



系外惑星の検出のための 分光連星系の高精度軌道決定

加藤 則行（神戸大学 D3）

伊藤 洋一（兵庫県立大学）

豊田 英里（神戸市立青少年科学館）

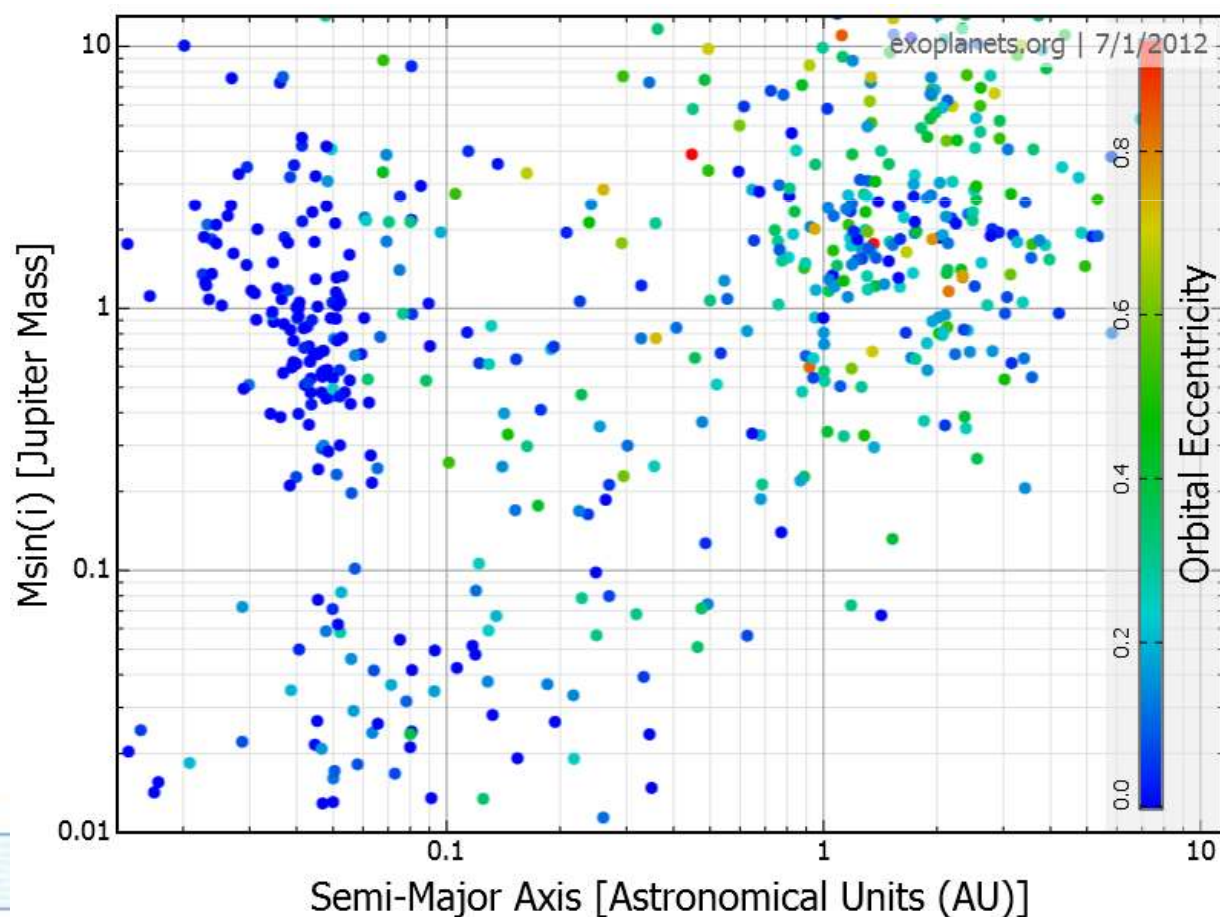
佐藤 文衛（東京工業大学）

2012/08/08 岡山ユースミーツミーティング



系外惑星の多様性

- 太陽系外惑星：太陽以外の恒星に付随する13木星質量以下の天体
太陽系には見られない多様な公転軌道を持つ
例：ホットジュピター，エキセントリックプラネット
⇒ 太陽系形成の標準理論で説明できない





惑星形成の理論モデル

- 太陽系形成の標準理論 (Hayashi 1981)
 - ~0.01太陽質量の軽い円盤
 - 微惑星→原始惑星→岩石 or ガス惑星
 - 系外惑星の多様性

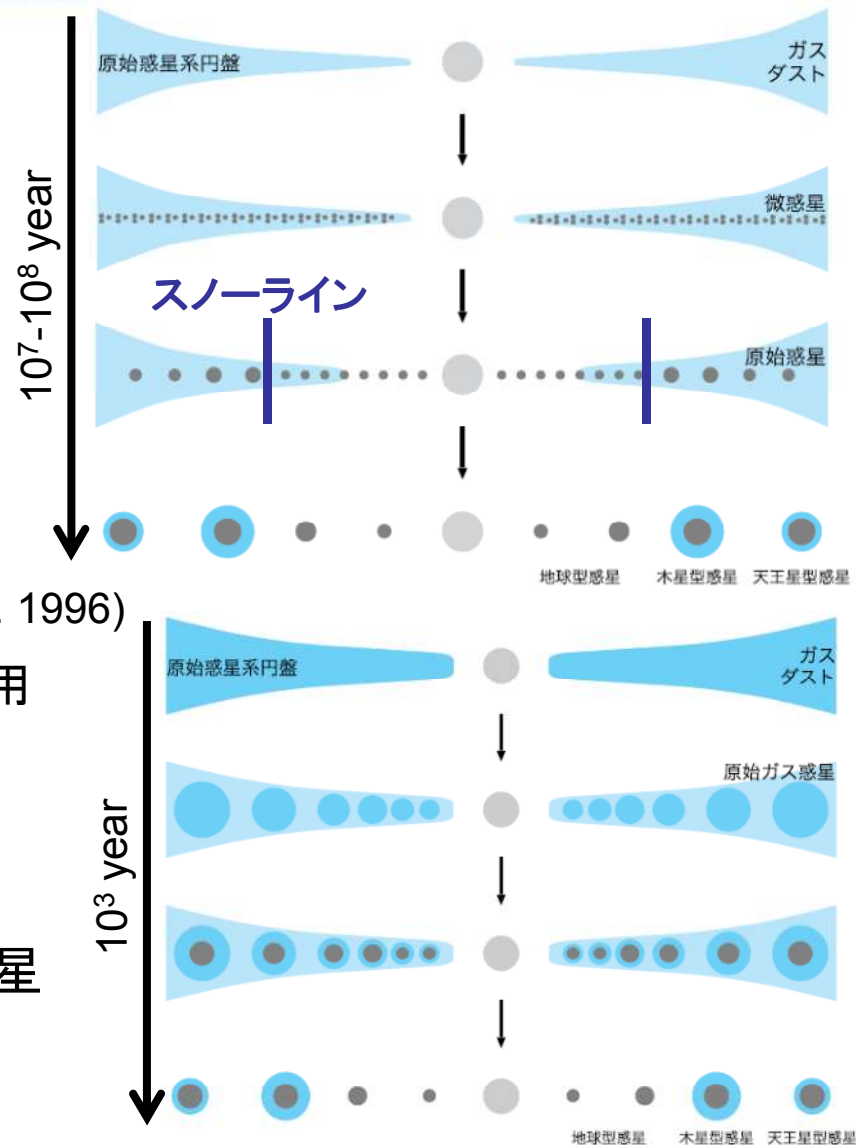
Type II migration (Lin et al. 1996)

円盤の降着による巨大ガス惑星移動

ジャンピング・ジュピター (Chambers et al. 1996)

複数個の巨大ガス惑星の重力相互作用

- 重力不安定モデル (Cameron 1978)
 - ~1太陽質量の重い円盤
 - 重力不安定によるガス塊形成→ガス惑星
 - ⇒ ホットジュピターを簡単に作れる
 - 逆に太陽系を作ることができない



2006年5月 天文月報 第99巻 5号 より抜粋



ハイブリットモデル

- コア集積と重力不安定のハイブリット (Inutsuka et al. 2010)

ファーストコアの大部分が原始惑星系円盤へ進化する

①原始星の質量が0.001太陽質量と非常に軽い

⇔ コア集積と重力不安定の両モデルでは~1太陽質量

②円盤の重力不安定により、複数個のガス塊が形成

③ガス塊は周囲のガスを降着し、巨大ガス惑星や伴星へ進化

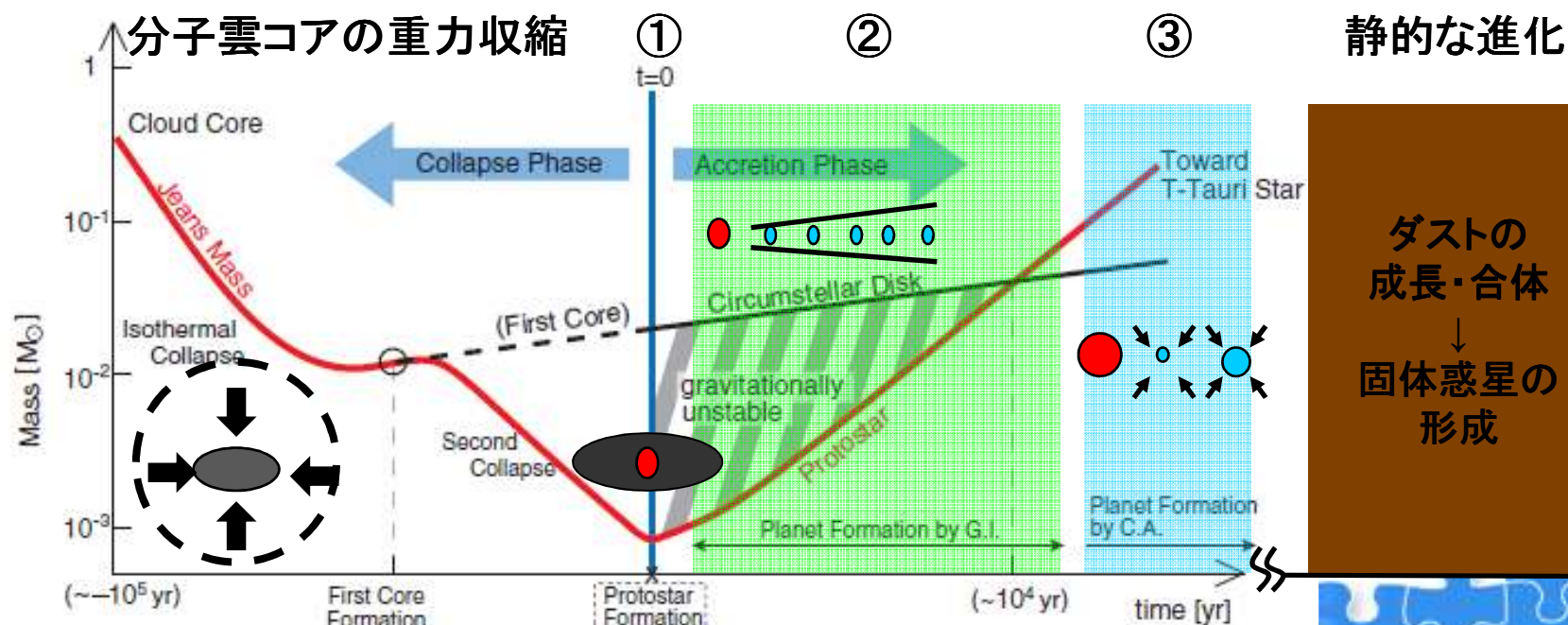


図. 分子雲コアからTタウリ型星までの進化



分光連星系の惑星

- 系外惑星の多様性を説明できるモデルはどれ？

理論的にも観測的にも制限を付けられていない

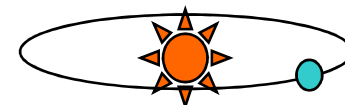


図. 星周惑星

- 分光連星系の星周に付随する巨大ガス惑星に着目

伴星により星周円盤の半径は制限される(Artymowicz & Lubow 1994)

連星間距離12AUの連星系では、コア集積と重力不安定のどちらでも巨大ガス惑星を作ることはいできない(Jang-Condell 2007)

⇔ 連星間距離が20AUならば可能(Jang-Condell et al. 2008)

連星系を対象とした惑星探査(e.g. Eggenberger et al. 2005):

連星間距離 ≥ 20 AUの連星系で約60個の星周惑星が発見された

⇔ 連星間距離 < 20 AUの連星系で、星周惑星は未発見

探査規模によるバイアス(100個程度: 単独星の10000個と比べ少ない)

ハイブリットモデルならば、巨大ガス惑星の形成を説明できる

⇒ ガス塊が伴星と巨大ガス惑星の基になる



目的 & 観測

- 目的

ハイブリットモデルの観測的な検証:

分光連星系の星周で、巨大ガス惑星が見つかるほどより良く実証できる

一般的な惑星の形成と進化は伴星の存在を考慮する必要がある:

おうし座星形成領域 (1Myr) の連星率は $\sim 100\%$ (Leinert et al. 1993)

FGK型主系列星の約50%が連星系をなす (e.g. Raghavan et al. 2010)

視線速度法を用いて分光連星系の星周の巨大ガス惑星を探索する

- 観測

岡山天体物理観測所の188cm望遠鏡と高分散分光器HIDESを用いた。

観測対象: 連星間距離 $\leq 10\text{AU}$ の分光連星系37天体

⇒ FGK型主系列星, $2 < V\text{等級} < 7$

観測波長: $3750 - 7500 \text{ \AA}$ 波長分解能: 60000

積分時間: 120 - 1800秒 S/N: ~ 150

観測期間: 2005年 - 2012年の約8年間

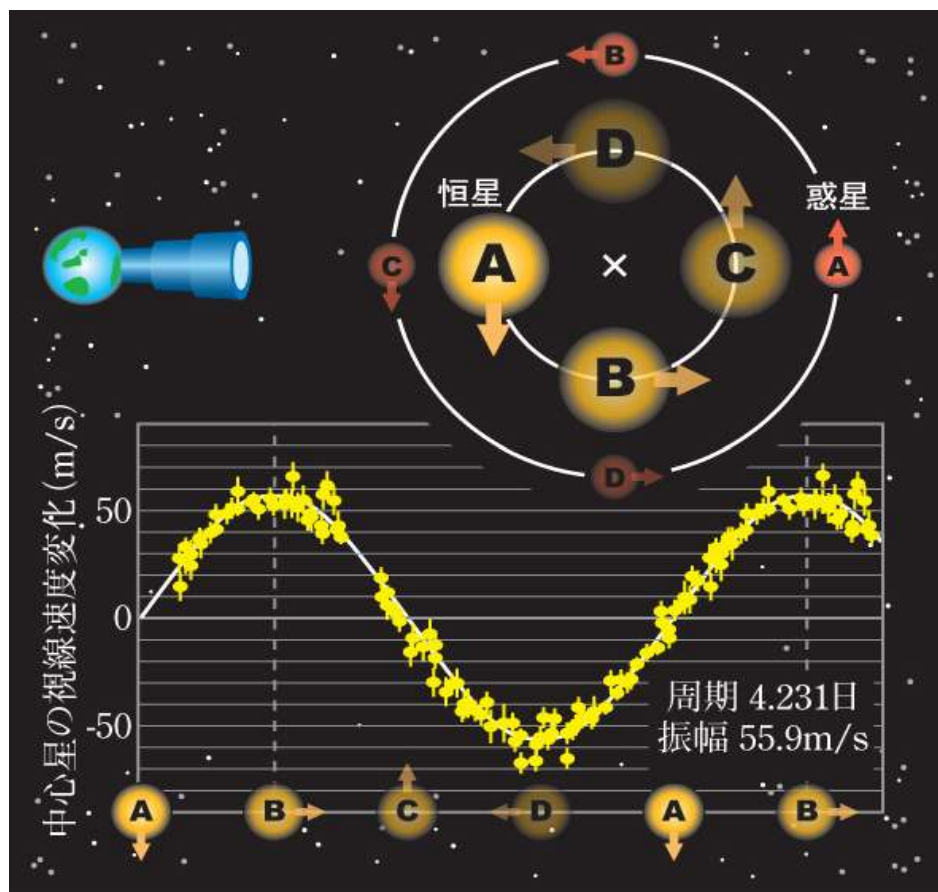


図. 188cm 望遠鏡

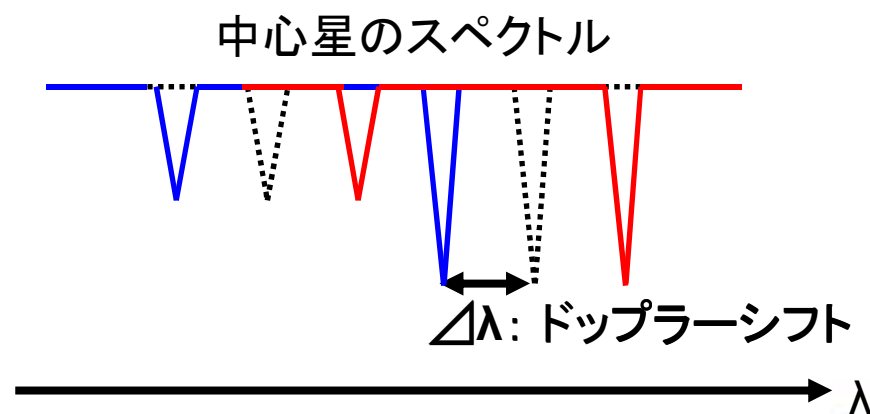


視線速度法

- 中心星のドップラーシフト(視線速度)から惑星を間接的に検出



D: 青方偏移 ——
B: 赤方偏移 ——
A, C: 偏移なし - - - - -



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

v : 視線速度

c : 光速

λ : 波長



解析 1/2

- ヨードセル

ヨウ素ガス入りガラスセル

- 5000-6000 Å に約1万本の吸収線
⇒ ドップラーシフトの基準として利用

- 一次処理

IRAFを用いて、以下の順に処理

- ① オーバースキャンの除去
- ② bias/flat処理
- ③ バックグラウンド除去
- ④ 一次元化
- ⑤ 波長較正
- ⑥ 規格化

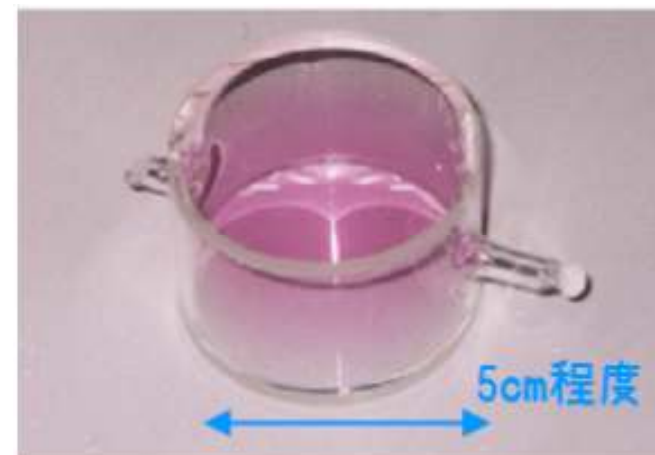


図. HIDESのヨードセル

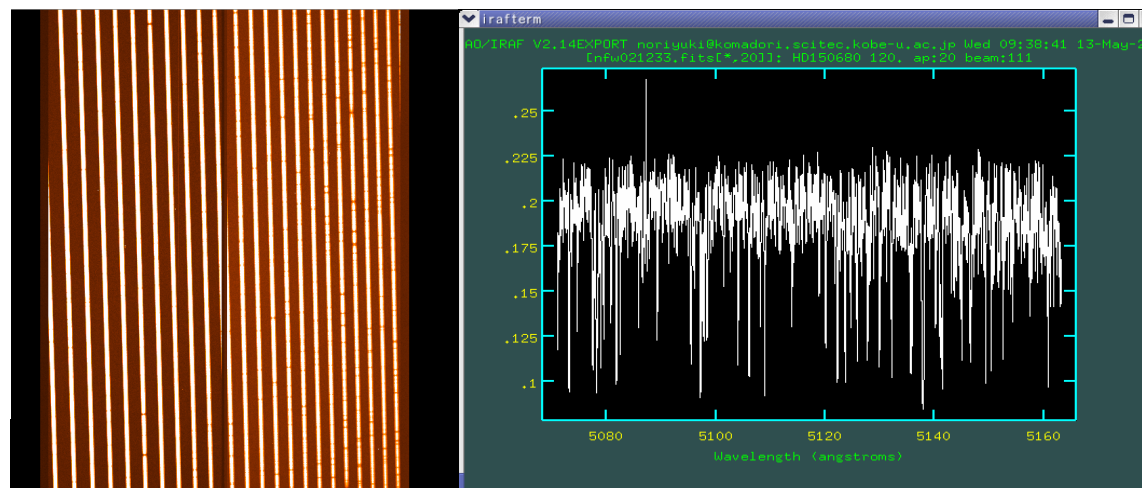


図. 生画像(左)と抽出したスペクトル(右)



解析 2/2

- 視線速度の計算

Sato et al. (2002) の計算コードを改良した計算コードを使用

観測スペクトル

モデルスペクトル

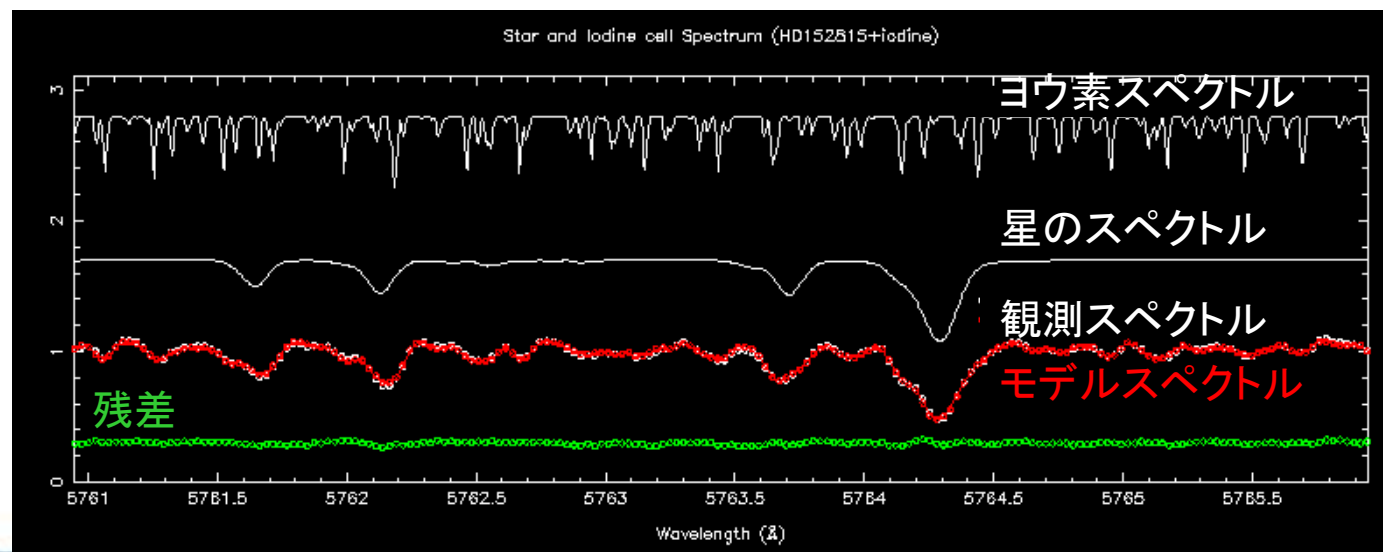
$$I(\lambda) = k[A(\lambda)S(\lambda + \Delta\lambda)] * IP$$

係数

ヨウ素スペクトル

星のテンプレートスペクトル

機器による吸収線のゆがみ具合



左辺と右辺が一致
するようにドップラー
シフト($\Delta\lambda$)を決定



10 m/s @ 8 yr

図. 視線速度の計算



結果

- 2005 - 2011年の観測から連星系に起因しない視線速度を持つ1天体を検出
観測点から連星系の視線速度を除去した視線速度残差は80日周期を持つ
 - ⇒ $\log R'_{\text{HK}} = -5.1$: 恒星の表面活動度は低い(Henry et al. 1996)
光度変化は~10日@Hipparcos の photometry
 - ⇔ 連星系による視線速度は、連星軌道の不定性で変わる
 - ⇒ 視線速度残差が持つ周期も変化してしまう

Secret

連星系に起因しない視線速度

80日の確からしい周期(黒点)

↓ 連星軌道の不定性

400日の確からしい周期(赤点)

どちらが正しい?

他に正しい周期が存在?

周期変動は存在しない?



連星軌道の高精度決定

- 連星軌道の不定性 $\Rightarrow$ 軌道位相の一部で観測点が不足

2012年6月に追観測を実施し、軌道要素を5-10倍高い精度で決定した

近点引数 [deg.]: $\Delta\omega = \pm 0.2$

± 0.1

視線速度変動の振幅 [m/s]: $\Delta K = \pm 60$

± 8

公転周期 [day]: $\Delta P = \pm 0.08$

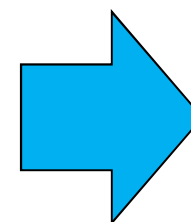
± 0.003

軌道離心率: $\Delta e = \pm 0.001$

± 0.0002

近点通過日: $\Delta T_0 = \pm 0.08$
(Kato et al. in prep.)

± 0.03



Secret

← 追観測で取得した観測

視線速度残差の変動:

24.7日の確からしい周期を持つ

※連星軌道の不定性を考慮しても、
同じ確からしい周期を得られる



まとめ

- 分光連星系を対象とした星周の巨大ガス惑星の探査
 - 一般的な惑星の形成と進化は近くに伴星が存在する環境で進行する
 - ⇒ 星・惑星形成を理解するうえで重要
- 連星軌道の高精度決定
 - 軌道の不定性が大きいと、視線速度残差の周期を一意に決めれない
 - ⇒ 残差の周期が変化してしまう1天体を2012年6月に追観測
 - 従来よりも5-10倍高い精度で軌道を決定
- 視線速度残差が24.7日の確からしい周期を持つ1天体
 - 星周惑星を保持する可能性は高い
 - ⇔ 25日周期はその他の周期(80日や400日)に対して有意なものか？
 - 今後Least-Scatter Method (LSM)* を用いて、周期の有意性を調べる
 - * 観測点をランダムにばらつかせ、標準偏差や χ^2 を最小とする
 - 周期が一意になるか調査する手法(Morbey 1985)