Astro-E2衛星搭載WAMを用いた全天硬X線観測における天体位置決定の研究

広島大学 理学部 物理科学科
高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室
平澤 歩

2005年02月10日

概 要

今年夏に打ち上げ予定の Astro-E2 衛星に搭載される WAM(Wide All-sky Monitor) は BGO シンチレーターと光電子増倍管から構成されており、HXD 検出器の主検出部を取り囲むように設置されている。WAM は非常に広い視野を持ち、ほぼ全天を観測することが出来るため突発的に発生するγ 線バーストやトランジェント天体の観測に適している。トランジェント天体の観測方法には地食観測を用いる。地食観測とは観測衛星が地球を回る際、ある天体が地球によって隠れる前後のカウントレートの差を観測することでターゲットの天体の明るさを測定するという方法であり、地食の継続時間からターゲットの天体の位置を求めることも出来る。

本研究では Astro-E2 が打ち上げられた後に速やかにデータ処理を行なえることを目指して地食観測を用いたリコンストラクションプログラムを作成し、ターゲットの天体の位置を決定し、それをもとに全天γ 線マップを作成することを試みた。

目 次

第 1 章　序論 **3**

1.1 Astro-E2 衛星 3

1.1.1 Astro-E2 衛星の概要 3

1.1.2 Wide All-Sky Monitor 5

1.2 観測対象 7

1.2.1 トランジェント天体 7

1.2.2 γ 線バースト 7

第 2 章　全天観測モニター **8**

2.1 地食観測 8

2.2 バックグラウンド 9

2.3 BATSE 11

2.4 WAM と BATSE の比較 14

2.5 卒業論文の目的 15

第 3 章　WAM 観測シミュレーター **16**

3.1 構成 16

3.2 光子発生のシミュレーションの手順 16

3.3 座標系 22

3.4 AstroCoordinate クラス 23

3.5 Geant4 による WAM 検出器シミュレーター 23

第 4 章　天体位置の決定 **25**

4.1 リコンストラクションの方法 25

4.2 地食による位置決定 25

4.2.1 リコンストラクションの手順 25

4.2.2 多数の天体についてのリコンストラクション 30

4.3 地食時の WAM 2 面のカウント比による位置決定 32

4.3.1 目的 32

4.3.2 リコンストラクションの方法 32

4.3.3 Crab のリコンストラクション 34
4.4 地食による半円と 2 面のカウント比を用いた半円による Crab の位置決定 35
4.4.1 半円の交点の求め方 35
4.4.2 Crab のリコンストラクション 36
4.5 位置決定の精度 39
4.5.1 地食で描いた半円の精度 39
4.5.2 カウント比を用いて描いた半円の精度 40

第 5 章 まとめと今後の課題 **41**

第1章　序論

1.1　Astro-E2 衛星

1.1.1　Astro-E2 衛星の概要

2005 年に打ち上げが予定されている Astro-E2 衛星は 2000 年にロケット事故で打ち上げが失敗してしまった Astro-E 衛星をベースに設計されている。Astro-E 衛星はそれぞれ異なった特徴を持つ Chandra 衛星、Newton 衛星と協力して観測を行なう予定であった。その 2 つの衛星には遅れをとってしまったが、改良がなされた Astro-E2 は打ち上げられた後に 2 つの衛星と互いに補い合い X 線でしか探ることの出来ない宇宙の謎を究めることが期待されている。

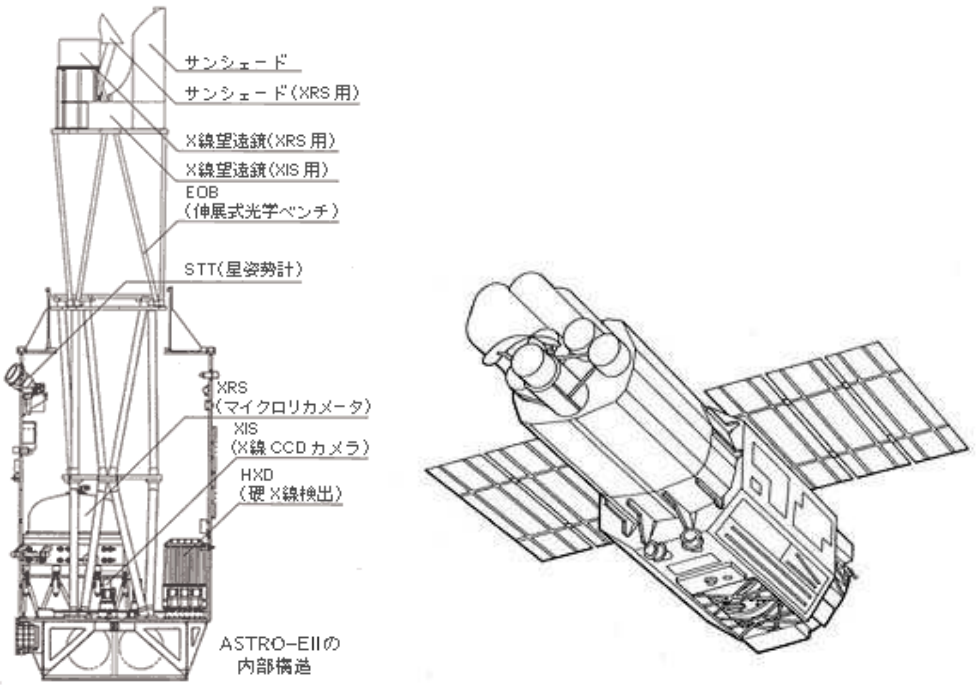

図 1.1: Astro-E2 衛星

Astro-E2 衛星は、様々なＸ線天体についてこれまで出来なかった０．３～６００ keV という広いエネルギー領域にわたって、より高いエネルギー分解能かつ高感度で多くの観測研究を行う予定である。その目的として、Ｘ線・ガンマ線による高温プラズマの研究、銀河団の進化や遠方にある暗い原始天体の探索、ブラックホール候補天体と活動銀河核の広帯域のスペクトル研究などがあげられる。

Astro-E2 衛星には５つの軟 X 線観測装置と１つの硬 X 線検出器が搭載されている。軟Ｘ線望遠鏡は、５つのＸ線反射鏡（ＸＲＴ）と５つの焦点面検出器（４つのＸＩＳ検出器と１つのＸＲＳ検出器）から成っている。ＸＩＳはＸ線ＣＣＤカメラで、０．４～１０ keV のエネルギー帯域をカバーし、エネルギー分解能は１２０ eV である。一方ＸＲＳはＸ線マイクロカロリメータを並べたもので、エネルギー帯域はＸＩＳと同程度で入射 X 線のエネルギーによらず１２ eV という高いエネルギー分解能を持つ。HXD は１０～７００ keV の領域の高エネルギーのＸ線を観測するために開発された硬Ｘ線検出器である。ＨＸＤは広島大学も開発に参加していて、井戸型フォスイッチという特殊な構造をとっている。これにより超低バックグラウンドを実現し、超高感度観測を可能としている。

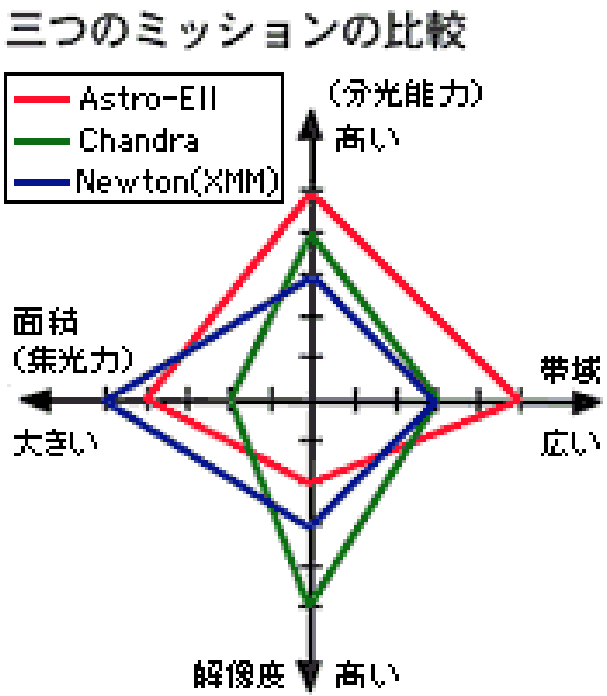

図 1.2: ３つの衛星の比較

1.1.2 Wide All-Sky Monitor

WAM (Wide All-Sky Monitor) は HXD の主検出部を取り囲む２０本の BGO シンチレーターと光電子増倍管から構成されている。WAM の本来の目的は HXD の主検出部に対するアクティブシールドであり、宇宙線が入り込むのを防ぐとともにバックグラウンド除去のために Anti 信号を出すことであるが、１ MeV でも ~ ６００ cm^2 という大きい有効面積を持っており非常に優れたγ 線バースト検出器となる。もしγ 線バーストが 2 つの面で求まれば ~ ５° の精度で天球面で円弧上にバースト源の位置を制限でき、また地没を利用してトランジェント X 線源のモニターとしても利用することが出来る。WAM はコリメーターを持たず、全方向からの放射線に感度を持つのでバックグラウンドが非常に高い。

BGO は 2 cm 程度の厚さで５１１ keV のγ 線を９０％吸収する、という非常に高いエネルギー吸収係数を持つ。また、高い密度を持つのでコンプトン散乱に基づくバックグラウンドを減らすことが可能であることや、吸湿性が無いために加工しやすいという利点がある。WAM は先端部にいくにつれて細い構造となっているが、これは重量削減のためと Well 検出部の GSO のどの方向に対しても４ cm 厚以上の BGO があるようにするためである。しかし WAM 用の BGO 結晶はテーパ形状を持つことや PMT の直径が２．８ cm と小さいために光量をロスしやすく、エネルギー分解能は６６２ keV で約２５％程度である。

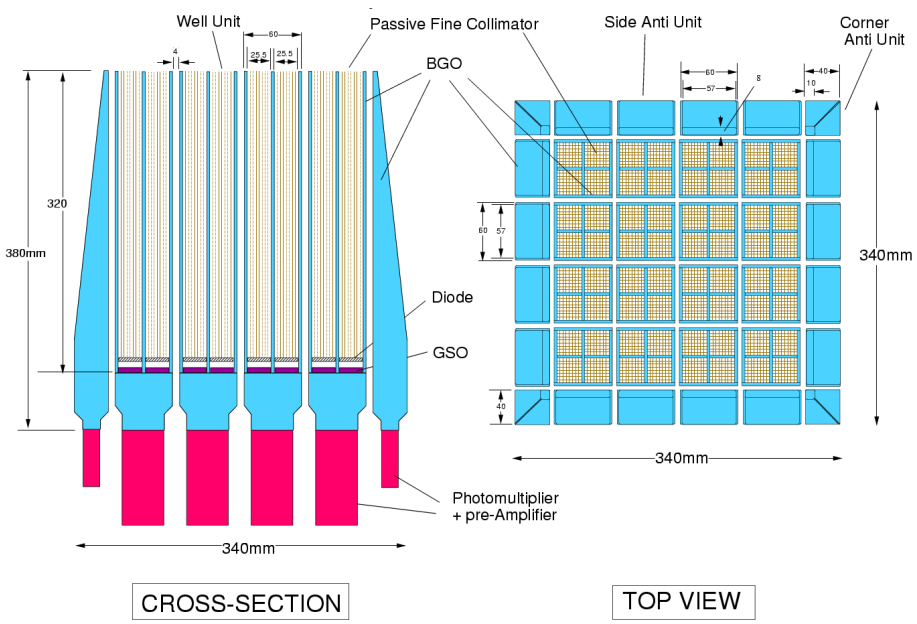

図 1.3: HXD 検出器

WAM の性能を次に示す。

- エネルギー領域 ： ５０ ~ ５０００ (keV)
- 有効面積 ： ８００ (cm^2)
- エネルギー分解能 ： ２５ (%)
- 感度 ： ≦１００ (mCrab)
- 視野 ： ~ ６．２８ (steradian)

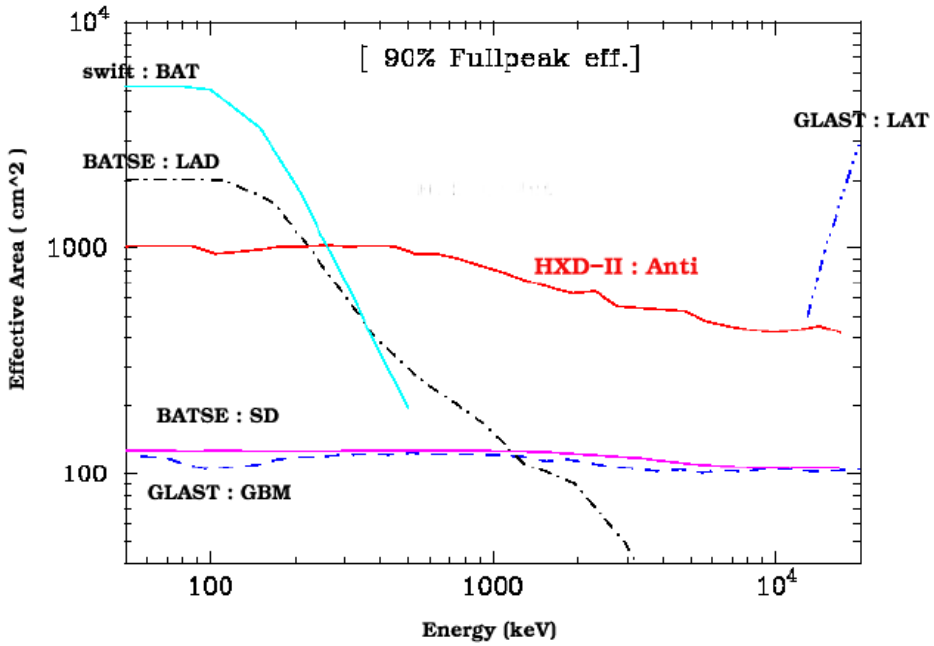

図 1.4: WAM の有効面積と他の検出器との比較

1.2　観測対象

1.2.1　トランジェント天体

トランジェント天体とは突発的に明るくなる天体である。その中の一つである X 線新星は X 線の領域で急激な増光を示す X 線星の一種で，X 線トランジエントとも呼ばれ、ブラックホールと普通の星の連星であることが多い。 ほんの数日で (X 線領域で) 何十倍も何百倍も明るくなり，数ヶ月から 1 年ぐらいかけて徐々にもとの明るさに戻る。 降着円盤がある種の不安定を起こして急激に明るくなったために，X 線新星現象が生じるのではないかと思われている。この増光現象時にはブラックホールはハイステートと呼ばれる状態になるが、ハイステートも種々の状態に分離される。降着円盤の状態が異なるのが原因とされているが、なぜ種々の状態になるのかわかっていない。また、状態変移に伴うジェットも観測されており、硬 X 線でのモニター観測が解明のために必要である。また、全天を長い間モニターし続ければ未知の X 線新星を発見できる。そうすれば現在広島大学で進めている 1 . 5 m 可視光望遠鏡でフォローアップ観測して新星の正体を探ることができ、新たなブラックホールの発見となる。

1.2.2　γ 線バースト

γ 線バーストとは、宇宙の一点から数秒間 ~ 数十秒間という短時間の間に強力な γ 線や X 線がやってくる現象で、1960 年代に核実験査察衛星ヴェラによって偶然に発見されたが、その後 30 年ほどその正体は謎とされてきた。50keV から 300keV の領域で、最も明るく輝く天体のフラックスは、$100\mathrm{count/s/cm^2}$ 以上にも達し、瞬間的にではあるが明るいγ 線源として知られるかに星雲のフラックスさえ、はるかに上回る。γ 線バーストは近年の研究により数十億 ~ 百数十億光年の遠方で発生する、宇宙最大の爆発現象であることがわかってきたが、その起源はまだよくわかっていない。現在最も有力な説では、太陽の数十倍以上の質量をもつ巨大な星が、その一生を終えてつぶれてブラックホールになるときにほぼ光速のジェットを放射し、そのジェットが地球の方向を向いていたときにγ 線バーストとして観測されるというものである。また、中性子星同士が合体してブラックホールを形成するときに発生するという説もある。γ 線や X 線は大気に吸収されるため、γ 線バーストそのものは人工衛星を用いないと観測できないが、爆発の後に急速に減光する「残光」(アフターグロー) を残す。この残光を地上の望遠鏡や高感度の宇宙望遠鏡で観測することによって、バースト源の距離、環境などを調べることができる。

第2章　全天観測モニター

全天観測とは、広い視野を持つ検出器を用いて広範囲の空の観測を行なうことを言う。その目的はX線新星などの突発的に出現する天体を素早く捉えることや、空の広い範囲に散らばっている多数の天体(長い周期で変動する天体など)を長期に渡ってモニターすることなどである。

全天観測のメリットとしては上にもあげた通り広範囲に渡る観測を行なっているのでγ線バーストやトランジェント天体の観測に有効であることがあげられる。その反対にデメリットとしては広範囲観測を行なうがゆえにバックグラウンドが高くなってしまい、遠方の天体(暗い天体)を観測するのは難しいということがあげられる。

2.1　地食観測

地食観測とはある天体を観測する際、衛星が地球の周りを周回する中でターゲットの天体が地球によって隠れる前後のカウントレートの差を観測することでターゲットの天体の明るさを測定するという観測方法である。地食が始まった時間の衛星の位置や、地食の継続時間からターゲット天体の位置を求めることも出来る。この方法を行なうには視野の広い検出器が有用であり、今までCGRO衛星に搭載されたBATSEがこの方法を用いて多大なる成果をあげている。

地食観測を行なうにあたって、最も重要なことはバックグラウンドの評価を精度良く行なうことである。なぜなら地食観測は視野が広くコリメートされていない検出器で行なうためバックグラウンドが非常に高いものとなり、地食前後のカウントレートの差に大きく影響してしまうためである。

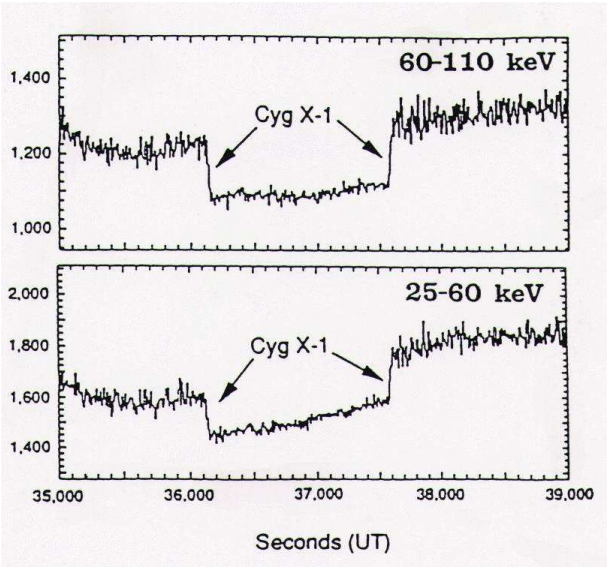

図 2.1: 地食前後でのカウントレートの差

2.2 バックグラウンド

WAM で観測を行なうにあたって非常に重要となるのがバックグラウンドである。WAM はバックグラウンド除去機能を持たない上に非常に大きな有効面積を持つため精度良くバックグラウンドを見積もることが正確な観測を行なう上で必要不可欠である。特に WAM の観測領域ではγ 線バックグラウンドを正確に見積もることが重要である。

γ 線バックグラウンドには

(1) 遠方天体起源のγ 線

(2) 地球の大気と荷電粒子の相互作用により生じるγ 線

(3)SAA 中の荷電粒子によるシンチレーターの放射化

がある。

(1) は primary と呼ばれ、太陽系外から直接地球にやってくるγ 線である。主に遠方宇宙の活動銀河核から放射されるものであると考えられている。

(2) は secondary と呼ばれ、宇宙線粒子と地球の大気が相互作用して発生する 2 次γ 線のことである。secondary は地磁気の影響を強く受けるため、衛星の位置、特に緯度によってフラックスが変化する。また、secondary は地球から外へ行く upward と地球に降り注ぐ downward に分類される。

(3) は最も支配的なバックグラウンドである。ブラジル上空の地磁気異常帯 (SAA)

には地球磁場に束縛された高エネルギー陽子が非常に高い密度で存在しており、衛星が SAA を通過する間に検出器を構成する物質と原子核反応を起こして検出器を放射化してしまう。放射化された検出器は自分でγ 線などを出して自分で検出してしまうためバックグラウンドとなる。こうした放射化バックグラウンドが天体からの信号に対してシグナル対雑音比を悪くする傾向は観測エネルギー帯が高くなるほど顕著である。これを出来る限り防ぐために WAM は BGO 結晶で作られていて、WAM で主検出部を囲うことでバックグラウンドの低減をはかっているが、WAM 自身のバックグラウンドの低減にはならない。

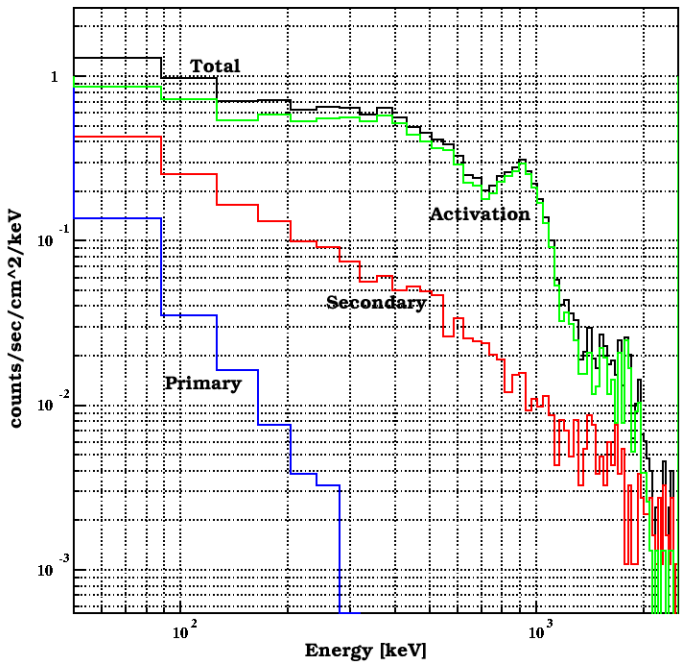

図 2.2: Anti 検出器のバックグラウンドモデル. 上から文中の (3)、(2)、(1) の成分を示してある

2.3 BATSE

BATSE とは1991 年から 2000 年まで活躍した、コンプトンガンマ線衛星 (Compton Gamma-Ray Observatory; CGRO) に搭載されていた 8 つの検出器による観測装置である。 8 つの検出器はそれぞれ NaI シンチレーターを利用した大面積のバースト検出のための LAD (Large Area Detector) とスペクトル取得用の SD (Sensitive Detector) のペアから成っていて、それらは衛星の角に八面体の形に配置されている。

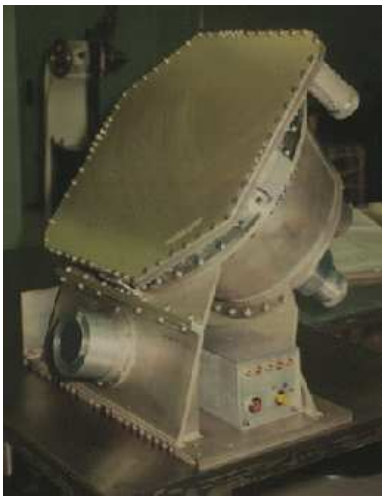

図 2.3: LAD(Large Area Detector))

BATSE は次のような性能を持っている。

- エネルギー領域 ： ２５ ~ ３００ (keV)
- 有効面積 ： ２０２５ (cm^2)
- エネルギー分解能 ： ２０ (%)
- 感度 ： ２０ (mCrab)
- 視野 ： ３.１４ (stradian)

この BATSE は１０年の間に 2704 個のガンマ線バーストを観測した。BATSE は５°の精度ではあるが位置方向決定能力を有しており、8 つの検出器でのカウント数の差によってバーストの方向を測定することが出来る。起こったバーストの位置誤差は系統誤差の二乗と統計誤差の二乗の和のルートである。統計誤差はバーストの強度に依存している。つまり弱いバーストに対しては２０°ぐらいの大きさとなり、強いバーストに対してはほとんど 0 にすることが出来る。また、BATSE は、バース

トをそれと気付くのに 2 秒、そのデータを地上局である NASA のゴダート航空センターに送るのに 2 秒から 3 秒、そして位置を計算するのに 0.1 秒ほどかかる。さらに各天文台に、電話回線やインターネットを使って位置情報が伝わるのに 0.3 秒ほど (方法によってはもっと長く) かかる。総計、最短でバースト開始から 5 秒ちょっとで観測準備を始めることが可能ということになる。

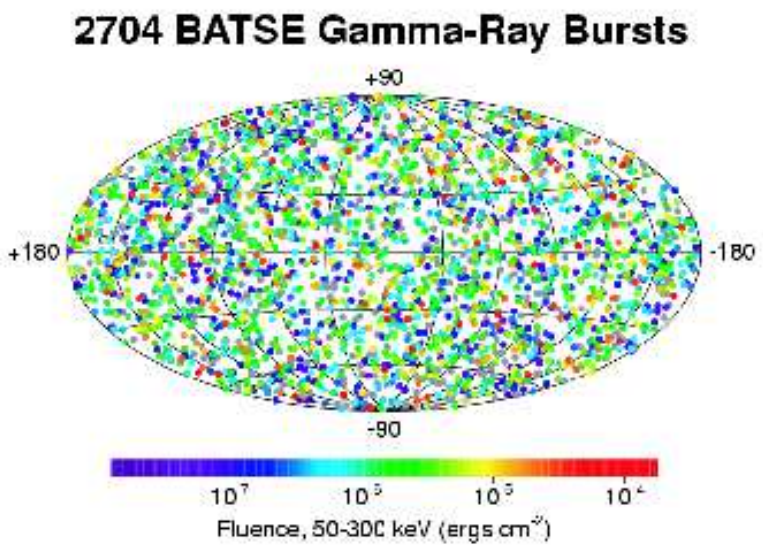

図 2.4: BATSE で観測されたガンマ線バーストの全天分布図

また BATSE ではトランジェント天体の観測も行なった。最も明るい X 線源のひとつである Cygnus X-1 についても長期的の観測を行ない、そのエネルギースペクトルを得た。

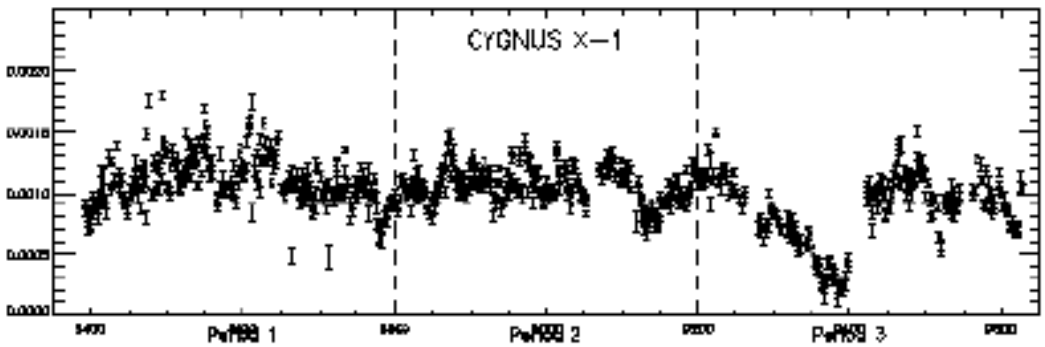

図 2.5: BATSE で観測された Cyg X-1 の X 線強度の長期的な変動

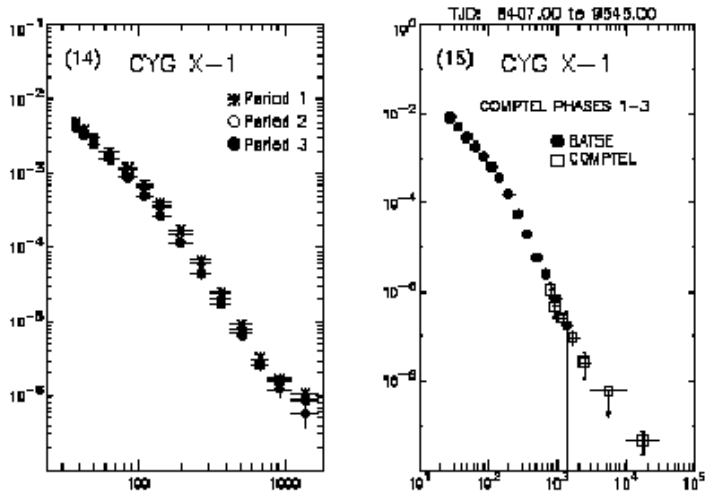

図 2.6: BATSE で観測された Cyg X-1 のスペクトル

2.4 WAMとBATSEの比較

	WAM	BATSE
エネルギー領域 (keV)	50 ~ 5000	25 ~ 300
有効面積 (cm^2)	800	2025
エネルギー分解能 (%)	25	20
角分解能 (°)	3	5
時間分解能 (s)	0.5	2.048
感度 (mCrab)	≦ 100	20
視野 (steradian)	~ 6.28	3.14

表 2.1: WAM と BATSE の性能の比較

表 2.1 からもわかるように WAM と BATSE を比較したとき、
WAM の方が優れている点

- エネルギー領域が広い
- 視野が広い
- 高エネルギー側での有効面積が大きい (図 1.4 参照)

がある。
逆に BATSE の方が優れている点

- エネルギー分解能がよい
- 感度がよい
- 低エネルギー側での有効面積が大きい (1.4 参照)
- WAM が衛星に組み込まれているのに対して BATSE は外側に設置されているので他の機器の影響を受けにくい

がある。

2.5　卒業論文の目的

WAM は非常に広い視野をもつため、トランジェント天体の観測に適しており、その成果を期待されている。トランジェント天体の観測を行なうには BATSE の観測においても用いられていた地食観測法が適している。この卒業論文では BATSE で観測された天体に対して地食観測を用いたリコンストラクションを行ない、ターゲットの天体の位置を決定する。それをもとに全天マップを作成するソフトの開発を行なうことを目的とする。このソフトを作成することにより Astro-E2 が打ち上げられた直後にでも、データ処理が迅速に進めて結果を早く出すことことが期待される。WAM の観測データをシミュレートするソフトは既にあり、これを用いてリコンストラクションの方法を開発、改善していくことが本論で特に行なったことである。

第3章　WAM観測シミュレーター

WAM の地食観測による位置決定プログラムを開発するためには観測模擬が必要であり、本論文では WAM 観測シミュレーターを用いる。そこで、この章では 2003 年度の山田さんの卒業論文を参考にして WAM 観測シミュレーターの概要について述べる。

3.1　構成

シミュレーターは図 3.1 のようになっている。まず天体とバックグラウンドの作る光子 (エネルギー方向) をシミュレートする部分。光子を検出器 WAM に入射させたときの反応をシミュレートする部分。そして反応の情報を観測データに変換する digitization である。digitization の部分はまだきちんと用意されていないのでここでは説明しない。以下に 2003 年度の山田さんの卒業論文の説明を行なっていく。

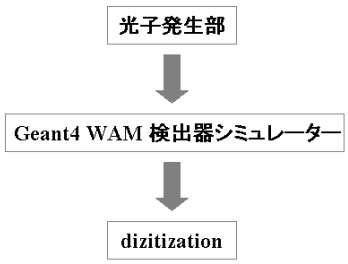

図 3.1: WAM 観測シミュレーターの構成

3.2　光子発生のシミュレーションの手順

光子発生の手順は

- 天体からの光子の発生
- バックグラウンドの発生

- 地食のシミュレーション
- Crab のカウントレートのシミュレーション

を行なう。

・天体からの光子を発生させる手順は図 3.2 の通りである。

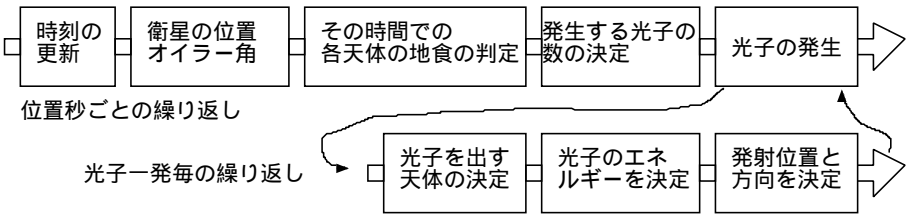

図 3.2: 天体からの光子発生の流れ

まず時刻の更新では時刻 (年月日時分秒) を MJD(modified Jurian date) に変換する。MJD とは 1858 年 11 月 17 日を 0 日とした表示であり、通常の暦で発生する不連続な部分を解消するために用いられている時刻である。この変換には日本の X 線観測グループが開発した atFunction ライブラリを用いている。

次に衛星の位置であるが、本論文では ASCA 衛星の軌道パラメータを用いている。ASCA 衛星は 1 日に地球の周りを 15 周していて、MJD を入力すると atFunction ライブラリによってその時間の ASCA 衛星の位置が得られる (図 3.3 参照)。これは衛星の軌道が時間がたつにつれて地球の緯度経度に対して段々とずれていくことを示している。宇宙の中で考えたときに衛星はほぼ同じ軌道上を動く。これは衛星は地球の回転とは無関係に動いているということであり、宇宙に対してほぼ一定の回転軸のまわりを回転しているということである。しかし、その衛星の軌道を地球座標で見てみると、図 3.3 のように衛星の軌道はその都度ずれていくように見える。これは衛星と同様に地球自体も宇宙に対して勝手に回っているからである。

衛星の位置が決まると、衛星と天体の位置関係から天体が地食しているかどうかの判定がなされる。地食している天体からは光は届かないため、地食していると判断された天体はその後のシミュレーションからは外される。

次にどの天体からの photon を発生させるかを決める。そのために BATSE で観測された 32 個の天体をシミュレーションに用いているようになっている。そのため 32 個の各天体の photon flux を足し合わせ、その中で一様乱数をふって天体の flux に応じて天体を決める。つまり photon flux が大きい天体の方が選ばれる確率が大きく、発生する光子数は多いということになる。

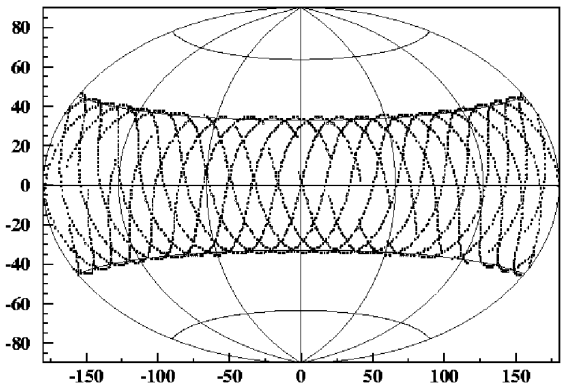

図 3.3: 地球上における衛星の動き (縦軸は緯度、横軸は経度)

光子のエネルギー (E) は power-law E^{-2} に従った乱数を発生させて天体のスペクトルを再現している。

また、光子の発射位置と方向を決定するには検出器を原点として半径 30cm の円盤を書き、それを検出器から天体方向に距離 50cm の位置に移し、円盤の軸を検出器の方向に向けて置く。そして円盤内でランダムに点をとり、そこから検出器に向かって光子を発射させる。

・バックグラウンドを発生させる手順は図 3.4 の通りである。

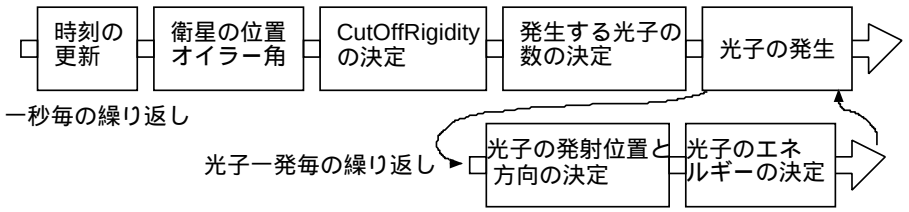

図 3.4: バックグラウンド発生の流れ

バックグラウンドはここでは宇宙背景放射 (CXB) と地球大気γ 線を考えている。CXB は常に一定のフラックスで発生させる。後者は宇宙線と大気の相互作用で出る。宇宙線は地球を取り巻く地磁気の影響で一定以下のエネルギーの粒子は軌道を曲げられてしまい、検出器まで届くことが出来ない。そのしきい値エネルギーの粒子についての運動量を Cut Off Rigidity と呼ぶ。Cut Off Rigidity は緯度に大きく依存しており、極付近では小さく、赤道付近では大きい傾向がある。

バックグラウンドも光子の発生と同様に発射位置と方向を決定するが、天体の場合と違って色々な方向からやってくるので方向も乱数で決めることになる。

衛星の位置の変化による大気γ 線のバックグラウンドのカウントレートの変化の例は図 3.5 のようになる。図 3.5 は縦軸が衛星に入射するバックグラウンドのカウントレート (count/s) 、横軸が時間 (秒) になっている。

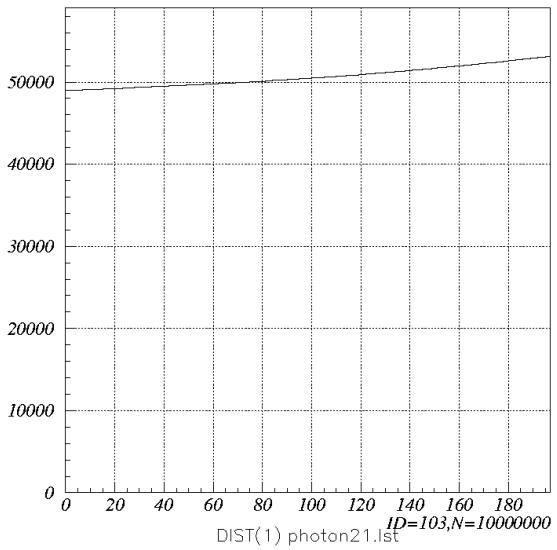

図 3.5: バックグラウンドのカウントレートの変化の例 (縦軸は衛星に入射するバックグラウンドのカウントレート (count/s)、横軸は時間 (秒))

・地食のシミュレーション

上記ふたつで得られた光子を検出器に入射させて Geant4 によって WAM での検出をシミュレートさせる。Crab について地食のシミュレーションを行なうと図 3.6 のようになる。これは WAM の一面 (最も外側にあり、観測に一番適した面) だけを用いて行なったシミュレーションであり、t=6922 秒で地食が起こっていることがわかる。

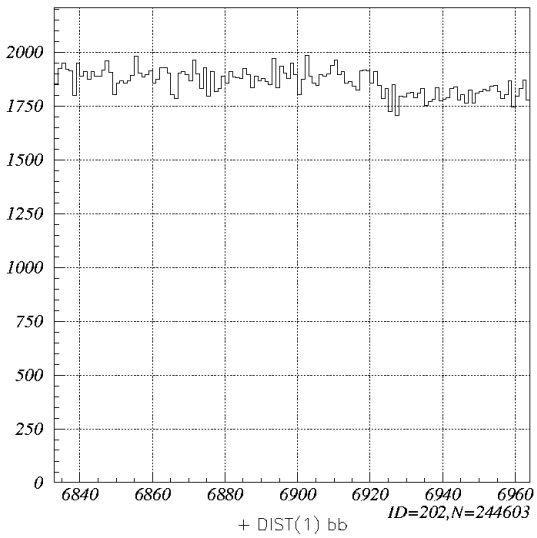

図 3.6: 地食のシミュレーション (縦軸はカウントレート (count/s)、横軸が時間 (秒))

・衛星の色々な姿勢における Crab のカウントレートのシミュレーション

ASCA 衛星は毎日違う天体を観測するように姿勢を変えるのでオイラー角も変化する。そのため、WAM に対する Crab の方向も毎日変化し、それにともなって Crab からのカウントレートも日々変化する。1993 年 5 月 ~ 10 月の ASCA 衛星のオイラー角の変化を用いて WAM 一面での Crab のカウントレートをシュミレートし、その頻度分布を求めると図 3.7 のようになる。今考えている面の向いている方向と逆の方向に Crab がいるとき (図 3.8) はカウントレートはほぼ 0 になるのでカウントレートが 0 の回数が多い。また、Crab が WAM の真正面に来たときのカウントレートは最大で 80c/s となることがわかる。

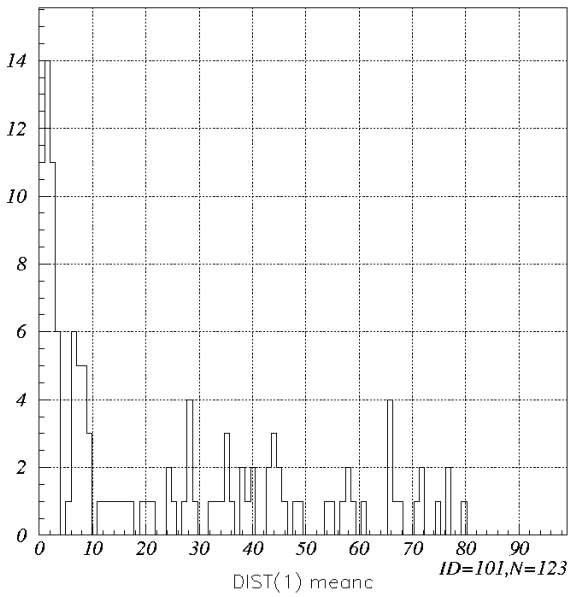

図 3.7: Crab のカウントレートの頻度分布 (縦軸は回数、横軸はカウントレート (count/s))

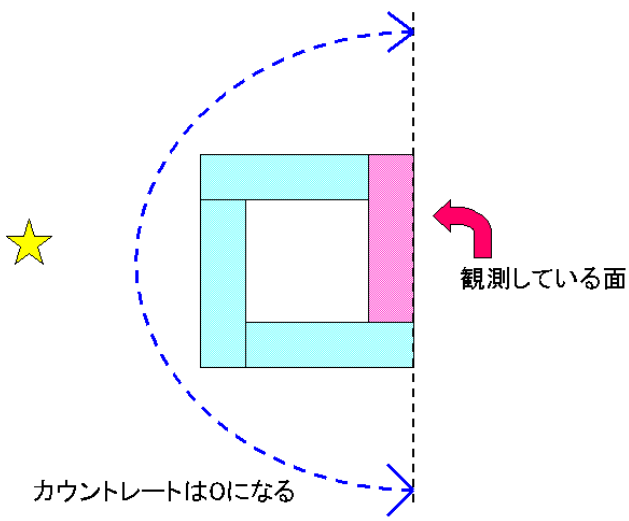

図 3.8: カウントレートが 0 になるとき

3.3　座標系

天体の座標表示には絶対座標系というものは存在せず、地球の自転軸を基準とする赤道座標系表示や銀河系を基準とする銀河座標系表示などの相対座標系が一般に使われる。それらは地球の公転や太陽系自体の銀河系に対する自転運動のため、同じ座標系でも時期により天体の座標値が変動するため、どの時期の座標系であるかと指定することも必要である。

天体の天球上の位置は、地球上の緯度や経度と同様に 2 つの角度で表される。地球の赤道面と天球面の交差面を緯度 $0°(\delta{=}0°)$ の「天の赤道」とし、赤道上で春分時の太陽の位置を経度 $0°(\alpha{=}0°)$ としたものを赤道座標系という。天の川に沿った面を緯度 $0°(\mathrm{b}{=}0°)$ とし、銀河中心を経度 $0°(\mathrm{l}{=}0°)$ とするものを銀河座標系という。衛星の位置は地球の緯度経度 (地球座標) で表される。本論文ではこれら 3 つの座標系について西径東径 $0°$ のところを経度 $0°$ とし、東経方向に $0° \sim 360°$ までとることにする。すると極座標表示 (θ,ϕ) に対して経度は ϕ、緯度は $90°$-θ になる。経度 $0°$、緯度 $0°$ の方向が X 軸、経度 $90°$、緯度 $0°$ 方向が Y 軸、緯度 $90°$ 方向が Z 軸となる。検出器で光子を反応させるときに用いる座標は観測方向を Z 軸の正の方向とし、太陽パドル方向を Y 軸とする衛星座標で表される。

また、衛星の姿勢にはオイラー角 (ϕ,θ,ψ) が用いられる。オイラー角とは回転を組合せて任意の姿勢に移動させる変換を表す 3 つの角度のことである。図 3.9 のように 3 つの回転角度を指定することであらゆる姿勢を定義することが出来る。

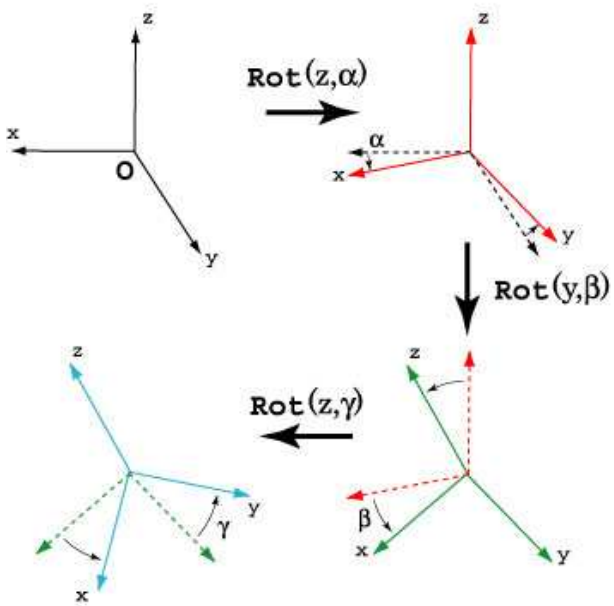

図 3.9: オイラー角の定義

まず、衛星の視野であるZ軸を天の北極に(δ=90°)、太陽パドルであるY軸を春分点(α=0°)に向ける。初めにZ軸を中心にφだけ反時計周りに回転させる。次に新しいY軸を中心にθだけ反時計周りに回転させ、最後に新しいZ軸を中心にψだけ反時計周りに回転させる。本論文では特にreconstructionの部分で検出器をターゲットの天体の方向に向けるためにオイラー角による回転を用いている。

以下にオイラー角の定義を行列式で述べる。回転は軸の正の方向から見て反時計周りに座標系を回すことなので、各点の位置は座標系に対して時計周りに回ることになる。すると、θ、ϕ、ψに対する回転行列はそれぞれ

$$\begin{pmatrix} cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ sin\theta & 0 & cos\theta \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} cos\phi & sin\phi & 0 \\ -sin\phi & cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} cos\psi & sin\psi & 0 \\ -sin\psi & cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

となる。よって、オイラー角で回す順番を考えると回転三つの組合せを表す行列は下記のようになる。

$$\begin{pmatrix} cos\psi & sin\psi & 0 \\ -sin\psi & cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ sin\theta & 0 & cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} cos\phi & sin\phi & 0 \\ -sin\phi & cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

この行列式を計算すると以下のような答えが得られる。

$$= \begin{pmatrix} cos\theta cos\phi cos\psi - sin\theta sin\psi & sin\theta cos\phi cos\psi + cos\theta sin\psi & -sin\phi cos\psi \\ -cos\theta cos\phi sin\psi - sin\theta cos\phi & -sin\theta cos\phi sin\psi + cos\theta cos\psi & sin\phi sin\psi \\ cos\theta sin\phi & sin\theta sin\phi & cos\phi \end{pmatrix}$$

3.4 AstroCoordinateクラス

AstroCoordinateクラスはatFunctionライブラリと高エネルギー物理分野で使われているCLHEPライブラリのHep3Vectorクラスを用いて、天体を衛星観測したときの状況を計算するプログラムであり、C++で書かれている。衛星軌道要素とオイラー角、天体の位置を入力すると任意の時刻での天体の見える方向、地食判定や座標変換を行なうことが出来る。

3.5 Geant4によるWAM検出器シミュレーター

Geant4は、FORTRAN言語を用いていたGeant3を、実験装置の大規模・複雑化、また応用分野の拡大化などシミュレーターへの機能要件が急激に複雑になってきたことに対してオブジェクト指向とC++言語を用いて再構築したものである。

Geant4 は、陽子・中性子・電子・γ 線・π 粒子・μ 粒子などの素粒子が物質中で起こす反応を正確にシミュレーションするソフトウエアであり、シミュレーションを行なって得られたデータは高エネルギー・原子核実験や宇宙科学において実験を行ない最終結果を導き出す際に非常に重要な役割を果たす。

WAM 検出器シミュレーターは宇宙研、理研、広島大学が中心となって開発しており、詳細は大野修論 (2004) を参照。

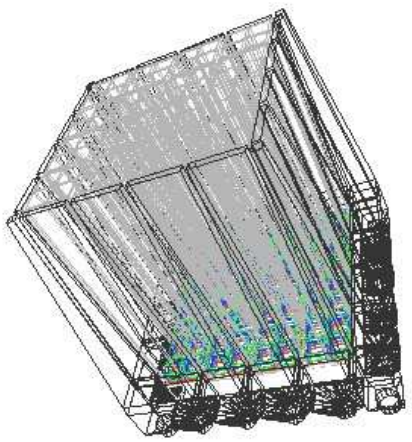

図 3.10: WAM 検出器シミュレーターのジオメトリの図

第4章　天体位置の決定

4.1　リコンストラクションの方法

リコンストラクションとは観測で得られたデータから観測対象に対する情報を再構築していく作業であり、今回はターゲットの天体の位置をリコンストラクションすることを目標としている。

その方法として、BATSE でも用いられていた地食観測を使い、地食が起こった時刻と地食が終わる時刻でターゲットの天体がいる位置の範囲をその都度天球上に半円として描き、複数の地食に対する半円の交点がターゲットの天体の位置となる方法を用いる。また、明るい天体については WAM 2 面で観測される photon 数のカウント比を用いてどの方向から photon が到来しているのか、つまりどの角度にターゲットの天体がいるのかを求めてその角度に半円を描くことができ、上記の半円との交点をとることで 1 回の地食に対して天体の位置を決めることが出来る。本章では第 3 章で説明したシミュレーションを用いて地食を再現し、それに対して実際に天体の位置を決める作業を行なった。

4.2　地食による位置決定

4.2.1　リコンストラクションの手順

まず、かに星雲 Crab のリコンストラクションを行なった。その手順は以下の通りである。

1. シミュレーションを開始する時刻を指定する。本論文では開始する時刻を 1998 年 12 月 24 日 18 時 29 分 59 秒とした。その時間は atFunction ライブラリによって MJD に変換される。(今回の開始時刻を MJD に直すと MJD = 4421241009(s) となる)

2. その時刻での Crab と衛星の位置関係から地食しているかどうかを判断する。もし地食しているようならその時間の MJD、登録した天体の ID(この場合は

Crab)、地食の有無、RA、DEC、天体の総 flux を書き出す。地食していないようなら MJD のみを書き出す。

3. その後 MJD を 60 秒進め、2 と同じ判定をする。それを開始時刻から一カ月経過するまで 60 秒毎に繰り返す。

4. 得たデータの中で地食に入るときと地食から出るときのみの MJD を取り出し、それぞれの時刻について Crab の位置を表す半円を天球面上に描く。半円の描き方を以下に説明する。

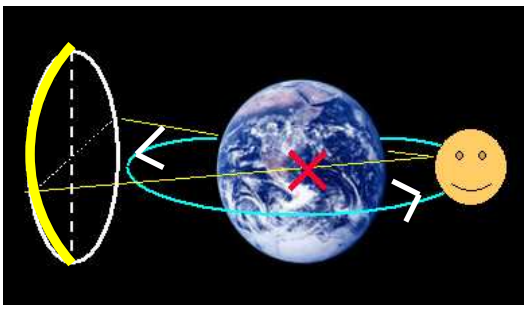

図 4.1: 半円の描き方

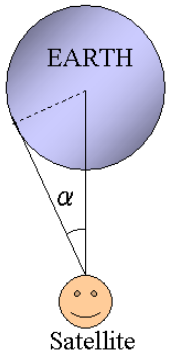

図 4.2: 半円の描き方 2

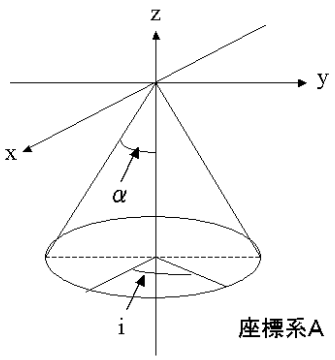

図 4.3: 半円の描き方 3

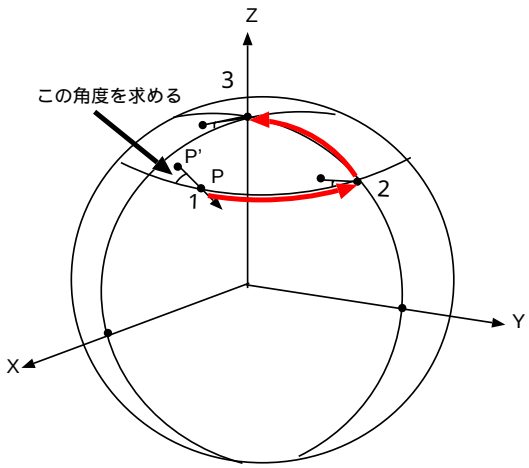

図 4.4: 衛星の軌道の傾き

衛星が図 4.1 の位置にいるときに地食が始まったとする (つまり衛星が地球の周りを反時計周り方向に進んでいるとする)。その衛星の位置から地球に対して接線を引き、その接線の延長線と天球の交点を描くと円になる。天球上での円の描き方は具体的に以下のようにした。

まず地食した衛星の位置から地球に対して引いた接線と地球の中心と衛星を結ぶ線のなす角を α とする (図 4.2)。すると地球に対して衛星が Z 軸方向にいる座標系 (‘A‘と呼ぶ) では天球上では極座標で (θ,180°-α) の円 (θ は任意) となる。これを地球座標に変換する。そのためには地球に対する衛星の位置を考えれば良い。今、衛星が地球座標で経度 ϕ_s、緯度 90°-θ_s にいるとする。衛星は座標系 A では θ=0(北極) にいるので、まず Y 軸周りに θ_s だけ回転させ、次に Z 軸周りに ϕ_s 回転させると、衛星は極座標で (ϕ_s,θ_s) となる。つまり地球座標になる。よって同じ座標回転を円 (ϕ,180°-α) に対しても行なう。プログラム中では ϕ を 1° ずつとって、計 360 個の点を座標変換させた。最後にそれらは地球座標で表されているので AstroCoordinate で赤道座標に変換する。

5. この円のうち、時間が少し経過したとき衛星から地球に隠れて見えなくなる部分に天体がいることになるので、天体の位置は半円にしぼることができる。この半円は衛星がやってきた側の半円になる。その半円の部分を求めるために衛星が地球の赤道面に対してどれくらい傾いて進んでいるのかを決定する (図 4.4)。

   地球赤道に対する衛星軌道のなす傾斜角を i とする。真東方向に進むときを 0° とし、北側の方向に傾いて進むときを正として表す。現時刻の衛星の位置 P と 1 秒前の衛星の位置 P' を考えると (図 4.4 の点 1)、$\overrightarrow{P'P}$ と赤道の成す角が i となる。i は次のように求める。

   まず P を 90°-ϕ_s だけ Z 軸 (地球回転軸) の周りに回す。すると P は Y 軸上 (ϕ=90°) になる (図 4.4 の点 2)。次に X 軸 (経度 0° 方向) の周りに θ_s だけ回転させると P は θ=0(天頂) に移る (図 4.4 の点 3)。この座標系を B とする。このときの P ' の位置が (ϕ'_{s-1},θ'_{s-1}) だったとすると、i=180°-ϕ'_{s-1} と求めることができる。次にこの i と半円の関係を考える。P と P ' を先ほどの座標系 A に変換すると、P ' は ϕ=270°-i の位置にいる。よって先ほどの座標系 A での円のうち、180°-$i \leq \phi \leq$ 360°-i の部分が該当する半円となる。地食が終わるときには-$i \leq \phi \leq$ 180°-i の部分となる。この半円を手順 4 の方法で回転させて赤道座標にすればよい。

これらの方法でかに星雲 Crab についてリコンストラクションを行なった。衛星が軌道を一周する間の 1 回の地食の始まり、終わりでリコンストラクションを行な

うと図 4.5 が得られた。これを見てわかる通り、地食が始まるときと地食が終わるときについてそれぞれ半円を描くと Crab の位置 (83.63,22.01) で半円が交わることがわかる。実は Crab は衛星軌道面の近くにあるので図 4.5 のように地食の始まりと終わりの半円がほぼ 1 点で交わるが、そうでない天体は半円は 2 点で交わるので天体の位置が一意には決まらない。その例を図 4.7 に示す。半円が 2 点で交わるのは、衛星軌道面に対して上下対称の位置にいる天体は、同じ時刻で地食が開始及び終了するからである。2 点交差しているうちのどちらか一方が天体の位置を表しており、図 4.7 の Cyg X-1 の場合は (-60.41,35.20) が正しい位置である。衛星軌道面は時間とともに少しずつ変化していくので、何日も地食を追っていけば実際の天体の位置で半円は常に交わり、そうでない交点は時間とともにずれていく。

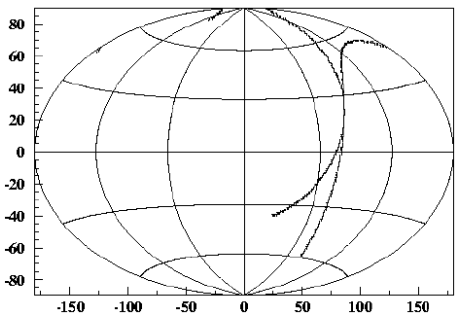

図 4.5: Crab のリコンストラクション (縦軸は δ、横軸は α)

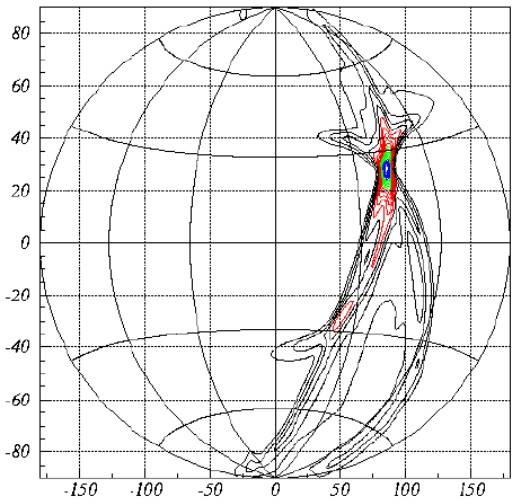

図 4.6: Crab のリコンストラクション (縦軸は δ、横軸は α)。青、緑、赤、黒の順に半円の重なりが大きい

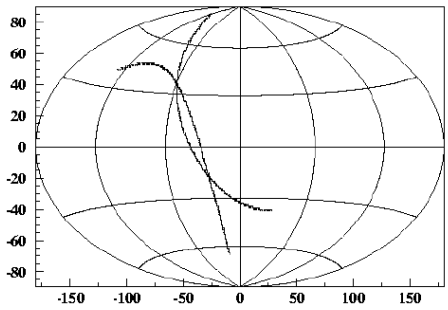

図 4.7: Cyg X-1 のリコンストラクション (縦軸は δ、横軸は α)

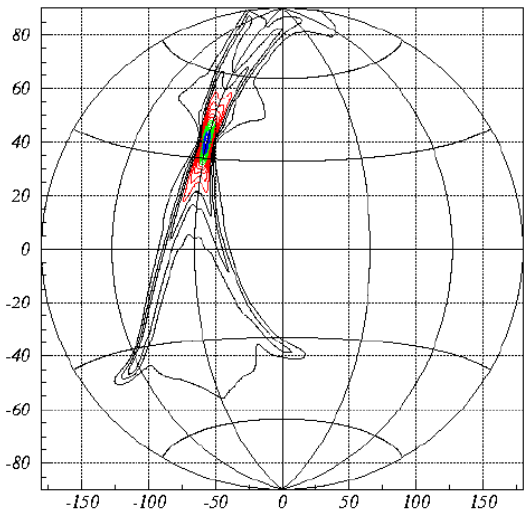

図 4.8: Cyg X-1 のリコンストラクション (縦軸は δ、横軸は α)。青、緑、赤、黒の順に半円の重なりが大きい

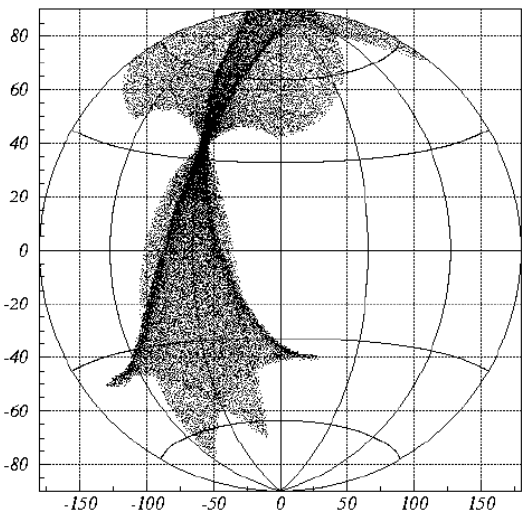

図 4.9: Cyg X-1 のリコンストラクション (縦軸は δ、横軸は α)

図 4.6 と図 4.8 に Crab と Cyg X-1 の一カ月の地食情報を用いて半円を天球に描いていった様子を示す。図 4.6 と図 4.8 においては青、緑、赤、黒の順に半円の重なりが大きい (図 4.9 参照)。つまり、半円の重なりが最も大きい青の部分に天体がいるということになる。Cyg-X1 についても一回の地食のみのリコンストラクションではわからなかったが、一カ月間リコンストラクションを行なうと半円は 1 点で交わることがわかる。Crab、Cyg X-1 の座標は赤道座標において (83.63,22.01)、(-60.41,35.20) であるので、その場所にきちんと半円の交点が来ている。よってリコンストラクション出来ている。一つの天体についてのリコンストラクションが成功したことから、全天マップを製作するにあたって他の天体についても Crab と同様にリコンストラクションを行なうことが出来るのか調べた。

4.2.2 多数の天体についてのリコンストラクション

ここでは BATSE で観測された天体のうちの１０個について観測データをシミュレートし、１０個の天体に対する地食時間の全てについて Crab で行なったリコンストラクションと同じ方法でリコンストラクションを行なった (Crab も含む)。リコンストラクションを行なった天体のデータは表 4.1 の通りである。

No.	Name	赤道座標		flux @100keV
		α	δ	(10^{-5}c/s/cm^2/keV)
0	1E1740-29	265.98	-29.72	7.649
1	3C273	187.28	2.05	1.783
2	4U1543-45	236.79	-47.67	1.787
3	4U1608-522	243.18	-52.42	3.324
4	4U1700-37	255.99	-37.84	4.249
5	Aqu X-1	287.82	0.58	2.449
6	Cen A	201.47	-42.97	6.373
7	Cir X-1	230.17	-57.17	2.231
8	Crab	83.63	22.01	5.562
9	Cyg X-1	299.59	35.20	6.190

表 4.1: 今回リコンストラクションに用いた 10 個の天体のデータ

その結果、図 4.10 を得た。

ここで図 4.10 を見ると本当の天体の位置と半円を描いて求められた天体の位置が一致していることがわかった。よってこの１０個の天体についてのリコンストラク

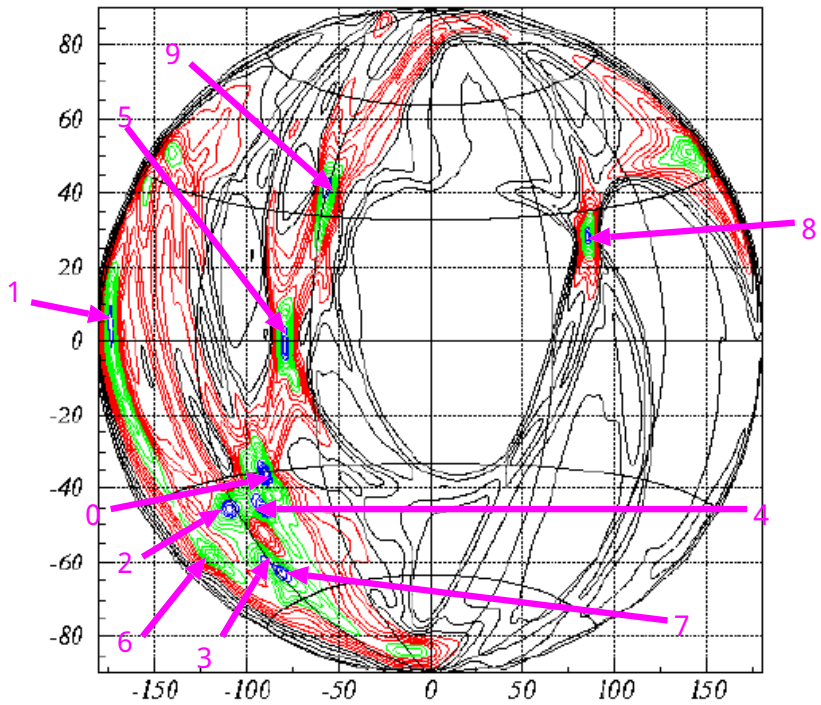

図 4.10: 10 個の天体のリコンストラクション (縦軸は δ、横軸は α、番号は表 4.1 で定義した天体の No.)

ションもきちんと行なわれている。しかし天体がないはずのところでも半円が重なってしまっているところがあった。これは１０個の天体についてそれぞれ一カ月分の地食による膨大な量の半円を描いているために No.2,3,4,7 などの近くにある天体について描かれた半円が重なってしまったためと思われる。§4.2.1 のようにひとつの天体についてのリコンストラクションを行なう場合はこの方法でもよいが、複数の天体についての全天マップを作成する際には不都合が生じてしまう。その場合、次に述べる WAM 2 面を用いたリコンストラクションを用いることが有効となる。

4.3 地食時の WAM 2 面のカウント比による位置決定

4.3.1 目的

前節の最後でも述べた通り、ターゲットの天体の個数が多くなるとその分地食の回数が多くなり、描く半円の数がとても多くなる。すると半円が重なってしまい、それが邪魔となってターゲットの天体の位置を見つけるのが困難になってしまう。それを防ぐために少ない半円でターゲットの位置を特定するために WAM 2 面のカウント比を用いた半円を描いてリコンストラクションを行ない、前節の方法を共に使ってターゲットの位置をより強く制限して半円の重なりを少なくする。

4.3.2 リコンストラクションの方法

今回のリコンストラクションにもかに星雲 Crab を用いた。カウント比を用いてリコンストラクションする際に、カウント比と X 線の入射角度の関係が必要となる。この関係は実は WAM に対する天体の方向がわからないと正確に求められないが、最初は天体の方向がわからない。そこで。最初は第一近似として天体が WAM 検出器に対して図 4.11 のような WAM 検出器の真横にいる場合の入射角度とカウント比の関係を用いることとする。その関係を以下のように求めた。ある天体についてその天体が side1 の真正面に来るように衛星の姿勢をオイラー角 (θ,ϕ,ψ) で調整すると side1 が天体の真正面に来たときは ψ=0 となる。そして図 4.11 のように θ、ϕ の値は一定で ψ の値を 0° ~ -45° まで変化させ、そのときの side1 と side0 で観測された photon 数を用いて 2 面のカウント比と ψ の関係を求めた (図 4.12)。そしてここで得られた図 4.12 を基に観測されたカウント比から天体の正しい位置を求めるのだが、上の関係は近似であり、実際の天体は図 4.11 のような方向にいないので、その天体の方向についてのカウント数と入射角度の比の関係を改めて求め直し、より精度良い天体方向を繰り返し求めていくことになる。しかし、今回は図 4.12 のみで天体の方向を決めることとする。

1. 今回は開始時刻を 1993 年 7 月 24 日 18 時 35 分 15 秒とした。地食を用いたリコンストラクションと同様に指定した時間は atFunction ライブラリによって MJD に変換される。シミュレーションをする際に衛星の姿勢をオイラー角 (θ,ϕ,ψ) を用いて定義する。

2. 地食によるシミュレーションと同様に、その時刻での Crab と衛星の位置関係から地食しているかどうかを判断し、地食していないなら Crab からの photon を発生させ、地食しているなら発生させない。

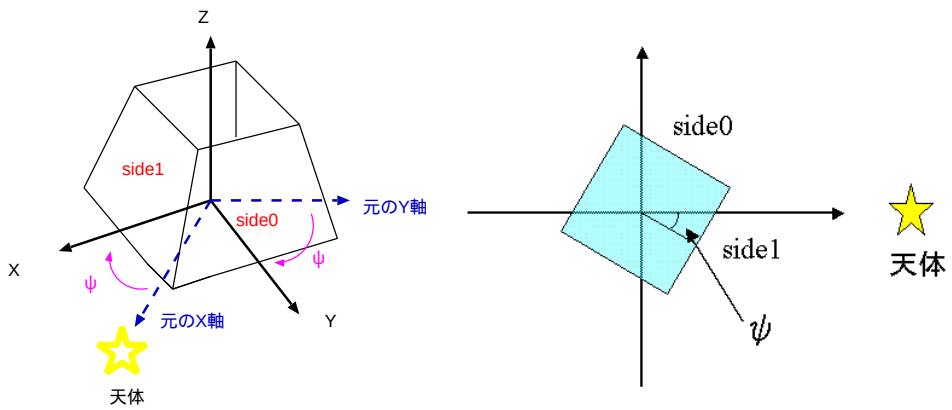

図 4.11: 入射角度とカウント比の関係を求める様子

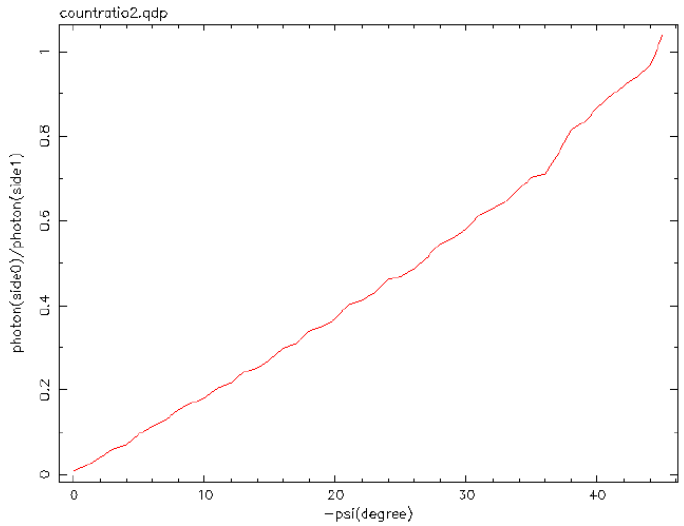

図 4.12: side1 に対する side0 のカウント比と入射角度 ψ との関係

3. その後 MJD を 1 秒進め、 2 と同じ判定をする。それを開始から 1 秒毎に 1800 回 (30 分) 繰り返す。

4. 地食付近の photon を Geant4 の WAM 検出器シミュレーターに入力してシミュレーションを行なう。

5. シミュレーションを行なった結果、side0 と side1 で検出された photon の量を取り出し、side0/side1 の値を求め、図 4.12 と比べてそのカウント比に対応する ψ の値を求める。その値を新たに ϕ_r とする。

6. まず (x,y,z)=(sinΘ,0,cosΘ) のベクトルを用意して、Θ の値を 0° から 180° まで変化させて XZ 面に半円を描く (座標系 C とする)。その半円について Z 軸を中

心として-ϕ_r だけ座標系を回転させて衛星座標系にする (図 4.13)。その後、入力したオイラー角で回転させると Crab の位置に半円が描かれる。

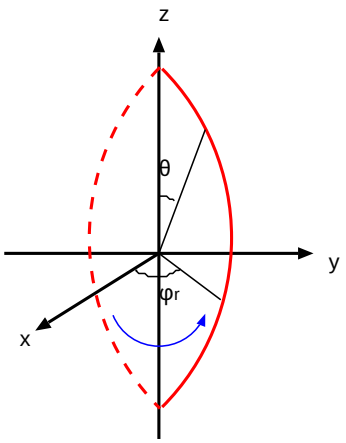

図 4.13: 半円の ϕ_r 回転の様子

4.3.3 Crab のリコンストラクション

§4.3.2 で述べた方法で Crab のリコンストラクションを行なった。

今回のリコンストラクションではオイラー角と ϕ_r の値は表 4.2 のように定めた。ここでオイラー角は side1 の photon 数が side0 の photon 数より多くなるように任意に選んだ。

θ	ϕ	ψ	ϕ_r
-22.01	83.63	-25	25
-10.01	93.63	-26	17.849715
-59.99	60.63	-12	38.215031
40.01	70.0	-1	29.772648
0	72.99	-14	26.305506

表 4.2: 各オイラー角とそれに対応する ϕ_r の値 (単位:度)

リコンストラクションを行なった結果、図 4.14 を得た。Crab の座標が (83.63,22.01) であるので 5 つの半円の交点は正しい Crab の位置を示していることがわかる。

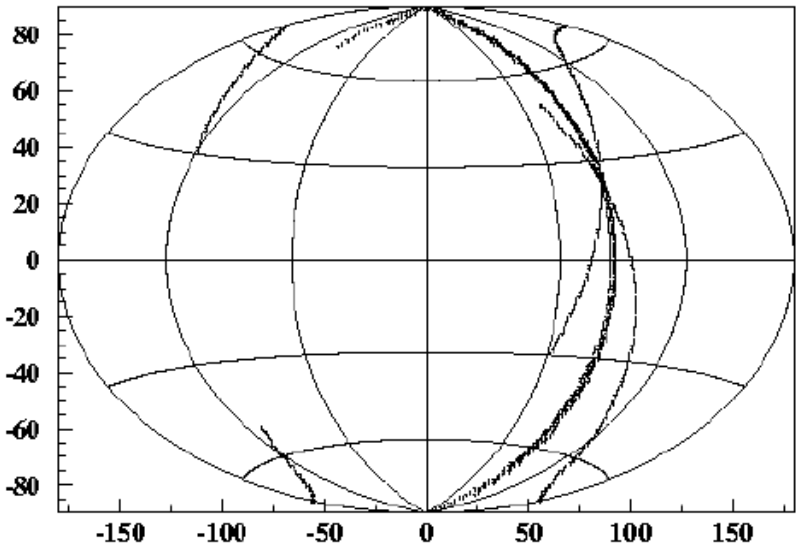

図 4.14: 2 面のカウント比を用いたリコンストラクション

4.4 地食による半円と 2 面のカウント比を用いた半円による Crab の位置決定

§4.2 と §4.3 で描かれた半円において、ターゲットの天体の位置はそれぞれの半円上に制限される。そのため、この二つの半円の交点が天体の位置ということになる。そこで §4.2 と §4.3 で行なった二つの方法で得られた半円の交点を求めてリコンストラクションを行ない、Crab の位置を決定する。

4.4.1 半円の交点の求め方

1. §4.3 で WAM の 2 面のカウント比を用いて描いた半円は赤道座標に変換する前に座標系 C で X 軸と Z 軸を含む面に Θ=0 ~ 180° の範囲で描かれているので (図 4.13)、§4.2 で地食を用いて描いた半円を §4.3.2 の手順 6 で述べた座標系 C に描くことを考える。そうすればカウント比による半円との交点を求めやすい。そのために地食を用いて描いた半円を赤道座標から検出器座標に座標変換した後にさらに Z 軸まわりに-ϕ_r だけ回転させる。

2. するとカウント比から描かれた半円は元の通り X 軸と Z 軸を含む面に θ=0 ~ 180° の範囲で描かれ、地食で描かれた半円とは X と Z を含む面上で交点を持つことになる (図 4.15)。

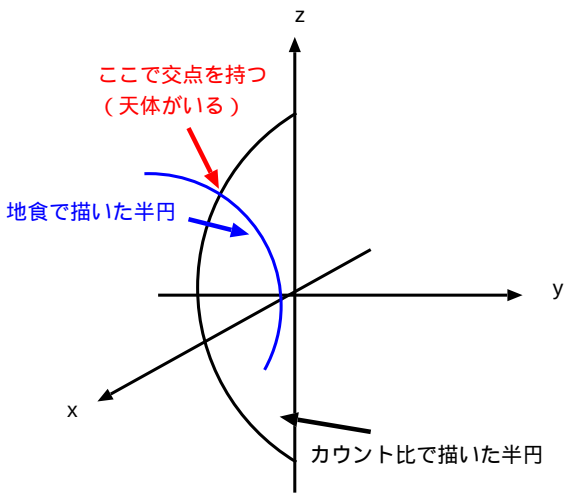

図 4.15: X 軸と Z 軸を含む面での二つの半円の交点 (座標系 C)

3. 交点では y 座標の極性が入れ替わるのでその前後の点だけを抜き出し、カウント比の半円で行なったのと同じように ϕ_r だけ回転させた後に検出器座標から赤道座標に座標変換を行なう。すると赤道座標での天体の位置を得ることが出来る。

4.4.2 Crab のリコンストラクション

§4.4.1 で述べた方法を用いて Crab についてリコンストラクションを行なった。

1. 地食で求められた半円は図 4.16 の通りであり、この半円上に Crab の位置 (83.63,22.01) がある。

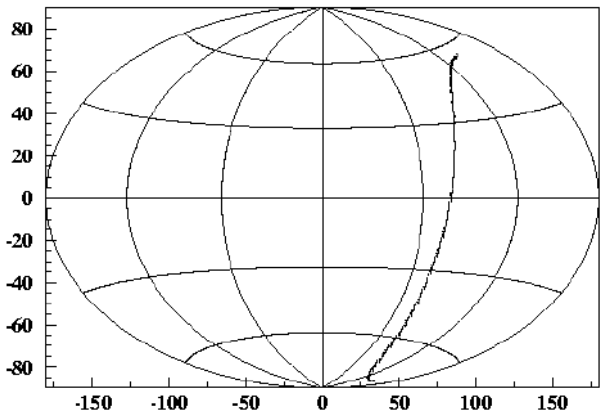

図 4.16: 赤道座標における Crab に対して地食で描かれた半円

2. この半円を §4.4.1 で述べた通りに赤道座標から検出器座標に座標変換した後に-ϕ_r だけ回転させる。すると座標系 C になって図 4.17 を得た。図 4.17 を見ると X 軸と 1 点で交わっている。この交点はカウント比で描いた半円との交点であるので、天体の位置を示す点となる。今、オイラー角は $(\theta,\phi,\psi) = (40.01,70.0,-1)$ を使用している。

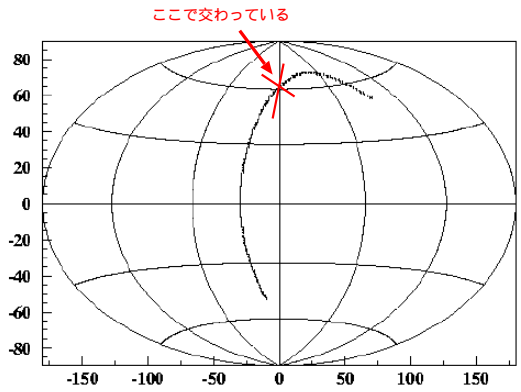

図 4.17: オイラー角 $(\theta,\phi,\psi) = (40.01,70.0,-1)$ のときの X 軸と Z 軸を含む面での二つの半円の交点 (座標系 C)

3. この交点の前後の点 (Y の極性が変化する前後の点) のみを抜き出し、§4.4.1 で述べた通りに ϕ_r だけ回転させた後に検出器座標から赤道座標に座標変換を行なう。すると図 4.18 が得られた。

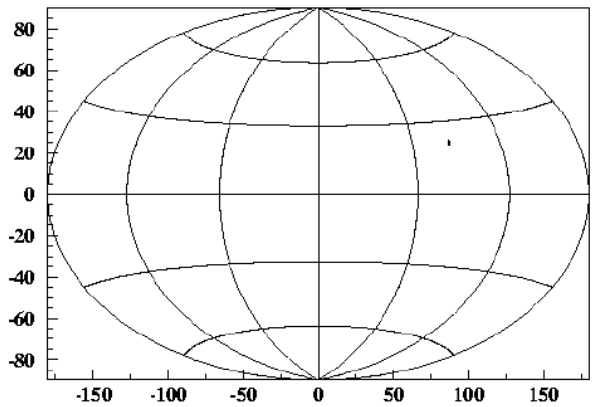

図 4.18: 赤道座標に戻したときの交点 (Crab の位置)

4. 1 ~ 3 の作業を表 4.2 の全てのオイラー角について行なった。なお、今回は Y の極性が変化する前の点から後の点までを Θ について 0.1 度ずつ 10 個プロットした。その結果、図 4.19 を得た。

図 4.19 より、ほぼ全ての点が Crab の位置 (83.63,22.01) にプロットされていることがわかる。よって Crab の位置が正しくリコンストラクションされているということになる。この方法であれば天体の無い位置で半円が重なることも少なくなり、全天マップを作成する際にも有益な方法であると言うことが出来る。

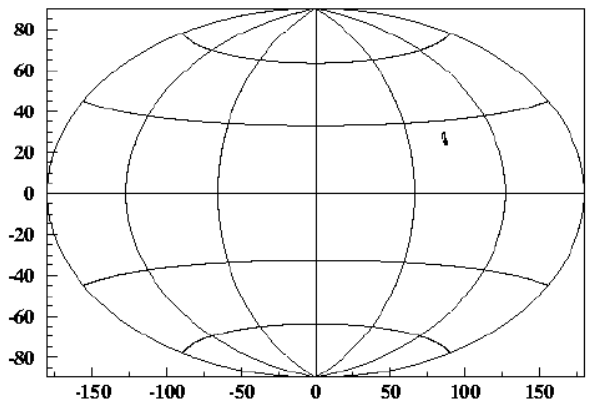

図 4.19: 5 つのオイラー角について赤道座標に戻したときの交点 (Crab の位置)

4.5 位置決定の精度

§4.2 と §4.3 で描いた半円について半円からどの程度の範囲にターゲットの天体が存在する可能性があるかどうかを求め、位置決定の精度を評価する。

4.5.1 地食で描いた半円の精度

地食を用いて半円を描く際に問題となるのは地食と判断される時刻の精度である (図 4.20)。

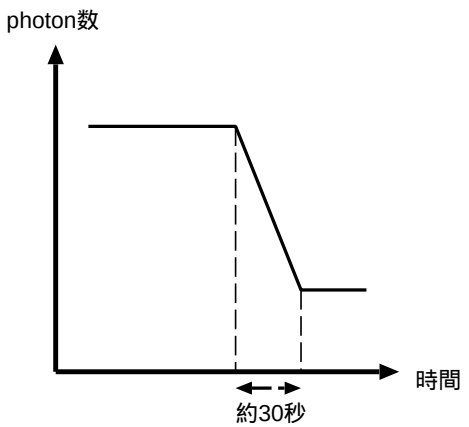

図 4.20: 地食によるカウントレートの変化

地食によるカウントレートの変化は BATSE のデータを見るとだいたい 30 秒くら

い続くので、地食時刻の精度は最大 30 秒に相当する。Astro-E2 が 90 分 (5400 秒) で地球を一周するので 1 秒あたり約 0.067 度進む。よって地食の時刻の精度の間に衛星は 2 度進むので、地食を用いて描いた半円の誤差は 2 度ということになる。つまり位置決定の半円の幅は 2 度ということになる。

4.5.2 カウント比を用いて描いた半円の精度

カウントの精度は天体の光子のカウント数とバックグラウンドの S/N で決まり、その精度は式 4.1 で求められる。

$$\frac{\sqrt{N}}{N-B} \tag{4.1}$$

ここで N は Crab とバックグラウンドの photon 数を足した全カウント数、B はバックグラウンドの photon 数である。地食前後の 30 秒のデータを用いて天体のカウントを求めるとすると、一日では約 600 秒となる。Astro-E2 はほぼ 2 日間同じオイラー角を保って周回するので、各オイラー角につき 1200 秒の有効時間があるということになる。山田卒論より、Crab の平均のカウント数は 23(count/s) なので 1200 秒では 27600(count) となる。また、バックグラウンドは primary と secondary が 1800(count/s)、放射化バックグラウンドが 4000(count/s) で合計約 5800(count/s) なので 1200 秒では 6960000(count) となる。よって

N=6987600、B=6960000

となり、これを式 4.1 に代入すると約 0.096 という値を得る。よってカウントの精度は 10%となり、図 4.12 の関係より半円の精度 (幅) は 5 度ということになる。Crab より暗い天体は S/N がより悪くなるので、位置決定の半円の精度はもっと悪くなる。山田卒論より Crab の約 0.5 倍の flux の天体まで 2 日間の地食で観測出来るということがわかっている。

しかし山田卒論でも述べている通り、今回は 天体のスペクトルの photon index を全て 2 として計算した他、HXD の周辺の機器によるエネルギー吸収を考慮していないので実際はもっと悪い精度になると思われる。

第5章　まとめと今後の課題

本研究では Astro-E2 衛星 WAM による地食観測から天体位置を決定する方法 (リコンストラクション) を試みた。

今回のリコンストラクションでは BATSE によって得られた天体のデータを用いて、地食観測とカウント比を使った半円を描いた。その両方の方法を用いて天体の位置決定をすることが出来、両方を同時に使用することで効率的にリコンストラクションを行なうことが出来ることがわかった。

地食を用いたリコンストラクションでは一カ月間の地食について半円を描くことで天体の位置を決定することが出来た。しかし以下のような問題点および今後の課題が判明した。

- 複数の天体について一度にリコンストラクションを行なうと半円が重なってしまい、天体が無いはずの場所にも半円の重なりが出来てしまった。それを解決するためには一カ月よりも短く、かつ正確に天体の位置が求まる期間でリコンストラクションを行なうことが必要となる。
- 地食の時刻の決定精度が位置決定精度に直接結び付く。よってカウントレートの変化から地食の時刻を精度良く求める方法を探る必要がある。
- 今回は side1 の photon 数が side0 の photon 数よりも多いオイラー角を任意で選んだが、実際は様々なオイラー角があり、それに対応出来るようにする必要がある。
- 今回は天体が検出器の真横にいると考えたが、実際には正確な位置を求めることが必要である。
- カウント比を用いるときにはバックグラウンドが非常に重要になるので精度を向上させるためにもバックグラウンドの見積もりを正確に行なうことが必要となる。

今回のリコンストラクションは一応成功はしたものの、まだ数多くの課題が残されているので、それを今年の夏の Astro-E2 衛星打ち上げまでにひとつずつ解決していくことが今後の課題となる。

Acknowledgment

本研究を行なうにあたって基本的な知識から完成まで全てにおいて様々な御指導をして下さった深澤先生、大杉先生に心から感謝致します。特に深澤先生には多くの助言をいただき、深く感謝しております。また、地食による半円を作成するにあたって多くの助言をいただいた山田さん、シミュレーションのみに留まらず全ての面において多大なる知識を与えて下さった大野さん、基礎知識やプログラムに関して様々なことを教えていただいた川埜さんにも心よりお礼を申し上げたいと思います。そして研究面のみならず、その他の面でも支えて下さった 4 年生のみなさんを始め、研究室の方々や事務の方々に心より感謝致します。

Reference

1. 山田 芳徳 : 2003 年度 広島大学 卒業論文 『Astro-E2 衛星搭載硬 X 線検出器による全方位観測の感度の推定』

2. 川添 哲志 : 2002 年度 広島大学 修士論文 『Astro-E2 衛星搭載硬 X 線全天モニタ装置のバックグラウンドの推定』

3. 大野 雅功 : 2001 年度 広島大学 卒業論文 『Astro-E2 衛星搭載 HXD 検出器におけるガンマ線バースト検出器装置の観測エネルギー領域拡大に向けた研究』

4. 大野 雅功 : 2003 年度 広島大学 修士論文 『Astro-E2 衛星搭載ガンマ線バーストモニタの信号処理回路の開発と応答関数の構築』

5. 宇宙科学研究所 SES データセンター 『科学衛星 Astro-E2 中間報告書』

6. 『Preflight Calibration and Performance of the Astro-E2/HXD-2 Anti Counter as the All Sky Monitor』 M.Ohno et al.,IEEE 2004,NSS,N16-20 presentation

7. J.C.Ling et al.『A BATSE EARTH-OCCULTATION CATALOG OF 0.03-1.8 Mev GAMMA-RAY SOURCE SPECTRA AND LIGHT CURVES FOR PHASES 1-3 (1991-1994)』2000,ApJ 127,79