

ASTRO-H 搭載コンプトンカメラの基礎特性評価と  
Multi Hit イベント解析

広島大学大学院 理学研究科 物理科学専攻  
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

M123901

中村 竜

主査: 深澤 泰司 副査: 両角 卓也

日付:2014/2/10

## 概要

2015年打上げ予定のASTRO-H衛星は日本で6番目の国際X線科学衛星である。ASTRO-Hは次の4つを目標に掲げている。1. 宇宙の大規模構造とその進化を解明 2. 宇宙の極限状態の理解 3. 非熱的エネルギーの解明 4. ダークマター・ダークエネルギーの解明。これらの観測の為に4つの検出器を搭載するが、その中でも最も高エネルギー帯域を担う検出器が軟ガンマ線検出器(SGD)である。SGDでは、我が国独自のコンセプト狭視野多層半導体コンプトンカメラを採用している。SGDの構成はSi/CdTe多層半導体センサー(CC)、リン青銅ファインコリメータ(FC)、BGOアクティブシールド(BGO)、CC1台につきSi半導体センサー32層、CdTe半導体センサー8層、さらに四方を囲む様にCdTe-Pad半導体センサーが $2 \times 4$ 層設置されている。CCの検出原理はコンプトン運動学を用いて光子の到来方向を強く制限し、バックグラウンド除去を行う。また、FCにて視野外からの光子を制限し、BGOでもCCとの反同時係数を取る事で2重のバックグラウンドを除去を行う。これらの技術により、現在運用中の'すざく'衛星搭載HXDより一桁良い感度での観測を目指す。2012年12月に初めて完成した衛星搭載品と同等のフル構成のCC(Full EM CC)に対して、長期動作試験及び熱真空試験を行った。衛星をいったん打ち上げると直接修理などを行う事ができない。このためFull EM CCが長時間安定して動作する事を確認するために長期動作試験を、また、衛星軌道上の環境でFull EM CCが正常に動作するか検証する為に熱真空試験をそれぞれ行った。これらの試験で正常CCが正常に動作している事やエネルギー分解能などの基礎特性が要求を満たしている事を確かめる事は非常に重要となる。本研究では特に長期動作試験と熱真空試験において、基礎特性にあたるエネルギー分解能及びライブタイム、スレッシュホールドの評価や同時に複数箇所で信号を検出しているMulti Hitイベントの解析を行った。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>概要</b>	<b>7</b>
1.1	ASTRO-H 衛星	7
1.2	軟ガンマ検出器 (SGD)	7
1.3	コンプトンカメラ	8
1.3.1	光電吸収とコンプトン散乱	8
1.3.2	コンプトン再構成とイメージング	10
1.3.3	角度分解能	11
1.3.4	COMPTEL 検出器	12
1.3.5	SGD 用狭視野多層半導体検出器	12
1.3.6	SGD のデータ処理系	19
<b>第 2 章</b>	<b>コンプトンカメラデータ解析手順</b>	<b>20</b>
2.1	データ形式	20
2.1.1	rawdata	20
2.1.2	イベントツリー、ヒットツリー	21
2.2	イベントデータ処理	21
2.2.1	ベDESTAL補正	21
2.2.2	コモンモードノイズ除去	23
2.2.3	エネルギー較正	23
2.3	バックプロジェクション	25
2.3.1	ヒットパターン	26
2.3.2	バックグラウンド	27
<b>第 3 章</b>	<b>データ解析</b>	<b>29</b>
3.1	ノイズレベル	30
3.2	スペクトル	32
3.2.1	スレッシュヨルド	36
3.3	ライブタイム	38
3.4	マルチヒットイベント	40
3.5	バックプロジェクション	49
<b>第 4 章</b>	<b>まとめと今後</b>	<b>52</b>
	付録 A スペクトル一覧	54

# 目次

1.1	ASTRO-H[1]	8
1.2	ASTRO-Hの観測エネルギー範囲 [13]	8
1.3	SGD 概念図 [5]	9
1.4	Siの反応断面積 [8]	9
1.5	CdTeの反応断面積 [8]	9
1.6	コンプトン散乱の微分断面積の極座標表示 [6]	10
1.7	コンプトン再構成の概念図 [1]	11
1.8	コンプトンコーン [2]	11
1.9	ARM[2]	12
1.10	COMPTEL 検出器概念図 [17]	13
1.11	CC 検出器位置関係の概略図 [1]	14
1.12	Si-Pad 写真 [18]	15
1.13	Si-Pad 検出器構造 [5]	15
1.14	Si-Pad のガードリング概念図	15
1.15	CdTe-Pad 写真 [9]	16
1.16	データ処理の流れ [3]	17
1.17	VATA450.3のタイミングチャート [3]	17
1.18	データ処理の流れ。矢印は信号の流れ。	19
2.1	左図: 1段階目で作成した構成曲線。右図: 1段階目の構成曲線を使用して作成したスペクトル [1]	23
2.2	左図: 2段階目で作成した較正曲線。右図: 1段階目の較正曲線を使用して作成したスペクトル [1]	24
2.3	左図: 3段階目で作成した較正曲線。右図: 1段階目の較正曲線を使用して作成したスペクトル [1]	25
2.4	$^{137}\text{Cs}(662\text{keV})$ の平面へのバックプロジェクションイメージ	26
2.5	$^{137}\text{Cs}(662\text{keV})$ の天球へのバックプロジェクションイメージ [1]	26
2.6	コンプトンカメラで考えられるヒットパターン例	26
2.7	荷電粒子の電離によるエネルギー損失 [15]	28
3.1	Full EM コンプトンカメラの写真 [1]	30
3.2	長期動作試験セットアップ [1]	30
3.3	内在バックグラウンド測定セットアップ [1]	30

3.4	熱真空試験のセットアップ	31
3.5	左図:1チャンネルのペDESTALスペクトル。右図:全13312チャンネルのノイズレベル。著しく悪くなっているチャンネルはない。どちらも熱真空試験時のデータ	31
3.6	熱真空試験において <sup>241</sup> Amを照射した際のある1ピクセルのスペクトル	32
3.7	Si-Padの配線図[5]	33
3.8	熱真空試験において <sup>241</sup> Amを照射した際の分解能マップ。Siの1番上の左図の青枠で囲まれたチャンネル	33
3.9	低温動作試験において <sup>137</sup> Csを照射し取得した際のスペクトル。赤がCdTeでトリガがかった光電吸収イベントのスペクトル、青がSiでトリガがかった光電吸収イベントのスペクトル	34
3.10	低温動作試験において <sup>137</sup> Csを照射した際のSi-CdTe2ヒットイベントのスペクトル	34
3.11	低温動作試験において <sup>22</sup> Naを照射した際のSi-CdTe2ヒットイベントのスペクトル	34
3.12	<sup>137</sup> Csの2次元プロット。横軸はCdTeのデポジットエネルギー、縦軸はSiのデポジットエネルギー	35
3.13	<sup>22</sup> Naの2次元プロット。横軸はCdTeのデポジットエネルギー、縦軸はSiのデポジットエネルギー	35
3.14	低温動作試験において <sup>137</sup> Csを照射した際のSi-CdTe-CdTe3ヒットイベントのスペクトル	35
3.15	低温動作試験において <sup>22</sup> Naを照射した際のSi-CdTe-CdTe3ヒットイベントのスペクトル	35
3.16	低温動作試験において <sup>137</sup> Csを照射して際のCdTeスペクトル。分解能8.93keV	36
3.17	低温動作試験に置いて <sup>137</sup> Csを照射して際の2hitスペクトル	36
3.18	低温動作試験において <sup>137</sup> Csを照射して際の3hitスペクトル	37
3.19	熱真空試験において <sup>241</sup> Amを照射した際の2次元ヒストグラム。横軸チャンネル、縦軸エネルギー。スレッシュホールドは6keV。60keVはCdTe層までほとんど届かないためSiのみ表示している。	38
3.20	熱真空試験において <sup>241</sup> Amを照射した際の2次元ヒストグラム。横軸チャンネル、縦軸エネルギー。スレッシュホールドは6keV。0chから63chまでを拡大している。60keVはCdTe層までほとんど届かないためSiのみ表示している。	38
3.21	熱真空試験において <sup>137</sup> Csを照射した際の2次元ヒストグラム。横軸ASICの番号、縦軸エネルギー[MeV]。スレッシュホールド6keVを達成している。CdTeのみトリガをかける設定のためCdTeのみ表示している。	38
3.22	事象間隔分布関数	39
3.23	熱真空試験において <sup>137</sup> Csのライブタイム。横軸はイベント間の時間で単位は320nsec、縦軸はカウント	40
3.24	熱真空試験において <sup>133</sup> Baのライブタイム。横軸はイベント間の時間で単位は320nsec、縦軸はカウント	40
3.25	ヒット回数ヒストグラム。線の色はそれぞれ、黄緑が <sup>133</sup> Cs、マゼンダが <sup>60</sup> Co、水色がLowgain設定時のバックグラウンドデータ	41
3.26	ヒット回数ヒストグラム。線の色はそれぞれ、水色がバックグラウンドデータ、黒が内在バックグラウンド取得データ	41
3.27	ヒット回数分布。 <sup>137</sup> Csを照射した際のデータ	42

3.28	長期動作試験において $^{133}\text{Ba}$ の 2Hit スペクトル。青が Si-Si-Si ヒット、マゼンダが Si-CdTe ヒット、水色が CdTe-CdTe ヒット。 . . . . .	42
3.29	長期動作試験において $^{133}\text{Ba}$ の 3Hit スペクトル。青が Si-Si-Si ヒット、黄緑が Si-Si-CdTe ヒット、マゼンダが Si-CdTe-CdTe ヒット、水色が CdTe-CdTe-CdTe ヒット。 . . . . .	42
3.30	$^{133}\text{Ba}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、 $^{133}\text{Cs}$ の各パターンの線源ピークイベントの到来比率 . . . . .	43
3.31	信号を出しているピクセル位置のプロット。 $^{137}\text{Cs}$ 照射時のデータの totalhit2 ヒットイベント。合計エネルギー 662keV で線源由来のイベントと考えられる . . . . .	44
3.32	信号を出しているピクセル位置のプロット。長期動作試験時の $^{137}\text{Cs}$ データの totalhit が 12。宇宙線イベントと考えられる。単位は mm でコンプトンカメラの空間を示す。 . . . . .	44
3.33	内在バックグラウンド試験において $^{137}\text{Cs}$ を照射した際の totalhit が 40 のイベントピクセル位置のプロット。キャンパスはコンプトンカメラの空間を表している。宇宙線プロットと考えられる。eventid が 178397。 . . . . .	45
3.34	3.33 における 1 ピクセルごとのデポジットエネルギーと z 軸座標の関係。eventid が 178397。totalhit が 40 のイベント . . . . .	46
3.35	1648 回ヒットイベントの信号を出しているピクセルの 3 次元プロット . . . . .	46
3.36	1648 回ヒットイベントの z 軸 (高さ) に対するカウントのヒストグラム . . . . .	46
3.37	図 3.33 における 1 ピクセルごとのデポジットエネルギーのヒストグラム。eventid が 178397。totalhit が 40 のイベント . . . . .	47
3.38	ヒット回数 5 回以上のヒット分布。赤が全てのイベント、青が直線フィットした宇宙線と考えられるイベント。データは熱真空試験時の $^{137}\text{Cs}$ 照射時のもの . . . . .	48
3.39	ヒット回数ごとのイベント数と宇宙線イベントの割合。データは熱真空試験時の $^{137}\text{Cs}$ 照射時のもの . . . . .	48
3.40	ヒット回数 5 回以上のヒット分布。赤が全てのイベント、青が直線フィットした宇宙線と考えられるイベント。データは Pb なしのバックグラウンド測定時のもの . . . . .	48
3.41	ヒット回数ごとのイベント数と宇宙線イベントの割合。データは Pb なしのバックグラウンド測定時のもの . . . . .	48
3.42	ヒット回数 5 回以上のヒット分布。赤が全てのイベント、青が直線フィットした宇宙線と考えられるイベント。データは内在バックグラウンド測定時のもの . . . . .	49
3.43	ヒット回数ごとのイベント数と宇宙線イベントの割合。データは内在バックグラウンド測定時のもの . . . . .	49
3.44	長期動作試験において $^{137}\text{Cs}$ を照射した際の Si-CdTe2 ヒットイベントのバックプロジェクション . . . . .	50
3.45	長期動作試験において $^{137}\text{Cs}$ を照射した際の Si-CdTe2 ヒットイベントの X 軸プロジェクション . . . . .	50
3.46	長期動作試験において $^{137}\text{Cs}$ の 662keV を Si-CdTe の 2 回ヒットで再構成した時の ARM 分布 . . . . .	50
3.47	長期動作試験において $^{133}\text{Ba}$ を照射した際の Si-CdTe2 ヒットイベントのバックプロジェクション . . . . .	51
3.48	長期動作試験において $^{133}\text{Ba}$ を照射した際の Si-CdTe2 ヒットイベントの X 軸プロジェクション . . . . .	51
3.49	長期動作試験において $^{133}\text{Ba}$ の 356keV を Si-CdTe の 2 回ヒットで再構成した時の ARM 分布 . . . . .	51

1	$^{137}\text{Cs}$ を照射した際の CdTe スペクトル。統計が少ないため ASIC でまとめている。detid が 100 から 143。 . . . . .	55
2	$^{137}\text{Cs}$ を照射した際の CdTe スペクトル。統計が少ないため ASIC でまとめている。detid が 150 から 211。 . . . . .	56
3	$^{137}\text{Cs}$ を照射した際の CdTe スペクトル。統計が少ないため ASIC でまとめている。detid が 212 から 243。 . . . . .	57
4	$^{137}\text{Cs}$ を照射した際の CdTe スペクトル。統計が少ないため ASIC でまとめている。detid が 244 から 275。 . . . . .	58
5	長期動作試験において $^{22}\text{Na}$ を照射した際の各パターンのスペクトル。 . . . . .	59

# 表 目 次

1.1	SGD への要求性能 [10]	9
1.2	SGD に用いられる Si-Pad 検出器 1 当たりの仕様 [7]	15
1.3	半導体に使用される元素の原子番号及び密度 [9]	16
1.4	SGD に用いられる CdTe-Pad 検出器 1 当たりの仕様 [7]	16
1.5	VATA450.3 のレジスタに設定可能な主なパラメータ [3]	18
2.1	生データビット	20
2.2	FLAGs に入っているデータとビット数	21
2.3	イベントツリー、ヒットツリーのブランチ例	22
2.4	1 段階目で使用する較正点 [1]	23
2.5	2 段階目で使用する較正範囲 [1]	24
2.6	3 段階目で使用する較正範囲 [1]	24
2.7	特性 X 線エネルギー [16]	27
2.8	物質の密度及びイオン化エネルギー	28



# 第1章 概要

## 1.1 ASTRO-H 衛星

2015年打ち上げ予定のASTRO-H衛星は日本のX線衛星の中では6番目の衛星である。ASTRO-H衛星の観測目標は

- 宇宙の大規模構造とその進化を解明
- 宇宙の極限状態の理解
- 非熱的エネルギーの解明
- ダークマター・ダークエネルギーの解明

の4つである。これらを解明するためにASTRO-H衛星は4つの検出器を搭載している。ASTRO-Hの概念図を図1.1に示した。軟X線分光装置(SXS:Soft X-ray Spectrometer)は観測エネルギー帯域が軟X帯域の0.3~12keVを目標とし、極低温に冷やしたマイクロカロリメータで1桁良いエネルギー分解能を目指す。軟X線撮像装置(SXI:Soft X-ray Imager)は観測エネルギー帯域は同じく軟X帯域で0.4~12keVを目標としたCCDカメラである。硬X線撮像器(HXI:Hard X-ray Imager)は観測エネルギー帯域が、硬X線帯域で5~80keVを目標とし、硬X線望遠鏡で集光し検出する。軟ガンマ線検出器は観測エネルギー帯域が軟ガンマ線帯域で40~600keVを目標とし、コンプトン運動学を用いる事で分光及び撮像を行う。これらの4つの検出器で0.3~600keVのエネルギー帯域をカバーする。4つの検出器のそれぞれのエネルギー帯域は図1.2に示した。

## 1.2 軟ガンマ線検出器(SGD)

軟ガンマ線検出器(SGD)はASTRO-H側面に2台搭載される。4つの検出器の中で最も高エネルギー帯域の30-600keVをカバーする検出器である。SGDは我が国独自のコンセプト'狭視野多層半導体コンプトンカメラ'を主検出器として持ちSGD1台に対して3ユニットとコンプトンカメラで構成される。他の光電吸収型検出器がコンプトン散乱をバックグラウンドとして扱う[2]のに対して、コンプトンカメラは積極的に用いて低バックグラウンドを実現している。コンプトンカメラの検出原理については次節で説明する。また、リン青銅製のファインコリメータは10度に視野を絞ることで天体以外の光子を遮断する。これに加え井戸型BGOアクティブシールドが検出器全体を覆っている。これはBGOシンチレータとAPDを組み合わせたアクティブシールドで、コンプトンカメラと反同時計数を取ることで視野外から来た信号を取り除くことができる。この様に徹底したバックグラウンド除去とコンプトン散乱を用いる事により、すざく衛星搭載HXD(Hard X-ray Detector)より一桁良い感度を目指す。また、偏光観測、高いエネルギー帯域のイメージングも目標とする目標達成のためのSGDの要求性能を表1.1に示す。

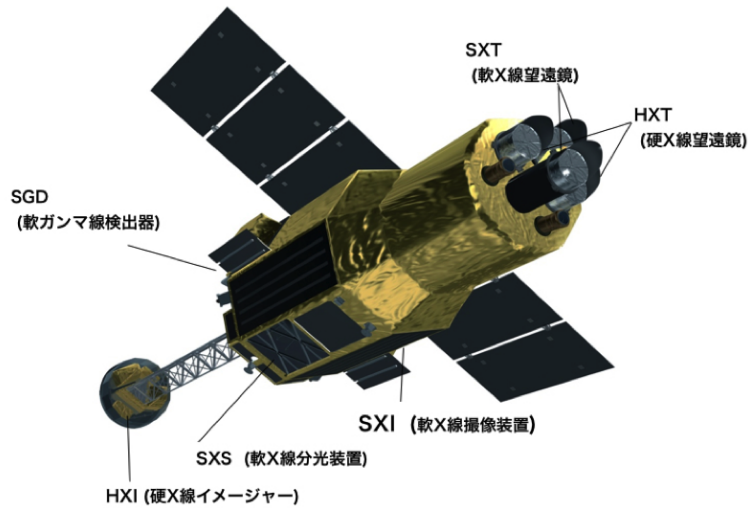


図 1.1: ASTRO-H[1]

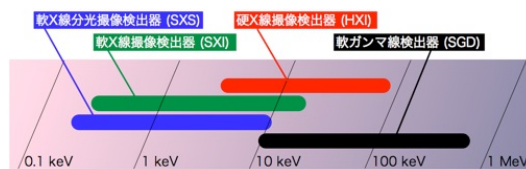


図 1.2: ASTRO-H の観測エネルギー範囲 [13]

## 1.3 コンプトンカメラ

コンプトンカメラはガンマ線との相互作用を用いて光子の到来方向を特定する検出器である。コンプトンカメラの検出原理はシンチレータや半導体を用いて散乱体と吸収体を用意する。ガンマ線が散乱体でコンプトン散乱 (1.3.2) されエネルギーを落とし、吸収体で光電吸収 (1.3.1) されたエネルギーを用いてコンプトン再構成を行う事で光子の到来方向を特定する。このコンプトン再構成で用いられる物理過程の光電吸収とコンプトン散乱を次項から説明をする。

### 1.3.1 光電吸収とコンプトン散乱

光電吸収は吸収物質がガンマ線光子と相互作用を起こし完全に吸収され、原子から束縛を解かれ光電子を放出する。ガンマ線が十分なエネルギーを持っていると K 殻電子を放出する確率が高い。コンプトン散乱の相互作用過程は入射ガンマ線光子と吸収物質中の 1 個の電子との間で起る。コンプトン散乱は放射性同位元素線源で典型的なエネルギーのガンマ線が引き起す主要な相互作用の過程となっている。図 1.4、図 1.5 に Si と CdTe の反応断面積を示す。

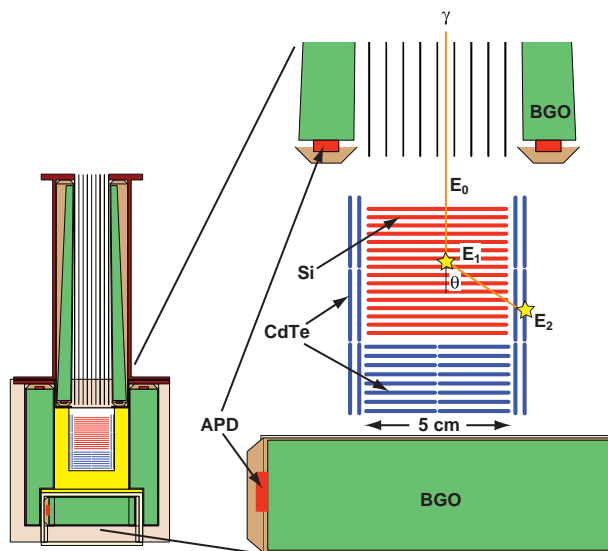


図 1.3: SGD 概念図 [5]

表 1.1: SGD への要求性能 [10]

Energy Range	10keV-600keV
Energy Resolution	$< 2keV$ (FWHM, at 60 keV)
Effective Area	$> 20cm^2$ (Compton mode, at 100keV)
FOV	$0.6 \times 0.6deg^2$ ( $< 150keV$ )
Timing Resolution	$25.6\mu s$
Operating Temperature	$\sim -20^{\circ}C$

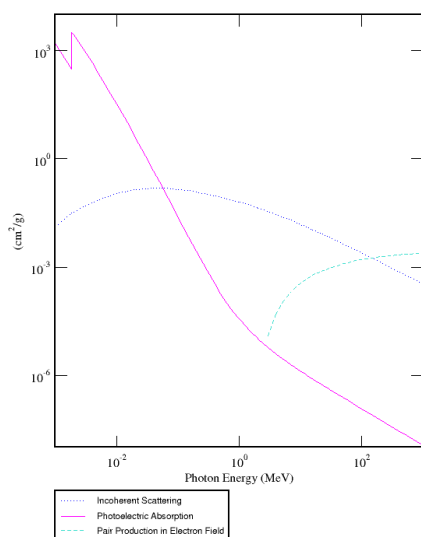


図 1.4: Si の反応断面積 [8]

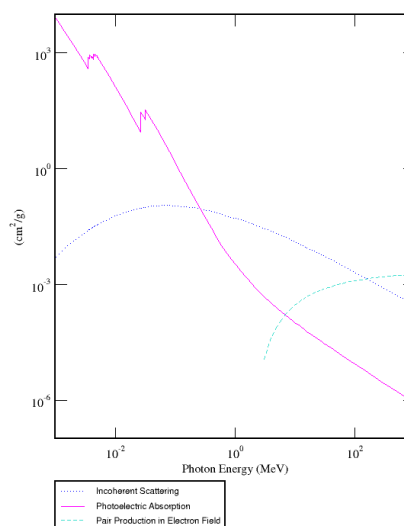


図 1.5: CdTe の反応断面積 [8]

入射ガンマ線の光子はコンプトン散乱によって最初の方向から角度  $\theta$  の方向から曲げられる。このとき光子はそのエネルギーの一部を、最初静止していたと仮定される電子へ伝達する。この電子は反跳電子 (recoil electron) と呼ばれる。すべての角度に散乱されるので、電子に伝えられるエネルギーはゼロから入射ガンマ線エネルギーに近い値まで変化する。この相互作用に対するエネルギー伝達と散乱角の関係を表す式は、エネルギーと運動量の保存則の連立方程式を解いて簡単に導くことができる。

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (1.1)$$

ここで  $E_\gamma$  は入射光子のエネルギー、 $E'_\gamma$  は散乱後の光子のエネルギー、 $m_e$  は電子の質量、 $c$  は真空中の光の速さを表す。この関係式から求めた  $\theta$  を用いて光子の到来方向とする。

散乱後のガンマ線の角度に対する分布は微分散乱断面積  $d\sigma/d\Omega$  に対するクライン・仁科の式により与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left[ \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right]^2 \left[ \frac{1 + \cos\theta^2}{2} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos\theta^2)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right] \quad (1.2)$$

ここで、 $\alpha \cong \frac{h\nu}{m_0 c^2} r_0$  は古典電子半径であり、角度分布を図 1.6 に分布を示す。

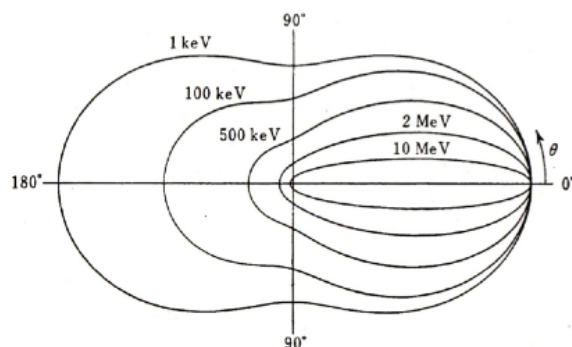


図 1.6: コンプトン散乱の微分散断面積の極座標表示 [6]

### 1.3.2 コンプトン再構成とイメージング

コンプトンカメラで再構成を行う際には、散乱体でのコンプトン散乱によるデポジットエネルギーと散乱位置、および、吸収体での光電吸収により放出された光電子のデポジットエネルギーと吸収位置を用いる。入射光子のエネルギーを  $E_{in}$ 、散乱体でのデポジットエネルギー  $E_1$ 、吸収体でのデポジットエネルギーを  $E_2$  とすると、これらのエネルギーの関係は次式の様に表す事が出来る。

$$E_{in} = E_1 + E_2 \quad (1.3)$$

式 1.1 を用いると、コンプトン散乱による散乱角は

$$\cos\theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} \quad (1.4)$$

と書ける。このことから、光子の到来方向を角度  $\theta$  をもった円錐上に制限を書ける事ができる。この円錐はコンプトンコーンと呼ばれる。複数のイベントにより生成されたコンプトンコーンの重ね合わせにより点源の位置を特定する。

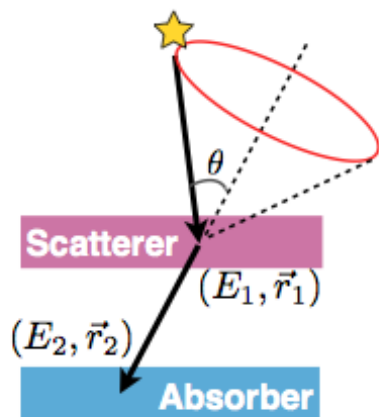


図 1.7: コンプトン再構成の概念図 [1]

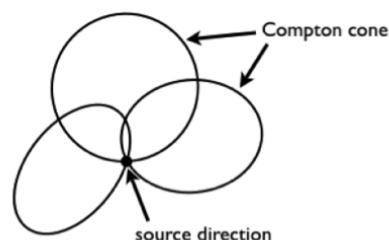


図 1.8: コンプトンコーン [2]

### 1.3.3 角度分解能

コンプトンカメラは前節で述べている通り、イメージングを行うことができる。イメージングを行う際に重要となるパラメータが角度分解能である。角度分解能はイメージング能力に直結し、バックグラウンド除去能率にもつながる。この角度分解能を評価するために ARM(Angular Resolution Measure) と呼ばれる値が用いられ、次式の様に定義される。

$$ARM(\Delta\theta) \equiv \theta_K - \theta_G \quad (1.5)$$

ここで、 $\theta_K$  はコンプトン再構成から、 $\theta_G$  は幾何学的な本当の散乱角である。

$$\Delta(\cos\theta_K) = \left(\frac{m_e c^2}{E_2^2} - \frac{m_e c^2}{(E_1 + E_2)^2}\right)\Delta E_2 - \frac{m_e c^2}{(E_1 + E_2)^2}\Delta E_1 \quad (1.6)$$

式 1.6 から角度分解能がエネルギー分解能に依存する事が分かる。エネルギー分解能依存に加え、角度分解能に影響を与える要因として、位置分解能が挙げられる。Pad 型半導体素子で検出を行うと反応位置をピクセルサイズより小さい値では求める事ができない。このため、位置分解能に限界が生じが、SGD では十分小さなピクセルサイズとなっている。

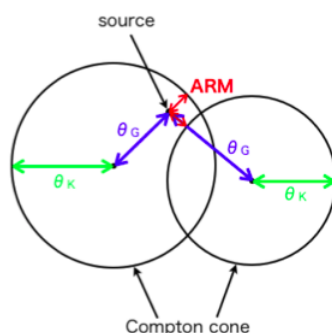


図 1.9: ARM[2]

### 1.3.4 COMPTEL 検出器

COMPTEL 検出器は 1991 年に NASA により打ち上げられたガンマ線観測衛星 CGRO (Compton Gamma Ray Observatory) に搭載された検出器であり、観測に用いられた唯一のコンプトンカメラである。図 1.10 に COMPTEL の概念図を示した。観測エネルギー帯域は 1~30MeV で散乱体に液体シンチレータ (NE213 A)、吸収体に固体シンチレータ (NaI(Tl)) を使用し読み出しに光電子増倍管を用いている。液体シンチレータと固体シンチレータは 1.5m 離れているので TOF 測定をする事で反応順序を決定する。また、吸収体シンチレータをプラスチックシンチレータで囲む事で荷電粒子イベントを除去し、さらに波形分別をしてガンマ線イベントと中性子イベントを区別する。課題としては天体以外のガンマ線、荷電粒子、中性子、検出器や筐体からのガンマ線によるバックグラウンドレベルが挙げられる。

### 1.3.5 SGD 用狭視野多層半導体検出器

SGD 用の狭視野半導体コンプトンカメラは Si-Pad 半導体センサー 32 枚と CdTe-Pad 半導体センサー 80 枚が高密度に積層した我が国独自のコンセプトを用いている。この技術を用いて、コンプトンカメラが抱えている課題である、高いバックグラウンドと低い検出効率を解決する。散乱体には Si ( $Z = 14$ ) を用いるが、理由は原子番号が小さい為に SGD のエネルギー帯域でコンプトン散乱断面積が大きい事と Doppler broadening の影響が小さいという事である。吸収体に CdTe ( $Z = 48, 52$ ) を用いる理由は、光電吸収断面積が大きいという事である。

図 1.11 に Si-Pad 半導体センサーと CdTe-Pad センサーの位置関係を示す。Si-Pad センサーは 2 枚ずつ鏡面対象に重ねられ 1 つのトレイとし 16 トレイ積層される。CdTe-Pad センサーは Bottom と Side に分けられる。CdTe-Bottom は 4 枚を 1 組とし、1 つのトレイに 2 組重ね 8 トレイ積層する。また、CdTe-Side は 6 枚を 1 組とし、2 組重ねられる。この、CdTe-Side の設置は大角度散乱を起こした光子の検出に効果を発揮する。これらの検出器で取得された信号は ASIC(2.2) で AD 変換される。

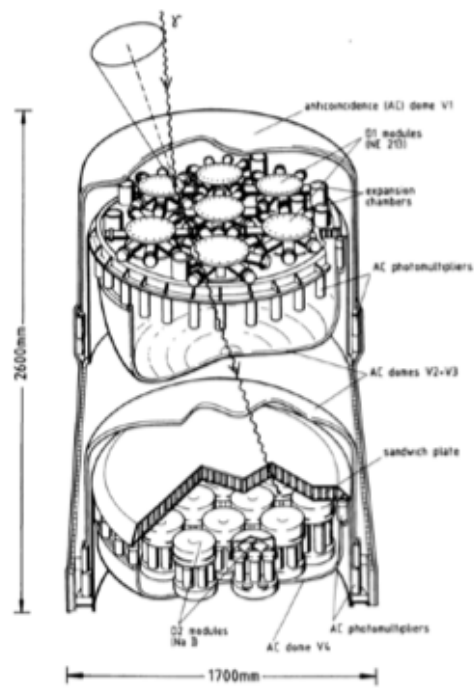


图 1.10: COMPTEL 検出器概念图 [17]

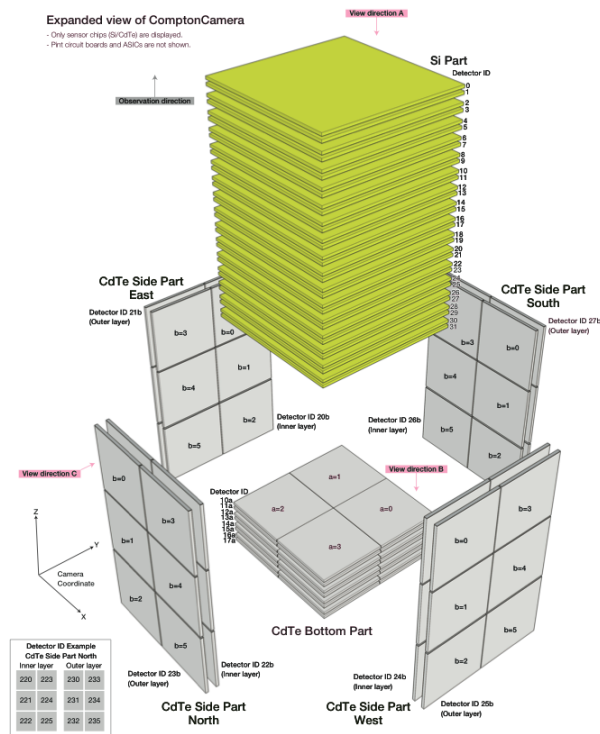


図 1.11: CC 検出器位置関係の概略図 [1]

## Si-Pad 検出器

Si-Pad 検出器の構造は、ホールを多く持つ p 型半導体がピクセル状に敷き詰められている面と電子を多く持つ n 型半導体の平板で構成される p-n 型半導体である。p-n 間は bulk と呼ばれ空乏層が形成されていてほとんどキャリアは存在しない。Pside 側の各ピクセルには電気信号を読み出しの為に Al 電極が DC 結合されている。読み出し線は 64 チャンネルずつ四隅に集められ LSI にて読み出される。[5] SGD では高密度に実装する為に Si-Pad の読み出し線のデザインを鏡対象にし、Pad を裏表に重ね合わせて 1 つのトレイに載せている。ピクセル同士で導通しないように SiO<sub>2</sub> の絶縁層で覆われている。また、Pside の電場を一樣に揃えるためにピクセルの外側にガードリングが設けられている図 1.14 にガードリングの概念図を示した。Si-Pad の仕様を表 1.2 に示す。



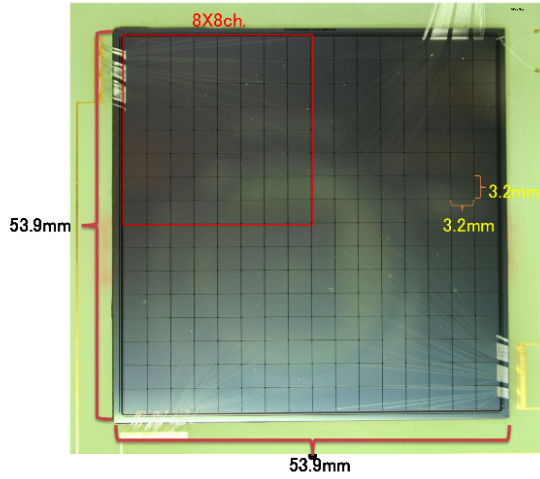


図 1.12: Si-Pad 写真 [18]

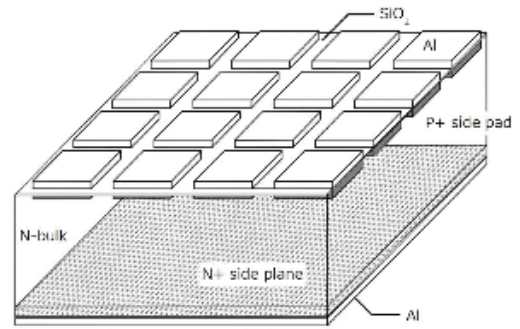


図 1.13: Si-Pad 検出器構造 [5]

表 1.2: SGD に用いられる Si-Pad 検出器 1 当たりの仕様 [7]

Description	Si
Sensor active area	$5.12 \times 5.12 \text{cm}^2$
Pixel area	$3.2 \times 3.2 \text{mm}^2$
Number of pixels	$16 \times 16$
Thickness of depletion layer	0.60 mm
Bias voltage	230V
Leakage current per pixel @ $-10^\circ\text{C}$	$< 50 \text{pA}$

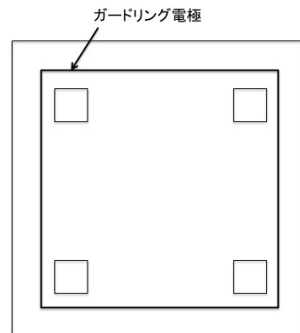


図 1.14: Si-Pad のガードリング概念図

## CdTe-Pad 検出器

CdTe-Pad(テルル化カドミウム) 半導体センサーも同じく入射した光子と半導体との相互作用により生成された電子・ホール対を読み出すことで信号を検出する。CdTe の構成元素は半導体を形成する元素の中でも原子番号が大きい。このため、数百 keV という高いエネルギー帯域でも 光電吸収率が高い。一般的に用いられる半導体の原子番号と密度を表 1.3 に示した。SGD で使用する CdTe-Pad は  $8 \times 8$  ピクセルであり、読み出しは p-side からは Pt 電極、n-side に In/Au バンプ接合を施しワイヤ本ディングで ASIC に接続して行っている。また、CdTe も Si と同じくガードリング構造を保持している。CdTe-Pad の仕様を表 1.4 に示す。

表 1.3: 半導体を使用される元素の原子番号及び密度 [9]

	CdTe	CZT	Si	Ge
原子番号	48,52	48,30,52	14	32
密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	5.85	5.81	2.33	5.33

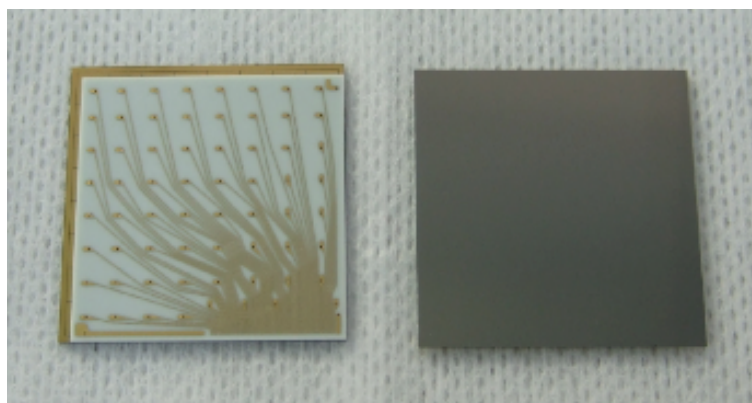


図 1.15: CdTe-Pad 写真 [9]

表 1.4: SGD に用いられる CdTe-Pad 検出器 1 当たりの仕様 [7]

Description	Si
Sensor active area	$2.56 \times 2.56 \text{cm}^2$
Pixel area	$3.2 \times 3.2 \text{mm}^2$
Number of pixels	$8 \times 8$
Thickness of depletion layer	0.60 mm
Bias voltage	1000V
Leakage current per pixel @ -10°C	$< 50 \text{pA}$

## VATA450.3 と Front-End Card (FEC)

Si-Pad と CdTe-Pad の信号処理には IDEAS 社の VATA450.3 を用いる。VATA450.3 のブロック図を図 1.16 に、タイミングチャートを図 1.17 に示す。SGD では 208 個の ASIC が搭載され、1 つの ASIC につき 64 チャンネルの読み出しを行う。チャンネルからの信号は VA 部の CSA で電圧波形に変換されたあとに VA 部後段回路と TA 部回路の 2 つの処理系に渡される。TA 部は fast shaper(時定数  $\sim 0.6\mu\text{s}$ )、ウィルキンソン型のディスクリミネータを備えており VA 部の CSA で増幅された信号を受け取りレジスタに設定したスレッシュドを超えるとトリガをかける。また、VA 部は CSA、slow shaper(時定数  $\sim 3\mu\text{s}$ )、サンプルホールド回路、マルチプレクサ、ウィルキンソン型ディスクリミネータを備え増幅整形を行う。また、あらかじめレジスタに設定したディレイ後の波高値がサンプルホールドされる。fast shaper でトリガがかかっていれば、このサンプルホールドされた波高値が ADC に渡されデジタル値に変換される。VATA450.3 は FEC と呼ばれる小型カードに搭載され、電源供給、信号送受信、Si-Pad や CdTe-Pad とのボンディング接続が行われる。FEC は Si-Pad、CdTe-Pad とともにトレイに搭載されている。VATA450.3 は後述の ACB(ASCII Control Board) に載せられた FPGA にて制御される。

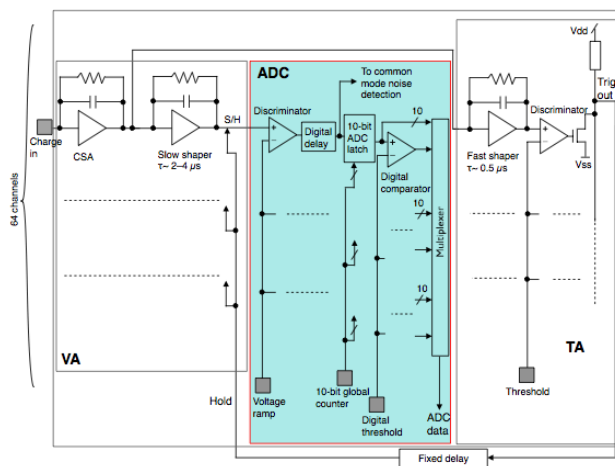


図 1.16: データ処理の流れ [3]

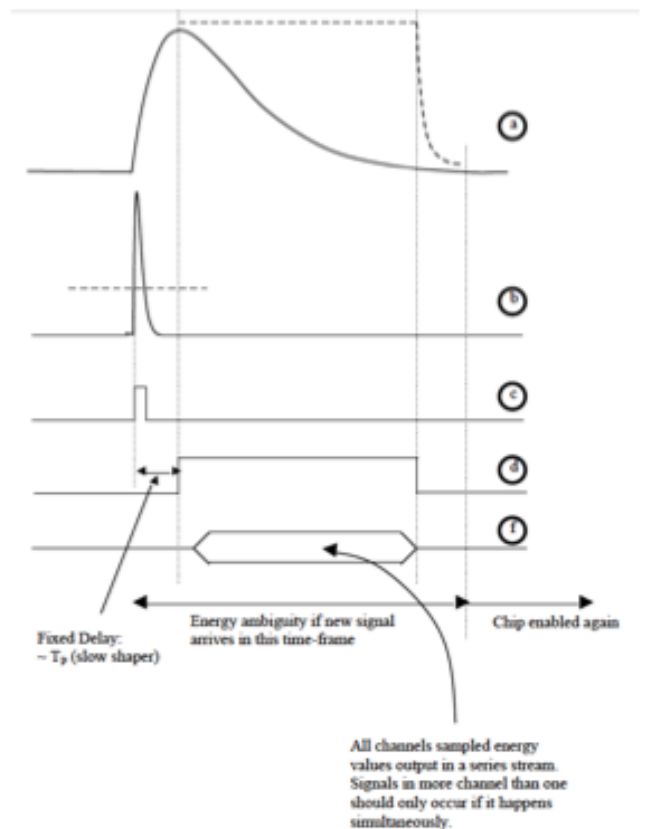


図 1.17: VATA450.3 のタイミングチャート [3]

ASIC のレジスタに設定可能なパラメータの例を表 1.5 に示す。

表 1.5: VATA450.3 のレジスタに設定可能な主なパラメータ [3]

Iramp_fb	ADC のランプスピード
DTHR	VA 部のディスクリミネータの参照電圧
pre_bias	プリアンプに流れるバイアス電流

AD 変換されたシリアル信号は ASIC8 つで 1 つのデジチェーンを形成し、28 系統デジチェーンが直列に渡され読み出される。

### Daisy Chain

デジチェーンは機器を数珠つなぎにし、信号を直列に扱う技術であるが、CC では 208 個ある ASIC を 28 系統 (Si,CdTe-Bottom では 8ASIC1 系統とし、CdTe-Side では 6ASIC を 1 系統としている) に分け 28 系統のデジチェーンを直列に接続し読み出している。

### ADB (ASIC Driver Board)

ADB は CC1 つに対して各側面 4 つで構成され、ADB1 つにつき 52 個の ASIC を制御する。役割としては ACB からの制御信号を受信し、その信号を ASIC に送信するとともに ASIC からのデータを ADB へ送る。また、ASIC への電源供給や ASIC に過電流が流れた場合の検出も ADB が担う。

### ACB (ASIC Control Board)

ACB は CC1 台に対して 1 枚搭載し、コンプトンカメラの底部に存在する。ACB の役割としては ASIC の設定及び ASIC レジスタの読み出し、ASIC の AD 変換の制御、MIO へのトリガや ASIC からのフォーマットデータの送信、デッドタイムのモニタなどが挙げられる。[7]

### POL ボード

POL(Point-of-Load) ボードは DC/DC コンバータを含み、電源ケーブルを短くし性能低下を防ぐ目的で設置されている電源である。コンプトンカメラでは ADB を経由して FEC に電源を供給している。

### HV-CC

前述の POL ボードは FEC の電源を供給しているが、HV-CC は Si-Pad 検出器及び CdTe-Pad に印可するバイアス電圧を供給している。Si-Pad には 500V、CdTe-Pad には 1500V までそれぞれ印可することが可能である。これらの機器を動かすための電源は衛星から SGD の PSU(Power Supply Unit) に供給される。PSU はさらに CPMU と APMU に分配する。カメラ系の電源は CPMU が担い、3 台の CC に分配する。

### 1.3.6 SGD のデータ処理系

SGD のデータは、SGD-S から SGD-AE,SGD-DPU,SGD-DE へ受け渡され処理される。DE で処理を受けたデータはバス機器の SMU(Satellite Management Unit) を通り、DR(Data Recorder) に書き込まれる。最終的にはこの DR が地上へデータを送信する。SGD のデータ処理の流れを図 1.18 に示す。

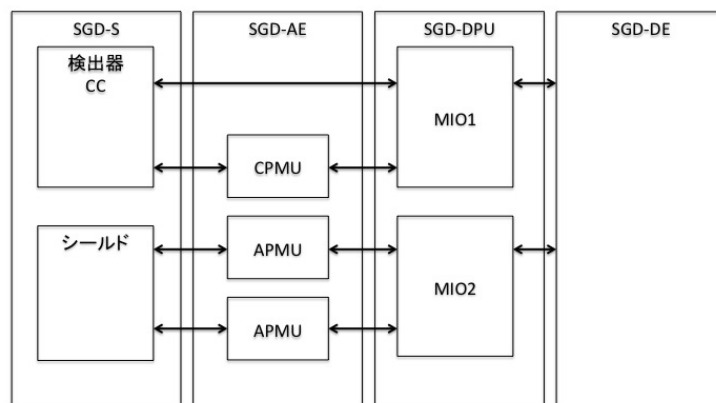


図 1.18: データ処理の流れ。矢印は信号の流れ。

AE(Analog Electronics) は CPMU と APMU で構成される。CPMU(Compton camera Power Management Unit) は 1 台につき 1 枚で構成される。CPMU の目的は House Keeping(HK) 機能および、コンプトンカメラ電源の高電圧の制御を行う事である。CPMU1 つで 3 つの CC と 2 つの HV-CC、POL ボードの制御を行う。APMU(APD Processing Module Unit) は SGD 1 台につき 2 枚で構成されている。APMU の目的はコンプトンカメラを取り囲む BGO アクティブシールド検出器を読み出す APD の 14 個の信号を処理する。この 14 個の信号には FastBGO と HitPat が用意されている。FastBGO はシールド部でバックグラウンドイベントを検出した際に 5us 以内にコンプトンカメラのデータに AD 変換を禁止する信号である。Hitpat はシールド部の信号に対して、ノイズフィルターを強くかけた場合に出されるトリガーをコンプトンカメラのイベントデータに付加する Flag で、地上でのオフラインのデータ解析に用いられる。DPU(Data Processing Unit) は MIO1 と MIO2 及び PSU から構成され、機能としては AE の制御及び AE と CC からのデータ受信、DE からの時刻情報を受け取り、PSU は前述の通り各機器に電源を供給する。図??、図?? に MIO1 と MIO2 の写真をそれぞれ示す。DE(Digital Electronics) は SpaceCard1 枚で構成され、機能としては DPU の制御および DPU からのデータ受信、DPU への時刻情報送信を行う。図??に DE の写真を示す。

## 第2章 コンプトンカメラデータ解析手順

コンプトンカメラから得た生データは可変長のビットデータとなっており、カメラ ID、また、どのトリガがかかった位置、ADC 値、各種フラグなどの情報が詰まっている。本研究では解析に CERN が提供している ROOT というフレームワークを使用しているため、ROOT<sup>1</sup>に対応した形式に変換する必要が必要がある。

### 2.1 データ形式

#### 2.1.1 rawdata

コンプトンカメラの生データ表は 2.1 の形式になっている。それぞれの説明を次に行う。start は 16bits で表し、イベントデータの始まりを示している。time は 32bits で表し、MIO により出力される時間を示す。CC ID は 2bit で表し、3 台のコンプトンカメラ内どの CC で取得したデータなのかを示す。FLAGs は 62bits で表す。それぞれの bit の振り分けは表 2.2 に示した。

event livetime は 24bits で表し、イベントの事象間隔を示す。No. hit ASIC は 8bits で表し、208 個の ASIC のうちいくつシグナルを出しているのかを示す。ASIC ID は 8bits で示し、どの ASIC から出力されているデータなのかを示し、シグナルを出している ASIC 数分だけ存在する。ASICDATA は  $91 + n \times 10$ bits で表す。n は各 ASIC 内でシグナルを出しているチャンネルの数に相当する数値で 1 ~ 64 の値を取る。最後に end bit で 1 つのイベントデータの終わりを表している。

表 2.1: 生データビット

name	bits	remarks
start	16bits	イベントデータの開始
time	32bits	MIO により生成される時間
CC ID	2bits	コンプトンカメラの ID(0 ~ 2)
FLAGs	62bits	イベントの種類の識別
event livetime	24bits	イベント間の時間
No. hit ASIC	8bits	信号を出している ASIC の数 (0 ~ 208)
ASIC ID	8bits × m	信号を出している ASIC の ID、 $m = 1 \sim 208$
ASIC DATA	$91 + n \times 10$ bits	ADC 値などのデータ ( $n = 1 \sim 64$ )
end	16bits	イベントの終わり

<sup>1</sup>ROOT は CERN が開発を行っている高エネルギー物理用解析フレームワークである。

表 2.2: FLAGS に入っているデータとビット数

name	bits	remarks
trigger	6bits	DC28 系統+pseuduo+forced+calpulse trig
trigpat	31bits	DC28 系統+pseudo+forced+calpulse trig
SEU Flag	1bit	SEU イベントであれば 1 を返す
lengh check	1bit	データ内容と長さが合わない時 1 を返す
Cal mode	1bit	Cal Pulse が ON であれば 1 を返す
fast BGO	4bits	fastBGO の信号が出ているかの判定に使用
hitpat BGO	4bits	BGO で hitpat 信号が出ているかの判定に使用
hitpat CC	3bits	hitpat 信号が出ているかの
CC busy	3bits	
reserve	8bits	予備

## 2.1.2 イベントツリー、ヒットツリー

イベントツリーは生データのフォーマットを解析フレームワークの ROOT で解析出来るように変換した形式である。この変換には ISAS で開発されている Compton Soft を用いる。イベントツリーには 2.3 上段に示したようなブランチ構造を持っており、これらのブランチには 1 イベントごとブランチ名に対応した値が詰められている。さらに、それぞれのブランチは互いに関連づけられているので、同一のイベントに対して、各種ブランチの値を取得することもできる。イベントツリーには 2.3 上段で示したとおり、1 イベントごとの波高値や信号を出しているデ이지ーチェーンや ASIC の番号などが詰められている。また、ヒットツリーはコモンモードノイズ除去、エネルギー較正の処理を行ったあとに生成される形式で、ヒットツリーには 2.3 下段に示すようなブランチ構造を保持している。ヒットツリーのブランチには実際のデポジットエネルギーに変換された値にあたる e\_pi や信号を出しているピクセルの 3 次元座標を示す、posx、posy、posz のなどの値が詰められている。

## 2.2 イベントデータ処理

### 2.2.1 ペDESTAL補正

コンプトンカメラで信号を検出した時、各チャンネルで違うゼロ点の値を持つ。このゼロ点の値をペDESTALと呼ぶ。正しく解析を行うためコモンモードノイズ除去やエネルギー較正を行うためにはチャンネル毎にずれたペDESTALを補正することが必要となる。コンプトンカメラはウィルキンソン型の ADC を採用している。ウィルキンソン型の AD 変換の特徴は参照電圧を設定した速さで上げていき、スローシェーパーの出力と等しくなった時の時間に対応するクロック値に対応した値に AD 変換する。各チャンネルにデジタルディレイ (クロックに適切なディレイをかける事) をかけることによりペDESTALを揃える事も可能である。[1]

表 2.3: イベントツリー、ヒットツリーのブランチ例

Branch of EventTree	説明	備考
eventid	イベント毎につけられた番号	
dcid	シグナルを出しているデジチェーンの番号	
adcn	イベント毎の ADC 値	n= 0 ~ 7.n は DC 内の ASIC 番号
cmnn	イベント毎のコモンモードノイズ値	n= 0 ~ 7.
indexn	ASIC 内での信号を出しているチャンネル番号	n= 0 ~ 7.
event_livetime	イベント間の隣接事象時間	

Branch of HitTree	説明	備考
eventid	イベント毎につけられた番号	
totalhit	1つのイベントでシグナルを出しているピクセル数	
posx,posy,posz	シグナルを出しているシグナルの $x,y,z$ 座標の値	
e_pha	1ピクセルの ADC 値	
e_pi	1ピクセルのエネルギー	
detid	シグナルを出している Pad 番号	
channel	シグナルを出しているチャンネル番号	1台の CC 内で付けられた通し番号



## 2.2.2 コモンモードノイズ除去

コモンモードノイズは1イベントにつき各 ASIC 単位で共通に乗るノイズである。SGD では ASIC 内部でコモンモードノイズを計算し除去を行っている。方法としては 64 チャンネル同時に AD 変換される際に、32 番目に変換が終了した値をコモンモードノイズ値として使用する。

## 2.2.3 エネルギー較正

本項は現在までに ISAS(宇宙科学研究所) で開発が行われている [1] のアルゴリズムを引用し説明を行う。較正の流れは次の通りである。

1 段階 もととなる粗いゲイン補正曲線を製作

2 段階 CdTe の高エネルギー側を利用し Si のエネルギーと、CdTe の低エネルギー側を較正

3 段階 2 段階目で作成した較正曲線をもとに、CdTe の高エネルギー側を再び較正

1 段階

段階的にエネルギー較正を行っていく為に必要となるもととなる粗い較正曲線を作成する。ここでは表 2.4 に示した点を用いて ASIC 毎の較正曲線を作成する。較正曲線は ADC 値 vs エネルギーとし較正点の間はスプライン曲線で補完する。

表 2.4: 1 段階目で使用する較正点 [1]

Detector	Gamma line (keV)
Si-Pad	0 (pedestal), 81.0 ( $^{133}\text{Ba}$ ), 477.7 ( $^{137}\text{Cs}$ Compton edge)
CdTe-Pad	0 (pedestal), 356.0 ( $^{133}\text{Ba}$ ), 511.0 ( $^{22}\text{Na}$ ), 662.0 ( $^{137}\text{Cs}$ )

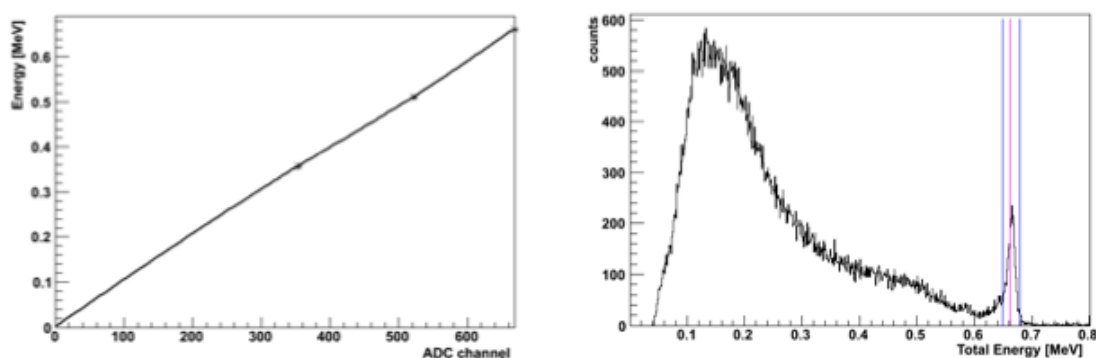


図 2.1: 左図: 1 段階目で作成した構成曲線。右図: 1 段階目の構成曲線を使用して作成したスペクトル [1]

## 2 段階

2 段階目では 1 段階目で作成した較正曲線を用いて、さらに較正の精度を向上させていく。2 段階目で使用する較正点の範囲を表 2.5 に示した。1 段階目の較正曲線を使用して  $^{137}\text{Cs}$  を照射した際の 2Hit イベントのスペクトルを用いる。スペクトルから 650 ~ 680keV の範囲に入り、且つ表 2.5 で用いた較正点の間隔が小さい 356 ~ 662keV の範囲に CdTe のデポジットエネルギーが入るイベントを較正に使用する。662keV とこの範囲に入ったデポジットエネルギーの差分を取ることによって、もう片方のデポジットエネルギーを計算し、この値を新たな較正点として使用する。この手法に取って得られた較正点の重ね合わせを原点を通る 3 次関数でフィットする事で新たな較正曲線を得ることができる。

表 2.5: 2 段階目で使用する較正範囲 [1]

event	Gamma line (keV)
Si/CdTe 2Hit	511.0 ( $^{22}\text{Na}$ ), 477.7 (137Cs Compton edge)
CdTe/CdTe 2Hit	0 (pedestal), 356.0 ( $^{133}\text{Ba}$ ), 511.0 ( $^{22}\text{Na}$ ), 662.0 ( $^{137}\text{Cs}$ )

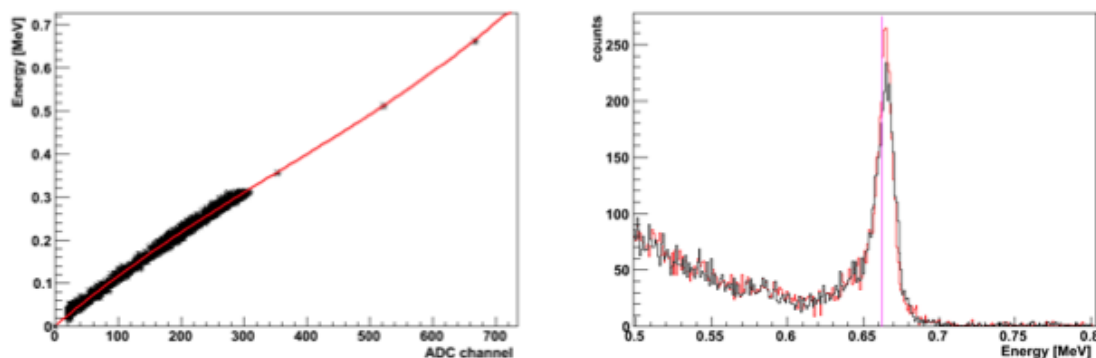


図 2.2: 左図: 2 段階目で作成した較正曲線。右図: 1 段階目の較正曲線を使用して作成したスペクトル [1]

## 3 段階

3 段階目の較正では較正を行うにあたり正しいと仮定していた CdTe の高エネルギー側の較正を 2 段階目までに作成した較正曲線を使用し較正していく。較正方法として 2 段階目と同じで較正点の範囲を変えて行う。3 段階目で使用する較正点の範囲は表 2.6 に示す。

表 2.6: 3 段階目で使用する較正範囲 [1]

event	Gamma line (keV)
Si/CdTe 2Hit	511.0 ( $^{22}\text{Na}$ , 504keV ~ 526keV), 662.0 (137Cs, 648keV ~ 677keV)
CdTe/CdTe 2Hit	511.0 ( $^{133}\text{Ba}$ , 500keV ~ 526keV), 662.0 ( $^{137}\text{Cs}$ , 650keV ~ 680keV)

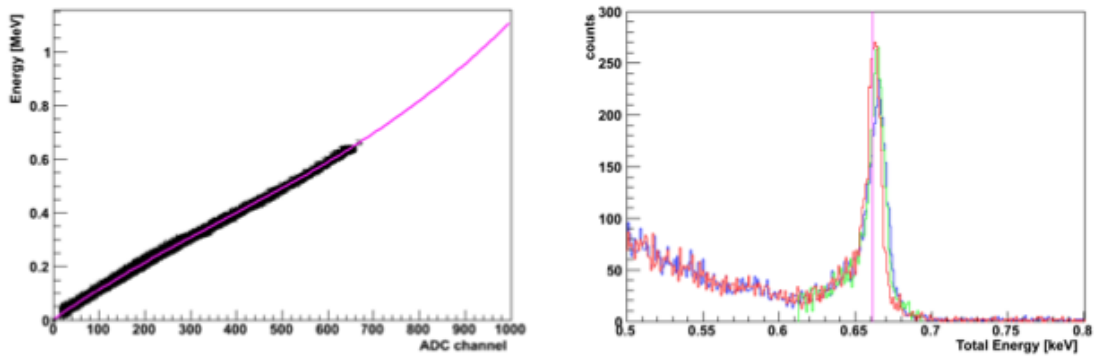


図 2.3: 左図: 3 段階目で作成した較正曲線。右図: 1 段階目の較正曲線を使用して作成したスペクトル [1]

この手法を繰り返していき較正曲線と 1 段階前の較正曲線に著しい違いがみられなければ較正曲線として使用することが出来る。詳細な較正方法は [1] を参照。

## 2.3 バックプロジェクション

ソースの位置はコンプトンコーンの交差点で表現できることは先に述べた (1.3.3)。コンプトンは立体的に描かれるが、実際に解析を行う際には評価の行いやすさを考えて平面や天球にへの投影 (バックプロジェクション) を行う。平面へのバックプロジェクションはガンマ線が最初に散乱した位置を原点としてコンプトンコーンを作成してガンマ線源がある平面との重なる位置にプロットすることで行う。ただし、実際に軌道上での観測を行う際には天体までの距離が分からない場合が存在する。この場合は平面のバックプロジェクションを行うことは出来ない。その為、平面の代わりに天球へのバックプロジェクションを行う。天球へのプロジェクションで天球とはコンプトンコーンの重なる位置にプロットを行うが、コンプトンコーンを作成する際にコンプトン散乱の方向と角度を用いる [1]。

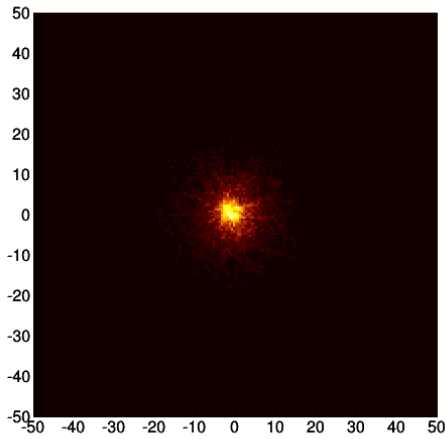


図 2.4:  $^{137}\text{Cs}(662\text{keV})$  の平面へのバックプロジェクションイメージ

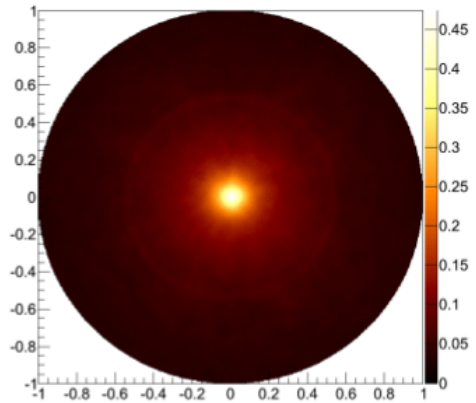


図 2.5:  $^{137}\text{Cs}(662\text{keV})$  の天球へのバックプロジェクションイメージ [1]

### 2.3.1 ヒットパターン

コンプトンカメラでの反応パターンには様々のパターンが存在する。図 2.6 にコンプトンカメラで考えられる単純な相互作用のパターンを示す。1 イベントに 1 つのみ信号を出している場合はガンマ線光子が光電吸収されていると考えられる。また、ヒット回数が 2 ~ 4 個のイベントのほとんどはガンマ線が検出器でコンプトン散乱され最後には光電吸収されるというものである。

また、5 ヒット以上の信号をだし、かつ、検出器をまっすぐ貫いているようなイベントは宇宙線に起因するイベントと考えることができる。

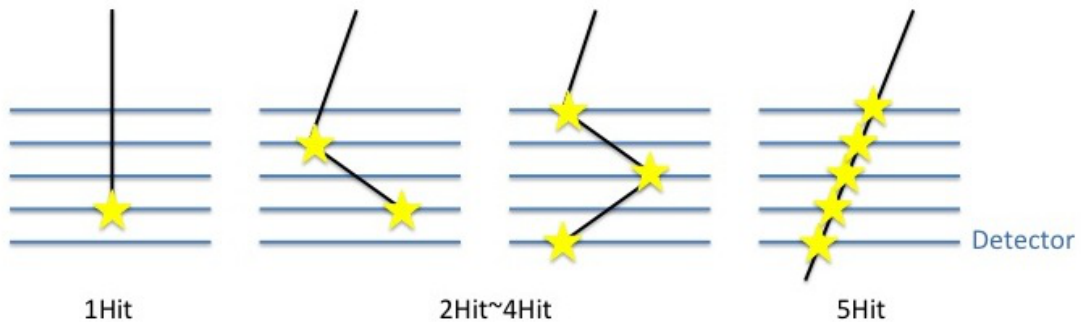


図 2.6: コンプトンカメラで考えられるヒットパターン例

但し、ヒットパターンはこの限りではなく、上にあげた例だけでは完全に説明することはできない。信号のなかには 2 次的な反応も含まれているからである。この 2 次的な反応には蛍光 X 線などが含まれる。

表??に Si、Cd、Te の蛍光 X 線のエネルギー及び発生確率を示す。

表 2.7: 特性 X 線エネルギー [16]

character X-rays	$K_{\alpha 1}[keV](rate[\%])$	$K_{\alpha 2}[keV](rate[\%])$	$K\beta 1[keV](rate[\%])$
$^{14}\text{Si}$	1.740(3.3)	1.739(1.64)	1.836(0.056)
$^{48}\text{Cd}$	23.174(46.1)	24.5(24.5)	26.095(7.69)
$^{52}\text{Te}$	27.472(46.2)	27.202(25.0)	30.955(8.21)

### 2.3.2 バックグラウンド

すべての検出器は少なからずバックグラウンドシグナルを検出しているが、その性質は検出器のサイズや素材、検出器の周囲に存在する環境にも依存する。バックグラウンドの種類としてはの 4 つがあげられる。[12]

- 宇宙線の 1 次及び 2 次成分
- 検出器を構成する物質中の自然の放射能による放射線
- 周囲の装置や遮蔽物を構成する物質からの自然の放射能による放射線
- 地上からの放射線や構造物からの放射線

#### 宇宙線

宇宙線には 1 次と 2 次の成分が存在する。1 次宇宙線の起源は銀河系や太陽系であると考えられている。この 1 次宇宙線の成分は約 98% がプロトンや原子核、残りの約 2% が電子である。このプロトンと原子核 98% のうち 87% がプロトン、12% がヘリウムの原子核、残りの 1% が重元素などの原子核である。[14] この 1 次粒子が地球の大気と相互作用をおこし、2 次粒子を生み出す。2 次宇宙線の成分としては  $\pi$  中間子や  $\mu$  中間子、電子、陽子、中性子、光子などさまざまな粒子が生成される。これらの粒子が地上に到達する事によりバックグラウンドシグナルとして検出される。

#### 宇宙線によるバックグラウンド

荷電粒子が物質を通過すると荷電粒子は物質を電離し、荷電粒子はエネルギーを損失する。荷電粒子が物質を単位距離通過した際のエネルギー損失  $-dE/dx$  は Bethe-Bloch formula で表される。

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2}\right) - 2\beta^2 - \delta \right] \quad (2.1)$$

$$W_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\sqrt{1 + \gamma^2 \beta^2} + s^2} \quad (2.2)$$

ここで、 $r_e = 2.817 \times 10^{-23} \text{cm}$  は古典電子半径、 $m_e = 511 \text{keV}/c^2$  は電子質量、 $M$  は荷電粒子の質量、 $N_a = 6.022 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$ 、 $I$  は材質の平均イオン化ポテンシャル、 $Z$  は材質の原子番号、 $A$  は材質の原子質量、 $\rho$  は材質の密度、 $z$  は入射粒子の電荷、 $\beta = v/c$  は入射粒子の速度、 $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$  は入射粒子のローレンツ因子、 $\delta$  は密度効果による補正項、 $W_{max}$  は1衝突での最大エネルギー損失、 $s = m_e M$  である。

荷電粒子の入射エネルギー  $\beta$  が 0.96 程度になると、 $dE/dx$  の関係になり、損失エネルギーは最小値 (最小電離損失 : minimum ionization loss) をとる。このような荷電粒子を MIP (最小電離粒子: Minimum Ionizing Particle) と呼ぶ。図 2.7 にミュオン、パイオン、プロトンの最小電離損失のグラフを示す。Si の場合、密度が  $2.33 \text{g cm}^{-3}$ 、イオン化エネルギー 173eV であり、最小電離エネルギーは 220keV 程度となる。

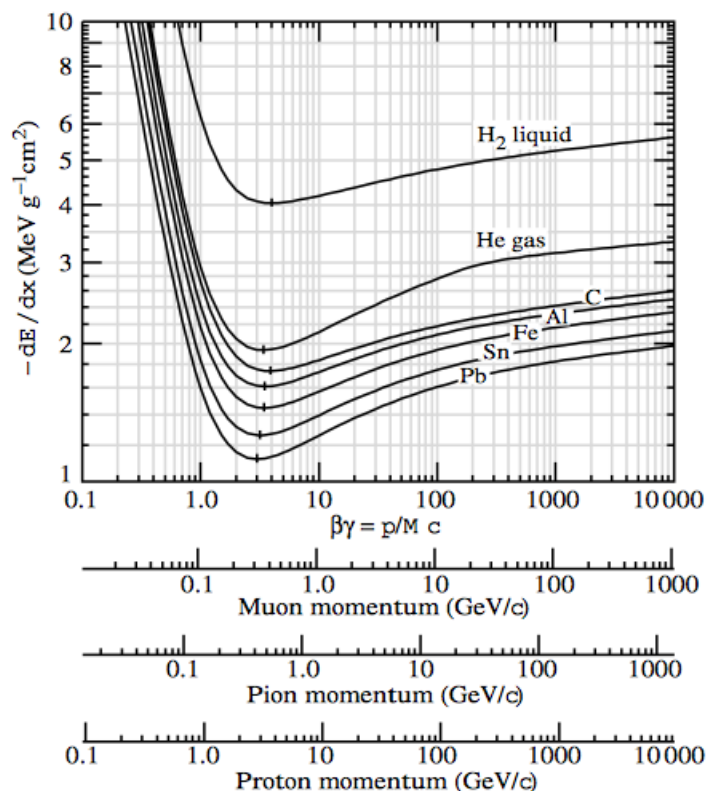


図 2.7: 荷電粒子の電離によるエネルギー損失 [15]

表 2.8: 物質の密度及びイオン化エネルギー

物質	C	Al	Fe	Pb	Si	Cd	Te
密度	2	2.70	7.86	11.34	2.33	8.65	6.24
I[eV]	78	166	286	823	173	521	560

## 第3章 データ解析

2012年12月に初めてコンプトンカメラの衛星搭載品と同等のフル構成のコンプトンカメラ (Full EM CC) が完成した。この Full EM CC の写真を図 5 に示す。本論文での解析項目は基礎特性の検証のためにスペクトル性能及びノイズレベル、ライブタイム、スレッシュホールドを解析し、バックグラウンドの状況を把握するためにヒット回数分布、シグナルを出しているピクセルの位置を示した3次元プロットを行い解析を行った。また、解析には Full EM CC に対して行われた試験のうち、長期動作試験及び熱真空試験、内在バックグラウンド測定 of データを用いている。長期動作試験は検出器の軌道上での安定動作を検証する試験である。衛星搭載の検出器は軌道上で継続的に動作することが求められる。また、検出器が地上になく不具合が生じても対処することができない。このため、検出器は確実に安定した動作をする必要がある。長期動作試験では4日間にわたり連続して動作試験を行った。測定条件はカメラ温度-9℃、バイアス電圧は Si センサーに 230V、CdTe センサーに 1000V を印可に設定し、約1日おきに  $^{137}\text{Cs}$  線源を照射し測定を行った。長期動作試験におけるスペクトル性能、ライブタイム率、ライトカーブ、バッドチャンネル分布の検証から正常に動作していることは宇宙科学研究所一戸悠人氏の修士論文で確認している [1]。熱真空試験は軌道上の環境で検出器が正常に動作するかどうかを検証する試験である。検出器が軌道上の環境にさらされた際に正常に動作する事を確認する重要な試験である。この熱真空試験で確認する主な項目は次の3点である。1. 放電現象が起きていないか。2. 熱集中が起きていないか。3. スペクトル性能が要求を満たすか。これらの項目を1についてはライトカーブを検証する事で、2についてはコンプトンカメラに取り付けた温度計で温度を確認する事及びノイズレベルを確認する事で、3については取得したスペクトルの検証を行う事により確認する。この試験は2012年12月16日～28日迄の13日間行った。温度は-20℃、バイアス電圧は Si:230V、CdTe:1000V、 $1.3 \times 10^{-3}\text{Pa}$  以下の条件で測定を行った。試験を行った結果放電現象や熱集中はみられず正常に動作している事を確認した。また、エネルギー分解能については次項に述べる。図 3.4 に熱真空試験のセットアップを示す。また、内在バックグラウンド測定はコンプトンカメラそのもののバックグラウンドレベルを見積もる試験である。測定セットアップとしてはコンプトンカメラを鉛シールド (5cm) で周囲を囲み、線源を照射せずに44時間測定している。カメラ温度は-11℃、バイアス電圧は Si に 230V、CdTe に 1000V 印可し測定をおこなった。ただし、鉛からのもので 70keV～80keV の蛍光 X 線を吸収するため、鉛の内側に厚さ 10mm から 25mm の銅、また、厚さ 2cm から 5cm の真鍮を設置した。銅からのもので 70keV～80keV の蛍光 X 線はコンプトンカメラのアルミシールドで吸収されると考えられる。解析データは (3.1) 及び (3.2) の  $^{241}\text{Am}$  データ、(3.3)、(3.4) の図 3.33 及び図 3.34、図 3.38、図 3.39 は熱真空試験時のデータを用い、内在バックグラウンド試験データを (3.4) の図 3.26 及び図 3.35、図 3.36、図 3.42、図 3.43 にて用いている。その他の解析に関しては長期動作試験のデータを用いている。

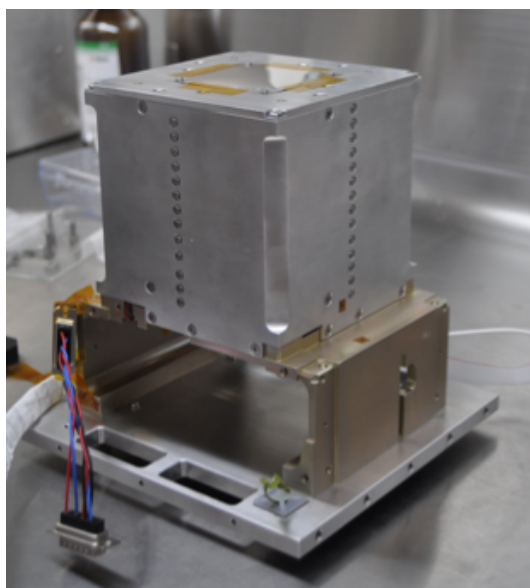


図 3.1: Full EM コンプトンカメラの写真 [1]

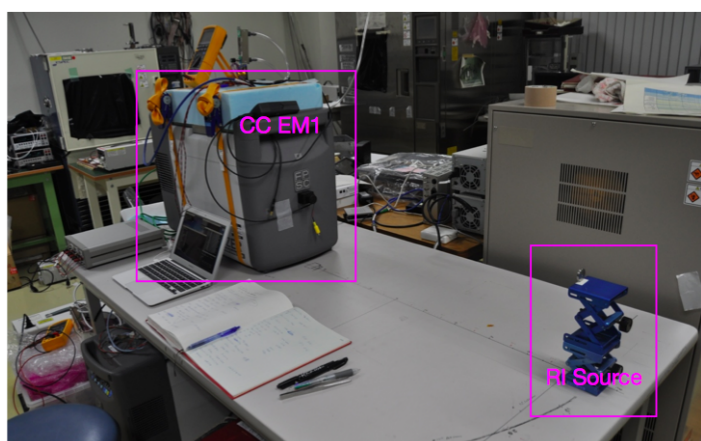


図 3.2: 長期動作試験セットアップ [1]

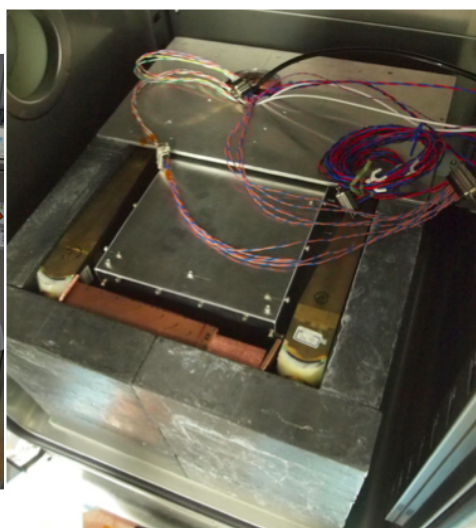


図 3.3: 内在バックグラウンド測定セットアップ [1]

### 3.1 ノイズレベル

ノイズレベル (ペDESTALをガウシアンでフィットしたときの分解能) の確認はコンプトンカメラの熱的な集中の有無を確かめる上で重要な検証となる。このため、ノイズレベルの検証では熱真空試験時のデータを用いて解析を行った。解析には取得したペDESTALデータを用いて検証を行う。ペDESTALデータは



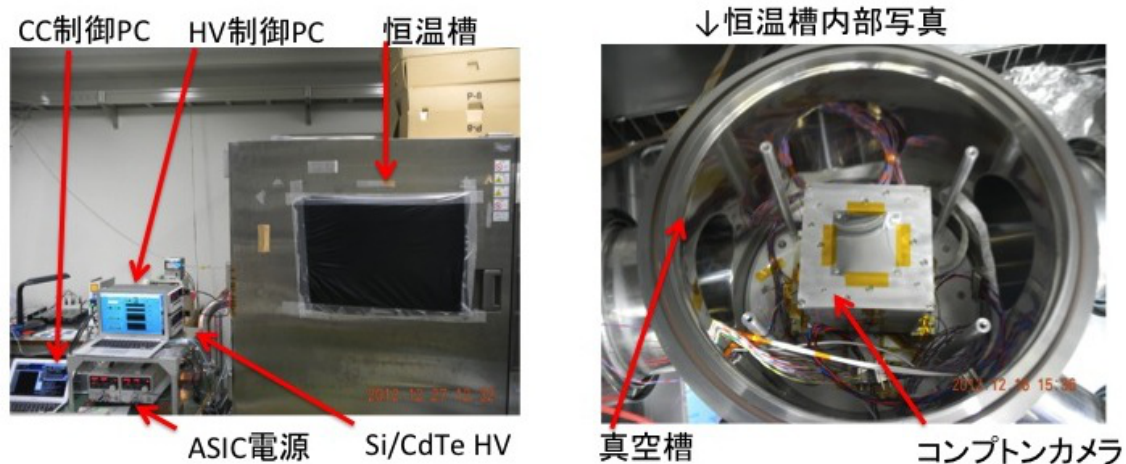


図 3.4: 熱真空試験のセットアップ

ASIC の設定を RO>All に設定しデータを取得することで、光子や粒子と相互作用を起こしていないチャンネルでも、その時の ADC 値を読み出すことができる。(2.2.1) で述べている通り、この ADC 値がペDESTAL (ゼロ点) となる。このペDESTAL をエネルギー較正を行い ADC 値からエネルギーに変換したスペクトルにし、このスペクトルをガウシアンでフィットする。フィット結果の FWHM がノイズレベルとなる。図 3.5 の左図があるピクセルでのペDESTAL であり、ノイズレベルは 1.04keV である。右図は全チャンネルでのノイズレベル分布のヒストグラムである。CdTe の分解能が Si より良くなっているが、これはリーク電流が小さくエネルギー分解能に起因するノイズが小さくなるためであると考えられる。もし、コンプトンカメラ内に熱集中が起こり温度が上昇しているようなことがあればノイズレベルが悪化しているピクセルが見られるが極端にノイズレベルが悪化しているチャンネルは見られない。

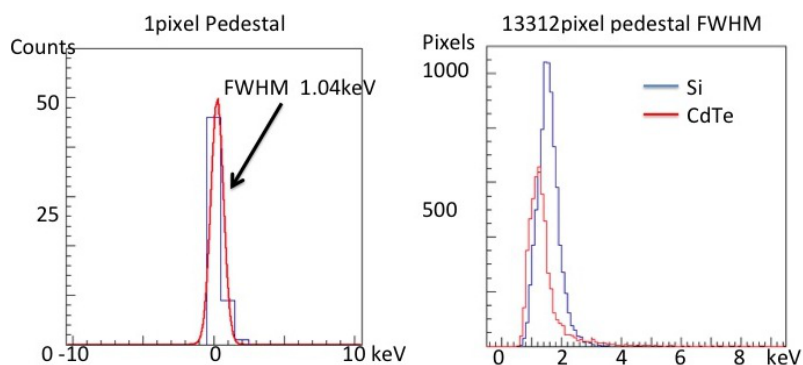


図 3.5: 左図:1 チャンネルのペDESTAL スペクトル。右図:全 13312 チャンネルのノイズレベル。著しく悪くなっているチャンネルはない。どちらも熱真空試験時のデータ

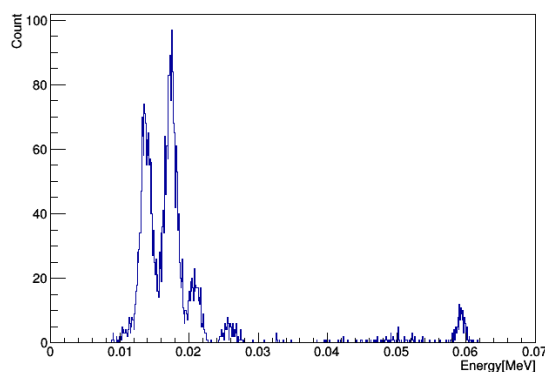


図 3.6: 熱真空試験において  $^{241}\text{Am}$  を照射した際のある 1 ピクセルのスペクトル

## 3.2 スペクトル

イメージング際に重要となる角度分解能は性能は、(1.3.3) で記述した通り、エネルギー分解能に依存する。このため、コンプトンカメラが要求性能を満たしているかを確かめることは非常に重要となる。この節ではコンプトンカメラで取得した各種スペクトルについて述べる。図 3.6 に  $^{241}\text{Am}$  を 45 分間照射した際のスペクトルを示す。このスペクトルは一番上の Si センサーで ADB.ID が 3、ASIC.ID が 0、index が 16 のチャンネルのものである。見えているピークはエネルギーが高い方から 59.5keV、26.3keV、21.0keV、17.6keV、13.9keV。59.5keV ピークのエネルギー分解能は 1.38keV である。図 3.7 の青枠で囲った領域内が ADB.ID が 3、ASIC.ID が 0 の ASIC である。青枠内のチャンネルの分解能マップを図 3.8 に示した。エネルギー分解能は概ね要求性能の 2.0keV を満たしていることを確認した。ただし、3.8 の左上あたりのチャンネルは 3.7 から分かる通り、読み出し線が多くピクセルの上を通過しており、また、センサーの端であるため、まわりを囲っているガードリングの影響も受けていることでエネルギー分解能が悪化していると考えられる。

図 3.8 の左上のチャンネルは読み出し線が集中していること及びガードリングの影響がエネルギー分解能に影響を与えていると考えられる。

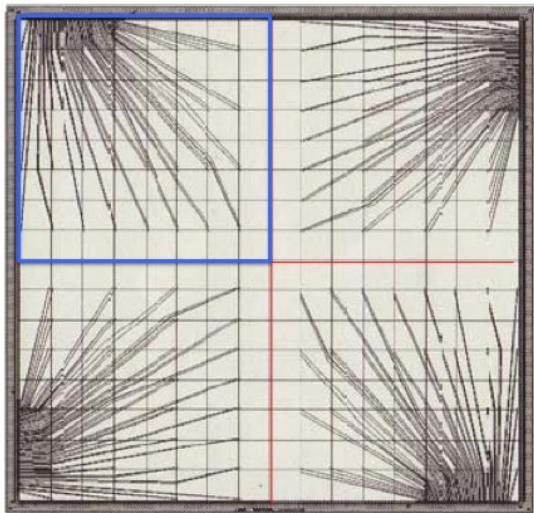


図 3.7: Si-Pad の配線図 [5]

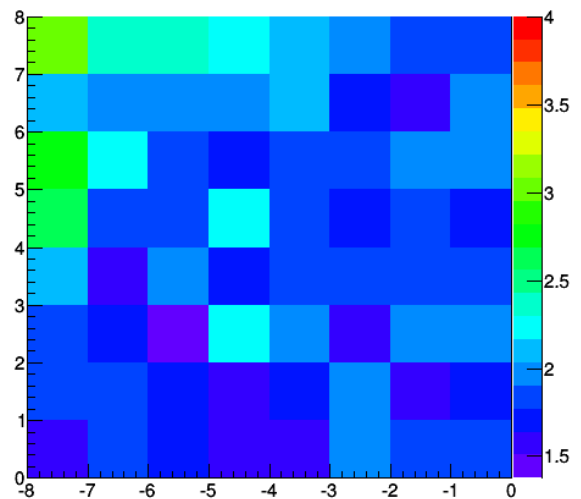


図 3.8: 熱真空試験において  $^{241}\text{Am}$  を照射した際の分解能マップ。Si の 1 番上の左図の青枠で囲まれたチャンネル

図 3.9 に  $^{137}\text{Cs}$  を 3600sec 照射したデータのスペクトルを示す。赤で描いたスペクトルは CdTe でトリガがかかり、かつ、ヒット回数が 1 回のイベントを全チャンネルで足し合わせたスペクトルである。CdTe のスペクトルでは  $^{137}\text{Cs}$  の 662keV ピークがしっかりとみえている。さらに、500keV 付近にみえる段差が 662keV ピークの後方散乱エッジである。式 (1.4) を散乱後のエネルギーの式に変換すると散乱後のエネルギーは  $E_2 = 2 \times (E_1 + E_2)^2 / (m_e c^2 + 2 \times (E_1 + E_2))$ , コンプトンエッジが見える散乱角は  $\theta = 180^\circ$  であるので  $E_2 = 2 \times 662^2 / (511 + 2 \times 662) = 477.7$ , コンプトンエッジのエネルギーは 477.7keV であることがわかる。青で描いたスペクトルは Si でトリガがかかり、かつヒット回数が 1 回のイベントを全チャンネルで足し合わせたスペクトルであるが、このエネルギーでの光電吸収反応断面積が小さいために 662keV ピークのカウントは少なくピークをみることができないが、CdTe と同様にコンプトンエッジをとらえることができている。

図 3.10 の左図のスペクトルは 1 イベントのヒット回数が 2 回で、Si と CdTe の両方で相互作用を起こしているイベントだけ取得しスペクトルを描いている。このスペクトルには反応の順番は考慮されていないため、Si でコンプトン散乱を起こし CdTe で光電吸収されたイベント及び CdTe でコンプトン散乱を起こし、Si で光電吸収を起こしたイベントも含まれている。このような 2 回ヒットのイベントのスペクトルでも 662keV ピークがしっかりと確認できた。また、右図 3.11 は  $^{22}\text{Na}$  をコンプトンカメラの位置から 22cm の位置から 3600 秒間照射した際のスペクトルである。右図も Si と CdTe で相互作用をした 2 回ヒットイベントである。同様に反応の順番は考慮していない。図 3.11 のスペクトルでは  $^{22}\text{Na}$  の 511keV ピークのコンプトンエッジ 340keV のピークを確認することはできない。

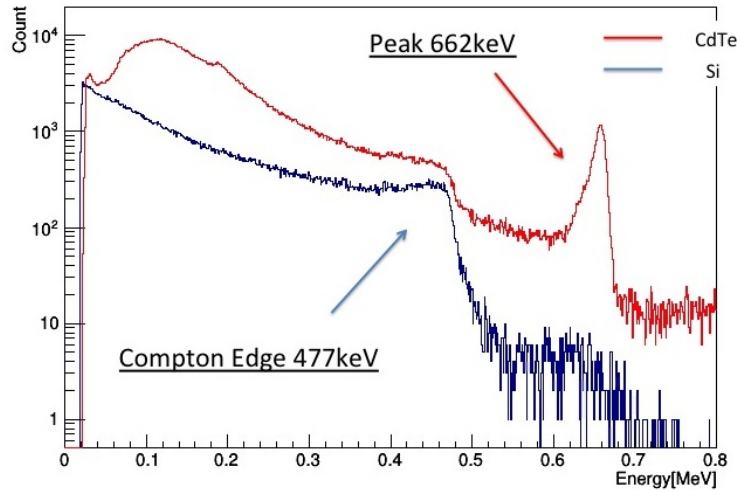


図 3.9: 低温動作試験において  $^{137}\text{Cs}$  を照射し取得した際のスペクトル。赤が CdTe でトリガがかかった光電吸収イベントのスペクトル、青が Si でトリガがかかった光電吸収イベントのスペクトル

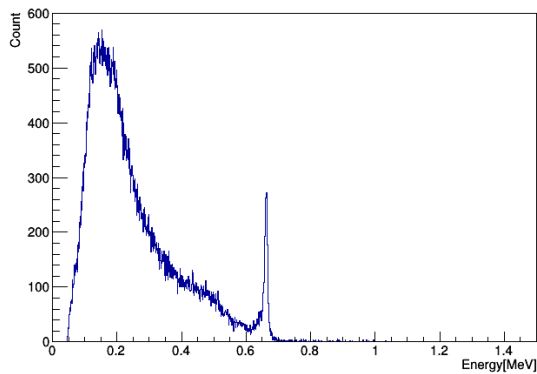


図 3.10: 低温動作試験において  $^{137}\text{Cs}$  を照射した際の Si-CdTe 2 ヒットイベントのスペクトル

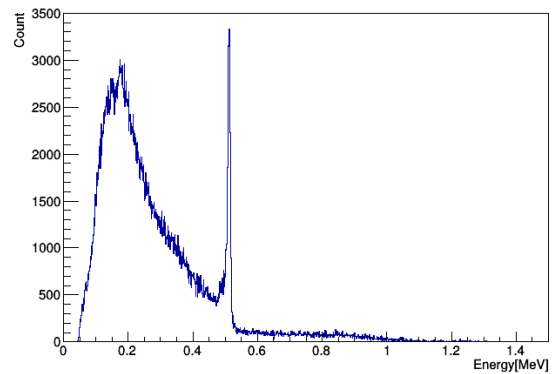


図 3.11: 低温動作試験において  $^{22}\text{Na}$  を照射した際の Si-CdTe 2 ヒットイベントのスペクトル

これらの2回ヒットのスペクトルを2次元プロットにしたグラフが図 3.12 と 3.13 である。図 3.12 の横軸に CdTe で相互作用をしたときのデポジットエネルギー、縦軸に Si で相互作用したときのデポジットエネルギーとしている。2次元プロット内に描かれている線内に入る 652keV から 672keV に入るイベントが  $^{137}\text{Cs}$  の 662keV ピークイベントであると考えられる。662keV ピークイベントで、Si のデポジットエネルギーが 500keV 以上の位置にプロットが少ないのは Si での光電吸収の反応断面積が小さいためであると考えられる。

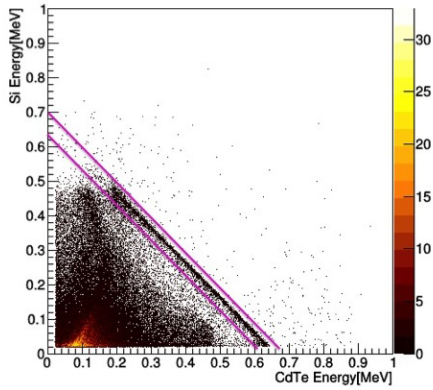


図 3.12:  $^{137}\text{Cs}$  の 2 次元プロット。横軸は CdTe のデポジットエネルギー、縦軸は Si のデポジットエネルギー

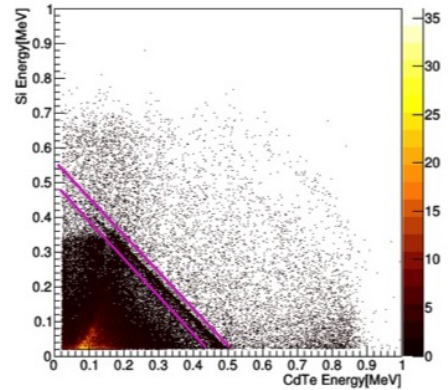


図 3.13:  $^{22}\text{Na}$  の 2 次元プロット。横軸は CdTe のデポジットエネルギー、縦軸は Si のデポジットエネルギー

また、図 3.14 と図 3.15 に 1 イベントのヒット回数が 3 回で、Si で 1 回、CdTe で 2 回相互作用しているイベントだけ取得しスペクトルを描いている。2 ヒットの時と同様に反応の順番は考慮されていない。それぞれ、左図が  $^{137}\text{Cs}$  を照射したときのスペクトル、右図が  $^{22}\text{Na}$  を照射したときのスペクトルである。511keV のピークは図 3.11 と比較しカウントが一桁低くなっているがはっきりと確認することが出来る。

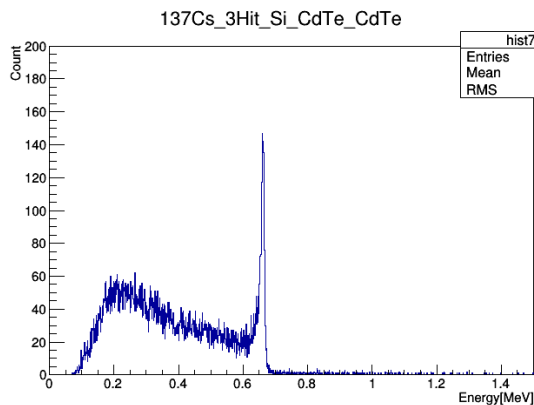


図 3.14: 低温動作試験において  $^{137}\text{Cs}$  を照射した際の Si-CdTe-CdTe 3 ヒットイベントのスペクトル

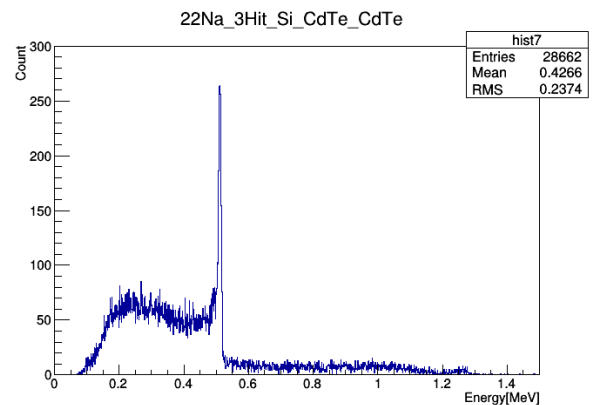


図 3.15: 低温動作試験において  $^{22}\text{Na}$  を照射した際の Si-CdTe-CdTe 3 ヒットイベントのスペクトル

図 3.16 に熱真空試験において  $^{137}\text{Cs}$  を照射した際のスペクトルを示している。測定条件はカメラ温度は -18℃、HV は Si センサーに 230V、CdTe センサーに 1000V 印可し、また、真空度は  $1.6 \times 10^{-3}\text{Pa}$  の条件下で測定した。このスペクトルは CdTe での 1 回ヒットを用いている。0.4MeV から 0.5MeV の間にコンプトンエッジのような様子が見えるが、これは光子がコンプトンカメラ周辺部でコンプトン散乱してエネルギーを失い散乱後の光子が CdTe センサーで光電吸収されたイベントであると考えられる。また、 $^{137}\text{Cs}$  の崩壊エネルギーの 662keV ピークをガウシアンでフィットした結果、エネルギー分解能は 8.93keV であり要求性能を満たしている。

図 3.17 は Si と CdTe それぞれ、1 回ずつ相互作用を起こした 2 回ヒットのイベントで図 3.18 はそれぞれ、 $^{137}\text{Cs}$  を照射した際の 2 回ヒットスペクトルと 3 回ヒットスペクトルを示した。

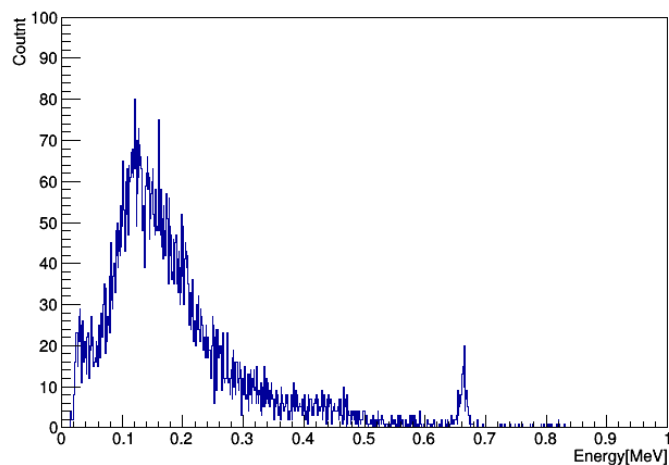


図 3.16: 低温動作試験において  $^{137}\text{Cs}$  を照射して際の CdTe スペクトル。分解能 8.93keV

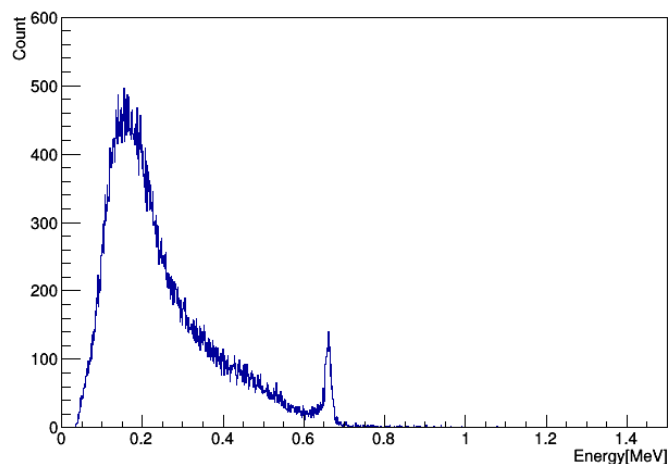


図 3.17: 低温動作試験に置いて  $^{137}\text{Cs}$  を照射して際の 2hit スペクトル

### 3.2.1 スレッシュホールド

検出器がどの程度低いエネルギーの信号まで検出することができるかを把握しておくことは検出器の低エネルギー領域の信頼性を確認するうえでも非常に重要となる。この検出限界 (スレッシュホールド) がコンプトンカメラの Si センサーと CdTe センサーでどの程度のエネルギーになっているかを確認する。Si センサー

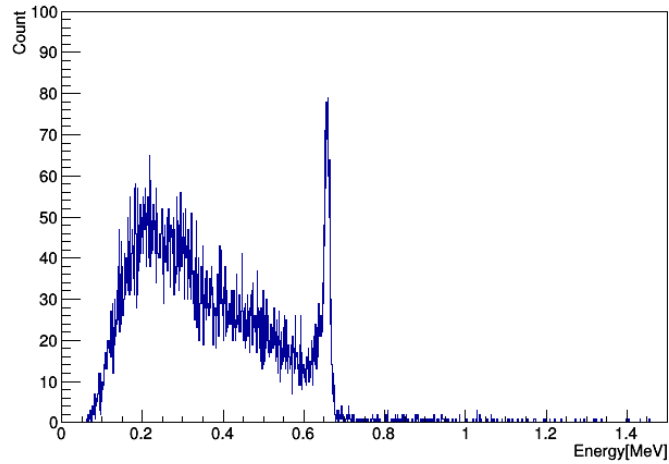


図 3.18: 低温動作試験において  $^{137}\text{Cs}$  を照射して際の 3hit スペクトル

については  $^{241}\text{Am}$  を照射した際のデータを用いて設定は DTHR が 5 かつ Si トリガのデータを使用する。カメラ温度は  $-10$  、真空度は  $1.2 \times 10^{-3}\text{Pa}$  の条件である。図 3.19、図 3.20 に 2 次元ヒストグラムを示す。図 3.19 で 3000ch、7000ch、10000ch、13000ch 付近にデータが入っていないのは Si トリガのみのデータを用いているために CdTe のチャンネルは除外している。図 3.20 で縦軸の  $0.01\text{keV}$  から  $0.02\text{keV}$  付近でカウントが多い領域は  $^{241}\text{Am}$  の  $13.9\text{keV}$ 、 $17.6\text{keV}$  のピークであり、カウントは少ないが  $0.06\text{keV}$  付近に  $59.5\text{keV}$  ピークも確認出来る。ノイズを引っ掛けることもなく、信号は  $6\text{keV}$  から検出出来ていることが分かる。CdTe センサーについては、 $^{137}\text{Cs}$  を照射した際のデータをもちいた。設定は DTHR5、カメラ温度は  $-18.2$  、 $1.6 \times 10^{-3}\text{Pa}$  の条件下で測定を行った。2 次元ヒストグラムを図 3.21 に示した。detid が 100 番台が CdTe-Bottom、200 番台が CdTe-Side である。CdTe トリガのみのデータを用いているため  $0 \sim 32$  番の ASIC は信号を出していない。270 番台の ASIC は HV を印可していないので正常なデータは出力していない。また、CdTe に関してはデータの統計が少ないために 1ASIC で足し合わせたスペクトルを用いている。CdTe のスレッシュホールドは  $6\text{keV}$  を達成している。

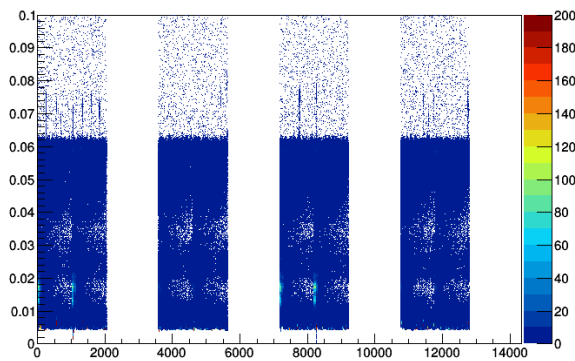


図 3.19: 熱真空試験において  $^{241}\text{Am}$  を照射した際の 2 次元ヒストグラム。横軸チャンネル、縦軸エネルギー。スレッシュホールドは 6keV。60keV は CdTe 層までほとんど届かないため Si のみ表示している。

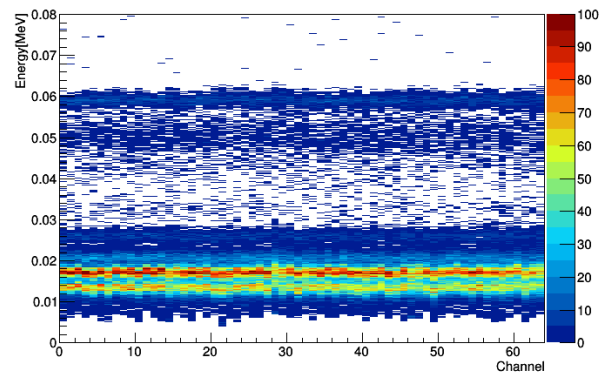


図 3.20: 熱真空試験において  $^{241}\text{Am}$  を照射した際の 2 次元ヒストグラム。横軸チャンネル、縦軸エネルギー。スレッシュホールドは 6keV。0ch から 63ch までを拡大している。60keV は CdTe 層までほとんど届かないため Si のみ表示している。

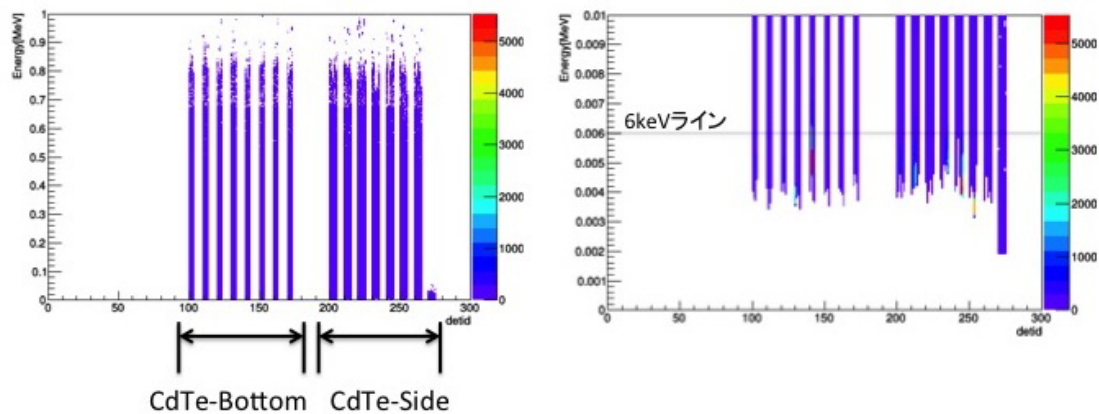


図 3.21: 熱真空試験において  $^{137}\text{Cs}$  を照射した際の 2 次元ヒストグラム。横軸 ASIC の番号、縦軸エネルギー [MeV]。スレッシュホールド 6keV を達成している。CdTe のみトリガをかける設定のため CdTe のみ表示している。

### 3.3 ライブタイム

ライブタイムはイベント間の検出器が待機状態になっている時間である。原子核の崩壊の様なポアソンランダム過程では隣接事象間隔は次の様な式で与えられる。図 3.22 の様な指数関数分布になる。

$$I_1(t)dt = Ae^{-Bt}dt \quad (3.1)$$



ここで  $I_1(t)$  は隣接したランダム事象間の間隔に対する分布関数、 $dt$  は微小時間間隔、 $rdt$  は微小時間  $dt$  の間に一つの事象が発生する微小確率である。[12] 測定中にノイズが大きくなり、トリガが多くなるように

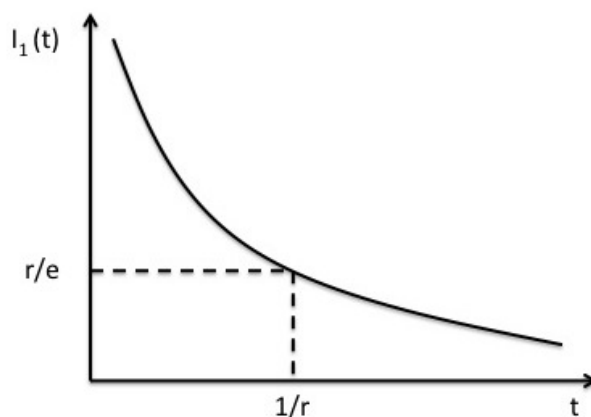


図 3.22: 事象間隔分布関数

なるとデッドタイムが増大し、ライブタイムが指数関数に従わなくなる。図 3.23 と図 3.24 ライブタイムのグラフを示した。横軸は時間(クロック)、縦軸カウンターのヒストグラムを作成した。今回設定しているクロック間の時間は  $320\text{nsec}$  であるので横軸の単位は 1 メモリが  $320\text{nsec}$  となっている。ライブタイム性能の検証にはを式 (3.1) でライブタイムヒストグラムをフィットを行い計算したカウントレート  $R = B/320\text{n[sec]}$  と総イベント数をライブタイムで割って計算したカウントレート  $R'$  とを比べてライブタイムの整合性を検証した。ここで、 $R'$  の計算に使用するライブタイムの値は扱っているデータのイベントツリーにつめている 1 イベントごとのライブタイムを足し合わせた合計をとっている。まず、 $^{137}\text{Cs}$  について、図 3.23 のライブタイムのヒストグラムに対して式 (3.1) の関数でフィットを行った。フィットの結果、傾きを表すパラメータ  $B$  は  $-3.62 \times 10^{-4}$  という値を得た。  $B$  をもちいるとレート  $R$  は、 $R = -3.62 \times 10^{-3} / 320 \times 10^{-9} = 1132.9$  となる。また、データの総イベント数は 1936526 イベントであり、ライブタイムの合計は 1710.8sec であるので、レート  $R'$  は  $R' = 1936526 / 1719.8 = 1131.9$  となる。この 2 つのレートを比べると 0.08 % で一致する。次に、 $^{133}\text{Ba}$  のデータについても行うと、 $R = 6.115$ 、 $R' = 6.106$  となり 0.15 % で一致した。

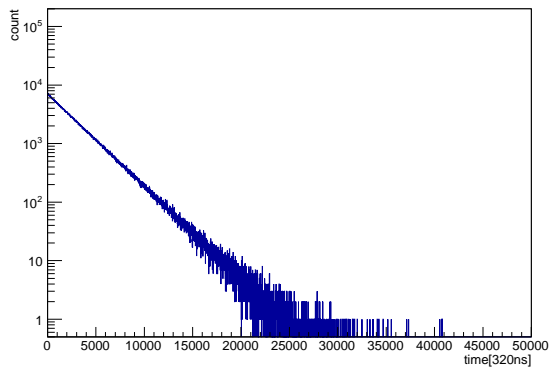


図 3.23: 熱真空試験において  $^{137}\text{Cs}$  のライブタイム。横軸はイベント間の時間で単位は 320nsec、縦軸はカウント

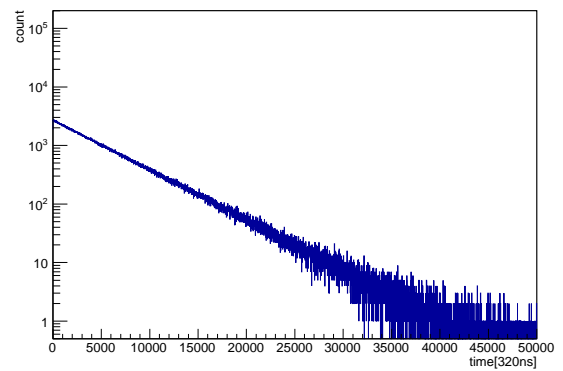


図 3.24: 熱真空試験において  $^{133}\text{Ba}$  のライブタイム。横軸はイベント間の時間で単位は 320nsec、縦軸はカウント

### 3.4 マルチヒットイベント

ここでは複数のヒットをコンプトンカメラに残したマルチヒットイベントについて調べる。まず、ヒット回数分布を調べることで、どのようなイベントがコンプトンカメラで検出されているかわかる。それを調べることで、コンプトンカメラで起きている現象を物理的に解釈し、コンプトンカメラが正しく動作しているか判断する情報となる。ヒット回数分布は 1 イベントで複数のピクセルが信号をだしているイベントについて横軸を 1 イベントで信号を出しているピクセル数、縦軸にライブタイムで規格化したカウントである。ヒット回数分布のグラフを図 3.25 と図 3.26 に示す。これらのヒストグラムはそれぞれのライブタイムで規格化を行っている。図 3.25 は線源  $^{137}\text{Cs}$  データ及び  $^{60}\text{Co}$ 、バックグラウンドデータの重ね合わせである。長期動作試験時のバックグラウンドデータに比べ線源データはヒット回数 10 回程度まではカウントレートが線源データよりも多く出ているが、10 回以上はほとんどレートが変わらないため、ヒット回数 10 回以上では線源イベントよりバックグラウンドイベントが支配的であると考えられる。図 3.26 は左図のバックグラウンドデータ (水色) と鉛で囲って取得した内在バックグラウンドデータ (黒) の比較である。2Hit から 8Hit 程度までは内在バックグラウンドデータのカウントレートが低く、鉛のシールドでバックグラウンドレベルを落としていると考えられるが、1Hit では内在バックグラウンドのカウントレートの方が高くなっている。これは、鉛シールドで囲んだことにより、外来のバックグラウンドを防いだ結果、コンプトンカメラの構成物質のトリウム系列の放射線同位体のイベントが光電吸収されるようなイベントが増えているからであると考えられる。

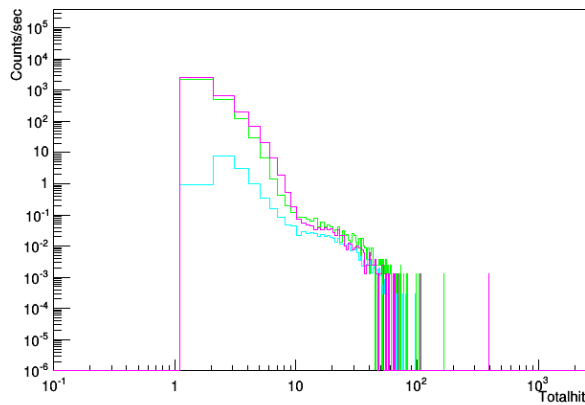


図 3.25: ヒット回数ヒストグラム。線の色はそれぞれ、黄緑が  $^{133}\text{Cs}$ 、マゼンダが  $^{60}\text{Co}$ 、水色が Lowgain 設定時のバックグラウンドデータ

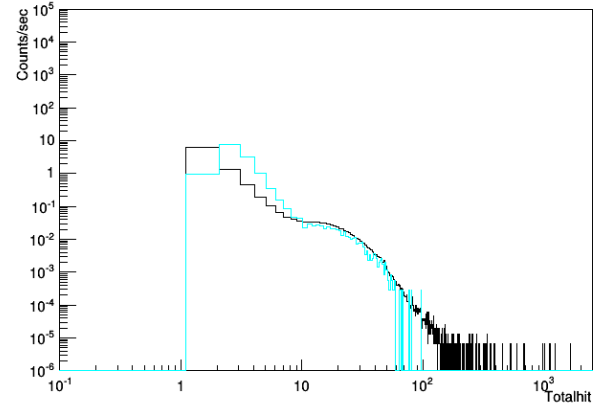


図 3.26: ヒット回数ヒストグラム。線の色はそれぞれ、水色がバックグラウンドデータ、黒が内在バックグラウンド取得データ

ヒット回数分布ヒストグラムの特徴からヒット回数を次の3つの区分に分けて解析を行った。領域1はヒット回数が1～9の線源からのイベントが多いと考えられる領域、領域2はヒット回数が10～100の各データで共通して見られる領域、領域3はヒット回数100以上の極端にヒット回数が多い領域の3つに区別した。

まず領域1である。 $^{137}\text{Cs}$ を照射した際のデータに関してヒット回数1から4及び5回以上のイベント数の割合を示したヒストグラムを図3.27に示す。全イベントに対する割合は1Hitが77.1%、2Hitが17.4%、3Hitが4.16%、4Hitが1.01%、5Hit以上は0.33%である。イベントのほとんどは光電吸収イベントと考えられる1Hitイベント、コンプトン散乱イベントと考えられる2Hitと3Hitイベントであることが分かる。

次に、コンプトン散乱イベントと考えられる2ヒットと3ヒットのみを考え、各種線源のピークイベントがパターンごとにどの程度の割合で発生しているかの検証を行った。ここでいうパターンとは2回ヒットイベントで相互作用を起こしているセンサーがSi-Si、CdTe-CdTeのイベント及び3回ヒットイベントで相互作用を起こしているセンサーがSi-Si-Si、Si-Si-CdTe、Si-Si-CdTe、CdTe-CdTe-CdTeイベントのことである。図3.28に $^{133}\text{Ba}$ を照射してデータを取得した際の2回ヒットイベントのスペクトル(青:Si-Si、マゼンダ:Si-CdTe、水色:CdTe-CdTe)、図3.29に3回ヒットイベントのスペクトル(青:Si-Si-Si、黄緑:Si-Si-CdTe、マゼンダ:Si-CdTe-CdTe、水色:CdTe-CdTe-CdTe)をそれぞれ示す。スペクトルで見えている5本ピークは高エネルギー領域からそれぞれ、383.8keV、356.0keV、302.8keV、276keV、81.0keVである。

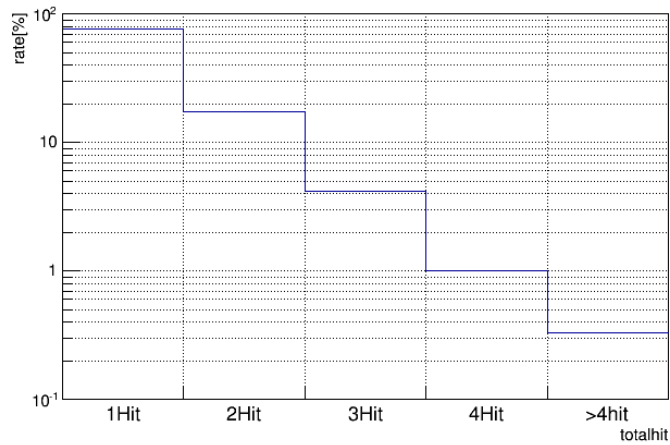


図 3.27: ヒット回数分布。 $^{137}\text{Cs}$  を照射した際のデータ

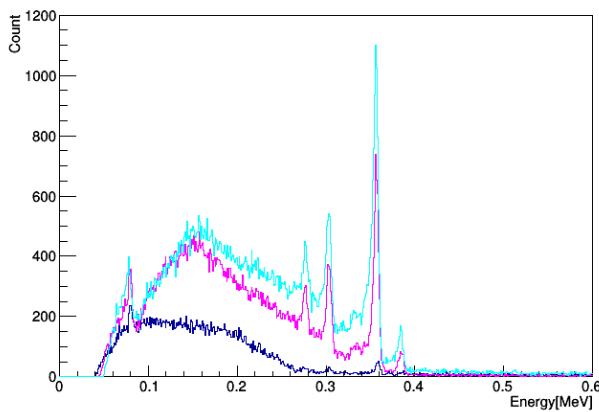


図 3.28: 長期動作試験において  $^{133}\text{Ba}$  の 2Hit スペクトル。青が Si-Si-Si ヒット、マゼンダが Si-CdTe ヒット、水色が CdTe-CdTe ヒット。

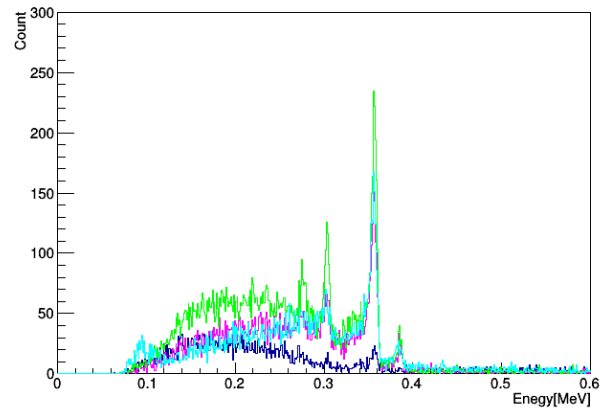


図 3.29: 長期動作試験において  $^{133}\text{Ba}$  の 3Hit スペクトル。青が Si-Si-Si ヒット、黄緑が Si-Si-CdTe ヒット、マゼンダが Si-CdTe-CdTe ヒット、水色が CdTe-CdTe-CdTe ヒット。

コンプトン再構成で主に使用するイベントは 2hit と 3hit のコンプトン散乱イベントである。そこで、2Hit、3Hit イベントに関してはコンプトンカメラ内で全エネルギーをデポジットしたイベントの作るスペクトル中の線源ピークに注目して、各パターンごとの割合を算出する。割合を算出するために、各パターンのスペクトルの線源ピークの面積を比較することで割合を求める。この時面積を計算するために線源ピークに対してガウスフィットを行う。

各パターンの割合の算出方法は次の通りである。まず各パターンについて次のガウス分布の関数と一次

関数の組み合わせでフィットを行った。

$$G(x) = \frac{s}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - H_0)^2}{2\sigma^2}\right) + Ax + B \quad (3.2)$$

ここで、 $s$  はガウス分布の面積、 $H_0$  はガウス分布の中心位置、 $\sigma$  は幅を表す。ガウス分布でフィットを行った結果得られた面積  $s$  を全パターンの面積  $s$  の足し合わせた面積  $S$  で割ることで各パターンでの線源ピークイベントの割合を算出している。図 3.30 に  $^{133}\text{Ba}$  及び、 $^{22}\text{Na}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  で得られた各ヒットパターンの割合を示す。

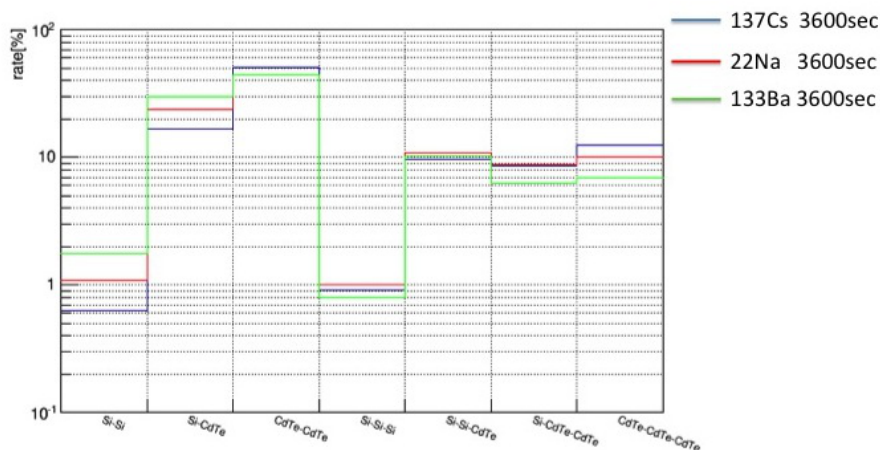


図 3.30:  $^{133}\text{Ba}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  の各パターンの線源ピークイベントの到来比率

356keV 以上のエネルギーであると Si のみで相互作用を起こしているイベントは少なく ~3 %程度であることがわかる。

次に領域 2 のデータにおけるイベントについて調査した。これらのイベントは全体の 1 %程度ある。ただし、内在バックグラウンドの 44 時間データは 5.6 %存在した。そこでこのようなイベントの特性を調べるために、信号を出しているピクセルの位置を示した 3次元プロットを作成した。図 3.32 に  $^{137}\text{Cs}$  における 3次元プロットを示す。このイベントはヒット回数が 12 で全て CdTe-Side で信号を出しているイベントである。このデータは長期動作試験時のデータのものであるので、コンプトンカメラを横に設置している。つまり、x 軸-50mm かつ y-z 平面が天をみるように設置している。そのため、このイベントは  $(x,y,z)=(-19.725,30.975,-66.475)$  で最初にエネルギーを落とし、一直線に CdTe-Side を貫いた宇宙線イベントであると考えられる。

図 3.33 にヒット回数が 40 回のイベントの 3次元プロットを示す。x 軸、y 軸、z 軸の単位は mm でコンプトンカメラの空間を表している。このイベントはコンプトンカメラの真上から粒子が到来し、コンプトンカメラの全層、つまり、Si32 枚と CdTe8 枚の合計 40 枚全てで相互作用を起こしエネルギーを落としていくイベントである。プロットの軌跡がコンプトンカメラを一直線に貫いているため宇宙線イベントと考えられる。図 3.34 にコンプトンカメラの z 軸座標とデポジットエネルギーの関係を示した。si で一番下のセンサーの z 軸座標が-55.4mm、cdte で一番上のセンサーの z 軸座標が-59.175mm である。宇宙線が通過した際に物質と相互作用を起こした時の最小電離エネルギーは Si で 220keV 程度、CdTe で 440keV 程度で

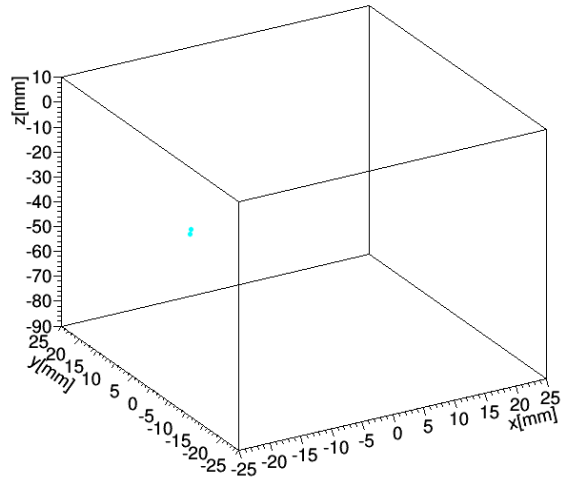


図 3.31: 信号を出しているピクセル位置のプロット。 $^{137}\text{Cs}$  照射時のデータの totalhit2 ヒットイベント。合計エネルギー 662keV で線源由来のイベントと考えられる

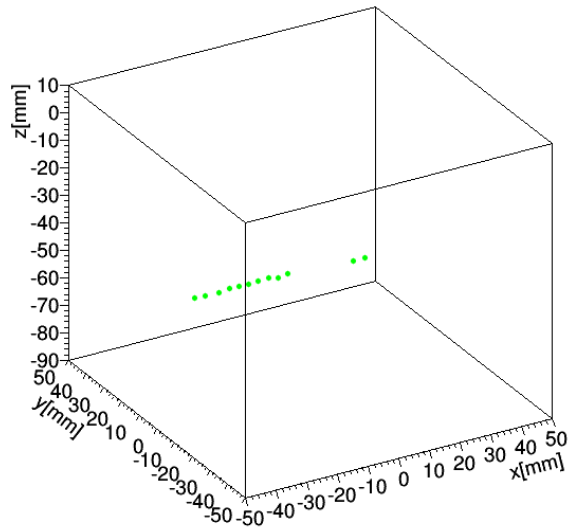


図 3.32: 信号を出しているピクセル位置のプロット。長期動作試験時の  $^{137}\text{Cs}$  データの totalhit が 12。宇宙線イベントと考えられる。単位は mm でコンプトンカメラの空間を示す。

あるが、このイベントのデポジットエネルギーの多くは Si では 200keV 程度、CdTe では 400keV 前後と概ね一致している。

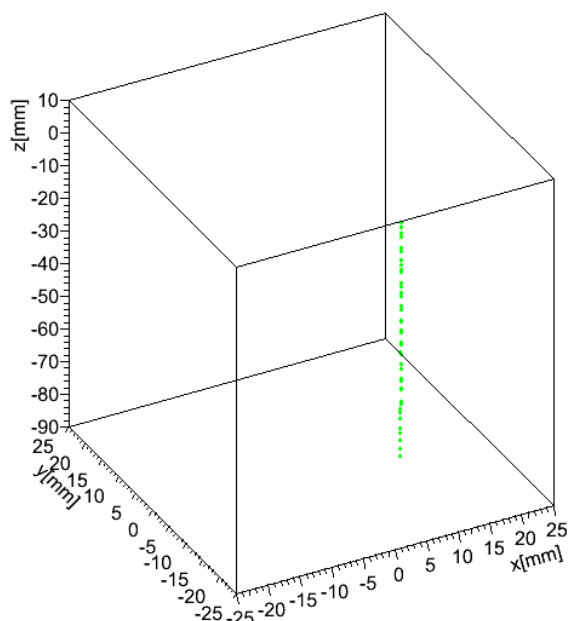


図 3.33: 内在バックグラウンド試験において  $^{137}\text{Cs}$  を照射した際の totalhit が 40 のイベントピクセル位置のプロット。キャンバスはコンプトンカメラの空間を表している。宇宙線プロットと考えられる。eventid が 178397。

つぎに領域 3 におけるイベントの 3 次元プロットを図 3.35 に示す。このイベントは内在バックグラウンド測定 44 時間のうち最大のヒット回数をだしていたイベントである。このプロットのからは宇宙線のような直線的な飛跡はみられない。図 3.36 にコンプトンカメラの  $z$  座標 (高さ) とカウントの関係を示したヒストグラムを示す。このイベントは Si、CdTe-Bottom、CdTe-Side 全てのセンサーの種類で信号を出しているイベントであるが、3.36 をみるとコンプトンカメラの上部での反応が多いことが分かる。また、図 3.37 にこのイベントにおける 1 ピクセルごとのデポジットエネルギーのヒストグラムを示す。このヒストグラムでは 200keV 程度にピークがきているが、MIP 粒子の Si センサー 1 枚で落とすエネルギーも 200keV 程度であるためこのイベントは宇宙線に起因するイベントであると考えられる。

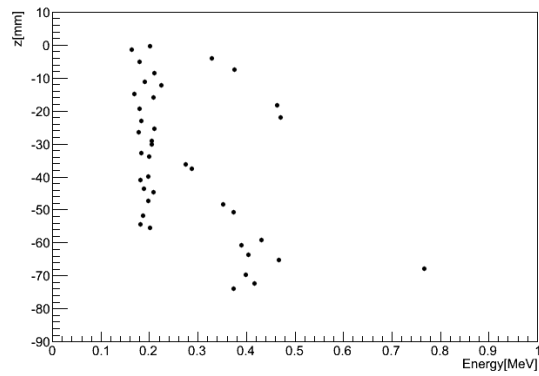


図 3.34: 3.33 における 1 ピクセルごとのデポジットエネルギーと z 軸座標の関係。eventid が 178397。totalhit が 40 のイベント

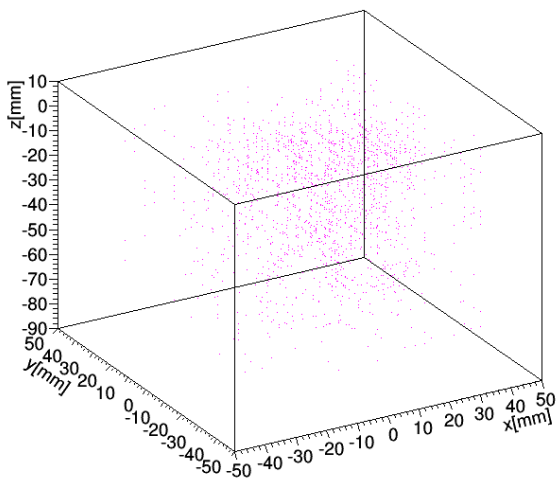


図 3.35: 1648 回ヒットイベントの信号を出しているピクセルの 3 次元プロット

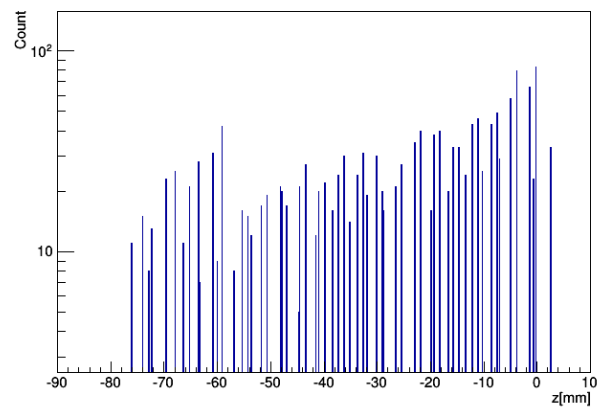


図 3.36: 1648 回ヒットイベントの z 軸 (高さ) に対するカウントのヒストグラム

ヒット回数 5 回以上のイベントについて図 3.32 のような直線状のイベントの数を調査した。判断基準としては、1 イベントでの信号を出しているピクセルの 3 次元位置を直線でフィットを行い、カイ二乗

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(P_i - m_i)^2}{(\Delta P_i)^2} \quad (3.3)$$

を求めた。ここで、 $P_i$ :データ位置、 $\Delta P_i = 1.6mm$ :ピクセル幅の 1/2、 $m_i$ :直線モデル値である。そして、 $\chi^2$  を自由度 (ヒット数-7) で割ったときに 1 より小さい場合に宇宙線イベントと判断することとした。パッ



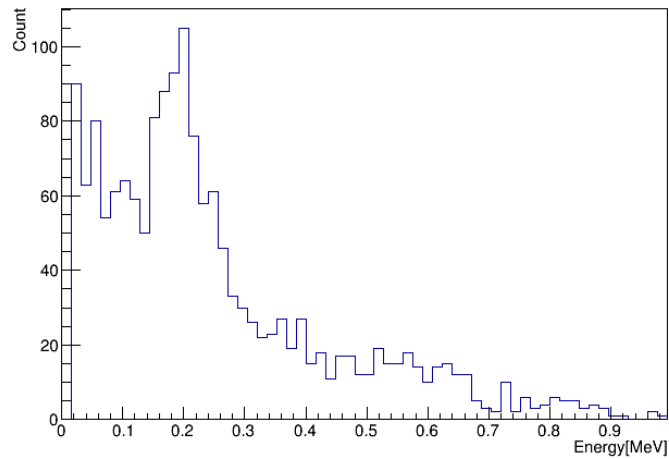


図 3.37: 図 3.33 における 1 ピクセルごとのデポジットエネルギーのヒストグラム。eventid が 178397。totalhit が 40 のイベント

クグラウンドデータに関するヒット回数ごとの総イベント数及び直線状イベントの数のヒストグラム、熱真空試験時における  $^{137}\text{Cs}$  照射時のデータが図 3.38 と図 3.39 であり、熱真空試験時の  $^{137}\text{Cs}$  照射時のデータ、図 3.40 と図 3.41 がバックグラウンドデータ、図 3.42 及び図 3.43 が内在バックグラウンド試験時のデータである。3 つのデータのどれもヒット数 20 ~ 40 では 40 ~ 60 % が直線状のイベントである。また、コンプトンカメラの層数 40 より大きなヒット数のイベントでは少なくなり、ヒット数 58 以上は直線状イベントは存在しなくなっていることが分かる。ヒット回数が 15 以下で  $^{137}\text{Cs}$  のデータの方が直線状のイベントが少なくなる理由は線源によるイベントが存在するためと考えられる。内在バックグラウンドでヒット数が少なくなる理由は宇宙線が鉛ブロックにより多重散乱されるようなイベントが増えるためと考えられる。

また、直線状でないイベントは次のようなものであった。宇宙線が通過した際にガンマ線を放射して直線と別のところにヒットを作ったイベント、純粋にノイズのような規則性がなくまばらにでているようなイベント。このようなイベントを区別できるようなアルゴリズムにしていく必要がある。

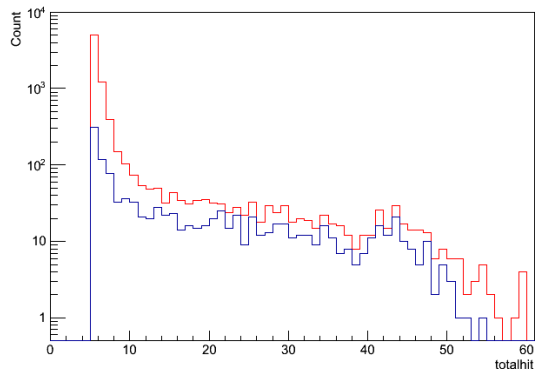


図 3.38: ヒット回数 5 回以上のヒット分布。赤が全てのイベント、青が直線フィットした宇宙線と考えられるイベント。データは熱真空試験時の  $^{137}\text{Cs}$  照射時のもの

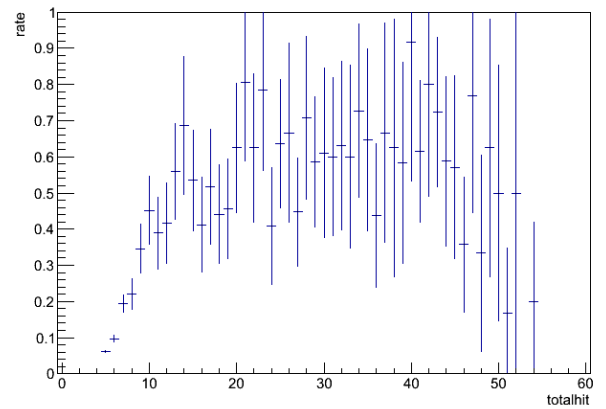


図 3.39: ヒット回数ごとのイベント数と宇宙線イベントの割合。データは熱真空試験時の  $^{137}\text{Cs}$  照射時のもの

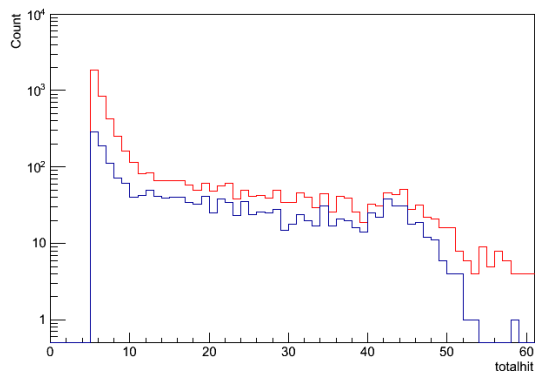


図 3.40: ヒット回数 5 回以上のヒット分布。赤が全てのイベント、青が直線フィットした宇宙線と考えられるイベント。データは Pb なしのバックグラウンド測定時のもの

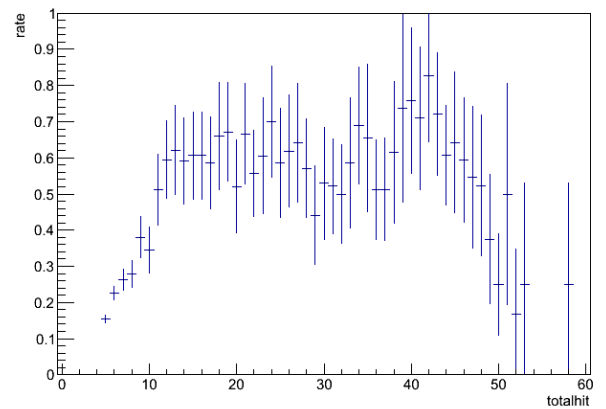


図 3.41: ヒット回数ごとのイベント数と宇宙線イベントの割合。データは Pb なしのバックグラウンド測定時のもの

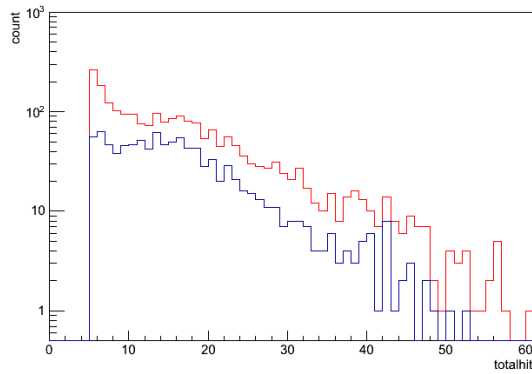


図 3.42: ヒット回数 5 回以上のヒット分布。赤が全てのイベント、青が直線フィットした宇宙線と考えられるイベント。データは内在バックグラウンド測定時のもの

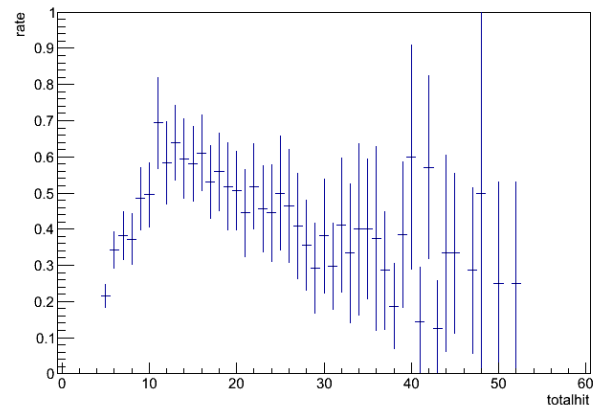


図 3.43: ヒット回数ごとのイベント数と宇宙線イベントの割合。データは内在バックグラウンド測定時のもの

### 3.5 バックプロジェクション

長期動作試験において  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{133}\text{Ba}$  を照射した際のデータの Si と CdTe で 2 回相互作用を起こしたイベントについてコンプトン再構成を行い、バックプロジェクションを行った。(2.3) で述べた通り、バックプロジェクションはイベントごとに描かれるコンプトンコーンの重ね合わせを線源を含む平面に投影する。図 3.44 及び図 3.47 に  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{133}\text{Ba}$  を照射した際のバックプロジェクションを行った図をそれぞれ示す。図 3.45 と図 3.48 は X 軸のみに投影を行ったものである。このようにカメラ中央に設置した線源のイメージがしっかりと取れている。図 3.46 と図 3.49 がそれぞれのイメージの ARM 分布である。 $^{133}\text{Ba}$  の ARM より  $^{137}\text{Cs}$  の ARM の分解能が良くなっている理由は低エネルギー側では Doppler broadening の効果が現れているためである。

また、バックグラウンドによるイメージング性能の悪化を防ぐための手法として UEP 法 (Uniformly enlarged projection) がある。UEP 法では、コンプトンコーンを 2 次元平面に投影したさいに一様にプロットすることで出現する 'ゴースト' と呼ばれる投影した平面の中心が明るくなるイメージが出現する。このゴーストを除去する手法をこのように呼んでいる。除去の手法としてはプロットする平面のピクセルとコンプトンコーンの原点からの距離に応じて重み付けを行うことである。[1]

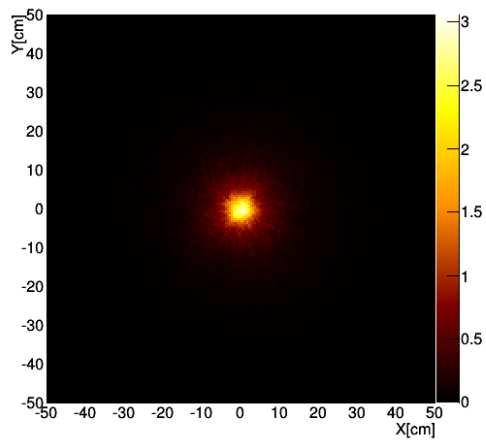


図 3.44: 長期動作試験において  $^{137}\text{Cs}$  を照射した際の Si-CdTe<sub>2</sub> ヒットイベントのバックプロジェクション

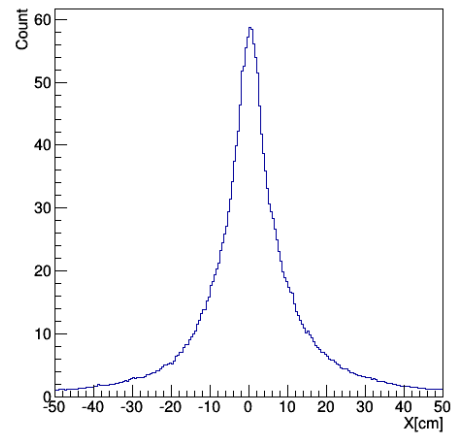


図 3.45: 長期動作試験において  $^{137}\text{Cs}$  を照射した際の Si-CdTe<sub>2</sub> ヒットイベントの X 軸プロジェクション

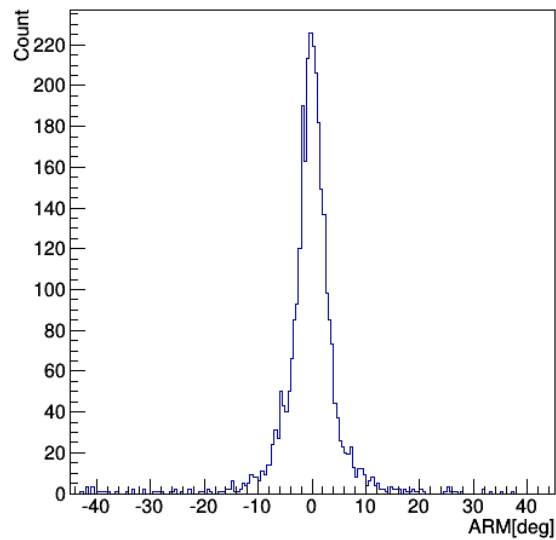


図 3.46: 長期動作試験において  $^{137}\text{Cs}$  の 662keV を Si-CdTe の 2 回ヒットで再構成した時の ARM 分布

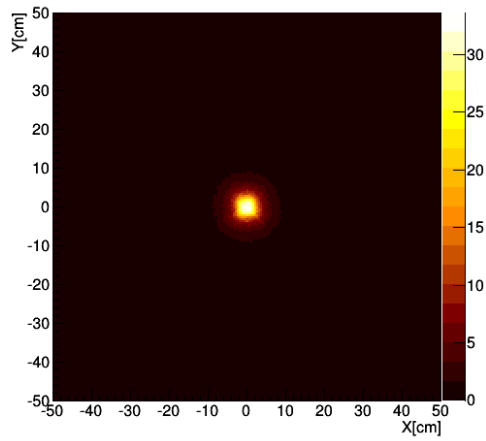


図 3.47: 長期動作試験において  $^{133}\text{Ba}$  を照射した際の Si-CdTe<sub>2</sub> ヒットイベントのバックプロジェクション

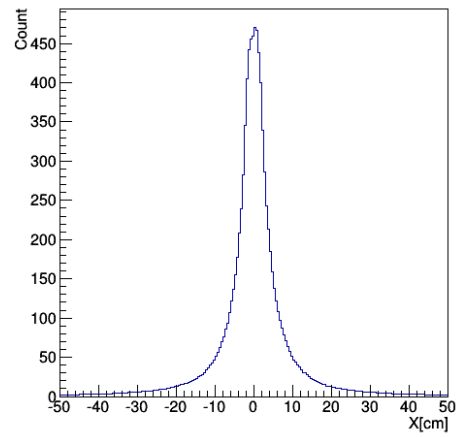


図 3.48: 長期動作試験において  $^{133}\text{Ba}$  を照射した際の Si-CdTe<sub>2</sub> ヒットイベントの X 軸プロジェクション

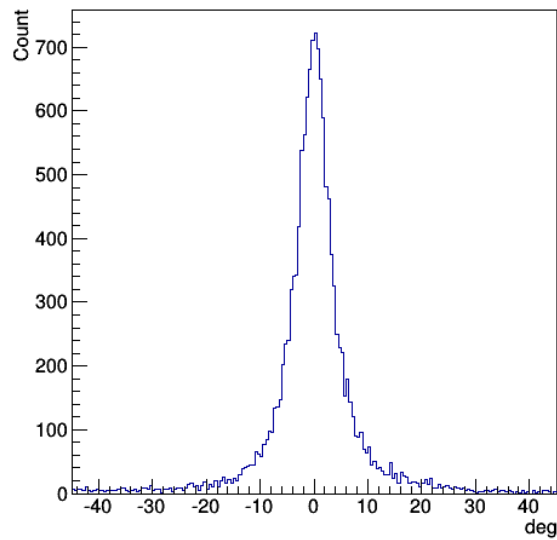


図 3.49: 長期動作試験において  $^{133}\text{Ba}$  の 356keV を Si-CdTe の 2 回ヒットで再構成した時の ARM 分布

## 第4章 まとめと今後

本研究ではSGD搭載のFull EMコンプトンカメラにおけるノイズレベル及びスペクトル性能、ライブタイム率やマルチヒットの解析を行った。本論文の結論を示す。

- Full EMコンプトンカメラのエネルギー分解能及びノイズレベル、ライブタイム率は要求を見たとし、コンプトンカメラが正常に動作していることを確認した。
- SiセンサーとCdTeセンサーについてのスレッシュホールドがともに6keVを達成していることを確認した。
- 1イベントに対して複数の信号を出しているマルチヒットイベントについて解析を行い、2Hit及び3Hitにおける各パターンの線源ピークイベントの割合を示した。また、ヒット回数が5以上のイベントに対して直線フィットを行うことにより宇宙線イベントと考えられる直線状のイベントの割合を示した。

今後は、詳細な宇宙線によるバックグラウンドレートを見積もるためにも、現状の直線フィットで取りこぼしがあると考えられる宇宙線イベントにも適応するアルゴリズムを開発し、さらに詳細に解析していく必要がある。また、宇宙線イベントがピクセルと相互作用してデポジットするエネルギーの入射角度依存性などの解析も行っていく必要がある。

# 謝辞

本論文を執筆するにあたり多くの方にご指導いただきました。指導教官である深沢先生には大学院から研究室に所属した私を快く受け入れてくださり、また、丁寧なご指導を頂いたことを深く感謝致します。深沢先生を始め研究室のスタッフの方々には大変お世話になりました。誠にありがとうございました。また、コンプトンカメラのテーマに決定してから宇宙科学研究所の高橋先生を始め、渡辺先生、博士後期課程の戸さんには大変お世話になりました。誠にありがとうございました。また、修士1年の古井君は同じ広島大学コンプトンカメラチームとして共に解析を行い研究生活を支えてもらいました。本当にありがとうございました。この論文上では全ての感謝を述べることは叶いませんが、本文章で協力していただいた皆様へ心から感謝の気持ちと御礼を申し上げたく、謝辞にかえさせていただきます。

## 付録 A スペクトル一覧

この付録では SGD 搭載 Full EM コンプトンカメラで取得した、各 ASID ごとのスペクトルを示す。



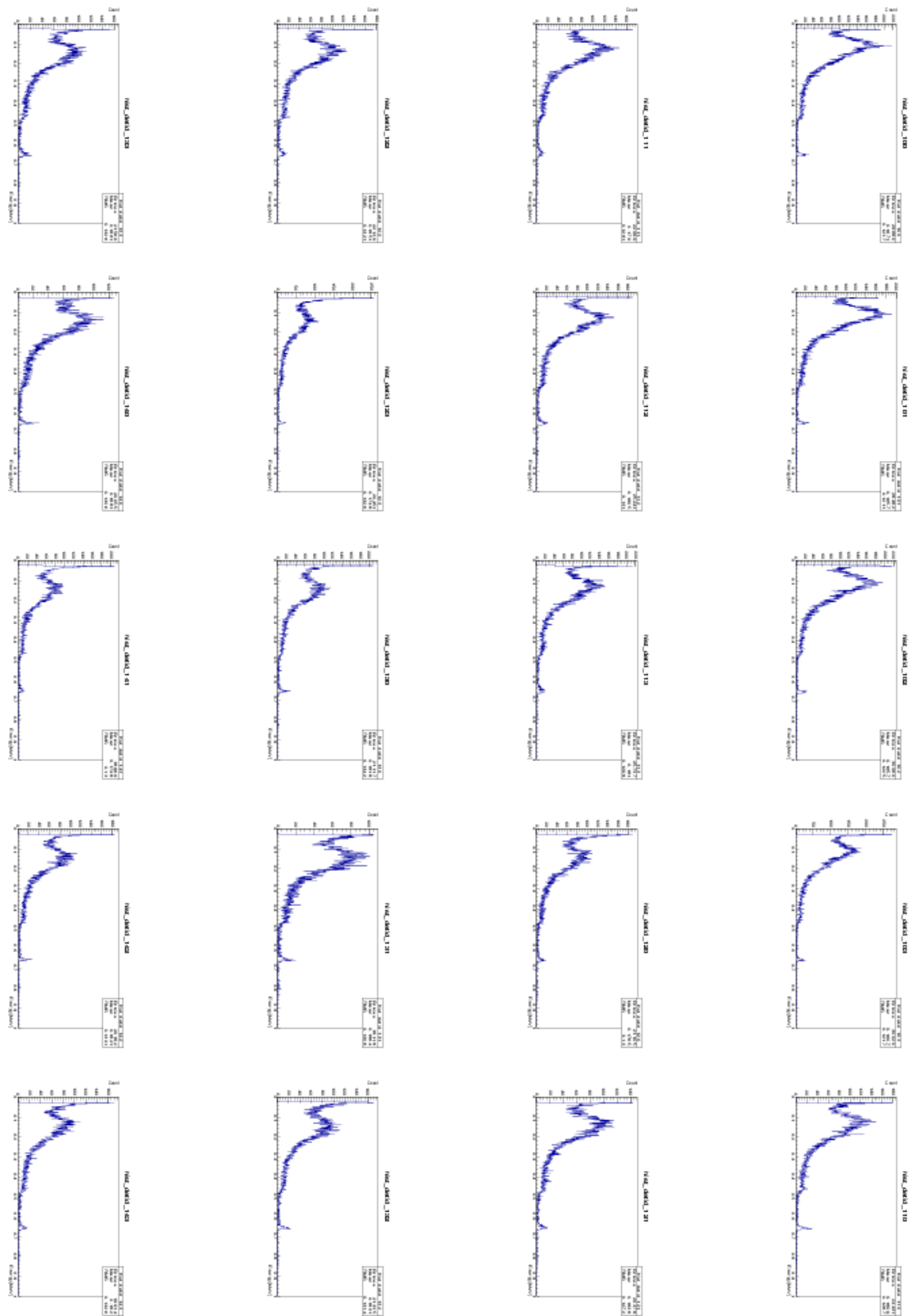


図 1:  $^{137}\text{Cs}$  を照射した際の CdTe スペクトル。統計が少ないため ASIC でまとめている。detid が 100 から 143。

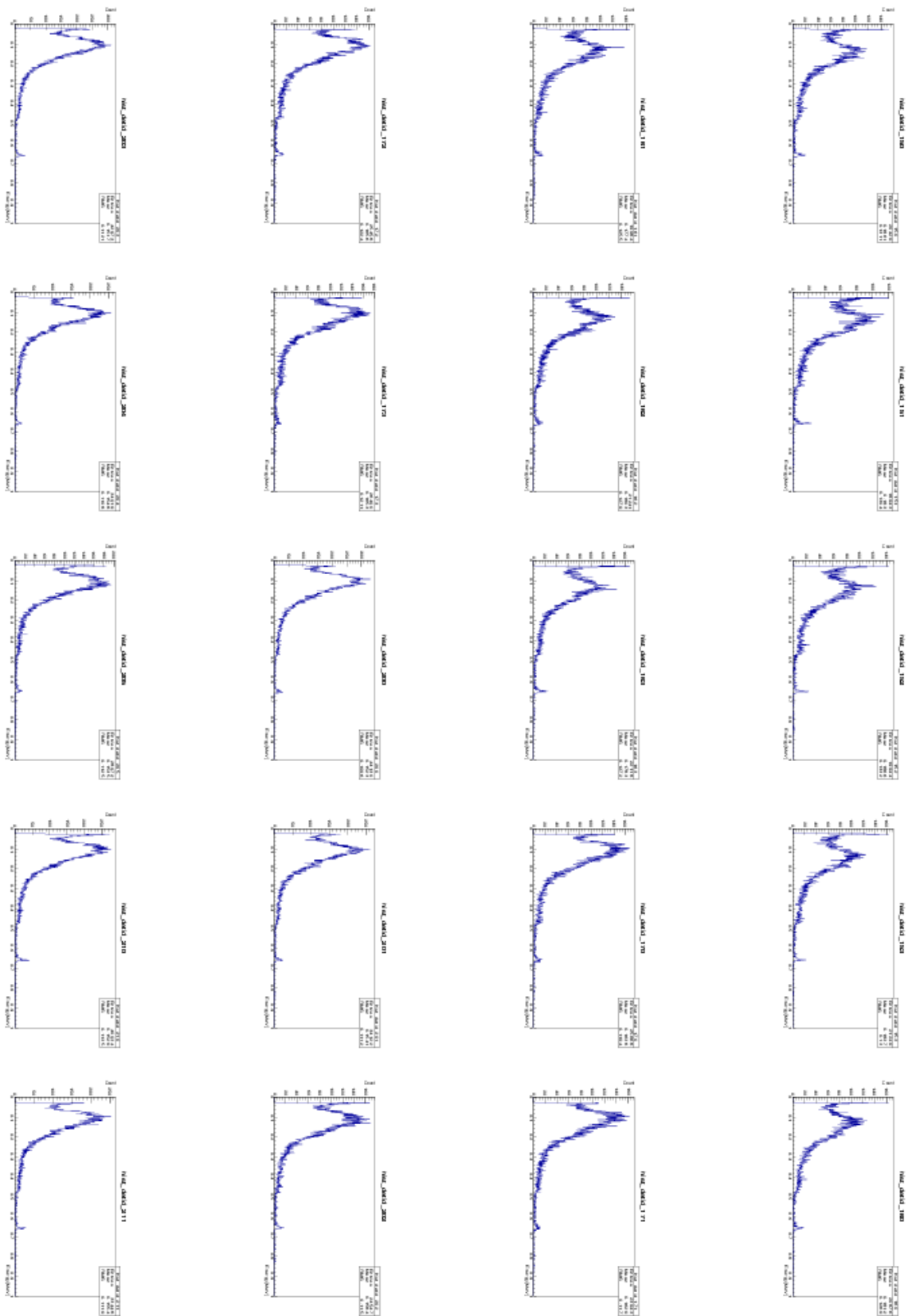


図 2:  $^{137}\text{Cs}$  を照射した際の CdTe スペクトル。統計が少ないため ASIC でまとめている。detid が 150 から 211。

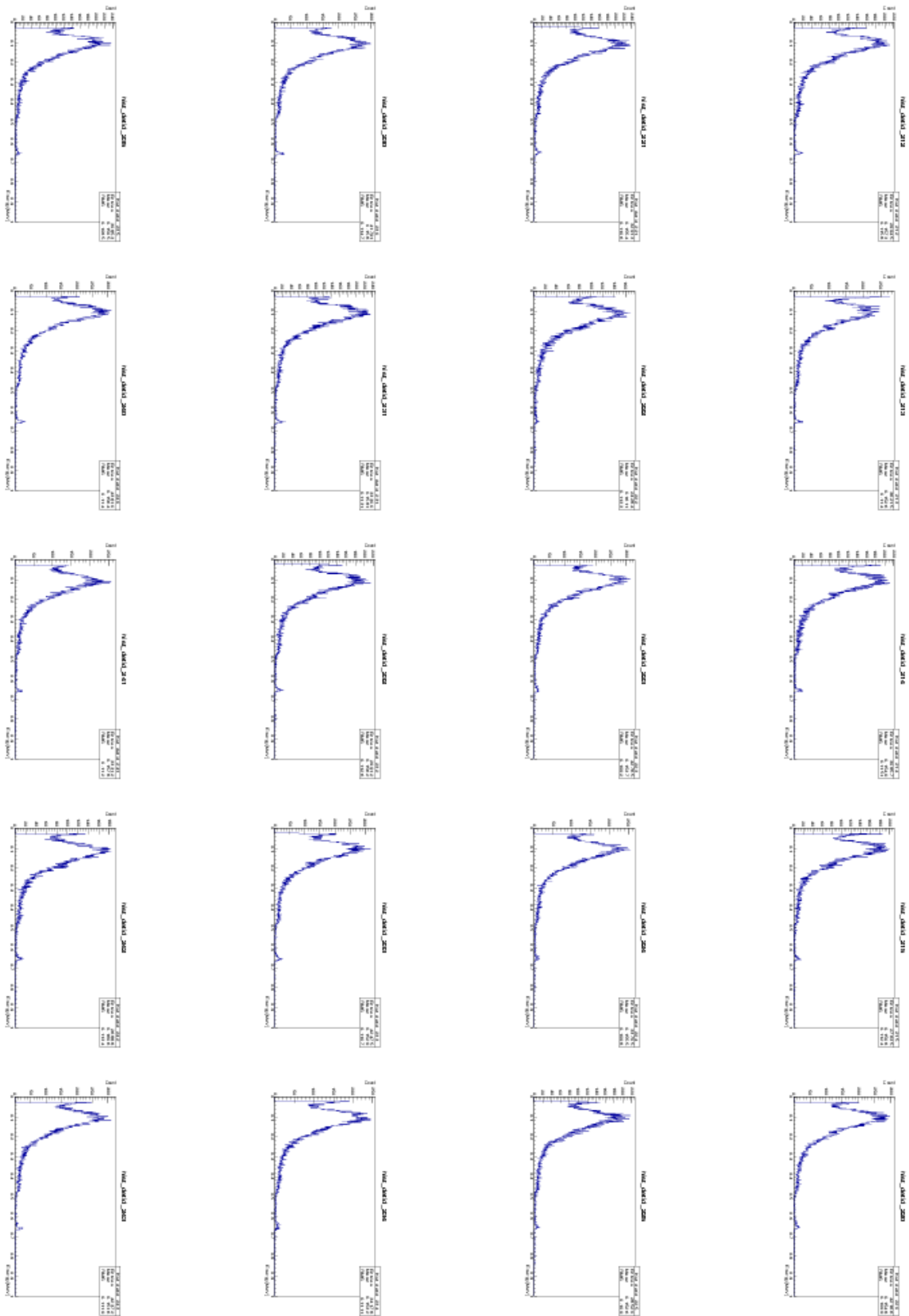


図 3:  $^{137}\text{Cs}$  を照射した際の CdTe スペクトル。統計が少ないため ASIC でまとめている。detid が 212 から 243。

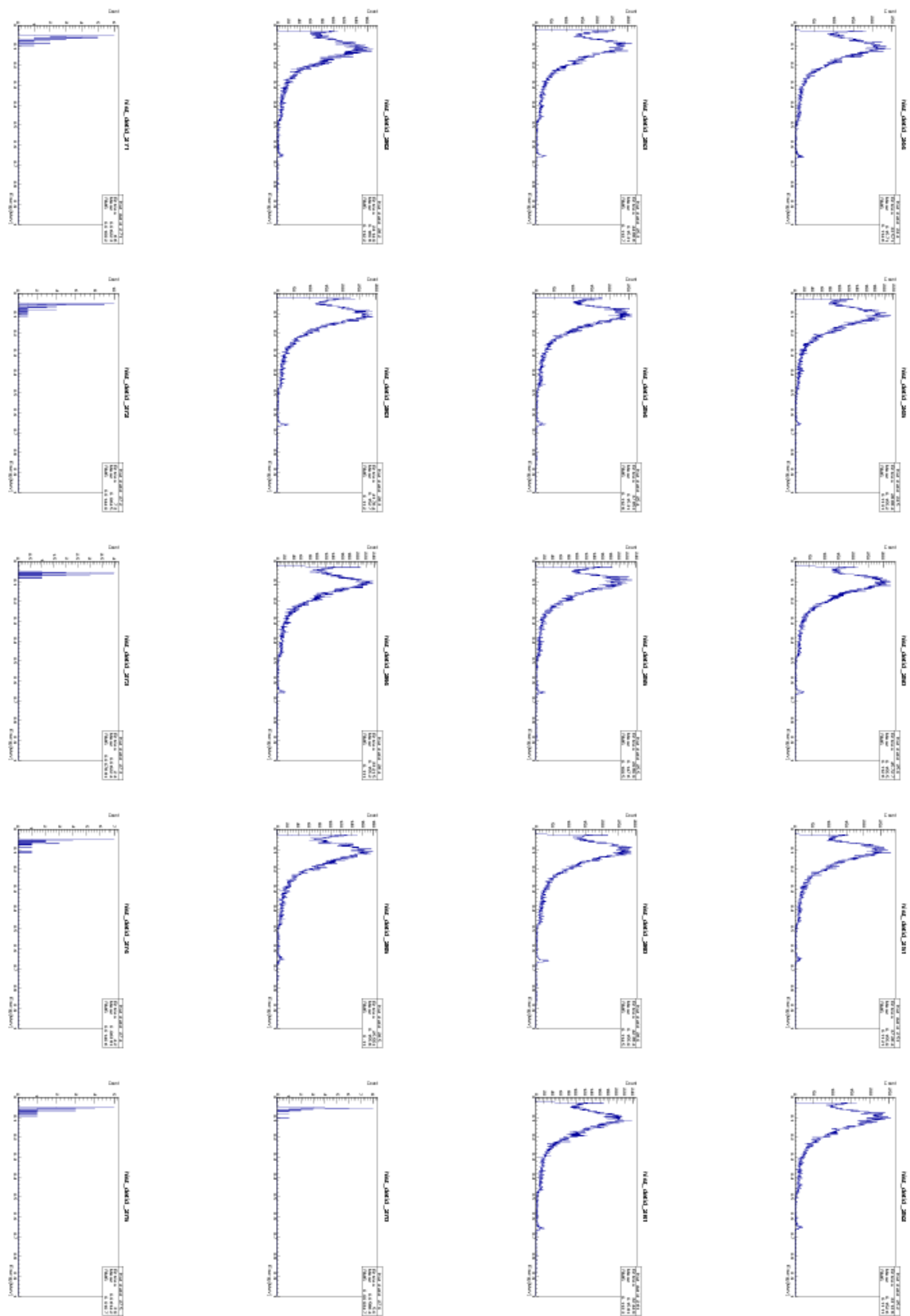


図 4:  $^{137}\text{Cs}$  を照射した際の CdTe スペクトル。統計が少ないため ASIC でまとめている。detid が 244 から 275。

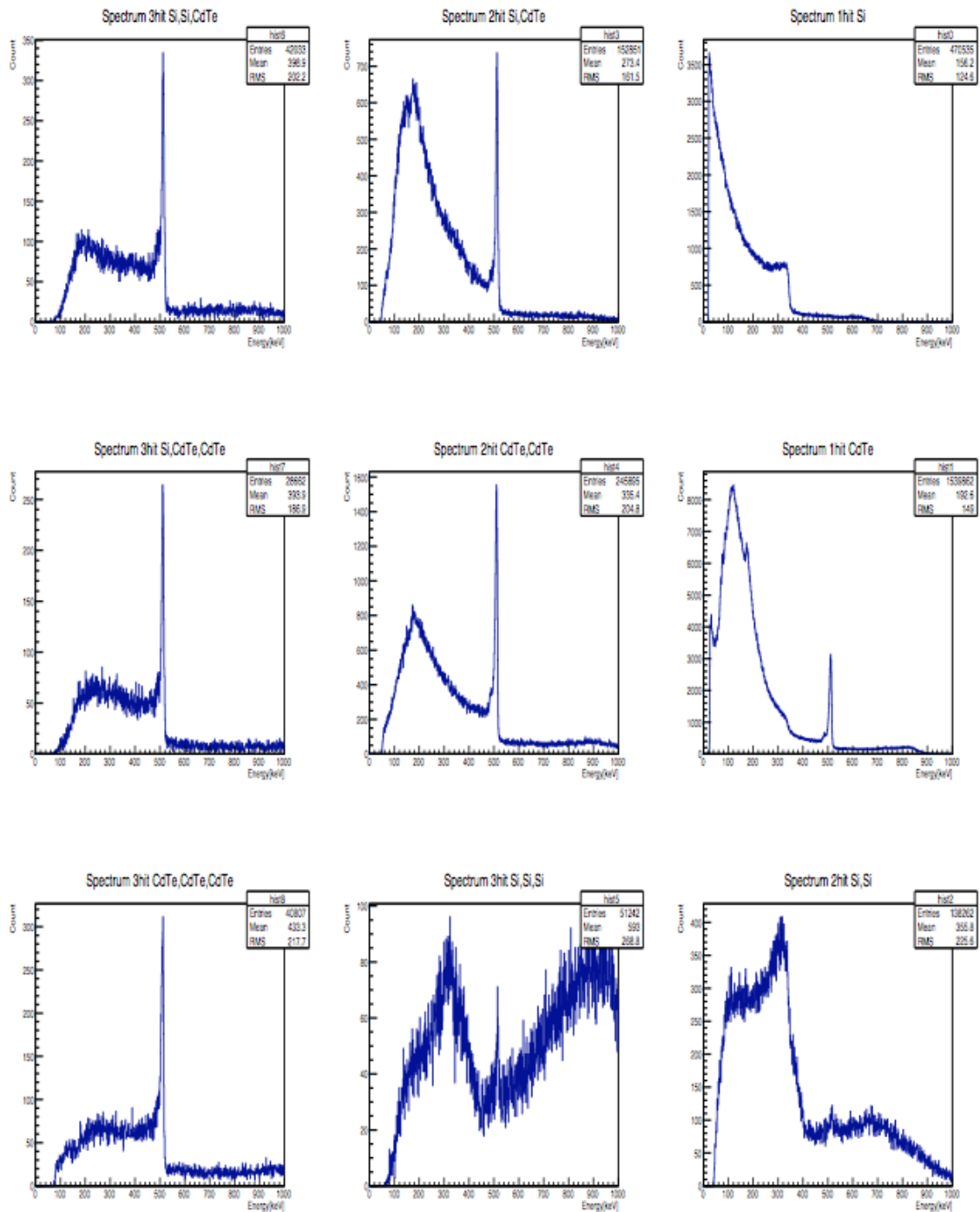


図 5: 長期動作試験において  $^{22}\text{Na}$  を照射した際の各パターンのスペクトル。

## 関連図書

- [1] 一戸 悠人 修士論文「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器におけるコンプトン再構成アルゴリズムの開発」東京大学
- [2] 小高 裕和 修士論文「Si/CdTe 半導体コンプトンカメラ試作機の開発と性能評価」東京大学
- [3] GAMMA MEDICA-IDEAS, "VATA 450.3-461.3 UAWE MANUAL ", MAY 2011
- [4] 渋谷 明伸 修士論文「ASTRO-H 搭載軟ガンマ線検出器のエネルギー構成法の確立」名古屋大学  
([http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat\\_detail.php?Title\\_No=09-01-05-03](http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=09-01-05-03))
- [5] 上野 一誠 卒業論文「ASTRO-H 搭載宇宙軟線ガンマ線観測用 Si センサーの軌道上放射線損傷による影響」広島大学
- [6] 古井 俊也 卒業論文「X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載コンプトンカメラの搭載同等品の性能評価」広島大学
- [7] Tajima,H et al. "Soft Gamma-ray Detector for the ASTRO-H Mission" SPIE 2010
- [8] NIST XCOM  
(<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>)
- [9] 福山 太郎 修士論文「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 等採用テルル化カドミウム半導体素子の開発と性能評価」
- [10] Takahashi,T. et al., "The ASTRO-H X-ray Observatory" Proc. SPIE 8443,2012
- [11] 田中 琢也 修士論文「衛星搭載機器統一通信企画 SpaceWire を用いた宇宙 X 線・ガンマ線観測用データ収集システムの開発」広島大学
- [12] Glenn F.Knoll 「放射線計測ハンドブック (第 3 版)」
- [13] ASTRO-H プロジェクトサイト  
(<http://astro-h.isas.jaxa.jp/>)
- [14] Malcolm S.Longair 'High Energy Astrophysics third edition'
- [15] S. Eidelman *etal.* 'Review pf Particle Physics' Phys. Lett. B 592, 1 (2004).
- [16] Richard B.Firestone, Virginia S. Shirley, 'Table of Isotopes (Eighth Edition, VolII)

- [17] G.Weodenspointner et al., 'TheCOMPTEL instrumental line background', A&A 368,347-368,2001
- [18] 朴寅春 修士論文 'Performance evaluation of Flight-Model Si-Pad sensors for Soft Gamma-ray Detector (SGD)'