

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610056

研究課題名(和文) アインシュタイン方程式ソルバーの開発によるガンマ線バースト爆発機構の解明

研究課題名(英文) Unveiling the Explosion Mechanism of Gamma-Ray Bursts by Developing Einstein-Equation Solver

研究代表者

長瀧 重博 (Nagataki, Shigehiro)

国立研究開発法人理化学研究所・長瀧天体ビッグバン研究室・准主任研究員

研究者番号：60359643

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：Einstein Toolkitという簡易ではあるがアインシュタイン方程式ソルバーを私や私の研究室でも使用出来る計算環境を実現しました。一方これとは独立に、私はより精密なアインシュタイン方程式ソルバーのフォーミュレーション"Puncture法"に従ってコード開発を行いました。コード開発自体は順調に進めることが出来、一部についてはEinstein Toolkitの計算との比較検証も行いました。

研究成果の概要(英文)：I succeeded to introduce Einstein Toolkit, which is an open-use code of Einstein Equation Solver, although it does not solve the Einstein Equations so exactly. Independently, I developed another Einstein Equation Solver using "Puncture Method". I could develop the code successfully, and I could compare the quality of my code by solving same, simple test problems by my code and Einstein Toolkit.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：アインシュタイン方程式 一般相対論 ブラックホール ガンマ線バースト 超新星爆発 磁気流体
マグネター 相対論的ジェット

1. 研究開始当初の背景

ガンマ線バーストは宇宙現象の中で最大規模の爆発現象であり、その爆発メカニズムなどは良く分かっていません。近年の観測により、少なくともガンマ線バーストの一部は大質量星がその一生を終える際に引き起こす超新星爆発と共に発生していることが明らかになってきました。しかし全ての超新星爆発がガンマ線バーストを伴う訳ではなく、極めて特別な状況が満たされた時のみ、ガンマ線バースト・超新星爆発の同時発生が起こると考えられています。この極めて特別な状況として、大質量星中心部に於いて高速回転するブラックホールが形成され、電磁場の介入によってブラックホールの回転エネルギーが引き抜かれるため、ガンマ線バーストジェットが形成されるという説があります。実際これまでに大質量星中心部にブラックホールが形成されたと仮定し、ブラックホール定常時空を仮定した上ではありますが、ブラックホール回転エネルギー引き抜き効果によってガンマ線バーストジェットが形成される数値シミュレーションが数例報告されています(軸対称性を仮定した 2 次元計算としては Barkov and Komissarov 2008, Nagataki 2009, 2011. 3 次元計算としては Nagataki 2013)。

2. 研究の目的

時空構造の時間進化を解く「アインシュタイン方程式ソルバー」を開発します。このソルバーを、私が既に開発している 3 次元一般相対論的磁気流体コードに組み込むことにより、「アインシュタイン方程式を解く一般相対論的 3 次元磁気流体コード」に仕上げることを目的です。このコードによって、時空構造の時間進化、とりわけブラックホール形成の瞬間を数値シミュレーションによって捉えることが可能となります。

本研究によって大質量星終末期に於けるブラックホール形成の瞬間からガンマ線バーストジェット形成に至るまでのダイナミクスを統一的に研究することが可能とすることが目的です。このような研究は世界でも例が無く、世界で初めての試みとなります。この研究により世界で他の追随を許さない、ガンマ線バースト爆発機構の解明に向けた理論研究が実現することが目的です。

この研究期間内に、時空構造の時間進化を解く「アインシュタイン方程式ソルバー」を開発することが目的です。このソルバーを、私が既に開発している 3 次元一般相対論的磁気流体コードに組み込むことにより、「アインシュタイン方程式を解く一般相対論的 3 次元磁気流体コード」に仕上げることを目的です。このアインシュタイン方程式ソルバーを組み込んだコードによって、時空構造の時間進化、とりわけブラックホール形成の瞬間を数値シミュレーションによって捉えることが可能となります。本研究により、大質量星終末期に於けるブラックホール形成の瞬間からガンマ線バーストジェット形成に至るまでのダイナミクスを統一的に扱う数値シミュレーションが実現することを目指します。

3. 研究の方法

本研究に於いては「アインシュタイン方程式ソルバー」を開発します。これにより、時空構造の時間進化、とりわけブラックホール形成の瞬間を数値シミュレーションによって捉えることが可能となります。一方既に私が開発しました 3 次元一般相対論的磁気流体コードでは、時空構造は時間的に変化しない、定常時空構造を仮定していません。具体的には、大質量星中心部で高速回転するブラックホールが形成されたと仮定し、それに対応したブラックホール時空構

造（カー・ブラックホール時空構造）を仮定した上で、その時空構造上での磁気流体計算を行っています。平たく言えば、本申請課題はこの3次元一般相対論的磁気流体コードにアインシュタイン方程式ソルバーというツールを組み込むことであると言えます。

アインシュタイン方程式ソルバーの歴史は長く、様々な手法が開発されています(e.g. Shibata and Nakamura 1995, Baumgarte and Shapiro 1999)。特に2005年、Pretorius氏が提案したフォーミュレーションはブレークスルーを起こし、これ以降、連星中性子星が合体してブラックホールを形成する現象を、数値的に非常に安定的に解くことが可能となりました（独立にCompanelli et al. 2006, Baker et al. 2006などのフォーミュレーションもあります）。この手法は大質量星中心部に於ける重力崩壊にも適用可能であり、大質量星中心部で高速回転するブラックホールの形成過程シミュレーション報告が幾つかのグループによってなされています（e.g. Sekiguchi and Shibata 2011, Ott et al. 2011 注：彼らの数値シミュレーションはブラックホール形成過程までを追っており、ガンマ線バーストジェット形成には至っていません）。これらのフォーミュレーションは特に連星中性子星合体现象の分野に於いてその正しさが良く検証されており、またそのコード開発に於けるテスト計算なども複数報告されています。本研究計画では開発したソルバーがこれらのテスト計算をパスすることを確認しながら、正確なものに仕上げます。

アインシュタイン方程式ソルバーが開発されますと、4次元時空各点に於ける時空の情報（メトリック）が計算出来るようにな

ります。このメトリック情報を、私が既に関連しました3次元一般相対論的磁気流体コードに組み込みます。前頁に述べた通り、現状の3次元一般相対論的磁気流体コードでは、メトリックを回転するブラックホールが創り出す定常時空と仮定し、その上で磁気流体計算を行っています。本研究により、このメトリック情報をアインシュタイン方程式ソルバーによって毎時更新していくことを可能にします。これによって大質量星終末期に於けるブラックホール形成の瞬間からガンマ線バーストジェット形成に至るまでのダイナミクスを統一的に扱える数値コードが実現されます。以上までの過程に於いては、一般相対論数値シミュレーションに深い理解を持つ国内研究者達と適宜情報交換を行い、目標を達成します。

4. 研究成果

アインシュタイン方程式ソルバーの開発に向けて、世界で行われている一般相対論的磁気流体コード（アインシュタイン方程式ソルバー・Microphysics入り）の開発状況を調べました。その結果Einstein Toolkitという簡易ではあるがアインシュタイン方程式ソルバーを用いて中性子星連星合体計算を行っている大阪大学特任准教授であるLuca Baiotti氏の存在を知ることになりました。そこで彼と意見交換を行いながら、私の研究グループでもEinstein Toolkitを使用出来る計算環境を実現しました。そこで私はEinstein Toolkitを用いて大質量星の重力崩壊数値シミュレーションを行いました。その結果アインシュタイン方程式ソルバー自体は有効に機能することが確認されました。一方これとは独立に、私はより精密なアインシュタイン方程式ソルバーのフォーミュレーション"Puncture法"に従ってコード開発を行いました。コード開発自体は順調に進めることが出来、一部についてはEinstein Toolkitの計算との比較検

証も行いました。ただ残念ながら査読論文等で報告する程には至っておらず、本研究課題終了以降も継続して研究を進めていく所存です。研究が今後進展し、査読論文として報告する際には本研究課題に対して謝辞を行います。また Einstein Toolkit 中の磁気流体計算ソルバーの部分については、高解像度計算を実現する Adaptive Mesh Refinement との整合性が良くなく、うまく動作しないことが確認されました。そこで私は独自に磁気流体計算ソルバーについてベクトルポテンシャル法を開発し、磁場を直接解く方法よりも更に安定したスキームで磁気流体計算を実行出来るようになりました。ガンマ線バースト数値計算に必要な高密度状態方程式についてはハドロン相・クォーク相の両方を取り込んだ最新の状態方程式を理化学研究所の原子核理論グループ等と連携することで導入に成功しました。本研究課題期間中に於いて、アインシュタイン方程式ソルバー自体は Einstein Toolkit を用いた簡易な形式で、かつニュートリノ輸送を解いていないなど近似的と言わざるを得ませんが、これまでの世界の水準を超えるガンマ線バースト中心エンジン研究の体制を整えることが出来ました。今後は Puncture 法を採用したアインシュタイン方程式ソルバーを完成させ、世界最先端のガンマ線バースト中心エンジン研究を実現させたく思います。アインシュタイン方程式ソルバー入りガンマ線バースト中心エンジンのプロジェクトは 10 年スケールで完成するものだと考えておりますが、本研究期間 3 年間に固い礎を築けたと考えております。ありがとうございます。尚、本研究の途中成果などはこの研究機関中でも国際会議、国内会議で随時紹介されました。またガンマ線バースト中心エンジンに関わるガンマ線バーストや超新星の研究を加速する上でも本研究課題での研

究内容・研究成果が大きく寄与しましたので、そのような研究については査読論文として紹介され、その査読論文中の謝辞にて本研究課題について言及させて頂きました。

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 9 件)

He, Hao-Ning; Kusenko, Alexander; Nagataki, Shigehiro; Zhang, Bin-Bin; Yang, Rui-Zhi; Fan, Yi-Zhong “Monte Carlo Bayesian search for the plausible source of the Telescope Array hotspot” Physical Review D, Volume 93, 2016, id.043011, DOI: 10.1103/PhysRevD.93.043011

Dainotti, M.; Petrosian, V.; Willingale, R.; O'Brien, P.; Ostrowski, M.; Nagataki, S. “Luminosity-time and luminosity-luminosity correlations for GRB prompt and afterglow plateau emissions” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 451, 2015, 3898-3908, DOI: 10.1093/mnras/stv1229

Ito, Hirotaka; Matsumoto, Jin; Nagataki, Shigehiro; Warren, Donald C.; Barkov, Maxim V. “Photospheric Emission from Collapsar Jets in 3D Relativistic Hydrodynamics” The Astrophysical Journal Letters, Volume 814, 2015, article id. L29, DOI: 10.1088/2041-8205/814/2/L29

Mao, Jirong; Ono, Masaomi; Nagataki, Shigehiro;

Hashimoto, Masa-aki; Ito, Hirotaka; Matsumoto, Jin; Dainotti, Maria G.; Lee, Shiu-Hang “Matter Mixing in Core-collapse Supernova Ejecta: Large Density Perturbations in the Progenitor Star?” The Astrophysical Journal, Volume 808, 2015, article id. 164, DOI:

10.1088/0004-637X/808/2/164

Ito, Hirotaka; Nagataki, Shigehiro; Matsumoto, Jin; Lee, Shiu-Hang; Tolstov, Alexey; Mao, Jirong; Dainotti, Maria; Mizuta, Akira “Spectral and Polarization Properties of Photospheric Emission from Stratified Jets” The Astrophysical Journal 査読有 Vol.789, 2014, id.159, DOI: 10.1088/0004-637X/789/2/159

Slane, P.; Lee, S.-H.; Ellison, D. C.;

Patnaude, D. J.; Hughes, J. P.; Eriksen, K. A.; Castro, D.; Nagataki, S. “A CR-hydro-NEI Model of the Structure and Broadband Emission from Tycho's Supernova Remnant” *The Astrophysical Journal* 査読有 Vol.783, 2014, id.33, DOI: 10.1088/0004-637X/783/1/33

Lee, Shiu-Hang; Slane, Patrick O.; Ellison, Donald C.; Nagataki, Shigehiro;

Patnaude, Daniel J. “A CR-hydro-NEI Model of Multi-wavelength Emission from the Vela Jr. Supernova Remnant (SNR RX J0852.0-4622)” *The Astrophysical Journal* 査読有 Vol.767, 2013, id.20, DOI: 10.1088/0004-637X/767/1/20

Ono, Masaomi; Nagataki, Shigehiro; Ito, Hirotaka; Lee, Shiu-Hang; Mao, Jirong; Hashimoto, Masa-aki; Tolstov, Alexey, “Matter Mixing in Aspherical Core-collapse Supernovae: A Search for Possible Conditions for Conveying ^{56}Ni into High Velocity Regions” *The Astrophysical Journal* 査読有 Vol.773, 2013, id. 161, DOI: 10.1088/0004-637X/773/2/161

Hirotaka Ito, Shigehiro Nagataki, Masaomi Ono, Shiu-Hang Lee, Jirong Mao, Shoichi Yamada, Pe'er Asaf, Akira Mizuta, Seiji Harikae, “Photospheric Emission From Stratified Jets” *The Astrophysical Journal* 査読有 Vol.777, 2013, 62-78, DOI:10.1088/0004-637X/777/1/62

[学会発表](計 15 件)

Shigehiro Nagataki “GRB Simulations” 招待講演, 国際会議 「Thinkshop Transient Bormio 2016」, Bormio, Italy, 21st January 2016.

S. Nagataki “Death of Massive Stars: Supernovae & Gamma-Ray Bursts” 招待講演, 国際会議 「Symposium: New Generation Quantum Theory -Particle Physics, Cosmology, and Chemistry- Kyoto」, Kyoto U., Kyoto, Japan, 9th Mar. 2016.

Shigehiro Nagataki “GRB Simulations” 招待講演, 国際会議

「Thinkshop Transient Bormio 2016」, Bormio, Italy, 21st January 2016.

Shigehiro Nagataki “Astrophysical Big Bang Simulations” 招待講演, 国際会議 「PACIFIC 2015」, Moorea, French Polynesia, 14 September 2015.

Shigehiro Nagataki “Collapsar Simulations as A Central Engine of Gamma-Ray Bursts” 国際会議 「Marcel-Grossmann Meeting 14」, Rome, Italy, 14 July 2015.

Shigehiro Nagataki “Astrophysical Big Bangs: From Engine to Remnants” 招待講演, 国際会議 「OMEG2015」, Beijing, China, 25 June 2015.

Shigehiro Nagataki, “Astrophysical Big Bang and Neutrinos”, 招待講演, 国際会議 「International Workshop on Neutrino Physics and Astrophysics」, Istanbul, Turkey, 2015/03/17

長瀧重博, “星の回転と超新星爆発・ガンマ線バースト”, 招待講演, 国内会議 「大質量星の進化・活動現象と星の回転」研究会, 北海道大学, 札幌, 2015/02/19

Shigehiro Nagataki, “Astrophysical Big Bang: From Engine to Remnant”, 招待講演, 国際会議 「PACIFIC2014」, Moorea, French Polynesia, 2014/09/16

Shigehiro Nagataki, “R-Process Nucleosynthesis in Astrophysical Big Bang”, 招待講演, 国際会議 「Nuclear Physics and Astrophysics of Neutron-Star Mergers and Supernovae, and the Origin of R-Process Elements」, Trento, Italy, 2014/09/08

Shigehiro Nagataki “Supernova and Nucleosynthesis” 招待講演, 国際会議 「The 13th CNS International Summer School」

2014/08/22-2014/08/23, Wako, RIKEN.

Shigehiro Nagataki “Supernovae: From Engine to Remnants” 招待講演, 国際会議「10th International Conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics」2014/05/12-2014/05/16, Bordeaux, France.

Shigehiro Nagataki “Challenge of Astrophysical Big Bang Laboratory: From Central Engine to Remnants” 招待講演, 国際会議「Supernovae and Gamma-Ray Bursts 2013」2013/10/14-2013/11/15, Kyoto Univ., Kyoto, Japan.

Shigehiro Nagataki “Challenge to Understand GRB Emission Mechanism from the Engine” 招待講演, 国際会議「Future directions of relativistic jets: Fermi and beyond」2013/08/31-2013/09/02, Skokloster, Sweden.

Shigehiro Nagataki “Collapsar Simulations: Central Engine of Long Gamma-Ray Bursts” 招待講演, 国際会議「F.O.E Fifty-One-Erg」2013/05/13-2013/05/17, Raleigh, the USA.

Shigehiro Nagataki “Relativistic Jet Formation and Dynamics” 招待講演, 国際会議「Multi-Scale Structure Formation and Dynamics in Cosmic Plasmas」2013年4月15日-2013年4月19日, Bern Switzerland

〔その他〕

ホームページ等

長瀧天体ビッグバン研究室

http://www.riken.jp/research/labs/associate/astro_big_bang/

長瀧天体ビッグバン研究室へようこそ

http://nagataki-lab.riken.jp/index_jp.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長瀧 重博 (NAGATAKI Shigehiro)

理化学研究所・長瀧天体ビッグバン研究室・准主任研究員

研究者番号：60359643

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

Maxim Barkov

Luca Baiotti

滝脇知也 (TAKIWAKI Tomoya)

伊藤裕貴 (ITO Hirotaka)

松本仁 (MATSUMOTO Jin)

水田晃 (MIZUTA Akira)

Maria Dainotti