卒業論文

東北大学電子光理学研究センター STB-Ring Tagging Efficiency Study のためのGEANT4シミュレーション

東北大学 理学部
物理学科 素粒子原子核物理学講座
加藤　新一

2010年 3月

概 要

東北大学電子光理学研究センター内にある STB-Ring(Stretcher-Booster Ring) とは、電子シンクロトロンである。このシンクロトロンで 1.2 GeV まで加速された電子の制動放射による γ 線を用いて、電磁相互作用によるストレンジネス生成素過程の実験などが行われている。実験の際、一つ一つの γ 線のエネルギーは Tagging System によって識別されている。

この Tagging System の Efficiency は実験の度に測定されてきたが、γ 線の rate を検出器の耐ええる rate に下げて行われていた。そこで今回は、γ 線の rate を下げずに Efficiency の測定をすることを目的に研究を行った。

論文では、まず第 1 章でストレンジネス生成素過程の実験や STB-Ring について説明する。第 2 章では荷電粒子や光子と物質との物理プロセスについて説明し、rate を落とさない状態での Efficiency 測定の方法と実験セットアップを考察する。第 3 章では、Efficiency 測定に使用する検出器 (カロリーメータ) についての説明と、宇宙線を用いたテスト実験について述べる。第 4 章では、カロリーメータについてのモンテカルロ・シミュレーションの結果と第 3 章での宇宙線を用いたテスト実験とを比較し、シミュレーションの妥当性を考察する。また、第 2 章で考察した Efficiency 測定の方法、実験セットアップでのモンテカルロ・シミュレーションの結果から、方法が適切であるかどうか考察する。

目 次

第 1 章　序論 **5**
1.1 Strangness 核物理 5
1.2 NKS2 実験 5
1.3 東北大学電子光理学研究センター STB-Ring 8
1.4 Tagging System 8
1.5 Sweep Magnet 10
1.6 卒業研究の目的 10

第 2 章　実験セットアップの想定 **11**
2.1 物質と荷電粒子との相互作用 11
2.1.1 Bethe-Bloch の公式 11
2.1.2 制動放射 11
2.2 物質と光子との相互作用 12
2.2.1 光電効果 12
2.2.2 コンプトン散乱 13
2.2.3 電子対生成 13
2.3 過去の実験データ 14
2.4 目的達成のためのアプローチと問題点 15
2.4.1 アプローチ 15
2.4.2 問題点 16
2.5 セットアップの想定 17

第 3 章　γ 線検出器 **19**
3.1 カロリーメータ 19
3.1.1 電磁シャワー 19
3.1.2 カロリーメータの構造 20
3.1.3 鉛シンチレーションファイバーカロリーメータ . . 20
3.2 PMT Test 22
3.3 宇宙線検出 23

3.3.1 セットアップ 24
3.3.2 結果 24

第 4 章 モンテカルロ・シミュレーション 27
4.1 Geant4 シミュレーション 27
4.2 カロリーメータ construction 27
4.3 宇宙線シミュレーション 27
4.3.1 セットアップ 27
4.3.2 結果 28
4.3.3 宇宙線検出結果との比較、考察 28
4.4 γ 線シミュレーション 29
4.4.1 セットアップ 29
4.4.2 結果 32
4.4.3 考察 34

第 5 章 今後の課題 36

図 目 次

1.1 $(e,e'K^+)$ 反応と $(\gamma,\ K^0)$ 反応の模式図 [2] 6
1.2 (γ,K^+) 反応と (γ,K^0) 反応の反応断面積の理論モデル [3] . 6
1.3 NKS2 実験概略図 [2] 7
1.4 STB-Ring 概略図 [4] 8
1.5 γ beam line 拡大図 [4] 8
1.6 Tagging System の概略図 [4] 9

2.1 原子と光子との相互作用の模式図。波線は光子、実線は電子を表し、白矢印は原子核の反跳を表す [8]。 13
2.2 物質が Pb の場合の、3 過程の反応確率 [5] 14
2.3 Tagging Efficiency(左軸) と，radiator の off/on の rate(黒四角, 右軸) 15
2.4 考えられうる連続的な相互作用の一例 17
2.5 セットアップの概要図。図の数値の単位は mm。実際の縮尺とは異なる。 18

3.1 鉛シンチレーションファイバーカロリーメータ (PbSciFi) . 21
3.2 PbSciFi を beam 照射面から見たもの 21
3.3 使用した PMT とプラスチックシンチレータ、^{90}Sr 22
3.4 各付加電圧に対するオシロスコープでの波形 22
3.5 付加電圧-2200V の時のオシロスコープでの波形 23
3.6 PbSciFi の遮光の様子 24
3.7 宇宙線検出の様子 25
3.8 検出時の logic 回路 25
3.9 得られた電荷分布 26
3.10 得られた電荷分布 (縦軸 log スケール) 26
3.11 得られた電荷分布 (60ch 以上の領域) 26

4.1 PbSciFi の Geant4 上での construction 28

4.2 宇宙線シミュレーションの概要図 29
4.3 1, 3, 5, 10 GeV μ^- の Pb 層での Energy Deposit(縦軸:計数, 横軸:エネルギー [MeV]) 30
4.4 1, 3, 5, 10 GeV μ^- の Fiber 層での Energy Deposit(縦軸:計数, 横軸:エネルギー [MeV]) 30
4.5 実際に得られた電荷分布 (図 3.11) 31
4.6 シミュレーションで得られた電荷分布 (図 4.4) 31
4.7 2007 年に測定された、コリメータ上流部でのビームサイズ。中央の白点で描かれる円の直径が 10 mm である。 . . 31
4.8 γ 線シミュレーションの概要図 32
4.9 単一エネルギーの γ 線による Fiber 層での Energy Deposit 33
4.10 Absorber を導入した時の Fiber 層での Energy Deposit . . . 35

第1章　序論

1.1　Strangness 核物理

自然界に安定に存在する原子核は、陽子と中性子で構成される。これに対し、strangness を持ったバリオン (Λ, Σ, Ξ) が入った原子核を、ハイパー核という。特に、Λ 粒子は strangness を持つバリオンの中で最も軽く、強い相互作用に対して安定である。また、strangness という新たな量子数を持つために陽子や中性子に対して Pauli の排他律の影響を受けない。このため、原子核内の深い束縛状態を探るためのプローブと成り得る [1]。

1.2　NKS2 実験

これまでの Λ 粒子の生成素過程の実験は、中間子ビームを用いた (K^-,π^-), (π^+,K^+) 反応、電子ビームを用いた $(e,e'K^+)$ 反応で行われてきた。

$$K^- + n \to \Lambda + \pi^- \tag{1.1}$$

$$\pi^+ + n \to \Lambda + K^+ \tag{1.2}$$

$$e + p \to e' + \Lambda + K^+ \tag{1.3}$$

これらはどちらも荷電 K 中間子を測定することで行われている。また、提唱されてきた理論 model もこれらの実験結果に基づいているが、実験結果の無い中性 K 中間子に関する $(\gamma,\ K^0)$ 反応の生成断面積の計算値はそれぞれの理論 model によりまちまちである。これはつまり、電磁相互作用による Λ 粒子生成素過程が十分に理解されていないことを意味している。

$$\gamma + n \to \Lambda + K^0 \tag{1.4}$$

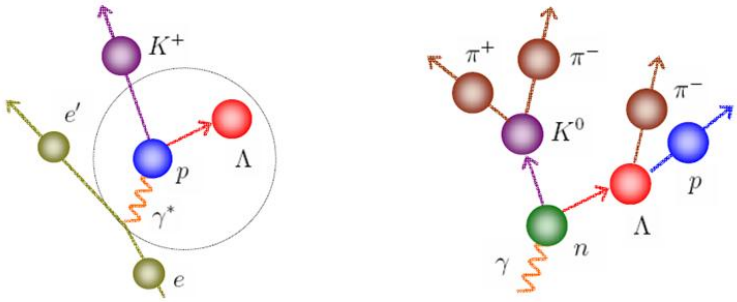

図 1.1: $(e,e'K^+)$ 反応と $(\gamma,\ K^0)$ 反応の模式図 [2]

また、$(e,e'K^+)$ 反応による Λ 粒子の生成素過程の理論的解析には電磁相互作用による Λ 粒子生成素過程の解明が必須である。

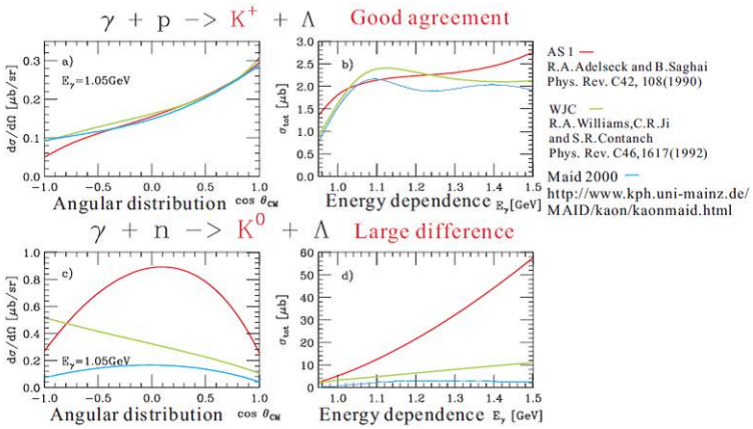

図 1.2: (γ,K^+) 反応と (γ,K^0) 反応の反応断面積の理論モデル [3]

これらのことから、$(\gamma,\ K^0)$ 反応による Λ 粒子生成素過程の実験は非常に重要であるといえる。

以下では、NKS2 実験の概要について説明する。

NKS2 実験では、電子線ビームを radiator に当てることで生じた制動放射による γ 線が、ターゲットの中性子と相互作用して中性 K 中間子と

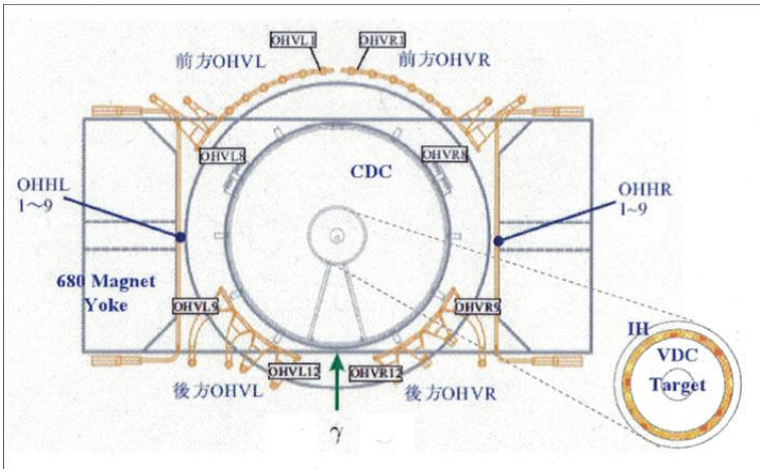

図 1.3: NKS2 実験概略図 [2]

Λ粒子が生成される。その後、生成したK_s^0が弱い相互作用によって 69.2 %がπ^-，π^+ に、Λ粒子は 63.9 %がπ^-,p に崩壊する。反応の前後で電荷が関与しない unique なハイパー核生成過程である。実験ではK_s^0から生成されたπ 中間子を測定することで、(γ，K^0) 反応による中性 K 中間子生成断面積の測定を行う。

具体的には、680 双極電磁石による磁場下でのπ 中間子の飛跡を、CDC (Cylindrical Drift Chamber) 及び VDC(Vertex Drift Chamber) で測定し、飛跡の曲率からそれぞれの運動量を求める。また、IH(Inner Hodoscope) 及び OH(Outer Hodoscope) による飛行距離と飛行時間から β を求め、運動量と β から質量を求めることでπ^-, π^+ を識別する。識別された 2 粒子の飛跡から崩壊点を (1.5) 式を用いて再構成し、Invariant Mass 分布からK_s^0 を同定する。

$$M_{K_s^0}^2 = \left(\sqrt{M_{\pi^+}^2 + \boldsymbol{p}_{\pi^+}^2} + \sqrt{M_{\pi^-}^2 + \boldsymbol{p}_{\pi^-}^2} \right)^2 - (\boldsymbol{p}_{\pi^+} + \boldsymbol{p}_{\pi^-})^2 \qquad (1.5)$$

ここで、M, $\boldsymbol{p}$ は質量、運動量を表し、添え字 K_s^0, π^+, π^- はそれぞれ K 中間子、π 中間子を表している。

1.3 東北大学電子光理学研究センターSTB-Ring

STB-Ring(Stretcher-Booster Ring) とは、東北大学電子光学研究センター内にある電子シンクロトロンである。

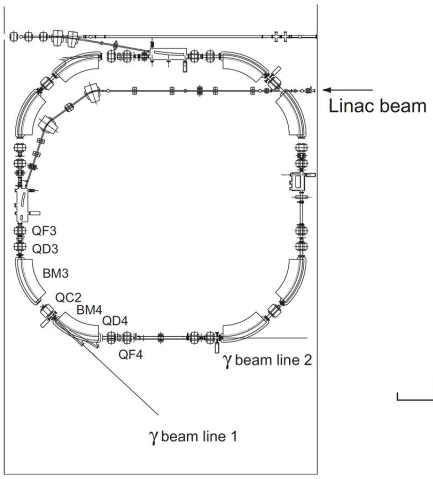

図 1.4: STB-Ring 概略図 [4]

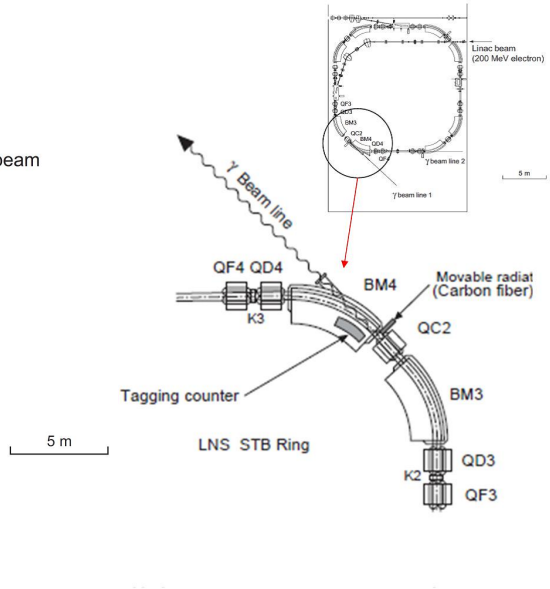

図 1.5: γ beam line 拡大図 [4]

電子はまず Linac で 150 MeV まで加速され、BM7 と QC4 の間にある電子線入射ラインから STB-Ring に入射される。電子は STB-Ring を周回しながら、約 1.2 秒で 1.2 GeV まで加速され、その状態で保持される。最大の beam current は 50 mA である。

BM4 と QC2 の間、BM4 から 32.5 cm の地点に可動式の Radiator が設置されている。Radiator は、直径 11μm のカーボンファイバーである。この直径は、beam size のおおよそ 1/100 の大きさである。電子 beam がこの Radiator により反跳することで、制動放射線として γ 線が発生する。

1.4 Tagging System

Tagging System とは、制動放射で発生したそれぞれの γ 線が、どれだけのエネルギーを持っているかを識別するためのシステムである。STB-

Ring 内を周回する 1.2 GeV の電子に対し、0.8 GeV∼1.1 GeV の範囲の γ 線を識別することが出来る。

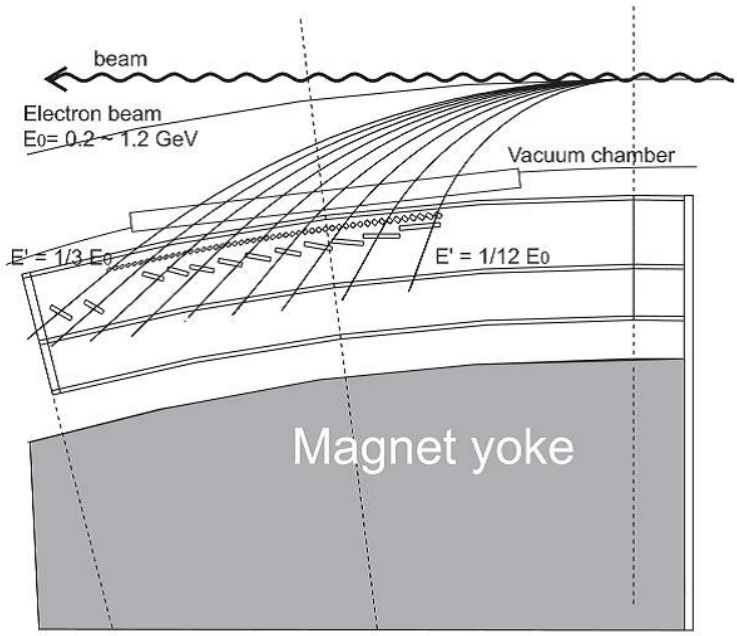

図 1.6: Tagging System の概略図 [4]

STB-Tagger は、50 本の Finger Counter(以下 TagF) と 12 本の Backup Counter(以下 TagB) からなるプラスチックシンチレーションカウンターであり、偏向電磁石 BM4 の内側に置かれている。これらが制動放射によって γ 線が発生する際にできる反跳電子を検出することで、それぞれの γ 線のエネルギーを識別できる。反跳電子に対して、BM4 が運動量解析の magnet の役割を果たしており、反跳電子は運動量に応じてそれぞれ異なる軌道をとるからである。TagF 1 本は約 6 MeV のエネルギー幅をカバーするように設計されている。

一方、TagB 1 本は TagF 4 本を覆うように置かれている。TagF だけではバックグラウンドが多くなってしまうため、TagB とのコインシデンスをとることでバックグラウンドを減らしている。このようにして Tag される γ 線の Maximum rate は約 10^7 photons/s である。

1.5 Sweep Magnet

NKS2 実験において、制動放射で発生したγ線がターゲットに届くまでに、途中の物質中での対生成によってある割合で e^+e^- ペアが生じる (photo conversion:電子陽電子対生成)。これは大量のバックグラウンドとなる。そのため、NKS2 の上流側に Sweep Magnet を設置し、約 1.3 T の磁場をかけることでこれらを除去している。大きさは、beam 軸方向に約 50 cm である。電子の曲率半径は、以下の式により求めることが出来る。

$$p = 0.3B\rho \tag{1.6}$$

p, B, ρ はそれぞれ、入射荷電粒子の運動量 [GeV/c]、磁場 [T]、曲率半径 [m] である。例えば、運動量 1 GeV の電子の曲率半径は 2.7 mとなる。

1.6 卒業研究の目的

現在にいたるまで、STB Ring の Tagging System に関する Efficiency の測定が何度も行われてきた。この測定は、発生したγ線を実際に検出することで行われるが、γ線を検出するためのカロリーメータや PMT などの検出器群が耐ええる rate を保つために、STB-Ring 内の Beam Intensity を落とした状態で測定されていた。しかしこの場合、得られた結果と全開運転での Efficiency が同様であるとは言い切ることはできない。今回は、STB-Ring の Beam Intensity を落とさずに Efficiency を測定することはできないか、というモチベーションからスタートし、考えられる方法の有効性をモンテカルロシミュレーションにより検証する。そして最終的には、実際に Efficiency を測定することを目的とする。また、自らが検出器群の取り扱いについて学び、コンピュータシミュレーションについて学ぶことも目的とする。

第2章　実験セットアップの想定

2.1　物質と荷電粒子との相互作用

2.1.1　Bethe-Bloch の公式

荷電粒子が物質を通過すると、粒子の電荷と物質との電磁相互作用によって、粒子は飛跡に沿って energy を失う。これを電離損失と呼ぶ。このときの energy 損失は、以下の Bethe-Bloch の式で与えられる [5][6]。

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

N_a : アボガドロ数 [g^{-1}]　r_e : 古典電子半径 [cm]　m_e : 電子質量 [MeV/c^2]

ρ : 物質密度 [g/cm^3]　Z : 物質の原子番号　A : 物質の原子質量

$\beta : \frac{v}{c}$　$\gamma : \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$　v : 粒子の速度 [m/s]

W_{max} : 一回の衝突での最大エネルギー移行 [MeV]

I : 平均励起ポテンシャル [MeV]　z : 電子を 1 とした時の入射粒子の電荷量

入射粒子に関する量は v^2 と z^2 のみである。したがって、電荷 ze の等しい粒子では、速度 v を等しくして測れば、損失はどの粒子に対しても同じである。物質による変化は、主に $\rho Z/A$ により決まる。大雑把にいえば、$Z/A \simeq 1/2$ なので、cm^{-1} あたりの損失は、g/cm^{-3} によって決まる。これはまた、両辺に $1/\rho$ を掛けることで、$g{\cdot}cm^{-2}$ あたりの損失はあまり物質によらないことを示している。

2.1.2　制動放射

荷電粒子が電子の場合、電子のエネルギーが約 10 MeV 以上から制動放射による放射損失が急激に増加してくる。物質の原子核のそばを通る

電子の軌道が、核のクーロン力のために曲げられると、電子は速度変化を生ずる。この際放出される光 (電磁波) が制動放射線である。他の荷電粒子でも起こりえるが、質量が非常に小さい電子は他の荷電粒子よりも著しく速度変化を受けやすい。電離損失との比をとると、

$$\frac{\left(\frac{dE}{dx\rho}\right)_{rad}}{\left(\frac{dE}{dx\rho}\right)_{ion}} \simeq \frac{(E+mc^2)\,Z}{1600mc^2} \tag{2.2}$$

となり、$E \geq$50 MeV では、電子のエネルギー損失の大部分は放射損失となる [7]。また、制動放射の反応断面積は、おおよそ $1/E$ に比例する。

2.2 物質と光子との相互作用

γ 線、すなわち光子が物質中を通過すると、そのいくつかは物質によって吸収される。このとき吸収されずに通過する光子数は、物質の厚さに対して指数関数的に減少することが知られている。

$$I = I_0 e^{-\mu x} \tag{2.3}$$

I : 通過粒子数　　I_0 : 初期粒子数　　x : 物質の厚さ [cm]

この μ[cm^{-1}] を吸収係数と呼ぶ。

μ に寄与する主要な過程は、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成の 3 過程である。以下ではそれらを説明する。

2.2.1 光電効果

γ 線が原子に吸収され、主として最内殻 (K 殻) の電子が、運動エネルギー $E_e = \hbar w_0 - I$($\hbar w_0$ は入射エネルギー、I は電子の電離エネルギー) として飛び出す。反応断面積は物質原子の原子番号 Z のほぼ 5 乗に比例する。電子が飛び出すことで生じた空孔には外殻の電子が入り、特性 X 線やオージェ電子を放出する。

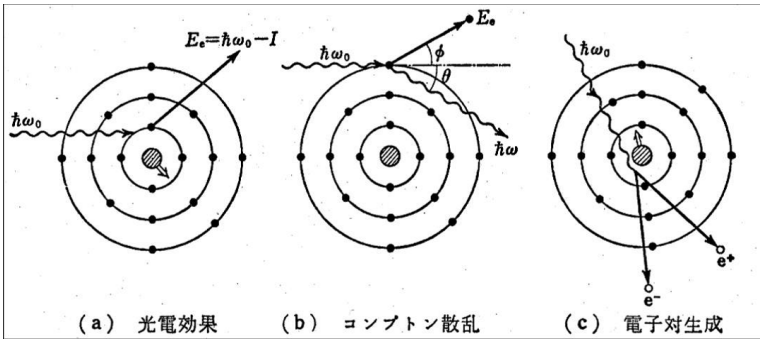

図 2.1: 原子と光子との相互作用の模式図。波線は光子、実線は電子を表し、白矢印は原子核の反跳を表す [8]。

2.2.2 コンプトン散乱

原子中の電子の束縛エネルギーが無視できるほど入射光子のエネルギーが大きくなると、光子と電子の衝突は、光子と自由電子との衝突と考えることが出来る。この、電子による光子の散乱をコンプトン散乱とよぶ。エネルギー運動量保存則から、散乱後の光子及び電子のエネルギーは以下のように求まる。

$$\begin{aligned} \hbar w &= \frac{\hbar w_0}{1+(\hbar w_0/mc^2)(1-\cos\theta)} \\ E_e &= \hbar w_0 \frac{2(\hbar w_0/mc^2)\cos^2\phi}{(1+\hbar w_0/mc^2)^2-(\hbar w_0/mc^2)^2\cos^2\phi} \\ \tan\phi &= \frac{mc^2}{mc^2+\hbar w_0}\cot\frac{\theta}{2} \end{aligned} \tag{2.4}$$

ここで、m は電子の静止質量、θ, ϕ はそれぞれ光子、電子の散乱角を表す。

2.2.3 電子対生成

光子のエネルギーが $\hbar w_0 > 2m_ec^2 \simeq$1.02 MeV になると、物質中の電磁場との相互作用により γ 線が消失して、1 対の電子と陽電子が運動エネルギー $\hbar w_0 - 2m_ec^2$ を分かち合って飛び出すことがある。これを電子対生成と呼ぶ。

以上の 3 過程の反応断面積は、図 2.2 にもあるように、γ 線のエネルギーによって大きく変化する。

今回の実験で測定しようとしているγ線のエネルギー範囲は 0.8 GeV ∼1.1 GeV なので、相互作用としては電子対生成を主に考えていくことになると考えられる。

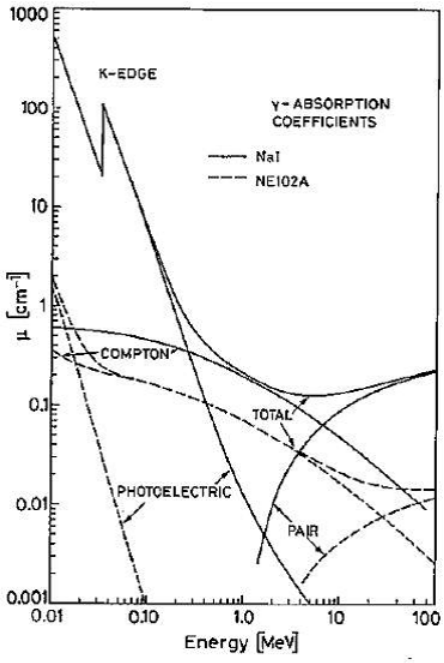

図 2.2: 物質が Pb の場合の、3 過程の反応確率 [5]

2.3 過去の実験データ

過去の実験データを紹介する [4]。この実験では Tagging Efficiency(ε_i) を、以下のように定義している。

$$\varepsilon_i = \frac{N_i(\mathrm{CsI})}{N_i(\mathrm{on}) - N_i(\mathrm{off})} \tag{2.5}$$

$N_i(\mathrm{CsI})$: CsI と i 番目のシンチレータとの coincidence 数
$N_i(\mathrm{on})$: i 番目のシンチレータでの計数 (radiator 有)
$N_i(\mathrm{off})$: i 番目のシンチレータでの計数 (radiator 無)

γ線検出器として $50 \times 50 \times 250\ \mathrm{mm}^3$ の CsI シンチレータを用い、Beam intencity を低い状態にして測定された。結果は、TagF について 15 ch 以下では≦ 80 %、それ以上では≦ 90 %となった。

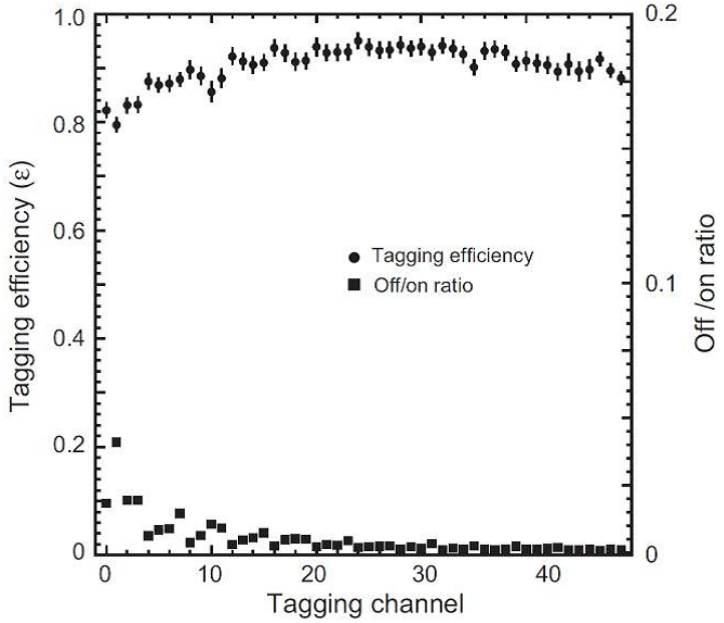

図 2.3: Tagging Efficiency(左軸) と，radiator の off/on の rate(黒四角, 右軸)

TagF は、チャンネル数が低いほど radiator に近い、つまり高エネルギーの γ 線を識別している。Efficiency が 100 %でない原因として、この実験では、Beam と radiator の原子核外電子との電子-電子散乱が≦ 20 %、CsI シンチレータに到達するまでの、空気層 (4 m) や真空にひいた Ring からの γ 線取り出し窓 (厚さ 4 mm の Al) での減衰が≦ 3 %の Efficiency reduction をおこしていると考察している。

2.4 目的達成のためのアプローチと問題点

2.4.1 アプローチ

今回の Efficiency 測定では、Beam Intensity を全開の状態にしたい。しかしながら、High rate の γ 線をそのままの rate で計測することは非常に難しい。例えば検出器群として PMT を使用しようとした場合、PMT の応答時間は 10 MHz 程度であるので、その程度まで rate は落とさなければいけない。

今回は、Tag される 0.8 GeV∼1.1 GeV の γ 線の rate だけでも数十 MHz あり、実際は tag されない低エネルギーの γ 線も検出器に到達する。そのため、今回は検出器の前に、何らかの Absorber を置いて、rate を下げることを考える。γ 線のエネルギーが非常に高いことから電子対生成による光子吸収が主になること、吸収されず通過する光子数が指数関数的に減少することを考慮し、Absorber として Pb を使用した場合の、rate の計算を以下に示す。

$$
\begin{aligned}
I &= I_0 e^{-\frac{1}{\lambda_{\mathrm{pair}}}x} \qquad \left(\lambda_{\mathrm{pair}} \cong \frac{7}{9X_0}\right) \\
&= I_0 e^{-\frac{7}{9X_0}x} \qquad (\mathrm{Pb} : X_0 = 0.56\ \mathrm{cm})
\end{aligned} \tag{2.6}
$$

$$
\begin{aligned}
x &= 1.0\ \mathrm{cm} \rightarrow \tfrac{I}{I_0} = 25.0\ \% \\
x &= 1.5\ \mathrm{cm} \rightarrow \tfrac{I}{I_0} = 12.5\ \% \\
x &= 2.0\ \mathrm{cm} \rightarrow \tfrac{I}{I_0} = 6.2\ \%
\end{aligned}
$$

λ_{pair} は、相互作用として電子対生成のみを考えた場合の減衰定数であり、X_0 は放射長である。放射長については 3 章で説明する。

これより、数 cm の Pb 板によって、検出可能な rate にすることが出来るように思える。

2.4.2 問題点

光子吸収は物質と γ 線との相互作用によっており、実際は前節で述べたような単純な考え方では不十分であり、その過程をしっかり考える必要がある。例えば高エネルギーの γ 線は物質中で電子対生成を生じるが、生成された電子はその物質中で制動放射による γ 線を発生させることが考えられる。陽電子は物質中の電子と対消滅をおこし γ 線を発生させることが考えられる。発生した γ 線がさらにコンプトン散乱をおこし、電子をはじき出すことも考えられる。このように考えると、Absorber を設置することで電子、陽電子や多くの低エネルギーの γ 線が発生することが考えられる (図 2.4)。

そこで、モンテカルロ・シミュレーションを用いて、Absorber を設置することでどれだけの低エネルギー γ 線が発生するのか、それは無視できる量なのか、発生してしまった低エネルギーの γ 線のみを除去するような物質を、Absorber の後ろなどに設置することはできないかなどを検証し、有効性を考察する。

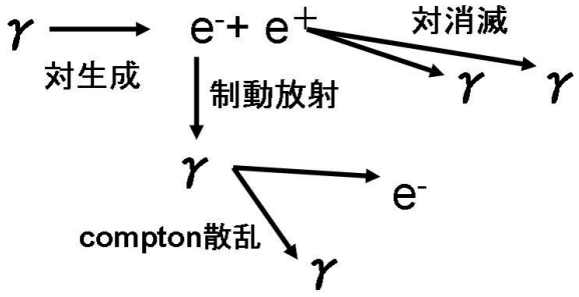

図 2.4: 考えられうる連続的な相互作用の一例

2.5 セットアップの想定

図 2.5 にセットアップの概要図を示す。Absorber としては Pb を用いることを想定し、Pb によって発生した低エネルギーの γ 線を取り除くための Absorber としては、プラスチックを用いることを想定する。Absorber との相互作用で発生し、かつ検出器に向かって飛行してくる電子、陽電子に関しては、Sweep Magnet に磁場をかけることで取り除くことができると考えられる。

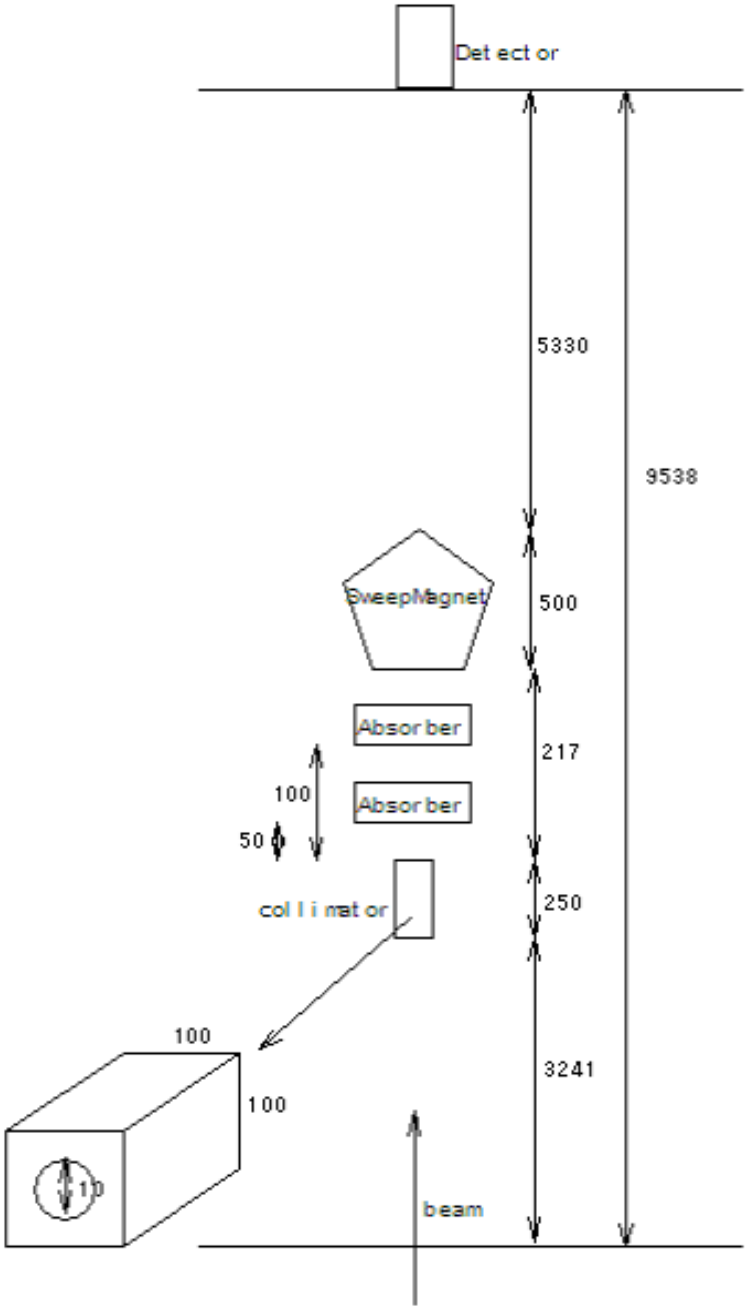

図 2.5: セットアップの概要図。図の数値の単位は mm。実際の縮尺とは異なる。

第3章　γ線検出器

今回の実験では、γ線検出器としてカロリーメータを用いる。この章ではカロリーメータについての説明と、今回実験に用いようとしているカロリーメータの紹介をしたあと、カロリーメータに接続するPMTのテスト、カロリーメータでの宇宙線検出について述べる。

3.1　カロリーメータ

カロリーメータとは、高エネルギー粒子のカスケードシャワー現象を利用して粒子エネルギーを測る測定器のことである。高エネルギーのγ線が物質に入射した場合、カスケードシャワーとしては電磁シャワーが考えられる。

3.1.1　電磁シャワー

高エネルギーの光子が物質に入射すると、電子陽電子対生成が起こる。ここで生成した電子と陽電子が制動放射や対消滅によって光子を生み出す。生み出された光子がさらに電子・陽電子対生成を起こす。このような過程が繰り返し起こり、電子陽電子光子の数が増大していく。この現象を電磁シャワーという。入射時に光子が持っていたエネルギーは多数の生成粒子に分配されるので、一つ一つの粒子エネルギーは粒子数の増加に伴い減少する。こうして電子や陽電子のエネルギーが物質によって決まる臨界エネルギーE_cまで減少すると、1放射長あたりの電離損失エネルギーが制動放射によるエネルギー損失を上回るようになり、制動放射やそれにより発生する光子による電子・陽電子対生成を通しての粒子増殖も止まり、物質の深さと共に粒子数は減少していく。E_cは以下の式で近似される[7]。

$$E_c \simeq \frac{580}{Z}[\mathrm{MeV}] \tag{3.1}$$

Z は原子番号である。

放射長 X_0[g/cm^2] とは、高エネルギーの入射光子に対して、電子陽電子対生成が確率 $P = 1 - e^{-\frac{7}{9}} \simeq 54\%$ で起こるような物質長を表すものである。

電磁シャワーにおいて、$E > E_c$ では、制動放射、電子対生成とも放射長 X_0 が特徴的な長さを表すが、$E < E_c$ ではクーロン散乱が無視できないため、横方向の広がりも無視できない。横方向の広がりはモリエール (Moliere) 半径 (Energy Deposit の 90 %を拾う円柱の半径)R_M で記述される。

$$R_M = (21 \text{ MeV})\frac{X_0}{E_c} \tag{3.2}$$

また、R_M の 3 倍の半径で 99 %の Energy Deposit を拾うことが出来る。

3.1.2 カロリーメータの構造

カロリーメータの種類には、主に 2 つある。

- Crystal(NaI 結晶や鉛ガラス) を用いて、シャワーによって生じた全ての電子、陽電子、光子による蛍光ないしはチェレンコフ光を観測するもの。

- シャワーをおこさせるための密度の高い物質 (鉛、タングステンなど) の板とシャワーで生じた電子を測定するための測定器 (プラスチック・シンチレータなど) を交互に重ね合わせたもの。

前者を、全吸収型カロリーメータと呼び、後者をサンプリング型カロリーメータと呼ぶ。全吸収型カロリーメータは、エネルギー分解能がよいが、高価で取扱いが難しい。サンプリング型カロリーメータは信号が早く取扱いが容易だが、エネルギー分解能、位置分解能は全吸収型に比べて劣る。

3.1.3 鉛シンチレーションファイバーカロリーメータ

今回の実験では、γ 線検出器として鉛シンチレーションファイバーカロリーメータ (Pb Scintilation Fiber Calorimeter) を用いる (以下 PbSciFi と呼ぶ)。

直方体の鉛の中に、プラスチック・シンチレータが直径 1.0 mm のファイバーの状態で蜂の巣状に詰まっている。大きさは $50.2 \times 52.0 \times 245$ mm^3

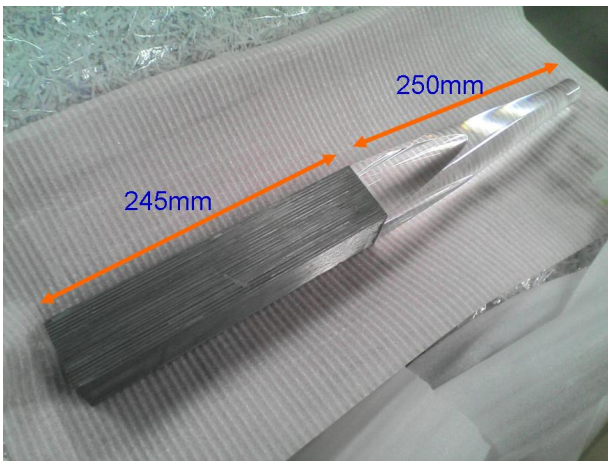

図 3.1: 鉛シンチレーションファイバーカロリーメータ (PbSciFi)

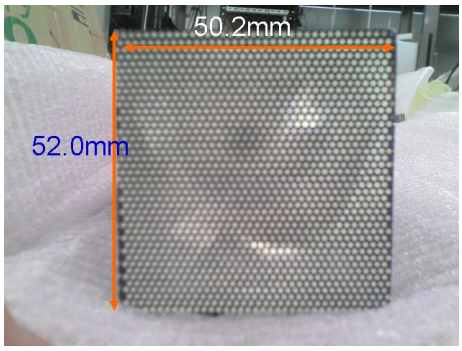

図 3.2: PbSciFi を beam 照射面から見たもの

であり、長さ 250 mm のライトガイドが接着されている。ファイバーの本数は、写真の水平方向に 37 本、垂直方向に 41 本、計 1477 本である。実験では beam 軸がファイバーと水平方向となる面から γ 線が入射するように設置する。鉛、プラスチック・シンチレータのモリエール半径はそれぞれ 1.70 cm、2.51 cm と計算される。PbSciFi の beam 軸中心からの半径は 2.5 cm 程度であるので、実験では入射した γ 線による電磁シャワーの一部が漏れ出すことが想定される。しかしながら今回目的としている Efficiency 測定の実験では γ 線の計数を測定できればよいので、シャワーの漏れは問題にならないと考えられる。

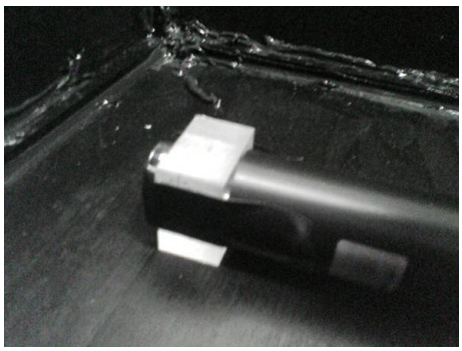

図 3.3: 使用した PMT とプラスチックシンチレータ、^{90}Sr

3.2 PMT Test

PbFibe に接着する PMT として、浜松ホトニクス製 H6152-01B(CA3948) を用いた。直径は 1 インチで、ライトガイドの末端の直径と同径である。ライトガイドに接着する前の Gain Test のために $32 \times 32 \times 20$ mm^3 のプラスチックシンチレータと、β 線源として ^{90}Sr を共に PMT にテープで接着し、暗箱に入れて付加電圧を変えながらオシロスコープで信号を記録した。

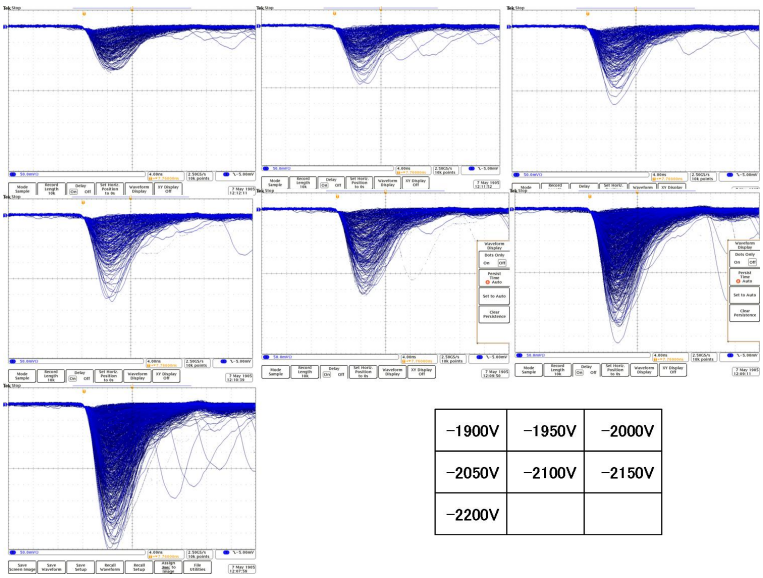

図 3.4: 各付加電圧に対するオシロスコープでの波形

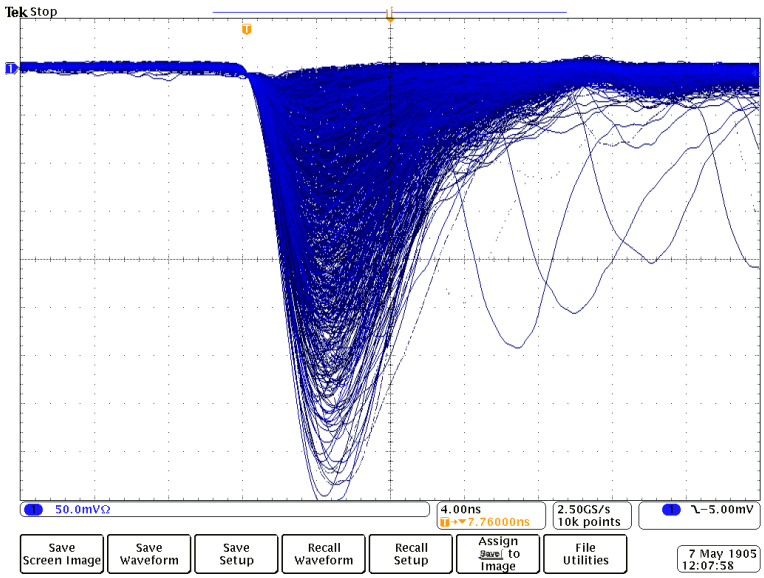

図 3.5: 付加電圧-2200V の時のオシロスコープでの波形

PMT の最大付加電圧が-2300 V であることと、オシロでの波形を観察した結果から、今回は-2200 V の電圧をかけて使用することとした。

3.3 宇宙線検出

宇宙線には宇宙から直接飛来する 1 次宇宙線と、1 次宇宙線と大気中の原子核との相互作用で作られる 2 次宇宙線がある。1 次宇宙線は主に陽子や中性子である。

この 1 次宇宙線と大気中の原子核との相互作用によってできた 2 次宇宙線はさらに原子核と相互作用をし、新たな 2 次粒子を生成する。これが何回か繰り返され多くの 2 次宇宙線が生成される。生成した多くの粒子は空気中で吸収されるが、2 次宇宙線として生成されるミューオンは透過力が強いため、運動エネルギーの高い状態で地上に到達する。

1 次宇宙線の中の陽子や中性子は空気中の核子と衝突し、多くの K 中間子と π 中間子を作る。K 中間子は π 中間子やミューオンなどに崩壊し、π 中間子は光子やミューオンやニュートリノなどに崩壊する。ミューオンも電子、ニュートリノに崩壊するが、ミューオンの平均寿命はミューオンの静止系で $\tau_\mu = 2.2 \times 10^{-6}$[s] であり、$K$ 中間子や π 中間子に比べ長い。

また、相対論的効果により寿命が $\gamma = E/mc^2$ 倍伸びる。2 次宇宙線としてのミューオンの平均エネルギーはおおよそ 3~4 GeV であることから、$\gamma \fallingdotseq 3 \sim 40$ となり、速度もほぼ光速に近いことから崩壊せずに地表に達することが可能となる。実際、地表に達する宇宙線の大部分はミューオンである。このミューオンは、$\cos^2\theta$ の天頂角分布 (θ は地面垂直方向からの角度) にしたがってふりそそぐことが知られている。

3.3.1 セットアップ

PbSciFi とライトガイドに、反射材としてアルミナイズドマイラーを巻き、ブラックシートで遮光する。また、PbSciFi のライトガイドの末端にオプティカルグリスを塗り、PMT をテープで固定する。

トリガー用プラスチックシンチレータを用意し、PbSciFi の上にのせる。図 3.8 の logic 回路を用い測定を行った。測定時間は約 20 時間である。

図 3.6: PbSciFi の遮光の様子

3.3.2 結果

得られた電荷分布の結果を図 3.9、3.10、3.11 に示す。

トリガーカウンターが PbSciFi よりも大きかったため、図 3.9 ではペデスタルが 40 ch 付近に鋭くたっている。 図 3.11 はペデスタルが入らないような領域に拡大したものである。

図 3.7: 宇宙線検出の様子

図3.11では、160 ch付近にピークを持ち、高エネルギー側にテールを引く分布を確認することが出来る。これが宇宙線のPbSciFi内でのEnergy Depositを表す分布であると考えられる。

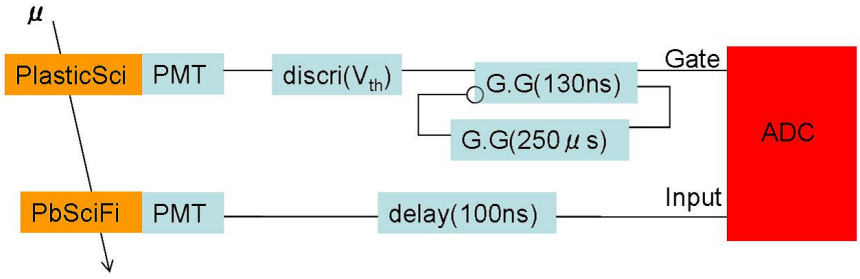

図 3.8: 検出時の logic 回路

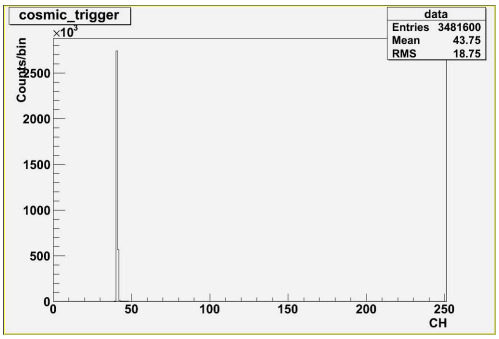

図 3.9: 得られた電荷分布

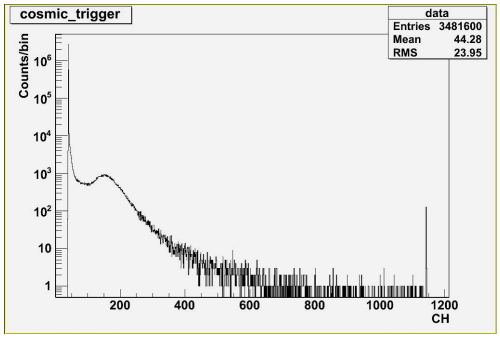

図 3.10: 得られた電荷分布 (縦軸 log スケール)

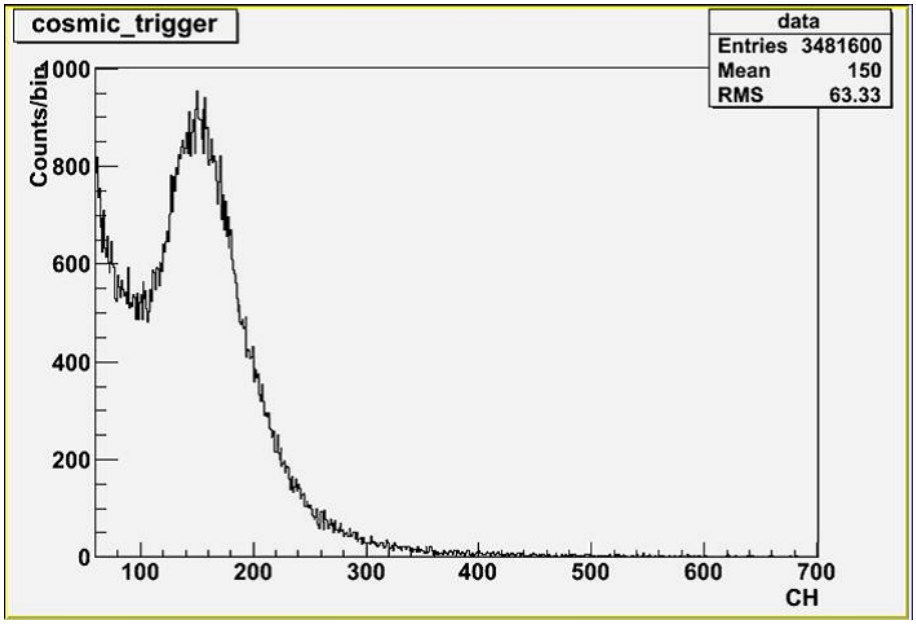

図 3.11: 得られた電荷分布 (60ch 以上の領域)

第4章　モンテカルロ・シミュレーション

4.1　Geant4シミュレーション

Geant4とは、粒子と物質との相互作用のシミュレーションを行うための大規模ソフトウェアである[9]。Geant4はオブジェクト指向技術とC^{++}言語を用いており、様々な物理プロセスや検出器ジオメトリーなどが書かれたコードを適宜使用することで、粒子シミュレーションを行うことが出来る。粒子と物質の相互作用のシミュレーションを行うことは、高エネルギー物理分野だけでなく、放射線医学などの分野でも不可欠となっている。シミュレーションプログラムとして1980年代に、CERNを中心とするメンバーによってFORTRAN言語を用いたGeantが開発された。Geant4はこの経験を生かしてGeantを国際的な協力の下で再構成、開発されたものである。

4.2　カロリーメータconstruction

Geant4内にPbSciFiの形状を構成することを考える。今回、それぞれのファイバー1本に対して図4.1のような直方体の構造体を最小単位として考え、それを敷き詰めることでPbSciFiの形状を再現することとした。

4.3　宇宙線シミュレーション

4.3.1　セットアップ

実際に行った宇宙線検出と同様の状況を再現するために、PbSciFi上面の表面全域をランダムにbeam射出点とした。また、beamの方向が$\cos^2\theta$

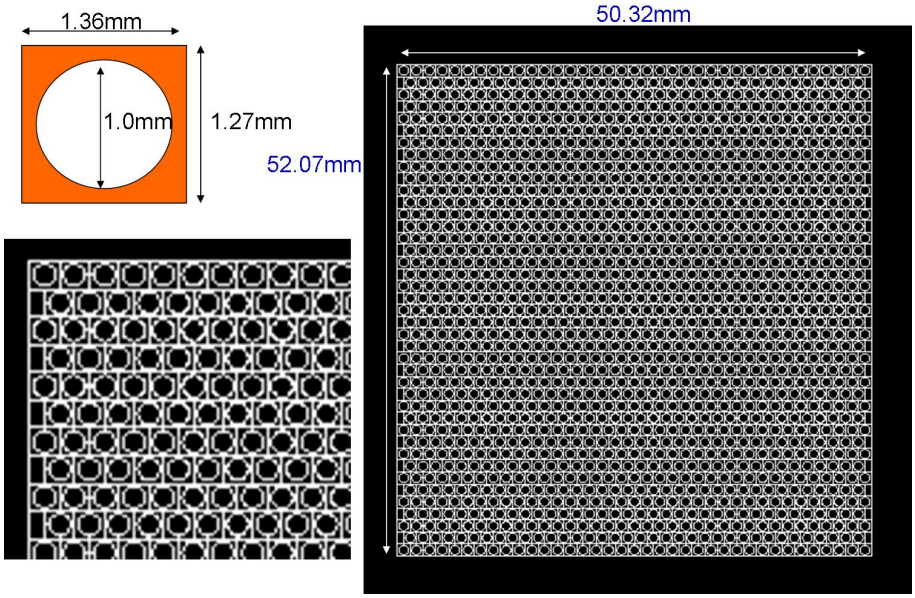

図 4.1: PbSciFi の Geant4 上での construction

の天頂角分布に従うようにランダムに設定した。入射 beam として μ^- を仮定し、入射時のエネルギーを 1 GeV から 10 GeV のあいだでいくつか変えながら Pb 層と Fiber 層での Energy Deposit を出力させた。

4.3.2 結果

図 4.3、4.4 に Pb 層、Fiber 層それぞれでの Energy Deposit の分布を示す。この結果から、1 GeV から 10 GeV のエネルギー領域では Energy Deposit の分布に大きな変化はあらわれないということがいえる。

4.3.3 宇宙線検出結果との比較、考察

シミュレーションで得られた、Fiber 層での Energy Deposit の分布と、実際に測定した Energy Deposit の分布では、ほぼ同様の形の分布となった (図 4.5)。

また、Bethe-Bloch の方程式より、エネルギー 1GeV のミューオンが単位長さあたりに落とすエネルギーは、Pb、Fiber に対してそれぞれ、

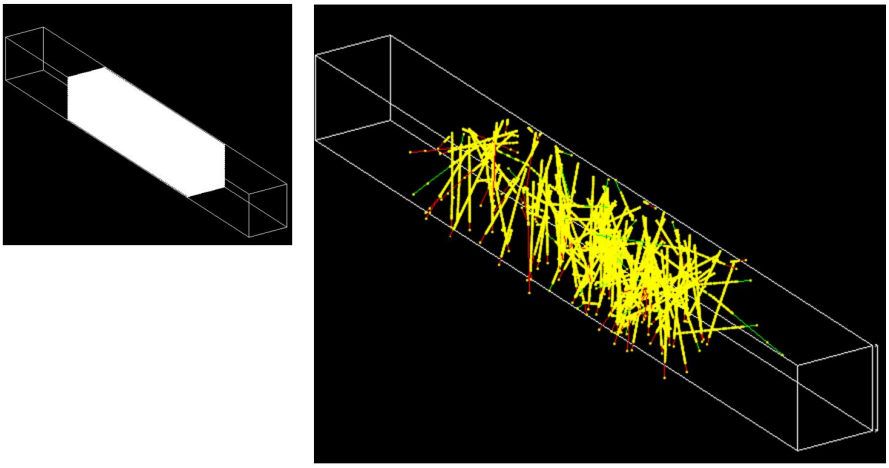

図 4.2: 宇宙線シミュレーションの概要図

13.3[MeV/cm]、2.10[MeV/cm] と計算される。

実際の PbSciFi の Pb 層と Fiber 層の、Fiber 断面側から見た面積比は 942:785 であり、ミューオンがカロリーメータに対して垂直に入射したとすると、ミューオンの Pb 層と Fiber 層の通過距離はそれぞれ 2.60 cm、2.39 cm と計算される。

以上２つの計算結果から、Energy Deposit を計算すると、Pb 層と Fiber 層でそれぞれ 35 MeV、5.0 MeV となる。

シミュレーションで得られた Energy Deposit のピークの値は、Pb 層と Fiber 層でそれぞれ 36∼40 MeV、4.5∼5.0 MeV と読み取れる。これは計算で求めた結果とほぼ一致する。

これらのことから、今回のモンテカルロシミュレーションは妥当な結果を出力しており、信頼できるものだと考えられる。

4.4 γ線シミュレーション

4.4.1 セットアップ

セットアップの想定で示したように、実際の実験を想定して各構造体を配置した。Sweep Magnet には 1 T の磁場を設定した。また、制動放射によって発生する入射 γ 線は広がりを持っているが、実際の実験ではビー

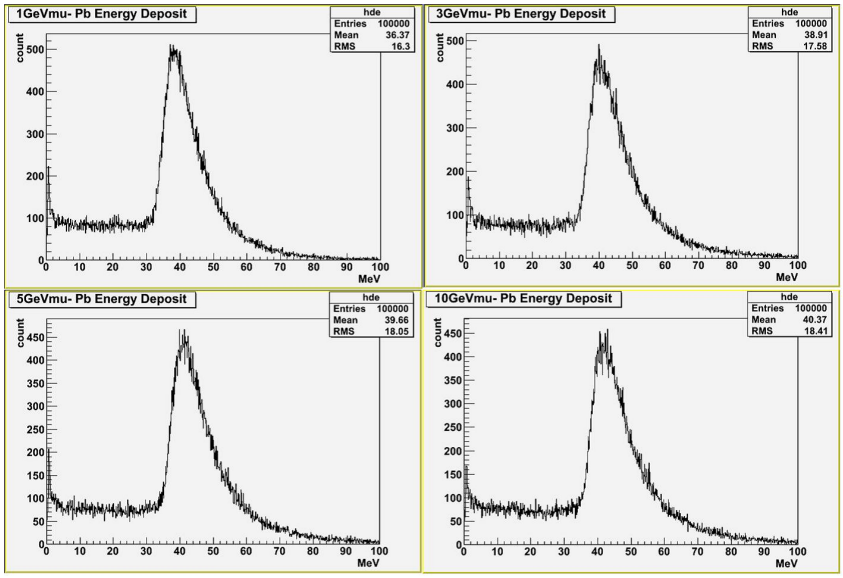

図 4.3: 1, 3, 5, 10 GeV μ^- の Pb 層での Energy Deposit(縦軸:計数, 横軸:エネルギー [MeV])

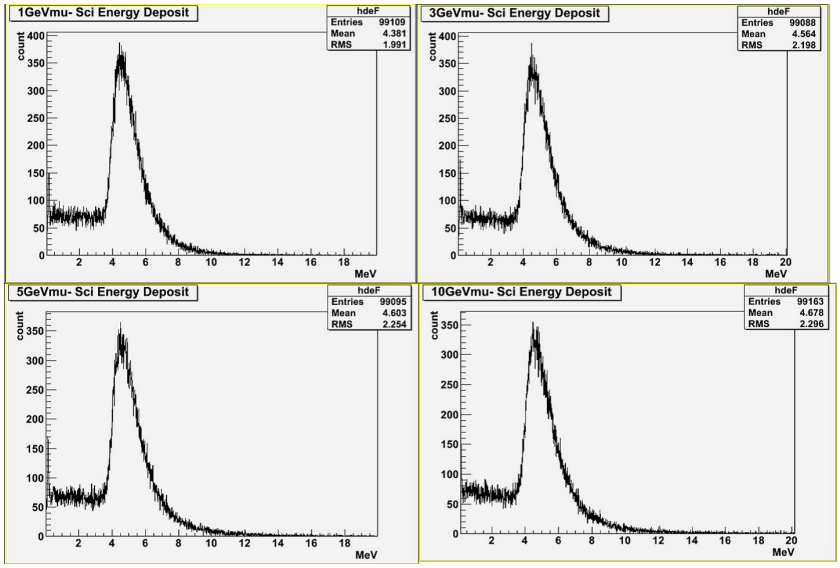

図 4.4: 1, 3, 5, 10 GeV μ^- の Fiber 層での Energy Deposit(縦軸:計数, 横軸:エネルギー [MeV])

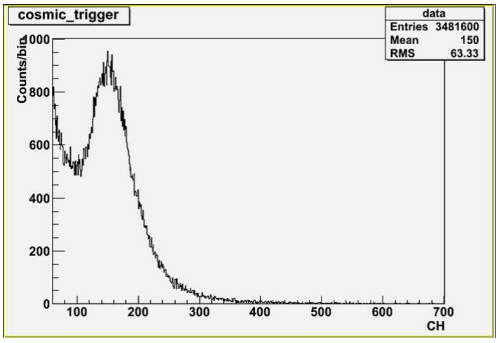

図 4.5: 実際に得られた電荷分布 (図 3.11)

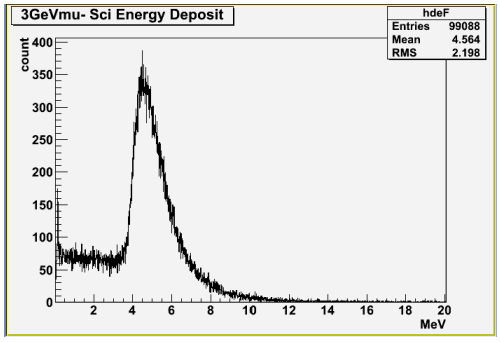

図 4.6: シミュレーションで得られた電荷分布 (図 4.4)

ムチューニングにより、コリメータ上流部でのビームの広がりは、コリメータサイズ（直径 10 mm）程度にとどまっている (図 4.7)。

今回は、コリメータ上流部でガウス分布（$\sigma = 1.5$ mm）に従った広がりを仮定し、設定した。Absorber については、beam 上流側に Pb、下流側にプラスチック (ポリカーボネート:$(C_2H_3Cl)_n$) を設定した。制動放射で発生する γ 線のエネルギーは、0 から 1.2 GeV まで可能性があるが、今回のシミュレーションでは、Tag される範囲である 0.8 GeV∼1.1 GeV のエネルギー領域に絞って γ 線を一様に発生させるように設定した。最終的には、Fiber 層での Energy Deposit を出力した。

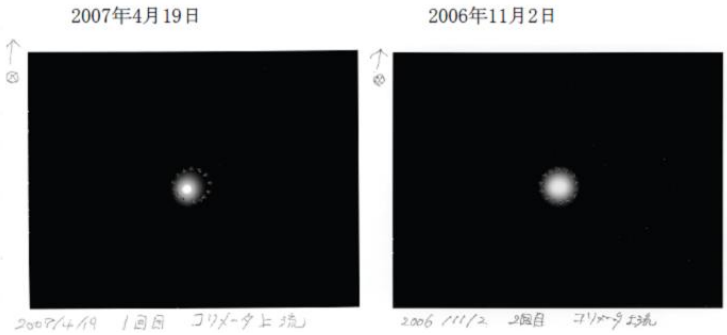

図 4.7: 2007 年に測定された、コリメータ上流部でのビームサイズ。中央の白点で描かれる円の直径が 10 mm である。

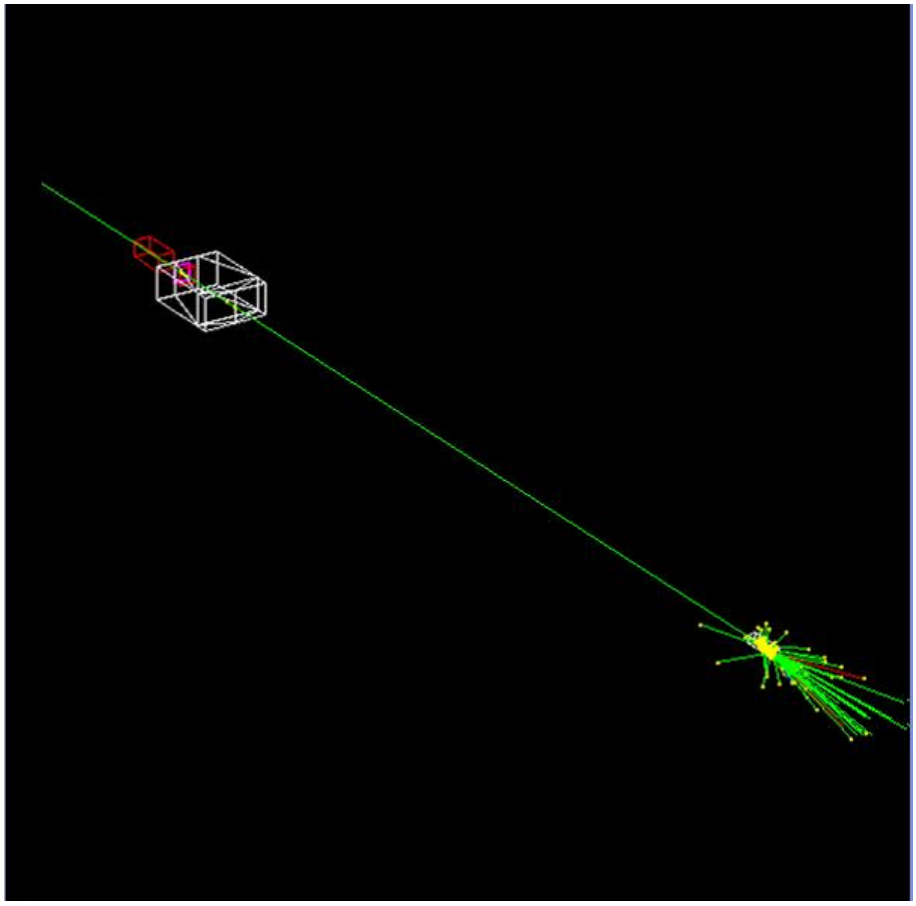

図 4.8: γ 線シミュレーションの概要図

4.4.2 結果

まず、Absorber を設置しない場合の Fiber 層での Energy Deposit のシミュレーション結果を示す (図 4.9)。それぞれ 50000 events で、左上は γ 線のエネルギーを 0.8 GeV から 1.1 GeV までランダムに選んだ結果であり、他は右上、左下…の順番に、γ 線のエネルギーを 0.8 GeV から 1.1 GeV まで 0.05 GeV 刻みに変えてシミュレーションした結果である。

それぞれガウス関数でフィッティングされており、各パラメータは p_0 が面積、p_1 が中心値、p_2 が標準偏差を表している。Energy Deposit のピークの位置が、0.05 GeV おきに平均して 3.5 MeV 平行移動していることが分かる。

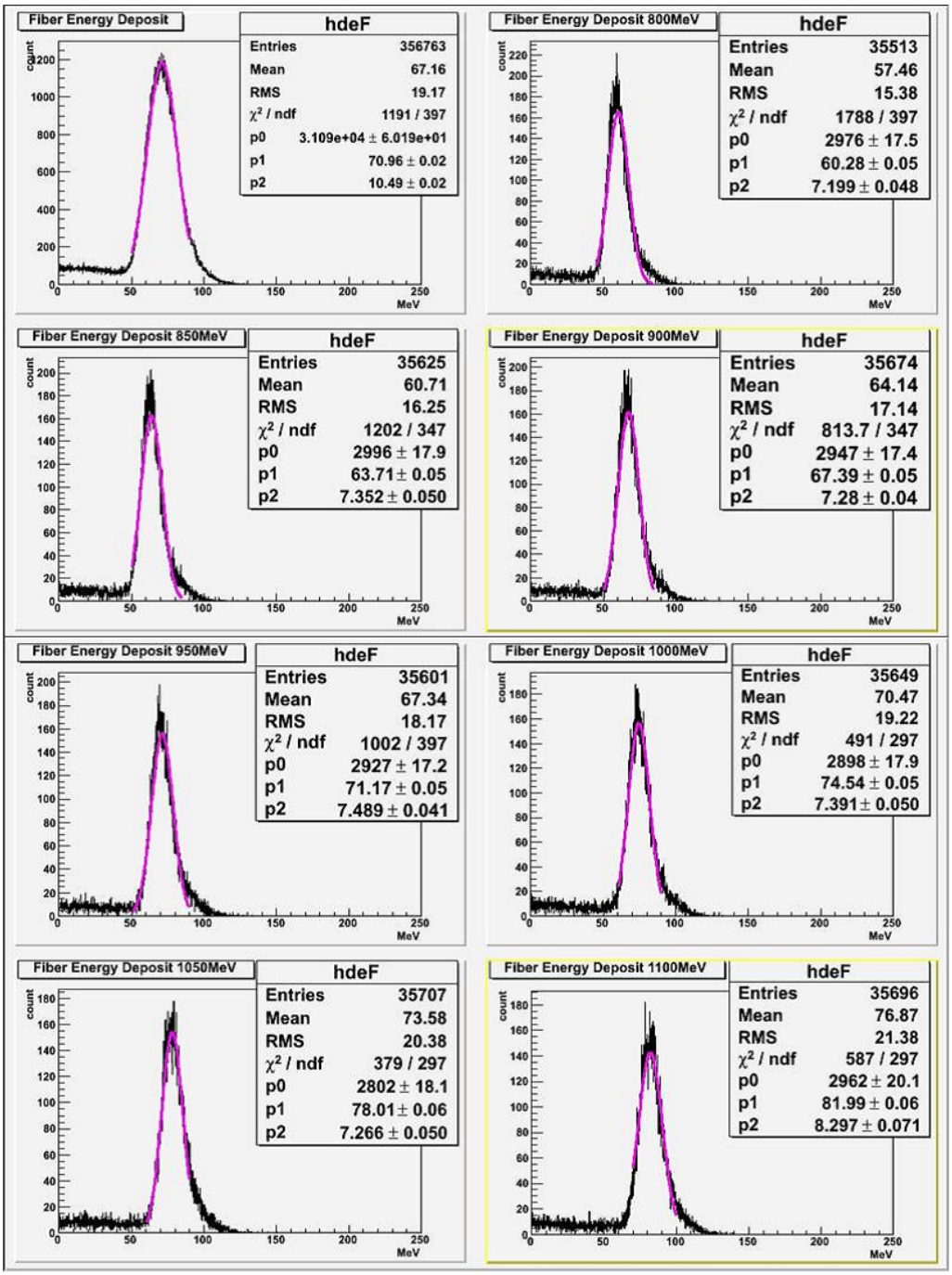

図 4.9: 単一エネルギーの γ 線による Fiber 層での Energy Deposit

次に、Absorber を設置した場合の Fiber 層での Energy Deposit のシミュレーション結果を示す (図 4.10)。γ 線のエネルギーは 0.8 GeV から 1.1 GeV までランダムに選ぶようにしており、左上のみ 500000 events で、他は 100000 events でシミュレーションしている。

左上は Absorber を設置していない状態で、以下右上、左下…の順番に、Absorber として 10 mm の Pb、15 mm の Pb、20 mm の Pb を設置したもの、15 mm の Pb と 3 mm のプラスチック、15 mm の Pb と 10 mm のプラスチック、15 mm の Pb と 100 mm のプラスチックを設置したものの結果である。

縦軸は log スケールで表してある。また、グラフ中の%のついた数字は 50 から 125 MeV の範囲を積分した際の、全面積に占める割合を示したものである。

4.4.3 考察

Absorber として Pb を設定した結果、event 数からみて Entry 数は減少している。しかしながら、指数関数を用いた計算で得られたほどの減少にはいたっておらず、15 mm の Pb を設置した場合では rate は 41 %ほどにしか減らなかった。

これは、グラフを見ても明らかなように、低エネルギーの γ 線が大量に発生し、それが検出器に到達していることが原因であると考えられる。

これらの大量に発生した低エネルギーの γ 線を除去する目的でプラスチックを設定したが、全体の rate は減少するものの、面積の割合の数値から、低エネルギーの γ 線のみを除去するような劇的な効果を得ることはできない、という結果となった。

実際の実験では、制動放射による γ 線は Tag されるエネルギー範囲だけでなく、0 から 1.2 GeV までの範囲でおおよそ 1 /E の分布に従った数のものが検出器に到達する。今回のように Tag されるエネルギー範囲の γ 線に限定したシミュレーションでは、rate が数 %まで減少し、かつ低エネルギー側の γ 線が除去されるような結果が期待されていたが、そのようにはならなかった。

現状としては、この Absorber を用いるという方法は適切でないという結論となる。

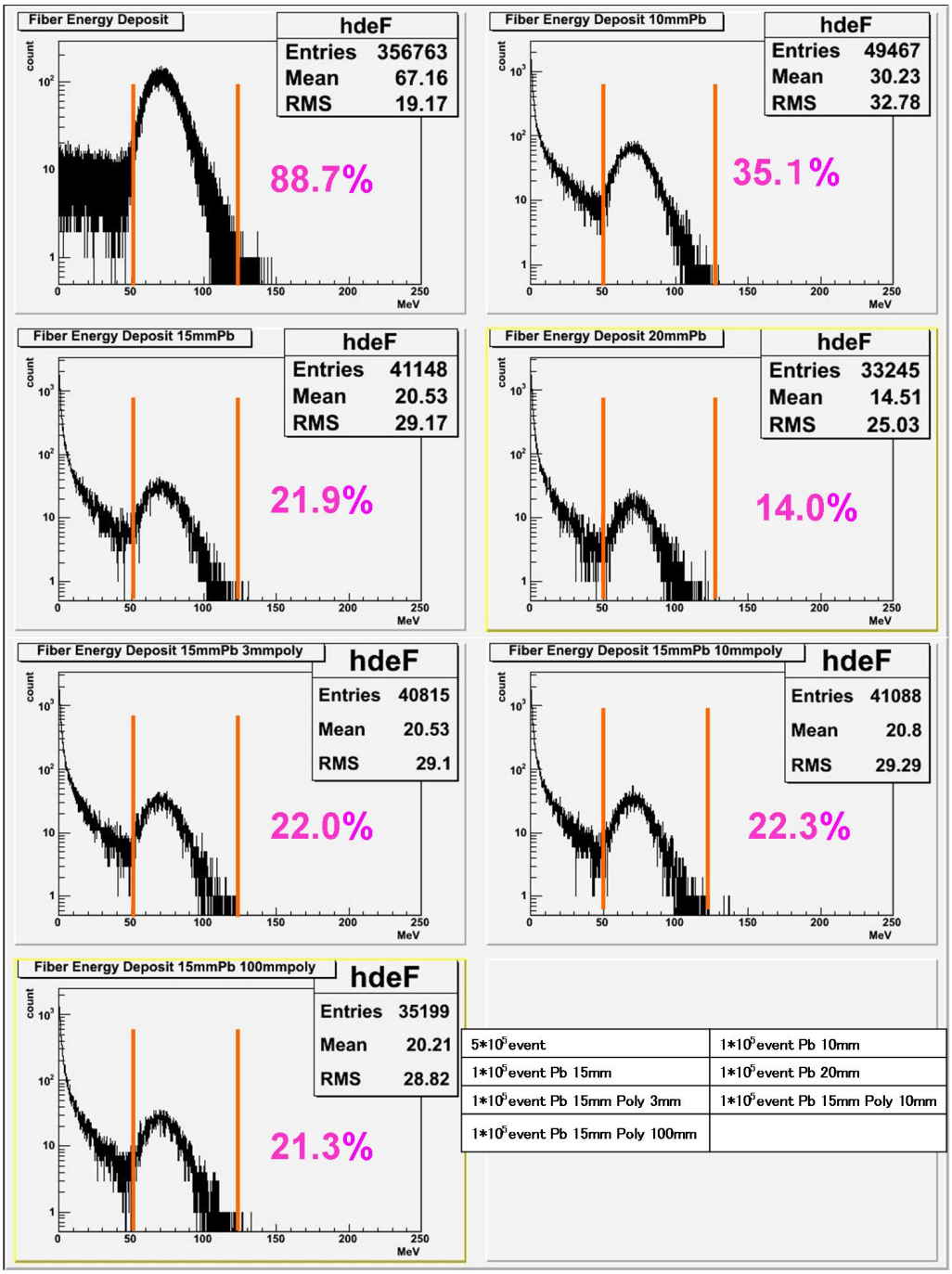

図 4.10: Absorber を導入した時の Fiber 層での Energy Deposit

第5章　今後の課題

今回の、Absorber を設置するという方法が適切でないという結果から、High rate 下では従来どおりにカロリーメータを用いて γ 線を検出するという手法そのものが非常に難しいと思わされた。そのため、なにか違う手法を試していかなければならない。例えば beam ライン上に、Pb などを電子陽電子ペアを発生させるための converter として設置し、Fright してくる電子陽電子対を薄いシンチレータ等で検出するなどが考えられるので、それらについての検証などをしていきたい。

参考文献

[1] O.Hashimoto and H.Tamura, ”Spectroscopy of Lambda hypernucle, ”Progress in Particle and Nuclear Physics, vol57, no.2,pp.564-653,2006

[2] 土井大輔, ”Honeycomb Drift Chamber に関する研究, ”卒業論文, 東北大学,2009.

[3] 伊藤健司, ”中性 K 中間子スペクトロメータ及びビームラインの基本特性の研究, ” 修士論文, 東北大学,2003.

[4] H.Yamazaki, et al., ”The 1.2GeV photon tagging system at LNS-Tohoku, ”Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 536 ,70-78,2005.

[5] W.R.Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. SpringerVerlag.

[6] particle Data Group

[7] K. クラインクネヒト著, 高橋嘉右, 古城肇共訳「粒子線検出器-放射線計測の基礎と応用-」(培風館)

[8] 八木浩輔「原子核物理学」(朝倉書店)

[9] http://geant4.web.cern.ch/geant4/

[10] G.F.Knoll,「放射線計測ハンドブック第 3 版」(日刊工業新聞社)

[11] 松本哲也, ”WLS ファイバーと押し出しシンチレーターを用いた電磁シャワーカロリメーターの研究, ”修士論文, 山形大学,2000.

[12] 柳田 耕司, ”ILD 電磁シャワーカロリメータのジェット事象を用いるエネルギー較正, ”修士論文, 信州大学,2009.

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方から御指導・御助力いただきましたことを、心より感謝いたします。

本研究課題の提案をしてくださり、当初は右も左も分からぬ自分にプログラミングについて１から御指導してくださった金田雅司助教授に感謝いたします。また、ビームライン上のセットアップ等について、唐突な質問ながら親切に解説してくださった神田浩樹助教授に感謝いたします。

そのほか、自分自身の発表の場で、貴重なご意見、アドバイス等をしてくださった橋本治教授、田村裕和教授、中村哲准教授はじめ、橋本研究室、小林研究室、中間エネルギーグループの教員の方々に心より感謝申し上げます。そのほか、共に卒論に取り組み、支えてくれた仲間に感謝いたします。