

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800159

研究課題名(和文)ガンマ線バーストジェット中を伝搬する相対論的輻射優勢衝撃波の理論研究

研究課題名(英文)Study of Radiation Dominated Shock Waves in Gamma-Ray Burst Jets

研究代表者

伊藤 裕貴 (Ito, Hirota)

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、ガンマ線バーストを引き起こしている相対論的ジェットの内部に形成された衝撃波が放射に与える影響を調べる事である。主に(1)相対論的輻射衝撃波の一次元定常解、及び(2)相対論的ジェットの多次元流体シミュレーションに基づいた研究を行った。

その結果、(1)からは相対論的輻射優勢衝撃波ではその散逸領域において、光子が多重散乱によって非熱的なエネルギー分布となる事を示した。(2)からは、非熱的分布の起源となる衝撃波はジェットの内部に普遍的に形成される事を示した。これらの結果は、合わせて相対論的輻射優勢衝撃波が、ガンマ線バーストの非熱的スペクトルの起源となる事を示唆している。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to investigate the effect of the shocks produced in the relativistic jet on the emission properties of gamma-ray bursts. The research is carried out mainly based on (1) steady state solution of radiation dominated shock waves in one dimension and (2) hydrodynamical simulation of relativistic jet in multi-dimensions.

In the case of (1), it is found that the energy spectrum of photons within the dissipation region of the radiation dominated shocks becomes highly non-thermal due to the multiple scattering by electrons. In the case of (2), it is found that the production of shocks which generates non-thermal photons are an inherent feature of relativistic jet. These results suggest that the radiation dominated shocks are the origin of the non-thermal spectrum observed in gamma-ray bursts.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：衝撃波 ガンマ線バースト 輻射輸送

### 1. 研究開始当初の背景

ガンマ線バーストは、大質量の星が重力崩壊を起こす際に形成したブラックホールから相対論的ジェットを噴出することによって引き起こされていると考えられている。その放射機構の明らかになっていないが、相対論的ジェットの内部に発生した衝撃波が、ガンマ線放射に大きな影響を与える事が示唆されている(図1参照)[1]。ジェット中の衝撃波はほぼ光の速度で伝搬し、輻射(光子)と物質(プラズマ)の衝突が散逸過程を担っている(相対論的輻射優勢衝撃波; 図2参照)。このような衝撃波の散逸過程を明らかにするためには、光子とプラズマ間のエネルギー、運動量の交換の詳細を適切に評価する必要があるが、そういった理論研究は少なく、特にガンマ線バーストで実現されるような、衝撃波の上流、下流共に輻射のエネルギーが優勢となっている衝撃波の研究に至ってはほぼ皆無であった。そのため、実際どのように衝撃波がガンマ線バーストの放射に影響するのかはあまりよく分かっていなかった。

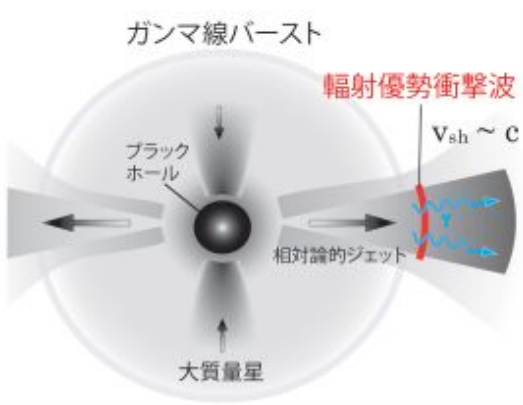


図1: ガンマ線バーストと相対論的輻射優勢衝撃波の模式図

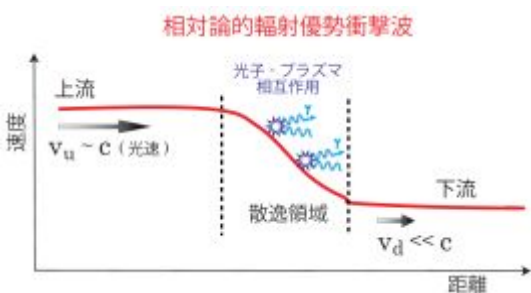


図2: 相対論的輻射優勢衝撃波の散逸領域の模式図

#### <引用文献>

[1] Levinson 2012, The Astrophysical Journal, Vol. 756, p174-183

### 2. 研究の目的

本研究の目的はガンマ線バーストの放射機構において本質的な役割を果たす相対論的輻射優勢衝撃波の研究を行う。具体的には、

相対論的衝撃波の散逸領域におけるプラズマ及び光子のエネルギー分布の遷移を明らかにし、ガンマ線バーストのジェットの放射への影響を理論的に精査する。主に取り組む事は、以下の2点である。

(1) 衝撃波の上流から下流に至るまでのプラズマ及び光子の空間及びエネルギー分布を記述する相対論的輻射優勢衝撃波の一次元定常解を構築する。これにより、衝撃波の散逸過程の詳細を明らかにする。

(2) 多次元流体シミュレーションを駆使する事によって、ジェット内の衝撃波を形成過程から明らかにし、放射への影響を明らかにする。

### 3. 研究の方法

前述のように、本研究では(1)一次元定常解に基づいた研究、及び(2)多次元流体シミュレーションに基づいた研究に取り組んだ。各研究の研究手法を以下に示す。

#### (1) 一次元定常解に基づいた研究

本研究では相対論的輻射優勢衝撃波に伴う微視的な散逸過程を明らかにするために、衝撃波上流から下流に至るまでのプラズマと光子の空間及びエネルギー分布を記述する一次元定常解の構築を行う。定常解を構築する手順は以下である。まず最初に、衝撃波の上流から下流に至るまでの散逸領域を含めたプラズマ流の構造を人為的に仮定する。次に、(i)仮定したプラズマ流の中の輻射輸送をモンテ=カルロ手法を用いて計算し、衝突の際に生じる光子、プラズマ間のエネルギー、運動量の交換を評価する。(ii)そこで得られた、光子、プラズマ流の定常状態(運動量流束、エネルギー流束一定)からのズレの情報を元に、定常状態に近づくように再度プラズマ流の構造を仮定する。後は(i),(ii)の行程を定常状態からのズレが十分小さくなるまで反復して行う。これにより、相対論的衝撃波の上流から衝撃波下流に至るまでの散逸過程において、プラズマと光子の空間及びエネルギー分布がどのように変化していくかを明らかにする。

#### (2) 多次元流体シミュレーションに基づいた研究

本研究では、大質量星の表面を突き破る相対論的ジェット(図1参照)の時間発展を多次元の流体シミュレーションを行う事によって明らかにする。これにより、ジェットの内部に衝撃波の形成過程を調べる。その後、シミュレーションの結果を背景流体として、モンテ=カルロ手法を用いた輻射輸送計算を行う事によって、ジェットからの放射を評価する。これにより、ジェットの内部にどのように衝撃波が発生し、それがどのように放射に影響するかを明らかにする。

#### 4. 研究成果

研究(1),(2)で得られた主な成果は以下である。

##### (1) 一次元定常解に基づいた研究

一次元定常解を構築する計算コードの開発し、衝撃波の伝搬速度のローレンツ因子が1.0以下の場合においては、収束した定常解が得られた。その結果、衝撃波の上流のエネルギーの大部分を光子が担っている場合は、光子のエネルギー分布は上流から下流に至るまでほぼ熱的分布となる事が分かった。その一方で、プラズマのエネルギー密度が上流にて卓越している場合は、散逸過程において急激にプラズマのエネルギーが光子へと受け渡される事によってプラズマが減速し(図3参照)、光子のエネルギー分布が非熱的分布となる事が分かった(図4参照)。また、その場合の光子のエネルギー分布の熱的分布からずれば、衝撃波の伝搬速度にはあまり依存しない事が分かった。

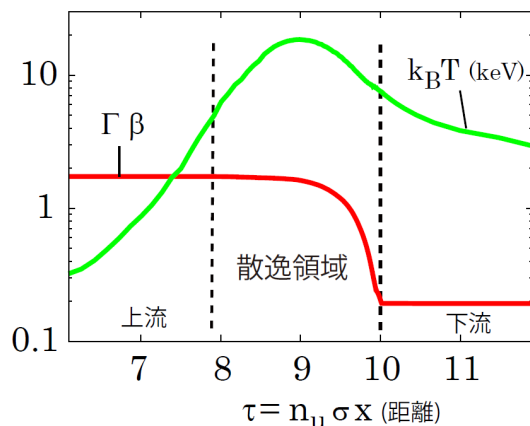


図3：相対論的輻射優勢衝撃波の四元速度( $\Gamma\beta$ )及び温度(T)の空間分布

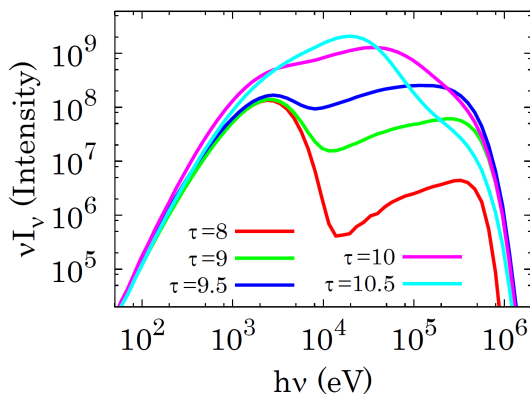


図4：相対論的輻射優勢衝撃波における光子の各位置( $\tau$ )でのエネルギー分布

本研究の最も重要な成果は、輻射優勢衝撃波が、ガンマ線バーストの大きな特徴である非熱的な放射スペクトルの起源となりうる事を示した点である。

##### (2) 多次元流体シミュレーションに基づいた研究

本研究からは大質量星の内部を伝搬した相対論的ジェットの高次元の時間変化を明らかにする事によって、その内部では輻射衝撃波が普遍的に形成される事を示した(図5参照)。また、その衝撃波は、ジェットの放射の性質(光度曲線やスペクトル)に強く影響する事が明らかになった(図6参照)。

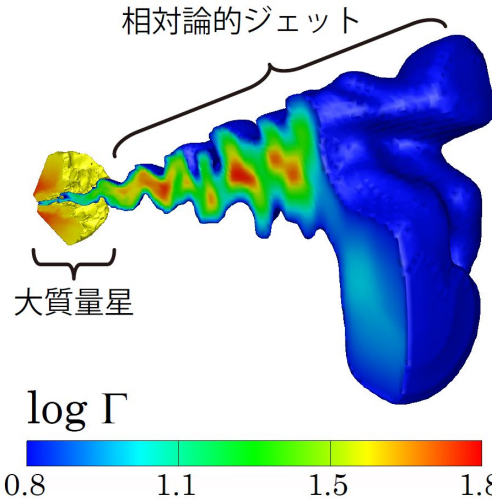


図5：大質量星の外層を突き破る相対論的ジェットの3次元流体シミュレーション

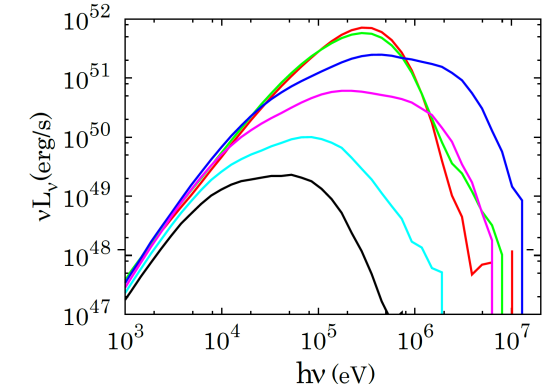
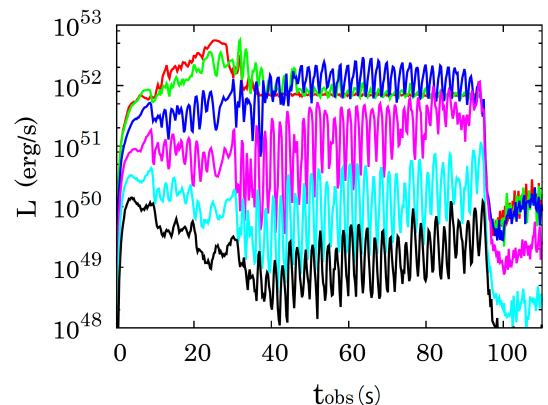


図6：3次元流体シミュレーションに基づいたジェットからの放射の光度曲線(上)及びスペクトル(下)

本研究の主な成果は、ジェットの内部に普

遍的に存在する衝撃波の影響によって、ガンマ線バーストの激しい時間変動や、非熱的スペクトルといった特徴が自然に再現できることを示した点である。

#### 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6件)

Yutaka Fujita, Nozomu Kawakatu, Isaac Shlosman, Hiroataka Ito, “The Young Radio Lobe of 3C 84: Gas Density in the Central 10 Parsec”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Blackwell Publishing, Vol 455, Issue 3, p2289-2294, (2016), 査読有  
10.1093/mnras/stv2481

Hiroataka Ito, Jin Matsumoto, Shigehiro Nagataki, Donald C. Warren, Maxim V. Barkov, “Photospheric Emission from Collapsar Jets in 3D Relativistic Hydrodynamics”, The Astrophysical Journal Letters, IOP Publishing, Vol 814, Issue 2, p29-35, (2015), 査読有  
10.1088/2041-8205/814/2/L29

Jirong Mao, Masaomi Ono, Shigehiro Nagataki, Masa-aki Hashimoto, Hiroataka Ito, Jin Matsumoto, Maria G. Dainotti, Shiu-Hang Lee, “Matter Mixing in Core-collapse Supernova Ejecta: Large Density Perturbations in the Progenitor Star?”, The Astrophysical Journal, IOP Publishing, Vol. 808, Issue 2, p164-189, (2015), 査読有  
10.1088/0004-637X/808/2/164

Hiroataka Ito, Motoki Kino, Nozomu Kawakatu, Monica Orienti, “Fate of Dead Radio-loud Active Galactic Nuclei: New Prediction of Long-lived Shell Emission”, The Astrophysical Journal, IOP Publishing, Vol. 806, Issue 2, p241-248, (2015), 査読有  
10.1088/0004-637X/806/2/241

Yuto Teraki, Hiroataka Ito, Shigehiro Nagataki, “Particle acceleration in superluminal strong waves”, The Astrophysical Journal, IOP Publishing, Vol. 805, Issue 2, p138-146, (2015), 査読有  
10.1088/0004-637X/805/2/138

Hiroataka Ito, Shigehiro Nagataki, Jin Matsumoto, Shiu-Hang Lee, Alexey Tolstov, Jirong Mao, Maria Dainotti,

Akira Mizuta, “Spectral and Polarization Properties of Photospheric Emission from Stratified Jets”, The Astrophysical Journal, IOP Publishing, Vol. 789, Issue 2, p159-177, (2014), 査読有  
10.1088/0004-637X/789/2/159

##### [学会発表](計13件)

Hiroataka Ito, “Study of photospheric emission from GRB jet based on 3D hydrodynamical simulation”, HEAP2015, KEK (茨城県・つくば市), 2015年10月6日

Hiroataka Ito, “Photospheric Emission Model for Prompt Emission of GRBs.” (招待講演), PACIFIC 2015 (タヒチ・フランス領ポリネシア), タヒチ, 2015年9月15日

伊藤裕貴, “相対論的輻射媒介衝撃波の定常解”, 日本天文学会秋季年会, 甲南大学(兵庫県・神戸市), 2015年9月9日

Hiroataka Ito, “Photospheric emission from GRB jets” (基調講演), GRB workshop 2015, 理化学研究所(埼玉県・和光市), 2015年8月21日

伊藤裕貴, “相対論的ジェットの伝搬ダイナミクスが与える光球面放射への影響”, 日本天文学春季年会, 大阪大学(大阪府・豊中市), 2015年3月18日

Hiroataka Ito, “Photospheric emission from structured relativistic jet in gamma-ray bursts” (基調講演), RIKEN-RESCEU-IPMU Joint Meeting, 東京大学(東京都・文京区), 2015年3月3日

伊藤裕貴, “構造を持った相対論的ジェットからの光球面放射”, コンパクト連星合体からの重力波・電磁波放射とその周辺領域, 京都大学基礎物理学研究所(京都府・京都市), 2015年2月13日

伊藤裕貴, “相対論的輻射媒介衝撃波の一次元定常解”, 理論懇シンポジウム, 国立天文台(東京都・三鷹市), 2014年12月24日~2014年12月26日

伊藤裕貴, “構造を持った相対論的ジェットからの光球面放射” (招待講演), 理論天文学研究会2014, 休暇村(千葉県・館山市), 2014年11月10日

Hiroataka Ito, “Effects of jet structure

on the photospheric emission in gamma-ray bursts” (招待講演), Ioffe Workshop on GRBs and other Transient Sources: 20 years of Konus-Wind Experiment, Ioffe Institute (サンクトペテルブルグ・ロシア), 2014年9月21日

伊藤裕貴, “三次元相対論的流体ミュレーションから探る相対論的ジェットからの光球面放射”, 日本天文学会秋季年会, 山形大学(山形県・山形市), 2014年9月11日

伊藤裕貴, “Photospheric Emission in GRBs” (基調講演), 超新星・ガンマ線バースト研究会 2014, 理化学研究所(埼玉県・和光市), 2014年8月27日

Hiroataka Ito, “Photospheric Emission in GRBs” (基調講演), RIKEN-IPMU-RESCEU Joint Meeting, 理化学研究所(埼玉県・和光市), 2014年7月8日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等  
なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊藤 裕貴 (ITO, Hiroataka)  
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