

Kepler 衛星計画の概要と成果（星震学を中心として）

高田 将郎

東京大学大学院理学系研究科天文学専攻

2011 年 12 月 28 日（水）

目的

- 系外惑星探査、特に生命居住可能領域 (habitable zone) にある地球と同程度の大きさの惑星を見つけること

惑星検出方法

- トランジット法: 惑星が中心星を隠す「食」現象を検出
- 特定領域 (白鳥座、琴座方向) の 15 万個以上の星を測光モニター

運用

- 打ち上げ: 2009 年 3 月 6 日
- 運用期間: 3 年半 (延長の可能性あり)

- 高精度長時間連続測光観測
- ▶ 変光星観測（固有振動の測定）に適する
- 星震学も Kepler 計画の目的の一つに
（もちろん、community のサイズとしては系外惑星の方がずっと大きい）
- Kepler Asteroseismic Science Consortium (KASC)
 - 参加者約 500 人
 - 13 のワーキンググループ（変光星の型もしくは課題ごと）

- 1 Solar-like p-mode Oscillations
- 2 Oscillations in Clusters
- 3 Beta Cephei Stars
- 4 Delta Scuti stars
- 5 roAp stars
- 6 Slowly Pulsating B-stars
- 7 Cepheids
- 8 **Red Giants**
- 9 Pulsations in binary and multiple stars
- 10 Gamma Doradus stars
- 11 Compact pulsators
- 12 Miras and Semiregulars
- 13 RR Lyrae stars

赤色巨星の構造と進化

構造

- 「高密度の中心部」と「広がった外層」の2重構造

進化

- ① RGB: 水素殻燃焼段階
- ② ヘリウムフラッシュ (低質量星の場合)
- ③ red clump stars: ヘリウム核燃焼段階

課題

- (1) 1と3は、外見上 (L , T_{eff}) 変わらないので観測的に区別するのは困難。
- (2) 主系列星から巨星への進化に伴い、中心部は外層より速く自転するようになることが予想される。観測的に検証できるか？

赤色巨星の振動

- 外層の対流による励起 (太陽と同じ)
- **混合モード**の存在 (中心部で重力波的、外層で音波的な振動)
観測されるのは、外層で大きく振れるモードのみ
(中心部の情報が得られる)
- 光度が小さい場合、まだ中心への質量集中度がさほど高くないので、放射減衰は重要ではない。
($M \lesssim 2M_{\odot}$, $R \sim 5R_{\odot}$, $L \sim 20L_{\odot}$ ぐらいの星を想定)

恒星の中の波と固有モード

(磁場や自転のない場合)

● 波の種類

波の種類	復元力	周波数
音波	圧力	高い
重力波	重力(浮力)	低い

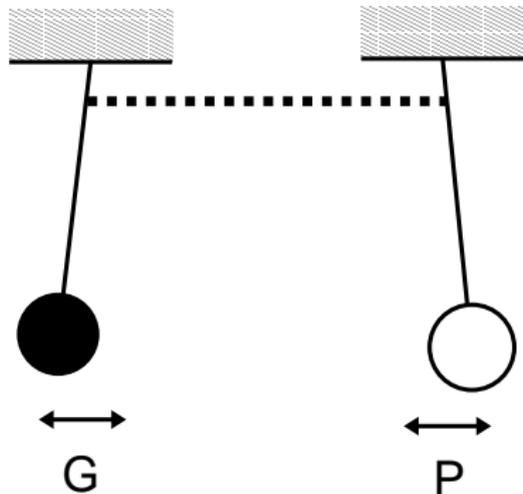
(浮力は非動径振動の場合のみ復元力として働く)

● 固有モードの種類

星の種類	固有モードの種類
主系列星	音波だけ(pモード)もしくは重力波だけ(gモード)で構成される
進化した星	中心部で重力波、外層で音波的な振動をする固有モード(混合モード)が出現

混合モードとは？

「連成振り子」のようなもの



G 中心部で重力波的に振動する系

P 外層で音波的に振動する系

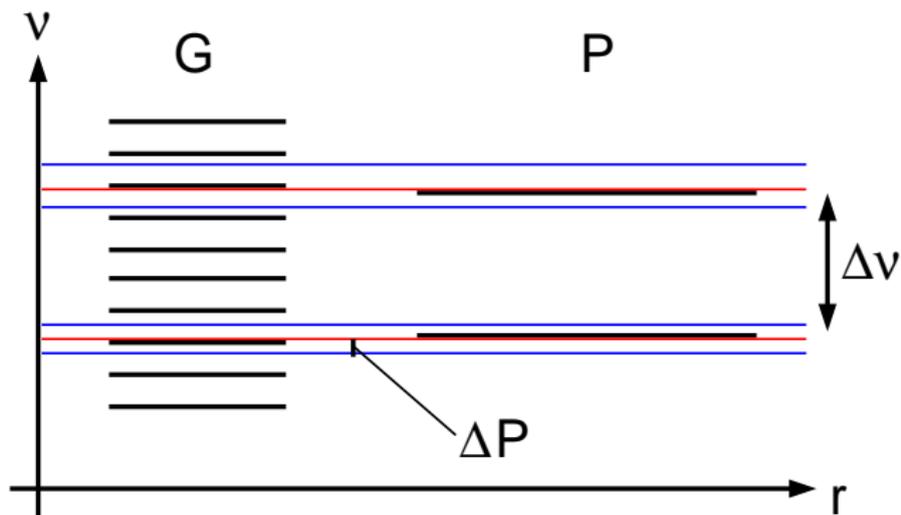
--- (弱い) 相互作用 (evanescent region の厚さ)

混合モードの性質

固有関数のタイプ

タイプ	固有関数	観測の可否	中心部の情報	外層の情報
A			x	
B				
C		x		x

観測される混合モードと周波数スペクトル



G系のスペクトルは等周期間隔、P系は等周波数間隔

- A 外層にトラップされるモード
- B 中心にも外層にもトラップされるモード

パワー・スペクトルを特徴付ける量

$\Delta\nu$ 平均密度の目安

$$\Delta\nu \sim \sqrt{\frac{GM}{R^3}}$$

ΔP 質量の中心集中度の目安

$$\Delta P \propto \left[\int \frac{N}{r} dr \right]^{-1}$$

N : 浮力 (Brunt-Väisälä) 周波数

中心集中度が大きい (N が大きい) ほど ΔP は小さくなる

水素殻燃焼段階とヘリウム核燃焼段階の区別 [Bedding et al. (2011)]

低光度の赤色巨星 400 個の振動を測定

- 動径モード ($l = 0$) の周波数間隔 ($\Delta\nu$)、双極子モード ($l = 1$) の周期間隔 (ΔP) を測定
- 分布は2つにはっきり分かれる (中心部の質量集中度の違いを反映)
- ▶ ΔP の小さい方が水素殻燃焼段階、大きい方がヘリウム核燃焼段階と解釈できる

内部微分回転の検出 [Beck et al. (2012)]

3つの赤色巨星について

- 双極子モード ($l = 1$) の **rotational splitting** を検出
- **A** タイプは主として外層の、**B** タイプは主として中心部の自転角速度の情報を持つ
- 中心部は、外層より約 10 倍以上高速に回転していると評価 (恒星内部の角運動量輸送過程に対する情報)

- Kepler 計画は、星震学にも多大な恩恵をもたらしつつある。
- 赤色巨星の星震学は、Kepler の高精度のデータを契機にして大きく発展しつつある。

- Beck et al., 2012, Nature, in press
- Bedding et al., 2011, Nature, 471, 608