

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：34304

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17665

研究課題名(和文)多様な超新星爆発の系統的シミュレーション研究

研究課題名(英文)Systematic study of various types of supernovae

研究代表者

諏訪 雄大(SUWA, Yudai)

京都産業大学・理学部・准教授

研究者番号：40610811

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：昨今の観測の急速な進歩によって、大質量星の最期の瞬間におこる大爆発(超新星爆発)には広い多様性があることがわかってきた。そこで、本課題では超新星爆発を包括的に理解することを目標に研究を進めてきた。特に、通常の超新星爆発を起こすような親星の構造の解明、短時間で減光する早進化超新星の中心でおこる元素合成の理論計算、超新星によって形成される中性子星の理論的な最小質量の評価、超新星爆発の際に膨大な量が放出されるニュートリノの系統的理論モデル構築、などの成果があった。

研究成果の学術的意義や社会的意義
星の進化の最終段階である超新星爆発の多様性が観測的に急速に明らかになっている。しかし、その理論的解釈やそこから広がる新しい展開についてはいまだ包括的な研究がなかった。本研究によって、通常の超新星と早進化超新星については包括的枠組みを構築する端緒が開かれた。さらに、当初の計画を拡充することで、中性子星の質量と連星大質量星の関係や、超新星ニュートリノについても新しい知見を得るに至った。今後、さらに発展していく観測に対して、物理的解釈を与えるのに不可欠な理論研究の新たな展開への基礎を作った。

研究成果の概要(英文)：Recent observations have shown that there is a wide variety of supernova explosions that occur in the last moments of a massive star. In this project, we have been working on a comprehensive understanding of supernova explosions. In particular, we have elucidated the structure of the progenitor star that causes canonical supernova explosions, calculated the nucleosynthesis at the center of rapidly-evolving supernovae, evaluated the theoretical minimum mass of neutron stars formed by supernovae, and constructed a systematic theoretical model of neutrinos, which are largely emitted during supernovae.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：超新星爆発 シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

超新星は、重元素の起源であり銀河の構造にすら影響を与え、宇宙の加速膨張の発見の契機になるなど、様々なスケールの宇宙進化を理解する上で最も重要な天体のひとつである。しかし、いまだにどのように爆発するのか明らかになっておらず宇宙物理学の最大の問題のひとつと目されている。

超新星爆発には多様性があることが観測的に確立されている。スペクトルによる分類として I 型や II 型があることがよく知られているが、近年は光度曲線による分類が重点的に調べられている。21 世紀に入り大規模なサーベイが実行され、明るさが大きく異なる超新星があることが明らかになった。具体的には、爆発エネルギーが通常の超新星の 10 倍ほどある極超新星や、ほかに 100 倍も明るい超高輝度超新星などが注目されている。これらの明るい超新星に加えて、光度の時間発展が著しく短い時間で進む早進化超新星も観測例を増やしており、様々な議論が急速に進んでいる。

2. 研究の目的

本研究では、これまで理論的には別々の取り扱いで研究されてきた多様な超新星爆発の研究を統一的な枠組みで系統的に理解することを目的とする。

3. 研究の方法

代表者が通常の超新星爆発の研究のために開発してきたニュートリノ輻射流体シミュレーションコードを用いて、様々な初期条件からシミュレーションを行い、観測的な超新星の多様性との関係性を理論的に調べる。

4. 研究成果

助成いただいた期間中に 10 本の査読論文を出版した。主な成果は以下の通りである。

1. 超新星の初期条件依存性

通常の超新星爆発を起こすのに適した親星の条件を、爆発シミュレーションをもちいて逆問題として与える手法を提案した。これまで星の進化計算にのみ立脚していた超新星の初期条件を独立に与える方法を確立した。また、実際に観測と整合的な親星を構築するのに成功した (Suwa and Müller, MNRAS, 2016)。

2. 超新星の爆発計算の新たな指標

超新星爆発の理論モデルの妥当性はこれまで爆発エネルギーが指標として用いられてきた。しかし、観測的によりよく測ることが可能なのは生成されるニッケル量であることに着目し、様々な爆発計算を用いて生成されるニッケル量を評価した。その結果、爆発エネルギーそのものよりも、その増加率がニッケル量と相関していることを発見し、今後の爆発シミュレーションの妥当性を調べるには、爆発エネルギー増加率を見るほうがよいことを提案した (Suwa, Tominaga, and Maeda, MNRAS, 2019)。

3. 早進化超新星の爆発シミュレーション

近接連星を考慮に入れた星の進化計算を行うことで、爆発直前の連星大質量星がどのような構造をしているのかを明らかにし、さらにその構造を初期条件としてニュートリノ輻射流体計算を行った。こうして得られた爆発は早進化超新星の光度曲線を説明するのに適切な爆発エネルギーや放射性にニッケルを作ることがわかっていたが、それに加えて、超鉄元素が形成されることを示した (Yoshida, Suwa, et al., MNRAS, 2017)。また、連星進化およびそこから超新星爆発によって形成される中性子星の質量を様々な親星について計算した。この計算から、中性子星の理論的な最小質量を導き、観測的に計られている中性子星の最小質量が説明可能であることを示した (Suwa, et al., MNRAS, 2018)。

4. 強磁場中性子星に駆動される極超新星シミュレーション

通常の超新星の10倍ほどの爆発エネルギーを持つ極超新星 (hypernova、あるいは broadline Type Ic supernova) の中心エンジンは、非常に磁場の強い (10^{15-16}G) 強磁場中性子星であるという仮説がある。こうした爆発では、強磁場中性子星の回転エネルギーが外部にジェット状もしくは磁気駆動風 (ここでは、まとめてアウトフローと呼ぶ) によって放出されると考えられているが、これらによって極超新星の観測的特徴である大きなニッケル質量が説明できるかはわかっていなかった。そこで、強磁場中性子星からのアウトフローを組み込んだ流体シミュレーションを行った。その結果、強磁場中性子星からのアウトフローが双極子放射で決まっている場合は、生成されるニッケル量は観測を説明するには不十分であることを明らかにした (Chen et al., ApJ, 2017)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Suwa Yudai, Tahara Hiroaki W H, Komatsu Eiichiro	4. 巻 2019
2. 論文標題 Kompaneets equation for neutrinos: Application to neutrino heating in supernova explosions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 083E04, 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz087	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 Suwa Yudai, Sumiyoshi Kohsuke, Nakazato Ken' ichiro, Takahira Yasufumi, Koshio Yusuke, Mori Masamitsu, Wendell Roger A.	4. 巻 881
2. 論文標題 Observing Supernova Neutrino Light Curves with Super-Kamiokande: Expected Event Number over 10 s	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 139, 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab2e05	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 Suwa Yudai, Yoshida Takashi, Shibata Masaru, Umeda Hideyuki, Takahashi Koh	4. 巻 481
2. 論文標題 On the minimum mass of neutron stars	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 3305 ~ 3312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty2460	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 Suwa Yudai, Tominaga Nozomu, Maeda Keiichi	4. 巻 483
2. 論文標題 Importance of ^{56}Ni production on diagnosing explosion mechanism of core-collapse supernova	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 3607 ~ 3617
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3309	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 Suwa Yudai	4. 巻 474
2. 論文標題 Supernova forecast with strong lensing	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 2612 ~ 2616
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx2953	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 Takashi, Suwa Yudai, Umeda Hideyuki, Shibata Masaru, Takahashi Koh	4. 巻 471
2. 論文標題 Explosive nucleosynthesis of ultra-stripped Type Ic supernovae: application to light trans-iron elements	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 4275 ~ 4285
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx1738	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 Enoto Teruaki, Shibata Shinpei, Kitaguchi Takao, Suwa Yudai, Uchide Takahiko, Nishioka Hiroyuki, Kisaka Shota, Nakano Toshio, Murakami Hiroaki, Makishima Kazuo	4. 巻 231
2. 論文標題 Magnetar Broadband X-Ray Spectra Correlated with Magnetic Fields: Suzaku Archive of SGRs and AXPs Combined with NuSTAR, Swift, and RXTE	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 8 (1-21)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/aa6f0a	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 -

1. 著者名 Chen Ke-Jung, Moriya Takashi J., Woosley Stan, Sukhbold Tuguldur, Whalen Daniel J., Suwa Yudai, Bromm Volker	4. 巻 839
2. 論文標題 Magnetar-powered Supernovae in Two Dimensions. II. Broad-line Supernovae Ic	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 85 (1-11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa68a4	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 Suwa Yudai、Mueller Ewald	4. 巻 460
2. 論文標題 Parametric initial conditions for core-collapse supernova simulations	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2664-2674
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stw1150	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 Takiwaki Tomoya、Kotake Kei、Suwa Yudai	4. 巻 461
2. 論文標題 Three-dimensional simulations of rapidly rotating core-collapse supernovae: finding a neutrino-powered explosion aided by non-axisymmetric flows	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L112-L116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slw105	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 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Yudai Suwa
2. 発表標題 On supernovae in binary systems
3. 学会等名 XIXth Nuclear Astrophysics workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yudai Suwa
2. 発表標題 On the minimum mass of neutron stars
3. 学会等名 10th DTA symposium "Stellar deaths and their diversity" (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yudai Suwa
2. 発表標題 Importance of late-time neutrino light curves
3. 学会等名 Deciphering multi-dimensional nature of core-collapse SuperNovae via gravitational-wave and neutrino signatures (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yudai Suwa
2. 発表標題 Supernovae from binary systems
3. 学会等名 GAMMA-RAY BURSTS AND SUPERNOVAE: FROM THE CENTRAL ENGINES TO THE OBSERVER (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 諏訪雄大、吉田敬、柴田大、梅田秀之、高橋亘
2. 発表標題 中性子星の最小質量
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 諏訪雄大
2. 発表標題 中性子星の最小質量
3. 学会等名 ～ 中性子星の観測と理論～ 研究活性化ワークショップ 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 諏訪雄大、富永望、前田啓一
2. 発表標題 超新星の第一原理シミュレーションで十分な量のニッケルは生成可能か
3. 学会等名 日本天文学会2018秋期年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yudai Suwa
2. 発表標題 Ultra-stripped Type Ic supernovae generating double neutron stars
3. 学会等名 DECIPHERING THE VIOLENT UNIVERSE (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 諏訪雄大
2. 発表標題 大質量星の死: 超新星爆発とガンマ線バースト
3. 学会等名 日本物理学会 2018年春季年会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 諏訪雄大
2. 発表標題 星の死: 超新星爆発
3. 学会等名 第30回 理論懇シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 諏訪雄大
2. 発表標題 中性子星形成と超新星
3. 学会等名 第2回 ~ 中性子星の観測と理論 ~ 研究活性化ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 諏訪雄大
2. 発表標題 強い重力レンズを用いた超新星予報
3. 学会等名 日本天文学会2017秋期年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 諏訪雄大
2. 発表標題 Reverse construction of initial conditions: from supernovae to progenitors
3. 学会等名 Many Riddles About Core-Collapse Supernovae (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 諏訪雄大
2. 発表標題 Neutrino-driven explosions of ultra-stripped Type Ic supernovae generating binary neutron stars
3. 学会等名 Supernovae: The Outliers (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 諏訪雄大
2. 発表標題 Supernovae as birth sites of neutron stars
3. 学会等名 Nuclear Physics, Compact Stars, and Compact Star Mergers 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 諏訪雄大
2. 発表標題 Supernovae generating binary neutron stars
3. 学会等名 Symposium on "New development in astrophysics through multimessenger observations of gravitational wave sources" (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 諏訪雄大
2. 発表標題 From supernovae to neutron stars
3. 学会等名 Quarks and Compact Stars 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 諏訪雄大、Ewald Mueller
2. 発表標題 超新星爆発の新しい初期条件の作り方と爆発シミュレーションの初期条件依存性
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋期大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 諏訪雄大
2. 発表標題 Neutrinos from explosive astrophysical objects
3. 学会等名 新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会 2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 諏訪雄大
2. 発表標題 超新星爆発研究の光と影
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会 2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 諏訪雄大、Ewald Mueller
2. 発表標題 超新星爆発計算のための新しい初期条件の作り方
3. 学会等名 日本天文学会2017年春季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yudai Suwa
2. 発表標題 Supernova Neutrino Light Curves beyond 10 s
3. 学会等名 GW Physics and Astronomy Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yudai Suwa
2. 発表標題 On supernovae in binary systems
3. 学会等名 Multi-Messenger Astrophysics in the Gravitational Wave Era (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yudai Suwa
2. 発表標題 Observing Supernova Neutrino Light Curves with Super-Kamiokande: Expected Event Number over Ten Seconds
3. 学会等名 Topics in Astroparticle and Underground Physics
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://www.cc.kyoto-su.ac.jp/~suwa/ Website of Yudai Suwa
--

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