

プロジェクト名(タイトル):

輻射輸送計算から探るガンマ線バーストの放射機構

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

ガンマ線バーストは突発的に大量のガンマ線が地球に降り注ぐ、宇宙で最も明るい天体现象である。その発生機構は未解明の部分が多いが、大質量星の重力崩壊や連星中性子星の合体に起因している事が分かっている。理論的な描像としては、これらの事象によって細く絞られたプラズマ流ほぼ光の速度で噴出し(相対論的ジェット)、このジェットからガンマ線が放出されていると考えられている。しかしながら、ジェットからどのようにしてガンマ線が放射されているか(放射機構)については、発見から40年が経過した現在においても解明されておらず、宇宙物理学の主要な研究課題の一つとなっている。

これまで多数の放射機構の理論モデルが提唱されているが、その中で有望視されてもの一つに“光球面放射モデル”がある。このモデルは、大量のガンマ線は初期に光学的に厚いジェットの内部に捕縛されており、膨張に伴い光学的に薄くなることによって光球面にて解放されるといった、単純な発想に基づいている。約10年前から盛んに議論されるようになってきているが、まだ理論的な精査が十分とはいえないのが現状である。

光球面放射を評価するためには、内部に捕縛されていた光子が相対論的ジェット中を伝搬し、解放されるまでの一連の過程を明らかにする必要があるため、輻射輸送計算が必須となる。これまでの大半の先行研究においては、このような計算を簡単のためジェットを定常球対称な流れと近似し行っている。しかしその一方で、流体シミュレーションに基づいた研究からは、ジェットの内部には衝撃波や不安定性などによって励起された乱流が普遍的に存在している事が明らかになっており、非定常かつ多次元の構造が本質的に重要である事が示唆されている。そのため、より現実的な状況設定における輻射輸送計算を行うことが求められている。

申請者はこの点に着目し、研究を行ってきた。Ito et al. 2015 では、大質量星の重力崩壊を想定した流体シミュレーションを用い、世界で初めて非定常で現実的な構造を持つ相対論的ジェットの計算を実現した。続く研究(Ito et al. 2019)では、光球面放射の計算から観測で知られるスペクトルと明るさの間の相関関係(米徳関係)が自然に再現されることを明らかにした。また、Ito et al. 2021 では、連星中性子星合体に起因するガンマ線バーストの計算を世界で初めて実施し、観測と整合する結果を得た。

上記の昨年度までの一連の研究(HOKUSAI プロジェクト番号 Q19362,Q20362,Q21362,Q22362)に引き続き、今年度は大質量星に起因するガンマ線バーストの光球面放射の性質をより詳しく調べることに取り組んだ。特に、特に、偏光を含む放射の詳細な性質を明らかにするための計算結果の解析に重点を置いた。

2. 具体的な利用内容、計算方法

本研究では、ガンマ線バーストに伴う相対論的ジェットからの光球面放射を評価するために、相対論的流体シミュレーションと輻射輸送計算を組み合わせた手法を採用している。計算の初期条件として大質量星の平衡状態を考慮し、その中心から注入された相対論的ジェットが膨張し、光学的に薄くなるまでの過程を流体シミュレーションで追跡した。続いて、得られた時間発展データを背景流体として用い、モンテカルロ輻射輸送計算により光球面放射を計算している。

輻射輸送計算では、光子をパケットとして扱うモンテカルロ法を使用し、各パケットがストークスパラメーターを持ち、その伝搬過程でのストークスパラメーターの変化を計算する。偏光に関しては、観測者に到達するパケットのストークスパラメーターの合計によって評価される。

3. 結果

図1(上図)は、時間積分した偏光の性質をまとめたものである。これは世界で初めて3次元シミュレーションを基にした光球面放射の偏光を評価した結果である。図に示されている通り、ジェットを中心コア領域では、偏光度が低い(数%以下)ことが明らかとなった。この結果はPOLAR衛星の観測が示唆する、明るいガンマ線バーストの偏光度が低い、または無偏光であるという観測結果と一致している。

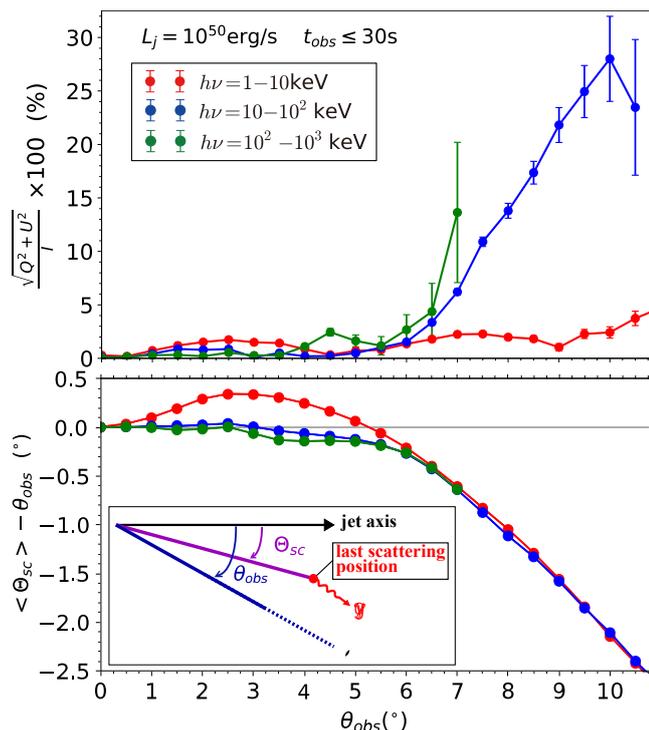


図1: 偏光度と観測者の見込み角度の関係(上)、および光子の最終散乱位置と観測者の見込み角度の関係(下)

一方、観測者の見込み角度が大きくなると、コア領域の外側から散乱角の大きい光子が観測され(図1下)、偏光度は見込み角度に伴って増大する傾向にある。偏光度は最大で30%を超えることが示されており、これは暗いガンマ線バースト(例えばX線フラッシュ)ほど高い偏光度を示す可能性があることを示唆している。本計算結果は、将来の偏光観測データによって検証されることが期待されるが、現在利用可能な偏光観測データは明るいガンマ線バーストに限られているため、直接の比較はできない。

4. まとめ

本研究では、大質量星の崩壊によるガンマ線バーストの光球面放射を、相対論的ジェットの流体シミュレーションに基

づいてモンテカルロ輻射輸送計算を用いて評価した。特記すべき成果として、3次元シミュレーションデータに基づいた偏光計算を世界で初めて実施した点が挙げられる。得られた計算結果は、現状の偏光観測データとの整合性を示すとともに、より暗いガンマ線バーストが高い偏光度を示す可能性が示唆された。

5. 今後の計画・展望

本研究では、相対論的ジェットの広範囲かつ長時間の伝搬過程を数値計算により追跡しているが、計算コストの制約から空間解像度がまだ十分でない。より高精度な議論を展開するためには、流体シミュレーションの精度向上が必要であり、今後の研究はこの改善に向けて進める予定である。

2023 年度 利用研究成果リスト

【口頭発表】

伊藤裕貴, “数値シミュレーションから探るロングガンマ線バーストの光球面放射の性質”, 日本天文学会 2023 年秋季年会, 名古屋大学, 日本, 2023 年 9 月 21 日