

Astro-E 搭載 CCD カメラ (XIS)
の応答関数の決定

西内 満美子

京都大学院 理学研究科 物理学第二教室 宇宙線研究室

1998 年 2 月 2 日

概要

日本で5番目のX線天文学衛星 Astro-E は、宇宙論的な遠距離にある天体をX線で詳しく観測したり、宇宙の高温プラズマのX線分光観測を高い精度と広いエネルギー範囲で行なうことなどを目的として、2000年はじめに打ち上げを予定されている。

この Astro-E 衛星は3種類の異なった検出器を搭載する。12eV@6.4keV もの高エネルギー分解能を持つカロリメータ XRS、 $\sim 700\text{keV}$ までの広いエネルギー範囲をカバーすることのできる高エネルギー X 線検出器 HXD、そして X 線を分光かつ同時に撮像可能な X 線 CCD カメラ XIS である。

我々京大 X 線グループはこの XIS 検出器の高エネルギー側 (2-12keV) のキャリブレーションを担当している。XIS は全部で4台のカメラよりなり、それぞれのカメラが CCD 素子を1つずつ持つ。CCD 素子は、蓄積領域を持つフレーム転送型で受光領域が25mm 四方。サイズが $24\mu\text{m}$ 四方のピクセルが、 1024×1024 個並んだ構造をしている。

去年10月、この XIS の Evaluation Model に対して、異なるエネルギーの6種の2次 X 線を照射することによりデータを取得した。我々の最終目的は XIS の Flight Model の応答関数作成である。それに先立ち、私は、この Evaluation Model から得られたデータを使用し、CCD の特性を調査するとともに、今年の秋の Flight Model 到着時に、限られた時間内で効率良く応答関数作成に望めるように、その手段の確立をおこなった。

具体的には 現在あがっている ASCA 衛星上の CCD カメラで採用されている event 検出方式を用いて、応答関数作成に必要なパラメータ、すなわち、エネルギー分解能、ゲイン、グレード分岐比、エスケープイベント、単色 X 線を当てた場合に CCD で得られるスペクトルの低エネルギー側のテール成分の起源について調査し、X 線検出素子としての CCD の性能を詳しく調べた。

もくじ

1	X線天文学と検出器	15
1.1	いままでの衛星	15
1.1.1	Einstein	15
1.1.2	ぎんが	16
1.1.3	ROSAT	16
1.1.4	ASCA	16
1.2	Astro-E 衛星	17
1.2.1	搭載機器と概略	17
1.2.2	Astro-E に期待される物理	17
2	X線検出器としてのCCD	19
2.1	動作原理	19
2.1.1	概要	19
2.1.2	駆動方式	19
2.1.3	電荷転送方式	22
2.2	性能	22
2.2.1	ノイズ	22
2.2.2	エネルギー・チャンネル線形関係	27
2.2.3	エネルギー分解能	27
2.2.4	検出(量子)効率	27
2.2.5	パイルアップ	28
3	XIS の仕様	29
3.1	ハードウェア	29
3.1.1	ハウジング	29
3.1.2	CCD チップ	30
3.1.3	エレクトロニクス	33
3.2	ソフトウェア	36
3.2.1	モード	36

3.2.2	データの定義（波高信号処理の方法）	39
3.2.3	ピクセル処理	40
4	単色 X 線に対する CCD のスペクトル	41
4.1	XIS で得られるデータの形態	41
4.2	イベント検出	41
4.3	CCD 内部での電子雲のふるまい	46
4.3.1	空乏層	46
4.3.2	中性領域	49
4.3.3	部分吸収	52
4.4	エスケープイベントとシリコン蛍光 X 線イベント	55
4.4.1	エスケープイベントの発生機構	55
4.4.2	シリコン蛍光 X 線イベントの発生機構	55
5	性能評価	59
5.1	性能評価の最終目標	59
5.2	性能評価システム	59
5.2.1	蛍光二次 X 線発生系	60
5.2.2	データ取得系	61
5.3	行なわれた実験と取得されたデータ	61
5.3.1	京大のシステムにおいて行なわれた実験	61
5.4	温度依存性	64
5.4.1	videocard の温度にたいする依存性	64
5.4.2	CCD チップの温度に対する依存性	66
5.4.3	まとめ	67
5.5	TEC 電圧の変化によるノイズ	67
5.6	ASCA 方式による解析	69
5.6.1	スプリット閾値の決定	71
5.6.2	ゲイン	72
5.6.3	エネルギー分解能	79
5.6.4	グレードゼロのスペクトルに関するモデルの決定	79
5.6.5	エスケープイベントと、シリコン蛍光 X 線イベント	90
5.7	グレード 2 イベントに対する非対称性の問題	96
5.8	量子効率	98
5.8.1	実験に用いた PC について	98
5.8.2	窓材の膜厚測定	99
5.8.3	量子効率実験	101
5.8.4	検出効率の増加のために	103

5.9 X線の強度変化に対する CCD の応答の変化	104
6 結論	109
6.1 まとめ	109
6.2 今後の課題	109

図一覧

2.1	3相電極 CCD の電荷転送	20
2.2	バーチャルフェイズ CCD の電荷転送	21
2.3	2相電極 CCD の電荷転送	21
2.4	CCD の転送方式	23
3.1	XIS センサー構成図	30
3.2	XIS センサーボンネット部構成図	30
3.3	XIS body の全体図	31
3.4	CCID17 チップ	32
3.5	Chip の読みだしの様子	33
3.6	XIS 検出器	34
3.7	Astro-E XIS のブロックダイアグラム	37
4.1	^{55}Fe を照射した場合の CCD でとられた生データのスペクトル (但しダークフレームは引かれている)。横軸：チャンネル (波高値)、縦軸：カウント数 (頻度)	42
4.2	グレードによるイベント検出法	44
4.3	Mn を当てた時のスペクトルの様子。左の列の上からグレード 0、グレード 1、グレード 2、グレード 3、右の列の上からグレード 4、グレード 5、グレード 6、グレード 7 に対応する。MnK α 、MnK β 、MnK α エスケープピーク、MnK β エスケープピーク、SiK α のラインが見えている。	45
4.4	MnK α MnK β のスペクトル。低エネルギー側にテールをひいているのがわかる。(注意：チャンネルは、解析ソフトの都合上 1000 チャンネルのオフセットがついてる。)	46
4.5	Si および GaAs における比抵抗と不純物濃度の関係	48
4.6	Si および GaAs における、キャリアの移動度と拡散係数の不純物濃度依存性	49
4.7	空乏層の深さが $50\mu\text{m}$ とした時の電極の位置における電荷の広がり (2σ 半径)。横軸は X 線が吸収された深さ (μm)、縦軸は 2σ 半径 (μm)。ただし、 $N_a=10^{12}\text{cm}^{-3}$ 、 $D=35\text{cm}^2\text{s}^{-1}$	50

4.8	電極の下の不感層で吸収される「部分吸収」のイベント。MIT の ACIS Calibration report より抜粋。	53
4.9	1700eV のエネルギーの X 線が不感層付近で吸収された場合を作るスペクトル。Si K edge 以下のエネルギーの X 線は同様なスペクトルを形成する。MIT の ACIS Calibration report より抜粋。	54
4.10	5414eV のエネルギーの X 線が不感層で部分吸収を受けた場合を作るスペクトル。一次電子雲の大きさが不感層厚に比べて無視できなくなるような高エネルギー X 線は、同様なスペクトルを形成する。MIT の ACIS Calibration report より抜粋。	54
4.11	エスケープイベントの発生機構（小谷修士論文 [1] より抜粋）	56
4.12	単色 X 線に対するスペクトル	57
5.1	京大における性能評価システム	62
5.2	データの流れ図	63
5.3	MnK α のピークを、videocard の温度の関数としてプロット。横軸は videocard の温度 ($^{\circ}$ C) 縦軸は MnK α のピークチャンネル	65
5.4	Mn K α ピーク、Mn K β ピーク、Mn K α エスケープピーク、Mn K β エスケープピーク、Si K α ピークを使ってエネルギーチャンネル関係を求め、 $\text{channel} = \text{offset} + \text{slope} \times \text{Energy}$ でフィット。その傾きとオフセットの様子を videocard の温度の関数としてプロット。横軸は videocard の温度 ($^{\circ}$ C) 縦軸上段 オフセット (ADU) 縦軸下段 傾き	65
5.5	ダークカレントの温度依存性。横軸：CCD の温度 ($^{\circ}$ C)、縦軸：ダークカレント (ADU)	66
5.6	読みだしノイズの温度依存性。横軸：CCD の温度 ($^{\circ}$ C)、縦軸：ダークカレント (ADU)。それぞれ \square が、Active 領域のゼロレベルをシングルガウシアンでフィットした際のガウシアンの幅の値 (1 幅) をプロットしたもの、 \triangle が、HOC 領域のゼロレベルを同じくシングルガウシアンでフィットした際の幅の値をプロットしたもの。	67
5.7	MnK α のピークの位置と σ の値を CCD の温度の関数としてプロット。横軸は CCD の温度 ($^{\circ}$ C)。縦軸上段は MnK α のピークチャンネル (ADU)、下段は MnK α ピークの σ の値 (ADU)	68
5.8	TEC 電圧。横軸：時間 (sec)、縦軸：電圧 (V)	70
5.9	CCD の温度。横軸：時間 (sec)、縦軸：温度 ($^{\circ}$ C)	70
5.10	heat sink の温度、横軸：時間 (sec)、縦軸：温度 ($^{\circ}$ C)	70
5.11	videocard の温度、横軸：時間 (sec)、縦軸：温度 ($^{\circ}$ C)	70
5.12	active 領域のゼロレベルの様子、横軸：フレーム数、縦軸：チャンネル (ADU)	70
5.13	HOC 領域のゼロレベルの様子、横軸：フレーム数、縦軸：チャンネル (ADU)	70

5.14	HOC 領域のゼロレベルの幅、横軸：フレーム数、縦軸：チャンネル (ADU) .	70
5.15	HOC 領域を Y 軸方向に射影、横軸：フレーム数、縦軸：チャンネル (ADU) .	70
5.16	スプリット閾値を変えた時の MnK α ピークのカウント数と σ の関係：グレード 0	72
5.17	スプリット閾値を変えた時の MnK α ピークの位置の変化：グレード 0	72
5.18	スプリット閾値を変えた時の MnK α ピークのカウント数と σ の関係：グレード 2	72
5.19	スプリット閾値を変えた時の MnK α ピークの位置の変化：グレード 2	72
5.20	スプリット閾値を変えた時の MnK α ピークのカウント数と σ の関係：グレード 3	73
5.21	スプリット閾値を変えた時の MnK α ピークの位置の変化：グレード 3	73
5.22	スプリット閾値を変えた時の MnK α ピークのカウント数と σ の関係：グレード 4	73
5.23	スプリット閾値を変えた時の MnK α ピークの位置の変化：グレード 4	73
5.24	グレード毎のピークチャンネル (2 次 X 線は Cl)	75
5.25	グレード毎のピークチャンネル (2 次 X 線は Ti)	75
5.26	グレード毎のピークチャンネル (2 次 X 線は Mn)	75
5.27	グレード毎のピークチャンネル (2 次 X 線は Fe)	75
5.28	グレード毎のピークチャンネル (2 次 X 線は Ni)	75
5.29	グレード毎のピークチャンネル (2 次 X 線は Zn)	75
5.30	シングルイベントに対するゲイン。横軸は入射 X 線のエネルギー (keV)、縦軸は出力波高 (チャンネル)。ベストフィットの直線は $channel = 14.8 + 253.6 \times E(keV)$ で表せる。但し、今は videocard の温度によるゲイン変化の補正は行なっていない。	76
5.31	グレード 6 イベントに対するゲイン。横軸は入射 X 線のエネルギー (keV)、縦軸は出力波高 (チャンネル)。ベストフィットの直線は $channel = 16.7 + 254.8 \times E(keV)$ で表せる。但し、videocard の温度によるゲイン変化の補正は行なっていない。	77
5.32	シングルピクセルイベントのエネルギーチャンネル関係の再現性。横軸は入射 X 線のエネルギー (keV)、縦軸は出力波高 (チャンネル)。但し、videocard の温度によるゲイン変化の補正は行なっていない。上段は 1 次関数によってエネルギーチャンネル関係を再現した。下段は 2 次関数を使って再現した結果。2 次関数を用いることで、エネルギーチャンネル関係の再現性は向上する。	78

5.33	エネルギー分解能 (グレード 0 イベント)。横軸：入射 X 線のエネルギー (eV)、上部縦軸：エネルギー分解能 (FWHM (eV))、下部縦軸：ベストフィットの曲線からのずれ。但し、videocard の温度によるゲイン変化の補正は行っていない。	80
5.34	数え落された電荷の量が、右から順番に (0eV-7eV)、(7eV-10eV)、(10eV-13eV)... のスペクトルを重ねたもの (注意：チャンネルは、解析ソフトの都合上、1000 チャンネルのオフセットがついている。)	82
5.35	数え落された電荷の量毎にわけたスペクトルの差にガウシアンをフィットしてやり、そのピークチャンネルと、ガウシアンのカウント数の関係をプロットしたもの。それぞれの点は、右側から数え落された電荷の量が (0eV-7eV), (7eV-10eV),(10eV-13eV),... の順にならんでいる。	83
5.36	数え落された電荷の量毎にわけたスペクトルの差にガウシアンをフィットしてやり、そのピークチャンネルと、ガウシアン幅の関係をプロットしたもの。それぞれの点は、右側から数え落された電荷の量が (0eV-7eV), (7eV-10eV),(10eV-13eV),... の順にならんでいる。	84
5.37	電荷の雲の分布の様子	85
5.38	スプリット毎にわけたスペクトルのラインの頂点に対して、ラインのカウント数をプロットしたもの (Mn K α にたいして) 実線: 数値計算結果、 \oplus : データ	86
5.39	MnK α ラインに対してダブルガウシアンモデルをフィットした様子。Reduced- $\chi^2 = 1.584$ (d.o.f.=214)	87
5.40	大きなガウシアンと小さなガウシアンのカウント数の比を入射 X 線のエネルギーの関数としてプロットしたもの。横軸：入射 X 線のエネルギー (keV)、縦軸：小さなガウシアンのカウント数 / 大きなガウシアンのカウント数	88
5.41	コンスタント成分と大きなガウシアンのカウント数の比を入射 X 線のエネルギーの関数としてプロットしたもの。横軸：入射 X 線のエネルギー (keV)、縦軸：コンスタント成分のカウント数 / 大きなガウシアンのカウント数	89
5.42	MnK α ラインに対して、exponential モデルをフィットした。Reduced- $\chi^2 = 1.206$ (d.o.f.=214)	90
5.43	シリコンの蛍光 X 線発生に対するモデル	93
5.44	エスケープイベントの発生率のデータと、数値計算による結果の比較	94
5.45	シリコン蛍光 X 線イベントの発生率のデータと、数値計算による結果の比較	95
5.46	グレード 2 イベント。図の下方向が CCD の読みだし口。	96
5.47	グレード 2 問題、CCD を縦方向に分割した場合	98
5.48	98
5.49	グレード 2 問題、CCD を横方向に分割した場合	99
5.50	99

5.51 PC の断面図 100

5.52 窓材であるアルミナイズドマイラの膜厚を測定した結果。横軸は PC と ^{55}Fe の間にはさんだ膜の枚数、縦軸は、その際に PC の受けたカウント数を、膜の枚数が 0 枚の時のカウント数で normalize した。実線は 5.13 式によりフィッティングした結果。 101

5.53 PC の量子効率を計算して出した結果。ただし、PC 内の gas の圧力は 1 気圧、温度は 24°C であると仮定している。 102

5.54 XIS CCD (EM1) の量子効率。実線は、空乏層の厚さが $50\mu\text{m}$ であるとして計算して量子効率を出した結果。 103

5.55 入射 X 線のエネルギーの違いによるグレード分岐比の違い。横軸は ASCA グレード、縦軸はグレード 0 のイベントのカウント数で normalize した各々のグレードでのカウント数を表す。照射した X 線は、左側の列上部より Al、Cl、Ti、右側の列上部より ^{55}Fe 、Ni、Zn、である。 105

5.56 Zn のグレード 7 のイベント 106

5.57 X 線強度変化に対するゲインの変化の様子。横軸の説明は本文参照。縦軸はメインピークのチャンネル。Ni $K\alpha$ 線を使用。 108

5.58 X 線強度変化に対するゲインの変化の様子。横軸の説明は本文参照。縦軸はメインピークの幅 (σ)。Ni $K\alpha$ 線を使用。 108

5.59 X 線強度変化に対するゲインの変化の様子。横軸の説明は本文参照。縦軸はメインピークのカウントレート。Ni $K\alpha$ 線を使用。 108

表一覧

3.1	XIS 諸元	35
3.2	エディットモードとクロックモードの組合せ。 : window mode 対応、 : window mode なし対応、 × : 対応せず、 - : clock mode とは無関係な処理 .	38

第 1 章

X 線天文学と検出器

X 線天文学は 1962 年に B.Rossi らが行なったロケット実験に始まった。X 線は地球大気によって遮られているために、地上からの観測は不可能である。従って宇宙からの X 線を観測するために、多くの気球、ロケット、人工衛星が使用されてきた。人工衛星による宇宙からの X 線観測は、1970 年にアメリカによって打ち上げられた Uhuru 衛星によって始めて行なわれたが、それ以来、種々の X 線検出器を載せた数多くの人工衛星が打ち上げられてきている。ここでは、そのうちの代表的なものについて簡単に述べ、そしてこの修士論文の趣旨となる XIS 検出器を搭載する Astro-E 衛星への移行を述べる。

1.1 いままでの衛星

1.1.1 Einstein

1978 年にアメリカの NASA によって打ち上げられた Einstein 衛星は、初めての本格的に撮像観測を行った X 線天文衛星である。

ウォルター 1 型の X 線ミラー (XRT) と、IPC (Imaging Proportional Counter)、SSS (Solid State Spectrometer)、HRI (High Resolution Imager)、FPCS (Bragg Focal Plane Crystal Spectrometer) なる 4 台の焦点面検出器、OGS (Objective Grating Spectrometer) なる分光器 (これは HRI と組み合わせられ使用された) を搭載していた。HRI は、角分解能が 2arcsec、視野が 25arcmin と撮像能力は優れているが、残念ながらエネルギー分解能はほとんどなく、また検出効率も低かった。IPC は、エネルギー分解能が $\delta E/E=100\%$ 、角分解能が 1arcmin、視野が 1deg ほどであった。SSS は、検出効率は高く、100K 程に冷却して使用されていた。FPCS は有効面積がかなり狭く、 $\sim 0.5\text{cm}^2$ 程しかなかった。

Einstein 衛星の主要な成果は、X 線天体の数を飛躍的に増大させたことである。そのほかにも系内天体に関しては超新星残骸の分光と撮像を行なうことにより、約 10 個ものパルサーを発見した。系外天体に関しては、M31 や LMC の撮像を行なうことによって点源の分離を行ない、楕円銀河やスターバースト銀河のホットガス、M87 のクーリングフローなどを発見した。

1.1.2 ぎんが

日本 3 番めの X 線衛星である「ぎんが」は、1987 年に打ち上げられた。有効面積が $\sim 4000\text{cm}^2$ に及ぶ大面積比例係数管 (LAC) を搭載し、感域は 2 ~ 37keV (ただし、高圧電源の設定によっては、 $\sim 60\text{keV}$ までの観測が可能であった。)、エネルギー分解能が、 $20\% @ 6\text{keV}$ であった。撮像はできなかったものの、LAC の大面積を生かし統計の良いデータを取得した。

打ち上げ直後に爆発した超新星 1987A を始めとして、さまざまな天体の観測を行ない、X 線パルサーや、 γ 線バーストからのサイクロトロン吸収線を観測し、ブラックホール天体候補を発見した。その他にも、セイファート銀河の型によるスペクトルの違いの発見、活動銀河の時間変動の観測などを行った。

1.1.3 ROSAT

ROSAT 衛星はドイツにより 1990 年に打ち上げられた紫外線、軟 X 線観測衛星である。ROSAT 衛星も、ウォルター 1 型ミラーを搭載し、その焦点面には X 線検出器として、HRI(High Resolution Imager) と、PSPC(Position Sensitive Proportional Counter) を搭載している。その他にも紫外線領域での観測器として、WFC(Wide Field Camera) を搭載している。HRI は、感度領域が 0.07~2.4keV、有効面積が 100cm^2 で、角分解能が 4arcmin である。PCSC の感度領域は 0.1~2.4keV でエネルギー分解能が $40\% @ 1\text{keV}$ 、角分解能が 0.5arcmin、時間分解能が $120\mu\text{sec}$ 、有効面積が 200cm^2 である。

ROSAT の成果は、約半年間の全天探査により約 60000 個もの新たな X 線源を分離したこと、X 線背景放射の 20arcsec 程度の構造を発見したことがあげられる。

1.1.4 ASCA

日本 4 番めの X 線天文衛星である ASCA は、1993 年に打ち上げられ、現在も我々に重要なデータを提供しつづけている。ASCA の特徴は、ミラーを積んだ衛星としては最大の有効面積を持つこと、ハードバンド (0.4-10keV) でのイメージングが可能であることである。ASCA は、XRT の焦点面検出器として、GIS(Gas Imaging Spectrometer) と、SIS(Solid-State Imaging Spectrometer) の 2 種類の検出器を搭載している。GIS は、0.7~10keV の感度領域を持ち、比較的よい時間分解能 ($\sim 0.1\text{ms}$) と、極めて低いバックグラウンド ($\sim 3 \times 10^{-4}\text{counts/sec/cm}^2/\text{keV}$) が特徴である。SIS は、MIT (Masachusetts Institute of Technology) のリンカーン研究所で開発された CCD チップを使用している。エネルギー分解能は、 $\sim 2\% @ 6\text{keV}$ と良い。しかし、CCD の大きさの制限より視野が狭いこと、読みだしに時間がかかることより時間分解能があまり良くない、などの難点もある。また現在は放射線損傷によるデータの質の悪化という問題を抱えている。

ASCA は、その素晴らしい X 線撮像能力とエネルギー分解能を生かし、今までに数々の成果をあげてきた。系外天体に関しては、 $z \sim 1$ までの distant cluster からの鉄の K ライ

ンを検出したこと、近傍銀河 NGC4258 や M81 の中に、低光度の AGN が存在することを発見したこと、楕円銀河のホットハローでの重元素の存在比が、理論予想より少ないことを発見したこと、鉄の輝線が強い 2 型セイファート銀河を発見したこと、また 2 型セイファート銀河は一般に強い吸収を受けた硬 X 線と吸収のない軟 X 線の 2 成分であるということが発見したこと、などがあげられる。系内天体に関しては星生成領域の Class I 天体から初めて硬 X 線を発見したこと、我々の銀河中心から、リプロセスによると思われる鉄の輝線を発見したこと、超新星残骸から非熱的な X 線放射を見つけ、超新星残骸が宇宙線の加速現場であることを確かめたこと、などがあげられる。

1.2 Astro-E 衛星

Astro-E 衛星は、2000 年 2 月に打ち上げ予定の日本で 5 番めの X 線天文学衛星である。Astro-E 衛星の主要観測目的は、宇宙論的な遠距離にある天体を X 線で詳細に観測すること、宇宙の高温プラズマの X 線分光観測を、高い精度と広いエネルギー範囲で行なうことなどがあげられる。これらによって、宇宙進化に対する新しい多くの知見が得られることが期待できる。以下に搭載機器と、その概略を述べる。

1.2.1 搭載機器と概略

Astro-E 衛星には 5 台の軟 X 線望遠鏡と、1 台の硬 X 線望遠鏡を搭載する。軟 X 線望遠鏡は 5 台の X 線反射鏡 (XRT) と、5 台の焦点面検出器からなる。5 台の焦点面検出器とは、1 台の XRS 検出器と 4 台の XIS 検出器である。XRS 検出器は X 線マイクロカロリメータのレイで、0.4keV~10keV 領域を $\sim 12\text{eV}$ のエネルギー分解能でカバーする。しかしそのままでは、10counts/sec/1 素子ほどのカウント数しか許されない。そのため、強い X 線源に対しては、有効面積を下げるためのフィルターを挿入して観測を行なう。また、XRS は冷却剤として、液体ヘリウム、固体ネオンを用いるが、Astro-E 全体の重さ制限から、冷却剤は約 2 年の寿命分を搭載する。XIS 検出器は X 線 CCD カメラで、感度領域は 0.4~12keV であり、それらの領域を約 100eV のエネルギー分解能でカバーし、Astro-E 衛星の標準的な検出器としての役割を果たす (詳細は 3 章参照)。硬 X 線望遠鏡 HXD は、井戸型のフォスウィッチシンチレータと、シリコン PIN 検出器の組合せであり、感度領域は 10keV~700keV にまでわたる。大きな有効面積と、低バックグラウンドにより、過去最高の検出感度を備える。

1.2.2 Astro-E に期待される物理

Astro-E 全体で、もっとも新しい物理を引き出すであろうと期待される性能は XRS の持つ高エネルギー分解能 ($\delta E \sim 12\text{eV}$) である。このような高エネルギー分解能を用いれば、輝線がブレンドされてしまうことなくユニークに同定できる。したがって、ブラックホール近傍から出る輝線のドップラー偏移の観測によって、ブラックホール近傍の物理により詳しく

迫ることができる。さらに、星生成領域や、超新星残骸、または銀河・銀河団中のプラズマの状態を詳しく調べることができ、プラズマの温度や、密度、電離度の新しい情報が得られる。例えば、銀河団中に落ち込むガスの速度の測定ができると考えられる。その大きな有効面積と高エネルギーまでのびた感度領域の2つを生かせば、いくつものパルサーのシンクロトロン吸収線をとらえることが可能で、その情報から中性子星の磁場に関する統計的な議論ができる。また、Astro-E上のすべての検出器を使えば、 $0.4\text{keV}\sim 700\text{keV}$ に渡る広いバンドでのスペクトルが集積できるので、例えばブレーザ、あるいは非熱的放射を出す超新星残骸のスペクトルをとれば、シンクロトロン放射とシンクロトロン逆コンプトンのスペクトルが、どのようにつながっているかがわかる。XRSは、 $\sim 12\text{eV}$ という高エネルギー分解能を有している反面、素子数が36個と限られているために、十分なイメージングが行えない。また、HXDではラインの多く存在する 10keV 以下に感度を持たないという欠点がある。ここをカバーすることができるのは、XISである。CCDという検出器は、ASCA以降のほとんどすべての衛星に搭載されてきている。その理由は、検出器における、エネルギー分解能、空間分解能、時間分解能、エネルギーレンジの広さ、という4種類の軸のバランスが非常に良いからである。XRSや、HXDの様に検出器に必要とされる軸のうちどれかを犠牲にすることによってある一つの特徴を生かしているような検出器だけでは、十分な物理がいえない。したがってここでXISの果たす役割は大きいのである。

第 2 章

X 線検出器としての CCD

2.1 動作原理

2.1.1 概要

CCD(charge-Coupled-Device) とは、数多くの MOS ダイオード (Metal-Oxide-Semiconductor) を並べた構造をしている。MOS ダイオードとは、金属と半導体の間に酸化物 (絶縁体) を挟み込んだもので、例えば、Al-SiO₂-p 型 Si のような系をいう。通常 p 型半導体上に並べられたこの多数の MOS ダイオードに対し、逆バイアス電圧を印加することにより、空乏層を形成させる。その空乏層中に入射してきた X 線は、光電効果を起こして入射 X 線エネルギーに比例した個数の 1 次電子群と正孔のペアを生成する。電極に与えてやる電圧の変化によってポテンシャルの井戸を次々と変化させてやり、生成された光電子を蓄積、かつとなりの MOS ダイオードに転送させる。

電荷転送のチャンネルには 2 つの種類がある。一つは、表面チャンネルデバイスと呼ばれるもので、電荷転送のチャンネルが Si と酸化層の界面付近に存在するもの。もう一つは埋め込みチャンネルデバイスと呼ばれ、電荷転送チャンネルは Si の内部に存在するものである。表面チャンネルデバイスは Si-SiO₂ 界面を利用することから、この界面における電荷のトラップが多く、転送効率が悪くなるという欠点を持つ。これをふせぐために fat zero と呼ばれる僅かなバックグラウンド電流を流し、トラップをあらかじめ埋めてしまう方法がある。しかし、大きな fat zero 電流を流すことにより、fat zero の揺らぎによるノイズレベルが大きくなるという欠点も考えられる。埋め込みチャンネルデバイスでは、電荷は基盤内に存在するため、酸化膜容量が実効的に少なくなる。したがって表面チャンネルデバイスに比べて、少量の電荷しか蓄積、転送できない。しかし、電荷トラップによる電荷転送効率の低下が少ないことや、電荷の転送速度が速いなどという優れた点もある。

2.1.2 駆動方式

となりあった MOS ダイオードの電極に与えてやる電圧のタイミングを調節してやることによって、ポテンシャルの井戸の深さを変えてやり、蓄積された信号電圧を次々と転送して

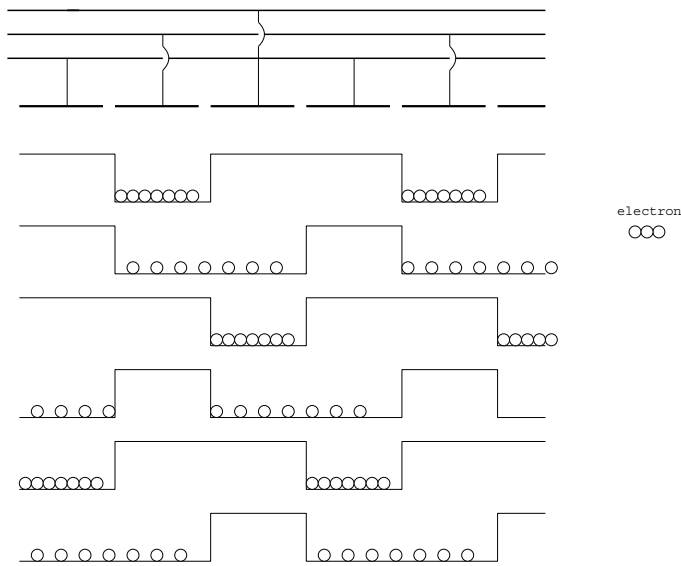


Figure 2.1: 3相電極 CCD の電荷転送

いくが、この電圧の与え方にはいくつか種類がある。

- 三相方式

図 2.1 に電極構造と駆動クロックの様子を示す。位相の異なる 3 つの駆動信号を電極に印加してやることによって電荷の転送を行なう。この方式の利点としては、駆動クロックの印加方法によって電荷の転送方向を制御できることがあげられる。

- バーチャルフェーズ方式

図 2.2 に見られるような電極構造を持った CCD のことをいう。この方式は、テキサス・インスツルメンツ社によって開発された。図からわかるように、転送電極は 1 組しか存在しない。これは、転送路の一部に不純物をドーピングすることによって、電極下に電位勾配を作ってやることによって実現された。この方式の最大の利点は、電極で吸収されることによって低エネルギー側の X 線の感度が低下してしまうという問題点が、電極を減らすことにより改善されていることである。しかし、駆動クロック間の 2 つのレベルの差の勾配が一定に制限されたり、電荷の転送が 1 方向のみに限られるなどの弱点もある。

- 二相方式

図 2.3 に見られるような構造をしている。バーチャルフェーズ方式のように、転送路の一部に不純物がドーピングしてある。しかし、電極はすべての面を覆っているため、低エネルギー側の感度はバーチャルフェーズ方式には劣る。駆動クロックが 2 組の逆位相の方形波でいいことから、駆動が容易であるのが利点である。

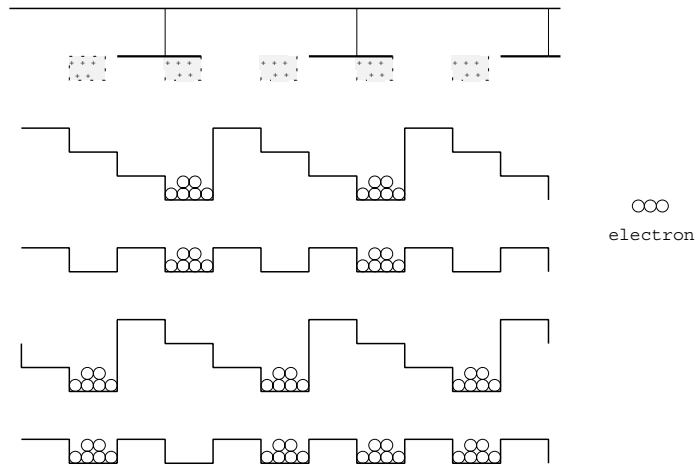


Figure 2.2: バーチャルフェイズ CCD の電荷転送

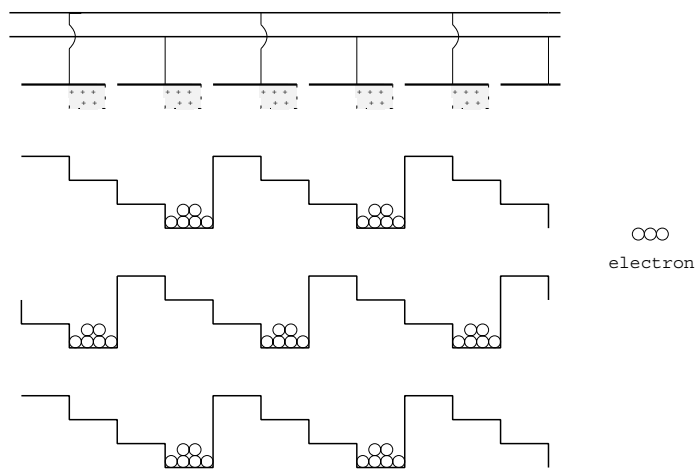


Figure 2.3: 2相電極 CCD の電荷転送

2.1.3 電荷転送方式

上で示したような方式にのっとり、クロックパルスを与えることで、電荷を垂直方向および水平方向に転送し、電荷信号を出力から読み出す。この時、CCD 上の電極の配置と読み出しのための転送の仕方には、次のような種類が存在する (図 2.4)。

- インターライン転送方式

インターライン転送方式では、光電効果により光子を検出する受光部と、光電効果により生成された電荷を出力へ転送する垂直転送部分が交互に並べられている。転送部分には光が当たらないようにと、アルミ等で遮断されている。1 フレームの露出が終了後、直ちにすべての電荷がすぐとなりの垂直転送列に送られる。その後、一列ずつ水平方向のシフトレジスタに転送されて出力される。

この方式は、光用として使用する時に、縦転送中に光が入らないのが最大の利点である。しかし、受光用のピクセル列と転送用のピクセル列が同一面に存在し、かつ転送用のピクセル列がすべて遮光されていることにより有効な受光面積が小さくなってしまふという問題点がある。

- フレームストアー転送方式

フレームストアー転送方式では、撮像部分と、電荷を出力へ転送するまでに一時的に蓄積する蓄積領域との 2 つからなる。撮像部分と蓄積部分は、蓄積部分が遮光されているという点を除いては、全く同等である。一フレームの撮像が終了すると、撮像部分にある電荷はそのまま垂直方向にすばやく蓄積領域に転送される。撮像領域から蓄積領域への電荷の移動が終了後、撮像領域は再び受光を始める。蓄積領域に転送されてきた電荷は、その後垂直方向の 1 列毎に水平シフトレジスタによって出力へ読みだされる。

撮像領域とおなじだけの蓄積領域が必要になってくるが、両者はほとんど同等なため、電極の構造が単純で済む。またインターライン方式のように、受光面積が限られることなく撮像領域全面において受光可能であるため、弱い光を検出するのに向いている。反対に垂直方向転送中は撮像が不可能であるため、その間の入射光が無視できないような強い光の検出には限界がある。

2.2 性能

X 線 CCD の性能評価をする上で、必要なパラメータの説明をおこなう。

2.2.1 ノイズ

- 読みだしノイズ

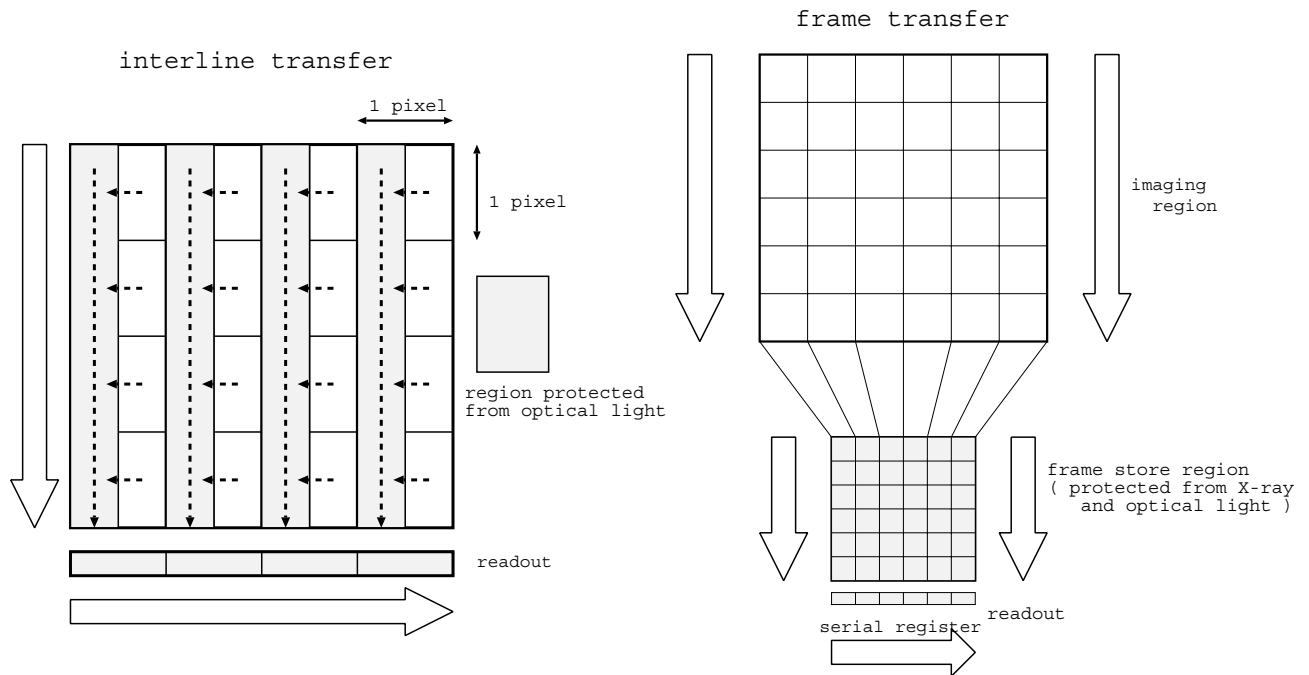


Figure 2.4: CCDの転送方式。左がインターライン方式、右がフレームトランスファー方式。

半導体検出器のエネルギー分解能 (FWHM) は、入射 X 線 E を用いて次の様に記述される。

$$\delta E = \sqrt{8 \log 2} \times \sqrt{N^2 + \frac{FE}{w}} \quad (e^-)$$

E = 入射 X 線のエネルギー

N = 読みだしノイズ

F = ファノファクタ

w = Si の平均電離エネルギー (3.65eV)

電子・正孔対生成エネルギーが w であるような半導体検出器に対して、エネルギー E の X 線が入射するとする。その際に生成される電子・正孔対の個数は、平均 $\frac{E}{w}$ 個である。入射 X 線のエネルギー E は、次の3つの過程に使われる。

- 1 : 電子がバンドギャップを越えるためのエネルギー
- 2 : 原子核格子の熱振動
- 3 : 新たに電子・正孔対を作るにはエネルギーが満たない電子の運動エネルギー

全く2と3の過程に E が分配されないとすれば、生成される電子・正孔対の個数は、 $\frac{E}{w}$ 個、すなわち揺らぎはゼロになる。また、これらがポアソン過程に従うならば、電子・正孔対の個数の揺らぎは、 $\sigma = \frac{E}{w}$ となる。実際は両者の中間となるので、ファノファクタと呼ばれる定数 F を導入して個数の揺らぎを表す。ファノファクタの値は物質によりことなり、シリコンでは約 0.12 である。すなわち、一般にシリコンの半導体

検出器でエネルギー分解能がいいのは、このファノファクタの値が小さいことが要因となっている。

- ダークカレント

ダークカレントとは、X線が全く入射していないにもかかわらず逆バイアス下でながれる電流のことをいう。半導体として通常用いられるシリコンのバンドギャップは、約 1.15eV である。過程がどうであれ、価電子帯に存在する電子がこのバンドギャップを越えさえすれば、信号電荷が作られることになる。温度が高いと、熱エネルギーでバンドギャップを越える電子も出てくる。これが信号電荷と区別できないために信号電荷に雑音がまじることになる。理想的な半導体においては、バンドギャップ中にはエネルギー準位は存在しない。しかし現実には、トラップと呼ばれる準位がこのバンドギャップ中に存在し、価電子帯から伝導帯に電子が励起される際に手助けをする。すなわち電子が「価電子帯 トラップ準位 伝導帯」様に励起される確率が「価電子帯 伝導帯」と励起される確率よりも圧倒的に高い¹。空乏層中の再結合 - 生成中心によるキャリアの発生率 p は、真性半導体中のキャリア濃度 n_i と、小数キャリアがトラップに捕獲されるタイムスケール τ_n によって、次のように表せる。

$$p = \frac{n_i}{2\tau_n}$$

また、 τ_n と、 n_i はそれぞれ次のように表せるから、

$$\tau_n = \frac{1}{\sigma_t \overline{v_{th}} N_t}$$

σ_t : トラップの捕獲断面積
 $\overline{v_{th}}$: 電子の熱速度の平均
 $n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_b T}\right)$
 N_c : 伝導帯における有効状態密度
 N_v : 価電子帯における有効状態密度
 T : 絶対温度
 k_b : ボルツマン定数

従って、ダークカレントはキャリアの電荷を q として、

$$I_t = qp = \frac{1}{2} q \sigma_t \overline{v_{th}} N_t \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_b T}\right)$$

よって、このトラップを介したダークカレントは温度依存性がおおきく、CCDの温度を下げることによりかなり影響が少なくなる。したがってXISでは、駆動温度を -90°C にまで下げることにより、ダークカレントの影響をかなりおさえている。

¹ただしシリコンにおいては、「価電子帯 伝導帯」の様な遷移は、運動量の保存が成立しないので起こらない。

- C T I

CTI とは、電荷転送非効率 (Charge Transfer Inefficiency) のことである。すなわち、電荷転送の際に完全に電荷が転送されることなく若干の電荷が残される場合があり、その際の真の信号電荷と、後に残された電荷との比のことである。CTI と CTE (Charge Transfer Efficiency) との間には次のような関係が成立する。

$$\text{CTE} = 1 - \text{CTI}$$

一回の転送における CTI は通常 10^{-4} 以下ととても小さい。しかし、転送回数が多くなるとこの影響は無視できなくなり、エネルギー分解能の劣化をもたらす。

CTI を支配するのは、CCD 内のトラップ準位による信号電荷の捕獲であると考えられている。バンド端からエネルギー δE の場所のトラップからのキャリア放出の時定数は次のように表せる (Shockley-Read-Hall 関係式)。

$$\tau_r(\delta E) = \frac{1}{\sigma_t(\delta E) v_{th} N_c \exp(\delta E / k_B T)}$$

v_{th} = キャリアの熱運動の平均速度
 k_B = ボルツマン定数
 T = 絶対温度
 $\sigma_t(\delta E)$ = 捕獲断面積
 N_c = 伝導帯の有効状態密度

このトラップが、時刻 $t=0$ にキャリアを捕獲したとして、時刻 t までにキャリアが放出される確率 $\rho(t; \tau_r)$ は

$$\rho(t; \tau_r) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right)$$

で与えられる。一旦すべてのトラップが埋められから n 回の転送が行なわれるとする。その後、 N 個のキャリアを持つ charge packet が転送されてくるとする。その時に 1 回の転送において、トラップに捕獲されることによって失われるキャリアの個数を δN とする。charge packet が空のトラップに出会って捕獲され、かつそのトラップから再び解き放たれるのがクロック周期よりも遅い場合を考えれば良いから、 δN はつぎのようにあらわせる。

$$\begin{aligned} \delta N &= N_t V_p \rho(n T_c l; \tau_r) \times (1 - \rho(T_c l; \tau_r)) \\ &= N_t V_p (1 - \exp(-\frac{n T_c l}{\tau_r})) \times \exp(-\frac{T_c l}{\tau_r}) \end{aligned}$$

またすべての転送において、キャリアを失う確率が同じだとすると、 n 回の転送後におけるキャリアの数は

$$N - \delta N_n = N(1 - \frac{\delta N}{N})^n \\ \sim N - n \delta N$$

よって、CTIは、

$$CTI = \frac{\delta N}{nN} \sim \frac{\delta N}{N} \quad (/1 \text{ 回の転送})$$

と表せる。

このCTIに起因して、転送ノイズというものがあげられる。CTIによって取り残される電荷量が、統計的に揺らぐことが原因である。トラップがキャリアを持つ確率は、2項分布に従うと考えられる。したがって、一回の転送における電荷転送量の揺らぎの自乗平均 $\overline{\delta N}$ は、その2項分布の分散で表せるから、ある準位のトラップに関して

$$\overline{\delta N} = V_p N_t \rho(1 - \rho) \\ = V_p N_t \exp(-\frac{T_{cl}}{\tau_r}) (1 - \exp(-\frac{T_{cl}}{\tau_r}))$$

となる。従って、トラップ順位が複数存在するなら、それらに関して和をとらねばならない。

一回の転送によって転送されるキャリアの数の揺らぎ δN と、 n 回転送後のキャリアの数の揺らぎ δN_n の間には、

$$\overline{\delta N_n^2} = 2n \overline{\delta N} \\ = 2n V_p N_t \exp(-\frac{T_{cl}}{\tau_r}) (1 - \exp(-\frac{T_{cl}}{\tau_r}))$$

なる関係が成立する。ここで、右辺に2という項がかかっているのは、一回の転送において charge packet が受ける揺らぎに、自分自身がなくす電荷量の揺らぎと前の packet が残っていた電荷の揺らぎの2種類があるからである。

ASCA(SIS)においては、打ち上げ後、宇宙空間における放射線損傷によってトラップの数が増え、CTIによる信号の劣化がかなりひどくなっている。XISについては現時点において、CTIの効果は無視できるが、打ち上げ後宇宙空間で宇宙線にさらされることにより、CTIの効果が無視できなくなる問題が必ず起こるはずである。

- 白傷 (Hot Pixel)、黒傷、Flickering Pixel

なにもX線を当てていない時のCCDのイメージ上に白い点や黒い点が見えることがある。(電荷が多ければ白く、少なければ黒いといというグレースケールで見た場合)

これらは、白傷、黒傷と呼ばれるもので、それぞれ電極がキャリアの吐きだし口や、吸い込み口になってしまっているものである。これらは、CCDの製造工程で生じるピクセルの欠陥が原因である。白傷はあたかもX線イベントかのごとくの波高を示す。これは電極の絶縁被膜の抵抗が低い電極で常に微弱電流がながれていることが原因である。しかし、一般にこのようなピクセルの示す波高値は以上に高いため、すぐに他のピクセルとの区別がつく。従ってその部分を除いて使用すれば良く、深刻なノイズ源となる心配はない。Flickering Pixelとは、Hot Pixelと同様、X線の入射がないにもかかわらずイベント閾値以上の電荷が蓄積されてしまい、イベントと認識されるピクセルのことをいう。しかし、Hot Pixelに比べて、イベントとして誤認される確立がはるかに低いもののみをさす。Flickering Pixelは、放射線損傷を受けたことによって大きな暗電流が流れてしまうピクセルであると考えられている。

2.2.2 エネルギー・チャンネル線形関係

あるエネルギーのX線が入ってきた時に、CCD内ではその入射エネルギーに比例した数の電荷が生成される。その電荷の量がAD変換されることによって、ある波高値と一対一に対応させられる。従って、あるエネルギーのX線が入射した際には、その波高値(チャンネル)が出力信号として出てくる。一般にエネルギーと出力波光値の間には線形関係が成り立つ。この入射X線のエネルギーと、出力信号の波光値の関係は、レスポンス関数作成の際にもっとも基本的なパラメータになるので、線形関係はもとより、その線形関係からのずれの様子までしっかりと調べることが必要である。レスポンス関数作成の際には、XISが4つの異なるセグメントが集まって一つの検出器をなしていることより、1台の検出器に対して少なくとも4つのことなつたエネルギーチャンネル関係を求めなくてはならない。また、後から述べるように、このエネルギーチャンネル関係は、イベント検出の方法によって異なつた値を示す。例えばASCA(SIS)で採用されているようなグレードという概念にしたがってイベント検出を行なうとすれば、8つのことなるグレードの各々に対してエネルギーチャンネル関係を求める必要がある。

2.2.3 エネルギー分解能

エネルギー分解能 $R(E_0)$ は、エネルギーの関数として

$$R(E) = \frac{\delta E(E_0)}{E_0}$$

$\delta E(E_0)$: 半値幅

と表せる。また、このエネルギー分解能というパラメータも、イベントの検出方法によって異なつた値をしめす。

2.2.4 検出(量子)効率

検出効率 Q_f の定義は次のようなものである。

$$Q_I = \frac{\text{CCDで検出された光子数}}{\text{入射光子数}}$$

すなわち CCD に入射してきた X 線すべてが検出されるわけではなく、一部は検出されない。低エネルギー側の X 線光子に対しては、空乏層まで届く前に CCD の全面に配置されている電極や、OBF (Optical Blocking Filter) によって吸収されることにより、検出効率が落ちる。また、高エネルギー側の X 線に対しては、電極は元より、空乏層まで透過してしまって、検出されることなくつき抜けてしまうイベントが増える。従って検出効率をあげるためには、低エネルギー側光子に対しては、電極や OBF などをできる限り薄くすること²、高エネルギー側光子に対しては、空乏層厚をできる限り大きくとることが望ましい。これら 2 つの過程を考慮してやることにより、検出効率 Q_I は次のように表せる。

$$Q_I = \exp(- \int \lambda(E,l)dl) \times [1 - \exp(- \lambda_{Si}(E)D)]$$

D : 空乏層厚

l : 光子の軌跡に沿った長さ

$\lambda(E,l)$: 電極など、遮断物の吸収係数

λ_{Si} : シリコンの吸収係数

2.2.5 パイルアップ

CCD に入射した X 線により生成された信号電荷は、ある一定時間蓄積され、そして順に転送されることにより、信号の位置情報が得られる。例えば、あるピクセルに同時に E のエネルギーを持つ X 線が 2 イベントはいつてきたとすると、CCD にとっては、そのイベントは「E だけのエネルギーを持つ X 線が 2 つはいつてきた」(パイルアップイベント)のか、「2E のエネルギーを持つイベントが 1 つはいつてきた」のか区別する手立てはない。従って、明るい光源などを観測する際には、このパイルアップに対して注意が必要になる。例えば XIS の Normal/Burst モードでは、少なくとも ~ 0.01 counts/pixel/exposure(8sec) 以上の明るさの天体を観測すると、パイルアップイベントが無視できなくなる。強い X 線源を観測する際にはレスポンス関数として、もちろんパイルアップの影響を考慮したものを使用しなくてはならない。

²または背面照射をしてやるという方法もある。

第 3 章

XIS の仕様

XIS 全体は、4 台のカメラ (XIS-S0, XIS-S1, XIS-S2, XIS-S3) と、2 つのアナログ回路系 (Analog Electronics/TEC control Electronics: AE/TCE) と、デジタル回路系 (Digital Electronics: DE) からなる。一台のカメラには、それぞれ 4 つのセグメントからなる CCD チップが 1 つずつ組み込まれている。

3.1 ハードウェア

3.1.1 ハウジング

各カメラは、ベースとボンネットの 2 つの部分からなる。(図 3.1、3.2 参照)

ボンネットの一番上はフードである。フードの内面には、フードの内壁で反射した光が直接 CCD に入らないよう、バツフルが取り付けられている。フードの下方には、ドアが取り付けられている。これは、そのさらに下に、CCD を可視光から遮断するために取り付けられている OBF (Optical Blocking Filter、Al コーティングしたポリイミドで、ポリイミドの厚みは 1000 Å、その片面に Al が 300 Å もう片面にも Al が 500 Å コーティングされている。)を守るためである。すなわち、Astro-E 打ち上げの際、OBF を大気圧中にさらすと空気中を伝わる振動で OBF が割れてしまうため、カメラ内部を少なくとも 100 Torr 以下の環境に保たなくてはならない。したがって、打ち上げ前から実際に観測が始まるまでの期間は、このドアは閉められ外部と遮断され、内部は真空に保たれている。ドアの内部は、電磁バルブによって衛星外部とつながっている。衛星打ち上げ後カメラボディーが冷却されることによって CCD 表面に水蒸気などがつかないように、打ち上げ直後にバルブを開き、内部をさらに高真空に引く。ドア開けは、アクチュエータにより制御される。また、ASCA (SIS) にはなかったが、XIS にはキラルソース (^{55}Fe) が取り付けられている。

ベース部分には、ヒートシンクの上に CCD がインストールされている。CCD は、ヒートシンクとの間の 3 つのペルチェ素子により冷却される。ベース部分は、コールドプレート上にのせられ、コールドプレートは、直接衛星本体に取り付けられる。コールドプレートには、ヒートパイプが取り付けられており、衛星外部のラジエータとつながっていて、熱を外

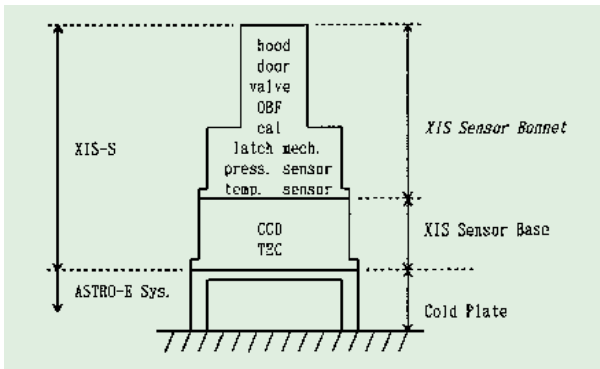


Figure 3.1: XIS センサー構成図

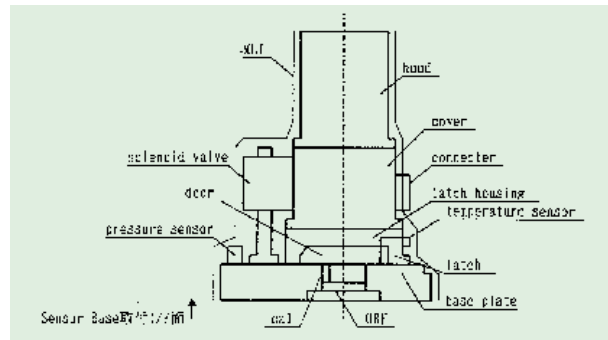


Figure 3.2: XIS センサーボンネット部構成図

部へ逃がしている。

3.1.2 CCD チップ

CCD 素子は、受光領域と蓄積領域を持ったフレーム転送型であり、MIT のリンカーン研究所で開発された（駆動方式は、3 相式である）。X 線を受ける受光領域は、ほぼ 25mm 四角で、一つのチップは 4 つの異なるセグメントからなり、画素の大きさは $24\mu\text{m}$ 角である（1024(縦) × 256(横) 個 × 4 セグメント）。蓄積領域も同じだけの画素がある。これが通常 4 個の読み出しノードを通して読み出される。各読み出しノードは 1024(縦) × 256(横) 個の画素を受け持つ。読み出す順序は、256+16 個の横方向画素を読み出した後、縦方向を一行転送する。これを 1024 回繰り返す。また読みだし口は、図 3.5 のようになっており、となりあったセグメント同士では読みだし口のついている方向が逆になっている。こうして読みだし口から取り出した信号から 1 フレームのイメージが得られるが、実際計算機上に取り込まれる時には、受光したピクセル 256 個 (active region) 以外にも CCD にクロックを送って空読みすることによってデータを取得する。この領域のことを Horizontal Over Clocking region(HOC region) という。（わざわざこのようなデータを取得するのは、active 領域のデータが、読み出されるまでに「露光 + 電荷転送 + 読み出し」の 3 過程を経てるからで、これらの影響を見積もるためである。XIS では HOC 領域は一つのセグメントに対して 1024×16 ピクセル存在する。）

カメラは 8 秒をユニットとした時間（「あすか」では 4 秒であった）で動作する。信号読みだし速度は、CCD の動作クロックスピードで決まっており、ユニット時間内に全画素を読み出す事が出来る。つまり各ノードはユニット時間内に 1024×256 個画素データを読み出す。読み出しモードは大別すると画像モードとタイミングモードとがある。画像モードは、ユニット時間内に全画面を 1 回読み出す事を原則とする。従って時間分解能は 8 秒となる（「あすか」のノーマルモードに対応する）。画像モードで時間分解能を上げる方法として、部分読みだしモード（「あすか」にはなかった機能である）がある。これは、読み出し領域を狭い領域に制限し、ユニット時間内に多数回読み出す方法である。さらに時間分解能を上

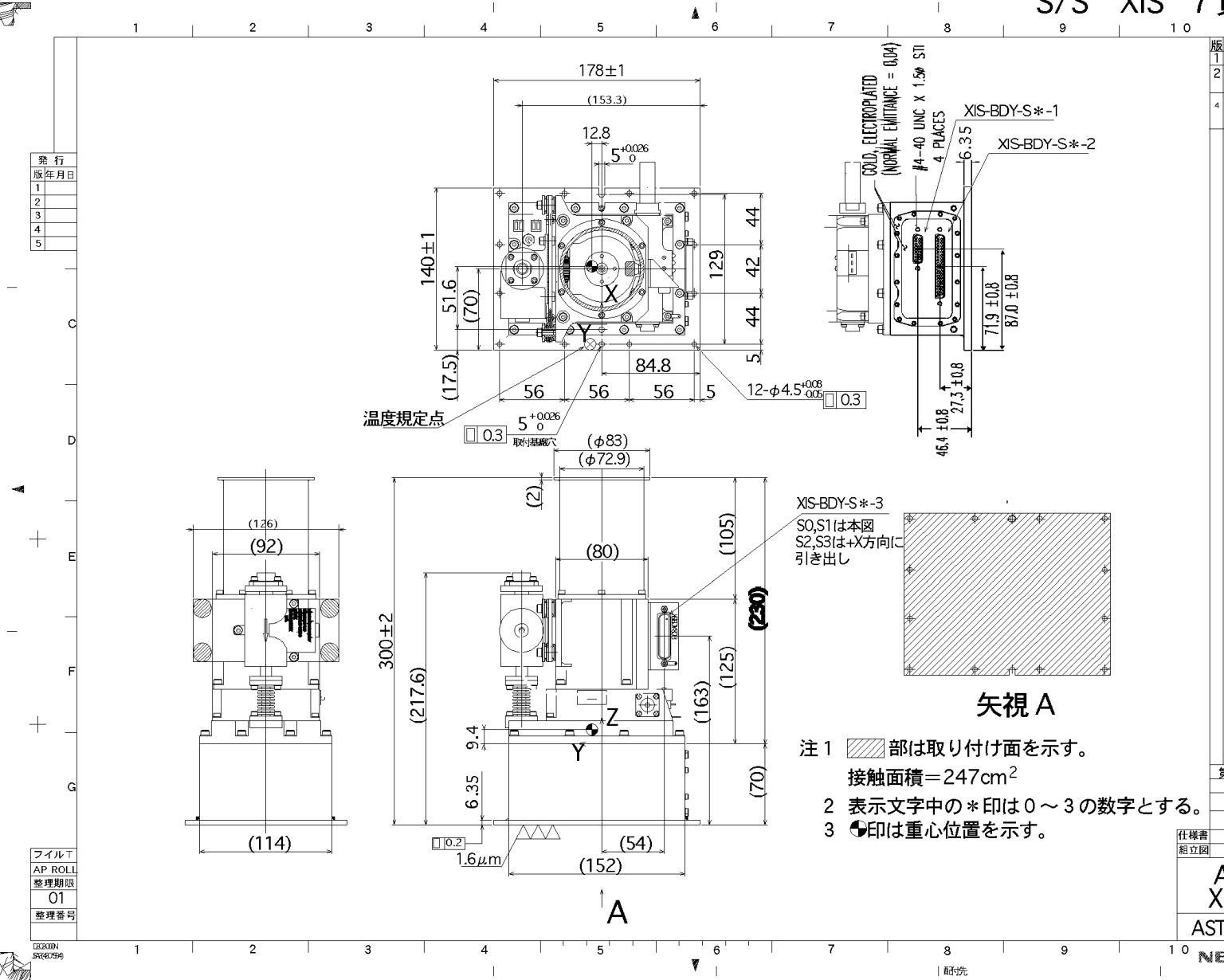


Figure 3.3: XIS body の全体図

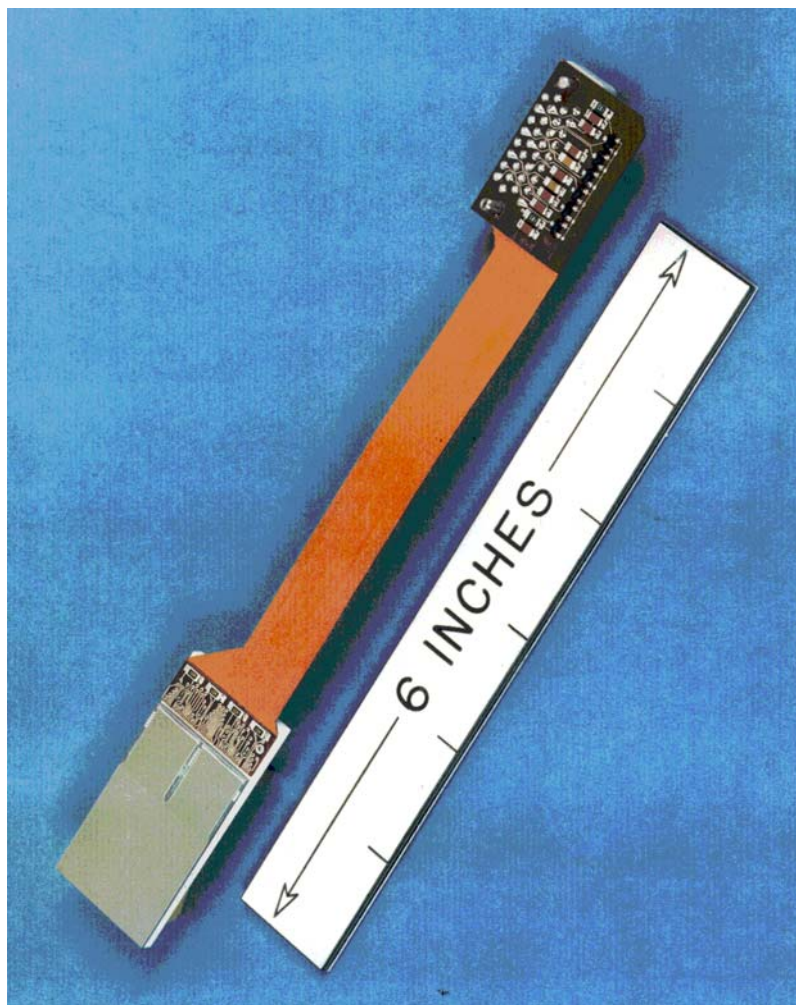


Figure 3.4: CCID17 チップ

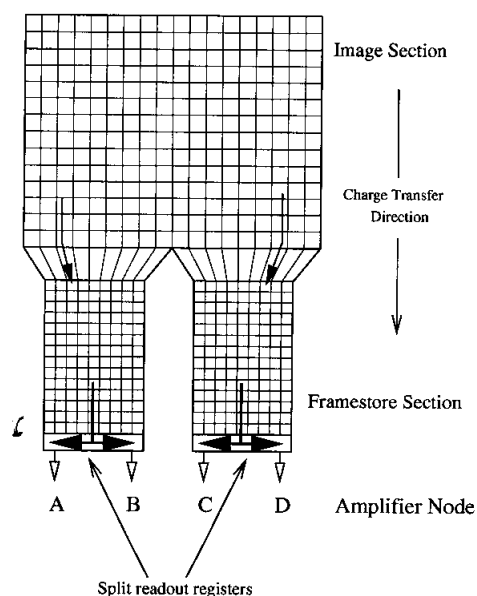


Fig. 1. Schematic of a MIT Lincoln Laboratory CCID-17 CCD.

Figure 3.5: Chip の読みだしの様子

げるには、「あすか」のファーストモードと同じ原理で動くタイミングモードがある。この他、明るいX線源に対応する為、ユニット時間の内の短時間だけ露光するバーストモードがある。

X線検出効率は、低エネルギー側ではOBF(光遮断フィルター)とゲート構造とで決まる。高エネルギー側は、素子の空乏層の厚さで決まる。これは動作電圧等でも変わるが、 $60\mu\text{m}$ (ノミナルな値)となる。従って、検出範囲は $0.4 \sim 12\text{keV}$ である。

X線検出の際のエネルギー分解能は、動作温度や動作速度で決まる熱雑音や、電荷転送効率で決まる。目標動作温度は -90 である。また、読み出し雑音は電子換算で約3個(RMS)(ノミナルな値)になり、 6keV でのエネルギー分解能は 130eV (FWHM)である。XISの性能を簡単にまとめておくと表3.1のようになる。

3.1.3 エレクトロニクス

- AE/TCE

AE/TCEはAE/TCE01、AE/TCE23の2系統からなり、それぞれS0、S1用S2、S3用である(図3.7参照)。一つのAE/TCE内には、それぞれのチップ用に4枚のカード(コントロールカード、ドライバーカード、ビデオカード、TCEカード)が完全

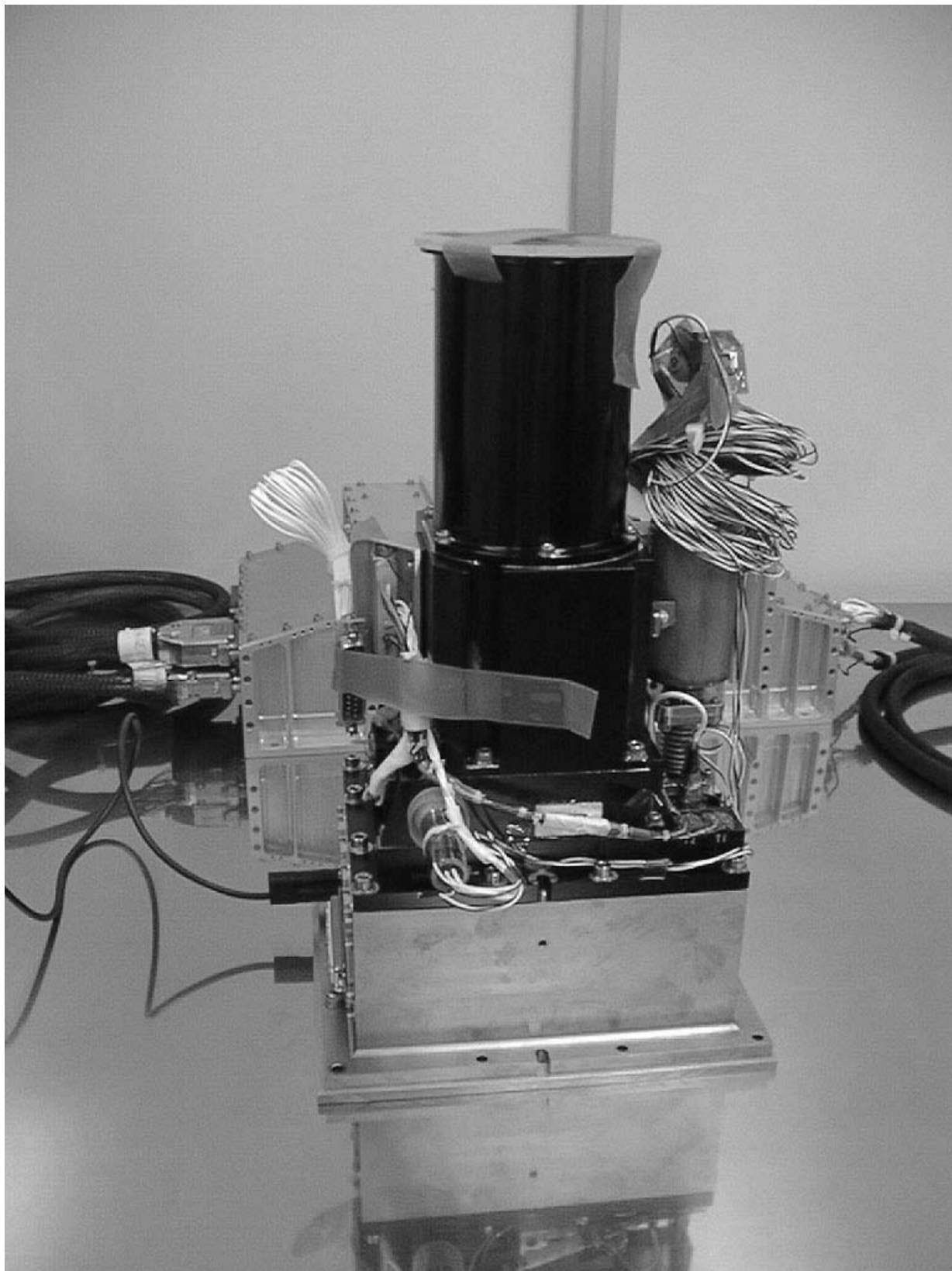


Figure 3.6: XIS 検出器

有効面積	~ 25mm × 25mm
有効画素数	1024 × 256 × 4
画素サイズ	24 μ m × 24 μ m
有効エネルギー範囲	0.4 ~ 12keV
時間分解能	8 秒 (但し Normal/Burst mode)
エネルギー分解能	130eV (FWHM) @ 6keV
読み出し雑音	電子換算で約 3 個
動作温度	-90 ~ -80

Table 3.1: XIS 諸元

に独立に 2 組ずつはいている。ここでは、アナログ信号の処理と、デジタル信号への変換を行なう。

AE 内では大きく分けて 2 つのデータの流れるがある。一つは CCD を介してやりとりされるピクセルデータと HK データである。

CCD と直接つながっているのはドライバーカードとビデオカードである。CCD はドライバーカードから送られてくるアナログクロックを受けとることにより、アナログのピクセルデータと HK データを、ビデオカードに流す。ビデオカードは受けとったアナログのピクセルデータをデジタル信号に変換しコントロールカードに流す。HK データはコントロールカード内で AD 変換される。コントロールカードはそれらのデータを PPU に渡す。

DE 上の MPU、PPU（後述）と直接やりとりをするのはコントロールカードのみである。MPU は適切なコマンドをコントロールカードに流す。コントロールカードは、そのコマンド内容を TCE カードに伝え、TCE カードが TEC の電流を制御することによって CCD の温度を調節する。（また、それと反対の経路を通して、同時に TEC の温度情報が MPU に伝えられる。）

また、どちらも CCD に送るクックに関する働きをうけもつ場所として、SRAM、PRAM が内蔵されている。SRAM は、CCD に送る 1 つのクロックのパターン情報を記憶する役割を持つ。それに対し PRAM は、SRAM にかいてあるクロックパターンを CCD の動作モードに合わせて組み合わせる役割を果たす。

- DE

DE は、PPU0 (Pixel Processing Unit)、PPU1、PPU2、PPU3 と、MPU(Main Processing Unit) からなる (図 3.7 参照)。ここでは、AE から送られてきたデジタル信号の処理を行なう。

PPU は、ピクセルデータに対して光洩れ補正、ダーク補正、などを行ないイベント検出をする。

MPU は、PPU から送られてきたピクセルデータや HK データを CCSDS パケット¹に編集したり、AE/TCE や PPU にコマンドを発行する。

3.2 ソフトウェア

ここではソフトウェアについての説明を行なう。

3.2.1 モード

モードには CCD の動かし方に関するクロックのモードと、CCD から出力されるデータ処理に関するエディットモードがある。それぞれの組み合わせ方は、表 3.2 に示した通りで、すべての組合せが可能というわけではない。

- クロックモード

撮像目的により、CCD の駆動の仕方には次の 3 つのモードが存在する。

ノーマルモード：CCD 上のピクセルをそのまま読み出すモードで、1 フレーム撮像するのに 8 秒を要する。

バーストモード：ノーマルモードとほとんど同じだが、8 秒間のうち何秒間かのみを撮像にもちいる。明るいソースを見るのに使われる（CCD の全面で撮像を行なう）。

パラレルサムモード：CCD 上で指定された複数ライン分の範囲のピクセルを、縦方向にチップ上で加算して読み出すモード。位置情報を犠牲にするが、撮像時間を極めて短くできることが特徴。場所のわかっている極めて明るい X 線源の観測に向いている。

この上の 3 つのモードのうち、ノーマルモードとバーストモードにはウィンドーオプションをつけることが可能である。ウィンドーオプションとは、CCD 上で指定した範囲にあるピクセルのみを、短い撮像周期で何度も撮像し読み出すものである。このオプションによりパイルアップを防ぐことができる（時間分解能もあがる）。但し、範囲の指定は、垂直方向にのみ可能である。

- エディットモード

XIS-DE は、撮像データから情報を取り出すが、テレメトリへ出力の際にはあらかじめ決められたフォーマットに従う。DE が出力する情報とテレメトリフォーマット対

¹Astro-E から地上にデータが送られてくる時には、すべてのデータが CCSDS パケットという可変調のパケットに編集されておりてくる。

Astro-E XIS Block Diagram

Ver 1.0 (1995????)
 Ver 1.1 (19960318)
 Ver 2.7 (19970120)
 Ver 4.0 (19971202)
 Ver 4.01(19971210)

Dotani
 Tsuru
 Tsuru
 Tsuru

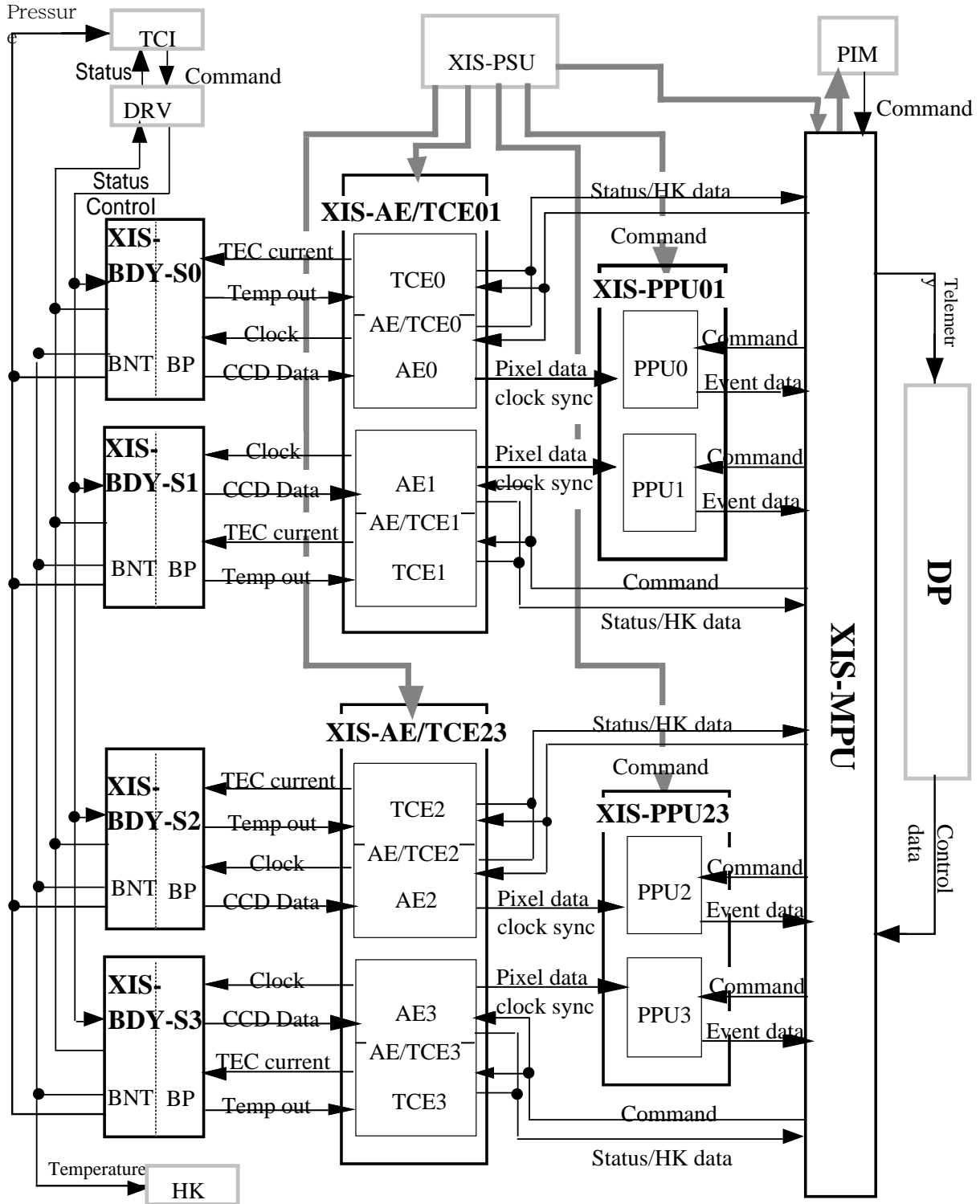


Figure 3.7: Astro-E XIS のブロックダイアグラム

	Normal	Parallel Sum	Burst
5×5		×	
3×3		×	
Top 3		×	
Timing	×		×
Dark Init			
Dark Update		×	
Frame			
Dark Frame	-	-	-

Table 3.2: エディットモードとクロックモードの組合せ。 : window mode 対応、 : window mode なし対応、 × : 対応せず、 - : clock mode とは無関係な処理

応して、エディットモードを定義する。そのエディットモードを各々簡単に説明する（このエディットモードは地上からのテレコマンドの指示により決定される。）。

5 × 5 : イベントを中心とする縦横 5 × 5 ピクセル中にあるすべてのピクセルレベルを出力する。

3 × 3 : イベントを中心とする 3 × 3 ピクセルのピクセルレベルと、その周りの 16 ピクセルに対して、ある閾値（この閾値のことを今後「スプリット閾値」と呼ぶ）を越えたものに関する位置とピクセルレベルの情報と、スプリット閾値以下であったピクセルの合計レベルを出力。

トップ 3 : イベントを中心とする 3 × 3 ピクセルのうち、上下と横のピクセルに関して、ピクセルレベルの高い順に二つのピクセルを選び、その場所とピクセルレベルを出す。その他にも、コーナーピクセルの内スプリット閾値を越えたもののパターン、スプリット閾値以下のピクセルレベルの合計なども出力する。

タイミング : パラレルサムモードに対して使用されるが、1 × 3 ピクセルの内スプリット閾値を越えたピクセルのレベルの合計と、グレード、時刻情報等を出力する。

ダークイニシャル : ダークレベルの初期値を決めるモード。ホットピクセルの位置情報を記録。

ダークアップデート : 定期的な更新や、精度上げを目的として、ダークレベルの更新を行なう。ダークイニシャルと同様にホットピクセルの位置情報を更新する。

フレーム : AE から出力された 1 フレーム分のすべての内容を、すべてテレメトリに出力する。撮像時間は、8/32/128 秒のうちから選択可能。

ダークフレーム : DE の記憶しているダークフレームの情報をテレメトリへ出力する。

3.2.2 データの定義（波高信号処理の方法）

AE から送られてきた信号は、ダークレベルや、光洩れ量の差引を行なって、始めて X 線光子の情報に直される。

$$(\text{ピクセルレベル}) = (\text{PH データ}) - (\text{ダークレベル}) - (\text{光洩れ量})$$

以下、上式の各々の定義を述べてゆく。

- PH データ

XIS-AE から読み出された生データ、すなわちピクセルデータの信号線で伝送されるデータそのものを表す。

- ダークレベル

PH データの実際のゼロレベルを示す値。ASCA (SIS) からの一つの大きな改良は、ダークの情報であろう。ASCA (SIS) では 16×16 ピクセル分で一つのダークの情報として用いていたのに対し、XIS ではすべてのピクセルについてのダークの情報が使える。

XIS-DE は、CCD フレームの各ピクセル毎に 1 つのダークレベルを維持している。運用時には、通常の観測処理にはいる前に必ずダークレベルの初期値を決定し、それを元にしてピクセルのレベル補正を行なう。ダークレベルの初期値決定は、いくつかのフレームを用いて行なうが、その場合用いるフレームの毎数として 4、8、16、32 フレームのいずれかを指定できる。さらに必要に応じて、ダークレベルの精度向上のため、次に述べる光洩れ量を考慮してダークレベルの更新も行なえる。また、ダークの情報の中には、ホットピクセルの情報も含まれている。

- 光洩れ量

衛星が、日陰から日照、あるいは日照から日陰に変わった時など PH データが観測対象以外からの光線を受けて一様に変動する。この変動の影響を取り除くために、XIS-DE は光洩れ量を定義している。

光洩れ量は、光洩れパーティション毎に定義され計算される。光洩れパーティション内のイベント以外の平均値をフレーム毎に計算し、その変化量が次のフレームに反映される。また、フレーム毎の光洩れ推定量はテレメトリに出力されるため、さらに急激な（1 フレーム毎くらの）変化があった時にも、その値を使って後から補正が可能である。なお、光洩れ量の補正は、クロックモードが、ノーマル、またはバーストの時のみで、パラレルサムモードの時には行なわれない。

- バイアスレベル

バイアスレベルとは、HOC 領域の PH データの平均値。そのうち 1024×256 個は、実際に X 線を受ける active 領域で、 1024×16 個は、実際に HOC(Horizontal Over Clock) 領域と呼ばれる。

これは、AE 内の回路部分でのゼロレベルの変移量に対応している。ただし、このような変移分は前述のダークレベルにすでに含まれているので、XIS-DE ではピクセルレベルの算出にバイアスレベルを考慮しない。ただし、AE 内の回路状態のモニタとして使えるので常時テレメトリに出力される。

上で定義されたピクセルレベルを用いて、イベント編集を行なう。イベント編集の方法は、指定されたエディットモードに従う。なお、このあたりの詳細については、[11] を参照されたい。

3.2.3 ピクセル処理

クロックモードの違いによって、ピクセル処理の方法が若干違う。下に簡単にピクセル処理の順番を述べる。

- ノーマル / バーストモード
 - 1: ダーク差引き
 - 2: イベント検出
 - 3: イベントなしのピクセルデータを使用して光洩れ処理を行なう
 - 4: パケット編集

- パラレルサムモード
 - 1: ダーク差引き
 - 2: イベント検出
 - 3: グレード判定
 - 4: ダークアップデート
 - 5: パケット編集

第 4 章

単色 X 線に対する CCD のスペクトル

4.1 XIS で得られるデータの形態

まず、XIS に単色 X 線を照射した場合、どのような形態のデータが得られるのか説明する（これは一般の CCD で得られるスペクトルでも同じである）。

XIS から得られるデータの形は、各ピクセルの位置と、そのピクセルで取得された電荷に比例する波高値との 2 次元ヒストグラムである。すなわち、一回の受光蓄積時間（Normal/Burst モードなら 8sec）毎に、一枚のイメージ（フレームデータという）が得られる。そのフレームデータからダークフレーム（前章参照）を引いてやったものが、入射 X 線に起因する基本的なフレームデータである。次に各々のピクセルの波高値を調べてやることにより、波高値と、その波高値をとるピクセルの頻度分布をかぞえる。その作業を何枚ものフレームデータに対しておこない、波高値と、その波高値をとるピクセルの頻度分布をプロットしてやったものを図 4.1 に示す。

CCD は X 線が当たっていないピクセルも出力するので、そのようなピクセルの形成する波高値分布のピークをゼロレベルと呼ぶ。図 4.1 のスペクトルの一番低エネルギー側に見えるのが、ゼロレベルのピークである。また、一番高エネルギー側とそのすぐ左どなりのピークは、それぞれ $MnK\beta$ 、 $MnK\alpha$ のラインである。また、ゼロレベルピークと、 $MnK\alpha$ のラインのピークの間連続成分から少しつきだしている小さな 2 つのピークは、それぞれ低エネルギー側からシリコンの $K\alpha$ ライン、 $MnK\alpha$ のエスケープピークライン（後述）である。

4.2 イベント検出

上で得られたスペクトルは、単にあるピクセルにおける波高値を調べ、その頻度をプロットしたものであるから、入射 X 線起因でないものも含まれている。ここでは、入射 X 線起因のイベントのみを取り出す方法として、ASCA（SIS）で採用されたイベント検出方法を述べる。

X 線が CCD に入射すると、その X 線のエネルギーに比例した量の電荷が生成される。

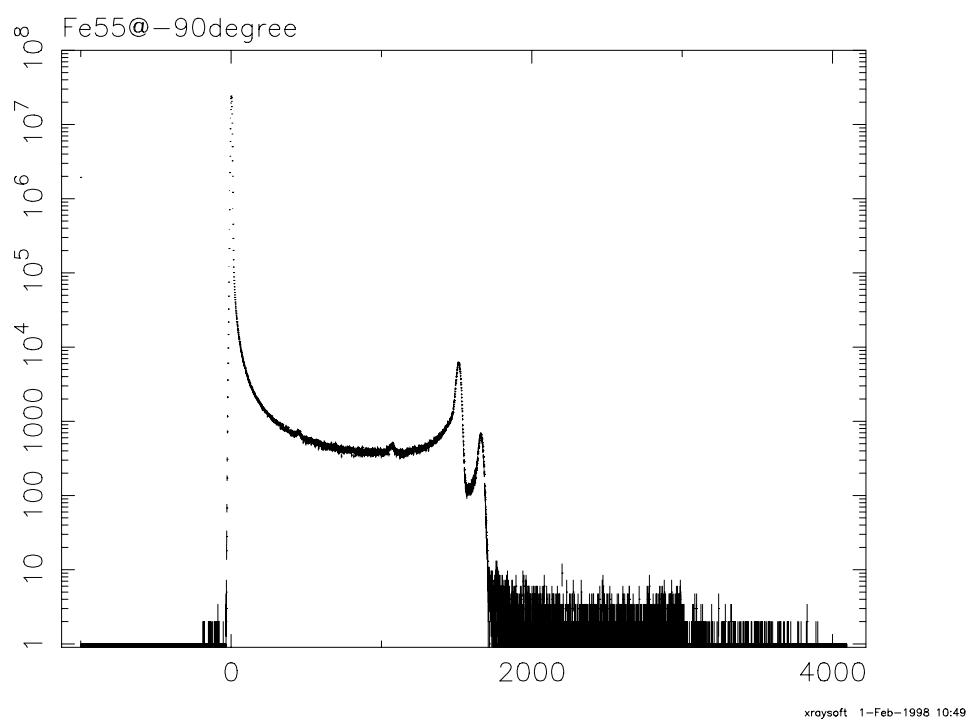


Figure 4.1: ^{55}Fe を照射した場合の CCD でとられた生データのスペクトル (但しダークフレームは引かれている)。横軸：チャンネル (波高値)、縦軸：カウント数 (頻度)

電荷の広がりがゼロならば、入射 X 線のエネルギーに比例した量の電荷がすべて一つのピクセルに収まることになるので、波高値が極大をとるピクセルすべてを探して、その電荷の量を数えてやれば良い。

しかし実際は電荷の広がりはゼロではなく、電荷が複数のピクセルにまたがる可能性がある。そこで、入射 X 線光子によって生成したすべての電子を加算するために、ASCA (SIS) ではグレードという概念を導入している。

まずは、CCD の各ピクセルについての波高値を調べ、その波高値がある閾値 (イベント閾値と言う) を越えているものを選び出す。そのようなピクセルすべてに対して、そのまわりの 3×3 ピクセルをとりだして、中心のピクセルの波高値が極大値であるかどうかを調べる。極大値をとっていたならば、そのピクセルにおいて X 線との相互作用が行なわれたとみなし、イベントと認識する。極大値をとっていない場合は無視する。

次にイベントを中心としたまわりの 8 ピクセルが、ある閾値 (スプリット閾値と言う) を越えているかどうか調べ、閾値を越えたピクセルのパターンにのっとなって、グレード選別を行なう。まわりのピクセルの内一つでもスプリット閾値を越えているものが存在する場合は、入射 X 線によって生成された電荷が 1 ピクセルに収まりきらずに 2 ピクセル以上に洩れこんでいる可能性が高い。その場合は中心ピクセルの電荷に対して、まわりのピクセルのうちのスプリット閾値を越えたものに対する電荷の足しあげをおこなう。

中心の 1 ピクセルだけに電荷が収まっているイベントを、シングルイベントというのに対し、このように 2 ピクセル以上にまたがっているイベントをスプリットイベントという。スプリットイベントのうち、グレード 7 のイベントは、グレード 0 ~ グレード 6 のどれにも当てはまらないイベントのことをいうが、X 線イベントでない可能性が高い。また、電荷の広がりの形は、おおむねまき形であると考えられるので、角のピクセルにスプリット閾値を越えるような電荷を持つイベント、すなわちグレード 1 などのイベントも X 線起因のイベントである可能性は低い。ASCA (SIS) ではこのようなイベントのうちグレード 0、グレード 2、グレード 3、グレード 4 を X 線イベントとしている。

例として、 $MnK\alpha$ を二次 X 線として当てた時のスペクトルの様子を 図 4.3 に載せる。全体的特徴を簡単に述べる。シングルイベントがもっともイベント数が多く、ついで縦にスプリットしたグレード 2 イベントの数が多い。それに引き続いて田の字型に広がったイベントであるグレード 6 イベント、そして横方向にスプリットしたグレード 3、グレード 4 イベントの順になっている。横方向にスプリットしたイベント (グレード 3 + グレード 4) が、縦方向にスプリットしたイベントよりも少ないのは、電極構造が縦方向と横方向でことなるためである。すなわち横方向にスプリットするには、チャンネルストップのポテンシャル障壁を越える必要があるからである。

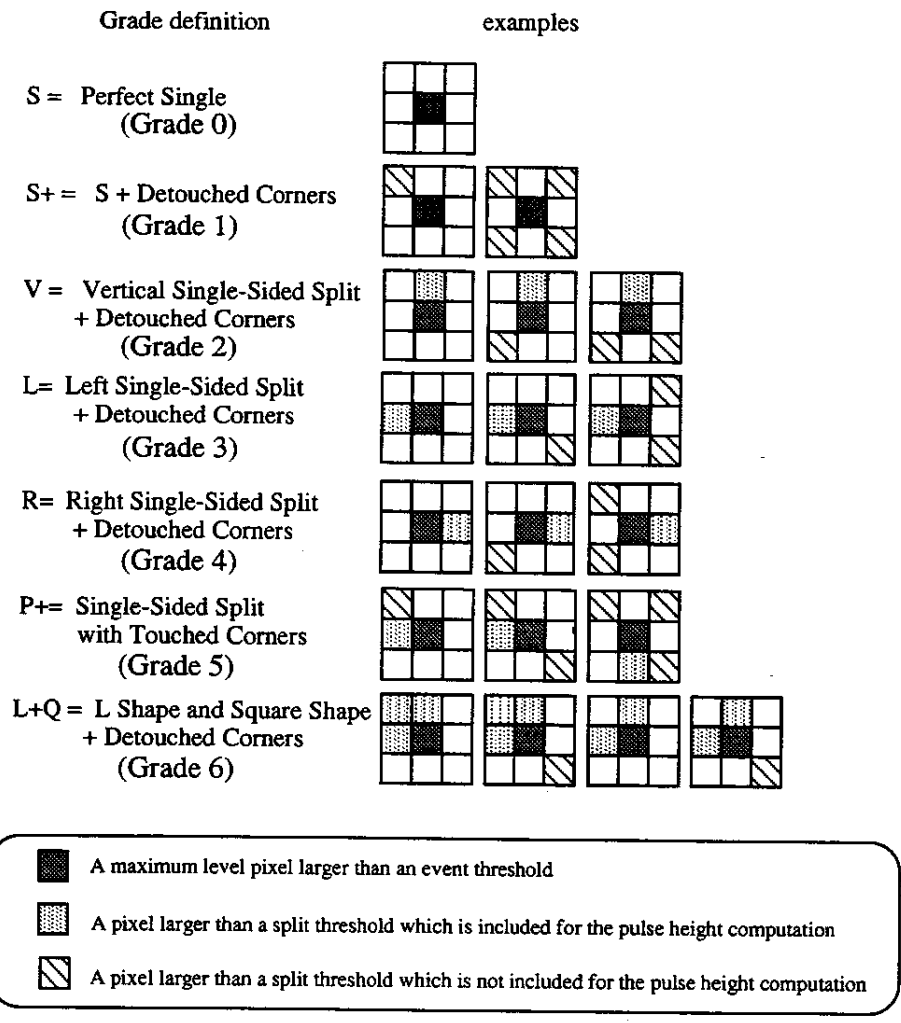


Figure 4.2: グレードによるイベント検出法

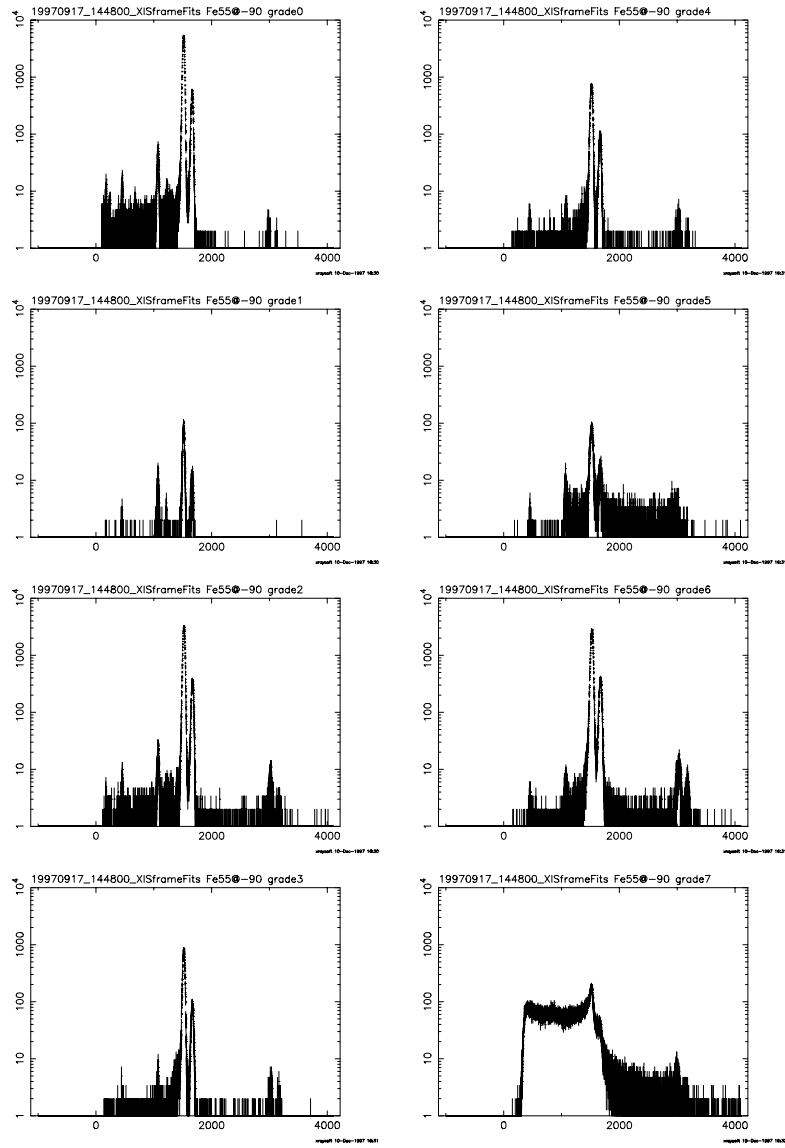


Figure 4.3: Mn を当てた時のスペクトルの様子。左の列の上からグレード0、グレード1、グレード2、グレード3、右の列の上からグレード4、グレード5、グレード6、グレード7に対応する。MnK α 、MnK β 、MnK α エスケープピーク、MnK β エスケープピーク、SiK α のラインが見えている。

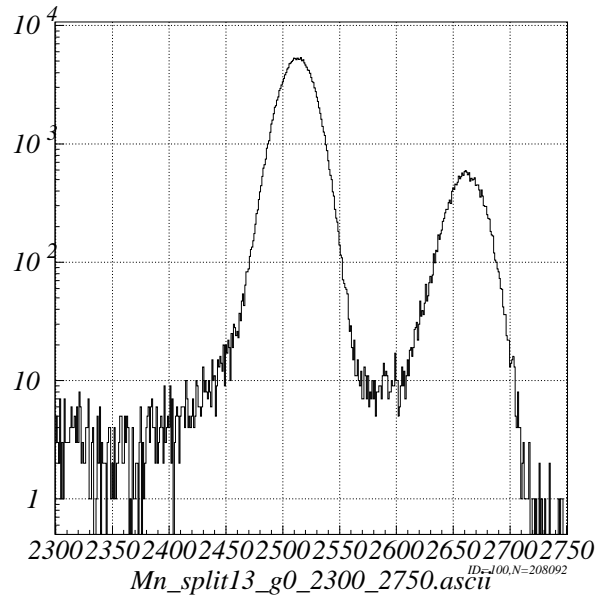


Figure 4.4: MnK α MnK β のスペクトル。低エネルギー側にテールをひいているのがわかる。(注意：チャンネルは、解析ソフトの都合上 1000 チャンネルのオフセットがついてる。)

4.3 CCD 内部での電子雲のふるまい

このようなイベント検出を経て得られた単色 X 線のスペクトル (シングルピクセルイベント) の MnK α 近傍のスペクトルの拡大図を、図 4.4 にしめす。一見してわかるように MnK α ピークは左右対称な単純なガウシアンではなく、低エネルギー側に裾をひいた形をしている。どうしてこのように左右非対称な形のスペクトルになるか考える。

CCD の内部は受光面側から、電極、空乏層、中性領域に大きく分けられる。入射 X 線が CCD 内のどの場所で吸収されるかによって、できた電子雲のふるまいが異なり、したがって形成されるスペクトルの形も異なる。

ここでは、各々の場所で X 線が吸収された場合、できた電子雲はどのような振舞いをするかについて述べ、形成されるスペクトルの形状を簡単に述べる。

4.3.1 空乏層

空乏層で入射 X 線が吸収されると、できた電子雲は強い電場に引かれて電極の位置までドリフトする。その際、一次電子雲の分布の形状がガウシアンで近似できるとし、またドリフト中もその形状を保つと仮定する。

一般に一次電子が作られた直後の広がりは入射 X 線の電場ベクトルの方向に

$$R = 0.0171 \times (E - E_b)^{1.75} \mu m \quad (4.1)$$

とあらわせる ([8]、[19]、[20]、[21] 参照)。E は入射 X 線のエネルギー、 E_b は、とびだした電子の結合エネルギーである。例えば、5.9keV の X 線であればこの値は $\sim 0.2\mu\text{m}$ 程になる。これに対して、1 ピクセルの大きさは $24\mu\text{m}$ 四方であるから、一次電子雲の広がり自体はそれほど問題にはならない。しかしこの一次電子雲は、シリコン中を電極付近までドリフトする間に次のような式にしたがって広がる。

$$v_z = dz/dt = \mu E(z) \quad (4.2)$$

$$E(z) = dV(z)/dz \quad (4.3)$$

$$(4.4)$$

v_z : ドリフト速度

μ : 移動度

$E(z)$: 深さ z における電場

$V(z)$: 深さ z における電圧

空乏層中のポテンシャルは

$$\frac{d^2V(z)}{dz^2} = \frac{qN_A}{\epsilon_{Si}} \quad (4.5)$$

N_A : 不純物濃度

ϵ_{Si} : シリコンの permittivity

とあたえられる。これに対して、空乏層の端ではポテンシャルも電場もゼロであるという境界条件、

$$V(z = l_d) = 0 \quad (4.6)$$

$$\left. \frac{dV(z)}{dz} \right|_{z=l_d} = 0 \quad (4.7)$$

$$(4.8)$$

l_d : 空乏層厚

を課してやることにより、最終的には次のような式で表せる。

$$V(z) = \frac{qN_A}{2\epsilon_{Si}} l_d^2 (1 - z/l_d)^2 \quad (4.9)$$

これより電子のドリフト時間は、 $z=0$ で $t=0$ であると考えれば、

$$t = \frac{\epsilon}{\mu e N_A} \log\left(\frac{l_d}{l_d - z}\right) \quad (4.10)$$

z : X 線の止まった深さ

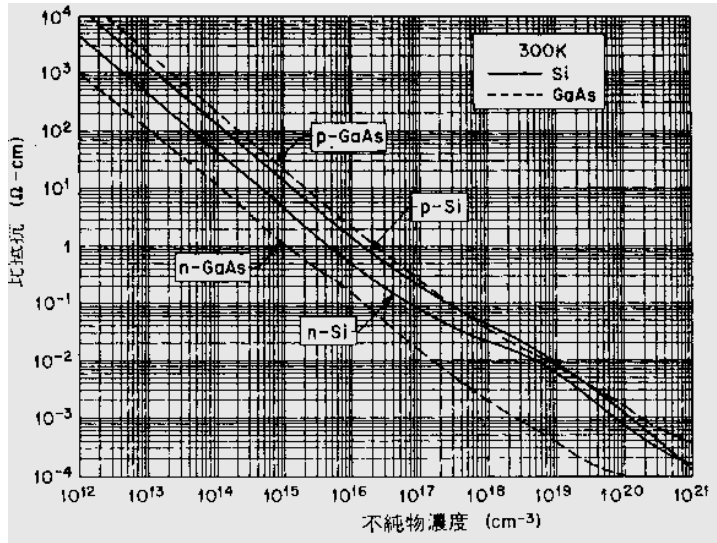


Figure 4.5: Si および GaAs における比抵抗と不純物濃度の関係

となるので、拡散の 1σ 半径は、拡散定数を D として

$$r_d = \sqrt{2Dt} = \sqrt{\frac{2D\epsilon}{\mu e N_A} \log\left(\frac{l_d}{l_d - z}\right)} \quad (4.11)$$

となる。

CCDID17 chip の比抵抗は、MIT Calibration report によると $\rho > 6500 \Omega - \text{cm}$ である。これと、図 4.5 により、CCDID17 chip の不純物濃度は、 $\sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ である。したがって、図 4.6 により、CCDID17 chip 中の電子の移動度と拡散係数はそれぞれ、 $\mu \sim 1300 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、 $D \sim 35 \text{ cm}^2/\text{s}$ となる（図 4.5 と図 4.6 は、[16] より抜粋）。 $D = 35 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、 $l_d = 50 \mu\text{m}$ 、 $N_A = 10^{12} / \text{cm}^3$ とした時、相互作用をおこした位置と拡散半径の関係は図 4.7 に表される。

これから入射 X 線が相互作用をおこした位置が深ければ深い程、すなわち、入射 X 線のエネルギーが高ければ高いほど、電荷の広がりは大きくなることになり、1 ピクセルサイズ ($24 \mu\text{m}$) に対して無視できない値となる。すなわち電極付近では、入射 X 線のエネルギーが高くなるほど電荷の広がりが、1 ピクセル内に収まることなく、2 ピクセル以上にまたがる可能性が高くなる。したがってその洩れ出しがスプリット閾値以下ならば、グレードゼロと認識されることになり、結果としてパルスハイトが、洩れだした電荷分低くなる。このようなイベントが低エネルギー側の裾を形成すると考えられる¹。

¹詳細は 5.6.1 章参照

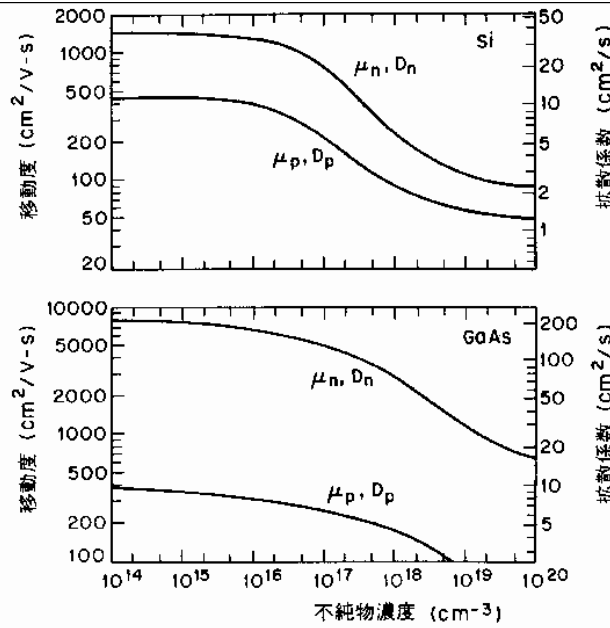


Figure 4.6: Si および GaAs における、キャリアの移動度と拡散係数の不純物濃度依存性

4.3.2 中性領域

入射 X 線が空乏層をつき抜けて、その下の中性領域で吸収された場合を考える。中性領域には空乏層のように電場がかかっていないので、次の拡散方程式にしたがってどんどん拡散する。従って、電極に到達した時の電荷雲の広がりイベント検出で使う 5×5 ピクセルサイズより大きくなる。このため 5×5 ピクセルでは全電荷を集めることができず、本来のエネルギーよりもさらに低エネルギー側に分布することになる ([8] 参照)。

$$D \nabla^2 \rho - \frac{\rho}{\tau} = \frac{d\rho}{dt} \quad (4.12)$$

ρ : 電子密度

τ : 自由電子の寿命

入射 X 線が吸収された場所を $r=0$ として円柱座標をとる (z 方向は電極と反対で垂直な方向、 $z=0$ は中性領域と空乏層の境界)。

初期条件、境界条件として、次のようなものを課してやる。

$$\rho(r, z, t) |_{t=0} = \rho_0 \delta(z - z_0) \frac{\delta(r)}{2\pi r} \quad (4.13)$$

$$\rho(r, z, t) |_{z=0} = 0 \quad (4.14)$$

$$-D \frac{\partial \rho}{\partial z} |_{z=0} = \frac{DT\rho}{LR} \quad (4.15)$$

$$(4.16)$$

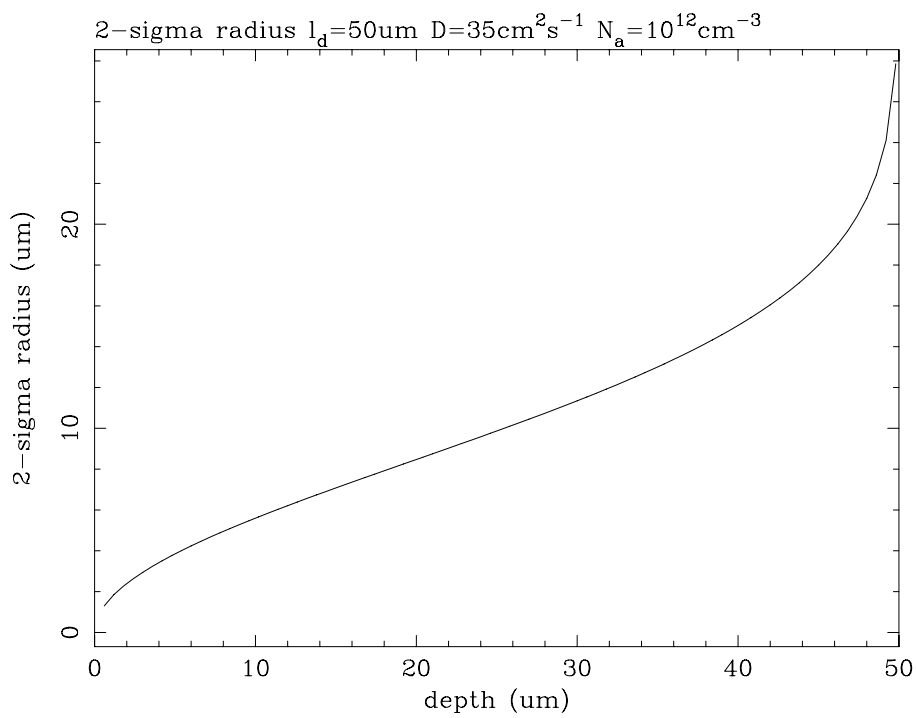


Figure 4.7: 空乏層の深さが $50\mu\text{m}$ とした時の電極の位置における電荷の広がり (2σ 半径)。横軸は X 線が吸収された深さ (μm)、縦軸は 2σ 半径 (μm)。ただし、 $N_a=10^{12}\text{cm}^{-3}$ 、 $D=35\text{cm}^2\text{s}^{-1}$

L: 拡散長 ($= \sqrt{D\tau}$)

d: 中性領域の厚み

z_0 : X 線の吸収された位置 (中性領域と空乏層の境界からの深さ)

R と T は、中性領域とその下の基板領域の境界での電子の振舞いを表す定数である。境界で電子が反射されるならば、 $R=1$ 、 $T=0$ 。反射されずに基板領域につき抜けるなら、 $R=0$ 、 $T=1$ 。

拡散方程式 (4.12) を以上の条件のもとに解くと、

$$\rho(r, z, t) = \rho_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{4\pi Dt} \exp\left(-D \frac{\alpha_n^2}{d^2} t - \frac{t}{\tau} - \frac{r^2}{4Dt}\right) \sin\left(\frac{\alpha_n}{d} z\right) \quad (4.17)$$

$$a_n = \frac{2\beta}{\beta + \cos^2 \alpha_n} \frac{1}{d} \sin\left(\frac{\alpha_n}{d} z_0\right) \quad (4.18)$$

α_n : 超越方程式 $\tan \alpha = -\frac{LR}{dT}$ の解

今、中性領域と基板の境界において、電子が反射と考えると、境界条件での定数は $R=1, T=0$ となる。従って、

$$\alpha_n = \frac{2n+1}{2} \pi \quad (4.19)$$

(4.17) より、空乏層と、中性領域の境界での電子流密度が次のように表せるので、

$$j(r, z, t) \Big|_{z=0} = D \frac{\partial \rho}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\rho_0}{d} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n \alpha_n}{4\pi t} \exp\left(-D \frac{\alpha_n^2}{d^2} t - \frac{t}{\tau} - \frac{r^2}{4Dt}\right) \quad (4.20)$$

電荷分布は

$$q(r) = \int_0^{\infty} j(r, 0, t) dt \quad (4.21)$$

$$= \frac{\rho_0}{2\pi d} \sum_{n=1}^{\infty} a_n \alpha_n K_0\left[\frac{r}{d} + \sqrt{\alpha^2 (d/L)^2}\right] \quad (4.22)$$

$$(4.23)$$

K_0 : 0 次の第 2 種変形ベッセル関数

従って、中心から半径 R の中にある電荷 $h(z_0, R)$ は、

$$h(z_0, R) = \int_0^R q(r) 2\pi r dr \quad (4.24)$$

$$= h(z_0, \infty) - \rho_0 R \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha_n a_n}{\sqrt{\alpha^2 (d/L)^2}} K_1\left[\frac{R}{d} \sqrt{\alpha^2 (d/L)^2}\right] \quad (4.25)$$

$$(4.26)$$

K_1 : 第 2 種変形ベッセル関数

$$h(z_0, \infty) = \rho_0 d \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha_n a_n}{\sqrt{\alpha^2 (d/L)^2}} \quad (4.27)$$

と表せる。

4.3.3 部分吸収

不感層 (SiO_2) 内の平均電離エネルギーと電子の飛程が、シリコン内部のそれと違う値をとるために、同じエネルギーの入射 X 線が入ってきても、シリコン内部 (空乏層、中性領域) で吸収される場合と、不感層内部で吸収される場合ではメインピークの出る位置が異なる。(不感層内の実効平均電離エネルギーは、 $52\text{eV}/\text{pair}$ である。この値は、再結合によるロスをも含むために、文献等で得られる平均電離エネルギーの値 $17\text{eV}/\text{pair}$ より大きく異なる ([22]、[23]))。

XIS の CCD の不感層厚は十分薄いので、入射 X 線が吸収される場所、また生成された光電子の飛んでいく方向によっては、

- 1 : イベントが不感層部分で吸収される
エネルギーの一部が不感層部分で電子に変換され、
不感層部分で吸収されなかった残りが空乏層内で吸収される。
- 2 : イベントが空乏層部分で吸収される
エネルギーの一部が空乏層内で電子に変換され、
残ったエネルギーが不感層部分で電子に変換される。

のようないわゆる「部分吸収」のイベントを生成することになる。

X 線が吸収される場所に、不感層が関係する場合、生成されるスペクトルは大きく次の 2 種類にわかれる。

- 1 : 入射 X 線のエネルギーが低い場合 (Si K edge エネルギー付近)
1 次電子雲の広がりが、不感層の厚さ ($\sim 70\text{nm}$) に比べて小さいため、電荷すべてが不感層内で吸収されるようなイベントが存在する。従って、生成されるスペクトルは、メインピークの $\sim(1/10)$ 程度のエネルギー付近に小さなピークを持つ。さらに上述の部分吸収イベントの形成するダラダラとした低エネルギー側の連続成分を持つ (Si 中と、 SiO_2 中のバンドギャップの値が 1.12eV 、 9eV であることより、この低エネルギー側のピークのイベント数は、メインピークのイベント数の、約 $(1/10)$ 程度となる。) ([22]、図 4.9 参照)。
- 2 : 入射 X 線のエネルギーが高い場合
1 次電子雲の広がりが不感層の厚さに対して無視できなくなる。従って 1 の場合のように、電荷すべてが不感層内で吸収されるようなイベントは少なくなる。その代わりに、電荷雲のうち SiO_2 に収まりきらずに SiO_2 よりもさらに受光面側にある Si_3N_4 の中に電荷を吸われ、その部分が失われるようなイベントが増える (注: Si_3N_4 中のポテンシャルは、 SiO_2 よりも低いために、入ってしまった電荷は出てこれない)。これらのイベントは、図 4.10 に見られるようなピークを持たず、低エネルギーに向かってどんどん増えるような構造を作る。従って、生成されるスペクトルは、低エネルギー側にピークにはならない広がった構造と、部分吸収による連続成分になる。 ([8]、[22]、[23] 参照)。

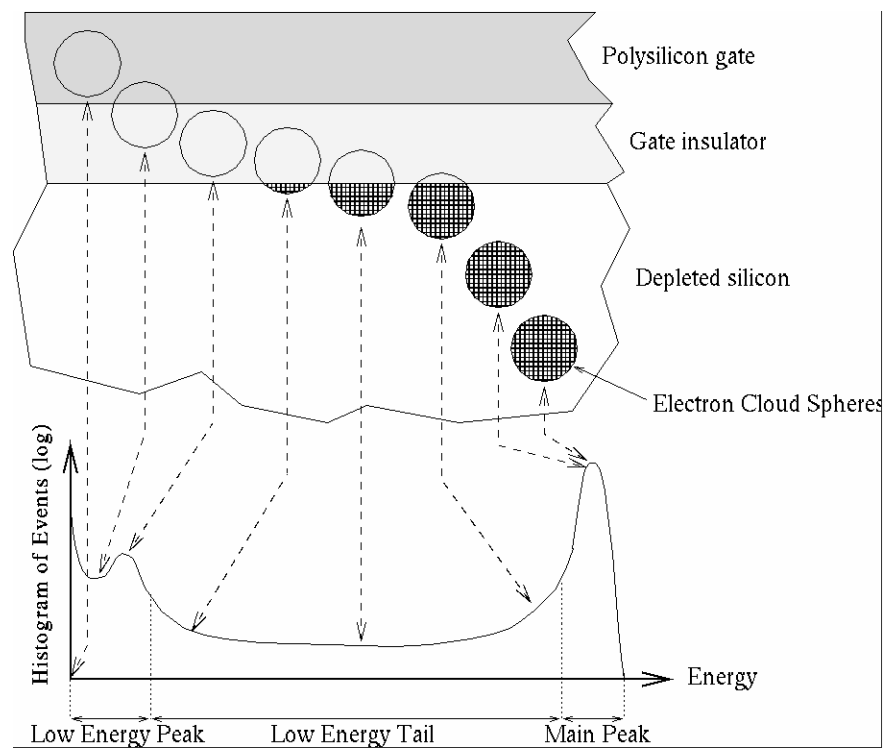


Figure 4.8: 電極の下の不感層で吸収される「部分吸収」のイベント。MIT の ACIS Calibration report より抜粋。

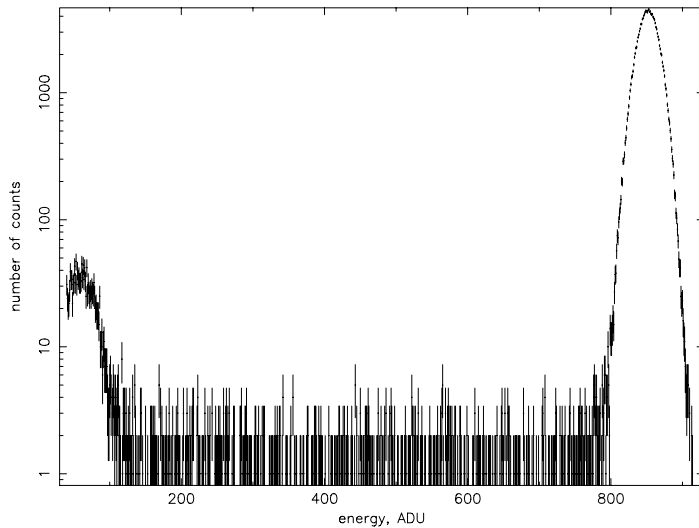


Figure 4.9: 1700eV のエネルギーの X 線が不感層付近で吸収された場合に作るスペクトル。Si K edge 以下のエネルギーの X 線は同様なスペクトルを形成する。MIT の ACIS Calibration report より抜粋。

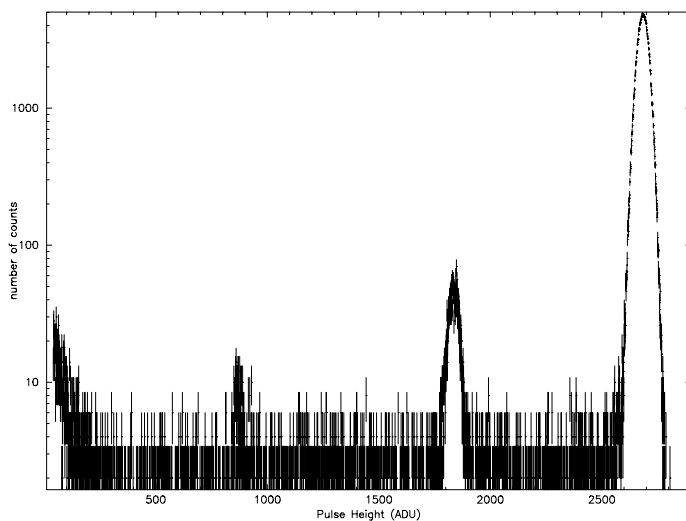


Figure 4.10: 5414eV のエネルギーの X 線が不感層で部分吸収を受けた場合に作るスペクトル。一次電子雲の大きさが不感層厚に比べて無視できなくなるような高エネルギー X 線は、同様なスペクトルを形成する。MIT の ACIS Calibration report より抜粋。

4.4 エスケープイベントとシリコン蛍光 X 線イベント

シリコンの吸収端のエネルギーよりも大きなエネルギーの X 線が入射した場合、図 4.1 に見られるように、かならずある確率でエスケープイベントと、シリコンの蛍光 X 線イベントが発生する。ここでは、それらのイベントの発生機構について述べる。

4.4.1 エスケープイベントの発生機構

CCD にシリコン吸収端以上のエネルギー E の X 線が入射すると、X 線は空乏層内の Si 原子に光電吸収される。その際、一番吸収断面積の大きな K shell 電子に当たり K shell 電子が弾き飛ばされることによって結果的に $E - E_k$ だけのエネルギーを持った光電子が生成される。残った Si 原子からは、多くの場合合計 E_k だけのエネルギーを持ったオージェ電子が放出される。(非エスケープイベント)しかし、約 3 パーセントの割合で、オージェ電子の代わりに Si の蛍光 X 線が放出される。Si の蛍光 X 線が発生した後、次の 3 つの過程が考えられる。

過程 1 : Si の蛍光 X 線が十分近傍で再び Si 原子に吸収される。

過程 2 : Si の蛍光 X 線は、空乏層から外に逃げ去ってしまう。

過程 3 : Si の蛍光 X 線が、遠くで(異なったピクセル)再び Si 原子に吸収される。

このうち、2 と 3 の過程においては、もともとの入射 X 線のエネルギーから Si の蛍光 X 線のエネルギーに対応する分だけ差し引いた値が、出力信号として出され、一つのピークを作ることになる。このようなイベントをエスケープイベントと呼ぶ。

4.4.2 シリコン蛍光 X 線イベントの発生機構

Si の蛍光 X 線イベントの発生機構は、2 つ考えられる。1 つ目は上の 3 の過程に従う場合、エスケープイベントと同時に、Si の蛍光 X 線のイベントも検出されるというものである。すなわち、エスケープイベントが検出されるピクセルとは異なったピクセルで、Si の蛍光 X 線が検出されるため、別々のイベントと見えてしまうわけである。

二つ目に考えられる Si 蛍光 X 線イベントの発生機構は、入射 X 線が空乏層ではなく、電極部分の Si に吸収されることによって出てくるものである。CCD に入射してきた X 線は、特に低エネルギーになればなるほど、空乏層に達する前にポリシリコンでできている電極部分に吸収される割合が高くなる。電極部分でも、上の機構と同様に Si の蛍光 X 線が発生する場合があり、その Si 蛍光 X 線が空乏層に吸収されることによって、Si のイベントが検出される。この過程を 4 とする。²

²各々の過程に番号が付けられているのは、次章でエスケープイベントに対するモデル計算を行なう際に使用するためである。

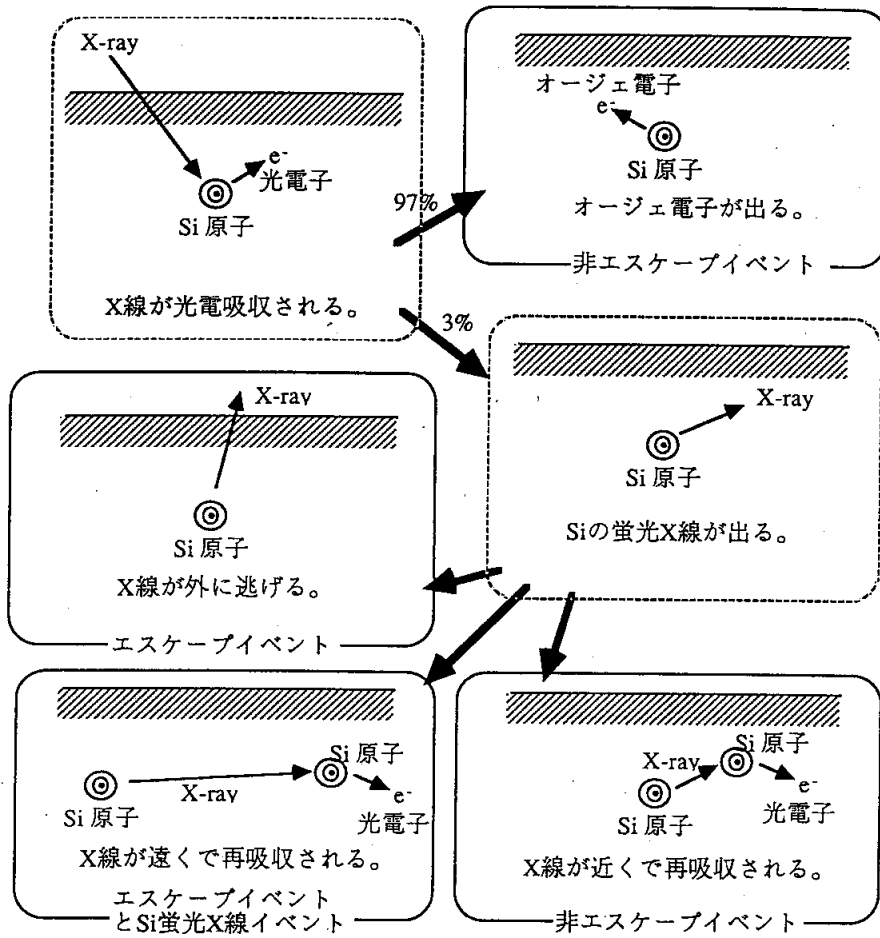


Figure 4.11: エスケープイベントの発生機構（小谷修士論文 [1] より抜粋）

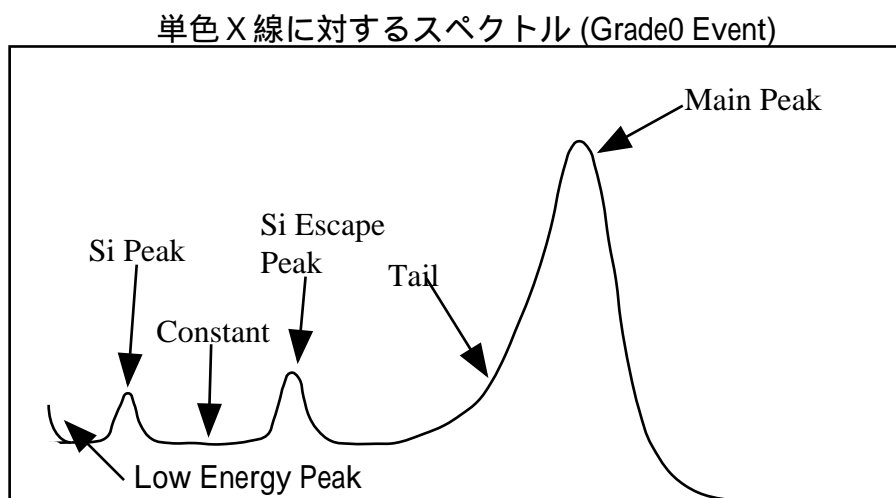


Figure 4.12: 単色 X 線に対するスペクトル

以上を簡単にまとめると、形成されるスペクトル (グレード 0) は図 4.12 のようになる。

第 5 章

性能評価

5.1 性能評価の最終目標

我々の性能評価の最終目標をあげる

- 0.1% の誤差の範囲でエネルギースケール（エネルギーチャンネル関係、エネルギー分解能）を決定する。
- 単色 X 線に対するスペクトルの形の再現を、誤差を 3% 以下で行なう。
- 10% の誤差の範囲内で量子効率を決定する。但し、Astro-E に搭載される他の検出器との相対誤差は、5% 以内に収めなければいけない。

以下、レスポンス関数作成の際に必要なパラメータを調べるために XIS の Evaluation Model から得られたデータの解析を行なう。キャリブレーションの最終的な目的は、レスポンス関数作成である。しかし、XIS の Evaluation Model から得られたデータを使って、今我々が行なうべきことは、「レスポンス関数を作る」ことではない。Evaluation Model の段階で、XIS のシステム全体に不都合がないかどうかを調べ、あった場合はその点の改善を行なうこと、また、XIS に使われている CCD の特性を理解すると共に、XIS の Flight Model がやってきた際に、戸惑うことなく限られた時間内で、レスポンス関数作成を行なうことができるよう、その方法を確立することである。したがって、1 台の CCD は、4 つのセグメントにわかれているが、そのすべてに対して詳細な解析を行なうことは必要ない。CCD の特徴を知るためには、一つのセグメントに対して調べるだけで十分である。以下に行なった解析は、すべてセグメント A に対して行なった結果のみであることに注意されたい。

5.2 性能評価システム

京都大学宇宙線研究室における XIS の性能評価システムは、蛍光二次 X 線発生系、データ取得系 (図 5.1) からなる。

5.2.1 蛍光二次 X 線発生系

はじめに蛍光 X 線発生システムとその強度モニターシステムについて説明する。蛍光二次 X 線発生システムとその強度のモニターシステムは、クリーンルーム内に設置されている。まず、用語の統一をしておく。以下、図 5.1内の二つの真空チェンバーを、二次 X 線発生チェンバー（図中右側）、サンプルチェンバー（図中左側）と呼び、二次 X 線発生チェンバーに取り付けられている SSD をリアルタイムモニター SSD、サンプルチェンバーに取り付けられている SSD をキャリブレーション SSD と呼ぶことにする¹。

我々は一次 X 線発生装置として、KEVEX 社製の 5039S を使用している。理由は強度の強い X 線が発生可能で、かつ発生される X 線の強度が安定していること、空冷式であるなどである。X 線発生装置中の真空管の中で高電圧をかけて加速された電子は、一次ターゲット（タングステン）に当たり、大きな加速度を受け一次 X 線を放射する。

一次 X 線は、二次 X 線発生チェンバー内に設置されている二次ターゲットボックスに照射されるようになっている。連続 X 線とタングステンの特性 X 線を含む一次 X 線が二次ターゲットに照射され、ターゲット中で反射、散乱されることにより、そのターゲット固有の特性 X 線が発生させることができる。二次 X 線発生チェンバー内には回転ステージが設置されており、8 個の異なった二次ターゲットボックスがインストールできるようになっている。回転ステージをまわしてやることにより、ターゲットの交換なしに 8 種類の異なった X 線が発生できるようになっている。

こうやって発生された蛍光二次 X 線は、二次 X 線発生チェンバーからサンプルチェンバー内に誘導され、サンプルチェンバー中央にインストールされている XIS に照射される。XIS は、サンプルチェンバー内に設置されている X ステージ上にインストールされる。X ステージとは XIS を二次 X 線ビームに対して垂直方向に動かすための装置である。この装置により、XIS を二次 X 線ビームライン上にのせる、外すの操作を行なう。

性能評価システム内で発生する二次 X 線は、キャリブレーション SSD と、リアルタイムモニター SSD によりモニターされている。リアルタイムモニター SSD は、常時二次ターゲットボックスから出てくる二次 X 線を監視し、強度に変動がないかどうか調べる。すなわち名前通り、real time での二次 X 線の強度モニターをおこなう。キャリブレーション SSD の方は、XIS をインストールしている場所でのスペクトルを測定することと、二次 X 線の絶対強度の測定に用いる。二次 X 線の絶対強度の測定は次の様に行なう。キャリブレーション SSD は、XIS とおなじ二次 X 線ビーム上に設置されているため、XIS に二次 X 線が当たっている時は同時にキャリブレーション SSD に X 線は当たらない。そこであらかじめ、Proportional Counter を XIS がインストールされる位置と同じ場所におき、その位置での二次 X 線強度を測定し、XIS の位置での二次 X 線強度と、キャリブレーション SSD の場所での二次 X 線強度の関係を調べておく。我々は、XIS に二次 X 線を照射してやる前後に、かならず X ステージを動かし XIS をビームライン上からはずしてキャリブレーション

¹リアルタイムモニター SSD は太郎、キャリブレーション SSD は次郎という愛称が付けられている。

SSD に二次 X 線を照射する。その際の二次 X 線強度から上の関係を用いて XIS での位置での二次 X 線強度を知る。

5.2.2 データ取得系

XIS で取得されたデータは、クリーンルーム内の Sun ワークステーション (fudou) で取り込まれる。取り込まれたデータは、Network を通じてクリーンルーム外部に運ばれ、DECα ワークステーション (fukuu) 内で蓄積、かつ QL 解析が行なえるようになっている (図 5.2)。

5.3 行なわれた実験と取得されたデータ

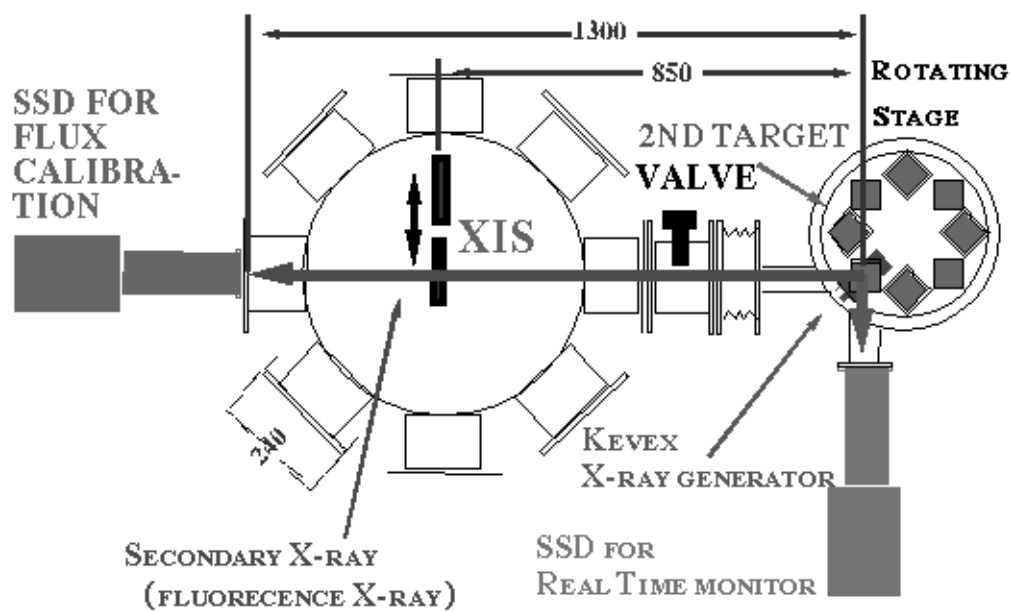
京大の性能評価システムを使用した XIS の性能評価実験は、1997 年 9 月 17 日～9 月 20 日と、10 月 8 日～10 月 15 日の期間に、また宇宙研の性能評価システムにおいて、1997 年 12 月 22 日～12 月 23 日の期間に行なわれた (TTM の時)。京大の性能評価システムを使用して取得されたデータは、高エネルギー側 (2keV 以上) での、XIS の駆動予定温度 (-90 度) におけるエネルギー分解能やゲインの線形性等を調べる、すなわちレスポンス関数決定のための実験である。(注：低エネルギー側の response 決定のための実験は阪大において行なわれているが、ここでふれない。) 宇宙研の性能評価システムで行なわれた実験は、Astro-E 全体の熱環境の数学モデルを確認するための試験で、Thermal Test Model とよばれる。XIS はこれに参加して、XIS 廻りの熱環境を詳しく測定した。その際に同時に XIS に ^{55}Fe の線源を当ててデータを取得した。

5.3.1 京大のシステムにおいて行なわれた実験

- 方法

実験は、京大のクリーンルーム内にある性能評価システムにおいて行なわれた。エネルギー分解能などの response 関数作成に必要なパラメータを得るには、XIS にいるようなエネルギーの単色 X 線を当ててやる必要がある。我々は、放射性同位元素 (^{55}Fe) からの X 線を基準として使用し、それ以外に京大の性能評価システムで発生することのできる 6 種類の蛍光 X 線を使用した。具体的には、蛍光二次 X 線発生装置 (レインボー) 中に、Al、Cl、Ti、Fe、Ni、Zn の合計 6 種類のターゲットをインストールして一次 X 線を当ててやり、それらから得られる蛍光 X 線を使用した。また、今回の実験において CCD はすべてノーマルモードで駆動された。また CCD からのデータ取得中は、CCD の駆動温度は $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ に保たれた。

XIS calibration System at KYOTO UNIVERSITY



Unit mm

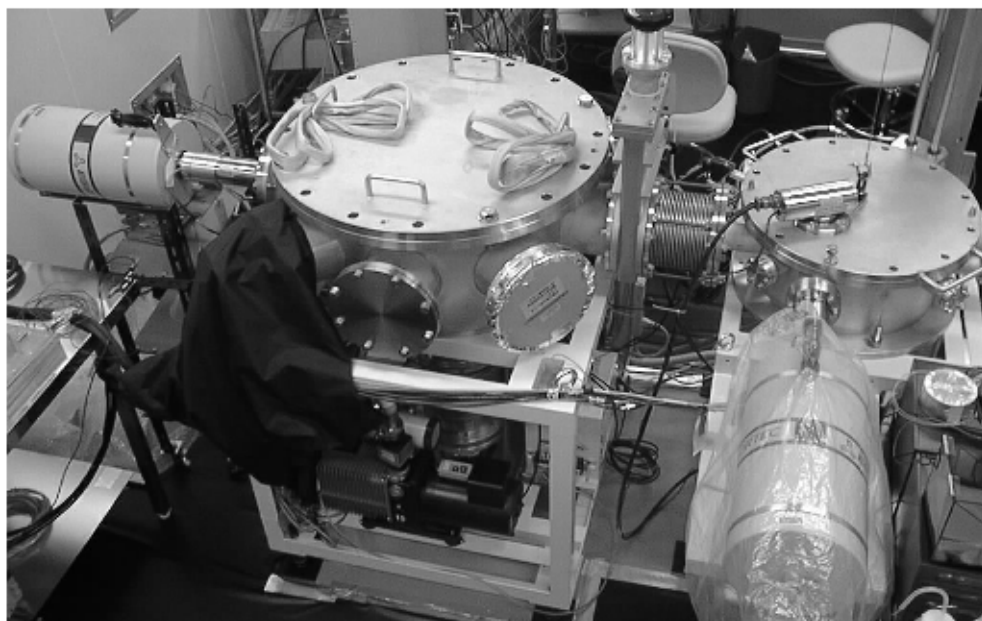


Figure 5.1: 京大における性能評価システム

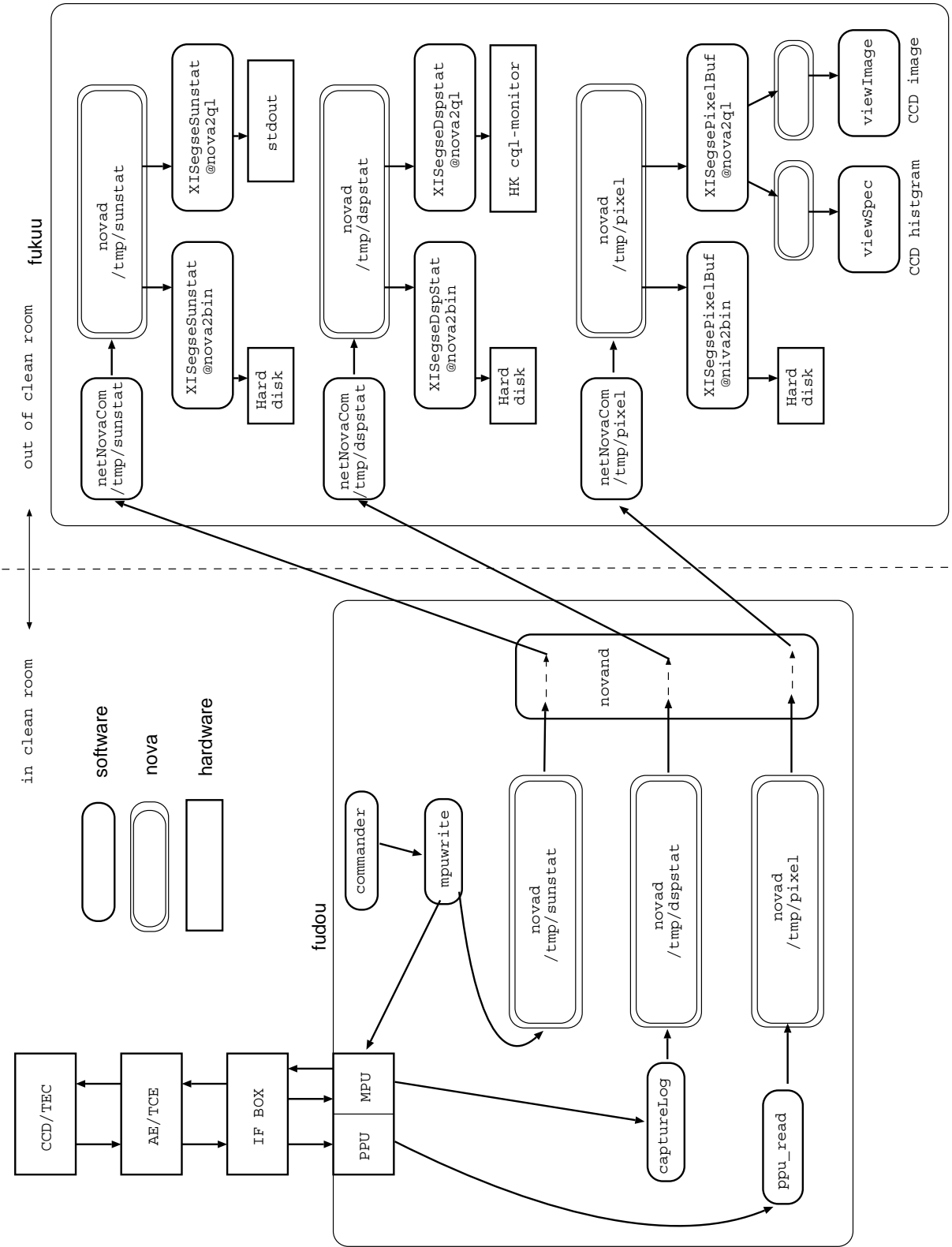


Figure 5.2: データの流れ図

5.4 温度依存性

ここでは、XIS の性能の温度依存性について述べる。ここでいう温度依存性とは、videocard(AE 内のアンプ) の温度依存性と、XIS の CCD チップ自体の温度依存性の 2 つである。

5.4.1 videocard の温度にたいする依存性

videocard がいろいろな温度をとっている時に ^{55}Fe を XIS に照射したデータを使用して解析を行なった。図 4.1に見られるような CCD の生スペクトルから、 ^{55}Fe の $K\alpha$ X 線のピークチャンネルと、ゼロピークのチャンネルの差を調べた。

図 5.3は、videocard の温度 (単位は $^{\circ}\text{C}$) に対する ^{55}Fe の $K\alpha$ X 線のピークチャンネル (単位は ADU) の関係をプロットしたものである。

あきらかに、videocard の温度が変化すると、Mn $K\alpha$ のピークの位置が変化することが見てとれる。videocard の温度が、 1°C 変化すると、Mn $K\alpha$ のピークチャンネルは、 2.70 ± 0.06 (ADU) 変化することがわかった。これは、X 線のエネルギーで $\sim 10\text{eV}$ に相当する。

ピークチャンネルのずれには、エネルギーチャンネル関係の直線の傾きが変わるのか、オフセットが変わるのかの 2 つの可能性がある。そこで、図 5.3の各々の点のデータに対して、今度はシングルピクセルイベントのスペクトルを集積し、そのスペクトルから Mn $K\alpha$ のピークだけではなく、Mn $K\beta$ ピーク、Mn $K\alpha$ エスケープピーク、Mn $K\beta$ エスケープピーク、Si $K\alpha$ ピークを調べてやり、それらからエネルギーチャンネル関係を調べ、そのオフセットと傾きを videocard の温度の関数としてプロットした (図 5.4)。これより、videocard の温度によってオフセットの値はそれほど変化していないのに対し、直線の傾きは videocard の温度が上がると急になることがわかる。

このように videocard の温度によってゲインが変化することが明らかになった。衛星が地球のまわりをまわる際に温度が変化する影響で、XIS-AE の駆動温度が一定に保てないことを考えれば、レスポンス関数を作成する上で、videocard の温度が大変重要なパラメータとなる。これらのことは、AE を提供している MIT と議論の上、MIT がこの問題にかんして AE に改善をくわえた²。現在 Flight Model では温度変化に対するゲインの変化は 0.002

²AE の製作は MIT の担当である。

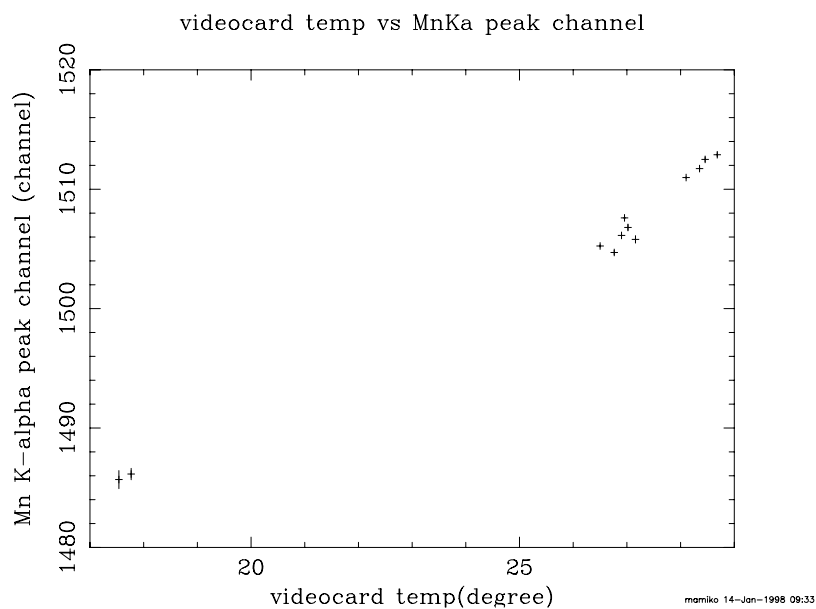


Figure 5.3: MnK α のピークを、videocard の温度の関数としてプロット。横軸は videocard の温度 ($^{\circ}$ C) 縦軸は MnK α のピークチャンネル
videocard temp vs liner and offset

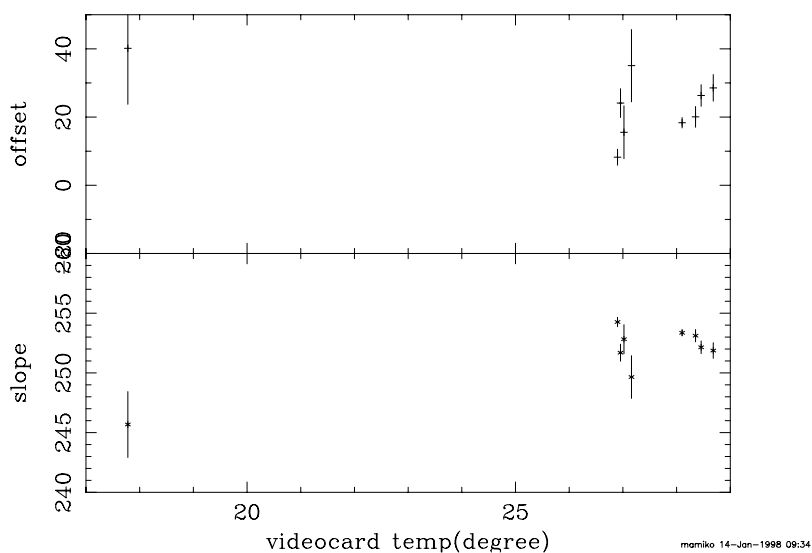


Figure 5.4: Mn K α ピーク、Mn K β ピーク、Mn K α エスケープピーク、Mn K β エスケープピーク、Si K α ピークを使ってエネルギーチャンネル関係を求め、 $\text{channel} = \text{offset} + \text{slope} \times \text{Energy}$ でフィット。その傾きとオフセットの様子を videocard の温度の関数としてプロット。横軸は videocard の温度 ($^{\circ}$ C) 縦軸上段 オフセット (ADU) 縦軸下段 傾き

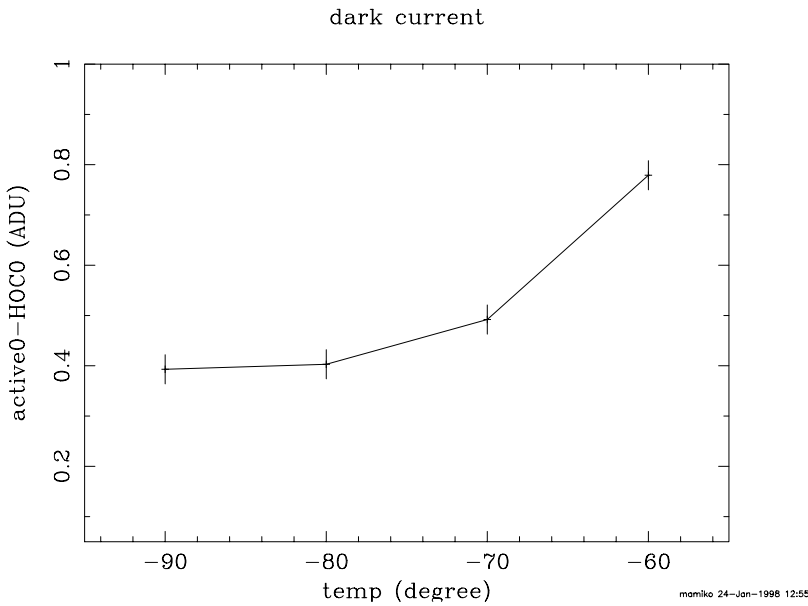


Figure 5.5: ダークカレントの温度依存性。横軸： CCD の温度 ($^{\circ}\text{C}$)、縦軸：ダークカレント (ADU)

5.4.2 CCD チップの温度に対する依存性

– ダークカレントの温度依存性

図 5.5 に、ダークカレントの温度依存性を示す。ダークカレントは、 active 領域のゼロレベルと、 HOC 領域のゼロレベルの差に相当する。従って、各々の領域のゼロレベルのピークをシングルガウシアンでフィットしてやることにより、そのピークチャンネルの差を調べた。 CCD の温度を -60°C から -90°C まで 10°C 刻みに変化させたところ、 CCD の温度が上がるにつれてダークカレントが増えていることがわかった。温度が高くなれば、熱的なエネルギーが増えるため、シリコン中のバンドギャップを飛び越えて伝導帯に上がってくる電子が増えることを考えれば、当然の結果といえよう。 XIS の予定動作温度である、 -90°C におけるダークカレントは、 1 チャンネルが $\sim 3.94\text{eV}$ (後述) であることより、 $0.43\text{e}/\text{pixel}/8\text{sec}$ 程度である。

– 読みだしノイズの温度依存性

図 5.6 に、読みだしノイズの温度依存性を示す。読みだしノイズは、 HOC 領域のゼロレベルの幅に対応する。 -70°C において、グラフ上の点の値が急に大きくなっているのは、 -70°C で取得されたデータに TEC 電圧の振動によるノイズ (後述) がのっていたため、その影響が出ていると思われる。 XIS の動作予定温度である、 -90°C における読みだしノイズは、 $\sim 3.12\text{ADU}$ であり、 3.368e(RMS) に相当する。

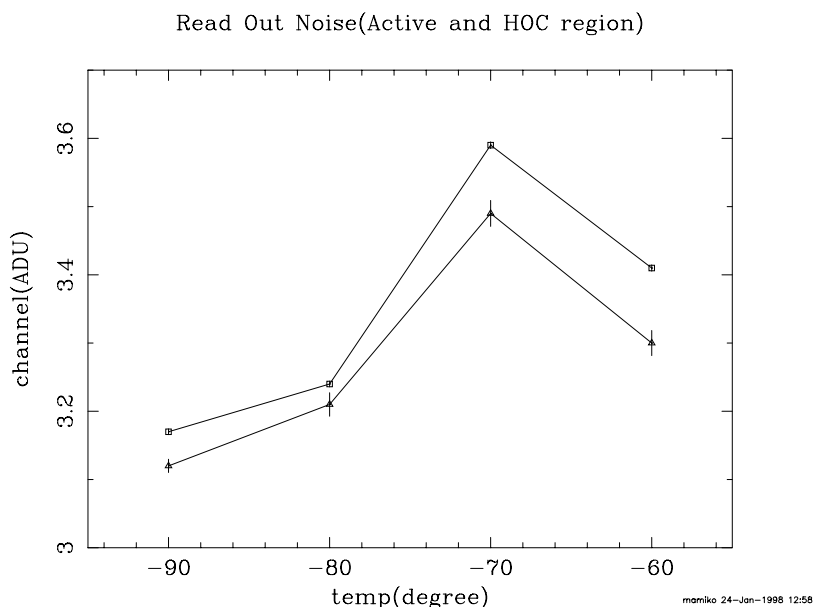


Figure 5.6: 読みだしノイズの温度依存性。横軸： CCD の温度 ($^{\circ}\text{C}$)、縦軸：ダークカレント (ADU)。それぞれ \square が、Active 領域のゼロレベルをシングルガウシアンでフィットした際のガウシアン幅の値 (1 幅) をプロットしたもの、 \triangle が、HOC 領域のゼロレベルを同じくシングルガウシアンでフィットした際の幅の値をプロットしたもの。

– ゲインの温度依存性

XIS の CCD のチップ自体のゲインが、駆動温度に対してどう変化するかを調べた。結果は図 5.7。横軸は CCD チップの温度 ($^{\circ}\text{C}$)、縦軸は Mn $K\alpha$ のピークチャンネル (ADU) である。これより、CCD チップ自体のゲインは駆動温度によらずほとんど変化しないことがわかる。

5.4.3 まとめ

以上まとめると、温度特性として、レスポンス関数作成の際にとり入れるべきパラメータは、videocard の温度だけで、CCD チップ自体の温度は必要ないことがわかった。

5.5 TEC 電圧の変化によるノイズ

京大における性能評価システムでデータを取得中、何度か TEC の電圧が振動するという現象が見られた。電圧の振動の振幅は peak to peak で約 5V もの値 (0.3 ~ 5V) をとっていた (図 5.8)。このとき、CCD の温度、Heat Sink の温度も、同期して変動するという現象がみられた。CCD の温度変化は、最大するとき peak to peak で約 0.5 度ほどであった。またそれだけではなく、active 領域の平均レベル、HOC 領域

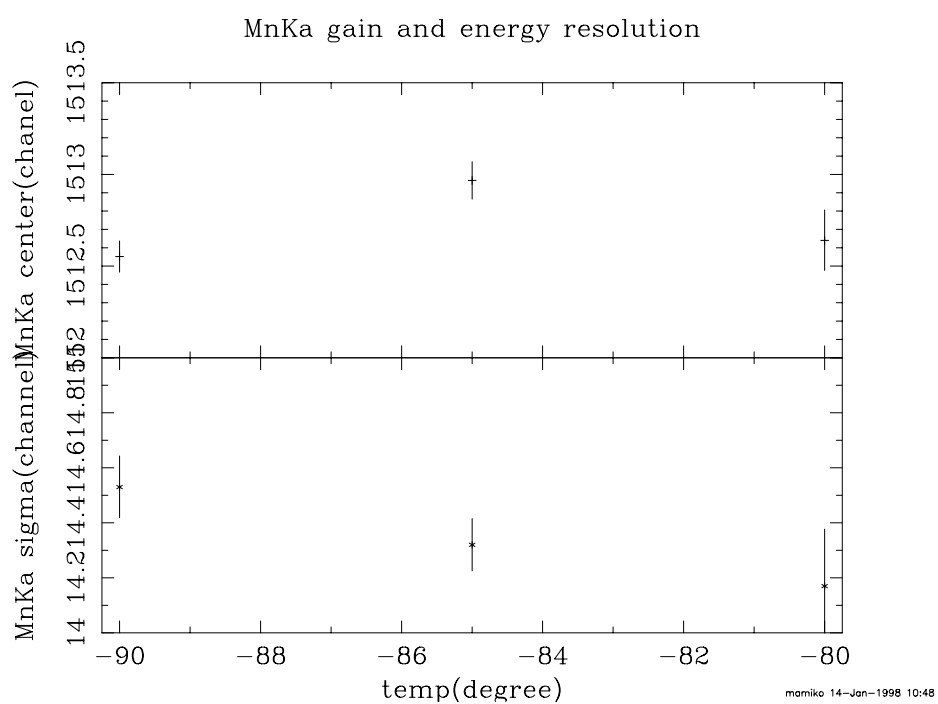


Figure 5.7: MnK α のピークの位置と σ の値を CCD の温度の関数としてプロット。横軸は CCD の温度 ($^{\circ}$ C)。縦軸上段は MnK α のピークチャンネル (ADU)、下段は MnK α ピークの σ の値 (ADU)

の平均レベル、HOC 領域のゼロレベルの広がり（つまりは読みだしノイズ）も同期して振動をおこしていた。図 5.14 からわかるように読みだしノイズは最大で 1ADU も変化する。

図 5.15 は TEC の電圧が振動している時にとられたデータの、HOC 領域の Y 方向への射影図を、フレーム毎にプロットしたもののうちの一枚である。HOC 領域の平均レベルが階段関数状に突然変化しているのが見てとれる。この階段状になっている上と下のレベルの違いは、最大で 5ADU ($\sim 20\text{eV}$) にもなる。このような現象は、TEC の電源が入っていない時や、電源が入っていても電圧が振動していない時にはみられない。すべての DE 内のイベント処理は 1 フレームを最小単位として行なわれるため、一つのフレーム内でこのようにレベルが変化してしまうと、その変化を解析に反映できず、ゼロレベルの判定を誤ってしまう。つまりは急激なゼロレベルの変化があったとしても、それには対応できずに変化の前後の平均をゼロレベルだと思ってしまうわけである。当然このようなデータのエネルギー分解能は悪くなってしまう。

このような現象は、大阪大学の性能評価システムでは見られなかったが、宇宙研で行なわれた TTM 試験では、程度の差こそあれ観測された。京大の性能評価システムで取得されたデータにおいてこのような現象が著しく観測されたのは、京大の性能評価システムにおける Heat Sink の容量が小さいことが原因だと考えられる。衛星に搭載される予定の Heat Sink の容量は京大のシステム中の Heat Sink の容量とほぼ等しい。そこで、Flight Model においてはこのような振動がおこらないように MIT 側に AE の改善を要請した³。

5.6 ASCA 方式による解析

今までに述べた、レスポンス関数決定に必要なパラメータは、地上における詳しい解析の手法によらないより生データに近いパラメータであった。しかし以下述べる、ゲイン、エネルギー分解能などのパラメータは、地上における詳しい解析の手法によってかなり値が異なる。ここでは、ASCA (SIS) で採用されている解析手法 (4.2 章参照) にのっとして XIS の性能評価をする。

しかし、グレードのことなるイベントは、後で述べるようにエネルギー分解能も違えば、ゲインも異なる。したがって、この ASCA 方式のイベント検出法を XIS でも採用するとなれば、各々のグレードに対してそれぞれレスポンス関数を作成してやらねばいけない。XIS は一つの検出器が 4 つのチップで構成され、かつ全部で 4 台の検出器があることを考えれば、 $4 \text{ 台} \times 4 \text{ チップ} \times 8 \text{ つのグレード} = 128 \text{ 個}$ のレスポンス関数を作成してやらねばいけないことになる。これは大変な仕事である。XIS でも ASCA 方式を採用するか否かは、熟考に値すると思われる。

³MIT 側が、AE の製作を受け持っている

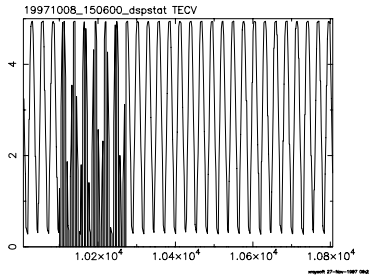


Figure 5.8: TEC 電圧。横軸：時間 (sec)、縦軸：電圧 (V)

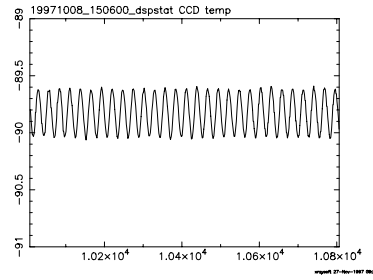


Figure 5.9: CCD の温度。横軸：時間 (sec)、縦軸：温度 ($^{\circ}\text{C}$)

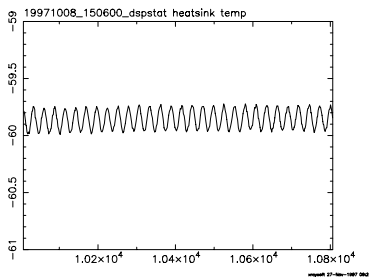


Figure 5.10: heat sink の温度、横軸：時間 (sec)、縦軸：温度 ($^{\circ}\text{C}$)

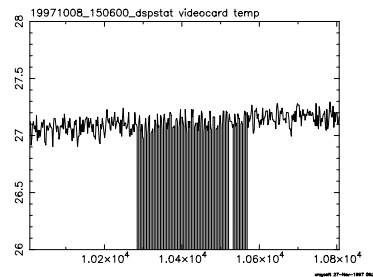


Figure 5.11: videocard の温度、横軸：時間 (sec)、縦軸：温度 ($^{\circ}\text{C}$)

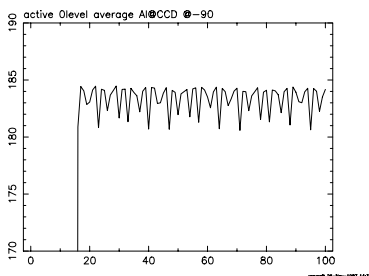


Figure 5.12: active 領域のゼロレベルの様子、横軸：フレーム数、縦軸：チャンネル (ADU)

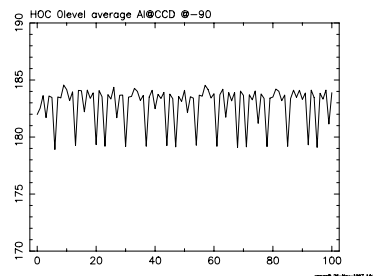


Figure 5.13: HOC 領域のゼロレベルの様子、横軸：フレーム数、縦軸：チャンネル (ADU)

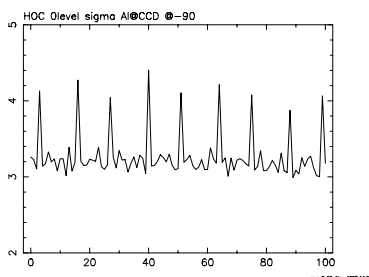


Figure 5.14: HOC 領域のゼロレベルの幅、横軸：フレーム数、縦軸：チャンネル (ADU)

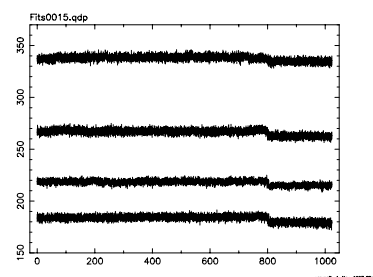


Figure 5.15: HOC 領域を Y 軸方向に射影、横軸：フレーム数、縦軸：チャンネル (ADU)

5.6.1 スプリット閾値の決定

図 5.16 ~ 図 5.23 は、 ^{55}Fe の線源を CCD に照射してやって取得したデータに対し、スプリット閾値を読みだしノイズレベルの 2σ (7ADU)、 3σ (10ADU)、 4σ (3ADU)、20ADU にとってやり、Mn $K\alpha$ のピークのカウント数と、ピークの幅（エネルギー分解能）を、それぞれグレード 0、グレード 2、グレード 3、グレード 4 に対してプロットしたものである。

CCD は X 線が当たっていないピクセルもある波高値を示す。その波高値、すなわちゼロレベルは一定ではなく、実際には揺らいている。ゼロレベルの分布はガウシアンで近似できると考えると、あるピクセルのゼロレベルがある波高値以上になる確率 $P(x)$ は、

$$P(x) = 2 \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad (5.1)$$

と表せる。したがって、ゼロレベルは 99.7% の確率で 3σ 以下の波高値をとることになる。すなわちスプリット閾値としては、誤ってゼロレベルの揺らぎを入射 X 線イベントの洩れ込みと認識しないために、できるだけ大きい値、少なくとも 3σ 以上を選ぶことが望ましい。

しかし、いくらでも大きな値にしていわけではない。このイベント検出の方法より、中心ピクセルのまわりにスプリット閾値以下の電荷の洩れ込みがあった場合、その洩れ込みは入射 X 線に起因した電荷とはみなされずすてられる（ゲインが低くなる）（図 5.17、図 5.19、図 5.21、図 5.23）。したがって、スプリット閾値の値を大きくとり過ぎればそれだけ電荷の数え落しの大きいシングルピクセルイベントが増え、出てきたスペクトルの低エネルギー側の裾の成分が大きくなる（4.5.5 章参照）。従って、この観点からはスプリット閾値はできるだけ小さい方がよい。実際には、これら両者の影響ができるだけ小さく押えられるようなスプリット閾値を選ぶことになる。

図 5.16 からスプリット閾値を大きくしていくにしたがって、グレード 0 イベントは増えてゆくことがわかる。しかしその増え方は一定ではなく、増え方はだいたいスプリット閾値が、読みだしノイズレベルの 4σ レベルに達するころには頭うちになる。読みだしノイズが存在しないならば、シングルイベントも、スプリットイベントもエネルギー分解能はかわらないはずであるが、実際には読みだしノイズが存在するために、複数のピクセルの電荷を足し合わせることによって、読みだしノイズも同時に足し合わせることになり、スプリットイベントに対しては分解能が悪くなる。したがって、良いエネルギー分解能のデータを得ようと思えば、シングルイベントはできるだけ多い方がいいことになる。

従って以上のことより、電荷の数え落しがないように、できるだけスプリット閾値は小さくなるよう、しかしながらエネルギー分解能を良くするためにできるだけシングルピクセルイベントを増やすよう、最終的にスプリット閾値を、読みだしノイズレベ

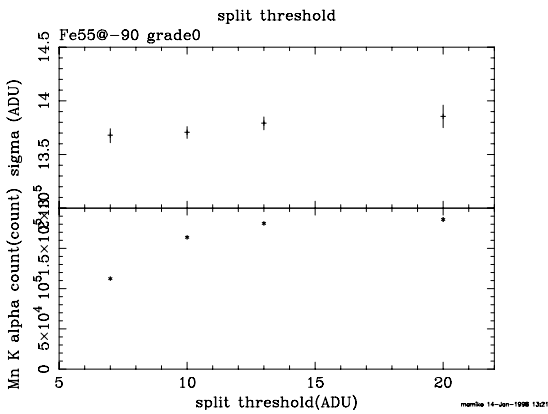


Figure 5.16: スプリット閾値を変えた時の MnK α ピークのカウント数と σ の関係：グレード 0

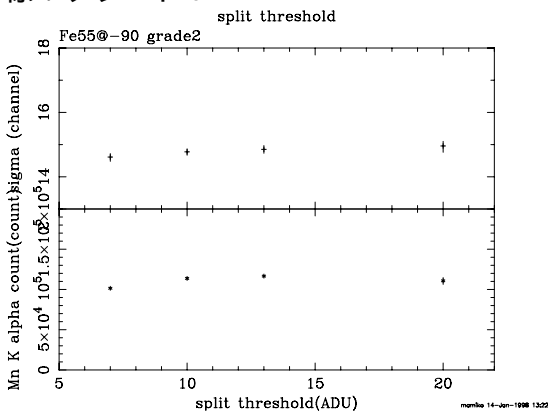


Figure 5.18: スプリット閾値を変えた時の MnK α ピークのカウント数と σ の関係：グレード 2

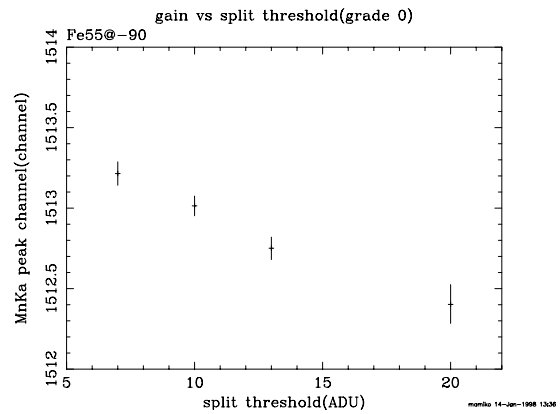


Figure 5.17: スプリット閾値を変えた時の MnK α ピークの位置の変化：グレード 0

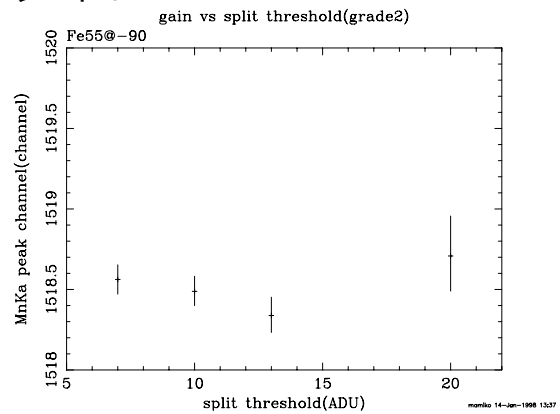


Figure 5.19: スプリット閾値を変えた時の MnK α ピークの位置の変化：グレード 2

ルの 4σ レベルと決定した。以下、特に断らない限り、すべての解析においてスプリット閾値はこの値に統一する。

5.6.2 ゲイン

グレード毎のゲイン

全ターゲット、すなわち Zn、Ni、Fe、 ^{55}Fe 、Ti、Cl \times 8 グレード についてのスペクトルを載せるのはあまりにも多いので、例として図 4.4 にあげた、MnK α のスペクトルを見てほしい。最終的なレスポンス関数作成時には、MnK α ピークの低エネルギー側のテール成分を再現できるようなモデルでフィットしてやった結果が必要となってくるが、ゲインを求めたり、エネルギー分解能を求めるにあたっては、このピークに対してシングルガウシアンをフィットした結果を用いることで十分である。理由

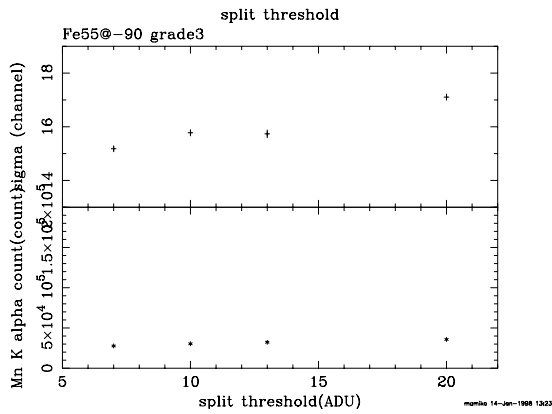


Figure 5.20: スプリット閾値を変えた時の MnK α ピークのカウンツと σ の関係 : グレード 3

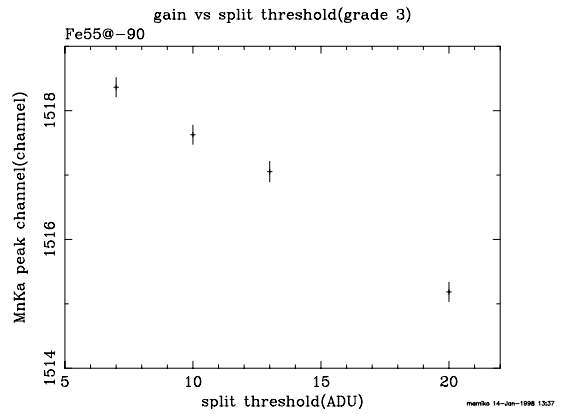


Figure 5.21: スプリット閾値を変えた時の MnK α ピークの位置の変化 : グレード 3

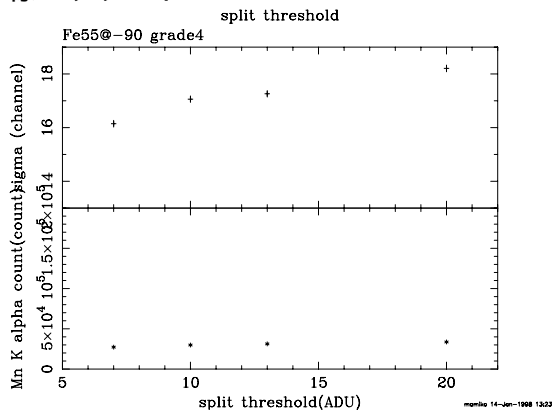


Figure 5.22: スプリット閾値を変えた時の MnK α ピークのカウンツと σ の関係 : グレード 4

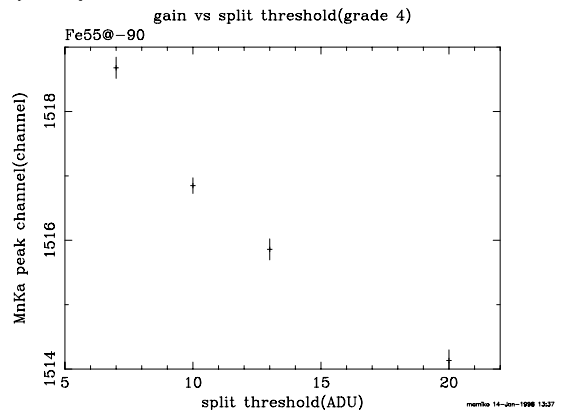


Figure 5.23: スプリット閾値を変えた時の MnK α ピークの位置の変化 : グレード 4

は低エネルギー側の裾は、ピークの頂点よりも十分下側から始まっており、ガウシアン
の頂点の位置や、 σ の値 (エネルギー分解能) には影響を及ぼさないためである。

全ターゲットに対して、グレード毎にそれぞれのメインピークである $K\alpha$ ラインのピーク
の位置をプロットしてやったものを図 5.24 ~ 図 5.29 に示す。これより、グレード
毎にゲインはかなり違うことがわかる。ASCA (SIS) では、このようなグレード毎の
ゲインの違いは考慮せずに、グレード 0 のゲインをすべてのグレードに対しても当て
はめて、レスポンス関数を作成している。グレード 0 イベントが全イベントの大半を
占める時はそれでもいいのかもしれないが、スプリット閾値の選び方によってはグレー
ド 0 イベントの割合が少なくなる場合もありうる。ASCA 方式のイベントセレクショ
ンを行なうならば、グレード毎にゲインを決めることが必要である。

シングルピクセルイベント (グレード 0 イベント) に対するゲイン

ここでは、シングルピクセルイベントに対するゲイン、すなわちエネルギーチャン
ネル関係を示す⁴。横軸がエネルギー (keV)、縦軸上段がチャンネル (ADU) 下段がベス
トフィットの直線 (チャンネル = $a + b \times$ エネルギー) からのずれ (データ点 - 直
線上の点) (ADU) である。まず、各々の点での統計の違いを考慮せず、エネルギー
チャンネル関係を一次関数でフィットした結果を載せる (図 5.30)。ベストフィット
の直線からのずれの形に注目すると、高エネルギー側に行くに従って、データ点が
カーブを描いて下にずれていっているのがわかる。この原因として、1 : AE の線形
性が成立していない 2 : 高エネルギー側で電荷の数え落としがある、の 2 つが考えら
れるが、後に述べるように、これは電荷の数え落としによる影響が大きい。

考察

ここで、グレードの違いによるゲインの違いについて少し考察を加える。図 5.24 ~
図 5.29 からわかるように、メインピークが低エネルギーの場合ではグレード毎のピー
クのチャンネルの違いはあまり見られないのに対し、メインピークが高エネルギーに
いくにしたがって、グレード 0 イベントと、グレード 6 イベントのピークチャンネル
の差がどんどん大きくなっている。これは、高エネルギーの X 線イベントの広がりが
電極付近では 1 ピクセルでは収まり切らずに広がっていること。したがって、グレー
ド 6 イベントでは電荷の数え落としがあることに起因する (4.3 章参照)。したがって、
ASCA (SIS) のようにシングルピクセルイベントのピークチャンネルを、他のグレー
ドのイベントに対しても適応するのは不適當であると思われる。

そこで、図 5.31 に、グレード 6 イベントのエネルギーチャンネル関係をプロットした
(この場合も、各々の点での統計の違いは補正していない。)。グレード 0 イベント

⁴videocard の温度によるゲインのずれの補正は行っていない。

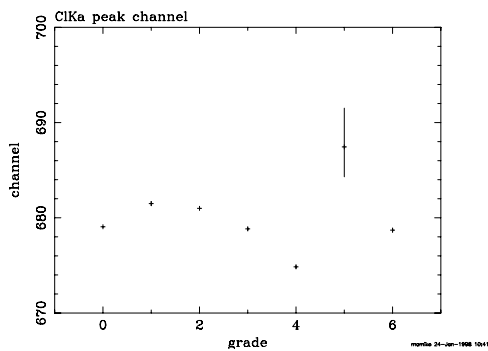


Figure 5.24: グレード毎のピークチャンネル (2次 X 線は Cl)

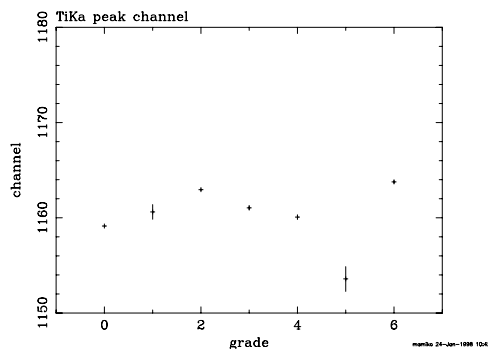


Figure 5.25: グレード毎のピークチャンネル (2次 X 線は Ti)

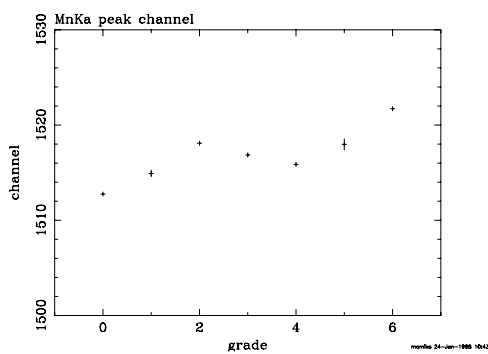


Figure 5.26: グレード毎のピークチャンネル (2次 X 線は Mn)

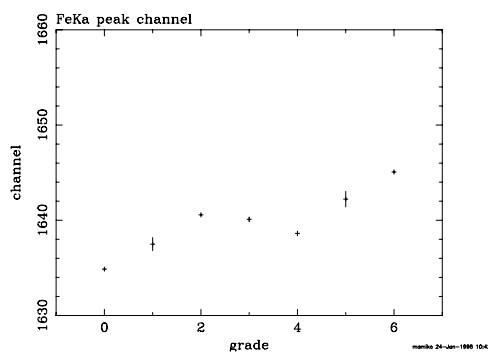


Figure 5.27: グレード毎のピークチャンネル (2次 X 線は Fe)

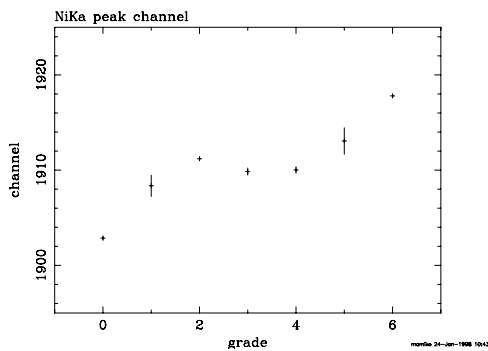


Figure 5.28: グレード毎のピークチャンネル (2次 X 線は Ni)

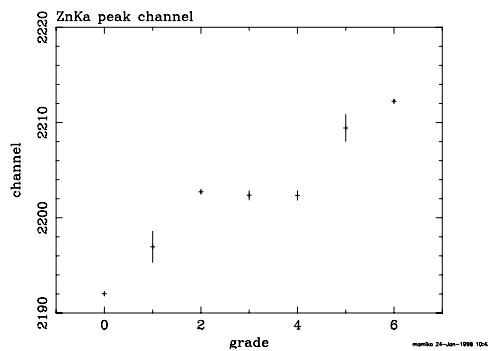


Figure 5.29: グレード毎のピークチャンネル (2次 X 線は Zn)

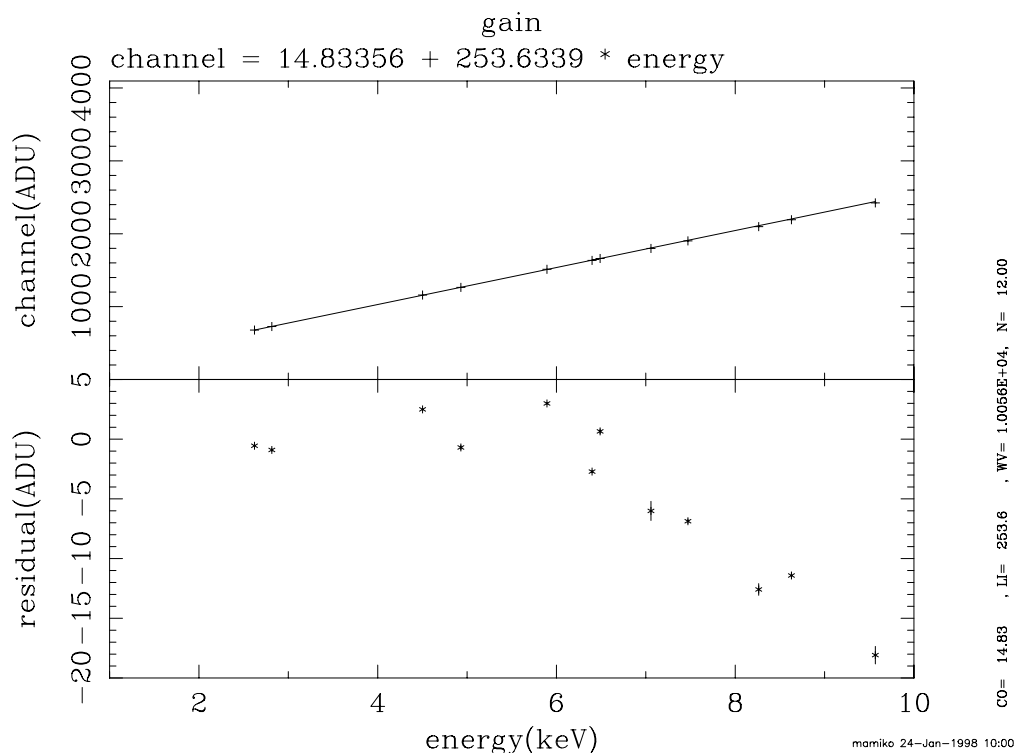


Figure 5.30: シングルイベントに対するゲイン。横軸は入射 X 線のエネルギー (keV)、縦軸は出力波高 (チャンネル)。ベストフィットの直線は $\text{channel} = 14.8 + 253.6 \times E(\text{keV})$ で表せる。但し、今は videocard の温度によるゲイン変化の補正は行っていない。

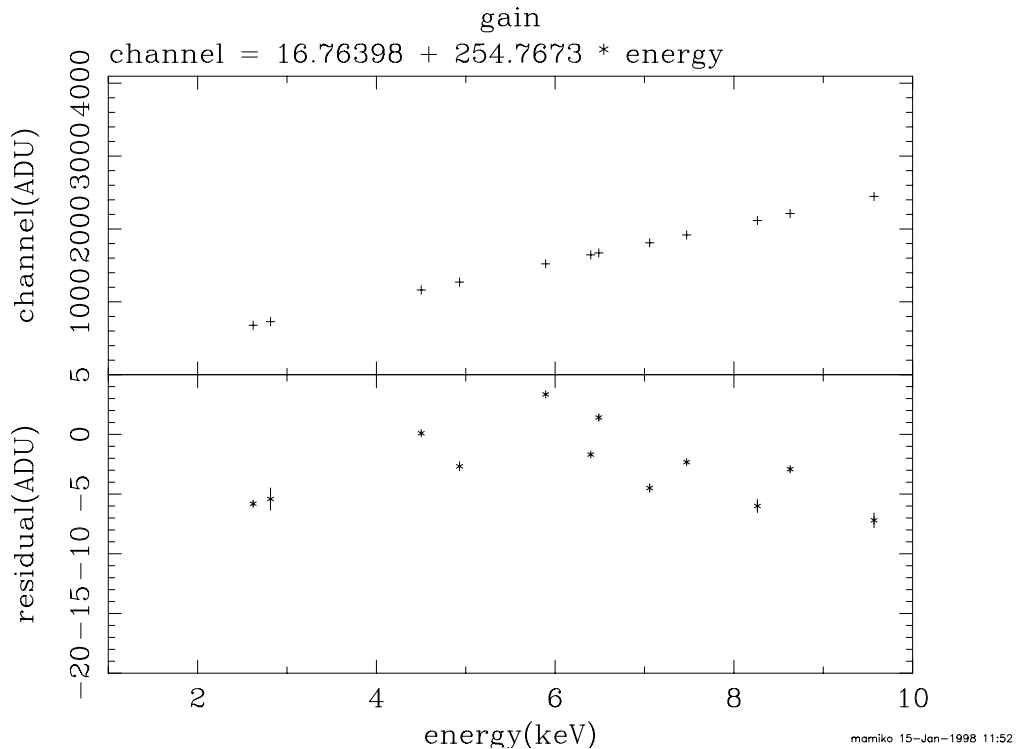


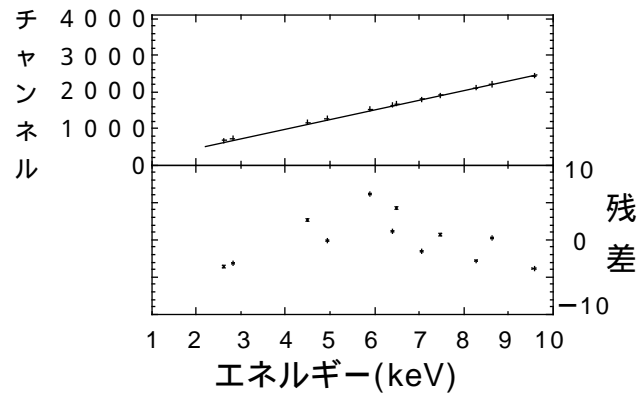
Figure 5.31: グレード 6 イベントに対するゲイン。横軸は入射 X 線のエネルギー (keV)、縦軸は出力波高 (チャンネル)。ベストフィットの直線は $\text{channel} = 16.7 + 254.8 \times E(\text{keV})$ で表せる。但し、videocard の温度によるゲイン変化の補正は行っていない。

のエネルギーチャンネル関係について、先ほど述べたような、シングルイベントについてピークチャンネルが高エネルギー側において低く出るとい現象が、グレード 6 イベントに対するエネルギーチャンネル関係では改善されているのが見てとれる。

エネルギーチャンネル関係の再現性

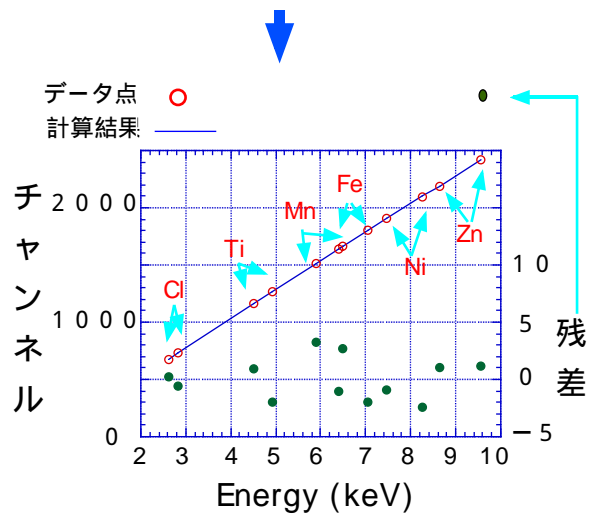
レスポンス関数作成にあたり、我々の目標はエネルギーチャンネル関係を 0.1% の誤差内で再現することである。シングルピクセルイベントのエネルギーチャンネル関係を一次関数でフィットした場合、データの再現性は、 $0.4\% @ 5.9\text{keV}$ となり、また残差 (データ - モデル) にうねりが見られる (図 5.32)。次にエネルギーチャンネル関係を 2 次関数により再現をこころみたところ、データの再現性は $0.22\% @ 5.9\text{keV}$ にまで改善し、さらに一次関数でフィットした場合の残差のうねりもなくなった (ただし、フィットの際に各々のデータ点における統計の差が、フィットの結果に影響を与えないよう、エラーをつけずにフィットを行なった)。

ゲイン



1次関数によるデータの再現性：0.4% @ 5.9keV

$$\text{チャンネル} = 14,96 + 254 \times E \quad E: \text{エネルギー (keV)}$$



$$\text{チャンネル} = 1.95 + 260.3E - 0.76E^2$$

E : エネルギー (keV)

データの再現性 → 0.22% @ 5.9keV

Figure 5.32: シングルピクセルイベントのエネルギーチャンネル関係の再現性。横軸は入射 X 線のエネルギー (keV)、縦軸は出力波高 (チャンネル)。但し、videocard の温度によるゲイン変化の補正は行なっていない。上段は 1 次関数によってエネルギーチャンネル関係を再現した。下段は 2 次関数を使って再現した結果。2 次関数を用いることで、エネルギーチャンネル関係の再現性は向上する。

5.6.3 エネルギー分解能

一番統計の良い Mn のデータに関して、MnK α の場所でのエネルギー分解能を求めたところ、

$$R(E) = \frac{\delta E}{E} = 0.022(FWHM) \quad (5.2)$$

であった。また、すべてのラインに対してもエネルギー分解能を求め、図 5.33 に、入射 X 線のエネルギーに対する、エネルギー分解能をプロットした⁵ (ただしこのとき、上でもとまったエネルギーチャンネル関係、channel=14.8+253.6×E(keV) を仮定している。)。これにたいして、

$$\delta E = \sqrt{8 \log 2} \times w \times \sqrt{N^2 + \frac{FE}{w}} (eV) \quad (5.3)$$

N: 読みだしノイズ

F: ファノファクター

E: 入射 X 線のエネルギー

w: 平均電離エネルギー

をフィットした。これより、現時点でデータの再現性は 5.6% 以内で行なえることがわかった。また読み出しノイズは、 $N = 6.52 \pm 0.37 (e^-)$ (RMS) であるとわかった。この値は、各々の二次 X 線を当てたデータに対して個別に求めた読み出しノイズ (電子換算で ~ 3 個分) と比べると大きな値をとっている。理由は、videocard の温度の違いによるゲインの違いの補正を行わずにフィットしたためであると考えられる。

5.6.4 グレードゼロのスペクトルに関するモデルの決定

ここでは、グレードゼロのスペクトルの形に対する考察を行なう。

先にも述べたように、スペクトル中のラインは、単色 X 線を当てているのにもかかわらず左右対称の形にならずに、低エネルギー側にテールを引く (図 4.4)。この低エネルギー側のテール成分は、シングルガウシアンでフィットした際に、メインピーククのシングルガウシアンのカウント数に対して、1 パーセント程とほとんど無視できる範囲である。しかし、レスポンス関数を作成する際に、できることならこの低エネルギー側のテールをも考慮したモデルによってラインをフィッティングすることにより正確さを増すことが望ましい。

以下ではまず、そもそもテール成分というのは一体どこから来るものなのか、について考察を行なう。その後、テール成分を再現するためのモデルとして、ASCA (SIS)

⁵この時、videocard の温度によるゲインのずれの補正は行なっていない

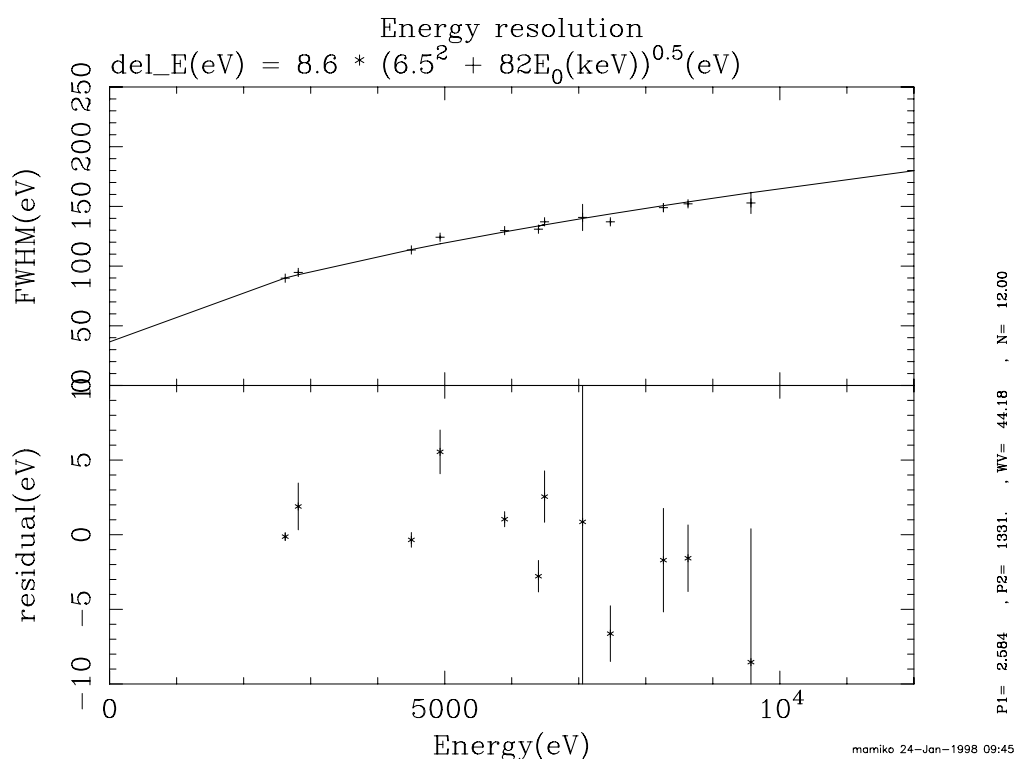


Figure 5.33: エネルギー分解能 (グレード 0 イベント)。横軸: 入射 X 線のエネルギー (eV)、上部縦軸: エネルギー分解能 (FWHM (eV))、下部縦軸: ベストフィットの曲線からのずれ。但し、videocard の温度によるゲイン変化の補正は行なっていない。

で採用されたダブルガウシアンモデルと、ガウシアンに加えてテール成分のところに指数関数を入れてやったモデルの二つについて検討を行なう。

テール成分の発生機構

スプリット閾値についてももう一度軽くふれる。

入射 X 線によってできた電荷が、電極に達した時に全く広がりを持たない場合、電荷はすべて一つのピクセルに拾われ、出力波高値は入射 X 線のエネルギーに比例したある値をとる。しかし実際には電荷分布が広がりを持つために、スプリット閾値なるものをもうけ、スプリット閾値以上の電荷はイベントと関係ありとみなす。すなわち周りのピクセルにもれこんだ電荷がスプリット閾値以下ならば、それはイベント起因の電荷とみなされない。この手法では、仮に周りのピクセルに電荷が洩れ込んでもその量がスプリット閾値以下なら、電荷の数え落しをしてしまう。この時のイベントの出力波高値は、

$$\text{「本来とるべき値 } \left(\frac{E}{w}\right)\text{」} \sim \text{「本来とるべき値} - \text{スプリット閾値} \times 8\text{」}$$

の間に分布するのではないかと予想できる（8 というのは周りの 8 ピクセルのことを意味する）。

これについて調べるために、数え落された電荷の量が「 $a \text{ eV} \sim (a+3)\text{eV}$ 」の間にはいるイベントを集めてスペクトルを集積した。

図 5.34 に各々の差をとったスペクトルをのせる。各々のガウシアンは右側から順にイベント周りの 8 ピクセルのうちもっともパルスハイトの大きいものの持つ電荷の量が $(0\text{eV}-7\text{eV}), (7\text{eV}-10\text{eV}), (10\text{eV}-13\text{eV}), \dots$ であるようなものである。差のスペクトルは、スプリット閾値の差を小さくとっているためにガウシアンで十分近似できる形をしている。これはあるエネルギーの X 線が入ってきた場合に生成される電荷の個数は、ガウス分布に従うものと考えられるためスプリット閾値の差をゼロに限りなく近くすれば差のスペクトルの形はガウシアンになるからと考えられる。それらのピーク的位置はスプリット閾値が大きくなるに従って、低エネルギー側にずれていくことがわかる。また、スプリット閾値が高くなるに従って、ピークのカウント数が小さくなることより、数え落しの多いイベントほど、その頻度は少なくなることがわかる。

つぎに、各々のスペクトルに対して、ガウシアンモデルを入れてフィットした。その結果を図 5.35 と図 5.36 に示す。

各々のガウシアンの広がり方は、大体一定といえる。それに対してカウント数は、ある曲線にのっているように見える。そこで、このカウント数の描く曲線を再現するために、次のような考察を行なった。

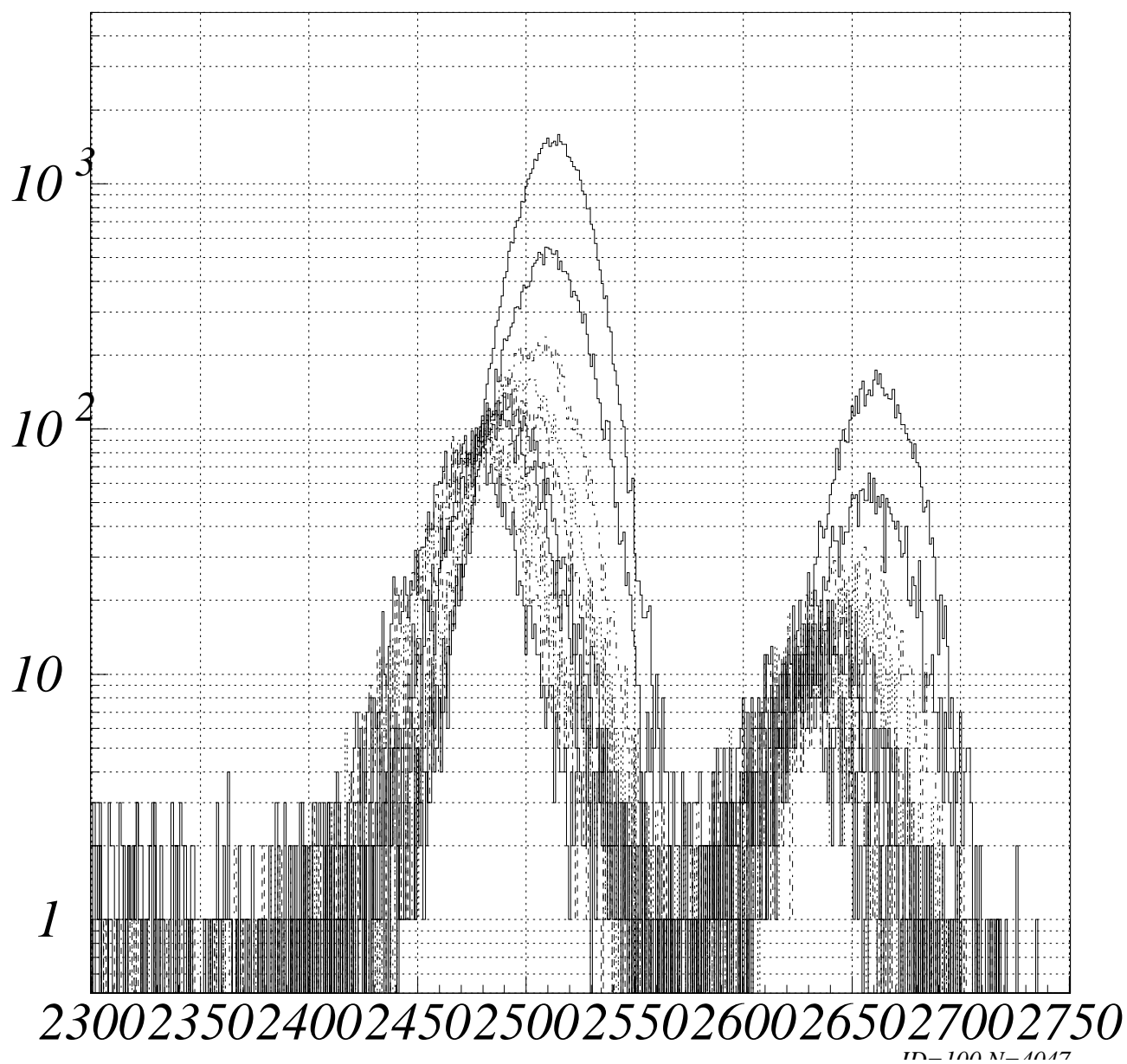


Figure 5.34: 数え落された電荷の量が、右から順番に (0eV–7eV)、(7eV–10eV)、(10eV–13eV)... のスペクトルを重ねたもの (注意: チャンネルは、解析ソフトの都合上、1000 チャンネルのオフセットがついている。)

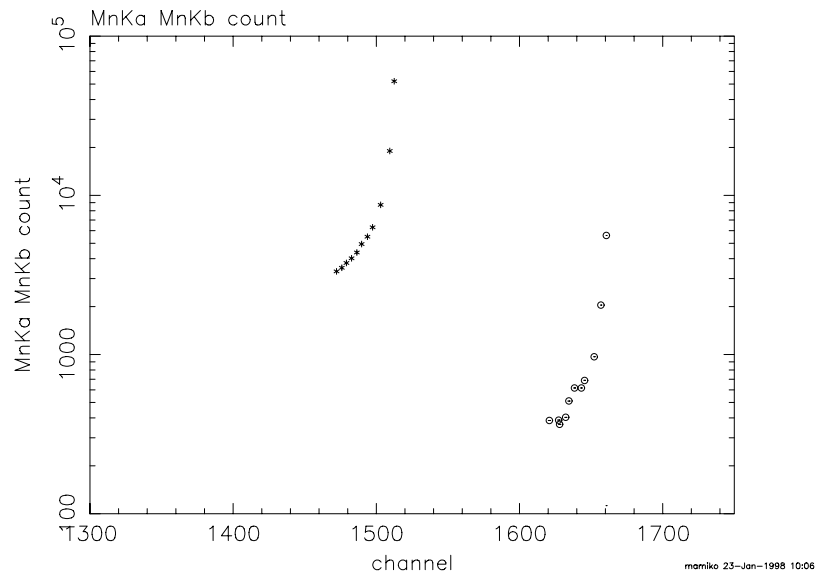


Figure 5.35: 数え落された電荷の量毎にわけたスペクトルの差にガウシアンをフィットしてやり、そのピークチャンネルと、ガウシアンのカウント数の関係をプロットしたもの。それぞれの点は、右側から数え落された電荷の量が $(0\text{eV}-7\text{eV})$, $(7\text{eV}-10\text{eV})$, $(10\text{eV}-13\text{eV})$, ... の順にならんでいる。

あるピクセルに電荷が吸収される場合を考えよう。今、電荷分布の形がガウシアンであるとする。図 5.37 のように、あるピクセルの端から距離 x ($x < 0.5L$, L は 1 pixel size) の場所に電荷分布の中心があるとする。すなわち電荷雲の分布の中心を基準 ($t=0$) として、 t 軸をとる。いま簡単のために、電荷分布 $\rho(E,x)$ は一次元であるとする、電荷雲の中心が入っているピクセル内に存在する電荷の量は

$$PH = \int_{-x}^{\infty} \frac{(E/w)}{\sqrt{2\pi}(r/2)} \exp\left(-\frac{t^2}{2(r/2)^2}\right) dt \quad (5.4)$$

r : 電荷の広がりの 2σ 半径

E : 入射 X 線のエネルギー

w : 平均電離エネルギー)

とあわせ、これだけの電荷がこのピクセル内に収集されることになる。今、となりのピクセルに洩れだした電荷が、スプリット閾値には達せず無視されたとすると、このイベントの波高値は本来とるべき値 (E/w) より小さくなり、 PH なる値をとる。いま、電荷の一部が数えおとされたイベントの、頻度分布というものを考えることにする。

PH の値は、ピクセルのどの位置に電荷分布の中心があるかで決まる。また、ピクセルのどの位置に電荷分布の中心があるかは、X 線がピクセルのどの位置に入射するか

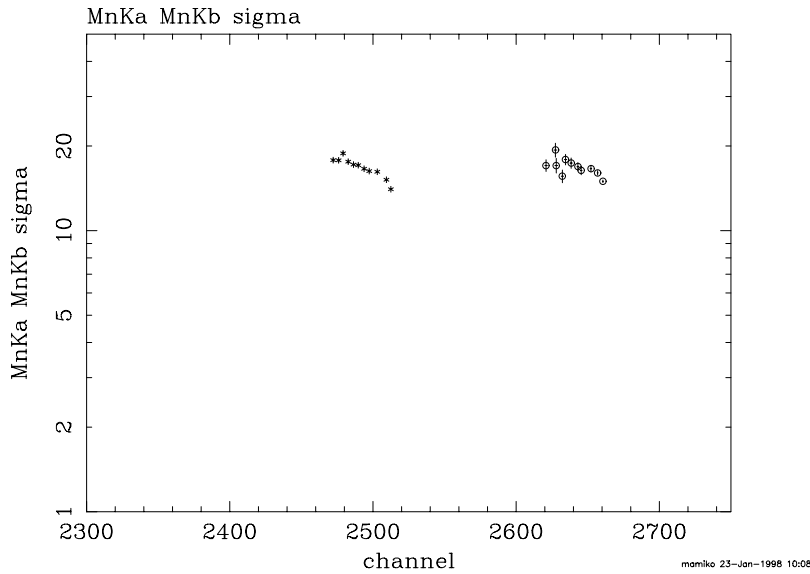


Figure 5.36: 数え落された電荷の量毎にわけたスペクトルの差にガウシアンをフィットしてやり、そのピークチャンネルと、ガウシアン幅の関係性をプロットしたもの。それぞれの点は、右側から数え落された電荷の量が $(0\text{eV}-7\text{eV})$, $(7\text{eV}-10\text{eV})$, $(10\text{eV}-13\text{eV})$, ... の順にならんでいる。

による。従ってピクセルの $(x \sim x+dx)$ なる位置に X 線が入射する確率は、

$$dP = dx/L \quad (5.5)$$

で表され、 x の値によらず一定の値をとる。

すると、波高値が、PH であるようなイベントの頻度は $dP/d(\text{PH})$ で表せる。

図 5.35 と比較するために、横軸に「波高値 PH」、縦軸に「PH の波高値を持つイベントの頻度」をとって計算結果をプロットした。図 5.38 に、その計算結果と、図 5.35 の MnK α 部分を重ねたものを示す。このように電荷の数えおとしについて、簡単なモデルを考えてやることによって、データを良く再現できる。すなわち、スペクトルのラインの低エネルギー側のテール成分は、電荷の数え落とされたイベントによって形成されていると考えられる。

また同時に、テールの形を調べることにより、電極の位置における電荷雲の平均の広がりを求めることが可能である。図 5.38 の実線は、上から順に電荷雲の 2σ 半径が $9\mu\text{m}$ 、 $7.9\mu\text{m}$ 、 $7\mu\text{m}$ 、の時のモデルによる計算結果である。この図より、MnK α X 線により生成される電極の位置における平均の電子雲の広がり、 $\pm 1\mu\text{m}$ の確からしさで、 $\sim 7.9\mu\text{m}$ であると決定できる。

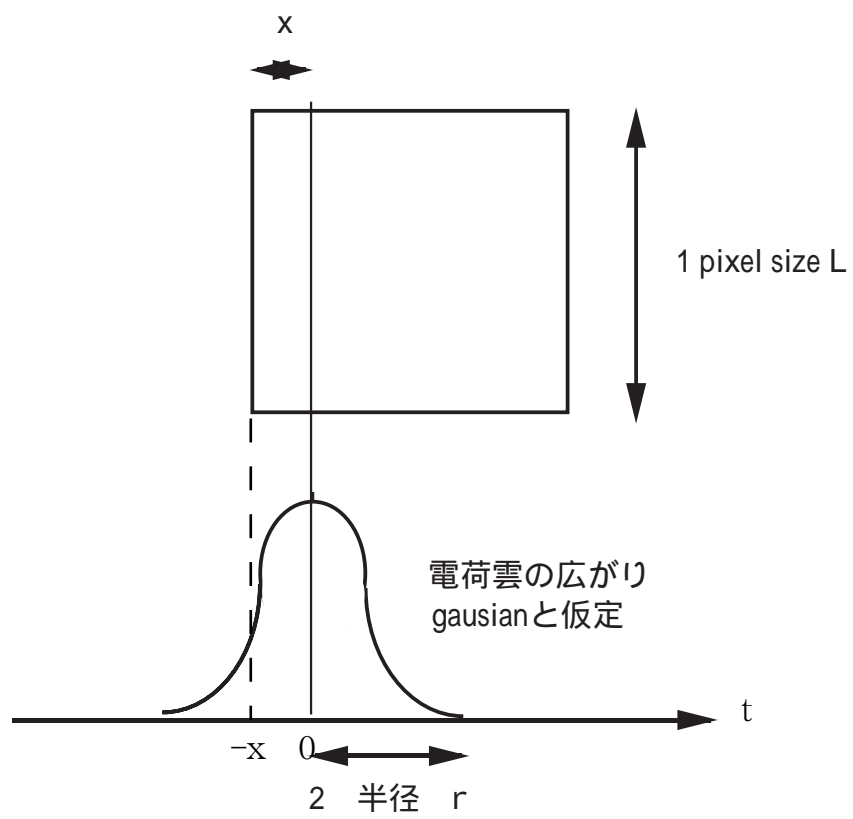


Figure 5.37: 電荷の雲の分布の様子

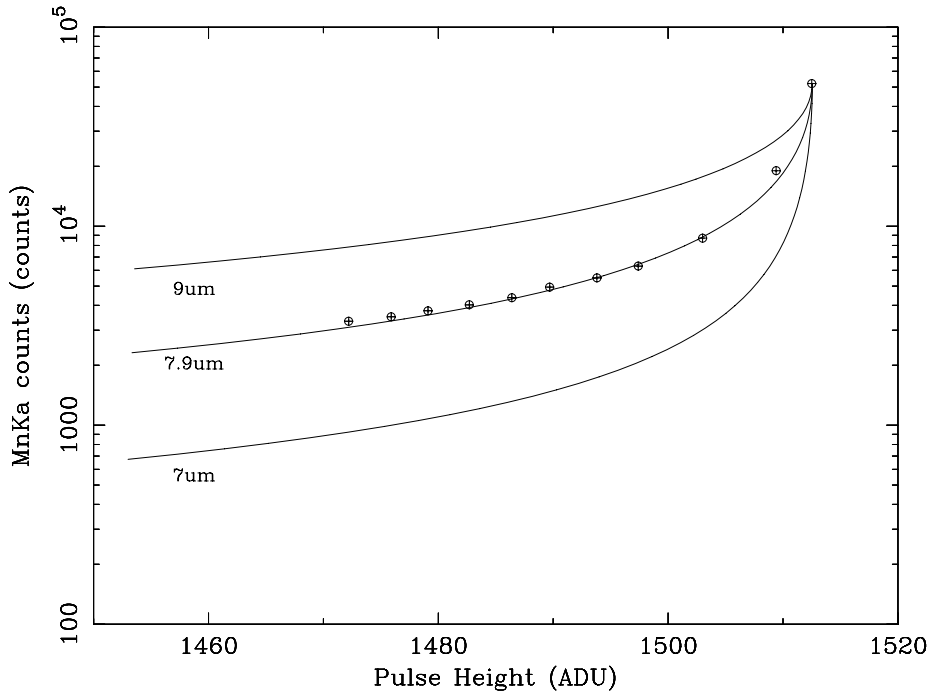


Figure 5.38: スプリット毎にわけたスペクトルのラインの頂点に対して、ラインのカウント数をプロットしたもの (Mn K α について) 実線: 数値計算結果、 \oplus : データ

一方、この結果の妥当性を、他の情報により検証する。MnK α X線が、CCDの空乏層内で吸収される平均の深さ(注: mean free path ではない)は、空乏層厚 $50\mu\text{m}$ の時に次の様に求められる(空乏層厚については後述)。

$$\bar{x} = \frac{\int_0^{50\mu\text{m}} x\mu\rho \times \exp(-\mu\rho x)dx}{\int_0^{50\mu\text{m}} \mu\rho \times \exp(-\mu\rho x)dx} \sim 18.1\mu\text{m} \quad (5.6)$$

μ : MnK α X線に対する Si 中の吸収係数 ($149 \text{ cm}^2/\text{g}$)

ρ : Si の密度 ($2.34 \text{ g}/\text{cm}^3$)

$\sim 18.1 \mu\text{m}$ の深さで吸収される X線が、電極の位置に引かれてくる間に広がる大きさは図 4.7 に表されるように $\sim 7.9\mu\text{m}$ である。これは、テールの形より求めた MnK α X線の電荷雲の広がりの平均値とコンシステントである。従って、上述のような解析を行ないテールの形を調べることにより、テール成分が電荷の数えおとされたイベントによって形成されるということがわかるだけでなく、電極の位置における電荷雲の平均の広がりをも、求めることが可能であるとわかった。

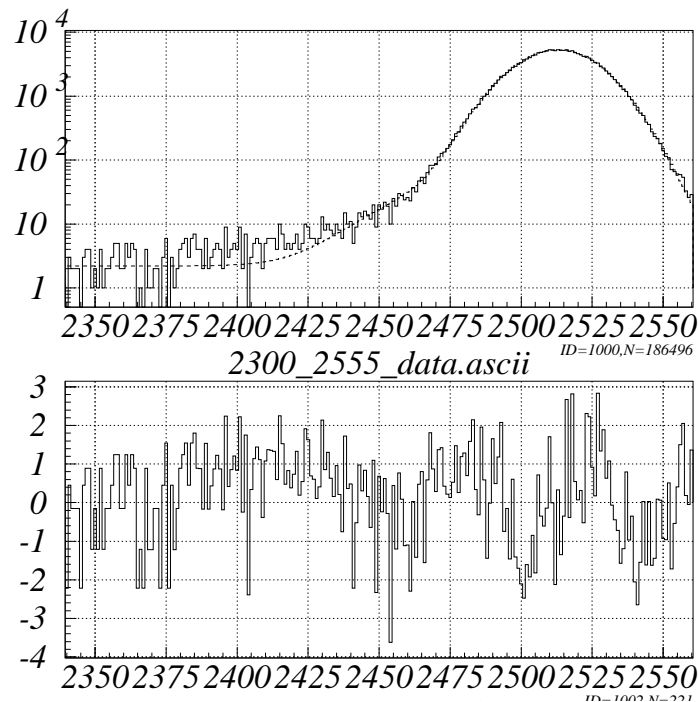


Figure 5.39: MnK α ラインに対してダブルガウシアンモデルをフィットした様子。
Reduced- $\chi^2 = 1.584$ (d.o.f.=214)

いろいろなモデル

上の考察によってテール成分のイベントは、スプリット閾値を導入したことにより、電荷が数えおとされたイベントであるとわかった。次にそのテール成分を再現すべく適当なモデルについて考える。我々は、上で考えたような、「ガウシアンをいくつも重ねた」ようなモデルは採用しない。その理由は、レスポンス関数を作成する際には、膨大な量のスペクトルに対してフィッティングを行なう必要があり、その一つ一つのラインに対して上で行なったような詳細な解析を行なうことは現実的でないからである。従って、我々はより簡単なモデルによるラインの形状の再現を考える。

– ダブルガウシアンモデル

ASCA (SIS) では、レスポンス関数作成の際にダブルガウシアンモデルを採用している ([1] 参照)。ダブルガウシアンモデルとは具体的には、「大きなガウシアン + 小さなガウシアン + コンスタント成分」をラインに入れてやることにより、テール成分を小さなガウシアンによって再現してやるものである。すべてのラインに対してのフィットの図を載せるのはあまりにも多いので、例として MnK α に対してフィットした様子を図 5.39 に示す。

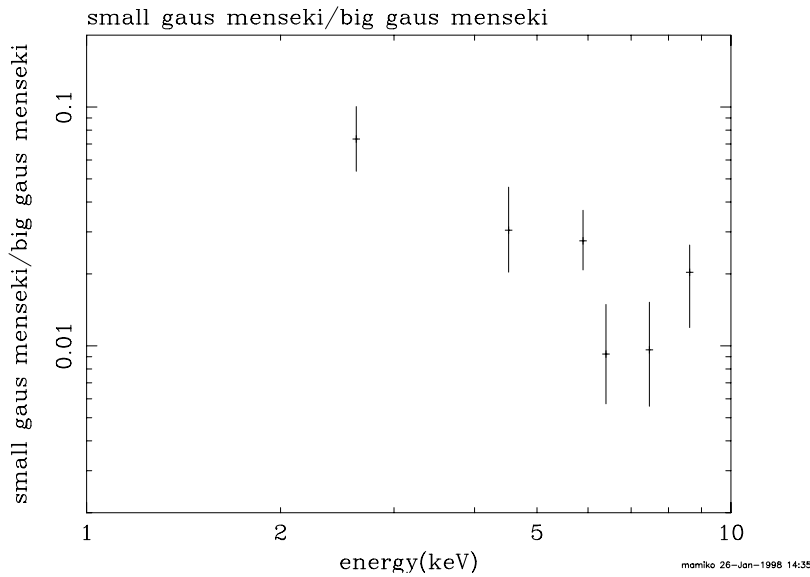


Figure 5.40: 大きなガウシアンと小さなガウシアンのカウント数の比を入射 X 線のエネルギーの関数としてプロットしたもの。横軸：入射 X 線のエネルギー (keV)、縦軸：小さなガウシアンのカウント数 / 大きなガウシアンのカウント数

図 5.40は、各々の二次 X 線の $K\alpha$ ラインに対して、大きなガウシアンのカウント数と、小さなガウシアンのカウント数の比をプロットしたものである。入射 X 線のエネルギーが低いと、小さなガウシアンのカウント数の割合は多い。これは、スプリット閾値をどのエネルギーの X 線に対しても一定の 13ADU にしていることが原因である。すなわち、低エネルギーにいけばいくほど、メインピークのエネルギーに対するスプリット閾値 (13ADU) の割合が高くなるため、周りに洩れ込む電荷の量を無視して、シングルイベントと誤認する確率が高くなり、従って小さなガウシアンのカウント数が増えると考えられる。

また、高エネルギー側で、大きなガウシアンのカウント数と小さなガウシアンのカウント数の比の減り方が一定になっている様子が見てとれる。これは、高エネルギー側にいけばいくほど電荷の広がりが大きくなり、シングルイベントそのものが減ってしまうため、大きなガウシアンのカウント数が減ることが原因であると考えられる。

– exponential モデル

図 5.39で示されたように、ダブルガウシアンモデルでは、residual 部分に少し構造が残る。この構造を改善すべく、新たな exponential モデルなるモデルで合わせてみた (図 5.42)。exponential モデルとは、「ガウシアン + exponential + コンスタント」の組合せからなる。ダブルガウシアンモデルの小さなガウシアンのかわりに、指数関数を入れてやることにより再現するものである (exponen-

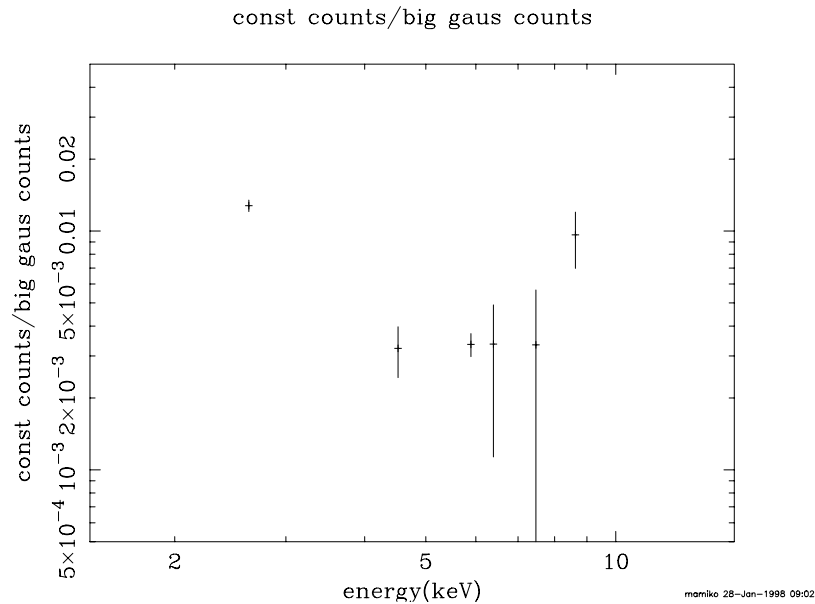


Figure 5.41: コンスタント成分と大きなガウシアンのカウント数の比を入射 X 線のエネルギーの関数としてプロットしたもの。横軸：入射 X 線のエネルギー (keV)、縦軸：コンスタント成分のカウント数 / 大きなガウシアンのカウント数

tial とガウシアンの境界で、exponential に対して cut off を入れている)。このモデルによって、residual 部分の構造は減少し、Reduced- χ^2 の値も減少した。

ここで、上記のダブルガウシアンモデルのコンスタント成分について考察を加える。イベントのうち、空乏層内のシリコンに吸収されて出てくるもの以外にも、電極内のシリコンによって吸収されて出てくるものについて考え、その量をおおまかに見積もる。電極も空乏層もあるエネルギーの X 線に対して光学的に薄いとすると、空乏層イベントに対して「電極の厚みに対する空乏層の厚みの比」をかけたくらいのイベント ($\sim 1\%$ 弱) が電極から出てくると思われる。図 5.41 に、コンスタント成分のカウント数と、大きなガウシアンのカウント数の比を示した。

このコンスタント成分のイベントが電極部分からであるとすると ([8] 参照)、 $A = (\text{コンスタント成分のカウント数}) / (\text{大きなガウシアンのカウント数})$ と、エネルギーの関係はどのようなになるかを考えてみる。まず、低エネルギー側では空乏層に到達する前に電極部分で吸収されるイベントが多いと考えられる。従って低エネルギー側では A は大きな値をとる。また、エネルギーが高くなるにつれ、厚さの薄い電極は光学的に薄くなっていき、電極部分で吸収されるイベントが減っていくため、 A の値は減少していくと思われる。しかし、もっと高エネルギー側に行くとも電極のみならず、空乏層の方も光学的に薄くなっていくので、電極部分からのイベントと、空乏層からのイベントの比というのは単に厚さの比になっていく。従って、高エネルギー側では

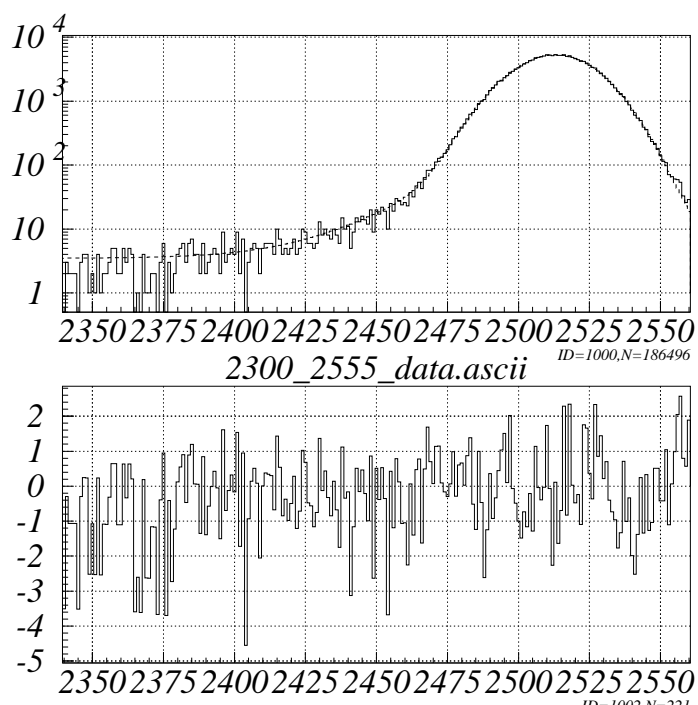


Figure 5.42: MnK α ラインに対して、exponential モデルをフィットした。Reduced $-\chi^2 = 1.206$ (d.o.f.=214)

A の値は一定になるはずである。ただし、図 5.41 で扱っているイベントは、シングルイベントのみであることに注意すると、高エネルギー側では電荷の広がりによってメインピークの中のシングルイベントの数が減るため、A の値は再び増え出すことが考えられる（コンスタント成分に寄与する電荷雲は、電極付近で生成されるため、あまり広がらないと考えられる）。

これは図 5.41 における傾向とほとんど一致している。したがって、このコンスタント成分は電極からのイベントであるという可能性が非常に高い。今後の課題として、電極部分で吸収されるイベントに対してモデルを立てることにより、スペクトルのコンスタント部分が再現できるかどうかを調べたいと考えている。

5.6.5 エスケープイベントと、シリコン蛍光 X 線イベント

応答関数作成の際に無視することのできないエスケープイベントと、シリコン蛍光 X 線イベントについて、簡単なモデルを立ててやり、実測との比較を行なう。

モデルによる計算

4.4 章で述べた過程 1~4 のうち、シリコンの蛍光 X 線発生には、過程 2 と過程 3、エスケープイベント発生には、過程 3 と過程 4 が関係する。

– シリコンの蛍光 X 線が空乏層で発生する場合（過程 2 と過程 3）

次のような簡単なモデルをたててやることによって計算する。

まず、CCD 上のあるピクセルに E なるエネルギーを持つ X 線が入射したとする。入射 X 線はそのピクセル内の空乏層の深さ D の位置でシリコン原子に光電吸収されたとする（過程 A）。深さ D の位置で吸収された X 線のうち $E - E_K$ のエネルギーは光電子生成に使われ、その分の電荷はそのピクセル上の電極に拾われる。

次に後に残されたシリコン原子から 3.7% の確率で出る、シリコン蛍光 X 線の行方を追う。問題にしているシリコン原子の位置を原点として、球面座標 (r, θ, ϕ) をとる。その原点から発せられたシリコン蛍光 X 線は、場所 (r, θ, ϕ) における素片 $(dr, d\theta, d\phi)$ において、再び別のシリコン原子に吸収されるとする（過程 B）。

過程 A と、過程 B の確率は次のように表せる

$$dP_A = \lambda \frac{\exp(-\lambda dD)}{1 - \exp(-\lambda dD)} \quad (5.7)$$

$$dP_B = \frac{1}{4\pi} \exp(-\lambda_{Si} dD) \lambda_{Si} dr d\Omega \quad (5.8)$$

λ : あるエネルギーの入射 X 線におけるシリコンの吸収係数

λ_{Si} : シリコンの蛍光 X 線エネルギーに対するシリコンの吸収係数

dP_A と dP_B をかけあわせて、 D, r, θ, ϕ について適当な範囲で積分してやることにより、過程 2 と 3 の確率を計算する。しかし、解析的には積分できないので、各々のパラメータに関して適当にメッシュを区切ってやって数値的に近似計算を行なった。

ここで、3 の過程に関しては、さらに 2 つの過程が含まれることに注意する。一つ目は、X 線の入射したピクセルの回り 3×3 ピクセル以外の場所で、シリコン X 線が吸収される場合（過程 3 の 1）。もう一つは、角のピクセルにおいてシリコン X 線が吸収された場合である（過程 3 の 2）。これは角のピクセルにスプリット閾値を越えるイベントがあっても、イベントの電荷を数える際には省いているからである。

ただし、ここで計算を簡単にするために、入射 X 線はピクセルの度真中に落ち、かつ X 線がシリコン原子に光電吸収される位置もピクセルの度真中であるとした。

– シリコンの蛍光 X 線が電極部分で発生する場合（過程 4）

電極部分の構造は、ポリシリコン、 SiO_2 、 Si_3N_4 からなっている。非チャンネルストップ部分のそれぞれの厚みは順に、273nm、275nm、27nm、となっている。また、一つのピクセル ($24\mu\text{m}$) のうち縦方向のみ $\sim 4\mu\text{m}$ がチャンネルストップ部となっており、そこでの、ポリシリコン、 SiO_2 、 Si_3N_4 の厚みは、それぞれ (273+350)nm、710nm、27nm、である ([17]、[18] 参照)。

シリコン輝線はこの部分のシリコンに吸収されて生じるので、X 線の吸収される確率 P は

$$P = 1 - \exp(-\lambda(E)d) \quad (5.9)$$

$\lambda(E)$: シリコンの吸収係数

d: 電極の厚み

そのうち、シリコンの蛍光 X 線が出る確率は、上に蛍光収率 $Y(=0.037)$ をかけたものである。シリコンの蛍光 X 線のエネルギーにおける mean free path は、 $12.2\mu\text{m}$ と電極の厚みに比べて十分長いため、一旦発生したシリコンの蛍光 X 線は電極部で再吸収されないものとする。するとジオメトリ的に考えて、発生した蛍光 X 線の内半分が空乏層中に入射してシリコンのイベントとして寄与することになる。

データとの比較

上で計算した結果と、実際のデータの比較を行なった。Cl、Ti、Mn(^{55}Fe)、Fe、Ni、Zn のデータに関して、メインピーク ($K\alpha$ ラインと、 $K\beta$ ライン)、各々のメインピークに対応するエスケープライン、シリコン $K\alpha$ ラインを調べた。すべてのピークに対して、(シングルガウシアン+コンスタント) モデルを入れてやりカウント数を調べた。ただしこのフィッティングでは、メインピークのテール成分について考慮していない。テール成分はメインピークの 1% 程度なので、結果には影響を与えない。よって、シングルガウシアンでフィットした結果を採用して、以下議論する。

– エスケープイベント

まずエスケープイベントについて述べる。

図 5.44 上の点は、各々の 2 次 X 線のエネルギーに対して、

$$\frac{\text{エスケープイベントのカウント数}}{K\alpha\text{ラインのカウント数} + K\beta\text{ラインのカウント数} + \text{エスケープイベントのカウント数}}$$

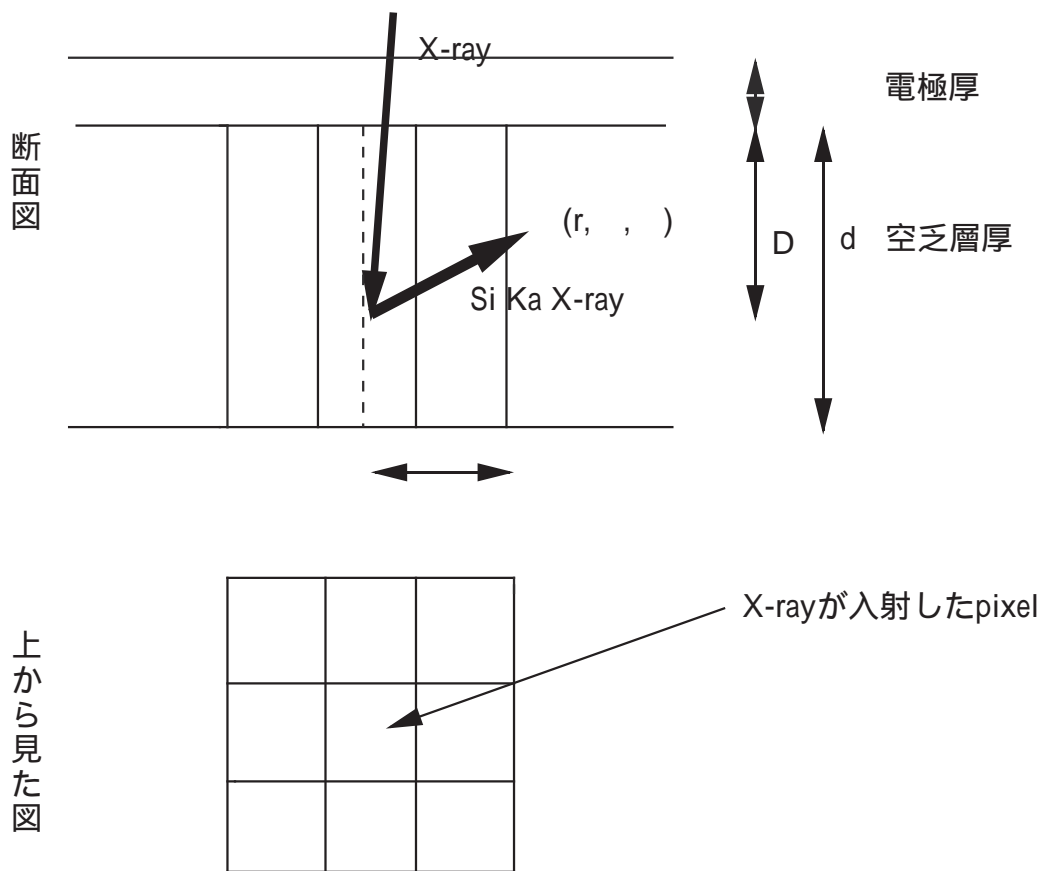


Figure 5.43: シリコンの蛍光 X 線発生に対するモデル

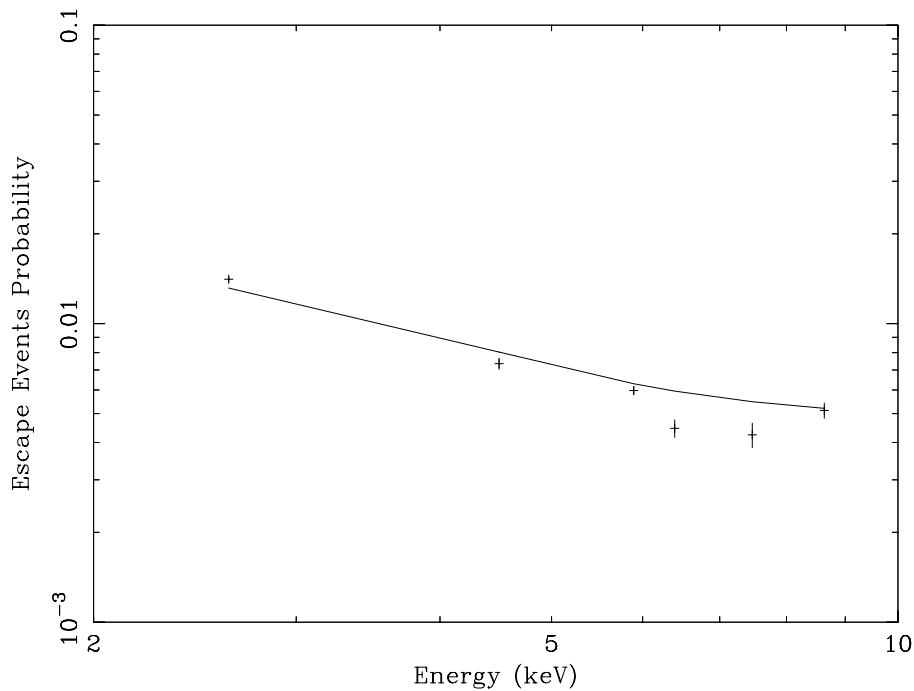


Figure 5.44: エスケープイベントの発生率のデータと、数値計算による結果の比較

をプロットしてやったものである。それに対して、図 5.44 上の実線は上のモデル計算で計算した結果（過程 2 と過程 3）を重ねたものである。計算結果と実測の傾向はほぼ一致している。計算結果と実測のずれは、過程 3 の 1 と過程 3 の 2 の計算過程において、計算を簡略化するために仮定をおいていることが原因と思われる。これらの仮定をのぞいてさらに計算をおこなうことは、今後の課題といえよう。

これについて、定性的な解釈を与えてみよう。図 5.44 より、入射 X 線のエネルギーが高くなると、メインピークのカウンタ数に対して、相対的にエスケープイベントのカウンタ数が減少する様子が見てとれる。これは、入射 X 線のエネルギーが高いほど、CCD 中のシリコン原子と相互作用され光電吸収される深さが深くなるため、CCD のより深い位置で発生したシリコンの蛍光 X 線は、CCD の外に逃げ出す確率が低くなるためであると考えられる。

– シリコン蛍光 X 線イベント

今回は、シリコン蛍光 X 線イベントに関して述べる。

図 5.45 上の点は

$$\frac{\text{シリコン蛍光 X 線イベントのカウンタ数}}{K\alpha \text{ ラインのカウンタ数} + K\beta \text{ ラインのカウンタ数}}$$

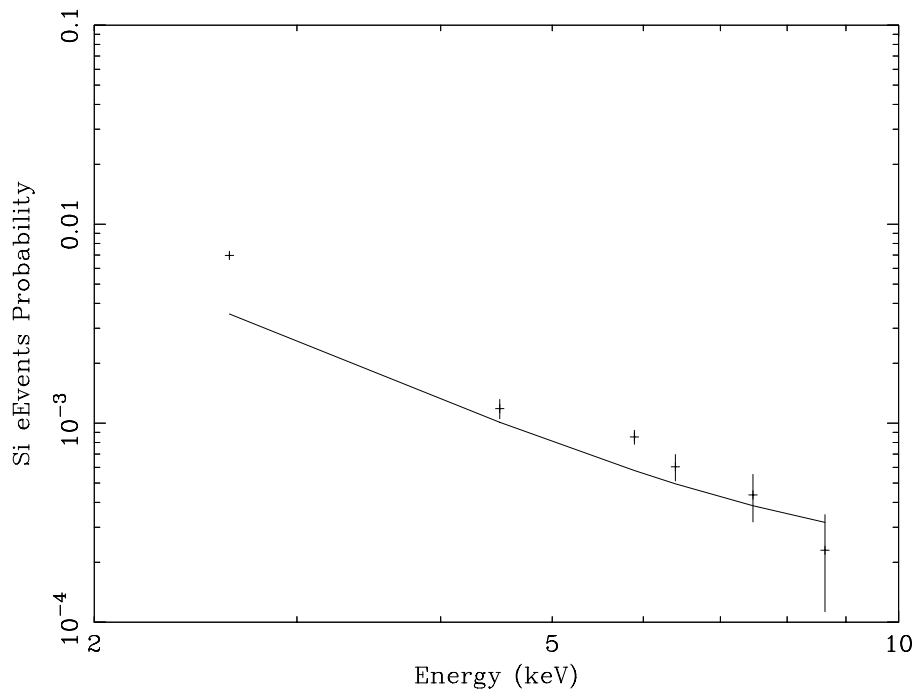


Figure 5.45: シリコン蛍光 X 線イベントの発生率のデータと、数値計算による結果の比較

をプロットしたものである。それに対して、図 5.45 上の実線は上のモデル計算で計算した結果（過程 3 の 1 と過程 4）を重ねてやったものである。シリコン蛍光 X 線イベントに対して、それなりのずれはあるものの、実測の傾向は再現できている。

図に対して定性的な解釈を述べる。空乏層内のある位置で発生したシリコンの蛍光 X 線が、1 ピクセル以上遠くに届く確率は 0.1 以下とかなり小さく、ほとんどが近くで再吸収される。従って、シリコンイベント発生のはほとんどは、電極で発生するものがしめている。電極で発生するシリコンイベントは、入射 X 線が低エネルギーになればなるほど多く、高エネルギー側にいくつれて単調に減少する。しかし、過程 3 の 1 に従って発生するイベントに対しては、どのエネルギーに対してもほとんど変わらない。この確率は、空乏層のある深さから中心をくりぬいた無限円盤を眺める立体角に比例し、それは深さによってほとんど変化しない。従ってそれらの足し合わせによって、図のように高エネルギー側で確率の減り方が小さくなっている。

以上を簡単にまとめる。レスポンス関数作成の際に、無視することが許されない過程であるエスケープイベントと、シリコンの蛍光 X 線イベントの発生機構について調べた。簡単なモデルをたてることによって、実際のデータを再現を試みた。今回の計算

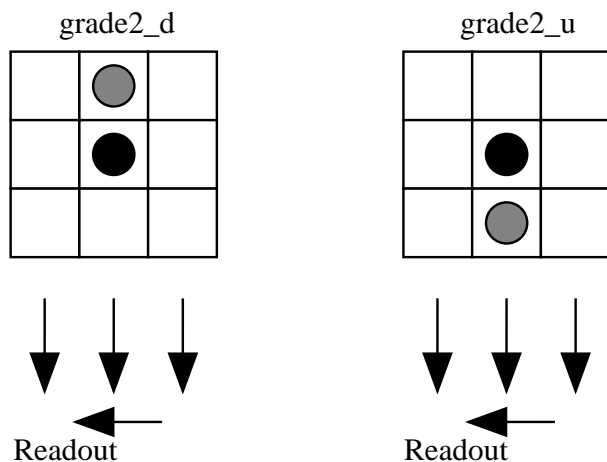


Figure 5.46: グレード 2 イベント。図の下方向が CCD の読みだし口。

に使ったモデルが、かなり簡略化されているためデータの再現性が完全ではない。今後の課題は、もう少し細かいところまで考慮したモデルを使って計算し、データの再現性をあげることである。

5.7 グレード 2 イベントに対する非対称性の問題

グレード 2 のイベントとは、CCD の縦方向にスプリットしたイベントであるが、これには、図 5.46 で示されるように、「読みだし口に近い方向にスプリットする」イベント（以下これを grade2-u と呼ぶ）と、「読みだし口に遠い方向にスプリットする」イベント（以下これを grade2-d と呼ぶ）の 2 種類が含まれる。

XIS の Evaluation Model でとられた ^{55}Fe のデータに関し、この grade2-u と grade2-u のイベント分岐比を CCD の場所毎に調べたところ、grade2-u のイベント数が、CCD の読みだし口に近い方向において grade2-d のイベント数よりも増えているという現象が見つかった⁶。これは CCD 内部の電極構造を考えれば、本来 CCD のどこの場所においても、grade2-u と、grade2-d のイベント数は同じになるべきであると考えられるため、とても不可解な現象である。

これについて、次のようなことを調べた。

- エネルギー依存性はあるのか？
- CCD の場所の縦方向の違いのみならず、横方向の場所の違いによっても同じような現象が見られるか？

⁶阪大の片山君による

- 横方向のスプリットイベントに関しては同じような現象が見られるか？

行なった解析は、次のようなものである。エネルギーの高い Z_n とエネルギーの低い Cl の 2 次 X 線を照射したデータについて（ただしこの解析に限り、スプリット閾値を 20ADU としている。）、

- セグメント A の領域を縦方向に 4 分割し、読みだし口に近い方向からそれぞれ、Area1、Area2、Area3、Area4 とし、各々の場所におけるグレード分岐比を調べた（図 5.48 参照）。
- セグメント A の領域を横方向に 4 分割し、読みだし口に近い方向からそれぞれ、AreaA、AreaB、AreaC、AreaD とし、各々の場所におけるグレード分岐比を調べた（図 5.50 参照）。

入射 X 線のエネルギーによらず、CCD の読みだし口に近いところで、grade2-u イベントの数が増える現象が確かめられた。従ってこの現象は、入射 X 線のエネルギーに依存するものではないことがわかった。CCD の縦方向の場所の違いによる grade-u と grade-d のイベント数には違いがあるが、CCD の横方向の場所の違いによるイベント数の違いは確認されなかった。また、横方向スプリットイベント (grade3 イベントと grade4 イベント) に対しては、Area1~Area4 の違いによるイベント数の違いは見られなかった。

そのうち Z_n についての結果を、図 5.47、図 5.49 にのせる。

図 5.47 から、場所が CCD の読みだし口に近くなればなるほど、シングルイベント（グレードゼロイベント）が、grade2-u イベントに変化してしまっていることがわかる。（CDD のどこの場所においても、グレード 0、grade2-u、grade-d イベントの合計数は同じである。）

ここで、この現象が与える影響というものを考えてみる。

CCD の場所毎によって、grade2-u、grade2-d のイベント数が違ってても、ASCA (SIS) で採用されているグレードわけによってイベント検出を行なえば、これらのイベントは一つのまとまった grade2 イベントとして認識されるので、一見あまり問題はないかのように思われる。が、この問題は先ほど述べたようにグレード 2 イベントだけで閉じているものではなく、グレード 0 イベントが CCD の場所によってグレード 2 イベントに変化してしまっていることにより起こっている。すなわち、グレード 0 イベントのグレード分岐比が CCD の場所毎に変化してしまうことを意味する。

またそれだけでなく、グレード 0 イベントが縦方向にスプリットしてしまうということの意味しているから、電荷がスプリットしてしまうことによるゲインの低下も無視できなくなる（すなわち縦方向の洩れ込みが、スプリット閾値よりも小さい場合、その分無視される）。従って、CCD の場所毎にゲインが変化してしまうわけである。

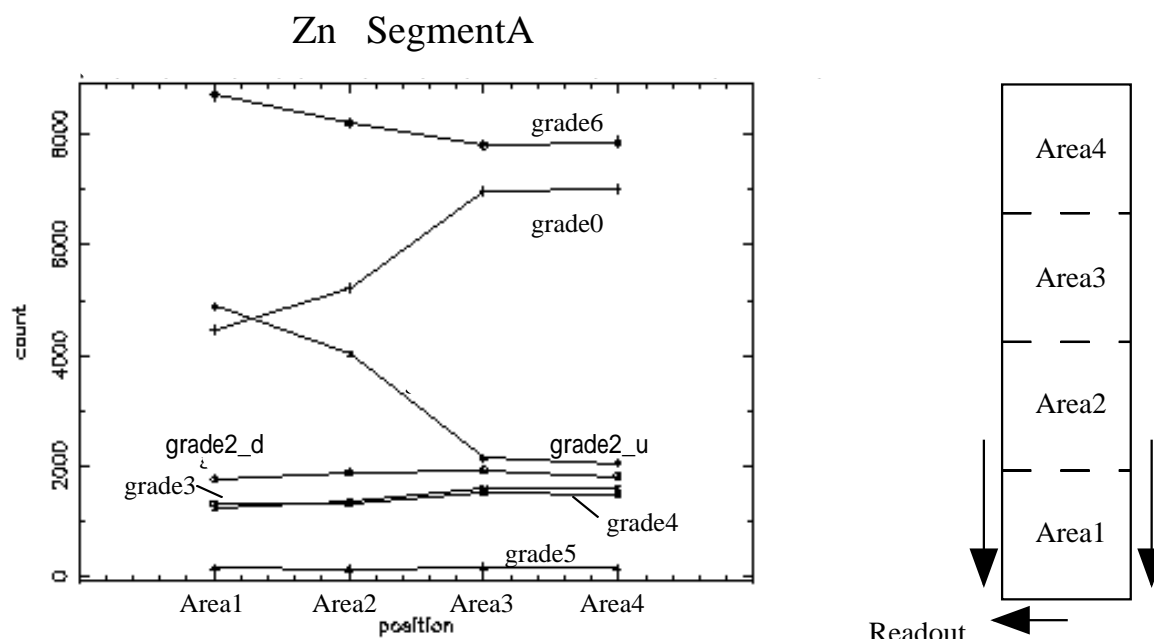


Figure 5.48:

Figure 5.47: グレード 2 問題、CCD を縦方向に分割した場合

この我々の報告を受け MIT 側が調査を行なったところ、この現象は CCD に与えるマイクロコードの一部が不適當であるからとわかった。Flight Model の AE においては、この点が改善されることになった。

5.8 量子効率

XIS の量子効率をはかるため、ガス比例計数管 (PC) を用いて実験した。理由は、内部の構造が簡単であるために、PC のカウトレートから、実際に PC の前に来ているカウトレート (すなわち X 線の絶対フラックス) を見積もるのが簡単にできるからである。XIS に照射する特性 X 線の絶対フラックスを事前に PC によって測定しておくことにより、XIS の量子効率を知ることができる。

5.8.1 実験に用いた PC について

実験に用いた PC は、大阪大学の常深先生によって作成されたものである。90mm × 41mm × 50mm の大きさをした gas cell を持ち、中に PR ガス (CH₄ 10% + Ar 90%) を流しながら使用する。PC の断面図は、図 5.51 の様になっている。もともと始めの設計では、窓材であるアルミナイズドマイラの補強のために、メッシュが取り付けられていた。しかしメッシュの透過率が良くわからないため、これを取り除いて実験を行なうことにした。そのために、PC を真空層の中にインストールして実験を行

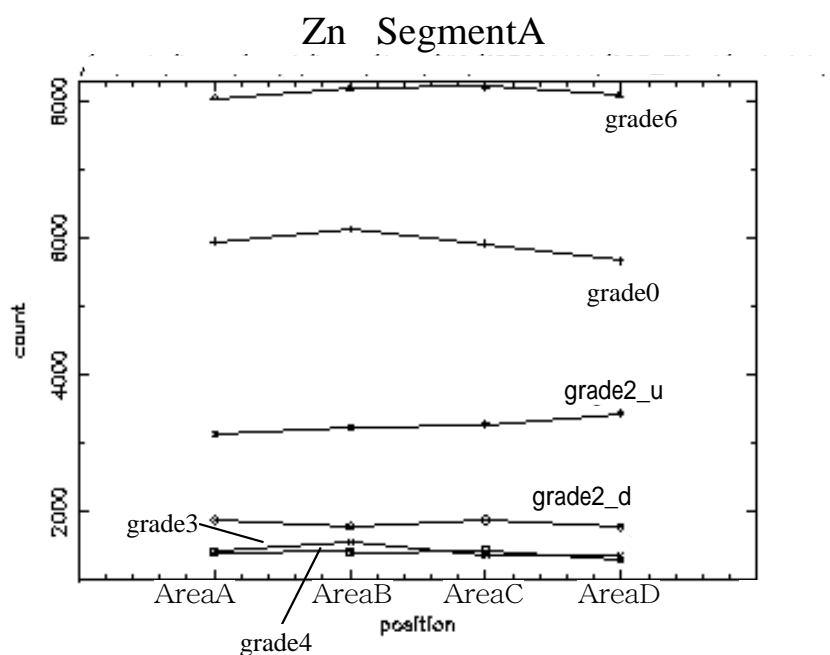


Figure 5.49: グレード 2 問題、CCD を横方向に分割した場合

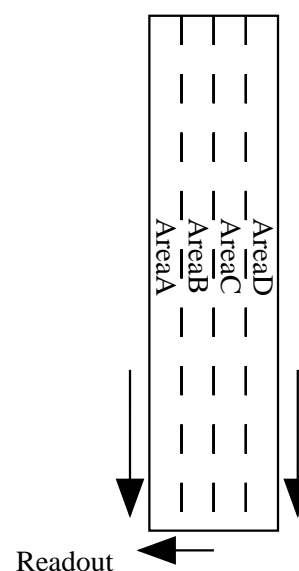


Figure 5.50:

なうと、1mm 程膜がふくれてしまうが（PC 内は 1 気圧である）、その効果による検出効率の変化は無視できる。また、窓の上に厚さ 2mm の銅製で、直径 8mm ϕ の穴が開いたコリメータを取り付けることによって、PC の有効面積を正確にはかれるようにした。

5.8.2 窓材の膜厚測定

PC の検出効率を決めるために、窓に使われている薄膜の膜厚測定をおこなった。

窓に使われている膜は、東レ製のポリエステルフィルム ”ルミラー” の両面にアルミを蒸着させたものである。（ルミラーの化学式は $C_{10}H_8O_4$ であり、密度は $1.4g/cm_3$ である。）メーカーが公表している厚みは、ルミラー $6\ \mu m$ 、アルミ $100\ \text{\AA} \times 2$ （両面）である。この膜による吸収量を測定するため以下の実験を行なった。

大気中で ^{55}Fe を PC に照射した。その際に、 ^{55}Fe と PC の間に膜をはさむ。膜の枚数を、0、4、8、12、16、20、24 枚と増やしていくことにより、カウント数の変化を調べる。また、 ^{55}Fe と PC の間の距離を一定に保つために、治具を使用する。

各々の膜の枚数に対して取得されたスペクトルから、バックグラウンドのスペクトルを引いたスペクトルを作成する。スペクトルには、 ^{55}Fe のラインと、Ar のエスケープのラインが存在する。従って、各々のデータの 2 つのラインに対して、それぞれシングルガウシアンでフィットし、そのカウント数を求める。

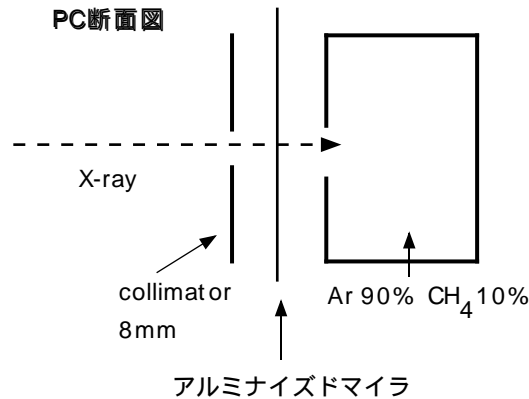


Figure 5.51: PC の断面図

Ar のエスケープピークと、 ^{55}Fe のピークを合わせたカウント数を求め、N 枚の時のデータのカウン数を、0 枚の時のカウン数で normalize する（これはすなわち透過率）。

こうしてもとめた透過率を、膜の枚数の関数としてプロットし（図 5.52）、

$$I/I_0 = \exp(-\rho_{\text{膜}} \mu_{\text{膜}} l_{\text{膜}}) \quad (5.10)$$

$$= \exp(-\rho_{\text{Al}} \mu_{\text{Al}} l_{\text{Al}}) \times \exp(-\rho_{\text{ルミラ}} \mu_{\text{ルミラ}} l_{\text{ルミラ}}) \quad (5.11)$$

$$= (0.999376)^x \times \exp(-0.0001 \times A \times x) \quad (5.12)$$

ρ : 密度

l : 厚さ

μ : 吸収係数

A : fit より求める値

x : 膜の枚数

なる関数でフィットしたところ、

$$A = 169.5^{+11.8}_{-11.5} \quad (5.13)$$

ともまった。これより、膜の厚さは、

$$0.0001 \times 169.5 = l_{\text{ルミラ}} \times 23.296 \quad (5.14)$$

$$l_{\text{ルミラ}} = 0.000728 \text{ cm} = 7.28^{+0.50}_{-0.50} \mu\text{m} \quad (5.15)$$

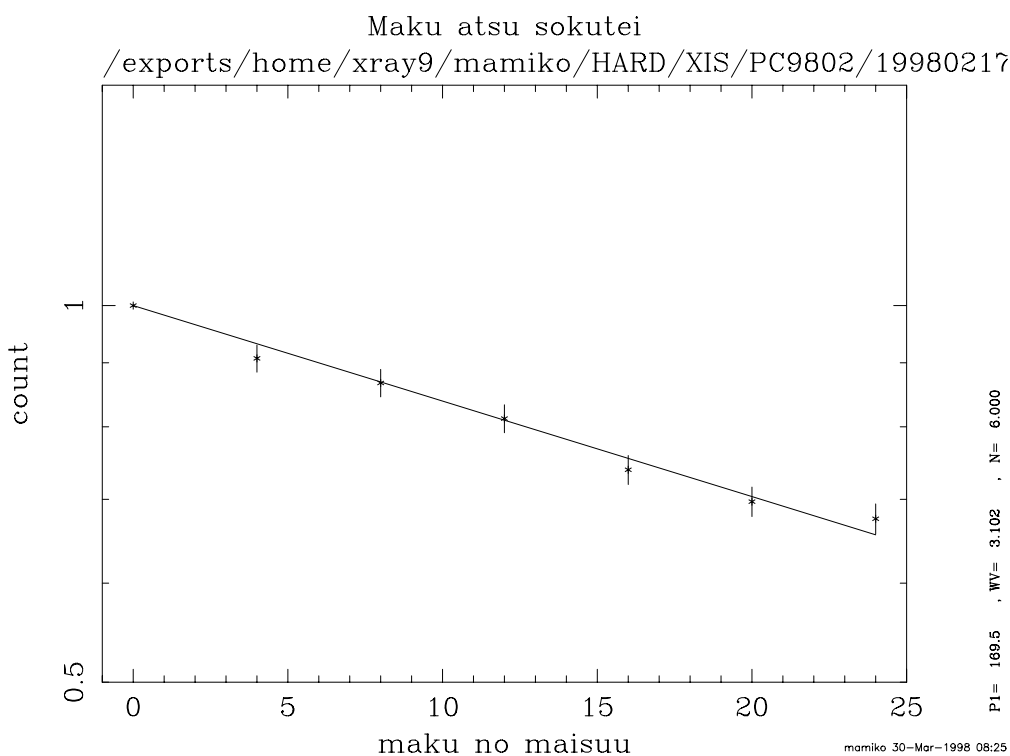


Figure 5.52: 窓材であるアルミナイズドマイラの膜厚を測定した結果。横軸はPCと ^{55}Fe の間にはさんだ膜の枚数、縦軸は、その際にPCの受けたカウント数を、膜の枚数が0枚の時のカウント数でnormalizeした。実線は5.13式によりフィッティングした結果。

となる。ただしこの時に、両面のAlの厚さは、メーカーのいう $100 \text{ \AA} \times 2$ であると仮定した(X線の吸収に効くのはルミラーの部分で、Alの膜厚の誤差による検出効率の誤差は、十分に無視できるほど小さい)。ルミラーの厚みは、メーカーの公表値よりも $\sim 20\%$ 厚いことがわかった。

5.8.3 量子効率実験

膜の厚さがわかれば、PCの量子効率がわかる。その様子を図5.53に示す(ただし、図に示している値は、PC内のgasの圧力が1気圧、温度が 24°C の場合である)。

実験は、1998年6月20日、宇宙線研究室のクリーンルームの中で行なった。XISのキャル中、XISがおかれるのと同じ場所にPCを設置して測定を行なった。XISのキャルでXISに照射する強度で、強度のrealtimeのモニターをおこないながらPCに2次X線を照射した。照射した二次X線の種類は、低エネルギー側からCl Ti Fe Ni Znの5種類である。

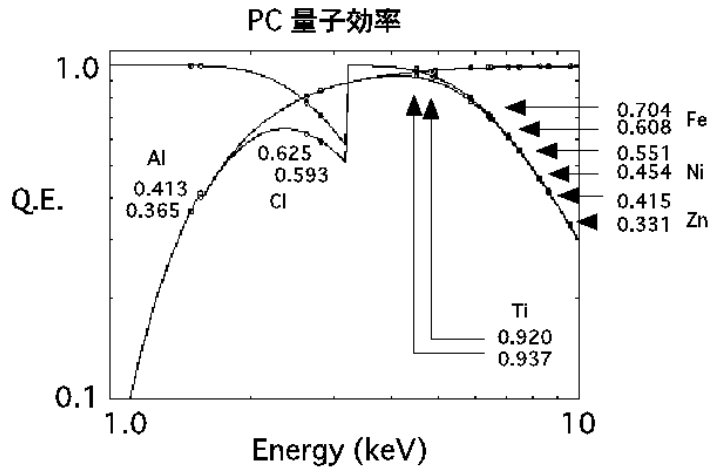


Figure 5.53: PC の量子効率を計算して出した結果。ただし、PC 内の gas の圧力は 1 気圧、温度は 24°C であると仮定している。

XIS に照射する蛍光 X 線の絶対フラックスを知るには、上でとられた PC のカウント数から、実際に XIS の位置に来ている X 線のカウント数を導き出さねばならない。PC で検出される X 線のカウント数というのは、窓材であるアルミ蒸着フィルムを通り過ぎて、かつ PC 内の PR ガス に検出された X 線のカウント数である。したがって、PC 直前の X 線のカウント数 (N_{real}) と、PC で検出された X 線のカウント数の関係 (N_{PC}) は、

$$N_{PC} = N_{real} \times Y \quad (5.16)$$

$$Y = Y_{gas} \times Y_{膜} \quad (5.17)$$

$$Y_{gas} = 1 - \exp(-\rho_{gas} \mu_{gas} l_{gas}) \quad (5.18)$$

$$Y_{膜} = \exp(-\rho_{Al} \mu_{Al} l_{Al}) \times \exp(-\rho_{ルミラ} \mu_{ルミラ} l_{ルミラ}) \quad (5.19)$$

$$\rho_{gas} = \frac{m \times P}{k \times T} \quad (5.20)$$

(m:gas の分子量、k:Boltzman 定数、P:gas 圧 (atm)、T:gas の温度 (K))

と表せる (ただし、この時に測定した gas 圧 (atm)、gas の温度は、測定値を信用して採用した)。

これにより XIS に照射する蛍光 X 線の絶対フラックス photons/sec/cm² がわかる。その値を使って XIS の CCD(EM1) の量子効率を求めた結果を図 5.54 に示す (グレード 0、2、3、4、6 を X 線イベントとしている)。実線は、XIS の構造が簡単な層状

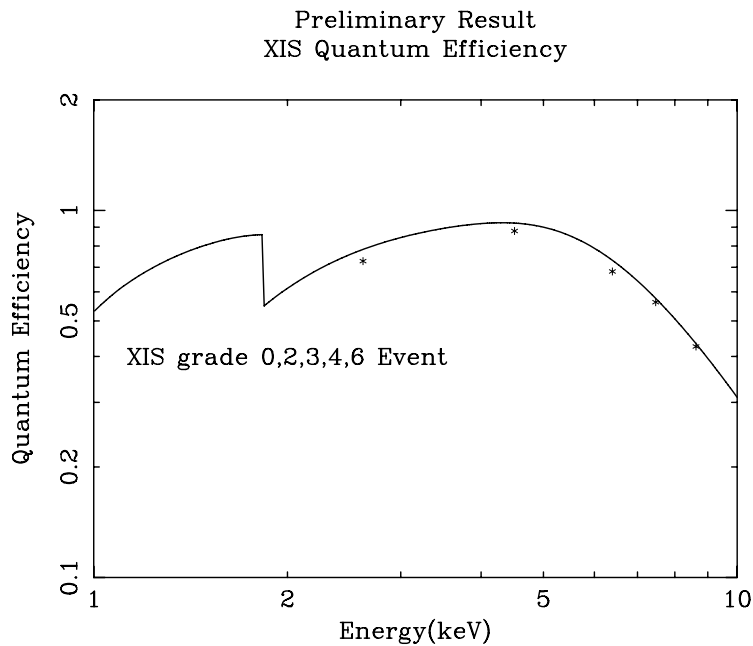


Figure 5.54: XIS CCD (EM1) の量子効率。実線は、空乏層の厚さが $50\mu\text{m}$ であるとして計算して量子効率を出した結果。

モデルであるとし、かつ、空乏層の厚さが $50\mu\text{m}$ であるとして計算した結果である（その際に用いた電極と不感層の厚みは、[18] に与えられている値である）。これにより、XIS-CCD(EM1) の空乏層の厚みは、約 $50\mu\text{m}$ であるとわかる。

5.8.4 検出効率の増加のために

図 5.55 は、それぞれ Al、Cl、Ti、 ^{55}Fe 、Ni、Zn のエネルギーでのグレード分岐比を表している。横軸はグレード、縦軸は各々のエネルギーにおけるグレード 0 イベントのカウンタ数に対する他のグレードイベントのカウンタ数の比である。一見してわかるようにエネルギーが高くなるに従って、シングルピクセルイベントであるグレード 0 イベントの全体に占める割合が、低くなっていくのがわかる（Cl の蛍光 X 線を当てた時に、一番シングルイベントが多くなっているのは Cl の蛍光 X 線エネルギーがシリコンの K エッジのすぐ上にあり、mean free path の長さがシリコンの K エッジの上と下で不連続に変化（エッジエネルギーのすぐ上で短くなる）しているためである）。ASCA で通常 X 線として認識されていたのは、グレード 0、2、3、4 であった。しかしこの図からわかるように、XIS の CCD においては高エネルギーになると、X 線イベントはシングルピクセルや 2 ピクセルに留まらずに、もっと大きく広がって

しまう。我々は、X 線イベントとしてグレード 6 をも含めるべきであるとかんがえ、前章ではグレード 0、2、3、4、6 を X 線イベントとして認識し量子効率をもとめた。

しかし、予想がつくように、実は Z_n ほどの高エネルギー X 線イベントになるとグレード 6 でも収まり切らずに、もっと広範囲に電子が広がる。図 5.56 は、 Z_n のグレード 7 イベントのスペクトルである。本来グレード 7 は、グレード 6 以上に広がったイベントであるため、X 線であるとの認識はされていない。しかし、スペクトル中には Z_n の $K\alpha$ と $K\beta$ のラインがしっかりと見えている。また、 Z_n の蛍光 X 線を照射して取得したフレームを見ていると、 3×3 ピクセル以上の広さに広がっているイベントもかなりの数を占めていることに気づく。今後我々は、 3×3 ピクセルだけを見るのではなくイベントの回りの 5×5 ピクセルに着目して X 線イベントとして認識されなかったイベントを拾い集めることで、高エネルギー側の検出効率をあげるつもりである。

5.9 X 線の強度変化に対する CCD の応答の変化

CCD に照射する X 線の強度が強くなると、パイルアップイベントの影響によって、CCD のレスポンスの様子が変化してくるとの予想が立つ。従って我々は、照射する X 線の強度をいろいろ変えることによって、基本的なレスポンスのパラメータ（ゲイン、エネルギー分解能、カウントレート）がどのように変化するか調べた。図 5.57、図 5.58 は例として Ni $K\alpha$ 線の強度をいろいろ変化させた時の、メインピークのチャンネル、エネルギー分解能がどのように変化するかプロットさせたものである。横軸 P は、X 線強度に比例する量で、定義は

「1 回の露出時間における 1 ピクセルあたりの平均イベント数」

である。P の増加に伴って、メインピークのチャンネルは減少し、かつメインピークの幅は広がることがわかる。X 線のカウント数が増えると隣合う X 線イベントの平均距離が小さくなるために、電荷雲の裾どうしが重なり合う確率が高くなる。（これは、電荷雲の大きさがより大きくなる高エネルギー X 線イベントに、多く見られる現象である。）ASCA 方式による X 線イベントの検出方法では、この現象をダークレベルの増加と区別することができない。従って、X 線強度が増加すれば、ピーク的位置は低くなり、エネルギー分解能は悪くなってしまいうのである。図 5.59 は、X 線の強度変化に対するカウントレートの変化を示している。X 線の強度変化に比例したカウントレートを点線で表す。本来ならば X 線の強度が増えるに従いカウントレートは、この点線で表せるような挙動を示すはずである。しかし現実には、X 線の強度が 0.5% を過ぎたところから点線から徐々に離れはじめ、5% に達するころには、ガクンと折れ曲がってしまう。これは、まさにパイルアップイベントの影響である。

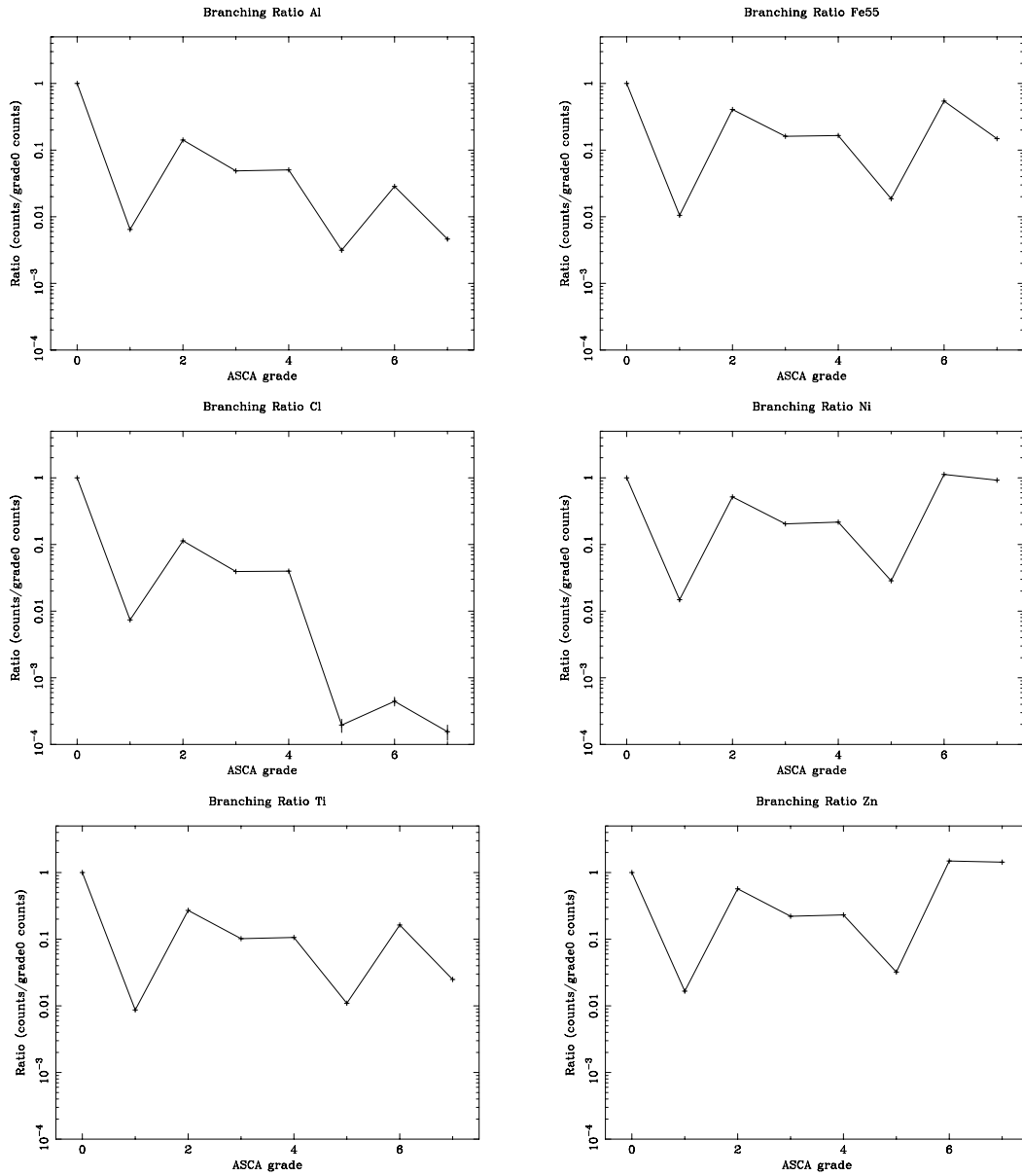


Figure 5.55: 入射 X 線のエネルギーの違いによるグレード分岐比の違い。横軸は ASCA グレード、縦軸はグレード 0 のイベントのカウント数で normalize した各々のグレードでのカウント数を表す。照射した X 線は、左側の列上部より Al、Cl、Ti、右側の列上部より ^{55}Fe 、Ni、Zn、である。

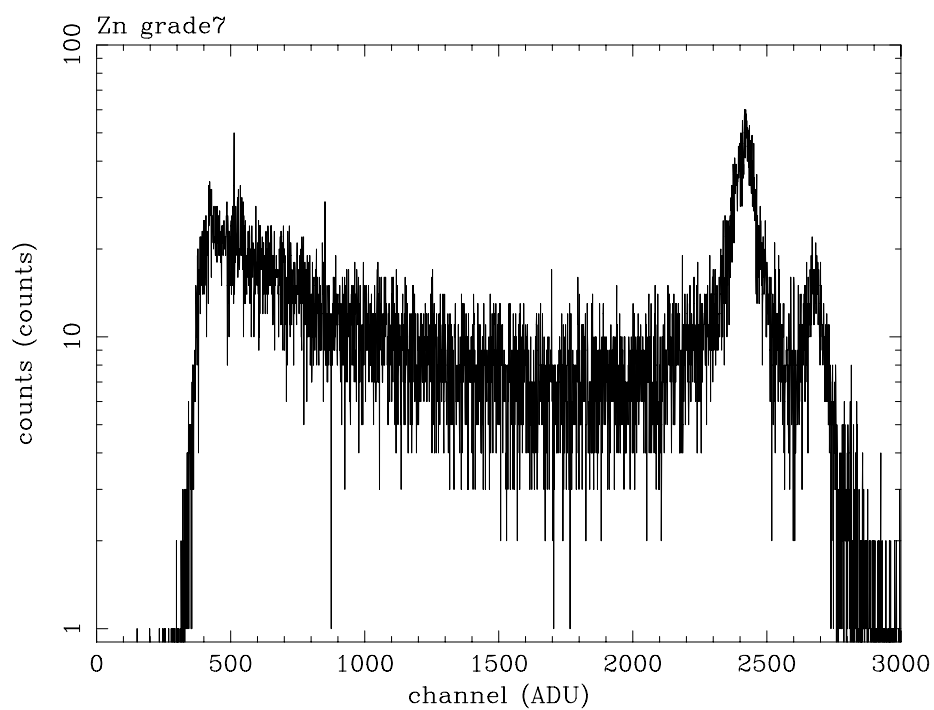


Figure 5.56: Zn のグレード 7 のイベント

このように、X線強度が強い場合、すなわち XIS で強い X線源を観測する時などには、Normal mode を用いると、特に検出効率の点での条件が非常に悪くなる。したがって、我々 XIS チームは Normal mode での観測を推薦しない。明るい X線源の観測には他の Burst mode、Parallel-sum mode などを使用することを推薦する。具体的な X線源に対する XIS での予想強度と、それらの X線源を観測するには、どのモードが適しているか、などの考察はこれから行なう予定である。

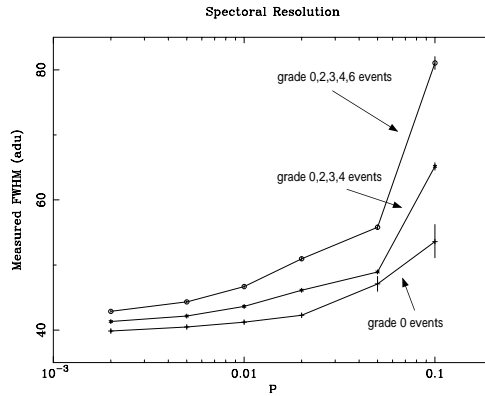
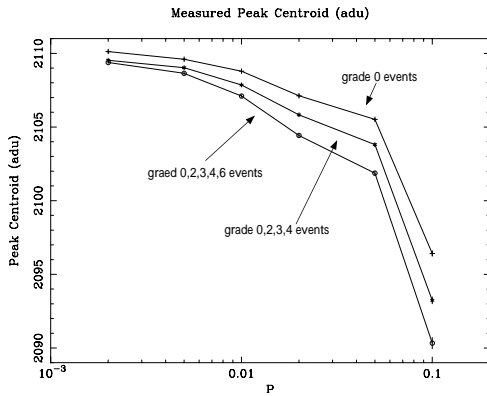


Figure 5.57: X線強度変化に対するゲインの変化の様子。横軸の説明は本文参照。縦軸はメインピークのチャンネル。Ni K α 線を使用。

Figure 5.58: X線強度変化に対するゲインの変化の様子。横軸の説明は本文参照。縦軸はメインピークの幅(σ)。Ni K α 線を使用。

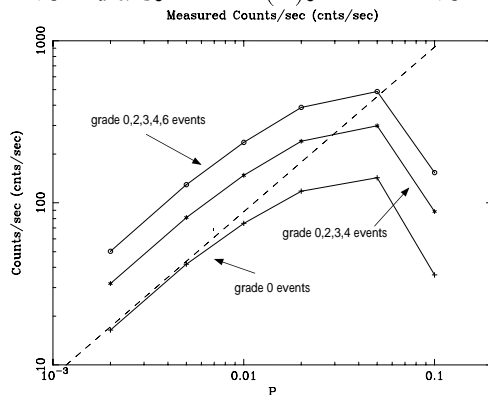


Figure 5.59: X線強度変化に対するゲインの変化の様子。横軸の説明は本文参照。縦軸はメインピークのカウンtrate。Ni K α 線を使用。

第 6 章

結論

6.1 まとめ

本論文を簡単にまとめる。

- Astro-E 搭載 CCD カメラ XIS の Evaluation Model に対して二次 X 線を当て、応答関数作成のためのデータを取得した。
- XIS の Evaluation Model の問題点を指摘し、それを反映して Flight Model においてはそれらの点が改善されることとなった。
- 応答関数に必要なパラメータ、エネルギー分解能、ゲイン等をもとめ、応答関数作成の手順を決定した。
- エスケープ率、シングルピクセルイベントのスペクトルの形状について調べ、簡単なモデルによって物理的な解釈をおこない、XIS に使用されている CCD の特性の理解を深めた。
- X 線の強度変化による、CCD の応答の変化のようすを調べた。
- XIS の性能を簡単にまとめる。
エネルギー分解能 : 2.3% @ 5.9keV
ダークカレント : 0.43 e/pixel/8sec
読みだし雑音 : 3.368 e (RMS)
AE(FM) の Video Card の温度依存性 : 0.002

6.2 今後の課題

今後の課題として、次のようなものが考えられる。

- MIT で取得された量子効率実験のデータ解析

MIT において、CCD チップの量子効率実験のデータが取得されている。このデータは、BESSY にあるシンクロトロン放射光を用いてキャリブレーションされた CCD チップをリファレンスとし、XIS の CCD に種々の蛍光 X 線を照射したものである。これを用いれば、リファレンス CCD と XIS-CCD の間の相対的なカウント数の比から XIS の CCD チップの量子効率を求めることができる。このデータを用いて求めた XIS の CCD の検出効率と、京大で PC を使って行なった量子効率実験の結果との照合を行なうことによって、我々の得た結果の信頼性を高める。

– ASCA 方式での他のグレードのスペクトルに対するモデルの決定

この論文でスペクトルの形の再現に対して詳しくふれたのは、グレード 0 イベントに対してのみであった。しかし、もしこの ASCA 方式を採用して応答関数を作成するならば、他のグレードに関しても、スペクトルの形を再現するモデルを探してやらねばならない。

– 新しいイベント解析法の開発

現在は、あるイベント閾値を越えたピクセルの回りの 3×3 のピクセルを見ることによって、グレード方式を使用してイベント検出を行なっている。しかし、グレードという概念を用いてイベントを分けるという、作為的な手順を踏むことになる。従ってもしできることなら、グレードという概念を用いない新しいイベント検出方法に沿って応答関数を作成したいと思っている。具体的にどのようなイベント検出方法を用いるかについては、現在検討中である。

– 応答関数の作成

これはほとんど最終的な課題であるが、XIS の Flight Model に対してもキャリブレーションをおこない、すみやかに応答関数作成のための実験と実際の作成にとりかからねばならない。

謝辞

この論文を作成するに当たり、多くの人からご援助を賜わり、また多大なる御迷惑をおかけしました。

今回行なわれた、次期衛星 Astro-E 搭載の CCD カメラ XIS の実験は、大阪大学や京都大学を中心に行なわれている戦略研究の元で初めて可能となったものです。

まず、私にこのような大きなプロジェクトの中で研究を進めるという機会を与えて下さった、私の指導教官である小山勝二教授に深くお礼申し上げます。

また、まったく何もわかっていなかった私を、実際の実験から、データの見方、解析の仕方のすべてに渡り、本当に本当に根気良く指導して下さいました栗木久光助手、鶴剛助手に深く感謝します。毎週開いて下さったハードのミーティングがなかったら、まちがいなく私は M3 になっていたことと思います。

京都大学宇宙線研究室の皆様には有形無形のご援助をいただきました。

特に冨田洋さんには、本当にお世話になりました。小山先生や栗木さん、鶴さんには、とても恥ずかしくて聞けないような数々の質問に答えていただいたことから始まり、解析のプログラムを書いていただいたり、私のかいたむちゃくちゃなプログラムのバグを探していただいたりなど、いいだしたらきりがありません。

前田良知さんには、クリーンルームの中の設備全般に渡り設計からなにからすべて担当していただきました。また、D 論を控えていらっしゃる忙しい時期に、プロポーションナルカウンターについていろいろ教えていただき、実験の方法を教えてくださいました。松本浩典さんには SSD の QL 解析プログラムを書いていただき、D 論の忙しい最中にバージョンアップまでしていただきました。坪井陽子さんには、真空系統の設備に対して担当していただきました。坂野正明さんには、コンピューター音痴の私に、ワークステーション関係の様々な知識を与えていただきました。同学年の浜口健二さんには、CCD に照射する精度のよい二次 X 線発生系を製作していただいたり、今度は冨田さんにさえ恥ずかしくて聞けないような基本的な質問に答えていただきました。同室の村上弘さん、横川淳さんとは、物理的なことに留まらず、いろいろな方面に關しての会話をかわすことができリフレッシュすることができました。

また、京都大学以外の方々にも大変お世話になりました。

大阪大学の常深博教授をはじめ、北本俊二助教授、林田清助教授、宮田恵美助手、大学院生の片山和典さんにお世話になりました。

宇宙研の堂谷忠靖助手、尾崎正伸助手にもお世話になりました。

以上以外の方々にもたくさんの援助と協力をいただきました。この場をもちまして、皆様方にお礼申し上げます。本当にありがとうございました。

西内 満美子

参考文献

- [1] 小谷 太郎, 修士論文 (東京大学 1993)
- [2] 山下 朗子, 修士論文 (東京大学 1995)
- [3] 尾崎正伸, 修士論文 (京都大学 1994)
- [4] 富田洋, 修士論文 (京都大学 1996)
- [5] 橋本谷 磨志, 修士論文 (大阪大学 1996)
- [6] 大野善明, 修士論文 (大阪大学 1996)
- [7] 今吉拓哉, 修士論文 (大阪大学 1997)
- [8] 藤原 哉, 修士論文 (大阪大学 1997)
- [9] 鈴木 星児, 修士論文 (大阪大学 1997)
- [10] 鶴 剛, CDR 文書 (京都大学 1998)
- [11] 「Astro-E XIS-DE システム機能仕様書」 (富士通 1997)
- [12] K.Mitsuda “a Close-look on Calibration Data“(1992)
- [13] K.Mitsuda Single-event line profile (1992)
- [14] 河田 燕「放射線計測技術」東京大学出版社
- [15] 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
- [16] S.M. ジー 作、南日康夫、川辺光央、長谷川文夫 訳「半導体デバイス」産業図書
- [17] M.Bauts,S.Kissel,G.Prigozhin,S.jones,T.Isobe,H.Manning,M.Pivovarovoff, G.Ricker,and J.Woo, “X-ray CCD Calibration for the AXAF CCD Imaging Spectrometer”
- [18] M.Pivovarovoff,S.Jones,M.Bauts,S.Kissel,G.Prigozhin,G.Ricker,H.Tsunemi and E.Miyata, “Measurement of the Sub-Pixel Structure of AXAF CCDs”
- [19] G.R.Hopkinson, “Analytic modeling of charge diffusion in charge-coupled device imager” Optical Engineering, Vol.26,No.8,1987

- [20] G.R.Hopkinson, “Charge Diffusion Effect in CCD X-ray Detectors(Theory)” Nucl.Instr.and Meth. 216(1983),423-429
- [21] D.H.Lumb and G.R.Hopkinson, “Charge Diffusion Effect in CCD X-ray Detectors(Experimental)” Nucl.Instr.and Meth. 216(1983),423-429
- [22] M.W.Bautz, J.A.Neusek and G.P.Garmire, “Science Instrument (SI) Calibration Report for the AXAF CCD Imaging Spectrometer (ACIS)” in preparation
- [23] G.Prigozhin,A.Rasmussen,M.Bautz and G.Ricker, “A model of the X-ray response of the ACIS CCD” SPIE proceedings 1998