

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：82118

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06857

研究課題名（和文）ブラックホール・中性子星連星からの正確な重力波の計算に向けた離心率低減の研究

研究課題名（英文）Reducing orbital eccentricity in initial data of black hole-neutron star binaries toward computations of accurate gravitational waveforms

研究代表者

久徳 浩太郎 (Kyutoku, Koutarou)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：30757125

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：今後、アメリカのLIGOや日本のKAGRAによって、ブラックホールと中性子星との連星が合体する際の重力波が検出されると期待されている。この重力波からは、中性子星の半径や、さらにそれを構成する高密度物質の状態方程式を引き出せる。本研究では、観測と比較するのに必要な、正確な重力波波形を導出するシミュレーションに向けて、円軌道の連星の初期条件を用意する手法を開発した。連星の様々なパラメータに対し、試した全ての場合で離心率を0.1%程度に抑えることに成功している。

研究成果の概要（英文）：LIGO (US) and KAGRA (Japan) will detect gravitational waves from merging black hole-neutron star binaries in the near future. Gravitational waves from them will enable us to know neutron star radii and the equation of state of high-density matter composing the neutron star. In this study, we develop a method to prepare initial conditions of circular black hole-neutron star binaries, which are necessary for numerical simulations to derive accurate gravitational waveforms to be compared with observed data. We successfully reduce the residual eccentricity to the 0.1% level for all of the cases we have tried so far with various parameters of binaries.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：重力波 一般相対論 ブラックホール 中性子星 初期値問題

1. 研究開始当初の背景

研究開始時点で、アメリカの LIGO を始めとする、いわゆる第二世代重力波検出器が本格稼働を控えており、特にブラックホールや中性子星からなる「コンパクト連星」が放射する重力波が近々検出されるようになると期待されていた。実際、この研究計画の期間中に、LIGO チームが連星ブラックホールからの重力波を検出したと報告し、世界中での大きなニュースとなった。

今後 LIGO が感度を上げ、あるいは日本の KAGRA などの検出器も稼働を始めると、ブラックホール・中性子星の連星からの重力波が年間 10 回程度のペースで検出されると期待されている。その観測からはブラックホールや中性子星の質量だけでなく、中性子星の半径など巨視的な量、またそれを通じて中性子星を構成する高密度物質の状態方程式（この場合は圧力と密度の関係）といった情報も得ることができる。中性子星の性質は原子核物理にとっても重要な情報であり、ブラックホール・中性子星連星からの重力波を観測することは、宇宙物理にとどまらない広い分野に大きな進展をもたらすことが期待される。

観測された重力波から物理的な情報を引き出すためには、それと比較するための正確な理論波形が必要である。そして、その計算には数値相対論による完全に一般相対論的なシミュレーションが必須である。しかし問題として、過去の研究では現実の宇宙に存在していると期待される円軌道の連星ではなく、1%-数%ではあるが非物理的な離心率を持った連星の計算しか（一部の例外を除き）されてこなかった。これは、シミュレーションの初期条件として与えるべき「準平衡状態」として、正確に円軌道のものを与える手法が確立されていなかったことによる。中性子星の性質を正確に知るためには、0.1%程度やそれ以下の離心率の波形が欠かせないことが過去の研究によって指摘されており、円軌道を持った準平衡状態の計算およびそれによるシミュレーションからの重力波導出は、今後の重力波観測に向けて喫緊の課題となっている。

2. 研究の目的

ブラックホール・中性子星連星からの正確な重力波波形を導出するための数値相対論シミュレーションの初期条件に用いるため、離心率が 0.1%以下の連星の準平衡状態を計算する手法を確立する。特に、ブラックホールのスピン = 自転角運動量が連星の軌道角運動量に平行（あるいはゼロ）で軌道面が変化しない場合だけでなく、スピンと軌道角運動量が揃っておらず、軌道面が歳差運動を起こす場合についても離心率の低減を行う。なお、合体直前の連星を考える場合は、中性子星の自転周期は連星の軌道周期よりも十分に長い場合、中性子星はスピンを持たないと考えて問題ない。これにより、今後の系統

的な数値相対論シミュレーションによって正確な重力波波形を網羅的に計算できる体制を整える。

3. 研究の方法

準平衡状態を計算する際に、軌道運動として公転速度だけを与えていた過去の定式化を進展させ、重力波放射の反作用による動径方向の接近速度も持たせられるようにする。時空の対称性を記述する Killing ベクトルに動径方向の成分を持たせ、それに応じて重力場の満たすべき初期値方程式と流体場の満たすべき静水圧平衡条件とを定式化する。これを実際に、準平衡状態を計算するコードに組み込み、数値解を構成する。

この定式化では、連星の運動状態は公転速度と接近速度、2 つの値によって指定されるため、円軌道を達成するための適切な値を得る手法を確立する。具体的には、離心率の残っている準平衡状態を初期条件として数値相対論による時間発展シミュレーションを行い、最初の 2-3 週の運動を解析して、円軌道を得るために必要な準平衡状態の公転・接近速度への補正を推定する。具体的には、離心率を持っている場合は連星間距離がそれに応じて振動することを利用し、その振動をケプラー運動で期待される離心率の影響と比較することで、それを減らすような公転・接近速度への補正を見積もる。ただし、このケプラー運動に基づく補正は完全に相対論的なものではないため、あくまで近似的にしか離心率を打ち消すことができない。そのため、この補正を繰り返し行うことで、段階的に離心率を低減し、最終的に準平衡状態の離心率を 0.1%以下にまで抑えることができるようにする。

4. 研究成果

ブラックホールのスピンがない場合、スピンの軌道角運動量と平行な場合、さらに軌道角運動量と揃っておらず軌道が歳差運動を起こす場合の全てについて、開発した手法により離心率を 0.1%程度にまで抑えられることがわかった。スピンがない場合については 3-4 回の補正によって離心率を十分に、特にケプラー運動に基づく補正によって単調に低減できることがわかった。スピンが平行な場合は 6-8 回程度の補正が必要になるが、やはり離心率は単調に低減させられることがわかった。

これに対し、スピンが揃っておらず歳差運動を起こす場合については、必ずしも単調に離心率を低減できるわけではなく、ケプラー運動に基づいて補正を加える際に工夫が必要であることもわかった。歳差運動の有無に関わらず、スピンがある場合には補正のために必要な計算量が重くなりがちであるため、シミュレーションの軌道運動から離心率を減らすための新たな補正手段構築も手がけている。これについては今後の系統的な重力波

計算に並行して、より広範なパラメータ（ブラックホール・中性子星の質量比や中性子星の状態方程式など）への応用と合わせて進めていこうと考えている。

ともあれ、離心率低減が比較的困難なく進んだため、歳差運動を起こさない場合に関しては、既に長時間の数値相対論シミュレーションによる重力波波形の計算を開始できている。今後は、歳差運動を起こす場合についても長時間計算を手がけていく予定である。得られた波形は論文にするとともに、自身のweb(<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~koutarou.kyutoku/>) で公開していくことも予定している。

本研究自体の研究成果についても計画期間中に論文にする予定であったが、重力波が実際に観測されたため、本研究の遂行とそれに続く重力波計算を優先すべきであると判断した。現時点で、特に歳差運動を起こすようなブラックホール・中性子星連星からの正確な重力波を計算するためには、(おそらく)本研究で開発した手法および計算コードによる準平衡状態を初期条件に採用するのが唯一の手段である。とはいえ、この研究計画の成果もなるべく早いうちに単独で論文にしたいと考えている。

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 10 件)

全て査読有り。

1. Koutarou Kyutou, Naoki Seto “Concise estimate of the expected number of detections for stellar-mass binary black holes by eLISA” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462, 2177-2183 (2016) doi: 10.1093/mnras/stw1767
2. Koutarou Kyutoku, Kunihiro Ioka “The unreasonable weakness of r-process cosmic rays in the neutron-star-merger nucleosynthesis scenario” *The Astrophysical Journal* 827, 83 (2016) doi: 10.3847/0004-637E/827/1/83
3. Kyohei Kawaguchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata, Masaomi Tanaka “Models of kilonova/macronova emission from black hole-neutron star mergers” *The Astrophysical Journal* 825, 52 (2016) doi: 10.3847/0004-637X/825/1/52
4. Yuichiro Sekiguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata, Keisuke Taniguchi “Dynamical mass ejection from the merger of asymmetric binary neutron stars: radiation-hydrodynamics study in general relativity” *Physical Review D*

93, 124046 (2016) doi: 10.1103/PhysRevD.93.124046

5. Tanja Hinderer, Andrea Taracchini, Francois Foucart, Alessandra Buonanno, Jan Steinhoff, Matthew Duez, Lawrence E. Kidder, Harald P. Pfeiffer, Mark A. Scheel, Bela Szilagy, Kenta Hotokezaka, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata, Cory W. Carpenter “Effects of neutron-star dynamic tides on gravitational waveforms within the effective-one-body approach” *Physical Review Letters* 116, 181101 (2016) doi: 10.1103/PhysRevLett.116.181101
6. Kenta Hotokezaka, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata “Measurability of tidal deformability by gravitational waves from coalescing binary neutron stars” *Physical Review D* 93, 064082 (2016) doi: 10.1103/PhysRevD.93.064082
7. Kenta Kiuchi, Pabro Cerda-Duran, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata “Efficient magnetic-field amplification due to Kelvin-Helmholtz instability in binary neutron stars” *Physical Review D* 92, 124034 (2015) doi: 10.1103/PhysRevD.92.124034
8. Francesco Pannarale, Emanuele Berti, Koutarou Kyutoku, Benjamin D. Lackey, Masaru Shibata “Aligned spin neutron star-black hole mergers: a gravitational waveform amplitude model” *Physical Review D* 92, 084050 (2015) doi: 10.1103/PhysRevD.92.084050
9. Francesco Pannarale, Emanuele Berti, Koutarou Kyutoku, Benjamin D. Lackey, Masaru Shibata “Gravitational-wave cutoff frequencies of tidally disruptive neutron star-black hole binary mergers” *Physical Review D* 92, 081504 (2015) doi: 10.1103/PhysRevD.92.081504
10. Kenta Kiuchi, Yuichiro Sekiguchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata, Keisuke Taniguchi, Tomohide Wada “High-resolution magnetohydrodynamics simulation of black hole-neutron star merger: mass ejection and short gamma-ray bursts” *Physical Review D* 92, 064034 (2015) doi: 10.1103/PhysRevD.92.064034

[学会発表](計 23 件)

1. 久徳浩太郎(招待) “重力波天文学と電磁波対応天体” 2016年度CRC将来計画タウンミーティング, 2017/3/24, 東京

- 大学(千葉・柏)
2. 久徳浩太郎 “eLISAによる重力波コスモグラフィとHubbleパラメータ問題” 日本物理学会第72回年次大会, 2017/3/18, 大阪大学(大阪・豊中)
 3. 久徳浩太郎 “ブラックホール・中性子星連星合体におけるニュートリノの放射と輸送” 連星中性子星・ブラックホールを含む重力波源の電磁波対応天体, 2017/3/8, 京都大学(京都・京都)
 4. 久徳浩太郎 (招待) “Numerical-relativity simulations of neutron-star binary mergers” Gravitational-Wave Astrophysics in the High Event-Rate Regime, 2016/12/6, 東京大学(東京・文京)
 5. 久徳浩太郎 “eLISAによる重力波コスモグラフィとHubbleパラメータ問題” 第5回観測的宇宙論ワークショップ, 2016/11/26, 広島大学(広島・東広島)
 6. Koutarou Kyutoku “Dynamical mass ejection from black hole-neutron star binaries” Compact Star Mergers and Nucleosynthesis, 2016/11/8, 京都大学(京都・京都)
 7. Koutarou Kyutoku “Neutrino transport in black hole-neutron star binaries: dynamical mass ejection and neutrino-driven wind” 8th Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium, 2016/10/26, ハンツヴィル(アメリカ)
 8. 久徳浩太郎 “ブラックホール・中性子星連星からのマルチメッセンジャー” コンパクト天体における高エネルギー現象, 2016/10/11, 東京大学(千葉・柏)
 9. 久徳浩太郎 “The unreasonable weakness of r-process cosmic rays in the neutron-star-merger nucleosynthesis scenario” 日本物理学会2016年秋季大会, 2016/9/23, 宮崎大学(宮崎・宮崎)
 10. 久徳浩太郎 “eLISAによるGW150914類似イベントの検出可能性” 日本天文学会2016年秋季年会, 2016/9/15, 愛媛大学(愛媛・松山)
 11. Koutarou Kyutoku (lecture) “Gravitational-wave astronomy and prospects of its application to nuclear physics” The 15th CNS International Summer School, 2016/8/25, 29, 理化学研究所(埼玉・和光)
 12. 久徳浩太郎(招待) “重力波天文学” 熱場の量子論とその応用, 2016/8/23, 理化学研究所(埼玉・和光)
 13. 久徳浩太郎(招待) “重力波天文学と今後の中性子星の性質への制限について” 相対論宇宙論弘前研究会2016, 2016/8/3, 弘前大学(青森・弘前)
 14. 久徳浩太郎 “The unreasonable

- weakness of r-process cosmic rays in the neutron-star-merger nucleosynthesis scenario” RIKEN-RESCEU 合同勉強会, 2016/7/27, 東京大学(東京・文京)
15. 久徳浩太郎 “磁気流体力学によるブラックホール・中性子星連星合体の数値相対論シミュレーション” 理研シンポジウム「スーパーコンピュータHOKUSAIとShoubu、研究開発の最前線」, 2016/6/8, 理化学研究所(埼玉・和光)
 16. 久徳浩太郎 “ニュートリノ輸送数値相対論によるブラックホール・中性子星連星の合体” 日本物理学会第71回年次大会, 2016/3/19, 東北学院大学(宮城・仙台)
 17. 久徳浩太郎 “Dynamical mass ejection from black hole-neutron star binaries” 新学術領域「重力波天体」第4回領域シンポジウム, 2016/2/18, 東京大学(千葉・柏)
 18. Koutarou Kyutoku “Dynamical mass ejection from black hole-neutron star binaries” 28th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, 2015/12/15, ジュネーブ(スイス)
 19. Koutarou Kyutoku “Reducing orbital eccentricity in initial data of black hole-neutron star binaries in the puncture framework” The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 2015/12/8, 京都大学(京都・京都)
 20. Koutarou Kyutoku “Dynamical mass ejection from black hole-neutron star binaries” Quarks to Universe in Computational Science, 2015/11/5, 奈良春日野国際フォーラム(奈良・奈良)
 21. 久徳浩太郎 “Dynamical mass ejection from black hole-neutron star binaries” High-Energy Astrophysics and Astroparticle Physics 2015, 2015/10/7, 高エネルギー加速器研究機構(茨城・つくば)
 22. 久徳浩太郎 “ブラックホール・中性子星連星からの力学的質量放出” 日本物理学会2015年秋季大会, 2015/9/25, 大阪市立大学(大阪・大阪)
 23. 久徳浩太郎 “Compact binary progenitors of short-hard gamma-ray bursts” GRB Workshop 2015, 2015/9/2, 理化学研究所(埼玉・和光)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:

発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久徳 浩太郎 (Koutarou Kyutoku)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子
核研究所・助教
研究者番号：30757125

(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

()