

氏名・(本籍)	いし だ とし ひと 石 田 俊 人
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第 1156 号
学位授与年月日	平成 2 年 3 月 28 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 天文学専攻
学位論文題目	Studies of Nonlinear Effect in Double-mode Cepheids (二重周期ケフェイドにおける非線形効果の研究)
論文審査委員	(主査) 教 授 竹 内 峯 教 授 須 田 和 男 助 教 授 氏 家 慧 一

論 文 目 次

Abstract

Chapter 1 Introduction

1-1 Observational Properties

1-2 Mass Discrepancy

1-2-1 Various Mass Determination Methods

1-2-2 Proposals to Reconcile Mass Discrepancies

1-3 Hydrodynamical Modeling

1-4 Overview of the Rest of the Thesis

Part I Analytical Investigations

Chapter 2 Oscillator Model Equations

2-1 Basic Equations

2-2 Derivation of Oscillator Model Equations

- 2-3 Effect of Synchronization
- 2-4 A Criterion of Double-mode Pulsation from Coupling Coefficients
- 2-5 Discussion
- Chapter 3 Amplitude Equations
 - 3-1 Simple Inference of Amplitude Equation Form
 - 3-2 Amplitude Equations of Two-mode Nonresonant Coupling Case
 - 3-2-1 Amplitude Equations in Wave Energy Form
 - 3-2-2 Modal Selection Properties
 - 3-3 The Amplitude Equations of Three-mode Nonresonant Coupling Case
 - 3-4 Concluding Remarks
- Chapter 4 Summary of Analytical Methods
- Part II Hydrodynamic Models
- Chapter 5 Effect of Helium Enrichment
 - 5-1 Model Parameters
 - 5-2 Results
 - 5-3 Derivation of the Modal Coupling Coefficients
 - 5-4 Conclusion
- Chapter 6 An Example of the Three-mode Nonresonant Coupling
 - 6-1 Models
 - 6-2 Results
 - 6-3 Discussion
 - 6-3-1 The Low Mass Model and Double-mode Cepheids
 - 6-3-2 The High Mass Model and the Shortest Period Cepheid HR 7308
 - 6-4 Conclusion
- Chapter 7 A 500-meshes model
 - 7-1 Method
 - 7-2 Results
 - 7-2-1 Linear Model
 - 7-2-2 Hydrodynamic Model
 - 7-3 Conclusion
- Chapter 8 Summary of Hydrodynamic Models
- Summary and Conclusion
- Acknowledgments
- References

論文内容要旨

二重周期ケフェイドは、基本振動と第一陪振動の2つのモードで同時に脈動している種族 I のケフェイド型脈動変光性である。これらの星において観測される2つの周期を、線形計算で得られる周期と比較して導かれる質量は、標準的進化モデルを用いるなど他の方法で得られる質量より、非常に小さい値となることが知られている。また、流体力学的モデルによる数値計算では、二重周期ケフェイドに相当するモデルが得られていない。このため、二重周期ケフェイドは、脈動星の理論における重要な未解決問題の1つとなっている。この二重周期ケフェイドの問題の原因としていくつかの候補が挙げられている。そして、そのうちの1つとして、非線形効果が指摘されている。

そこで、本研究では二重周期ケフェイドにおける非線形効果を、解析的解法、および、流体力学的モデルによる数値計算の2つの方法で総合的に研究した。

第1章では、二重周期ケフェイドに関するこれまでの研究状況をまとめる。すなわち、観測による二重周期ケフェイドの性質、さまざまな質量決定法、その間の矛盾の問題と提案されている解決策、流体力学的モデルによる再現問題と提案されている解決策が述べられる。

第I部では、解析的研究について述べる。

第2章では、非共鳴的2モード結合の場合の振動子モデル方程式を調べる。ここでは、これまでの研究の結果を発展させて、線形断熱の場合のモード結合係数から、二重周期脈動が起きるためにモデルのパラメーターの満たすべき条件が導かれる。さらにこの条件に、線形モデルから計算されている結合係数を当てはめて、標準的進化モデルから導かれる質量のモデルのほうが、質量を減少させたモデルよりも、二重周期脈動となるパラメーターの範囲が広いことが示される。また、この二重周期脈動となる範囲は、非線形効果によって決まっていることがわかる。

第3章では、これまで調べられていなかった非共鳴的3モード結合の場合の振幅方程式の定常解とその周りの解のふるまいを調べる。3つ以上のモードが結合している場合、モード結合の変化によりカオスの振動が起り得ることが示される。これは、これまで脈動星で起り得るカオスの振動としては、指摘されていなかったものである。なお、流体力学的モデルにおける3モード結合の実例が第6章で示される。

第4章では、解析的研究のまとめを行う。

第II部では、流体力学的モデルによる数値計算について述べる。

第5章では、脈動星の外層中のヘリウム量の増加による模型の性質の変化を調べた。その結果、ヘリウム量の増加は、第一陪振動を選択的に強め、二重周期を再現する方向には働かないことがわかった。また、模型のふるまいを非共鳴的2モード結合の場合の振幅方程式に当てはめて、モード結合係数が導出される。二重周期脈動となるためにこれらの係数が満たすべき条件を適用した結果、この章で調べた模型は、二重周期脈動となるかどうかの境界近くにあることが示される。

第6章では、第3章で解析的に研究した非共鳴的3モード結合の流体力学的模型における実例が示される。ここでは、同じ光度、有効温度で質量の異なる2つの模型の数値計算を行った。2つの模型で得られた結果は、以下のようなものである。

- (1) 質量の小さい模型では、基本振動、第一陪振動、第二陪振動の3つのモードが、複雑に相互作用しているようすが示された。この模型は、これまで二重周期ケフェイドの模型として調べられ、第一陪振動が最終的に残るモードであることがわかっている2つの模型の中間のパラメーターをもつ。すなわちこの模型は、流体力学的模型がパラメーターの小さな変化により大きく性質を変えることを、実例として示したことになる。このような結果は、流体力学的模型のモード選択の性質が、非線形的な複雑な過程で決まっていることを示唆している。
- (2) 質量の大きい模型は、第二陪振動が最終的に残るモードであることがわかった。この模型は、第二陪振動での脈動星の候補などとして多くの観測者の興味を引いている天体 HR7308 が、脈動不安定帯を初めて横切っている天体である可能性を明らかにした。ただしこれは、二重周期ケフェイドとは関連しない副次的な結果である。

これら2つの模型のふるまいは、いずれもこれまでの流体力学的模型の数値計算では得られていないものであり、非共鳴的2モード結合の振幅方程式では説明できないものである。

解析的研究、および、流体力学的模型の数値計算により得られた上記のような結果から、非線形効果が二重周期ケフェイドにおいて重要であることが明らかとなった。第5章で調べた模型が二重周期で脈動する境界近くにあることを考えると、これまで二重周期ケフェイドに相当する模型が見つからないのは、従来用いられている流体力学的模型の精度不足により、脈動星の複雑な非線形的性質を再現していないためではないかと考えられる。そこで、第7章では、模型中の層の数を大幅に増加させて、その効果を調べた。その結果、脈動星の基本的性質の1つである各モードの線形成長率が、模型の層の増加により変化し、十分多数の層になると収束することがわかった。

第8章では、流体力学的模型による数値計算の結果をまとめる。

本研究により、二重周期ケフェイドにおいて非線形効果が重要であることが明らかとなった。また、流体力学的模型の改良を試みた結果、従来の粗い模型は、脈動星の基本的性質においても不正確であることがわかった。このような粗い模型では、複雑な非線形的効果を再現できないことは、おおいに有り得ることである。これらのことから、今後、流体力学的模型で二重周期ケフェイドを研究するには、十分な精度の模型でパラメーターの変化による非線形効果の微妙な変化を細かく調べる必要があると考えられる。

論文審査の結果の要旨

本論文は、ケフェウス型変光星が二重の周期性を示す条件について理論的に研究し、非線形効果の定量的検討が重要であることを指摘したものである。

ケフェウス型変光星は典型的な脈動変光星であり、詳しく研究され、恒星の構造や天体の距離決定にあたって依りどころとされている重要な星であるが、その変光に際して二重の周期性の認められるいわゆる二重周期ケフェイドについては、流体力学的シミュレーションによって再現する試みが失敗し、その周期比の説明にも困難がある。

申請者は、各種パラメータを変えていくつかの流体力学的模型について二重周期性の再現を不可能であった結果のうえに立ち、ファンデルポル項を持つ振動子の結合した模型について、従来の研究の不備な点を改め、二重周期性が極限周期解の振幅の組合せのある限られた範囲でのみ現れることを指摘し、また、3個のモードが交互に発現する流体力学的模型を見出し、このような場合にはカオス的な複雑な振動が生ずることがあり得ることを指摘した。このような結果は、二重周期ケフェイドが、非線形効果の微妙な条件が満たされた際に発現するのではないかということを示している。

申請者は、さらに従来の流体力学的模型における差分化が、僅か数十個の層への分割の程度であることに注意し、これを数百個の層に区分して計算を試みた。その結果、恒星模型の振動的安定性のような基本的量が、分割数によって著しく変化することを見出した。この結果は、二重周期性の発現に敏感に関わる基本的な振動の性質が、従来の模型では正しく取り扱われていなかった可能性を示すものである。したがって、より多くの層に区分した流体力学的模型の研究の重要性が明らかとなった。

以上のように、本論文は著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、石田俊人提出の論文は、理学博士の学位論文として合格と認める。