

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)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。本年度は主に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。解析的な見積もり(Levinson & Nakar 2020)からは、 r 過程元素が大量に存在している場合は衝撃波内での光子生成率が高くなり、 r 過程がない場合と比べて温度が低くなることが示唆されている。そこで本研究では、第一原理計算によって高精度にその様相を調べることに取り組んだ。

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。これまでの研究(プロジェクト番号 G19009,G20002)との違いは、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 v_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は衝撃波の速度を $v_u=0.25c$, $0.5c$ とした場合の衝撃波の構造となっている(c は光速)。図から分かるように、r 過程元素の有無によって速度構造がほとんど変わらない一方、温度の絶対値は、r 過程元素が質量の大半を占めている場合、r 過程元素が存在しないときより 10 倍程度低くなること が明らかになった。

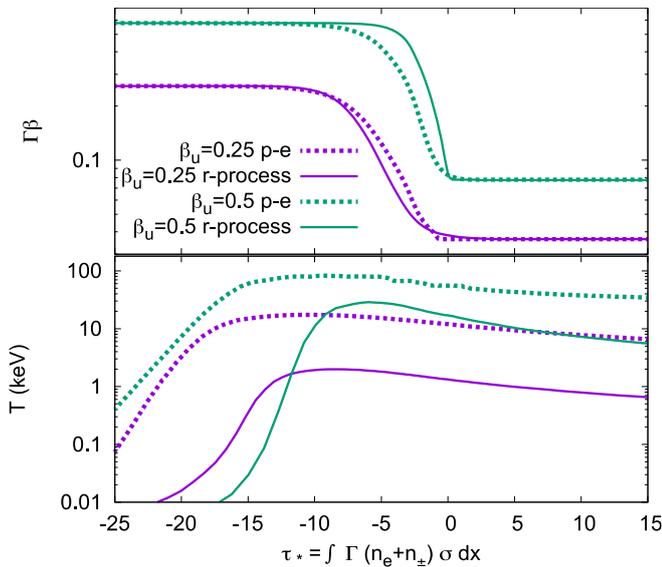


図1: 相対論的輻射媒介衝撃波の衝撃波静止系での速度 (上) 及び温度(下)の空間分布。紫と緑の線は、それぞれ $v_u=0.25c$, $v_u=0.5c$ の計算結果に対応している。実線はプラズマが完全に r 過程元素によって構成されている場合 ($f_r=1$) を表しており、比較のために r 過程元素が全く存在しなかった場合 ($f_r=0$) の結果を破線にて表している。

図2が Levinson & Nakar 2020 による衝撃波下流の温度の解析的な見積もりと、本計算結果の比較となっている。この図から、数倍程度の定量的なずれは見られるものの、定性的な温度の衝撃波速度に対する依存性は、解析的な見積もりと良い一致をみせていることが分かる。また、Levinson & Nakar 2020 においても示唆されたように、r 過程元素が大量に含まれている場合は、衝撃波速度が光速の約 60%を

超過したあたりで、電子・陽電子の対生成が重要になることが明らかになった。

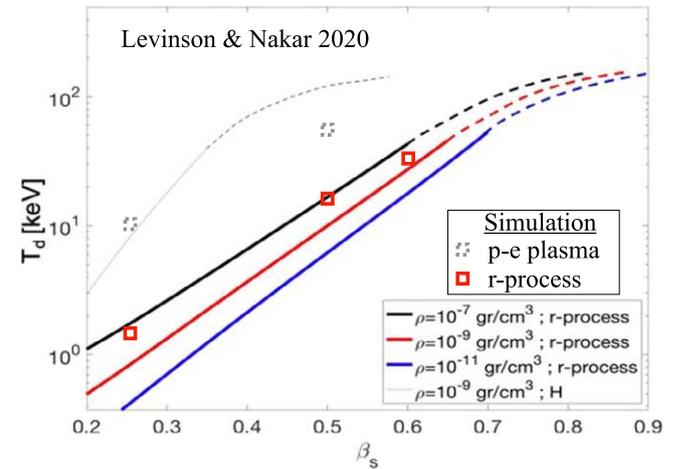


図2: 衝撃波下流における温度の衝撃波速度 v_u に対する依存性。線が Levinson & Nakar 2020 による解析的な見積もりであり、四角の点が本計算結果である(赤: $f_r=1$, 灰: $f_r=0$)。

4. まとめ

本研究では相対論的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。本年度は主に、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を探ることに取り組んだ。主な成果は光速の 25% から 60%の範囲の伝搬速度をもった衝撃波の構造を明らかにした点である。一連の計算からは、解析的な見積もりから示唆されたように、r 過程元素が大量に存在している場合は、r 過程元素が存在しない場合と比べて、衝撃波内部の温度が低くなることが明らかになった。本研究結果からは、連星中性子星合体時に発生するショックブレイクアウトの放射は、通常の r 過程元素がほとんど存在しない環境下で発生するショックブレイクアウトに比べて低いピークエネルギーを持ったスペクトルを示すことが示唆される。

5. 今後の計画・展望

本研究では、光速の 25% から 60%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み、系統的な研究を行う予定である。また場合によっては、衝撃波内部の高エネルギー光子の存在によって r 過程元素の光分解反応が重要になる可能性があるが、その詳細についても探求していく予定である。

2021 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

Hiroataka Ito, Oliver Just, Yuki Takei, Shigehiro Nagataki, “A global numerical model of the prompt emission in short gamma-ray bursts”, *The Astrophysical Journal*, Vol. 918, Issue 2, p59-70, (2021)

【口頭発表】

伊藤裕貴, “Relativistic radiation mediated shocks in photon starved regime”, 日本天文学会秋期年会, オンライン研究会, 2021 年 9 月 15 日

伊藤裕貴, “First principle calculation of relativistic radiation mediated shocks”, r-EMU Workshop 2021, オンライン研究会, 2021 年 10 月 18 日