

# X線CCD新イベント抽出法の 「すざく」データへの適用

河手香織 蔵本哲也

平成21年3月31日

# 目次

<b>1</b>	<b>検出器</b>	<b>1</b>
1.1	すざく	1
1.2	CCD	1
1.2.1	空乏層	2
1.2.2	X線との相互作用	3
1.2.3	初期電子雲	3
1.2.4	電子雲の振る舞い	3
1.3	XIS	5
1.3.1	FI型とBI型	6
1.3.2	XISの性能の指標	7
1.4	すざくデータ	7
<b>2</b>	<b>イベント抽出法</b>	<b>8</b>
2.1	Grade法	8
2.1.1	ASCA Grade方式	8
2.1.2	XIS Grade方式	9
2.1.3	入射X線のエネルギー	9
2.2	Fitting法	11
2.2.1	一般論	11
2.2.2	今回の場合	11
<b>3</b>	<b>Fitting法の適用</b>	<b>13</b>
3.1	天体データ	13
3.1.1	GC SOUTH	13
3.1.2	E0102-72	13
3.2	エネルギー較正	14
3.2.1	GC SOUTH(FI)	14
3.2.2	E0102-72(FI)	16
3.2.3	GC SOUTH(BI)	19
3.2.4	E0102-72(BI)	20
3.3	X線判定条件	23
3.3.1	X線による電子雲の広がり(較正用線源による考察)	23
3.3.2	電子雲の広がりのエネルギー依存性(FI)	24
3.4	解析結果	31
3.4.1	FI型データ	31
3.4.2	BI型のデータ	34
3.4.3	考察	37
3.4.4	課題	44

<b>4</b>	<b>中性領域で吸収された X 線について</b>	<b>46</b>
4.1	中性領域での電荷の損失とその補正 . . . . .	46
4.2	補正に必要なパラメータについて . . . . .	47
4.3	補正によるスペクトルの変化 . . . . .	51
<b>A</b>	<b>Gaussian の形の決定</b>	<b>56</b>
<b>B</b>	<b>プログラムによる Fitting</b>	<b>64</b>
B.1	自作プログラムの原理 . . . . .	64
B.2	結果 . . . . .	65
B.3	計算時間 . . . . .	68

## 概要

2005年に日本で5番目のX線天文衛星となる「すざく」が打ち上げられた。複数の検出器が搭載されていて、その中にはX線CCDカメラもある。CCD検出器ではX線だけでなく宇宙線等の高エネルギー粒子も検出されるのでこれらを除く必要があり、現在、X線を選び出すイベント抽出法としてGrade法が用いられている。Grade法では $3 \times 3$ ピクセルの波高値の分布パターンでX線を選別する。しかしこの方法だと広がり大きい高エネルギー粒子が捨てられやすく、すざくで取得できる $5 \times 5$ すべてのデータを有効に利用したいといった理由からFitting法という新しいイベント抽出法が考えられた。Fitting法では $5 \times 5$ のデータにGaussianをFitさせることで直接的に電子雲の広がりを測る。実際にFitting法を用いるとGrade法に比べ検出効率が数%あがることが地上実験で確認されている。

そこでこのFitting法をすざくからの実際のデータに適用してみた。較正用線源や天体の輝線を利用して、エネルギー依存性を考慮しつつX線による電子雲の広がりを見積もる。これによりバックグラウンドを除去してみると、Grade法と似たスペクトルを得ることに成功し、エネルギー分解能をほぼ悪化させることなく数%検出数を増加させることができた。またFitting法では電子雲の広がりエネルギーの関係から中性領域で吸収された電荷量を戻すことが可能になって、結果としてさらに検出数を増加させることができた。fittingの精度について課題は残るものの、将来的にピクセルサイズが小さくなっていけばこのイベント抽出法はより有効なものになると考えられる。

# 1 検出器

## 1.1 すざく

「すざく」(Astro-E2)は、「はくちょう(1979年)」「てんま(1983年)」「ぎんが(1987年)」「あすか(1993年)」に続く日本の5番目のX線天文衛星で、日米の国際協力で製作され、2005年7月10日にJAXA内之浦宇宙空間観測所から打上げられた。衛星は近地点高度250 km、遠地点高度550 kmの楕円軌道に投入後、高度約550 kmの略円軌道へ最終投入された。直径2.1 m、全長6.5 m(軌道上で鏡筒伸展後の値)の大きさを持っていて、太陽パドルを広げると5.4 mの幅になる。日本の科学衛星の中では大型の衛星で、重量は1700 kgもある。一日に地球を15周し、そのうち地上局から通信できるのは5回のみで約10分ずつ行われる。

すざくには5つの軟X線検出器と1つの硬X線検出器が搭載されている。非常に軽量ながら10keVに近い高エネルギーX線に対しては世界最大級の感度を持った反射望遠鏡(XRT)が5台搭載され、その焦点面に4台のX線CCDカメラ(XIS)と一桁も波長分解能の高い高分解能X線分光器(XRS)がおかれている。(ただしXRSは2005年8月8日、液体ヘリウムの消失により観測不可能になった。)さらに硬X線帯域(10-600keV)を観測できる硬X線検出器(HXD)が1台搭載されている。

すざくではこれら4台のXISとHXDで同じ天体を同時に観測することができ、様々なX線天体に対しこれまでない広いエネルギー帯(0.3-600keV)にわたり、高いエネルギー分解能かつ高感度のX線分光が可能になっている。

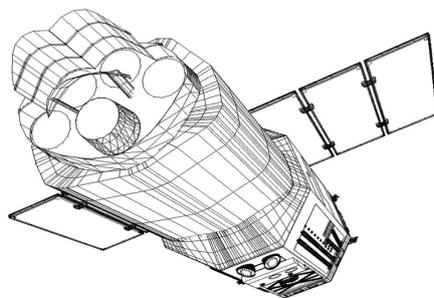


図 1: SUZAKU

## 1.2 CCD

CCDは1970年代から開発されている半導体を用いた撮像素子で、数~数十 $\mu\text{m}$ 四方の画素が数百万個並べられて1つのチップを構成している。半導体検出器は相互作用によりX線を空乏層で吸収し、電子正孔対を発生させて検出するものであり、CCDでは画素ごとに集められた電荷はバケツリレーの要領で転送されて読み出される。半導体は平均電離エネルギーが小さいため高いエネルギー分解能が得られるので、CCDは優れたエネルギー分解能と位置分解能をあわせ持っているといえる。それにより正確な入射X線のエネルギー、位置、さらに時刻を同時に測定することができる。

### 1.2.1 空乏層

X線 CCD の各画素の構造は大きく MOS ダイオード型と pn 接合型の 2 つに分けられ、このうち XIS に使用されている CCD は MOS 構造である。MOS とは Metal(金属)Oxide(酸化膜)Semiconductor(半導体)の略で、この三層を順に接続したものを MOS 構造という。半導体部分にはシリコン、金属層にはポリシリコンを堆積させたものを使っている。また微細加工のしやすさなどから、CCD では半導体内の不純物としてボロン (ホウ素) などの Ⅲ 族原子を添加したキャリアが正の電荷を持つ p 型半導体がいわれている。

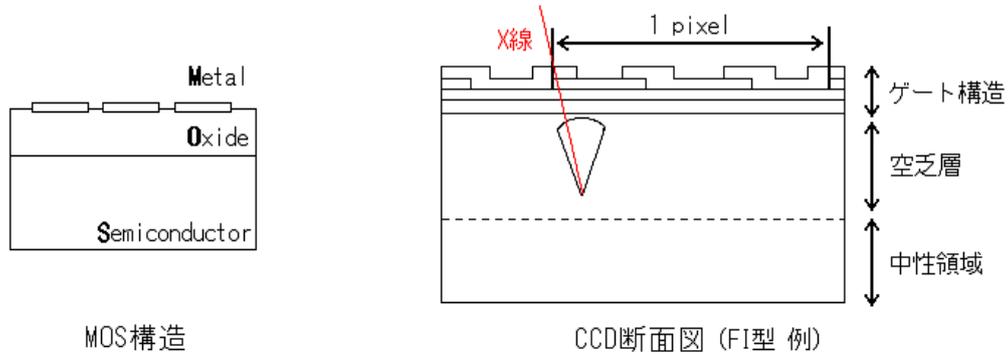


図 2: 構造

MOS 構造の p 型 CCD のポテンシャル構造を示している (図 3)。左図は金属と半導体を電氣的に絶縁した状態である。

- フェルミ準位 : 金属あるいはシリコンの電子の平均エネルギー
- 真性フェルミ準位 : 不純物の含まれていない場合のフェルミ準位で、荷電子帯と伝導帯のちょうど中間にくる。p 型半導体では荷電子帯のすぐ上にアクセプタ準位を持つためフェルミ準位は真性フェルミ準位よりも下側になる。

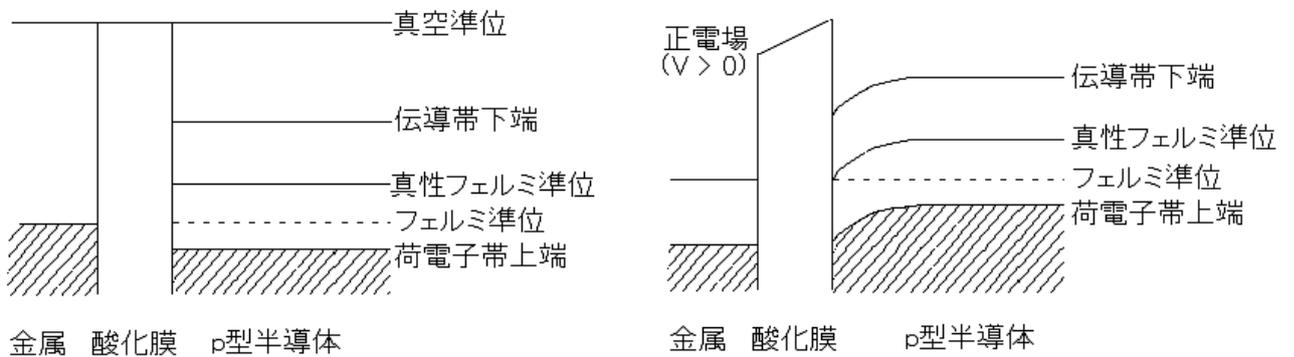


図 3: ポテンシャル

金属部に正電圧をかけると、酸化膜の両側に電位差が生じて酸化膜内とシリコンの表面の垂直方向に電界が生じる。すると多数キャリアである正孔は右方向に追い込まれシリコン表面にキャリアが存在しなくなる。(正孔にとっては右の方がエネルギーが低い)この状態を「空乏」とよび、空乏状態のシリコン表面を空乏層という。空乏層の奥のポテンシャルの平坦な部分を中性領域と呼ぶ。印加電圧を増していくとエネルギーバンドが強く下に曲がり空乏層の幅が深くなっていくが、そのうち真性フェルミ準位とフェルミ準位が交わるようになる。すると少数キャリア(電子)が多数キャリア(正孔)より多くなるためn型半導体のようになる。これを「N反転」とよび、反転状態になると印加電圧を大きくしても負電荷がたまることで電位を支え、空乏層の幅はこれ以上深くできなくなる。

### 1.2.2 X線との相互作用

X線がイベント認識されるにはCCDと相互作用をしないといけない。X線イベントとして検出されるのはほとんどが空乏層で相互作用したものである。

XISのエネルギー領域である0.2-12keV程度ではX線と物質の相互作用はほぼ光電吸収である。X線のエネルギーEがSiのK殻エネルギー $E_k$ より大きい場合、K殻の電子をたたき出し、たたき出された電子は $E-E_k$ の運動エネルギーを持って初期電子雲の形成にまわる。Eが $E_k$ より小さい場合はL殻の電子がたたき出される。

### 1.2.3 初期電子雲

光電吸収によってたたき出された電子は半導体中で荷電子帯にいる電子と弾性散乱を繰り返してその運動エネルギーを周囲の原子に与え、多数の電子正孔対を作る。光電吸収によって内殻電子を失ったSi原子のほとんどがAuger電子(内殻の空いた準位に外殻の電子が落ちる時に束縛エネルギーの差の分だけ別の外殻電子にエネルギーを与える過程において放出される電子)を放出し、その電子もまた電子正孔対の生成にまわる。このように内殻は埋まっていき、最終的には荷電子帯の電子のみが電子正孔対を作ると考えられる。電子正孔対を作り出すのに必要なエネルギーはSiの電離エネルギー3.65eVなので生成される電子正孔対はEに比例した $E/3.65$ 個になる。内殻電子を失ったSi原子からわずかな確率でAuger原子の代わりにKL殻間のエネルギーに相当する蛍光X線が発生する場合がある。このときのX線が同一ピクセル内ですぐ再吸収されてしまうとSiの蛍光X線(1.739keV)に対応するイベントと、 $E-1.739\text{keV}$ に対応するエスケープイベントが検出されてしまう。Auger原子と蛍光X線の起こる割合は原子番号によって異なり、大きいほど蛍光X線の発生する割合が高くなる傾向にある。Siの蛍光X線となる確率は約4.7%である。生成された電子は初期電子雲を形成する。Auger電子によって一箇所にすべての電子が生成される場合は初期電子雲は等方的と考えられてその半径は $\beta$ 線の飛程を測定することにより $a[\text{cm}]=1.71 \times 10^{-6} \times E^{1.75}$ と表される。

### 1.2.4 電子雲の振る舞い

半導体中で電子雲が形成されると、電界によって電荷は電極の方へと集積される。この時、電子はドリフト、拡散、再結合の作用に応じて運動する。

- ・ドリフト

電荷は電界中で受ける力によりある一定の方向に動く。電界の方向を  $z$  軸とすると、運動方程式

$$-eE(z) = m_e \frac{d^2 z}{dt^2} \quad (1)$$

に従う。半導体中では電子は原子との衝突を繰り返しながら運動するので、衝突から次の衝突までに要する時間 (平均緩和時間)  $\tau$  を用いて、次のように表せる。

$$-eE(z)\tau \sim mv_e \quad (v_e : \text{電荷の平均速度}) \quad (2)$$

これを变形して

$$v = -\mu E(z) \quad (\mu : \text{電子移動度}) \quad (3)$$

となる。電子移動度は電荷の移動が外部の電界によりどのように影響されるかを知る指標となる。

#### ・拡散

電子は熱運動により濃度の低いところから高いところへと拡散し、拡散方程式によって表される。

$$\frac{d\rho}{dt} = D\nabla^2 \rho \quad (\rho : \text{電子の分布密度}) \quad (4)$$

この解は、

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4Dt}\right) \quad (5)$$

であり、これは  $1\sigma = \sqrt{2Dt}$  のガウシアンである。つまり電子雲は時間とともに広がっていく。また、 $D \equiv v_{th}l = \frac{kT}{e} \mu_e$  ( $v_{th}$ : 室温での平均速度、 $l$ : 電子の平均自由行程) である。

#### ・再結合

電子は正孔と再結合して平衡状態に戻ろうとする。Si では直接再結合はほとんど起こらず、不純物を介した間接再結合が主要となる。不純物の個数密度  $N$ 、捕獲断面積を  $\sigma$  とすると再結合のタイムスケールは

$$\tau_p = \frac{1}{v_{th}\sigma_p N} \quad (6)$$

である。電子の個数は  $\exp(-\frac{t}{\tau_p})$  に比例して減少する。再結合までに電子が拡散する典型的な距離、拡散長  $L$  は

$$L = \sqrt{D\tau_p} \quad (7)$$

で定義される。

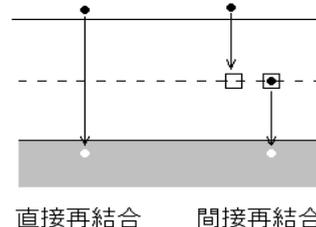


図 4: 再結合

半導体中での電子の振る舞いを計算するにはこれらを足し合わせる必要があるが、見積もり程度ならタイムスケール等を比べればよい。空乏層中は電界がかかっているの、ここで X 線が吸収されればただちに電極までドリフトして蓄積され、露出時間が終わり次第転送される。

### 1.3 XIS

X線検出用 CCD カメラである XIS はエネルギー、時間、空間分解能のバランスがよく、天体の精密な位置決定は3種の検出器で XIS しかおこなえない。広い視野での撮像を行いながら高い精度の分光を連続的に行うことができ、4 台の望遠鏡を合わせると高エネルギー X 線に対して世界でも最大級の有効面積を持つことになる。とされている。

ここでさまざまな XIS の性能諸元を示す。

有効感度帯域	0.2-12keV
ピクセル数 (有効画数)	1024(横) × 1026(縦) ( 1024(横) × 1024(縦) )
ピクセルサイズ	24 × 24 μ m
空乏層厚	70 μ m(FI)、45 μ m(BI)
有効面積 (1 台)	340cm <sup>2</sup> (FI)、390cm <sup>2</sup> (BI)@1.5keV 350cm <sup>2</sup> (FI)、100cm <sup>2</sup> (BI)@8keV
視野	17.8' × 17.8'
空間分解能	2.0'
時間分解能	8msec(P-sum)
読み出しノイズ	< 3e <sup>-</sup>
動作温度	-90

表 1: XIS の性能諸元

XIS で使用されている CCD の構造を下図に示す。

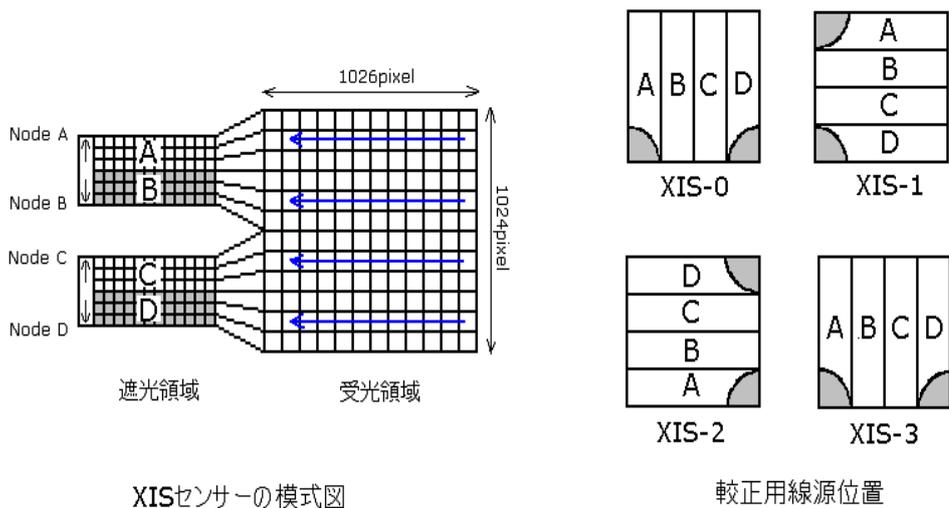


図 5: CCD の構造

CCD では X 線の入射により形成された電子雲は電界によって電極に集められ、電極ごとに電圧を変化させることで次々に隣へと転送されていく。XIS では三相方式が採用され、1 ピクセルあたり 3 つの電極があり、順番に電圧をかけることで電荷を移動させて転送している。このような方法で読み出し口まで転送されるが、ただ転送するのでは転送中に X 線が入射すると入射位置が正確に測定できなくなる。そこで XIS には受光領域と遮光領域がある。受光領域で蓄積された電荷は露出時間が終わると遮光領域へ移されて、そこで 1 ピクセルずつ読み出されていき、最終的に読み出し口まで転送されていく。図のように、XIS では受光領域の隣に同等のピクセル配置を持つ遮光領域をつなげたフレームトランスファー方式が用いられている。読み出し時間短縮のため XIS には読み出し口が 4 つあり、これによって CCD は  $256 \times 1024$  ピクセルをひとつのセグメントとした 4 つのセグメントに分けられている。読み出し部分から FET に送られた電荷は電圧にかえられ、プリアンプ、フィルターアンプなどを経て ADC へ送られる。

さらに、あすかの X 線検出用 CCD カメラである SIS から改良された点として較正用線源がある。SIS で劣化後ゲインが変化して較正するのが困難であったことから、XIS には較正用に  $^{55}\text{Fe}$  を取りつけ、常に CCD の角に照射させている。これにより常に Mn-K $\alpha$  線 (5.9 keV) と Mn-K $\beta$  線 (6.5 keV) の輝線によるピークを得ることができる。

### 1.3.1 FI 型と BI 型

あすかに搭載されていた SIS との違いとして BI 型の CCD チップがある。今まで使用されていたのは FI 型の CCD チップで、4 台の XIS のうち 3 台 (XIS0,2,3) は従来の FI 型を、1 台 (XIS1) は新しい BI 型を使用している。それぞれの CCD の特徴を示していく。

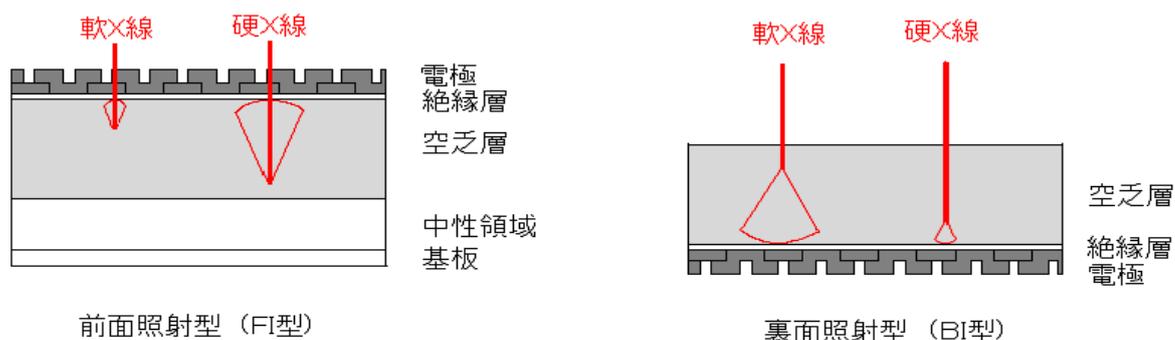


図 6: ポテンシャル

前面照射型 FI(Front-illuminated CCD)

電極側から X 線を入射させる CCD。エネルギーの低い軟 X 線の方が電極近くで吸収されるため、拡散による電子雲の広がりが小さい傾向にある。

利点：X 線が電極近くで吸収されるので電荷が電極へ向かう際に起こす拡散や再結合の効果が小さくエネルギー分解能に優れる。

欠点：低エネルギーの X 線の多くは電極層や絶縁層が遮蔽物となり空乏層まで到達できず検出効率が悪

くなる。

裏面照射型 BI(Back-illuminated CCD)

電極の反対側から X 線を入射させる CCD。エネルギーの高い硬 X 線の方が電極近くで吸収されるため、拡散による電子雲の広がりが小さい傾向にある。

利点：中性領域も削られて遮蔽物がほとんどないので、低エネルギーの検出効率が優れている。

欠点：FI よりも電極から離れたところで吸収されるため、拡散や再結合の影響で分解能が悪化する。

### 1.3.2 XIS の性能の指標

ゲイン	: 入射 X 線エネルギーに対する出力 channel の値。出力 channel は電荷量を電圧情報に変換したもので理想としては線形のものとなる。
エネルギー分解能	: エネルギー E の X 線が入射すると $\frac{E}{\text{電離エネルギー}}$ 個の電子が生じる。これには統計的な揺らぎやノイズの不確実性があり、このゆらぎに相当するエネルギーの大きさがエネルギー分解能である。近接した輝線を分離できるかの指標になる。
電荷転送効率 (CTE)	: 集められた電荷は転送されて読み出されるが、転送途中で電荷の一部が失われてすべての電荷が読み出されるとは限らない。1 つの電荷が 1 ピクセルの転送で失われる確率を電荷転送非効率 (CTI) とし、CTE を 1-CTI で定義する。
読み出しノイズ	: 電子回路起源のノイズ。
暗電流	: CCD に X 線が入射しなくても熱励起により電荷が生じることがある。XIS では動作温度を -60 から -90 に下げて暗電流をより抑えられるようになっている。
ダークレベル	: ピクセルごとの PH データのゼロレベルを示す値。暗電流と読み出しノイズの大きさを表す。
Bad Pixel	: 製造の過程や放射線による損傷により X 線が入射しなくても常に高い波高値を示すピクセルのこと。転送と逆方向に電荷が tail を引くことがありこれを Bad Column という。tail は Bad Pixel の後ろに引くことが多い。
光洩れ	: X 線 CCD は可視光にも感度を持つので、衛星が地球の周回軌道上で日陰から日照、日照から日陰に変わった時などはターゲット以外からの可視光の洩れこみにより PH データが一様に変化する場合がある。
パイルアップ	: 入射 X 線の量が多いとき、1 回の露光時間中に複数の X 線が同一あるいは近接したピクセルに入射すると電荷が足しあわされてエネルギーが高い 1 つのイベントとみなされてしまう。パイルアップが起こると正しいスペクトルを知ることができなくなる。

## 1.4 すざくデータ

容量による制限から、 $5 \times 5$ 、 $3 \times 3$ 、 $2 \times 2$  ピクセル毎のいずれかのデータを取得でき、天体の明るさに応じて使い分けられている。 $5 \times 5$  のデータはイベント中心のピクセル位置と周囲  $5 \times 5$  ピクセルの波高値が送信され、イベントデータとしては最もデータ量が多い。今回の解析ではこの  $5 \times 5$  データを使用する。公開されている XIS のデータには 2 種類あり、unfilter イベントファイルと clean イベントファイルがある。unfilter イベントファイルは衛星から出力されるすべてのイベントのファイルであり、さまざまな不要なイ

ベントも含まれている。これにいくつかのスクリーニングや補正を行ったものが clean イベントファイルである。

- ・補正

CCD の各ピクセルからの信号を読み出した際に得られる値には暗電流などによるオフセットが乗ってしまう。X 線の電荷量を正確に見積もるにはこれらを補正する必要があるので、ダークレベルや光洩れ量の補正を行う。また放射線損傷などによる格子欠陥が電荷にとってのトラップとなるので CTI の補正も行う必要がある。

- ・スクリーニング

不要な時間帯のイベントなどを除去する。主なものをあげておく。

SAA(南大西洋異常帯) 通過時とその直後や maneuver 中の時間のデータを破棄する。(SAA では磁気が非常に弱く陽子の層ができているので、強い放射線の存在する領域となりその中のデータは使えない。)

衛星の角度によってデータを選択する。(衛星は地球の周りを周回しているため、角度によっては地球がターゲットとの間に入ってターゲット天体を観測できていない時がある。よって elevation でカットしたり (ELV>5 かつ DYE ELV>20)、衛星の姿勢が揺れている時間を除去する必要がある。

常に高い値を返してしまう hot pixel や値が変動する flickering pixel を除去する。

- ・X 線イベントの抽出

XIS では X 線だけでなく宇宙線等の高エネルギー粒子も検出されてしまう。そこで全イベントから X 線イベントを抽出したり、入射した X 線のエネルギー決定を行ったりする必要がある。この方法をイベント抽出法といい、現在は Grade 法という方法が用いられている。これについては次の章で詳しく説明する。

このようなデータ処理をして初めてターゲット天体の X 線イベントファイルである clean イベントファイルができる。これらのイベントファイルは「Xselect」というソフトウェアを使えば、様々なフィルタをかけたり、ライトカーブ・イメージ・スペクトルを抽出したりできる。

## 2 イベント抽出法

X 線 CCD には天体からの X 線の他に、宇宙線などのバックグラウンドも入射する。そこで、バックグラウンドも含んだ全イベントの中から、X 線イベントだけを出来るだけ過不足無く選び出すことが必要になる。この章では、まず現在一般的に用いられている Grade 法を紹介する。それから、Grade 法に替わり得るイベント抽出法である、Fitting 法について説明することにしたい。

### 2.1 Grade 法

#### 2.1.1 ASCA Grade 方式

ASCA Grade 方式は ASCA/SIS で採用されていた Grade 方式である。Astro-E2/XIS で採用されている XIS Grade 方式とは Grade の定義などが若干異なるが、XIS Grade 方式を説明するうえで必要になるので、最初に ASCA Grade 方式について説明する。

まず、波高値があるイベント閾値を超え、かつ周囲  $3 \times 3$  ピクセルの波高値よりも高いピクセルを、イベントの中心ピクセルとする。そして、中心ピクセルの周囲  $3 \times 3$  ピクセルに着目し、それらのうちで波高値がスプリット閾値を超えたピクセルの分布によって、そのイベントを 0~7 の Grade に分類する。Grade は

図7のように定義されており、Grade0~6に分類されないものは全てGrade7に分類される。これらのうちで、X線イベントとみなされるのはGrade0,2,3,4,6である。Grade1,5,7は、複数のX線のパイルアップや宇宙線などによるものとみなし、除外される。

### 2.1.2 XIS Grade方式

次に、Astro-E2/XISで採用されているXIS Grade方式について説明する。ASCA衛星では、テレメトリ容量の都合上、各イベントに対して中心ピクセルの周囲 $3 \times 3$ ピクセルのデータしか保存できなかったが、Astro-E2では $5 \times 5$ ピクセルのデータまで保存できるようになった。この性質を利用して、X線イベントとバックグラウンドなどをより厳密に区別できるようにしたのが、XIS Grade方式である。

Gradeの定義について、ASCA Grade方式から変更・追加された点を以下にまとめておく。

- ASCA Grade方式のGrade6には”L-shape”と”square-shape”の2種類が含まれるが、XIS Grade方式では前者をGrade6、後者をGrade8として再定義する。
- Grade7のうちで、スプリット閾値を超えているピクセルが中心ピクセルの周囲 $3 \times 3$ ピクセル以内に収まっているものを、Grade9として定義する。これはX線イベントとみなす場合もある。
- $3 \times 3$ ピクセル内でスプリット閾値を超えているピクセルと外側で隣接するピクセルに、1つでもスプリット閾値を超えているものがあれば、Grade10として定義する。これは、バックグラウンドによるイベントとみなす。
- Grade8のうち、中心ピクセルに隣接する2ピクセルよりも、それらに挟まれる位置にあるピクセルの方が波高値が高いものをGrade11と定義する。これは、パイルアップによるイベントとみなす。

以上のように、Grade0~11の12種類にイベントを分類する方式をXIS Grade 12方式と呼び、Grade8をGrade6に、Grade9,10,11をGrade7に押し込めたものをXIS Grade 8方式と呼ぶ。XIS Grade 8方式では、ASCA Grade方式と同様、Grade0,2,3,4,6をX線イベントとみなす。以降の議論では、特に断らない限り、全てXIS Grade 8方式を用いるものとする。

### 2.1.3 入射X線のエネルギー

Grade法では、入射X線のエネルギーはPIという量で表される。これは、Grade毎に定義されたいくつかのピクセル(図7参照)の波高値の和に対して、センサー毎、セグメント毎のゲインのばらつき、温度によるゲイン変化などの補正を行い、 $1[\text{ch}] = 3.65[\text{eV}]$ となるように調整した量である。即ち、入射X線のエネルギーは式(8)で表されることになる。

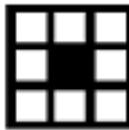
$$E[\text{eV}] = 3.65 \times (\text{PI}[\text{ch}]) \quad (8)$$

なお、XIS Grade方式ではGrade6の波高計算の方法が変更されており、スプリット閾値を超えた2ピクセルに挟まれた(スプリット閾値を超えていない)ピクセルの波高値も加えることになっている。

**[Definition]**

**[Examples]**

Grade 0  
= perfect single



Grade 1  
= single  
+ detached corners



Grade 2  
= vertical single-sided split  
+ detached corners



Grade 3  
= left single-sided split  
+ detached corners



Grade 4  
= right single-sided split  
+ detached corners



Grade 5  
= single-sided split  
with touched corners



Grade 6  
= L-shape or square-shape  
+ detached corners



Grade 7

その他

	中心ピクセル
	PHがスプリット閾値以上のピクセル(波高計算に用いる。)
	PHがスプリット閾値以上のピクセル(波高計算に用いない。)

図 7: Grade の定義 (ASCA Grade 方式)

## 2.2 Fitting 法

### 2.2.1 一般論

現在、イベント抽出法としては、一般に Grade 法が用いられている。しかし、Grade 法にもいくつかの問題点がある。例えば、閾値の決め方である。イベントがどの Grade に分類されるか、延いては X 線検出率やエネルギー分解能がどの程度になるかということは、スプリット閾値に強く依存している。しかし、スプリット閾値は実験などから経験的に決めるしかなく、決め方が難しいという問題がある。

この問題を解決しうるのが、Fitting 法である。Fitting 法とは、イベントを構成するピクセルの波高分布を Gaussian で fitting し、得られた Gaussian の分散を電子雲の広がりとみなして、その大きさからイベントが X 線か否かを判別するという方法である。この方法であれば、電子雲の大きさを直接的に測定できるので、より適切なイベント抽出が可能になると期待できる。

また、Fitting 法には他の利点もある。それは、Grade 法では捨てられていた X 線イベントを救出できるかもしれないということだ。Grade 法の場合、 $3 \times 3$  以上に広がったイベントは全て Grade7 に分類され、捨てられていた。これは、XIS の対象となるエネルギーの X 線の場合、電子雲の広がりはいずれも 1~2 ピクセルに収まると考えられるからである。しかし、高エネルギー X 線の場合、電子雲が  $3 \times 3$  ピクセル以上に広がることも考えられる。Grade 法であればこのようなイベントは全て捨てられてしまうことになるが、Fitting 法であればエネルギー毎の電子雲の広がりを直接求めることで、このようなイベントも救出することができると考えられる。

### 2.2.2 今回の場合

以上で Fitting 法の一般論について説明してきたわけだが、実際に Fitting 法で解析を行おうとすると、何を用いて fitting を行うのか、パラメータの初期値はどうするのかなどが問題になってくる。そこで、今回行った Fitting 法の特徴を以下にまとめておく。

1. fitting に用いるデータは、 $5 \times 5$  ピクセルのものを使用する。なお、各ピクセルの位置を表す座標は、図 8 のように定義しておく。
2. fitting は、CERN が作成している科学データ解析環境である「ROOT」を用いて行う。
3. fit させる Gaussian は、2 次元対称 Gaussian とする。

$$G(x, y; A, x_0, y_0, \sigma) = A \exp \left\{ -\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (9)$$

即ち、求めるパラメータは Gaussian の頂点の高さ  $A$ 、頂点の座標  $(x_0, y_0)$ 、分散  $\sigma$  の 4 つである。

4. パラメータの初期値は  $A = (\text{中心ピクセルの波高値})$ 、 $(x_0, y_0) = (0, 0)$ 、 $\sigma = 0.4$  とする。また、パラメータを動かす範囲については、特に制限を設けない。
5. 入射 X 線のエネルギーは、fitting で求めた Gaussian の合計波高値で表されるとする。ここで、合計波高値とは、各ピクセルの中心座標での Gaussian の値を  $5 \times 5$  ピクセルについて足し合わせたものとする。

$$(\text{合計波高値}) = \sum_{x, y=-2}^2 G(x, y; A, x_0, y_0, \sigma) \quad (10)$$

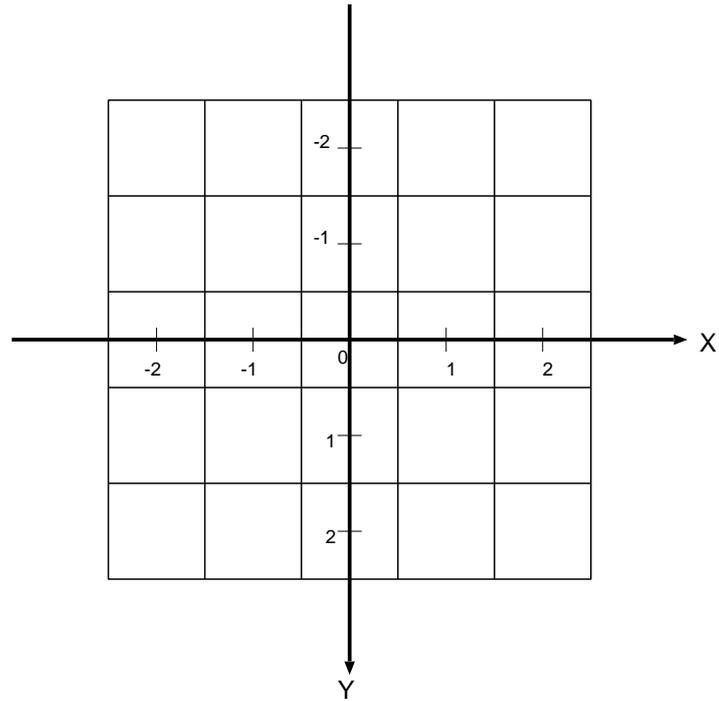


図 8: 5 × 5 ピクセルにおける座標

以上を基に、Fitting 法のイメージを 1 次元の場合について図にしたのが図 9 である。図中の青点はデータの波高値を表し、赤点は Gaussian のピクセル中心での値を表している。赤点の値を全ピクセルについて足し合わせたものが、合計波高値になる。

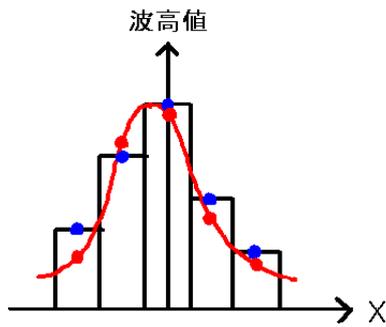


図 9: Fitting 法のイメージ (1 次元の場合)

### 3 Fitting法の適用

2.2で考察したように、Fitting法を用いるとX線の検出効率をあげることができると考えられる。このことは、地上実験でも確かめられている([1], [2], [3])。しかし、実際の天体データにFitting法が適用されたことは、これまでなかった。そこで、今回我々は天体のデータに対してFitting法を適用してみることにした。

#### 3.1 天体データ

最初に、今回我々がFitting法を適用した天体データについて簡単に紹介しておく。

##### 3.1.1 GC SOUTH

銀河中心(赤経  $266.5016^\circ$ 、赤緯  $-29.1694^\circ$ )からは  $2.45\text{keV}$ (S XV- $K\alpha$ )、 $3.13\text{keV}$ (Ar XVII- $K\alpha$ )のX線などが放射されている。なお、今回使用したデータの観測時間は  $1.2958 \times 10^5$  秒である。

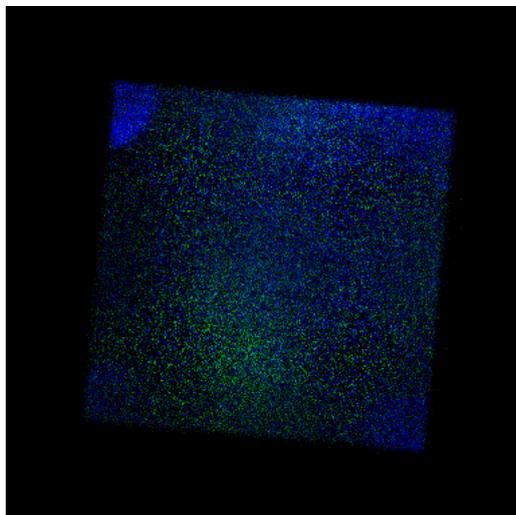


図 10: GC SOUTH

##### 3.1.2 E0102-72

この天体は赤経  $15.9884^\circ$ 、赤緯  $-72.0403^\circ$ に位置する、明るい超新星残骸である。 $0.57\text{keV}$ (O VII- $K\alpha$ )、 $0.65\text{keV}$ (O VIII- $K\alpha$ )のX線を放射しており、低エネルギーでのエネルギー較正に用いられる。今回使用したデータの観測時間は、 $4.1598 \times 10^3$  秒である。

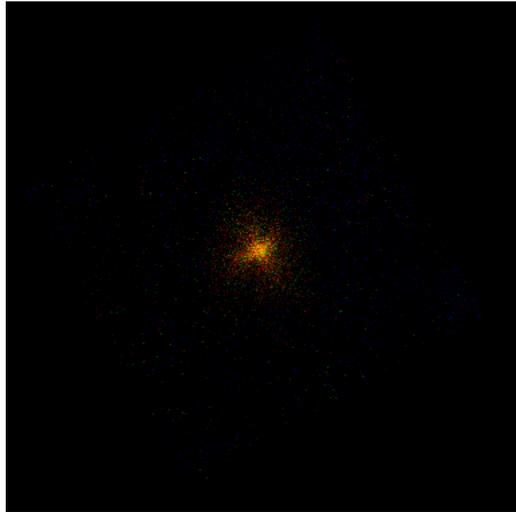


図 11: E0102-72

## 3.2 エネルギー較正

Fitting 法では、合計波高値で入射 X 線のエネルギーを表す。そこで、まずエネルギー較正を行い、合計波高値とエネルギーの関係式を求めておく。この時、センサー毎はもちろん、セグメント毎にもエネルギー較正を行う必要があることに注意しなければならない。

### 3.2.1 GC SOUTH(FI)

GC SOUTH を xis0 で観測したデータについてエネルギー較正を行う。データに Fitting 法を適用し、得られた合計波高値を横軸、イベントのカウント数を縦軸にしてスペクトルを作ると図 12 のようになる。

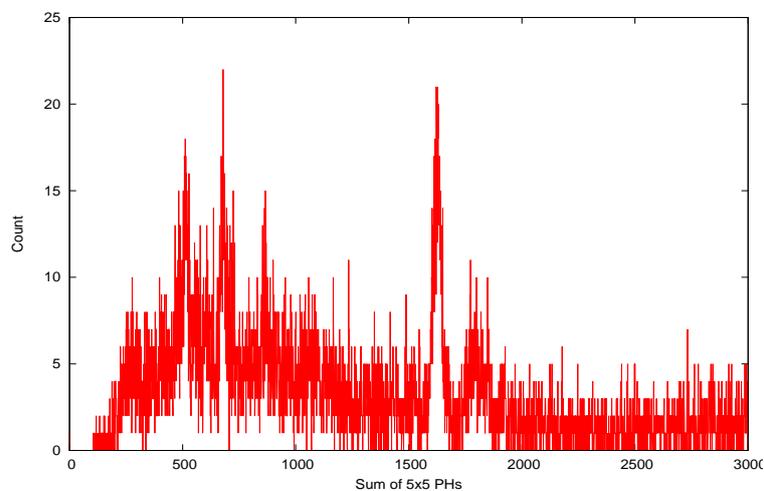


図 12: FI 型 CCD セグメント A のデータで作った GC SOUTH のスペクトル (バックグラウンド未除去)

バックグラウンドはまだ取り除いていないが、X線の輝線は確認できるので、これを Gaussian で fitting する。今回は、較正用線源の 5.9keV,6.5keV の輝線と、GC SOUTH からの 2.45keV,3.13keV の輝線を利用した。これらの輝線は連続 X 線やバックグラウンドなどの連続成分に乗っているので、2.45keV,3.13keV の輝線については Gaussian に定数を加えたもの、5.9keV,6.5keV 輝線については Gaussian に冪関数を加えたもので fitting した。2.45keV,3.13keV についての fitting 結果を図 13 に、5.9keV,6.5keV についての fitting 結果を図 14 に示す。また、各輝線に対する Gaussian のピーク中心の座標を、表 2 にまとめておく。なお、セグメント B,C のデータでは 5.9keV に相当する輝線が確認できなかったため、これについては fitting を行わなかった。

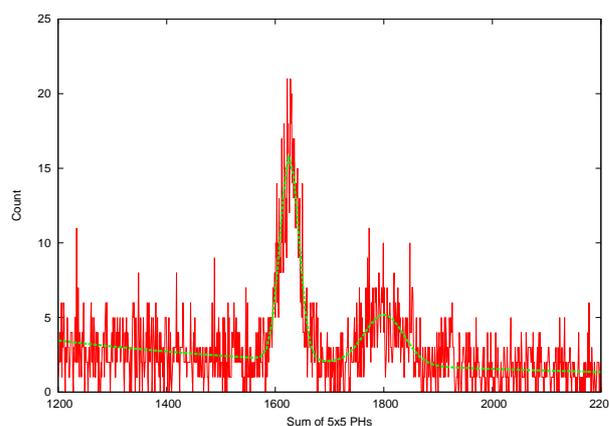
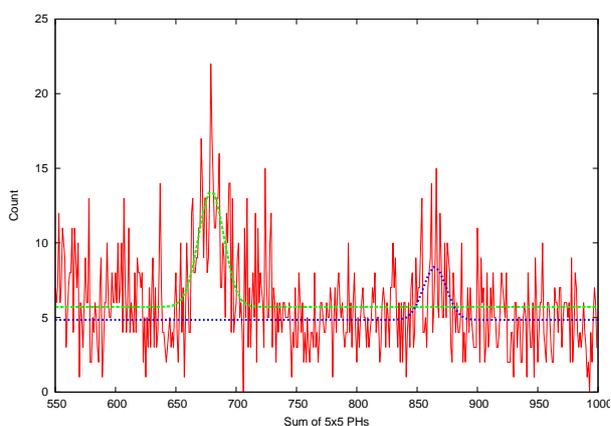


図 13: GC SOUTH(FI) の 2.45keV,3.13keV の輝線に対する fitting  
 図 14: GC SOUTH(FI) の 5.9keV,6.5keV の輝線に対する fitting

表 2: GC SOUTH(FI) データにおける、エネルギーと合計波高の関係

セグメント	2.45keV	3.13keV	5.9keV	6.5keV
A	$679.301 \pm 1.282$	$864.696 \pm 2.249$	$1626.20 \pm 0.5536$	$1800.64 \pm 3.254$
B	$652.567 \pm 0.8380$	$830.453 \pm 2.629$	—	$1759.93 \pm 2.370$
C	$687.220 \pm 1.416$	$865.252 \pm 3.697$	—	$1857.84 \pm 3.435$
D	$676.388 \pm 1.136$	$860.035 \pm 3.067$	$1618.50 \pm 0.7362$	$1812.79 \pm 2.313$

このようにして合計波高値とエネルギーの対応が分かったので、これを一次関数で fitting すると図 15 のようになり、エネルギー較正の式 (11)(12)(13) (14) が得られる。

$$E[\text{eV}] = (3.61658 \pm 0.02025) \times (\text{segA 合計波高値}) - (5.61200 \pm 26.97) \quad (11)$$

$$E[\text{eV}] = (3.64091 \pm 0.02579) \times (\text{segB 合計波高値}) + (83.9056 \pm 30.57) \quad (12)$$

$$E[\text{eV}] = (3.42190 \pm 0.05361) \times (\text{segC 合計波高値}) + (118.058 \pm 66.91) \quad (13)$$

$$E[\text{eV}] = (3.58727 \pm 0.05510) \times (\text{segD 合計波高値}) + (33.6164 \pm 73.42) \quad (14)$$

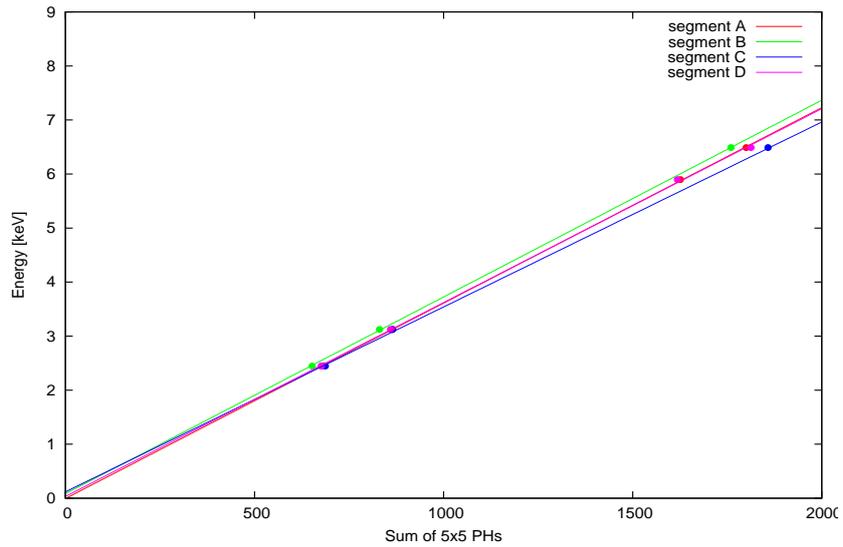


図 15: GC SOUTH(FI) のエネルギー較正

### 3.2.2 E0102-72(FI)

E0102-72 を `xis0` で観測したデータについても、同様にエネルギー較正を行う。横軸を合計波高値、縦軸をイベントのカウント数として作ったスペクトルは図 16 のようになるので、X 線の輝線を Gaussian で fitting する。

今回は、較正用線源の 5.9keV, 6.5keV の輝線と、E0102-72 からの 0.57keV, 0.65keV の輝線を利用した。やはり

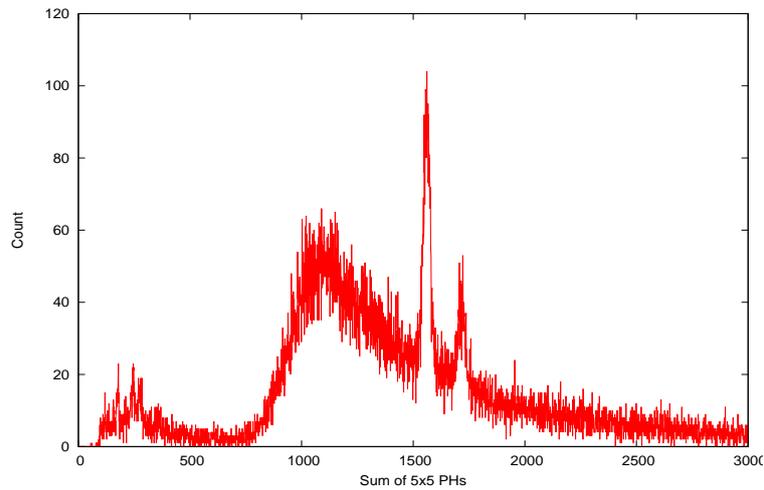


図 16: FI 型 CCD セグメント B のデータで作った E0102-72 のスペクトル (バックグラウンド未除去)

連続成分があるので、0.57keV, 0.65keV の輝線については Gaussian に一次関数を加えたもの、5.9keV, 6.5keV 輝線については Gaussian に冪関数を加えたもので fitting した。0.57keV, 0.65keV についての結果を図 17

に、5.9keV,6.5keV についての結果を図 18 に示す。また、各輝線に対する Gaussian のピーク中心の座標を、表 3 にまとめておく。セグメント A,D のデータでは 0.57keV,0.65keV に相当する輝線が確認できなかったため、これについては fitting を行わなかった。

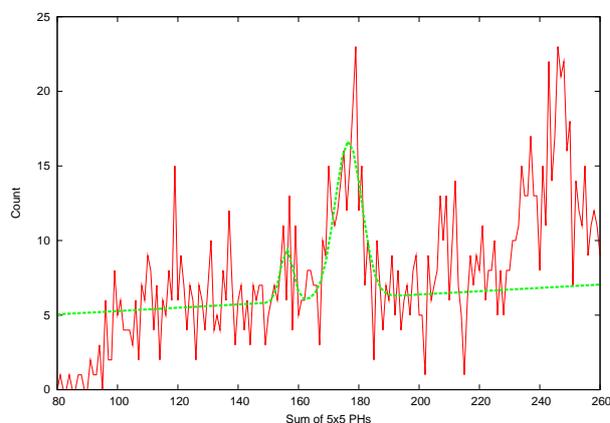


図 17: E0102-72(FI) の 0.57keV,0.65keV の輝線に対する fitting

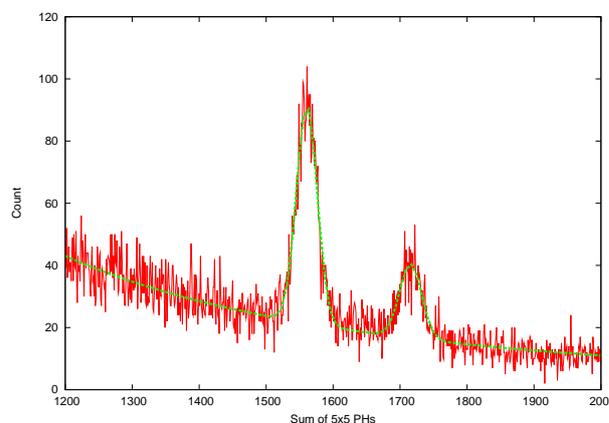


図 18: GC SOUTH(FI) の 5.9keV,6.5keV の輝線に対する fitting

表 3: E0102-72(FI) データにおける、エネルギーと合計波高の関係

セグメント	0.57keV	0.65keV	5.9keV	6.5keV
A	—	—	$1630.54 \pm 0.2676$	$1794.39 \pm 0.7788$
B	$156.118 \pm 1.148$	$176.544 \pm 0.5659$	$1560.80 \pm 0.2489$	$1715.81 \pm 0.7573$
C	$157.309 \pm 4.346$	$185.506 \pm 0.5992$	$1646.60 \pm 0.4024$	$1809.65 \pm 1.008$
D	—	—	$1623.77 \pm 0.6989$	$1792.77 \pm 1.798$

このようにして合計波高値とエネルギーの対応が分かったので、これを一次関数で fitting すると図 19 のようになり、エネルギー較正の式 (15)(16) (17)(18) が得られる。

$$E[\text{eV}] = 3.61916 \times (\text{segA 合計波高値}) - 5.19146 \quad (15)$$

$$E[\text{eV}] = (3.79201 \pm 0.002013) \times (\text{segB 合計波高値}) - (1.98260 \pm 2.346) \quad (16)$$

$$E[\text{eV}] = (3.58556 \pm 0.007183) \times (\text{segC 合計波高値}) - (3.66655 \pm 8.831) \quad (17)$$

$$E[\text{eV}] = 3.50888 \times (\text{segD 合計波高値}) + 198.393 \quad (18)$$

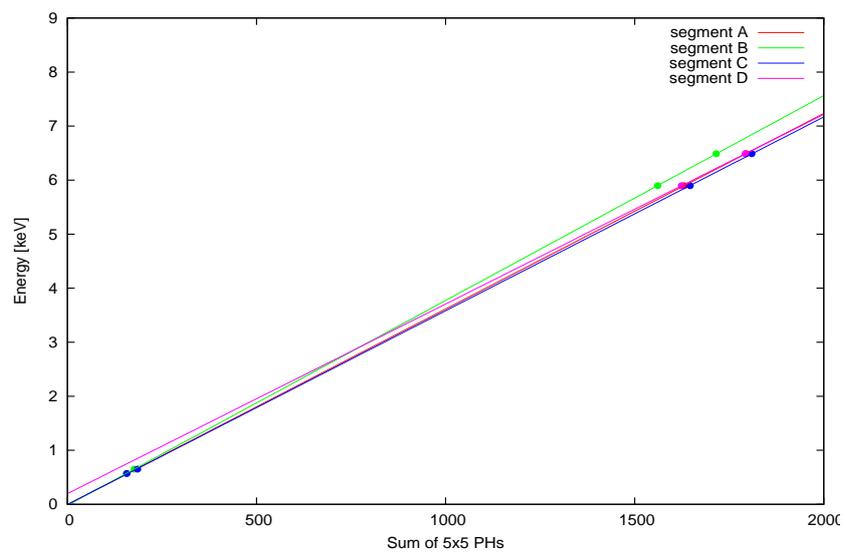


図 19: E0102-72(FI) のエネルギー較正

### 3.2.3 GC SOUTH(BI)

GC SOUTH を `xis1` で観測したデータについても、同様にエネルギー較正を行う。スペクトルの全体図は図 20 のようになる。

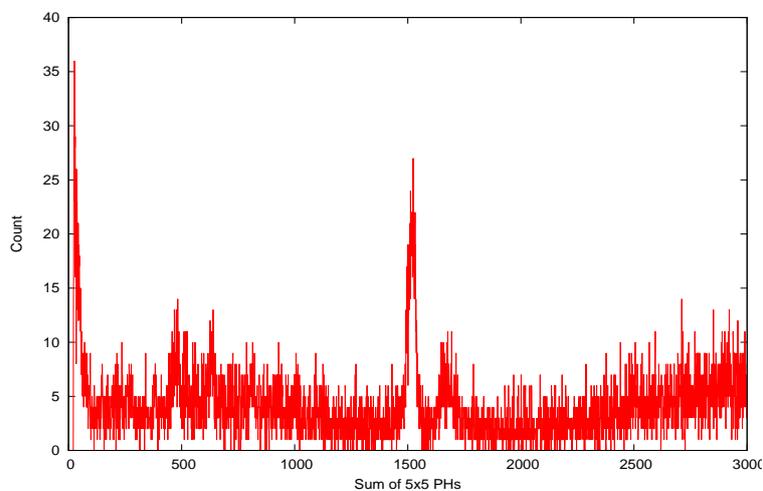


図 20: BI 型 CCD セグメント A のデータで作った GC SOUTH のスペクトル (バックグラウンド未除去)

FI の時と同様に、2.45keV,3.13keV の輝線には Gaussian に定数を加えたもの、5.9keV,6.5keV の輝線には Gaussian に冪関数を加えたもので fitting を行う。2.45keV,3.13keV の輝線に対する fitting の結果を図 21 に、5.9keV,6.5keV の輝線に対する fitting の結果を図 22 に示す。また、各輝線に対する Gaussian のピーク中心の座標を、表 4 にまとめておく。

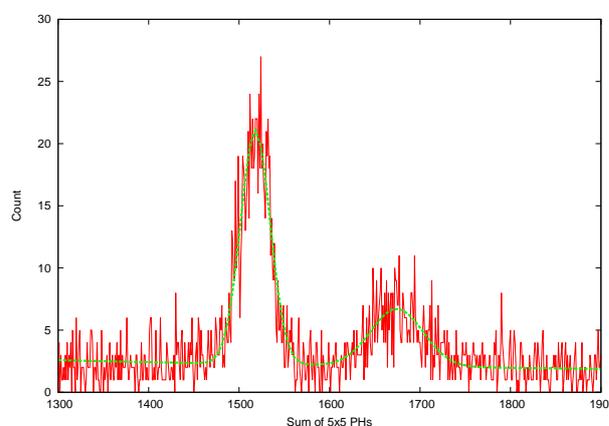
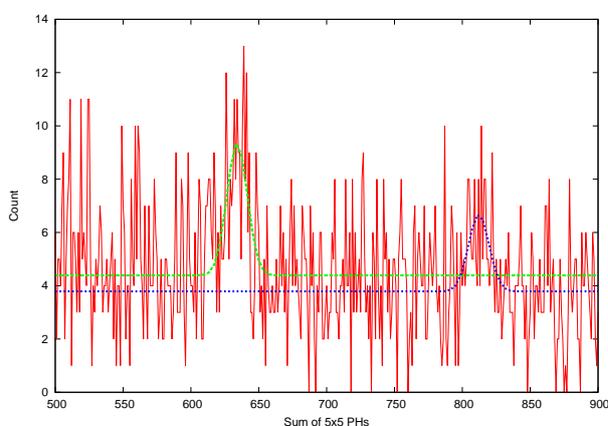


図 21: GC SOUTH(BI) の 2.45keV,3.13keV の輝線に対する fitting  
図 22: GC SOUTH(BI) の 5.9keV,6.5keV の輝線に対する fitting

表 4: GC SOUTH(BI) データにおける、エネルギーと合計波高の関係

セグメント	2.45keV	3.13keV	5.9keV	6.5keV
A	634.071 ± 1.293	812.151 ± 2.030	1518.02 ± 0.4149	1674.45 ± 2.237
B	606.202 ± 0.5760	769.567 ± 3.411	—	1671.37 ± 2.108
C	627.712 ± 0.9733	800.734 ± 1.833	—	1707.41 ± 2.066
D	620.371 ± 1.069	793.698 ± 2.359	1492.04 ± 1.497	1677.45 ± 3.956

これらの関係から求めたエネルギー較正の式は式 (19)(20) (21)(22) であり、これらを図で表すと図 23 のようになる。

$$E[\text{eV}] = (3.89901 \pm 0.01347) \times (\text{segA 合計波高値}) - (32.8253 \pm 16.73) \quad (19)$$

$$E[\text{eV}] = (3.77398 \pm 0.05412) \times (\text{segB 合計波高値}) + (186.383 \pm 60.54) \quad (20)$$

$$E[\text{eV}] = (3.73362 \pm 0.02790) \times (\text{segC 合計波高値}) + (116.970 \pm 32.02) \quad (21)$$

$$E[\text{eV}] = (3.86816 \pm 0.07013) \times (\text{segD 合計波高値}) + (56.2620 \pm 86.28) \quad (22)$$

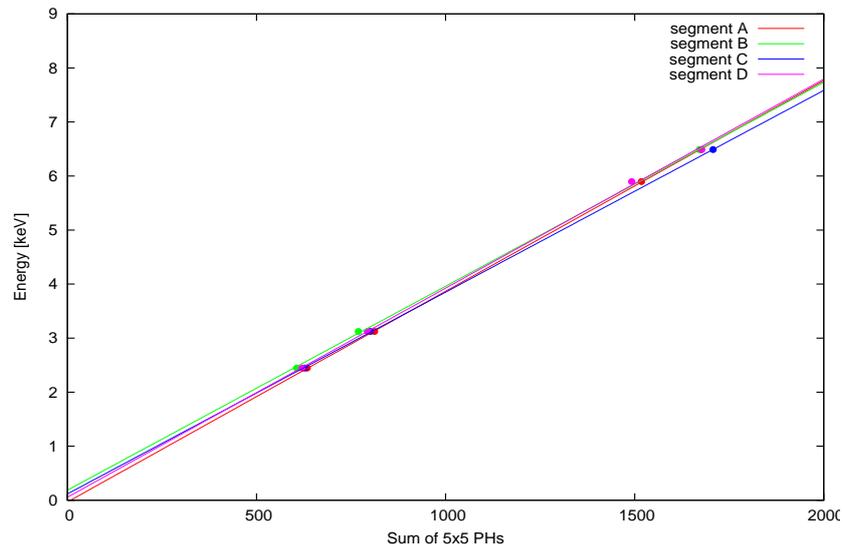


図 23: GC SOUTH(BI) のエネルギー較正

### 3.2.4 E0102-72(BI)

E0102-72 を xis1 で観測したデータについても、同様にエネルギー較正を行う。スペクトルの全体図は図 24 のようになる。

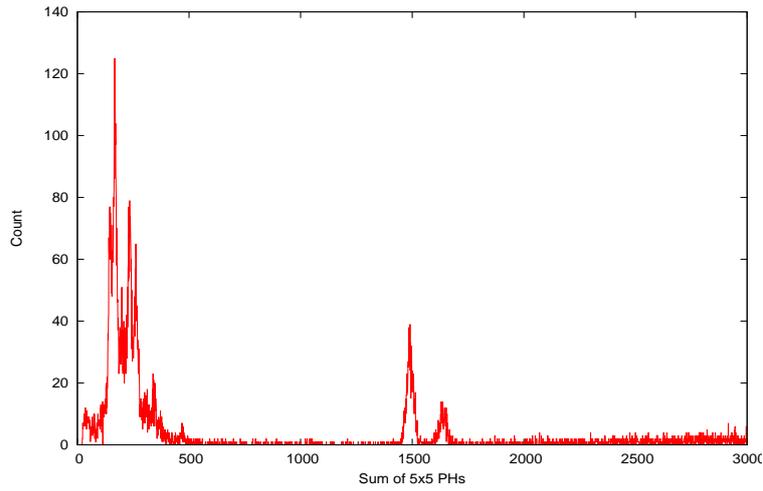


図 24: BI 型 CCD セグメント B のデータで作った E0102-72 のスペクトル (バックグラウンド未除去)

0.57keV, 0.65keV の輝線については FI の時と同様 Gaussian に一次関数を加えたもので fitting を行ったが、5.9keV, 6.5keV の輝線については連続成分がほとんどなかったので Gaussian のみで fitting を行った。0.57keV, 0.65keV の輝線に対する fitting の結果を図 25 に、5.9keV, 6.5keV の輝線に対する fitting の結果を図 26 に示す。また、各輝線に対する Gaussian のピーク中心の座標を、表 5 にまとめておく。

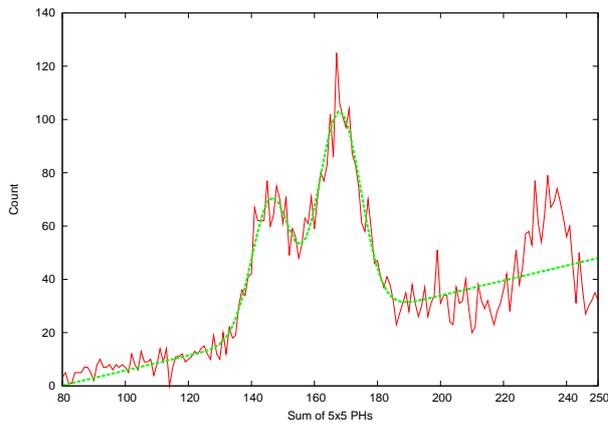


図 25: E0102-72(BI) の 0.57keV, 0.65keV の輝線に対する fitting

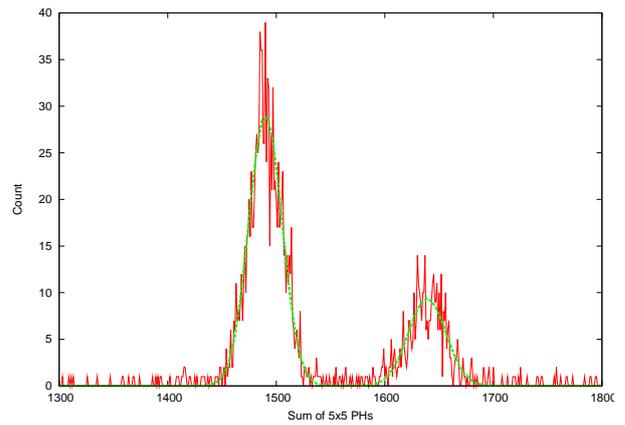


図 26: E0102-72(BI) の 5.9keV, 6.5keV の輝線に対する fitting

表 5: E0102-72(BI) データにおける、エネルギーと合計波高の関係

セグメント	0.57keV	0.65keV	5.9keV	6.5keV
A	–	$156.504 \pm 2.062$	$1526.74 \pm 0.4654$	$1680.11 \pm 0.8439$
B	$146.297 \pm 0.4013$	$167.849 \pm 0.2747$	$1490.00 \pm 0.5391$	$1639.02 \pm 0.8964$
C	$149.292 \pm 0.2580$	$171.568 \pm 0.1991$	$1525.56 \pm 0.4611$	$1678.43 \pm 0.9366$
D	–	$168.451 \pm 1.915$	$1503.75 \pm 0.5405$	$1654.60 \pm 1.097$

これらの関係から求めたエネルギー較正の式は式 (23)(24) (25)(26) であり、これらを図で表すと図 27 のようになる。

$$E[\text{eV}] = (3.77239 \pm 0.1283) \times (\text{segA 合計波高値}) + (49.4418 \pm 168.6) \quad (23)$$

$$E[\text{eV}] = (3.90257 \pm 0.07512) \times (\text{segB 合計波高値}) - (7.51986 \pm 83.62) \quad (24)$$

$$E[\text{eV}] = (3.81015 \pm 0.07304) \times (\text{segC 合計波高値}) - (5.77632 \pm 83.24) \quad (25)$$

$$E[\text{eV}] = (3.86900 \pm 0.1285) \times (\text{segD 合計波高値}) - (11.7304 \pm 166.4) \quad (26)$$

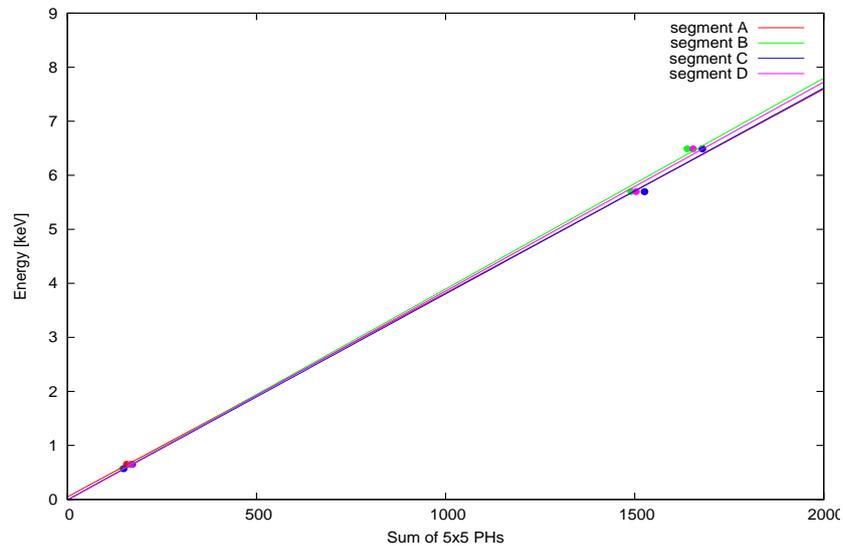


図 27: E0102(BI) のエネルギー較正

### 3.3 X線判定条件

Fitting 法では、fitting によって得られた Gaussian の分散の大きさが電子雲の広がりを表していると考え、その大きさによってイベントが X 線か否かを判定する。この章では、それを判定するための条件について考えてみたい。

#### 3.3.1 X線による電子雲の広がり (較正用線源による考察)

まず、X 線による電子雲がどの程度まで広がるのかを調べる。そのために、CCD で較正用線源がある部分のデータだけを抜き出した。この部分のデータであれば、大半のイベントが 5.9keV, 6.5keV の X 線であると考えられる。このデータに対して Fitting 法を適用し、得られた結果を横軸をエネルギー、縦軸を分散としてプロットしたものが図 28 である。図中の二本の直線で挟まれた領域に 5.9keV の X 線が分布しており、その広がりは  $\sigma < 0.4$  程度であることが分かる。

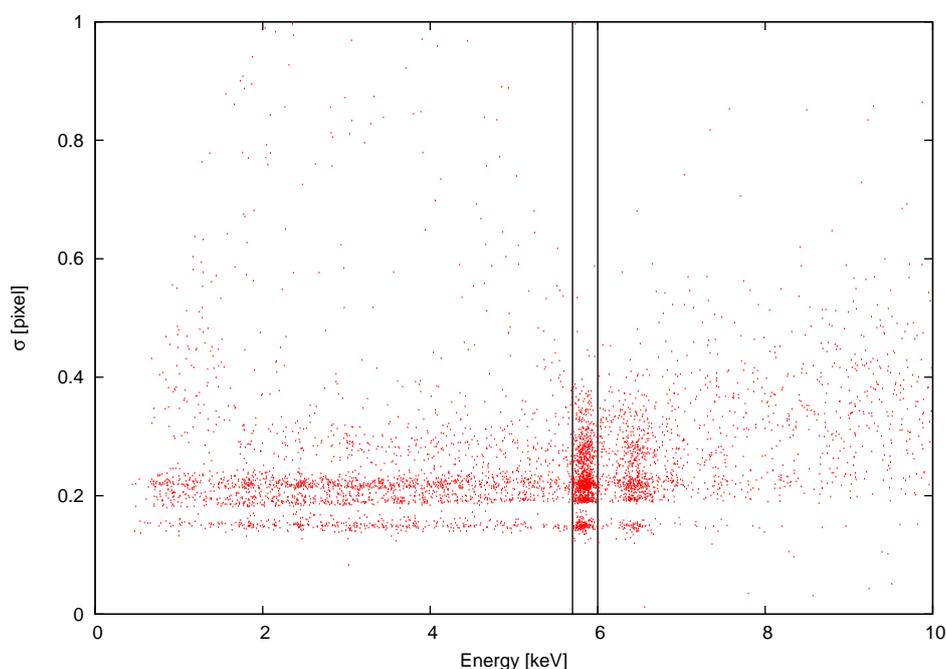


図 28: 較正用線源からの X 線による電子雲の広がり (xis0 で GC SOUTH を観測したデータのもの)

ただ、この図だけでは正確な境界を考えづらいので、二本の直線に挟まれた領域内 (5.7keV ~ 6.0keV) に含まれるイベントだけを抜きだし、そのイベント数が分散によってどのように変化するのかを考えた。それが図 29 である。図中の曲線は、一番右の「山」に対して Gaussian で fitting を行ったものである。この「山」を Gaussian で fitting することが適切かどうかは分からないが、分布の上限を定量的に求めるため、便宜上 Gaussian を用いた。Gaussian の  $3\sigma$  を分布の上限として定義すると、その値は  $0.386 \pm 0.0160$  となった。

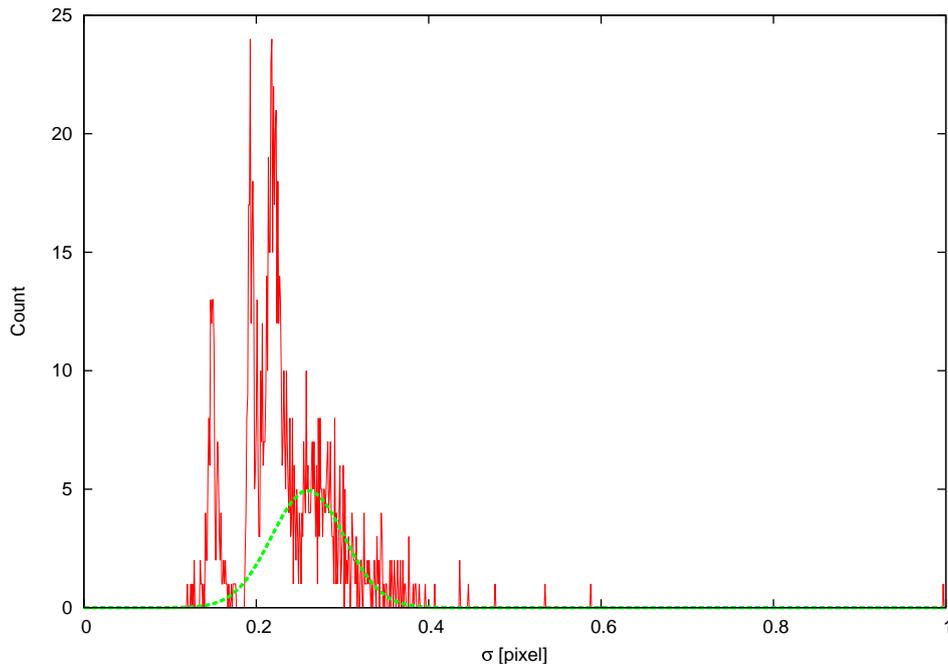


図 29: 5.9keV のイベントの、分散によるイベント数の変化 (xis0 で GC SOUTH を観測したデータのもの。較正用線源部分のデータのみ。)

### 3.3.2 電子雲の広がりエネルギー依存性 (FI)

3.3.1 より、X 線による電子雲の広がりが  $\sigma < 0.386$  となることが分かったので、イベントの X 線判定条件を  $\sigma < 0.386$  (一定) とすることも一つの方法であるといえる。ただ、電子雲の広がりが入射 X 線のエネルギーに依存しているということから考えると、X 線判定条件についてもエネルギー依存性を考慮した方が、より好ましい結果が得られると考えられる。そこで、この節ではエネルギー依存性を考慮した X 線判定条件について考えてみたい。

#### バックグラウンドを含んだデータを使うことについて

X 線判定条件のエネルギー依存性を考えるためには、5.9keV, 6.5keV 以外のエネルギーの X 線による電子雲の広がりを求めなければならない。地上実験ができるのであれば、実際に様々なエネルギーの X 線を CCD に照射して、それによる電子雲の広がりを求めてやればよいだろうが、今回はそれができない。そこで、今回は天体からの X 線を利用することにした。

しかし、現時点ではまだ X 線判定条件が分かっていないので、X 線とバックグラウンドを分離することができず、X 線による電子雲の広がりをうまく求められるかどうかは分からない。このことを確かめるため、fitting 法で求めたエネルギーを横軸、分散を縦軸にとって全イベントをプロットしたのが図 30 である。

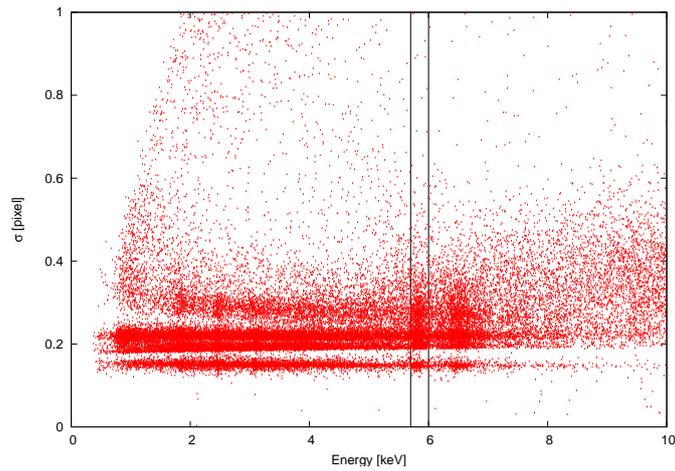


図 30: 全イベントの電子雲の広がり (xis0 で GC SOUTH を観測したデータのもの)

図 28 とは違いバックグラウンドと思われるイベントが広い範囲に分布しているが、X 線と思われるイベントが  $\sigma < 0.4$  程度の領域に集中していることは図 28 と同じである。3.3.1 と同様に、二本の直線に挟まれた領域内 (5.7keV ~ 6.0keV) に含まれるイベントだけを抜きだし、そのイベント数が分散によってどのように変化するのかを考えると、図 31 のようになった。図 31 について、分布の上限を Gaussian の  $3\sigma$  で求めると、 $0.409 \pm 0.0145$  となった。この値は、誤差を考慮すれば、較正用線源の部分のデータだけを用いて求めた値とあまり大きくは変わらない。つまり、このような方法で分布の上限を求めるのであれば、バックグラウンドの影響は比較的小さいといえる。よって、この方法で天体からの X 線による電子雲の広がりを求めることにする。

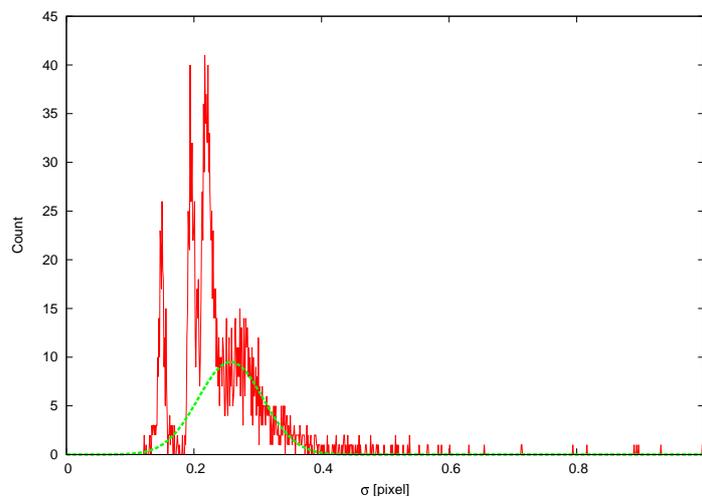


図 31: 5.9keV のイベントの、分散によるイベント数の変化 (xis0 で GC SOUTH を観測したデータのもの。較正用線源以外の部分のデータも含む。)

### FI の場合の X 線判定条件

GC SOUTH を xis0 で観測したデータから 2.45keV, 3.13keV, 5.9keV, 6.5keV の X 線を含む部分を切り出した様子を図 32 に、E0102-72 を xis0 で観測したデータから 0.57keV, 0.65keV, 5.9keV, 6.5keV の X 線を含む部分を切り出した様子を図 33 に示す。また、切り出したデータから X 線の上限を求めた結果を表 6 にまとめておく。なお、X 線エネルギーの欄の括弧内の値は、切り出したエネルギー範囲を示したものである。

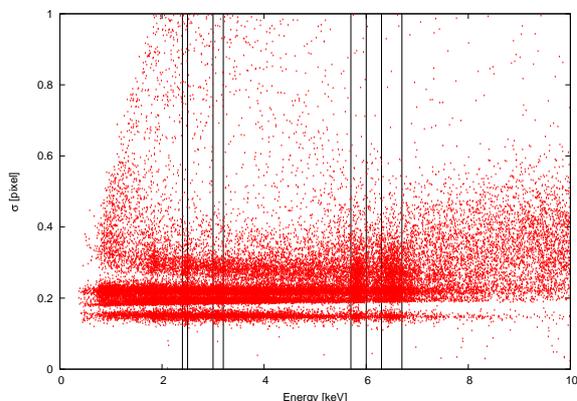


図 32: GC SOUTH データ (FI) からの切り出し

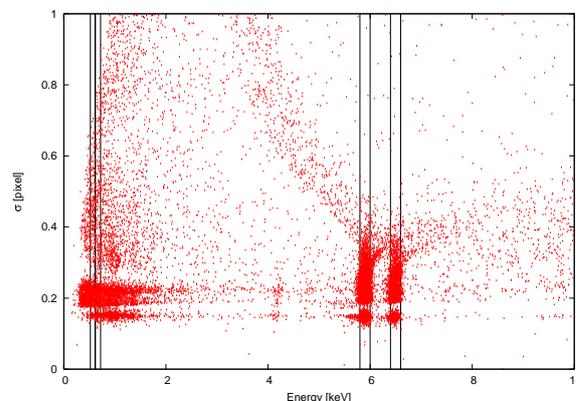


図 33: E0102-72 データ (FI) からの切り出し

表 6: X 線による電子雲の広がりの上限 (FI)

天体	X 線エネルギー [keV]	電子雲の広がりの上限 [pixel]
E0102-72	0.57(0.52 ~ 0.61)	$0.268 \pm 0.00639$
	0.65(0.62 ~ 0.72)	$0.250 \pm 0.00152$
	5.9(5.8 ~ 6.0)	$0.373 \pm 0.00703$
	6.5(6.4 ~ 6.6)	$0.407 \pm 0.0155$
GC SOUTH	2.45(2.4 ~ 2.5)	$0.354 \pm 0.00721$
	3.13(3.0 ~ 3.2)	$0.344 \pm 0.00346$
	5.9(5.7 ~ 6.0)	$0.409 \pm 0.0145$
	6.5(6.3 ~ 6.7)	$0.423 \pm 0.00977$

この結果を、横軸をエネルギー、縦軸を電子雲の広がりの上限としてプロットしたのが図 34 である。高エネルギーの方が電子雲の広がりが大きくなっており、FI-CCD の原理から予想される結果と一致している。これらを一次関数で fitting すると式 (27) が得られた。

$$\sigma = (0.0239 \pm 0.00353) \times E[\text{keV}] - (0.259 \pm 0.0163) \quad (27)$$

式 (27) で表される直線を図 30 上に重ねて描き、表示範囲を広げたものが図 35 である。E0102-72 についても同じ図を描くと、図 36 のようになる。どちらの図でも、直線の上下でイベント数の密度が明らかに変化していることが分かる。よって、この直線を FI-CCD での X 線判定条件とし、この直線よりも下の領域にあるイベントを X 線とみなすことにする。

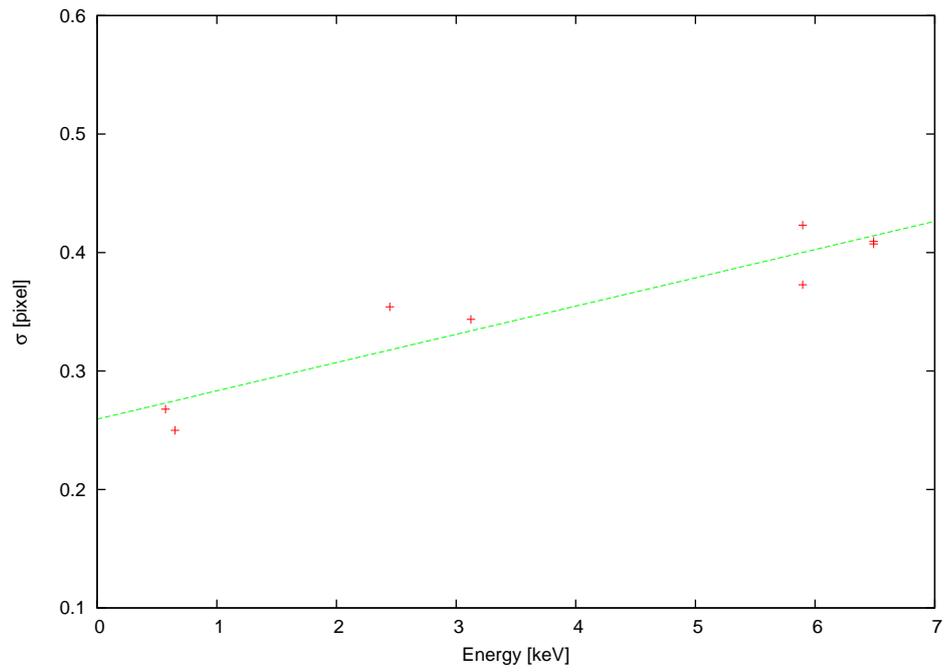


図 34: FI での X 線判定条件

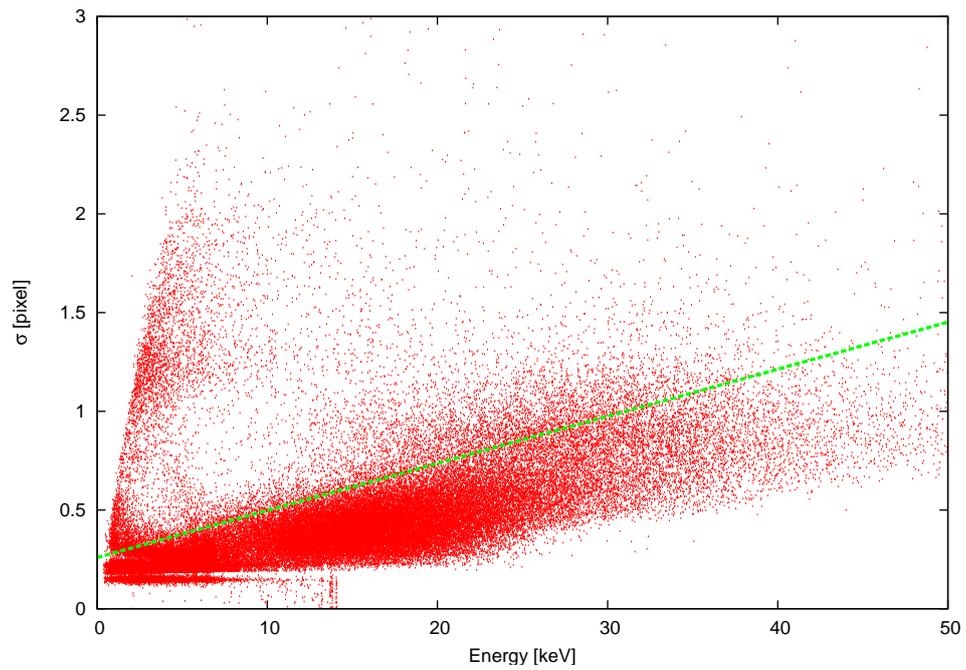


図 35: FI での X 線判定結果 (GC SOUTH)

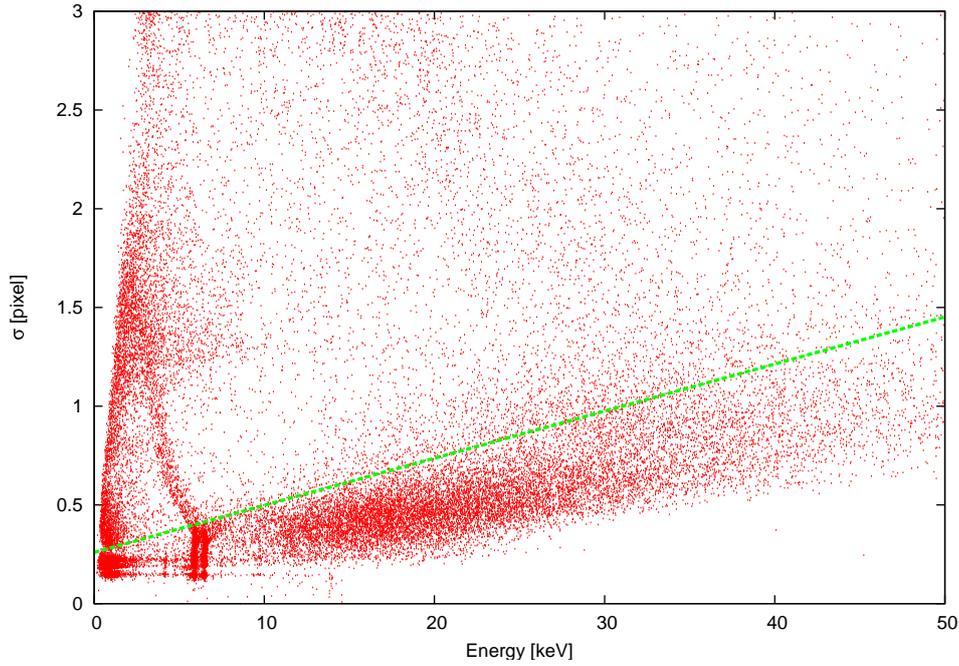


図 36: FI での X 線判定結果 (E0102-72)

#### BI の場合の X 線判定条件

BI についても、同様に X 線判定条件を求める。BI の場合の、X 線による電子雲の広がりの上限を表 7 にまとめる。

表 7: X 線による電子雲の広がりの上限 (BI)

天体	X 線エネルギー [keV]	電子雲の広がりの上限 [pixel]
E0102-72	0.57(0.52 ~ 0.60)	$0.453 \pm 0.00493$
	0.65(0.61 ~ 0.70)	$0.465 \pm 0.00187$
	5.9(5.8 ~ 6.0)	$0.357 \pm 0.144$
	6.5(6.4 ~ 6.6)	$0.347 \pm 0.0145$
GC SOUTH	2.45(2.34 ~ 2.55)	$0.425 \pm 0.0143$
	3.13(2.91 ~ 3.30)	$0.410 \pm 0.0107$
	5.9(5.7 ~ 6.0)	$0.360 \pm 0.00881$
	6.5(6.2 ~ 6.75)	$0.363 \pm 0.261$

この結果を、横軸をエネルギー、縦軸を電子雲の広がりの上限としてプロットしたのが図 37 であり、これに一次関数を fit させると式 (28) が得られた。

$$\sigma = (0.0182 \pm 0.00102) \times E[\text{keV}] - (0.469 \pm 0.00471) \quad (28)$$

今度は高エネルギーの方が電子雲の広がりが小さくなっており、やはり予想とあっている。

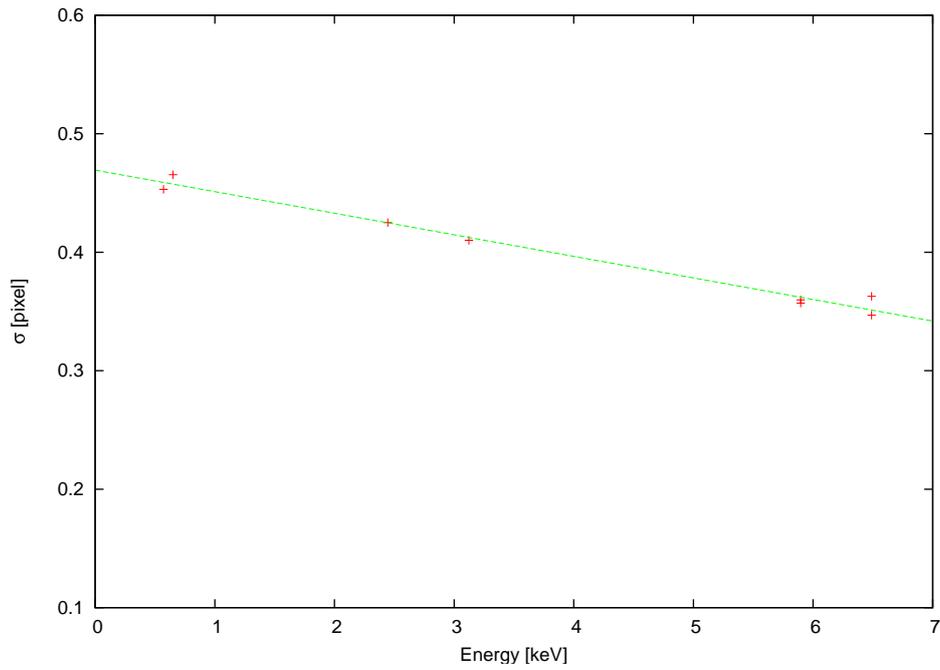


図 37: BI での X 線判定条件

この直線による X 線判定の様子を図 38,39 に示す。図 38 は GC SOUTH についてのもので、図 39 は E0102-72 についてのものである。高エネルギー領域ですれてはいるものの、実際に使用される 1keV ~ 8keV 程度の領域では、直線の上でイベント数の密度が明らかに変化していることが分かる。よって、この直線を BI の場合の X 線判定条件とし、この直線よりも下の領域にあるイベントを X 線とみなすことにする。

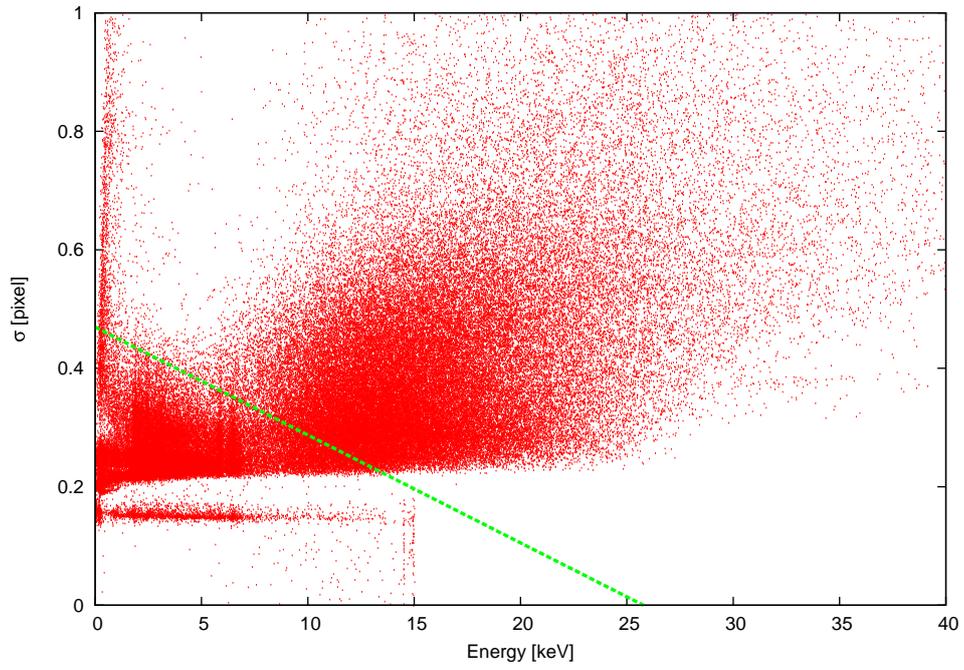


図 38: BI での X 線判定結果 (GC SOUTH)

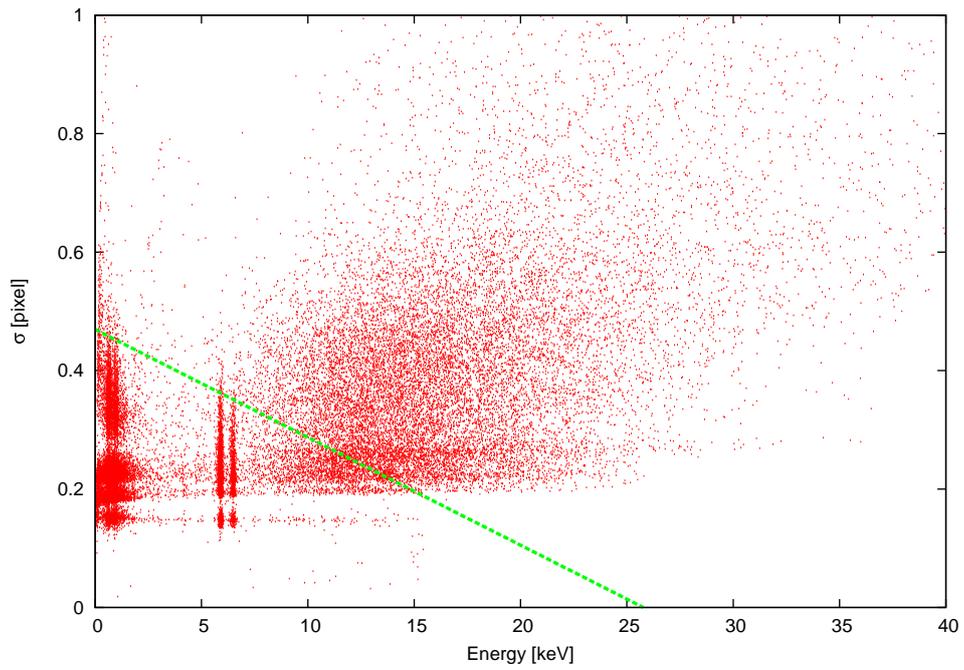


図 39: BI での X 線判定結果 (E0102-72)

### 3.4 解析結果

以上のような X 線判定条件から得られたスペクトルを XIS の種類ごとに紹介していく。

#### 3.4.1 FI 型データ

高エネルギーほど電子雲が広がる FI 型では、Grade 法に対して特に高エネルギー側でのカウント数が増えると期待されている。

まずは GC SOUTH の FI 型の観測データから得られたスペクトルを示す。

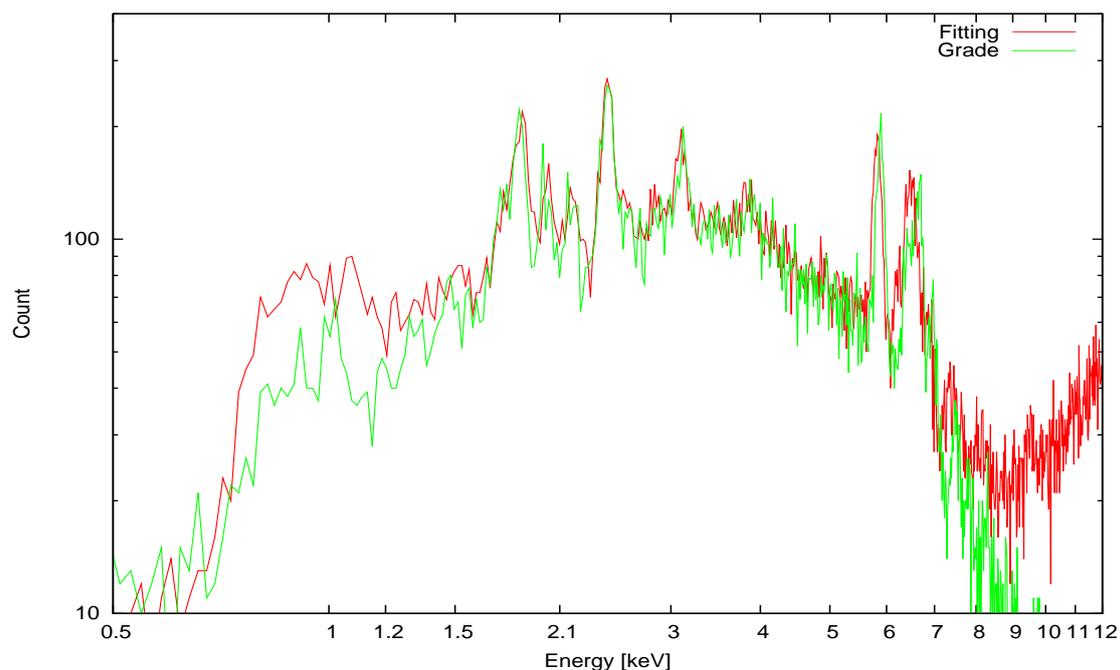


図 40: GC SOUTH(FI 型) のスペクトル

スペクトルを見やすくするために、縦軸には全観測時間についての 18.25eV(5bin) ごとのカウント数を用いている。得られたスペクトル (赤) のうえに Grade 法で得られたスペクトル (緑) を重ねてみると、よく似たスペクトルを得ることに成功していることが分かる。天体からの SXV-K $\alpha$  線 (2.45keV) と Ar XVII-K $\alpha$  線 (3.13keV) による輝線や cal source の輝線 (5.9keV,6.5keV) もはっきり出ている。これらの各輝線のピークに一次元 Gaussian を fitting した結果を示す。

Fitting 法

エネルギー		fit	Error
2.45keV	a	32.224	±1.825
	b	2.458	±0.002
	c	0.038	±0.003
	d	21.592	±0.945
3.13keV	a	13.902	±1.301
	b	3.104	±0.005
	c	0.046	±0.005
	d	22.571	±0.576
5.9keV	a	25.481	±0.928
	b	5.830	±0.003
	c	0.070	±0.003
6.5keV	d	17.603	±0.723
	e	6.491	±0.006
	f	0.132	±0.006
	m	130.589	±21.84
	n	1.345	±0.107

Grade 法

エネルギー		fit	Error
2.45keV	a	33.457	±1.621
	b	2.457	±0.002
	c	0.040	±0.003
	d	19.655	±1.07
3.13keV	a	13.631	±1.43
	b	3.131	±0.004
	c	0.038	±0.005
	d	22.636	±0.533
5.9keV	a	29.152	±0.860
	b	5.889	±0.002
	c	0.069	±0.002
6.5keV	d	15.988	±0.538
	e	6.608	±0.007
	f	0.186	±0.008
	m	389.319	±46.11

2.45keV と 3.13keV に fitting した関数

$$g(E) = a \times \exp\left(-\frac{(E-b)^2}{2c^2}\right) + d$$

5.9keV と 6.5keV に fitting した関数

$$g(E) = a \times \exp\left(-\frac{(E-b)^2}{2c^2}\right) + d \times \exp\left(-\frac{(E-e)^2}{2f^2}\right) + m \times E^n$$

次に E0102 の FI 型の観測データから得られたスペクトルを示す。

Xselect で取得される Grade 法のスペクトルに合わせて縦軸は全観測時間についての 3.65eV(1bin) ごとのカウント数を用いている。E0102 も Grade 法と似たスペクトルが得られている。しかし低エネルギー域で検出数がとても多くなって分解能が非常に悪くなっている部分 (0.3-0.6keV 付近) が見られ、E0102 から観測されるはずの O VII-K $\alpha$  線 (0.57keV) のピークがつぶれてしまっている。これについては、次の 3.4.4 でふれることにする。

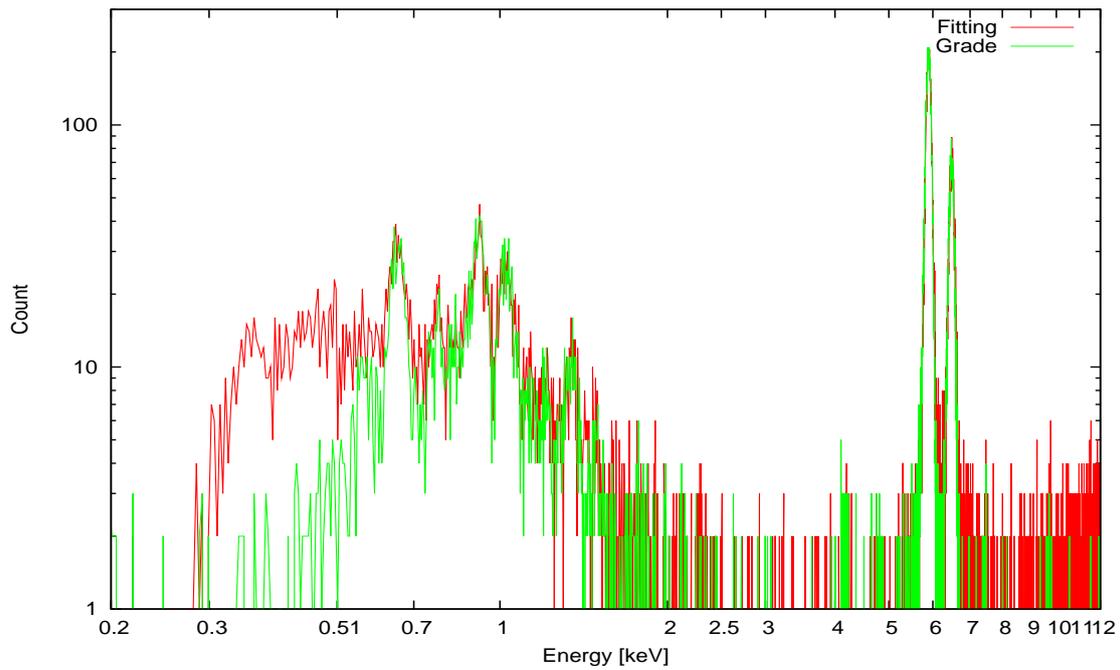


図 41: E0102(FI 型) のスペクトル

Fitting 法				Grade 法			
エネルギー		fit	Error	エネルギー		fit	Error
0.57keV	a	6.0823	±1.023	0.57keV	a	5.109	±1.663
	b	0.566	±0.011		b	0.569	±0.004
	c	0.041	±0.021		c	0.012	±0.004
0.65keV	d	22.959	±1.633	0.65keV	d	24.779	±1.405
	e	0.651	±0.002		e	0.654	±0.001
	f	0.019	±0.002		f	0.017	±0.001
	m	23.256	±1.327		m	16.208	±0.956
5.9keV	a	194.672	±1.141	5.9keV	a	193.726	±1.221
	b	5.898	±0.0004		b	5.893	±0.0004
	c	0.059	±0.0004		c	0.060	±0.0004
6.5keV	a	71.811	±1.095	6.5keV	a	70.741	±0.829
	b	6.487	±0.001		b	6.482	±0.0009
	c	0.064	±0.001		c	0.064	±0.0009

0.57keV と 0.65keV に fitting した関数

$$g(E) = a \times \exp\left(-\frac{(E-b)^2}{2c^2}\right) + d \times \exp\left(-\frac{(E-e)^2}{2f^2}\right) + m \times E^2$$

5.9keV と 6.5keV に fitting した関数

$$g(E) = a \times \exp\left(-\frac{(E-b)^2}{2c^2}\right)$$

### 3.4.2 BI 型のデータ

次に BI 型のデータでのスペクトルを示す。高エネルギーの広がったイベントを拾うことはもちろん、X 線判定条件において BI 型のデータでは高エネルギーの X 線ほど電子雲の広がりが小さくなるとしているので、BI 型のスペクトルに見られる高エネルギー側の NXB が除去できることが期待される。

まずは GC SOUTH の BI 型の観測データから得られたスペクトルを示す。

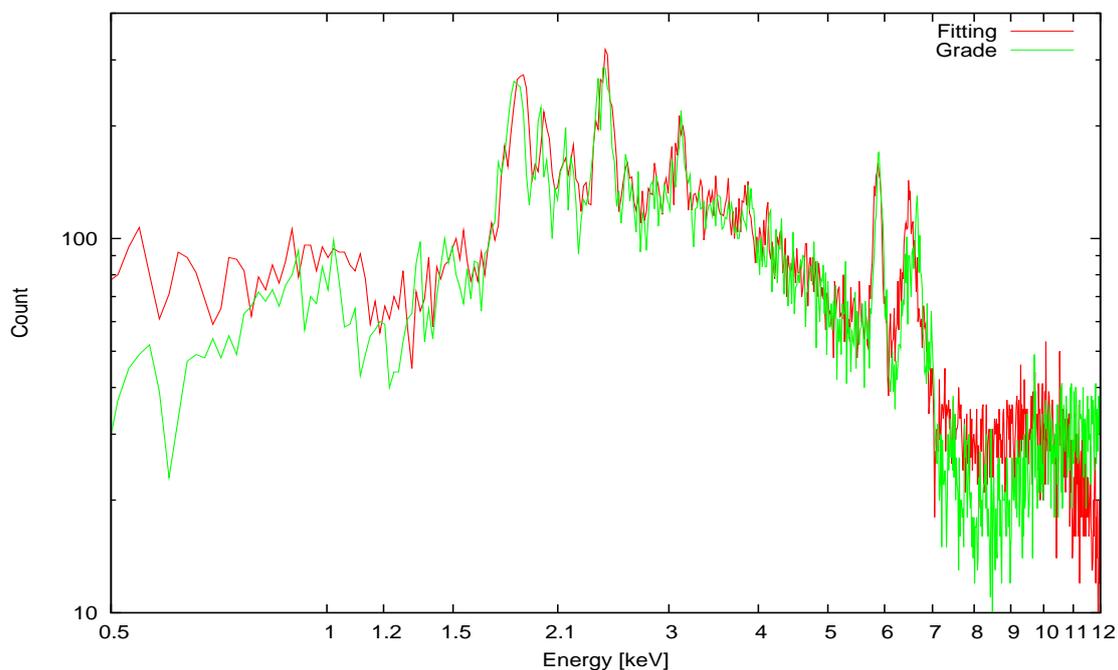


図 42: GC SOUTH のスペクトル

FI 型と同様に、縦軸には全観測時間についての 18.25eV(5bin) ごとのカウント数を用いている。FI 型の場合よりさらに Grade 法に近い形のスペクトルを得ることに成功した。また高エネルギー側の NXB については、わずかに除去できたものの完全には落とせなかった。

Fitting 法

エネルギー		fit	Error
2.45keV	a	33.759	±1.875
	b	2.454	±0.003
	c	0.004	±0.003
	d	27.274	±0.883
3.13keV	a	14.761	±1.671
	b	3.121	±0.005
	c	0.041	±0.006
	d	25.982	±0.471
5.9keV	a	21.448	±0.827
	b	5.874	±0.003
	c	0.069	±0.003
6.5keV	d	14.702	±0.590
	e	6.508	±0.006
	f	0.138	±0.007
	m	249.496	±16.38
	n	1.791	±0.044

Grade 法

エネルギー		fit	Error
2.45keV	a	33.543	±1.803
	b	2.441	±0.002
	c	0.052	±0.004
	d	22.885	±1.664
3.13keV	a	15.079	±1.707
	b	3.130	±0.004
	c	0.030	±0.004
	d	25.422	±0.542
5.9keV	a	22.252	±0.800
	b	5.899	±0.003
	c	0.068	±0.003
6.5keV	d	12.885	±0.511
	e	6.616	±0.008
	f	0.175	±0.008
	m	410.049	±45.97
	n	2.145	±0.071

2.45keV と 3.13keV に fitting した関数

$$g(E) = a \times \exp\left(-\frac{(E-b)^2}{2c^2}\right) + d$$

5.9keV と 6.5keV に fitting した関数

$$g(E) = a \times \exp\left(-\frac{(E-b)^2}{2c^2}\right) + d \times \exp\left(-\frac{(E-e)^2}{2f^2}\right) + m \times E^n$$

次に E0102 のデータで得られたスペクトルを示す。

E0102 でも非常に Grade 法に近い形のスペクトルが得られた。BI 型の場合は O VII-K $\alpha$  線 (0.57keV) のピークも Grade 法と変わらない分解能で得られ、さらに低エネルギーの領域までスペクトルの形が一致していることが分かる。

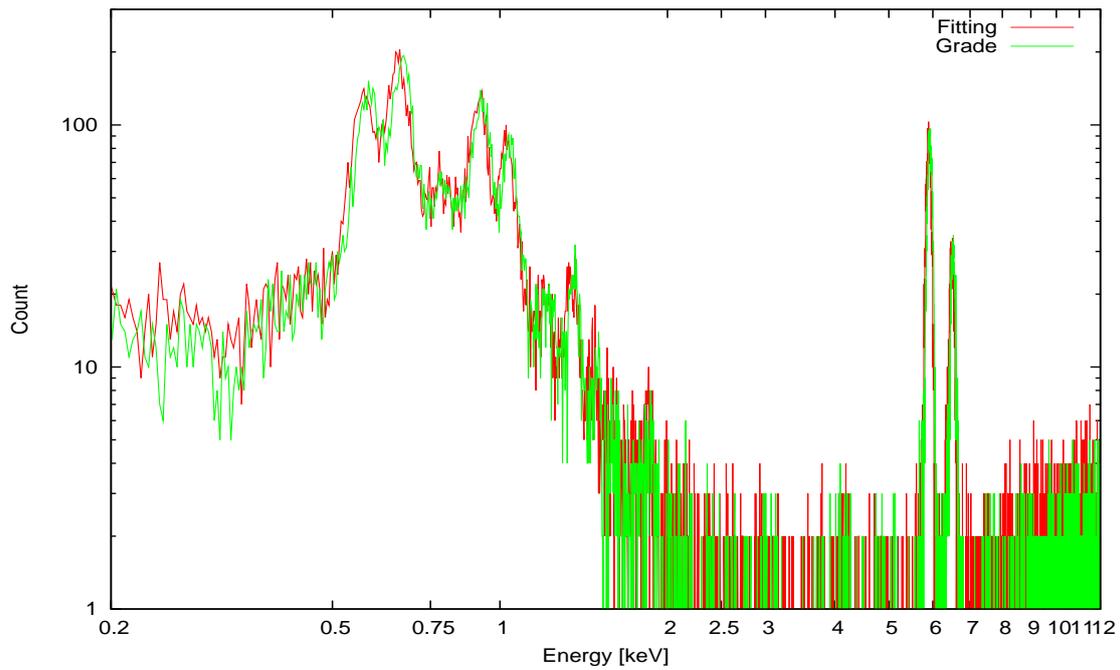


図 43: E0102 のスペクトル

Fitting 法				Grade 法			
エネルギー		fit	Error	エネルギー		fit	Error
0.57keV	a	100.994	±3.342	0.57keV	a	105.205	±3.175
	b	0.569	±0.001		b	0.582	±0.0009
	c	0.023	±0.001		c	0.025	±0.001
0.65keV	d	141.24	±3.397	0.65keV	d	146.31	±3.388
	e	0.654	±0.001		e	0.668	±0.0006
	f	0.024	±0.001		f	0.022	±0.0007
	m	98.939	±4.153		m	88.941	±2.889
5.9keV	a	87.047	±1.407	5.9keV	a	86.319	±0.680
	b	5.896	±0.001		b	5.926	±0.0005
	c	0.058	±0.001		c	0.059	±0.0005
6.5keV	a	29.108	±0.680	6.5keV	a	28.944	±0.489
	b	6.489	±0.002		b	6.520	±0.001
	c	0.064	±0.002		c	0.064	±0.001

0.57keV と 0.65keV に fitting した関数

$$g(E) = a \times \exp\left(-\frac{(E-b)^2}{2c^2}\right) + d \times \exp\left(-\frac{(E-e)^2}{2f^2}\right) + m \times E^2$$

5.9keV と 6.5keV に fitting した関数

$$g(E) = a \times \exp\left(-\frac{(E-b)^2}{2c^2}\right)$$

### 3.4.3 考察

#### エネルギー分解能

上記の fitting の結果を用いて、それぞれのピークのエネルギー分解能を比較してみる。まずは FI 型のエネルギー分解能を示す。

Fitting 法			Grade 法		
fit エネルギー [keV]	分解能 [%]	Error	fit エネルギー [keV]	分解能 [%]	Error
2.458	3.677	±0.271	2.457	3.856	±0.258
3.104	3.527	±0.417	3.131	2.838	±0.367
5.830	2.816	±0.125	5.889	2.760	±0.096
6.491	4.774	±0.231	6.6078	6.622	±0.272
0.566	17.281	±8.560	0.569	4.833	±1.845
0.651	7.013	±0.606	0.654	6.037	±0.411
5.898	2.348	±0.016	5.893	2.381	±0.017
6.487	2.320	±0.041	6.482	2.320	±0.031

この結果を両対数グラフにプロットし、fitting する。

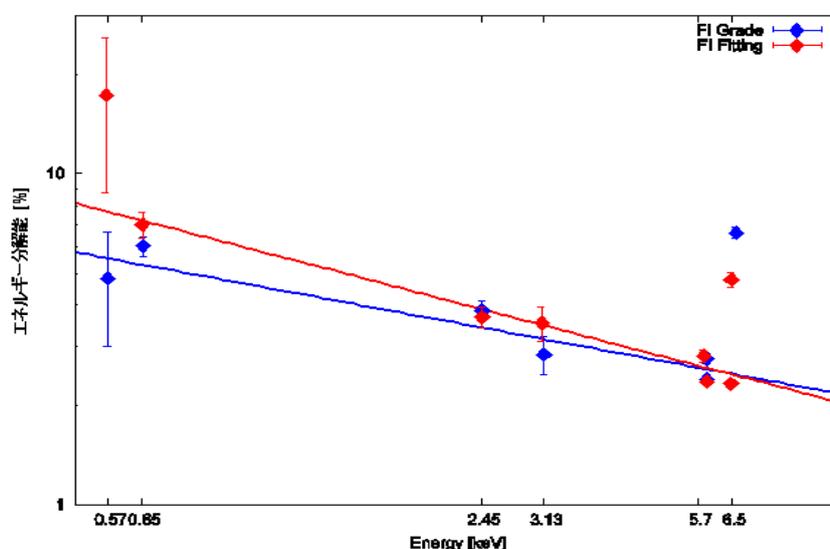


図 44: FI 型の分解能の比較

Fitting 法 :  $f(E) = E^{-0.465} \times e^{1.776}$  (Error : ±5.738, ±1.516)

Grade 法 :  $f(E) = E^{-0.330} \times e^{1.527}$  (Error : ±11.21, ±2.748)

fit してみると Grade 法と同程度のエネルギー分解能ではあるが、低エネルギー側で少し悪化していることがわかる。(ただし Fitting 法で得られたほとんどつぶれている 0.57keV のピークは fitting の際には入れなかった。) 目安のため、半値幅 ( $2.35 \times \sigma$ ) を示しておく。

59.1eV(Fitting), 46.0eV(Grade)@1keV、 160.8eV(Fitting), 161.4eV(Grade)@6.5keV であった。

次に BI 型の分解能を示す。

Fitting 法			Grade 法		
fit エネルギー [keV]	分解能 [%]	Error	fit エネルギー [keV]	分解能 [%]	Error
2.454	4.286	±0.304	2.441	5.048	±0.397
3.121	3.077	±0.418	3.130	2.286	±0.313
5.874	2.760	±0.125	5.899	2.720	±0.115
6.508	4.994	±0.240	6.616	6.208	±0.300
0.569	9.569	±0.413	0.582	10.092	± 0.021
0.654	8.607	±0.285	0.6682	7.741	±0.045
5.896	2.322	±0.043	5.926	2.330	±0.402
6.488	2.321	±0.063	6.520	2.293	±0.242

FI 型同様、この結果を両対数グラフにプロットして fitting する。

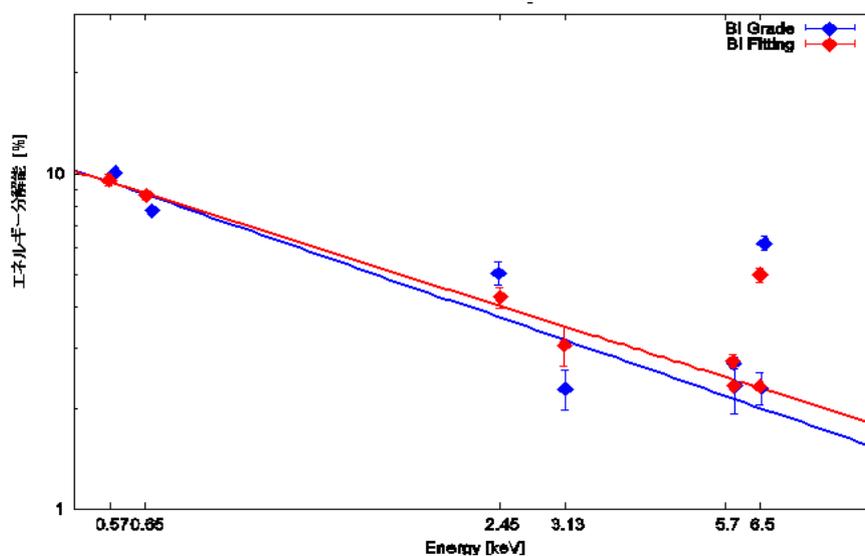


図 45: BI 型の分解能の比較

Fitting 法 :  $f(E) = E^{-0.581} \times e^{1.919}$  (Error : ±0.025, ±0.020)

Grade 法 :  $f(E) = E^{-0.637} \times e^{1.889}$  (Error : ±11.21, ±2.748)

XIS で使用される全エネルギー域について、ほぼ Grade 法と同程度の分解能が得られていることが分かる。目安のため半値幅を示しておく。

68.1eV(Fitting),66.1eV(Grade)@1keV、149.3eV(Fitting),130.5eV(Grade)@6.5keV であった。

GC SOUTH の 6.5keV のピークのエネルギー分解能が他のピークに比べて極端に悪いように見える。しかしこれは GC SOUTH からの中性鉄による 6.4keV の輝線を分離できていないためと考えられるので、FI 型、BI 型ともに分解能の fitting の際のデータには用いなかった。

## イベント増加率

先に定義したイベント増加率を用いて、Grade 法に対して Fitting 法の検出数がどのくらい増えたかを計算する。ピークごとに計算したほうが分かりやすいが、Grade 法と Fitting 法で分解能が異なるためピーク幅が違うので複数のピークごとにカウントするものとする。

まずは FI 型のデータについて計算する。GC SOUTH のスペクトルの結果を示す。

unfilter でのイベント数 : 327025 イベント

補正・Screening したイベント数 : 97931 イベント

Fitting 法を適用したイベント数 (0.5-12keV) : 42318 イベント

Grade 法を適用したイベント数 (0.5-12keV) : 34334 イベント

エネルギー幅 [keV]	Grade 法 [counts]	Fitting 法 [counts]	イベント増加率 [%]	Error
1.2-1.5	920	1025	11.4	±4.076
1.5-2.1	3585	3658	2.036	±2.303
2.1-4	12465	12941	3.819	±1.209
4-5.5	6376	6677	4.721	±1.672
5.5-7	6963	7492	7.5973	±1.547
1.2-8.5	32090	34319	6.946	±0.726

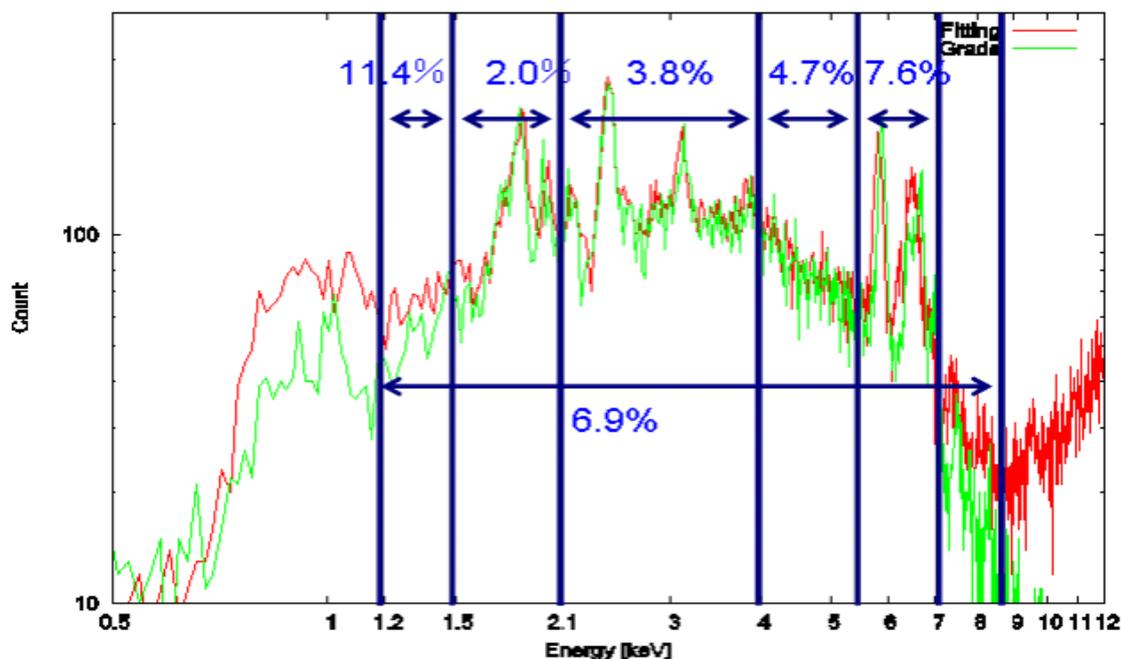


図 46: GC SOUTH(FI 型) のイベント増加率

XIS で主に使用されるエネルギー域では数 % のイベント増加がみられた。特に高エネルギーほど増加率が大きいことも分かる。また 1.2-8.5keV でのエラーは 0.6% 程度より、この増加は有意であると考えられる。

次に E0102 のスペクトルの結果を示す。

unfilter でのイベント数 : 878085 イベント  
 補正・Screening したイベント数 : 213110 イベント  
 Fitting 法を適用したイベント数 (0.2-12keV) : 18031 イベント  
 Grade 法を適用したイベント数 (0.2-12keV) : 15247 イベント

エネルギー幅 [keV]	Grade 法 [counts]	Fitting 法 [counts]	イベント増加率 [%]	Error
0.51-0.7	618	882	42.718	±3.676
0.7-2	2609	2958	13.377	±2.369
5.5-7	11337	11628	2.567	±1.287

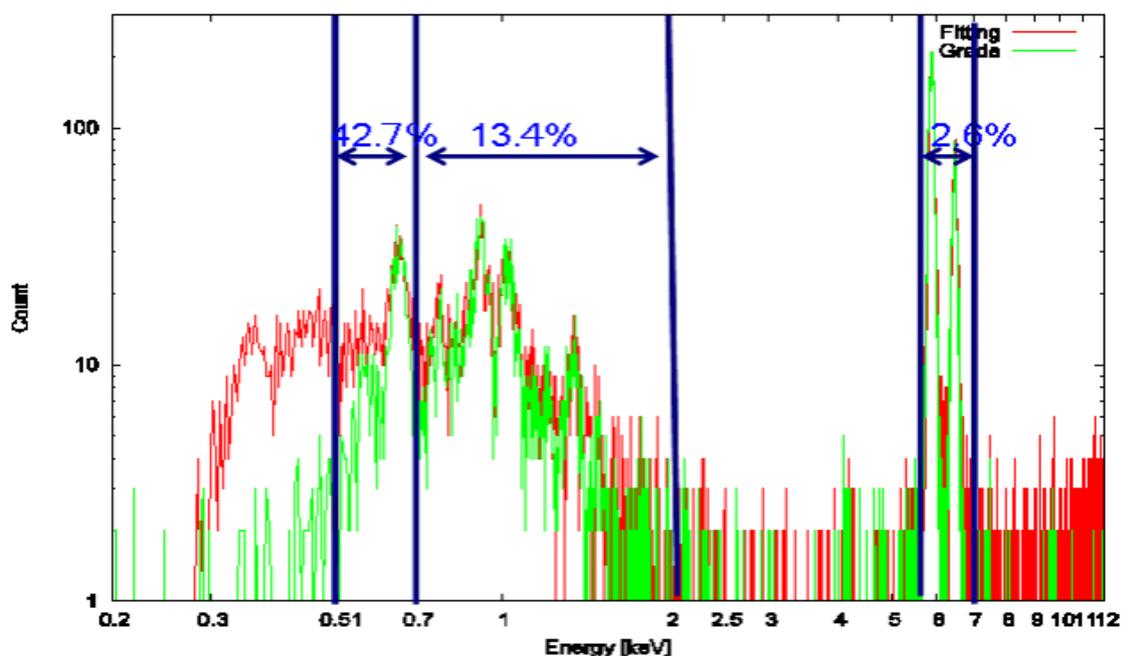


図 47: E0102(FI 型) のイベント増加率

低エネルギー部分では検出数がかなり増加しているもののピークがつぶれているのでバックグラウンドを拾っている可能性があり信頼できる増加率とは言い難い。しかし E0102 のデータには低エネルギーのイベントしかないので、5.5-7keV での増加したイベントは cal source の輝線によるイベントと考えられ、この検出数の増加は信頼できるといえそうである。

次に BI 型のイベント増加率を計算する。

GC SOUTH のスペクトルの結果を示す。

unfilter でのイベント数 : 727360 イベント  
 補正・Screening したイベント数 : 135956 イベント  
 Fitting 法を適用したイベント数 (0.5-12keV) : 44873 イベント  
 Grade 法を適用したイベント数 (0.5-12keV) : 41511 イベント

エネルギー幅 [keV]	Grade 法 [counts]	Fitting 法 [counts]	イベント増加率 [%]	Error
0.7-1.6	3327	3938	18.365	±1.989
1.6-2.75	9957	10468	5.132	±1.332
2.75-4	8535	8967	5.062	±1.439
4-5.5	6167	6478	5.043	±1.694
5.5-7	6031	6402	6.152	±1.690
0.7-8.0	35357	37957	7.354	±0.688

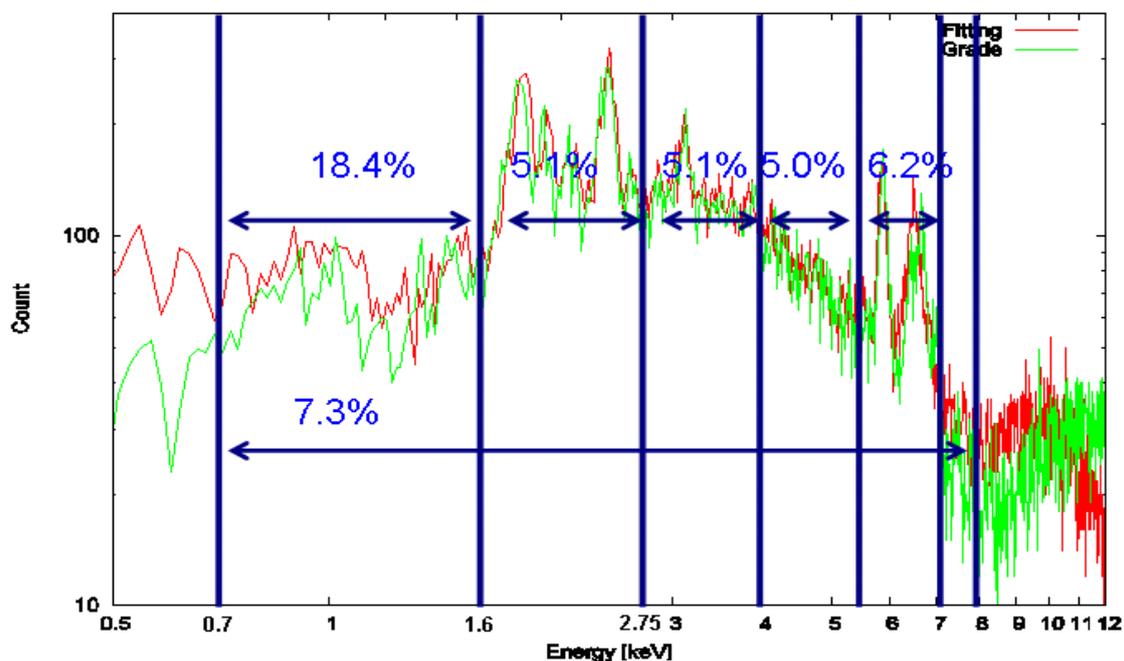


図 48: GC SOUTH(BI 型) のイベント増加率

BI 型のスペクトルでも全エネルギー域で有意な増加がみられる。FI 型同程度の増加率だが、低エネルギー側での増加率がやや大きい。

E0102 のスペクトルの結果を示す。

unfilter でのイベント数 : 307606 イベント  
 補正・Screening したイベント数 : 42743 イベント  
 Fitting 法を適用したイベント数 (0.2-12keV) : 24123 イベント  
 Grade 法を適用したイベント数 (0.2-12keV) : 22638 イベント

エネルギー幅 [keV]	Grade 法 [counts]	Fitting 法 [counts]	イベント増加率 [%]	Error
0.5-0.75	6428	6613	2.878	±1.703
0.75-2	8391	8556	1.966	±1.507
5.5-7.3	4915	5018	2.096	±1.966

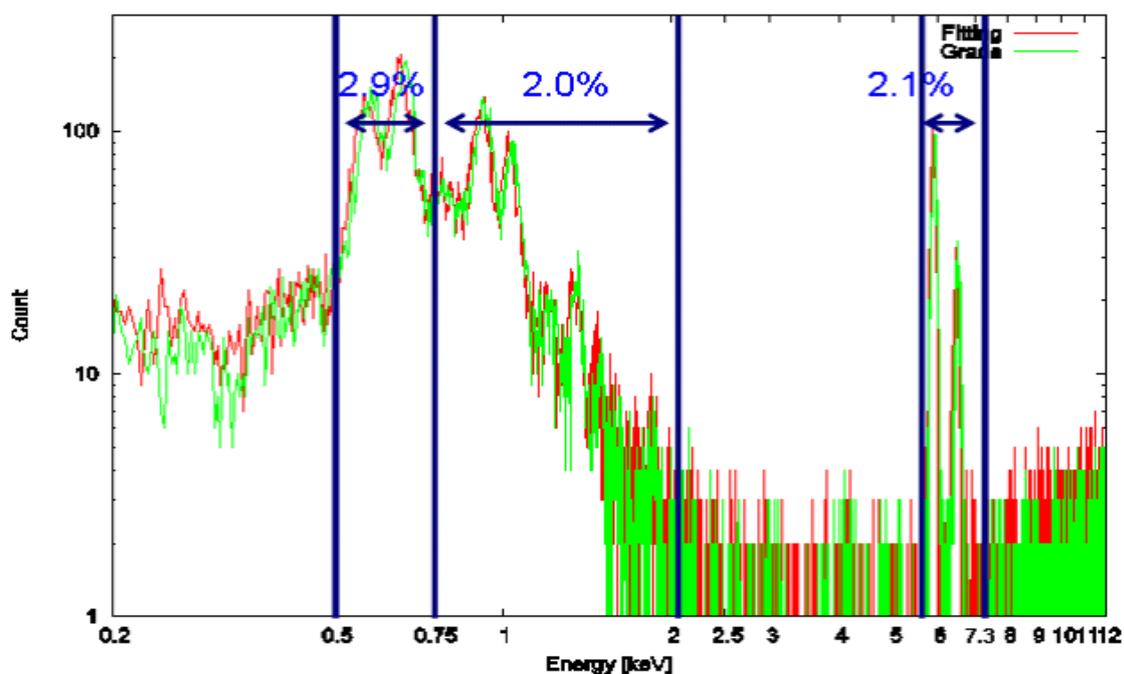


図 49: E0102(BI 型) のイベント増加率

E0102 でも全体的に 2% 程度のイベント増加がみられる。E0102 の BI 型のスペクトルはエネルギー分解能が Grade 法と変わらないので、このイベントの増加は特に信用できそうである。

さらに、GC SOUTH に連続成分があることを利用してイベント増加率のエネルギー依存性を調べてみた。ピークに関係なくスペクトルを 1keV ごとに区切りその間でのイベント増加を計算するものとする。

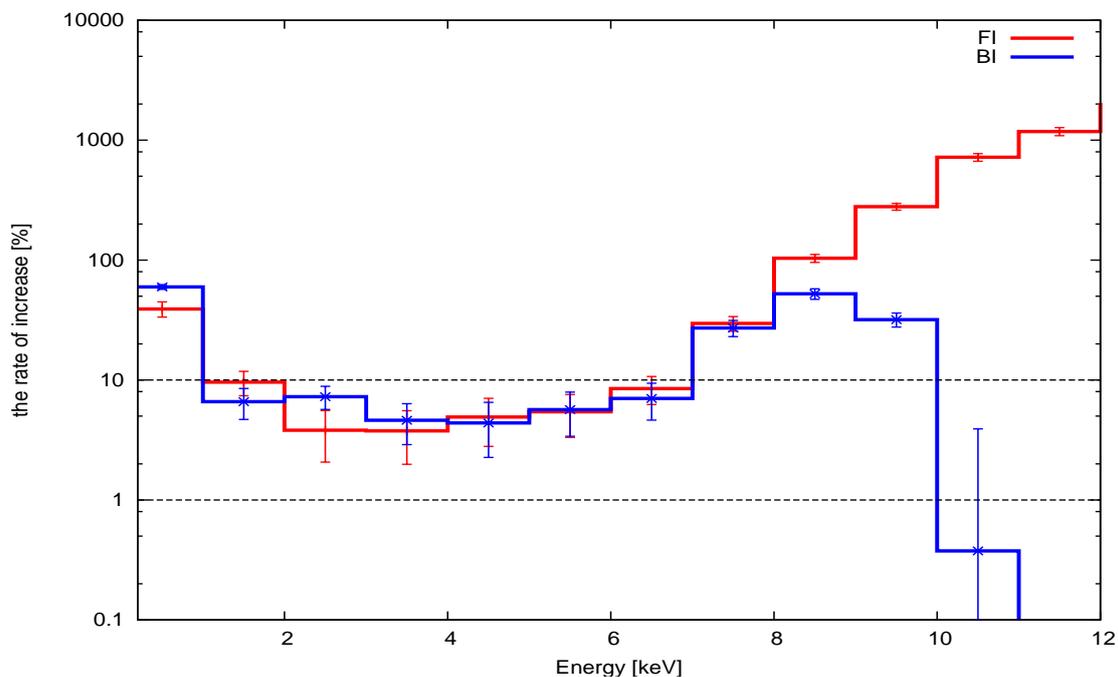


図 50: イベント増加率のエネルギー依存性

FI 型 (赤)、BI 型 (青) とともに XIS で主に使用される 1-8keV の範囲では Grade 法に対して数パーセントのイベント増加がみられることが分かる。また高エネルギー側にいくほどイベント増加が大きく、Grade 法で捨てられがちであった高エネルギーの広がったイベントを拾えていることも分かる。ただし BI 型の高エネルギー域ではイベント増加率が負になってしまっている。BI 型は X 線判定条件である X 線による電子雲の広がりの大きさが高エネルギーほど小さいので、Grade 法にあった高エネルギー側の NXB の除去できているためと考えられ、X 線イベントの抽出としてはこの検出数の減少は問題ないといえそうである。逆に FI 型の高エネルギー域ではイベント増加率が非常に大きくなっている。FI 型は電子雲の広がりの大きさが高エネルギーほど大きいので、高エネルギーの広がったイベントも拾えているが、Grade 法に比べて高エネルギーのバックグラウンドを拾いやすくなってしまっている可能性がある。これについては 3.3.4 で詳しくみていくことにする。

### 3.4.4 課題

Fitting 法が正確にスペクトルが作れているか調べるために Grade 法のスペクトルと比較してみる。違いが顕著であった FI 型の E0102 のスペクトルを示す。

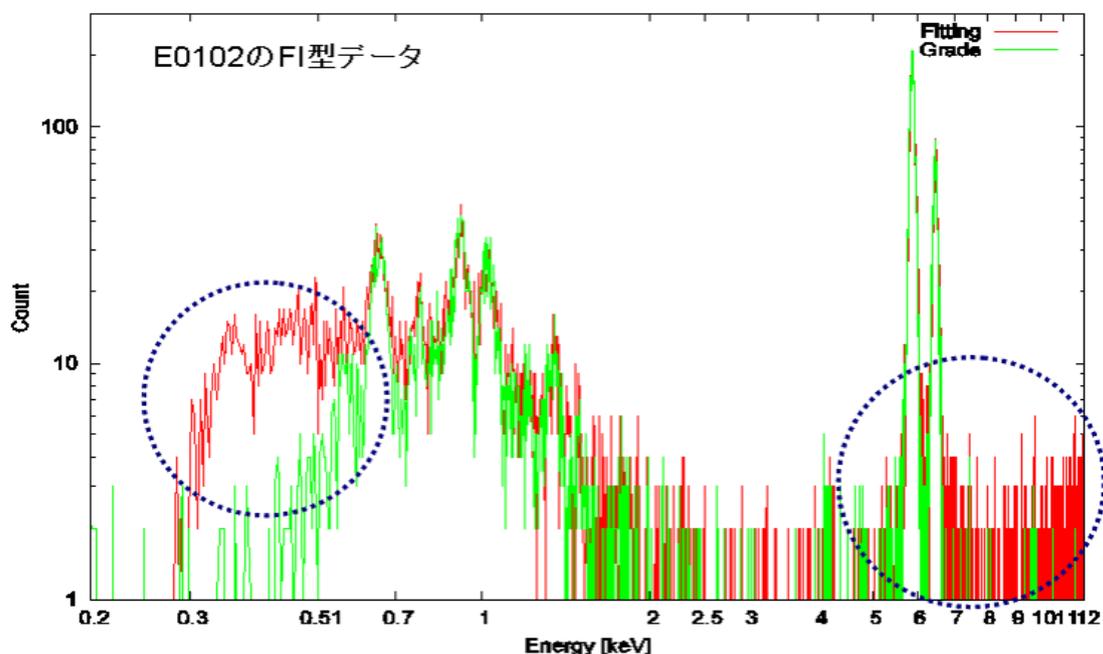


図 51: Grade 法との相違点 (FI 型の E0102)

点線で囲まれた 0.3-0.6keV と高エネルギーのあたりで Fitting 法の検出数が大きく増加していることが分かる。Grade 法と比べスペクトルがつぶれて分解能が悪くなっていることから単純に X 線イベントの検出数が増えたとは考えにくいので、その原因を考える。

具体的にイベントの各ピクセルの波高値のデータを見てみると、図のような一方向性を持つイベントが一部捨て切れていないことが分かった。特に周囲のピクセルの波高値が補正によって負になっているイベントに多いようである。一方向性をもつイベントができる原因としては考えられるのは宇宙線等によるバックグラウンド、複数の X 線の入射などである。

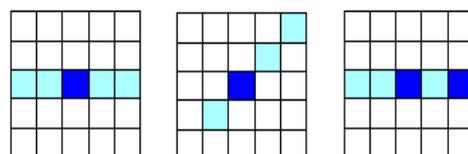


図 52: 一方向性を持つイベント

バックグラウンドは当然イベント抽出の時点で除きたい。また複数の X 線が  $5 \times 5$  ピクセル内に入射した場合も、電子雲が洩れこんできた場合とは違ってそれぞれの X 線による電子雲が重なるほど近いところに入射していると考えられる。この場合はひとつの X 線イベントの正確な電荷量を計算することができないので正確なスペクトルを作るためにはやはり除去した方がいい。

つまり、このような一方向性を持つイベントはやはりイベント抽出法によって除去しておく必要がある。Fitting 法でこれらのイベントをすべて除く方法としては非対称な Gaussian を fit させることが考えられる。しかしすぎくからのデータには  $5 \times 5$  ピクセルの離散的なデータしかないので、パラメータの多い複雑な関数では正確に fit させることができなかった。

その中でも比較的簡単な関数である xy 方向の分散が異なる非対称 Gaussian を E0102 の FI 型のデータに fit させ、xy 方向への一方向性の強いイベントを除いてみると (図 53) のようになった。

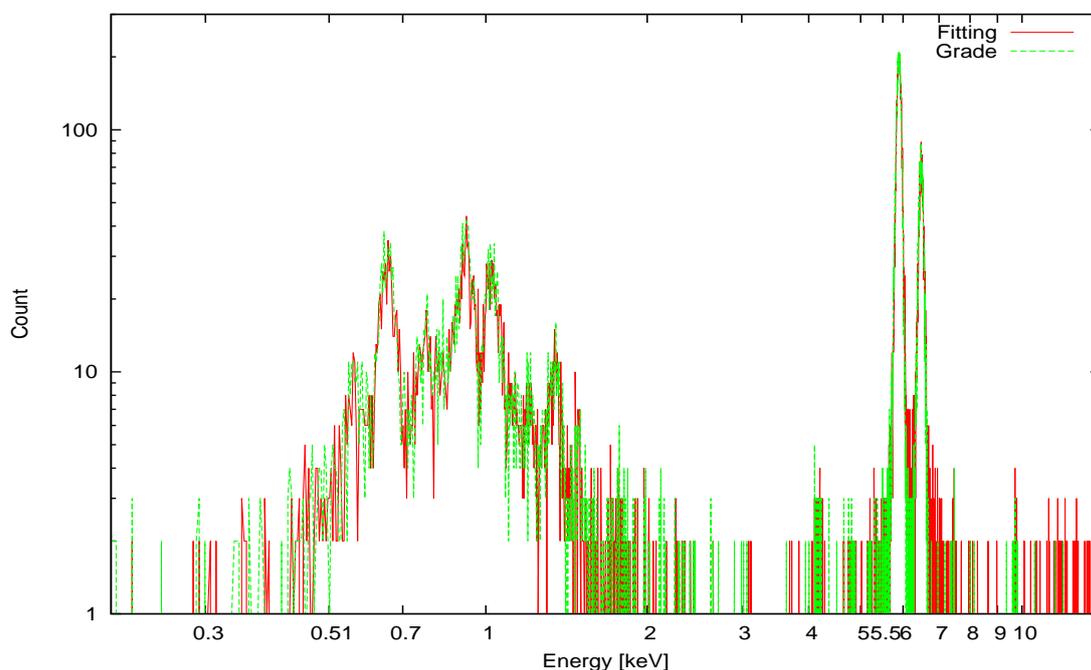


図 53: 一方向性の強いイベントを除いたイベント

(図 53) のスペクトルは別々の fitting の結果を使用して 2 回の除去をしているので、除去しすぎている可能性もあり正確なスペクトルとは言い難いが、一方向性の強いイベントを正確に除去することができれば Grade 法と変わらないエネルギー分解能を持つスペクトルが得られると予想できる。(一方向性の強いイベントを除去した場合、全体としてイベント増加率は 2% 程度になっていた。)

つまり、現時点では  $5 \times 5$  のデータまでしかないが、解像度を上げるために将来的にピクセルサイズが小さくなっていけば、fitting に使用できるデータ点も増えて複雑な非対称な関数でも正確にフィットできるようになるはずである。そうなれば Grade 法ではパターン数がかなり増えて分類が複雑になってしまうことから、Fitting 法がより有効になると考えられる。

## 4 中性領域で吸収された X 線について

図 36 をよく見ると、X 線を表す「縦線」は X 線判定条件の直線で完全に止まっているわけではなく、そこからさらに左上に向かって伸びていることが分かる。この「延長部分」は、X 線が CCD の中性領域で吸収されたため、生じた電荷の一部が失われ、エネルギーが本来の値よりも低く見積もられたイベントを表していると考えられる。実際、同じ E0102-72 のデータであっても、中性領域の存在しない BI-CCD で観測された図 39 では、このようなものは見られない。もしこれらのイベントを救出することができたなら、X 線検出率をさらに増加させることができるだろう。そこで、この章では中性領域で吸収された X 線を救出する方法について考えてみたい。

### 4.1 中性領域での電荷の損失とその補正

中性領域には電界が存在しないので、電子の移動は拡散によるものだけになる。そのため、空乏層に到達するまでの時間が長くなり、再結合の効果が無視できなくなる。よって、再結合の項も加えた拡散方程式 (29) を考えなくてはならない。ここで、 $\rho$  は電子の密度分布、 $D$  は拡散係数、 $\tau$  は中性領域での電子の寿命である。また、座標系としては図 54 のような円柱座標を考えている。

$$\frac{d}{dt}\rho(r, z, t) = D\nabla^2\rho(r, z, t) - \frac{\rho(r, z, t)}{\tau} \quad (29)$$

$t = 0$  に、中性領域内の点  $(r, z) = (0, z_0)$  で X 線が吸収されたとする。また、空乏層との境界を  $z = 0$ 、基盤との境界を  $z = d$  とすると、初期・境界条件は (30) のようになる。

$$\begin{cases} \rho(r, z, 0) = \rho_0\delta(z - z_0)\delta(r) & : \text{初期条件} \\ \rho(r, 0, t) = 0 & : \text{空乏層との境界条件} \\ -D\frac{\partial\rho}{\partial z}\Big|_{z=d} = 0 & : \text{基盤との境界条件} \end{cases} \quad (30)$$

初期・境界条件 (30) のもとで拡散方程式 (29) を考えると、最終的に空乏層に到達する電荷の割合は式 (31) で表されることになる ([2], [3])。ここで、 $L$  は拡散長  $\sqrt{D\tau}$  ある。

$$h(z_0) = \frac{\cosh\left(\frac{d-z_0}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{d}{L}\right)} \quad (31)$$

式 (31) は X 線が吸収された深さ  $z_0$  の関数だが、実際に分かるのは電子雲が電極に到達した時の最終的な広がり  $\sigma$  であるので、これらの関係式を求めなければならない。そこで、中性領域での電子雲の広がり  $\sigma_{\text{中性領域}}$  は  $z_0$  に比例すると仮定して、

$$\sigma_{\text{中性領域}} = \frac{\sigma_0}{d} z_0 \quad (32)$$

という関係が成り立っているとする。ここで、 $\sigma_0$  は中性領域の一番奥で X 線が吸収された時の、空乏層に到達するまでの電子雲の広がりを表す量である。また、空乏層での電子雲の広がり  $\sigma_{\text{空乏層}}$  は、X 線判定条件の式 ( $a_{\text{判定}}E + b_{\text{判定}}$ ) で与えられる。これは、X 線判定条件の式が空乏層での電子雲の広がり  $\sigma$  の上限、つまり空乏層の一番奥から電極に到達するまでに電子雲が広がる量を表しているからである。以上より、電子雲が電極に到達した時の最終的な広がり  $\sigma$  は、式 (33) で与えられることになる。

$$\sigma = \sigma_{\text{中性領域}} + \sigma_{\text{空乏層}} = \frac{\sigma_0}{d} z_0 + (a_{\text{判定}}E + b_{\text{判定}}) \quad (33)$$

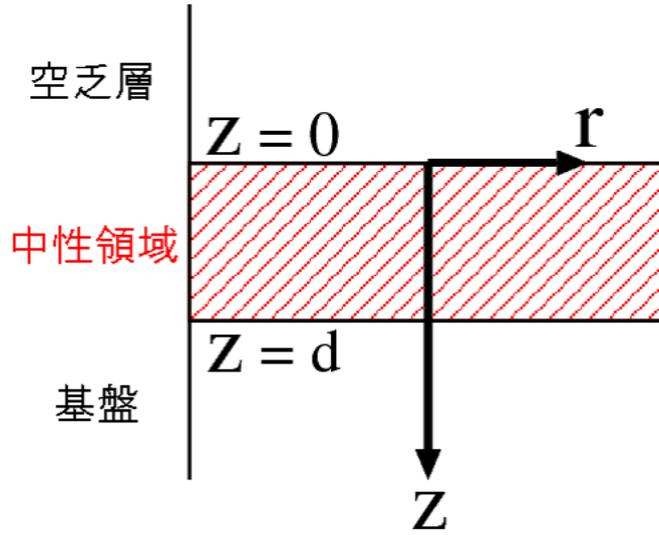


図 54: 拡散方程式 (29) を考える上での座標系

これで  $z_0$  と  $\sigma$  の関係が分かったので、式 (31),(33) から  $z_0$  を消去すると、式 (31) は式 (34) のように書き直せる。

$$h(\sigma) = \frac{\cosh \left[ \frac{d}{L} \left\{ 1 - \frac{\sigma - (a_{\text{判定}} E + b_{\text{判定}})}{\sigma_0} \right\} \right]}{\cosh \left( \frac{d}{L} \right)} \quad (34)$$

X 線によって生じる電荷量は X 線のエネルギーに比例しているの、真のエネルギーを  $E_0$ 、見かけのエネルギーを  $E$  とすると、これらの間には式 (35) の関係が成り立つ。

$$\frac{E}{E_0} = h(\sigma) \quad (35)$$

よって式 (34),(35) より、中性領域で吸収された X 線の真のエネルギーを求める式 (36) が求められる。

$$E_0 = E \frac{\cosh \left( \frac{d}{L} \right)}{\cosh \left[ \frac{d}{L} \left\{ 1 - \frac{\sigma - (a_{\text{判定}} E + b_{\text{判定}})}{\sigma_0} \right\} \right]} \quad (36)$$

なお、この式が物理的な妥当性をもつのは  $0 < z_0 < d$  の時、つまり  $\sigma$  が式 (37) の範囲にある時だけである。

$$(a_{\text{判定}} E + b_{\text{判定}}) < \sigma < \sigma_0 + (a_{\text{判定}} E + b_{\text{判定}}) \quad (37)$$

## 4.2 補正に必要なパラメータについて

中性領域での電荷損失を補正する式が求まったので、後は中性領域の厚さと拡散長の比  $\frac{d}{L}$ 、中性領域での広がりの上限  $\sigma_0$  の二つのパラメータさえ求めれば、中性領域で吸収された X 線の真のエネルギーを求めることができるはずである。これらのパラメータを求めるには、CCD に単一エネルギーの X 線を入射させる実験を行い、得られた結果から fitting で求めるなどの方法が考えられる。しかし、今回はそれを行うこ

とができないので、式 (36) を  $\sigma$  について解いた式 (38) に適当なパラメータを代入して、図 36 において X 線を表す「縦線」の折れ曲がりをうまく再現できるものを探してみた。

$$\sigma = (a_{\text{判定}}E + b_{\text{判定}}) + \sigma_0 \left[ 1 - \frac{L}{d} \cosh^{-1} \left\{ \frac{E}{E_0} \cosh \left( \frac{d}{L} \right) \right\} \right] \quad (38)$$

例えば、 $\frac{d}{L} = 1$ 、 $\sigma_0 = 0.5$  したものを図 55 に示す。図中の水色、黄色、緑色、青色の線は、それぞれ式 (38) において  $E_0 = 0.57\text{keV}, 0.65\text{keV}, 5.9\text{keV}, 6.5\text{keV}$  としたものである。また、二本の黒線は、補正を行う範囲 (37) を示している。この図は 5.9keV, 6.5keV の「縦線」の折れ曲がりを比較的よく再現しているので、今回はこのパラメータを用いて、中性領域で吸収されたイベントの補正を行うことにした。なお、実際はパラメータはエネルギー依存性を持っていると考えられるが、今回はそれを求めるのが困難なので、パラメータを定数として補正を行った。

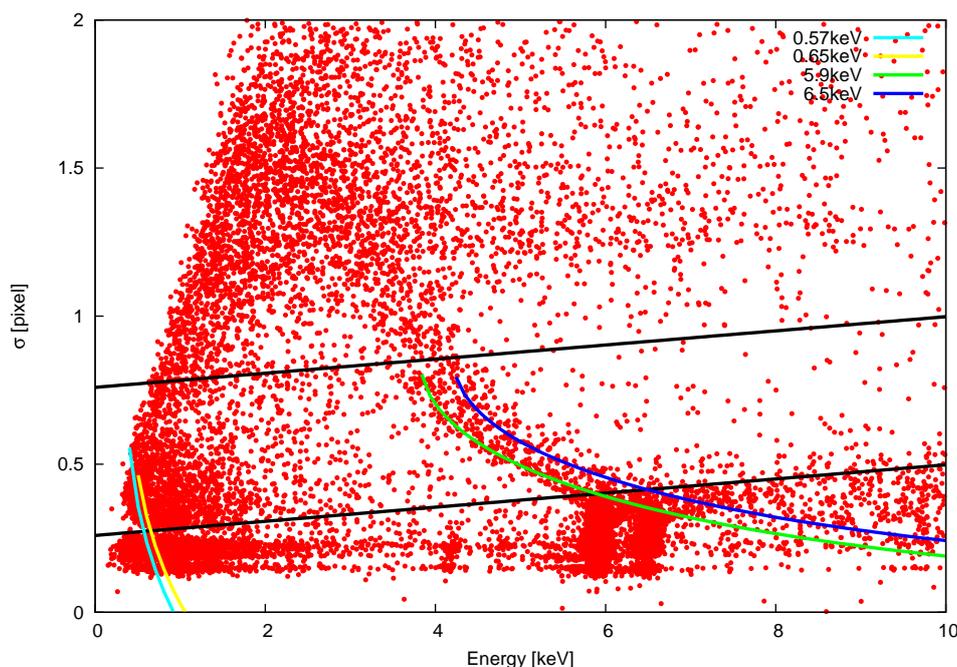


図 55: 中性領域で吸収されたイベントに対する補正曲線 (E0102)

図 55 の二本の黒線に挟まれた領域に対して補正を行った結果を図 56 に示す。5.9keV, 6.5keV の X 線を表す「縦線」の折れ曲がりが補正されている様子がわかる。ちなみに、(X 線判定条件+ $\sigma_0$ ) よりも上の領域に対して補正を行っても、図 57 のようになって、「縦線」の折れ曲がりを正しく補正できない。このため、今回は (X 線判定条件+ $\sigma_0$ ) より下にあるイベントだけを X 線イベントとみなすことにした。ただ、これらの図を見れば明らかなように、(X 線判定条件+ $\sigma_0$ ) より上の領域にも中性領域で吸収されたものと思われるイベントがかなり残っている。今回はこれらのイベントを救出することができなかったが、もし正しいパラメータを求めることができれば、これらのイベントを救出することができるかもしれない。

GC SOUTH を FI で観測したデータについても、E0102-72 と同じパラメータで補正を行った。その様子を図 58, 59 に示しておく。

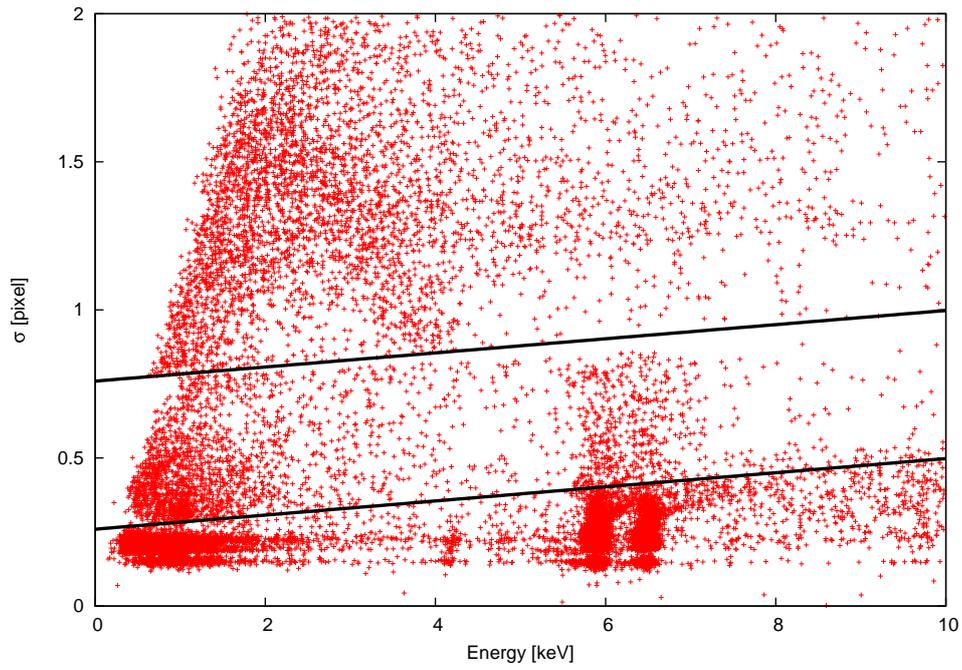


図 56: E0102-72 データの中性領域で吸収されたイベントを補正 ( (X 線判定条件 $+\sigma_0$ ) より下の領域のみ補正)

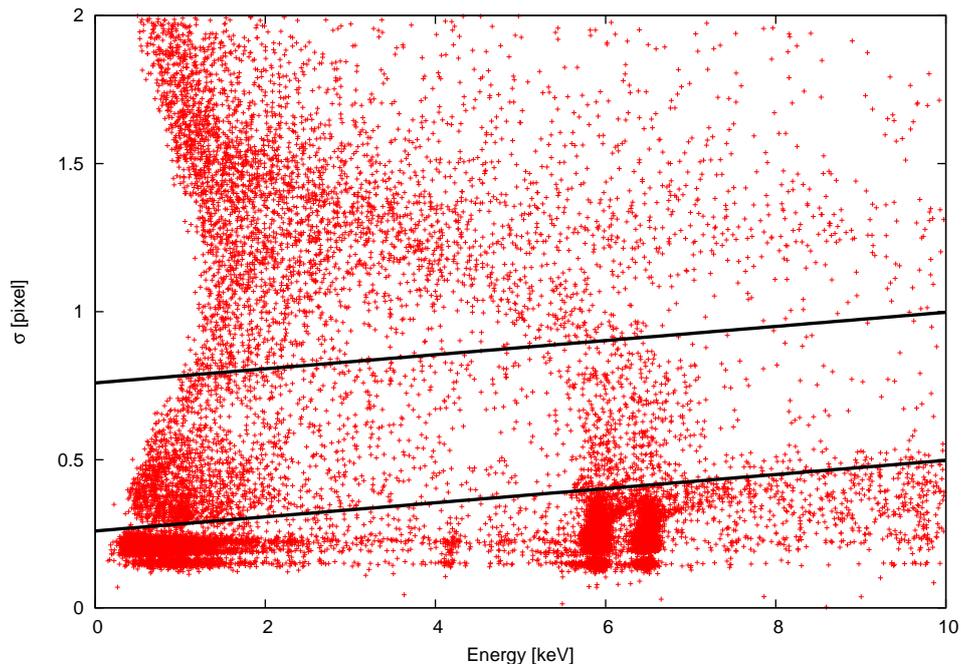


図 57: E0102-72 データの中性領域で吸収されたイベントを補正 ( (X 線判定条件 $+\sigma_0$ ) 以上の領域も補正)

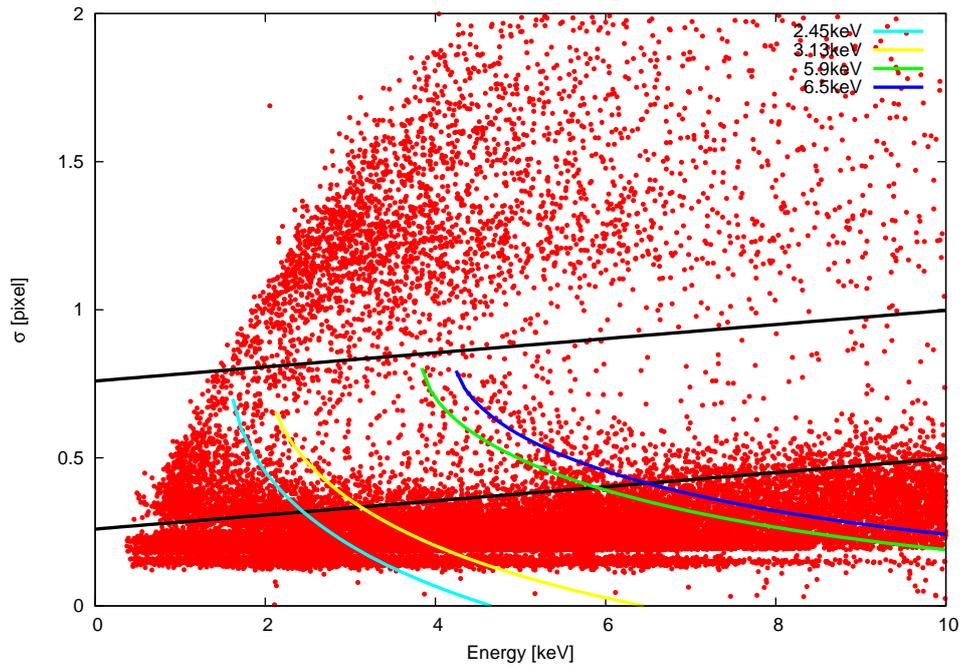


図 58: 中性領域で吸収されたイベントに対する補正曲線 (GC SOUTH)

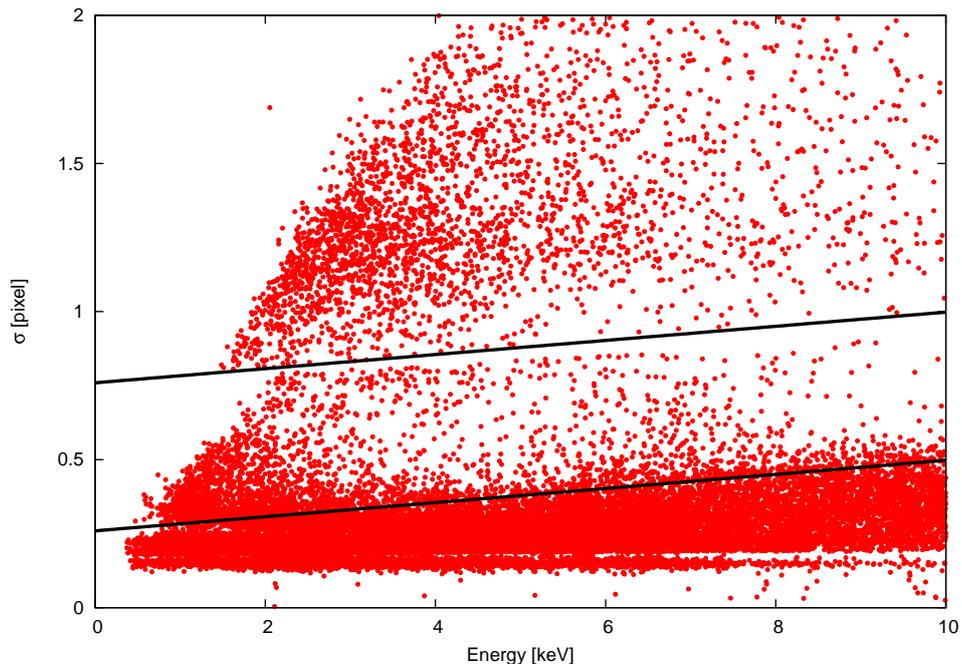


図 59: GC SOUTH データの中性領域で吸収されたイベントを補正

### 4.3 補正によるスペクトルの変化

中性領域で吸収されたイベントに対する補正も考慮に入れたイベント抽出について、改めてまとめておく。

1.  $\sigma \leq (X \text{ 線判定条件})$  のイベントは、Fitting 法で得られたエネルギーをそのままイベントのエネルギーとした。
2.  $(X \text{ 線判定条件}) < \sigma < (X \text{ 線判定条件} + \sigma_0)$  のイベントは、式 (36) によって補正されたエネルギーをそのイベントのエネルギーとした。
3.  $\sigma \geq (X \text{ 線判定条件} + \sigma_0)$  のイベントについては、今回はバックグラウンドとみなして除去した。
4.  $\sigma < (X \text{ 線判定条件} + \sigma_0)$  のイベントは X 線であるとみなし、1, 2 で求めたエネルギーによって分類し、スペクトルを作った。

こうして、中性領域で吸収されたイベントも含んだスペクトルが得られたので、イベント増加率や分解能などを調べてみる。まず、スペクトルの全体図を図 60, 61 に示す。図 60 が E0102-72 のスペクトル、図 61 が GC SOUTH のスペクトルである。いずれの図でも、中性領域で吸収されたイベントも含んだ Fitting 法のスペクトルを青線、含まない Fitting 法のスペクトルを赤線、Grade 法のスペクトルを緑線で示している。

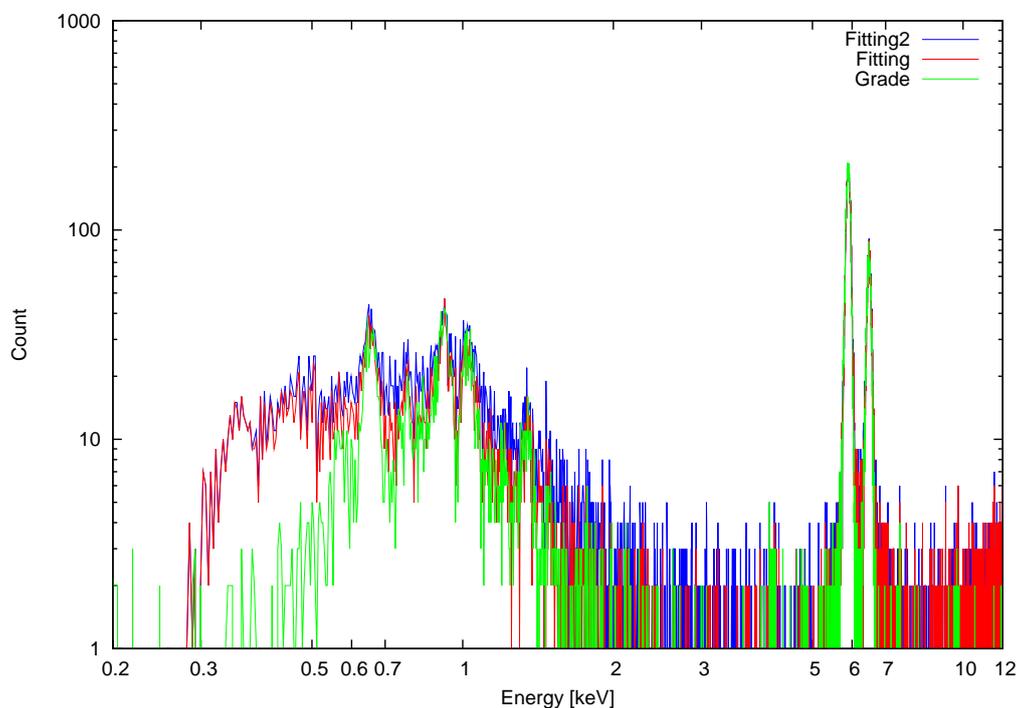


図 60: 中性領域で吸収されたイベントも含んだスペクトル (E0102-72)

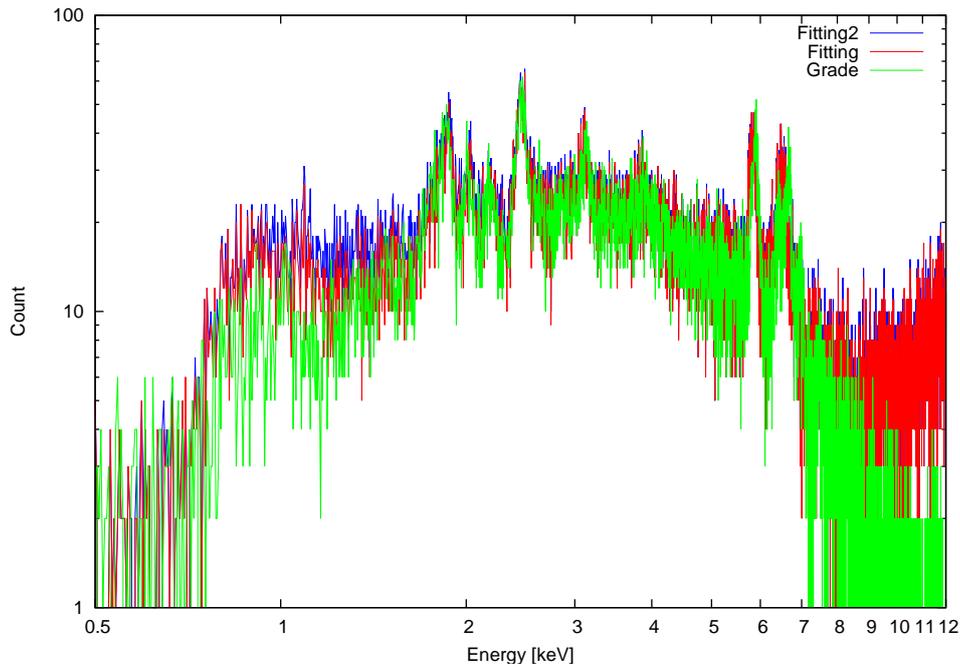


図 61: 中性領域で吸収されたイベントも含んだスペクトル (GC SOUTH)

当然ながら、中性領域で吸収されたイベントも含めた方がイベント数が増加している。どの程度増えたのかを表 8, 9 に示す。表 8 が E0102-72、表 9 が GC SOUTH についてのものである。また、E0102-72 のスペクトルを 1keV 毎に区切った場合のイベント増加率を図 62 に、GC SOUTH のスペクトルの場合の図を図 63 に示す。

表 8: 中性領域で吸収されたイベントも含めた場合のイベント数の増加率を、ピークを含む範囲について示したもの (E0102-72)

エネルギー範囲 [keV]	Fitting 法 (補正あり) のイベント数	Grade 法 に対するイベント増加率 [%]	Fitting 法 (補正なし) に対するイベント増加率 [%]
0.51 ~ 0.70	1092	$76.699 \pm 2.8488$	$23.810 \pm 3.6566$
0.70 ~ 2.0	4231	$63.169 \pm 1.5350$	$43.036 \pm 1.6756$
5.5 ~ 7.0	12140	$7.0830 \pm 1.2197$	$4.4032 \pm 1.2429$
7.0 ~ 9.0	481	$440.45 \pm 2.1351$	$25.916 \pm 5.4428$
9.0 ~ 12	997	$774.56 \pm 1.1305$	$12.149 \pm 4.1132$

表 9: 中性領域で吸収されたイベントも含めた場合のイベント数の増加率を、ピークを含む範囲について示したもの (GC SOUTH)

エネルギー範囲 [keV]	Fitting 法 (補正あり) のイベント数	Grade 法 に対するイベント増加率 [%]	Fitting 法 (補正なし) に対するイベント増加率 [%]
1.2 ~ 1.5	1318	43.261 ± 2.9988	28.585 ± 3.2387
1.5 ~ 2.1	4261	18.856 ± 1.9068	16.484 ± 1.9350
2.1 ~ 4.0	13724	10.100 ± 1.1238	6.0505 ± 1.1554
4.0 ~ 5.5	6944	8.9084 ± 1.5926	3.9988 ± 1.6481
7.0 ~ 9.0	3500	70.982 ± 1.6274	11.005 ± 2.2119
9.0 ~ 12	5964	655.89 ± 0.50112	7.0736 ± 1.7403

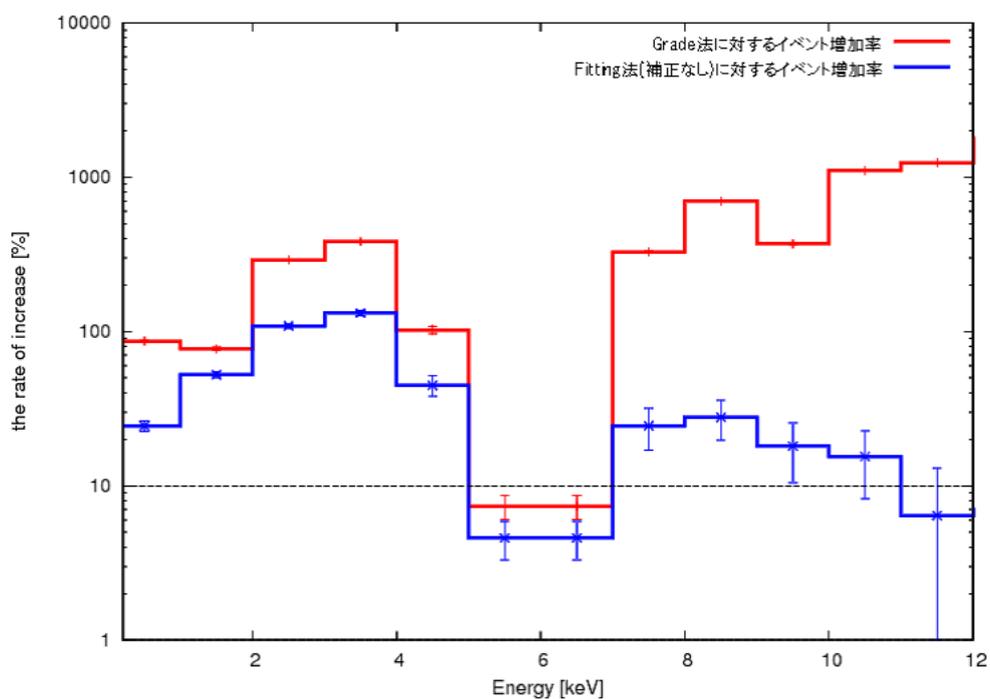


図 62: 中性領域で吸収されたイベントも含めた場合のイベント増加率を、1keV 毎に示したもの (E0102-72)

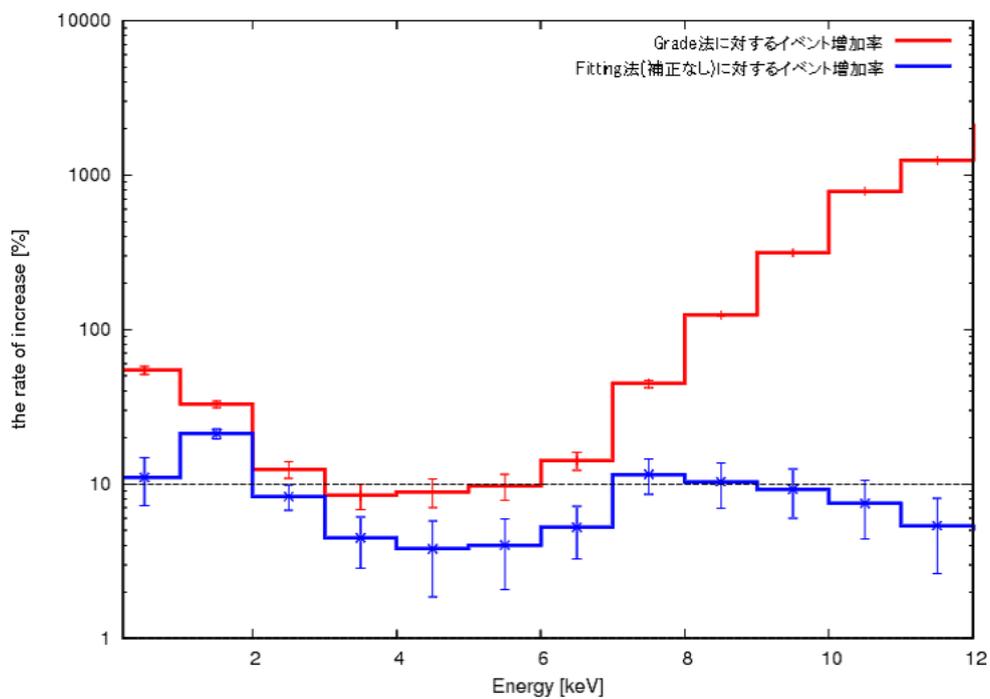


図 63: 中性領域で吸収されたイベントも含めた場合のイベント増加率を、1keV 毎に示したもの (GC SOUTH)

次に、エネルギー分解能を表 10, 11 に示す。表 10 が E0102-72、表 11 が GC SOUTH についてのものである。

表 10: 中性領域で吸収されたイベントも含めた場合のエネルギー分解能の変化 (E0102-72)

エネルギー [keV]	Grade 法 [%]	Fitting 法 (補正なし)[%]	Fitting 法 (補正あり)[%]
0.57	$4.83 \pm 1.85$	$17.3 \pm 8.56$	$21.1 \pm 41.2$
0.65	$6.04 \pm 0.411$	$7.01 \pm 0.606$	$8.86 \pm 2.32$
5.9	$2.38 \pm 0.0173$	$2.35 \pm 0.0159$	$2.38 \pm 0.0229$
6.5	$2.32 \pm 0.0314$	$2.32 \pm 0.0408$	$2.39 \pm 0.0457$

表 11: 中性領域で吸収されたイベントも含めた場合のエネルギー分解能の変化 (GC SOUTH)

エネルギー [keV]	Grade 法 [%]	Fitting 法 (補正なし)[%]	Fitting 法 (補正あり)[%]
2.45	$3.86 \pm 0.258$	$3.68 \pm 0.271$	$3.59 \pm 0.257$
3.13	$2.84 \pm 0.367$	$3.53 \pm 0.417$	$3.38 \pm 0.360$
5.9	$2.76 \pm 0.0957$	$2.82 \pm 0.125$	$3.05 \pm 0.105$
6.5	$6.62 \pm 0.272$	$4.77 \pm 0.231$	$5.93 \pm 0.208$

結果を見てみると、分解能は若干悪くなっているが、その分イベント増加率は高くなっている。また、分解能の悪化もそれほど大きなものではないので、今後の Fitting 法の改良において中性領域で吸収されたイベントの救出を考えることは十分に意味のあることだと言えよう。特に、これは Grade 法では決してできないことなので、もしできるようになれば Fitting 法の大きな利点になるだろう。ただ、そのためにはパラメータを正しく求めることが必要である。また、今回はパラメータを定数としたが、実際にはエネルギー依存性を持つと思われるので、その点も考慮する必要があるだろう。

## A Gaussian の形の決定

ROOT の特徴を考慮しながら Fitting 法で用いる Gaussian の形について考える。決定する必要があるのは以下の値である。

- ・入射 X 線のエネルギーを見積もるためのイベントの電荷量を表す値
- ・パラメータ
- ・初期値

その際、次の条件を考慮する必要がある。

- ・計算にあまり時間がかからないこと
- ・より正確なイベントの電荷量を求められること

まず、「fitting で得られた値がイベントの正確な電荷量を示している」ということをどのように確認するかという問題がある。5.9keV と 6.5keV の輝線によるイベントしかない cal source のデータから 5.9keV の X 線によるイベントだけを抜き出して fitting する。得られた値のうちイベントの電荷量を表すと期待される値を横軸に、分散を縦軸にプロットしてみる。もし x 軸の値が正確な電荷量を表していれば、単一エネルギーの X 線によるイベントを用いているので、様々な電子雲の広がりを持つイベントが存在するものの、電荷量を表す横軸方向の広がりはずら減るはずである。よってこの広がりが最も小さかった値を電荷量を表す値として用いることにする。

### イベントの電荷量を表す値

前にも示しているように、Fitting 法では波高値が電子数に対応するので波高値からイベントの電荷量つまりは X 線のエネルギーを見積もる。つまり入射 X 線のエネルギーの値を求めるためにはイベント全体の電荷量を求める必要があり、これは Gaussian の体積から求められるはずである。しかしすべてのイベントに対して数値積分を実行すると計算時間がかかってしまうので、解析解である

$$V = 2\pi \times a \times d^2 \quad (39)$$

を利用して Gaussian の体積を求めてみる。

まずはパラメータ 4 つで、すべてフリーパラメータの Gaussian を fit させた。

$$G(x, y) = A \times \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (40)$$

ここで初期値は、A が中心ピクセルの波高値、 $(x_0, y_0)$  が  $(0, 0)$ 、 $\sigma$  が 0.4 である。この 0.4 という初期値は様々な Fitting を通して X 線イベントと非 X 線イベントの境界となる目安の値と予想できたので、初期値によってどちらかになりやすい傾向がでないようにこの境界の値を初期値として利用することにした。

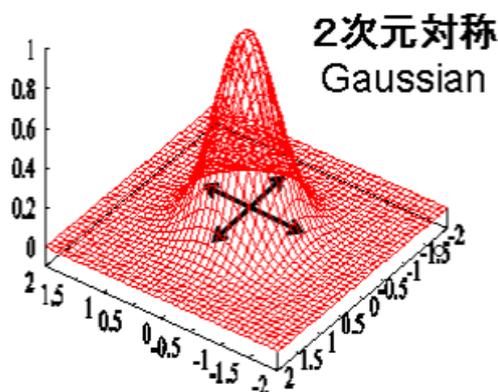


図 64: Gaussian

この結果を横軸に体積、縦軸に分散でプロットしてみる(図 65 の (1) のデータ)。これは 5.9keV の輝線によるイベントだけを抽出したデータであるにもかかわらず、Gaussian の体積は横軸方向に広く分布していて、この値からでは X 線のエネルギーを見積もることができないと分かる。25 点だけの離散的なデータに Gaussian を fit しているのに単純に体積を用いたのでは正確な電荷量は得られないためだと考えられる。よって、X 線のエネルギーを見積もる値の候補として横軸を fit した Gaussian のピクセル中心での波高値の和(図 65 の (2))、25 ピクセルの波高値のデータと(図 65 の (3))、Gaussian の高さ (A の値)(図 65 の (4))にしてプロットしてみた。

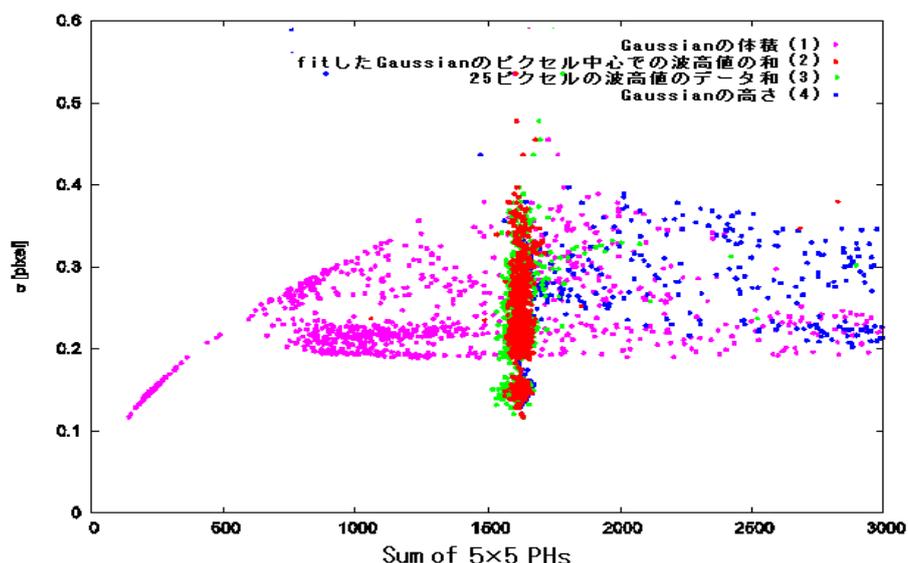


図 65: イベント波高値の決定

fit した Gaussian のピクセル中心での波高値の和 (2) を横軸にとった時、様々な電子雲の広がりをもつイベントがあるにもかかわらず波高値の和の値はある一定の範囲内に収まっている。これより「fit した Gaussian のピクセル中心での波高値の和」からエネルギーを見積もることとし、本文中では「イベントの合計波高値」と呼ぶことにしている。

25 ピクセルの波高値のデータと (3) を用いると、ある一定の範囲内に収まっていてよく電荷量を表しているように思われるが、一部電荷量が高く出ているイベントがある。これは 1 番外側のピクセルに隣のイベントの電子雲の一部が洩れこんでいるようなイベントの場合に、データとを用いるとこの洩れこんできた電荷量もこのイベントの電荷量として加えられてしまうためと考えられる。

Gaussian の高さ (4) を横軸にプロットした場合、横軸方向に広く分布してしまっている。ROOT では(図 66) のように各ピクセル中心でのデータの値が保存するような fitting をするため、中心値が (0,0) からずれた場合には高さがかかなり大きく出てしまい、電子雲の広がりによって大きく値が変わってしまう傾向にあることが分かった。このことから「fit した Gaussian のピクセル中心での波高値の和」を用いるのが適当であると考えられる。

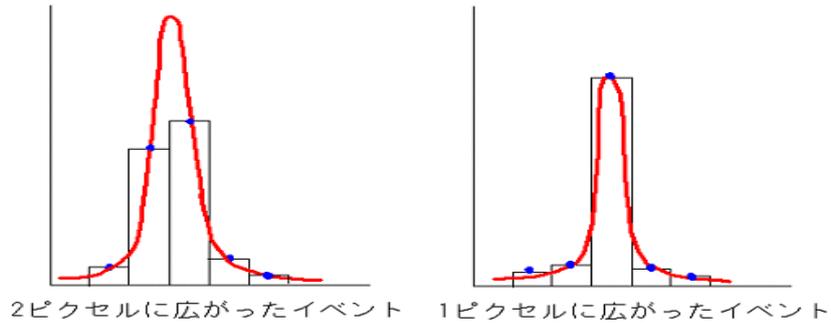


図 66: ROOT による Fitting

### Gaussian の形

次に fit する Gaussian の形を考える。対称性と定数項、Gaussian の中心値について以下のような関数を考えた。

対称性	定数項	中心値
対称	定数項なし	(0,0) に固定
非対称 (2 方向)	制限をつける	平均値
	フリー	二段階 Fitting
		フリー

#### 対称性について

あまり広がっていないイベントでもその広がりに一方向性があれば宇宙線等によるものと考えられるので、これを評価するためには非対称な Gaussian を用いる必要がある。しかし非対称な Gaussian はパラメータが多く式も複雑になるので、25 点の離散的なデータへの fitting はうまくいかない。よって中でも比較的式が簡単な分散が  $x, y$  の 2 方向で異なる関数をフィットさせてみた。しかし一方向性のあるデータにフィットさせると広がりのない方向での分散が異常に小さくなってしまい電子雲の広がりを正確に表しているとはいえないイベントがみられ、適切な X 線判定条件を考えることができなかった。

#### 定数項について

X 線が入射していないピクセルの波高値は 0 のはずだが、ダークレベル等の補正でピクセルによっては波高値が 0 でないものや、負のものも存在する。補正の効果を正確に表現するには Gaussian に定数項を加えた方がいいのではないかと考えた。

よってフリーパラメータとして定数項を組み込むと、図のようなバックグラウンドと思われるイベントを広がりの小さな X 線として分類してしまった。つまり定数項をつけるのであればある程度制限を加える必要がある。

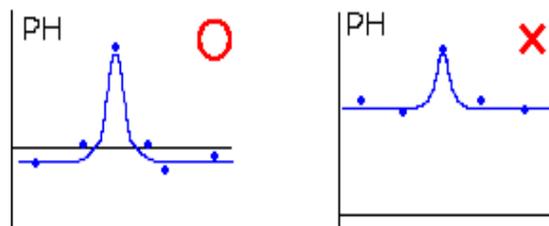


図 67: 定数項

2 × 2 ピクセルまでに広がるイベントのデータに fitting を行った結果をみると定数項は 1 番波高値の高い中心ピクセルの 1% までに収まっていたのでこれを上限として制限を加えることにした。この制限のもとで fitting してみると、わずかではあるが定数項を加えなかった場合に比べてばらつきが大きいくことが分かる。さらにイベントの合計波高がマイナスになるイベントが現れていることも分かった。定数項は 0 ~ -2 程度のイベントが多く、広がりが 1 ピクセル程度のイベントでは波高値が負のピクセルが効いて合計波高値が負になってしまうのである。そこでこの影響を抑えるために、X 線は 3 × 3 ピクセル以内には収まることを利用して、イベントの合計波高値として 3 × 3 ピクセルのみの和を用いてみた。すると合計波高値が負になっていたイベントをほぼ救い出すことができたが、中心がずれるイベントもあるので、すべてのイベントで同じ条件でこの値を計算するのは難しい。以上の結果から、定数項は考えない方が正確な電荷量が求められそうである。

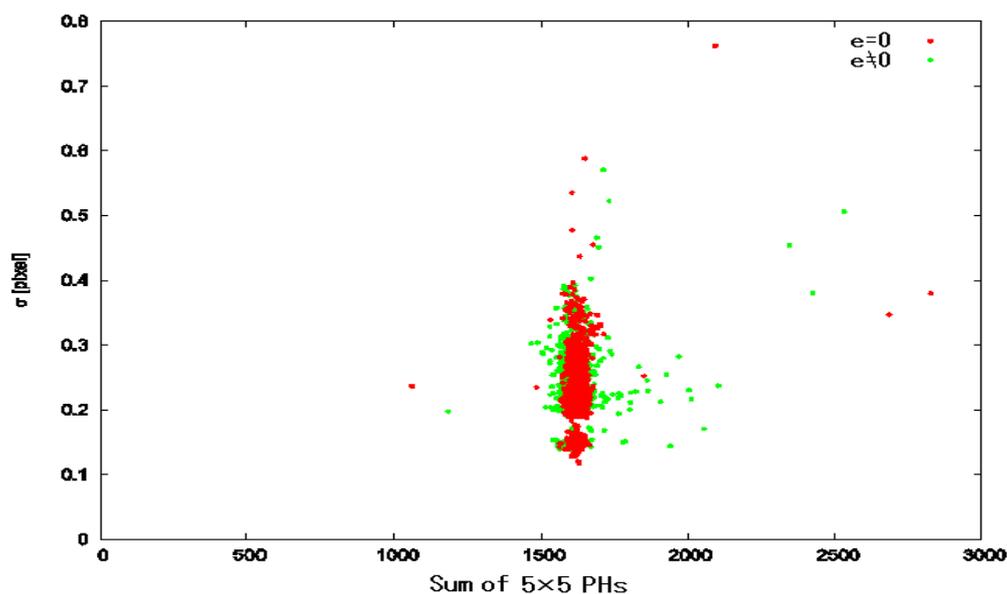


図 68: 定数項の有無

### Gaussian の中心値について

もし中心値を固定することができれば計算時間をかなり短くすることができるはずである。

まず中心のピクセルの波高値が  $5 \times 5$  ピクセルの中で 1 番大きいから、 $(x_0, y_0)$  を  $(0,0)$  に固定してみる。

しかし、これではイベントが 2 ピクセルに広がる場合などでガウシアンがうまく Fit できない。

次に  $(x_0, y_0)$  を 25 ピクセルの波高値による重みをつけた平均に固定してみる。

これなら電子雲の広がり解析的な中心を決定できるはずである。しかしこの方法では隣のイベントの電子雲が洩れこんで外側に波高値の高いピクセルがある場合に、計算した中心値が図中の印のあたりにきてしまって Gaussian が fit できなくなる場合があることが分かった。これでは 1 イベントを抜き出すことができない。

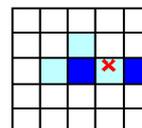


図 69: 平均値

最後に二段階 Fitting も試してみた。

まずは A をピクセルの中心値で固定して分散と  $(x_0, y_0)$  をパラメータとして fit し、そこで得られた  $(x_0, y_0)$  を固定して再び A と分散をパラメータとして fit するというものである。前にも示したように ROOT では Gaussian の高さを表す A の値がかなり大きくなる場合がある。しかしこの方法を用いれば、A の値は中心ピクセルの波高値程度の値にある程度抑えられ、解析的な体積の計算で電荷量を表すことができる可能性があると考えられる。

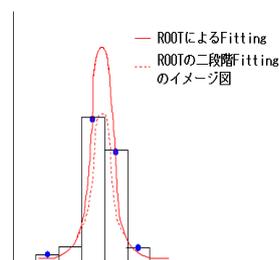


図 70: 二段階 Fitting のイメージ

二段階 Fitting で多くのイベントは A の値が中心ピクセルの波高値程度に抑えられた。しかし計算に 2 倍以上時間がかかり、解析的な体積の値も広く分布してしまった。よって、 $(x_0, y_0)$  も fitting で決定することにした。

参考までに中心値を  $(0,0)$  に固定した場合 (図 71 の (1))、重みをつけた平均に固定した場合 (図 71 の (2))、二段階 Fitting で決めた場合 (図 71 の (3))、フリーパラメータで決めた場合 (図 71 の (4)) の、横軸にイベントの合計波高値、縦軸に分散をプロットしたグラフを示しておく。やはりフリーパラメータで決定したものが 1 番まとまっていることが分かる。

3 つの条件について様々な組み合わせの関数で fitting を試してみたが、最終的に 1 番シンプルな制限なしのパラメータ 4 つの対称 2 次元 Gaussian を用いた場合が 1 番正確に電荷量を表していることがわかった。連続的なデータがない分、シンプルな Gaussian が 1 番 fit させやすいようである。最終的な計算時間は 10000 イベントにつき 2 分程度であった。

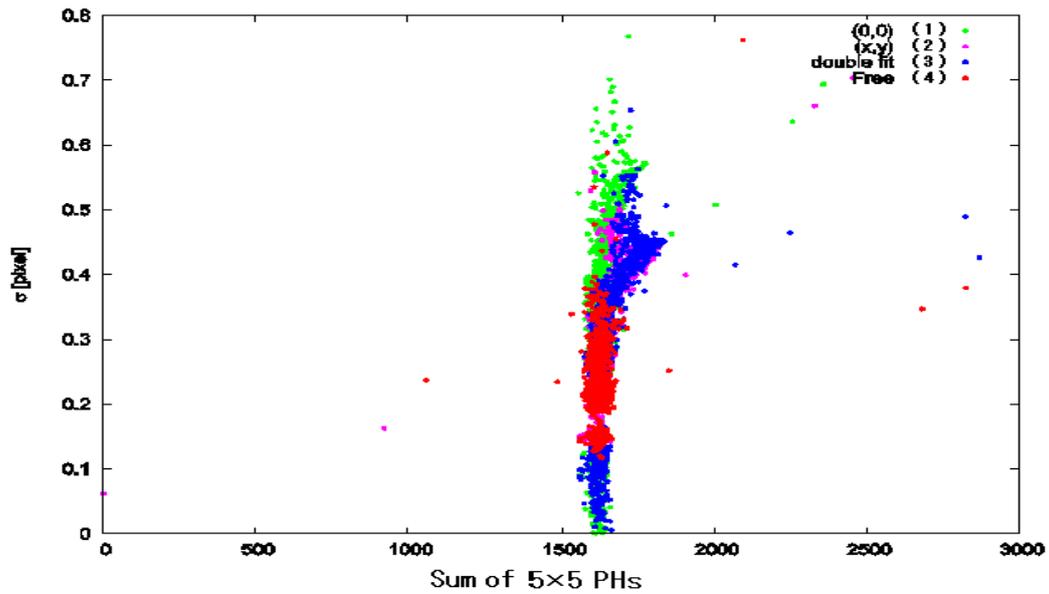


図 71: 中心値の決定方法

### プログラム

補正、スクリーニングをしたイベントファイルを以下のようなデータファイルに変形する。5×5 ピクセルの位置を  $x$ 、 $y$  座標に (図 8) のようにプロットするので、データファイルには ( $x$  座標)、( $y$  座標)、(ピクセルの波高値) というよう出力させている。

```

0 0 1357.270058
-1 -1 -6.000000
0 -1 3.243642
1 -1 1.020768
-1 0 4.139368
1 0 269.467322
-1 1 -4.000000
0 1 -2.189142
1 1 0.000000
-2 -2 3.043130
-1 -2 -3.000000
0 -2 2.032635
1 -2 7.077264
2 -2 0.000000
-2 -1 2.033440
2 -1 0.000000
-2 0 3.045259
2 0 7.081073
-2 1 1.021775

```

```

2 1 -5.000000
-2 2 5.067355
-1 2 -1.000000
0 2 7.084901
1 2 5.067355
2 2 0.000000      (1 イベント分のデータ)

```

```

0 0 1598.437279
-1 -1 -1.000000
0 -1 -3.000000
1 -1 0.000000
-1 0 -4.000000
1 0 -2.804714
-1 1 3.005115
0 1 2.268315
:
:
```

このデータファイルを用いて、以下のプログラムを ROOT 内で使用した。

```

{
  TCanvas c1("name", "title");

  int index;
  long count = 0;
  double x,y,z[25],a,f,F,A,B,C,D;
  double pi = 4*atan(1.0);
  int k,j,dx=1,dy=1;
  double Vsum,Vkj,Vseki;
  ifstream data("(データファイル名)");
  ofstream fout("(出力ファイル名)");

  while(1){
    index = 0;
    f=0;
    if (data.eof()) break;
    count++;
    cout<< count <<"\n";
    TGraph2D *g1 = new TGraph2D();
    TF2 *f1 = new TF2("f1","[0]*exp(-((x-[1])**2+(y-[2])**2)/(2*[3]**2))",-2,2,-2,2);

```

```

while ((index<25) && (data >> x >> y >>z[index])) {
    a = z[0];
    g1->SetPoint(index, x, y, z[index]);
    F = f+z[index];
    f = F;
    index++;
}

f1.SetParameters(a,0,0,0.4);
g1.Fit("f1");
A=f1.GetParameter(0);
B=f1.GetParameter(1);
C=f1.GetParameter(2);
D=fabs(f1.GetParameter(3));

Vsum = 0;
for(k=(-2/dx); k<=(2/dx); k++) {
    for(j=(-2/dy); j<=(2/dy); j++) {
        Vkj=dx*dy*A*exp(-(pow((k*dx-B),2.0)+pow((j*dy-C),2.0))/(2*pow(D,2.0)));
        Vsum = Vsum + Vkj;
    }
}
Vseki=2*pi*A*D**2;

fout<< count <<"\t";
fout<< a <<"\t";
fout<< A <<"\t";
fout<< B <<"\t";
fout<< C <<"\t";
fout<< D <<"\t";
fout<< F <<"\t";
fout<< Vseki <<"\t";
fout<< Vsum <<"\n";

delete f1;
delete g1;
}

data.close();
fout.close();
}

```

## B プログラムによる Fitting

今回の解析では、ROOT を利用して Fitting 法を行ったが、これとは別に自作のプログラムでも Fitting 法を行ってみたので、その結果について簡単に記しておく。

### B.1 自作プログラムの原理

作ったプログラムは、最小二乗法を用いて最適なパラメータを求めるプログラムである。まず、このプログラムの原理について説明する。

fit させる Gaussian を  $A \exp \left\{ \frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{2\sigma^2} \right\}$  としたときの、誤差の二乗和 (41) を考える。ただし、 $(x_i, y_j)$  ( $i, j = -2, -1, 0, 1, 2$ ) はピクセル中心の座標、 $z_{i,j}$  はそのピクセルの波高値である。

$$L(A, x_0, y_0, \sigma) = \sum_{i,j=-2}^2 \left[ z_{i,j} - A \exp \left\{ \frac{(x_i - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2}{2\sigma^2} \right\} \right]^2 \quad (41)$$

この誤差の二乗和が各パラメータについて下に凸な関数であると仮定し、これを最小にする値を求める。例えばパラメータ  $A$  について考えると、パラメータ  $A$  を  $\delta A$  だけ動かした時、誤差の二乗和は  $\delta L = L(A + \delta A, x_0, y_0, \sigma) - L(A, x_0, y_0, \sigma)$  だけ変化する。この  $\delta L$  が正の場合はパラメータを小さくしていき、負の場合はパラメータを大きくしていく。そして、 $\delta L$  の符号が変化したところで、パラメータを動かすのをやめ、その時のパラメータの値を最適値とするのである (図 72 参照)。

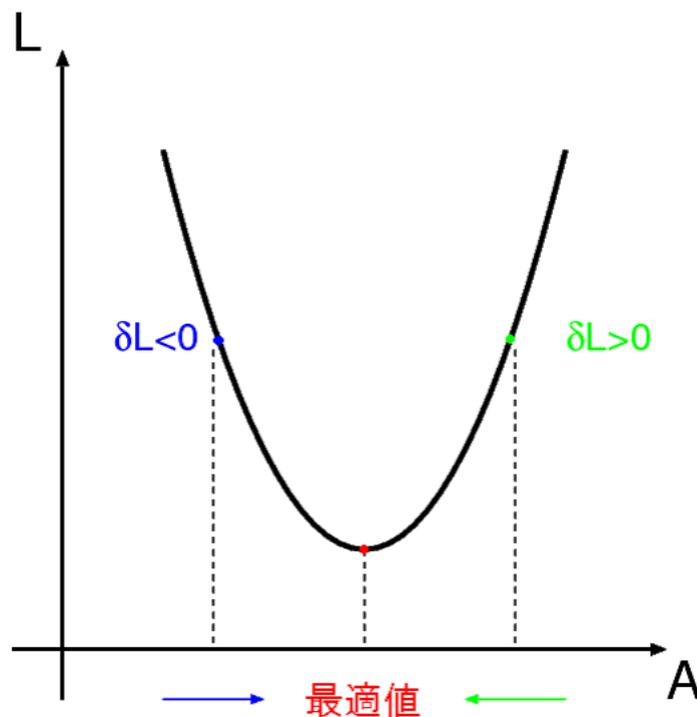


図 72: パラメータの最適値の求め方

以上の作業を、 $x_0 \rightarrow y_0 \rightarrow A \rightarrow \sigma$ の順に行い、各パラメータの最適値を求めた。なお、パラメータの初期値、動かす幅、動かす範囲は表 12 のようにした。

表 12: パラメータに関する諸量 (自作プログラム)

パラメータ	初期値	動かす幅	動かす下限	動かす上限
$A$	中心ピクセルの波高値	1.0	0.0	中心ピクセルの波高値の 10 倍
$x_0$ [pixel]	0	0.1	-2.5	2.5
$y_0$ [pixel]	0	0.1	-2.5	2.5
$\sigma$ [pixel]	0.4	0.001	0.0	5.0

## B.2 結果

E0102-72 を xis0 で観測したデータを自作のプログラムで fitting し、得られたエネルギーを横軸、分散を縦軸にしてプロットしたものが、図 73 である。5.9keV,6.5keV の X 線を表す「縦線」が、高エネルギー側に曲がってしまっており、X 線のエネルギーを正しく評価できていないことがわかる。

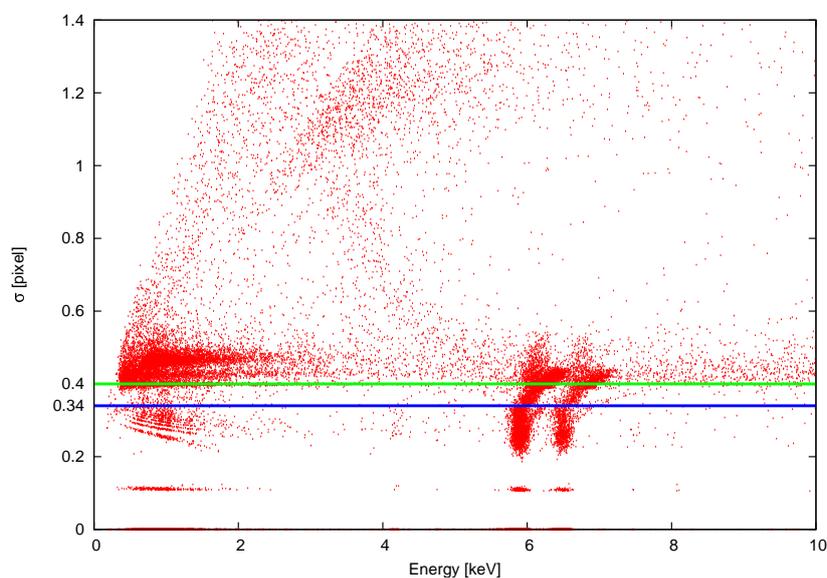


図 73: 自作プログラムでの fitting 結果

今回の場合、エネルギー依存性のある X 線判定条件を考えるのは難しいので、X 線判定条件を定数としてスペクトルを作った。 $\sigma < 0.40$  (図 73 の緑色の線より下) のイベントから作ったスペクトルを図 74 に示す。赤線が自作プログラムによる Fitting 法、緑線が Grade 法のスペクトルである。また、このスペクトルの低エネルギー側 (0.4keV ~ 2keV) の拡大図を図 75 に、高エネルギー側 (5keV ~ 8keV) の拡大図を図 76 に示す。図 73 において 5.9keV,6.5keV の X 線を表す「縦線」が曲がってしまっていたことから予想できたことだが、これらの X 線のピークが崩れてしまっている。ただし、低エネルギー側のスペクトルは

Grade 法とほぼ同じスペクトルを再現できており、エネルギー分解能もあまり大きくは変わらない。イベント数も、0.4keV~2keV の範囲で、Grade 法に対して 5.466%増加している。

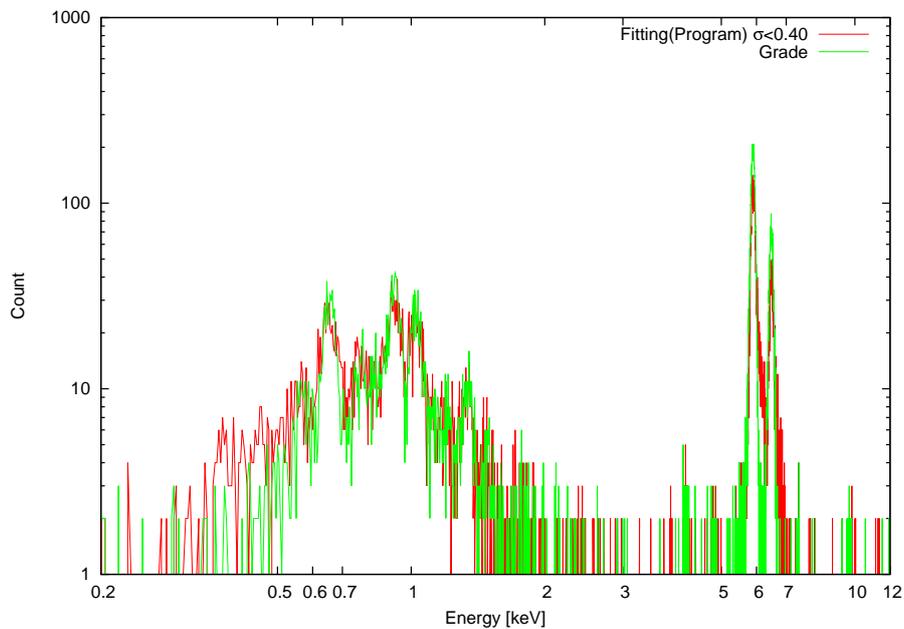


図 74: 自作プログラムで作った E0102-72(FI) のスペクトル

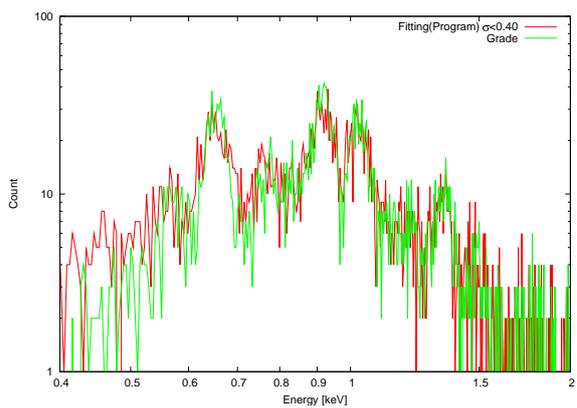


図 75: 低エネルギー側拡大図 ( $\sigma < 0.40$ )

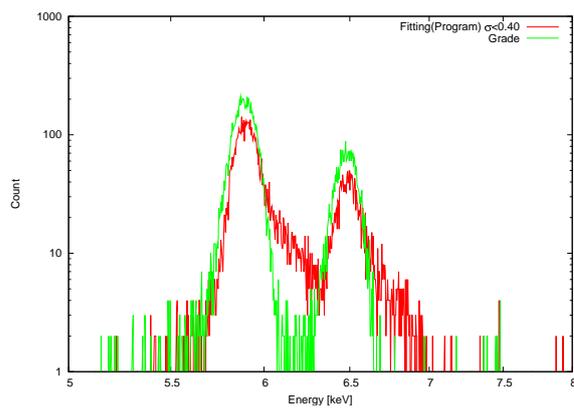


図 76: 高エネルギー側拡大図 ( $\sigma < 0.40$ )

なお、 $\sigma < 0.34$ (図 73 の青線より下) の、エネルギーが正しく評価できているイベントだけを用いて作ったスペクトルは図 77 のようになる。青線が自作プログラムによる Fitting 法、緑線が Grade 法のスペクトルである。低エネルギー側の拡大図は図 78、高エネルギー側の拡大図は図 79 である。この場合は、高エネルギー側でもピークの形が崩れていないものの、イベント数がかなり減少してしまった(5keV~7keV で Grade 法に対して 39.42%の減少)。以上のように、自作プログラムには、高エネルギー領域を正しく評価できないという問題が残ってしまった。

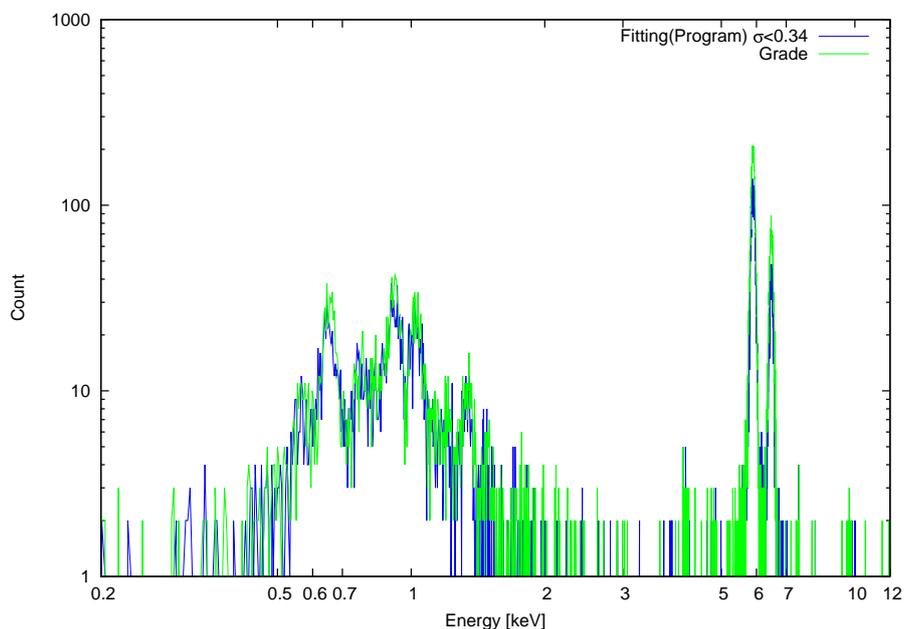


図 77: エネルギーが正しく評価できているイベントだけで作ったスペクトル

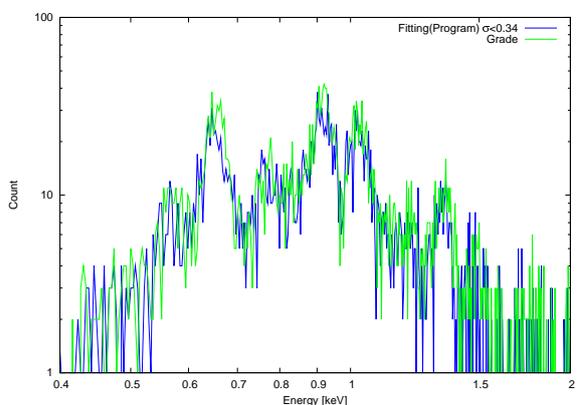


図 78: 低エネルギー側拡大図 ( $\sigma < 0.34$ )

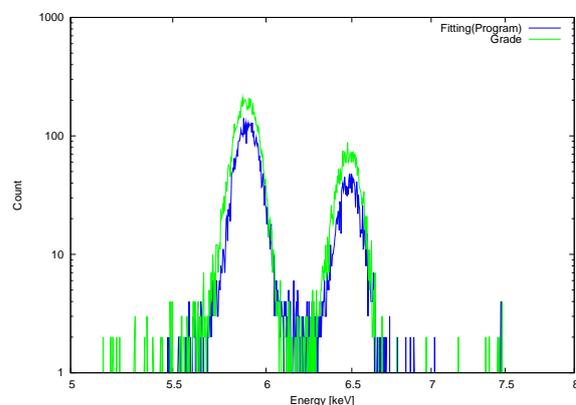


図 79: 高エネルギー側拡大図 ( $\sigma < 0.34$ )

### B.3 計算時間

今回利用した四つのデータを fitting するのに要した時間を、ROOT と自作プログラムのそれぞれについて表 13 にまとめておく。平均計算時間は、ROOT が 64.59 [イベント/秒]、自作プログラムが 267.6 [イベント/秒] となった。ただし、これはあくまでも目安であり、実際は fit するデータの内容によってかなり増減し得るものである。

表 13: Fitting 法の計算時間

天体データ	全イベント数	ROOT	自作プログラム
GC SOUTH(FI)	97931	22 分 16 秒	4 分 41 秒
E0102-72(FI)	213110	52 分 11 秒	18 分 51 秒
GC SOUTH(BI)	135956	35 分 47 秒	5 分 39 秒
E0102-72(BI)	42743	16 分 8 秒	1 分 19 秒

### 参考文献

- [1] 村上弘志, 修士論文 (京都大学 1999)
- [2] 河野誠, 修士論文 (京都大学 2001)
- [3] 山口弘悦, 修士論文 (京都大学 2005)
- [4] 「すざく」ファーストステップガイド 第 4.0.1 版 (Process Version 2.1-2.3) (2008)
- [5] Astro-E2 XIS Science FITS 確認書 (2005)

### 謝辞

今回の課題研究を進めるにあたり、宇宙線研究室の皆様から多くの助言や協力を頂きました。特に、指導教官である助教の松本先生には本当にお世話になりました。解析が行き詰った時にはいつも適切なアドバイスを頂き、そのおかげでなんとか結果をまとめることができました。また、TA の劉さんにご自身の研究が忙しいにも関わらず毎回実験室に足を運んで下さり、解析の進め方から発表の仕方まで全てに渡って御指導頂きました。劉さんがいらっしゃらなかったら、解析をここまで進めることはできなかったと思います。

最後に、P6 メンバーとして共にゼミや実験を行った、石神君、今野君、澤野君、福間君、義川君にもお礼を言いたいと思います。皆さんとの議論のおかげで、物理や実験に対する理解を深めることができました。今回の課題研究を最後までやり遂げることができたのも、皆さんと励ましあえたからだと思っています。本当にありがとうございました。