

機関番号：18001

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540275

研究課題名 (和文) 磁場をもつ連星中性子星の準平衡状態と数値相対論の初期データ

研究課題名 (英文) Quasi-equilibriums of magnetized binary neutron stars and initial data for numerical relativity simulations

研究代表者

瓜生 康史 (URYU KOJI)

琉球大学・理学部・准教授

研究者番号：40457693

研究成果の概要 (和文)：磁場を持つ連星中性子星の準平衡状態を計算するための定式化と一般化された熱力学法則を導くことに成功した。平衡・準平衡状態にある高密度星の構造を計算するプログラム (Cocal コード) の開発に着手し、3軸不等の回転中性子星の構造の計算などに成功した。また、連星中性子星の準平衡解を数値相対論的な連星合体シミュレーションの初期条件として提供し、ここから得られた重力波形の解析を試みた。

研究成果の概要 (英文)：Formulations for computing quasi-equilibrium of magnetized binary neutron stars and their generalized thermodynamic laws are derived. We develop a new code, Cocal – Compact Object CALculator, to calculate structures of compact objects in quasi-equilibriums, and successfully compute, for example, triaxially deformed rapidly rotating neutron stars. Quasi-equilibrium solutions for binary neutron stars are also calculated, and they are provided as initial data sets for simulations of binary inspirals. Gravitational waveforms obtained the simulations are analyzed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

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、連星中性子星、高速回転星、ブラックホール・中性子星連星、中性子星磁場

## 1. 研究開始当初の背景

数値相対論的シミュレーションコードはこの10年間で着実に進歩し、これまでに連星中性子星合体、連星ブラックホール合体、大質量中性子星や星のコアの崩壊などのダイナミカルな過程が詳しく解明されてきた。近年は高密度核物質の状態方程式や磁場の効果を中性子星に取り入れて、シミュレーションを行い、「連星中性子星合体がショート

$\gamma$ 線バースト源となり得るか」、「コアの崩壊後に原始中性子星がどのように形成されるか」といった、より現実的な相対論的宇宙物理学の問題に取り組む試みが始まっている。しかし一方で、シミュレーションの初期データとなる連星中性子星の準平衡解などに、核物質の状態方程式や磁場の効果を厳密に取り入れることには、未だ誰も成功していない。

## 2. 研究の目的

本研究では、(1) 磁場を持つ連星中性子星の構造を計算するための定式化を導く、(2) 高密度核物質の状態方程式をパラメータで精度良く近似した状態方程式や (1) で求めた磁場計算の定式化等を導入し、より現実的な連星中性子星の準平衡解を求めるための数値計算法を開発する、(3) (2) で求めた準平衡解を数値相対論の初期データとして提供し重力波計算に応用する。また求めた準平衡状態を利用した重力波形のテンプレートを構築することを目指す。

## 3. 研究の方法

研究の目的(1)で述べたテーマについては、電磁場と電磁流体を伴う時空の一般化された熱力学法則を導くと共に、BekensteinとOronによって提案された理想磁気流体(MHD)の理論を用いてMHD-Euler方程式の可積分条件を調べ、この方程式の第一積分を導くことを試みる。この研究は、パリ天文台CNRS主任研究員のEricourgoulhon氏との共同研究で行う。

(2)の数値計算法開発においては、これまでに開発してきた連星中性子星、ブラックホール-中性子星連星、連星ブラックホール、及び、回転中性子星の計算コードを統合し、数値相対論の分野の研究者が広く利用できるようにコードの整備を同時に進める。特に、Fortran 90/95の標準的なコーディングルールに従いプログラムとデータを構造化した理解しやすいコードにすることで、卒業研究生や大学院生もコード開発に参加したり、研究テーマに利用できるようにする。この第一段階として、中性子星の構造と3次元空間(コーシー超曲面)に対称性を課さずに回転中性子星を計算する新たなコードを開発する。また、連星計算に適した座標系の導入と、その座標上でポアソン方程式や重力波成分の計算に用いるヘルムホルツ方程式を解くサブルーチンを順次実装する。

(3)のテーマでは、連星中性子星の準平衡解を初期条件とし、重力波放射による連星合体直前の5~10周期の重力波の波形を数値シミュレーションから計算する。この波形を解析することで実際に中性子星内部の高密度核物質の状態方程式にどの程度制限がつけられるかについて定量的に調べる。様々な高密度核物質の理論的モデルから導かれた状態方程式の候補を少ないパラメータで近似する状態方程式を作成し、このパラメータを系統的に変化させて初期値データを準備し、シミュレーションを実行する。得られた重力波の波形を3次post-Newtonianの2体軌道運動から放出される重力波形に接続

し、合体前のインスパイラル時の重力波形のテンプレートを作成する。この波形の解析から状態方程式のパラメータをどの程度の精度で制限できるかを調べる。この研究は柴田大氏(京大基研)及び、ウィスコンシン大ミルウォーキー校の重力波データ解析グループ(John L. Friedman, Jolien Creighton, Jocelyn Read, Charalampos Markakis 各氏)との共同研究で進める。また、これに関連してwaveless定式と呼ばれるメトリックの全成分を解く定式化を用いて、連星中性子星の準平衡解を求めるコードの開発も行う。このコードを用いて解系列を計算し、さらに、この解を初期条件に用いた際のシミュレーション結果への影響を評価することも試みる。

## 4. 研究成果

(1) ヘリカル対称性を仮定したEinstein-Maxwell時空と電磁流体からなる系についての一般化された熱力学法則を導出することに成功した。この法則からヘリカルキリングベクトルに付随した保存量の微小変化が電磁流体の静止質量、エントロピー、渦度、磁束の変化及びブラックホールの表面積と電荷の変化で表されることが示された。また、BekensteinとOronの理想MHD理論のように、磁束と磁気流体の渦度が独立に保存する場合、この保存量の変化がゼロになるように平衡解の系列を求めることが出来ることを示した。また、この理想MHD理論では、ラグランジアン電流と電磁場の相互作用項を理想MHD条件と未定ベクトルの内積を取った項で置き換えて方程式を導くが、この未定ベクトルがヘリカルベクトルと平行であれば初期超曲面上でMHD-Euler方程式の第一積分を導くことが可能であることを示した。以上のことから、磁場を持つ連星中性子星を計算するための定式化を導くことに成功した。

この研究でBardeen-Carter-Hawkingらによって提唱された軸対称定常のブラックホールと完全流体からなる時空の一般化された熱力学法則を、電磁場を伴ったブラックホール-中性子星連星のように軸対称性をもたないヘリカル対称(回転系での定常性)時空の場合の法則へと拡張することに成功した。この結果を今後磁場を持つ高密度天体の安定性の解析や、定常的で安定な磁場構造の導出等に応用することを考えている。

(2) 様々な高密度天体の平衡・準平衡解を統一的に計算できるコードCocal(Compact Object CALCulator)の開発を着手した。これまでにアインシュタイン方程式の初期データの解法(IWM定式またはWaveless定式(下記(3)②参照)を用いた解法)、重力波四重極放出公式、非等質量連星の計算のための複数の極座標格子上でのPoisson solver、定常重

力波計算のための Helmholtz solver 等の実装を終えている。将来的にはこのコードを公開する予定である。

Cocal コードの最初の成果として、3 軸不等の Jacobi 楕円体的な形状に変形した高速回転中性子星の解を求めることに世界で初めて成功した (図 1)。これは、相対論的な強い重力の場合でも中性子星の高密度核物質の状態方程式が十分硬く、粘性が極端に強い場合、中性子星が高速回転するとこのような非軸対称形に変形する可能性があることを意味する。原始中性子星はこの程度の高速で回転し得ることから、ここで求めた解を原始中性子星の形成と進化のモデルに応用することを検討している。

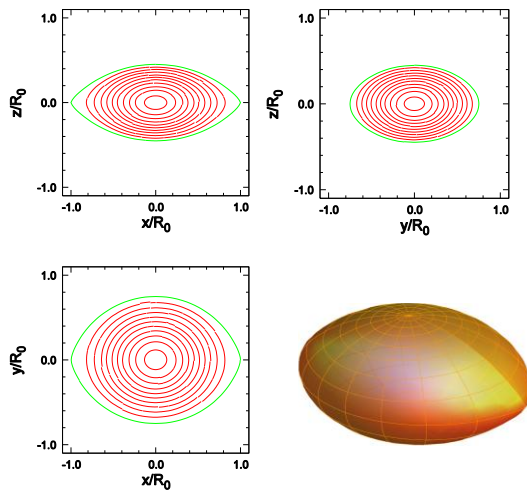


図 1: 3 軸不等の中性子星の構造。長半径, 短半径を含む平面内の  $\rho/\rho$  の値の等高線と表面の形状。

今後は、①(1)で導いた定式化等を利用して磁場を持つ高密度天体を計算するようコードを拡張する、②Helmholtz solver を利用して Einstein 方程式を解くことで、重力波の成分も含んだ初期データを求める方法を確立する、③非等質量の連星中性子星やブラックホール-中性子星連星の準平衡解の計算法を開発する、④自転を考慮した連星中性子星の準平衡解の解法を開発する、といったテーマに順次取り組んでいく計画である。

(3) ①中性子星の質量を固定した下で状態方程式のパラメーターを変化させることで、高密度核物質の状態方程式の違いを反映させた中性子星連星のインスパイラルのモデルを準備する。各モデルについて、インスパイラルの際に放出される重力波の波形のテンプレートを作成し、異なるモデル間の波形の差の SN 比を重力波検出器のノイズスペクトルを与えた下で計算した。SN 比が 1 より大きければこれらのモデルを区別できるこ

とになる。ノイズスペクトルとして、Advanced LIGO の 1.4 太陽質量の連星中性子星インスパイラルに最適化された検出器のノイズ (スタンダード), バースト波形に最適化された検出器のノイズ (ブロードバンド), 1150Hz のパルサー波形に最適化された検出器のノイズ (ナローバンド) の 3 つを用い、重力波源までの実効距離を 100Mpc として SN 比を計算した。重力波検出器の設定をスタンダードとした場合は、SN 比は 1 より小さい値しか得られなかったが、ブロードバンドやナローバンドにした場合には、各モデルの波形を有意に区別できることがわかった。実際、図 2 のように重力波の振幅と検出器の雑音のスペクトルを比較すると、合体直前の 5~10 周期 (周波数 700Hz~1000Hz 付近) の振幅がナローバンドやブロードバンド (図中の burst optimized) の雑音曲線より十分大きくなっていることが分かる。

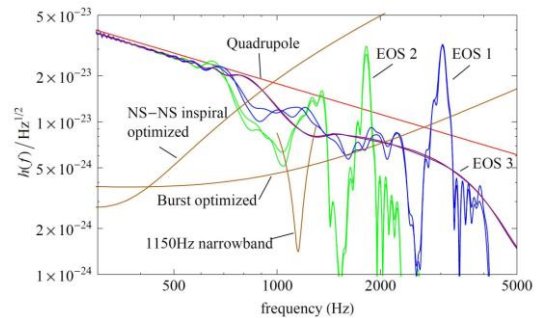


図 2: 重力波の振幅と Advanced LIGO の雑音曲線のスペクトル。(この図では実効距離を 50Mpc としてある。)

ポストニュートニアン近似が有効な時点での重力波のデータ解析から、連星系の全質量、質量比、軌道運動の位相等が精度よく決まったとすると、この結果を中性子星の状態方程式のパラメーターの決定精度に書き直すことができる。我々が今回変化させた状態方程式のパラメーターは一つだけで、これを中性子星の半径で表すと、上述のブロードバンドで実効距離 100Mpc の場合、約 1 km 程度の精度で半径を決定できることが分かった。

② 近接連星中性子星の準平衡解計算に用いられて来た Isenberg-Wilson-Mathews (IWM) らによる共形平坦な空間メトリックを仮定した定式化ではアインシュタイン方程式の一部の成分だけを解くため、準平衡解の軌道に数%の誤差が含まれてしまう事が知られていた。そこで waveless 定式と呼ばれる場の方程式の全成分を maximal スライス条件と共形空間メトリックに対する横波ゲージ条件の下で解く定式化を用いて、連星中性子星の円軌道準平衡解を計算する数値コード

を開発し、解系列を求めることに成功した。われわれのグループが開発した差分法に基づくコードで計算された解と、パリ天文台グループが開発したスペクトル法によるコードで計算した結果を比較し数値解が一致していることを確認した。また、この円軌道解が以前のIWMの定式から計算された解より良い精度で円軌道を満たしていることを示した。得られた解は、中性子星連星合体のシミュレーションの初期条件の改良されることが期待できる。

今後は(2)のCocalコードの開発をさらに推し進め、磁場を持つ連星中性子星、ブラックホール-中性子星の準平衡解を計算し合体シミュレーションの初期データとして提供し、合体後の磁気回転不安定性や磁場の増幅、また重力波の波形の計算等に应用する。また準平衡解の解系列自体から連星の合体直前の重力波のインスパイラル波形のテンプレートを生成することを試みたい。

#### 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6件)

- ① Koji Uryu, Eric Gourgoulhon, Charalampos Markakis, Thermodynamics of magnetized binary compact objects, Physical Review D, 査読有, 82巻, 2010, 104054-1-21
- ② Koji Uryu, Francois Limousin, John L. Friedman, Eric Gourgoulhon, Masaru Shibata, Non-conformally flat initial data for binary compact objects, Physical Review D, 査読有, 80巻, 2009, 124004-1-23
- ③ Jocelyn S. Read, Charalampos Markakis, Masaru Shibata, Koji Uryu, Jolien D. E. Creighton, John L. Friedman, Measuring the neutron star equation of state with gravitational wave observations, Physical Review D, 査読有, 79巻, 2009, 124033-1-12
- ④ Xing Huang, Charalampos Markakis, Noriyuki Sugiyama, Koji Uryu, Quasiequilibrium models for triaxially deformed rotating compact stars, Physical Review D, 査読有, 78巻, 2008, 124023-1-13

[学会発表] (計10件)

- ① Koji Uryu, Eric Gourgoulhon, and Charalampos Markakis, Magnetized binary black holes and neutron stars in equilibrium, 20th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan

(JGRG20), September 21-25, 2010, YITP, Kyoto University, Kyoto, Japan

- ② Eric Gourgoulhon, Koji Uryu, and Charalampos Markakis, Magnetized binary compact objects, 19<sup>th</sup> International Conference on General Relativity and Gravitation (GR19), July 5-9, 2010, Mexico City, Mexico
- ③ Koji Uryu, Eric Gourgoulhon, and Charalampos Markakis, Thermodynamics of magnetized binary neutron stars and black holes, Eriguchi fest: Physics of Compact Objects, March 16-17, 2010, Rizzan Sea-Park hotel, Onnason, Okinawa, Japan
- ④ Charalampos Markakis, Jocelyn S. Read, Masaru Shibata, Koji Uryu, Jolien D. E. Creighton, and John L. Friedman, Inferring the neutron star equation of state from binary inspiral waveforms 12th Marcel Grossmann Meeting, 12-18 July, 2009, Institut d'Astrophysique de Paris, Paris, France
- ⑤ John L. Friedman, Jocelyn Read, Charalampos Markakis, Masaru Shibata, Koji Uryu, Jolien Creighton, and Keisuke Taniguchi, Extracting equation of state parameters from inspiral waveforms, American Physical Society, 2009 APS April Meeting, May 2-5, 2009

[その他]

ホームページ等

[http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/~apweb\\_uryu](http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/~apweb_uryu)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

瓜生 康史 (URYU KOJI)  
琉球大学・理学部・准教授  
研究者番号：40457693

##### (2) 研究分担者

( )  
研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )  
研究者番号：

##### (4) 研究協力者

- ① Eric Gourgoulhon・CNRS/Observatoire de Paris/Universite Paris Diderot・Directeur de recherche
- ② Charalampos Markakis・University of Wisconsin-Milwaukee・大学院生 (博士課程)