

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 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

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現象である。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。

そのような中で、放射機構を説明する理論モデルとして有望視されているものの一つに光球面放射モデルがある。光球面放射モデルとは、初期にジェットの内部に捕縛されていた大量の光子が、膨張に伴い光子を捕縛できなくなり解放するというシナリオである。光球面放射を正確に評価するためには、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。多く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。しかしながら、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。このように複雑な振る舞いを示すジェットからの放射は、定常球対称を課した計算からは適切に評価できないため、より現実的な状況設定における輻射輸送計算を行う事が望まれる。

申請者はその点に着目した研究をこれまでに行っている。Ito et al. 2015 においては相対論的流体シミュレーションとモンテカルロ法を採用した輻射輸送計算を駆使することによって、非定常で現実的な構造を持った相対論的ジェッ

トからの光球面放射を評価した。その結果、ジェットは星の外層と衝突することによって、複雑な構造を示し、それが放射に強く反映されることを明らかにした。さらに Ito et al. 2019 においては、観測から経験的に知られていたスペクトルのピークエネルギーと最大光度の間に成立する相関関係(米徳関係)が、伝搬の際に形成したジェットの内部構造に起因して説明できることを明らかにした。これらの一連の成果は光球面放射がガンマ線バーストの主な放射機構を担っていることを強く示唆している。

上記と昨年度までの一連の研究(HOKUSAI プロジェクト番号 Q19362,Q20362)においては、大質量星の重力崩壊を想定したシミュレーションを行ってきたが、今年度は同様の計算手法のもとで、連星中性子星合体を想定したシミュレーションに取り組んだ。主な目的は、その結果が、連星中性子星合体に伴うと考えられているガンマ線バーストの種族(ショートガンマ線バースト)の観測と整合するかについて調べることである。

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、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ることによって評価している。計算の初期条件としては連星中性子星合体後に形成される、ブラックホール、降着円盤、及び放出物質(エジェクタ)を考慮している。この与えられた初期条件の下で、ブラックホールの近傍から相対論的ジェットを注入し、それ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によって計算する。次に、そこで得られた時間発展データを背景流体として採用し、モンテカルロ輻射輸送計算を実行することによって、光球面放射を評価している。

3. 結果

図1が本研究で行なった流体シミュレーションのスナップショットとなっている。図から分かるように、ブラックホール近傍では、降着円盤とジェットの間強い相互作用があり(図1

左)、それがジェットの開き角や、時間変動といった性質に強く反映されることが明らかになった。またより遠方では、ジェットは膨張するエジェクタ中を伝搬し突き抜けている(図1右)。このエジェクタとの相互作用もジェットの構造を決める上で重要な役割を果たしている。

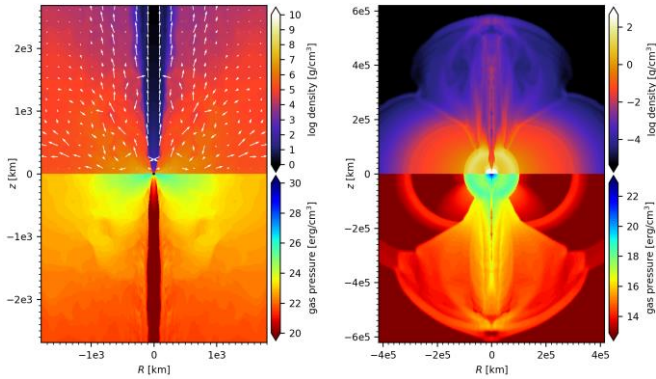


図1: ジェットが注入されて2秒後の流体シミュレーションのスナップショット。左がブラックホール降着円盤の近傍のズームで、右が全体像に対応している。上下は、それぞれ質量密度と圧力の空間分布を表している。左上の図中の矢印は速度方向を示している。

輻射輸送計算の結果からは、スペクトルのピークエネルギーと明るさの間には優位な相関があることが確認できた(図2)。観測において確認されている相関関係と比較すると、分布に関しては若干のズレが見られるものの、相関の冪は整合することが明らかになった。

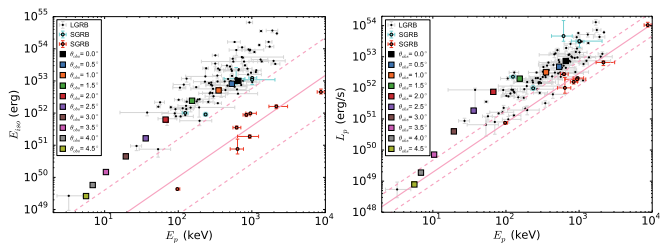


図2: スペクトルのピークエネルギー(E_p)と全放射エネルギー(E_{iso})及び最大光度(L_p)の関係。エラーバー付きの点が観測に対応し、四角の点がシミュレーションの結果である。シミュレーションに関しては、色の違いがジェットの進行方向に対する観測者の方向の違いに対応している。

4. まとめ

ショートガンマ線バーストに伴う光球面放射を、相対論的ジェットの流体シミュレーションに基づいたモンテカルロ輻射輸送計算を行うことによって評価した。主な成果としては、スペクトルのピークエネルギーと明るさの間には優位な相関があることが認められた。この結果は、観測事実と整合して

おり、ショートガンマ線バーストの放射機構が光球面放射によって説明できる可能性を示唆している。

5. 今後の計画・展望

本研究では、1モデルのシミュレーションしか行っていないのが現状である。そのため、より精度の高い議論を行うためには、多様な初期条件を採用したシミュレーションを行い、系統的な研究を行う必要がある。今後は、その方向性で研究を継続する予定である。

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