

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K21630

研究課題名（和文）相対論的ジェット中の輻射輸送計算に基づいたガンマ線バーストの放射機構の系統的研究

研究課題名（英文）Study of Gamma-ray Burst Emission Mechanism Based on Radiation Transfer Calculation

研究代表者

伊藤 裕貴 (Ito, Hirotaka)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・研究員

研究者番号：30434278

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、3次元の相対論的シミュレーションと輻射輸送計算を駆使することによって、ガンマ線バーストに伴う光球面放射の評価を行なった。最大の成果は、観測から経験則として知られていたガンマ線スペクトルのピークエネルギーと光度の相関関係（米徳関係）が、光球面放射によって自然に再現されることを明らかにした点である。米徳関係は放射の主な成分の普遍的な性質を反映していると考えられるため、本成果は光球面放射がガンマ線バーストの主な放射機構を担っていることを強く示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ガンマ線バーストは宇宙で最も明るい爆発現象である。しかしながら、ガンマ線バーストがどのようにしてその放射を実現しているのかは長らく未解明であった。本研究では、現実的な状況設定のもとで行なった数値シミュレーションによって、その謎に大きく迫る結果を得ている。本成果はガンマ線バーストの全容を解明する重要な一歩であり、大質量星の爆発メカニズムの理解に繋がる期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, we explore the photospheric emission in gamma-ray bursts based on relativistic hydrodynamical simulations and post-process radiation transfer calculations in three dimensions. Our simulations reveal that the empirical correlation between the spectral peak energy and luminosity (Yonetoku relation) can be naturally reproduced by the photospheric emission. This result strongly suggests that photospheric emission is the dominant emission mechanism in 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 相対論的ジェット 輻射輸送

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ガンマ線バーストは突発的に大量のガンマ線が地上に降り注ぐ、宇宙で最も明るい天体現象である。最初の発見から約40年間、精力的な研究が理論・観測の両面で行われてきており、現在では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、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現象であると考えられている。しかしながら、ジェットからガンマ線が放出する物理過程は未だ解明されておらず、宇宙物理学の主要なテーマの一つとなっている。

そのような中で近年脚光を浴びている理論モデルとして、ジェットが光学的に厚い状態から、膨張により光学的に薄い状態に遷移する際に開放する光子をガンマ線の起源とする“光球面放射モデル”がある。しかし、“光球面放射モデル”は理論面ではまだまだ精査が必要な部分が多い。光球面放射を正確に評価するためには、内部に捕縛されていた光子が相対論的ジェット中を伝搬し解放されるまでの一連の過程を明らかにする必要があるため、輻射輸送計算が必須となる。これまでの大半の先行研究においては、このような計算を、簡単のためジェットを定常球対称な流れと近似し行っている。一方で、相対論的ジェットの流体シミュレーションに基づいた研究からは、ジェットの内部には非一様な内部構造が普遍的に存在しており、非定常かつ多次元の構造が本質的に重要である事が示唆されている。このように複雑な振る舞いを示すジェットからの放射は、定常球対称を課した計算からは適切に評価できないため、より現実的な状況設定における輻射輸送計算を行う事が望まれる。

### 2. 研究の目的

上述の背景を踏まえ、本研究では相対論的流体シミュレーションと輻射輸送計算を駆使することによって、現実的なジェットのダイナミクスに基づいた光球面放射を精査することを目的としている。特に、相対論的ジェットが星の外層と衝突する際に形成する内部構造が光度やスペクトルといった放射の性質にどのように反映されるかについて検証した。

### 3. 研究の方法

研究の手法としては、最初にジェットが親星の外層を突き破り、光学的に薄くなるまでの過程を3次元の相対論的流体シミュレーションによって計算する。次に、そこで得られた時間発展データを背景流体として採用し、輻射輸送計算を行う事によりジェットからの光球面放射を評価する。流体シミュレーションの初期条件としては、重力崩壊前である太陽の16倍の質量を持つウォルフ・ライエ星を計算領域内に配置しおり、その中心領域から様々なパワーを持った相対論的ジェットを注入し、時間発展を解いている。輻射輸送計算には光子を粒子として扱うモンテカルロ法を採用しており、初期に光学的に厚い領域に熱的な光子をジェットの内部に注入し、光球面放射で解放されるまでの過程を解いている。

### 4. 研究成果

図1は本研究において取り組んだ相対論的流体シミュレーションの一例となっている。この図は、親星の外層(紫色の領域)を突き破り、遠方まで伝搬した相対論的ジェットの速度構造(青から赤までのカラーコンター)を図示したものである。図からは、星の外層と衝突しながら外に向かって突き進んだジェットは、星の外層と衝突したことによって非一様な構造を形成し、中心軸から離れた位置ほど速度やエネルギーが小さくなっていることが見て取れる。我々の取り組んだ計算からは、パワーの異なるジェットを注入した場合も、共通して同様の構造を示すことが確認された。

輻射輸送計算の結果得られる光球面放射はジェット構造を強く反映するものになっている。観測者の位置による依存性に着目すると、上記の構造に起因して、見込み角 $\theta_{\text{obs}}$ (ジェットと観測者の視線方向がなす角度: 図1参照)が大きくなるほど、観測されるガンマ線スペクトルのピークエネルギーが光度ともに小さくなることが明らかになった。本研究における最大の成果は、その結果生じたピークエネルギーと光度の間の相関が、ガンマ線バーストの観測から経験則として知られていた相関関係(米徳関係)をよく再現することを示した点である。

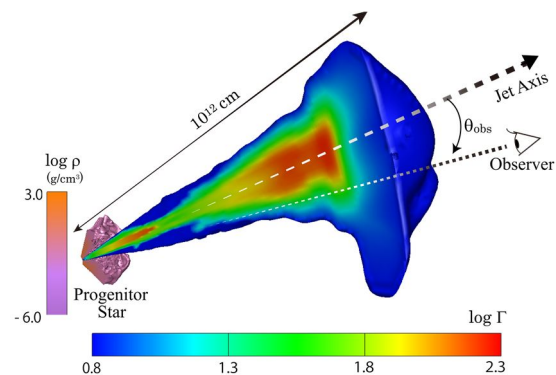


図1:大質量星を突き破るジェットの相対論的シミュレーションの一例(左)。

図2が、観測から得られている米徳関係とシミュレーションの直接比較の図となっている。エラーバーのついた灰色の点が観測データで、赤、緑、青の点が数値シミュレーションの結果となっている（色や形の違いはジェットのパワー、継続時間の違いを表している）。図から分かるように、シミュレーションの結果は、パワーや継続時間などに依存せず、米徳関係を再現している。米徳関係は観測される多くのガンマ線バーストで成り立つことから、放射の主な成分の普遍的な性質を反映していると考えることができる。そのため、本研究の現実的な状況設定に基づいた数値シミュレーションによって米徳関係が自然に再現できたことは、光球面放射がガンマ線バーストの主な放射機構を担っていることを強く示唆している。

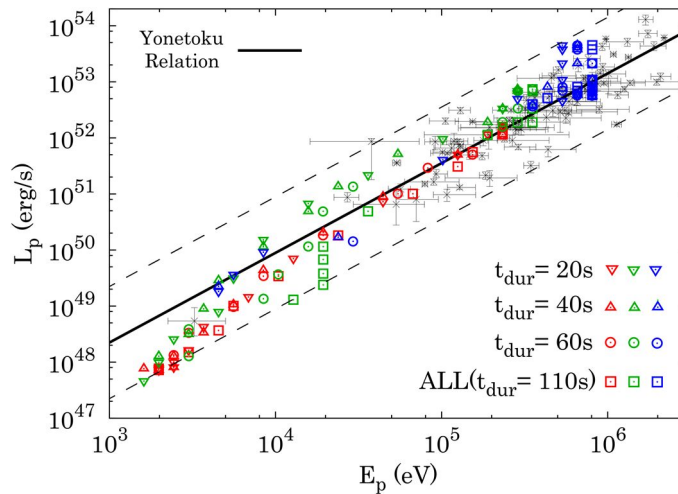


図2：観測から得られた米徳関係と数値シミュレーションの比較。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ito Hirotaka, Levinson Amir, Nagataki Shigehiro	4. 巻 492
2. 論文標題 Monte Carlo simulations of relativistic radiation-mediated shocks: II. photon-starved regime	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1902 ~ 1913
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz3591	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ito Hirotaka, Matsumoto Jin, Nagataki Shigehiro, Warren Donald C., Barkov Maxim V., Yonetoku Daisuke	4. 巻 10
2. 論文標題 The photospheric origin of the Yonetoku relation in gamma-ray bursts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1504 ~ 1510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-09281-z">http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-09281-z</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Warren Donald C, Barkov Maxim V, Ito Hirotaka, Nagataki Shigehiro, Laskar Tanmoy	4. 巻 480
2. 論文標題 Synchrotron self-absorption in GRB afterglows: the effects of a thermal electron population	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4060 ~ 4068
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1093/mnras/sty2138">https://doi.org/10.1093/mnras/sty2138</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ito Hirotaka, Levinson Amir, Stern Boris E, Nagataki Shigehiro	4. 巻 474
2. 論文標題 Monte Carlo simulations of relativistic radiation-mediated shocks: I. Photon-rich regime	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2828 ~ 2851
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx2722	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshida Kazuki, Yoneoku Daisuke, Sawano Tatsuya, Ito Hirotaka, Matsumoto Jin, Nagataki Shigehiro	4. 巻 849
2. 論文標題 Search for a Signature of Interaction between Relativistic Jet and Progenitor in Gamma-Ray Bursts	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 64 ~ 64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa8e48	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishii Ayako, Ohnishi Naofumi, Nagakura Hiroki, Ito Hirotaka, Yamada Shoichi	4. 巻 348
2. 論文標題 Validation of radiative transfer computation with Monte Carlo method for ultra-relativistic background flow	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 612 ~ 633
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2017.07.038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kino M., Ito H., Wajima K., Kawakatu N., Nagai H., Itoh R.	4. 巻 843
2. 論文標題 Fossil Shell in 3C 84 as TeV $\gamma$ -Ray Emitter and Cosmic-Ray Accelerator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 82 ~ 82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa7336	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Hirotaka Ito
2. 発表標題 Numerical Simulations of Photospheric Emission from Collapsar Jets
3. 学会等名 Fifteenth Marcel Grossmann Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroataka Ito
2. 発表標題 Prompt Emission of Gamma-ray Bursts
3. 学会等名 Windows on the Universe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 星とジェットの間相互作用で説明するプリカーサー放射
3. 学会等名 日本天文学会秋期年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 光子のエスケープを考慮した相対論的輻射媒介衝撃波の解から探る衝撃波ブレイクアウトに伴う放射
3. 学会等名 日本天文学会春期年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 Photospheric Emission from Collapsar Jets in 3D Relativistic Hydrodynamics
3. 学会等名 FOE2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 光球面放射の数値シミュレーションから明らかにする米徳関係の起源
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 三次元相対論的流体シミュレーションから明らかにする米徳関係の起源
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 Numerical Simulations of Photospheric Emission from Collapsar Jets
3. 学会等名 THESEUS Workshop 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 光球面放射の数値シミュレーションから明らかにする米徳関係の起源
3. 学会等名 平成29年度cfcaユーザーズミーティング
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 Numerical Simulations of Photospheric Emission from Collapsar Jets
3. 学会等名 Theories of Astrophysical Big Bangs (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 数値シミュレーションから明らかにする光球面放射の性質
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 Physics of Relativistic Radiation Mediated Shocks
3. 学会等名 RIKEN-RESCEU Joint Seminar (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 相対論的輻射媒介衝撃波の物理
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会
4. 発表年 2016年



1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 Steady-state solution of relativistic radiation mediated shocks
3. 学会等名 第29回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 定常解から探る相対論的輻射媒介衝撃波のガンマ線バーストの放射への影響
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 Numerical Simulations of Photospheric Emission in Gamma-Ray Bursts
3. 学会等名 Workshop to bring together experts on High Energy Astrophysics from Japan and Israel (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 The photospheric origin of the Yonetoku relation in gamma-ray bursts
3. 学会等名 Ioffe Workshop on GRBs and other transient sources: 25 Years of Konus-Wind Experiment (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 Numerical Simulations of Photospheric Emission in Gamma-Ray Bursts
3. 学会等名 Yamada Conference LXXI: Gamma-ray Bursts in the Gravitational Wave Era 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ガンマ線バーストのスペクトルと明るさの相関関係の起源 - 宇宙最大の爆発現象の理論的解明へ前進 -  
[http://www.riken.jp/pr/press/2019/20190403\\_1/](http://www.riken.jp/pr/press/2019/20190403_1/)

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考