

課題名(タイトル):

相対論的輻射媒介衝撃波のモンテカルロシミュレーション

利用者氏名: ○伊藤 裕貴(1)

理研における所属研究室名:

(1)長瀧天体ビッグバン研究室

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

超新星やガンマ線バーストといった高エネルギー天体現象は、星が爆発を起こすことによって引き起こされている。爆発によって生じた衝撃波は、星の内部を伝播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、衝撃波の散逸領域に捕縛していた大量の光子を突発的に解放する。このショックブレイクアウトと呼ばれる現象が、これらの爆発現象から放たれる最初期の電磁波放射の起源となっている。ショックブレイクアウトにおける衝撃波は、光子とプラズマ粒子間の相互作用によって形成される輻射媒介衝撃波になっている。そのため、ショックブレイクアウトの性質を明らかにするためには、光子・プラズマ粒子間の相互作用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。輻射媒介衝撃波の構造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のだが、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)に関しては拡散近似が適用できるため、その計算は非常に容易になる。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:図1左を参照)は拡散近似が適用できなくなるため、その散逸過程を明らかにするためには、詳細な輻射輸送計算が必要となる。さらに相対論的衝撃波では電子・陽電子対生成や、電子散乱におけるクライン-仁科効果も無視できなくなり、計算がより一層複雑になる。これらの数値的な困難により、相対論的輻射媒介衝撃波の第一原理計算に取り組んだ先行研究は、ほとんどないというのが現状であった。特に、ショックブレイクアウトに適用できるような、衝撃波の上流領域においてプラズマの温度が低い状況における計算は Budnik et al. 2010 (ApJ, 725, 63)の研究のみであった。尚、Budnik et al.

2010 では衝撃波のローレンツ因子が6以上となるような場合のみに限られているため、より低い速度の場合に関しての相対論的輻射媒介衝撃波の性質は明らかになっていない。

そこで本研究では、独自に開発した数値計算コードを用いて Budnik et al. 2010 の計算結果の検証を行うと共に、これまで明らかにされていなかった速度が光速の10%からローレンツ因子6未満の相対論的輻射媒介衝撃波の計算に取り組んだ。

2. 具体的な利用内容、計算方法

本研究で数値計算コードは、申請者が先行研究(Ito et al. 2018)にて開発したものをベースに改良したものである。改良した点は、ショックブレイクアウトにおいて本質的な役割を果たす、制動放射過程による光子生成・吸収の効果を輻射輸送計算に取り込んだ点である。本コードにて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う(図1右を参照)。

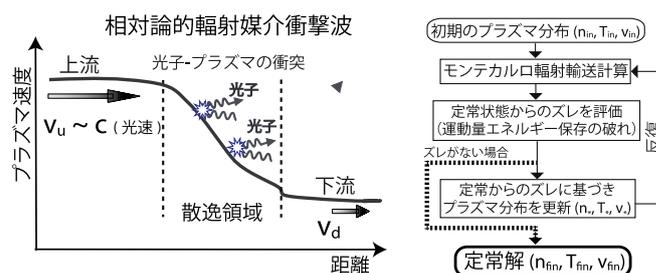


図1:相対論的輻射媒介衝撃波の衝撃波静止系でのイ

メージ図 (左) と、数値計算コードのアルゴリズムの概要 (右)。

3. 結果

本研究からは、幅広い伝搬速度における相対論的輻射媒介衝撃波の散逸構造が明らかになった。先行研究 (Budnik et al. 2010) においても検証されていたローレンツ因子6以上の超相対論的な場合は、当該研究と整合する結果を得た。図2にて示すように、完全な一致には至らないが同様な速度構造となっている。また、Budnik et al. 2010 で示されたように、本研究においても多量の電子・陽電子が生成されることによって、衝撃波下流の温度が速度に余り依存せずに 100keV 程度になることが分かった。得られたスペクトルに関しても、先行研究と同様に、非熱的なものとなりプラズマの速度方向に強くビームされた高エネルギー成分が現れることが確認できた。

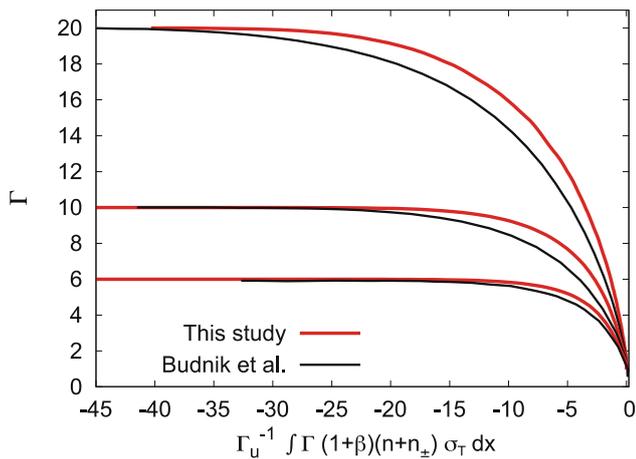


図2: 上流のローレンツ因子が6,10および20の場合の相対論的輻射媒介衝撃波の構造。先行研究(Budnik et al. 2010)が黒線に対応し、本研究の結果は赤線で示されている。

先行研究では調べられていなかった低い速度の衝撃波の計算からは、衝撃波の伝搬速度が光速の約50%以上になると電子・陽電子対生成が顕著になることが分かった。速度構造に関しては、減速がおこる長さスケールはローレンツ因子が2程度のときに最小となり、それ以下の速度では輻射輸送が拡散に近づく一方で、それ以上の速度においてはクライン-仁科の効果がより強く効くようになるために大きくなることが明らかになった。スペクトルの特徴は超相対論的な場合と同様に非熱的なものとなるが、速度方向にビームされた高エネルギー成分は速度が低くなるとともに弱くなることが示された。図3にて、ローレンツ因子が2の場合の計

算結果を示す。

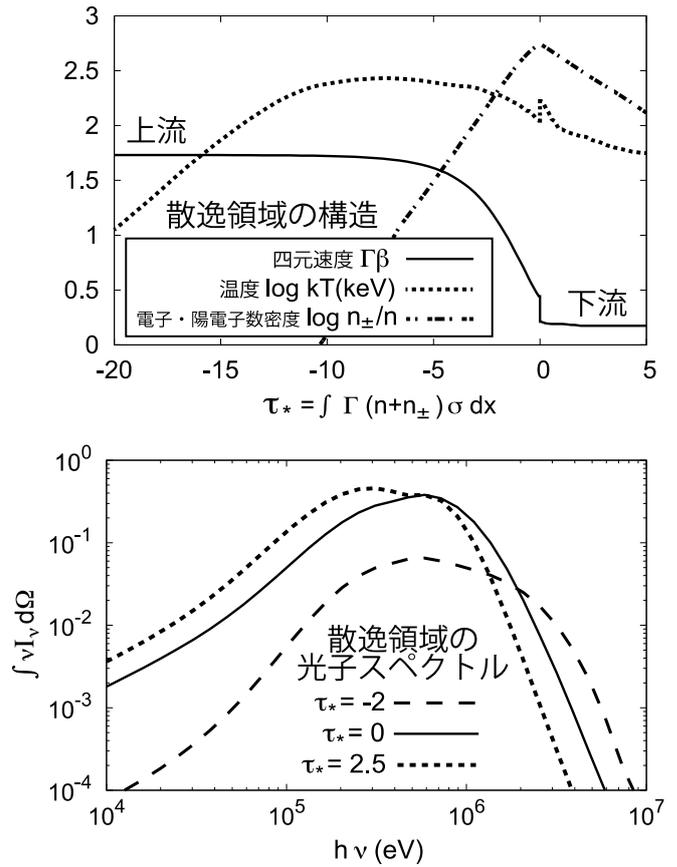


図3: 上流のローレンツ因子が2の場合の相対論的輻射媒介衝撃波の散逸構造(上)とその領域における光子のスペクトル(下)。

尚、本研究で明らかになった相対論的輻射媒介衝撃波の大きな特徴としては、散逸領域における光子の低エネルギー帯域のスペクトルが、プランクやウィーン分布といった熱的なものと比較すると圧倒的にソフト(低エネルギーの光子が比較的が多い)になっている点があげられる。この結果は、衝撃波の伝搬速度によらず共通したものである。このことから、相対論的ショックブレイクアウトに伴う放射は従来考えられていたものよりソフトになり、可視光や紫外線領域が明るくなることが示唆された。そのため、ショックブレイクアウトは捉えることが難しい現象ではあるが、従来の予想よりこれらの波長域における検出率が高くなることが期待される。

4. まとめ

本研究では相対論的なショックブレイクアウトにおいて本質的な役割を果たす相対論的輻射媒介衝撃波の第一原理計算に取り組んだ。本研究の主な成果は、光速の10% からローレンツ因子 20 に至るまでの、幅広い伝搬速度の相対論的輻射媒介衝撃波の性質を初めて系統的に明らかにし

た点である。相対論的ショックブレイクアウトに対して得られた新たな知見としては、従来の予想よりも可視光や紫外線波長域において明るくなることである。この結果から、これらの波長域における広視野の観測計画（LSST や ULTRASAT）において、相対論的ショックブレイクアウトの検出率が従来予想されていたものよりも高くなることが期待される。

#### 5. 今後の計画・展望

本研究では、衝撃波上流における光学的な厚みが十分に大きく、散逸領域に光子が完全に捕縛されている場合の相対論的輻射媒介衝撃波の計算を行なっている。厳密には、これらの計算はショックブレイクアウトが起きる直前までの衝撃波の性質を記述することはできるが、光子が散逸領域から解放（エスケープ）されるショックブレイクアウト時には直接適用することはできない。したがって、本研究の次のステップとしては、光子のエスケープがある場合の相対論的輻射媒介衝撃波の計算に取り組み、より正確に相対論的ショックブレイクアウトに伴う放射を評価することである。

2019年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

Hiroataka Ito, Jin Matsumoto, Shigehiro Nagataki, Donald C. Warren, Maxim V. Barkov, Daisuke Yoeneoku, “The photospheric origin of the Yonetoku relation in gamma-ray bursts”, Nature Communications, Vol.10, Article Number: 1504, (2019)

Hiroataka Ito, Amir Levinson, Shigehiro Nagataki, “Monte-Carlo simulations of relativistic radiation mediated shocks: II. photon starved regime”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 492, Issue 2, p1902-1913, (2020)

【口頭発表】

Hiroataka Ito, “The photospheric origin of the Yonetoku relation in gamma-ray bursts”, 招待講演, Ioffe Workshop on GRBs and other transient sources: 25 Years of Konus-Wind Experiment, 2019年9月9日, Ioffe Institute (ロシア、サンクトペテルブルク)

Hiroataka Ito, “Numerical simulation of photospheric emission in gamma-ray bursts”, 一般講演, Yamada Conference LXXI: Gamma-ray Bursts in the Gravitational Wave Era 2019, 2019年10月30日, 赤レンガ倉庫 (横浜市)

【その他(著書、プレスリリースなど)】

伊藤裕貴, 松本仁, 長瀧重博, Donald C. Warren, Maxim V. Barkov, 米徳大輔, 「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」2019年4月3日, プレスリリース(理化学研究所、国立天文台、金沢大学の共同発表)