

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03878

研究課題名（和文）相対論的輻射媒介衝撃波の定常解に基づいた衝撃波ブレイクアウトの理論研究

研究課題名（英文）Theoretical Study on Shock Breakout Based on Steady Solutions of Relativistic Radiation Mediated Shocks

研究代表者

伊藤 裕貴 (Ito, Hiroataka)

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、独自に開発した数値計算コードを用いて、輻射媒介衝撃波の構造を第一原理から明らかにし、超新星爆発や低光度ガンマ線バーストなどの爆発現象に伴う衝撃波ブレイクアウトの性質を理論的に精査した。初めに、衝撃波ブレイクアウトが発生する前の衝撃波の構造を、光速の10%からローレンツ因子20の範囲の伝搬速度を持つ衝撃波について明らかにした。次に、緩やかに密度が減少する領域で発生する衝撃波ブレイクアウトに焦点を当て、同じ伝搬速度の範囲の衝撃波がブレイクアウトの進行に伴い示す構造の進化と、それに伴い解放される放射のスペクトルを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では独自の数値手法を用いて、光速の10%以上の速度で伝搬する輻射媒介衝撃波の構造を第一原理から明らかにした。特に、光速の約30%を超過する伝搬速度を持つ衝撃波に対しては、このような第一原理的な手法がその性質を解明する上で不可欠であり、特に衝撃波から光子が解放される効果を実装した計算に関しては世界初の試みである。これにより、これらの高速な衝撃波がブレイクアウトを開始する際の光学的厚みや、解放される光子の放射スペクトルが初めて明らかになった。この成果は超新星やガンマ線バーストの理解を深めるとともに、関連する天体物理学の分野に重要な示唆を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a numerical code that enables the computation of the structure of radiation mediated shocks (RMSs) from first principles, to explore the nature of shock breakouts associated with phenomena such as supernovae and low-luminosity gamma-ray bursts. Initially, we derived the structure of RMSs prior to the shock breakout, focusing on shocks with propagation speeds ranging from 10% of the speed of light to a Lorentz factor of 20. We then focused on shock breakouts occurring in regions where density gradually decreases, exploring the evolution of the shock structure and the corresponding spectra of radiation released as the breakout progresses, across the same range of propagation speeds.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ショックブレイクアウト 衝撃波 輻射輸送

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

超新星やガンマ線バーストは、大質量の星の重力崩壊もしくは連星中性子星の合体に起因する爆発に伴う高エネルギー天体现象である。爆発によって生じた衝撃波は、星の内部を伝搬し星の表面もしくはその外側に存在している星周物質に到達した際に、内部に捕縛していた大量の光子を解放する。この衝撃波ブレイクアウトが、これらの天体现象の最初期の放射の起源となっている。衝撃波ブレイクアウトにおける衝撃波は、光子とプラズマ粒子の衝突によって形成される輻射媒介衝撃波になっている（通常の衝撃波はプラズマ粒子同士の衝突が起源となっている）。そのため、その放射の性質を明らかにするためには、光子・プラズマ粒子間の衝突が担っている輻射媒介衝撃波の散逸過程を明らかにする必要がある。

輻射媒介衝撃波は様々な高エネルギー天体现象において重要な役割を果たしていると考えられており、その理論研究は1960年代から盛んに行われてきている。輻射媒介衝撃波の物理を明らかにするためには、輻射輸送計算によって光子・プラズマ間の衝突に伴うエネルギー・運動量の交換を評価する必要がある。衝撃波の伝搬速度が光の速度に比べて十分遅い場合（非相対論的輻射媒介衝撃波）に関しては、光子はほぼ等方的な分布となるため輻射輸送は拡散過程と近似でき、その計算は非常に容易になる。そのため、非相対論的輻射媒介衝撃波の物理は1970年代には既に確立していた。その一方で、伝搬速度が光の速度に近づいた場合は、光子は非等方的な分布となり、輻射輸送を解く際に近似的な手法は適用できない。近似を課さない輻射輸送計算によって、ほぼ光の速度で運動しているプラズマ粒子と、光子の間の衝突を正確に評価するのは困難であるため、そのような計算に取り組んだ先行研究は数例にとどまっているのが現状である。特に衝撃波ブレイクアウトに適用できる相対論的輻射媒介衝撃波の計算は、Budnik et al. 2010にて行われた非常に限定的な状況設定におけるもののみとなっており、その計算精度にも課題を残している。

衝撃波ブレイクアウトにおける衝撃波の伝搬速度は、爆発のエネルギーや星の外層や星周物質の分布に強く依存し、非相対論的なものから相対論的なものまで幅広く存在していると考えられている。その放射からは、未だよく分かっていない爆発直前の星の状態を探ることができ、長年の謎となっている爆発のメカニズムを解明する上でも大変重要な示唆を得ることができる。そのため、理論研究には未だ確立されていない相対論的輻射媒介衝撃波の散逸過程を明らかにし、相対論的な衝撃波ブレイクアウトの観測に備えることが求められる。これによって、初めて多様な観測から爆発直前の星の情報を引き出すことが可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究では輻射媒介衝撃波の散逸過程を精密な計算から明らかにし、衝撃波ブレイクアウトに伴う放射を評価することを目的としている。光子とプラズマ粒子の間の微視的な衝突過程を適切に取り扱った相対論的な輻射媒介衝撃波の理論研究は前例がほとんどないため、本研究課題でまず特筆すべきは先駆的な研究になっている点である。学術的独自性としては、これまで未解明であった相対論的輻射媒介衝撃波の物理過程の確立を成し遂げることによって基礎物理学の発展に貢献するという側面とともに、それによって相対論的な衝撃波ブレイクアウトという天文学において重要な研究課題に世界最先端の精度で取り組む点が挙げられる。

本研究を推進することは、大型観測機の発展によって多数の観測が予想されている衝撃波ブレイクアウトの観測データから、爆発直前の星の情報を引き出す重要なツールを提供することとなる。そのため、これまでよく分かっていなかった星の爆発前の様相を明らかにし、ひいては長年の未解決問題である星の爆発機構の解明に繋がることが期待される。

### 3. 研究の方法

本研究では独自に開発した数値コードを用いて、輻射媒介衝撃波の定常解を構築している。本コードの具体的な計算手法は以下の通りである。まず、衝撃波の上流から下流に至るまでのプラズマ流の構造（速度、温度 $T$ 、電子・陽電子の密度 $n_{\pm}$ ）を粒子数保存が満たされるように人為的に仮定する。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、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（エネルギー・運動量流束が一定）からのズレの情報に基づき、定常状態に近づくようにプラズマ流の構造に修正を加える。この(i),(ii)の行程を定常状態からのズレが十分小さくなり、収束するまで反復して行う。

本計算において、主なパラメータは衝撃波上流の密度( $n_u$ )と速度( $u$ : 光速で規格化された速度)

である。また、光子の衝撃波からのエスケープを考慮した計算に関しては(後述の 4.(2), (3)を参照)、それに加えて上流の光学的厚み( $\tau_u^*$ )が入力パラメータとなる。これらの与えられた入力パラメータに基づき、本コードは輻射媒介衝撃波の上流から下流に至るまでの各位置におけるプラズマの温度、速度、電子・陽電子の密度、および光子のエネルギー分布を算出する。これにより、さまざまな伝搬速度を持つ衝撃波において、その散逸過程で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ことができる。光子のエスケープを実装した計算では、ブレイクアウトの進行に伴い示す衝撃波の構造の進化に加え、それに伴い解放される放射のスペクトルが評価される。本コードで採用しているモンテ-カルロ輻射輸送計算は、輻射媒介衝撃波の散逸過程において本質的な役割を担うコンプトン散乱、電子・陽電子による制動放射/吸収、電子・陽電子の生成/消滅の過程を近似を課すことなく実装している。したがって、本研究では輻射媒介衝撃波の散逸過程をこれらの素過程を第一原理的に計算することにより、高精度に明らかにしている。

#### 4. 研究成果

##### (1) 衝撃波ブレイクアウト前の輻射媒介衝撃波の構造

最初に取り組んだ計算は、非常に光学的に厚いプラズマ中で発生する輻射媒介衝撃波についてである。このような状況では、光子は衝撃波内に完全に閉じ込められており、衝撃波ブレイクアウトが発生する前の輻射媒介衝撃波の計算に対応する。考慮した衝撃波の伝搬速度は、光速の 10% からローレンツ因子 20 の範囲である。図 1 は、四元速度、温度、および対生成で発生した電子・陽電子の密度を上流からの光学的厚さ  $\tau_u^*$  の関数として図示している。

衝撃波の直下流の温度は、 $\beta_u = 0.1$  で約 0.5 keV から  $\beta_u = 0.5$  で約 50 keV に変化することが明らかになった。 $\beta_u > 0.5$  では、指数関数的な電子・陽電子対生成によって温度がサーモスタットのように作用するため、温度は伝搬速度に対して非常に弱い依存性しか示さない。その結果、相対論的な衝撃波においては、ローレンツ因子  $\beta_u$  によらず直下流の温度は約 100-200 keV 程度の値を示すことが明らかになった。

図 2 は、衝撃波の直下流の領域における光子のスペクトルを示している。スペクトルのピークエネルギーは上述の温度を反映して  $E_p \sim 3kT$  の値となる。そのため、相対論的な衝撃波( $\beta_u > 0.5$ )では、伝搬速度によらず、数 100keV 程度の値を示す。また、全て場合において、スペクトルは熱的なスペクトルから優位なズレを示すことが明らかになった。ピーク以下のスペクトル部分はプランク分布よりもはるかにソフトである。これは、

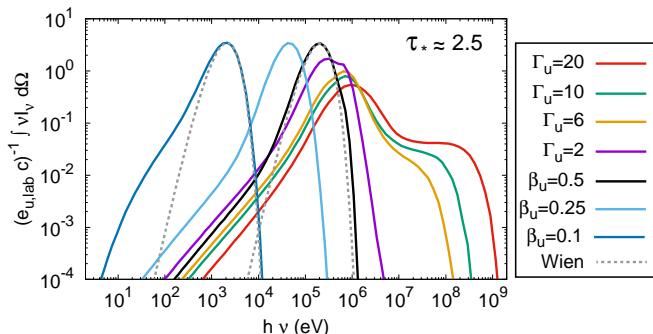


図 2: ブレイクアウト前の衝撃波直下流領域の光子のスペクトル

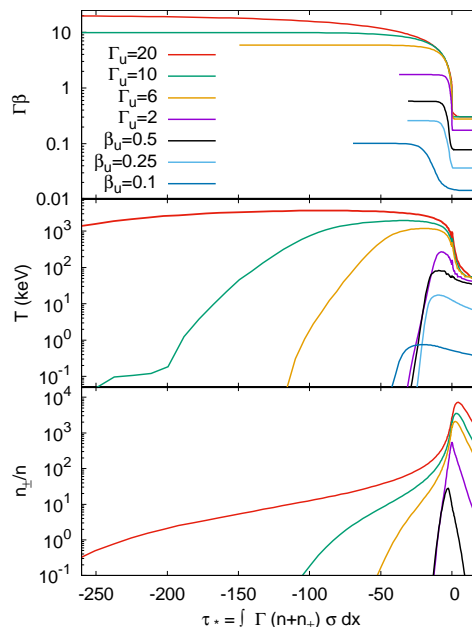


図 1: ブレイクアウト前の輻射媒介衝撃波の構造

制動放射によって継続的に生成されるソフトな光子により形成される。ピーク以上のスペクトルは、準相対論的な衝撃波( $\beta_u < 0.5$ )の場合、指数関数的なカットオフと適合するが、相対論的な衝撃波ではローレンツ因子が大きくなるにつれてカットオフからの超過が顕著になり、 $\sim \beta_u^2 m_e c^2$  まで伸びる(ここで、 $m_e$  は電子の静止質量、 $c$  は光速)。この冪型で伸びた高エネルギー成分は、衝撃波の減速領域で起こるバルクコンプトン効果によって形成されている。

##### (2) 星風からの準相対論的な衝撃波ブレイクアウトに伴う輻射媒介衝撃波

次に、衝撃波上流の光学的厚みが減少し、一部の光子が上流からエスケープする輻射媒介衝撃波の計算に取り組んだ。本研究では、大質量星を取り囲む星風のような、徐々に密度が減少する領域で発生する衝撃波ブレイクアウトを想定している。このような条件下では、プラズマが衝撃波を横断する時間と上流密度の変化の時間スケールが同程度になるため、衝撃波ブレイクアウト

時の輻射媒介衝撃波の進化は準定常的に進行すると近似できる。その結果、定常衝撃波を計算する本計算コードが適用可能となる。

エスケープを実装した計算は、最初、準相対論的な伝搬速度を持つ衝撃波 ( $\beta_u = 0.1 - 0.5$ ) に適用された。図3は、伝搬速度が  $\beta_u = 0.25$  の場合の、衝撃波の上流からエスケープする光子のスペクトルを示している。各線は、衝撃波で散逸されるエネルギーがエスケープする光子によって運ばれる割合  $f_{\text{esc}}$  の特定の値に基づいて計算され、徐々に進行する衝撃ブレイクアウト中に放出される瞬間的なスペクトルを表す。小さい  $f_{\text{esc}}$  より早期の放射に対応している。

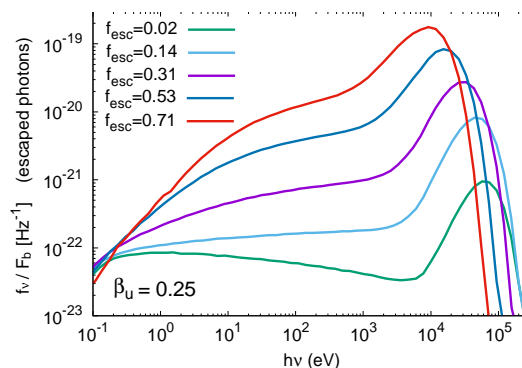


図3：ブレイクアウト中に解放される光子のスペクトル ( $\beta_u = 0.25$ )

研究(1)で探求した光子のエスケープがない場合と同様に、スペクトルの  $E_p$  は衝撃波直下流の温度を反映する。 $\beta_u < 0.5$  の伝搬速度を持つ衝撃波においては、 $f_{\text{esc}}$  の増加に伴い光度が増加するとともに、 $E_p$  がより低いエネルギーへシフトする傾向を示す。これは  $f_{\text{esc}}$  の増加によって下流温度の低下することに起因している。 $\beta_u = 0.25$  の衝撃波の場合、 $E_p$  はハードな X 線のエネルギー帯域 ( $\sim 10\text{keV}$ ) で進化する。先行研究 (Ioka et al. 2019) で議論された通り、ハードからソフトへの進化過程での放射の重ね合わせが、衝撃波ブレイクアウト候補 XRT080109 で観測された非熱スペクトルに寄与する可能性があるが明らかになった。また本研究からは、不定性は大きいものの、eROSITA によって年に 1 回程度このような星風領域で発生する衝撃波ブレイクアウトが観測される可能性が示唆された。

スペクトルの形状に関しても、研究(1)と同様な結果となっている。 $E_p$  以下のスペクトルはプランク分布よりもはるかにソフトであり、これは制動放射のスペクトルを反映している。この結果は、従来の熱的なスペクトルを想定した予測と比較して、衝撃波ブレイクアウトの低エネルギー側の放射が大幅に明るくなることを示唆している。

### (3) 星風からの相対論的衝撃波ブレイクアウトに伴う輻射媒介衝撃波

研究(2)に引き続き、相対論的な伝搬速度 ( $\beta_u > 0.5$ ) を持つ衝撃波の計算にも同様の状況設定のもとで取り組んだ。このような衝撃波では、準相対論的な伝搬速度 ( $\beta_u < 0.5$ ) の場合とは異なり、 $E_p$  がブレイクアウトの進行とともに減少するという傾向は見られない。 $E_p$  は  $f_{\text{esc}}$  の値に関わらず、数 100keV 程度に保たれることが明らかになった。これは、研究(1)にて前述したように、生成された電子・陽電子がサーモスタットのような役割を果たし、衝撃波下流の温度を 100-200keV 程度に保つことに起因している。図4は  $\beta_u = 10$  の伝搬速度をもつ衝撃波において、上流からエスケープする光子のスペクトルを示している。図から分かるように、 $E_p$  は  $f_{\text{esc}}$  の値によらず約 600keV で、ほぼ一定の値を示している。

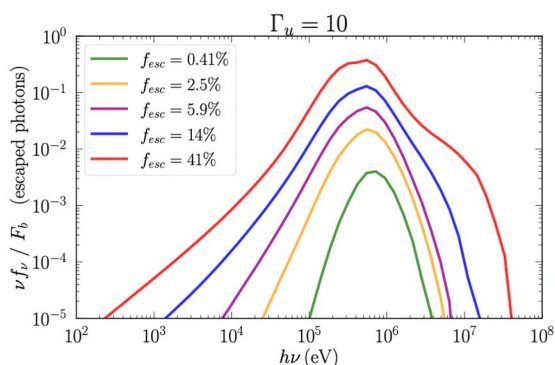


図4：ブレイクアウト中に解放される光子のスペクトル ( $\beta_u = 10$ )

準相対論的な衝撃波においてもみられた  $E_p$  以下のソフトな成分は、相対論的衝撃波に関しても確認された。したがって、このソフトな成分は衝撃波の速度によらず、衝撃波ブレイクアウトの顕著な特徴として現れることが明らかになった。

$E_p$  より上のエネルギー帯域では、熱的なスペクトルが示すような指数的なカットオフでは再現できず、優位な超過がみられた。この高エネルギーの超過成分は  $\beta_u$  が大きく、特に  $f_{\text{esc}}$  が高い場合に顕著となる。これは研究(1)においてみられたバルクコンプトン効果によって発生した成分ではなく (バルクコンプトンによる超過成分は存在しているが、そのような光子は衝撃波の下流方向に伝搬するため、エスケープされる光子としては観測されない)、相対論的輻射媒介衝撃波の特徴であるサブショックの影響で生成されている。サブショックはプラズマ間の相互作用によって散逸を起こす領域で、その直下流領域は局所的に高温となり、高温の電子・陽電子が逆コンプトン散乱を起こしてこの高エネルギーの超過成分を形成する。 $f_{\text{esc}}$  の増加とともにその効果が顕著に現れる理由は、サブショック領域で散逸されるエネルギーが増大するためである。

まとめると、光子のエスケープの効果を考慮した相対論的輻射媒介衝撃波では  $E_p$  が安定した値を示す一方で、 $f_{\text{esc}}$  の増加に伴い熱的スペクトルからのズレがより顕著になることが明らかになった。これは、相対論的衝撃波において、ブレイクアウトが進行するにつれて、スペクトルが  $E_p$  の低エネルギー側および高エネルギー側の双方で広がることを示唆している。ガンマ線で観測される突発現象において、これらの特徴を捉えることで、その起源が相対論的衝撃波ブレイクアウトであるかを検証できると期待される。

## 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 6件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ito Hirotaka, Matsumoto Jin, Nagataki Shigehiro, Warren Donald C., Barkov Maxim V., Yonetoku Daisuke	4. 巻 961
2. 論文標題 Numerical Simulation of Photospheric Emission in Long Gamma-Ray Bursts: Prompt Correlations, Spectral Shapes, and Polarizations	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 243 ~ 243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ace775	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 Ito Hirotaka, Matsumoto Jin, Nagataki Shigehiro, Warren Donald C., Barkov Maxim V., Yonetoku Daisuke	4. 巻 961
2. 論文標題 Numerical Simulation of Photospheric Emission in Long Gamma-Ray Bursts: Prompt Correlations, Spectral Shapes, and Polarizations	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 243 ~ 243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ace775	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 Parsotan Tyler, Ito Hirotaka	4. 巻 8
2. 論文標題 GRB Prompt Emission: Observed Correlations and Their Interpretations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 310 ~ 310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/universe8060310	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, Just Oliver, Takei Yuki, Nagataki Shigehiro	4. 巻 918
2. 論文標題 A Global Numerical Model of the Prompt Emission in Short Gamma-ray Bursts	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 59 ~ 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac0cf9	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 Warren Donald C., Dainotti Maria, Barkov Maxim V., Ahlgren Bjorn, Ito Hirotaka, Nagataki Shigehiro	4. 巻 924
2. 論文標題 A Semianalytic Afterglow with Thermal Electrons and Synchrotron Self-Compton Emission	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 40 ~ 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac2f43	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, Nakar Ehud	4. 巻 499
2. 論文標題 Monte Carlo simulations of fast Newtonian and mildly relativistic shock breakout from a stellar wind	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4961 ~ 4971
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa3125	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, 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

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 伊藤裕貴、Amir Levinson
2. 発表標題 Radiation Mediated Shocks
3. 学会等名 TCAN22 on binary neutron stars workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022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 IRCC-AFP meeting 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 Numerical Simulations of Photospheric Emission in GRBs
3. 学会等名 The Sixteenth Marcel Grossmann Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 The photospheric origin of Ep-Lp and Ep-Eiso correlations in GRBs
3. 学会等名 The Sixteenth Marcel Grossmann Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 Relativistic radiation mediated shocks in photon starved regime
3. 学会等名 日本天文学会2021秋季年会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 Monte Carlo simulations of fast Newtonian and mildly relativistic shock breakout from a stellar wind
3. 学会等名 日本天文学会2022春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 相对論的輻射媒介衝撃波の第一原理計算
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤裕貴
2. 発表標題 相对論的輻射媒介衝撃波の第一原理計算
3. 学会等名 第33回理論懇シンポジウム
4. 発表年 2020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

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 Israel/Japan Transient Theory Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
イスラエル	Tel Aviv University			
米国	University of Maryland			
ドイツ	重イオン研究所			
ロシア連邦	Russian Academy of Sciences			