

ドップラーシフト法による分光連星系の 星周に付随する系外惑星の探査

加藤 則行(神戸大学 D2)

伊藤 洋一(神戸大)

豊田 英里(神戸市立青少年科学館)

佐藤 文衛(東工大)

2011/08/03 夏の学校





もくじ

- イントロダクション
- 惑星系の形成
- 目的, 観測の詳細
- 解析
- 結果, 議論
- まとめ

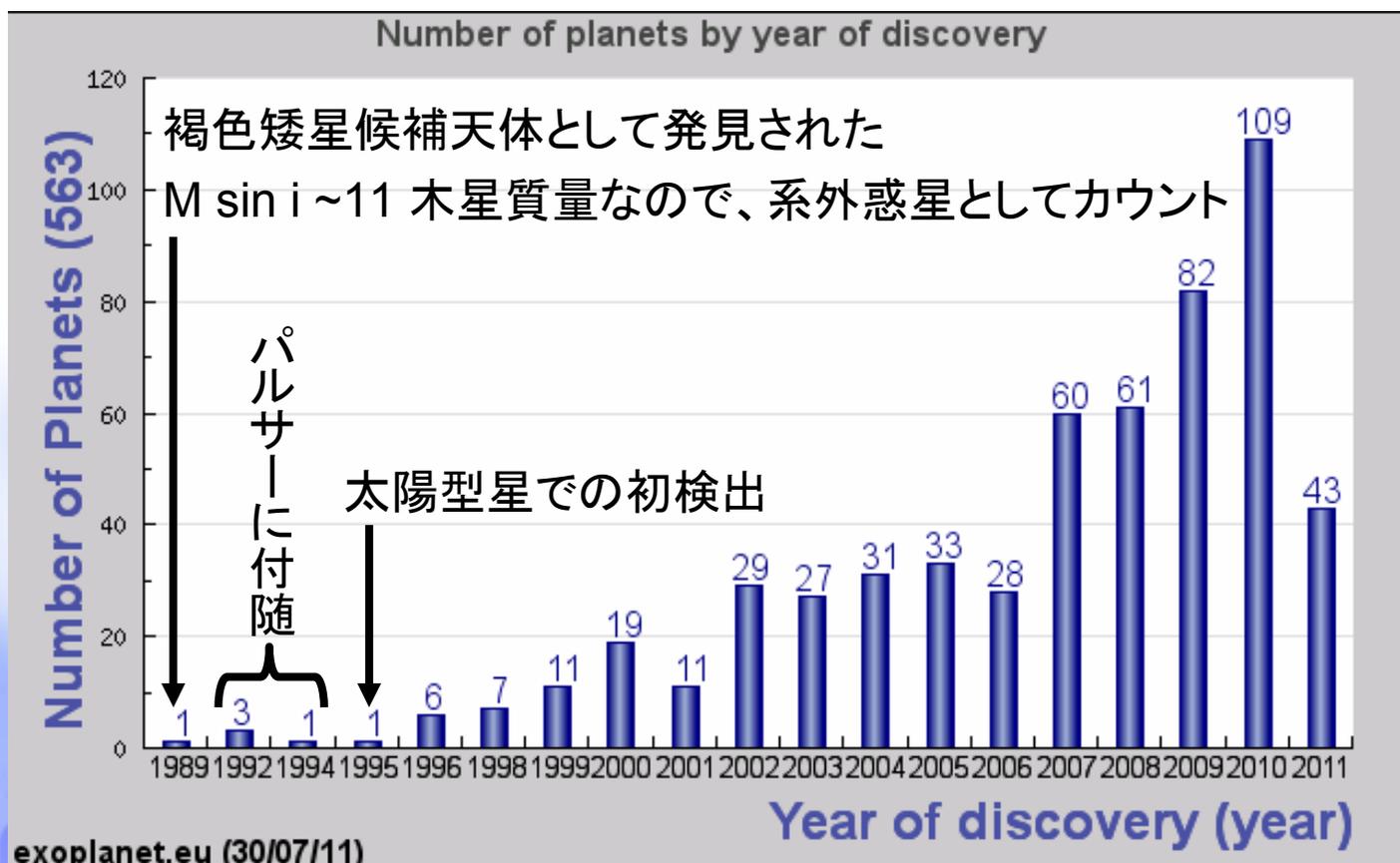


イントロダクション 1/3

- 太陽系外惑星（系外惑星）

太陽以外の恒星を公転する、質量が13木星質量以下の天体

Mayor & Queloz (1995) の発見以来、563個（2011年7月末）が確認された



The Extrasolar Planets Encyclopaedia より抜粋

イントロダクション 2/3

系外惑星の探査手法

1. ドップラーシフト法

惑星の公転による中心星のふらつきから検出

2. トランジット法

惑星の恒星面通過時の減光から検出

3. 直接撮像法

中心星の光を遮蔽し直接検出

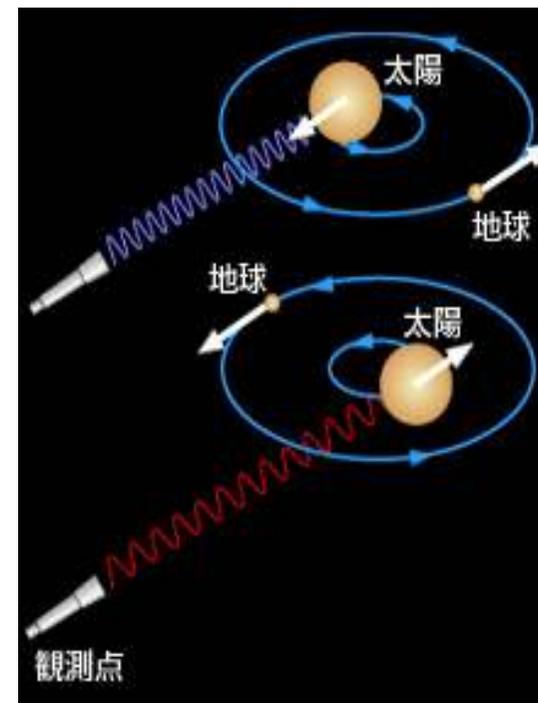


図. ドップラーシフト法

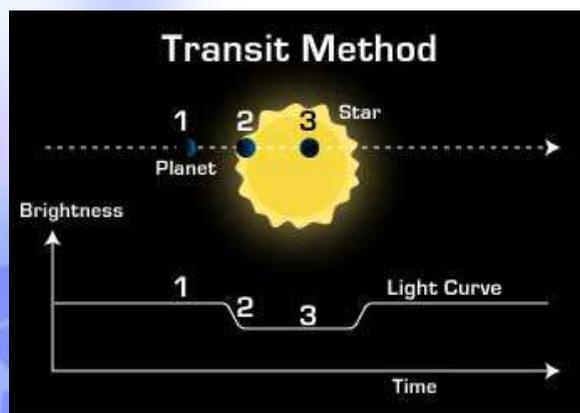


図. トランジット法

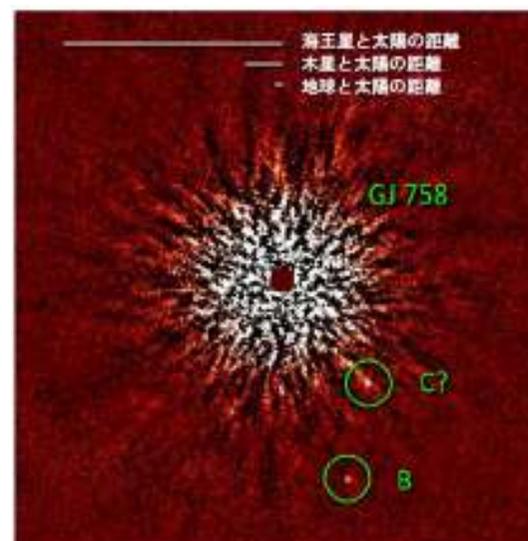


図. すばる望遠鏡による直接撮像

イントロダクション 3/3

- 様々な探査対象

FGK型主系列星で単独な星：~430個

G型巨星：~40個

M型主系列星：~30個

実視連星系の星周：~60個

⇒ 主星：FGK型主系列星

連星間距離 ≥ 20 AU

ほとんどが主星付随

分光連星系(連星間距離 < 20 AU)では未発見

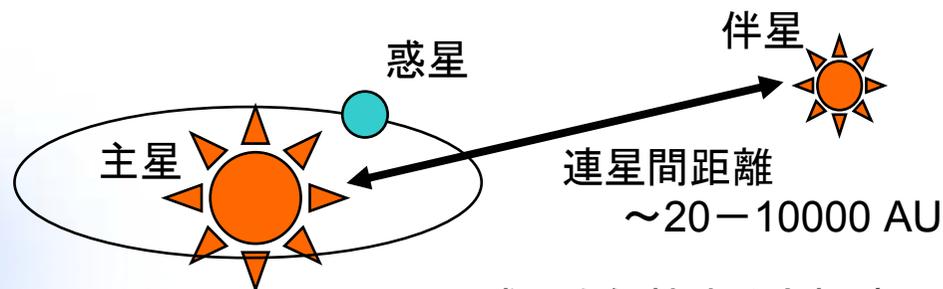


図. 惑星を保持する実視連星系

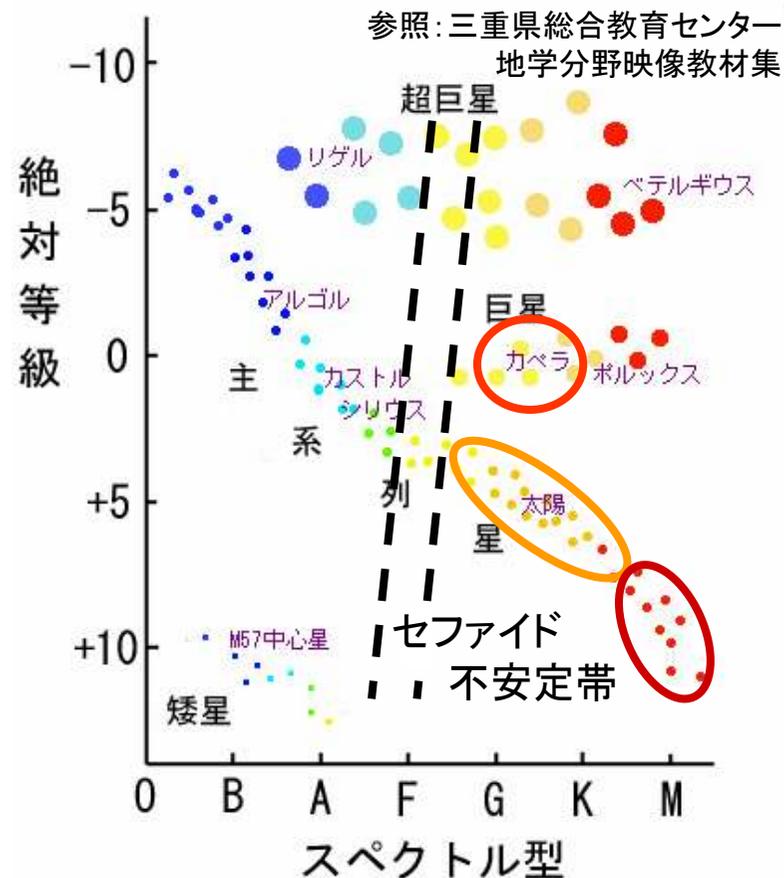


図. HR図上での系外惑星の探査領域



惑星系の形成

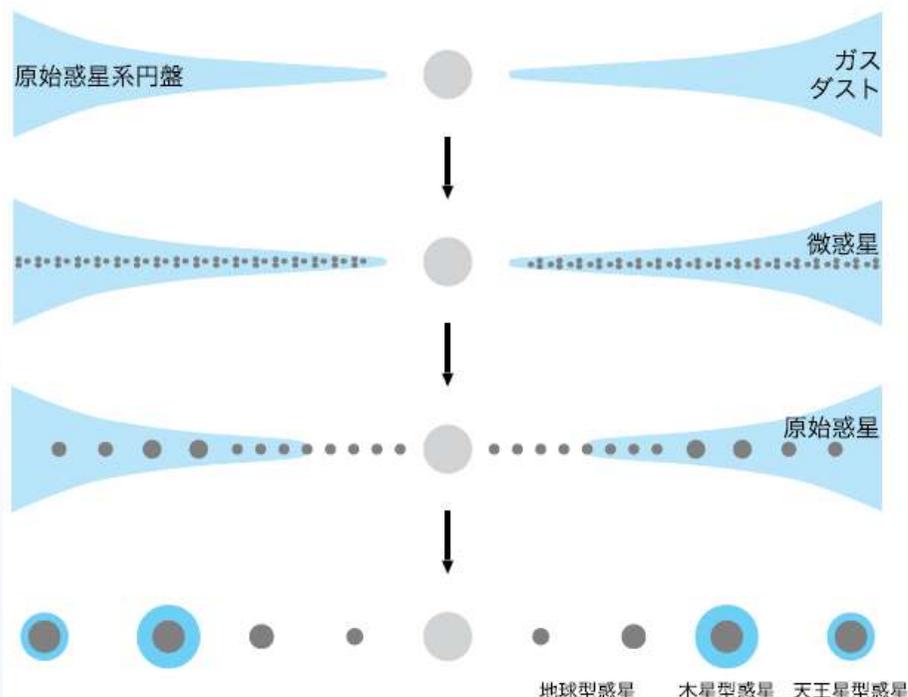
- 京都モデル v.s. Cameronモデル -

• 京都モデル (Hayashi et al. 1985)

円盤質量 ~ 0.01 太陽質量

微惑星・原始惑星の形成

質量が異なる惑星を形成可能

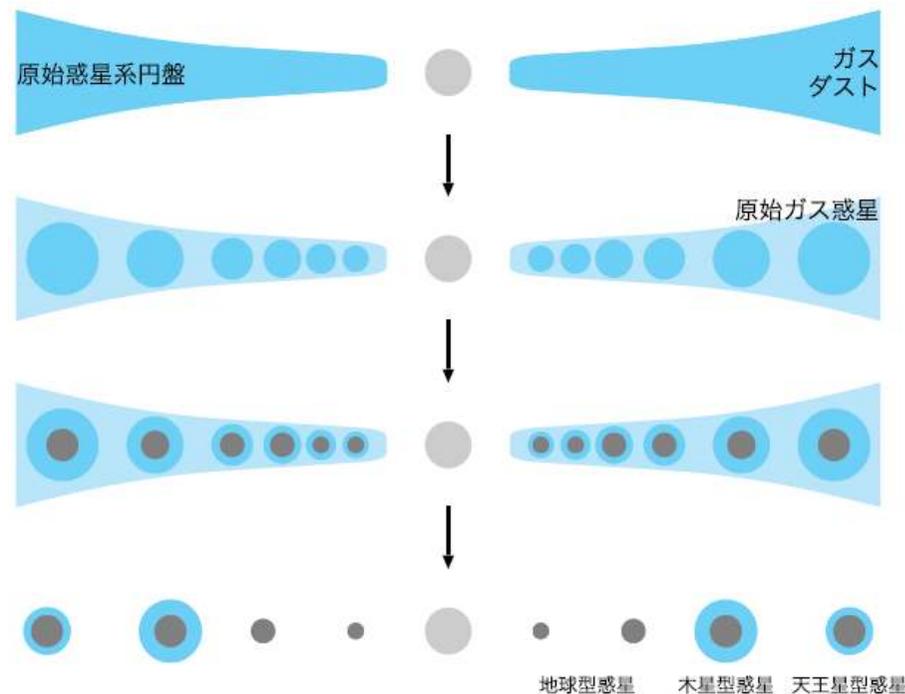


• Cameronモデル (Cameron 1976)

円盤質量 ~ 1 太陽質量

重力不安定によるガス塊の形成

巨大惑星を簡単に作れる



「惑星系の起源—Cameron モデル対京都モデル—」, 小久保英一郎, 2006年5月 天文月報 第99巻 5号 より抜粋

既知の巨大惑星の形成は、どちらでも説明できる



分光連星系における巨大惑星の形成 1/2

- 連星間距離 $\leq 10\text{AU}$ の分光連星系の星周円盤

一方の星による円盤半径の制限 (Artymowicz & Lubow 1994)

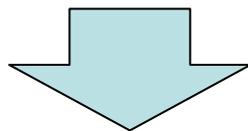
⇒ 質量差10倍, 円軌道: 主星周り 連星間距離の~50%
伴星周り 連星間距離の~20%

スノーラインの位置 (Hayashi 1981, Kokubo & Ida 2002)

$$r_{ice} \sim 2.7 \left(M_{star} / M_{sun} \right)^2 \text{ AU} \quad [0.5 \leq M_{star} / M_{sun} \leq 3]$$

⇒ FGK型主系列星: ~3AU

固体物質が不足: ガス捕獲可能な原始惑星が形成できない



京都モデルでは、巨大惑星の形成を説明できない



分光連星系における巨大惑星の形成 2/2

- Cameronモデルなら説明できそう

一方の星からの摂動により円盤内部に濃い密度ムラができやすくなる (Boss 2006)

⇒ 密度ムラから巨大惑星ができる可能性がある

{ 中心の原始星より10-100倍も重い原始星周円盤が形成し得る
{ この円盤は重力不安定を起こし複数のガス塊を作り得る (Machida et al. 2010)

⇒ ガス塊から伴星と巨大惑星が形成する可能性がある

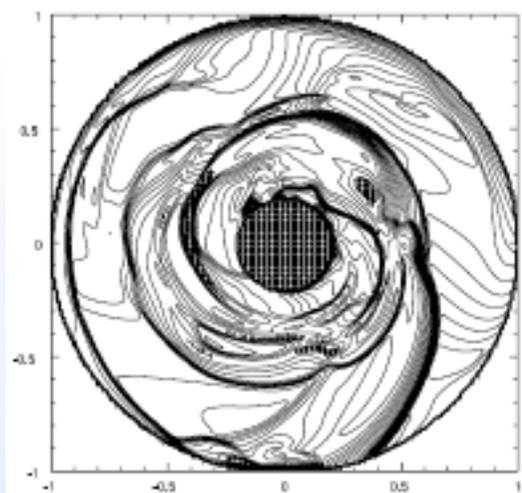


図. 円盤内部の密度ムラ (ref. Boss 2006)

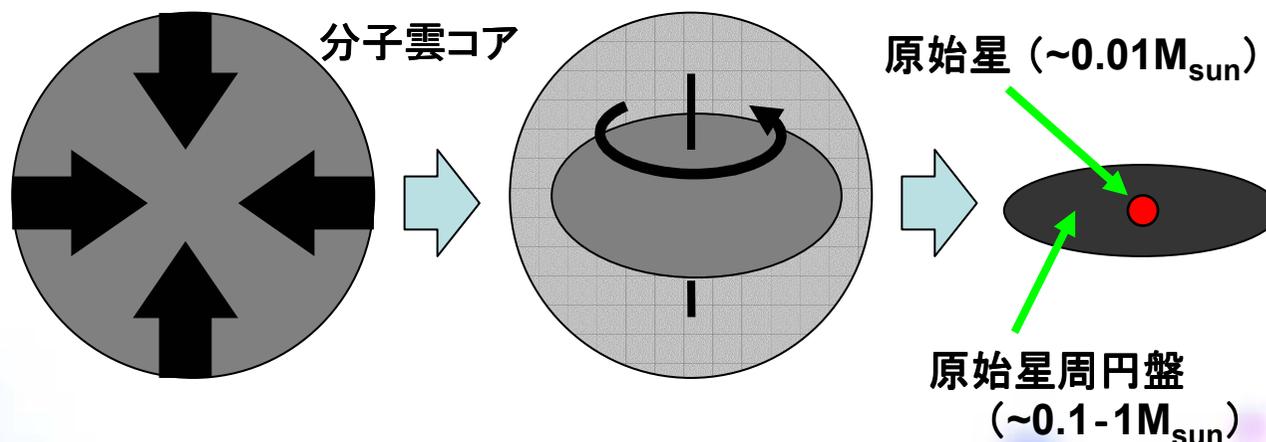


図. 重い星周円盤の進化



目的&探査

- 分光連星系での巨大惑星の探査は現実的か？

理論: Cameronモデルを考えると存在し得そう

観測: FGK型主系列星の半数は伴星を持つ (Duquennoy & Mayor 1991)

若い連星系の星周円盤は十分重い場合もある (Duchene 2010)

⇒ 数多くの惑星が存在すると想像できる

- 分光連星系を対象とした巨大惑星の探査

手法: ヨードセルを用いた高精度ドップラーシフト測定法

⇒ 重力不安定で形成した可能性が高い巨大惑星を収集

対象: SB1分光連星系29天体

主星のスペクトルだけが観測できる

SB2分光連星系8天体

主星と伴星双方のスペクトルが観測できる

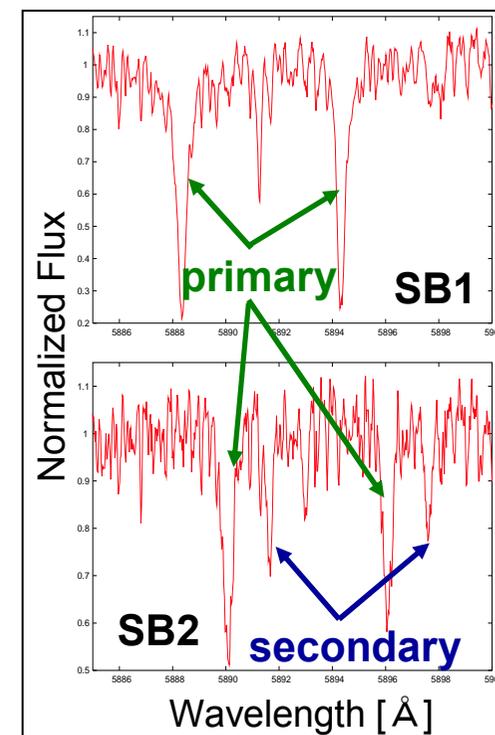
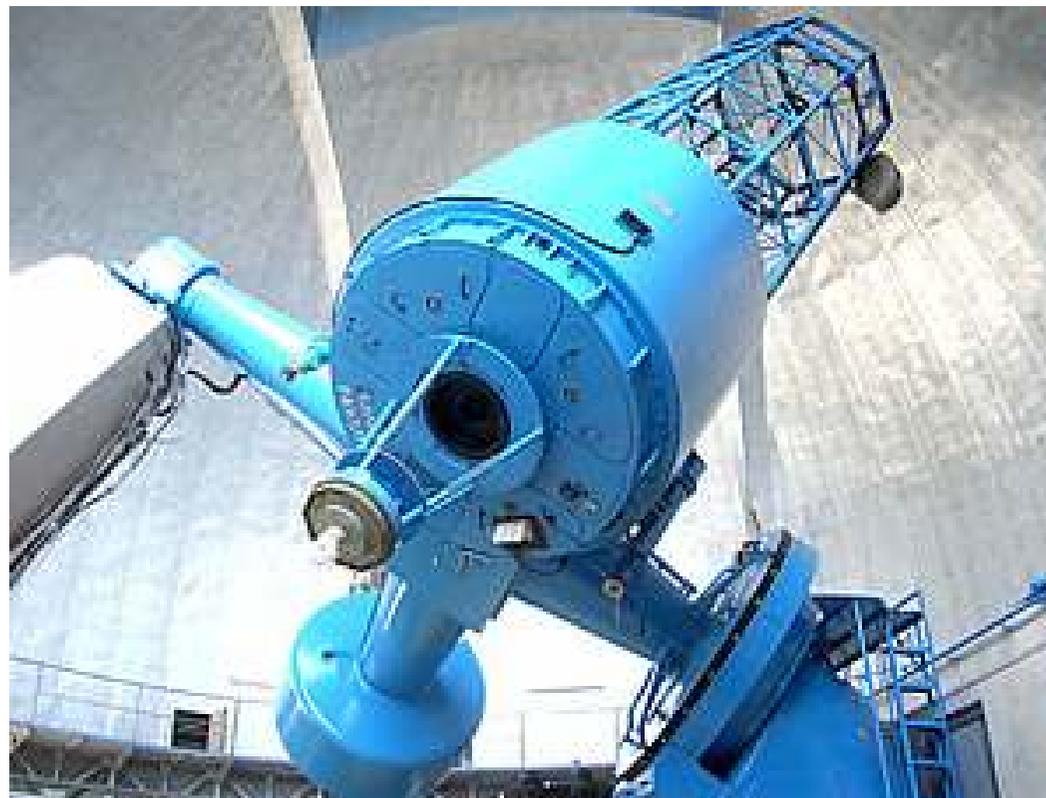


図. SB1 v.s. SB2

観測詳細

高分解能の恒星スペクトルを取得するため、**高分散分光観測**を実施

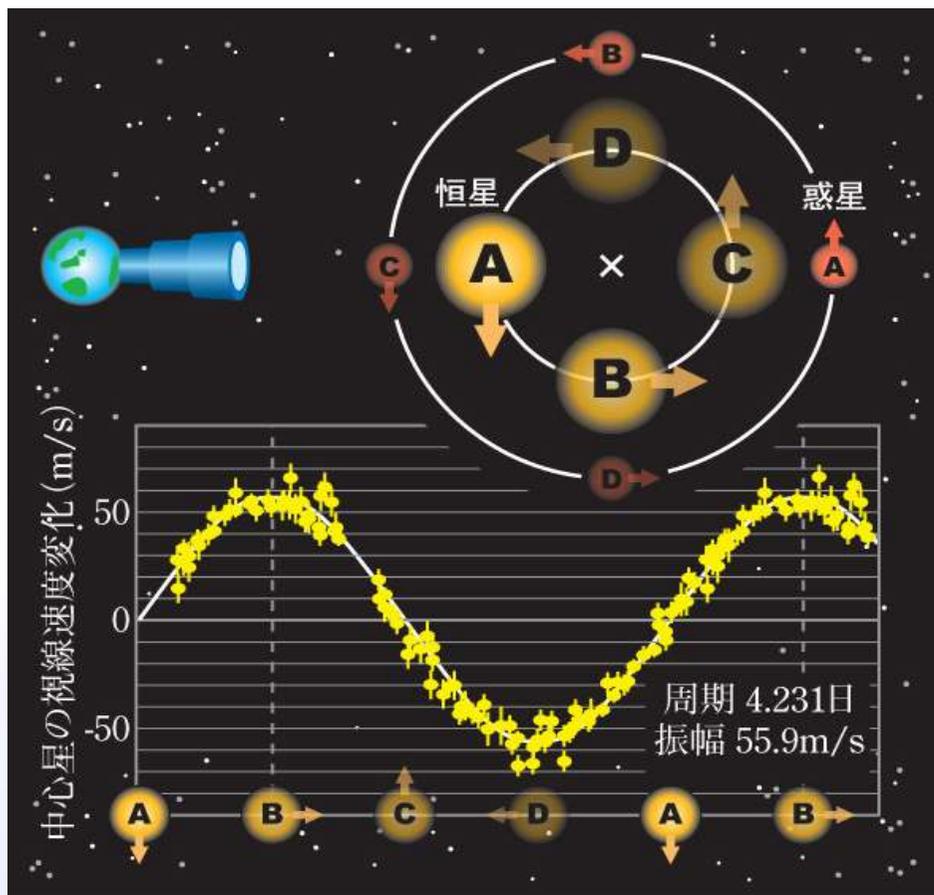
- 場所・・・岡山天体物理観測所
- 装置・・・188cm望遠鏡
高分散分光器HIDES
- 観測波長・・・3750-7500 Å
- スリット幅・・・200 μ m
- 波長分解能・・・~60000
- 積分時間・・・120-1800s
- S/N・・・100-200
- 波長較正・・・Th-Ar ランプ使用
- 観測日程・・・2005年から2008年まで毎月2-3晩
2009年5月と9月, 2010年4月と7月は7晩以上の連続観測



188cm望遠鏡@OAO

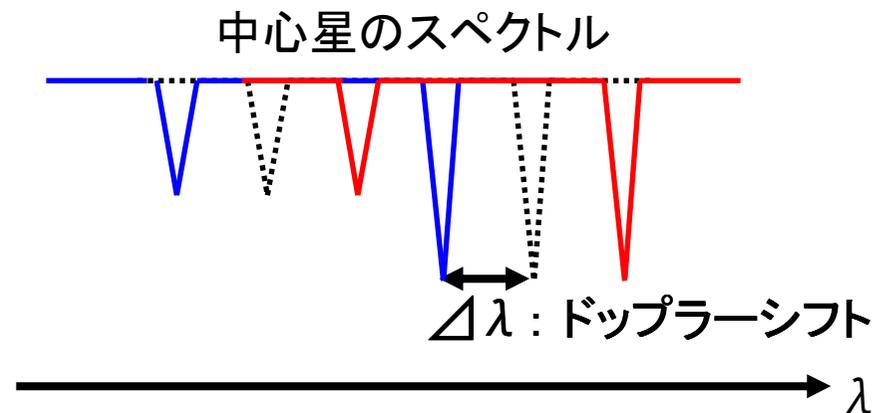
ドップラーシフト法

- 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



理科年表オフィシャルサイト より抜粋

- 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

- 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
- 短距離の透過でも強い吸収
- 化学的に安定かつ無毒

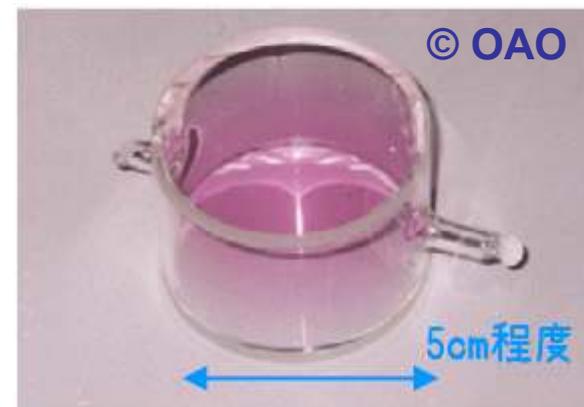
- 一次処理 & 視線速度計算

一次処理: IRAFを使用

視線速度計算: Sato et al. (2002)のコードを使用

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

ドップラーシフトの
基準として利用



HIDESのヨードセル

モデルスペクトルが観測
スペクトルに一致するよう
にドップラーシフト($\Delta\lambda$)
を決定する

視線速度の測定精度 ~10 m/s (2005-2010)



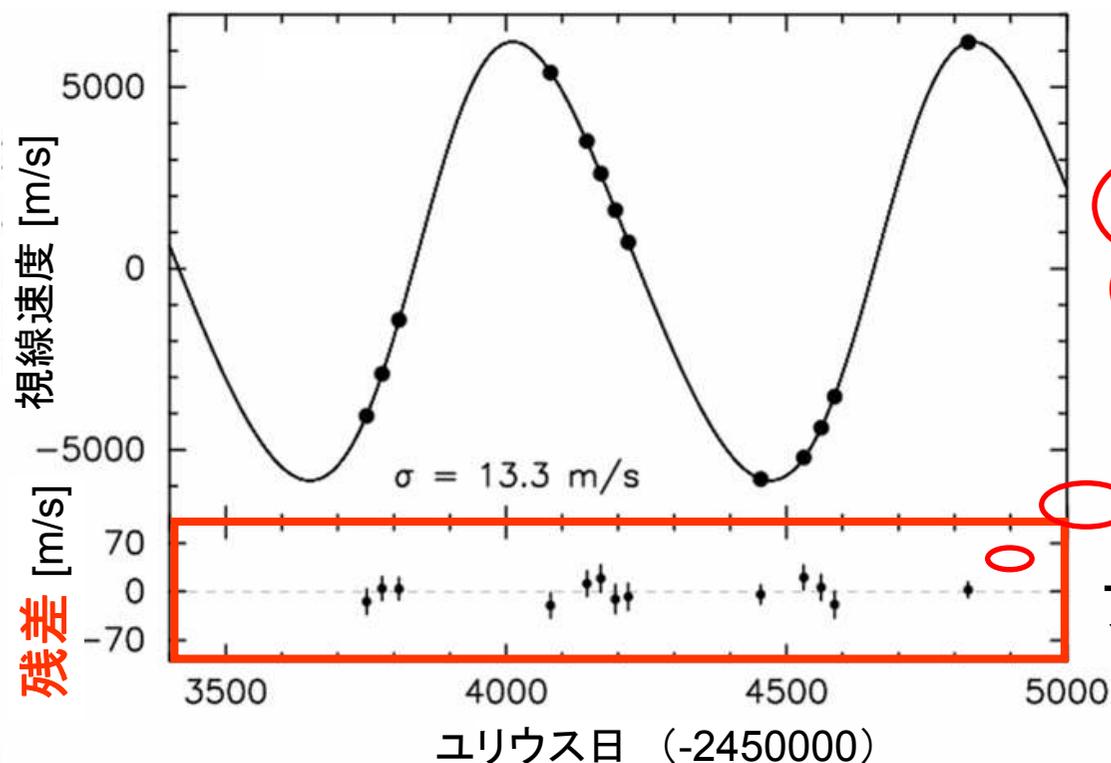
分光連星系に付随する惑星の検出手法

- 分光連星系の視線速度を除去した**残差**

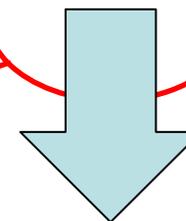
観測点 = 連星系の公転運動による視線速度

+

(あれば) 惑星の公転運動による視線速度



連星系の運動以外に
起因する視線速度

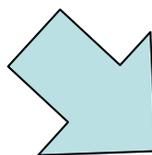
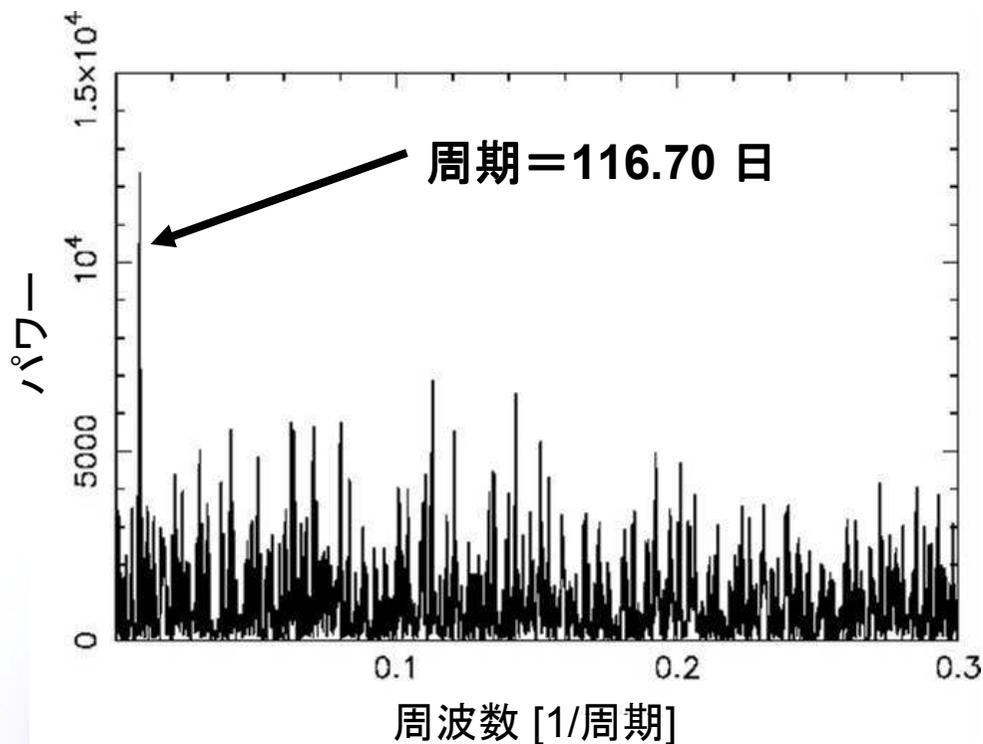


フーリエ変換による周期解析

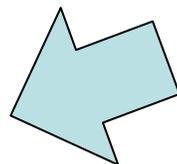
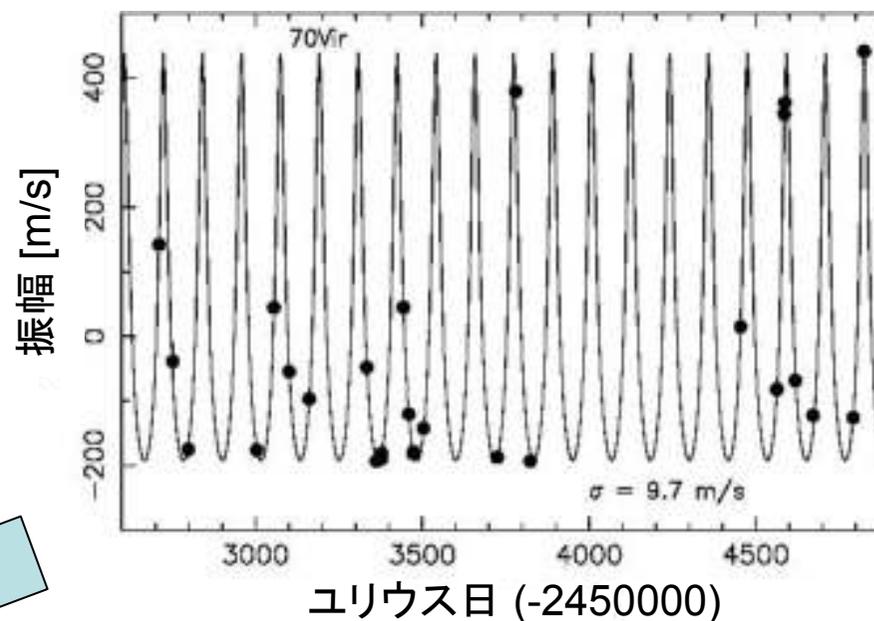


フーリエ変換による周期解析

- 例: 既知の惑星を持つ70Virのパワースペクトル



ケプラー運動を仮定した
視線速度の周期関数を
最小二乗で観測点にフィット



公転周期 = 116.689 日
振幅 = 315.22 m/s
軌道離心率 = 0.39

最小二乗で得られた周期関数より



結果

- 確からしい周期を持つSB1分光連星系

連星間距離: 1.962 AU

視線速度の測定誤差: ~ 12 m/s

残差をフーリエ変換

⇒ 404.80日の確からしい周期

Secret

Secret

1個の惑星による視線速度の
変動である可能性が高い

⇒ 質量: 1.3 木星質量
軌道長半径: 1.1 AU

議論 1/2

- 恒星の表面活動による見かけの視線速度

表面活動の指標: Ca II のHK輝線の強度 $R'_{HK} \propto$ 視線速度 (Saar et al. 1998)

$$\log R'_{HK} > -4.8 \Rightarrow \text{活発 (Henry et al. 1996)}$$

確からしい周期を持つ主星の表面活動度: $\log R'_{HK} = -5.133 \Rightarrow 2.74 \text{ m/s}$

表面活動だけでは、 $\sigma \sim 30 \text{ m/s}$ の視線速度の変動を説明できない

- Hipparcos衛星のphotometry

B-band: 観測期間=763日

周期=9.89日

V-band: 観測期間=763日

周期=9.92日

**404.80日相当の
光度変化は見られない**

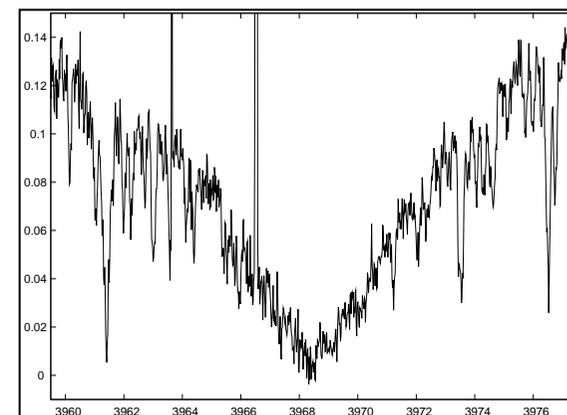
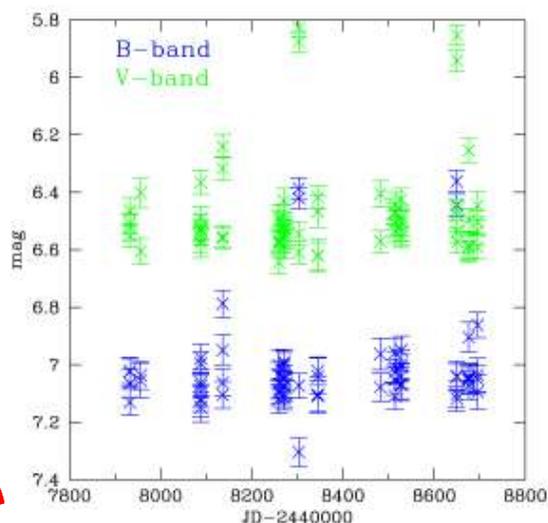


図. Ca II H 輝線@3968.49 Å

図. Hipparcosのphotometry



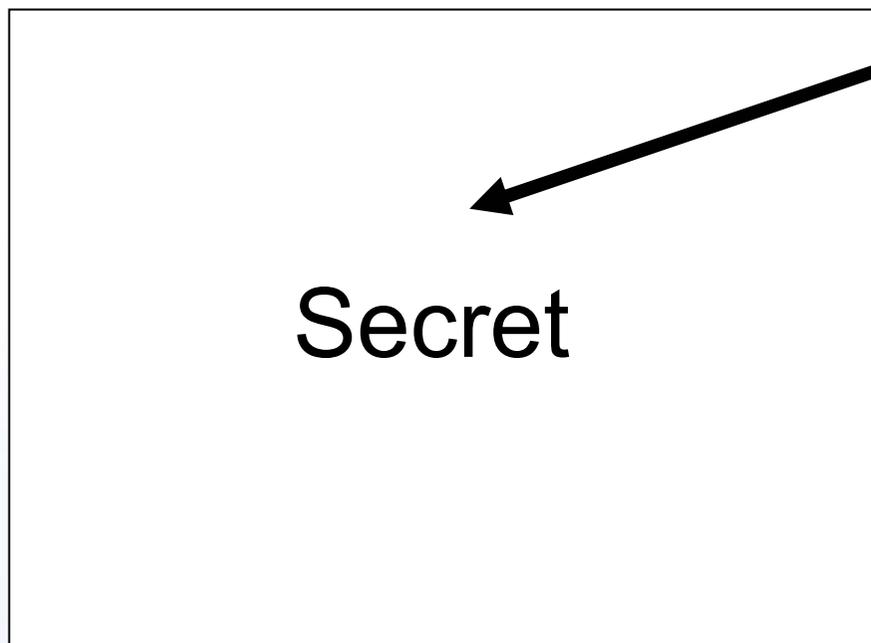
議論 2/2

- 連星系の公転軌道の不定性

ドップラーシフト法による分光連星系の系外惑星の検出:

観測点 - **連星系の公転運動による視線速度** = 残差 の周期変動の有無

⇒ 連星軌道の不定性により残差のバラつきが変わり得る



実線: 連星系の公転運動による視線速度

軌道エラー { 振幅 ± 0.06 km/s
公転周期 ± 0.08 日
軌道離心率 ± 0.001

実際に

振幅 + エラー: 852.21 日

軌道離心率 - エラー: 24.78 日

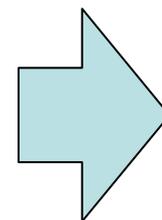
と異なる周期が出てしまう

まとめ

- 分光連星系の星周に付随する巨大惑星

形成: Cameronモデルで形成可能

観測: FGK型主系列星の半数が伴星を持つ
若い連星系に十分重い円盤

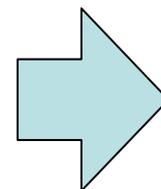


数多く存在し得る

- ドップラーシフト法による探査

対象: 連星間距離 ≤ 10 AUの分光連星系

装置: 188cm望遠鏡+HIDES @ OAO



1天体の有力候補

- 連星軌道の不定性問題

残差のバラつきが変わり、周期解析による結果が変わってしまう

⇒ 解決策を検討