

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14306

研究課題名（和文）超新星シミュレーションの入力物理の近代化

研究課題名（英文）Employment of modern input physics for supernova simulations

研究代表者

滝脇 知也 (TAKIWAKI, Tomoya)

国立天文台・科学研究部・助教

研究者番号：50507837

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）：3次元数値シミュレーションの結果の爆発エネルギーやニッケル量は観測と比べて少ない。その問題を解決するために、ニュートリノ反応や状態方程式の入力物理のアップデートを行った。特に Horowitz 2017で提案された陽子中性子とニュートリノ間の散乱の反応率の変更は超新星爆発の可否に大きな影響を与えることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超新星爆発は恒星の最期の大爆発であり、その爆発メカニズムの解明は天文学者の悲願である。核物理のアップデートにより、このメカニズムの理解が一歩進み、より現実的な計算ができるようになった。メカニズムはまだ完全に解明されたわけではないが、このアップデートなくしては正解には至れない。超新星爆発の研究において非常に重要な一歩となったと考えられる。

研究成果の概要（英文）：We tried to solve one of the largest problem in recent studies of core-collapse supernovae. In 3D neutrino radiation hydrodynamic simulations, the obtained explosion energies and mass of ejected Ni is significantly smaller than those in the observations. We updated the cross section of neutrino and nucleons, that was proposed by Horowitz 2017. We found that this change strongly affects the dynamics of the shock in the supernovae.

研究分野：宇宙物理

キーワード：ニュートリノ 超新星爆発

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超新星爆発は巨大な原子核とも言える中性子星を作り出す過程そのものであり、宇宙物理と原子核物理双方にとって重要な天体現象である。また、これまでは観測的な情報が少なかったが、将来ニュートリノとそして同時に重力波を検出することで、その詳細な爆発の様子を知ることができるかと期待されている。

この超新星爆発で最も大きな謎はその爆発メカニズムである。研究が始まった当初からニュートリノによる加熱が重要なのではないかと指摘されていたが、実際に数値計算を行うと爆発が起こらず、理論と観測の間に大きなギャップがある (e.g. Sumiyoshi et al. 2005)。このギャップを埋めるため、様々な研究が行われてきた。

本研究の申請をした 2016 年 10 月の超新星爆発研究の状況は以下のようなものであった。まず、ニュートリノ輻射輸送を用いた 3 次元計算が可能になった (Takiwaki et al. 2012, 2014)。これまでの 1 次元球対称の数値計算では爆発が起こらなかったが、3 次元計算では一度止まった衝撃波が再び外向きに動きだし、爆発が起こることが明らかになった。その一方で、シミュレーションで得られた爆発エネルギーやニッケル生成量 (生成地の温度に強く依存) が観測よりも系統的に小さく、シミュレーションに何か問題があることも明らかであった。

2. 研究の目的

超新星爆発の 3 次元数値シミュレーションの結果の爆発エネルギーやニッケル量は観測と比べて少ない。その問題を解決するために、ニュートリノ反応や状態方程式の入力物理のアップデートを行うというのが本研究の目的である。

3. 研究の方法

ニュートリノ反応や状態方程式の入力物理のアップデートとして、2016 年 10 月の段階では、重陽子の導入とそのニュートリノ吸収放出プロセスのアップデートを計画していた。一方 2017 年に Horowitz らによって中性子、陽子といった、中性子星周りにより多く存在する元素のニュートリノ反応率の修正が報告された。後者のほうが爆発メカニズムに与える影響が大きいので、計画を変更して後者の効果を導入した。

4. 研究成果

本研究費の成果として、20 本の論文を出版した。特にこの研究の貢献が大きいものについてピックアップして紹介する。

Kotake, Takiwaki, Fischer, Nakamura, Martinez-Pinedo 2018 はまさにこの Horowitz 2017 の核子散乱の効果について調べた論文である。2 次元シミュレーションを行い、この効果が入ってなかった場合爆発しなかった星が、この効果を入れたシミュレーションでは爆発に転じた。この論文では他のニュートリノ反応についても、クラシカルな反応率とアップデートされた反応率について両方計算し、効果を見比べてみた。その中でも Horowitz の核子散乱のアップデートは効果の大きいものであった。

Sasaki, Takiwaki, Kawagoe, Horiuchi, Ishidoshiro 2020 でもこの反応率を用いた 1 次元計算を行った。この研究は電子捕獲型超新星爆発という極めて親星が軽く外層が薄い場合の超新星爆発を取り扱っており、必ずしもこのアップデートしたニュートリノ反応がなければ爆発しないというものではないが、このアップデートのおかげでより高いニュートリノ光度が得られている。このおかげで星の内部でのニュートリノ振動を誘起しやすくなっている。この論文ではこのニュートリノ振動の観測への影響をハードネスという量で特徴付けた。ハードネスは高エネルギーニュートリノ観測数/低エネルギーニュートリノの観測数で定義しており、平均エネルギーがもともと違う、二種類のニュートリノが混じり合うと急激な変動を見せる。ハイパーカミオカンデを使った反電子型ニュートリノの観測に加えて DUNE を使った電子型ニュートリノの観測も議論した。ニュートリノの質量階層性の違いにもよるが、およそ 10kpc 以内で電子捕獲型超新星爆発があればこの集団振動の効果が検出できることがわかった。Zaizen et al. 2020 として JCAP から 2020 年 6 月に出版した論文では違う親星でハロー効果まで含めたニュートリノ振動を議論しているが、そこでも同様に核子散乱の結果ニュートリノ光度が高くなっている効果が結果に影響を与えていると思われる。ここでは 2 次元シミュレーションの結果を用いた。

この核子散乱の効果をとりにれた 3 次元数値シミュレーションも行っている (出版はまだである)。本研究はシミュレーションだけで 2 年ほどかかったが、完全に衝撃波が復活することを示した。衝撃波がこれまでの計算より早く復活し、新核子散乱率が爆発を助けることを確かめた。また、不定性が大きいものの爆発エネルギーも評価した。こちらは観測よりもファクター少ないことが予想された。これはシミュレーションにまだ足りないものがあることを暗に意味しており、新しい研究の動機となる。最新の状態方程式の効果についても、軽元素の取り扱いが衝撃波復活に与える影響を精査した。

もともとは行う予定であった重陽子の効果については、数値シミュレーションまでは行ったが

論文化はしていない。結果は当初考えていたより影響が小さそうである。ただし、Horowitz 2017のような補正はまだ考えていないので、その効果をいれたらやはり影響があるかもしれない。今後、研究を進めたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 20件 / うち国際共著 12件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sasaki Hirokazu, Takiwaki Tomoya, Kawagoe Shio, Horiuchi Shunsaku, Ishidoshiro Koji	4. 巻 101
2. 論文標題 Detectability of collective neutrino oscillation signatures in the supernova explosion of a 8.8 M _s star	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.063027	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 Shibagaki Shota, Kuroda Takami, Kotake Kei, Takiwaki Tomoya	4. 巻 493
2. 論文標題 A new gravitational-wave signature of low-T/ W instability in rapidly rotating stellar core collapse	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L138 ~ L142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slaa021	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 Abbar Sajad, Duan Huaiyu, Sumiyoshi Kohsuke, Takiwaki Tomoya, Volpe Maria Cristina	4. 巻 101
2. 論文標題 Fast neutrino flavor conversion modes in multidimensional core-collapse supernova models: The role of the asymmetric neutrino distributions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.043016	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 Nakamura Ko, Takiwaki Tomoya, Kotake Kei	4. 巻 71
2. 論文標題 Long-term simulations of multi-dimensional core-collapse supernovae: Implications for neutron star kicks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz080	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, Takiwaki Tomoya, Kotake Kei, Takahashi Koh, Nakamura Ko, Umeda Hideyuki	4. 巻 881
2. 論文標題 One-, Two-, and Three-dimensional Simulations of Oxygen-shell Burning Just before the Core Collapse of Massive Stars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 16 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab2b9d	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 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 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 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 該当する

1. 著者名 Kawahara Hajime, Kuroda Takami, Takiwaki Tomoya, Hayama Kazuhiro, Kotake Kei	4. 巻 867
2. 論文標題 A Linear and Quadratic Time-Frequency Analysis of Gravitational Waves from Core-collapse Supernovae	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 126 ~ 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aae57b	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 Masada Youhei, Kotake Kei, Takiwaki Tomoya, Yamamoto Naoki	4. 巻 98
2. 論文標題 Chiral magnetohydrodynamic turbulence in core-collapse supernovae	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.083018	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 O' Connor Evan, Bollig Robert, Burrows Adam, Couch Sean, Fischer Tobias, Janka Hans-Thomas, Kotake Kei, Lentz Eric J, Liebend?rfer Matthias, Messer O E Bronson, Mezzacappa Anthony, Takiwaki Tomoya, Vartanyan David	4. 巻 45
2. 論文標題 Global comparison of core-collapse supernova simulations in spherical symmetry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 104001 ~ 104001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6471/aadeae	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 Katsuda Satoru, Takiwaki Tomoya, Tominaga Nozomu, Moriya Takashi J., Nakamura Ko	4. 巻 863
2. 論文標題 Progenitor Mass Distribution of Core-collapse Supernova Remnants in Our Galaxy and Magellanic Clouds Based on Elemental Abundances	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 127 ~ 127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aad2d8	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 Hayama Kazuhiro, Kuroda Takami, Kotake Kei, Takiwaki Tomoya	4. 巻 477
2. 論文標題 Circular polarization of gravitational waves from non-rotating supernova cores: a new probe into the pre-explosion hydrodynamics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L96 ~ L100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/sly055	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 Kuroda Takami, Kotake Kei, Takiwaki Tomoya, Thielemann Friedrich-Karl	4. 巻 477
2. 論文標題 A full general relativistic neutrino radiation-hydrodynamics simulation of a collapsing very massive star and the formation of a black hole	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L80 ~ L84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/sly059	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 Sasaki H. , Kajino T. , Takiwaki T. , Hayakawa T. , Balantekin A. B. , Pehlivan Y.	4. 巻 96
2. 論文標題 Possible effects of collective neutrino oscillations in three-flavor multiangle simulations of supernova p processes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevd.96.043013	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 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 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 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 Horiuchi Shunsaku , Nakamura Ko , Takiwaki Tomoya , Kotake Kei	4. 巻 44
2. 論文標題 Estimating the core compactness of massive stars with Galactic supernova neutrinos	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 114001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6471/aa8f1f	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 Kuroda Takami , Kotake Kei , Hayama Kazuhiro , Takiwaki Tomoya	4. 巻 851
2. 論文標題 Correlated Signatures of Gravitational-wave and Neutrino Emission in Three-dimensional General-relativistic Core-collapse Supernova Simulations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa988d	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 Kotake Kei , Takiwaki Tomoya , Fischer Tobias , Nakamura Ko , Martinez-Pinedo Gabriel	4. 巻 853
2. 論文標題 Impact of Neutrino Opacities on Core-collapse Supernova Simulations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaa716	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	4. 巻 475
2. 論文標題 Anisotropic emission of neutrino and gravitational-wave signals from rapidly rotating core-collapse supernovae	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L91-L95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/sly008	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 Shibagaki Shota, Kuroda Takami, Kotake Kei, Takiwaki Tomoya	4. 巻 493
2. 論文標題 A new gravitational-wave signature of low- $T/ W $ instability in rapidly rotating stellar core collapse	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L138 ~ L142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slaa021	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 Suzuki Akihiro, Moriya Takashi J., Takiwaki Tomoya	4. 巻 887
2. 論文標題 Supernova Ejecta Interacting with a Circumstellar Disk. I. Two-dimensional Radiation-hydrodynamic Simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 249 ~ 249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab5a83	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7件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Tomoya Takiwaki
2. 発表標題 C01 progress report
3. 学会等名 The first annual symposium of the innovative area "Gravitational Wave Physics and Astronomy: Genesis" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 滝脇知也
2. 発表標題 ニュートリノ振動を考慮したニュートリノスペクトルの系統的研究
3. 学会等名 新学術領域地下素核C01 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomoya Takiwaki
2. 発表標題 Rotation aided neutrino driven explosion
3. 学会等名 Workshop on The Progenitor-Supernova-Remnant Connection (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomoya Takiwaki
2. 発表標題 Supernovae Wars: Results of Comparison Project
3. 学会等名 DTA workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 滝脇知也
2. 発表標題 超新星爆発の長時間計算, その前に
3. 学会等名 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomoya Takiwaki
2. 発表標題 Oblate Supernova Explosions Aided by Rotation
3. 学会等名 Deciphering the violent universe (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomoya Takiwaki
2. 発表標題 Three dimensional simulations of rapidly rotating core-collapse supernovae
3. 学会等名 Southern Horizons in Time-Domain Astronomy (国際学会)
4. 発表年 2017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
---------	---------------------------	-----------------------	----