

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 長瀧天体ビッグバン研究室

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、大質量の星の重力崩壊や連星中性子星の合体に起因する爆発現象である。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。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、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も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ン-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研究は少なく、まだその物理に未解明の部分は多い。特に散逸領域において光子の生成が無視できない場合の計算を行なった研究は、Budnik et al. 2010、我々の先行研究である Ito et. 2020a、2020b(HOKUSAI を利用した研究:プロジェクト番号 G19009,G20002,Q21522)のみに限られている。

上述の学術的背景をふまえて、本研究では光子生成と電子・陽電子対生成の効果を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、多様なショックブレイクアウト現象の性質を明らかにすることを目的としている。本年度は昨年度に引き続き連星中性子星合体に伴う相対論的輻射媒介衝撃波の性質を探ることに取り組んだ。具体的には、連星中性子星合体時に形成されると考えられている r 過程元素に多量に含んだプラズマ中の衝撃波の計算を行なった。主に着目した点は、相対論的輻射媒介衝撃波の内部において、r 過程元素の光分解反応がどの程度発生するかについてである。

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。本研究の特徴は昨年度の研究(プロジェクト番号 Q21522)と同様に、制動放射・吸収過程に r 過程元素の影響を取り込んだ点である。

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: β_u もしくはローレンツ因子 Γ_u)、密度(n_u)、r 過程元素の質量分率(f_r)、平均質量数($\langle A \rangle$)である。本年度は v_u 以外のパラメータは、 $n_u = 10^{15}$, $f_r = 1$, $\langle A \rangle = 208$ と固定した計算を行なった。

3. 結果

図1が本研究の結果のまとめとなっている。図からも分かるように、衝撃波の速度が増加するほど r 過程元素が分解される割合が増加することが明らかになった。その主な要因は、速度が増加することによって、バルクコンプトンの効果が強まり、衝撃波の内部により高エネルギーの光子が発生するからである。しかしながら、光分解される割合はローレンツ因子 $\Gamma_u=10$ の高速な衝撃波の場合であっても1%に満たないことが、本計算により明らかになった。

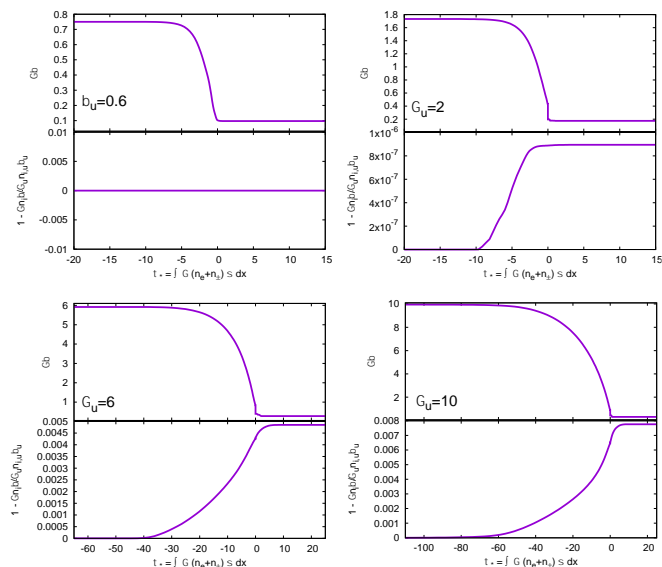


図1: 相対論的輻射媒介衝撃波の衝撃波静止系での四元速度(上)及び光分解される r 過程元素の割合(下)の空間分布。

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。昨年度に引き続き本年度は r 過程元素が大量に含まれているプラズマにおいて発生する衝撃波の性質の探究を行った。主な成果は、相対論的輻射媒介衝撃波の内部で発生する r 過程元素の光分解反応の定量的な評価に成功した点である。一連の計算からは、衝撃波の速度が増加するほど、光分解される r 過程元素の割合が増加するが、 $\Gamma_u=10$ の高速な衝撃波の場合であっても1%未満にとどまることが明らかになった。本研究結果は、連星

中性子星合体時に発生する衝撃波においては、r 過程の光分解反応はほとんど起こらないことが示唆された。

5. 今後の計画・展望

本研究では、衝撃波領域において光子が完全に捕縛されている場合の計算に取り組んだ。今後は、光子が衝撃波領域からエスケープされる効果を実装した計算に取り組み、ショックブレイクアウトの放射の性質を探究する予定である。

2022 年度 利用研究成果リスト

【口頭発表】

Hiroataka Ito, “Physics of Relativistic Radiation Mediated Shocks”, IRCC-AFP Meeting 2022, 国立天文台, 日本, 2022 年 10 月 25 日

Hiroataka Ito, Amir Levinson, “Radiation Mediated Shocks”, TCAN on BNS and BH/NS Workshop 2022, オンライン国際会議, 2022 年 6 月 24 日