

ガンマ線バーストの多様性の起源 についての理論的研究



山崎 了

〈青山学院大学理工学部 物理・数理学科 〒252-5258 相模原市中央区淵野辺 5-10-1〉

e-mail: ryo@phys.aoyama.ac.jp

ガンマ線バースト (GRB) の時間変動, 継続時間, スペクトル, 残光などの観測的性質は多様である. その多様性を説明することは, GRB の放射機構やジェット構造, さらに発展して GRB の起源を突き止めることにもつながると期待され, 多くの理論モデルが提唱されてきた. われわれは, GRB によく似た種族の「X線フラッシュ」について着目し, GRB と X線フラッシュを統一的に説明する「Off-axis ジェットモデル」を提唱した. われわれのモデルでいろいろな観測事実を説明できるが, 説明できないイベントもあり, モデルの妥当性や適用限界の検討, およびモデルをさらに発展させることは今後の課題である.

1. はじめに: ガンマ線バーストとは?

ガンマ線バースト (GRB) とは, 一日におよそ 1 回の頻度で典型的には 250 keV 程度のガンマ線 ($\text{keV} = 10^3$ 電子ボルト) が約 0.01-300 秒間観測される天体現象である. ガンマ線バーストの正体は, 1967 年の発見¹⁾以来長らく未解明であったが, 1997 年以降になって研究が著しく進展した. 1997 年 5 月 8 日にイタリアの BeppoSAX 衛星が受けた GRB 970508 を追観測したところ, GRB 本体の発生直後から数日後にかけて徐々に減光していく X線および可視光の放射 (残光: afterglow と呼ぶ) が発見された. そして, 可視光スペクトル中に金属の吸収線が見つかって赤方偏移 z が測られ, GRB が宇宙論的な距離 ($z = 0.835$) で起こっていることがわかった²⁾. 距離がわかるとエネルギーを概算することができる. 単純に計算すると 10^{52} erg かそれ以上という値になる. エネルギー放出率にすると 10^{51} erg s^{-1} 程度以上となり, 宇宙にあるすべての銀河の明るさの合計に匹敵する. このように, 単純に言って GRB はとても明

る. また, 後に述べるように, ある種の GRB は大質量星の進化の最終段階で発生することがわかっている. これらの事実に注目し, GRB を用いて宇宙の進化, 特に初代天体形成や星生成率, さらにダークエネルギーなどについて調べる研究も日本では盛んである³⁾⁻⁷⁾. また銀河の個数密度の観測値と組み合わせることにより, 一つの銀河当たり約 100 万年に 1 回の割合で GRB が起こっていると概算され, GRB は宇宙で頻繁に起こる天体現象であることがわかる.

現在, さまざまな観測的事実や理論的考察から, GRB はローレンツ因子 $\Gamma \sim 100$ かそれ以上でわれわれの方向へ向かう相対論的ジェットから生じるものと考えられている⁸⁾⁻¹¹⁾. ジェットを形成する相対論的プラズマ流同士が衝突して内部衝撃波を作り, そこで非熱的なエネルギー分布をもつ高エネルギー電子が生成され, それらがシンクロトロン放射などを行い, GRB として観測される. ここで重要な点は, ジェットの静止系では放射される光子のエネルギーは主に X線であり, これを観測者の静止系から見るとジェットが観測者の

方向に飛んできているので、相対論的ドップラー効果によりガンマ線として見えるということである。このことは3章以降の話のポイントとなる。その後、ジェットは周囲の星間ガスにぶつかって外部衝撃波を作り、シンクロトン放射によりX線や可視光、電波などの残光を引き起こす。このような「内部・外部衝撃波モデル」が標準的なGRBの放射モデルとなっていて、非常に大雑把には、GRBの観測量を説明できている。このような相対論的ジェットを生み出すもの、つまりセントラルエンジンの正体については未解明で、宇宙物理学最大の謎の一つとなっている。

2. GRBの観測的多様性

GRBは観測的には個体差が激しいというのが最も大きな特徴である。このため、GRBにはさまざまな分類法があり、それによっていろいろな種族に分類されるが、本稿では簡単のため最も重要な二つである継続時間と放射スペクトルについての分類のみに注目する。

2.1 Long GRBとShort GRB

コンプトン衛星搭載のBATSEで検出されたGRBの継続時間の分布は、2秒あたりを境目とする二極性(bi-modal)分布を示す¹²⁾。継続時間の長いほうはLong GRB、短いほうはShort GRBと呼ばれる。分布の二極性から、両者は別起源と考えるのが主流の考え方である。

HETE-2衛星がとらえたLong GRB 030329は、GRB本体の発生から4日後に光学残光にバンプ(再増光)が見え出して、そのスペクトルを見ると、爆発エネルギーの大きな超新星とそっくりであった¹³⁾⁻¹⁵⁾。このことから、Long GRBは特異な超新星爆発と関連し、重い星の最期に起こる現象だと考えられるようになった。また、Long GRBは星形成の活発な銀河で起こっていることもこのことを支持している。

Swift衛星打ち上げ直後の2005年、Short GRBのX線・可視光帯域の残光が次々に検出され

た¹⁶⁾⁻¹⁸⁾。これにより、Short GRBの中には楕円銀河で起こっているものがあることがわかった。

Long GRBの母銀河には楕円銀河は一つもなく、Short GRBとLong GRBの別起源説を支持するものと考えられる。現在ではShort GRBは中性子星などのコンパクト星同士の連星の合体によって起こると考えるのが標準的である。

2.2 Long GRBとX線フラッシュ(XRF)

GRBは非熱的放射をしており、スペクトルは折れ曲がったべき関数でよくフィットできる。一般にGRBの νF_ν -スペクトルは山形となる。そのピークを与える光子のエネルギーを E_p と呼び、これらの光子が全放射エネルギーに最も寄与する。典型的なGRBでは $E_p \sim 250$ keVのガンマ線帯域に入るので、「ガンマ線」バーストと呼ばれるのである。ところが、 E_p が数keVから数十keVのX線帯域にあるイベントも多数あり、これらは「X線フラッシュ(XRF)」と呼ばれる^{19), 20)}。XRFとGRBの中間的な性質をもつ「X線過剰GRB」(X-ray rich GRB)と呼ばれる種族も存在する²¹⁾。

HETE-2やSwift衛星などの活躍により、XRFについての観測的性質が明らかになった^{22), 23)}。

XRF、X線過剰GRB、そしてLong GRBの諸性質を調べると、 E_p やフラックスなどの観測量が連続的に分布しており、また、バーストの継続時間や発生頻度などの、 E_p 以外の性質はよく似ている。このことから、これら三つの種族は異なる起源ではなく、同族である、つまり重い星の爆発に関連していると考えるのが自然である。

3. X線フラッシュ(XRF)の起源

XRFが注目された理由は、John Heiseが「XRFの高赤方偏移GRB説」を提唱したからであろう²⁰⁾。すなわち、宇宙膨張の効果で赤方偏移の大きな($z > 5$) GRBのガンマ線は波長が伸びてX線として観測される。遠くの天体を見ることはそれだけ過去の宇宙を見ることになるので、XRF

は初代天体ができたころの宇宙に誕生した星の爆発現象なのではないか、というわけだ。その後まもなく複数の XRF の追観測が行われ、発見された母銀河が比較的近傍 ($z < 3.5$) であることがわかり²⁴⁾、この説ですべての XRF を説明するのは苦しくなった。

先にも述べたように、XRF は Long GRB と同一で、連続的な現象であると考えられる。そのため、両者を統一的な描像でとらえると、GRB 本体の放射機構についての理解が深まると期待される。2002 年以降、このような背景のもとで XRF と Long GRB の統一モデルが多数提唱された。どのモデルも一長一短で、正確にはどれも否定はできないのであろう。問題は、どのような起源の XRF の数が多いかということである。

3.1 XRF の Off-axis ジェットモデル

数多くの XRF の理論モデルの中で、最も早く提唱されたのがわれわれのモデルであり、「Off-axis ジェットモデル」と呼ばれている²⁵⁾⁻²⁷⁾。1 章で述べたように、GRB は相対論的ジェットの放射である。したがって、ジェットを見込む角と相対論的ビーミング効果が GRB の放射機構を考える上で重要になる。われわれはこのことに注目したモデルを提唱した。

図 1 のように、開き角 $\Delta\theta$ をもつジェットの放射を考える。(A) の場合のように軸方向から見ると GRB になるが、(B) の場合のように角度 $\theta_v > \Delta\theta$ で見ると、青方偏移が弱くなるので、主にガンマ線ではなく X 線として見える。また、ビーミング効果が弱くなるので放射強度は小さくなる。図 2 に θ_v の違いでどのようにスペクトルが変化するかを定性的に示した。このように、ガンマ線バーストをジェットの軸からすこし外れて見たら XRF となる。われわれのモデルと他のモデルとの大きな違いは観測されたイベント数との定量的な比較が可能な点である²⁸⁾。また、単純明快さもモデルの特徴であろう。

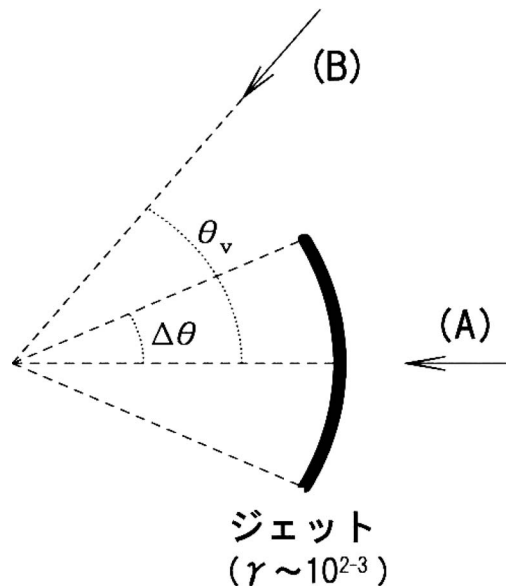


図 1 「Off-axis ジェットモデル」の模式図²⁶⁾。ジェットを (A) 真正面から見た場合 ($\theta_v < \Delta\theta$) は Long GRB になり、(B) 斜め方向から見た場合 ($\theta_v > \Delta\theta$) は XRF となる。

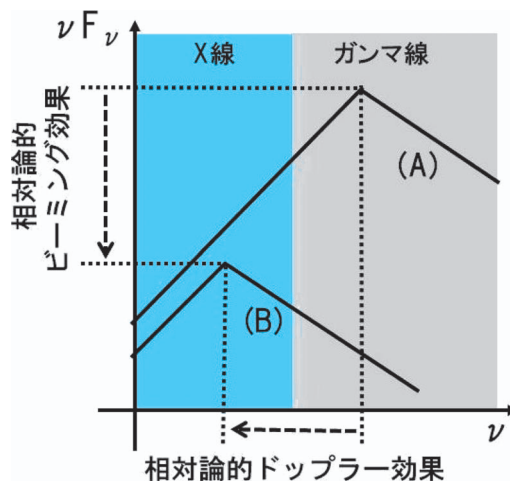


図 2 図 1 に対応して、(A)、(B) のそれぞれの場合について、観測されるスペクトルを定性的に示した。

3.2 Off-axis ジェットモデルの予言と観測の比較

われわれのモデルはいくつもの予言をもっていた。そのいくつかはすぐに観測と比較され、議論の対象となった。

例えば、XRF も超新星を伴うはずである。

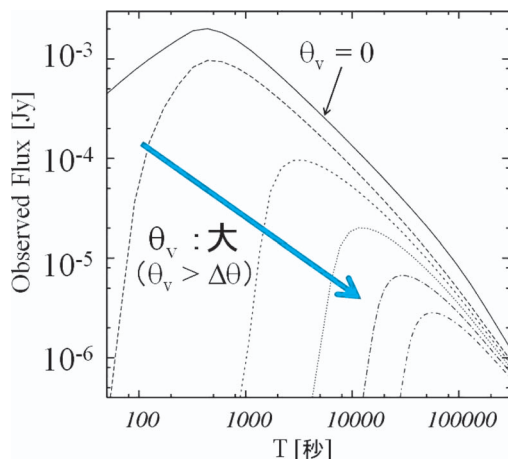


図3 開き角 $\Delta\theta=0.1$ ラジアン of ジェットを見込む角度 θ_v をいろいろ変えたときの、可視光残光を標準理論に基づいて理論的に計算したもの。実線は $\theta_v=0$ で、点線や破線等は、 $\theta_v=0.11$ ラジアンから 0.02 ラジアンずつ大きくしていったときのもの。GRB は $z=1$ で発生しているとした。

HETE-2 衛星の受けた XRF 020903²⁹⁾ の光学残光を調べたところ、数十日後から超新星特有の増光およびスペクトル変化が観測された³⁰⁾。また、XRF は GRB より真に暗いので XRF は近くのものが多いはずである。例えば XRF 020903 の赤方偏移は 0.251 で、Long GRB の典型値 $z\sim 1-2$ に比べて小さかった。

観測との対比という文脈でこれまで最も議論されているのは、XRF の残光の振舞いである。図3に示したように、Off-axis ジェットモデルは、XRF の残光は Long GRB とは異なることを予言する。標準シナリオに基づけば、典型的な Long GRB の残光は（超新星成分などの増光を除くと）数百秒後以降は単調に減光を続ける。これに対し、ジェットを軸からはずれたところから見ると、残光は発生直後は極端に暗く、数千秒かそれ以降まで増光を続けたあとでようやく減光に転じる^{31), 32)}。このことも相対論的ビーミング効果で説明できる。つまり、ジェットのローレンツ因子の大きな初期段階では、相対論的ビーミング効果の

ためにジェットを斜め方向から見ると暗く観測されてしまうのだが、しだいにジェットが減速しローレンツ因子が小さくなるにつれてビーミング効果が弱くなり、そのことが原因で徐々に明るくなっていくように観測される。最終的にはビーミング効果が十分弱くなり、ジェットを見込む角による違いが見られなくなる。

HETE-2 衛星や Swift 衛星によって受かった XRF の追観測が盛んに行われ、さまざまなイベントに対して残光の観測が行われた。その結果、複数の XRF の可視光残光から、モデルの予言通り、増光する時間帯があることが報告された³³⁾⁻³⁵⁾。一方で、XRF 050416a の X 線残光は増光成分は見られず、モデルの予言に反していた²³⁾。単純な Off-axis ジェットモデルでは XRF の残光観測の結果のすべてを満足に説明することはできないようである。

モデルの予言に反するイベントが報告されると、今度はそれも説明できるようにモデルを修正したくなるのが人情である。われわれはジェットの放射領域が非一様ならば XRF の残光は増光成分をもつ場合ももたない場合もあることに気づき、この「非一様ジェットモデル」に基づいて残光を含めた観測結果を説明した^{36), 37)}。ジェットが親星を突き抜ける際に非一様性をもつようになることはシミュレーションでも見えており、われわれにとってはモデルの自然な拡張だった。しかし、モデルの予言能力が小さくなってしまったといった批判もいただいた。なんでもかんでも説明しようとすると言言能力がなくなってしまうという良い勉強になった。

4. まとめと今後の展望

XRF に対するわれわれの「Off-axis ジェットモデル」は、提唱された理論的解釈のなかで最も早いものであったばかりでなく、論文発表当時の旬の観測装置を用いてすぐに検証可能な予言を多数もち、観測に指針を与えることができた。そのた

め、観測結果の比較の対象となる理論モデルとなり、多くの批判・賛同を頂戴することになった。また、モデルの理論的予言と観測を比較することでモデルを発展させることができた。理論を発表した直後にそれが観測によってテストされるため、一喜一憂して落ち着かないことが多かったが、スリリングな展開を楽しむことができたと思う。

「Off-axis ジェットモデル」で説明可能なイベントもあれば説明できないイベントもある。今後モデルに改良を加えていったとしても、すべてのイベントを無矛盾に説明するのは難しいのかもしれない。他の理論モデルで説明可能なイベントも混じっている可能性は高いであろう。要は最も重要なものは何かということである。いまのところ、GRBの観測の多様性を説明するうえで、ジェットを見込む角度が重要な働きをすることを一連の研究で示したと言える。これは、たとえモデルが死んだとしても後に残る概念になるであろう。

XRF についての筆者の最近の理論的な取り組みを簡単に紹介させていただく。筆者は Swift 時代の残光観測の理論的解釈の仕事を多数行ったが、それらを総合すると、X線残光と可視光残光を単一のシンクロトロン成分で説明しようとするのが困難なことがたくさんある^{23), 38), 39)}。したがって両者は別起源であり、残光は少なくとも二つの独立な成分の重ね合わせになっていると考えるのが自然なようである。このことに動機づけられ、X線早期残光の振舞いを説明するために、主に GRB 本体と可視光残光を起こす成分と主に X線残光を起こす成分からなる2成分ジェットモデルを提唱した⁴⁰⁾。このモデルの枠組みでは XRF 050416a のように GRB 本体と X線残光は別成分になるので必ずしも X線残光に増光成分がなくても良いことになる。このモデルでは、X線残光を起こす成分は GRB 本体を起こす成分よりも数千秒前にセントラルエンジンから放出される。したがって、MAXI などの全天 X線探査によって GRB 発生から数千秒前に何らかの前兆が観測さ

れるかもしれない。このモデルはすこしばかり奇抜な印象を受けるかもしれない。しかし最近 GRB 発生後1日以上もセントラルエンジンの活動が続いているという観測的示唆が得られており、そう思うと、GRB 発生数千秒前くらいからセントラルエンジンが活発であっても不思議でないのかもしれない。

最後に Short GRB の起源についても簡単に触れておきたい。現在の多数派は Long GRB と Short GRB は別起源だとするものであるが、もしそうだとすると、イベント数が似ているのは偶然ということになる。われわれは、Swift 衛星によって Short GRB の観測が進展する直前に、Short GRB も Long GRB と同じく特異な超新星爆発起源で、ジェットの周辺を見ると Short GRB になるという、多数派とは異なる考えを提案した³⁶⁾。ジェットの真ん中を見ると Long GRB として見え、ジェットを斜め方向から見ると XRF として見える。これは Short GRB, Long GRB, XRF すべての統一理論であり、活動銀河核の統一モデルの GRB 版を目指したものであった。この理論ではイベント数が Short GRB, Long GRB, XRF で同じくらいになるのは当たり前である。さらにこのモデルで発生頻度や継続時間分布、初期 X線残光などの観測事実も同時に説明することができた^{37), 41), 42)}。この GRB 統一モデルは、発表直後の Swift の観測¹⁶⁾⁻¹⁸⁾ で否定されたように思ったが、その後の観測の進展をみると、完全に否定されたわけでもないのかもしれない。2005年以降、Short GRB の Swift による検出率は伸びない。楯円銀河が母銀河であると断定できる Short GRB は現時点では一つしかない。Short GRB の中で Long GRB と違う種族であるものは全体の中のほんの一部であってほとんどの Short GRB は Long GRB と同一起源であるという可能性はまだ残る。GRB 統一モデルの大きな予言は、Short GRB にも超新星が伴うというものである。今後、このようなイベントが現れるかどうか、楽しみにしていきたい。

謝 辞

本稿は、筆者が院生時代に京都大学天体核研究室に在籍していたころから今日に至るまで続けてきた研究をまとめたものである。この間にたくさんの方々にお世話になった。院生時代の指導教官であった京大の中村卓史教授、兄弟子である井岡邦仁氏、弟弟子の当真賢二氏には特にお世話になった。上記以外のすべての共同研究者諸氏にも日頃からお世話になっていることに対し、この場を借りて御礼を申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Klebesadel R. W., et al., 1973, ApJ 182, L85
- 2) Metzger M. R., et al., 1997, Nature 387, 878
- 3) 井岡邦仁, 2004, 天文月報 97, 523
- 4) 村上敏夫ほか, 2004, 天文月報 97, 516
- 5) 河合誠之ほか, 2007, 天文月報 100, 17
- 6) 井上 進, 2009, 天文月報 102, 248
- 7) 米徳大輔ほか, 2010, 天文月報 103, 501
- 8) 小林史歩, 2002, 天文月報 95, 84
- 9) 中村卓史, 山崎 了, 2005, 物理学会誌, 60, 271
- 10) Zhang, B., Mészáros, P., 2004, IJMPA 19, 2385
- 11) Abdo A. A., et al., 2009, Science 323, 1688
- 12) Kouveliotou C., et al., 1993, ApJ 413, L101
- 13) Stanek K. Z., et al., 2003, ApJ 591, L17
- 14) 植村 誠ほか, 2004, 天文月報 97, 169
- 15) 川端弘治ほか, 2004, 天文月報 97, 176
- 16) Fox D. B., et al., 2005, Nature 437, 845
- 17) Gehrels N., et al., 2005, Nature 437, 851
- 18) Barthelmy S. D., et al., 2005, Nature 438, 994
- 19) Gotthelf E. V., et al., 1996, ApJ 466, 779
- 20) Heise J., et al., 2001, in Proc. 2nd Rome Workshop: Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era, eds. Costa E., Frontera F., Hjorth J. (Springer-Verlag), p. 16
- 21) Strohmayer T. E., et al., 1998, ApJ 500, 873
- 22) 坂本貴紀, 2005, 天文月報 98, 507
- 23) Sakamoto T., et al., 2008, ApJ 679, 570
- 24) Bloom J. S., et al., 2003, ApJ 599, 957
- 25) Ioka K., Nakamura T., 2001, ApJ 554, L163
- 26) Yamazaki R., et al., 2002, ApJ 571, L31
- 27) Yamazaki R., et al., 2003, ApJ 593, 941
- 28) Yamazaki R., et al., 2004, ApJ 606, L33
- 29) Sakamoto T., et al., 2004, ApJ 602, 875
- 30) Bersier D., et al., 2006, ApJ 643, 284
- 31) Granot J., et al., 2002, ApJ 570, L61
- 32) Yamazaki R., et al., 2003, ApJ 591, 283
- 33) de Ugarte Postigo, A., et al., 2007, A&A 462, L57
- 34) Fynbo J. P. U., et al., 2004, ApJ 609, 962
- 35) Guidorzi C., et al., 2009, A&A 499, 439
- 36) Yamazaki R., et al., 2004, ApJ 607, L103
- 37) Toma K., et al., 2005, ApJ 635, 481
- 38) Sato G., et al., 2007, ApJ 657, 359
- 39) Urata Y., et al., 2007, ApJ 668, L95
- 40) Yamazaki R., 2009, ApJ 690, L118
- 41) Yamazaki R., et al., 2006, MNRAS 369, 311
- 42) Toma K., et al., 2006, ApJ 640, L139

Origin of Observational Diversity of Gamma-ray Bursts

Ryo YAMAZAKI

Department of Physics and Mathematics, Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe, Sagami-hara 252-5258, Japan

Abstract: Gamma-ray bursts (GRBs) are the most violent explosive phenomena in the universe, which arise from relativistic jets toward us. The GRBs are observationally categorized into various sub-classes, such as short and long GRBs, X-ray rich GRBs, X-ray flashes, and so on. There are observational implications that the long GRBs, the X-ray rich GRBs, and the X-ray flashes have the same origin. Motivated by this fact, we propose a simple unified model of long GRBs, X-ray rich GRBs, and X-ray flashes by considering the relativistic beaming and Doppler effects. In our “off-axis jet” model, the viewing angle is an important parameter. The X-ray flashes and the X-ray rich GRBs are normal long GRBs viewed from off-axis directions. The model has many predictions which are testable with current instruments.