

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04024

研究課題名（和文）宇宙の初代星の超新星爆発の特性と重力波源となるブラックホール生成との関連を探る

研究課題名（英文）Properties of Supernova Explosions of First Stars and Connections to Blackhole Formation as Gravitational Wave Sources

研究代表者

野本 憲一（Nomoto, Ken'ichi）

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・客員上級科学研究員

研究者番号：90110676

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、重力波で観測されている質量の大きいブラックホールと高度に明るく輝く新種の超新星の親星の性質を明らかにし、初代星の質量と進化を解明することを目的とした。電子対生成によって脈動を起こしつつ重力崩壊する80-140太陽質量(Msun)の星の進化と爆発の計算により下記のような点を明らかにした。1) この大質量星は脈動によって星周物質を形成する。2) ブラックホールの上限質量は約50 Msun となり、重力波観測による推定と一例を除くと矛盾しない結果となる。3) ブラックホールの形成に伴う超新星のモデルから、Si/O、Ca/O 比が親星の質量の推定に重要であることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々自身の起源、将来を解明する上で、この宇宙がどのように誕生し進化してきたかを明らかにすることは、学術的にも社会的にも最も重要な課題の一つである。多くの観測が宇宙はビッグバンとして始まったことを示しているが、ビッグバン後にどのような初代星が形成されたかは明らかになっていない。本研究では、最近の重力波の観測から得られたブラックホールの質量を手がかりに、ブラックホールの形成に伴う特異な超新星のモデルを計算し、ブラックホールと超新星の親星の質量範囲を特定することができた。それにより、初代星の有力候補とその質量範囲を推定することができた。

研究成果の概要（英文）：This project aims at clarifying the nature and evolution of first stars in the universe, in particular, the nature of the progenitors of massive black holes observed with gravitational waves and the new type of superluminous supernovae. We have studied the 80-140 solar mass (Msun) stars, which undergoes pair-instability pulsations and gravitational collapse to form black holes. Our findings are as follows: 1) These massive stars undergo lots of mass loss due to pulsations and form circumstellar matter. 2) The maximum of the black hole is about 50 Msun, which is consistent with the gravitational wave observations (except for 1 exception). 3) Nucleosynthesis of supernovae that associated with the black hole formation shows the importance of the Si/O and Ca/O ratios to identify the progenitor masses.

研究分野：天文学

キーワード：初代星 超新星 ブラックホール 重力波 元素の起源

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙の初代星がどのような典型的な質量を持ち、どのような超新星爆発を起こして元素合成をしたかを解明することは、現在の天文学の最も重要な課題の一つである。すなわち、ビッグバン宇宙論においては、大規模構造形成がコールド・ダークマター・シナリオにより再現されており、初期宇宙の暗黒時代に終わりを告げる初代星の形成に始まる宇宙の黎明期の進化の解明が、観測的にも理論的にも現在の主要な課題の一つとなっている。初代星の質量関数、進化、超新星爆発がどのようなものであったかは、宇宙の再電離の源や、巨大質量および中間質量ブラックホールの種が何であったか、重力波源となった大質量連星ブラックホールの起源かどうか、そして、初代銀河がどのように形成されたか、宇宙の元素がどのように生成されていったか、などの現在の天文学の大きな「問い」を解決する重要なカギである。

(2) 近年の3次元流体力学的シミュレーションによって推定されたる初代星の質量範囲は大質量寄りに広い範囲のものとなっており、今後、観測的な制約をつけモデルを検証するには、何が必要かは重要な「問い」となっている。初代の大質量星の質量関数に制約を与えるのではないかと最近注目されているのが、2015年以来観測されている重力波の多くがブラックホールの合体によるもので、かつブラックホールの質量が予想より大きいことである。その一方で、最近発見発見されるようになった、通常の重力崩壊型超新星の10倍から500倍もの明るさに達する「超高輝度超新星」(Superluminous Supernova: SLSN)や、非常に短時間に同じように明るく輝く超新星(Fast Blue Optical Transient: FBOT)の源も大質量星であることが示唆されている。特にSLSNのほとんどは、矮小銀河すなわち、金属量の少ない環境で発生しており、初代星の手がかりを与える可能性がある。

(3) そのような大質量星の中でも、電子対生成の効果で脈動を起こしつつ重力崩壊する80-140太陽質量(M_{sun})の星が、初代星に強く関係しており、重いブラックホールの質量関数と上限質量の決定や、高光度の特異な超新星の源に重要な貢献をしているという作業仮説を立てるに至った。この質量範囲の星は、最終的には重力崩壊して重いブラックホールを形成することが予測されているが、これまで、そのような進化の計算があまり行われてこなかった、言わば未開拓の質量範囲の星である。その進化の最終段階がどのようなものであるかという「問い」に答えることは、重力波観測が天体物理的にどういう意味があるかという「問い」に答えることにもなる。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、重力波で観測されている質量の大きいブラックホールと高度に明るく輝く新しいタイプの超新星とが、初代星の正体とその爆発の手がかりを提供しているというアイデアに基づき、これらのブラックホールや特異な超新星の親星の性質を明らかにし、初代星の質量と進化を解明することを目的とする。特に電子対生成によって脈動を起こしつつ重力崩壊する80-140 M_{sun} の星が、初代星や重いブラックホール・特異な超新星の源に関係しているという作業仮説を立て、その検証を試みる。第一に、ブラックホールの質量関数を予測する。第二に、非常に短時間に明るく輝く超新星の特異な性質を説明することを試みる。第三に、元素合成計算から初代星との関係を調べる。

(2) 上記のアイデアに基づく本研究では、80-140 M_{sun} の星の進化の最終段階と、その爆発に伴う元素合成の特徴を解明することが、まず第一の目的である。この質量範囲の星は、それより重い140-300 M_{sun} の星が電子陽電子対生成による不安定によって酸素の核爆発を起

こして完全に飛び散る（対生成型超新星）と予想されているのとは異なり、対生成による不安定によって脈動（対生成脈動）しつつ重力崩壊することが予想される。その脈動とそれに起因するコアからの大規模な質量放出の過程をシミュレーションし、星周物質の質量範囲を求め、それによってブラックホールの質量関数や上限質量の範囲を推定することを目指す。

(3) 対生成型超新星は核爆発を起こしてブラックホールを形成しないので、80-140 Msun の星が、重力波で観測されているような重いブラックホールの質量関数と上限質量を与えていることが予想される。今後の重力波観測によって明らかになると期待されるブラックホールの質量関数や上限質量との比較が可能となる。重力波を使った天文学の遂行という学術的意義と創造性は大きいと考えられる。

(4) また80-140 Msun の星が超新星爆発をおこす場合、爆発による衝撃波が星周物質と衝突し、非常に明るく輝く特異な超新星となることが期待できる。異なる質量を持つ星周物質との衝突による異なる光度曲線が超高輝度超新星(SLSN)やFBOTの光度曲線を説明し得るかどうかを明らかにする。SLSNやFBOTは、その明るさから、遠方でも観測可能で、初代星、初代銀河、初期宇宙の研究に迫ることが可能である。従ってSLSN やFBOTの特徴と、赤方偏移が4という遠方で観測されている超新星や、今後すばる望遠鏡のHSCによる探索で発見されるであろう高赤方偏移の超新星の特徴との比較検討を行う。SLSNは、超新星探査が矮小銀河に対しても行われるようになって、10年ほど前から初めて発見され始めた。FBOT も同様に、最近になって、発見数が急増しており、観測的にも研究の初期の段階にある。したがって、理論的な解明も進んでおらず、非常に初期の段階からその解明に貢献することができ、その結果、多くの新知見が得られることが期待できる。

(5) 初代星と関係をより直接的に調べるために、初代星の元素合成が、第二世代の極端に金属量の少ない星(Extremely Metal Poor=EMP星)の元素組成を決めていることに着目する。そのため、80-140 Msun のジェット状の超新星爆発による元素合成を計算し、EMP星の元素組成比と比較する。対生成型超新星の核爆発による元素合成は、よく調べられていて、EMP 星の組成とは合致しないことが示されている。この点、80-140 Msun の星の元素合成はほとんど調べられておらず、本研究の独自の課題となる。

3. 研究の方法

(1) 80-140 Msun の星の重力崩壊に至る進化を、星の質量と金属量の細かい関数として、主系列から計算する。単独星と連星系の場合それぞれについて計算し、水素の多い外層がついている場合についても、対生成脈動とそれに伴う質量放出を計算する。ブラックホールの上限質量は、単独星と連星系の場合で異なり、連星系の場合は、重力波観測から推定されるブラックホールの質量との比較を行う。

(2) 対生成脈動で形成された星周物質の質量を親星の関数として求め、超新星爆発による放出物と星周物質の衝突過程を放射流体力学コードによってシミュレートし、超新星の光度曲線を計算する。明るく輝く超新星となることが期待できるが、星周物質の質量が小さい場合の光度曲線がFBOTの光度曲線と、大きい場合は超高輝度超新星(SLSN)の光度曲線をよく説明するという作業仮説の検証を行う。そのために、すばるHSCによる探査の結果も含む、SLSNやFBOTの観測データ(光度曲線、スペクトル)の収集、データベースの構築を行う。

(3) ブラックホールを形成しつつも、ジェット状のガス放出によって超新星爆発を起こす過程は、2D 流体力学計算コードを用いる。ブラックホールの形成自体は計算せず、ある距離の所でのジェットの形成を仮定する。爆発放出物における元素合成計算の結果を極端な金属欠乏星(EMP星)の元素組成と比較する。極端な金属欠乏星の元素組成の特異性の一つは、

炭素からカルシウムに至るアルファ元素が鉄に対して極端に多いという炭素過剰・金属欠乏星の特徴を、ジェット状のガス放出モデルで再現できるかどうか、モデルのパラメータにどのような制限がつくか、を検討する。さらには、Zn/Feの比が大きいという観測的特徴も、ジェット状ガス放出モデルの重要な検証点となる。

4. 研究成果

(1) まず、電子対生成によって脈動を起こしつつ重力崩壊する80-140 Msunの星が、初代星や重いブラックホール・特異な超新星の源にどう関係しているかの研究を行った。そのために、80-140 Msunの星の重力崩壊に至る進化を、星の質量と金属量の細かい関数として計算した。特に、連星系での質量移動によってヘリウム星になった場合について、対生成脈動とそれに伴う質量放出を計算した。対生成脈動で形成された星周物質の質量を親星の関数として求め、それ以外の物質はブラックホールに落下するとして、ブラックホールの上限質量は約50 Msunと求めた。重力波観測から推定されるブラックホールの質量との比較を行った。重力波観測からは、ほとんどのブラックホールの質量は50 Msunに近いが、それ以下と推定され、本研究の結果と矛盾しないように見える。このことは、観測されたブラックホールの親星のかなりの部分が、80-140 Msunという質量も持つことを示唆する。

(2) 80 - 140 Msunの星は、脈動によって水素を含まないガスを爆発直前まで放出し続け、星の直近に存在する星周物質を形成する。星周物質の超新星爆発への影響は、特異な超新星のモデルとして重要であることを見出した。

(3) LIGO/VIRGOによって推定されたブラックホールの質量の中で、一例、理論値の上限より大きいものが報告されている。これは、ブラックホールの質量のmass-gapの予測と矛盾しているように見える。そこで、原子核反応の不定性、特に炭素とヘリウムの融合で酸素をつくる反応の不定性がどの程度星の進化に影響を与えるかを研究し、星が重力崩壊する段階の構造に大きな影響を与えることを見出した。これは、ヘリウム燃焼の後に生成される炭素の量が、その後の炭素殻燃焼の強さに大きな影響を与えるためであることが分かった。したがって、初代星の進化と重力崩壊の帰結、元素合成がその質量にどのように依存するかは、原子核反応の不定性を十分に考慮した研究を必要とする。特に、電子対生成不安定に起因する超新星爆発の質量範囲が変化すると、初代星からの鉄の放出量に変化し、銀河の化学進化のモデルに大きな影響を与える。こうした新たな研究課題が明確になった。

(4) ブラックホールの形成に伴うジェット状の超新星爆発の2次元シミュレーションを行い、元素合成の特徴を見出すことに焦点を当てた。爆発の親星としては、金属量ゼロで初期質量が太陽の40倍という大質量星を採用した。シミュレーションでは、ジェットのエネルギーと巾をパラメータとし、ジェットが親星の中を伝搬しつつ元素合成を行う過程を計算し、次の量のエネルギー依存性を調べた。爆発によって放出される質量とブラックホールとなる質量、 ^{56}Ni の生成量、Sc-Ti-Vの生成量の相関、Zn/Fe比。同じエネルギーの爆発では、1次元球対称の爆発モデルと比べると、 ^{56}Ni の生成量やZn/Fe比は大きな値が得られる。特に金属欠乏星HE1327+2326の紫外線観測で得られた大きなZn/Fe比が得られたことは、この星の元素組成に対するジェット状の爆発の寄与を強く示唆するものである。初代星の質量、回転、爆発メカニズムの解明に重要な手がかりが得られた。

(5) ジェット状の超新星爆発のシミュレーションの継続研究を行い、爆発の親星としては、初期質量が太陽の20-25倍の星を採用した。球対称の爆発モデルと比較した元素合成の特徴として、Si/O, Ca/O比が、小さくなることを見出した。Si/O, Ca/O比の観測値が爆発の親星の質量の判定に使われているので、この比の理論値を、親星の質量の関数として求めることが重要であることを結論づけた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 14件／うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Zha Shuai, O' Connor Evan P, Couch Sean M, Leung Shing-Chi, Nomoto Ken' ichi	4. 巻 513
2. 論文標題 Hydrodynamic simulations of electron-capture supernovae: progenitor and dimension dependence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1317 ~ 1328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac1035	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Jiang Jian, Yasuda Naoki, Maeda Keiichi, Tominaga Nozomu, Doi Mamoru, Ivezić Zeljko, Yoachim Peter, Uno Kohki, Moriya Takashi J., Kumar Brajesh, Pan Yen-Chen, Tanaka Masayuki, Tanaka Masaomi, Nomoto Ken' ichi	4. 巻 933
2. 論文標題 MUSSES2020J: The Earliest Discovery of a Fast Blue Ultraluminous Transient at Redshift 1.063	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L36 ~ L45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac7390	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsuruta Sachiko, Kelly Madeline J., Nomoto Ken' ichi, Mori Kanji, Teter Marcus, Liebmann Andrew C.	4. 巻 945
2. 論文標題 Ambipolar Heating of Magnetars	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 151 ~ 158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acbd38	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hartwig Tilman, Ishigaki Miho N., Kobayashi Chiaki, Tominaga Nozomu, Nomoto Ken' ichi	4. 巻 946
2. 論文標題 Machine Learning Detects Multiplicity of the First Stars in Stellar Archaeology Data	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 20 ~ 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acbcc6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tiwari Vishal, Graur Or, Fisher Robert, Seitzzahl Ivo, Leung Shing-Chi, Nomoto Ken'ichi, Perets Hagai Binyamin, Shen Ken	4. 巻 515
2. 論文標題 The late-time light curves of Type Ia supernovae: confronting models with observations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3703 ~ 3715
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac1618	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Zha Shuai, O'Connor Evan P, Couch Sean M, Leung Shing-Chi, Nomoto Ken'ichi	4. 巻 513
2. 論文標題 Hydrodynamic simulations of electron-capture supernovae: progenitor and dimension dependence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1317 ~ 1328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac1035	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Isobe Yuki, Ouchi Masami, Suzuki Akihiro, Moriya Takashi J., Nakajima Kimihiko, Nomoto Ken'ichi, Rauch Michael, Harikane Yuichi, Kojima Takashi, Ono Yoshiaki, Fujimoto Seiji, Inoue Akio K., Kim Ji Hoon, Komiyama Yutaka, Kusakabe Haruka	4. 巻 925
2. 論文標題 EMPRESS. IV. Extremely Metal-poor Galaxies Including Very Low-mass Primordial Systems with $M = 10^4\text{-}10^5 M_{\text{sun}}$ and 2%-3% (O/H): High (Fe/O) Suggestive of Metal Enrichment by Hypernovae/Pair-instability Supernovae	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 111 ~ 118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac3509	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Weng Jianbin, Zhou Ping, Chen Yang, Leung Shing-Chi, Toonen Silvia, Perets Hagai B., Nomoto Ken'ichi, Zenati Yossef, Vink Jacco	4. 巻 924
2. 論文標題 Spatially Resolved X-Ray Study of Supernova Remnant G306.3-0.9 with Unusually High Calcium Abundance	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 119 ~ 125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac308d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ishigaki Miho N, Hartwig Tilman, Tarumi Yuta, Leung Shing-Chi, Tominaga Nozomu, Kobayashi Chiaki, Magg Mattis, Simionescu Aurora, Nomoto Ken'ichi	4. 巻 506
2. 論文標題 Origin of metals in old Milky Way halo stars based on GALAH and Gaia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5410 ~ 5429
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1982	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Leung Shing-Chi, Fuller Jim, Nomoto Ken'ichi	4. 巻 915
2. 論文標題 Fast Blue Optical Transients Due to Circumstellar Interaction and the Mysterious Supernova SN 2018gep	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 80 ~ 89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abfcbe	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Magg Mattis, Nordlander Thomas, Glover Simon C O, Hansen Camilla J, Ishigaki Miho, Heger Alexander, Klessen Ralf S, Kobayashi Chiaki, Nomoto Ken'ichi	4. 巻 498
2. 論文標題 A minimum dilution scenario for supernovae and consequences for extremely metal-poor stars	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3703 ~ 3712
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa2624	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Joyce Meridith, Leung Shing-Chi, Molnar Laszlo, Ireland Michael, Kobayashi Chiaki, Nomoto Ken'ichi	4. 巻 902
2. 論文標題 Standing on the Shoulders of Giants: New Mass and Distance Estimates for Betelgeuse through Combined Evolutionary, Asteroseismic, and Hydrodynamic Simulations with MESA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 63 ~ 87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abb8db	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Baklanov Petr, Lyskova Natalia, Blinnikov Sergei, Nomoto Ken'ichi	4. 巻 907
2. 論文標題 Strongly Lensed Supernova Refsdal: Refining Time Delays Based on the Supernova Explosion Models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 35 ~ 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abcd98	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Leung Shing-Chi, Diehl Roland, Nomoto Ken'ichi, Siebert Thomas	4. 巻 909
2. 論文標題 Exploration of Aspherical Ejecta Properties in Type Ia Supernovae: Progenitor Dependence and Applications to Progenitor Classification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 152 ~ 172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abc9c1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計3件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 渡辺くりあ
2. 発表標題 高い鉄酸素比を持つ極金属欠乏銀河の元素組成比とその起源
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺くりあ
2. 発表標題 Mixing-Fallback超新星爆発モデルで探る極金属欠乏銀河の豊富な鉄の起源
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shing-Chi Leung and Ken'ichi Nomoto
2. 発表標題 White Dwarf Explosions
3. 学会等名 Sixteenth Marcel Grossmann meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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
研究分担者	鈴木 知治 (Suzuki Tomoharu) (20280935)	中部大学・工学部・教授 (33910)	

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
---------	---------