様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　２ 年　６ 月　３ 日現在

機関番号：８２４０１
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2017～2019
課題番号：１７Ｋ０５４５８

研究課題名（和文）超新星からの重力波で探る高密度領域の物理

研究課題名（英文）Probing the physics for the high density region via gravitational waves from supernovae

研究代表者
祖谷　元（Sotani, Hajime）

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・研究員

研究者番号：７０３８６７２０

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,900,000円

研究成果の概要（和文）：超新星爆発からの重力波シグナルは重力波源として有力視されている。本研究では、特に数値シミュレーションの結果として示されている重力波シグナルの物理的背景を星震学的立場から探るべく、超新星爆発後に作られた原始中性子星からの重力波を摂動的なアプローチにより系統的に解析した。その結果、重力波の直接観測を通して原始中性子星の平均密度の時間進化を捉えることができることを示した。また、ブラックホールに潰れる場合には、ニュートリノと重力波の同時観測により原始中性子星の最大質量に関する情報も得られることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義
重い星の最期に起こる超新星爆発後に残される中性子星内部の密度は原子核密度よりずっと大きいため、地上実験からその物理的な特性を決めることは非常に困難である。そのため、このような高密度天体の観測を通して、逆に高密度領域での物理を垣間見ることができるわけである。本研究では重力波という物理量に着目し、超新星爆発後の高密度天体内部の情報を抜き出すことを目指した。これにより、原子核物理が提唱する高密度領域における物理に、天体観測から制限を与えることができるかもしれない。

研究成果の概要（英文）：The core-collapse supernova explosions are one of the most promising gravitational wave sources. In this study, in order to understand the gravitational wave signals appearing in the numerical simulations, we systematically study the gravitational wave frequencies of the protoneutron stars via asteroseismology, which is a perturbative approach. Then, we find that one would extract the time evolution of the average density of protoneutron star via gravitational wave observations. We also find that in the case of the black hole formation, one could get the information about the protoneutron star with the maximum mass by simultaneous observations of neutrino and gravitational waves.

研究分野：宇宙物理

キーワード：宇宙物理　重力波　状態方程式　原始中性子星

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

１．研究開始当初の背景

太陽質量の 8～25 倍程度の重たい星は進化の最終段階に於いて超新星爆発を起こし、最終的に中性子星が残る。その内部密度は標準核密度を優に超えるため、星の構造を決めるには地上実験から決まる核物質の性質だけでは不十分である。そのため、中性子星は高密度領域における物理を知る上で絶好の“実験室”であると言える。特に、2006 年には、軟γ線リピーターにおける巨大フレア現象において準周期的振動が発見された。軟γ線リピーターは強磁場を伴う中性子星であるため、発見された準周期的振動は中性子星の振動を直接捉えた初の観測事例と考えられている。この観測事実から、中性子星の状態方程式には観測的な制限が与えられている。さらに、2015 年には連星ブラックホール合体時における重力波の直接観測に初めて成功した。これにより、重力波天文学がいよいよ幕開けしようとしている段階にあった。

連星系合体時における重力波放射の次に有力な重力波源候補は、超新星爆発であろう。これまで数値シミュレーションにより重力崩壊型超新星爆発の数値計算が多く行われてきた。その過程で、このような系からの重力波放出に関する議論も行われている。特に、爆発後１秒程度の時間において、振動数が数百ヘルツから数キロヘルツまで上昇する重力波シグナルの存在が数値計算により示されているが、この背景を探ることは超新星爆発における物理を知る上で非常に重要であると考えられていた。

２．研究の目的

中性子星はこの世で最も高密度な状態を実現する天体であり、内部構造は未だ不確定である。しかし、中性子星の振動や放出される重力波は、その内部構造に強く依存したものとなるため、逆問題として中性子星の観測を通じて星内部の情報を知ることができる。そこで本研究では、超新星爆発により生まれる原始中性子星からの重力波に着目する。超新星爆発で放出される重力波の観測を通して、原始中性子星における物質の特性を明らかにすることを目指す。さらに、放出される重力波のエネルギーを見積もり、その観測可能性を探るとともに、重力波観測を用いた核物質パラメータへの制限の可能性に迫る。宇宙物理学と原子核物理学の両分野に資する研究であり、非常にユニークな研究内容と言える。

３．研究の方法

計算機の進歩や計算コードの改良により精度の高い数値シミュレーションが可能になりつつあるが、重力波のような振幅の小さな物理量を議論するのは未だ容易ではない。特に、連星系合体に比べると超新星爆発は球対称に近いため放出重力波は弱くなり、数値シミュレーションを通して直接重力波を議論するのは非常に困難である。そこで、本研究では摂動論的なアプローチを用いて星震学的立場から超新星爆発時の原始中性子星からの重力波を議論する。実際、数値シミュレーションの際にデメリットであった球対称に近いという点は、超新星爆発における重力波を摂動的に取り扱うには都合が良い。さらに、摂動論的なアプローチによる重力波の解析では、重力波放出の背後にある物理を理解することが容易になる。原始中性子星から重力波には様々な固有モードがあると考えられるが、それぞれの固有モードには対応する物理的な背景があるからである。

特に、本研究では、重力崩壊型超新星爆発の数値シミュレーションの専門家との共同研究を行うことで、より現実的な原始中性子星モデルを用いた重力波の解析や核物質パラメータの制限が可能となる。数値シミュレーションにより原始中性子星の動的な進化を追う一方で、各時刻における原始中性子星からの重力波を摂動計算により求めるという戦略である。段階的に詳細な物理を取り入れたモデルでの計算を行うことで、重力波のスペクトルがどの固有モードに対応するか同定する。さらに、重力波スペクトルを原始中性子星の半径や質量といった物理量の組合せで特徴付けることで、重力波の直接観測により原始中性子星の半径や質量を測ることを目指す。超新星爆発後に生まれる原始中性子星の周りには親星の物質がまだ残っているため、爆発直後の原始中性子星の姿を捉えるには重力波が唯一の手段である。このようにして、世界で初めて、包括的な原始中性子星における振動解析を行い、重力波観測から高密度領域における状態方程式への制限に迫る。

４．研究成果

本研究課題を通して、主に以下のような研究成果をあげた。

(1) 15太陽質量の親星モデルに対して、異なる２つの状態方程式を用いた３次元相対論的数値シミュレーションの各時刻での数値データを球対称化することで原始中性子星の背景モデルを用意し、その上で線形解析を行った。特に、相対論的な時空振動であるwモードと音波モードであるfモードの解析を行った。その結果、wモードやfモードの振動数時間進化は状態方程式によるが、それぞれの振動数を状態方程式依存性のないように星のコンパクトネスや平均密度の関数として表すことに成功した。つまり、wとfモードの重力波スペクトルの時間進化観測を通して、原始中性子星のコンパクトネスや平均密度の時間進化が、状態

方程式によらず決まることになる。これらは、状態方程式に依存する星の質量と半径の時間進化に焼き直せるので、結果的に超新星爆発からの重力波を観測することで、高密度領域における状態方程式を原理的に決めることができることを示した。

(2) 通常の冷たい中性子星とは異なり、超新星爆発後の原始中性子星の表面の定義は曖昧さが残る。そのため、原始中性子星における重力波星震学を行なっているそれぞれのグループにより、表面の取り扱いやそこでの境界条件を適当に採用している。しかし、これでは統一的な議論が難しいため、我々はこれらの流儀の違いによって、重力波振動数の進化がどのように異なるか系統的な解析を行なった。その結果、原始中性子星の表面を10の11乗cm^3程度の密度と定義した場合に、原始中性子星における重力波の基本振動数が数値シミュレーションで示された重力波シグナルとよく一致することがわかった。これにより、原始中性子星からの重力波観測を通して、原始中性子星の比較的高密度領域における情報（特に、原始中性子星の平均密度）を引き出せることを示した。一方、他のグループで採用されている、衝撃波面において固定端境界条件を課す場合には、数値シミュレーションの結果をうまく説明することはできなかった。

(3) 重い星の最期に起こる超新星爆発は、親星の質量が比較的重い場合、爆発が成功せず最終的にはブラックホールに潰れると考えられている。この場合、通常の超新星爆発と同様にコアバウンス後に原始中性子星が生成されるが、そこに親星の外層が徐々に膠着することでブラックホールに潰れる。特に、ブラックホールに潰れる直前は、原始中性子星の質量は仮定した状態方程式から決まる最大質量に達していると考えられるため、通常の爆発が成功する超新星爆発とは違い、最大質量に関わる情報が重力波観測からわかるという利点がある。また、同時に観測されるニュートリノシグナルは、ブラックホールに潰れる瞬間に消滅するため、ニュートリノ観測を通して、その瞬間を知ることができる。そこで、このようにブラックホール形成を伴う超新星爆発後の原始中性子星からの重力波振動数の時間進化を系統的に調べた。その結果、親星のモデルや原始中性子星の状態方程式とはほぼ無関係に、基本振動数がそれぞれの時間に対応する原始中性子星の平均密度でうまく記述できることがわかった。つまり、ニュートリノ観測を通してブラックホールに潰れる時刻がわかり、その時刻での重力波振動数を用いることでブラックホールに潰れる瞬間、つまり最大質量となる原始中性子星の平均密度が観測的に決まるわけである。これは、高密度領域における状態方程式に対して強い制限を与えると期待される。さらに、重力的な浮力が復元力となる振動モードと基本振動の比は、原始中性子星のコンパクト度（質量を半径で割った量）で、うまく記述できることも見つけた。これにより、重力波の基本振動だけでなく重力的な浮力が復元力となる振動モードも観測された場合には、原始中性子星のコンパクト度も観測的に決められるかもしれない。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計12件（うち査読付論文　12件／うち国際共著　2件／うちオープンアクセス　0件）

１．著者名 Sotani Hajime	４．巻 101
２．論文標題 Light curves from highly compact neutron stars with spot size effect	５．発行年 2020年
３．雑誌名 Physical Review D	６．最初と最後の頁 063013-1, -10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.063013	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 Sotani Hajime、Sumiyoshi Kohsuke	４．巻 100
２．論文標題 Determination of properties of protoneutron stars toward black hole formation via gravitational wave observations	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Physical Review D	６．最初と最後の頁 083008-1, -12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.083008	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 Sotani Hajime、Silva Hector O.、Pappas George	４．巻 100
２．論文標題 Finite size effects on the light curves of slowly-rotating neutron stars	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Physical Review D	６．最初と最後の頁 043006-1, -10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.043006	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 該当する

１．著者名 Sotani Hajime、Kuroda Takami、Takiwaki Tomoya、Kotake Kei	４．巻 99
２．論文標題 Dependence of the outer boundary condition on protoneutron star asteroseismology with gravitational-wave signatures	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Physical Review D	６．最初と最後の頁 123024-1, -14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.123024	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 Sotani Hajime、Kokkotas Kostas D.	4．巻 97
2．論文標題 Compactness of neutron stars and Tolman VII solutions in scalar-tensor gravity	5．発行年 2018年
3．雑誌名 Physical Review D	6．最初と最後の頁 124034-1~-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.124034	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 該当する

1．著者名 Sotani Hajime、Iida Kei、Oyamatsu Kazuhiro	4．巻 479
2．論文標題 Constraints on the nuclear equation of state and the neutron star structure from crustal torsional oscillations	5．発行年 2018年
3．雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6．最初と最後の頁 4735～4748
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1093/mnras/sty1755	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 Sotani Hajime、Miyamoto Umpei	4．巻 98
2．論文標題 Pulse profiles of highly compact pulsars in general relativity	5．発行年 2018年
3．雑誌名 Physical Review D	6．最初と最後の頁 044017-1~-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.044017	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 Sotani Hajime、Miyamoto Umpei	4．巻 98
2．論文標題 Systematical study of pulsar light curves with special relativistic effects	5．発行年 2018年
3．雑誌名 Physical Review D	6．最初と最後の頁 103019-1~-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.103019	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 Sotani Hajime、Iida Kei、Oyamatsu Kazuhiro	4．巻 470
2．論文標題 Probing crustal structures from neutron star compactness	5．発行年 2017年
3．雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6．最初と最後の頁 4397～4407
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1093/mnras/stx1510	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 Sotani Hajime、Kuroda Takami、Takiwaki Tomoya、Kotake Kei	4．巻 96
2．論文標題 Probing mass-radius relation of protoneutron stars from gravitational-wave asteroseismology	5．発行年 2017年
3．雑誌名 Physical Review D	6．最初と最後の頁 063005-1~-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.063005	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 Sotani Hajime、Miyamoto Umpei	4．巻 96
2．論文標題 Sensitivity of pulsar light curves to spacetime geometry and efficacy of analytic approximations	5．発行年 2017年
3．雑誌名 Physical Review D	6．最初と最後の頁 104018-1~-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.104018	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 Sotani Hajime	4．巻 96
2．論文標題 Pulse profiles from a pulsar in scalar-tensor gravity	5．発行年 2017年
3．雑誌名 Physical Review D	6．最初と最後の頁 104010-1~-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.104010	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12件（うち招待講演　4件／うち国際学会　8件）

１．発表者名 祖谷元，住吉光介
２．発表標題 ブラックホール形成を伴う超新星での重力波星震学
３．学会等名 日本物理学会
４．発表年 2020年

１．発表者名 Sotani Hajime
２．発表標題 Double-layer torsional oscillations in a neutron star crust as a lasagna sandwich
３．学会等名 9th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSYM2019)（招待講演）（国際学会）
４．発表年 2019年

１．発表者名 祖谷元，飯田圭，親松和浩
２．発表標題 ズレ振動における中性子星クラスト中パスタの効果とその重要性
３．学会等名 日本物理学会
４．発表年 2019年

１．発表者名 Sotani Hajime
２．発表標題 Crustal torsional oscillations inside the deeper pasta structures
３．学会等名 STARS2019/SMFNS2019（国際学会）
４．発表年 2019年

１．発表者名 Sotani Hajime、Iida Kei、Oyamatsu Kazuhiro
２．発表標題 Constraint on the equation of state from the quasi-periodic oscillations in ginat flares
３．学会等名 Fifteenth Marcel Grossmann Meeting - MG15（国際学会）
４．発表年 2018年

１．発表者名 Sotani Hajime、Kuroda Takami、Takiwaki Tomoya、Kotake Kei
２．発表標題 Constraint on the equation of state via supernova gravitational waves
３．学会等名 Fifteenth Marcel Grossmann Meeting - MG15（国際学会）
４．発表年 2018年

１．発表者名 Sotani Hajime
２．発表標題 Gravitational waves from protoneutron stars and nuclear EOS
３．学会等名 IWARA2018 - 8th International Workshop on Astronomy and Relativistic Astrophysics（国際学会）
４．発表年 2018年

１．発表者名 Sotani Hajime
２．発表標題 Impact of nuclear symmetry energy on neutron star structure and crustal oscillations
３．学会等名 HAWAII2018 -5th JOINT MEETING OF THE NUCLEAR PHYSICS DIVISIONS OF THE APS and The JPS-（招待講演）（国際学会）
４．発表年 2018年

１．発表者名 Sotani Hajime
２．発表標題 Crustal torsional oscillations and nuclear saturation parameters
３．学会等名 Xiamen-CUSTIPEN Workshop on the EOS of Dense Neutron-Rich Matter in the Era of Gravitational Wave Astronomy（招待講演）（国際学会）
４．発表年 2019年

１．発表者名 祖谷元
２．発表標題 星震学による中性子星核物質の探究
３．学会等名 日本物理学会（招待講演）
４．発表年 2017年

１．発表者名 Hajime Sotani
２．発表標題 Gravitational wave asteroseismology with protoneutron stars
３．学会等名 29th International Texas Symposium on Relativistic Astrophysics（国際学会）
４．発表年 2017年

１．発表者名 祖谷元、飯田圭、親松和浩
２．発表標題 クラスト振動の系統的解析：棒状原子核層の効果と中性子星半径・質量への制限
３．学会等名 日本物理学会
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