

「ひとみ」硬X線イメージャの
軌道上バックグラウンド評価

Estimation of non-X-ray background in orbit
with Hitomi hard X-ray imagers

東京大学大学院
理学系研究科 物理学専攻
馬場・中澤研究室

鈴木寛大

平成30年1月25日

概要

宇宙の高エネルギー現象の解明には X 線衛星が活躍しており、ブラックホールへのガス降着や超新星爆発により生成する高温プラズマなどの興味深い現象が理解されてきた。だが、天体からの光子が典型的にべき関数型に減少していく 10 keV 以上の硬 X 線帯域では検出器バックグラウンド (NXB) が観測感度を制限している。将来の衛星に向けた高感度な観測の実現には、衛星軌道上における NXB の理解と適切な対策による除去が必須である。

NXB の起源は主に一次宇宙線の高エネルギー陽子や太陽風の電子、大気中で二次的に生成する中性子、光子 (Albedo 光子) である。中でも中性子由来の成分は理解が浅く、電荷を持たないためその除去も難しいことから、今後、高感度な検出器を実現する際の最後の壁になると考えられている。中性子のフラックスは大気に侵入する一次宇宙線陽子のフラックスに比例すると考えられるため、軌道上の中性子成分の強度は宇宙線陽子の強度の空間分布を反映する。ただし、100 keV を超えるガンマ線帯域で顕著になる Albedo 光子も大気中で宇宙線陽子をもとに生成するので同様の分布を示し、これに由来する成分と中性子成分はよく似た挙動を示すと考えられる。

本論文では中性子成分の理解を目指し、2016 年に約 2 週間運用された「ひとみ」X 線衛星の硬 X 線撮像分光器 (HXI) が観測した NXB を詳細に調べた。HXI は 5 層の半導体を重ねた形状の主検出器を持ち、各層でのスペクトルを比較することで NXB の各成分を分離することが可能である。軌道上陽子や電子に由来する成分は比較的よく調べられているため、本論文では特に、中性子成分以外の影響を受けにくい 2-4 層目の観測データに着目し、軌道上での NXB カウントレートの空間分布、エネルギースペクトルなどを調べた。

中性子以外の NXB 成分の寄与を抑えるようデータセレクションを施すと、NXB 強度は宇宙線陽子の強度とおおむね比例する空間分布をもち、確かに中性子、Albedo 光子由来の成分 (相関成分) が主であることが確認できた。すなわち、荷電粒子に由来する NXB はよく除去できたと言える。さらに、相関成分のみを抽出するため、軌道上での宇宙線陽子の強度が高い時間帯と低い時間帯それぞれのスペクトルを引き算したスペクトル (差分スペクトル) を作成した。また、差分スペクトルをスケールして平均 NXB スペクトルから引き算することで、宇宙線陽子のカウントレートと相関しない成分 (不変成分) を見積もることができた。宇宙線陽子の強度にしたがった NXB スペクトルの変化は、ここで求めた差分スペクトルをスケールしたものと不変成分スペクトルでよく説明することができた。最後に、打ち上げ前になされた HXI チームによる NXB のシミュレーション結果と本研究で得た差分スペクトル、不変成分スペクトルを比較したところ、おおまかな傾向は一致するものの、エネルギー帯域によっては大きく異なっていることが示され、シミュレーションの改善点を抽出できた。今後は本論文で得られた知見を生かして NXB 中性子成分のシミュレーション精度を 10% 程度まで高めることで、将来衛星のシールド設計に反映したい。

目次

第1章	X線天文学の背景と本研究の目的	1
第2章	衛星搭載の硬X線検出器	3
2.1	「ひとみ」衛星搭載の硬X線撮像分光器 (HXI)	3
2.1.1	HXIの主検出器	5
2.1.2	パッシブシールド	5
2.1.3	アクティブシールド	6
2.1.4	宇宙線モニタ	7
2.1.5	較正用線源 ^{241}Am	7
2.1.6	HXIのイベントセレクション	7
2.2	NuSTARの硬X線検出器	8
2.3	次期X線衛星FORCEの硬X線検出器	9
第3章	衛星軌道上でのX線バックグラウンド	11
3.1	宇宙からの粒子を起源とするバックグラウンド (NXB)	11
3.1.1	検出器まわりの放射化 (陽子起源バックグラウンド)	12
3.1.2	電子バックグラウンド	13
3.1.3	中性子バックグラウンド	15
3.1.4	二次宇宙線光子 (Albedo 光子) バックグラウンド	16
3.2	宇宙背景X線放射 (CXB)	16
第4章	BGO アクティブシールドの有効性の測定	19
4.1	目的と手段	19
4.2	使用したデータ	19
4.3	内之浦上空でのNXBスペクトル比較	19
4.4	NXBスペクトルの解釈	21
4.5	まとめ	23
第5章	DSSD 2-4のNXBの基礎調査	24
5.1	目的と手段	24
5.2	使用したデータ	24
5.3	NXBカウントレートの空間分布	24
5.4	NXBスペクトル	25
5.5	北西の特にカウントレートが高い領域でのNXB起源	27
5.6	放射化成分の寄与	29

5.7	まとめ	32
第6章	DSSD 2-4 NXB の中性子成分の理解	36
6.1	目的と手段	36
6.2	使用したデータ	36
6.3	この章での解析の進め方	36
6.4	DSSD 2-4 と宇宙線モニタのカウントレート (CR rate) の相関	37
6.5	CR rate の大きさの違いによる DSSD 2-4 スペクトルの変化	41
6.6	DSSD 2, 3, 4 のスペクトル比較	41
6.7	エネルギー帯域ごとの DSSD 2-4 と CR rate の相関	43
6.8	CR rate と相関する成分 (相関成分) としない成分 (不変成分) の抽出	46
6.9	衛星の姿勢の違いによる DSSD 2-4 スペクトルの変化	47
6.10	相関成分と不変成分のスペクトルによるデータの再現	48
6.11	シミュレーション結果との比較	50
6.12	まとめ	56
第7章	まとめと今後の研究	58
7.1	まとめ	58
7.2	今後の研究方針	59
付録A	BGO イベント中の相関成分	62

目次

1.1	超新星残骸 HB 21 の電波と GeV ガンマ線イメージ	2
2.1	「ひとみ」 X 線衛星の概観	4
2.2	HXI の概観	4
2.3	DSSD の模式図	5
2.4	NuSTAR の主検出器	9
2.5	NuSTAR の主検出器を取り囲む CsI アクティブシールド	9
3.1	地球のまわりの地磁気の様子	12
3.2	HXI 搭載 CdTe DSD の放射化スペクトルのシミュレーション結果	13
3.3	DEMETER 衛星が観測した軌道上電子カウントレートの空間分布	14
3.4	「すぎく」宇宙線モニタが観測した軌道上での宇宙線カウントレートの空間分布	15
3.5	2005 年時点での軌道上での COR の大きさの分布	16
3.6	入射光子による二次蛍光輝線の模式図	17
3.7	軌道上での各バックグラウンド粒子の平均エネルギースペクトル	18
4.1	通常観測と地食の模式図	20
4.2	内之浦上空での全 blanksky 中の cleaned イベントとアクティブシールドの反同時係数で除去されたイベント (BGO イベント) のスペクトル比較	21
4.3	内之浦上空での全地食中の cleaned イベントと BGO イベントのスペクトル比較	22
4.4	内之浦上空での全 blanksky と全地食での DSSD 各層の BGO イベントのスペクトル	22
5.1	全 blanksky での各層のカウントレートの空間分布	25
5.2	全地食での各層のカウントレートの空間分布	26
5.3	宇宙線モニタが観測した軌道上陽子カウントレート平均の空間分布 (HXI1, 2 の平均)	26
5.4	全 blanksky での各層のスペクトル	27
5.5	全地食での各層のスペクトル	27
5.6	全地食での SAA2 領域を除いたカウントレート分布	28
5.7	全地食の SAA2 を除く領域での各層のスペクトル	28
5.8	全 blanksky、北西の非常に明るい領域での各層のスペクトル	30

5.9	全 blanksky、北西の非常に明るい領域とスクリーン後 NXB 平均との差分スペクトル	30
5.10	全 blanksky、北西の非常に明るい領域での DSSD 2, 3, 4 それぞれとスクリーン後 NXB 平均との比のスペクトル	31
5.11	全 blanksky の北西の非常に明るい領域での各層のイメージ	31
5.12	全 blanksky の T_SAA_core < 6 ks の時間帯でのカウントレート分布	32
5.13	全地食の T_SAA_core < 6 ks の時間帯でのカウントレート分布	33
5.14	全 blanksky の T_SAA_core > 6 ks の時間帯でのカウントレート分布	33
5.15	全地食の T_SAA_core > 6 ks の時間帯でのカウントレート分布	33
5.16	全 blanksky の T_SAA_core で分けたそれぞれのスペクトル	34
5.17	全 blanksky の T_SAA_core で分けたそれぞれのスペクトル (50 keV 以上の拡大図)	34
5.18	全 blanksky の T_SAA_core で分けたそれぞれのスペクトルとスクリーン後 NXB 平均との比	35
6.1	全 blanksky の DSSD 2-4 と CR rate, DSSD 1, CdTe DSD カウントレートの相関	38
6.2	全地食の DSSD 2-4 と CR rate, DSSD 1, CdTe DSD カウントレートの相関	38
6.3	電子成分と放射化成分が強いイベントを除いた全 blanksky での各層のカウントレートの空間分布	39
6.4	電子成分と放射化成分が強いイベントを除いた全地食での各層のカウントレートの空間分布	39
6.5	全 blanksky _{sel.} の DSSD 2-4 と, CR rate, DSSD 1, CdTe DSD カウントレートの空間分布の相関	40
6.6	全地食 _{sel.} の DSSD 2-4 と, CR rate, DSSD 1, CdTe DSD カウントレートの空間分布の相関	40
6.7	全 blanksky _{sel.} , 全地食 _{sel.} の DSSD 2-4 カウントレートの空間分布の相関	41
6.8	CR rate ごとに抽出した全 blanksky _{sel.} と全地食 _{sel.} の DSSD 2-4 スペクトル	42
6.9	CR rate ごとに抽出した全 blanksky _{sel.} と全地食 _{sel.} の DSSD 2-4 スペクトル (binning を変えたもの)	42
6.10	全 blanksky _{sel.} , 全地食 _{sel.} それぞれでの DSSD 2, 3, 4 それぞれのスペクトル	43
6.11	全 blanksky _{sel.} , 全地食 _{sel.} それぞれでの DSSD 2, 3, 4 それぞれのスペクトル (binning を変えたもの)	43
6.12	全 blanksky _{sel.} におけるエネルギー帯域ごとの CR rate と DSSD 2-4 カウントレートの相関	44
6.13	全地食 _{sel.} におけるエネルギー帯域ごとの CR rate と DSSD 2-4 カウントレートの相関	45
6.14	全 blanksky _{sel.} , 全地食 _{sel.} それぞれにおける CR rate が高い領域と低い領域での DSSD 2-4 スペクトルの差分	47
6.15	全 blanksky _{sel.} , 全地食 _{sel.} それぞれにおける DSSD 2-4 イベントのうち CR rate と相関しない成分 (不変成分) のスペクトル	47

6.16	衛星が地球を見込む角 (Elevation) ごとの DSSD 2-4 スペクトル	48
6.17	衛星が地球を見込む角 (Elevation) ごとの DSSD 2, 4 スペクトルとスク リーン後 NXB 平均の比	49
6.18	DSSD 2-4, 全 blanksky _{sel.} の CR rate ごとのスペクトルと、6.8 節で求めた 差分スペクトルをスケールしたものと不変成分スペクトルの和との比較 . .	50
6.19	DSSD 2-4, 地食 _{sel.} の CR rate ごとのスペクトルと、6.8 節で求めた差分ス ペクトルをスケールしたものと不変成分スペクトルの和との比較	51
6.20	DSSD 2-4 の全 blanksky _{sel.} データと各バックグラウンド成分のシミュレー ションスペクトル	53
6.21	図 6.14 の差分スペクトルと、シミュレーションの相関成分スペクトル . . .	53
6.22	図 6.14 の差分スペクトルと、シミュレーションの中性子スペクトル	54
6.23	データとシミュレーションの不変成分スペクトル	54
6.24	データと、シミュレーションの不変成分に Albedo 光子を加えたスペクトル	55
6.25	データとシミュレーションのスペクトル全体の比較	55
6.26	データと、Albedo 光子を除いたシミュレーションのスペクトル全体の比較	55
A.1	全 blanksky での BGO イベントのカウンtrate の空間分布	62
A.2	全地食での BGO イベントのカウンtrate の空間分布	63
A.3	DSSD 2-4 BGO イベントのカウンtrate と CR rate の空間分布の相関 .	64
A.4	全 blanksky _{sel.} における CR rate の大きさごとの BGO イベントのスペクトル	64
A.5	全 blanksky _{sel.} におけるエネルギー帯域ごとの CR rate と DSSD 2-4 BGO イベントのカウンtrate の相関	65
A.6	全 blanksky _{sel.} における CR rate が高い領域と低い領域それぞれの BGO イ イベントのスペクトルの差分	66
A.7	Elevation ごとの DSSD 2-4 BGO イベントのスペクトル	66

表 目 次

2.1	HXI 検出器の基本性能	6
2.2	代表的な無機シンチレータの特性	7
2.3	本研究で扱った主なHXIの検出信号の種類	8
2.4	NuSTARの基本性能	9
2.5	FORCE衛星が目指す基本性能	10
3.1	CdTeの放射化を起源とする主なX線帯域の輝線	14
4.1	HXIの観測ログ	20
4.2	内之浦上空でのBGOイベントとcleanedイベントのカウントレート比較	21
5.1	データセレクションなしのDSSD 2-4, CdTe DSD, DSSD 1それぞれの平均カウントレート	25
6.1	各エネルギー帯域における不変成分のカウントレートと占める割合	45
6.2	DSSD 2-4データのスペクトルの性質	57

第1章 X線天文学の背景と本研究の目的

宇宙には、地上ではなし得ない高エネルギー現象が起こる現場が数多く存在する。ブラックホールや中性子星に降着するガス、中性子星表面からの黒体放射、超新星爆発がつくる高温プラズマ（超新星残骸）、銀河団を覆うプラズマなどが代表的である。このような天体では物質が1000万度という高温に達し、熱制動放射や輝線放射の過程により、主にX線と呼ばれる ~ 0.1 keV から ~ 100 keV のエネルギーをもつ電磁波を放射する [1]。このため、宇宙での高エネルギー現象の理解には、X線観測が強い武器となる。

宇宙からのX線は地球大気により吸収されるため、地上では観測できず、高い高度での観測が必須である。太陽系外ではじめてX線源が発見されたのはRicardo Giacconiらのロケット実験による [2]。この天体はさそり座 X-1 と呼ばれる低質量星と中性子星の連星系であった。以降、X線観測にはロケットや気球が用いられてきたが、ロケットは観測可能な時間が数分と短く、気球はX線吸収量を十分減らせる高度に達することが難しいなどの問題点があった。これらを解決したのがX線天文衛星である。世界初のX線天文衛星はNASAによるUhuruであり、打ち上げは1970年であった。それ以降、各国から10機以上の衛星が打ち上げられ、より長時間にわたる高感度な観測が行われてきた。現在活躍しているX線衛星は、軟X線帯域 (< 10 keV) に感度をもち角分解能に優れたChandra [3] や硬X線帯域 (> 10 keV) の感度に優れたNuSTAR [4] (どちらもアメリカ航空宇宙局: NASA)、軟X線帯域に大有効面積を誇るXMM-Newton [5] (欧州宇宙機関: ESA) が挙げられる。日本は「はくちょう」(1979年) [6], 「てんま」(1983年) [7], 「ぎんが」(1987年) [8], 「あすか」(1993年) [9], 「すぎく」(2005年) [10], 「ひとみ」(2016年) [11] と6機の衛星を開発したX線天文学のリード国である。現在も、残念ながら運用停止となった「ひとみ」衛星の代替機として軟X線帯域を世界最高のエネルギー分解能で観測するXARM (X-ray Astronomy Recovery Mission) や主に硬X線帯域を「ひとみ」を超える感度で観測する次世代の衛星FORCE (FOcusing Relativistic universe and Cosmic Evolution) といった計画が進められている。

X線衛星の活躍により、数々の高エネルギー現象が発見され、解明されてきた。例えば、ブラックホールと恒星の連星系や銀河中心の超巨大ブラックホールにおけるガス降着の描像、星間プラズマや銀河団プラズマ中の原子組成、超新星残骸プラズマ中の衝撃波による荷電粒子の加速メカニズムなどが興味深い。私は中でも、超新星残骸での粒子加速に特に興味をもち、加速現場プラズマのX線観測というアプローチからその仕組みを探っている [12]。図1.1に、私が解析している超新星残骸HB 21のWENSS衛星による92 cm電波イメージ (左) [13] とFermi衛星によるGeVガンマ線イメージ (右) [14] を示す。電波ではTeV以上のエネルギーまで加速された電子のシンクロトロン放射が見え、GeVガンマ線ではGeV以上まで加速された陽子が近傍の分子雲中で原子核反応を起こした際に生成する π^0 中間子の崩壊によるガンマ線放射が見える。どちらも確かに高エネルギーまで荷

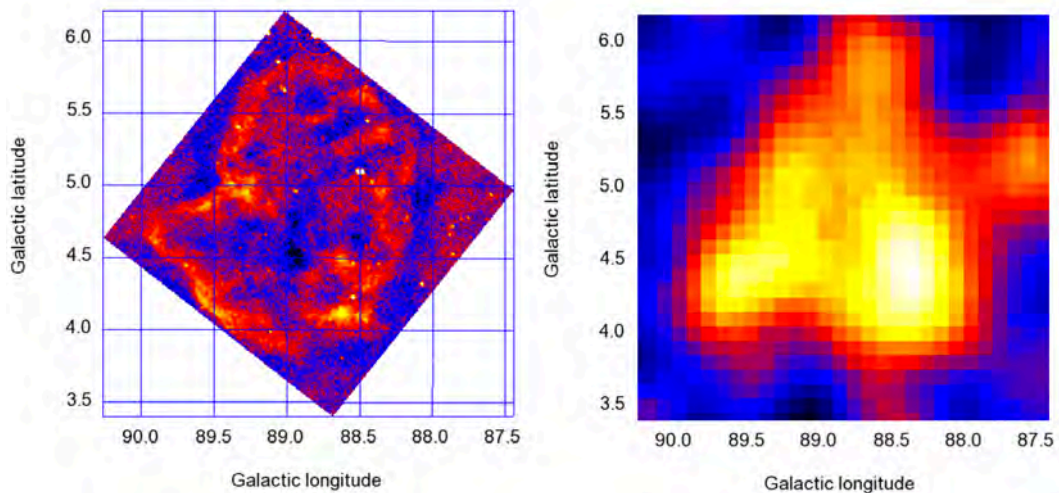


図 1.1: 超新星残骸 HB 21 の電波イメージ (左) [13] と GeV ガンマ線イメージ (右) [14]

電粒子が加速されていることを示しており、X線観測からはその加速現場であるプラズマの温度や密度、電離状態を知ることができるため、プラズマの状態と粒子加速の関係性を探ることができる。

だが、超新星残骸のような大きく広がった、しかも表面輝度が小さい放射の観測では、天体からのX線にバックグラウンド信号が大量に混ざり、観測感度が制限されてしまう。また点源であっても、天体からの放射強度は典型的にエネルギーのべき乗に比例して下がっていくため、硬X線帯域ではバックグラウンドレベルが感度を決める。したがって、硬X線帯域で研究対象となるサンプル数を増やし、議論の精度をより上げていくには、バックグラウンドの正確な見積もりと低減の工夫が必須である。

本研究は、「ひとみ」衛星に搭載された硬X線撮像分光器が約2週間の観測により得た世界最高感度のデータをあらゆる視点から精査することで、X線衛星の検出器バックグラウンドを詳細に理解することを目的とする。

第2章 衛星搭載の硬X線検出器

本研究での衛星軌道上バックグラウンドの解析には、「ひとみ」X線衛星による観測データを用いた。ここでは「ひとみ」搭載の硬X線撮像分光器 (Hard X-ray Imager: HXI) やシールドなどの性能について説明した上で、硬X線観測の例として現在運用中の硬X線観測衛星 NuSTAR, 次期X線衛星 FORCE それぞれの硬X線検出器について紹介する。

2.1 「ひとみ」衛星搭載の硬X線撮像分光器 (HXI)

「ひとみ」は、2016年2月に打ち上げられた日本で6番目のX線天文衛星である。図2.1に「ひとみ」衛星の概観を示した。この衛星には軟X線望遠鏡 (Soft X-ray Telescope: SXT) と硬X線望遠鏡 (Hard X-ray Telescope: HXT) がそれぞれ2台ずつ搭載され、SXTの焦点面には軟X線撮像分光器 (Soft X-ray Imager: SXI) と軟X線分光器 (Soft X-ray Spectrometer: SXS) が1台ずつ、HXTの焦点面にはHXIが2台置かれた。さらに望遠鏡を持たない軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector: SGD) も2台搭載し、合計で6台の検出器が載せられていた。残念ながら「ひとみ」は打ち上げから約2ヶ月で運用停止となってしまった。

図2.2にHXI検出器全体の断面図を示す[16]。「ひとみ」衛星には同じ設計のHXIが2つ搭載されており、それぞれHXI 1, HXI2と命名されている。HXIの最大の特徴は5–80 keVにおいて世界最高レベルの感度で撮像分光観測が可能なことである。HXTはブラッグ反射を利用した「多層膜スーパーミラー」を使った望遠鏡であり、以前の「すざく」衛星では不可能だった硬X線の集光ができるようになったことで高い感度を実現できる。1台のHXTの有効面積は174 cm²、角分解能 (Half Power Diameter: HPD) は $\sim 1.9'$ である (どちらも30 keVでの値) [11]。さらにHXIの主検出器は5層の薄型半導体の両面ストリップ検出器 (Double-sided Strip Detector: DSD) からなる。このため、撮像により天体の信号とバックグラウンドの弁別が容易であるのに加え、天体由来のX線を検出できる最小限の薄さにすることで、一般に検出器体積に比例するバックグラウンドを抑制している。主検出器を囲むシールドには、電離損失や光電吸収によりバックグラウンド粒子を止めるパッシブシールドに加え、アクティブシールドという技術も使われている。アクティブシールドとはシールドが信号を検出した直後は主検出器のイベント取得を一時的に止めるという反同時係数の方法である。これらの技術により、HXIの観測感度は「すざく」衛星搭載の硬X線検出器と比較して30 keVで ~ 40 倍という躍進を達成した[11]。

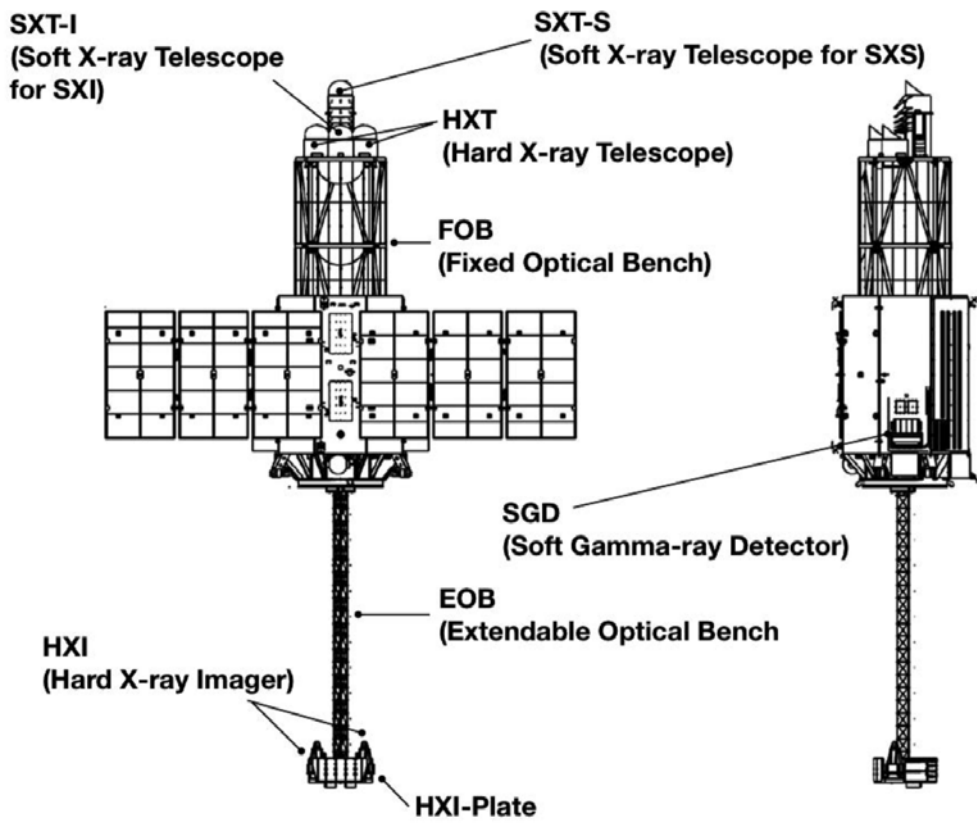


図 2.1: 「ひとみ」 X線衛星の概観 [11]。

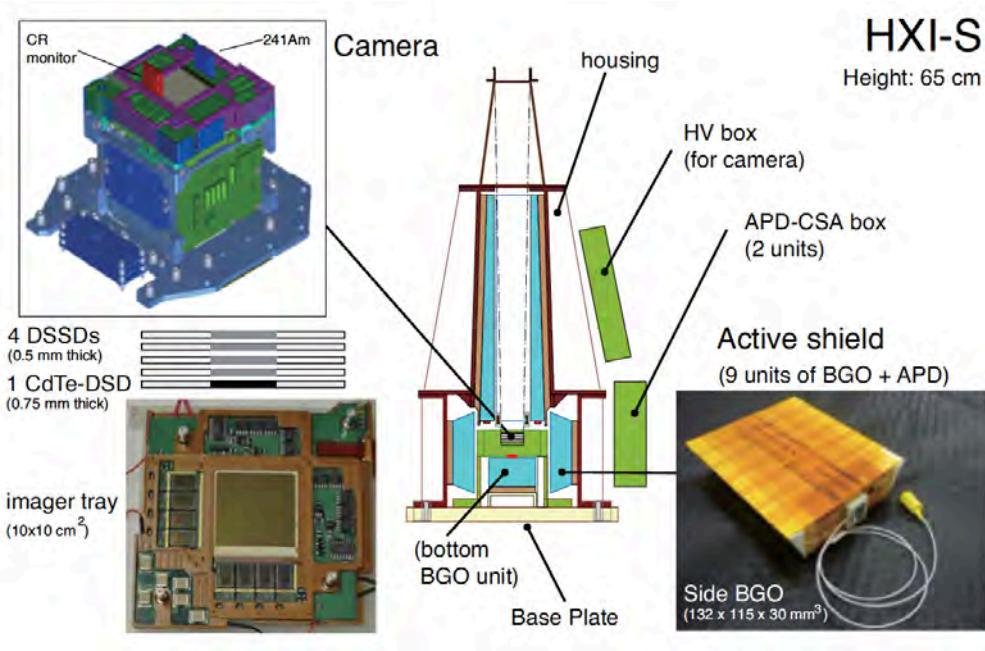


図 2.2: 「ひとみ」 HXI の概観 [16]。

2.1.1 HXIの主検出器

図2.2左が主検出器の拡大図である。HXI主検出器の上部4層は両面Siストリップ半導体検出器 (Double-sided Silicon Strip Detector: DSSD)、下部1層がCdTe DSDである。DSSDは上層からそれぞれDSSD 1, DSSD 2などと命名されている。図2.3にDSSDの模式図を示した[17]。DSSDはn型Siの両面にストリップ状のp⁺とn⁺型Siをそれぞれ直交するようにpn接合したもので、各ストリップが独立なダイオードとなるため位置分解が可能である。それぞれの面は128本のストリップからなるため、128 × 128ピクセルという空間分解能をもつ。空乏層にX線光子が入射し電子正孔対をつくると、印加してある電圧により電子は最も近傍のn⁺型ストリップに引き寄せられ、逆に正孔はp⁺型ストリップに移動する。それぞれどのストリップに信号を出したかが分かるため、入射光子が相互作用した2次元座標を知ることができる。CdTe DSDもDSSDと原理は同じだが、p⁺型とn⁺型Siの代わりにPtとAlストリップがそれぞれ使われている。各層は信号の読み出し回路 (ASIC: Application Specific Integrated Circuit) とつながっている。ASICのシェイパーの動作範囲はDSSDで120 keV以下、CdTe DSDで150 keV以下である。80 keV以上の帯域はHXTがカバーできないため天体由来の信号を集光することはできないが、バックグラウンド信号のデータを用いることはできる。

HXIの基本性能を表2.1に示す。観測視野の大きさに対して角分解能は十分小さい。検出素子の厚さはDSSD1枚が500 μm、CdTe DSDが750 μmであり、< 25 keVの低エネルギー光子は主にDSSDが検出し、それ以上の高エネルギー帯域はCdTe DSDがカバーする設計になっている。

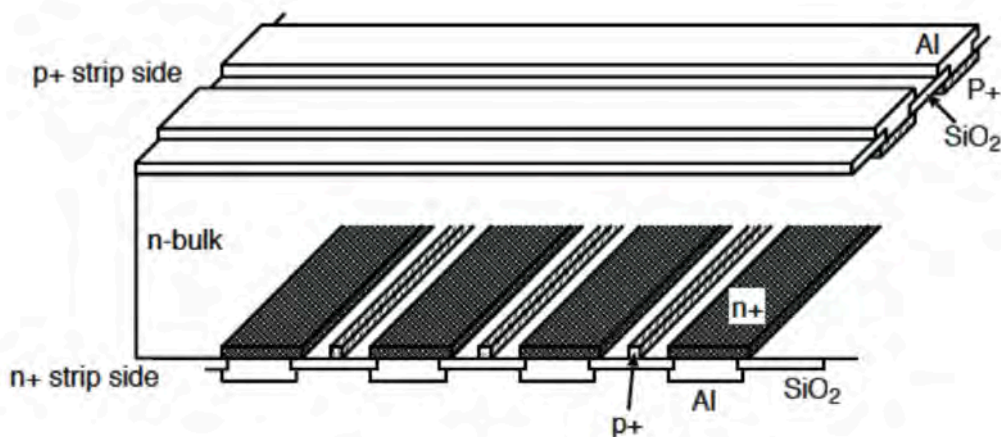


図 2.3: DSSD の模式図 [17]。

2.1.2 パッシブシールド

パッシブシールドは、バックグラウンドの荷電粒子と光子を相互作用によって止め、主検出器まで到達しないことを目的とする。物質が電離損失で奪えるエネルギーは Z 、光電吸収の断面積は $\sim Z^4$ (Z は原子番号) にそれぞれ比例するため[19]、パッシブシールドに

表 2.1: HXI 検出器の基本性能 [11][15]。

エネルギー帯域	5–80 keV
視野	9'.17 × 9'.17
角分解能	~ 2' (HPD)
有効面積	> 300 cm ² at 30 keV
撮像面積	32 mm × 32 mm
位置分解能	250 μm
エネルギー分解能	< 2 keV at 60 keV (FWHM [†])
時間分解能	25.6 μs
運用温度	-25 °C

[†] Full Width at Half Maximum

は原子番号が大きい元素が適している。HXI にはシールドとして主に BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) 結晶が用いられた (図 2.2 中央に青で示されている) が、これはパッシブシールドとアクティブシールド両方の役割を兼ねている。純粋なパッシブシールドとしては、検出器の筐体 (housing; 図 2.2 中央) の内側や BGO シールド同士の間隙に 0.3 mm 厚の Pb が配置されている。パッシブシールドは主検出器の周囲に配置するだけで機能するため簡単だが、軌道上の宇宙線粒子は GeV 以上のエネルギーをもつものが多く、視野外からのガンマ線光子も MeV を超えるものが多いため、これらを完全に阻止することは困難である。

2.1.3 アクティブシールド

パッシブシールドの問題点を補完するのにとても有効なのがアクティブシールドである。アクティブシールドは、図 2.2 中央のように主検出器の周りを別のシンチレータで囲み反同時計数をとることで、視野外からのバックグラウンドの多くを除去する方法である。この場合はシールドでバックグラウンド粒子を止める必要がなく、相互作用さえすれば良いため、パッシブシールドと比較して軽く、小さくできるという大きな利点がある。HXI では、底面に 1 個、主検出器の側面に 4 個、さらにその上に 4 個の BGO シンチレータが置かれており、井戸型のアクティブシールドの中に主検出器が配置された形になっている。主検出器から見ると、視線方向以外のどの方向も厚さ 2 cm 以上の BGO で覆われているという設計になっている。反同時計数の VETO 信号のゲート幅は 5 μs 以下である。

シンチレータは主にプラスチックシンチレータ (有機シンチレータ) と無機シンチレータがあるが、一般に有機シンチレータは原子番号が小さくガンマ線に対する断面積が小さいため、「すぎく」、「ひとみ」などのアクティブシールドには無機シンチレータが用いられてきた。中でも特に適しているのは BGO シンチレータであり、HXI でもこれが用いられた。アクティブシールドが主に要求する性質は、ガンマ線に対する反応断面積が大きいこと、蛍光の減衰時間が短いことなどが挙げられる。蛍光の減衰時間は短いほど反同時計数のための VETO 信号のゲート幅を短くできるので、デッドタイムを低減して効率を上げることができる。図 2.2 に代表的な無機シンチレータの特徴を示す [19]。BGO は、Bi

の原子番号が83と大きいことに加え密度も大きいことに加え、ガンマ線の検出効率が他のシンチレータと比較して非常に高い。

表 2.2: 代表的な無機シンチレータの特性 [19]

結晶*	密度 (g cm ⁻³)	屈折率	蛍光波長 (nm)	減衰時間 (μs)	潮解性
NaI(Tl)	3.67	1.85	410	0.23	あり
CsI(Tl)	4.51	1.80	565	1.0	若干
BGO (Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂)	7.13	2.15	480	0.30	なし
ZnS(Ag)	4.09	2.36	450	0.20	なし

* 括弧内は添加されている活性化物質を表す。

2.1.4 宇宙線モニタ

図 2.2 左上のように、各 HXI の主検出器の近くには単体で置かれた Avalanche Photo Diode が置かれており、CR monitor (宇宙線モニタ) の役割を担っている。宇宙線モニタは通過する荷電粒子の数を記録するデバイスである。検出器は 10×10 mm² の面積を持ち、厚さ 1 mm のプラスチック (ポリエーテルエーテルケトン: PEEK) で覆われている。このため、100 keV 程度の電子は電離損失で止まってしまうため計数されず、主に陽子を数えることができる。したがって、宇宙線モニタを使用することで軌道上陽子カウントレートの空間分布が直接的に測定できる。

2.1.5 較正用線源 ²⁴¹Am

図 2.2 左上のように、各 HXI の宇宙線モニタの向かい側には較正用線源である ²⁴¹Am が設置してある。これは 13.9 keV, 59.5 keV など硬 X 線帯域に輝線を出すため、検出器のゲイン較正に用いられる。崩壊レートは ~4 Bq である。²⁴¹Am はプラスチックシンチレータに覆われており、崩壊する際に放出される α 粒子を捉えて同時計数を行うことで ²⁴¹Am 由来の信号を弁別することができる。

2.1.6 HXI のイベントセレクション

ここでは、HXI で観測される信号の種類について説明する。HXI が検出する各イベントには、検出したエネルギーや座標、時間の他に、DSSD, CdTe DSD のどの layer が信号を受けたか、BGO アクティブシールドの VETO 信号が出たか、pseudo 信号か否か、²⁴¹Am からの信号か否か、などの情報がフラグとして記録される。

本研究で扱う、HXI が検出した信号の種類と、それぞれに対応する主な条件を表 2.3 に示す。cleaned イベントは通常の解析に用いる、視野方向からの信号である。pseudo イベ

ントは、dead time の補正のために検出器内部で発生させている 2 Hz の信号である。dead time とは、BGO が出す VETO 信号のゲートのように信号が検出できない時間のことで、HXI 検出器では 10% 程度である。本研究では、注目する信号のカウントレートを求める際、ある時間や座標区間内の注目する信号の数を (pseudo イベントの数) / 2 で割ることで、検出器の dead time を補正したカウントレートを求めている。BGO イベントは、BGO アクティブシールドが出した VETO 信号のゲート幅の間に HXI が信号を得たイベントである。これはすなわちアクティブシールドが反同時計数で除去するバックグラウンド信号であり、BGO イベントと cleaned イベントのカウントレートを比較すればアクティブシールドがどれほどの効率でバックグラウンド信号を除去できているのか測定できる。

表 2.3: 本研究で扱った主な HXI の検出信号の種類

信号の種類	主な条件
全イベント共通	<ul style="list-style-type: none"> • 1 つの layer のみ信号を検出 • DSD の両面でそれぞれ 1 本、または隣接する 2 本のストリップで検出 • DSD の両面で検出したエネルギーが等しい • ^{241}Am 由来の信号でない
cleaned イベント	<ul style="list-style-type: none"> • BGO の VETO 信号なし* • pseudo 信号由来のトリガでない
pseudo イベント	<ul style="list-style-type: none"> • pseudo 信号由来のトリガである
BGO イベント	<ul style="list-style-type: none"> • BGO の VETO 信号あり† • pseudo 信号由来のトリガでない

* FASTBGO フラグ, HITPAT フラグがどちらも立っていないもの。

† FASTBGO フラグが立ったもの。

2.2 NuSTAR の硬 X 線検出器

NASA の硬 X 線観測衛星 NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array) は 2012 年に打ち上げられ、現在も運用されている。NuSTAR の基本性能を表 2.4 に示した。5–80 keV の高エネルギー帯域に対応できる硬 X 線望遠鏡を世界で初めて搭載し、撮像ができるのが強みである。焦点面には Cd, Zn, Te からなる CZT 半導体を用いた主検出器が設置されている。主検出器は図 2.4 のように 32×32 ピクセルの素子が 2×2 に配置され、視野 10' × 10' をカバーしている。衛星にはこの検出器が 2 セット搭載されている。また、図 2.5 に示すように、主検出器は円筒形の CsI シンチレータに囲まれ、アクティブシールドの方法がとられている。衛星は赤道軌道に投入されており、南大西洋異常帯 (SAA; 次章で述べる) を通らないため検出器の放射化 (次章で述べる) によるバックグラウンドを抑えられる。ただし CsI シールドが 1 cm 程度と薄いため、必ずしもバックグラウンドは低くない。

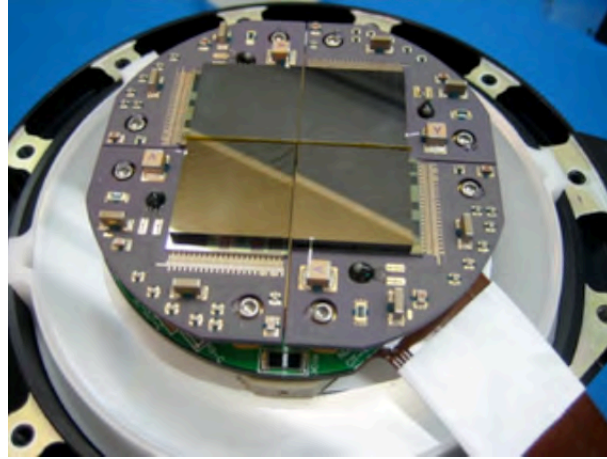


図 2.4: NuSTAR の焦点面に置かれた主検出器 [20]。

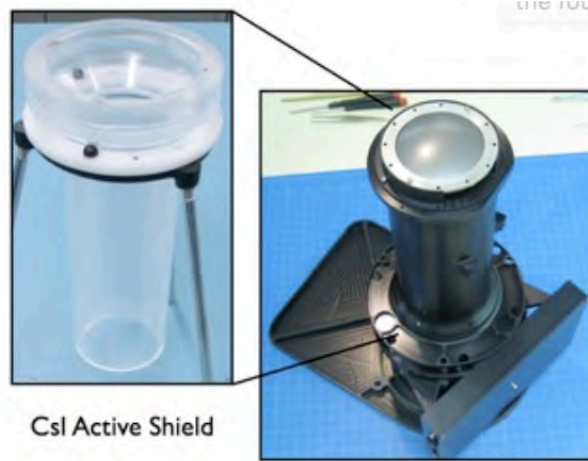


図 2.5: NuSTAR の主検出器を取り囲む CsI アクティブシールド [20]。

表 2.4: NuSTAR の基本性能 [4]。

エネルギー帯域	5–80 keV
視野	10' × 10' at 10 keV
角分解能	54" (HPD)
有効面積	300 cm ² at 30 keV (2セットで)
エネルギー分解能	500 eV at 10 keV (FWHM)
時間分解能	2 μs

2.3 次期X線衛星 FORCE の硬X線検出器

次期X線衛星 FORCE は、2020年代後半の打ち上げを目指す、「ひとみ」HXIの後継となるミッションである。FORCE衛星が目指す基本性能を表 2.5 に示す。最大の強みは、1–80 keV の広い帯域で ~ 10" (HPD) という世界最高の角分解能である。また、「ひとみ」

までの衛星では不可能だった、1つで広帯域の観測ができる検出器の実用化により、軟X線帯域と硬X線帯域でそれぞれ別の望遠鏡と検出器を配置する必要がなくなった。これにより検出器部全体を小型化し、システムをより簡潔にまとめることができる。

FORCE 衛星の主検出器は、HXI と同様に Si や CdTe 半導体の多層構造からなり、また井戸型 BGO アクティブシールドも継承される予定である。だが搭載予定の Si 検出器は DSSD ではなく、SOI (Silicon-On-Insulator) 技術を用いてより高い時間分解能やエネルギー分解能を目指す X 線 CMOS 検出器 (XRPIX) である [21]。CdTe は HXI と同じく DSD が用いられる。

FORCE 衛星では、非常に良い角分解能により視野中の点源をほとんど取り除けるため、宇宙 X 線背景放射 (CXB; 次章で述べる) の影響は「ひとみ」HXI の 10% 以下になると予想される。するとバックグラウンドとして主となるのは荷電粒子を起源とする Non X-ray Background (NXB; 次章で述べる) であり、NXB をどれだけ理解し削減できるかで FORCE の観測感度が決定づけられる。

表 2.5: FORCE 衛星が目指す基本性能。

エネルギー帯域	1–80 keV
視野	$> 7' \times 7'$ at 30 keV
角分解能	$\sim 10''$ (HPD)
有効面積	$> 250 \text{ cm}^2$ at 30 keV
エネルギー分解能	$< 300 \text{ eV}$ at 6 keV (FWHM)
時間分解能	数 $10 \mu\text{s}$

第3章 衛星軌道上でのX線バックグラウンド

硬X線帯域の宇宙観測における検出器感度を上げるためには、衛星軌道上のX線バックグラウンドの理解と適切な対策が不可欠である。X線バックグラウンドの起源となるのは主に宇宙から降り注ぐ荷電粒子と宇宙X線背景放射（Cosmic X-ray Background: CXB）である [22][23]。荷電粒子を起源とするX線バックグラウンドは Non X-ray Background (NXB) と呼ばれる。この他にも、検出器に内在するバックグラウンドとして、検出器の材料がわずかに含む ^{40}K などの放射性同位体が発するX線やガンマ線があるが、それらの寄与は小さいため本論文では詳しくは触れない。以下で上記2つのバックグラウンド成分の特徴や軌道上での空間分布と、本研究で用いた「ひとみ」HXIで観測されたエネルギースペクトルについて述べる。後述の通り、本研究では特にNXBの中性子成分の理解に取り組んだが、ここでは他の成分の特徴についても概説しておく。

3.1 宇宙からの粒子を起源とするバックグラウンド (NXB)

宇宙から来る荷電粒子には2つの種類がある。1つは宇宙空間を満たす高エネルギー粒子線（一次宇宙線）である。一次宇宙線は荷電粒子からなり、その $\sim 90\%$ は陽子である。もう1つは太陽風であり、これもほとんどは陽子からなるが、電子も含まれる。地球で観測される荷電粒子の総量としては、陽子はほとんど宇宙線、電子は太陽風を起源とする。

「すざく」や「ひとみ」などのX線衛星は、高度 ~ 550 kmを略円軌道で周回する。荷電粒子は地磁気にトラップされるため、多くは ~ 1000 km以下には到達せず、GeVを超える高エネルギー宇宙線だけが衛星軌道、さらには高度500km以下の地球大気まで侵入することができる。大気に侵入した一次宇宙線粒子は、

$$p + p \rightarrow p + n + \pi^+, \quad (3.1)$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (3.2)$$

$$p + p \rightarrow p + p + \pi^0, \quad (3.3)$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad (3.4)$$

などの過程を経て μ 粒子、 π 中間子、中性子、光子などを生成する。これらは二次宇宙線と呼ばれ、衛星から見ると地球からの放射になることから Albedo成分とも呼ばれる。図3.1は地球のまわりの地磁気の様子の模式図である [24]。赤と灰色で示した領域が、荷電粒子がトラップされている2層構造の領域（ヴァン・アレン帯）である。赤の領域（内帯）には陽子と電子、灰色の領域（外帯）には電子のみが捕捉されている。地磁気の軸が地球の

中心を通らず、また自転軸に対して傾いているため、一部には陽子と電子がトラップされた内帯が高度400 km以下まで到達してくる領域があり、南大西洋異常帯 (South Atlantic Anomaly: SAA) と呼ばれる。また、電子がトラップされた外帯は、北アメリカなどに衛星高度まで達する領域をもっている。

GeV以上のエネルギーをもつ陽子がHXI内のDSSDおよびCdTe DSD内で直接、電離損失で失うエネルギーは100 keVを超える。したがって、5–80 keVに感度をもつHXIでは直接バックグラウンドになることはない。また、シールドを貫いて検出器に当たったイベントは反同時計数で必ず除去される。ただし、検出器まわりの物質中の原子核と強い相互作用を起こして放射性同位体を生成し (放射化)、その崩壊により遅れて放射される核ガンマ線やX線、 β 線は大いに影響してくる。検出器内部で発生するX線をアクティブシールドの反同時計数で全て除去することはできないからである。一方で、検出器に直接当たってバックグラウンドとなるものには電子と二次宇宙線中性子、光子がある。二次宇宙線粒子の多くは地上に向かうが、一部は逆に上向きに放出され、電氣的に中性であれば電離損失や磁場の影響を受けず衛星高度まで到達しうる。ここでは、以上の成分についてそれぞれ説明する。

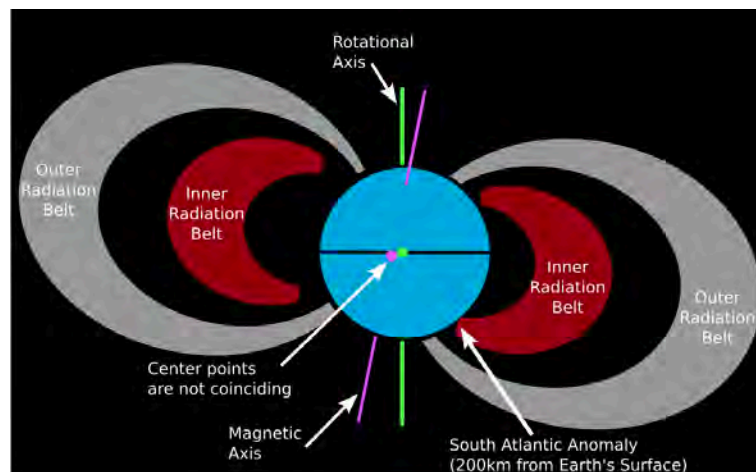


図 3.1: 地球のまわりの地磁気の様子 [24]。赤い領域には陽子と電子が、灰色の領域には電子のみが捕捉されている。

3.1.1 検出器まわりの放射化 (陽子起源バックグラウンド)

HXI 検出器まわりで放射化を起こすのは主に CdTe DSD の Cd, Te と BGO シールド中の Bi, Ge である。図 3.2 に、CdTe DSD で観測される Cd, Te の放射化を起源とする X 線スペクトルのシミュレーション結果を示す [25]。赤線が SAA 通過後 5 ks 以内、青線が SAA 後 6 ks 以上経過後のスペクトルである。表 3.1 に CdTe の放射化を起源とする主要な輝線の起源となる同位体、その半減期と輝線の中心エネルギーを示した。宇宙線陽子が大量に捕捉されている SAA を通過した直後は放射化が激しく、生成した同位体の崩壊に伴う輝線などの増加が特に 25 keV (Cd, Te) と 157 keV (^{122m}In) に見られる。これらの放

放射性同位体の典型的な崩壊時間は1–10 ks であるので、6 ks 以上経過後のスペクトルでは輝線が大幅に減っているのが見て取れる。

Bi や Ge の放射化による輝線や β 線は主に 50 keV 以上のエネルギーをもつため、高エネルギー帯域で断面積が大きい CdTe DSD で主に観測される。Cd の放射化成分も主に CdTe DSD で検出されるが、25 keV のピークなどは DSSD にも影響しうる。その場合、CdTe DSD のすぐ上にある DSSD 4 が最も影響を受けることになる。HXI への放射化の影響についてはシミュレーションとの比較が進められており、実際のジオメトリや軌道上環境を再現する難しさのためスペクトルを完全に再現することはできていないが、大づかみには理解されている [25]。

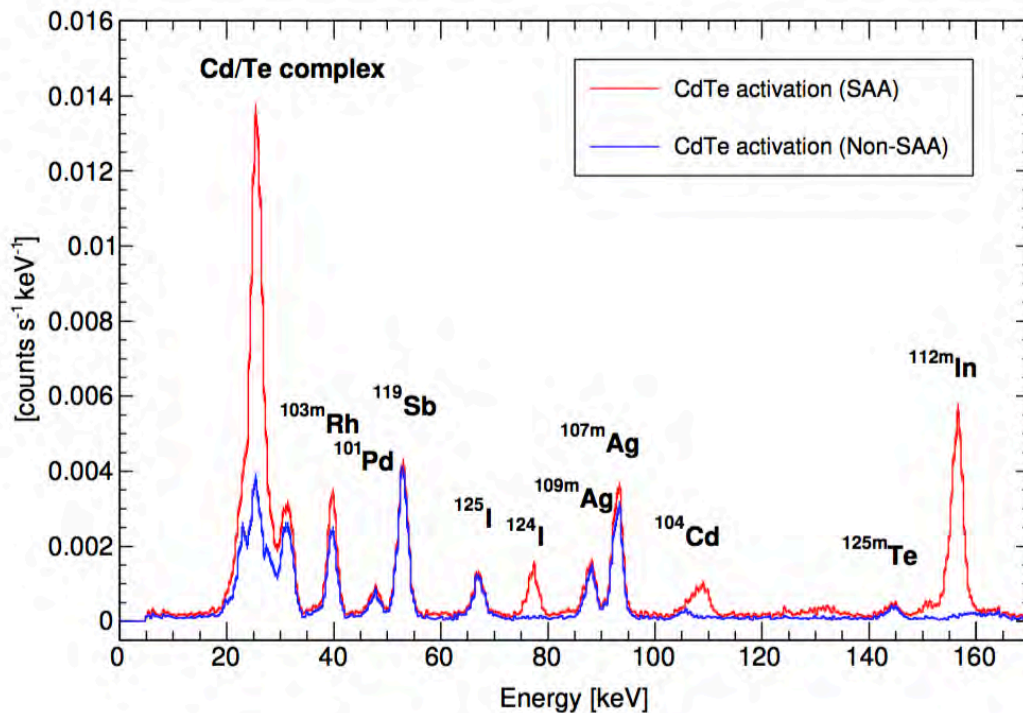


図 3.2: HXI の CdTe DSD 検出器で見られる放射化スペクトルのシミュレーション結果 [25]。赤が SAA 後 5 ks 以内、青が SAA 後 6 ks 以上経過後のスペクトルを示す。元素名は輝線の起源を表す。

3.1.2 電子バックグラウンド

図 3.3 に DEMETER 衛星が観測した軌道上の電子のカウントレート分布を表す [26]。地磁気にトラップされた keV 帯域の電子は上述の通り、主に SAA やその周辺、北アメリカ周辺に非常に多い。

HXI が感度をもつ 5–80 keV のエネルギーをもつ電子は BGO シールドを貫くことはできないが、HXI 検出器の視野方向から進入して DSSD まで到達したり、制動放射を出して観測されうる。電子が直接到達した場合は DSSD 1 層目でほぼ全てのエネルギーを失うた

表 3.1: CdTe の放射化を起源とする主な X 線帯域の輝線を出す同位体の種類と半減期、輝線の中心エネルギー [25]

元素	半減期 (s)	輝線の 中心エネルギー (keV)
$^{112m}\text{In}^*$	1240	157
^{105m}Ag	434	25
^{119}Sb	1.37×10^5	53, 28
^{112}In	893	27
^{107m}Ag	44.3	93
^{107}Cd	2.34×10^4	25, 22
^{103m}Rh	3370	40

* 質量数の m は準安定同位体を表す。

め、電子成分は主に DSSD 1 のみで見られ、観測されるエネルギースペクトルはもとの電子がもつべき関数型の連続分布となる [27]。電子の制動放射などで光子が放射される場合は、必ずある確率で光子が DSSD 1 を透過するため、DSSD 2, 3, 4 でも検出される。HXI への電子バックグラウンドの影響についても放射化と同様、大まかに理解されている。

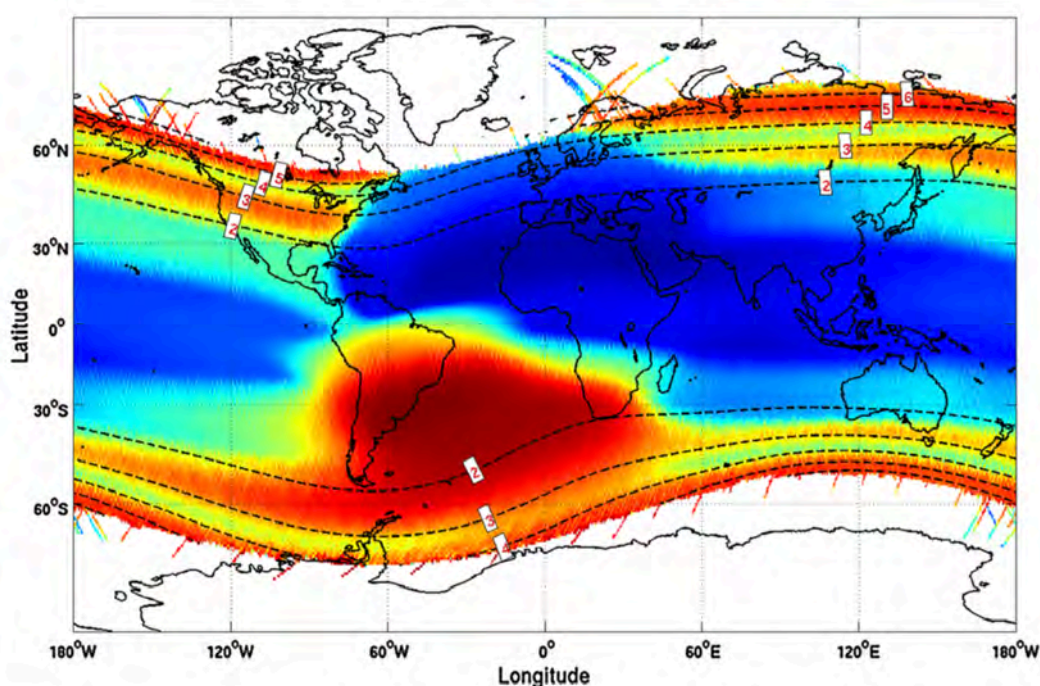


図 3.3: DEMETER 衛星が観測した軌道上電子カウントレートの空間分布 [26]。93 keV 以上のエネルギーをもつもののみ計数されている。赤が明るい領域である。

3.1.3 中性子バックグラウンド

二次宇宙線の中性子は地磁気の影響を受けず、その強度の空間分布は一次宇宙線陽子の強度分布にのみ左右される。一次宇宙線陽子が地球大気へ侵入できるかどうかは磁気限界硬度 (Cut-off Rigidity: COR) の大ききで決まる。COR がより大きい領域にはより高エネルギーの陽子しか侵入できない。大気中で生成される中性子の数は、降り注ぐ陽子の数に比例するはずなので、軌道上での中性子カウントレートと陽子のカウントレートも基本的に比例関係にあると考えられる。図 3.4, 図 3.5 に「すぎく」衛星搭載の宇宙線モニタが得た軌道上での宇宙線カウントレートの空間分布 [28] と「すぎく」が運用を開始した 2005 年時点での COR の分布を示す。これら 2 つには大まかに負の相関が見て取れる。地磁気の軸の永年変化により COR の分布は年々変わっていくため、「ひとみ」衛星が運用された 2016 年での COR 分布はこれとは少し異なる。

中性子との相互作用の断面積は軽い原子核ほど大きいので、主に DSSD 中の Si 原子核と衝突を起こす。ただし中性子は電離損失をしないため反応断面積が小さく、ほとんどは検出器のシールドを透過する。このため中性子バックグラウンド強度は衛星の姿勢にはよらず、検出器の体積に依存する。このため 4 層の DSSD では同じように観測される。得られるエネルギースペクトルは主に核同士の弾性散乱によるべき関数型の連続成分である。中性子由来のバックグラウンドは、多くの衛星では別のバックグラウンド成分に埋もれてしまい無視できるが、「すぎく」や「ひとみ」など荷電粒子バックグラウンドを徹底して除去している検出器では重要な成分となる。例えば「すぎく」の PIN Si 硬 X 線検出器では中性子が主要なバックグラウンドとなっていた [29]。HXI の NXB では、DSSD 1 は電子成分が、CdTe DSD は放射化成分が主であるが、それらの成分の影響を受けにくい DSSD 2-4 については中性子成分が強く影響していると考えられる [27]。このように中性子成分は重要なバックグラウンド成分であるにもかかわらず、まだ理解が浅く、その強度は $\pm 50\%$ 程度の精度でしか分かっていない。したがって、次期 X 線衛星に向けては、次項目で述べる二次宇宙線光子とともに、現在最も取り組むべき X 線バックグラウンド成分といえる。

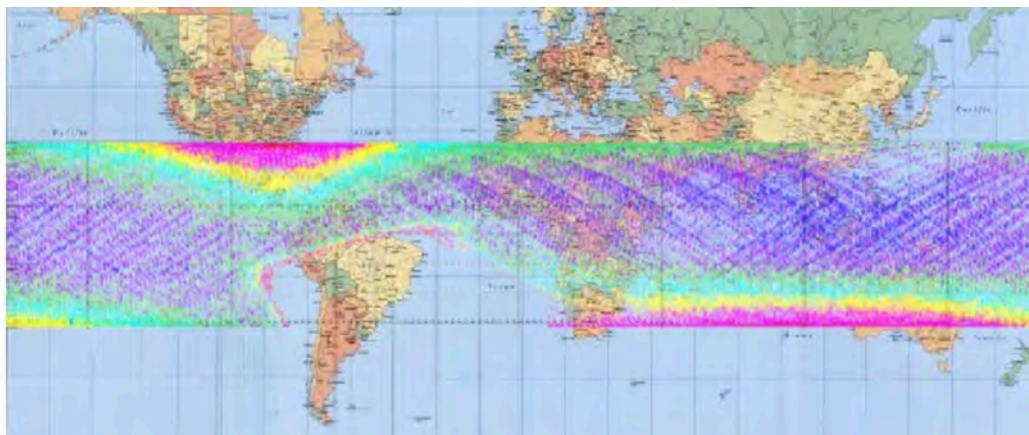


図 3.4: 「すぎく」が観測した軌道上での宇宙線カウントレートの空間分布 [28]。赤が明るい領域である。

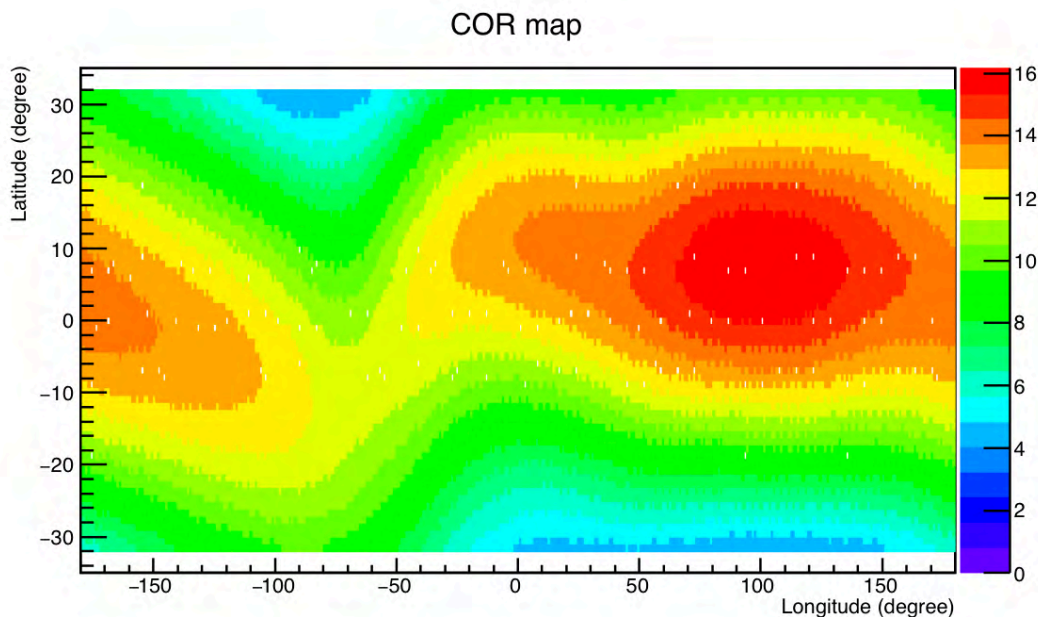


図 3.5: 2005 年時点での軌道上での COR の大きさの分布。単位は GV である。

3.1.4 二次宇宙線光子 (Albedo 光子) バックグラウンド

大気中で生成する二次宇宙線光子 (Albedo 光子) の数も中性子と同様、一次宇宙線陽子の数に比例するので、軌道上での強度の空間分布は中性子成分と同様だと考えられる。

HXI では、視野外からくる光子はアクティブシールドの反同時計数によって効率的に除去することができる。例えば厚さ 2 cm の BGO では 300 keV までの光子の 99% が相互作用を起こす。光子が視野方向から入射する場合は、そのまま検出器で光電吸収されて連続的なエネルギー分布を示す場合と、二次蛍光輝線と呼ばれる輝線成分を示す場合とがある。二次蛍光輝線とは、図 3.6 のように、入射光子が BGO シールドなどの表面近くで相互作用し電子を励起したとき、脱励起で発する蛍光がシールドから抜け出したものである。基本的にアクティブシールドが信号を検出した場合は反同時計数がとられるが、アクティブシールドには VETO 信号を出すためのスレッシュホールドエネルギーが設定されているため、励起された光電子に受け渡されたエネルギーがこれを越えない場合は反同時計数がとれず、主検出器でも信号が検出されうる。一次宇宙線陽子がシールドに当たった場合も二次蛍光輝線は放射されうるが、陽子のほとんどは数 GeV 以上のエネルギーをもち、これらはシールド内で必ず ~ 10 MeV 以上の電離損失をするため、必ず反同時計数で除去される。したがって、二次蛍光輝線を引き起こすのは光子 (および低エネルギー宇宙線) のみである。

3.2 宇宙背景 X 線放射 (CXB)

X 線バックグラウンドの起源となるもう 1 つの成分は CXB である。CXB は宇宙のあらゆる方向からほぼ一様な強度で地球に降り注ぐ [23]。1999 年に打ち上がったアメリカの

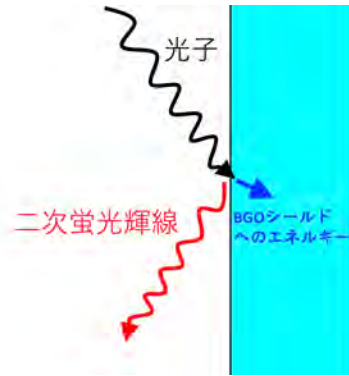


図 3.6: 入射光子による二次蛍光輝線の模式図。

X線衛星 Chandra の $0.5''$ (HPD) という非常によい角分解能により、軟X線帯域の CXB のほとんどが銀河系外からの点源放射であるということが判明した [30]。CXB も視野外からくる場合は Albedo 光子と同様にアクティブシールドの反同時計数で大幅に削減できるが、視野方向から入射するものはバックグラウンドに大きく寄与する。CXB は Albedo 光子よりもソフトな (平均的なべきが大きい) エネルギー分布をもち、二次蛍光輝線を出しやすい [31]。CXB それ自体については非常によく理解されており、スペクトルは光子指数 1.4 のべき関数で 40 keV 以上に折れ曲がりがある [32]。2–10 keV のフラックスは $\sim 6.38 \times 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ str}^{-1}$ である [23]。

この章で説明したそれぞれのバックグラウンド粒子の軌道上での平均的なエネルギースペクトルを図 3.7 に示した [31]。中性子 (赤), SAA に捕捉された陽子 (黒), CXB (青), Albedo 光子 (緑), 一次宇宙線陽子 (マゼンタ), 太陽風の電子 (シアン) それぞれが示されている。10–100 keV では CXB が最も明るい成分であるのが分かる。

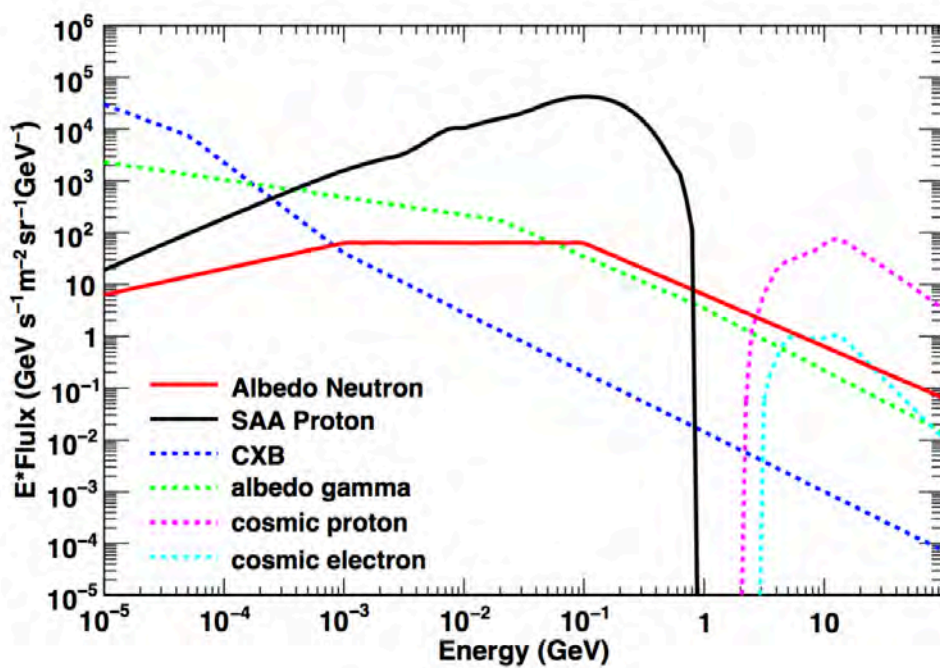


図 3.7: 軌道上での各バックグラウンド粒子の平均エネルギースペクトル [31]。中性子 (赤), SAA に捕捉された陽子 (黒), CXB (青), Albedo 光子 (緑), 一次宇宙線陽子 (マゼンタ), 太陽風の電子 (シアン) を示す。

第4章 BGO アクティブシールドの有効性の測定

4.1 目的と手段

この章では、HXI のアクティブシールドがどれだけ有効に働いたか調べることを目的とする。通常の NXB と比較してアクティブシールドの反同時計数で除去された信号がどれだけあるかを調べることで、アクティブシールドで反同時計数をとった場合ととらない場合のカウントレートの比を出すことができる。

4.2 使用したデータ

「ひとみ」衛星が地上に観測データを送れるのはアンテナがある内之浦上空（(経度, 緯度) = (130°, 25°) 周辺）だけなので、観測中のデータ保存量を抑えるよう、アクティブシールドの反同時係数で除去された信号（BGO イベント）は基本的に保存されず、内之浦上空でのみ地上に転送されている。

表 4.1 に、「ひとみ」HXI の観測ログを示す。このうち、None2, IRU checkout, RX J1856.5-3754 の計 14 観測中は 5–80 keV の帯域で明るい光源がなく、主に NXB と CXB が観測されている。以下の解析では、これらの観測期間中の通常観測データ（以下、全 blanksky）と、IGR J16138-4848 から Crab までの計 22 観測中の地食データ（以下、全地食）をそれぞれ用いた。ここで、図 4.1 のように、通常観測とは視線方向から地球を見込む角が 5 度以上、地食とは視線方向から地平線まで角度が 5 度以上である時間帯での cleaned イベントと定義する。全 blanksky と全地食の違いは主に視野中の CXB の有無だと想定される。また、イメージ解析を除いては HXI1 と 2 の 5–200 keV データを平均したものを使用した。2.1.1 で述べた通り、バックグラウンド信号の解析には HXT のカバー範囲を越える 80 keV 以上の帯域のデータも用いることができる。データ解析に用いたツールは CERN が提供する解析ツール ROOT 5.34/34 である（以降の章でも同じ）。

4.3 内之浦上空での NXB スペクトル比較

図 4.2, 図 4.3 に内之浦上空周辺での cleaned イベントと BGO イベントのスペクトルを全 blanksky と全地食についてそれぞれ示す。黒が cleaned イベント、青が BGO イベントである。DSSD 1 では通常観測のみハードなスペクトルになっており、BGO イベントは 30 keV で cleaned イベントの 10 倍高い。BGO イベントのスペクトルの形は DSSD 2–4 と

表 4.1: HXI の観測ログ

観測期間	OBSID	Target name	Notes
3/11 21:24–3/14 16:20	100042020–100042040	IGR J16318–4848	HXI1 観測開始
3/14 16:20–3/14 18:00	000007010	None2	
3/14 18:00–3/15 17:56	000007020	None2	HXI2 観測開始
3/15 17:56–3/16 19:40	000008010–000008060	IRU Check out	
3/16 19:40–3/19 19:00	100043010–100043040	RX J1856.5–3754	
3/19 19:00–3/23 13:30	100050010–100050040	G21.5–0.9	
3/23 13:30–3/25 11:28	100043050–100043060	RX J1856.5–3754	
3/25 11:28–3/25 18:01	100044010	Crab	

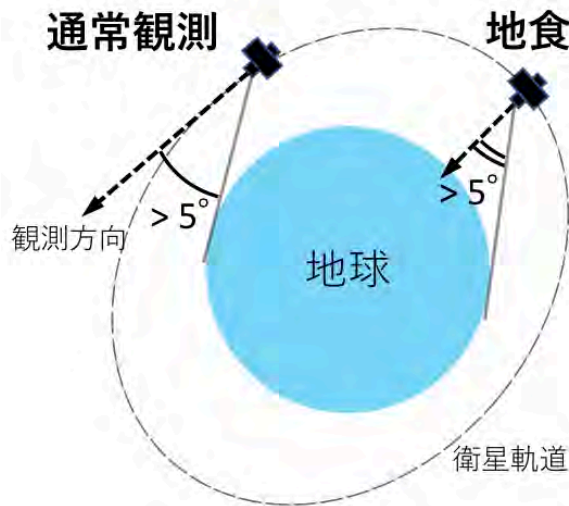


図 4.1: 通常観測と地食の模式図。

よく似ている。DSSD 2–4 ではどちらもスペクトルの形が似ており、BGO イベントは 30 倍程度高い。また $\approx 23, 75$ keV にピーク構造が見られる。CdTe DSD では cleaned イベントの 20–50 keV などに見えているピーク構造が BGO イベントには見られない。BGO イベントは 100 keV で cleaned イベントの 10 倍高い。

図 4.4 に示すように、DSSD 1–4 の BGO イベントスペクトルは全てよく似ており、 < 20 keV に 30% 程度の違いが見られる。 ~ 25 keV のピークは DSSD 4 が高く、 ~ 75 keV のピークは DSSD 1 が高い。全 blanksky, 全地食それぞれの場合で BGO イベントと cleaned イベント各層のカウントレートを表 4.2 に記した。アクティブシールドによるバックグラウンド信号の除去率 (BGO イベント / (BGO イベント + cleaned イベント)) は、86–98% であった。BGO イベント, cleaned イベントはどちらも、またどの層についても全地食が少し低い、全 blanksky と全地食の違いはどれもわずかである。

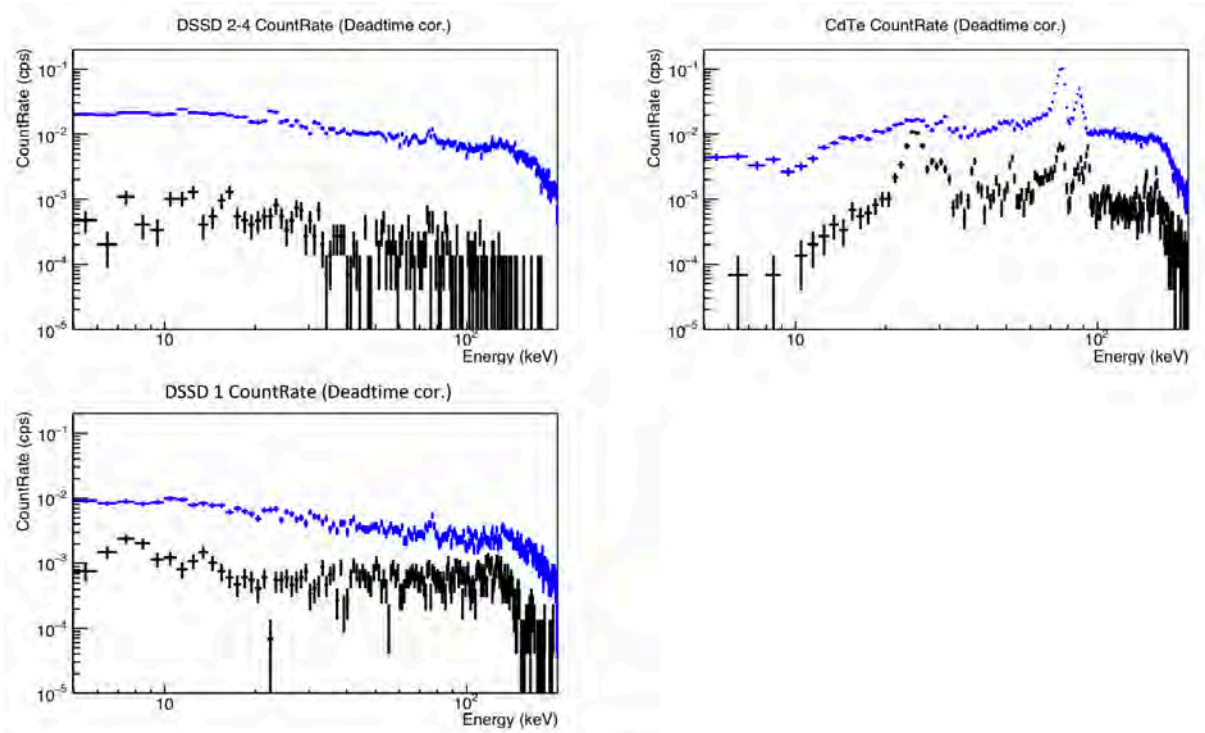


図 4.2: 内之浦上空での全 banksky 中の cleaned イベントとアクティブシールドの反同時係数で除去されたイベント (BGO イベント) のスペクトル比較。DSSD 2-4 (左上), CdTe DSD (右上), DSSD 1 (左下) をそれぞれ示した。黒が cleaned イベント、青が BGO イベントである。

表 4.2: 内之浦上空での BGO イベントと cleaned イベントのカウントレート比較

		DSSD 2-4	CdTe DSD	DSSD 1
全 banksky	BGO イベント (s^{-1})	1.59	2.56	0.606
	cleaned イベント (s^{-1})	0.0356	0.285	0.0994
	除去率*	97.8	90.0	85.9
全地食	BGO イベント (s^{-1})	1.54	2.46	0.588
	cleaned イベント (s^{-1})	0.0354	0.283	0.0935
	除去率	97.8	89.7	86.3

* BGO イベント / (BGO イベント + cleaned イベント) (%)。

4.4 NXB スペクトルの解釈

DSSD 2-4 の BGO イベントのスペクトルにピークが見られる $\approx 23, 75$ keV はそれぞれ Cd の蛍光輝線 ($K\alpha_1, K\alpha_2$) と、Bi の二次蛍光輝線 ($K\alpha_1, K\alpha_2$) の中心エネルギーと無矛盾である。さらに、layer 間で比較すると 23 keV は DSSD 4 が高く、75 keV は DSSD 1 が高いことは、23 keV ピークが DSSD 下方から、75 keV ピークが DSSD 上方から来ること

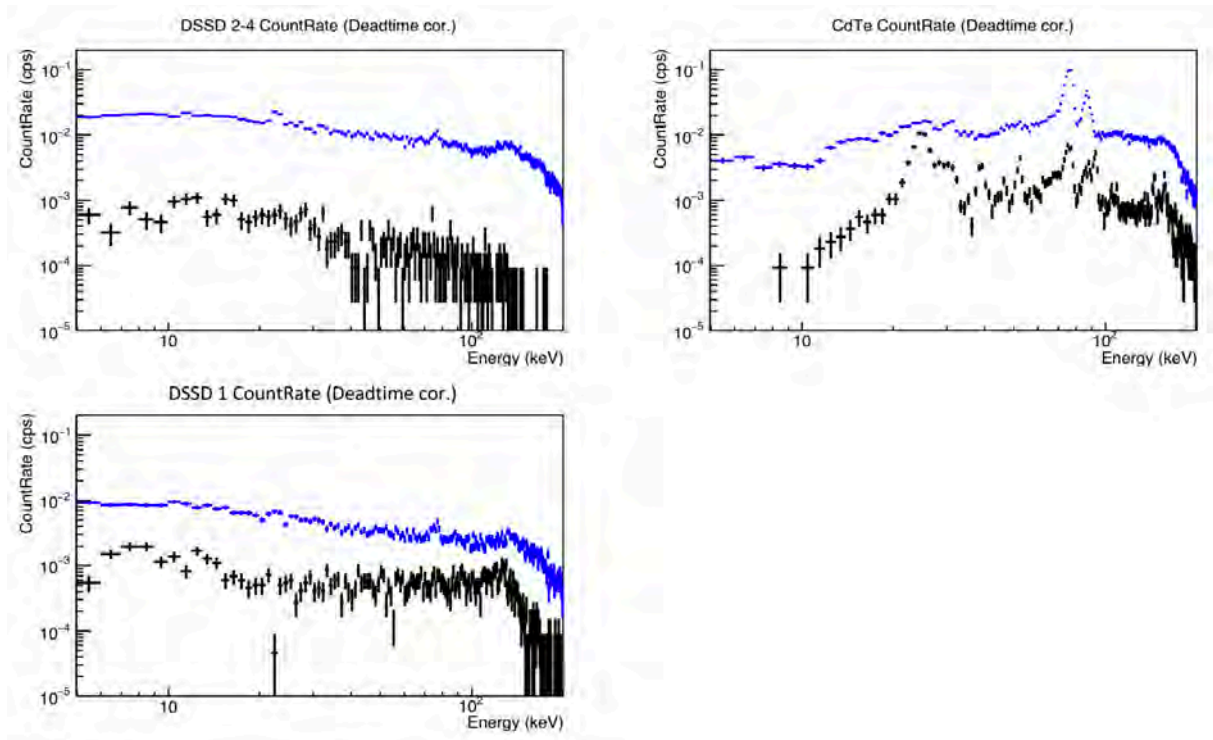


図 4.3: 内之浦上空での全地食中の cleaned イベントと BGO イベントのスペクトル比較。DSSD 2-4 (左上), CdTe DSD (右上), DSSD 1 (左下) をそれぞれ示した。黒が cleaned イベント、青が BGO イベントである。

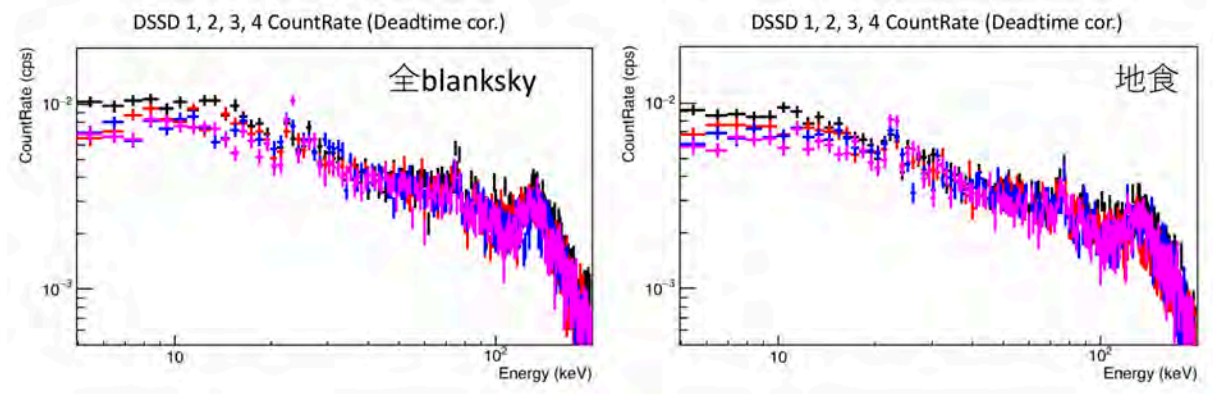


図 4.4: 内之浦上空での全 blanksky と全地食での DSSD 1 (黒), 2 (赤), 3 (青), 4 (マゼンタ) の BGO イベントのスペクトル比較。

を示唆し、それぞれが CdTe DSD と BGO シールドを起源とすることを支持する。BGO シールドは HXI の横や下にも配置されているが、二次蛍光輝線を発するのは BGO の表面近くで光子が相互作用した場合であるため、HXI の視野方向にのびた上方の BGO が発しやすい。

DSSD 1 の cleaned イベントのスペクトルで、高エネルギー側で主となっているハードな

成分は、視野に入ってきた電子が起源である [27]。視野から入ってきた電子が直接 DSSD に当たったイベントはアクティブシールドに信号を出さないため、アクティブシールドの反同時計数で除去されるイベントには電子成分は含まれないと考えられる。したがって、DSSD 各層の BGO イベントのスペクトルが似ているのは、電子成分を除くと DSSD が検出するバックグラウンドは layer 間の差を生まない成分が主であることを意味する。すなわち、反応断面積が小さい中性子や、DSSD に対して周囲から等方的に来る可能性がある Albedo 光子と BGO の二次蛍光輝線が考えられる。

CdTe DSD の cleaned イベントのスペクトルは Cd, Te, Bi, Ge の放射化が主な起源とわかっており、核崩壊の種類によって、スペクトルに β 線などの連続成分を示す場合と全吸収ピークを示す場合がある [25]。アクティブシールドの反同時計数で除去されるイベントのスペクトルにピーク構造が少ないのは、検出器で全吸収が起きるとアクティブシールドに信号を出さないためだと考えられる。つまり、Cd, Te の放射化を起源とする輝線が主成分となっている 20–60 keV の帯域のバックグラウンドは反同時計数では除去しにくいことが観測的に分かった。

全 blanksky のほうが全地食よりカウントレートが少し高いのは CXB の影響だと思われる。だがその違いは BGO イベントについては DSSD 2–4 で 1%, DSSD 1 でも 3%, cleaned イベントについては DSSD 2–4 で 0.6%, DSSD 1 で 6% であり、CXB の影響はさほど大きくないことが分かった。

この章では BGO イベントのうち内之浦上空のデータに着目したが、それ以外の座標でもわずかにデータが保存されている領域があった。より詳細について追究した結果を付録 A に記してある。

4.5 まとめ

この章では、アクティブシールドがどれだけ有効に働いているかを観測データを用いて調べた。行った解析とその結果を以下にまとめる。

- アクティブシールドの反同時計数で除去されるイベント (BGO イベント) が残されている内之浦上空のデータを用いて cleaned イベントと BGO イベントのカウントレートを比較した。結果、DSSD 2–4, CdTe DSD, DSSD 1 それぞれでバックグラウンド信号の除去率は $\sim 98\%$, $\sim 90\%$, $\sim 86\%$ であった。
- DSSD に見られる ~ 23 keV, 75 keV のピークは layer 間に差が見られ、それぞれ Cd の蛍光輝線と BGO シールドからの二次蛍光輝線に由来すると考えられる。
- DSSD 1, 2, 3, 4 の BGO イベントのスペクトルはいずれもよく似ており、視野に入ってきた電子成分が含まれていないことを示した。したがって DSSD の BGO イベントは layer 間に差を出さない成分 (中性子, Albedo 光子, BGO の二次蛍光輝線が考えられる) が主であることを意味する。
- CdTe DSD に着目すると、アクティブシールドでは Cd, Te, Bi, Ge などの放射化を起源とする輝線の全吸収ピークを除去できないため、放射化を起源とする輝線が主成分となっている 20–60 keV の帯域のバックグラウンドを下げるのは難しいということが観測的に分かった。

第5章 DSSD 2-4のNXBの基礎調査

5.1 目的と手段

この章では、NXBの中性子成分の理解のため、DSSD 2-4が観測したNXBを大づかみに理解することを目的とする。DSSD 2-4のカウントレートの空間分布やスペクトル、イメージから電子や放射化の影響を見積もり取り除くことで、残る成分（中性子、Albedo光子、CXB）がどういう特徴をもつかを調べた。

5.2 使用したデータ

使用したのは4章と同じ全 blanksky と全地食のデータである。イメージ解析を除いてはHXI1と2の5-200 keV データを平均したものをを用いた。

5.3 NXB カウントレートの空間分布

図5.1と図5.2はそれぞれ、全 blanksky と全地食中でのDSSD 2-4（左上）、CdTe DSD（右上）、DSSD 1（左下）のカウントレート分布を表す。図5.1右上には衛星が描く軌道の例を矢印で示した。表5.1には、全 blanksky と全地食それぞれについて、各層の平均カウントレートを示した。

DSSD 2-4に着目すると、基本的にカウントレートは $0.02-0.1 \text{ s}^{-1}$ だが、SAAのまわりと全 blanksky の北西領域の一部に 0.15 s^{-1} を超える特に明るい領域がある（図5.1に四角で示した）。また、全地食でのみSAA北東に明るい領域がのびている。他の層についてもDSSD 2-4と共通して全 blanksky の北西に一部明るい領域がある。さらにCdTe DSDはDSSD 2-4と同様、SAA北東に明るい領域があり、全 blanksky と全地食で分布が異なる。

図5.3はHXI1と2の宇宙線モニタが観測したカウントレートの、HXI全観測期間にわたる平均の分布である。ただし、SAA中でpseudo イベントが保存されていない都合上、この図ではdead time補正はなされていない。SAAの中でも特に明るい領域を四角で示し、SAA.coreと定義した。SAAを除いて北西と南東が明るいのはDSSD 2-4の傾向と一致しているので、中子とAlbedo光子の成分は確かにDSSD 2-4に寄与していると思われる。

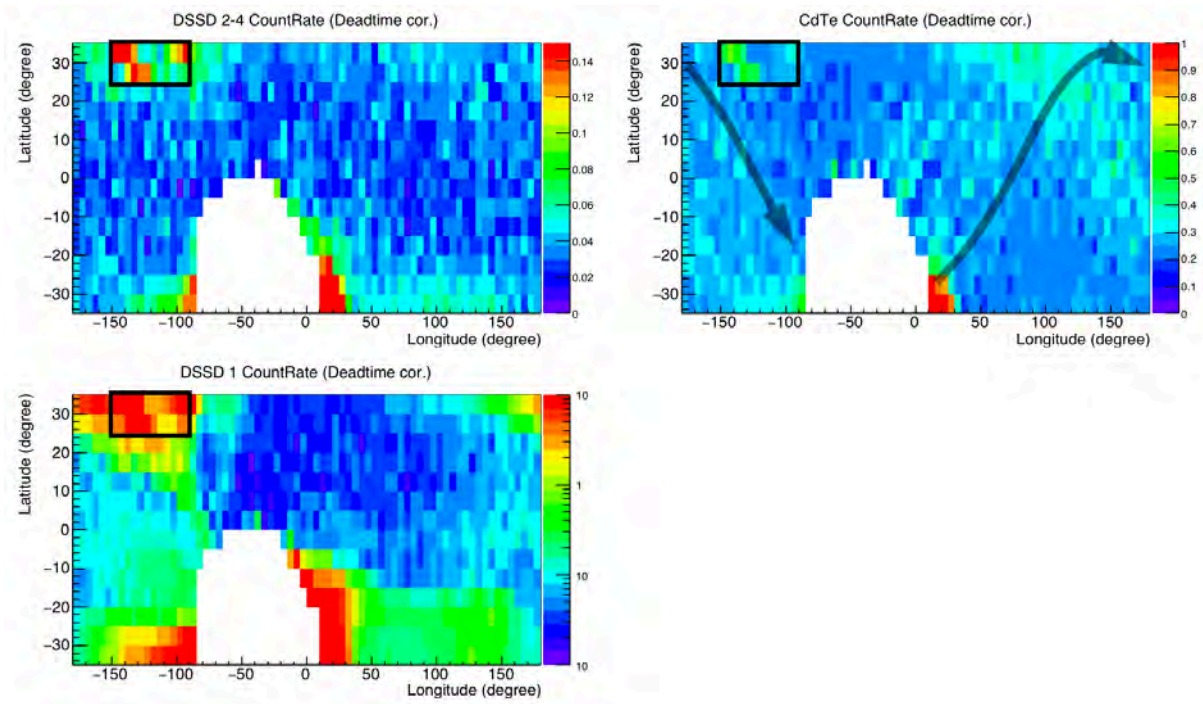


図 5.1: 全 blanksky での DSSD 2-4 のカウントレート分布 (左上) と同じく CdTe DSD (右上), DSSD 1 (左下)。北西の特に明るい領域を四角で囲んだ。衛星が描く軌道の例を矢印で示した。

表 5.1: データセレクションなしの DSSD 2-4, CdTe DSD, DSSD 1 それぞれの平均カウントレート (s^{-1})

	DSSD 2-4	CdTe DSD	DSSD 1
全 blanksky	0.048	0.27	1.3
全地食	0.038	0.26	0.34

5.4 NXB スペクトル

図 5.4, 図 5.5 は、それぞれ全 blanksky と全地食データ全体での DSSD 2-4 (青), CdTe DSD (赤), DSSD 1 (緑) のスペクトルを表す。DSSD 2-4 は連続成分と、 ≈ 75 keV などにピーク構造がいくつか見られる。これは前章で BGO イベントのスペクトルに見られたのと同様に Bi の二次蛍光輝線 ($K\alpha_1, K\alpha_2$) だと思われる。CdTe DSD には主に Cd, Te, Bi などの放射化による輝線と連続成分が確認でき、DSSD 1 はハードな電子成分が主である。全 blanksky と全地食で DSSD 1 の明るさは 30 keV で ~ 4 倍異なっている。

図 5.6, 図 5.7 は、DSSD 1 が特に明るい、すなわち電子成分が強い領域 (以下、SAA2) を除くため用いられた領域と、その領域から抽出した全地食スペクトル (以下、スクリーン後 NXB 平均スペクトル) である [27]。以降の解析では、注目するスペクトルとスクリー

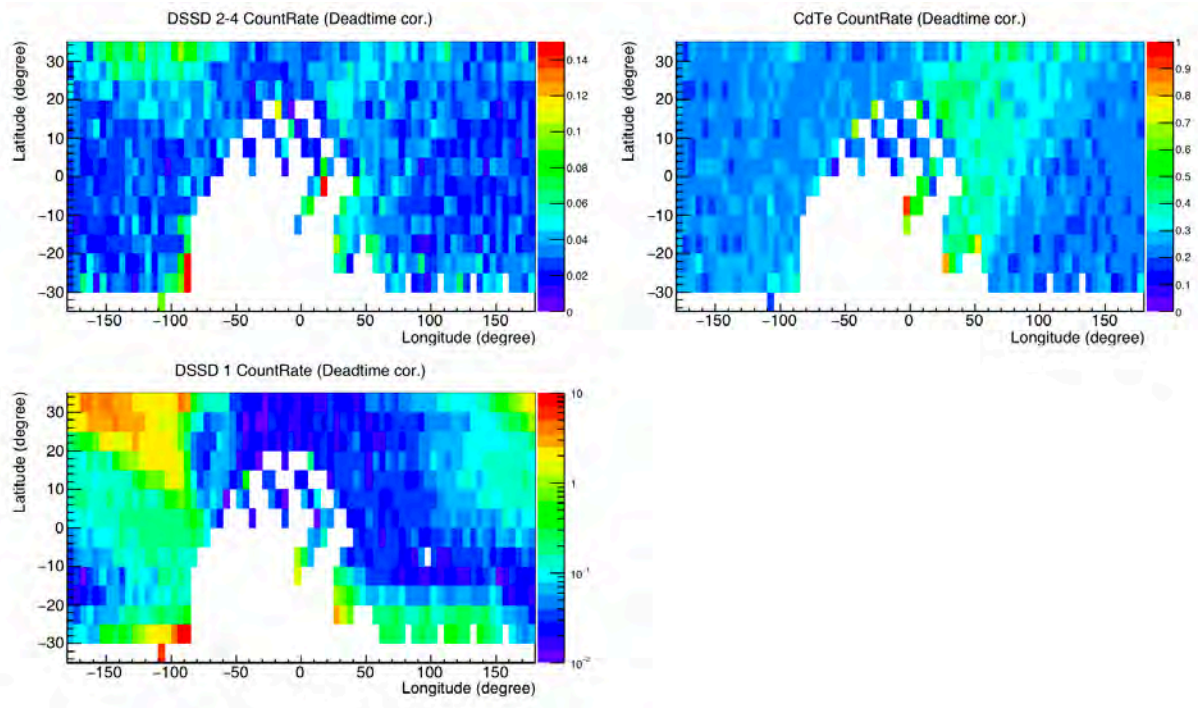


図 5.2: 全地食での DSSD 2-4 のカウントレート分布 (左上) と同じく CdTe DSD (右上), DSSD 1 (左下)。

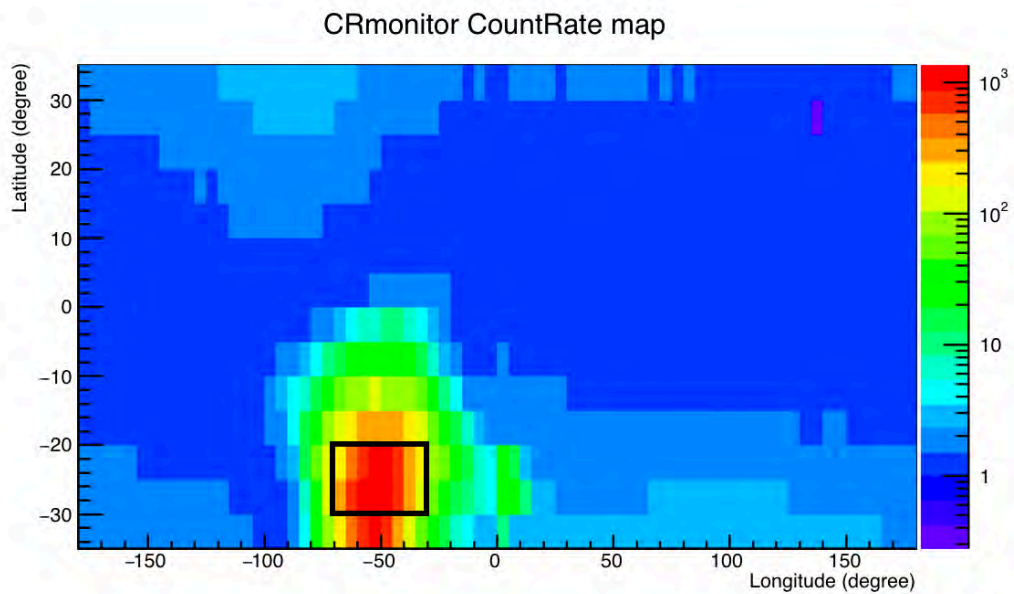


図 5.3: 宇宙線モニタが観測した陽子カウントレートの空間分布 (HXI1, 2 の平均)。四角で囲った特に明るい領域が SAA_core である。dead time 補正はなされていない。

ン後 NXB 平均スペクトルとの比をとって議論することがある。

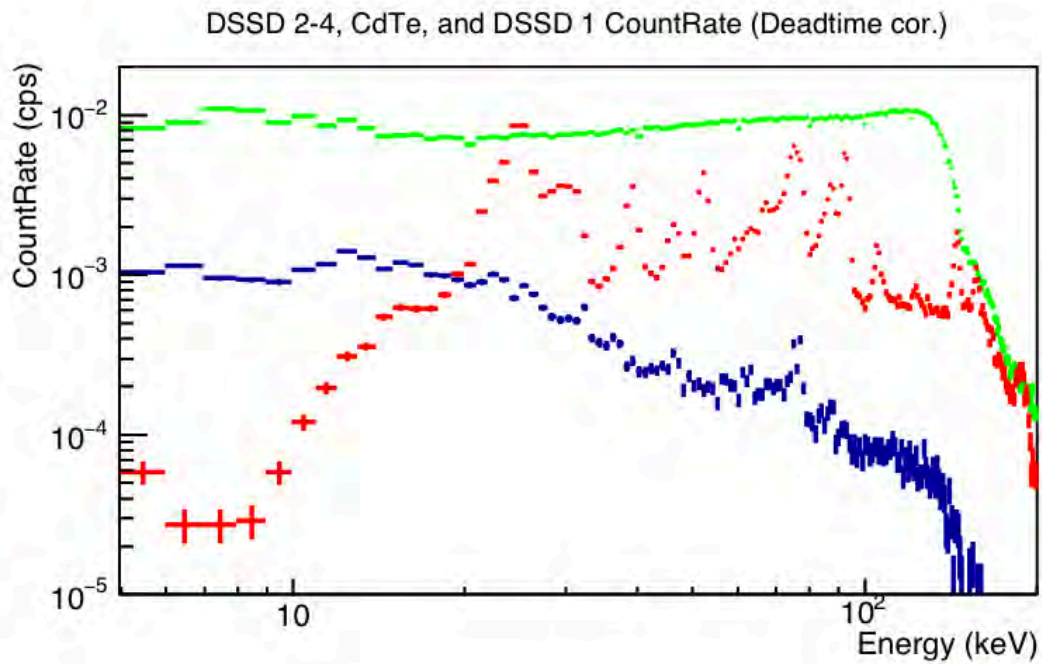


図 5.4: 全 blanksky での DSSD 2-4 (青) , CdTe DSD (赤) , DSSD 1 (緑) のスペクトル。

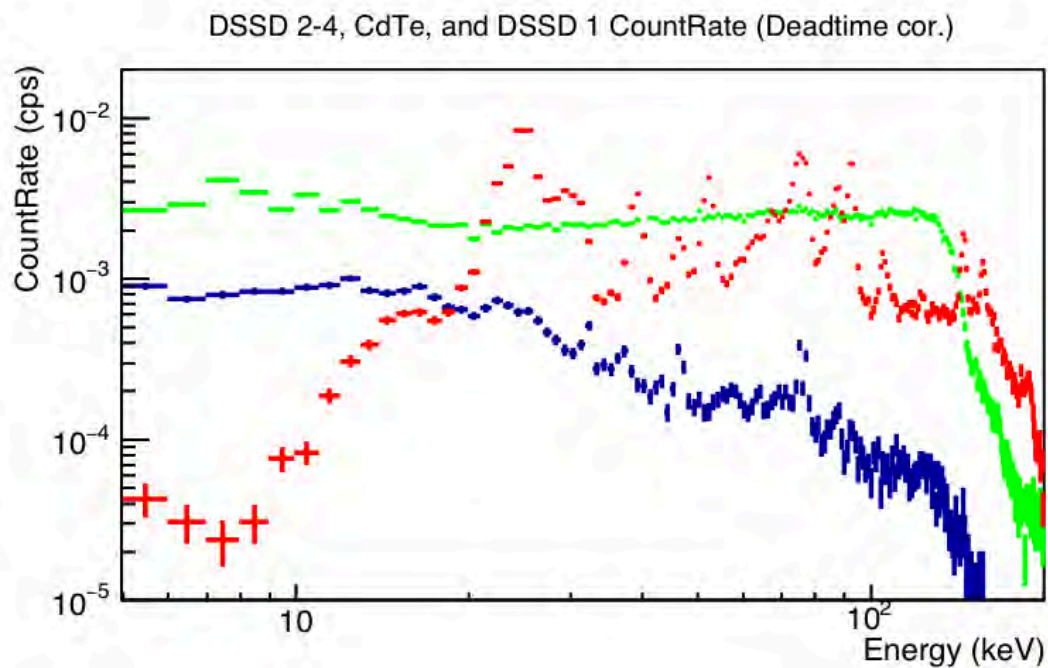


図 5.5: 全地食での DSSD 2-4 (青) , CdTe DSD (赤) , DSSD 1 (緑) のスペクトル。

5.5 北西の特にカウントレートが高い領域での NXB 起源

全 blanksky のカウントレート分布で、北西の一部に非常に明るい領域（図 5.1 の四角で示した領域）が見られた。この領域では宇宙線カウントレートが特別高くないにも関わ

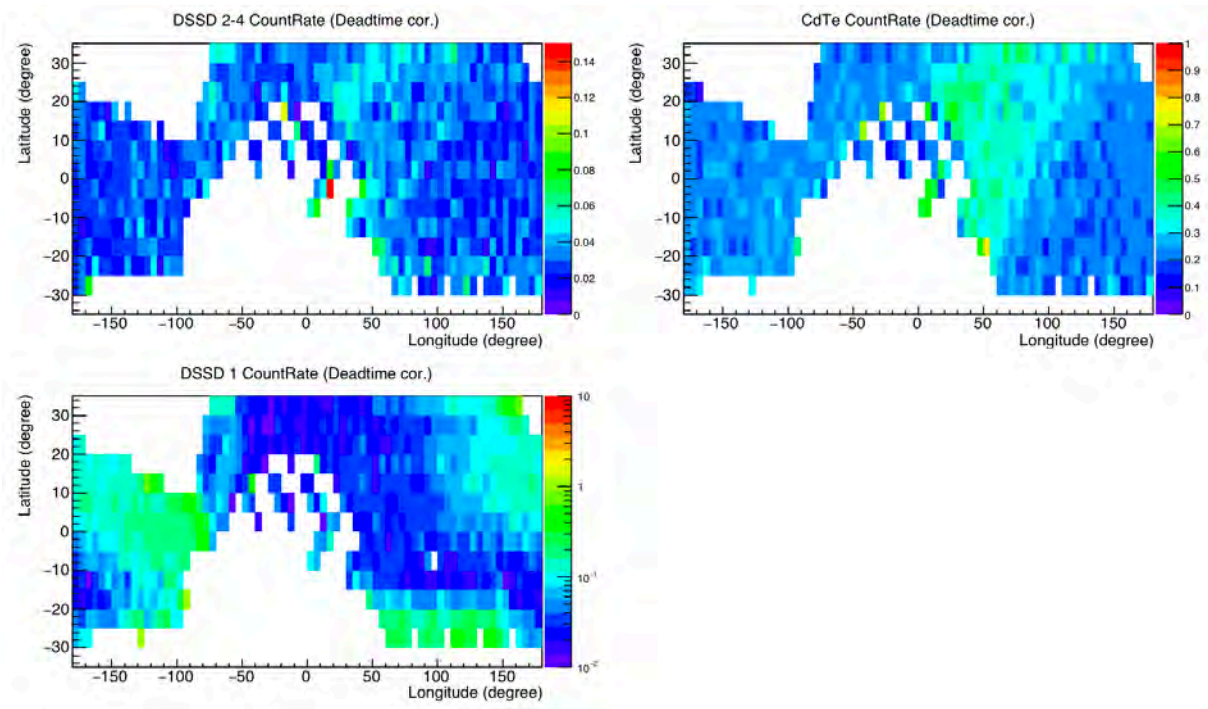


図 5.6: 全地食での SAA2 領域を除いた DSSD 2-4 (左上) , CdTe DSD (右上) , DSSD 1 (左下) のカウントレート分布。

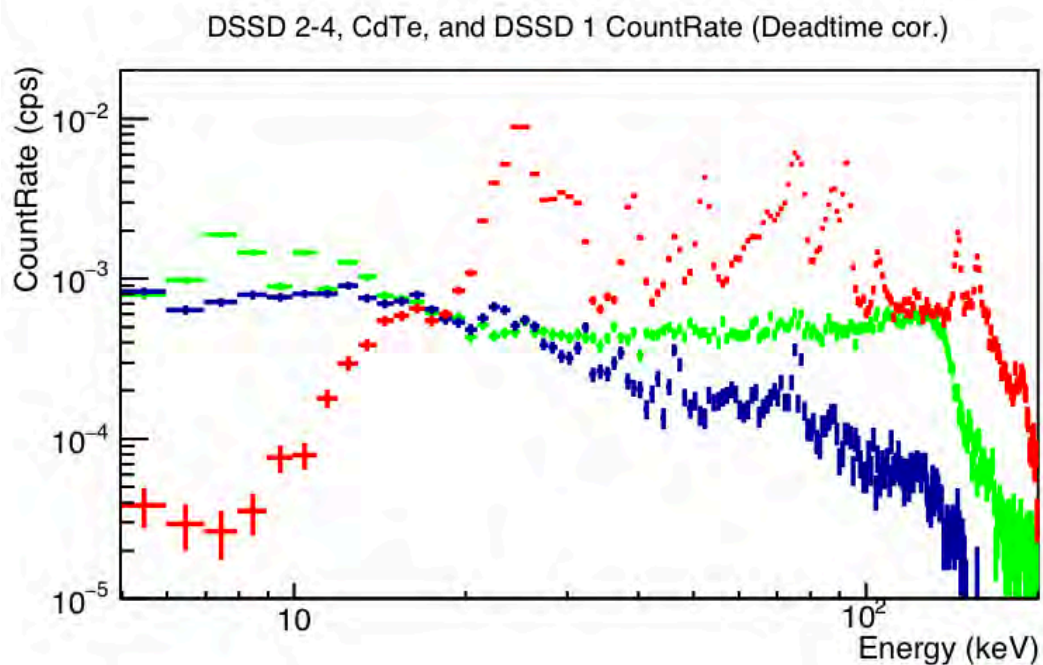


図 5.7: 全地食の SAA2 を除く領域での DSSD 2-4 (青) , CdTe DSD (赤) , DSSD 1 (緑) のスペクトル (スクリーン後 NXB 平均スペクトル)。

らず、どの層も急に明るくなっているため、中性子や Albedo 光子、放射化成分の寄与ではないと考えられる。図 5.8 はこの領域での DSSD 2-4 (青)、CdTe DSD (赤)、DSSD 1 (緑) のスペクトルである。DSSD 2-4 はスクリーン後 NXB 平均よりもソフトになり、CdTe DSD は連続成分に対する輝線強度の比が下がっている。DSSD 1 は電子由来のハードな成分が非常に高くなっており、スペクトルの形はスクリーン後 NXB 平均と似ている。

スクリーン後 NXB 平均との違いを明らかにするため、図 5.9 ではこの領域のスペクトルとスクリーン後 NXB 平均スペクトルとの差分をとったスペクトル (差分スペクトル) を示した。DSSD 2-4, CdTe とも差分スペクトルは連続成分が主で、DSSD 2-4 では ~ 20 keV、CdTe DSD では ~ 50 keV にピークをもつ形をしている。DSSD 1 は、電子成分がべきを大きく変えずにスクリーン後 NXB 平均の ~ 150 倍という明るさになっている。すなわち、この領域は電子成分が非常に強く、それが DSSD 1 より下層にも影響しているのだと考えられる。

図 5.10 に DSSD 2 (左上)、3 (右上)、4 (左下) それぞれとスクリーン後 NXB 平均スペクトルとの比を示した。 ~ 20 keV の盛り上がりは上層ほど明るく、20 keV における DSSD 2 から 3、3 から 4 への減少分はどちらも $\sim 30\%$ である。上層ほど明るいことは、この成分が HXI 視野方向からくることを示唆する。だが検出器と相互作用するのが電子だとすると、DSSD 1 と相互作用せずに DSSD 2-4 で検出されることは考えにくく、cleaned イベントではすでに除去されているはずである。一方で、検出されるのが光子だとすると、DSSD 1 枚で吸収される 20 keV 光子の割合は $\sim 40\%$ なので、20 keV カウントレートの 70% 程度が光子、残り 30% が中性子など layer 間で変わらない成分だとすればこの layer 間の差と無矛盾である。

図 5.11 は、HXI1 が観測した、この領域の DSSD 2-4 (左上)、CdTe DSD (右上)、DSSD 1 (左下) のイメージである。もし視野に入った電子が DSSD 2-4 でも直接、相互作用しているならば、電子は DSSD 1 による遮蔽のため下層の検出器の中心には到達できず、DSSD 2-4 と CdTe DSD は中心が暗いイメージになるはずである。だがイメージには明るさの偏りが見られない。したがって、DSSD 1 のカウントレートを上げているのは電子であり、DSSD 2-4 と CdTe のカウントレートに寄与するのは何らかの過程で生成した連続的なエネルギー分布をもつ光子だと考えられる。

5.6 放射化成分の寄与

全 blanksky と全地食のカウントレートの空間分布を比較すると、CdTe DSD のカウントレートが上昇する領域が異なる。CdTe DSD のカウントレートを担うのは主に検出器まわりの放射化成分なので、CdTe DSD の明るさが大きく上昇するのは SAA 通過後と考えられ、衛星の軌道を考慮するとそれは SAA の北東の領域である。ただし、地球座標上に示すカウントレートの空間分布では、1 つの座標に衛星が北向き、南向きに進む軌道での値が重なるため、SAA の北東の領域が必ずしも SAA 通過後ではないことに留意する必要がある。

放射化成分が特に強いのは SAA 通過後 6 ks 以内と分かっている [25]。ここでは、SAA の中でも特に明るい SAA_core を通った後の経過時間 (以下、T_SAA_core) が 6 ks 以内

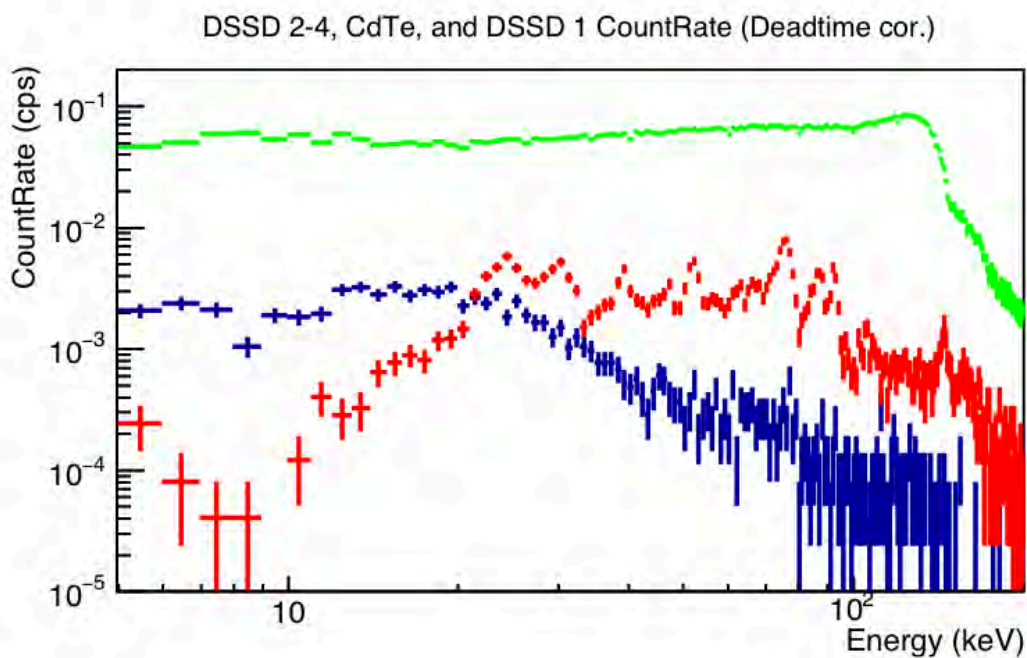


図 5.8: 全 blanksky、北西の非常に明るい領域での DSSD 2-4 (青) , CdTe DSD (赤) , DSSD 1 (緑) のスペクトル。

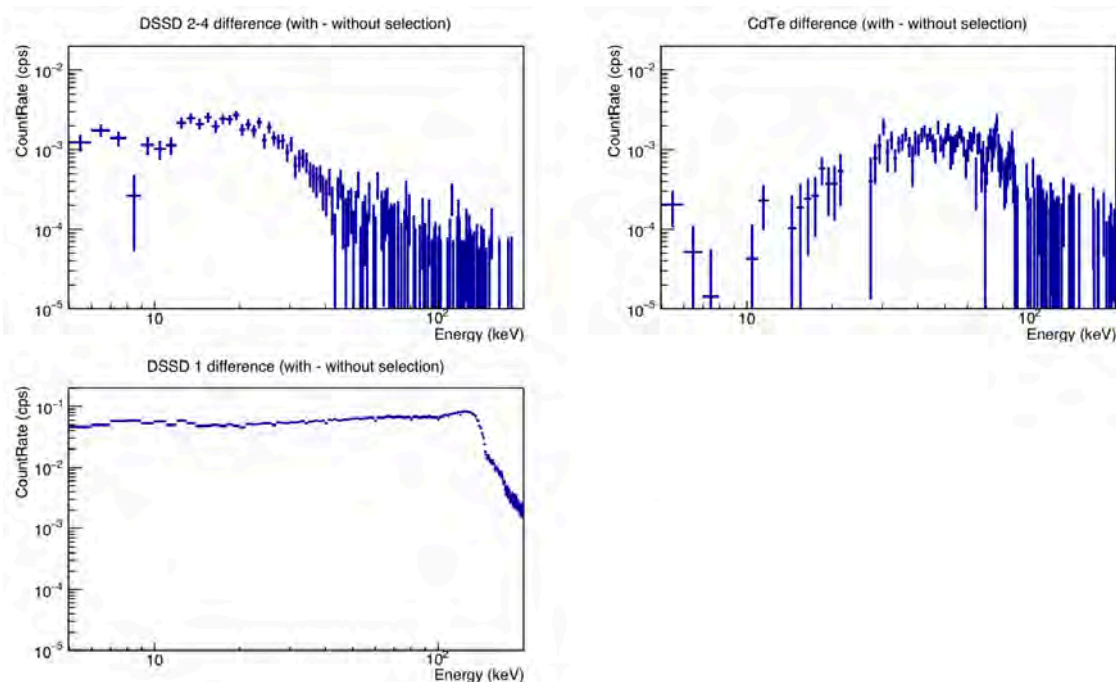


図 5.9: 全 blanksky、北西の非常に明るい領域とスクリーン後 NXB 平均との差分スペクトル。DSSD 2-4 (左上) , CdTe DSD (右上) , DSSD 1 (左下) を示す。

のイベントを抽出した。図 5.12, 図 5.13 はこのイベントを全 blanksky, 全地食それぞれから抽出したカウントレート分布である。CdTe DSD は SAA_core 直後に平均カウントレ

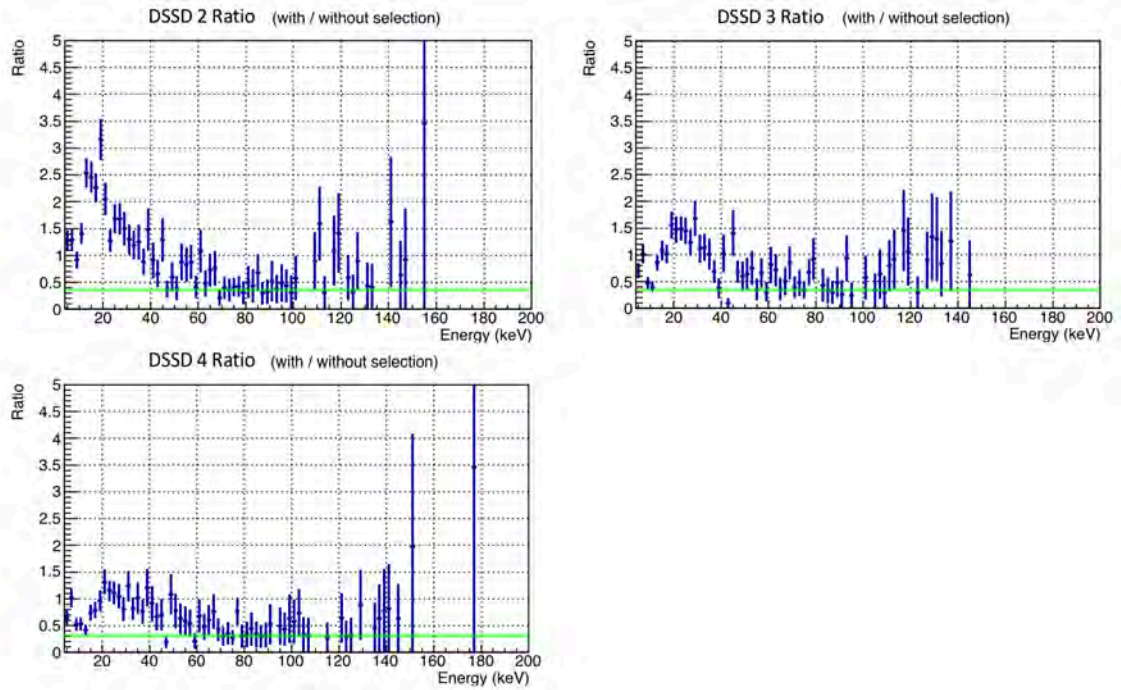


図 5.10: 全 blanksky、北西の非常に明るい領域での DSSD 2 (左上), 3 (右上), 4 (左下) それぞれとスクリーン後 NXB 平均との比のスペクトル。比が $1/3$ の位置を緑線で示した。

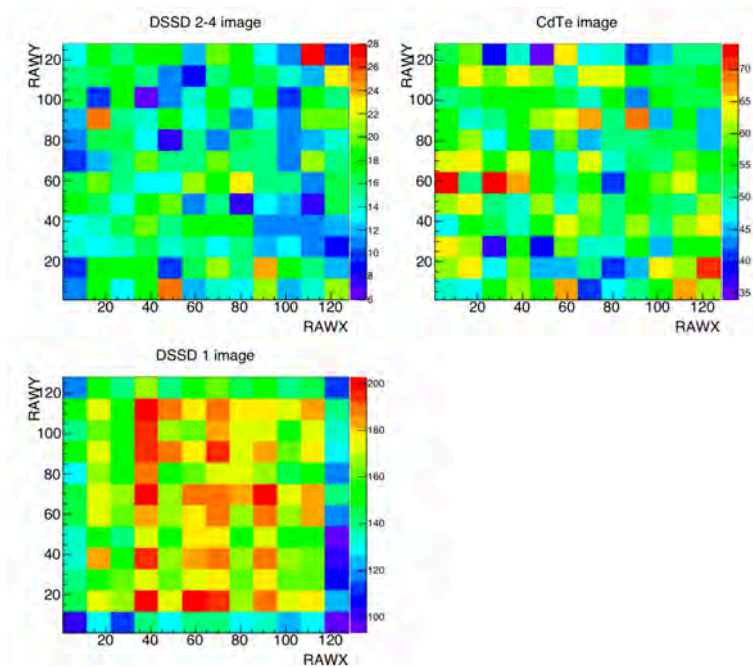


図 5.11: 全 blanksky の北西の非常に明るい領域での DSSD 2-4 (左上), CdTe DSD (右上), DSSD 1 (左下) イメージ。RAWX, RAWY は検出器面上のストリップ番号を表す。

トの2倍ほどの明るさになり、軌道に沿って徐々に暗くなっていくのが分かる。さらに DSSD 2-4 も同様の傾向を示しており、SAA_core 通過後を抽出すると DSSD 2-4 への放射化の影響も調べることができると思われる。

図 5.14, 図 5.15 は、逆に $T_SAA_core > 6$ ks のイベントを全 blanksky, 全地食それぞれから抽出したカウントレート分布である。この場合は CdTe DSD, DSSD 2-4 とともに SAA 北東に明るい領域がなくなっている。すなわち、 T_SAA_core によって放射化が強い時間帯のイベントとそうでないイベントを切り分けられることが分かった。放射化成分が強い時間帯を除くと、DSSD 2-4 のカウントレートは宇宙線モニタのカウントレートと座標全体にわたってよく似た分布を示すのが見て取れる。したがって、放射化が強く影響する時間帯を除くことで中性子と Albedo 光子の成分がよりよく見えてきたと考えられる。

図 5.16, 図 5.17 は、 T_SAA_core が < 2 ks (黒), $2-4$ ks (赤), $4-6$ ks (青), > 6 ks (マゼンタ) それぞれの各層のスペクトルを全 blanksky から抽出したものである。座標によるカウントレートの違いの影響を抑えるため、SAA2 を除いた領域のデータを用いた。DSSD 2-4 は < 2 ks のみ 30 keV 以上の帯域が高い。CdTe DSD は経過時間とともに全体が下がっていき、特に 25 keV (Cd, Te), 157 keV (^{122m}In) の輝線の変化が大きい。経過時間に沿った変化が分かりやすいよう、図 5.18 には T_SAA_core ごとの全 blanksky のスペクトルのスクリーン後 NXB 平均との比を示した。これも SAA2 を除いた領域のデータを用いた。DSSD 2-4 で黒が明るいのは主に 40-70 keV, ~ 100 keV であり、 $T_SAA_core > 2$ ks ではほぼスペクトルが同じである。したがって、DSSD 2-4 への放射化の影響は $T_SAA_core < 2$ ks にのみ現れるといえる。CdTe DSD の 25 keV と 157 keV の輝線については、それぞれ最大 3 倍, 6 倍の変化が見て取れる。

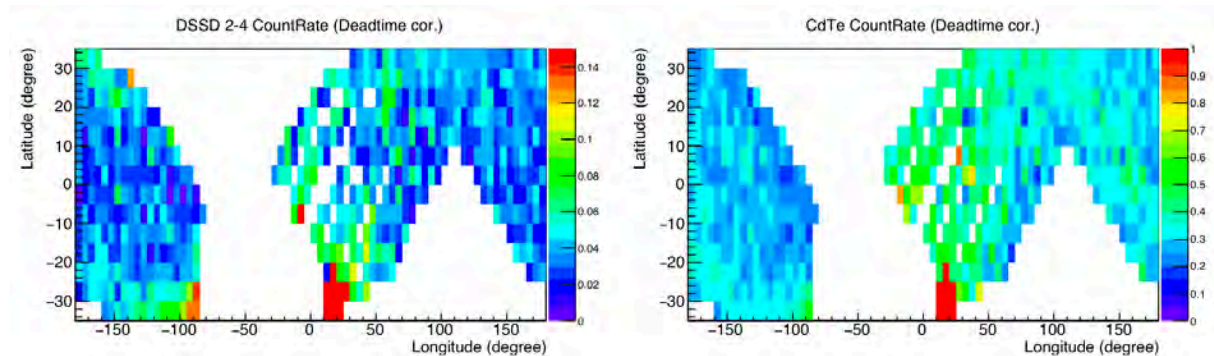


図 5.12: 全 blanksky の $T_SAA_core < 6$ ks の時間帯での DSSD 2-4 (左), CdTe DSD (右) カウントレート分布。

5.7 まとめ

この章では、NXB の中性子成分の理解のため、中性子成分の寄与が大きいと思われる DSSD 2-4 のデータに着目した。行った解析とその結果を以下にまとめる。

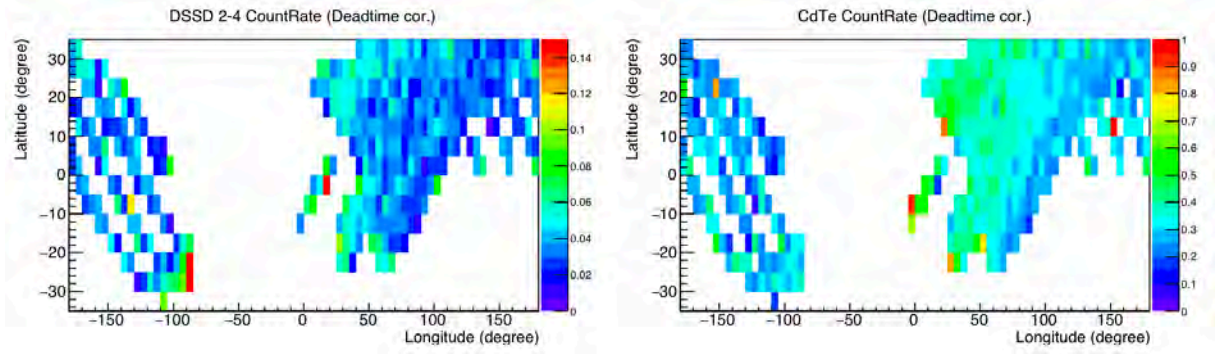


図 5.13: 全地食の T_SAA_core < 6 ks の時間帯での DSSD 2-4 (左) , CdTe DSD (右) カウントレート分布。

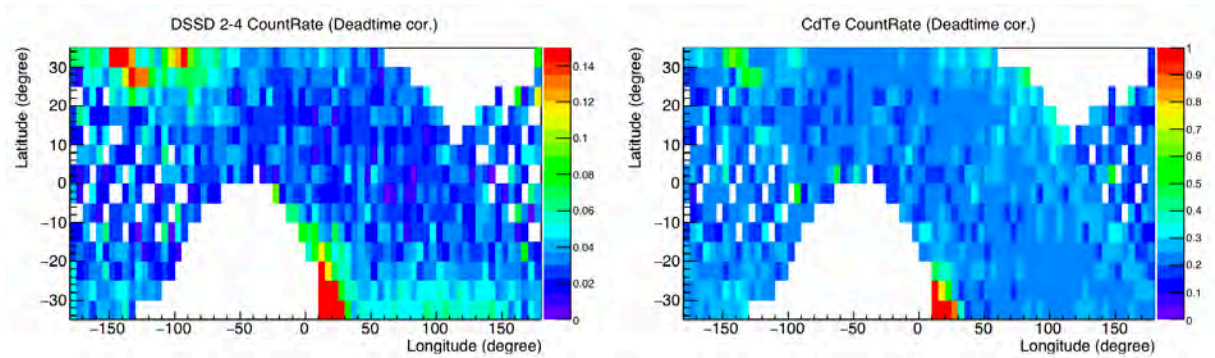


図 5.14: 全 blanksky の T_SAA_core > 6 ks の時間帯での DSSD 2-4 (左) , CdTe DSD (右) カウントレート分布。

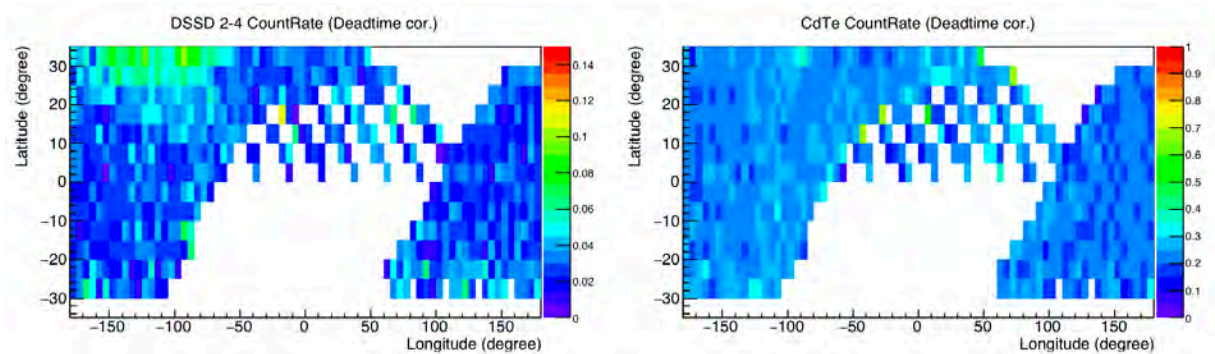


図 5.15: 全地食の T_SAA_core > 6 ks の時間帯での DSSD 2-4 (左) , CdTe DSD (右) カウントレート分布。

- DSSD 2-4 の NXB のカウントレート分布を見ると、全 blanksky, 全地食とも基本的に $0.02\text{--}0.1\text{ s}^{-1}$ で、全 blanksky の北西の一部 ((経度, 緯度) = (110°, 30°) 周辺) に非常に明るい領域があるのと、全 blanksky, 地食ともに SAA の北東にカウントレ

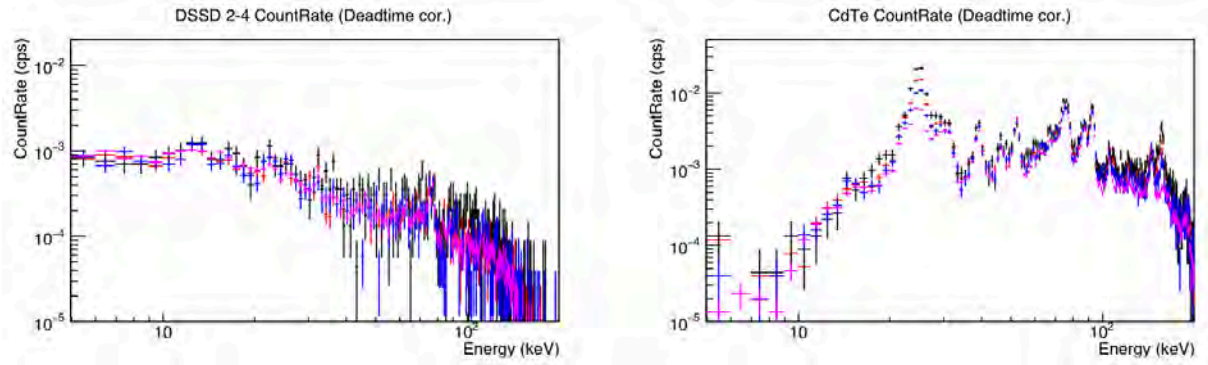


図 5.16: 全 blanksky の T_SAA_core で分けた DSSD 2-4 (左), CdTe DSD (右) スペクトル。黒: T_SAA_core < 2 ks、赤: T_SAA_core 2-4 ks、青: T_SAA_core 4-6 ks、マゼンタ: T_SAA_core > 6 ks。座標によるカウントレートの違いの影響を抑えるため SAA2 を除いた領域のデータを用いた。

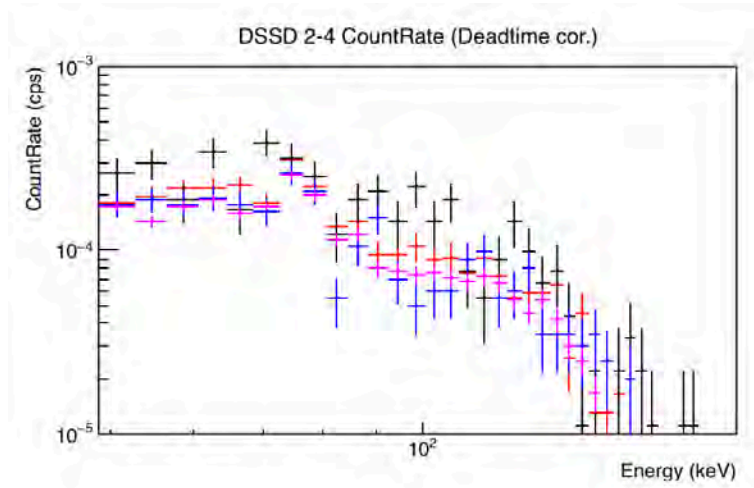


図 5.17: 全 blanksky の T_SAA_core で分けた DSSD 2-4 スペクトルの 50 keV 以上を拡大したもの。黒: T_SAA_core < 2 ks、赤: T_SAA_core 2-4 ks、青: T_SAA_core 4-6 ks、マゼンタ: T_SAA_core > 6 ks。座標によるカウントレートの違いの影響を抑えるため SAA2 を除いた領域のデータを用いた。

トが高い領域が見られた。

- 全 blanksky では北西の一部に DSSD 2-4 のカウントレートが 0.15 s^{-1} を超える明るい領域が見られた。この領域では DSSD 2-4 のスペクトルがスクリーン後 NXB 平均と比較して $\sim 20 \text{ keV}$ に連続的な盛り上がりをもっていた。増加した成分は DSSD の上層ほど明るく、DSSD 2 から 3, 3 から 4 の減少分がどちらも $\sim 30\%$ であることから、光子であると考えられる。
- DSSD 2-4 が放射化の影響を受けるのは主に T_SAA_core < 2 ks の時間帯であり、スペクトルは 40-70 keV, $\sim 100 \text{ keV}$ が高くなっていた。

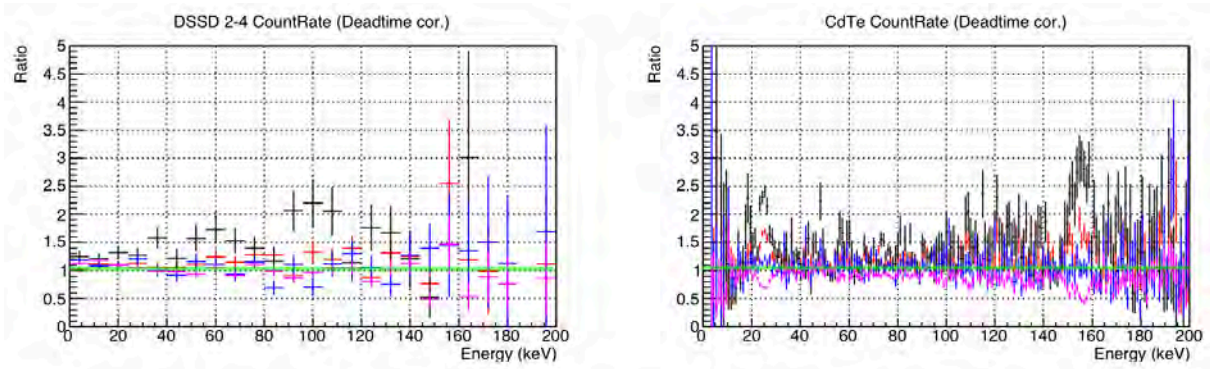


図 5.18: 全 blanksky の T_SAA_core で分けた DSSD 2-4 (左) , CdTe DSD (右) スペクトルとスクリーン後 NXB 平均との比。黒 : T_SAA_core < 2 ks、赤 : T_SAA_core 2-4 ks、青 : T_SAA_core 4-6 ks、マゼンタ : T_SAA_core > 6 ks。比が 1 の位置を緑線で示してある。座標によるカウントレートの違いの影響を抑えるため SAA2 を除いた領域のデータを用いた。

- 電子や放射化成分が強く影響する空間領域や時間帯を除くと、DSSD 2-4 のカウントレートは宇宙線モニタのカウントレートとよく似た空間分布を示す。すなわち、中性子と Albedo 光子の成分の DSSD 2-4 への寄与は確かに見えていると考えられる。

第6章 DSSD 2-4 NXBの中性子成分の理解

6.1 目的と手段

この章では、前章を受けて、DSSD 2-4のNXBスペクトルから中性子成分のみを抽出し、その特徴を理解することを目的とする。DSSD 2-4と宇宙線モニタのカウントレートの空間分布の相関に着目し、エネルギー帯域ごとの相関や宇宙線モニタのカウントレートが高い領域と低い領域でのDSSD 2-4スペクトルの違いなど様々な視点からDSSD 2-4データを調べることで、相関する成分（中性子とAlbedo光子）としない成分（電子、放射化など）、さらには中性子とAlbedo光子の寄与を切り分けることを試みた。

6.2 使用したデータ

使用したのは4章と同じ全blankskyと全地食データである。ただし6.9節ではCXBの影響を調べるため、天体由来の信号がないNone2, IRU checkout, RX J1856.5-3754の計14観測の全データを用いた。イメージ解析を除いてはHXI1と2のデータを平均したものをを用いた。

6.3 この章での解析の進め方

この章では主として、中性子とAlbedo光子の成分のみが軌道上陽子のカウントレートと比例関係を示すこと、DSSD2, 3, 4のスペクトル間に差があればそれを担うのは中性子以外の成分である、という2点に着目し、次の点を調査した。

- DSSD 2-4と宇宙線モニタのカウントレート（CR rate）の相関
- CR rateの大きさの違いによるDSSD 2-4スペクトルの変化
- DSSD 2, 3, 4のスペクトル比較
- エネルギー帯域ごとのDSSD 2-4とCR rateの相関
- CR rateと相関する成分（相関成分）としない成分（不変成分）の抽出
- 衛星の姿勢の違いによるDSSD 2-4スペクトルの変化
- 相関成分と不変成分のスペクトルによるデータの再現

6.4 DSSD 2-4 と宇宙線モニタの カウントレート (CR rate) の相関

DSSD 2-4 のカウントレートが宇宙線モニタのカウントレート (CR rate) と似た空間分布を示すということを定量化するため、ここでは両者の各座標でのカウントレートの相関を調べた。全 blanksky, 全地食それぞれで全くセクションをかけずに相関をとった結果を図 6.1 左上, 図 6.2 左上に示す。全 blanksky, 全地食ともおおよそ直線的な相関を示し、 $CR\ rate > 2\ s^{-1}$ にはいくつか直線から大きく外れる点がある。図 6.1, 図 6.2 それぞれの右上, 右下はさらに DSSD 1, CdTe DSD カウントレートとの相関を示したものである。それぞれの図の右上で赤い点は DSSD 1 が明るい領域なので、直線から外れる点はどれも DSSD 1 が明るいことが分かる。さらに、これらには SAA 通過後の放射化の影響も含まれている。

電子と放射化の成分の影響を差し引くため、図 6.3, 図 6.4 のように、全 blanksky, 全地食とも、SAA まわりの電子が強い領域と放射化が DSSD 2-4 に強く影響する $T_SAA_core < 2\ ks$ の時間帯、さらに blanksky では北西の特に明るい領域のイベントを除き、DSSD 2-4 と CR rate との相関を調べた。以降の解析ではこのセクションをかけたイベントをそれぞれ全 $blanksky_{sel.}$, 全地食 $_{sel.}$ とする。結果が図 6.5 である。直線から外れる bin が大きく減ったのが分かる。 $CR\ rate \sim 1.3\ s^{-1}$ の構造を詳しく見るため、図 6.7 では CR rate の大きさごとに点を 9 個にまとめて表示した。全 $blanksky_{sel.}$, 全地食 $_{sel.}$ とも、おおよそ直線上に乗っているのが確認できる。DSSD 2-4 カウントレートが CR rate と強い相関をもつことは、DSSD 2-4 の主成分が中性子と Albedo 光子であることを支持する重要な結果である。

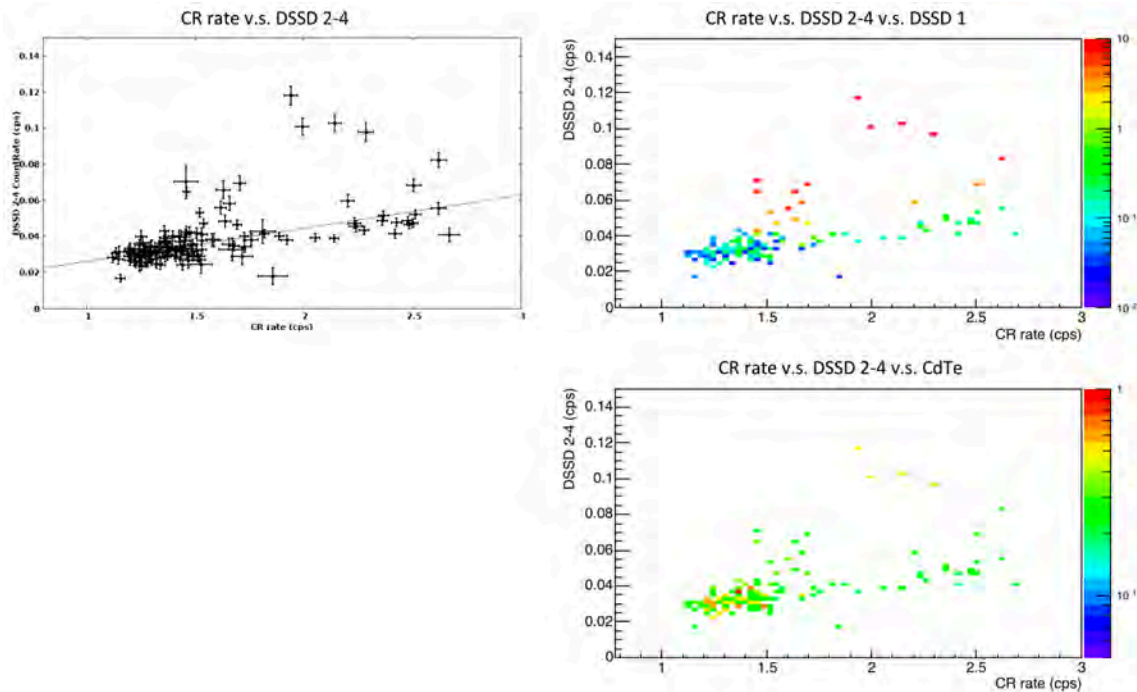


図 6.1: 全 blanksky の DSSD 2-4 と CR rate, DSSD 1, CdTe DSD カウントレートの空間分布の相関。DSSD 2-4 カウントレートと CR rate (左上) , それらに加えて DSSD 1 カウントレート (右上) , CdTe DSD カウントレート (右下) の相関をとった。左上図では、一次関数でフィットした結果も示した。

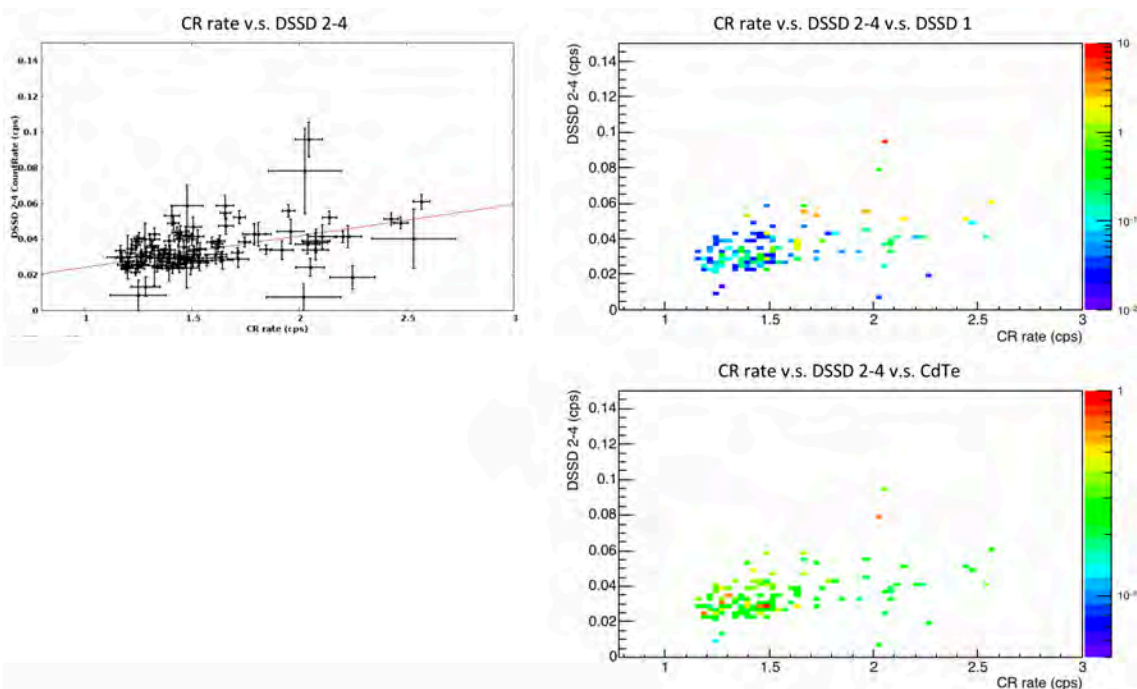


図 6.2: 全地食の DSSD 2-4 と CR rate, DSSD 1, CdTe DSD カウントレートの空間分布の相関。DSSD 2-4 カウントレートと CR rate (左上) , それらに加えて DSSD 1 カウントレート (右上) , CdTe DSD カウントレート (右下) の相関をとった。左上図では、一次関数でフィットした結果も示した。

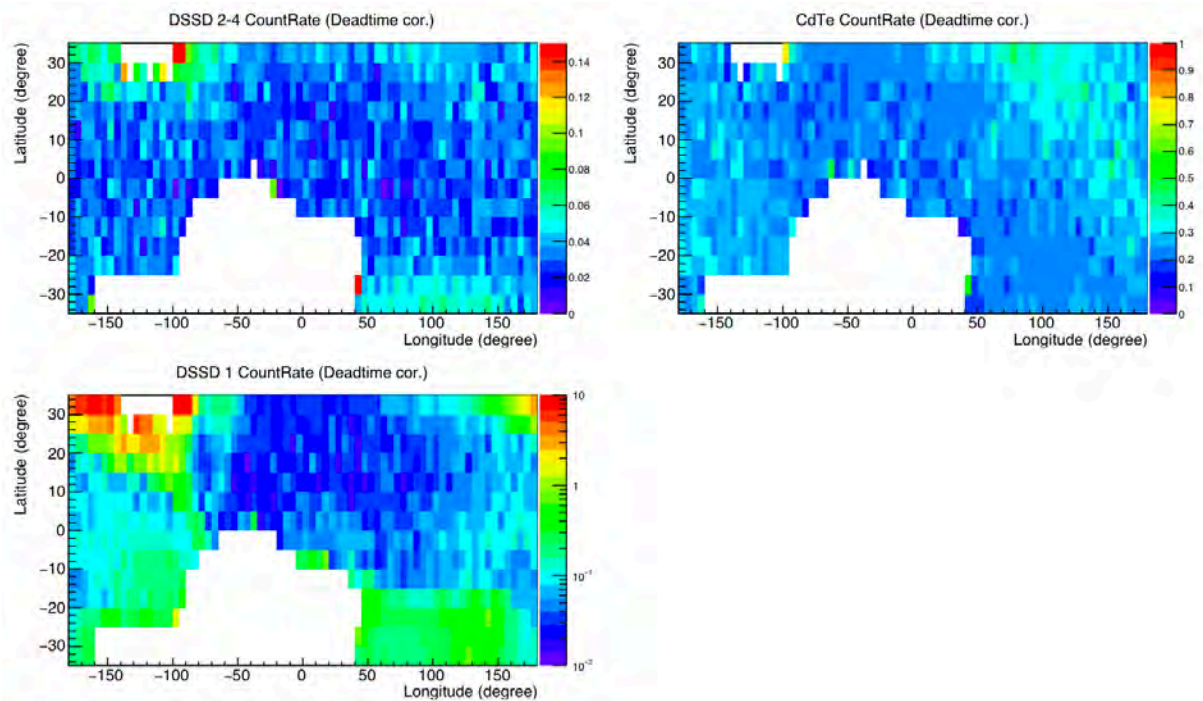


図 6.3: 電子成分と放射化成分が強いイベントを除いた全 blanksky での DSSD 2-4 (左上), CdTe DSD (右上), DSSD 1 (左下) のカウントレートの空間分布。

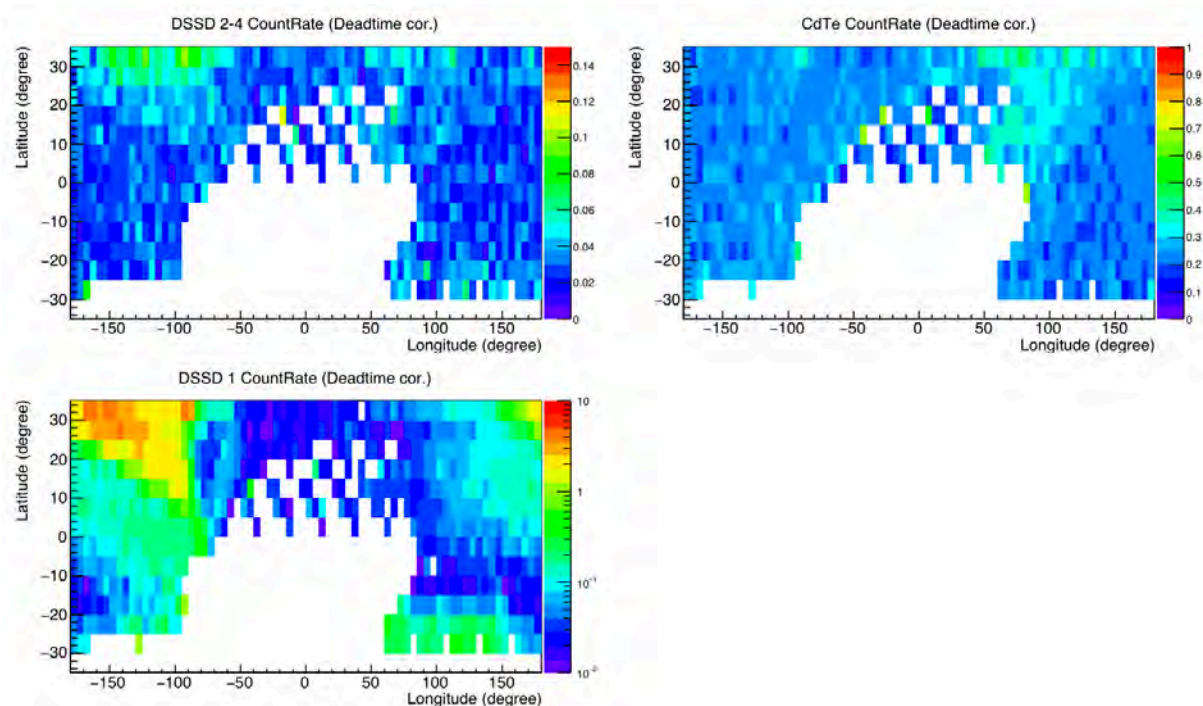


図 6.4: 電子成分と放射化成分が強いイベントを除いた全地食での DSSD 2-4 (左上), CdTe DSD (右上), DSSD 1 (左下) のカウントレートの空間分布。

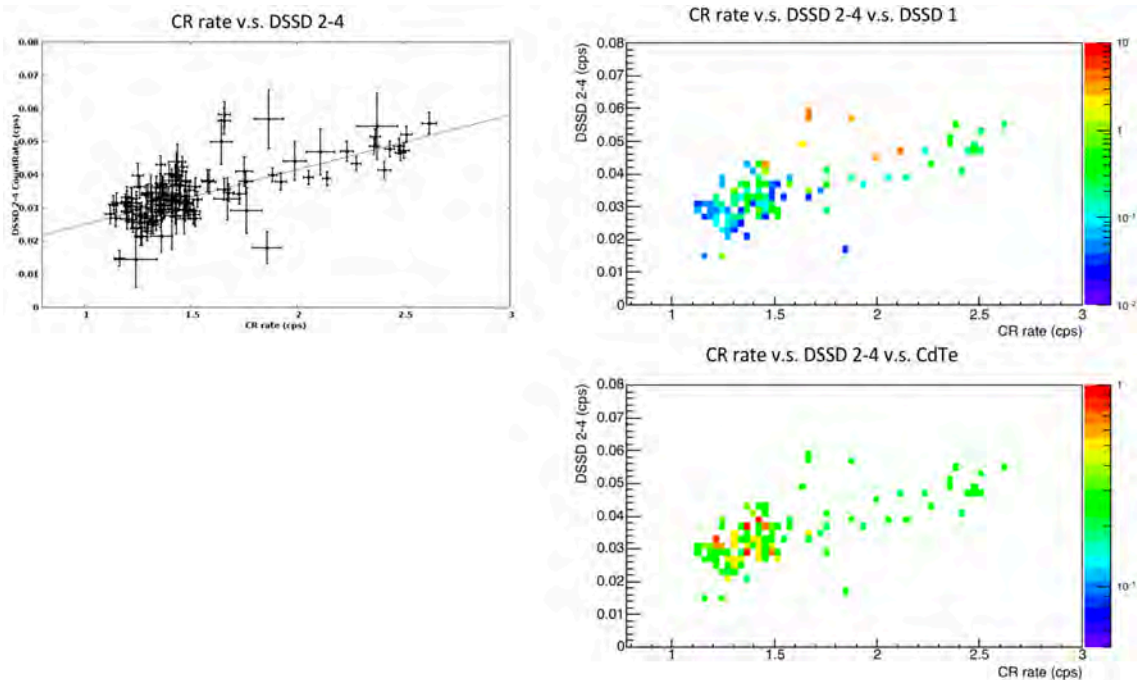


図 6.5: 全 blanksky_{sel} の DSSD 2-4 と、CR rate, DSSD 1, CdTe DSD カウントレートの空間分布の相関。DSSD 2-4 カウントレートと CR rate (左上), それらに加えて DSSD 1 カウントレート (右上), CdTe DSD カウントレート (右下) の相関をとった。左上図では、一次関数でフィットした結果も示した。

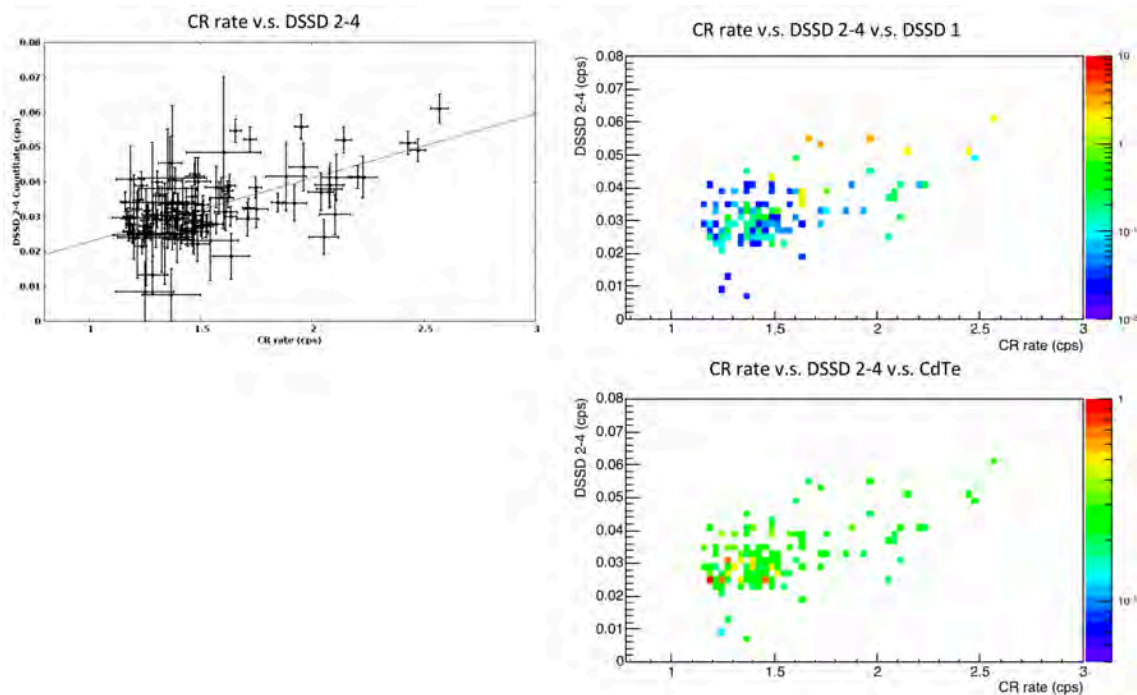


図 6.6: 全地食_{sel} の DSSD 2-4 と、CR rate, DSSD 1, CdTe DSD カウントレートの空間分布の相関。DSSD 2-4 カウントレートと CR rate (左上), それらに加えて DSSD 1 カウントレート (右上), CdTe DSD カウントレート (右下) の相関をとった。左上図では、一次関数でフィットした結果も示した。

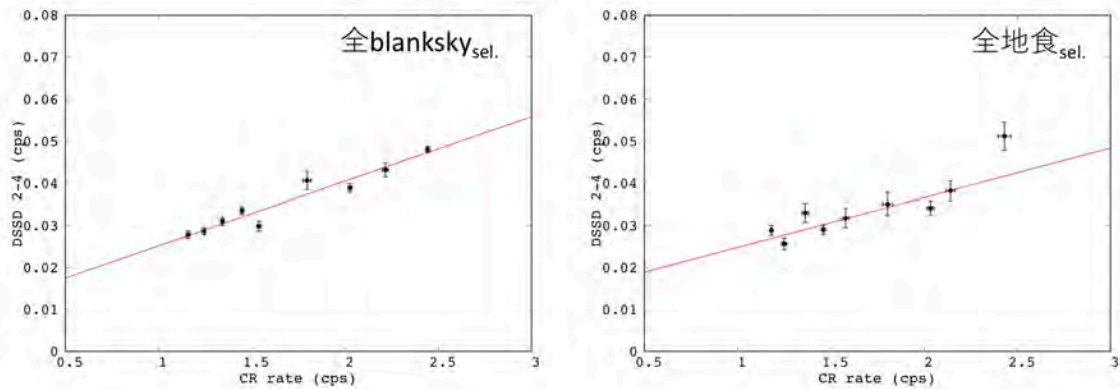


図 6.7: 全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} の DSSD 2-4 カウントレートの空間分布の相関。それぞれ一次関数でフィットした結果も示した。

6.5 CR rate の大きさの違いによる DSSD 2-4 スペクトルの変化

ここでは、CR rate の大きさごとに DSSD 2-4 のスペクトルを抽出し、それぞれのカウントレートの差がどのエネルギー帯域を占めるか、またスペクトルの形はどう違うのかを調べた。図 6.8 は全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} の DSSD 2-4 イベントを CR rate の大きさにしたがって分けたそれぞれのスペクトルであり、図 6.9 は 50 keV 以上の拡大図である。CR rate の値 (s^{-1}) が < 1.2 (黒), 1.2-1.5 (赤), 1.5-2.0 (青), > 2.0 (マゼンタ) のイベントについて示した。CR rate の変化にしたがう DSSD 2-4 スペクトルの変化が大きいのは 40 keV 以下の低エネルギー帯域である。したがって、40 keV 以上の高エネルギー側では中性子と Albedo 光子成分の寄与は小さいと思われる。スペクトルの形を比較すると、全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} とも 10 keV 以下ではおよそ形を保ったまま高さが変化しているが、全 blanksky_{sel.} の 10-20 keV では CR rate が高いほどフラットな形になっており、全地食_{sel.} ではマゼンタのみ ~17, 25 keV にピークらしき構造が見える。

6.6 DSSD 2, 3, 4 のスペクトル比較

ここでは、DSSD 2, 3, 4 のスペクトルに違いが見られるか、見られるとすればどのエネルギー帯域にどのような形の変化が見られるかを調べた。図 6.10 は全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} それぞれの DSSD 2 (黒), 3 (赤), 4 (青) スペクトルである。DSSD 2-4 の差が大きいのは 10-20 keV であり、全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} とも上層ほど明るい。10-20 keV のカウントレートは DSSD 2 に対して 3, 4 がそれぞれ 75%, 62% の値をとっている。上層ほど盛り上がった形になっており、全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} とも、~13, 15 keV にピークがあるようにも見える。図 6.11 は 50 keV 以上を拡大したものである。50 keV 以上では layer 間の差は見られない。

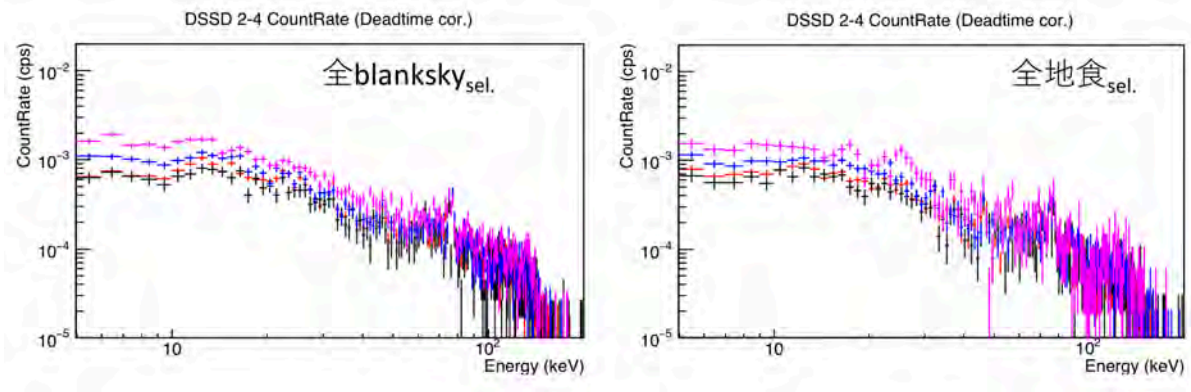


図 6.8: CR rate ごとに抽出した全 blanksky_{sel.} の DSSD 2-4 スペクトル。CR rate (s^{-1}) の範囲はそれぞれ < 1.2 (黒) , $1.2-1.5$ (赤) , $1.5-2.0$ (青) , > 2.0 (マゼンタ) である。

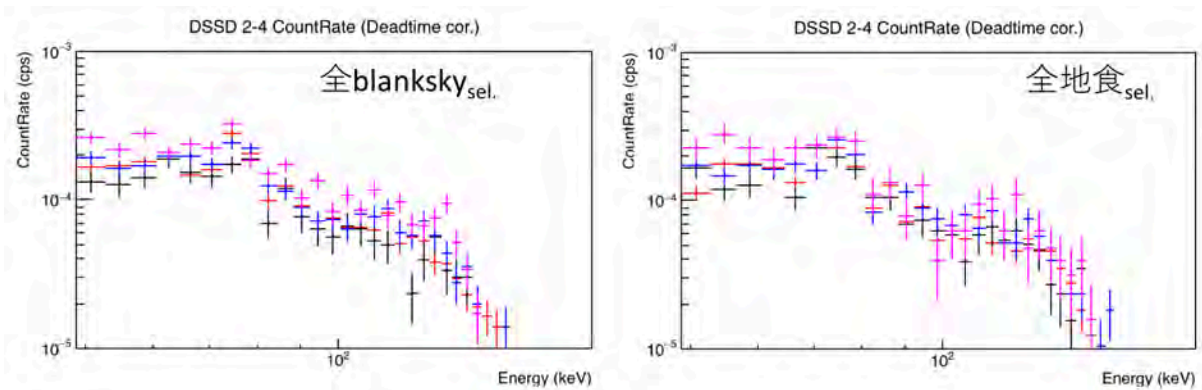


図 6.9: CR rate ごとに抽出した全 blanksky_{sel.} の DSSD 2-4 スペクトルの 50 keV 以上を拡大したもの。CR rate (s^{-1}) の範囲はそれぞれ < 1.2 (黒) , $1.2-1.5$ (赤) , $1.5-2.0$ (青) , > 2.0 (マゼンタ) である。

中性子成分は layer 間の違いをほとんど作らないはずなので、10-20 keV の layer 間の変化を生むのは別の成分である。例えば 15 keV での DSSD 2 から 3, 3 から 4 の減少分は全 blanksky_{sel.} で $30 \pm 12\%$ である。DSSD1 枚は 15 keV 光子を $\approx 70\%$ 吸収するので、何らかの過程で発生した光子が DSSD 2 カウントレートの 40%, layer 間の差を作らない成分が残りの 60% を占めるとすれば、DSSD 2 から 3 への変化分は光子が担うとして矛盾ない。さらにこのとき DSSD 3 では光子成分が $17 \pm 7\%$ となっているため、DSSD 3 から 4 への減少は $12 \pm 5\%$ と予想でき、実際の減少分である $30 \pm 12\%$ とおよそ無矛盾である。この光子成分の寄与を見積もるため、少なくとも DSSD 2 と 3, 3 と 4 の差分は光子であると考え、10-20 keV の全カウントレートの少なくとも 16% が光子で占められていると言える。

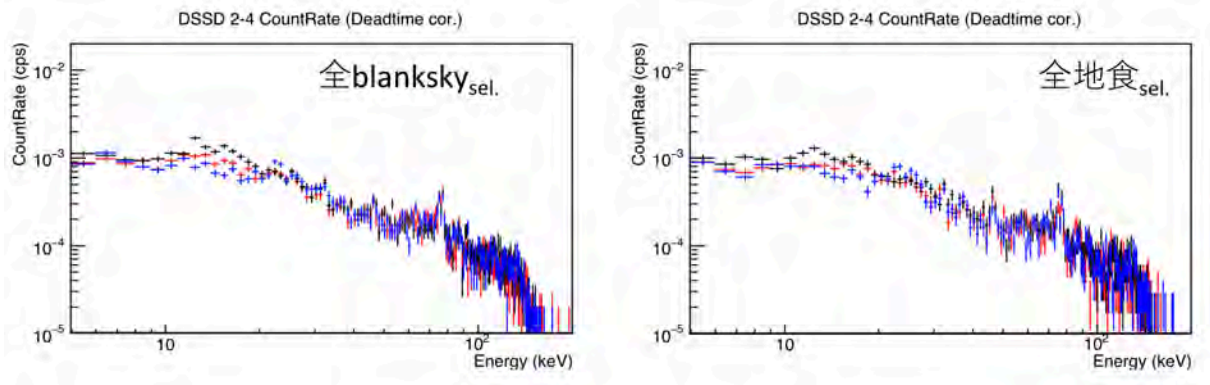


図 6.10: 全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} での DSSD 2 (黒), 3 (赤), 4 (青) それぞれのスペクトル。

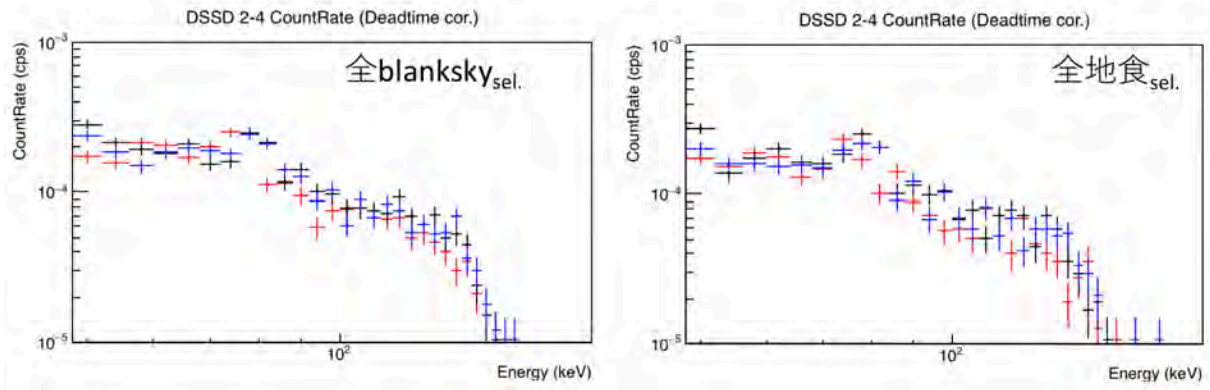


図 6.11: 全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} での DSSD 2 (黒), 3 (赤), 4 (青) それぞれのスペクトルの 50 keV 以上を拡大したもの。

6.7 エネルギー帯域ごとの DSSD 2-4 と CR rate の相関

ここでは、中性子と Albedo 光子が主成分となるエネルギー帯域を明らかにするため、エネルギー帯域ごとの DSSD 2-4 カウントレートと CR rate の相関を詳しく調べた。図 6.12, 図 6.13 にその結果を示す。それぞれの相関プロットについてベストフィットの一次関数 ($A \times (\text{CR rate}) + B$) も示した。この結果をもとに、表 6.1 には各エネルギー帯域における CR rate と相関しない成分 (不変成分; B) のカウントレートと全体に占める割合を示した。全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} とも、やはり 40 keV 以下に強い相関が見られ、40 keV 以上では相関は小さいのが分かる。layer 間の違いが見られた 10-20 keV の帯域も強い正の相関を示している。低エネルギー側ほど不変成分の寄与が小さいが、90 keV 以上でも不変成分が減っている。10-20 keV では不変成分が ~ 40% 以下である。したがって、6.6 節での議論の通り、この帯域では DSSD 2, 3, 4 の差をつくる光子成分が 16% 以上含まれると考えられるものの、それが相関成分と不変成分のどちらに含まれるかの判断はできない。

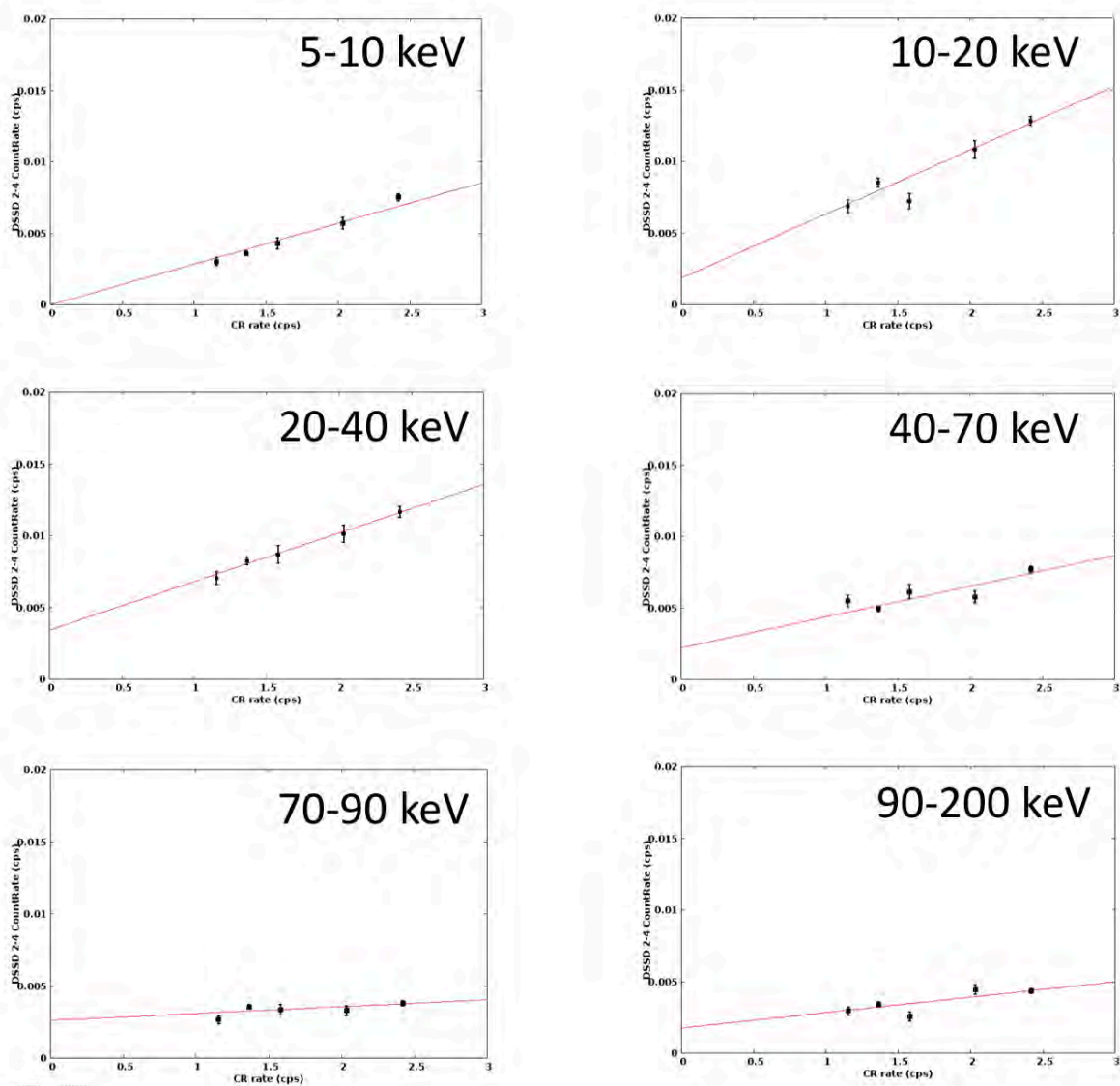


図 6.12: 全 $\text{blanksky}_{\text{sel}}$ におけるエネルギー帯域ごとの CR rate と DSSD 2-4 カウントレートの相関。それぞれを一次関数でフィットした結果を示してある。ただし 5-10 keV ではベストフィットの定数成分が負になるため、定数を 0 に固定してフィットした。

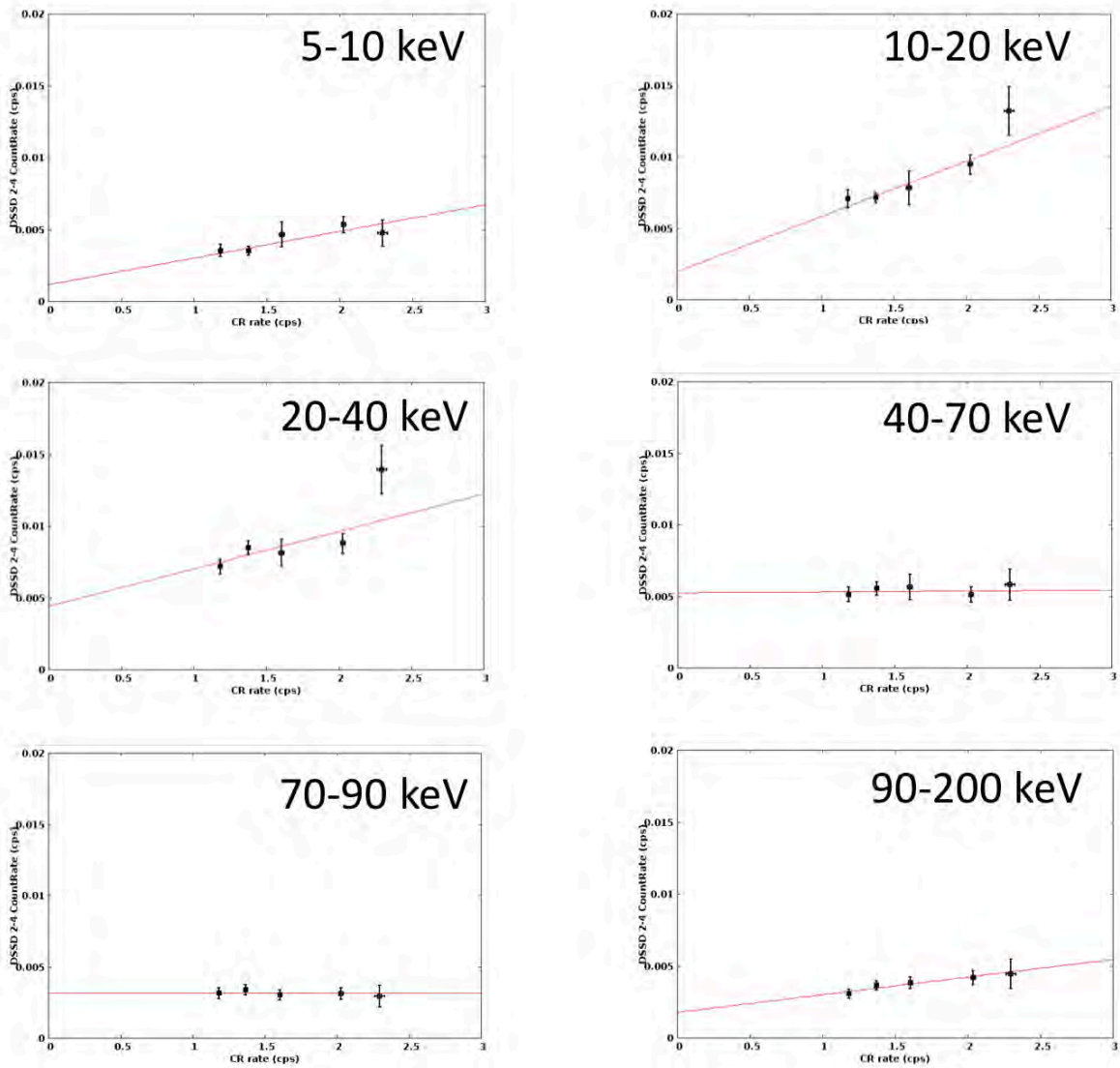


図 6.13: 全地食_{sel.}におけるエネルギー帯域ごとの CR rate と DSSD 2-4 カウントレートの相関。それぞれを一次関数でフィットした結果を示してある。ただし、70-90 keV ではベストフィットの比例係数が負になるため、定数のみでフィットした。

表 6.1: 各エネルギー帯域における不変成分のカウントレートと占める割合

	エネルギー (keV)	5-10	10-20	20-40	40-70	70-90	90-200
全 blanksky _{sel.}	カウントレート *	0 [†]	1.9 ± 1.3	3.4 ± 0.4	2.2 ± 0.9	2.6 ± 0.5	1.8 ± 0.7
	占める割合 (%)	0 [†]	21 ± 15	37 ± 4	37 ± 16	78 ± 16	51 ± 20
全地食 _{sel.}	カウントレート *	1.2 ± 0.8	2.0 ± 1.4	4.4 ± 2.2	5.3 ± 0.6	3.5 ± 0.3 [‡]	1.8 ± 0.4
	占める割合 (%)	28 ± 19	22 ± 16	47 ± 23	97 ⁺³ ₋₁₁	100 [‡]	47 ± 11

* 単位は 10^{-3} s^{-1} 。

† フィットすると不変成分のカウントレートが負になるため 0 とした。

‡ フィットすると不変成分のカウントレートが全カウントレートをオーバーするため 100% を占めるとした。

6.8 CR rateと相関する成分（相関成分）としない成分（不変成分）の抽出

ここでは、CR rateと相関する中性子と Albedo 光子の成分のみのスペクトルを取り出すため、CR rate $< 1.5 \text{ s}^{-1}$ の領域と CR rate $> 1.5 \text{ s}^{-1}$ の領域からそれぞれ DSSD 2-4 スペクトルを抽出し、その差分をとったスペクトル（差分スペクトル）を作成した。第一近似では、不変成分は差し引かれて差分スペクトル中に残らないはずなので、差分スペクトルには CR rateと相関する成分（相関成分）のみが残されるはずである。

図6.14に全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.}それぞれの CR rateが低い側のスペクトル（黒）, CR rateが高い側のスペクトル（赤）, それらの差分スペクトル（青）を示した。全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.}とも、差分スペクトルはスクリーン後 NXB 平均スペクトルなどよりもソフトである（平均的なスペクトルのべきが大きい）ことから、中性子と Albedo 光子はやはり低エネルギー側で強いといえる。全 blanksky_{sel.}と全地食_{sel.}での差分スペクトルを比較すると、全 blanksky_{sel.}では10-20 keVが盛り上がるのに対して全地食_{sel.}では20-30 keVが盛り上がっているという違いが見られる。

差分スペクトルを用いると、逆に不変成分を見積もることができる。差分スペクトルの形は相関成分スペクトルと同じだと考えられるが、平均スペクトル中の相関成分の全カウントレートは差分スペクトルからは分からないので、正しく不変成分を求めるには相関成分の高さを推定する必要がある。そこで、全 blanksky_{sel.}では、5-10 keV カウントレートが6.7節で求めた不変成分のカウントレートと合うように差分スペクトルをスケールして平均スペクトルから引き、不変成分を求めた。全地食_{sel.}では、6.7節で求めたカウントレートの誤差が大きいためそれは用いず、差分スペクトルの全カウントレートが全 blanksky_{sel.}と同じと仮定してスケールし、それを平均スペクトルから引くことで不変成分を求めた。これらの結果が図6.15である。平均 DSSD 2-4 スペクトル（黒）, 差分スペクトル（青）, 不変成分（マゼンタ）を示した。さらに、6.7節で求めた各エネルギー帯域での不変成分のカウントレートのエラー範囲を薄黒の領域で示した。これらを見ると、全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.}とも不変成分はやはり高エネルギー側を占めることがわかる。不変成分スペクトルは6.7節で求めた各エネルギー帯域の不変成分のカウントレートとおおよそ無矛盾であった。全 blanksky_{sel.}と全地食_{sel.}での不変成分の違いは主に20-30 keVに現れている。

全 blanksky_{sel.}と全地食_{sel.}の違いの原因には2つ考えられる。1つは実際にバックグラウンド成分の寄与が異なることの効果である。例えば、DSSD 1のカウントレートは全 blanksky_{sel.}と全地食_{sel.}で多少異なる空間分布をもっており（図5.1, 図5.2）、電子成分の影響が両者で異なることを示唆している。また、単純には、宇宙から来る CXB は全 blanksky_{sel.}で強く、大気から来る Albedo 光子は全地食_{sel.}で強く影響すると考えられる。これらについては本論文では追究しないが、考慮すべき点である。2つ目は、実際にはバックグラウンド成分の寄与に差はないものの、差分スペクトルをつくる際に CR rateが高い側と低い側で不変成分が均等でないことによる効果である。放射化成分については T_SAA_coreが小さい時間帯を用いていないので同じだけ寄与があると考えてよいが、例えば電子成分は座標によって100倍以上の強度の違いがあるので、たとえ平均的な影響が小さいとしても差分スペクトルに寄与が残りうる。また、CXBは衛星の姿勢によって寄

与が異なると考えられるので、CR rateの大ききでイベントを分けたときに衛星の姿勢に偏りがあれば、同じく差分スペクトルに影響しうる (6.9節参照)。

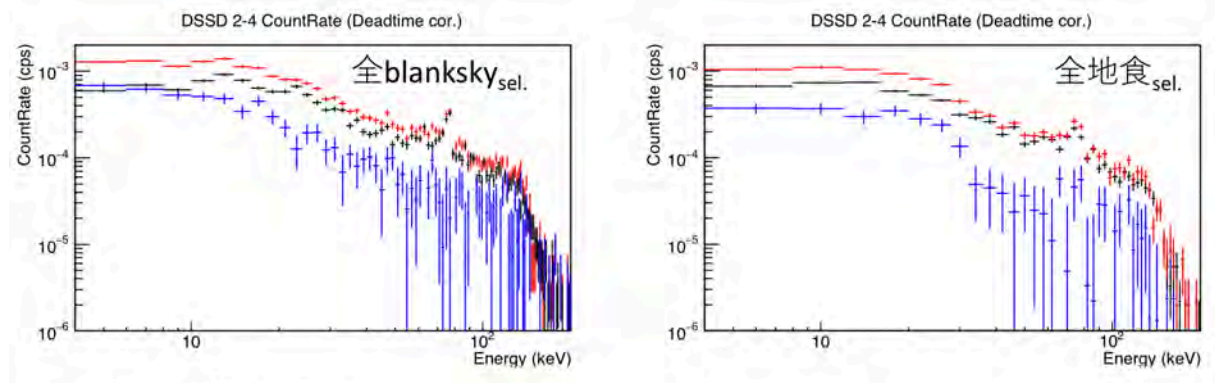


図 6.14: 全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} それぞれにおける DSSD 2-4 の CR rate (s^{-1}) < 1.5 の領域のスペクトル (黒) と > 1.5 の領域のスペクトル (赤)、それらの差分をとったスペクトル (青)。

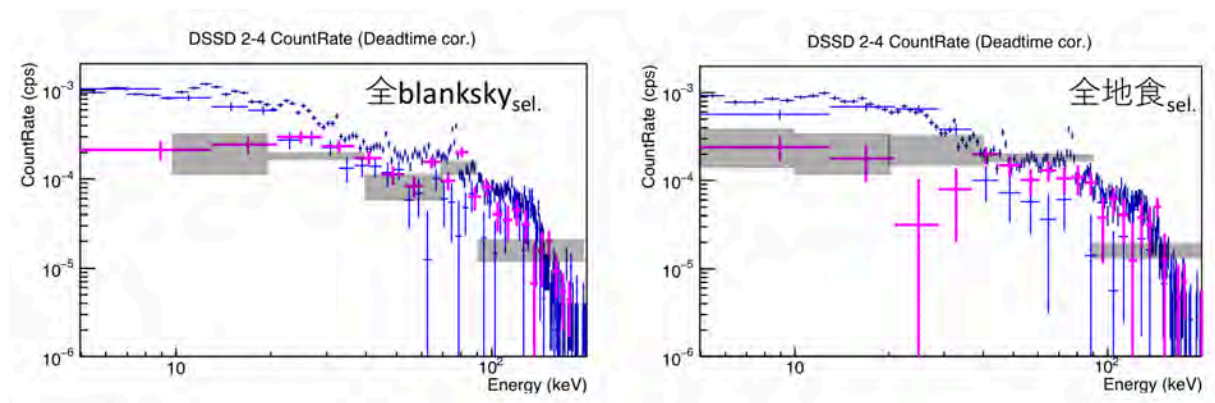


図 6.15: 全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} それぞれにおける DSSD 2-4 スペクトル (黒) と図 6.14 で求めた差分スペクトル (青)、さらに CR rate と相関しない成分 (不変成分; マゼンタ)。薄黒の領域は 6.7 節で求めた各エネルギー帯域での不変成分のカウントレートのエラー範囲を表す。不変成分は、全 blanksky_{sel.} ではスケールした差分スペクトルを平均スペクトルから引き、5-10 keV カウントレートを 6.7 節で求めた不変成分のカウントレートに合わせたもの。全地食_{sel.} では、差分スペクトルを全 blanksky_{sel.} の差分スペクトルと全カウントレートが等しくなるようスケールして平均スペクトルから引き、不変成分を求めた。

6.9 衛星の姿勢の違いによる DSSD 2-4 スペクトルの変化

ここでは、CXB 光子の DSSD 2-4 への影響を見積もるため、衛星の姿勢ごとの DSSD 2-4 スペクトルを作成した。ここでは None2, IRU checkout, RX J1856.5-3754 の計 14 観

測の全データを用い、衛星の視線方向が地球を見込む角の大きさ (Elevation; 通常観測を正、地食を負とする) ごとにイベントを抽出した。電子と放射化の成分の影響を抑えるため全 blanksky_{sel.} と同じセレクションをかけた。図 6.16 がその結果である。Elevation によるスペクトルの違いは主に 20 keV 以下で見られることがわかる。15 keV において最大 (赤) から最小 (青) への減少分は ~30% である。

CXB のうち BGO シールドを透過してくるものは 10% 以下なので、バックグラウンドに影響するのは主に HXI の視野方向から入ってくるものだと考えられる。これを確かめるため、図 6.17 のように図 6.16 右図と同じものを DSSD 2 のみ、DSSD 4 のみで作成した。DSSD 2 では Elevation による違いが 10 keV において最大 ~40% の差が見られるが、DSSD 4 ではほぼ差がない。これより、確かに CXB は上層ほど影響する、すなわち視野方向からくるものが主だということが確認できた。全 blanksky_{sel.} と全地食_{sel.} の差分スペクトル、不変成分スペクトルそれぞれの違いが大きい 20–30 keV の帯域では Elevation による変化は小さいと分かったので、この差は CXB とは関係しないと思われる。

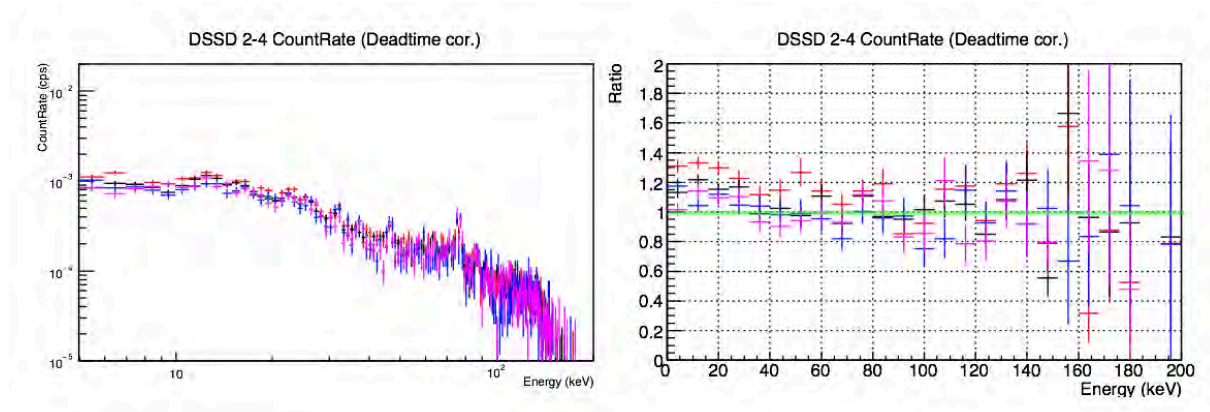


図 6.16: 衛星が地球を見込む角 (Elevation) ごとの DSSD 2–4 スペクトル (左) とスクリーン後 NXB 平均との比 (右)。それぞれについて Elevation (°) > 30 (黒), 0–30 (赤), –20–0 (青), < –20 (マゼンタ) について示した。右図では比が 1 となる位置を緑線で示した。

6.10 相関成分と不変成分のスペクトルによるデータの再現

ここでは、6.8 節で導き出した差分スペクトルと不変成分スペクトルを用いて DSSD 2–4 データが説明できるかを検証した。差分スペクトルが DSSD 2–4 スペクトルの CR rate にしたがった変動を正しく抽出できており、また不変成分を正しく見積もれていれば、CR rate の大きさごとに並べたスペクトルはスケールした差分スペクトルと不変成分の和で説明できるはずである。

図 6.18, 図 6.19 は、全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} それぞれの CR rate ごとのスペクトル (黒) と、スケールした差分スペクトル (青) と不変成分の和 (赤) とを比較したものである。全 blanksky_{sel.} では差分スペクトルは 5–10 keV のカウントレートを CR rate ごとのスペク

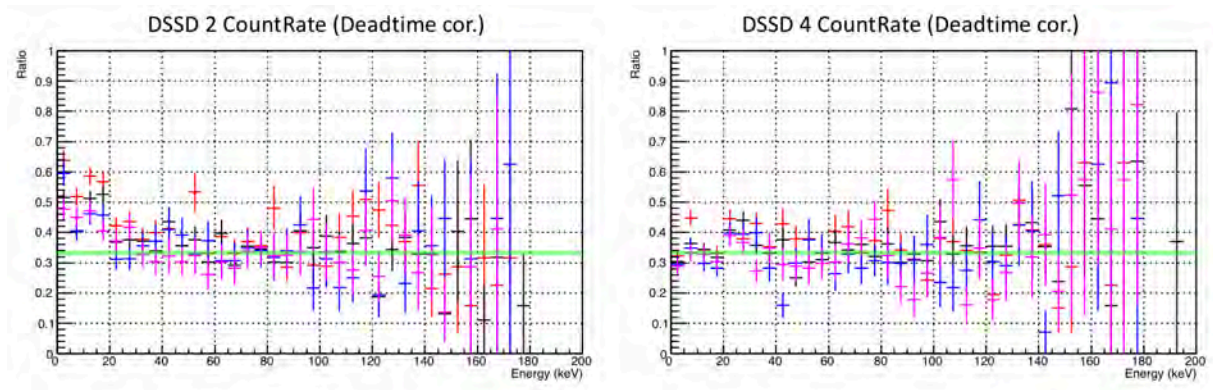


図 6.17: 衛星が地球を見込む角 (Elevation) ごとのスペクトルのスクリーン後 NXB 平均との比。DSSD 2 (左) と DSSD 4 (右) について示した。それぞれについて Elevation ($^{\circ}$) > 30 (黒), $0-30$ (赤), $-20-0$ (青), < -20 (マゼンタ) について示した。比が $1/3$ となる位置を緑線で示した。

トルと合わせるようにスケールし、全地食_{sel.}では全カウントレートが全 blanksky_{sel.}の対応する差分スペクトルと等しくなるようスケールした。これらを見ると、全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.}とも差分スペクトルと不変成分スペクトルの和が CR rate にしたがったスペクトル変化をよく説明できているのが見て取れる。したがって、おおむね正しく相関成分と不変成分のスペクトルを抽出できていることが確かめられた。

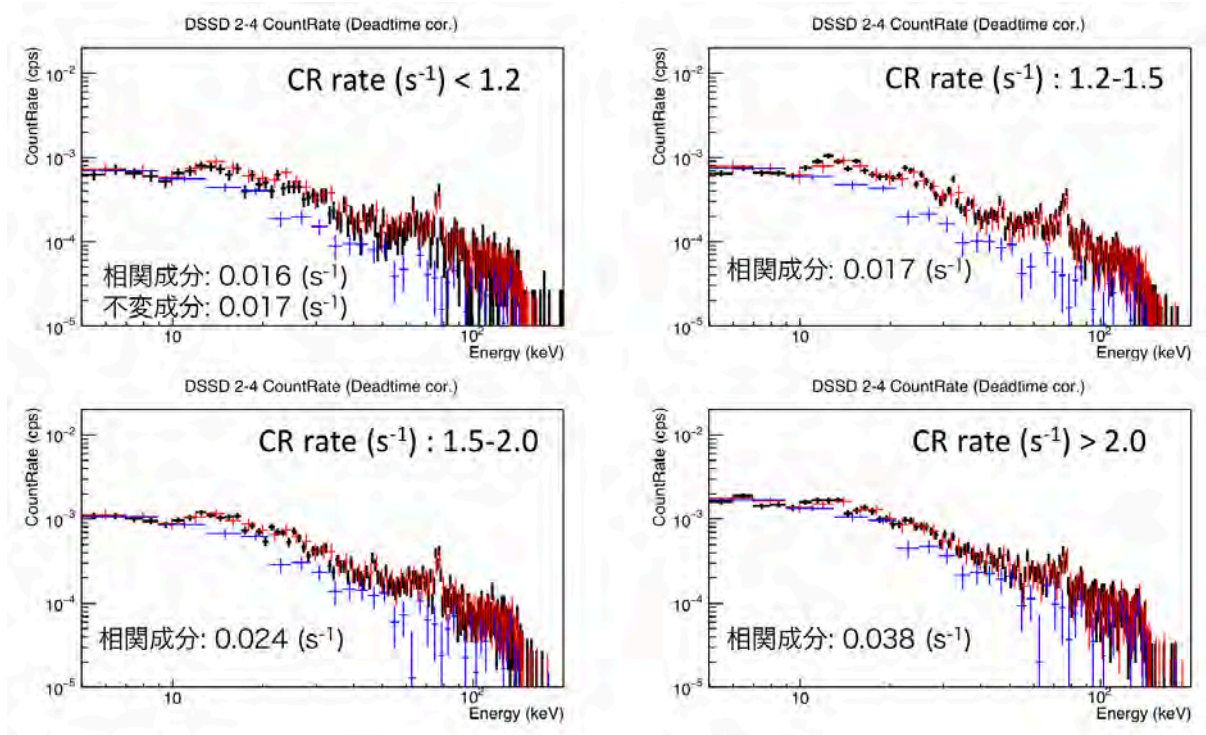


図 6.18: DSSD 2-4 , 全 blanksky_{sel.} の CR rate ごとのスペクトル (黒) それぞれと、6.8 節で求めた差分スペクトルをスケールしたもの (青) と不変成分スペクトルの和 (赤) との比較。差分スペクトルは 5-10 keV のカウントレートを CR rate ごとのスペクトルと合わせるようにスケールしてある。

6.11 シミュレーション結果との比較

以下では、シミュレーションにより推定されたスペクトルで差分スペクトルや平均スペクトルが説明できるかを検証した。シミュレーションスペクトルは、高エネルギー物理の分野でよく使われるモンテカルロシミュレータ Geant 4 ツールを用い、「ひとみ」HXI チームにより衛星の打ち上げ前に作成されたものである。地食を仮定したシミュレーションが行われており、バックグラウンド起源粒子のエネルギー分布の仮定は [31] (図 3.7) , 検出器まわりのジオメトリは [25][27] にある。

全 blanksky_{sel.} の DSSD 2-4 スペクトルにシミュレーションスペクトルを重ねたものを図 6.20 に示す。DSSD 2-4 スペクトル (黒) と、シミュレーションの中性子 (赤) , Albedo 光子 (マゼンタ) , 電子 (青) , CdTe と BGO の放射化 (緑) , CXB (黄) , シミュレーションスペクトルの和 (赤太線) それぞれのスペクトルを示した。20 keV 以下では中性子成分が主であり、Albedo 光子が寄与するのは 50 keV 以上の高エネルギー側である。これらのスペクトルはまだ観測データを説明できると確認されておらず、むしろ本研究の結果をフィードバックすべきものあることに注意が必要である。また、データの ~120 keV 以上は ASIC のシェイパーが正しく動作しておらず、シミュレーションとの比較には使えない。

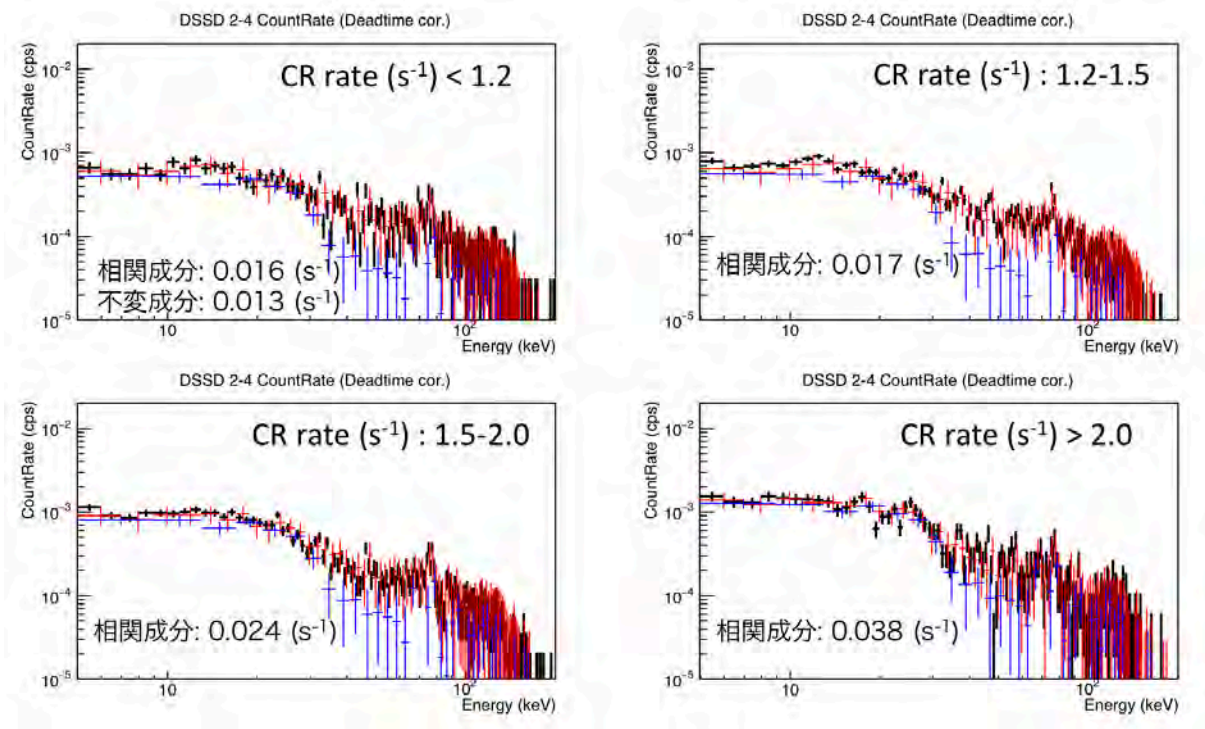


図 6.19: DSSD 2-4, 地食_{sel.} の CR rate ごとのスペクトル (黒) それぞれと、6.8 節で求めた差分スペクトルをスケールしたもの (青) と不変成分スペクトルの和 (赤) との比較。差分スペクトルは、全カウントレートが全 blanksky_{sel.} の対応する差分スペクトルと等しくなるようスケールしてある。

図 6.21 では、図 6.14 で求めた差分スペクトル (青) とシミュレーションの相関成分 (赤), 不変成分 (黄) スペクトルである。相関成分は中性子と Albedo 光子、不変成分は電子、CdTe と BGO の放射化, CXB の成分からなる。差分スペクトルとシミュレーションの相関成分スペクトルの形を比較するため、相関成分スペクトルは 5-120 keV のカウントレートが差分スペクトルと等しくなるようスケールしてある。これらを見ると、全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} とも相関成分はデータの方がシミュレーションよりもソフトになっており、特に 10-20 keV には差分スペクトルの超過が最大 ~2 倍あるのが分かる。また、全地食_{sel.} では 20-30 keV でもデータが ~2 倍超過している。

シミュレーションの中性子スペクトルが Albedo 光子成分よりもソフトであることに注目し、中性子スペクトルのみとデータを比較したのが図 6.22 である。シミュレーションスペクトルは 5-120 keV のカウントレートが差分スペクトルと等しくなるようスケールしてある。全 blanksky_{sel.} ではシミュレーションとデータがよく合っており、シミュレーションが正しければ Albedo 光子の寄与が小さいと言える。全地食_{sel.} については、40-120 keV のみのカウントレートを合わせてシミュレーションスペクトルをスケールした場合 (赤点線) も示した。全地食_{sel.} では 20-30 keV のデータ超過はやはり説明できないものの、他の帯域のべきはシミュレーションの中性子成分とよく合っている。

Albedo 光子成分は CXB と同様、HXI 視野に入ってくるものが主であると思われ、シミュレーションが正しければ 90 keV 以上に強く影響するはずだが、90 keV 以上の帯域

だと DSSD の光電吸収断面積がとても小さいために layer 間に差は見られず、この帯域を用いて Albedo 光子成分の寄与を調べるのは難しい (図 6.11 参照)。したがって中性子と Albedo 光子の成分を切り分けるのは、データのみからでは困難だと考えられる。

図 6.23 には DSSD 2-4 データの不変成分 (マゼンタ) とシミュレーションの不変成分スペクトル (黄) を示した。スペクトルの形を比較するため、シミュレーションの不変成分は 5-120 keV のカウントレートがデータの不変成分と等しくなるようスケールしてある。全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} とも不変成分スペクトルの 10-20 keV でデータが ~50% 不足、30-50 keV で ~2 倍超過しているが、50 keV 以上の帯域では同じような形を示している。相関成分に Albedo 光子成分の寄与が小さいと分かっているので、シミュレーションの不変成分に Albedo 光子成分を加えたものをデータと比較した。結果が図 6.24 である。ここでもスペクトルの形を比較するため、シミュレーション結果は 5-120 keV のカウントレートがデータと等しくなるようスケールしてある。この場合は図 6.23 と比較してよく合っているのが分かる。全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} とも、シミュレーションとデータの差が見られるのは主に 30-50 keV である。すなわち、Albedo 光子は中性子よりも CR rate との空間的相関が小さい可能性があると言える。

図 6.25 では、全成分のデータ (黒) とシミュレーション結果 (赤実線) を比較した。シミュレーションのスペクトルは 5-120 keV のカウントレートがデータと等しくなるようスケールしてある。赤点線は相関成分、黄点線は不変成分のシミュレーション結果である。この図では、シミュレーションの相関成分には Albedo 光子も含まれているが、全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} ともおおそデータを説明できている。しかしシミュレーション結果の相関成分から Albedo 光子成分を除くと、図 6.25 のように、データよりソフトなスペクトルになってしまう。このことから、Albedo 光子は CR rate との相関は小さいものの、やはり DSSD 2-4 への寄与は有意にあると考えられる。

以上をまとめると、相関成分についてはデータの方がソフトであり、特に 10-20 keV にはデータの超過があった。また、全地食_{sel.} では 20-30 keV にも大きな超過があった。ただし中性子成分のみのシミュレーション結果と比較すると、全 blanksky_{sel.} はよく合い、全地食_{sel.} も 20-30 keV 以外の帯域はよく合っていた。不変成分については、全 blanksky_{sel.} ではデータとシミュレーションのスペクトルの形はおおよそ一致したものの、全地食_{sel.} では 20-30 keV にデータの大きな不足が見られた。シミュレーションの不変成分に Albedo 光子成分を加えると不変成分はよりデータと合った。また、Albedo 光子を除いたシミュレーション結果よりも Albedo 光子を含むほうが、より全成分のデータを説明できた。これらより、Albedo 光子成分は CR rate との相関が中性子と比べて小さいと考えられる。

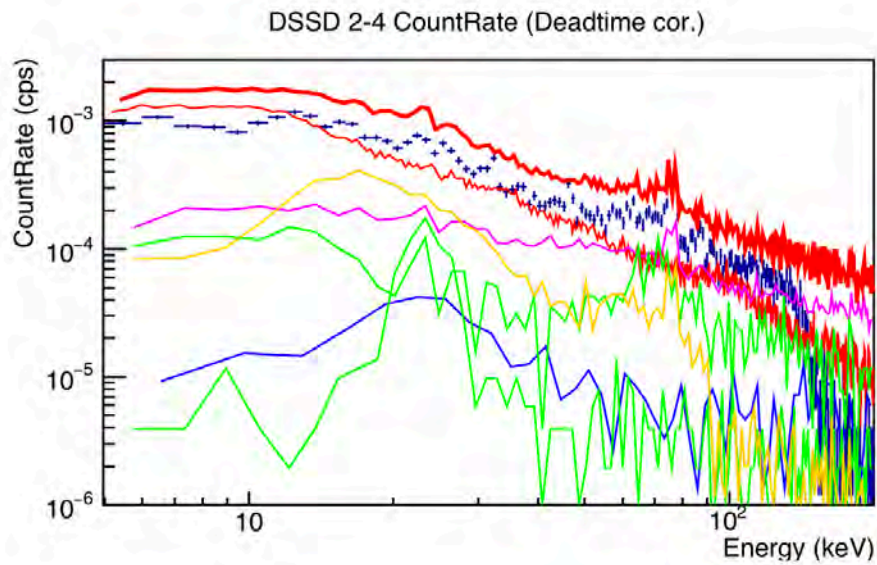


図 6.20: DSSD 2-4 の全 blanksky_{sel.} データ (黒) と各バックグラウンド成分のシミュレーションスペクトル。中性子 (赤), Albedo 光子 (マゼンタ), 電子 (青), CdTe と BGO の放射化 (緑), CXB (黄), 全成分の和 (赤太線) のスペクトルを示した。

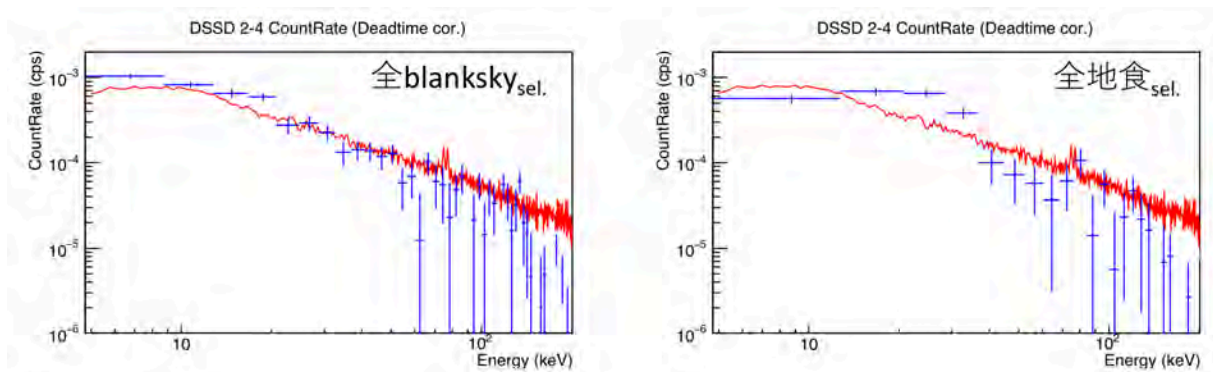


図 6.21: 図 6.14 の差分スペクトル (青) と、シミュレーションの相関成分 (赤)。シミュレーションの相関成分は 5-120 keV のカウントレートが差分スペクトルと等しくなるようスケールしてある。

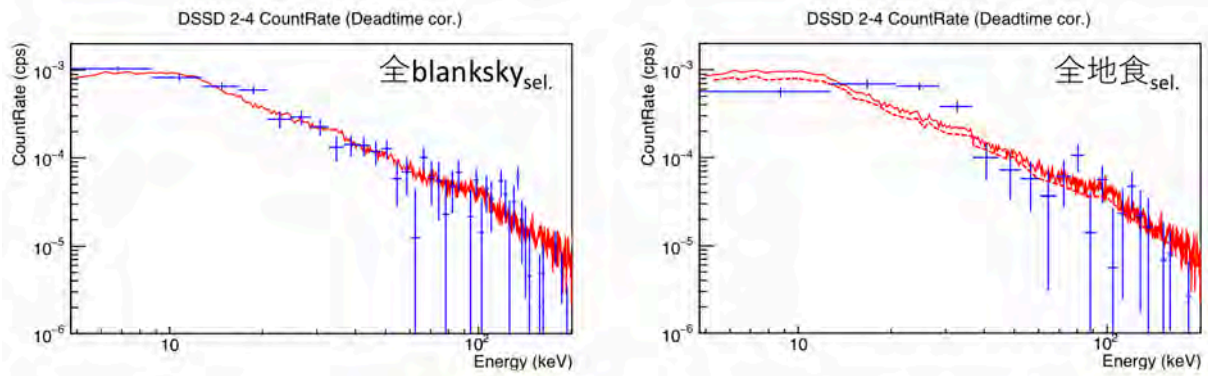


図 6.22: 図 6.14 の差分スペクトル (青) と、シミュレーションの中性子成分 (赤)。シミュレーションの中性子成分は 5–120 keV のカウントレートが差分スペクトルと等しくなるようスケールしてある。右図の赤点線は、シミュレーションの中性子成分を 40–120 keV のカウントレートが差分スペクトルと等しくなるようスケールした場合である。

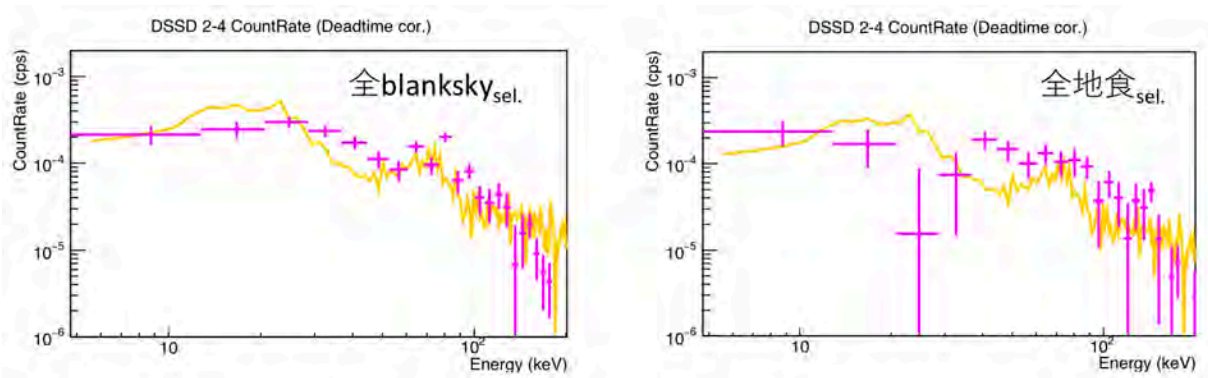


図 6.23: 不変成分のデータ (マゼンタ) とシミュレーション (黄) のスペクトル。シミュレーションのスペクトルは 5–120 keV のカウントレートがデータの不変成分と等しくなるようスケールしてある。

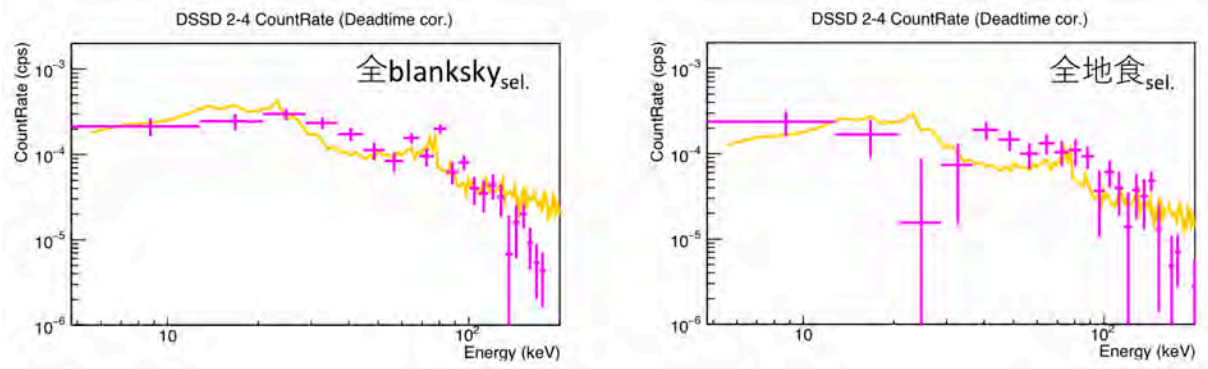


図 6.24: 不変成分のデータ（マゼンタ）と、Albedo 光子を加えた不変成分のシミュレーション（黄）のスペクトル。シミュレーションのスペクトルは5–120 keVのカウントレートがデータの不変成分と等しくなるようスケールしてある。

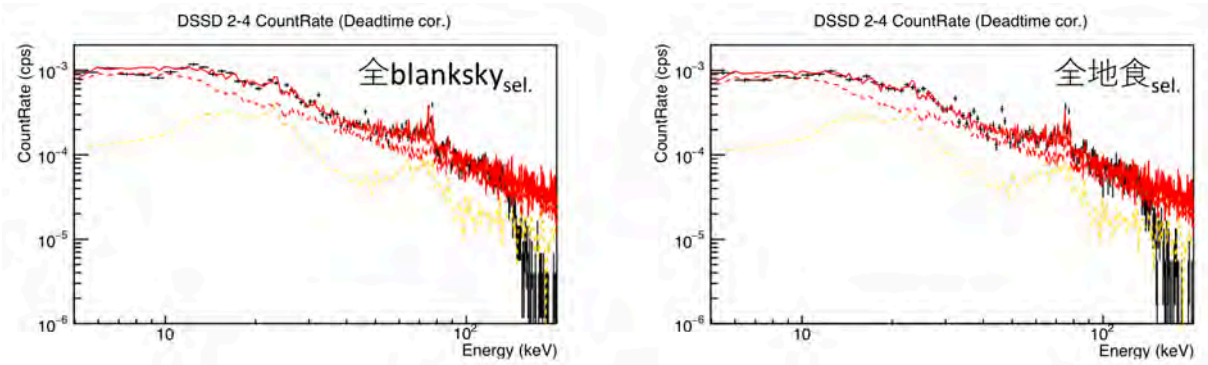


図 6.25: 全成分のデータ（黒）とシミュレーション（赤実線）のスペクトル。シミュレーションのスペクトルは5–120 keVのカウントレートがデータと等しくなるようスケールしてある。赤点線は相関成分、黄点線は不変成分のシミュレーション結果である。

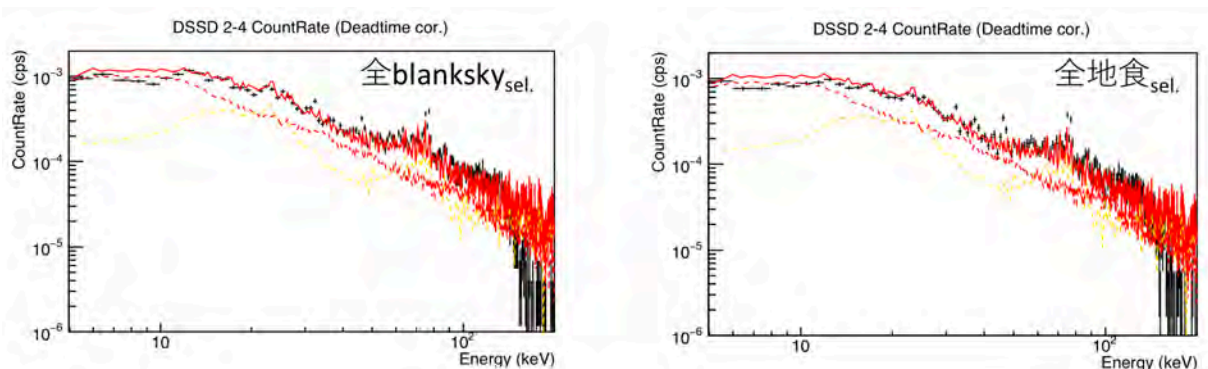


図 6.26: 全成分のデータ（黒）と、Albedo 光子成分を除いたシミュレーション（赤実線）のスペクトル。シミュレーションのスペクトルは5–120 keVのカウントレートがデータと等しくなるようスケールしてある。赤点線は中性子成分、黄点線は不変成分のシミュレーション結果である。

6.12 まとめ

この章では DSSD 2-4 イベントから中性子成分とそれ以外を弁別することを目的とした。ここで明らかになった DSSD 2-4 スペクトルの性質のまとめを表 6.2 に示す。行った解析とその結果の概要は以下にまとめる。

- 6.4 節では DSSD 2-4 カウントレートと CR rate との相関を調べたところ、電子と放射化の成分が強く影響しているイベントを除くとおおむね比例関係があることが分かった (図 6.5, 図 6.6)。よって、確かに DSSD 2-4 の主成分は中性子と Albedo 光子だと考えられる。
- 6.5 節では CR rate の大きさごとの DSSD 2-4 スペクトルを比較した。主にスペクトルが変化しているのは 40 keV 以下のエネルギー帯域であった (図 6.8)。
- 6.6 節では DSSD 2, 3, 4 それぞれのスペクトルを比較した。主に違いが見られたのは 10-20 keV であり、上層ほど高い傾向があった (図 6.10)。減少分は全 $\text{blanksky}_{\text{sel}}$ については DSSD 2 と 3, 3 と 4 どちらも $\sim 30\%$ であり、layer 間の差を生むのは光子だと思われる。したがって、DSSD 2-4 の 10-20 keV には視野に入ってくる光子も 16%以上寄与することが分かった。
- 6.7 節ではエネルギー帯域ごとの DSSD 2-4 カウントレートと CR rate の相関を調べたところ、全 $\text{blanksky}_{\text{sel}}$, 全地食_{sel.}とも 40 keV 以下のみ相関が強いことが確認できた (図 6.12, 図 6.13)。さらに 40 keV 以下でも低エネルギー側ほど不変成分の割合が小さかった。
- 6.8 節では CR rate が高い領域と低い領域での DSSD 2-4 スペクトルの差分をとり、相関成分の抽出を試みた。するとスクリーン後 NXB 平均と比較してソフトなスペクトルが得られ、特に全 $\text{blanksky}_{\text{sel}}$ では 10-20 keV が、全地食_{sel.}では 20-30 keV が盛りがった構造を示した (図 6.14)。差分スペクトルを用いて導出した不変成分スペクトルは、6.7 節で求めた各エネルギー帯域の不変成分カウントレートとおおよそ一致した (図 6.15)。
- 6.9 節では DSSD 2-4 への CXB の影響を見積もるため、Elevation ごとの DSSD 2-4 スペクトルを作成し、比較した。主に違いが見られたのは 5-20 keV で、15 keV においては最も高い場合と低い場合の差は 30%程度であった (図 6.16)。したがって、全 $\text{blanksky}_{\text{sel}}$ と全地食_{sel.}の 20-30 keV の違いを生む原因は別にあることが分かった。
- 6.10 節では、CR rate の大きさごとの DSSD 2-4 スペクトル変化を、6.8 節で導き出した差分スペクトルをスケールしたものと不変成分スペクトルの和で評価した。すべてよく説明できたので、相関成分と不変成分をおおむね正しく抽出できていることが確認できた (図 6.18, 図 6.19)。
- 6.11 節では HXI チームが行ったモンテカルロシミュレーション結果とデータを比較した。シミュレーションが正しければ Albedo 光子成分は 90 keV 以上に強く寄与す

るが、この帯域では DSSD の光電吸収断面積がとても小さく layer 間に差を見せないことから、データのみで差分スペクトルから中性子と Albedo 光子の成分を切り分けるのは難しいと考えられる。

- シミュレーション結果とデータを比較すると、低エネルギー側を相関成分が担い、高エネルギー側を不変成分が担うという傾向は一致し、スペクトルの形もそれぞれ似ていた (図 6.21, 図 6.23)。相関成分についてはデータの方がソフトであり、特に 10–20 keV にはデータの超過があった。全地食_{sel.} では 20–30 keV にも大きな超過があった。ただし中性子成分のみのシミュレーション結果と比較すると、全 blanksky_{sel.} はよく合い、全地食_{sel.} も 20–30 keV 以外の帯域はよく合った (図 6.22)。不変成分については、10–20 keV にデータの不足、30–50 keV にデータの超過が見られた。
- シミュレーションの不変成分に Albedo 光子成分を加えると不変成分はよりデータを説明できた (図 6.24)。また、Albedo 光子を除いたシミュレーション結果よりも Albedo 光子を含むほうが、より全成分のデータを説明できた (図 6.25, 図 6.26)。これらより、Albedo 光子成分は CR rate との相関が中性子と比べて小さいと考えられる。

表 6.2: DSSD 2–4 データのスペクトルの性質

エネルギー帯域 (keV)	相関成分の * 割合 (%)	layer 間の差	シミュレーションとの主な違い *†	
			相関成分	不変成分
5–10	100 ^b , 72 ± 19 ^o	なし	なし	なし
10–20	79 ± 15 ^b , 78 ± 16 ^o	上層ほど明るい	なし	なし
20–30	63 ± 4 ^b , 53 ± 23 ^o	なし	なし ^b , 超過 ^o	なし
30–40	63 ± 4 ^b , 53 ± 23 ^o	なし	なし	超過
40–70	63 ± 16 ^b , 3 ⁺¹¹ ₋₃ ^o	なし	なし	なし
70–90	22 ± 16 ^b , 0 ^o	なし	なし	なし
90–200	49 ± 20 ^b , 53 ± 11 ^o	なし	なし	なし

* 上付きの b, o はそれぞれ全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} を表す。添字なしは両者共通の性質である。

† 相関成分, 不変成分それぞれで、全カウントレートが等しくなるようシミュレーションスペクトルをスケールした上での違い。ただし全地食_{sel.} の相関成分は 40 keV 以上のカウントレートを合わせた場合について記した。シミュレーションの相関成分は中性子のみ, 不変成分は Albedo 光子を含むそれ以外の成分とした。

第7章 まとめと今後の研究

7.1 まとめ

本論文では、4章でBGO アクティブシールドによるバックグラウンド除去効率の測定、5章でNXB 中性子成分の理解のため DSSD 2-4 のNXB の基礎調査、6章でNXB 中性子成分の抽出を行った。分かったことの概要を以下にまとめる。

- アクティブシールドの反同時計数で除去されるイベントが残されている内之浦上空のデータを用いて cleaned イベントと BGO イベントのカウントレートを比較した結果、DSSD 2-4, CdTe DSD, DSSD 1 それぞれでバックグラウンド信号の除去率は $\sim 98\%$, $\sim 90\%$, $\sim 86\%$ であった。
- DSSD 2-4 のNXB のカウントレートの空間分布を見ると、全 blanksky, 全地食とも基本的に $0.02\text{--}0.1\text{ s}^{-1}$ で、全 blanksky の北西の一部に非常に明るい領域があるのと、全 blanksky, 地食ともに SAA の北東にカウントレートが高い領域が見られた。
- 全 blanksky のみで見られた北西のカウントレートが高い領域では、DSSD 2-4 のスペクトルがスクリーン後 NXB 平均と比較して $\sim 20\text{ keV}$ に連続的な盛り上がりをもっていた。増加した成分は DSSD の上層ほど明るく、 20 keV で DSSD 2 から 3, 3 から 4 の減少分がどちらも $\sim 30\%$ であることから、何らかの過程で増加した光子であると考えられた。
- DSSD 2-4 が放射化の影響を受けるのは主に $T_SAA_core < 2\text{ ks}$ の時間帯であった。
- 電子や放射化成分が強く影響する空間領域や時間帯を除いたデータ (全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.}) では、DSSD 2-4 のカウントレートは宇宙線モニタのカウントレート (CR rate) とよく似た空間分布を示し、DSSD 2-4 カウントレートと CR rate の相関をとると、おおむね比例関係があった。したがって、確かに DSSD 2-4 の主成分は中性子と Albedo 光子 (相関成分) だと考えられる。
- エネルギー帯域ごとの DSSD 2-4 カウントレートと CR rate の相関をとると、全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} とも 40 keV 以下のみ相関が強く、CR rate と相関しない成分 (不変成分) の割合が小さかった。 $10\text{--}20\text{ keV}$ の帯域では DSSD 2, 3, 4 の上層ほどカウントレートが高いという違いが見られ、何らかの光子成分が寄与していることがわかった。

- 衛星の姿勢ごとの DSSD 2-4 スペクトルを比較することで、CXB の影響は 5-20 keV のみに見られることが分かり、全 blanksky_{sel.} と全地食_{sel.} の相関成分、不変成分の 20-30 keV の違いを生む原因は別にあることが分かった。
- CR rate の大きさごとの DSSD 2-4 スペクトルは、6.8 節で導き出した差分スペクトルをスケールしたものと不変成分スペクトルの和ですべて非常によく説明できたので、相関成分と不変成分をおおむね正しく抽出できていることが確認できた。
- CR rate が高い領域と低い領域での DSSD 2-4 スペクトルの差分をとり、相関成分のみ抽出したもの（差分スペクトル）と、さらに差分スペクトルを用いて不変成分スペクトルを導出した。それらを HXI チームが行ったモンテカルロシミュレーションの結果と比較すると、低エネルギー側を相関成分が担い、高エネルギー側を不変成分が担うという傾向は一致した。相関成分についてはデータの方がソフトであり、特に 10-20 keV にはデータの超過があった。全地食_{sel.} では 20-30 keV にも大きな超過があった。ただし中性子成分のみのシミュレーション結果と比較すると、全 blanksky_{sel.} はよく合い、全地食_{sel.} も 20-30 keV 以外の帯域はよく合った。不変成分については、10-20 keV でデータの不足、30-50 keV でデータの超過が見られた。
- シミュレーションの不変成分に Albedo 光子成分を加えると不変成分はよりデータを説明できた。また、Albedo 光子を除いたシミュレーション結果よりも Albedo 光子を含むほうが、より全成分のデータを説明できた。これらより、Albedo 光子成分は CR rate との相関が中性子と比べて小さいと考えられる。
- シミュレーション結果が正しければ Albedo 光子成分は 90 keV 以上に強く寄与するが、この帯域では DSSD の光電吸収断面積がとても小さく layer 間に差を見せないことから、データのみで差分スペクトルから中性子と Albedo 光子の成分を切り分けるのは難しいと考えられる。

7.2 今後の研究方針

本論文では、DSSD 2-4 の NXB イベントから CR rate と相関する成分（中性子、Albedo 光子）、しない成分（電子、CdTe と BGO の放射化、CXB）をそれぞれおおむね正しく抽出することができ、またシミュレーションの改善点を抽出することができた。だが、まだ全 blanksky_{sel.} と全地食_{sel.} の差やシミュレーションとデータの差の原因については十分に議論していない。そこで今後の追究としては、まず全 blanksky_{sel.} と全地食_{sel.} の違いについてより詳細に調べ、データの差分スペクトルから確かに電子成分が除かれているかなどを確かめた上で、本論文で述べた結果を HXI チームにフィードバックし、シミュレーションを再検討する。例えば、シミュレーションで用いられたジオメトリには HXI まわりの衛星部品などが含まれていないため、それらがデータとシミュレーションとの差異を生んでいる可能性がある。将来的にはシミュレーションの精度を 10% 程度まで高め、中性子と Albedo 光子のスペクトルの形の違いによって両者を分離することでそれぞれの寄与を正しく推定し、衛星のシールド設計に反映したい。

謝辞

本研究を進める上で、また本論文をまとめる上で多くの方にお世話になりました。この場をお借りして御礼を申し上げます。

指導教官である中澤先生、馬場先生には日頃より基礎知識や考え方、研究の方針、さらには学会や研究会での発表に関する懇切丁寧なご指導を賜ってまいりました。中澤先生には大学4年次の特別実験からお世話になっており、いかに生データとその誤差を議論するのが大事かを教わってまいりました。本研究でも、誤差を含めた議論により見通しがよくなることが多々ありました。馬場先生には文書や発表資料をいかに伝わりやすく工夫するか、アドバイスをいただきました。博士課程では天体解析のほうでもますますお世話になるかと思えます。今後ともよろしく願いいたします。

本研究ではHXIチームの方々からアドバイスをいただきました。特に萩野さんと小高さんにはシミュレーションのデータをいただいたりHXIデータのイベントセレクションやバックグラウンド起源粒子に関する議論でお世話になりました。今後も研究を続けていく上で助けていただくことが多いと思えますので、またよろしく願いいたします。

研究室の先輩方にも、研究を始めたばかりの頃に解析ソフトの使い方や検出器の理解を助けていただいたり、ミーティングや発表練習で熱心に耳を傾けていただいたりと、大変お世話になりました。本研究に関することのみならず、日々のデータ解析で細々した問題に直面した際にも真剣に対応してくださり、助けてくださいました。特に古田さんには、研究全般にわたってとてもお世話になりました。文章一般の修正からプログラミングに関するアドバイス、検出器や超新星残骸の物理的な理解まで、忙しい中でも時間を割いていただきまして、本当にありがとうございました。和田さん、春日くん、松元くんとは次年度以降も同じ研究室ということで、今後ともお世話になります。和田さんは実験物理の先輩として尊敬しています。X線検出器やエレクトロニクスの知識を教えてくださいましたし、これからも学ばせていただくことが多いと思えますのでよろしく願います。春日くん、松元くんは発表練習に付き合っていたり、ミーティングなど日頃の行事の準備をありがとうございました。まだまだ知識・理解不足の自分ですが、より良い議論ができるように成長していきたいと思えますので、今後ともよろしく願います。

日々の研究生活においては、大学のサークル仲間や学科の同期、地元の友達の皆さんにもお世話になりました。特にサークル仲間は、とりとめない雑談やたまの旅行など、気晴らしに付き合っていたいただきありがとうございます。たまに会う地元の友達の皆には、それぞれの分野での努力や困難の話を聞かせてもらって、とても励みになっています。

両親をはじめとする家族の皆には、研究の道に進む自分を暖かく見守っていただき、本当に感謝しています。まだまだ力不足ですが、毎日の学びをこれからも一層大切にし、世界で活躍できるよう向上心を持ち続けていきます。最後に、研究室同期の清野さんには日頃のたわいもない会話や相談ごことから研究に関する議論まで、たくさんの面で支えと

なったださいました。心より感謝しています。

平成 30 年 1 月 25 日
鈴木 寛大

付録A BGO イベント中の相関成分

ここでは、アクティブシールドの反同時計数で除去されたイベント (BGO イベント) を使い、5, 6 章と同様に CR rate と相関する成分 (相関成分) を抽出することを試みた。用いたデータは 4 章と同じく全 blanksky, 全地食の BGO イベントである。

図 A.1, 図 A.2 に、BGO イベントが保存されている空間領域とそこでの各層のカウンtrate を示した。内之浦上空は (経度, 緯度) = (130°, 25°) 周辺だが、特に全 blanksky ではそれ以外の広い領域でもデータが保存されているのが分かる。DSSD 2-4 の空間分布はやはり CR rate の分布 (図 5.3) と似ており、さらに DSSD 2-4 のみならず CdTe DSD と DSSD 1 でも似た分布が見られる。したがって、DSSD 1 に関しては 4 章で確認した通りだが、CdTe DSD も相関成分の影響を大きく受けていると思われる。ただし、SAA 通過後の軌道が残されているので CdTe DSD は放射化によるカウンtrate 変動も含まれている。よって以降では、簡単のため 6 章と同じセレクションをかけた全 blanksky_{sel.}, 全地食_{sel.} のデータを使い、主に全 blanksky_{sel.} に着目した。

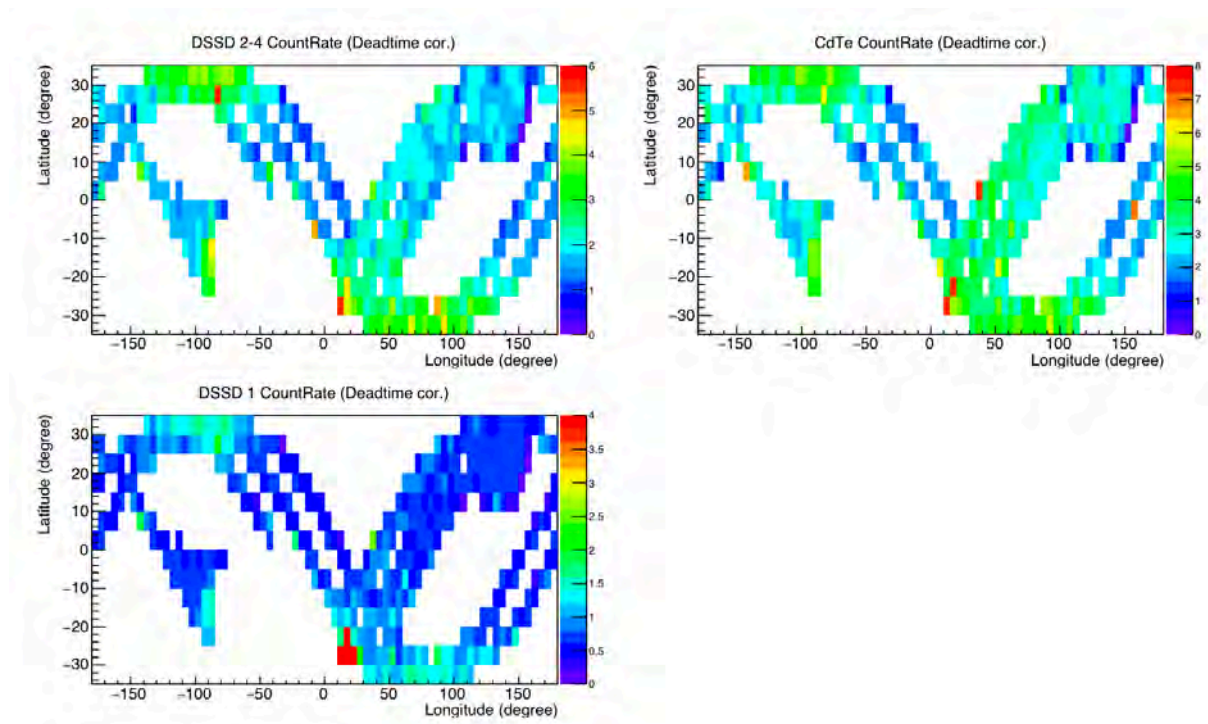


図 A.1: 全 blanksky での BGO イベントのカウンtrate の空間分布。DSSD 2-4 (左上), CdTe DSD (右上), DSSD 1 (左下) を示した。

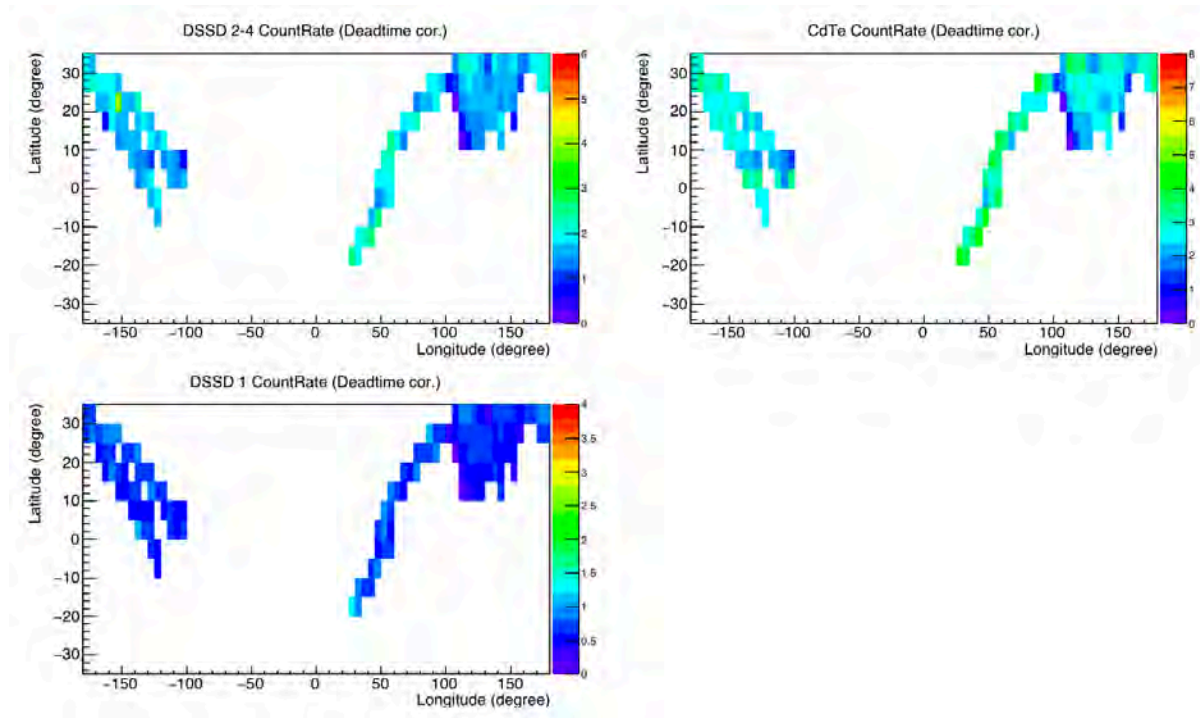


図 A.2: 全地食でのBGO イベントのカウンtrートの空間分布。DSSD 2-4 (左上) , CdTe DSD (右上) , DSSD 1 (左下) を示した。

図 A.3 に、全 $\text{blanksky}_{\text{sel}}$ 、全地食 sel 、それぞれの CR rate と DSSD 2-4 BGO イベントのカウンtrートとの相関を示した。全 $\text{blanksky}_{\text{sel}}$ では CR rate の広い範囲にわたってイベントがあり、強い相関が確認できる。図 A.4 は、全 $\text{blanksky}_{\text{sel}}$ の BGO イベントのスペクトルを CR rate の大きさごとに並べたものである。DSSD 2-4 に着目すると、6章で扱った cleaned イベントと異なり、70 keV 以上の高エネルギー側までスペクトルの違いが大きく見えている。また、 $\approx 23, 75$ keV の輝線強度も CR rate とともに変動している。CdTe DSD でもやはり CR rate にしたがった変化が見て取れる。図 A.5 ではエネルギー帯域ごとに CR rate と DSSD 2-4 カウンtrートとの相関をとった。どの帯域も一次関数でよく説明でき、さらにベストフィットではどれも定数がエラーの範囲で 0 以下となったため、ほぼ相関成分のみで説明できることが分かった。CR rate (s^{-1}) < 1.5 , > 1.5 の領域でのスペクトルを引き算して相関成分を抽出した結果が図 A.6 である。DSSD 2-4 と 1 はやはり似たスペクトル形をもち、6章で扱った cleaned イベントと比較するとよりハードなスペクトルである。また、 ~ 130 keV に大きな盛り上がりがある。現時点では BGO イベントのシミュレーション結果がないため、シミュレーションとの比較は今後の課題である。図 A.7 では 6.9 節と同じデータを用いて Elevation ごとの各層のスペクトルを比較した。どの層も大きな差は見られず、BGO イベントの相関成分は Elevation によらないことが分かった。

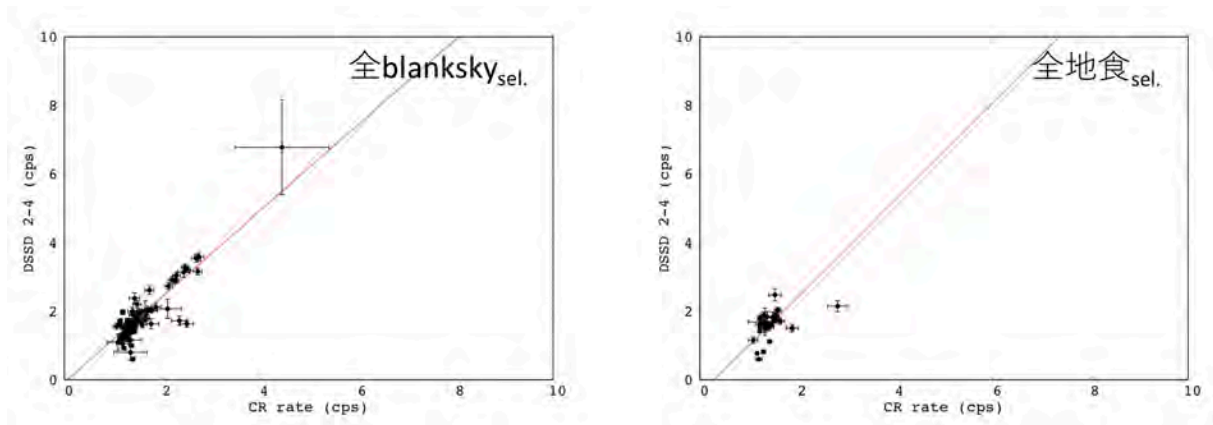


図 A.3: DSSD 2-4 BGO イベントのカウンtrateと CR rate の空間分布の相関を全 blanksky_{sel.} (左), 全地食_{sel.} (右) についてプロットしたもの。それぞれベストフィットの一次関数を示してある。

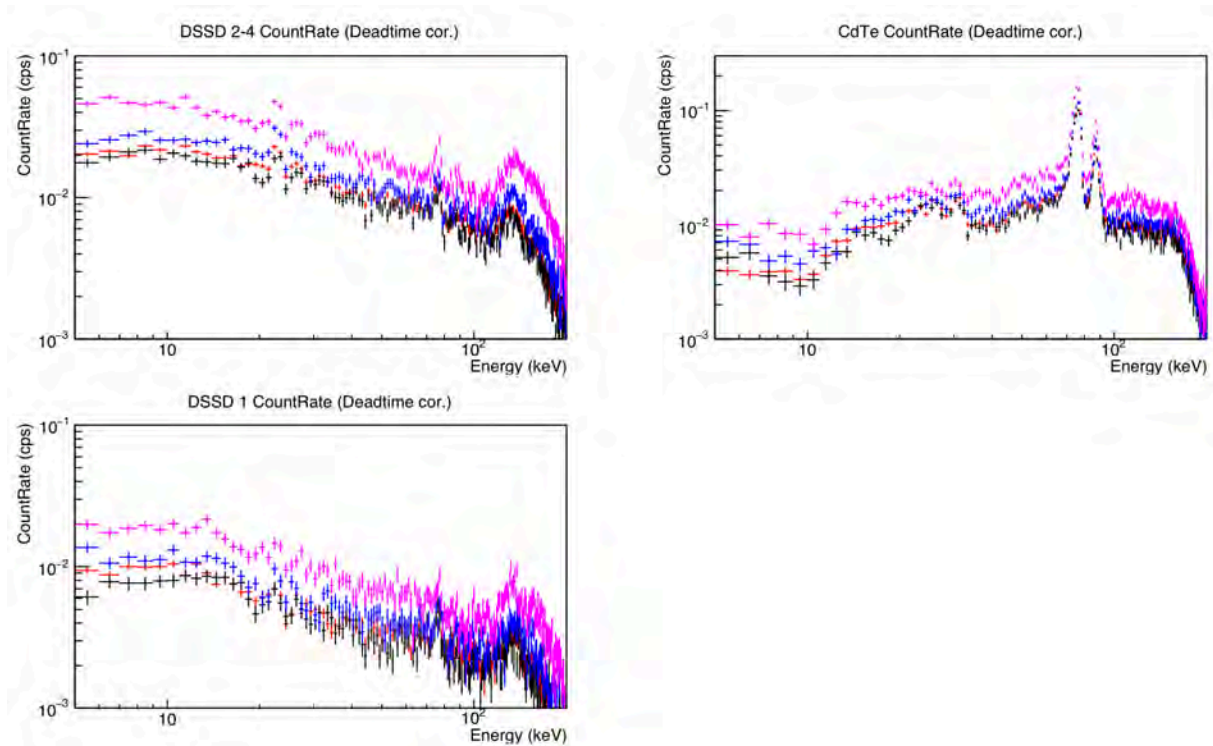


図 A.4: 全 blanksky_{sel.} における CR rate の大きさごとの BGO イベントのスペクトル。DSSD 2-4 (左上), CdTe DSD (右上), DSSD 1 (左下) を示した。

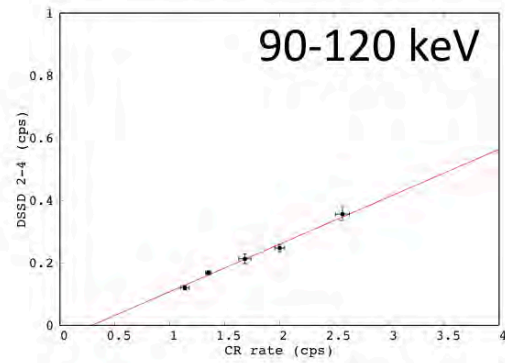
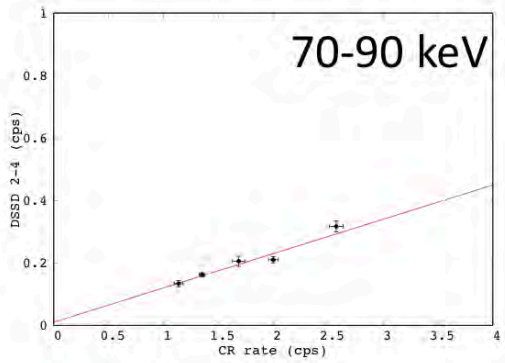
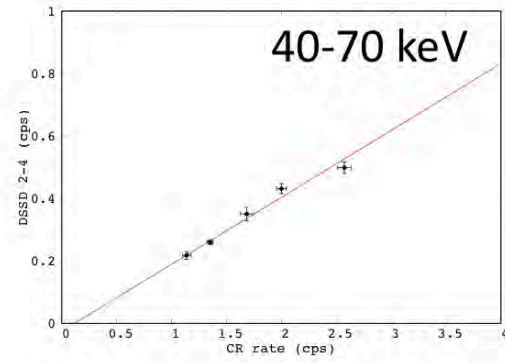
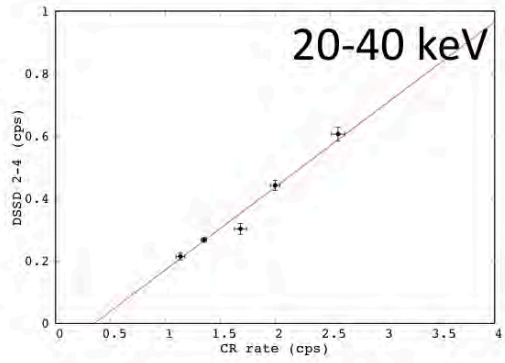
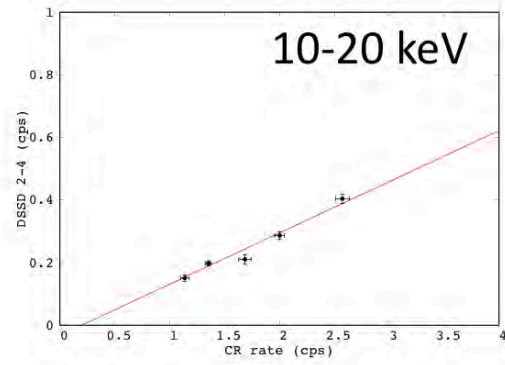
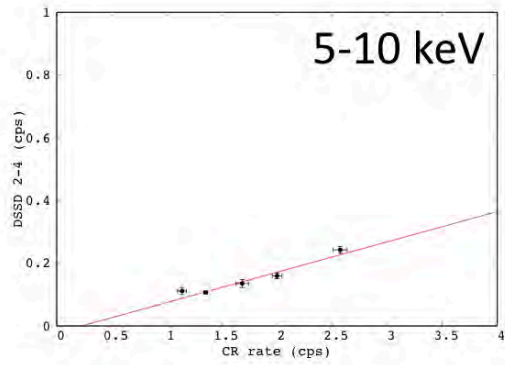


図 A.5: 全 $\text{blanksky}_{\text{sel}}$ におけるエネルギー帯域ごとの CR rate と DSSD 2-4 BGO イベントのカウントレートの相関。それぞれのエネルギー帯域でベストフィットの一次関数が示してある。

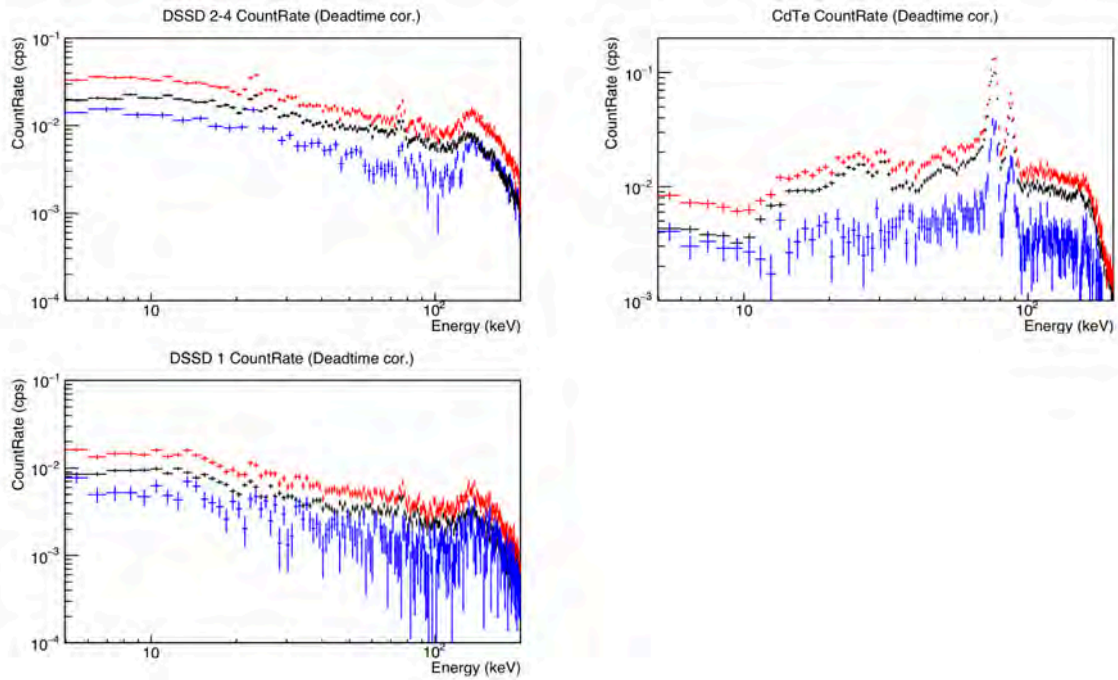


図 A.6: 全 blanksky_{sel.} における、CR rate (s $^{-1}$) < 1.5 の領域のスペクトル (黒) と > 1.5 の領域のスペクトル (赤)、それらの差分をとったスペクトル (青)。DSSD 2-4 (左上), CdTe DSD (右上), DSSD 1 (左下) を示した。

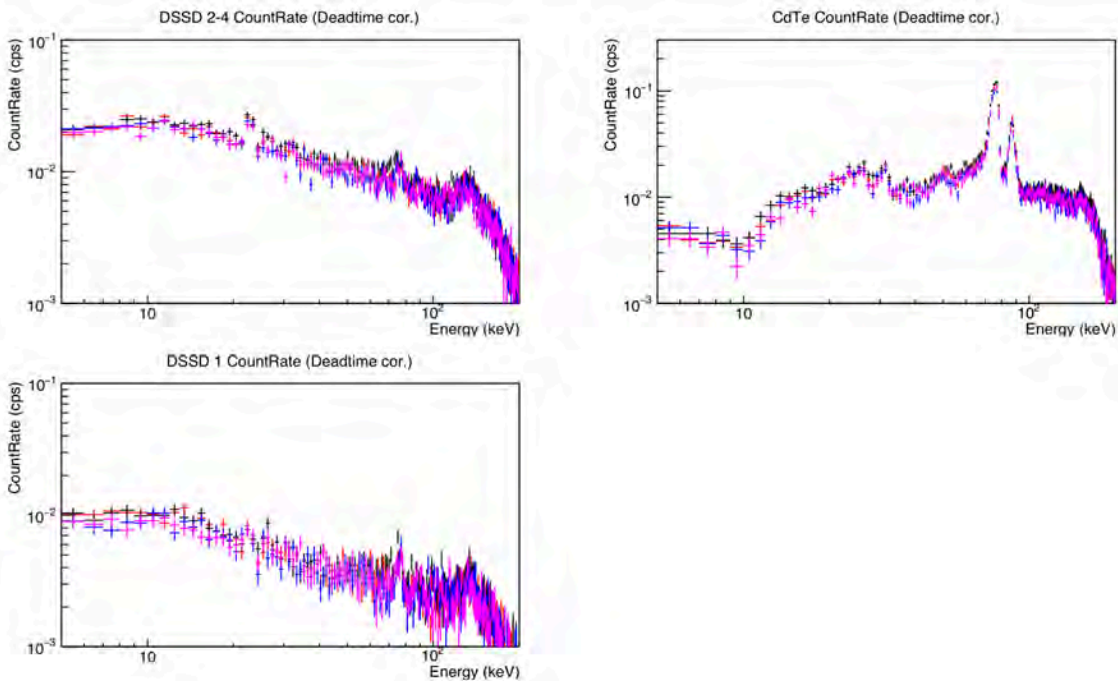


図 A.7: Elevation ごとの DSSD 2-4 BGO イベントのスペクトル。Elevation ($^\circ$) > 30 (黒), $0-30$ (赤), $-20-0$ (青), < -20 (マゼンタ) それぞれを表示した。DSSD 2-4 (左上), CdTe DSD (右上), DSSD 1 (左下) を示した。

参考文献

- [1] Malcolm S. Longair, 2011, "High Energy Astrophysics 3rd Edition", Cambridge University Press
- [2] Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, F. R., & Rossi, B. B. 1962, "Evidence for x Rays From Sources Outside the Solar System", Physical Review Letters, 9, 439
- [3] Rajiva, S. 1999, "Chandra X-ray observatory (AXAF) - NASA's most powerful X-ray space telescope", Bulletin of the Astronomical Society of India, 27, 231
- [4] Harrison, F. A., Boggs, S., Christensen, F., et al. 2010, "The Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR)", Proceedings of SPIE, 7732, 77320S
- [5] Mason, K. O., Bignami, G., Brinkman, A. C., & Peacock, A. 1995, "The XMM observatory", Advances in Space Research, 16, 41
- [6] Kondo, I., Inoue, H., Koyama, K., et al. 1981, "Cosmic X-ray satellite 'Hakucho' ", Space Science Instrumentation, 5, 211
- [7] Tanaka, Y., Fujii, M., Inoue, H., et al. 1984, "X-ray astronomy satellite Tenma", PASJ, 36, 641
- [8] Swinbanks, D. 1987, "Japan's Ginga (ASTRO-C) X-ray satellite", NATURE, 326, 322
- [9] Tanaka, Y., Inoue, H., & Holt, S. S. 1994, "The X-ray astronomy satellite ASCA", PASJ, 46, L37
- [10] Mitsuda, K., Bautz, M., Inoue, H., et al. 2007, "The X-Ray Observatory Suzaku", PASJ, 59, S1
- [11] Takahashi, T., Mitsuda, K., Kelley, R., et al. 2014, "The ASTRO-H X-ray Astronomy Satellite", Proceedings of SPIE, 9144, 914425
- [12] Suzuki, H., et al. 2018, submitted
- [13] <https://skyview.gsfc.nasa.gov/current/cgi/query.pl>
- [14] Pivato, G., Hewitt, J. W., Tibaldo, L., et al. 2013, "Fermi LAT gamma-ray observations of the supernova remnant HB 21", ApJ, 779, 179

- [15] Sato, G., Kokubun, M., Nakazawa, K., et al. 2014, "The Hard X-ray Imager (HXI) for the ASTRO-H Mission", Proceedings of SPIE, 9144, 914427
- [16] Nakazawa, K., et al. 2018, submitted
- [17] 中野俊男, 2009年, "X線衛星 ASTRO-H 搭載用 Si 両面ストリップ検出器の評価と検証", 修士論文, 東京大学
- [18] 古田禄大, 2016年, "次世代 X 線衛星での応用を目指した 1–80 keV の広帯域における アクティブシールドの最適化", 修士論文, 東京大学
- [19] Glenn F. Knoll, 1989, "Radiation Detection and Measurement 2nd Edition", Wiley & Sons, Inc.
- [20] <https://www.nustar.caltech.edu/page/detectors>
- [21] Tsuru, T. G., Matsumura, H., Takeda, A., et al. 2014, "The ASTRO-H X-ray Astronomy Satellite", Proceedings of SPIE, 9144, 914412
- [22] 西村純, 1986年, "宇宙放射線", 共立出版株式会社
- [23] Kushino, A., Ishisaki, Y., Morita, U., et al. 2002, "Study of the X-Ray Background Spectrum and its Large-Scale Fluctuation with ASCA", PASJ, 54, 327
- [24] https://en.wikipedia.org/wiki/South_Atlantic_Anomaly
- [25] Odaka, H., et al. 2018, submitted
- [26] Whittaker, I. C., Gamble, R. J., Rodger, C. J., Clilverd, M. A., & Sauvaud, J.-A. 2013, "Determining the spectra of radiation belt electron losses: Fitting DEMETER electron flux observations for typical and storm times", Journal of Geophysical Research (Space Physics), 118, 7611
- [27] Hagino, K., et al. 2018, submitted
- [28] 中本創, 2006年, "X線観測衛星『すざく』搭載 XIS 検出器のバックグラウンドの研究", 修士論文, 広島大学
- [29] Kitaguchi, T. 2008, "Suzaku Studies of Energetic Neutrons from a Solar Flare and the Atmosphere", Ph.D. thesis, University of Tokyo
- [30] Moretti, A., Campana, S., Lazzati, D., & Tagliaferri, G. 2003, "The Resolved Fraction of the Cosmic X-Ray Background", ApJ, 588, 696
- [31] Mizuno, T., Hiragi, K., Fukazawa, Y., et al. 2010, "Monte Carlo simulation study of in-orbit background for the soft gamma-ray detector on-board ASTRO-H", Proceedings of SPIE, 7732, 77323C

[32] Peter Schneider, 2014, "Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction", Springer