

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740165

研究課題名(和文) 多次元輻射流体計算を用いたガンマ線バーストジェットの研究

研究課題名(英文) Study of Gamma-Ray Bursts by Multi-Dimensional Radiation-Hydrodynamic Simulations

## 研究代表者

長倉 洋樹 (Nagakura, Hiroki)

京都大学・基礎物理学研究所・研究員

研究者番号：00616667

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では超新星爆発やガンマ線バーストといった高エネルギー天体現象に関する物理機構の解明に向けた研究を行っている。これら物理機構の解明のためには、多次元輻射流体計算が必要になるのだが、この計算は一般的に大変難しく、これまで非常に簡単な方法でのみ解かれていた。本課題では、この多次元輻射流体計算を第一原理的に解けるような数値計算コードの開発、及び実装を行う事を目的とし、これらの研究について成果を上げた。本コードはさらに、重力を一般相対論的な扱いにできるものにまで拡張させた。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of this study is to unveil the nature of high energy astrophysical phenomena such as core-collapse supernovae and gamma-ray bursts. Though multi-dimensional radiation-hydrodynamics simulations are necessary to achieve this goal, there have never been carried out these simulations except for employing some approximate methods because of the difficulties to handle them. In this study, I developed ab-initio multi-dimensional radiation hydrodynamical code, and achieved to establish how to handle of this. I also extend to be able to incorporate general relativistic effects, which is also one of the big achievements in this study.

研究分野：理論宇宙物理学

キーワード：輻射輸送 流体 輻射流体 特殊相対論 一般相対論 ガンマ線バースト 超新星爆発 連星中性子合体

## 1. 研究開始当初の背景

ガンマ線バースト (通称 GRB) は、数ミリ秒～数 100 秒程度の短い時間に、大量のガンマ線が地球に降り注ぐ、宇宙最大の突発的天体現象である。また、大質量星が進化の最後を起こす超新星爆発と、継続時間が長い (~2 秒以上) タイプの GRB (Long GRB) がほぼ同時期に起こっている事が観測によって確認されており、大質量星の終焉と GRB がどのように関連し、そしてどのような物理機構が働いているのか、現在でも活発に議論が行われている。一方で、比較的短い継続時間 (~2 秒以内) の GRB は、Short GRB (SGRB) と呼ばれ、この種のタイプの GRB は LGRB と違って、他の天体現象と付随しているような観測証拠はないものの、連星中性子星の合体が SGRB を発生させているのではないかと、現在では考えられている。連星中性子星合体もまた、高エネルギー天体現象であり、有力な重力波候補天体の一つでもある。このように GRB は、その他の天体現象と密接に関連しており、分野をまたいで幅広く興味を集めている。一方で、これらの発生には、ブラックホールや中性子星などの、コンパクト天体が関わり、高温高密度の極限環境における現象であるため、GRB の研究は天文・宇宙物理としての研究対象だけではなく、重力、素粒子、核物理、プラズマ物理といった、基礎物理の研究の発展にも大きく貢献している。

## 2. 研究の目的

GRB の研究の歴史は長く、既に最初の観測から 40 年以上も経過している。一方で、物理機構についての理解は着実に進んでいるものの、未解決問題も多く残されている。特に GRB を駆動させる中心エンジンや、これに引き続いて起こる相対論的ジェットの伝搬に焦点を当てると、輻射場と物質場との非線形相互作用の不定性が色濃く残っている。GRB の中心エンジン付近は、ニュートリノが大量に発生し、これが非平衡場として物質中を伝搬してエネルギー輸送の媒介的な役割を果たすことで、GRB の中心エンジン駆動に大きな役割を担っている事が示唆されている。実際、ニュートリノ同士は、対消滅機構によって、局所的に物質にエネルギーを供給することができ、これがジェット形成の起源だというシナリオが提唱されている。また、ジェットが発生し、これが伝搬している間には、今度は光子が物質と非平衡になり、これもまたジェットのダイナミクスに影響を与えると考えられている。

このような非平衡にある輻射場と物質場が、互いのダイナミクスに影響を与えるような系では、輻射流体計算を行う必要がある。一般的に輻射流体計算は、非線形偏微分方程式で記述されるため、数値計算を用いて解析される。しかし、輻射流体コードの開発は、大変難しく、一方その重要性から、現在世界

的に開発競争にある。また、GRB は相対論的な効果が強く現れる現象であるため、この取り扱いが必要不可欠となる。この相対論的な取り扱いの必要性が問題をさらに難しくしている。これらの輻射流体コード開発にあたっては、重力崩壊型超新星爆発におけるニュートリノ輻射流体計算でも、ほぼ同様の問題が残っており、超新星爆発機構の解明において、長年足かせとなっている。

本研究では、相対論的輻射流体コードの開発を行い、開発されたコードや、相対論的流体コードを用いて GRB や超新星爆発における数値シミュレーションを実行し、これらの物理機構を調べる事を目的としている。

## 3. 研究の方法

本研究は、輻射流体コード開発、及び数値計算の実行の 2 つのパートからなっている。

研究開始当初は、Moment 法 (M1 closure) と呼ばれる近似的な輻射輸送法をベースに輻射流体コードを開発する予定であったが、相対論的な効果が強くなる領域では、本手法の取り扱いが適さないことがわかり、コード開発のベースを変更した。新たなベースとして採用したのが、第一原理計算に基づいたボルツマン Sn 法である。輻射輸送の基礎方程式は、6 次元位相空間における分布関数の発展方程式として記述されるが、これがボルツマン方程式である。すなわち、近似的な手法を用いずに、第一原理的に輻射輸送計算を行う方針に変更した。しかし、ボルツマン計算においても、相対論的な効果を取り入れる事は大変難しく、これまで特別な対称性 (例えば球対称) を課した状況でのみしか、そのような計算は行えていなかった。また、本研究では多次元な輻射流体コード開発が必要であるが、球対称計算で用いていた手法は対称性の特性を利用した数値アルゴリズムを用いていたため、多次元計算には適用できず、全く新たな数値アルゴリズムを開発しなければならなかった。これに加えて、重力、EOS や様々な微視的素過程による反応レート計算なども GRB や超新星計算には必要であり、これらの開発も本研究期間中に行った。本研究の初期 3 年間は、主に輻射流体計算における相対論的な数値アルゴリズムの開発に専念し、またその他の物理のモジュールの開発も平行して行った。

また、輻射流体の数値実験を行う場合には、大規模スパコンでの並列計算を必要とする。これは、多次元輻射流体計算は一般的に数値計算コストが高いためである。並列計算を効率よく行うために、チューニング作業なども行う必要がある。これらコードの整備にも 1 年ほど時間を当て、これによって「京」のような大規模並列計算機でも、高い実効性能で数値シミュレーションが可能となった。

コード開発を進める一方で、既に開発を終えていた相対論的流体コードを用いて、GRB ジェットの数値シミュレーションを実行し、

様々な成果を上げた（4の研究成果を参照）。ここで行った計算は、大質量終焉時のGRBジェット計算と、中性子星連星合体後のジェット伝搬計算である。後者の研究は、当時私が所属していた基礎物理学研究所の数値相対論グループとの共同研究である。彼らは中性子星連星合体に精通しており、この分野の世界最先端を走っている。彼らの計算した中性子星連星合体の数値計算結果をもとに、合体時に放出されたエジェクタの密度分布のモデルを作り、GRB ジェットの伝搬計算を行った。

#### 4. 研究成果

以下に主要な研究成果を順次紹介する。また、それぞれの研究成果と関連のある論文を、“発表論文業績欄”の番号で記した。研究成果の詳細については、それぞれの論文を参照していただきたい。

##### (1) ニュートリノ駆動メカニズムによるジェット伝搬ダイナミクス、及び親星のジェット貫通性の研究（発表論文⑤を参照）

本研究では、ニュートリノ駆動機構のモデルをもとにジェットのエネルギーや時間進化を決め、その後の進化のジェット伝搬を相対論的流体シミュレーションによって調べた。本計算によって、非常にコンパクトなWolf-Rayet星のようなタイプの星で、かつ高速回転しているコアを持っている場合には、ジェットが親星を貫通できうる事を示した。ジェットの親星の貫通性は、GRBの発生の必要条件であり、この可能性を示した事は大変重要である。また、回転を速くするに従って、GRBの光度とトータルエネルギーが上昇する事もわかり、現在のGRBの観測的特徴を示す事もできた。

##### (2) 連星中性子合体後のジェット伝搬計算（発表論文③を参照）

近年、数値相対論による連星中性子の合体計算が精密化され、ニュートンの（古典的）な重力の取り扱いによる計算と、結果が異なる事がわかってきた。その最も大きな違いは、合体後に放出されるエジェクタの形状である。

一般相対論では、ニュートンに比べて重力が強くなる。そのため、合体後の衝撃波がニュートンの取り扱いの場合よりも強くなり、エジェクタがほぼ球対称に近い形状で噴出される事が近年明らかとなった。一方、これまでのニュートンの計算では、エジェクタは赤道面付近に集中していた。

このようにエジェクタの性質の理解が従来のものとは変わった事で、エジェクタとGRBジェットとが相互作用する可能性がでてきた（これまでの研究では、エジェクタは赤道面に集中していたため、ジェットとエジェ

クタとは相互作用しないと考えられていた）。我々は、この点に焦点をあて、球状に膨張するエジェクタ中でのジェット伝搬のシミュレーションを行い、エジェクタがジェットのコリメーション（絞り）に大変重要な役割を担う事を明らかにした。図1にその結果を載せる。ジェットはエジェクタとの相互作用によってコクーン（繭）を形成して、これがジェットを絞り、そのまま細い形状を保っている事がわかる。実際、Short GRBの観測的特徴としての多くのジェットが絞られている事がわかっていたが、その物理機構は不明であった。本研究によって、初めてSGRBのジェットコリメーションの起源を説明できる機構を提唱する事ができた。

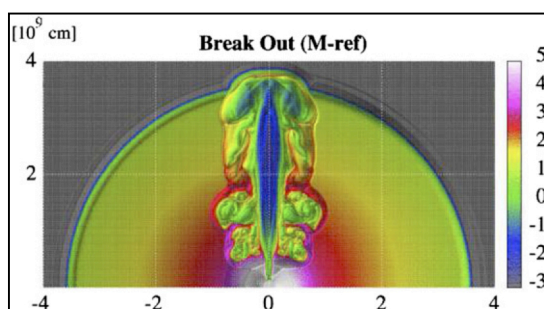


図1 連星中性子合体後の相対論的ジェット伝搬の数値計算結果（密度分布）

##### (3) 多次元特殊相対論的ボルツマン流体コード開発（発表論文②）

本研究プロジェクトの要である、相対論的ボルツマン輻射流体コード開発を完成させた。但し、本コード開発は、主にニュートリノ輸送に焦点をおき、またこの実装は超新星爆発に対して行った。この研究では、従来の手法とは全く独立の手法で、相対論的な効果を取り入れている。

ボルツマン方程式は、左辺の移流項と右辺の衝突項からなるが、これら2つの効果を相対論的に矛盾無く取り入れる事は、大変難しく、世界的にみても、近似法を除いては着手すらされていない問題であった。先行研究で用いていた方法は、流体の速度が小さいと近似し、 $v/c$ 展開をもとにした定式化が主流であった。しかしGRBや超新星爆発の問題のような強く相対論的効果が現れる問題には適さず、さらに一般相対論化させるときにも、この手法は問題となる。我々が開発した方法は、このような展開法を用いず、2つの独立のエネルギーグリッドを用意する事で、相対論的効果を完全に取り入れる事に成功した。

この方法の最も優れている事は、一般相対論的輻射流体計算にも、応用が可能であるという事である。実際、以下の成果で載せるように、多次元ボルツマン輻射流体コードの一般相対論化への拡張も既に行っている。

我々はさらに、本コードの並列化及びチューニング作業を完了させ、「京」コンピュー

タを用いて、平成 27 年度に、世界で初めて多次元ボルツマン流体コードによる超新星爆発計算を実行した。この計算結果は国内外の学会、及びセミナーを通じて発表し、各研究グループから高く評価されている。本結果については、解析と論文執筆をほぼ完了し、海外のトップジャーナルに投稿間近である。

(4)一般相対論的ボルツマン輻射流体コード開発 (発表論文①、⑨を参照)

多次元一般相対論的ボルツマン輻射流体計算に必要な定式化を行った (⑨)。輻射パートの一般相対論化への拡張をするにあたり、数値計算として取り扱いやすいように、本定式化は工夫をこらしている。さらに、この定式化は、発表論文②で用いた手法と大変相性が良く、同様の数値アルゴリズムが適用できる。

発表論文①では、実際にボルツマン輻射パートを一般相対論化に拡張させ、この手法を超新星計算に応用させた。具体的には、超新星計算において、原始中性子星が激しく振動する事があるが、これを精度よく解くために、Moving mesh を導入した。そしてここに一般相対論化の手法を取り入れている。図 2 にそのアイディアの概観図を載せる。

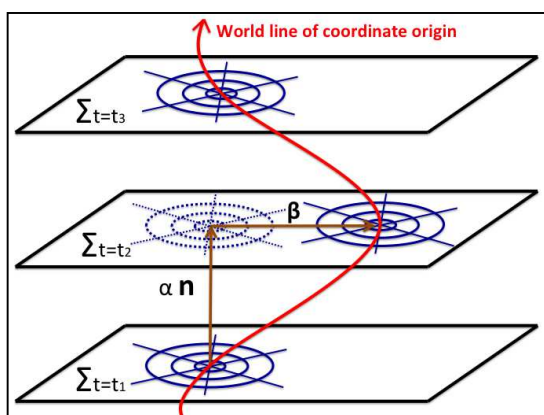


図 2 Moving mesh と一般相対論化

もともと、一般相対論にはゲージの自由度がある。このゲージの自由度を利用することで自然に Moving mesh をコードに取り入れる事ができる。ここで最も重要なのが、Moving mesh によって生じる、見かけ上の加速項によって位相空間を歪めてしまう効果を、一般相対論的な定式化を行ったことによって、これもまた自然に取り入れる事に成功した事である。本研究によって得られた手法は、今後のアインシュタインソルバーを結合させ、第一原理的な一般相対論的輻射流体コードを用いた超新星爆発計算や GRB 計算の基盤となる事は間違いなく、今後のコード開発にとっても大変重要な成果となった。

また、この開発したコードは、GRB ジェット伝搬中の光子における輻射流体計算にも適用ができるため、現在これらのコード開発

及び整備を、引き続き行っている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

① Hiroki Nagakura, Wakana Iwakami, Shun Furusawa, Kohsuke Sumiyoshi, Shoichi Yamada, Hideo Matsufuru and Akira Imakura, “Three-dimensional Boltzmann Hydro Code for Core Collapse in Massive Stars. II. The Implementation of Moving-mesh for Neutron Star Kicks”, The Astrophysical Journal Supplement, accepted (査読あり)

② Hiroki Nagakura, Kohsuke Sumiyoshi and Shoichi Yamada, “Three-dimensional Boltzmann Hydro Code for Core Collapse in Massive Stars. I. Special Relativistic Treatments”, The Astrophysical Journal Supplement, Volume 214, Issue 2, article id. 16, 19 pp., 2014 (査読あり)

③ Hiroki Nagakura, Kenta Hotokezaka, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata and Kunihiro Ioka, “Jet Collimation in the Ejecta of Double Neutron Star Mergers: A New Canonical Picture of Short Gamma-Ray Bursts”, The Astrophysical Journal Letters, IOP publishing, Volume 784, Issue 2, article id. L28, 5 pp., 2014 (査読あり)

④ Hiroki Nagakura, Yu Yamamoto and Shoichi Yamada, “A Semi-dynamical Approach to the Shock Revival in Core-collapse Supernovae”, The Astrophysical Journal, IOP publishing, Volume 765, Issue 2, article id. 123, 12 pp., 2013 (査読あり)

⑤ Hiroki Nagakura, “The Propagation of Neutrino-driven Jets in Wolf-Rayet Stars”, The Astrophysical Journal, IOP publishing, Volume 764, Issue 2, article id. 139, 7 pp., 2013 (査読あり)

⑥ Ryosuke Hirai, Hiroki Nagakura, Hirotada Okawa and Kotaro Fujisawa, “Hyperbolic Self-Gravity Solver for Large Scale Hydrodynamical Simulations”, Physical Review D, The American Physical Society, Volume 93, 083006, 2016 (査読あり)

⑦ Daisuke Nakauchi, Kazumi Kashiya, Hiroki Nagakura, Yudai Suwa and Takashi

Nakamura, “Optical Synchrotron Precursors of Radio Hypernovae”, The Astrophysical Journal, Volume 805, Issue 2, article id. 164, 7 pp., 2015 (査読あり)

⑧ Wakana Iwakami, Hiroki Nagakura and Shoichi Yamada, “Critical Surface for Explosions of Rotational Core-collapse Supernovae”, The Astrophysical Journal, Volume 793, Issue 1, article id. 5, 16 pp., 2014 (査読あり)

⑨ Masaru Shibata, Hiroki Nagakura, Yuichiro Sekiguchi and Shoichi Yamada, “A conservative form of Boltzmann’s equation in general relativity”, Physical Review D, The American Physical Society, Volume 89, 084073, 2014 (査読あり)

⑩ Wakana Iwakami, Hiroki Nagakura and Shoichi Yamada, “Parametric Study of Flow Patterns behind the Standing Accretion Shock Wave for Core-Collapse Supernovae”, The Astrophysical Journal, Volume 786, Issue 2, article id. 118, 22 pp., 2014 (査読あり)

⑪ Shun Furusawa, Hiroki Nagakura, Kohsuke Sumiyoshi and Shoichi Yamada, “The Influence of Inelastic Neutrino Reactions with Light Nuclei on the Standing Accretion Shock Instability in Core-collapse Supernovae”, The Astrophysical Journal, IOP publishing, Volume 774, Issue 1, article id. 78, 13 pp., 2013 (査読あり)

⑫ Yu Yamamoto, Shin-ichiro Fujimoto, Hiroki Nagakura, Shoichi Yamada, “Post-shock-revival Evolution in the Neutrino-heating Mechanism of Core-collapse Supernovae”, The Astrophysical Journal, IOP publishing, Volume 771, Issue 1, article id. 27, 17 pp., 2013 (査読あり)

⑬ Ayako Ishii, Naofumi Ohnishi, Hiroki Nagakura and Shoichi Yamada, “Parallel computing of radiative transfer in relativistic jets using Monte Carlo method”, High Energy Density Physics, Volume 9, Issue 2, p. 280-287., 2013 (査読あり)

⑭ Kei Kotake, Kohsuke Sumiyoshi, Shoichi Yamada, Tomoya Takiwaki, Takami Kuroda, Yudai Suwa and Hiroki Nagakura, “Core-collapse supernovae as

supercomputing science: A status report toward six-dimensional simulations with exact Boltzmann neutrino transport in full general relativity”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Oxford University Press, Volume 2012, Issue 1, id.01A301 (査読あり)

[学会発表] (計 20 件)

① Hiroki Nagakura, “Full Boltzmann Hydrodynamic Simulations for Core Collapse Supernovae on K computer”, 2015 Symposium on “Quarks to Universe in Computational Science (QUCS2015), November 4-November 8 2015, Nara, Japan (invited)

② Hiroki Nagakura, “Numerical relativistic hydrodynamics”, 2014 International School on Numerical Relativity, July 27-August 03, 2014, Beijing, China (invited)

③ Hiroki Nagakura, “Gamma-Ray Bursts from Death of Massive Stars”, The 43rd Workshop on Gravitation and Numerical Relativity, Seoul, Korea, 2012 (invited)

④ Hiroki Nagakura, “Jet propagation and its collimation in the ejecta of double neutron star merger”, Gamma-Ray Bursts in the Multi-messenger era, 16-19 July 2014, Paris, France “aural”

⑤ Hiroki Nagakura, “Neutrino-Driven Jet Penetration from a compact Wolf-Rayet star”, Gamma Ray Bursts in the Era of Rapid Follow-up, 18-22 June 2012, Liverpool, United Kingdom “aural”

⑥ Hiroki Nagakura, “Constraints to the GRB central engine from jet penetrability to massive stars”, Gamma-Ray Bursts 2012 Conference, 7-11 May 2012, Munich, Germany “aural”

⑦ 長倉 洋樹, “Multi-D Relativistic Boltzmann-Hydro Code for Core Collapse Supernovae (CCSNe)”, 超新星・ガンマ線バースト研究会, 2014年8月25~27日, 理化学研究所和光キャンパス (招待講演)

⑧ 長倉 洋樹, “Semi-dynamical approach to the shock revival in core-collapse supernovae ~超新星爆発成功のための新しいCriterion~”, 2012 理論天文学研究会 (天文台), 2012年11月5-7日, 三浦半島 (招待講演)

⑨ 長倉洋樹、岩上わかな、古澤峻、住吉光介、山田章一、松古栄夫、今倉暁、”2D Supernova Simulations with Full Boltzmann Neutrino Transport”、4th Annual Symposium of the Innovative Area on Multi-messenger Study of Gravitational Wave Sources、2016年2月18～20日、Lecture Hall, Kavli IMPU main building (口頭)

⑩ 長倉洋樹、岩上 わかな、住吉 光介、山田 章一、松古 栄夫、今倉 暁、”多次元ボルツマン輻射流体コードによる超新星計算”、HPCI 分野 5 全体シンポジウム、2015年3月11～12日、紀尾井フォーラム (口頭)

⑪ 長倉洋樹、住吉光介、山田章一、”多次元ニュートリノボルツマン流体コード開発”、日本天文学会2014年秋季年会、2014年9月11～13日、山形大学 (口頭)

⑫ 長倉洋樹、仏坂健太、関口雄一郎、柴田大、井岡邦仁、”連星中性子星合体によって放出された Ejecta 中でのジェット伝搬とコリメーション”、日本天文学会2014春季年会、2014年3月19～22日、国際基督教大学 (口頭)

⑬ 長倉洋樹、住吉光介、山田章一、”相対論的多次元ボルツマン流体コードの開発”、HPCI 戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」全体シンポジウム、2014年3月3～4日、富士ソフトアキバプラザ (口頭)

⑭ 長倉洋樹、住吉光介、山田章一、”多次元ボルツマン流体コード開発の現状と今後の課題”、新学術領域「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」のまとめと今後を語る研究会、2013年12月20～21日、鳴子 (口頭)

⑮ 長倉洋樹、山本裕、山田章一、”Semi-dynamical approach to the shock revival in CCSNe”、日本天文学会2013年秋季年会、2013年9月10～12日、東北大学 (口頭)

⑯ 長倉洋樹、住吉光介、山田章一、”Multi-Dimensional Boltzmann-Neutrino Transfer and Hydrodynamic Code for Supernova Simulations”、新学術領域「重力波天体」第1回シンポジウム、2013年3月1～2日、大阪市立大学 (口頭)

⑰ 長倉洋樹、山本裕、山田章一、”Semi-dynamical approach to the shock revival in core-collapse supernovae”、第25回理論懇シンポジウム「計算宇宙物理学の新展開」、2012年12月22～24日、つくば国際会議場 (口頭)

⑱ 長倉洋樹、”ニュートリノ駆動型コラプサーモデルのジェットブレイクアウト可能性”、ガンマー線バースト研究会、2012年11月28～30日、石川県文教会館 (口頭)

⑲ 長倉洋樹、”ニュートリノ駆動型コラプサーモデルによるGRB種族の統一像”、日本天文学会2012年秋季年会、2012年9月19～21日、大分大学 (口頭)

⑳ 長倉洋樹、住吉光介、山田章一、”多次元相対論的ボルツマン輻射輸送の数値解法”、第26回理論懇シンポジウム「2020年代を見据えた理論宇宙物理・天文学」、2013年12月25～27日、IPMU (ポスター)

〔図書〕(計 1 件)

① 長倉洋樹、ながれ(日本流体学会)第31巻第5号 P419-430、一般相対論的圧縮性流体力学を用いたブラックホール降着流中のSASIの研究、2012

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長倉洋樹 (NAGAKURA, Hiroki)  
京都大学基礎物理学研究所  
特任助教  
研究者番号: 00616667