

# 低光度ガンマ線バーストの起源

当真賢二<sup>\*1</sup> (天体核研究室)

記録：筒井亮、野口大樹 座長：乾達也

天体核研究室は重力、宇宙物理学、宇宙論の3本柱を掲げて研究を行っており、今年度もそれぞれの分野のもとで多くの研究成果が得られた。そのすべてを紹介する時間的余裕はないので、ここではそれらを代表して、宇宙物理学分野から当真が、宇宙論分野から須山が自分の研究成果について紹介する。

## 1 イン트로ダクション

宇宙物理学は宇宙の種々の天体の構造と進化を理解しようという学問であるが、その中で近年急速に大きな研究分野として発展しているものがガンマ線バーストなる天体現象についての研究である。ガンマ線バースト(以下 GRB と略す)というのは1日に2, 3発、天空上のどこかで起こる爆発現象である。図1(左)は GRB の一例で、ガンマ線光子のカウントレートの時間変動を表す。このようにガンマ線が数秒(場合によっては数千秒)地球に到来する。爆発までの距離は典型的に100億光年であることがわかっている。それはいままでに確認されている天体現象の中で最も明るいものであり、数秒間のガンマ線のエネルギーは太陽が一生涯かけて放出するエネルギーに匹敵する。発見から40年、様々な観測的・理論的研究が進められてきているが、いまだ何が爆発を起こしているのかがはっきりしていない。天体核研究室ではそれについて迫るべく、日々研究に励んでいる。GRB 研究全般については昨年度の第二教室年次報告での「学問の流れ」で井岡氏によって紹介されているので、そちらも参照されたい(井岡邦仁, 2006)。

## 2 GRB の観測的性質と理論モデル

### 2.1 シンクロトロン衝撃波モデル

通例、ガンマ線が到来したあとに残光が観測される。それは可視光・エックス線・電波などの多波長で観測され、1日ほどかけてゆっくりと減光していく。図2(右)はガンマ

---

<sup>\*1</sup> ベストトーク賞受賞。

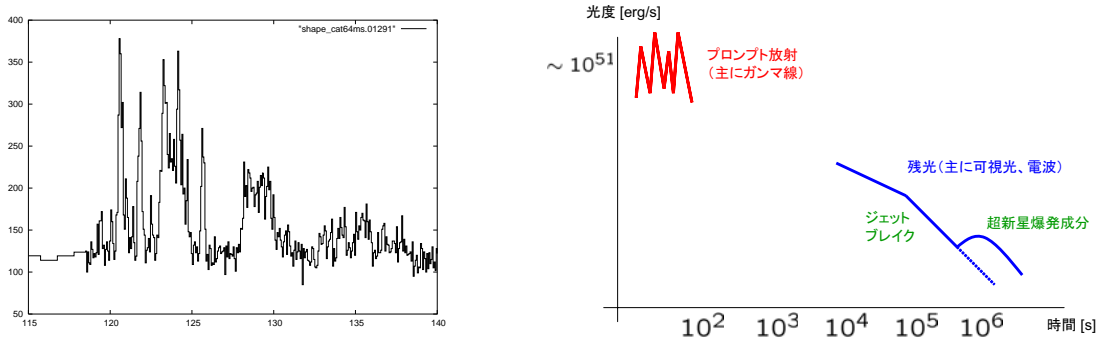


図 1: (左) GRB の例。横軸は時間 (単位は秒) で縦軸は光子のカウントレートである。(右) 典型的な GRB の観測結果を簡単に図示したもの。最初の数秒の激しい光度変動は爆発的なガンマ線放射 (左図) に対応している。

線の爆発的な放射 (プロンプト放射) とそのあとの主に可視光・電波域で観測される残光の振る舞いをまとめたものである。残光は地上の望遠鏡で数時間後から観測されはじめ、時間のべき乗則の減光を示す。多くの場合、1 日後に減光が急になり (ジェットブレイクと呼ばれる) また比較的近いイベントの場合には親星の超新星爆発の成分が重なって見える。

超新星爆発というのはおよそ太陽以上の質量を持つ重い星がその最期を迎えるときに起こす爆発であり、可視光域で特徴的なスペクトルを示す。GRB のいくつかのイベントでは、残光の構造のないべき乗則のスペクトルが減衰し超新星爆発特有の輝線・吸収線構造を持つスペクトルが現れることが観測されている (Hjorth et al., 2003; Stanek et al., 2003)。このことから GRB の起源は星の最期に関連しているのではないかと考えられている。

さて、以上の観測結果の大枠を説明する標準的な理論モデルがある (図 2 参照)。これはシンクロトロン衝撃波モデルと呼ばれる。まず星がその核燃焼を終えると自らの重力に耐え切れず陥落し、中心に 10<sup>6</sup>cm 程度の空間スケールを持つブラックホールあるいは中性子星を形成する。(中性子星は核力で自己重力を支えている星であり限界質量を持つ。それ以上の質量が陥落すればブラックホールとなる。) ここで、もし親星の自転が速かったならば、中心にできた回転するコンパクト天体からローレンツ因子  $\Gamma$  が 100 を超えるほどの相対論的な速度のプラズマ流が回転軸方向に放出されると考えられる (Woosley, 1993) (しかしその詳細な機構は明らかではない)。プラズマ流は親星 (そのスケールは 10<sup>11</sup>cm 程度) を突き破り、流れの非一様性が衝撃波を作り (その場所は 10<sup>13</sup>cm 程度) そこで非熱的に加速された電子によるシンクロトロン放射が最初のガンマ線として観測される (Rees & Mészáros, 1994)。そのあとプラズマ流はまわりの星間媒質と相互作用して

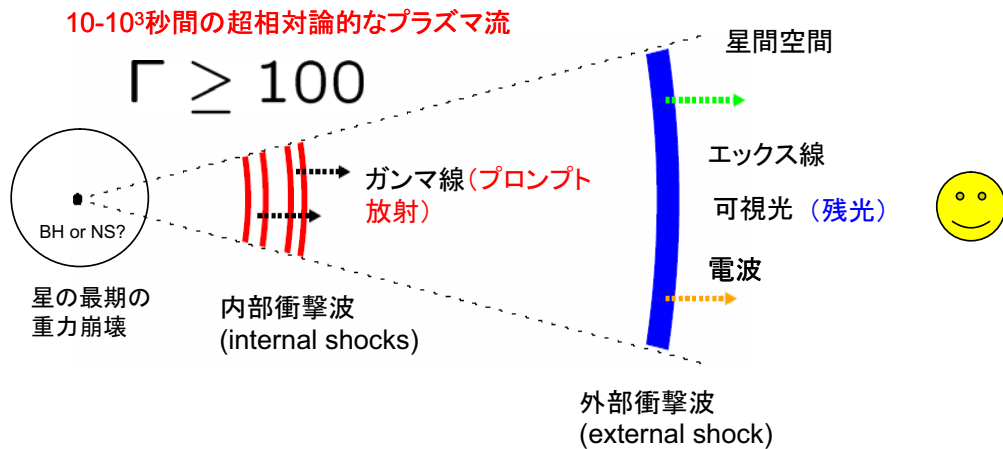


図 2: GRB の標準な理論モデル。星の崩壊でできたコンパクト天体が駆動する相対論的速度のプラズマ流の運動エネルギーが衝撃波を通じて散逸し輻射エネルギーに転換される。

衝撃波を作り (その場所は  $10^{16}$  cm 程度) それによるシンクロトロン放射が残光として観測される (Mészáros & Rees, 1997)。エネルギー論としては、星の重力エネルギーあるいは回転エネルギーがコンパクト天体によって運動エネルギーに転換され、それが星の外で衝撃波を通じて散逸し、内部エネルギーを得た電子が輻射エネルギーに転換するということを行なっている。

この理論モデルが支持されるのは残光が発見される以前からそのスペクトルの構造と時間変化を予測していたということにある。現在では残光の観測結果からこの標準理論モデルに基づいてプラズマ流の初期運動エネルギーや周りの星間媒質の密度などの物理的パラメータを決定できるようになっている (Panaitescu et al., 2002; Yost et al., 2003)。

## 2.2 GRB はジェットである

放射領域の静止系では電子が等方的な輻射場を作ると考えられるが、その放射領域は超相対論的速度で観測者の方向に運動しているため、観測者系では放射はビーミングする。その結果、放射領域の一部 ( $\sim 2\pi\Gamma^{-2}$  の立体角) しか観測できないことになる。したがって放射するプラズマ流が球対称に放出されているのかジェット状に放出されているのかは観測的には直接判別できない。

それにもかかわらず GRB はジェット状に放出されたプラズマ流から放射されていると理論的に考えられている。理由のひとつは残光にジェットブレイクが観測されることである (図 3 参照)。ジェット状の放射領域は相対論的な音速  $c_s \simeq c$  ( $c$  は光速) で等方に広がる

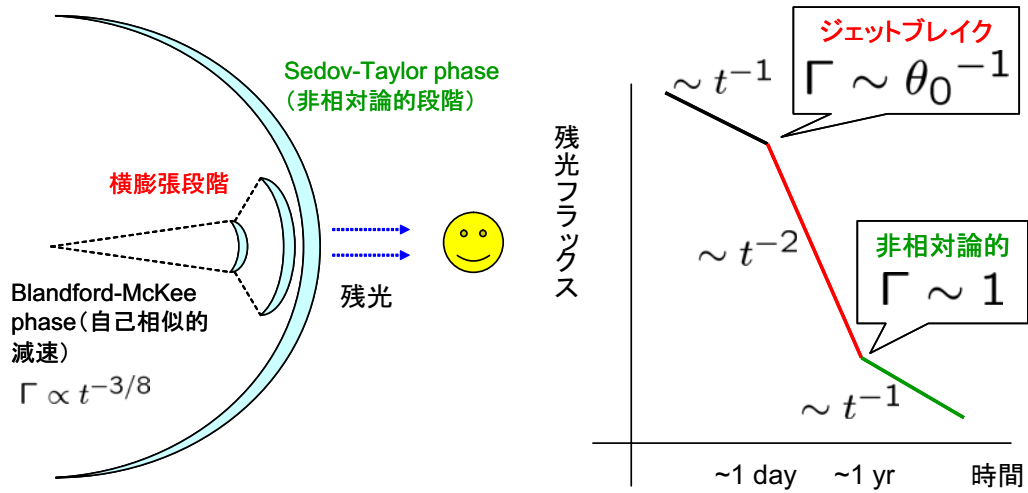


図3: (左)ジェット状の外部衝撃波の発展。 $\Gamma \sim \theta_0^{-1}$  になったところで横膨張が卓越し、球対称流に近づいていく。(右)ジェット状の外部衝撃波からの残光フラックスの時間変動。ジェットの横膨張が卓越するときがフラックスの最初の折れ曲がりに対応し、ジェットが球対称になり速度が非相対論的になるときにフラックスは再びゆるやかになる。

うとするが、それによってジェットの開角は初期値  $\theta_0$  から  $\theta \simeq \theta_0 + c_s \tau / (ct) \simeq \theta_0 + \Gamma^{-1}$  のように発展すると考えられる。よってジェットのローレンツ因子  $\Gamma$  が減衰して  $\theta_0^{-1}$  を下回れば、急激にジェットは横方向に膨張し、球対称流に近づいていく。これにともなって残光のフラックス密度は急激に下がり、ジェットブレイクとして観測されるのである(図2の右)。補足として、プラズマの流れが球対称になるとフラックス密度は再びゆるやかになる。

また、理由の二つ目として、全体的なエネルギー論と運動学が挙げられる。すなわち、観測的に GRB のガンマ線エネルギーはそれが等方的に放射されたとすると  $E_{\gamma, \text{iso}} \sim 10^{53} \text{erg}$  であり、初期ローレンツ因子が  $\Gamma \geq 100$  ということが示唆されるが、それらの事実がジェット状の流れであることを要求する。まず、星の崩壊でブラックホールあるいは中性子星ができたときに開放される重力エネルギーは  $E_g \simeq GM_c/R_c \simeq 3 \times 10^{53}$  であり ( $M_c$ ,  $R_c$  は崩壊するコアの質量と半径)、回転エネルギーもその程度に推定される。これが利用できる最大限のエネルギーであるが、このすべてがガンマ線に転換されるとは考えられない。もし流れがジェット状であれば、ガンマ線のエネルギーは  $E_\gamma \simeq E_{\gamma, \text{iso}} \theta_0^2 / 2 \simeq 10^{51} (\theta_0 / 0.1)^2 \text{erg}$  となって  $E_g$  より十分小さく現実的である。また星の静止エネルギーはおおよそ  $M_\odot c^2 \sim 10^{54} \text{erg}$  である ( $M_\odot$  は太陽質量)。よって中心のコンパクト天体が星の物質を球対称に吹き飛ばそうとすると流れは必ず非相対論的に

なる。これは超新星爆発に対応する。したがって少ない物質 ( $E_\gamma/\Gamma \sim 10^{-5}M_\odot c^2$ ) をジェット状に飛ばすのが望ましいことがわかる。

### 3 低光度ガンマ線バースト

2004 年末に打ち上げられた GRB 専用衛星 Swift によって大きな観測的成果が次々と得られているが、ここではそのうち低光度 GRB についての成果に着目する。低光度 GRB というのは観測されたプロンプト放射が通常の GRB の光度より 5 桁以上も暗かったイベントを指す。現在までにまだ 1, 2 例しか検出されていないが、我々近傍での発生率は通常の GRB よりおよそ 100 倍高いことが推定される。すなわち、低光度 GRB は単なる特異な GRB ではなく、別の GRB 種族を形成している可能性がある (Pian et al., 2006)。

2006 年 2 月 18 日に発生した低光度 GRB (GRB 060218 と名付けられる) は可視光の残光に超新星爆発を伴うものであった (Campana et al., 2006)。その超新星成分の詳細いモデルフィッティングの結果、超新星爆発の運動エネルギーは  $E_{k,SN} \simeq 2 \times 10^{51}$  erg であり、放出された質量は  $M_{ej} \simeq 2M_\odot$  であった。これらはいずれもいままでの超新星爆発を伴う GRB についての値  $E_{k,SN} \simeq 3 \times 10^{52}$  erg,  $M_{ej} \simeq 10M_\odot$  より非常に小さい。このことから、GRB 060218 の親星の質量は通常よりも小さく、崩壊の際にブラックホールではなく中性子星を形成したのではないかと考えられている (Mazzali et al., 2006)。

### 4 ジェットモデルの危機とその解決

この Swift 衛星が検出した低光度 GRB 060218 が GRB のジェットモデルに対して問題を投げかけた。それは電波残光の観測データから始まった (図 4)。電波残光はバーストの 2 日後から 22 日後までに検出されており、8.46 GHz 帯では典型的なべき乗則の減光を示しており、スペクトルも典型的なべき乗則であった (Soderberg et al., 2006)。これらは標準的なシンクロトロン衝撃波モデルでフィッティングすることができ、得られたパラメータからプラズマ流のローレンツ因子が  $\Gamma \approx 2(t/\text{days})^{-3/8}$  と求められる。ここで、もしプラズマ流がジェット状であれば ( $\theta_0 \leq \pi/2$ ) 6 日後までに  $\Gamma \simeq \theta_0$  となってジェットブレイクが起こるはずである。ところが、ジェットブレイクは 22 日まで観測されていない。このことから低光度 GRB はジェットではないのではないかという議論が盛んになされた。

上述した運動学の議論から、星の球対称な爆発で相対論的な流れを作ることは難しく、や

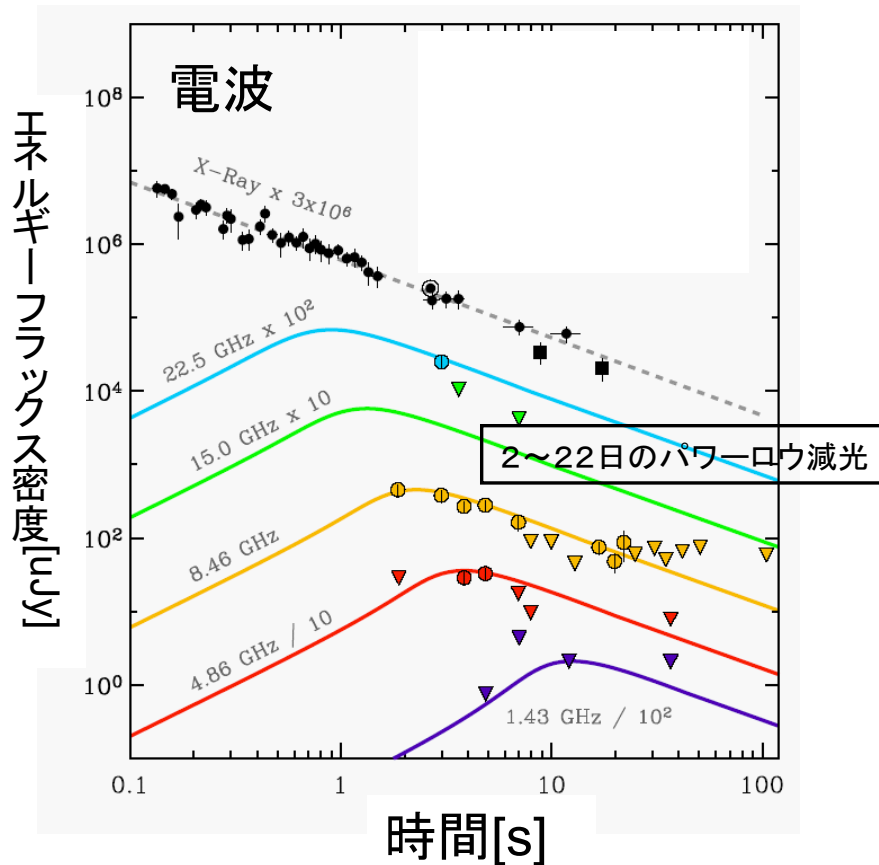


図 4: 低光度 GRB 060218 の電波残光。バーストの 2 日後から 22 日後にかけてべき乗則の減光が続き、ジェットブレイクが見られない。

はりジェットモデルのほうが望ましいと考えられる。そこで私はこの電波残光がジェットブレイク前の減衰段階ではなく、ジェットブレイク後の流れが球対称になったところの非相対論的段階を表しているのではないかという可能性を探り、見事に観測を説明する物理的パラメータを得ることに成功した (Toma et al., 2007)。非相対論的段階のシンクロトロン衝撃波モデルにもとづいて、電波残光のフラックスはプラズマ流の初期運動エネルギー  $E_k \simeq 10^{48} \text{erg}$  と星間媒質の密度  $n \simeq 10^2 \text{cm}^{-3}$  でフィットすることができ、さらに非相対論的段階に移行する時間スケールが  $t_s \simeq 2 (E_k/10^{48} \text{erg})^{1/3} (n/10^2 \text{cm}^{-3})^{-1/3} \text{days}$  と見積もられる。すなわち電波の観測が開始される以前にこのイベントのジェットは早々とジェットブレイクし、さらに非相対論的段階に入っていたと解釈することができる。可視光残光のデータからそのジェットが  $\theta_0 \simeq 0.3$ ,  $\Gamma_0 \simeq 5$  であればよいこともわかった。くわえて星内のジェットの伝播を解析し、これが星を現実的な時間スケールで突き破り、要求される開角とローレンツ因子を得ることができることを示した。

## 5 まとめ

GRB の観測的性質と理論モデルをレビューし、私の提案した低光度 GRB のジェットモデルについて紹介した。通常の GRB は星の重力崩壊でできたブラックホールが駆動する相対論的ジェットから生じると考えられており、それに対して低光度 GRB 060218 の起源は星の重力崩壊でできた中性子星が駆動する相対論的ジェットで説明することができる。

相対論的ジェットは GRB だけでなく、ほかに活動銀河核や X 線星などにも存在が確認されており、その駆動機構は宇宙物理学全体における大きな謎となっている。今回の研究で相対論的ジェットがブラックホール特有の現象ではないということが示唆される。また、有名な蟹パルサーなど、孤立した中性子星からジェットが放出されていることが観測で確認されているが、その速度は  $\sim 0.5c$  程度であり、それほど速くはない。すなわち密度の薄いところで回転する中性子星ではなく、星内部のような密度の濃いところでの中性子星の動的振る舞いをより詳細に研究することが今後の課題となると思われる。

## 参考文献

- Campana, S., et al. 2006, *Nature*, 442, 1008  
Hjorth, J., et al. 2003, *Nature*, 423, 847  
井岡邦仁 2006, 物理学第二教室研究グループ年次報告, 41, 113  
Mazzali, P., Deng, J., Nomoto, K., Pian, E., Tomionaga, N., Tanaka, M., & Maeda, K. 2006, *Nature*, 442, 1018  
Mészáros, P., & Rees, M. J. 1997, *Astrophys. J.*, 476, 232  
Panaitescu, A., & Kumar, P. 2002, *Astrophys. J.*, 571, 779  
Pian, E., et al. 2006, *Nature*, 442, 1011  
Rees, M. J., & Mészáros, P. 1994, *Astrophys. J.*, 430, L93  
Soderberg, A. M., et al. 2006, *Nature*, 442, 1014  
Stanek, K. Z., et al. 2003, *Astrophys. J.*, 591, L17  
Toma, K., Ioka, K., Sakamoto, T., & Nakamura, T. 2007, *Astrophys. J.*, 659, 1420  
Woosley, S. E. 1993, *Astrophys. J.*, 405, 273  
Yost, S. A., Harrison, F. A., Sari, R., & Frail, D. A. 2003, *Astrophys. J.*, 597, 459