

## 課題名(タイトル):相対論的輻射輸送計算から明らかにす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)長瀧天体ビッグバン研究室

## 1. 本課題の研究の背景、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上に降り注ぐ、宇宙で最も明るい天体現象である。ガンマ線バーストの発生機構は未解明の部分が多いが、現在では太陽の数十倍の質量を持った大質量星の爆発現象と密接に関連している事が分かっている。理論的な描像としては、大質量星が重力崩壊を起こす際に、星の中心領域からほぼ光の速度で細く絞られたプラズマ流(相対論的ジェット)が噴出され、このジェットから大量の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)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、近年の観測・理論的研究の両面から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、シナリオである。従来の理論モデルでは説明する事が困難であった多くの観測的特徴が自然に再現できるため、約10年前から盛んに議論され始め大きな脚光を浴びている。その一方で、光球面放射の研究の歴史は浅いため、まだ理論的に精査が必要な部分が多いのも現状である。

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。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 においては相対論的流体シミュレーションと相対論的輻射輸送計算を駆使することによって、世界に先駆けて、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。特筆すべきは衝撃波の存在によって、観測されている非熱的スペクトルが再現できる可能性があることを示した点である。本課題では上述の研究を継続し推し進め、多様な状況設定における計算をより高精度で実行した。

## 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理論的に精査する。具体的な手法としては、最初に、中心エンジンから駆動されたジェットが遠方に伝搬し、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、輻射輸送計算を実行することによって、光度曲線、スペクトル、及び偏光といった放射の性質を評価する。

本課題を遂行するにあたって、流体シミュレーションに関しては共同研究者である松本仁氏(リーズ大学)が独自の計算資源を用いて担当し、申請者は、その計算データをHOKUSAI に転送して、輻射輸送計算の実行を担当する。本研究で使用する輻射輸送計算の数値コードはモンテカルロ法を採用したものであり、光子を粒子として扱い、多数の粒子の時間発展を解く粒子法シミュレーションとなっている。高い並列化効率が実現されたコードであり、円滑に計算が実行できるようになっている。

## 3. 結果

今年度は主に、ジェットのパワーが放射にどのように影響するかについて調べた。その結果、先行研究で得られた結果は、より高精度な計算においても成立することを明らかに

し、それがパワーに依存しないことが分かった。最も重要な成果は、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、放射の最大高度の間に成立する相関関係(米徳関係)が、本計算によって自然に再現された点である。この結果からは、米徳関係が主に観測者の位置の違いによって生じていることが強く示唆された(図1,2 参照)。

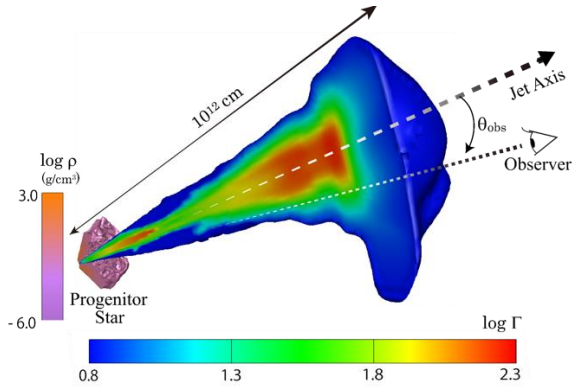


図 1 : 相対論的ジェットの流体シミュレーション

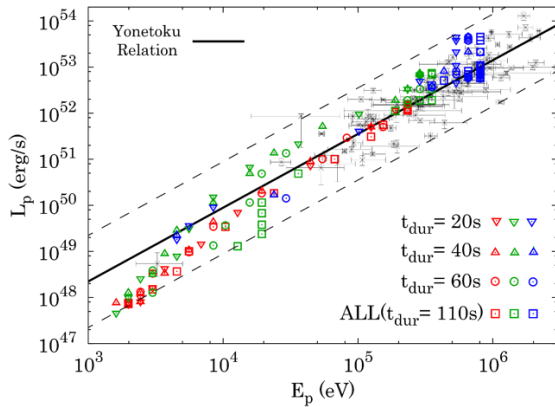


図 2 : 輻射輸送計算から得られた放射の最大光度  $L_p$  とスペクトルのピークエネルギー  $E_p$  の相関関係。エラーバーのある灰色の点が観測データであるのに対し、赤・緑・青の点が、申請者が行った数値計算の結果である。観測から知られている相関関係がよく再現できている事が確認できる(Nature Communication 投稿中)。

#### 4. まとめ

ガンマ線バーストに伴う光球面放射を適切に評価するために、相対論的ジェットの流体シミュレーションに基づいた相対論的輻射輸送計算を行った。その結果、星とジェットの衝突のダイナミクスは、放射に多大な影響を与えることが確認された。また起源が明らかではなかった米徳関係が、観測者の位置の違いによって説明できることを明らかにした。この結果は、ガンマ線バーストの主な放射機構が、光球面

放射であることを強く示唆している。

#### 5. 今後の計画・展望

本研究では、大質量星の崩壊に伴うガンマ線バーストに着目したが、ガンマ線バーストには連星中性子星合体、もしくは中性子星・ブラックホール連星合体に伴う種族(ショートガンマ線バースト)が存在していると考えられている。今後は主に、ショートガンマ線バーストに着目した研究を行っていく。具体的には、流体シミュレーションに関しては、申請者と同じ研究室に所属している、当該分野の専門家である共同研究者 Just 氏が担当し、相対論的輻射輸送計算に関しては、本研究と同様に申請者が担当して取り組む予定である。

平成 30 年度 利用研究成果リスト

【口頭発表】

1. (招待講演) Hiroataka Ito, “Numerical Simulations of Photospheric Emission from Collapsar Jets”, Fifteenth Marcel Grossmann Meeting, ローマ・ラ・サピエンツァ大学 (ローマ、イタリア), 2018 年 7 月 2 日
2. (招待講演) Hiroataka Ito, “Prompt Emission of Gamma-ray Bursts”, Windows on the Universe, International Center for Interdisciplinary Science and Education (クイニョン、ベトナム), 2018 年 8 月 7 日
3. (招待講演) Hiroataka Ito, “Prompt Emission of Gamma-ray Bursts”, Stellar deaths and their diversity, 国立天文台 (三鷹市、日本), 2019 年 1 月 22 日