

AMEGO衛星計画による MeV ガンマ線偏光観測の  
シミュレータを用いた検討

広島大学理学部物理学科  
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B174810

末岡 耕平

主査：深澤 泰司 副査：岡本 宏己

2021 年 2 月

## 概要

ガンマ線バーストとは、秒程度から数時間にわたってガンマ線が閃光のように放出される現象である。このガンマ線バーストによるガンマ線の放射メカニズムは、まだ解明されていない。ガンマ線バーストの放射がシンクロトロン放射によるものならば、放射されるガンマ線は強く偏光するため、ガンマ線偏光を観測することで、ガンマ線バーストの放射メカニズムを探ることができる。2030年ごろの打ち上げを目指す AMEGO 衛星を用いることで、ガンマ線バーストのガンマ線偏光観測をすることができる。しかし、AMEGO 衛星によるガンマ線バーストを対象としたガンマ線偏光観測の研究は、あまりなされていない。そこで、本研究では、Geant4 によるモンテカルロシミュレーションを用いて、AMEGO 衛星の検出器と偏光ガンマ線の相互作用を再現し、ガンマ線偏光観測のシミュレータを作成した。また、そのシミュレータを用いて検出器の 200 keV における有効面積を求めた。

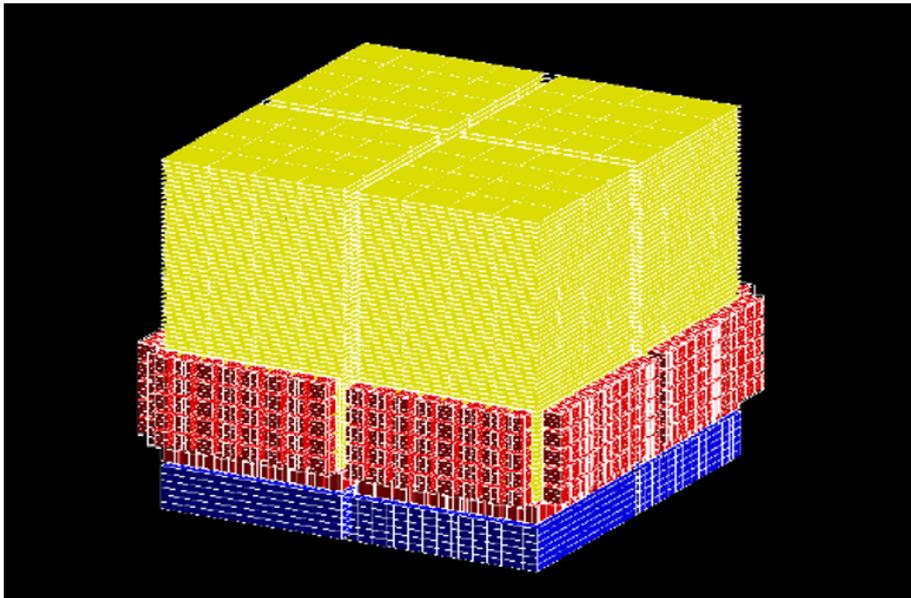


図 1: Geant4 上で再現した AMEGO の検出器

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>はじめに</b>	<b>7</b>
1.1	ガンマ線バースト	7
1.2	偏光	9
1.3	AMEGO 衛星計画	9
1.4	ガンマ線と物質の相互作用	10
1.4.1	光電吸収	10
1.4.2	コンプトン散乱	11
1.4.3	電子陽電子対生成	11
1.4.4	コンプトン再構成	12
1.5	研究目的	15
<b>第 2 章</b>	<b>AMEGO 衛星とガンマ線偏光観測</b>	<b>16</b>
2.1	AMEGO の検出器	16
2.1.1	Tracker	18
2.1.2	Low-Energy Calorimeter	19
2.1.3	High-Energy Calorimeter	20
2.2	AMEGO によるガンマ線偏光観測	21
<b>第 3 章</b>	<b>ガンマ線観測のシミュレーション</b>	<b>24</b>
3.1	シミュレーションソフト Geant4	24
3.2	ComptonSoft	25
3.3	コンプトンイベントの選び出し	26
3.3.1	選び出しの必要性	26
3.3.2	コンプトン再構成による選び出し	26
3.3.3	コンプトン再構成の検証	28
<b>第 4 章</b>	<b>AMEGO の検出器の作成</b>	<b>34</b>
4.1	ジオメトリの作成	34
4.1.1	Tracker の作成	35
4.1.2	Low-Energy Calorimeter の作成	39
4.1.3	High-Energy Calorimeter の作成	44
4.1.4	AMEGO における各検出器の配置	47
4.2	検出器およびその電極のパラメータ設定	47
4.2.1	シリコン半導体検出器	48

4.2.2	CZT 半導体検出器 . . . . .	51
4.2.3	CsI シンチレーター . . . . .	56
4.3	検出器の検証 . . . . .	59
<b>第 5 章</b>	<b>コンプトンイベントの有効面積の測定</b>	<b>67</b>
5.1	有効面積の測定 . . . . .	67
5.2	さまざまなエネルギーにおける有効面積の測定 . . . . .	74
<b>第 6 章</b>	<b>まとめと今後の課題</b>	<b>78</b>

# 目次

1	Geant4 上で再現した AMEGO の検出器	1
1.1	CGRO 衛星が観測した典型的なガンマ線バーストの強度変化 [3]	8
1.2	シンクロトロン放射の原理 [4]	8
1.3	電磁波の概念図 [6]	9
1.4	AMEGO の性能 [7]	10
1.5	AMEGO の感度 [7]	10
1.6	コンプトン散乱体でのコンプトン散乱。入射光子のエネルギーを $E_0$ 、光子が落としたエネルギーを $E_1$ 、散乱後の光子のエネルギーを $E_2$ 、散乱角を $\theta$ とした。水色の太い矢印が入射光子の飛跡。	11
1.7	電子陽電子対生成	12
1.8	コンプトン散乱後に光電吸収。入射光子のエネルギーを $E_0$ 、光子が落としたエネルギーを $E_1$ 、散乱後の光子のエネルギーを $E_2$ 、散乱角を $\theta$ とした。水色の太い矢印が入射光子の飛跡。	13
1.9	コンプトン再構成	14
1.10	コンプトンイメージングの概念図	14
1.11	反跳電子を利用せずに行ったコンプトンイメージング (左図) と反跳電子を利用して行ったコンプトンイメージング (右図)。	15
2.1	AMEGO の検出器の展開図 [7]	16
2.2	各検出器とガンマ線光子の相互作用。図の左側のイベントが、入射光子が検出器とコンプトン散乱した後に光電吸収されるコンプトンイベント。図の右側のイベントが、電子陽電子対生成後に生じた電子、陽電子が検出器によって捕らえられるイベント。[7]	17
2.3	AMEGO の検出器の有効面積。緑色の線は、反跳電子の到来方向を把握したときのコンプトンイベントの有効面積。青色の線は、反跳電子の到来方向を把握しないときのコンプトンイベントの有効面積。青色の点線は、反跳電子の到来方向を把握しないときのシリコン検出器におけるコンプトンイベントの有効面積。赤色の線は、電子陽電子対生成の有効面積。[7]	18
2.4	両面シリコンストリップ検出器の概念図	18
2.5	両面シリコンストリップ検出器 16 枚を $4 \times 4$ で配置したもの [7]	19
2.6	CdZnTe 半導体検出器の読み出し口 (左図)[10] と CdZnTe 半導体検出器を 16 個合わせたモジュール (右図)[7]。	19
2.7	Low-Energy Calorimeter の構造 [7]	20
2.8	CsI(Tl) シンチレータの読み出し口	20
2.9	CsI(Tl) シンチレータを 26 本用いたもの [7]	21

2.10	コンプトン散乱。入射光子のエネルギーを $E_0$ 、光子が落としたエネルギーを $E_1$ 、散乱後の光子のエネルギーを $E_2$ 、散乱角を $\theta$ とした。	22
2.11	図 2.10 を検出器の真上から見たとき。黒い矢印が偏光方向を表しており、水色の点線の矢印が光子の散乱方向となっている。また、xy 平面に散乱方向を射影したときの x 軸からの角度を $\Phi$ としている。	22
2.12	モジュレーションカーブ。散乱角度 $\Phi$ を横軸、カウントを縦軸とするヒストグラム。隣り合うカウントの最大値と最小値の角度の差は $\frac{\pi}{2}$ となる。	23
3.1	Geant4 によるシミュレーション。図の中央の灰色の物体に、ガンマ線の光子を照射している。ガンマ線の光子の飛跡が緑色の線で示されている。	24
3.2	合計 2 ヒットのイベントの概念図	26
3.3	シミュレーションの概要図	28
3.4	図 3.3 のシミュレーションを Geant4 で可視化したもの。ガンマ線の光子の飛跡が緑色の線で示されている。	28
3.5	合計 2 ヒットのイベントにおけるエネルギースペクトル	29
3.6	2 ヒットのコンプトンイベントにおけるエネルギースペクトル ( $a=1, b=1$ )	30
3.7	2 ヒットのコンプトンイベントにおけるエネルギースペクトル ( $a=2, b=2$ )	31
3.8	2 ヒットのコンプトンイベントにおけるエネルギースペクトル ( $a=3, b=3$ )	32
4.1	各検出器におけるガンマ線の透過率	35
4.2	1 枚のシリコン半導体検出器	36
4.3	図 4.2 を 16 枚用いた。	36
4.4	図 4.3 を 4 枚用いた。	37
4.5	図 4.4 を 10mm の間隔を空けて重ねた。	37
4.6	図 4.4 を 60 枚重ねた。	38
4.7	Geant4 で作成した Tracker	39
4.8	1 個の CZT 半導体検出器	40
4.9	16 個の CZT 半導体検出器	40
4.10	50 個の図 4.9 を並べた。	41
4.11	50 個の図 4.9 を並べた。	41
4.12	40 個の図 4.9 を並べた	42
4.13	2 個の図 4.10 を並べた。	42
4.14	図 4.13 を 4 個用いた。	42
4.15	4 個の図 4.11、4 個の図 4.12、1 個の図 4.14 を用いた。	43
4.16	上図が図 4.15 を y 軸負の方向から見た図。下図が図 4.15 を x 軸正の方向から見た図。	43
4.17	Geant4 で作成した Low-Energy Calorimeter	44
4.18	1 個の CsI シンチレータ	45
4.19	26 個の CsI シンチレータ	45
4.20	図 4.19 を 4 枚用いた。	45
4.21	図 4.20 を 6 枚並べた。	46

4.22	Geant4 で作成した High-Energy Calorimeter	46
4.23	各検出器を z 軸正の方向から見た図。黒い点は、各検出器の xy 座標における原点を表している。	47
4.24	Geant4 で作成した AMEGO の検出器	47
4.25	シリコン半導体検出器の detector ID	50
4.26	Tracker の一層目のシリコン半導体検出器の detector ID	50
4.27	Tracker の detector ID の決める際の各 ID	51
4.28	本研究における、CZT 半導体検出器の読み出し口	52
4.29	CZT 半導体検出器の detector ID	54
4.30	CZT 半導体検出器の detector ID	55
4.31	Low-Energy Calorimeter の detector ID の決める際の各 ID	56
4.32	CsI(Tl) シンチレータの読み出し口	57
4.33	CsI(Tl) シンチレーターの detector ID	57
4.34	CsI(Tl) シンチレーターの detector ID	58
4.35	High-Energy Calorimeter の detector ID の決める際の各 ID	58
4.36	detector ID が 10101 の Si 半導体検出器のみを設置して 30keV のガンマ線を入射させた時の光子が検出器と反応した正確な位置の x-y 平面分布 (上) と z 軸分布 (下)。	60
4.37	detector ID が 10101 の Si 半導体検出器のみを設置して 30keV のガンマ線を入射させた時の、検出器が取得したガンマ線光子の反応位置の x-y 平面分布 (上) と z 軸分布 (下)。	60
4.38	detector ID が 10101 の Si 半導体検出器のみを設置して 30keV のガンマ線を入射させた時の検出器が取得したエネルギースペクトル。横軸は keV で、縦軸はカウント数である。	61
4.39	detector ID が 11110101 の CZT 半導体検出器のみを設置して 150keV のガンマ線を入射させた時の光子が検出器と反応した正確な位置の x-y 平面分布 (上) と z 軸分布 (下)。	62
4.40	detector ID が 11110101 の CZT 半導体検出器のみを設置して 150keV のガンマ線を入射させた時の、検出器が取得したガンマ線光子の反応位置の x-y 平面分布 (上) と z 軸分布 (下)。	62
4.41	detector ID が 11110101 の CZT 半導体検出器のみを設置し 150keV のガンマ線を入射させた時の検出器が取得したエネルギースペクトル。横軸は keV で、縦軸はカウント数である。	63
4.42	横軸の入射光子のエネルギーに対して縦軸に検出器が取得したエネルギースペクトルにおけるピークのエネルギーをプロットした。	64
4.43	100keV の入射光子に対して、detector ID が 11110101 の CZT 半導体検出器の読み出した口が読み出したエネルギースペクトル	64
4.44	detector ID が 20011101 の CsI シンチレータのみを設置して 600keV のガンマ線を入射させた時の光子が検出器と反応した正確な位置の x-y 平面分布 (上) と z 軸分布 (下)。	65
4.45	detector ID が 20011101 の CsI シンチレータのみを設置して 600keV のガンマ線を入射させた時の、検出器が取得したガンマ線光子の反応位置の x-y 平面分布 (上) と z 軸分布 (下)。	65
4.46	detector ID が 20011101 の CsI シンチレータのみを設置し 600keV のガンマ線を入射させた時の検出器が取得したエネルギースペクトル。横軸は keV で、縦軸はカウント数である。	66
5.1	全ての検出器が取得したエネルギースペクトル	68
5.2	Tracker が取得したエネルギースペクトル	68

5.3	Low-Energy Calorimeter が取得したエネルギースペクトル . . . . .	69
5.4	High-Energy Calorimeter が取得したエネルギースペクトル . . . . .	70
5.5	合計 2 ヒットのイベントにおけるエネルギースペクトル (High-Energy Calorimeter を除く) . . . . .	72
5.6	2 ヒットのコンプトンイベントにおけるエネルギースペクトル (High-Energy Calorimeter を除く) . . . . .	73
5.7	2 ヒットのコンプトンイベントの内訳 . . . . .	74
5.8	500 keV の光子を入射した時のエネルギースペクトル。(1) は全ての検出器が取得したエネルギースペクトル。(2) は合計 2 ヒットのイベントにおけるエネルギースペクトル (High-Energy Calorimeter を除く)。(3) は 2 ヒットのコンプトンイベントにおけるエネルギースペクトル (High-Energy Calorimeter を除く)。 . . . .	75
5.9	1000 keV の光子を入射した時のエネルギースペクトル。(1) は全ての検出器が取得したエネルギースペクトル。(2) は合計 2 ヒットのイベントにおけるエネルギースペクトル (High-Energy Calorimeter を除く)。(3) は 2 ヒットのコンプトンイベントにおけるエネルギースペクトル (High-Energy Calorimeter を除く)。 . . . .	76
5.10	エネルギーに対する 2 ヒットのコンプトンイベントの有効面積 . . . . .	77

# 第1章 はじめに

## 1.1 ガンマ線バースト

ガンマ線バーストとは、宇宙で起きる現象の中で最も光度の高い物理現象である。1967年に、核兵器の実験で放出される放射線を検出する目的で作られた核実験探知衛星 Vela によって初めて発見された。ガンマ線バーストでは、秒程度から数時間にわたってガンマ線が閃光のように放出され、その後数日間にわたり X 線、可視光、電波などが観測されることがある。ガンマ線バーストによるガンマ線放射をプロンプト放射と呼び、その後に観測される電磁波を残光と呼ぶ。プロンプト放射の発生メカニズムには、シンクロトロン放射が関係しているという説などがあるが、まだ、解明されるにはいたっていない。シンクロトロン放射とは、光速に近い速度の電子等の荷電粒子が磁場中で磁力線の周りを螺旋運動しながら進むときに放出される電磁波である。また、シンクロトロン放射は偏光度が高く、数 10 パーセントにも達する。シンクロトロン放射が起きているならば、強く偏光したガンマ線が放射される。このガンマ線の偏光の情報を調べることで、ガンマ線バーストの具体的な放射メカニズムを探ることが可能になる。さらに、ガンマ線バーストを起こす天体は重力波やニュートリノの発生源とも考えられているので、重力波やニュートリノとともにガンマ線で観測することで、ガンマ線バーストを総合的に解明することが可能になる。ただし、ガンマ線バーストは、いつどの方向で発生するのかが事前にわからず、継続時間が短いため観測が難しい。そのため、ガンマ線バーストの観測に適した観測衛星が必要となる。

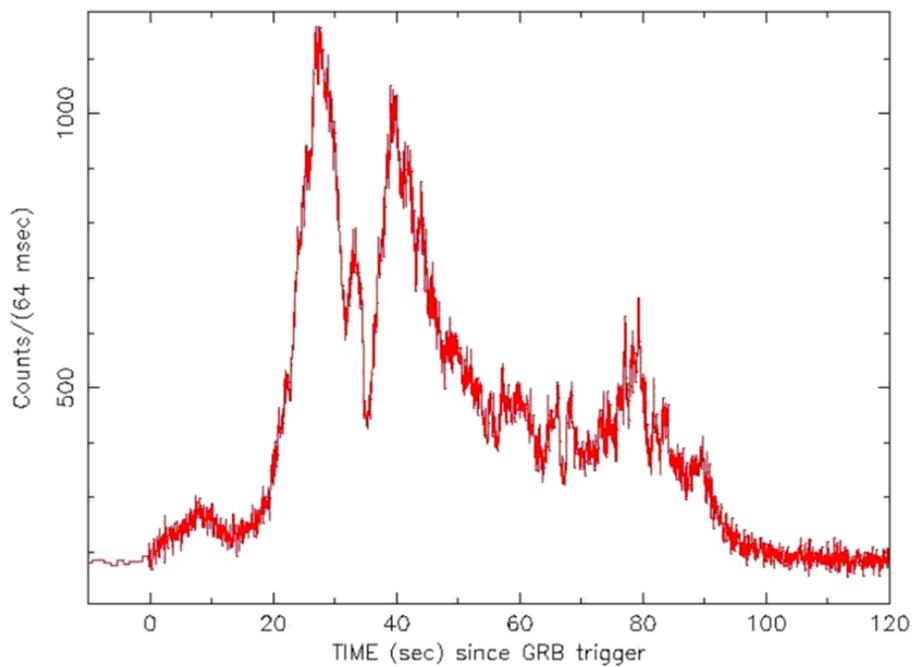


図 1.1: CGRO 衛星が観測した典型的なガンマ線バーストの強度変化 [3]

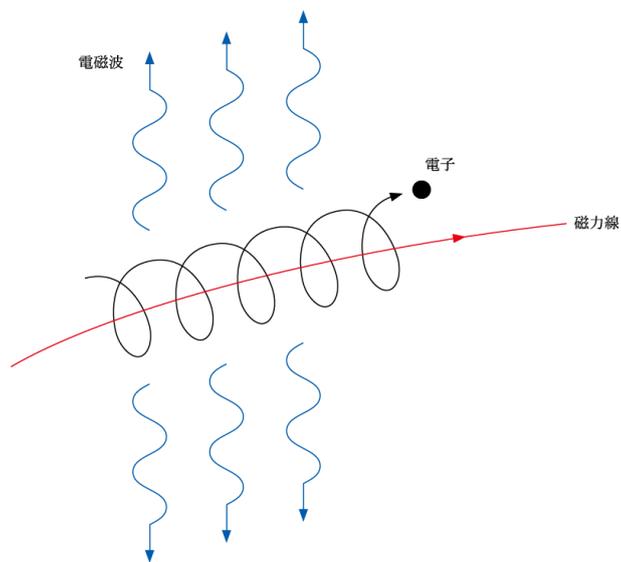


図 1.2: シンクロトロン放射の原理 [4]

## 1.2 偏光

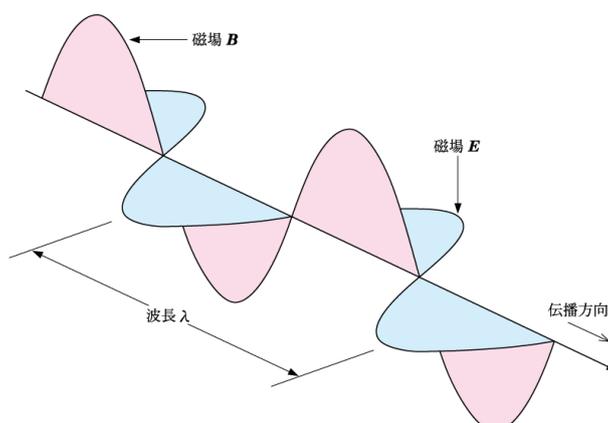


図 1.3: 電磁波の概念図 [6]

光は、電場と磁場の変化を伝播する電磁波である。光子が集団となったときに、電場（および磁場）の振動方向が規則的となった状態を偏光と呼ぶ。電場ベクトル（および磁場）の軌跡から、直線偏光、円偏光、楕円偏光に分類することができる。高エネルギー現象からのシンクロトロン放射では直線偏光が主に観測される。電場ベクトルの振動する向きを、偏光方向と呼ぶ。天体からの光が偏光している時は、光が元々偏光していたか、もしくは無偏光であったが観測者に伝わる過程で偏光状態になったことを示唆しており、天体の物理を探る上で重要な情報が偏光から得られる。シンクロトロン放射由来の偏光が観測された場合、粒子加速における磁場の構造の情報が得られる。シンクロトロン放射では、磁場に特定の向きがある場合は、磁場の向きと垂直の方向に直線偏光した光が放射される。そのため、強い偏光が観測された場合は、その電磁波が放出された領域では磁場の向きがそろっていたと考えられる。一方、電磁波が放射される領域の磁場の向きがランダムな場合には、偏光度の低い電磁波が観測される。そのため、ガンマ線バーストがシンクロトロン放射による場合は、多数のガンマ線バーストに対して偏光度などの統計的な測定ができれば、ガンマ線バーストの発生機構を特定できる可能性がある。[2][5]

## 1.3 AMEGO 衛星計画

AMEGO とは、2030 年ごろの打ち上げを目指している全天 MeV ガンマ線観測衛星計画である。1990 年代の COMPTEL 以降は観測が進展していない 0.1 MeV～100 MeV の MeV 帯域の観測衛星として期待されている。また、全天ガンマ線モニターの後継機としても必要とされている。観測可能なエネルギー範囲が 200 keV から 5 GeV であり、視野が天球の 20 % という広い視野を持つため、突発天体現象であるガンマ線バーストも含めて、重力波、高エネルギーニュートリノとともにマルチメッセンジャー天文学に大きく寄与することが期待されている。また、同じ天体を長期に連続モニターできるため、時間軸（タイムドメイン）天文学にも大きく貢献するだろう。AMEGO の性能について、図 1.4 にまとめた。AMEGO は、ガンマ線偏光観測も行えるため、ガンマ線バーストやブレーザーなどのジェット天体のガンマ線偏光の観測も期待される。AMEGO は、NASA の衛星計画に応募中であるが、大型衛星版 (Probe mission) の AMEGO

とともに、中型衛星版 (MIDEX) で検出器構成が縮小された AMEGO-X が提案されており。本卒論では主に AMEGO に関するシミュレーションを行う。

<b>Energy Range</b>	200 keV to >5 GeV
<b>Angular Resolution per Photon</b>	2.5° (1 MeV), 2° (100 MeV), 1° (1 GeV)
<b>Energy Resolution</b>	1% (1 MeV, FWHM/E), ~10% (1 GeV, FWHM/E)
<b>Field of View</b>	2.5 sr (20% of the sky)
<b>Line Sensitivity</b>	$1 \times 10^{-6}$ ph cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> for the 1.8 MeV <sup>26</sup> Al line in 5 years
<b>Polarization Sensitivity</b>	4% MDP for a 100 mCrab flux, observed for 10 <sup>6</sup> s
<b>Continuum Sensitivity</b>	$7 \times 10^{-12}$ (1 MeV), $3.5 \times 10^{-12}$ (100 MeV) erg cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> in 5 years

図 1.4: AMEGO の性能 [7]

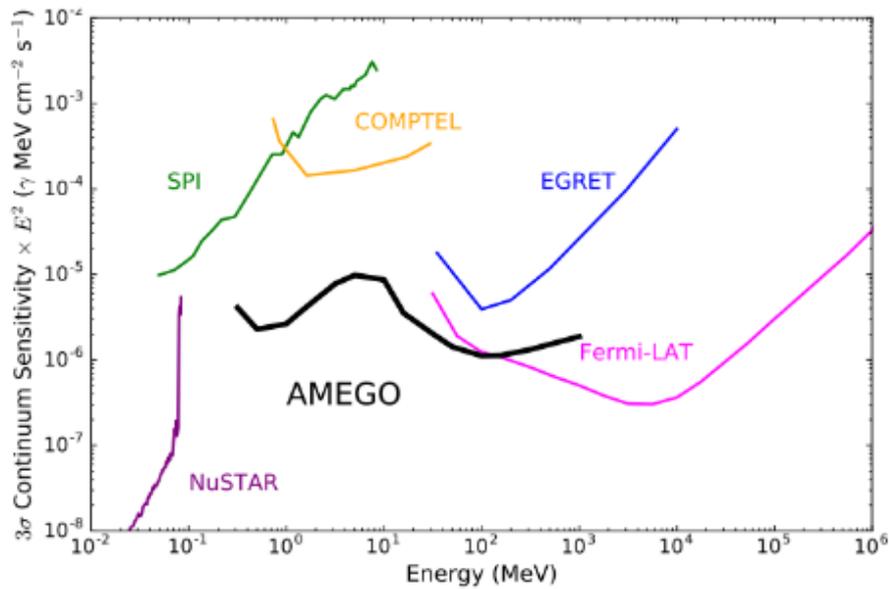


図 1.5: AMEGO の感度 [7]

## 1.4 ガンマ線と物質の相互作用

ガンマ線の測定は、ガンマ線と物質の相互作用を利用して行われる。ガンマ線と物質の相互作用は、光電吸収、コンプトン散乱、電子陽電子対生成の三つの過程がある。この三つは、入射光子のエネルギーの一部または全てを電子のエネルギーに変換する反応である。

### 1.4.1 光電吸収

光電吸収過程では、ガンマ線光子が物質中の原子の束縛電子と反応することで、光子が完全に消滅し、束縛電子がエネルギーをもらい元いた原子から飛び出す。この飛び出した電子は、さらにほかの複数の原子と衝突して、多数の自由電子を作り出し、それが電気信号として読み出される。

## 1.4.2 コンプトン散乱

コンプトン散乱過程とは、光子と物質中の一個の電子と反応することで、光子が散乱し、同時に電子が光子のエネルギーの一部をもらう。図 1.6 のように、散乱後の光子のエネルギー  $E_2$  は、電子の質量  $m_e c^2$ 、光速  $c$ 、散乱角  $\theta$ 、入射光子のエネルギー  $E_0$ 、光子が落としたエネルギー  $E_1$  を用いて、

$$E_2 = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (1.1)$$

となる。コンプトン散乱が検出器の中で一回起こるだけでは、光子の情報の一部しか得られないので、有効なイベントにならないが、検出器中で複数の散乱および光電吸収が起きると、有効なイベントとして使うことができる。

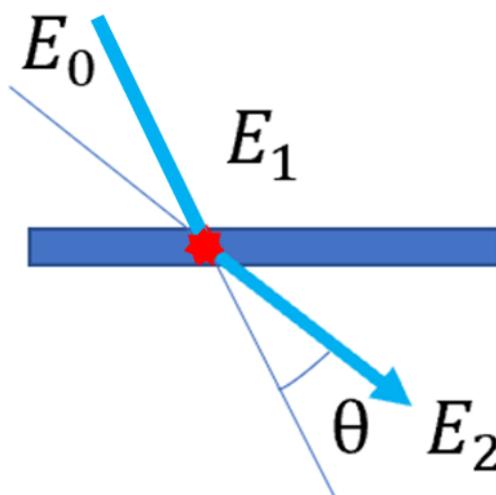


図 1.6: コンプトン散乱体でのコンプトン散乱。入射光子のエネルギーを  $E_0$ 、光子が落としたエネルギーを  $E_1$ 、散乱後の光子のエネルギーを  $E_2$ 、散乱角を  $\theta$  とした。水色の太い矢印が入射光子の飛跡。

## 1.4.3 電子陽電子対生成

電子陽電子対生成過程では、物質中で光子が完全に消滅し、電子と陽電子に変換される。入射ガンマ線光子のエネルギーが電子の静止質量エネルギーの 2 倍である 1022 keV を超えると、電子陽電子対生成が可能になる。電子陽電子対生成に必要な 1022 keV 以上のエネルギーを持つ光子の余剰エネルギーは、全て陽電子、電子の運動エネルギーに置き換わる。生じた電子陽電子は、物質中で様々な反応を通してエネルギーを落としながら減速する。陽電子は最終的に電子と対消滅し、電子と陽電子のそれぞれの静止エネルギー 511 keV を有するガンマ線光子が 2 個生成される。この反応は、10 MeV 以上のガンマ線を測定するための主要相互作用である。

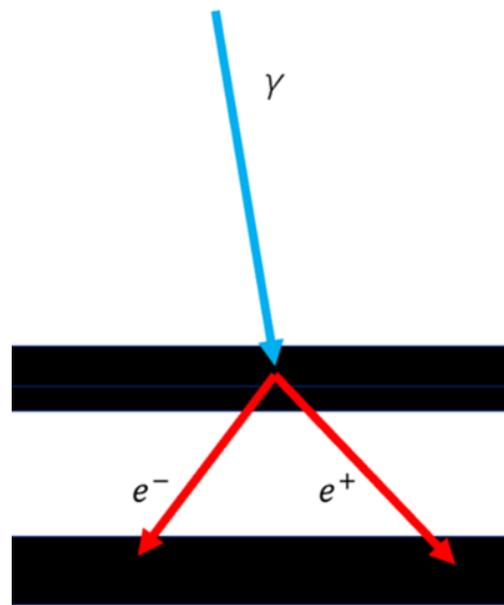


図 1.7: 電子陽電子対生成

#### 1.4.4 コンプトン再構成

図 1.6 で光子が散乱された後、検出器内で光電吸収が起きたとする。それを図 1.8 に表した。

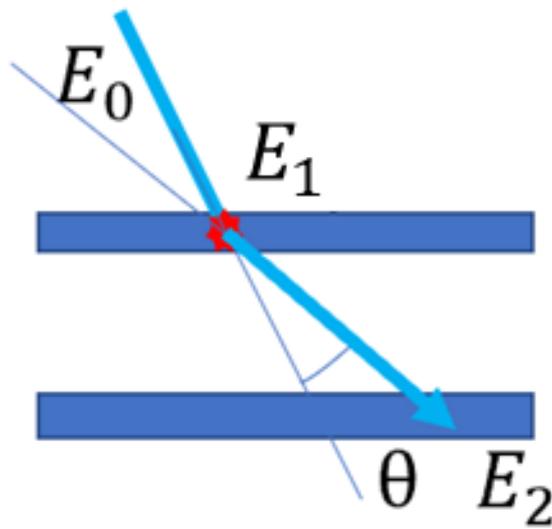


図 1.8: コンプトン散乱後に光電吸収。入射光子のエネルギーを  $E_0$ 、光子が落としたエネルギーを  $E_1$ 、散乱後の光子のエネルギーを  $E_2$ 、散乱角を  $\theta$  とした。水色の太い矢印が入射光子の飛跡。

このとき、検出器から入射光子のエネルギーと散乱後のエネルギーの両方ともが得られるので、式 (1.1) から、

$$\cos \theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2(E_1 + E_2)} E_1 \quad (1.2)$$

が成り立ち、散乱角  $\theta$  を求めることができる。また、散乱・吸収した位置も測定されたとする。これによって、光子の到来方向を図 1.9 の角度  $\theta$  の円錐状に制限することができる。これが、最も単純なコンプトン再構成である。また、この円錐を伸ばすとガンマ線の入射方向にある平面と交わるが、その交線をコンプトンコーンと呼ぶ。

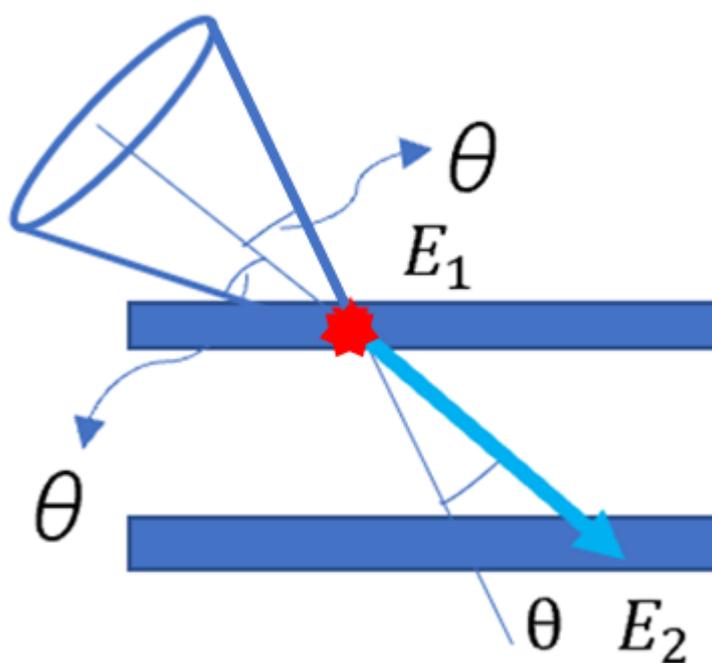


図 1.9: コンプトン再構成

同じ光源からの光子に対して、同様にコンプトンコーンを描いていくと、図 1.10 のように交点生まれ、そこが光子の到来方向となる。このようにして、光源の方向を導き出すことをコンプトンイメージングと呼ぶ。

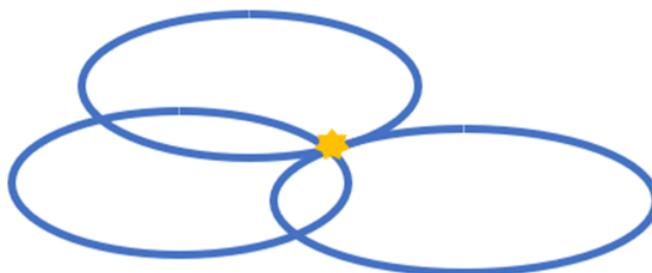


図 1.10: コンプトンイメージングの概念図

入射光子のエネルギーが数 100 keV 以上の場合、コンプトン散乱時に反跳電子が強くはじき出される。この反跳電子の移動方向を検出しない場合は、図 1.11 の左図のようにコンプトンコーンが二つの光源と交わってしまう場合がある。一方、反跳電子の移動方向を検出できる場合には、各ガンマ線の到来方向をコン

プトンコーンの一部の方位角範囲に制限できるため、図 1.11 の右図のように、コンプトンコーンを光源付近に制限することができ、他の天体と交わずに、より正確なコンプトンイメージングが可能になる。

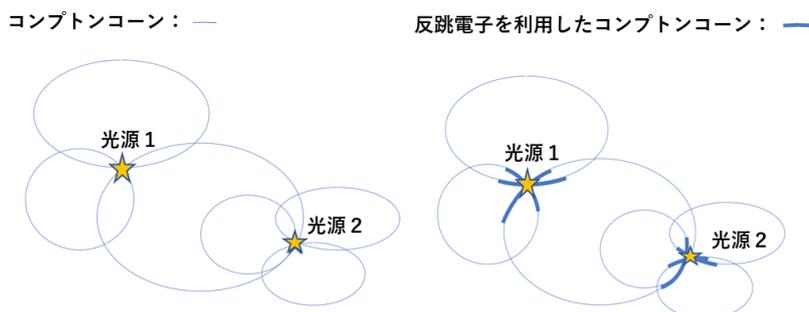


図 1.11: 反跳電子を利用せずに行ったコンプトンイメージング (左図) と反跳電子を利用して行ったコンプトンイメージング (右図)。

## 1.5 研究目的

これまで述べてきたように、ガンマ線バーストの放射メカニズムは、ガンマ線偏光を観測することで解明される可能性がある。また、AMEGO には、ガンマ線バーストのガンマ線偏光観測が可能な検出器が搭載される予定である。AMEGO は反跳電子を利用することにより、より正確なコンプトンイメージングが可能な検出器を搭載する予定であり、この反跳電子を用いたガンマ線偏光観測の研究は多くなされている。先述のとおり、入射光子のエネルギーが数 100 keV 以上のときにのみ反跳電子を利用することができるため、数 100 keV 以上では暗い天体であるガンマ線バーストにおいては、反跳電子を用いた観測が行えない。そのため、ガンマ線バーストを対象としたガンマ線偏光観測の研究は、あまりなされていない。ただ、ガンマ線バーストは極めて明るい天体であり、反跳電子を利用しなくても他の天体と区別することができるため、偏光の情報が十分に得られる可能性がある。そこで、本研究では、モンテカルロシミュレーションを用いて、AMEGO の検出器と偏光ガンマ線の相互作用を再現し、ガンマ線偏光観測のシミュレーションを行うことで、MeV ガンマ線偏光観測の可能性について検証する。反跳電子を利用できないが、ガンマ線バーストのように極めて明るい光源を対象にしてシミュレーションを行う。

## 第2章 AMEGO 衛星とガンマ線偏光観測

### 2.1 AMEGO の検出器

AMEGO の検出器は、Tracker、Low-Energy Calorimeter、High-Energy Calorimeter の三つの検出器で構成される。AMEGO の検出器の展開図を、図 2.1 に示した。図 2.2 に、ガンマ線光子と各検出器との反応を示した。入射光子によるコンプトン散乱と電子陽電子対生成は、主に Tracker 部分において生じる。Tracker で散乱された光子は、主に Low-Energy Calorimeter において最終的に光電吸収される。コンプトン再構成をすることで、ガンマ線のエネルギー計測および到来方向の決定がなされる。また、Tracker での電子陽電子対生成によって発生した粒子群は、High-Energy Calorimeter において吸収され、ガンマ線のエネルギー計測および到来方向の決定がなされる。また、AMEGO の有効面積を図 2.3 に示した。

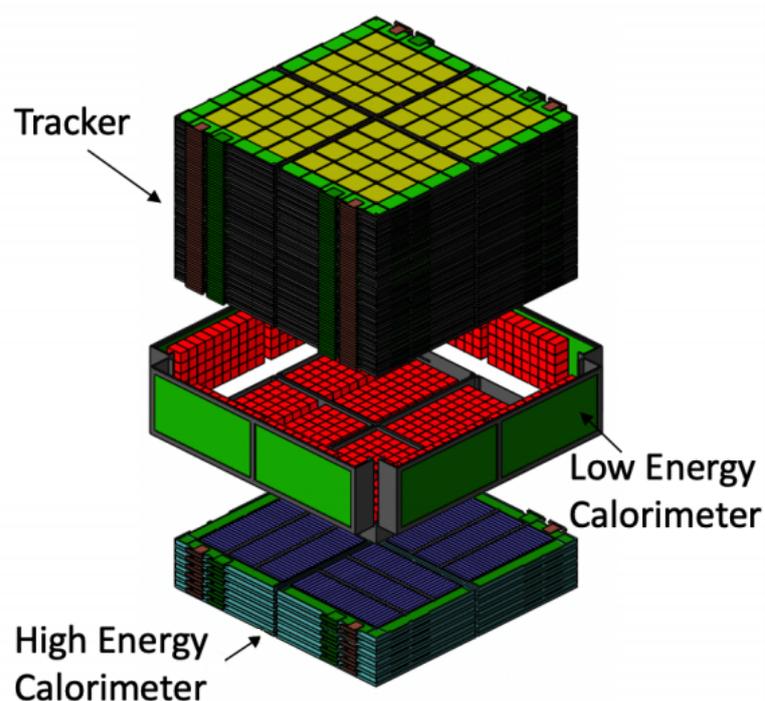


図 2.1: AMEGO の検出器の展開図 [7]

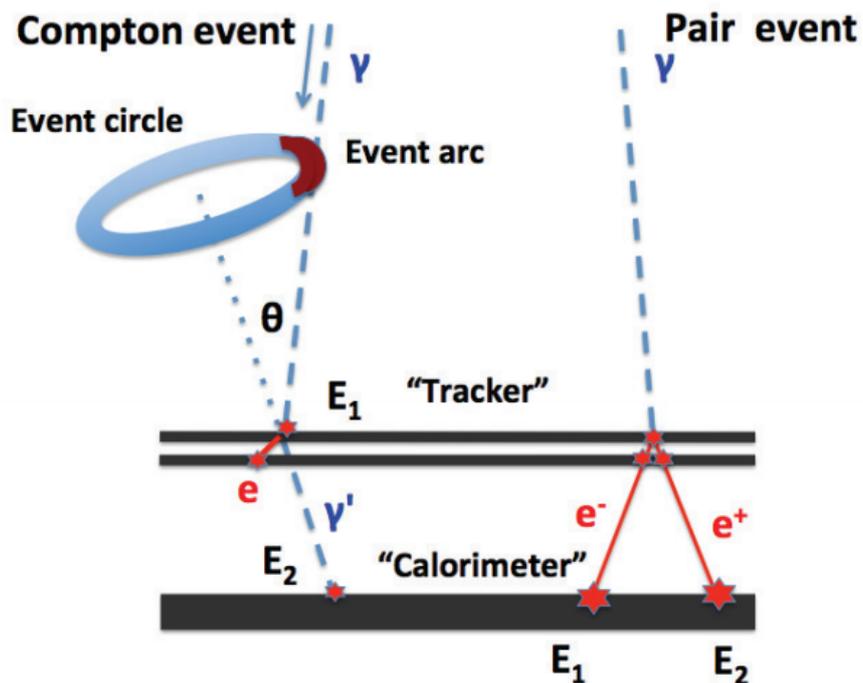


図 2.2: 各検出器とガンマ線光子の相互作用。図の左側のイベントが、入射光子が検出器とコンプトン散乱した後に光電吸収されるコンプトンイベント。図の右側のイベントが、電子陽電子対生成後に生じた電子、陽電子が検出器によって捕らえられるイベント。[7]

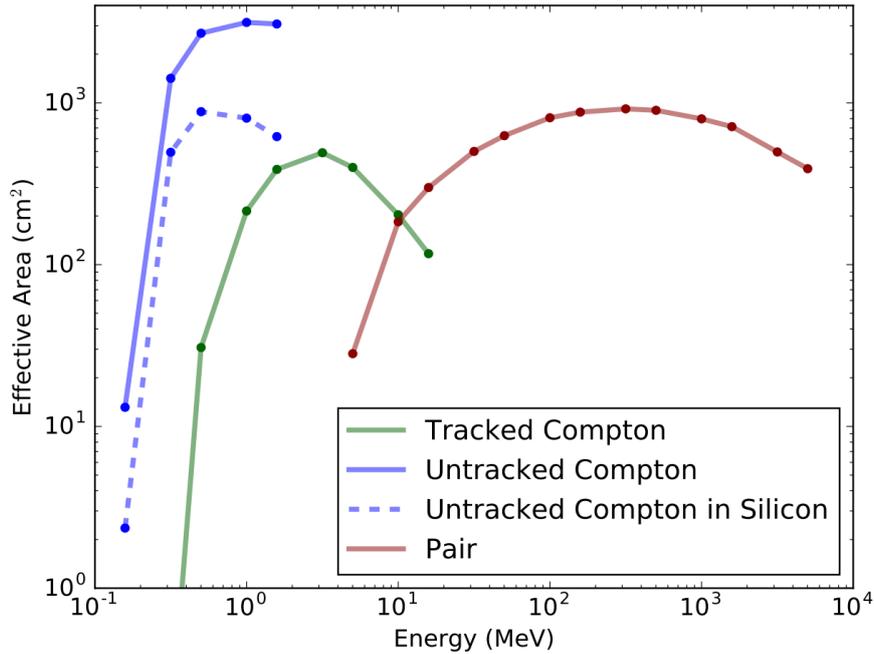


図 2.3: AMEGO の検出器の有効面積。緑色の線は、反跳電子の到来方向を把握したときのコンプトンイベントの有効面積。青色の線は、反跳電子の到来方向を把握しないときのコンプトンイベントの有効面積。青色の点線は、反跳電子の到来方向を把握しないときのシリコン検出器におけるコンプトンイベントの有効面積。赤色の線は、電子陽電子対生成の有効面積。[7]

### 2.1.1 Tracker

Tracker は、合計 3840 枚の両面シリコン検出器で構成されている。両面シリコンストリップ検出器は、一枚の検出器の表面と裏面にそれぞれ、ストリップピッチが  $500 \mu\text{m}$  の 190 列の筋状 (ストリップ) の読み出し口が付いており、表面のストリップと裏面のストリップは全て直交するように配置されている。これにより、反応位置の 3 次元の位置情報がわかる。また、各反応位置でのデポジットエネルギーも計測する。両面シリコンストリップ検出器の概念図を図 2.4 に表した。図 2.5 が 4 つで一層となり、合計 60 層ある。

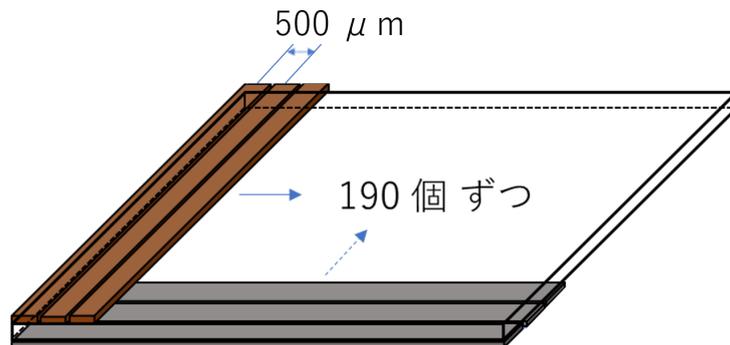


図 2.4: 両面シリコンストリップ検出器の概念図

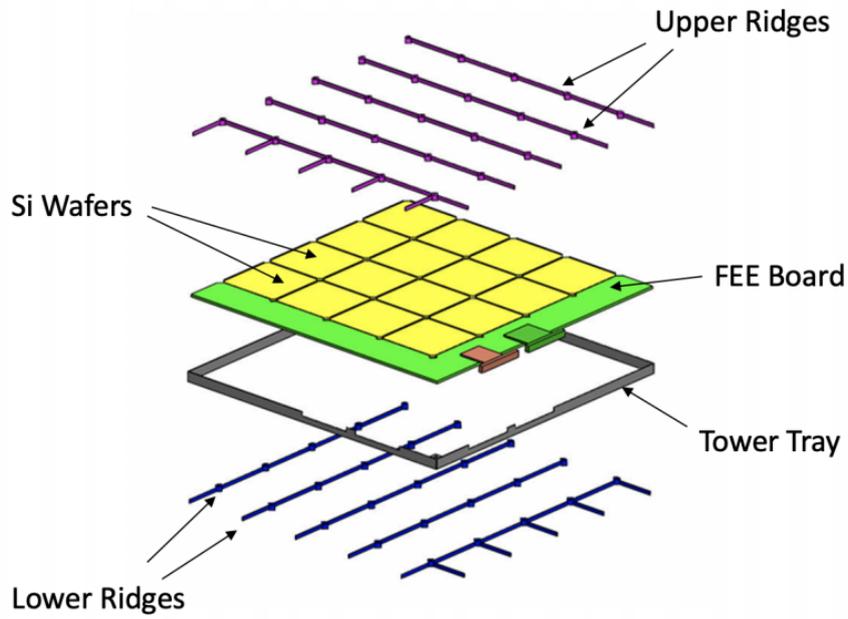


図 2.5: 両面シリコンストリップ検出器 16 枚を  $4 \times 4$  で配置したもの [7]

### 2.1.2 Low-Energy Calorimeter

Low-Energy Calorimeter は、合計 12160 個の CdZnTe 半導体検出器で構成されている。CdZnTe 半導体検出器には、図??の左図のように、カソードが 1 チャンネル、アノードが 5 チャンネルあり、合計 6 チャンネルの読み出し口が付いている。760 個の図??の右図が、2.7 のように組み立てられ、Tracker の下の部分を覆うように設置される。

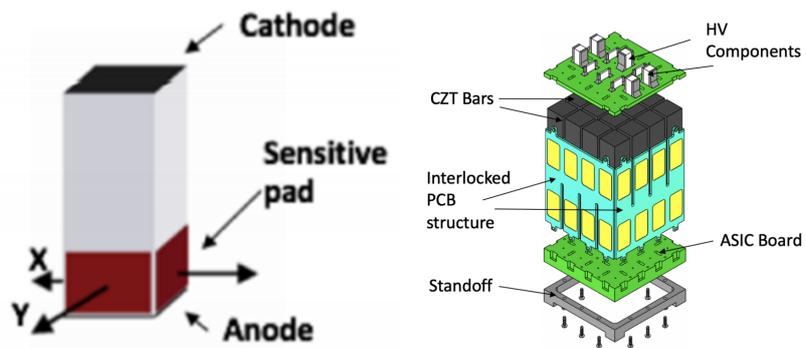


図 2.6: CdZnTe 半導体検出器の読み出し口 (左図)[10] と CdZnTe 半導体検出器を 16 個合わせたモジュール (右図)[7]。

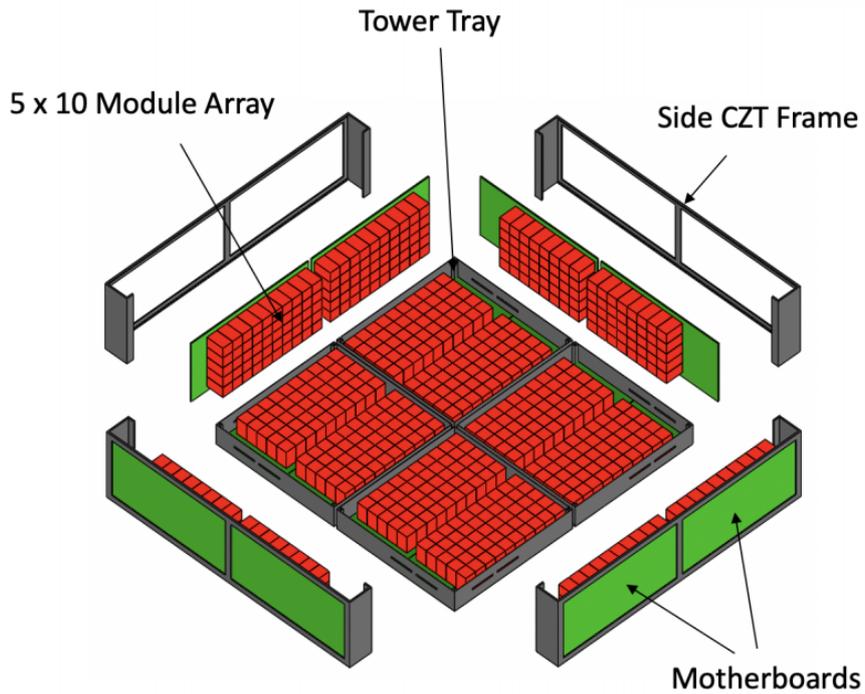


図 2.7: Low-Energy Calorimeter の構造 [7]

### 2.1.3 High-Energy Calorimeter

High-Energy Calorimeter は、合計 624 個の CsI(Tl) シンチレーターの検出器で構成されている。また、CsI(Tl) シンチレーターには、図 2.8 のように SiPM が付き、読み出し口が合計 2 チャンネルとなっている。図??4 つで一層となり、合計 6 層の構造をとる。



図 2.8: CsI(Tl) シンチレーターの読み出し口

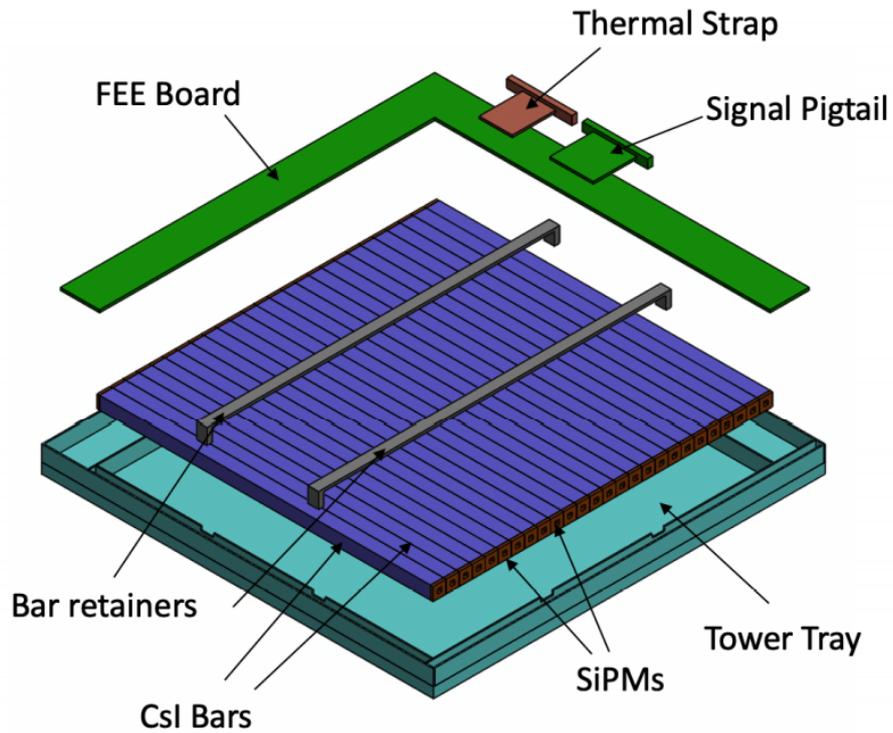


図 2.9: CsI(Tl) シンチレータを 26 本用いたもの [7]

## 2.2 AMEGO によるガンマ線偏光観測

光が偏光していれば、コンプトン散乱時の散乱方向に異方性が出るという原理がある。AMEGO では、この原理を用いて偏光を観測する。図 2.10 のように、コンプトン散乱が起きたとする。この時、検出器を真上から見たときの光子の散乱方向と偏光方向を表したものが図 2.11 である。光が偏光しているときは、図 2.11 のように、偏光方向に対して垂直な方向に光子が散乱されやすい。

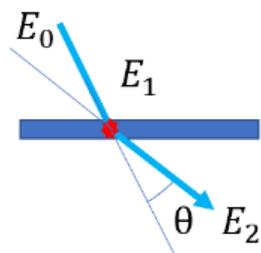


図 2.10: コンプトン散乱。入射光子のエネルギーを  $E_0$ 、光子が落としたエネルギーを  $E_1$ 、散乱後の光子のエネルギーを  $E_2$ 、散乱角を  $\theta$  とした。

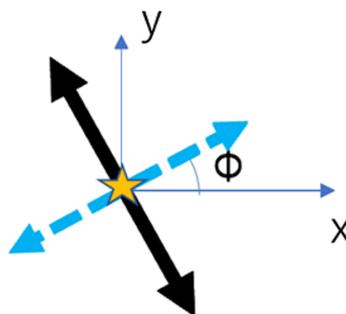


図 2.11: 図 2.10 を検出器の真上から見たとき。黒い矢印が偏光方向を表しており、水色の点線の矢印が光子の散乱方向となっている。また、xy 平面に散乱方向を射影したときの x 軸からの角度を  $\phi$  としている。

直線偏光をしている入射光が検出器とコンプトン散乱すると、コンプトン散乱の反応断面積の異方性から散乱方向に偏りが生じる。この異方性の度合いを調べることで入射光子の偏光方向および偏光度を求めることができる。理想的な検出器の場合、検出器内の異方性は図 2.12 のように現れる。散乱方位角に対するガンマ線光子の数分布 (ヒストグラム) 作ると、図 2.12 のような曲線が描ける。この曲線はモジュレーションカーブと呼ばれ、

$$N(\phi) = A - B \cos(2(\phi - \phi_0)) \tag{2.1}$$

で表すことができる。ここで、 $\phi_0$  は偏光方向の x 軸からの角度とした。

ここで、 $\Pi$  を、図 2.12 の  $N_{max}$  と  $N_{min}$  から、

$$\Pi = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}} \tag{2.2}$$

とする。入射光が完全偏光の場合の  $\Pi$  が  $\Pi_0$  とすると、入射ガンマ線の偏光度は、 $\frac{\Pi}{\Pi_0}$  で与えられる。

## モジュレーションカーブ

$$N(\phi) = A - B \cos(2(\phi - \phi_0))$$

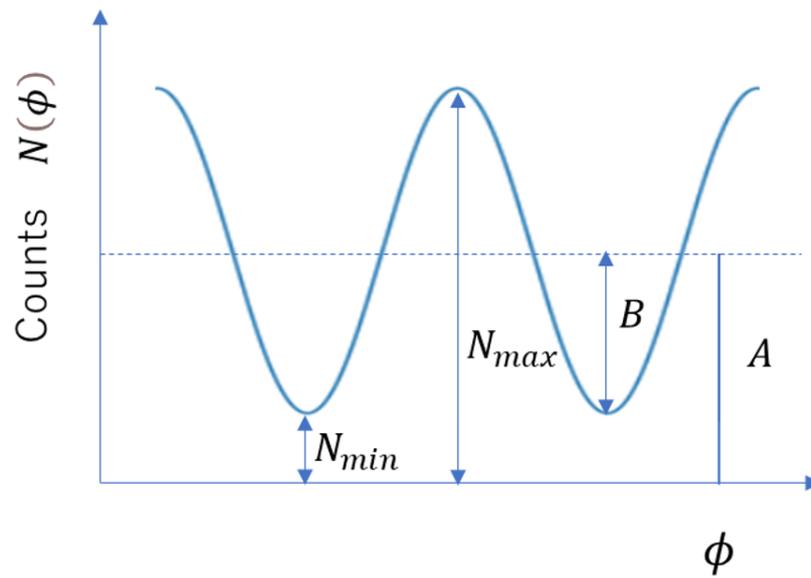


図 2.12: モジュレーションカーブ。散乱角度 $\phi$ を横軸、カウントを縦軸とするヒストグラム。隣り合うカウントの最大値と最小値の角度の差は $\frac{\pi}{2}$ となる。

## 第3章 ガンマ線観測のシミュレーション

### 3.1 シミュレーションソフト Geant4

Geant4とは、物質中における素粒子の飛跡をシミュレートするソフトである。高エネルギー宇宙物理学や、放射線医学の分野の研究において使われている。本研究では、version 10.0.05.p01CのGeant4を用いた。C++言語を用いたものであり、特定の機能を持ったクラスで構成されている。主な三つのクラスについて以下に記した。

- `DetectorConstruction` : 検出器などの構造物を設定するクラス。
- `PrimaryGeneratorAction` : 初期粒子を設定するクラス。入射する素粒子の種類、エネルギー、位置などを定義する
- `EventAction` : 入射した素粒子が物質と相互作用する際に起こる物理現象ごとの結果の取得や出力の仕方を設定するクラス。

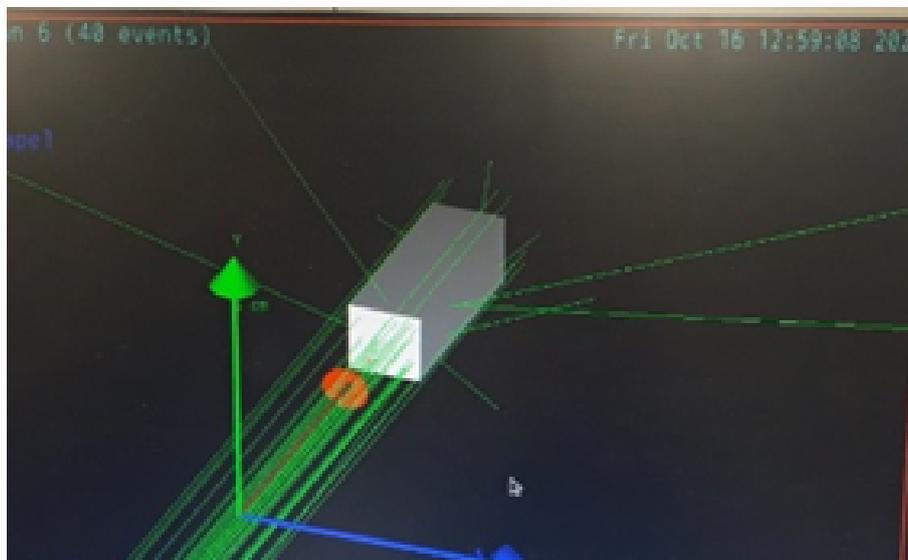


図 3.1: Geant4 によるシミュレーション。図の中央の灰色の物体に、ガンマ線の光子を照射している。ガンマ線の光子の飛跡が緑色の線で示されている。

## 3.2 ComptonSoft

本研究では、ComptonSoft を用いることによって Geant4 を動かした。ComptonSoft とは、ひとみ衛星の性能を検証するために用いられたソフトである。(ComptonSoft の詳細は、<https://github.com/odakahirokazu/ComptonSoft> にある)。Geant4 では、光子と検出器が反応した位置や光子が検出器で落としたエネルギーを正確に取得できるが、実際の検出器に付いている読み出し口が取得する光子の反応した位置や落としたエネルギーには測定誤差が生じる。読み出し口の幅から位置の測定誤差が生じ、エネルギー分解能によって、取得するエネルギーにも誤差が生じる。ComptonSoft では、設定された個々の読み出し口に対してエネルギーの測定誤差やトリガースレッシュホールドといった検出器のシミュレーションを行うことできる。本研究では、Geant4 で作成した AMEGO の検出器の物体の構造や大きさに対応した読み出し口の設定を、ComptonSoft を用いて行った。ここで、本研究で使用する語句についての説明をする。ある一つの入射した光子が検出器内で 1 回以上の相互作用をしたことを「イベント」と呼び、1 イベント内で入射した素粒子が検出器と起こした各相互作用を「ヒット」と定義する。読み出し口を定義するときには、各読み出し口に ID と呼ばれる番号を付けており、各読み出し口を、「チャンネル」と呼ぶ。

ComptonSoft を用いた Geant 4 でのシミュレーション時には、検出器が取得した情報は、イベント順に記録されるが、各イベント内の情報は、時系列なヒット順ではなく、若い番号のディテクターかつ若い番号のチャンネルで取得した情報から記録される。シミュレーションの結果は各ヒット毎に記録されている。各ヒットの情報はイベント中の何番目のヒットであるか、どの検出器のどの位置で反応したのか、どれだけのエネルギーを検出器に落としたのかなどである。以下に、各ヒットの主な情報について記載した。

- eventid : 時系列順に付けられたイベントの番号
- ihit : イベント内で取得された順に付けられたヒットの番号
- num\_hits : イベント内のヒットの数
- detector : 検出器の番号
- pixelx : x 方向の読み出し口の番号
- pixely : y 方向の読み出し口の番号
- real\_posx : 素粒子が検出器と反応した実際の x 方向の位置
- real\_posy : 素粒子が検出器と反応した実際の y 方向の位置
- real\_posz : 素粒子が検出器と反応した実際の z 方向の位置
- energy : 検出器が取得したエネルギー
- posx : 反応を検出した読み出し口 (電極) の X 座標
- posy : 反応を検出した読み出し口 (電極) の y 座標
- posz : 反応を検出した読み出し口 (電極) の z 座標
- ini\_energy : 入射光子のエネルギー

### 3.3 コンプトンイベントの選び出し

本研究では、シミュレーション時の全イベントのうち、合計2ヒットのイベントに注目する。さらに、合計2ヒットの各イベントにおいてコンプトン再構成を行い、一回散乱一回吸収イベントとそうでないイベントに分ける。なお、本研究では、一回散乱一回吸収イベントを2ヒットのコンプトンイベントと呼ぶ。

本研究では、AMEGO 検出器内に入射した光子がどこかでコンプトン散乱をしてその散乱光子がどこかで光電吸収された2ヒットからなる1イベントを取り出す。このようなイベントを2ヒットコンプトンイベントと呼ぶ。各イベントに対してコンプトンイベントであるか判別(コンプトン再構成)を行い、コンプトンイベントのみを選び出す。

#### 3.3.1 選び出しの必要性

偏光の情報は、コンプトン散乱時の方位角分布から読み取るため、2ヒットのコンプトンイベントを取り出すことで、入射光子の偏光の情報を調べることが可能になる。また、2ヒットのコンプトンイベントは、入射した光子のエネルギーを取得することができるため、光のエネルギーと偏光の対応関係を調べることができる。また、イベント内の正しいヒットの順番を知るためにも2ヒットのコンプトンイベントの選び出しを行う。

#### 3.3.2 コンプトン再構成による選び出し

合計2ヒットのイベントの概念図を、図3.2に表した。

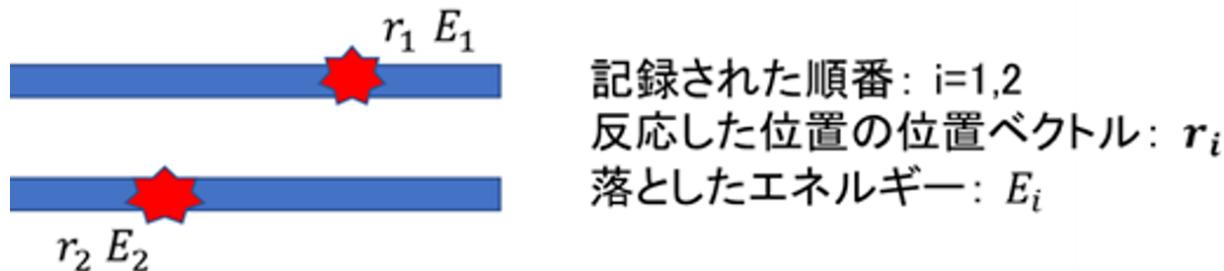


図3.2: 合計2ヒットのイベントの概念図

このとき、図3.2のイベントは、以下の(ア)、(イ)、(ウ)のいずれかのイベントに該当していると考えられる。

- (ア) 光子が  $r_1$  でコンプトン散乱した後、 $r_2$  で光電吸収されるコンプトンイベント
- (イ) 光子が  $r_2$  でコンプトン散乱した後、 $r_1$  で光電吸収されるコンプトンイベント
- (ウ) コンプトンイベント以外のイベント

まず、(ア)が起きたと仮定する。このとき、散乱角を  $\theta$  とすると、 $\cos \theta$  は、光源の位置ベクトルを  $r$  として、光子の到来方向と光子を検出した位置から、

$$\cos \theta = \left( \frac{r_1 - r}{|r_1 - r|} \right) \cdot \left( \frac{r_2 - r_1}{|r_2 - r_1|} \right) \quad (3.1)$$

となる。

また、光子が落としたエネルギーから求まる散乱角を  $\theta'$  とすると、 $\cos \theta'$  は、

$$\cos \theta' = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2(E_1 + E_2)} E_1 \quad (3.2)$$

となる。ここで、 $-1 \leq \cos \theta' \leq 1$  より、エネルギー  $E_1$ 、 $E_2$  は、

$$f = 2E_2 E_1 + 2E_2^2 - E_1 m_e c^2 \geq 0 \quad (3.3)$$

を満たさなければならない。しかし、 $E_1$ 、 $E_2$  がエネルギー分解能による誤差を持つため、 $f$  もエネルギー分解能による誤差を持つ。このため、 $f$  の誤差を  $\Delta f$  とし、 $E_1$ 、 $E_2$  が、

$$f + a\Delta f \geq 0 \quad (3.4)$$

を満たす必要があると考える。ここで、 $a$  は、変更可能なパラメータとする。また、

$$g \equiv \cos \theta - \cos \theta' \quad (3.5)$$

とおく。 $g$  は、検出器のエネルギー分解能による誤差を持つとする。エネルギー分解能による  $g$  の誤差を  $\Delta g$  とおくと、 $g$  は、

$$-b\Delta g < g < b\Delta g \quad (3.6)$$

を満たす必要があると考える。ここで、 $b$  は、変更可能なパラメータとする。したがって、式(3-4)と式(3-6)を満たすなら、(ア)のイベントが実際に起きたとみなすことができる。式(3-4)と式(3-6)を満たさないときは、(イ)のイベントを仮定し、(ア)の場合と同様にして、実際に起きたイベントかどうかを判定する。(ア)と(イ)の両方のイベントに該当しないときは、(ウ)のイベントが起きたとみなす。これを、合計2ヒットの全イベントに対して行うことで、2ヒットのコンプトンイベントとそうでないものに分類することができ、2ヒットのコンプトンイベントの選び出しが可能になる。

### 3.3.3 コンプトン再構成の検証

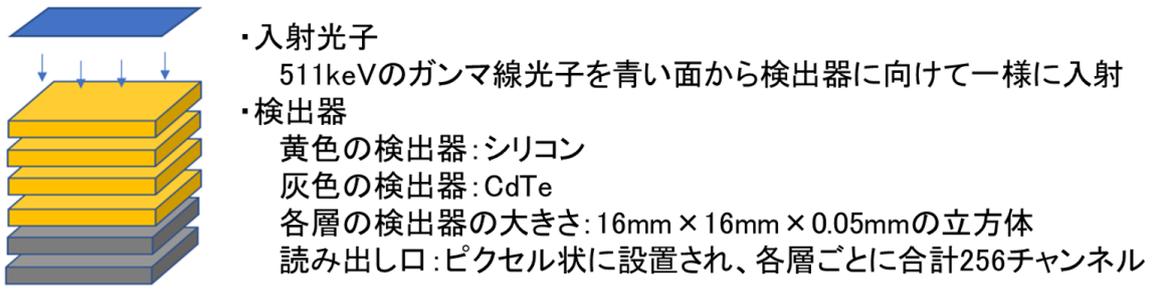


図 3.3: シミュレーションの概要図

図 3.3 のように、6 層の検出器に対して、検出器の真上の青の正方形の領域から合計 1 億個の 511 keV のガンマ線光子を一様に入射するシミュレーションを行い、2 ヒットのコンプトンイベントの選び出しの検証を行う。

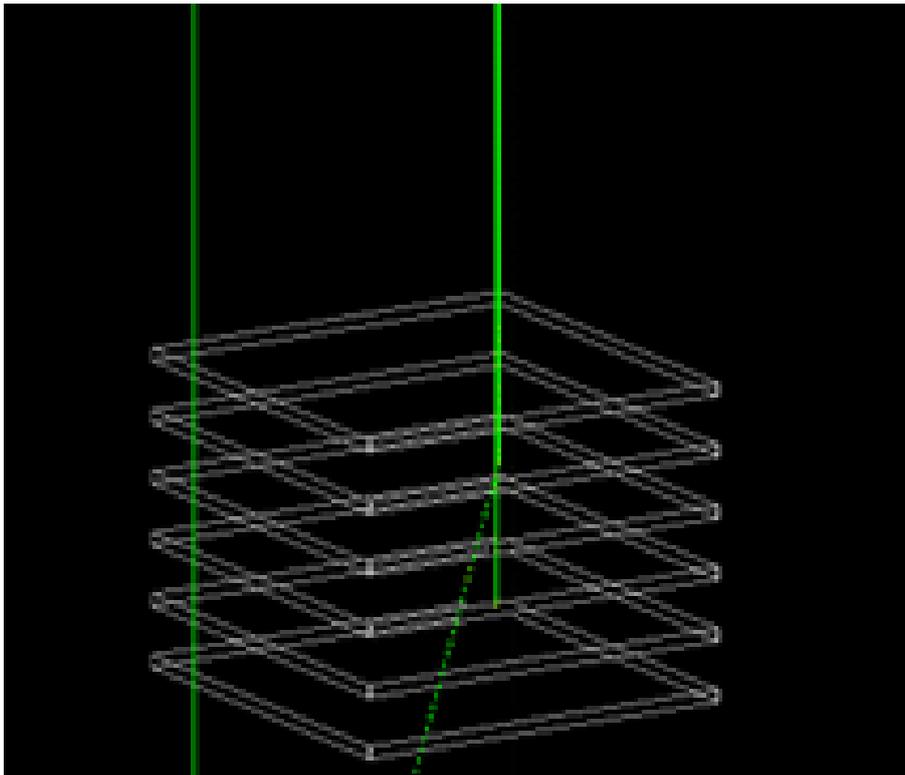


図 3.4: 図 3.3 のシミュレーションを Geant4 で可視化したもの。ガンマ線の光子の飛跡が緑色の線で示されている。

図 3.3 のシミュレーションにおいて、上記の方法により、2 ヒットのコンプトンイベントの選び出しを

行った。合計2ヒットの全イベントにおけるエネルギースペクトルを図3.5に表し、2ヒットのコンプトンイベントの選び出しをすることによって求めた2ヒットのコンプトンイベントにおけるエネルギースペクトルを図3.6にプロットした。なお、式(3-4)、式(3-6)において、aを1、bを1とした。

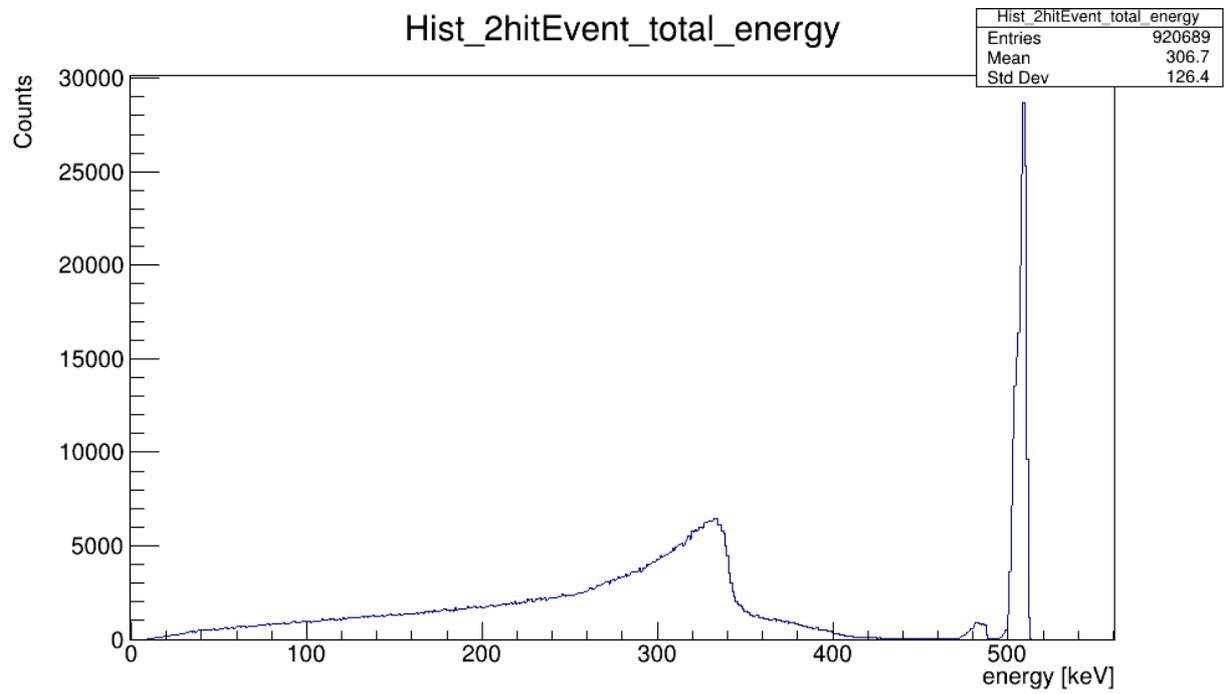


図 3.5: 合計2ヒットのイベントにおけるエネルギースペクトル

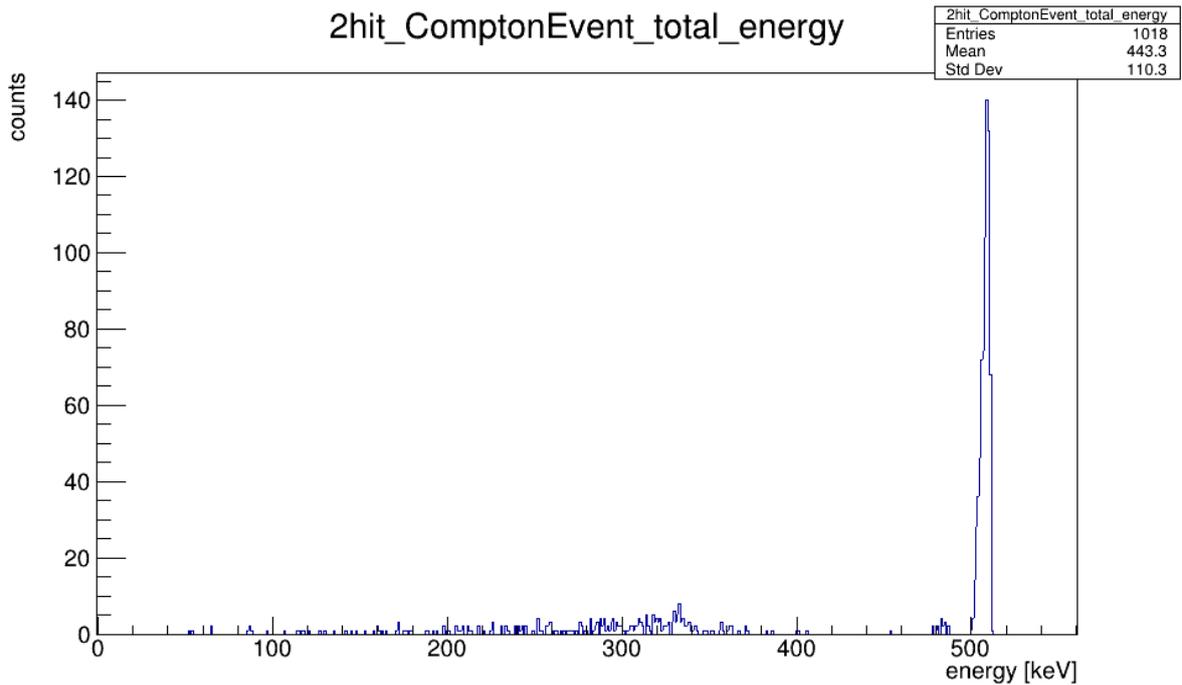


図 3.6: 2 ヒットのコンプトンイベントにおけるエネルギースペクトル (a=1,b=1)

ここで、ピーク付近のイベントは、より正しく選び出されたイベントだと思われる。図 3.6 では、グラフ内の全イベントに対するピーク付近のイベントの割合が、図 3.5 におけるグラフ内の全イベントに対するピーク付近のイベントの割合よりも高くなっていることがわかる。したがって、2 ヒットのコンプトンイベントの選び出しができていていると考えられる。しかし、図 3.6 からわかるように、2 ヒットのコンプトンイベントのみを取り出すことはできておらず、2 ヒットのコンプトンイベント以外のイベントも取り出していることがわかる。

また、式 (3-4)、式 (3-6) における、 $a$ 、 $b$  を変えて 2 ヒットのコンプトンイベントの選び出しを行い、エネルギースペクトルを求めた。(図 3.7、図 3.8)

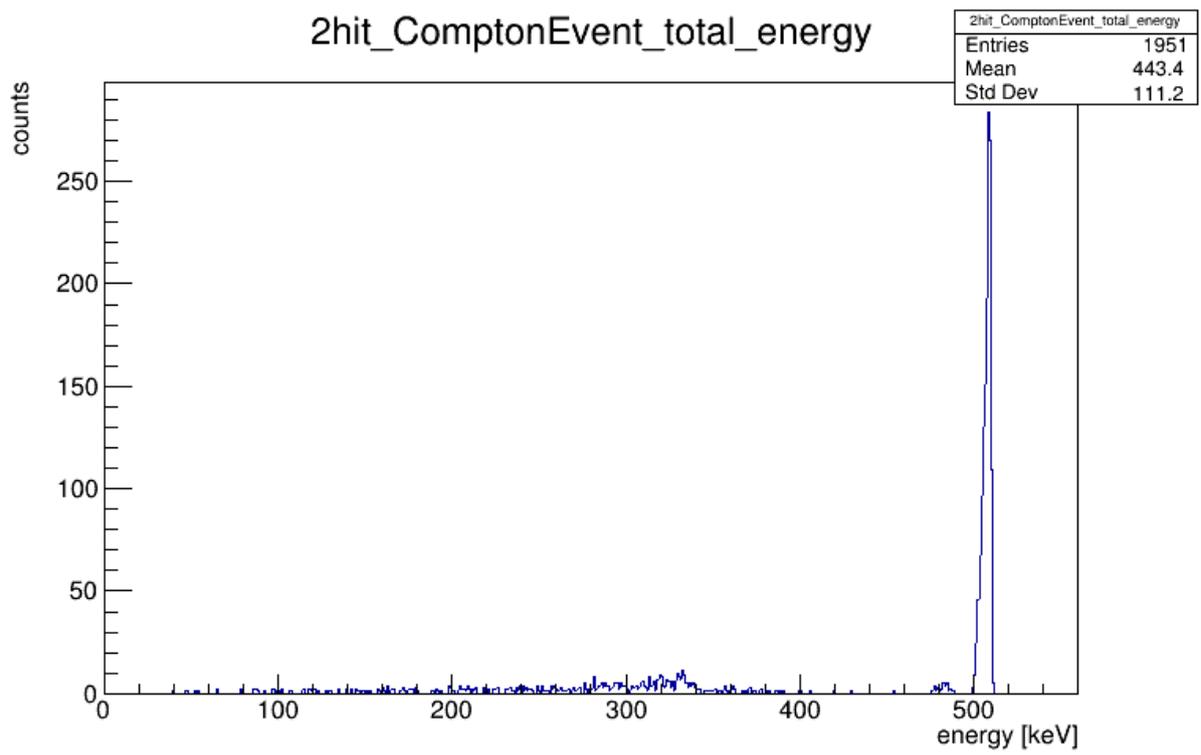


図 3.7: 2 ヒットのコンプトンイベントにおけるエネルギースペクトル (a=2,b=2)

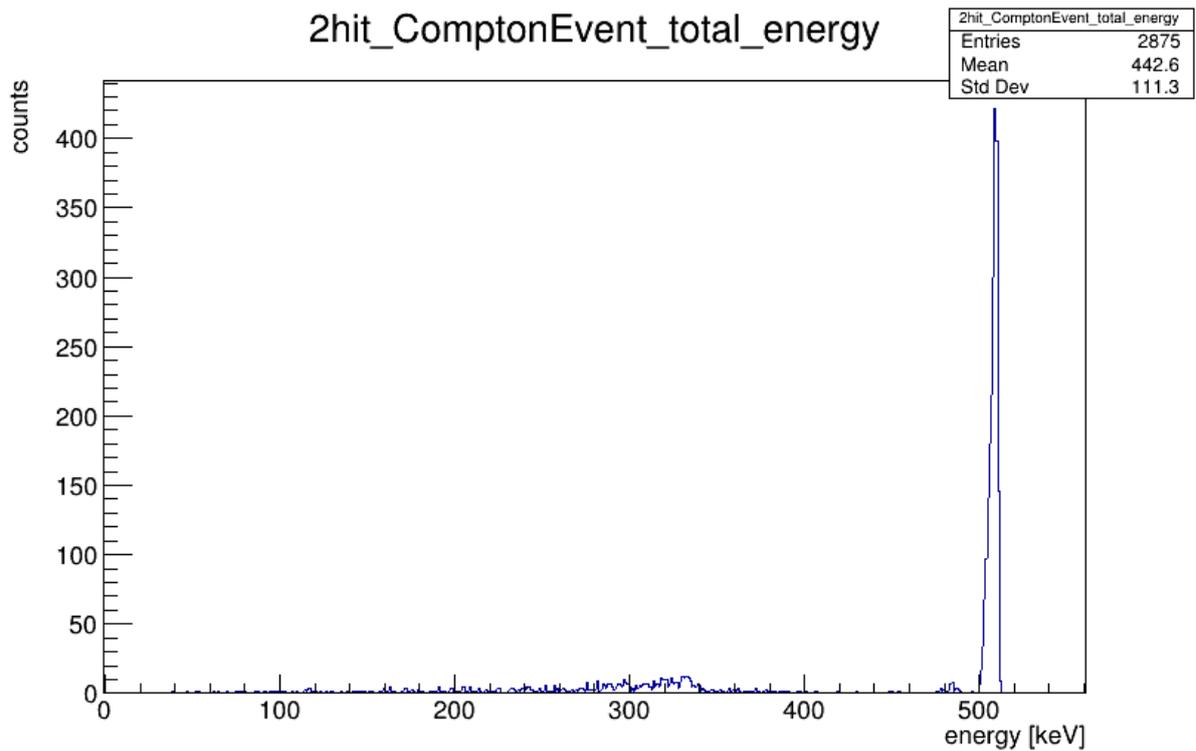


図 3.8: 2 ヒットのコンプトンイベントにおけるエネルギースペクトル ( $a=3, b=3$ )

図 3.6、図 3.7、図 3.8 のそれぞれにおいて、選び出されたイベントの総数に対する、ピーク付近の 490keV から 530keV までの範囲のイベントの個数の割合を計算した結果を表 3.1 に表した。

表 3.1: パラメータ  $a$ 、 $b$  による、ピーク付近のイベントの割合の変化

	$a=1, b=1$	$a=2, b=2$	$a=3, b=3$	$a=4, b=4$
・ 2 ヒットコンプトンイベントとして選び出したイベントの数	1018	1951	2875	3823
・ 選び出したもののうち、490keVより大きく、530keV未満の範囲の個数	720	1386	2029	2689
・ (選び出したもののうち、490keVより大きく、530keV未満の範囲の個数) ÷ (選び出した個数) × 100	70.72692	71.04049	70.57391	70.33743

表 3.1 内の三つの場合においては、 $a=2$ 、 $b=2$  としたときに、2 ヒットのコンプトンイベント以外のイ

ベントの個数の割合が最も少ないことがわかった。

## 第4章 AMEGOの検出器の作成

### 4.1 ジオメトリの作成

Geant4でAMEGOの検出器を作成した。検出器の形、大きさ、種類については、AMEGOチーム [7] から得られた情報をもとにして設定した。なお、読み出しに利用する回路基盤などの部品は除いて作成した。Trackerを構成する元素を、Siとし、密度を  $2.34 \text{ g/cm}^3$  とした。Low-Energy Calorimeterを構成する化合物をCdZnTeとし、密度を  $5.81 \text{ g/cm}^3$  とした。High-Energy Calorimeterを構成する物質をCsIとして、密度を  $4.53 \text{ g/cm}^3$  とした。本来、High-Energy Calorimeterは、CsI(Tl)で構成されているが、Tlの含有量がほんのわずかであることから光子との反応確率は低いためCsIと等価と考え、CsIを使用した。CsI(Tl)の密度は、CsIの密度とほとんど等しいため、CsIを使用した。これらの設定を、表4.1にまとめた。また、検出器の密度を  $\rho$ 、検出器の厚さを  $d$  とすると、反応断面積を  $\sigma$  とすると、透過率  $P$  は、

$$P = \exp(-\rho\sigma d) \quad (4.1)$$

と表せる。この式から、作成した各検出器におけるガンマ線の透過率を求め、図4.1に示した。透過率を求める際には、光電吸収とコンプトン散乱の反応断面積の合計を代入した。したがって、求めた透過率は、光電吸収とコンプトン散乱が起きない確率を表している。各検出器の厚さは、AMEGOチーム [7] から得られた情報である。

表 4.1: 各検出器の物質の設定

	Tracker	Low-Energy Calorimeter	High-Energy Calorimeter
構成する元素・化合物	Si	CdZnTe	CsI
密度 [ $\text{g/cm}^3$ ]	2.34	5.81	4.53
厚さ [ cm ]	3	4	9
化学組成	Si : 1	Cd : 0.45 Zn : 0.05 Te : 0.5	Cs : 0.5 I : 0.5

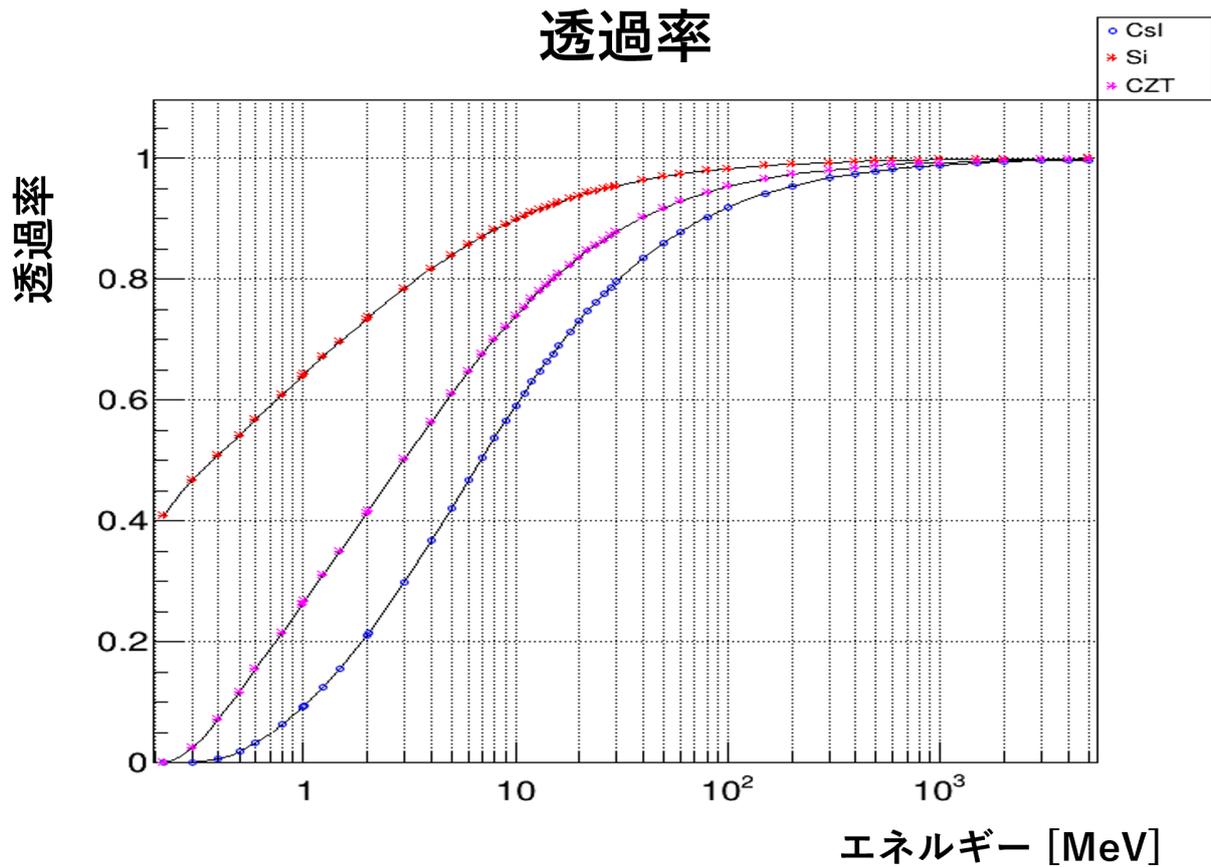


図 4.1: 各検出器におけるガンマ線の透過率

以下で、Tracker、Low-Energy Calorimeter、High-Energy Calorimeter の形や大きさ、配置の設定について簡単に説明する。なお、AMEGO を配置する空間での xyz 座標を図の中に表した。

#### 4.1.1 Tracker の作成

1. 一枚のシリコン半導体検出器を、厚さ 0.5 mm、大きさ  $95 \times 95 \text{ mm}^2$  となるように設定した。
2. シリコン半導体検出器を隙間なく  $4 \times 4$  のタイル状に並べた (図 4.3)。
3. 30 mm の間隔を開けながら  $2 \times 2$  のタイル状に並べた。
4. 1 層分の Tracker モジュールを縦方向に 10 mm の間隔を空けながら 60 枚重ねた (図 4.4, 図 4.5)。実際に Geant4 で作成した検出器のモデルを図 4.7 に示す。

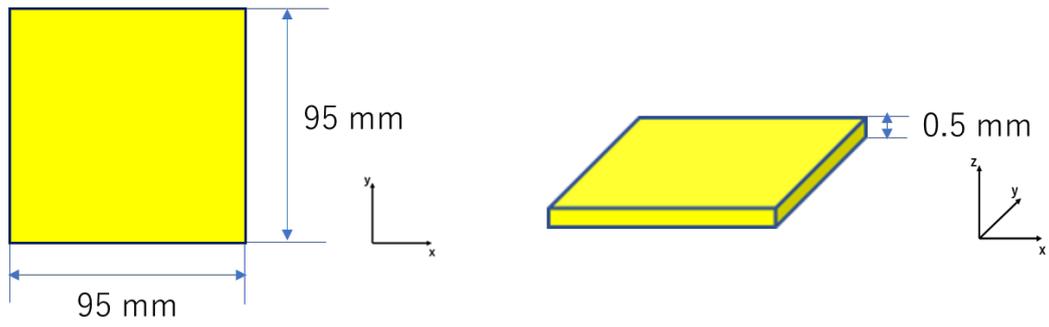


図 4.2: 1 枚のシリコン半導体検出器

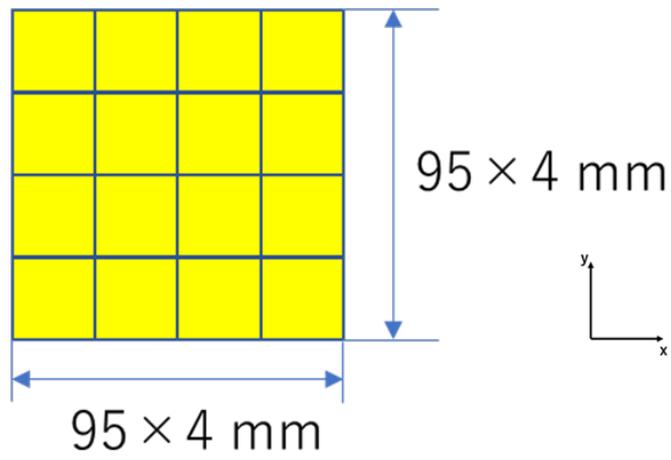


図 4.3: 図 4.2 を 16 枚用いた。

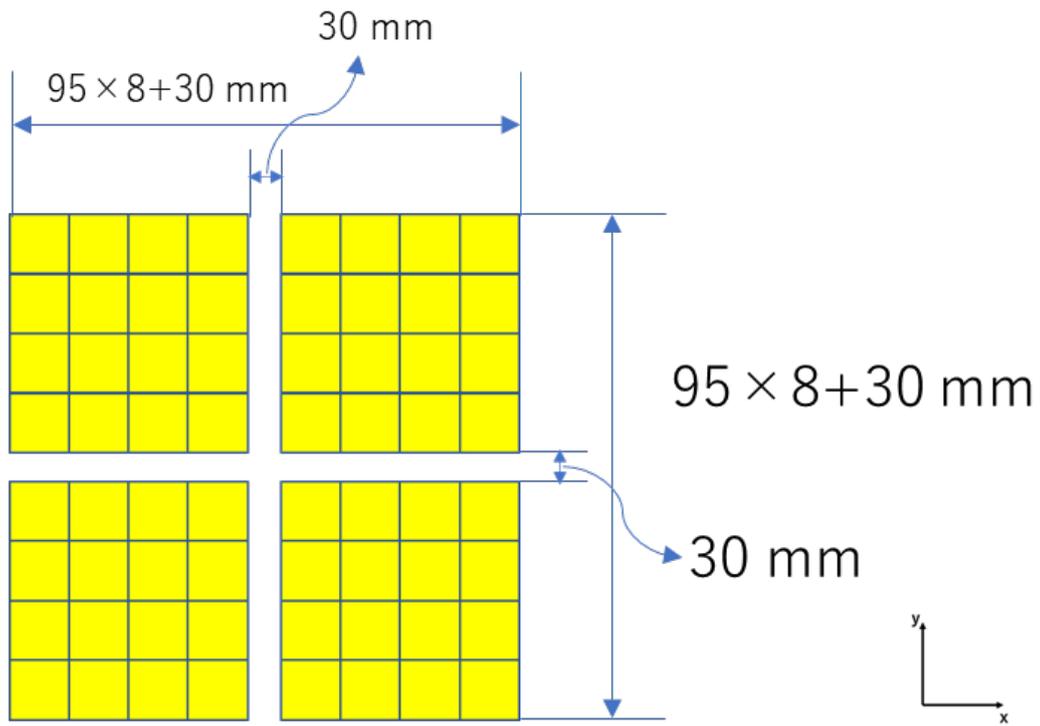


図 4.4: 図 4.3 を 4 枚用いた。

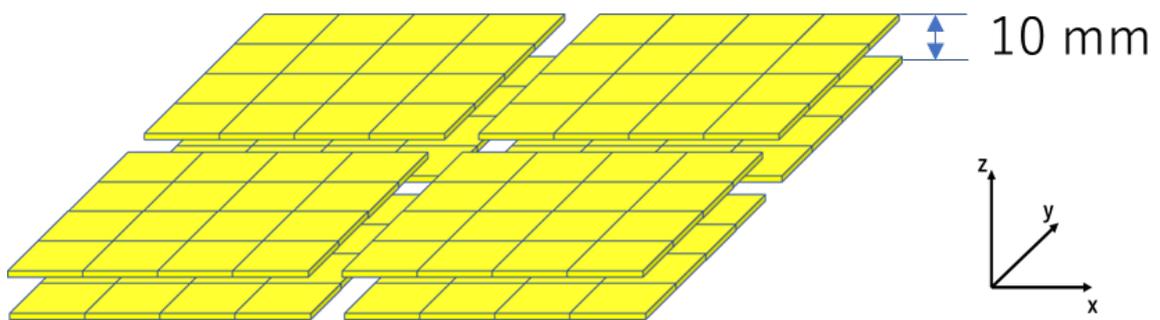


図 4.5: 図 4.4 を 10mm の間隔を空けて重ねた。

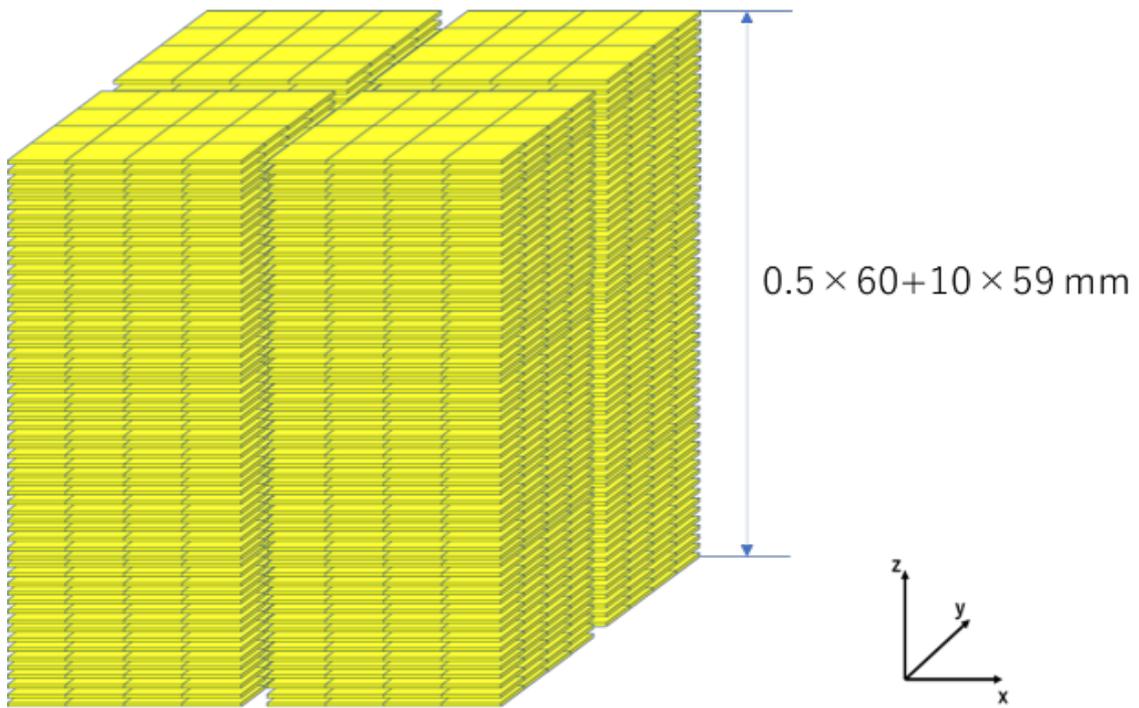


図 4.6: 図 4.4 を 60 枚重ねた。

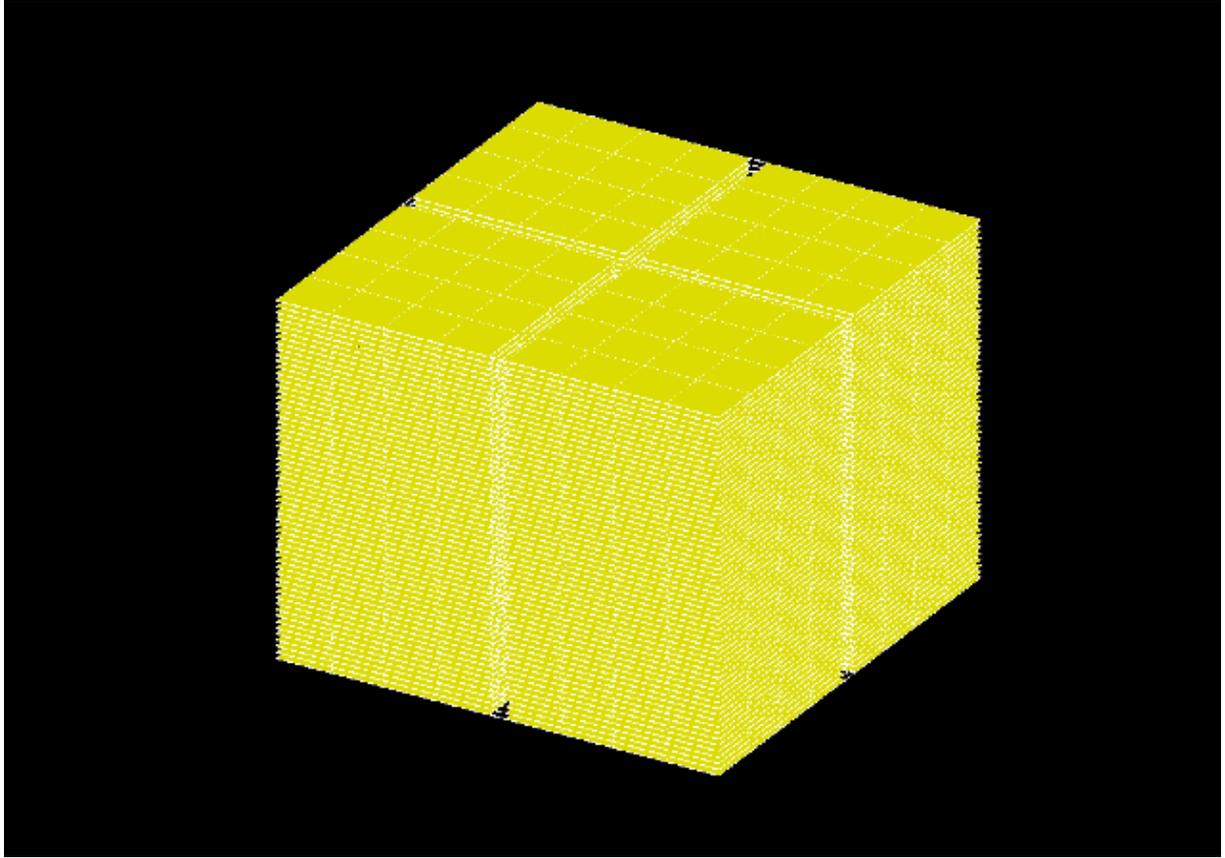


図 4.7: Geant4 で作成した Tracker

#### 4.1.2 Low-Energy Calorimeter の作成

1. 1 個の CZT 半導体検出器を厚さ 40 mm、大きさ  $8 \times 8 \text{ mm}^2$  となるように設定した (図 4.8)。
2. 16 個の CZT 半導体検出器を隙間なく  $4 \times 4$  で詰めたものを 1 つのモジュールとした (図 4.9)。
3. 50 個の CZT 半導体検出器のモジュールを  $xy$  平面と  $yz$  平面にそれぞれ  $5 \times 10$  のタイル状に配置した (図 4.10, 図 4.11)。また、40 個の CZT 半導体検出器のモジュールを  $xz$  平面に  $5 \times 8$  のタイル状に配置した (図 4.12)。
4. 3 で  $xy$  平面に作成した 50 個のモジュール 2 組を隣り合うように配置したもの (図 4.13) を、 $2 \times 2$  のタイル状に配置した (図 4.14)。

5. 3で  $yz$  平面に配置した 50 個のモジュールを 4 組と  $xz$  平面に配置した 40 個のモジュールを 4 組を、4 で作成した 400 個のモジュールの上に配置する Tracker を覆う様に配置した (図 4.15)。図 4.15 を  $x$  軸方向正の方向から見た図と、 $y$  軸負の方向から見た図を図 4.16 に示した。実際に Geant4 で作成した検出器のモデルを図 4.17 に示す。

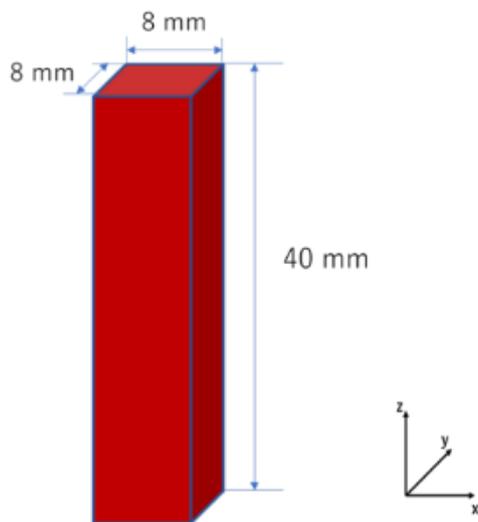


図 4.8: 1 個の CZT 半導体検出器

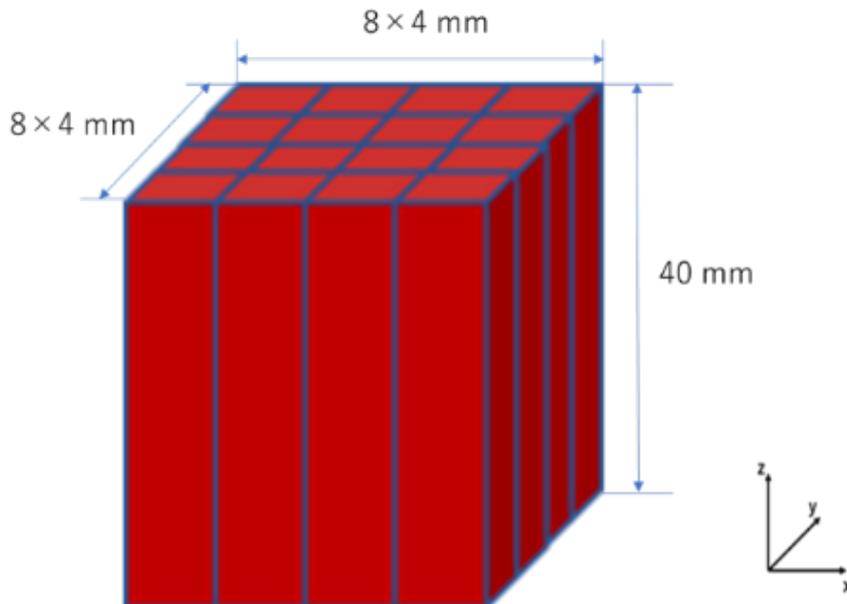


図 4.9: 16 個の CZT 半導体検出器

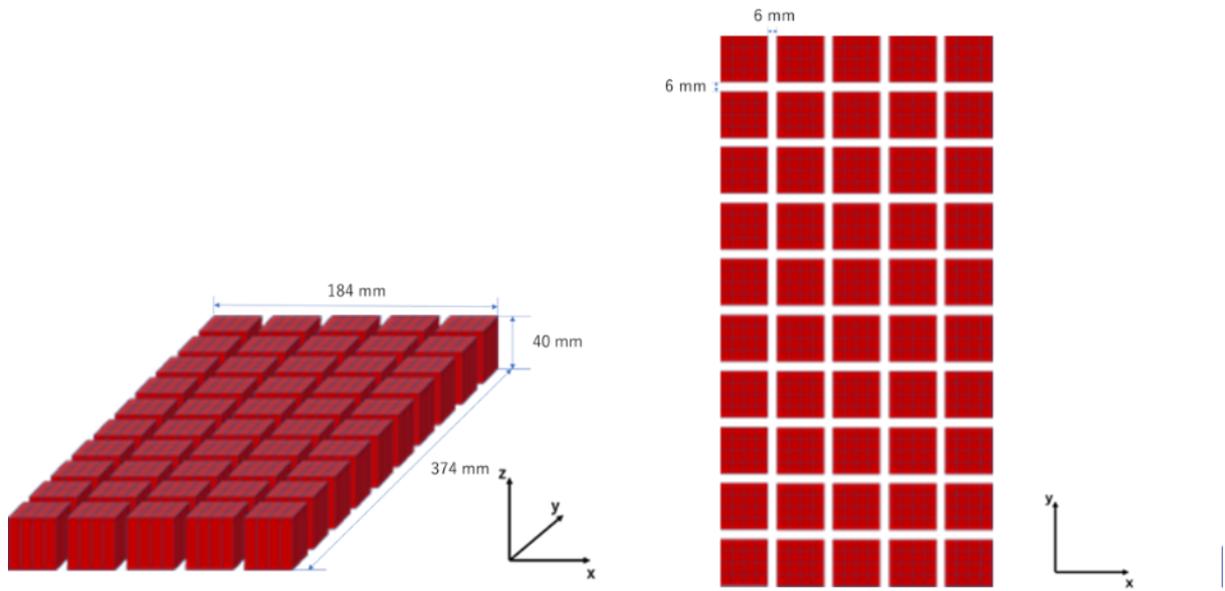


図 4.10: 50 個の図 4.9 を並べた。

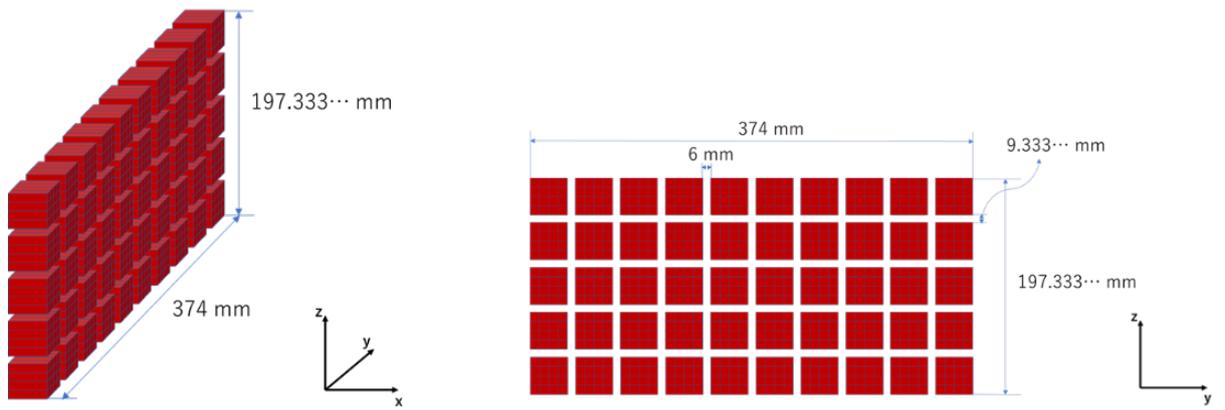


図 4.11: 50 個の図 4.9 を並べた。

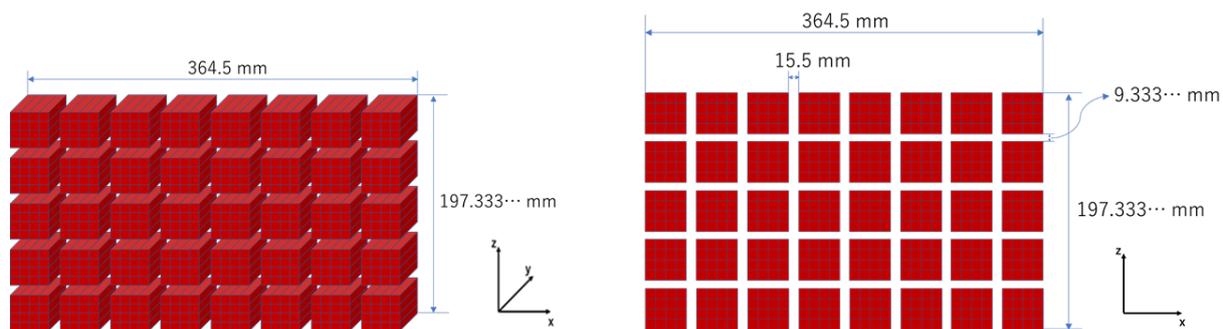


図 4.12: 40 個の図 4.9 を並べた

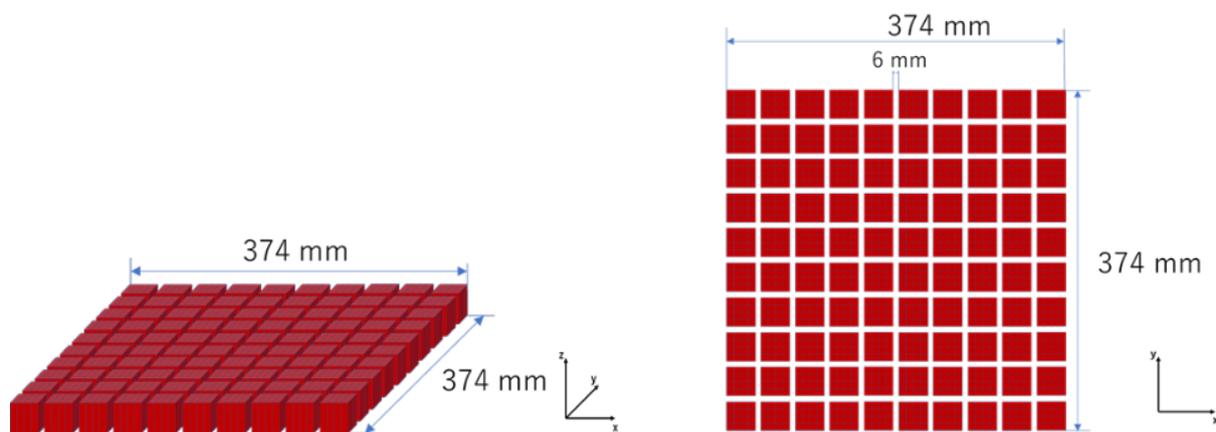


図 4.13: 2 個の図 4.10 を並べた。

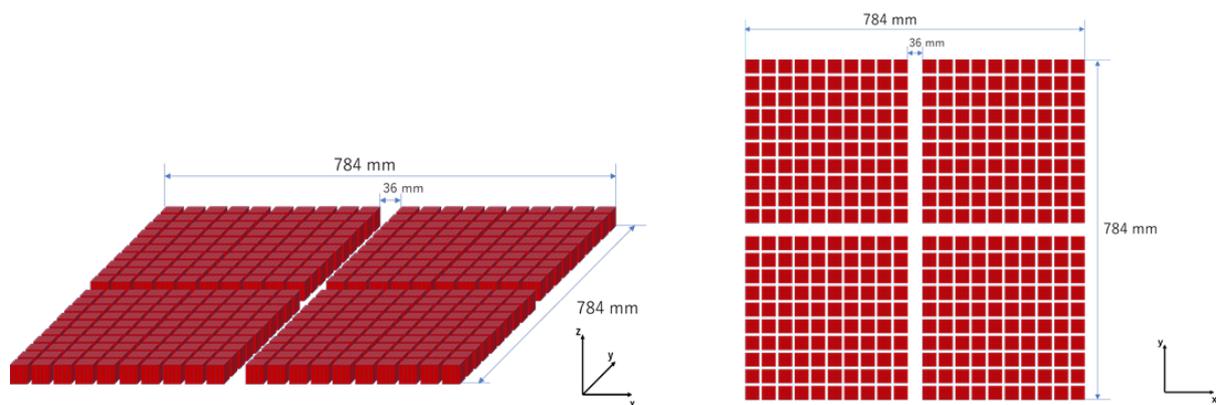


図 4.14: 図 4.13 を 4 個用いた。

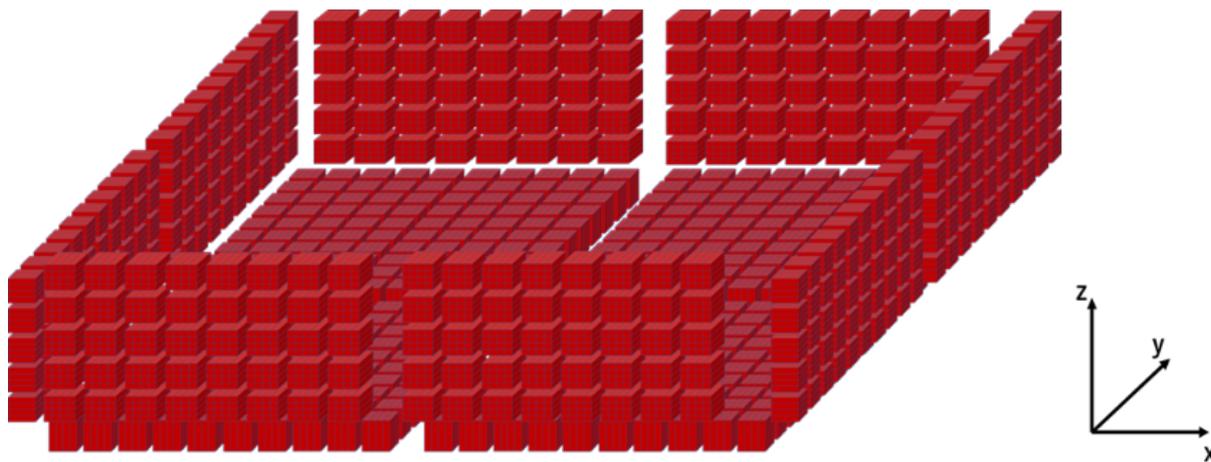


図 4.15: 4 個の図 4.11、4 個の図 4.12、1 個の図 4.14 を用いた。



図 4.16: 上図が図 4.15 を y 軸負の方向から見た図。下図が図 4.15 を x 軸正の方向から見た図。

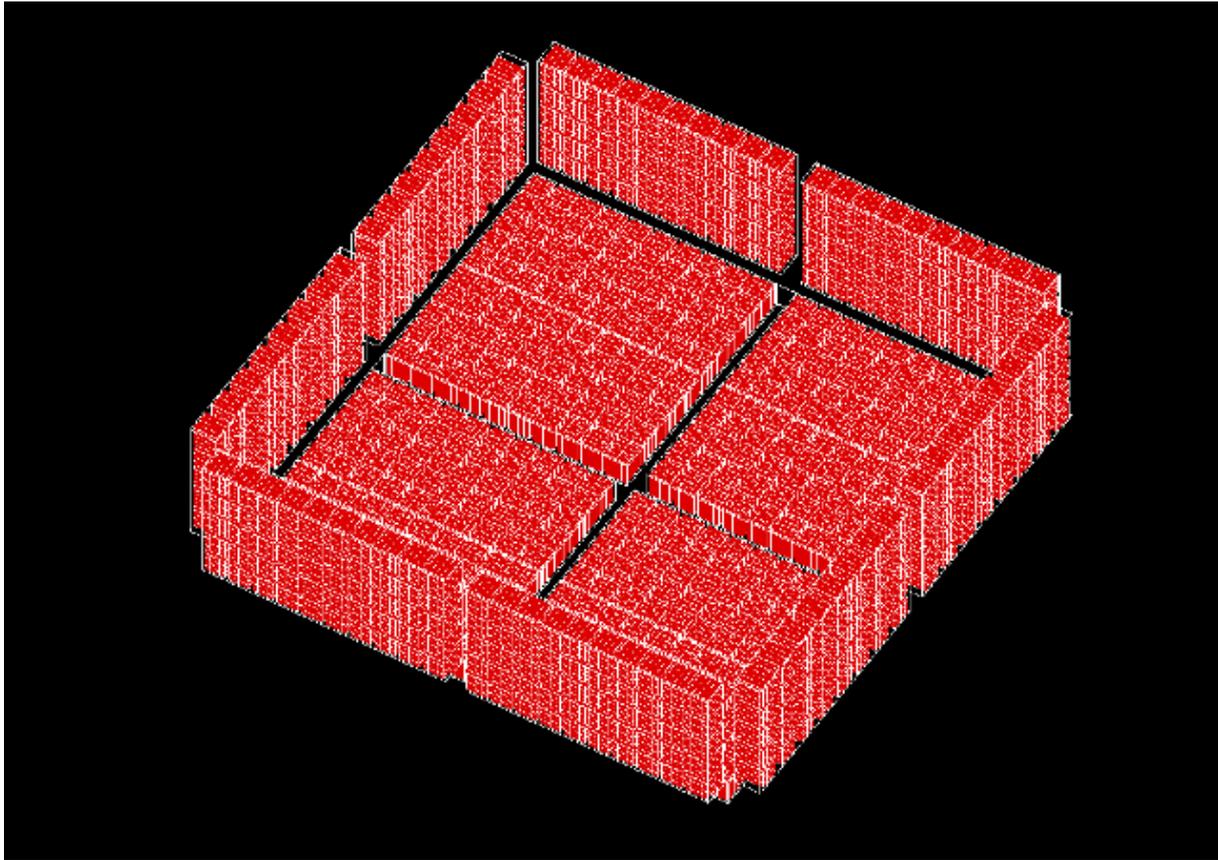


図 4.17: Geant4 で作成した Low-Energy Calorimeter

### 4.1.3 High-Energy Calorimeter の作成

1. 1 個の CsI シンチレーターを厚さが 15 mm、大きさが  $380 \times 15 \text{ mm}^2$  となるように設定した (図 4.18)。
2. 26 個の CsI シンチレーターを xy 平面上で隣り合う様に配置した (図 4.19)。
3. 2 で作成した 26 個の CsI シンチレーターを 4 組用いて、xy 平面上にタイル状に配置する (図 4.20)。
4. 3 でタイル状に並べたものを 1 mm の間隔を空けながら 6 層重ねた (図 4.21)。実際に Geant4 で作成した検出器のモデルを図 4.22 に示す。

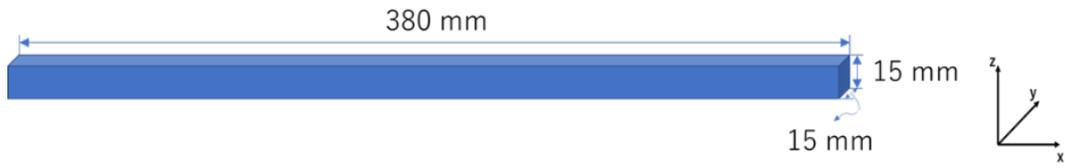


図 4.18: 1 個の CsI シンチレータ

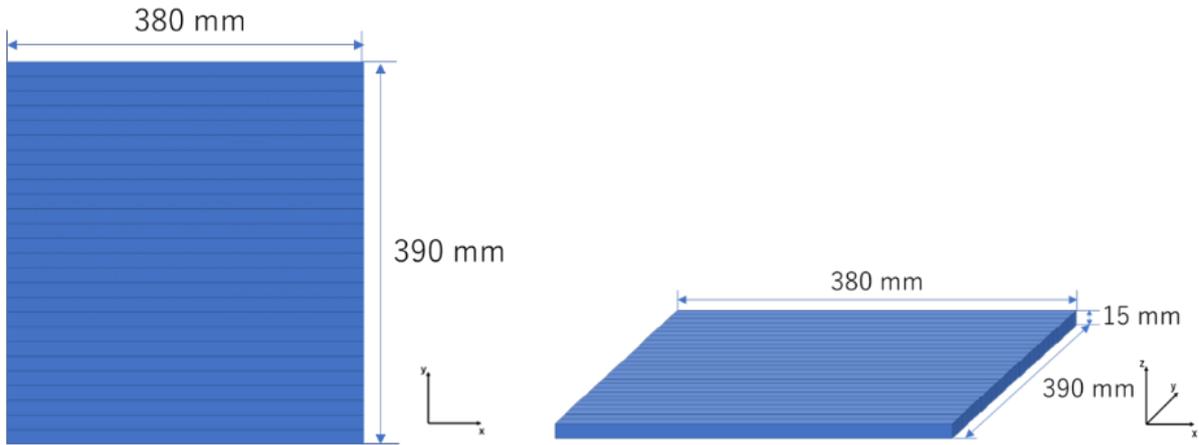


図 4.19: 26 個の CsI シンチレータ

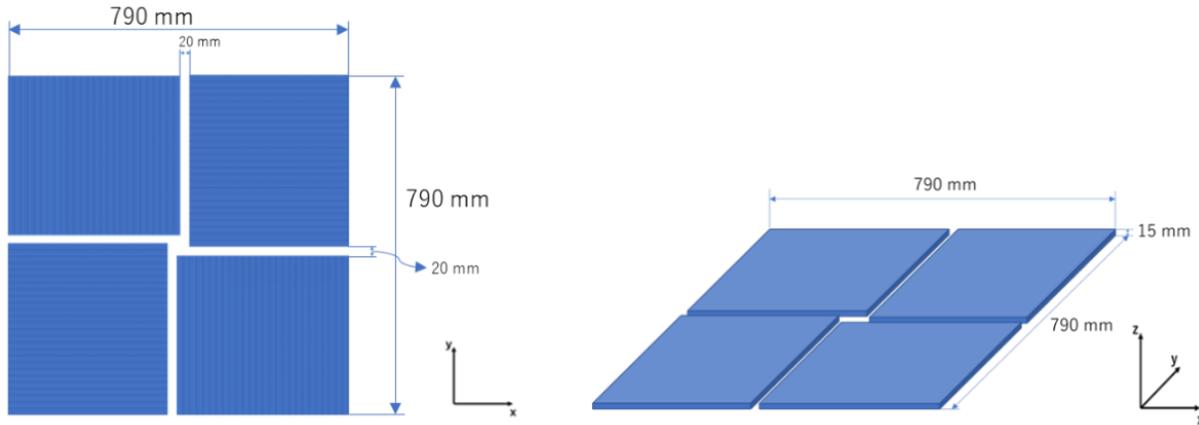


図 4.20: 図 4.19 を 4 枚用いた。

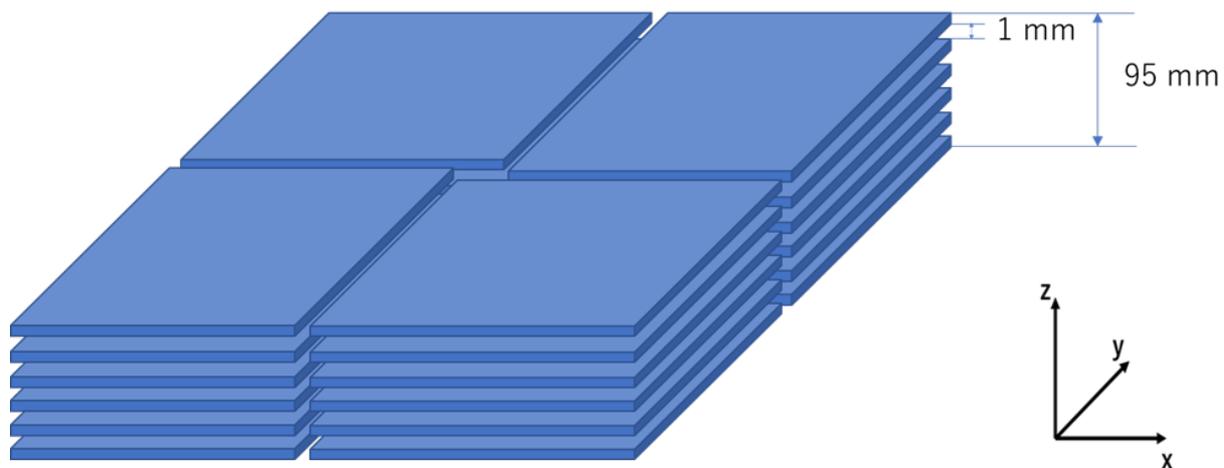


図 4.21: 図 4.20 を 6 枚並べた。

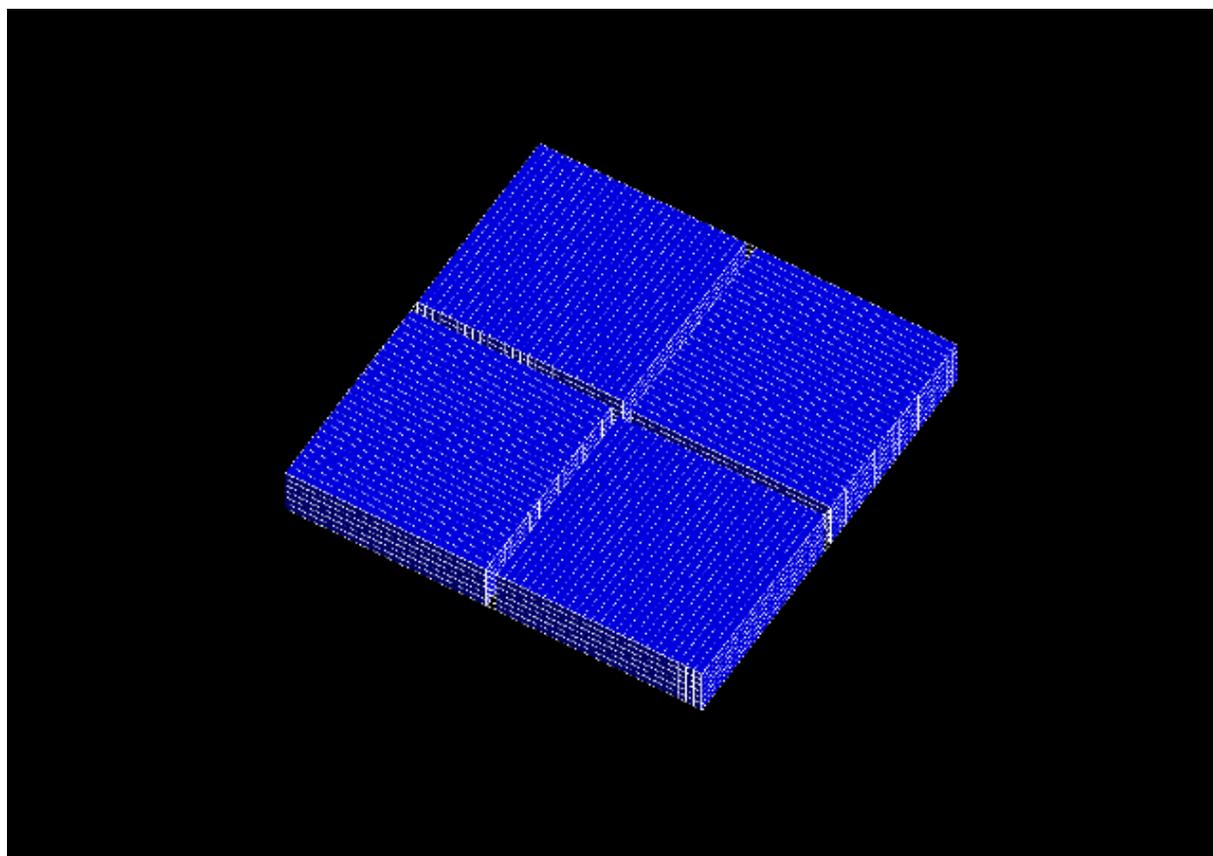


図 4.22: Geant4 で作成した High-Energy Calorimeter

#### 4.1.4 AMEGO における各検出器の配置

完成した3つの検出器をそれぞれz軸正の方向から見たときに、図4.23に表したそれぞれの検出器におけるxy座標の原点(図中の黒い点)が重なり、上もしくは下の検出器との間隔が10mmとなるように設置した。この設定をGeant4に与えることで、図4.24のAMEGOの検出器を作ることができた。

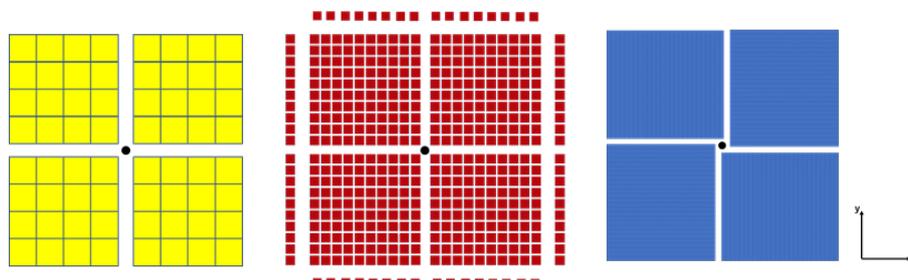


図 4.23: 各検出器を z 軸正の方向から見た図。黒い点は、各検出器の xy 座標における原点を表している。

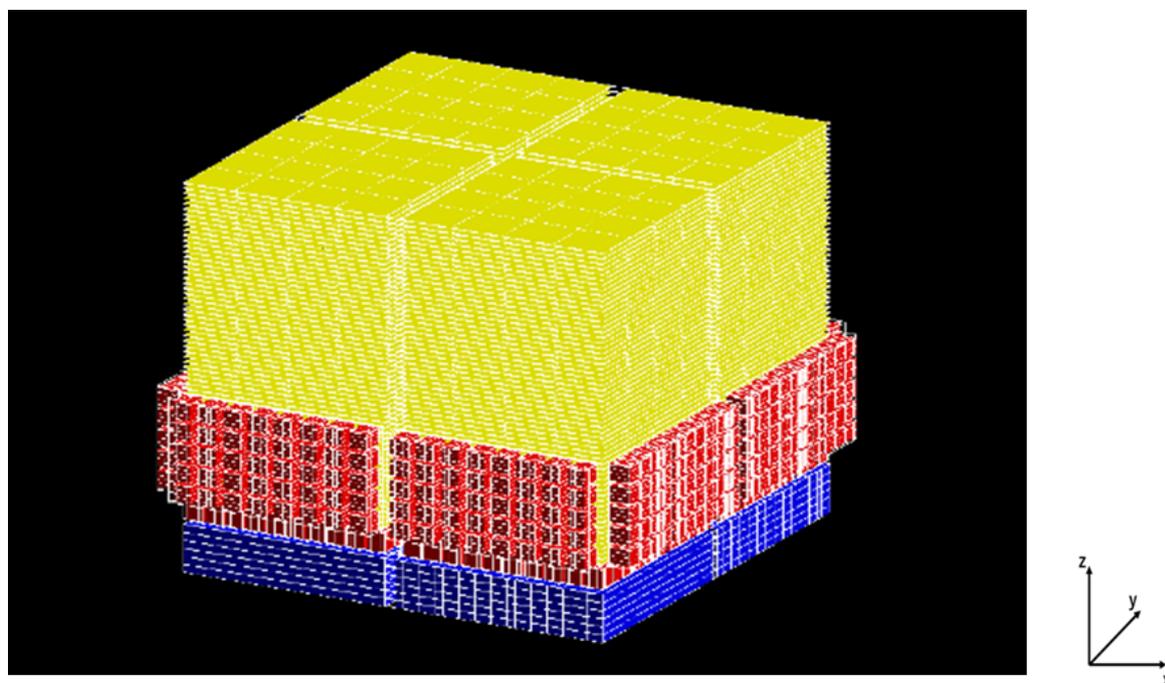


図 4.24: Geant4 で作成した AMEGO の検出器

## 4.2 検出器およびその電極のパラメータ設定

先述のとおり、Geant4 で作成した AMEGO の検出器の物体の構造や大きさに対応した読み出し口の設定を ComptonSoft を用いて行う必要がある。シリコン半導体検出器、CZT 半導体検出器、CsI シンチレーターの読み出し口の設定を行う。読み出し口の設定は XML 形式で記述することで Geant4 シミュレーション及

び ComptonSoft シミュレーションに適用される。ComptonSoft では、Geant4 で作成した図 4.24 のジオメトリ内の各検出器に 8 桁の ID を付ける。そして、各検出器に対応した ID を指定して読み出し口の設定を行う。主なパラメータについての説明を表 4.2 にまとめた。

表 4.2: 主なパラメータの説明

パラメータの種類	内容
・ type	読み出し口の種類
・ trigger_discrimination	エネルギーのトリガーのガウス分布における $\sigma$ の値と中心の値を設定する。
・ noise_level	エネルギー分解能を表した以下の式の
・ threshold	エネルギーのしきい値を設定する。
・ efield	半導体検出器にかかる電圧を設定する。
・ charge_collection	移動度の値を設定する。

#### 4.2.1 シリコン半導体検出器

シリコン半導体検出器は、図 2.4 のように読み出し口を設定した。表面は x 方向に 190 チャンネルあり、裏面は y 方向に 190 チャンネルある。

また、ComptonSoft において、読み出し口のパラメータを表 4.3 のように設定した。

表 4.3: シリコン半導体検出器の読み出し口のパラメータ

	シリコン半導体検出器
• type	2DStrip
• trigger_discrimination	center="14", sigma="3.55"
• noise_level	param0="0.8", param1="0.019", param2="0.0"
• threshold	value="10.0"
• upside	anode="1", xstrip="1"
• temperature	value="255.0"
• efield	bias="230.0", mode="1"
• charge_collection	mode="0",
• diffusion	mode="1"
spread_factor	cathode="1.0", anode="1.0"
• timing_resolution	trigger="3.0e-7", energy_measurement="1.0e-6"
• pedestal_generation	flag="1"
• channel_properties	side="anode"
disable	status="0"
compensation	factor="1.0"
• channel_properties	side="cathode"
disable	status="0"
compensation	factor="1.0"
• reconstruction	mode="1"

また、これらの設定をするにあたって、Tracker 内のシリコン半導体検出器の ID を、図 4.25 と図 4.26 のように付けた。

# Tracker

(detector ID : 0 ~ 590315)

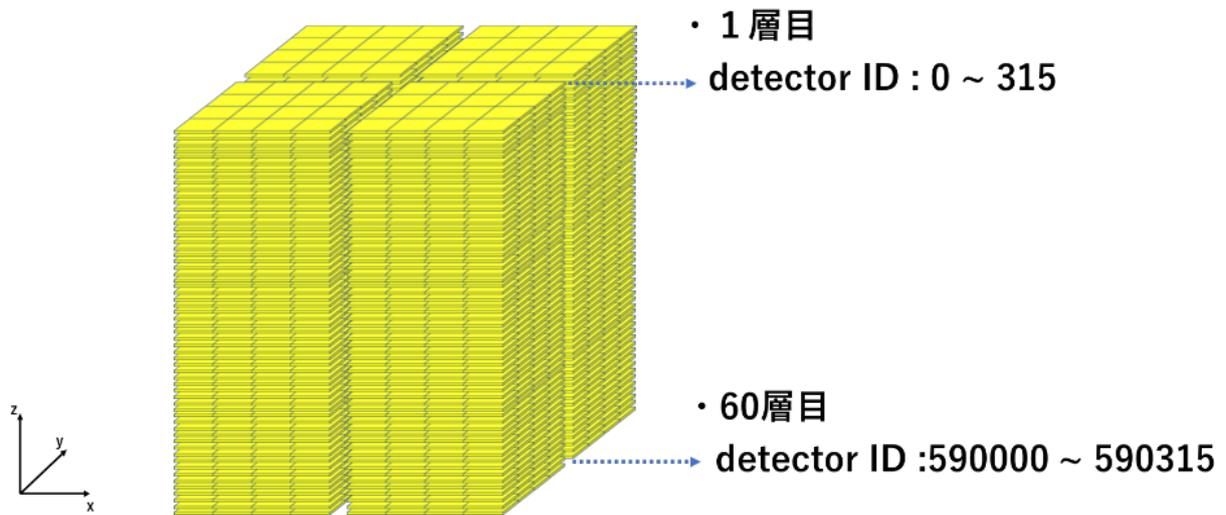


図 4.25: シリコン半導体検出器の detector ID

## Trackerの1層目

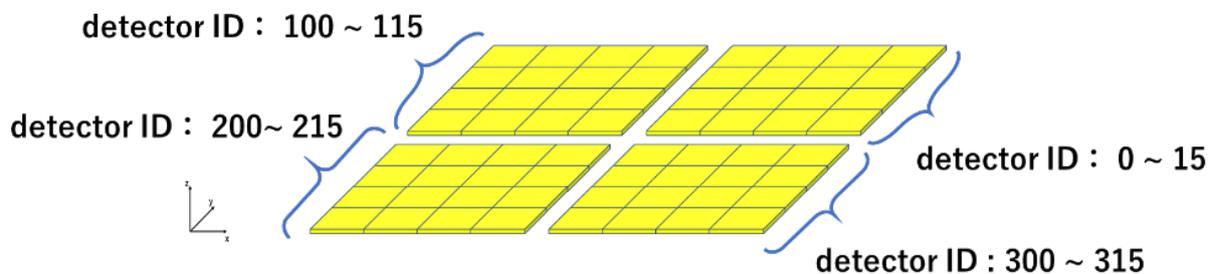


図 4.26: Tracker の一層目のシリコン半導体検出器の detector ID

Tracker 内のシリコン半導体検出器の ID を決める際に、Layer、Section、Element を定義した。Tracker は 60 枚の Layer からなり、各 Layer は 4 個の Section からなり、各 Section は 16 個の Element からなるとした (図 4.27)。このとき、detector ID は

$$[\text{detector ID}] = [\text{Tracker ID}(=0)] \times 10000000 + [\text{Layer ID}] \times 10000 + [\text{Section ID}] \times 100 + [\text{Element ID}] \quad (4.2)$$

と表せる。つまり、detector ID が与えられれば、どの検出器であるか特定できる。

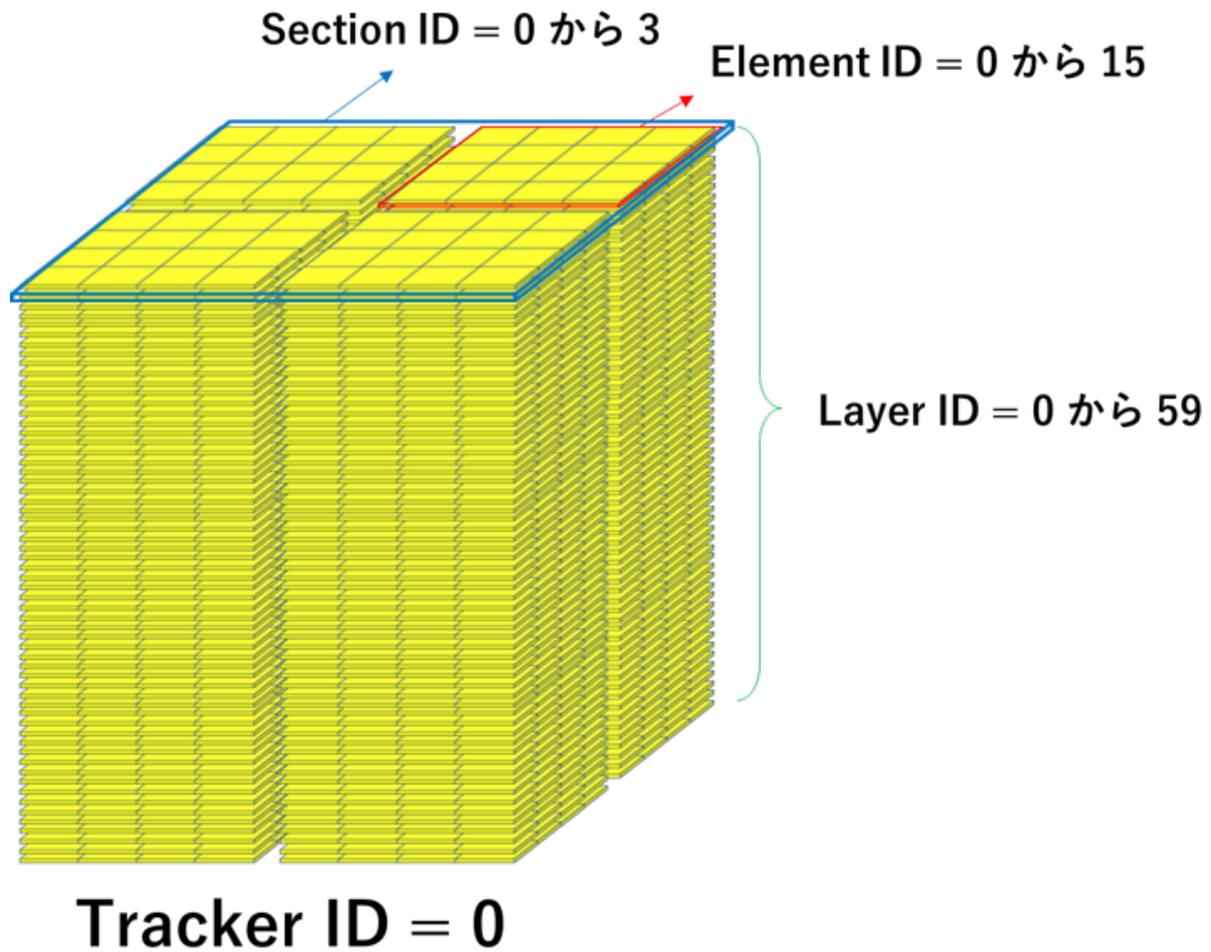


図 4.27: Tracker の detector ID の決める際の各 ID

#### 4.2.2 CZT 半導体検出器

AMEGO の CZT 半導体検出器には、カソードが 1 チャンネル、アノードが 5 チャンネルあり、合計 6 チャンネルの読み出し口が付いている。しかし、ComptonSoft では検出器側面に読み出しがついているような構成を扱うことができない。そのため、本研究においては、図 4.28 のように、上の面にカソードが 1 チャンネルあり、下の面にアノードが 1 チャンネルある設定を行った。この場合、1 つの CZT 半導体検出器に対して、合計 2 チャンネルの読み出し口が付いている。

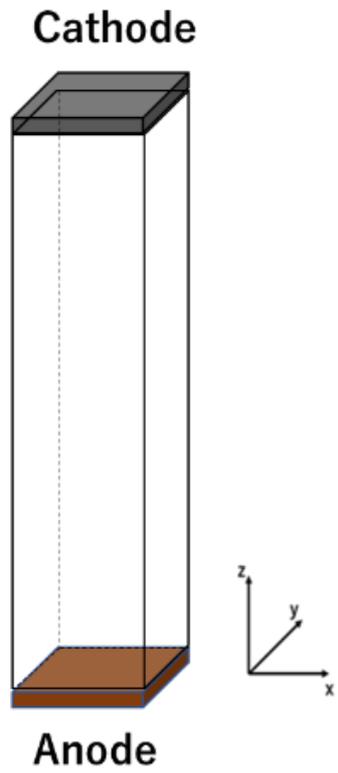


図 4.28: 本研究における、CZT 半導体検出器の読み出し口

また、ComptonSoft において読み出し口のパラメータを表 4.4 のように設定した。

表 4.4: CZT 半導体検出器の読み出し口のパラメータ

	CZT半導体検出器
• type	2DStrip
• trigger_discrimination	center="14", sigma="3.55"
• noise_level	param0="0.8", param1="0.019", param2="0.0"
• threshold	value="10.0"
• upside	anode="0", xstrip="1"
• temperature	value="255.0"
• efield	bias="4000.0", mode="1"
• charge_collection	mode="1",
mutau	electron="1.0e-3", hole="3.0e-5"
• diffusion	mode="1"
spread_factor	cathode="2.0", anode="1.5"
• channel_properties	side="anode"
disable	status="0"
compensation	factor="1.0"
• channel_properties	side="cathode"
disable	status="0"
compensation	factor="1.0"
• reconstruction	mode="1"

また、CZT 半導体検出器の ID を、図 4.29 と図 4.30 のように付けた。

# Low-Energy Calorimeter (detector ID : 10100000 ~ 17333915)

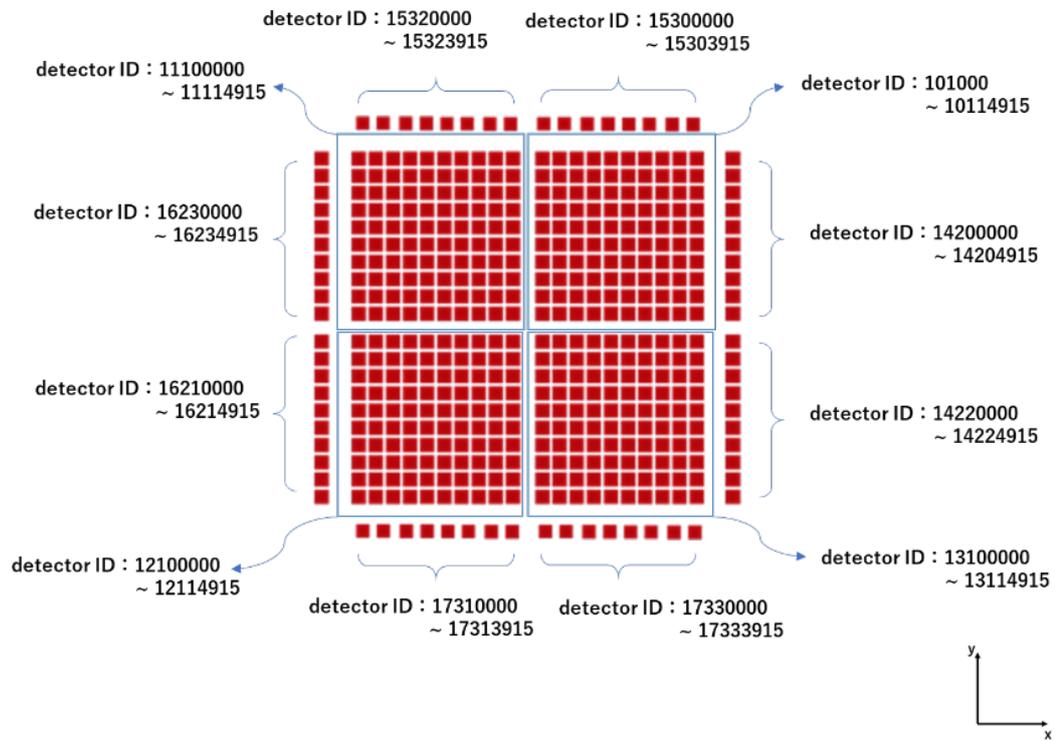


図 4.29: CZT 半導体検出器の detector ID

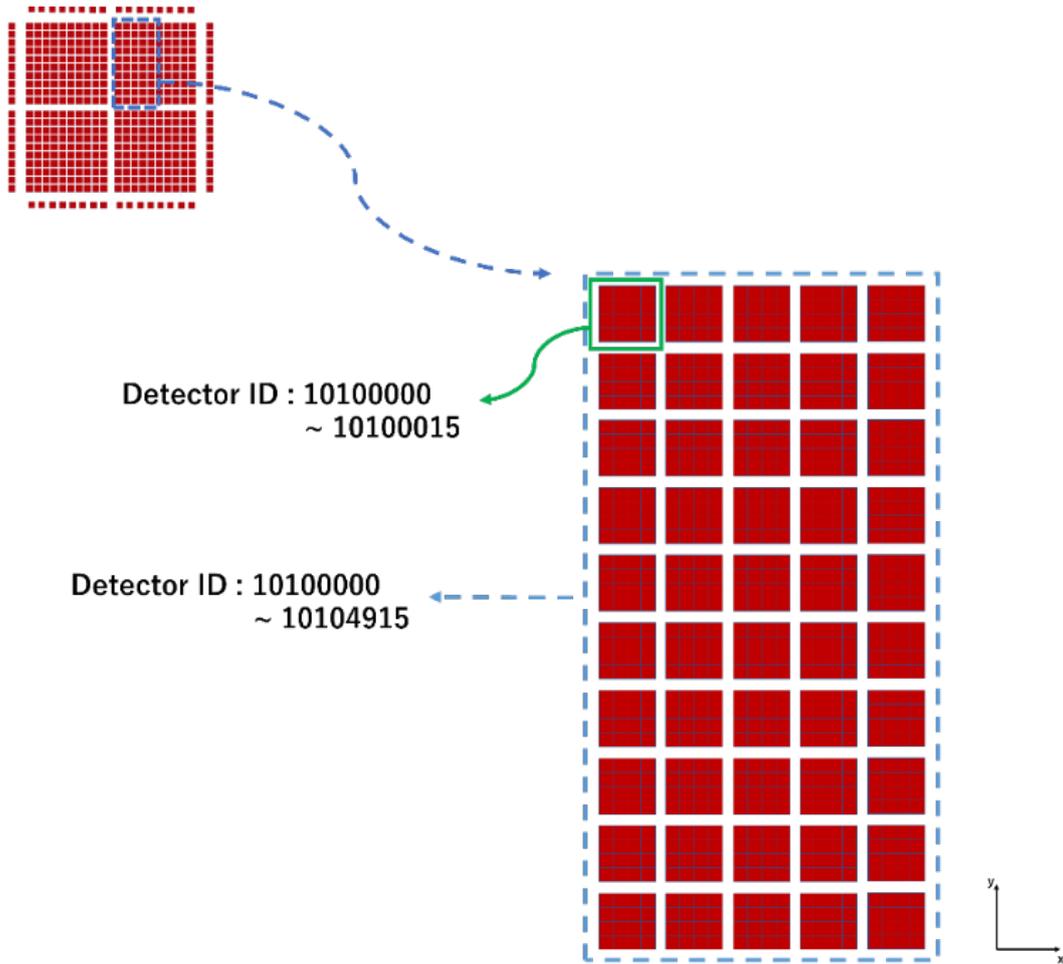
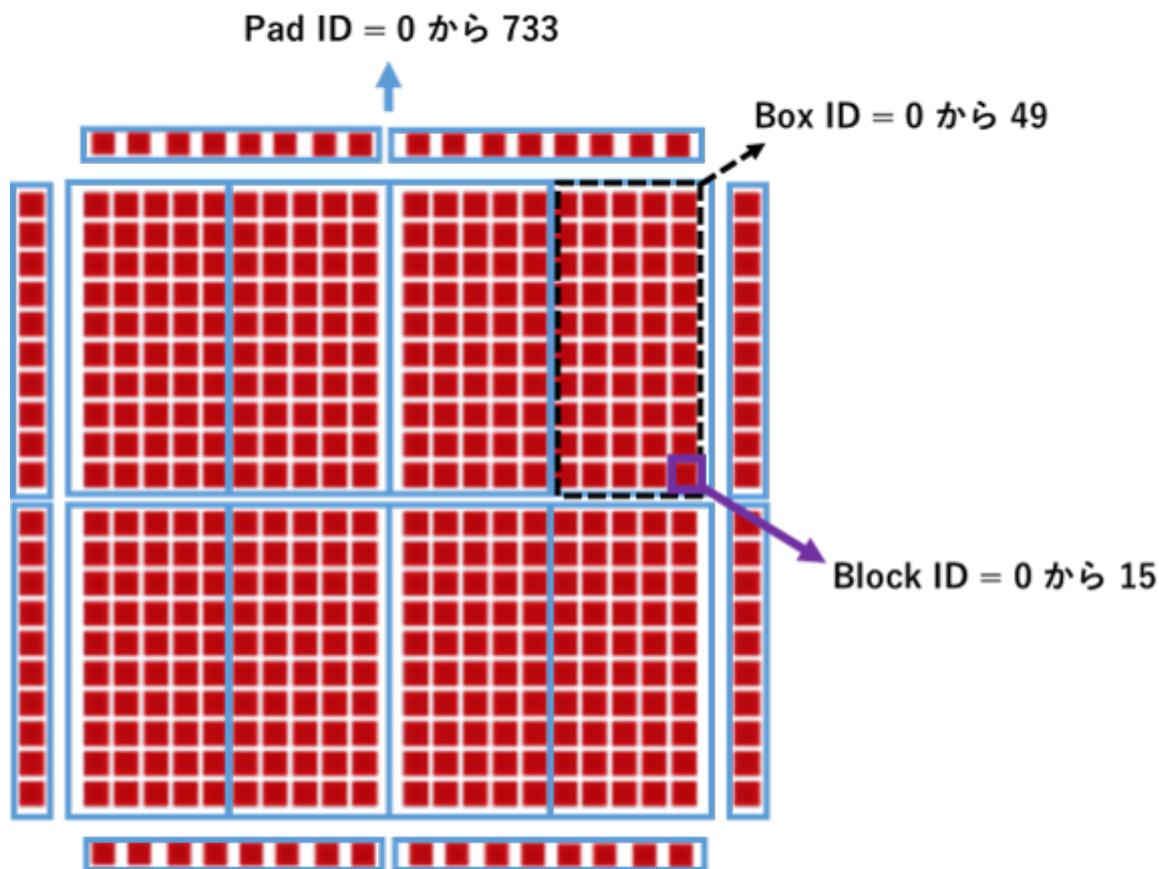


図 4.30: CZT 半導体検出器の detector ID

Low-Energy Calorimeter 内の CZT 半導体検出器の ID を決める際に、Pad、Box、Block を定義した。Low-Energy Calorimeter は 16 枚の Pad からなり、各 Pad は 50 個もしくは 40 個の Box からなり、各 Box は 16 個の Block からなるとした(図 4.31)。このとき、detector ID は

$$[\text{detector ID}] = [\text{Low - EnergyCalorimeter ID}(= 1)] \times 10000000 + [\text{Pad ID}] \times 10000 + [\text{Box ID}] \times 100 + [\text{Block ID}] \quad (4.3)$$

と表せる。つまり、detector ID が与えられれば、どの検出器であるか特定できる。



## Low-energy Calorimeter ID = 1

図 4.31: Low-Energy Calorimeter の detector ID の決める際の各 ID

### 4.2.3 CsI シンチレーター

AMEGO の CsI シンチレーターには、先述のとおり、両端に 1 つずつ SiPM が付き、合計 2 チャンネルの読み出し口が付いている。しかし、ComptonSoft ではシンチレータの両側面に読み出しがついているような構成を扱うことができない。そのため、CsI シンチレーターには、図 4.32 のように片方の側面に SiPM を付け、読み出し口が合計 1 チャンネルとなるように設定した。また、SiPM が検出器の外側を向くように CsI シンチレーターを配置した。

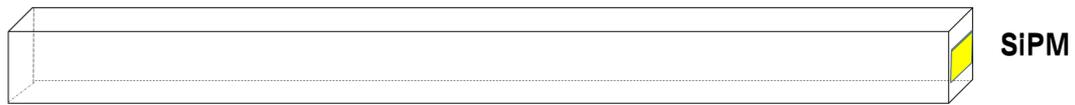


図 4.32: CsI(Tl) シンチレータの読み出し口

また、ComptonSoft において、読み出し口のパラメータを表 4.5 のように設定した。

表 4.5: CsI(Tl) シンチレータの読み出し口のパラメータ

	CsIシンチレータ
• type	Scintillator
• noise_level	param0="3.56", param1="1.63", param2="0.0"
• threshold	value="139.6"
• reconstruction	mode="1"

また、CsI(Tl) シンチレータの ID は、図 4.33 と図 4.34 のように定めた。

## High-Energy Calorimeter

(detector ID : 20001000 ~ 20052125)

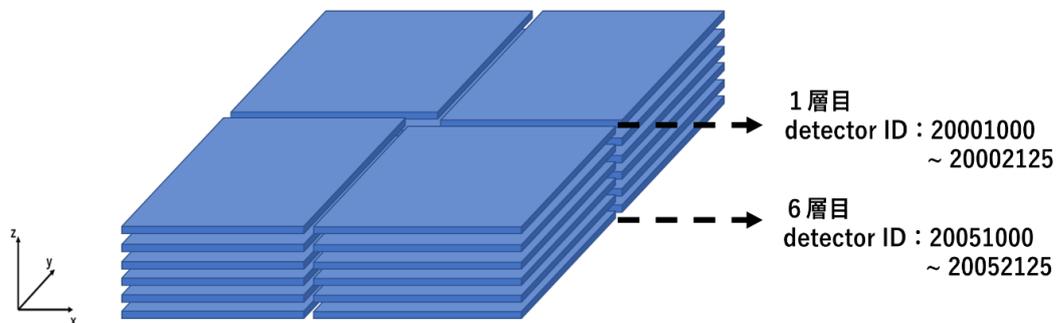


図 4.33: CsI(Tl) シンチレータの detector ID

## High-Energy Calorimeterの1層目

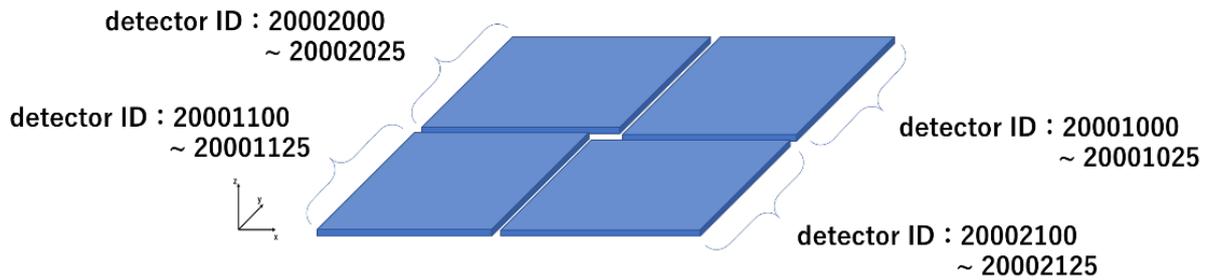
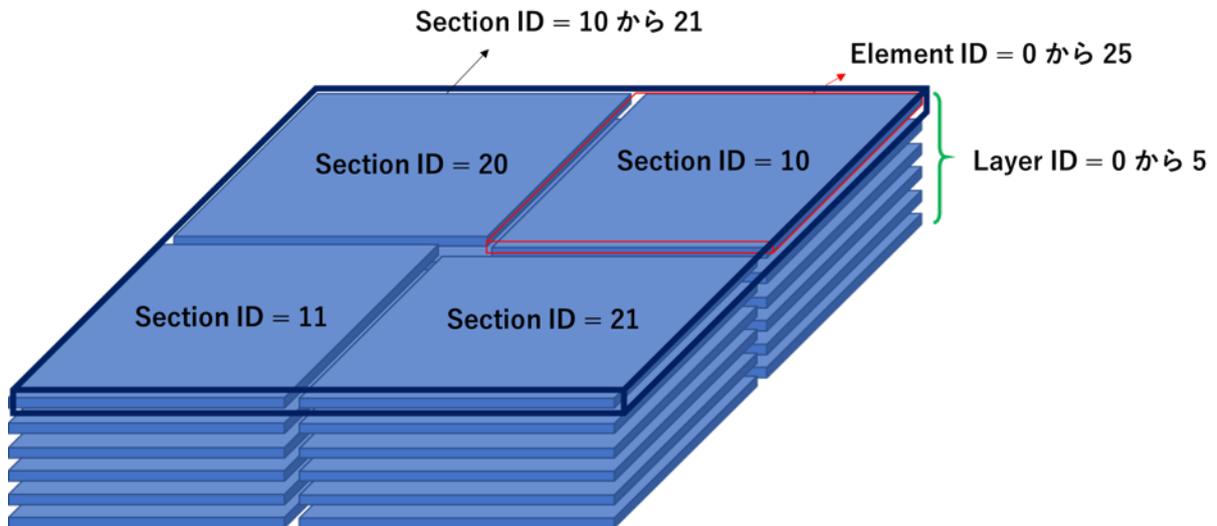


図 4.34: CsI(Tl) シンチレーターの detector ID

High-Energy Calorimeter 内のシリコン半導体検出器の ID を決める際に、Layer、Section、Element を定義した。High-Energy Calorimeter は 6 枚の Layer からなり、各 Layer は 4 個の Section からなり、各 Section は 26 個の Element からなるとした (図 4.35)。このとき、detector ID は

$$[\text{detector ID}] = [\text{High - Energy Calorimeter ID}(=2)] \times 10000000 + [\text{Layer ID}] \times 10000 + [\text{Section ID}] \times 100 + [\text{Element ID}] \quad (4.4)$$

と表せる。つまり、detector ID が与えられれば、どの検出器であるか特定できる。



## High-energy Calorimeter ID = 2

図 4.35: High-Energy Calorimeter の detector ID の決める際の各 ID

### 4.3 検出器の検証

前節で設定した読み出し口の位置情報が正しく設定されているかどうか検証する。任意の位置にある1つの検出器を指定し、その位置の範囲にのみに光子を放射し、指定した検出器から光子が入射情報が得られれば正しく設定されているとみなし、他の検出器においても同様に設定できているとみなす。作成した Tracker、Low-Energy Calorimeter、High-Energy Calorimeter のそれぞれから検出器を一個ずつ取り出し、ガンマ線観測をすることで、検出器に正しい位置情報が付与されているかを確認する。

まず、Tracker から detector ID が 10101 の検出器を取り出し、30keV のガンマ線光子を検出器正面の z 軸正の方向から検出器の面に対して一様に 1 万個照射した。このシミュレーションの結果を図 4.36、図 4.37、図 4.38 に示した。図 4.36 は、検出器の中で、実際に反応した位置の数分布を示している。実際に反応した位置の位置ベクトルを (real\_posx,real\_posy,real\_posz) としており、各要素の単位は cm である。図 4.36 中の上の図は、real\_posx と real\_posy の二次元ヒストグラムであり、下の図は、real\_posz の一次元ヒストグラムである。また、図 4.37 に、検出器が取得したガンマ線光子の反応位置の数分布を表した。検出器が取得した位置の位置ベクトルを (posx,posy,posz) としており、各要素の単位は cm である。図 4.37 中の上の図は、posx と posy の二次元ヒストグラムであり、下の図は、posz の一次元ヒストグラムである。なお、posx、posy においては、読み出し口の幅の 0.05 cm をビンの幅としている。また、posz は検出器の z 方向の長さの 0.05 cm をビンの幅としている。図 4.38 は、検出器が読み出したエネルギースペクトルを示した。

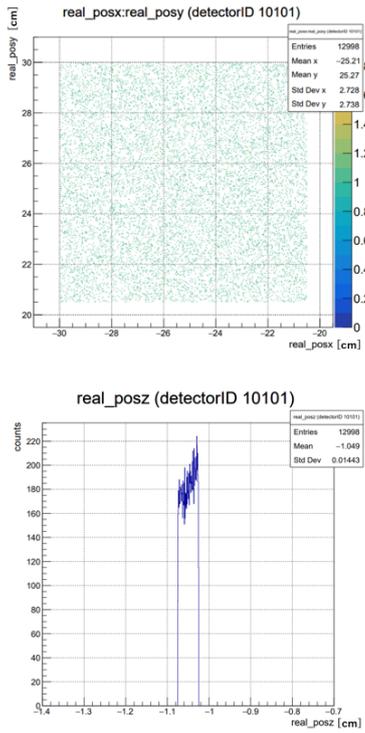


図 4.36: detector ID が 10101 の Si 半導体検出器のみを設置して 30keV のガンマ線を入射させた時の光子が検出器と反応した正確な位置の x-y 平面分布 (上) と z 軸分布 (下)。

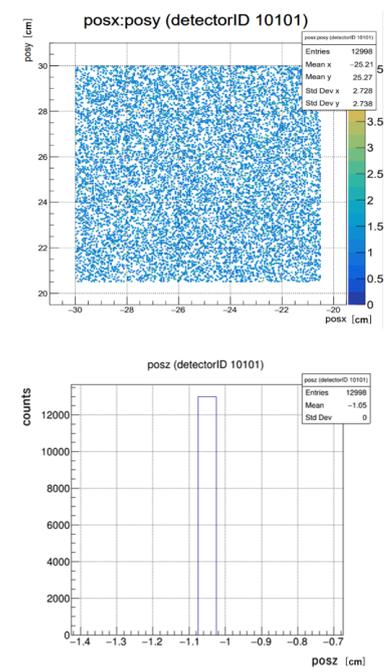


図 4.37: detector ID が 10101 の Si 半導体検出器のみを設置して 30keV のガンマ線を入射させた時の、検出器が取得したガンマ線光子の反応位置の x-y 平面分布 (上) と z 軸分布 (下)。

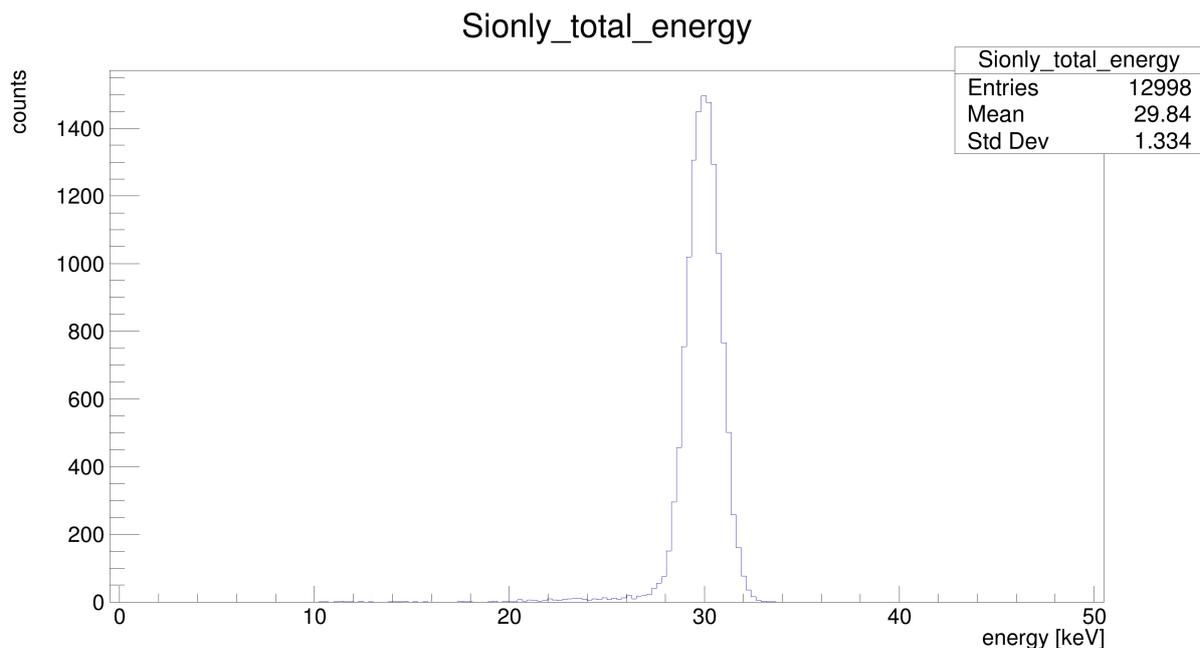


図 4.38: detector ID が 10101 の Si 半導体検出器のみを設置して 30keV のガンマ線を入射させた時の検出器が取得したエネルギースペクトル。横軸は keV で、縦軸はカウント数である。

検出器を設置した位置は (-252.5,252.5,-10.5) であり、検出器の全面にガンマ線が当たるようにするため、 $9.5 \times 9.5$  cm の範囲に 30keV の光子を放射した。その結果、図 4.36 のように検出器の全面に光子が当たっていることを確認した。また、図 4.38 のエネルギースペクトルにガウス関数によるフィッティングを行うことによって、ピークのエネルギーが入射した光子のエネルギーとなっていることがわかるため、エネルギーの取得が正しく行われていると考えた。以上のことから、単体の Si 検出器を設置してシミュレーションした結果、ComptonSoft 内で意図したように検出器の位置を設定でき、かつエネルギー取得も行えることがわかった。この結果から、Tracker を構成する他の Si 検出器においても正しい設定ができているとみなす。

次に、Low-Energy Calorimeter から、detector ID が 11110101 の検出器を取り出し、150keV のガンマ線光子を検出器正面の z 軸正の方向から検出器の面に対して一様に 1 万個照射した。このシミュレーションの結果を図 4.39、図 4.40、図 4.41 に示した。図 4.39 は、検出器の中で、実際に反応した位置の数分布を示している。また、図 4.40 に、検出器が取得したガンマ線光子の反応位置の数分布を表した。なお、posx、posy はどちらも読み出し口の幅の 0.8cm をビンの幅としている。また、posz は検出器の z 方向の長さの 4cm をビンの幅としている。図 4.41 は、検出器が読み出したエネルギースペクトルを示している。

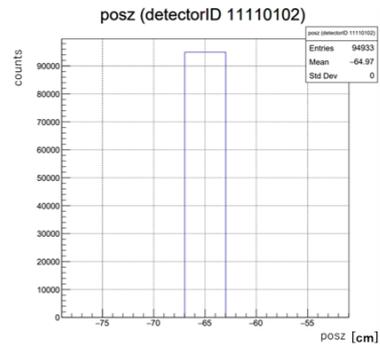
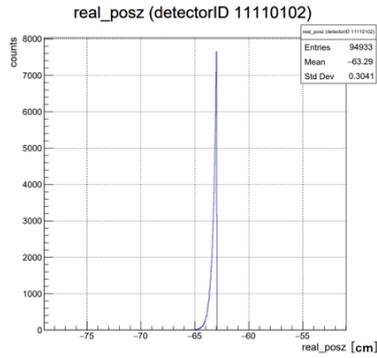
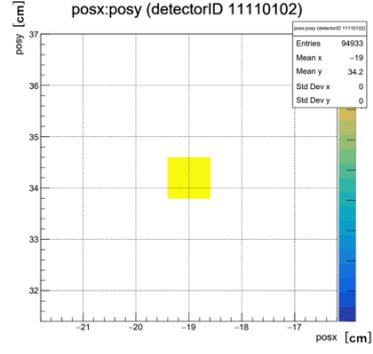
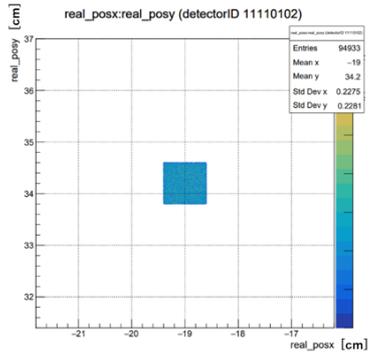


図 4.39: detector ID が 11110101 の CZT 半導体検出器のみを設置して 150keV のガンマ線を入射させた時の光子が検出器と反応した正確な位置の x-y 平面分布 (上) と z 軸分布 (下)。

図 4.40: detector ID が 11110101 の CZT 半導体検出器のみを設置して 150keV のガンマ線を入射させた時の、検出器が取得したガンマ線光子の反応位置の x-y 平面分布 (上) と z 軸分布 (下)。

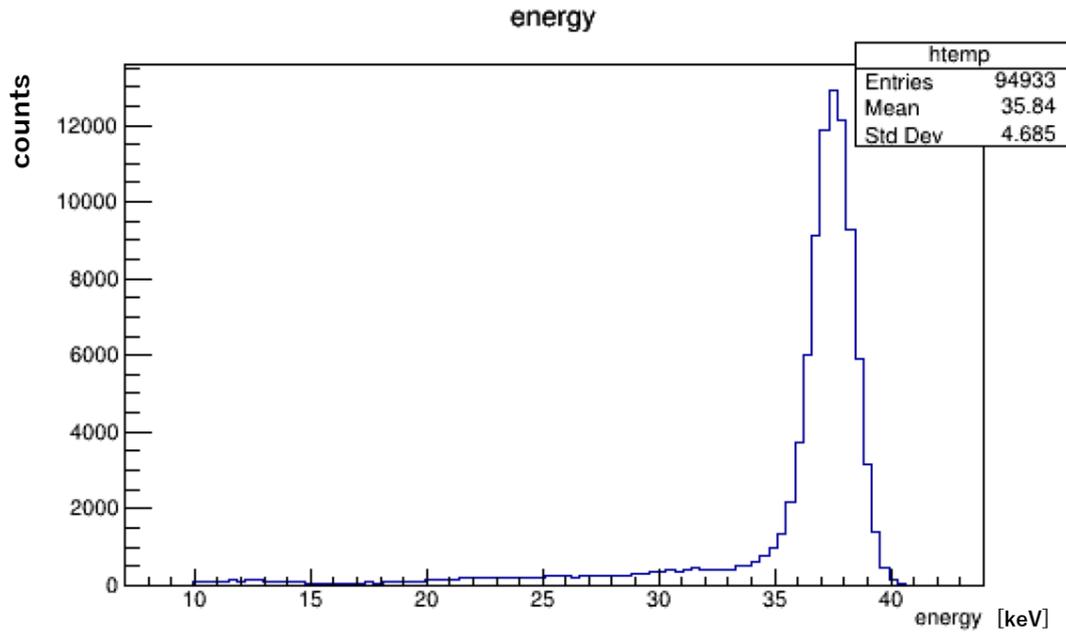


図 4.41: detector ID が 11110101 の CZT 半導体検出器のみを設置し 150keV のガンマ線を入射させた時の検出器が取得したエネルギースペクトル。横軸は keV で、縦軸はカウント数である。

検出器を設置した位置は (-190.0,342.0,-649.75) であり、検出器の全面にガンマ線が当たるようにするため、 $0.8 \times 0.8$  cm の範囲に 150keV の光子を放射した。その結果、図 4.39 のように検出器の全面に光子が当たっていることを確認した。

一方、図 4.41 のエネルギースペクトルから、エネルギーの読み出しは正しく行われていないと考えた。検出器が長いので、電荷とホールが検出器の電極にトラップされてしまうため、入射光子のエネルギーを読み出すことができないのではないかと考えた。そのため、100keV、200keV、300keV、400keV、500keV、600keV、700keV、800keV、900keV、1000keV の入射光子を検出器に照射するシミュレーションを新たに行い、それぞれのエネルギースペクトルにおけるピークのエネルギーが入射した光子のエネルギーよりもどれだけ低く読み出されているかを調べた。各エネルギー帯における、エネルギースペクトルを作成し、ガウス関数によるフィッティングを行うことによって、ピークのエネルギーの値を求め、図 4.42 のエネルギー較正直線を求めることができた。

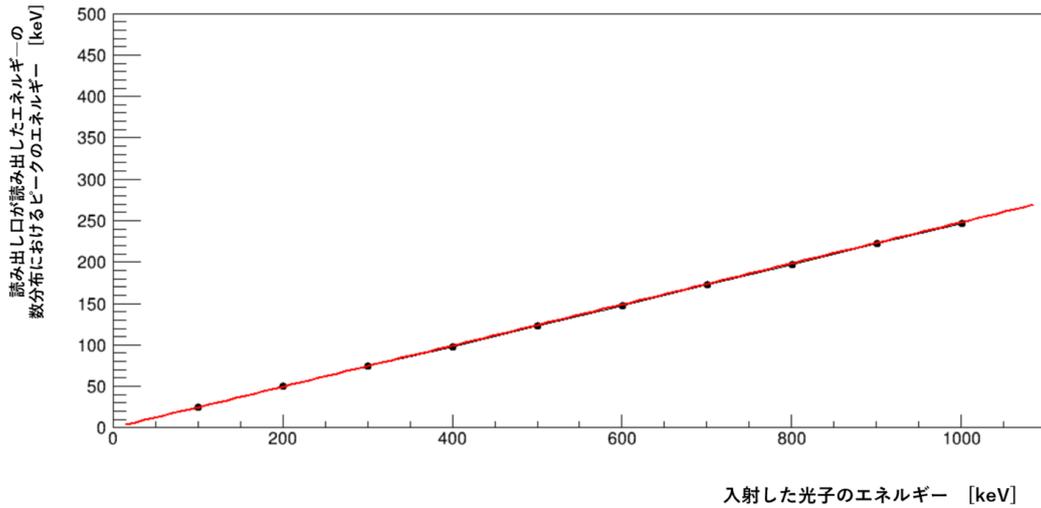


図 4.42: 横軸の入射光子のエネルギーに対して縦軸に検出器が取得したエネルギースペクトルにおけるピークのエネルギーをプロットした。

正しい読み出しを行うためには、求められたエネルギー較正曲線の傾きの逆数を検出されたエネルギーに乗じる。ComptonSoft には、このエネルギー較正直線の傾きの逆数を用いてエネルギーを読み出されるようにするという設定が可能である。補正を行い、再度 100keV の入射光子に対して、シミュレーションを行った。その結果、図 4.43 のエネルギースペクトルを取得できた。

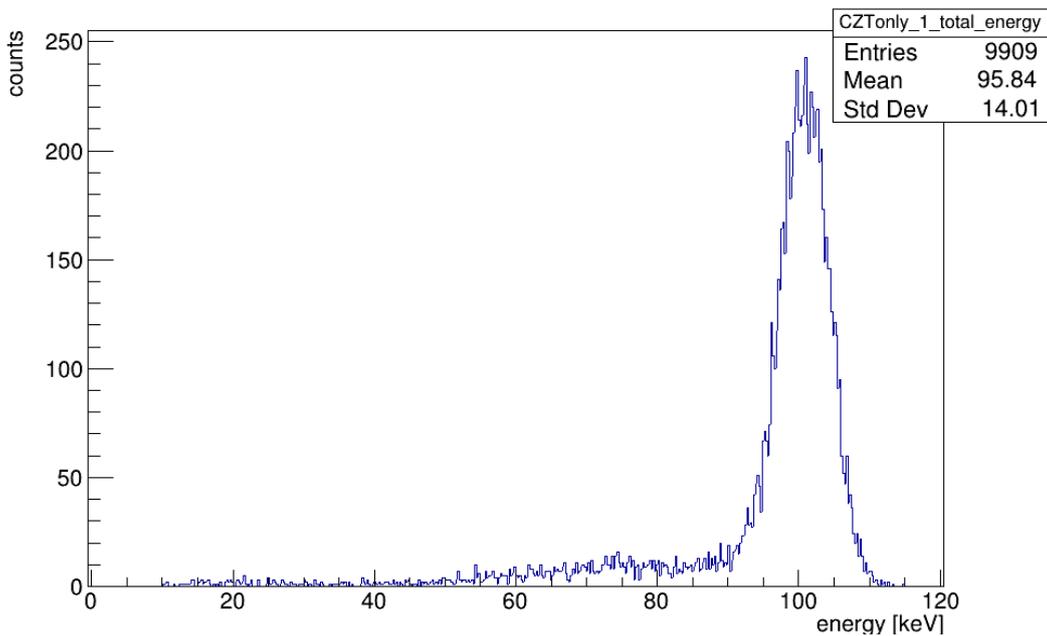


図 4.43: 100keV の入射光子に対して、detector ID が 11110101 の CZT 半導体検出器の読み出した口が読み出したエネルギースペクトル

以上のことから、単体の CZT 検出器を設置してシミュレーションした結果、ComptonSoft 内で意図したように検出器の位置を設定でき、かつ補正の設定を行うことでエネルギー取得も行えることがわかった。この結果から、Low-Energy Calorimeter を構成する他の CZT 検出器においても正しい設定ができていとみなす。

次に、High-Energy Calorimeter から、detector ID が 20011101 の検出器を取り出し、600keV のガンマ線光子を検出器正面の z 軸正の方向から検出器の面に対して一様に 1 万個照射した。このシミュレーションの結果を図 4.44、図 4.45、図 4.46 に示した。図 4.44 は、検出器の中で、実際に反応した位置の数分布を示している。また、図 4.45 に、検出器が取得したガンマ線光子が反応した位置の数分布を表した。なお、posx は検出器の x 方向の長さの 38 cm をビンの幅とし、posy は読検出器の y 方向の長さの 1.5 cm をビンの幅としている。また、posz は検出器の z 方向の長さの 1.5 cm をビンの幅としている。図 4.46 は、検出器が読み出したエネルギースペクトルを示している。

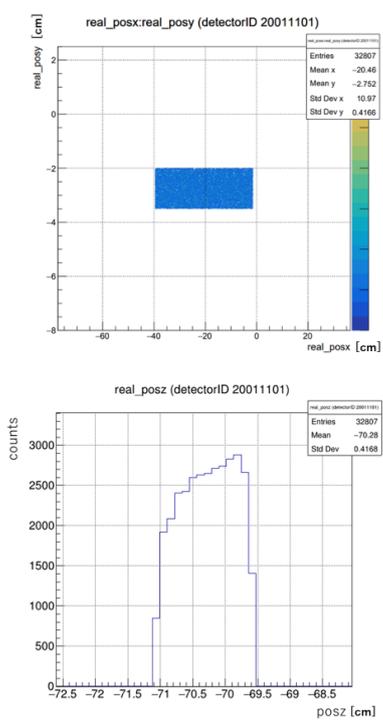


図 4.44: detector ID が 20011101 の CsI シンチレータのみを設置して 600keV のガンマ線を入射させた時の光子が検出器と反応した正確な位置の x-y 平面分布 (上) と z 軸分布 (下)。

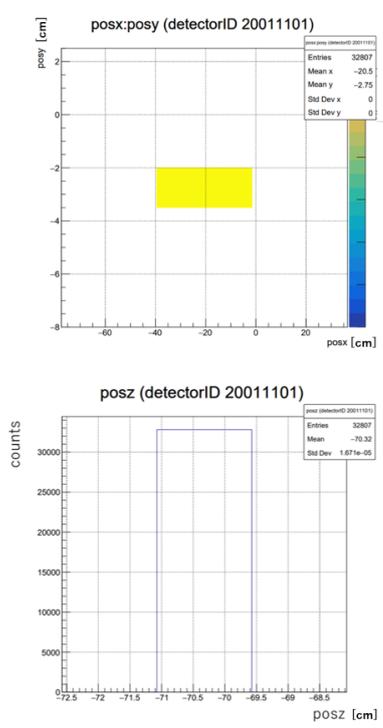


図 4.45: detector ID が 20011101 の CsI シンチレータのみを設置して 600keV のガンマ線を入射させた時の、検出器が取得したガンマ線光子の反応位置の x-y 平面分布 (上) と z 軸分布 (下)。

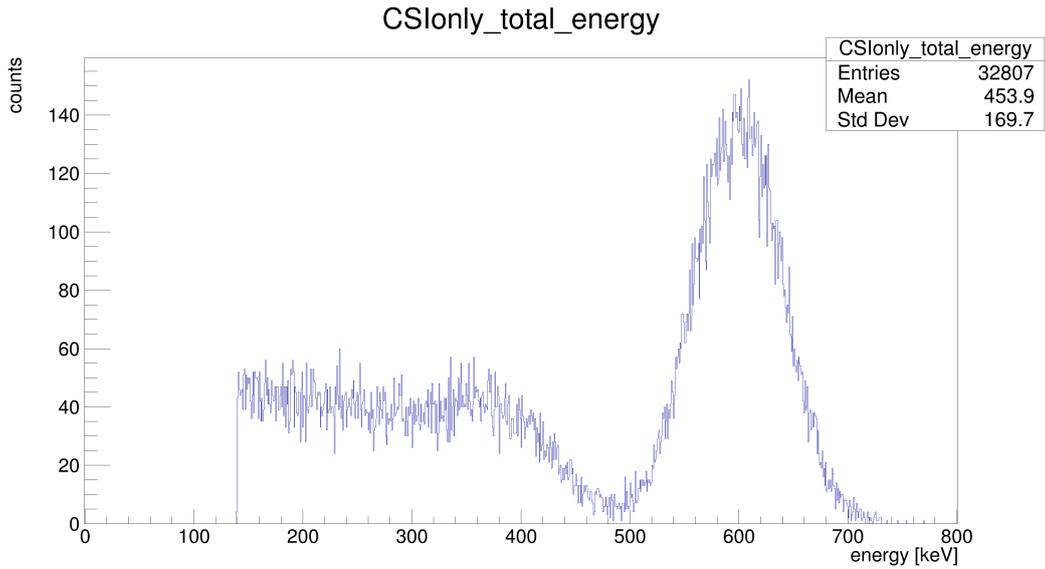


図 4.46: detector ID が 20011101 の CsI シンチレータのみを設置し 600keV のガンマ線を入射させた時の検出器が取得したエネルギースペクトル。横軸は keV で、縦軸はカウント数である。

検出器を設置した位置は (-205.0,-27.5,-703.25) であり、検出器の全面にガンマ線が当たるようにするため、 $1.5 \times 38$  cm の範囲に 600keV の光子を放射した。その結果、図 4.44 のように検出器の全面に光子が当たっていることを確認した。図 4.46 のエネルギースペクトルにガウス関数によるフィッティングを行うことによって、ピークのエネルギーが入射した光子のエネルギーとなっていることがわかり、また、ピークの左側にコンプトン散乱による影響が現れているため、エネルギーの取得が正しく行われていると考えた。以上のことから、単体の CsI を設置してシミュレーションした結果、ComptonSoft 内で意図したように検出器の位置を設定でき、かつエネルギー取得も行えることがわかった。この結果から、High-Energy Calorimeter を構成する他の CsI 検出器においても正しい設定ができているとみなす。以上により、AMEGO の検出器のジオメトリが意図した通りに配置されていることを確認した。

## 第5章 コンプトンイベントの有効面積の測定

第4章で作成した AMEGO ジオメトリを用いて、2ヒットのコンプトンイベントの有効面積を測定する。有効面積とは、検出器の検出効率を表す指標の一つであり、2ヒットのコンプトンイベントの有効面積は、

$$A_{eff} = \frac{N_{2hit}}{N_{total}} A \quad (5.1)$$

と表され、 $A$  は検出器に放射した領域、 $N_{total}$  は検出器に放射した光子の合計数、 $N_{2hit}$  は検出器内で2ヒットしたコンプトンイベントの数である。

### 5.1 有効面積の測定

本研究では、第4章で作成した AMEGO ジオメトリを用いてシミュレーションを行い、2ヒットのコンプトンイベントの個数を求めることで、有効面積を計算した。

Tracker の1層目全面に相当するの  $6241 \text{ cm}^2 (79 \times 79 \text{ cm}^2)$  に向けて一様に  $200 \text{ keV}$  のガンマ線光子を42万個、検出器正面から入射した。このときに、AMEGO 全体が取得したエネルギースペクトルは図 5.1 になった。また、Tracker、Low-Energy Calorimeter、High-Energy Calorimeter のそれぞれで取得したエネルギースペクトルを、図 5.2、図 5.3、図 5.4 に示す。なお、CZT 半導体検出器の取得するエネルギーは、第4章で求めた較正直線の傾きの逆数をヒットツリーから得られるエネルギーに乗じることで補正した。以上のヒストグラムでは、ピークのエネルギーが入射光子のエネルギーとなっており、また、ピークの左側にコンプトン散乱による影響が現れているため、検出器の読み出し口によるエネルギーの取得が正常に行われていると考えた。

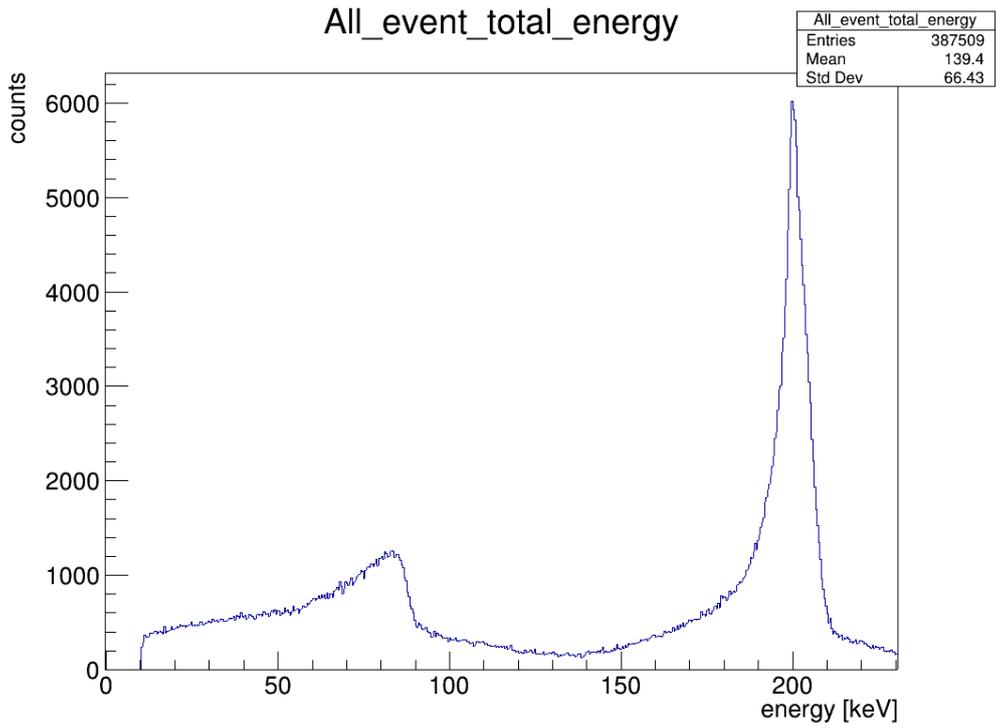


図 5.1: 全ての検出器が取得したエネルギースペクトル

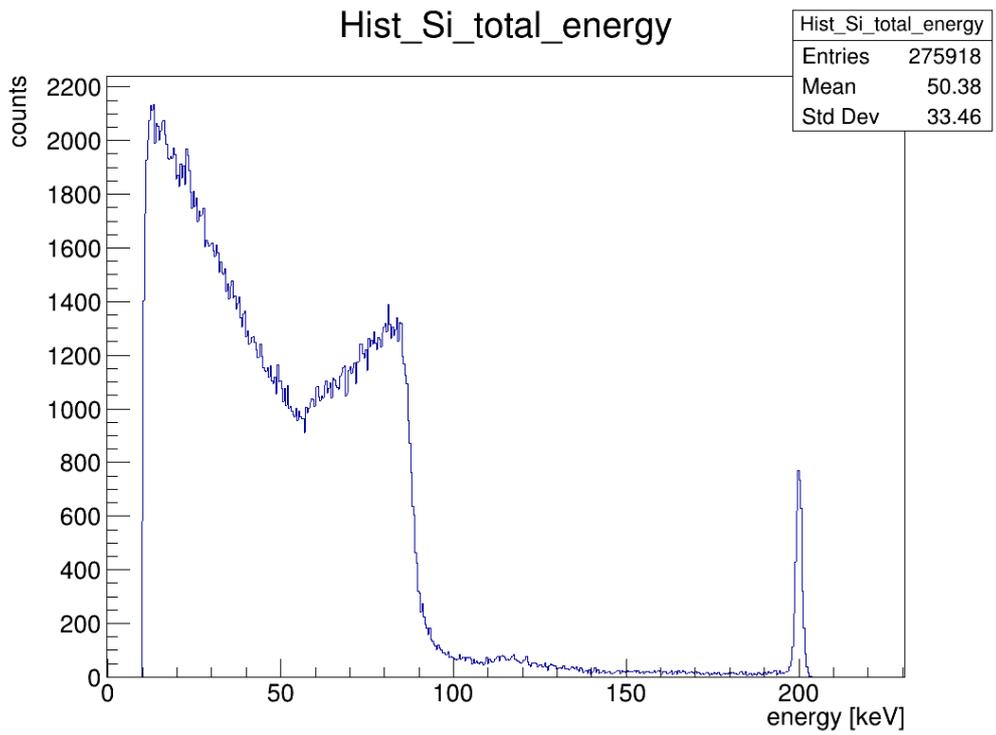


図 5.2: Tracker が取得したエネルギースペクトル

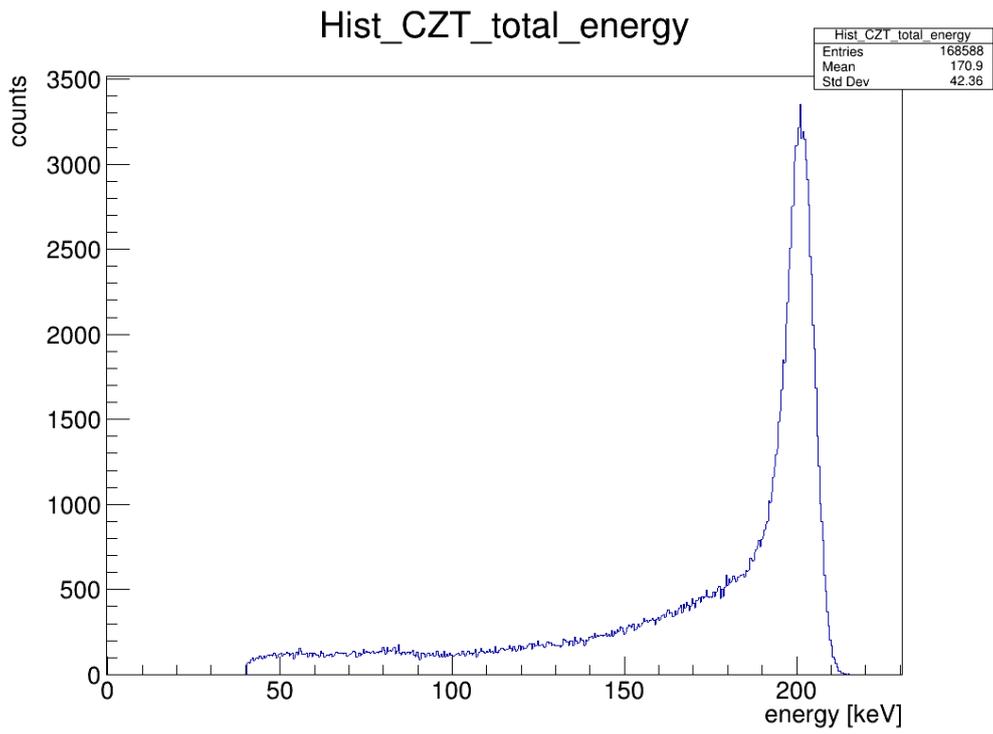


図 5.3: Low-Energy Calorimeter が取得したエネルギースペクトル

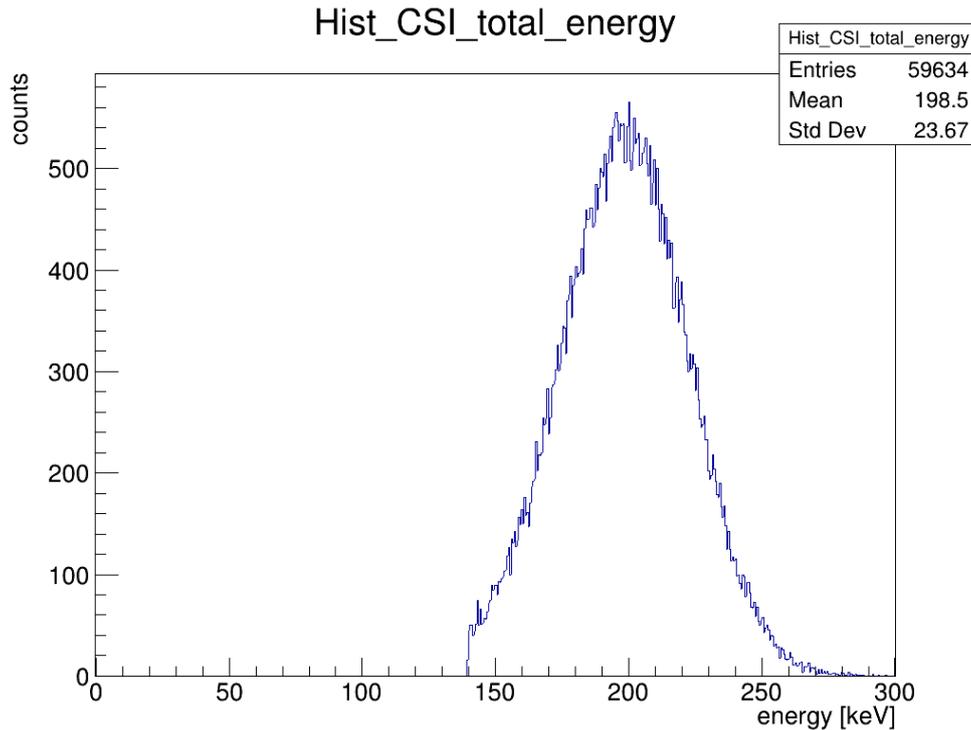


図 5.4: High-Energy Calorimeter が取得したエネルギースペクトル

合計 2 ヒットのイベントに対してコンプトン再構成をすることで、コンプトンイベントの選び出しを行う。第 3 章の式 (3.4)(3.6) を満たす合計 2 ヒットのイベントを 2 ヒットのコンプトンイベントとみなしてその個数を数えた。選び出しの手順は、以下の通りである。

1. 全体のイベントを取り出す
2. 2 ヒットのイベントのみを取り出す
3. CsI との反応を含まないイベントを取り出す
4. コンプトン再構成に成功したイベントのみを取り出す

このようにして求めたコンプトンイベントには、Si-Si、Si-CZT、CZT-CZT 間で起きる 3 種類のイベントが含まれている。CsI では、反応した位置の情報が粗く読みだされるため、CsI との反応を含むコンプトンイベントは選ばなかった。

また、パラメータ a、パラメータ b を表 5.1 のようにして変えた。表の下から二番目の行に、選び出したコンプトンイベントのうち正しく選び出されたであろうイベントの割合を各パラメータにおいて計算した。入射光子のエネルギー 200 keV に対して  $\pm 5$  keV の範囲のイベントを正しく選び出されたであろうイベントとした。そして、ピーク付近のこの範囲に分布しているイベント数が、コンプトンイベントとして選び出された数において占める割合をパーセンテージで求めた。この割合が比較的高いときのパラメータを使用することにする。また、同時に検出効率を表す、有効面積についても計算し、できるだけ有効面積が大きく

なるようなパラメータになるように決定した。その結果、 $a=4.5$ 、 $b=4.5$  のときに、選び出した個数に対する正しく選び出されたであろうイベントの割合が最も高くなり、検出効率も比較的良好いため、 $a=4.5$ 、 $b=4.5$  として選びだしを行った。

表 5.1: パラメータに対するピーク付近のカウント数の割合

	a=1,b=1	a=2,b=2	a=3,b=3	a=3.5,b=3.5	a=4,b=4	a=4.5,b=4.5	a=5,b=5
・ 2 ヒットコンプトンイベントとして選び出したイベントの数	167	316	477	556	629	695	847
・ 選び出したイベントのうち、195keVより大きく、205keV未満の範囲の個数	120	234	360	423	476	529	581
・ (選び出したイベントのうち、195keVより大きく、205keV未満の範囲の個数) ÷ (選び出した個数) × 100	71.85628743	74.05063291	75.47169811	76.07913669	75.67567568	76.11510791	68.59504132
・ 2 ヒットコンプトンイベントの有効面積	2.481540476	4.695609524	7.087992857	8.261895238	9.346640476	10.32736905	12.58601667

なお、有効面積は式 (5-1) から計算し、 $a=4.5$ 、 $b=4.5$  の場合、

$$(\text{有効面積}) = \frac{695}{420000} \times 6241 \approx 10.33 \text{ cm}^2 \quad (5.2)$$

と求めた。第 2 章にあるように、AMEGO の想定されている 200 keV のコンプトンイベントの有効面積 (図 2.3) は、60 cm<sup>2</sup> ほどに対し、本研究で求めた結果は小さいことがわかる。これは図 2.3 に示されている有効面積が 3 ヒット以上のコンプトンイベントも考慮した場合であることが要因であると考えられる。2 ヒットのコンプトンイベントの数に 3 ヒットのコンプトンイベントや 4 ヒットのコンプトンイベントの選び出しによる光子の数を加えていけば、図 2.3 の値に近づくと考えられる。

合計 2 ヒットのイベントにおけるエネルギースペクトルを図 5.5、2 ヒットのコンプトンイベントにおけるエネルギースペクトルを図 5.6 に示した。

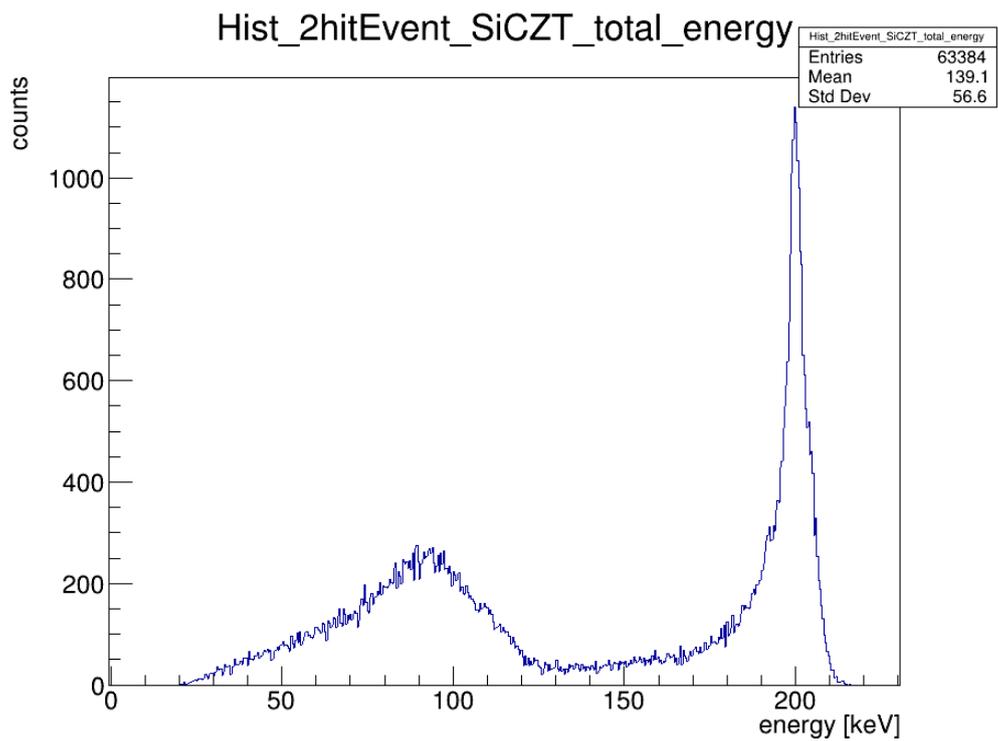


図 5.5: 合計 2 ヒットのイベントにおけるエネルギースペクトル (High-Energy Calorimeter を除く)

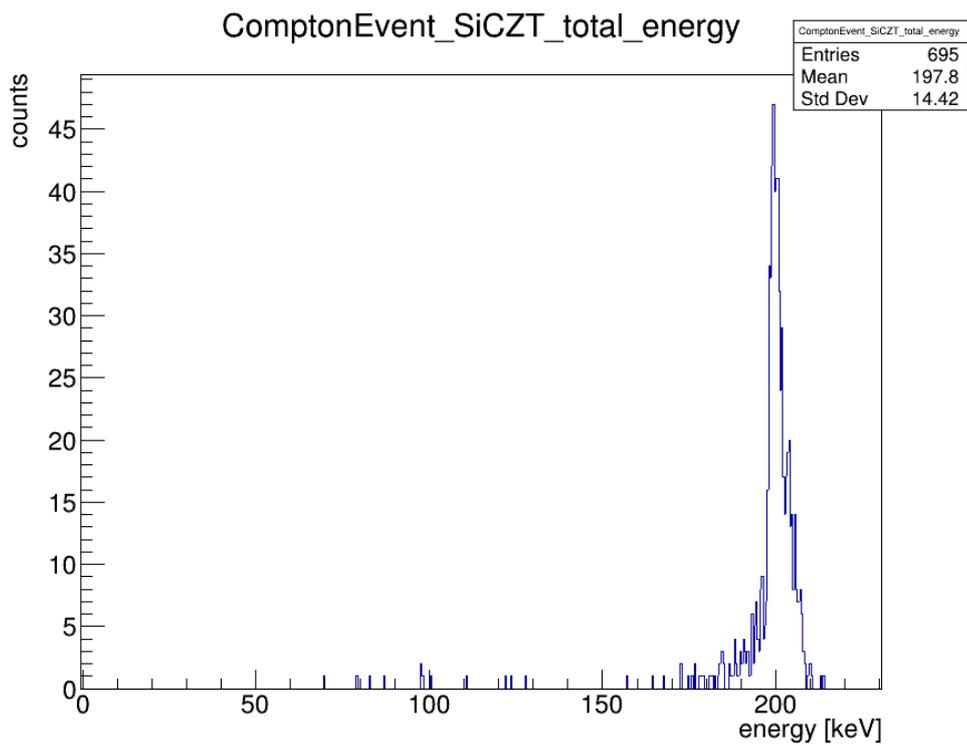


図 5.6: 2 ヒットのコンプトンイベントにおけるエネルギースペクトル (High-Energy Calorimeter を除く)

695 個の 2 ヒットのコンプトンイベントのうち、Si-Si、Si-CZT、CZT-CZT 間のそれぞれの反応の個数を求め、図 5.7 に示した。

## コンプトンイベントの内訳

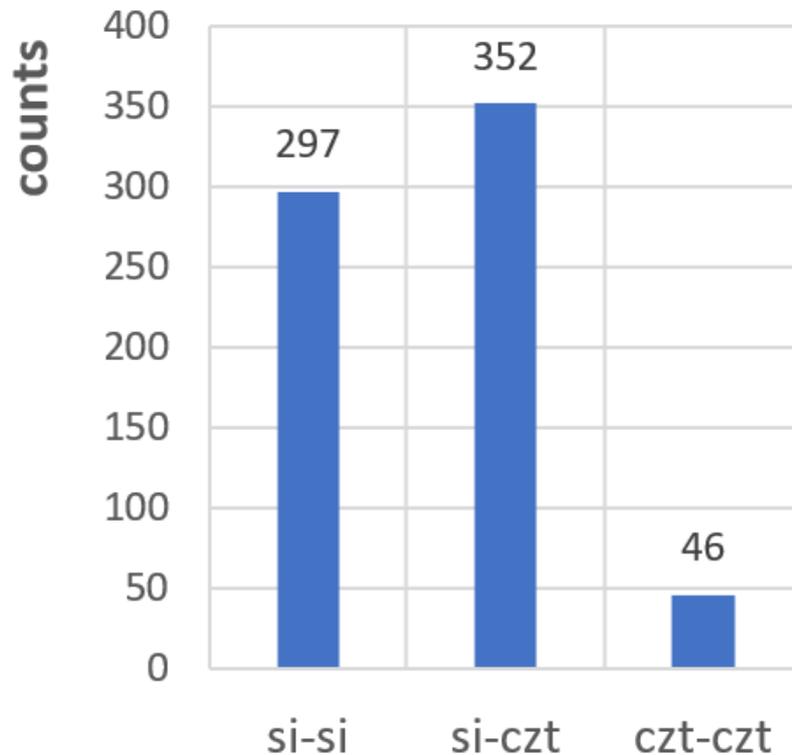


図 5.7: 2 ヒットのコンプトンイベントの内訳

### 5.2 さまざまなエネルギーにおける有効面積の測定

さまざまなエネルギー帯においてシミュレーションを行い、有効面積と入射光子のエネルギーの関係を調べることで、AMEGO における、各エネルギー帯での 2 ヒットのコンプトンイベントの検出効率を求めることができる。先述のとおり、偏光はコンプトンイベントにおいて測定をするものである。したがって、各エネルギー帯におけるコンプトンイベントの有効面積を求めることで、各エネルギー帯における、偏光が測定可能なイベントの検出効率を把握することができる。

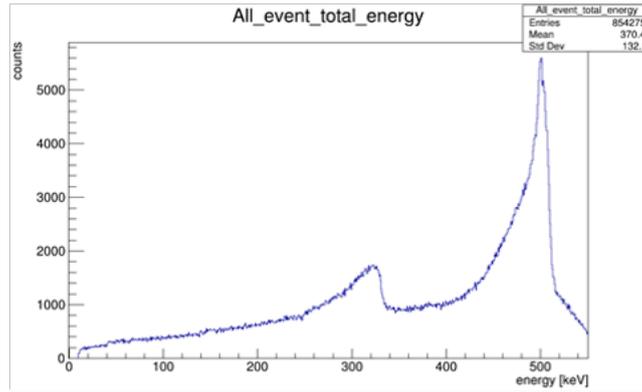
本研究では、200 keV に加えてさらに 500 keV と 1000 keV における有効面積を求めた。

500 keV の光子を検出器の正面から 92 万個入射したとき、AMEGO が取得したエネルギースペクトルは図 5.8 になった。このとき、2 ヒットのコンプトンイベント (光子が CsI で反応したイベントは除く) として選び出したイベントの個数は 2152 個となった。なお、選び出しをする際のパラメーターは、 $a=4.5$ 、 $b=4.5$  としている。このとき、2 ヒットのコンプトンイベントの有効面積は、

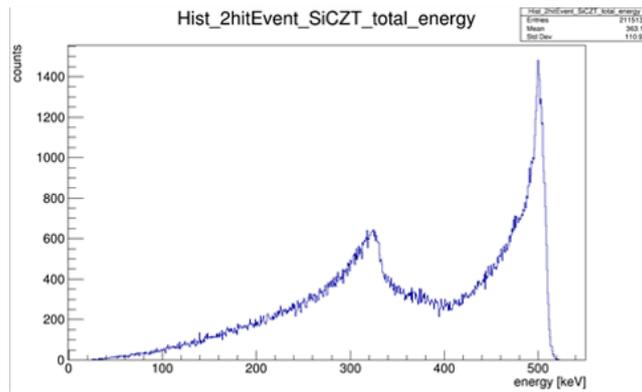
$$(\text{有効面積}) = \frac{2152}{920000} \times 6241 \approx 14.60 \text{ cm}^2 \quad (5.3)$$

と求めた。

(1)



(2)



(3)

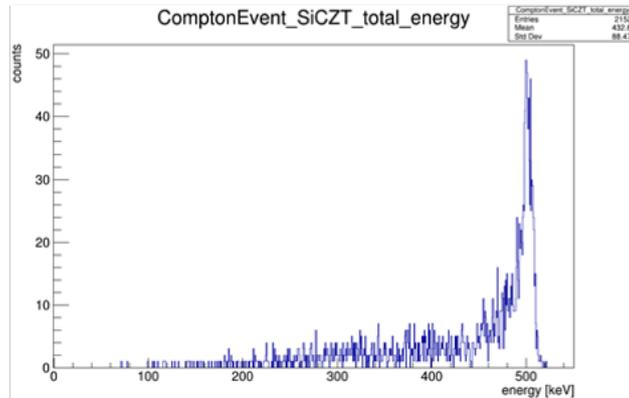


図 5.8: 500 keV の光子を入射した時のエネルギースペクトル。(1) は全ての検出器が取得したエネルギースペクトル。(2) は合計 2 ヒットのイベントにおけるエネルギースペクトル (High-Energy Calorimeter を除く)。(3) は 2 ヒットのコンプトンイベントにおけるエネルギースペクトル (High-Energy Calorimeter を除く)。

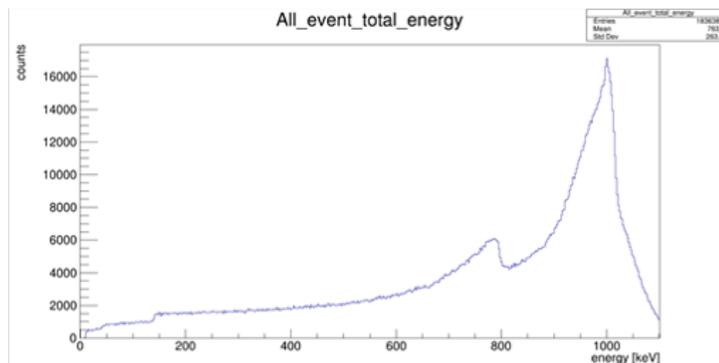
1000 keV の光子を検出器の正面から 204 万個入射したとき、AMEGO が取得したエネルギースペクトルは図 5.9 になった。このとき、2 ヒットのコンプトンイベント (光子が CsI で反応したイベントは除く) として選び出したイベントの個数は 2812 個となった。なお、選び出しをする際のパラメーターは、 $a=4.5$ 、 $b=4.5$

としている。このとき、2 ヒットのコンプトンイベントの有効面積は、

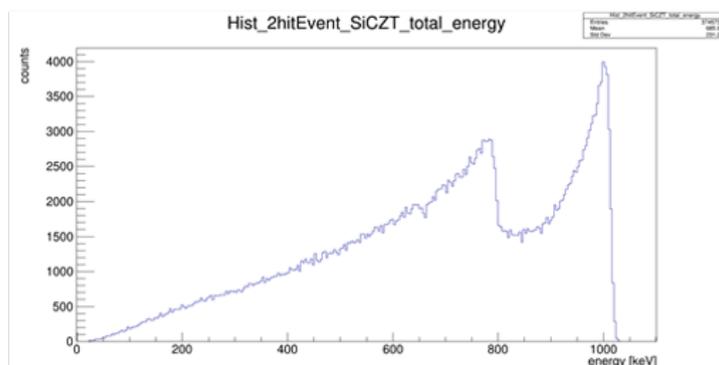
$$(\text{有効面積}) = \frac{2812}{2040000} \times 6241 \doteq 8.60 \text{ cm}^2 \quad (5.4)$$

と求めた。

(1)



(2)



(3)

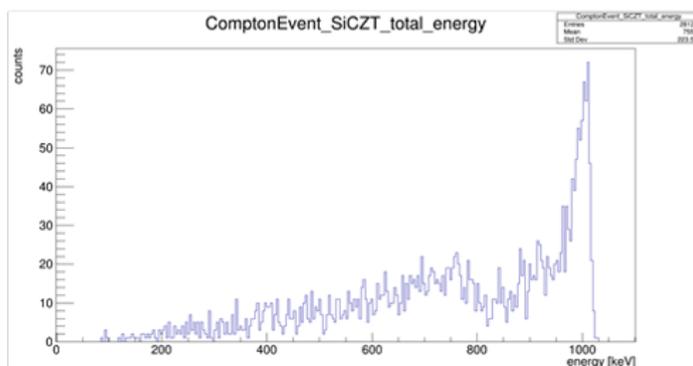


図 5.9: 1000 keV の光子を入射した時のエネルギースペクトル。(1) は全ての検出器が取得したエネルギースペクトル。(2) は合計 2 ヒットのイベントにおけるエネルギースペクトル (High-Energy Calorimeter を除く)。(3) は 2 ヒットのコンプトンイベントにおけるエネルギースペクトル (High-Energy Calorimeter を除く)。

200 keV、500 keV、1000 keV のそれぞれにおける 2 ヒットのコンプトンイベントの有効面積は、同じグ

ラフにプロットした (図 5.10)。

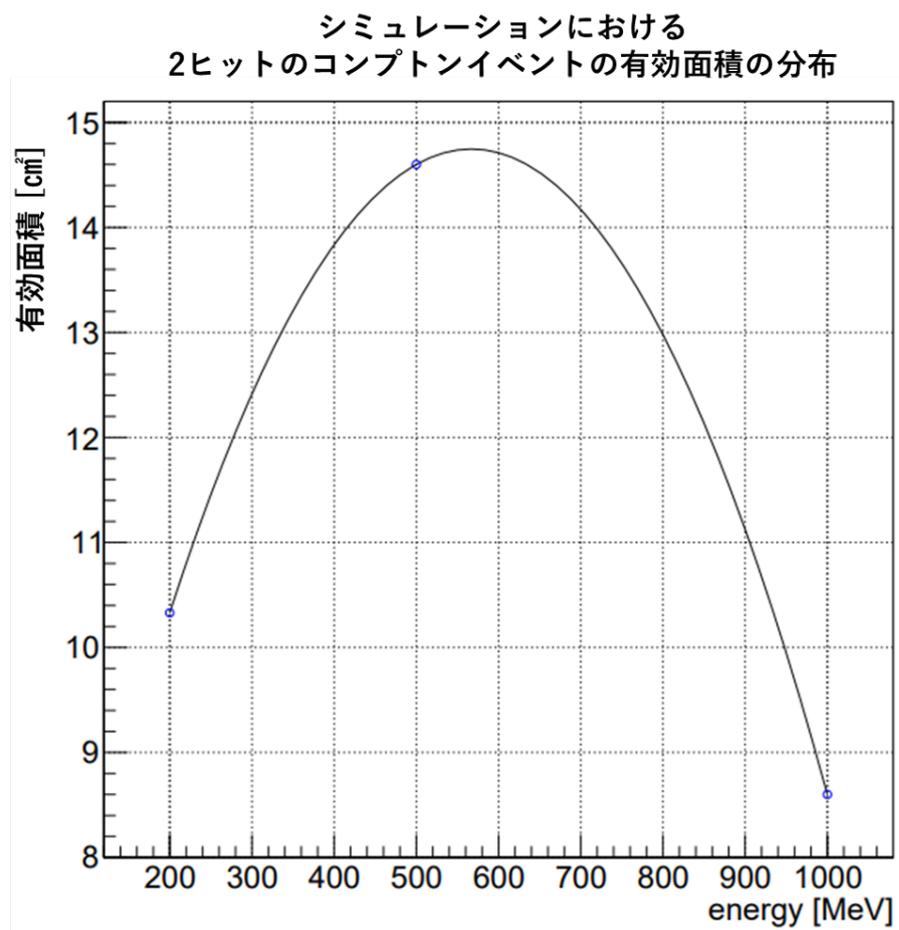


図 5.10: エネルギーに対する 2 ヒットのコンプトンイベントの有効面積

## 第6章 まとめと今後の課題

本研究では、ガンマ線バーストの放射メカニズムを探るための手段として、ガンマ線観測衛星 AMEGO を用いることを検討した。ガンマ線バーストのように数百 keV において暗い天体の AMEGO による偏光観測は、反跳電子を用いた偏光観測が行えないため海外では研究がされていない。しかし、日本では、ガンマ線バーストのように数百 keV 以下で明るい天体に関する偏光観測の研究は、ひとみ衛星の運用の際に、数多くの研究がなされており、その際に開発された ComptonSoft を用いることで、本格シミュレータによるガンマ線偏光観測の検討が可能である。Geant4 上で AMEGO の検出器の構造を再現し、ComptonSoft を用いて実際の検出器の応答を反映させることで、AMEGO によるガンマ線偏光観測の本格シミュレーションを行うことができる。

本研究では、Geant4 上で AMEGO の検出器の構造を再現した。そして、その構造に対応した AMEGO の読み出し口を ComptonSoft を用いて再現した。また、偏光観測が可能となる 2 ヒットのコンプトンイベントの選び出しをコンプトン再構成により行う方法を構築し、検証を行った。最後に、AMEGO の検出器における、200keV、500keV、1000keV のそれぞれの入射光子に対する 2 ヒットのコンプトンイベントの有効面積を求めた。

今後は、ガンマ線バーストのような数百 keV 以下で明るく、偏光を持ったガンマ線を観測するシミュレーションを行う。また、シミュレーションの際に取得した合計 2 ヒット以上のイベントの中には、本来は 2 ヒットのコンプトンイベントに、反跳電子や蛍光 X 線によるヒットが含まれている可能性があるが、本研究においては、この可能性を無視して 2 ヒットのコンプトンイベントの選び出しを行った。今後は、このような可能性も考慮した選び出しをする必要がある。

# 謝辞

最後に、本論文の制作にあたりご指導いただいた深澤先生、内田先生に感謝の意を表します。その他、研究室の皆様にも様々な形でお世話になりました。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] 天文学辞典 ガンマ線バースト  
<https://astro-dic.jp/gamma-ray-burst/>
- [2] ガンマ線偏光で探るガンマ線バーストの放射メカニズム  
[https://www.asj.or.jp/geppou/archive\\_open/2013\\_106\\_03/106\\_214.pdf](https://www.asj.or.jp/geppou/archive_open/2013_106_03/106_214.pdf)
- [3] 金沢大学 宇宙物理学研究室  
<http://astro.s.kanazawa-u.ac.jp/labo/GRB/>
- [4] 天文学辞典 シンクロトロン放射  
<https://astro-dic.jp/synchrotron-radiation/>
- [5] 幅田翔 広島大学 2016 年  
修士論文 「X 線天文衛星ひとみ搭載 SGD の偏光観測に向けたデータ処理の最適化」
- [6] 天文学辞典 電磁場  
<https://astro-dic.jp/electromagnetic-wave/>
- [7] AMEGO NASA  
[https://asd.gsfc.nasa.gov/amego/files/AMEGO\\_Decadal\\_RFI.pdf](https://asd.gsfc.nasa.gov/amego/files/AMEGO_Decadal_RFI.pdf)
- [8] 放射線計測ハンドブック
- [9] 挽谷 政弥 広島大学 2017 年  
卒業論文 「X 線分光観測とシミュレーションを用いた鉄輝線共鳴散乱による銀河団乱流速度の制限」
- [10] Modular Position-sensitive High-resolution  
Calorimeter for Use in Space Gamma-ray  
Instruments Based on Virtual Frisch-grid CdZnTe  
Detectors  
<https://inspirehep.net/files/158a8d7f665c79cd437d89de819aa3a1>