

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340069

研究課題名(和文) 中心エンジンから解き明かすガンマ線バースト放射機構

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)

独立行政法人理化学研究所・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) 14,600,000円、(間接経費) 4,380,000円

研究成果の概要(和文)：我々が開発した一般相対論的磁気流体コードにより、ガンマ線バースト形成のシミュレーションを行い、高速回転するブラックホール程、より強力なジェットを噴出することを示しました。このようなシミュレーションは現在我々のものを含めて世界に二例しか報告がありません。また相対論的なガンマ線バーストジェット伝搬のシミュレーションを行い、光球面からの熱的放射の足し合わせを計算し、ガンマ線バーストの光度・エネルギー関係式をほぼ説明しました。我々はガンマ線伝搬モンテカルロシミュレーションを行い、ガンマ線バーストの特徴的スペクトルを再現し、日本の衛星IKAROSが検出したガンマ線バーストの強い偏光度も再現しました。

研究成果の概要(英文)：For this project, we have developed our General Relativistic MHD code and applied it for numerical simulations of formation of Gamma-Ray Burst (GRB) jets. We found that more rapidly rotating black holes can drive stronger GRB jets. Up to now, only two groups in the world have succeeded to perform such simulations. We also did numerical simulations on propagation of relativistic GRB-Jets. We succeeded to explain the phenomenological relation between Luminosity and Energy of Gamma-rays in GRBs by estimating the photospheric emission from the photosphere of GRB jets. Further, we did Monte-Carlo simulations for propagation of gamma-rays in GRB-jets. We succeeded to explain the typical spectrum of GRBs as well as large polarization that was observed recently by a Japanese satellite, IKAROS.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ガンマ線バースト ガンマ線放射輸送 磁気流体 ニュートリノ 一般相対論 ブラックホール マグネター 宇宙定数

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙最大の爆発現象とされるガンマ線バーストは、発見から 30 年間その起源すら分からず、宇宙物理学上の大きな謎とされていました。典型的なガンマ線バーストは数秒から数十秒程度の継続時間を持ち、ミリ秒 秒程度の激しい時間変動を示し、ブレークを持つベキ型スペクトルを示します。ガンマ線バーストに関する研究は、1997 年 2 月 28 日の BeppoSAX 衛星によるガンマ線バースト観測以降、急激な進展を見せています。即ち、ガンマ線バーストに引き続いて起こる X 線放射、アフターグローが観測されたのです。X 線による位置決定精度はガンマ線の精度よりも高く、ガンマ線バーストの発生位置を正確に決めることが出来ます。その上で光学望遠鏡によるフォローアップ観測の結果、ガンマ線バーストが遠方の銀河に含まれる天体で起こっている現象であることが確定したのです。更に 1998 年 4 月 15 日、ガンマ線バーストが大質量星進化の最終段階である超新星爆発と同じタイミングで、同じ場所で起こっていることが報告されたのです。

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ぬことが分かります。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を持つ静止質量は、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メカニズム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、その起源は良く分かっていません(中心エンジンの活動性が時間変動しているという説、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要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

ガンマ線バーストの放射機構(爆発エネルギー、スペクトル、時間変動)を、中心エンジンまで遡って第一原理から解明します。地球に到達するガンマ線バーストは、中心エンジンからガンマ線放射領域に至るまでの様々な過程が密接に関連し合っています。従って、ガンマ線バースト放射機構を理解することは、ガンマ線バーストの物理全体を理解することに相当します。ガンマ線バースト放射機構が完全に理解出来れば、ガンマ線バーストを距離指標として用い、宇宙論に応用する道も開けます。つまり本研究はガンマ線バーストを距離指標として用いる物理的基盤を与えます。以上の流れは世界の潮流に乗った研究ですが、強調すべきは我々の研究が

世界最先端を行っている点であり、むしろ我々こそが世界の潮流を創り出している点です。

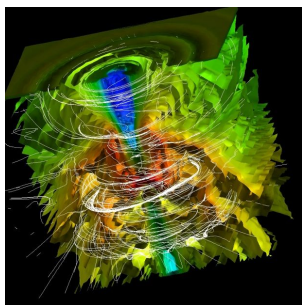
### 3. 研究の方法

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(研究目的の欄ご参照ください)に分類し、それぞれのパートの精度を上げ(平成23年度)最終的にそれらを統合することにより(平成24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。

### 4. 研究成果

パート1 「ガンマ線バースト中心エンジン」についての成果:

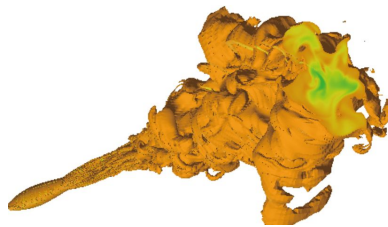
長瀧が開発した一般相対論的磁気流体コードにより、大質量星に於けるガンマ線バースト形成のシミュレーションを行いました。重力崩壊の結果、高速回転しているブラックホールが中心に形成されると仮定し、ブラックホールの回転エネルギーがBlandford-Znajek過程によってどの程度引き抜けるのか、またその引き抜きによってガンマ線バーストジェットは形成出来るのかということの数値シミュレーションによって検証しました。その結果、より高速回転するブラックホール程、より強力なジェットを噴出することが明確に示されました。このようなシミュレーションは現在我々のものを含めて世界に二例しか報告がありません。その後長瀧は3次元コードを開発し、従来の2次元計算を更に上回るハイレベルの数値シミュレーションを実現しました(上図)。



パート2「相対論的ジェットの伝搬」についての成果:

長瀧と、共同研究者の水田晃氏(理化学研究所)により、相対論的なガンマ線バーストジェット伝搬のシミュレーションを行いました。またその光球面からの熱的放射の足し合わせを計算し、観測的に知られているガンマ

線バーストの光度・エネルギー関係式をほぼ説明することが出来ました。また松本仁氏(理化学研究所) Asaf Pe'er氏(UCC)も共同研究者に加わり、数値シミュレーションとモンテカルロ計算の結合に着手を始めました(下図)。



パート3「ガンマ線伝搬過程」についての成果:

長瀧と、連携研究者の伊藤裕貴氏(理化学研究所)により、ガンマ線伝搬モンテカルロシミュレーションを行いました。結果として、ガンマ線バーストの特徴的なスペクトルの再現に成功しました。特に2重構造を持つガンマ線バーストジェットを想定した時、観測される冪型スペクトルを良く再現することを確認しました。また同様の構造の下、期待されるガンマ線バーストの偏光度を評価しました。我々の計算は、近年日本の衛星IKAROSで検出したガンマ線バーストの偏光度を説明出来る程度の強い偏光度も再現出来ることを示しました。我々が採用しているフォトスフェリックモデルでは一般に大きな偏光度は出せないだろうという通説がありましたが、我々の研究成果はその通説を覆す画期的なものでありました。

その他の特筆すべき成果:

当初計画していました上記3パートについての成果に加えましてガンマ線バーストジェットに於ける高エネルギーニュートリノ生成、ガンマ線バースト絶対光度評価と宇宙論への応用、超新星爆発機構及びそれに付随するニュートリノ・重力波放出、ジェット状超新星に於ける爆発的元素合成、超新星残骸等々多岐に渡り、本研究に深く関連するテーマについて実り多い研究成果を挙げる事が出来ました。これは申請当初に予期していなかったもので、大きな成果を挙げられたことに感謝と喜びを感じています。

### 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 28件)

- (1) A CR-hydro-NEI Model of the Structure and Broadband Emission from Tycho' SNR, Patrick Slane, Shiu-Hang Lee, Donald Ellison, Daniel Patnaude, John Hughes, Kris Eriksen,

- Daniel Castro, Shigehiro Nagataki The Astrophysical Journal 783 id.33, 10pp (2014) 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/783/1/33
- (2) Gravitational Wave Signatures from Low-Mode Spiral Instabilities in Rapidly Rotating Supernova Cores, Takami Kuroda, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Physical Review D Volume 89, id.044011 (2014) 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevD.89.044011
- (3) Photospheric Emission from Stratified Jets, Hiroataka Ito, Shigehiro Nagataki, Masaomi Ono, Shiu-Hang Lee, Jirong Mao, Shoichi Yamada, Asaf Pe'er, Akira Mizuta, Seiji Harikae, Astrophysical Journal Volume 777, pp.62-78 (2013) 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/777/1/62
- (4) Matter Mixing in Aspherical Core-Collapse Supernovae: A Search for Possible Conditions for Conveying  $^{56}\text{Ni}$  into High Velocity Regions, Masaomi Ono, Shigehiro Nagataki, Hiroataka Ito, Shiu-Hang Lee, Jirong Mao, Masa-aki Hashimoto, Alexey Tolstov, The Astrophysical Journal 773, id.161, 29pp (2013) 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/773/2/161
- (5) A Generalized Model of Non-Linear Diffusive Shock Acceleration Coupled to an Evolving Supernova Remnant, Shiu-Hang Lee, Donald Ellison, Shigehiro Nagataki, The Astrophysical Journal Volume 750, id.156 13pp (2012) 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/750/2/156
- (6) IceCube Nondetection of Gamma-Ray Bursts: Constraints on the Fireball Properties, Hao-Ning He, Ruo-Yu Liu, Xiang-Yu Wang, Shigehiro Nagataki, Kohta Murase, Zi-Gao Dai, The Astrophysical Journal Volume 752, id.29 10pp (2012) 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/752/1/29
- (7) Gravitational Wave Signatures of Hyperaccreting Collapsar Disks, Kotake Kei, Tomoya Takiwaki, Seiji Harikae, The Astrophysical Journal Volume 755, id.84 14pp (2012) 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/755/2/84
- (8) Fully General Relativistic Simulations of Core-Collapse Supernovae with an Approximate Neutrino Transport, Takami Kuroda, Kei Kotake, Tomoya Takiwaki Volume 755, id.11 21pp (2012) 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/755/1/11
- (9) Three-Dimensional Hydrodynamic Core-Collapse Supernova Simulations for an 11.2 Msun Star with Spectral Neutrino Transport, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, Yudai Suwa The Astrophysical Journal Volume 749, id.98, 17pp (2012) 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/749/2/98
- (10) Failed Gamma-Ray Bursts: Thermal Ultraviolet/Soft X-Ray Emission Accompanied by Peculiar Afterglows, Ming Xu, Shigehiro Nagataki, Yonfeng Huang, Shiu-Hang Lee, The Astrophysical Journal, Volume 746, id.49 (2012) 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/746/1/49
- (11) Thermal Radiation from Gamma-Ray Burst Jets, Akira Mizuta, Shigehiro Nagataki, Jun'ichi Aoi, The Astrophysical Journal, Volume 732, id.26 (2011) 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/732/1/26
- (12) Rotating Black Holes as Central Engines of Long Gamma-Ray Bursts: Faster is Better, Shigehiro Nagataki, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 63, p.1243-1249 (2011) 査読有  
DOI: 10.1093/pasj/63.6.1243
- [学会発表](計 36件)
- (1) Challenge of Astrophysical Big Bang Laboratory: From Central Engine to Remnants, Nagataki Shigehiro, International Conference on Supernovae and Gamma-Ray Bursts 2013, Kyoto, Japan, 2013年11月12日 (基調講演)
- (2) Multi-D Core-Collapse Supernova Explosions and the Astrophysical Multi-Messengers, Kotake Kei, International Conference on Supernovae and Gamma-Ray Bursts 2013, Kyoto, Japan, 2013年10月29日 (招待講演)
- (3) Challenge to Understand GRB Emission Mechanism from the Engine, Nagataki Shigehiro, International Workshop on Future Directions of Relativistic Jets: Fermi and Beyond, Skokloster, Sweden, 2013年8月31日 (招待講演)
- (4) Collapsar Simulations: Central Engine of Long Gamma-Ray Bursts, Nagataki Shigehiro, International Conference on F.O.E Fifty-One Erg, Releigh, the US, 2013年5月13日 (招待講演)
- (5) Relativistic Jet Formation and Dynamics, Nagataki Shigehiro, International Workshop on Multi-Scale Structure Formation and

- Dynamics in Cosmic Plasmas, Bern, Switzerland, 2013年4月16日(招待講演)
- (6) Life of Long Gamma-Ray Bursts: From Explosion to Remnants, Nagataki Shigehiro, International Workshop on PACIFIC 2012, Moorea, French Polynesia, 2012年9月1日(招待講演)
- (7) Brainstorming on Core-Collapse Supernova Theory with Perspectives toward Multi-Messenger Astronomy, Kotake Kei, International Workshop on Nuclear Theory Program INT-12-2a, Seattle, the US, 2012年7月13日(招待講演)
- (8) Gravitational Waves from Core-Collapse Supernovae, Kotake Kei, Marcel Grossmann Meeting13, Stockholm, Sweden, 2012年7月1日(招待講演)
- (9) Aspherical Supernova Explosion and Gamma-Ray Bursts, Nagataki Shigehiro, ExUL-2012 GRB Workshop, Moscow, Russia, 2012年6月14日(招待講演)
- (10) Numerical Simulations of Central Engine of Long Gamma-Ray Bursts, Nagataki Shigehiro, Ginzburg Conference of Physics, Moscow, Russia, 2012年6月2日(招待講演)
- (11) Collapsar and Magnetar Models for Long-Duration Gamma-Ray Bursts, Nagataki Shigehiro, Gamma-Ray Burst Conference 2012, Munich, Germany, 2012年5月9日(招待講演)
- (12) General Relativistic MHD Simulations of Collapsars: Dynamics and Explosive Nucleosynthesis, Nagataki Shigehiro, Particle Astrophysics and Cosmology Including Fundamental Interactions (PACIFIC) 2011, Moorea, French Polynesia, 2011年9月10日(招待講演)
- (13) Numerical Recipes in Microphysics to Energize Core-Collapse Supernovae, Kotake Kei, International Workshop on Microphysics in Computational Relativistic Astrophysics, Perimeter Institute, Canada, 2011年6月20日(招待講演)
- (14) Multidimensional supernova simulations with a concentration of equation of state, Kotake Kei, International symposium of symmetry energy, Massachusetts, the US, 2011年6月17日(招待講演)
- (15) Numerical Propagation of UHECRs: Spectrum, Arrival Direction, Composition,, Nagataki Shigehiro,

International Conference on Multi-Messenger Astronomy of Cosmic-Rays, Beijing, China, 2011年4月11日(招待講演)

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.riken.jp/research/labs/associate/astro\\_big\\_bang/](http://www.riken.jp/research/labs/associate/astro_big_bang/)

<http://nagataki-lab.riken.jp/Home.html>

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/ws/2013/sngrb/SN-GRB2013.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長瀧 重博(NAGATAKI SHIGEHIRO)

独立行政法人理化学研究所・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

固武 慶(KOTAKE KEI)

福岡大学・理学部・准教授

研究者番号：20435506

### (3) 連携研究者

伊藤 裕貴(ITO HIROTAKA)

独立行政法人理化学研究所・長瀧天体ビッグバン研究室・特別研究員

研究者番号：30434278