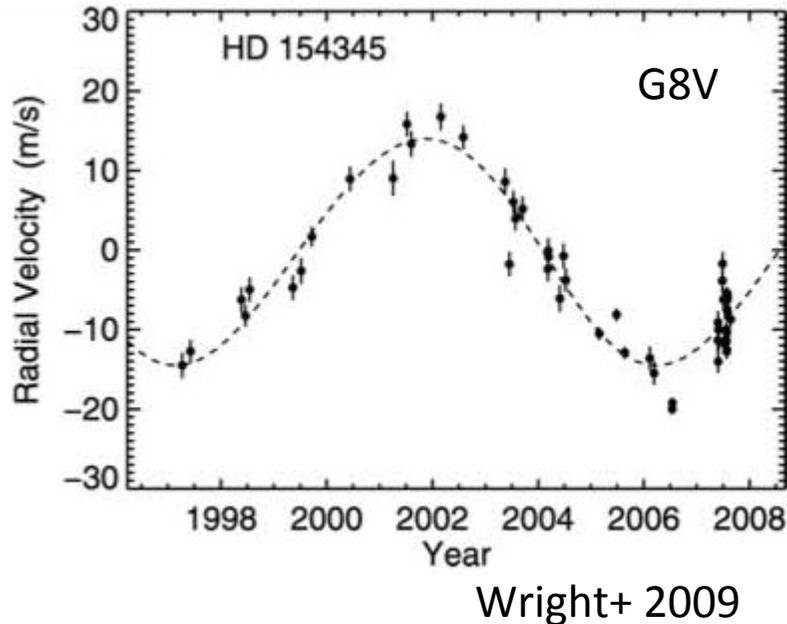
活動性(黒点数)と
視線速度は正の相関

太陽の黒点数の変化(11年周期)



NAOJ

活動性の長期変動による視線速度変化



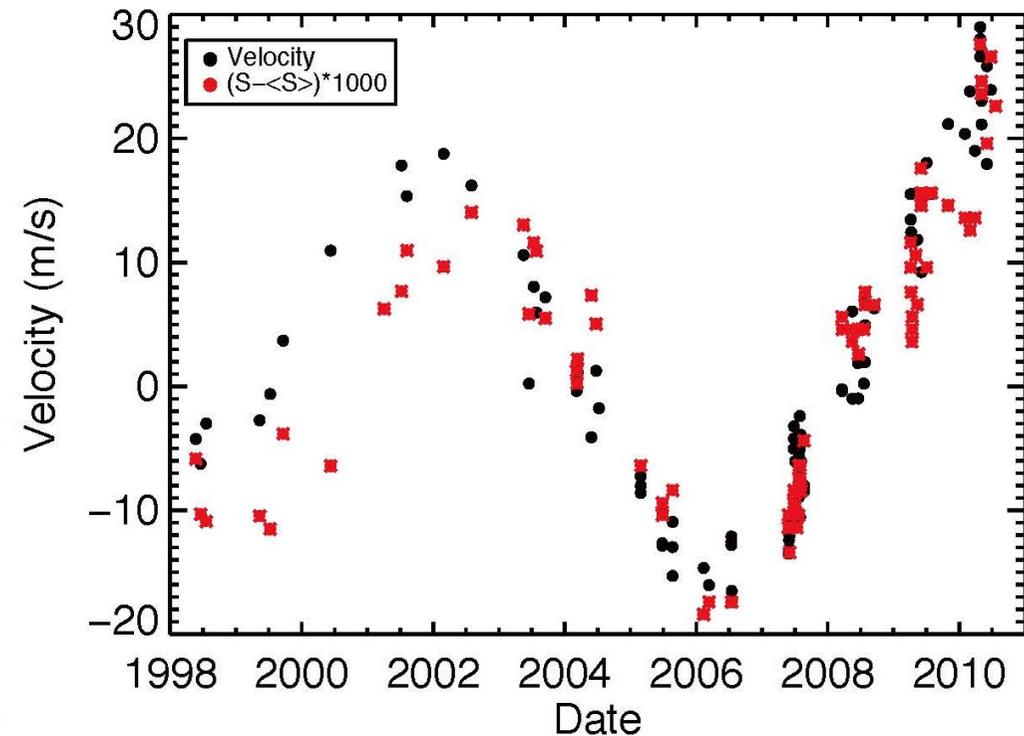
$M \sin i = 0.95 M_{\text{JUP}}$

$a = 4.2 \text{ AU}$

$P = 9.2 \text{ yr}$

黒: 視線速度

赤: 彩層輝線 (Ca I HK) 強度



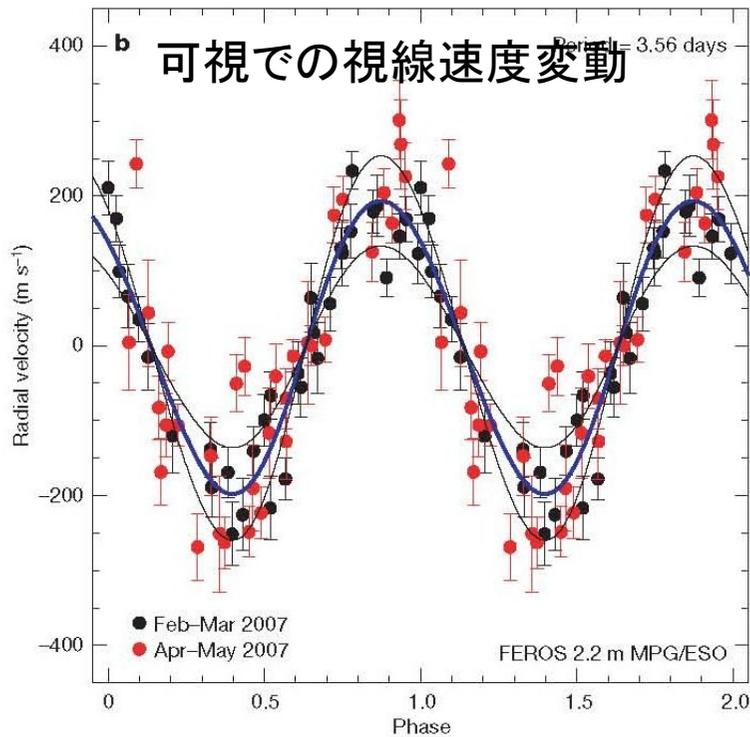
惑星ではなく恒星活動の
変化による見かけ上の
視線速度変化か？

若い惑星

■ TW Hya ($0.7M_{\odot}$)

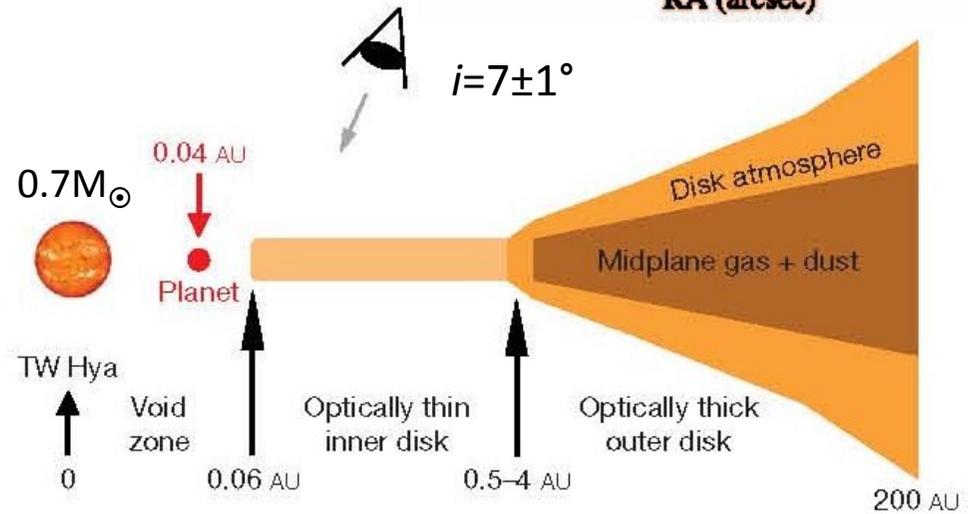
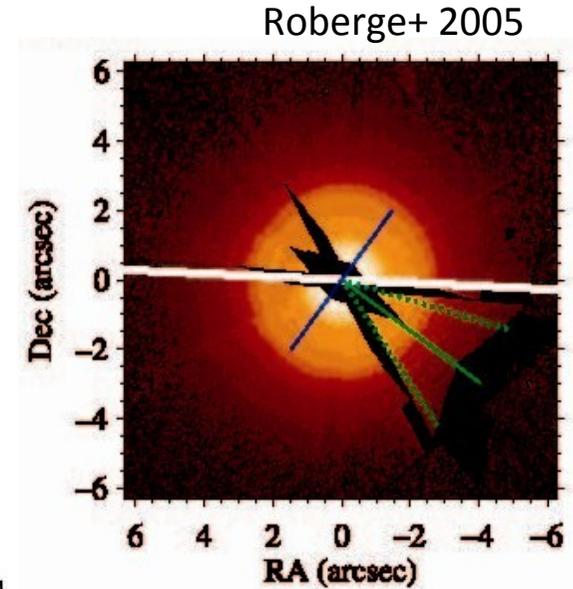
年齢 $\sim 8-10$ Myr

$$M_{\text{planet}} = 9.8 \pm 3.3 M_{\text{JUP}}$$



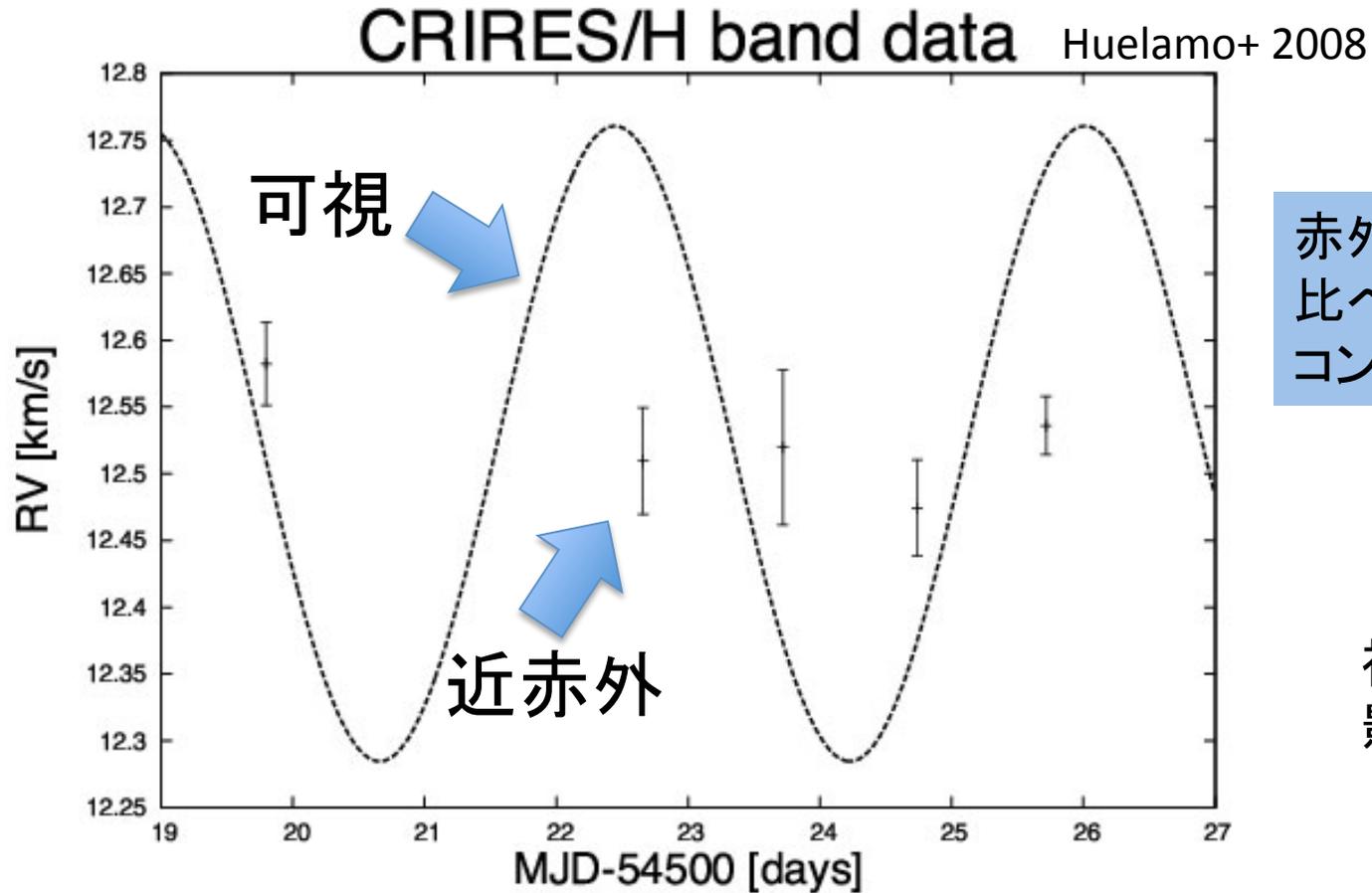
TW Hyaの星周
円盤 (by HST)

ほぼ face-on



Setiawan+ 2008

...ではなかった



赤外では可視に
比べて黒点と光球の
コントラストが小さい

視線速度への
影響が小さい

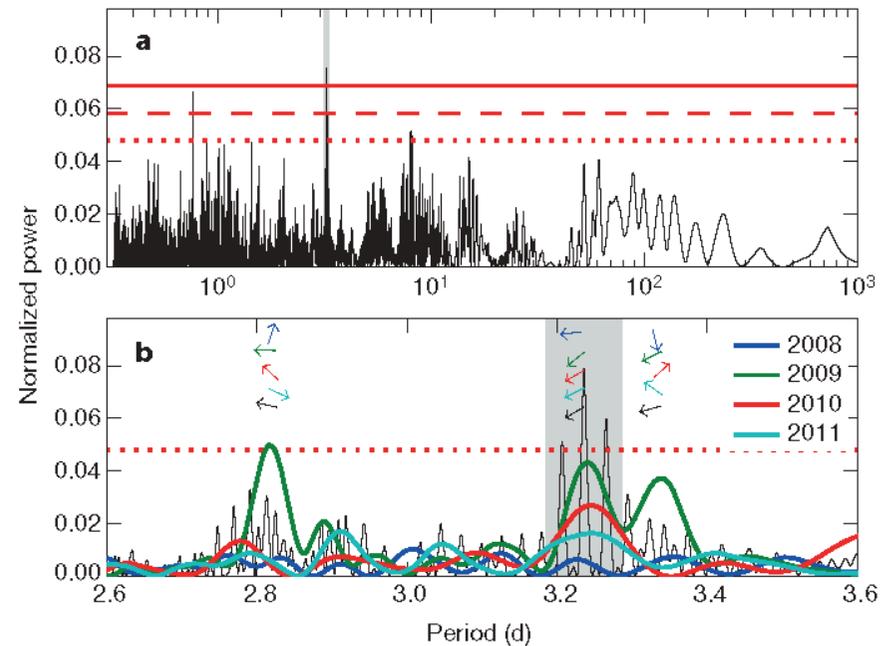
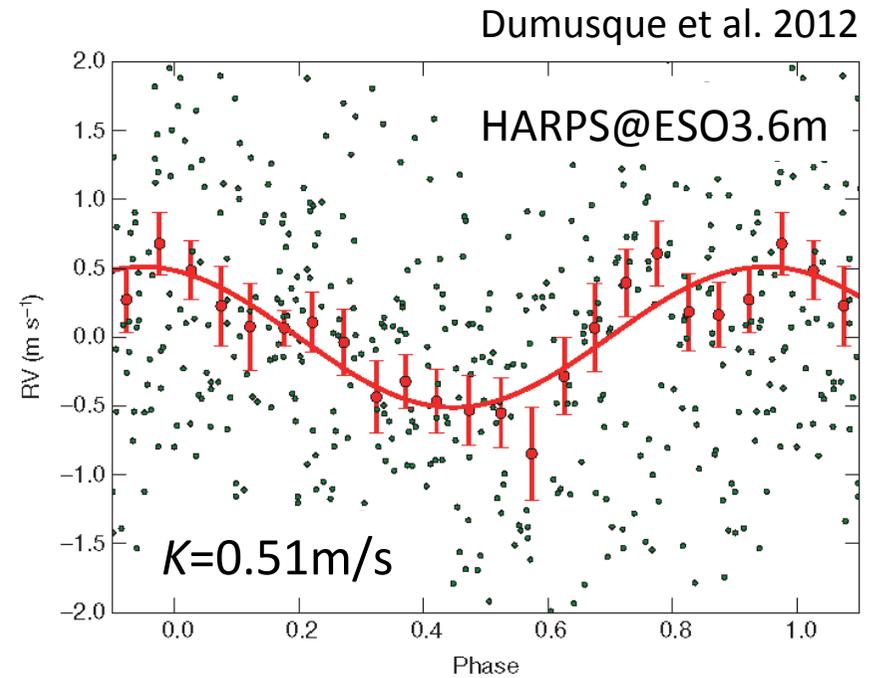
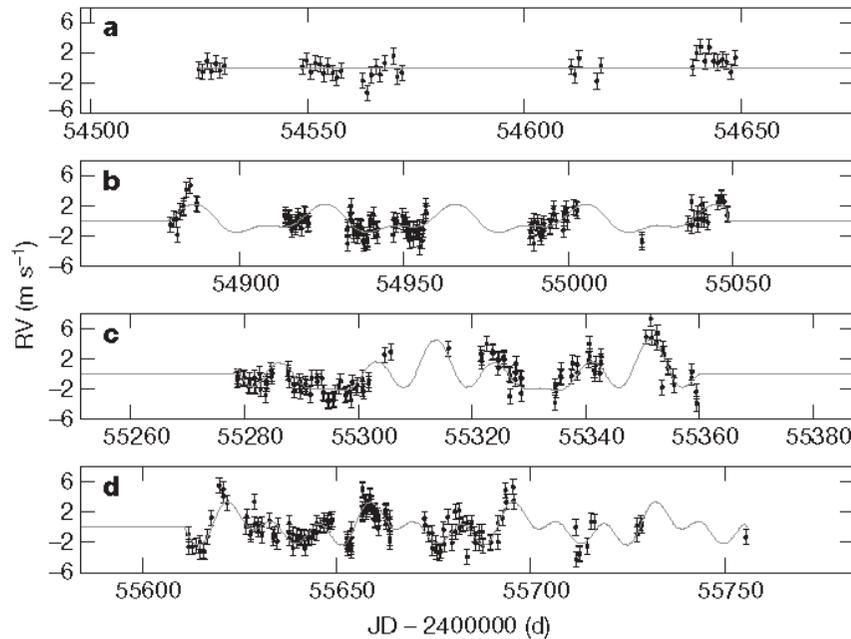
地球型惑星

■ α Cen B

✓ 中心星 K1V, $0.9M_{\odot}$

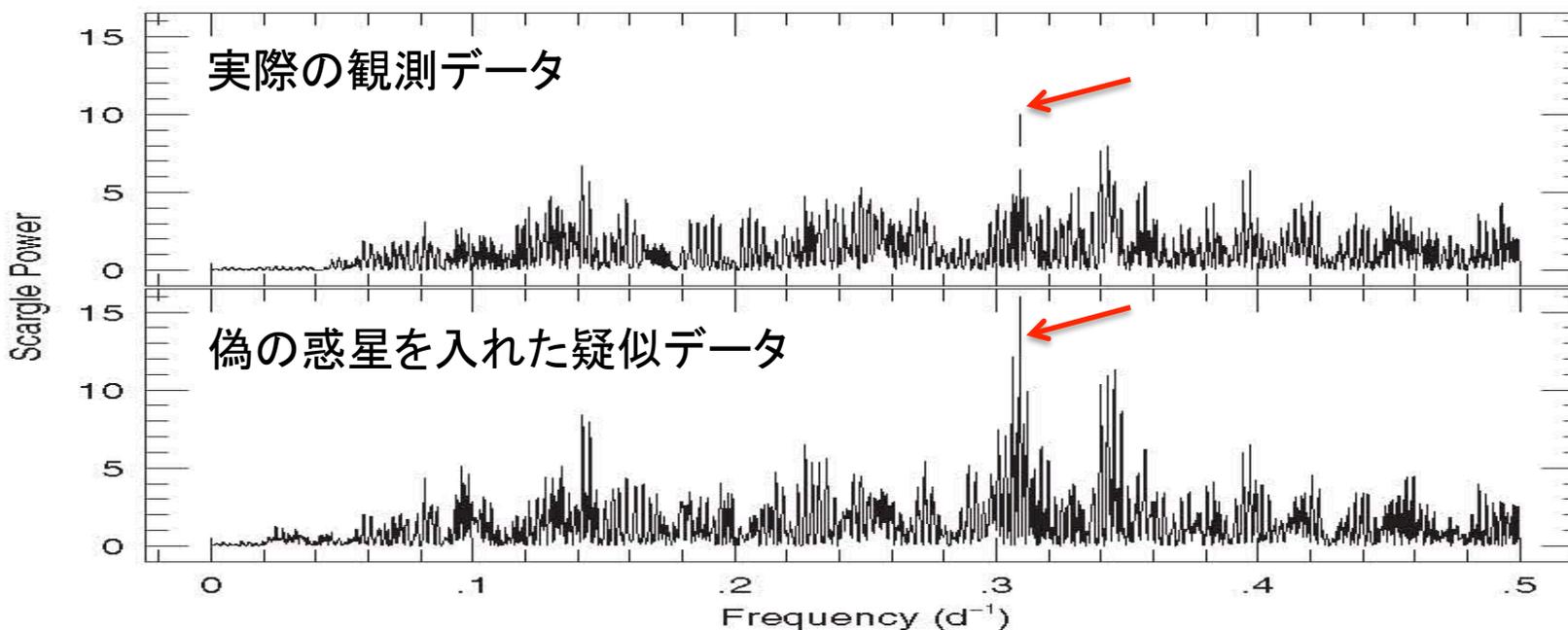
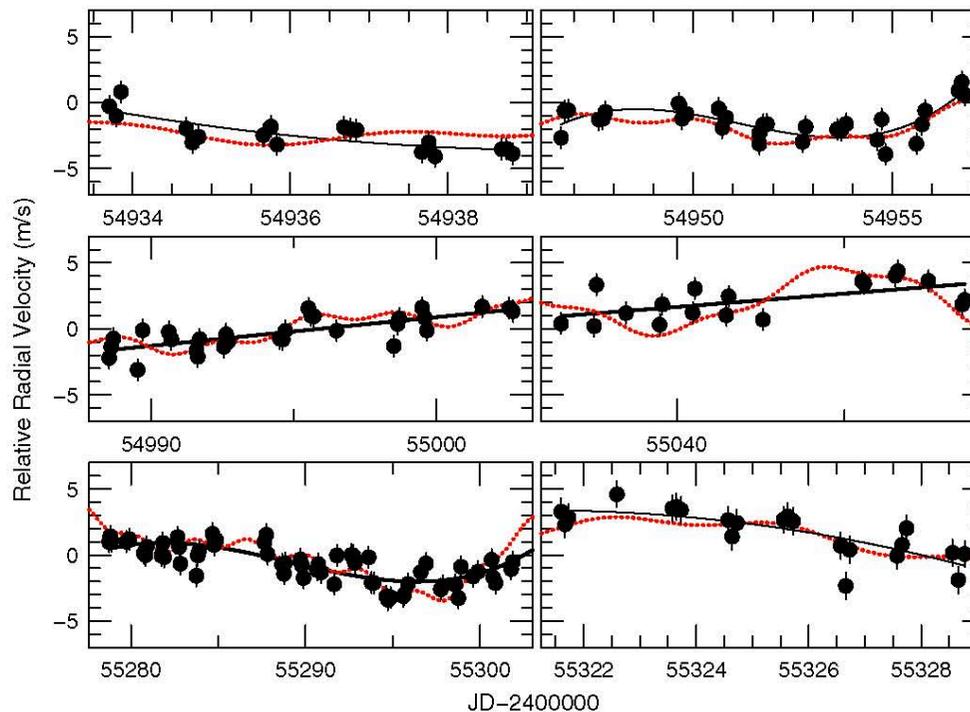
✓ 惑星 $P=3.2\text{d}$, $M\sin i=1.13M_{\oplus}$

□ Rotational activity ($P\sim 38\text{d}$)

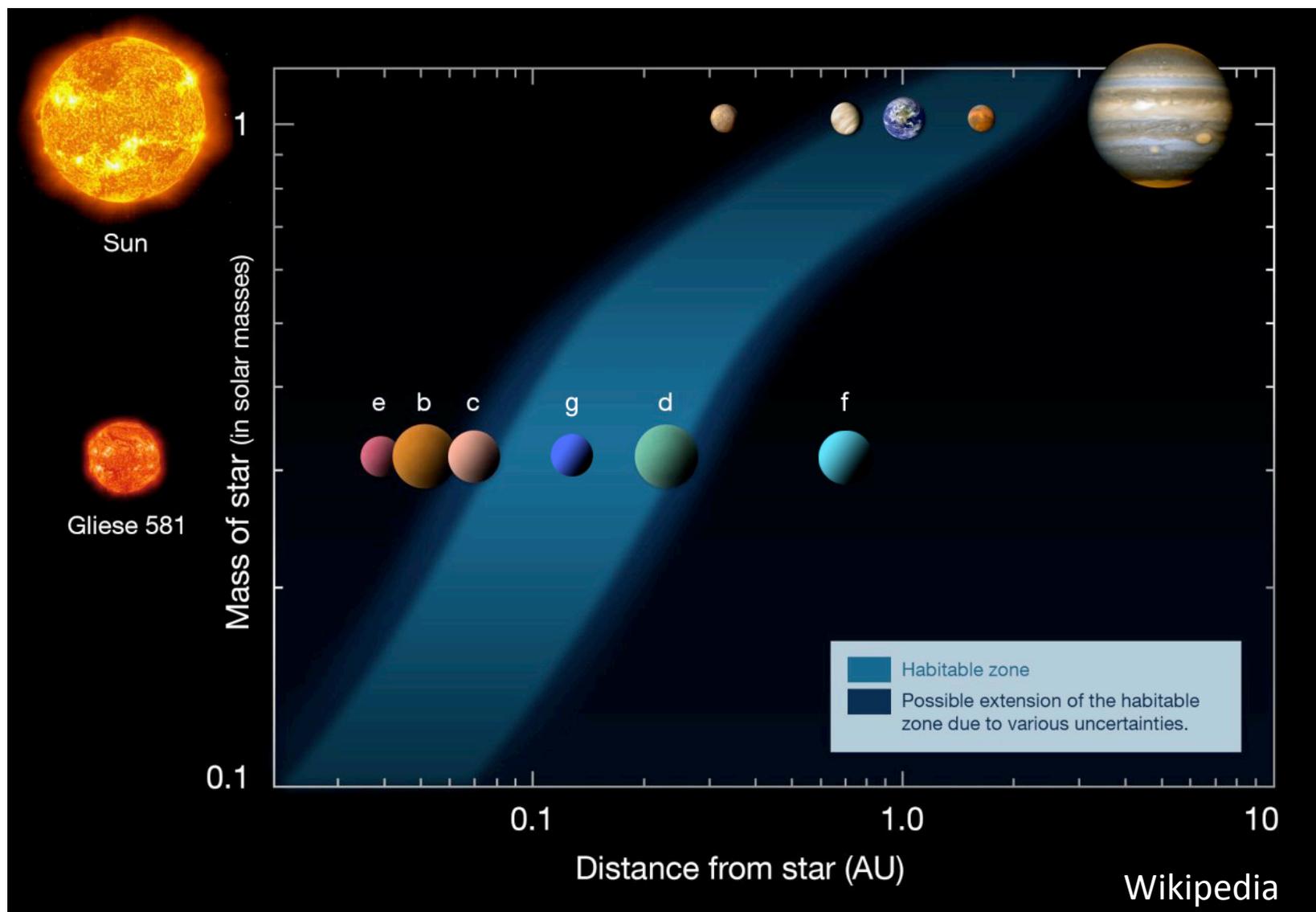


... ではない？

ローカルのトレンドの
除き方を変えると、
惑星の信号(3.2日周期)
が弱くなる(Hatzes 2013)
→惑星と結論づけるには
時期尚早



ハビタブルゾーン惑星：GJ581



生命が存在できる初の惑星発見？

ナショナルジオグラフィック 公式日本語サイト 10月1日(金)16時30分配信

[写真を縮小](#)



今回発見された惑星グリーゼ581gの想像図。地球のように青や緑に彩られている。

(Illustration courtesy Lynette Cook)

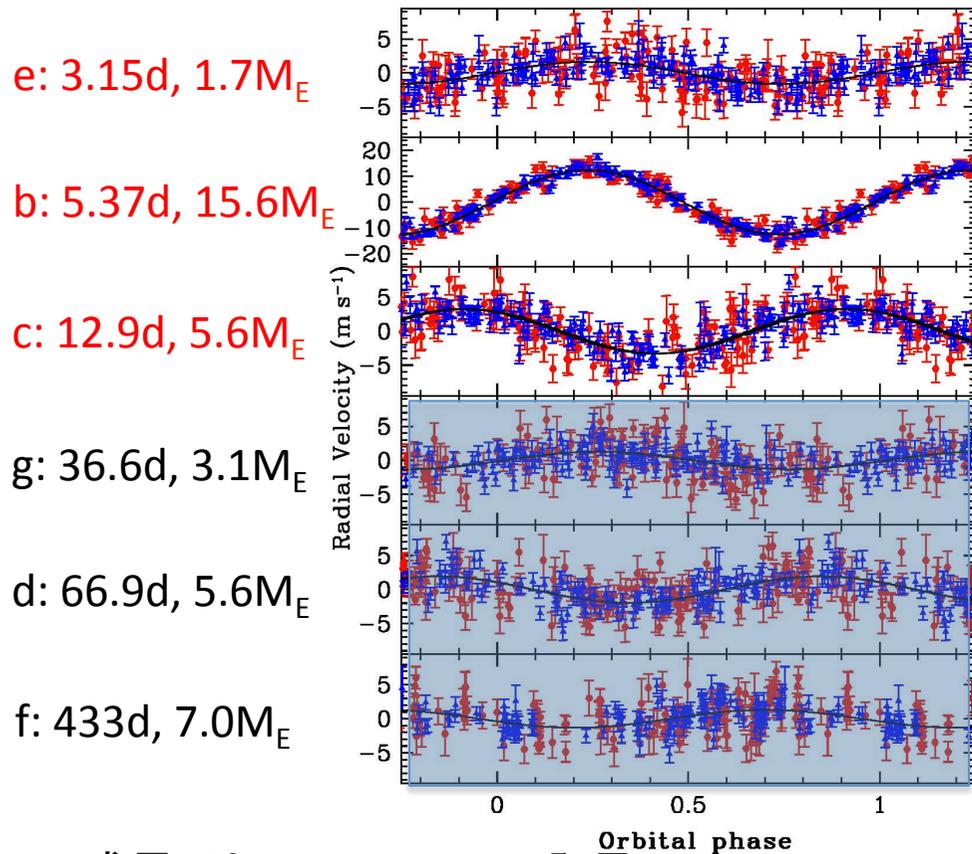
近隣恒星を調査中の天文学者チームが、生命が存在できる可能性のある太陽系外惑星を初めて発見したと発表した。この惑星は岩が多く、大気と温暖な領域、さらに生命が存在するためには欠かせない液体の水が存在する可能性がある。

地球型惑星とされる太陽系外惑星は既にいくつか見つかっている。しかし、ワシントンD.C.にあるカーネギー研究所の天文学者ポール・パトラ氏が2010年9月29日にWeb上で開催されたメディア向け説明会で語っ

たところによると、新惑星は暑すぎも寒すぎもしない「ゴルディロックス・ゾーンと呼ばれる領域を持つ初めての惑星だ。質量も(主星からの)距離も、表面に水が存在するために最適」だという。赤色矮星グリーゼ581(Gliese 581)を約37日の周期で公転しており、グリーゼ581gと命名された。

... ではない？

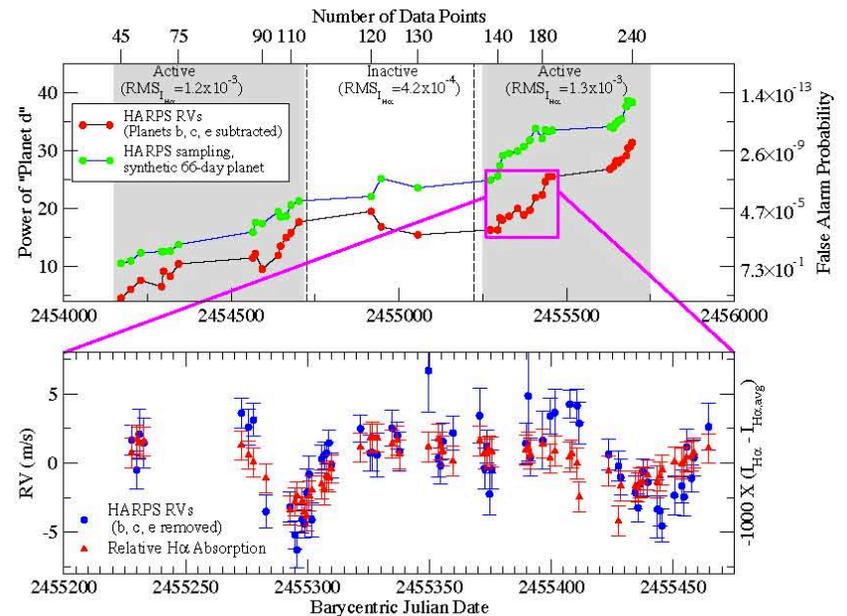
Vogt et al. 2010 Keck+HARPS



※惑星dはMayor+2009で発見

Fig. 5.— Phased reflex barycentric velocities of the host star due individually to the planets at 3.15 days, 5.37 days, 12.9 days, 37 days, 67 days, and 433 days from the all-circular fit of Table 2. Filled (red) hexagon points are from Keck while filled (blue) triangles are from HARPS.

Robertson et al. 2014



惑星b,c,eを除いた後の視線速度変動が、H α 線強度の変動と強い相関がある

→ 恒星の活動性起源の可能性

→ これを補正すると惑星g,d,fの信号は消える

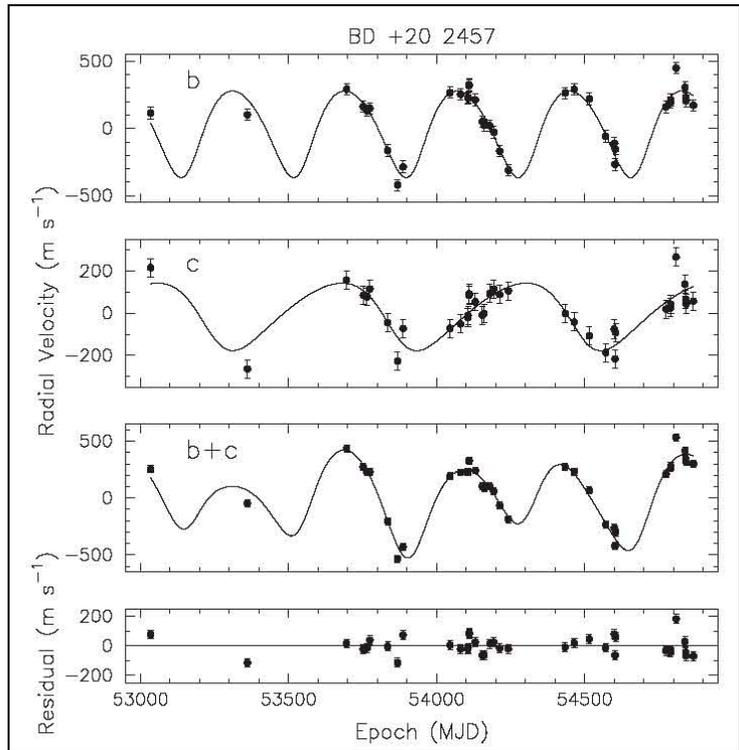
不安定な系は観測されない

惑星系の安定性

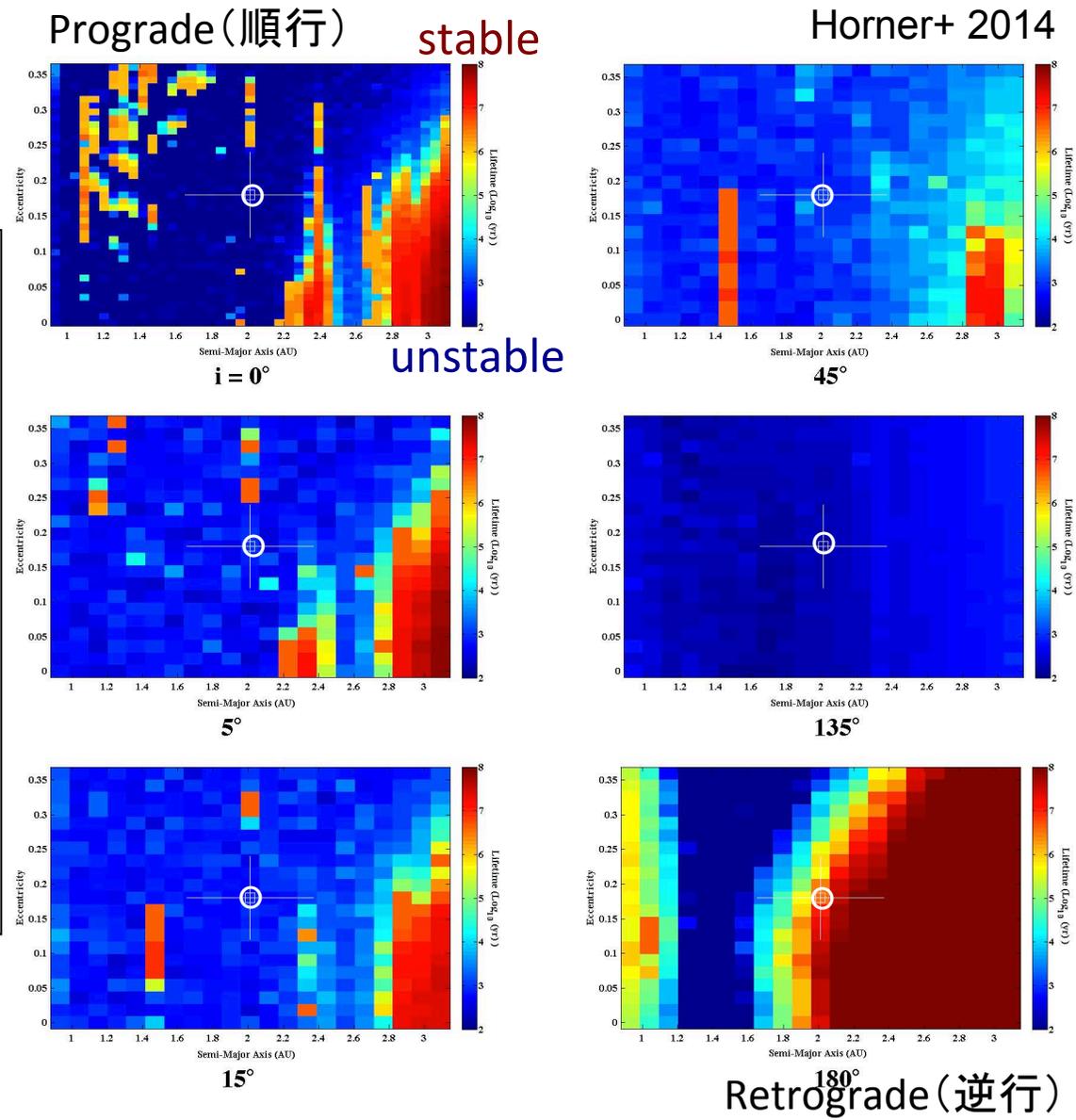
BD+20 2457

(K2III, $M_* = 2.8M_{\odot}$)

Best-fit orbits of 2-Keplerian model (b:1.45AU, $21M_{JUP}$, c:2.01AU, $12M_{JUP}$; Niedzielski+ 2009) are unstable (Horner+ 2014) unless they are **retrograde**



Niedzielski+ 2009



180° Retrograde (逆行)

まとめ

- 恒星の視線速度変化を測る
 - 測定精度は基本的には光子量とスペクトルの形で決まる。しかし一般に器機的な系統誤差はそれより大きく、これを如何に抑えるかが鍵。
- 見かけの視線速度変化
 - 恒星の表面活動は惑星検出を阻害、あるいは惑星を誤検出させる。様々なタイムスケールの変動が存在。
- 惑星系の安定性
 - 複数惑星系では、観測データに最もよく合う軌道でも惑星間の重力を考慮すると不安定な場合がある。
- 複数の検出法の併用も惑星検出には効果的