X線天文衛星「すざく」搭載
広帯域全天モニタ(WAM)のバックグラウンド解析

M042873
高橋拓也

広島大学大学院理学研究科
高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

2006 年 2 月 27 日

主査：大杉 節
副査：石川 健一

概 要

広帯域全天モニタ (Wide-band All-sky Monitor:WAM) は、X 線天文衛星「すざく」に搭載された硬 X 線検出器 (HXD-II) の外側に配置された BGO 結晶を用いたアクティブシールドであり、主検出器のバックグラウンドを下げることがその第一の役割であるが、それ自身も全天観測可能な検出器として構成されている。WAM は広いエネルギー帯域 (50 keV~ 5 MeV) と大きな有効面積を持つため、主に突発現象の観測において力を発揮する。2005 年 7 月のすざく打ち上げ以降、順調に観測が続けられており、多数のガンマ線バースト (GRB) や太陽フレアの観測に成功している。

これら天体の観測や解析を行ううえで重要となってくる要素に WAM の軌道上でのバックグラウンドが挙げられる。バックグラウンドを正しく評価することにより、主検出器のバックグラウンドの理解へと繋がり、また、暗い GRB の探査や、明るい天体の地食によるモニター観測が可能となる。さらに研究室の進めるガンマ線観測衛星 GLAST(2007 ~) のバックグラウンドの理解にも繋がる。しかしながら、WAM のバックグラウンドは通る軌道により大きく変動することが分かっており、単純な差引では正確に除去できない。この変動は地球磁場の影響や軌道上での放射化によって説明できるが、エネルギーバンドごとにその影響が異なっている。そこで本研究ではバックグラウンドを各エネルギーごとにモデル化することで、より良いバックグラウンドの除去を目指す。今回用いたのは、一つ目として、バックグラウンドの時間変動プロファイルを地球磁場や機器の放射化をパラメータとした関数でフィッティングを行うことでバックグラウンドの時間変動のモデルを構築する手法をとった。その際、100 keV 以下では地球の大気ガンマ線の影響もあることが分かった。もう一つの手法は、衛星の地球上の位置での平均カウントを求め、それをバックグラウンドのモデルとするやりかたである。さらにこれら二つを組み合わせることで、よりよいバックグラウンドのモデル関数を構築し、それによるフィッティングを各エネルギーチャンネルに対して行った。

WAM のライトカーブは１秒ごとに取得され、エネルギーバンドが 54 ch あるため、年間約７億６千万のヒストグラム数となり、処理したりフィットしたりするのに大きな CPU パワーが必要となる。そこで PC クラスタを構築することも本研究の一環として行っている。

目 次

第 1 章　X 線天文衛星「すざく」 **5**
1.1　概要 5
1.2　硬 X 線検出器 HXD-II 6
1.2.1　HXD-II センサ部 6
1.2.2　広帯域全天モニタ (WAM) 7

第 2 章　WAM のバックグラウンド **11**
2.1　荷電粒子バックグラウンド 11
2.2　ガンマ線バックグラウンド 12
2.2.1　遠方天体起源のガンマ線 12
2.2.2　大気ガンマ線 13
2.2.3　検出器の放射化バックグラウンド 13
2.3　BATSE による地食解析とバックグラウンドのモデル化 14
2.3.1　BATSE とは 14
2.3.2　解析方法 14
2.3.3　天体からのフラックス 15
2.3.4　バックグラウンドモデル 15
2.3.5　突発現象の除去 16

第 3 章　解析環境の整備 **17**
3.1　目的 17
3.2　計算能力の向上手法 17
3.3　ハードウェア 18
3.3.1　中央演算処理装置 (Central Processing Unit : CPU) 18
3.3.2　記憶装置 19
3.3.3　ネットワーク 20
3.3.4　停電対策 20
3.4　Operating System (OS) 21
3.5　今回のシステム構成 21
3.6　インストール 23
3.7　解析ソフトウェア 25
3.7.1　「すざく」用解析ソフト 25
3.7.2　一般の解析ソフト 26
3.8　今後の課題 26

第 4 章　解析 **28**
4.1　WAM データの種類 28
4.2　軌道上でのバックグランド 29

4.3 軌道上でのバックグランドのカウントマップ 34
4.4 ライトカーブのモデルフィッティング 36
4.5 データベースからの差し引き 39
4.6 パラメータの探索 46
4.6.1 低エネルギー側に寄与するもの 46
4.6.2 新しいモデルでのフィッティング 49
4.6.3 そのほかのパラメータ 50

第 5 章 まとめ **56**
5.1 今後の課題 56
5.1.1 WAM4 面のカウントの違い 56
5.1.2 解析環境の整備 56

図 目 次

1.1 X 線天文衛星「すざく」とその軌道 5
1.2 硬 X 線検出器 HXD-II 6
1.3 HXD-II 概要図 6
1.4 HXD-II / Well １ユニット 7
1.5 WAM ユニットの構造 8
1.6 ガンマ線バーストの E_{peak} と放射光度の比較 9
1.7 BATSE で観測された地食ライトカーブ 10
1.8 HXD-WAM で観測された太陽フレア 10

2.1 検出器のバックグラウンド源 11
2.2 軌道上での COR マップ 12
2.3 WAM のライトカーブと COR^{-1} の対応 12
2.4 大気ガンマ線生成のメカニズム 13
2.5 South Atlantic Anormaly 13
2.6 CGRO 衛星と BATSE 14

3.1 HXD データの流れ 25
3.2 構築中の PC クラスタ 27

4.1 WAM 4 面 29
4.2 WAM-0 ライトカーブ 29
4.3 「すざく」の軌道 30
4.4 050817 のカウントと COR^{-1} の対応 31
4.5 WAM-0 ライトカーブ (4 Energy Band)(1) 31
4.6 WAM-0 ライトカーブ (4 Energy Band)(3) 32
4.7 WAM-0 ライトカーブ (4 Energy Band)(3) 32
4.8 WAM-0 ライトカーブ (4 Energy Band)(4) 33
4.9 WAM-0 ライトカーブ比較 33
4.10 軌道上での全 54Ch カウントマップ 34
4.11 各エネルギーバンドでのカウントマップ (WAM-0)(1) 35
4.12 各エネルギーバンドでのカウントマップ (WAM-0)(2) 35
4.13 WAM-0 Ch1 モデルフィッティング (05/10/10) 37
4.14 WAM-0 Ch 1 モデルフィッティング (フレア除去) 37
4.15 WAM-0 Ch2 モデルフィッティング 38
4.16 WAM-0 Ch 1 モデルフィッティング 39
4.17 WAM-0 Ch 2 モデルフィッティング 39
4.18 周辺８ピクセル 40
4.19 フレア除去を試したカウントマップ (南東移動) 40
4.20 フレア除去を試したカウントマップ (北東移動) 41

4.21 フレア除去を試したカウントマップ (2) 41
4.22 フレア除去を試したカウントマップ (3) 42
4.23 WAM ４面カウントマップ 42
4.24 WAM ４面カウントマップ (2) 43
4.25 各エネルギーバンドでのカウントマップ (WAM-0) 43
4.26 BGD を差し引いたライトカーブ (05/08/19) 44
4.27 BGD を差し引いたライトカーブ (05/09/16) 44
4.28 BGD を差し引いたライトカーブ (05/10/22) 45
4.29 BGD を差し引いたライトカーブ (05/11/24) 45
4.30 低エネルギー側と高エネルギー側の比較 46
4.31 低エネルギー側と COR の対応 47
4.32 地球と WAM のなす角度 47
4.33 ライトカーブと COR^{-1}、earth_on の関係 48
4.34 ライトカーブと COR^{-1}、earth_on の関係 (2) 48
4.35 新モデルでの Ch2 フィッティング 49
4.36 新モデルでのフィッティング (高エネルギー側) 49
4.37 新モデルでのフィッティング (高エネルギー側,20bin まとめ) 50
4.38 WAM ４面の比較 (1) 50
4.39 WAM ４面の比較 (2) 51
4.40 WAM と地磁気方向の関係 52
4.41 WAM-0 のバックグラウンドの長期変動 53
4.42 WAM-0 のバックグラウンドの長期変動と衛星高度の変化 53
4.43 WAM-0 のバックグラウンドの長期変動 (WAM4 面) 54
4.44 カウントと COR と衛星高度の比較 55

第1章　X線天文衛星「すざく」

1.1　概要

X 線天文衛星「すざく」は「あすか」に続く、日本で 5 番目の X 線天文衛星である。「すざく」は 2005 年 7 月に M-V ロケットによって打ち上げられ、現在順調に観測を行っている。「すざく」は高度約 550 km で赤道から約 30 度傾いた楕円軌道を取り、約 96 分で地球を一周する。

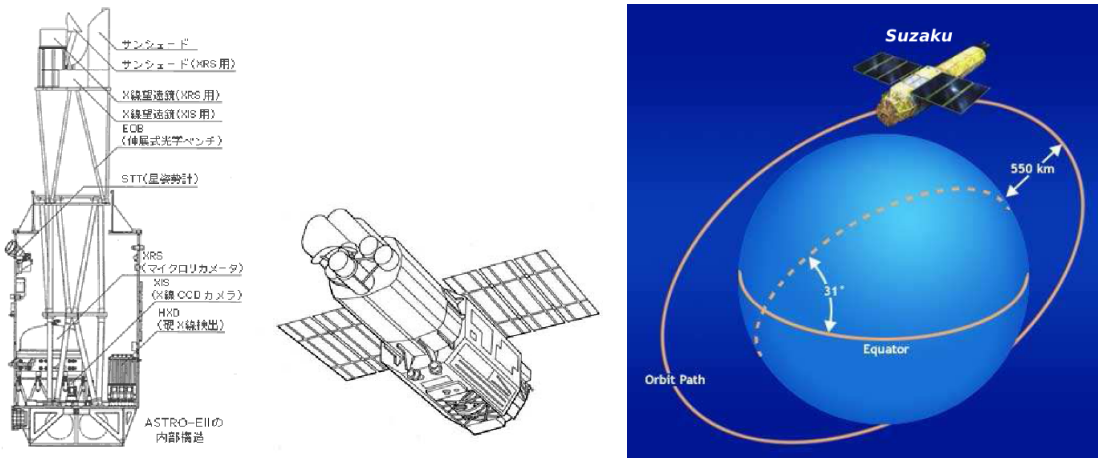


図 1.1: X 線天文衛星「すざく」とその軌道

「すざく」に搭載された観測機器は、軟 X 線反射鏡 (X-Ray Telescope ; XRT) の焦点面に置かれた 4 つの X 線 CCD カメラ (X-ray Imaging Spectrometer ; XIS) および高分解能 X 線分光器 (X-ray Spectrometer ; XRS) と、硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector ; HXD) から成る。XIS は CCD の持つ非常に優れた位置分解能と高いエネルギー分解能により、精度の良い分光と撮像が同時にできることが特徴である。このことは、銀河団や超新星残骸などの拡がった天体の観測に大きな力を発揮する。XRS は X 線の入射に伴う微弱な温度変化をとらえることで X 線のエネルギーを非常に良く決定でき、6 eV という高エネルギー分解能を実現していた。これにより活動銀河核のブラックホール近傍から放射されていると考えられている鉄輝線をかつて無い精度で分光し、輝線放射領域の状態などを詳しく探ることが期待されていた。しかしながら XRS は故障により残念ながら観測不可能となってしまった。硬 X 線検出器 HXD-II は 10 keV から 600 keV という非常に広い軟ガンマ線領域を観測することができる。このように「すざく」は 0.5 keV から 600 keV までの非常に広いエネルギー領域をかつて無いほどの低バックグラウンドで観測することが可能な衛星となっている。「すざく」に搭載された現在稼働中の検出器の概要を表 1.1 にまとめる。

	XIS + XRT	HXD-II / Well	HXD-II / WAM
検出器	FI CCD x 3 BI CCD x 1	Si PIN ダイオード + GSO シンチレータ	BGO シンチレータ
視野	17.8’ x 17.8’	34’ x 34’ (< 100 keV) 4.6° x 4.6° (> 100 keV)	~ 2π
エネルギー範囲	0.2 ~ 12 keV	10 ~ 700 keV	50 ~ 5000 keV
特徴	高エネルギー分解能 @ 1 keV 以下	極低バックグラウンド	全天モニタ

表 1.1: 「すざく」搭載検出器

1.2 硬 X 線検出器 HXD-II

「すざく」に搭載された硬 X 線検出器 HXD-II は 10 keV から 700 keV までの非常に広範囲のエネルギー領域を観測する。この領域は熱制動放射や黒体輻射などの熱的な放射からシンクロトロン放射や逆コンプトン散乱などの非熱的放射が見えて来る非常に重要な領域でありながら、ガンマ線の相互作用としてコンプトン散乱が支配的になるため、ガンマ線の全エネルギーを測定することが難しく、バックグラウンドが非常に大きくなるため、有効な観測がこれまで行われずにいた。しかし、HXD-II はバックグラウンドを極限までに抑える構造を持つために、数 100 keV のエネルギー領域において、これまでのいかなる検出器よりも良い感度をもつ。

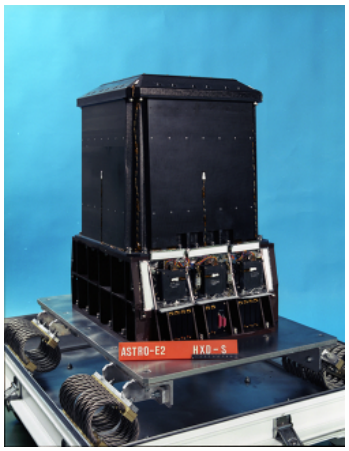


図 1.2: 硬 X 線検出器 HXD-II
(c) JAXA / ISAS

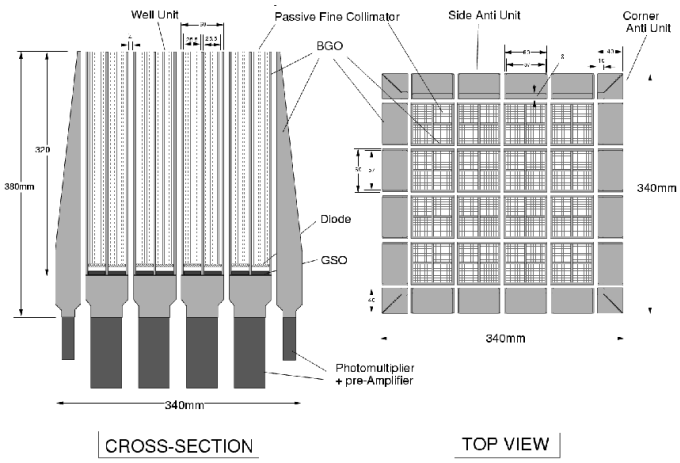


図 1.3: HXD-II の概要図

1.2.1 HXD-II センサ部

HXD-II の主検出器は中央に配置された 16 本の井戸型フォスイッチ構造を持った Well 検出器である。Well の 1 ユニットのイメージを図 1.4 に載せる。フォスイッチ構造とは BGO シンチレータと GSO シンチレータを組み合わせた検出器のことで、井戸型の構造をもった BGO は GSO に対して反同時計数をとることで、コンプトン散乱などのバックグラウンドイベントを効率良く除去することができる。さらにこのフォスイッチ構造の検出器を複数並べる配置をとることによって、視野外からの X 線混入を防ぐための狭い視野を維

持しながら大面積の検出器を実現した。この複眼型構造は隣り合うユニット間での反同時計数を取ることを可能にし、さらにバックグラウンドを軽減させることができる。さらに井戸部には燐青銅で作られたパッシブなファインコリメータが挿入されており、低エネルギー側の視野をさらに狭めている。HXD-II の Well 検出器はこのようなバックグラウンドを極限までに抑える設計がなされており、その結果、従来の検出器に比べて数倍以上良い感度を実現している。

図 1.4: HXD-II / Well １ユニット (イメージ)　　(c) JAXA / ISAS

また、主検出器の周囲には厚い 20 本の BGO シンチレータが取り囲んでいる。これらは宇宙線陽子などの宇宙線から主検出器を守るアクティブシールドとしての役割とともに反同時計数にも参加することで、さらなるバックグラウンドの低減を実現しており、Anti 検出器と呼ばれている。Anti 検出器は主検出器の周りを取り囲み、視野が広いことと、阻止能の高い BGO 結晶で構成されていることから、全天を観測するトランジェントモニタや、MeV 領域に渡るガンマ線バースト検出器として用いることができる。この Anti 検出器を用いた全天モニタの詳細は § 1.2.2 で述べる。

1.2.2　広帯域全天モニタ (WAM)

広帯域全天モニタ (Wide-band All-sky Monitor ; WAM) とは、先ほど述べたように「すざく」に搭載された硬 X 線検出器 HXD-II の外側に配置された BGO 結晶を用いたアクティブシールドである。WAM は広いエネルギー帯域 (50 keV~ 5 MeV) と大きな有効面積を持つため、主に突発現象の観測において力を発揮する。WAM の構造を図 1.5 に示す。

全天モニタという点で WAM と同様の特徴を持つ BATSE の LAD と比較した場合、WAM はシンチレータとして高い阻止能を持つ BGO を使用していることにより、検出器の面積では 1100cm^2 と BATSE の 2025cm^2 には及ばないが、高いエネルギー帯の数 100 ~ 数 MeV の領域で BATSE を凌ぐ。このことは MeV 領域まで延びているガンマ線バーストのスペクトルや太陽フレアを観測する上で有利な点であると言える。WAM の主な性能は表 1.2 にまとめる。

WAM による観測対象には次のようなものがある。

1. **ガンマ線バーストの観測**

   ガンマ線バースト (GRB) とは宇宙における最大の爆発現象である。1960 年代からその存在が知られており、日に数個というけっして希ではない頻度で発生する現象でありながら、その正体はまったく謎につつまれていた。

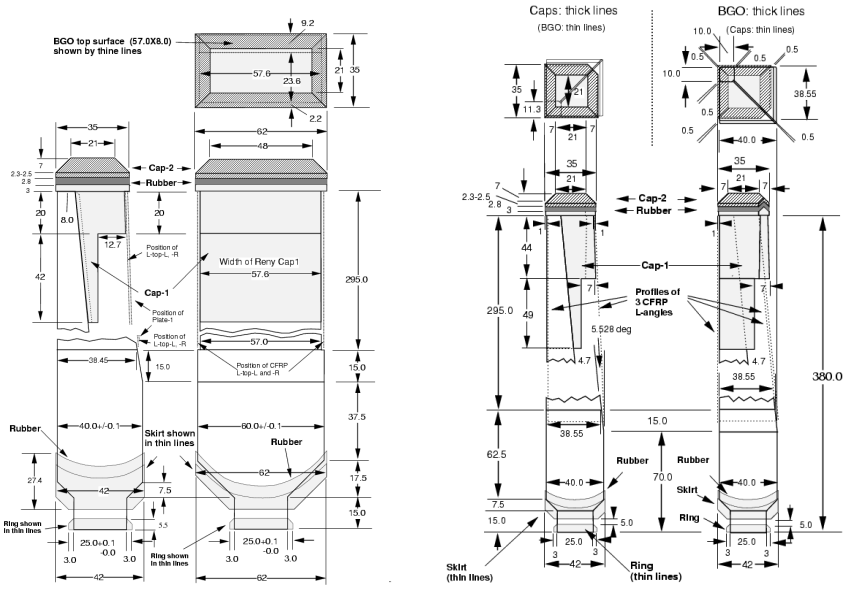


図 1.5: WAM ユニットの構造 (左：サイドカウンタ, 右：コーナーカウンタ)

検出器数	4 (WAM 0,1,2 and 3)
エネルギー範囲	50 ~ 5000 keV (54 channel + OverFlow)
エネルギー分解能	30% @ 662 keV
有効面積	800 cm^2 @ 100 keV , 400 cm^2 @ 1 MeV
時間分解能	31.25 msec (ガンマ線バーストデータ) , 1 sec (モニタデータ)

表 1.2: WAM 性能

HXD-WAM によるガンマ線バースト観測は、数 100keV から MeV 領域においてこれまでのどの検出器よりも有効な観測が行えることが期待される。ガンマ線領域でガンマ線バーストを観測することで、バーストそのものの物理を解明することが可能である。この領域において期待される物理には以下のようなものがあると思われる。

(a) バースト発生領域の物理の解明

ガンマ線バーストのスペクトルには典型的に折れ曲がりの構造が見られることが BATSE などにより報告されている。ガンマ線領域の放射はシンクロトロン放射であると考えられており、この折れ曲がりは高エネルギー電子のエネルギーに関係があると考えられる。ガンマ線バーストのスペクトルの時間変動をみてみると、時間が経ち、スペクトル強度が下がるに連れて、折れ曲がりのエネルギー E_{peak} も低くなっていくことが報告されている。これはシンクロトロン放射によって電子がエネルギーを失っていくためであると考えられる。この過程のタイムスケール (クーリングタイム) を知ることでバースト領域の電子のエネルギーや磁場のエネルギー密度を求めることが可能である。HXD-WAM は時間分解能がよく、E_{peak} の変動を詳細に追うことが可能である。

(b) E_{peak} の分布問題の結着

BATSE と HETE-2 両者では E_{peak} の分布が異なる結果が得られている。HXD-WAM は バーストスペクトルの E_{peak} を 100 keV から 3 MeV までの広範囲にわたって精度良く決定することが可能である。HXD-WAM による ガンマ線バー

ストの観測によりこの問題に決着をつけることができると期待されている。また、これまでの結果により、E_{peak} とバーストのガンマ線光度に相関が見られることが示唆されている。図 1.6 によるとガンマ線領域から X 線領域にわたって両者の相関が見られる。しかし、エラーが大きいところもあり、詳細な構造は分からない。HXD-WAM によって E_{peak} が精度良く求まると、この関係をさらに詳細に調べることが可能である。

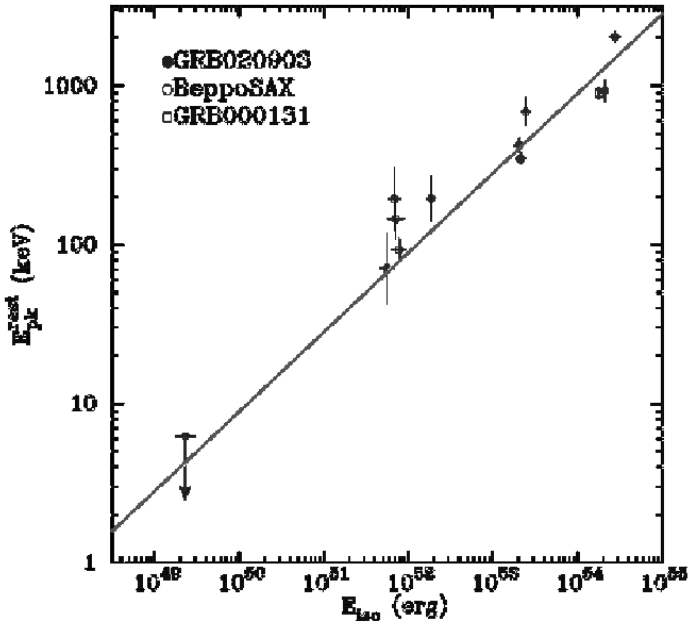


図 1.6: ガンマ線バーストの E_{peak} と放射光度の比較　縦軸：E_{peak}　横軸：光度

2. **地食を利用したトランジェントモニタ**

地球の食 (Earth Occultaion) を利用した天体観測とはある既知の天体が地球に隠れる前後でのカウントレートの差を観測することで、対象天体の明るさを測定する観測技術のことである。この手法は全天を見渡すことのでき、時間分解能の良い検出器で広く用いられており、CGRO 衛星に搭載された BATSE などが有名である。BATSE ではこの手法により、毎日数 10 個の天体をモニタした。BATSE で得られたかに星雲の地蝕前後のカウントレートを表したものを図 1.7 に示す。ここに見られるように地蝕前後で有為なカウントレートの差が見られる。

Earth Occultation 法においてはバックグラウンドの評価をいかに精度良く行うかが重要になって来る。なぜなら、視野の広い検出器にとって、バックグラウンドは非常に高いものとなり、地蝕前後のカウントレートの差に大きく影響するからである。ここでいうバックグラウンドとは、宇宙線バックグラウンドや対象天体以外からの X 線の他にも自身の検出器が宇宙線陽子などによって放射化されたときに生じるガンマ線も含む。

3. **太陽フレアの観測**

太陽では、黒点の周辺部で突発的に輝きがまし、大量の高エネルギー粒子を惑星間空間に向けて振り撒く現象が時々起こる。この現象を太陽フレアと言う。太陽フレアの規模は、その X 線強度により分類が行われ、強い方から X、M、C の等級がある。

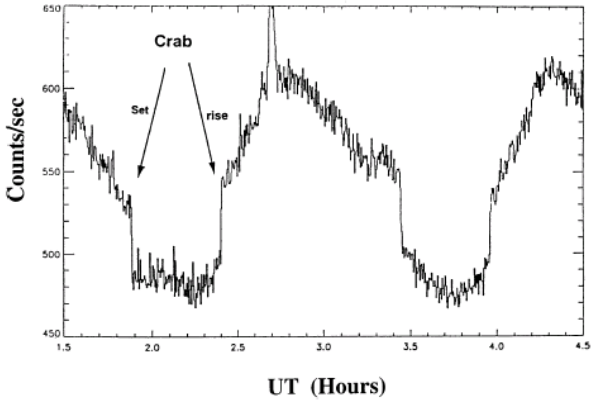


図 1.7: BATSE により観測された地食によるライトカーブの変化　[9]

太陽フレアの発生機構としては、太陽の活動領域に蓄えられた磁気エネルギーが、磁気再結合によって熱エネルギーや運動エネルギーに変換されることによる、と言う説が有力である。

フレアの爆発過程において、特に急激な現象がフレア発生初期の時間帯に観測される粒子加速現象である。このとき加速された粒子が密度の高い彩層に飛びこむと硬 X 線が発生する。太陽観測衛星「ようこう」はこれを捉えることを目的としている。

HXD-WAM は全天モニタであり、また、４面あるうちの T0 面と呼ばれる面は常に太陽方向を向いている。そのため太陽の活動をモニタリングするのに適している。図 1.8 に HXD-WAM で捉えた 2005 年 9 月 9 日 19:13(UT) に発生した強度 X6.2 の太陽フレアのライトカーブを載せる。横軸が世界時、縦軸がカウント、エネルギーは 50 ~ 80 keV である。最初の急激なカウントアップは太陽が地球の影から出てきた部分である。最後でカウントが 0 になっているのはフレアに伴うガンマ線のカウントレートがあまりにも高くて検出器の安全装置が働き、電源が落とされたためである。このように HXD-WAM でも太陽フレアについて観測することが可能である。

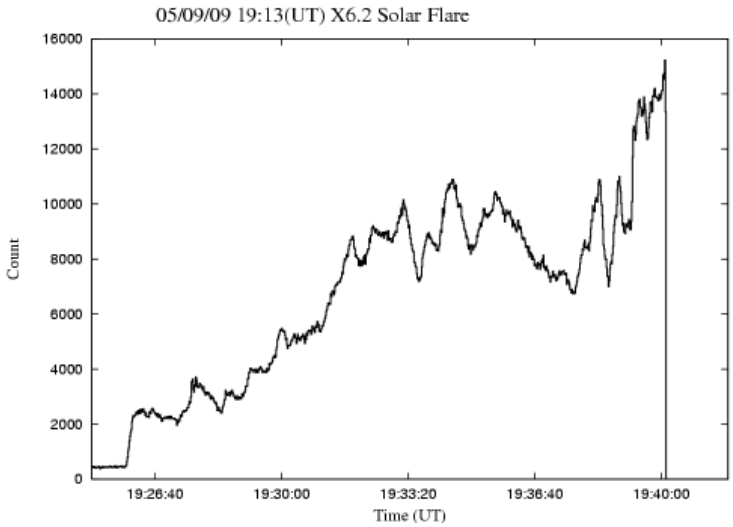


図 1.8: HXD-WAM で観測された太陽フレア

第2章　WAMのバックグラウンド

WAM による天体観測を行う上で重要となってくる要素に WAM のバックグラウンドが挙げられる。バックグラウンドを精度良く見積もることで、天体の検出感度を向上させることが可能となり、同時に正しいスペクトルやライトカーブを取得できるようになる。

WAM は主検出部のバックグラウンド除去機能は持っているが、WAM 自身のバックグラウンド除去機能は持っておらず、その上非常に大きな有効面積を持つため、入射してくる様々な粒子がバックグラウンドとなる。WAM のエネルギーバンドである 50 ~ 5000 keV での観測を考えた場合、衛星軌道上でのバックグラウンドは大きく分けて、荷電粒子によるものとガンマ線によるものがある。衛星でのバックグラウンド源の模式図を図 2.1 に示す。

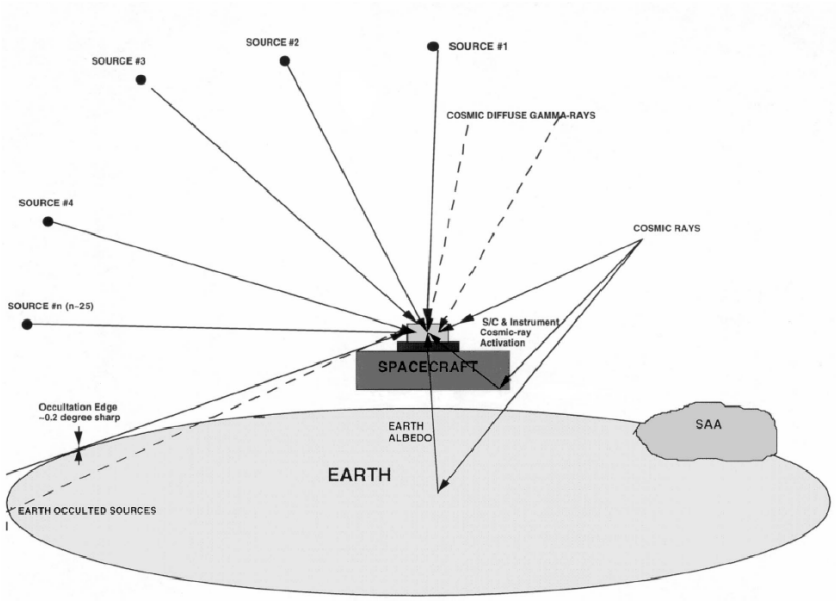


図 2.1: 検出器のバックグラウンド源　[9]

2.1　荷電粒子バックグラウンド

衛星上での荷電粒子の強度は、その地球上の位置での地球磁気圏を貫くために必要とされるエネルギーによって変化する。この地球磁場による荷電粒子のシールド能力のことを charged particle Cut Off Rigidity (COR) と呼ぶ。COR の高い場所では荷電粒子は地球磁場によって多くが止められるためバックグラウンドは小さくなり、反対に COR の低い場所では荷電粒子が地球磁場を貫いて降り注ぐため、バックグラウンドは増加する。WAM 軌道上での COR の分布図を図 2.2 にのせる。WAM におけるライトカーブと COR の対応の一例を図 2.3 に示す。横軸は時間、縦軸はカウントである。実線は WAM のライトカー

ブを示し、破線は COR^{-1} の関数となっている。COR の低いところではカウントが高くなり、高いところでは低くなる傾向が見て取れる。

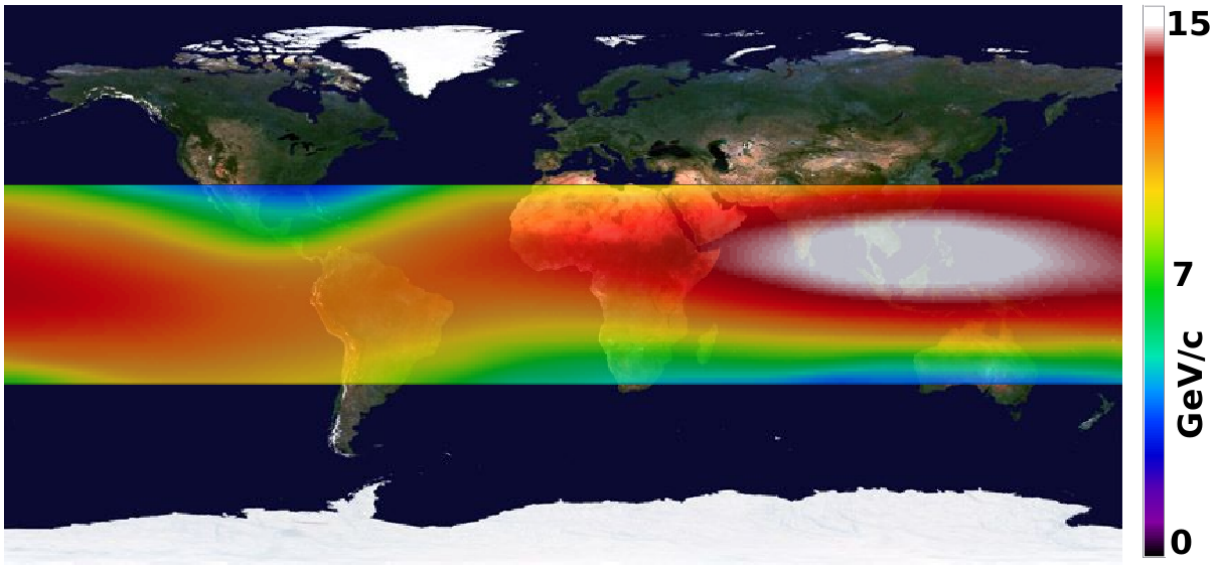


図 2.2: 軌道上での COR のマップ (横：経度 (±180 deg)、縦：緯度 (±90 deg))
衛星画像提供：JAXA

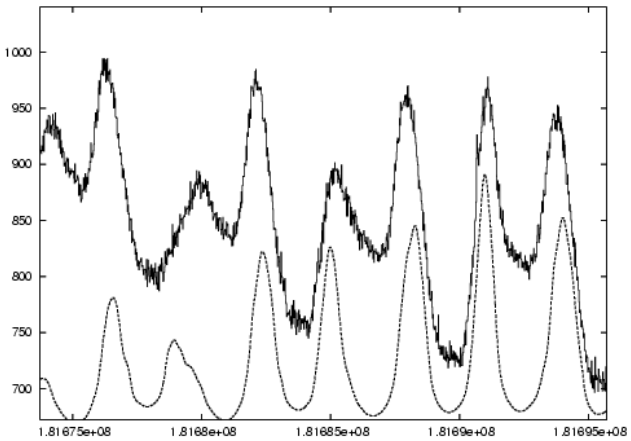


図 2.3: WAM のライトカーブと COR^{-1} の対応 (縦軸；カウント，横軸：時間 (sec))

2.2 ガンマ線バックグラウンド

2.2.1 遠方天体起源のガンマ線

これは宇宙ガンマ線バックグラウンドの一次成分と呼ばれるもので、遠方天体を起源とする成分であり、多数の活動銀河核の X 線の足し合わせであると考えられている。スペクトルに角度依存性が無く、等方的なのが特徴となっており、50 keV 以下のエネルギーで支配的となる。

2.2.2　大気ガンマ線

これは二次成分と呼ばれるもので、地球磁場に捕らえられた荷電粒子が地球の大気と相互作用を起こし、それによって生じたガンマ線である。この過程の図を 2.4 に示す。この強度は視線方向にある大気の柱密度に依存する。

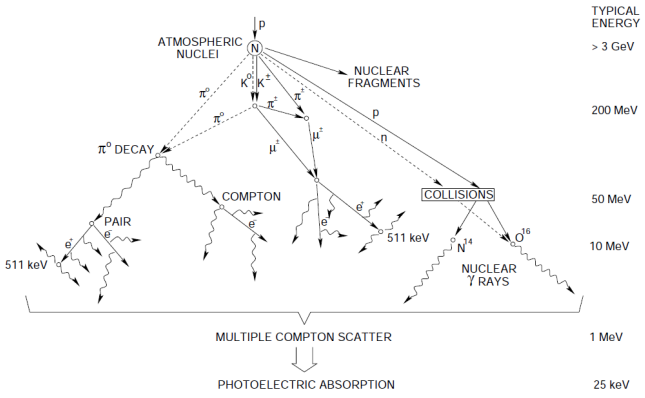


図 2.4: 大気ガンマ線生成のメカニズム　[10]

2.2.3　検出器の放射化バックグラウンド

検出器に用いられているシンチレータの放射化は軌道上におけるバックグラウンドの中で支配的な成分である。ここでいう放射化とは陽子などの宇宙線が検出器を構成する物質と核反応を起こし、放射性同位体を生成することであり、ここで生成された同位体が崩壊するときに放射されるガンマ線が検出器のバックグラウンドとなる。WAM は表面積が大きいため多くの陽子を浴びるため、検出器の放射化は大きなバックグラウンド源となる。とくにこの影響が顕著に表れるのは地球上に存在する地磁気異常帯を通過したときである。この異常帯は南大西洋地磁気異常帯 (South Atlantic Anomaly：SAA) と呼ばれ、地磁気が弱いため大量の放射線が降り注ぐ。SAA で強くなる荷電粒子はX線検出器にとって強い影響を与える。WAM の場合、SAA で光電子増倍管が壊れないように SAA に入る場合には高圧電源を切って入るようになっている。しかし通過によるシンチレータの放射化は避けられないため、SAA 通過後にはバックグラウンドのカウントは増大する。

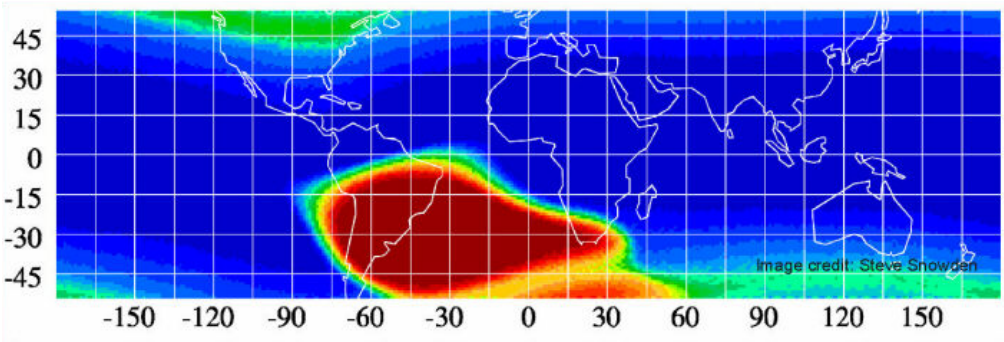


図 2.5: South Atlantic Anormaly　[12]

2.3　BATSE による地食解析とバックグラウンドのモデル化

BATSE では以下に述べるような方法でバックグラウンドを除き、地食解析を行った。バックグラウンドは観測衛星であればほぼ同様であり、BATSE で用いられた方法は WAM にも参考になるものと思われる。そのため、ここでは BATSE が取った手法について述べる。

2.3.1　BATSE とは

Burst and Transient Source Experiment (BATSE) とは Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO) 衛星に搭載された検出器のうちの一つで、NaI シンチレータでつくされた Large Area Detectors (LAD) とスペクトル取得のための Spectroscopy Detector (SD) で構成され、CGRO の四隅に計 8 つ搭載されている (図 2.6)。その性能は表 2.1 に示す。

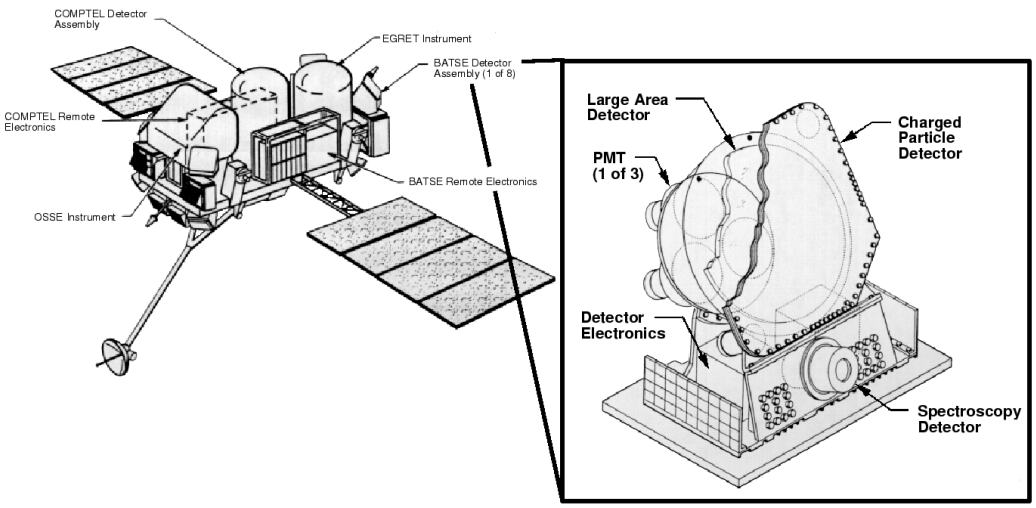


図 2.6: CGRO 衛星と BATSE　[13]

検出器数	8
エネルギー範囲	20 ~ 1000 keV
エネルギー分解能	20%
有効面積	2025 cm^2
時間分解能	2.048 sec
視野	4π str (Total)

表 2.1: BATSE 性能

2.3.2　解析方法

地食解析を行う場合、次の二通りの手法が考えられる。

1. 地食近辺のライトカーブを足し合わせて、バックグラウンドを多項式でフィッティングを行い、地食による段差を見る。

この手法の場合、バックグラウンドの変動が複雑なときには地食による段差が埋もれてしまうことになる。これは単純な多項式では駄目だということである。

2. 地食ごとにバックグラウンドをモデル化してデータから差し引き、差し引いた残りを足していく。

   BATSE が取った手法はこちらである。次から BATSE が取った手法について述べていく。

BATSE が用いたデータ解析手法は、バックグラウンドのライトカーブを複数のパラメータをもつモデルでフィッティングして求め、差し引くことである。モデルは次のようになる。各時間 bin i で予想されるカウント $\tilde{n}_i$ は

$$\tilde{n}_i = \sum_j A_{ij} r_j \tag{2.1}$$

で表される。ここで j は変動の要因を表すパラメータ番号である。A_{ij} は変動のライトカーブのテンプレートで、ライトカーブをフィットしてパラメータ r_j を求める。以下、A_{ij} について述べていく。

2.3.3 天体からのフラックス

天体からのガンマ線は、地球による食の前後では大気を通過してくるのでカウントレートが変化する。それを表すために以下のモデルをいれる。計算は地球の偏平率やエネルギーによる効果を考慮し、

$$A_c(i) = \exp[-\mu(E_i)x_i] \tag{2.2}$$

x_i は天体を見通したときに視線方向上にある空気の柱密度 (g cm^{-2})、$\mu(E_i)$ はエネルギー E でのガンマ線吸収係数となる。

2.3.4 バックグラウンドモデル

バックグラウンドのモデルは重要な部分であり、バックグラウンドとしては主に次の 6 つが考えられる。

(1) 長期間の観測での機器の放射化による定数量
(2) 宇宙線の *prompt* 効果 (COR 依存)
(3) 地磁気異常帯を通過することによる放射化
(4) 宇宙線による放射化
(5) 地球大気による宇宙ガンマ線バックグラウンドの時間変動
(6) 地球大気からのガンマ線

prompt CR は入ってきた宇宙線に伴って短いタイムスケールで表れるバックグラウンドで、次の式で表される。

$$R_{\mathrm{CR}} = \sum_n B_n U_n \tag{2.3}$$

U_n は８つの検出器の Upper Level Discriminators(ULDs) rate で、B_n はフィットから求められる８つの定数。

大気ガンマ線によって生じる宇宙線によるカウントレート R は

$$R_{\oplus} = A_{\oplus}\, T_{\oplus} + [\sum_{n} (B_{\oplus})_n\, U_n]\, T'_{\oplus} \qquad n = 0, ..., 7 \tag{2.4}$$

U_n は上で与えられた値。$T_{\oplus}$ は LAD のレスポンス。$A_{\oplus}$ は大気は本質的に放射化してないので 0 と予想されるが、地球大気による宇宙ガンマ線の吸収や散乱があると、この影響が出てくる。A の項は低エネルギー側で支配的となる。$B_{\oplus}$ の項は地球に入射した宇宙線からの二次ガンマ線による。$T'_{\oplus}$ は $T_{\oplus}$ と相似の項。

2.3.5　突発現象の除去

トランジェント現象 (GRB や太陽フレアなど) はモデルには含まれず、すぐに予測することも出来ないため、線形モデルは適さず、これらを除去する必要がある。演算手順は、まずモデルよりも明らかに大きなデータを取り除く。そして異常値を確認するため予備的なフィッティングを行い、モデルから 5σ 離れている点を定義する。そしてデータ点を取り除く。

第3章　解析環境の整備

3.1　目的

観測衛星で日々取得されるデータは非常に膨大な量となり、一日あたり約１ Giga Byte (GB) 程度のサイズになる。衛星の耐用年数は通常５年で設計されており、単純に計算すると Total で 5(year)×365(days)×1(GB) = 1825(GB) ~ 2(Tera Byte) のディスク容量が必要となる。これほどのデータは通常のパソコンでは保存することは困難な量であり、さらに、保存するディスクの耐障害性も考慮する必要がある。

また一方、衛星により取得されたデータからいち早く新たな結果を得るためには、迅速な解析が必須である。そのためにはより強力なパワーを持つ解析用ハードウェアが必要不可欠である。今回扱っている WAM のデータを例に出すと、WAM は１秒ごとにスペクトルを取得する構造となっており、さらにエネルギーバンドが 54 ch あるため、年間で約７億６千万という巨大な数のヒストグラム数となる。これを解析するには巨大な CPU パワーが必要なのは言うまでもない。

ここで解析用ハードに要求される仕様としては、先ず第一にあまりに特殊なハードウェアは使いたくない、ということが挙げられる。特殊なハードウェアは一般に入手性に難があり、故障などの際、長期に渡りハードウェアの使用が不可能になる自体が想定されるからである。これは日々の解析を行っていく上で重要な問題である。また、特殊なハードは価格も高価になりやすい。そのために、なるべく市販品を用いることでで安価に強力なパワーを手に入れることを目指す。市販品を用いることで故障の際などにもすぐに代替のパーツを手に入れることができ、また修理作業も自分達の手で行える。それによりハードウェアが使用不可能な期間を短縮することが可能となり、迅速な解析を行う上で有用となる。そのために衛星データ解析のための環境整備を行った。

3.2　計算能力の向上手法

パソコンの処理能力を向上させる場合、一番単純な方法はパソコンの頭脳である CPU の性能を上げることである。しかしながら、CPU 一個あたりの処理能力には限界があり、パソコン一台で大規模な解析に必要とされる計算能力をすべて確保することはほぼ不可能と言える。

そこで近年注目されているのは、一台のマシン内に CPU を複数個備え、同時にジョブを走らせることで処理時間の短縮をはかったマルチプロセッサシステムや、一つの CPU コアに二つの CPU 分の処理回路が入ったデュアルコアシステム、さらには次に説明するような複数のコンピュータを一台のマシンとして振る舞わせることで処理能力の向上をはかるクラスタリングやグリッドコンピューティングなどの手法がある。

クラスタリング

複数台のコンピュータを互いに接続し、ユーザーや、他のコンピュータから見た場合、接続されたマシンが全体として一台のコンピュータを形成しているかのように振る舞わせる技術のことをクラスタリングと呼ぶ。このようなコンピュータでは複数のコンピュータを一台のコンピュータを扱うように管理することが出来、仮に一台が停止してもシステム全体は止まることはなく、処理を続けながら、修理・交換といった作業が可能となる。この技術により接続するコンピュータの台数を増やすだけで性能の向上をはかることが出来る。

グリッドコンピューティング

ネットワークを介して複数のコンピュータを繋ぐことで仮想的に高性能なコンピュータを作り、利用者はそこから必要なだけ処理能力や記憶容量を取り出して使うシステムのことをグリッドコンピューティングという。

複数のコンピュータに並列処理を行わせることによって、一台一台の性能が低くても高速に大量の処理が実行可能となる。

良く知られているものでは地球外の生命体を探す「SETI@home」などがある。

3.3 ハードウェア

3.3.1 中央演算処理装置 (Central Processing Unit : CPU)

CPU はパソコンの基本的な性能をほぼ決める重要なパーツである。一般に CPU の性能は「動作クロック × １クロック当たりの実行可能な命令数 (Instructions Per Clock cycle : IPC)」で表される。IPC を増加させるよりもクロック数を増加させる手法をとり、性能を向上させてきたのが CPU 大手 Intel 社であり、IPC とクロックを同様に増加させてきたのが Advanced Micro Devices (AMD) 社である。どちらの手法が優れているかは一概に決めることは出来ないが、クロックを向上させる手法では CPU から発生する熱の問題などが無視できなくなってきており、両社とも現在では IPC とクロックのバランスをとる手法をとり、さらに 1CPU パッケージ内に CPU 複数個分の回路を内蔵したマルチコア化を押し進めている。

解析システム構築に当たって、一般の PC パーツで組み立てることになるのだが、性能とともに信頼性もそれなりに考えることからワークステーション/サーバー用の CPU を使うことにした。この分野の CPU としては Intel の Xeon シリーズ、AMD の Opteron シリーズがある。今回のシステムでは AMD の Opteron を用いることにした。Opteron の優れている点は主に次の２点がある。

1. CPU 内にメモリコントローラを内蔵し、メモリ内のデータを読み出す際の遅延を少なくする改良が加えられている。また、メモリコントローラの内蔵により、別途コントローラチップを必要とせず、消費電力の点からも有利。

2. 現在 PC で使われている 32bit の x86 命令と呼ばれるものを 64bit に拡張した AMD64 と呼ばれる機能を搭載している。この機能により、64bit のシステムを構築した場合でも従来からの 32bit 命令をほぼそのまま実行可能となり、将来的な拡張にも対応。

２に関しては現在 Intel 社の Xeon にも同等機能は搭載されているが、１の点に関しては Opteron のみであり、Opteron を採用することにした。

3.3.2　記憶装置

衛星からのデータを格納するために巨大な量の記憶領域が必要となってくる。一台の記憶装置で賄うにはそれこそスーパーコンピュータなどで使われるテープドライブなどが必要となるが、それらの装置は非常に高価なものであり、簡単に利用できるものではなく、最初の目的にも反する。そのため一般の PC で安価に大容量の記憶領域を確保するために RAID と呼ばれる手法が用いられている。

Redundant Arrays of Inexpensive Disks (RAID)

RAID とは複数台の記憶装置に対して、データを分散記録させることで高速性や信頼性の高いディスク装置を実現させる技術のことである。RAID はその性質により、RAID 0 から RAID 6 まで区分されている。

RAID 0 は複数台の記録装置にデータを分散して書き込むことで高速なデータ転送を実現している。別名ストライピングとも言う。記録装置の数を増やすことでデータの転送速度を向上させることが可能であるが、デメリットとして記録装置が故障した際のデータ復元機能は無く、信頼性は向上しない。

RAID 1 は同一のデータを複数の記録装置に書き込むことで耐障害性の向上をはかっており、ミラーリングとも呼ばれる。この方式の場合、使える記録装置の容量は常に総容量の半分程度となり、利用効率はあまり良くない。

RAID 5 は RAID 1 に似た方式であるが、パリティと呼ばれるエラー検出符号を構成する全てのディスクに対して分散して記録する。このパリティ情報を用いることで１台の記録装置が故障した場合でも壊れた装置の内容を復旧させることが出来る。また、パリティには使用する記録装置一台分の容量が必要となるため、使用台数が増えるにつれて利用効率は高くなる。信頼性は向上するが、パリティの生成などのため、高速性はさほど期待できない。また、２台以上壊れた場合にはパリティからの復旧も不可能である。これをパリティを２重にとることで回避するのが RAID 6 であるが、まだ一般的ではない。

今回のシステムでは、RAID 5 方式をとることで信頼性のある巨大な記録領域を確保することにした。用いた記憶装置は Serial-ATA 接続のハードディスクドライブ (HDD) である。サーバ向けではよく SCSI 接続の HDD が使われている。SCSI の場合、サーバ向けだけあり、信頼性、速度の点では ATA 接続のものを上回っているが、入手性はあまり良くなく、また、一台当たりのディスク容量も ATA 製品と比べると大きくはない。ATA 接続の HDD は一般 PC 向け製品であるので入手性も高く、SCSI の HDD に比べ価格も安い。また、現時点で一台当たり最大 500GB と SCSI に比べ圧倒的な記録容量を誇る。そのため Serial-ATA 接続の HDD を使うことにした。今回の RAID システムでは一台 400GB の HDD を用い、6 台で RAID 5 を組み、総容量 2.0TB の記憶領域を確保した。RAID ボードには 8 ポートの接続場所があるが、ボードの制限上 2.0TB までのディスクしか構築できないため 6 台で RAID-5 を組み、のこり 2 台のうち、1 台はそのまま使用、もう 1 台は RAID-5 用のスペアディスクにする、という構成となっている。

3.3.3　ネットワーク

PC クラスタは各マシンをネットワークで繋ぎ構築されるため、ネットワークの速度も重要な要素となってくる。高速なネットワークとしては、１チャネルあたり最大2.5 Gigabit/sec の InfiniBand などがあるが、今回のシステムでは安くそれなりに高速なネットワークを構築可能な 1000BASE-T 方式の Gigabit Ethernet を使用している。転送速度は理論上の最大値で 1 Gbit/sec で ~ 125 MByte/sec となる。通常の 100BASE-TX に比べ、理論値で 10 倍の速度があり、クラスタシステムのボトルネックとなる可能性を減少させている。

3.3.4　停電対策

今回のシステムでは停電などの突発的な電力切断にも対策を施した。データの書き込み中に停電が起こるなどしてシステムが正常に終了されなかった場合、データの破損や最悪システムの破損に繋がることも考えられる。そのため無停電電源装置 (Uninterruptible Power Supply : UPS) を導入することにした。UPS は平たく言えばバッテリーのことであり、外部からの電力供給が中断された場合にも内蔵の電源によって少しの間電力を供給することが出来る。この間にシステムを安全に止めることが可能である。今回導入した UPS は APC 社の SUA1500RMJ2UB である。これは 2U ラックサイズの UPS で、標準プラグの場合 1260 VA / 900 W の出力を持つ。これを６台導入した。電源供給可能時間は最大電力使用時もおよそ９分あり、安全にシステムを停止するまでの時間は十分持たせることが出来る。また、専用のソフトウェアを用いることで UPS がバッテリーモードになった場合にユーザーに警告メッセージを送ったり、自動でシステムを停止させることも可能であり、人が常に電力状況を確認する必要もない。

型番		SUA1500RMJ2UB
最大出力 VA		1500
最大出力 W		980
VA	W	RunTime (min)
70	50	321
140	100	185
280	200	91
420	300	55
560	400	37
700	500	26
840	600	19
980	700	14
1120	800	11
1200	900	9

表 3.1: UPS のバックアップ時間　（メーカーサイトより）

3.4 Operating System (OS)

ハードウェアの仕様がだいたい固まったので、OS を選ぶ作業に移る。HXD に限らず衛星の解析ソフトは Linux 用が多いため、必然的に用いる OS は Linux となるが、Linux の種類は多岐にわたるため、取捨選択が必要である。前提として現在個々のマシンで動いている解析環境がそのまま使えること、および安定していること、が挙げられる。

現在我々の研究室で用いている Linux は Vine Linux の Ver2.5 から Ver3.2 である。Vine Linux は Redhat Linux の系列に属する。そのため Redhat Linux 系の中から OS を選ぶようにした。検討したのは次の Linux である。今回は全て 32bit OS である。なお、64bit OS については、のちにインストール予定のクラスタソフトウェアの Score (エスコア) においてマルチプロセッサプログラミングのための API である Omni OpenMP が動作しないという問題があるため、今回は候補から外している。

- Fedora Core 3,4
- Scientific Linux 4.1
- Redhat Linux 9

まず、Fedora Core 4 (FC4) であるが、インストール作業自体は簡単に行えた。しかしながら、インストール後、HXD 解析用のソフトが正常にコンパイルできなかった。FC4 の gcc は ver4 であり、glibc もそれに合わせてバージョンアップされているため、正常にコンパイルが出来なかったものと思われる。ひとつバージョンを落とした FC3 でも同様であった。そのため FC を使うことはあきらめた。

次に、有名な商用エンタープライズ向け Linux のオープンソースコードをアメリカの Fermi 国立研究所が再構築した Linux である Scientific Linux (SL) のバージョン 4.1 を試した。この Linux は各国の高エネルギー実験などに採用され、研究業務用としてサポートされているという特徴を持つ。インストールは FC 同様問題無く行えたものの、やはり解析用ソフトのコンパイル問題が発生した。SL の glibc はバージョン 2.3 であるが、今まで使用していた解析ソフトに必要なのはバージョン 2.2 であり、2.3 と 2.2 系では互換が取れていない部分があることが分かった。そのせいでコンパイルが出来なかったものと推測される。大元のソフトウェアを 2.3 系で再びコンパイルすれば解決する問題と思われるが、大元のソフトウェアのコンパイル作業に置いてもいくつか問題が発生し、解決には時間がかかると思われたので、SL も使用を断念した。

次に試したのが Redhat Linux (RH) のバージョン９である。RH9 はそれなりに古い Linux であるが、そのため安定しているだろうと思い試すことにした。インストール時に RAID を構築しているディスクをフォーマットすることが出来なかったが、最初は空領域にしておき、インストール作業終了後フォーマットを行うことでこの問題は解決できた。RH9 も glibc は 2.3 系だったが、ダウングレードを行うことで 2.2 系のソフトウェアもコンパイルすることが出来た。また、用いることを計画しているクラスタリングソフトウェアのインストールマニュアルも整備され、必要なファイルも揃えられていることから、今回は Redhat Linux 9 を OS として使用することに決めた。

3.5 今回のシステム構成

以上を踏まえた上で今回構成されたシステムは次の表のようになる。ディスクアレイを持つ保存用システム兼クラスタの管理を行う予定のマスターシステムとクラスタで計算を担当するサブシステムの２種類がある。インストール作業については次の節で述べる。

	マスターシステム
CPU	AMD Opteron 246 (2.0 GHz) ×1
Memory	PC3200 ECC Registered DDR SDRAM 1GB ×2
HDD-1	80GB (システム用)
HDD-2	400GB ×8 (1:normal, 6:RAID-5, 1:spare)
OS	Redhat Linux 9

	サブシステム
CPU	AMD Opteron 246 (2.0 GHz) ×2
Memory	PC3200 ECC Registered DDR SDRAM 1GB ×2
HDD	400GB ×2
OS	Redhat Linux 9

表 3.2: システム構成

簡単に性能を調べるために理化学研究所の情報基盤センター [16] で提供されている姫野ベンチを用いてみた。姫野ベンチとは、情報基盤センター・センター長の姫野龍太郎氏が非圧縮流体解析コードの性能評価のために考えたものでポアッソン方程式解法をヤコビの反復法で解く場合に主要なループの処理速度を計るもので、コードは非常に短く簡単にコンパイル・実行できるので、即座に実測速度（何 MFLOPS）を求めることが出来る。これの C プログラム版を使用した。各システムでの実行結果は次の表のようになる。比較のため、研究室で使用している他のデスクトップマシンの結果ものせる。コンパイラには Linux に標準で入っている GCC を用いた。

システム (ホスト名)	CPU Spec	GCC Ver.	Option	Measured speed (MFLOPS)
マスター (elixir)	Opteron 246 (2.0GHz)	3.2.2	-O3 -DSMALL -msse2	931.74
サブ (cluster06)	Opteron 246 x2 (2.0GHz)	3.2.2	-O3 -DSMALL -msse2	975.68
研究室 1 (mirage)	AthlonXP 2500+ (1.83GHz)	3.3.2	-O3 -DSMALL -msse	430.43
研究室 2 (endeavor)	Athlon64 3000+ (1.8GHz)	3.3.2	-O3 -DSMALL -msse2	837.66
研究室 3 (vryce)	AthlonXP 1700+ (1.5GHz)	3.3.2	-O3 -DSMALL	306.01
研究室 4 (neko)	Pentium 4 (1.6GHz)	3.3.2	-O3 -DSMALL -march=pentium4 -msse2	333.97

表 3.3: 姫野ベンチ S サイズの結果

マスターシステムは１台しかないが、サブシステムは全部で２０台あり、そのうち８台が現在稼働中である。なお、全部稼働させていないのは、現在クラスタマシンを置いてある部屋の電力事情による。

3.6 インストール

ここからは実際のインストール作業について簡単に紹介していく。マスターシステムは *elixir* と名付けた。*elixir* とは「万能薬」の意味であり、今回のシステムがデータ解析の万能薬となるよう願ってこの名前にした。*elixir* のインストール時のディスク設定は次の表 3.4 の通りである。

System Disc	80 GB	Data Disc	2.4 TB
/	1540 MB	/ users	180 GB
/ boot	100 MB	/ elixir2	220 GB
/ swap	4100 MB	/ elixir3	2.0 TB
/ usr	6200 MB		
/ home	10250 MB		
/ elixir1	残り全て		

表 3.4: マスターのディスクパーティション

なお、データディスクとしては上の表 3.4 Data Disc に書いてあるものの他に、システム側の残り (/elixir1) やサブマシンに搭載されている二つの 400GB ハードディスクの残り部分が割り当てられる。サブマシンのシステム容量も基本的にはマスターと同サイズなので、サブマシン一台あたりデータディスクとして使用できる領域は 700GB ほどあり、サブマシン全２０台で ~ 14TB の容量があることになる。

Redhat のインストールであるが、インストールタイプは自分達で必要なものを設定するために「カスタム」を選択した。設定は表 3.5 に示す。

パッケージ	設定	パッケージ	設定
X Windows System	D* + redhat-printer	メールサーバ	postfix, sendmail-cf
Gnome Desktop	D	ネットワークサーバ	D - talk
エディタ	D	閲覧ツール	D + gcc-objc
技術系	ALL	カーネル開発	D
Graphical Internet	mozilla 系のみ	X Software 開発	D
Text internet	D	Gnome Soft 開発	D
Office	tetex,xpdf	管理ツール	D
著作	ALL	システムツール	D + ethereal-gnome + nmap-frontend
サウンド、ビデオ	無し	印刷サポート	ALL
サーバ設定	D + printer 系		*D = Default

表 3.5: インストール設定

認証設定の部分では NIS を有効にした。NIS の名前には命名規則は特に無く、ただ識別に用いられるだけなので、単純にマシン名から取って elixir_nis とした。そしてこのマシンを NIS サーバとした。NIS (Network Information Service) とは、ネットワークを介しコ

ンピュータの情報を共有するシステムのことで、小規模なネットワークで用いられることが多い。ユーザー情報などを共有することにより、各マシンでのユーザー追加作業が必要なくなる。

このような設定でインストールを行った。ネットワーク設定では、このマシンにはLANが3個ついておりeth0がIntel Ether Express 100による100BASE-TX Ethernet、eth1,2がBroadcom Tigon 3による1000BASE-T Gigabit Ethernetとなっている。eth0を研究室内ネットワーク用として、グローバルIPアドレスを与え、eth1をクラスタ内ネットワーク用としてプライベートIPアドレスを与えた。eth2は今回は使用していない。インストール時にはOSの節でも述べたが、SATAディスクは自由領域のままにしておいた。インストール後にext3ファイルシステムとしてフォーマットを行った。インストール後の設定は研究室内の他のマシンのものを参考に行った。詳細な説明は割愛する。

クラスタ用サブマシンのインストールも基本的にはマスターマシンと同様に行った。インストールパッケージではサーバ用ソフトはインストールしないことにした。ネットワーク設定はeth0,2は使用せず、eth1にプライベートIPを割り当て、DNSおよびゲートウェイはマスターのプライベートIPを入力した。また、認証設定はNISを使用した。

サブマシンも立ち上がったので、NISの設定がうまくいっているかを確かめた。ユーザー情報はきちんと共有されているようでパスワードもきちんと通ったが、ログインできないという問題が発生した。エラーメッセージを見たところ、ユーザーのホームディレクトリがサブマシンに作られていないということが原因だということが分かった。基本的にユーザーのホームディレクトリはユーザー追加作業のときに同時に作成されるものであるが、今回はNISを使っているため、ユーザー追加作業はマスターのみで行っている。そのため各サブマシンではユーザーのホームディレクトリがない、という状況になってしまうようである。しかしながら、手間を減らすために各マシンでのユーザー追加作業を除くようにしたのだから、わざわざ各マシンに入ってホームディレクトリを作成する、という作業はなるべくやりたくない。数が少ないのであればそれでもいいのだろうが、今回のように多くなってくると一人のユーザーを追加するだけでも２０個のマシンにディレクトリの作成作業が必要となり非効率的である。これを解決するためにやや乱暴ではあるが、ホームディレクトリの場所をネットワークで共有する手法を取ることにした。具体的にはマスターの/usersディレクトリを書き込み可能な状態で各サブマシンと共有するという方法である。これにより各マシンでのホームディレクトリ追加作業も除くことが可能となった。この方式の問題点としてはネットワークで共有しているため、多くのユーザーが書き込みや読み込みを行うとローカルのディスクと比較して速度が低下する、という点である。この問題の解決については今後の課題とし、現状ではマシンを使用するユーザーが少ないこともあり、ネットワーク共有方式のままで行くことにする。

3.7　解析ソフトウェア

ここではインストールした解析ソフトについて一部を簡単に紹介する。解析ソフトは /elixir2 ディレクトリ内にまとめてある。

3.7.1　「すざく」用解析ソフト

「すざく」での HXD のデータの流れの概略を図 3.1 に示す。

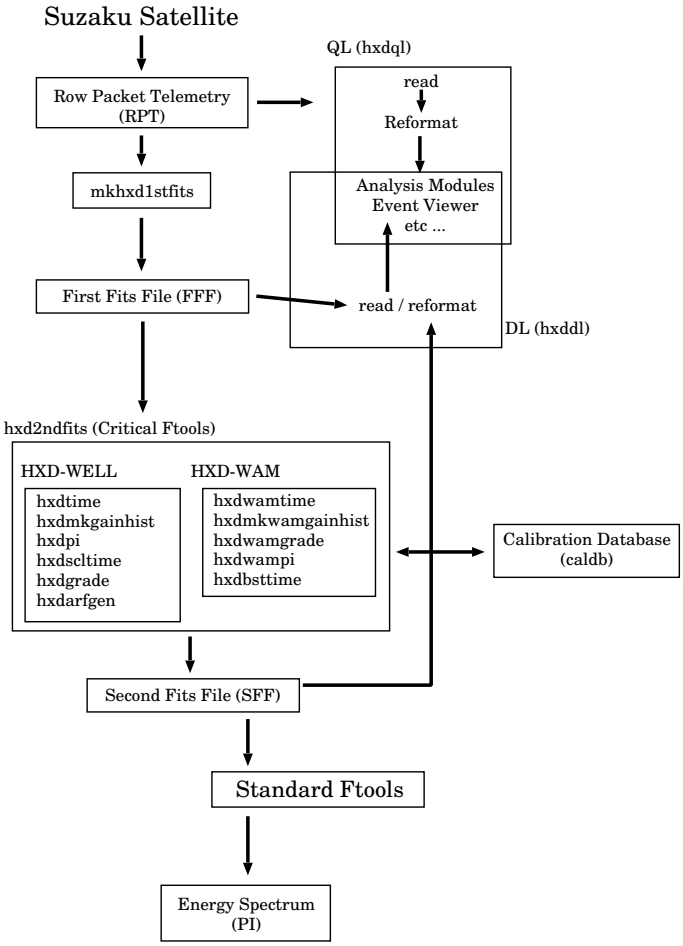


図 3.1: HXD のデータの流れ

「すざく」で得られた天体からのデータはまず Row Packet Telemetry (RPT) というデータとして地上に降ろされる。これをそのまま読み込み、衛星の状態チェックなどを行うことを QL といい、そのために用いられるのが hxdql というソフトである。RPT データを FITS 形式と呼ばれるファイルフォーマットに変換するソフトが mkhxd1stfits であり、これにより作成された衛星データを First Fits File (FFF) と呼ぶ。FFF から先ほどの RPT と同じように解析を行うことを DL といい、そのソフトウェアが hxddl と呼ばれるものである。hxdql と hxddl は本質的には同じソフトであり、異なるのは読み込ませるファイルフォーマットの違いぐらいである。

次に、FFF に対し各種補正や時刻付けを行いよりユーザーに使いやすいデータを作成するスクリプトが hxd2ndfits で、この中にはいくつかのソフトウェアが含まれている。データの時刻付けを行う hxdtime、ゲインの変動履歴を作成する hxdmkgainhist、HXD-Well の PIN

検出器や PMT の PI 補正を行う hxdpi、Event の種別などでデータの品質を決める hxdgrade などで構成されている。HXD-WAM にも同種のソフトが用意されている。こうしたソフトを使い作成される FITS ファイルを Second Fits File (SFF) と呼ぶ。一般に公開されるファイルはこの SFF である。この SFF を一般の解析用ツール (Ftools) で解析を行い、天体のスペクトルやライトカーブを得る。

今回のシステムでもこれら HXD 用ソフトが正常に動作することを確かめた。

3.7.2　一般の解析ソフト

HEAsoft

HEAsoft は NASA の Goddard Space Flight Center (GSFC) が開発した衛星データ解析用ソフトウェア群である。HEAsoft は、X 線衛星ミッションのスペクトル解析やタイミング解析、イメージング解析を行うための XANADU、FITS 形式のファイルを扱うための一般的および各衛星固有のツール郡の FTOOLS、FITS 形式ファイルを読み書きするためのライブラリである FITSIO、FITS ファイルビューアの fv、などからなる。

今回のシステムにはいくつかのバージョンをインストールした。昔の衛星などで必要とされる場合があるからである。インストールしたバージョンは、5.2, 5.3, 6.0 である。どのバージョンでも衛星データの解析を行えることは確かめてある。

ROOT

ROOT は CERN の高エネルギー原子核実験の解析用に開発されたソフトウェアである。C++言語で書かれており、C++のインタプリタも内蔵してある。

データのヒストグラムの表示やスペクトルフィッティングなどに非常に役に立つ。C++言語を使えるため、自分達でフィッティング用関数などが簡単に作ることできる。

インストールバージョンは、4.04 および 5.04 である。

DISPLAY45(dis45)

DISPLAY45(dis45) は CERN のライブラリを基づいて作られたヒストグラム解析用ソフトである。日本の X 線グループではよく使用されている。

インストールしてあるバージョンは 1.90, 2.00 である。

3.8　今後の課題

いま現在のシステムでは単純に通常より速いマシンが複数台連なっているだけ、という状態であり、一つの処理を手動で分割し、各マシンで実行するという疑似並列化とでもいうような環境である。これをクラスタ化し、全マシンを並列化した高速な解析環境を構築することが今後の大きな課題である。

そのためにインストールしようと考えているクラスタ用ソフトウェアに Score(エスコア) というものがある。Score は技術研究組合 新情報処理開発機構において研究開発されたソフトウェアでパソコン 2 台から並列処理をできる PC クラスタを作成することが可能となる。現在のマシンにもインストールはしてあり、8 台のマシンで計 16 ノードの動作も確

認はしてある。しかし、まだ本格的に実行する段階になく、これを最大限に活用する方法を構築することが課題となっている。

また、インストールの節でも述べたが、各ユーザーのホームディレクトリをどうするのか、という問題もある。現状のままではユーザーを増加させた場合、おそらく速度低下の原因となる。クラスタ化してしまえば各マシンにログインする必要も無くなるので、クラスタ構築を進めるというのも一つの解であると考える。これについてはどのようにするのか一番良い方法なのか検討中である。

OS についても検証作業を進めて行く。今回インストールした Redhat 9 は開発やサポートが終了しているために解析ソフトのバージョンが新しくなるのについていけなくなる恐れもある。そのため他の Linux についても HXD 用ソフトを正常に動作させることが可能なのか検証していく。

図 3.2: 構築中の PC クラスタ

第4章　解析

4.1　WAM データの種類

WAM で取得されるデータには 2 種類ある。一つはトランジェントデータ (TRN data) で、もう一つはガンマ線バーストデータ (GRB data) である。GRB データはガンマ線バーストが機上判定にかかったときのみ転送される。一方 TRN データは 1 秒毎に取得される。各データの特徴は次の表 4.1 に示す。

	Energy channel	時間分解能	カバーする時間	目的
GRB	4 ch	1/32 sec (TH : Time History)	128 sec (16 sec before 112sec after)	GRB
TRN	55 ch (0 ~ 53 ch + Overflow)	1 sec (PH : Pulse Height)	every 1 sec	monitor for background and transient phenomena

表 4.1: WAM データの特徴

今回の解析で使用するのは、TRN データの方である。表にも示してあるが、TRN データでは一秒ごとに WAM のコーナー (図 4.1 の Tx0, x = 0 ~ 3) を除く側面 4 ユニットのスペクトルの和の情報を PH(Pulse height History) データという形で取得する。PH データはその名の通りパルスハイト情報を重視したデータであり、WAM が得た AD 変換された ADC 64 チャンネルデータを 0 ~ 47 channel はそのまま、48 ~ 55 channel は 2bin まとめ、56 ~ 63 channel は 4bin まとめをすることで、全 54 channel となっている。エネルギーに直すと 0 ~ 2000 keV に相当する。2 ~ 5 MeV に相当する部分は PH チャンネルとは別の Overflow チャンネルに格納されている。PH の 0,1ch を除き、Overflow を加えた 53 ch で 50 ~ 5000 keV のエネルギーレンジをカバーする。

一方、今回は使用しない GRB データの TH データは時間分解能を重視したデータであり、エネルギービンは ADC チャンネルを 4 つのバンドに分けて取得するため少ないが、時間分解能は 31.25 msec と非常に良い。ADC チャンネルと TH データの対応は次の表 4.2 に示す。

	エネルギー範囲	ADC Channel
TH 0	50 ~ 110 keV	2,3
TH 1	110 ~ 240 keV	4 ~ 7
TH 2	240 ~ 520 keV	8 ~ 16
TH 3	520 ~ 5000 keV	17 ~ 63, Overflow

表 4.2: ADC チャンネルと TH データの対応

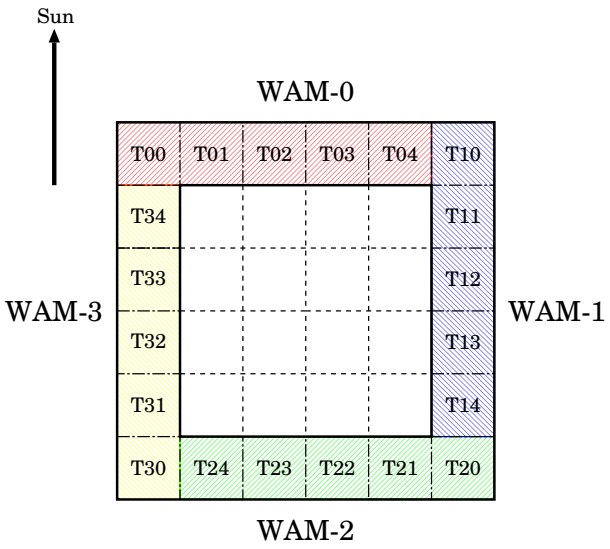


図 4.1: WAM ４面の概略図 (HXD を上から見た場合)

4.2　軌道上でのバックグランド

次に、今回解析する WAM のバックグラウンドの様子について図 4.2 に示す。図には太陽方向の WAM-0 の典型的な WAM の約二日分のライトカーブを示してある。

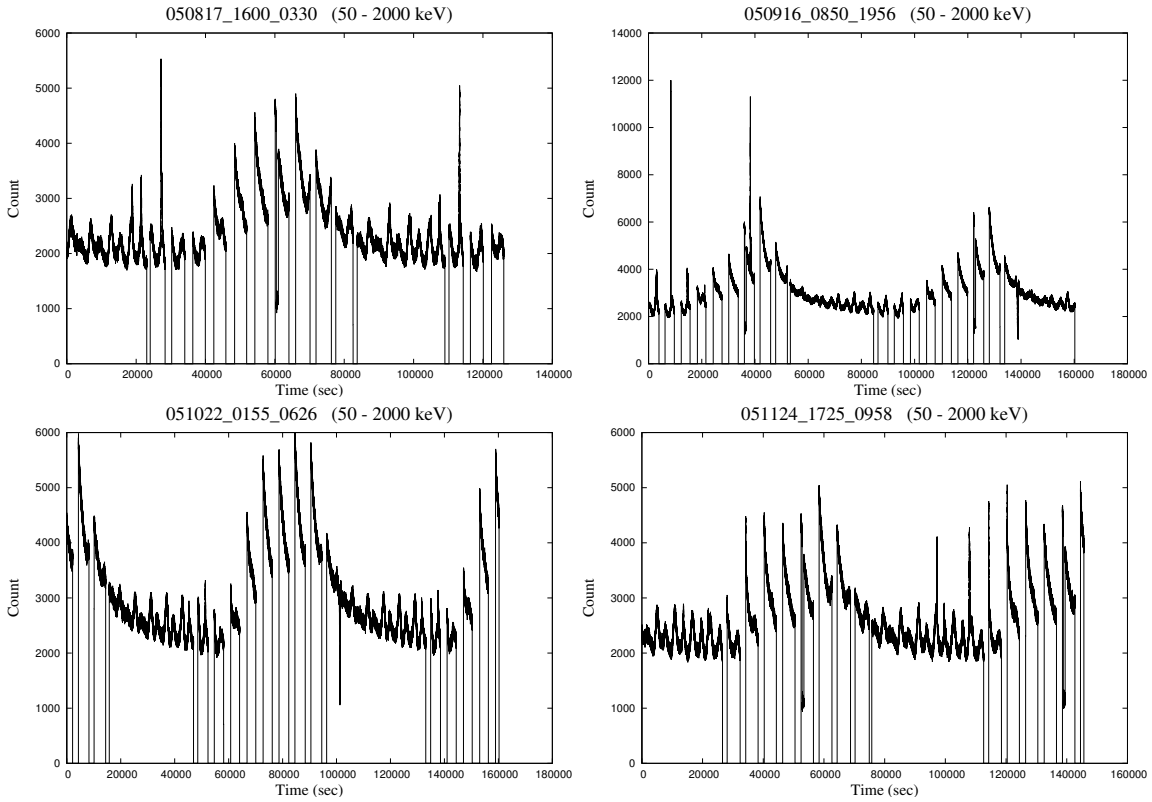


図 4.2: 典型的な WAM-0 ライトカーブ　(横軸：時間、縦軸：カウント)

ライトカーブが大きく変動していることが図からすぐに分かる。その変動の様子は大まかな部分ではどれも SAA(左上の図だと Time = 20000 ~ 80000 あたりでカウントが 0 になっている部分) を通過するたびにカウント上昇、通過後減少といった風に似た傾向を示

す。また、SAA が無い時間帯 (左上の図だと Time = 0 ~ 20000 や 85000 ~ 110000 付近) でのはっきりと見えるカウントのアップダウンが COR の影響による変動である。例として 050817 の Time=85000 ~ 110000 付近を拡大したものを図 4.4 にのせる。エネルギーバンドは 200 ~ 800 keV なので少し図 4.2 とは異なるが、おおまかな傾向は同じである。COR によるカウントの変動の様子が良く分かる。

しかしながら、細かく見た場合、上昇するカウントの値や減少の様子などがどれも微妙に異なっているように見える。具体的には 05/10/22 のデータでは SAA でのカウント上昇が大きいが、他の日ではそこまで大きな上昇はしていない、などである。

これら日ごとの違いはおそらく「すざく」の地球上での位置によるものと考えられる。「すざく」が地球上をどのように動いているかを図 4.3 に示す。これはある日の一日分の軌道を地球座標でプロットしたものである。「すざく」はこのような軌道で西から東へ地球上を移動している。しかも、常に一定の位置を移動しているのではなく、図からも分かるように、次の周では前の周の軌道からすこしずれた位置を通る。また、約 96 分周期の楕円軌道をとるため、衛星の高度が 560 km から 580 km まで変化する。そのため、通る軌道により SAA や COR などの影響が異なり、それがカウントレートや変動の様子の違いに結び付くと考えられる。

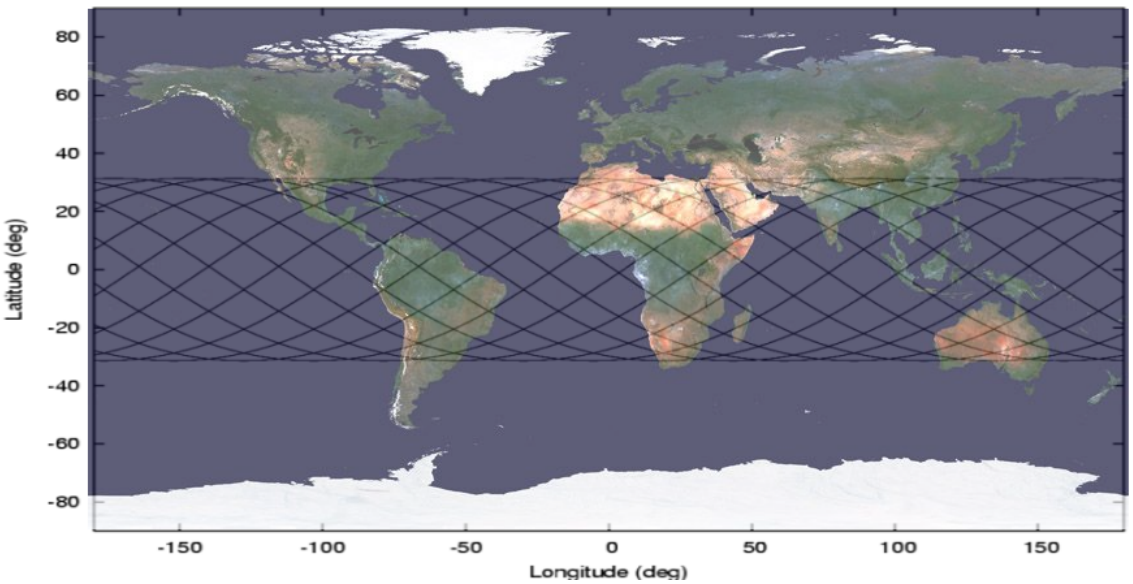


図 4.3: ある日の「すざく」の軌道　左から右方向へ移動する

次に、エネルギーごとで振る舞いが異なっているかどうかを調べるため、先ほどのデータを 4 つのエネルギーレンジに分けてプロットしてみた。用いたエネルギーレンジは TH データを参考に、50 ~ 110 keV、110 ~ 240 keV、240 ~ 520 keV、520 ~ 2000keV の 4 つを使うことにした。そのようにして作成した先ほどの 4 日分のライトカーブを図 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 に示す。

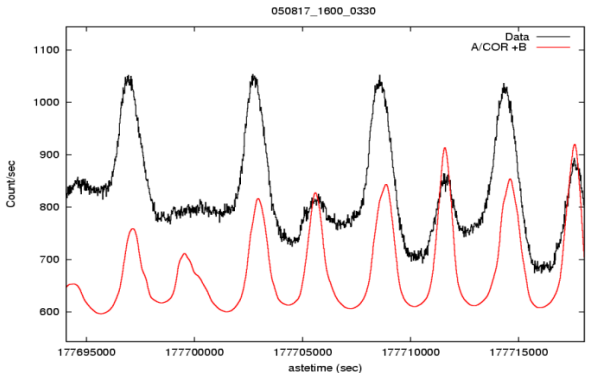


図 4.4: 050817 のカウントと COR^{-1} の対応

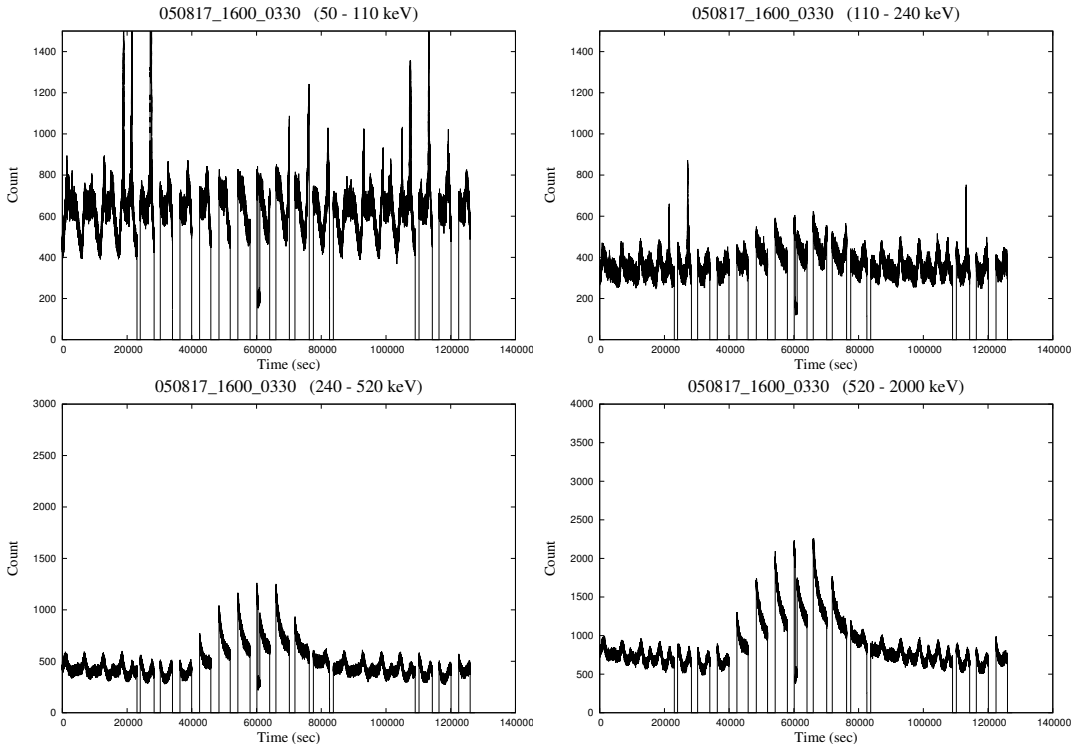


図 4.5: 05/08/17 WAM-0 ライトカーブ (4 Energy Band)　(横軸：時間、縦軸：カウント)

エネルギーバンドごとのライトカーブを見た場合、エネルギーによってライトカーブの変動の様子が異なっていることが分かった。50 ~ 110 keV は SAA を通過しても大きく変動はしないが、エネルギーが高くなるにつれて、カウントの大幅な上昇が見られる。また、その変動も先ほどのように日ごとに様子が違う。050817 や 051124 のように低エネルギー側での SAA 通過での変動が小さいときは高エネルギー側での変動もそれほどは大きくないが、050916 や 051022 のように低エネルギー側でも SAA 通過に伴うカウントアップが見えているデータでは、高エネルギー側での SAA カウントアップが大きいという状態になっている。例として、520 ~ 2000 keV のデータで 2 つの日を比較してみたのが図 4.9 である。黒が 050817、赤が 050916 のデータである。分かりやすくするために SAA の位置などを大体揃えてある。カウントの違いが良く分かる。

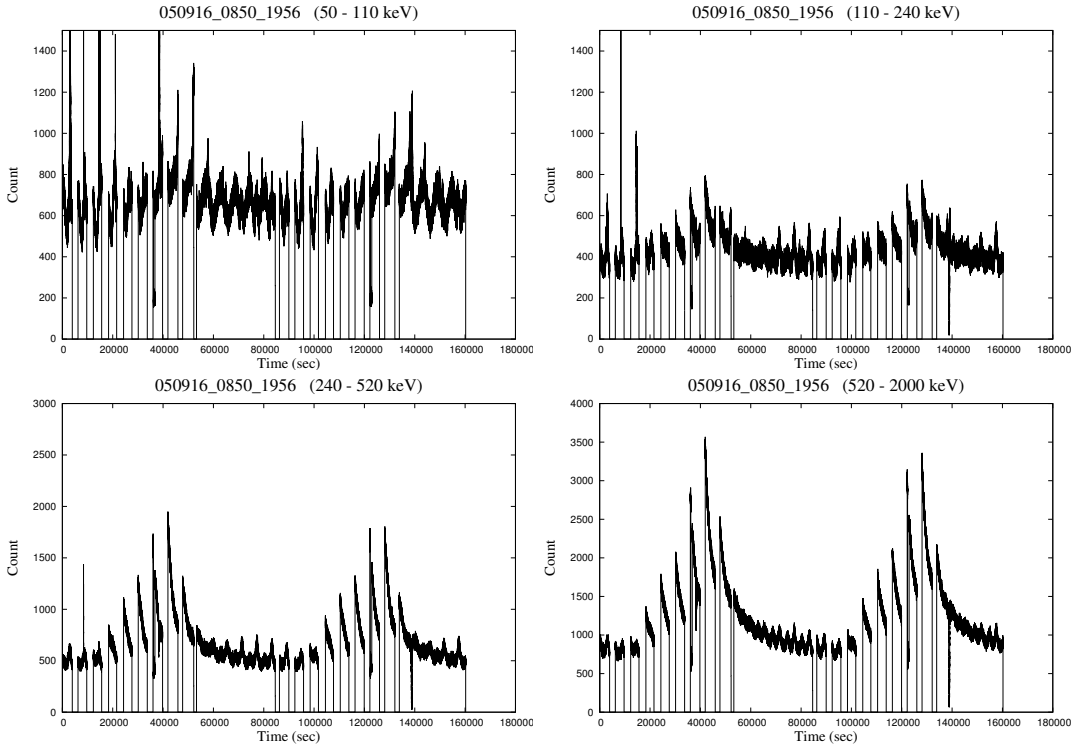


図 4.6: 05/09/16 WAM-0 ライトカーブ (4 Energy Band)　(横軸：時間、縦軸：カウント)

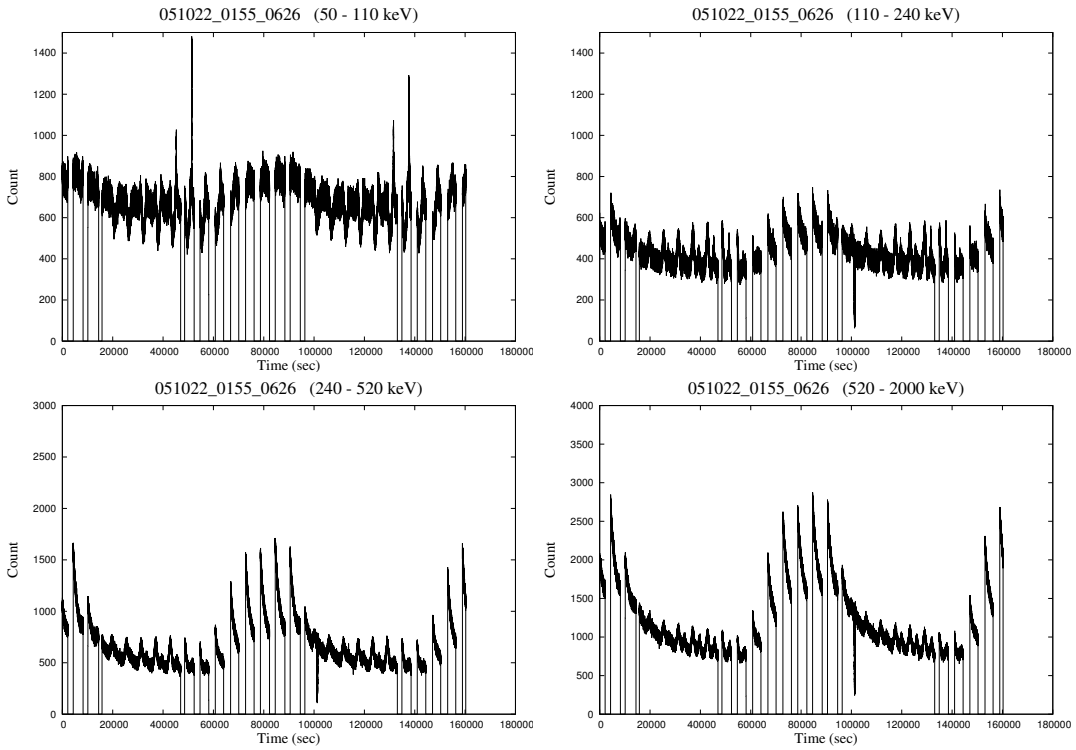


図 4.7: 05/10/22 WAM-0 ライトカーブ (4 Energy Band)　(横軸：時間、縦軸：カウント)

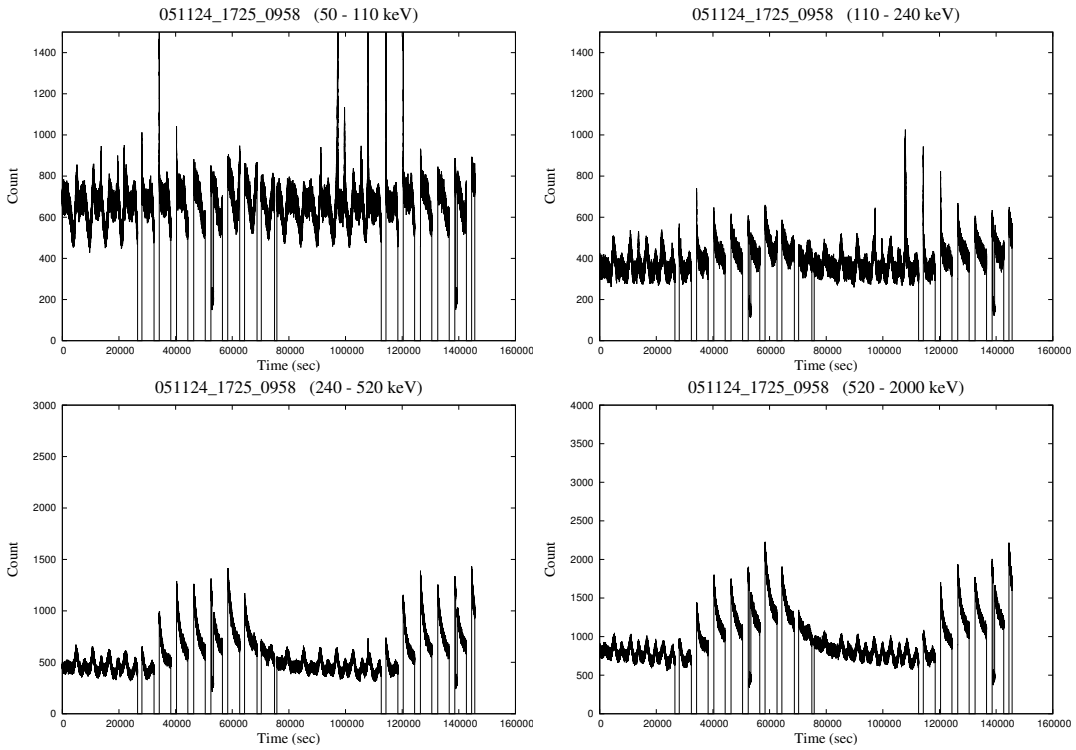


図 4.8: 05/11/24 WAM-0 ライトカーブ (4 Energy Band)　(横軸：時間、縦軸：カウント)

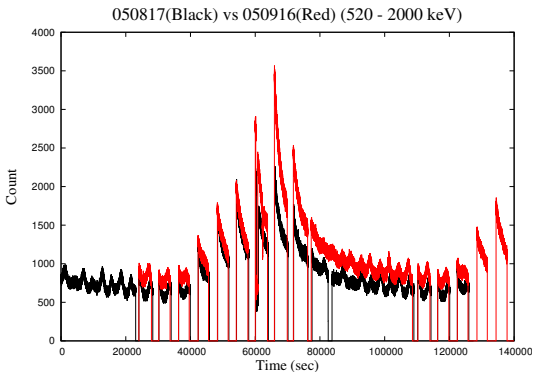


図 4.9: 520 ~ 2000 keV のライトカーブの比較　(横軸：時間、縦軸：カウント)

4.3　軌道上でのバックグランドのカウントマップ

ここでは、通る軌道によりバックグラウンドがどれだけ異なるのか、地球上での位置で表すことでカウントマップを作成することにした。

図 4.10 は 9/17 ~ 10/19 までの期間の WAM-0 の全 channel のデータを足しあわせて平均を取り、地球座標でプロットしたものである。これ以前の期間は太陽フレアが頻発していた時期であり、平均を取る際にカウントを大きく押し上げてしまうので除外してマップを作成した。また、今回の期間内でも太陽フレアなど突発現象が発生しているが、そのようなカウントが大幅に上昇した部分は取り除いてある。同時に極端にカウントが少ない場合も除いてある。

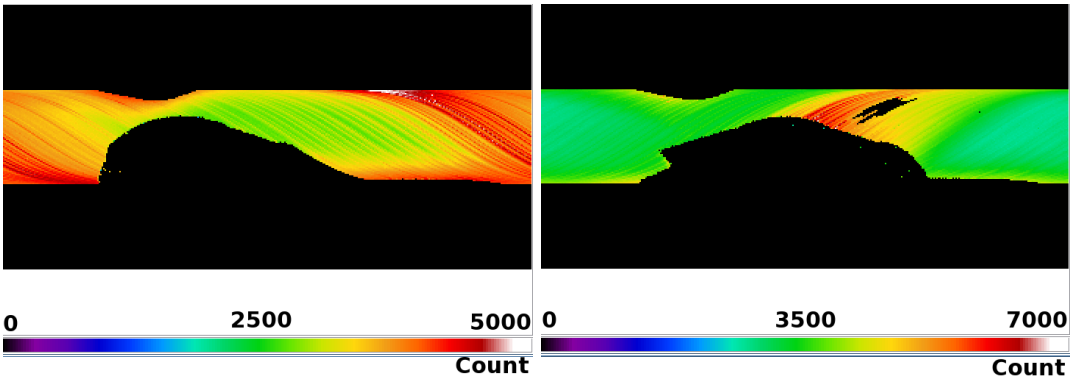


図 4.10: WAM-0 の軌道上での全 54Ch カウントマップ (左：南東移動、右：北東移動)
(横：経度 (±180 deg)、縦：緯度 (±90 deg))

ここで南東移動時と北東移動時に分けているのは、衛星の軌道によって SAA を通る場合、通らない場合があるからである。

北東移動時のマップを見ると、SAA 通過後にカウントが高くなっていることが分かる。なお、北東移動時の SAA 以外の部分で穴が大きく空いている箇所は WAM がユニットスキャンという光電子増倍管 (PMT) の動作確認を行っている部分である。通常 WAM の PMT は四本同時に動作しており、そのカウントの足しあわせを行っているが、ユニットスキャン時は PMT を一本ずつ動作させているため、カウントが約 1/4 に減少している。そのためカウントが少ない場合に除くという条件に当てはまり、マップに穴が空くという状態になっている。

エネルギーごとに分けてマップを作成してみると次の図 4.11, 4.12 のようになる。

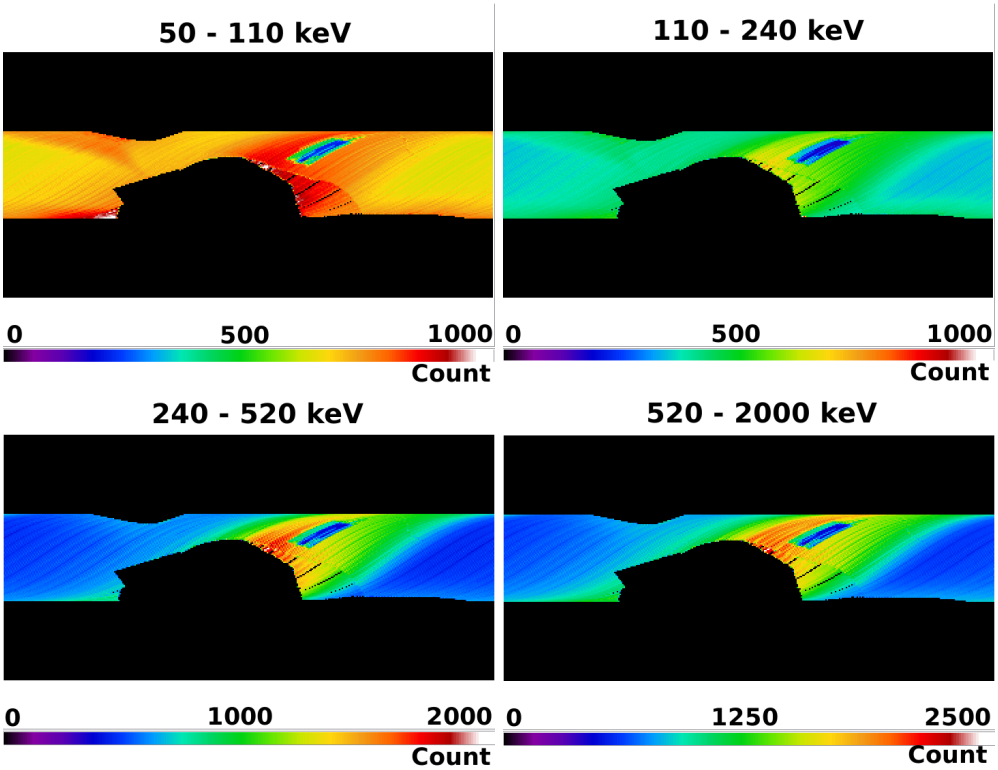


図 4.11: WAM-0 の各エネルギーバンドでのカウントマップ　(北東移動)
(横：経度 (±180 deg)、縦：緯度 (±90 deg))

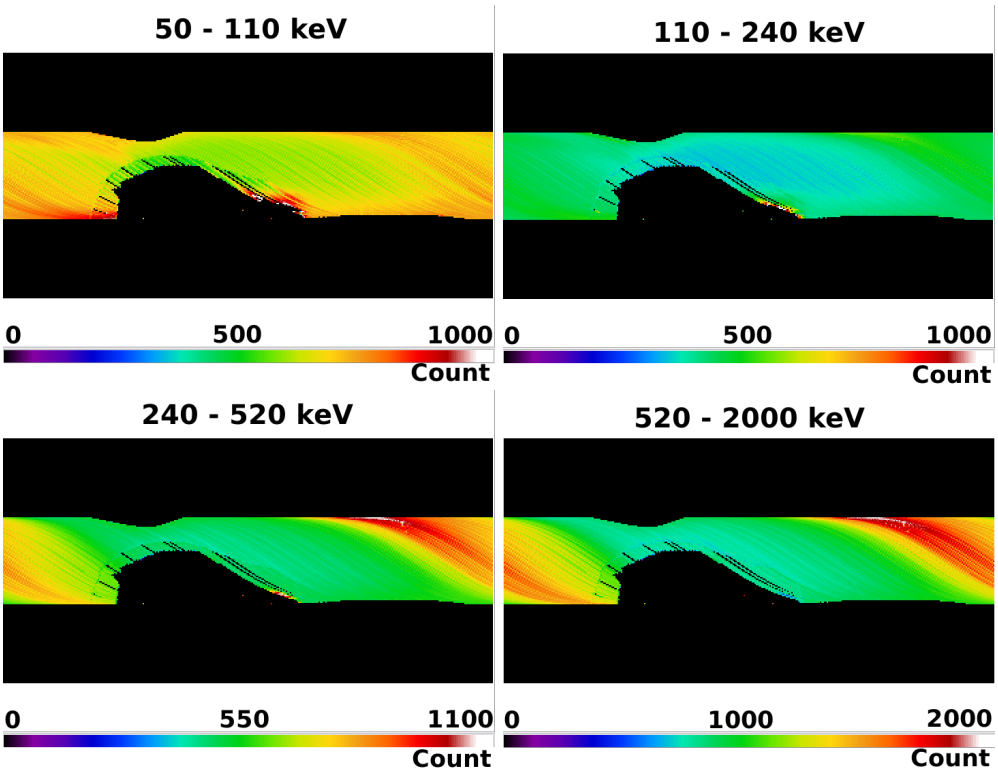


図 4.12: WAM-0 の各エネルギーバンドでのカウントマップ　(南東移動)
(横：経度 (±180 deg)、縦：緯度 (±90 deg))

4.4 ライトカーブのモデルフィッティング

ここではまず、過去に打ち上げられた日本のX線衛星「ぎんが」や§2.3でも述べたBATSEの手法を参考にする。「ぎんが」やBATSEではバックグラウンドに影響を与えるものをパラメータ化してモデルに取り込むということを行った[8][9]。HXDの主検出部でもこの手法によりバックグラウンドのモデル化を行っており、WAMでもこの手法でバックグラウンドのモデル化を行ってみた。

いきなり多種多様なパラメータを取り込んでも複雑になるばかりか無意味なものまで取り込んでしまうことになりかねないので、単純なものから徐々にパラメータを増やしていくことにした。なおHXD-PINで用いられるモデル式Fは次のようなものである。

$$
\begin{aligned}
F &= \mathrm{A} + \mathrm{B} \times (\mathrm{COR})^{\mathrm{C}} + \mathrm{D} \times (\mathrm{wanti})^{\mathrm{E}} \times \left(1.0 + \mathrm{F} \times \exp\left(\frac{-(\mathrm{T_SAA})}{\mathrm{G}}\right)\right) \\
&+ \mathrm{H} \times \exp\left(\frac{-(\mathrm{T_SAA})}{\mathrm{I}}\right) + \mathrm{J} \times (\mathrm{PINUD})^{\mathrm{K}} + \mathrm{A} \times \mathrm{L} \times \frac{d\mathrm{sky}}{dt}
\end{aligned}
$$

A ~ L は定数、COR, wanti, T_SAA, PINUD, sky が各パラメータを表す。COR は Cutoff Rigidity、wanti は Well-GSO の 460 ~ 700 keV のカウント、T_SAA は SAA 通過後の経過時間、sky は昼地球、夜地球、空を表すパラメータである。

これを元に、HXD-WAM用へとモデル関数を再構築する。まずはCORパラメータのみを取り入れた F = A/COR + B という関数でフィッティングを行うことにした。

用いるWAMのTRNデータはFITS形式というファイルフォーマットのもので、ここで使用するデータは衛星から得られたデータを使いやすいようにしたFirst Fits File (FFF)というデータ形式である。このFFFの中には、TRNデータが得られた時間を示すS_TIMEや、PHデータであるTRN_PH、そのほかにも各種カウンタ情報やガンマ線バーストのフラグなどが格納されている。そのほかにauxiliary HK (EHK)と呼ばれるファイルもあり、この中には衛星の姿勢情報などが納められている。これらの中から必要な情報のみを抜き出すプログラムを自作し、フィッティングに使用するデータを作成した。FFFから抜き出したものは、時刻S_TIME、TRN_PH[54]、TRN_UD、TRN_DT、TRN_AE_MODULEである。Overflowチャンネルである TRN_OVER_FLOW は現在用いていない。TRN_UD、TRN_DTはそれぞれWAMのUpper Discriのカウント、Dead Timeのカウントである。TRN_AE_MODULEはWAMの各面(0,1,2,3)を識別するための値である。また、EHKからもTIME, CORおよび衛星の地球上での位置を表すSAT_LON、SAT_LATを抜き出した。EHKのTIMEを抜き出した理由はTRNデータが1秒ごとなのに対してEHKは30秒毎のデータであるため、そのままだとうまく繋げられなかったからである。両者の時刻を比較することで、全TRNデータにCORや地球座標の値を付け加えることが出来た。これから使用するデータは太陽面方向のWAM-0のデータである。

実際にフィッティングを行った結果を図4.13に示す。これは2005/10/10 12:07(UT)からのWAM-0のCh 1(20 ~ 50 keV)をF = A/COR + Bでフィットした図である。同一データを一万秒毎に分けてフィットしてある。Ch 1は本来使用されない部分ではあるが、カウントが多くフィッティングの傾向をつかみやすいと考え、ここでは用いている。

図中の黒線がWAM T0のライトカーブで緑がモデルである。SAAでのカウント0部分を除いていないため、右下のデータはフィットがおかしいことになっている。また左上や左下の図では、SAAをかすめるSmall SAAと呼ばれる部分(図4.13左上の横軸3000付近)

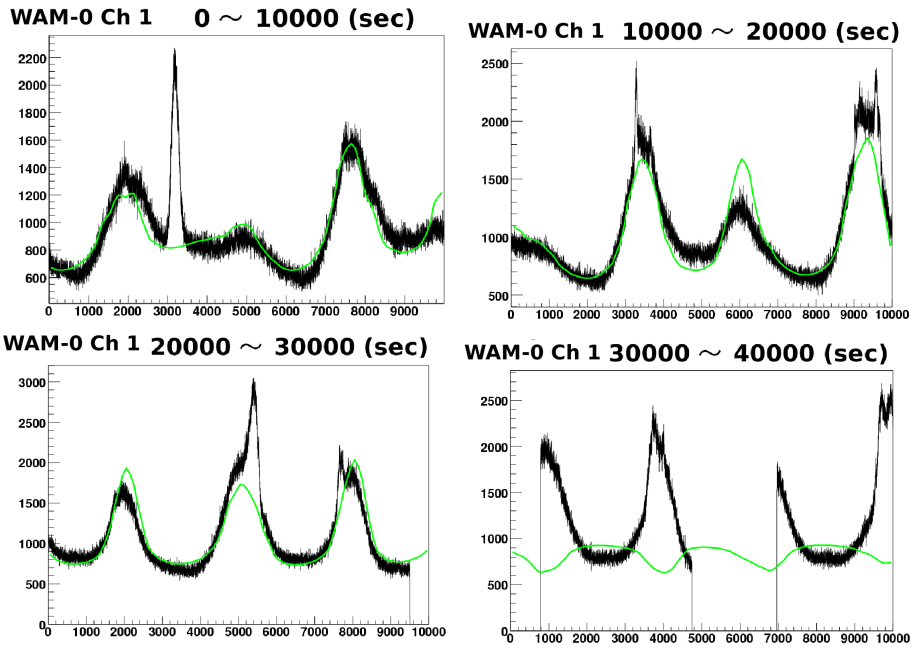


図 4.13: Ch1 モデルフィッティング　黒：ライトカーブ、緑：モデル (横軸：時間、縦軸：カウント)

や COR の低い部分 (図 4.13 左下の横軸 5500 付近) でフレアアップが見られる。このような部分や SAA 部分を除いてデータをつなぎ合わせ、フィッティングを行うと次の図 4.14 ようになった。

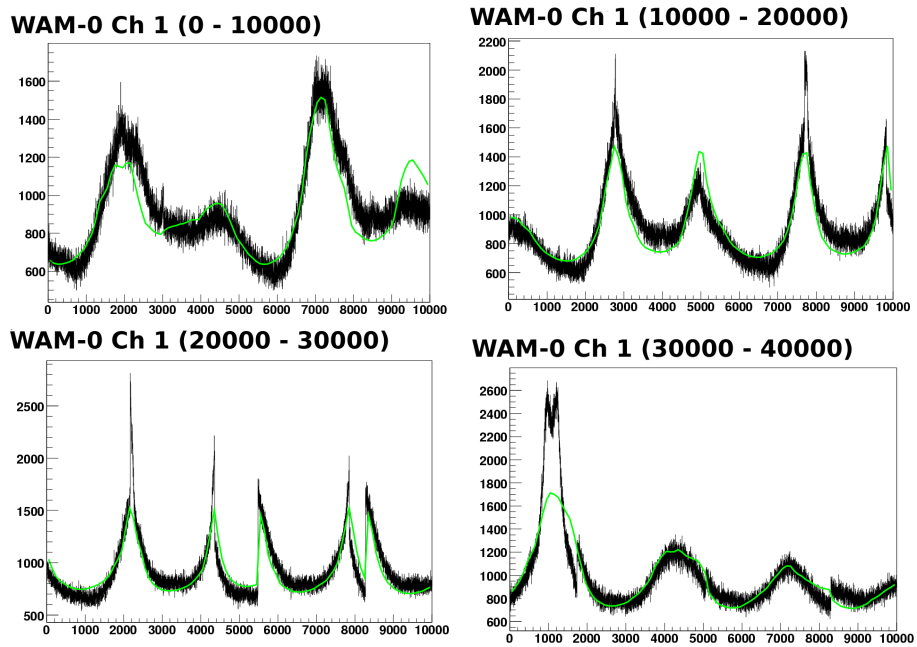


図 4.14: Ch1 モデルフィッティング (除去後)　黒：ライトカーブ、緑：モデル (横軸：時間、縦軸：カウント)

図のカウントの段差が出来ている部分は SAA や Small SAA、COR の低い部分をカットしたために出てきた部分である。よくあっているようにも見えるが、良く見てみると、左上の図の右端や右上の図の横軸が 5000 付近でモデルの方がデータを上回っていたりする

部分が見られる。同様に一つ上の Ch 2 (50 ~ 80 keV) でもフィットを行ってみた (図 4.15)。

先ほどの Ch 1 とは傾向が異なり、COR の依存性だけでは説明できない部分が生じてくる。カウントが急激に上がっている箇所は突発現象などが発生した部分と考えられる。このようにエネルギーバンドによってもライトカーブの様子が異なることが分かる。

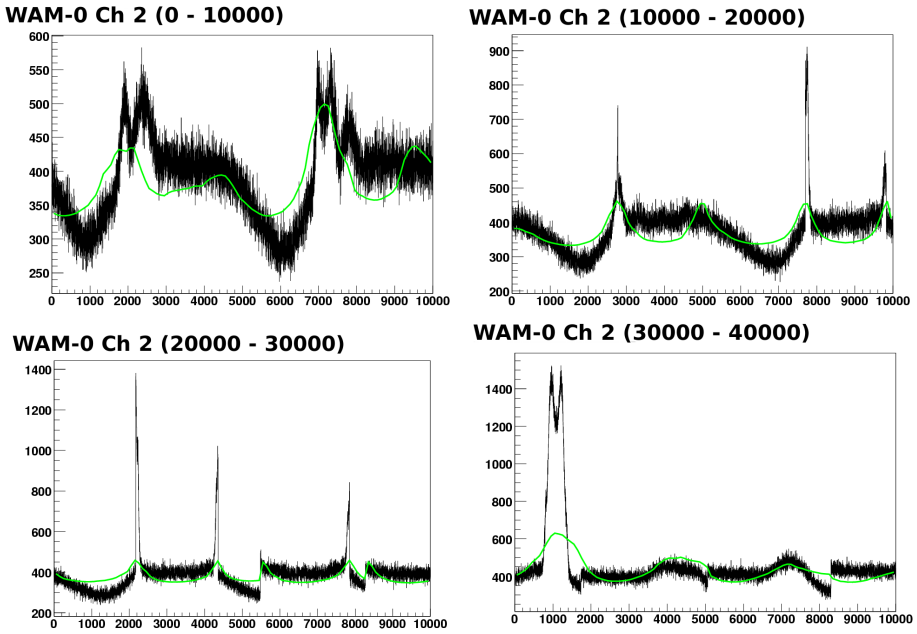


図 4.15: Ch2 モデルフィッティング (除去後)　黒：ライトカーブ、緑：モデル (横軸：時間、縦軸：カウント)

つぎにパラメータを一つ増やした。TRN_UD を追加し、F = A/COR + B×(TRN_UD) + C という関数でフィットを行ってみた。先ほどと同じデータを用いた結果を図 4.16, 4.17 示す。やはり先ほどと同様にエネルギーごとの違いが見える。また、モデルカーブにがたつきが多く見られるようになったが、これは追加した TRN_UD のカウントのゆらぎが見えているものと思われる。TRN_UD カウンタの値がライトカーブのカウントよりも小さいため、モデルに取り込んだ場合にかかっている定数項の効果でゆらぎも増加して表れたものと推測できる。Ch 1 については A/COR + B の場合よりも良くなったように見受けられる。しかし、実際に使用するデータである Ch 2 では TRN_UD を増やしてももとのモデルにがたつきが見られるようになっただけで劇的にモデルが良くなるというわけではない。つまり、TRN_UD はとくに意味のあるパラメータとして使用することはできない、ということである。

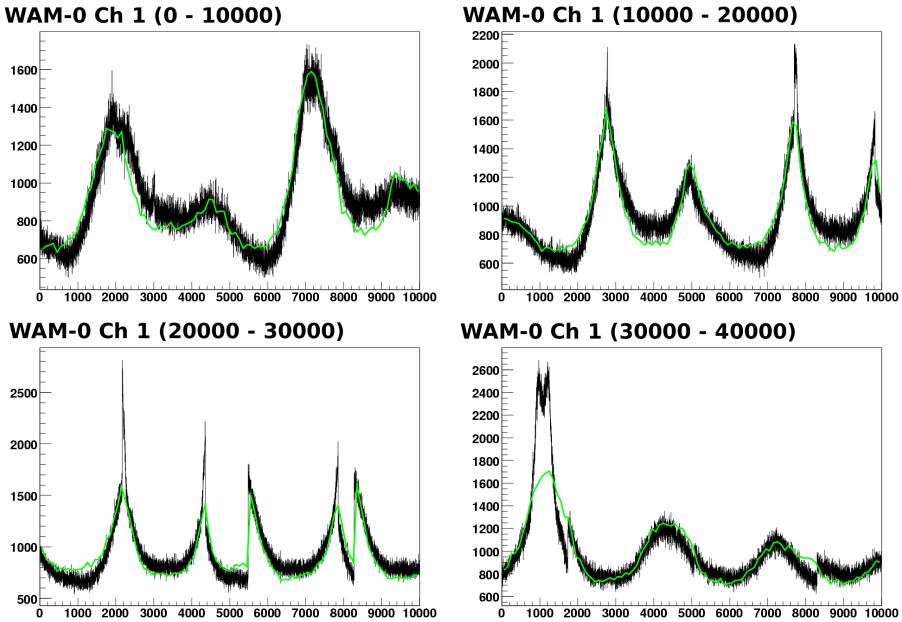


図 4.16: Ch1 モデルフィッティング　黒：ライトカーブ、緑：モデル (横軸：時間、縦軸：カウント)

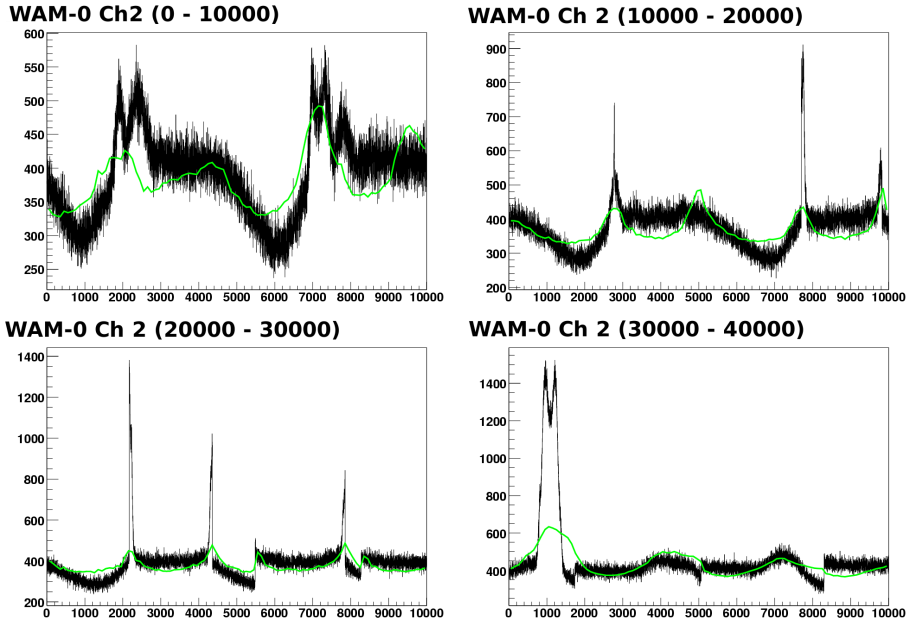


図 4.17: Ch2 モデルフィッティング　黒：ライトカーブ、緑：モデル (横軸：時間、縦軸：カウント)

4.5　データベースからの差し引き

単純なモデル化作業では WAM のバックグラウンドをうまく表せないことが先の結果から分かった。COR は図 2.2 で示したように地球上の位置との相関がある。そこで先ほど §4.3 で示した軌道上のカウントマップを用いてデータベース化し、そこからの差し引きを行ってみることにした。

§4.3 ではフレアが発生した日は全てデータ削除するという手法をとってきた。しかし、

フレアのある日を全部除くなどをするのは統計を少なくしてしまうという問題がある。また、データ量が増えるにしたがい時間が多く必要となってくるため、このような異常カウントを除く作業もなるべくなら簡潔にして時間の節約にしたい。

そこでフレアアップなどのカウント上昇を除くことを二つの手法で試してみた。一つ目はカウントマップを作成する際に図 4.18 のようにあるピクセル A のカウントを決める際に、その周辺 8 ピクセル (No.1 ~ 8) のカウントとの比較を行う方法である。まず No.1 ~ 8 のカウントが 0 のときはそのピクセルは無視する。次に 0 でない No.1 ~ 8 のピクセルのカウントを調べ、A のカウントが No.1 ~ 8 の中で 2 番目に低い値の X 倍以上ならば A のカウントの平均値には加えない、という手法をとった。比較元のイメージはあらかじめ作成しておく必要がある。元イメージはフレアなどが極力無いことが望ましい。X の値を変えることで抜き出すカウントの調整ができる。ここではこの手法を便宜上「8px 比較型」と呼ぶ。

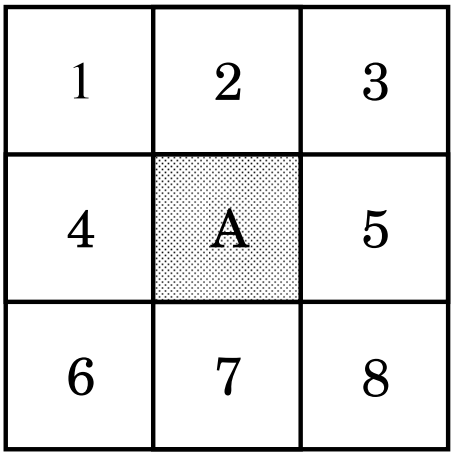


図 4.18: 周辺 8 ピクセル

8px 比較型でいくつかのフレアを含むデータを用い、フレアアップが除去出来るのかを試してみたのが図 4.19, 4.20 である。X の値は 1.5 としている。

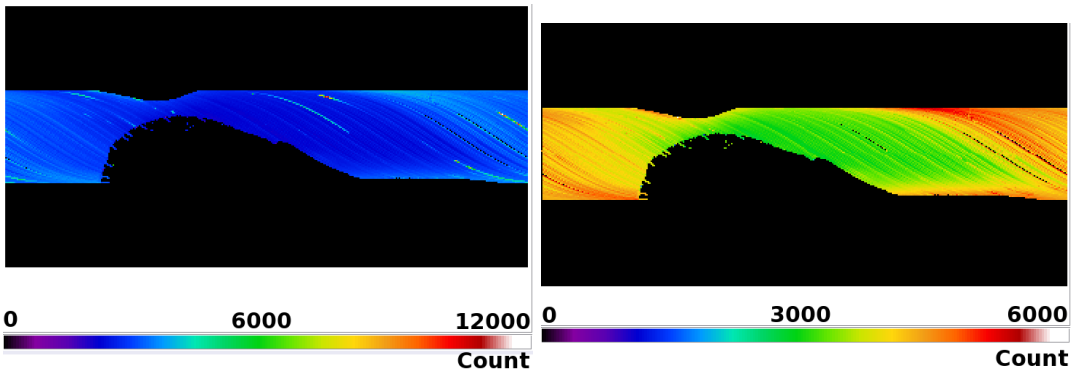


図 4.19: 8px 比較で作成した全 54Ch カウントマップ（南東移動) (左：除去前、右：除去後)　(横：経度 (±180 deg)、縦：緯度 (±90 deg))

フレアアップはそれなりに除去できているように思われるが、フレア除去を試す前のカウントマップと比較した際に値が入らない箇所ができてしまっている。ユニットスキャン付近や SAA をでた直後など周辺ピクセルが無い、もしくは周辺カウントの X 倍以上の値

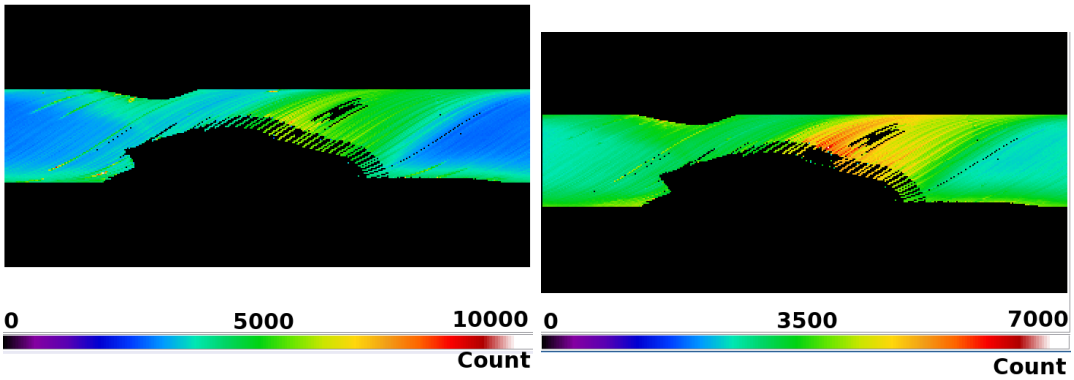


図 4.20: 8px 比較で作成した 54ch カウントマップ (北東移動)(左：除去前、右：除去後) (横：経度 (±180 deg)、縦：緯度 (±90 deg))

しかない場合に起こっている模様である。

もう一つの方法がカウントの平均値 (Mean) とカウントの分散 (RMS) を用いるものである。カウントの分散を取り、分散の X 倍よりも大きい部分をカットすることで異常に高いカウント値を除去することを目指す。簡単に表すと、Mean±(X×RMS) の範囲にあるカウントのみでもう一度平均カウントを取り直すという手法である。「RMS 型」とここでは呼ぶことにする。その結果を図 4.21 のせる。

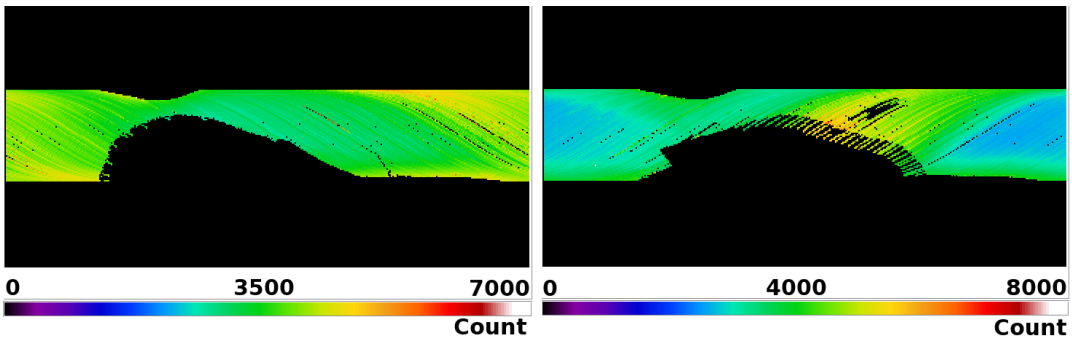


図 4.21: RMS 型で作成したカウントマップ (左：南東移動、右：北東移動)　(横：経度 (±180 deg)、縦：緯度 (±90 deg))

こちら側でも穴抜けが発生している部分がある。これらを解決するためにはデータ量を増やせばいいのではないかと考えた。データを 10/20 ~ 11/24 の期間を追加してみた。その結果 (RMS 型) が次の図 4.22 になる。穴抜け部分は減少したもののまだ残っている。また、SAA のタイミングが 11/10 より変更になったため、それによる影響も見える。SAA 突入前後でのカウントの抜けや、南東移動時の SAA との境でのカウントアップがそれである。この部分は変更後のためデータ量が少なく、分散を取ってもほとんど変わらなかったものと思われる。

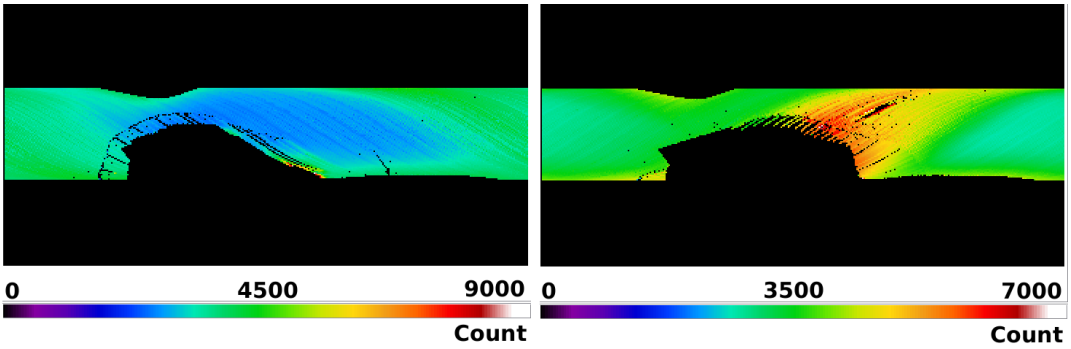


図 4.22: RMS 型で作成したカウントマップ (左：南東移動、右：北東移動)
(横：経度 (±180 deg)、縦：緯度 (±90 deg))

穴抜けが多くなるため、結局太陽フレアなどのカウントが高い部分はデータを詰めるときにあるカウント未満と言う条件で除くようにした。そのようにして作成した WAM 全 4 面の 9/17 ~ 11/24 のカウントマップは次のようになる。

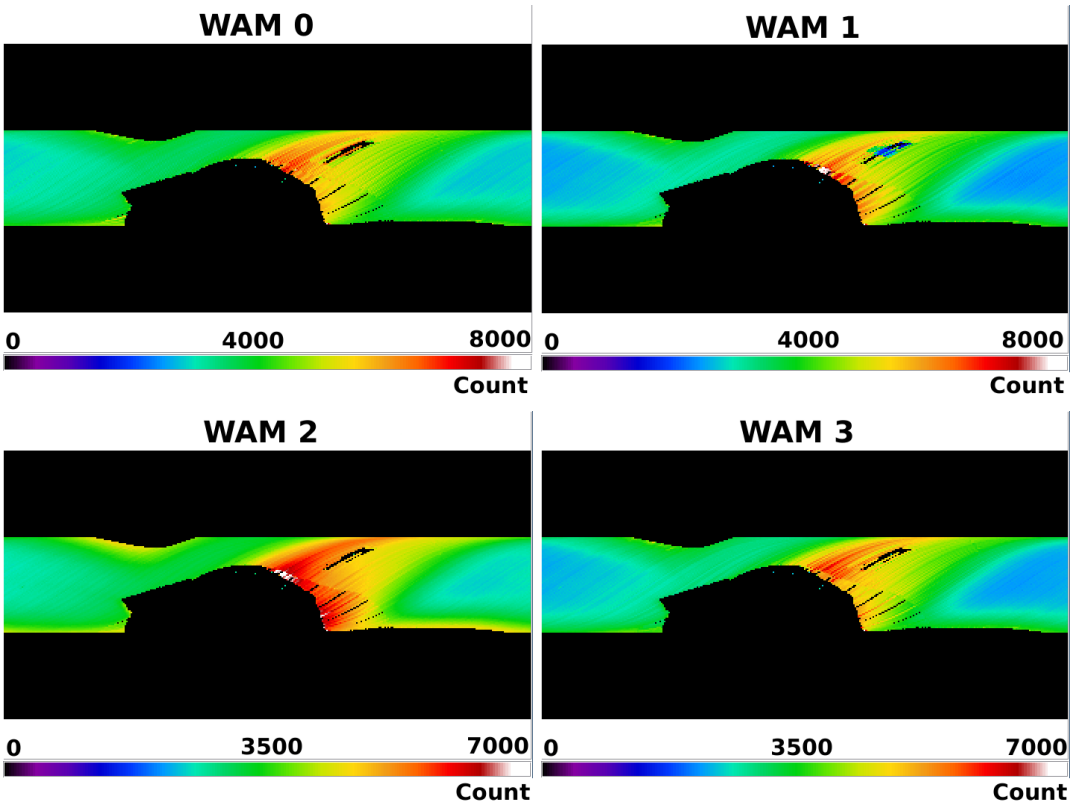


図 4.23: WAM4 面のカウントマップ　(北東移動)
(横：経度 (±180 deg)、縦：緯度 (±90 deg))

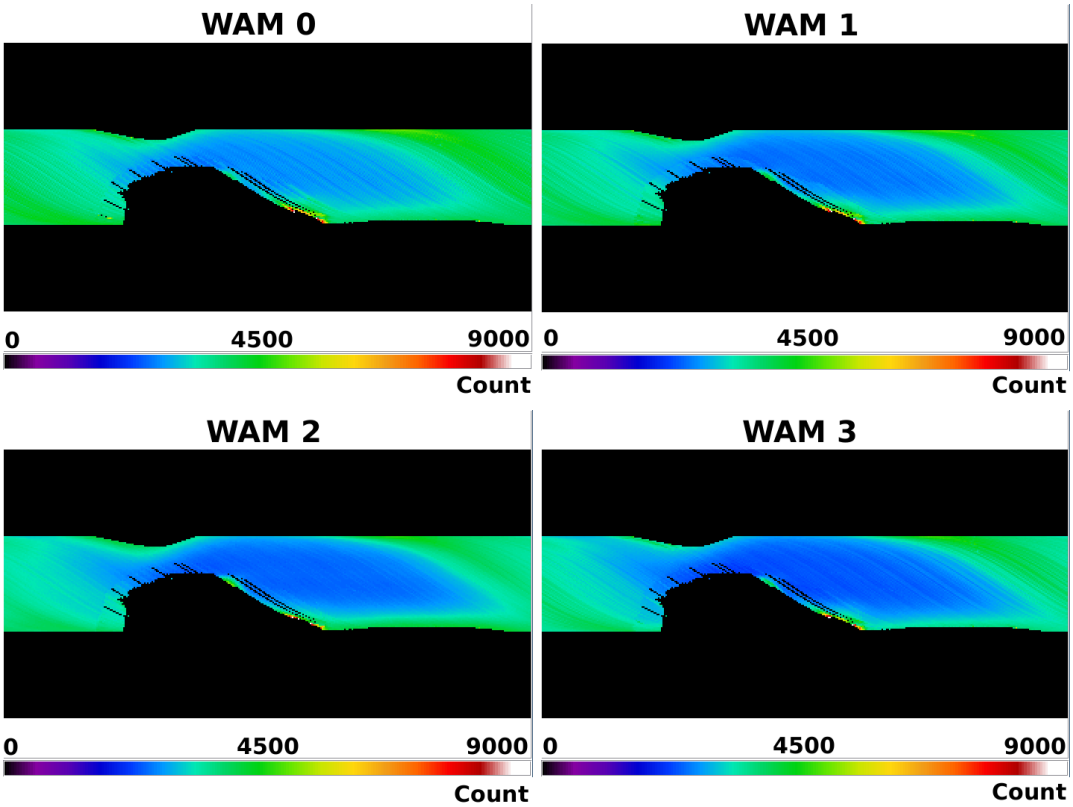


図 4.24: WAM4 面のカウントマップ　(南東移動)
(横：経度 (±180 deg)、縦：緯度 (±90 deg))

カウントマップができたので、これをバックグラウンドとして実際のデータと比較することを試した。用いたのは WAM-0 のデータでエネルギーバンドを TH の 4 バンドに合わせてある。§4.3 でも出したが、もう一度 WAM-0 の 4 エネルギーバンドのカウントマップをのせておく。差し引きを行った結果を図 4.26 ~ 4.29 に示す。赤がデータ、緑がバックグラウンド、青が差し引きを行ったライトカーブである。

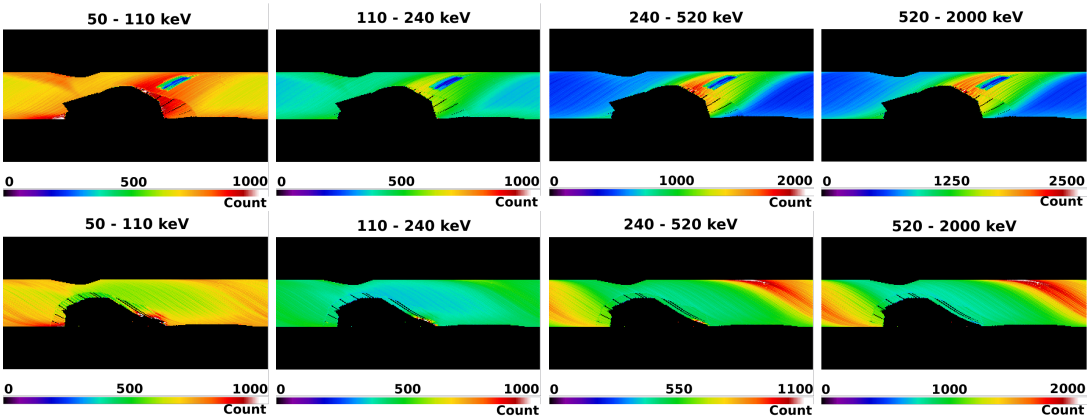


図 4.25: WAM-0 の各エネルギーバンドでのカウントマップ
上段：北東移動、下段：南東移動　(横：経度 (±180 deg)、縦：緯度 (±90 deg))

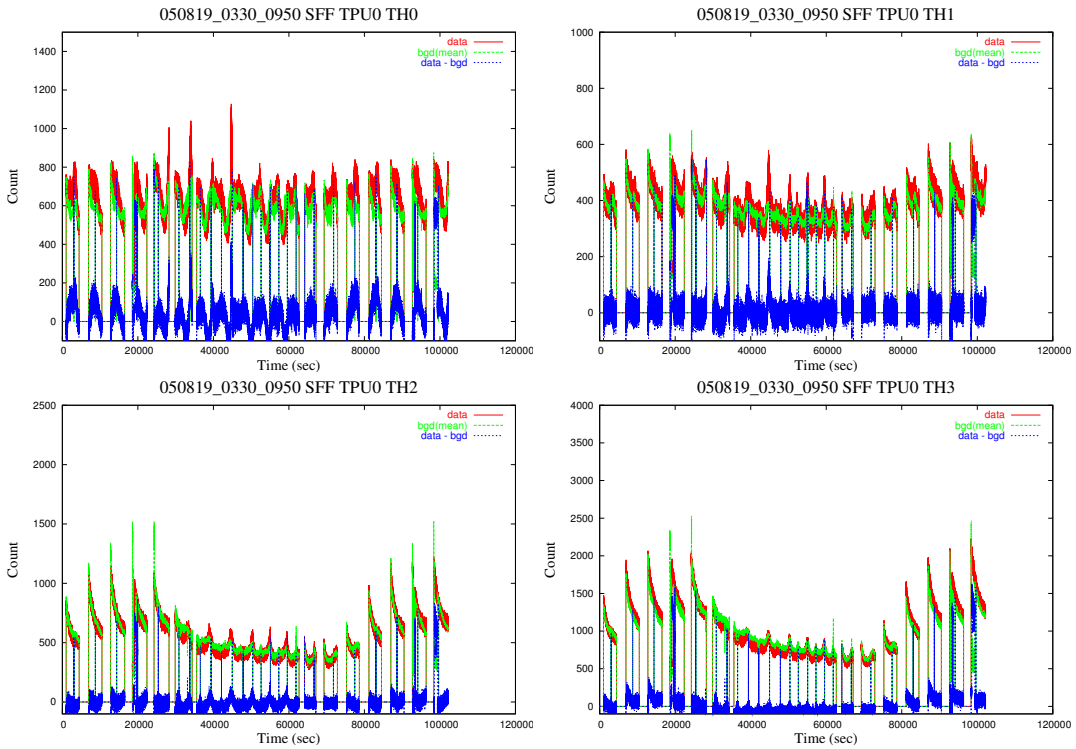


図 4.26: バックグラウンドを差し引いたライトカーブ (05/08/19)
赤：データ、緑：BGD、青：差し引いたライトカーブ　(横：時間、縦：カウント)

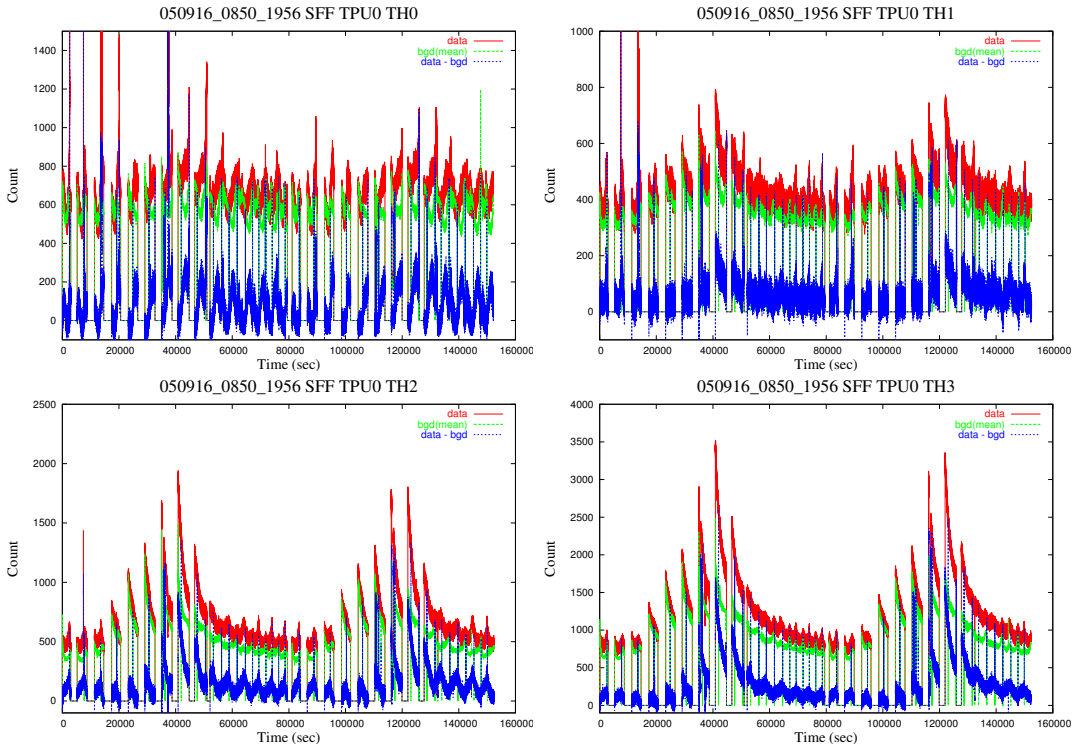


図 4.27: バックグラウンドを差し引いたライトカーブ (05/09/16)
赤：データ、緑：BGD、青：差し引いたライトカーブ　(横：時間、縦：カウント)

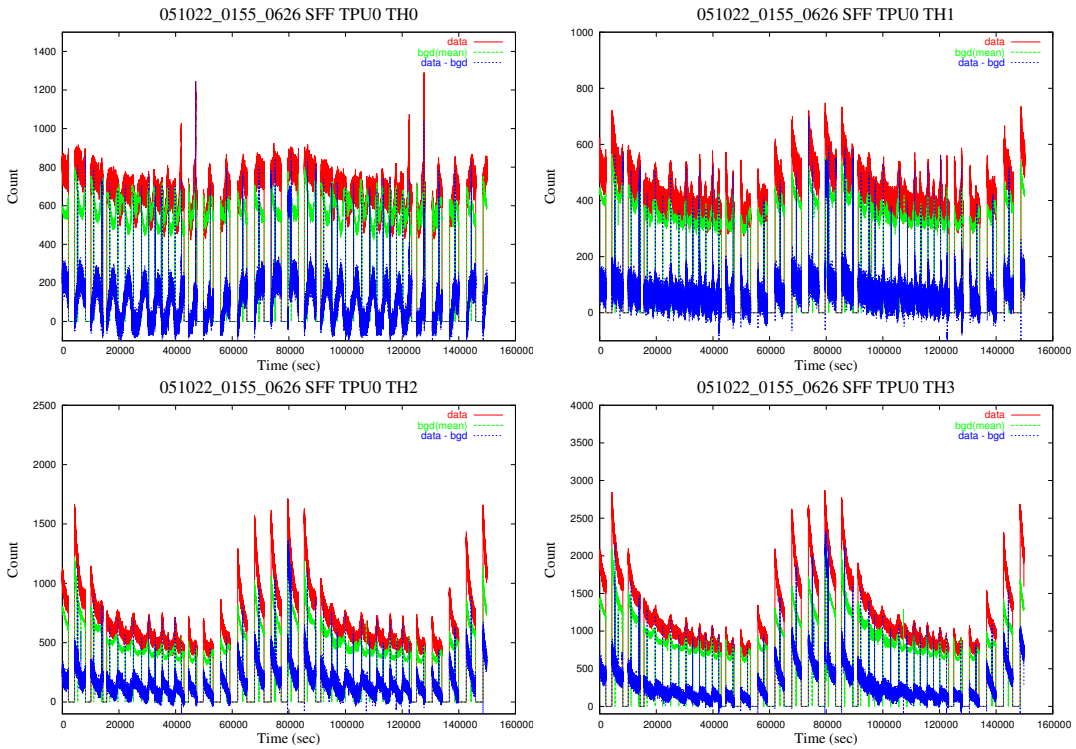


図 4.28: バックグラウンドを差し引いたライトカーブ (05/10/22)
赤：データ、緑：BGD、青：差し引いたライトカーブ　(横：時間、縦：カウント)

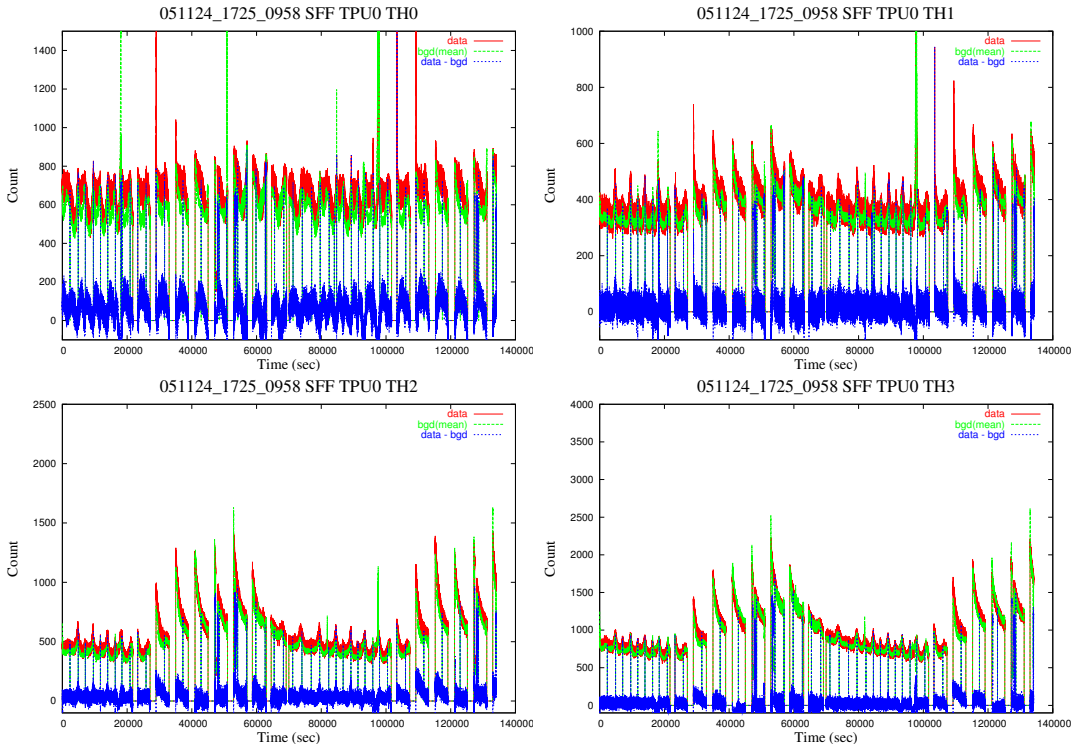


図 4.29: バックグラウンドを差し引いたライトカーブ (05/11/24)
赤：データ、緑：BGD、青：差し引いたライトカーブ　(横：時間、縦：カウント)

差し引いたライトカーブを見てみると、引いた後のライトカーブ(青)がほぼ一直線になり、差し引きがうまくいっているように見えるもの(05/08/19 TH3 Time = 40000 ~ 60000 など)があるが、そのカウントは±100 カウント程度揺らいでおり、より良い差し引きのためにはまだまだ工夫が必要に思われる。また、大きくずれているものもあることが分かる。合っていない部分はまず、SAA 通過後の部分に見られる。SAA の通過に伴うカウントアップが常に一定ではなく、軌道ごとに違う可能性を示唆している。また、低エネルギー側(TH0)でもバックグラウンドマップと合っていない部分が多く見られる。低エネルギー側だけに寄与するようなバックグラウンド源がなにか存在する可能性も考えられる。

4.6 パラメータの探索

単純なモデル化や平均値との差し引きではうまくバックグラウンドを引き切れないことが分かった。そこで、バックグラウンドをモデル化する上で必要なパラメータに何があるのかを探ることにした。

4.6.1 低エネルギー側に寄与するもの

先ほどのイメージからの比較を行ったときに、低エネルギー側(TH0)で合わない部分が多く見られた。詳しく見てみると、TH0 バンドのライトカーブとそれ以外のライトカーブでは違う挙動を示すものがあった。その一例を図 4.30 に示す。

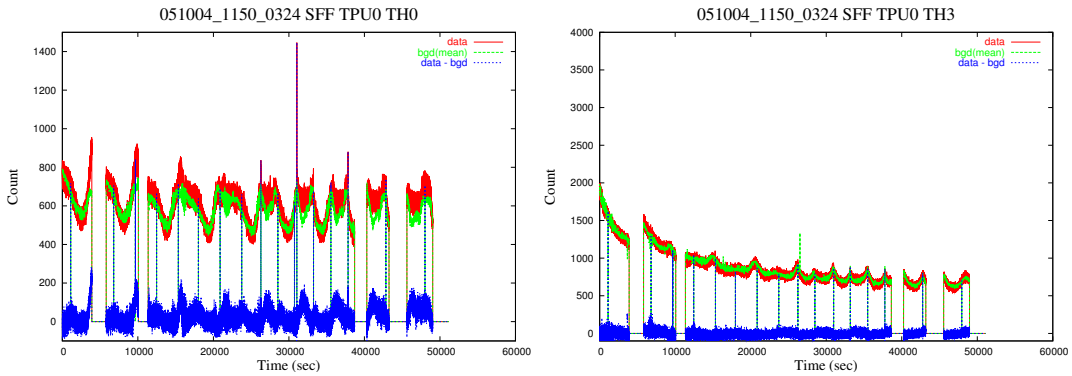


図 4.30: 低エネルギー側と高エネルギー側の比較(05/10/04)　左：TH0 右：TH3
赤：データ、緑：BGD、青：差し引いたライトカーブ　(横：時間、縦：カウント)

高エネルギー側では SAA 通過に伴うシンチレータの放射化の影響がなだらかなカウントの減少という形で現れているが、一方、低エネルギー側では、高エネルギー側のように SAA 通過に伴うシンチレータの放射化成分はほとんど見られないことが分かる。

また、低エネルギー側のデータを詳しく見た場合、Time = 25000 ~ 40000 付近にかけて、その時間帯での平均カウントを表す緑の線よりも明らかに超過している部分が見られる。低エネルギー側に影響を与えるものとしては Cutoff Rigidity(COR) がまず挙げられるため、この部分と COR がどのように対応しているのかを調べてみた(図 4.31)。05/10/04 の WAM-0 面のデータでの Time = 25000 ~ 40000 付近とある定数 A,B を用いて COR の影響を表した F = A / COR + B を同時に表示させてある。

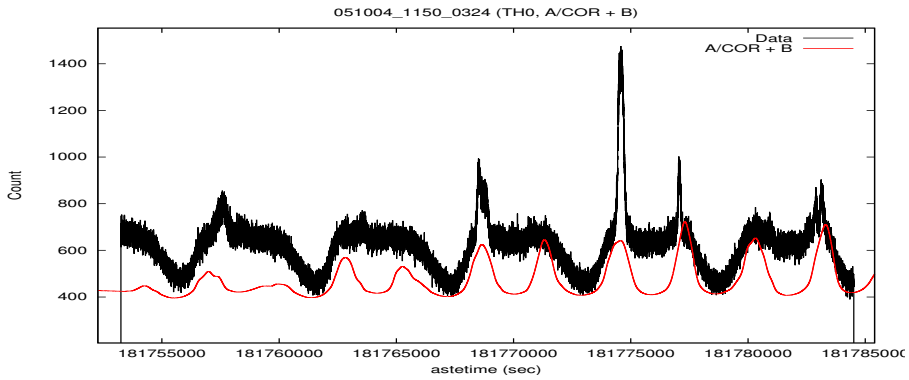
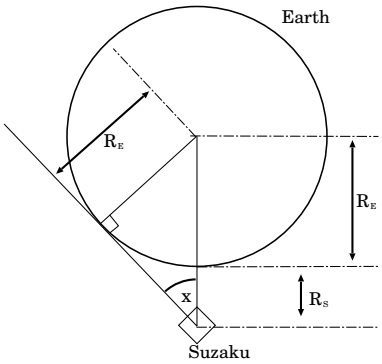


図 4.31: 低エネルギー側と COR^{-1} の比較 (05/10/04)
　　黒：データ、赤：A/COR + B　(横：時間、縦：カウント)

COR^{-1} が低いとき、つまり COR による影響があまり無く、バックグラウンドが下がっていてもおかしくない場所 (横軸が 181770000 付近など) でもカウントが減少せず高いままであることが分かる。このような現象が起きていたのはこの日だけではなく、他にも 05/11/13 や 05/12/06 などがあり、この日だけの特別な現象ではない、ということが分かった。

だとすると、より良いモデル化作業のためにこの低エネルギー側に影響を与える何かを突き止める必要が出てくる。BATSE のバックグラウンドモデルを参考にすると、候補として挙げられるものに地球大気からのガンマ線 (大気ガンマ線) がある。WAM は全天モニタ機能を持つため、当然地球を見る時間帯も出てくることになり、そのときに大気ガンマ線が WAM に入射してくるのではないかと考えられる。

そこでモデルに地球を見ているときを 1、見ていないときを 0 とするパラメータ earth_on を導入してみた。



earth_on の導出方法は左図 4.32 で説明する。まず、地球の半径を $R_E \sim 6400$km、「すざく」の高度を $R_S \sim 570$km、WAM のある面と地球のなす角度を x とする。$\sin x = R_E/(R_E + R_S)$ となるので、x を計算すると、$x \sim 67$ 度が得られる。そこで x が 67 度以下の場合にはその面が地球を見ているとして earth_on = 1 とし、それ以外を earth_on = 0 とした。

図 4.32: 地球と WAM のなす角度

earth_on と COR、ライトカーブの対応を図 4.33 および 4.34 に示す。用いたのは 05/10/03 と 05/11/23 の WAM-0 面の Ch2(50 ~ 80 keV) のデータである。黒が Ch2 のライトカーブ、赤がある定数倍した COR^{-1}、緑が earth_on を表す。earth_on は分かりやすくするために 400 倍して図示してある。

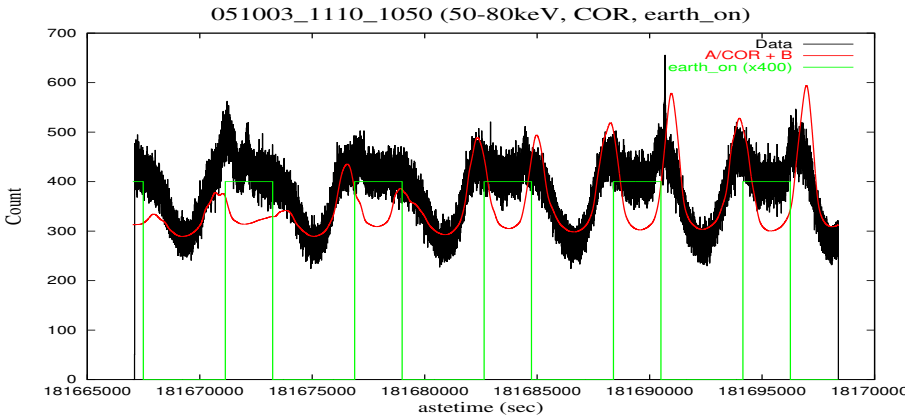


図 4.33: 低エネルギー側と COR^{-1}、earth_on の関係 (05/10/03)
黒：データ、赤：A/COR + B、緑：earth_on (×400)　(横：時間、縦：カウント)

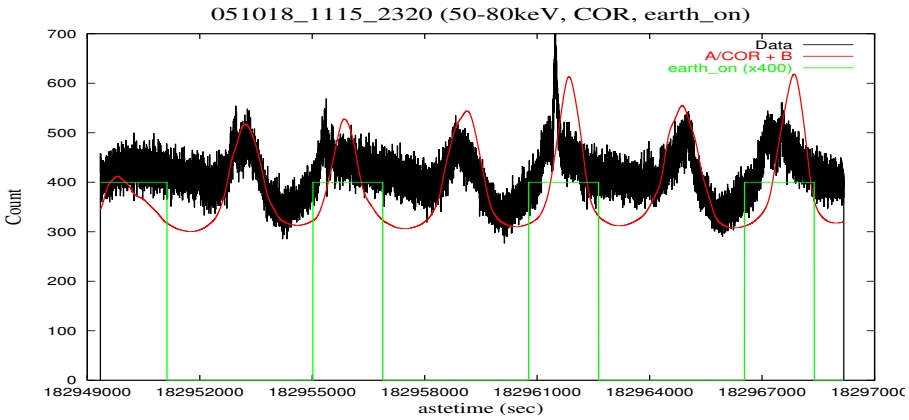


図 4.34: 低エネルギー側と COR^{-1}、earth_on の関係 (05/10/18)
黒：データ、赤：A/COR + B、緑：earth_on (×400)　(横：時間、縦：カウント)

05/10/03 についてはカウントが低くなっていてもおかしくないのに高いままの部分と earth_on が関係していることがはっきりと分かる。一方で 05/10/18 については earth_on とカウントの高い部分が必ずしも対応していない。この不一致は単純に 67 度以下で地球を見る、としていることが原因ではないかと考える。67 度というのは WAM の面の中心からの法線が地球にかかるかからないの角度であり、実際の WAM は面であり、また、斜め方向からも入射はあると考えられるため、実際はここまで単純ではないものと思われる。また、WAM は地球に対して常に 90 度の傾きを持っているわけでは無いので、それも影響しているものと思われる。

大まかに見ると、低エネルギー側には大気ガンマ線の影響があると考えられ、それは earth_on というパラメータでモデルに取り込むことが可能であると分かった。

4.6.2　新しいモデルでのフィッティング

低エネルギー側に影響を与える大気ガンマ線に関してパラメータ化することが出来たので、それを取り込んだ新しいモデルでデータのフィッティングを試みた。低エネルギー、高エネルギー両方に対応させることを考えて、新しいモデルは次式のようになる。

$$F = A + B \times (\mathrm{COR})^{-1} + C \times (\mathrm{MeV_Count}) + D \times (\mathrm{earth_on}) \tag{4.1}$$

ここで $A \sim D$ はある定数、COR は Cutoff Rigidity、MeV_Count はその時刻での 1 ~ 2 MeV のカウント、earth_on は地球を見る or 見ない、である。第二項は低、高エネルギー両方に関係するパラメータ、第四項は低エネルギー側に関係するパラメータで、第三項は高エネルギー側に関係するパラメータである。

フィッティングを行った結果の一部を図 4.35 に示す。エネルギーは Ch 2 = 50 ~ 80 keV である。

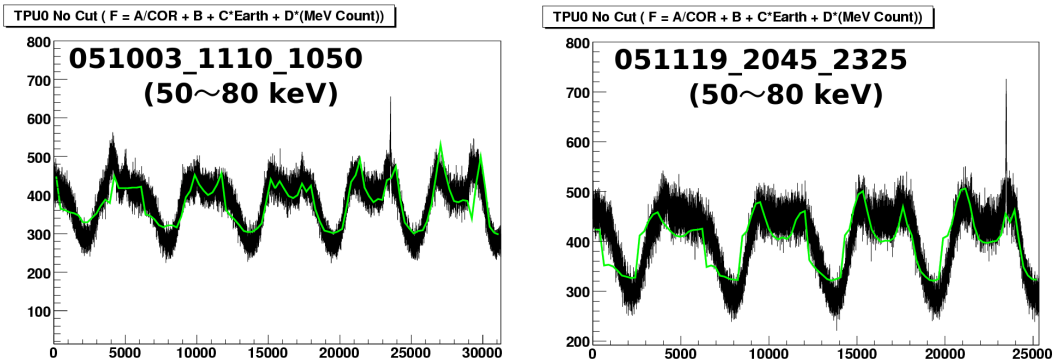


図 4.35: 新モデルでの Ch2 フィッティング　左：05/10/03 右：05/11/19
黒：データ、緑：モデル　(横：時間、縦：カウント)

一方、高エネルギー側ではこのモデルでフィットすると次の図 4.36 のようになった。05/10/03 の Ch19(610 ~ 640 keV) と Ch53(1950 ~ 2100 keV) の結果を図示してある。

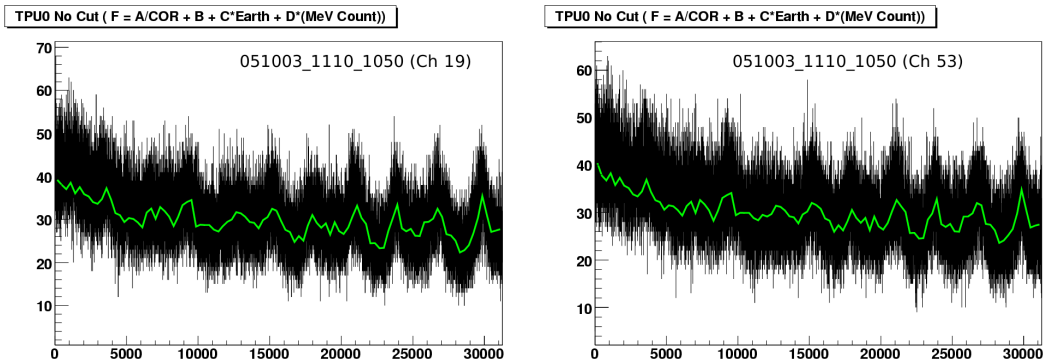


図 4.36: 新モデルでのフィッティング (高エネルギー側)　左：Ch19 右：Ch53
黒：データ、緑：モデル　(横：時間、縦：カウント)

モデルとデータはあっているようにも思われるが、もとのデータの揺らぎが大きすぎて判断がつかない。そのため何秒間かのデータをまとめて bin まとめをしてみる (図 4.37)。なお横軸が短くなっているのは bin まとめをしたため、データ数が 1/20 になったからである。

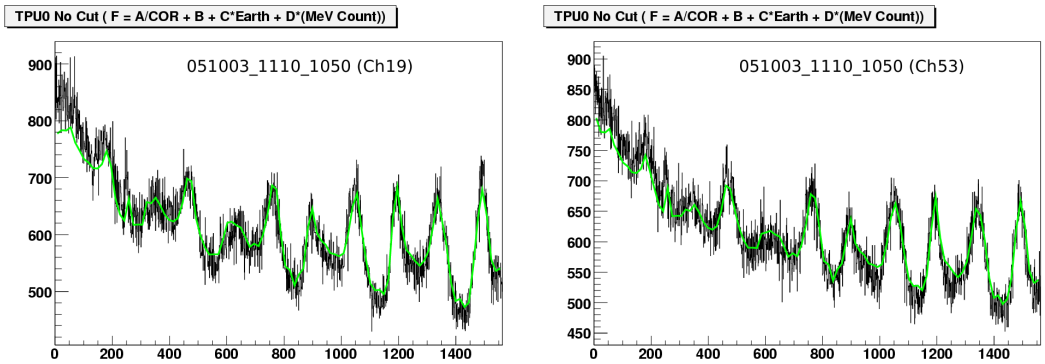


図 4.37: 新モデルでのフィッティング (高エネルギー側,20bin まとめ)　左：Ch19 右：Ch53
黒：データ、緑：モデル　(横：時間、縦：カウント)

bin まとめをしたライトカーブとモデルを見てみると、ほぼデータとモデルがあっていることが分かる。

フィッティングで得られた定数を見ると低エネルギー側 (Ch 0 ~ 5 = 50 ~ 140 keV) では earth_on による影響が見えているが、高エネルギー側 (Ch 6 以上 (> 150 keV)) では徐々に earth_on の項が影響を与えなくなり、MeV_Count の項が支配的になっている。つまり、大気ガンマ線は高エネルギー側には寄与しないことがこれからも確認できる。

新しくしたモデルは低エネルギー側では大気ガンマ線の効果を取り込んだためより良くなり、高エネルギー側に対しても MeV_Count の項が支配的となりよくモデルとデータがあう。そのため新しく作ったモデルは低エネルギー側、高エネルギー側の両者を良く表せ、適当なモデルであるといえる。

4.6.3　そのほかのパラメータ

さらに精度を上げるために他に必要なパラメータはなにかあるのか、ということで、まず、WAM 4 面でなにか違う傾向が見えるかどうか確かめてみた。WAM の各面はそれぞれ 90 度違った方向を見ているため、各面違った傾向が見えてもおかしくない。エネルギーバンド 200 ~ 800 keV での結果の一例を図 4.38, 4.38 に示す。データは 20 秒を bin まとめしてある。

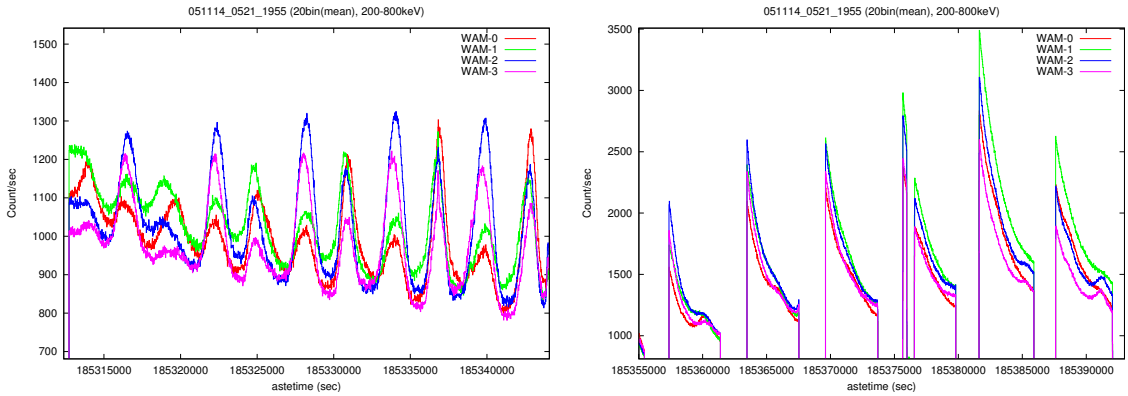


図 4.38: WAM4 面の比較 (05/11/14, 20bin まとめ)　(横：時間、縦：カウント)
左：SAA を通らない期間 右：SAA を通った期間

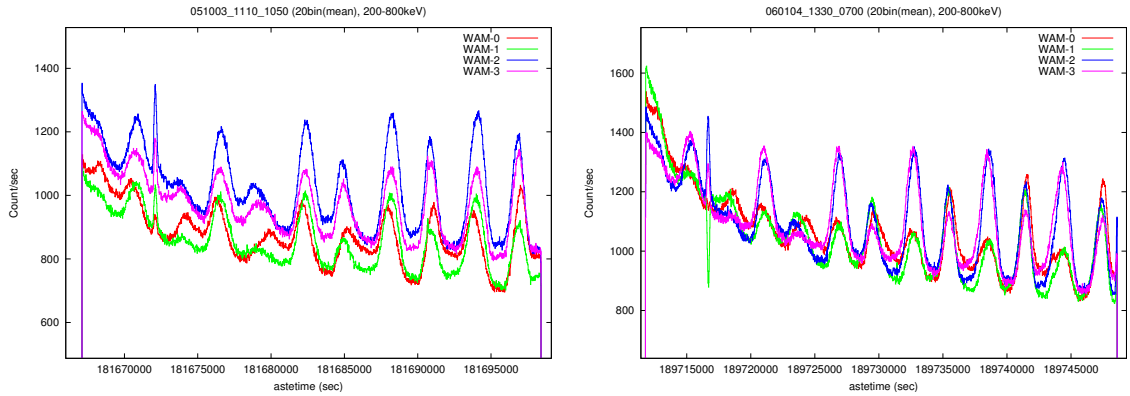


図 4.39: SAA を通らないときの WAM4 面の比較 (20bin まとめ)
(横：時間、縦：カウント)　左：05/10/03 右：06/01/04

カウントレートの違いの他に COR の影響の違いなどが図から見て取れる。06/01/04 を例にとると、WAM-0 面や WAM-3 面は常に COR の影響によるカウントの変動が大きく見えるが、WAM-1,2 面ではあるところでは COR で大きく変動し、またあるところでは少ししか変動しない、といった感じである。図 4.39 にも別の日で SAA を通らない時のデータを図示してあるが、この変動は日によっても異なることが分かる。この影響を与えるものとしては、WAM に入射する粒子の方向が関係している可能性がある。WAM の 4 面はそれぞれ別の方向を向いており、そのため粒子がある方向からやってくる場合にまともに入射する面と入射しない面が出てくることが考えられ、それが COR の影響の違いなどに現れるのでは、と考えた。SAA についても同様のことが言える。図 4.38 の右図を見てみると、WAM-1 面は SAA を通過するたびにほかの面よりもカウントが大きく上昇していることが分かる。これも WAM の向きによるのでは、と考えた。この場合だと、SAA 内で WAM-1 が向いている方向から粒子がやってきているのではないかと考えられる。

そこで、粒子の方向に寄与しそうなものとして、地球磁場の方向を考えた。地球磁場は荷電粒子をトラップするため、磁場の方向に沿って荷電粒子が運動している可能性がある。そこで、地球磁場の向きとカウントとの相関を調べてみた (図 4.40)。図には WAM4 面のライトカーブ (200 ~ 800 keV) と地球磁場の衛星軸からの回転角と角度を示してある。回転角の色分けは WAM の各面の方向を表しており、赤が WAM-0、緑が WAM-1、青が WAM-2、ピンクが WAM-3 面の方向となる。例として 05/10/18 と 05/11/23 のデータを示してあるが、05/11/23 については回転角とライトカーブに対応があるように見える (磁場の回転角が向いている面のカウントが高くなっている) が、05/10/18 については特に対応しているようには見られない。

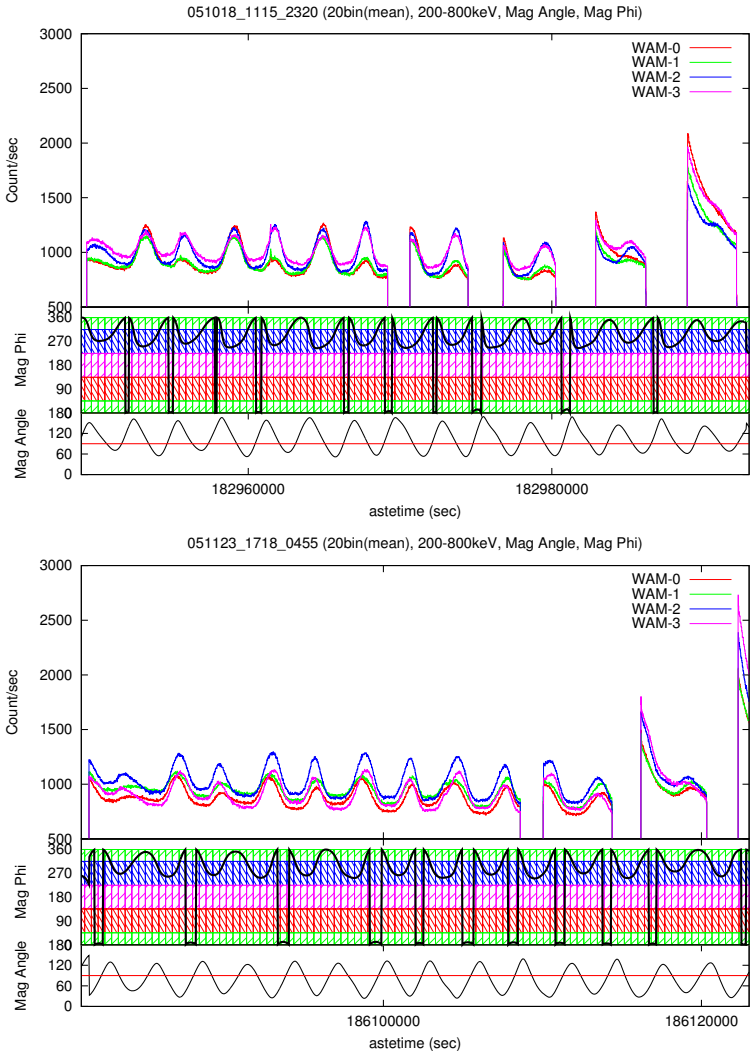


図 4.40: WAM と地球磁場の方向の関係　(上：05/10/18、下：05/11/23)
上段：WAM4 面ライトカーブ、中段：地球磁場の衛星軸まわりの回転角
下段：地球磁場の衛星軸からの角度

次に WAM のカウントの長期変動の様子を調べた (図 4.41)。用いたデータは WAM-0 面のデータで、地球座標で経度が 100 ± 10 度、緯度が 0 ± 10 度の範囲内で南東移動しているときのものを使用した。この範囲は COR が地球上でもっとも高い地域であり、COR によるバックグラウンドの変動を極力抑えられる。また、南東移動のデータを選んだのは南東移動時にこの地域を通過するときには SAA もほとんど通っておらず、SAA 通過に伴う放射化成分の影響も取り除け、本当のバックグラウンド成分のみの変動の様子を見ることが出来るからである。エネルギーバンドとしては 200 ~ 800 keV と 1 ~ 2 MeV の二つのバンドを使用した。データの期間は 05/08/22 ~ 06/01/08 までとなっている。

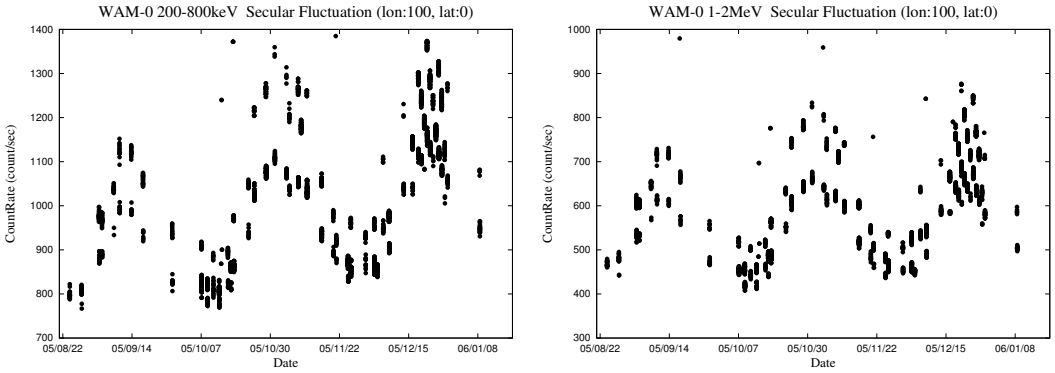


図 4.41: WAM-0 のバックグラウンドの長期変動の様子
　左：200 ~ 800 keV、右：1 ~ 2 MeV

どちらのエネルギーバンドでもバックグラウンドカウントが上下に大きく変動している様子が分かる。またその大きな変動の他に、徐々にカウントが上昇していく様子も分かる。これは検出器のシンチレータが上空で徐々に放射化され、バックグラウンドが上昇したものと考えられる。

そのほかに影響を与えるものとして、衛星の高度も考えられる。「すざく」の高度は 560 ~ 580 km と変化しており、同じ地球上の位置を通る場合でも高度が異なれば、COR などの影響が異なることが考えられる。高度が高いとそれだけ地球磁場による荷電粒子のシールド能力も低下すると考えられ、それによりバックグラウンドが上昇することが考えられる。さきほどの長期変動も高度の影響があるのではないかと考え、カウントと高度を同時に表してみた。

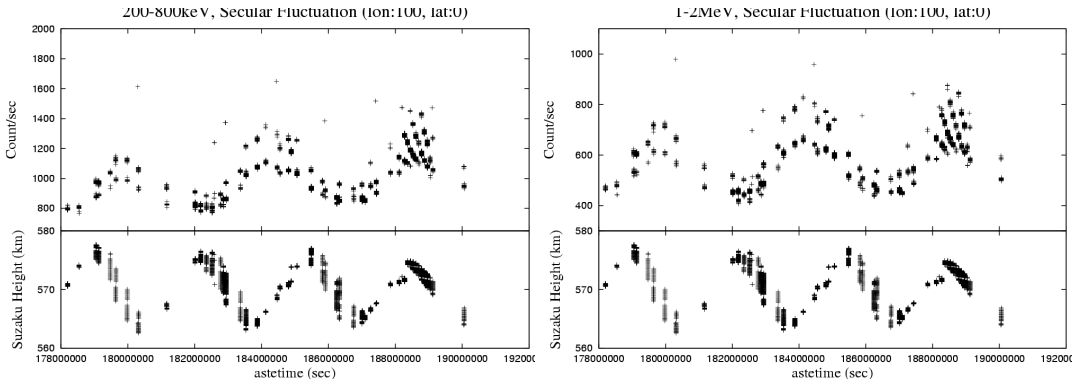


図 4.42: WAM-0 のバックグラウンドの長期変動の様子とこの座標での衛星高度の変化
　左：200 ~ 800 keV、右：1 ~ 2 MeV

相関があるように見えなくもないが、カウントの変動周期よりも高度の変化周期のほうが速いように見える。また、WAM の各面で長期変動に違いが無いかも調べてみた。先ほどの WAM-0 で用いたデータと同期間で、200 ~ 800 keV のデータである。大まかな傾向の線も同時に図示してある。WAM-0 が一番変動が大きく、WAM-2 はあまり変動していないことが分かる。

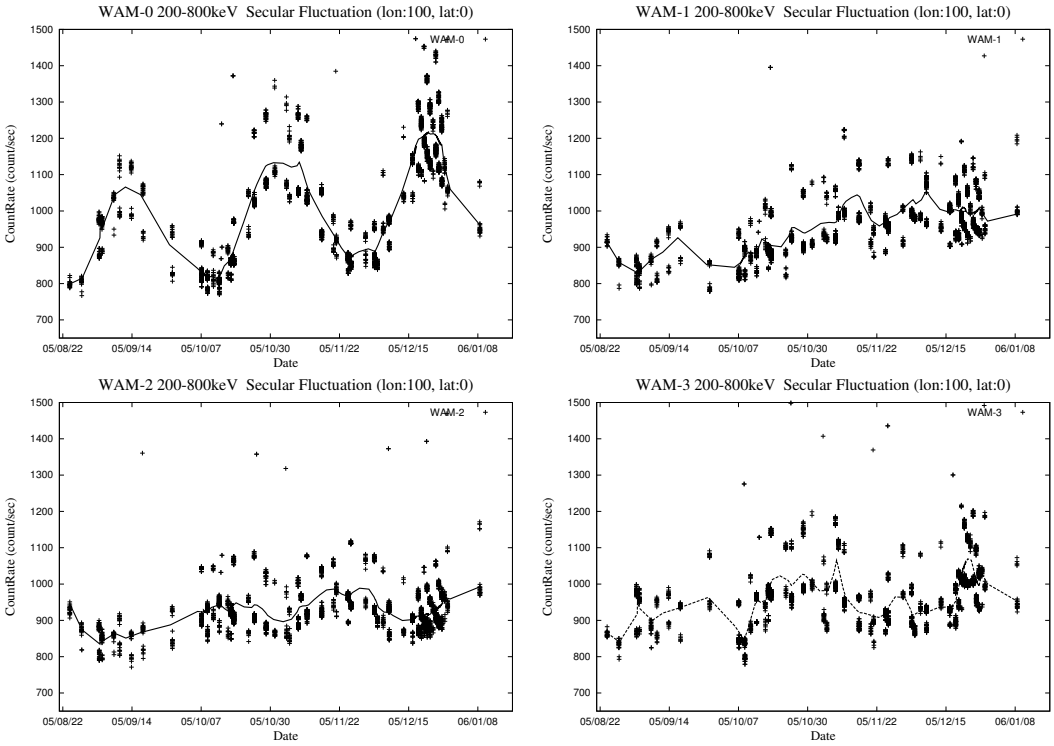


図 4.43: WAM4 面のバックグラウンドの長期変動の様子
　左上：WAM-0、右上：WAM-1、左下：WAM-2、右下：WAM-3

次に高度と COR などとの関係を見るために二つのデータで比較をしてみた (図 4.44)。用いたのはエネルギーバンド 200 ~ 800 keV の 05/09/16 のデータと、05/10/22 のデータである。

05/10/22 のデータを良く見てみると、図中にいくつか青線で示すように、COR の低い (1/COR が大きい) 箇所と高度が高くなった箇所が一致した場合、変動が大きくなっていることが分かる。青線で示した部分は、隣により COR の低い部分があるが、そのときよりもカウントが大きくなっており、高度との関係が現れていると考えられる。一方、05/09/16 の方であるが、こちらは COR が低い部分と高度が高い部分が重なることはあまり無く、10/22 の青線と同程度の COR の部分に赤線を引いているが、高度がそれほど高くないために、10/22 ほどカウントが増加していないことが分かる。

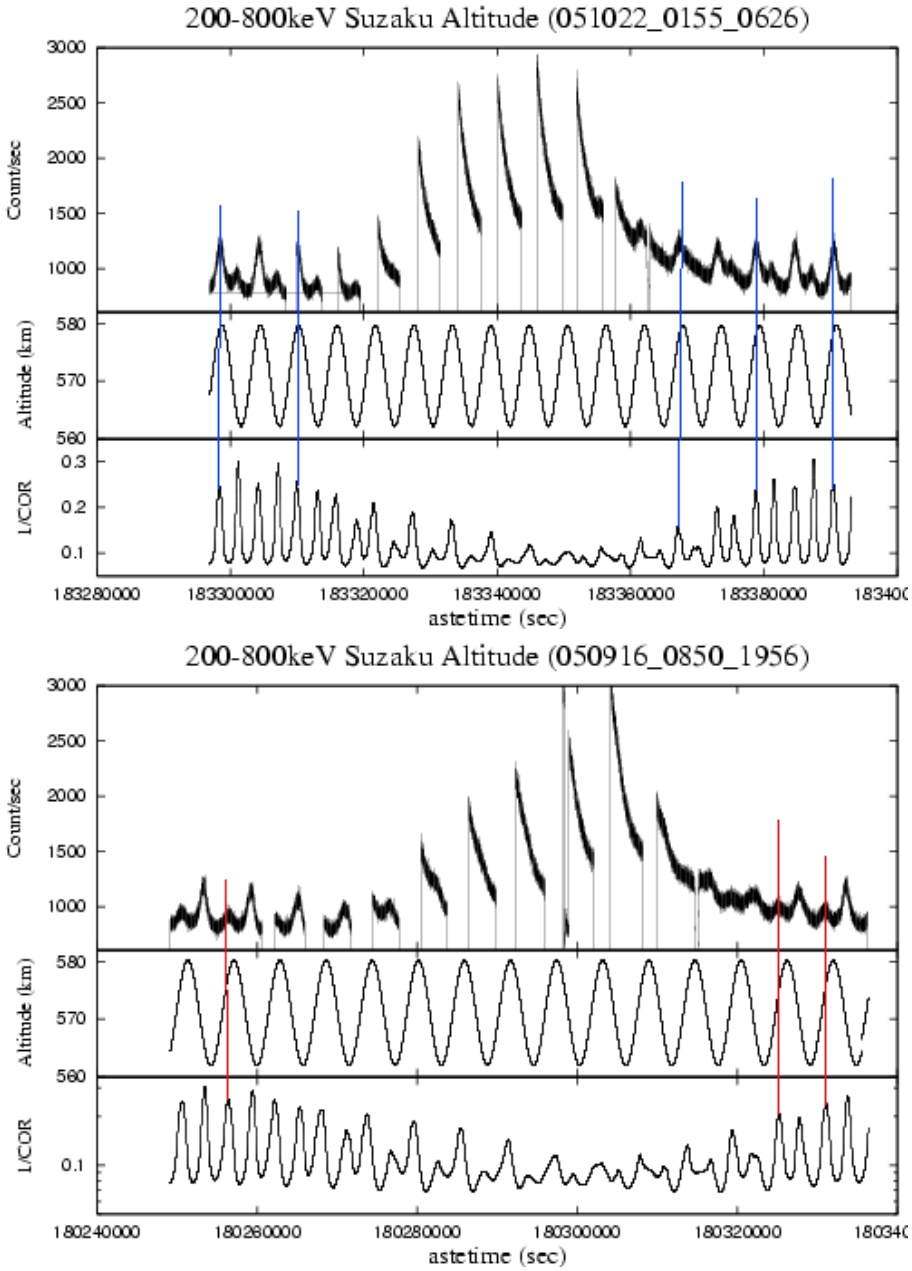


図 4.44: カウントと COR と衛星高度の比較　　下：2005/09/16、上：2005/10/22

第5章　まとめ

今回、HXD-WAM のバックグラウンドについてその変動の様子やバックグラウンド源となるものについて解析を行った。そこで分かったこととしては

1. 200 keV 未満の低エネルギー側では Cutoff Rigidity や平均カウントからは説明できない部分があり、それについては大気ガンマ線の影響が見えていると考えられる。
2. 200 keV 以上の高エネルギー側については Cutoff Rigidity と平均カウントを用いたモデルで良く合う。

の 2 点がある。低エネルギー側に関しては、Cutoff Rigidity と大気ガンマ線の影響を組み合わせたモデルで良く合うものもあるが、まだ、うまくモデルと合わないものも存在し、それについてはさらに解析を進める必要がある。現在考えている方法としては、大気ガンマ線の影響をいま用いているようなステップ関数ではなく、WAM と地球との角度の関数で表すやり方がある。この手法をとることで、大気ガンマ線の影響を受ける部分の急激な段差を解消し、また、現在あまりあっていない部分もより合うようになるのではないかと期待している。

5.1　今後の課題

5.1.1　WAM4 面のカウントの違い

§4.6.3 で見たように、WAM の 4 面のカウントを比較すると同じ時間帯でもカウントに違いが現れていることが分かった。§4.6.3 ではこのカウントの違いは粒子の到来方向に関係すると考えた。そこで粒子の方向に関係がありそうなものとして地球磁場とカウントとの関係を見てみたが、特に相関があるようには見えなかった。そのため、地球磁場以外に WAM の各面に影響を与えるものがあるのか詳細な解析を続ける必要がある。

5.1.2　解析環境の整備

今回整備した解析マシン群は現在マスター 1 台+サブ 9 台という構成で稼働中であるが、PC クラスタとしてはまだ不十分である。また、全機稼働させるには設置する部屋の電源環境の整備などを待つ必要があるため、いますぐに全てを稼働させることは無理である。この間に現在残っている課題を解決することにする。具体的には

解析用 PC クラスタとして整備すること
より使いやすいユーザー環境の整備

の 2 点がある。

クラスタの整備としては、クラスタソフトウェアのインストールは終了しているが、性能を発揮させるためのプログラムを組む必要がある。このプログラムについての学習を進め、自分でクラスタ用の解析プログラムを作成できるようにする。

また、ユーザー環境の整備については、各ユーザー用のホームディレクトリの設定や各マシンへのログイン方法などについて見直すことを考えている。

残った問題を解決することでより使いやすく快適な解析環境を構築することを目指す。

謝辞

本研究を行うにあたって、様々な御指導をしてくださった大杉先生、深沢先生に感謝致します。特に深沢先生には基本的な知識から解析の道筋についても的確な助言を頂き、深く感謝しています。また、WAM に関する情報やプログラムの作成の面では大野さんに幾度もお世話になり、大変助かりました。心よりお礼申し上げます。そして日々の活動において、研究面のみならずそのほかの面でも支えてくださった 4 年生はじめ研究室のみなさまや、事務の方々に心より感謝致します。

References

[1] 「すざく」Web ページ　http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/

[2] HXD-WAM Web ページ
http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/research/HXD-WAM/WAM-GRB/

[3] 科学衛星 Astro-E2 実験報告書 (第 2 分冊)
宇宙科学研究本部 データセンター

[4] The Suzaku Technical Description
Institute of Space and Astronautical Science (ISAS/JAXA) and the Laboratory for High Energy Astrophysics NASA/Goddard Space Flight Center

[5] 大野 雅功　2004 年度 修士論文 (広島大学)

[6] 川添 哲志　2003 年度 修士論文 (広島大学)

[7] 平澤 歩　2004 年度 卒業論文 (広島大学)

[8] Hayashida et al. 1989,PASJ,41,373

[9] J.C. Ling et al. 2000,ApJS,127,79

[10] S.E. Shaw et al. 2002,astro-ph/0211424 v1

[11] B.A.Harmon et al. 2001,astro-ph/0109069 v1

[12] ROSAT Web ページ　http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/

[13] BATSE Web ページ　http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/

[14] Linux で並列処理をしよう 石川 裕 ほか 著，共立出版

[15] PC Cluster Consortium　http://www.pccluster.org/

[16] 理化学研究所 情報基盤センター　http://accc.riken.jp/index.html

[17] IT 用語辞典 e-Words　http://e-words.jp/