

令和元年5月17日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03986

研究課題名(和文) 多次元一般相対論的輻射流体力学シミュレーションによる超新星爆発の研究

研究課題名(英文) Study on Core-Collapse Supernovae with Multi-Dimensional, General Relativistic, Radiation-Hydrodynamical Simulations

研究代表者

山田 章一 (YAMADA, Shoichi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：80251403

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、大質量星がその進化の果てに起こすコアの重力崩壊とそれが引き起こす超新星爆発ならびに中性子星またはブラックホールの形成を、第一原理的シミュレーションにより定量的に研究することを目指し、問題の定式化、コードの開発とテスト、京コンピュータにおけるプロダクティブランを行った。ニュートリノ輸送をフルに相対論的に扱うボルツマンソルバーを用いた軸対称2次元でのシミュレーションに世界で初めて成功し、爆発するモデルを構築するとともに、自転の影響も調べた。この計算ではニュートン重力を用いていたので、アインシュタイン方程式を数値的に解くコードを従来とは異なり、球座標上で開発することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブラックホールの合体から放出された重力波の直接検出や巨大ブラックホールの影の電波観測などが近年立て続けに発表され、専門家非専門家を問わずブラックホールに関する興味が高まっている。本研究は、中でも重力波がその存在を明らかにした数10太陽質量のブラックホールがどのような親星からどのようにして形成されたかを明らかにすることを目指して行っているものであり、その社会的、学術的意義は極めて高いと言える。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aimed to perform first-principles simulations of gravitational collapse of massive star cores in multi-dimensions. It is a process to produce supernova explosions and is accompanied by the formation of compact stars such as neutron stars and black holes. We developed a numerical code that does not employ any artificial approximation unlike other codes and that is fully general relativistic. We applied the code to the simulation of core-collapse supernovae under axisymmetry and found an explosion in one of the models. This is the first-ever success in multi-dimensional simulations at this level of sophistication in neutrino transfer. We also studied the influences of rotations on the dynamics. In these simulations, gravity was still Newtonian. We hence developed a code to solve the Einstein equations numerically. One of nice features of this code is that it employs spherical coordinates unlike others. We fully tested this code and found that it works well indeed.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：重力理論 ダークエネルギー 宇宙論 インフレーション 素粒子統一理論 超新星 重力崩壊 ニュートリノ輸送

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

質量が太陽の約 10 倍以上の恒星がその寿命の果てる際に起こす重力崩壊型超新星爆発は、多くの研究者の長年にわたる様々な側面からの研究にもかかわらず、その爆発機構が不明なままである。重力崩壊型超新星の爆発機構の研究には定量的かつ正確な計算が要求され、通常はスーパーコンピュータによる大規模な数値シミュレーションが行われる。とりわけ近年は、流体力学的不安定性のために超新星爆発は自発的に対称性を破ってしまうと考えられており、そのダイナミクスは本質的に非球対称であると思われる。超新星爆発の定量的な計算には空間多次元性を考慮することが必要不可欠である。しかるに、多次元空間におけるニュートリノ輸送計算は、流体力学と異なり単に計算量が多くなるだけでなく、運動量空間における輸送も球対称の場合とは定性的に異なるため、解くのが格段に難しくなる。このため従来の研究では、輸送方程式自体を近似的なものに取り替えてしまうか、ボルツマン方程式を解いている場合でも相対論的效果は一切無視されていた。その結果、異なるグループの計算結果は互いに矛盾しているだけでなく、これらの計算に用いられた近似の良し悪しを検証する手段もなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上述のような積年の問題を解決すべく、従来の計算に用いられてきたような妥当性の検証が困難な近似を用いることなく、ニュートリノ輸送方程式を第一原理の数値計算により解くコードを開発し、それによる超新星爆発のシミュレーションを行い、これまでの計算に用いられてきた様々な近似法の問題点を明らかにするとともに、現在超新星爆発の機構として最も有望視されているニュートリノ加熱機構が本当に機能するかを明らかにする。また、これまでの超新星爆発の研究は爆発を起こし中性子星を形成するモデルを作ることに傾注してきすぎた感があるが、近年の重力波の観測からも明らかのように、爆発に失敗しブラックホールになってしまう場合も同様に重要であり、こうした場合も扱えるようにすることが喫緊の課題である。そのためにはフルに一般相対論的な計算が不可欠であり、この研究では第一原理的計算の一環としてコードの一般相対論化を進める。

3. 研究の方法

本研究は、申請者がこれまでに独自に開発してきたニュートリノ輸送用のボルツマン方程式を有限差分して解くコードと、流体力学方程式をやはり有限差分法で解くコードを完全に一般相対論化するとともに、アインシュタイン方程式を有限差分して時空の発展を解くコードを開発し、それらを組合せて重力崩壊型超新星爆発の多次元シミュレーションに適用することを目指す。それにより、従来のように正当化の困難な近似を用いることなしに、現在の標準パラダイムであるニュートリノ加熱機構の可否を明らかにするとともに、爆発に失敗しブラックホールが形成されるような場合にも適用できるようにすることを目指す。具体的には、時空の(3+1)分解といわゆる BSSN 形式によるアインシュタイン方程式の数値解法を球座標に適用し、同じ分解に基づき定式化されたボルツマン方程式ソルバーと結合することを目指す。また、計算効率の向上を図り、複数のモデルを系統的に調べられるようにする。

4. 研究成果

(1)ボルツマンソルバーの一般相対論化とそれによる超新星爆発シミュレーション

これまでに開発してきた流束制限付き拡散近似や M1-closure 法といった人為的な近似をすることなしに第一原理的にニュートリノ輸送を計算するコードを用い、超新星爆発のシミュレーションを行うとともに、今後これをブラックホールができるような場合にも使うことができるように完全に一般相対論化することを行なった。計算は有限差分法を用い、通常の流体計算のように空間をメッシュに切るだけでなく、ニュートリノの運動量空間もメッシュに切って行う。回転する星も扱うため軸対称性のみを仮定する。このため空間は 2 次元、運動量空間はフルに 3 次元となり、全体では 5 次元の大規模な計算となるため、京コンピュータを使用した。

軸対称を仮定した超新星爆発の第 1 原理計算

重力に関しては非相対論的だが、ニュートリノ輸送についてはフルに特殊相対論効果を取り込んだボルツマンソルバーを実装した軸対称下での超新星爆発のシミュレーションを行った。親星として 11.2 太陽質量(M_{sun})の無回転モデルを使用し、状態方程式としては Shen らによるものと Lattimer & Swesty によるもの二つを用い、その結果を詳細に比較した。どちらも京コンピュータを使用し、コアのバウンス後 300ms まで計算した。

その結果、比較的柔らかい Lattimer & Swesty の状態方程式を用いたモデルで爆発の兆候を見出した。これは、多次元の第 1 原理計算としては世界で初めてのことである。一方、硬い Shen らの状態方程式では衝撃波は停滞したのち復活の兆しを見せなかった。両者の違いは乱流強度の違いに起因していることを明らかにした。

また、ボルツマンソルバーを用いることにより初めて可能となることとして、運動量空間におけるニュートリノ角度分布を定量的に調べた。それによると、ニュートリノ分布は一般に非軸対称で、主軸の向きも動径方向とは一致しないことがわかった。また、現象論的近似として頻繁に用いられる M1-closure との比較も行い、決して無視できない違いがあることを示した。

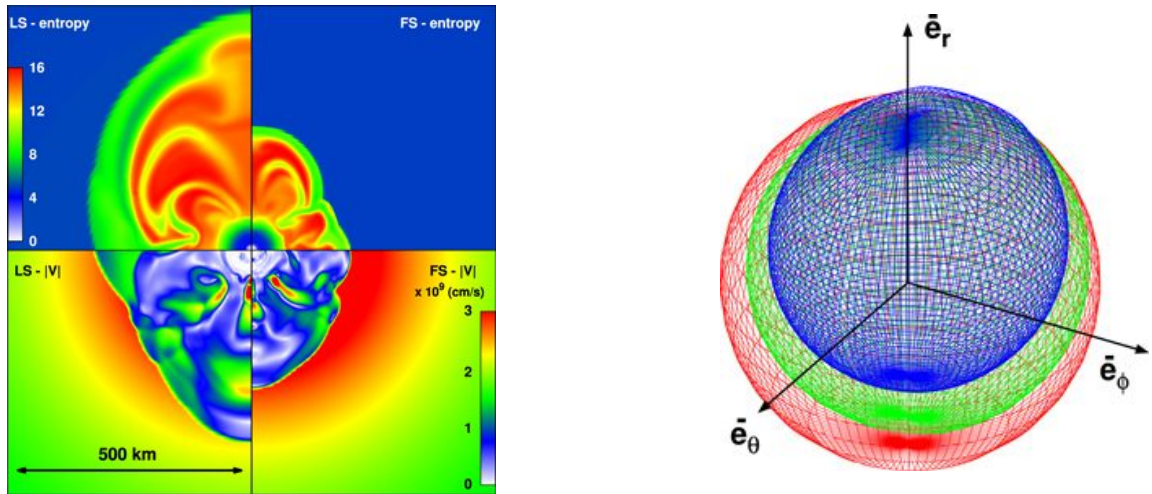


図 1-1: 子午面における物理量分布(左図)と運動量空間における電子型ニュートリノの分布(右図)。左図の時刻は $t=200\text{ms}$ 、左半分が Lattimer & Swesty の状態方程式、右半分が Shen らの状態方程式を用いた結果。上半分が 1 核子あたりのエントロピー、下半分が流体の速さの分布。右図で色の違いは半径の違い：赤 $r=23\text{km}$ 、緑： $r=39\text{km}$ 、青： $r=49\text{km}$ 。

次に、親星が自転している場合のシミュレーションを同様な手法で行った。親星は同じものを使用し、角運動量を付加してからシミュレーションを行った。中心の角速度は 1rad/s として、弱い差動回転を入れた。状態方程式としては、Shen らによるものを核密度以下で多核種を考慮するように独自の拡張を加えたものを用いた。また、これに付随して原子核による電子捕獲反応をアップデートした。

この研究では運動量空間におけるニュートリノ分布に注目した。これは回転のためニュートリノがネットに角運動量を持つようになるからである。ニュートリノが持ち出す角運動量については解析的な評価法が定式化されているので、これがどの程度正しいかも定量的に調べた。

その結果、エディントンテンソルはニュートリノと物質の反応と物質の運動との複雑なやり取りにより決まっており、M1-closure ではこれを十分に表せず、最大 20% の誤差を生じうることを明らかにした。一方、Epstein が与えたニュートリノが持ち去る角運動量に関する評価は、一般に正しい値に対して過大評価する傾向にあることがわかった。

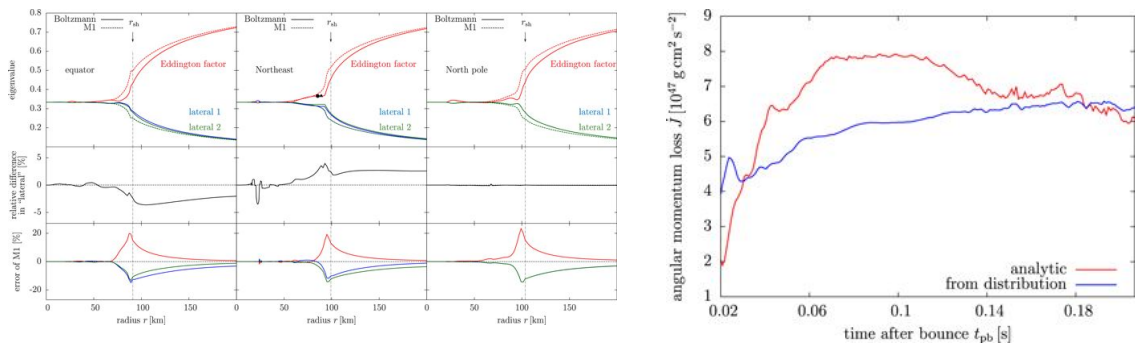


図 1-2: 回転モデルにおけるエディントンテンソルの固有値の比較(左図)とニュートリノが持ち去る角運動量の時間発展(右図)。左図において色は固有値を指定している。また、線種の違いは数値計算の結果(実線)と M1-closure 近似(破線)を表す。中段は角度による相対変化、下段は M1-closure の相対誤差。右図で赤線は Epstein の表式による評価。青は数値計算結果。

ボルツマンコードの一般相対論化と中性子星のキック

上述の計算においては、ボルツマンソルバーは特殊相対論的であるにとどまっていたが、ブラックホール形成に適用する場合一般相対論化は必須である。本研究では、次項で述べるインシュタイン方程式ソルバーに合わせ、時空の(3+1)分解に基づく一般相対論的ボルツマン方程式の定式化を球座標上で行い、その実装をした。これにより、座標系の変換をうまく使い、中性子星の固有運動を直接扱うことが可能になった。これは、現象論的なニュートリノ輸送や原始中性子星を切り取ってしまうような従来の計算とは異なり、ボルツマンソルバーを全領域に用いた計算としては世界で初めてのことである。

その結果、場合によっては従来考えられていたよりも早い段階から中性子星の固有運動が開始されること、またそれはニュートリノの非等方的放出によるものであることが明らかになった。最終的な中性子星のキック速度を得るためにはより長時間の計算を行い、この後に起こると考えられている流体力学的に生じるキックの影響を調べることが重要である。

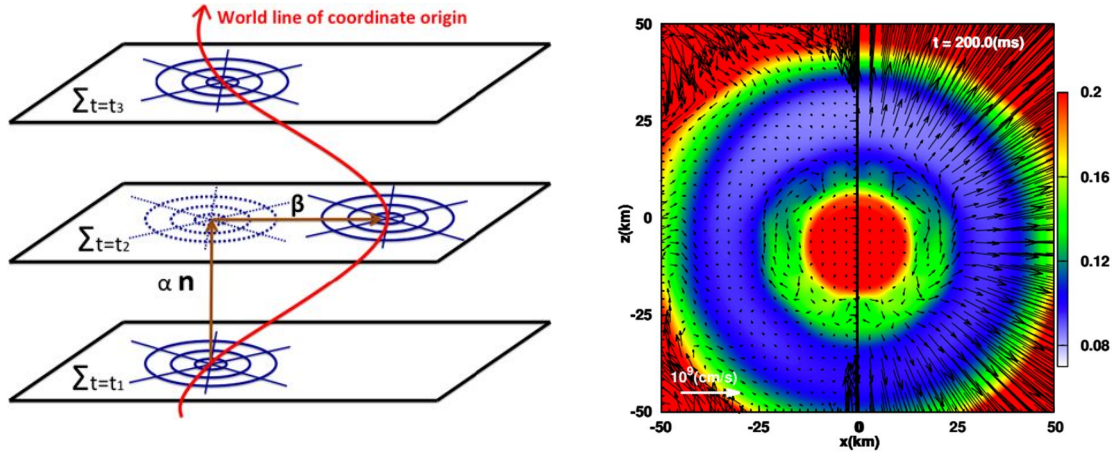


図 1-3: 時空の(3+1)分解に基づく球座標の変位の様子(左図)と中性子星の固有運動の様子(右図)。左図で赤線は球座標の原点の世界線を表す。右図ではカラーが子午面における原始中性子星近傍のYe分布を表し、矢印が速度(左半分)とニュートリノ流束(右半分)を表す。

(2)球座標で使用可能なアインシュタインソルバーの開発

超新星爆発シミュレーションのための一般相対論的ボルツマン輻射流体コードを開発する一環として、一般相対論的重力のためにアインシュタイン方程式を数値的に解く数値相対論コードを開発した。これまでに開発されてきたボルツマン輻射流体コードは球座標を用いてきたので、これに取り付ける数値相対論コードも球座標を採用する。球座標数値相対論は、原点及び極軸上に存在する座標特異点の影響で数値計算が破綻してしまうことが指摘されていたが、Baumgarte et al. (2013)によりそれを回避する方法が提案された。本研究ではこの手法を採用し、球座標であっても問題なく時空計量の発展を計算できるコードの開発に成功した。先行研究においては座標グリッド間隔が等間隔の場合のみ考えられていたが、今回開発したコードは超新星シミュレーションコードへの応用を考え、非等間隔グリッドによる実装に成功している。以下、これらの成果について詳述する。

軸対称/非軸対称線形重力波解

近年、LIGO/VIRGO 検出器により連星中性子星合体や多くのブラックホール連星合体が見つかったことから、天体からの重力波を検出する重力波天文学の重要性が高まっている。超新星爆発からも重力波が放射されると期待されている。重力波は信号を予測しておくことが検出・解釈の上で重要となるため、数値相対論による超新星シミュレーションの重大な使命の一つは重力波信号の予測である。したがって、数値相対論コードを開発する際には、重力波を正確に取り扱えることを確認することがまず重要となる。そこで、本研究で開発した球座標数値相対論コードも、まず重力波解を確認することから始めた。

球座標における重力波の解析解としては、Teukolsky 波と呼ばれる解が知られている。図 1 に示したのは、軸対称モードの線形重力波解の時間発展を数値解と解析解で比較したものである。図中の十字の記号が数値解を表し、実線は解析解を表す。これらは独立に構成したものの、両者は非常によく一致しており、数値解は解析解を非常によく再現できていること

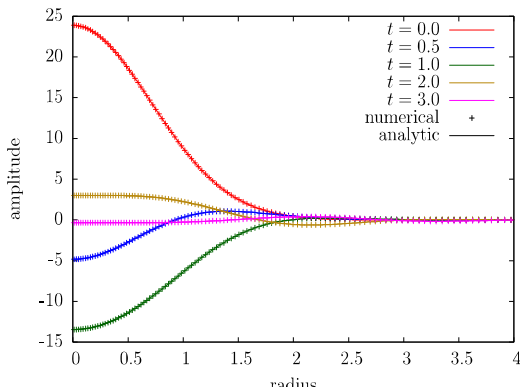


図 1: 軸対称モードの線形重力波解
空間計量の rr 成分の平坦な場合の値 1 からのずれの時間発展を示す。色の違いは考えている時刻の違いであり、十字記号は数値解、実線は解析解を表す。縦横の軸は任意単位で表している。

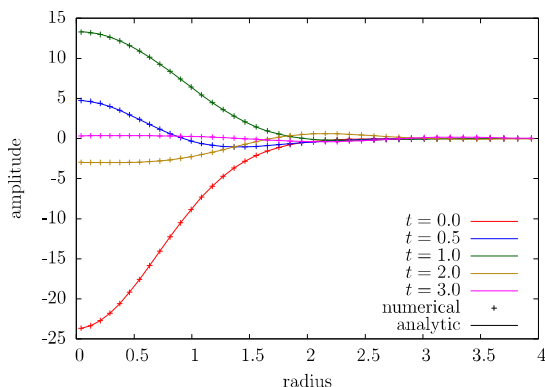


図 2: 非軸対称モードの線形重力波解
図 1 と同様だが、非軸対称モードの解を表している。

がわかる。

また、図2には非軸対称モードの場合の数値解と解析解の比較を示す。凡例は図1と同様である。ここでも、数値解は解析解を非常によく再現できていることを示している。ここに示した非軸対称モードは本質的に三次元的な計算である。これは将来の課題である三次元超新星爆発シミュレーションを見越したものであり、計算機資源さえ許せば現在開発中のコードはそのまま三次元計算に応用可能であることを示している。

複数のゲージ条件におけるシュバルツシルト解の振る舞い

本研究では、強い重力場の取扱いを確かめるために、シュバルツシルト時空を開発した数値相対論コードで正しく扱えるかを確認した。ここでは中心のブラックホールの質量を M とし、幾何単位系を採用して時刻と距離は M を単位として表している。

アインシュタイン方程式においてはゲージの自由度が存在するため、適切にゲージの自由度を定めないとシュバルツシルト解は定常解に見えない。本研究で開発した数値相対論コードで採用しているゲージ条件のもとでは、トランペット・スライスと呼ばれる座標の選び方でシュ

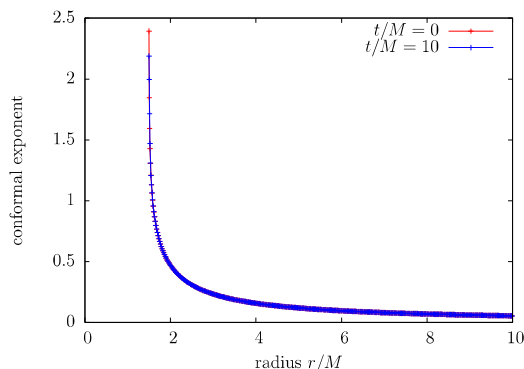


図3: トランペット・スライスでのシュバルツシルト解
共形指数の時間発展を示す。色の違いは考えている時刻の違いであり、解が定常であることを示す。横軸及び時刻は中心質量 M を単位として表している。

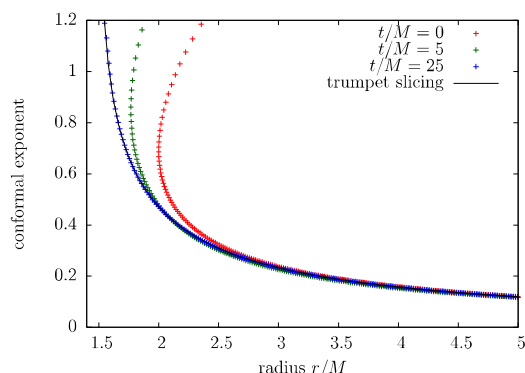


図4: ワームホール・スライスでのシュバルツシルト解
図3と同じく、共形指数の時間発展を示す。黒い実線はトランペット・スライスでの解を表し、時刻とともに初期条件が定常解に漸近していく様子が見えている。

バルツシルト解が定常解となるため、まずはそれを調べた。図3に示したのは、トランペット・スライスを採用して構成したシュバルツシルト解を初期条件として時間発展させた結果である。ここで図に示したのは共形指数 Φ である。初期に構成した解析解を離散的なデータに変換するときには多少のノイズが発生し、時間発展させるとそれが緩和する過程で若干初期条件からずれるように見えるが、十分時間が経過した後も解は同じ形を保っており、強い重力場のもとでの定常解を正しく取り扱えていることがわかる。

次に、強い重力場のもとでの非定常解を調べるために、ワームホール・スライスと呼ばれる座標の選び方をしたときに座標系が動いて定常解であるトランペット・スライスに変化していく様子を調べた。この様子は図4に示しており、図3と同様共形指数をプロットしている。ワームホール・スライスにおいてはアインシュタイン・ローゼン橋によってもう一つの時空と実際の時空を繋げるため、図4の初期時刻 $t/M = 0$ のように解は多価になる(赤十字)。そこから座標系のドリフトによって時刻 $t/M = 5$ の解(緑十字)のようにトランペット・スライスの解(黒実線)に近づいていき、十分時間が経てば(青十字)その定常解に落ち着く。ここから、強い重力場のもとでの動的な解も正しく取り扱えていることがわかる。

以上により真空中では十分なテストを行うことができたため、今後の研究においては流体コードと結合し、物質場が存在する中での一般相対論的重力の振る舞いを正しく取り扱えるか順次確認していく。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計18件)

1. “Linear Analysis of the Shock Instability in Core-collapse Supernovae: Influences of Acoustic Power and Fluctuations of Neutrino Luminosity”, K. Sugiura, K. Takahashi, S. Yamada, 2019, ApJ, 874, 12pp, DOI: 10.3847/1538-4357/ab08a2
2. “Linear Analysis of Fast-Pairwise Collective Neutrino Oscillations in Core-Collapse Supernovae based on the Results of Boltzmann Simulations”, M. Delfan Azari, S. Yamada, T. Morinaga, W. Iwakami, H. Okawa, H. Nagakura, K. Sumiyoshi, 2019, accepted for PRD, 25pp.

3. “Comparing treatments of weak reactions with nuclei in simulations of core-collapse supernovae”, H. Nagakura, S. Furusawa, H. Togashi, S. Richers, K. Sumiyoshi, S. Yamada, 2019, ApJS, 240, 32pp, DOI: 10.3847/1538-4365/aaafac9
4. “On the Neutrino Distributions in Phase Space for the Rotating Core-Collapse Supernova Simulated with a Boltzmann-Neutrino-Radiation-Hydrodynamics Code”, A. Harada, H. Nagakura, W. Iwakami, H. Okawa, S. Furusawa, H. Matsufuru, K. Sumiyoshi, S. Yamada, 2019, ApJ, 872, 19pp, DOI: 10.3847/1538-4357/ab0203
5. “Effects of rotation and magnetic field on the revival of a stalled shock in supernova explosions”, K. Fujisawa, H. Okawa, Y. Yamamoto, S. Yamada, 2019, ApJ, 872, 17pp, DOI: 10.3847/1538-4357/aaffdd
6. “Simulations of core-collapse supernovae in spatial axisymmetry with full Boltzmann neutrino transport”, H. Nagakura, W. Iwakami, S. Furusawa, H. Okawa, A. Harada, K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Matsufuru, A. Imakura, 2018, ApJ, 854, 13pp, DOI: 10.3847/1538-4357/aaac29
7. “A Detailed Comparison of Multidimensional Boltzmann Neutrino Transport Methods in Core-collapse Supernovae”, S. Richers, H. Nagakura, C. D. Ott, J. Dolence, K. Sumiyoshi, S. Yamada, 2017, ApJ, 847, 21pp, DOI: 10.3847/1538-4357/aa8bb2
8. “Dependence of weak interaction rates on the nuclear composition during stellar core collapse”, S. Furusawa, H. Nagakura, K. Sumiyoshi, C. Kato, S. Yamada, 2017, PRC, 95, 11pp, DOI: 10.1103/PhysRevC.95.025809
9. “Three-dimensional Boltzmann-Hydro code for core-collapse in massive stars II. The Implementation of moving-mesh for neutron star kicks”, H. Nagakura, W. Iwakami, S. Furusawa, K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Matsufuru, A. Imakura, 2017, ApJS, 229, 14pp, DOI: 10.3847/1538-4365/aa69ea

[学会発表](計 11 件)

1. “Corotation Resonance as Low T/W Dynamical Instability in Differentially Rotating Stars” Motoyuki Saijo 2018 年 Physics of Core-Collapse Supernovae and Compact Star Formations
2. “The Neutrino Distribution in the Rotating Core-Collapse Supernova” Harada, A., Yamada, S., Iwakami, W., Okawa, H., Nagakura, H., Sumiyoshi, K., Furusawa, S., Matsufuru, H., 2018 年 Physics of Core-Collapse Supernovae and Compact Star Formations (国際学会)
3. 「ボルツマン輻射輸送計算による回転星の超新星爆発」原田了 2018 年 日本天文学会 2018 年春季年会
4. “Dynamics of relativistic r-mode instability in rotating relativistic stars” Motoyuki Saijo 2017 年 27th Workshop on General Relativity and gravitation in Japan
5. 相対論的回転星の r-モード不安定性：質量流束四重極モーメントの重力波輻射反作用力 西條統之 2017 年 日本物理学会 2017 年秋季大会
6. 「ボルツマン輻射輸送計算による回転星の超新星爆発」原田了 2017 年日本天文学会 2017 年秋季大会
7. “Toward general relativistic supernovae simulations” 原田了 2017 年 3 月 24 日 東京大学 The Third ALPS Symposium on Photon Science (招待講演)(国際学会)
8. “The Rotating Core-Collapse Supernova Simulation with Full Boltzmann Neutrino Transport” Harada, A, Iwakami, W., Okawa, H., Yamada, S., Nagakura, H., Sumiyoshi, K., Matsufuru, H., Imakura, A. 2017 年 Workshop on the Progenitor-Supernova-Remnant Connection (国際学会)
9. ボルツマン輻射輸送計算による回転星の超新星爆発 原田了 2017 年 第 30 回理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム 「星の物理の新地平」
10. “Normal Mode Analysis of Low T/W Dynamical Instability in Differentially Rotating Stars” 西條統之 2016 年 12 月 26 日 ~ 28 日 京都大学 The New development in astrophysics through multi messenger observations of gravitational wave sources(国際学会)
11. 「回転星の重力崩壊における γ -Ye 関係」 原田了 2016 年 12 月 20 日 ~ 22 日 東北大学 2016 年度 理論懇談会シンポジウム 「重力が織りなす宇宙の諸階層」