

ガンマ線バースト観測衛星 Swift 衛星搭載

Burst Alert Telescope

佐藤 悟朗、 高橋 忠幸、 中澤 知洋、 渡辺 伸 (ISAS/JAXA、高橋研究室)、
田代 信、 鈴木 雅也 (埼玉大)、 岡田 祐、 高橋 弘充 (東大)、
Swift-BAT Instrument team (NASA/GSFC、サザンプトン大 他)

1. Swift ガンマ線バースト観測衛星

ガンマ線バースト (GRB) は、ガンマ線領域で光り輝く (\sim few photons $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ flux in the 50–300 keV band) 突発的な天体現象であり、1960 年代後半のVela衛星による発見以来、この 30 年間で飛躍的に理解が進んできた。特に、BeppoSAX衛星搭載のWFCによって正確な位置決定が行われたことにより、バーストに続くX線での残光発見[1]、そして可視光、電波に至る地上からのフォローアップ観測が行われ、GRBが宇宙論的遠方で発生していることが明らかになったのである[2]。近年では、2000 年にHETE-2 衛星が打ち上げられ、バースト発生から残光観測に入るまでの時間を飛躍的に短縮し、発生直後からの残光の振る舞いを調べることが可能になった。また、これまでに観測されたバーストの継続時間を見てみると、ミリ秒から数十分まで幅広く分布し、0.3 秒程度 (short burst) と 30 秒程度 (long burst) をピークに 2 種類に大別できることがわかる (図 1)。しかしながら、これらのうち継続時間の短いshort burstとその残光に関する研究はあまり進んでいない。なぜなら、BeppoSAX衛星は 1 秒以下のバーストの位置を正確に決定することができず、またshort burst がハードなスペクトルを持つ傾向があるためHETE-2 では検出しづらいためである。

こうした研究をさらに推し進めるために開発が進められているのが、Swift ミッションである。Swift は、GRB と残光の観測専用の衛星で、ガンマ線イメージャ (Burst Alert Telescope, BAT)、X 線望遠鏡 (XRT)、UV 可視光望遠鏡 (UVOT) の 3 種類の検出器を搭載する (図 2)。GRB を

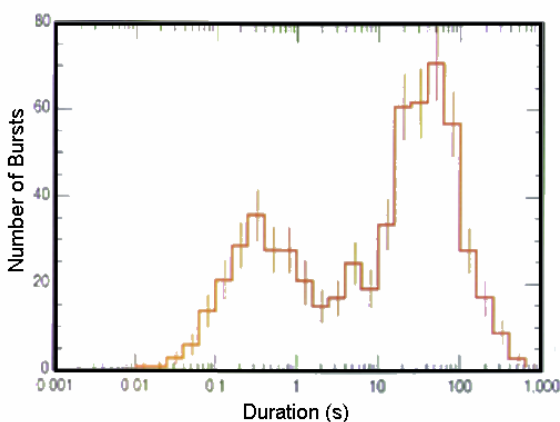


図 1. BATSE によって検出された GRB のバースト継続時間の分布

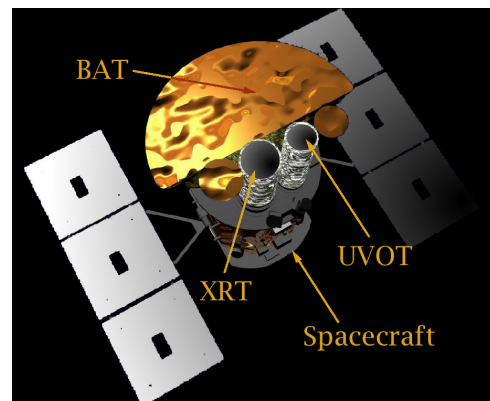


図 2. Swift 衛星 (NASA/GSFC)

BAT の持つ 1.4 steradian (half coded) という広い視野で常時監視し、バースト発生とともにその位置を 1-4 角で自動決定、XRT、UVOT の視野内にターゲットを入れるように衛星自身を 1 分程度で回頭する。これにより、バースト検出後約 1 分から、数時間後あるいは数日後まで観測を続ける。この際、衛星上のソフトウェアでバーストのプライオリティ値を計算し、新たに発生したバーストのプライオリティ値が前の値を上回ると、次のバーストの観測に移ることになる[3]。また、BAT が監視するエネルギー領域は 15-150 keV と比較的高いので、数多くの short burst の検出も期待される。Swift 衛星は、2004 年の 5-6 月の打ち上げを目指し、米英伊を中心とした国際共同ミッションとして開発が進められている。日本からは、ISAS/JAXA、埼玉大、東大が、BAT 検出器チームに加わっており、NASA/GSFC などと共同して、開発・キャリブレーション試験を進めている。

2. Burst Alert Telescope (BAT) と検出器の特性評価

BAT は、NASA/GSFC において開発が進められ、2002 年春から組み立てが始まり、現在は作業をほぼ完了している。また、その性能を最大限に引き出せるように、開発と並行してキャリブレーション試験を行い、検出器の評価を行ってきた。図 3 に BAT の概念図を、表 1 に各種パラメータを示す。BAT の検出器面には、 $4 \times 4 \times 2 \text{ mm}^3$ の大きさの CdZnTe 半導体素子が 32,768 個敷き詰められており（全体で $5,200 \text{ cm}^2$ の面積）、各素子が一つ一つのピクセルとして働く。検出器面の 1 m 上方には、 $5 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$ の大きさの鉛タイルを敷き詰めて作られたコーディドマスクが位置する。これにより、コーディドマスクの影のパターンを撮像し、そのモジュレーションを解くことで、スカイイメージの再合成やスペクトロスコピーを行う。従って、この極めて多数の CdZnTe 検出器の個性を把握することが、大きな鍵となる。

ここで、キャリブレーション試験中に取得した個々の CdZnTe 半導体素子の ^{57}Co に対するスペクトルを図 5 に示す。図中には適当に選択した 3 つの素子のスペクトルを重ねてプロットした。これらは既に電氣的な特性（ゲインとオフセット）の違いを補正したものである。122 keV のラインを

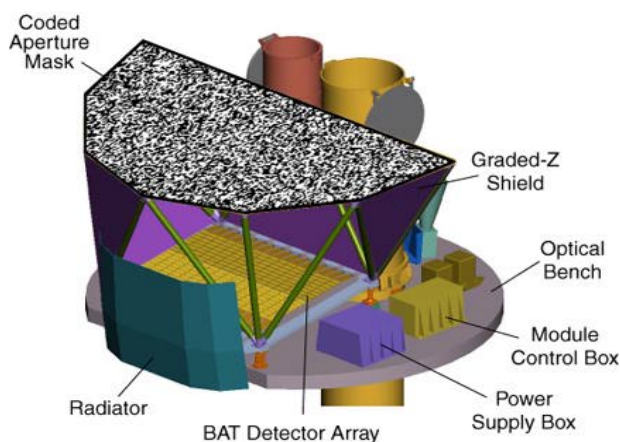


図 4. Burst Alert Telescope (NASA/GSFC)

BAT Parameter	Value
Energy Range	15-150 keV
Energy Resolution	~7 keV
Aperture	Coded mask, random pattern, 50% open
Detection Area	5240 cm ²
Detector Material	CdZnTe (CZT)
Field of View	1.4 steradian (half-coded)
Detector Elements	256 modules of 128 elements
Detector Element Size	$4 \times 4 \times 2 \text{ mm}^3$
Coded Mask Cell Size	$5 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3 \text{ Pb tiles}$
Telescope PSF	20 arcmin
Position Determination	1-4 arcmin
Sensitivity	$\sim 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

表 1. BAT Characteristics

見てみると、それぞれ低エネルギー側にテイルを引いていることが判る。これは、CdZnTe 半導体の低い電荷輸送特性（特にホール）のためである。また、32,768 個という膨大な数の CdZnTe を用いるにあたり、製造過程でスペクトル形状を見てある程度選別しているが、その数の多さからどうしても素子ごとの輸送特性の違いが生じ、ピーク位置、テイルの大きさにバラつきができてしまっていることも判る。これらのピーク位置の違いを評価して、約 3 万個のスペクトルを足し合わせたものが、図 6 のスペクトルである。~7 keV の優れたエネルギー分解能を示している。一方、図 5 で示した検出器ごとの応答特性（ピーク効率やテイルの大きさのばらつき）を把握するため、我々が独自に開発した CdZnTe 検出器の特性評価ソフトウェアを用いて、キャリブレーションデータの解析を行った。このソフトウェアは、CdZnTe 素子内のキャリアの移動度 μ と平均寿命 τ の積（ $\mu\tau$ 積）をパラメタとしてスペクトル形状をモデル化、実際に取得されるスペクトルとフィッティングを行うことで、電荷輸送特性を求めるものである[4]。この手法を CdZnTe 素子全数（現在約 28,000 個）に適用し、各素子の $\mu\tau$ 積を求めた結果を図 7（電子）、図 8（ホール）に示す。これらの図は、 $\mu\tau$ 積の値をカラーで表し、実際の検出器の配置状に並べたものである。これによって、図中に見られるような大きな幾何学的構造が発見され、後に製造ロットの違いに一致することが判明した[5]。こうして得られたパラメタから、現在は各 CdZnTe 検出器、及び 32,768 個全体での応答関数を構築中である。

続いて、BAT による撮像の例を示す。図 9 に示すのは、XY ステージを検出器の 3 m 上方に設置し、線源をゆっくりと動かしながら BAT でデータを取得したものである。検出器面のコーディドマスクの影のパターンをフーリエ変換によって像を再合成した。「BAT」という文字がくつき

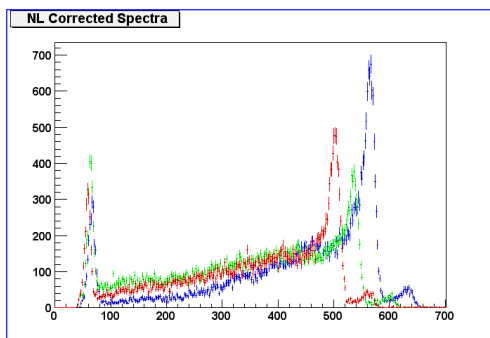


図 5. 適当に選択した CdZnTe 素子の ^{57}Co スペクトル。

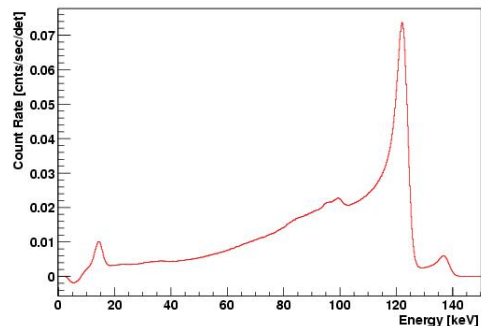


図 6. 約 3 万個の CdZnTe のサムスペクトル。ピーク位置を補正して足し合わせている。

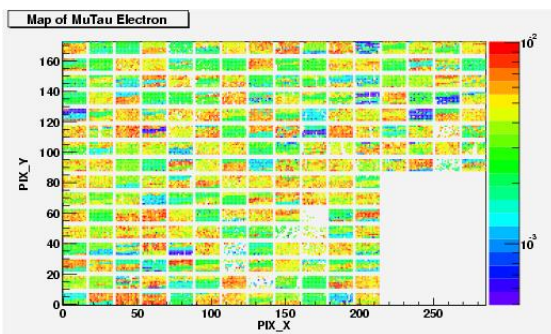


図 7. 電子の $\mu\tau$ 積の値をカラーで表したマップ。256 x 128 (32768)ピクセルが表示されている。

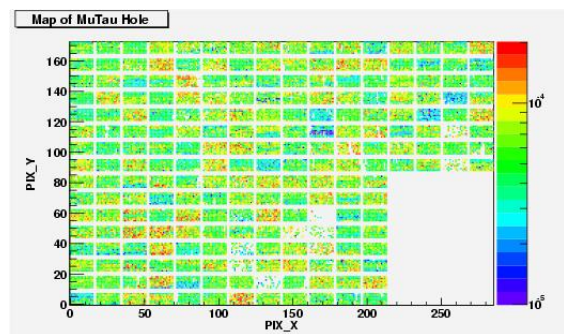


図 8. ホールの $\mu\tau$ 積のカラーマップ。

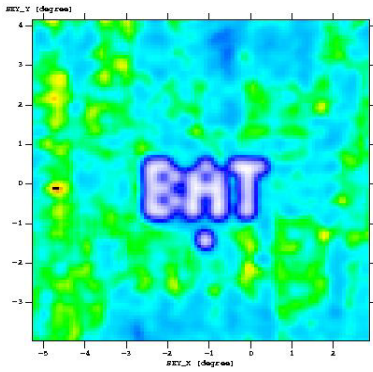


図 9. 線源を動かして撮像したイメージ。

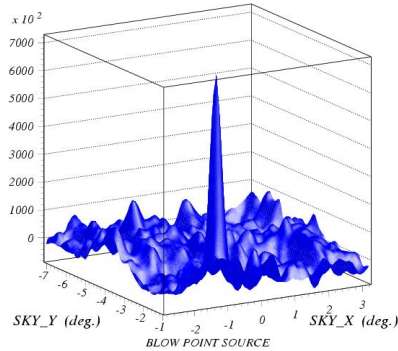


図 10. 左図の点源部分の拡大図。

りと撮像されていることが判る。また、図 10 は「BAT」の文字の下にある点源に対する像を拡大したものであり、半値幅は 23.7 arcmin であり、設計どおりの結像性能を示している。

3. BAT 検出器シミュレータの開発

BAT 検出器が Swift 衛星に搭載されると、衛星本体からの散乱成分がスペクトルに大きく入り込んでくることが予想されるため、BAT 検出器の応答関数を構築するには、衛星全体の構造物を考慮する必要がある。また、荷電粒子の入射による放射化の影響も考慮すべき重要な点である。そこで我々は、Geant 4 の枠組みの中で、サザンプトン大学が開発した衛星全体の質量モデル (図 11) に、我々が求めた CdZnTe 個々の検出器特性を組み込んだ BAT 検出器シミュレータを開発した (Simulation program with Swift Mass Model, Sim-SwiMM[6])。これを用いて、実際のキャリブレーション試験の一つを再現した (図 12)。図には実際のデータとシミュレーション結果を重ねて表示しており、ピークの形からテイル構造まで極めて良く一致していることが判る。

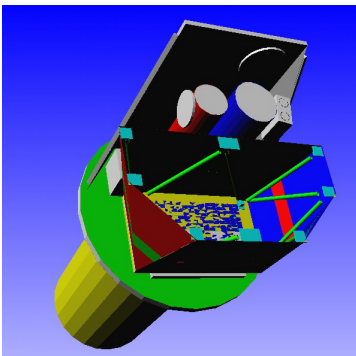


図 11. Swift Mass Model

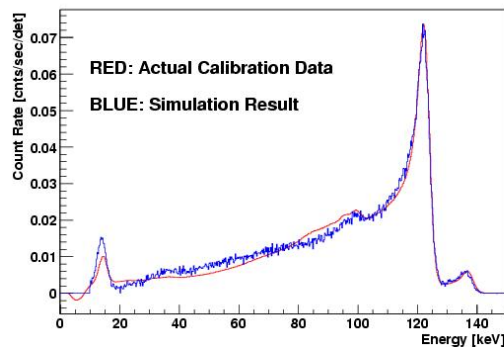


図 12. キャリブレーション試験の再現結果。

実際のデータとシミュレーションは良く一致している。

参考文献

- [1] E. Costa, et al., 1997, Nature 387, 783
- [2] van Paradijs et al., 1997, Nature, 386, 686
- [3] Gehrels et al., ApJ in press
- [4] Sato et al. 2002, IEEE Trans. Nucl. Sci., 49, 1258
- [5] Sato et al. 2003, Proc. SPIE
- [6] 佐藤 悟朗 他, 2003, 理研シンポジウム集録