ASTRO-E 衛星搭載 XIS での X 線検出の素過程と応答関数

今西 健介
京都大学院 理学研究科 物理学第二教室 宇宙線研究室

2001 年 5 月 11 日

概要

X 線天体観測は、光学や電波では知り得ない宇宙の高エネルギー現象を解明する手段として今や天文学の重要な地位を占めている。日本でもこれまで 4 台の X 線天文衛星を上げ、様々な特筆すべき成果を挙げてきた。 ASTRO-E はそれに引続き、 2000 年 2 月に打ち上げられる X 線天文衛星である。 ASTRO-E には 4 台の X 線 CCD カメラ (XIS; X-ray Imaging Spectrometer) が搭載される。 X 線 CCD カメラは、空間 · エネルギー · 時間分解能のバランスが良く、 ASCA に初めて搭載されて以来、ほとんどの X 線衛星に使われている標準的な検出器である。

我々は大阪大学、宇宙科学研究所、マサチューセッツ工科大学と共同で、 XIS の開発 · 製作および地上較正試験を行なってきた。特に高エネルギー X 線 ($>$2 keV) における性能評価は京都大学を中心に行なわれてきた。私は、これらのデータを元に XIS のエネルギースペクトルの応答関数を作成した。天体からの X 線を検出器で受け取った時、我々は元のスペクトルに検出器特有の変換を受けた情報を得る。得られたデータから元の情報に還元するためには、この変換を正確に知る必要がある。この変換を表す関数が応答関数であり、その精度は観測結果の精度を決める重要な要素である。

地上較正試験の結果、単色 X 線に対する XIS のパルス波高値分布は、エネルギーに対応するチャンネル付近に現れる単純なガウス関数だけではなく、低エネルギーに伸びる tail やいくつかのライン構造を持っていることがわかった。私はこの応答関数を、 CCD 内部で起こっている物理過程の違いを元にして、メインピーク、サブピーク、三角成分、コンスタント成分、 Si エスケープ、 Si ラインという 6 つの成分に分離した。このような詳細なモデル化はこれまでに例のない試みである。次に、各成分のエネルギー依存性を調べるため、内部の過程をモデル化した簡単なシミュレーションを行ない、試験データを良く再現する結果を得た。このシミュレーションを用いれば、 CCD の基本的なパラメータ (空乏層厚など) を与えるだけで応答関数が計算でき、個性がそれぞれ違う 4 台の XIS にも順次対応が可能である。これを元に、 4 台の XIS 各々について応答関数を構築した。以上の解析により、これまでにない精度の応答関数が構築された。また、 CCD は衛星軌道上で宇宙放射線により損傷を受け、応答関数も経年変化していくことが知られている。私はこれに対応するための機上較正計画と、それを使った応答関数の補正方法についても考察した。

目次

1 X 線天文学 **1**
1.1 X 線天文衛星 . . . 1
1.2 X 線検出器 . . . 3

2 ASTRO-E 衛星 **5**
2.1 概要 . . . 5
2.2 X 線反射望遠鏡 (XRT) . . . 6
2.3 検出器 . . . 7
2.3.1 XRS . . . 7
2.3.2 HXD . . . 9
2.3.3 XIS . . . 9

3 X 線 CCD **11**
3.1 MOS ダイオードの構造 . . . 11
3.2 X 線と CCD の相互作用 . . . 12
3.2.1 光電吸収 . . . 12
3.2.2 初期電子雲 . . . 13
3.2.3 Auger 電子と Si 蛍光 X 線 . . . 14
3.2.4 ドリフト · 拡散 · 再結合 . . . 14
3.3 各種仕様 . . . 16
3.3.1 X 線照射方式 . . . 16
3.3.2 チャネルデバイス . . . 16
3.3.3 電極構造 . . . 17
3.3.4 電荷転送方式 . . . 17
3.3.5 電荷読みだし方式 . . . 18
3.4 基本性能の指標 . . . 19

4 XIS (X-ray Imaging Spectrometer) **23**
4.1 センサー . . . 23
4.1.1 CCD チップ . . . 25
4.1.2 ボンネット · OBF . . . 26
4.1.3 TEC . . . 26
4.1.4 キャリブレーションソース . . . 26
4.2 周辺回路 . . . 26
4.2.1 AE/TCE . . . 26
4.2.2 DE . . . 27
4.3 観測モード . . . 28
4.3.1 Clock mode . . . 28

4.3.2 Edit mode . . . 30
4.4 データ処理法 . . . 31
4.4.1 補正 . . . 31
4.4.2 イベント検出法 . . . 32

5 XIS の応答関数構築 37
5.1 概要 . . . 37
5.2 性能評価システム . . . 37
5.2.1 京都大学システム . . . 37
5.2.2 大阪大学システム . . . 40
5.3 応答関数構築の流れと取得データ . . . 41

6 旧 XIS3 データを用いた応答関数の構築 43
6.1 Normal mode に対する各成分の評価 . . . 43
6.1.1 6 成分モデル . . . 44
6.1.2 メインピーク (ゲイン、エネルギー分解能) . . . 47
6.1.3 サブピーク . . . 50
6.1.4 コンスタント成分 . . . 53
6.1.5 Si エスケープ . . . 59
6.1.6 Si ライン . . . 64
6.1.7 三角成分 . . . 69
6.1.8 まとめ . . . 71
6.2 P-sum mode に対する各成分の評価 . . . 76
6.2.1 メインピーク (ゲイン・エネルギー分解能) . . . 76
6.2.2 その他の成分 . . . 78
6.2.3 まとめ . . . 79
6.3 量子効率について . . . 82

7 応答関数の flight センサーへの対応方法 83
7.1 XIS0 のデータへの応答関数の対応 . . . 83
7.1.1 Normal mode . . . 85
7.1.2 P-sum mode . . . 88
7.1.3 まとめ . . . 90
7.2 全センサーへの応答関数の対応 . . . 90
7.2.1 ゲイン・エネルギー分解能の決定 . . . 90
7.2.2 応答関数の決定 . . . 92
7.2.3 現状での問題点と今後の課題 . . . 95

8 応答関数に必要な精度 97
8.1 精度見積りの手法 . . . 97
8.2 メインピーク . . . 97
8.3 サブピーク成分 . . . 98
8.4 コンスタント成分 . . . 99
8.5 Si エスケープ . . . 100
8.6 Si ライン . . . 100
8.7 まとめ . . . 101

9 経年変化への対応 **103**
9.1 CTI 増加に伴うゲイン変動 103
9.2 CTI 増加に伴うエネルギー分解能劣化 104
9.3 機上較正計画 105
9.4 補正方法 106

10 まとめと今後の課題 **109**

図目次

2.1 ASTRO-E 衛星概観 5
2.2 ASTRO-E 衛星の模式図と望遠鏡、検出器の位置関係 6
2.3 Wolter I 型 X 線反射鏡 7
2.4 XRS Dewar 概観 8
2.5 HXD 概観 9

3.1 MOS CCD の断面図 11
3.2 0.2-20keV の X 線に対する Si、O の質量吸収係数 12
3.3 0.2–20keV の X 線に対する初期電子雲の半径 13
3.4 キャリアの移動度・拡散係数と不純物濃度の関係 (温度 300K) 15
3.5 直接再結合と間接再結合の模式図 16
3.6 電極構造の概略図 17
3.7 電荷転送方式の概略図 18
3.8 CCD からの出力波形 19

4.1 XIS と他の検出器の位置 (ASTRO-E を上から見た図) 23
4.2 上: XIS 検出器の概観図 左下: センサー 右下: ボンネット 24
4.3 XIS CCD チップ 25
4.4 ACIS の電極構造 (左図) とチャネルストップ構造 (右図) 26
4.5 AE/TCE と CCD チップ、TEC の関係 27
4.6 DE と CCD チップからのデータの流れ 28
4.7 Normal mode の電荷転送パターン 29
4.8 P-sum mode の電荷転送パターン (256 ピクセル加算の場合) 29
4.9 Burst mode の電荷転送パターン 30
4.10 Grade 判定法による分類 (Normal/Burst mode) 34
4.11 Grade 判定法による分類 (P-sum mode) 35

5.1 京都大学 XIS キャリブレーションシステムの概観 38
5.2 X 線発生装置からのスペクトル (HV = 15 kV) 39
5.3 大阪大学 XIS キャリブレーションシステムの概観 41

6.1 ^{55}Fe を照射した時の旧 XIS3 の出力波高値 (Normal mode, Grade0+2+3+4+6) 44
6.2 XIS レスポンスを構成する 6 つの成分 45
6.3 6 成分の発生過程のチャート 46
6.4 旧 XIS3 の入射 X 線エネルギー vs 出力 channel(C1) 関係 (Normal mode) . . 48
6.5 旧 XIS3 の入射 X 線エネルギー vs エネルギー分解能関係 (Normal mode) . . 48
6.6 Normal mode と P-sum mode のエネルギー分解能の比較 49
6.7 2×2 ピクセル以上に拡がったイベントに対する Normal mode と P-sum mode での判断の違い 50

6.8 サブピーク発生の原理図 (左: XIS 断面、右: 上部からの絵) 51
6.9 split threshold を変えた時のサブピーク成分の強度変化 51
6.10 旧 XIS3 の ^{55}Fe K_α 付近をダブルガウシアンでフィッティングした結果 52
6.11 エネルギー vs T2 関係 53
6.12 コンスタント成分発生の原理図 (XIS 断面) 54
6.13 絶縁層・電極境界付近で吸収された時の模式図 55
6.14 Mn Kα に対するコンスタント成分の形状の計算結果 56
6.15 旧 XIS の Mn Kα データに対し求めたコンスタント成分の形状をフィットした結果 56
6.16 入射 X 線のエネルギーに対するコンスタント成分の相対強度 58
6.17 チェンバーによる散乱の影響の見積り (Al) 58
6.18 コンスタント成分強度から計算された初期電子雲の半径 59
6.19 Si エスケープ発生過程の原理図 (XIS 断面) 60
6.20 入射 X 線のエネルギーに対する Si エスケープ成分の相対強度 61
6.21 Si エスケープ強度シミュレーションのモデルフィット結果 62
6.22 α の空乏層厚に対する依存性 62
6.23 l の空乏層厚に対する依存性 63
6.24 N の空乏層厚に対する依存性 63
6.25 Si エスケープ強度のシミュレーション結果に対する空乏層厚の依存性 64
6.26 Si ライン発生過程の原理図 (XIS 断面) 65
6.27 入射 X 線のエネルギーに対する Si ライン成分の相対強度 65
6.28 Si ライン強度シミュレーションのモデルフィット結果 66
6.29 シミュレーションによる Si ライン強度の電極厚に対する依存性 67
6.30 シミュレーションによる Si ライン強度の絶縁層厚に対する依存性 67
6.31 シミュレーションによる Si ライン強度の空乏層厚に対する依存性 68
6.32 Si ライン強度から計算された ρd の値 69
6.33 チャネルストップの各パラメータの模式図 71
6.34 構成された応答関数による旧 XIS3 データのフィッティング結果 73
6.35 応答関数によりモデル化された各成分の相対強度 75
6.36 ^{55}Fe を照射した時の出力波高値 (P-sum mode, Grade0+1+2) 76
6.37 旧 XIS3 の入射 X 線エネルギー vs 出力 channel 関係 (P-sum mode) 77
6.38 旧 XIS3 の入射 X 線エネルギー vs エネルギー分解能関係 (P-sum mode) . . 77
6.39 旧 XIS3 の ^{55}Fe のデータ (P-sum mode) を Normal mode の応答関数でフィットした結果 (S1 だけ変更している) 78
6.40 エネルギー vs T2 関係 (P-sum mode) 79
6.41 エネルギー vs T4 関係 (P-sum mode) 79
6.42 構成された応答関数による旧 XIS3 データのフィッティング結果 (P-sum mode) 80
6.43 XIS の量子効率 (XIS2) 82

7.1 ^{55}Fe を照射した時の XIS0 の出力波高値 84
7.2 XIS0 の入射 X 線エネルギー vs 出力 channel(C1) 関係 85
7.3 XIS0 の入射 X 線エネルギー vs エネルギー分解能関係 86
7.4 S1 のみ補正した応答関数による XIS0 ^{55}Fe の fitting 結果 87
7.5 S1, T2 を補正した応答関数による XIS0 データの fitting 結果 88
7.6 S1, T2 を補正した応答関数による XIS0 データの fitting 結果 (P-sum mode) . 89
7.7 各センサーの ^{55}Fe データの fitting 結果 (Normal mode) 93
7.8 各センサーの ^{55}Fe データの fitting 結果 (P-sum mode) 94

8.1 メインピーク幅 (S1) に必要な精度 98
8.2 サブピーク強度 (T2) に必要な精度 99
8.3 コンスタント成分強度に必要な精度 100
8.4 Si ライン強度に必要な精度 101

9.1 Chandra ACIS で報告されているエネルギー分解能 vs 転送回数関係 105
9.2 CTI 増加量を較正するためのポインティング 106

表目次

1.1 主な X 線天文衛星 . . . 2

2.1 ASTRO-E と ASCA の XRT 性能の比較 . . . 7
2.2 ASTRO-E の 3 種類の検出器の性能諸元 . . . 10

4.1 XIS の 4 センサーの名称 . . . 23
4.2 Edit mode と Clock mode の組合せ . . . 28

5.1 各ターゲットの特性 X 線のエネルギーと X 線発生装置にかける電圧、電流値 40
5.2 応答関数作成に用いたキャリブレーションデータ . . . 42

6.1 本章で用いている旧 XIS3 データのログ . . . 43
6.2 本章で行なった解析の各種パラメータ . . . 43
6.3 本章で用いる各種パラメータ . . . 46
6.4 旧 XIS3 ゲイン、エネルギー分解能に対する fitting 結果 . . . 47
6.5 応答関数を構成する成分と各パラメータ . . . 72
6.6 旧 XIS3 のゲイン、エネルギー分解能に対する fitting 結果 (P-sum mode) . . . 78

7.1 本節で用いている XIS0 データのログ . . . 83
7.2 XIS0 のゲイン、エネルギー分解能に対する fitting 結果 (Normal mode) . . . 86
7.3 熱真空試験中の ^{55}Fe K$_\alpha$ 輝線データのフィッティング結果 (Normal mode) . . . 91
7.4 熱真空試験中の ^{55}Fe K$_\alpha$ 輝線データのフィッティング結果 (P-sum mode) . . . 91
7.5 各センサーの各層の厚み . . . 92
7.6 各センサーのサブピーク、コンスタント強度 (Normal, P-sum 共通) . . . 92

8.1 目標とする精度のまとめ . . . 101

表目次

第 1 章

X 線天文学

天体からの X 線は地球大気により強い吸収を受けてしまうので、大気圏を飛び越えて観測しなくてはならない。古くは 1962 年、 B. Rossi らがロケットを打ち上げて、さそり座方向から強力な X 線を検出したこと (Sco X−1) が X 線天文学のすべての始まりである。以降、様々な人工衛星が多種多様の X 線天体を発見し、現在その数は 10 万にも達している。 1999 年に打ち上げられた Chandra、 XMM 衛星、さらに本論文の趣旨である XIS が搭載される ASTRO-E 衛星の活躍により、 X 線天文学は今後さらに発展していくだろう。本章では主な X 線天文衛星と X 線検出器について簡単に紹介し、 ASTRO-E と XIS が今後どのような役割を担っていくのかを述べる。

1.1 X 線天文衛星

X 線天文衛星の歴史は、 1970 年にアメリカが Uhuru 衛星を打ち上げて始まる。それ以来、アメリカ、ヨーロッパ、そして日本がそれぞれ多種多様の X 線天文衛星を打ち上げ、様々な成果を上げている (表 1.1)。ここでは現在稼働中の 5 つの衛星について簡単に紹介し、その中で ASTRO-E はどのようなアドバンテージを有しているかを述べる (ASTRO-E については 2章で詳しく述べる)。

ASCA

1993 年に打ち上げられた日本で第 4 番目の X 線天文衛星。 2 台の蛍光比例計数管 (GIS) と、世界で初めて 2 台の X 線 CCD カメラ (SIS) を搭載した。また性能の良い X 線反射望遠鏡により、初めて硬 X 線帯域 (>2keV) での撮像分光観測を可能にした。活動銀河核 (AGN) からの拡がった鉄輝線の発見、前主系列星からの X 線検出などの成果を上げている。また硬 X 線撮像分光能力を生かして超新星残骸 SN1006 が宇宙線加速の現場であることも明らかにした。

RXTE (Rossi X-ray Timing Exploere)

1995 年に NASA により打ち上げられた衛星。名前の通り、 X 線天体の時系列解析を主目的に、 PCA, HEXTE という 2 つの蛍光比例計数管と ASM(All Sky Montor) を搭載している。 2–250keV をカバーし、時間分解能は 1μsec にも達する。 kilohertz QPO やガンマ線バーストの X 線 afterglow、多数の X 線パルサーなどを発見している。

BeppoSAX

1996 年にイタリアにより打ち上げられた衛星。 LECS, MECS, HPGSPC, PDS という 4 種類の蛍光比例計数管と WFC(Wide Field Camera) を搭載し、 0.1–300keV という広い

X 線帯域において観測が出来ると言うのが最大の特徴。ガンマ線バーストの X 線 afterglow 観測などで良い成果を上げている。

Chandra (AXAF)

NASA により 1999 年 7 月に打ち上げられた衛星。角分解能 0.5″ という過去最高の撮像能力を持つ X 線反射望遠鏡を有している。検出器はマイクロチャネルプレートと 10 枚の X 線 CCD(ACIS) からなり、 CCD は望遠鏡から来る X 線を直接イメージングする観測と、回折格子 (Grating) による位置情報を犠牲にした分光観測が行なえる。

XMM-Newton (X-ray Multi-Mirror Mission)

1999 年 12 月に ESA(European Space Agency) により打ち上げられた衛星。その名の通り、 X 線反射望遠鏡を多数枚重ねることにより過去最高の検出感度を持つ。検出器は、撮像分光観測用の 2 種類の X 線 CCD カメラ (EPIC-MOS/pn) と、 grating 用の CCD 検出器 (RGS) が搭載されている。また、同時に光学 · 紫外線観測出来る検出器 (OM) もある。

衛星の種類も多様化していく中でこれから国際競争に生き残っていくためには、その衛星が他の衛星に比べ何が優れているのかを正確に理解し、その特色を最大限生かすような観測を行なっていかなければならない。 ASTRO-E の最大の利点はその高エネルギー分解能である。特に拡がった天体や、硬 X 線帯域での分解能は他の衛星の追随を許さない。つまり ASTRO-E は、その起源が謎である Galactic diffuse の解明、超新星残骸中の高温プラズマの物理状態の解明、 AGN の鉄輝線の詳細観測などで大きな成果を挙げることが期待される。唯一の撮像観測用検出器である XIS は、それらの X 線源の位置決定のため欠かすことの出来ない検出器である。

表 1.1: 主な X 線天文衛星

名称	国	稼働年	検出器 †
Uhuru	アメリカ	1970–1973	P
Ariel-5	イギリス	1974–1975	P
HEAO-1	アメリカ	1977–1979	P, SC
Einstein	アメリカ	1978–1981	P, SC, M
Hakucho	日本	1979–1984	P
Tenma	日本	1983–1984	P, SC
EXOSAT	ESA	1983–1986	P
Ginga	日本	1987–1991	P
ROSAT	ドイツ	1990–1998	P, M
ASCA	日本	1993–	SC, CCD
RXTE	アメリカ	1995–	P
BeppoSAX	イタリア	1996–	SC
Chandra	アメリカ	1999–	M, CCD
XMM-Newton	ESA	1999–	CCD
ASTRO-E	日本		CR, CCD, SC, SS

† P: 比例計数管、 SC: 蛍光比例計数管、 M: マイクロチャネルプレート、 SS: 半導体検出器、 CCD: X 線 CCD、 CR: カロリメータ

1.2 X 線検出器

X 線観測は、その強度、エネルギー、位置、時刻といった情報を測定し、どのような天体がどのような過程で X 線を放出しているかを理解することに他ならない。当然、これらの情報をより精度良く決定できる検出器が必要になってる。以下では多種多様な X 線検出器について説明する。

比例計数管

Ar などの不活性ガスを金属容器に詰め込んだもの。 X 線が容器内に入射してくると、ガスによる光電吸収により電子が生じる。電子は金属容器と芯線の間にかけられている高電圧により加速し、周辺ガスを電離、その数を増幅しながら芯線に集められる。この数を数えることにより X 線のエネルギーを決定する。軽量で大面積のものを作ることが可能という利点があるが、反面、増幅率の不定性等の問題でエネルギー分解能は良くないという欠点もある。 Ginga、 ROSAT 衛星などに使用された。

蛍光比例計数管

比例計数管の改良版で、電子増幅でなく蛍光を利用してエネルギーを計るようにしたもの。一次電子を増幅が起こらない程度の電場で発光領域に移動させる。電子は周囲の原子を電離、励起するが、それが基底状態に戻る際に発する蛍光を光電子増倍管で読み取るという原理になっている。 ASCA 衛星の GIS などに用いられている。また、 ASTRO-E 衛星の HXD(GSO, BGO) はガスでなく結晶で蛍光を起こさせる種類の検出器である。

マイクロチャネルプレート

入射 X 線によって生じる光電子を多数個の光電子増倍管で検出する。エネルギー分解能を犠牲にするかわりに、高い空間分解能、時間分解能を達成できる。 ROSAT や Chandra 衛星で使用されている。

半導体検出器

半導体中の空乏領域に X 線が入射した際に出来る、電子 - 正孔ペアの数を数えることによりエネルギーを計測する検出器。半導体ではエネルギーに対して出来る電子の量がガスより圧倒的に多いので、ゆらぎは小さく高いエネルギー分解能が達成される。 ASTRO-E HXD のうち Si PIN 型検出器はこの種類である。

X 線 CCD

微小な半導体検出器をモザイク状にならべ、撮像能力を持たせたもの。 ASCA で初めて衛星に搭載されて以来 (SIS)、 Chandra、 XMM 衛星にも搭載され今や X 線検出器の主力になっている。高エネルギー分解能、高空間分解能が特徴である。また使用法によっては時間分解能も向上させることが出来る。 XIS は ASTRO-E 衛星に搭載される CCD カメラである。

カロリメータ

X 線のエネルギーを素子の温度上昇として検出するもの。極低温で動作することにより圧倒的なエネルギー分解能を達成できる。ただし素子の反応の時定数が遅いので時間分解能は悪い、現状での技術では CCD ほどの微小な素子を作ることが出来ないので空間分解は期

待できない、といった欠点も合わせ持つ。 ASTRO-E XRS で世界で初めて衛星に搭載される。

X 線 CCD はこれらの中での、撮像、分光、時刻測定のバランスが最も良い標準的な検出器である。本論文では、日本の次期 X 線天文衛星 ASTRO-E に搭載される X 線 CCD カメラ、 XIS の X 線検出素過程の詳細解明と、それに基づいたエネルギースペクトルに対する応答関数の構築について報告する。

第 2 章

ASTRO-E 衛星

2.1 概要

ASTRO-E 衛星は日本で第 5 番目の X 線天文衛星である。 2000 年 2 月に鹿児島宇宙空間観測所 (KSC) から M-V 型ロケットの 4 号機によって、高度約 500km の略楕円軌道に打ち上げられる予定である。

衛星には、現在稼働中の X 線天文衛星 ASCA の性能をさらに向上させた X 線反射望遠鏡 (XRT) が 5 台と、その焦点面には 4 台の X 線 CCD カメラ (XIS) と 1 台の高精度 X 線分光装置 (XRS) が置かれる。またこれに加え、硬 X 線帯域 (10–700keV) を観測する硬 X 線検出器 (HXD) が搭載される。これら計 6 台の検出器で同じ天体を同時に観測することが出来る。

図 2.1: ASTRO-E 衛星概観

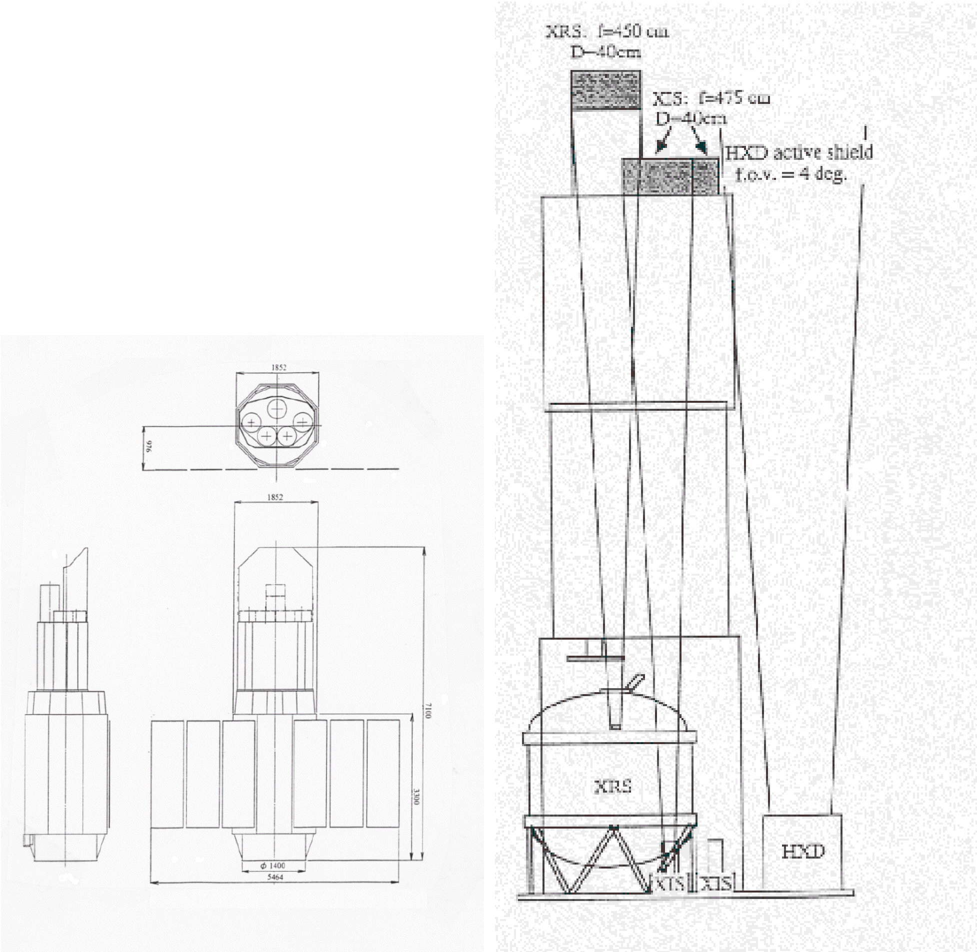


図 2.2: ASTRO-E 衛星の模式図と望遠鏡、検出器の位置関係

2.2 X 線反射望遠鏡 (XRT)

X 線反射望遠鏡 (XRT) は、焦点面に XIS を置くもの 4 台 (XRT-I) と、 XRS を置くもの 1 台 (XRT-S) から構成される。両者は原理自体は全く同じものだが、性能がわずかに異なる。

原理は ASCA XRT と同じく、金属面すれすれに入射した X 線が全反射することを利用している。反射面は回転放物面と回転双曲面を組み合わせた Wolter I 型 (図 2.3) と呼ばれる光学系を使用しており、有効面積を稼ぐために口径のわずかに異なる鏡を 1000 枚以上重ねている。 ASCA XRT に比べると、

- レプリカ法導入による鏡面精度の向上により角分解能が 2 倍程度良化。
- 鏡の枚数を増やすことにより、有効面積 (感度) が約 1.5 倍増加。
- 焦点距離を伸ばし斜入射角を小さくすることで高エネルギー側での感度を向上。

等の改良が加えられている。

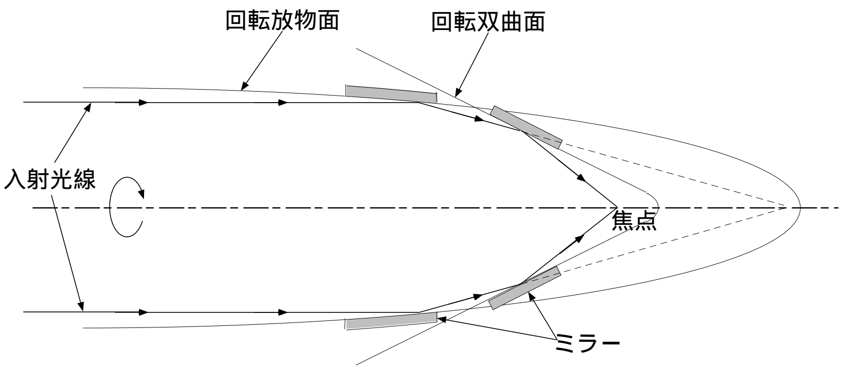


図 2.3: Wolter I 型 X 線反射鏡
[10] より抜粋

表 2.1: ASTRO-E と ASCA の XRT 性能の比較

	ASTRO-E XRT-I	ASTRO-E XRT-S	ASCA XRT
台数	4	1	1
反射材	Au	Pt	Au
直径	399mm	400mm	345mm
鏡面数	1400	1344	960
焦点面距離	4.75m	4.50m	3.50m
斜入射角	0.18-0.60°	0.19-0.63°	0.24-0.70°
視野 @1keV/7keV	$19'/19'$	$19'/19'$	$24'/16'$
有効面積 †@1.5keV/7keV	$450\mathrm{cm}^2/250\mathrm{cm}^2$	$450\mathrm{cm}^2/250\mathrm{cm}^2$	$300\mathrm{cm}^2/150\mathrm{cm}^2$
各分解能	$1.5'$	$1.5'$	$3.0'$

†: 検出器 1 台当たり

2.3 検出器

2.3.1 XRS

XRS (X-ray Spectrometer) は、世界で初めて衛星に搭載される X 線マイクロカロリメータである。 X 線マイクロカロリメータは、入射 X 線のエネルギーを吸収素子 (XRS では HgTe を使用) の温度上昇として測定する検出器である。エネルギー分解能は素子のフォノンゆらぎによって決まり、 XRS では素子を巨大な真空断熱容器 (Dewar; 図 2.4) に収め極低温で動作することにより入射 X 線のエネルギーにほぼよらず $\sim$10eV という値を達成している。これは ASCA SIS の実に 10 倍以上の性能で、これによりこれまで分解できなかった輝線の resonance line、 forbidden line、 intercombination line、 sattelite line などを分光することが可能になる。プラズマの温度、密度、電離度などの物理状態の高精度測定に極めて強力な観測手段になることが期待される。

ただし XRS は冷却材の寿命である 2–2.5 年しか利用出来ない。また、 (1) 素子の応答速度が 100msec と遅いので、専用のフィルターホイールでカウントレートを落してパイル

アップを防がなくてはならない、(2) 技術的な問題で 32 画素の array しか作れないため、視野は狭く空間分解能も低い、というような欠点もある。

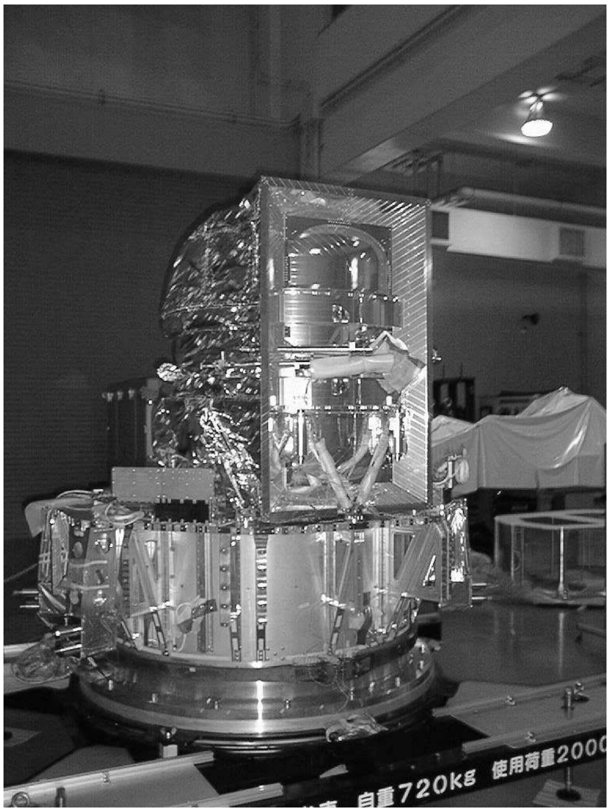


図 2.4: XRS Dewar 概観

エネルギー分解能

吸収体素子の熱容量を C、温度を T とすると、素子全体の内部エネルギーは CT、フォノン 1 つあたりのエネルギーは kT と考えられるので、フォノン数は $CT/kT = C/k$ となる。よってフォノン数のゆらぎによる素子のエネルギーのゆらぎは、

$$\Delta E = \sqrt{C/k}kT = \sqrt{kT^2C} \tag{2.1}$$

となる。実際はこれに加え素子の熱ゆらぎとサーミスタによるジョンソンノイズがあるため、補正項 ξ ($\sim$2) を含めてエネルギー分解能は、

$$\Delta E_{FWHM} = 2.35\xi\sqrt{kT^2C} \tag{2.2}$$

と求められる。動作温度を極低温にすることによりこの値を極限まで小さくすることが可能である。XRS ではカロリメータ自身の固有ノイズによって決まるエネルギー分解能は $\sim$4eV と見積もられる。

2.3.2 HXD

HXD (Hard X-ray Detector) は、井戸型複眼フォスイッチ結晶シンチレータと Si PIN フォトダーオードを合わせた検出器で、 X 線反射鏡を用いない非イメージング装置として硬 X 線観測を行なう。 10–700keV という広いエネルギー帯域で、過去のいかなる宇宙 X 線装置よりも高い感度の観測ができるのが最大の特徴である。

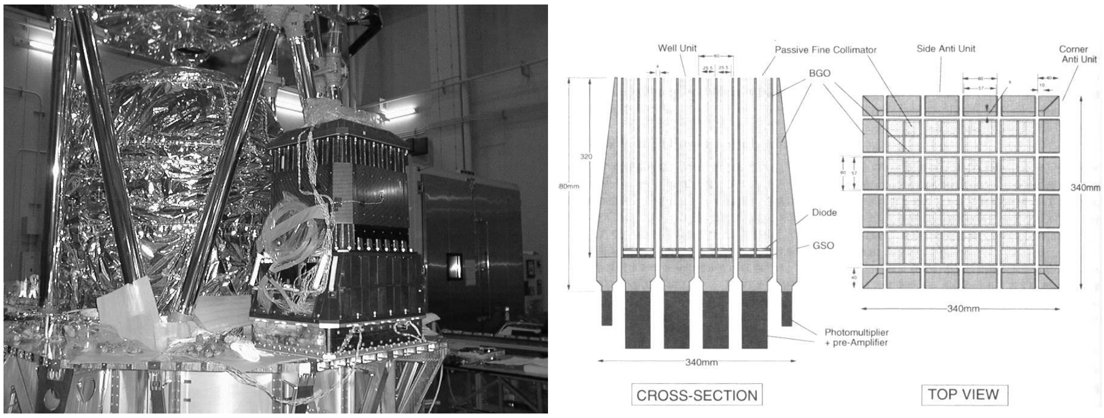


図 2.5: HXD 概観

Well 検出器ユニット

ターゲット天体からの X 線は 4×4 のマトリックス状に配置された 16 ユニットの Well 検出器により検出される。 1 本の Well 検出器は重量約 3.78kg で、 4.6×4.6° の視野を覆う。

Well 検出器の大部分を占めるのは細長い井戸状構造を形成している BGO 結晶で、これで放射線アクティブシールドを行なう。井戸の底には、 2mm 厚のフォトダイオードを 2 枚重ね 10–80keV に有効な感度を持つように設計された Si PIN 型半導体検出器を置き、 X 線を受ける。 PIN ダイオードを抜けてくるような高エネルギー X 線は、その下に配置した GSO 結晶によって吸収される。

Anti 検出器ユニット

Well 検出器ユニットの外側には、シールド用の 20 ユニットの Anti 検出器が配置されている。 Anti 検出器は BGO 結晶シンチレータとフォトチューブを組み合わせたもので、シールドとしてだけでなくそれ自体も硬 X 線に強い感度を持つ検出器として働く。従ってこれは優秀なガンマ線バースト検出器にもなり、 ∼5° の精度でバースト源の 1 次元の位置を決定できる。またトランジェント天体のモニターとしても利用できる。

2.3.3 XIS

XIS (X-ray Imaging Spectrometer) は X 線検出用 CCD カメラである。エネルギー · 時間 · 空間分解能のバランスが良いのが特徴で、特に天体の位置決定は 3 種の検出器のうち XIS でしか行なえない。

基本的には ASCA 衛星に搭載されている SIS と同じ検出器であるが、 SIS に比べ以下のような改良点が加えられており、性能としては飛躍的に向上している。

- 空乏層厚が 30μm から 70μm に増加したため、高エネルギー側での検出効率が約 2 倍向上した。
- SIS で特に問題になった打ち上げ後の放射線損傷による性能劣化に対応するために、動作温度を -60° から -90° に下げることにより暗電流を効果的に抑える、各ピクセル毎にダークレベルを保持する、軌道上較正線源を設ける、といった対策がなされた。
- SIS では 4 枚のチップを合わせて 1 センサーにしたため、すき間ができてしまっていた。 XIS は 1 センサー 1 チップで構成されるのでこのようなすき間は存在しない。

XIS については 4章でより具体的に紹介する。

表 2.2: ASTRO-E の 3 種類の検出器の性能諸元

	XRS	HXD	XIS
台数	1	1	4
有効感度帯域	0.4–10keV	10–700keV	0.2–12keV
素子数	16×2	4×4(Well) 20(Anti)	1024×1026
素子サイズ	1.22×0.32mm	21.5×21.5mm(PIN) 24×24mm(GSO)	24×24μm
有効面積 (1 台)	150cm^2@1keV 130cm^2@7keV	230cm^2(@<40keV) 330cm^2(@>40keV)	300cm^2@1keV 250cm^2@7keV
視野	$2\times4'$	$0.8\times0.8^\circ$@60keV $2.8\times2.8^\circ$@500keV	$17.4\times17.4'$
エネルギー分解能	12eV	3keV@10keV 9%@662keV	130eV@6keV
空間分解能 †	$1.5'$	–	$1.5'$
時間分解能	–	61μsec	8msec(P-sum)
動作温度	65mK	$\sim -20^\circ$	-90°

†: XRT の分解能で決まっている

第 3 章

X 線 CCD

CCD (Charge-Coupled Device) とは、多数の半導体素子 (ピクセル) を格子状に並べたものである。それぞれのピクセルが X 線検出器として働くため、入射 X 線のエネルギー、方向、時間を同時に測定することが出来る。衛星搭載品としては ASCA の SIS が世界初で、ASTRO-E はもちろん、 Chandra、 XMM にも搭載され、現在もっとも汎用性の高い検出器である。

半導体素子の構造は MOS 構造と p-n 接合の 2 種類がある。 XIS を始め多くの衛星搭載 CCD は MOS 構造であるが、中には XMM EPIC pn のように p-n 接合を取るものもある。以下では MOS 構造について詳細に述べる。

3.1 MOS ダイオードの構造

図 3.1に MOS (Metal-Oxide Semiconductor) ダイオードの断面図を示す。金属 (電極) と半導体の間に絶縁体である酸化物の膜を挟んだ構造をしている。絶縁体は通常 SiO_2 や Si_3N_4 などが用いられる。

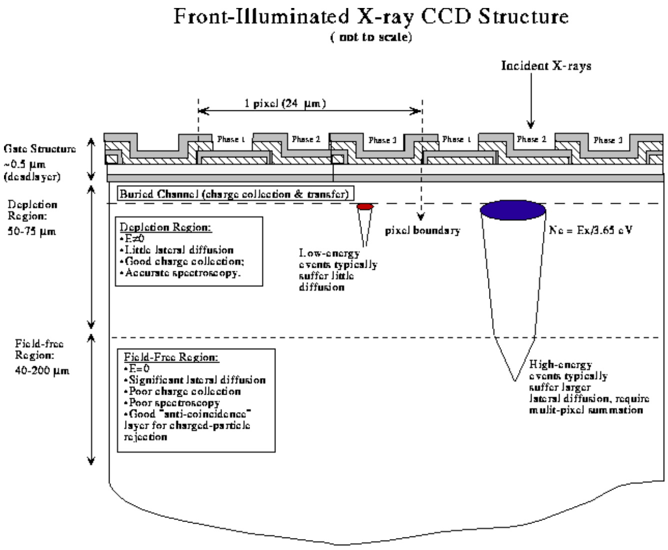


図 3.1: MOS CCD の断面図

p(n) 型 Si 半導体で形成される MOS ダイオードに対し電極に正 (負) 電圧を印加すると、クーロン力により多数キャリアは排斥され空乏層を形成する。印加電圧を大きくするにつれ空乏層厚は増加するが、あるところで頭打ちになる。これは、ある一定限度を越えると空乏層表面に集まる小数キャリアにより生じる内部電場が無視できなくなり、印加電圧でのキャリアの排除が困難になるためである。

3.2 X 線と CCD の相互作用

X 線は主に CCD 内の Si と相互作用してイベントとして認識される。 CCD 内部でどのような物理過程が起こっているかを理解することは、本論文の主題である応答関数構築に必要不可欠である。本節では X 線と CCD の相互作用について詳しく述べる。

3.2.1 光電吸収

0.2–12keV 程度のエネルギーでは、 X 線と物質の相互作用はほぼ 100% 光電吸収である。X 線のエネルギー (E_0) が Si K 殻のエネルギー (E_K=1.838keV) より大きい場合、 X 線は K 殻の電子をたたき出す。電子は E_0-E_K の運動エネルギーを持って初期電子雲の形成にまわる (後述)。また、 $E_0 < E_K$ の場合は L 殻の電子がたたき出される。

光電吸収がどの程度の確率で発生するかは次の式で表される。

$$P = 1 - e^{-\mu\rho z} \tag{3.1}$$

ここで、 z は X 線が物質を通過した距離、 ρ は物質の密度、 μ は質量吸収係数、 P は z までに X 線が物質に吸収される確率である。質量吸収係数は E_0 の関数であり、物質ごとに異なる値を取る。図 3.2に Si に対する質量吸収係数を示す。 1.838keV に不連続点 (K 吸収端) が見られるが、これは光電吸収の対象が L 殻電子から K 殻電子に変わるためである。また、以降では絶縁層での O による吸収も考慮に入れるので、 O に対する質量吸収係数も合わせて示してある (O の K 吸収端は 0.543keV である)。

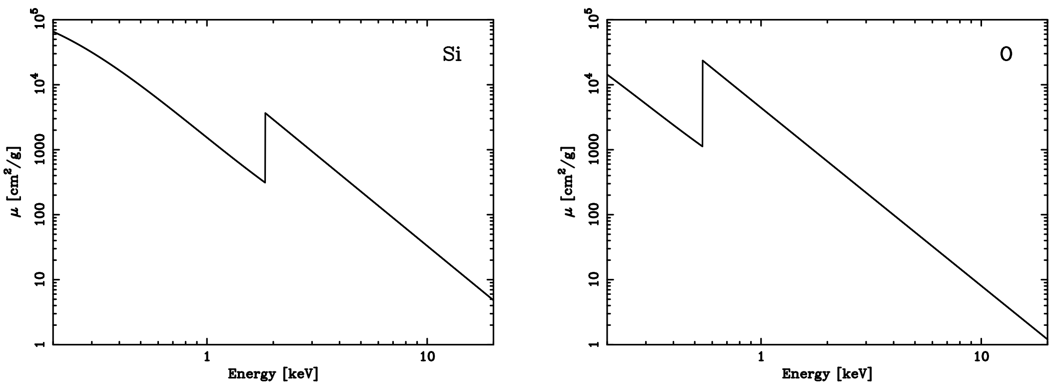


図 3.2: 0.2-20keV の X 線に対する Si、 O の質量吸収係数

Si 質量吸収係数は [13] により 3.2式の関数で近似されている。また、 O 質量吸収係数に対しても同様の関数で独自にフィッティングを行なった結果、 3.3式を得た。 5章以降では

これらを用いて議論を進める。

$$\mu_{Si}\ [\mathrm{cm^2/g}] = \begin{cases} 10^{[3.19-2.71\log(E_0)+0.0755(\log(E_0))^2+0.873(\log(E_0))^3]} & \text{for } E_0 < 1.838\mathrm{keV} \\ 10^{[4.3-2.78\log(E_0)]} & \text{for } E_0 \geq 1.838\mathrm{keV} \end{cases} \tag{3.2}$$

$$\mu_{O}\ [\mathrm{cm^2/g}] = \begin{cases} 10^{[2.48-1.83\log(E_0)+1.50(\log(E_0))^2+0.970(\log(E_0))^3]} & \text{for } E_0 < 0.543\mathrm{keV} \\ 10^{[3.65-2.74\log(E_0)]} & \text{for } E_0 \geq 0.543\mathrm{keV} \end{cases} \tag{3.3}$$

3.2.2 初期電子雲

光電吸収でたたき出された電子は周囲の Si 原子と弾性散乱を繰返し、多数の電子 · 正孔対を作る。生成されるキャリアの数は $\mathrm{E_0}$ に比例する。キャリアを 1 つ生成するのに必要なエネルギーを平均解離エネルギー (W 値) と言う。正確には平均解離エネルギーは $\mathrm{E_0}$ や温度に依存するが [11]、 XIS で用いている条件下では Si に対してはほぼ W_{Si}=3.65 eV で一定である。つまり、入射 X 線のエネルギーが全てキャリア生成に使われた場合は、 $\mathrm{E_0}/0.00365$ 個の電子が作られる。逆に、生成電子の数を数えることにより入射 X 線のエネルギーを知ることが出来るわけである。電荷はピクセル間を転送され、順次読み出されていく (3.3.2–3.3.5節)。

生成された電子は初期電子雲を形成する。電子雲は一次電子の飛程に沿って形成されるので、一次電子の飛び出す方向が等方的であると仮定するなら、その形状は一様分布した球で近似できる。また、その半径は β 線の飛程を測定することにより実験的に、

$$a\ [\mathrm{cm}] = 1.71 \times 10^{-6} \cdot E_0^{1.75} \tag{3.4}$$

と表されることがわかっている [13] (図 3.3参照)。

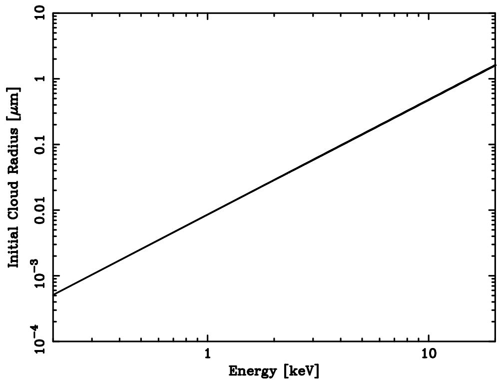


図 3.3: 0.2–20keV の X 線に対する初期電子雲の半径

初期電子雲は有限の拡がりを持っているので、場合によっては周辺ピクセルに電荷が洩れ出してしまうことがある。周辺ピクセルにまたがってしまった場合はイベント検出法 (4.4.2章参照) により電荷量は元のピクセルに加算されるが、洩れだしが十分小さい場合は戻しきれずに少し低いエネルギーを出力してしまう (サブピーク; 6.1.3章参照) [1]。また、空乏層と上方の電極 · 絶縁層にまたがった場合は電荷の復帰は不可能で、結果としてスペクトルに低エネルギーまでの tail を作ってしまう (コンスタント成分; 6.1.4章参照)。

[1]周辺ピクセルの洩れ出しはドリフトによる拡がりも考慮しなくてはならない。

3.2.3 Auger 電子と Si 蛍光 X 線

光電吸収により内殻電子を失った原子 (Si K 吸収端以上のエネルギーでは K 殻電子) は、次のうちどちらかの過程を通ってエネルギーを放出する。

Auger 電子

外殻の電子を運動エネルギー 1.838$-$E$_b$ keV (1.838 keV: Si K 殻の束縛エネルギー、E$_b$: 外殻の束縛エネルギー) で飛び出させる。飛び出した電子は Auger 電子と呼ばれ、一次電子と同じく初期電子雲の形成に回る。この場合は E$_0$ に対応するだけのキャリアが生成される (メインピーク; 6.1.2章参照)。

Si 蛍光 X 線

空いた K 殻に L 殻から遷移が起こり、 Si 蛍光 X 線 (1.739 keV) が発生する。その後の Si 蛍光 X 線の過程により、次のようないくつかのイベントパターンが考えられる。

- 同一ピクセル内で再吸収
  Auger 電子の場合と見分けはつけられない
- 近傍 (3×3 ピクセル) で再吸収
  電荷は 2 つのピクセルに分かれるが、イベント検出法 (4.4.2章参照) により中心ピクセルに加算される
- 十分遠くのピクセルで再吸収
  E$_0-$E$_K$ に対応するイベント (Si エスケープ; 6.1.5章参照) と、 E$_K$ に対応するイベント (Si ライン; 6.1.6章参照) になる
- 空乏層の外に逃げる
  E$_0-$E$_K$ に対応するイベント (Si エスケープ) になる

ほとんどのイベントでは Auger 電子が放出され、 Si 蛍光 X 線が発生する割合はわずか 3.7 % である。

3.2.4 ドリフト · 拡散 · 再結合

ドリフト

生成された初期電子雲は、空乏層にかけられている強い電場により電極方向にドリフトする。 X 線が吸収された深さを z(空乏層表面を z=0 にする)、 z でのポテンシャルを $\Phi(z)$ とすると、ドリフト速度 v_z は、

$$v_z = \frac{dz}{dt} = \mu_n(-\frac{d\Phi(z)}{dz}) \tag{3.5}$$

と表される。ここで μ_n [V·s] はキャリアの移動度と呼ばれるパラメータで、不純物濃度 (N_A) の関数である (図 3.4)。空乏層中はアクセプタイオンのみが電荷を持っているので、ポアソン方程式から $\Phi(z)$ は、

$$\Delta\Phi(z) = \frac{qN_A}{\varepsilon_{Si}} \tag{3.6}$$

となる。ここで q は電子の素電荷 (1.60×10^{-19} C)、 ε_{Si} は Si 中の誘電率 (1.04×10^{-12} F/cm) を表す。さらに空乏層中での境界条件

$$\begin{cases} \Phi(z=D)=0 \\ \frac{d\Phi(z)}{dz}\Big|_{z=D}=0 \end{cases} \tag{3.7}$$

から、電子雲が電極に到達する時間は以下のように計算される。

$$t_{drift}=\frac{\varepsilon_{Si}}{q\mu N_A}\log(\frac{D}{D-z}) \tag{3.8}$$

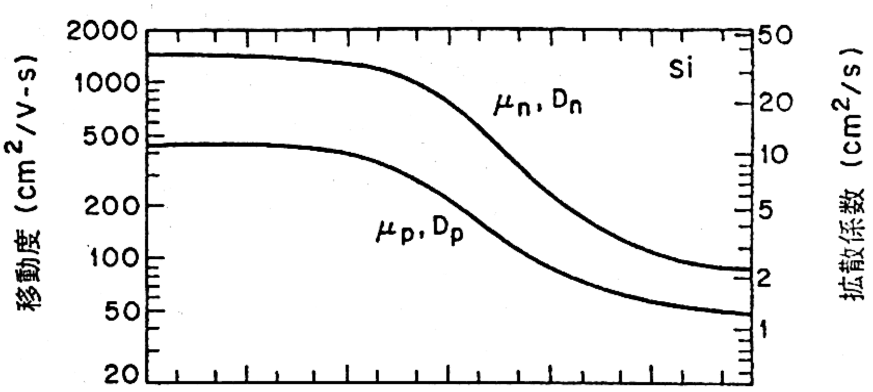


図 3.4: キャリアの移動度・拡散係数と不純物濃度の関係 (温度 300K)
[13] より抜粋。 p: 正孔、 n: 電荷を表す。

拡散

ドリフト中の電子雲は拡散により拡がる。拡散過程は、次の拡散方程式

$$\frac{d\rho}{dt}=D_n\bigtriangledown^2\rho \tag{3.9}$$

で表現される。ここで、 ρ は電子の密度分布、 D_n は拡散係数と呼ばれる値である (図 3.4)。これは $\sigma=\sqrt{2D_nt_{drift}}$ のガウシアンを表しており、従って電荷は電極に到達するまでにこの程度の拡がりを持つことになる。

再結合

電子は荷電子帯中の正孔と再結合し平衡状態に戻ろうとする。再結合過程は、電子が直接荷電子帯に落ち込む直接再結合と、中間準位 (トラップ) を介して遷移する間接再結合があるが (図 3.5)、Si 半導体では間接再結合が主となる [16]。間接再結合の時定数 τ_r は、電子の速度を v_e、トラップの密度を n_t、捕獲断面積を σ_t とすると、

$$\tau_r=\frac{1}{v_e\sigma_t n_t} \tag{3.10}$$

となる。トラップが少ない間は再結合はほとんど効かないが、打ち上げ後宇宙放射線による損傷によりトラップが増加した場合はこの効果を考える必要が出てくる (9章参照)。

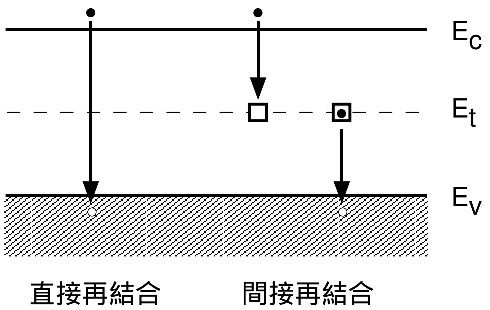


図 3.5: 直接再結合と間接再結合の模式図
●: 電子、○: 正孔、□: トラップを表す。また、 E_c、 E_v、 E_t はそれぞれ伝導帯、荷電子帯、トラップのエネルギー準位を表す。

3.3 各種仕様

用途により様々な方式の CCD が存在する。以下では項目毎に各種仕様の詳細を述べる。(XIS の用いている方式には † 印をつける)

3.3.1 X 線照射方式

前面照射型 (Front Illuminated)†
電極側 (図 3.1の上方) から X 線を照射する。電極近くで吸収されるため拡散・再結合が少なく高エネルギー分解能が達成されるが、電極を通過できない低エネルギー X 線での検出効率が悪い。多くの検出器はこの方式を用いている。 XIS も前面照射型である。

裏面照射型 (Backside Illuminated)
電極の反対側 (図 3.1の下方) から X 線を照射する。電極での吸収の影響がないので、低エネルギーでの検出効率が良い反面、吸収位置が電極から遠いため拡散・再結合によるエネルギー分解能悪化が無視できない。最近では、 Chandra ACIS-S (6chip 中 2chip) や XMM の EPIC pn などがこの方式を用いている。

3.3.2 チャネルデバイス

表面チャネルデバイス
熱平衡状態においては、半導体と金属のフェルミ準位を一定に保とうと電荷の移動が生じ、半導体表面にエネルギーバンドの溝が生成される。この溝に電子を蓄積し、そのまま転送する CCD を表面チャネルデバイスと呼ぶ。絶縁層付近では電荷トラップにより電荷転送効率が悪いのが欠点である。

埋め込みチャネルデバイス †
空乏層と絶縁層の間に Si 基板と逆の極性の層を作り、ここで電荷転送するデバイス。転送チャネルが Si 基板の中に存在するので、表面チャネルデバイスに比べ電荷転送効率が格段に良くなる。 XIS はこちらを採用している。

3.3.3 電極構造

電荷転送の方法によって以下のような電極構造が取られる。

三相方式 † (図 3.6上)
1 ピクセルに 3 つの電極を置く方式。印加電圧を調節しそれぞれのポテンシャルを図 3.6のように変化させることにより電荷を順次転送していく。

バーチャルフェーズ方式 (図 3.6左下)
電極は 1 組しか配置しないが、一部に不純物をドープすることによって電位勾配を作り、それを利用して電荷転送を行なう方式。低エネルギー X 線の電極での吸収を小さく押えられるのが最大の特徴。

二相方式 (図 3.6右下)
バーチャルフェーズ方式と同じく不純物をドープさせる方式だが、電極がチップ前面を覆っている点が異なる。

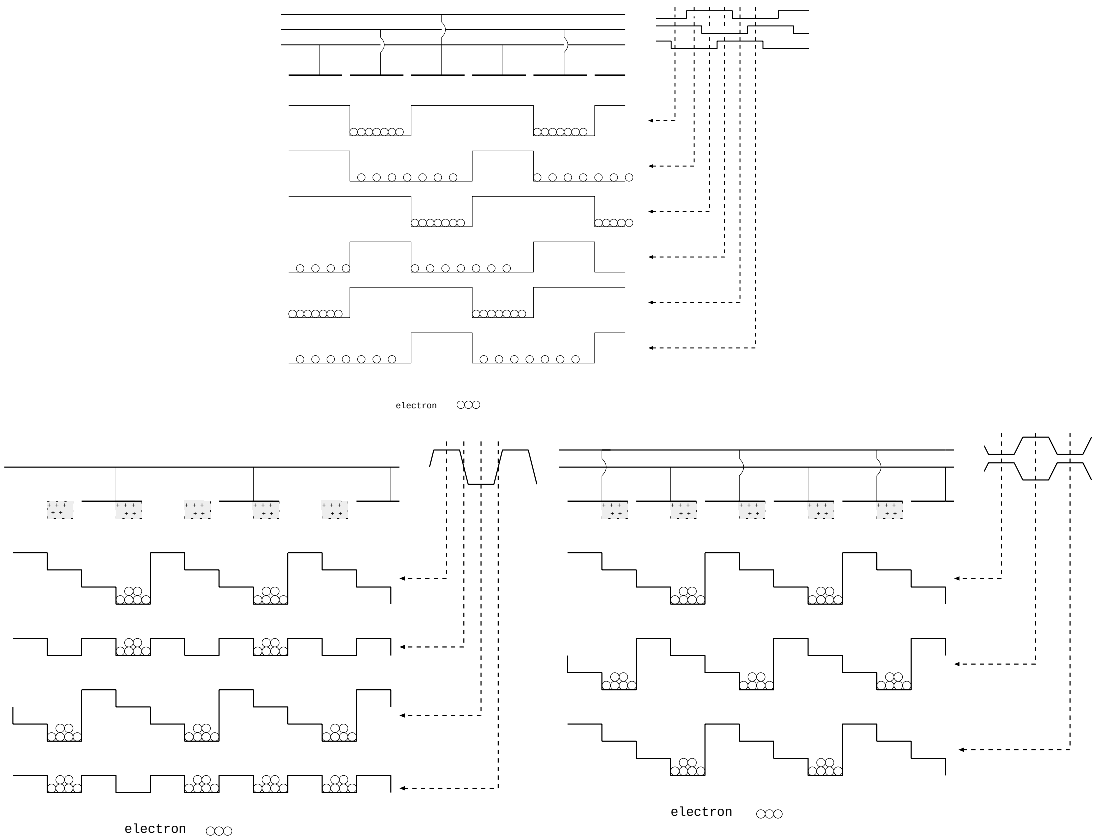


図 3.6: 電極構造の概略図
上: 三相方式、左下: バーチャルフェーズ方式、右下: 二相方式

3.3.4 電荷転送方式

Full Frame Transfer 方式 (図 3.7左上)
一定時間の露光後、一列ずつ読みだし口に転送していく方式。読みだし中は X 線が入

射しないように、受光領域にシャッターをかぶせる。そのため、露光時間にロスが生じるのが大きな欠点である。

Frame transfer 方式 † (図 3.7右上)
受光領域の下に同等・同数のピクセルを持つ遮光された蓄積領域を持つ。露光後、受光領域の電荷が直ちに蓄積領域に移動し、水平シフトレジスタによって順次出力される。受光 → 蓄積領域への転送が十分短いためシャッターが不要であること、蓄積領域での電荷読みだし中も露光が可能であることから、露光の時間ロスが少なくて済むのが特徴。 XIS は Frame transfer 方式を用いている。

Interline 方式 (図 3.7下)
受光領域のすぐ横に Al 等で遮蔽された転送領域を配置したもの。転送はすばやく行なえるが、有効面積は当然素子の半分になってしまう。また、遮蔽を通過してしまう高エネルギー X 線での性能は期待できない。

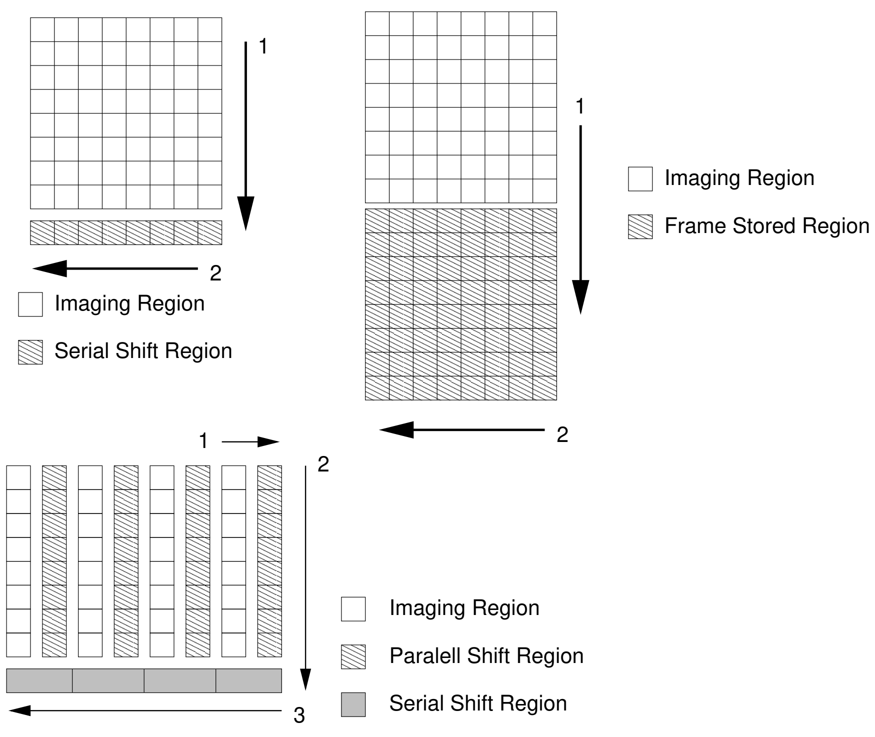


図 3.7: 電荷転送方式の概略図
左上: Full Frame Transfer 方式、右上: Frame Transfer 方式、下: Interline 方式

3.3.5 電荷読みだし方式

CCD から得られる出力信号は図 3.8のように reset、 floating、 signal の 3 レベルからなっており、 floating − signal を信号波高として読みだす。その読みだし法により、以下の 3 つの方式がある。

遅延方式
読みだし信号を 2 分し、 floating level を遅延回路で遅らせる。それぞれの差をとることにより信号波高を認識する方式。 ASCA SIS は数種類のタイミングの遅延信号を作り多重サンプリングすることにより精度を上げている。

多重サンプリング方式
floating、 signal レベルを複数回サンプリングして差を取る方式。サンプル数が多ければ多いほど精度は良くなる。回路系は単純なもので良いが、非常に高速な ADC が必要となる。

積分方式 †
多重サンプリングの代わりに、 floating、 signal レベルを積分して求める方式。やはり精度は良くなるが、高速 ADC は必要にならないため多重サンプリングより現実的に使いやすい。しかし回路系を複雑にしなければならないという欠点もある。 XIS はこの方式である。

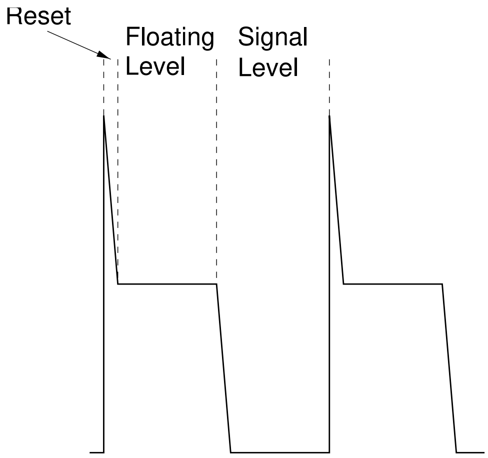


図 3.8: CCD からの出力波形

3.4 基本性能の指標

<u>ゲイン</u>

出力 channel/ 入射 X 線のエネルギーのこと。出力 channel は集められた電荷量を ADC により電圧情報に変換して読み取った値であるので、ゲインは理想的には一定値を取る。しかし、現実的には W 値の変化や [11] ADC の性能などの要因によりゲインがエネルギーによりばらつくこともあり得る。ゲインをどれだけ正確に見積もるかによって X 線エネルギー決定の誤差が決まる。

<u>エネルギー分解能</u>

上でも述べたように入射 X 線のエネルギーは生成される電荷量を数えることにより求められ、得られる電荷量の平均値は E_0/W_{Si} になる。しかしこの電荷量には統計的ゆらぎが生

じる。 poisson 分布からのずれを Fano 因子 (F) と呼ばれる値に押し込め、その分散は、

$$\sigma_e = F\frac{E_0}{W_{Si}} \tag{3.11}$$

と表される。 Si 中では F = 0.12 である。また、システムによる読みだしのノイズ (σ_{read} [electron]) も加わるので、最終的に得られる電荷量は、

$$\sqrt{\sigma_{read}^2 + F\frac{E_0}{W_{Si}}} \tag{3.12}$$

を 1σ とするガウス分布になる。

エネルギー分解能は上のガウシアンの半値幅 (FWHM) を eV 単位で表したもので、次のように計算される。

$$\begin{aligned} FWHM &= \sqrt{8\ln 2}\cdot W_{Si}\cdot\sqrt{\sigma_{read}^2 + F\frac{E_0}{W_{Si}}} \\ &= 2.35\sqrt{N_{read}^2 + W_{Si}FE_0} \end{aligned} \tag{3.13}$$

ここで、 $N_{read} = W_{Si}\sigma_{read}$ [eV] とした。

量子効率

入射 X 線のうちイベントとして認識される割合を示す量のこと。空乏層で吸収される確率に対応する。低エネルギー側では電極や絶縁層で吸収されやすく、高エネルギー側では空乏層をつき抜けやすくなるため、それぞれ量子効率は下がる。元の X 線源の強度 (flux) を知るために必要なパラメータである。

ダークレベル

X 線が入射しない時でも、 CCD は暗電流や光洩れなどの原因により、 0ch ではなく少し高いところに出力波高値を出す。このレベルをダークレベルと呼ぶ。イベント検出の際はダークレベルを何らかの方法で見積り、 offset として引いてやる必要がある。

暗電流

CCD は安定状態においても、熱励起によりトラップ (図 3.5) を介してキャリアが伝導体に流れ、微弱な電流を作ることがある。これを暗電流と呼ぶ。熱励起の確率は CCD の動作温度を下げることにより低く抑えることが出来る。 XIS では動作温度を -90 度にすることにより暗電流を ~ 0.4 electron/frame/pixel に抑えている。

電荷転送非効率 (CTI)

電荷転送中にトラップへの電子捕獲や再結合が起こり、一部電荷が失われるということが起こる。この電荷損失の割合を電荷転送非効率 (CTI; Charge Transfer Inefficiency) と呼ぶ。 CTI はトラップの密度に比例するので、衛星軌道上で宇宙放射線により CCD が損傷を受けると大きく効いてくる。 Chandra 衛星の ACIS が強烈な放射線損傷により CTI を悪化させ問題になっている (9章)。

パイルアップ

入射 X 線の光量が多いとき、 1 回の露出時間に複数の X 線が同一あるいは近接ピクセルに入射してくる可能性が高くなる。これらを分離することは出来ないので、出力としては 2 つの X 線エネルギーを足した値になってしまう。これがパイルアップである。

Hot pixel

X 線が入射していなくても常に高いあるいは低い信号波高値を出すピクセルがいくつか存在している。これらをそれぞれ Hot pixel、 Flickering pixel と呼ぶ。これらは製造行程上何らかの原因で出来ると考えられる。また損傷を強く受け多数の格子欠陥を作ってしまったピクセルもこの類になる。

第 4 章

XIS (X-ray Imaging Spectrometer)

本章では XIS (X-ray Imaging Spectrometer) の概要について述べる。

4.1 センサー

XIS は 4 台のセンサー (XIS0, XIS1, XIS2, XIS3, 表 4.1 参照) からなり、それぞれが独立の XRT の焦点面に置かれる (図 4.1)。同じ視点を同時に観測するため、実効的に検出効率を 4 倍にした観測が可能になっている。個々のセンサーの概観を図 4.2に示す。

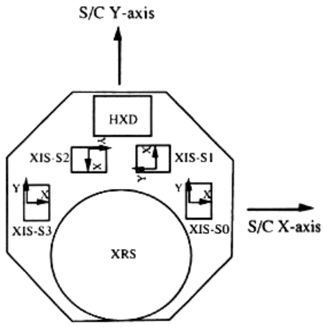


図 4.1: XIS と他の検出器の位置 (ASTRO-E を上から見た図)
[17] より抜粋

表 4.1: XIS の 4 センサーの名称

センサー名	XIS0	XIS1	XIS2	XIS3
CCD 名	w206c2	w404c4	w283c1	w285c1
ボンネット名	A01	A02	A04	A03
OBF 名	R/N7436-3	R/N7436-4	R/N7552-1	R/N7436-2
キャルソース名	No5	No7	No4	No6
圧力センサー	B33-48	B33-50	B33-52	B33-51

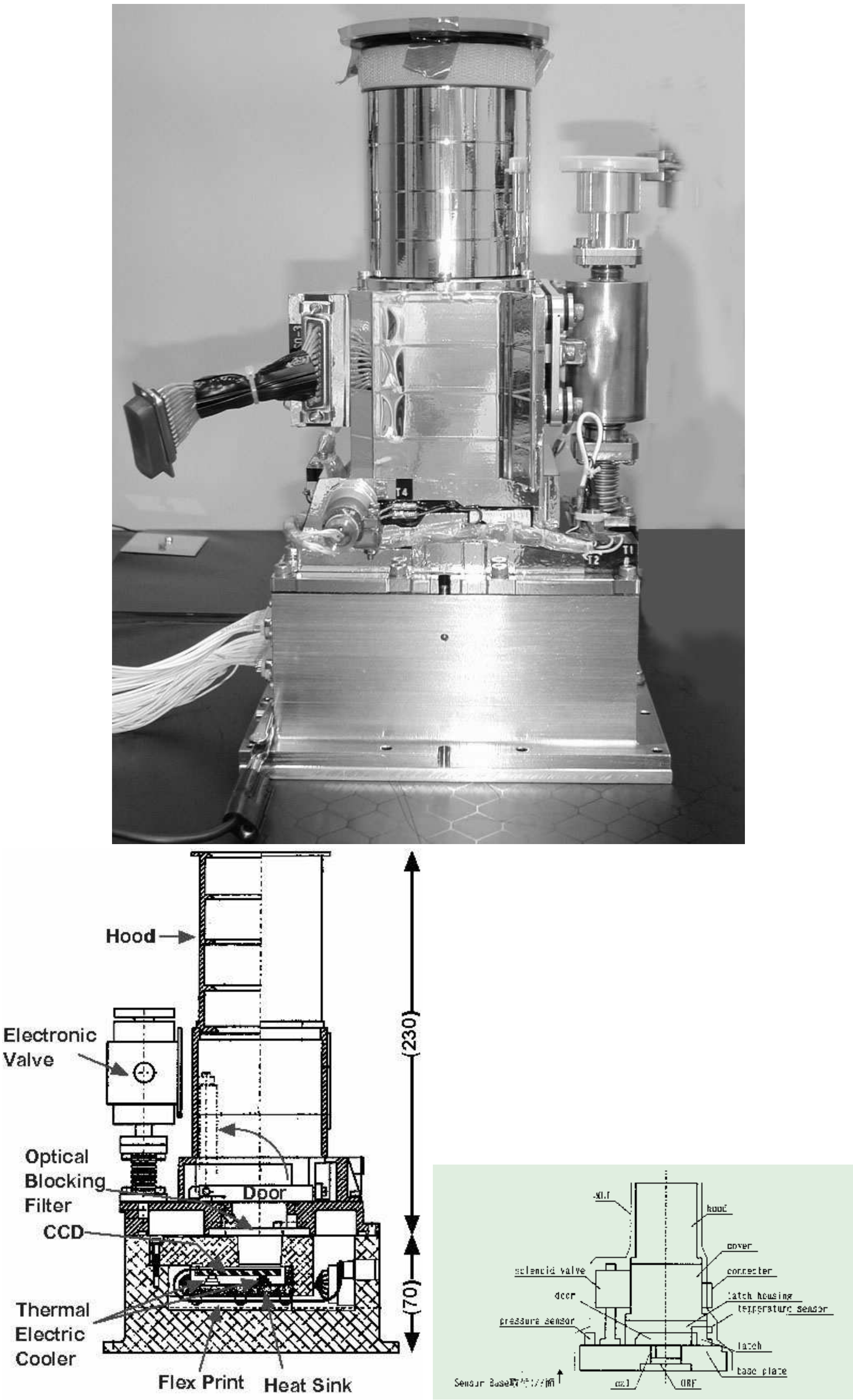


図 4.2: 上: XIS 検出器の概観図 左下: センサー 右下: ボンネット

4.1.1 CCD チップ

XIS で使用している MIT Lincoln 研究所製 CCDID17 チップの正面図を図 4.3に示す。frame transfer 方式の前面照射型である。図の上方が受光領域 (Imaging area) で、 24μm 四方の画素 (pixel) が 1024×1026 個モザイク状にならんでいる。図の下方部分が蓄積領域 (framestore area) で、蓄積領域と同数のピクセルが存在するが、画素サイズは 21μm×13.5μm とやや小さめである。また、読みだし時間を減少させるために読みだし口は 4 つ設けられており、これらが独立な回路を通して出力される。読みだし口の違いによりチップを 4 つに分割し (図中で縦方向に分割する)、それぞれをセグメント A, B, C, D と呼ぶ。各セグメントはゲイン値が異なるため応答関数作成の際には注意が必要である (6.1.2章参照)。

なお、 XIS3 は読み出し口のひとつに不具合があるため通常モードでのセグメント A の読み出しは出来ないようになっている。

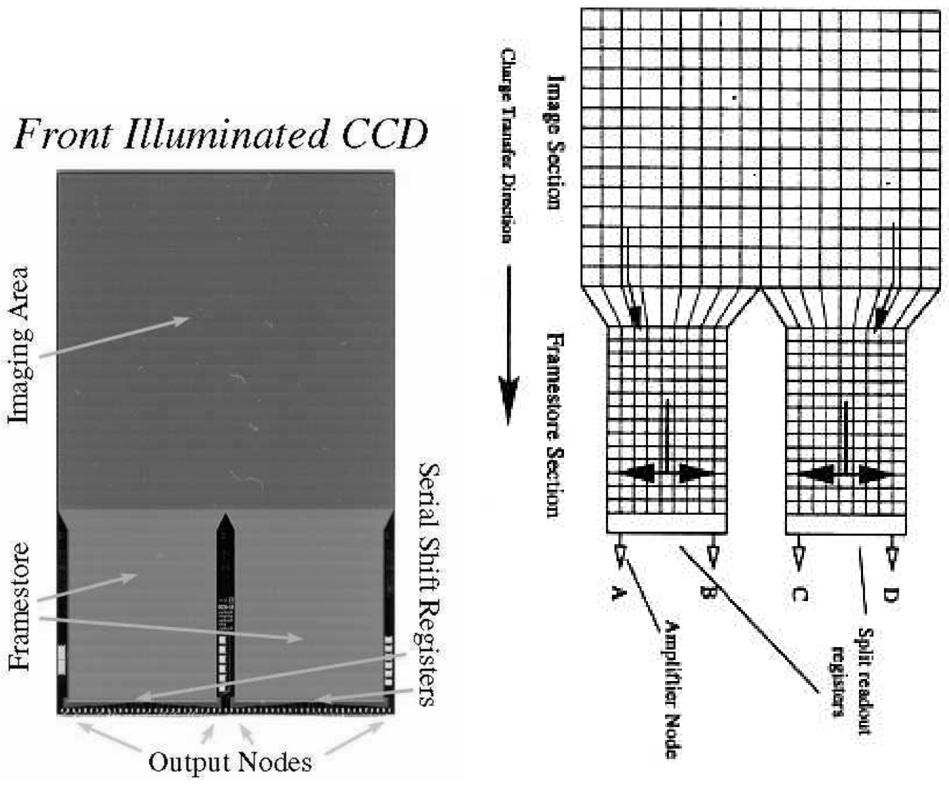


図 4.3: XIS CCD チップ

図 4.4 (左) に電極構造の断面図を示す。形成過程上生じる電極のオーバーラップが見られる。ところで、ピクセル間は転送方向に関しては電極によりポテンシャルを変化させることで障壁を作り電荷の移動を押えることが出来るが、転送に垂直方向に関してはそれが出来ないので、不純物を集中的にドープして人工的な障壁を作る。これを「チャネルストップ」と呼ぶ (図 4.4右)。応答関数のうち、三角成分 (6章参照) 形成の原因となる。

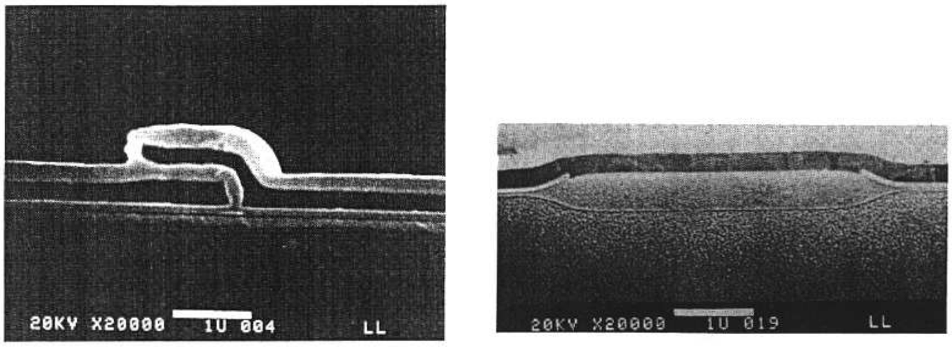


図 4.4: ACIS の電極構造 (左図) とチャネルストップ構造 (右図)
[18] より抜粋。これらは Chandra ACIS の写真だが、 XIS も全く同じ構造を持っている。

4.1.2 ボンネット · OBF

CCD チップの上方には図 4.2 (右下) のようなボンネットがついている。これにより入射 X 線は XRT 方向に制限される。また、 CCD は可視光にも感度を持つため XRT 方向から来る可視光も遮断しなくてはならない。そのため、さらにボンネットの下に OBF (Optical Blocking Filter) がついている。 OBF とは Al を表面に蒸着したポリイミドで、これにより可視光帯域での透過率は 1 万分の 1 以下に抑えられているが、 X 線帯域では 50% 以上 (O K 輝線に対して) 透過率がある。

4.1.3 TEC

CCD チップはベースに置かれる。チップの下方には TEC (Thermal Electric Cooler) と呼ばれるペルチェ素子が取り付けられ、これによりチップの温度制御がなされる。

4.1.4 キャリブレーションソース

ボンネット内部にはキャリブレーションソースとして放射性同位元素 ^{55}Fe が据え付けられており、打ち上げ後も常にチップの隅 (Seg D) を照射する。 ASCA SIS ではこれがなかったため打ち上げ後の性能劣化に基づくゲイン変化に対応仕切れなかったが、 XIS では常時機上較正が可能になる。なお ^{55}Fe は電子捕獲で ^{55}Mn に変化してから X 線を放出するので、 Mn K_α (5.894 keV)、 K_β (6.489 keV) の特性 X 線が得られる。

4.2 周辺回路

4.2.1 AE/TCE

CCD の動作制御 · データ取得をするアナログ電気回路系 (AE; Analog Electronics) と、 CCD の温度制御回路系 (TCE; Thermal Controller Electronics) からなる。 4 センサーごとに独立の回路系があるが、回路箱や電源が XIS0 と XIS1、 XIS2 と XIS3 で共通に使われているので、 AE/TCE01、 AE/TCE23 と呼ぶ。

各回路系は、 Controll Card · Driver Card · Video Card · TCE Card から構成される (図 4.5)。

- Controll Card
  全体の制御、および DE との受信 · 送信を行なう。 HK データ (House Keeping; CCD チップの電圧 · 温度などの環境データを A/D 変換したもの) の取得や、クロックパターンの生成なども Controll Card で行なわれる。

- Driver Card
  CCD の駆動信号を生成 · 転送する。

- Video Card
  CCD からのピクセルの出力波高値を受け取り A/D 変換を行なう。

- TCE Card
  TEC に流す電流を制御し、 CCD の温度を調節する。

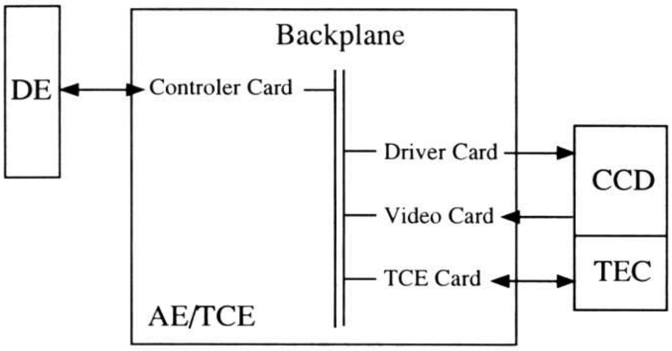


図 4.5: AE/TCE と CCD チップ、 TEC の関係
[17] より抜粋

4.2.2 DE

デジタル電気回路系 (DE; Digital Electronics) は PPU (Pixel Processing Unit)、 MPU (Main Processing Unit) からなり、 AE から送られてきたデジタル信号の処理を行ない DP (Data Processor) に転送する役割を持つ。

- PPU
  ピクセルごとの PH 値に対し、光洩れ · ダーク補正を行ないゼロレベルを引き、イベント検出を行なう。

- MPU
  PPU から送られてくるデータをテレメトリフォーマット (CCSDS Packet; 衛星から地上に送られてくるデータ形態) に編集し DP に送信する。また、 AE/TCE の制御も行なう。

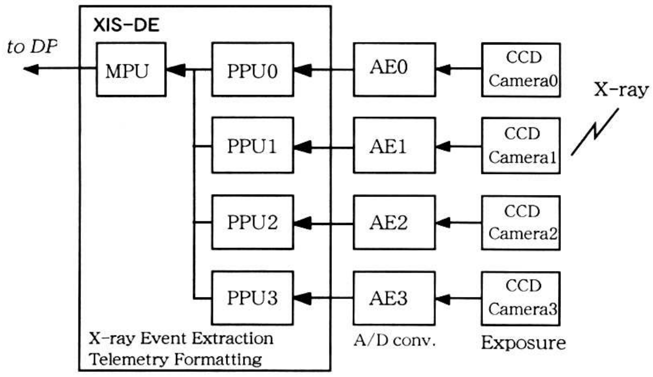


図 4.6: DE と CCD チップからのデータの流れ
[17] より抜粋

4.3 観測モード

XIS の観測モードは、電荷読みだし方式 (Clock mode) と 1 イベント当たりに出力される情報量 (Edit mode) の組合せによりいくつかのパターンが用意されている。可能な組合せを表 4.2にまとめる。

表 4.2: Edit mode と Clock mode の組合せ

Edit mode	Clock mode		
	Normal	P-sum	Burst
5×5	◎	×	◎
3×3	◎	×	◎
2×2	◎	×	◎
Timing	×	○	×
Dark Init	◎	○	◎
Dark Update	◎	×	◎
Frame	◎	○	◎
Dark Frame	–	–	–

◎: Window option 可能、○: 使用可だが Window option は不可、×: 使用不可

4.3.1 Clock mode

XIS の clock mode は大きく分けて 3 通りある。これらは μ code と呼ばれるクロックパターンにより決定される。センサー毎に clock mode を変えることは出来るが、セグメント毎に変えることは出来ない。

- Normal mode (図 4.7)
  CCD チップ上の全てのピクセルデータを読みだす。 1frame の読みだしは 8 秒かかる。

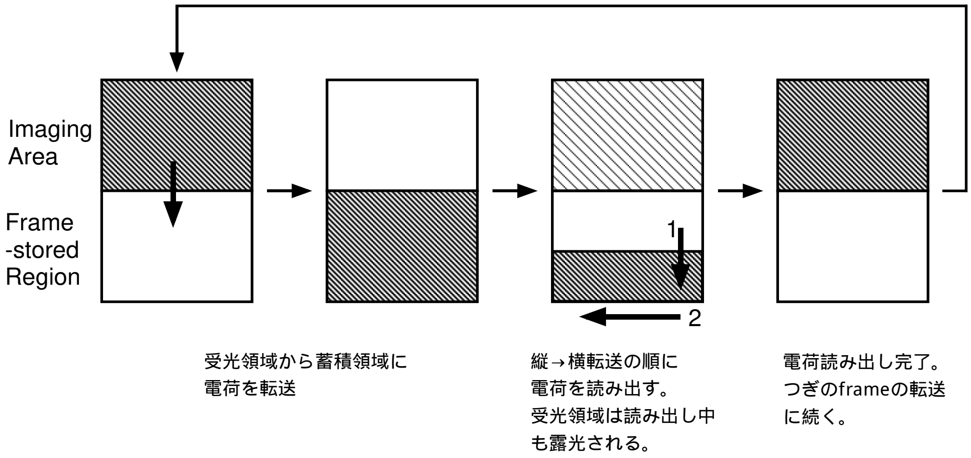


図 4.7: Normal mode の電荷転送パターン

- P-sum (Paralell sum) mode (図 4.8)
縦転送方向にピクセルを加算して読みだす。加算ラインは 64/128/256 ピクセルから選ぶ。これを蓄積領域が埋まるまで繰返すことにより、縦軸に時間情報を持ったイメージが作成される。 frame としての読みだし時間は加算数によらず 8 秒とするので、時間分解能は 8/1024 ～ 8 ミリ秒が得られる。また露光時間も極めて短くなる。 ASCA SIS の fast mode と同じである。

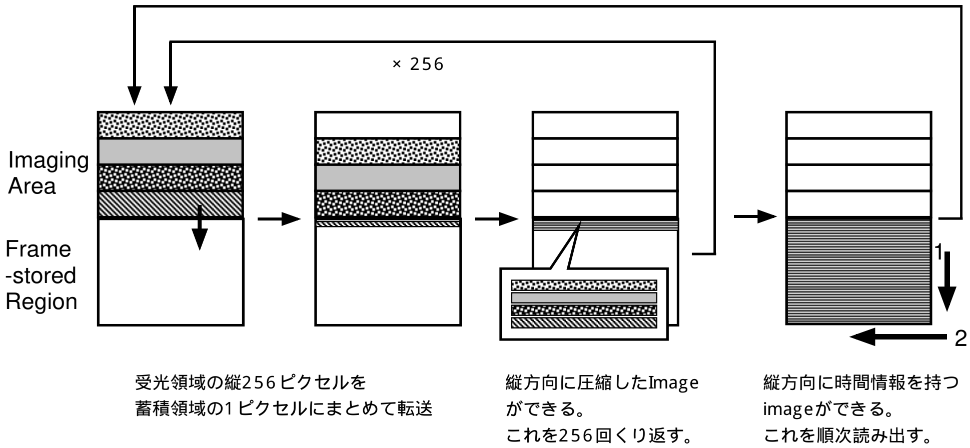


図 4.8: P-sum mode の電荷転送パターン (256 ピクセル加算の場合)

- Burst mode
Normal mode と同じく全ピクセルの情報を読みだすが、露出時間 8 秒のうち前半の何秒かを捨てて実効的に露出時間を短くする。パイルアップやテレメトリ飽和が起こるような明るい天体の観測に用いられる。ただし時間分解能は 8 秒のままである。

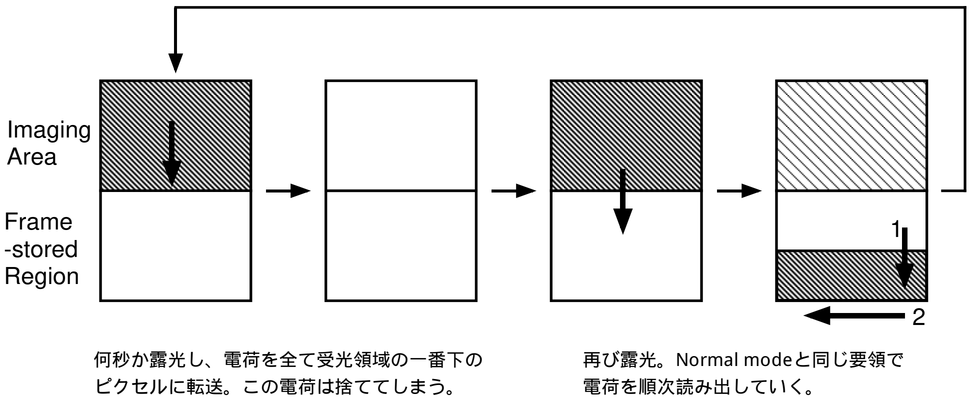


図 4.9: Burst mode の電荷転送パターン

Window option

Normal/Burst mode にはさらに Wondow option をつけることも可能である。これは 1024×1024 ピクセルのうちの一部を読む方式であり、露出時間・時間分解能ともに短くなる。Window は縦転送方向のみ、全 frame の 1/4、1/8、1/16 サイズが指定できる。また Window スタートのピクセル位置も指定できる。

4.3.2 Edit mode

- 5×5 mode
  イベントの座標と、周辺 5×5 ピクセルの波高値が出力される。最もデータ量が多いので、明るい天体を観測している場合はテレメトリの飽和に気をつけなければならない。

- 3×3 mode
  イベントの座標と、周辺 3×3 ピクセルの波高値が出力される。さらにその周囲の 16 ピクセルのうち、split threshold (後述) を越えたピクセルの位置と波高値、下回ったピクセルの波高値の合計も出力される。

- 2×2 mode
  イベントの座標と、(1) イベント中心ピクセル、(2) 隣接する上下左右の 4 ピクセルのうち中心の次に波高値が高いピクセル (PH-2)、(3) PH-2 の対称なピクセルを除いた 2 ピクセルのうち高いほうのピクセル (PH-3)、(4) PH-2 と PH-3 の間のピクセル、の計 4 ピクセルの波高値が出力される。さらに、この 4 ピクセルがどちら側に偏っているか、3×3 内のコーナーピクセルと PH-2 の外側のピクセルが split threshold を越えているか、3×3 ピクセルの外周のうち split threshold を越えなかったピクセルの波高値の合計と加えたピクセル数、という情報も出力される。

- Timing mode
  イベントの座標と、Grade 判定法に応じて周辺ピクセルの波高値を加えた値、判定された Grade、の 3 つの情報が出力される。P-sum mode で使われる。

- Dark Init/Update mode
  ダークレベルを更新した後、Hot pixel の座標とそのダークレベルが出力される。

- Frame mode
  全てのピクセルの波高値が出力される。露光時間は 8/32/128 秒から選ぶ。

- Dark Frame mode
  PPU に記憶される全ピクセルのダークレベル値が出力される。

4.4 データ処理法

4.4.1 補正

CCD からの出力波高値には、真のゼロレベルにオフセットが付加されている。これを差し引くために以下のような補正が行なわれる。

<u>ダークレベル補正</u>

XIS では各ピクセル毎のダークレベルが DE に保持されており、これを元に各 frame 毎にダークレベルの除去が行なわれる。

ダークレベルは Dark Init / Update mode 時に更新される。またその際には hot pixel も選び出され、その位置も保持される。

ダークレベルは、 Normal/Burst mode では指定した frame 数のデータ (デフォルトでは 16frame)、 P-sum mode では指定したピクセル上のライン数 (デフォルトでは 8 ライン) を用いて決定される。 n 回目の exposure でのあるピクセルの波高値を $PH_0(n)$、 $(n-1)$ 回目までの exposure で決定したダークレベルを $D(n-1)$ とすると、次のような処理が行なわれる。

$$PH_0(n) - D(n-1) > \mathrm{darkUpper} \text{ の時、 } D(n) = D(n-1)$$
$$PH_0(n) - D(n-1) < \mathrm{darkLower} \text{ の時、 } D(n) = PH_0(n)$$
$$\mathrm{darkLower} < PH_0(n) - D(n-1) < \mathrm{darkUpper} \text{ の時、}$$
$$D(n) = D(n-1) + (PH_0(n)-D(n-1))/h$$

ここで darkUpper, darkLower はダークレベルの閾値の上限および下限、 h はヒストリパラメータと呼ばれる量 (デフォルトは 8) である。

また DarkInit/Update mode の最後に、ダークレベル値を Hot pixel threshold と呼ばれる値と見比べ、ダークレベル値の方が大きい場合そのピクセルを Hot pixel と認識し地上に送信する。

DarkInit/Update mode の違いは、前者は mode のはじまりに以前から保持していたダークレベルの情報を捨ててしまうのに対し、後者はそれを出発点のダークレベル値として用いるということである。なお Timing mode では各ライン毎にダークレベルの更新を行なっているので、 DarkUpdate mode を行なう必要はない。

<u>光洩れ量補正</u>

衛星が地球周回軌道上で日照から日陰、あるいは日陰から日照に移った時には、観測対象以外からの可視光線の洩れ込み量が変化し、ダークレベルは急激に変化する。これにより、上の手法で格納されたダークレベルは真のダークレベルと大きくかけ離れてしまうという状況に陥る。これを補正するために、 5×5, 3×3, 2×2 mode では frame 毎に光洩れ量と呼ばれる値を計算し、ダークレベルのずれを補正する。なお、 Timing mode ではダークレベルは常に行なわれているのでこの補正を行なう必要はない。

光洩れ補正量は 1 セグメントを適度に分割したパーティション毎に行なわれる。分割数は 1×1 から 4×16 の間で選ぶ (デフォルトは 4×16)。あるパーティションについて、 n 回目の Exposure で決定される光洩れ量 L(n) は、パーティション内で、

$$\mathrm{LightLow} \leq \mathrm{PH}_0(\mathrm{n}) - \mathrm{D}(\mathrm{n}) - \mathrm{L}(\mathrm{n}-1) \leq \mathrm{LightUppr}$$

であるピクセルについてピクセルレベルの平均を取った値を L(n−1) に加えて決定される。つまり、

$$\mathrm{L}(\mathrm{n}) = \mathrm{L}(\mathrm{n}\text{-}1) + < \mathrm{PH}_0(\mathrm{n}) - \mathrm{D}(\mathrm{n}) - \mathrm{L}(\mathrm{n}-1) >$$

である。ここで LightLow, LightUppr は光洩れ量の閾値の上限、下限である。また、 L(n) がある指定した量 (maxLight) を越えた場合は L(n) = maxLight とする。(n+1) 回目の Exposure ではこの L(n) を光洩れ量として用いる。

4.4.2 イベント検出法

上記補正を行なった後、イベントと認識されるピクセルは次のような手順で決定される。

1. event threshold lower/upper を設け、

$$\text{event threshold lower} \leq \mathrm{PH} \leq \text{event threshold upper}$$

   なるピクセルを抽出。ここで PH はダークレベル、光洩れ補正を行なった後のピクセルのパルス波高値を表す。

2. 周辺 3×3 ピクセル (P-sum mode の場合は左右 2 ピクセル) を調べ、これらよりも PH が大きいものをイベントと認定する 。

しかしこれらの中には荷電粒子等のバックグラウンドイベントも含まれるので、 X 線イベントのみ抜き出す必要がある。また、 X 線イベントであっても、ピクセル境界で吸収されたり電子雲がピクセル以上に拡がったりした場合、周辺ピクセルに洩れ出していた電荷を戻し、正しい波高値を計算する工夫がいる。以下ではこの 2 つの点を考慮したイベント検出法について述べる。

Grade 判定法

イベントと認識されたピクセルの周囲 3×3 ピクセルの波高値の分布によりイベント検出を行なう手法である。 split threshold という値を与え、周辺でパルス波高値がこの値を越えているピクセルを抽出し、そのパターンにより 8 つの Grade に分類する (図 4.10) [1]。

真の X 線イベントの大部分ははせいぜい周辺 4 ピクセル程度にしか拡がらないのに対し、荷電粒子によるバックグラウンドイベントは 3×3 いっぱいに拡がるので、 grade 7 をバックグラウンドイベントとして除去する[2]。また grade 1,5 は 1 イベントは電荷の洩れ出しの形態ではなく、パイルアップにより生じていると考えられるのでこれも除去する。さらに Grade0, 2, 3, 4, 6 形状のイベントでも、 (1) Grade0 以外で 3×3 の外周 16 ピクセルに split threshold を越えるピクセルがあるもの、 (2) Grade6 の四角く拡がったイベントのうち、角

[1] Grade0–6 に含まれないイベントを Grade7 とする。
[2] SIS では Grade6 も非 X 線イベントとしていた。

のピクセルが隣のピクセルより波高値が高いもの、も除く。以上の screening により残ったイベントを真の X 線イベントとして認識する。

次に、周辺ピクセルに跨っている電荷量を中心ピクセルに加算してやらなければならない。 split threshold というのは、そのピクセルレベルが電荷の洩れ出しによるものか単なるダークレベルのゆらぎなのかを判断する閾値である。 XIS では、ダークレベルがガウシアン分布していると考え、ゆらぎを拾う確率を 0.1% 以下にするように 4σ を split threshold として採用している (具体的には 20ch[9])。隣接ピクセルでこの値以上の波高値を持つものは、中心ピクセルから電荷の洩れ出しがあったと判断して中心ピクセルの波高値に加える。また grade 6 では最大 4 ピクセルを合計する。これで入射 X 線に対する正しい波高値を得ることが出来る。

また、 P-sum mode では左右のピクセルを見て Grade 判定を行なう (図 4.11)。

以下の解析は全て Grade 判定法を用いている。

Fitting 法 [9]

Grade 判定法は X 線イベントでも 3×3 以上に拡がってしまったものを捨ててしまっているので効率が悪い。特に XIS では SIS に比べ空乏層が厚くなった分拡がった X 線イベントは無視できない量存在している。そこで、 5×5 ピクセルの波高値を 2 次元ガウシアンでフィッティングして、その拡がりによりイベント検出を行なう方法が考案されている。

ガウシアンの拡がりを σ とすると、バックグラウンドイベントは典型的に $\sigma > 2$pixel 程度になるのに対し、 X 線イベントは σ <1pixel に収まる。この違いにより X 線イベントの認識をする。また、正しいパルス波高値はガウシアンの体積を計算することにより求められる。

これは特に拡がりが大きくなる高エネルギー側で有効で、 $\sigma \leq 2$pixel を X 線イベントとすると 12keV で 80% 程度の検出効率の増加が達成されている。

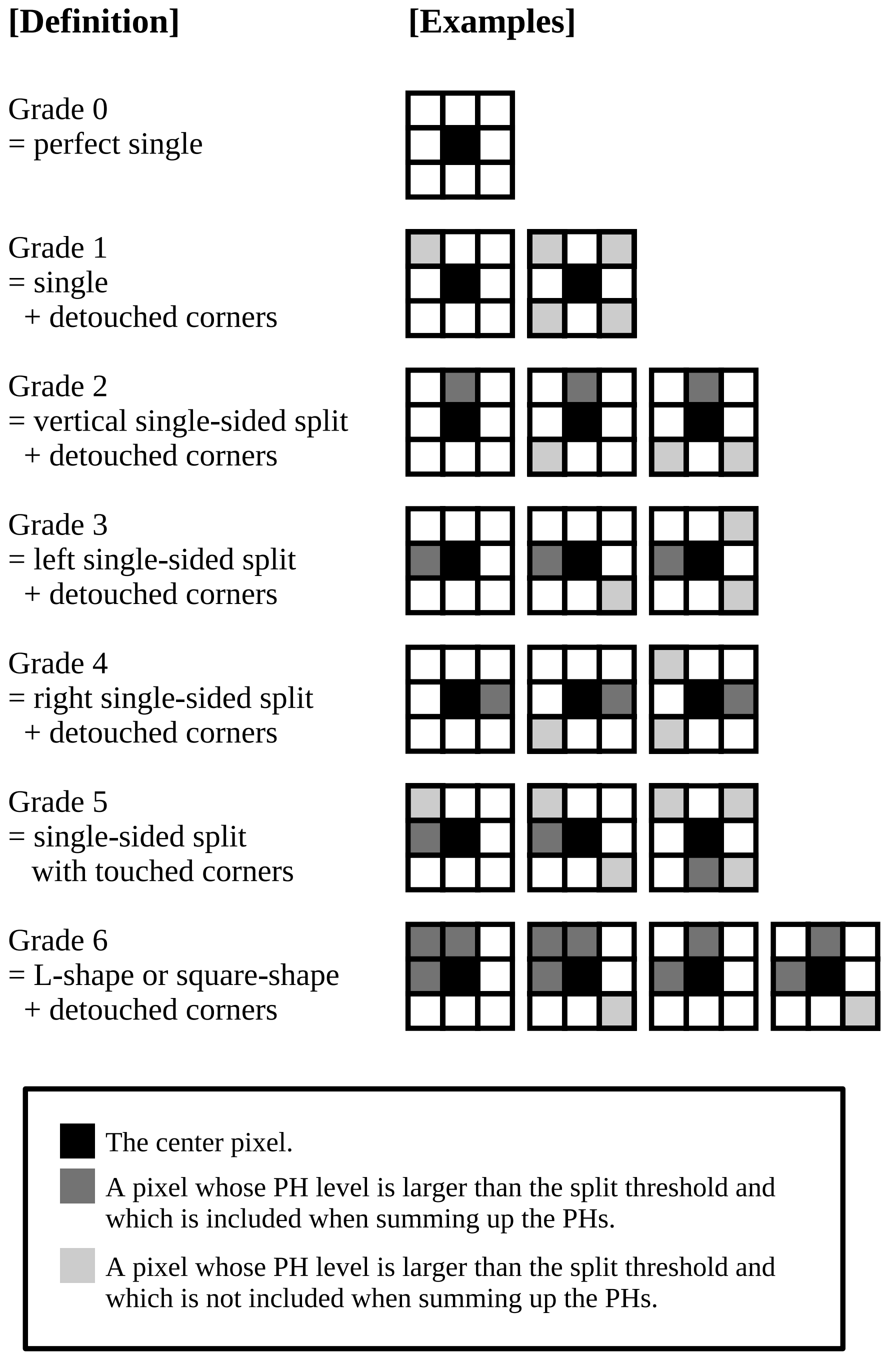


図 4.10: Grade 判定法による分類 (Normal/Burst mode)

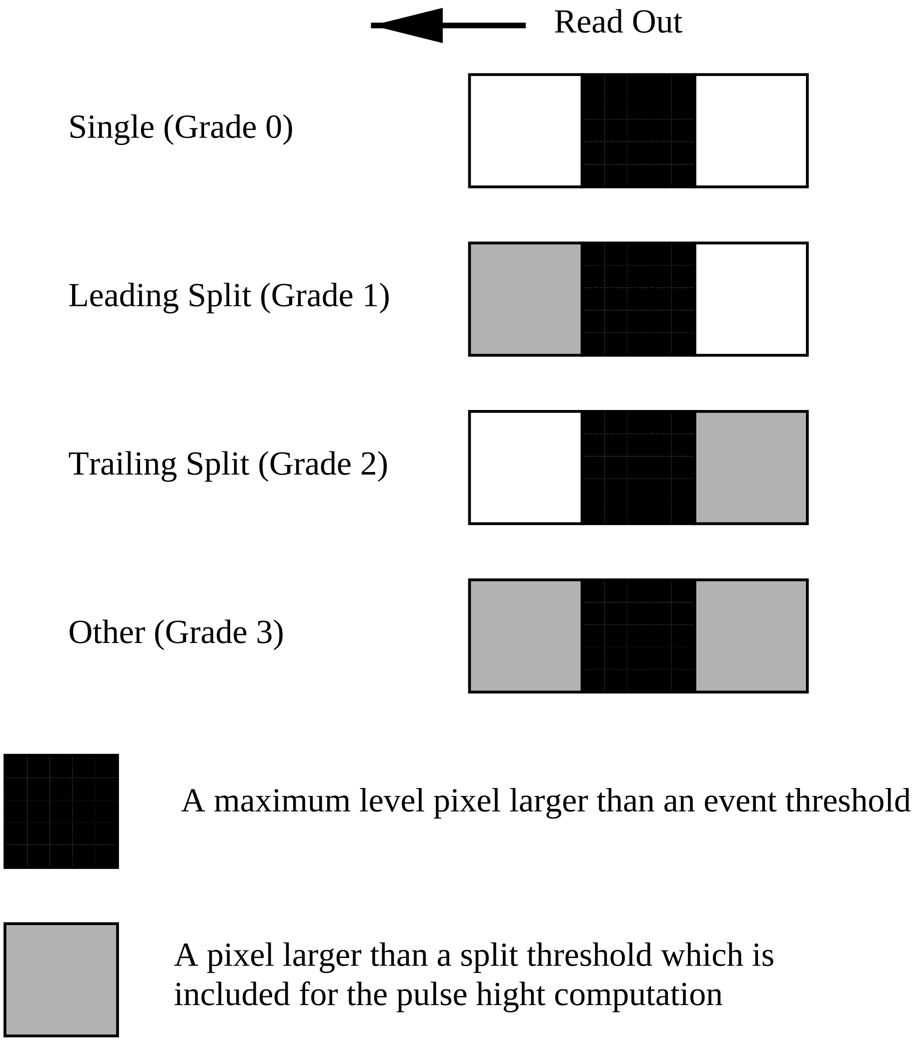


図 4.11: Grade 判定法による分類 (P-sum mode)

第 5 章

XIS の応答関数構築

5.1 概要

天体からの X 線を検出器で受け取った時、その出力信号は元のスペクトルを如実に表すのではなく、検出器特有の変換を受けた情報になる。つまり、天体が放出しているスペクトルを **S(E)**、観測されるパルス波高値の分布を **PH(ch)** とすると、ある行列 **R(ch,E)** を用いて、

$$\mathbf{PH(ch)} = \mathbf{R(ch,E)} \otimes \mathbf{S(E)} \tag{5.1}$$

の関係が成り立つ。我々は **R(ch,E)** を正確に知ることにより、得られたデータ (**PH(ch)**) から元の情報 (**S(E)**) を推定することが可能になる。この **R(ch,E)** が応答関数である。

地上試験では **R(ch,E)** を知るために、既知のスペクトルを持つ X 線を検出器に入射させ、その出力信号を測定する。特に入射 X 線の単色性が高いほどより正確な測定が可能となる。

XIS は 4 台衛星に搭載されるが、各センサーは若干個性を持つ (空乏層や電極・絶縁層の厚みの違いなど) ので、それぞれについて別の応答関数を構成しなくてはならない。また、動作モードによっても別途応答関数を用意する必要がある。

5.2 性能評価システム

XIS のキャリブレーションは主に京都大学と大阪大学で行なわれた。以下ではこれらの性能評価システムについて述べる。

5.2.1 京都大学システム

京都大学宇宙線研究室では主に高エネルギー側 ($>$2 keV) での較正試験を行なった。性能評価システムは蛍光二次 X 線発生系である。概観を図 5.1に示す。

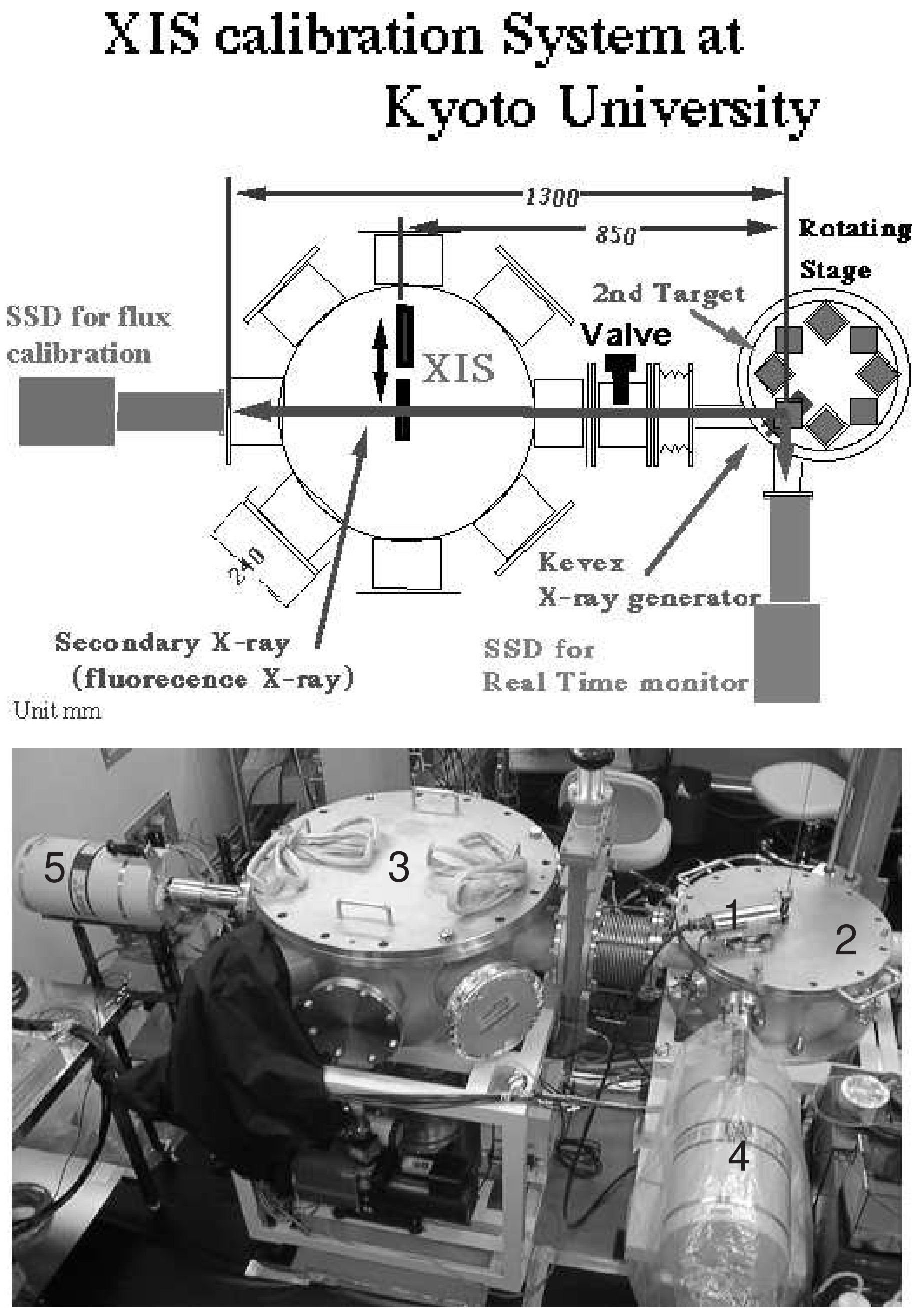


図 5.1: 京都大学 XIS キャリブレーションシステムの概観

1: 一次 X 線発生装置、 2: 二次 X 線発生チェンバー、 3: サンプルチェンバー、
4: リアルタイムモニター SSD、 5: キャリブレーション SSD

一次 X 線源である KEVEX 社製 X 線発生装置 (図中 1) は、高電圧により加速された電子がタングステンと衝突し、制動輻射による連続 X 線とタングステンの特性 X 線を発生する。図 5.2に 15 kV の管電圧をかけた時の一次 X 線のスペクトルを示す。この X 線を二次 X 線発生チェンバー (図中 2) 内にあるターゲットに照射し、ターゲット固有の特性 X 線 (単色 X 線) を得る。ターゲットは、大阪大学の試験データと相互チェックが出来るように 2 keV

以下の輝線を持つ Al と、2–12 keV のエネルギーで均等な幅で測定点が得られるように、Cl、Ti、Fe、Ni、Zn、Se の計 7 種類が選ばれた。ステージを回転させることによりどのターゲットに照射するかを決定できる。二次 X 線単色度は応答関数の精度を左右するので、これを向上させるためターゲットの純度のアップや X 線フィルターの設置を行なった [8]。その結果、98% 以上の単色性が達成されている。

こうして得られた二次 X 線はサンプルチェンバー (図中 3) 内の XIS に照射される。またターゲットとは別に放射性同位元素 ^{55}Fe もあり、これを直接 XIS に照射することも出来る。

また今回の試験は XIS の量子効率測定も目的としているため、二次 X 線の強度をモニターする必要がある。そこで、常時二次 X 線を受け、強度変動がないかをチェックするリアルタイムモニター SSD (図中 4) と、二次 X 線の絶対強度の測定に用いるキャリブレーション SSD (図中 5) を設置し、同時にデータが取得された。

実験で用いた X 線発生装置の電圧 · 電流値を表 5.1に示す。ここで P は二次 X 線強度を表す指標で、1frame での全ピクセルに対する event frame の割合を示す。例えば P=0.2% の場合は X 線強度は、

$$\frac{0.002 \times 1024\mathrm{pixel} \times 256\mathrm{pixel}}{8\mathrm{sec}} \sim 64\mathrm{counts/sec/segment} \qquad (5.2)$$

ということになる。この値が一定値を越えるとパイルアップによる影響で応答関数が変化することが判明している [7]。よって以下の解析では Al, Cl では P=0.5% か 0.2%、Ti 以上では P=0.2% のデータを用いた。

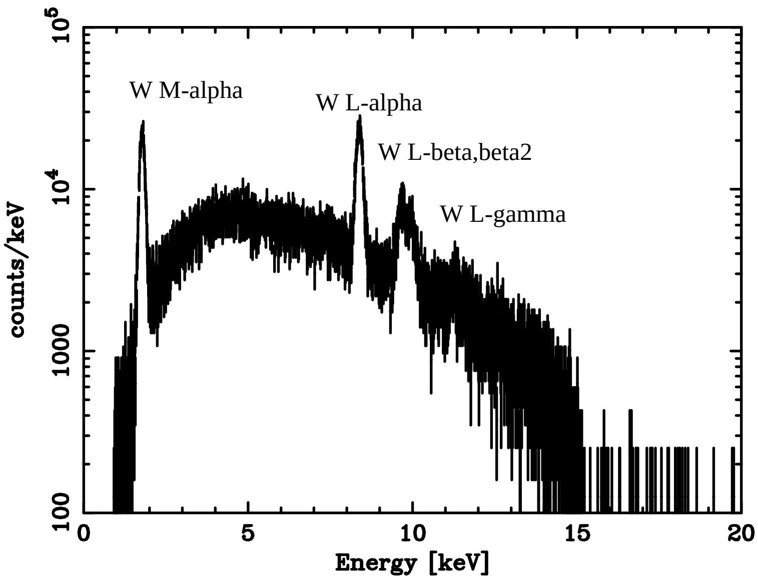


図 5.2: X 線発生装置からのスペクトル (HV = 15 kV)

表 5.1: 各ターゲットの特性 X 線のエネルギーと X 線発生装置にかける電圧、電流値

Target	Energy		電圧	電流; P†=0.2%	0.5%	1.0%	2.0%
	K_α(keV)	K_β(keV)	kV	mA	mA	mA	mA
Al	1.486	1.560	5	0.029	0.073	0.15	0.29
Cl	2.621	2.815	5	0.045	0.113	0.23	0.45
Ti	4.508	4.931	15	0.047	0.117	0.23	0.47
^{55}Fe	5.894	6.489	—	—	—	—	—
Fe	6.398	7.057	15	0.058	0.145	0.29	0.58
Ni	7.471	8.263	15	0.060	0.15	0.30	0.60
Zn	8.630	9.570	20	0.058	0.145	0.29	0.58
Se	11.207	12.492	20	0.066	0.165	0.33	0.66

†: 本文参照

5.2.2 大阪大学システム

低エネルギー側 (<2 keV) での較正試験を行なった大阪大学の性能評価システムの概観を図 5.3に示す。

阪大システムは回折格子 (Grating) を用いた X 線分光系を用いている。以下では簡単な原理を述べる。詳細については [1] を参照されたい。

Manson 社製 X 線発生装置 (一次ターゲットは Ag を使用) により得られた一次 X 線を SES (Si-K Edge Spectrometer) に入射させる。 SES 中で X 線はスリット、集光鏡で収束されて回折格子 (Grating) に入射する。回折 X 線はエネルギーの違いにより一次元的に分散するので (図中では低エネルギーほど下に集まる)、 Focal Plane 上に置いた XIS で適当にピクセルを区切ってデータを集積すればほぼ単色 X 線に対するデータが連続的に得られる。

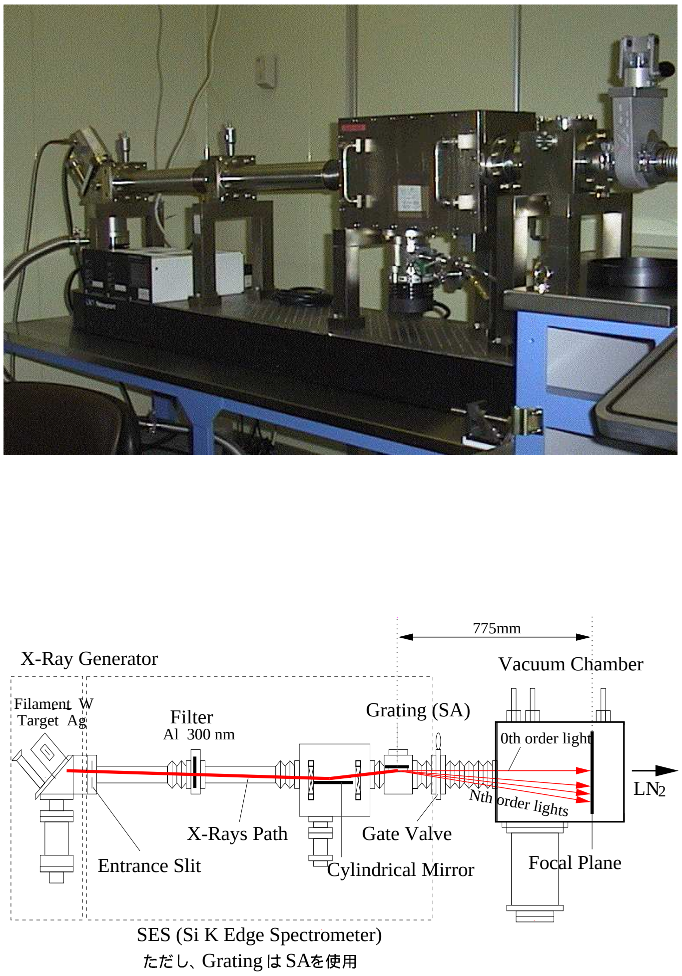


図 5.3: 大阪大学 XIS キャリブレーションシステムの概観
([1] より抜粋)

5.3 応答関数構築の流れと取得データ

XIS は ASCA SIS と同じ CCD カメラであるが、受光面積や空乏層厚の増加等の改良点が加えられている。また、動作クロックや回路系も改良されている。この XIS の性能を詳しく調べるために、出来るだけ多くのエネルギー、多くの動作モードで性能評価を行ない、それを元に応答関数を構築していかねばならない。しかし、flight 品 (FM: Flight Model) は時間的や取扱の制約のため長期間の試験を行なうことは出来ない。そこで我々は flight 品に近い試作品 (EM: Engineering Model) を用いて詳細試験を行なった。

これまで、^{55}Fe のデータに対しては詳細な解析がなされており [9]、以下のような応答関数の特徴が明らかになっている。

- 応答関数の動作モード依存性について、 Normal mode、 P-sum mode の 2 種類に大

別できる。

- センサー毎で異なる。

私はこの結果を踏まえ、地上試験で得られたデータを元に Normal, P-sum mode の 2 種類の応答関数の詳細なモデル化を行なった。

実際にどのようなデータを取り、どのような流れで応答関数を構築していったかを以下にまとめる。

1. 旧 XIS3 と呼ばれる試作品を京都に搬入し、 8 点のエネルギーに対するデータを取得した。これを元に、 XIS 応答関数の詳細なモデル化を行なった (6章)。

2. この応答関数の flight 品への応用方法の確立を目的に、京都、大阪において flight 品 XIS0 のデータを取得した。その結果、上で構成した応答関数の基本的なパラメータを変更するだけで対応が可能であるとこと明らかにした (7.1章)。

3. XIS0 の結果を元に、他の flight 品毎に個別の応答関数を作成した。実際にデータに応用できるかを調べるために、宇宙科学研究所 (ISAS) で ASTRO-E 衛星の熱真空試験 (1999 年 8–9 月) 中に取得された各センサーのデータ (常時 ^{55}Fe が照射されていた) を用いて確認を行なった (7.2章) 。

応答関数作成に用いたキャリブレーションデータを表 5.2 にまとめる。

表 5.2: 応答関数作成に用いたキャリブレーションデータ

Sensor ID	ISAS(^{55}Fe)	阪大 (連続 X 線)	京大
XIS0	○	○	○ (Al, Cl, Zn, ^{55}Fe)
XIS1	○	○	×
XIS2	○	○	×
XIS3	○	○	×
旧 XIS3(EM)	×	×	○ (Al, Cl, Ti, Fe, Ni, Zn, Se, ^{55}Fe)

第 6 章

旧 XIS3 データを用いた応答関数の構築

本章では旧 XIS3 のデータを用いた応答関数の構築について述べる。用いたデータのログを表 6.1に、データ解析時に設けた各種パラメータを表 6.2に示す。

表 6.1: 本章で用いている旧 XIS3 データのログ

Target	電圧	電流	Normal mode Frame 数	P-sum mode Frame 数
Al	5 kV	0.2%	416	205
Cl	5 kV	0.2%	416	206
Ti	15 kV	0.2%	416	206
^{55}Fe	–	–	96	271
Fe	15 kV	0.2%	430	206
Ni	15 kV	0.2%	416	206
Zn	20 kV	0.2%	416	206
Se	20 kV	0.2%	416	220

表 6.2: 本章で行なった解析の各種パラメータ

darkLower/darkUpper†	$-40/40$ [ch]
Hot pixel threshold†	3000 [ch]
Event threshold Lower/Upper‡	50/4095 [ch]
split threshold‡	20 [ch]
Normal mode でイベントと認識した Grade‡	Grade 0,2,3,4,6
P-sum mode でイベントと認識した Grade‡	Grade 0,1,2
P-sum mode 加算数	128

†: 4.4.1節参照、‡: 4.4.2節参照、

6.1 Normal mode に対する各成分の評価

Normal mode で取得したデータの応答関数を知るために、まず放射性同位元素 ^{55}Fe からの X 線を照射して得られた出力波高値の分布 (スペクトル) を図 6.1に示す。ダークレベ

ルは引かれており、また Grade 法により Grade0,2,3,4,6 と判定されたものを X 線イベントと認識し合計したものを示している。次のような特徴が確認される。

- Mn K_α (5.894keV)、 K_β (6.489keV) 輝線に対応していると思われる 2 つの強いピークが 1500〜2000ch 付近に見られる。
- セグメント毎の全体的な形状は同じだが、ピークの位置 (ゲイン) は異なる。
- その他にも低エネルギー側にいくつかのライン構造が見られる。
- ピークの低エネルギー側にかけて tail がある。これは X 線により作られた電荷を十分集められなかったために生じていると思われる。

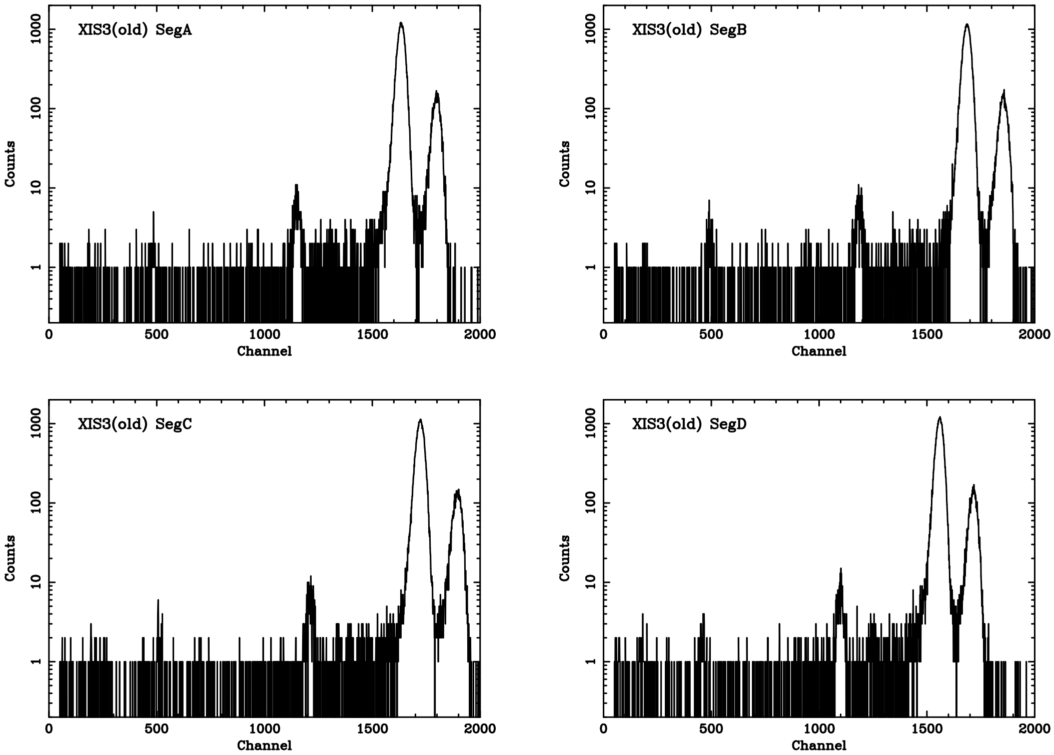


図 6.1: ^{55}Fe を照射した時の旧 XIS3 の出力波高値 (Normal mode, Grade0+2+3+4+6)

6.1.1 6 成分モデル

以下ではこのスペクトルを、 CCD 内部で起こる物理過程の違いに応じて 6 つの成分に分割し検討する (図 6.2参照)。

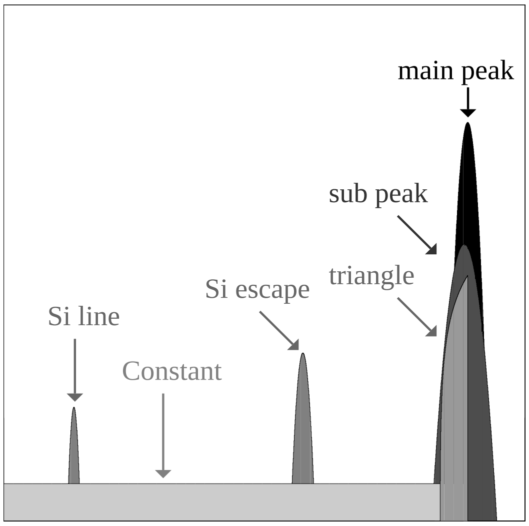


図 6.2: XIS レスポンスを構成する 6 つの成分

- メインピーク
  入射 X 線のエネルギーに対応する channel を中心に見られる拡がった成分。検出器の基本性能である線形性、エネルギー分解能に直結する。ほとんど (90% 以上) のイベントはこの成分に含まれる。

- サブピーク
  split threshold 以下の電荷量が周辺ピクセルに逃げていったため、メインピークより少し低エネルギー側に表れてしまう tail 成分 [5][7]。

- 三角成分
  縦転送方向と垂直に設けられているチャネルストップによる電荷の部分吸収により現れる tail 成分。特に低エネルギー側で顕著に見られる [1]。

- コンスタント成分
  電極・絶縁層による部分吸収により現れる成分。

- **Si** エスケープ
  入射 X 線が光電吸収された後 Si 蛍光 X 線が発生し、 Si 蛍光 X 線が吸収されたピクセルの外に逃げていった場合に作るピーク。入射 X 線のエネルギー − Si 蛍光 X 線のエネルギー (1.739keV) に対応する channel に見られる。

- **Si** ライン
  Si エスケープと逆に、逃げていった Si 蛍光 X 線が吸収された時にできるイベント。

各成分がどのような物理過程で発生しているかを図 6.3に簡単にまとめる。

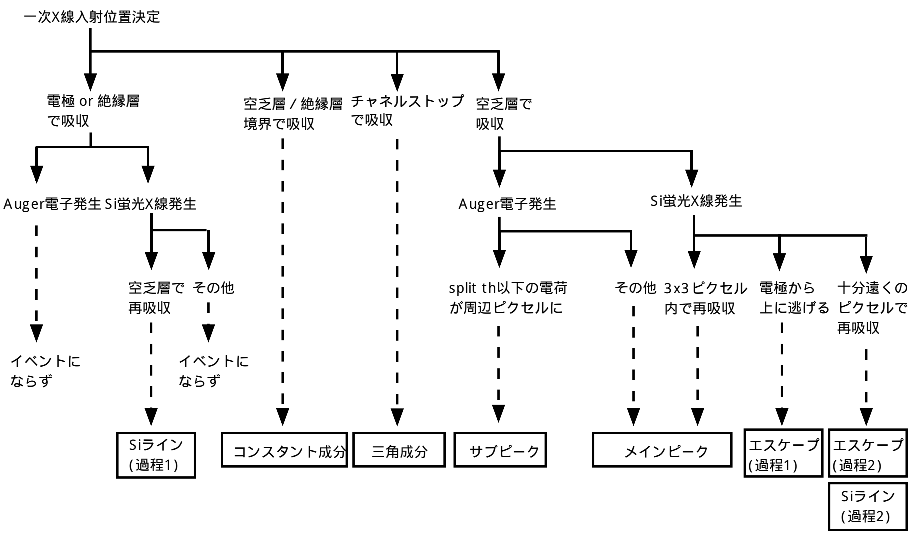


図 6.3: 6 成分の発生過程のチャート

各成分の評価は次のステップに従って行なう。

step 1: 形 (関数型) がどのようになるかを検討

step 2: 実験データやシミュレーションを用いて、上の関数型で必要なパラメータを入射 X 線のエネルギー (E_0) の関数として表現する。

以下では多数の計算式が出てくるので、ここで使用するパラメータを表 6.3にまとめておく。

表 6.3: 本章で用いる各種パラメータ

E_0	入射 X 線のエネルギー [keV]	a	初期電子雲の半径 [cm]
μ_{Si}	Si 質量吸収係数 [cm^2/g]	μ_O	O 質量吸収係数 [cm^2/g]
μ_{esc}	Si 蛍光 X 線に対する μ_{Si}[cm^2/g]		
d_1	電極厚 [cm]	ρ_1	電極の Si 密度 [g/cm^3]
d_2	絶縁層厚 [cm]	ρ_2^{Si}	絶縁層の Si 密度 [g/cm^3]
		ρ_2^O	絶縁層の O 密度 [g/cm^3]
D	空乏層厚 [cm]	ρ_3	空乏層の Si 密度 [g/cm^3]
w	ピクセルサイズ (=24μm)		
w_c	チャネルストップの幅 [μm]	d_c	チャネルストップの深さ [cm]
F	fano factor (0.12)	W_{Si}	Si 平均解離エネルギー (3.65eV)
N_{read}	読みだしノイズ [eV]	Fy	Si 蛍光収率 (0.037)

6.1.2 メインピーク (ゲイン、エネルギー分解能)

step 1

メインピーク成分の photon は全て入射 X 線のエネルギーに対応する数の電子を集めているので、パルス波高値は確率過程を加味して単純な single gaussian で表現される。必要なパラメータは以下の式に含まれる 3 つ。

$$N_{main}(ch) = \frac{T1}{S1\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(ch-C1)^2}{2 \cdot S1^2}} \tag{6.1}$$

T1 がメインピークに含まれる面積 (= イベント数) 、 C1 がガウス中心 [ch] を表す。また、エネルギー分解能 (FWHM[eV]) は以下の式で導出される。

$$FWHM = S1 \cdot 2.35 \cdot \frac{E_0}{C1} \tag{6.2}$$

step 2

実際に各エネルギーのデータに対しメインピーク付近を fitting し、ガウシアンのパラメータがどのように変化しているかを調べた。サブピーク成分の寄与 (後述) も考え、 fitting はガウシアン 2 本で行なった。また、サブピークに相当するガウシアンのパラメータは、強度以外は 6.1.3節で設定された値に固定した。

図 6.4、図 6.5に各セグメントごとでの入射 X 線エネルギーに対する C1、 FWHM の関係を示す。また、図 6.4を一次関数、図 6.5を 3.13式の関数で fitting した結果を図中の線 (エネルギー分解能の方は灰色の線) と表 6.4に示す。なおエネルギー分解能の fitting の際、 $W_{Si}F$ は理論値である $3.65 \times 0.12 \approx 0.44$ に固定した。

表 6.4: 旧 XIS3 ゲイン、エネルギー分解能に対する fitting 結果

Segment	Gain [ch/eV]	offset [ch]	N_{read} [eV]	N′ [10^{-6}]
A	0.27745(1)	0.33(4)	11.8(5)	13(1)
B	0.28638(1)	−0.80(4)	12.0(5)	16(1)
C	0.29186(1)	3.18(4)	12.6(5)	17(1)
D	0.26409(1)	3.70(4)	15.1(4)	15(1)

注: 括弧の中の数字は、値の最後の桁につくエラーの大きさ

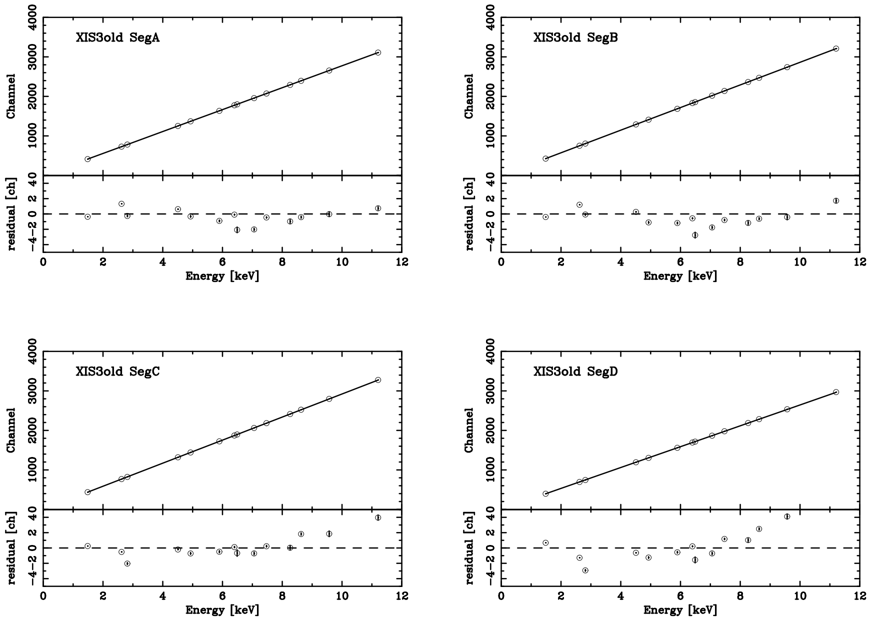


図 6.4: 旧 XIS3 の入射 X 線エネルギー vs 出力 channel(C1) 関係 (Normal mode)

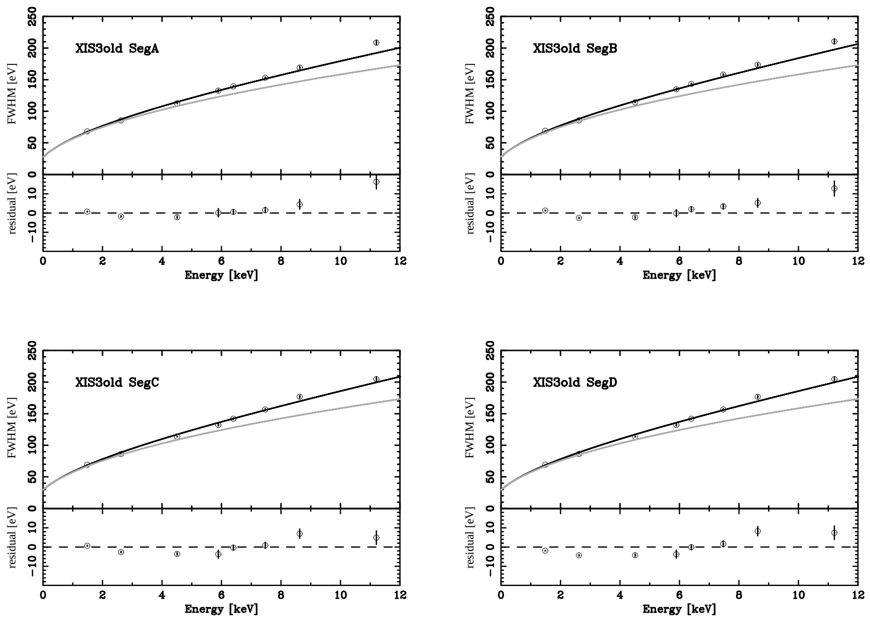


図 6.5: 旧 XIS3 の入射 X 線エネルギー vs エネルギー分解能関係 (Normal mode)

灰色の線は 3.13式の関数で fitting した結果、黒い線は 6.3式の関数で fitting した結果を示す。下の残差は後者の関数とのものである。

ゲインの線形性は特に問題ない程度の精度は達成されている。一方エネルギー分解能は、高エネルギー側で理論値よりデータの方が高くなる傾向が見られる。

この原因を調べるために、異なる clock mode (P-sum, §4.3.1 参照) で取得したデータに対するエネルギー分解能と比較した。

両モードでのエネルギー分解能を図 6.6に示す (Seg A のみ)。低エネルギー側では Normal, P-sum に大きな差は見られないが、高エネルギーに行くにつれ Normal での値が大きくなっていく傾向が見られる。また、これらを 3.13式で fitting すると両者ともほぼ同じ関数 (図中の灰色の線) を与える。この関数は P-sum mode のデータを良く再現しているが、Normal mode では高エネルギーにずれを残している。

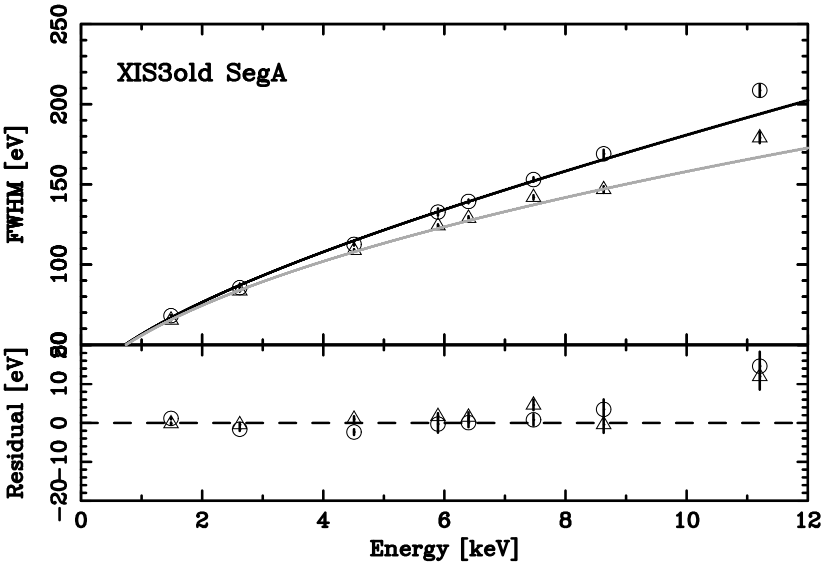


図 6.6: Normal mode と P-sum mode のエネルギー分解能の比較

○: Normal mode、△: P-sum mode を表す。また実線はそれぞれのデータを 3.13式、6.3式でフィッティングした結果を表す。

ずれが目立ち始める 4keV 以上の高エネルギー側の Normal mode の分解能を調べたところ、入射 X 線エネルギーに対し線形の関係があることがわかった。そこで、 3.13式を、高エネルギー側で線形になるように次のように変形した。

$$FWHM = 2.35 \cdot \sqrt{N_{read}^2 + W_{Si}FE_0 \cdot 1000 + N'(E_0 \cdot 1000)^2} \tag{6.3}$$

この関数でフィッティングした関数を図 6.5、 6.6の実線で示す。これにより Normal mode のエネルギー分解能は良く再現されていることが伺える。

両者はクロックのタイミングとイベント検出法以外は何も変わっていないので、原因があるとすればイベント検出法にあると思われる。例えば 2×2 ピクセル以上に拡がったイベントの場合、 P-sum mode ではイベントとは認識されないが、 Normal mode では最大 160ch (∼580eV) 程度の電荷を失ってイベントとなる可能性がある (図 6.7)。こういうこと要素が

エネルギー分解能の悪化を招いていると考えられる。しかし原理的には、応答関数としてはこういう周辺ピクセルへの洩れこみはサブピーク成分で表現されるはずであり、メインピークに影響が表れるとは思えない。もう一つ考えられるのは、それぞれの加算ピクセル数の違いによる読み出しノイズの差が出ていると言う可能性である。そこで、 SegA の ^{55}Fe でのデータを例に取って、加算ピクセルの平均値 (Grade0: 1pixel、 Grade234: 2pixel、 Grade6: 3or4pixel) を調べてみたところ、 Normal mode では 1.87 ピクセルであったのに対し P-sum mode は 1.38 ピクセルとなり、 Normal mode では実効的に読みだしノイズを多く含めていることになる。これは約 1.5eV のエネルギー分解能の差になるが、データでの差 (約 8eV) を再現する程度の量ではない。また観測時間中にゲインが線形に変動しているようなことがあれば、高エネルギー側のエネルギー分解能の悪化を引き起こす原因になるが、これでは Normal/P-sum mode での挙動の違いを説明する根拠にならない。以上、現状ではエネルギー分解能の変化について明確な説明は得られていない。

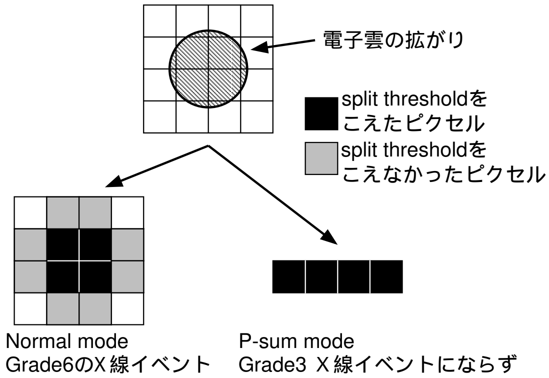


図 6.7: 2×2 ピクセル以上に拡がったイベントに対する Normal mode と P-sum mode での判断の違い

表 6.4に着目すると、同一センサーでもセグメントによってゲインが全くことなることが伺える。これは読みだし口の違いのためプレアンプの性能が微妙に異なることに起因する。また offset はせいぜい数 ch 程度で問題になる程度の大きさではない。

ゲインに比べ、エネルギー分解能に関するパラメータはセグメント間での違いは小さい。これは、応答関数自体の形状はセグメント毎にほとんど異ならないと言うことを示している。よって以下では、 offset を 0 に仮定し、 1ch = 3.65eV になるようにゲインを補正して 4 センサーのスペクトルを合計して議論する。補正後は以下の式により C1 [ch]、 S1 [ch] が定まる。

$$C1 = \frac{E_0}{0.00365} \tag{6.4}$$

$$S1 = \frac{\sqrt{N_{read}^2 + W_{Si} F E_0 \cdot 1000 + N'(E_0 \cdot 1000)^2}}{3.65} \tag{6.5}$$

6.1.3 サブピーク

サブピーク成分は ASCA SIS の応答関数にも組み込まれていて、 [5] に詳細に述べられている。また XIS についても [7] や [1] で詳しく調べられている。

サブピークは、ドリフトにより一部電荷量が周辺ピクセルに逃げた時に作られる (図 6.8)。こういうイベントは、通常は Grade 判定法により split イベントとみなされ、電荷量は加算されメインピークに相当するエネルギーが出力される (4.4.2節参照)。しかし解析上設けている split threshold のため、これより少ない電荷の洩れだしがあった場合は認識することができない。これがスペクトルにメインピーク中心から split threshold 分の tail を作る原因となる。

この解釈が正しいなら、 split threshold の値を変えれば tail 成分の割合が変化するはずである。実際 [1] により、 split threshold を大きくすると tail 成分が増加するという結果が得られている (図 6.9)。

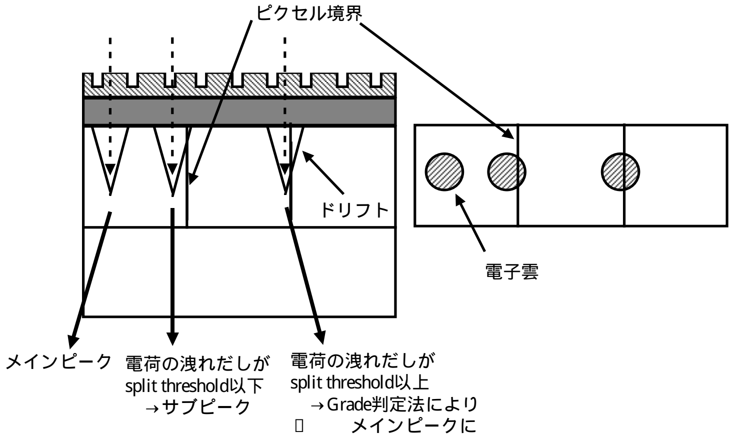


図 6.8: サブピーク発生の原理図 (左: XIS 断面、右: 上部からの絵)

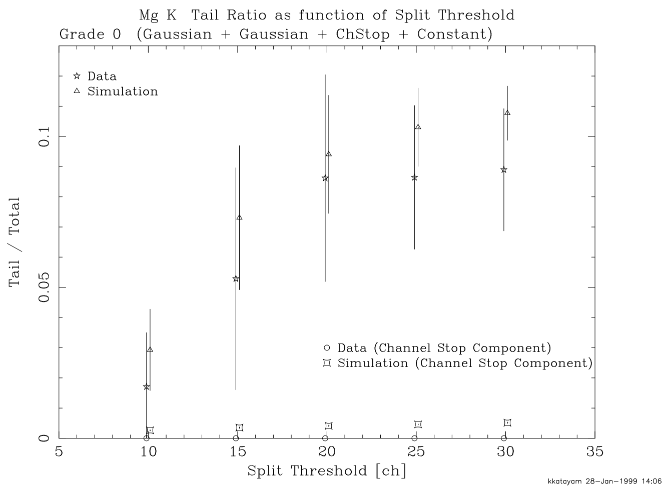


図 6.9: split threshold を変えた時のサブピーク成分の強度変化

阪大での Mg K 輝線のデータ。 [1] より抜粋。

step 1

形状を知るためには、一次 X 線により生成される電荷がどのような割合で周辺ピクセルに洩れ出すかを知る必要がある。これはピクセルサイズや初期電子雲の電荷分布、ドリフトによる拡がりの効果を知ることにより解析的に計算できるが、SIS で実効的に single gaussian で良くフィットできることがわかったので ([5] 図 4.13 参照) 以来このモデルを用いている (メインピーク成分と合わせてダブルガウシアンモデルと呼ぶ)。実際に ^{55}Fe K$_\alpha$ のデータをダブルガウシアンでフィッティングした結果を図 6.10に示す。

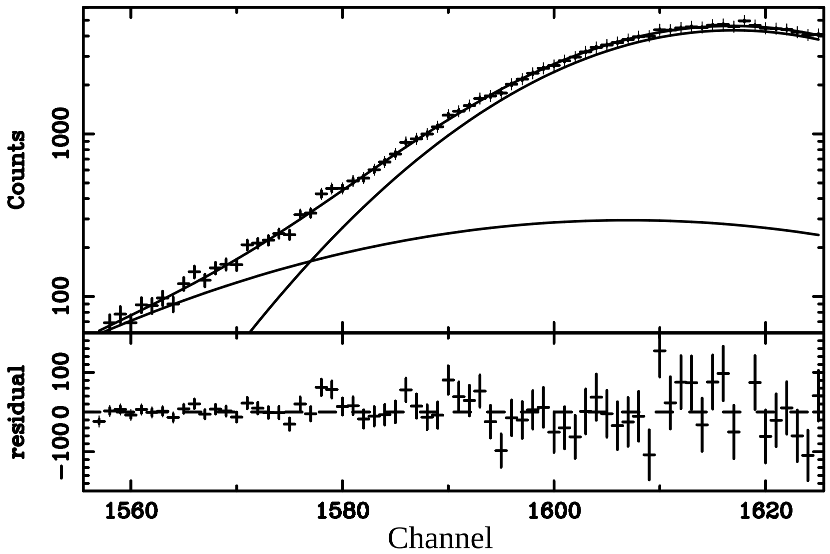


図 6.10: 旧 XIS3 の ^{55}Fe K$_\alpha$ 付近をダブルガウシアンでフィッティングした結果
上: データとベストフィットモデル、下: データとモデルの残差

step 2

パラメータはメインピークの時と同様、中心 (C2) とガウス幅 (S2)、それに強度 (T2) の 3 種類。

まず C2 はスプリットイベントの中心に対応していると思われる。はみ出し量が split threshold 以下の任意の値をとると仮定すると、

$$C2 = \frac{1}{2} \times (split\ threshold) \tag{6.6}$$

と考えられる。実際、シミュレーションや実験データからの帰納からこれの正当性が確かめられている ([1] 図 7.91、7.92 参照)。今回の解析では split threshold = 20ch を用いているので、C2 = 10ch となる。これは入射 X 線のエネルギーやセンサー毎の個性に関わらず一定である。

次に C2 を固定し、T2, S2 を free parameter にして fitting を行なった。結果、S2/S1 の値はエネルギーに対する相関は緩く、誤差の範囲内で一定であるとみなして良かったの

で、

$$S2 = 1.78 \times S1 \tag{6.7}$$

に固定した。改めてデータを fitting し、各エネルギーについて T2/T1 を導出した。結果を図 6.11に示す。得られた結果を良く再現するモデルとして以下のような式が与えられた。

$$\frac{T2}{T1} = \begin{cases} 0.0427 \times E_0^{0.8} & \text{for } E < 1.838\text{keV} \\ 0.0265 \times E_0^{0.88} & \text{for } E > 1.838\text{keV} \end{cases} \tag{6.8}$$

Si K 吸収端以下の式は阪大データの解析結果による帰納である [2]。

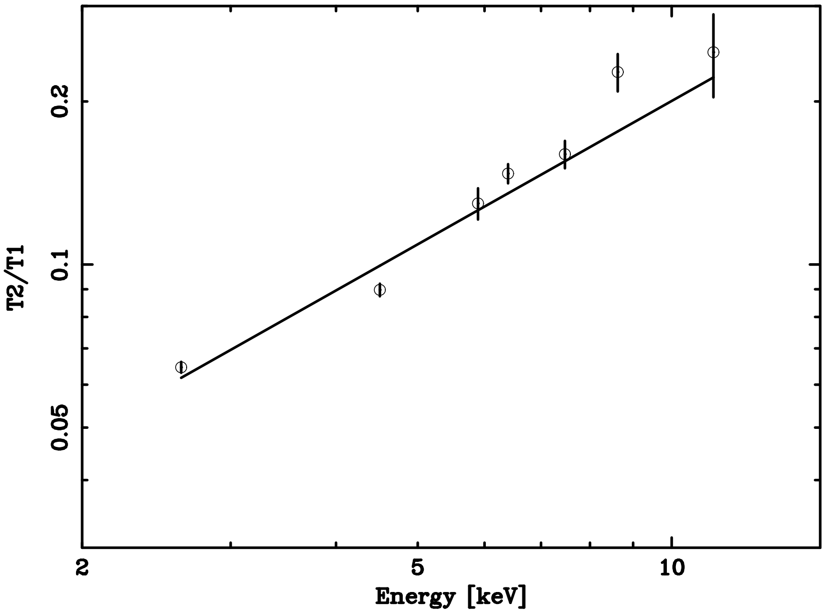


図 6.11: エネルギー vs T2 関係
丸: 実験データ、実線: ベストフィットモデルを表す。

6.1.4 コンスタント成分

コンスタント成分は、一次 X 線が空乏層表面近くで吸収されて一部電荷が絶縁層に拡がった場合に表れる。図 6.12に原理図を示す。絶縁層 (SiO_2) での理論的な平均解離エネルギー (W_{SiO_2}) は 17 eV 程度であるが、再結合などを強く受け、実効的には 52 eV 程度になる。初期電子雲のうち絶縁層に洩れこんだ割合を s とすると、出力されるエネルギー E' は、

$$E' = (1-s)E_0 + sE_0 \times \frac{W_{Si}}{W_{SiO_2}} \tag{6.9}$$

と計算される。これが $0\sim E_0$ に tail を形成する [15]。

なお以下のモデル化では、計算の簡略化のため絶縁層では電荷が形成されないとする ($W_{SiO_2} \to \infty$)。

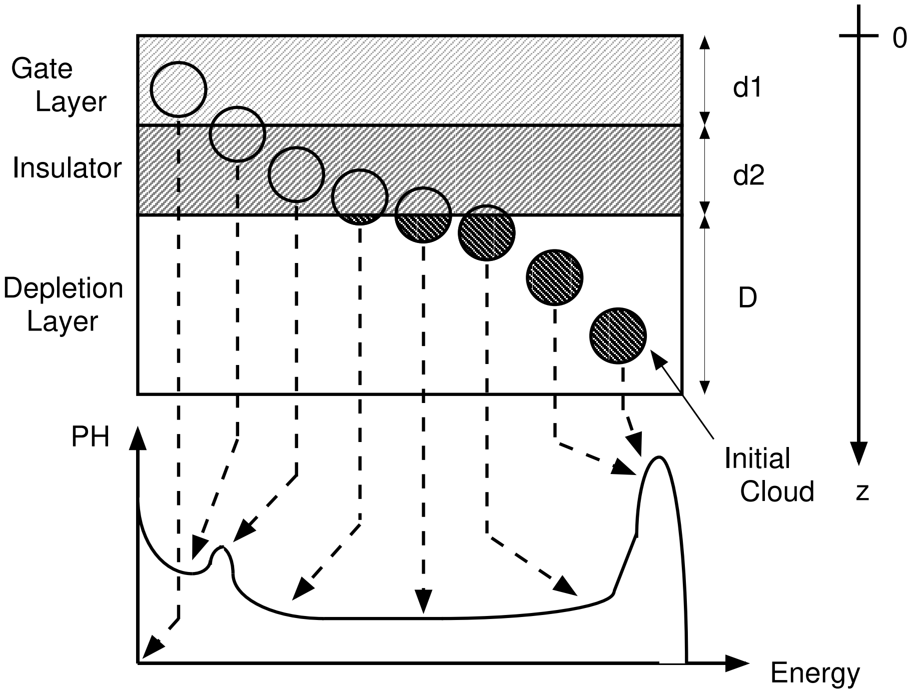


図 6.12: コンスタント成分発生の原理図 (XIS 断面)

Step 1

まず一次電子がどの程度の深さで吸収されるかを計算する。 z 軸を図 6.12のようにとると、 z〜z+dz で吸収される確率は、

$$dP = \begin{cases} \mu_{Si}\rho_1 e^{-\mu_{Si}\rho_1 z}dz & \text{for } 0 \leq z < d_1 \\ (\mu_{Si}\rho_2^{Si} + \mu_O\rho_2^O)e^{-(\mu_{Si}\rho_2^{Si}+\mu_O\rho_2^O)z}dz & \text{for } d_1 \leq z < d_1 + d_2 \\ \mu_{Si}\rho_3 e^{-\mu_{Si}\rho_3 z}dz & \text{for } d_1 + d_2 \leq z < d_1 + d_2 + D \end{cases} \tag{6.10}$$

となる。

空乏層と絶縁層の境界付近で吸収された時の状況を図 6.13に示す。 $W_{SiO_2} = \infty$ と仮定したので、図中の斜線部分に含まれる電荷が全て失われる。電子雲中は一様に電荷が分布していると仮定すると、出力されるエネルギー E は集められる電荷量に比例するので単純な体積計算により求まり、

$$dE = E_0\frac{3(a^2 - R^2)}{4a^3}dz \tag{6.11}$$

$$E = \frac{E_0}{4a^3}(R + a)^2(2a - R) \tag{6.12}$$

となる。ただし $R = z - d_1 - d_2$ である。

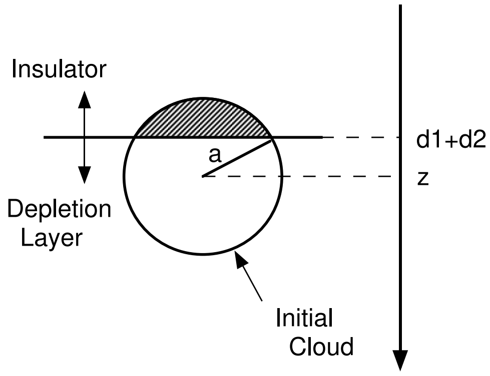


図 6.13: 絶縁層・電極境界付近で吸収された時の模式図

スペクトルの形状 $(\mathrm{N}_{cons}(\mathrm{E}))$ は $\frac{dP}{dE}$ により求められる。ただし得られるデータは離散的であるので、 $\frac{dP}{dE}\Delta E$ $(\Delta E$: channel 幅 $=$ 3.65eV$)$ になる。これは解析的には計算できない。そこで以下のような極限での値を計算してみた。$(\mu_2\rho_2 = \mu_{Si}\rho_2^{Si} + \mu_O\rho_2^O$ を表す)。

(1) 電子雲がほとんど絶縁層に含まれる時($E \simeq 0$)

$$N_{cons}(E) = e^{-(\mu_{Si}\rho_1 d_1+\mu_2\rho_2 d_2)} e^{-\mu_2\rho_2 a(1+\sqrt{\frac{4E}{3E_0}})}(1-e^{-\mu_2\rho_2 a\frac{\Delta E}{\sqrt{3E_0E}-E}})$$

(2) 絶縁層・空乏層境界付近の絶縁層で吸収される時($E \simeq 0.5E_0 - \delta$)

$$N_{cons}(E) = e^{-(\mu_{Si}\rho_1 d_1+\mu_2\rho_2 d_2)} e^{-\mu_2\rho_2 a(1+\sqrt{\frac{2E}{E_0}})}(1-e^{-\mu_2\rho_2 a\frac{2\Delta E}{3(\sqrt{2E_0E}-E)}}) \qquad (6.13)$$

(3) 絶縁層・空乏層境界付近の空乏層で吸収される時($E \simeq 0.5E_0 + \delta$)

$$N_{cons}(E) = e^{-(\mu_{Si}\rho_1 d_1+\mu_2\rho_2 d_2)} e^{-\frac{2}{3}\mu_{Si}\rho_3 a(1-\frac{2E}{E_0})}(1-e^{-\mu_{Si}\rho_3\frac{12aE_0\Delta E}{(5E_0-4E)(E_0+4E)}})$$

(4) 電子雲がほとんど空乏層に含まれる時($E \simeq E_0$)

$$N_{cons}(E) = e^{-(\mu_{Si}\rho_1 d_1+\mu_2\rho_2 d_2)} e^{-\mu_{Si}\rho_3 a(1-2\sqrt{\frac{1}{3}(1-\frac{E}{E_0})})}(1-e^{-\mu_{Si}\rho_3\frac{a\Delta E}{\sqrt{3E_0(E_0-E)}-(E_0-E)}})$$

6.13(1)–(4) 式を Mn K_α に対して計算し、 E に対してプロットした結果を図 6.14に示す。$E = 0.5E_0$ 付近に不連続点が出来ているが、これは一次 X 線の吸収点が絶縁層から空乏層に移る際に dP が不連続に変化することに起因する。つまり、絶縁層では Si 密度が低いため一次電子が吸収されにくいのでパルス波高値が低いのに対し、空乏層では吸収されやすくなり波高値が高くなるという解釈になる。

最終的な関数としては、低エネルギー側から、 (1)→(2)→(3)→(4) を滑らかに結ぶものを構成すれば良い。しかし、図を見ると、 (2) や (3) の近似点 $(E = 0.5E_0)$ でも (1) や (4) はほとんど同じ関数を与えていることがわかる。よって、 $E = 0 \sim 0.5E_0$ では (1)、 $E = 0.5E_0 \sim E_0$ では (4) を用いて近似することにする。

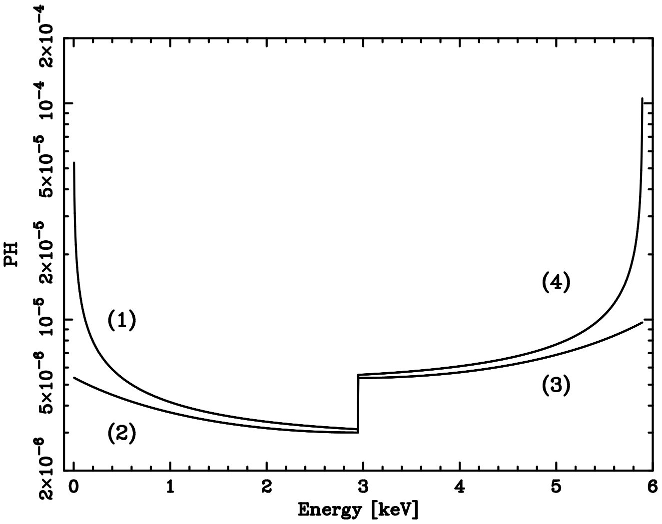


図 6.14: Mn Kα に対するコンスタント成分の形状の計算結果
図中の番号は 6.13式で用いている近似値に対応する。

実験データに対して計算された形状が正しいかを見るために、^{55}Fe に対し、コンスタント成分のみが dominant であると思われる付近 (600–800ch 付近) を使って上記モデルをフィッティングした (normalization だけ free にした)。結果を図 6.15に示す。低、高エネルギー側の盛り上がっているところなど、データに対する再現性は良い。

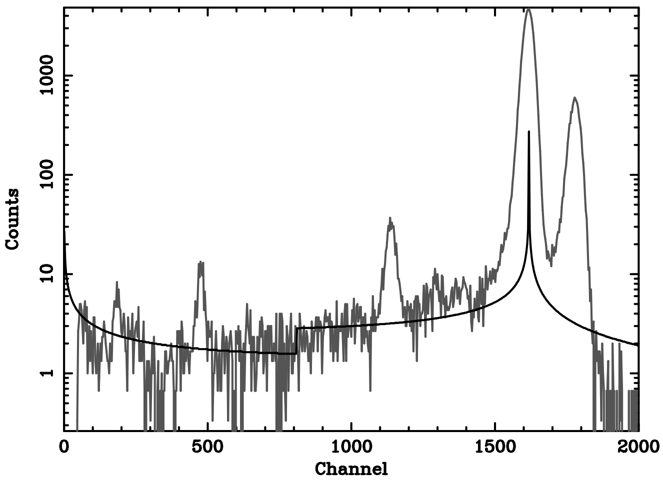


図 6.15: 旧 XIS の Mn Kα データに対し求めたコンスタント成分の形状をフィットした結果

Step 2

強度変化の都合上、積分値が T4 になるように上で求めたスペクトル形を以下のように変形する。また、 $ch = E/0.00365$、 $C1 = E_0/0.00365$ を用いて出力チャンネルの関数にも直しておく。

$$N_{cons}(ch) = \begin{cases} T4 \cdot \frac{e^{-\mu_2\rho_2 a(2+\sqrt{\frac{4ch}{3C1}})}}{1-e^{-(\mu_2\rho_2+\mu_{Si}\rho_3)a}}(1 - e^{-\mu_2\rho_2 a\frac{1}{\sqrt{3C1ch}-ch}}) & \\ \qquad\qquad \text{for } 0 \le ch < 0.5C1 & \\ T4 \cdot \frac{e^{-\mu_2\rho_2 a}e^{-\mu_{Si}\rho_3 a(1-2\sqrt{\frac{1}{3}(1-\frac{ch}{C1})})}}{1-e^{-(\mu_2\rho_2+\mu_{Si}\rho_3)a}}(1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3 a\frac{1}{\sqrt{3C1(C1-ch)}-(C1-ch)}}) & \\ \qquad\qquad \text{for } 0.5C1 \le ch < C1 & \end{cases} \tag{6.14}$$

強度パラメータ (T4) 以外は全て固定パラメータとして外から与えられる。

各特性 X 線のデータについて、コンスタント成分のみが見えていると思われるエネルギー帯域をとり、 T4 のみを free parameter にしてフィッティングした。ベストフィットでの T4/T1 を図 6.16に示す。

以下では T4/T1 を計算により導出する。 T4 は一次 X 線が $z = d_1+d_2-a \sim d_1+d_2+a$ で吸収される確率を表しているので、 N_e をイベント数とすると

$$T4 = N_e \int_{z=d_1+d_2-a}^{z=d_1+d_2+a} dP = N_e e^{-\mu_{Si}\rho_1 d_1} e^{-\mu_2\rho_2(d_2-a)}(1 - e^{-\mu_2\rho_2 a}e^{-\mu_{Si}\rho_3 a}) \tag{6.15}$$

となる。また、 T1 は $z = d_1 + d_2 + a \sim d_1 + d_2 + D - a$ で吸収される確率なので、

$$T1 = N_e \int_{z=d_1+d_2+a}^{z=d_1+d_2+D+a} dP \cong N_e e^{-\mu_{Si}\rho_1 d_1} e^{-\mu_2\rho_2 d_2} e^{-\mu_{Si}\rho_3 a}(1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3 D}) \tag{6.16}$$

と計算される。以上より、

$$\frac{T4}{T1} = \frac{e^{(\mu_2\rho_2+\mu_{Si}\rho_3)a} - 1}{1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3 D}} \tag{6.17}$$

となる。計算結果を図 6.16上で灰色の線で表す。 2 つの不連続点は、それぞれ O、 Si の K 吸収端 (1.838keV, 0.543keV) に相当する。

全体的にデータの方が強度を強く出している。この解釈としてまず考えられるのは、データがチェンバーなどのトムソン散乱によるバックグラウンド成分を拾っているという可能性である。散乱成分がどの程度含まれるかは [8] により見積もられている。例として最もデータを計算結果が離れている Al の場合の見積り結果を図 6.17に示す。しかしせいぜい 10% 程度の寄与しかなく、図 6.16でのずれを説明できる程度の量ではない。

京都大学でのルームバックグラウンドの影響と言うことも考えられるが、影響はせいぜい 1counts/s/sensor 程度であり、全く問題ないと言って良い。

コンスタント強度の計算値とのずれは今のところ原因不明であるが、データに合わすために、強度を定数倍しておく。フィッティングの結果、計算値を 1.59 倍すればデータと良く一致することがわかった。最終的な強度の関数を図 6.16の黒い線で示す。

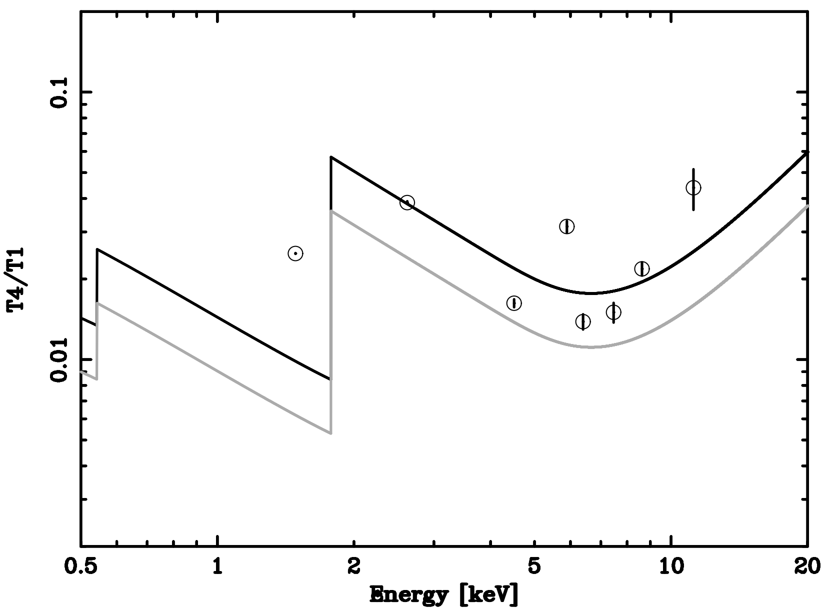


図 6.16: 入射 X 線のエネルギーに対するコンスタント成分の相対強度
丸は実験データ、灰色の線は計算により予想される値、黒の線はデータに合うように理論値を 1.59 倍したもの。

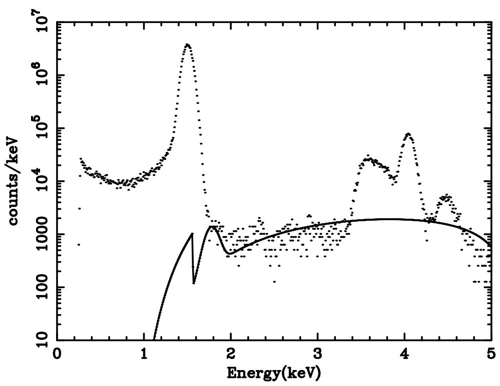


図 6.17: チェンバーによる散乱の影響の見積り (Al)
実線が散乱成分の寄与を表す。

コンスタント強度から初期電子雲半径の導出

コンスタント成分強度 (6.17式) は空乏層厚 (D) と初期電子雲の半径 (a) により決定される。ということは、空乏層厚を固定しておけば強度から初期電子雲の半径を求めることが

可能である。 6.17 式を変形すると以下のような式が得られる。

$$a = \frac{1}{\mu_2\rho_2 + \mu_{Si}\rho_3} \cdot \ln(1 + (1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3 D}) \cdot \frac{T4}{T1}) \tag{6.18}$$

これを用いて各成分につき a を計算した。結果を図 6.18 に示す。 2–10keV 付近では β 線の飛程を実測することにより求められた [13] のモデルと良く一致していることがわかる。しかし、それより低 · 高エネルギー側ではデータとの相関性はあまり良くない。これが上で述べた強度のずれの原因になっている。初期電子雲の大きさのモデルを若干修正してやれば上の矛盾は解消されるかも知れないが、現状のデータ数でははっきりしたことは言えない。

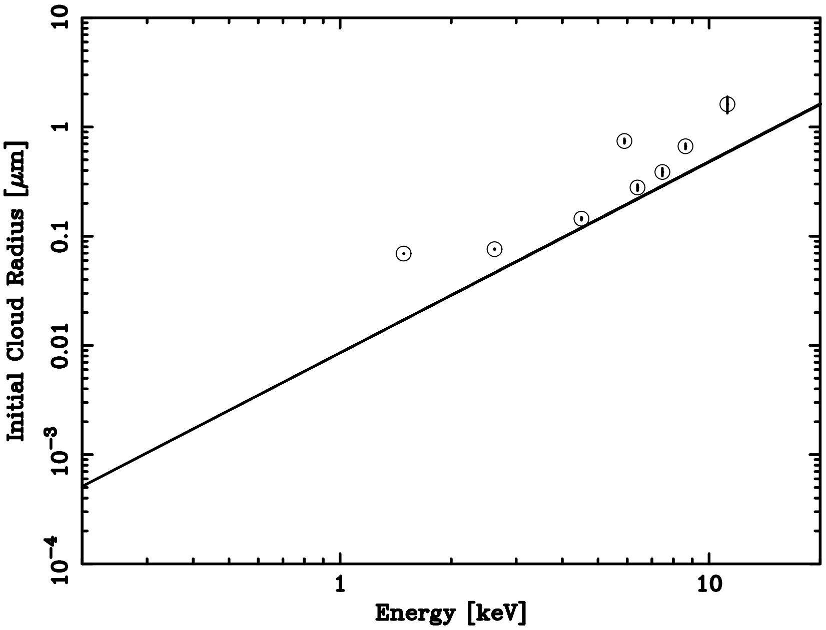


図 6.18: コンスタント成分強度から計算された初期電子雲の半径
丸は実験データ、直線は [13] のモデルを表す。

6.1.5 Si エスケープ

Si エスケープは、空乏層で一次 X 線が吸収 → Si 蛍光 X 線が発生後、

- 電極側から外に逃げる (過程 1)
- 十分遠く (3×3 ピクセルより外) で再吸収される (過程 2)

という 2 つの過程で起こると考えられる (図 6.19)。[1，2]

[1] 過程 2 では、周辺 3×3 ピクセルで Si 蛍光 X 線が再吸収されてしまうと、 Grade 判定法により Grade2、3、 4 のメインピークイベントか Grade1 イベントになるため、 3×3 より外側で再吸収される必要がある。

[2] 中性領域側に逃げるイベントも考えられるが、中性領域で作られた電子雲は拡散により一部イベントとしてカウントされてしまうため明確にピークを構成しないと判断し、ここでは議論に加えないことにする。

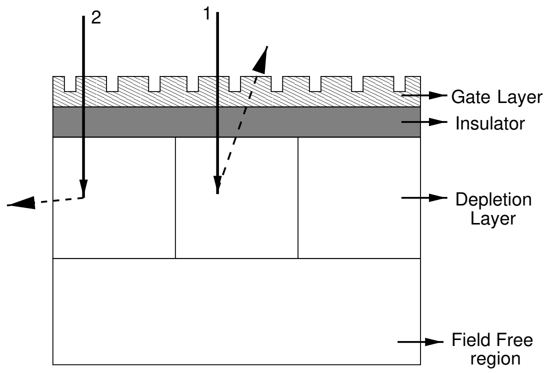


図 6.19: Si エスケープ発生過程の原理図 (XIS 断面)
実線の矢印: 入射 X 線、破線の矢印: Si 蛍光 X 線 を表す。

step 1

Si エスケープに関する全てのイベントが同じエネルギーに対応しているので、メインピークと同様、形は single gaussian で表現される。必要なパラメータは、ガウス中心 (C5)、拡がり (S5)、強度 (T5) の 3 つ。

step 2

3 つのパラメータのうち、 C5、 S5 は 6.1.2節で導出したゲイン、エネルギー分解能の式から求められる。

強度 (T5) は、 Si 蛍光 X 線の飛程の確率からエスケープになる割合を計算することにより求められる。ただし球対称でないピクセルの形状などを考えると、計算はコンスタント成分ほど単純に行なえるものではない。そこでまずモンテカルロシミュレーションを行ない、その結果を忠実に再現するような関数を考えることにする。

シミュレーションの流れは、

1. 入射 X 線の位置 (x, y) を乱数を振って決める。
2. 光電吸収の深さ (z) を決める。これは 3.1式により確率計算される。
3. 吸収後の過程 (Auger 電子発生か Si 蛍光 X 線発生) を決める。ここでは 3.7% の確率で Si 蛍光 X 線が起こるとする。
4. Si 蛍光 X 線が発生した場合、これが再吸収される位置 (x', y', z') を決める。これも 3.1式により確率計算される。

である。入射 X 線のエネルギーを 0.2 keV きざみにそれぞれ 100 万イベント simulation を行ない、図 6.3で示したような各過程がどのような割合で起こるかを計算した。

図 6.20に実験データとシミュレーションによる Si エスケープの相対強度を示す。計算結果はデータを良く再現しており、誤差は最大でも約 70% 程度である。

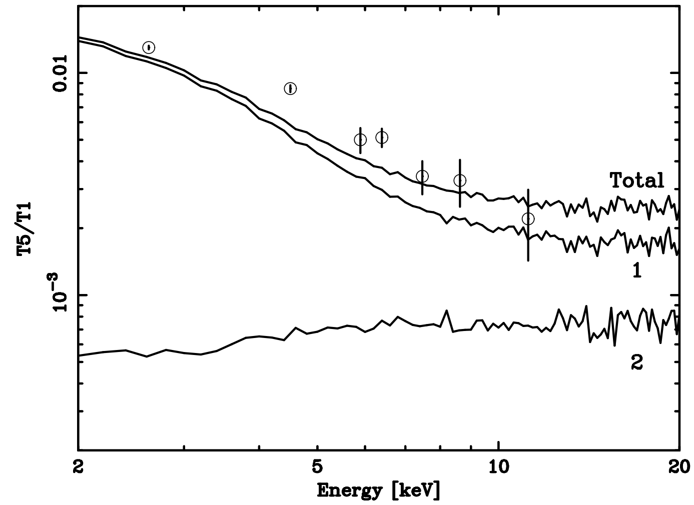


図 6.20: 入射 X 線のエネルギーに対する Si エスケープ成分の相対強度
丸印は実験データ、1、2、Total はそれぞれ過程 1、過程 2、それらの合計のシミュレーション結果を表す。

シミュレーション結果の関数化

これらの結果をを E_0 の関数として表さねばならない。そのために以下では CCD 内の素過程を簡単に計算する。

過程 1

過程 1 は、深さ z∼z+dz で一次 X 線が吸収され (過程 1.1)、Si 蛍光 X 線が発生し上半分に飛び出し (過程 1.2)、空乏層の外まで吸収されずに逃げる (過程 1.3)、という 3 つの過程のかけ合わせである。それぞれの確率は次のように表される。

$$dP_{1.1} = e^{-\mu_{Si}\rho_1 d_1} e^{-(\mu_{Si}\rho_2^{Si}+\mu_O\rho_2^O)d_2}\mu_{Si}\rho_3 e^{-\mu_{Si}\rho_3 z}dz \tag{6.19}$$

$$P_{1.2} = \frac{1}{2} \times Fy \tag{6.20}$$

$$P_{1.3} = e^{-\mu_{esc}\rho_3\alpha z} \tag{6.21}$$

過程 1.1 右辺の最初の 2 つの exponential は、一次 X 線が電極と絶縁層で吸収されない確率を表している。また、過程 1.3 では立体角がある分 z より遠くまで逃げなくてはならないので、実効的に z を α 倍して用いている。 $dP_{1.1}\cdot P_{1.2}\cdot P_{1.3}$ を z=0∼D [μm] まで積分することにより過程 1 になる確率が計算される。また、メインピークになる確率は 6.16式で表されるので、相対強度は以下のように計算される。

$$\frac{T5.1}{T1} = \frac{1}{1-e^{-\mu_{Si}\rho_3 D}}\int_0^D 0.0185\cdot\mu_{Si}\rho_3 e^{-\mu_{Si}\rho_3 z}\cdot e^{-\mu_{esc}\rho_3\alpha z}dz$$

$$= \quad 0.0185 \cdot \frac{\mu_{Si}}{\mu_{Si} + \alpha\mu_{esc}} \cdot \frac{1 - e^{-(\mu_{Si}+\alpha\mu_{esc})\rho_3 D}}{1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3 D}} \tag{6.22}$$

α を free parameter にしてシミュレーションをフィッティングした結果を図 6.21に示す。ベストフィットで $\alpha = 2.17$ が得られた。

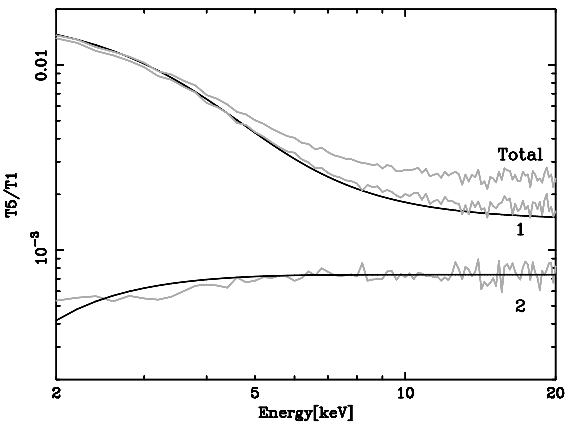


図 6.21: Si エスケープ強度シミュレーションのモデルフィット結果
灰色: シミュレーション、黒: ベストフィットモデルを表す。

α は空乏層厚 (D [μm]) に依存するパラメータと予想される。その依存性を調べるために、空乏層厚を変化させて上記のシミュレーション + フィッティングを行ない α を導出した。その結果が図 6.22である。現実的に必要となる空乏層厚 40μm 以上ではほぼ次のような一次関数の依存性である。

$$\alpha = 2.012 + 21.09D \tag{6.23}$$

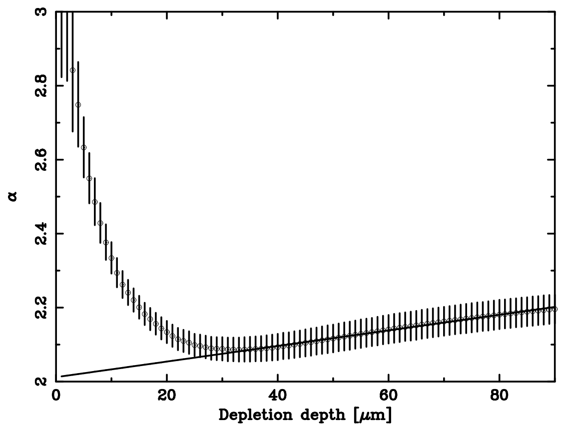


図 6.22: α の空乏層厚に対する依存性
丸が各空乏層厚に対するベストフィット値、直線がこのデータを 40μm 以上で一次関数でフィットした結果を表す。

過程 2

過程 2 は空乏層の中心付近で吸収された時に起こりやすい。そこで、上下 l [μm] 除いた空乏層内 (z = $l \sim$ D-2l) で吸収された時、ある確率 N で過程 2 になると仮定する。相対強度は次のように計算される。

$$\frac{T5.2}{T1} = N \cdot \frac{e^{-\mu_{Si}\rho_3 l}(1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3(D-2l)})}{1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3 D}} \tag{6.24}$$

N、 l とも、やはり空乏層厚に依存すると思われるので、過程 1 の時と同様、様々な空乏層厚に対してシミュレーションを行ないパラメータを導出した。結果を図 6.23、 6.24に示す。空乏層厚 40μm 以上で適当な関数でフィットした結果、これらは次のような式で表される。

$$l = 2.906 \log(D + 3.929 \times 10^{-3}) + 6.464 \tag{6.25}$$

$$\mathrm{N} = 4.107 \times 10^{-4} \log(D - 1.587 \times 10^{-3}) + 1.664 \times 10^{-3} \tag{6.26}$$

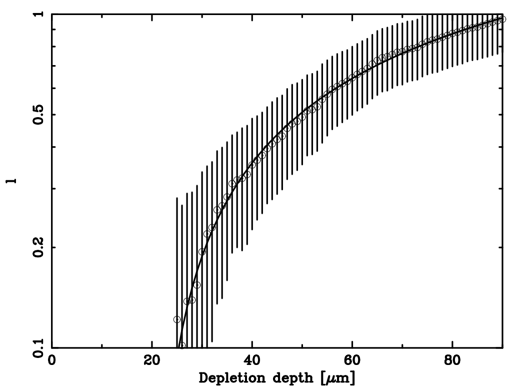


図 6.23: l の空乏層厚に対する依存性
丸が各空乏層厚に対するベストフィット値、直線がこのデータを 40μm 以上でフィットした結果を表す。

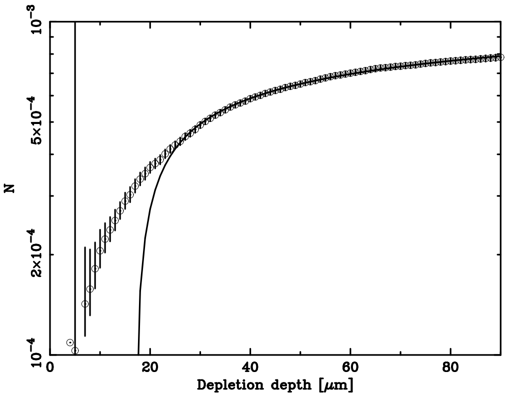


図 6.24: N の空乏層厚に対する依存性
丸が各空乏層厚に対するベストフィット値、直線がこのデータを 40μm 以上でフィットした結果を表す。

強度のパラメータ依存性

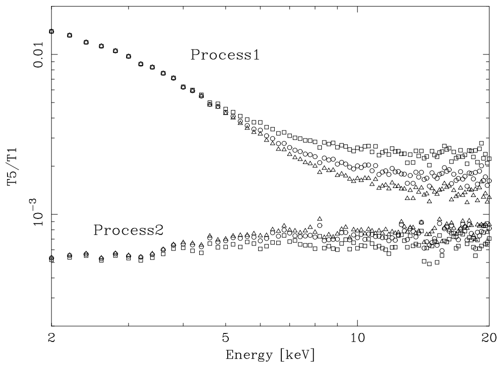
6.22–6.26式を見ると、エスケープ成分強度は空乏層厚 (D [μm]) のみに依存するという結果が得られている。そこでその依存性を調べるため、上記シミュレーションを空乏層厚を変化させて行なってみた。空乏層厚 = 50μm、 70μm、 90μm でのシミュレーション結果を図 6.25に示す。空乏層が大きくなると、高エネルギー側 (約 5keV 以上) で過程 1 の相対強度が減り過程 2 の相対強度が増える傾向が見られる。これは直観的には次のような状況を考えることで理解される。

1. 空乏層を透過しやすい高エネルギー側で検出効率が増加し、結果としてメインピーク強度 (T1) が大きくなる。

2. 過程 1 はほとんど空乏層表面での光電吸収で作られると考えられるので、強度 (T5.1) は空乏層にはあまり依存しない。

3. 空乏層が厚い分、 Si 蛍光 X 線は上下よりも左右に逃げやすくなる。よって過程 2 の強度 (T5.2) が増える傾向になる。

しかし全体 (図 6.25右) としてはそれぞれが相殺される形となり、 T5/T1 の空乏層厚に対する依存性は比較的緩くなっている。



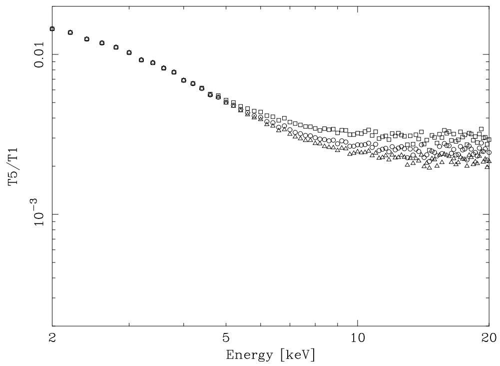


図 6.25: Si エスケープ強度のシミュレーション結果に対する空乏層厚の依存性
左図上方: 過程 1、左図下方: 過程 2、右図: 合計を表す。また、四角、丸、三角はそれぞれ空乏層厚 50μm、 70μm、 90μm でのシミュレーション結果を表す。

6.1.6 Si ライン

Si ライン発生の素過程は、

- 電極または絶縁層で一次 X 線が吸収された後に Si 蛍光 X 線が空乏層で再吸収される (過程 1)
- 空乏層で吸収された後に Si 蛍光 X 線が十分遠くのピクセルで再吸収される (過程 2)

の 2 つが考えられる (図 6.26)。過程 2 は Si エスケープの過程 2 と同じものである。

step 1

形状はメインピーク、 Si エスケープと同様、 single gaussian で表現される。

step 2

パラメータの評価は Si エスケープと同様に強度 (T6) だけで良い。ここでも 6.1.5節で示したモンテカルロシミュレーションを用いる。

シミュレーション結果を図 6.27に示す。誤差は最大でも約 20% 程度に押えられている。

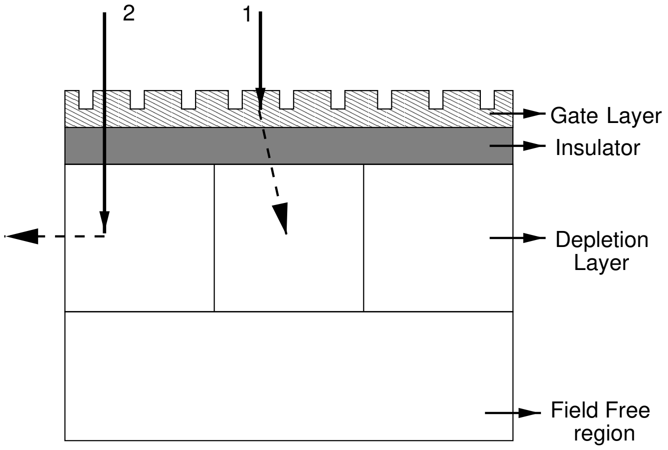


図 6.26: Si ライン発生過程の原理図 (XIS 断面)
実線の矢印: 入射 X 線、破線の矢印: Si 蛍光 X 線 を表す。

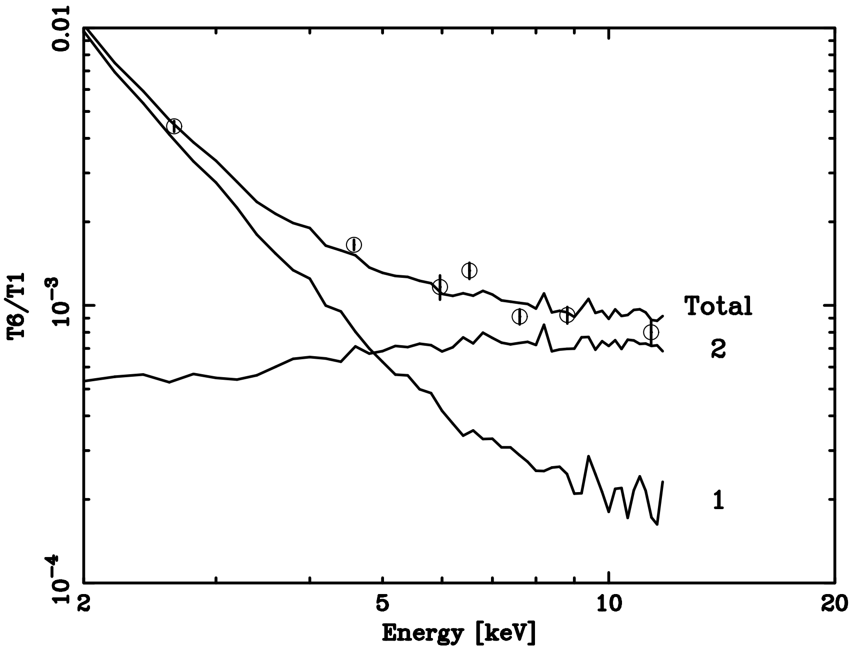


図 6.27: 入射 X 線のエネルギーに対する Si ライン成分の相対強度
丸印は実験データ、 1、 2、 Total はそれぞれ過程 1、過程 2、それらの合計のシミュレーション結果を表す。

過程 2 は Si エスケープの過程 2 と全く同じ素過程を考えているので、 6.24、 6.25、 6.26式を用いて表現すれば良い。

過程 1 は、一次 X 線が電極 or 絶縁層の Si で吸収され (過程 1.1)、 Si 蛍光 X 線が空乏層方向に飛び出し (過程 1.2)、空乏層内で再吸収される (過程 1.3) という 3 つに分割して考える。それぞれの確率は次のように計算される。

$$P_{1.1} = 1 - e^{-\mu_{Si}\rho_1 d_1} e^{-\mu_{Si}\rho_2^{Si} d_2} \tag{6.27}$$

$$P_{1.2} = \frac{1}{2} \times Fy \tag{6.28}$$

$$P_{1.3} = 1 - e^{-\mu_{esc}\rho_3 D} \cong 1 \tag{6.29}$$

よって相対強度は次のように表される。

$$\frac{T6.1}{T1} = 0.0185 \cdot \frac{1 - e^{-\mu_{Si}\rho_1 d_1} e^{-\mu_{Si}\rho_2^{Si} d_2}}{e^{-\mu_{Si}\rho_1 d_1} e^{-(\mu_{Si}\rho_2^{Si} + \mu_O \rho_2^{O}) d_2} (1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3 D})} \tag{6.30}$$

6.30式のパラメータは全て外から与えられるものである。値を代入して得られた関数をシミュレーション結果に重ねたものを図 6.28に示す。

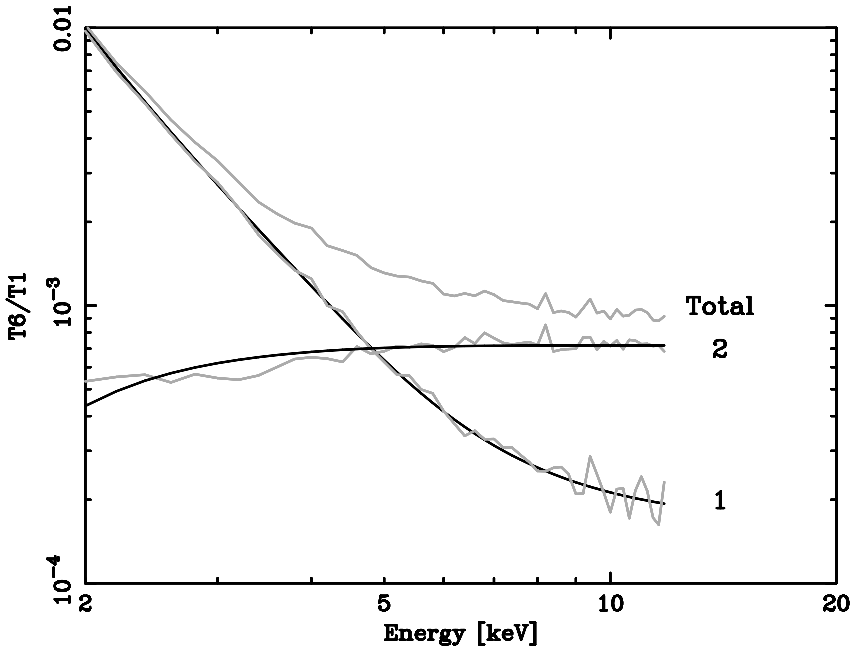


図 6.28: Si ライン強度シミュレーションのモデルフィット結果
灰色: シミュレーション、黒: ベストフィットモデルを表す。

強度のパラメータ依存性

過程 1 は、電極厚 (d_1 [μm])、絶縁層厚 (d_2 [μm])、空乏層厚 (D [μm]) に依存している。これらのパラメータを変化させてシミュレーションした時の違いを図 6.29、 6.30、 6.31に示す。次のような依存性が確認される。

1. 空乏層厚に対する依存性はほとんどない。

2. 電極や絶縁層の厚みは大きいほど低エネルギー側での過程 1 の割合が大きくなる。特に電極厚に強く依存する。

2. は電極 · 絶縁層厚が厚くなった分過程 1 に回りやすくなったという直観的な理解で納得できる。絶縁層より電極の厚みが強く効くのは電極の方が Si 密度が大きいためである。

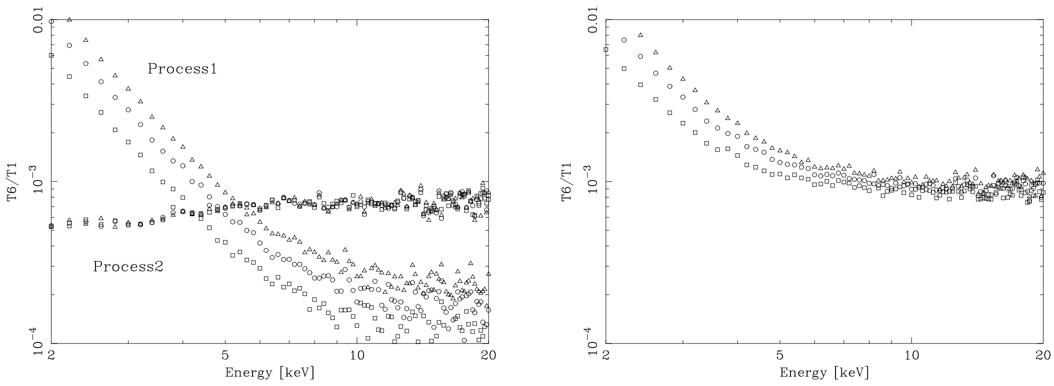


図 6.29: シミュレーションによる Si ライン強度の電極厚に対する依存性
左図上方: 過程 1、左図下方: 過程 2、右図: 合計を表す。また、四角、丸、三角はそれぞれ電極厚 0.28μm、 0.48μm、 0.68μm でのシミュレーション結果を表す。

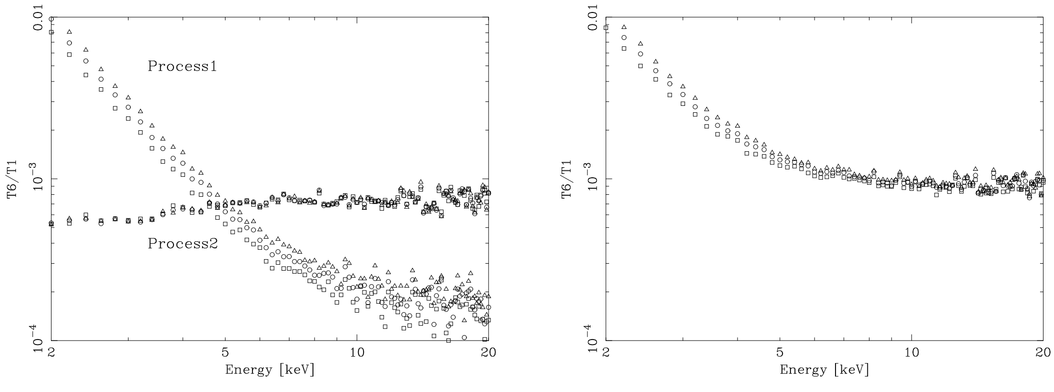


図 6.30: シミュレーションによる Si ライン強度の絶縁層厚に対する依存性
左図上方: 過程 1、左図下方: 過程 2、右図: 合計を表す。また、四角、丸、三角はそれぞれ絶縁層厚 0.06μm、 0.26μm、 0.46μm でのシミュレーション結果を表す。

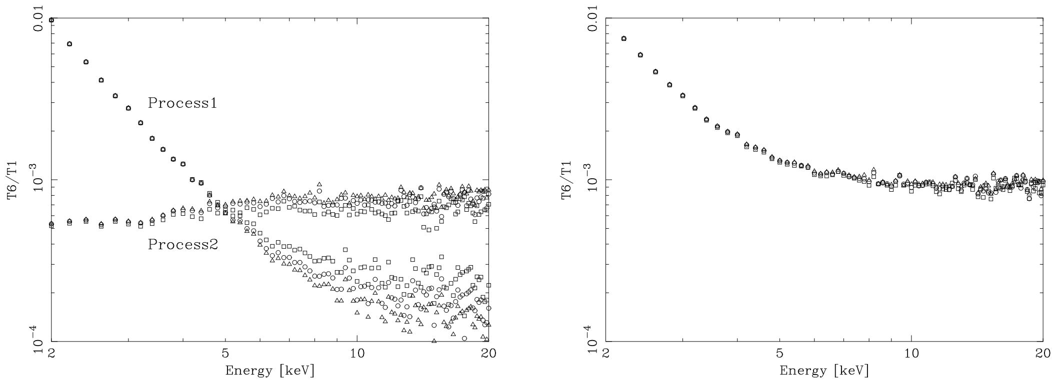


図 6.31: シミュレーションによる Si ライン強度の空乏層厚に対する依存性
左図上方: 過程 1、左図下方: 過程 2、右図: 合計を表す。また、四角、丸、三角はそれぞれ空乏層厚 50μm、 70μm、 90μm でのシミュレーション結果を表す。

Si ライン強度から電極・絶縁層厚の導出

上の結果を用いると、逆に Si ライン強度から電極・絶縁層の厚みを計算することが出来る。 6.30式を変形することにより、次のような式が得られる。

$$\rho d = \frac{1}{\mu_{Si}} \cdot \ln(1 + \frac{1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3 D}}{0.0185} \cdot \frac{T6 - T6.2}{T1}) \tag{6.31}$$

ただし、 $\rho d = \rho_1 d_1 + \rho_2^{Si} d_2$、 $T6 = T6.1 + T6.2$ である。 D を仮定することにより ρd が計算されるのである。[3] $D = 70\mu$m として各特性 X 線の Si ライン強度から ρd を逆算した結果を図 6.32に示す。コンスタントモデルでフィッティングした結果、

$$\rho d = (1.48 \pm 0.09) \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2 \tag{6.32}$$

という値が得られた。シミュレーションで用いた値は、 MIT で量子効率から計算された電極・絶縁層厚で、

$$\rho d = 2.42 \cdot 0.45 \times 10^{-4} + 1.03 \cdot 0.35 \times 10^{-4} = 1.45 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2 \tag{6.33}$$

であった。全く別の方法で導出した値だがこれと良く一致している。

[3]図 6.31でも示したように、 D は依存性の低いパラメータであるのでさほど精度は必要とされない。

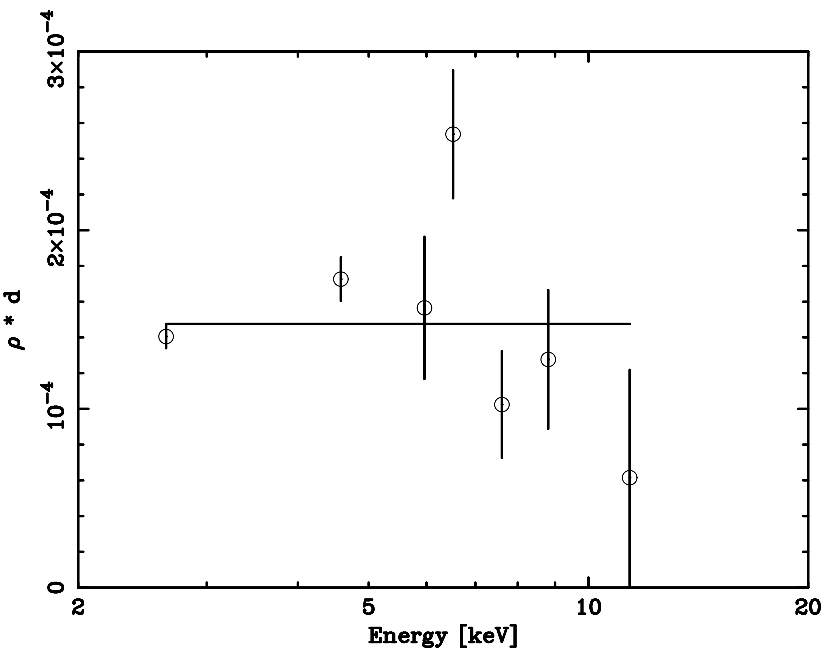


図 6.32: Si ライン強度から計算された ρd の値
$\rho d = \rho_1 d_1 + \rho_2^{Si} d_2$ を表す。
直線はコンスタントモデルのベストフィット結果を表す。

6.1.7 三角成分

三角成分 (チャネルストップ成分) は特に低エネルギー側のデータで目立つので、京大のデータだけでは評価はほとんど不可能である。阪大で取得した XIS0 のデータを用いた評価は [1] で詳細に行なわれているので、ここではその紹介を簡単に行なう。

三角成分は、低エネルギー X 線に対するスペクトルの縦転送に垂直な方向の split イベント (Grade3,4) で良く目立つことから、チャネルストップ (4.1.1節) 起源のイベントと予想される。チャネルストップはアクセプタ濃度が高いので、ここで吸収されたイベントは強く拡散や再結合を受けてしまい、やや低エネルギー側に出力されると考えられる。

step 1

まず、チャネルストップで吸収された時、集められる電荷量 ν は吸収の深さ z で一意に次のように決まると仮定した。

$$\nu(x) = \nu_0\{1 - (1-p)(1 - (\frac{z}{d_c})^{0.5})\} \tag{6.34}$$

ここで、 ν_0 は光電吸収による全電荷量 $(= \frac{E_0}{W_{Si}})$、 d_c はチャネルストップの厚み、 p は free parameter である。これに、深さ $z \sim z + dz$ で吸収される確率

$$P(z)dz = \mu_{Si}\rho_3 e^{-\mu_{Si}\rho_3 z} dz \tag{6.35}$$

と出力波高分布 $N_{tri}(ch)$ (ただし $ch = \frac{\nu}{3.65}$) との関係式

$$N(ch)d(ch) = P(z)dz \tag{6.36}$$

を連立させることにより、次のような表式が得られる。

$$N_{tri}(ch) = \begin{cases} T3' \cdot (ch - F3) & \text{for } F3 < ch < C1 \\ 0 & \text{for others} \end{cases} \tag{6.37}$$

ここで、$T3' = \frac{2 \cdot 3.65 \cdot \mu_{Si}\rho_3}{(1-p)^2}$、$F3 = \frac{E_0}{(3.65)^2}$ である。これは三角形のスペクトル構造を表す。

step 2

強度評価の都合上、関数型を次のように変形する (積分値 T3 を返すようにする)。

$$N_{tri}(ch) = \begin{cases} T3 \cdot \frac{ch - F3}{2(C1-F3)^2} & \text{for } F3 < ch < C1 \\ 0 & \text{for others} \end{cases} \tag{6.38}$$

F3 は一次 X 線がチャネルストップの底で吸収された時に表層にたどり着くまでに失われる電荷量を表している。これを知るには、チャネルストップの構造と内部で起こる物理過程を正確に理解しなければならない。しかし阪大の分散光のデータフィッティングから、

$$F3 = 80\text{ch} \tag{6.39}$$

であることがわかっている。つまり入射 X 線のエネルギーに関わらず、チャネルストップの底で吸収されたイベントは、$80 \times 3.65 \cong 300$ eV を失うということになる。

T3 は X 線がチャネルストップで吸収される確率を表しているので、

$$T3 = \frac{w_c}{w}(1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3 d_c}) \tag{6.40}$$

と計算される。ここで w, w_c はピクセルとチャネルストップの幅 ($w = 24\mu$m) を表す (図 6.33参照)。一方メインピークになる成分は空乏層で吸収された時なので、

$$T1 = \frac{w_c}{w}e^{-\mu_{Si}\rho_3 d_c}(1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3 D}) + (1 - \frac{w_c}{w})(1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3 D}) \tag{6.41}$$

である。[4] T3/T1 を計算することにより三角成分の分岐比が次のように求まる。

$$\frac{T3}{T1} = \frac{w_c(1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3 d_c})}{w_c e^{-\mu_{Si}\rho_3 d_c}(1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3 D}) + (w - w_c)(1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3 D})} \tag{6.42}$$

チャネルストップの各サイズは量子効率から求められており、$w_c = 2\mu m$、$d_c = 0.35\mu m$ である [18]。

[4] ここで用いている T1,T3 は、すでに電極と絶縁層は通過したと仮定していることに注意が必要である。そのため 6.1.4章で導出している T1 は少し意味合いが異なる。

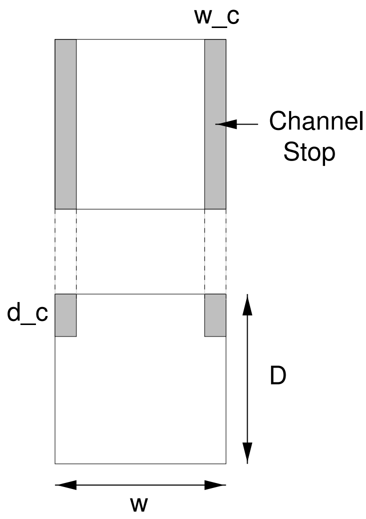


図 6.33: チャネルストップの各パラメータの模式図
上図: 上から見た図、下図: ピクセルの断面図

6.1.8 まとめ

以上の評価をまとめる。単色 X 線に対する XIS の応答関数 (全体の積分強度が 1 になるように規格化してある) は 6.43式で表される。

$$\begin{aligned} N(ch) &= Gauss(ch,\ C1,\ S1) \\ &\quad + t2 \cdot Gauss(ch,\ C2,\ S2) \\ &\quad + t3 \cdot Tri(ch,\ C3,\ S3) \\ &\quad + t4 \cdot Cons(ch,\ C4) \\ &\quad + t5 \cdot Gauss(ch,\ C5,\ S5) \\ &\quad + t6 \cdot Gauss(ch,\ C6,\ S6) \end{aligned} \tag{6.43}$$

ここで、

$$tn = \frac{Tn}{T1}(n = 2, 3, 4, 5, 6) \tag{6.44}$$

$$Gauss(ch,\ C,\ S) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(ch-C)^2}{2 \cdot S^2}} \tag{6.45}$$

$$Tri(ch,\ F,\ C) = \begin{cases} \frac{1}{2(C-F)^2}(ch - F) & \text{for } F < ch < C \\ 0 & \text{for others} \end{cases} \tag{6.46}$$

$$Cons(ch,\ C) = \begin{cases} T4 \cdot \frac{e^{-\mu_2\rho_2 a(2+\sqrt{\frac{4ch}{3C}})}}{1-e^{-(\mu_2\rho_2+\mu_{Si}\rho_3)a}}\left(1 - e^{-\mu_2\rho_2 a\frac{1}{\sqrt{3Cch}-ch}}\right) \\ \qquad\qquad \text{for } 0 \le ch < 0.5C \\ T4 \cdot \frac{e^{-\mu_2\rho_2 a} e^{-\mu_{Si}\rho_3 a(1-2\sqrt{\frac{1}{3}(1-\frac{ch}{C})})}}{1-e^{-(\mu_2\rho_2+\mu_{Si}\rho_3)a}}\left(1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3 a\frac{1}{\sqrt{3C(C-ch)}-(C-ch)}}\right) \\ \qquad\qquad \text{for } 0.5C \le ch < C \end{cases} \tag{6.47}$$

をあらわす。また、各パラメータは表 6.5にまとめてあるような変数で決定される。

表 6.5: 応答関数を構成する成分と各パラメータ

成分	関数型	パラメータ	パラメータを決める変数	本文中の参照式
メインピーク	$Gauss$	T1	–	–
		C1	E_0	6.4 式
		S1	E_0, N_{read}, $W_{Si}F(=0.44)$, N'	6.5式
サブピーク	$Gauss$	t2	E_0	6.8式
		C2	E_0, split_th(=20ch)	6.6式
		S2	S1	6.7式
三角成分	Tri	t3	E_0, d_c, w_c, D	6.42式
		C3	(= C1)	–
		F3	C1	6.39式
コンスタント成分	$Cons$	t4	E_0, D	6.17式
		C4	(= C1)	–
Si エスケープ	$Gauss$	t5	E_0, D	6.22式、6.24式
		C5	E_0	(= C1 − E_0/0.00365)
		S5	E_0, N_{read}, $W_{Si}F$	(= S1@E=E_0−1.739keV)
Si ライン	$Gauss$	t6	E_0, d1, d2, D	6.30式、6.24式
		C6	(= 1739/3.65ch)	–
		S6	N_{read}, $W_{Si}F$	(= S1@E=1.739keV)

注: $tn = \frac{Tn}{T1}$ を表す。

応答関数を決定するには、split_th、N_{read}、N'、$W_{Si}F$、d1、d2、D、d_c、w_c の 9 つのパラメータを外から与えてやれば良い。また、ゲインパラメータは応答関数には陽に含まれていないが、ゲインを補正し 4 セグメントのスペクトルを合計する際に必要となる (6.1.2節参照)。

旧 XIS3 の 7 種類の特性 X 線に対するデータをこの関数でフィッティングした結果を図 6.34に示す。ここで、Ni や Zn のデータに見られる 5–7keV 付近のライン成分はチェンバーの散乱による特性 X 線、Cl で応答関数で再現仕切れていない 0.7–2keV 付近の盛り上がりはチェンバーでのトムソン散乱による成分である [8]。

また、図 6.35にモデル化された各成分の相対強度 (全体の合計を 1 とする) を示す。ほとんどのイベントがメインピーク成分になっていると考えて良いが、その分岐比は高エネルギーになるにつれ徐々に低くなり、10 keV では約 82% にまで落ち込む。

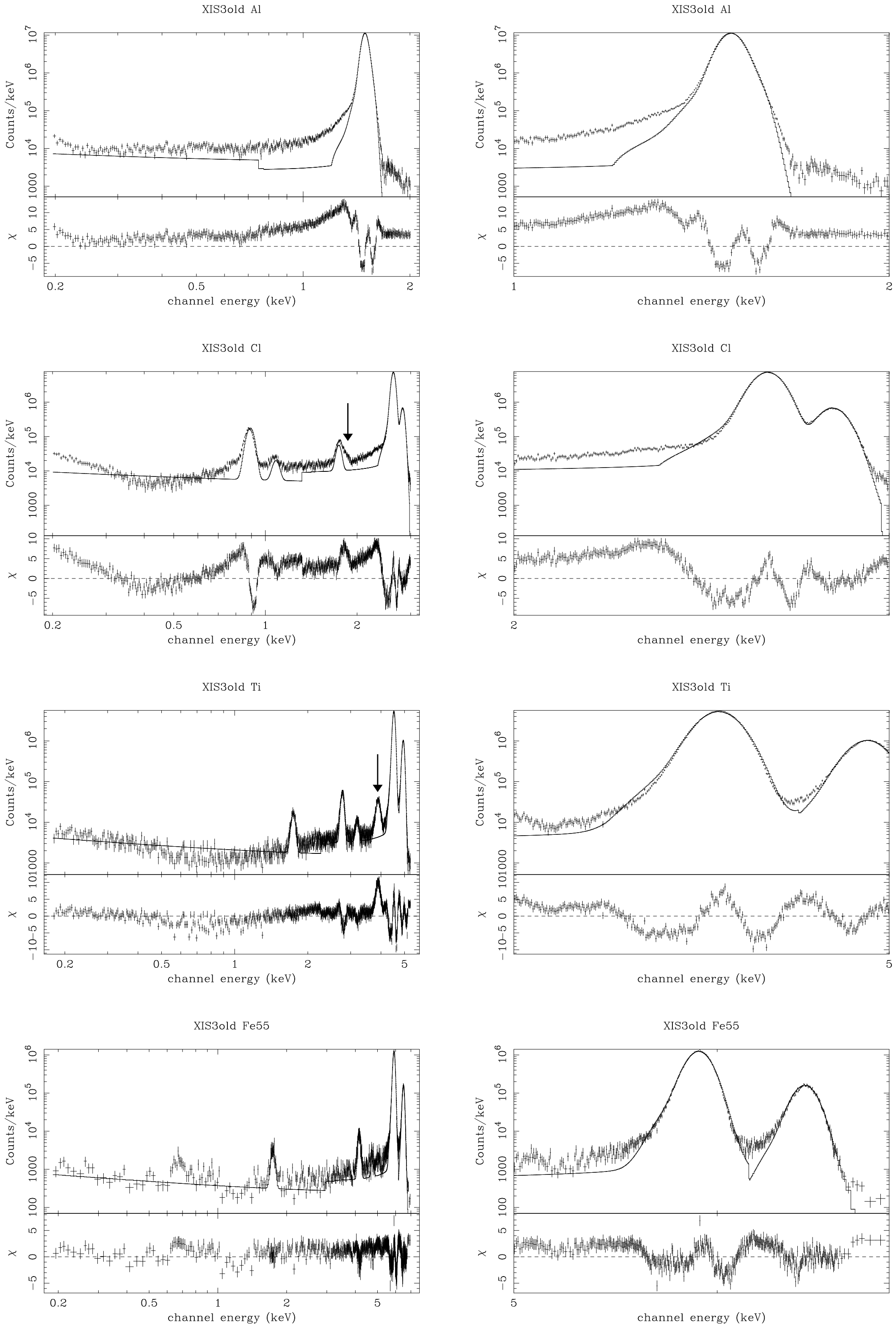


図 6.34: 構成された応答関数による旧 XIS3 データのフィッティング結果
上から順に、 Al, Cl, Ti, ^{55}Fe のデータ。左は全体図、右はメインピーク付近の拡大図。
図中で矢印で示した部分はチェンバーの散乱による特性 X 線である。

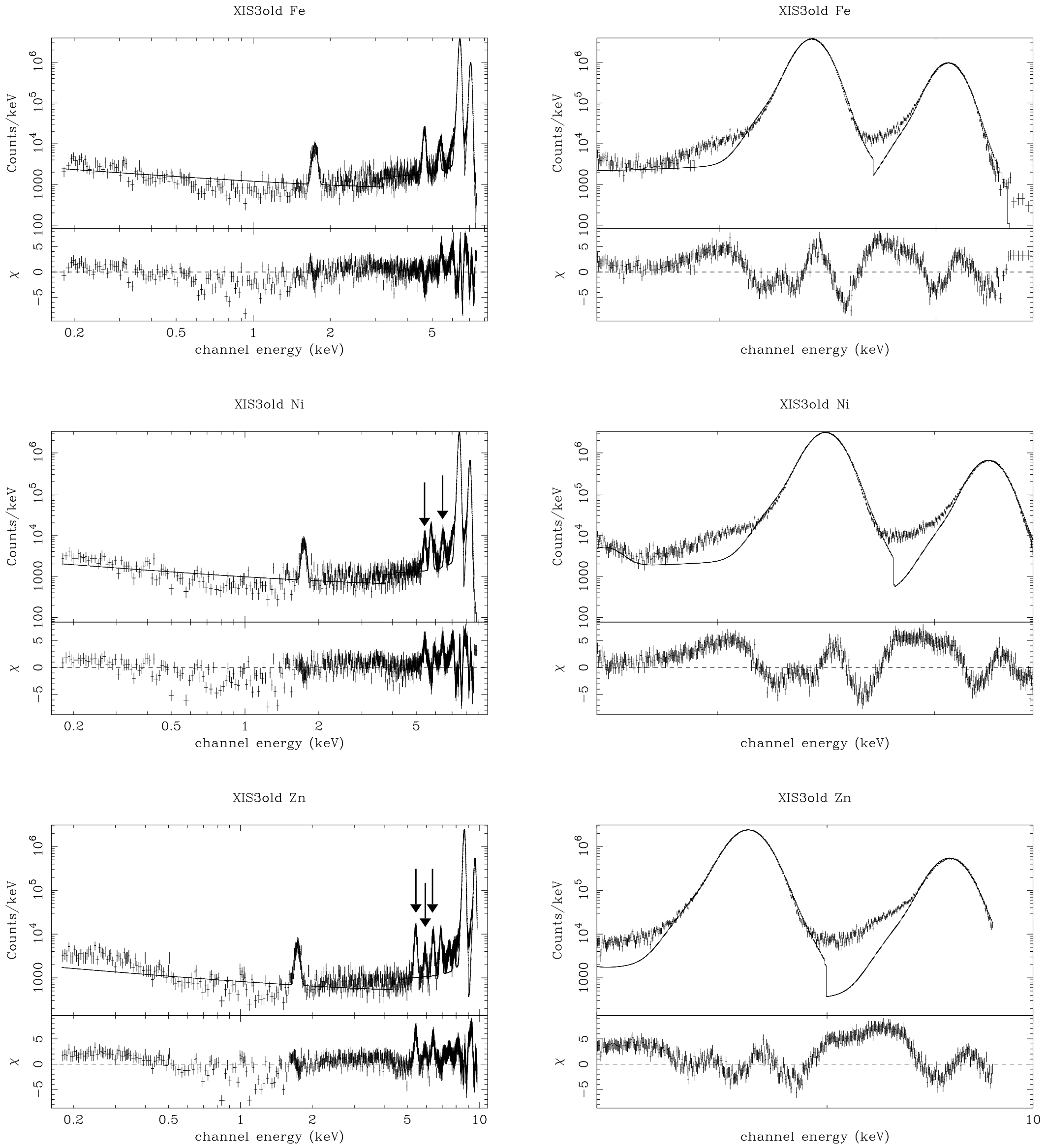


図 6.34続き。上から、 Fe, Ni, Zn のデータ。

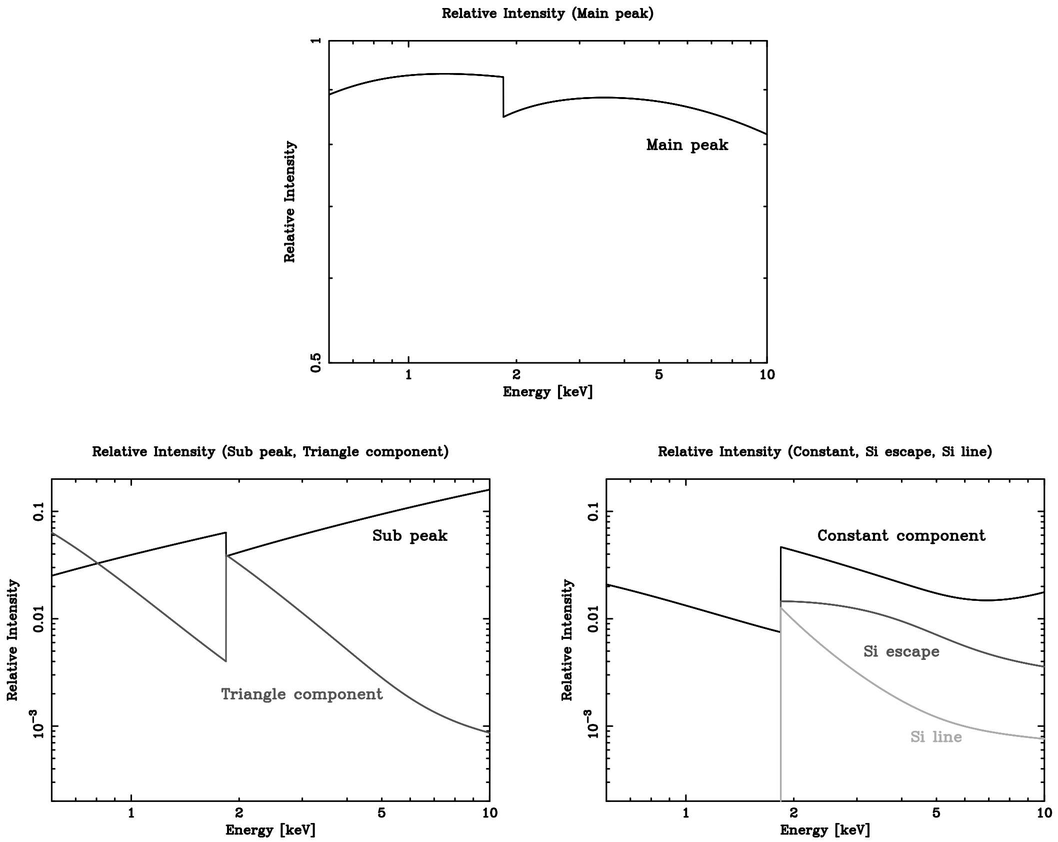


図 6.35: 応答関数によりモデル化された各成分の相対強度
上: メインピーク、左下: サブピーク、三角成分、
右下: コンスタント成分、 Si エスケープ、 Si ライン
縦軸は全成分合計の強度を 1 としたときの相対強度を表す。

6.2 P-sum mode に対する各成分の評価

次に P-sum mode のデータに対する応答関数の構築について述べる。

まず Normal mode と同様、旧 XIS3 に ^{55}Fe を照射して得られたスペクトルを図 6.36に示す。 Grade 法により Grade 0,1,2 に判定されたものを X 線イベントとして認識し合計している。図 6.1と見比べて形状自体にはそれほど劇的な変化があるようには見えない。よって P-sum mode でも 6 成分モデルを適用する。

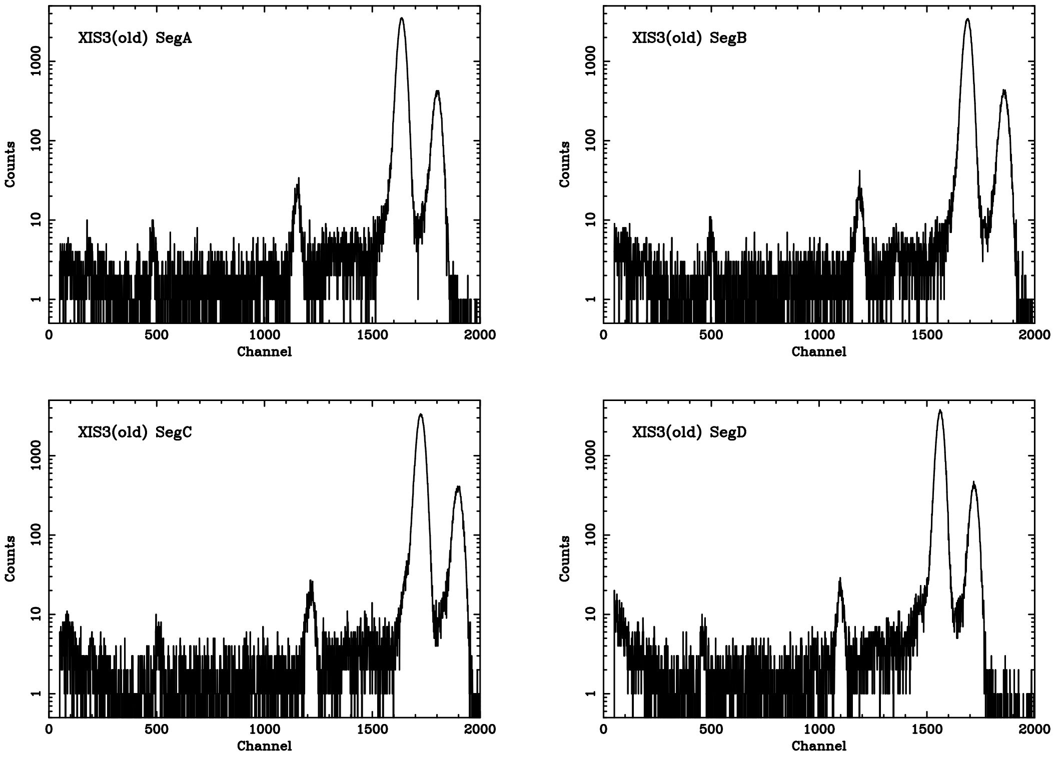


図 6.36: ^{55}Fe を照射した時の出力波高値 (P-sum mode, Grade0+1+2)

6.2.1 メインピーク (ゲイン · エネルギー分解能)

まず、ゲイン · エネルギー分解能について調べた。各特性 X 線について、メインピークとサブピークのガウス成分が支配的である範囲でガウス 2 本でフィットし、メインピークの中心 channel とエネルギー分解能を導出した。結果を図 6.37、 6.38に示す。

次に、それぞれを一次関数と 3.13式でフィッティングした。ベストフィトモデルを図中の実線で表す。また、フィッティングパラメータを表 6.6にまとめる。

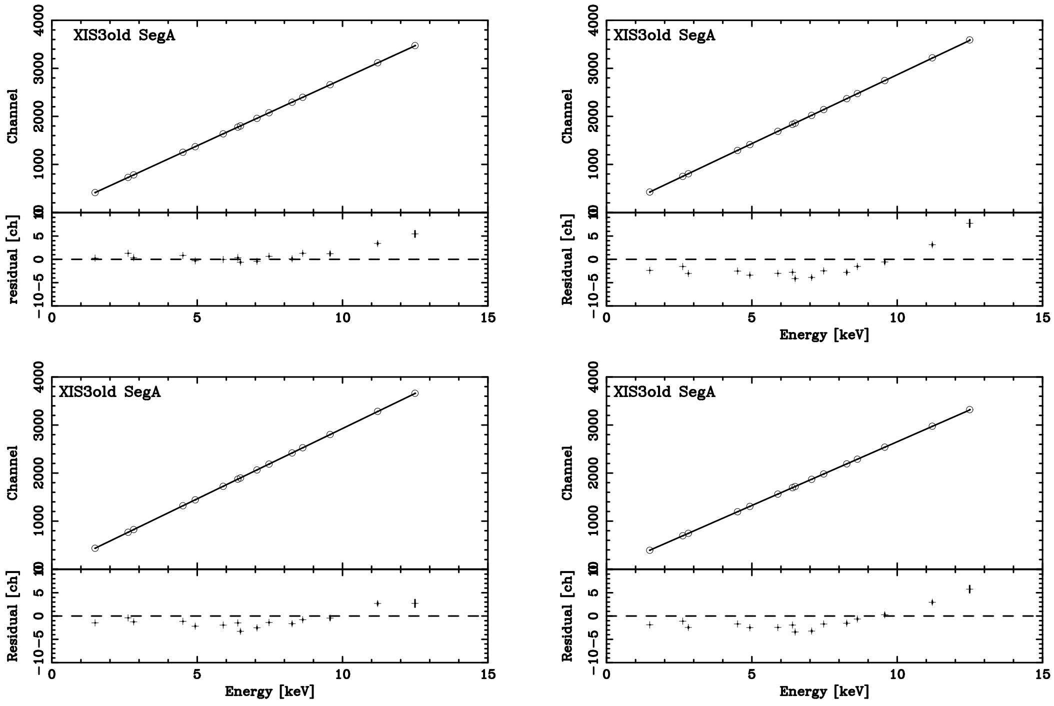


図 6.37: 旧 XIS3 の入射 X 線エネルギー vs 出力 channel 関係 (P-sum mode)

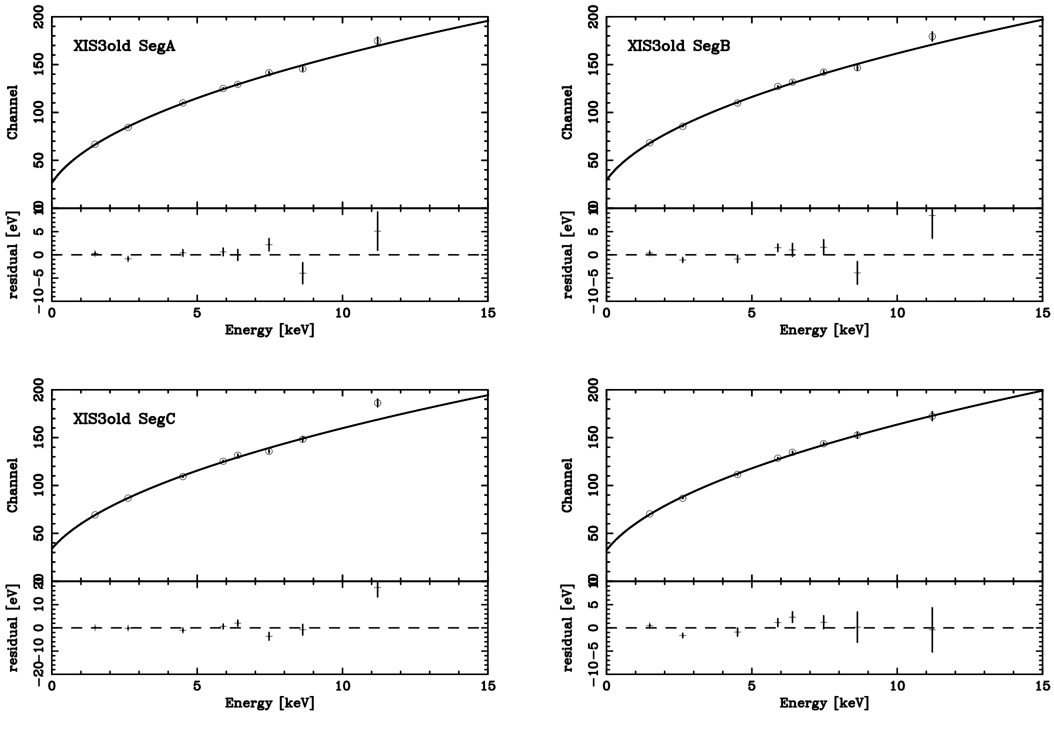


図 6.38: 旧 XIS3 の入射 X 線エネルギー vs エネルギー分解能関係 (P-sum mode)

表 6.6: 旧 XIS3 のゲイン、エネルギー分解能に対する fitting 結果 (P-sum mode)

Segment	Gain [ch/eV]	offset [ch]	N_{read} [eV]
A	0.27774(1)	0.20(5)	11.2(4)
B	0.28680(1)	−1.12(5)	12.5(5)
C	0.29285(1)	−0.61(5)	13.5(4)
D	0.26529(1)	−0.87(5)	14.4(4)

注: 括弧の中の数字は、値の最後の桁につくエラーの大きさ。

エネルギー分解能が Normal mode より若干良いのは、 6.3式に表れている E_0^2 に比例するゆらぎが含まれないためだと思われる。実際、このゆらぎを除けば、 Normal mode と同じパラメータでデータを良く再現できる (図 6.7参照)。またゲインも若干異なるので、これも Normal mode とは別に与える必要がある。

以下では、表 6.6のデータを用いてゲイン補正し、全セグメントを合計して議論を進める。

6.2.2 その他の成分

その他の成分がどのように変化するかを調べるために、 S1 以外のパラメータは Normal mode で求めた式を用いて応答関数を構成し、 P-sum mode のデータをフィッティングしてみた (図 6.39)。

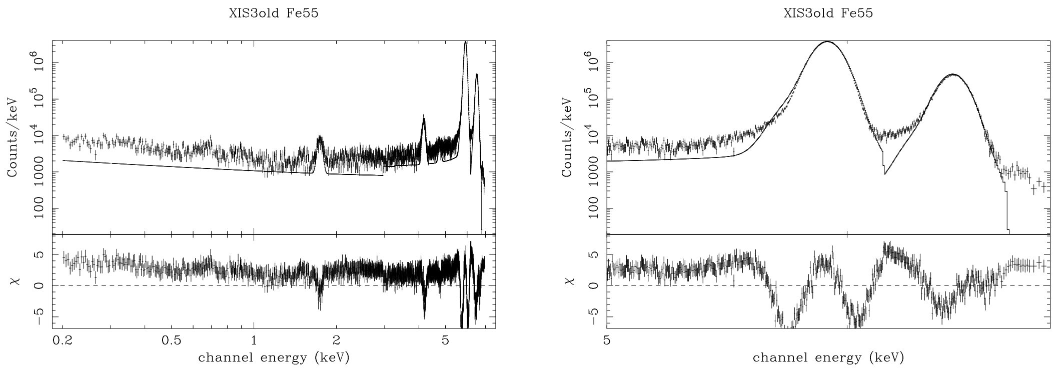


図 6.39: 旧 XIS3 の ^{55}Fe のデータ (P-sum mode) を Normal mode の応答関数でフィットした結果 (S1 だけ変更している)
左: 全体図、右: メインピーク付近の拡大図

まず tail 部分が応答関数の方が強いことがわかる。これは次のように理解できる。 P-sum mode では周辺ピクセルの洩れ出しのうち、上下方向に関しては最終的に加算されてしまうので認識できない。すると実効的には Normal mode に比べてサブピークへの分岐比は 1/2 になると思われる。

実際に P-sum mode のデータをフィッティングして T2 を求めた結果 (図 6.40)、強度を 0.62 倍すればデータを良く再現することがわかった。

もう一つ、コンスタント成分の data 点が数倍高い位置にあることも伺える。そこで、各エネルギーについてコンスタント成分強度をフィッティングにより求めた。結果を図 6.41に示す。 ^{55}Fe に限らず全てのエネルギーで強度が上がっていることがわかる。右図はモデルの normalization だけ free にし、データをフィッティングしてみた結果である。理論式 (6.17式) 強度 ($\mathrm{T4}_{theory}$) に比べ、強度を 3.83 倍すればデータを良く再現することがわかった。

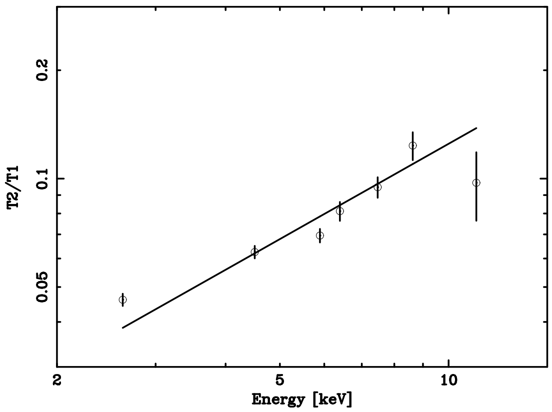


図 6.40: エネルギー vs T2 関係 (P-sum mode) 丸: 実験データ、実線: ベストフィットモデルを表す。

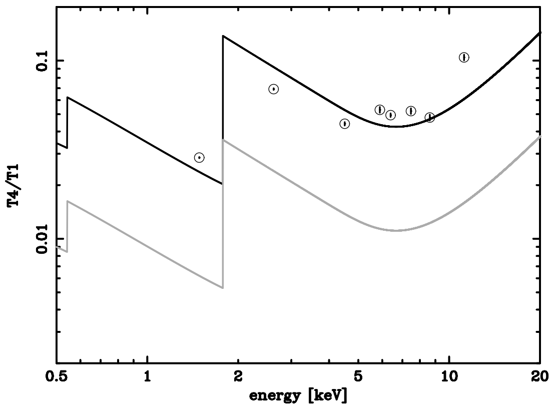


図 6.41: エネルギー vs T4 関係 (P-sum mode) 丸は実験データ、灰色の線は計算により予想される値、黒の線はデータに合うように理論値を 3.83 倍したもの。

6.2.3 まとめ

P-sum mode での応答関数についてまとめる。

- 関数形自体は Normal mode と同じで良い。
- Normal mode と異なるパラメータは、 C1, S1, T2 (=0.62T2), T4 (=3.83$\mathrm{T4}_{theory}$) の 4 つ。

旧 XIS3 の各成分について、構成された関数でフィッティングした結果を図 6.42に示す。

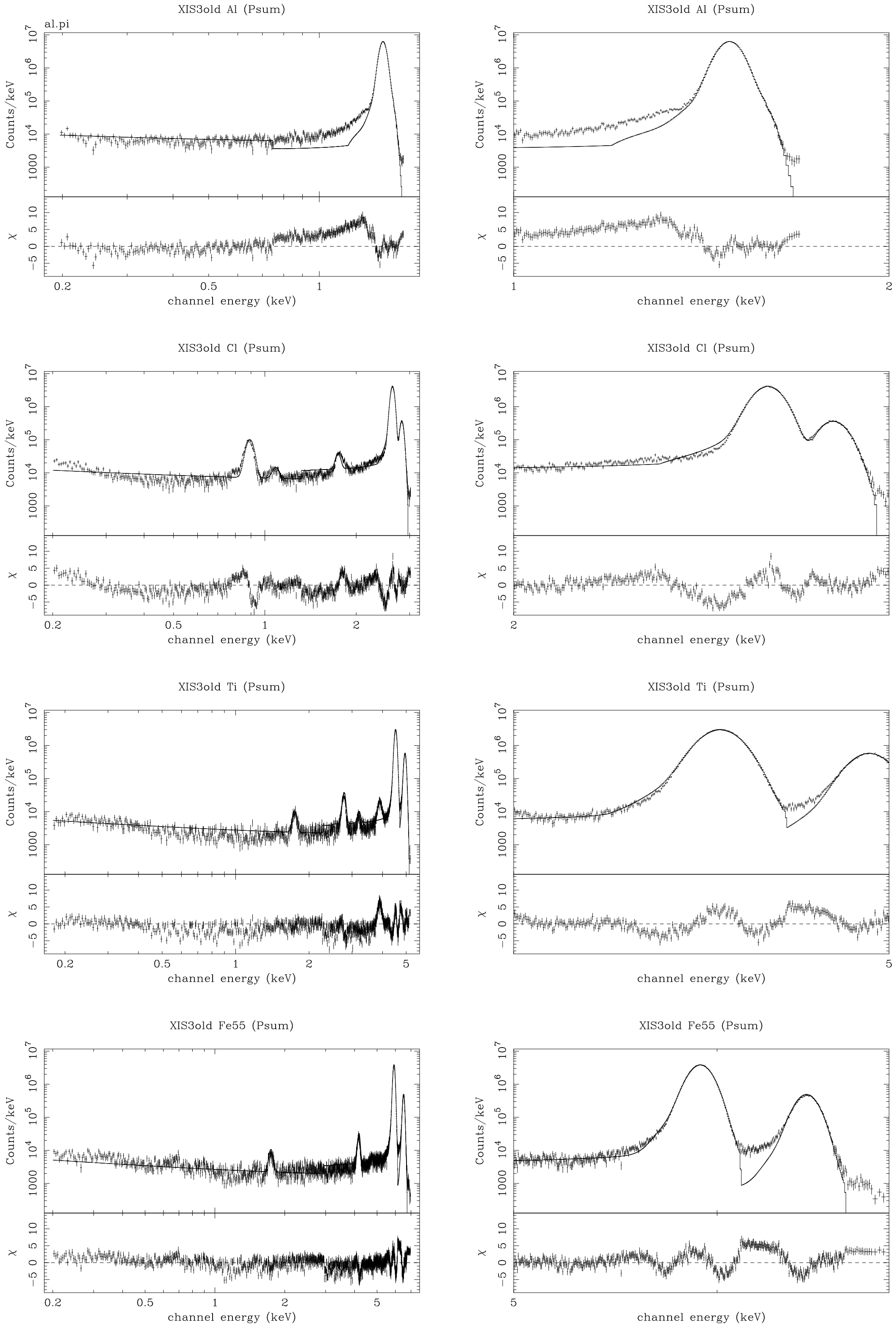


図 6.42: 構成された応答関数による旧 XIS3 データのフィッティング結果 (P-sum mode)
上から順に、 Al, Cl, Ti, ^{55}Fe のデータ。左は全体図、右はメインピーク付近の拡大図。

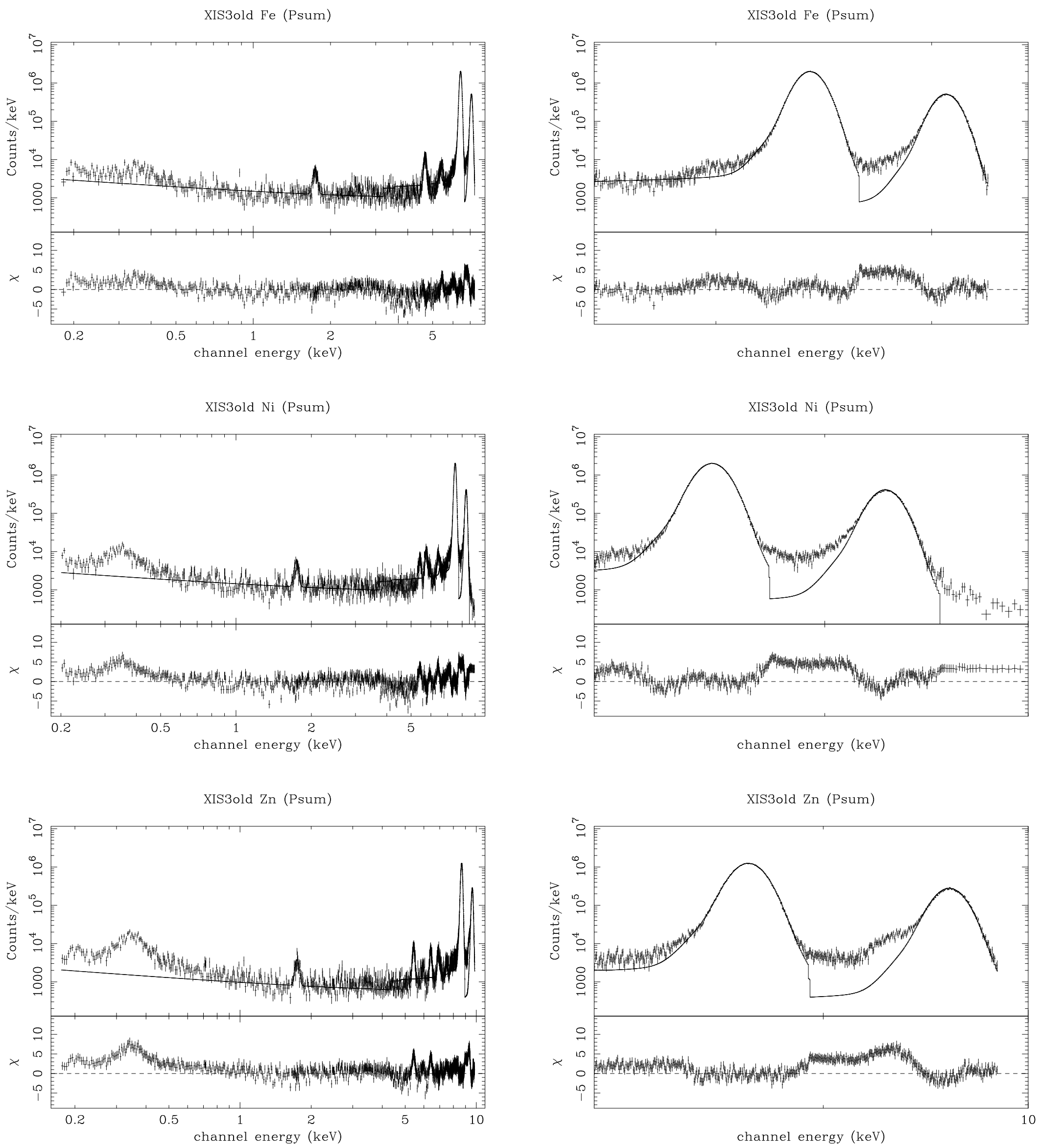


図 6.42続き。上から、 Fe, Ni, Zn のデータ。

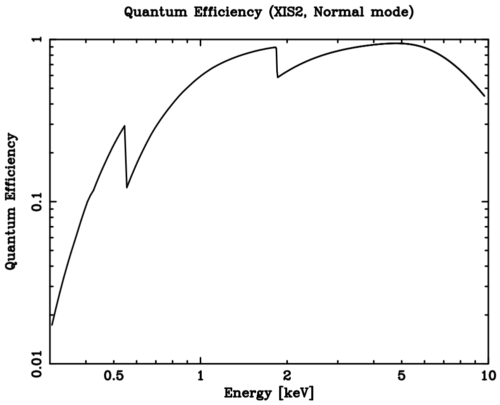
6.3 量子効率について

実際に観測データを扱う際には量子効率 (3.4節) による強度、スペクトル形の変化も考慮に入れなくてはならない。つまり、量子効率を $\mathbf{Q(E)}$ とすると、

$$\mathbf{PH(ch)} = \mathbf{Q(E)} \otimes \mathbf{R(ch, E)} \otimes \mathbf{S(E)} \tag{6.48}$$

により出力波高値が決定される。 $\mathbf{Q(E)} \otimes \mathbf{R(ch, E)}$ を変換の行列として用いることにより、ターゲット天体の X 線強度、スペクトル形を知ることができるのである。

XIS の量子効率 (XIS2) は図 6.43のようになっている。詳しくは [6] を参照されたい。



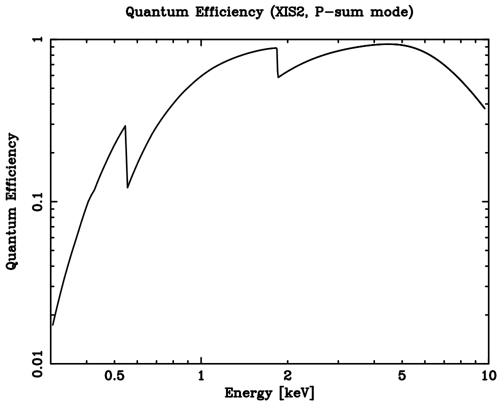


図 6.43: XIS の量子効率 (XIS2)
左: Normal mode、右: P-sum mode。詳しくは [6] を参照。

第 7 章

応答関数の flight センサーへの対応方法

次に行なわなければならないのが、 6章で構築した応答関数をどのように FM 品 (XIS0–3) に応用すればよいかを調べることである。

7.1 XIS0 のデータへの応答関数の対応

まず XIS0 で詳細にデータを取得し、応答関数をどのように対応させれば良いかを調べた。用いたデータのログを表 7.1に示す。解析のパラメータは旧 XIS3 と同じ値 (表 6.2) を用いた。

表 7.1: 本節で用いている XIS0 データのログ

Target	電圧	電流 (P)†	Normal mode Frame 数	P-sum mode Frame 数
Al	5kV	0.5%	96	96
Cl	5kV	0.5%	96	96
^{55}Fe	–	–	496	496
Zn	20kV	0.2%	196	196

†: 表 5.1参照

図 7.1に XIS0 に ^{55}Fe を照射して得られたスペクトルを示す。 Normal, P-sum mode とも、旧 XIS3 のデータに比べて形状が劇的に変わっているということはない。よって応答関数の形状自体は特に変える必要はない。

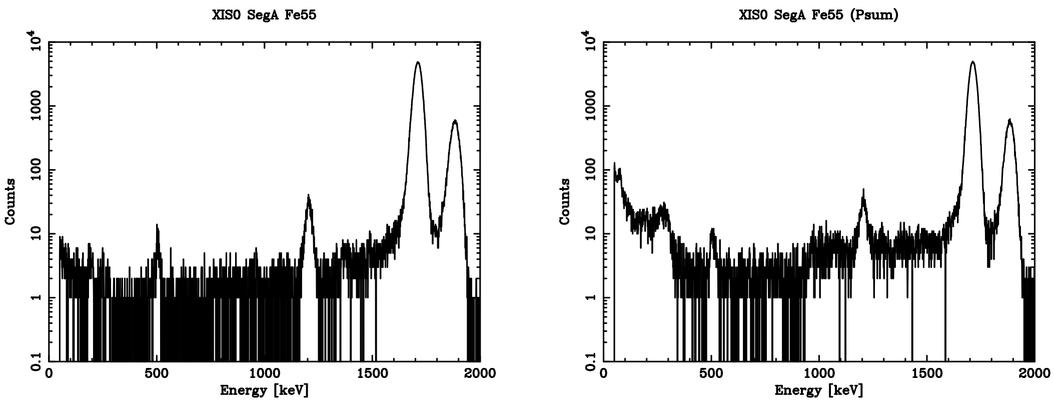


図 7.1: ^{55}Fe を照射した時の XIS0 の出力波高値
左: Normal mode (SegA)、右: P-sum mode (SegA) のデータ

6章で構成した応答関数は、基本的なパラメータを与えるだけで決められるはずである (6.1.8節参照) 。これらのパラメータは次のような要領で与えられる。

- ゲイン · エネルギー分解能 (N_{read}、 $W_{Si}F$、 N')
  本章では実際にデータを fitting して与えられる。その他のセンサーや機上での導出の仕方については 7.2節、 9章を参照。

- split threshold
  解析上与えるパラメータ。特に指定がない場合は 20 ch で固定している。

- 電極厚 (d1)· 絶縁層厚 (d2)
  阪大で得られた低エネルギー側のデータでの検出効率からこれらの層の吸収量を求め、それをモデルに当てはめることにより計算される [4]。得られた値は表 7.5にまとめる。

- 空乏層厚 (D)
  熱真空試験中のデータを用いて、 [17] の方法で求める。 Grade0,2,3,4,6 のイベントは空乏層、 Grade7 のイベントは中性領域で吸収されたイベントであると仮定すると、それぞれのイベント数 (N_{02346}、 N_7) の関係は、

$$\frac{N_{02346}}{N_{02346}+N_7} = 1 - e^{-\mu_{Si}\rho_3 D} \tag{7.1}$$

  で表される。これを解いて、

$$D = \frac{1}{\mu_{Si}\rho_3} \cdot \ln(\frac{N_{02346}}{N_7}+1) \tag{7.2}$$

  により空乏層が導出される。実際に得られた値を表 7.5にまとめる。詳しくは [6] を参照されたい。

- チャネルストップパラメータ (w_c、 d_c)
  ピクセルの中央と端での量子効率の違いを測定することにより原理的に決定することは出来るが、そのためにはメッシュを通して X 線を照射するなど複雑な実験システムが必要であり、現実には測定されていない。そこで [18] に報告されている値 (w_c=4.2μm、 d_c=0.35μm) を各センサー共通に用いることにする。

結局、センサー毎に異なる値を取るのは、ゲイン、エネルギー分解能、電極 · 絶縁層 · 空乏層厚だけである。

7.1.1 Normal mode

まずゲイン、エネルギー分解能に関するパラメータを求めなければならない。そこでメインピーク付近をダブルガウシアンで fitting し、エネルギー vs チャンネル / エネルギー分解能関係を導出した。結果を図 7.2、 7.3に示す。

これらを理論モデルで fitting し、各パラメータを求めた。ベストフィットモデルを図中の実線で、パラメータを表 7.2にまとめる。それぞれモデルでの再現性は良いことが伺える。また、旧 XIS3 の時と同様、ゲインはセンサー毎に変わるがエネルギー分解能に関するパラメータはセンサー間の差は小さい。よって以下では全セグメントを合計したスペクトルを用いて議論する。

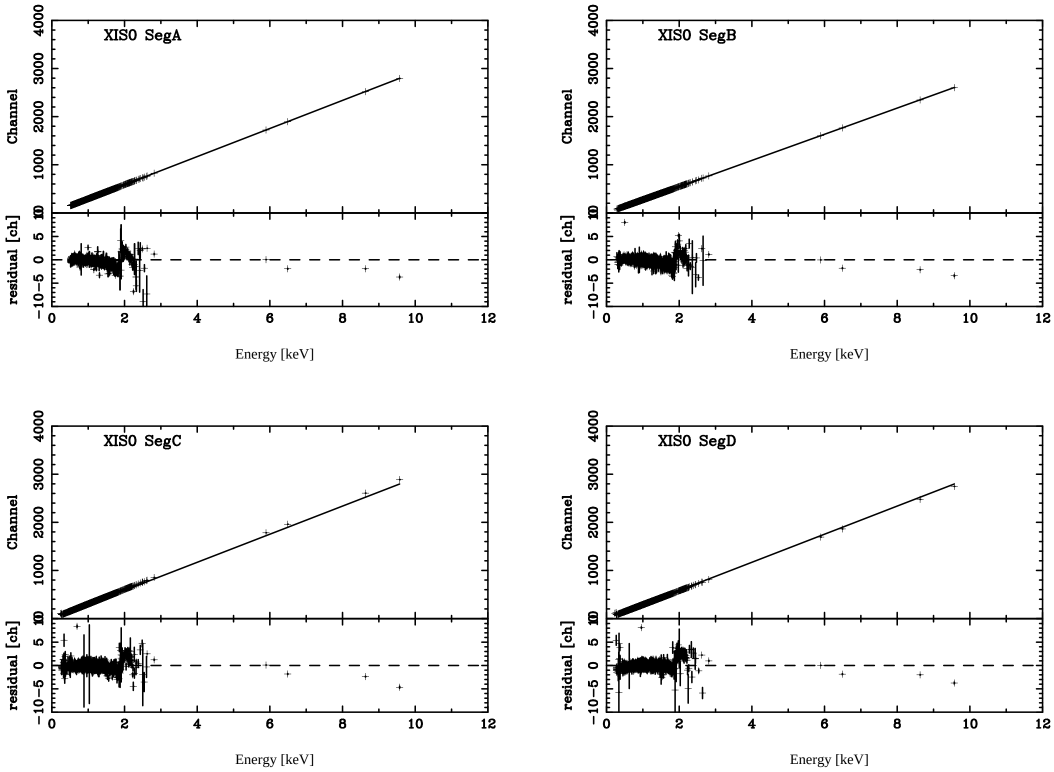


図 7.2: XIS0 の入射 X 線エネルギー vs 出力 channel(C1) 関係

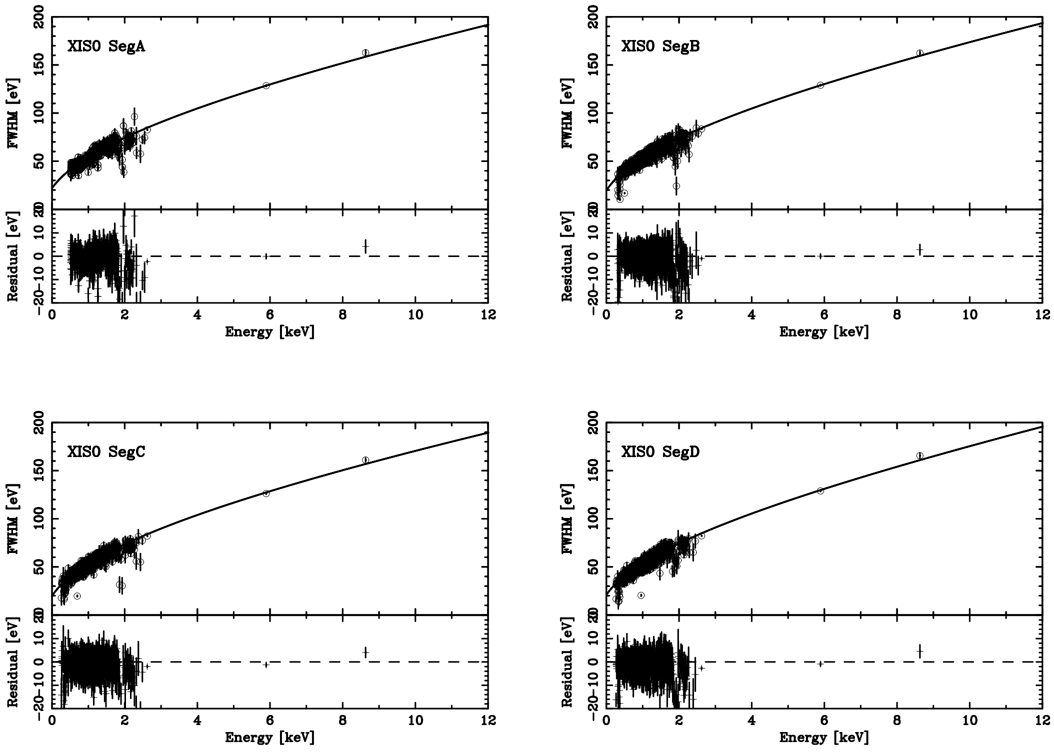


図 7.3: XIS0 の入射 X 線エネルギー vs エネルギー分解能関係

表 7.2: XIS0 のゲイン、エネルギー分解能に対する fitting 結果 (Normal mode)

Segment	Gain [ch/eV]	offset [ch]	N_{read} [eV]	N‘ [10^{-6}]
A	0.29220(1)	0.04(2)	9.3(1)	9(2)
B	0.27222(1)	0.15(2)	8.2(1)	10(2)
C	0.30222(1)	0.72(2)	8.3(1)	8(2)
D	0.28718(1)	0.94(2)	8.8(1)	11(2)

注: 括弧の中の数字は、値の最後の桁につくエラーの大きさ

次に、実際に求められたパラメータを与えて 6.1.8節の要領で応答関数を作成し、^{55}Fe のデータに対して fitting を行なった。図 7.4にその結果を示す。概ね良くあっているが、唯一、メインピークのすぐ低エネルギー側にモデルの盛り上がりが見える。^{55}Fe ではこの付近はサブピークが支配しているので、おそらくこの強度を強く見積り過ぎているためだと思われる。実際にデータに合うように、サブピーク強度を 0.75 倍にした結果が図 7.4の右下の図である。

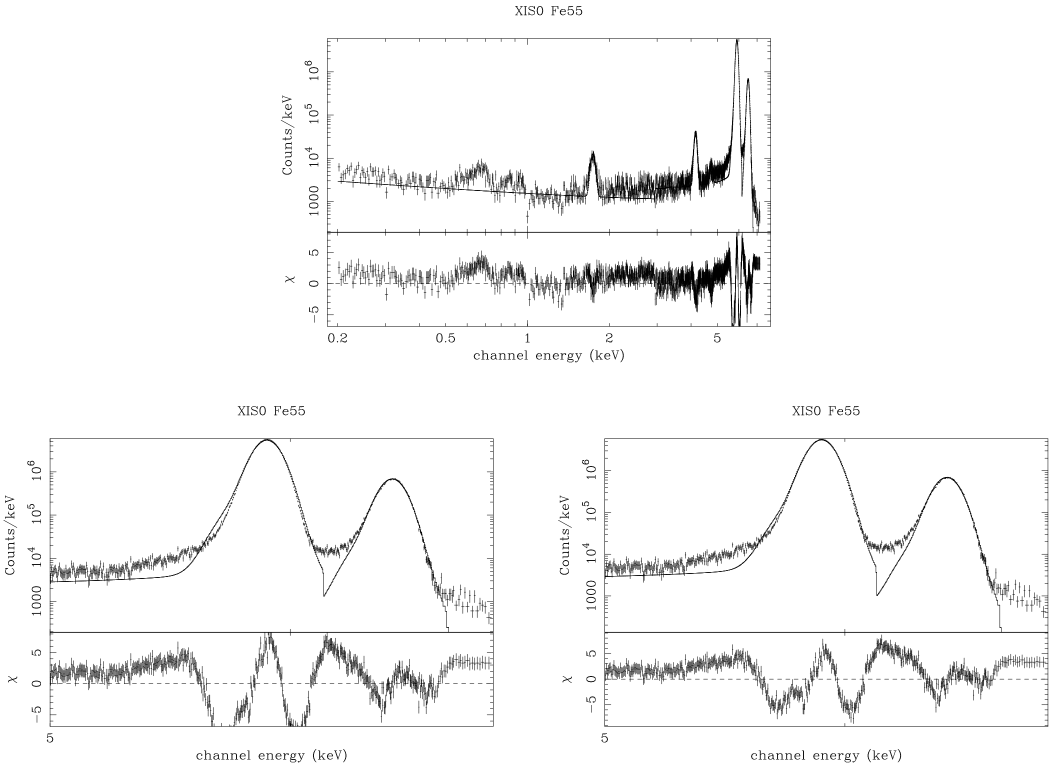


図 7.4: S1 のみ補正した応答関数による XIS0 ^{55}Fe の fitting 結果
上は全体図、左下は上図のメインピーク付近の拡大図。
右下はサブピーク強度を 0.75 倍にしたもの。

その他のデータに対しても同じ関数で fitting を行なった。結果を図 7.5に示す。特に変更したサブピーク部分も良く再現されている。これは、

センサー毎に各成分の強度は変わり得るが、その形状やエネルギー依存性が変わることはない

ということを示している。

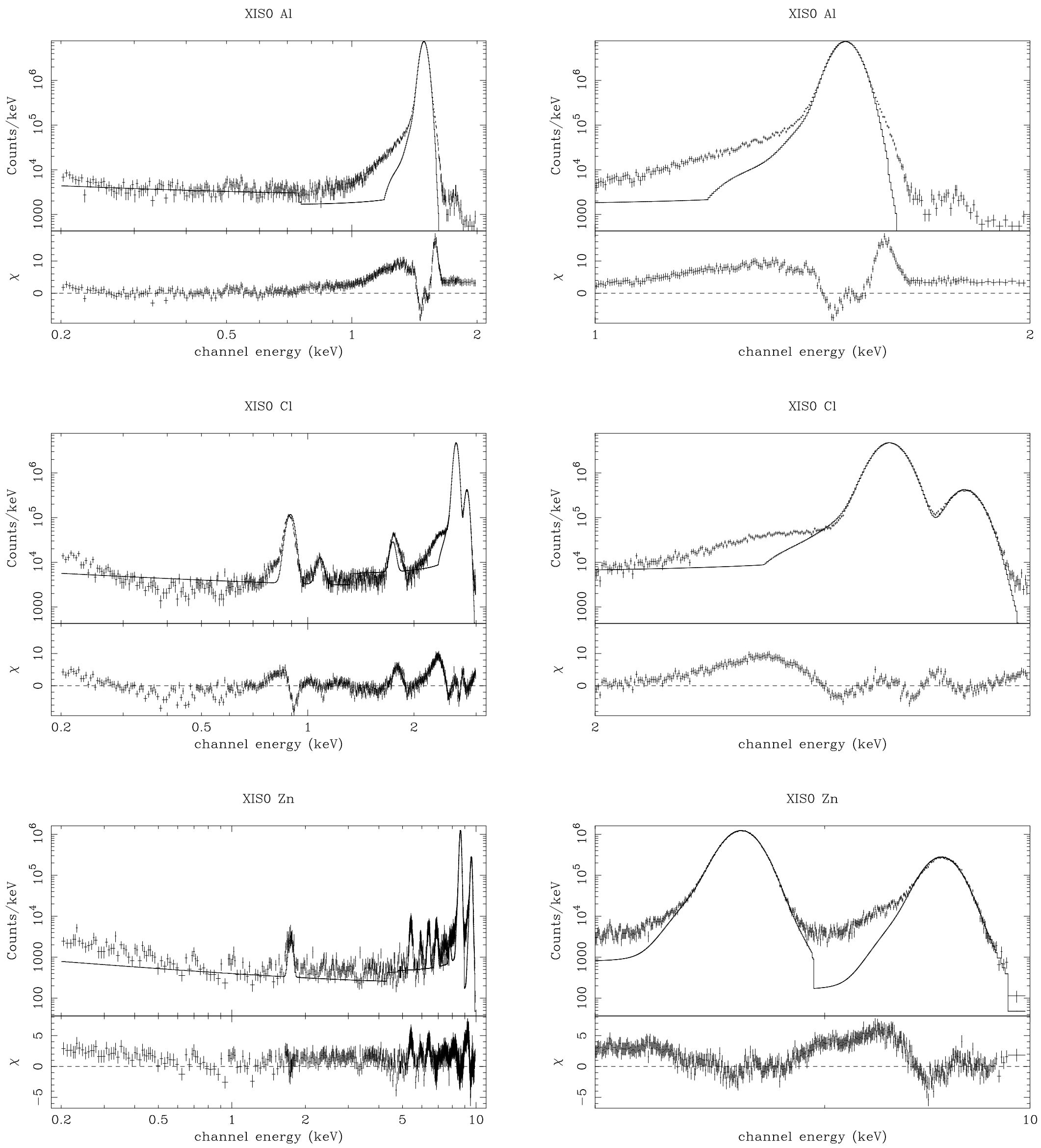


図 7.5: S1, T2 を補正した応答関数による XIS0 データの fitting 結果
上から、 Al, Cl, Zn のデータ。左は全体図、右はメインピーク付近の拡大図。

7.1.2 P-sum mode

P-sum mode でも行なう解析は Normal mode と同じである。ただし阪大ではシステム上 P-sum mode のデータは取得することが出来ないので、京大のデータのみで解析を行なった。結果、 Normal mode の時と同じく、 C1, S1, T2 (0.75 倍) のみ変化させればデータを良く再現する応答関数を作成できることがわかった。図 7.6にスペクトルフィットの結果だけ示す。

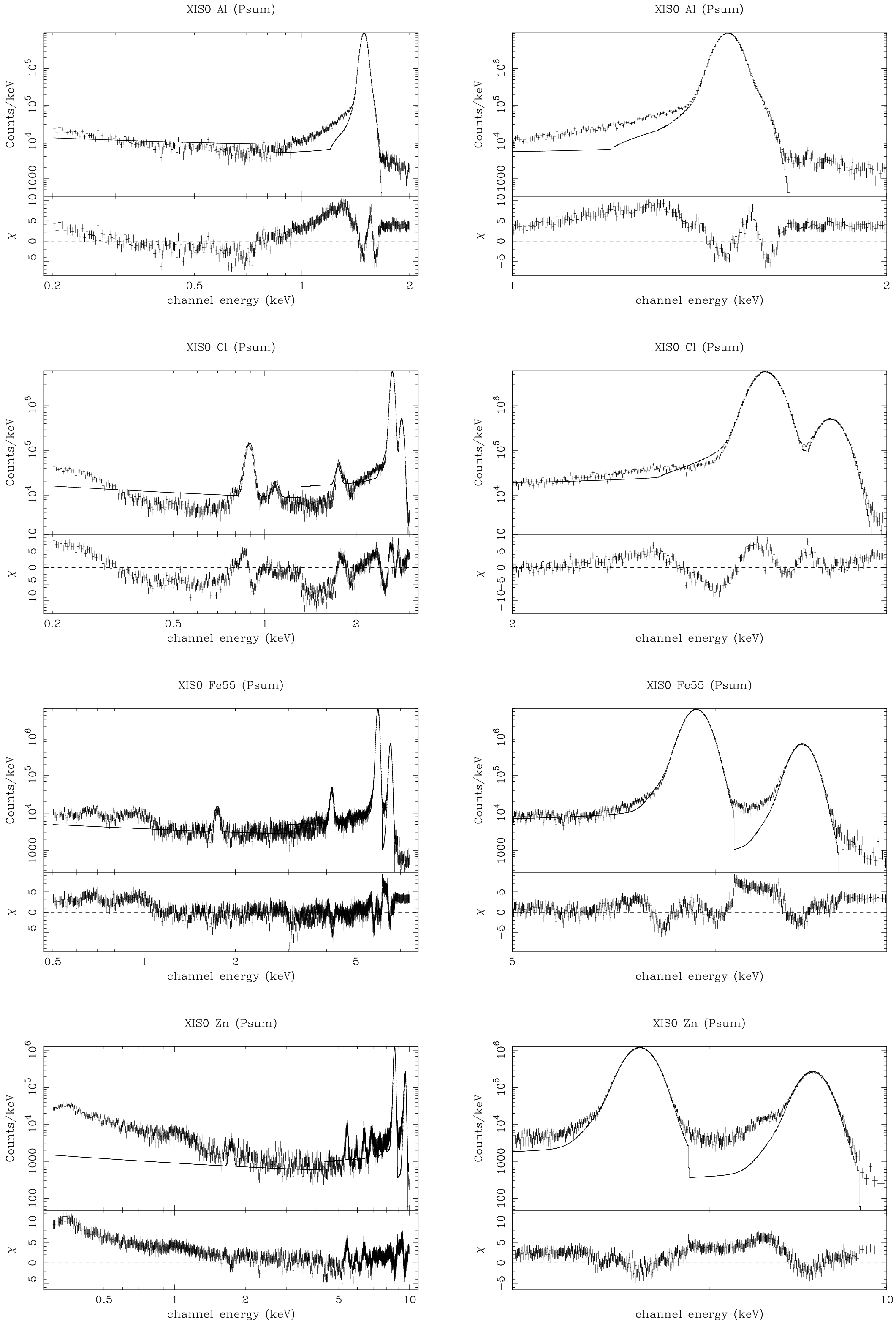


図 7.6: S1, T2 を補正した応答関数による XIS0 データの fitting 結果 (P-sum mode) 上から、 Al, Cl, ^{55}Fe, Zn のデータ。左は全体図、右はメインピーク付近の拡大図。

7.1.3 まとめ

XIS0 の実験結果を元にした応答関数の fitting の結果、以下のような特徴が明らかになった。

- 旧 XIS3 で構築した応答関数の 6 成分モデルはセンサーに関わらず適応が可能。
- それぞれの成分の形状を決定するパラメータ (表 6.5の $t1--t6$ 以外のパラメータ) については、センサー毎に基本的なパラメータ (7.1節の先頭を参照) を与えるだけで決定できる。
- 強度 (表 6.5の $t1--t6$) に関しては変化する可能性があるので適宜何らかの方法で決めてやらなければならない。

その他のセンサーへの対応は、この考えに基づいて行なうことになる。

7.2 全センサーへの応答関数の対応

最後に全 4 センサーへの対応について考察する。 XIS0 以外のセンサーに関しては地上試験で十分なデータが取られていないので、実質的にはキャリブレーションソース (^{55}Fe) のデータのみで応答関数を決定できるようにしなくてはならない。しかし、 7.1.3節で述べたような特徴が明らかになっているので、データ点は 1 つのみで決定が可能であり、衛星軌道上での微調整にも対応できる。実際に ISAS 熱真空試験中の ^{55}Fe データを用いて応答関数を構築した流れを以下で説明する。

7.2.1 ゲイン · エネルギー分解能の決定

これらは ^{55}Fe のデータをフィッティングして求める。フィッティングは、ピークの周辺、メインピークとサブピークしか効かない程度の幅 ($E_0\pm$ 数 100eV) をとり、ガウシアン 2 本で行なう。得られたメインピークのパラメータに対し、 offset は 0 であるという仮定を置くことによりゲインが一意に求まる。

エネルギー分解能に関しては 1 点のデータで 3 つのパラメータを決めなければならないのでそう単純ではないが、次のような方法で求めることが出来る。

1. $W_{Si}F$ は一定 (=0.44) であると仮定する。
2. 6.1.2節でも述べたように、 P-sum mode では $N'=0$ である。よって P-sum mode のデータから N_{read} を求める。
3. Normal mode のデータから N' を求める。

以上の手法を用いて導出したパラメータを、 fitting 結果とともに表 7.3 (Normal mode)、表 7.4 (P-sum mode) にまとめる。

ただし注意しなければいけないのは、打ち上げ後は劣化に伴う CTI の増加などの影響 (9章参照) でさらに自由度は大きくなり、一意にパラメータを決定するのは容易ではなくなるだろう。打ち上げ後の機上キャリブレーションにより、変化しないパラメータを見つけ出してやる必要がある。

表 7.3: 熱真空試験中の ^{55}Fe K$_\alpha$ 輝線データのフィッティング結果 (Normal mode)

		ch @5.894keV	sigma [ch]	FWHM [eV]	N_{read}[eV]†	N' [10^{-6}]
XIS0	SegA	1718.31(4)	14.84(9)	127.5(8)	0	10(2)
	SegB	1593.65(3)	15.01(9)	129.0(8)	15	6(3)
	SegC	1780.13(4)	14.83(8)	127.2(7)	6	9(2)
	SegD	1684.77(3)	14.95(9)	129.2(8)	0	12(3)
	Total	–	–	129.1(4)	9	10(1)
XIS1	SegA	1674.78(4)	16.0(1)	132(1)	16	9(3)
	SegB	1622.67(4)	15.8(1)	134.7(9)	14	14(3)
	SegC	1662.83(4)	15.6(1)	130.3(8)	17	6(3)
	SegD	1649.59(4)	15.7(1)	132(1)	13	11(3)
	Total	–	–	132.4(5)	15.2	10(2)
XIS2	SegA	1587.07(3)	14.88(8)	129.8(7)	8	11(2)
	SegB	1574.14(3)	14.86(9)	130.7(8)	11	11(3)
	SegC	1609.16(3)	15.05(9)	129.5(7)	8	11(2)
	SegD	1598.20(3)	14.93(9)	129.3(7)	5	12(2)
	Total	–	–	129.2(3)	12.1	8(1)
XIS3	SegB	1541.59(4)	14.7(1)	131.8(9)	8	14(3)
	SegC	1596.88(4)	15.1(1)	130.7(8)	10	12(3)
	SegD	1547.43(3)	14.4(1)	129.2(7)	8	11(2)
	Total	–	–	129.8(4)	19	10(1)

括弧の中の値は最後の桁につくエラーの大きさを表す。 Total は全セグメント合計したスペクトルでの値。
†: P-sum mode での fitting 結果 (表 7.4) から与えられる。

表 7.4: 熱真空試験中の ^{55}Fe K$_\alpha$ 輝線データのフィッティング結果 (P-sum mode)

		ch @5.894keV	sigma [ch]	FWHM [eV]	N_{read}[eV]
XIS0	SegA	1719.42(2)	14.8(1)	119.3(8)	$\sim 0^\dagger$
	SegB	1594.66(2)	14.37(8)	124.8(7)	15(2)
	SegC	1781.34(2)	15.5(1)	120.7(9)	6(6)
	SegD	1685.64(2)	14.5(1)	119.4(8)	$\sim 0^\dagger$
	Total	–	–	121.6(2)	9(1)
XIS1	SegA	1675.95(2)	15.2(1)	125.3(8)	16(3)
	SegB	1624.21(2)	14.6(1)	124.1(8)	14(3)
	SegC	1664.14(2)	15.1(1)	125.8(8)	17(3)
	SegD	1651.43(2)	14.7(1)	123.4(8)	13(3)
	Total	–	–	124.9(2)	15.2(7)
XIS2	SegA	1587.98(2)	13.89(9)	121.1(7)	8(5)
	SegB	1574.60(2)	13.90(8)	122.2(7)	11(3)
	SegC	1609.75(2)	14.09(8)	121.1(7)	8(5)
	SegD	1598.61(2)	13.88(8)	120.2(7)	5(7)
	Total	–	–	123.0(2)	12.1(9)
XIS3	SegB	1541.97(2)	13.52(8)	121.3(7)	8(4)
	SegC	1597.50(2)	14.1(1)	122(1)	10(5)
	SegD	1548.01(2)	13.56(9)	121.2(8)	8(5)
	Total	–	–	122.4(2)	10(1)

括弧の中の値は最後の桁につくエラーの大きさを表す。 Total は全セグメント合計したスペクトルでの値。
†: エネルギー分解能の理論的限界 (119.7eV) を越えているのでほとんど 0 だと思われる。

7.2.2 応答関数の決定

応答関数の形状は、7.1節で示したパラメータを与えることにより決定する。電極、絶縁層、空乏層厚は各センサー毎に表 7.5のように求められている。手法は 7.1節を参照。より詳しくは [6] を参照されたい。

表 7.5: 各センサーの各層の厚み

	電極 [μm]	絶縁層 [μm]	空乏層 [μm]
XIS0	0.32896±0.00008*	0.26811±0.00024*	74.14±1.02
XIS1	0.494±0.059	0.217±0.030	70.40±1.73
XIS2	0.475±0.023	0.271±0.010	73.01±0.34
XIS3	0.467±0.018	0.281±0.007	72.07±2.68

* : MIT cal data から

各成分強度に関しては、特に理論的解釈がはっきりしていないサブピーク、コンスタント成分の 2 つを、データに合うように変更した。旧 XIS3 で用いた値との違いを表 7.6に示す。特にコンスタント強度 (T4) は、旧 XIS3 で理論値に対しかさ上げした 1.59 倍を取り除くことによりデータを良く再現するということがわかった。

表 7.6: 各センサーのサブピーク、コンスタント強度 (Normal, P-sum 共通)

Sensor	XIS0	XIS1	XIS2	XIS3
$T2/T2^{\dagger}_{S3old}$	0.5	1.0	0.8	0.5
$T4/T4^{\dagger}_{S3old}$	1/1.59	1/1.59	1/1.59	1/1.59

†: 旧 XIS3 で設定した値との比率

以上のような流れで現状での応答関数が構築された。この応答関数での fitting 結果を図 7.7に示す。

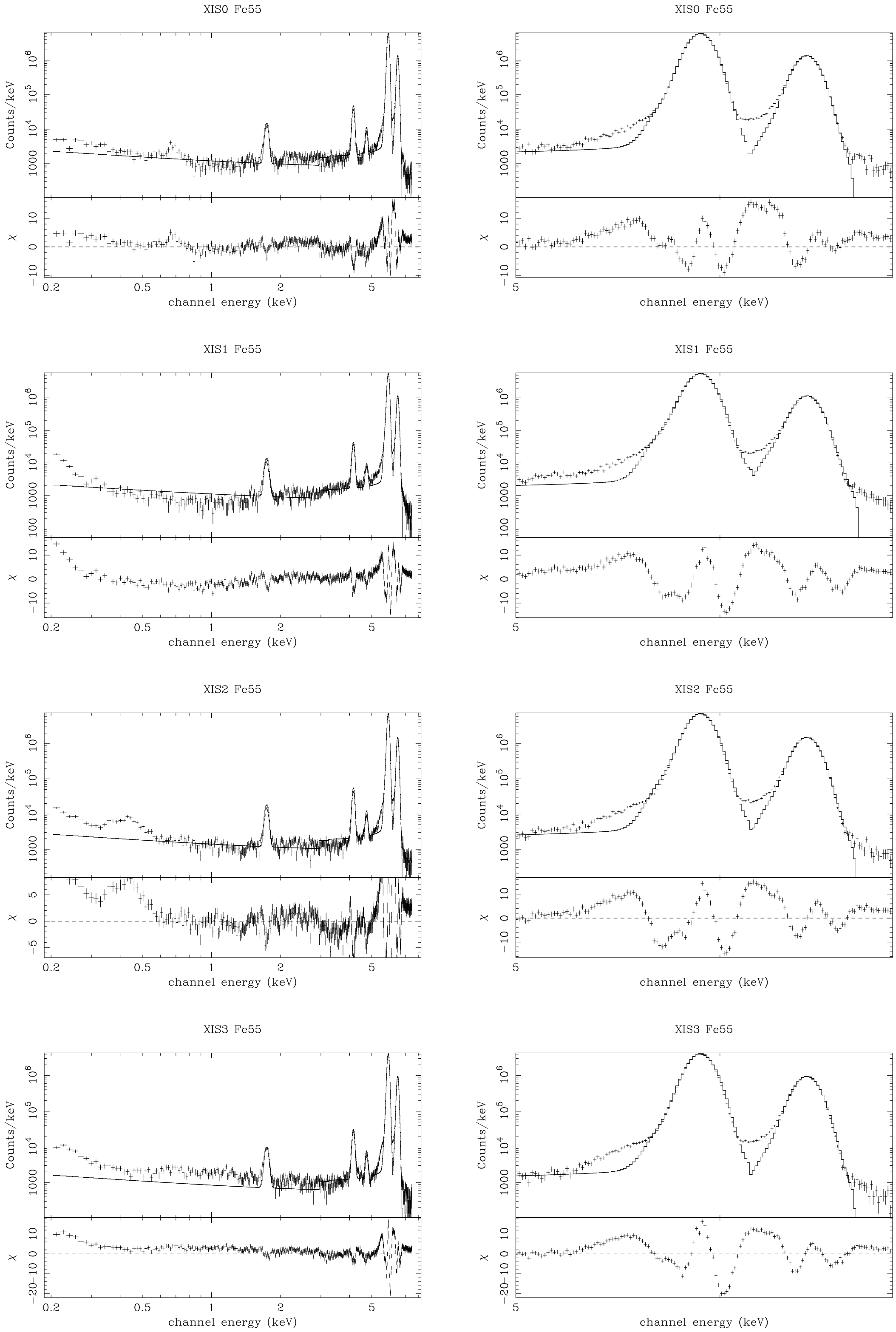


図 7.7: 各センサーの ^{55}Fe データの fitting 結果 (Normal mode)
上から、 XIS0, XIS1, XIS2, XIS3。左は全体図、右はメインピーク付近の拡大図。

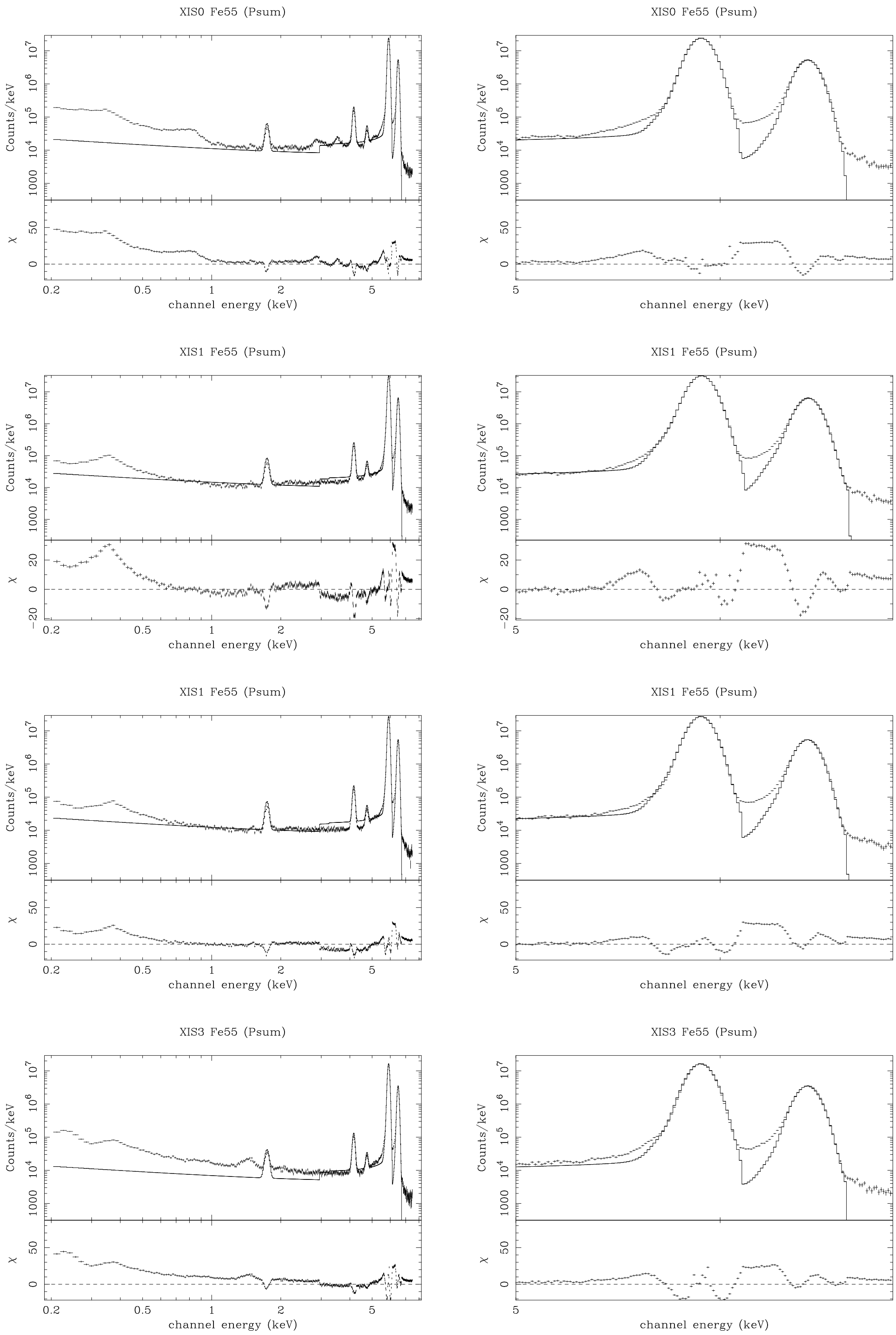


図 7.8: 各センサーの ^{55}Fe データの fitting 結果 (P-sum mode)
上から、 XIS0, XIS1, XIS2, XIS3。左は全体図、右はメインピーク付近の拡大図。

7.2.3 現状での問題点と今後の課題

現状ではデータをなるべく忠実に再現するように応答関数を構築しているため、未だ物理的に解釈できていないことがいくつか存在している。それらをここにまとめ、今後のさらなる研究の課題とする。

- サブピーク強度はセンサー毎にばらつきがあるようだ。しかし現在はエネルギー依存性はセンサー毎に変わらないと思っているので、 ^{55}Fe のデータを fitting することにより一意に決定することは可能である。今後としては、サブピークの発生原理をより詳細に調べることにより、このばらつきが何に起因しているかを調べる必要がある。
- コンスタント成分強度は、旧 XIS3 や XIS0 (京大のデータ) では理論値よりも高くなるので 1.59 倍かさ上げしていた。しかし熱真空試験のデータでは、 Normal mode では理論値で良く再現される。京大のシステムに特有のバックグラウンドがあるという可能性がまず思い浮かぶが、現状でははっきりとした結論は得られていない。また、P-sum mode では相変わらず理論値からのかさ上げが必要である。 Normal / P-sum mode で強度が変化するような素過程を見逃しているのかも知れない。

第 8 章

応答関数に必要な精度

応答関数の精度は良いに越したことはないが、現実問題としてデータを 100% 再現するような関数を構成することは不可能である。ではどの程度の精度が必要かと言うのは、実際の天体観測でデータを誤って認識しないことということで決定される。本章ではその精度の見積りについて述べる。なお、低エネルギー側で目立つ三角成分は京大のデータでは判断が難しいので今回の評価には加えていない。

8.1 精度見積りの手法

応答関数の精度は観測の統計的ゆらぎとのせめぎ合いで決まる。つまり、

$$\text{応答関数のずれによる不定性} < \text{統計的ゆらぎ}$$

である間は良いが、観測時間が長くなり統計的ゆらぎが十分小さくなってくると問題になってくる。そこで、ある統計量 (X 線イベント数) に対し上式の大小関係が保たれる応答関数の精度の最大値を見積もる。具体的な手法を以下に示す。

1. 各成分について、最も精度が要求されると思われるスペクトル形を想定し、 XIS でデータ取得した時に予想されるパルス波高値分布をシミュレートする。統計量は適度に何パターンか変化させる。

2. 上のシミュレーション結果に対し、わざとパラメータ (表 6.5参照) を変化させて構築した応答関数を用いてフィッティングする。想定したスペクトルのパラメータが 1σ エラーの範囲で一致していれば OK とする。最大どの程度の誤差まで許されるかを見積もる。

8.2 メインピーク

中心エネルギー (C1) については、すでに線形性が $\pm 0.2\%$ 程度の誤差で保たれていることがわかっている。今回はライン幅 (S1) についての見積りを行なった。

超新星残骸、銀河団などの観測により様々な輝線が観測される。これらの放射源は膨張している可能性があるので、ラインのドップラー拡がりがあることが予想される。もし S1 が精度良く決定していなかったなら、本来拡がったラインなのにそれを認識できなかったり、あるいは拡がっていないラインでも誤って拡がりを検出してしまうという状況になり、観測に強い制限を与えてしまうことになる。 S1 の精度はこの状況をいかに最小限に抑えられるかで決まる。

想定したモデル

想定したモデルは、星間吸収 ($N_{\rm H}$=10^{22}cm^{-2}) × {powerlaw (Γ=2) + Gaussian (6.7keV、σ=0eV)}。 Gaussian の等価幅 (Equivalent Width) は 1keV、 3keV の 2 パターンについて行なった。前者は典型的な熱的放射をする超新星残骸 (CasA[12] など)、後者は現在知られている天体の中で最も大きな等価幅で、 X 線反射星雲 SgrB2[14] を意識している。

結果

統計量 (カウント数) に対しパラメータを正しく認識したぎりぎりの精度を図 8.1に示す。つまり、得られたラインより左側の観測ではレスポンスの不定性による systematic なエラーは統計エラーより十分小さいが、右側になると systematic なエラーが無視できなくなる、と言うような図である。これによると、例えば Cas A を 20ks 観測する場合は、 0.5–1% 程度の精度、つまり、 5.9keV ($FWHM$ ≈130eV) では 0.65–1.3eV 程度の誤差に抑えなくてはならない。

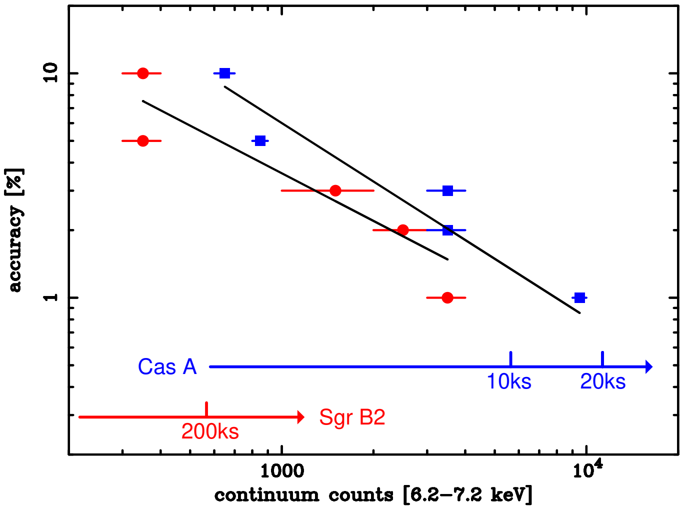


図 8.1: メインピーク幅 (S1) に必要な精度

横軸はライン付近 (6.7±0.5keV) の連続成分のカウント数。 EW=1keV (丸)、 3keV(四角) について simulate してある。下の矢印は、実際に Cas A (EW=1keV)、 Sgr B2(EW=3keV) をどの程度の時間観測したらどこに来るかを示してある。また、黒い線は powerlaw model で fitting した結果。それぞれのベキは、 −0.87 (EW=1keV)、 −0.61 (EW=3keV)。

8.3 サブピーク成分

サブピーク成分もメインピークと同様、その精度を誤るとライン構造の拡がりを誤認する原因となり、必要精度もこの制限で決まる。特に強度 (T2) の正確さが重要であるので、これについての見積りを行なった。

モデル

特性 X 線に関する精度であるので、メインピークの時と同じモデルを用いた。

結果

結果を図 8.2に示す。やはり Cas A を 20ks 観測するには、 2–3% 程度の精度が必要である。

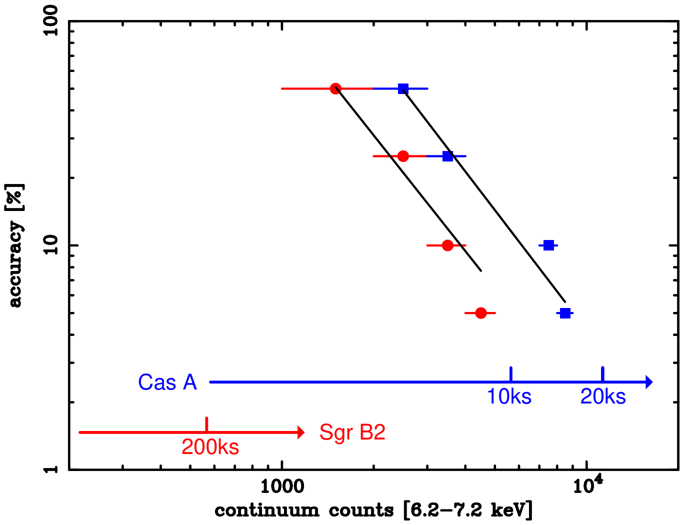


図 8.2: サブピーク強度 (T2) に必要な精度

横軸はライン付近 (6.7±0.5keV) の連続成分のカウント数。 EW=1keV (丸)、 3keV(四角) について simulate してある。黒い線は powerlaw model で fitting した結果。それぞれのベキは、 −1.78 (EW=1keV)、 −1.82 (EW=3keV)。

8.4 コンスタント成分

強度 (T4) の見積りを誤ると、高エネルギー側から流れてきたコンスタント成分をあたかも低エネルギー X 線のイベントと認識してしまい、天体のスペクトル型 (巾、吸収量など) の決定に大きな不定性を残してしまう。特に高エネルギー X 線の比率が大きい場合、つまり強い星間吸収を受けている時などで大きな問題になる。必要精度はこのスペクトル型を正確に認識できると言う条件で決定される。

モデル

用いたモデルは、星間吸収 × powerlaw (Γ=2)。吸収量は、原始星やセイファート II 型銀河の観測を意識して、大きめのもの ($N_{\rm H}=10^{23}{\rm cm}^{-2}$、 $3\times10^{22}{\rm cm}^{-2}$) に対して simulation した。

結果

結果は図 8.4に示す。上限のカウント数を 10^5counts (1couts ${\rm s}^{-1}\times$100ks) とすると、 10–20% 程度の精度が必要となる。

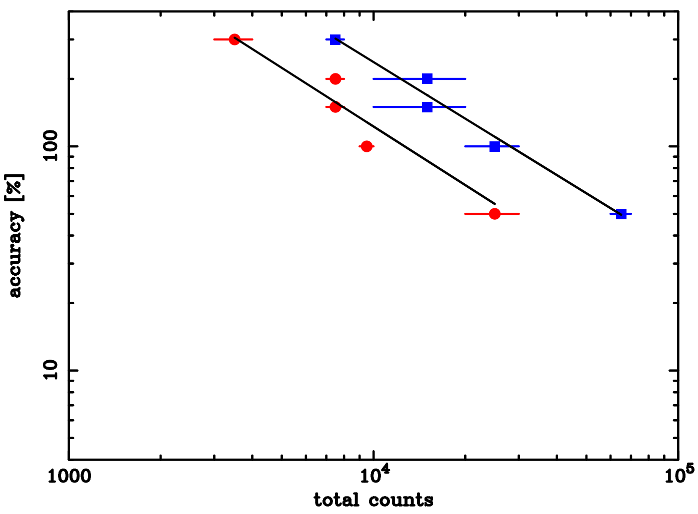


図 8.3: コンスタント成分強度に必要な精度

N_{H}=10^{23}cm^{-2} (丸)、 3×10^{22}cm^{-2} (四角)、について simulate してある。黒い線は power-law model で fitting した結果。それぞれのベキは、 -0.87 (N_{H}=10^{23}cm^{-2})、 -0.84 (N_{H}=3×10^{22}cm^{-2})。

8.5 Si エスケープ

Si エスケープは特に simulation は行なっていない。なぜなら、この成分自体は強度が弱いうえに、入射 X 線エネルギーに対して出力されるチャンネルが異なるので、全体としてなまされ目立った成分になることはないからである。

8.6 Si ライン

Si エスケープとは逆に、常に同じエネルギーに出力される Si ラインは連続 X 線を観測する際には問題になる。精度としては、この位置 (1.74keV) にラインが存在するのではないかと勘違いしない程度の強度 (T6) の精度が目標になる。

モデル

コンスタント成分と同様、高エネルギーの photon の比率が大きい時に目立ってくるので、コンスタント成分の時と同じモデルを用いた。

結果

結果は図 8.4を参照。やはり上限を 10^5counts とすると、 20–30% 程度の精度で十分である。

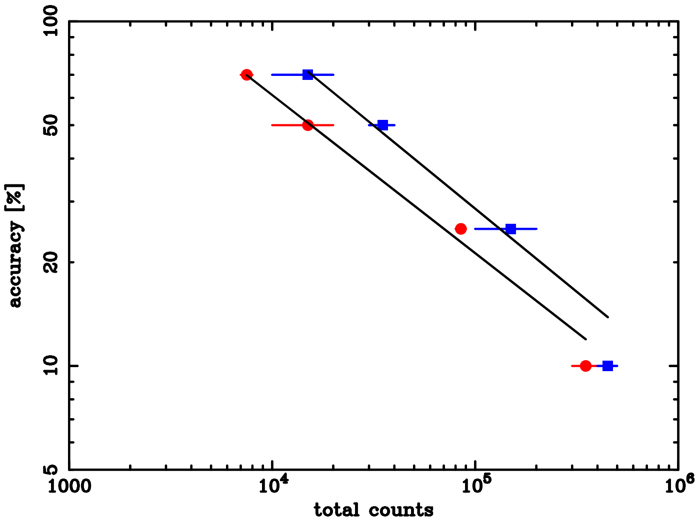


図 8.4: Si ライン強度に必要な精度

$N_H=10^{23}\mathrm{cm}^{-2}$ (丸)、$3\times10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$ (四角)、について simulate してある。黒い線は power-law model で fitting した結果。それぞれのベキは、-0.46 ($N_H=10^{23}\mathrm{cm}^{-2}$)、$-0.48$ ($N_H=3\times10^{22}\mathrm{cm}^{-2}$)。

8.7 まとめ

応答関数で目標とする精度 (これだけの精度でデータとあっているなら実際の観測には影響がないという閾値) と現状での精度を表 8.1に示す。現状での精度は旧 XIS3 のデータを用いて次のように定義した。

$$\left| \frac{\text{データ}\,fitting\text{による強度} - \text{モデルの強度}}{\text{データ}\,fitting\text{による強度}} \right| \tag{8.1}$$

データ点とモデルによる最大のエラーと典型的なエラー (8.1式の平均値) の両方を示す。

表 8.1: 目標とする精度のまとめ

成分	S1	T2	T4	T6
精度の目標	0.5–1%	2–3%	10–20%	20–30%
現状での精度 (典型値)	2%	10%	30%	10%
現状での精度 (最大)	5%(Se)	20%(Zn)	60%(Al)	20%(Fe)
参照図	図 6.5	図 6.11	図 6.16	図 6.20

S1, T2

特に Zn, Se などの高エネルギー側で低い精度である。しかしこれらのデータのメインピーク付近にはチェンバーによる散乱成分が比較的多く含まれている可能性があるので ([8] 参照)、実際はもう少し良い精度が達成されているかも知れない。また、実観測でも 8 keV 以上に強いライン放射をするような天体はなく、この付近の精度が問題になることはないと考えられる。

典型値でも、現状の精度では若干目標に足りない。今後より目標値に近付くように修正していかねばならない。また、観測を視野に入れた場合特に精度が必要となるのは鉄輝線付近であるが、Fe (6.398 keV) での精度は 1%(S1)、4%(T2) 程度であるので、目標値のある程度近くまでは達成されている。

T4

ライン成分に注目しなくてはならない S1, T2 と違い、特定のエネルギーで極端に精度が悪くても全体での精度がそれなりに良ければ問題になることはない。現状では 30% 程度で、目標の数値までは若干足りない。今後の修正が必要であろう。

T6

どのエネルギーに対しても現状では全く問題ない。

第 9 章

経年変化への対応

CCD は宇宙放射線により損傷を受ける。これにより生じた格子欠陥が電荷トラップとなり、CTI の悪化や暗電流の増大を招く。特に CTI の悪化は 1999 年 7 月に打ち上げられた Chandra 衛星の CCD カメラ (ACIS) に大きな影響を及ぼし、予期せぬゲインの変動やエネルギー分解能の劣化を引き起こしている。放射線帯を通過する Chandra の軌道 (長楕円軌道) が問題であるとも言われており、もしそうなら放射線帯より低い軌道を地球周回する ASTRO-E ではさほど問題にならないかも知れない (実際同じ地球周回軌道である ASCA では Chandra ほどの劇的な劣化は見られていない)。また、 ASCA の経験を元に、 XIS では CTI 劣化を防ぐ様々な工夫を施している (2.3.3節参照)。しかし我々は様々な状況を見越して、時々刻々対処出来るようにしておかなければならない。

本章では CTI の変化に伴う応答関数の変化 (特にゲイン・エネルギー分解能) への対応のための機上キャリブレーション計画、補正法について述べる。

9.1 CTI 増加に伴うゲイン変動

ゲイン変動は、 [10] で ASCA SIS において理論的・観測的に良く調べられている。 XIS でもその技術を用いる。

CTI は、 CCD 内の電荷トラップにより転送電荷が捕獲されることが原因だと言われている。あるトラップが時刻 t=0 に電荷を捕獲した場合、時刻 t までに電荷を放出する確率 $p(t)$ は、

$$p(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{9.1}$$

と表される。ここで τ は電荷放出の時定数である。

あるピクセルに注目する。時刻 t=0 に全てのトラップが埋まり、 a 回の転送の後 N 個の電荷を持つ charge packet が転送されてきたとする。転送クロック時間を t_C、 charge packet の体積を V_P、トラップの密度を ρ_t とすると、 charge packet が出会うトラップの数 N_t は、

$$N_t = \rho_t V_P p(at_C) = \rho_t V_P (1 - e^{-\frac{at_C}{\tau}}) \tag{9.2}$$

と計算される。これらに転送電荷の一部が取り込まれるわけだが、次転送までの時間に取り込まれた電荷が再放出されたら電荷は失われないことになるので、一回の転送で失われる電荷量 ΔN、 CTI は以下のように計算される。

$$\Delta N = \rho_t V_P (1 - e^{-\frac{at_C}{\tau}}) e^{-\frac{at_C}{\tau}} \tag{9.3}$$

$$\mathrm{CTI} = \frac{\Delta N}{N} \ [1/\mathrm{transfer}] \tag{9.4}$$

結局、 CTI はトラップ密度 (ρ_t) に比例して増加すると予想される。

XIS や SIS の用いている frame transfer 方式では、電荷転送は、 (1) 受光領域 → 蓄積領域への縦転送、 (2) 蓄積領域での縦転送、 (3) Serial register での横転送、の 3 種類がある。それぞれにおける転送回数 /CTI を、 n_v/C_v、 n_{st}/C_{st}、 n_h/C_h とすると、最終的に出力される電荷量は次のように計算される。

$$\begin{aligned} N' &= N(1-C_v)^{n_v}(1-C_{st})^{n_{st}}(1-C_h)^{n_h} \\ &\simeq N(1-n_vC_v)(1-n_{st}C_{st})(1-n_hC_h) \end{aligned} \tag{9.5}$$

ここで、 $C \ll 1$ を用いた。

9.2 CTI 増加に伴うエネルギー分解能劣化

CTI によって取り残される電荷のゆらぎは、転送雑音としてエネルギー分解能に影響を及ぼす。地上較正試験時では CTI は問題にならないほど小さいので問題ないとしエネルギー分解能には考慮に入れていなかったが、機上では大きな問題になる。

転送 1 回あたりに charge packet に与えられる転送雑音による電荷のゆらぎの二乗平均を N_1^2 とすると、これはトラップが電荷を保持しているか否かの二項分布として与えられ、

$$N_1^2 = \rho_t V_P p(1-p) \tag{9.6}$$

となる。 n 回転送が行なわれると、転送雑音の合計 N_{CTI}^2 は、

$$N_{CTI}^2 = 2nN_1^2 = 2n\rho_t V_P p(1-p) \tag{9.7}$$

となる。ここで $2n$ になるのは、 charge packet は前の packet から受け取る転送雑音と自分自身の転送雑音を受けるためである。 charge packet の体積 (V_P) は入射 X 線のエネルギー (E_0) に比例していると考えられるので、結局、転送雑音の二乗は、転送回数 (n)、トラップ密度 (ρ_t)、入射 X 線エネルギー (E_0) に比例して増えると予想される。

転送雑音を考慮したエネルギー分解能は以下の式で与えられる。

$$FWHM = 2.35\sqrt{N_{read}^2 + W_{Si}FE_0 + N'E_0^2 + N_{CTI}^2} \tag{9.8}$$

しかし実際に Chandra の機上キャリブレーションにより報告されている状況を見ると (図 9.1)、エネルギー分解能は転送回数の 1/2 乗よりも大きな依存性があるように見受けられる。考えられる解釈としてトラップ密度に勾配があるなどが挙げられるが、現状では確かな解釈は得られていない。現実としては、エネルギー分解能悪化のこれらのパラメータの依存性は、機上較正試験の結果を元に決定していかなければならない。

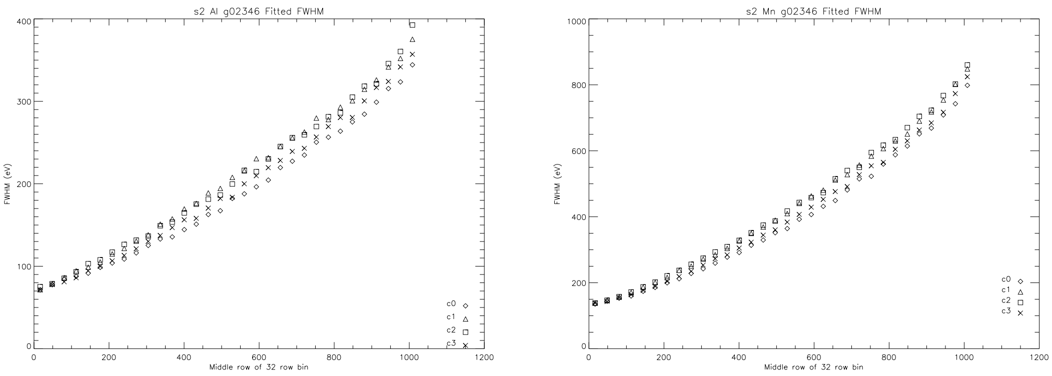


図 9.1: Chandra ACIS で報告されているエネルギー分解能 vs 転送回数関係
横軸が縦転送回数、縦軸がエネルギー分解能を表す。
左: Al、右: Mn のデータ。印はセンサーの違いを表す。

9.3 機上較正計画

9.5式、 9.8式の経年変化を導出するための機上キャリブレーション計画について述べる。

CTI に関するパラメータは、トラップ密度 (ρ_t)、転送回数 (n)、 X 線エネルギー (E_0) の 3 つである。 ρ_t は時間とともに変化するので、打ち上げからの経過時間 (t) と同等だと思って良い。これらの依存性を調べられるようなキャリブレーション計画を作らなければならない。具体的には、

- ターゲット
  E_0 の依存性を知るために、様々なエネルギーの特性 X 線を放出してることが望ましい。しかもライン中心のシフトを十分認識できる程度に明るいものに絞られる。 SIS でも用いていた超新星残骸 Cas A[12] が適当であろう。

- ポインティング
  n の依存性を調べるために、同時期、同条件の観測をポインティングの位置を変えて行なう必要がある。 3 種類の転送により CTI が変わる可能性があるため、図 9.2のような 3 点の観測を行なう。

- 観測時期
  以上の観測を定期的に行ない、 CTI やそれに伴うゲイン変動やエネルギー分解能劣化の経年変化を調べる。

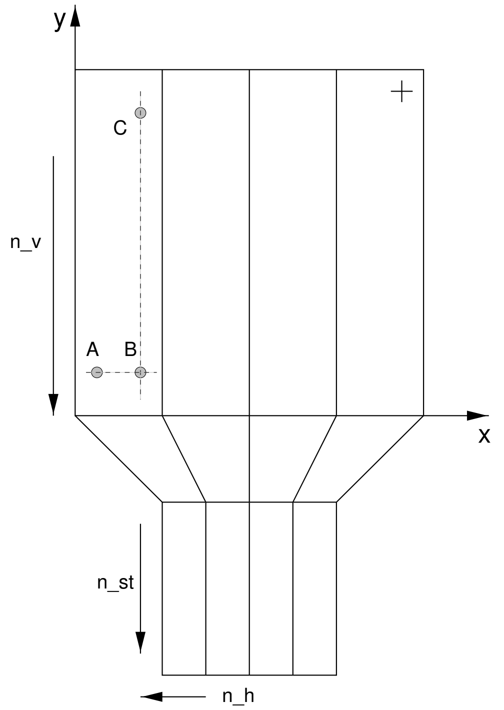


図 9.2: CTI 増加量を較正するためのポインティング
+ はキャリブレーションソースの位置を表す。

9.4 補正方法

実際に得られたキャリブレーションデータからどのように補正するかを以下に述べる。

ゲイン補正

図 9.2の A,B,C 3 ポインティングの座標をそれぞれ $(\mathrm{x}_1,\ \mathrm{y}_1)$、$(\mathrm{x}_2,\ \mathrm{y}_1)$、$(\mathrm{x}_2,\ \mathrm{y}_2)$、観測時点での 3 種類の CTI を $\mathrm{C}_v(t_{obs})$、$\mathrm{C}_{st}(t_{obs})$、$\mathrm{C}_h(t_{obs})$ とする (打ち上げ時を t=0 とする)。あるエネルギー E_0 の特性 X 線に注目すると、それに対する各ポインティングでの出力エネルギーは以下のように計算される。

$$
\begin{aligned}
E_A &= E_0(1 - y_1 C_v(t_{obs}))(1 - n_{st} C_{st}(t_{obs}))(1 - x_1 C_h(t_{obs})) \\
E_B &= E_0(1 - y_1 C_v(t_{obs}))(1 - n_{st} C_{st}(t_{obs}))(1 - x_2 C_h(t_{obs})) \\
E_C &= E_0(1 - y_2 C_v(t_{obs}))(1 - n_{st} C_{st}(t_{obs}))(1 - x_2 C_h(t_{obs}))
\end{aligned}
\tag{9.9}
$$

ここで n_{st} は蓄積領域での縦転送の回数 (=1024) である。これらを連立して解くことにより、$\mathrm{C}_v(\mathrm{t}_{obs})$、$\mathrm{C}_{st}(\mathrm{t}_{obs})$、$\mathrm{C}_h(\mathrm{t}_{obs})$ が求まる。放射線損傷を受けたピクセルは経過時間に比例して増加すると思われるので、CTI も従って時間の一次関数になると予想される。打ち上げ時での CTI は 0 であると仮定すると、時刻 t での CTI は、

$$
C_{\{h,v,st\}}(t) = \frac{t}{t_{obs}} C_{\{h,v,st\}}(t_{obs}) \tag{9.10}
$$

と近似的に求められる。これを 9.5式に代入してゲインを補正する。

エネルギー分解能補正

$N_0^2(E_0) = N_{read}^2 + W_{Si}FE_0 + N'E_0^2$ が時間に対し変化しないと仮定する (つまり表 7.3、7.4 で求めた値を用いる)。ある条件 (観測時期、転送回数、入射 X 線エネルギー) でデータを取得し、 fitting して導出したエネルギー分解能を ΔE とすると、その時点での N_{CTI}^2 の大きさは以下のように求められる。

$$N_{CTI}^2(t_{obs}, E_0, n_v, n_h, n_{st}) = (\frac{\Delta E}{2.35})^2 - N_0^2(E_0) \tag{9.11}$$

これをなるべくたくさんの観測条件で求め、それぞれがどのような依存性になるかを調べなければならない。

E_0 依存性に関しては、 CasA を観測に用いれば同時に 3,4 点のエネルギーに対してデータ取得が可能なので、これで対応出来る。転送回数依存性は、図 9.2の A-B、 B-C 間で出来るだけたくさんの観測を行なうことで対応できる。実際の観測スケジュールなどを考えるとそれほど大量の観測時間は期待できないが、最低でも縦 · 横方向に 3 点程度の観測は欲しい。また観測時間依存性は、キャリブレーションソースのデータにより詳しく調べられる。

ユーザーには応答関数作成ソフトを配布し、観測時点での補正量を含んだ応答関数を各自で作成してもらう予定である。その要領は以下のようになる。

1. 読み出し口に最も近い付近 (図 9.2の A 付近) では以上の劣化の影響は小さいと判断し、ここでのキャリブレーションデータを用いて基本となる応答関数の修正、再構築を行なう。

2. 機上キャリブレーション結果を反映したファイルを用意する。観測の時間、座標から予想されるゲイン変動、エネルギー分解能悪化量を引き出せるようにする。

3. まず、セグメント毎のゲインを補正し 1ch = 3.65 eV にする際に、ゲイン変動量を読み込み正しい値を出力させる。

4. 2. で用意した基本応答関数に、エネルギー分解能の悪化量をかけ合わせ、新しい応答関数を作成する。これを用いてスペクトルフィッティングを行なう。

第 10 章

まとめと今後の課題

本論文は ASTRO-E 衛星搭載 X 線 CCD カメラ、 XIS の応答関数の構築について述べたものである。以下に結果をまとめる。

- 地上較正試験において、様々な単色 X 線に対する XIS のデータを取得した。
- 上のデータを元に XIS の応答関数を詳細に調べた。 CCD 内部での物理過程の違いに応じて応答関数をメインピーク、サブピーク、三角成分、コンスタント成分、 Si エスケープ、 Si ラインの 6 成分に分割し、それぞれのエネルギー依存性をデータ、シミュレーションを用いて詳しく調べた。これにより、これまでにない精度の応答関数が構築された。
- 動作モード (Normal/P-sum mode)、センサー毎による応答関数の相違について調べた。それを元に、衛星搭載品 4 台 (XIS0–3) の Normal/P-sum mode での応答関数を個別に構築した。
- 現状での応答関数の精度が実際の観測にどれくらいの影響を与えるかを調べた。
- 衛星打ち上げ後の宇宙放射線による CCD 劣化と、それによる応答関数の変化への対応策について考察した。

今後の課題と、衛星打ち上げ後に行なわなくてはならない作業について以下にまとめる。

- 構築された応答関数はこれまでにない精度ではあるが、 8章でも述べたように要求される精度はまだまだ高い。今後は機上での観測データを元に応答関数を微調整し、より精度の高いものを構築していかねばならない。
- サブピーク成分やコンスタント成分の強度、あるいは Normal/P-sum mode によるエネルギー分解能の相違など、物理的解釈がなされていない事項がいくつかある。これらについてより詳細に考察し、より精度の良いモデルを構築していきたい。
- 打ち上げ後は、機上での CCD の劣化状況を確認しながらそれにすばやく対応し、時々刻々新しい応答関数を提供していく。

謝辞

本修士論文作成にあたり、多くの方々の御指導、御協力を賜わりました。ここに深く感謝したいと思います。

今回の研究が京都大学宇宙線研究室の皆様の御協力の上に成り立っていることは言うまでもありません。
指導教官の小山勝二教授には実験、データ解析のみならず、物理、天文にいたるまで様々な助言を頂きました。ここに深く感謝します。愛媛大学の粟木久光助教授には、京都大学時代に応答関数作成の直属の上司として本当に本当に多大なる御尽力を頂きました。応答関数の基本からデータ解析法、シミュレーション方法に至るまで、知識の少ない私を根気良く指導して頂きました。またこの論文の校正でもお世話になりました。鶴剛助手には、学部生の頃の実験から指導して頂きました。また発想力の乏しい私に考える機会を幾度となく与えて下さいました。本論文の校正の際にも御協力して頂きました。

今回の XIS の較正試験は戦略研究によりサポートして頂き初めて可能になったものです。この研究の代表者である大阪大学の常深博教授に深く感謝します。また大阪大学の方々には同じ XIS グループとして支えて頂きました。北本俊二助教授、林田清助教授、宮田恵美助手には、XIS の実験、解析において多大なる御尽力を頂きました。片山晴善さんには阪大のデータやその解析法を教えて頂き、また結果の絵などをたくさん頂きました。荘保信さんにもデータをたくさん頂きました。また衛星の熱真空試験では QL 解析の方法を懇切丁寧に教えて頂きました。
宇宙科学研究所の方にもお世話になりました。堂谷忠靖助手には熱真空試験の際に親切に指導して頂きました。尾崎正伸助手には応答関数作成ソフトを作って頂きました。また熱真空試験の時も要領の得ない私を根気良く指導して頂きました。

今やアメリカの坪井陽子さんには、X 線による原始星観測について詳しく教えて頂きました。NASDA の冨田洋さんには超新星残骸について興味深い話をたくさん聞かせて頂きました。坂野正明さんには XIS 解析ソフトを多数作って頂きました。また研究室で煮詰まっている私を食事に誘ってはげましてくれました。西内満美子さんには、応答関数作成の先輩としてその基本やこれまでの結果を優しく教えて頂きました。またマゼラン雲観測部隊のボスとして部下の私を指導して頂きました。濱口健二さんには、実験システムの構築をして頂きその使用法を教えて頂きました。また原始星観測などで様々な discussion をして頂きました。村上弘志さんには、実験の手法からデータ解析の基本、XIS の基本に至るまで数え切れないほどのアドバイスを頂きました。また本論文で用いている Sgr B2 についても詳しく教えて頂きました。横川淳さんには、入学当初のまだ右も左もわからない私にデータ解析の手法を丁寧に教えて頂き、パルサー論文作成や観測プロポーザル作成の際に計り知れないほどの御協力を頂きました。同期の辻本匡弘さんには、データ解析から研究会発表、さらには本論文作成に当たって幾度となく相談にのって頂きました。同室の馬場彩さんには、私の気晴らしのくだらない話につき合って頂きました。河野誠さんには、年末の alpha のバー

ジョンアップの際に遅くまでつき合って頂きました。

宇宙線研究室の X 線グループ以外の方にも大変お世話になりました。舞原俊憲教授には、講義で様々な知識を頂きました。岩室史英助手には、すばる観測の興味深い話を聞かせて頂きました。田沢雄二助手には、書類作成などでお世話になりました。後藤美和さんには最近太り気味の私をたしなめて頂きました。本原顕太郎さんには車を出して遠くまで食事に連れていって頂きました。同期の田口智之さん、秦 隆志さんとは共に励ましあって修士論文を作成しました。原島隆さんには食事につき合ってもらったりしました。秘書の中小路有香さんには各種申請などをやって頂きました。

最後に、全ての ASTRO-E チームの方々に感謝します。ASTRO-E は打ち上げ失敗という本当に残念な結果に終ってしまいましたが、来たるべき ASTRO-E2 の打ち上げの際にこの修士論文の経験が必ずや実を結ぶことでしょう。

今西 健介

参考文献

[1] 片山 和典, 修士論文 (大阪大学 1999)

[2] 片山 晴善, 修士論文 (大阪大学 2000)

[3] 合志陽一・佐藤公隆編 「エネルギー分散型 X 線分析 半導体検出器の使い方」学会出版センター

[4] 幸村 孝由, 修士論文 (大阪大学 1999)

[5] 小谷 太郎, 修士論文 (東京大学 1993)

[6] 荘保 信, 修士論文 (大阪大学 2000)

[7] 西内 満美子, 修士論文 (京都大学 1998)

[8] 濱口 健二, 修士論文 (京都大学 1998)

[9] 村上 弘志, 修士論文 (京都大学 1999)

[10] 山下 朗子, 修士論文 (東京大学 1995)

[11] Fraser, G.W., Abbey, A.F., Holland, A., McCarthy, K., Owens, A., & Wells, A. 1994, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 350, 368

[12] Holt, S.S., Gotthelf, E.V., Tsunemi, H., Negoro, H. 1994, PASJ, 46, L151

[13] Janesick, J., Elliott, T., Collins, S., Daud, T., Campbell, D., Dingizian, A., & Garmire, G. 1986, Proc. SPIE, 597, 364

[14] Murakami, H., Koyama, K., Sakano, M., Tsujimoto, M., & Maeda, Y. 2000, ApJ, in press

[15] Prigozhin, G.Y., Rasmussen, A., Bautz, M., Ricker, G.R, 1998, Proc. SPIE, 3444, 267

[16] Sze, S.M. 「半導体デバイス」 産業図書 1987

[17] 宇宙科学研究所 SES データセンター 「科学衛星 ASTRO-E 中間報告書 (第 2 分冊)」(1998)

[18] Science Instruments (SI) Calibration Report for the AXAF CCD Imaging Spectrometer (ACIS) Ver. 0.9