

Stellar Pulsations from Synchronized Elements

太陽・恒星 12b

お茶の水女子大学 高橋沙綾

脈動変光星とは膨張収縮によって明るさが変わる星である。球殻の固有振動を扱う従来の脈動理論によってこれらの星について多くのことが分かってきた。しかし長期間にわたる変光の特徴にはまだ説明しきれないものが多い。そこで、星を多数の振動する部分要素の結合とみなし、多様な変光を部分要素の同期現象によって説明する「脈動変光星の同期モデル」を考案した。対流によって駆動される長周期脈動変光星は多数のローレンツモデルを結合させたモデルによって説明した。変光のパワースペクトルに $1/f$ ゆらぎが見られ、観測と一致する結果となった。

1. はじめに

脈動変光星は古くから研究されており、その理論は星のパラメータの決定、進化、内部構造の解明に役立ってきた。しかし、すべての現象が理解されているわけではない。たとえば、RR Lyr 型星の Blazhko 効果、セファイドの多重周期、モードの分岐など脈動周期よりも長い時間にわたって起こる変化の一部が未解明である[1]。さらに長周期脈動変光星に関しては不規則な変光がみられており、そのメカニズムは完全には分かっていない。またパワースペクトルに $1/f$ ゆらぎがみられるといった報告もある[2]。

従来の脈動理論は、星の脈動を球殻の固有振動とみなしたもので、脈動の多様性はどのようなモードがどれぐらいの強度比で存在しているかで説明される。しかし、うなりや共鳴の周期を超えて変化する成分や、ある特定の高次モードが生き残る理由は分かっていない。現在は計算機によって流体モデルを解くことで星のパラメータによって多様な脈動が再現できるものの、その理由が分かったとは言えないのではないだろうか。

そこで我々は「脈動変光星の同期モデル」を提案する。これは星表面の部分的な振動が同期することで星全体の脈動として観測されるという考え方をもとにしている。従来の球殻の固有振動をトップダウンの考え方とみなすと、当モデルはボトムアップ方式だといえよう[図 1]。各要素は星の脈動メカニズムを簡単な形で含む自励振動となっており、それらの同期の程度によって多様性が現れると考えられる。

第二章では κ -メカニズムによる脈動のモデル、第三章では対流によって駆動される脈動の同期モデルを説明し、結合の強さを変化させることで得られた脈動の特徴を簡単にまとめる。

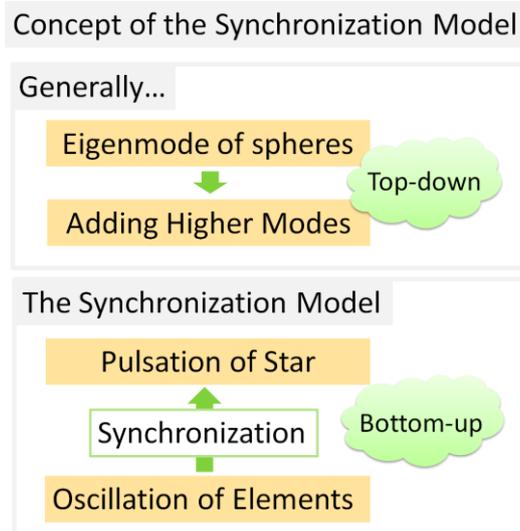


図 1. 同期モデルの概念

2. κ -メカニズムによる脈動

2-1. κ -メカニズムのモデル

κ -メカニズムは星の膨張収縮によりガスの部分電離層の電離度が変化し、それに伴うガスの放射吸収率の変化によって脈動の増幅を説明するものである。星の収縮の際はガスの電離度が高まり、放射は吸収される。星が膨張に転じると電離度の低下によって吸収されていた放射が放出され、膨張を助長する。ここで電離度が担う放射のせき止め・解放の役割を負性抵抗と同様に考えることができる。そこで今回は κ -メカニズムの効果を Van der Pol 方程式の抵抗を用いて各部分要素の振動の方程式に組み込んだ。

要素 i の従う方程式は以下のとおりである。

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} + \frac{dV}{dx_i} = \mu(a_i^2 - x_i^2) \frac{dx_i}{dt} + \lambda(x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1})$$

$V = \alpha/x^2 - \beta/x$ とし、左辺は重力と圧力によるポテンシャルのもとでの微小振動を表現している。右辺第一項が Van der Pol 型の負性抵抗で κ -メカニズムを表現している。さらに右辺第二項で要素 i は両隣の要素と引き合うように結合されている。

星の光度曲線と radial velocity curve は対応している事が分かっているため、 dx_i/dt を平均したものをこのモデルの光度曲線とする。

2-2. 結果

$N=50, \mu=0.3, \alpha=1, \beta=1.5$ のもと、初期条件 x_i と dx_i/dt はランダムに選択し、負の抵抗の閾値 a_i もランダムに選んだ。 λ を変化させた結果は以下のとおりである。

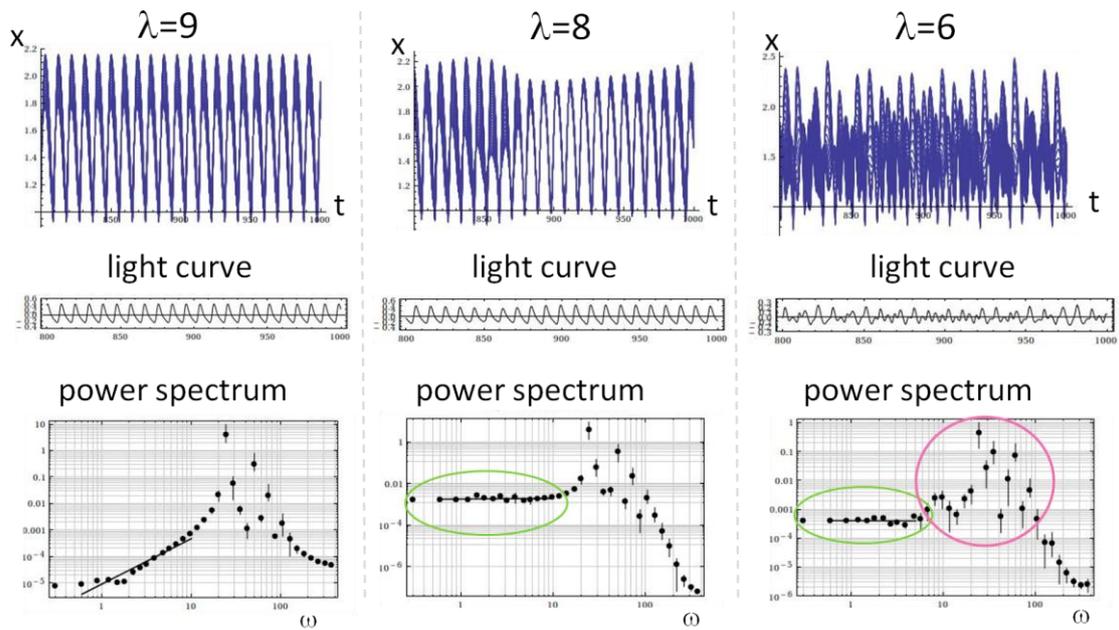


図 2. κ -メカニズムのモデルの計算結果 ($\lambda = 9, 8, 6$ の場合)
 上段: x_i のプロット、中央の段: 光度曲線、下段: パワースペクトル

λ が大きいとき、つまり結合が強いときはすべての要素が完全に同期しており、結合が弱くなるほど要素の振動が不揃いになっていくことが分かる。 $\lambda=9$ の時、振幅は同期していないものの、位相は完全に同期しており、リミットサイクル振動が見られた。パワースペクトルにもきれいにピークが見えている。 $\lambda=8$ の際は位相のずれによって振幅が緩やかに変化している様子が得られ、Blazhko 効果のようにも見える。さらに結合が弱くなった $\lambda=6$ のとき、多様な周期がある事が分かる。類似のものでうなりやこぶが見られるものもあった。また、結合が弱くなるとパワースペクトルの長周期成分が増加するという結果が得られた。

3. 対流による脈動

3-1. 対流のモデル

対流による脈動の一つとして太陽表面の細かい振動が挙げられる。これは対流が星の表面を打ち、その波が星全体に伝わり星の固有振動数と一致すると生き残る、といった原理で **stochastic oscillation** とよばれる。一方、赤色巨星の振幅の大きな脈動も表面の深い対流層によるものだと考えられているが、脈動の中での対流の振る舞いを記述する理論が不完全なため、完全には理解されていない。

今回は簡単のため一つの要素を対流渦とみなし、ローレンツモデルで置いた。ローレンツ方程式を y で結合させるとき、要素 i の方程式は以下のとおりである。

$$\frac{dx_i}{dt} = -3(x_i - y_i)$$

$$\frac{dy_i}{dt} = -x_i z_i + 26.5x_i - y_i - \frac{\varepsilon}{2}(y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1})$$

$$\frac{dz_i}{dt} = x_i y_i - z_i$$

なお各係数は単一のローレンツモデルがストレンジアトラクタを描くようにとってある。また、ローレンツモデルにおいて z は対流の上下の温度差を表現するため、星の光度は z_i^4 の和で定義する。

3-2. 結果

$N=50$ のもと、初期条件は $x_i, dx_i/dt, y_i, dy_i/dt$ はランダムに選択し、 $z_i=dz_i/dt=0$ として計算し、以下の結果を得た。

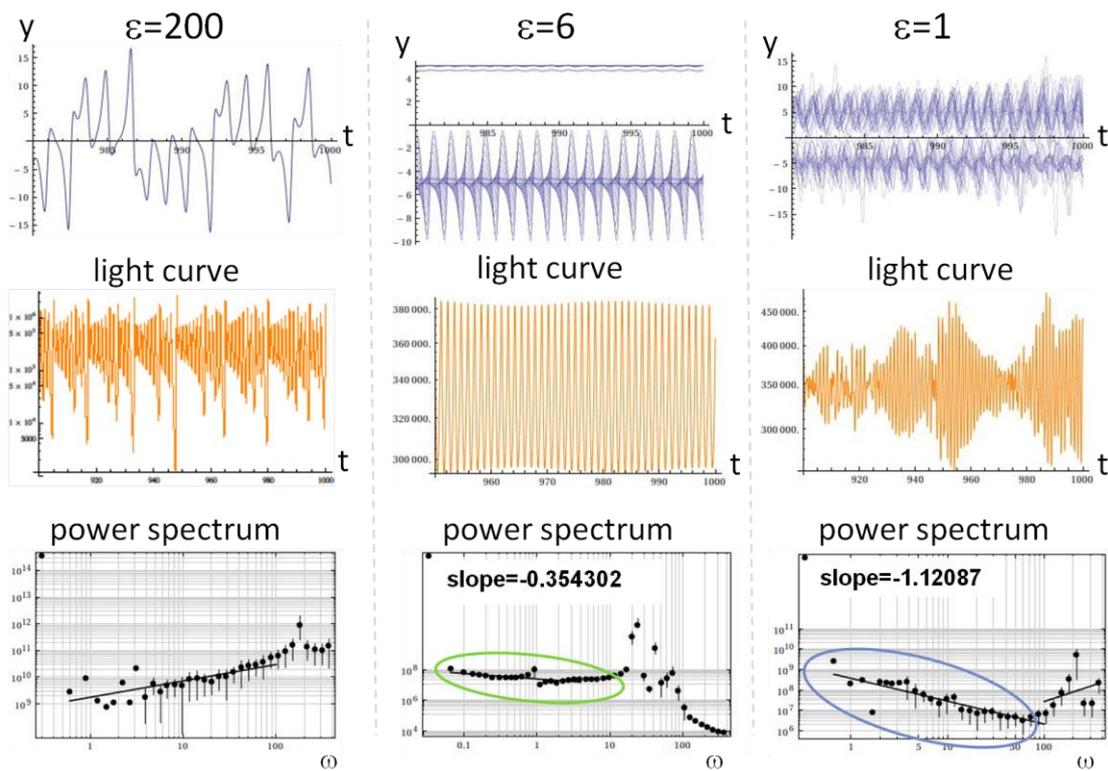


図 3. 対流のモデルの計算結果 ($\varepsilon=200, 6, 1$ の場合)

上段: y_i のプロット、中央の段: 光度曲線、下段: パワースペクトル

対流のモデルでも κ -メカニズムのモデルと同様に、結合が強い場合 ($\varepsilon=200$) すべての要素は同じタイミングで振動している。つまり星全体を一つのローレンツモデルで表した場合に等しい。結合が弱くなると同期する要素と同期しない要素に分かれはじめ、 $\varepsilon=6$ の場

合にはミラ型のような高度曲線になっている。 $\epsilon=1$ の場合には、かなり不規則な振動が得られた。パワースペクトルをみると、やはり結合が弱くなると長周期成分が増加することが分かった。とくにこの対流のモデルでは、 $\epsilon=1$ でパワースペクトルの傾きが-1に近い(1/f ゆらぎを持つ) 結果となった。

ここで、結合 ϵ によってパワースペクトルの傾きがどのように変化するかをプロットした。 ϵ が約 0.6 より大きい値で 1/f ゆらぎが得られている[図 4]。 ϵ が 0 の時 1/f ゆらぎがないことから、要素の相互作用が 1/f ゆらぎをもたらしていると考えられる。

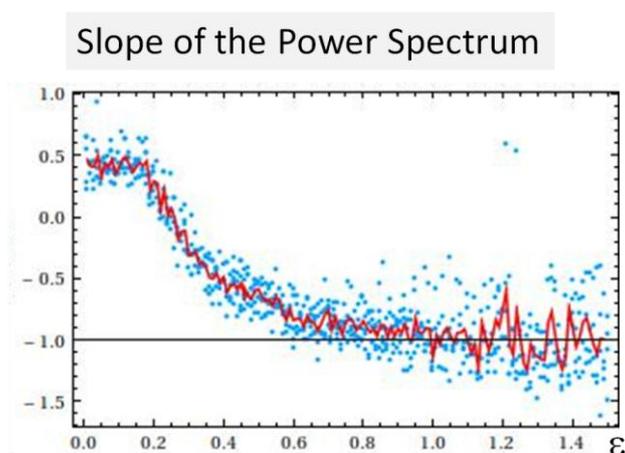


図 4. パワースペクトルの傾き

4. まとめと今後

脈動変光星の同期モデルを κ -メカニズムと対流、二つの励起メカニズムの場合について考案した。いずれのモデルも、結合が強いほど全要素がそろいやすく、規則的な脈動が得られた。結合を弱くするほどに要素の振動はそろいにくくなり、互いが打ち消しあう形で振幅が小さく不規則な脈動が得られた。例えば κ メカニズムのモデルでは、うなりやこぶのような構造がみられた。また、結合が弱いほど長周期成分が増加し、対流のモデルではパワースペクトルに 1/f ゆらぎが得られた。以上のことから、星の脈動の長期的な変化や多様性は要素の相互作用によってもたらされるのではないかと考えられる。

ここで結合の物理的意味が重要になる。現時点では、例えば音速（星の密度）ではないかと推測できるが、大雑把に見て星の密度が上がるほど細かい脈動をする星が多いことから、このモデルでは逆の結果が得られているように思われる。また、他のパラメーターと独立して扱うことができるかどうかという点も考える必要がある。単純さは保ちながらも、モデルをより実際の星に近づけるために他のパラメーターを含め今後検討する。さらに、観測との対応付けの方法も検討していく。

参考文献

- [1] 例えば、J. Daszynska-Daszkiewicz, *Comm. in Asteroseismology*, **159**, 2009 (arXiv: 0901.4842)
- [2] L. L. Kiss et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **372**, 1721-1374, 2006