

令和 3 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03641

研究課題名(和文) 連星白色矮星合体レムナントは宇宙重力波望遠鏡で見えるか？

研究課題名(英文) Are merger remnants of binary white dwarfs observable by spaceborne gravitational-wave detectors?

研究代表者

吉田 慎一郎 (Shin'ichirou, Yoshida)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：40568284

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：2つの白色矮星からなる近接連星は、重力波を放出しながら近づいていき、最終的に合体する。本研究では、合体で生まれた天体が高速自転することにより起きる特徴的な振動を調べた。このような振動は0.1Hz程度の振動数を持ち、DECIGO(DECi-Hertz Gravitational Observatory)、BBO(Big Bang Observer)など中間周波数での宇宙重力波望遠鏡計画のターゲットとなりうる。本研究では、合体で誕生した天体の数値モデルを作り、その固有振動を解析して不安定な振動を探した。また、固有振動からの重力波振幅を計算し、それらが実際に観測可能であることを示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近接する白色矮星連星の合体は、熱核融合型(1a型)超新星爆発の前駆天体として、また質量の大きな、あるいは磁場の強い白色矮星を作る過程として興味深い現象である。今回の研究では、これまで議論されていなかった、合体直後に残された残存天体からの重力波放射について、全く新たな可能性を提案できた。周波数0.1Hz帯での重力波観測において、これは新たなターゲット天体となるだろう。また、1a型超新星爆発が合体に引き続き起きるならば、一連の過程において重力波と電磁波によるマルチメッセンジャー観測も期待できることを示唆できた。

研究成果の概要(英文)：A close binary composed of two white dwarfs emits gravitational wave and finally merges to form a single remnant. In this research I studied characteristic oscillations of rapidly rotating remnants. The oscillations modes of interest here are in the frequency range of 0.1 Hz (decihertz). The frequency range is in the observable window of such planned space-borne gravitational wave observatories as DECIGO (DECi-hertz Gravitational Observatory) and BBO (Big Bang Observer). Here I numerically constructed the remnant models of the mergers and computed the unstable eigenmode oscillations of them. I also computed the amplitude of gravitational waves from the oscillations. By this study it is shown that the remnant's oscillations are observable with the planned space-borne gravitational wave observatory.

研究分野：理論宇宙物理学

キーワード：白色矮星 連星 重力波

1. 研究開始当初の背景

LIGO, VIRGO による重力波の直接観測の成功により, 宇宙空間でより低周波領域の重力波を観測する計画も具体性を帯びてきた. このような計画において最初に観測される天体の一つは, 銀河系内の白色矮星連星である. これら連星は重力波放射によって角運動量を失っていき, 最終的には合体する. 合体後に残されたレムナント天体には, 熱核融合型 (Ia 型) 超新星爆発を起こすものがあるという示唆がなされている. そこで, 電磁波だけではなく, 重力波によって合体後の天体が観測されれば, Ia 型超新星の起源や性質を知ることができるだろう. しかし, このようなレムナントからの重力波の振動モードや, その観測可能性を調べた研究は存在していなかった.

2. 研究の目的

白色矮星同士合体後の残骸天体(レムナント)の差動回転が十分強ければ, 非軸対称な振動が動的に不安定になり, 振動数がほぼ一定の強い重力波を放射すると予想される. 白色矮星の振動の典型的な周波数は, 0.01-1Hz 領域に高い感度を持つ宇宙重力波望遠鏡 DECIGO (DECI-hertz Gravitational Observatory), BBO (Big Bang Observer) 等の感度が最高になる領域にあり, 不安定振動するレムナントからの強い重力波の観測が期待できる.

本研究では, これら差動回転する白色矮星合体レムナントの固有振動を調べる数値コードを開発し, それを用いて動的不安定性が起きる物理的条件を明らかにする. また, これらレムナントからの重力波が観測可能かどうかについて調べる.

3. 研究の方法

本研究では最初に, 合体レムナントを軸対称・定常な平衡星モデルとして数値的に構築した. このモデルは, 現実的な星の物質の熱力学性質を考慮して作られている.

このモデルに対して, 適切な境界条件を付与した線形モード解析を数値的に行った. 平衡モデルは軸対称なので, モード解析は一般に 2 次元固有値問題になるが, モデルの密度分布が平たい円盤状をしていることから, 回転軸と垂直な方向に振動を限定する 1 次元固有値問題に単純化して問題を解析した.

4. 研究成果

(1) 平衡モデル星

平衡モデル星を数値的に構成するため, 物質の静水圧平衡と自己重力を無撞着に解く数値コードを開発した (Hachisu, I. (1986)). 合体レムナントの角速度分布は, 先行研究の流体シミュレーション (Yoon, S-C. et al. (2007)) で得られた, 低速一様自転のコア + 高速差動自転のエンベロープの 2 層構造を採用した. 状態方程式は有限温度の白色矮星物質のものをを用い, エンベロープ温度や中心密度, 星の元素組成を変えて一連の平衡モデルを得ることができた (図 1 [1]). 高速自転するモデルの一般形は, 一様自転する重く小さなコアを取り巻いて差動自転するエンベロープが円盤状に広がる構造をとっている.

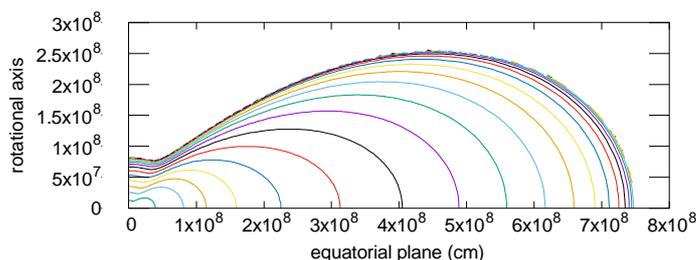


図 1. 白色矮星連星合体レムナント平衡モデルの密度分布例 [1]. 子午面による断面をプロット. 縦軸は自転軸, 赤道面 (横軸) に対称なので, 上半面だけを表示している.

また, この研究結果の知見を用いて 2019 年に観測された特異な I 型超新星 SN2019bkc の光度変化の全く新しいモデルを提案した [2]. このモデルでは, 白色矮星合体レムナントが合体後の熱的進化によって大きさを変化させ, それに応じて星の磁場の強さと, 磁気双極子放射の強さが変

化することによって光度曲線を説明している。

なお、ここで得られた平衡モデルを用いて米国、ヨーロッパの研究者との共同研究を開始した。この共同研究では、計算された平衡モデルを初期条件として用いて、Ia型超新星爆発の数値シミュレーションを行い、核反応で合成された元素の種類と量を調べている (S. Neopane, R. Fisher, K. Bhargava, N. Roy, S. Yoshida, S. Toonen, 237th American Astronomical Society Meeting)

(2) 合体レムナントの固有モード解析と重力波観測の可能性

質量、温度、自転速度を変えた一連の合体レムナント平衡系列を作り、それらに対して固有モード解析を行った。非軸対称振動モードのパターン速度が星の回転と一致する“共回転モード”として不安定振動が現れるという予測が正しいことが確認され、複数の共回転モードが不安定で増大するモードとして現れることがわかった。そのうち、一つの系列は圧力の変動が共回転によって増大する音波モードであるが、もう一つの系列はコリオリ力を復元力とする慣性モードが共回転によって増大するものであることが結論された。特に、後者のモードの成長速度が早いので、合体直後には不安定化した慣性モードが支配的になると予想できる。

このような不安定成長したモードが非線形効果によって飽和すると、その固有振動数に従って星の質量四重極が時間変動し、重力波が放射される。今回の研究は線形近似を行なっているため、成長が飽和したときの振幅を求められないが、先行研究から示唆される飽和振幅を用いて重力波の振幅の大きさを見積もり、これを宇宙空間での重力波天文台計画における目標感度と比較した(図2 [3])。ここでの重力波信号は、振動数一定の振動を、星の差動回転が粘性によって均される時間だけ繰り返すという仮定を置いている。

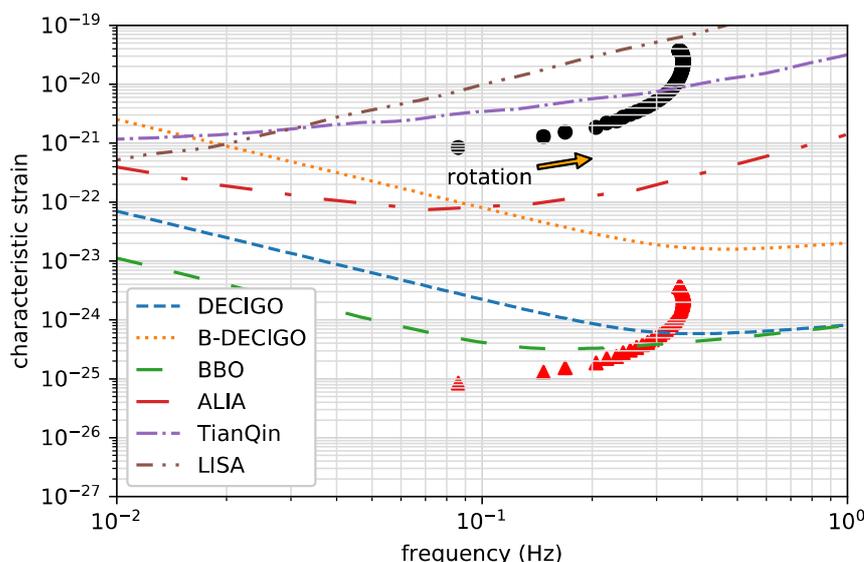


図2．最も成長の早い振動モードの周波数(横軸)と、その重力波信号の大きさ(縦軸)．黒い丸は差動回転する星の数値シミュレーションから示唆される飽和振幅を採用した場合、赤い三角はガス円盤の安定性解析から示唆される飽和振幅を採用した場合の大きさ．各曲線は計画されている宇宙重力波天文台の感度曲線．重力波源の距離は20Mpcを仮定．

最も成長の早い振動モードからの重力波信号は、0.1-1Hzの帯域にあり、星の質量が大きいほど、また星の自転が早いほど大きい。差動回転する星の流体シミュレーション (Shibata, M. et al. 2001) から示唆される飽和振幅は0.01-0.1程度と大きく、一方ガス円盤の安定性解析から示唆される飽和振幅は 10^{-5} 程度と小さい。これらを両方採用して、重力波信号の大きさの上限と下限を見積もった。これによると、飽和振幅が小さい場合でもDECIGOやBBOを持ちいれば、おとめ座銀河団程度までの距離でレムナントからの重力波が観測可能であることがわかった。また飽和振幅が大きい場合は、DECIGOの縮小版であるB-DECIGOや、LISA、TianQinでも観測可能である。おとめ座銀河団までの距離での白色矮星合体イベント数を見積もると、年間数十程度の重力波イベントが期待できることがわかった。

この研究課題の題目とした問「連星白色矮星合体レムナントは宇宙重力波望遠鏡で見えるか？」については、肯定的な結果が得られたといえよう。

文献リスト

- [1] S.Yoshida, “Rotating white dwarf models with finite-temperature envelope”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 486, Issue 3, p.2982-2994 (2019)
- [2] S.Yoshida, “On the Central Engine of the Fastest-declining Type I Supernova SN2019bkc”, *Research Notes of the American Astronomical Society*, Volume 3, Issue 7, article id. 112 (2019)
- [3] S.Yoshida, “Decihertz Gravitational Waves from Double White Dwarf Merger Remnants”, *The Astrophysical Journal*, Volume 906, Issue 1, id.29, 10pp. (2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shin'ichirou Yoshida	4. 巻 3
2. 論文標題 On the Central Engine of the Fastest-declining Type I Supernova SN2019bkc	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Research Notes of the American Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 112
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/2515-5172/ab35de	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Shin'ichirou	4. 巻 486
2. 論文標題 Rotating white dwarf models with finite-temperature envelope	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2982 ~ 2994
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stz1030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Shin'ichirou	4. 巻 906
2. 論文標題 Decihertz Gravitational Waves from Double White Dwarf Merger Remnants	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 29 ~ 29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/abc7bd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Shin;ichirou Yoshida
2. 発表標題 Double white dwarf merger remnants as low frequency gravitational wave sources
3. 学会等名 The Beginning and Ends of Double White Dwarfs (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田慎一郎
2. 発表標題 自転する星の超大質量ブラックホールによる潮汐破壊
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 吉田慎一郎
2. 発表標題 Rotating merger remnant models of white dwarf binaries
3. 学会等名 The 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 吉田慎一郎
2. 発表標題 連星白色矮星合体レムナントからの deciHz 帯重力波放射
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Neopane, R. Fisher, K. Bhargava, N. Roy, S. Yoshida, S. Toonen
2. 発表標題 Near-Chandrasekhar Mass Type Ia Supernovae from the Double-Degenerate Channel
3. 学会等名 237th American Astronomical Society Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田慎一郎
2. 発表標題 連星白色矮星合体レムナントの平衡モデル
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	University of Massachusetts Dartmouth		
オランダ	University of Amsterdam		