

星震学

柴橋博資

1. なぜ星震学か

- 光では見えない星の内部を見る新しい眼
- 日震学の成功から一般の星へ
- 様々な物理環境・状態
 - 進化段階・成層構造・化学組成・対流・輻射・輻射吸収係数・拡散・状態方程式・自転構造・磁場・活動・連星・惑星
 - 脈動に現れるこれらの徴候と逆問題

2. 変光星観測から星震学へ

- 大量のデータ取得・解析

地上：MACHO, OGLE, MOA, ASM, ...

衛星：CoRoT, Kepler, ...

- 統計的議論

- 格段の高精度化

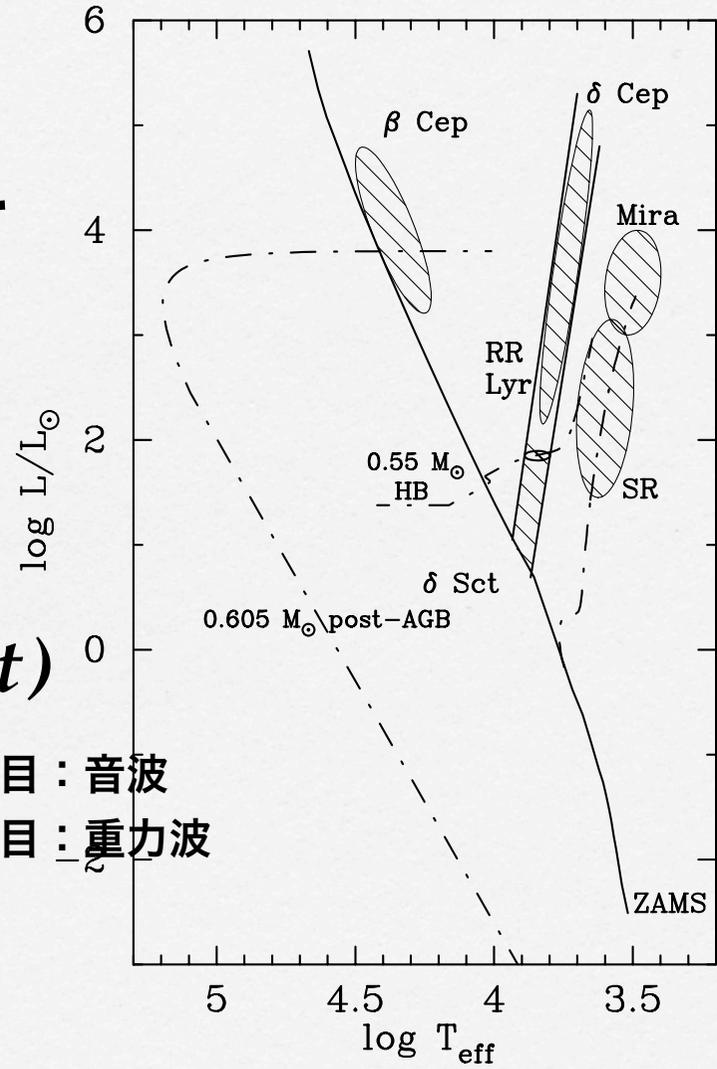
$$\Delta L/L \sim 10^{-6}$$

$$v_{\text{rad}} \sim 1\text{m/s}$$

嘗て

$\Delta L(t)$

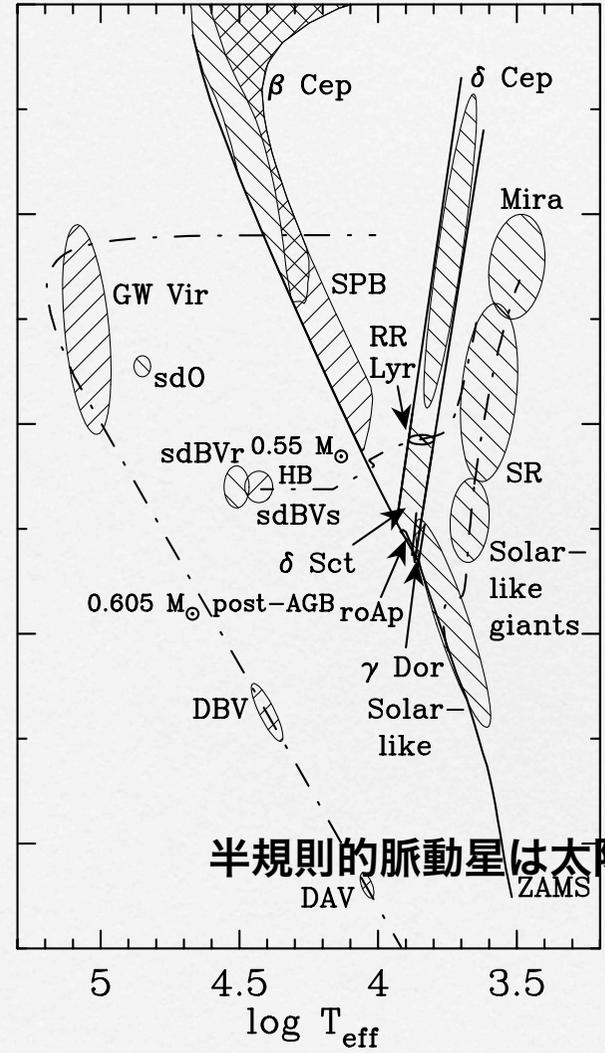
左右網目：音波
右左網目：重力波



いま

$\tilde{L}(\omega)$

半規則的脈動星は太陽型振動か



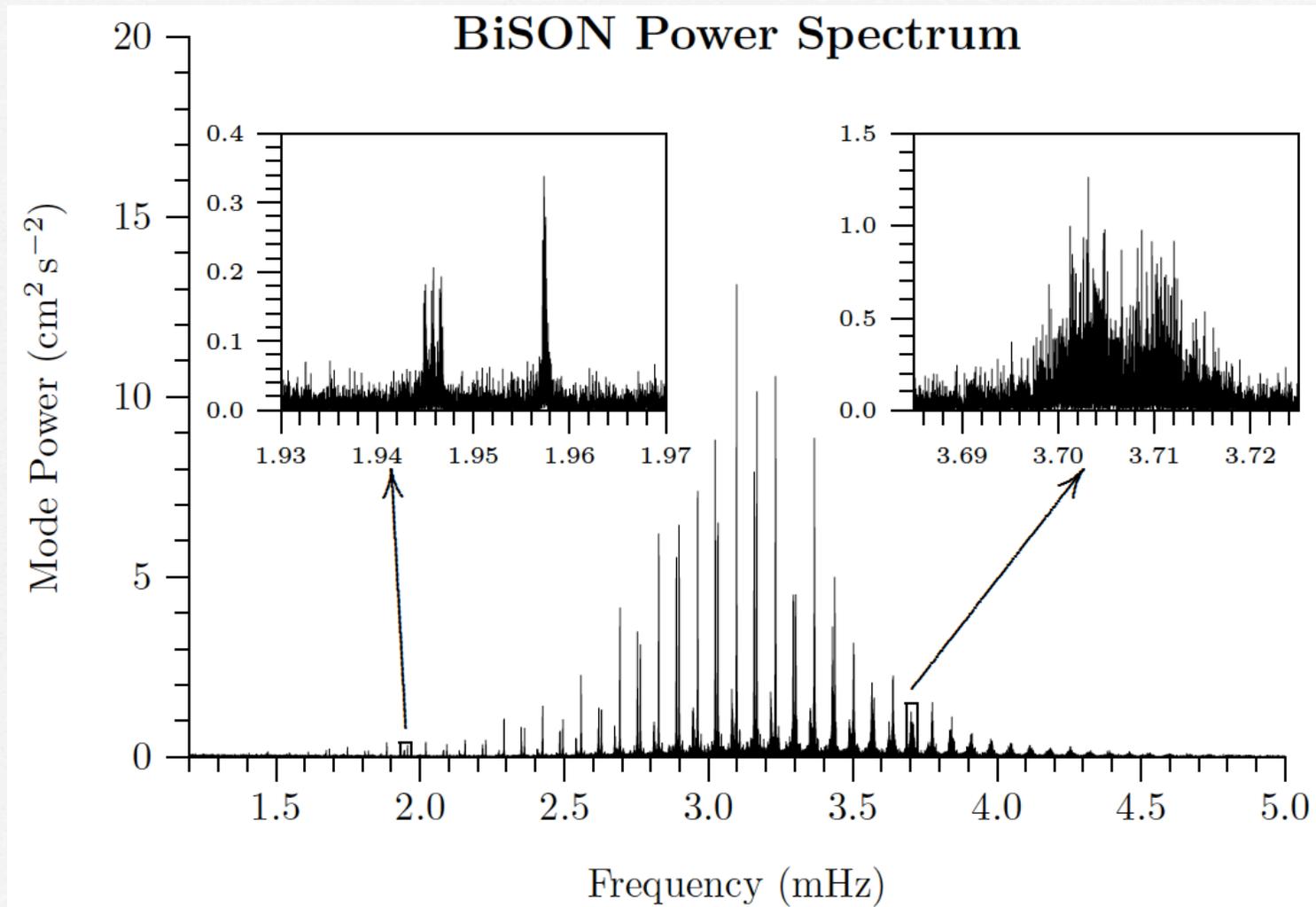
図は Handler, G. 2012, in pressより引用

3. 励起機構

- 熱的過安定性
 - イオン化層での輻射吸収特性による κ 機構
 - 脈動に伴う対流の変動による機構
 - 熱核反応による ε 機構
 - 二重拡散過安定性
- 乱対流による確率論的励起
 - 乱対流による発生する音波が星全体で共鳴
- 潮汐による強制振動

4. 星の振動

- 太陽以外の星は星像に分解できない
- 細かい表面模様の振動は検出できない



図は <http://bison.ph.bham.ac.uk>より引用

音波モード：

$$\nu_{nl} \approx \Delta\nu (n + l/2 + \varepsilon) - d_{nl}$$

$$\Delta\nu = [2 \int c^{-1} dr]^{-1}$$

d_{nl} ：中心部依存

音の高さ \sim (星表面と中心を音速で往復する時間) $^{-1}$

これは星全体で決まる量 $\sim (GM/R^3)^{1/2}$

但し音速は中心部では速いので中心部には鈍感

音速勾配があるので音は屈折して伝播

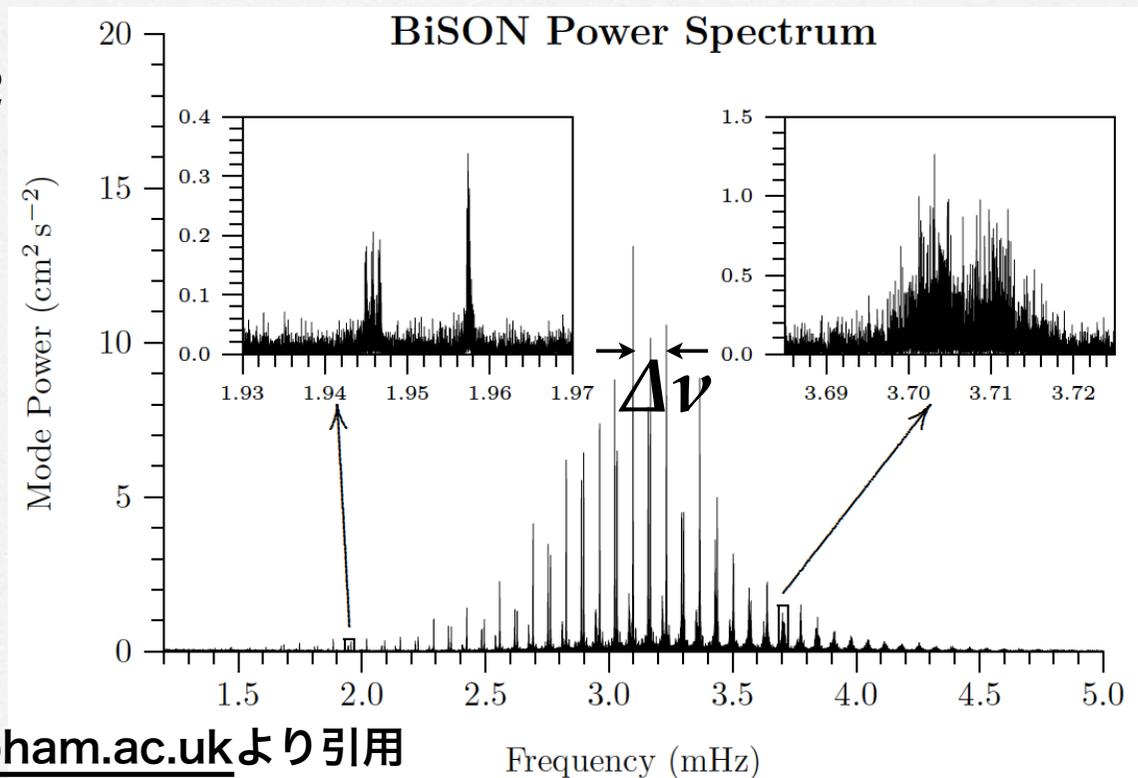
そこで中心部、進化状態に敏感な量にも僅かに依存

$$\Delta\nu \propto M^{1/2} R^{-3/2}$$

$$\nu_{\max} \propto g T_{\text{eff}}^{-1/2} \propto MR^{-2} T_{\text{eff}}^{-1/2} \quad \leftarrow \text{経験則}$$

$$\therefore R \propto \nu_{\max} \Delta\nu^{-2}$$

$$M \propto \nu_{\max}^3 \Delta\nu^{-4}$$



図は <http://bison.ph.bham.ac.uk>より引用

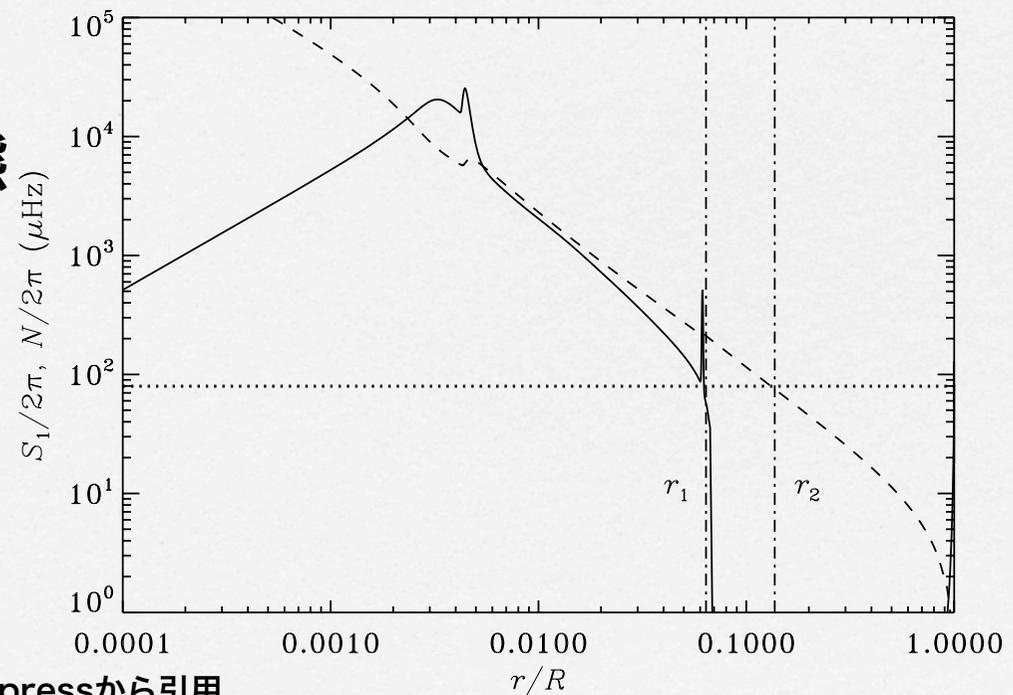
重力波：浮力が復元力

重い組成と軽い組成が急勾配で成層していれば、

浮力は強く、周期は短い

音波と重力波が混合状態

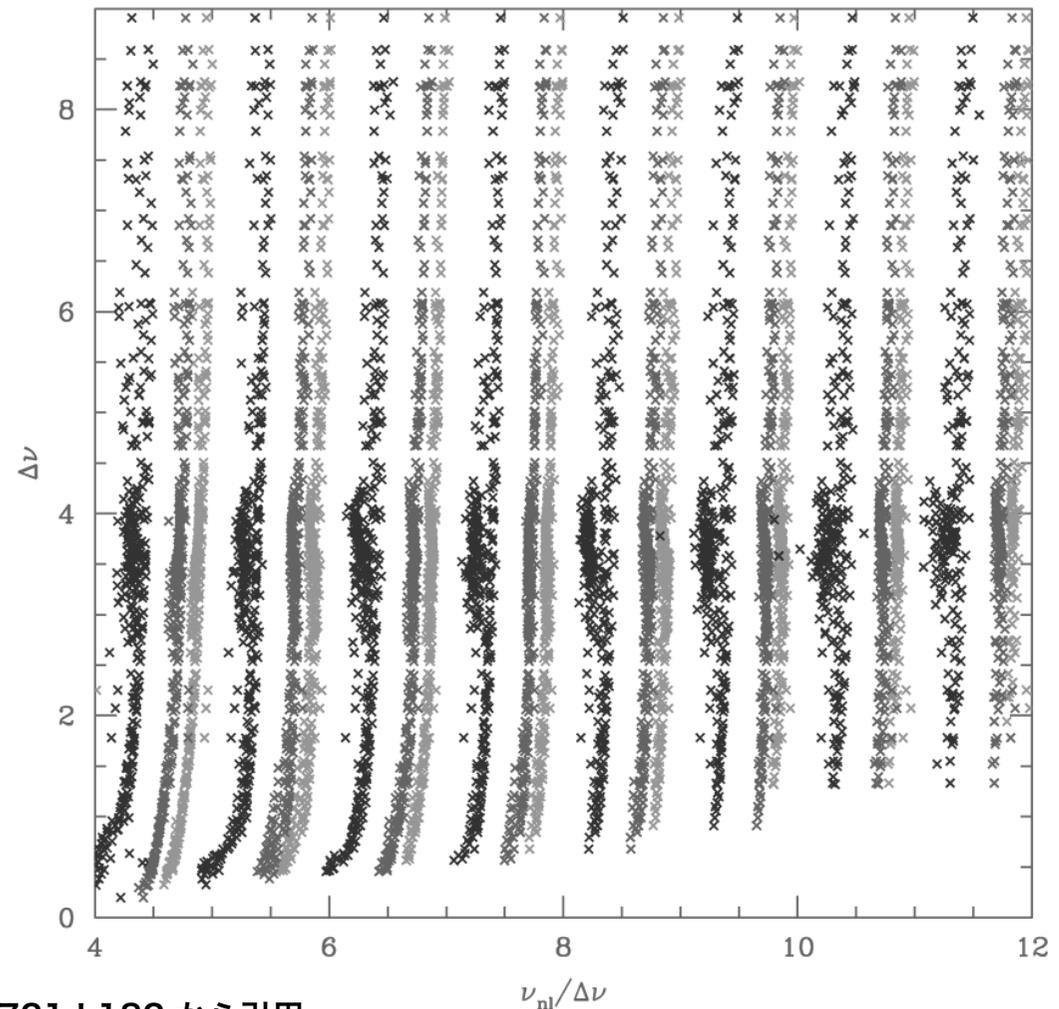
赤色巨星



図は Christensen-Dalsgaard, J. 2012, in pressから引用

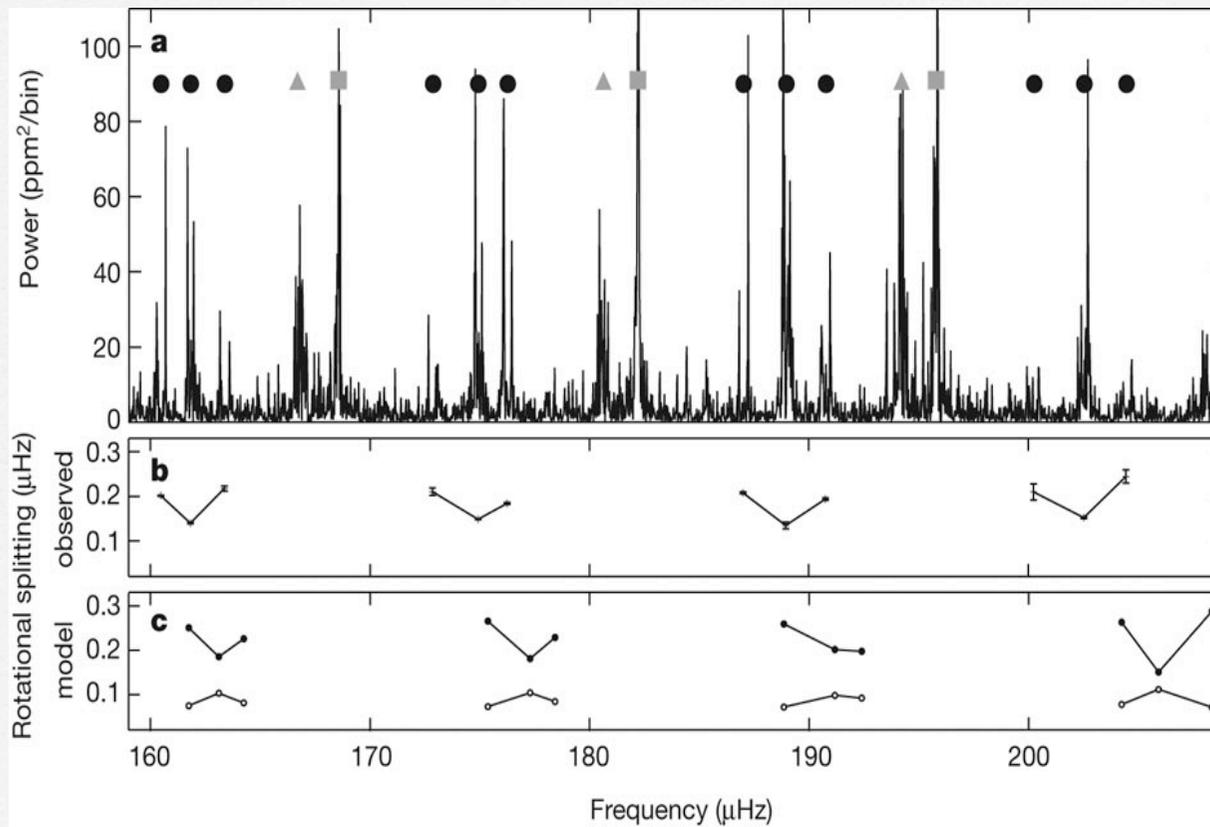
$l=1$ のモードならば、中心部の重力波と外層の音波が混合状態なので、中心部で振動するモードも検出される

中心部の自転と外層の自転の違いが見える



図は Montalban J. et al. 2010, ApJ 721 L182 から引用
Bedding T.R. et al. 2011, Nature 471 608
Beck P. et al. 2011, Nature doi:10.1038/nature10612

Oscillation spectrum of KIC 8366239.



図は PG Beck et al. Nature 000, 1-3 (2011) doi:10.1038/nature10612 から引用

5. 観測手法

● 測光観測

● 長い観測時間幅

● 長い連続観測可能 **Kepler revolution !**

● 極めて高いSN比 **cf. 高田講演**

● 分光観測

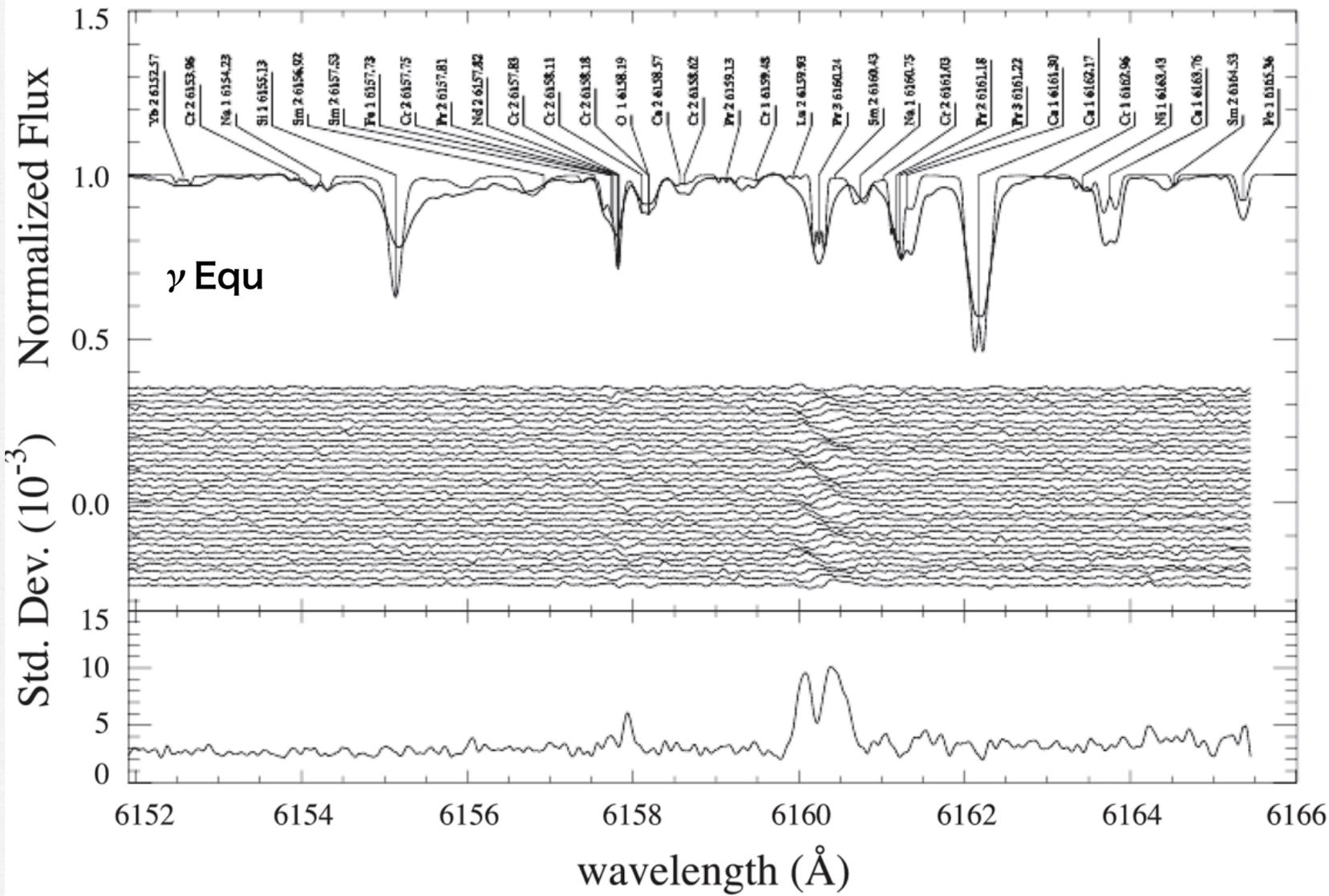
● 高い波長分解能

● 高い時間分解能 **8m級望遠鏡の威力**

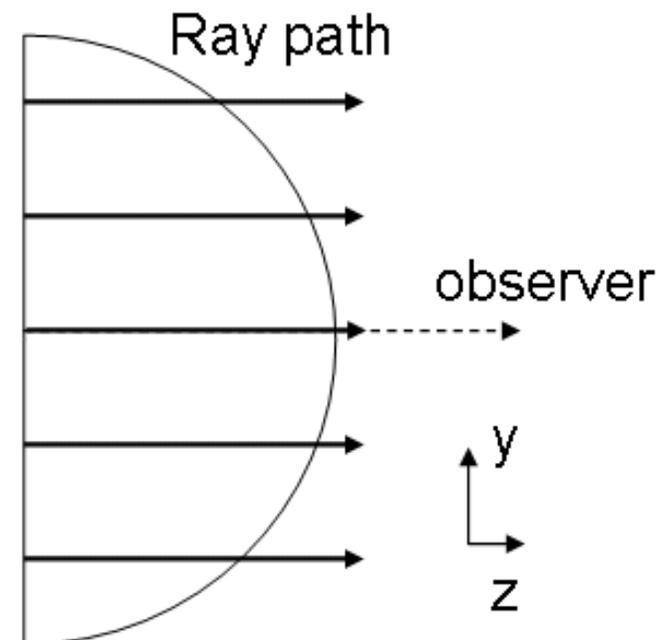
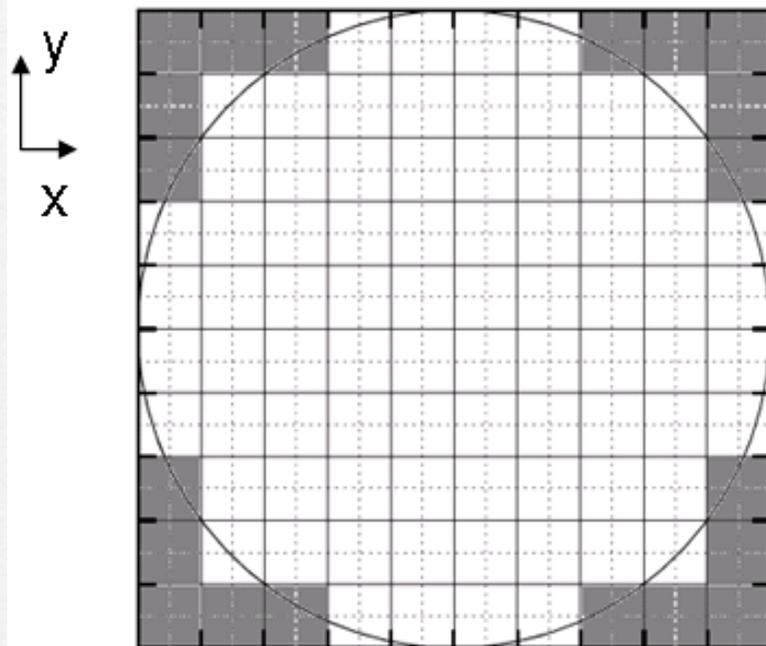
● 極めて高いSN比

6. 反定立と新知見

- 平行平面大気で十分（竹田）か
 - 運動を考慮する際は幾何学が効く
 - 短波長の脈動は大気成層構造を見透かす
 - 太陽以外の星で3次元大気情報
- 視線速度は分光観測でしか出来ない（中村）か
 - ドップラー効果は脈動光度変化にも現れる
 - 連星脈動星は測光のみから連星情報



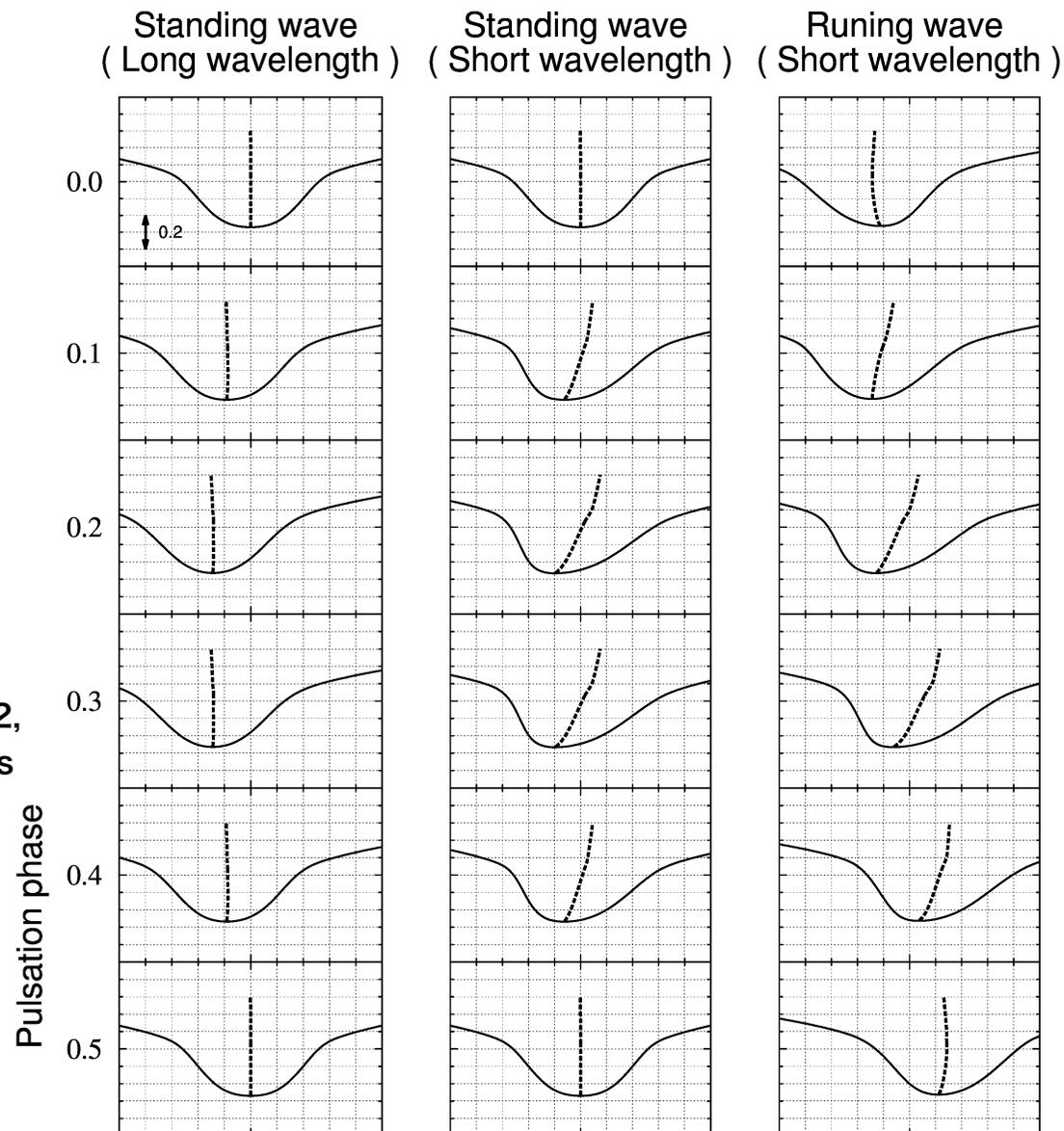
図は Kochukhov & Ryabchikova 2001, A&A 374 615 より引用



Nomura, Naito
& Shibahashi 2012,
PASJ, 65, in press

星像を2次元に分割して、各要素毎
にドップラー効果を入れて輻射輸送
を解き、面積分する

Nomura, Naito
& Shibahashi 2012,
PASJ, 65, in press



連星中の時計・脈動・パルサー

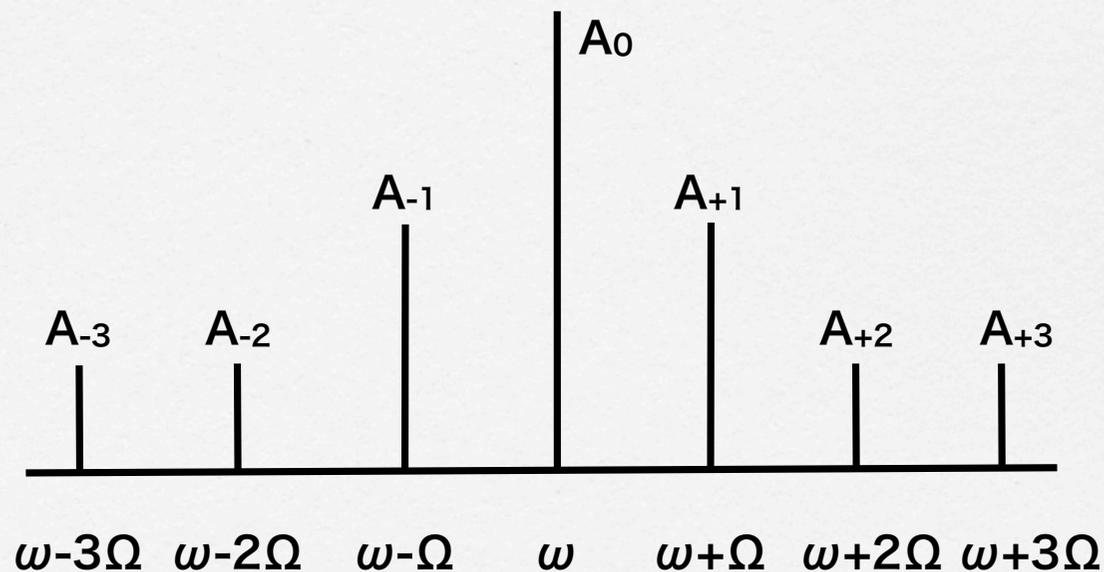
- 公転運動による距離の変動
- 信号伝達時間に周期変動
- 脈動・パルスの位相が周期変動
- 脈動周期自身が公転周期で周期変動

H. Shibahashi & D.W. Kurtz, 2011, MNRAS, submitted

これより以下の図は全て上記論文からの引用

規則性からのずれの解析

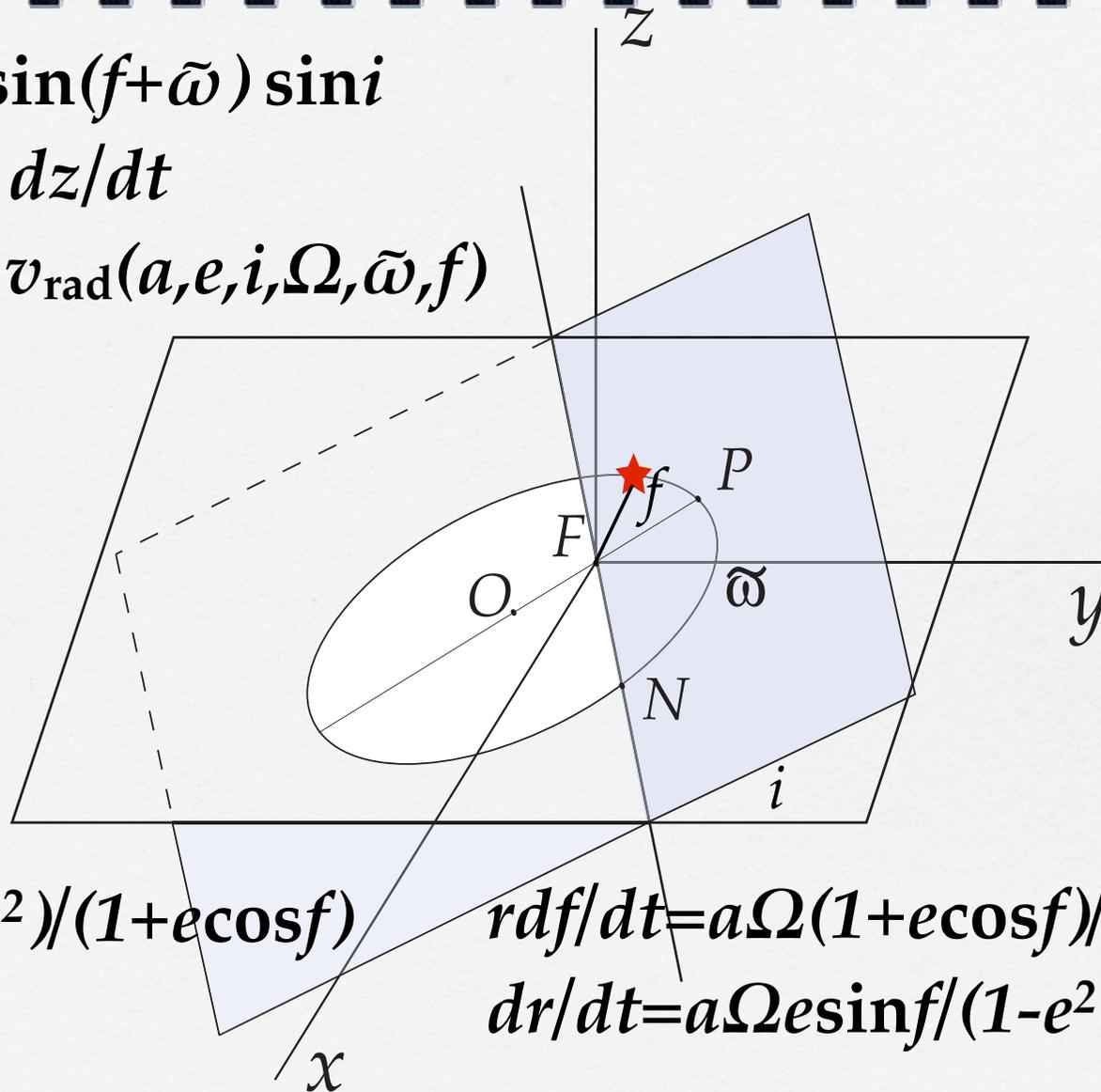
- 伝統的な解析法：O-C
- 最善の方法：フーリエ変換



$$z = r \sin(f + \tilde{\omega}) \sin i$$

$$v_{\text{rad}} = dz/dt$$

$$= v_{\text{rad}}(a, e, i, \Omega, \tilde{\omega}, f)$$

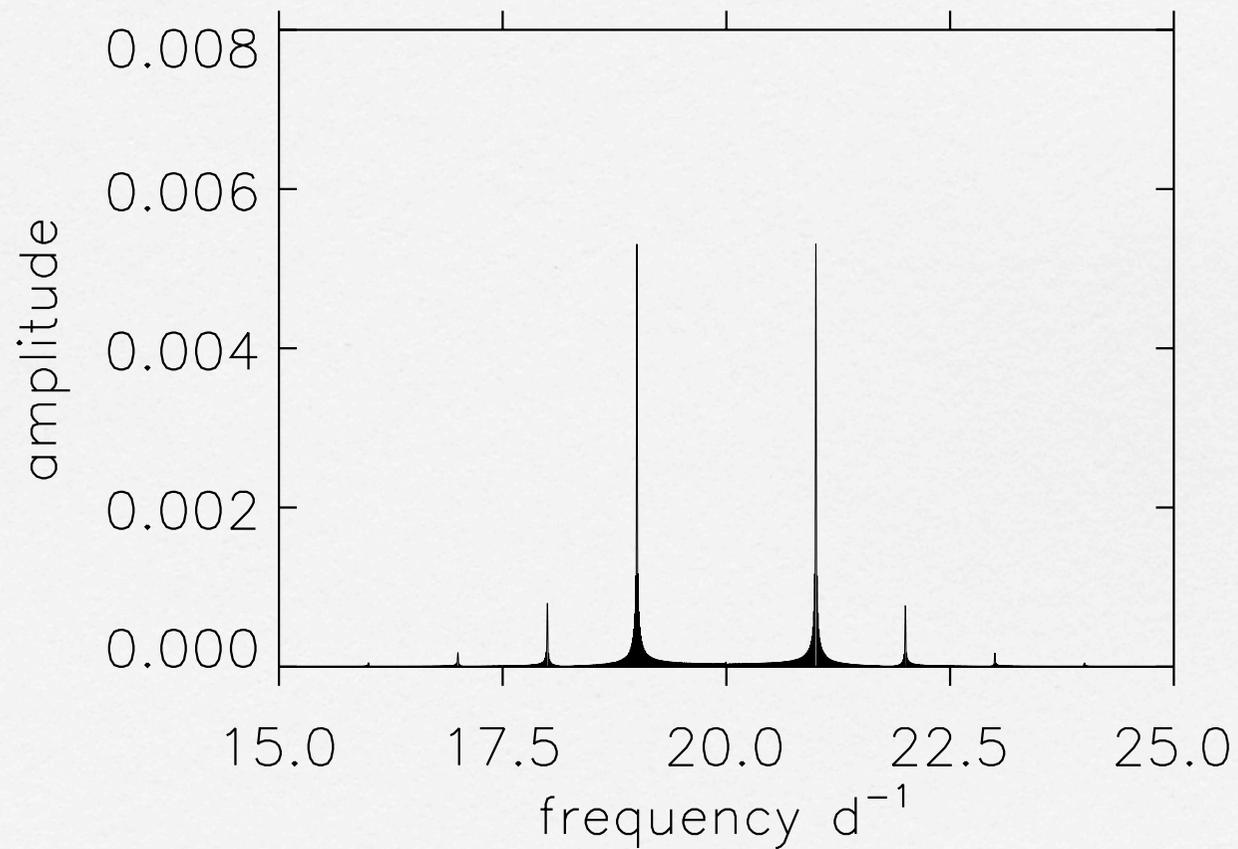


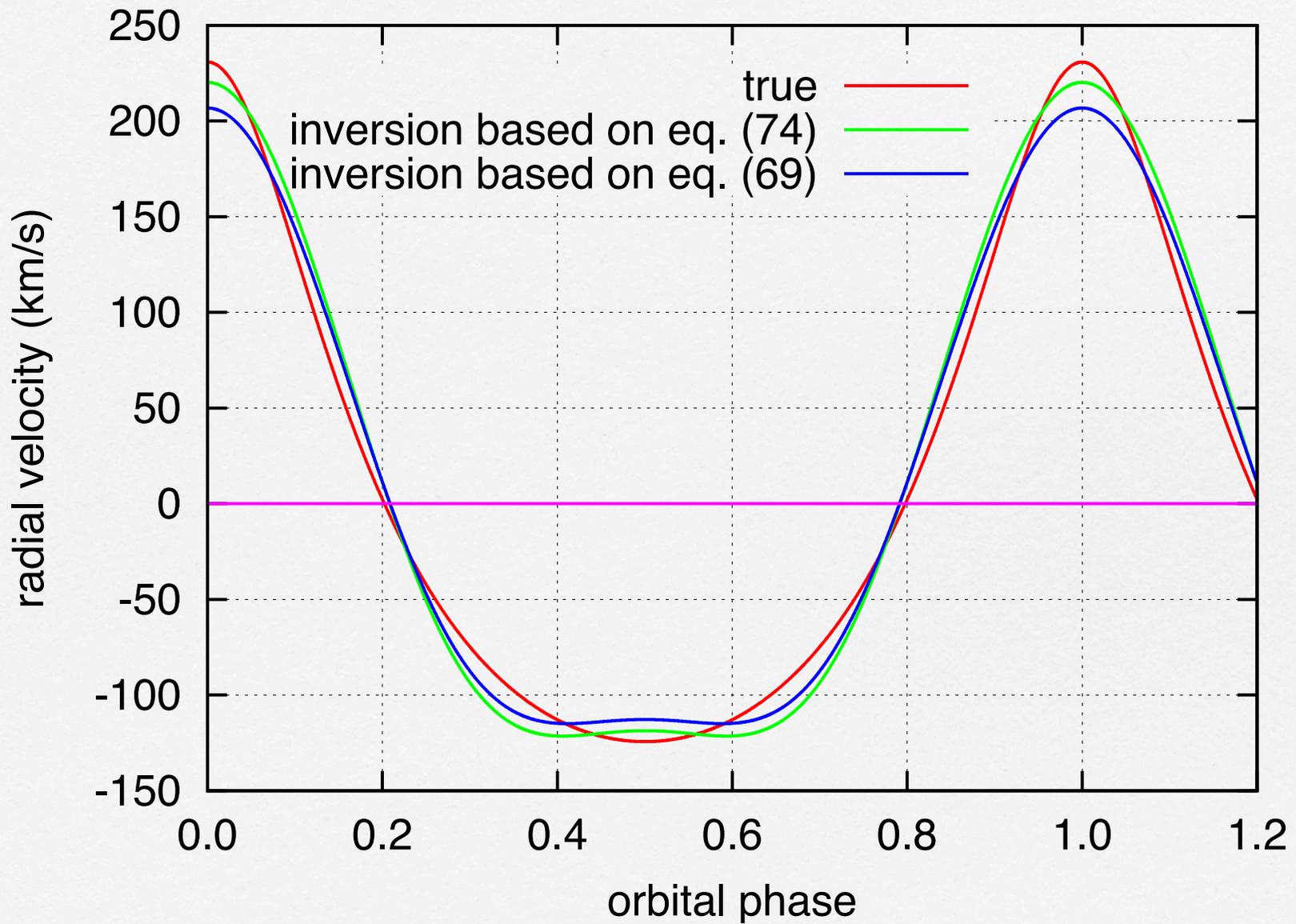
$$r = a(1 - e^2) / (1 + e \cos f)$$

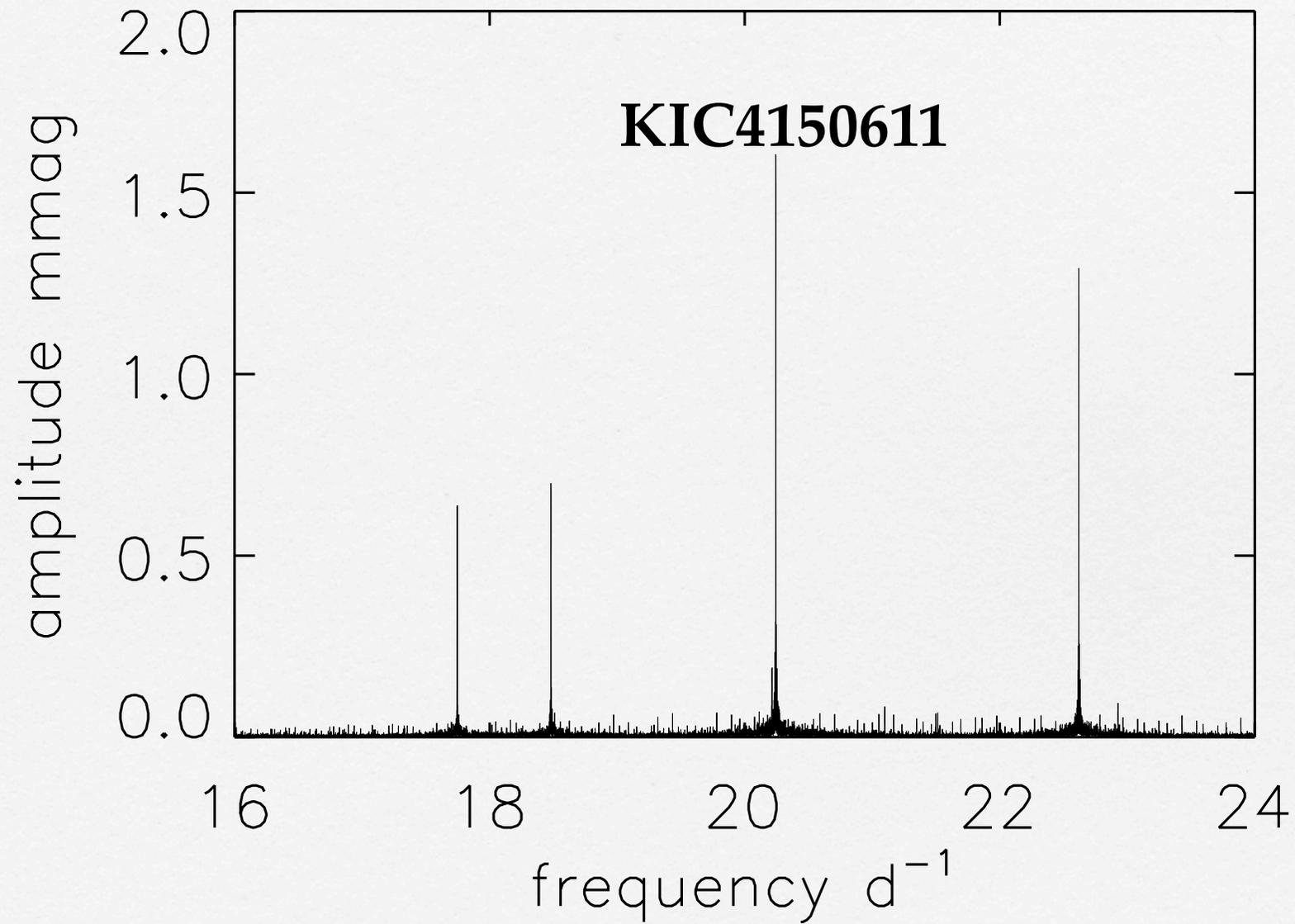
$$r df/dt = a \Omega (1 + e \cos f) / (1 - e^2)^{1/2}$$

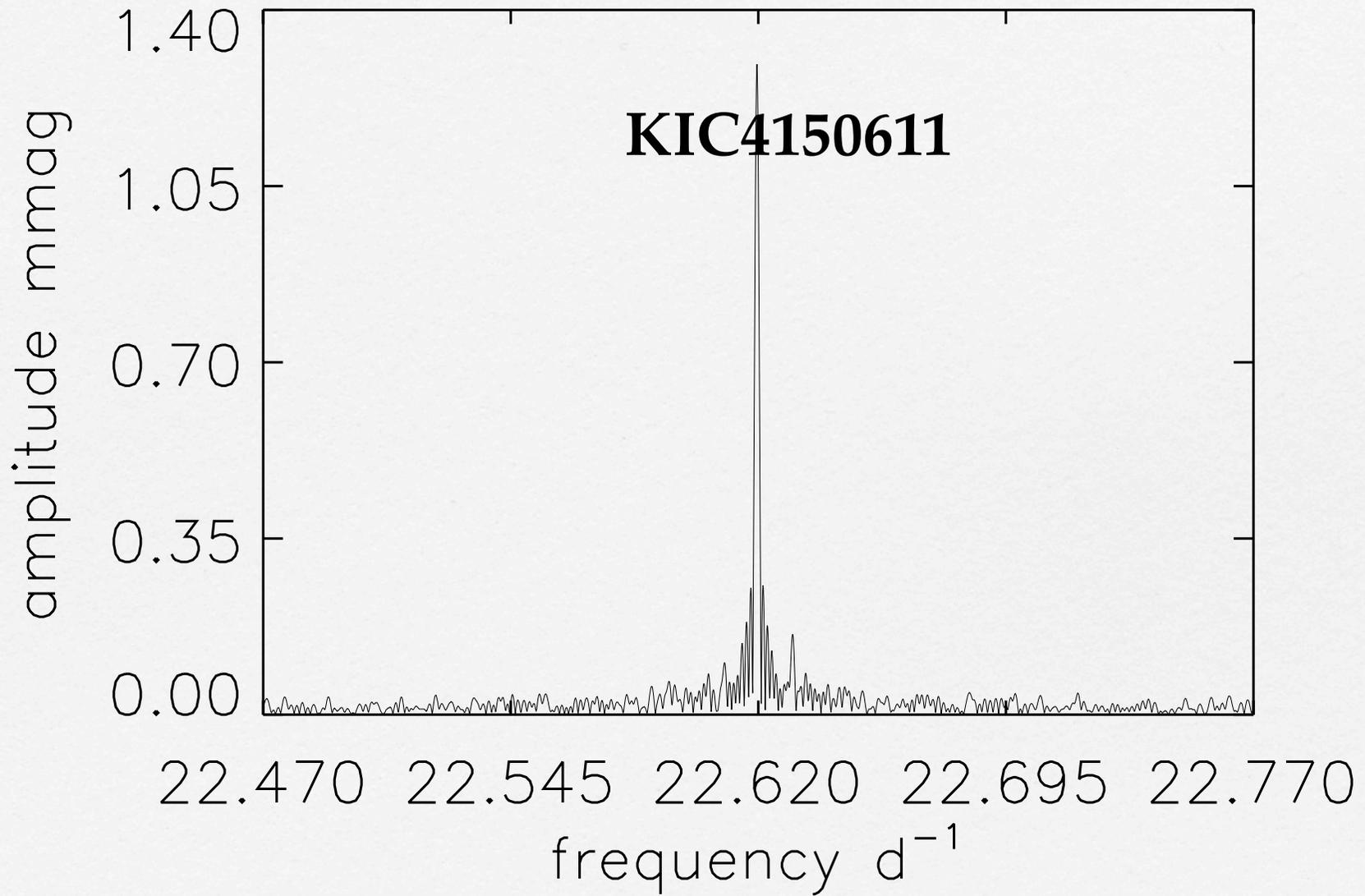
$$dr/dt = a \Omega e \sin f / (1 - e^2)^{1/2}$$

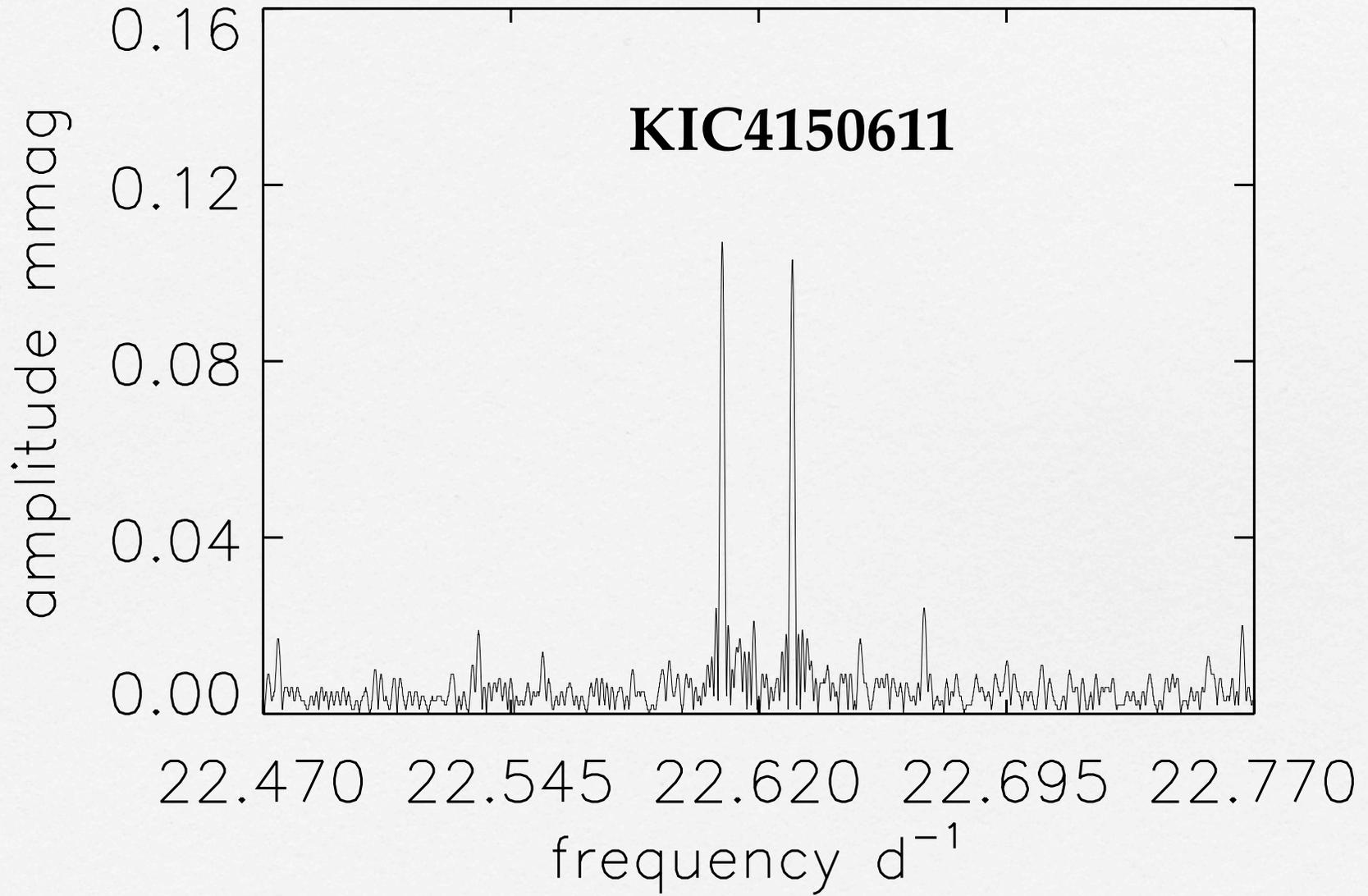
- 測光データをフーリエ変換
- 微細構造の振幅と位相から軌道要素を抽出

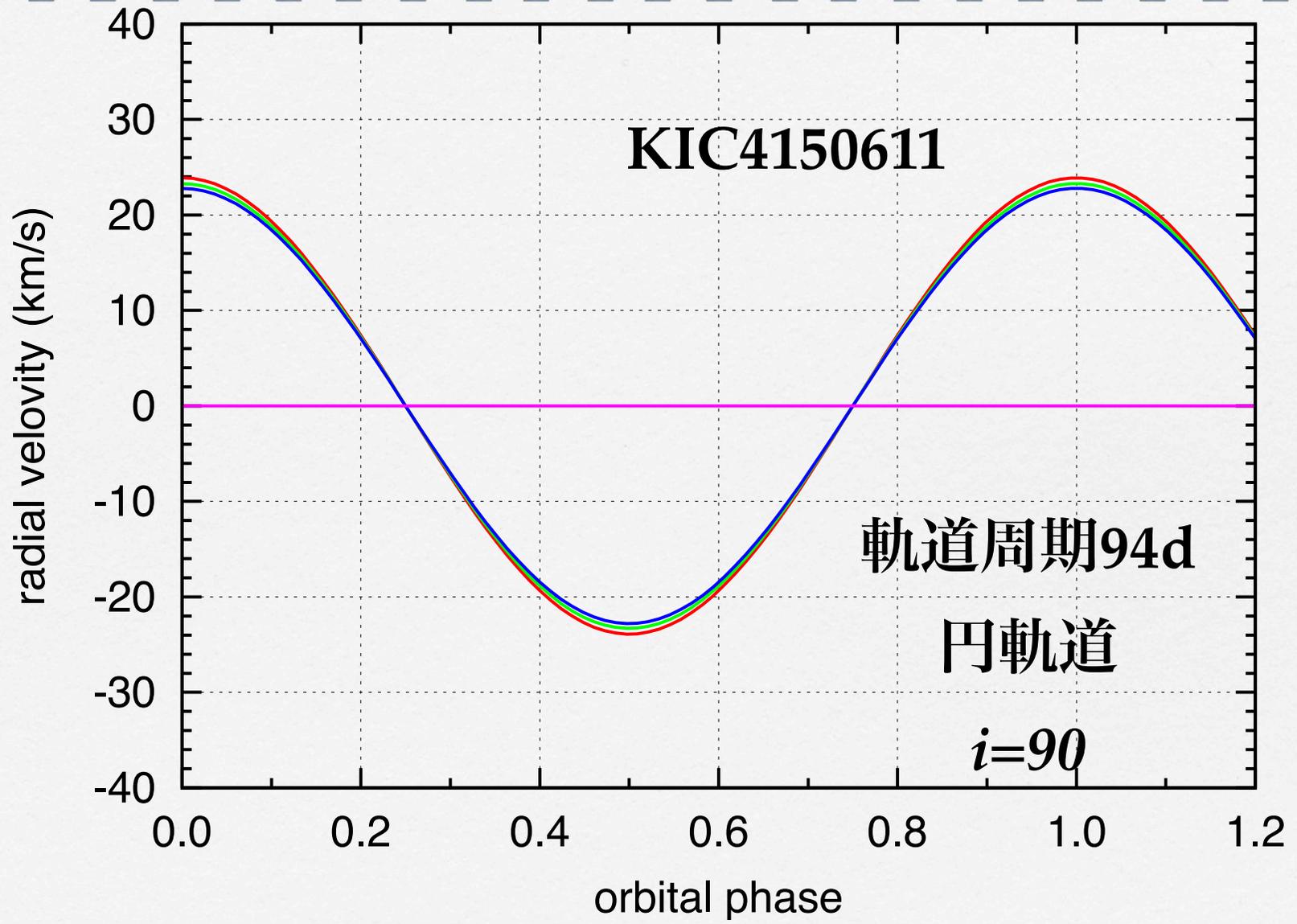












7. 系外惑星探索に関する可能性

- 測光による蝕の観測から惑星の大きさ
- 惑星質量も同時に測光から
- 惑星の密度が測光観測のみから決定
- 早期型星でも探索可能

8. まとめ

- 星の内部を観測するための眼
- 興奮する程の圧倒的な精度
- 結果は他では得られない質的な新しさ
- 手法の理論も新規
- 結果の理論的解釈も必要