

氏 名	勝倉 大輔
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学 位 記 号 番 号	博理工甲第 1166 号
学位授与年月日	令和2年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学 位 論 文 題 目	Systematic Study of Spectral Diversity in Gamma-Ray Burst Prompt Emissions (ガンマ線バースト即時放射におけるスペクトル多様性についての系統的 研究)
論 文 審 査 委 員	委員長 教 授 田代 信 委 員 准 教 授 寺田 幸功 委 員 准 教 授 佐藤 浩介 委 員 教 授 井上 直也 委 員 学 外 坂本 貴紀

論文の内容の要旨

The Gamma-Ray Burst (GRB) is an explosive phenomenon producing enormous gamma-ray photons in a cosmological distance. GRBs are radiation from jets which are compact region moving relativistically. In the basis of the relativistic fireball model, which is a widely accepted working hypothesis for GRB emission, enormous energy ($E \sim 10^{53}$ erg) is injected into the compact region with $r \sim 100$ km. Hence, an optically thick “fireball” expanding along the jets is expected to produce large amount of both thermal and non-thermal radiation. Spectra of GRBs’ prompt emission, however, show power-law shape, which implies non-thermal emission. Band (1993) reported that the spectra were fitted well by the phenomenological function which was described as two power laws ($\propto E^\alpha$ and $\propto E^\beta$) joined smoothly at a break energy $(\alpha - \beta)E_0$. The parameter $E_{\text{peak}} \equiv (2 - \alpha)E_0$ which indicates the peak energy in νF_ν (or $EN(E)$) spectrum is distributed over a broad energy band from keV to MeV. However, the mechanism generating the observational diversity of E_{peak} remains largely a mystery.

In this thesis, we discuss two questions on GRB spectra: "existence of thermal component" and "spectral diversity of peak energies".

To search thermal component in GRB spectra, we focused on the energy dependence of the time constants in the exponential decaying phase of the prompt emission, which reflects radiation processes in general Rybicki & Lightman (1979). In this study, we analyzed 15 exponential decaying GRBs observed by both the Burst Alert Telescope (BAT, 15-150 keV) and X-Ray Telescope (XRT, 0.3--10 keV) mounted *Swift* so that we measure the dependency in the lower energy band. We obtained energy resolved time constants from 17 peaks (pulses) from 16 GRB events. Among them, the energy dependence of time constants of 2 GRBs were well fitted by a single power-law, while 15 GRBs’ were fitted

only by broken power-law models. The mean value of the low-energy index of decay constants was $\tau(E) \propto E^{-0.54 \pm 0.06}$, which supports synchrotron radiation. Whereas, the high-energy index of decay-time constants was distributed from $-0.3 < \gamma_2 < 0.1$. This deviation from the dependency of synchrotron radiation means that existence of another radiation component in prompt emission. In the spectral analysis of decaying phase, χ^2 in results of the spectral fitting for 9 out of 17 pulses was significantly improved by adding a blackbody model to a non-thermal model (PL, CPL, Band function). However, the spectra in our samples are non-thermal, and the blackbody components derived from the spectral analysis are so weak that it is difficult to explain the high energy index, on the simple blackbody radiation. We conclude, therefore, that synchrotron radiation and "another component" exist in the spectrum fitted with the Band function.

Next, we focused on the mystery of the spectral diversity of peak energies'. Even the most basic question of whether the diversity originates in something intrinsic in the GRB jets or mere observational effects, most notably viewing angles of the observer as suggested in the popular off-axis model has not been answered, yet. We have performed a systematic study of GRBs, which have various E_{peak} values, observed by *Swift*, investigating their prompt and X-ray afterglow emissions.

We cataloged the long-lasting GRBs observed by the *Swift* between 2004 December and 2014 February in 3 categories according to the classification by Sakamoto et al. 2008: X-Ray Flashes (XRFs), X-Ray Rich GRBs (XRRs), and Classical GRBs (C-GRBs). We then derived $E_{\text{peak}}^{\text{obs}}$, as well as $E_{\text{peak}}^{\text{src}} \equiv (1+z)E_{\text{peak}}^{\text{obs}}$ if viable, of the *Swift* spectra of their prompt emission. We also analyzed their X-Ray afterglows and found the trend that the GRB events with a lower $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$, i.e. softer GRBs, are fainter in the 0.3--10 keV X-ray luminosity and decay more slowly than harder GRBs. The intrinsic event rates of the XRFs, XRRs, and C-GRBs were calculated, using the *Swift*/BAT trigger algorithm. That of either of the XRRs and XRFs is larger than that of the C-GRBs. If we assume that the observational diversity of E_{peak} is explained with the off-axis model, these results yield the jet half-opening angle of $\Delta\theta \approx 0.32^\circ$, jet break time of $t_{\text{jet}} \lesssim 30\text{s}$ and the variance of the observing angles $\theta_{\text{obs}} \lesssim 0.6^\circ$. This implies that the tiny variance of the observing angles of $\lesssim 0.6^\circ$ would be responsible for 2 orders of the E_{peak} diversity observed by *Swift*/BAT, which is unrealistic. Therefore, we conclude that the E_{peak} diversity is not explained with the off-axis model, but is likely to originate from some intrinsic properties of the jets of the GRBs.

論文の審査結果の要旨

ガンマ線バースト（GRB）は、宇宙論的遠方で大量のガンマ線光子を発生する爆発的現象として知られる。その放射領域は、観測者方向に相対論的速度で進むジェットであると考えられており、超新星爆発あるいは相対論的天体の合体が起源とされる。観測されるガンマ線フラックスと変動の時間スケール、および母銀河の赤方偏移値から、等方放射を仮定したときの放射エネルギーは 10^{53} erg 程度、放射領域のサイズは 100 km 程度と見積もられている。起源となる爆発現象から放出されたプラズマがジェットを形成する過程で、光学的に厚いプラズマから高速で運動する光学的に薄いジェットに変化する、fireball モデルが広く受け入れられている。このモデルによれば、光学的に厚い領域からの熱的放射と、光学的に薄い衝撃波領域がつくり出す非熱的放射の双方が存在すると予想される。

しかしながら、実際に観測される GRB 即時放射のガンマ線スペクトルは、一般に、非熱的である。すなわち現象論的には、一つの冪関数、あるいは二つの冪関数を上に凸の形でなめらかに繋いだ関数でよく表現されることが知られている。特に後者の関数は Band 関数として知られており、あらゆる光度の GRB にみられる。Band 関数において、二つの冪関数が接続されるエネルギー (E_{peak}) は、GRB 放射の特徴的なエネルギーとして特に重要であるが、実に keV 帯域から MeV 帯域まで 3 桁にわたって分布しておりその起源を普遍的に説明する物理過程を想定することは難しい。一方で、光度と E_{peak} に系統的な相関があることも知られており、年間数百も観測される GRB に共通した放射過程が予想される。この共通性と多様性をどのように理解するかは、GRB の研究において長く議論されてきたテーマである。

本研究は、(1) GRB 即時放射スペクトルとその変動の観測から、熱的起源をもつ放射過程の探索と、(2) 多数の GRB 即時放射と残光放射を系統的に整理することで行った、GRB の多様性を説明するモデルの検証の二つによって構成される。

最初の課題 (1) については、学位論文 4 章に記述されているように、本研究では特に、GRB の減光過程におけるスペクトル変動に着目している。一般に減光過程は、プラズマ中の電子の放射冷却を反映し、しばしば指数関数であらわせる。指数減光の時定数は電子のエネルギーに依存するので、結果として、光子エネルギーの関数となる。本研究では、Swift 衛星搭載の BAT 装置と XRT 装置によって、同時に十分な統計精度をもって観測できた 17 イベントの指数減光を解析し、帯域ごとの減光時定数をエネルギーの冪関数で評価した。その結果、17 イベントのうちの 15 イベントについてはおよそ 10 keV 以下の低エネルギー帯域と数 keV 以上の高エネルギー帯域で異なる冪となることを初めて示した。なお、残りの 2 例では観測帯域にわたって単一の冪で表せた。二つの冪をもつ 15 イベントにおいて、低エネルギー帯域の冪は、一例を除いてシンクロトロン放射で期待される -0.5 と矛盾せず、全体の平均も -0.54 ± 0.06 であった。その一方、高エネルギー帯域の冪は、-0.3 から 0.2 と、よりエネルギー依存性が小さい範囲に分布した。これはシンクロトロン自己コンプトン放射、光球面コンプトン放射、あるいは、黒体放射のレーリギーゾーン領域などで予想される範囲にある。ただし、時定数の検討にあわせて、個々のスペクトル変動についても詳細に検討したが、これらの放射過程を特定するにはいたらなかった。

第二の課題 (2) については、学位論文 5 章に詳述されている。本研究では、先行研究 (Sakamoto et al. 2008) に従って、2005 年 4 月から 2014 年 2 月に Swift 衛星で観測された GRB を、X 線フラッシュ (XRF)、X 線リッチ GRB (XRR)、および古典的 GRB (C-GRB) の三種に分類した上で、それぞれの X 線光度と E_{peak} の関係、および残光の減光の様子を系統的に比較した。前者では、これら三種の GRB は、先行研究で報告されているとおり、連続的に分布しており、本質的に異なるという特徴は見られないことを確認してい

る。一方、残光の振る舞いにおいては、ジェットに対して大きな見込み角をもつ場合に予想されるような一時的な増光はみられず、 E_{peak} が低く光度が低いものほど、緩やかな減光をしめす傾向がみられた。さらに、XRF、XRR、C-GRB の三種の GRB をジェットを見込む角度の違いのみで説明するモデル (van Eerten et al. 2012) を用い、三種の発生頻度をこれまでの観測報告から相対論的ビーミング効果を補正し、定量的に評価した。その結果、観測された発生頻度と残光の振る舞いを単一の構造をもつジェットで統一的に説明するためには、そのジェットの開き角が 0.32 度程度であり、見込む角が、GRB の種別に応じて 0 度から 0.6 度に分布していることが要求されることを明らかにした。ただし、ここで要請されるジェットの開き角であれば、星間空間において 30 秒間もたたずにジェットが減速し、ジェットブレイクと呼ばれる急激な残光の減光が見られるはずであることも同時に指摘している。しかしながら、後者で予測されるような減光は観測と矛盾している。よって、これら三種の GRB を統一的なジェットとそれを見込む角度の違いのみで説明することは、少なくともすでに提案されているモデルでは、できないことを明らかにした。これは三種の GRB が、ジェットそのものの構造が異なっていることを強く示唆する結果である。

このように、本研究で明らかにされた、(1) GRB の即時放射機構と (2) ジェットの構造についての観測的な制限は、綿密なデータ解析から導き出された新しい知見であり、GRB の放射機構と放射領域の構造についての重要な観測的な研究成果と評価できる。