

プロジェクト名(タイトル):

## 第一原理計算にもとづいた相対論的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 上坂スピン・アイソスピン研究室

## 1. 本プロジェクトの研究の背景、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。これらの爆発に伴う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。この「ショックブレイクアウト」と呼ばれる現象は、これらの天体から放出される最初期の電磁波放射の源である。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る。そのため、この現象の性質を解明するには、散逸過程を含む輻射媒介衝撃波の詳細を明らかにする必要がある。

輻射媒介衝撃波の構造を明らかにするためには、散逸領域での光子とプラズマのエネルギーおよび運動量交換の詳細な評価する必要が求められる。非相対論的輻射媒介衝撃波の場合、拡散近似を用いた光子輸送の計算が可能であるため比較的容易だが、相対論的輻射媒介衝撃波ではこの近似は適用できない。そのため、散逸領域の詳細な構造を明らかにするには、精密な輻射輸送計算が不可欠である。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ず、計算はより一層複雑になる。これらの数値的な困難から、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の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 で行われた研究)に限定されている。

この学術的背景を踏まえ、本研究は光子生成および電子・陽電子対生成を取り入れ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指している。今年度の研究では、

主に密度の高い星風に取り包まれた星の相対論的爆発に伴う輻射媒介衝撃波の計算に注力した。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

本研究を行う上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本質的な役割を担うコンプトン散乱、電子・陽電子の生成消滅、及び熱的プラズマの制動放射と吸収といった素過程を第一原理から計算し、その散逸構造を明らかにするものとなっている。より具体的には、上記の素過程を取り入れた輻射輸送計算をモンテカルロ手法によって解くことにより、相対論的なプラズマと光子の間の相互作用を明らかにし、衝撃波の散逸構造を算出している。特に今年度は、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に、衝撃波領域から光子がエスケープする効果を実装した計算に取り組んだ。

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  $\Gamma_u$ )、密度( $n_u$ )、そして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( $\tau_s$ )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、様々な  $\tau_s$  の値を採用した計算を実施した。

## 3. 結果

図1に示されるのは、計算によって求めたショックブレイクアウトに伴う放射スペクトルである。各線は衝撃波からエスケープする光子のエネルギー量の違いを表している。スペクトルのピークエネルギーはエスケープする光子の量に強く依存しないことが確認され、おおよそ数 100keV となっている。これは相対論的な衝撃波の特徴である大量の電子・陽電子対の生成が衝撃波下流の温度を約 100keV に安定させる効果を反映している。スペクトルの形状に関しては、従来

の単純な理論予想とは異なり、ウィーン分布のような熱的なスペクトルからは優位なズレがあることが明らかになった。特にピークエネルギー以下では、 $f_\nu \propto \nu^0$  となるようなソフトなスペクトルが低エネルギー域に広がっていることが示された。

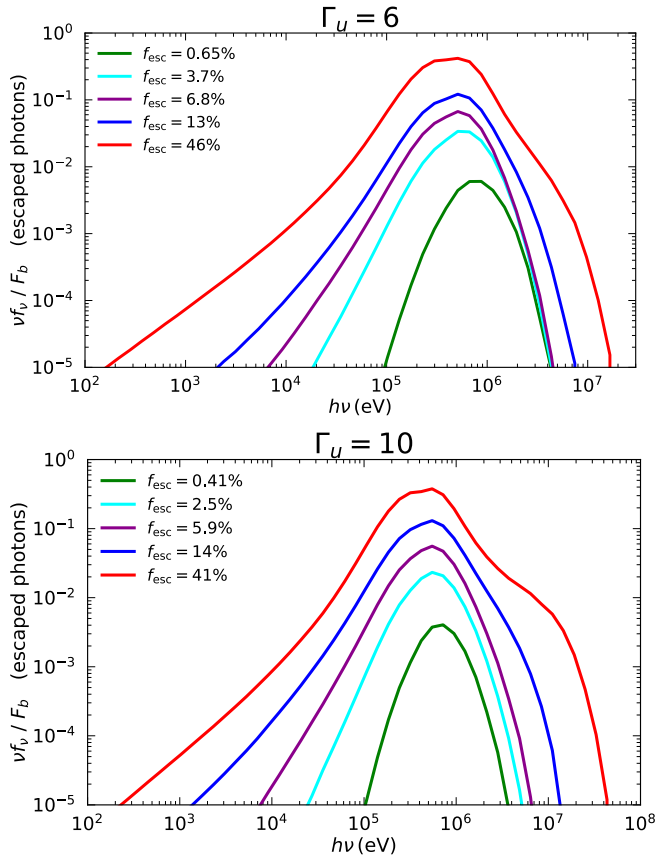


図1: 衝撃波の伝搬速度のローレンツ因子が  $\Gamma_u = 6$  (上)、 $10$  (下) の場合の、ショックブレイクアウトに伴う放射のスペクトル

#### 4. まとめ

本研究では、衝撃波領域から光子がエスケープする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に取り組んだ。これにより、相対論的ショックブレイクアウトの放射スペクトルを世界で初めて評価し、その結果、熱的なスペクトルとは大きく異なる特徴を持つスペクトルを示すことが確認された。

#### 5. 今後の計画・展望

今年度は、上流プラズマの組成を陽子・電子とし、またプラズマのエネルギー分布は全領域において熱的であると仮定した計算を行った。今後は、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った場合の計算にも取り組んでいく予定である。

2023 年度 利用研究成果リスト

**【口頭発表】**

Hiroataka Ito, “Physics of Radiation Mediated Shocks”, Israel/Japan Transient Theory Workshop, 東京大学, 日本, 2023 年  
9 月 29 日