

修士論文

MeVガンマ線観測におけるコンプトン再構成アルゴリズムの
シミュレーションを用いた研究

広島大学 先進理工系科学研究科 先進理工系科学専攻 物理学プログラム
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

M214640

末岡 耕平

主査：深澤 泰司

副査：志垣 賢太

副査：リプタック ザカリージョン

2023年1月

概要

MeV ガンマ線観測では、中性子星合体や超新星爆発による元素合成、ガンマ線バースト、粒子加速天体、ブラックホールや中性子星などのコンパクト天体からの放射など、天文学において重要な天体現象の観測が予想されている。このため、MeV ガンマ線天文学は大きく期待されているが、その観測は困難なため、ほとんど進展していない。特に、0.1 MeV から 10 MeV までの MeV ガンマ線はコンプトン散乱を繰り返すため、この複雑な散乱過程を再構成して入射ガンマ線のエネルギーと到来方向を求めること(コンプトン再構成)が必要になる。この再構成によって、ガンマ線の偏光情報も得られるようになる。ガンマ線バーストは、宇宙で生じる天体現象の中で最も明るい物理現象であるが、そのメカニズムは完全には解明されていない。もし、ガンマ線バーストの放射がシンクロトン放射によるものならば、強く偏光したガンマ線が放射される。ガンマ線バーストは 100 keV から 1 MeV 付近で特に強い放射をするため、MeV ガンマ線観測によってこの偏光情報を調べることで、ガンマ線バーストの具体的な放射機構を探ることができる。AMEGO 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。CGRO 衛星に搭載された COMPTEL 検出器以降、観測が進んでいない MeV 帯域のガンマ線観測において期待されている。また、2.5 sr の広い視野や数 100 keV から数 GeV のエネルギー帯域、高い偏光感度でガンマ線観測を行うことができるため、突発天体現象であるガンマ線バーストの観測に適している。

そこで、本研究では、AMEGO によるガンマ線バーストのガンマ線偏光観測を検討することを目的として、数 100 keV から 1 MeV におけるコンプトン再構成の検討を行う。本研究では、AMEGO とガンマ線の相互作用を模擬するシミュレータを作成し、それを利用してコンプトン再構成アルゴリズムを構築した。そして、そのアルゴリズムを使用して MeV ガンマ線観測のシミュレーションを行い、アルゴリズムの評価を行った。また、コンプトン再構成が可能なイベントを増やすためのアルゴリズムを開発し、検証を行った。

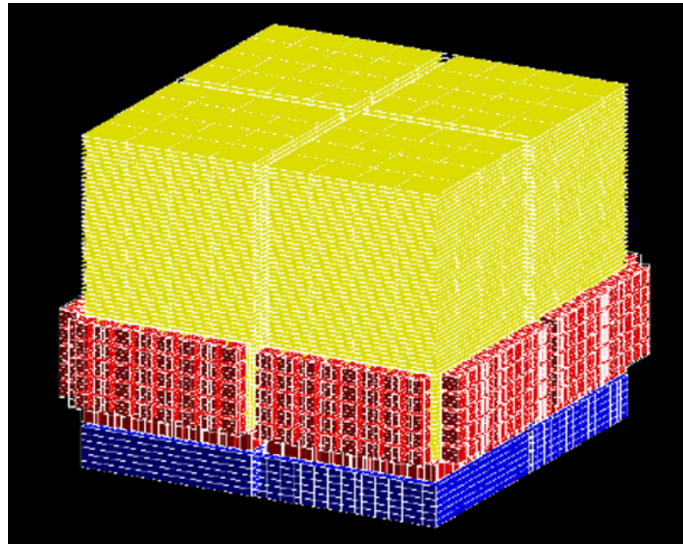


図 1: Geant4 上で再現した AMEGO の検出器

目次

第 1 章	はじめに	8
1.1	MeV ガンマ線天文学	8
1.2	ガンマ線バースト	8
1.3	AMEGO 計画	9
1.4	MeV ガンマ線の相互作用	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	12
1.5	コンプトン再構成	12
1.6	MeV ガンマ線の偏光観測	15
1.7	研究目的	16
第 2 章	AMEGO による MeV ガンマ線観測	18
2.1	AMEGO 検出器	18
2.1.1	Tracker	18
2.1.2	Low-Energy Calorimeter	19
2.1.3	High-Energy Calorimeter	20
2.2	AMEGO 検出器を使った MeV ガンマ線観測	21
2.2.1	0.1 MeV から 10 MeV における MeV ガンマ線観測	22
2.2.2	10 MeV 以上における MeV ガンマ線観測	22
第 3 章	シミュレーション環境の構築	23
3.1	Geant4 と ComptonSoft について	23
3.1.1	Geant4	23
3.1.2	ComptonSoft	24
3.2	AMEGO ジオメトリの定義	25
3.2.1	Tracker の定義	26
3.2.2	Low-Energy Calorimeter の作成	30
3.2.3	High-Energy Calorimeter の作成	35
3.2.4	3つの検出器の配置	38
3.3	読み出し口の定義	38
3.3.1	シリコン半導体検出器	39
3.3.2	CZT 半導体検出器	42

3.3.3 CsI シンチレーター	47
第 4 章 コンプトン再構成アルゴリズム	50
4.1 コンプトン再構成アルゴリズム	50
4.1.1 コンプトン再構成アルゴリズムとは	50
4.1.2 n ヒットイベント	50
4.1.3 分解能の考慮	52
4.1.4 複数の順序が散乱角の条件式を満たす場合	52
4.1.5 コンプトン再構成アルゴリズムのまとめ	52
4.2 コンプトン再構成アルゴリズムの検証	53
第 5 章 蛍光 x 線及び電子のマージアルゴリズム	57
5.1 簡単な検出器について	57
5.1.1 ジオメトリの定義	57
5.1.2 読み出し口の定義	57
5.2 蛍光 x 線のマージアルゴリズム	60
5.2.1 マージの必要性	60
5.2.2 マージアルゴリズムとは	60
5.2.3 マージアルゴリズム	61
5.2.4 蛍光 x 線のマージアルゴリズムの検証	64
5.3 電子のマージアルゴリズム	69
5.3.1 マージアルゴリズム	69
5.3.2 電子のマージアルゴリズムの検証	76
5.4 マージアルゴリズムの検証結果	79
第 6 章 まとめと今後の課題	82

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]	9
1.2	AMEGO の感度 [1]	10
1.3	AMEGO の性能 [1]	10
1.4	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 、光子の落としたエネルギーを E_1 、散乱した後の光子のエネルギーを E_2 、散乱角を θ とした。水色の太い矢印が入射光子の飛跡。	11
1.5	電子陽電子対生成	12
1.6	コンプトン散乱後に光電吸収が生じる様子。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 θ とした。水色の太い矢印が入射光子の飛跡とする。	13
1.7	コンプトン再構成	14
1.8	コンプトンイメージングの概念図	14
1.9	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
1.10	コンプトン散乱の様子。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 θ とした。	15
1.11	図 1.10 を検出器の真上から見た図。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 Φ としている。	15
1.12	モジュレーションカーブ。散乱角度 Φ 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。	16
2.1	AMEGO の検出器の展開図 [1]	18
2.2	両面シリコンストリップ検出器の概念図	19
2.3	両面シリコンストリップ検出器 16 枚を 4×4 で配置したもの [1]	19
2.4	CdZnTe 半導体検出器の読み出し口 (左図)[12] と CdZnTe 半導体検出器を 16 個合わせたモジュール (右図)[1]。	20
2.5	Low-Energy Calorimeter の構造 [1]	20
2.6	CsI(Tl) シンチレータの読み出し口	21
2.7	CsI(Tl) シンチレータを 26 本用いたもの [1]	21

2.8	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は、コンプトン散乱の後に光電吸収が生じるイベント。図の右側のイベントは、電子陽電子対生成後に生じた電子と陽電子が検出器によって捕らえられるイベント。[1]	22
3.1	Geant4 を使ったシミュレーション。中央にある灰色の物体に、ガンマ線を照射した。ガンマ線の飛跡は緑色の線で表されている。	23
3.2	各検出器に対するガンマ線の透過率。	26
3.3	シリコン半導体一枚。	27
3.4	図 4.3 を 16 枚使用した。	27
3.5	図 4.4 を 4 枚使用した。	28
3.6	図 3.5 を 10mm の間隔を取り、重ねた。	28
3.7	図 3.5 を 60 枚重ねた。	29
3.8	Geant4 で定義した Tracker	30
3.9	CZT 半導体 1 個。	31
3.10	CZT 半導体 16 個	31
3.11	50 個の図 3.10 を配置した。	32
3.12	50 個の図 3.10 を配置した。	32
3.13	40 個の図 3.10 を配置した。	33
3.14	2 個の図 3.11 を配置した。	33
3.15	図 3.14 を 4 個使用した。	33
3.16	4 個の図 3.12、4 個の図 3.13、1 個の図 3.15 を使用した。	34
3.17	上図が図 3.16 を y 軸負の方向から見た Low-Energy Calorimeter。下図が図 3.16 を x 軸正の方向から見た Low-Energy Calorimeter。	34
3.18	Geant4 で定義した Low-Energy Calorimeter 検出器。	35
3.19	CsI シンチレーター 1 個。	36
3.20	CsI シンチレーター 26 個。	36
3.21	図 3.20 を 4 枚使用した。	36
3.22	図 3.21 を 6 枚配置した。	37
3.23	Geant4 で定義した High-Energy Calorimeter 検出器。	37
3.24	3 つの検出器をそれぞれ z 軸正の方向から見た図。黒い点は、各検出器の中心。	38
3.25	Geant4 で定義した AMEGO 検出器。	38
3.26	シリコン半導体検出器の detector ID	41
3.27	Tracker の一層目のシリコン半導体検出器の detector ID	41
3.28	Tracker の detector ID を決める際に用いた ID	42
3.29	CZT 半導体検出器の読み出し口。	43
3.30	CZT 半導体検出器の detector ID	45
3.31	CZT 半導体検出器の detector ID	46
3.32	Low-Energy Calorimeter の detector ID を決める際に用いた各 ID	47
3.33	CsI シンチレータの読み出し口	48
3.34	CsI シンチレーターの detector ID	48

3.35 CsI シンチレーターの detector ID	49
3.36 High-Energy Calorimeter の detector ID を決める際に用いた各 ID	49
4.1 コンプトン再構成アルゴリズムをかける前のイベント数。	54
4.2 コンプトン再構成アルゴリズムをかけた後のイベント数。	54
4.3 再構成率。アルゴリズムをかける前のイベント数のうち、アルゴリズムをかけて反応順序をただ一つ抽出できたイベント数の割合。	55
4.4 正解率。反応順序をただ一つ抽出できたイベント数のうち、抽出したただ一つの反応順序が正解であるイベント数の割合。	56
5.1 簡単な検出器。	57
5.2 再構成率。アルゴリズムをかける前のイベント数のうち、アルゴリズムをかけて反応順序をただ一つ抽出できたイベント数の割合。シミュレーションで得られたコンプトン散乱と光電吸収のみによってガンマ線光子のエネルギーが全て検出器に落ちたイベントに対してアルゴリズムをかけた。	59
5.3 正解率。反応順序をただ一つ抽出できたイベント数のうち、抽出したただ一つの反応順序が正解であるイベント数の割合。シミュレーションで得られたコンプトン散乱と光電吸収のみによってガンマ線光子のエネルギーが全て検出器に落ちたイベントに対してアルゴリズムをかけた。	60
5.4 蛍光 x 線が 1 シグナル生じた 3 シグナルイベント。蛍光 x 線が出なければ、2 ヒットイベントとして処理されるべき。	61
5.5 簡単な検出器において、ガンマ線光子とは別のシグナルを生じる蛍光 x 線のエネルギースペクトル。Geant4 により 300 keV のガンマ線光子を簡単な検出器に照射したときに生じた 3 シグナルイベントについて、蛍光 x 線の既知のエネルギーと一致するエネルギーの統計を取った。	62
5.6 蛍光 x 線が走った距離 (赤)。飛び出した蛍光 x 線の反応位置と蛍光 x 線が生まれた相互作用とは別の相互作用の位置との距離 (青)。Geant4 により 300 keV のガンマ線光子を簡単な検出器に照射したときに生じた 3 シグナルイベントについて、シグナル間の距離の統計を取った。	63
5.7 マージ率。アルゴリズムをかける前のイベント数のうち、アルゴリズムをかけて蛍光 x 線のエネルギーをマージできたイベント数。	65
5.8 正解率。アルゴリズムをかけて蛍光 x 線のエネルギーをマージできたイベント数のうち、蛍光 x 線のシグナルとマージをする先のシグナルの判定が正解であるイベント数。	66
5.9 再構成率。蛍光 x 線のシグナルとマージをする先のシグナルの判定が正解だったイベント数のうち、コンプトン再構成アルゴリズムをかけて反応順序をただ一つ抽出できたイベント数の割合。	67
5.10 正解率。反応順序をただ一つ抽出できたイベント数のうち、抽出したただ一つの反応順序が正解であるイベント数の割合。	68
5.11 一番左の図は電子が 1 シグナル生じた 3 シグナルイベント。真ん中の図と一番右の図は電子が 2 シグナル生じた 4 シグナルイベント。	69

5.12	電子が走った距離(赤)と、その組み合わせ以外のシグナル間距離(青)のヒストグラム。Geant4により 300 keV のガンマ線光子を簡単な検出器に照射したときに生じた、ガンマ線光子のシグナル(1 から 2 シグナル)と電子のシグナル(1 から 2 シグナル)からなる 3 シグナルイベントについて統計を取った。	71
5.13	向かい合う層に飛び出した電子の 1 シグナルとガンマ線光子 1 シグナルの 2 シグナルイベントにおける、電子のシグナルのエネルギーとガンマ線のシグナルのエネルギーの二次元ヒストグラム。下図は、上図のデータ数を高さにした図である。Geant4 により 300 keV のガンマ線光子を簡単な検出器に照射したときに生じた電子 1 シグナル、ガンマ線光子 1 シグナルの 2 シグナルイベントについて統計を取った。	72
5.14	向かい合う層に飛び出した電子が後方散乱して元のガンマ線光子と同じ検出器に戻る電子 2 シグナルとガンマ線光子 1 シグナルの 3 シグナルイベントにおいて、散乱された後の電子のシグナルのエネルギーとガンマ線光子のシグナルのエネルギーの二次元ヒストグラム。Geant4 により 300 keV のガンマ線光子を簡単な検出器に照射したときに生じた電子 2 シグナル、ガンマ線光子 1 シグナルの 3 シグナルイベントについて統計を取った。	73
5.15	ガンマ線光子の 1 から 2 シグナルと電子の 1 から 2 シグナルからなる 3 シグナルイベントにおいて、ガンマ線光子から同じ層内に向けて飛び出した電子のシグナルとガンマ線光子のシグナルのエネルギーの二次元ヒストグラム。Geant4 により 300 keV のガンマ線光子を簡単な検出器に照射したときに生じた電子を含む 3 シグナルイベントについて統計を取った。	74
5.16	マージ率。アルゴリズムをかける前のイベント数のうち、アルゴリズムをかけて電子のエネルギーをマージできたイベント数。	76
5.17	正解率。アルゴリズムをかけて蛍光 x 線のエネルギーをマージできたイベント数のうち、電子のシグナルとマージをする先のシグナルの判定が正解であるイベント数。	77
5.18	再構成率。電子のシグナルとマージをする先のシグナルの判定が正解だったイベント数のうち、コンプトン再構成アルゴリズムをかけて反応順序をただ一つ抽出できたイベント数の割合。	78
5.19	正解率。反応順序をただ一つ抽出できたイベント数のうち、抽出したただ一つの反応順序が正解であるイベント数の割合。	79
5.20	Geant4 のシミュレーションにより得られた全エネルギーがデポジットした 3~5 シグナルイベントに対して、マージアルゴリズムを加えることで正しくコンプトン再構成されるイベント数の増加割合を調べた。	81
6.1	100-600 keV のガンマ線を簡単な検出器に入射する Geant4 シミュレーションによって得られた全エネルギーがデポジットした 2~5 シグナルイベントに対して、コンプトン再構成アルゴリズムと蛍光 x 線のマージアルゴリズム、電子のマージアルゴリズムの三つを用いてコンプトン再構成を行い、コンプトン散乱後に光電吸収が生じている本来 25 ヒットのイベントのうち、正しくコンプトン再構成されるイベント数の割合を調べた。	82
6.2	100-600 keV のガンマ線を簡単な検出器に入射する Geant4 シミュレーションによって得られた全エネルギーがデポジットした 2~5 ヒットイベントのうち、2 ヒットイベントの割合を調べた。	83

- 6.3 100-600 keV のガンマ線を簡単な検出器に入射する Geant4 シミュレーションによって得られた全エネルギーがデポジットした 2~5 ヒットイベントのうち、蛍光 x 線や電子が飛び出したイベントの割合を調べた。 83
- 6.4 300 keV のガンマ線を簡単な検出器に入射する Geant4 シミュレーションによって得られた全エネルギーがデポジットした 2~5 シグナルイベントに対して、コンプトン再構成アルゴリズムと蛍光 x 線のマージアルゴリズム、電子のマージアルゴリズムの三つを用いてコンプトン再構成を行った結果をまとめた。 84

第1章 はじめに

1.1 MeV ガンマ線天文学

MeV 帯域のガンマ線は、中性子星合体や超新星爆発による元素合成や、ガンマ線バースト、粒子加速天体、ブラックホールや中性子星などのコンパクト天体からの放射など、様々な天体現象の観測が予想されている。このため、MeV ガンマ線天文学は、多波長天文学やマルチメッセンジャー天文学において大きく期待されている。しかし、その観測は困難なため、1990年代のCGRO衛星に搭載されたCOMPTEL以降はほとんど観測されていない。特に、0.1 MeV から 10 MeV までの MeV ガンマ線は、反射鏡を用いた集光ができず、検出器において主にコンプトン散乱を繰り返すため、到来方向やエネルギーの測定は難しい。[4][5]

1.2 ガンマ線バースト

ガンマ線バーストは、宇宙で生じる天体現象の中で最も明るい、突発的な物理現象である。数秒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。この放射をプロンプト放射と呼んでいる。プロンプト放射は、100 keV から 1 MeV 付近で特に強い放射をする。また、プロンプト放射の後数日間にわたってガンマ線、X線、可視光、電波などが観測されることがあり、これらの電磁波は残光と呼ばれている。プロンプト放射の発生機構は完全には解明されていないが、いくつかの説が提唱されており、その一つに、シンクロトロン放射がある。シンクロトロン放射とは、光速に近い速度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り、偏光度が高い。もし、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ため、こ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機構を探ることができる。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、突発的に発生し、継続時間も短いため観測が難しい。そのため、突発天体現象の観測に適した観測衛星が必要となる。[7]

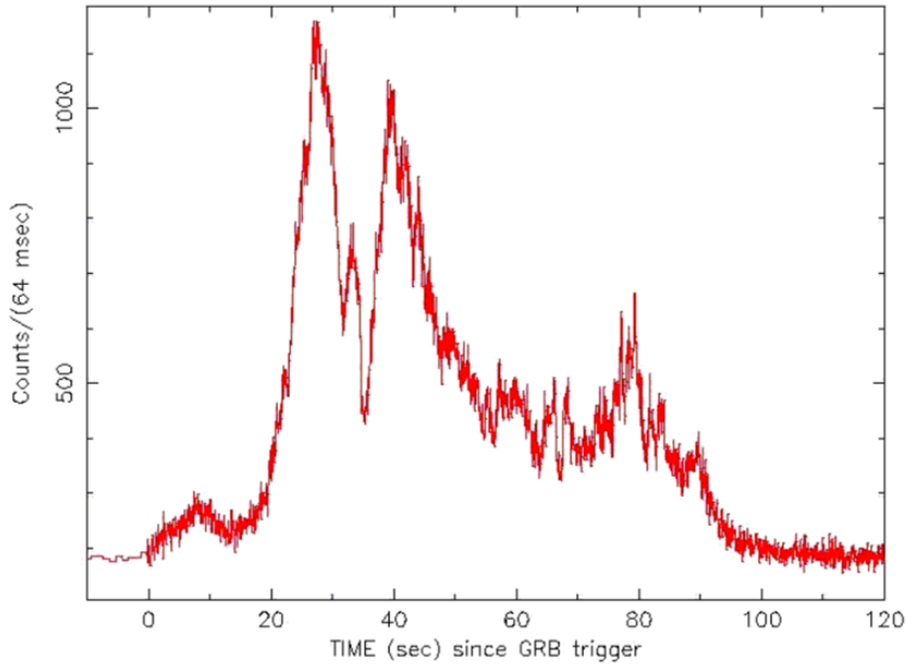


図 1.1: CGRO 衛星が観測した典型的なガンマ線バーストの強度変化 [3]

1.3 AMEGO 計画

AMEGO は、2030 年ごろの打ち上げを目指す全天 MeV ガンマ線観測衛星計画のことである。CGRO 衛星に搭載された COMPTEL 検出器以降、観測が進んでいない 0.1 MeV から 100 MeV の MeV 帯域のガンマ線観測において期待されている。AMEGO と COMPTEL 及びその他の衛星の感度を図 1.2 に表した。また、AMEGO は、2.5 sr の広い視野や数 100 keV から数 GeV の広いエネルギー帯域、高い偏光感度でガンマ線観測を行うことができるため、マルチメッセンジャー天文学の進歩に大きく寄与することが期待されており、全天ガンマ線モニターであるフェルミ衛星の後継機としても期待されている。また、一つの天体を長期間連続して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 の性能を図 1.3 に示した。AMEGO は、NASA の衛星計画として、大型衛星版 (Probe mission) の AMEGO とともに、中型衛星版 (MIDEX) で検出器の構成が縮小した AMEGO-X が提案された。いずれも 2022 年度では採択されなかったが、今後のさらなる提案に向けて計画が進んでいる。本修論では主に AMEGO に関する研究を行う。[1]

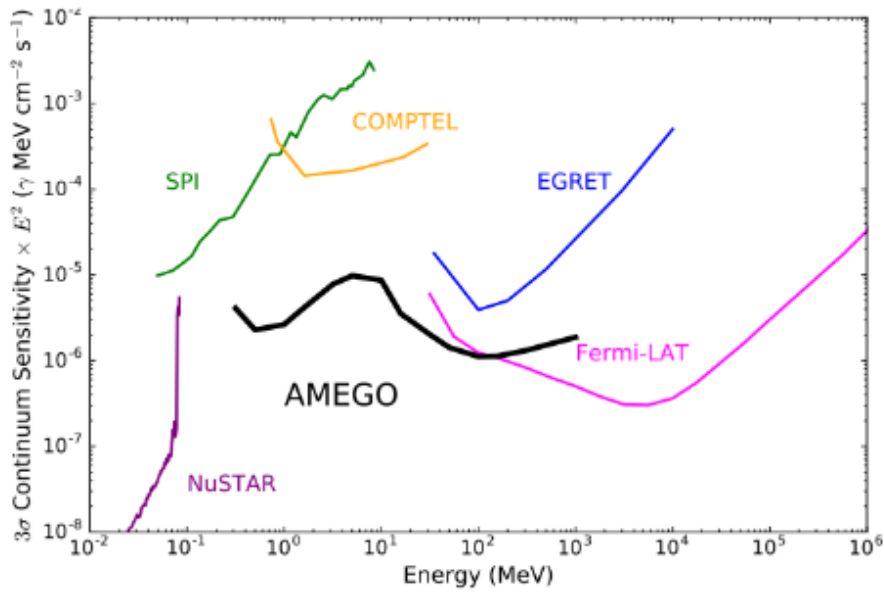


図 1.2: AMEGO の感度 [1]

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

図 1.3: AMEGO の性能 [1]

1.4 MeV ガンマ線の相互作用

MeV ガンマ線は、いくつかの方法で物質と相互作用する。MeV ガンマ線観測において特に重要な反応は、光電吸収、コンプトン散乱、電子陽電子対生成である。この三つの反応は、入射ガンマ線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。以下で、それぞれについて説明する。

1.4.1 光電吸収

光電吸収は、入射したガンマ線の光子が物質中の原子に束縛された電子と反応し、光子が完全に消滅する相互作用である。このとき、反応した電子は、光子のエネルギー $h\nu$ から結合エネルギー E_o を引いたエネルギー E_{e^-} を持つ光電子となり、原子から飛び出す。

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

十分なエネルギーを持ったガンマ線が入射する場合、原子の中で最も強く結合している K 殻の電子が光電子として放出される確率が最も高い。

飛び出した光電子は、さらにほかの複数の原子と衝突して、多くの自由電子を作り出し、それが電気信号として検出される。内殻の電子が光電子として放出された場合、原子がエネルギー的に不安定となるため、空いた内殻に外殻の電子が遷移し、安定になろうとする。そのとき、外核と内殻のエネルギー準位の差分のエネルギーを持った光子（蛍光 x 線）あるいは、原子内の電子（オージェ電子）が放出される。例えば、K 殻の電子が光電子として放出される場合、まず K 系列の蛍光 x 線が生じ、K 殻を埋めた電子を供給した外殻の空席がさらに外側の殻の電子によって埋められるため、K 系列に続いて L、M、... と順次蛍光 x 線が放出される。ここで、K 系列の蛍光 x 線のエネルギーが最大であり飛程が比較的長いいため、ガンマ線観測において最も重要になる。[10]

1.4.2 コンプトン散乱

コンプトン散乱は、入射したガンマ線の光子が物質中の電子に衝突し散乱される相互作用である。その結果、光子のエネルギーの一部を受け取った反跳電子とエネルギーが減少した散乱ガンマ線光子の二つが生じる。図 1.4 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 θ 、入射したガンマ線の光子のエネルギー 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。検出器の中で生じる相互作用がコンプトン散乱一回のみでは、光子の情報の一部しか得られないため、有効なイベントにならないが、検出器中で複数のコンプトン散乱および光電吸収が生じると、有効なイベントとして使うことができる。[10]

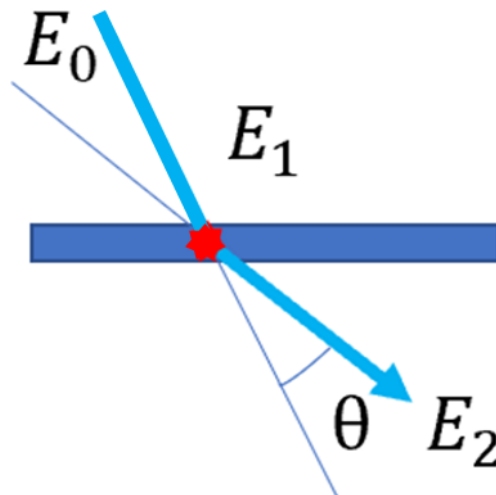


図 1.4: コンプトン散乱体でのコンプトン散乱。入射光子のエネルギーを E_0 、光子の落としたエネルギーを E_1 、散乱した後の光子のエネルギーを E_2 、散乱角を θ とした。水色の太い矢印が入射光子の飛跡。

1.4.3 電子陽電子対生成

電子陽電子対生成は、入射したガンマ線の光子が物質中で完全に消滅し、電子と陽電子が生じる相互作用である。入射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 を超えることで、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。最終的に陽電子は電子と対消滅し、電子と陽電子のそれぞれの静止エネルギー 511 keV を持つガンマ線光子が2個生じる。この反応は、10 MeV 以上のガンマ線を測定するための主要な相互作用である。

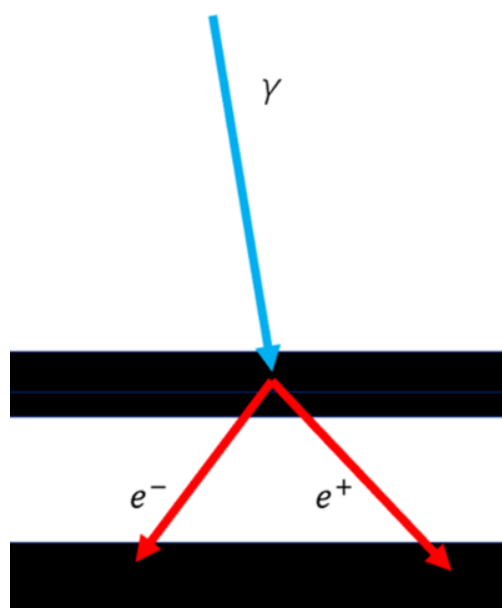


図 1.5: 電子陽電子対生成

1.5 コンプトン再構成

コンプトン再構成とは、検出器で生じたコンプトン散乱および光電吸収から、散乱の過程を再構成し、ガンマ線光子の入射エネルギーや到来方向を求めることである。また、この再構成によって、ガンマ線の偏光情報が得られるようになる。図 1.6 にエネルギー E_0 を持ったガンマ線光子がコンプトン散乱によってエネルギー E_1 を検出器に落として散乱し、光電吸収によってエネルギー E_2 失い、消失した様子を表した。

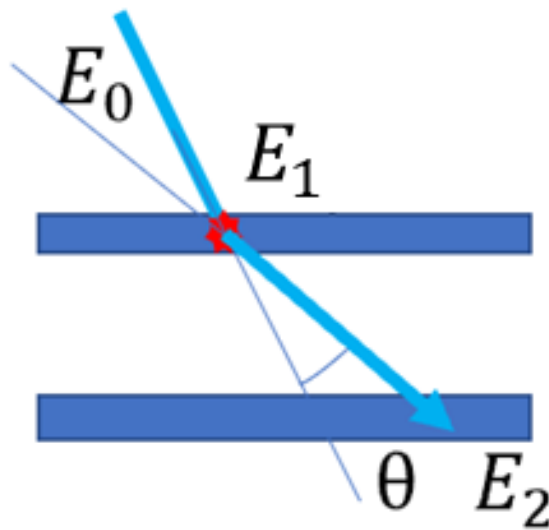


図 1.6: コンプトン散乱後に光電吸収が生じる様子。入射光子のエネルギーを E_0 、光子が落としたエネルギーを E_1 、散乱後の光子のエネルギーを E_2 、散乱角を θ とした。水色の太い矢印を入射光子の飛跡とする。

このとき、検出器に落ちたエネルギー E_1 と E_2 から、入射光子のエネルギー E_0 と散乱後のエネルギー E_2 が得られるため、式 (1.1) から、

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

となり、散乱角 θ を求めることができる。そして、光子が検出器で反応した位置から、光子の到来方向を図 1.7 の角度 θ 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、この円錐はガンマ線の入射方向の平面と交わり、その交線をコンプトンコーンと呼ぶ。

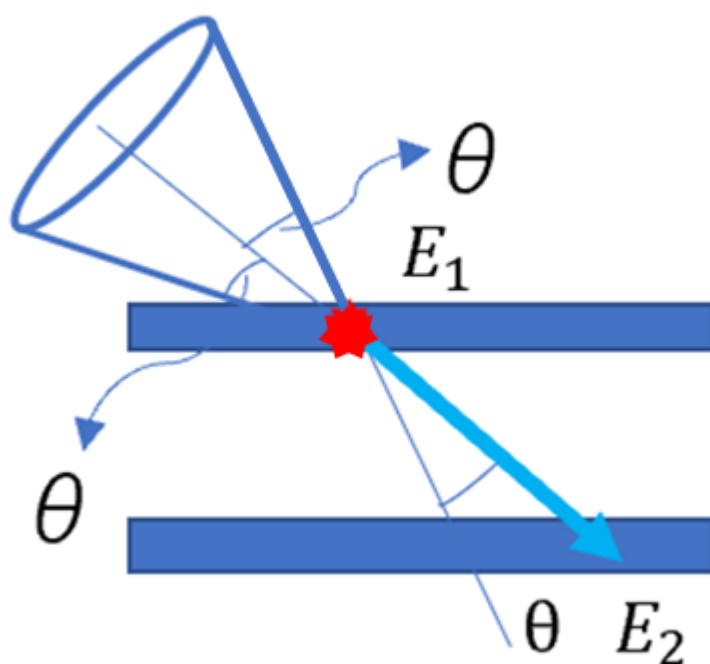


図 1.7: コンプトン再構成

同じ光源から到来した複数の光子に対して、同じようにコンプトンコーンを描くと、図 1.8 のように交点生まれ、そこを光子の到来方向と見なす。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。

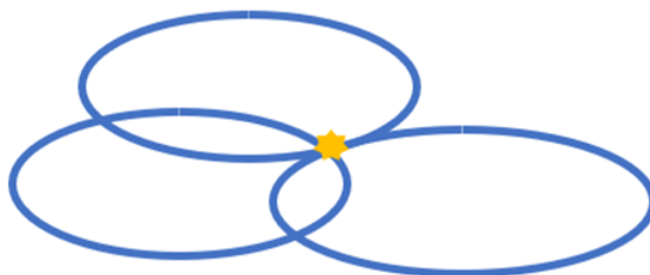


図 1.8: コンプトンイメージングの概念図

入射光子のエネルギーが約 1 MeV 以上の場合、コンプトン散乱の際に反跳電子がはじき出される。この反跳電子の移動方向を検出できない場合は、図 1.9 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ことがある。一方、反跳電子の飛跡を検出できる場合は、各ガンマ線の到来方向をコンプトンコーン

ンの一部の方位角範囲に制限できるため、図 1.9 の右図のように、コンプトンコーンを本来の光源付近に制限することができるため、別の光源と交わることなく、より正確なコンプトンイメージングが可能になる。

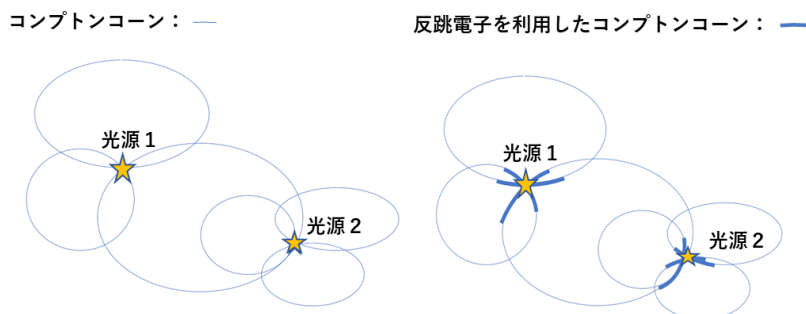


図 1.9: 反跳電子を利用せずに行ったコンプトンイメージング (左図) と反跳電子を利用して行ったコンプトンイメージング (右図)。

1.6 MeV ガンマ線の偏光観測

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ため、この原理を用いて MeV ガンマ線の偏光を観測することができる。図 1.10 のように、コンプトン散乱が生じたとする。この時、真上から検出器を見たときの光子の散乱方向と偏光方向を図 1.11 に表した。ガンマ線が偏光しているときは、図 1.11 のように、光子は偏光方向に対して垂直な方向に散乱されやすい。

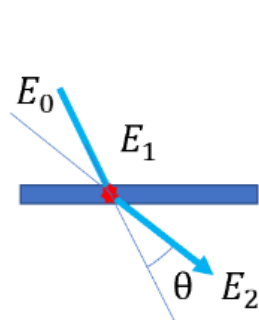


図 1.10: コンプトン散乱の様子。入射光子のエネルギーを E_0 、光子が落としたエネルギーを E_1 、散乱後の光子のエネルギーを E_2 、散乱角を θ とした。

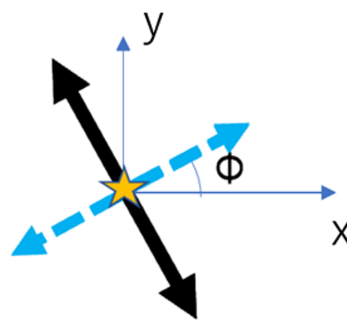


図 1.11: 図 1.10 を検出器の真上から見た図。黒い矢印が偏光方向を表しており、水色の点線の矢印が光子の散乱方向となっている。また、 xy 平面に散乱方向を射影したときの x 軸からの角度を Φ としている。

直線偏光をしているガンマ線と検出器との間でコンプトン散乱が生じると、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ガンマ線の偏光方向と

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 1.12 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) を作ると、図 1.12 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、

$$N(\phi) = A - B \cos(2(\phi - \phi_0)) \quad (1.3)$$

で表すことができる。ここで、 ϕ_0 は偏光方向の x 軸からの角度とした。

ここで、 Π を、図 1.12 の N_{max} と N_{min} から、

$$\Pi = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}} \quad (1.4)$$

とする。入射光が完全偏光の場合の Π が Π_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

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

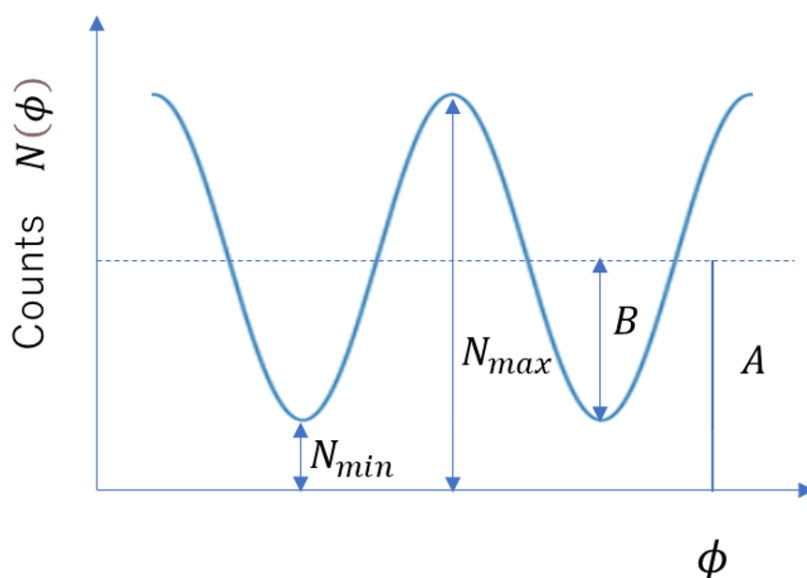


図 1.12: モジュレーションカーブ。散乱角度 ϕ を横軸、カウントを縦軸とするヒストグラム。隣り合うカウントの最大値と最小値の角度の差は $\frac{\pi}{2}$ となる。

1.7 研究目的

宇宙最大の爆発現象であるため、初期宇宙の解明やマルチメッセンジャー天文学などにおいて欠かせない天体であるガンマ線バーストのプロンプト放射の発生メカニズムを解明するためには、ガンマ線偏光を観測することが重要であると考えている。ガンマ線バーストのプロンプト放射は 100 keV から 1 MeV で特に強い放射をするため、そのエネルギー帯の観測が可能な AMEGO のガンマ線偏光観測によって発生メカ

ニズムが明らかになると考えられる。AMEGO は、数 100 keV から 1 MeV においては、多くの散乱において反跳電子を利用した、より正確なイメージングを行うことができないが、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、AMEGO によるガンマ線バーストのガンマ線偏光観測を検討することを目的として、数 100 keV から 1 MeV における反跳電子を利用しないコンプトン再構成の検討を行う。本研究では、まず AMEGO とガンマ線の反応を模擬するシミュレータを作成し、それを利用してコンプトン再構成アルゴリズムを構築した。

第2章 AMEGO による MeV ガンマ線観測

2.1 AMEGO 検出器

AMEGO は、Tracker、Low-Energy Calorimeter、High-Energy Calorimeter の三つの検出器を搭載する。AMEGO の検出器の展開図を、図 2.1 に示した。

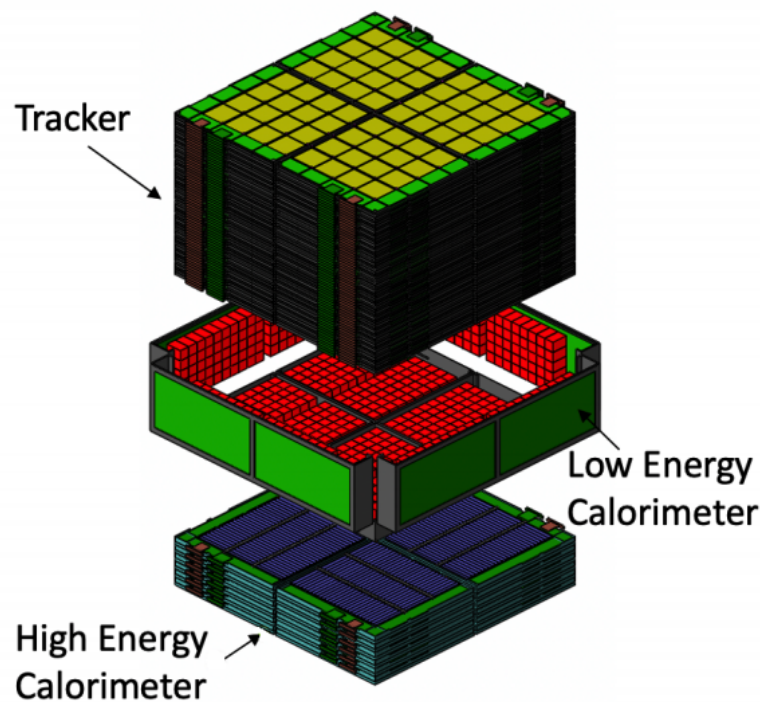


図 2.1: AMEGO の検出器の展開図 [1]

2.1.1 Tracker

Tracker は、合計 3840 枚の両面シリコンストリップ検出器で構成される。この両面シリコンストリップ検出器には、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が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の計測も行う。両面シリコンストリップ検出器の概念図を図 2.2 に表した。厚さ $500\ \mu\text{m}$ の図 2.3 を 4 つ平面上に正方形型

に並べたものを一層として合計 60 層重ねることで、多重散乱の影響を最小限に抑えつつ、トラッカー内で十分なガンマ線相互作用 (主にコンプトン散乱) の確率を得ることができる。

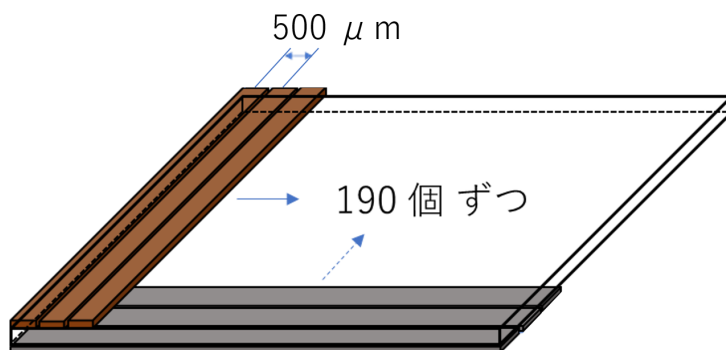


図 2.2: 両面シリコンストリップ検出器の概念図

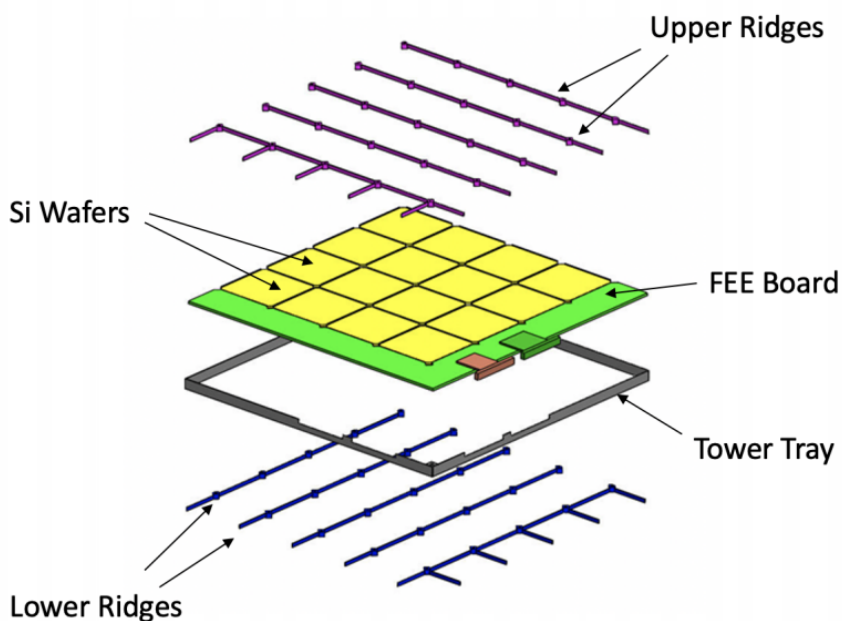


図 2.3: 両面シリコンストリップ検出器 16 枚を 4 × 4 で配置したもの [1]

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る。CdZnTe 半導体検出器は、図 2.4 の左図のように、カソードが 1 チャンネル、アノードが 5 チャンネルの合計 6 チャンネルの読み出し口が付く。760 個の図 2.4 の右図が、図 2.5 のように組み立てられる。Low-Energy Calorimeter はコンプトン散乱光子のエネルギーや反応位置を測定するための検出器であり、検出可能なコンプトン散乱の散乱角をより大きくするために Tracker の下から約 3 分の 1 を覆うように設置される。

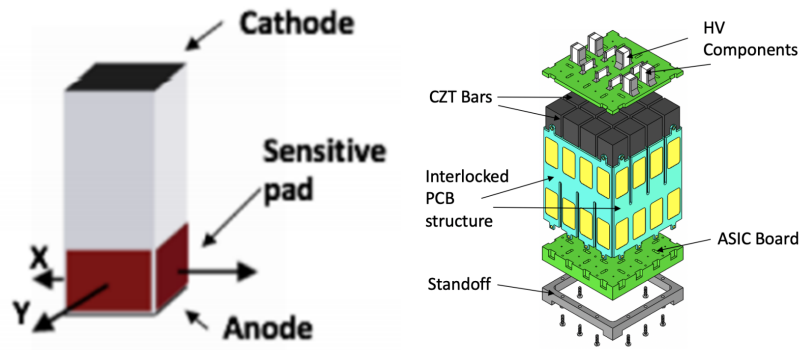


図 2.4: CdZnTe 半導体検出器の読み出し口 (左図)[12] と CdZnTe 半導体検出器を 16 個合わせたモジュール (右図)[1]。

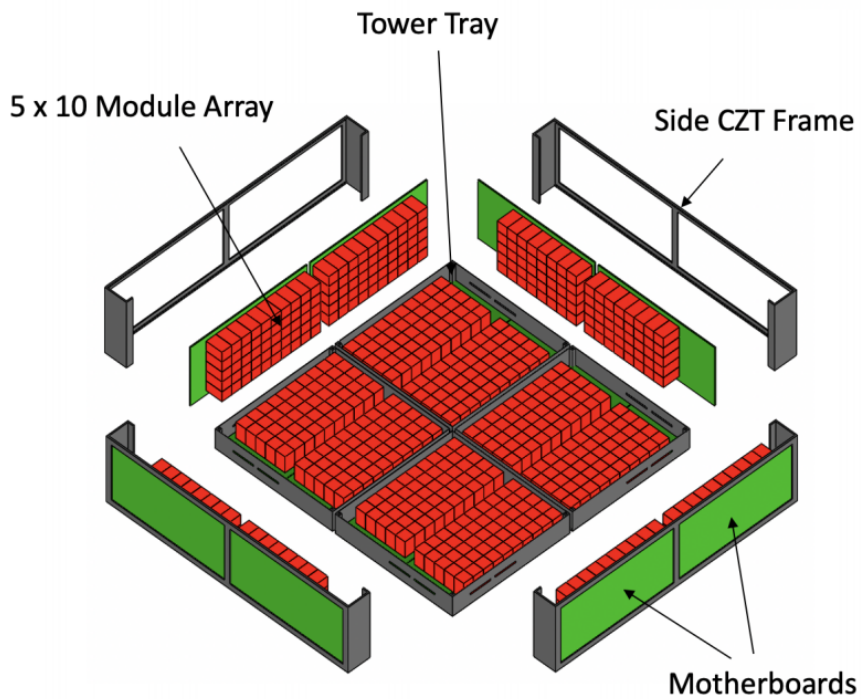


図 2.5: Low-Energy Calorimeter の構造 [1]

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る。また、CsI(Tl) シンチレーターは、図 2.6 のように両側に SiPM が付いており、読み出し口が合計 2 チャンネルとなる。図?? を 4 つ平面上に正方形型に並べたものを一層とし、それが 6 つ重なった合計 6 層の構造をとる。High-Energy

Calorimeter は、より高エネルギーの入射ガンマ線と Tracker との間で生じる電子陽電子対生成によって放出される電子や陽電子などの位置やエネルギーの測定を可能にするために、Low-Energy Calorimeter の下に配置される。



図 2.6: CsI(Tl) シンチレータの読み出し口

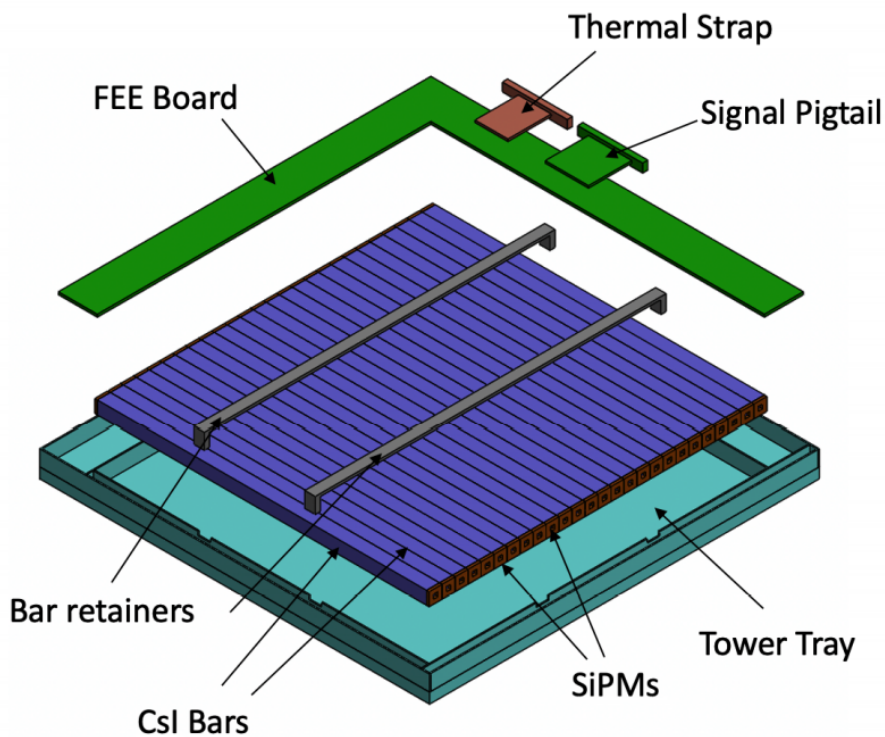


図 2.7: CsI(Tl) シンチレータを 26 本用いたもの [1]

2.2 AMEGO 検出器を使った MeV ガンマ線観測

図 2.8 に、ガンマ線光子と各検出器の反応を表した。

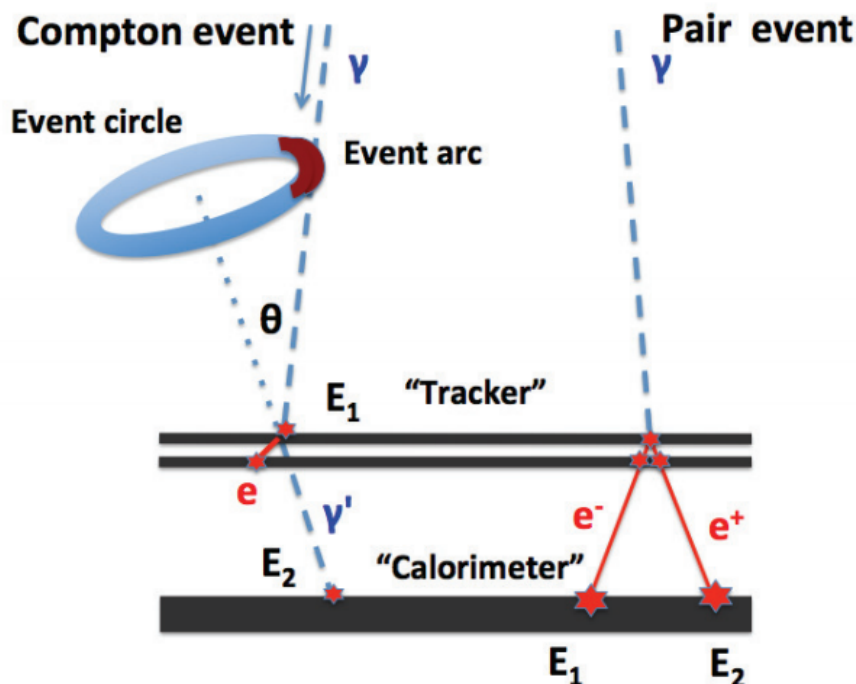


図 2.8: 各検出器とガンマ線光子の相互作用。図の左側のイベントは、コンプトン散乱の後に光電吸収が生じるイベント。図の右側のイベントは、電子陽電子対生成後に生じた電子と陽電子が検出器によって捕らえられるイベント。[1]

2.2.1 0.1 MeV から 10 MeV における MeV ガンマ線観測

0.1 MeV から 10 MeV のガンマ線が AMEGO に入射した場合、検出器においては主にコンプトン散乱と光電吸収が生じる。主に Tracker においてコンプトン散乱が生じ、散乱されたガンマ線光子は最終的に Low-Energy Calorimeter での光電吸収によって消失する。Tracker と Low-Energy Calorimeter で検出されたガンマ線光子の反応位置と落としたエネルギーを用いてコンプトン再構成し、コンプトンイメージングを行う。

2.2.2 10 MeV 以上における MeV ガンマ線観測

10 MeV 以上のガンマ線が入射する場合は、主に電子陽電子対生成が生じる。電子陽電子対生成は主に Tracker で生じ、生成された電子と陽電子は High-Energy Calorimeter において吸収される。各検出器で検出されたエネルギーと反応位置から、電子や陽電子の飛跡を再構成することで、イメージングを行う。

第3章 シミュレーション環境の構築

3.1 Geant4 と ComptonSoft について

コンプトン再構成アルゴリズムの開発は、コンピュータ上において MeV ガンマ線と検出器との相互作用を模擬するシミュレータを利用して行った。シミュレーションを行うために使用した Geant4 と ComptonSoft について、以下で説明する。

3.1.1 Geant4

Geant4 とは、素粒子の物質中における飛跡をシミュレートするためのツールキットである。高エネルギー物理学や放射線医学などの分野の研究で使われる。C++を用いており、特定の機能を持つ複数のクラスで構成されている。主なクラスを以下に記した。

- DetectorConstruction クラス：検出器など、構造物の定義を行うためのクラス。
- PrimaryGeneratorAction クラス：入射する初期粒子の定義を行うためのクラス。
- EventAction クラス：入射した粒子ごとの結果の取得や出力の仕方を定義するクラス。

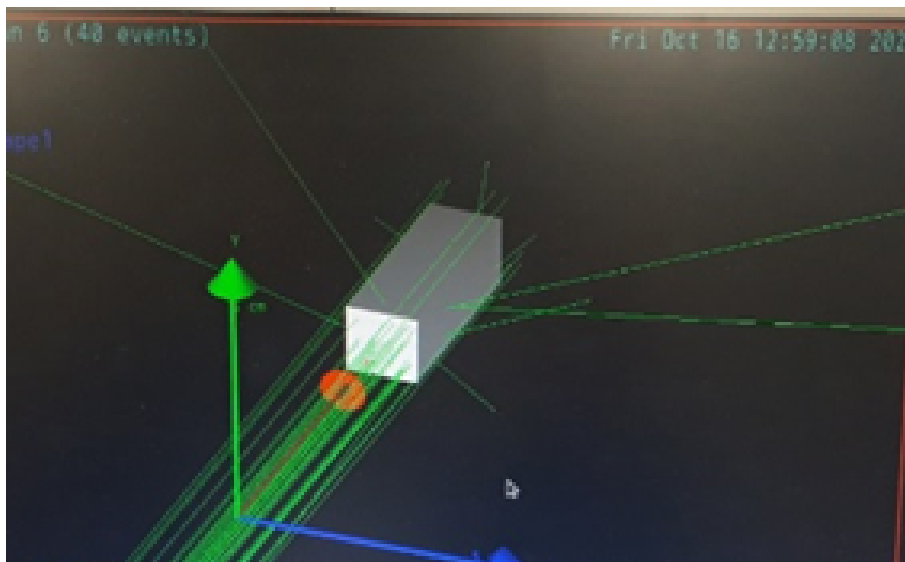


図 3.1: Geant4 を使ったシミュレーション。中央にある灰色の物体に、ガンマ線を照射した。ガンマ線の飛跡は緑色の線で表されている。

3.1.2 ComptonSoft

本研究では、Geant4 と同時に ComptonSoft を利用してシミュレーションを行った。ComptonSoft は、ひとみ衛星の性能の検証に用いられたソフトである。(ComptonSoft についての詳細は、<https://github.com/odakahirokazu/ComptonSoft> にある)。ComptonSoft では、読み出し口ごとに位置分解能やエネルギー分解能、トリガースレッシュOLDといった、検出器のシミュレーションを行うことができる。粒子が物質と反応した位置や落としたエネルギーを取得するために Geant4 を使い、Geant4 で得られた値に検出器の読み出し口ごとの測定誤差などを反映させるために ComptonSoft を用いた。

ここで、本研究で使用する語句の説明をする。光子が検出器に入射して反応し終わるまでを「イベント」と呼び、1 イベント内で入射光子と検出器との間で生じた各相互作用を「ヒット」と定義する。検出器の各読み出し口には「ID」と呼ばれる番号を付けており、各読み出し口は「チャンネル」と呼んでいる。また、各読み出し口が取得した信号を「シグナル」と定義する。

ComptonSoft と Geant4 を用いたシミュレーションにおいて、検出器が取得した情報はイベント順に記録され、各イベント内の情報は、時系列なヒット順ではなく、小さい番号の検出器かつ小さい番号のチャンネルで取得したヒットから順に記録される。シミュレーションの結果は各ヒット毎に記録され、1 イベント内で何番目に記録されたヒットであるか、どの検出器のどのチャンネルで反応したのか、どれだけのエネルギーが落とされたのかなどの情報が得られる。以下に、各ヒットで得られる主な情報について記載した。

- eventid : 記録されたイベントの番号
- ihit : イベント内で記録されたヒットの番号
- 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 : 検出器で生じた相互作用の位置 (x 方向)
- real_posy : 検出器で生じた相互作用の位置 (y 方向)
- real_posz : 検出器で生じた相互作用の位置 (z 方向)
- energy : 各ヒットで読み出し口が取得したエネルギー
- posx : 相互作用を検出した読み出し口の中心の位置 (x 方向)
- posy : 相互作用を検出した読み出し口の中心の位置 (y 方向)
- posz : 相互作用を検出した読み出し口の中心の位置 (z 方向)
- ini_energy : 入射光子のエネルギー

3.2 AMEGO ジオメトリの定義

Geant4 において、AMEGO 検出器のジオメトリを定義した。検出器の形状や大きさ、材質については、AMEGO チーム [9] から得られた情報をもとに設定した。なお、読み出しのために必要な回路基盤などの部品は除いて作成した。

AMEGO 検出器は、Tracker、Low-Energy Calorimeter、High-Energy Calorimeter の三つからなる。Tracker は、Si で構成されており、密度を 2.34 g/cm^3 とした。Low-Energy Calorimeter は、CdZnTe で構成されており、密度を 5.81 g/cm^3 とした。High-Energy Calorimeter は、CsI として、密度を 4.53 g/cm^3 とした。本来、High-Energy Calorimeter は、CsI(Tl) で構成されるが、Tl の含有量がほんのわずかであり、光子との反応確率は低く、密度も CsI 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。

検出器の密度を ρ 、検出器の厚さを d 、反応断面積を σ とすると透過率 P は以下の式で表せる。

$$P = \exp(-\rho\sigma d) \quad (3.1)$$

この透過率の式から、定義した AMEGO の各検出器に対するガンマ線の透過率を求め、図 4.2 に示した。反応断面積には、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ているため、求めた透過率は光電吸収とコンプトン散乱が生じない確率を表している。

表 3.1: 各検出器の物質の定義

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

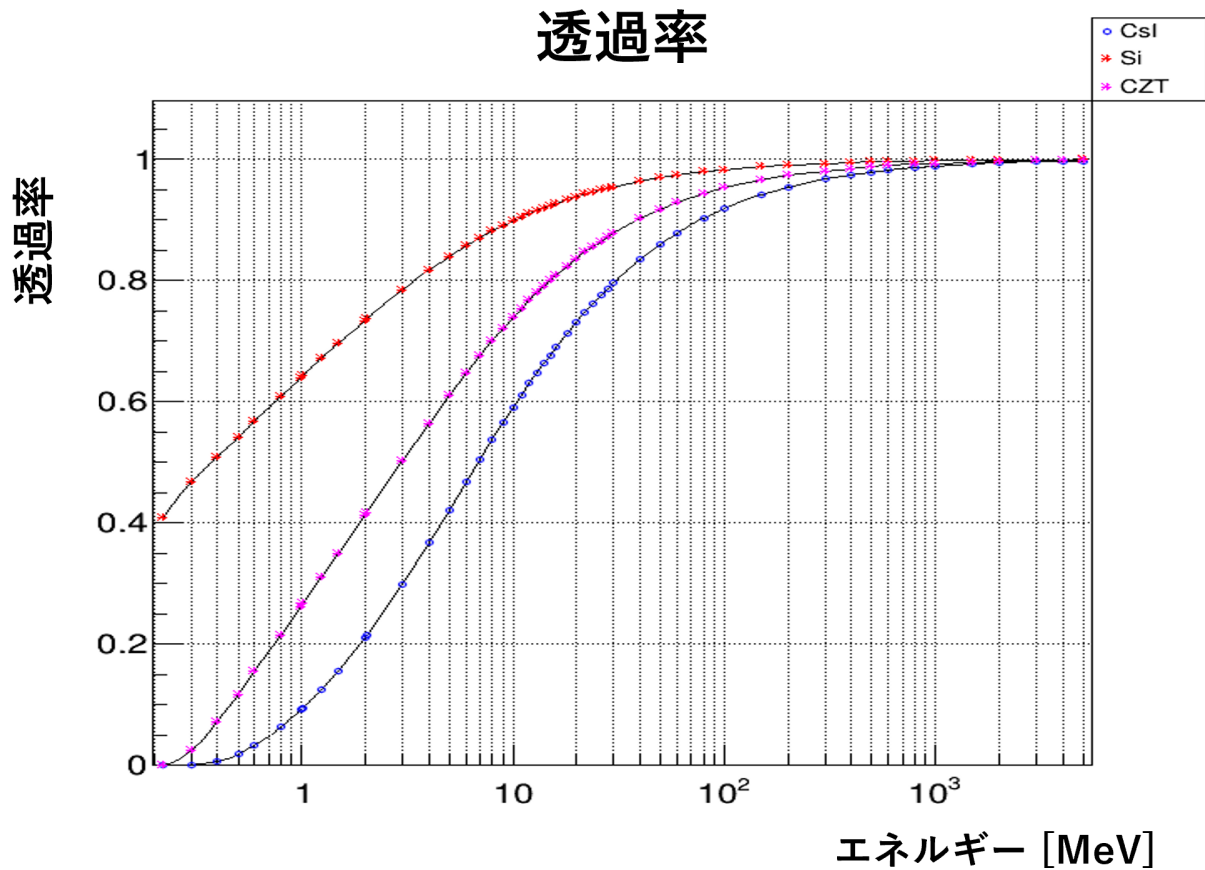


図 3.2: 各検出器に対するガンマ線の透過率。

以下で、Tracker、Low-Energy Calorimeter、High-Energy Calorimeter の形状や大きさ、配置の定義について簡単に説明する。

3.2.1 Tracker の定義

1. シリコン半導体一枚の厚さを 0.5 mm、大きさを $95 \times 95 \text{ mm}^2$ と定義した。
2. 平面上に 4×4 の正方形型でシリコン半導体を並べた (図 4.4)。
3. 30 mm の間隔を取りながら、平面上に 2×2 の正方形型になるように並べたものを一層とした。
4. Tracker モジュール一層を縦方向に 10 mm の間隔を取りながら 60 枚重ねた (図 3.5, 図 3.6)。Geant4 で定義した Tracker 検出器を図 3.8 に示した。

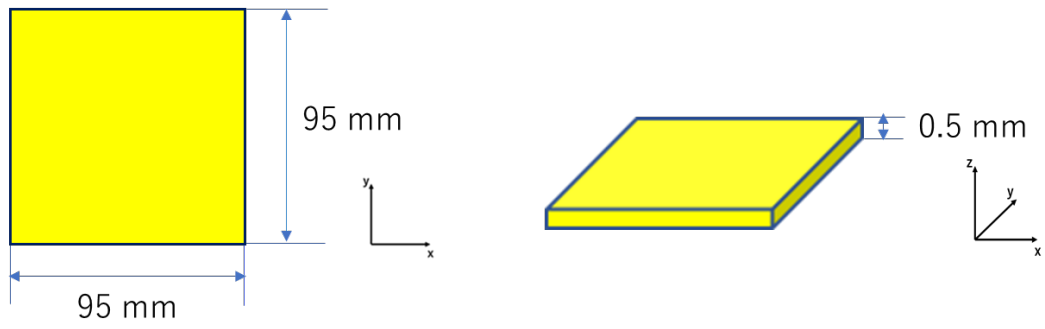


図 3.3: シリコン半導体一枚。

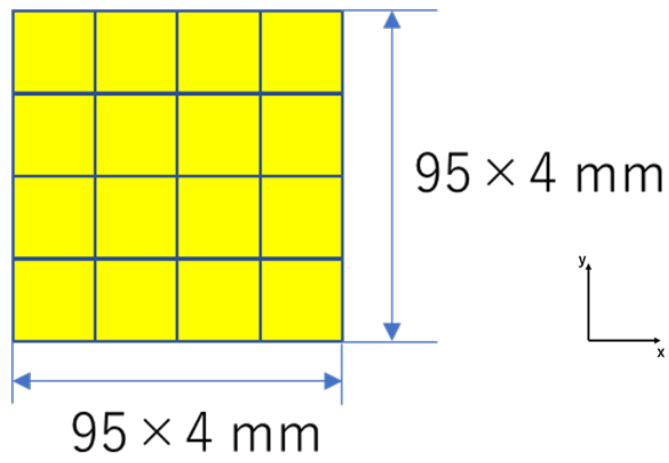


図 3.4: 図 4.3 を 16 枚使用した。

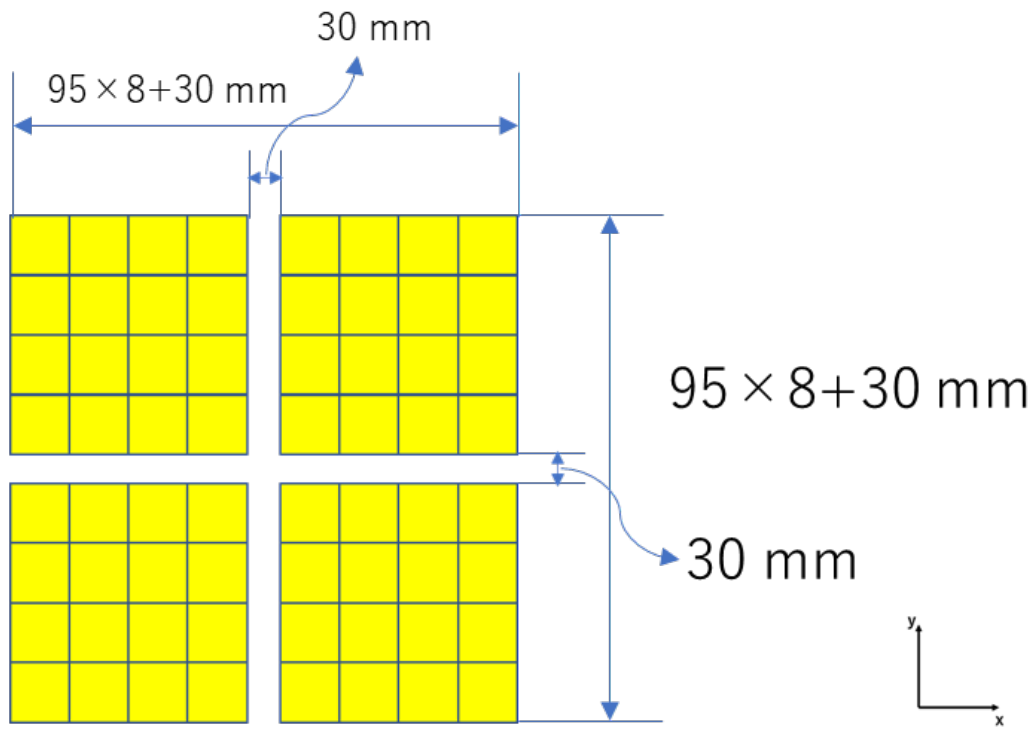


図 3.5: 図 4.4 を 4 枚使用した。

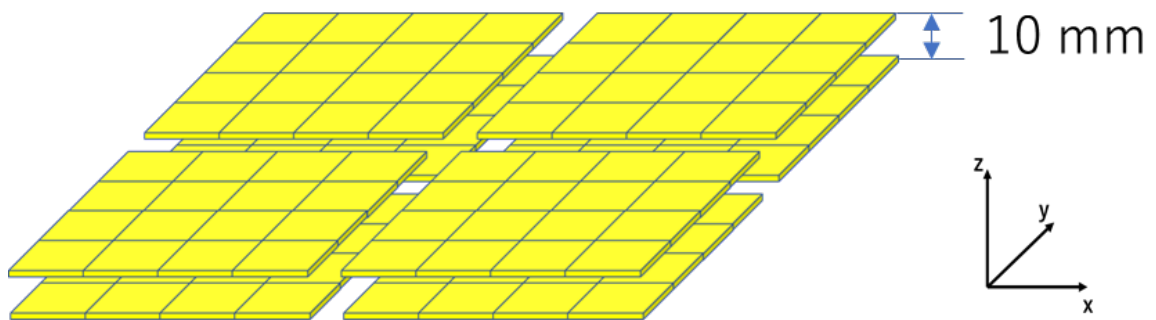


図 3.6: 図 3.5 を 10mm の間隔を取り、重ねた。

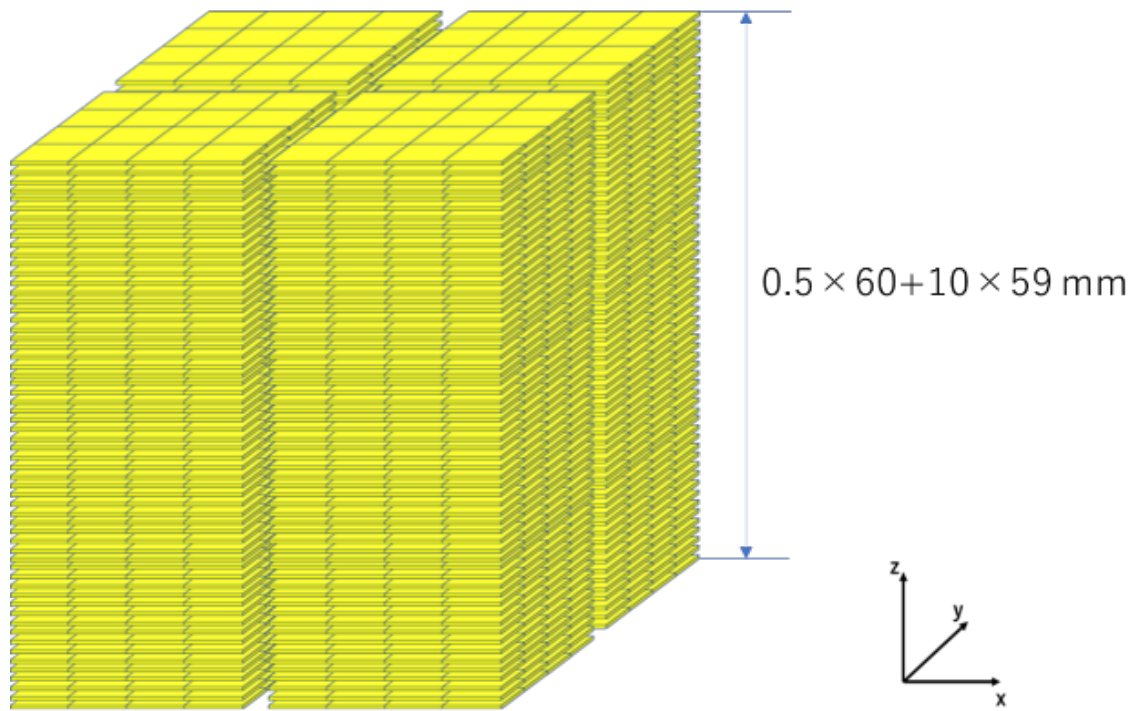


図 3.7: 図 3.5 を 60 枚重ねた。

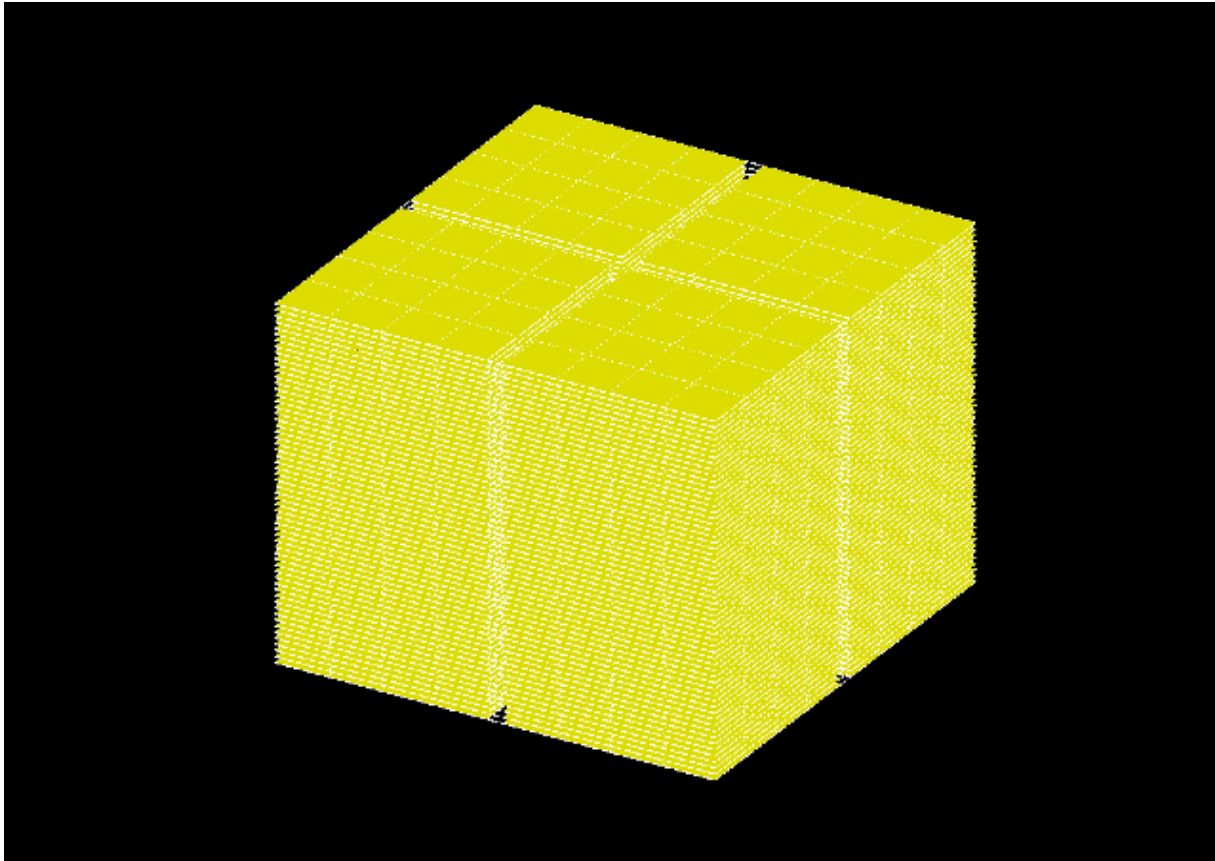


図 3.8: Geant4 で定義した Tracker

3.2.2 Low-Energy Calorimeter の作成

1. CZT 半導体 1 個の厚さを 40 mm、大きさを $8 \times 8 \text{ mm}^2$ として定義した (図 3.9)。
2. CZT 半導体 16 個を平面上に 4×4 で詰めたものを 1 つのモジュールとして定義した (図 3.10)。
3. CZT 半導体のモジュール 50 個を xy 平面と yz 平面上にそれぞれ 5×10 となるように配置した (図 3.11, 図 3.12)。また、CZT 半導体のモジュール 40 個を xz 平面上に 5×8 となるように配置した (図 3.13)。
4. 3 で xy 平面上に配置した 50 個のモジュールをもう一組、隣り合うように配置したもの (図 3.14) を、 xy 平面上に 2×2 となるように配置した (図 3.15)。
5. 3 で yz 平面上に配置したもの 4 組と xz 平面上に配置したもの 4 組を、4 で作成した 400 個のモジュールの上に囲うように配置した (図 3.16)。図 3.16 を x 軸正と y 軸負の方向からそれぞれ見た Low-Energy

Calorimeter を図 3.17 に示した。Geant4 上で定義した Low-Energy Calorimeter 検出器を図 3.18 に示した。

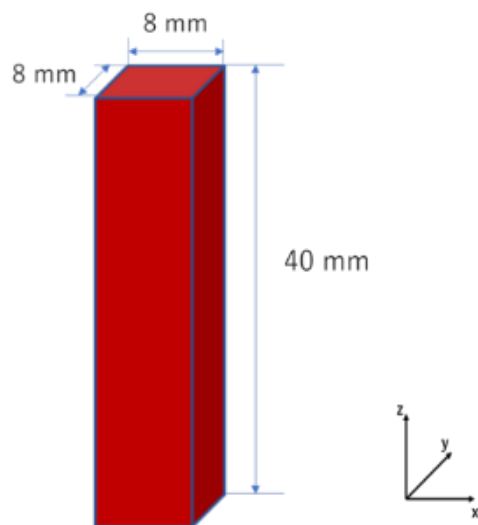


図 3.9: CZT 半導体 1 個。

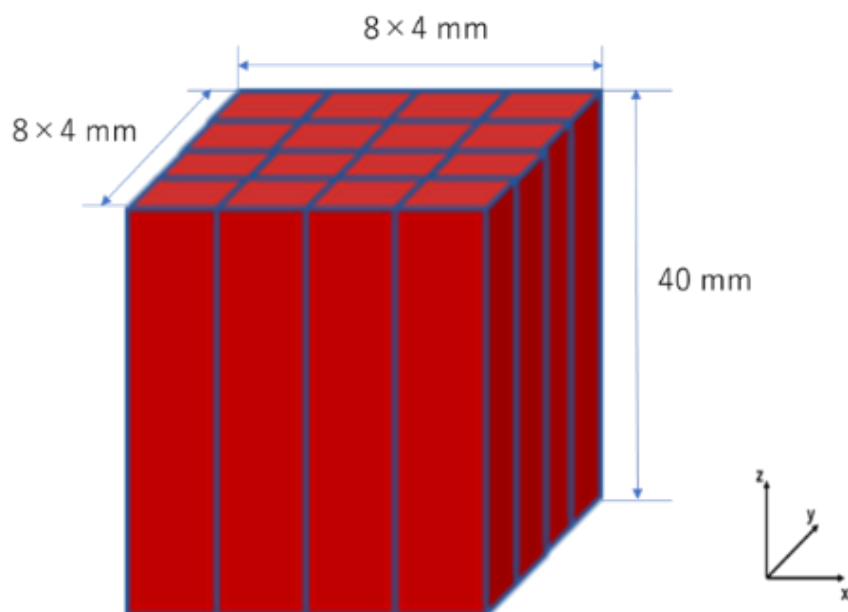


図 3.10: CZT 半導体 16 個

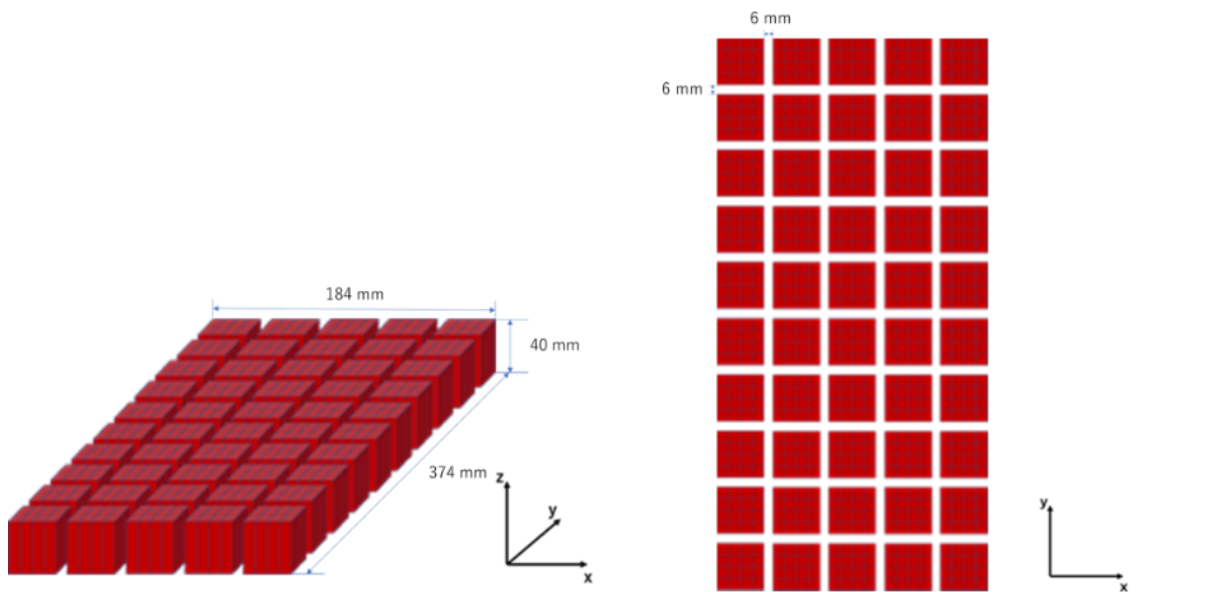


図 3.11: 50 個の図 3.10 を配置した。

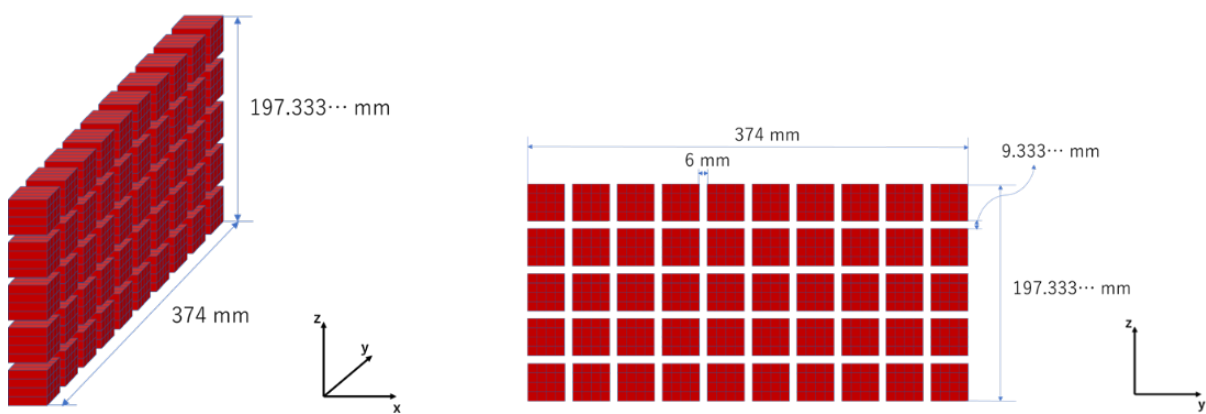


図 3.12: 50 個の図 3.10 を配置した。

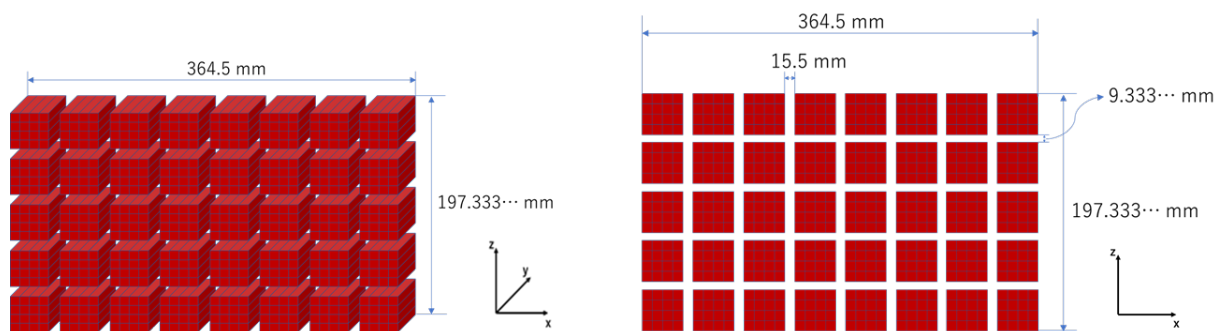


図 3.13: 40 個の図 3.10 を配置した。

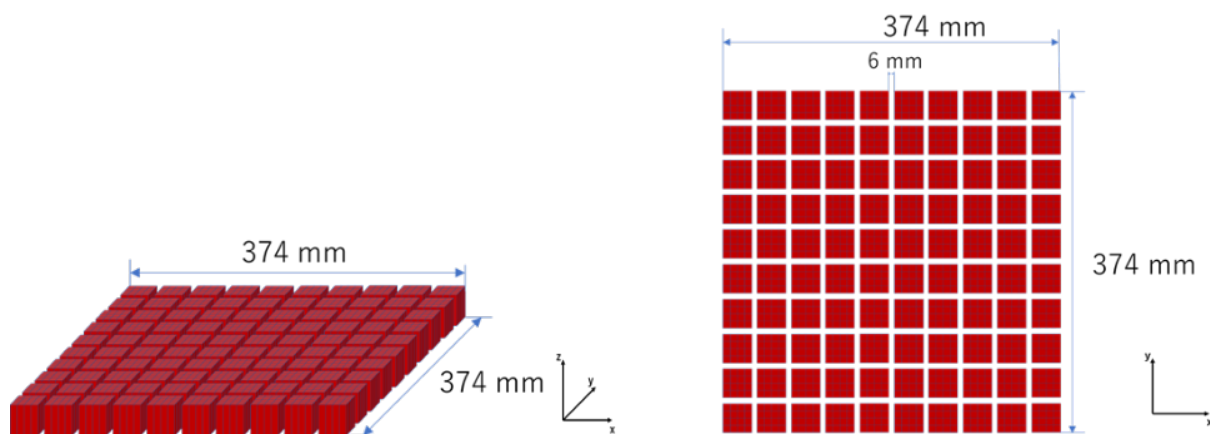


図 3.14: 2 個の図 3.11 を配置した。

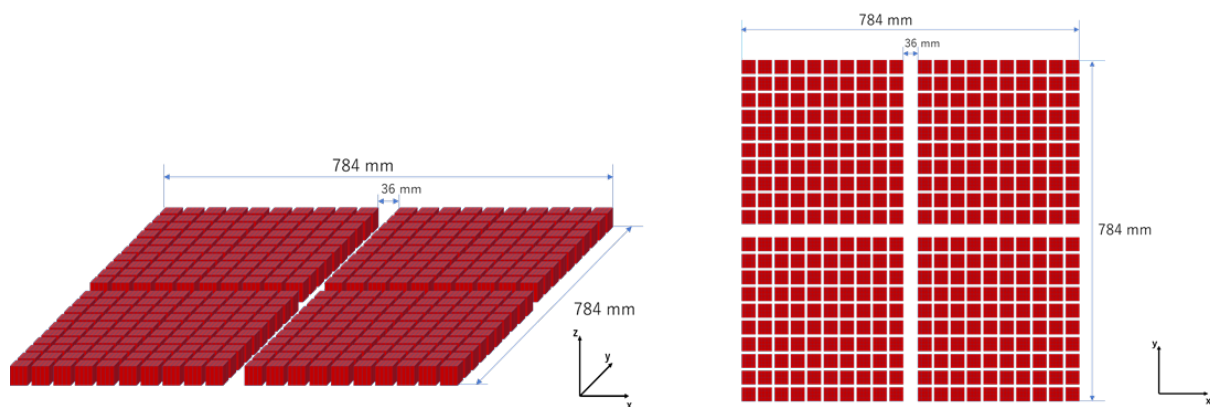


図 3.15: 図 3.14 を 4 個使用した。

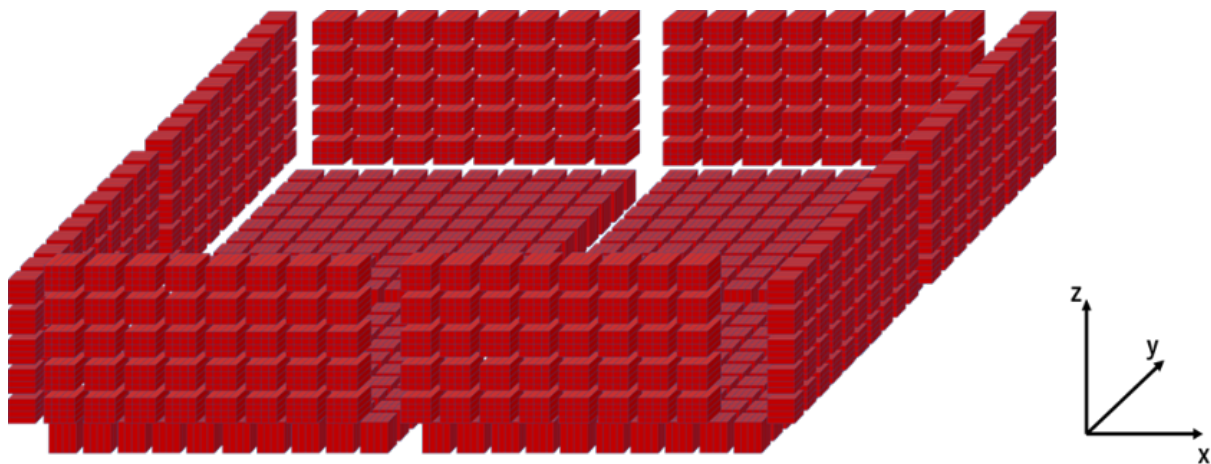


図 3.16: 4 個の図 3.12、4 個の図 3.13、1 個の図 3.15 を使用した。



図 3.17: 上図が図 3.16 を y 軸負の方向から見た Low-Energy Calorimeter。下図が図 3.16 を x 軸正の方向から見た Low-Energy Calorimeter。

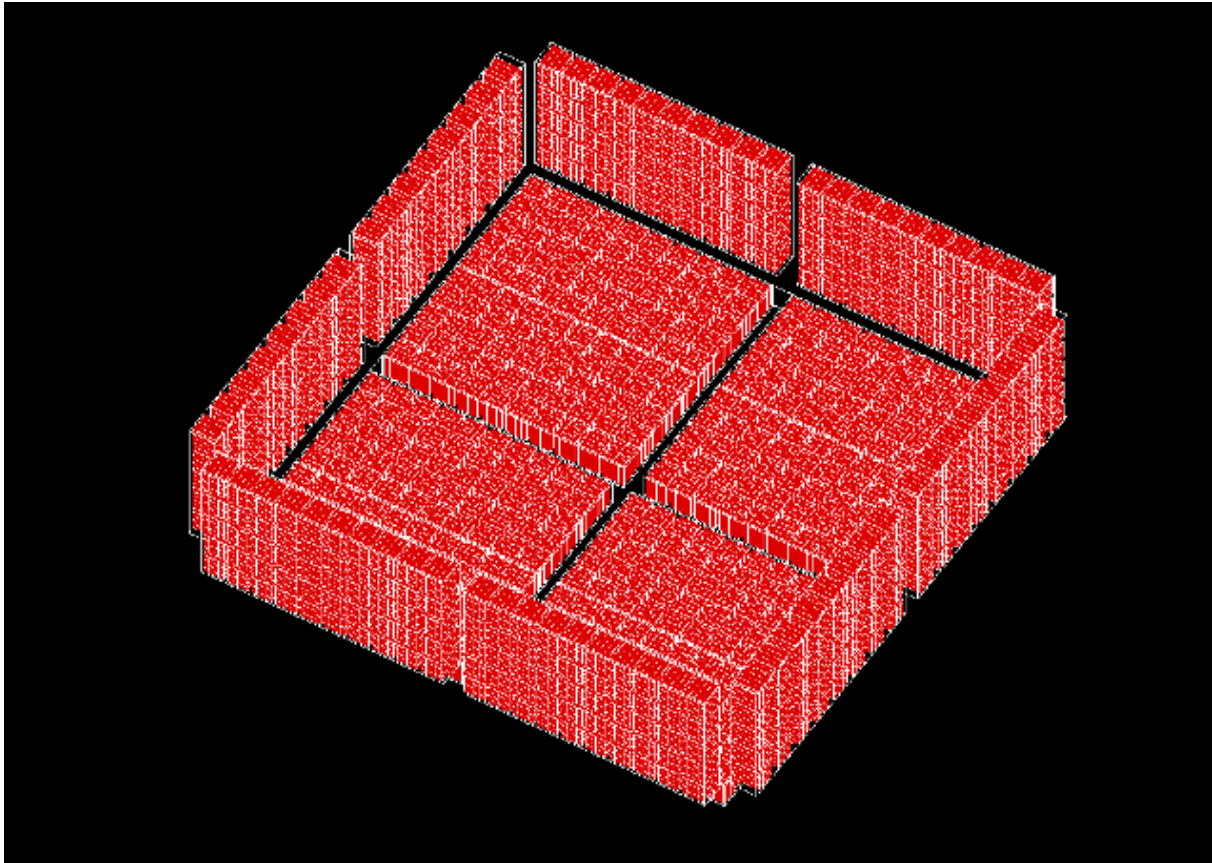


図 3.18: Geant4 で定義した Low-Energy Calorimeter 検出器。

3.2.3 High-Energy Calorimeter の作成

1. CsI シンチレーター 1 個の厚さを 15 mm、大きさを $380 \times 15 \text{ mm}^2$ と定義した (図 3.19)。
2. CsI シンチレーター 26 個を xy 平面上に隣り合うように配置した (図 3.20)。
3. 2 で配置したものを 4 組用いて、xy 平面上に正方形型に配置した (図 3.21)。
4. 3 で配置したものを 1 mm の間隔を取りながら 6 層重ねた (図 3.22)。Geant4 で定義した High-Energy Calorimeter 検出器を図 3.23 に示した。

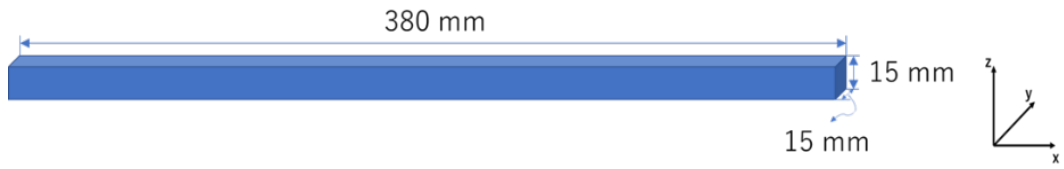


図 3.19: CsI シンチレーター 1 個。

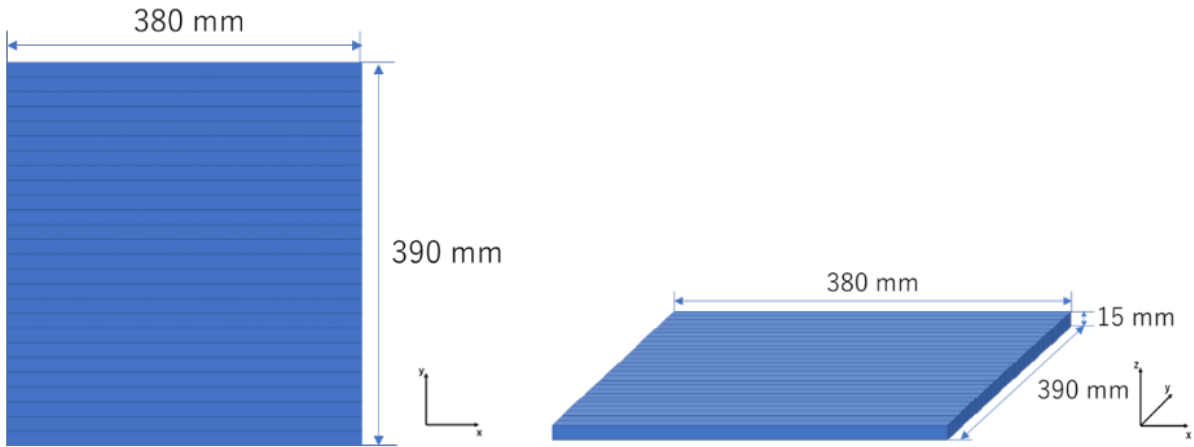


図 3.20: CsI シンチレーター 26 個。

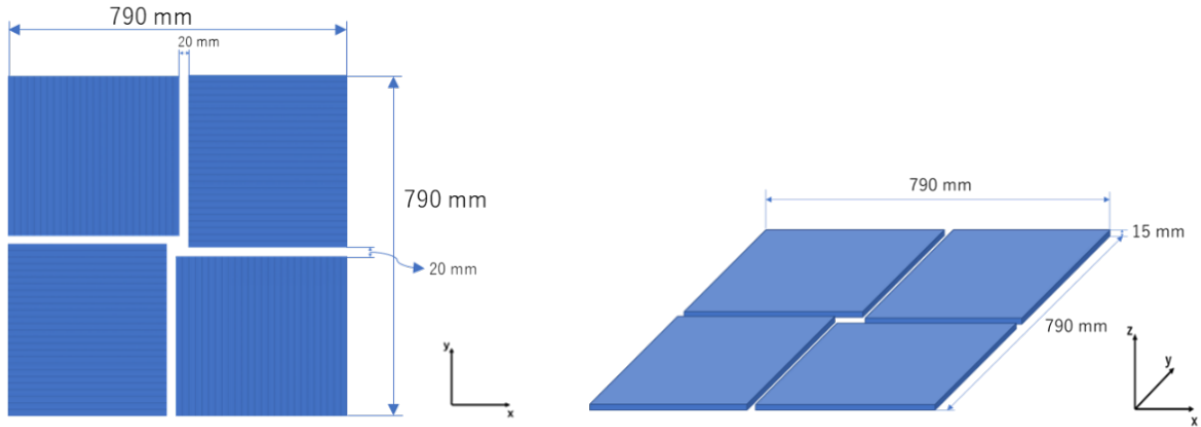


図 3.21: 図 3.20 を 4 枚使用した。

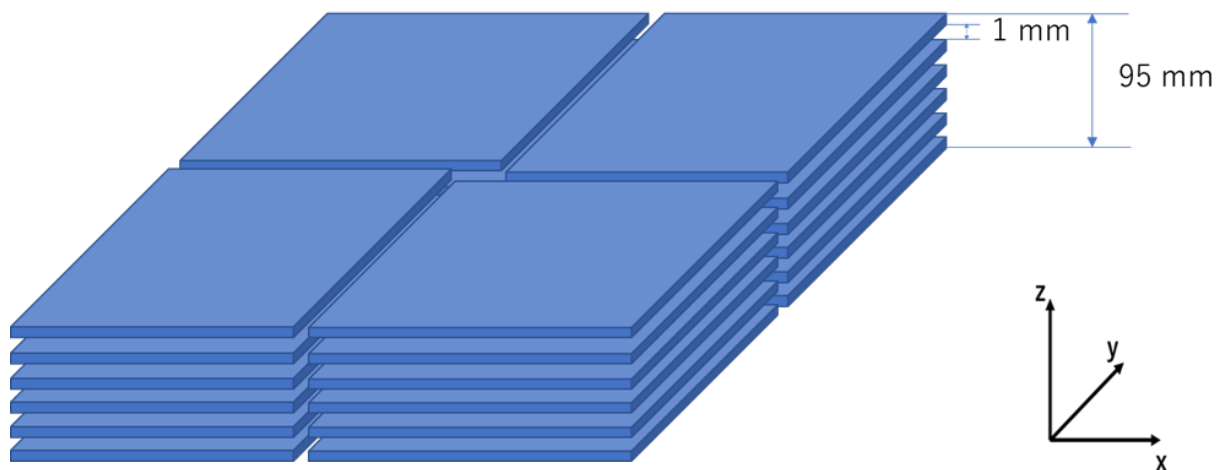


図 3.22: 図 3.21 を 6 枚配置した。

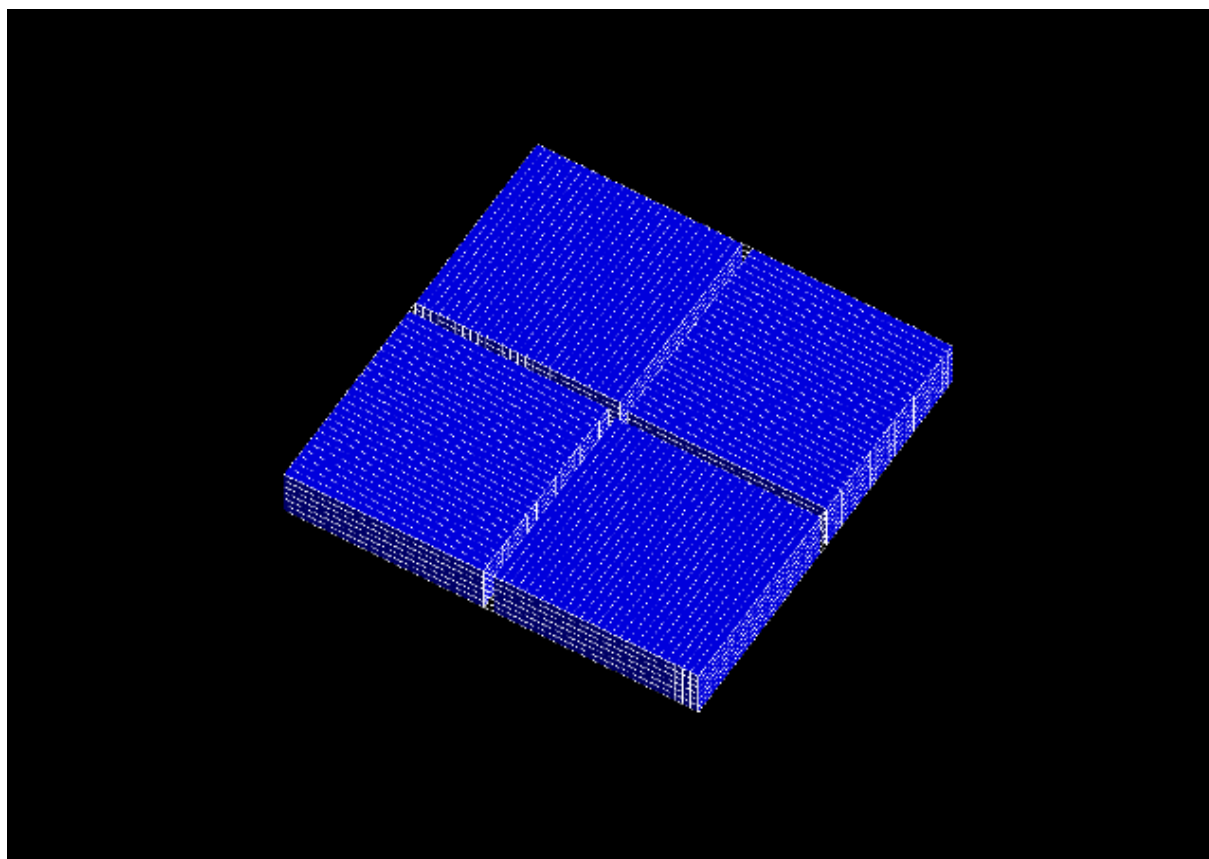


図 3.23: Geant4 で定義した High-Energy Calorimeter 検出器。

3.2.4 3つの検出器の配置

定義した3つの検出器を、間隔を 10 mm 取りながら、図 3.24 に表したそれぞれの検出器の中心 (図中の黒い点) が重なるように配置することで、AMEGO 検出器のジオメトリを定義した (図 3.25)。

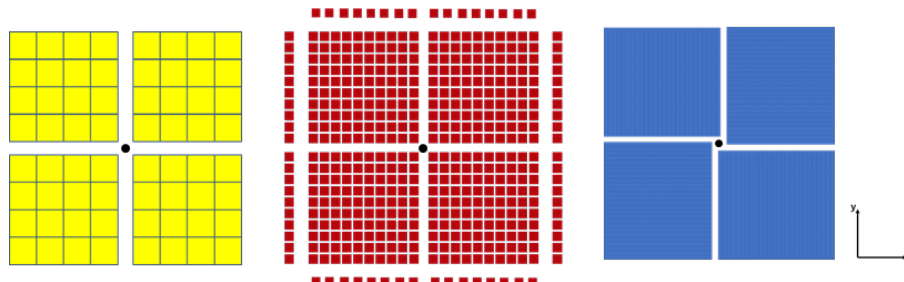


図 3.24: 3つの検出器をそれぞれ z 軸正の方向から見た図。黒い点は、各検出器の中心。

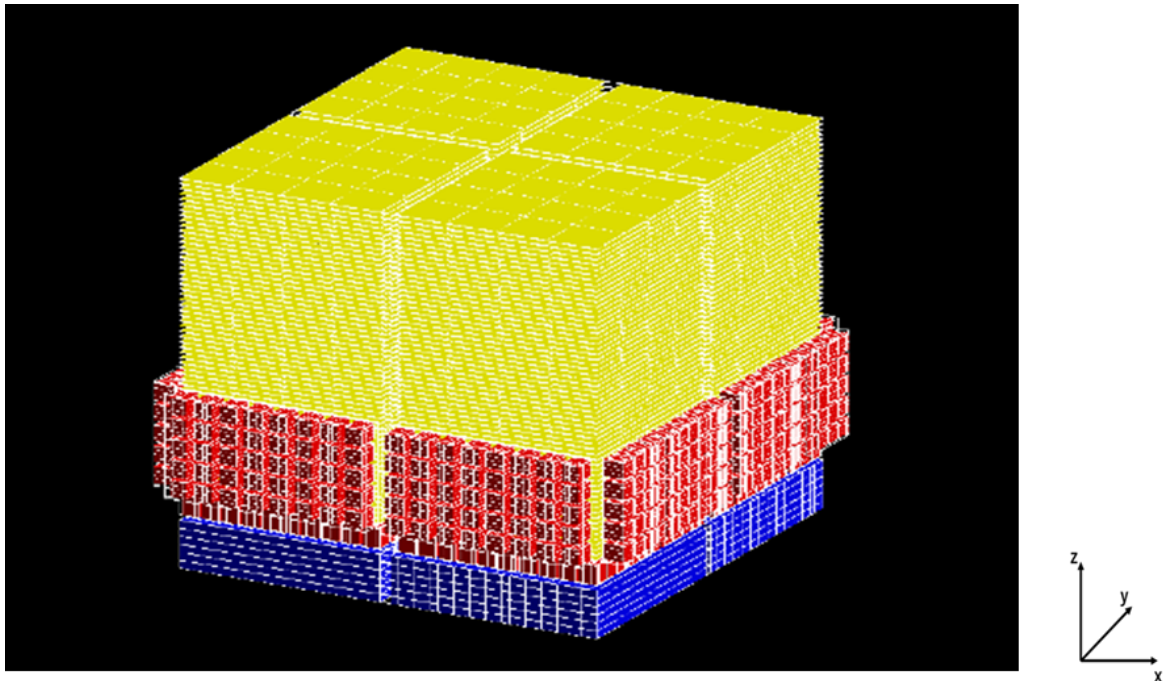


図 3.25: Geant4 で定義した AMEGO 検出器。

3.3 読み出し口の定義

先述のとおり、Geant4 で定義した AMEGO 検出器に対応した読み出し口の定義を 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を定義をする。読み出し口の定義は、XML 形式で記述することで Geant4 と ComptonSoft によるシミュレーションに適用される。ComptonSoft ではまず、Geant4 で定義した図 3.25 の一つ一つの検出器に 8 桁の ID を付けて、

各検出器に対応した ID を指定することで読み出し口を定義する。読み出し口の主なパラメータについて表 3.2 に表した。

表 3.2: 主なパラメータの説明

	シリコン半導体検出器のパラメータ
• 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 σ 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 $param0$ 、 $param1$ 、 $param2$ を設定する。 $\Delta E = \sqrt{E_{param0} + E_{param1}^2 + (E_{param2})^2}$
• 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	移動度の値を決定する。

3.3.1 シリコン半導体検出器

シリコン半導体検出器の読み出し口は、図 2.2 のように定義した。表の面には x 方向に 190 チャンネル、裏の面には y 方向に 190 チャンネル設置した。

また、読み出し口のパラメータは、ComptonSoft において表 3.3 のとおりに定義した。

表 3.3: 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、読み出し口の定義にあたり、各シリコン半導体検出器の ID を、図 3.26、図 3.27 のように設定した。

Tracker

(detector ID : 0 ~ 590315)

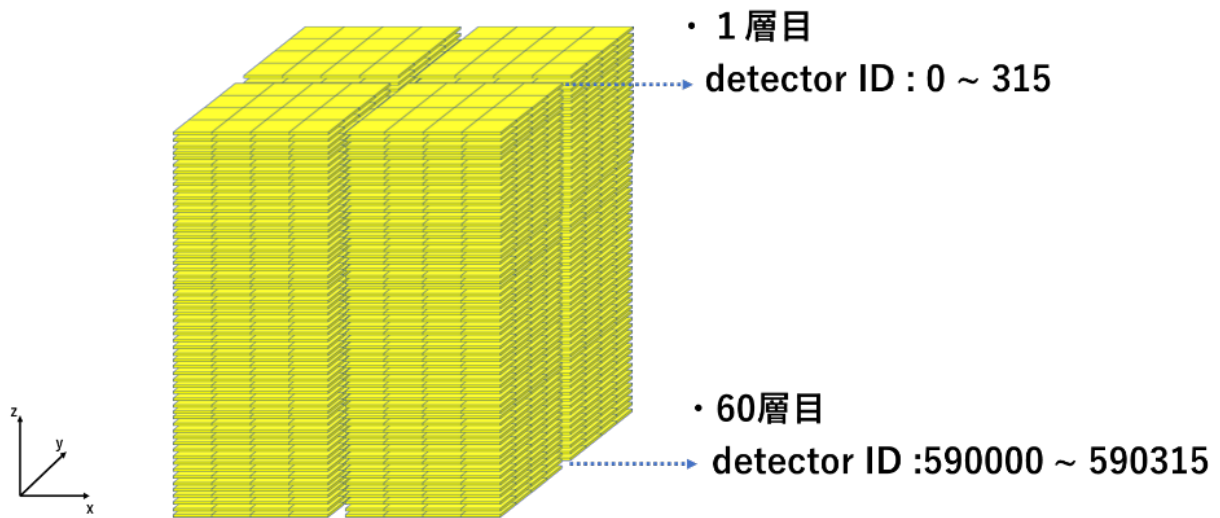


図 3.26: シリコン半導体検出器の detector ID

Trackerの1層目

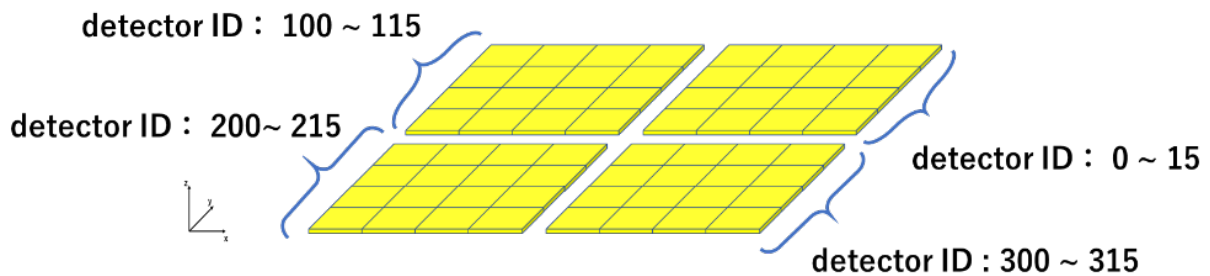


図 3.27: Tracker の一層目のシリコン半導体検出器の detector ID

シリコン半導体検出器の ID の設定するために、Layer、Section、Element を定義している。Tracker は 60 枚の Layer からなり、Layer は 4 個の Section で分けられ、Section は 16 個の Element で分けた (図 3.28)。このとき、detector ID は以下の式で表せる。

$$[\text{detector ID}] = [\text{Tracker ID}(=0)] \times 10000000 + [\text{Layer ID}] \times 10000 + [\text{Section ID}] \times 100 + [\text{Element ID}] \quad (3.2)$$

つまり、detector ID が与えられれば、どの検出器であるかを特定することができる。

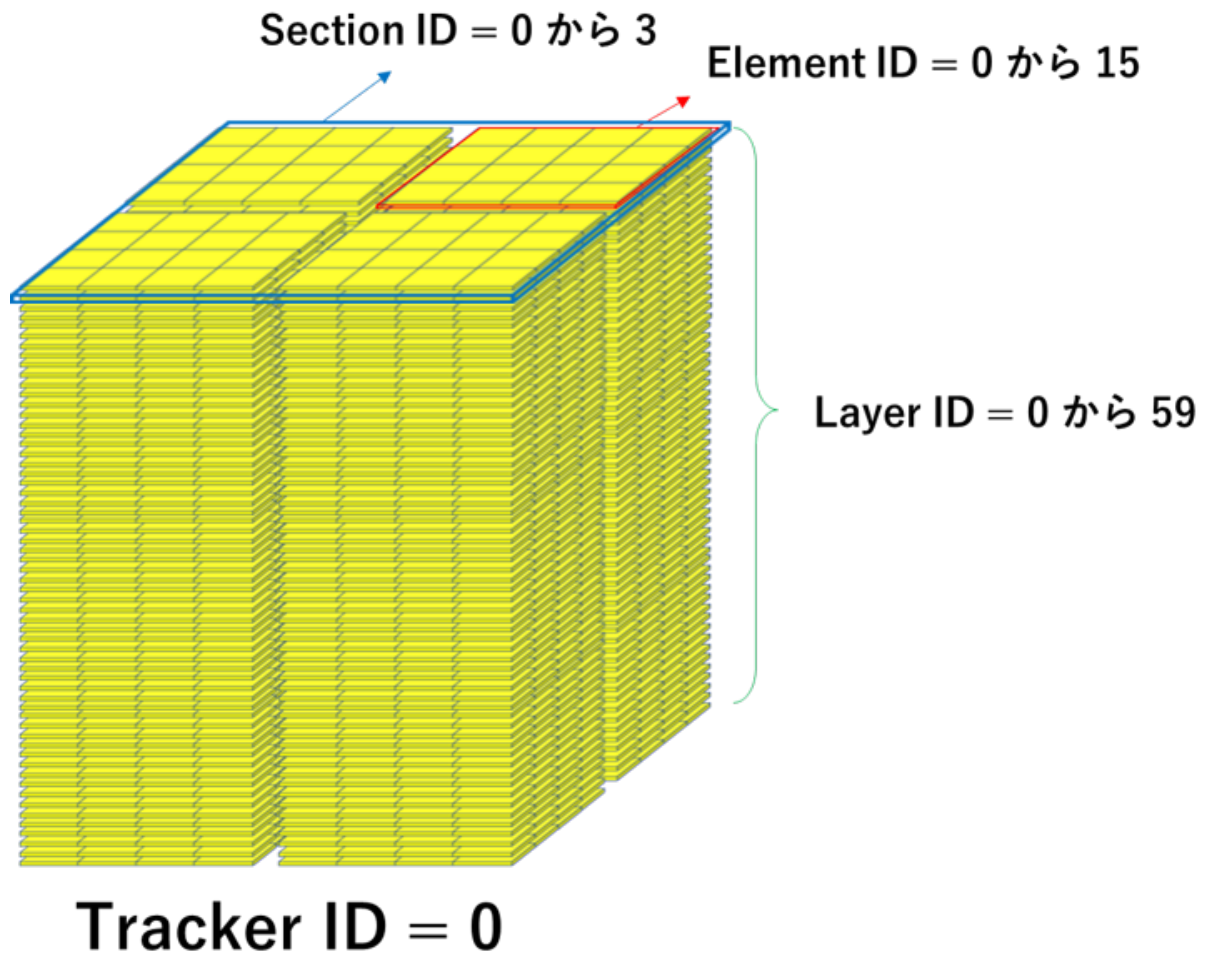


図 3.28: Tracker の detector ID を決める際に用いた ID

3.3.2 CZT 半導体検出器

CZT 半導体検出器は、カソードが 1 チャンネルとアノードが 5 チャンネルあり、合わせて 6 チャンネルの読み出し口を設定する必要がある。しかし、ComptonSoft では検出器の側面に読み出し口が付くような構成を扱えないため、本研究では、図 3.29 のように上の面にカソードを 1 チャンネル、下の面にアノードを 1 チャンネルの合計 2 チャンネルを定義した。

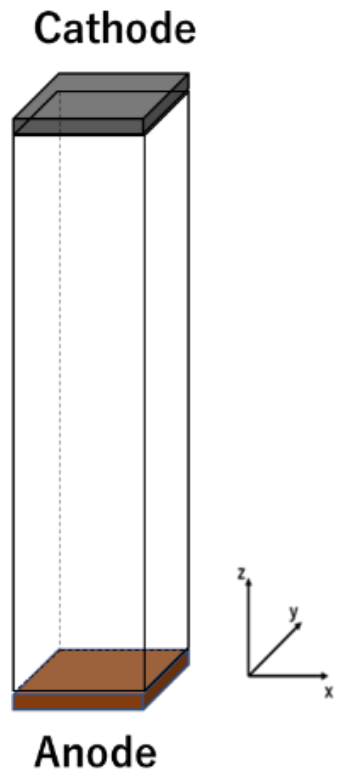


図 3.29: CZT 半導体検出器の読み出し口。

また、読み出し口のパラメータは、ComptonSoft において表 3.4 のように定義した。

表 3.4: 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、読み出し口の定義にあたり、CZT 半導体検出器の ID を図 3.30、図 3.31 のように設定した。

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

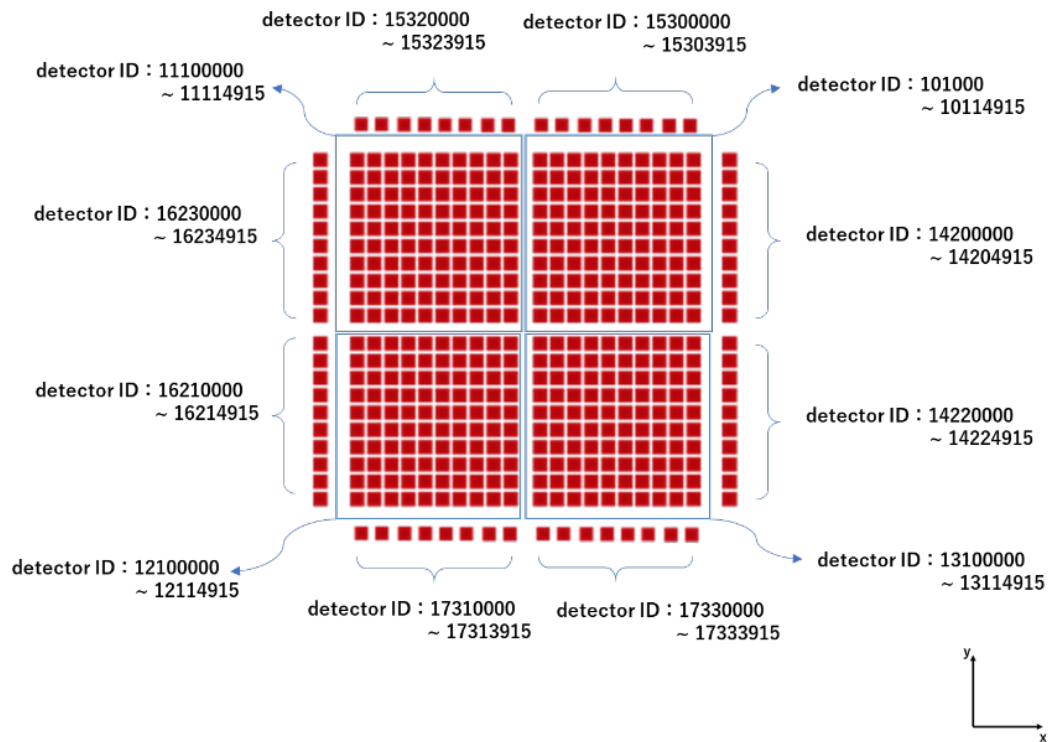


図 3.30: CZT 半導体検出器の detector ID

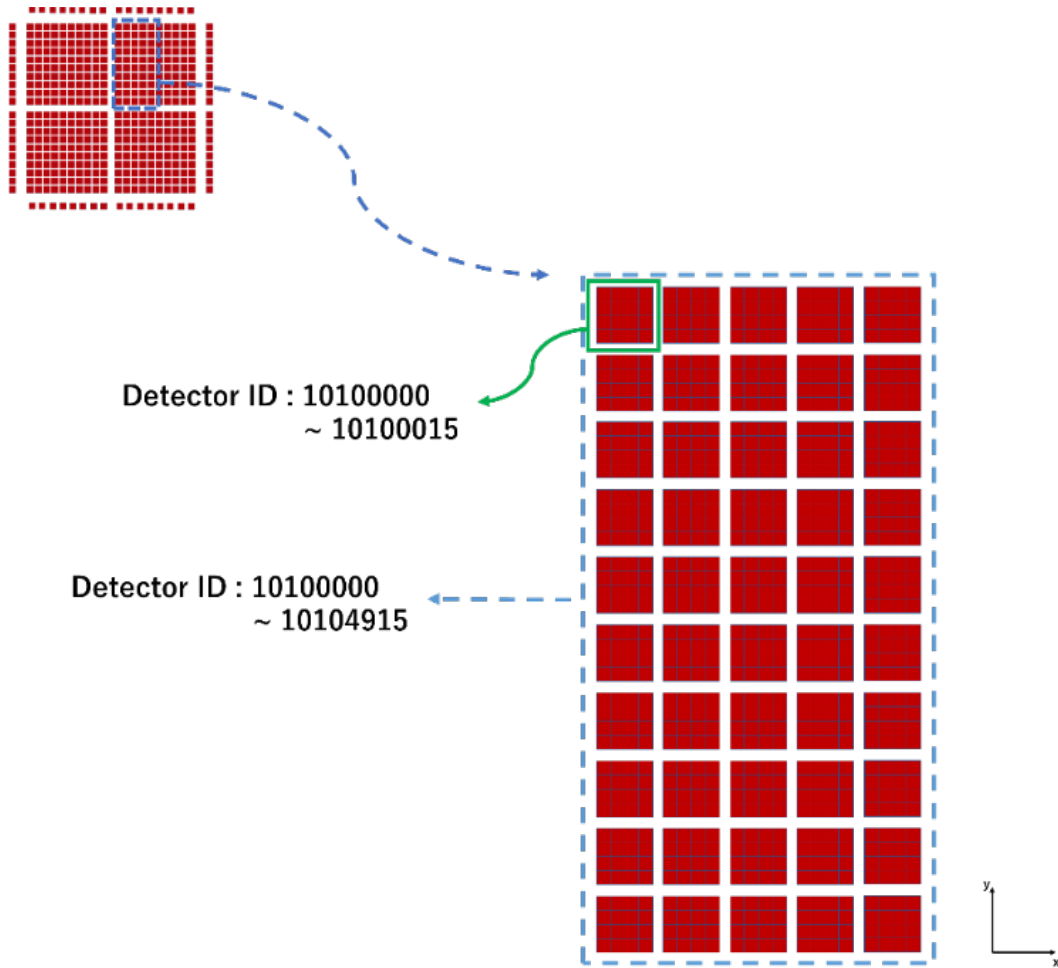
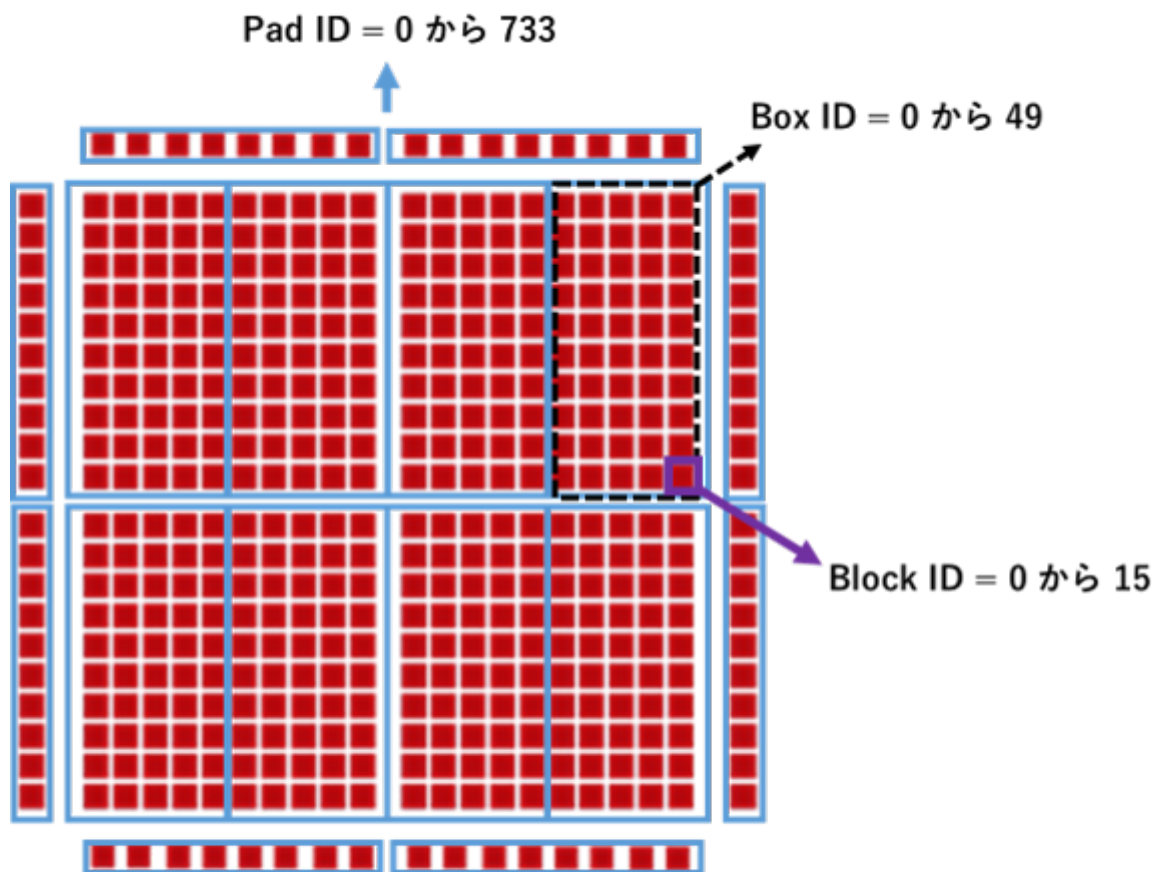


図 3.31: CZT 半導体検出器の detector ID

CZT 半導体検出器の ID の設定において、Pad、Box、Block を定義した。Low-Energy Calorimeter は 16 個の Pad からなり、Pad は 50 個あるいは 40 個の Box で構成され、Box は 16 個の Block からなると定義した (図 3.32)。このとき、detector ID は以下の式で表せる。

$$[\text{detector ID}] = [\text{Low - Energy Calorimeter ID}(= 1)] \times 10000000 + [\text{Pad ID}] \times 10000 + [\text{Box ID}] \times 100 + [\text{Block ID}] \quad (3.3)$$

つまり、detector ID が与えられれば、どの検出器であるかを特定することができる。



Low-energy Calorimeter ID = 1

図 3.32: Low-Energy Calorimeter の detector ID を決める際に用いた各 ID

3.3.3 CsI シンチレーター

CsI シンチレーターは、先述のとおり、両端に SiPM が一つずつあり、合計 2 チャンネルの読み出し口が付けられる。しかし、ComptonSoft ではシンチレータの両側面に読み出しが付き構成を扱えないため、CsI シンチレーターには、図 3.33 のように片方の側面にのみ SiPM を設置し、読み出し口が合計 1 チャンネルと定義した。SiPM が外側を向くように CsI シンチレーターの配置を行った。

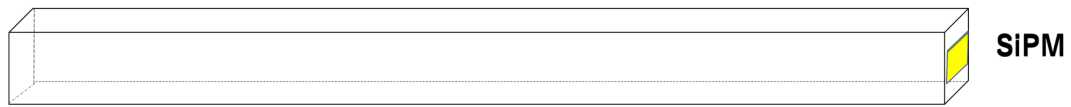


図 3.33: CsI シンチレータの読み出し口

読み出し口のパラメータは、ComptonSoft において表 3.5 のように定義した。

表 3.5: CsI 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、読み出し口の定義にあたり、CsI シンチレータの ID を図 3.34、図 3.35 のように設定した。

High-Energy Calorimeter

(detector ID : 20001000 ~ 20052125)

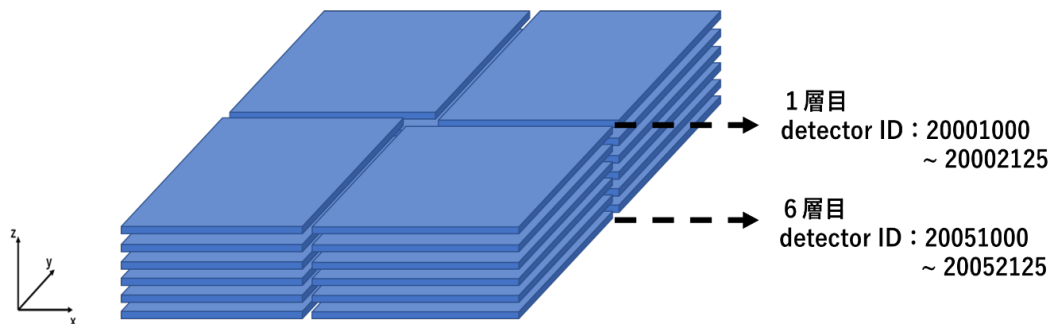


図 3.34: CsI シンチレータの detector ID

High-Energy Calorimeterの1層目

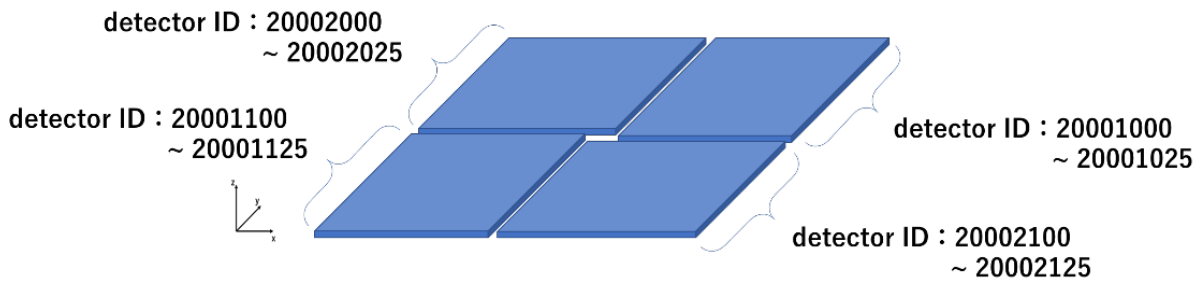
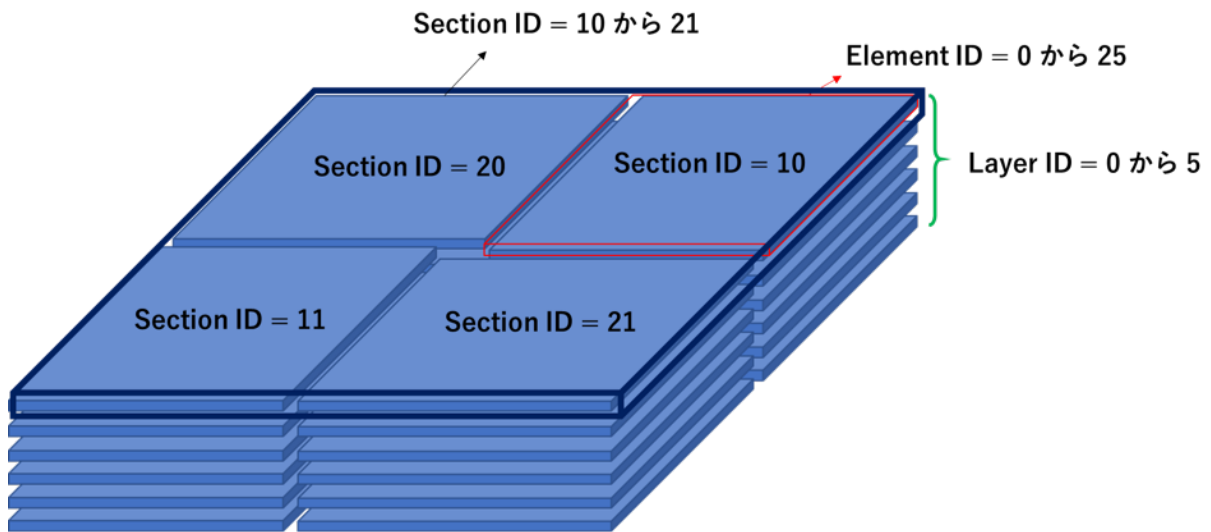


図 3.35: CsI シンチレーターの detector ID

CsI シンチレーターの ID の設定において、Layer、Section、Element を定義した。High-Energy Calorimeter は Layer6 枚からなり、Layer は 4 個の Section で構成され、Section は 26 個の Element で構成される (図 3.36)。このとき、detector ID は以下の式で表せる。

$$[\text{detector ID}] = [\text{High - Energy Calorimeter ID}(=2)] \times 10000000 + [\text{Layer ID}] \times 10000 + [\text{Section ID}] \times 100 + [\text{Element ID}] \quad (3.4)$$

つまり、detector ID が与えられれば、どの検出器であるかを特定することができる。



High-energy Calorimeter ID = 2

図 3.36: High-Energy Calorimeter の detector ID を決める際に用いた各 ID

第4章 コンプトン再構成アルゴリズム

4.1 コンプトン再構成アルゴリズム

AMEGOにおけるコンプトン再構成アルゴリズムについて説明する。本研究では、ガンマ線光子の n ヒットイベントのコンプトン再構成を行うためのアルゴリズムを構築した。

4.1.1 コンプトン再構成アルゴリズムとは

コンプトン再構成は、入射した各ガンマ線光子に対して、初めの二つのヒットの位置と各ヒットで落ちたエネルギーを得ることができれば、第一章の式 (1.2) を使うことで、完了することができる。ここで、検出器から得られる物理量は、各ヒットの位置と各ヒットで落ちたエネルギーのみである。したがって、各ヒットがどの順序で反応したかさえ知ることができれば、コンプトン再構成をして到来方向の制限と入射エネルギーを求めることができる。

しかし、検出器で得られるイベント内の各ヒットの情報は、時系列の反応順序とは関係のない順番で記録されているため、実際には n ヒットイベントの場合は $n!$ 通りの反応順序が考えなければならない。このとき、コンプトン再構成とは、イベント内の各ヒットの反応順序を決定し、入射光子の到来方向とエネルギーを求めるものであるが、反応順序を求める過程で到来方向とエネルギーも同時に考慮するため、コンプトン再構成アルゴリズムとは、イベント内のヒットの反応順序を決定することと同義である。

また、本研究では、AMEGOによるガンマ線バーストの全天観測を目的としているため、あらかじめ光源の方向を制限することなくコンプトン再構成を行うことのできるアルゴリズムを考えた。

4.1.2 n ヒットイベント

検出器に入射したガンマ線光子が n ヒットしたイベントのコンプトン再構成アルゴリズムについて以下で説明する。

検出器で得られる n ヒットイベントの各ヒット情報 ($i=0,1,\dots,n-2$ として、位置 \mathbf{r}_i と落ちたエネルギー e_i) は、下付きの数字を検出器における記録順番として、

$$\{(\mathbf{r}_0, e_0), (\mathbf{r}_1, e_1), \dots, (\mathbf{r}_{n-1}, e_{n-1})\}$$

と表すことができる。ここで、反応した順番と記録順番が一致している場合を仮定する。 $i=0$ から $i=n-2$ までの $n-1$ 回のコンプトン散乱と $i=n-1$ で光電吸収が生じたとすると、 i 番目のコンプトン散乱における散乱角は以下の式で表せる。

$$\cos \theta_{iK} = 1 - \frac{m_e c^2}{E_{i+1}} + \frac{m_e c^2}{E_i}$$

散乱角を θ_{iK} 、散乱の直前のガンマ線光子のエネルギーを

$$E_i = e_i + e_{i+1} + \dots + e_{n-1}$$

として、散乱した直後のガンマ線光子のエネルギーを

$$E_{i+1} = e_{i+1} + e_{i+2} \dots + e_{n-1}$$

としている。

なお、 $i=n-1$ 番目においてもコンプトン散乱が生じ、ガンマ線光子が検出器外へ飛び出す場合は、飛び出したガンマ線光子のエネルギーを E_{escape} とすると、散乱前後のエネルギーは以下となる。

$$E_i = e_i + e_{i+1} + \dots + e_{n-1} + E_{escape}$$

$$E_{i+1} = e_{i+1} + e_{i+2} \dots + e_{n-1} + E_{escape}$$

ここで、 $\cos \theta$ の取り得る範囲から、 $i=0,1,\dots,n-2$ の全てのコンプトン散乱 i において

$$-1 \leq \cos \theta_i \leq 1 \quad (4.1)$$

が成り立つ。

また、検出器で得られる各ヒットの位置から幾何学的に散乱角を求めることができる。このとき、本研究では全天観測を想定しており、視野を制限することができないため、一つ目の散乱角以外を幾何学的に求めている。ここで、 $i=1,\dots,n-2$ において幾何学的に求まる散乱角 θ_{iG} は以下の式で表すことができる。

$$\cos \theta_{iG} = \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{i-1}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{i-1}|} \cdot \frac{\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i|}$$

このとき、 $i=1,\dots,n-2$ の全てのコンプトン散乱において以下の式が満たされる。

$$\cos \theta_{iG} - \cos \theta_{iK} = 0 \quad (4.2)$$

ここで、 $i=0,1,\dots,n-1$ と反応順番が一致するためには、各コンプトン散乱において式 (4.1) と式 (4.2) が満たされていないといけない。ただし、 $n=2$ の 2 ヒットイベントについては、幾何学的な散乱角を求めることができないため、式 (4.1) のみが満たされていれればよい。

このように、ガンマ線光子の n ヒットイベントにおいて考え得る $n!$ 通りの反応順序のうち、各コンプトン散乱において式 (4.1) と式 (4.2) が全て満たされている順序を実際に生じた反応順序として採用する。

4.1.3 分解能の考慮

検出器の位置分解能とエネルギー分解能により、位置とエネルギーの測定には、誤差が生じる。誤差による影響を考慮して、コンプトン再構成アルゴリズムについて説明する。

まず、式 (4.1) を式変形すると、以下の式で表せる。

$$0 \leq f_i \equiv 2E_{i+1}^2 + 2E_{i+1}e_i - e_i m_e c^2 \leq 2E_{i+1}^2 + 2E_{i+1}e_i$$

$f_i \leq 2E_{i+1}^2 + 2E_{i+1}e_i$ は自明であるため、式 (4.1) は以下の式で表せる。

$$f_i \geq 0$$

ここで、検出器の分解能を考慮すると、 E_i 、 e_i がエネルギー分解能による誤差を持つため、 f_i もエネルギー分解能による誤差 Δf を持つ。このため、 f_i は a を変更可能な定数として、

$$f_i + a\Delta f_i \geq 0 \quad (4.3)$$

を満たせばよい。

また、式 (4.2) について検出器の分解能を考慮すると、

$$g_i \equiv \cos \theta_{iG} - \cos \theta_{iK}$$

として、 g_i は、位置分解能とエネルギー分解能による誤差 Δg_i を持つ。このため、 g_i は変更可能な定数 b を用いて、

$$-b\Delta g_i \leq g_i \leq b\Delta g_i \quad (4.4)$$

を満たせばよい。

4.1.4 複数の順序が散乱角の条件式を満たす場合

考え得る $n!$ 通りのヒット順序のうち、複数の順序が式 (4.3) と式 (4.4) を満たした場合は、以下のようにただ一つの順序を抽出する。

式 (4.3) と式 (4.4) を満たす複数の順序の中で、入射して 2 回目から $n-1$ 回目のコンプトン散乱のそれぞれにおいて、 g_i 同士の比較を行う。このとき、比較したコンプトン散乱の全てにおいて g_i の値が最も 0 に近い順序があれば、その順序を正しい反応順序と判定する。

4.1.5 コンプトン再構成アルゴリズムのまとめ

以上によって、ガンマ線光子の n ヒットイベントのコンプトン再構成を行うことができる。その手順を以下にまとめた。 a と b は、可変の定数である。

1. 全ての $i(i=0,1,2,\dots,n-2)$ で $f_i + a\Delta f_i \geq 0$ を満たす反応順序を抽出する。ガンマ線光子の2ヒットイベントは、ここで再構成完了となる。
2. 全ての $i(i=1,2,\dots,n-2)$ で $-b\Delta g_i \leq g_i \leq b\Delta g_i$ を満たす反応順序を抽出する。
3. 複数の反応順序が1と2を満たす場合、入射して2回目から $n-1$ 回目のコンプトン散乱それぞれにおいて、 g_i の比較を行い、全てのコンプトン散乱において g_i の値が0に最も近い順序があれば、その反応順序を抽出する。

以上の手順により、最終的に抽出したただ一つの反応順序を正しい反応順序と判定する。

4.2 コンプトン再構成アルゴリズムの検証

コンプトン再構成アルゴリズムの検証を、ガンマ線光子の n ヒットイベント ($n=2,3,4,5$) に対して行った。Geant4 と ComptonSoft を用いて、100 keV、200 keV、300 keV、400 keV、500 keV、600 keV のガンマ線光子を AMEGO 検出器の真上から数10万発程度照射するシミュレーションによって得られたイベントのうち、入射ガンマ線の全エネルギーが検出器に落ち、かつ、ガンマ線光子が n ヒットしたイベント ($n=2,3,4,5$) のみを取り出し、そのイベントにコンプトン再構成アルゴリズムを適用し、コンプトン再構成を試みた。また、コンプトン再構成アルゴリズムにおいて a と b は Δf 、 Δg から生じる f 、 g の誤差の範囲を調整するための定数であり、検出器の性能に関する様々な検証を行った上で最も適当な値を入れるべきである。ただし、ここでは、ガンマ線光子と検出器の相互作用によって蛍光 x 線や電子が出て、別の読み出し口でシグナルが生じるようなイベントは、ここでは扱わず、ガンマ線光子がコンプトン散乱と光電吸収の相互作用によって入射エネルギーを全て検出器に落すイベントのみを対象として検証するため、理論上は全てのイベントが式(4.3)と式(4.4)を満たすことになる。そのため、なるべくほとんどの f と g が式(4.3)の式(4.4)を満たすように、 $a\Delta f$ を1000で一定、式(4.4)の $b\Delta g$ を2.65で一定とした。なお、検出器のエネルギー分解能と位置分解能による測定誤差は、シミュレーションに反映されている。

以下に、コンプトン再構成アルゴリズムをかける前とかけた後で、ガンマ線光子の n ヒットイベントの数をプロットした。

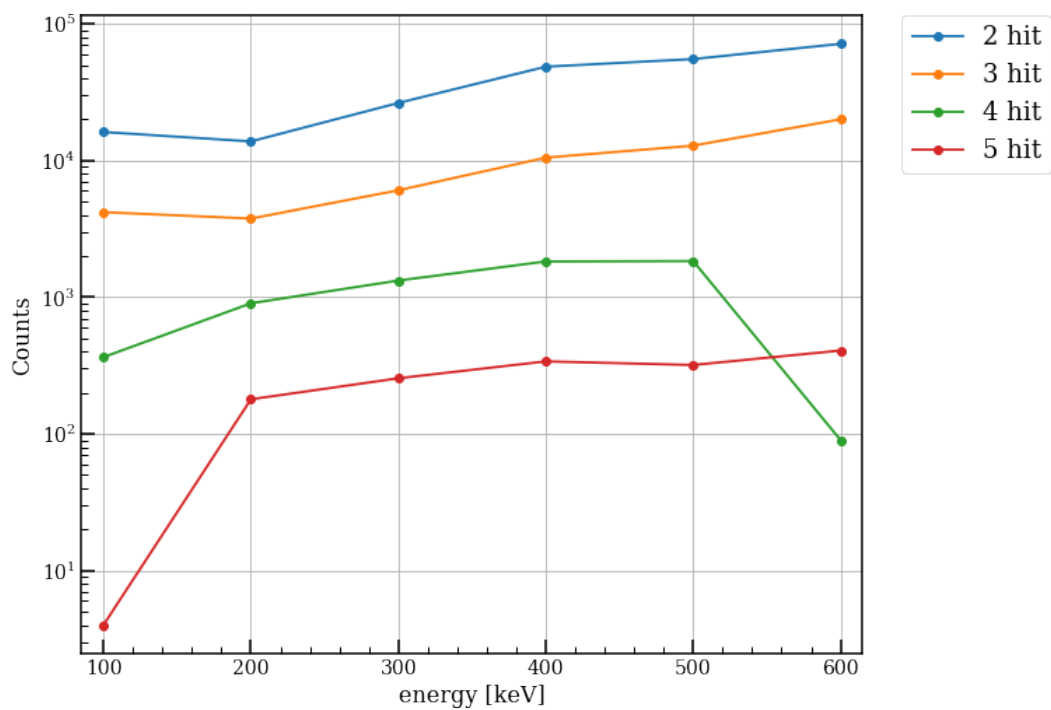


図 4.1: コンプトン再構成アルゴリズムをかける前のイベント数。

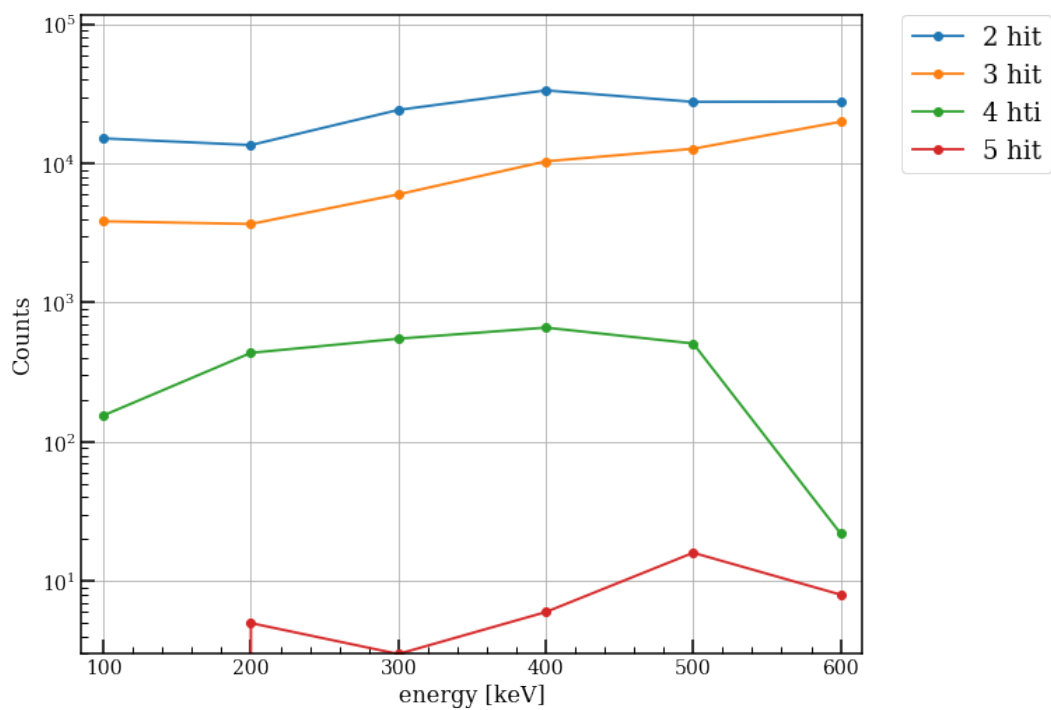


図 4.2: コンプトン再構成アルゴリズムをかけた後のイベント数。

ここで、上図のイベント数の変化と再構成結果から得られる「再構成率」と「正解率」を以下のように定義する。

$$\text{再構成率} = \frac{\text{アルゴリズムをかけて反応順序をただ一つ抽出できたイベント数}}{\text{アルゴリズムをかける前のイベント数}} \cdot 100$$

$$\text{正解率} = \frac{\text{抽出したただ一つの反応順序が正解であるイベント数}}{\text{反応順序をただ一つ抽出できたイベント数}} \cdot 100$$

再構成率と正解率を求め、以下にプロットした。

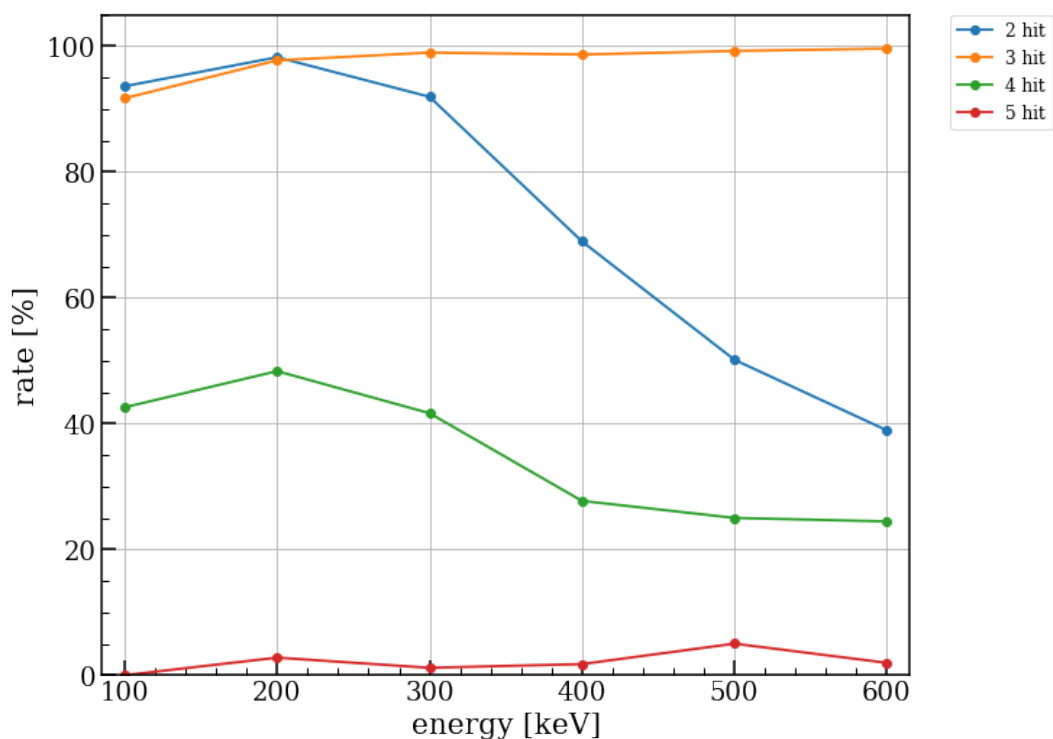


図 4.3: 再構成率。アルゴリズムをかける前のイベント数のうち、アルゴリズムをかけて反応順序をただ一つ抽出できたイベント数の割合。

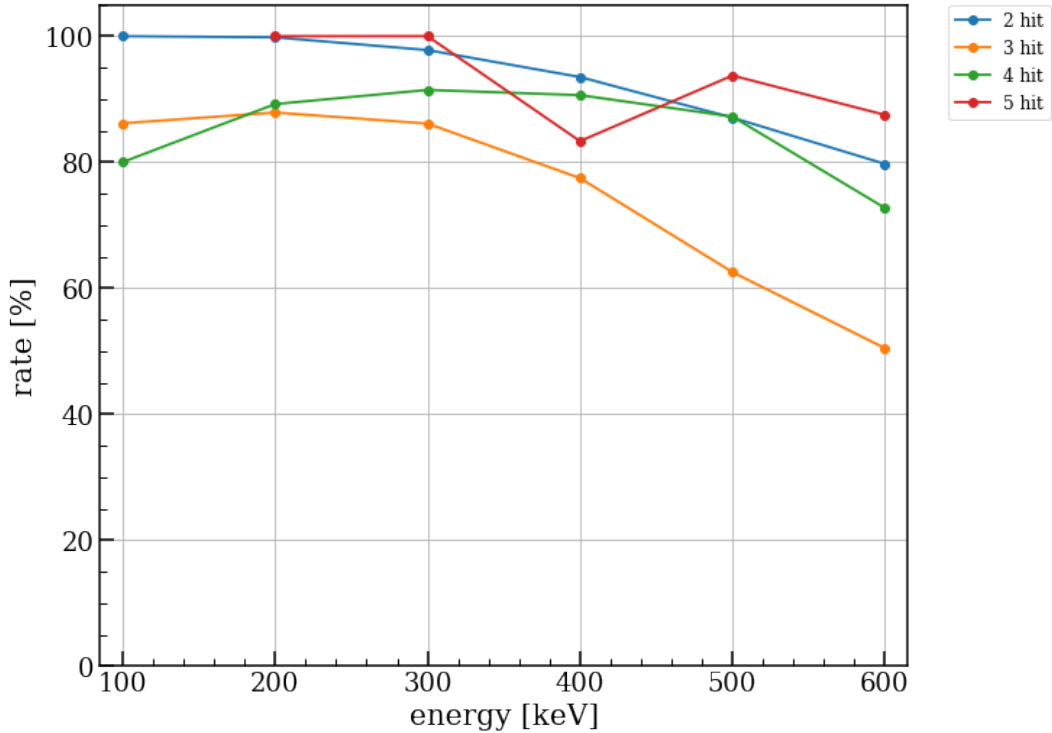


図 4.4: 正解率。反応順序をただ一つ抽出できたイベント数のうち、抽出したただ一つの反応順序が正解であるイベント数の割合。

再構成率に関しては、2 ヒットイベント、3 ヒットイベントは 100 keV から 300 keV までにおいて 90 % 以上であったが、4 ヒットイベントと 5 ヒットイベントはどのエネルギー帯でも 50 % を下回る結果となった。

正解率に関しては、2 ヒットイベント、3 ヒットイベント、4 ヒットイベント、5 ヒットイベントは 100 keV から 300 keV までにおいて 80 % 以上であったが、高エネルギーになるにつれて減少が見られた。この減少は、入射ガンマ線のエネルギーが高エネルギーになるにつれて、位置分解能の大きい CdZnTe 半導体検出器に到達するようになり、再構成の結果が不正解となる場合が増えたことが理由として考えられる。

再構成アルゴリズムで反応順序を決定できないイベントの多くは、式 (4.3) の条件を満たす反応順序が二つある 2 ヒットイベント、式 (4.4) の g_i が全てのヒットで最小となる反応順序が一つも持たない 3 ヒット以上のイベントであった。また、再構成結果が間違えるイベントの多くは、正しい反応順序が式 (4.3) の条件を満たさないがもう一つの反応順序がその式を満たしてしまうイベントや式 (4.4) の g_i が全てのヒットで最小となる反応順序が正しくないイベントである。これらは、式 (4.3) と式 (4.4) で計算される数値に検出器による誤差が含まれていることが要因である。

第5章 蛍光x線及び電子のマージアルゴリズム

5.1 簡単な検出器について

第五章では、ガンマ線と検出器との相互作用の際に二次的に生じる粒子の処理方法について述べるが、その処理方法の検証をするにあたって AMEGO 検出器よりも構造が簡単な検出器を使用した。この検出器を「簡単な検出器」と呼ぶ。

5.1.1 ジオメトリの定義

その簡単な検出器は、一辺が 16 mm、厚さが 0.5 mm の正方形型のシリコン半導体 4 枚と CdTe 半導体 2 枚を 2 mm の間隔を取りながら重ねて 6 層の検出器と定義した (図 5.1)。

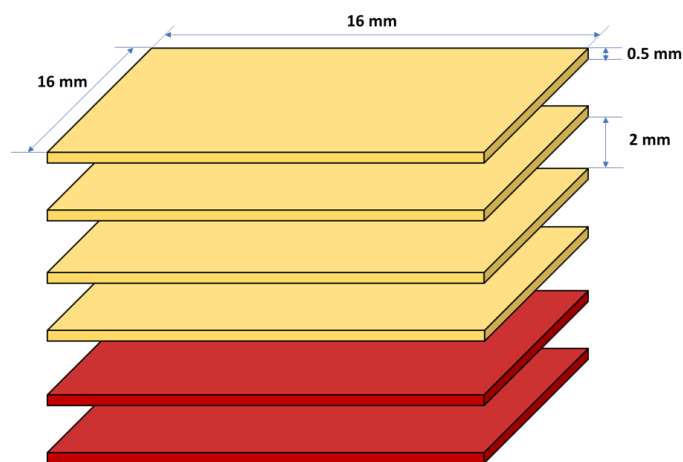


図 5.1: 簡単な検出器。

5.1.2 読み出し口の定義

簡単な検出器の半導体 1 枚あたりには、一辺が 1 mm の正方形型をした読み出し口が 16×16 のタイル状に配置され、1 ピクセルの大きさは一辺が 10 mm の正方形型である。また、読み出し口のパラメータを表 5.1 と表 5.2 に表した。

表 5.1: シリコン半導体の読み出し口のパラメータ。

	シリコン半導体検出器のパラメータ
• type	2DPixel
• trigger_discrimination	center="5.0", sigma="0.5"
• noise_level	param0="0.25", param1="0.019", param2="0.001"
• threshold	value="5.0"
• upside	anode="0", pixel="1"
• temperature	value="265.0"
• efield	bias="300.0", mode="1"
• charge_collection	mode="0",
• diffusion	mode="1"

表 5.2: CdTe 半導体検出器の読み出し口のパラメータ。

	CdTe 半導体検出器の読み出し口のパラメータ
• type	2DPixel
• trigger_discrimination	center="5.0", sigma="0.5"
• noise_level	param0="0.25", param1="0.019", param2="0.0"
• threshold	value="5.0"
• upside	anode="0", pixel="1"
• temperature	value="265.0"
• efield	bias="1000.0", mode="1"
• charge_collection	mode="1",
• diffusion	mode="1"

以下に、簡単な検出器において、コンプトン再構成アルゴリズムでコンプトン再構成をした結果について再構成率と正解率を求め、プロットした。

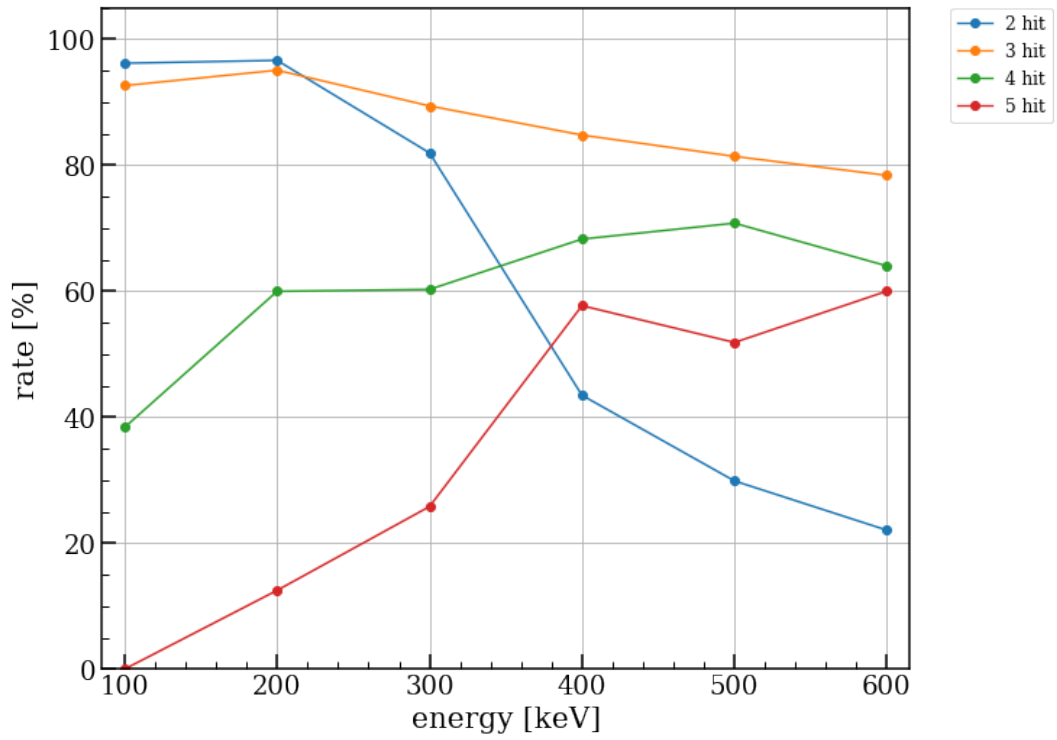


図 5.2: 再構成率。アルゴリズムをかける前のイベント数のうち、アルゴリズムをかけて反応順序をただ一つ抽出できたイベント数の割合。シミュレーションで得られたコンプトン散乱と光電吸収のみによってガンマ線光子のエネルギーが全て検出器に落ちたイベントに対してアルゴリズムをかけた。

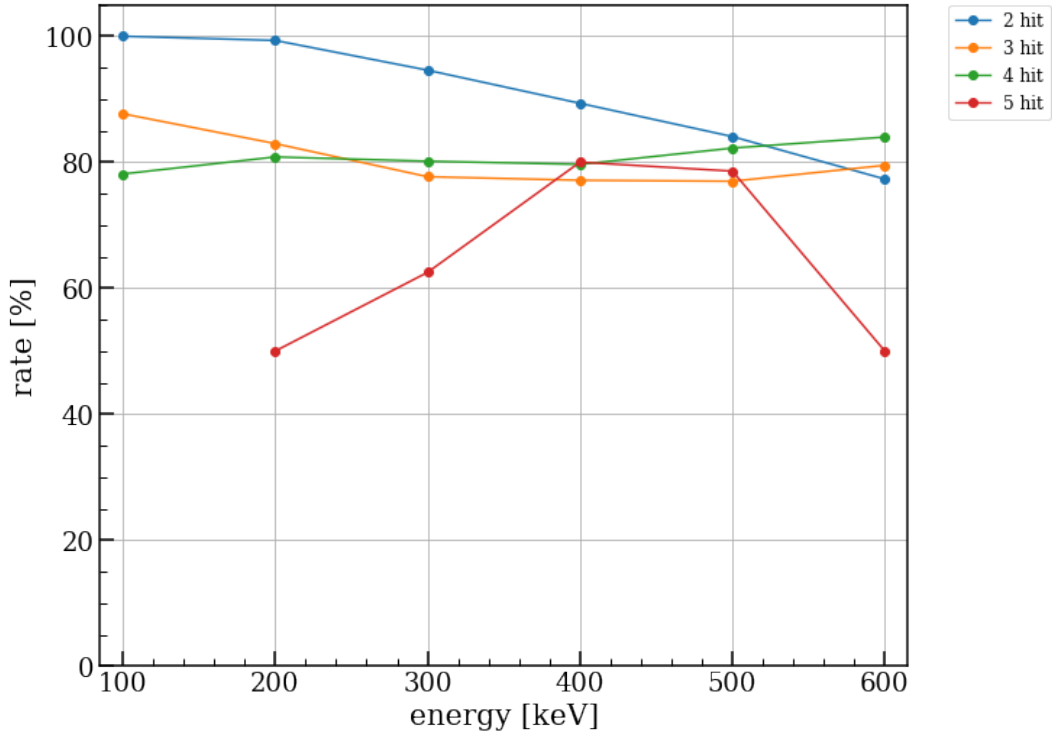


図 5.3: 正解率。反応順序をただ一つ抽出できたイベント数のうち、抽出したただ一つの反応順序が正解であるイベント数の割合。シミュレーションで得られたコンプトン散乱と光電吸収のみによってガンマ線光子のエネルギーが全て検出器に落ちたイベントに対してアルゴリズムをかけた。

5.2 蛍光 x 線のマージアルゴリズム

5.2.1 マージの必要性

先述のとおり、第 4 章で検証を行ったコンプトン再構成アルゴリズムが対象としていたイベントは、入射ガンマ線の全エネルギーが検出器に落ち、ガンマ線光子に n ヒットしたイベントのみである。つまり、光電吸収などの際に生じる蛍光 x 線や光電子がガンマ線光子が反応した読み出し口とは別の地点に到達し、そこで、シグナルが検出されるようなイベントは対象としていない。しかし、効率が良く、より精度の高い観測を行うためにはできるだけ多くのイベントを再構成する必要がある。

そこで、コンプトン再構成アルゴリズムの対象となるイベントを増やすため、蛍光 x 線によって生じたシグナルのエネルギーを蛍光 x 線が発生した読み出し口のシグナルに戻す処理 (マージ) について考えた。

5.2.2 マージアルゴリズムとは

蛍光 x 線が 1 シグナル生じた 3 シグナルイベントを図 5.4 に表した。この 3 シグナルイベントでは、ガンマ線が光電吸収の直前に持っていたエネルギーの一部を蛍光 x 線が持ち出し、別の読み出し口でシグナルを

生じさせている。これによって、入射ガンマ線以外のシグナルが検出され、ガンマ線が各ヒットで落としたエネルギーと位置が不明となるため、先述のコンプトン再構成アルゴリズムで再構成することができない。

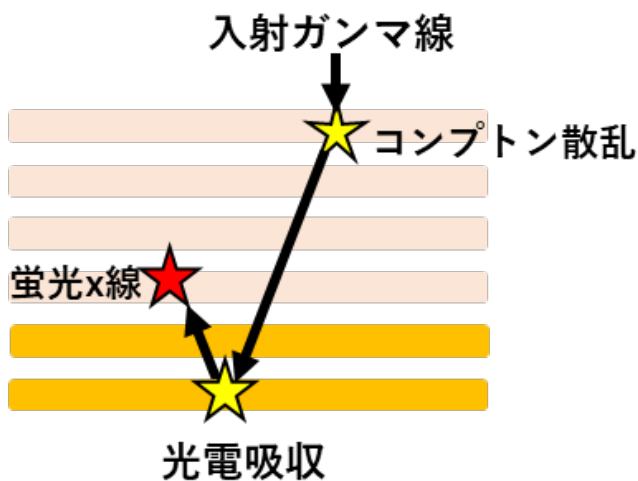


図 5.4: 蛍光 x 線が 1 シグナル生じた 3 シグナルイベント。蛍光 x 線が出なければ、2 ヒットイベントとして処理されるべき。

そこで、このようなイベントを再構成するためには以下の三つが必要になる。

1. 蛍光 x 線のシグナルがどれかを判定する。
2. 蛍光 x 線を出したガンマ線光子のシグナルを同定する。
3. 蛍光 x 線のエネルギーをガンマ線光子のシグナルにマージする。

これらの手順でマージをすることができれば、蛍光 x 線が 1 シグナル生じた 3 シグナルイベントの場合であれば、ガンマ線光子による 2 ヒットイベントとしてコンプトン再構成することが可能になる。本研究では、この処理をマージアルゴリズムと呼んでいる。

5.2.3 マージアルゴリズム

ここで、蛍光 x 線は原子の種類によってある特定のエネルギーを持って生じるものであるため、蛍光 x 線のエネルギーは既知の値となる。そのため、蛍光 x 線の既知のエネルギーと一致するシグナルがあれば、そのシグナルを蛍光 x 線と判定することができる。

そこで、簡単な検出器において、ガンマ線光子とは別のシグナルを生じさせる蛍光 x 線の種類を Geant4 のシミュレーションによって調べた (図 5.5)。そして、ガンマ線光子とは別のシグナルとして生じる主な蛍光 x 線について、表 5.3 にまとめた。

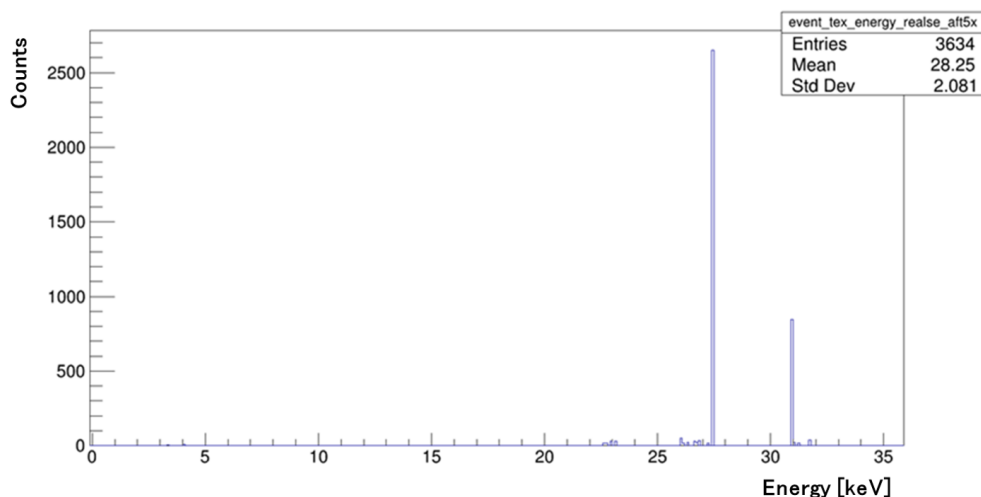


図 5.5: 簡単な検出器において、ガンマ線光子とは別のシグナルを生じる蛍光 x 線のエネルギースペクトル。Geant4 により 300 keV のガンマ線光子を簡単な検出器に照射したときに生じた 3 シグナルイベントについて、蛍光 x 線の既知のエネルギーと一致するエネルギーの統計を取った。

図 5.5 から、簡単な検出器で生じる蛍光 x 線は、Cd と Te から生じる合計 16 個の 20 keV 以上の K 系列 X 線 (表 5.3) がほとんどであるため、以下のように蛍光 x 線のシグナルの判定を行う。

- Cd と Te から生じる合計 16 個の K 系列 X 線の既知のエネルギーと等しいシグナルを蛍光 x 線によるシグナルと判定する。

ここで、検出器のエネルギー分解能を考慮し、表 5.2 のノイズレベルパラメータから以下のように蛍光 x 線のエネルギーの測定誤差を求め、その誤差付近に入るエネルギーを持つシグナルを蛍光 x 線と判定する。蛍光 x 線のエネルギーを E_x 、誤差を dE_x とおくと、 $param0=0.25$ 、 $param1=0.019$ 、 $param2=0.0$ を用いて、

$$dE_x \equiv \sqrt{param0^2 + E_x param1^2 + E_x^2 param2^2}$$

となる。

また、蛍光 x 線は特定のエネルギーを持つため、ある特定の距離離れた地点まで到達すると考えられる。そこで、Geant4 のシミュレーションにより、蛍光 x 線が生まれたガンマ線光子のヒット位置と、飛び出した蛍光 x 線の反応位置との間の距離を調べ、蛍光 x 線の走る距離についてヒストグラムを作成した (図 5.6)。同時に、蛍光 x 線が生まれた相互作用とは別の相互作用が生じた位置と、飛び出した蛍光 x 線の反応位置との間の距離についてもプロットしている。

表 5.3: 主な蛍光 x 線の種類。

元素	蛍光 x 線の種類	エネルギー [keV]
Te	$K_{\beta 4}$	31.774 keV
Te	$K_{\beta 2}$	31.704 keV
Te	$K_{\beta 5}$	31.237 keV
Te	$K_{\beta 1}$	30.995 keV
Te	$K_{\beta 3}$	30.944 keV
Te	$K_{\alpha 1}$	27.472 keV
Te	$K_{\alpha 2}$	27.202 keV
Te	$K_{\alpha 3}$	26.875 keV
Cd	$K_{\beta 4}$	26.702 keV
Cd	$K_{\beta 2}$	26.644 keV
Cd	$K_{\beta 5}$	26.304 keV
Cd	$K_{\beta 1}$	26.095 keV
Cd	$K_{\beta 3}$	26.061 keV
Cd	$K_{\alpha 1}$	22.174 keV
Cd	$K_{\alpha 2}$	22.984 keV
Cd	$K_{\alpha 3}$	22.693 keV

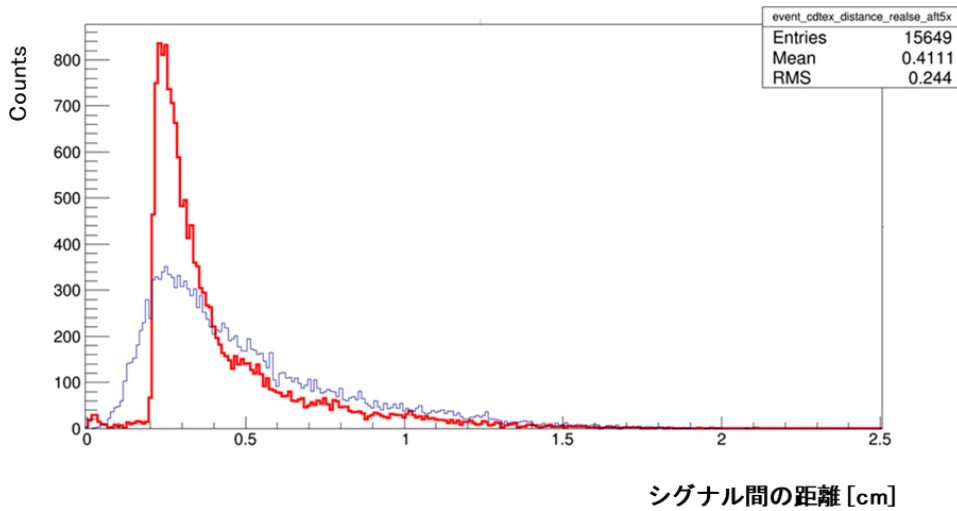


図 5.6: 蛍光 x 線が走った距離 (赤)。飛び出した蛍光 x 線の反応位置と蛍光 x 線が生まれた相互作用とは別の相互作用の位置との距離 (青)。Geant4 により 300 keV のガンマ線光子を簡単な検出器に照射したときに生じた 3 シグナルイベントについて、シグナル間の距離の統計を取った。

図 5.6 から、読み出し口から飛び出した蛍光 x 線は 0.2 cm から 0.4 cm の距離離れた比較的近い地点まで走る傾向が強く見られる。そのため、蛍光 x 線が生まれたガンマ線光子のシグナルの判定は以下のように行う。

- 蛍光 x 線との距離が上記の 0.2 cm から 0.4 cm の距離内にあるシグナルを、蛍光 x 線が生まれたガンマ線光子のシグナルと判定し、マージを行う。
- マージを行う先のシグナルが複数個ある場合は、蛍光 x 線のシグナルとの距離がより短いシグナルの方へマージを行う。

したがって、以下の手順で蛍光 x 線のマージを行う。ここで、シグナルの総数を n 、 i 番目のシグナルのエネルギーを $e_i (i=0, 1, \dots, n-1)$ 、Cd と Te から生じる 16 個の K 系列 X 線の既知のエネルギーを $E_k (k=0, 1, \dots, 15)$ 、シグナル間の距離を R 、蛍光 x 線が走る距離の下限を a cm、上限を b cm としている。また、蛍光 x 線は主に入射ガンマ線光子による光電吸収の際に生じるため、各イベントで蛍光 x 線が一つだけ生じる場合のみを考えている。

1. $e_i = E_k$ となるシグナルがただ一つある場合、そのシグナルを蛍光 x 線のシグナルと判定する。
2. 蛍光 x 線と判定したシグナルとの距離 R が $a \leq R \leq b$ となるシグナルを蛍光 x 線が生まれたガンマ線光子のヒットと見なし、蛍光 x 線と判定したシグナルのエネルギーをマージする。
マージを行う先のシグナルが複数個ある場合、距離 R が最も小さいシグナルにマージする。

5.2.4 蛍光 x 線のマージアルゴリズムの検証

蛍光 x 線のマージアルゴリズムの検証を、ガンマ線光子のヒットが $n-1$ 回と蛍光 x 線のシグナルが一つ生じた n シグナルイベント ($n=2, 3, 4, 5, 6$) に対して行った。Geant4 と ComptonSoft を用いて、100 keV、200 keV、300 keV、400 keV、500 keV、600 keV のガンマ線光子を簡単な検出器の真上から数億発程度照射するシミュレーションによって得られたイベントのうち、入射ガンマ線の全エネルギーが検出器に落ち、かつ、ガンマ線光子のヒットが $n-1$ 回と蛍光 x 線のシグナルが一つ生じたイベントのみを取り出し、そのイベントにマージアルゴリズムを適用し、蛍光 x 線のマージを試みた。なお、検出器のエネルギー分解能と位置分解能による測定誤差は、シミュレーションに反映されている。また、マージアルゴリズムにおいて、蛍光 x 線が走る距離の下限 a を 0.2 cm、上限 b を 0.4 cm とした。

ここで、以下のように「マージ率」とマージの「正解率」を定義する。

$$\text{マージ率} = \frac{\text{アルゴリズムをかけて蛍光 x 線のエネルギーをマージできたイベント数}}{\text{アルゴリズムをかける前のイベント数}} \cdot 100$$

$$\text{正解率} = \frac{\text{蛍光 x 線のシグナルとマージをする先のシグナルの判定が正解であるイベント数}}{\text{アルゴリズムをかけて蛍光 x 線のエネルギーをマージできたイベント数}} \cdot 100$$

マージ率を図 5.7 に、正解率を図 5.8 に表した。

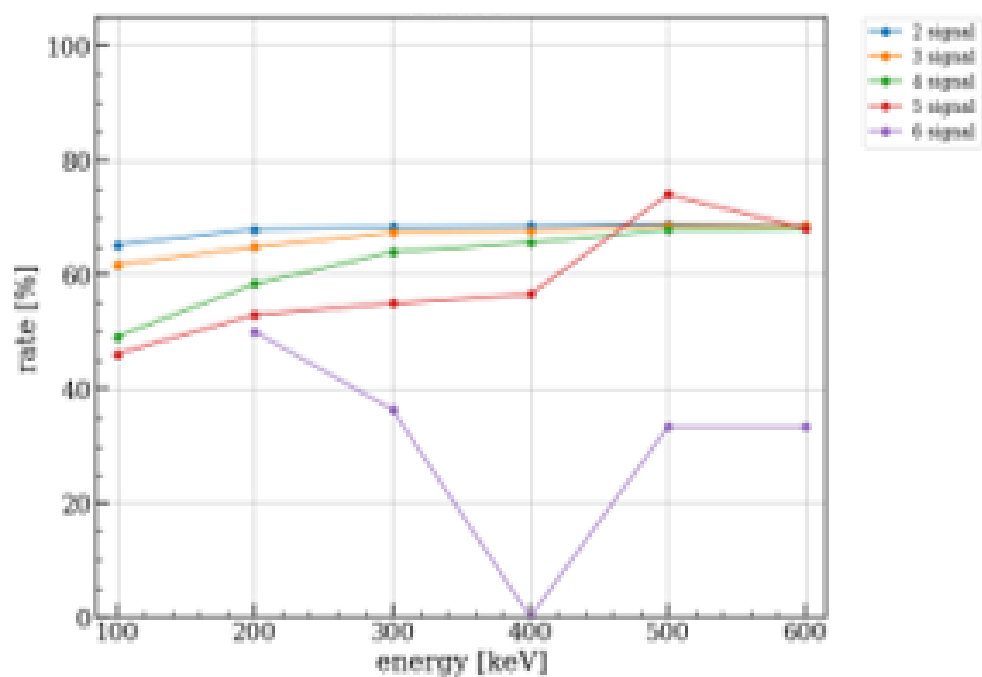


図 5.7: マージ率。アルゴリズムをかける前のイベント数のうち、アルゴリズムをかけて蛍光 x 線のエネルギーをマージできたイベント数。

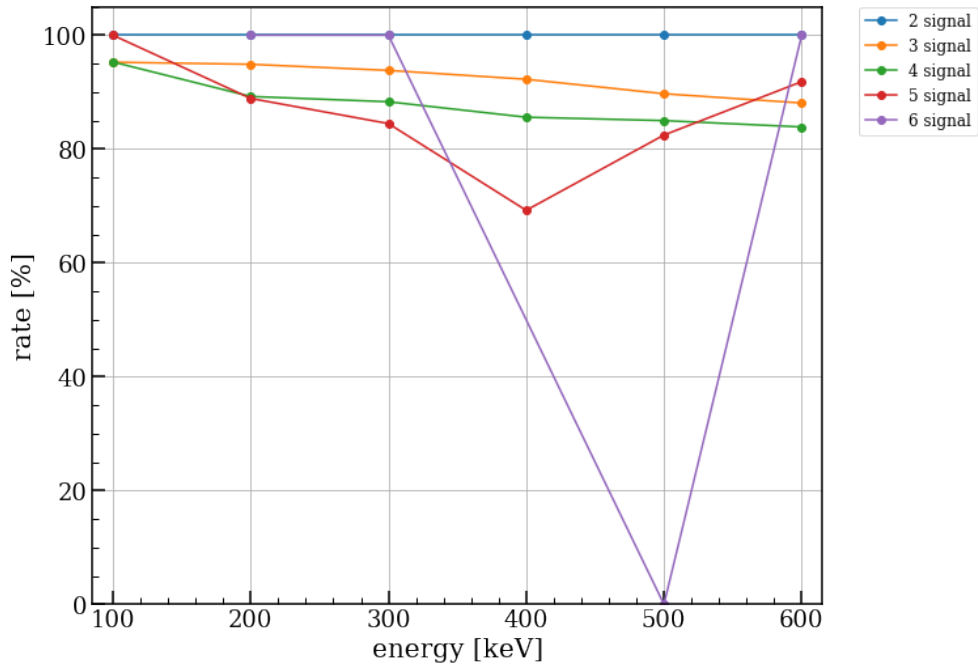


図 5.8: 正解率。アルゴリズムをかけて蛍光 x 線のエネルギーをマージできたイベント数のうち、蛍光 x 線のシグナルとマージをする先のシグナルの判定が正解であるイベント数。

図 5.7 から、マージ率は 6 シグナルを除くどのシグナルイベントにおいてもほとんどのエネルギー帯で 50-70 % 程度となっている。図 5.8 から、マージの正解率は、2-5 シグナルイベントはほとんどのエネルギー帯において 80 % 以上となっていた。6 シグナルイベントは、マージアルゴリズムをかける前の数が非常に少なく、求めた二つの割合における誤差が大きいため、他の 2-5 シグナルイベントにおける割合との差が大きくなっていると考えられる。

ここで、蛍光 x 線のエネルギーマージをした n シグナルイベントは、ガンマ線光子の $n-1$ ヒットイベントとして考えられることができる。そこで、アルゴリズムをかけて蛍光 x 線のエネルギーをマージできたイベントのうち、蛍光 x 線のシグナルとマージをする先のシグナルの判定が正解だったイベントに対してコンプトン再構成アルゴリズムをかけて検証を行った。

図 5.9 に再構成率、図 5.10 に正解率を示した。

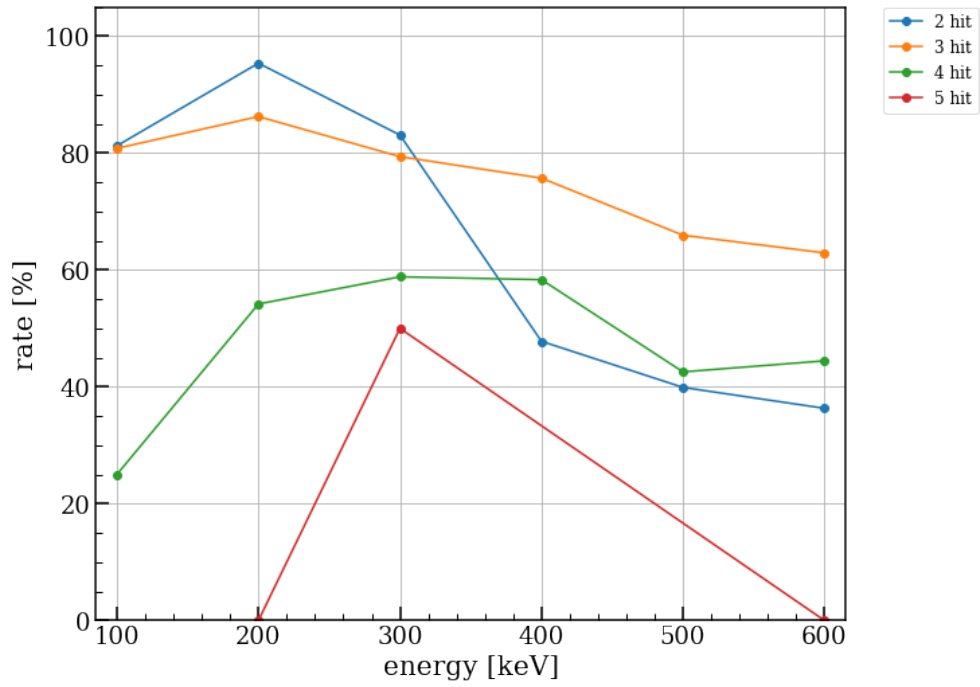


図 5.9: 再構成率。蛍光 x 線のシグナルとマージをする先のシグナルの判定が正解だったイベント数のうち、コンプトン再構成アルゴリズムをかけて反応順序をただ一つ抽出できたイベント数の割合。

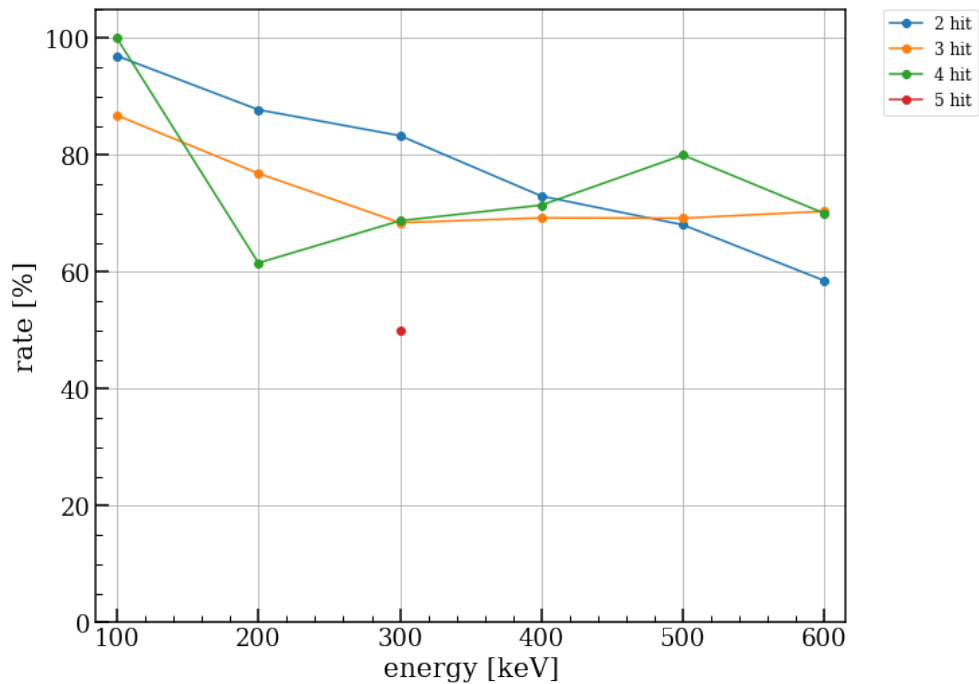


図 5.10: 正解率。反応順序をただ一つ抽出できたイベント数のうち、抽出したただ一つの反応順序が正解であるイベント数の割合。

上の二つの図より、2-3 ヒットイベントの 100-300 keV における再構成率は約 80 % 以上あり、2-4 ヒットイベントの正解率は約 60 % 以上に達している。

以上のように、蛍光 x 線のシグナルとガンマ線光子のヒットによるシグナルが生じたイベントにマージアルゴリズムをかけることで、コンプトン再構成アルゴリズムによって再構成可能なイベント数を増やすことができた。

以下に、マージアルゴリズムによる 300 keV の入射ガンマ線による蛍光 x 線 1 シグナルとガンマ線光子 2 シグナルあるいはガンマ線光子 3 シグナルの 3 シグナルイベントに対するコンプトン再構成アルゴリズムの結果の変化についてまとめた。マージアルゴリズムをかけることで、蛍光 x 線 1 シグナルとガンマ線光子 2 シグナルの 3 シグナルイベントがガンマ線光子のみの 3 シグナルイベントに変わることによって、再構成されたイベント数が約 1.6 倍、反応順序が正解と一致したイベント数が約 1.7 倍に増加したことが確認できる。

- コンプトン再構成アルゴリズムのみをかけるとき

コンプトン再構成アルゴリズムの対象イベントのうち再構成されたイベント数：63974 個
再構成された反応順序が正解と一致したイベント数：48573 個

- マージアルゴリズムの後にコンプトン再構成アルゴリズムをかけるとき

コンプトン再構成アルゴリズムの対象イベントのうち再構成されたイベント数：103610 個
再構成された反応順序が正解と一致したイベント数：83618 個

5.3 電子のマー ジアルゴリズム

ガンマ線光子の相互作用の際に生じた電子が飛び出して別の読み出し口で反応するようなイベントに対しても、蛍光 x 線のマー ジアルゴリズムと同様に電子のシグナルのエネルギーをガンマ線光子のシグナルにマー ジをすることで、コンプトン再構成アルゴリズムの対象となるイベント数を増やすことができる。

5.3.1 マー ジアルゴリズム

簡単な検出器において電子のシグナルが生じる主なイベントは、図 5.11 のように、検出器の表面付近にガンマ線光子がヒットした際に生じた電子が向かい合う検出器に飛び出し、向かい合う検出器の表面付近で吸収されるか、もしくは、そこで後方散乱し、最初に電子が生じた検出器に戻ってくるイベントである。電子が 1 シグナルとガンマ線光子が 1 シグナルの合計 2 シグナルイベントにおいて、どの層に電子が飛び出しやすいかを Geant4 シミュレーションで調べてまとめた (表 5.4)。表 5.4 から、ガンマ線光子の相互作用から生じた電子のシグナルは検出器から飛び出して向かい合う層に走りやすい傾向にあると分かる。また、表 5.5 に電子が 2 シグナルとガンマ線光子が 1 シグナルの合計 3 シグナルイベントにおいて、電子 2 シグナル目が 1 シグナル目と同じ電子によって生じたイベント数と別の電子によって生じたイベント数をそれぞれまとめた。表 5.5 において、別々の電子によって 2 シグナル生じる場合の二つの電子はオー ジェ電子と光電子である。電子 2 シグナル目が 1 シグナル目と同じ電子によって生じたイベントにおいて、検出器から飛び出した電子が向かい合う層に 1 シグナル目を生じさせてそこで後方散乱し元の検出器に戻り 2 シグナル目が生じたイベント数と、同じ層の中を電子が走る過程で二つのシグナルが生じたイベント数についてそれぞれ表 5.6 にまとめた。表 5.5 と表 5.6 から、ガンマ線光子はまず向かい合う層に走り、そこで後方散乱されて元の検出器に戻ってきやすいことが分かる。このように、飛び出した電子は、向かい合う層に飛び出しやすいことと、そこで後方散乱されやすい。ただし、図 5.11 の一番右の図のように電子が同じ層内に走る場合もある程度存在している。

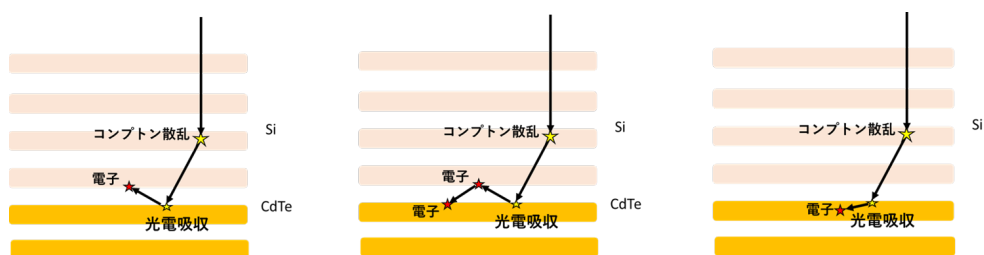


図 5.11: 一番左の図は電子が 1 シグナル生じた 3 シグナルイベント。真ん中の図と一番右の図は電子が 2 シグナル生じた 4 シグナルイベント。

また、電子のマー ジには以下の三つのことが必要になる。

1. シグナル間の距離から、検出器の表面付近で散乱を繰り返す電子のシグナルとそれを生じさせたガンマ線光子のシグナルの組を判定する。

表 5.4: Geant4 でのシミュレーションにおいて全エネルギーが検出器に落ちた、電子 1 シグナルとガンマ線光子 1 シグナルの合計 2 シグナルイベントにおいて、電子のシグナルがどの検出器で得られたかについて。

イベントの総数	向かい合う層に走ったイベント数	同じ層内に走ったイベント個数
377799 個	377789 個	10 個

表 5.5: Geant4 でのシミュレーションにおいて全エネルギーが検出器に落ちた、電子 2 シグナルとガンマ線光子 1 シグナルの合計 3 シグナルイベントにおいて、電子の 2 シグナルが同じ電子によって生じたイベント数と別々の電子によって生じたイベント数をそれぞれまとめた。

	イベントの数
二つとも同じ電子	83754 個
別々の電子	2294 個

表 5.6: Geant4 でのシミュレーションにおいて全エネルギーが検出器に落ちた、同じ電子による 2 シグナルとガンマ線光子 1 シグナルの合計 3 シグナルイベントにおいて、電子の 2 シグナル目が後方散乱の後に生じたイベント数と、電子の 2 シグナル目も同じ検出器内で生じたイベント数についてまとめた。

	イベント数
電子 2 シグナルが後方散乱で生じたイベント	80402 個
電子 2 シグナルが同じ層内で生じたイベント	3352 個

2. 各シグナルのエネルギーから、ガンマ線光子のシグナルを一つ判定する。
3. ガンマ線光子のシグナルに電子のシグナルのエネルギーをマージする。

そこでまず、電子が走った距離と、その組み合わせ以外のシグナル間距離のヒストグラムをそれぞれプロットした (図 5.12)。

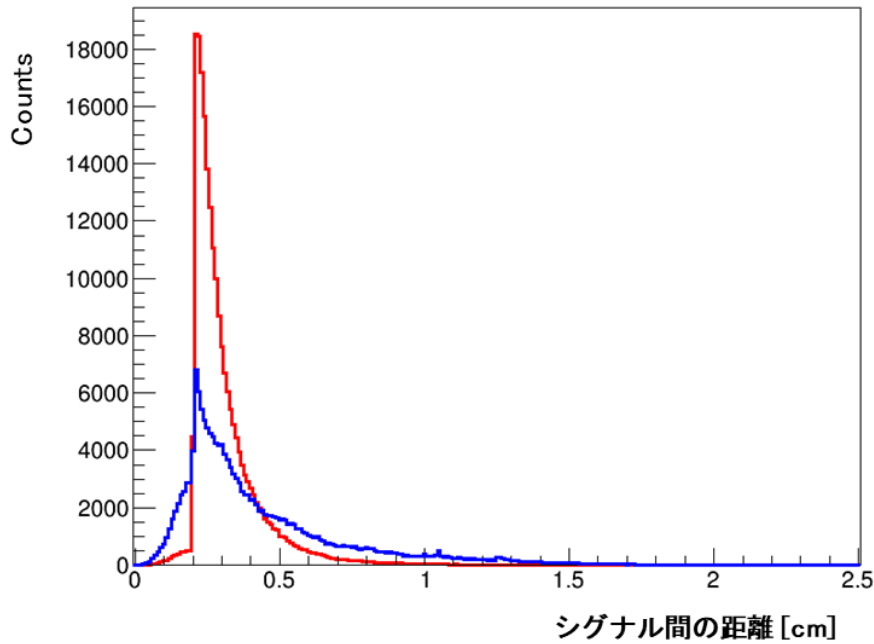


図 5.12: 電子が走った距離 (赤) と、その組み合わせ以外のシグナル間距離 (青) のヒストグラム。Geant4 により 300 keV のガンマ線光子を簡単な検出器に照射したときに生じた、ガンマ線光子のシグナル (1 から 2 シグナル) と電子のシグナル (1 から 2 シグナル) からなる 3 シグナルイベントについて統計を取った。

図 5.12 から、電子の走る距離は 0.2 cm から 0.44 cm となる傾向が強いことが分かる。これは、各層の間の距離 0.2 cm を越えて電子が飛び出して向かい合う層の検出器に吸収される、あるいは後方散乱される場合が多いためである。したがって、0.2 cm から 0.44 cm の距離にあるシグナルの組は電子とガンマ線光子の組と判定できる。また、電子は検出器の中を移動する際は常にエネルギーを検出器に落としていくため、ガンマ線光子のヒット地点から隣のピクセルまでの距離 0.1 cm の範囲にシグナルの組がある場合も電子とガンマ線光子の組と判定する。

ここで、電子とガンマ線光子のシグナルの組におけるガンマ線光子のシグナルの判定に、各シグナルのエネルギーを利用することを考える。

ガンマ線光子と電子のシグナルのエネルギーの関係を図 5.13 と図 5.14、図 5.15 に示した。

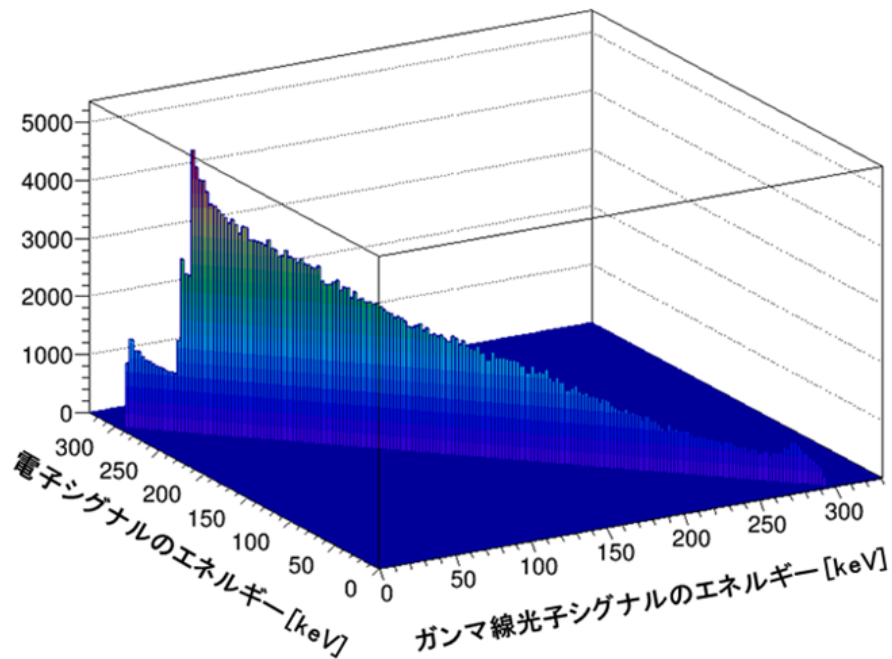
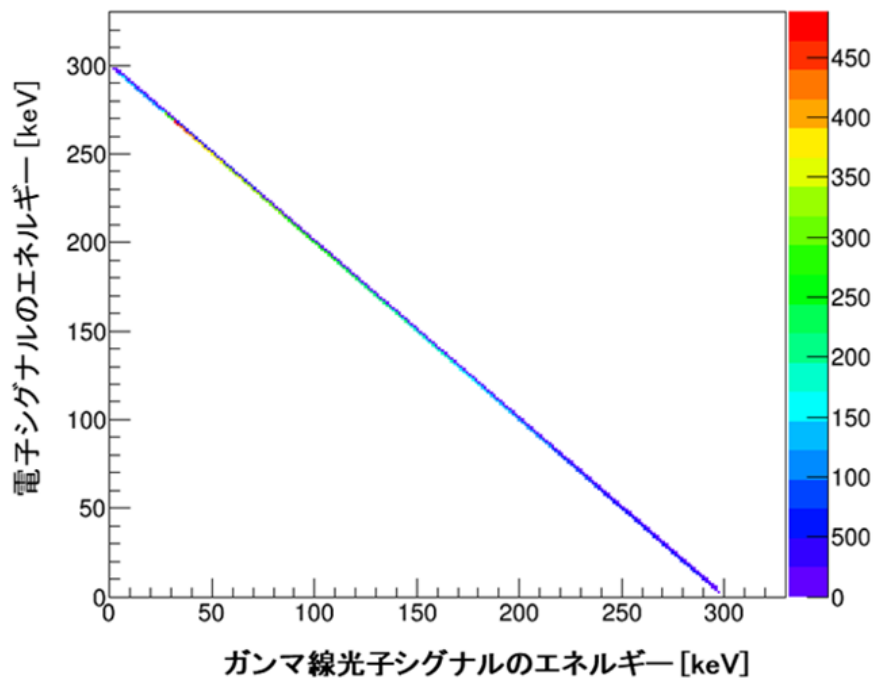


図 5.13: 向かい合う層に飛び出した電子の 1 シグナルとガンマ線光子 1 シグナルの 2 シグナルイベントにおける、電子のシグナルのエネルギーとガンマ線のシグナルのエネルギーの二次元ヒストグラム。下図は、上図のデータ数を高さにした図である。Geant4 より 300 keV のガンマ線光子を簡単な検出器に照射したときに生じた電子 1 シグナル、ガンマ線光子 1 シグナルの 2 シグナルイベントについて統計を取った。

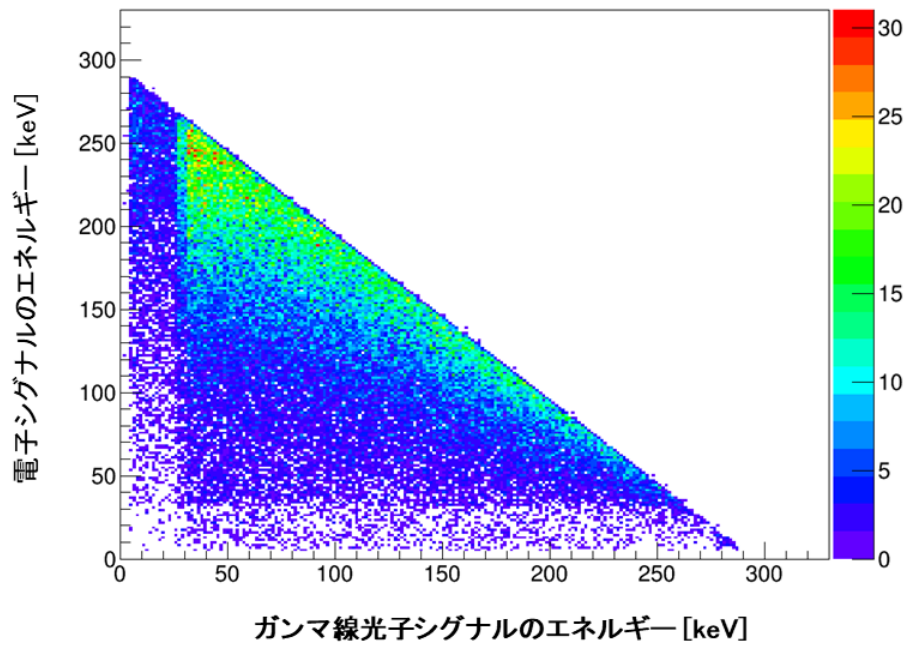


図 5.14: 向かい合う層に飛び出した電子が後方散乱して元のガンマ線光子と同じ検出器に戻る電子 2 シグナルとガンマ線光子 1 シグナルの 3 シグナルイベントにおいて、散乱された後の電子のシグナルのエネルギーとガンマ線光子のシグナルのエネルギーの二次元ヒストグラム。Geant4 により 300 keV のガンマ線光子を簡単な検出器に照射したときに生じた電子 2 シグナル、ガンマ線光子 1 シグナルの 3 シグナルイベントについて統計を取った。

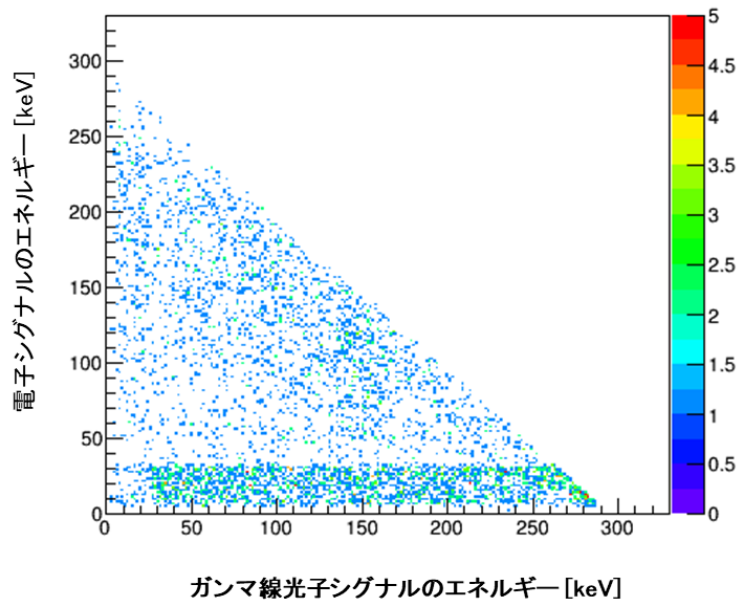


図 5.15: ガンマ線光子の 1 から 2 シグナルと電子の 1 から 2 シグナルからなる 3 シグナルイベントにおいて、ガンマ線光子から同じ層内に向けて飛び出した電子のシグナルとガンマ線光子のシグナルのエネルギーの二次元ヒストグラム。Geant4 により 300 keV のガンマ線光子を簡単な検出器に照射したときに生じた電子を含む 3 シグナルイベントについて統計を取った。

図 5.13 と表 5.4 から、向かい合う検出器で電子がエネルギーを全て落とすときは、電子の方がエネルギーが大きい場合が多いことが分かる。したがって、シグナル間の距離を使って判定した電子とガンマ線のシグナルの組のシグナル数が 2 個のとき、かつ、シグナル間の距離が 0.2 cm から 0.3 cm あるときは、シグナルのエネルギーが大きい方をガンマ線光子のシグナルと判定できる。

図 5.14 と表 5.5 から、向かい合う検出器で電子が後方散乱して元の検出器に帰って吸収されるときは、最後に反応した電子のシグナルのエネルギーがガンマ線光子のシグナルのエネルギーよりも大きいことが分かる。したがって、シグナル間の距離を使って判定した電子とガンマ線のシグナルの組のシグナル数が 3 個のときは、同じ層にある 2 つのシグナルのうち、エネルギーが小さい方をガンマ線光子のシグナルと判定する。

図 5.15 から、ガンマ線光子のヒットから生じた電子が同じ層内を走りシグナルを生じさせるときは、電子のシグナルのエネルギーの方が元のガンマ線光子のシグナルのエネルギーよりも低くなる傾向があることが分かる。したがって、1 ピクセルの幅 0 cm から 0.1 cm の距離離れた同じ層内に電子とガンマ線光子のシグナルがそれぞれ一つずつある場合は、エネルギーが大きい方をガンマ線光子のシグナルと判定する。

これらの電子のエネルギーと走る距離の傾向を使って、電子のマージアルゴリズムを以下に定義する。
マージ対象のシグナルの組は、以下の四つとする。

- 飛び出した電子が同じ層内を走り 1 シグナル生じさせる場合。
- 飛び出した電子が向かい合う層に行き、1 シグナル生じさせる場合。
- 飛び出した電子が向かい合う層に行き、1 シグナル生じさせると同時に後方散乱されて、元の層で 1 シグナル生じる場合。
- 飛び出した電子が向かい合う層に行き、1 シグナル生じさせた後、その層内を走り 1 シグナルが生じる場合。

以上の四つの場合をマージするためのアルゴリズムは以下である。

1. シグナル間の距離 R が 0 cm から 0.44 cm の範囲、あるいは 0 cm から 0.1cm の範囲 (つまり隣り同士のピクセル) にシグナルが 2 個あれば、その二つのシグナルを電子とガンマ線光子のシグナルの組と判定する。
2.
 - 0 cm から 0.1cm の距離を満たす 2 シグナルが一組ある場合は、シグナルのエネルギーが大きい方をガンマ線光子のシグナルと判定する。
 - 0.2 cm から 0.44 cm 距離を満たす 2 シグナルの組が一組ある場合は、シグナルのエネルギーが小さい方をガンマ線光子のシグナルと判定する。
 - 0.2 cm から 0.44 cm の距離を満たす二つのシグナルの組が二つあり、それらのシグナルのうち、共通のシグナルが一つだけあり、残りの二つのシグナルが同じ層内にある場合は、同じ層にある二つのシグナルのうち、エネルギーの小さい方をガンマ線光子のシグナルと判定する。
 - 0 cm から 0.1cm の距離を満たす 2 シグナルの組が一組あり、かつ、0.2 cm から 0.44 cm 距離を満たす 2 シグナルの組が一組あり、それらのシグナルのうち、共通のシグナルが一つだけある場合は、1 シグナルしかない層のシグナルをガンマ線光子のシグナルと判定する。
3. ガンマ線光子のシグナルに電子のシグナルのエネルギーを全てマージする。

5.3.2 電子のマージアルゴリズムの検証

電子のマージアルゴリズムの検証を、ガンマ線光子と電子のシグナルが合計 3 シグナルのイベントに対して行った。Geant4 と ComptonSoft を用いて、300 keV のガンマ線光子を簡単な検出器の真上から数億発程度照射するシミュレーションによって得られたイベントのうち、入射ガンマ線の全エネルギーが検出器に落ち、かつ、ガンマ線光子と電子のシグナルが合計 3 シグナルのイベントのみ (ただし、電子のシグナルは 1 つ以上) を取り出し、そのイベントにマージアルゴリズムを適用し、電子のマージを試みた。なお、検出器のエネルギー分解能と位置分解能による測定誤差は、シミュレーションに反映されている。

ここで、以下のように「マージ率」と「正解率」を定義する。

$$\text{マージ率} = \frac{\text{アルゴリズムをかけて電子のエネルギーをマージできたイベント数}}{\text{アルゴリズムをかける前のイベント数}} \cdot 100$$

$$\text{正解率} = \frac{\text{電子のシグナルとマージをする先のシグナルの判定が正解であるイベント数}}{\text{アルゴリズムをかけて電子のエネルギーをマージできたイベント数}} \cdot 100$$

マージ率を図 5.16 に、正解率を図 5.17 に表した。

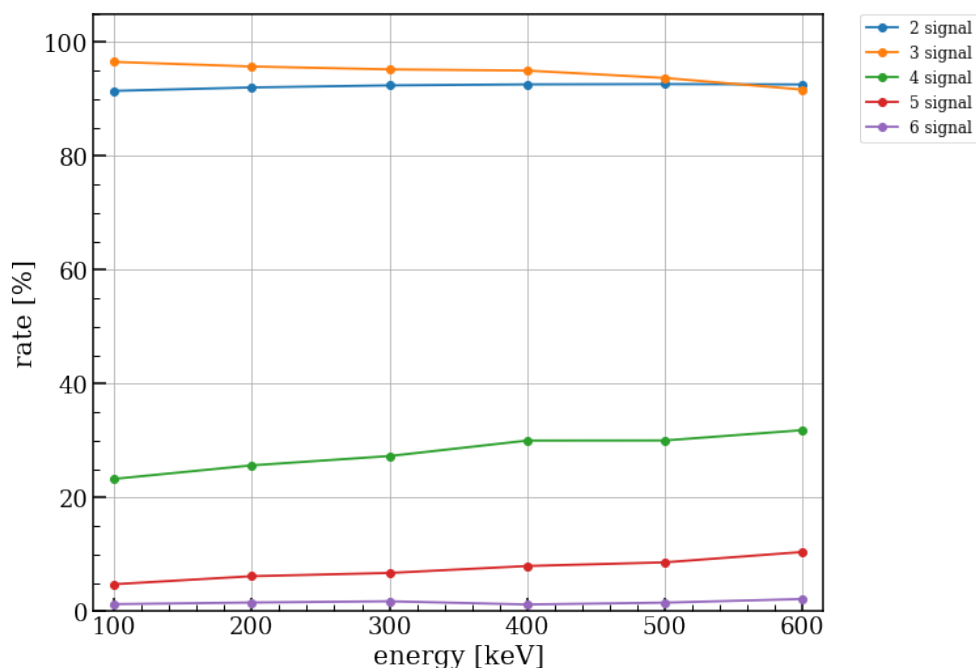


図 5.16: マージ率。アルゴリズムをかける前のイベント数のうち、アルゴリズムをかけて電子のエネルギーをマージできたイベント数。

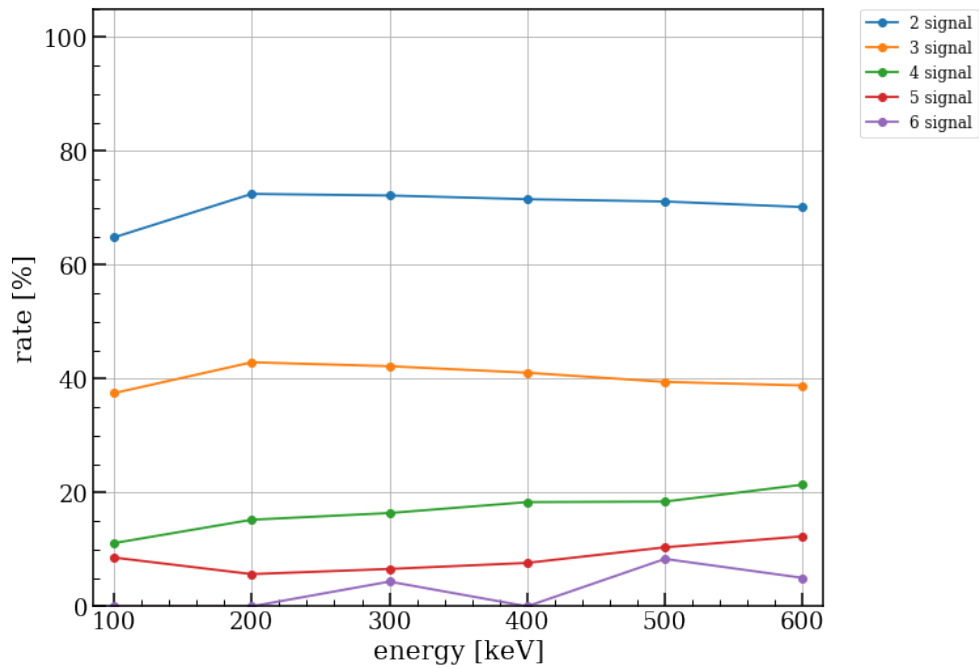


図 5.17: 正解率。アルゴリズムをかけて蛍光 x 線のエネルギーをマージできたイベント数のうち、電子のシグナルとマージをする先のシグナルの判定が正解であるイベント数。

この結果から、正解率が蛍光 x 線のと比べて低いことが分かる。その理由としては、蛍光 x 線のように、予めエネルギーなどで蛍光 x 線のシグナルを特定できておらず、そのため電子の元のガンマ線光子のシグナルの候補に電子自身も含まれることと、各イベント内に複数の電子のシグナルがあることが挙げられる。ヒット数が多くなるにつれて、値が減少しているのは、電子のシグナル数が増えることと、電子のマージ先の候補が増えることが原因と考えられる。また、本来電子は検出器の中を走る間は常にエネルギーを落とし続けるため電子と元のガンマ線光子のシグナル間の距離は短くなるが、簡単な検出器では別の層に飛び出す電子が多いため、電子のシグナル間距離が長くなり、他のガンマ線光子との距離が縮まることでマージが困難になっていると考えられる。

また、マージが正解したイベントに対して、さらにコンプトン再構成アルゴリズムをかけたところ以下のような結果となった。図 5.18 に再構成率、図 5.19 に正解率を示した。

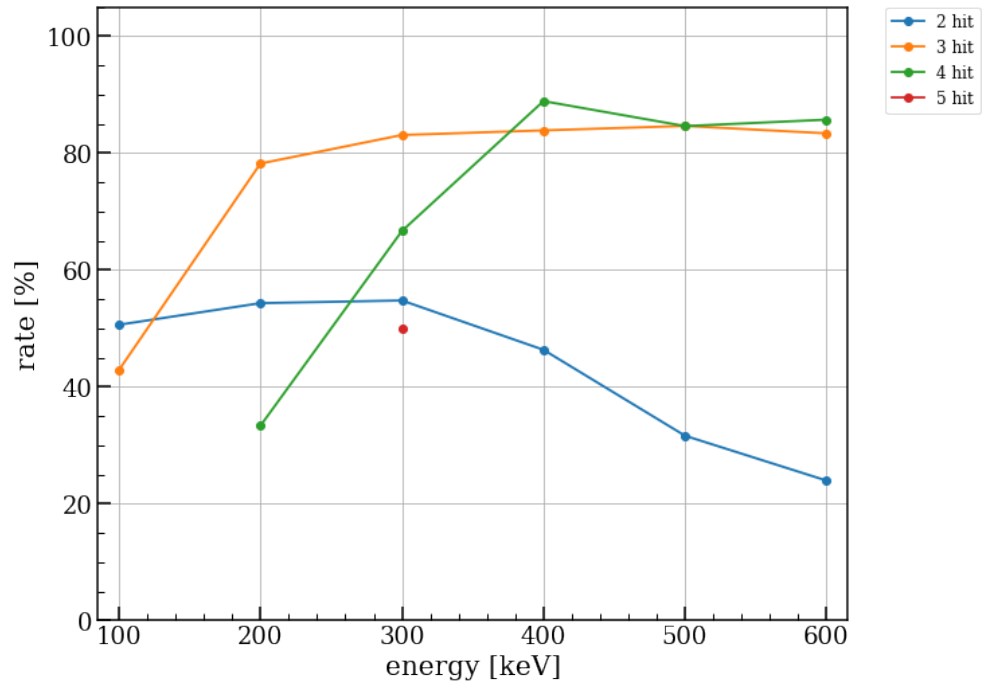


図 5.18: 再構成率。電子のシグナルとマージをする先のシグナルの判定が正解だったイベント数のうち、コンプトン再構成アルゴリズムをかけて反応順序をただ一つ抽出できたイベント数の割合。

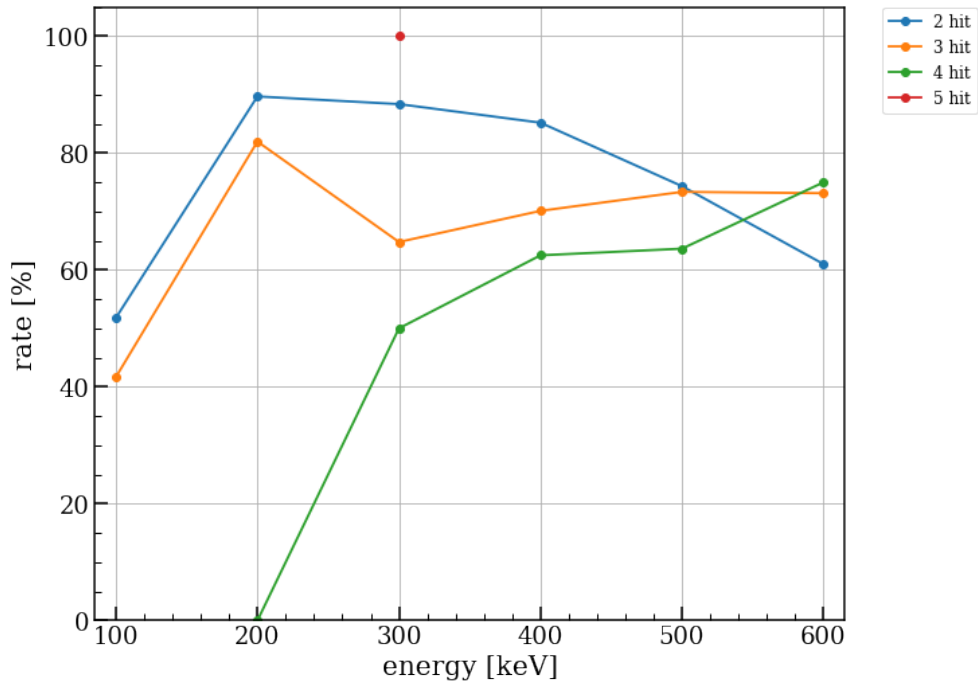


図 5.19: 正解率。反応順序をただ一つ抽出できたイベント数のうち、抽出したただ一つの反応順序が正解であるイベント数の割合。

以上の結果より、マージアルゴリズムをかけることで、コンプトン再構成をすることができないイベントを再構成することのできるイベントへと変化させることが確認された。また、高エネルギー側になるにつれて再構成率と正解率が悪くなっている理由としては、そもそも電子が飛び出すガンマ線光子のヒットは幅 0.1 cm の読み出し口の端や検出器の表面付近で起こるため電子が別の読み出し口に飛び出しやすくなっている場合が多いと思われ、この場合、ガンマ線光子のヒットした位置の誤差が大きくなっていることが考えられる。そのため、入射ガンマ線のエネルギーが高くなるにつれてガンマ線光子の散乱飛距離が長くなることで、散乱してヒットする複数のガンマ線光子同士の位置関係の誤差が少なくなっていく、コンプトン再構成アルゴリズムにおいて反応順序が正解となる割合が低エネルギーの入射ガンマ線光子と比較して高くなると考えられる。

5.4 マージアルゴリズムの検証結果

先述のように、マージアルゴリズムはコンプトン再構成アルゴリズムによって再構成されるイベントを増やすことを目的としている。そこで、100 keV から 600 keV の入射ガンマ線光子の全エネルギーが簡単な検出器にデポジットした 3 から 6 シグナルイベントに対して、コンプトン再構成アルゴリズムと蛍光 x 線及び電子のマージアルゴリズムを用いてコンプトン再構成を試みた。

電子のマージアルゴリズムの場合は、ガンマ線光子のみのイベントにかけると、以下のように蛍光 x 線のマージアルゴリズムの場合よりも多くのイベントが間違えてマージされてしまう (表 5.7)。

表 5.7: Geant4 での 300 keV のガンマ線光子を簡単な検出器に入射するシミュレーションにおいて、全エネルギーがデポジットしガンマ線光子のみからなる 3 シグナルイベントに対して、電子のマージアルゴリズムと蛍光 x 線のマージアルゴリズムをそれぞれかけたときに、間違えてマージをされてしまう割合。

	ガンマ線光子のみのイベントのマージ率
電子のマージアルゴリズム	44.63 %
蛍光 x 線のマージアルゴリズム	2.56 %

そこで、アルゴリズムをかける順番は以下の通りである。

手順 1 蛍光 x 線のマージアルゴリズム

手順 2 コンプトン再構成アルゴリズム (一回目)

手順 3 電子のマージアルゴリズム

手順 4 コンプトン再構成アルゴリズム (二回目)

まず、蛍光 x 線のマージアルゴリズムによって蛍光 x 線と思われるシグナルをマージする。そして、コンプトン再構成アルゴリズムにより反応順序の再構成を試みる。これによって、再構成されない場合は、電子のシグナルがあると考え、電子のマージアルゴリズムによって電子と思われるシグナルをマージし、再度コンプトン再構成アルゴリズムにかける。

また、電子のマージアルゴリズムのガンマ線光子の判定に関してはエネルギーの大小関係などを用いて行う方法を定義したが、蛍光 x 線のマージをすでに行っている場合は、すでにガンマ線光子のシグナルが判明しているため、もし、電子とガンマ線光子のシグナルの組にすでに判明しているガンマ線光子のシグナルがあれば、エネルギーの大小に関係なくガンマ線光子と判明しているシグナルにマージすることとする。

以下に、反応順序が正しく再構成されたイベント数について、手順 1 のコンプトン再構成アルゴリズムに蛍光 x 線と電子のマージアルゴリズムを加えることで手順 1 のみの場合の何倍に増加したかプロットした (図 6.1)。

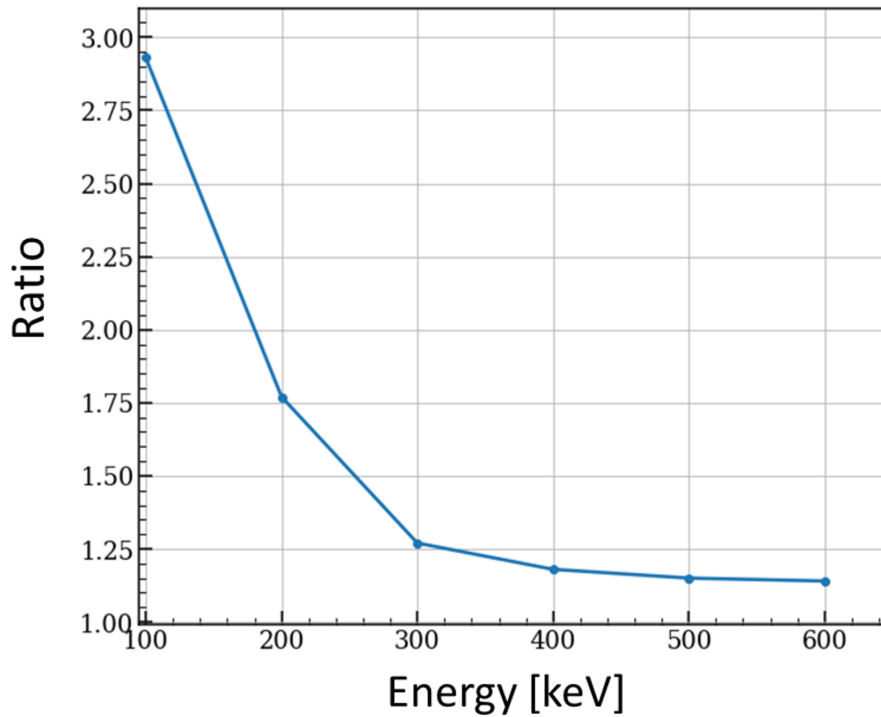


図 5.20: Geant4 のシミュレーションにより得られた全エネルギーがデポジットした 3~5 シグナルイベントに対して、マージアルゴリズムを加えることで正しくコンプトン再構成されるイベント数の増加割合を調べた。

このグラフから、蛍光 x 線のマージアルゴリズムと電子のマージアルゴリズムをかけることで、反応順序が正しく再構成される 3-5 シグナルのイベント数が 1.14-2.93 倍増加していることが分かる。

AMEGO 検出器は簡単な検出器とほとんど同じ物質で構成されており、多重の層からなるという構造上においても似ているため、ガンマ線光子から出た蛍光 x 線や電子によるシグナルが別の読み出し口で生じるイベントは簡単な検出器の場合と同様に起こり得ると考えられる。そのため、AMEGO 検出器においても、簡単な検出器において構築したマージアルゴリズムを適用することで、コンプトン再構成できるイベント数を増やすことができると考えられる。

第6章 まとめと今後の課題

簡単な検出器において、「5.4 マージアルゴリズムの検証結果」の手順1から5によって、コンプトン再構成アルゴリズムと蛍光x線のマージアルゴリズム、電子のマージアルゴリズムの三つを用いたコンプトン再構成を行った結果を以下にまとめた。

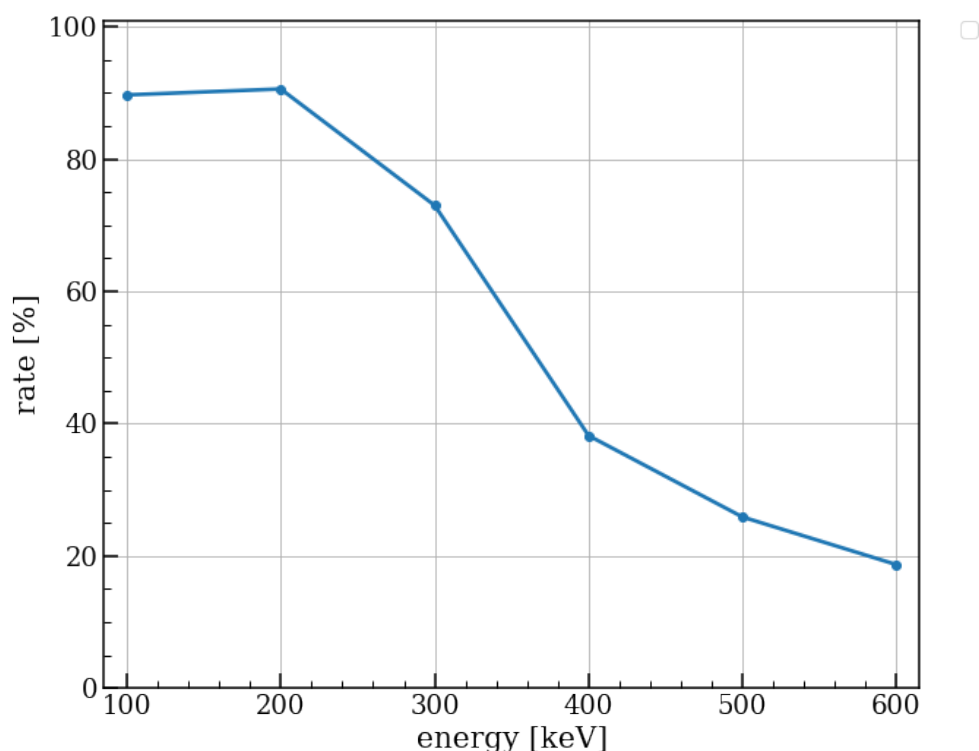


図 6.1: 100-600 keV のガンマ線を簡単な検出器に入射する Geant4 シミュレーションによって得られた全エネルギーがデポジットした2~5シグナルイベントに対して、コンプトン再構成アルゴリズムと蛍光x線のマージアルゴリズム、電子のマージアルゴリズムの三つを用いてコンプトン再構成を行い、コンプトン散乱後に光電吸収が生じている本来25ヒットのイベントのうち、正しくコンプトン再構成されるイベント数の割合を調べた。

図 6.1 から、100-300 keV では約 70-90 % の割合で正しく再構成することができていることが分かる。入射ガンマ線のエネルギーが高エネルギーになるにつれて割合が減少している原因としては、2-5 ヒットイベントの 90 % 以上を占める 2 ヒットイベント (図 6.2) の再構成率が高エネルギー側になるにつれて大幅に減少すること (図 5.2) と、ガンマ線のみイベントよりも再構成が難しい電子や蛍光 x 線が飛び出したイベントが 2-5 ヒットイベントを占める割合が高エネルギー側になるにつれて増加すること (図 6.3) が考えられる。

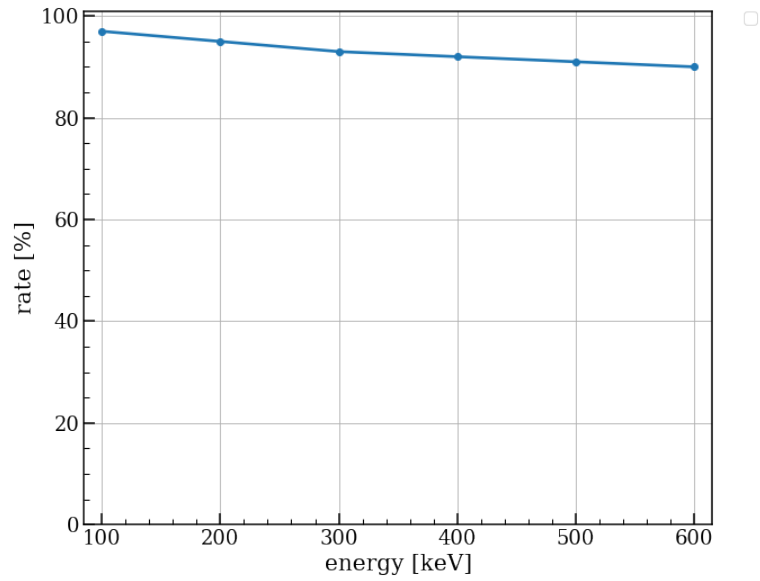


図 6.2: 100-600 keV のガンマ線を簡単な検出器に入射する Geant4 シミュレーションによって得られた全エネルギーがデポジットした 2~5 ヒットイベントのうち、2 ヒットイベントの割合を調べた。

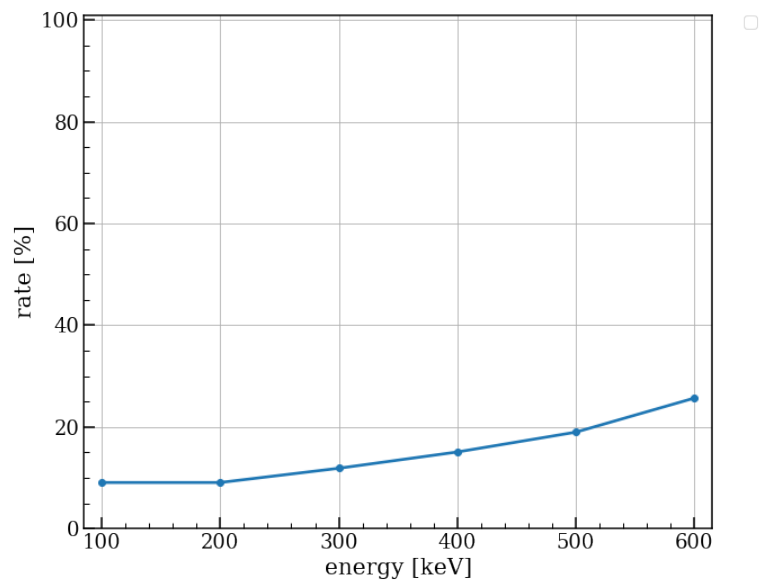


図 6.3: 100-600 keV のガンマ線を簡単な検出器に入射する Geant4 シミュレーションによって得られた全エネルギーがデポジットした 2~5 ヒットイベントのうち、蛍光 x 線や電子が飛び出したイベントの割合を調べた。

また、300 keV のガンマ線を入射して生じた 2-5 ヒットイベントが再構成される過程を図 6.4 にまとめた。

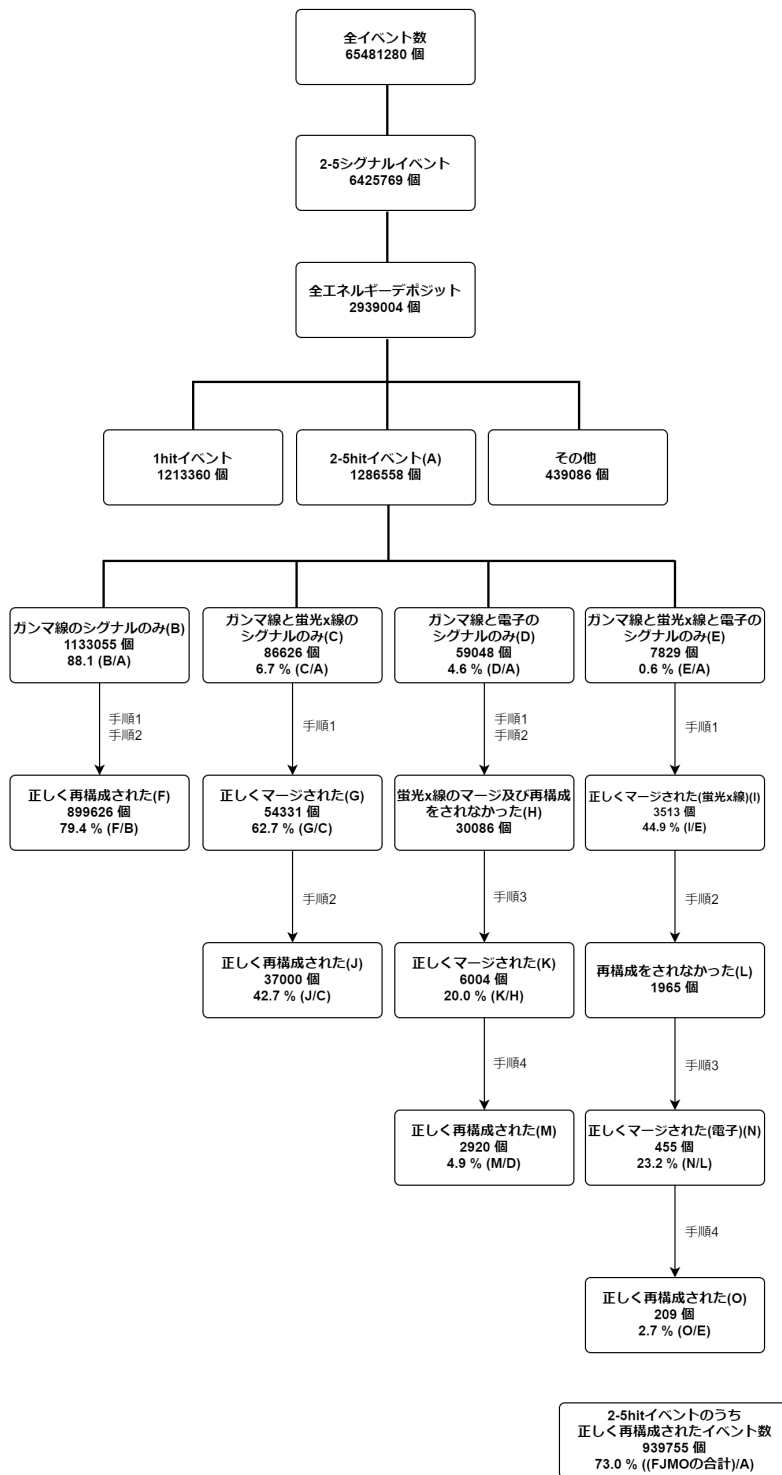


図 6.4: 300 keV のガンマ線を簡単な検出器に入射する Geant4 シミュレーションによって得られた全エネルギーがデポジットした 2~5 シグナルイベントに対して、コンプトン再構成アルゴリズムと蛍光 x 線のマージアルゴリズム、電子のマージアルゴリズムの三つを用いてコンプトン再構成を行った結果をまとめた。

本研究では、数 100 keV から 1 MeV における反跳電子を利用しないコンプトン再構成の検討を行った。コンプトン再構成を行うためには、入射したガンマ線光子の反応順序を決定するアルゴリズムが必要になる。そこで、運動学的に求まる散乱角と幾何学的に求まる散乱角を使用して反応順序を決定するコンプトン再構成アルゴリズムを開発し、AMEGO 検出器のシミュレーションにより検証を行った。その結果、AMEGO 検出器では入射ガンマ線のエネルギーが 100 keV から 300 keV の場合、再構成したイベントの反応順序の正解率は 80 %以上に達した。また、再構成可能なイベントを増やすために、二次的に生じた蛍光 x 線や電子の信号を元のガンマ線の信号にマージするマージアルゴリズムを、AMEGO 検出器よりも構造が簡単な検出器のシミュレーションを用いて開発し、検証を行った。その結果、コンプトン再構成アルゴリズムにマージアルゴリズムを加えることによって再構成可能なイベントが増加することを確認した。また、マージアルゴリズムを加えたコンプトン再構成アルゴリズムによって 2-5 ヒットイベントを再構成した結果、入射ガンマ線のエネルギーが 100 keV から 300 keV の場合は約 70-90 %のイベントを正しく再構成することができていた。

今後のアルゴリズムの検討課題としては、精度の低いアルゴリズムの再検討や、入射したガンマ線光子が検出器の外へ飛び出すイベントの再構成の検討、入射方向が分かっている天体を観測する場合のアルゴリズム開発、機械学習を用いたアルゴリズム開発などがある。今後は、それらの課題を検討しながら、開発した蛍光 x 線や電子のマージアルゴリズムを AMEGO 検出器へ適用させて、ガンマ線バーストを光源とする AMEGO による MeV ガンマ線観測のシミュレーションを行い、MeV ガンマ線観測の可能性を調査する必要がある。

謝辞

最後に、本研究を進めるにあたりご指導いただいた深澤先生、内田先生には大変お世話になりました。先生方のお力添えのおかげで、本論文を書き上げることができました。その他、研究室の皆様にも様々な形で本当にお世話になりました。大変感謝申し上げます。

参考文献

- [1] AMEGO_Decadal_RFI.pdf
https://asd.gsfc.nasa.gov/amego/files/AMEGO_Decadal_RFI.pdf
- [2] Mthesis_ichinohe.pdf
https://rd.kek.jp/ronbun/2013/Mthesis_ichinohe.pdf
- [3] 末岡耕平 2021 年 広島大学
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
- [4] 高田淳史
電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡による系内拡散 MeV ガンマ線の観測
- [5] 高田淳史
電子飛跡検出型コンプトンカメラを用いた MeV ガンマ線天体探査実験計画
- [6] 金沢大学 宇宙物理学研究室
<http://astro.s.kanazawa-u.ac.jp/labo/GRB/>
- [7] 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
- [8] 金沢大学 宇宙物理学研究室
<http://astro.s.kanazawa-u.ac.jp/labo/GRB/>
- [9] 幅田翔 2016 年 広島大学
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」
- [10] 放射線計測ハンドブック 第 4 版
- [11] 挽谷 政弥 2017 年 広島大学
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」
- [12] 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>