

星震学を用いた惑星をもつ 巨星の質量推定

南雲 暉

(東工大地球惑星科学専攻M2)

佐藤文衛(東工大)、神戸栄治(国立天文台)、
安藤裕康(国立天文台)、大宮正士(国立天文台)、
原川紘季(国立天文台)

発表の流れ

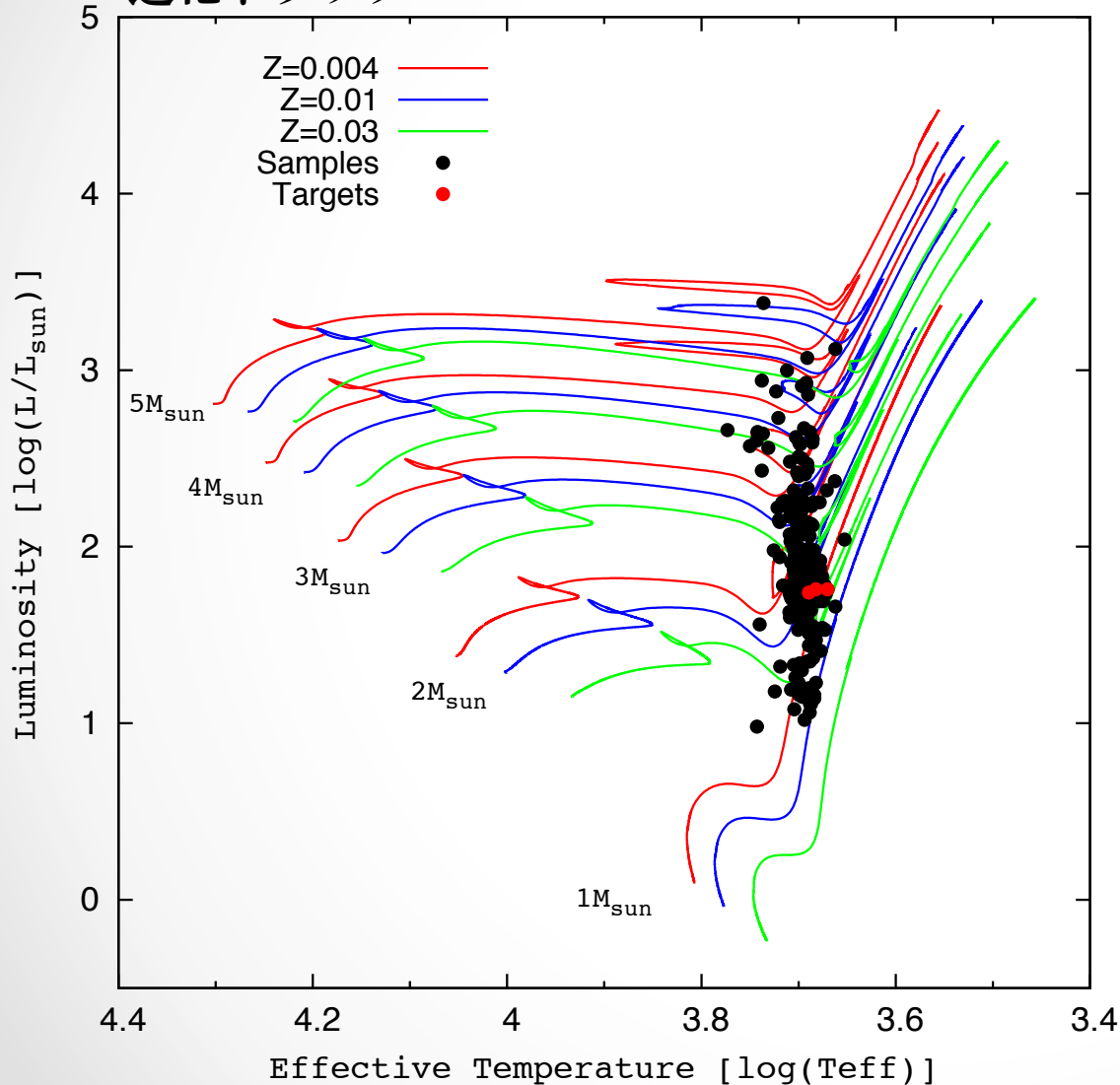
1. 背景・目的
2. 星震学について
3. 観測
4. 解析及び質量推定
5. まとめ

背景

- **中質量巨星**を対象としたRVサーベイが精力的に行われ、多くの**巨星周りの系外惑星**が発見されてきている (e.g. Sato+2013, Lee+2013)
- 巨星周りの惑星は太陽型周りの惑星と異なる特徴が明らかになった
 - 恒星質量と巨大惑星頻度に正の相関がある (Johnson+2010)
 - 中質量星周りでは短周期惑星が欠乏している (Sato+2008)
 - Etc...
- ◇ 一般的な惑星形成論の構築に巨星周りの惑星探しは重要であるが、**巨星の質量不定性**という問題がある

巨星の質量推定

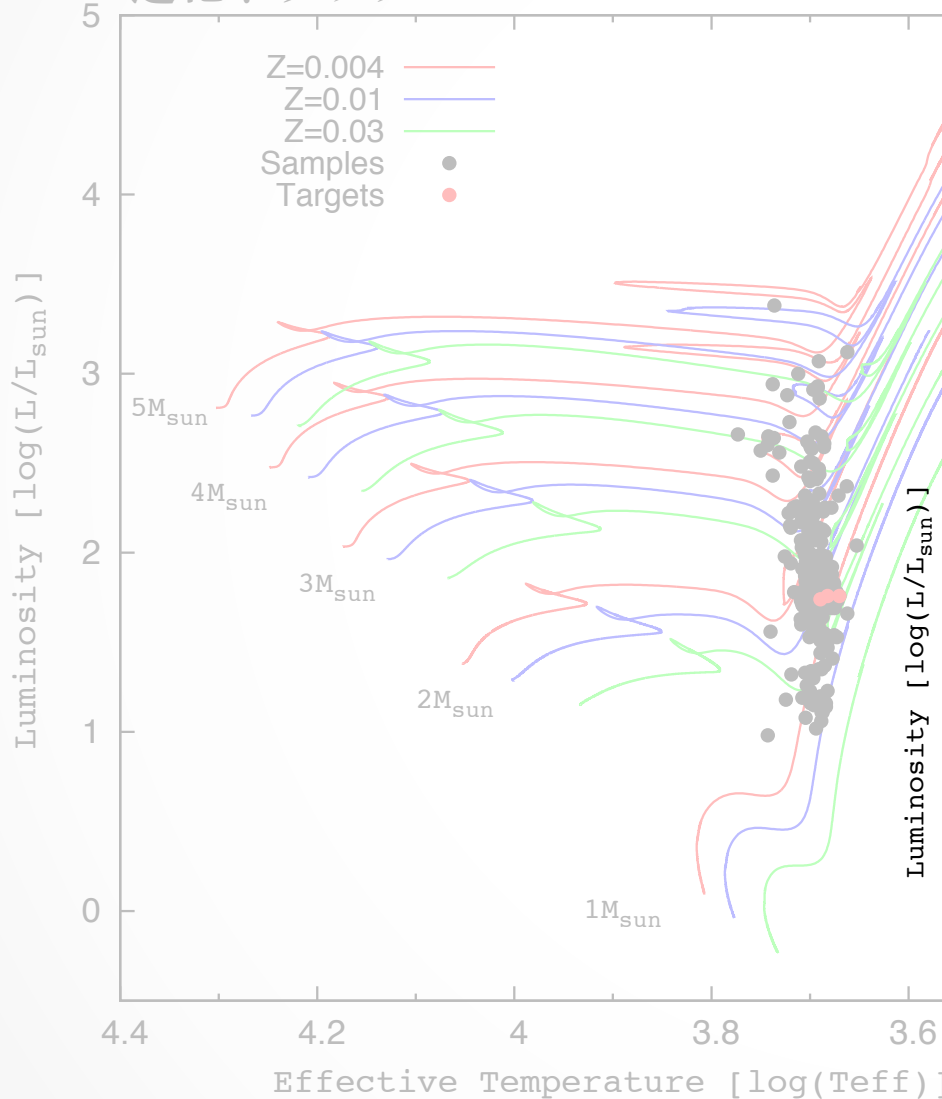
進化トラック



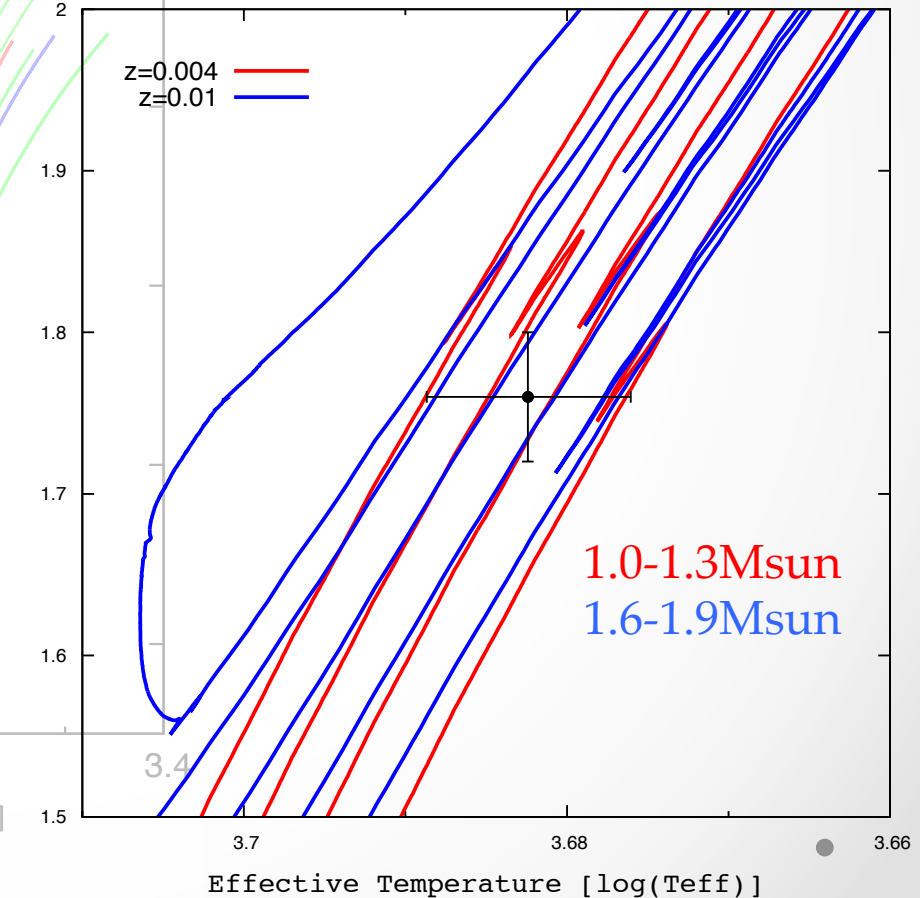
- Takeda+2008のサンプルは巨星域のレッドクランプ領域にあり、エラーバーの範囲に多くの進化トラックが存在

巨星の質量推定

進化トラック



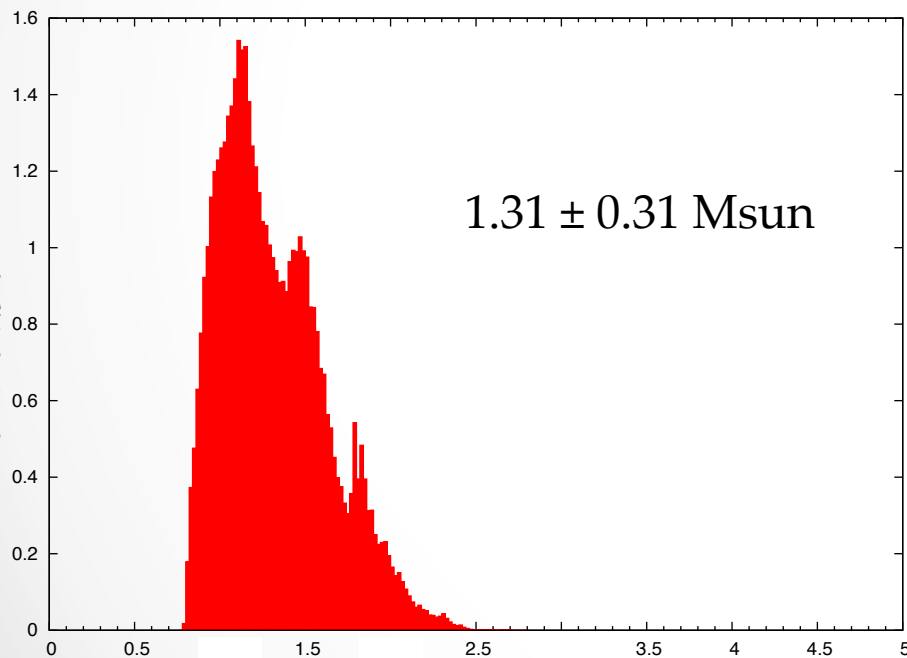
● Takeda+2008のサンプルは巨星域のレッドクランプ領域にあり、エラーバーの範囲に多くの進化トラックが存在



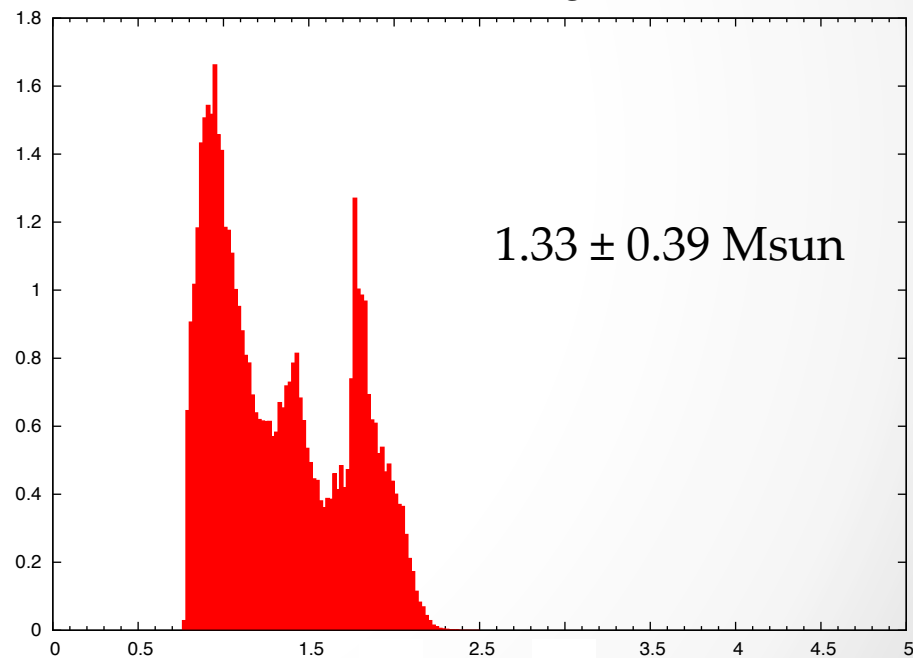
統計的な質量推定の不定性

ベイズ推定を用いて絶対等級及び有効温度から確率的に質量を推定
da Silva +2006

HD104985



HD127243

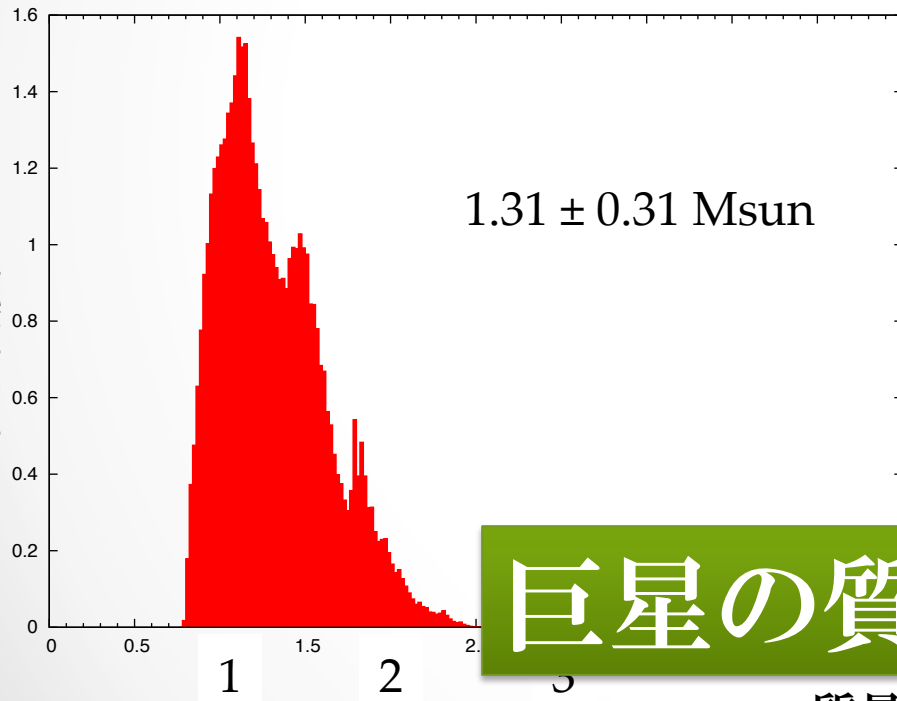


質量[Msun]

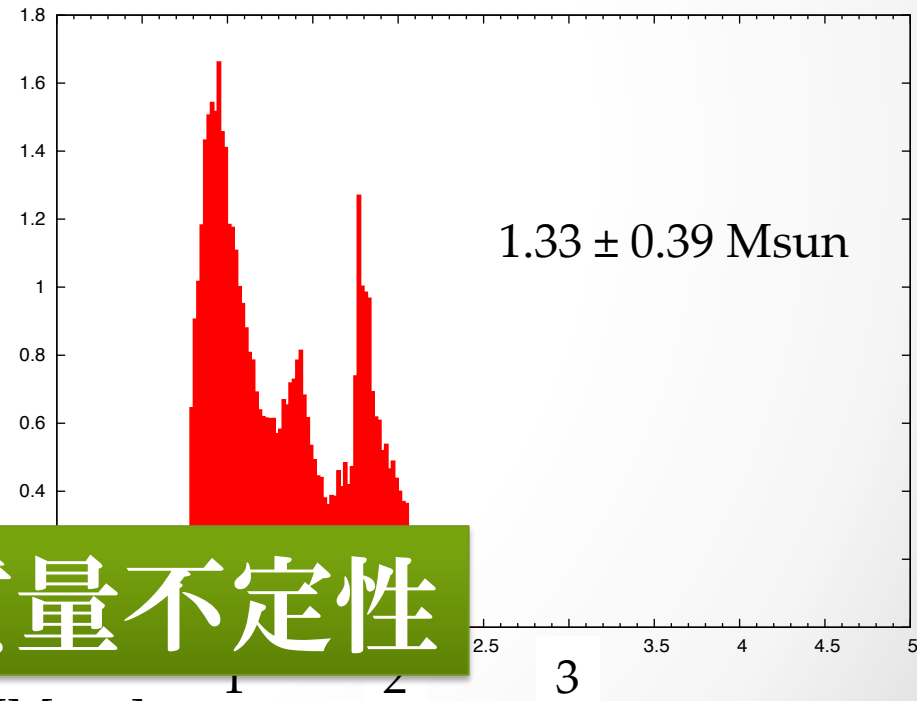
統計的な質量推定の不定性

ベイズ推定を用いて絶対等級及び有効温度から確率的に質量を推定
da Silva +2006

HD104985



HD127243



巨星の質量不定性

目的

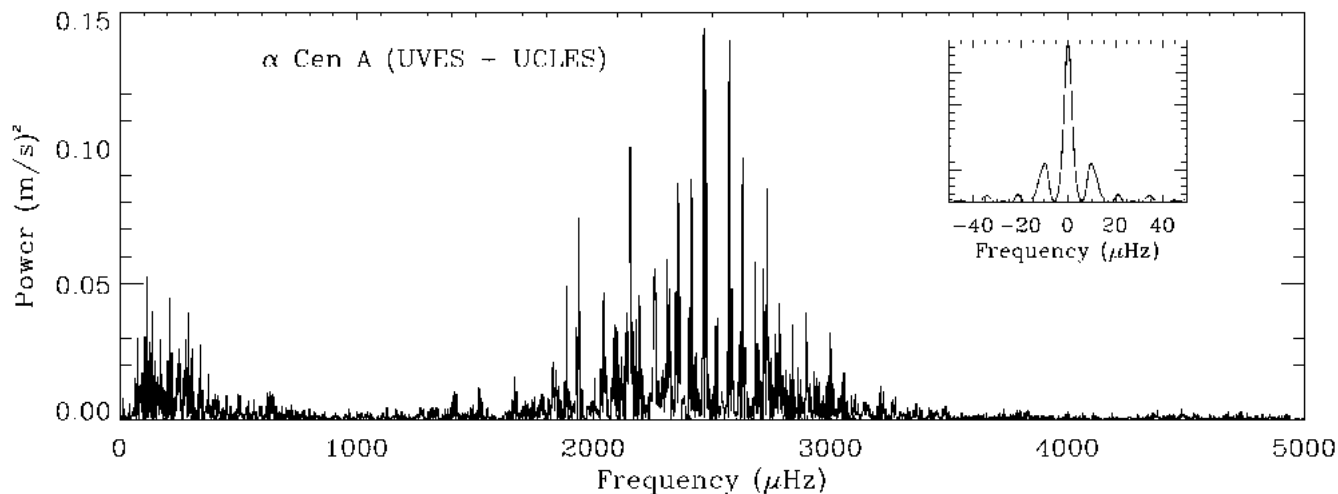
- 質量推定に関して通常の統計的手法の限界
⇒ **観測的に** 恒星質量を求めたい
- 本研究の目的
星震学を用いた観測的な巨星の質量推定を試みる

発表の流れ

1. 背景・目的
2. 星震学について
3. 観測
4. 解析及び質量推定
5. まとめ

星震学

- 準巨星 β Hyi (Bedding+2001)、矮星 α CenA (Butler+2004) で太陽の 5 分振動に相当するものを観測
- パワースペクトルは点光源の星をトータルライトで観測したことに相当



alpha CenAのRVの
パワースペクトル

Butler+2004

スケーリング則

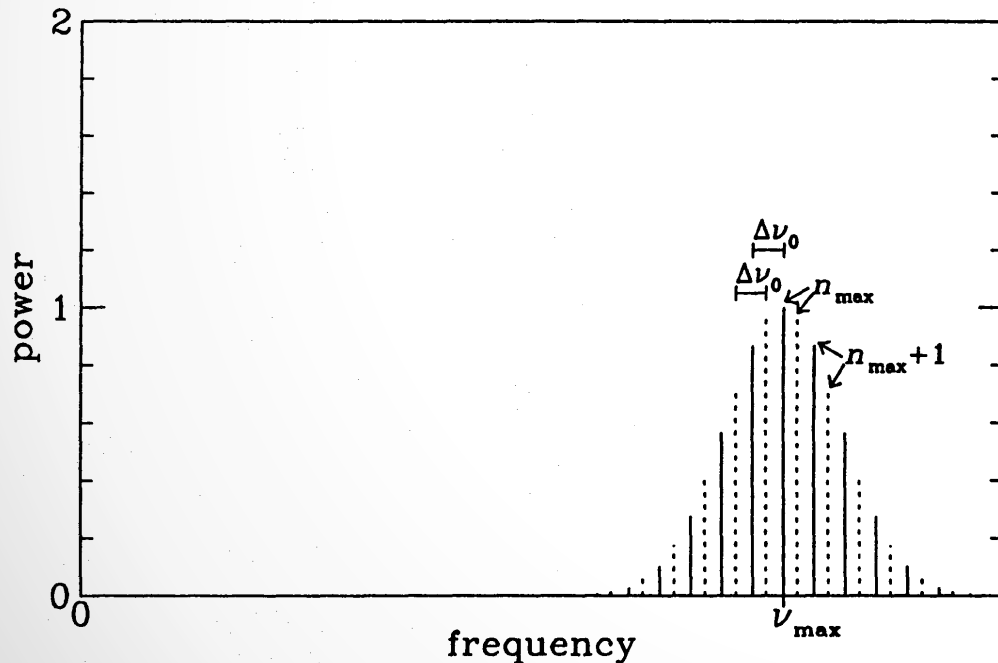
Kjeldsen & Bedding 1995

$$\nu_{\max} = 3050 \left(\frac{g}{g_{\odot}} \right) \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}} \right)^{-1/2} [\mu\text{Hz}]$$

$$\Delta\nu_{\text{max}} = 134.9 \left(\frac{g}{g_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^{-1/2} [\mu\text{Hz}]$$

$$R_{*} = \left(\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max,\odot}} \right) \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{\odot}} \right)^{-2} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}} \right)^{1/2} R_{\odot}$$

$$M_{*} = \left(\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max,\odot}} \right)^3 \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{\odot}} \right)^{-4} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}} \right)^{3/2} M_{\odot}$$



観測的に質量が推定する

$\Delta\nu$: ラージセパレーション(星の平均密度に依存)

$$\nu \sim \Delta\nu \left(n + \frac{1}{2} l + \varepsilon \right)$$

○スケーリング則は巨星でも有効
Ando+2008

発表の流れ

1. 背景・目的
2. 星震学について
3. 観測
4. 解析及び質量推定
5. まとめ

観測

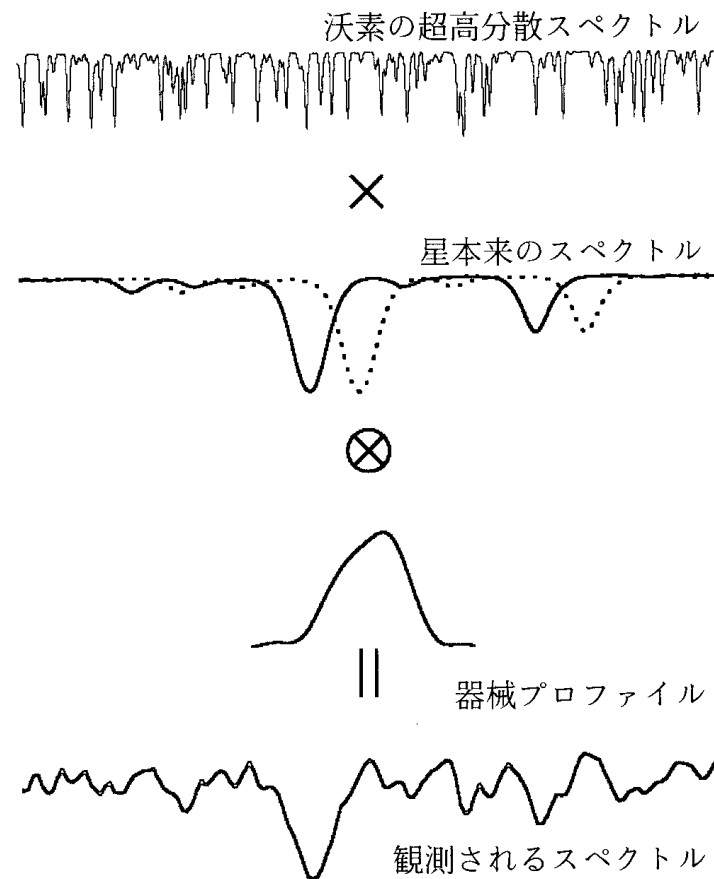
- 対象天体：HD104985 (V=5.78, G9III),
HD127243 (V=5.4, K0III),
HD221345 (V=5.22, K0III)
- 観測期間：2015.9.19-28, 2016.3.17-26
- 装置：188cm望遠鏡 HIDES (R=50000) + I2Cell
- 中心波長域：390~750nm
- 典型的な露出時間：800s, 660s, 480s
- 典型的なS/N: ~300

発表の流れ

1. 背景・目的
2. 星震学について
3. 観測
4. 解析及び質量推定
5. まとめ

視線速度解析

- 5000-6000Åのスペクトルを用いる
- I2Cellを用いて恒星のスペクトルのドップラー効果による波長のずれを読み取る




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

質量推定

質量の推定

$$\nu_{\max} = 3050 \left(\frac{g}{g_{\odot}} \right) \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}} \right)^{-1/2} \quad [\mu\text{Hz}]$$


$$M = \frac{1}{3050} R^2 T^{1/2} \nu_{\max}$$

温度は観測値、
半径は干渉計で
直接計測されたものを使う

ν_{\max} の決定(周波数解析)

General Lomb-Scargle Periodogram

$$y(t) = a \cos \omega t + b \sin \omega t + c$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{[y_i - y(t_i)]^2}{\sigma_i^2} = W \sum w_i [y_i - y(t_i)]^2$$

$$p(\omega) = \frac{\chi_0^2 - \chi^2(\omega)}{\chi_0^2}$$

t_i : 時刻(データ)

y_i : RV(データ)

$y(t_i)$: 時刻 t_i における理論的RV

w_i : normalized weight

$$w_i = \frac{1}{W} \frac{1}{\sigma_i^2} \quad \left(W = \sum \frac{1}{\sigma_i^2} \quad \sum w_i = 1 \right)$$

HD221345

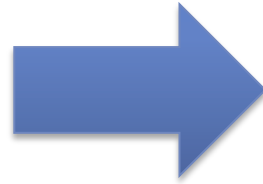
$$v_{\max} = 26.982 \pm 0.008 \text{ [\mu Hz]}$$

$$R/R_{\text{sun}} = 12.82 \pm 0.32$$

(Ligi+2012)

$$T_{\text{eff}} = 4813 \pm 70 \text{ K}$$

(Takeda+2008)

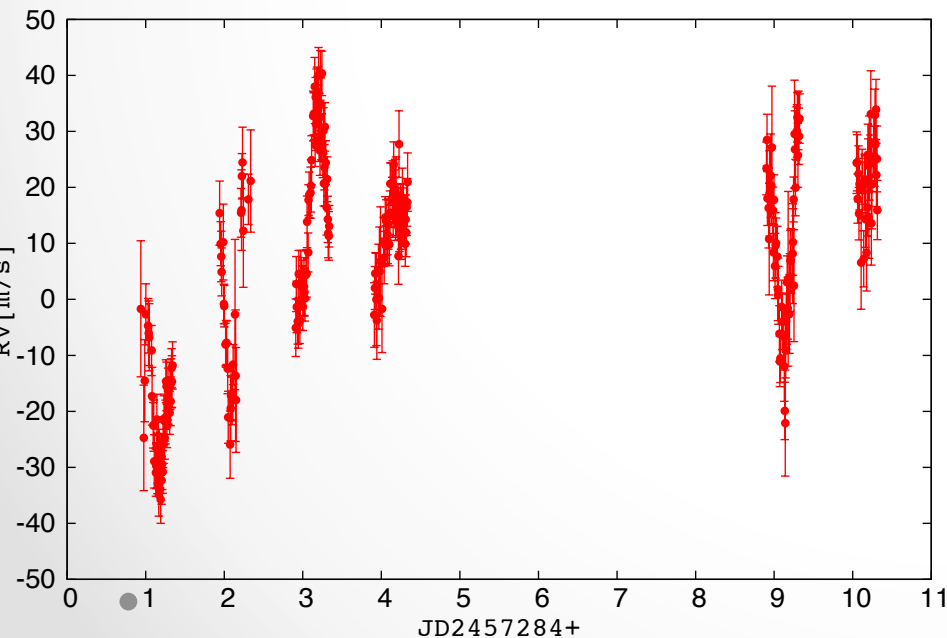


$$M/M_{\text{sun}} = 1.32 \pm 0.08$$

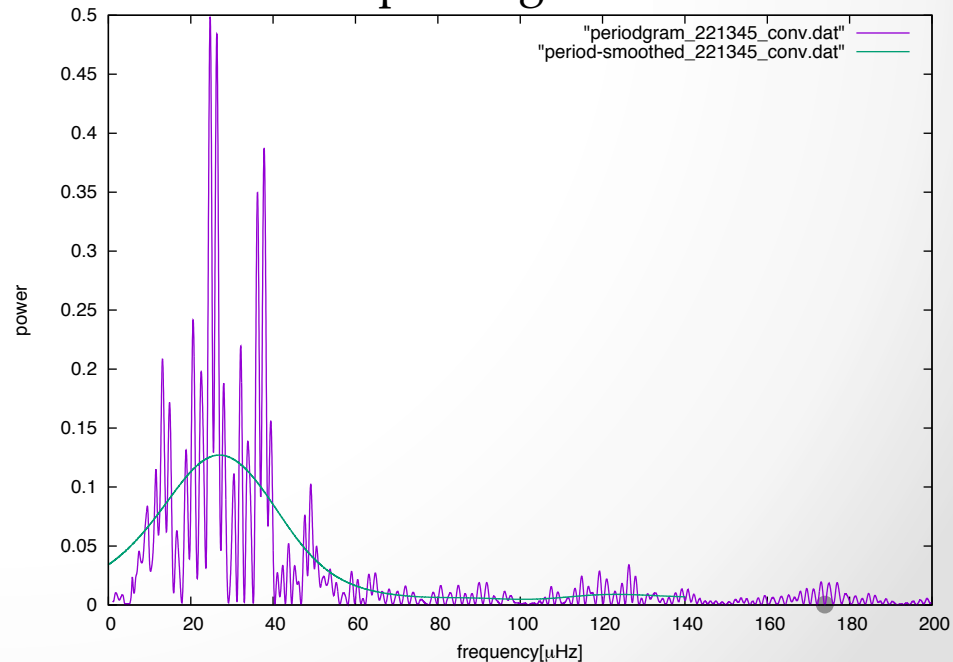
da Silva+2006の手法: $M/M_{\text{sun}} = 1.81 \pm 0.45$

Takeda+2008: $M/M_{\text{sun}} = 2.20 +0.13 -0.18$

RV series



periodgram



HD104985

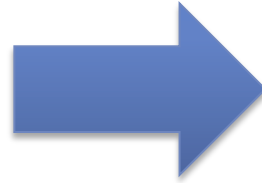
$$v_{\max} = 33.53 \pm 0.02 [\mu\text{Hz}]$$

$$R/R_{\text{sun}} = 10.97 \pm 0.82$$

(van Belle & von Braun 2009)

$$T_{\text{eff}} = 4679 \pm 70 \text{ K}$$

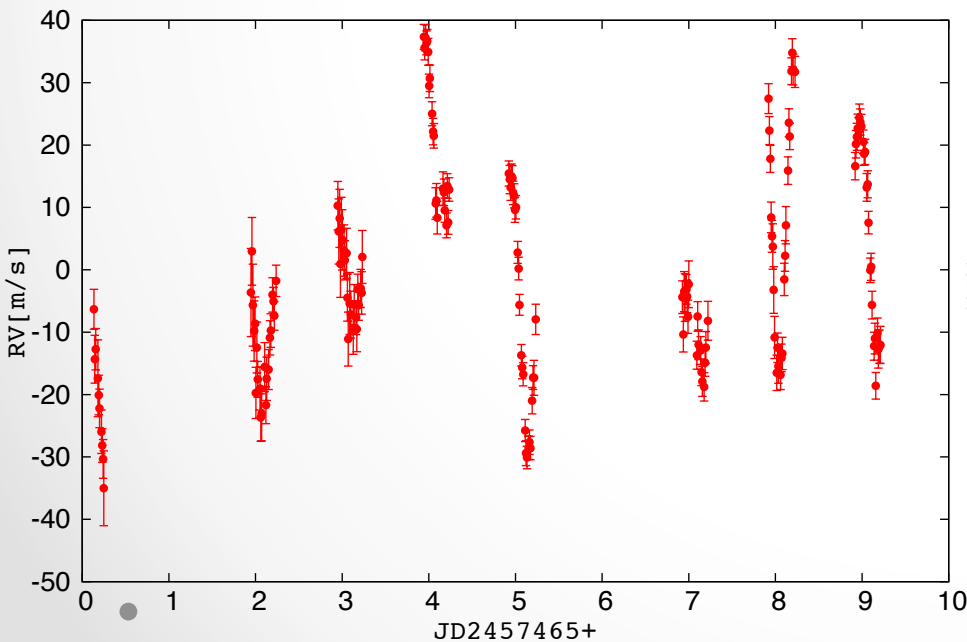
(Takeda+2008)



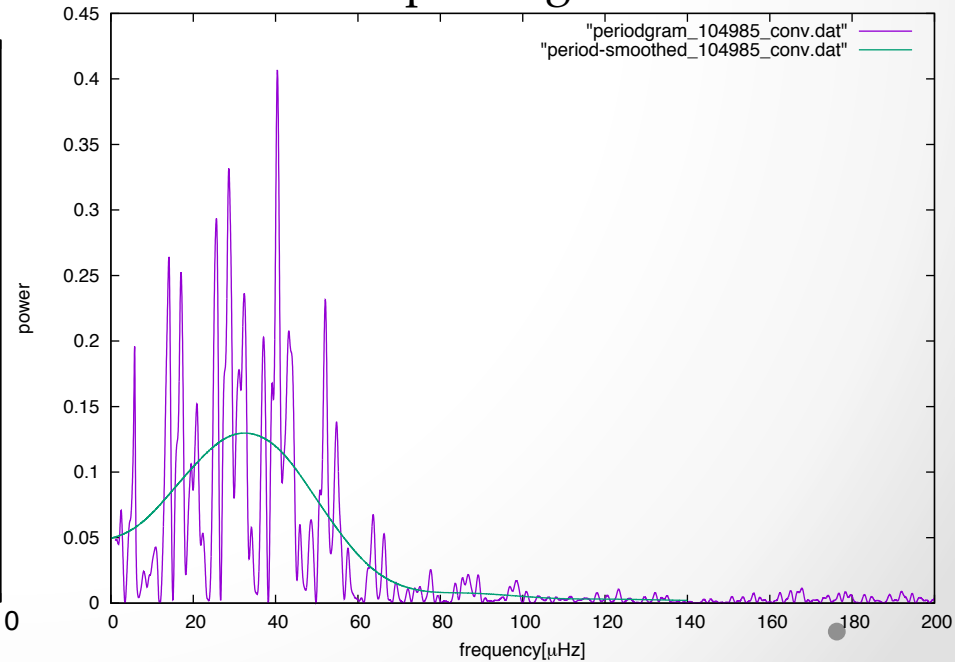
$$M/M_{\text{sun}} = 1.19 \pm 0.24$$

da Silva+2006の手法: $M/M_{\text{sun}} = 1.31 \pm 0.31$
Takeda+2008: $M/M_{\text{sun}} = 2.12 +0.05 -0.63$

RV series



periodgram



HD127243

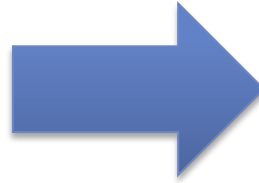
$$v_{\max} = 28.92 \pm 0.01 \text{ [\mu Hz]}$$

$$R/R_{\text{sun}} = 10.3 \pm 1.1$$

(南雲卒論)

$$T_{\text{eff}} = 4893 \pm 70 \text{ K}$$

(Takeda+2008)

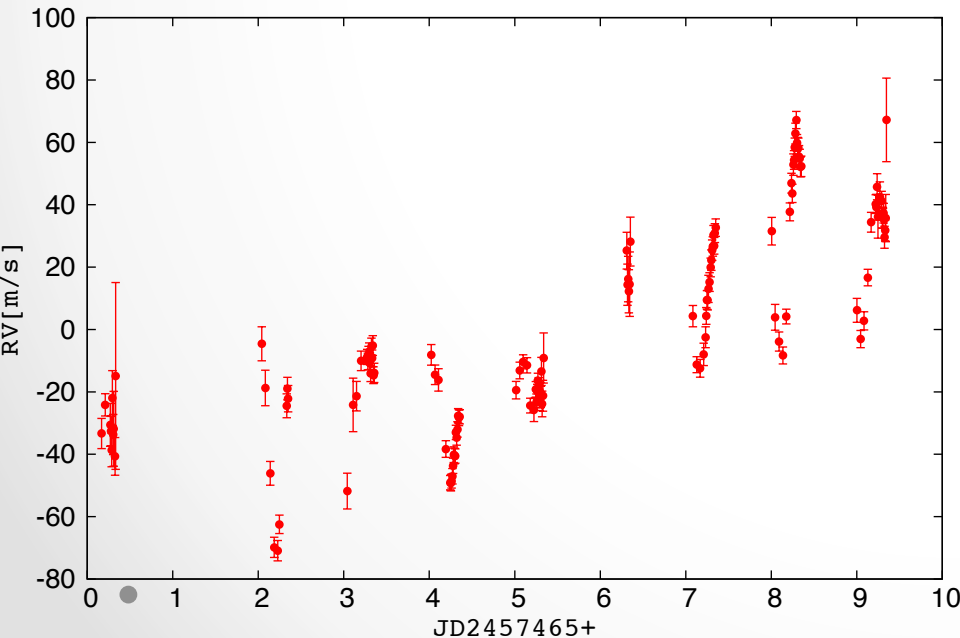


$$M/M_{\text{sun}} = 0.92 \pm 0.20$$

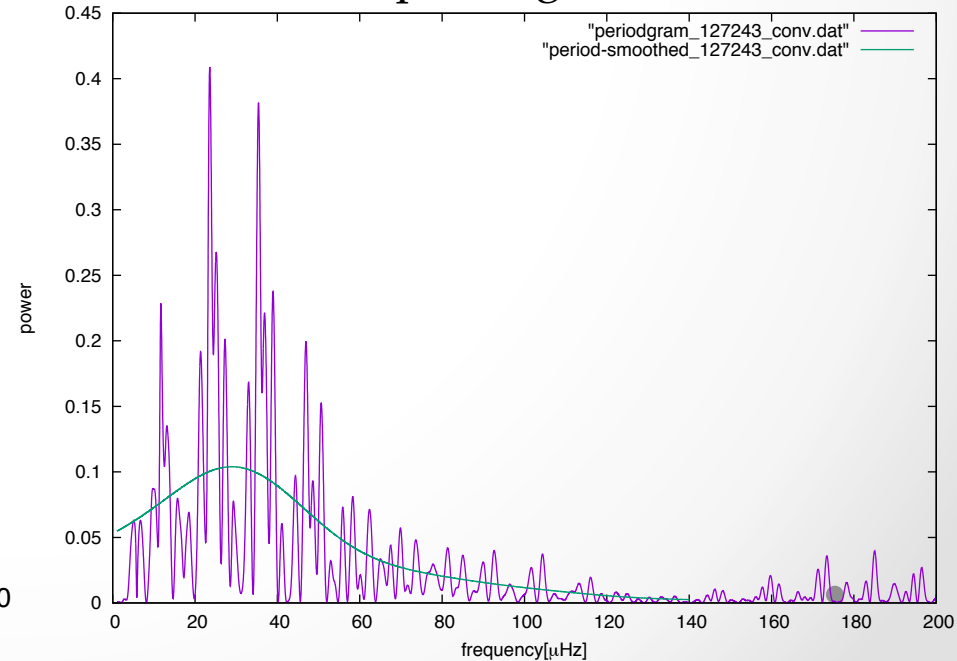
da Silva+2006の手法: $M/M_{\text{sun}} = 1.33 \pm 0.39$

Takeda+2008: $M/M_{\text{sun}} = 1.92 +0.09 -0.63$

RV series



periodgram



まとめ

- 星震学を用いて質量を算出した
 - ✓ HD104985, HD127243, HD221345
- すべての天体において低質量よりの質量が見積もられた
- 確率密度分布における低質量側のピークに相当
 - ✓ Bimodalな分布では低質量側のピークを支持
- エイリアスの除去をどうするか

各天体の質量

天体	Takeda+2008	da Silva+2006	This work
HD104985	2.12 +0.05 -0.63	1.31 ± 0.31	1.19 ± 0.24
HD127243	1.92 +0.09 -0.63	1.33 ± 0.39	0.92 ± 0.20
HD221345	2.20 +0.13 -0.18	1.81 ± 0.45	1.32 ± 0.08

Solar mass