

課題名(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)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、衝撃波の内部(散逸領域)に捕縛していた大量の光子を解放する。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(通常の衝撃波はプラズマ粒子同士の相互作用が起源となっている)。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(Zel'dovich & Raizer 1967 など)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・プラズマ間の相互作用に伴うエネルギー、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。また散逸領域において光子は熱平衡状態にあるため、そのエネルギー分布に関して輻射輸送を解くことなく、局所的な温度のプランク分布で記述される。そのため、非相対論的輻射媒介衝撃波の物理は70年代には確立していた。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)は拡散近似が適用できなくなり、光子のエネルギー分布も衝撃波速度が光の速度の約10%を超えたあたりで熱平衡から外れてしまう。そのため、相対論的輻射媒介衝撃波の構造、およびその散逸領域における光子

の分布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ナー-仁科効果といった量子電磁力学的な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、数例にとどまっているのが現状である(Budnik et al.2010; Beloborodov 2017; Lundman et al. 2018; Ito et al 2018;2020)。特に衝撃波の散逸領域から光子が解放される効果を取り入れた計算は行われていないため、相対論的ショックブレイクアウトに直接適用できる相対論的輻射媒介衝撃波の計算は、皆無である。

上述の学術的背景をふまえて、本研究では相対論的ショックブレイクアウトの性質を、光子が衝撃波から解放される効果は無矛盾に取り入れた相対論的輻射媒介衝撃波の第一原理計算を行うことによって明らかにすることを目的としている。

### 2. 具体的な利用内容、計算方法

本研究では相対論的輻射媒介衝撃波の数値計算に基づき、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。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、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。

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  $v_0$ )、密度( $n_0$ )、及び考慮している上流領域のサイズ(光学的な厚み)である。これらのパラメータを変えた計算を多数行うこと

により、衝撃波から解放される放射の性質を明らかにしている。

### 3. 結果

図1は衝撃波の速度を  $v_u=0.1c, 0.5c$  とした場合の衝撃波の速度構造となっている ( $c$  は光速)。図から分かるように、光速の 10%程度の場合には拡散近似を適用した解析モデルでよく近似できる一方、光速の 50%程度になると、拡散近似は適用できないことが明らかになった。

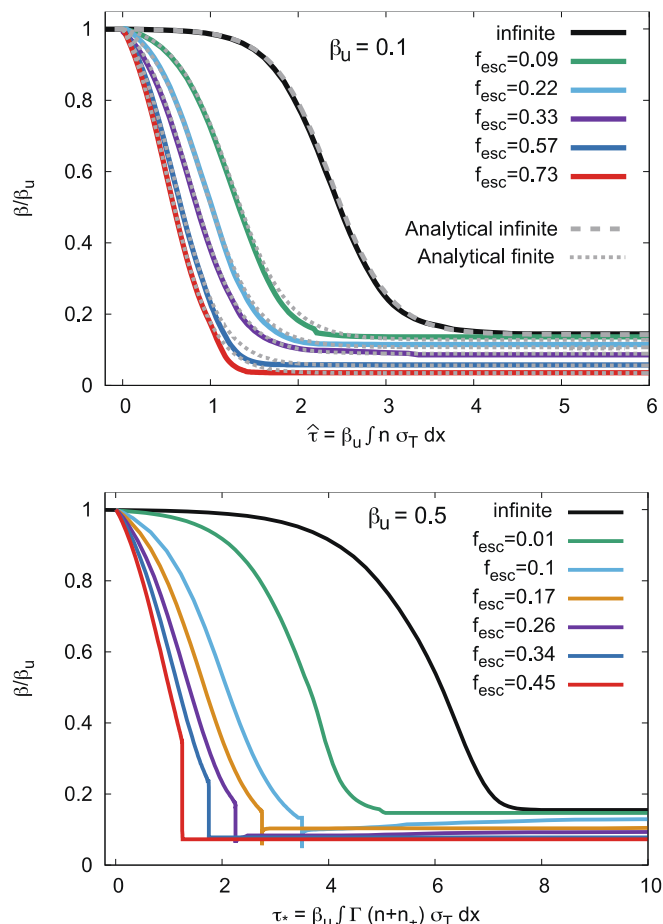


図1: 相対論的輻射媒介衝撃波の衝撃波静止系での速度構造。線の違いは、衝撃波から解放される光子のエネルギーと衝撃波に流流するエネルギーの比の違いに対応している。

図2が本計算から得られた、衝撃波から開放される光子のエネルギースペクトルとなっている。大きな特徴としては、プランク分布からは大きく離れた、幅広いスペクトルとなっている点である。特にピークエネルギーより低いエネルギーにおいては、プランク分布を大きく超過したフラックスを示すことが明らかになった。

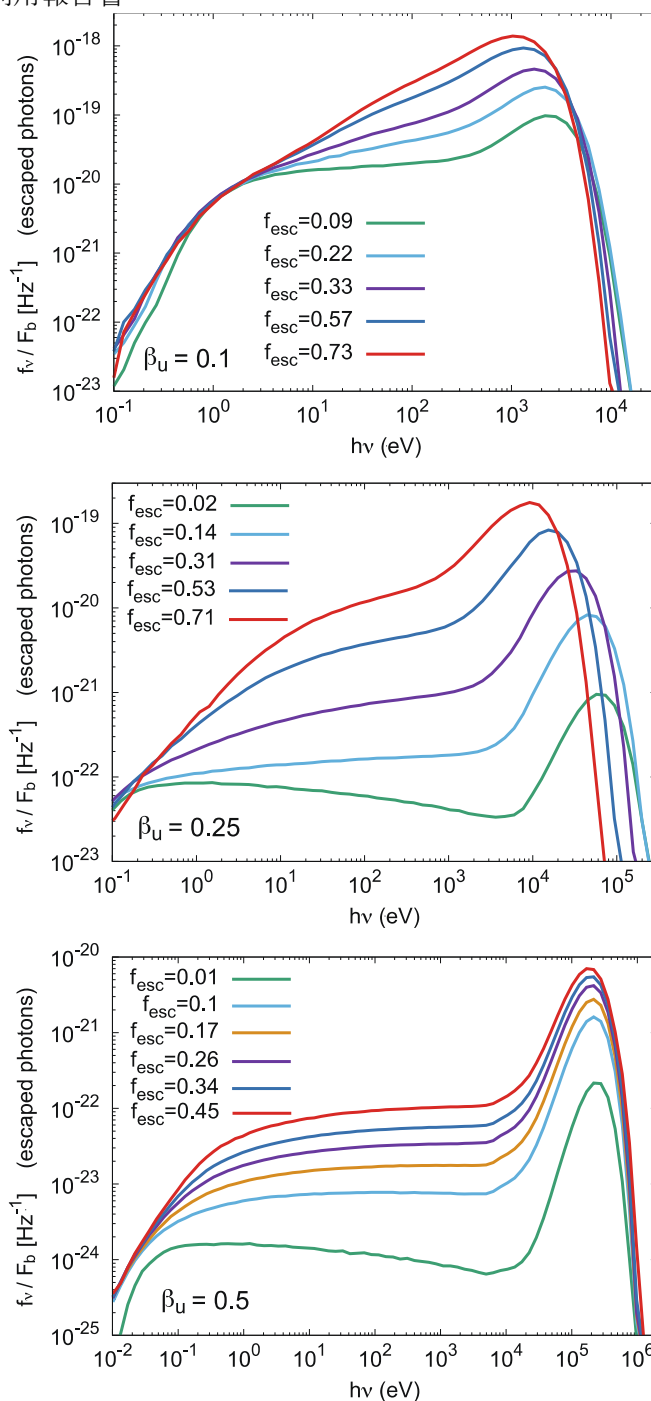


図2: 衝撃波から解放される光子のエネルギースペクトル (上図: $v_u=0.1c$ , 中図: $v_u=0.25c$ , 下図: $v_u=0.5c$ )。線の違いは、衝撃波から解放される光子のエネルギーと衝撃波に流流するエネルギーの比の違いに対応している。

本研究では、本計算に基づき、 $v_u = 0.1 - 0.5c$  の範囲の速度を持った、超新星爆発に伴うショックブレイクアウトの光度曲線のモデル化も行なっている。その結果から、このようなショックブレイクアウトは eRosita の衛星によって、年間約1回程度の観測が期待できることを明らかにした。

### 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50%に至るまでの伝搬速度を持った衝撃波のショックブレイクアウトの放射の性質を明らかにした点である。新たな知見としては、放射スペクトルの低エネルギースペクトルが、プランク分布などとは大きくずれ、明るくなることが確認された。

#### 5. 今後の計画・展望

本研究では、光速の10%から50%に至るまでの伝搬速度を持った衝撃波に計算に取り組んだ。今後は、より速い速度を持った相対論的衝撃波の計算に取り組むことによって、より幅広い天体现象に適用できるショックブレイクアウトの研究を推進する予定である。

2020 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

Hiroataka Ito, Amir Levinson, Ehud Nakar, “Monte-Carlo simulations of fast Newtonian and mildly relativistic shock breakout from a stellar wind”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 499, Issue 4, p4961-4971, (2020)

【口頭発表】

伊藤裕貴, “相対論的輻射媒介衝撃波の第一原理計算”, 一般講演, 高エネルギー宇宙物理学研究会 2020, 2020 年 12 月 17 日, オンライン開催

【ポスター発表】

伊藤裕貴, “相対論的輻射媒介衝撃波の第一原理計算”, 一般講演, 第 33 回理論懇シンポジウム, 2020 年 12 月 23 日, オンライン開催