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

広島大学理学部物理科学科

高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学グループ

B092314

古井 俊也

主查 深澤泰司 副查 高畠敏郎

2013年2月

概 要

sub-MeV 領域 (数十 keV~数 MeV) は高温プラズマからの熱的な放射が弱く、制動放射、シンクロトロン 放射、逆コンプトン散乱といった非熱的な放射が支配的になる転換領域と言われている。この領域を観測す ることで宇宙における粒子加速機構の解明に繋がる。

次期国際 X 線天文衛星 ASTRO-H に塔載される軟 γ 線検出器 SGD はこの sub-MeV 領域を観測する。SGD の主検出部は Si と CdTe を用いた半導体コンプトンカメラと呼ばれるもので、コンプトン運動学を用いて エネルギーと光子到来方向を決定することができる。これをコンプトン再構成という。

本研究では、コンプトンカメラの搭載同等品を衛星打ち上げ時と同じ温度、真空状態(~ -25 ℃, 1.8×10⁻³Pa) に置き、スペクトル取得、コンプトン再構成を行った。また、これを用いてイメージング 能力やバックグラウンド除去能力を左右するエネルギー分解能や角度分解能の評価を試みた。

目 次

第1章	ASTRO-H 衛星に搭載するコンプトンカメラ	9
1.1	次期国際 X 線天文衛星 ASTRO-H	9
1.2	軟ガンマ線検出器 SGD	10
1.3	ガンマ線と物質の相互作用...................................	13
	1.3.1 光電吸収	13
	1.3.2 コンプトン散乱	14
1.4	コンプトンカメラの原理	16
	1.4.1 イメージング	16
	1.4.2 角度分解能	17
	1.4.3 SGD コンプトンカメラの特徴	19
1.5	本研究の目的	22
第2章	コンプトンカメラのデータ読み出し	23
2.1	半導体検出器	-3
	2.1.1 半導体検出器の原理 ····································	23
	2.1.2 Si-Pad	25^{-5}
	2.1.3 CdTe-Pad	27
2.2	ASIC	-· 27
2.3	ASIC 制御とデータ処理システム	28
	2.3.1 daisy chain、層、区画	28^{-5}
	2.3.2 7 ロントエンドエレクトロニクス	30
	2.3.3 電圧系統	32
2.4	データフォーマット	33
笛 3音	データ解析の手順	34
31	トットリストの作成	34
0.1	311 ペデスタル補正	34
	319 コモンチードノイズ除去	34
	313 エネルギー較正	35
	314 ヒットリスト	37
32	イベント再構成	38
3.3	バックプロジェクション	42

第4章	熱真空試験とデータ解析	44
4.1	実験の概要とセットアップ...................................	44
4.2	実験の結果	49
4.3	解析	49
第5章	まとめと今後	66
.1	付録	68

図目次

1.1	ASTRO-H 衛星のイメージと各検出器の配置 [3]	10
1.2	X 線からγ線までのエネルギー帯域における検出器の感度。ASTRO-H に搭載する HXI と	
	SGD は期待される感度で示している。[4]	11
1.3	SGD の断面図。水色の部分が BGO アクティブシールド、赤色の四角がその信号を読み出す	
	APD、BGO に囲まれているピンクと緑色のものがコンプトンカメラである。コンプトンカ	
	メラ3台で1ユニットを形成し、ASTRO-H には2ユニット搭載される。	11
1.4	Si-Pad 一枚の写真。コンプトンカメラにはこれが 32 枚積み重ねられる。	12
1.5	コンプトンカメラ 1 台の CAD 設計 [6]	12
1.6	エンジニアリングモデルコンプトンカメラ1台の写真	12
1.7	Si,CdTe などの相互作用断面積。低エネルギー側では光電吸収が支配的だが、途中からコン	
	プトン散乱が支配的な反応となってくる事が分かる。[7]...........	13
1.8	コンプトン散乱の模式図 [9]	15
1.9	コンプトン散乱の微分断面積の極座標表示。光子は左から入射されており、エネルギーが高	
	くなるにつれ、前方散乱の確率が高くなることが分かる。[7]	15
1.10	散乱体、吸収体 l つずつの単純なコンプトンカメラの模式図。青色の散乱体で散乱角 θ でコ	
	ンプトン散乱し、エネルギー <i>E</i> 1 を損失する。その後、緑色の吸収体で光電吸収されてエネ	
	ルギー <i>E</i> ₂ を損失する。[9]	16
1.11	複数イベントに対するコンプトンコーン。コーンが重なるほど光子源の存在する確率が大き	
	くなっていき、一つの交点に多く重なっているところを光子源存在位置とする。[4]	17
1.12	ARM の定義 [4]	18
1.13	Doppler Broadening Effect による角度分解能の元素周期性変化の様子。原子の種類により	
	電子の運動量が違うので、Doppler Broadening の効果がそれぞれ異なる。[10]	19
1.14	COMPTEL 検出器の模式図 [11]	20
1.15	SGD の断面図。井戸型 BGO シンチレータ (緑色) の上部から中部にかけて内側に黒い線が	
	見られるが、これがファインコリメータである。	21
1.16	ファインコリメータ EM 品を光子入射方向から見た写真 [13]	21
1.17	ファインコリメータ EM 品を横から見た写真 [13]	21
2.1	半導体と絶縁体のエネルギーギャップの比較 [7]	24
2.2	p-n 接合半導体検出器で発生する電流と電場 [15]	24
-2.3	空乏領域 [15]	24
2.4	空乏層の大きさ。順方向バイアス電圧をかけると空乏層は小さくなり、逆方向バイアス電圧	_
	をかけると空乏層は大きくなる。[15]	25
		_

2.5	Si-Pad の模式図。複数のピクセルから構成されいる。[16]	26
2.6	Si-Pad につけられた読み出し線。Si-Pad1 枚が4分割され、隅に読み出し線が集められてい	
	る。SGD コンプトンカメラは図 2.6 と図 2.6 に鏡面対称のものを交互に重ねて構成される。	
	[17]	26
2.7	-15 度、200V 印加、積分時間 300sec、線源 Am での Si-Pad1 ピクセルのエネルギースペク	
	トル。読み出し線が少ない中央のピクセルを使用した。エネルギー分解能は 1.9keV。	27
2.8	CdTe-Pad,EM 素子。左がピクセル状になっている pt 電極側で、右か共通電極になっている	
	In 電極側。pt 電極側に読み出し線が見える。[18]	28
2.9	VATA450.3 のブロックダイアグラム [21]	29
2.10	VATA450.3 のタイミングチャート [21]	29
2.11	daisy chain (Si) 例えば dc2 は Si の a 区画 0,2,4,6 層にある 8 つの ASIC で構成される。 .	29
2.12	daisy chain (CdTe Bottom)	29
2.13	daisy chain (CdTe Side)	30
2.14	データ処理システム。一番小さな四角が ASIC (FEC)、それを囲んでいる青い四角が daisy	
	chain、オレンジの四角がコンプトンカメラ1台を表す。なお、図中では daisy chain→dc, コ	
	ンプトンカメラ →CC と略記している。	31
2.15	FEC の配置。(a) は Si について描いたもので、真ん中の格子模様の入った四角が Si-Pad、そ	
	の四隅にある青色の四角が ASIC、それを囲んでいるものが FEC である。ASIC は FEC の	
	上に乗っている。 (b) は CdTe-Bottom について描いたもので、真ん中の四分割されてい	
	る四角が CdTe-Pad で、その他は (a) と同じである。[22]	31
2.16	検出器、ASIC 動作に用いる電源の供給フローチャート	32
3.1	一段階目で作られた較正曲線の例 [23]	36
3.2	一段階目のエネルギー較正曲線をもとに較正した Si-CdTe2 回ヒットイベントのエネルギー	
	スペクトル。青い線で囲まれているところが ¹³⁷ Cs の 0.662MeV イベントと考えられる。[23]	36
3.3	高エネルギー側の較正曲線をもとに、Si のエネルギー、CdTe の低エネルギー領域の較正点	
	を追加し、フィッティングしている第二段階の様子。[23]	37
3.4	2 回ヒットイベント (同時に 2 つの検出器にヒットがあったイベント) の反応順序。左は Si-	
	CdTe イベント、右は CdTe-Si イベントになっており、どちらを選択するかによって光子到	
	来方向が全く異なる。	38
3.5	EM コンプトンカメラのジオメトリを設定して行ったモンテカルロシミュレーションの結果	
	を用い、1 ヒットイベントに対する複数ヒットイベントの割合を示した。	39
3.6	EM コンプトンカメラのジオメトリにより制限される Si-CdTe イベントの散乱角。点線で描	
	いた方が最大散乱角を、破線で描いた方が最小散乱角を表す。	40
3.7	E ₁ –E ₂ マップ。マップ中に描かれている線は散乱角度を表す。主に Si-CdTe イベントに対	
	して用いる。	40
3.8		
	バックプロジェクションの様子	43
/ 1	バックプロジェクションの様子	43
4.1	バックプロジェクションの様子 モニタリングに用いた QL 画面。左がイメージング画像で、真ん中がエネルギースペクトル。 本来は左にライトカーブも描かれていたが、図中には描かれていたい	43

4.2	実験のセットアップ No.1	45
4.3	実験のセットアップ No.2	46
4.4	実験のセットアップ No.3	46
4.5	コンプトンカメラからデータを得た時点でのペデスタルの分布。デジタルディレイをかけて	
	いないためペデスタルピークがそろっていないことが分かる。	49
4.6	図 4.5 に対してコモンモードノイズを除去した時のペデスタル分布。ある程度まとまって分	
	布するようになったが、ペデスタルピークは合っていない	50
4.7	5 Pixel channel のペデスタル分布をガウシアンでフィットした。	51
4.8	44 Pixel channel のペデスタル分布をガウシアンでフィットした。	51
4.9	エネルギー較正曲線の図。f(x) が3章で述べたようにして作られた曲線で、f(x-a) と書かれ	
	た方はペデスタル補正を行った時の曲線である。	52
4.10	左図の低エネルギー側の拡大図。この2つの線の差がペデスタルのズレである。	52
4.11	エネルギー較正曲線適用後のペデスタル分布図.................................	52
4.12	ペデスタル分布の図を描き、それをガウシアンでフィットした。半値幅は 1.14keV 程度であ	
	る。	52
4.13	Si のピクセルのペデスタル分布を描いた。半値幅は 1.06keV 程度である。	53
4.14	CdTe-Bottom のピクセルのペデスタル分布を描いた。半値幅は 1.15keV 程度である。	53
4.15	CdTe-Side のピクセルのペデスタル分布を描いた。半値幅は 1.36keV 程度である。	53
4.16	全ピクセルによる ²⁴¹ Am のエネルギースペクトル。エネルギー分解能は 1.74 <i>keV</i> 程度であ	
	る。	54
4.17	全ピクセルによる ⁵⁷ Co のエネルギースペクトル。エネルギー分解能は 2.36 <i>keV</i> 程度である。	54
4.18	全ピクセルによる ¹³⁷ Cs のエネルギースペクトル。エネルギー分解能は 12.91 <i>keV</i> 程度であ	
	る。	54
4.19	²⁴¹ Am の Si 1 ヒットのスペクトル。エネルギー分解能は 1.64 <i>keV</i> 程度である。	55
4.20	⁵⁷ Coの CdTe Bottom 1 ヒットのスペクトル。エネルギー分解能は 2.17keV 程度である。 .	56
4.21	⁵⁷ Co の CdTe Side 1 ヒットのスペクトル。エネルギー分解能は 2.41 <i>keV</i> 程度である。	56
4.22	¹³⁷ Cs の CdTe Bottom 1 ヒットのスペクトル。エネルギー分解能は 12.83 <i>keV</i> 程度である。	56
4.23	¹³⁷ Cs の CdTe Side 1 ヒットのスペクトル。エネルギー分解能は 12.15 <i>keV</i> 程度である。	56
4.24	²⁴¹ Am の Si-Si 2 ヒットのエネルギースペクトル。エネルギー分解能は 2.74 <i>keV</i> 程度。	57
4.25	⁵⁷ Co の CdTe-CdTe 2 ヒットのエネルギースペクトル。エネルギー分解能は 2.69 <i>keV</i> 程度。	57
4.26	¹³⁷ Cs の Si-CdTe 2 ヒットのエネルギースペクトル。エネルギー分解能は 13.41 <i>keV</i> 程度。.	57
4.27	¹³⁷ Cs の CdTe-CdTe 2 ヒットのエネルギースペクトル。エネルギー分解能は 13.24 <i>keV</i> 程度。	57
4.28	Si 層にある 1 ピクセルのエネルギースペクトル。このピクセルの番号は 100 である。	59
4.29	CdTe 層にある1ピクセルのエネルギースペクトル。このピクセルの番号は 2240 である。 .	59
4.30	エネルギーピーク位置の頻度分布 (Si 層)。線源に ²⁴¹ Am を用いた時のものである。	59
4.31	エネルギーピーク位置の頻度分布 (CdTe 層)。線源に ⁵⁷ Co を用いた時のものである。	59
4.32	Si層の各ピクセルのエネルギースペクトルをフィッティングした時のσを横軸に、そのσを	
	持つピクセル数を縦軸に表したグラフである。................................	60

4.33	CdTe 層の各ピクセルのエネルギースペクトルをフィッティングした時のσを横軸に、その	
	σを持つピクセル数を縦軸に表したグラフである。	60
4.34	¹³⁷ Cs を当てた時、CdTe Bottom 層の 1pixel のエネルギースペクトル。	61
4.35	¹³⁷ Cs を当てた時、CdTe Bottom 層の 1ASIC 分の合計エネルギースペクトル。	61
4.36	イベント再構成によって得た <i>E</i> ₁ – <i>E</i> ₂ マップ。 ¹³⁷ Cs を照射した時のデータを用いて作成した。	62
4.37	バックプロジェクションの様子。コンプトンコーンが重ねられていくのが分かる。	63
4.38	Cs 線源の Si-CdTe の 2 回ヒットイベントのイメージ画像	64
4.39	左のイメージングの時の ARM 分布	64
4.40	Cs 線源の時の Cd-CdTe2 回ヒットイベントのイメージ画像	64
4.41	左のイメージングの時の ARM 分布	64
1	²⁴¹ Am を照射した時に得られる各 Si-Pad のエネルギースペクトル。横軸がエネルギー (MeV)	
	で、縦軸がカウント数を表す。右上に示されているスペクトルが最上部の検出器で、その下	
	に描かれているスペクトルは最上部の検出器の一つ下に位置する。上から下に向かって読む	
	ことで、検出器の位置が下がっていくようにスペクトルを並べており、一番下までいくとそ	
	の左の列の上へ読み進める。・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	69
2	¹³⁷ Cs を照射したときに得られる、層ごとの CdTe-Pad のエネルギースペクトル。	70
3	最上部の Si-Pad に Am を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。	71
4	最上部の Si-Pad に Am を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。	72
5	最上部の Si-Pad に Am を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。	73
6	最上部の Si-Pad に Am を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。	74
7	最上部の Si-Pad に Am を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。	75
8	最上部の Si-Pad に Am を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。	76
9	最上部の Si-Pad に Am を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。	77
10	最上部の Si-Pad に Am を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。	78
11	CdTe の中で最上部に位置する CdTe-Pad に Cs を照射して得られる 32 ピクセルのエネル	
	ギースペクトル。	79
12	CdTe の中で最上部に位置する CdTe-Pad に Cs を照射して得られる 32 ピクセルのエネル	
	ギースペクトル。	80
13	CdTe の中で最上部に位置する CdTe-Pad に Cs を照射して得られる 32 ピクセルのエネル	
	ギースペクトル。	81
14	CdTe の中で最上部に位置する CdTe-Pad に Cs を照射して得られる 32 ピクセルのエネル	
	ギースペクトル。	82
15	CdTe の中で最上部に位置する CdTe-Pad に Cs を照射して得られる 32 ピクセルのエネル	
	ギースペクトル。	83
16	CdTe の中で最上部に位置する CdTe-Pad に Cs を照射して得られる 32 ピクセルのエネル	
	ギースペクトル。	84
17	CdTe の中で最上部に位置する CdTe-Pad に Cs を照射して得られる 32 ピクセルのエネル	
	ギースペクトル。	85

18	CdTe の中で最上部に位置する CdTe-Pad に Cs を照射して得られる 32 ピクセルのエネル	
	ギースペクトル。	86

表目次

1.1	COMPTEL と SGD のコンプトンカメラの相違 [11][12]	19
2.1	Si-Pad の仕様 [17]	26
2.2	CdTe-Pad の仕様 [18]	28
2.3	SGD イベントデータフォーマット	33
3.1	ヒットリストの内容。ただしここに示したものは全てでは無く、後の解析で必要となるもの	
	だけである。	37
3.2	図 3.5 をもとに計算して得られた Si-CdTe イベントの最大、最小散乱角	40
3.3	Si,Cd,Te の特性 X 線のエネルギーと割合。他にも特性 X 線は出るが、それぞれ高い割合で	
	出る 3 つを選んで記載した。[24]	42
3.4	コンプトンリストの内容。ただし重要なものだけ抜粋して記載している。	42
4.1	実験の工程表 No.1	47
4.2	実験の工程表 No.2	48
4.3	-25°C、1.7×10 ⁻³ Pa の条件の下、EM コンプトンカメラで得られたエネルギー分解能の値。	58

第1章 ASTRO-H衛星に搭載するコンプトンカ メラ

ブラックホールや活動銀河核、超新星爆発などを X 線~γ線で観測すると非常に明るく輝いて見える。 つまり、これらは莫大な重力や爆発エネルギーを持ち、数万~数億度の極限状態にある天体である。このよ うな天体は稀に存在するものでは無く、宇宙に存在する 90 パーセント以上の物質がそうであるといわれて いる。[1] 以上のような高エネルギー天体を観測するために、日本が中心となって ASTRO-H 衛星を打ち上 げる予定である。

1.1 次期国際 X 線天文衛星 ASTRO-H

ASTRO-H とは 2015 年度打ち上げ予定の次期国際 X 線天文衛星で、全長 14m、総重量 2.5t になる。この衛星で期待されるサイエンスとして代表的なものは以下の通りである。[2]

- 1. 銀河や銀河団内部の高温プラズマ状態を詳細に見ることで、その形成や進化過程を解明する。
- 2. ブラックホールや中性子星について、X 線放射のドップラーシフトや時間変動などから、近傍の物理 状態を明らかにする。
- 3. 超新星残骸や銀河中心領域などの非熱的拡散 X 線放射の撮像により、宇宙線加速のメカニズムに迫る。
- 4. 軟 X 線観測では発見できなかった、光学的に厚い吸収物質に埋もれた活動銀河核を探査し、硬 X 線 における宇宙 X 線背景放射の起源を明らかにする。

衛星には4つの検出器が搭載される。まず1つ目は軟 X 線分光検出器 SXS(Soft X-ray Spectrometer)で、 マイクロカロリメータの技術を使用した高エネルギー分解能 (\simeq 7eV)の精密分光器である。この検出器の観 測波長の範囲は 0.3-10keV である。2 つ目の検出器は X 線 CCD カメラ SXI(Soft X-ray Imager)で、CCD としては最大級の視野 ($38 \times 38 arcmin^2$)をもつ分光、撮像カメラである。また、観測波長範囲は 0.4-12keV である。 3 つ目の検出器は硬 X 線撮像検出器 HXI(Hard X-ray Imager)である。これは CdTe の両面スト リップ検出器 (DSSD : Double Side Strip Detector)の上に 4 層の Si-DSSD を積層した検出器を硬 X 線望 遠鏡の焦点に置く事により、現在稼働中のすざく衛星より 2 桁程度感度が向上している。観測波長範囲は 10-80keV である。4 つ目の検出器は軟ガンマ線検出器 SGD(Soft Gamma-rau Detector)で、観測波長範囲 は 10-600keV である。



図 1.1: ASTRO-H 衛星のイメージと各検出器の配置 [3]

1.2 軟ガンマ線検出器 SGD

SGD が担当する観測エネルギー帯域は sub-MeV と呼ばれる領域の一部である。これは高温プラズマか らの熱的放射が弱く、制動放射、シンクロトロン放射、逆コンプトン散乱などの非熱的放射が支配的になる 転換領域である。この領域を観測することで、粒子加速機構の解明につながると期待されている。

このように sub-MeV は宇宙における加速機構を知ることが出来る重要な領域なので、現在までに様々な装置で観測されてきた。しかし図 1.2 から分かるように、この領域における検出器の感度は他のエネルギー帯域に比べて 2-3 桁も悪い。この大きな理由は 2 つある。一つは観測天体からの信号と比較して、軌道上のバックグラウンドが非常に大きいこと。もう一つは検出器と光子の相互作用で光電吸収の確率が小さくなり、コンプトン散乱の確率が大きく支配的になることである。(光電吸収は光子のエネルギー全てを吸収するが、コンプトン散乱は光子が持つエネルギーの一部のみを渡して散乱する。つまり従来の光電吸収型の検出器にとって、コンプトン散乱は元々光子が持っていたエネルギーを知る事が出来ず、観測に不必要で邪魔な情報を残すバックグラウンド源なのである。)[4] これに対して、コンプトン散乱を逆に利用して高感度観測を行おうとしているものが SGD である。どのように利用しているかは 1.4 節で述べるので、以下構成について述べる。

観測天体以外からやってくる X 線や γ 線以外にも、陽子が主検出部に当たって生成される放射性同位体 がバックグラウンド源になり得る。そこで SGD は図 1.3 のように、主検出部周りを井戸型の阻止能の大き い BGO シンチレータで覆い、陽子が入りにくいようにしてある。BGO はアクティブシールドとして用い、 宇宙線を遮断してコンプトンカメラに当たらないようにし、たとえ当たったとしても反同時係数をとるこ とでバックグラウンドとして除去する。反同時計数をとるというのは、主検出部とシールドに同時に信号が あった場合にその信号をバックグラウンドとして取り除くことである。また、井戸型になっている理由は、 γ線の到来方向を制限するためである。[5]

主検出部はコンプトンカメラと呼ばれ、図 1.4 で示した半導体検出器 Si-Pad を 32 枚積み重ねている。そ



図 1.2: X 線から γ 線までのエネルギー帯域における検出器の感度。ASTRO-H に搭載する HXI と SGD は 期待される感度で示している。[4]



図 1.3: SGD の断面図。水色の部分が BGO アクティブシールド、赤色の四角がその信号を読み出す APD、 BGO に囲まれているピンクと緑色のものがコンプトンカメラである。コンプトンカメラ 3 台で 1 ユニット を形成し、ASTRO-H には 2 ユニット搭載される。



図 1.4: Si-Pad 一枚の写真。コンプトンカメラにはこれが 32 枚積み重ねられる。



図 1.5: コンプトンカメラ 1 台の CAD 設計 [6]



図 1.6: エンジニアリングモデルコンプトンカメラ1 台の写真

の下半導体検出器 CdTe-Pad を1面当たり2×2枚にして8枚積み重ねる。さらにSiと CdTeを積層した ものの周りに、1面当たり2×3枚の CdTe-Pad を2枚重ねて設置する。平均の積層ピッチは1.8mm であ る。コンプトンカメラの CAD 図と写真を図1.5、図1.6に示した。ここで図1.6 はコンプトンカメラのエン ジニアリングモデル (EM) であるが、EM とは「衛星搭載品と同等の試作機」のことであり、本卒論で扱っ たものである。

1.3 ガンマ線と物質の相互作用

sub-MeV 領域では光子と物質 (ここでは Si,CdTe) の相互作用は図 1.7 に示したように光電吸収、コンプトン散乱が主な反応になる。したがってカメラの原理を説明する前に、まず光電吸収とコンプトン散乱について説明を行う。



図 1.7: Si,CdTe などの相互作用断面積。低エネルギー側では光電吸収が支配的だが、途中からコンプトン 散乱が支配的な反応となってくる事が分かる。[7]

1.3.1 光電吸収

光電吸収は光子が物質中の束縛電子によって吸収されて消失し、光子の持っていたエネルギーが電子に 移る現象である。この相互作用は原子との間でおこるもので、自由電子との間で起こることは出来ない。光 子のエネルギーが K 殻の束縛エネルギーを超えている場合、K 殻電子を光電子として放出する確率が 80% 程度で最も大きい。この光電子は以下のようなエネルギー *E_e-*を持つ。[7]

$$E_{e^-} = h\nu - E_b \tag{1.1}$$

 E_b は光電子が最初に存在した殻の結合エネルギーを表している。 光電吸収の断面積は、規格化因子を無視すると近似的に以下のようになる。[8]

$$\sigma \approx \frac{Z^{5}}{(h\nu)^{\frac{7}{2}}} \quad (E_{\gamma} < m_{e}c^{2}\mathcal{O} \, \boldsymbol{\xi} \, \boldsymbol{\vartheta})$$
$$\sigma \approx \frac{Z^{5}}{h\nu} \quad (E_{\gamma} > m_{e}c^{2}\mathcal{O} \, \boldsymbol{\xi} \, \boldsymbol{\vartheta}) \tag{1.2}$$

ここで注目すべきところは、光電吸収の断面積が物質の原子番号の5乗に比例している事である。つまり ガンマ線を光電吸収によって検出する場合、CdTe($Z_{Ge} = 48, Z_{T_e} = 52$)や NaI($Z_I = 53$)といった原子番 号の大きな物質が適している。

光電吸収により光電子が放出されると、光電子がもともと存在した電子軌道に一つ空席が出来る。この 空席は媒質中の自由電子の捕獲や他の殻の電子が落ちる事により、直ちに基底状態に戻る。このときに1個 以上の特性(蛍光)X線光子、またはオージェ電子が放出される。このX線は発生した場所のすぐ近くで光 電吸収作用をして再吸収されてしまう事がほとんどなのだが、このX線が検出器外に逃げ出してしまう事 もあり、エスケープと呼ぶ。この場合、検出器で検出されるエネルギーの一部が外に逃げてしまうため、注 意が必要である。

1.3.2 コンプトン散乱

コンプトン散乱は入射光子と物質中の1つの電子との間で起こる相互作用の一つである。コンプトン散 乱の様子を図1.8 に示した。入射光子はコンプトン散乱により最初の方向から角度 θ の方向へ曲げられる。 この時光子は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渡す。この電子は反跳電子 (recoil electron) と呼ばれる。コンプトン散乱に対するエネルギー伝達と散乱角の関係式はエネルギー・運動量保 存則より容易に導く事ができ、以下のようになる。

$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \tag{1.3}$$

ここで E_{γ} は入射光子のエネルギー、 E'_{γ} は散乱後の光子のエネルギー、 m_e は電子の質量、cは真空中の光速を表す。

散乱光子の微分断面積はクライン・仁科の式で与えられ、以下のようになる。[4]

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \left(\frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma}}\right)^2 \left(\frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma}'} + \frac{E_{\gamma}'}{E_{\gamma}} - 2sin^2\theta cos^2\zeta\right)$$
(1.4)

ここで $r_e = e^2/m_e c^2$ は古典電子半径であり、 ζ は光子の偏光角である。入射光子が無偏光の場合は式 (1.5) のように書ける。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \left(\frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma}}\right)^2 \left(\frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma}'} + \frac{E_{\gamma}'}{E_{\gamma}} - 2sin^2\theta\right)$$
(1.5)

この微分散乱断面積を極座標表示したものが次の図 1.9 である。この図から入射光子のエネルギーが高くなるにつれ、前方散乱の確率が非常に高くなっていくことが分かる。



図 1.8: コンプトン散乱の模式図 [9]



図 1.9: コンプトン散乱の微分断面積の極座標表示。光子は左から入射されており、エネルギーが高くなる につれ、前方散乱の確率が高くなることが分かる。[7]

1.4 コンプトンカメラの原理

コンプトンカメラは1.2節で説明した通り、Si(散乱体) と CdTe(吸収体)の計2種類の検出器で構成され る。この2種類の検出器内で起こるコンプトン散乱について、コンプトン運動学を用いることにより入射 光子の持つエネルギーや線源の位置などの情報が得られる。この具体的な方法と重要なパラメータである 角度分解能について以下で述べる。

1.4.1 イメージング

説明を簡単にするため、図 1.10 のように散乱体、吸収体それぞれ一つずつにして考える。



図 1.10: 散乱体、吸収体 1 つずつの単純なコンプトンカメラの模式図。青色の散乱体で散乱角 θ でコンプ トン散乱し、エネルギー *E*₁ を損失する。その後、緑色の吸収体で光電吸収されてエネルギー *E*₂ を損失す る。[9]

入射光子はまず散乱体でコンプトン散乱される。この時反跳電子は散乱体中で止まり、持っていたエネ ルギー *E*₁ を損失する。散乱光子は吸収体で光電吸収され、エネルギー *E*₂ を損失する。検出器で検出する のは、これらの相互作用が起こった位置と損失エネルギー *E*₁、*E*₂ である。 入射光子のエネルギーを *E*_{in} とすると、エネルギー保存則より

$$E_{in} = E_1 + E_2 \tag{1.6}$$

が成り立つ。また、式 (1.3) で $E_{\gamma} = E_{in} = E_1 + E_2$, $E'_{\gamma} = E_2$ と読み替えて、散乱角 $cos\theta$ について解くと

$$\cos\theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} \tag{1.7}$$

となる。このようにコンプトン運動学の式に基づき、光子がどのようにコンプトン散乱されたのか(どの程 度の散乱角で光子が散乱したのか)再構成していくことをコンプトン再構成と呼ぶ。ここで重要なのは散 乱角、すなわち入射光子到来方向が「散乱体、吸収体でのエネルギー損失の値から図 1.10 に描かれている ような円錐上に制限される」事である。この円錐をコンプトンコーンと呼ぶ。

同一コンプトンコーン上ならば光子源が存在する確率の重みは等しい。つまり、一つのコンプトンコーンだ

けでは光子源が存在する方向を一意に決定できない。そこで、同一光子源からの複数のイベントに対して 上と同様の事を行ってコーンを描き、交点を光子源の位置と特定する。(図 1.11 参照) これがイメージング の基本原理である。



図 1.11: 複数イベントに対するコンプトンコーン。コーンが重なるほど光子源の存在する確率が大きくなっていき、一つの交点に多く重なっているところを光子源存在位置とする。[4]

1.4.2 角度分解能

前の節で、散乱角 θ から作られるコンプトンコーンを重ねることにより、光子到来方向を決定できると 説明した。この θ を良い分解能で求めないとコーンを重ねたときに交点 (光子源が存在しうる領域)が大き くなり、イメージング能力の低下につながる。また、バックグラウンドの除去にも角度分解能がその能力を 発揮する。つまり、角度分解能はコンプトンカメラにとって重要なパラメータなのである。

この角度分解能を評価する指標として Angular Resolution Measure(ARM) がよく用いられる。式 (1.7) により求められた散乱角を θ_K 、コンプトンコーンの軸と光子が入射する方向のなす角を θ_G とする。ARM はこの二つの角度の差として定義される。すなわち、

$$ARM = \theta_K - \theta_G \tag{1.8}$$

観測対象が天体の場合、十分距離が離れており、光子の入射方向は検出器に対して垂直とみなせるので理想 としては ARM = 0 である。しかし様々な理由から実際にはそうならない。考えられる大きな理由の一つ はエネルギーの測定誤差である。 $f(E_1, E_2) = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2}$ とおくと (右辺は式 (1.7) より)、誤差の伝 搬則から散乱角 $\cos\theta_K$ のずれは

$$\Delta(\cos\theta_K) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial E_1}\right)^2 \Delta E_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial E_2}\right)^2 \Delta E_2^2}$$
$$= \left(\frac{m_e c^2}{E_2^2} - \frac{m_e c^2}{(E_1 + E_2)^2}\right) \Delta E_2 - \frac{m_e c^2}{(E_1 + E_2)^2} \Delta E_1 \tag{1.9}$$

となる。ここで ΔE_1 、 ΔE_2 はエネルギーの測定誤差である。式 (1.9) から、エネルギー測定誤差を小さく しなければ θ_K が精度良く求まらない事が分かる。

ARM $\neq 0$ になる二つ目の理由は反応位置の測定誤差で、反応位置のみで決定される θ_G の精度が悪くなるのは当然のことである。

以上の二つの理由からエネルギー分解能と位置分解能の良い検出器が求められる。しかし、分解能が共に 0である理想的な検出器を使ったとしても ARM=0 にならない。これは 1.3.2 でコンプトン散乱を考えた時 少し強調したが、電子が静止していると仮定したことに依る。実際の電子は原子核周りで有限の運動量*p*_e を持っており、静止していない。個々の電子の持つ運動量が一定でないため角度分解能が悪化し、この悪化 のことを Doppler Broadening Effect と呼ぶ。

この効果によってコンプトン散乱の式 (1.3) および (1.7) がどのように変更されるか、以下に示す。 ||**p**_e||≪m_ec の場合、散乱前の電子のエネルギーは非相対論的近似から

$$E_e = m_e c^2 \quad \longrightarrow \quad E_e \sim m_e c^2 + \frac{\|\boldsymbol{p}_e^2\|}{2m_e} \tag{1.10}$$

となる。この変更された式とエネルギー・運動量保存則から、散乱後の光子の持つエネルギー E_{γ}' と散乱角 $\cos\theta$ は、

$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} (1 - \cos\theta_K)} \longrightarrow E'_{\gamma} = \frac{1}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} (1 - \cos\theta_K)} \left(E_{\gamma} + \frac{(\mathbf{p}'_{\gamma} - \mathbf{p}_{\gamma}) \cdot \mathbf{p}_e}{m_e} \right)$$
(1.11)

$$\cos\theta_{K} = 1 - \frac{m_{e}c^{2}}{E_{2}} + \frac{m_{e}c^{2}}{E_{1} + E_{2}} \longrightarrow \cos\theta_{K} = 1 - \frac{m_{e}c^{2}}{E_{2}} + \frac{m_{e}c^{2}}{E_{1} + E_{2}} - \frac{c^{2}(\mathbf{p}_{\gamma}' - \mathbf{p}_{\gamma}) \cdot \mathbf{p}_{e}}{E_{2}(E_{1} + E_{2})}$$
(1.12)

ここで、 p_{γ} , p'_{γ} はそれぞれ散乱前、散乱後の光子の運動量である。(1.11)の第二項、(1.12)の第四項が Doppler Broadening を考慮した事による補正項で、散乱後の光子エネルギー E'_{γ} と散乱角 θ_K は散乱前の 電子の運動量が大きいほど影響を受ける。

補足だが、Doppler Broadening Effect は元素の周期性に依存する事が先行研究 [10] より分かっている。 すなわち、1 族や 2 族元素 (アルカリ金属、アルカリ土類金属) で影響が最も小さく、1 8 族元素 (希ガス) で最大になる。図 1.13 にその様子を示した。



図 1.12: ARM の定義 [4]



図 1.13: Doppler Broadening Effect による角度分解能の元素周期性変化の様子。原子の種類により電子の 運動量が違うので、Doppler Broadening の効果がそれぞれ異なる。[10]

1.4.3 SGD コンプトンカメラの特徴

さて、ここまでコンプトンカメラの一般的な原理について述べてきた。この節では SGD に搭載するコン プトンカメラの特徴について考える。

まず COMPTEL 検出器と比較して SGD コンプトンカメラの特徴を考える。COMPTEL とは NASA が 打ち上げたガンマ線観測衛星 CGRO(Compton Gamma Ray Observatory) に搭載されたコンプトンカメラ であり、CGRO はこれまでで唯一コンプトンカメラによって観測を行った衛星である。この COMPTEL の模式図を図 1.14 に、COMPTEL と SGD の違いを表 1.1 に示す。

	COMPTEL	SGD
散乱体	液体シンチレータ (NE 213A),1 層	Si-Pad,32枚
吸収体	円柱状の NaI(Tl),1 層	CdTe-Pad,32枚 (Bottom),48枚 (side)
層の間隔	1.58m	1.8mm

表 1.1: COMPTEL と SGD のコンプトンカメラの相違 [11][12]

この表から SGD コンプトンカメラの特徴の一つは、多層かつ高密度に検出器を積層していることだと言え る。まず一つ目の理由としてシンチレータは Si-Pad や CdTe-Pad と比較してエネルギー分解能が悪いこと が挙げられる。1.4.2 節で述べたように、エネルギー分解能の良し悪しは角度分解能やイメージングに影響 するため、出来るだけ分解能の良いものを選ぶ必要がある。二つ目の理由はシンチレータが大きいことで ある。大きいと細かい位置情報を得ることができず、COMPTEL のように検出器同士を数 m も離さなけれ ばならない。これにより全体がとても大きくなってしまう。以上のシンチレータの欠点を減らし、さらに有 効面積を大きくするため、SGD では薄い位置検出型センサー (Si:0.6mm, CdTe:0.75mm)の多層高密度化 したものを用いる。

二つ目の特徴は、表から分かるように検出器に用いる物質が違うことである。SGD で使われる Si,CdTe



図 1.14: COMPTEL 検出器の模式図 [11]

については 2.1.2、2.1.3 で述べる。

他の特徴として、SGDには二つの観測モードがあることが挙げられる。一つ目はコンプトン再構成を行う「コンプトンモード」。二つ目は100keV以下の低いエネルギー帯域で検出効率を上げるため、光電吸収のみのイベントも観測の対象にする「光電吸収モード」である。コンプトンモードと違い、光電吸収モードでは1イベント中に得られるスレッショルド以上の信号すべての和をとって1ヒットとしている。光電吸収モードは従来の観測装置と同じ使い方であるため、バックグラウンドは高いが、明るい天体に対しては問題ない。

最後に挙げる特徴は、コンプトン再構成をイメージングでは無くバックグラウンド除去に用いる点であ る。図 1.15 のように、SGD には検出部前面にファインコリメータを設置している。これは図 1.16、図 1.17 のようなリン青銅でできた格子状の金属である。約 150keV 以下の低エネルギー領域の光子に対し、BGO で 10 度程度まで絞った視野をさらに絞る装置で、およそ 0.5~1 度の狭視野になる。[13]

150keV 以下という領域では (特に 100keV 以下で)Doppler Broadening の効果が大きくなり、コンプトンカ メラの角度分解能はかなり悪くなる。そうなると、もはや絞られた視野よりも角度分解能が大きくなりイ メージングは出来ない。そこでこのエネルギー領域ではコンプトン再構成をイメージングに用いるのでは 無く、ARM カットを行うことによって視野外から来たとされるイベントをカットしてバックグラウンド除 去を行い、SGD の高感度観測に貢献している。このカットは、従来の光電吸収モードでは除去できなかっ た放射化由来のバックグラウンド (上空のプロトンによって検出器自身が放射性同位体となって出すガンマ 線など) を除去するのに役立つ。



図 1.15: SGD の断面図。井戸型 BGO シンチレータ (緑色) の上部から中部にかけて内側に黒い線が見られ るが、これがファインコリメータである。





図 1.17: ファインコリメータ EM 品を横から見た写真 [13]

図 1.16: ファインコリメータ EM 品を光子入射方向か ら見た写真 [13]

1.5 **本研究の目的**

本研究では、ASTRO-H 衛星の運用環境下に EM コンプトンカメラを置き、線源を当ててスペクトルを 取得する熱真空試験を行った。ここで運用環境とは温度-25 度 ~-20 度、真空度 $\simeq 1.8 \times 10^{-3}$ Pa、Si-Pad に 230V 印加、CdTe に 1000V,800V 印加 という環境である。EM とは既に述べたように衛星搭載同等品の ことである。これを運用環境下において試験することは衛星が運用を始めた時にうまく動作し、かつ要求 通りの性能を発揮するか確認することに等しく、大変重要な試験である。

本研究の目的は二つある。一つ目は EM コンプトンカメラを運用環境下で不具合なく動作させられるか 確認することである。これは実験中のモニタリングと、スペクトルやイメージングの取得をうまく行える かで判断する。もう一つの目的は、EM コンプトンカメラの性能評価を行うことである。すなわち、取得し たスペクトルやイメージングから角度分解能、エネルギー分解能を出し、要求性能と比較して評価するこ とである。

第2章 コンプトンカメラのデータ読み出し

コンプトンカメラを構成する半導体検出器は、ピクセルアレイ構造であり、一枚当たり数十〜数百のピ クセルを持つ。カメラ全体だと膨大な数のピクセル数になり、これらすべてを処理するシステムが必要にな る。この章では半導体検出器と処理システムについて述べる。

2.1 半導体検出器

2.1.1 半導体検出器の原理

結晶性の物質には格子に周期性があり、そのため固体内の電子が許容されるエネルギーは帯状になる。 つまり、電子はこの帯と帯の間のエネルギー領域には存在できない。このエネルギー領域の事を禁止エネ ルギーギャップという。半導体とは 1eV 程度の禁止エネルギーギャップを持つものである。絶縁体も禁止エ ネルギーギャップを持つが、こちらは 5eV 以上の大きなギャップを持つ。半導体にはいくつかの種類が存在 し、単体の IV 族 (Si,Ge など)を用いた真性半導体や、CdTe,GaAs といった複数の元素からなる化合物半 導体、真性半導体に不純物を添加してギャップを小さくした不純物半導体がある。このような半導体が検出 器として用いられる理由は、シンチレーション検出器と比較して得られる電荷キャリアが多く、入射エネル ギーから電気信号へ効率良く変換できるためである。

さて、放射線検出に使用される半導体検出器は、p型(価電子が一つ少ない元素を添加)とn型(価電子 が一つ多い元素を添加)の半導体を接合した p-n 接合と呼ばれるものである。この接合の最も重要な性質は 整流性である。つまり、電圧を順方向に印加すると電流を流し、逆方向に印加するとほとんど電流を流さな いダイオードの役割をもつことである。

p型とn型の半導体が接合されると、接合部における大きなキャリア密度の勾配によりキャリアの拡散が起 きる。正孔はp側からn側へ、電子はn側からp側へと拡散する。正孔がp側から拡散されると、負のア クセプタイオンが中和されずに接合近傍に残る。これは、自由に動き回れる正孔と違い、アクセプタイオン は格子に固定されているからである。n側も同様に考え、電子が拡散すると正のドナーイオンが接合近傍に 残る。この結果、接合p側には負の空間電荷、n側には正の空間電荷が形成され、図2.2の向きに電場が発 生する。この電場の向きは各キャリアの拡散電流の向きと反対になっている。熱平衡状態では、電場による ドリフト電流と密度勾配による拡散電流は打ち消し合う。

中性領域から接合部に近づくと図 2.3 のような狭い遷移領域がある。この領域では不純物イオンによる空間 電荷の一部がキャリアによって補償されている。この遷移領域を超えると完全にキャリアがない領域にな る。ここは空乏領域 (空乏層) と呼ばれる。この空乏層に可視光や放射線が入射すると光電効果により価電 子帯に存在している電子が励起して伝導帯へ移り、価電子帯に正孔を形成する。逆バイアス (正電圧を n 側 にかける) によって電子、正孔がそれぞれ両端に移動し、この電荷量から入射した放射線のエネルギーを算 出する。これが p-n 接合型半導体検出器の検出原理である。[7][14][15] なお、電荷量からエネルギーを出せる理由は、生成される電子-正孔対の数が入射放射線エネルギーに比例するからである。

以上の議論より、空乏層が厚いと高い検出率をもつ事が分かる。空乏層の厚さは以下の式で表され、逆 バイアスをかけるほど大きくなる。

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_S(V_{bi} - V)}{qN_B}} \tag{2.1}$$

ここで ϵ_S は半導体の誘電率、 V_{bi} は外部電圧がかけられていない熱平衡下での全静電ポテンシャル、 N_B は軽くドープした不純物濃度、V は外部電圧で符号は、順方向バイアスの時は正、逆方向バイアスの時は負である。

逆バイアスを大きくしていき、ある臨界電圧 (降伏電圧) に達すると急に電流が流れだすが、これをブレー クダウンと呼ぶ。ブレークダウンは検出器にとって大きなノイズになるので、臨界電圧より小さい電圧をか けなければならない。



図 2.1: 半導体と絶縁体のエネルギーギャップの比較 [7]



図 2.2: p-n 接合半導体検出器で発生する電流と電場 [15]



図 2.3: 空乏領域 [15]



図 2.4: 空乏層の大きさ。順方向バイアス電圧をかけると空乏層は小さくなり、逆方向バイアス電圧をかけ ると空乏層は大きくなる。[15]

2.1.2 Si-Pad

コンプトンカメラの散乱体に使われる物質には (1) 原子番号が小さく、Doppler Broadning Effect の 影響と光電吸収断面積が小さいこと。(2) SGD の観測エネルギー領域でちょうどコンプトン散乱が支配的 になること。 という二つの要請から Si が選ばれた。さて、Si を用いる検出器の候補は二つあり、それは Si-Pad(pixel-array-type Si sensor) と DSSD(double-sided silicon strip detector) である。DSSD は Si-Pad に比べ、高エネルギー分解能、高位置分解能の検出器であるが、費用がかかり構造も複雑である。また、目 標性能は Si-Pad で十分に達成できるという理由から、SGD コンプトンカメラには DSSD ではなく Si-Pad を使用することになった。

ではこの Si-Pad の模式図と仕様を図 2.5、表 2.1 に示す。

Si-Pad は n 型 Si ウエハーの上に p 型半導体、下に n 型半導体プレートを設置する構造である。結果、p 型の各ピクセルが n 型のプレートと対になり、ダイオードを形成する。電圧を印加するとこの p-n 間に空 乏層が形成され、2.1 節で述べたように光子を検出する。検出された信号を読み出すために、各ピクセルに は DC 結合された Al 電極が引き出し線として付けられており (図 2.6)、Al 電極以外は SiO₂ の絶縁層で覆 われている。これは電流がピクセルに直接流れないようにするためである。絶縁層の厚さはおよそ 1 μ m 程 度であり、読み出し線の幅、厚さはそれぞれ 8 μ m、4.5 μ m である。SGD コンプトンカメラは図 2.6 と、図 2.6 に鏡面対称な検出器を交互に積層して構成される。説明簡略化のため、図 2.6 とそれに鏡面対称な検出 器をそれぞれ α 型検出器、 β 型検出器と呼ぶことにする。

図 2.7 は温度-15 度の恒温槽に Si-Pad を入れ、200V の電圧を印加した時に得られた²⁴¹Am のエネルギー スペクトルである。温度と電圧は実際に運用される条件 (~ -20 度、200 ~ 250V) に近づけている。赤い線 でフィッティングしているのが 59.5keV のピークで、エネルギー分解能は 1.90keV であった。



size	$54.0\times54.0mm^2$
pixel pitch	3.2mm
pixel size	$3.14\times3.14mm^2$
bulk thickness	0.6mm
number of pixels	$256(16\times16)$

表 2.1: Si-Pad の仕様 [17]

図 2.5: Si-Pad の模式図。複数のピクセルから構成されい る。[16]



図 2.6: Si-Pad につけられた読み出し線。Si-Pad1 枚が4分割され、隅に読み出し線が集められている。SGD コンプトンカメラは図 2.6 と図 2.6 に鏡面対称のものを交互に重ねて構成される。[17]



図 2.7: -15 度、200V 印加、積分時間 300sec、線源 Am での Si-Pad1 ピクセルのエネルギースペクトル。読み出し線が少ない中央のピクセルを使用した。エネルギー分解能は 1.9keV。

2.1.3 CdTe-Pad

CdTe を構成する元素の原子番号はそれぞれ Cd=48、Te=52 である。図 1.7 でも示したように、この大 きい原子番号のため数百 keV のガンマ線に対してもシンチレータと同じくらい高い光電吸収断面積を持ち、 コンプトンカメラの吸収体として使われる。CdTe は吸収体として良い性能を持つが、均質な結晶を作るこ とが技術的に困難であったため、COMPTEL を含めて今まで使われてこなかった。しかし、近年検出器に 用いることが可能な高品質 CdTe 結晶の作製が可能になり、SGD コンプトンカメラで実用化されることに なった。[9] この CdTe-Pad 検出器の EM 素子を図 2.8 に示す。これは単結晶 CdTe ウエハーの Te 面に In を蒸着したものを陽極に、Pt を無電解メッキでつけたものを陰極として用いている。この CdTe は p 型半 導体で、仕事関数の小さい In を電極として用いると、電極と半導体の間に高いショットキー障壁をもたら し、検出器はダイオード特性をもつ。非常に小さいリーク電流をもつため、0.5mm ~ 1mm の厚さの素子 に 500V ~ 1000V という高いバイアス電圧をかける事ができる。この高い電場によって CdTe 内で生じた 移動度が小さく、寿命の短いキャリアを全て電極まで移動させる事ができ、高いエネルギー分解能を実現し ている。[18]

2.2 ASIC

コンプトンカメラ全体では1万を超えるチャンネル数があり、これらのチャンネルから来る信号を同時かつ 瞬時に処理する、コンパクトで低ノイズな読み出しシステムが必要がある。このため、これまで IDEAS 社の ASIC(Application Specific Integrated Circuit) である VATA チップが改良されてきた。現状では VATA450.3 が用いられている。VATA450.3 は 0.35µm の CMOS 技術が用いられた、10.0mm × 6.5mm × 450µm とい



size	$26.75\times26.75mm^2$
pixel pitch	3.2mm
pixel size	$3.15\times3.15mm^2$
bulk thickness	0.75mm
number of pixels	$64(8 \times 8)$

図 2.8: CdTe-Pad,EM 素子。左がピクセル状になっている pt 電極側で、右か共通電極になっている In 電極側。pt 電 極側に読み出し線が見える。[18]

表 2.2: CdTe-Pad の仕様 [18]

うサイズのチップである。[19]Pad 型検出器の隅に集められた読み出し線に繋げられ、一つで 64ch 分の信 号を処理することができる。また、コンプトンカメラー台当たり 208 個搭載される。

VATA450.3 は VA 部と TA 部の二つの信号処理回路から構成され、VA 部は CSA、slow shaper、サンプ ルホールド回路、マルチプレクサからなり、TA 部は fast shaper、ディスクリミネータからなる。このブ ロックダイアグラムを図 2.9 に示す。

検出器から得られる各チャンネルの信号は、まず VA 部の CSA(電荷有感型前置増幅器) に入力され、増幅 される。(図 2.10,a) CSA を出た信号は VA 部の slow shaper と TA 部の fast shaper に分かれて入力される。 fast shaper 出力はディスクリミネータに入力され、指定した threshold を超えると (図 2.10,b) 全 64ch 分 の信号は wired-OR されて一つのトリガー信号を出力する (図 2.10,c)。これを受けて適切なディレイをかけ られた slow shaper の出力 (各チャンネルの波高値) がサンプルホールドされる。図 2.10,d はサンプルホー ルドのスタートタイミングを表す信号で、f は各チャンネルの波高値がホールドされている様子を表してい る。その後マルチプレキサが最初のチャンネルとつながり、クロック信号にあわせて 1ch ずつ、全 64ch の サンプルホールドされた波高値が AD 変換されて読み出される。そして最後に読み出し終了の信号が出さ れ、読み出しが終わる。[9][20]

2.3 ASIC 制御とデータ処理システム

2.3.1 daisy chain、層、区画

コンプトンカメラのフロントエンドエレクトロニクス (ユーザーと直接やり取りを行うシステム) は Front-End Card(FEC)、ASIC Driver Board(ADB)、ASIC Control Board(ACB) で構成される。これらを説明 するためには daisy chain、層、区画という言葉の意味を理解しておく必要があるので、先にこの3つにつ いて簡単に説明する。

Pad 型検出器は読み出し線が四隅に集められており (CdTe-Pad は一つの隅に集められているが、4枚で 1 面を構成するので結局四隅に引き出し線が集められる)、そこから ASIC に接続されている。さて、ASIC で処理されたデータは8 個 (CdTe Side は6 個) ずつの ASIC のデータにまとめられて後段に送られる。さ らに8 個 (または6 個) の ASIC 内でも読み出される順番が決まっており、鎖でつながれたように順に読み 出されていく様子から、この ASIC のまとまりは daisy chain と呼ばれる。それぞれの daisy chain には番 号がつけられており、EM コンプトンカメラでは図 2.11, 2.12, 2.13 のようになっている。



[21]



図 2.11: daisy chain (Si) 例えば dc2 は Si の a 区画 0,2,4,6 層にある 8 つの ASIC で構成される。



⊠ 2.12: daisy chain (CdTe Bottom)



⊠ 2.13: daisy chain (CdTe Side)

次に図 2.11~図 2.13 にでてきた「層」「区画」という言葉について説明する。2.2 節で述べたように、SGD コンプトンカメラは α 型と β 型の検出器が交互に積層されている。この α 型検出器 2 β 型検出器 1 枚ずつ が重ねられ、一つの「層」が形成される。これまでコンプトンカメラは Si-Pad を 32 枚重ねていると説明 してきたが、16 層重ねていると言い換えることが出来る。CdTe についても同様である。

図 2.6 で見たように Si-Pad は 1 枚で 16×16 の 256 ピクセル持ち、8×8 の 64 ピクセルに四分割した一つを ASIC 一つが担当する。この四分割したものを「区画」と呼び、それぞれ a,b,c,d という名前がつけられて いる。CdTe は最初から 8×8 ピクセルの CdTe-Pad を用いているので、CdTe-Pad 一枚で一区画となる。

2.3.2 フロントエンドエレクトロニクス

フロントエンドエレクトロニクスは図 2.14 のようにデータの処理を行う。図の左側二つのシステムは 4 グループに分かれているが、これは a,b,c,d の各区画でデータが処理されているからである。図から検出器で 得られたデータは「FEC↔ADB↔ACB↔DPU」という様に処理される。このデータ処理について述べる。

FEC は ASIC を乗せているカードのことで、図 2.15 のような配置である。Si,CdTe-Bottom 検出器の n 枚目と n+1 枚目 (n:偶数) の上下二つの FEC は背中合わせになっており、これらは結びつけられて層を形 成する。さらに daisy chain を構成してデータを ADB に送る。CdTe-Side は他と作りが違い一面 (6ASIC) で 1daisy chain を形成する。以上まとめると、FEC と呼ばれる ASIC が一区画当たり 8×5+6×2 = 52 枚存在し、それらが結びついて層、daisy chain を形成した後、ADB にデータが送られるのである。[22] ADB は CdTe-Side のようにコンプトンカメラの側面にそれぞれ一つずつ、計4つ存在し、FEC(ASIC) か らのデータを各区画ごとに受け取り ACB に送る。ACB はコンプトンカメラの底に一つ設置されており、4 区画のデータ (コンプトンカメラー台の全データ) を受け取って DPU に送られる。

SGD コンプトンカメラでは、ユーザーが目的に合わせて自由にオペレーションを行うことができる。こ



図 2.14: データ処理システム。一番小さな四角が ASIC (FEC)、それを囲んでいる青い四角が daisy chain、 オレンジの四角がコンプトンカメラ1台を表す。なお、図中では daisy chain→dc, コンプトンカメラ →CC と略記している。



図 2.15: FEC の配置。(a) は Si について描いたもので、真ん中の格子模様の入った四角が Si-Pad、その四 隅にある青色の四角が ASIC、それを囲んでいるものが FEC である。ASIC は FEC の上に乗っている。 (b) は CdTe-Bottom について描いたもので、真ん中の四分割されている四角が CdTe-Pad で、その他は (a) と同じである。[22]

こでオペレーションとは、例えばスレッショルド値の設定や、検出器のトリガー ON/OFF の設定など色々 ある。オペレーションは DPU 内の User FPGA で行い、ACB へ信号を送る。ACB の CC FPGA で信号を 4 区画分に分けて ADB、FEC へと送り、各 ASIC にどのようなデータをとればいいのか指令する。

2.3.3 電圧系統

検出器や ASIC に電源がどのように供給されるのかを図 2.16 に示した。衛星からの電源は、まず Bus Power 方式でおよそ 50V が DPU 内の Power Supply Unit(PSU) に送られる。次に SGD-AE 内の APD Processing and Management Unit(APMU) と Camera Power Management Unit(CPMU) に分けられる。 APMU は BGO の信号を読み出す APD に使用される電源の管理や、APD CSA からの信号を受け取る機器 である。CPMU はコンプトンカメラで使用される電源や温度の管理、処理を行う機器である。次に CPMU から POL Board へ電源が供給されるが、ここではコンプトンカメラ 3 台に供給する電源を分岐する処理と その管理を行っている。POL Board から送られた電源は各コンプトンカメラの ACB→ 4 つの ADB→ 各 FEC(ASIC) というように供給され、ASIC が動作する仕組みになっている。なお、各 ASIC の動作に必要 な電圧は 2~3V 程度である。

Si-Pad, CdTe-Pad 検出器は空乏層を作らなければならないので、それぞれ 230V, 1000V もの高い電圧 (HV) が必要になる。この HV は PSU からでは無く HV-CC から供給されるが、HV 印加の制御は CPMU によって行われる。



図 2.16: 検出器、ASIC 動作に用いる電源の供給フローチャート

2.4 データフォーマット

SGD コンプトンカメラで得られるデータはどういうもので、どれくらいの大きさを持っているのかを表 2.3 に示す。また、そのイベントデータ中の flag について表に続いて説明する。

SGD イベントデータの名称	ビット数	補足
start	16bits	
time	32bits	MIO 内部の時間カウンタ
event livetime	24bits	イベントごとにカウンタをリセットして、 各イベントのライブタイムを計測
CC ID	2bits	CC ID=1 or 2 or 3
flags	62bits	別途記載
No. hit ASIC	8bits	ADC データを出した ASIC の個数
ASIC ID	8bits	
ASIC Data	91+n*10 (104~736) bits	1 hit=104 bits, 2 hit=112
end	16bits	

表 2.3: SGD イベントデータフォーマット

- SGD イベントデータ中の flag について。
- trigger: 6bits(5bits(28daisy chain + pseudo + forced + calpulse trig = 31 種類)+1bits) どの信号でトリガーしたのかについてのデータ。
 28 系統 (0~15:Si, 16~19:CdTe-Bottom, 20~27:CdTe-Side), 28:forced, 29:pseudo, 30:calpulse
 同時に二つ以上トリガーしたときは、大きい番号の方を 5bits に記録して、2 以上のビットを H にする。
- 2. trigpat: 31bits(28daisy chain, pseudo, forced, calpulse trig) 28daisy chain のトリガーパターン。
- 3. SEU flag: 1bit
- length check: 1bit
 各 ASIC のデータ内容とその長さに矛盾があれば H にする。
- 5. Cal mode: 1bit
- 6. fast BGO: 4bits
- 7. hitpat BGO: 4bits
- 8. hitpat CC: 3bits
- 9. CC busy: 3bits
- 10. reserve: 8bits 予備。

第3章 データ解析の手順

第2章では検出器の原理やSGD内でのデータ処理について述べた。これで我々は光子を検出した時の データ(生データ)を得ることが出来るが、このまますぐにイメージングやARM分布を描ける訳では無い。 生データは全チャンネルのADC値であり、そこから必要な情報をリスト化し、それを用いて高度な解析 (イメージングなど)を行う。これらの解析にはISAS/JAXAで開発されたコンプトンソフトと呼ばれるソ フトウェアを用いる。この章ではコンプトンソフトがどのような解析を行っているのか説明する。ただし、 コンプトンソフトは今後のアップデートにより内容が変わる可能性がある。

3.1 ヒットリストの作成

高度な解析を行うために必要な情報とは、1つのイベント中に検出器に何回ヒットしたかを表す totalhit、 ヒットした検出器がどれかを表す detid、ヒットがあった位置を表す pos、PHA の値を表す e_pha などであ る。今挙げたものはほんの一例なのだが、このような情報をリスト化したものをヒットリストと呼ぶ。まず はこのヒットリストの作成から始める。

3.1.1 ペデスタル補正

実験で測定を行う際には零点を合わせておく必要がある。これを行わなければ零点からずれている分だ け得られたデータにもずれが生じ、正しいデータを得ることが出来ない。コンプトンカメラで得られるパ ルスハイトデータも例外では無く、零点を合わせる作業が必要であり、これはペデスタル補正と呼ばれる。 零点 (ペデスタル) はエネルギー損失0の時の ADC 値である。

このペデスタル値は次のようにして求める。検出器で光子を検出するとASICによって全チャンネルがサン プルホールドされてデータを読み出す。ヒットしているのはこの中で数チャンネル程度だと考えられ、ヒッ トチャンネル以外は全てペデスタル値の計算に使用される。1イベントで得られるデータの内ほとんどがペ デスタルなので、スペクトル中に見られる一番大きなピークがペデスタルピークである。このピークはガ ウス分布に従うため、ガウシアンでフィットしてその平均値のADC値をペデスタル値と決定する。ペデス タル値はチャンネル毎に違うので全てのチャンネルについて調べデータベース化しておき、ペデスタル補正 時に用いる。

3.1.2 コモンモードノイズ除去

次にコモンモードノイズの除去を行う。コモンモードノイズとは同一 ASIC 内の全チャンネルに共通し て現れるノイズのことであり、エネルギー分解能に影響するので除去する必要がある。
コモンモードノイズは ASIC の中で計算される。前章までで述べたように一つの ASIC は 64ch を担当して おり、ASIC が読み出しを開始すると 64ch が同時に AD 変換されて ADC 値を出す。この変換において、32 番目に AD 変換が終わったチャンネルの ADC 値をコモンモードノイズとして出力する。

ペデスタル補正とコモンモードノイズ除去をおこなったので、Pulse Height Amplitude(PHA)を得るこ とが出来る。しかし、このままではノイズレベル (ペデスタル分布の標準偏差 [9])の大きいチャンネルが存 在してしまう。これはワイヤーボンディングが外れている、元々そのチャンネルは HV 印加時の暗電流値が 大きい、などといったことが原因である。ノイズレベルが高いとトリガーが高いレートで出てしまい、どれ が光子検出によって得られた信号か分からなくなってしまう。これは検出器全体のデータ取得の妨げにな る。こういったノイズレベルの高いチャンネルはバッドチャンネルと呼ばれる。バッドチャンネルを他の 正常なものと一緒に扱わないために、DPU 内の User FPGA でトリガーを出さないように指示してバッド チャンネルのデータ読み出しを除外することができる。

3.1.3 エネルギー較正

本研究では、宇宙科学研究所の一戸氏によって開発されたエネルギー較正方法を用いた。参考文献 [23] を 引用しながらこの方法について説明する。まずエネルギー較正とは、得られた ADC 値を keV,MeV といっ たエネルギーに変換することである。今回用いるエネルギー較正法は大きく 3 つの段階に分けることがで き、それは以下の通りである。

およそのエネルギー較正曲線の作成

↓ Si のエネルギー、CdTe の低エネルギー領域の較正 ↓ CdTe の高エネルギー領域を再び較正

このような較正方法を用いなければならないのは、「ASIC のゲインがリニアではない」「下の層の Si-Pad には低エネルギーの光子が届かないため、エネルギー既知の線源を当てても低エネルギー領域の較正がで きない」「Si では 100keV 以上で光電吸収がほとんど起きない」といった理由からである。

第一段階では複数の放射線源を使って光電吸収ピークやコンプトンエッジ等からチャンネルとエネルギー の関係を得て、ADC channel - Energy のグラフにプロットする。そしてプロットされた点をスプライン曲 線で接続する。ここでスプライン曲線とは与えられた複数の点を通る滑らかな曲線であり、代表的な補間法 である。これによりおよそのエネルギー較正曲線を描くことが出来る。この較正曲線の例を図 3.1 に示す。

第二段階では、まず第一段階で作られた較正曲線を使ってエネルギー較正を行う。このとき得られた Si-CdTe の2回ヒットイベントのスペクトルを図 3.2 に示す。この図において青い線で挟まれた 0.65~0.68MeV のイベントは¹³⁷Cs のエネルギーピーク (0.662MeV) イベントだと考えられる。

さて、図 3.1 において較正点の間隔が出来るだけ狭い領域 (CdTe, 0.356~0.662MeV) を、暫定的に正しく較 正できた領域と考える。Si と CdTe で落としたエネルギーの和が 0.65~0.68MeV であり、さらに CdTe で 落としたエネルギーが 0.356~0.662MeV のイベントに対して、Si で落としたエネルギーの値を計算するこ とが出来る。その計算式は 0.662*MeV – E_{CdTe}* となる。この計算により求まったエネルギー値を y 座標、 この時の Si の ADC 値 x 座標とする新たな較正点を較正曲線のグラフに追加する。較正点を足していき、



図 3.1: 一段階目で作られた較正曲線の例 [23]



図 3.2: 一段階目のエネルギー較正曲線をもとに較正した Si-CdTe2 回ヒットイベントのエネルギースペクトル。青い線で囲まれているところが¹³⁷Cs の 0.662MeV イベントと考えられる。[23]

フィットしている様子が図 3.3 である。以上の作業を繰り返し、ある程度較正点が集まったらフィッティン グを行う。このようにして得られた曲線を較正曲線とする。



図 3.3: 高エネルギー側の較正曲線をもとに、Si のエネルギー、CdTe の低エネルギー領域の較正点を追加 し、フィッティングしている第二段階の様子。[23]

第三段階で行うことは、ここまでで得られた最新の較正曲線を用い、第一段階で暫定的に正しいと考え た領域を較正することである。

この3つの段階を繰り返し、最終的にどのエネルギー領域でも正しく較正できるエネルギー較正曲線を 得る。(以上のエネルギー較正アルゴリズムの正当性については参考文献 [23] 参照)

3.1.4 ヒットリスト

エネルギー較正が終わり ch からエネルギーに変換された Pulse height invariant(PI) を得ることが出来 た。なお、設定したエネルギースレッショルドを超えたものをヒットとしており、出来るだけノイズが入ら ないように考慮している。また反応位置はそれぞれの検出器1ピクセルの中央値としている。以上で必要 な情報がそろったので、ヒットリストを作ることが出来る。この先の解析に必要、または重要である項目に ついてまとめて掲載する。

項目	項目の意味
totalhit	一つのイベント内で検出器にヒットした回数
posx, posy, posz	光子を検出した検出器の反応位置 (一番上の Si-Pad 表面の中央を原点とする)
e_pha	PHA 値 (得られた ADC 値にペデスタル補正とコモンモードノイズ除去を施したもの)
e_pi	PI 値 (ch 表示の PHA 値をエネルギー較正直線を用いて対応するエネルギーに変換したもの)
time	光子を検出した時間 (unixtime で表示される)
detid	ヒットした検出器 ID
channel	全検出器の各ピクセルにつけられた通し番号 (0~14335)

表 3.1: ヒットリストの内容。ただしここに示したものは全てでは無く、後の解析で必要となるものだけで ある。

3.2 イベント再構成

前節で作成したヒットリストを用いてコンプトン再構成を行いたいが、これだけではまだ不十分である。 なぜならヒットリストから分かることは、一つのイベント内で何回、どの場所にヒットし、どれだけのエネ ルギーを損失したか (検出したか) という情報だけだからである。コンプトン再構成にはさらに、(1) それは どのような順番でヒットしているのか。(2) 各ヒットはコンプトン散乱や光電吸収、蛍光 X 線などの反応の 内、どの反応によるものか。という情報が必要で、これを求めることをイベント再構成と呼ぶ。

イベント再構成の際、以下の図 3.4 のように、どちらが最初にヒットしたかを間違えると光子到来方向を大 きく間違えてしまうことになる。また、光子が光電吸収されたときに蛍光 X 線や光電子を発生する可能性 があり、これが作る偽のコンプトンイベント (フェイクイベント) はバックグラウンドになり得るので、注 意して行わなければならない。



図 3.4: 2回ヒットイベント (同時に 2つの検出器にヒットがあったイベント)の反応順序。左は Si-CdTe イ ベント、右は CdTe-Si イベントになっており、どちらを選択するかによって光子到来方向が全く異なる。

図 3.5 はモンテカルロシミュレーションを行った結果を用い、1 ヒットイベントに対する複数ヒットイベ ントの割合を示したものである。エネルギーが高くなるにつれて少しずつ差が縮まるが、500keV 程度まで は2回ヒットイベントの割合は4回ヒットイベントに対して占める割合が1-2桁大きい。3回ヒットイベン トは低エネルギー側では2回ヒットイベントに対して1桁ほど少ないが、エネルギーが大きくなると割合 も大きくなる。つまり2回、3回ヒットイベントに対してコンプトン再構成を行えば、ほぼ十分であるこ とが分かる。

それではヒットの順番、種類の決定について、最も重要である2回ヒットイベントについて述べる。2回 ヒットのコンプトンイベントはどちらかでコンプトン散乱し、その後光電吸収しているイベントなので、反 応の種類を決定できれば順番も同時に決まる。(フェイクイベントについては後で考慮する。)

検出したエネルギー値から反応の順番を決定するには、「 $E_1 > E_2$ 」または「 $E_1 < E_2$ 」のような条件が常に成りたてば良い。例えば「 $E_1 < E_2$ 」の関係が「常に」成り立つ時、エネルギーの値を見て低い方を1ヒット目と断言できるからである。そして「 $E_1 < E_2$ 」の関係が「常に」成り立つための条件は、 E_1 が最大値または E_2 が最小値の時にこの関係が成り立っていることである。ここで E_1, E_2 はそれぞれ1ヒット目、2ヒッ



図 3.5: EM コンプトンカメラのジオメトリを設定して行ったモンテカルロシミュレーションの結果を用い、 1 ヒットイベントに対する複数ヒットイベントの割合を示した。

ト目で検出したエネルギー値である。コンプトン運動学の式 (1.7) を *E*₂ について解き、上の考え方を適用 してみる。

$$\cos\theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} \longrightarrow E_2 = \frac{E_{in}}{1 + \frac{E_{in}}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)}$$
(3.1)

散乱光子のエネルギー E_2 が最小になるのは散乱角=180 度、すなわち反跳電子が入射光子から最大のエネ ルギーをもらった時である。式 (3.1) に θ = 180° を代入すると、

$$E_{2min} = \frac{E_{in}}{1 + \frac{2E_{in}}{m_e c^2}}$$
(3.2)

式 (3.2) で $E_{in} < \frac{m_e c^2}{2} = 255 keV$ の時 $E_{2min} > \frac{E_{in}}{2}$ となり、どのような散乱角でも $E_1 < E_2$ と結論づけること が出来る。以上まとめると、 $E_{in} = (E_1 + E_2) < \frac{m_e c^2}{2} = 255 keV$ の時は、エネルギーの低いヒットを 1 ヒッ ト目 (コンプトン散乱)、高いヒットを 2 ヒット目 (光電吸収) と決定できる。Doppler Broadening の影響に よりこの関係が崩れることがあるかもしれないが、現在のコンプトンソフトでは考慮していない。

さて、入射エネルギーが 255keV 未満であれば上記の関係により反応の順番 (種類) を求めることが出来 た。しかし 255keV を超えるとこの関係が崩れるケースが出てくるので他の方法を用いなければならない。 まず 255keV 以上の時の E_1 と E_2 の関係を制限する方法を述べる。コンプトンカメラ真上から光子が入射 した際、Si-CdTe Bottom,Si-CdTe Side のヒットの内、散乱角が最小または最大になるのは図 3.6 の時だと 考えられ、その時の散乱角度は表 3.2 のようになる。ここで散乱角とエネルギーを結びつける式 (1.7) を E_1 について解いて、

$$\cos\theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} \longrightarrow E_1 = \left(\frac{m_e c^2}{E_2(\cos\theta - 1) + m_e c^2}\right) E_2 \tag{3.3}$$

この θ に先ほどの最大、最小値を代入すると以下の図 3.6 が得られた。図 3.7 は $E_1 - E_2$ マップと呼ばれる。これは1イベントが1プロットで表され、落としたエネルギーや入射エネルギーがすぐに分かる図である。0° ~ 86°の線で囲まれる領域に Si-CdTe Side イベントが、4° ~ 172°の線で囲まれる領域に Si-CdTe



散乱の種類	最小散乱角	最大散乱角
Si - CdTe Bottom	0°	86°
Si - CdTe Side	4°	174°

表 3.2: 図 3.5 をもとに計算して得られた Si-CdTe イベントの最大、最小散乱角

図 3.6: EM コンプトンカメラのジオメトリにより制限される Si-CdTe イベントの散乱角。点線で描いた方が最大散乱角を、破 線で描いた方が最小散乱角を表す。



図 3.7: *E*₁-*E*₂ マップ。マップ中に描かれている線は散乱角度を表す。主に Si-CdTe イベントに対して用いる。

Bottom イベントがプロットされる。(0° というのは x 軸のことである。) これで散乱角により *E*₁,*E*₂ の関 係に制限をつけることが出来るが、反応の種類を特定することは出来ない。この問題は先行研究により、モ ンテカルロシミュレーションを用いて 2 回ヒットイベントの特徴を見つけ、その特徴から種類を決定すると いう方法で解決された。[4](そしてこれは現段階でも改良が進められている。[23]) この手法について述べる。

Si-CdTe, CdTe-Siイベント

2回ヒットイベントには Si-CdTe, CdTe-Si, Si-Si, CdTe-CdTe, fake event といった種類がある。まずは Si-CdTe, CdTe-Si イベントについて考える。このイベントでは Si でコンプトン散乱し、CdTe で光電吸収 する Si-CdTe イベントの方が割合がかなり大きい。これはシミュレーションによって得られた結果で、具 体的に Si-CdTe Bottom イベントに対する CdTe Bottom-Si イベントの割合は 140keV で 0.01%、560keV で 2.8%程である。高エネルギー側ほど割合は大きくなる。[4] この結果を考慮し、コンプトンソフトでは 2 ヒットイベントにおいて 1 ヒット目の変数に CdTe、2 ヒット目の変数に Si のフラグが立った時 (すなわち CdTe-Si)、Swap 関数を用いて中の情報を入れ替えて Si-CdTe イベントとして扱う。

Si-Si, CdTe-CdTe イベント

次に2回とも同じ種類の検出器に当たったこれらのイベントについて考える。説明の便宜上ヒットのあった位置をそれぞれ a,b とする。a の位置で落としたエネルギーを仮に *E*₁、b の位置でのエネルギーを *E*₂ とおく。この2ヒットに対して ARM(1.4.2 参照) を計算する。今度は逆に b の位置で落としたエネルギーを *E*₁,a の位置でのエネルギーを *E*₂ とおく。そして ARM を計算する。この二つの ARM を比較して値の小さい方 (理想値と実験値がより近い方)を採用する。これで種類の判定が出来る。

fake event

さて、2 ヒットイベントの最後はフェイクイベントの時である。フェイクイベントとは、すなわちコンプ トン散乱や光電吸収した際に出る蛍光 X 線、光電子、反跳電子が光電吸収されるイベントである。これら を上と同じように扱うと光子到来方向を大きく間違ってしまうので、出来るだけフェイクイベントを除く必 要があり注意しなければならない。

まず蛍光 X 線によるフェイクイベントについて述べる。コンプトンカメラを構成する物質から出される 蛍光 X 線は以下の表の様なエネルギーを持つ。Si の蛍光 X 線は数 keV 程度とエネルギーが小さく、すぐに 再吸収される。また Si は原子番号が小さく光電吸収断面積が小さいため、この反応については無視する。 (1.3.1 節参照) 問題なのは Cd,Te から出される方で、およそ 20~30keV 程度のエネルギーを持っている。2 ヒットイベントについて、*E*₁ が表に示した Cd,Te のエネルギーから ±0.5keV 以内の時に蛍光 X 線フラグ が立つ。このフラグが立ったイベントは蛍光 X 線イベントと判断され、後にこのイベントをカットするこ とが出来ようになっている。

特性X線	エネルギー [keV]	割合 [%]
¹⁴ Si $K_{\alpha 1}$	1.740	3.3
14 Si $K_{\alpha 2}$	1.739	1.64
$^{14}{\rm Si}~K_{\beta 1}$	1.836	0.056
$^{48}\mathrm{Cd}~K_{\alpha 1}$	23.174	46.1
${\rm ^{48}Cd}\ K_{\alpha 2}$	22.984	24.5
${\rm ^{48}Cd}\ K_{\beta 1}$	26.095	7.69
52 Te $K_{\alpha 1}$	27.472	46.2
52 Te $K_{\alpha 2}$	27.202	25.0
52 Te $K_{\beta 1}$	30.995	8.21

表 3.3: Si,Cd,Te の特性 X 線のエネルギーと割合。他にも特性 X 線は出るが、それぞれ高い割合で出る 3 つを選んで記載した。[24]

次に光電子、反跳電子について述べる。これらは荷電粒子であるので、発生しても電磁気的な力によっ てエネルギーを失い停止する。しかし、高いエネルギーを持っているとエネルギーを失うまでに時間がかか り、その分遠くまで飛ぶ。この距離が長くなって他のピクセルや検出器で検出されることがある。このよう にフェイクイベントになり得る時は、*E*₁の値が高いところまで分布する。すなわち図 3.7 の青色の線より 左側にプロットが見られる。これは先に説明した散乱角の条件によって除去できる。これによって除去でき ないイベントはバックグラウンドとなる。

これでイベント再構成は終わりだが、この時点でヒットリストと同じようなコンプトンリストが作られる。(コンプトンリストは本論文中のみで使う言葉である。) コンプトンリストにはイベント再構成を行ったことにより得られたコンプトンイベントに関する情報が詰められる。以下に重要な項目をまとめる。

項目	項目の意味
h1detid	1ヒット目の光子を検出した検出器 ID
h1edep	1 ヒット目で光子が落としたエネルギー
h1posx, h1posy, h1posz	1 ヒット目の光子を検出した検出器の反応位置
h2detid	2 ヒット目の光子を検出した検出器 ID
h2edep	2 ヒット目で光子が落としたエネルギー
h2posx, h2posy, h2posz	2 ヒット目の光子を検出した検出器の反応位置

表 3.4: コンプトンリストの内容。ただし重要なものだけ抜粋して記載している。

3.3 バックプロジェクション

ここまでの解析によって2ヒットの反応位置、順番、検出したエネルギーが分かっているので、バック プロジェクションを行うことができる。バックプロジェクションとは、コンプトン再構成を行った時に描か れるコンプトンコーンを二次元平面に射影して重ねていくことである。コンプトンコーンを重ねることに よって光子源があると思われる位置をイメージングすることが出来る。 下の図はバックプロジェクションの様子を描いたものである。まず2ヒットの反応位置の延長線を線源の ある高さまで引き、その交点をAとする。1ヒット目の反応位置を中心にしてコンプトン運動学で求まる θ_E だけ延長線を傾ける。このとき延長線の長さは変えない。今度はAを中心にして傾けた延長線を2π回 転し、その軌道上に一様ランダムに点をプロットする。今回の解析では1つのコンプトンコーンを描くた めに回転角2 π /1000 ごとにプロットした。これを2次元平面に投影すると1イベントに対するコンプトン コーンを一つ書くことができ、イベントの数だけこれを繰り返す。以上がバックプロジェクションの流れで ある。

ここまでの流れを見ていると分かるように、反応位置から求まる散乱角とコンプトン運動学から求まる 散乱角の差 (ARM、1.4.2 参照) が大きい時、そのイベントは正しくないコンプトンコーンを描いてバック グラウンドになる。よって ARM の絶対値を自分で設定し、その ARM の絶対値を超えたイベントは、バッ クグラウンドとして除去する。このバックグラウンド除去の方法は ARM Cut と呼ばれる。



図 3.8: バックプロジェクションの様子

第4章 熱真空試験とデータ解析

何度か述べたように、本研究では熱真空試験を行った。すなわち EM コンプトンカメラを運用環境下に おいて期待される性能を発揮するか、試験中に不具合が出ないかを確認する試験である。この章では得ら れたデータの解析結果を示し、その結果について議論する。

4.1 実験の概要とセットアップ

熱真空試験 (以後実験) を宇宙科学研究所、高橋研究室で 2012 年 12 月 16 日 ~12 月 28 日まで行った。こ の実験には 6 人参加し、私の役割は主に Quick Look(QL) でのモニタリングであった。モニタリングする 項目はコンプトンカメラやカメラを支える台に複数取り付けた温度計の示す温度分布が急激に変化せず、一 定値をとりつづけるか。ライトカーブを見て急激にピークが立たないか。暗電流値が急激に変化しないか。 真空装置は一定値を保っているか、であった。



図 4.1: モニタリングに用いた QL 画面。左がイメージング画像で、真ん中がエネルギースペクトル。本来 は右にライトカーブも描かれていたが、図中には描かれていない。

実験に使った機器を以下の図 4.2~4.4 に示す。コンプトンカメラは図 4.4 のように真空槽に入れられ、 $1.4 \times 10^{-3} \sim 1.9 \times 10^{-3}$ Pa 程の真空状態に保たれる。この真空槽は丸ごと恒温槽の中へ入れられる。この 恒温槽で温度を一定に保ち、実験では -25° C, -20° C, 20° C の測定を行った。放射線源はエネルギーの低

い ²⁴¹Am は真空槽の上に、エネルギーの高い ¹³⁷Cs, ¹³³Ba, ⁵⁷Co, ⁶⁰Co は恒温槽の上においた。それぞれ コンプトンカメラまでの距離は $\simeq 200mm$, $\simeq 1000mm$ である。コンプトンカメラへの電源、および高電圧 は市販の電源を用いた。HV は PC で制御され、暗電流値の時間変化を見られるようになっている。検出器 に印加した HV は Si→230V, CdTe→800V,1000V である。また、コンプトンカメラのコントロールとデー 夕読み出しは搭載品の MIO とほぼ同じロジックの回路を用いた。



図 4.2: 実験のセットアップ No.1



温度計測ロガー

図 4.3: 実験のセットアップ No.2



図 4.4: 実験のセットアップ No.3

寺間	設定温度	真空度	線源	線源場所	設定	pre bias
:23	20°C	6.0 × 10 [°] -3Pa	BG		low gain	(Si 7, CdTe 7)
1:00	20°C	1.3 × 10 [°] -3Pa	BG		high gain	(Si 7, CdTe 7)
3:15	–25°C	1.2 × 10 [°] -3Pa	BG		high gain	(Si 7, CdTe 7)
4:00	–25°C	1.9 × 10 [°] -3Pa	BG		low gain	(Si 7, CdTe 7)
6:05	–25°C	1.9 × 10 [°] -3Pa	137Cs	工 単 晋 国	low gain	(Si 7, CdTe 7)
21日)12:00	–25°C	1.8 × 10 [°] -3Pa	BG		low gain	(Si 7, CdTe 7)
1730	–25°C	1.8 × 10 [°] -3Pa	BG		low gain	(Si 7, CdTe 0)
23:00	–25°C	1.8 × 10 [°] -3Pa	BG		low gain	(Si 0, CdTe 0)
16:33	-15°C	1.4 × 10 [°] -3Pa	BG		low gain	(Si 7, CdTe 7)
1730	-15°C	1.4 × 10 [°] -3Pa	137Cs	恒温槽上	low gain	(Si 7, CdTe 7)
-18:40	-15°C	1.4 × 10 [°] -3Pa	BG		low gain	(Si 7, CdTe 7)
-19:12	-15°C	1.4 × 10 [°] -3Pa	137Cs	工 単 晋 国	low gain	(Si 7, CdTe 7)
-20:19	-15°C	1.4 × 10 [°] -3Pa	BG		low gain	(Si 5, CdTe 5)
-21:20	-15°C	1.4 × 10 [°] -3Pa	BG		low gain	(Si 5, CdTe 5)
-21:50	-15°C	1.4 × 10 [°] -3Pa	BG		low gain	(Si 5, CdTe 5)
-13:52	–25°C	1.6 × 10 [°] -3Pa	BG		low gain	(Si 7, CdTe 7)
-16:53	–25°C	1.8 × 10 [°] -3Pa	137Cs	恒温槽上	low gain	(Si 7, CdTe 7)
-19:54	–25°C	1.7 × 10 [°] -3Pa	241Am	恒温槽内	high gain(Si trg のみ)	(Si 7, CdTe 7) Irampfb 1
-20:46	-25°C	1.7 × 10 [°] -3Pa	BG		high gain(Si trg のみ)	(Si 7, CdTe 7)
-21:30	-25°C	1.7 × 10°-3Pa	241Am	恒温槽内	high gain(Si trg のみ)	(Si 7, CdTe 7) Irampfb 0
22:35	–25°C	1.7 × 10 [°] -3Pa	241Am	恒温槽内	high gain(CdTe trg のみ)	(Si 7, CdTe 7)
23:35	-25°C	1.7 × 10 [°] -3Pa	BG		high gain(CdTe trg のみ)	(Si 7, CdTe 7)
23:52	–25°C	1.7 × 10 [°] -3Pa	57Co	恒温槽内	high gain(CdTe trg のみ)	(Si 7, CdTe 7)

\
_
-
- H I
?N
41
Ы
4
~
17
ARC
影
قت
TA
100
£Η
ъп
ImV
11III.
100
in the
10
- ^
T
\
1
0
1
- 21
- TT
ö
G
ñ
55

	23:53-(26日)9:48	-25°C	1.7 × 10°-3Pa	57Co	恒温槽内	high gain(CdTe trg のみ)	(Si 7, CdTe 7)
12月26日	9:56-12:06	-25°C	1.7 × 10 [°] -3Pa	133Ba	恒温槽上	high gain(CdTe trg 07)	(Si 7, CdTe 7)
	12:06-1327	-25°C	1.7 × 10 [°] -3Pa	BG		low gain	(Si 7, CdTe 7)
	13:27-20:00	-25°C	1.7 × 10 [°] -3Pa	60Co	恒温槽上	low gain	(Si 7, CdTe 7) CdTe 1000V
	22:02-22:32	-25°C	1.7 × 10 [°] -3Pa	60Co	恒温槽上	low gain	(Si 7, CdTe 7) CdTe 800V
	21:18-(27日)17:10	-25°C	1.7 × 10 [°] -3Pa	137Cs	棚の上	low gain	(Si 7, CdTe 7)
12月27日	17:43-19:12	-25°C	1.7 × 10 [°] -3Pa	137Cs	棚の上	low gain	(Si 7, CdTe 7)
	19:12-21:12(終了)	-25°C	1.7 × 10 [°] -3Pa	137Cs	恒温槽上の左	low gain	(Si 7, CdTe 7)

表 4.2: 実験の工程表 No.2

4.2 実験の結果

今回の実験から以下のことがわかった。真空環境で検出器に HV をかけたが問題なく動作し、HV にも 影響は出なかった。温度変化、暗電流値、ライトカーブ、真空計をモニターしたが、どれも安定してほぼ一 定の値を示し続けた。また温度に関して、実験前に予想された値に近い値を示したことから廃熱のモデル も特に問題がないことが確認できた。以上より運用環境下にコンプトンカメラをおいて動作させても、問 題ないことが確認できたと言える。

4.3 解析

それでは得られた実験結果をまとめ、解析を進めていく。

3章で述べられた通りに解析を進めるならば、線源を当てたデータに対し、ペデスタルファイルを用いて 各チャンネル毎にペデスタル補正を行う。そしてその値から ASIC が計算したコモンモードノイズを引く、 という流れになる。しかし「ASIC が計算した」というところに注意する必要がある。ASIC がコモンモー ドノイズを計算するのはデータを取得する前であり、計算される前にあらかじめペデスタル補正を行うよ うに ASIC に指令を出す必要があった。この指令に当たるものが「デジタルディレイをかける」という作 業である。この作業を行えばペデスタル値の算出 (後で行う)を我々がする必要はないのだが、本実験では このデジタルディレイをかける作業を行わなかった。そのため以下の図 4.5 のようにコンプトンカメラから データを得た時点ではペデスタルの分布が激しく変動してピークが合わない。32 番目に AD 変換が終わっ たチャンネルの ADC 値がコモンモードノイズとして出力されるので、ASIC ごとにペデスタルを合わせて おかなければらず、合わせなければ正しい値が出力されない。つまり、本実験においてコモンモードノイズ 値はあまり正しくない値を用いており、多少エネルギー分解能に悪影響が出ると考えられる。



図 4.5: コンプトンカメラからデータを得た時点でのペデスタルの分布。デジタルディレイをかけていない ためペデスタルピークがそろっていないことが分かる。

以下、デジタルディレイの説明である。ASIC で使用されているウィルキンソン型の ADC は、参照電圧 を VA 部スローシェイパーの出力電圧に等しくなるまで少しずつ上げていき、要した時間をクロックで測

ることによって AD 変換を行う。このようなクロックに、各チャンネルに適切なディレイ (デジタルディレ イ) をかけることによってペデスタル補正を行うことが出来る。[23]

さてここまでのことを踏まえると、今回の実験について言えばコモンモードノイズの差し引きとペデス タル補正は実行する順番が逆になっても問題ない。なぜならば、ペデスタル補正を先に行うのはコモンモー ドノイズを正しい値で得たかったからなのだが、デジタルディレイによって補正出来なかった以上順番は関 係ないからである。これから行う解析は、生データからコモンモードノイズを引き、次にペデスタル補正、 エネルギー較正という順番で行った。

まず ASIC が出した値を用いてコモンモードノイズの差し引きを行った。以下の図 4.6 はそのときに得 られたペデスタル分布である。この図は横軸にピクセルチャンネル、縦軸に ADC 値をプロットしたもので あり、ADC=0 付近のみ示したものである。ペデスタルピーク位置はピクセル毎にそろっていないのが分 かる。



図 4.6: 図 4.5 に対してコモンモードノイズを除去した時のペデスタル分布。ある程度まとまって分布する ようになったが、ペデスタルピークは合っていない

そこでこの図のデータを用いて、各ピクセルのペデスタル値を求める。ただし、どのようなデータでも ペデスタル値算出に使える訳ではなかった。本実験ではデジタルスレッショルドを設定しているからであ る。デジタルスレッショルドとは実験者が任意に ADC 値を設定し、その値を超えた信号だけを読み出すし きい値のことである。

一万を超えるチャンネル数を持つコンプトンカメラの中で実際に光子が当たり信号を出すのは数十 ch 程度 で、他は全てペデスタルとなる。ペデスタルは零点補正をするためだけに用い、数百万、数千万といった 膨大な量のデータは必要ない上、データ容量も大きくなり邪魔になる。この膨大な量のデータを省くため、 デジタルスレッショルドを設定してペデスタルを採らないようにしているのである。

したがって、ペデスタル取得用にデジタルスレッショルドを設定しなかったデータを用いてペデスタル値を 決定した。(既に示した図 4.5, 4.6 もこのデータについて描いた図である。)以下に得られたペデスタルピー クの一例を示す。図 4.7, 4.8 は Si-Pad 最上面の、ある 1ch のペデスタル分布をガウシアンでフィットした 図である。この時の中央値が、そのチャンネルでのペデスタル値である。これは図 4.6 で見たように ADC channel-10~10 の間に分布するが、その値は各ピクセルでずれていることがわかる。全ピクセルについてペ デスタル値を求め、後で参照できるようにデータベース化した。(.dat 形式のファイルにデータを詰めた)



図 4.7: 5 Pixel channel のペデスタル分布をガウシア 図 4.8: 44 Pixel channel のペデスタル分布をガウシ ンでフィットした。 アンでフィットした。

このデータベースを用いてペデスタル補正を行うのだが、今回の解析ではプログラムの都合上、その次 の解析段階であるエネルギー較正とまとめて実行した。まとめたと言っても、ペデスタル補正をしてからエ ネルギー較正を行うという順番は変わっていない。エネルギー較正曲線は3章で述べたようにして一戸氏 によってつくられたものを用いた。出来た関数の例が以下の図 4.9 の f(x) と書かれ方である。これは Pixel channel=0 のグラフで、各チャンネルによって微妙に形が異なる。

ところでこの関数は x 軸が ADC channel、y 軸が Energy(MeV) のグラフになっている。したがって各チャ ンネルについてペデスタルの値だけ f(x) を x 軸方向に平行移動させれば、エネルギー較正を行う前にペデ スタル補正を行ったことになる。図 4.10 は図 4.9 の低エネルギー側について拡大した図である。2 つの線の ズレがはっきりと見ることができ、この x 軸方向への差分がペデスタル値のズレである。

図 4.11 は横軸にピクセルチャンネル、縦軸にエネルギー (MeV) をプロットしたもので、エネルギー=0 付 近にペデスタル値が集まっていることが分かる。これをより分かりやすく示すために、図 4.12 に横軸エネ ルギー (MeV)、縦軸カウント数の一次元グラフで表した。また、半値幅 (ノイズレベル) を出すためにガウ シアンでフィットした。このフィット結果から半値幅は 1.14keV 程度であった。さらに Si、CdTe-Bottom、 CdTe-Side それぞれの半値幅も、図 4.13~図 4.15 のようにガウシアンでフィットして求めた。結果は順に 1.06keV、1.15keV、1.36keV 程度であった。

線源を置いて取得したデータに対してコモンモードノイズの除去を行い、その後較正曲線を適用してヒットリストを作った。この時点でエネルギースペクトルが得られたので、全ピクセルで得られた²⁴¹Am、⁵⁷Co、¹³⁷Csのエネルギースペクトルをそれぞれ図 4.16、図 4.17、図 4.18 に示す。全て片対数グラフになっている。また、ここで用いる線源を当てた時のデータは、積分時間 1 時間のデータである。各線源のエネルギーピークについて、ガウシアンによるフィッティングを行った。それぞれエネルギーピークのエネルギー値は²⁴¹Am が 59.5keV、⁵⁷Co が 122keV、¹³⁷Cs が 662keV である。

今回の実験では²⁴¹Amのスペクトル取得時、低エネルギーの為に CdTe 層まで光子が届かないと考え、



図 4.9: エネルギー較正曲線の図。f(x) が3章で述べ たようにして作られた曲線で、f(x-a) と書かれた方は ペデスタル補正を行った時の曲線である。 図 4.10: 左図の低エネルギー側の拡大図。この2つの 線の差がペデスタルのズレである。



図 4.11: エネルギー較正曲線適用後のペデスタル分 密 4.12: ペデスタル分布の図を描き、それをガウシア 布図 ンでフィットした。半値幅は 1.14keV 程度である。



図 4.13: Si のピクセルのペデスタル分布を描いた。半 図 4.14: CdTe-Bottom のピクセルのペデスタル分布 値幅は 1.06*keV* 程度である。 を描いた。半値幅は 1.15*keV* 程度である。



図 4.15: CdTe-Side のピクセルのペデスタル分布を描いた。半値幅は 1.36keV 程度である。



図 4.16: 全ピクセルによる ²⁴¹Am のエネルギースペ 図 4.17: 全ピクセルによる ⁵⁷Co のエネルギースペク クトル。エネルギー分解能は 1.74*keV* 程度である。 トル。エネルギー分解能は 2.36*keV* 程度である。



図 4.18: 全ピクセルによる ¹³⁷Cs のエネルギースペクトル。エネルギー分解能は 12.91keV 程度である。

ノイズを軽減するために Si トリガーのみ on にしていた。逆に線源が ⁵⁷Co の時は、²⁴¹Am よりもエネル ギーが高いので CdTe トリガーのみ on にしていた。また、高エネルギーの放射線を出す ¹³⁷Cs はさらに多 くの光子が CdTe 層までエネルギーを落とさずに届くと考えられる。以上の事から Si1 ヒットイベントには ²⁴¹Am、CdTe1 ヒットイベントには ⁵⁷Co と ¹³⁷Cs を用いてスペクトルを描いた。図 4.19 は線源が ²⁴¹Am で Si 検出器に 1 ヒットしたイベントのみについて描いたエネルギースペクトルである。図 4.20 は線源が ⁵⁷Co で CdTe-Bottom 検出器に 1 ヒットしたイベントについて、図 4.21 は CdTe-Side 検出器に 1 ヒット したイベントについて描いたエネルギースペクトルである。図 4.22、4.23 は共に線源が ¹³⁷Cs であり、図 4.22 は CdTe Bottom に 1 ヒットしたイベントのみについて、図 4.23 は CdTe Side に 1 ヒットしたイベン トのみについて描いたエネルギースペクトルである。



図 4.19: ²⁴¹Am の Si 1 ヒットのスペクトル。エネルギー分解能は 1.64keV 程度である。

次に 2 ヒットイベントについて描く。1 ヒットの時と同じ理由から、線源が ²⁴¹Am の場合は Si-Si の 2 ヒットイベントのスペクトルを、⁵⁷Co の場合は CdTe-CdTe の 2 ヒットイベントのスペクトルを描く。また、線源が ¹³⁷Cs の場合は Si-CdTe、CdTe-CdTe の 2 ヒットイベントについてスペクトルを描く。図 4.24 は ²⁴¹Am を線源にして、Si-Si の 2 回ヒットイベントについて描いたエネルギースペクトルである。また、線源が ⁵⁷Co の時の CdTe-CdTe イベントについて、図 4.25 で示す。さらに線源が ¹³⁷Cs で Si-CdTe の 2 回 ヒットイベントについては図 4.26 で、CdTe-CdTe のイベントについては図 4.27 で示す。

ここまでで得られたエネルギー分解能の値を表 4.3 のようにまとめた。要求性能は 2keV(@60keV) である。



図 4.20: ⁵⁷Co の CdTe Bottom 1 ヒットのスペクト 図 4.21: ⁵⁷Co の CdTe Side 1 ヒットのスペクトル。 ル。エネルギー分解能は 2.17*keV* 程度である。 エネルギー分解能は 2.41*keV* 程度である。



図 4.22: ¹³⁷Cs の CdTe Bottom 1 ヒットのスペクト 図 4.23: ¹³⁷Cs の CdTe Side 1 ヒットのスペクトル。 ル。エネルギー分解能は 12.83*keV* 程度である。 エネルギー分解能は 12.15*keV* 程度である。



図 4.24: ²⁴¹Am の Si-Si 2 ヒットのエネルギースペク 図 4.25: ⁵⁷Co の CdTe-CdTe 2 ヒットのエネルギース トル。エネルギー分解能は 2.74*keV* 程度。 ペクトル。エネルギー分解能は 2.69*keV* 程度。



図 4.26: ¹³⁷Cs の Si-CdTe 2 ヒットのエネルギースペ 図 4.27: ¹³⁷Cs の CdTe-CdTe 2 ヒットのエネルギー クトル。エネルギー分解能は 13.41*keV* 程度。 スペクトル。エネルギー分解能は 13.24*keV* 程度。

ヒットの種類	@0 keV	$@59.5 \text{keV}(^{241} \text{Am})$	$@122 \text{keV}(^{57} \text{Co})$	$@662 keV(^{137} Cs)$
Si 1hit	$1.06 \mathrm{keV}$	$1.64 \mathrm{keV}$		
CdTe Bottom 1hit	$1.15 \mathrm{keV}$		$2.17 \mathrm{keV}$	$12.83 \mathrm{keV}$
CdTe Side 1hit	$1.36 \mathrm{keV}$		$2.41 \mathrm{keV}$	$12.15 \mathrm{keV}$
Si-Si 2hit		$2.74 \mathrm{keV}$		
Si-CdTe 2hit				$13.41 \mathrm{keV}$
CdTe-CdTe 2hit			$2.69 \mathrm{keV}$	$13.24 \mathrm{keV}$
All	$1.14 \mathrm{keV}$	$1.74 \mathrm{keV}$	$2.36 \mathrm{keV}$	$12.91 \mathrm{keV}$

表 4.3: -25°C、1.7×10⁻³Pa の条件の下、EM コンプトンカメラで得られたエネルギー分解能の値。

表 4.3 から、エネルギー分解能は 1.74keV(@59.5keV) であり、要求性能の 2keV(@60keV) より小さい値が 出ていること、高エネルギー側程エネルギー分解能の値が大きくなっていることが読み取れる。さて、こ こで書いたエネルギー分解能の大きさは (1) もともとの検出器の性能 (2) エネルギー較正が正しく行われた か、という 2 点で決まる。ここでは (2) について考える。エネルギー較正曲線はピクセル毎に異なってお り、各ピクセルのエネルギーピークの位置はこの曲線で決まる。そしてピーク位置がずれていると、全ピク セルでのエネルギースペクトルを描いたときに見えるピークが各ピクセルのものより広がって見える。こ れがエネルギー較正曲線がエネルギー分解能にきいてくる (悪化させる) 理由である。そこで今回行った エネルギー較正がどの程度の精度で行われたのか、各ピクセルでのエネルギーピークのズレから評価する。 具体的には以下の (a)~(c) の様に行う。

(a) まず 1 ピクセルごとのエネルギースペクトルをガウシアンでフィットし、そのガウシアンの広がり (分散) ΔE_p^2 を計算する。その様子を表したものが下の図 4.28、図 4.29 である。図 4.28 が Si 層、図 4.29 が CdTe 層のスペクトルである。

(b) 次にエネルギーピーク位置の頻度分布を描く。これを表したものが図 4.30、図 4.31 である。この分布 の広がり (分散) σ_p^2 は、エネルギーピークのピクセル間でのずれを表す。

(c) 全ピクセルでのエネルギースペクトルの広がり (分散) $\Delta E^{'2}$ は

$$(\Delta E')^2 = (\Delta E_p)^2 + \sigma_p^2$$

と書く事ができる。つまり $(\Delta E_p)^2$ に対する σ^2 の比をとることにより、エネルギーピークのピクセル間で の広がり (分散) が、1 ピクセルのエネルギースペクトルの広がり (分散) に対してどの程度か定量的に評価 する事が出来る。

では実際に図 4.32、図 4.33 から得られるエネルギースペクトルの σ の典型的な値と、図 4.30、図 4.31 で 求めたエネルギーピーク位置の頻度分布の σ の値を用いて計算する。

まず Si 層について

$$\frac{0.1472^2 keV}{0.7^2 keV} \times 100 = 4.4\% \tag{4.1}$$

CdTe 層について

$$\frac{0.2414^2 keV}{1.2^2 keV} \times 100 = 2.97\%$$
(4.2)

これは十分小さく、エネルギー較正曲線によるエネルギー分解能の悪化はそれほど影響が無いと考えら れるが、今後較正曲線を改良する事によって分解能の悪化を少しでも無くす必要がある。



図 4.28: Si 層にある 1 ピクセルのエネルギースペクト 図 4.29: CdTe 層にある 1 ピクセルのエネルギースペル。このピクセルの番号は 100 である。 クトル。このピクセルの番号は 2240 である。



図 4.30: エネルギーピーク位置の頻度分布 (Si 層)。線 図 4.31: エネルギーピーク位置の頻度分布 (CdTe 層)。 源に ²⁴¹Am を用いた時のものである。 線源に ⁵⁷Co を用いた時のものである。



図 4.32: Si 層の各ピクセルのエネルギースペクトルを 図 4.33: CdTe 層の各ピクセルのエネルギースペクト フィッティングした時の σ を横軸に、その σ を持つピ ルをフィッティングした時の σ を横軸に、その σ を持 クセル数を縦軸に表したグラフである。 つピクセル数を縦軸に表したグラフである。

表 4.3 に書かれている ¹³⁷Cs のエネルギー分解能は他と比べてかなり大きい値が出ている。この理由に ついて考察した。まず始めに ¹³⁷Cs の1ピクセルのエネルギースペクトルを描いた。これを表したのが図 4.34 である。

このエネルギースペクトルから、統計が少なすぎるため全くエネルギーピークが見えない事が分かる。 そこで1ASIC分(64ピクセル分)の合計エネルギースペクトルを描いた。これを表したのが図 4.35 である。 1ASIC分のスペクトルを描いて、ようやくピークが見え始めた。次にこの1ASIC分の合計スペクトルを 645keV~675keVの範囲においてガウシアンでフィットした。(この範囲内でのカウント数は約 400 であっ た。)さて、フィット結果からこのスペクトルのエネルギー分解能はおよそ 12.57keV であり、この時点で 既に大きい値が出ている。この原因として考えられることは二つあり、(1)もともとエネルギー分解能が悪 かった。(2) エネルギー較正がうまくいっておらず、各ピクセルでエネルギーピークの位置がずれていた。 その状態で 1ASIC 分のスペクトルを足したので分解能が悪くなった。という事である。²⁴¹Am や ⁶⁰Co を 用いた時は良い分解能を示していた事から、分解能悪化の原因は (2) であると考えられる。原因を推定した ので、再度エネルギー較正を行いたかったが、上で述べた様に 1 ピクセル当たりの統計が非常に少ないた め、これ以上の較正は出来なかった。



図 4.34: ¹³⁷Cs を当てた時、CdTe Bottom 層の 1pixel 図 4.35: ¹³⁷Cs を当てた時、CdTe Bottom 層の 1ASIC のエネルギースペクトル。 分の合計エネルギースペクトル。

さて、次に行ったのがイベント再構成で、これは反応の順序や種類を決定するものであった。(3.2 節参 照) イベント再構成は 3.2 節で述べたようなイベントの選択や処理をコンピュータで実行、解析し、図 4.36 のような E1-E2 マップを得た。この図は 1 ヒット目が Si にヒットし、2 ヒット目が CdTe にヒットしたイ



図 4.36: イベント再構成によって得た $E_1 - E_2$ マップ。 137 Cs を照射した時のデータを用いて作成した。

ベントに限定している。まずこの図を見て、 $E_1 + E_2$ が662keV 付近の青い線で挟んだ範囲にプロット点が 集まっていることが分かる。この662keV というのは¹³⁷Csのピークの値であり、コンプトンイベント (コ ンプトン散乱ー光電吸収)を起こして入射時に持っていたエネルギーを(ほぼ)全て落とした光子が集まって いる。次に気がつくのは、255keV 以下の低エネルギー側において y=xの直線でイベントが選別されている ことである。3章で255keV 以下の2ヒットイベントに対しては、コンプトン運動学から検出器で落とした エネルギーが小さい方をコンプトン散乱と決定できると述べたが、まさにこれを反映した結果である。ま た、0~20keV では光子を検出していないように見えるが、これはデジタルスレッショルドを設定している ためである。

では図 4.36 の青い線で囲まれた部分に対してバックプロジェクションを行う。ここで注意するのは、Si-CdTe イベントにだけ適用される訳では無く、1 ヒットイベントを除くイベントに対して行うということで ある。3 章でも述べたように、バックプロジェクションは一つのイベントに対して光子到来方向を制限する コンプトンコーンを一つ作る。このコーン上の重みは等しくなっているため、他のコーンと重なって密度が 高くなった点は、光子が存在する確率が他と比較して高い場所である。

以上を踏まえ、実際にコンプトンコーンを作っている様子である図 4.35 を見てみる。様々な大きさのコーンが描かれており、真ん中当たりで最もコーンが密集して線源の置いてある位置が分かるようになってきている。この図は²⁴¹Am を線源とした Si-CdTe Bottom イベントの再構成画像である。²⁴¹Am のエネルギーは小さいが Si-Pad の一番下の層まで光子が届くことは、本論文付録のエネルギースペクトルを見れば分かる。しかし一回 Si でコンプトン散乱し、余計エネルギーが小さくなった光子は CdTe の層までなかなかた

どり着けないだろう。この後示す¹³⁷Csのデータと積分時間がほぼ同じであるのに関わらず、²⁴¹Amでは コーンが見える程イベント数が少ないのは、こういった理由からだと思われる。

図 4.37 ではコーンが楕円状に描かれていることに気づく。本来描かれるコンプトンコーンは真円であるが、 今回の解析では線源の置いてある二次元平面上にコーンを投影した。楕円に見えるのはこのためである。簡 単に「二次元へ投影した」と言ったが、実はイメージングに大変な影響を及ぼす。というのも二次元平面に 射影することで、均一に揃っていたコーンの重みが崩れ、重みの大きい所と小さい所が出来てしまうからで ある。コンプトンコーンの中心に近い方に重みが集中してしまい、線源を置いていないバックグラウンドの 測定を行った時でも線源を置いているかのようなイメージが出来てしまう。これを補正するためにはコーン の始点からの距離に応じて重み付けを行えば良いはずであるが、この解析はまだ出来ていない。



図 4.37: バックプロジェクションの様子。コンプトンコーンが重ねられていくのが分かる。

それでは¹³⁷Cs 照射で得られたバックプロジェクションによるイメージを ARM 分布と一緒に図 4.38~4. 41 に示す。

イメージング画像の横軸と縦軸は線源の存在する位置を表し、単位は mm である。用いた線源の大きさ は数 mm 程度で、図 4.38 の中心の赤い円を線源の形と考えると正しくイメージングできていると考える事 が出来る。その周りに緑色や水色の円が見えるが、これはコンプトンコーンを二次元平面に投影すること で、均一にそろえられていた線源が存在する確率の重み分布が変化し、線源がないところにイメージを作っ てしまうことが原因ではないかと考えられる。





図 4.38: Cs 線源の Si-CdTe の 2 回ヒットイベントの イメージ画像

図 4.39: 左のイメージングの時の ARM 分布



図 4.40: Cs 線源の時の Cd-CdTe2 回ヒットイベント のイメージ画像



図 4.41: 左のイメージングの時の ARM 分布

以上が今回の解析結果である。エネルギースペクトルを描く、イメージングを取得する、分解能を算出 するといった解析は行うことが出来た。そしてエネルギー分解能は、今回の解析結果からは要求と同程度の ものを出す事ができた。ただし、エネルギー較正曲線をさらに改良してより良い分解能を出す必要がある。 イメージングについても、ほぼ使った線源と同じ大きさのイメージを描く事が出来た。角度分解能について も改良して、より良い分解能を出す必要がある。これは今後の課題である。

第5章 まとめと今後

今回コンプトンカメラの衛星搭載同等品の熱真空試験を行い、運用環境で期待された性能が発揮される か、連続動作させて不具合は出ないか、などのチェックを行った。試験中コンプトンカメラのライトカーブ や暗電流値、温度のチェックを行っていたが特に問題は (システム的にも) 起こらなかった。つまり運用環 境下での動作は、この時点までは問題なく出来たと言うことが出来るだろう。

次に性能評価のための解析を行った。まずペデスタル補正を行おうとしたが、ASIC にデジタルディレイ がかかっていなかったため、エネルギー較正曲線に反映させた。コモンモードノイズを引いた後エネルギー較 正を行い、様々な線源のエネルギースペクトルを取得した。このときエネルギーピークをガウシアンでフィッ トし、エネルギー分解能を得た。求まったエネルギー分解能はコンプトンカメラ全体で1.74keV(@59.5keV)、 2.36keV(@122keV)、10.92keV(@662keV)であった。その後バックプロジェクションによりイメージングを 行った。実験で実際に使った線源の大きさと、イメージングの線源だと思われる部分の大きさを比較した 所、ほぼ同じ大きさのものが描けている事が分かった。ARM 分布から角度分解能を調べると、高エネル ギー領域 (662keV) で 14° となった。

以上のことを踏まえて、今後早急に行いたいことは以下の事柄である。

1. エネルギー較正曲線を改善する事により、より良いエネルギー分解能を得る

2. そもそもエネルギー分解能がどの程度 ARM へ寄与するのか定量的に求める

3. 解析手法を改善する事でより良い角度分解能を得る

4. バックプロジェクションによるイメージングにおいて、重み分布の補正

謝辞

本論文を進めるにあたり、深澤先生には日頃から指導していただきました。本当にありがとうございました。宇宙科学研究所の高橋先生、渡辺さん、一戸さんには出張の受け入れや試験、解析方法について丁寧に教えていただきました。ありがとうございました f。M 1の中村さんには研究デーマが決定してから細かなところまで丁寧に教えていただきました。ありがとうございました。また、M 1の田邉さんにはシミュレーションやソフトについて分からないことがあったとき、丁寧に教えていただきました。ありがとうございました。他にも研究室のスタッフの皆様、事務の皆様、先輩方、4年生のみんなには普段の生活でお世話になっています。ありがとうございます。これからもよろしくお願いします。

.1 付録

この付録では今回の熱真空試験で得られた各層ごとや各ピクセルごとのエネルギースペクトルを示す。 しかしコンプトンカメラには1万を超えるピクセルがあるので全てを載せる訳では無く、その一部である。 まずここでどのようなスペクトルを載せているのか解説する。

図の番号	線源	検出器	区画
1	Am	各層ごと	abcd 全て
2	\mathbf{Cs}	各層ごと	abcd 全て
3	Am	(Si-Pad の中で) 最上部の Si-Pad の 32 ピクセル	a
4	Am	最上部の Si-Pad の 32 ピクセル	a
5	Am	最上部の Si-Pad の 32 ピクセル	b
6	Am	最上部の Si-Pad の 32 ピクセル	b
7	Am	最上部の Si-Pad の 32 ピクセル	с
8	Am	最上部の Si-Pad の 32 ピクセル	с
9	Am	最上部の Si-Pad の 32 ピクセル	d
10	Am	最上部の Si-Pad の 32 ピクセル	d
11	\mathbf{Cs}	(CdTe-Pad の中で) 最上部の CdTe-Pad32 ピクセル	a
12	\mathbf{Cs}	最上部の CdTe-Pad32 ピクセル	a
13	\mathbf{Cs}	最上部の CdTe-Pad32 ピクセル	b
14	\mathbf{Cs}	最上部の CdTe-Pad32 ピクセル	b
15	\mathbf{Cs}	最上部の CdTe-Pad32 ピクセル	с
16	\mathbf{Cs}	最上部の CdTe-Pad32 ピクセル	с
17	\mathbf{Cs}	最上部の CdTe-Pad32 ピクセル	d
18	\mathbf{Cs}	最上部の CdTe-Pad32 ピクセル	d

区画については図 2.2 を参照。



図 1: ²⁴¹Am を照射した時に得られる各 Si-Pad のエネルギースペクトル。横軸がエネルギー (MeV) で、縦 軸がカウント数を表す。右上に示されているスペクトルが最上部の検出器で、その下に描かれているスペク トルは最上部の検出器の一つ下に位置する。上から下に向かって読むことで、検出器の位置が下がっていく ようにスペクトルを並べており、一番下までいくとその左の列の上へ読み進める。



図 2: ¹³⁷Cs を照射したときに得られる、層ごとの CdTe-Pad のエネルギースペクトル。


図 3: 最上部の Si-Pad に Am を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。



図 4: 最上部の Si-Pad に Am を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。



図 5: 最上部の Si-Pad に Am を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。



図 6: 最上部の Si-Pad に Am を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。



図 7: 最上部の Si-Pad に Am を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。



図 8: 最上部の Si-Pad に Am を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。



図 9: 最上部の Si-Pad に Am を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。



図 10: 最上部の Si-Pad に Am を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。



図 11: CdTe の中で最上部に位置する CdTe-Pad に Cs を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。



図 12: CdTe の中で最上部に位置する CdTe-Pad に Cs を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。



図 13: CdTe の中で最上部に位置する CdTe-Pad に Cs を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。



図 14: CdTe の中で最上部に位置する CdTe-Pad に Cs を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。



図 15: CdTe の中で最上部に位置する CdTe-Pad に Cs を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。



図 16: CdTe の中で最上部に位置する CdTe-Pad に Cs を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。



図 17: CdTe の中で最上部に位置する CdTe-Pad に Cs を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。



図 18: CdTe の中で最上部に位置する CdTe-Pad に Cs を照射して得られる 32 ピクセルのエネルギースペクトル。

参考文献

- [1] (http://astro-h.isas.jaxa.jp/challenge/x-ray.html)
- [2] <http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/0skXrayTlabHP/ASTRO-H_SXI.html >
- [3] (http://www.astro.isas.jaxa.jp/~takahasi/ASTRO-H/ASTRO-H_gaiyou.html)
- [4] 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 2008 年
- [5] 徳田伸矢 卒業論文 「X 線天文衛星 ASTRO-H 用搭載型 BGO シンチレータの光量試験」 広島大 学 2012 年
- [6] 渡辺伸 2012年日本天文学会秋季年会発表資料 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器 (SGD) の 開発状況」
- [7] Glenn F.Knoll 「放射線計測ハンドブック(第3版)」
- [8] A.Das, T.Ferbel 「素粒子・原子核物理学の基礎〜実験から統一理論まで〜(初版)」
- [9] 青野博之 修士論文 「Si/CdTe コンプトンカメラによるガンマ線イメージング実験」 東京大学 2009 年
- [10] Andreas Zoglauer and Gottfreied Knbach, "Doppler Broadening as a Lower Limit to the Angular Resolution of Next Generation Compton Telescopes", Proc. SPIE, Volume 4851, pp.1302-1309, 2003
- [11] G.Weidenspointner et al., "TheCOMPTEL instrumental line backgraund", A&A 368, 347-368, 2001
- [12] V.SCHÖNFELDER et al., "INSTRUMENT DESCRIPTION AND PERFORMANCE OF THE IMAGING GAMMA-RAY TELESCOPE COMPTEL ABOARD THE COMPTON GAMMA-RAY OBSERVATORY", ApJS, 86:657-692, 1993
- [13] 田邉利明 2012年日本天文学会秋季年会発表資料 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器用ファイ ンコリメータのエンジニアリングモデルの性能評価」
- [14] 花畑義隆 修士論文 「X線天文衛星 ASTRO-H 搭載アクティブシールドの基礎特性評価とデジタル 信号処理の検討」 広島大学 2010 年
- [15] S.M. Sze 「半導体デバイスー基礎理論とプロセス技術ー (第2版)」
- [16] 上野一誠 卒業論文「ASTRO-H 搭載宇宙軟ガンマ線観測用 Si センサーの軌道上放射線損傷による影響」 広島大学 2012

- [17] Katsuhiro Hayashi et al., "Radiation effects on the silicon semiconductor detectors for the ASTRO-H mission", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 699, 225-229, 2013
- [18] 福山太郎 修士論文 「次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載用テルル化カドミウム半導体素子の開発と 性能評価」 東京大学 2011
- [19] GAMMA MEDICA-IDEAS, "VATA 450.3-461.3 UAWE MANUAL", MAY 2011
- [20] 宇野進吾 修士論文 「宇宙硬 X 線撮像用低ノイズ両面シリコンストリップ検出器の開発」 広島大 学 2002
- [21] (http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=1&resId=0&materialId=1&confId= 56207)
- [22] Hiroyasu Tajima et al., "Soft Gamma-ray Detector for the ASTRO-H Mission", SPIE, Volume 7732, pp. 773216-773216-17, 2010
- [23] 一戸悠人 「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 2013
- [24] Richard B. Firestone, Virginia S. Shirley, "Table of Isotopes (Eighth Edition, Vol.II)"