

論文内容の要旨

Gamma-ray and X-ray Study of Relativistic Jets in Gamma-ray Burst Sources detected with *Swift*

(Swift 衛星を用いたガンマ線バーストにおける
相対論的ジェットの見測的研究)

佐藤 悟朗

はじめに

ガンマ線バースト (GRB) は、宇宙の一点から突然大量のガンマ線が放射される現象である。1967 年の発見以来、その正体は大きな謎に包まれてきたが、1990 年代以降の見測的・理論的進展により、宇宙論的な距離における宇宙で最大の爆発現象であることが明らかとなった。その放射は、ローレンツ因子にして 100 以上 (活動銀河核ジェットよりも 1 桁上) というアウトフローによる衝撃波がひきおこすものと考えられているが、この超相対論的アウトフロー (GRB ジェット) が作られる原因そのものについては、ほとんど分かっていない。1997 年に、ガンマ線放射 (プロンプトエミッション) に引き続く残光成分が発見され、X 線や可視光、電波といった多波長での爆発後の追見測が可能となり、GRB の位置、GRB ジェットの構造、そしてガンマ線バーストのエネルギー収支にいたるまでの幅広い情報が提供されるようになった。しかし、これまでの見測では、残光成分をガンマ線放射の直後から見測することが難しく、限られた情報の中での研究にとどまっていた。

Swift 衛星は、このような状況を打破するため、ガンマ線バーストの見測だけでなく、自動追尾まで行なう初めての GRB 探査衛星として開発された。*Swift* 衛星は、広視野のガンマ線イメージャを用いて軌道上でバースト源を探知し、すぐさま衛星を回頭させて X 線望遠鏡や可視光望遠鏡で見測を行うことができる。3 年間という極めて短い期間で開発された *Swift* 衛星において、我々は、その鍵を握るガンマ線イメージャ、BAT (Burst Alert Telescope) 検出器の開発に当初より携わり、特に BAT 検出器のエネルギースペクトルを決めるために必要な応答関数の構築を行った。

GRB に付随する残光は、相対論的な物質流が星間物質と衝突し、衝撃波を形成、粒子加速、放射冷却を起こして減速していく様子を反映し、時間と共に減光する。これに加えて、GRB 発生後の或る時期に急速に減光率が増加することが指摘されてきた。これはジェットブレイク (Fig. 1) と呼ばれ、GRB の中心エンジンから放出されたジェットが、放出時の開き角を越えて急速に膨張することが原因と考えられている。見測からジェットの元の開き角を求め、立体角の補正をすることで GRB の真の放射エネルギーを計算することができる。

GRB においてプロンプトエミッションのスペクトルの形状やその時間変動は、GRB 現象の発生機構を探ると共に、GRB の真の放射エネルギーを求めるために必要であり、これを正確に与える事は、*Swift* ミッションにおいて極めて重要である。本論文では、第一に *Swift* 衛星を用いた GRB 解析の礎と

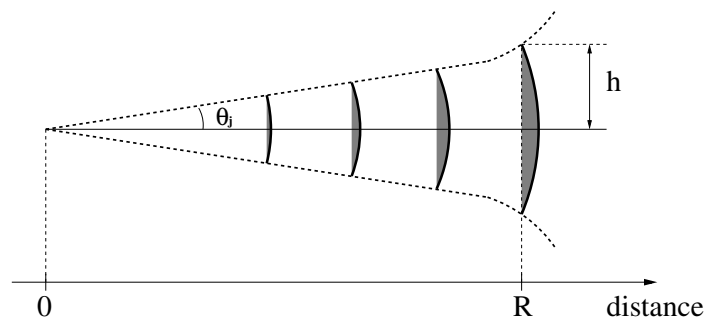


Figure 1: ジェットブレイク概念図。シェル状の放出物は、最初は一定の開き角 θ_j を保ったまま進むが、バルク運動のローレンツ因子が $1/\theta_j$ 程度になると、進行方向に対して垂直な方向に広がり始め、急速に減速する。この現象は、残光の光度曲線のべきの折れ曲がりとして観測されることが期待される。

なる BAT 検出器による GRB スペクトルの導出を行い、それにもとづく初期観測の結果をまとめる。第二に *Swift* によって新しく観測された GRB サンプルを用い、多波長追観測のデータを応用して、ジェットの幾何学形状に由来するジェットブレイク現象の探査を行う。

Swift 衛星搭載 BAT 検出器の応答関数の構築

GRB は、宇宙のランダムな方向で発生するため、効率よく検出するためには広い視野が要求される。一方で、一緒に搭載されている X 線と紫外可視光の望遠鏡をバースト発生源に向けることを考えると、高い空間分解能が必要となる。BAT 検出器では、比較的新しい半導体素子である CdZnTe 検出器を約 3 万個敷き詰め（全体で 5200 cm^2 の面積）、鉛でできた符号化マスク（コーデッドマスク）と組み合わせることで、 $90^\circ \times 120^\circ$ の広視野と、1-4 分角の角度分解能を両立させる。

BAT 検出器のもう一つの役割は、プロンプトエミッションそのもののスペクトルと時間変動を高い精度で追うことにより、GRB の放射を探ることもである。しかしながら、BAT 検出器に使われている CdZnTe 半導体はエネルギー応答が非常に複雑で、かつ約 3 万個の素子の応答にバラツキが存在するため、一つ一つの精緻な特性評価が必須となる。

CdZnTe 検出器の応答が複雑なのは、電荷の移動度が低く、寿命が短いために、素子内で発生した電子・正孔対を集めきることが難しく、テイルと呼ばれる構造がスペクトルに現れるからである。光子が検出器と相互作用する深さはエネルギーに依存するため、テイル構造もエネルギー依存性を持つ。我々は、異なったバイアス電圧で取得したスペクトルを組み合わせる新しい手法を提唱、開発し、実際にキャリブレーションに適用した。これによって、3 万個もの CdZnTe 素子の応答関数が決まり、GRB スペクトルを正確に求めることが可能となった。さらに、BAT の広い視野を考えると、大角度から入ってくるガンマ線に対する応答の変化や、検出器表面近くで相互作用した場合の蛍光 X 線が検出器から逃げ出す（エスケープ）効果など、スペクトル構造を複雑にする現象を包括的に取り入れるため、モンテカルロ法を用いることで、その複雑なエネルギー応答を構築することに成功した。ここで開発した応答関数は、BAT の解析ソフトウェアの中に取り込まれ、全世界に公開されている。

Swift 衛星による GRB 観測

Swift 衛星は、2004 年 11 月に打ち上げを迎え、2005 年 9 月時点で 77 個の GRB を検出することに成功している。我々は、これらのガンマ線観測データの系統的な解析を行い、GRB の継続時間の分布や、スペクトルの形状との関連を調査した。過去の観測で得られた継続時間の分布では、いわゆるロングバーストと呼ばれる比較的継続時間の長い GRB と、ショートバーストと呼ばれる、1 秒以下というような継続時間の短い GRB との間で二極構造が見られたのに対し、*Swift* 衛星で捉えた GRB では、こ

れまでのところ明確な違いは見られていない。また、ショートバーストではより高エネルギー側へスペクトルが伸びていると言われていたが、ロングバーストとの差異は見られなかった。ただし、ショートバーストの絶対的な検出数がまだ少ないため、結論は今後の観測に委ねられる。

また、これらの観測のうち 46 例では GRB の検出から 50–350 秒後という早期の追観測を実現している。*Swift* チームによる X 線観測結果の報告では、多くの場合で、光度曲線の最初に急激な減光成分（時間のべき < -3 ）があり、その後、比較的緩やかな減光成分（時間のべき -0.5 程度）が続く。さらにこれが少し折れ曲がって、時間のべき -1.2 程度で減衰する。この最後のべきの折れ曲がりとは、これまでの標準的なシンクロtron衝撃波モデルでは説明できず、その折れ曲がりの時刻まで中心エンジンからのエネルギー注入が続いているためとする説がある。このうち、初期の急激な減光成分は、GRB 本体を放出する放射源がシェル状に薄くなっていると想定した場合、観測者の方向を基準として高緯度の領域から放射される成分と考えると、矛盾が無い。また、一部の GRB では、フレア形状の X 線放射を伴うことが発見された。これは、中心エンジンが長期に渡り活動しているためという説が有力となっている。我々は、GRB 050319 と、GRB 050713a という二つの GRB の X 線データを解析し、早期減光成分と、X 線フレアの特徴を確認している。

ジェットの幾何学形状に由来するジェットブレイク現象の探査

GRB において、ジェット状に絞られたアウトフローは、星間物質を掃き集めるに従って減速を受ける。アウトフローの塊は、その共動系では光速に近い速度で膨張しているが、ローレンツ因子の大きなうちは相対論的な時間の遅れのため、静止系から見ると膨張は進まず、ジェットの開き角はほぼ一定のまま進む。ところが、ローレンツ因子が小さくなると、膨張が効き始め開き角が大きくなる。すると、ますます星間物質を掃き集めて急激に減速が進むことになる。これが、さきに述べたジェットブレイクと呼ばれる現象の理解である。ジェットブレイクの時刻まで、残光はほぼ t^{-1} に比例して暗くなるのに対し、ジェットブレイク以降は $t^{-2\sim-2.5}$ に比例して急速に暗くなるのが導かれている。また、ジェットブレイクは、これまで主に可視光で調べられてきたが、*Swift* 衛星による観測では、おそらく検出可能な GRB が暗くなったために可視光残光が比較的暗く、X 線での観測が重要となっている。ジェットブレイクは、流体力学的な運動学で決まる現象であり、様々な波長で同時に観測されるはずである。

プロンプトエミッションの放射エネルギーは、通常、等方的な放射を仮定して求められるが (E_{iso})、ジェットブレイクが観測されると、ジェットの開き角を計算し、その補正を加えた真のジェットの放射エネルギー ($E_{\gamma} = (1 - \cos \theta_j) E_{\text{iso}}$) を求めることができる。補正したエネルギーとスペクトルのピークエネルギー ($E_{\text{peak}}^{\text{src}}$) との間には正の相関が見つかり、Ghirlanda の関係 ($E_{\text{peak}}^{\text{src}} \propto E_{\gamma}^{0.7}$) と呼ばれている。この相関が非常に強いことから、この関係を用いて $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ から導かれる GRB の光度を指標とすることで、初期宇宙を探ったり、宇宙論パラメタに制限をつける試みがなされている。*Swift* 衛星の観測により、赤方偏移が 6 を超える高赤方偏移の GRB が検出されはじめており、こうした宇宙論に係る研究を推進する上でも、Ghirlanda の関係の確かさを確認することが不可欠となっている。

ところが、*Swift* 衛星による観測では、ほとんどの場合でジェットブレイクの証拠が見つかっていない。そこで、我々は、過去の観測から得られた Ghirlanda の関係を逆に利用することで、ジェットブレイクの時刻を予想し、実際に観測された X 線残光の光度曲線と比較するという着想を得た。この手法を適用するには、赤方偏移の決定、プロンプトエミッションのピークエネルギー、放射エネルギーの総量、および X 線バンドでの高精度な観測が必要である。我々は、先に述べた系統的な解析を元に、2005 年 7 月まででこれらの条件を満たす 3 つの GRB (GRB 050401, XRF 050416a, GRB 050525a) を選び出し、これらのガンマ線・X 線データを解析した。

その結果、まず、等方的な放射を仮定したエネルギーと、スペクトルのピークエネルギーとの間には、これまでに Amati らによって発見された相関 (Amati の関係; $E_{\text{peak}}^{\text{src}} \propto E_{\text{iso}}^{0.5}$) を満たすことが確認された。これは、プロンプトエミッションについて、シンクロtron衝撃波モデルという従来の放射メカニズムを支持するものである。

しかしながら、X 線光度曲線を調べると、先程述べた手法により予想した時間帯には折れ曲がり

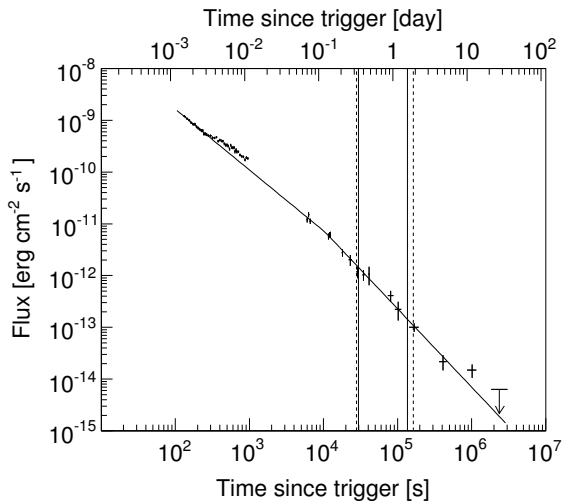


Figure 2: GRB 050525a に伴う X 線残光の光度曲線。Ghirlanda の関係を利用すると、縦線で囲まれた時間帯にジェットブレイクが起こることが予想されるが、実際の光度曲線にその兆候は見られない。

は見つからず、むしろ直線的に伸びていることが判明した。Fig. 2 に、GRB 050525a の場合を示す。BAT のトリガー時刻から 10600 ± 3300 秒後に、 $t^{-1.18 \pm 0.02}$ から $t^{-1.51 \pm 0.06}$ への折れ曲がりがあるが、折れ曲がり後の時間変化が依然として緩やかなため、ジェットブレイクの特徴とは一致しない。一方で、Ghirlanda の関係から求めたジェットブレイクの予想時刻は、縦線で囲まれた時間帯となるが、そこにべきの折れ曲がりは見られない。この時間帯に折れ曲がりがないならば、予想されるよりも、より早い時間帯か、またはより遅い時間帯にジェットブレイクが起きていると考えられる。早い時間帯には、先程述べた折れ曲がりが存在する。仮にこれをジェットブレイクと見なせば、開き角を計算して、Ghirlanda らと同じように補正したエネルギー (E_γ) を計算することができるが、Ghirlanda の関係からは外れる。一方、遅い時間帯にジェットブレイクが存在するケースは、残光が最後に検出された時刻から下限値を求めることができるが、この場合も Ghirlanda の関係からは外れることになった。

Fig. 3 に、3つの GRB に対して計算した結果を示すが、いずれも同様の結果を得た。図中、左側の3点が X 線で早い時期に見えた折れ曲がりを見なした場合で、右側の3点は、最後の観測時刻を元に計算した下限値である。つまり、過去のジェットブレイク観測と比較して、十分に長い時間を観測しているにも関わらず、ジェットブレイクが見つからないということが明らかとなったのである。本研究で解析を行った3つの GRB は、Amati の関係は満たし、かつ観測条件が良いものを選んだだけであるので、我々が特異な GRB だけを解析したとは考えづらい。従って、Ghirlanda の関係を全ての GRB に適用するには注意が必要である。今回の研究結果は、Ghirlanda の関係が成り立つとしても、これまで考えられてきたよりもはるかに分散が大きいということを示唆している。さもないければ、ジェットブレイクが起きているにも関わらず、X 線と可視光とで異なる振る舞いをする事を要求することになる。

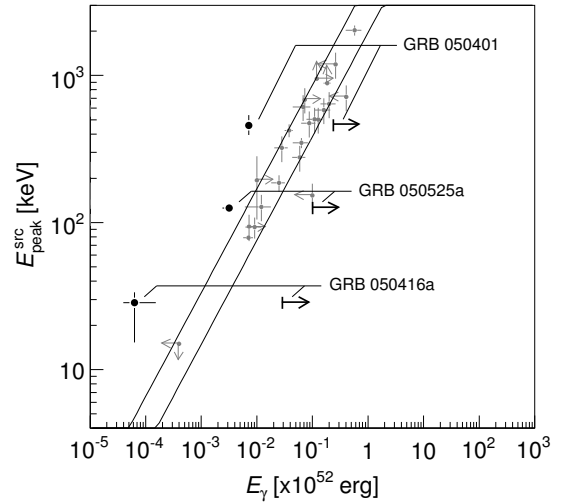


Figure 3: ジェットの開き角の効果を補正したジェットの放射エネルギーと、スペクトル中のピークエネルギーとの関係。過去に観測されたもの（グレー）は、強い相関関係を示し、2本の直線で囲まれる領域に入る (Ghirlanda et al. 2004)。それに対し、Swift で捉えた3つのバーストは、アウトライアーとなる。