

課題名(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)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、その一部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。しかしながら、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している。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、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。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放射の最大高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。

本課題では上述の研究を継続し推し進め、Ito et al. 2019 に行ったモンテカルロ輻射輸送計算を、より多数の光子数にて実行することによって、光球面放射の時間変動や偏光といった詳細な性質に関する研究を行った。

### 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。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、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。本課題では Ito et al. 2019 と同じ流体シミュレーションのデータに基づき、10倍の光子数を採用したモンテカル

ロ輻射輸送計算に取り組むことによって、スペクトルの短時間変動、および偏光といった詳細な性質を十分な光子数統計のもとで明らかにしている。

### 3. 結果

本計算によって放射の時間変動を調べた結果、各時刻における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(図1参照)。この結果は、ジェットのパワーや観測者の位置によらず成立する。実際の観測からもこのような相関は確認されているため、本結果は昨年度の結果に同様に光球面放射がガンマ線バーストの放射機構を担っていることを示唆するものとなっている。

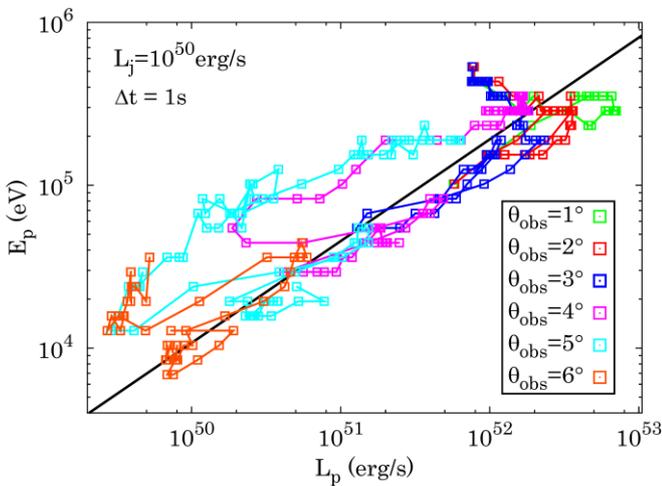


図 1: 各時刻におけるスペクトルのピークエネルギー( $E_p$ )と明るさ( $L_p$ )の相関関係。各線の色の違いは観測者の位置(ジェットの中心軸と観測者の視線方向がなす角度  $\theta_{\text{obs}}$ )の違いを示している。

さらに本研究では、ジェットが伝搬によって形成した構造に起因して、場合によっては優位な偏光も光球面放射に伴うことが明らかになった。その偏光度は観測者の視線方向に対して強い依存性を示し、ジェットの正面付近( $\theta_{\text{obs}} < 4^\circ$ )から観測した場合はほぼ無偏光である一方で、ジェット軸に対する視線方向のズレが大きくなるほど偏光度も大きくなることが分かった(図2参照)。この結果は、明るいガンマ線バーストが無偏光となる一方で、暗いものは優位な偏光度を伴うことを示唆する。現状のガンマ線バーストの観測においては、未だ優位な比較ができるクオリティの偏光観測は実現されていないため、POLAR2などの将来の偏光観測計画による検証が待たれる。

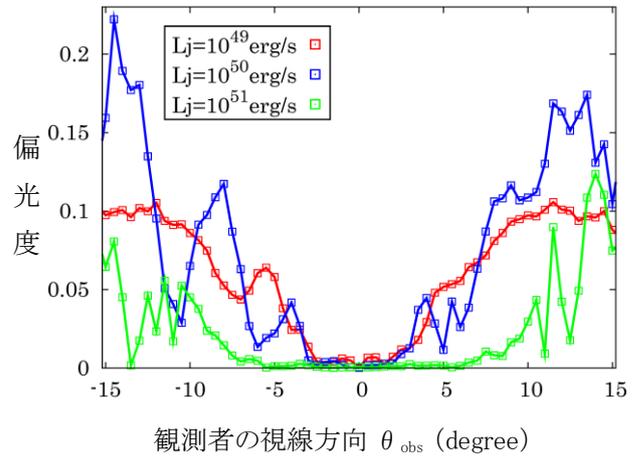


図 1: 放射に伴う偏光度の観測者依存性。各線の色の違いはジェットのパワーの違いを示している。

### 4. まとめ

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。多量の光子数を採用した輻射輸送計算を実現することによって、先行研究(Ito et al. 2019)では、探求することができていなかったスペクトルの短時間変動、および偏光といった性質を明らかにすることができた。主な成果としては、各時刻における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、観測事実と整合するために先行研究に引き続き、ガンマ線バーストの主な放射機構を光球面放射が担っていることを示唆するものとなっている。さらに偏光計算からは、明るいガンマ線バーストが無偏光となる一方で、暗いものは優位な偏光度を伴うことを示唆する結果を得た。この結果は、将来的にPOLAR2などの偏光観測計画などによって検証することが望まれる。

### 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、モンテカルロ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。

2019年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

Hiroataka Ito, Jin Matsumoto, Shigehiro Nagataki, Donald C. Warren, Maxim V. Barkov, Daisuke Yoeneoku, “The photospheric origin of the Yonetoku relation in gamma-ray bursts”, Nature Communications, Vol.10, Article Number: 1504, (2019)

Hiroataka Ito, Amir Levinson, Shigehiro Nagataki, “Monte-Carlo simulations of relativistic radiation mediated shocks: II. photon starved regime”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 492, Issue 2, p1902-1913, (2020)

【口頭発表】

Hiroataka Ito, “The photospheric origin of the Yonetoku relation in gamma-ray bursts”, 招待講演, Ioffe Workshop on GRBs and other transient sources: 25 Years of Konus-Wind Experiment, 2019年9月9日, Ioffe Institute (ロシア、サンクトペテルブルク)

Hiroataka Ito, “Numerical simulation of photospheric emission in gamma-ray bursts”, 一般講演, Yamada Conference LXXI: Gamma-ray Bursts in the Gravitational Wave Era 2019, 2019年10月30日, 赤レンガ倉庫 (横浜市)

【その他(著書、プレスリリースなど)】

伊藤裕貴, 松本仁, 長瀧重博, Donald C. Warren, Maxim V. Barkov, 米徳大輔, 「ガンマ線バーストのスペクトルと明るさの相関関係の起源」2019年4月3日, プレスリリース(理化学研究所、国立天文台、金沢大学の共同発表)