

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287056

研究課題名(和文) 中心エンジンから紐解くガンマ線バースト放射機構の根源的解明

研究課題名(英文) Unveiling Emission Mechanism of Gamma-Ray Bursts from the Central Engine

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) 11,700,000円

研究成果の概要(和文)：我々は3次元相対論的磁気流体計算コードを開発しました。これを用いて大質量星中を突き抜ける相対論的ジェット伝搬シミュレーションの計算を行いました。この結果を用いてガンマ線伝搬過程パートの計算を行いました。その結果近年日本のIKAROS衛星が捉えたガンマ線バーストの偏光について理論的考察を行いました。また観測と整合するガンマ線バーストの非熱スペクトルを示しました。また結果は未公表ながら(2017年度、発表予定)、ガンマ線バーストの観測を良く説明する、大変画期的な結果を得ることが出来ました。これによって我々はフォトスフェリックモデルが正しいモデルであると実証したと確信しています。

研究成果の概要(英文)：We have developed a 3-dimensional relativistic magneto-hydro code. Using the code, we have performed simulations of a relativistic jet that is penetrating through its progenitor star. Using the results, we calculated radiation transfer in gamma-ray band. Using our results, we discussed the observed polarization by IKAROS satellite (Japanese one). Also, we reproduced the observed spectrum of gamma-ray bursts. In fiscal year 2017, we are going to release our very important result which is explaining observations of gamma-ray bursts very well. Due to our results, we believe that we have obtained the evidence that the photospheric emission mechanism is the one for prompt emission of gamma-ray bursts.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ガンマ線バースト ブラックホール 輻射輸送 超新星 相対論的ジェット ニュートリノ 状態方程式
式 アインシュタイン方程式

1. 研究開始当初の背景

近年大変研究の盛んなガンマ線バーストは、現在も尚、多くの謎につつまれています。たとえば、ガンマ線バーストの距離、フラックス、継続時間から推して、ガンマ線バーストは 10^{51} erg 程度の爆発現象でなければならないことが分かります。しかもそれがミリ秒程度の早い時間変動を示すことから、放射源はコンパクトでなければなりません。しかしながらそのようなコンパクト領域に大量のエネルギーを持たせると、領域内の温度は電子陽電子を作れる程に高温となり、光学的に厚くなります。従ってこのような領域からの放射は熱的な放射となっている筈なのですが、実際にはガンマ線バーストは非熱的スペクトルを示すのです。現在この問題を解決するために、ガンマ線バーストはローレンツ因子数百にも達するような高速ジェットからの放射であると考えられています。地球で観測される光子のエネルギーは数百 keV のガンマ線であっても、流体静止系では数 keV 程度の光であり、電子陽電子を作れるようなものでなく、従って光学的に薄く、非熱的スペクトルになれるというものです。これは一見良い説明ですが、この帰結は以下の通り大変に厳しい要求です。 10^{51} erg でローレンツ因子数百のジェットが持つ静止質量は、太陽質量の百万分の一程度となります。一方ガンマ線バースト(の少なくとも一部)は大質量星の最終段階である超新星爆発と共に起こる現象ですので、その親星は数十倍の太陽質量を持っています。つまりバリオンが大量に集中した領域(大質量星)から、バリオンを殆ど含まない、クリーンでかつ巨大エネルギーを持つジェットを放出せよ、という要求なのです(**ガンマ線バーストの中心エンジン問題**)。

上記以外にもガンマ線バースト放射を理解

するためには、解決しなければならない性質が多数あります。たとえばガンマ線バーストのスペクトルは、典型的にはブレークを持つ冪型ですが、その冪指数は、通常高エネルギーガンマ線天体からの放射機構として考えられるシンクロトロン放射、シンクロトロン自己吸収、逆コンプトン放射をどう組み合わせても説明出来ないものとなっています。特にブレーク位置より低エネルギー側の指数は、永年理論研究者が議論し、説明出来ていない指数なのです(**ガンマ線バーストスペクトル問題**)。時間変動についても良く分かっていません。ミリ秒 秒程度の激しい時間変動を示す訳ですが、この時間変動のメカニズムが分かっていません。時間変動を起こすには何かしらの“揺らぎ”が必要ですが、その起源が明らかになっていません(中心エンジンの活動性が時間変動している説、ジェットが伝搬している間に流体不安定性が成長してシェルが出来上がる説などがあります：**ガンマ線バースト時間変動問題**)。

また、(何かしらの相関則を用いて)ガンマ線バーストの絶対光度を推定し、距離指標に使えるかという興味があります。ガンマ線バーストは宇宙最大の爆発現象で、大変明るく、他の標準光源よりも遠い宇宙を探ることに適しています。しかしながら(例えば Ia 型超新星と比較して)ガンマ線バーストには明るさにばらつきがあり、ガンマ線バーストを距離指標としてうまく使いきれていないという現状があります。言い方を換えますと、「Ia 型超新星の明るさは、チャンドラセカール限界質量を持つ白色矮星が爆発的元素合成を起こして爆発すると、 10^{51} erg 程度の原子核結合エネルギーが解放されるので標準光源として利用出来る」というステートメントに比べて、まだまだ人類はガンマ線バーストを距離指標として

利用出来る程に理解出来ていないのです
(**ガンマ線バーストの宇宙論への適用可能性問題**)。

2. 研究の目的

以上の説明から、ガンマ線バーストの放射機構を解明するためには、ガンマ線バーストの中心エンジンから放射領域に渡るまでの物理全体に対する理解を深め、議論の精度を上げていかなければならないことが分かります。本研究ではこの一連の過程を「**ガンマ線バースト中心エンジン**」、「**相対論的ジェット**の伝搬」、「**ガンマ線伝搬過程**」の3つのパートに分類し、それぞれのパートの研究精度を上げ、最終的にそれらを統合することにより、**ガンマ線バースト放射機構に対する世界最先端の理解を目指します**。

3. 研究の方法

ガンマ線バーストの放射機構を解明するためには、ガンマ線バーストの中心エンジンから放射領域に渡るまでの物理全体に対する理解を深め、議論の精度を上げていく必要があります。本研究ではこの一連の過程を「**ガンマ線バースト中心エンジン**」、「**相対論的ジェット**の伝搬」、「**ガンマ線伝搬過程**」の3つのパートに分類し、それぞれのパートの精度を上げ(平成26年度)最終的にそれらを統合することにより(平成27年度以降)ガンマ線バースト放射機構に対する世界最先端の理解を達成します。研究手法は主に数値シミュレーションを採用します。研究を並列するパートに分けますので(担当者も各パートにバランス良く配置します)たとえ一つのパートの研究がうまく進まない場合でも、他のパートに於いて一定の成果を挙げられる枠組みを組んでいます。

研究手法としては主に数値シミュレーションを採用します。上記3つのパートは、それぞれに深く関連する現象ですが、数値コードの開発という観点からは、お互いに独立して作業を進めることが出来る要素も多くあります。ですので、特に平成26年度は並列してコード開発作業に取り組み、

平成27年度以降にお互いを組み合わせていくという方式を採用し、作業の効率化に努めます。

研究体制としては、それぞれのパートについて、既に研究経験を持つ人員を2名ずつ配置し、パート内でも更に役割分担を設け、研究計画が滞りなく進行するようにします。

4. 研究成果

「相対論的ジェットの伝搬」

本研究ではガンマ線バースト放射を説明するモデルとして「**フォトスフェリックモデル**」を念頭に置いて研究を行いました。

平成26年度、我々は3次元相対論的磁気流体計算コードを開発しました。これを用いて大質量星中を突き抜ける相対論的ジェット伝搬シミュレーションの予備的計算を行いました。平成27年度にはそのコードを用いて大質量星中を突き抜ける相対論的ジェット伝搬シミュレーションを実際に行いました。この結果を用いて以下に述べるガンマ線伝搬過程パートの計算を行いました。平成28年度には様々な親星モデル、および様々なジェットの状態に対する伝搬シミュレーションを系統的に行いました。

「ガンマ線伝搬過程」

上記流体計算で評価される流体各素片から放射される熱的放射が伝搬中にどの程度散乱を経験するのか、その結果最終的にどのようなスペクトルに変形されて地球上に到達するのかということ計算するのがこのパートの役割です。特にこのパートで重要となる狙いは、高エネルギー電子による逆コンプトン散乱により、ガンマ線の高エネルギー側の冪指数が熱放射スペクトルから変更され、観測と整合する非熱スペクトルになることです。平成26年度、我々はこのアイデアを推進するべく、バルクコンプトンだけでなく電子温度に起因する(そし

てそれはジェット中で起こる衝撃波下流では非常に高温になる)逆コンプトン散乱効果も取り入れたモンテカルロ計算コードの開発をしました。この計算に於いて偏光度も計算出来るようになりました。このコードを用いて、背景場として定常流を仮定した下で、近年日本の IKAROS 衛星が捉えたガンマ線バーストの偏光について理論的考察を行い、査読論文として公表しました。平成 27 年度には高エネルギー電子による逆コンプトン散乱により、ガンマ線の高エネルギー側の冪指数が熱放射スペクトルから変更され、観測と整合する非熱スペクトルになることを示しました。更に驚いたことに低エネルギー側のスペクトルも、ジェットの様々な場所からの熱的放射の重ね合わせによって説明出来ることを発見し、査読論文として公表しました。平成 28 年度には、結果は未公表ながら(2017 年度、発表予定)ガンマ線バーストの観測を良く説明する、大変画期的な結果を得ることが出来ました。これによって我々はフォトスフェリックモデルが正しいモデルであると実証したと確信しています。

「ガンマ線バースト中心エンジン」

中心エンジン計算は、強重力場、強磁場、高密度状態方程式、ニュートリノ物理など複雑な物理が絡みあう現象ですが、それら全てを網羅した数値コードは開発されていません。平成 26 年度はこれまで開発してきた 3 次元一般相対論的磁気流体コードを更に高精度に拡張しました。特にアインシュタイン方程式ソルバーの装着を検討し、次年度実際に装着実現の見込みがあることを確認しました。平成 27 年度には実際にアインシュタイン方程式ソルバーの装着に成功し、アインシュタイン方程式ソルバーを用いた一般相対論的重力に基づく大質量星の重力崩壊のテスト計算を行いました。

た。平成 28 年度にはこれまで開発してきた 3 次元一般相対論的磁気流体コードを用いたテスト計算として、回転するブラックホール周りの降着円盤中での磁気回転不安定性による磁場増幅と、磁気散逸の繰り返しに関して 3 次元一般相対論的磁気流体シミュレーションによる解析を行いました。磁気回転不安定性に起因する時間変動によって質量降着率、ジェットの時間変動に強い相関が見られました。

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 8 件)

1. Warren III Donald Cameron, Ellison, D.C., Barkov, M.V., Nagataki, S. “Nonlinear Particle Acceleration and Thermal Particles in GRB Afterglows” *Astrophysical Journal* 835, 248 (15p), 2017/02/01.

査読有

2. He, H., Kusenko, A., Nagataki, S., Zhang, B.B., Yang, R.Z., Fan, Y.Z. “Monte Carlo Bayesian search for the plausible source of the Telescope Array hotspot” *Physical Review D*, Volume 93, Issue 4, id.043011, 02/2016.

査読有

3. Ito, H., Matsumoto, J., Nagataki, S., Warren, D.C., Barkov, M.V. “Photospheric Emission from Collapsar Jets in 3D Relativistic Hydrodynamics” *Astrophysical J. Lett.* 814, id.L29 12/2015.

査読有

4. Tolstov, A., Blinnikov, S., Nagataki, S., Nomoto, K. “Shock Wave Structure in

Astrophysical Flows with an Account of Photon Transfer” *Astrophys. J.* Volume 811, Issue 1, article id. 47, 09/2015.

査読有

5. Dainotti, M., Petrosian, V., Willingale, R., O'Brien, P., Ostrowski, M., Nagasaki, S. “Luminosity-time and luminosity-luminosity correlations for GRB prompt and afterglow plateau emissions” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS)*, Volume 451, Issue 4, p.3898-3908, 08/2015.

査読有

6. Mao, J., Ono, M., Nagasaki, S., Hashimoto, M., Ito, H., Matsumoto, J., Maria, D., Lee, S.H. “Matter Mixing in Core-collapse Supernova Ejecta: Large Density Perturbations in the Progenitor Star?” *Astrophys. J.* 808, 164, 08/2015.

査読有

7. Dainotti Maria Giovanna, Del Vecchio Roberta, Nagasaki Shigehiro, Capozziello Salvatore, “Selection Effects in Gamma-Ray Burst Correlations: Consequences on the Ratio between Gamma-Ray Burst and Star Formation Rates” *Astrophysical Journal* Volume 800, Issue 1, article id. 31, pages 12 (2015)

査読有

8. Hirotsugu Ito, Shigehiro Nagasaki, Jin Matsumoto, Lee Shiu-Hang, Tolstov Alexey, Mao Jirong, Dainotti Maria, Akira Mizuta “Spectral and Polarization Properties of Photospheric Emission from Stratified Jets” *The Astrophysical Journal* Vol. 789, Issue 2, p19-37, 2014/7/1

査読有

〔学会発表〕(計 20 件)

1. A. Mizuta et al. “General Relativistic MHD simulation of a blackhole, accretion disk, and jets” *Plasma Astrophysics and Extreme High Energies*, カリフォルニア大学アーバイン校、(アーバイン市、アメリカ合衆国) 2017. 2.6 (招待講演)

2. A. Mizuta et al. “3D GRMHD simulations of relativistic jet launch and particle acceleration” *Particle Astrophysics and Cosmology Including Fundamental Interactions (PACIFIC) 2016*, モーレア島、フランス領ポリネシア 2016/09/14 (招待講演)

3. Shigehiro Nagasaki “Massive Star Explosions” *International Workshop on Quantum Many-Body Problems in Particle, Nuclear, and Atomic Physics*, Da Nang, Vietnam 2017/3/10. (招待講演)

4. Shigehiro Nagasaki “Astrophysical Big Bangs” *PACIFIC2016*, Moorea, French Polynesia, 2016/9/14. (招待講演)

5. Shigehiro Nagasaki “Theoretical Studies on Supernovae and Gamma-Ray Bursts” *Frontiers of Nonlinear Physics*, Nizhny Novgorod-St. Petersburg, Russia, 2016/7/20. (招待講演)

6. 水田晃 “GRMHD simulations of black hole and accretion disk” *高エネルギーガンマ線でみる極限宇宙 2015*, 柏(東大柏キャンパス図書館)、2016年1月14日 (招待講演)

7. Akira Mizuta “3D GRMHD simulations of jet launch from BH and accretion disk” *HEAP2015*, Ibaraki (KEK Phys. Build.), Japan, 9th Oct. 2015 (招待講演)

8. S. Nagasaki “Death of Massive Stars: Supernovae & Gamma-Ray Bursts” *Symposium: New Generation Quantum Theory -Particle Physics, Cosmology, and Chemistry-* Kyoto (Kyoto U. Chemistry Build.), 9th Mar. 2016. (招待講演)

9. Shigehiro Nagasaki “GRB Simulations” *Thinkshop Transient Bormio 2016*, Bormio, Italy, 21st January 2016. (招待講演)

10. Shigehiro Nagasaki “Astrophysical

Big Bang Simulations” PACIFIC 2015, Moorea, French Polynesia, 14 September 2015. (招待講演)

11. Shigehiro Nagataki “3D Relativistic Radiation-Hydro Simulation for Photospheric Emission in GRBs” Marcel-Grossmann Meeting 14, Rome, Italy, 16 July 2015. (招待講演)

12. Shigehiro Nagataki “Astrophysical Big Bangs: From Engine to Remnants” OMEG2015, Beijing, China, 25 June 2015. (招待講演)

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

14. 長瀧重博, “Astrophysical Big Bang: From Engine to Remnant”, 超新星残骸研究会, 名古屋大学(物理教室), 2014/06/12 (招待講演)

15. Shigehiro Nagataki, “Astrophysical Big Bang and Neutrinos”, International Workshop on Neutrino Physics and Astrophysics, Istanbul, Turkey, 2015/03/17 (招待講演)

16. Shigehiro Nagataki, “R-Process and Nucleosynthesis in Astrophysical Big Bang”, Recent progress on r-process and nucleosynthesis, RIKEN (Nishina Center), Saitama, 2014/11/25 (招待講演)

17. Shigehiro Nagataki, “Astrophysical Big Bang: From Engine to Remnant”, PACIFIC2014, Moorea, French Polynesia, 2014/09/16 (招待講演)

18. Shigehiro Nagataki, “R-Process Nucleosynthesis in Astrophysical Big Bang”, Nuclear Physics and Astrophysics of Neutron-Star Mergers and

Supernovae, and the Origin of R-Process Elements, Trento, Italy, 2014/09/08 (招待講演)

19. Shigehiro Nagataki, “Supernova and Nucleosynthesis 1”, The 13th CNS International Summer School, RIKEN (Nishina Center), Saitama, 2014/08/22 (招待講演)

20. Shigehiro Nagataki, “Supernova Explosions: From Engine to Remnant”, HEDLA 2014: 10th International Conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics, Bordeaux, France, 2014/05/12 (招待講演)

[その他]
ホームページ
http://nagataki-lab.riken.jp/research_en.html
<http://indico2.riken.jp/indico/conferenceDisplay.py?confId=2450>
http://abb-lab.riken.jp/index.php/workshop/grb_workshop_2015/
http://nagataki-lab.riken.jp/workshop/program_SNGRB2014.html

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

水田 晃 (MIZUTA Akira)
国立研究開発法人理化学研究所・戎崎計算宇宙物理研究室・研究員
研究者番号: 90402817

(3) 連携研究者

伊藤 裕貴 (ITO Hirotaka)
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・特別研究員
研究者番号: 30434278

松本 仁 (MATSUMOTO Jin)
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・基礎科学特別研究員
研究者番号: 70722247