

学位論文題目

Post-Newtonian Equilibrium Solutions to the Three-Body Problem in General Relativity
(一般相対論における三体問題に対するポスト・ニュートン平衡解)

学位論文要旨

近年、日本の KAGRA をはじめ第 2 世代の重力波検出計画が盛んであり、これにより近い将来には強い重力場における一般相対論の検証が可能になると期待されている。しかし、これらの重力波検出器では重力波波形の予測がなければ実際の検出が困難であり、そのために、重力波源となる天体のダイナミクスの理解が必要である。実際、二体系ダイナミクスの研究を通して、中性子星連星等から放出される重力波の理論計算が盛んである。また、日本の研究者らによる最近の研究では、そのような連星のまわりに第三体が存在すれば、それによる三体相互作用が連星のダイナミクスに大きな影響を与える可能性が指摘されている。

一方で、日本の JASMINE 等の高精度位置天文観測計画が活発化している。これらによって、我々の銀河中心等の天体ダイナミクスについて、一般相対論の検証に資する精密な観測データがそろおうとしている。銀河中心には大質量ブラックホールがあると考えられており、そのまわりは多数の大質量星からなる多体系である。しかしながら、三体以上の多体系については、一般相対論の効果を取り入れた理論研究が寡少である。そこで、一般相対論的な三体系に着目する。

ニュートン重力における三体問題の解析的な平衡解として、オイラーの直線解およびラグランジュの正三角解が存在する。直線解では三天体が同一直線上に、正三角解では三天体が正三角形の各頂点に配置され、それぞれ三天体が相対距離を変えずに運動する。これらの解は、三天体のうち一つを質量ゼロのテスト粒子とする制限三体問題の場合にラグランジュ点 - L_1, L_2, L_3, L_4 , および L_5 - として知られている。また、ラグランジュの正三角解は三天体の質量比によっては安定であり、実際に、太陽系において対応する天体（トロヤ群）が発見されている。これらの平衡解が一般相対論的な重力場のもとでどのような変更を受けるかという議論は、一般相対論的な三体系ダイナミクスの理解の基盤となる重要な課題である。

重力場が一般相対論的に弱い場合には、天体の運動速度 v は光速 c に比べて非常に遅いので、その比 v/c によってアインシュタイン方程式をベキ展開することで、ニュートン重力に対する一般相対論的な補正を取り入れることが出来る。これはポスト・ニュートン (PN) 近似と呼ばれる。この時、一般相対論的な主要な補正 (1PN) 項は v/c の 2 次において初めて現れる。申請者は、この 1PN 項を取り入れることで任意の質量を持つ三天体が円運動す

る場合に，ニュートン重力における三体問題の平衡解に対応する，一般相対論的な直線平衡解および三角平衡解を解析的に探求した．

まず，オイラーの直線解に対応する直線平衡解が，天体間の相対距離に PN 補正を加える事で一般相対論的な重力場においても許されることを示した．また，この時，平衡解となる三天体の直線配置の数がニュートン重力の場合と一致する，すなわち，オイラーの直線解に対応するラグランジュ点の数は一般相対論的な重力場においても変更されないことを証明した．

次に，1PN 項を考慮すると，正三角配置の場合には二つの限られた場合：(1) 三天体がすべて有限の等質量である；(2) 二つが質量ゼロのテスト粒子で残りの一体が有限の質量を持つ，を除いて平衡解が許されないことを示した．また，この配置に一般相対論的な補正を加える事で，ラグランジュの正三角解に対応する，PN 三角平衡解を任意の質量を持つ三天体に対して構築した．加えて，この新たな三角平衡解に対する線形安定性を調べ，この系が安定となるための三天体の質量比に対する条件を導いた．

さらに，これらの PN 平衡解において，天体間の相対距離に対する補正の大きさを求めるだけでなく，天体の角速度がニュートン重力の場合に比べ必ず遅くなることを示した．

これらの結果は，高精度な位置天文観測を通じて一般相対論の検証に用いることが出来るだけでなく，一般相対論的な三体系から放出される重力波の研究の基盤として有用である．