

令和 2 年 6 月 6 日現在

機関番号：82401

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2019

課題番号：16KK0109

研究課題名（和文）微視的な散逸過程を考慮した輻射輸送計算から探るガンマ線バーストの放射機構（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Study of Gamma-ray Burst Emission Mechanism Based on Radiation Transfer Calculation with Microscopic Dissipation Process(Fostering Joint International Research)

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） 4,600,000円

渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究は、相対論的なアウトフローに伴う微視的散逸過程を考慮した輻射輸送計算を行うことによって、ガンマ線バーストの放射過程を探ることを目的としている。主に着目したのは、光子とプラズマの相互作用が散逸過程を担っている相対論的輻射媒介衝撃波の物理、およびそれに伴う放射である。主な研究成果は、独自に開発した数値計算コードを用いて、多様な状況における相対論的輻射媒介衝撃波の定常解を構築したことである。その結果、通常のガンマ線バーストや低光度ガンマ線バーストの放射に対する有用な示唆を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

相対論的輻射媒介衝撃波は、ガンマ線バーストのような相対論的な爆発現象において重要な役割を果たすと考えられている。しかしながら、計算が困難であるため、その物理の詳細は長らく明らかにされていなかった。本研究では、独自の手法を採用した数値コードを開発することによって、その長年の課題を解き明かすことに成功している。

研究成果の概要（英文）：The aim of this research is to investigate the emission of gamma-ray bursts by performing a radiation transfer calculation which takes into account the effects of dissipation processes that play a role in relativistic outflows. In particular, we focus on the relativistic radiation mediated shocks in which the interaction between photon and plasma governs the dissipation. The main achievement is that we succeed to obtain a steady state solution of relativistic radiation mediated shocks in various conditions. As a result, we find important implications to the emission processes in normal and low-luminosity 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 衝撃波 輻射輸送

1. 研究開始当初の背景

輻射媒介衝撃波は超新星やガンマ線バーストを含めた様々な高エネルギー天体現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。衝撃波の伝播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、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、伝播速度が光の速度に近づいた場合(相対論的輻射媒介衝撃波)は、輻射輸送を解く際に近似的な手法が適用できなくなり、正確な計算を実行するのは大変困難となる。そのため、相対論的輻射媒介衝撃波の精密計算を行った研究は、一部限定的な状況設定のものを除き行われてきていない。相対論的輻射媒介衝撃波は、通常のガンマ線バーストの放射に多大な影響を与えていることが示唆されているため、その研究はこれらの天体現象の物理を明らかにするためにも重要となる。

2. 研究の目的

本研究では多様な状況における相対論的輻射媒介衝撃波の散逸過程を明らかにし、その物理がガンマ線バーストの放射に与える影響を精査することを目的としている。具体的には、衝撃波の構造およびその内部における光子のエネルギー分布を第一原理から計算し、衝撃波から解放される際の放射スペクトルを評価する。特に、通常のガンマ線バーストおよび、低光度ガンマ線バーストの2種族に適用できる計算に取り組む。

3. 研究の方法

本研究では、独自に開発した数値計算コードを用いて、相対論的輻射媒介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エネルギー分布を記述する定常解を構築する。そして、多様な状況設定における計算を実行することによって、ガンマ線バーストの放射への影響を精査する。具体的な計算手法は以下である。

最初に、衝撃波の上流から下流に至るまでのプラズマ流の構造(密度 n 、温度 T 、速度 v)を、粒子数保存を満たすように、衝撃波静止系にて人為的に仮定する。次に、(i)仮定したプラズマ流中の輻射輸送を、モンテカルロ法を用いて計算し、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)そこで得られた定常状態(光子・プラズマの全エネルギー運動量流速が一定)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更新する。後はこの(i),(ii)の行程を、ズレが小さくなり定常解に収束するまで反復して行く。

4. 研究成果

(1)通常のガンマ線バーストに関して

通常のガンマ線バーストにおいては、相対論的ジェット内部に発生した衝撃波が相対論的輻射媒介衝撃波であることが示唆されている。そこで、本研究ではジェットの内部で実現されているような高温のプラズマにおける衝撃波の計算に取り組んだ。図1はその計算の一例である。本計算からは衝撃波から、光子が解放される割合が大きくなると衝撃波にサブショックと呼ばれる、プラズマ間の相互作用による衝撃波が発生することが明らかになった。また、それに起因し、局所的にプラズマの温度が高温となり、電子・陽電子プラズマがサブショック近辺にて発生することが分かった。

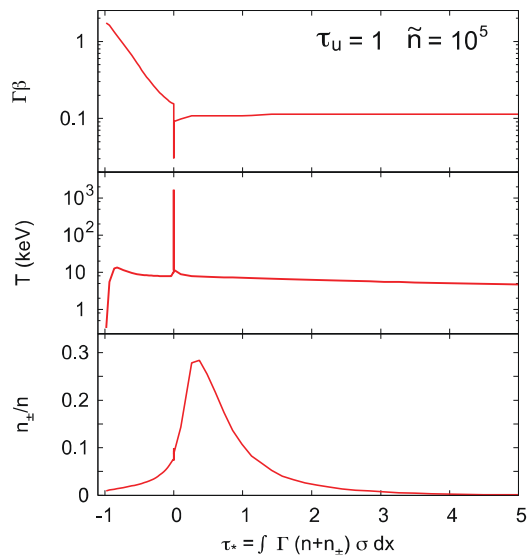


図1：相対論的輻射媒介衝撃波の数値計算の一例。上から四元速度、温度、電子・陽電子プラズマ密度の空間分布を示している。

図2が、衝撃波から解放された光子のスペクトルとなっている。図からも分かるように、解放された光子は非熱的スペクトルを示す。本結果からは、相対論的輻射媒介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っている可能性が示唆される。また、本計算からは、衝撃波から解放される光子のスペクトルは、解放される前の衝撃波内部に捕縛されていた時のものから大きく変化しないことも明らかになった。

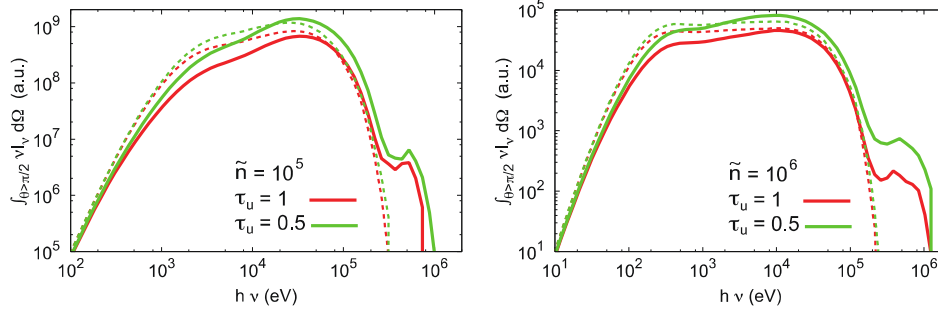


図 2：相対論的輻射媒介衝撃波から解放された光子のスペクトルの例。赤と青の実線は解放される光子のエネルギーの総量の違いを表している。点線は光子が衝撃波から光子が解放されなかった場合の衝撃波内部における光子スペクトルとなっている。

(2)低光度ガンマ線バーストに関して
 低光度ガンマ線バーストの起源を説明する有力な理論モデルには、相対論的衝撃波が親星を突き破る際に発生するとするものがある。その際の衝撃波は、低温のプラズマに発生する相対論的輻射媒介衝撃波となっている。そこで本研究ではそのような状況における相対論的輻射媒介衝撃波の計算に取り組んだ。図 3 が計算結果のまとめとなっている。明らかになった特徴の一つは、衝撃波の速度が光速の 50%以下の範囲では衝撃波下流の温度は速度と共に急激に上昇する一方で、それ以上の速度においては $kT \sim 100\text{-}200$ keV 程度に落ち着くという点である。これは、速度が相対論的になった場合は大量の電子・陽電子が発生し、それが温度の上昇を強く抑制するためである。また相対論的な衝撃波では常にサブショックが発生することが明らかになった。

図 4 には衝撃波の下流における光子のスペクトルを示している。上記の温度の振る舞いを反映して、速度が光速 50%以下の場合はピークエネルギーが衝撃波の速度に強く依存する ($E_p \propto \beta^3$) 一方で、それ以上の速度においては数 100keV 程度となることが確認されている。また、全ての速度 (光速の 10%以上) の衝撃波に共通して、そのスペクトルは熱的なもの (Wien 分布: 図の点線) に比べて大幅に広がったスペクトルを示すことが明らかになった。ピークエネルギーより低いエネルギーに着目すると平坦なスペクトルとなっており ($f_{\nu} \propto \nu^0$) これは低光度ガンマ線バースト GRB060218 の最新の紫外線・可視光帯域のスペクトル解析と整合する結果となっている。相対論的な衝撃波に関しては、ピークより高いエネルギーにおいて非熱的な成分が現れることが明らかになっている。この高エネルギー放射のほとんどは観測者の方向には放出されないと考えられるが、一部その兆候は観測でも確認できると期待される。

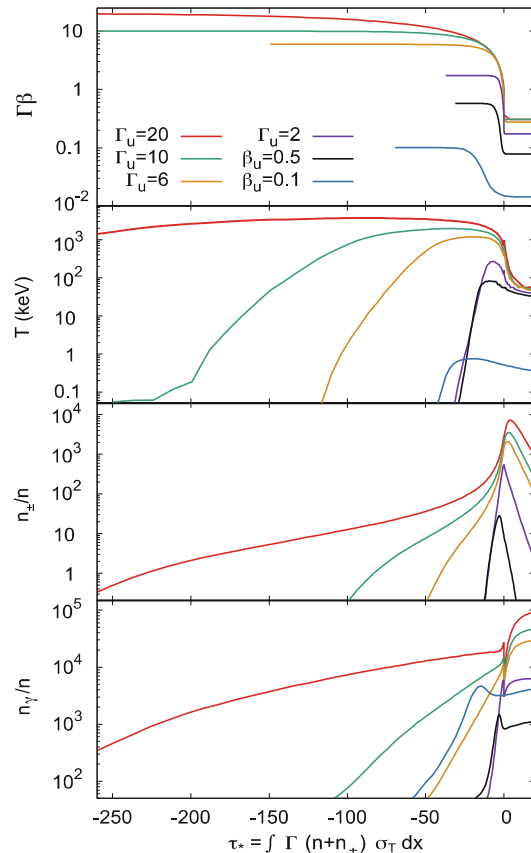


図 3：低温のプラズマ中の相対論的輻射媒介衝撃波の構造。上から四元速度、温度、電子・陽電子プラズマ密度、光子数密度の空間分布を示している。線の色の違いが衝撃波の速度の違いを表している。

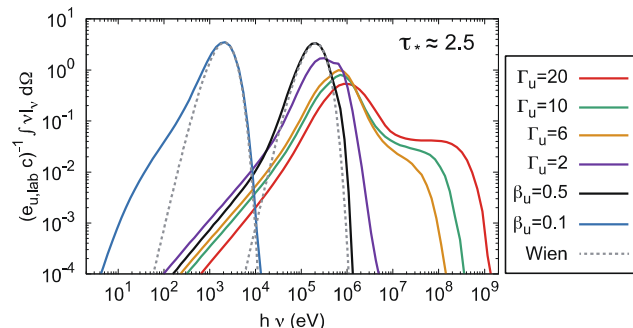


図 4：低温のプラズマ中の相対論的輻射媒介衝撃波の下流における光子スペクトル。線の色の違いが衝撃波の速度の違いを表している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

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） http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-09281-z	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, 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8件（うち招待講演 4件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Hirotaka Ito
2. 発表標題 Relativistic Radiation Mediated Shocks
3. 学会等名 Jet and Shock Breakouts in Cosmic Transients（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

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 HirotaKa Ito
2. 発表標題 Prompt Emission of Gamma-ray Bursts
3. 学会等名 10th DTA symposium "Stellar deaths and their diversity" (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 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 HirotaKa Ito
2. 発表標題 Relativistic Radiation Mediated Shocks
3. 学会等名 RIKEN-RESCEU joint seminar (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 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/
--

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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	レヴィンソン アミール (Levinson Amir)	テルアビブ大学・Raymond & Beverly Sackler Faculty of Exact Sciences・教授	