

Suzaku/WAM におけるガンマ線バーストの 位置決定能力の数値計算による検証

藤沼 洸 (埼玉大学大学院理工学研究科)

Abstract

2005 年に打ち上げられた日本の X 線天文衛星「すざく」には硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector;HXD) が搭載され、世界最高感度で硬 X 線天体を観測している。その外周を取り巻くシンチレーター結晶は全天からの放射を受けるため、Wide-bandAll-skyMonitor(WAM) として全天 X 線観測に役立てられる。撮像機能はないものの、50–5000keV 帯域で全天のほぼ半分の視野を持ち、他の観測装置に比べ有効面積が大きいいため、ガンマ線バースト (GammaRayBurst;GRB) 等の突発天体を年間 150 イベント以上検出する。しかし、WAM 単独では突発天体の位置を決定することができないため、解析できる GRB は他衛星との同期観測によって入射方向が特定できた約 6 割の天体に限られる。残りの約 4 割の GRB を解析するためには、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、様々な到来方向に対する WAM のエネルギー応答を詳細に調べることで、GRB の到来方向を推定できるようにする必要がある。

本研究では、Geant4 ツールキットを用いて「すざく」のマスモデルを作成、モンテカルロシミュレーションツールを開発し、全天から降り注ぐ光子に対する WAM の応答を光子の入射角度ごとに調べた。結果、各面での検出効率は、光子の入射角度を反映することが再確認でき、より定量的な見積もりが可能になった。他の衛星で到来方向がすでにわかっている 30GRB に対し、WAM の観測データをシミュレーションの結果と比較することで、独自に到来方向を推定した。実際の GRB の位置に対して、推定した到来方向を比較した結果、両者の差分の平均は、物質が多い冷媒タンクなどがある方向を除けば約 11° 以内であることがわかった。より正確な位置決定をするには、更なる検証が必要である。本講演では、この手法と結果について発表する。

1 はじめに

「すざく」(ASTRO-EII) は、日本で 5 番目の X 線天文衛星である。「すざく」には検出器が 4 つ搭載されている。X 線 CCD カメラ (X-ray Imaging Spectrometer;XIS)(Koyama et al. 2007)、X 線マイクロカロリメーター (X-Ray Spectrometer;XRS)(Richard et al 2007)、硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector;HXD)(Takahashi et al. 2007)、そして、4 つめの検出器として、広帯域全天モニター (Wide band All sky Monitor;WAM) がある (Yamaoka et al. 2005,2009)。これは、HXD の外周を囲む 20 本の BGO 結晶シンチレーターのことである。全天から降り注ぐ大量の宇宙線から HXD を守るアクティブシールドの役割を果たすと同時に、有効面積が大き

く ($400\text{ cm}^2/\text{side}@1\text{ MeV}$)、広い観測エネルギー帯域 (50–5000 keV) を誇る検出器として観測を行う。そして、全天のほぼ半分の視野を持つため全天モニターとして、ガンマ線バーストや太陽フレアなどの突発天体の観測をしている。

ガンマ線バースト (GammaRay Burst;GRB) は、遠方宇宙で発生する宇宙最大規模の爆発現象である。放射されるエネルギーは 10^{54} erg にもおよび、これは太陽が一生涯をかけて放射するエネルギーに相当する。継続時間は数ミリ秒から百秒程度まで様々だが、特に 2 秒を境に短い GRB を Short GRB、長い GRB を Long GRB と呼ぶ。GRB の正体や放射機構は未だ議論されている。GRB のスペクトルは Band Function という 2 つのべき関数を指数関数で滑らかにつなぐような関数でよく表される (Band et al. 1993)。

WAM は GRB を年間 150 イベント以上検出している。しかし、WAM 単独では突発天体の位置を決定することができないため、スペクトル解析に利用できる GRB は他衛星と同期した約 6 割の天体に限られる。残りの約 4 割の GRB を解析するためには、その到来方向を推定できるようにする必要がある。本研究では、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、様々な到来方向に対する WAM のエネルギー応答を詳細に調べた。シミュレーションより、WAM の検出効率には角度依存性があることを確かめた上で、WAM の幾何学的構造を利用して入射角を推定し、その精度を検証した。

2 シミュレーション条件

シミュレーションを行うジオメトリーは「すざく」全体の物質や密度、空間分布を再現したマスモデルを使用して、「すざく」打ち上げ後に消失した XRS の冷却タンク内の液体 He、固体 Ne は真空とするように変更した。入射させる光子のスペクトルは 50–5000 keV の範囲で、典型的な GRB のスペクトルである Band Function を仮定し、そのパラメーターは $\alpha = -1.0$ 、 $\beta = -2.5$ 、 $E_{peak} = 250$ keV と設定した。その光子を WAM を中心とした天球から、中心に向かって等方的に 10^9 発入射した。角度の設定は、WAM0、WAM1、WAM2、WAM3 それぞれの正面を $\theta = 90^\circ$ 、 $\theta = 0^\circ$ 、 $\theta = -90^\circ$ 、 $\theta = -180^\circ$ とする。また、HXD の上面を $\theta = 0^\circ$ 、底面を $\theta = 180^\circ$ とした。そして、WAM の 4 つの面に加えて、HXD の底面部にある BGO からなる Bottom も光子に対するエネルギー応答を調べた。

シミュレーションの結果、各面の検出効率は到来方向をよく反映しており、WAM に検出効率の角度依存性があることが確かめられた。

3 位置決定方法

GRB の検出は、WAM 各面ごとの光度曲線を用いる。到来方向は各面の光度の比に顕れると期待される。そこで、各面のカウントレートの比をシミュレ

ーションに基づき、あらかじめ到来方向ごとに求めておく。このために、Step 2 で各面について求めた到来方向ごとの光子数ヒストグラムを用いた。すなわち、2 つの - ヒストグラムを作成した。これにより、GRB を WAM で観測した場合に、WAM の 2 つの面のカウント比から到来方向を推測できるデータが得られた。今後はこの比が、実際に観測された 2 つの面の比と一致する - 領域を以下の手順に従って限定していく。

まず、推定をする GRB を選び出す。WAM で検出された GRB から、WAM の 2 つ以上の面でうかつている、他の衛星により到来方向が決定されている、という条件を満たす GRB を選び出す。本研究では、2009 年から 2014 年までに観測された 30GRB を選択した。

一例として GRB130502B のデータを用いて、推定の流れを説明する。

- Step1 WAM の観測データからカウント数を求める。

GRB の光度曲線を作成する。バックグラウンドを引いた後のソース領域を積分することで、カウント数を求めた。GRB130502B の光度曲線を図 1 に示す。

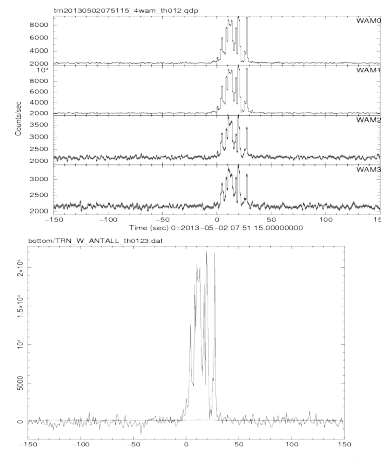


図 1: GRB130502B の光度曲線。上から WAM0, WAM1, WAM2, WAM3, Bottom

各面のカウント数は、WAM0 が 42569 ± 298 、WAM1 が 53343 ± 302 、WAM2 が 12607 ± 219 、WAM3 が 9553 ± 213 、Bottom が 287056

± 1282 であった。ただし、WAMの4つの面は50–110 keVの帯域でのカウント数であり、Bottomのみ50–5000 keVのカウント数で、誤差は信頼区間68%の値とした。WAM1が一番カウント数が多く、WAM0が2番目の多いことがわかる。このことから、このGRBのおおまかな到来方向がわかる。 $\theta = 90^\circ$ が正面のWAM0が一番明るく、 $\theta = 0^\circ$ が正面のWAM1がその次に明るいので、 ϕ は大きく見積もって -45° – 135° の方向から来たと考えられる。

- Step 2 明るい2つの面の比(観測データ)をヒストグラム(シミュレーション)に反映させ、方向を求める。

WAMの観測データから、明るい2つの面、WAM1,WAM0のカウント数の比を計算すると比 $ratio = 0.798$ 、誤差 $sigma = 0.007$ となる。シミュレーションより得られたWAM0/WAM1のカウント比が、観測データのカウント比である $ratio = 0.798$ と等しくなる Bin を等高線で示したヒストグラムが図2である。ヒストグラムには、誤差を考慮して $ratio = 0.798 \pm 0.007$ での等高線も同様に示してある。

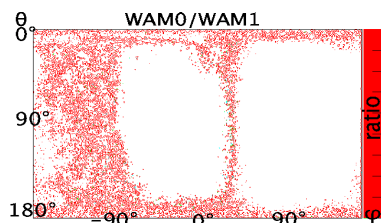


図 2: WAM0/WAM1 のヒストグラムに観測データの比の等高線を書いた。横軸 ϕ 、縦軸 θ 、高さが各 bin での WAM0 と WAM1 のカウント数の比。

Step 1 の結果を考慮して $\theta = -45^\circ$ – 135° のみを考えると、図2から ϕ が 30° – 50° に等高線が書かれていることがわかる。この等高線が書かれている角度がWAMの明るい2つの面から推定できる入射角度である。

- Step 3 WAMの暗い面とBottomの比(観測データ)をヒストグラム(シミュレーション)に反映

させ、方向を求める。

WAMの暗い面とBottomの比についても Step 2と同様の作業を行う。観測データから、暗い面であるWAM3とBottomのカウント数の比を求めると $ratio = 30.04$ 、誤差 $sigma = 0.68$ となる。シミュレーションより得られたBottom/WAM3のカウント比が、観測データのカウント比である $ratio = 30.04$ と等しくなる bin を等高線で示したヒストグラムが図3である。ヒストグラムには、誤差を考慮して $ratio = 30.04 \pm 0.68$ での等高線も示してある。

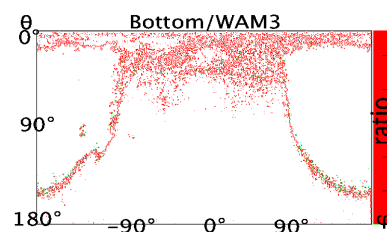


図 3: Bottom/WAM3 のヒストグラムに観測データの比の等高線を書いた。横軸 ϕ 、縦軸 θ 、高さが各 bin での WAM0 と WAM1 のカウント数の比。

図3の等高線が書かれている角度が、WAMの暗い面とBottomから推定できる入射角度である。Step 2同様に θ は -45° – 135° の範囲に限定して考える。

- Step 4 方向(Step 2)と方向(Step 3)を同時に満たす入射角度(θ 、 ϕ)を求める。

WAMの2つの面により求めた θ 方向と、WAMとBottomにより求めた ϕ 方向を同時に満たす角度を求める。まず、それぞれ規格化を行う。シミュレーションのWAM0/WAM1のヒストグラム(図2)から $ratio$ を引いた後、 $sigma$ で割る。この規格化により、二次元ヒストグラムの高さが $ratio$ の bin は高さ0になり、高さ $ratio \pm sigma$ の bin は高さ1になる。高さ $ratio \pm 2sigma$ の bin は高さ2になる。というように、 $ratio$ に近い領域ほど高さが0に近い値になる。同様にBottom/WAM3のヒストグラム(図3)についても規格化を行う。

そして規格化処理後、2つのヒストグラムの各 Bin の値の二乗和の平方をとる。その値が10以

下の角度のみを示したの図 4 である。ここで、10 以下というのは、10sigma の信頼区間で考えるということになる。

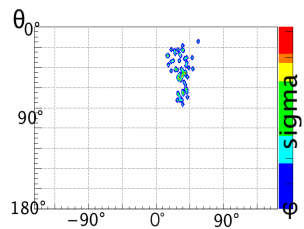


図 4: 、 とともに入射角として可能性がある角度

この作業により示された角度は、 、 とともに到来方向として可能性が高いと考えられる。そして、示された(、)を 方向、 方向それぞれに射影し、ガウシアンでフィッティングを行う。フィッティングで得られた中心値をシミュレーションより得た推定値とする。 方向、 方向に射影しガウシアンでフィッティングしたものを図 5 に示す。

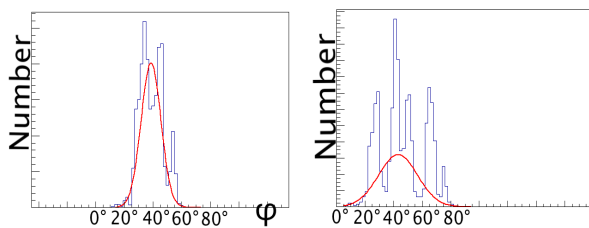


図 5: 図 3 で示された点を 、 へ射影し、ガウシアンでフィッティングした。左: 、 右:

フィッティングの結果、それぞれのガウシアンのピークは $\phi = 38.73^\circ$ 、 $\phi = 43.27^\circ$ となり、これがシミュレーションの推定値ということになる。

4 結果

同様の手順で、選んだ 30GRB について入射角の推定を行った。その推定値と他の衛星により決定されている入射角の差分の平均を、WAM の最も明るかった面別に比較したものを表 1 に示す。

方向については、WAM2 を除けば、約 10° 程度の精度で見積もれることがわかった。WAM2 の精度

表 1: 30GRB 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	の差分の平均	の差分の平均
WAM0	3.55 °	37.64 °
WAM1	7.45 °	41.13 °
WAM2	33.89 °	65.11 °
WAM3	11.18 °	54.48 °

が悪くなってしまったのは、WAM2 の正面には冷媒タンクがあり、その影響によるものと考えられる。方向については、どの面が明るい場合でも精度よく見積もれなかった。

5 まとめ

「すざく」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、様々な角度からの入射光子に対する WAM のエネルギー応答を調べた。それを実際の観測データと比較することで、WAM で GRB の到来方向を推定できるのかどうか検証した。30GRB について検証を行い、推定値と実際の到来方向の差分の平均を求めた。その結果、WAM2 以外の面が最も明るい場合、 方向に関して θ は 11° 以内で見積もることができる。 方向の見積もりは、Bottom 部分だけでは難しく、他の検出器と合わせて検証する必要があるだろう。今後は、WAM のエネルギー分解能を考慮し、より実際の検出器の応答に近づけて推定を行う。また、さらに多くの GRB について検証を行う。

Reference

- Koyama, K., et al. 2007, PASJ
- Richard L, Kelley., et al. 2007, PASJ
- Takahashi, T., et al. 2007, PASJ
- Yamaoka, K., et al. 2005, ITNS
- Yamaoka, K., et al. 2009, PASJ
- Band, D., et al. 1993, ApJ