

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

Orbital Evolution and Stability of
Relativistic Multi-Body Systems

相対論的な多体系の軌道進化及び安定性

申請者

Haruka	SUZUKI
--------	--------

鈴木	遼
----	---

Department of Pure and Applied Physics

Research on Theoretical Astrophysics

2021年2月

重力により束縛された天体の多体系力学は、Kepler の法則の発見に端を発し、16 世紀から今日まで続く天文学における最も古い研究分野の一つである。Poincare の定理が示すように、3 つ以上の天体を含む系は非可積分であり、個々の天体の軌道は時にカオス的な振る舞いを示すなど、一般に複雑である。こうした多体系の運動をどのように解析するかという問題は多体問題と呼ばれ、18 世紀頃からは解析力学を用いて議論されるようになり、様々な特殊解や軌道共鳴といった現象などが発見されるとともに、軌道の安定性が様々に議論されてきた。近年では、多くの系外惑星の発見に伴い、そうした惑星系の形成理論への応用という文脈でも多くの研究がなされている。特に最近では、計算機能力の向上により、シミュレーションを用いた多体系の運動方程式の直接積分が長時間多数行えるようになり、多体問題の理解は一層深まっている。

しかしながら、こうした研究のほとんどは、ニュートン力学の枠組みで行われたものである。これは、多体問題の対象が研究の当初より惑星系や衛星系が主であったため、一般相対性理論によるニュートン重力への補正が極めて小さく、無視できるからであるが、もし多体系を構成する天体がブラックホールや中性子星、白色矮星といった、いわゆるコンパクト天体であるとすると、一般相対論的効果が必ずしも無視できない。水星の近日点移動からも分かるように、一般相対論的重力のもとでは、構成天体の軌道の時間発展にニュートン力学のそれとは定性的に異なるところが現れ、その安定性にも影響が出ることが予想される。

コンパクト天体を含む重力多体系は実際にその存在が観測されている。例えば、2014 年にはパルサーとして観測された中性子星の周りを二つの白色矮星が周回している系が発見され、その軌道には相対論的効果が水星軌道以上に顕著に現れていることが報告されている。また、2017 年にノーベル物理学賞を受賞した、LIGO によるブラックホール連星の合体からの重力波直接観測は、その後太陽質量の数 10 倍程度のブラックホール連星が多数存在することを明らかにしている。また、2020 年のノーベル物理学賞となった研究では、天の川銀河の中心に超巨大ブラックホールが存在することが、近傍天体の運動の観測から明らかにされたが、こうした超巨大ブラックホールはどの銀河の中心にも存在すると考えられており、一般相対論効果が無視できないコンパクトな多体系を形成していても全く不思議はない。

本学位論文は、こうしたことを背景に、コンパクト天体からなる 3 体系における、古在機構と呼ばれる軌道共鳴現象と、軌道の Hill 安定性について、一般相対論を考慮した解析を行っている。古在機構は、最近では von Zeipel-Lidov-Kozai 機構と呼ばれることが多くなってきているが、3 体目の天体が中心 2 天体から離れたところを周回するいわゆる階層 3 体系で起こる現象で、2 つの軌道面の相対的な傾きと中心連星軌道の離心率が、

軌道周期よりもずっと長いタイムスケールで交互に励起するものである。一方、Hill 安定性は軌道間の距離により系の安定性を議論するものであり、直感的には「2つの天体の軌道が極めて接近すると、天体同士の衝突やカオス的な動きによる天体の系からの離脱などを誘発する」ということに基づいている。本学位論文は4つの章と2つの補遺から構成されている。以下、各章の概要とその評価を述べていく。

第1章はイントロダクションで、申請者は、天体力学を議論する上で必要となる Kepler の軌道要素を導入し、それに対する Lagrange の惑星方程式や、永年変化を記述するためによく用いられる二重平均法などについて簡潔にまとめている。また、本論文で一般相対論的效果を扱う際に用いるポストニュートン近似と、そのもとでの運動方程式である Einstein-Infeld-Hoffmann 方程式についても、ここで説明している。

第2章以降が申請者の行った研究である。まず第2章では、連星パルサーを含む3体系における古在機構による連星軌道離心率の誘起が重力波放出に与える影響と、パルサータイミング観測によるその検出可能性について議論している。パルサーは自転する中性子星で、そこから放出される電波が自転周期で規則正しく観測されるため、パルサーが連星の構成天体になっていると軌道要素を詳細に決定することができる。Hulse と Taylor は、連星の軌道長半径が重力波の放出により一般相対論の予言通りに短くなっていていっていることを見出し、1993年にノーベル物理学賞を受賞している。実際には、電波観測によって得られる近点通過時刻の累積変化 (Cumulative Shift of Periastron Time: CSPT) を理論と比較することになる。申請者はこの連星パルサー系の周りを3つ目の天体が周回している場合を考えている。重力波放出率は軌道の離心率に大きく依存するため、古在機構により中心連星の離心率が大きくなると重力波がより多く放出されるため、CSPT は孤立連星の場合とは異なる特徴を示すと予想される。申請者はこれを定量的かつ詳細に調べた。3体系では CSPT が簡単な関数で与えられないため、申請者はまずポストニュートン近似を用いた運動方程式を数値的に長時間積分し、一周ごと有効軌道要素を求め、その変化に基づき得られる重力波放出率の時間発展から CSPT 曲線を求めている。こうした計算手法を一般の階層3体系に対して定式化したのは本研究が初めてであり高く評価できる。また実際にそれを適用した結果、古在機構が起こると CSPT 曲線は大きく折れ曲がることを明らかにした。仮に古在機構が発現している期間の電波観測が欠けたとしても、その存在を推定することができる点は興味深い。古在機構は軌道周期よりもずっと長いタイムスケールで起こる現象であるため、申請者はこれが実際に観測できるための条件を、多数のモデル計算を系統的に行うことにより明らかにしており、観測の観点からも有用な結果となっている。さらには、従来からよく用いられてきた二重平均法の問題点を明確に示した点は理論的にも重要であ

る。

第3章は相対論的 Hill 安定性の研究に当てられている。ニュートン力学においては、3体系が Hill 安定であるための十分条件は、Sundman 不等式を用いてそれぞれの天体の運動可能領域と禁止領域を区分することにより得られる。申請者はポストニュートン近似を用い、この手法を相対論的に拡張することを試みている。その際、中心天体の質量が他の構成天体よりもずっと大きいことを仮定している。相対論を加味すると、Sundman 不等式に速度依存する項が現れ、そのままでは運動可能領域・禁止領域を得ることができない。そこで申請者は、ポストニュートン近似でのビリアル関係を用い、運動量を位置の関数として近似することで、運動可能領域・禁止領域を得ることに成功している。このアイデアは申請者独自のもので評価できる。こうして得られた Hill 安定性の近似的十分条件が有用なものであることを確かめるために、申請者は多数の異なる初期条件に対して、実際に3体系の進化を数値計算し、系が Hill 不安定になるまでの時間と初期の軌道間距離との関係を調べた。その結果、超巨大ブラックホールを中心天体とする3体系では、相対論の効果が無視できず、一般に系はより Hill 不安定になることを明らかにするとともに、先に得た近似的な十分条件が、特に離心率の小さい時に、数値計算結果をよく再現することも確認した。また、当然ではあるが、ニュートン力学で求められた従来の十分条件は全く成り立たないことも示している。申請者はタイムスケールを比較することにより、Hill 安定性への一般相対論の影響では、近点の移動が重要であるという考察もしており、重要な結果であると高く評価できる。

第4章は結論で、本学位論文で得られた知見がまとめられている。

以上述べてきたことをまとめると、本学位論文で申請者は、近年の観測からより多くの存在が示唆される、コンパクト天体が重力的に束縛された3体系の軌道進化について、古在機構と Hill 安定性に着目し、これまであまり研究されてこなかった一般相対論的重力の影響を定量的かつ系統的に調べた。理論の定式化から初め、数値計算による検証を行い、観測可能性まで議論したその成果は独創的で、今後のこの分野の研究にも資するものとなっている。よって、本論文は博士（理学）の学位にふさわしいものと認める。

2021年2月

審査員

主査 早稲田大学教授 博士（理学）東京大学 山田 章一

早稲田大学教授 理学博士（京都大学） 前田 恵一

早稲田大学教授 博士（理学）早稲田大学 辻川 信二