

Suzaku/WAM で観測されたガンマ線バーストの数値計算による位置決定法の開発とその系統誤差の評価

藤沼 洸 (埼玉大学大学院理工学研究科)

Abstract

X 線天文衛星「すざく」に搭載されている広帯域全天モニタ (Wide-band All-sky Monitor; WAM) は、全天のほぼ半分の視野を持ち、硬 X 線帯域で大きな有効面積 (800 cm^2 at 100 keV) を持つため、ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst; GRB) をはじめとする突発天体を年間 300 イベントあまり検出する。しかし、WAM は到来方向を制限する機構を持たず、天体の位置の決定ができない。このため、光子の到来方向に依存する応答関数が作成できず、スペクトル解析できるイベントは、太陽フレアのほか他衛星によって位置決定された約 1 割の GRB に限られる。残りの 9 割の GRB を解析するためには、その到来方向を独自に求める必要がある。そこで我々は、まず衛星全体を再現したマスモデルを作成、モンテカルロシミュレーションを行い、光子の入射角度ごとに WAM の 4 面のそれぞれの計数率を詳細に調べた。この結果を、実際の観測結果と比較する事で WAM 単独で到来方向を推定する方法を開発した。この方法を検証するために、他衛星の観測により到来方向が既知の 32 の GRB について、このシミュレーションツールを用いて推定した到来方向と比較した。その結果、物質が多い冷媒タンクがある方向を除けば、両者の方位角方向の差分の平均は約 7° の精度であった。さらに、推定した到来方向で応答関数を作成、スペクトル解析を行い、その結果を他衛星によって決定された到来方向で作成した応答関数による評価と比較した。そして、WAM のみで観測された GRB のスペクトル解析をした際のパラメーターの系統誤差を見積もった。これにより、新たに 800 イベントあまりの GRB をスペクトル解析できるようになった。

1 イントロダクション

全天モニタは、宇宙で突然発生するガンマ線バースト (Gamma Ray Burst; GRB) や太陽フレアといった突発天体の検出に有効である。2005 年に打ち上げられた X 線天文衛星「すざく」に搭載されている広帯域全天モニタ (Wide-band All-sky Monitor; MAM, Yamaoka et al. 2009) もその一つである。WAM は、硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector; HXD) の外周を取り囲むように 4 つの面からなる反同時計数用の $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) シンチレーションカウンタであるが、50–5000 keV という広い観測帯域、 $\sim 2\pi \text{ sr}$ におよぶ広い視野、100 keV の光子に対して 800 cm^2 という大きな有効面積を持つため全天モニタとして利用される。そして、年間 300 イベントあまりの突発天体を検出してきた。4 つの面は、それぞれ WAM0, WAM1, WAM2, WAM3 と名付けられており、各面が独立に計数可能である。WAM の概観を図 1

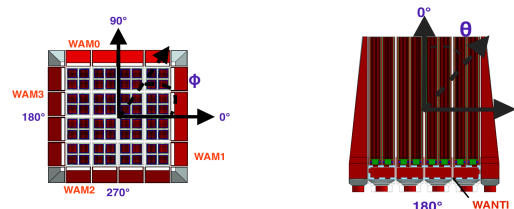


図 1: WAM ジオメトリー。左: WAM を上から見た図。右: WAM を横から見た断面図

に示す。WAM の応答関数は、光子の入射角度に強く依存するため、スペクトル解析をするためには天体の位置情報が必要となる。しかし、WAM 単独では入射光子の到来方向を知ることができない。そのため、観測された GRB は Swift/BAT や Fermi/GBM などと同期観測されている必要があり、それらの衛星によって決定された位置情報を用いて応答関数を作成している。この方法によってスペクトル解析できている GRB は約 1 割に限られている。残りの約

9 割の GRB を解析するためには、独自に位置を決定する必要がある。

2 位置決定方法の開発

我々は、WAM 単独での GRB 位置決定が、検出器の幾何学的構造を利用して各面のカウント比をモンテカルロシミュレーションと実測値で比較することにより可能かどうか調査した。

2.1 シミュレーションによる検出効率の角度依存性のデータベース構築

我々はまず、衛星全体を構成する物質やその密度、空間分布を再現したマスモデルを用いてモンテカルロシミュレーションを行い、様々な入射角度に対する WAM と HXD 底面部 (WANTI) のエネルギー応答を詳細に調べた。モンテカルロシミュレーションには、Geant4 コードを利用した。マスモデルは、地上実験などをもとに較正されている WAM エネルギー応答関数の構築に使用されているもの (Ohno et al. 2005, Ozaki et al. 2006, Terada et al. 2005) をベースに、一部使用材料の再現度を高めるなどの修正を加えた。入射光子スペクトルは、10–5000 keV の範囲で典型的な GRB のスペクトルである Band Function ($\alpha = -1.0$, $\beta = -2.5$, $E_{\text{peak}} = 250$ keV) を仮定した。天球上から一様に衛星全体に向かって入射させ、入射角度ごとに各光子がどの面で検出されるか、その確率分布を計算した。ここでは、HXD の上面を $\theta = 0^\circ$ 、底面を $\theta = 180^\circ$ として、WAM0、WAM1、WAM2、WAM3 それぞれの正面を $\phi = 90^\circ$ 、 $\phi = 0^\circ$ 、 $\phi = 270^\circ$ 、 $\phi = 180^\circ$ とする (図 1)。

シミュレーションの結果、WAM の各面、WANTI で検出された粒子の入射角度に対する計数率を図 2、図 3 に示す。一様に入射させたので、各面での計数率は、入射角度に対する各面での検出効率を示している。したがって、WAM の検出効率は入射角度を強く反映していることが確かめられた。その上で我々は、この結果をもとに角度応答のデータベースを構築した。

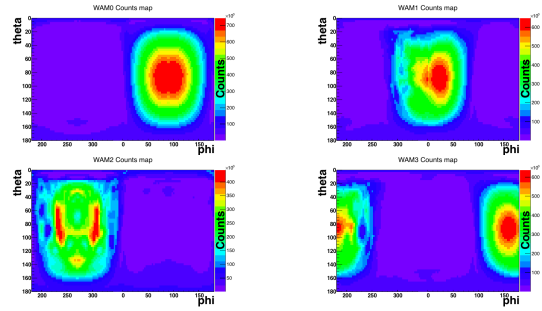


図 2: WAM の検出効率入射角度依存性のシミュレーション結果。左上: WAM0. 右上: WAM1. 左下: WAM2. 右下: WAM3.

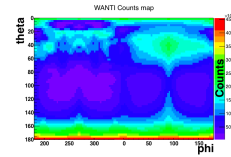


図 3: WANTI の検出効率入射角度依存性のシミュレーション結果

2.2 位置決定アルゴリズム

GRB の実測値とシミュレーションが一致する入射角度をその GRB の方向とみなす。実測値とデータベースの一致は、両者の χ^2 が最小となる角度 (θ, ϕ) を求めることによって評価される。まず次の 2 つについて χ^2 を計算する。(1)WAM の明るい 2 つの面のカウント比、(2)WAM の 1 番明るい面と WANTI のカウント比。実測値は、バックグラウンドを引いた後の光度曲線を積分することで求めたカウント数から、対象の面のカウント比を計算する。その際、WAM の光度曲線は 100 – 300 keV 帯域を使用した。100 keV 以下は WAM のレスポンスの不定性が大きく、300 keV 以上は SN 比が悪くなるため使用しない。WANTI は、エネルギーチャンネルが区別されていないため、全エネルギー帯域の光度曲線を用いる。シミュレーションのカウント比は、図 2、図 3 を利用して角度ごとに計算する。これらを用いて、(1),(2)それぞれ

$$\chi^2(\theta, \phi) = \left(\frac{\text{ratio}_{\text{Obs}} - \text{ratio}_{\text{Sim}}(\theta, \phi)}{\sigma_{\text{Obs}}} \right)^2$$

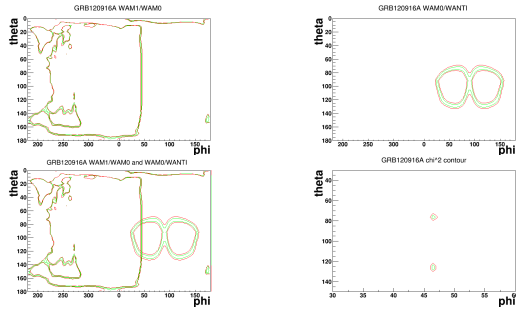


図 4: GRB120916A の位置決定した時の χ^2 マップ。左上: WAM の明るい 2 つの面。右上: WAM の明るい面と WANTI。左下: 重ねた。右下: 和をとった後。緑線は信頼区間 68%、赤線は信頼区間 90% を示している。

を計算する。ratio_{Obs} は実測値のカウント比、 σ_{Obs} は実測カウント比の統計誤差、ratio_{Sim}(θ, ϕ) はシミュレーションの角度 (θ, ϕ) のカウント比である。さらに、(1)(2) の $\chi^2(\theta, \phi)$ の和を計算して、それが最小となる角度 (θ, ϕ) をその GRB の位置とする。一例として GRB120916A の位置決定をした場合の結果を図 4 に示す。信頼区間が示されている等高線の間の領域が GRB120916A の位置であると考えられる。この方法においては、GRB の位置を 2 方向に絞ることができた。

2.3 開発した方法の精度検証

この方法を用いて実際に 2009 年から 2014 年の間に観測された GRB について位置決定を行い、その精度を検証した。The Gamma-ray Coordinates Network (GCN) に投稿されている WAM で観測された GRB の中から、他衛星と同期観測され位置が決定されており、少なくとも WAM の 2 つの面で検出されている 32 の GRB を使用した。これらはいずれも $100 - 1000$ keV の帯域で $4.32 \times 10^{-6} \text{erg cm}^{-2}$ 以上の明るさを示したイベントである。独自に決定した位置と、他衛星により決定されている位置の差分の平均を求めたものを表 1 に示す。 ϕ 方向は WAM2 を除けば約 7° 程度、 θ 方向は、2 つの推定位置から正解に近い方のみを選択できれば、約 13° 程度の精度で決定できることがわかった。WAM2 の精度が悪い原因

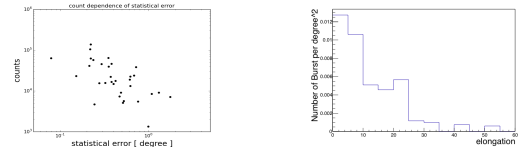


図 5: 計算された誤差の分布。左: 最も明るい面のカウント数に対する統計誤差。右: 離角の分布

としては、WAM2 の正面にある X 線分光器 (X-Ray Spectrometer) の冷媒タンクのマスマodelの再現性が十分でないためと考えられる。

3 系統誤差の評価

この方法において、決定した位置にどの程度の系統誤差があるかどうか、また、最終的にスペクトル解析する際に、パラメーターやフラックスに考慮すべき系統誤差を見積もった。

3.1 位置決定法の系統誤差の計算

この位置決定法における統計誤差を次のように定義する。

$$\sigma = \sqrt{\delta\theta\delta\phi \cos\theta}$$

ここで、 $\delta\theta = \sqrt{\Delta\chi^2 C_{\theta\theta}}$ 、 $\delta\phi = \sqrt{\Delta\chi^2 C_{\phi\phi}}$ であり、自由度 2 の 68% 信頼区間に値する $\Delta\chi^2 = 2.30$ 、 $C_{\theta\theta}$ 、 $C_{\phi\phi}$ はヘッセ行列の対角成分である (Press et al. 1986)。計算した誤差の分布を図 5 に示す。これらを用いて系統誤差を次のように求める。各イベントの統計誤差の平均値 Stat_{ave} と、離角の分布の 1σ の値 Total_{68%} を計算する。そして、次の計算により系統誤差 Sys_{68%} を求める (Pendleton et al. 1999)

$$(\text{Sys}_{68\%})^2 = (\text{Total}_{68\%})^2 - (\text{Stat}_{\text{ave}})^2$$

これにより系統誤差は、

$$\text{Sys}_{68\%} = \sqrt{(14.03^\circ)^2 - (0.51^\circ)^2} = 14.02^\circ$$

と計算された。この方法では、系統誤差が支配的で、それは約 14° であることがわかった。系統誤差の要因としては、シミュレーションにおけるマスマodelの再現性や、地球大気により散乱された粒子の影響などが考えられるが、これから詳細に調べていく必要がある。

表 1: 32GRB についての推定値と実際の入射角との差分の平均

最も明るい面	θ の差分の平均 (正解に近い角度/遠い角度)	ϕ の差分の平均 (正解に近い角度/遠い角度)
WAM0(10GRB)	13.05° / 68.36°	6.61° / 6.92°
WAM1(8GRB)	16.00° / 51.61°	10.70° / 10.48°
WAM2(8GRB)	11.64° / 87.00°	26.03° / 23.37°
WAM3(6GRB)	12.19° / 62.87°	6.09° / 7.13°
32GRB	13.28° / 67.81°	12.39° / 11.96°

表 2: スペクトル解析の系統誤差

モデル	パラメーター	光子指数	ベギが折れ曲がるエネルギー	フラックス (100 - 1000 keV)
Band Function(18GRB)		25.4% / 3.91%*	18.6%	29.3%
Power-law with exponential cutoff(13GRB)		11.1%	15.7%	58.0%
Power-law(1GRB)		6.68%	—	280%

いずれも 90%エラー

* 低エネルギー側の光子指数/高エネルギー側の光子指数

3.2 スペクトル解析の系統誤差の評価

他衛星が決定した位置と独自に決定した位置で、応答関数を作成、スペクトル解析をそれぞれ行った。モデルごとに、パラメーターやフラックスの差分が何%あるのか調べ、その系統誤差を求めた。また、決定された2方向両方の結果を考慮している。この結果を表2に示す。GRB120916A($1.17 \times 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2}$)をスペクトル解析した場合、ベストフィットモデルがBand Functionで、そのパラメーターとそれに対する統計誤差は、 $\alpha = -0.64^{+70\%}_{-48.9\%}$ 、 $\beta = -2.55^{+11.0\%}_{-40.6\%}$ 、 $E_{peak} = 315^{+18.7\%}_{-15.7\%} \text{ keV}$ 、フラックスが $4.05^{+1.96\%}_{-7.29\%} \times 10^{-7} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。暗いイベントの場合は、求めた系統誤差はフラックスを除いて、統計誤差と比べて大きくはないことがわかる。

4 まとめ

「すざく」搭載のWAMにおいて、衛星全体を再現したマスモデルを用いてモンテカルロシミュレーション

を行い、それを観測値と比較することでGRBの位置を決定する方法を開発した。32の明るいGRB(100 - 1000 keVで $4.32 \times 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2}$ 以上の明るさ)について位置決定精度の検証を行った。また、WAM単独で位置決定しスペクトル解析を行う場合の系統誤差を見積もった。本研究の結果により、WAMで観測されたが、まだスペクトル解析されていない約800のGRBのスペクトル解析を行える可能性を示した。

Reference

- Ohno, M., et al. 2005, IEEE Trans. Nucl. Sci., 52, 2758
 Ozaki, M., et al. 2005, IEEE Trans. Nucl. Sci., 53, 1310
 Pendleton, G. N., et al. 1999, ApJ, 512, 362
 Press, W. H., et al. 1986, Numerical Recipes in C. Cambridge Univ. Press
 Terada, Y., et al. 2005, IEEE Trans. Nucl. Sci., 52, 902
 Yamaoka, K., et al. 2009, PASJ, 61, 35