

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05085

研究課題名(和文) 数値相対論の初期データ計算法の発展的研究

研究課題名(英文) Developmental research on the numerical method for initial data in numerical relativity

研究代表者

瓜生 康史 (URYU, Koji)

琉球大学・理学部・教授

研究者番号：40457693

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、数値相対論的シミュレーションの初期データとして利用される高密度天体の平衡解や準平衡解を求めるための新たな定式化の研究と数値計算コードの開発を行った。特に、これまでに開発を進めてきた初期データ計算コード COCAL コードを発展させて、多様で現実的な高密度天体の計算を行った。定式化については、相対論的電磁流体等の保存則と時間発展をハミルトニアン形式を用いて統一的に導くことに成功した。初期データ計算については、自転を伴う連星中性子星、3軸不等形状に変形した高速回転高密度星、様々な差動回転をする高密度回転星、新しい状態方程式を利用した高速回転クォーク星などの計算に成功した。

研究成果の概要(英文)：We have been studying new formulations for computing equilibriums and quasiaequilibrium initial data of compact objects, and developing new numerical code, Compact Object CALculator (COCAL) for computing various realistic compact objects used as initial data sets for numerical relativity simulations. In this research project, we have successfully derived conservation laws and evolution schemes for hydrodynamic as well as magnetohydrodynamic flows in a unified Hamiltonian description. We have also successfully calculated quasiaequilibrium initial data for spinning binary neutron stars and triaxially deformed rapidly rotating stars, and performed numerical simulations starting from those data sets. We have also obtained equilibrium solutions of differentially rotating stars with various rotation laws and of rapidly rotating quark stars using newly developed equations of states for a quark matter for the first time.

研究分野：相対論的宇宙物理学

キーワード：相対論・重力(理論)、重力波、相対論的宇宙物理学、数値相対論、相対論的回転星、中性子星磁場、連星中性子星、連星ブラックホール

1. 研究開始当初の背景

本課題の研究期間は、米国のレーザー干渉計型重力波検出器 LIGO の公式な初観測期間や欧州の同型の検出器 VIRGO の稼働開始期間と重なっていた。これらの検出器の計画が予定通りに進めば、連星ブラックホールや連星中性子星がインスパイラルから合体に至る際に放出する重力波の記念すべき初の直接検出が期待できると、当初より本課題の公募書類にも述べておいた。2015 年の LIGO による連星ブラックホールからの重力波の初検出(GW150914)、特にそれがこれまで発見されたことのない中間質量ブラックホールであったこと、さらに 2017 年の LIGO と VIRGO による連星中性子星の初検出 (GW170817)、その重力波源天体の同定とそれに続いた光学対応天体の多波長観測は、まさに全て期待通りの出来事でありながら驚愕するしかない偉業であった。これは人類が宇宙に向けられた新たな目を獲得し、新しい宇宙物理学と天文学のフロンティアへの第一歩を踏み出した歴史的な出来事に他ならない。重力波天文学の時代の幕開けとなったこれらの成果は、どのような大げさな言葉でもその重要性を伝えきれないと感じられる程のものである。

わが国でも LIGO、VIRGO と同様の感度を有するレーザー干渉計型重力波検出器 KAGRA の建設が 2012 年より進められてきている。このような検出器が重力波検出に成功するためには、重力波源天体の理解や、観測可能性の議論、予想される重力波の波形テンプレートの構築など、理論的な基礎研究が不可欠である。高密度天体の理論的研究の中でも、数値相対論的シミュレーションは有望な重力波源である連星合体や超新星爆発などのダイナミカルな現象を直接研究することができる強力な手法である。数値相対論は過去 15 年程度の間に多くの研究者の努力によって、実際の重力波検出に利用されるまで開発が進んで来ていた。一方で、数値相対論的シミュレーションのための初期データは、Einstein 方程式の性質から初期超曲面上で拘束条件を満たすデータを求める必要があるが、これを求める方法は十分に整備されているとは言えない状況だった。例えば、現実的な初期データは、高密度天体の平衡状態や準平衡状態に近いと考えられるが、様々な天体のこのようなデータに強い磁場、差動回転、連星の自転、現実的な状態方程式などを取り入れる方法は十分に開発されていなかった。

2. 研究の目的

中性子星・ブラックホール・白色矮星等の高密度天体からなる連星の、インスパイラルから合体に至る際に放出される重力波とその重力波源の詳しい理解や、合体直後に生成される天体や超新星爆発のように強い重力場を考慮しなくてはならない系の研究には数値相対論的シミュレーションが欠かせない。本研究の目的は、この様なシミュレシ

ョンの現実的な初期データや高速回転をする高密度星の平衡解を求めるための定式化を導出すること、この様な初期データや平衡解を統一的に求めるための数値計算コードを開発すること、さらに、実際にこれらのデータを初期条件とした数値相対論的シミュレーションを実行することである。具体的には、これまでの計算例が少なかつたりほとんど取り上げられて来なかった、以下のような問題に取り組む。

(1) 連星中性子星合体について、自転を伴う連星中性子星の初期データの構築とこれを利用した合体シミュレーションを行う。これまでの自転を伴う連星中性子星の合体シミュレーションによると、自転は合体後に周囲に放出される物質の量に大きく影響することが示唆されている。しかし、この様な計算はまだ比較的例が少ないため、今後さらなる研究が必要とされている。

(2) 3 軸不等に変形した高速回転高密度星の平衡解を計算するコードの開発と、この解の時間発展をシミュレーションを行って調べる。高密度物質の粘性が強い極限では、十分に回転が速いと回転星が 3 軸不等の楕円体型に変形することがある。超新星爆発直後の原始中性子星は乱流磁場等による粘性が強い可能性があり、かつ、フォールバック降着流によって十分に高速な剛体回転をする可能性があることが示唆されている。そこで、この様な 3 軸不等の平衡解の系列がどのようなものかを数値的に解を求めて調べる。さらに、数値相対論的シミュレーションを行うことで、この様な天体の安定性を議論する。

(3) 様々な差動回転をする高密度星の平衡解を計算するコードを開発する。連星中性子星合体直後に生成される超質量中性子星や、上述の原始中性子星などは一般には様々な差動回転をしていることが予想される。特に超質量中性子星では、回転軸付近から赤道方向に向かって、回転角速度が一旦増加してから再び減少して行くような分布になることがシミュレーションから示唆されている。この様な差動回転を、平衡解の数値計算にも取り入れられるような定式化を導き、その計算コードを開発する。これから、超質量中性子星などのより精密なモデルを構築することを目指す。

(4) 高密度核物質が飽和密度を充分超えた中性子星のコアの部分はクォーク物質になっていると考えられている。また、安定なクォーク物質が存在して、全体がクォークで出来ているストレンジクォーク星のモデルも提案されている。このようなクォーク物質の状態方程式を実装し、高速回転するクォーク星の軸対称平衡解と 3 軸不等の準平衡解を構築する。

(5) 強い磁場を持つ相対論的な流体などの保存則と時間発展方程式の一般的な定式化を行う。

3. 研究の方法

本研究の中心となるのは、高密度天体の平衡・準平衡解からなる、数値相対論の初期データ計算コードの開発である。我々は、本研究に先立つ2期の科研費基盤研究(C)において、このような初期データ計算コード Compact Object CALculator (COCAL) コードを開発してきた。このコードは、3+1 形式で書いた Einstein の重力場の方程式と Maxwell の方程式 (電磁場の効果を取り入れる場合のみ用いる) に定常性を仮定して導出した楕円型方程式系と、やはり定常性を仮定して導出した相対論的 (電磁) 流体の方程式系の第一積分を連立させ、これらの差分方程式系の数値解を自己無撞着場法を用いて逐次的に求めるものである。表は、これまでに開発を済ませた COCAL コードの部分をもとめたものである。(2018 年度に開発したものを含む。) 四角で囲んだ部分が、本研究課題で主に開発するコードになる。

高密度天体	自転	重力	電磁場	極座標
回転NS	剛体回転	共形平坦	Waveless	1パッチ
	差動回転	Waveless		
連星BH	任意のスピン	共形平坦		3又は1パッチ
連星NS	任意のスピン	共形平坦		3パッチ
連星BH-NS				
BHとガスディスク	剛体回転	Kerr-Schild		1パッチ
	差動回転			
重力波テスト		スカラー波		3又は1パッチ

NS - Neutron Star, BH - Black Hole
 共形平坦 - 空間的メトリックを共形平坦と仮定して簡単化した定式化
 Waveless - 波動成分を切り捨てた下で場の方程式の全成分を解く定式化

自転を伴う連星中性子星の初期データの計算では、Tichy の先行研究によって導出された自転の効果を含んだ相対論的流体の運動方程式の第一積分を利用する。差動回転する高密度星の研究においては、従来の定式化ではごく限られた差動回転しか取り扱うことが出来ない事から、様々な差動回転を表すことのできる定式化をまず導き、これを COCAL コードに実装する。また、表には書かれていないが、これらに加えて、3 軸不等の回転星や星の表面でのエネルギー密度が有限になるクォーク星をより精度良く計算するために、星の表面付近の計算を改良するサブルーチンや、クォーク物質の状態方程式を計算するためのサブルーチンを開発し、このような平衡解・準平衡解を求める。

上で求めた連星中性子星や3軸不等の回転星の準平衡解を初期データとして、数値シミュレーションを実行する。数値シミュレーションには公開されている標準的な数値相対論コード Einstein Tool Kit (Cactus code) を利用する。このために、COCAL コードのデータを Cactus コードに受け渡すためのドライバーも併せて開発する。Einstein Tool Kit (Cactus code) は数値相対論的シミュレーションの分野で最も広く利用されているパブリックドメインソフトウェアである。

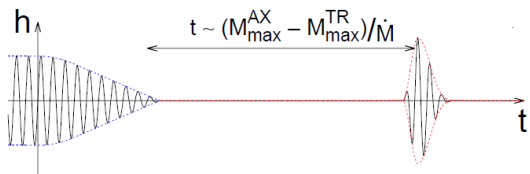
4. 研究成果

(1) 本研究の初年度に Antonios Tsokaros 氏 (Illinois 大) と共同で準平衡円軌道にある連星中性子星の初期データ計算コードを開発した。このコードを利用して、自転を伴う連星中性子星の準平衡解の系列 (連星系の静止質量を一定に保ち、軌道半径を変化させた解の集合) を系統的に求めることに成功した。さらに、星のコンパクトネス (重力が相対論的になっている度合いを表す量、質量と半径の比 M/R) を下げて、白色矮星程度のコンパクトネス ($M/R \sim 10^{-4}$) の場合についても計算を行い、円軌道にある連星白色矮星の解も同じコードで計算可能であることを確認した。

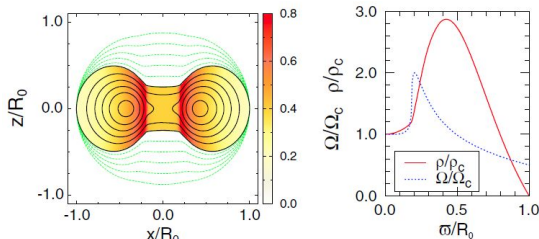
このコードで計算された準平衡円軌道にある連星中性子星の解を初期データとして、Cactus コードを利用してインスパイラルから合体に至るシミュレーションを実行した。COCAL コードで求めたデータをシミュレーションに利用するのはこれが初めてであることから、COCAL コードの初期データから開始したシミュレーションの結果を、標準的に利用されているパリ天文台で開発された Lorene コードによる初期データから開始した結果と詳しく比較校正を行い、両者が精度よく一致することを確認した。

(2) これまでに開発した回転星の初期データコードを改良し、3 軸不等の高密度回転星の準平衡解を精度良く計算することに成功した。状態方程式のパラメーターを固定して、回転の遅い解から早い解までと、コンパクトネスの低い解から高い解までを系統的に計算を行った結果、3 軸不等の回転星の最大質量モデルを求めることに成功した。また、この最大質量は状態方程式が充分硬いと球対称解の最大質量を超えること、また、状態方程式が星のコア付近は軟らかく外層で硬いタイプであると、この最大質量が球対称解の最大質量を超える割合が極端に増大することを発見した。

さらに、超新星爆発の後に生成される原始中性子星がこの様な3軸不等高密度星だと仮定して、上述の結果がそこから発せられる重力波形に及ぼす影響について議論した。フォールバック降着流の下で3軸不等の回転星の質量が増加すると、3軸不等解が存在しなくなるため、下図のように一度重力波シグナルが消失する。その後軸対称星の最大質量に至り、重力崩壊による重力波を放出する。3軸不等の回転星の最大質量と軸対称回転星の最大質量の差が状態方程式に大きく依存することから、これらの重力波シグナルが到達する時間差を利用して状態方程式に対する制限を得ることを提案した。



(3) 連星中性子星合体直後に生成する超質量中性子星に見られる、回転軸から赤道方向に向かって回転角速度が一旦増加した後減少する回転則など、数種類の新しい回転則をモデル化するための定式化を導出し、これを差動回転星の計算コードに実装した。このコードを用いて、様々な差動回転をする軸対称回転星の平衡解を系統的に計算することに成功した。質量放出をするモデルでは、その最大質量を得ることが出来た。また、トロイダル形状になるモデルでは、剛体回転をする回転星の最大質量をはるかに上回る超質量星の解が存在することを示すことが出来た。



図は連星合体により生成される超質量中性子星の差動回転則に近いモデルの平衡解を表している。左図はそのような星の子午面内の密度分布を等高線で、回転角速度分布を濃淡で表している。また、破線は回転が遅い場合から早い場合までの星の表面形状の変化を表している。右図は赤道面内の半径方向に沿って密度と回転角速度をプロットしたもので、一旦増加してから減少に転じる角速度をモデル化出来ていることが分かる。

(4) 高速回転するクォーク星のモデルを構築するために、クォーク物質の状態方程式として、MIT バッグモデルと最近提案されたクラスト化したクォーク物質の状態方程式をCOCAL コードに実装した。クォーク(ストレンジ)物質の性質から、クォーク星の表面ではエネルギー密度が有限の値を持つため、物質の分布が不連続になる。このような表面を精度良く取り扱うためのサブルーチンを開発し、高速回転するクォーク星の軸対称平衡解及び3軸不等の準平衡解の系列を求めた。

(5) 連星中性子星のインスパイラルのシミュレーションは相対論的流体の方程式を同時に積分する必要があることから、一般に連星ブラックホールのインスパイラルシミュレーションより数値計算の精度が悪くなる事が知られている。これを改良する可能性のある定式化として、相対論的流体の方程式をハミルトン形式で表して、自然な保存形に書かれた運動方程式や保存則を統一的に導いた。また、ネーター対称性が存在する場合に運動方程式の第一積分を簡単に導くことが出来ることを示した。

今回と過去2期の基盤研究を通して、数値相対論の初期データコードCOCALの整備が進み、高密度天体に関する様々な問題を取り扱うことが可能になってきた。今後はこのデータを利用する研究者を増やすことで分野に貢献して行きたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 9件)

Enping Zhou, Antonios Tsokaros, Luciano Rezzolla, Renxin Xu, Koji Uryu, "Rotating quark stars in general relativity" Universe 4, 48--1-8 (2018), 査読あり,

DOI: 10.3390/universe4030048

Enping Zhou, Antonios Tsokaros, Luciano Rezzolla, Renxin Xu, and Koji Uryu, "Uniformly rotating, axisymmetric, and triaxial quark stars in general relativity", Physical Review D 97, 023013--1-15 (2018), 査読あり,

DOI: 10.1103/PhysRevD.97.023013

Koji Uryu, Antonios Tsokaros, Luca Baiotti, Filippo Galeazzi, Keisuke Taniguchi, Shin'ichirou Yoshida, "Modeling differential rotations of compact stars in equilibriums", Physical Review D 96, 103011--1-8 (2017), 査読あり, DOI: 10.1103/PhysRevD.96.103011

Charalampos Markakis, Koji Uryu, Eric Gourgoulhon, Jean-Philippe Nicolas, Nils Andersson, Athina Pouri, Wojtech Witzany, "Conservation laws and evolution schemes in geodesic, hydrodynamic and magnetohydrodynamic flows", Physical Review D 96, 064019--1-26 (2017), 査読あり, DOI: 10.1103/PhysRevD.96.064019

Antonios Tsokaros, Milton Ruiz, Vasileios Paschalidis, Stuart L. Shapiro, Luca Baiotti, Koji Uryu, "Gravitational wave content and stability of uniformly rotating, triaxial neutron stars in general relativity", Physical Review D 95, 124057--1-14 (2017), 査読あり, DOI: 10.1103/PhysRevD.95.124057

Koji Uryu, Antonios Tsokaros, Luca Baiotti, Filippo Galeazzi, Noriyuki Sugiyama, Keisuke Taniguchi, Shin'ichirou Yoshida, "Do triaxial supramassive compact stars exist?", Physical Review D 94, 101302(R)--1-6 (2016), 査読あり, DOI: 10.1103/PhysRevD.94.101302

Antonios Tsokaros, Bruno C. Mundim, Filippo Galeazzi, Luciano Rezzolla, Koji Uryu, "Initial-data contribution to the error budget of gravitational waves from neutron-star binaries", Physical Review D 94, 044049--1-19 (2016), 査読あり, DOI: 10.1103/PhysRevD.94.044049

Koji Uryu, Antonios Tsokaros, Filippo Galeazzi, Hideya Hotta, Misa Sugimura, Keisuke Taniguchi, Shin'ichirou Yoshida, "New code for equilibriums and quasiequilibrium initial data of compact

objects. III. Axisymmetric and triaxial rotating stars”, Physical Review D 93, 044056--1-18 (2016), 査読あり,
DOI: 10.1103/PhysRevD.93.044056

Antonios Tsokaros, Koji Uryu, Luciano Rezzolla, “New code for quasiequilibrium initial data of binary neutron stars: Corotating, irrotational, and slowly spinning systems”, Physical Review D 91, 104030--1-29 (2015), 査読あり,
DOI: 10.1103/PhysRevD.91.104030

〔学会発表〕(計 6 件)

Antonios Tsokaros(発表者), Koji Uryu, Milton Ruiz, Stuart Shapiro, “Spin in binary neutron star initial data”, APS April Meeting 2018, April 14-17 (2018), Columbus, Ohio

Antonios Tsokaros(発表者), Koji Uryu, Luca Baiotti, Filippo Galeazzi, Bruno Mundim, Luciano Rezzolla, Noriyuki Sugiyama, Keisuke Taniguchi, Shin'ichirou Yoshida, “Binary neutron star initial data and single, rotating neutron stars as gravitational wave emitters”, 27th Midwest Relativity Meeting, October 12-14 (2017), University of Michigan in Ann Arbor, Michigan

Enping Zhou(発表者), Antonios Tsokaros, Luciano Rezzolla, Renxin Xu, Koji Uryu, “Numerical configurations of differentially rotating quark stars”, Compact Stars in the QCD Phase Diagram VI (Cosmic matter in heavy-ion collision laboratories?) September 26-29 (2017) Dubna, Russia

Antonios Tsokaros(発表者), Koji Uryu, Luca Baiotti, Filippo Galeazzi, Bruno Mundim, Luciano Rezzolla, Noriyuki Sugiyama, Keisuke Taniguchi, and Shin'ichirou Yoshida, “Binary neutron star initial data and single, rotating neutron stars as gravitational wave emitters”, American Physical Society April Meeting (2017), January 28-31 2017, Washington DC USA

岡本章宏(発表者), 瓜生康史, Antonios Tsokaros, Filippo Galeazzi, 谷口敬介, 吉田慎一郎, “差動回転する中性子星の力学平衡解”, 日本天文学会 2017 年春季年会, 2017 年 3 月 15 日~3 月 18 日, 福岡県福岡市西区九州大学伊都キャンパス

Antonios Tsokaros(発表者), Koji Uryu, Luciano Rezzolla, “Quasi-equilibrium solutions for slowly spinning binary neutron stars”, BNS2015: Workshop on Binary Neutron Star Mergers, May 27-29th (2015), Thessaloniki

〔その他〕

琉球大学理学部 物質地球科学科 物理系 宇宙物理学研究室ホームページ

http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/~apweb_user/

COCAL コードドキュメントページ(仮設)
http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/~uryu/Cocal_tmp2/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瓜生 康史 (URYU, Koji)

琉球大学・理学部・教授

研究者番号: 4 0 4 5 7 6 9 3

(2) 研究協力者

ツォカロス アントニオス

(TSOKAROS, Antonios)

University of Illinois Urbana-Champaign

・ Department of Physics

・ Research Scientist