

低エネルギー $\gamma$ 線に対して高感度な電子・陽電子対  
生成型宇宙 $\gamma$ 線検出器のデザイン検討

広島大学理学部物理科学科  
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B083760

田邊 利明

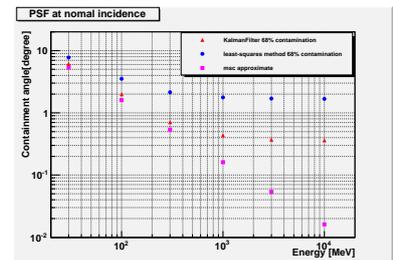
主査:水野 恒史

副査:中島 伸夫

2012年2月10日

## 概要

$\gamma$ 線天文学は宇宙からやってくる 1 MeV~数 100 TeV の  $\gamma$ 線を観測し天体现象の研究を行う分野である。入射  $\gamma$ 線が 100 GeV 以下の場合には人工衛星による観測が必要となる。最新の宇宙  $\gamma$ 線観測衛星である Fermi 衛星は主検出器に電子・陽電子対生成型  $\gamma$ 線検出器 LAT を搭載している。LAT は高いエネルギーの  $\gamma$ 線観測を重視した設計であり、例えば 10 GeV で角度分解能  $0.15^\circ$  という、1990 年代に活躍した EGRET 検出器の約 3 倍の分解能を達成するなどにより感度を向上させている。一方低いエネルギーの  $\gamma$ 線に対しては、有効面積や角度分解能は高エネルギーほどはよくない。ソフトなスペクトルを持つ天体があり、光子数が多いことから低エネルギー  $\gamma$ 線観測も重要である。このような低エネルギー  $\gamma$ 線の観測では天体と銀河放射面との切り分けが難しく、角度分解能の向上により改善が期待される。そこで本研究では、LAT を参考に低エネルギー  $\gamma$ 線に対して高感度な検出器、特に角度分解能の向上に重点をおいて検出器デザインを検討した。



薄いタングステンの板 (0.01 cm, 0.03 radiation length) に電子を入射した時のエネルギー毎の角度分解能。青が最小二乗法、赤カルマンフィルターによる角度分解能。マゼンダが多重散乱の近似値。

# 目次

第1章	Introduction	6
第2章	$\gamma$ 線観測	9
2.1	$\gamma$ 線観測の意義	9
2.2	$\gamma$ 線観測衛星	9
2.2.1	Fermi-LAT と EGRET の性能比較	9
2.3	X線, $\gamma$ 線光子と物質の相互作用	12
2.3.1	光電吸収	12
2.3.2	コンプトン散乱	13
2.3.3	電子・陽電子対生成	14
2.4	電子・陽電子対生成型 $\gamma$ 線検出器	14
2.4.1	電子・陽電子と物質の相互作用 [13]	14
2.4.2	検出原理	15
第3章	Geant4による $\gamma$ 線観測に関連した物理プロセスの検証	19
3.1	Geant4とは	19
3.2	$\gamma$ 線の反応断面積	19
3.2.1	検証方法	20
3.2.2	検証結果	22
3.3	多重散乱	24
3.3.1	検証方法	24
3.3.2	検証結果	25
第4章	電子・陽電子対生成型 $\gamma$ 線検出器のデザイン検討	27
4.1	Fermi衛星搭載LAT検出器の概要と性能	27
4.2	デザイン検討方法	27
4.2.1	シミュレータの作成	28
4.2.2	シミュレータの検証	30
4.3	電子の角度分解能	33
4.3.1	角度分解能の算出方法	33

4.3.2	結果	34
4.4	$\gamma$ 線の角度分解能	35
4.4.1	角度分解能の算出方法	35
4.4.2	結果	35
第5章	まとめと今後	37

# 目次

1.1	SAS-2,COS-B,EGRET の断面図 [1] . . . . .	7
2.1	LAT のエネルギーごとの有効面積。特に 1 GeV 以上の高エネルギー帯域で大きな面積をもつ。 [7] . . . . .	11
2.2	LAT のエネルギーごとの角度分解能。実線が 1 光子が入射してきたときに 68% の割合で位置決定することができる角度範囲、破線は 95% の割合で位置決定することができる角度範囲。表 2.1 には 68% での角度分解能を示している。 [7] . . . . .	11
2.3	Fermi による全天マップ [5] . . . . .	12
2.4	EGRET による全天マップ [4] . . . . .	12
2.5	LAT 検出器の模式図 [7] . . . . .	16
2.6	トラックの検出原理 [6] . . . . .	17
2.7	カロリメータの構造図。 [8] . . . . .	17
2.8	ACD の構造図。最上層の $5 \times 5$ のアレイとサイドの 16 枚が 4 層に渡り計 89 枚のシンチレータが用いられている。 [8] . . . . .	18
3.1	Geant4 内で作成したタングステン、Si、Pb の板に $\gamma$ 線を入射 . . . . .	20
3.2	実験セットアップの略図。矢印の向きに信号が流れる。 . . . . .	21
3.3	Pb の反応断面積測定実験検出器部 . . . . .	21
3.4	Si の反応断面積。マゼンダ (低エネルギー側) が光電吸収、赤 (中間のエネルギー) がコンプトン散乱、青 (高エネルギー) が対生成、黒が全反応断面積である、実線が NIST、クロスが Geant4 によるシミュレーションを示す。 . . . . .	22
3.5	タングステンの反応断面積。色及び印は図 3.3 と同様。 . . . . .	23
3.6	Pb の反応断面積。色及び印は図 3.3 と同様。また黒の丸印 (エラーバー付き) が実験値である。 . . . . .	23
3.7	30 MeV の電子の角度分布。黒が角度分布、青がガウシアン、赤がラザフォード散乱である。 . . . . .	25
3.8	30 MeV の電子の角度分布を積分したヒストグラム . . . . .	26

3.9	エネルギー毎の角度分解能。青の丸印がシミュレーション、マゼンダの四角が多重散乱の近似値。シミュレーションの3 GeVと10 GeVはユーザープログラムの出力精度の限界で見かけ上角度分解能が悪くなっているのを省略した。 . . . . .	26
4.1	最上部のSiと一様なビームの反応の頻度分布図。横軸X座標、縦軸Y座標、色が各ピクセルでの反応数に対応する。1ピクセルの大きさはSiストリップ半導体検出器のピッチと同じ0.228 mmにしてある。 . . . . .	31
4.2	Geant4内で作成したLATトラック一部を単純化したジオメトリ。白がFront Converterで0.03 radiation lengthのタングステン(12枚)、水色がBack Converterで0.18 radiation lengthのタングステン(4枚)、マゼンダがSiストリップ半導体検出器(36枚)。 . . . . .	32
4.3	Digitization後の最上部のSiと一様なビームの反応の頻度分布図。横軸X座標、縦軸Y座標、色が各ピクセルでの反応数に対応する。1ピクセルの大きさはSiストリップ半導体検出器のピッチと同じ0.228 mmにしてある。 . . . . .	32
4.4	エネルギー毎の角度分解能。青が最小二乗法、赤がカルマンフィルターから求めた角度分解能、マゼンダが多重散乱の近似値。 . . . . .	35
4.5	エネルギー毎の $\gamma$ 線の角度分解能。青がカルマンフィルターで出した2本のトラックの中点として求めた $\gamma$ 線の角度分解能、マゼンダは同じエネルギーの電子に対する多重散乱の近似値。 . . . . .	36

# 表 目 次

1.1	SAS-2,COS-B,EGRET,Fermi の検出天体数 [2][4][3][5] . . . . .	7
2.1	Fermi と EGRET の性能比較表 [2][5][6][8] . . . . .	10
4.1	Fermi 衛星搭載 LAT 検出器の性能表 [5][6][8] . . . . .	28
4.2	Geant4 内で記述したジオメトリの各パラメータ値 . . . . .	29
4.3	Digitization 前の出力結果 . . . . .	30
4.4	Digitization 後の出力結果 . . . . .	30

# 第1章 Introduction

宇宙からやってくる $\gamma$ 線(1 MeV~数100TeV)を観測し、天体现象の研究を行うのが $\gamma$ 線天文学である。 $\gamma$ 線は、そのエネルギーによって有効な観測方法が違ってくる。大きく分けると地上望遠鏡を用いる方法と人工衛星を用いる方法の2種類になる。

$\gamma$ 線は地球大気中の原子核と相互作用し、電磁シャワーを起こす。入射 $\gamma$ 線が100 GeV以上の超高エネルギー $\gamma$ 線の場合は、シャワーに伴い発生したチェレンコフ光が地表まで到達するので、地上望遠鏡によって観測することができる。代表的な装置にナミビアに設置された100 GeV~100 TeVのエネルギーバンドを持つH.E.S.S.(High Energy Stereoscopic System)、ラ・パルマ島に設置された50 GeV~30 TeVのエネルギーバンドを持つMAGIC(Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescope)等がある。

入射 $\gamma$ 線が100 GeV以下の場合は、大気によって吸収されてしまい、地表に届かないので人工衛星による観測が必要となる。人工衛星に搭載する検出器も、観測しようとするエネルギー帯域により有効なものが変わってくる。数10 MeV~数10 GeVの $\gamma$ 線の場合、物質との相互作用は主に電子・陽電子対生成であるので、このエネルギー帯域の $\gamma$ 線を観測するには対生成型の検出器を用いるのがよい。星間空間を飛び交う宇宙線陽子は星間ガスとの相互作用によってこのエネルギー帯域に $\gamma$ 線を放射する。よって、数10 MeV~数10 GeVの $\gamma$ 線を観測することにより宇宙線の起源や加速機構、銀河系の構造を探ることができる。

対生成型の検出器には1967年OSO-3衛星、1972年SAS-2衛星、1975年COS-B衛星、1991年EGRET検出器、そして2008年に打ち上げられたFermi衛星搭載LAT検出器がある。OSO-3はシンチレーション検出器を、SAS-2,COS-B,EGRETは飛跡検出にスパークチェンバーを用いている。スパークチェンバーは宇宙線の飛跡に沿って電離されて生じた電子を種として放電を起こす装置で、飛跡を記録することにより大きく感度を向上させることができた。SAS-2,COS-B,EGRETと代を重ねるごとに、検出器のサイズが大きくなっており、これによって有効面積を増やしていった。図1.1にSAS-2,COS-B,EGRETの断面図を示す[1]。最新のFermi衛星搭載LATには、飛跡検出部にSiストリップ半導体検出器が用いられている。このSiストリップ半導体検出器は228  $\mu\text{m}$ ピッチの高い位置分解能を持ち、また検出器同士を短い間隔で敷き詰めることができる。これによって視野と角度分解能が大きく向上している。各衛星のおおよその検出天体数を表1.1に示す[2][5]。

2012年1月現在、Fermi衛星は打ち上げから3年以上が経ち、100を超える原著論文に

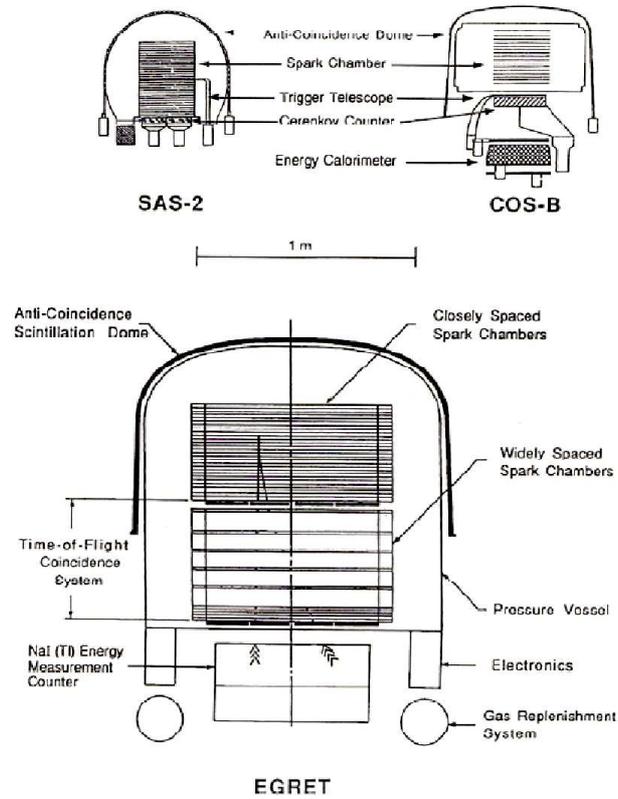


図 1.1: SAS-2,COS-B,EGRET の断面図 [1]

表 1.1: SAS-2,COS-B,EGRET,Fermi の検出天体数 [2][4][3][5]

	検出天体数
SAS-2	10
COS-B	20
EGRET	270
Fermi	1873

代表されるように研究チームによって多くの成果が発表されている。しかし、低エネルギー $\gamma$ 線に関しては有効面積や角度分解能の面において GeV 領域よりも感度が低い。ソフトなスペクトルを持つ天体が存在し、光子数が多いことからこのような低エネルギー $\gamma$ 線も重要な観測対象である。しかし 100 MeV の角度分解能は 3.5 度程度と大きく、銀河面放射との切り分けが難しくなるため不定生が大きくなっている。

そこで本研究では、Fermi 衛星で比較的感度の低かった低エネルギー $\gamma$ 線に対して高感度な検出器を目指して、特に角度分解能の向上に重点をおいて検出器デザインを検討する。

## 第2章 $\gamma$ 線観測

### 2.1 $\gamma$ 線観測の意義

光速に近い速さで宇宙空間を飛び交う宇宙線がどこで発生しているのか、またどのようにして加速されているのかは現在の宇宙物理学における主要なテーマの1つである。最近の X 線、 $\gamma$ 線観測から超新星残骸により宇宙線電子・陽子が加速されている証拠が得られつつある。また宇宙線は星間ガスとの相互作用により銀河面に沿って広がった $\gamma$ 線を放射する。従って $\gamma$ 線を観測することによって宇宙線の起源や加速に加え、銀河系内の物質分布についての情報が得られる。

### 2.2 $\gamma$ 線観測衛星

$\gamma$ 線観測は 1960 年代の OSO-3 衛星,1970 年代の SAS-2 衛星,COS-B 衛星,1990 年代の CGRO 衛星搭載 EGRET 検出器,そして 2008 年に打ち上げられた Fermi 衛星搭載 LAT 検出器によって着実に成果を上げてきた。特に最新の Fermi-LAT はこれまでの $\gamma$ 線観測衛星と比べて検出天体の数をおよそ 10 倍に増やすなど多くの成果をあげている。ここでは、Fermi 衛星搭載 LAT 検出器と 1990 年代に活躍した EGRET 検出器について性能を比較する。

#### 2.2.1 Fermi-LAT と EGRET の性能比較

Fermi 衛星は LAT(Large Area Telescope) と GMB(Gamma-ray Burst Monitor) の 2 種類の検出器を持っている。主検出器である LAT は広い視野とエネルギー帯で全天 $\gamma$ 線スキャンを行う装置であり、1991 ~ 2000 年に活躍した EGRET 検出器の性能を大きく上回っている。以下 Fermi と書く場合は LAT を指す。

Fermi と EGRET の性能比較は表 2.1 に示してある通りで、Fermi はエネルギー帯、視野、有効面積、空間分解能、エネルギー分解能、時間分解能等全ての面において EGRET の性能を大きく上回っている。LAT の角度分解能を図 2.1 に、有効面積を図 2.2 に示す [8]。100 MeV 以上で 3.5 deg、10 GeV 以上で 0.15 deg という高い空間分解能を持ち、有効面

積も特に 1 GeV 以上の高エネルギー領域で広いので、Fermi で得られるイメージの質は飛躍的に向上している。Fermi 及び EGRET で得られた全天  $\gamma$  線マップを図 2.3, 図 2.4 に示す。Fermi で得られたイメージの方が銀河面近くでも点源がはっきりと見えていることがわかる。これは角度分解能が向上したためである。

表 2.1: Fermi と EGRET の性能比較表 [2][5][6][8]

	Fermi(LAT) Dffuse Class	EGRET
エネルギーバンド	20 MeV – 300 GeV	20 MeV – 30 GeV
有効面積	6500 cm <sup>2</sup> (1 GeV)	1500 cm <sup>2</sup>
Field of View	> 2.4 sr	0.5 sr
角度分解能	3.5°(100 MeV) 0.15°(10 GeV)	5.8°(100 MeV) 0.5°(10 GeV)
エネルギー分解能	9 – 15%(100 MeV – 1 GeV) 8 – 9%(10 GeV)	10%
1 イベントデットタイム	26.5 $\mu$ s	100 ms
点源位置決定精度	< 0.5'	15'
点源感度	$3 \times 10^{-9}$ cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	$10^{-7}$ cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
検出天体	1873	271

Fermi の性能が EGRET に比べ飛躍的に向上した理由は、それぞれの検出器によるところが大きい。EGRET はそれまで主流であったスパークチェンバーを用いている。EGRET のスパークチェンバーは圧力容器中にあり、Ne ガスが封入されている。 $\gamma$  線が対生成を起こしてできた電子・陽電子がチェンバー内を走る時にこの Ne ガスを電離する。TOF(Time-of-Flight) シンチレータがトリガとなり高電圧をかけて火花放電を起こす。この火花の位置をチェンバー内に張られたワイヤで記録することで電子・陽電子の飛跡を計測し、 $\gamma$  線の到来方向を割り出している。このワイヤは約 813  $\mu$ m ピッチである [9][10]。それに対して、Fermi では Si ストリップ半導体検出器を用いて、 $\gamma$  線が対生成してできた電子・陽電子の飛跡を Si ストリップ半導体検出器で計測し、 $\gamma$  線の到来方向を割り出している。Si ストリップ半導体検出器は 228  $\mu$ m ピッチという高い空間分解能を持っている [6][8]。特に 1 GeV 以上の高エネルギー側で空間分解能、有効面積を大きく向上させることにより、EGRET の 271 に対して Fermi は 1873 もの天体を検出することに成功した [5]。

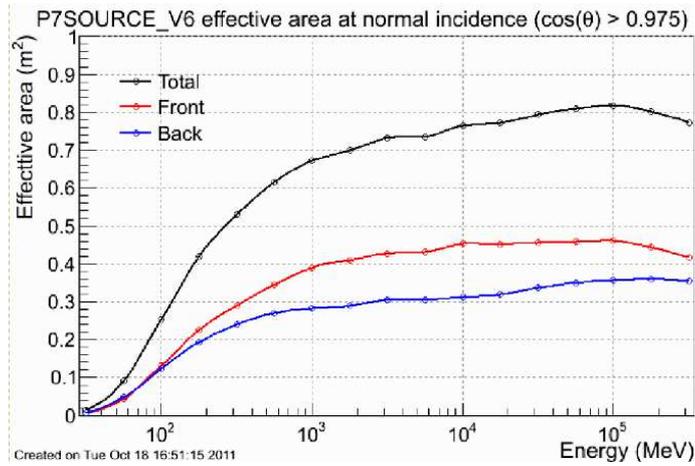


図 2.1: LAT のエネルギーごとの有効面積。特に 1 GeV 以上の高エネルギー帯域で大きな面積をもつ。[7]

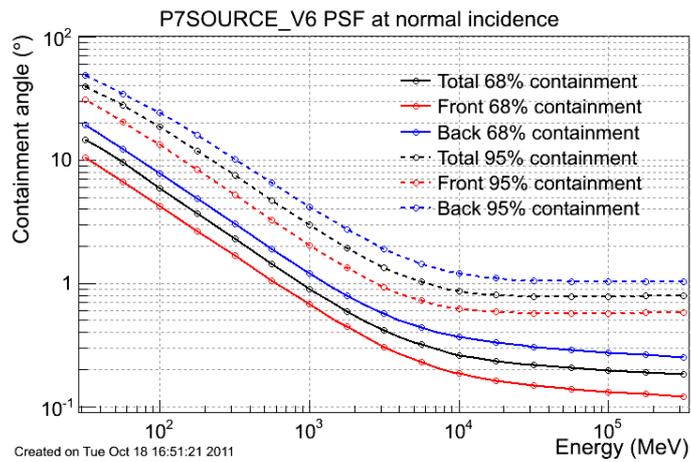


図 2.2: LAT のエネルギーごとの角度分解能。実線が 1 光子が入射してきたときに 68% の割合で位置決定することができる角度範囲、破線は 95% の割合で位置決定することができる角度範囲。表 2.1 には 68% での角度分解能を示している。[7]

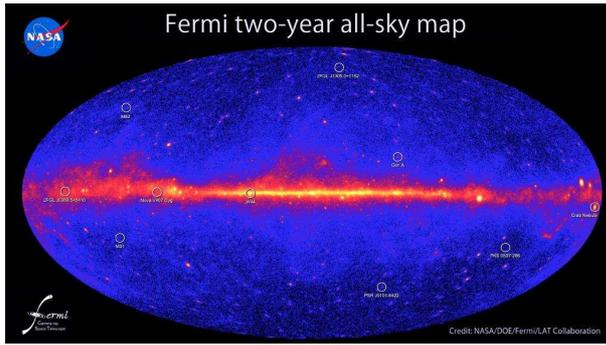


図 2.3: Fermi による全天マップ [5]

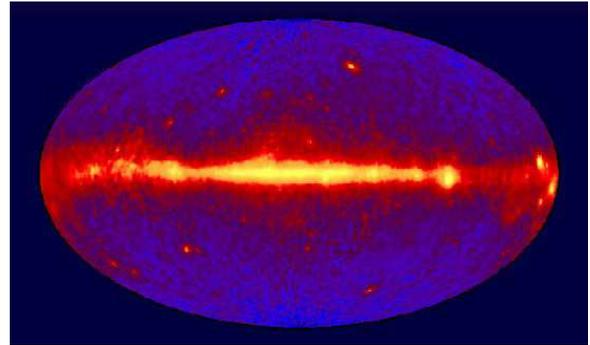


図 2.4: EGRET による全天マップ [4]

## 2.3 X線, $\gamma$ 線光子と物質の相互作用

X線,  $\gamma$ 線光子と物質の相互作用には、主に以下の3つの反応がある。

1. 光電吸収
2. コンプトン散乱
3. 電子・陽電子対生成

これらの反応によって、X線  $\gamma$ 線のエネルギーが電子や陽電子等に受け渡され、それらが物質中でエネルギーを失うことで、そのエネルギーを検出することが出来る。このうち MeV 領域の  $\gamma$ 線と物質との反応は主にコンプトン散乱と電子・陽電子対生成である。

以下それぞれの反応についての詳細を説明する [12]。

### 2.3.1 光電吸収

光電吸収は、X線  $\gamma$ 線が持っている全エネルギーが、原子に束縛されている電子に吸収され、電子を放出する現象のことである。このときに放出される電子のエネルギー  $E_e$  は次のように表すことができる。

$$E_e = E_\gamma - E_B \quad (2.1)$$

ここで、光子のエネルギーが  $E_\gamma$ 、電子の原子中での束縛エネルギーが  $E_B$  である。 $\gamma$ 線の場合、もとのエネルギーが高いため  $E_B$  の大きさはあまり重要ではない。1原子当りの光電吸収断面積は近似的に以下のように表すことができる。

$$\sigma_{p.e.} = 4\alpha^4 \sqrt{2} Z^5 \phi_0 \left( \frac{m_e c^2}{E_\gamma} \right)^{\frac{7}{2}} \quad (2.2)$$

ここで、 $\phi_0 = \frac{8\pi r_e^2}{3} = 6.651 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$  はトムソン散乱断面積、 $\alpha = \frac{1}{137}$  は微細構造定数、 $m_e$  は電子の質量、 $c$  は光速である。

式(2.2)から、光電吸収の反応断面積は物質の原子番号 $Z$ の5乗におよそ比例していることが分かる。

光電吸収の反応断面積は、それぞれの電子殻の束縛エネルギー付近で急激に増大し、それを超えると減少する。これにより、エッジ構造を持つ。100 keV を超えるエネルギーの光子に対しては、ほとんどの物質でK殻電子による吸収が最も大きな寄与を持っている[11]。

### 2.3.2 コンプトン散乱

コンプトン散乱は、光子と自由電子との弾性散乱である。物質中の電子は原子核に束縛されているので自由電子ではないが、入射光子のエネルギーが電子の束縛エネルギーより十分に大きいときには、自由電子と見なすことが出来る。散乱前の電子の運動量をゼロとして、運動量保存則及びエネルギー保存則より、次の式が得られる。

$$E_\gamma' = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2 (1 - \cos\theta)}} \quad (2.3)$$

ここで、 $E_\gamma'$  は散乱光子のエネルギー、 $\theta$  は光子の入射方向に対する散乱角、 $m_e$  は電子の質量である。電子1個に対するコンプトン散乱の断面積 $\sigma_c$ はクライン・ニコの式によって得られる。

$$\frac{d\sigma_c}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \frac{k^2}{k_0^2} \left( \frac{k_0}{k} + \frac{k}{k_0} - 2\sin^2\theta \cos^2\chi \right) \quad (2.4)$$

ここで、 $r_e^2$  は電子の古典半径、 $k_0$ 、 $k$  はそれぞれ入射光子、散乱光子の運動量、 $\chi$  は偏光ベクトルに対する散乱方位角である。原子内の軌道電子は各々独立に散乱していると考えられるので、物質中での散乱断面積は原子番号 $Z$ に比例する。

コンプトン散乱は物質によって異なるが、数100 keV~10 MeV程度で主成分となる。高エネルギー側は電子・陽電子対生成が起こるエネルギーと重なるので、電子・陽電子対生成型 $\gamma$ 線検出器ではコンプトン散乱の影響も考慮しなければならない。

### 2.3.3 電子・陽電子対生成

対生成は、 $\gamma$ 線光子が電子・陽電子対に変換される反応である。電子・陽電子の静止質量がそれぞれ511 keVであるので、 $\gamma$ 線光子のエネルギーが1022 keVを超えると起こりうる。対生成の断面積はエネルギーが $2m_e c^2$ で立ち上がり、1 GeV付近で漸近値をとる。 $E_\gamma \gg m_e c^2$ の場合、次のように近似できる。

$$\sigma_{pp} = 4Z^2 \alpha r_e^2 \left[ \frac{7}{9} \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) - \frac{2}{9} \right] \quad (2.5)$$

式(2.5)から、電子・陽電子対生成の反応断面積は原子番号 $Z$ の2乗に比例することが分かる。対生成型 $\gamma$ 線検出器では、生成した電子・陽電子の飛跡とエネルギー測定を行うことで、入射光子のエネルギー及び方向を得るような仕組みになっている。LAT検出器は、この原理を用いた代表的な検出器である[11]。

## 2.4 電子・陽電子対生成型 $\gamma$ 線検出器

10 MeV以上のエネルギーを持った $\gamma$ 線を検出するには、このエネルギー帯域での主要反応である対生成を用いるのが良い。この対生成を用いた検出器を電子・陽電子対生成型 $\gamma$ 線検出器という。

ここでは、電子・陽電子と物質の相互作用及び、電子・陽電子対生成型 $\gamma$ 線検出器の検出原理について述べる。

### 2.4.1 電子・陽電子と物質の相互作用 [13]

荷電粒子と物質の相互作用には、主に以下の4つの反応がある。

1. 電離
2. 励起
3. 制動放射
4. 弾性散乱

さらに、陽電子の場合には電子・陽電子対消滅がある。以下それぞれの反応について説明する。

- 電離

原子に束縛された軌道電子が荷電粒子によって束縛から解放されて自由になる現象を電離と呼ぶ。Fermi衛星では対生成で生じた電子・陽電子がSiストリップ半導体

検出器中で電離を起こし、この電離された電子を電気信号として検出することで飛跡を知ることができる。

- 励起

軌道電子がエネルギーを得て、さらに外側の軌道に移る現象を励起と呼ぶ。多くの物質は励起によって不安定な状態になるので、励起された電子はエネルギーを光子として放出して安定な状態へと遷移する。この時に放出される光子をシンチレーション光と呼ぶ。Fermi 衛星のカロリメータは CsI シンチレータからのシンチレーション光を検出する装置である。

- 制動放射

荷電粒子が電場中を進む時に、電場によって進行方向が曲げられる。この際に電磁波が放出される現象を制動放射と呼ぶ。制動放射の強度は物質の原子番号に比例し、入射荷電粒子の質量の 2 乗に反比例する。従って電子は陽子に比べ、制動放射でエネルギーを失いやすい。

- 弾性散乱

原子核とのクーロン力により軌道が曲げられる現象を弾性散乱と呼ぶ。反応確率は原子番号の 2 乗に比例する。ほとんどの粒子の場合、弾性散乱によるエネルギー損失は他の現象による損失に比べて小さい。物質が厚いと複数回の弾性散乱を起こし、これを多重散乱と呼ぶ。

- 電子・陽電子対消滅

陽電子が物質中の電子と結合して消滅する現象を電子・陽電子対消滅と呼び、511 keV の X 線が 2 本生じる。

このうち、電子・陽電子対生成型  $\gamma$  線検出器で重要な反応は複数回の弾性散乱 (多重散乱) である。多重散乱によって電子・陽電子の向きが変わり、 $\gamma$  線の到来方向の情報を失ってしまう。これが低エネルギーでの  $\gamma$  線の角度分解能を決める。

## 2.4.2 検出原理

電子・陽電子対生成型  $\gamma$  線検出器で最新のものが LAT 検出器である。この種類の検出器は、 $\gamma$  線が入射したときに対生成によってできた電子・陽電子をとらえることでガンマ線を検出する。

LAT 検出器は飛跡を検出するトラッカー (TKR)、エネルギーを測定するカロリメータ (CAL)、バックグラウンドになる荷電粒子を識別する Anti-coincidence Detector (ACD) の

3つから構成されている。LAT 検出器の模式図を図 2.5 に示す [8]。また、LAT 検出器の詳細を以下に述べる [6][8]。

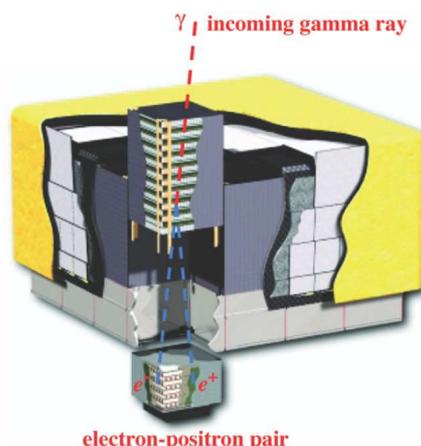


図 2.5: LAT 検出器の模式図 [7]

- トラッカー (TKR)

トラッカーは対生成によってできた電子・陽電子の飛跡を捉えて入射  $\gamma$  線の到来方向を割り出す検出器である。19 層のトレイにそれぞれ Si ストリップ半導体検出器を  $4 \times 4 = 16$  枚を取り付けた Si レイヤーが 2 枚、入射  $\gamma$  線と相互作用を起こすための原子番号の高いタングステンのシートを重ねあわせて構成されている。Si レイヤーは最上部と最下部のトレイにはそれぞれ下部、上部にのみ使われているので全部で 36 枚の Si レイヤーが使われている。Si レイヤーは X 座標と Y 座標を測定する 2 枚でタングステン 1 枚に重ねる形で置かれている (図 2.6)[8]。

有効面積を確保するためには、タングステンシートは厚いほうが優れているが、厚すぎると生成された電子・陽電子がタングステンによって多重散乱されてしまい角度分解能が悪くなる。特に、低エネルギーの  $\gamma$  線の到来方向の精度を上げるためには多重散乱は無視できない。そこで、最初の 12 枚のトレイには薄いシート (0.03 radiation length) が使われている。これを Front Converter と呼ぶ。高いエネルギーを持つガンマ線の場合は多重散乱をそれほど気にする必要が無いので、有効面積を確保するために下の 4 層のトレイには厚いシート (0.18 radiation length) が使われている。これを Back Converter と呼ぶ。それよりも下のトレイには多重散乱によって飛跡が曲げられることの無いようにタングステンシートは使われていない。

トラッカーが  $\gamma$  線を検出する原理を描いたイラストを図 2.6 に示す。トラッカーに  $\gamma$  線が入射すると、タングステンシートによって対生成が起こり、電子・陽電子が

生成される。その飛跡を Si ストリップ半導体検出器によって検出し  $\gamma$  線の到来方向を割り出している。

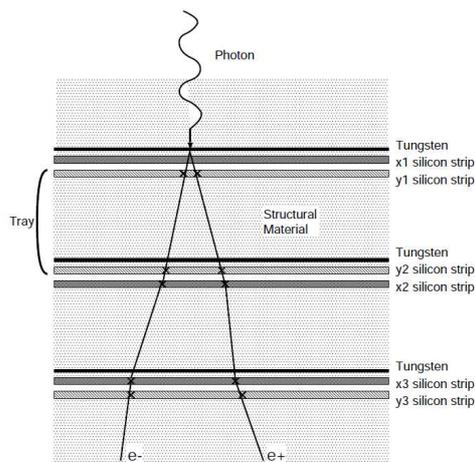


図 2.6: トラッカーの検出原理 [6]

- カロリメータ (CAL)

カロリメータは入射した荷電粒子のエネルギーを測定する装置である。カロリメータはトラッカーの下部に位置し、CsI(Tl) シンチレータのアレイで構成されている。入射  $\gamma$  線光子から生成された電子・陽電子が入射すると、電磁カスケードが起こり、それによって生じたシンチレータ光をフォトダイオードで検出し、入射  $\gamma$  線光子のエネルギーを測定している。図 2.7 にカロリメータの構造図を示す。

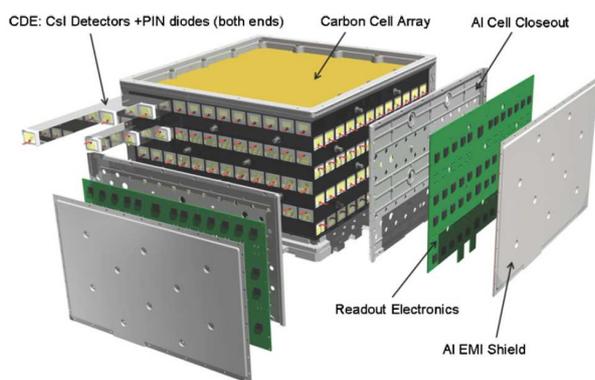


図 2.7: カロリメータの構造図。 [8]

- Anti-coincidence Detector(ACD)

ACDはトラックを覆う89枚のセグメント化されたシンチレータである。ACDは光ファイバーを介して光電子増倍管により荷電粒子からの信号を読み出しを行っている。反同時計数により、99.97%以上の荷電粒子バックグラウンドを除去することができる。図2.8にACDの構造を示す。

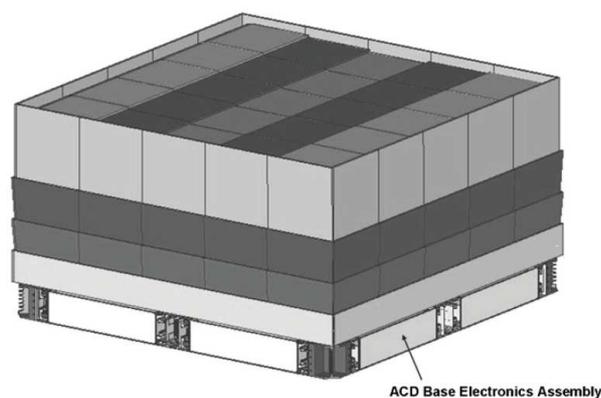


図 2.8: ACD の構造図。最上層の  $5 \times 5$  のアレイとサイドの 16 枚が 4 層に渡り計 89 枚のシンチレータが用いられている。[8]

図 2.1,2.2 を見ると、Fermi は角度分解能、有効面積共に高エネルギーに比べて低エネルギーに対する性能が低いことがわかる。低エネルギー  $\gamma$  線の観測精度を向上させることができれば、特にソフトなスペクトルを持つ天体に対して銀河面放射との切り分けが容易になり、これらのターゲットにおける宇宙線の起源や加速についての研究を進めることが期待できる。そこで、本研究では数 100 MeV 以下の低エネルギー  $\gamma$  線に対して Fermi を上回る性能を目指した検出器、特に角度分解能の向上を図ったデザインの検討を行った。

# 第3章 Geant4による $\gamma$ 線観測に関連した物理プロセスの検証

## 3.1 Geant4とは

Geant4とは粒子と物質との間で生じる様々な相互作用をシミュレーションするモンテカルロシミュレーションプログラム群である。元々は、高エネルギー加速器実験で粒子検出器を作る時に装置をシミュレーションする目的で開発された。現在では、高エネルギー実験、宇宙関連分野、医療応用分野等様々な場所で利用されている。Geant4は検出器ジオメトリの記述に優れており、またユーザーが物理プロセス等、シミュレーションコードの一部を変更することができFermi衛星や天体硬X線偏光計PoGO Lite等で実際に採用されている。そこで、低エネルギー $\gamma$ 線に対して高感度な電子・陽電子 $\gamma$ 線検出器のデザイン検討を行う本研究でもGeant4をシミュレーションツールとして用いることにした。

検出器のデザイン検討の前にGeant4における粒子と検出器の相互作用について物理プロセスの検証を行う。これは、Geant4内で本研究に関連する物理プロセスにバグがある可能性があるからである。また、Geant4内には様々なクラスが存在する。例えばジオメトリを定義するDetectorConstruction、物理プロセスを定義するPhysicsListがあり、これらのシミュレーションコードを書き換えることでユーザーが任意のジオメトリやシミュレーションに見合った物理プロセスを用いることができる。しかし、ユーザーが書き換えたシミュレーションコードが間違っているとジオメトリや物理プロセスも間違ったものとなる。よって、Geant4に内包するバグ及びユーザーの使用ミスが無いか確認するために物理プロセスの検証を行う必要がある。

ここでは $\gamma$ 線観測に関連する物理プロセスとして光子の反応断面積と電子の多重散乱について検証する。

## 3.2 $\gamma$ 線の反応断面積

$\gamma$ 線の反応断面積は、 $\gamma$ 線と物質の間での反応の起きやすさを示す量である。名前の通り面積の次元を持ち、 $10^{-28} \text{ m}^2 = 1 \text{ barn}$ と定義されている。反応断面積の検証方法及び検証結果を以下に示す。

### 3.2.1 検証方法

今回デザインする電子・陽電子対生成型  $\gamma$  線検出器は Fermi 衛星搭載 LAT 検出器を参考としている。LAT 検出器は Converter にタングステンを、検出器に Si ストリップ半導体検出器を用いている。タングステンにかわり Pb を Converter に用いる計画もあった。また Pb は実際に実験を行うことが可能であったので実験値との比較を行うために今回はタングステン、Si、Pb についてそれぞれ反応断面積を検証した。

検証方法は図 3.1 のように Geant4 内にタングステン、Si、Pb の薄い板を作成し板に 30 keV~100 MeV の  $\gamma$  線を入射する。Geant4 は入射イベントごとにどのような反応が起こったかを出力できるので、この出力から板と  $\gamma$  線の反応確率を求め以下の式から反応断面積を算出する。

$$P = 1 - e^{-\rho d \sigma} \quad (3.1)$$

ここで、 $P$  が反応確率、 $\rho$  が密度、 $d$  が板の厚さ、 $\sigma$  が反応断面積である。Geant4 により求めた反応断面積と NIST(National Insitute of Standards Technology,[14]) が提供する文献値とを比較することで Geant4 の物理プロセスが正しいかどうか検証する。

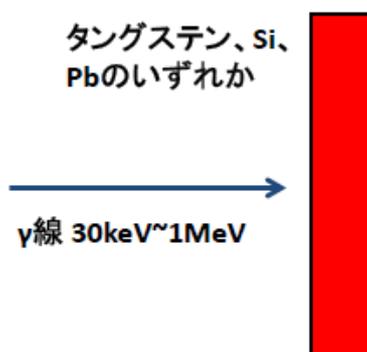


図 3.1: Geant4 内で作成したタングステン、Si、Pb の板に  $\gamma$  線を入射

Geant4 内に薄い板 (タングステンは 0.004 mm、Si は 0.1 mm、Pb は 0.004 mm) を作成し、そこに  $\gamma$  線を  $10^6$  回入射した。板の厚みは反応断面積が 1 よりも十分に小さい確率になるように決めた。これにより、光電吸収、コンプトン散乱、電子・陽電子対生成の各々について他の反応が起きたか否かの補足を考えることなく反応確率を計算できる。

Pb に関しては実際に実験も行い得た反応断面積を Geant4 で得られたものと比較した。厚さ 5.2 mm の Pb 板に  $^{22}\text{Na}$ (ピークエネルギー:511 keV,1274.5 keV)、 $^{137}\text{Cs}$ (ピークエネルギー:662 keV) の線源を照射し、検出器 (PMT+NaI) で検出したデータをポケット MCA を用いて取得した。また、検出器に直接線源を照射したデータも取得し、両者を比べることで各エネルギーに対する Pb の反応確率を求め、式 (3.1) により反応断面積を求めた。

実験セットアップの略図を図 3.2 に示す。実験機器は NaI、PMT、プリアンプ、Shaper、ポケット MCA の順に繋いでおり、PMT と NaI は光学グリズを用いて接着している。線源及び Pb は各大きさに合わせて切り抜いたダンボールで固定し、図 3.3 のように検出器の前に置いた。

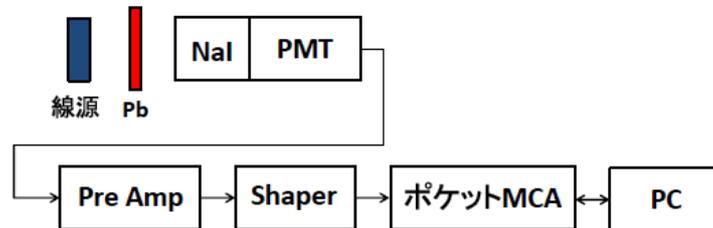


図 3.2: 実験セットアップの略図。矢印の向きに信号が流れる。



図 3.3: Pb の反応断面積測定実験検出器部

### 3.2.2 検証結果

上記の方法で得た反応断面積を図 3.4、3.5、3.6 にまとめる。

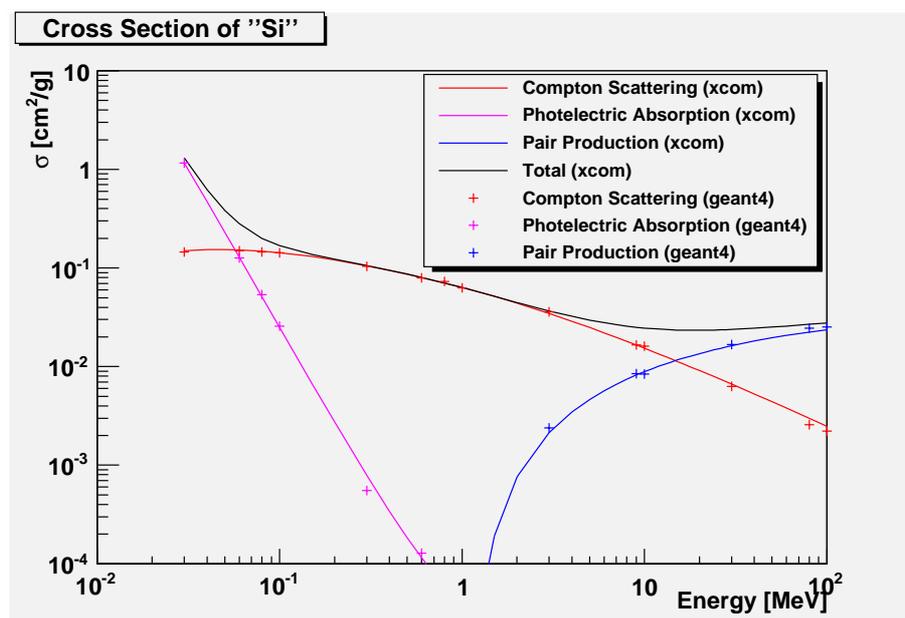


図 3.4: Si の反応断面積。マゼンダ (低エネルギー側) が光電吸収、赤 (中間のエネルギー) がコンプトン散乱、青 (高エネルギー) が対生成、黒が全反応断面積である、実線が NIST、クロスが Geant4 によるシミュレーションを示す。

図 3.4、3.5 を見るとタングステン及び Si に関しては 30 keV~100 MeV の範囲で NIST による文献値と Geant4 によるシミュレーション値が一致していることから、反応断面積は正しいことが分かる。さらに図 3.6 から Pb については反応断面積が誤差の範囲で実験値とも一致していることが確認できる。よって Geant4 における反応断面積の物理プロセス、特に数 MeV 以上のエネルギー帯域で支配的な反応であるコンプトン散乱、電子・陽電子対生成の物理プロセスが正しいことが確認できた。また電子・陽電子対生成は 10 MeV 以上で主要な反応となっていることも確認でき、対生成型  $\gamma$  線検出器は 10 MeV 以上でないとコンプトン散乱の影響で精度よく  $\gamma$  線を検出できないことも分かる。

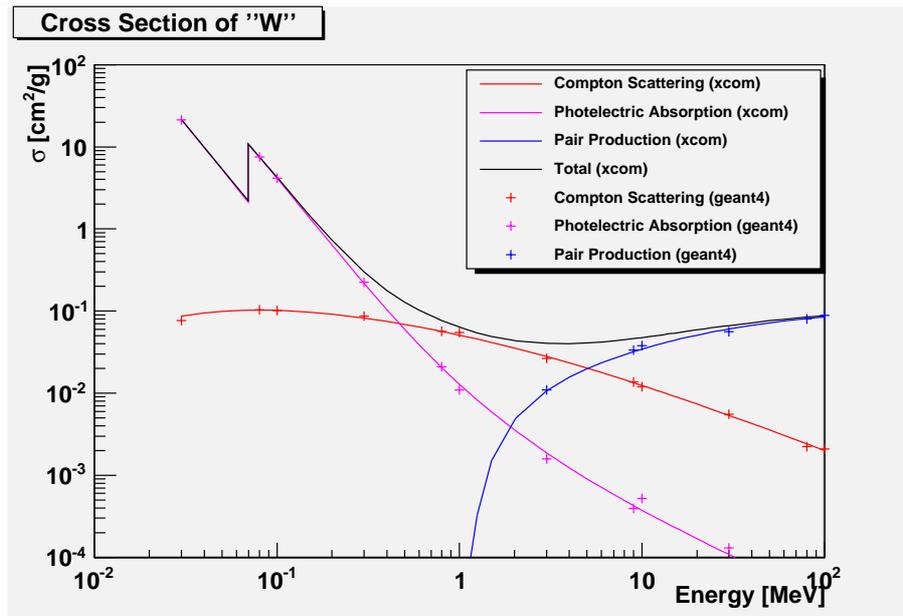


図 3.5: タングステンの反応断面積。色及び印は図 3.3 と同様。

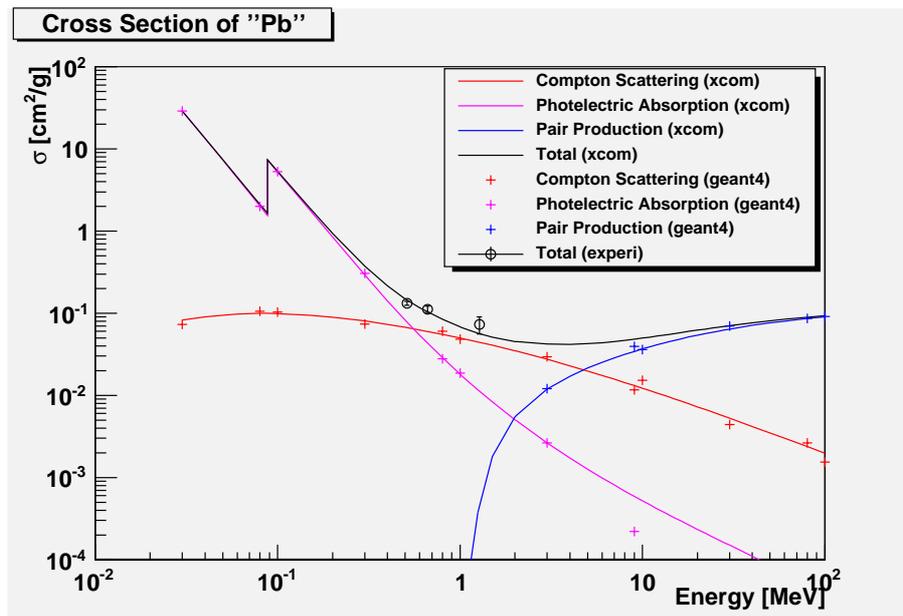


図 3.6: Pb の反応断面積。色及び印は図 3.3 と同様。また黒の丸印 (エラーバー付き) が実験値である。

### 3.3 多重散乱

多重散乱とは、原子核とのクーロン力により起こる弾性散乱が複数回起こる現象のことである。対生成の起きやすい密度の大きな物質中では多重散乱も起きやすく、電子・陽電子の進行方向が変わってしまうので、対生成型 $\gamma$ 線検出器にとっては $\gamma$ 線の到来方向を割り出す時に問題となりうる。多重散乱を特徴づける角度 $\theta_0$ を

$$\theta_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}\theta^{\text{rms}} \quad (3.2)$$

と定義すると、多重散乱の角度分布は標準偏差 $\theta_0$ のガウシアン

$$f = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_x} \frac{1}{\sigma_x} \exp\left(-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right) \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_y} \frac{1}{\sigma_y} \exp\left(-\frac{(y-\bar{y})^2}{2\sigma_y^2}\right) dx dy \quad (3.3)$$

で近似できる。また $\theta_0$ は以下の近似式で求めることができる [15]。

$$\theta_0 = \frac{13.6\text{MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln\left(\frac{x}{X_0}\right)\right] \quad (3.4)$$

ここで、 $p$ はモーメント、 $\beta c$ は速度、 $z$ は入射粒子の電荷数、 $\frac{x}{X_0}$ は radiation lengths 当りの散乱物質の厚さである。入射粒子のエネルギーが静止質量より十分に高い時は $\beta c p$ は入射粒子のエネルギーに一致する。つまり式(3.4)より、多重散乱の角度分布はエネルギーに反比例することが分かる。よって、入射エネルギーの低い $\gamma$ 線ほど到来方向予測時に散乱の影響が大きくなる。

#### 3.3.1 検証方法

Geant4内にタングステンの薄い板を作成する。板の厚みはFermiトラッカーFront Converterと同じ0.01 cm (0.03 radiation length)である。この板に30 MeV~10 GeVのエネルギー範囲で電子を約5万回入射しGeant4の出力データからタングステンによる電子の68% contamination radiusを求め、式(3.2),(3.4)から得られる $\theta^{\text{rms}}$ と比較することでGeant4における多重散乱プロセスが正しいか検証する。 $\theta^{\text{rms}}$ は68% contamination radiusよりやや小さいが、違いは大きくないのでここでは無視する。まずGeant4の出力する散乱角を用いて横軸 $\cos\theta$ 、縦軸カウント数で各エネルギー毎に角度分布をプロットする。さらに68% contamination radiusを求めるために、角度分布を積分して横軸 $\cos\theta$ 、縦軸に規格化した積分カウント数もプロットする。

### 3.3.2 検証結果

Geant4内に作成したタングステンの薄い板(厚さ 0.01 cm, 0.03 radiation length)に 30 MeV~10 GeV のエネルギー範囲で電子を約 5 万回入射した時の 30 MeV における角度分布を図 3.7 に示す。

角度分布は多重散乱が支配的であればガウシアンでフィット可能であるが、シミュレーション結果はガウシアンに加え  $\theta = 0$  付近 ( $\cos\theta = 1$  付近) に鋭いピークが重なっていた。これはタングステンが厚さ 0.01 cm (0.03 radiation length) とかなり薄い為、ラザフォード散乱もそれなりの確率で起こっているとして説明することができる。ラザフォード散乱は荷電粒子が薄い物質を通過する時に原子核が作るクーロン場により 1 回だけ弾性散乱される現象のことである [12]。実際にラザフォード散乱の角度依存性である  $\frac{1}{\sin^4\frac{\theta}{2}}$  を角度分布図に重ね書きすると、 $\cos\theta=1$  付近の成分はラザフォード散乱が主であることが分かる。

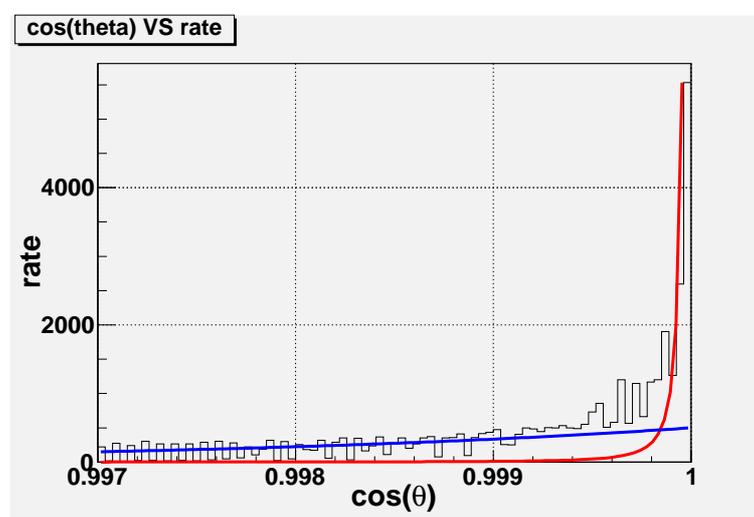


図 3.7: 30 MeV の電子の角度分布。黒が角度分布、青がガウシアン、赤がラザフォード散乱である。

図 3.7 を積分し 1 に規格化したヒストグラムが図 3.8 である。図 3.8 において縦軸が 0.32 となる横軸の  $\theta$  が 68% contamination radius である。

エネルギー毎に求めた角度分解能と式 (3.2), (3.4) によって計算したエネルギー毎の多重散乱による  $\theta^{\text{rms}}$  の近似値をプロットしたものが図 3.9 である。

図 3.9 で 30 MeV~300 MeV の範囲でシミュレーションによる角度分解能と多重散乱の近似値は良く一致しており、Geant4 及びユーザープログラムにおける多重散乱プロセスは正しく実装できていることが検証できた。

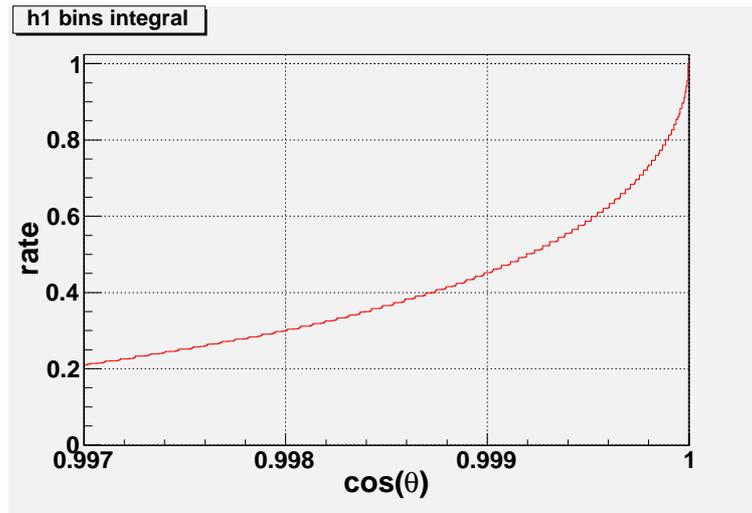


図 3.8: 30 MeV の電子の角度分布を積分したヒストグラム

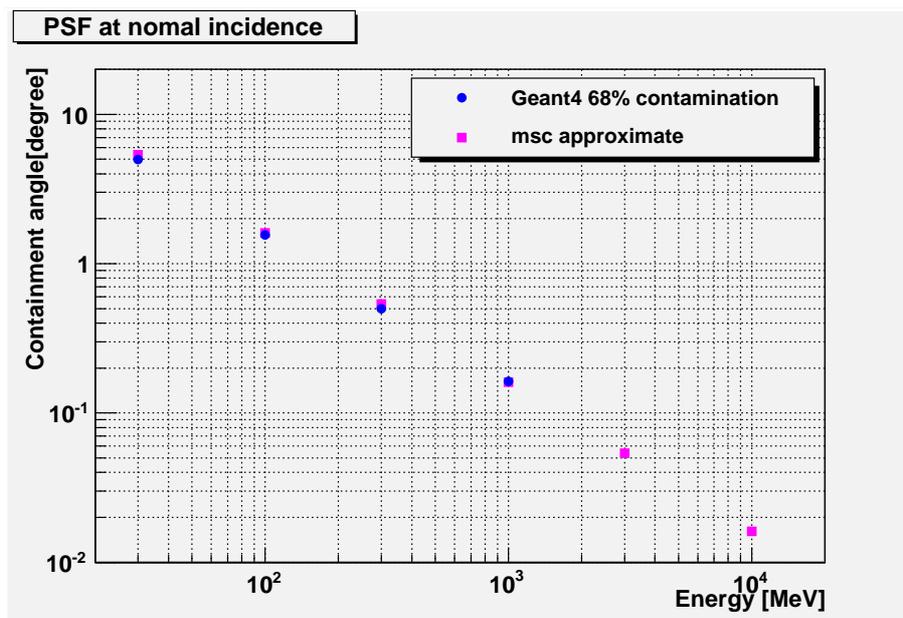


図 3.9: エネルギー毎の角度分解能。青の丸印がシミュレーション、マゼンダの四角が多重散乱の近似値。シミュレーションの 3 GeV と 10 GeV はユーザープログラムの出力精度の限界で見かけ上角度分解能が悪くなっているため省略した。

# 第4章 電子・陽電子対生成型 $\gamma$ 線検出器 のデザイン検討

前章までで、Geant4を用いて $\gamma$ 線観測に伴う反応を正しくシミュレーションできることが確認できた。本章ではシミュレーションを用いて低エネルギー $\gamma$ 線に対して高感度な電子・陽電子対生成型 $\gamma$ 線検出器のデザイン検討を行っていく。デザイン検討はLAT検出器を出発点として行っていくので、まずはLAT検出器の概要と性能について簡単に復習する。

## 4.1 Fermi衛星搭載LAT検出器の概要と性能

Fermi衛星は2008年6月12日にKennedy宇宙センターで打ち上げられた宇宙 $\gamma$ 線衛星であり、アメリカ、日本、イタリア、フランス、スウェーデン等による国際協力のもとに開発された。Fermi衛星には主検出器であるLAT(Large Area Telescope)とGBM(Gamma-ray Burst Monitor)の2つの検出器が搭載されている。LATは広い視野とエネルギーバンドで全天 $\gamma$ 線スキャンを行っている。その性能は1991~2000年に活躍したEGRET検出器を大きく凌ぐもので、様々な高エネルギー現象の解明やEGRETでは未同定であった天体の同定等で成果をあげている。

LAT検出器は飛跡を検出するトラッカー、エネルギーを測定するカロリメータ、バックグラウンドになる荷電粒子を識別するACD(Anti-coincidence Detector)の3つから構成されている。LATの性能を表4.1に示す。

本研究ではLATのトラッカーを参考に低エネルギーの $\gamma$ 線に対して高感度な検出器のデザインを検討する。

## 4.2 デザイン検討方法

本研究では低エネルギー $\gamma$ 線に対して高感度な $\gamma$ 線検出器、特に角度分解能の向上に重点を置いてデザイン検討を行う。そこで、LATトラッカーの基本的な構造はそのままに低エネルギー $\gamma$ 線で角度分解能が低くなる原因であるConverterの厚みを変更するなど低エネルギー $\gamma$ 線に対して感度向上を試みる。

表 4.1: Fermi 衛星搭載 LAT 検出器の性能表 [5][6][8]

	Fermi(LAT) Dffuse Class
エネルギーバンド	20 MeV-300 GeV
有効面積	6500 cm <sup>2</sup> (1 GeV)
Field of View	> 2.4 sr
角度分解能	3.5° (100 MeV) 0.15° (10 GeV)
エネルギー分解能	9-15%(100 MeV-1 GeV) 8-9%(10 GeV)
1 イベントデットタイム	26.5 μs
点源位置決定精度	<0.5'
点源感度	3 × 10 <sup>-9</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>

検討のおおまかな手順は以下の通りである。まず LAT の構造を本質的な部分のみ抜き出して単純化したジオメトリを Geant4 内に実現する。次いで Si ストリップの位置分解能を取り込み (Digitization)、電子及び  $\gamma$  線を入射して角度分解能を算出し、物理プロセスからの予想や LAT 検出器のものと比較を行う。その上で Converter の厚みなどを変更して角度分解能に対する影響を見る。

#### 4.2.1 シミュレータの作成

デザイン検討を行うために作成したシミュレータについて説明する。

##### 1. ジオメトリ作成

Geant4 は検出器ジオメトリを記述することに優れている。Geant4 内には予めジオメトリを定義するクラス (DetectorConstruction) が存在し、ユーザーが必要なジオメトリを記述すれば任意にジオメトリを作成することができる。Geant4 内の記述はプログラミング言語の 1 つである C++ を用いている。ジオメトリの各値はユーザープログラム内でパラメータ化して記述した。これにより、パラメータ部分を変更するだけで簡単にジオメトリの変更が可能になるようにしている。パラメータ化した値を表 4.1 に示す。Si 半導体間のわずかなギャップや読みだし回路など、角度分解能を検討する上で本質でない部分は省略した。

##### 2. Digitization

表 4.2: Geant4 内で記述したジオメトリの各パラメータ値

Construct	
Front Converter の枚数	G4int Number_of_Layer_W1 = 12;
Back Converter の枚数	G4int Number_of_Layer_W2 = 4;
Si の枚数	G4int Number_of_Layer_Si = 18;
Converter 間の距離	G4double W2W = 30.0*mm;
Converter と Converter 下部の Si の距離	G4double Conv2Si1 = -2.2*mm;
Converter と Converter 上部の Si の距離	G4double Conv2Si2 = -4.2*mm;
Front Converter Size	
Front Converter の面積	G4double Converter_x = 350.208*mm; G4double Converter_y = 350.208*mm
Front Converter の厚み	G4double Converter_z = 0.1*mm;
Back Converter Size	
Back Converter の面積	G4double Converter2_x = 350.208*mm; G4double Converter2_y = 350.208*mm
Back Converter の厚み	G4double Converter2_z = 0.72*mm;
Si Size	
Si の面積	G4double Strip_x = 350.208*mm; G4double Strip_y = 350.208*mm;
Si の厚み	G4double Strip_z = 0.4*mm;

Digitization は、物理座標で記録されたシミュレーションのヒット情報を検出器出力に置き直す作業である。Geant4 によるシミュレーションの結果は実数で返ってくるが、実際の検出器では各検出器の精度によりデジタル化された値、例えばLATではSi ストリップ半導体検出器のピッチ間隔 0.228 mm 毎の値が返ってくる。電子・陽電子対の再構成は Digitization の出力に対して行う。LAT では 2 章で述べたように X 座標, Y 座標を検出する Si ストリップ半導体検出器が規則的に並べられているが、まず X, Y の 2 次元でデジタル化してプログラムの検証を行い、その後 1 次元に情報を落とすこととした。Digitization 後は EventNo、入射粒子の名前、質量、初期エネルギー、入射座標、入射方向、各 Si に割り振った Id とデジタル化したヒット座標を出力している。Digitization 前後の出力結果の一例を以下に示す。

表 4.3: Digitization 前の出力結果

Id	X 座標	Y 座標
0	-74.92	-46.81
1	-74.91	-46.81
2	-74.86	-46.83
3	-74.86	-46.83
4	-74.86	-46.88
5	-74.86	-46.89
6	-74.83	-47.00
7	-74.83	-47.01
8	-74.84	-47.13
9	-74.85	-47.14
10	-74.92	-47.31

表 4.4: Digitization 後の出力結果

Id	X 座標	Y 座標
0	-74.898	-46.854
1	-74.898	-46.854
2	-74.898	-46.854
3	-74.898	-46.854
4	-74.898	-46.854
5	-74.898	-46.854
6	-74.898	-47.082
7	-74.898	-47.082
8	-74.898	-47.082
9	-74.898	-47.082
10	-74.898	-47.31

## 4.2.2 シミュレータの検証

この節では 4.2.1 節で作成したシミュレータ (Digitization プログラムを含む) が正しく動作するか以下の手順で検証していった。

- ジオメトリ作成

作成したジオメトリが正しく存在するか以下の 3 つの方法で検証する。

1. Geant4 の出力による検証

Geant4 は入射粒子毎にどのような反応が起こったのかを出力できる。また、Geant4 内では板それぞれに Id を振り分けることができ、作成した板全てと反応していれば各板に対応した Id が全て出力される。作成した全ての物質に対してヒットがおこるように 1 GeV のミューオンを入射することで、ジオメトリが正しく存在しているか確認する。Id の振り分けは Front Converter, Back Converter, Si の各々で上から順に Id=0,1,2...となっている。出力結果から Front Converter, Back Converter, Si がそれぞれ意図した通りの Z 座標に置けていることが確認できた。

## 2. フラットビームによる検証

+Z 方向から一様なビームを入射することでジオメトリが作成した通りの大きさであるかが確認できる。フラットビームは Si 検出器より少し広めの  $360.0 \times 360.0 \text{ mm}^2$  の範囲に入射した。ヒット位置の分布を図 4.1 に示す。この図から Si 検出器は意図した通りに  $350.208 \times 350.208 \text{ mm}^2$  の大きさで実装されていることが確認できた。

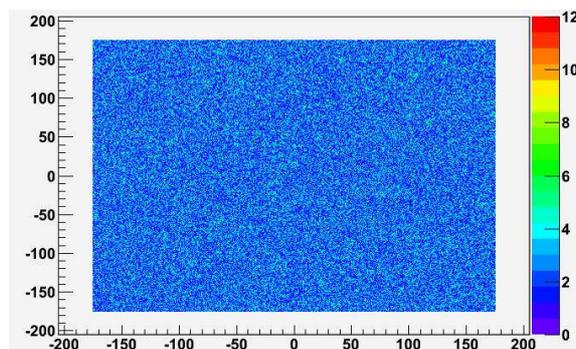


図 4.1: 最上部の Si と一様なビームの反応の頻度分布図。横軸 X 座標、縦軸 Y 座標、色が各ピクセルでの反応数に対応する。1 ピクセルの大きさは Si ストリップ半導体検出器のピッチと同じ 0.228 mm にしてある。

## 3. ジオメトリの視覚化

Geant4 にはいくつかの視覚化ツールが存在し、その中の 1 つである Dawn を用いてジオメトリの視覚化を行った。視覚化することで目視によってジオメトリの検証を行った。視覚化したジオメトリを図 4.2 に示す。

視覚化によって各々のコンポーネントが Geant4 内で作成したとおりに存在していることが確認できた。

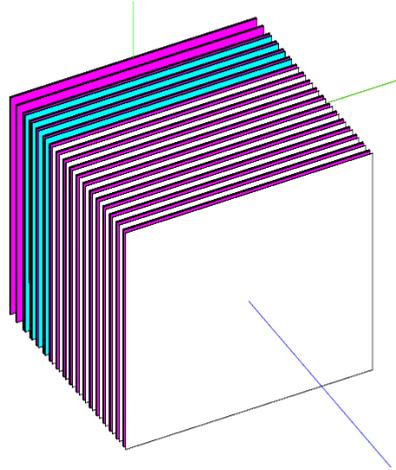


図 4.2: Geant4内で作成したLATトラッカー部を単純化したジオメトリ。白がFront Converterで0.03 radiation lengthのタングステン(12枚)、水色がBack Converterで0.18 radiation lengthのタングステン(4枚)、マゼンダがSiストリップ半導体検出器(36枚)。

- Digitization

プログラミング言語の一つであるpythonを用いたGeant4の出力データをDigitizationした。Digitization後はX,Y座標はSiストリップ半導体検出器のピッチ間隔である0.228 mm間隔で出力される。このDigitizationを行うプログラムにバグがあるとヒット位置がずれたり、抜けが生じる可能性がある。そこでDigitization後のヒット位置を表4.4にあるように目で確認することに加え、図4.1と同様にプロットした(図4.3)。この図からDigitizationも正しく動いていることが確認できた。

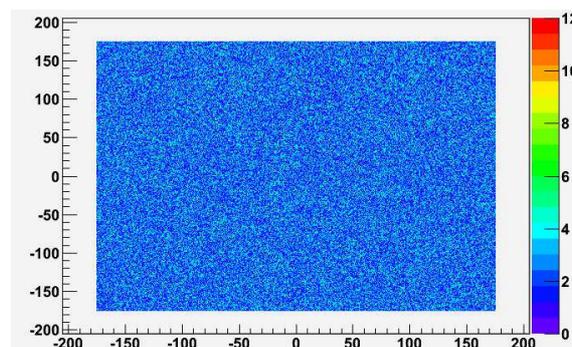


図 4.3: Digitization後の最上部のSiと一様なビームの反応の頻度分布図。横軸X座標、縦軸Y座標、色が各ピクセルでの反応数に対応する。1ピクセルの大きさはSiストリップ半導体検出器のピッチと同じ0.228 mmにしてある。

## 4.3 電子の角度分解能

この節では4.2.2節で正しく実装されていることを確認したシミュレータを用いてシミュレーションを行い、得られた結果から電子の角度分解能を求める。最終的に角度分解能を求めたいのは $\gamma$ 線であるが、この場合は対生成により生成された電子・陽電子各々の飛跡を出す必要がある。そこで $\gamma$ 線に先駆け、まずは電子の飛跡をフィッティングで求め正しく角度分解能が算出できるか確認することとした。

### 4.3.1 角度分解能の算出方法

電子の角度分解能は以下の2通りの方法で算出した。

- 最小二乗法

最小二乗法はデータ点との残差の二乗和が最も小さくなるモデルを求める方法である。低エネルギーでは多重散乱の影響が大きく、徐々に飛跡が直線からずれていくので最初の2点で最小二乗法を行うこととした。(つまり最初の2点を結ぶ直線を求めるのと同義である。)

- カルマンフィルター

カルマンフィルターは1960年頃にKalmanらによって提唱された、離散的な誤差のある観測から逐次的にモデルパラメータを決定する数学的手法である。Fermiでは電子及び陽電子の飛跡を決めるのに用いられている。つまり、最初のヒット点から次のヒット点の範囲を予測し、予測範囲内に次のヒットがあれば2点の位置情報から次のヒット点の範囲を予測し...という作業を逐次行い、到来方向の情報が精度よく得られる点のみを用いている。フィットの際に多重散乱により飛跡が徐々に曲がる効果を逐次的に取り込むので、最初の電子または陽電子の進行方向を決めるのに必要十分な数のヒットのみを使うことができる。カルマンフィルター自体は一般的な概念であり、本研究では日本の電子・陽電子リニアコライダー (JLC) グループが開発したライブラリ (KalTest) を使用した。

実際のFermiでのデータ解析ではXZ面の飛跡とYZ面の飛跡を別々に求め、それらを結びつける作業 (パターン認識) が行われるがこれは複雑な作業であり、また検出器デザイン (Converterの厚みなど) と角度分解能の関係を見る上で本質的ではない。そこで1次元 (XZ面) で角度分解能を求め、それを $\sqrt{2}$ 倍することで近似的に2次元の角度分解能として算出することにした。

### 4.3.2 結果

最小二乗法とカルマンフィルターによって得られた電子のエネルギー毎の角度分解能と多重散乱の近似値をプロットしたものを図4.4に示す。

最小二乗法により求めた角度分解能と多重散乱の近似値を比較すると最小二乗法の結果は低エネルギー側では多重散乱の近似値と近い値を得ることができた。高エネルギー側はDigitizationによってSiストリップピッチを考慮したために角度分解能は悪くなっている。このことはストリップピッチが0.228 mm, X座標を測るレイヤー同士の間隔が32 mmであり、これによって決まる最小の角度分解能が0.6度であることから裏付けられる。また低エネルギーにおける多重散乱の影響を考慮して2点で最小二乗法を行ったが、高エネルギーにおいては多重散乱の影響は少なくなるので最小二乗法に用いる点は多い方がよく、フィット点が少ないことも高エネルギー側の角度分解能を悪くしている要因の1つであると考えられる。

カルマンフィルターにより求めた角度分解能と最小二乗法を比較すると全エネルギーに渡りカルマンフィルターの方がより良い角度分解能を得ている。これはカルマンフィルターが各イベントエネルギー毎に最適な数の点を用いて飛跡を求めているからであり、高エネルギー側で大きな改善が見られる。低エネルギー側でも改善が見られ、多重散乱の近似値と概ね同じ値を得ることができた。高エネルギー側で多重散乱の近似値と完全に一致しないのは最も直線に近い1つのトラック(これをプライマリトラックと言う)のみを求めていることが原因と考えられる。高エネルギーではトラック内で電磁シャワーが発生しはじめ、複数のトラックが生じるのでこれらの平均をとることでより精度をあげることが可能となる。

以上からカルマンフィルターを用い、プライマリトラックを出すことで特に本研究が対象とする低エネルギー(30 MeV~300 MeV)に対しては物理プロセスの限界で決まる値に近い角度分解能を求めることができた。そこで次節では30 MeV~300 MeVのエネルギーで $\gamma$ 線の角度分解能を議論する。

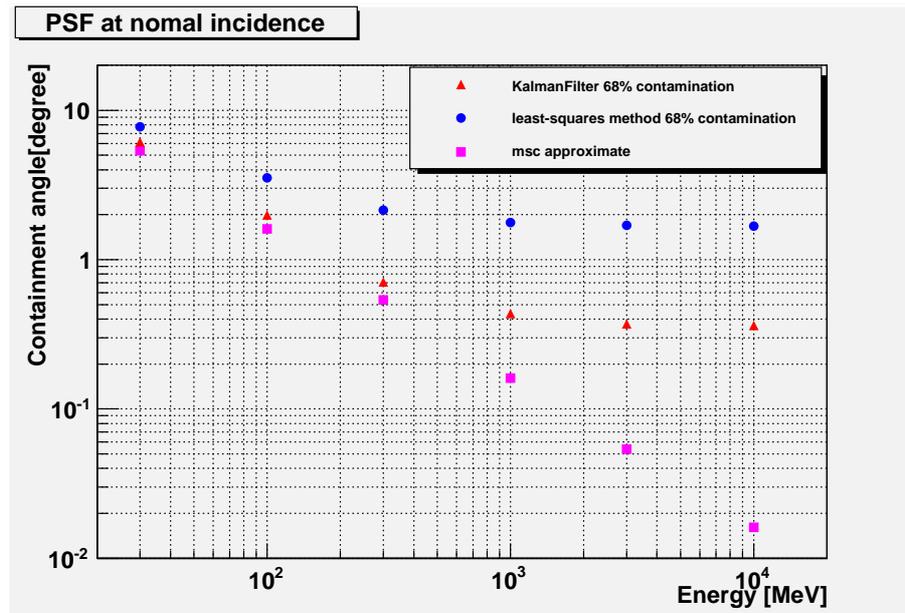


図 4.4: エネルギー毎の角度分解能。青が最小二乗法、赤がカルマンフィルターから求めた角度分解能、マゼンダが多重散乱の近似値。

## 4.4 $\gamma$ 線の角度分解能

この節では前節で用いたカルマンフィルターによって  $\gamma$  線の角度分解能を求める。

### 4.4.1 角度分解能の算出方法

30 MeV~300 MeV の  $\gamma$  線を作成したジオメトリに入射し、ヒット情報を (電子の場合と同様に)1次元に投影し、XZ 平面上で左端、右端のトラックの方向を求める。求めた2本のトラックの中点を  $\gamma$  線の到来方向として  $\gamma$  線の角度分解能を算出した。

### 4.4.2 結果

得られた  $\gamma$  線と多重散乱の近似値をプロットしたものを図 4.5 に示す。

図 4.4 と比較すると電子の場合のおよそ2倍の角度分解能となった。これは  $\gamma$  線が対生成し電子・陽電子にエネルギーを分配するため、電子・陽電子は入射  $\gamma$  線より低いエネルギーを持つので多重散乱の影響を受けやすいからだとして定量的には理解できる。また図 2.2 と比較すると Fermi とほぼ同じ角度分解能であり、概ね Fermi の角度分解能を再現することができた。

今後は Converter の厚さを変更し、Converter の厚さに対する  $\gamma$  線の角度分解能と有効面積 (有効なイベント数) の変化を定量的に評価し、低エネルギー  $\gamma$  線に対して感度を持たす最適なパラメータを探す必要がある。また、 $\gamma$  線の到来方向を求める際に電子・陽電子のエネルギーの重み付けを考慮するなどの改良も行いたい。

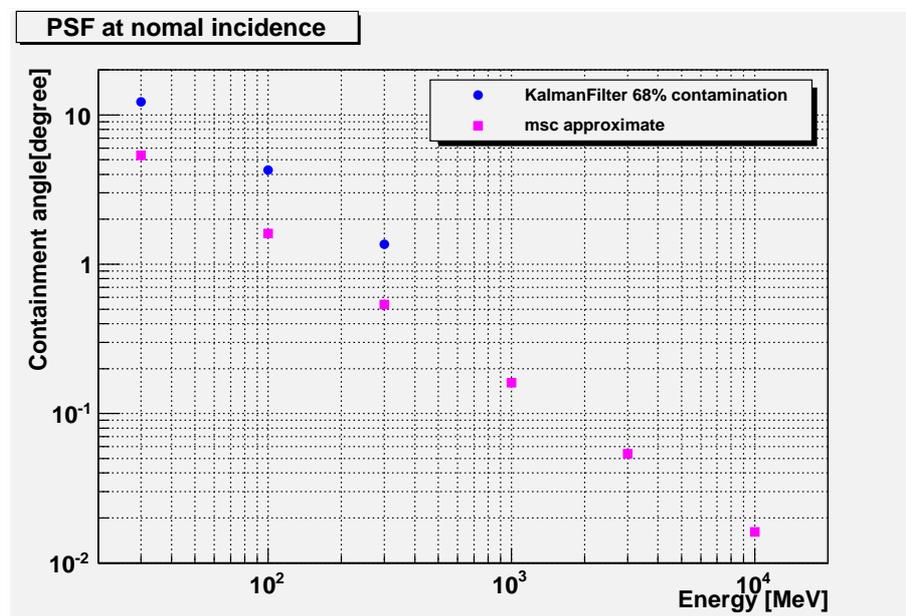


図 4.5: エネルギー毎の  $\gamma$  線の角度分解能。青がカルマンフィルターで出した2本のトラックの midpoint として求めた  $\gamma$  線の角度分解能、マゼンダは同じエネルギーの電子に対する多重散乱の近似値。

## 第5章 まとめと今後

本研究は今活躍中の Fermi 衛星が比較的苦手としている低エネルギー $\gamma$ 線を精度よく観測するために、低エネルギー $\gamma$ 線に対して高感度な検出器、特に角度分解能に重点を置いた検出器のデザイン検討を目的とする。これによりソフトなスペクトルを持つ天体の研究や銀河面放射との切り分けをより精度よく行うことができると期待される。このために、3章では道具立てである Geant4 の物理プロセスを検証し、4章でデザイン検討のためのシミュレータを作成した。

3章で行った物理プロセスの検証では、Geant4内でSi, タングステン, Pbの薄い板に $\gamma$ 線を入射しシミュレーションから得られた反応断面積を理論値及び実験値と比較することで $\gamma$ 線の反応断面積の物理プロセスが正しいことを確認した(3.2節)。また、Geant4内でタングステンの薄い板に電子を入射しシミュレーションで得られた角度分解能を多重散乱の近似値と比較することで多重散乱の物理プロセスが正しいことも確認した(3.3節)。

4章ではまず、ジオメトリをパラメータ化して記述し、パラメータを変更するだけで簡単にジオメトリの変更ができるシミュレータを作成した(4.2節)。次いで、実際の検出器におけるストリップピッチを考慮してDigitizationを行いシミュレーションのヒット情報を検出器の出力に置き直した(4.2節)。また、カルマンフィルターを用い、電子に対して入射エネルギーに応じ最適な数のヒット情報を用いることで本研究で対象とする低エネルギー(30 MeV~300 MeV)に対して物理プロセスの限界によって決まる値に近い角度分解能を求めることができた(4.3節)。

その上で4.4節では $\gamma$ 線に対して Fermi の角度分解を概ね再現することができた。

今後は Converter の厚さに対する角度分解能と有効面積(有効なイベント数)の変化を定量的に評価し、低エネルギーに対して感度を持った最適なパラメータを探すなどして低エネルギー $\gamma$ 線に対して高感度な対生成型 $\gamma$ 線検出器のデザイン検討を行いたい。

# 謝辞

本論文を作成するにあたり協力していただいた多くの方に感謝します。水野先生には基本的な知識から研究方針やプログラム等多くのことを丁寧に指導していただき本当に感謝しています。研究のやり方やプログラミング知識の乏しい私を一から丁寧に御指導して頂いたおかげでこの論文を書き上げることができました。誠にありがとうございます。先本さんには研究だけでなく色々な話で楽しませてもらい、この論文を書き上げる元気を頂きました。米谷さんには研究方針や色々なアドバイスを頂きありがとうございました。木村さんにはプログラムの相談にのってもらい本当に助かりました。小部屋の方々にはいつも楽しい雰囲気の中で研究させてもらいました。ありがとうございます。その他の本論文作成に協力して頂いた方々もありがとうございました。

## 関連図書

- [1] Volker Schonfelder(Ed.),The Universe in Gamma Rays,56.57.58(2001)
- [2] 深沢泰司,ガンマ線衛星 GLAST と日本 X 線観測衛星による  $\gamma$  線多波長観測 (2004)
- [3] 木舟正,宇宙高エネルギー粒子の物理学=宇宙線・ガンマ線天文学,培風館 (2004)
- [4] NASA CGRO HomePage  
<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/images/egret/>
- [5] NASA Fermi HomePage  
[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/GLAST/news/gamma-ray-census.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/gamma-ray-census.html)
- [6] 佐田貴幸,Fermi 衛星を用いた太陽系近傍の分子雲領域における宇宙線と星間物質の研究,広島大学 修士論文 (2011)
- [7] Fermi LAT Homepage  
<http://www-glast.stanford.edu>
- [8] W.B.ATWOOD et al.,THE LARGE AREA TELESCOPE ON THE FERMI GAMMA-RAY SPACE TELASCOPE MISSIO(2009)
- [9] D.Thompson et al.,1993,ApJS 86,692
- [10] 山本和英,モンテカルロシミュレーションによる宇宙  $\gamma$  線検出器 EGRET の応答関数の再評価,広島大学 卒業論文 (2005)
- [11] 平木一至,モンテカルロシミュレーションによる衛星搭載軟  $\gamma$  線検出器の軌道上放射化バックグラウンドの評価,広島大学 修士論文 (2009)
- [12] William R. Leo,Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments
- [13] GLENN F.KNOLL 木村逸郎/阪井英次訳「放射線計測ハンドブック第3版」日刊工業新聞社

[14] National Insititute of Standards Technology  
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

[15] Particle Data Group, PARTICLE PHYSICS BOOKLET