

課題名(タイトル):

第一原理計算に基づいたショックブレイクアウトの理論研究

利用者氏名:

○伊藤 裕貴(1)

理研における所属研究室名:

(1)開拓研究本部 長瀧天体ビッグバン研究室

1. 本課題の研究の背景、目的、関係する課題との関係
超新星やガンマ線バーストは、大質量星の重力崩壊や連星中性子星の合体などの爆発現象によって引き起こされる。爆発によって発生した衝撃波が星の内部を伝播し、星の表面や星周物質に到達した際に、散逸領域内に捕縛されていた光子を解放する過程を「ショックブレイクアウト」と呼び、これらの爆発現象に伴い放出される最初期の電磁波放射となっている。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との相互作用によって形成される輻射媒介衝撃波であり、その詳細な構造を解明することは、この現象の理解に不可欠である。

輻射媒介衝撃波の散逸構造を明らかにするには、光子とプラズマ間のエネルギーおよび運動量の交換を詳細に評価する必要がある。非相対論的な衝撃波では、拡散近似による光子輸送計算が可能であるため比較的解析が容易であるが、相対論的な衝撃波ではこの近似が適用できず、より精密な輻射輸送計算が求められる。さらに、電子・陽電子対生成や、電子散乱におけるクライン-仁科効果といった効果も考慮に入れなければならない。計算はより一層複雑になる。そのため、相対論的輻射媒介衝撃波の第一原理計算に取り組んだ研究は少なく、物理的理解には未解明の部分が多い。特に、散逸領域における光子生成が無視できない場合の計算は、Budnik et al. 2010 や我々の先行研究 Ito et al. 2020a, 2020b (HOKUSAI プロジェクト番号 G19009, G20002, Q21522, Q22522, Q23522 にて実施)に限定されている。

本研究では、光子生成および電子・陽電子対生成を考慮した相対論的輻射媒介衝撃波の第一原理計算を実施し、多様なショックブレイクアウト現象の特性を解明することを目的とする。今年度は、昨年度の研究を発展させ、密度の高い星風に囲まれた星の相対論的爆発に伴う輻射媒介衝撃波の解析をさらに深化させた。

2. 具体的な利用内容、計算方法

本研究で使用する数値コードは、申請者が独自に開発したものであり、相対論的輻射媒介衝撃波の散逸過程において重要な役割を担うコンプトン散乱、電子・陽電子の生成・消滅、熱的プラズマの制動放射・吸収といった素過程を第一原理から計算するものである。これらの素過程を組み込んだ輻射輸送計算をモンテカルロ手法により解くことで、相対論的プラズマと光子の相互作用を詳細に解析し、衝撃波の散逸構造を明らかにしている。

今年度は、光学的に厚い星風に囲まれた星の爆発に伴う相対論的ショックブレイクアウトの放射を評価するため、衝撃波領域からの光子エスケープ効果を実装した計算を実施した。その過程で、昨年度の計算に存在していたバグを修正し、低エネルギーカットオフの取り扱いを改良することで計算精度を向上させた。さらに、詳細な解析を行い、先行研究(Granot et al. 2018)で開発されたモデルとの比較を実施した。

本計算において主な入力パラメータは、衝撃波静止系における上流のプラズマの速度(衝撃波の伝播速度のローレンツ因子 Γ_u)、密度(n_u)、および衝撃波からエスケープする光子のエネルギー量を決定する衝撃波の光学的厚み(τ_s)である。今年度の研究では、プラズマの密度を $n_u = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ に固定し、 $\Gamma_u = 2, 6, 10$ という3つの異なる衝撃波速度で、さまざまな τ_s の値を用いた計算を実施した。

3. 結果

図1は、数値計算で得られた衝撃波の構造と解析モデルとの比較を示している。主な発見として、ローレンツ因子が低い衝撃波($\Gamma_u = 2$)の場合、計算結果は解析モデルとよく一致することが分かった。一方で、ローレンツ因子が高い衝撃波($\Gamma_u = 6, 10$)では、エスケープする光子の割合(fesc)が

増加するにつれて、解析モデルとの乖離が大きくなることが明らかになった。さらに、図からも分かるように、 f_{esc} が大きくなると衝撃波の減速幅が解析モデルと比較して 10 倍以上狭くなることが確認された。詳細な解析の結果、これは、数値計算では解析モデルと比較して高エネルギー光子の生成量が多く、それに伴い電子・陽電子対生成がより効率的に進行するため、急激な衝撃波の減速が引き起こされることに起因することが分かった。

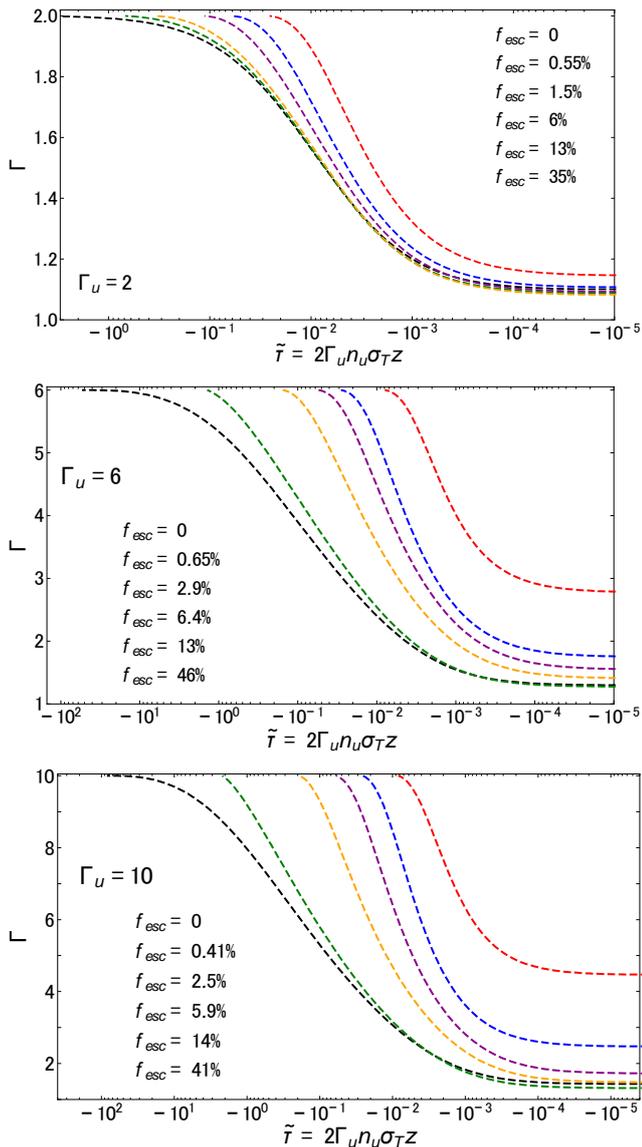


図 1: $\Gamma_u = 2$ (上), 6 (中), 10 (下) の衝撃波におけるローレンツ因子の空間分布 (実線) と、解析モデル (破線) との比較。

この結果から、相対論的ショックブレイクアウトの発生タイミングは、同じローレンツ因子を仮定した場合の従来の見積もりよりも大幅に遅れる可能性が示唆された。このことから、ショックブレイクアウトの継続時間および放出エネルギーが、従来の推定よりも長く、大きくなることが示唆される。加えて、

相対論的ショックブレイクアウトにおいては、その継続時間、放射エネルギー、スペクトルのピークエネルギーの間に closure relation が成立するとされてきたが、本研究ではこの closure relation に対して修正を加えることに成功した。

4. まとめ

本研究では、衝撃波領域からの光子エスケープ効果を実装した相対論的輻射媒介衝撃波の第一原理計算を実施した。その結果、相対論的ショックブレイクアウトの見積りに用いられてきた従来の解析モデルは、ローレンツ因子が $\Gamma_u \geq 6$ の場合に破綻することを示した。さらに、本研究の結果から、相対論的ショックブレイクアウトは従来の予測よりも遅れて発生し、放射エネルギーおよび継続時間が従来の推定よりも大きくなることが明らかになった。

5. 今後の計画・展望

今後の展望として、より多様な衝撃波のパラメータを採用し、密にパラメータ空間を探索することで、ショックブレイクアウトの観測量に関するより詳細な予測を行うことが挙げられる。さらに、プラズマのイオン組成を変更した計算や、プラズマの分布が非熱的となる場合の計算にも取り組む予定である。

2024 年度 利用研究成果リスト

【口頭発表】

Hiroataka Ito, “Monte Carlo Simulations of Relativistic Shock Breakout”, r-EMU Symposium 2024, 理化学研究所, 2024 年 6 月 6 日

【ポスター発表】

Hiroataka Ito, “First principle calculation of radiation mediated shocks”, 学術変革(A)マルチメッセンジャー天文学：第 2 回領域研究会, 源泉湯の宿 松乃位, 2024 年 10 月 18-20 日