

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。

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。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 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駆使することによって、世界で初めて非定常で現実的な構造を持った相対論的ジェットを背景流体とした計算を実現している。継続して行った研究(Ito et al. 2019)においては、流体シミュレーションに基づいた光球面放射の計算からは、観測で知られてい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ている。最新の研究(Ito et al. 2021)においては、連星中性子星合体に起因するガンマ線バーストに関する計算も世界で初めて実現し、観測と整合する結果を得ている。

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)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、米徳関係以外の経験則として知られている相関関係が成立するかについての探究を行った。

### 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、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大質量星の平衡形状を考慮している。この初期条件の下で、大質量星の中心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が主な結果のまとめとなっている。輻射輸送計算の結果からは、これまでの研究から明らかになっていた米徳関係のみならず、スペクトルのピークエネルギーと全放射エネルギーの相関関係 ( $E_p$ - $E_{\text{iso}}$  関係: 上図)、およびローレンツ因子と最大光度との相関関係 ( $\Gamma_0$ - $L_p$  関係: 下図)も再現されることが示された。

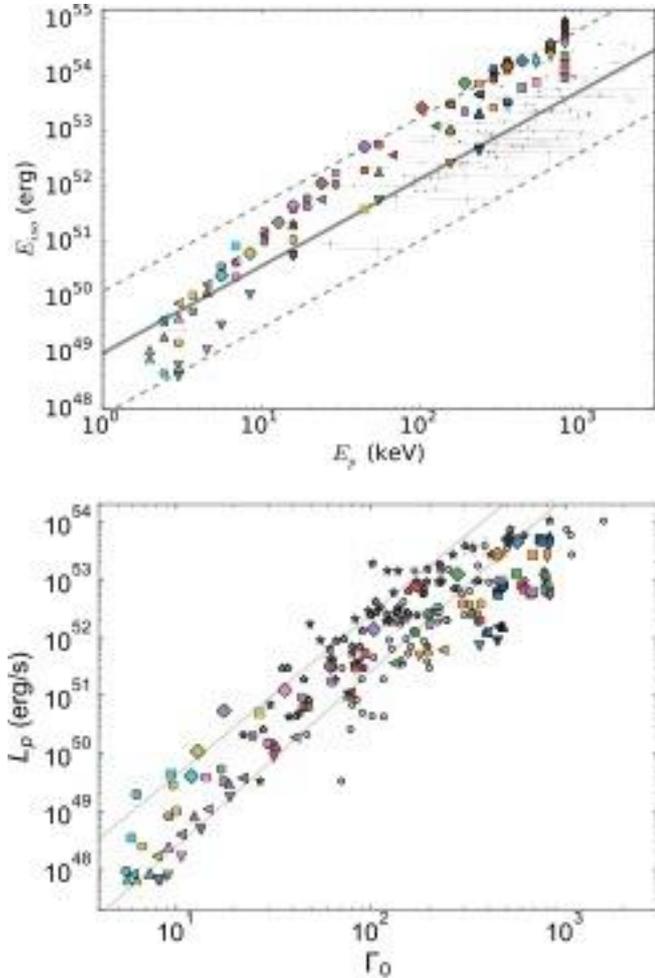


図1: スペクトルのピークエネルギー( $E_p$ )と全放射エネルギー( $E_{\text{iso}}$ )の関係(上)、およびジェットの高速度因子( $\Gamma_0$ )と最大光度( $L_p$ )の関係(下)。エラーバー付きの点が観測に対応し、色付きのシンボルがシミュレーションの結果である。シミュレーションに関しては、色の違いがジェットの進行方向に対する観測者の方向の違いに対応している。

#### 4. まとめ

大質量星の重力崩壊に伴う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全放射エネルギー、またローレンツ因子と最大光度には優位な相関があることが認められた。これらの相関は、観測事実と整合しており、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、広範囲にわたる相対論的ジェットの長時間の伝搬過程を計算している。そのため、数値計算コストの関係から、空間解像度がまだ十分とはいえない。より精度の高い議論を行うためには、流体シミュレーションのアップデートを行い、その点を改善することが望まれる。今後は、その方向性で研究を継続する予定である。

2022 年度 利用研究成果リスト

**【口頭発表】**

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

Hirota 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