

A Unified Model of Short and Long Gamma-Ray Bursts, X-Ray Rich Gamma-Ray Bursts, and X-Ray Flashes

大阪大学 宇宙進化グループ 山崎 了

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、数 10 から数 100keV の γ 線が数秒から数十秒間にわたって観測される天体現象である。GRB は観測衛星によっておよそ 1 日に 1 回の頻度で観測されている。GRB が発見されたのは 1960 年代後半のことであった。1967 年に大気圏外核実験禁止条約が結ばれ、大気圏外の核実験が行われているかどうか監視する目的で打ち上げられた Vela 衛星が地球以外の方向からやってくる γ 線を偶然検出したのが GRB 研究の始まりである (Klebesadel, Strong, & Oleson, 1973)。

1997 年以前の GRB の観測はその一瞬の数秒間の γ 線を検出することしかできず、それからわかることは γ 線の時間変動や見かけの明るさ、エネルギー・スペクトル、GRB の到来方向等くらいであった。特に GRB までの距離が不明であり、天文学者間で論争となっていた；GRB は (1) 我々の銀河内 (我々の銀河の大きさは約 10 万光年) で起こっている、(2) 宇宙論的な距離 (数 10 億から 100 億光年以上) で起こっている、という二つの意見が対立していたが、当時は前者を支持する宇宙物理学者たちの方が大半だったようである。

1997 年 5 月 8 日にイタリアの BeppoSAX 衛星が受けた GRB から、その後数時間から数日かけて続く X 線の残光 (afterglow) が発見され、これによって正確な到来方向が決定された。その情報をもとに Keck 望遠鏡で可視光の残光がとらえられ、その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 (Metzger et al. 1997)。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 くらいかそれ以上という値になる。太陽よりも重たい星が死ぬときに引き起こす超新星爆発のエネルギーくらいである。大雑把に言って、現在の太陽が 1000 億年かかって放出するエネルギーがわずかに数十秒の間に γ 線で放出されていることになる。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、1 つの銀河あたり 100 万年に 1 回の割合で GRB が起こっていると概算できる。地球の年齢 (約 50 億年) と比べるとかなり頻繁に GRB が起こっていることがわかる。

現在、様々な観測的事実や理論的考察から、GRB はローレンツ因子 $\Gamma \sim 100$ 程度で我々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 (Zhang & Mészáros, 2004)。そのような相対論的プラズマ流同士が衝突して内部衝撃波を作り、そこで非熱的な粒子の加速が起こって 100 MeV 程度のエネルギーをもつ電子が生成され、同時に 10^5 G 程度の強い磁場も形成され、電子がシンクロトロン放射をして X 線が放射され、光のドップラー効果で光子エネルギーが $\Gamma \sim 100$ 倍になって、 γ 線として観測される (GRB)。さらに、相対論的プラズマがまわ

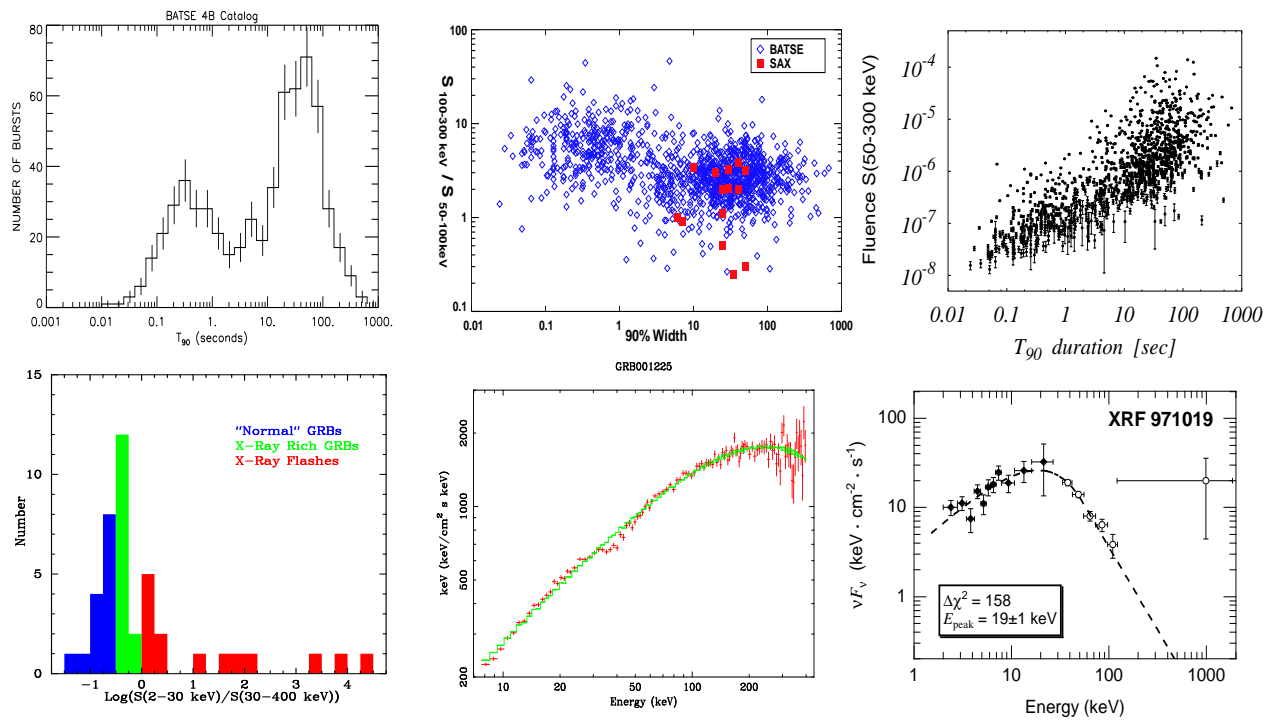


図 1: 上段左 : GRB の継続時間の分布 (BATSE Web page より)。上段真中 : GRB の継続時間–ハードネス関係 (Kulkarni et al. 2000)。上段右 : GRB の継続時間–Fluence (= flux を時間積分したもの) 関係。下段左 : *HETE* 衛星の受けた GRB のハードネス分布 (Lamb et al. 2003)。下段真中 ; long GRB の νF_ν -スペクトル (Barraud et al. 2003)。下段右 ; X-ray flash の νF_ν -スペクトル (Kippen et al. 2001)。

りの星間空間にぶつかって外部衝撃波を作り、X 線や可視光、電波などのシンクロトロン放射が生じる (afterglow)。このような内部・外部衝撃波モデル (シンクロトロン衝撃波モデル) が標準的な GRB の放射モデルとなっていて、GRB の観測量をおよそ説明することに成功している。

このような高エネルギーの相対論的プラズマの膨張を引き起こすもの、つまり GRB の central engine はまだ明らかになっておらず、宇宙物理学最大の謎の一つとなっている。 10^{51} erg 以上という莫大なエネルギーを一瞬のうちに解放できる天体現象としては、重たい星の爆発 (超新星爆発、極超新星爆発) や、連星中性子星の合体などが考えられるが、ある種の GRB に対しては、前者が GRB の中心天体の有力な候補なのではないかと考えられている。

2 ガンマ線バーストの観測的性質

GRB は観測的には個体差が激しく、いろいろな criterion でいくつかの種族に分類される。ここでは、もっとも重要な継続時間とスペクトルの性質に注目した分類のみを挙げる。

継続時間

継続時間が 2 秒より長いものを long GRB、2 秒より短いものを short GRB と呼ぶ。図 1 の上段左を見ると、bimodal 分布になっているように見えるが、検出器のバイアスによるものであるという議論もある。

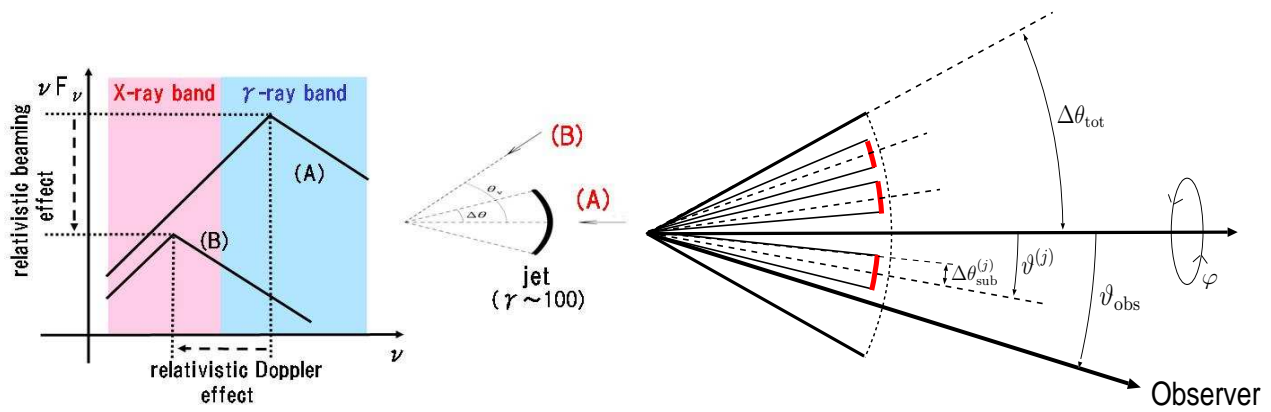


図 2: 左：相対論的ビーミング効果とドップラー効果。ある一つのジェットを正面からみると明るいハードな放射が観測され (A)、斜め方向からみると暗いソフトな放射が観測される (B)。右：我々の提唱する multiple sub-jet モデル。ある confine された領域の中に 1000 発程度の相対論的 sub-jet (又は放射セグメント) が生じていると仮定する。

スペクトルの性質

GRB のスペクトルは double power-law でフィットできる (図 1 の下段真中と下段右を参照)。 νF_ν -スペクトルのピークを与える光子のエネルギー (E_p) は、典型的には $E_p \sim 200\text{--}300\text{ keV}$ である。図 1 上段真中を見ると、short GRB は long GRB に比べて少しだけスペクトルがハードであるという兆候が見える。また、ここ数年、X-ray flash や X-ray rich GRB と呼ばれる、 $E_p \sim 10\text{ keV}$ くらいのソフトなイベントもかなり多いことがわかってきた。

long GRB/X-ray rich GRB/X-ray flash は超新星爆発起源？

図 1 下段左の結果に代表されるように、long GRB, X-ray rich GRB, X-ray flash の観測量の分布は連続的で、スペクトル以外の性質 (event rate や継続時間など) は良く似ていることから、これらは同一起源であると考えることができる。2003 年 3 月 29 日に HETE 衛星の受けた GRB は X-ray rich GRB に分類されるが、見掛け上かなり明るい現象で新聞でもとり上げられた。このイベントの 10 日後くらいの afterglow の光学域のスペクトルはエネルギーの大きな超新星爆発のものと酷似していた。つまり、long GRB, X-ray rich GRB, X-ray flash は重量星の爆発と関係しているということが明らかになったのである。

Short GRB – long GRB connection ?

Short GRB からは afterglow は受かっておらず、long GRB に比べると short GRB についての理解は進んでいないのが現状である。しかし、いくつか注目すべき観測結果がある。long GRB のはじめの 1 秒と short GRB の性質は良く似たものであるということがわかってきた。さらに short GRB から long GRB にわたって、fluence (= flux を時間積分したもの) は継続時間に比例することから (図 1 上段右を参照)、バーストの luminosity は一定であると考えることができる。これらのことから、バースト中の各パルス (1 秒程度かそれ以下) の性質は long GRB も short GRB も同じで、継続時間の違いはただ単にパルスの数の違いと考えることができる。

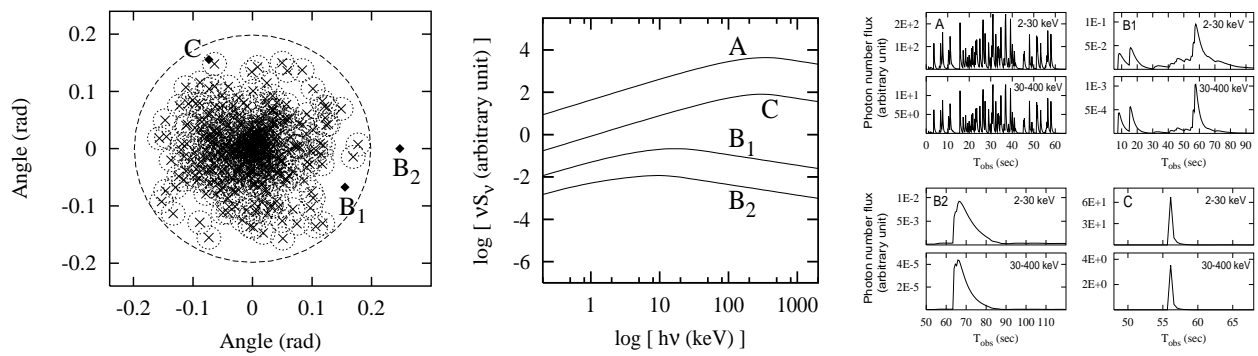


図 3: 左 : sub-jet の角度分布 (ジェット全体を正面からみた図)。小さい点線が sub-jet の放射領域を示し、×印は sub-jet の中心軸方向。A, B₁, B₂, C はそれぞれ観測者の視線方向を示す。A は見えないが、ジェット全体を真正面からみたときである。真中 (右) : A, B₁, B₂, C の視線方向からみたときの観測されるスペクトル (時間変動曲線)。

3 ガンマ線バーストの統一モデル

上で見たような short GRB, long GRB, X-ray rich GRB, X-ray flash の観測的類似性から、これらの起源は同じであると考えられる。それを支持するもう一つの根拠として short GRB, long GRB, X-ray rich GRB, X-ray flash の観測頻度が 4-5 倍の範囲内で同じであるということが挙げられよう。それに対して世界的には、short GRB は連星中性子星の合体から、long GRB/X-ray rich GRB/X-ray flash は重量星の爆発からそれぞれ生じるとする説が一般的であることには注意しておく。

GRB は相対論的 ($\Gamma \sim 100$) ジェットから生じているので、その放射機構を探る上では相対論的ビーミング効果と光のドップラー効果が重要になる (図 2 左を参照)。ある一つのジェットに着目しよう。ジェット静止系で X 線が放射される時、それを正面から見ると、光のドップラー効果で光子エネルギーが $\Gamma \sim 100$ 倍になって γ 線が観測される。一方ジェットを斜めから見ると、光のドップラー効果があまり効かず X 線が観測される。相対論的ビーミング効果も重要で、ジェットの進行方向から $\Gamma^{-1} \sim 0.01$ rad 以上離れた角度から見ると観測されるフラックスは極端に小さくなる。

このことを用いて我々は GRB の統一モデルを提唱した。中心天体からいくつもの sub-jet が放出されていると仮定する (図 2 右を参照)。一つ一つの sub-jet が時間変動曲線における一つのパルスを作り、その継続時間は 1 秒程度である。sub-jet の角度分布は一様ではなく、中心軸方向に密に、周辺部は疎になるように分布していると仮定する (図 3 左)。ここでは sub-jet の起源については考えないが、ジェットが星をつき抜ける間に起こる流体力学的不安定がその候補として挙げられる。

“A” の方向からみたとき : long GRB

ジェットを真正面から見たとき ($\vartheta_{\text{obs}} = 0$) を考える。視線方向に数十発の sub-jet が発射している。この場合はバーストの継続時間は長くなり (図 3 右 A を参照)、long GRB として観測される。

“C” の方向からみたとき : short GRB

視線方向に sub-jet がちょうど一つ発射しているとき、その sub-jet からの放射のみが卓越し、

short GRB として観測される (図 3 右 C を参照)。ジェット中心部に多数存在する sub-jet からの寄与は相対論的ビーミング効果のためほとんど無視できるくらい小さくなる。

“B” の方向からみたとき : X-ray rich GRB/X-ray flash

視線方向に sub-jet が一つも発射されていないとき、ハードな放射は観測されず、X-ray rich GRB/X-ray flash として観測される (図 3 真中 B_1 , B_2 を参照)。

4 まとめ

今日、ガンマ線バースト (GRB) は相対論的ジェットから生じているという観測的・理論的示唆が得られている。そうすると、相対論的なビーミング効果とドップラー効果が GRB の放射機構を調べる上では重要になる。我々は、観測的には多様で様々な種族に分類される GRB を統一的に説明するモデルを提唱した。同様の議論は銀河の中心にある活動銀河核の統一モデル等にも見られるものである。

つまり、すべての GRB は同一起源であるということになる。既に数個の X-ray rich GRB から超新星爆発の兆候を示す観測結果が報告されているが、我々のモデルが正しいとすると、short GRB, long GRB, X-ray rich GRB, X-ray flash すべてが超新星爆発と関連していることになる。近い将来の観測で short GRB にも超新星爆発の兆候が現れることを期待したい。

References

- Barraud, C. et al. 2003, *Astronomy & Astrophysics*, 400, 1021
- Kippen, R. M. et al. 2001, in proc. 2nd Rome Workshop: Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era (preprint astro-ph/0102277)
- Klebesadel, R. W., Strong, I. B., & Oleson, R. A. 1973, *The Astrophysical Journal Letters*, 182, L85
- Kulkarni, S. R. et al. 2000, AIP conf, Proc. 526: Gamma-Ray Bursts, 5th Huntsville Symposium, 277 (preprint astro-ph/0002168)
- Lamb, D. Q. et al. 2003, in proc. The Restless High-Energy Universe, Royal Tropical Institute, Amsterdam (preprint astro-ph/0309462)
- Metzger, M. R. et al. 1997, *Nature*, 387, 878
- Stanek, K. Z. et al. 2003, *The Astrophysical Journal Letters*, 591, L17
- Yamazaki, R., Ioka, K., & Nakamura, T. 2004, *The Astrophysical Journal Letters*, 607, L103
- Zhang .B & Mészáros, P. 2004, *International Journal of Modern Physics A*, in press (preprint astro-ph/0311321)