

平成 30 年度 卒業論文  
宇宙線ミュオンを用いた物質の透視実験

神戸大学 理学部 物理学科  
粒子物理研究室  
角 源一郎 谷口 浩平 吉田 佳織

2019 年 3 月 7 日

# 目次

第 1 章	ミューオンラジオグラフィー実験	1
1.1	序論 . . . . .	1
1.2	ミューオンの物質との相互作用 . . . . .	2
1.3	目標 . . . . .	4
第 2 章	実験装置の概要	5
第 3 章	宇宙線ミューオンのシミュレーション	7
3.1	CRY を用いた宇宙線分布シミュレーション . . . . .	7
3.2	Geant4 を用いた検出器シミュレーション . . . . .	9
3.3	検出器を通過しない宇宙線の除外 . . . . .	10
3.4	障害物の設定 . . . . .	11
3.5	障害物によるミューオンの吸収量 . . . . .	11
第 4 章	実験装置	14
4.1	装置のセットアップ . . . . .	14
4.2	光検出装置 . . . . .	15
4.3	光読み出し装置 . . . . .	21
4.4	ファイバーと MPPC の光学接続 . . . . .	23
第 5 章	光検出器 MPPC の運用	27
5.1	EASIROC の HV 供給 . . . . .	27
5.2	InputDAC の特性測定 . . . . .	29
5.3	MPPC の性能測定 . . . . .	32
第 6 章	実験装置の均一性評価	36
6.1	ミラースプレーの効果 . . . . .	36
6.2	Threshold の決定 . . . . .	40
6.3	各チャンネルの平均光電子数 . . . . .	44
6.4	天頂角分布ごとの光量 . . . . .	46

6.5	波長変換ファイバーによる光の減衰 . . . . .	49
6.6	チャンネルごとの efficiency . . . . .	52
6.7	物質の透視実験に用いるチャンネル . . . . .	54
6.8	装置の均一性の評価 . . . . .	58
第 7 章	宇宙線ミュオンを用いた透視実験の解析	61
7.1	透視実験の概要 . . . . .	61
7.2	角度分布の作成と結果 . . . . .	62
7.3	シミュレーションの設定と角度分布の結果 . . . . .	65
7.4	角度分布の比較結果 . . . . .	67
7.5	検出器起源の偏り . . . . .	68
7.6	建造物との比較 . . . . .	71
第 8 章	まとめ	74
謝辞		75
参考文献		76

# 表目次

1.1	$\mu$ 粒子の生成過程 . . . . .	1
3.1	Papini による一次宇宙線の陽子のフラックスの変数 . . . . .	7
4.1	実験装置に使用したもの . . . . .	15
4.2	使用した波長変換ファイバーの特性 [7] . . . . .	17
5.1	2 進数表記 . . . . .	32
6.1	各条件での平均光電子数 . . . . .	39
6.2	立ち下がりを示す光電子数とその点での $\varepsilon_i$ の値 . . . . .	43
6.3	宇宙線イベントの割合と内訳 . . . . .	47
6.4	Fit 結果 . . . . .	51

# 目次

1.1	CRY による宇宙線 $\mu^+\mu^-$ のエネルギー分布	2
1.2	$\mu$ 粒子の運動量に対する電離損失	3
1.3	$\mu$ 粒子の運動量に対する電離損失 (Bethe-Bloch の式に従う範囲)	3
1.4	到来方向の読み出し	4
2.1	装置の概要	5
2.2	プラスチックシンチレータの大きさ。中の黄緑色は、波長変換ファイバーを表している。	6
3.1	CRY による宇宙線 $\mu^+\mu^-$ のエネルギー分布	8
3.2	CRY による宇宙線 $\mu^+\mu^-$ の天頂角分布	8
3.3	宇宙船トラックの再構成方法	9
3.4	検出器を通過しない宇宙線の除外	10
3.5	障害物の設定方法。 左が検出器上全面に障害物を置いた場合、右が半面に置いた場合を示す。	11
3.6	宇宙線ミューオンの $x$ 平面角度分布。赤が何も置かなかった場合、黄色が障害物を置いた場合を表す。	12
3.7	ミューオン検出数の変化量の割合	12
3.8	宇宙線ミューオンの $y$ 平面角度分布。以下同上。	12
3.9	ミューオン検出数の変化量の割合	12
3.10	宇宙線ミューオンの $x$ 平面角度分布。赤が何も置かなかった場合、黄色が障害物を置いた場合を表す。	13
3.11	ミューオン検出数の変化量の割合。 障害物をおいた正方向のみ検出数が減っている。	13
3.12	宇宙線ミューオンの $y$ 平面角度分布。以下同上。	13
3.13	ミューオン検出数の変化量の割合	13
4.1	装置の写真	14
4.2	実験装置の電子学	15

4.3	押し出し形プラスチックシンチレータ . . . . .	16
4.4	波長変換ファイバー [7] . . . . .	16
4.5	波長変換ファイバー Y-11(200)MS の吸収・発光スペクトル [7] . . . . .	17
4.6	APD の内部構造 [5] . . . . .	18
4.7	APD 増倍率の印加電圧依存 [5] . . . . .	18
4.8	増倍率の温度依存性 [5] . . . . .	19
4.9	クエンチング抵抗と APD による MPPC の構造 [5] . . . . .	20
4.10	リニアアンプによる MPPC 出力波形 [5] . . . . .	20
4.11	EASIROC 回路図概略 [8] . . . . .	21
4.12	Pre-Amp 出力波形 . . . . .	22
4.13	Fast-Shaper 出力波形 . . . . .	22
4.14	Slow-Shaper 出力 . . . . .	22
4.15	Hold した Slow-Shaper 出力波形 . . . . .	22
4.16	EASIROC の写真。左側にある EASIROC1B と書かれたものが ASIC の EASIROC である。中央右にあるのが FPGA の Artix-7 である。 . . . . .	23
4.17	GOMI connector[12] . . . . .	24
4.18	GOMI Connector 写真。左 : MPPC 側パーツ・右 : 波長変換ファイバー側パーツ。 [11] . . . . .	24
4.19	GOMI Connector に MPPC が組み込まれ、ファイバー側パーツと接続された状態 [11]。 . . . . .	24
4.20	GOMI Connector : 波長変換ファイバー側パーツ [11] . . . . .	25
4.21	GOMI Connector : MPPC 側パーツ [11] . . . . .	26
5.1	DAC によるバイアス調整機能 [9] . . . . .	28
5.2	InputDAC の特性 [9] . . . . .	28
5.3	InputDAC の出力電圧と入力値の関係 [10] . . . . .	29
5.4	外部トリガーを用いる場合のブロック図 . . . . .	30
5.5	LED の光を MPPC で測定したときのデータ。赤線で囲った部分を拡大したものを図 5.6 に示す。 . . . . .	30
5.6	図 5.5 を拡大した図。緑線の間を interval とする。 . . . . .	30
5.7	キャリブレーション . . . . .	31
5.8	InputDAC と interval の関係。赤線で囲まれた部分が線形になっていない。また、青線で囲まれた部分の interval が他と比較して大きい。 . . . . .	31
5.9	interval と MPPC に印加されている電圧の関係。切片を降伏電圧とする。 . . . . .	33
5.10	MPPC の降伏電圧。青は測定したデータ、赤は規格値である。下はその誤差である。 . . . . .	33
5.11	分解能の関係からこの付近の電圧における interval は測定することができない。 . . . . .	34

5.12	MPPC の interval . . . . .	35
6.1	ミラースプレー . . . . .	37
6.2	波長変換ファイバーのミラースプレー塗装前 . . . . .	37
6.3	ミラースプレー塗装後 . . . . .	37
6.4	トリガー用に用いるシンチレータ (四角形の部分) と PMT(円筒形の部分)。 . . . .	38
6.5	シンチレータ周りのセットアップ . . . . .	38
6.6	検出光電子数の位置依存性とミラーペーストの有無。青色の分布がミラーペーストをしなかった場合、赤色が塗装した場合。 . . . . .	39
6.7	平均光電子数の位置依存性。赤色の点が塗装ありの場合で、青色が塗装無しの場合。 . . . . .	40
6.8	赤で示されたストリップが Masked チャンネル、Ch. がチャンネル番号。 . . . . .	41
6.9	測定に用いる GOMI コネクタと波長変換ファイバーの接続部分。写真奥に見えるのは GOMI コネクタを設置し、68pin ケーブルと接続するための基板。 . . . . .	41
6.10	基板に向かってみたときのシンチレータの配置。各格子に表されている文字でシンチレータを区別する。 . . . . .	41
6.11	EASIROC のトリガー条件 . . . . .	42
6.12	横軸が検出光電子数、縦軸がイベント数。ML チャンネルで測定したイベントを元に作成した。左の図がイベントカット前のヒストグラムであり、ペDESTAL 付近にイベント数が多く、ノイズによる寄与が多い。一方で右図がイベントカット後であり、ペDESTAL 付近のイベントが少なくなっている。 . . . . .	42
6.13	$\varepsilon_i$ の光電子数 $i$ を変化させた際のヒストグラム。横軸が $i$ 、縦軸が $\varepsilon_i(\%)$ 。 . . . . .	43
6.14	MPPC から得られる ADC 分布 . . . . .	44
6.15	光電子数分布。オレンジの線で囲った部分は、ペDESTAL である。赤線のように threshold を設ける。 . . . . .	44
6.16	平均光電子数が多いチャンネルの例。平均光電子数は、22.3 p.e. である。 . . . . .	45
6.17	平均光電子数が少ないチャンネルの例。平均光電子数は、5.8 p.e. である。 . . . . .	45
6.18	物質の透視実験のトリガー条件 . . . . .	45
6.19	各チャンネルの平均光電子数 . . . . .	46
6.20	宇宙線イベントの例 . . . . .	47
6.21	天頂角分布。青線が実データ。赤線は 6.6 節で求めた efficiency を用いて補正したデータ。緑線はシミュレーションから求めたデータである。 . . . . .	48
6.22	天頂角分布ごとの光量 . . . . .	49
6.23	MPPC からの距離と平均光電子数の関係 . . . . .	50
6.24	Fit 結果。一番近いところのデータは、外れ値であると考え Fit 範囲から除外している。 . . . . .	51
6.25	inefficiency の補正。オレンジの領域を補正する。緑の領域は補正できない。 . . . .	52

6.26	チャンネルごとの efficiency。青が実験で測定した efficiency。赤は光電子数分布がポアソン分布に従うと仮定して、平均光電子数から求めた efficiency。 . . . . .	53
6.27	実際の光電子数分布とポアソン分布の比較 . . . . .	54
6.28	正常なチャンネル . . . . .	55
6.29	信号が見えないチャンネル . . . . .	55
6.30	信号が見えないチャンネルの位置 . . . . .	56
6.31	正常なチャンネル . . . . .	57
6.32	ノイズの多いチャンネル . . . . .	57
6.33	ノイズの多いチャンネルの位置 . . . . .	58
6.34	上の層の比較結果。黒線が実データで、赤線が補正後のデータである。 . . . . .	59
6.35	下の層の比較結果。黒線が実データで、赤線が補正後データである。 . . . . .	59
6.36	上の層の比較結果。赤線が補正後のデータで青線がシミュレーションのデータである。 . . . . .	60
6.37	下の層の比較結果。赤線が補正後データで青線がシミュレーションのデータである。 . . . . .	60
7.1	自然科学棟 3 号館 . . . . .	61
7.2	測定位置 . . . . .	61
7.3	仮想平面の概略図 . . . . .	63
7.4	座標の定義 . . . . .	64
7.5	座標と建造物との対応 . . . . .	64
7.6	通過位置の例 . . . . .	64
7.7	赤で示されたストリップが masked チャンネル、Ch. がチャンネル番号。 . . . . .	65
7.8	$z = 15\text{ m}$ の地点における仮想平面上の角度分布 . . . . .	66
7.9	$z = 15\text{ m}$ の地点における仮想平面上の角度分布 (シミュレーション) . . . . .	66
7.10	すべてのチャンネルを再構成の対象とした時のシミュレーションにおける角度分布	67
7.11	East, North 軸に沿った射影図。縦軸が事象数を表す。青色のヒストグラムが masked チャンネルを考慮しなかった場合のシミュレーションで、赤色が masked チャンネルを考慮し再構成に用いない場合。事象数は検出器から得た総事象数で規格化している。 . . . . .	68
7.12	到来頻度分布図。 $\Delta(\%)$ の大きさは色の違いで示し、青色のピクセルはミューオンの到来頻度が低く、黄色のピクセルは頻度が高い場所。NSEW はそれぞれ方角を表している。 . . . . .	69
7.13	East 軸、North 軸にそって射影した場合の $\Delta(\%)$ の値。黒色が回転前、緑が 90 度回転、赤が 180 度回転させた場合のヒストグラム。 . . . . .	69
7.14	回転前の $\Delta$ 分布図 . . . . .	70
7.15	90 度回転後の $\Delta$ 分布図 . . . . .	70

7.16	180 度回転後の $\Delta$ 分布図 . . . . .	70
7.17	到来頻度分布図と建造物の配置の比較 . . . . .	71
7.18	移動後の検出器の位置 . . . . .	72
7.19	East 軸、North 軸にそって射影した場合の $\Delta(\%)$ の値。黒色が回転前、緑が 90 度回転、赤が 270 度回転させた場合のヒストグラム。 . . . .	72
7.20	到来頻度分布図と建造物の配置の比較 (移動後) . . . . .	73

# 第 1 章

## ミュオンラジオグラフィー実験

### 1.1 序論

ラジオグラフィーとは放射線を用いて、物体の内部構造や状態を透過像として撮影する方法である。放射線は物体を透過する際に物体と相互作用を起こし散乱したり、エネルギーを失ったりするため、その結果放射線の一部が遮蔽される。物体透過後の放射線の分布から、その内部を知ることができる。代表的な例として、X線撮影技術は医療現場などさまざまな場面で使用されている。しかし、X線は厚さ数 cm 金属や火山やピラミッドなど大きな構造物などの透過しにくい物質の内部は撮影することはできない。ミュオンラジオグラフィーでは、宇宙線に含まれる  $\mu$  粒子 (ミュオン) をラジオグラフィに用いることで X線撮影の欠点を克服することが出来る。

宇宙線とは宇宙から絶えずに地球に降り注いでいる原子核や素粒子のことである。その中で、地球大気に飛び込む前の宇宙線を「一次宇宙線」、大気に飛び込み変化することで生まれるものを「二次宇宙線」と言う。様々な種類の宇宙線がある中で  $\mu$  粒子を用いる理由としては、宇宙線の中で地上に多く降り注いでいること、平均 1GeV 程度で幅広いスペクトラムを持つこと、そして物質との相互作用が主に最小電離作用 (後述) で透過力が高いことなどがあげられる。

表 1.1  $\mu$  粒子の生成過程

崩壊前	崩壊後
$\pi^+$	$\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
$\pi^-$	$\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
$K^+$	$\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
$K^-$	$\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

表 1.1 は、本実験で用いる  $\mu$  粒子の生成過程を示している。一次宇宙線が大気に散乱されると、多数の  $\pi, K$  粒子などのハドロンを生成する。これを空気シャワーと呼ぶ。これらの  $\pi$  粒子、 $K$  粒子から  $\mu$  粒子が生成されていることが分かる。 $\mu$  粒子は様々な方向から到来し、またラジオグラフィの対象となる物質の厚さは一般に到来方向により変化する。

## 1.2 ミューオンの物質との相互作用

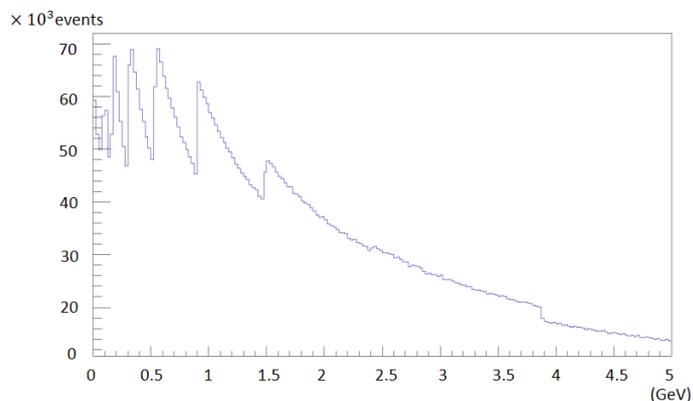


図 1.1 CRY による宇宙線  $\mu^+\mu^-$  のエネルギー分布

$\mu$  粒子は物質を通過する際に物質内の電子と衝突することでエネルギーを失う。これ以外の反応はあまり起きないため、失うエネルギーの大きさは通過した物質の質量厚さ (密度の積分値)  $x$  にほぼ比例する。失うエネルギーが大きければ通過する  $\mu$  粒子の数が大きく減少し、失うエネルギーが小さければ通過する  $\mu$  粒子の数の減少が小さい。例えば図 1.1 より 1GeV のエネルギーを損失すると、 $\mu$  粒子の数が約 20% 減少することが分かる。そのため、検出される  $\mu$  粒子の数の分布から大きな構造物などの物質の内部構造を知ることができる。

今回の実験で対象とする宇宙線  $\mu$  粒子は図 1.1 よりおおよそ 5GeV 以下である。この範囲では電離損失は図 1.2 の Bethe-Bloch の式 (1.2.1) に従う範囲に当てはまる。

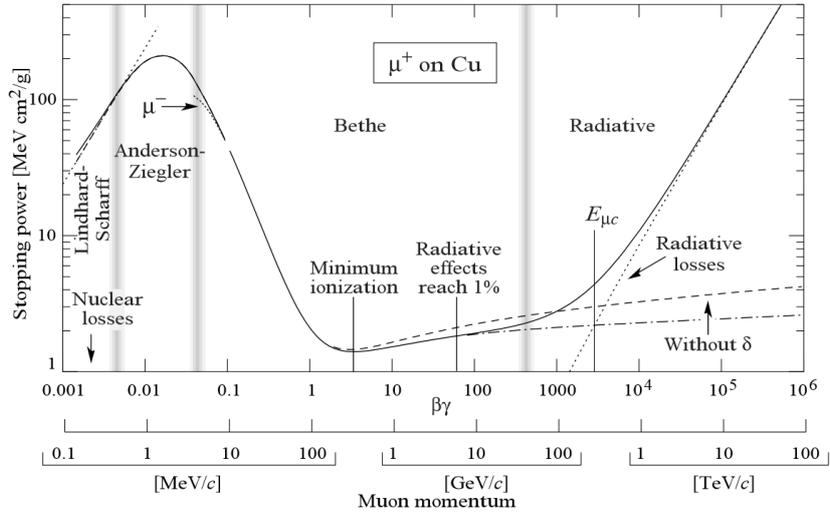


図 1.2  $\mu$  粒子の運動量に対する電離損失

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{2\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\beta\gamma}{2} \right) \right] \quad (1.2.1)$$

Bethe-Bloch の式 (1.2.1) に従う範囲を見ると電離損失は速度が大きくなるにつれ最初は急激に減少し、ある速度からは増加に転じるが、増加量は非常に緩やかになり一定とみなせる。このほぼ一定とみなせる電離損失を最小電離損失 (MIP: minimum ionizing particle) といい、多くの宇宙線の電離損失はこの値となる。

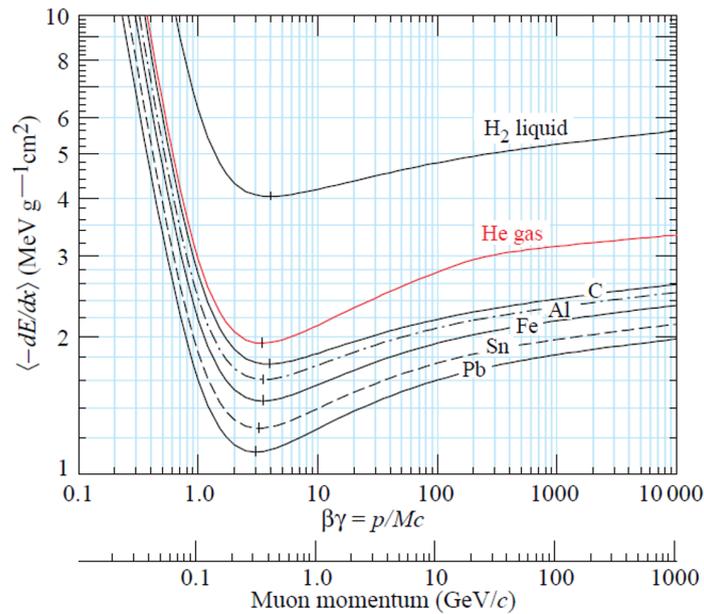


図 1.3  $\mu$  粒子の運動量に対する電離損失 (Bethe-Bloch の式に従う範囲)

例えば、1m の鉛であれば、おおよそ 1GeV のエネルギーを損失する。

$\mu$  粒子のような荷電粒子が通過した際に、その失ったエネルギーを使って発光するシンチレータと呼ばれる検出器を用いてミュオンの到来が検出できる。しかし、このままでは到来方向を知ることができない。そのため、まずストリップ状のシンチレータを図 1.4 のように縦、横に複数並べてプレート状の検出器を作成し、これを二層重ね合わせることで三次元方向の到来方向を検出できるようにする。検出器の具体的な寸法については第 2 章で説明する。

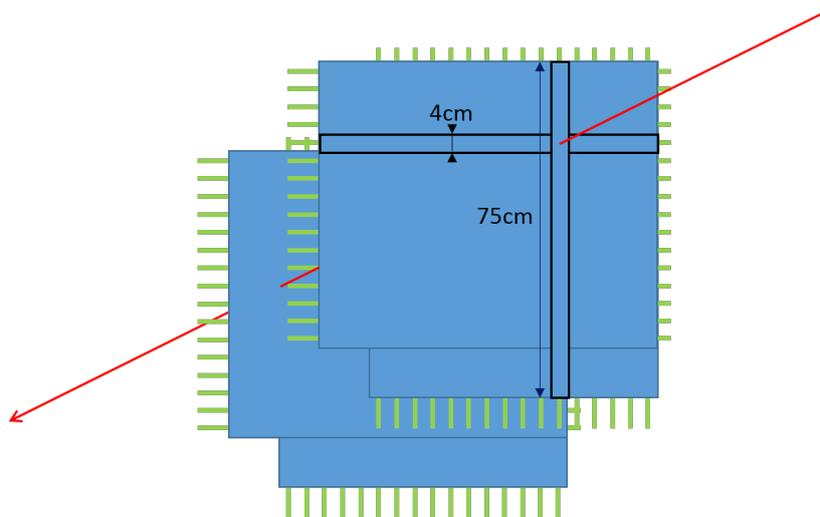


図 1.4 到来方向の読み出し

### 1.3 目標

本実験の目標を以下に示す。

- シミュレーションを用いた測定感度の評価  
作成した検出器で、物質の影響を確認できるかどうかシミュレーションを用いて評価する。
- 実験装置の性能評価  
物質の質量分布を正確に推測するために、実験装置の位置測定における均一性を調べる。
- データ解析  
得られたデータをもとに、作成した検出器で周囲の建造物によるミュオンの到来頻度の減少が見られるかどうか確認する。

以上を踏まえ宇宙線ミュオンを用いたラジオグラフィーを行い、神戸大学自然科学研究棟 3 号館などの透視を行う。

## 第 2 章

# 実験装置の概要

本実験では、宇宙線の到来方向を測定するために、プラスチックシンチレータを  $x$ 、 $y$  方向にそれぞれ 16 枚並べ重ねたものを上下 2 層作る (図 2.1)。

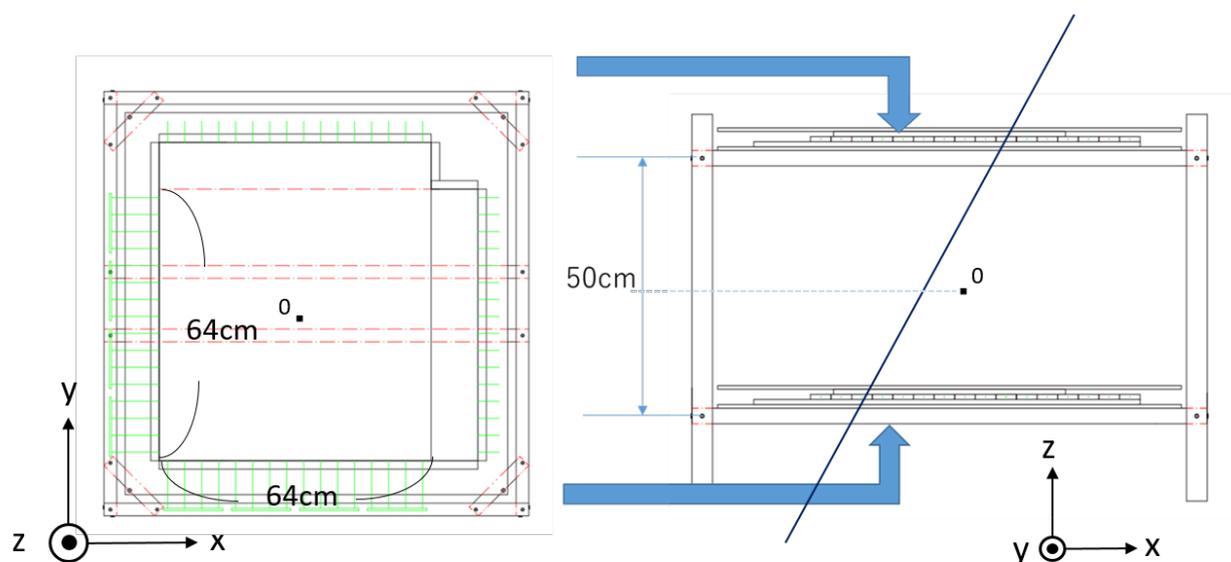


図 2.1 装置の概要

プラスチックシンチレータから発せられたシンチレーション光は、直径 1.5cm の波長変換ファイバーで集光する (図 2.2)。

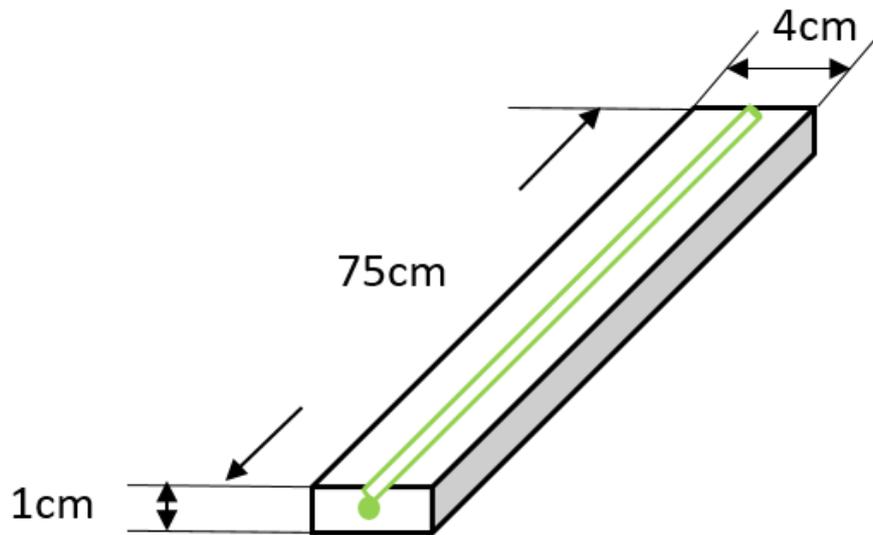


図 2.2 プラスチックシンチレータの大きさ。中の黄緑色は、波長変換ファイバーを表している。

上下の層の間隔は昨年の研究結果 [1] より、事象数と角度分解能（1.6 度）の兼ね合いから 50cm に決定した。有効検出面積は、64cm × 64cm である。

## 第 3 章

# 宇宙線ミュオンのシミュレーション

CRY(Cosmic-ray Shower Library) と Geant4 を用いて、宇宙線ミュオンの検出数の到来方向依存を見積もる環境を構築した。自然科学総合研究棟 3 号館相当の物質が検出器上部にある場合、ない場合など、いくつかの環境におけるミュオンの検出数を比較し、作成した検出器で 3 号館の影響によりミュオンが減少する効果が確認できるかどうか確かめた。

### 3.1 CRY を用いた宇宙線分布シミュレーション

#### 3.1.1 CRY

CRY (Cosmic-ray Shower Library) とは、大気中のプロトン励起宇宙線シャワーのモンテカルロシミュレーションのパッケージである。MCNPX (Monte Carlo N-Particle eXtended) に基づき宇宙線の 1 GeV~100 TeV の一次粒子と 1 MeV~100 TeV の二次粒子のシミュレーションにより事前に算出されたデータから、宇宙線分布を生成する。

大気モデルは、大気を 42 列の均一な密度の層として近接する層で密度を 10% ずつ変化させている。シミュレートする大気の高部の高度は海拔 31 km である。

大気中の宇宙線粒子は主に銀河系宇宙線の陽子によるもので、アルファ線と重原子核からの寄与は小さい。そのため現在、CRY は一次陽子の効果のみをシミュレートしている。フラックスの表現は

$$J(E) = A(E + B)^\alpha E^\beta \text{ protons/m}^2/\text{steradian/second/GeV} \quad (3.1.1)$$

が用いられている [2] [3]。ここで  $E$  は核子あたりの運動エネルギーである。

表 3.1 Papini による一次宇宙線の陽子のフラックスの変数

	A	B(GeV)	$\alpha$	$\beta$
Solar minimum	18000	0.92	-4.00	1.25
Solar maximum	18000	1.61	-3.83	1.08

磁化した太陽プラズマが惑星間を占めるにつれて低いエネルギーの陽子が地球からそれていくため、低いエネルギーの宇宙線粒子のフラックスは太陽風と反相関する。ある特定の日の陽子のフラックスは太陽活動の極大のときと極小の時のフラックスに重み付けされ、

$$J(E)_{date} = (1 - x)J_{smin}(E) + xJ_{smax}(E) \quad (3.1.2)$$

で表される [2]。ここで  $x = |\sin(\pi\Delta T/T_{cycle})|$ 、 $T_{cycle}$  は太陽の活動周期、 $\Delta T$  は周期の開始からの時間である。

CRY ではシミュレートする高度を海拔 0m、2100m、11300m から選ぶことができる。今回の宇宙線分布シミュレーションは自然科学棟 3 号館に近い条件で行った。シミュレート結果を集計する際に、電荷をもつ粒子、つまり陽子、電子、ミューオン、パイ中間子とそれらの反粒子のみを選んだ。標高は 0m、地磁気緯度は 25.99 度、日付は 2019 年 1 月 11 日とした。

### 3.1.2 宇宙線ミューオンの分布

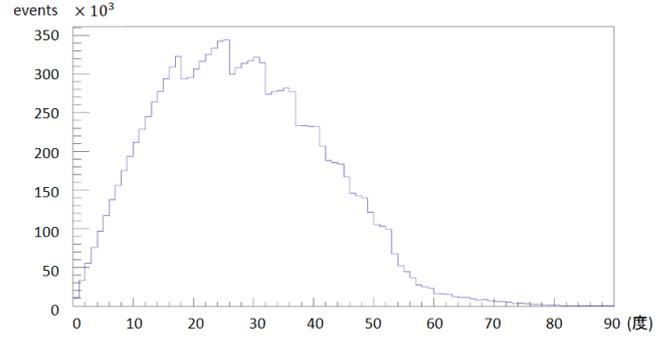
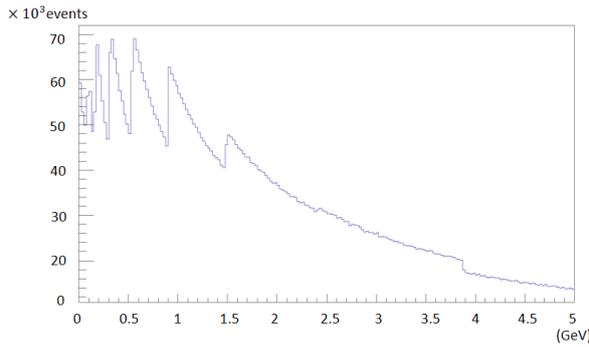


図 3.1 CRY による宇宙線  $\mu^+\mu^-$  のエネルギー分布 図 3.2 CRY による宇宙線  $\mu^+\mu^-$  の天頂角分布

図 3.1、図 3.2 は、1000 万イベントで CRY のシミュレーションを実行した際の宇宙線ミューオンのエネルギーと天頂角分布を表す。グラフにがたつきがみられるのは、シミュレーションの精度によるものだと考えられる。

補足として、ミューオンの天頂角分布は、天頂角によってミューオンが通過する大気の厚さが変化することに関係する。通過する大気の厚さ  $x$  で  $\mu$  の鉛直強度を、

$$I(x, 0) \approx Ax^{-n} \quad (3.1.3)$$

と近似する。通過する大気の厚さ  $x$  で天頂角  $\theta$  方向の強度  $I(x, \theta)$  は  $I(x, 0)$  に比べて大気の厚さが  $x/\cos\theta$  変化するから、

$$\begin{aligned} I(x, \theta) &\approx I\left(\frac{x}{\cos\theta}, 0\right) \\ &= Ax^{-n} \cos^n \theta \\ &= I(x, 0) \cos^n \theta \end{aligned} \quad (3.1.4)$$

と表される [4]。地上付近のミューオンでは  $n \approx 2$  と考えられている。

## 3.2 Geant4 を用いた検出器シミュレーション

### 3.2.1 Geant4

Geant4 とは、粒子が物質中を通過する際に生じる相互作用過程を正確にシミュレーションするソフトウェア・パッケージである。相互作用が起こった点の座標、エネルギー損失量、時間などの情報が得られる。

### 3.2.2 検出器の設定

4 cm × 75 cm × 1 cm のプラスチックシンチレータの中心に直径 1.5 mm の穴をあけたものを  $x, y$  方向にそれぞれ 16 枚並べ重ねたものを上下二層作り、2 章で述べたジオメトリに沿って検出器を設定した (図 2.1)。座標軸について、 $x, y$  の原点は重なり部分 (64 cm 四方の正方形) の中心に、 $z$  の原点は検出器間の中心においた。CRY でシミュレーションした宇宙線を  $z = 15$  m の位置で 40 m 四方の面から入射させ、Geant4 でミューオンが検出器を通過した座標を求めその座標からトラック再構成を行った。

### 3.2.3 宇宙線トラックの入射方向の再構成

各層 1 枚、計 4 枚のシンチレータを通った宇宙線事象のみを用いる。宇宙線を検出したシンチレータの中心座標の二層ずつの組み合わせから、上層と下層それぞれで  $(x, y)$  座標を定め、その二点から宇宙線の飛跡の入射方向を再構成した。 $xz$  面上の入射角を  $\theta_x$ 、 $yz$  面上の入射角を  $\theta_y$  とする。

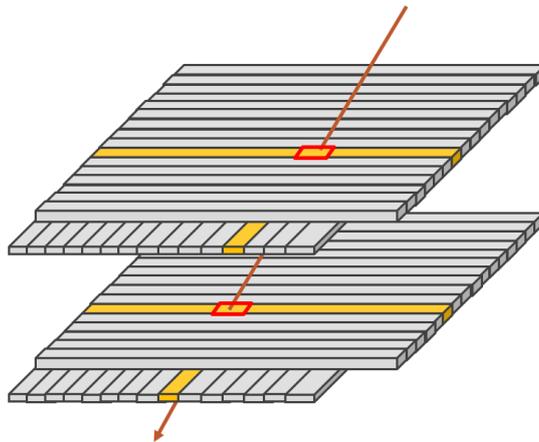


図 3.3 宇宙線トラックの再構成方法

### 3.3 検出器を通過しない宇宙線の除外

検出器を明らかに通過しない宇宙線を Geant4 で計算しなくて済むよう、CRY でのシミュレーションの段階で二層の検出器それぞれの中心の高さの一辺 1.0 m の正方形を通過しない宇宙線を除外して、Geant4 の計算量を減らした (図 3.4)。

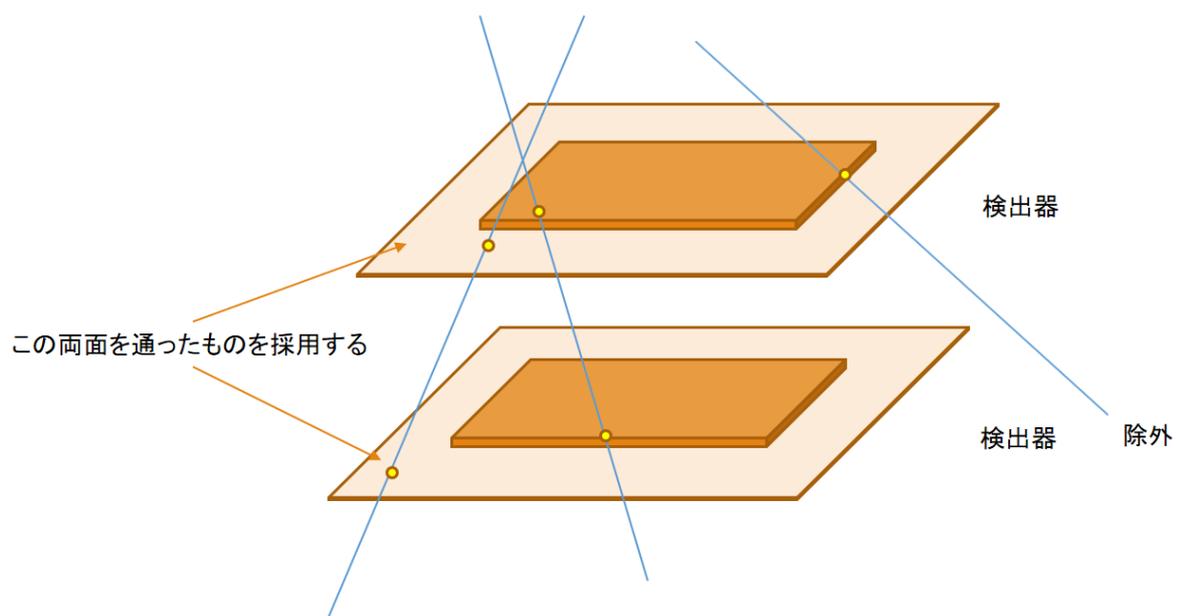


図 3.4 検出器を通過しない宇宙線の除外

### 3.4 障害物の設定

検出器は自然科学総合研究棟 3 号館の 3 階に設置している。3 号館 3 階の上には 5 階分の床と最上階の天井があり、おおよその建築物の床の厚さは 20~50 cm であるので、3 号館が鉄筋コンクリート製であるとして、検出器上に  $30\text{ cm} \times 6 = 180\text{ cm} \simeq 2\text{ m}$  分に相当するコンクリートがあると考えた。これを、1. 設置しない、2. 検出器上全面に設置、3. 検出器上  $x$  平面半面のみ設置、の 3 パターンでシミュレーションを行い、ミュオンの検出数の到来方向依存を比較した。

具体的には、 $30\text{ m} \times 15\text{ m} \times 2\text{ m}$  と  $15\text{ m} \times 15\text{ m} \times 2\text{ m}$  のコンクリートをそれぞれ  $z = 5\text{ m}$  の位置に図 3.5 のように設置することで、コンクリートが検出器上の全面、半面にある状況を作った。

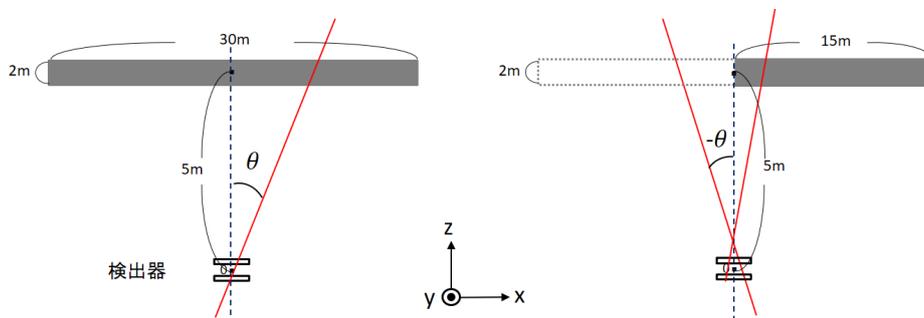


図 3.5 障害物の設定方法。

左が検出器上全面に障害物を置いた場合、右が半面に置いた場合を示す。

### 3.5 障害物によるミュオンの吸収量

#### 3.5.1 全面に障害物を設置した場合

まず検出器上に何も置かなかった場合と検出器上全面に障害物を置いた場合のミュオンの検出数の角度分布を比較した (図 3.6~図 3.9)。赤のヒストグラムは何も置かなかった場合、黄色のヒストグラムが障害物を置いた場合を表している。ここで、ヒストグラムの横軸の値が不連続なのは、飛跡の再構成の際に、それぞれのシンチレータの中心座標の値を用いたからである。

$x$  平面  $y$  平面どちらにおいても、検出数が全体でおよそ 25% 減少していることが分かる。角度の絶対値が大きいほど誤差が大きくなっているのは、その角度を持つ検出器を二層両方通過するミュオンの数が少ないためだと考えられる。

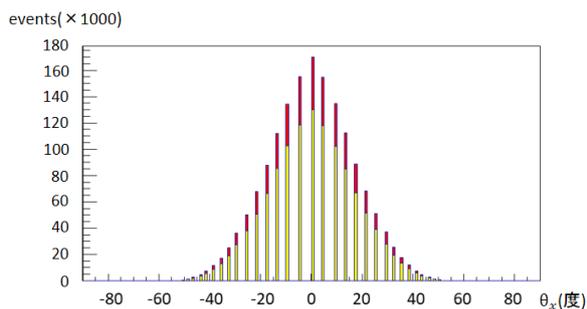


図 3.6 宇宙線ミュオンの  $x$  平面角度分布。  
赤が何も置かなかった場合、黄色が障害物を置いた場合を表す。

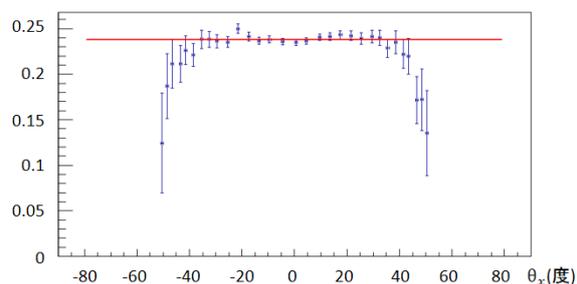


図 3.7 ミューオン検出数の変化量の割合

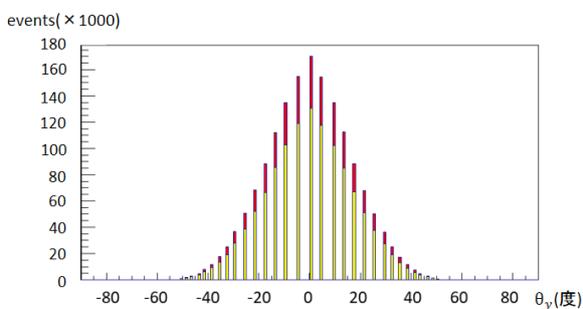


図 3.8 宇宙線ミュオンの  $y$  平面角度分布。  
以下同上。

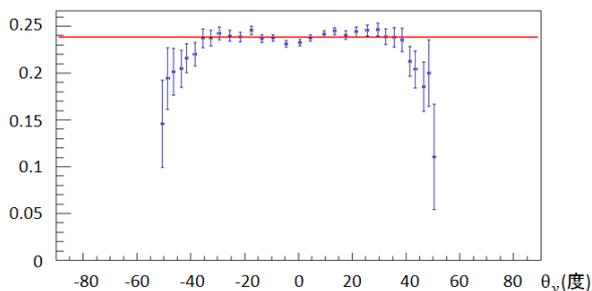


図 3.9 ミューオン検出数の変化量の割合

### 3.5.2 半面に障害物を設置した場合

続いて検出器上に何も置かなかった場合と検出器上の  $x$  平面半面に障害物を置いた場合のミュオンの検出数の角度分布を比較した (図 3.10~図 3.13)。 $x$  平面に着目すると、障害物を置いた正方向のみ検出数がおおよそ 25% 減少している。

$y$  平面については、検出数の減少量は約 10% であるが、変化量の割合は角度によらずあまり変わっていない。

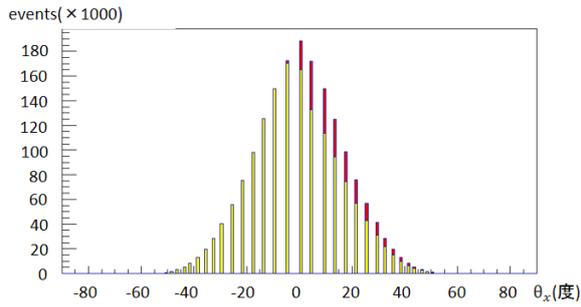


図 3.10 宇宙線ミュオンの  $x$  平面角度分布。  
赤が何も置かなかった場合、黄色が障害物を置いた場合を表す。

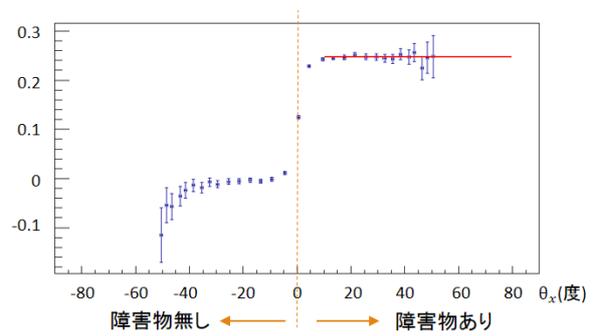


図 3.11 ミューオン検出数の変化量の割合。  
障害物をおいた正方向のみ検出数が減っている。

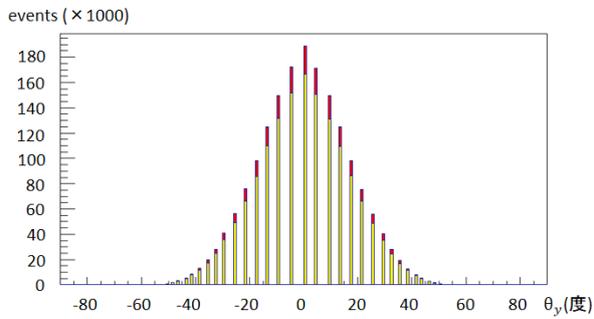


図 3.12 宇宙線ミュオンの  $y$  平面角度分布。  
以下同上。

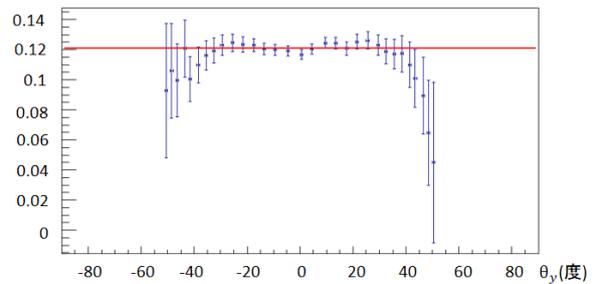


図 3.13 ミューオン検出数の変化量の割合

以上の結果より、厚さ 2m のコンクリートを置くとミュオンの検出数はおよそ 25% 減少することが分かった。これをもって、作成した検出器を用いて自然科学総合研究棟 3 号館の影響を確認することができるかと判断した。

## 第 4 章

# 実験装置

### 4.1 装置のセットアップ

本実験では、宇宙線の到来方向を測定するために、縦、横方向に 16 本のシンチレータを並べたものを 2 層作成し、図 2.1 のように構築する。装置の写真を図 4.1 に掲載した。去年は、MPPC の基板部分を L アングルに固定していたが、取り扱いがしづらく遮光もしづらかったので木の板に取り付けることにした。それに伴って、MPPC の取り付け位置が高くなったため、シンチレータの下に 1 枚板を敷くことで、MPPC と波長変換ファイバーの高さを同じにした。また、基板の構造上横方向には 1mm 程度ずれが生じるため、MPPC とシンチレータの距離をなるべく離す (8.5cm) ことで波長変換ファイバーにかかる力を極力減らした。

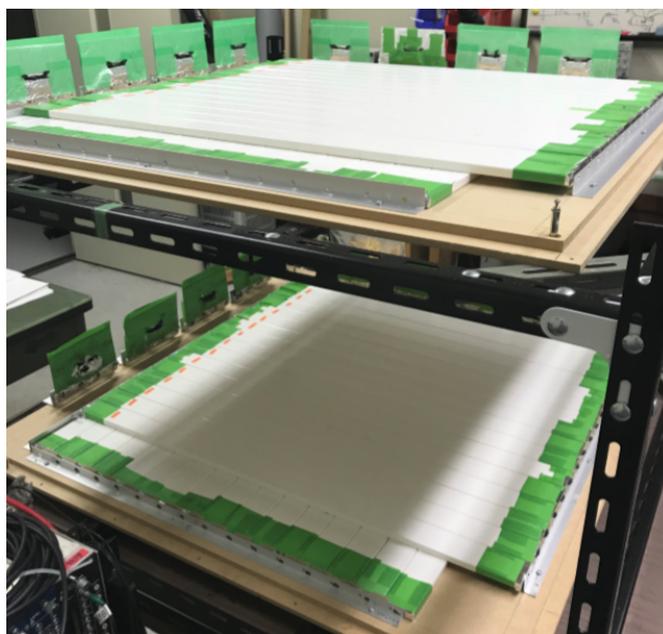


図 4.1 装置の写真

検出器、及びデータ取得システムを図 4.2 に示す。シンチレータが発したシンチレーション光を波長変換ファイバーで集光、変換し、MPPC で検出する。MPPC の出力電圧が EASIROC の Trigger 条件を満たした場合、Trigger 信号が出される。その信号を Discriminator で成形し、Delay でタイミングを調節して Hold 信号として EASIROC に入れる。そのデータをパソコンで読み出す。Discriminator は本来必要ないが、Trigger 信号をよりきれいにするために導入した。各モジュールの詳しい説明は、4.2 節と 4.3 節で述べる。

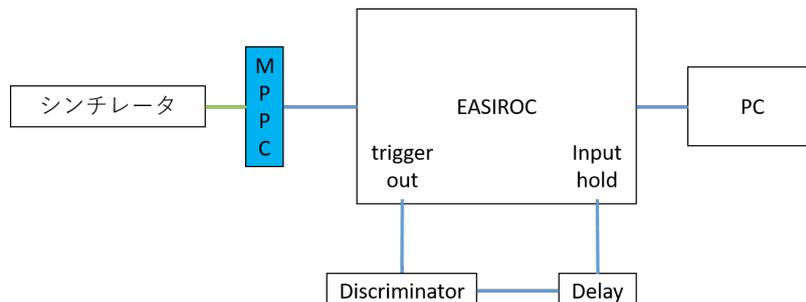


図 4.2 実験装置の電子学

データを取得するためのモジュールや実験で使用したものを表 4.1 に示す。

表 4.1 実験装置に使用したもの

検出器	型番	メーカー
押し出しプラスチックシンチレータ		株式会社シーアイ工業
波長変換ファイバー	Y-11(200)MS	株式会社クラレ
MPPC	S13360-1375CS	浜松ホトニクス株式会社
モジュール		
EASIROC		浜松ホトニクス株式会社
ディレイ	N022	株式会社豊伸電子
ディスクリミネータ	KN241	株式会社カイズワークス

## 4.2 光検出装置

### 4.2.1 押し出し形プラスチックシンチレータ

押し出し形プラスチックシンチレータは、押し出しによって成型されたプラスチックシンチレータである。従来のプラスチックシンチレータに比べて、安価に作成できるという利点がある。実際に使用したものは、真ん中部分に穴の開いた短冊状のシンチレータ（厚み 1cm × 幅 4cm × 長さ 75cm）である。



図 4.3 押し出し形プラスチックシンチレータ

この制作にあたって、3m のものをのこぎり等を用いて 4 本に切断して使用しているため、一本の長さは約 75cm になっている。端面が平らになるようにやすりをかけた。また、光漏れを防ぐため、プラスチックシンチレータと屈折率がほぼ同等なオプティカルグリスを用いてシンチレータの端面と反射材を接着した。これを合計で 64 本作成した。4.2.2 節で説明する波長変換ファイバーを通すので、端面に張った反射材に穴をあける。先に穴を開けずにファイバーで突いて破る形で穴をあけた。その理由は大きく穴をあけてしまい光漏れが起きる可能性があるためである。

#### 4.2.2 波長変換ファイバー

波長変換ファイバーは、外部からの特定の波長を吸収し、波長変換材により長い波長の光を再発光するプラスチックファイバーである。シンチレーション光を吸収し、波長を変換し再発光することで、光読み出し装置に光を導く。図 4.4 に波長変換ファイバーの原理についての概念的な図を示す。なお、使用したファイバーの直径は 1.5mm である。

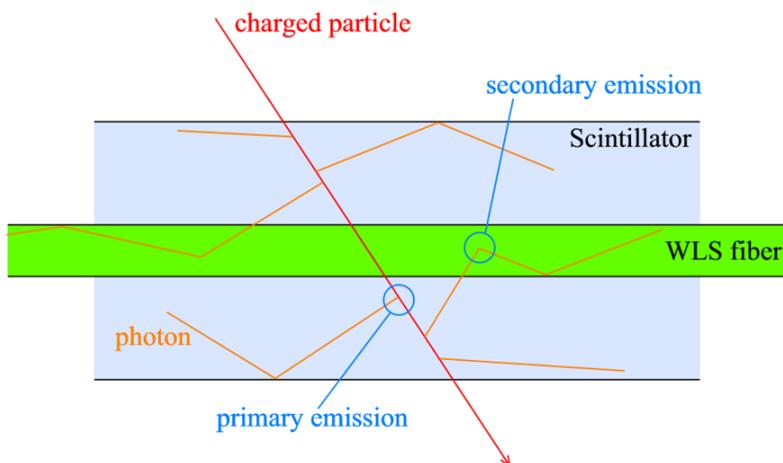


図 4.4 波長変換ファイバー [7]

一般的な光ファイバーでは、側面からの光がファイバー内の全反射条件を満たさないために、ファイバー内に捕獲してファイバー内を伝達させることはできない。しかし、波長変換ファイバーではファイバー内で再発光した光で全反射条件を満たすものであれば、ファイバー内を伝達できるという違いがある。ミューオンが通過することで発生するシンチレーション光は、シンチレータの減衰長が短いためシンチレータ内部ですぐに減衰してしまう。波長変換ファイバーの減衰長は、

シンチレータの大きさ（約 75cm）に比べて長い（3.5m 以上）ためシンチレーション光を波長変換ファイバーで受け取ることで減衰を防ぐ。そして、ファイバー内を通った光を MPPC で受け取る。

表 4.2 には波長変換ファイバーの特性を、図 4.5 では波長変換ファイバー Y-11(200)MS の吸収・発光スペクトルを示した。図 4.5 から、短い波長の光を長い波長の光に変換していることが分かる。

表 4.2 使用した波長変換ファイバーの特性 [7]

型番	発光色	発光ピーク	吸収ピーク	減衰長
Y-11(200)MS	緑	476nm	430nm	3.5m 以上

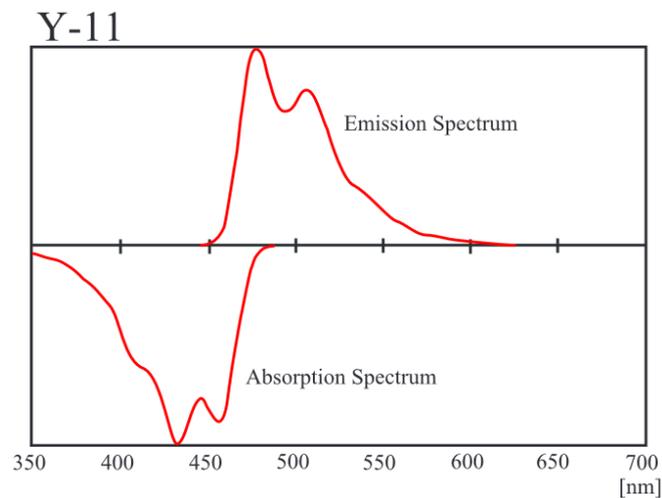


図 4.5 波長変換ファイバー Y-11(200)MS の吸収・発光スペクトル [7]

### 4.2.3 MPPC

MPPC (Multi Pixel Photon Counter) は受光面に APD (Avalanche Photo Diode) を多数配列させた光子計測デバイスである。APD は P 型半導体と N 型半導体を接合 (PN 接合) したフォトダイオードである。フォトダイオードにバンドギャップ以上のエネルギーを持つ光が入射すると、その光エネルギーにより電子-正孔対を生じる。PN 接合に逆電圧を印加すると、キャリア密度の低い空乏層内で生じた電子-正孔対のうち電子を  $N^+$  側、正孔を  $P^-$  側に、それぞれ電場によってドリフトする。大きなエネルギーを持った電子が結晶格子に衝突、イオン化し、イオン化が連鎖的に発生する。これがアバランシェ増幅である (図 4.6)。

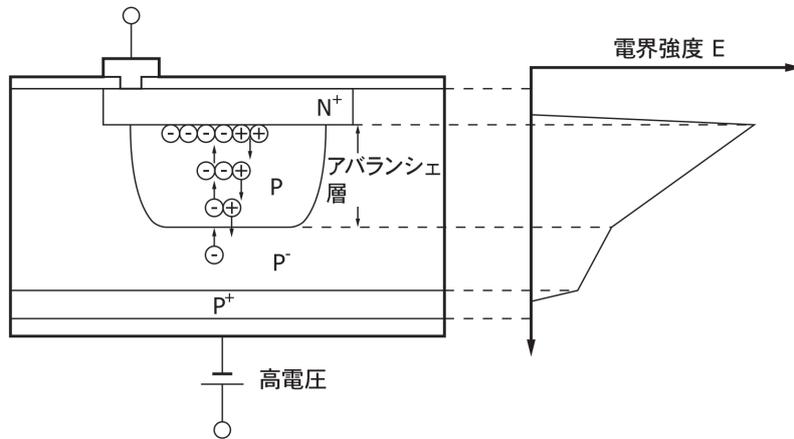


図 4.6 APD の内部構造 [5]

APD の増倍率はイオン化率によって決まり、イオン化率は空乏層にかかる電界強度に依存する。PN 接合に逆電圧を印加していくと、空乏層内の電界が上がりアバランシェ増幅を起こして、ある電圧で急激に逆電流が増加する現象が起こる。この時の電圧を降伏電圧（ブレイクダウン電圧）という。降伏電圧を超えた逆電圧で APD を動作させることをガイガーモードという。APD を降伏電圧付近で使用すると、出力光電流が入射光量に比例しない現象が現れることから、ガイガーモードで APD を動作させることによりシングルフォトンの検出が可能になる。浜松ホトニクス社製 Si APD S12023-05 の増倍率と逆電圧の関係を図 4.7 に示す。

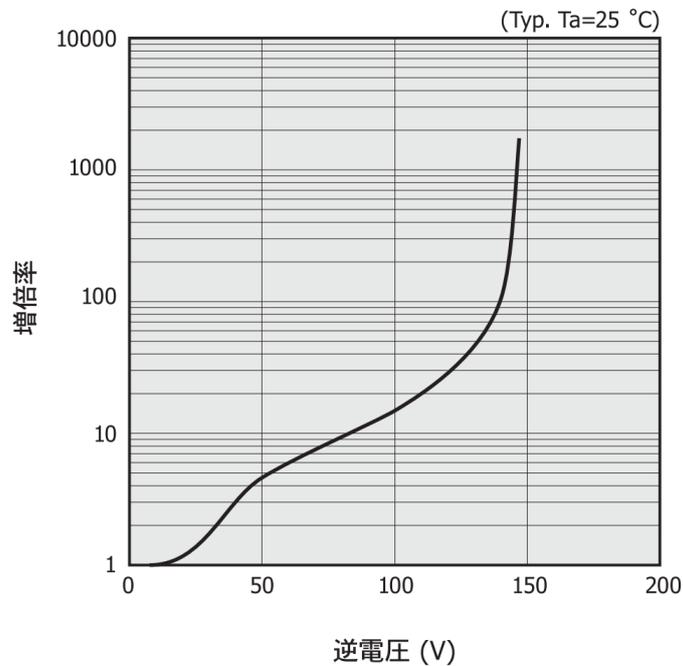


図 4.7 APD 増倍率の印加電圧依存 [5]

APD の増倍率には、温度特性がある。温度が上がると、結晶の格子振動が激しくなり、加速されたキャリアのエネルギーが十分に大きくならないうちに結晶と衝突する確率が大きくなり、イオン化が起こりにくくなる。このため、温度が上昇すると増倍率が小さくなる。一定の出力を得るには、温度により逆電圧を変化させるか、素子の温度を一定に保たなければならない。

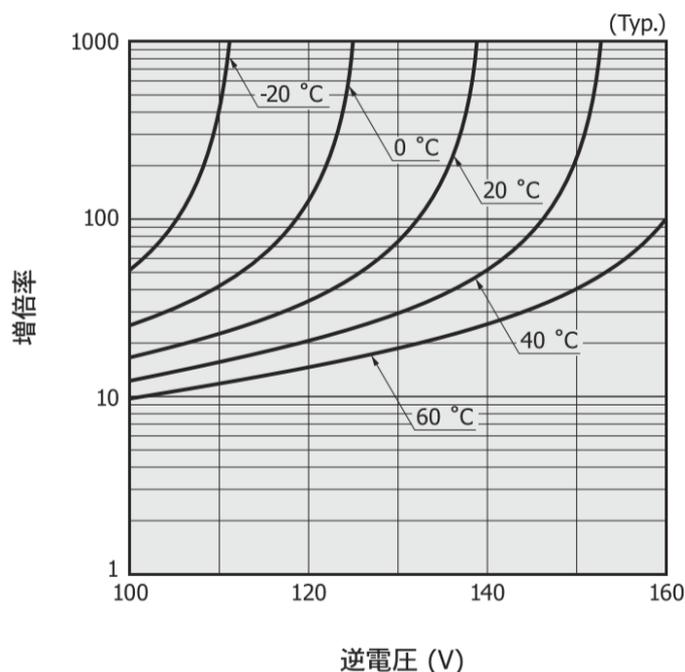


図 4.8 増倍率の温度依存性 [5]

MPPC は APD をガイガーモードで動作させる。並列接続で配列した APD のうち、光子を検出した APD それぞれから一定の出力電流を得るため、MPPC は光子を検出した APD 数に応じた電流を出力し、その出力電荷測定によって光子計測を行う。1 つの APD の 1 フォトンの検出において、ガイガーモードでの放電（ガイガー放電）は素子内の電場が保たれる間継続する。ガイガー放電を止めて次の光子を検出するためには、APD に動作電圧を下げる外部回路が必要である。今回用いた MPPC では、各 APD にクエンチング抵抗を直列に接続（図 4.9）し、クエンチング抵抗に電流が流れる際の電圧降下によって、動作電圧を低下させ、アバランシェ増幅を短時間で停止させる。

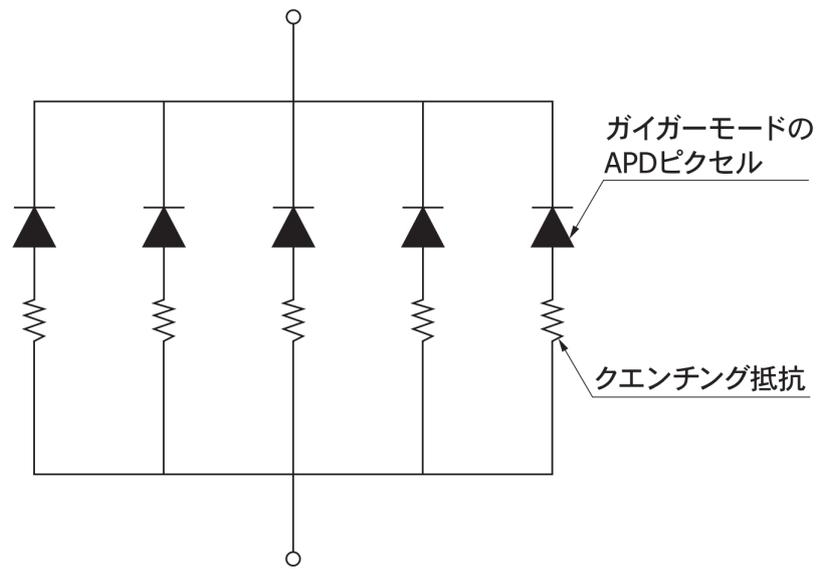


図 4.9 クエンチング抵抗と APD による MPPC の構造 [5]

浜松ホトニクス社のリニアアンプを用いたパルス波形の観測を図 4.10 に示す。ガイガー放電による波形の立ち上がりは鋭く、クエンチング抵抗による立ち下がりはややなだらかになっている。

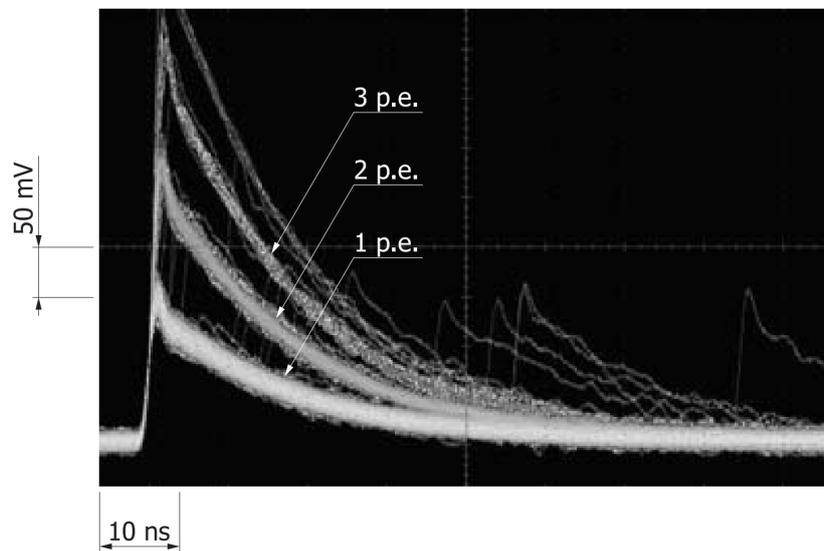


図 4.10 リニアアンプによる MPPC 出力波形 [5]

### 4.3 光読み出し装置

荷電粒子がシンチレータを通過して発するシンチレーション光は、波長変換ファイバーで吸収、再発光させ、ガイガーモード APD を用いた光検出器 MPPC に導く。MPPC の多チャンネル同時読み出しには、ASIC (Application Specific Integrated Circuit) と FPGA (Field-Programmable Gate Array) を用いた EASIROC モジュールを用いる。

#### 4.3.1 EASIROC モジュール

MPPC の出力電荷の読み出しには、 $\Omega$ -group が開発した ASIC の EASIROC を用いる。EASIROC チップは、MPPC の 32ch 同時駆動、及び読み出しが可能である。EASIROC チップの制御は、XILINX 社提供の FPGA の Artix-7 によって行う。EASIROC チップが測定した出力電荷を ADC でデジタルに変換し、MPPC が検出した光子数を評価する。

EASIROC チップの回路図を、図 4.11 に示す。Pre-Amp で High-Gain、Low-Gain にそれぞれ増幅される。High-Gain 側の Fast-Shaper (立ち上がり時間 25ns) を通った信号は EASIROC 内の Discriminator に通し、Trigger 信号として用いる。Slow-Shaper の出力電圧はキャパシタに保持されている。Hold 信号によって Slow-Shaper とキャパシタ間の回路を切断し読み出す。Low-Gain 側の電圧を ADC でデジタルに変換し、High-Gain 側は EASIROC モジュールのアナログ出力チャンネルに通し、観察に用いる。

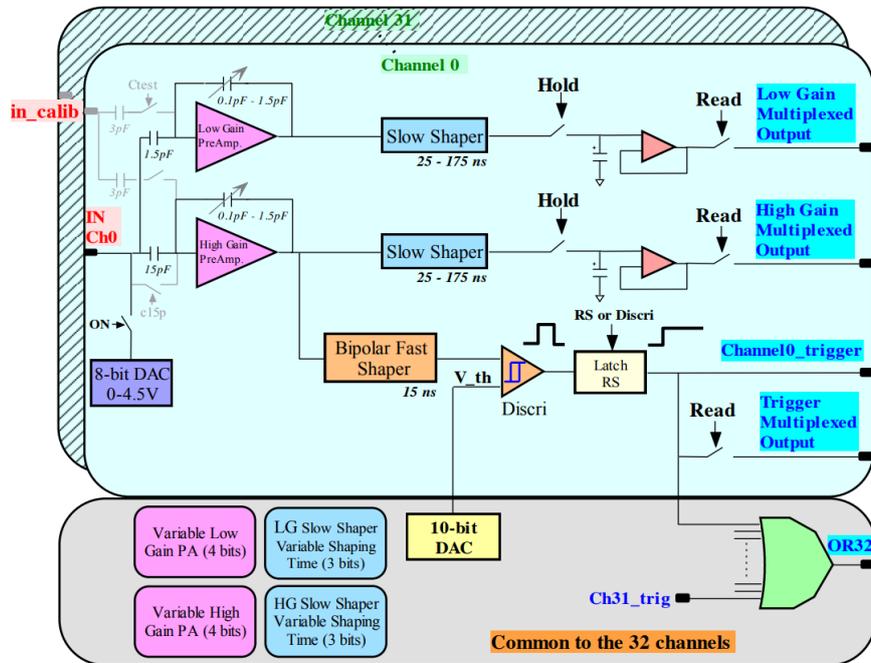


図 4.11 EASIROC 回路図概略 [8]

High-Gain 側の Pre-Amp、Slow-Shaper、Fast-Shaper の出力波形を図 4.12 から図 4.15 に示す。Fast-Shaper の信号が threshold を超えると Trigger 信号が出される。threshold は各チャンネルにかけることができる。Slow-Shaper の立ち上がり時間に合わせて Delay 回路を組み、Trigger 信号を Input hold に入力する (図 4.2)。Slow-Shaper 波形の peak で電圧を Hold し、読み出す。Slow-Shaper の立ち上がり時間は 25ns から 175ns まで 25ns ごとに変更可能である。今回は、Fast-Shaper の立ち上がり時間 25ns (固定) に対して、Slow-Shaper の立ち上がり時間は 100ns を選んだ。Delay 回路は EASIROC モジュールの外に、Delay モジュールと LEMO ケーブルを用い、1ns 単位で調節した。

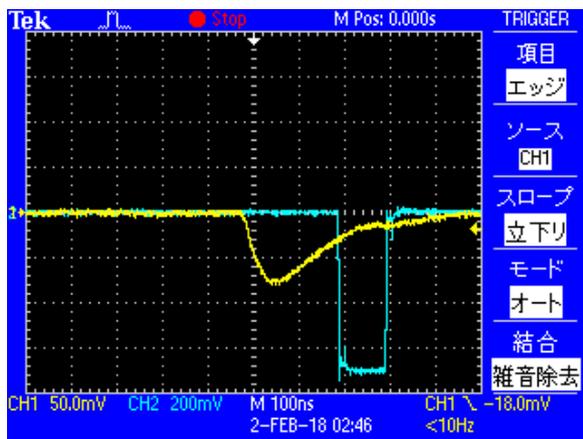


図 4.12 Pre-Amp 出力波形

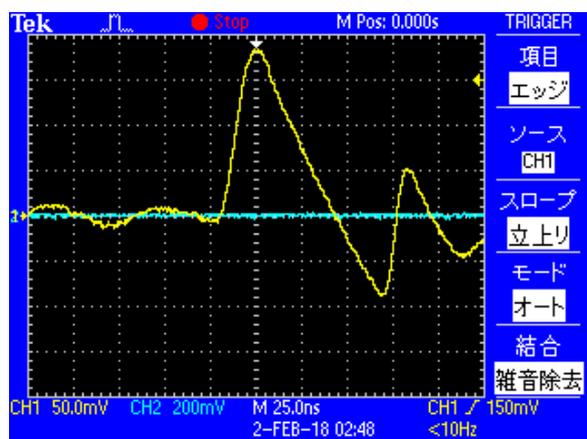


図 4.13 Fast-Shaper 出力波形

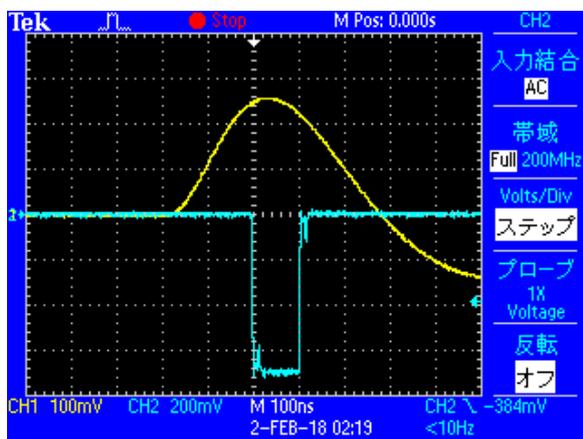


図 4.14 Slow-Shaper 出力

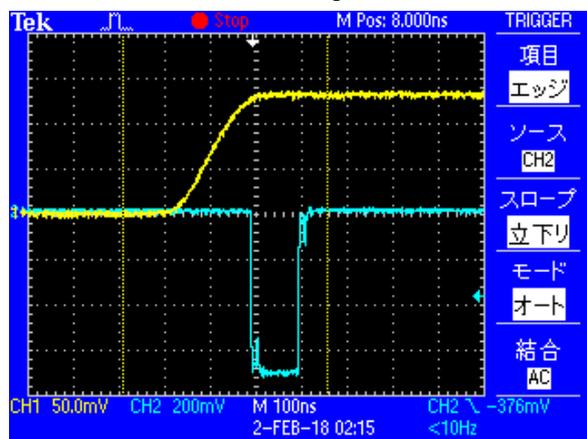


図 4.15 Hold した Slow-Shaper 出力波形

EASIROC モジュールには、EASIROC チップが2つ搭載されており、MPPC の64ch 同時駆動、及び読み出しが可能である。EASIROC の写真を図 4.16 に示す。

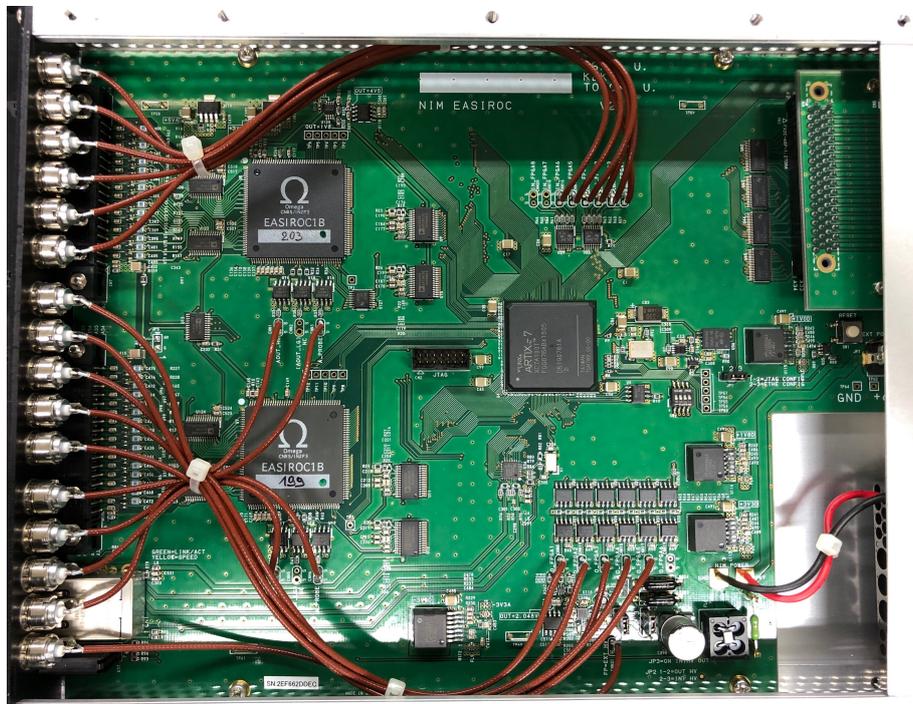


図 4.16 EASIROC の写真。左側にある EASIROC1B と書かれたものが ASIC の EASIROC である。中央右にあるのが FPGA の Artix-7 である。

#### 4.4 ファイバーと MPPC の光学接続

MPPC の受光領域と波長変換ファイバーの光学接続には、GOMI Connector (General Optical MPPC Injection Connector) を用いた。GOMI connector は、図 4.17 にあるように、プラスチック製の2パーツからなるコネクタで、ファイバー端面と MPPC とを密着した形で接続することで、光漏れを防ぎ、光量の損失を小さくしている。

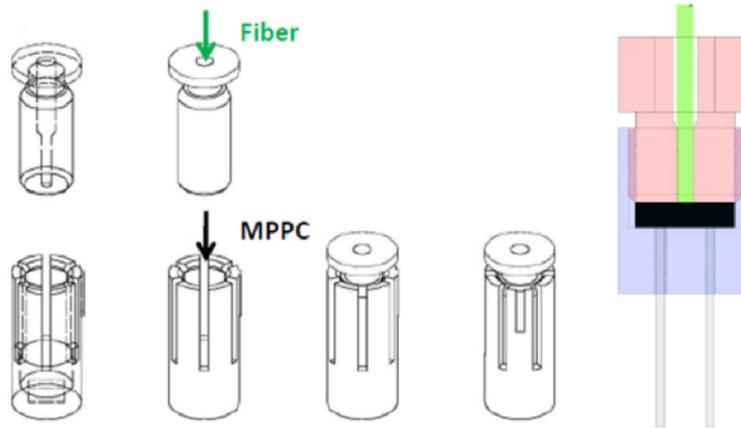


図 4.17 GOMI connector[12]

GOMI Connector の写真を図 4.18 に示す。左が MPPC 側パーツ、右が波長変換ファイバー側パーツである。また、MPPC を実際に挿入して、両パーツを接続した時の写真を図 4.19 に示す。



図 4.18 GOMI Connector 写真。左 : MPPC 側パーツ・右 : 波長変換ファイバー側パーツ。 [11]



図 4.19 GOMI Connector に MPPC が組み込まれ、ファイバー側パーツと接続された状態 [11]。

また、図 4.20 に波長変換ファイバー側パーツの設計図を、図 4.21 に MPPC 側パーツの設計図を、それぞれ示す。

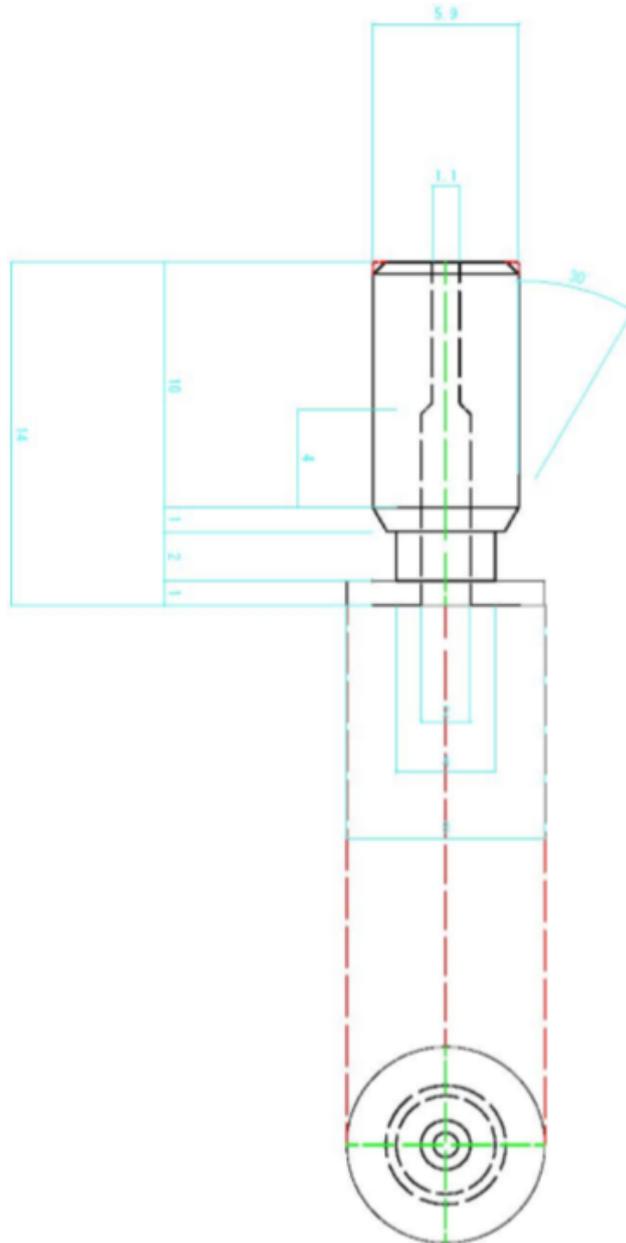


図 4.20 GOMI Connector : 波長変換ファイバー側パーツ [11]

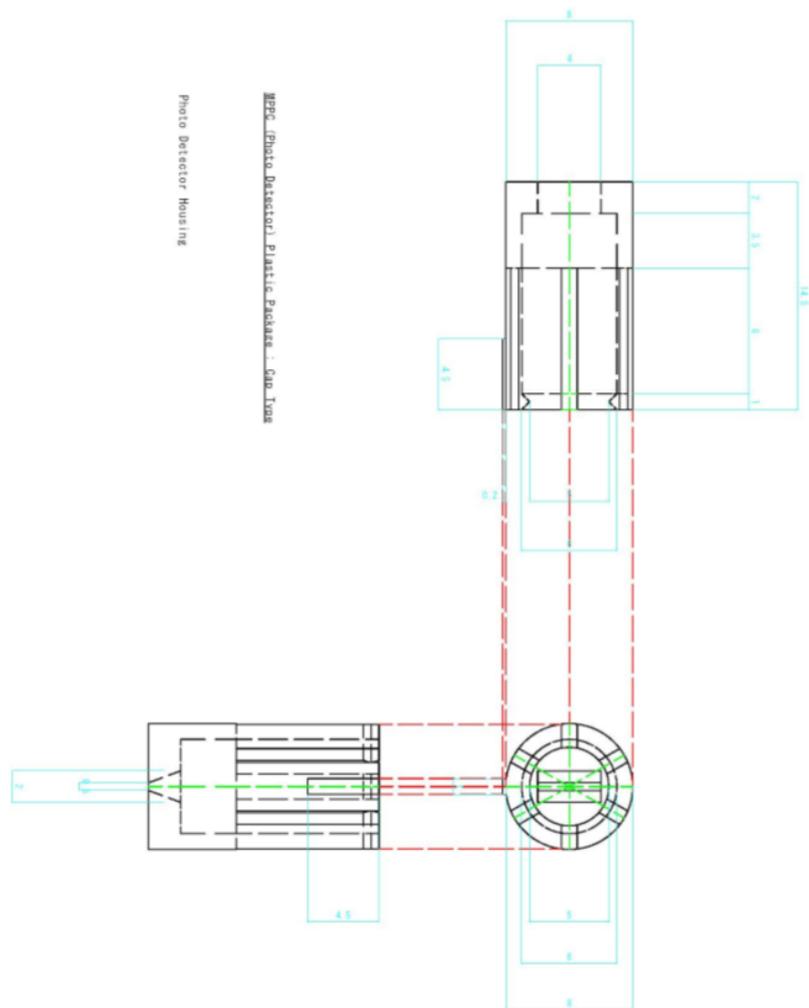


図 4.21 GOMI Connector : MPPC 側パーツ [11]

図 4.20 からわかるように、GOMI connector の波長変換ファイバーを通す穴は、もともと 1.1mm である。しかし、本実験では直径 1.5mm の波長変換ファイバーを用いたため、GOMI connector の穴を 1.5mm に広げた。このことにより、波長変換ファイバーの端面の中心と MPPC の受光領域の中心にずれが生じる可能性がある。目視では中心がずれていないため許容することにした。

## 第 5 章

# 光検出器 MPPC の運用

宇宙線を測定する際に、何 p.e. 以上を宇宙線とみなすかの Threshold を設けることになる。その際に、各チャンネル間で ADC 値とそれに相当する光子数にずれが存在すると、解析の際に検出数にばらつきが生じてしまう。MPPC には、降伏電圧にばらつきがあるため各チャンネルごとに電圧を調整して、ADC 値とそれに相当する光子数を一定にする必要がある。そのために、MPPC の 1p.e. あたりの ADC 値の印加電圧依存を調べ、各 MPPC の個体差を調べる。また、EASIROC の HV 供給の仕組みについても理解する。

### 5.1 EASIROC の HV 供給

EASIROC の HV 供給は一律の電圧を供給したのち、DAC を用いて MPPC にかかる電圧をチャンネルごとに調整する (式 5.1.1)。そこで用いられる InputDAC と呼ばれる DAC は MPPC のアノード側に配置されていて、正の電圧を出力することによりバイアス電源と信号線間の電位差を調整して MPPC のバイアスを調整する (図 5.1)。InputDAC の出力電圧はその設定値が 0 の時に最大で、設定値を上げるごとに  $1\text{bit} = 20\text{mV}$  の傾きに沿って下がっていく (図 5.2)。InputDAC のデジタル入力 (InputDAC On) +8bit で構成されており、9bit 目は DAC の On/Off を担っている。基本的に常に InputDAC は On なので、 $256 + \text{設定したい値} = \text{書き込む数字}$  となる。

$$V_{Bias} = V_s(HV\ supply) - V_i(InputDAC) \quad (5.1.1)$$

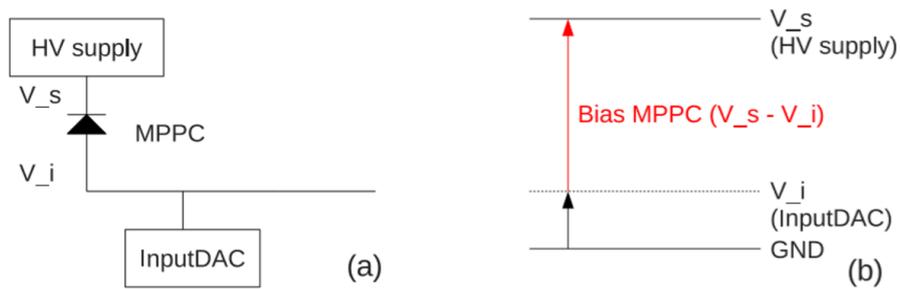


図 5.1 DAC によるバイアス調整機能 [9]

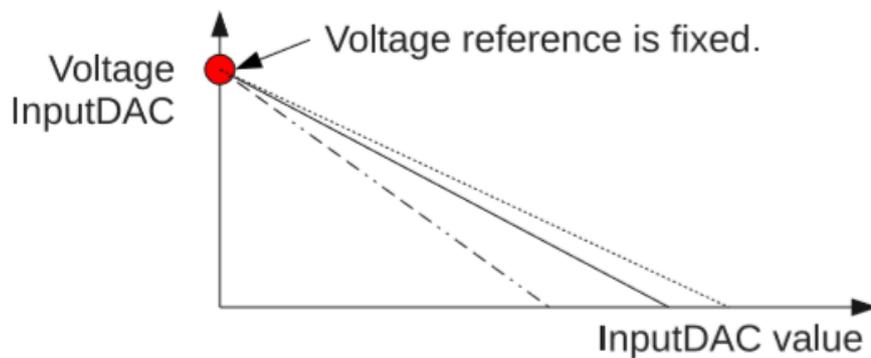


図 5.2 InputDAC の特性 [9]

今回は 2015 年 3 月 5 日に行われた NIM EASIROC module 講習会の中村勇さんのスライド [10] より、InputDAC の出力電圧を式 5.1.2 とする (図 5.3)。 $V_i$  は InputDAC の出力電圧。 $x$  は書き込んだ値である。

$$V_i = -0.0195x + 9.4479 \quad (5.1.2)$$

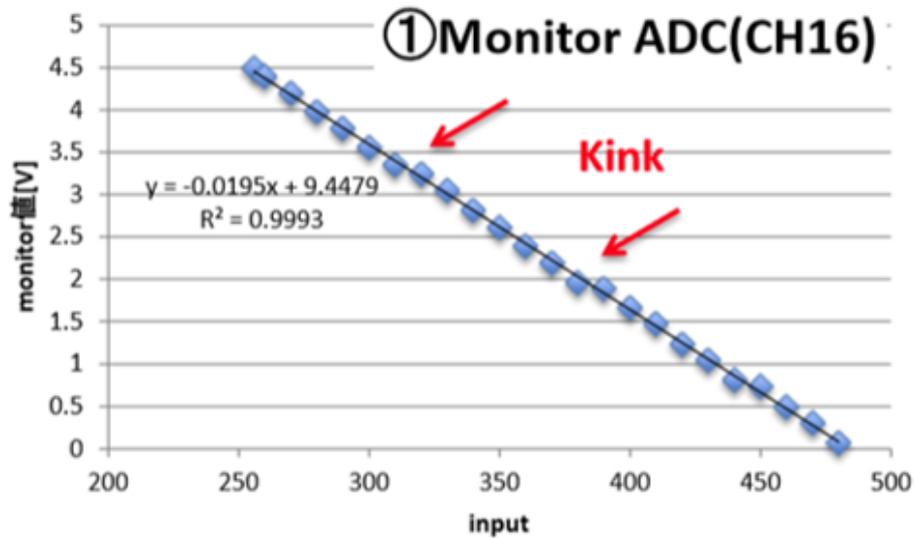


図 5.3 InputDAC の出力電圧と入力値の関係 [10]

## 5.2 InputDAC の特性測定

5.1 節より、MPPC に印加される電圧を調節するには InputDAC が重要であることがわかる。そこで、InputDAC の特性を測定する。

### 5.2.1 測定方法

測定のセットアップを図 5.4 に示す。LED に周期的に Pulse Generator から電圧をかけることで LED を発光させる。それと同時に Pulse Generator はトリガー信号を発する。Pulse Generator のトリガー信号は TTL 信号であるため、Level Adaptor を用いて NIM 信号に変換する。Discriminator で成形し、Delay させて、タイミングを調節してから EASIROC に Hold 信号として入れた。EASIROC には、内部からもトリガー信号を出すことができるが、ここでは、Pulse Generator を用いて外部からのトリガー信号で測定した。

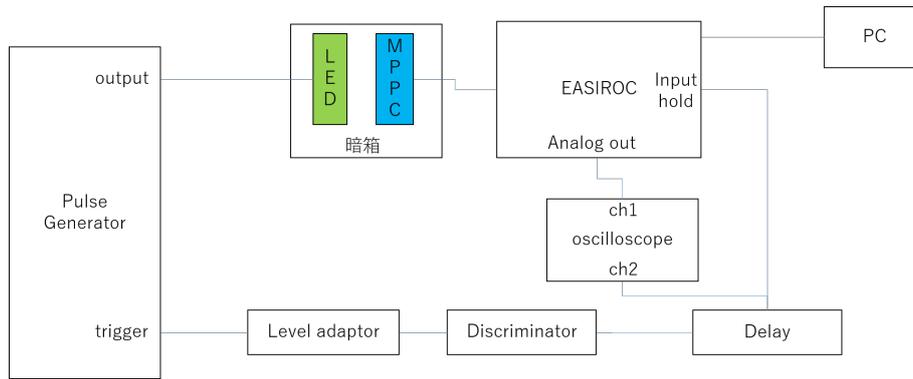


図 5.4 外部トリガーを用いる場合のブロック図

EASIROC の HV は一定にして、InputDAC の値を 510 から 10 間隔で減らしていき、各 p.e. 間の ADC の間隔 (interval) がどのように変化するかを見る。

LED の光を MPPC で測定すると、図 5.5 のようなデータが得られる。各光電子数のピークをガウス関数で Fit し (図 5.6)、その平均値を一次関数で Fit して、キャリブレーションを行う (図 5.7)。その時の傾きが各 p.e. 間の ADC の間隔 (interval) である。

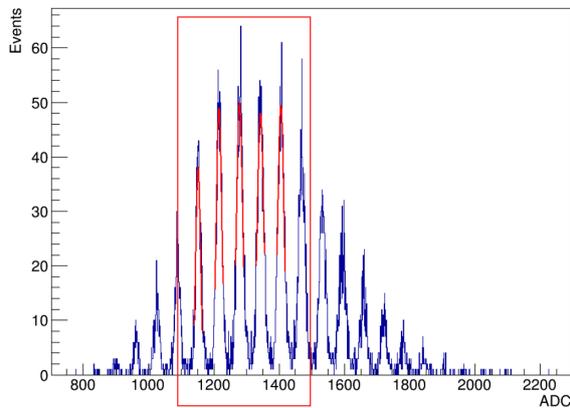


図 5.5 LED の光を MPPC で測定したときのデータ。赤線で囲った部分を拡大したものを図 5.6 に示す。

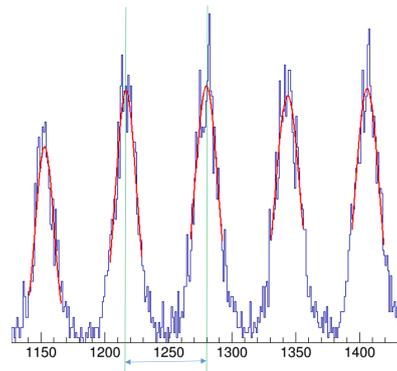


図 5.6 図 5.5 を拡大した図。緑線の間を interval とする。

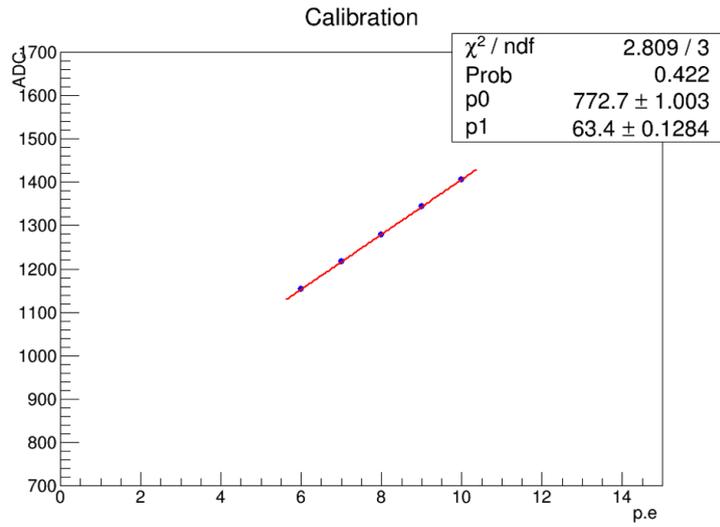


図 5.7 キャリブレーション

## 5.2.2 InputDAC の性質

MPPC の No.1027 を用いて測定した結果を図 5.8 に示す。赤線で囲まれた部分が、線形になっていないことが分かる。式 5.1.2 より、 $x = 485$  で InputDAC の出力電圧が 0 になる。従って、InputDAC の出力電圧が 0 V 付近以下になる値をとってはいけなことが分かる。

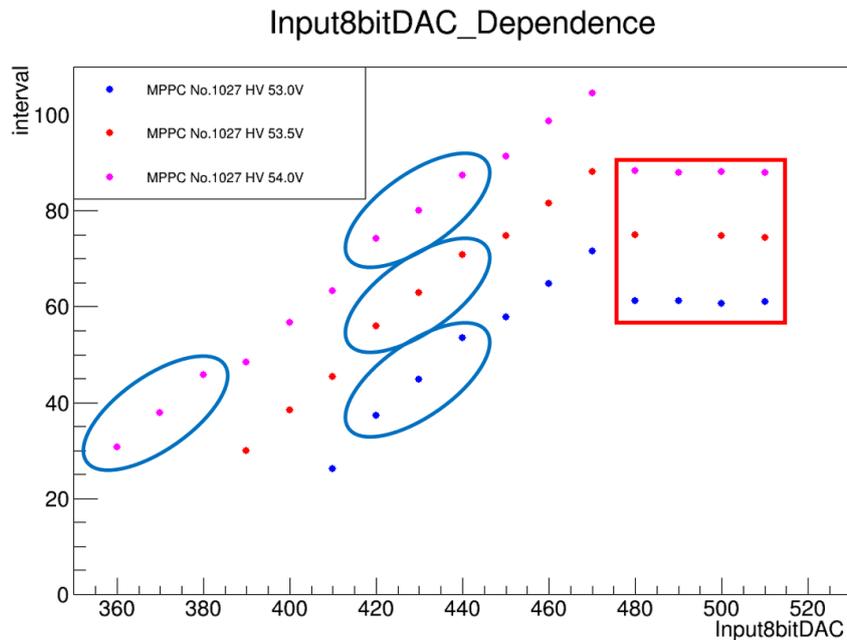


図 5.8 InputDAC と interval の関係。赤線で囲まれた部分が線形になっていない。また、青線で囲まれた部分の interval が他と比較して大きい。

### 5.2.3 InputDAC の bit 特性

図 5.8 の青線で囲った部分が、他のデータ点から予測される値と比べて interval が大きい。  
表 5.1 に測定した InputDAC の値の 2 進数表記を示す。

表 5.1 2 進数表記

10 進数表記	2 進数表記
360	101101000
370	101110010
380	101111100
390	110000110
400	110010000
410	110011010
420	110100100
430	110101110
440	110111000
450	111000010
460	111001100

図 5.8 の青線で囲った部分のデータ点はすべて 6bit 目の DAC が使われている。このことから、このチャンネルでは 6bit 目の DAC が 1bit 目の DAC の 32 倍になっていないことが分かる。このような DAC の性質のばらつきはチャンネルごとに異なっているが、許容することにした。

## 5.3 MPPC の性能測定

5.2.1 節と同様のセットアップと解析手法で測定を行う。

InputDAC の値を 450 に固定し、EASIROC の HV を変化させて降伏電圧を求める。本来、降伏電圧は APD がガイガーモードになる電圧のことを言うが、慣例として各 p.e. 間の ADC の間隔 (interval) が 0 になる電圧を降伏電圧ということにする。式 5.1.1 と式 5.1.2 を用いて MPPC に印加される電圧を求め、interval との関係から降伏電圧を求める (図 5.9)。

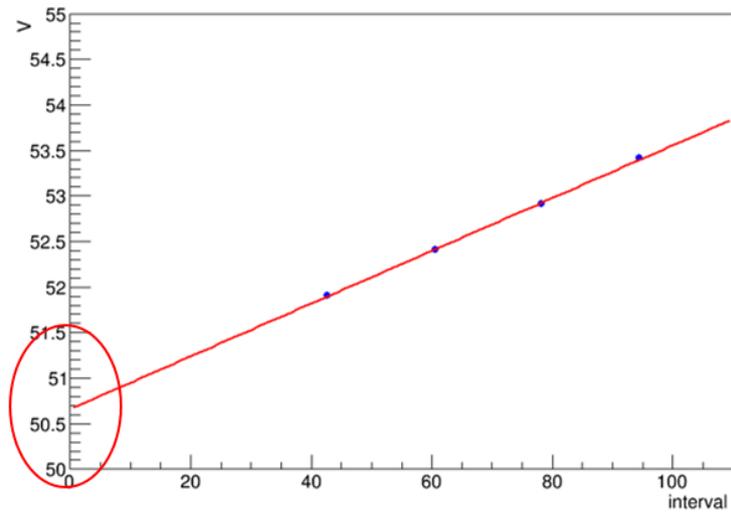


図 5.9 interval と MPPC に印加されている電圧の関係。切片を降伏電圧とする。

### 5.3.1 MPPC の降伏電圧

測定した MPPC の降伏電圧を図 5.10 に示す。

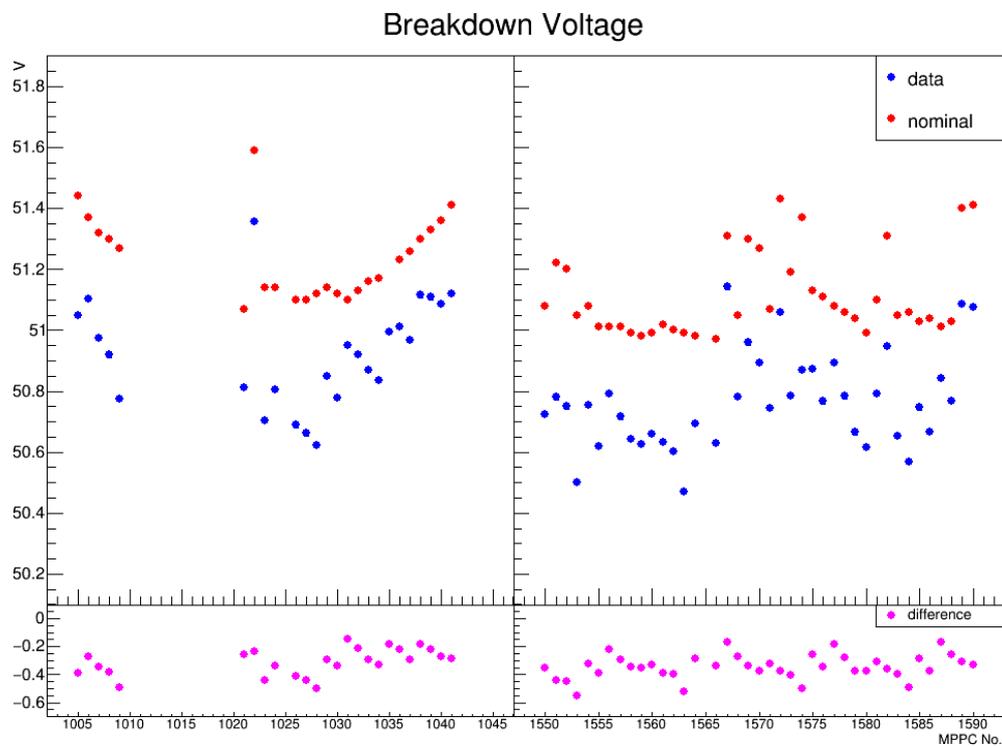


図 5.10 MPPC の降伏電圧。青は測定したデータ、赤は規格値である。下はその誤差である。

全体的に規格値より 0.2V-0.6V 低く出ている。この原因は、浜松ホトニクス の降伏電圧の定義が違 うためであると考えらる。浜松ホトニクスでは、PN 接合に逆電圧を印加していったときにあ る電圧で急激に逆電流が増加し、その逆電流が  $100\mu A$  となる電圧を降伏電圧としている。またほ かの原因として、印加電圧が降伏電圧からわずかに高いときに、interval が線形であるかわからな いこと (図 5.11)、降伏電圧には温度依存性があることがあげられる。

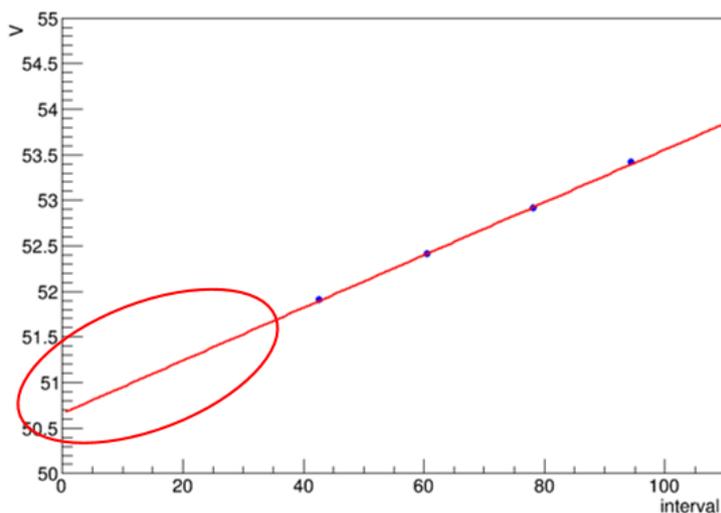


図 5.11 分解能の関係からこの付近の電圧における interval は測定することができない。

### 5.3.2 interval の電圧依存性 (GAIN)

MPPC の印加電圧を 1V あげると interval がどのくらい増加するかを調べる。測定した結果を 図 5.12 に示す。

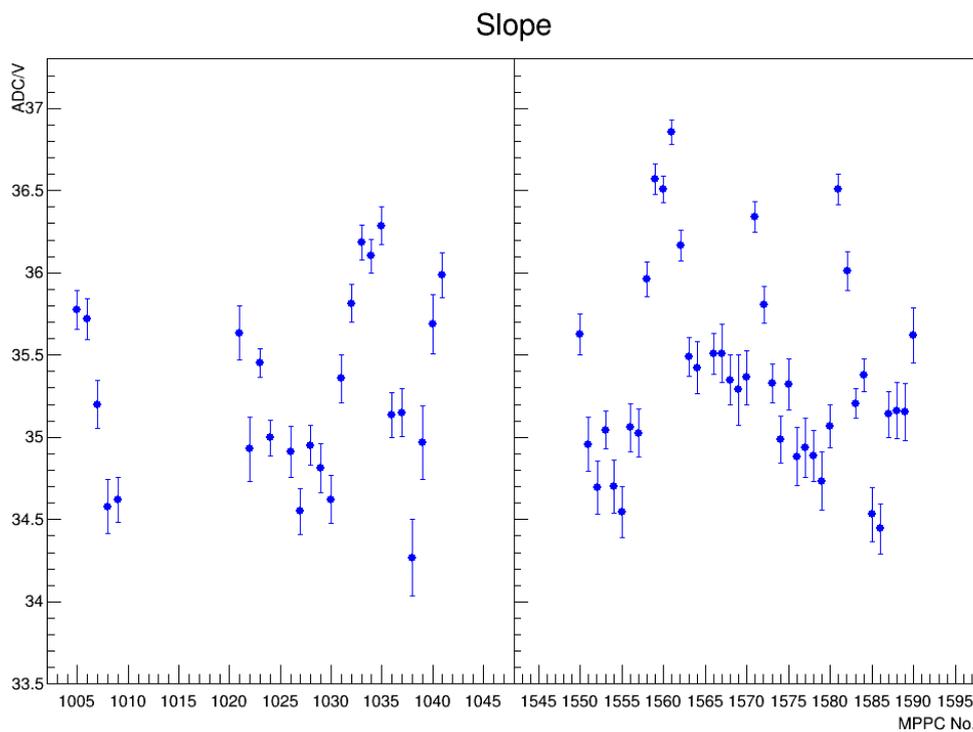


図 5.12 MPPC の interval

どの MPPC も  $35.5 \pm 1.5$  (5% 以内) の範囲に収まっていて、個体差はあまり見られない。本実験では、以上の結果を用いて interval がすべて 40 になるよう概算した値を設定した後に、inputDAC の bit 特性を考慮して微調整を行った。

## 第 6 章

# 実験装置の均一性評価

本実験ではミューオンの数の分布から、物質の質量分布を推測できる装置を作成した。縦、横方向に 16 本のシンチレータを並べたものを 2 層作ることで、三次元方向の到来方向が測定できる。もし実験装置が不均一であると、イベント数にばらつきが出て物質の質量分布がゆがむ。そのためこの章では、実験装置の位置測定における均一性について調べた。

### 6.1 ミラースプレーの効果

シンチレータに荷電粒子が通過したという情報は、荷電粒子が通過した際にシンチレータが発するシンチレーション光を波長変換ファイバーで再発光させ、全反射によって MPPC まで伝達させることで信号として得ることができる。波長変換ファイバーで再発光させた光は、一次元方向に長く伸びるファイバーの両方向に伝達する。一方で MPPC を片側のファイバー端面にのみ設置しているため、もう片方のファイバー端面に何も処置を施さない場合、MPPC の検出光電子数がその分低下すると考えられる。そのため、検出光電子数の増加の目的で MPPC を設置していない方のファイバー端面にミラースプレーを塗装し、その面の光子の反射率を上げることで平均光電子数を増加させることが可能かを調べた。塗装前後で検出する平均光電子数を比較する。ミラースプレーとして『NIS ガルバーコートスプレー GA001』を用いた。

#### 6.1.1 実験方法

ミラースプレー無塗装のときと塗装後の 2 通りで、検出光電子数の、荷電粒子の通過位置依存性がどのように変化するかを比較する。MPPC を設置している基盤に近い側のシンチレータの端を原点にとり、もう一方のシンチレータ端に向かう方向を正とした  $x$  軸を決める。 $x = 0, 31.5, 63$  cm のそれぞれを通過した荷電粒子による検出光電子数の位置依存性を測定した。



図 6.1 ミラースプレー

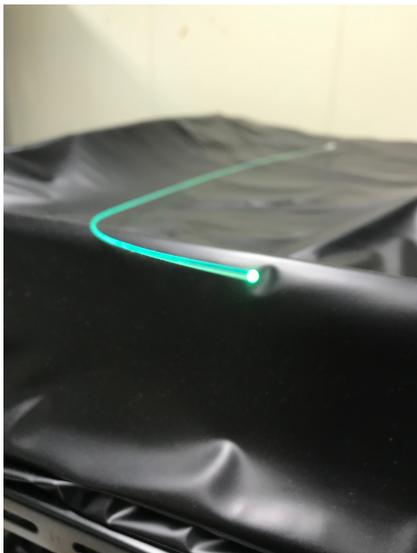


図 6.2 波長変換ファイバーのミラースプレー塗装前



図 6.3 ミラースプレー塗装後

## 6.1.2 装置のセットアップ

ミューオンの測定用シンチレータ上での通過位置を限定し、その領域から伝達する光子の数を測定するために、トリガー用のシンチレータを用い、シンチレーション光は光電子増倍管 (PMT) で増幅、電気信号に変換した。(図 6.4)。これらを1つにまとめて用いており別々に用いることはないため、以降では便宜上「トリガー用シンチレータ」と呼称する。



図 6.4 トリガー用に用いるシンチレータ (四角形の部分) と PMT(円筒形の部分)。

トリガー用シンチレータの受光面は一辺 12 cm の正方形であり、これを測定用シンチレータの垂直 1 cm 真上に  $x$  方向任意の位置にて設置する。これにより、トリガー用シンチレータがカバーする領域 ( $12 \times 4 \text{ cm}^2$ ) を通過したミューオンによる検出光電子数を測定することができる。PMT には 1300V の電圧を印加し、トリガー用シンチレータに 0.05V 以上の信号が入力した際にトリガーがかかるようにした。

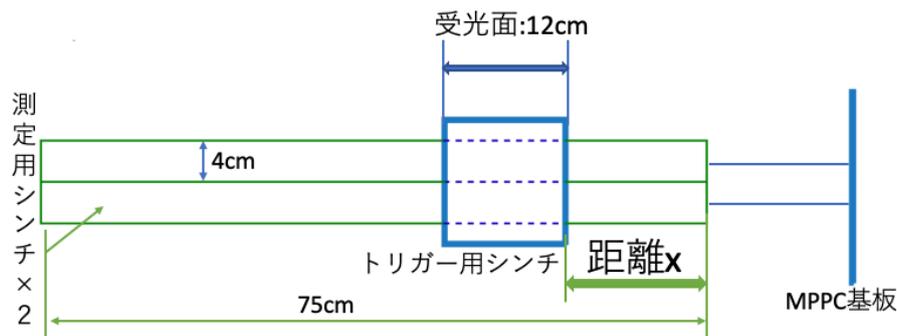


図 6.5 シンチレータ周りのセットアップ

図 6.5 のように測定用のシンチレータを2つ並べているが、実際に解析に用いたチャンネルは図 6.5 の下側のみである。このシンチレータにミラースプレー塗装前の波長変換ファイバーを挿入し測定した後、塗装後の波長変換ファイバーに入れ替えて測定を行なった。1つしか用いなかった理由は、以下の2つである。

1. シンチレータや MPPC、Gomi コネクタを塗装前後で同じ条件にするため
2. 既存の装置を用いておこなった実験であり、既存の形として測定用シンチレータを2つ並べることでこれらが固定される仕組みになっていた

以上のセットアップで、塗装前後の  $x = 0, 31.5, 63\text{cm}$  の三点における検出光電子数を測定した。

### 6.1.3 実験結果と考察

横軸を光電子数、縦軸をイベント数として、結果を図 6.6 に示す。それぞれ左の図から順に  $x = 0, 31.5, 63\text{cm}$  の位置にトリガー用シンチレータを設置した。青色の分布が波長変換ファイバーにミラーペーストを塗装しなかった場合であり、赤色が塗装した場合である。

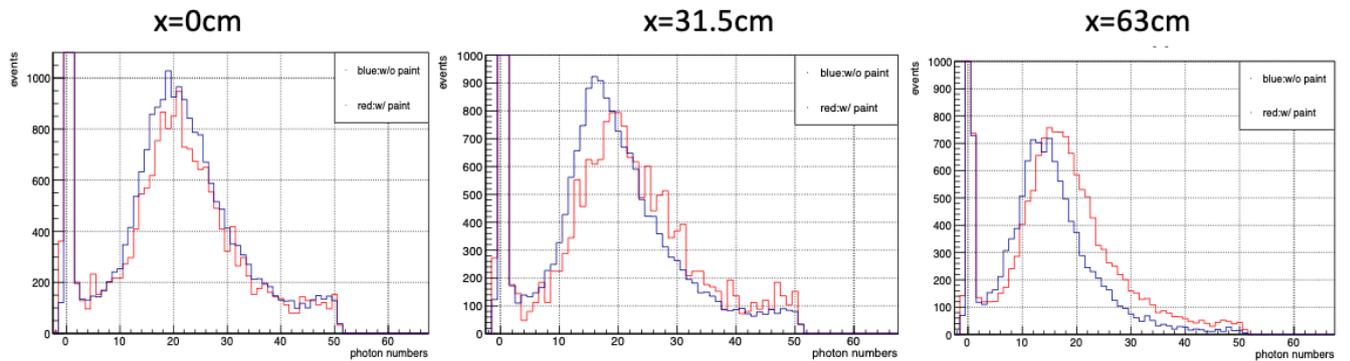


図 6.6 検出光電子数の位置依存性とミラーペーストの有無。青色の分布がミラーペーストをしなかった場合、赤色が塗装した場合。

各分布をペDESTAL付近ではないピークをガウス分布で fit し、平均光電子数を求めた。結果を図 6.7 に示す。

ガウス分布で fit した結果、平均光電子数と、ミラーペーストの有無による平均光電子数の差  $|\Delta N|$  は表 6.1 のようになった。結果として、 $x$  の全体的にミラーペーストを塗装した場合の方が

表 6.1 各条件での平均光電子数

$x(\text{cm})$	ペーストあり	ペーストなし	$ \Delta N $
0	20.78	20.10	0.7
31.5	20.19	17.13	3.1
63	16.41	13.95	2.5

検出光電子数が多いことが分かる。ミラーペーストを塗装した場合の平均光電子数は、無塗装の場合と比較して  $x = 0\text{cm}$  のとき 3%、他は 15% の増加が確認できる。しかし、実験に用いた無塗装と塗料後の波長変換ファイバーは同一のものではないため、ファイバーに存在する傷からの光漏れ

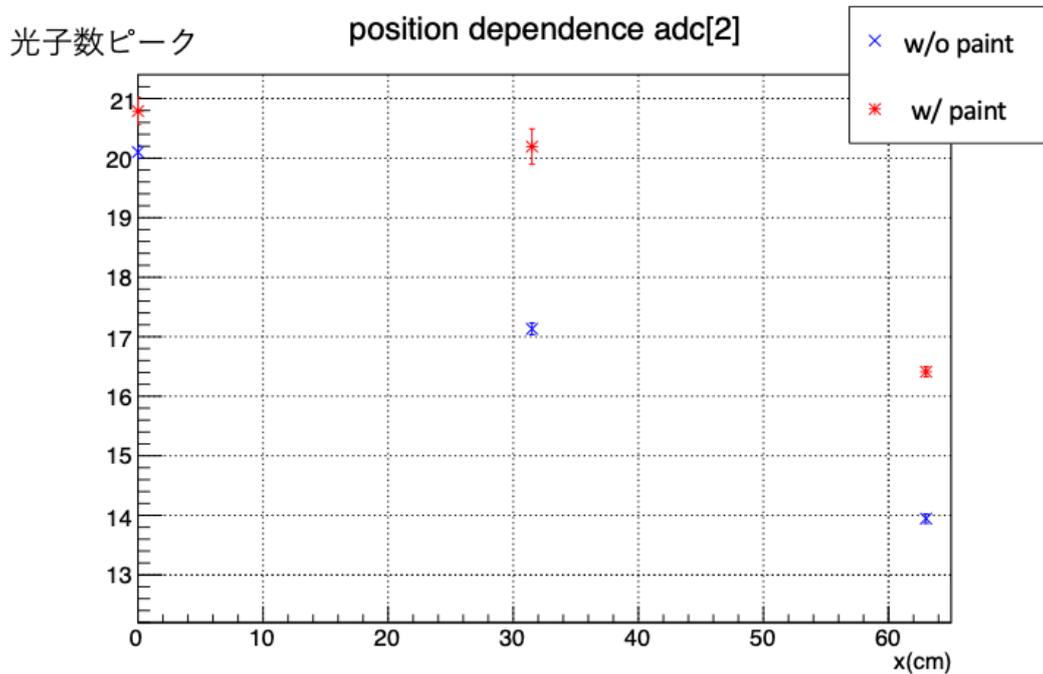


図 6.7 平均光電子数の位置依存性。赤色の点が塗装ありの場合で、青色が塗装無しの場合。

の量の違いや、端面の研磨の個体差などを考慮しなければならない。よって、正確にどの程度の光電子数の増加が期待できるかを論じることができない。しかし、 $x$  の 3 点でミラースプレーを塗装した場合の方が光電子数が増加していることから、端面に塗装を施すことは光電子数の増加に貢献していると考えられる。

## 6.2 Threshold の決定

MPPC の出力には、入射光子による信号ではないノイズが含まれる。ガイガーモードでは、ノイズのほとんどは熱的に発生したキャリアによる APD の熱雑音であり、各 APD からの熱雑音はその時の増幅率に従って 1p.e. 分の出力電流になる。ゆえに、ペDESTAL 付近の MPPC 出力の値はそれらのノイズの寄与が支配的になっている。一方で宇宙線の光電子数分布はペDESTAL 付近から光電子数 30 以上まで幅広く分布しているため、高検出効率を維持しつつノイズと宇宙線による信号が混在する領域をカットし、宇宙線のみを測定するための Threshold を決定する必要がある。

### 6.2.1 測定方法

図 6.8 に示すように、宇宙線の検出光電子数分布のうち、ある光電子数  $i$  以上のイベント数  $N_{\geq i}$  が全体のイベント数  $N_{total}$  に占める割合を求める。この割合のことを宇宙線の検出効率  $\varepsilon_i$  と定義

する。

$$\varepsilon_i = \frac{N_{\geq i}}{N_{total}}$$

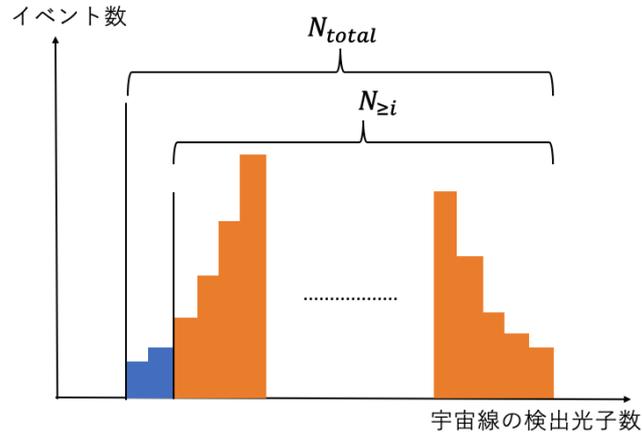


図 6.8 赤で示されたストリップが Masked チャンネル、Ch. がチャンネル番号。

$\varepsilon_i$  が高く、かつノイズをほぼ全て除去できるような光電子数の値  $i$  を求める。そのためにノイズを除去し、宇宙線のみによる検出光電子数分布を得る必要がある。ここでは、その分布を得るための装置のセッティングについて説明する。

図 6.10 のようにシンチレータを 2 行 3 列に並べ、それぞれを同図のように格子内の文字で区別する。

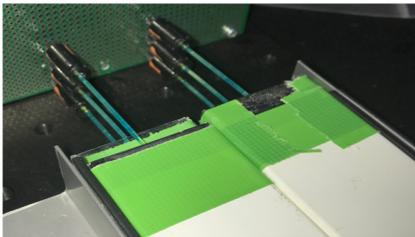


図 6.9 測定に用いる GOMI コネクタと波長変換ファイバーの接続部分。写真奥に見えるのは GOMI コネクタを設置し、68pin ケーブルと接続するための基板。

UL	UR
ML	MR
LL	LR

図 6.10 基板に向かってみたときのシンチレータの配置。各格子に表されている文字でシンチレータを区別する。

EASIROC のトリガー条件として層ごとに論理和をとり、その後一番上の層と一番下の層の論理積をとる (図 6.11)。中央の層には何も課さない。このことより、蓄積する測定データは全て一番上の層と一番下の層から同時に信号が来ているイベントのみとなるため、中央のチャンネルから得られる光電子数分布に占めるノイズによる寄与を減らすことができる。次にイベントカットとして、上の層と下の層からの信号が光電子数 10 以上の際のみ、中央のチャンネルから得られるイベ

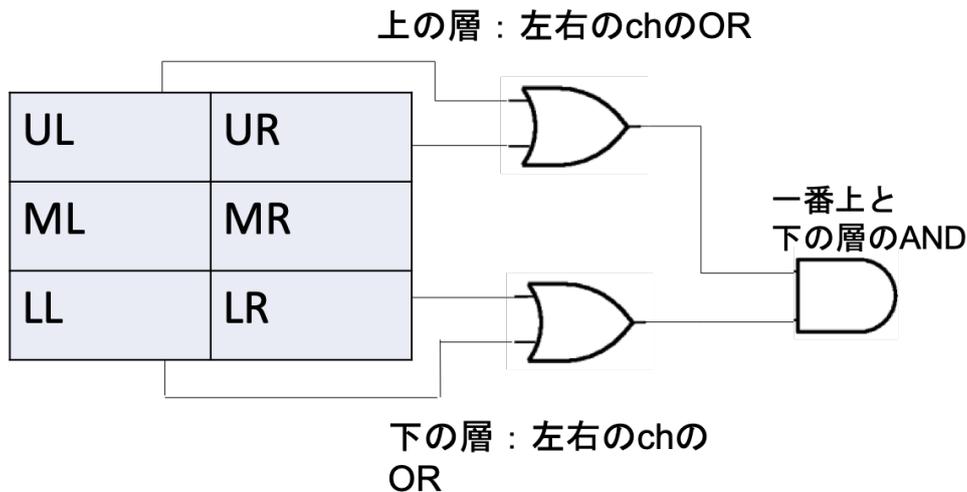


図 6.11 EASIROC のトリガー条件

ントを光電子数分布のヒストグラムに用いる。以上の過程で作成した検出光電子数の分布 (図 6.12 右) を、すべて宇宙線のイベントによるものであると仮定し、検出効率  $\epsilon_i$  を求める。

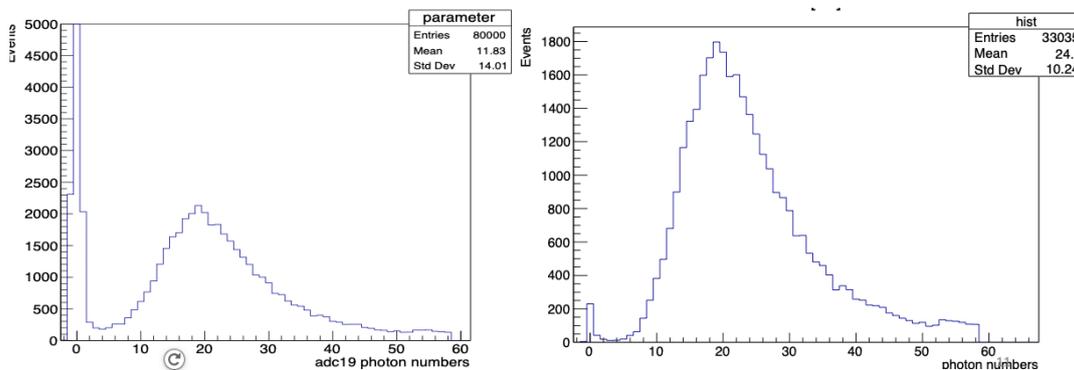


図 6.12 横軸が検出光電子数、縦軸がイベント数。ML チャンネルで測定したイベントを元に作成した。左の図がイベントカット前のヒストグラムであり、ペDESTAL付近にイベント数が多い、ノイズによる寄与が多い。一方で右図がイベントカット後であり、ペDESTAL付近のイベントが少なくなっている。

### 6.2.2 測定の結果と考察

検出効率  $\epsilon_i$  を、光電子数  $i$  を 0 から最大値まで変化させてそれぞれ求めた。その結果が図 6.13 である。青色のヒストグラムは ML チャンネルから得た測定データを用い、赤色のものは MR チャンネルから得たものである。これらそれぞれの分布における立ち下がりを示す光電子数と、その点での  $\epsilon_i$  の値を表 6.2 に示す。

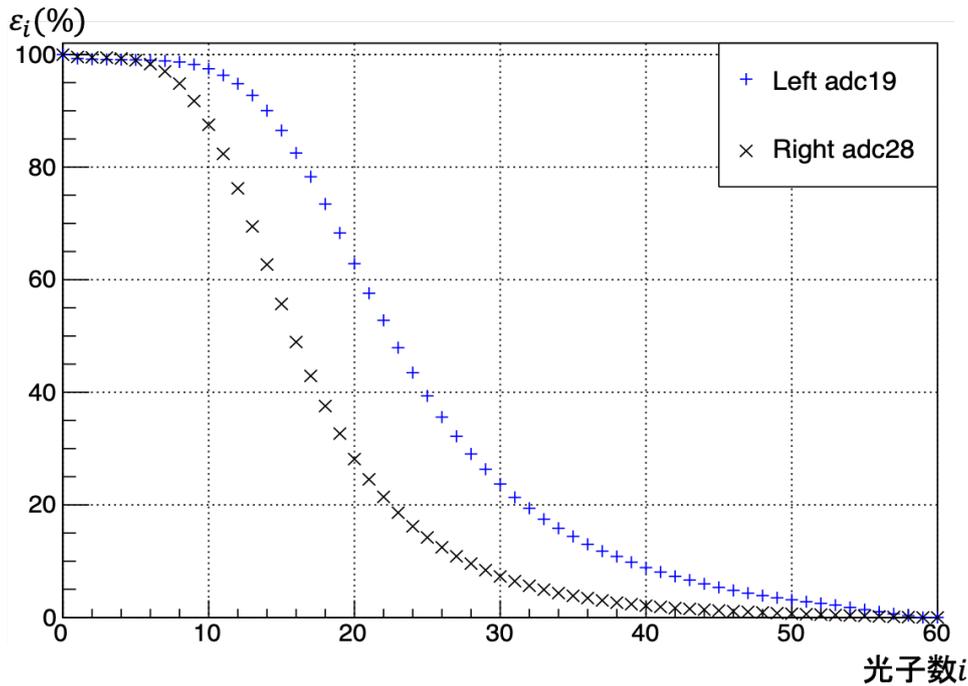


図 6.13  $\varepsilon_i$  の光電子数  $i$  を変化させた際のヒストグラム。横軸が  $i$ 、縦軸が  $\varepsilon_i(\%)$ 。

表 6.2 立ち下がりを示す光電子数とその点での  $\varepsilon_i$  の値

チャンネル	ML	MR
$i$	8.5	6.5
$\varepsilon_i(\%)$	98.2	97.0

これらの測定値から、宇宙線の測定の際に光電子数 7 以上で Threshold を設定すると、検出効率が大きく低下するチャンネルが存在していることがわかる。また、ノイズは光電子数が 2.5 未満までに多く分布することから、検出効率を高いままに維持するためには Threshold として決定する光電子数は 6.5 未満にし、ノイズをカットするためにはその光電子数を 2.5 以上にしなければならない。また、本実験で検出効率をもとめたチャンネルは 2 つだけであり、光電子数 6.5 以上で検出効率が大きく低下した MR チャンネルの平均光電子数\*1は 14 であった。そのため、それよりも小さい平均光電子数の値をもつチャンネルが存在した場合、より小さい光電子数から検出効率が大きく減少し始める可能性がある。よって Threshold として光電子数 4.5 以上に相当する信号を宇宙線によるものと決定する。次節にて、検出器に用いられている 64 チャンネル全ての宇宙線の平均光電子数を求め、十分な検出効率が得られているかを確認する。さらにチャンネル毎に光量差がある原因について調べた後、その光量のばらつきを補正する方法について説明する。

\*1 詳しくは次節にて説明する

## 6.3 各チャンネルの平均光電子数

### 6.3.1 平均光電子数が重要な理由

安定して高効率の宇宙線検出を行うためには、宇宙線通過時における MPPC 受光面への入射光量を確保する必要がある。MPPC の出力から得られる ADC 分布を図 6.14 に示す。MPPC に熱雑音も入射光子もないときのペDESTAL ADC 値は約 830 である。この測定の際には、このチャンネルを threshold の値が約 1000 でトリガーをかけた時の信号、およびほかのチャンネルがヒットしたためにほぼペDESTALの値となっている信号、あるいはノイズとなっているものが測定された時の信号が混ざっている。ペDESTAL付近のイベントは、主にほかのチャンネルでトリガーした時の ADC 値である。それぞれのピークをガウス分布で Fit し、その平均値を光電子数に対応させる。5 つ以上のピークの平均値を 1 次関数で Fit し、ADC 値から光電子数へ変換する。変換して得られた光電子数分布を図 6.15 に示す。ペDESTAL付近ではないピークをガウス分布で Fit し、得られた平均値をそのチャンネルの平均光電子数とする。

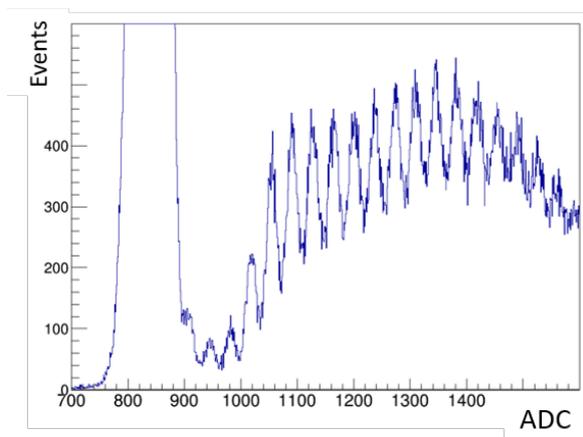


図 6.14 MPPC から得られる ADC 分布

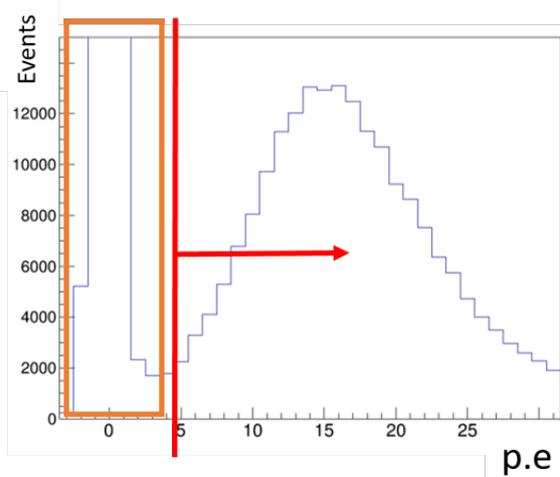


図 6.15 光電子数分布。オレンジの線で囲った部分は、ペDESTALである。赤線のように threshold を設ける。

熱電子に起因するノイズをカットするために、threshold を設けて測定するが、平均光電子数が少ないと、宇宙線を検出できない確率が高くなる。例えば、図 6.16 のように、平均光電子数が 22.3p.e. である場合、宇宙線を十分検出していると思われる。一方、図 6.17 のように、平均光電子数が 5.8p.e. である場合、threshold 以下にも宇宙線による信号があると思われる、検出効率が落ちていると考えられる。

前年度は、光電子数が全体的に十分ではなく（平均光電子数 8p.e. ）かつ、各チャンネルのばらつきが大きかったことが問題だった。これは、波長変換ファイバーと MPPC の接続部分における

光子数ロスが多いためと思われた。今年は接続部分に T2K 実験用に作られた GOMI connector を用いることにしたため、平均光電子数の増加が期待される。

この効率低下の定量的評価を 6.6 節で述べる。

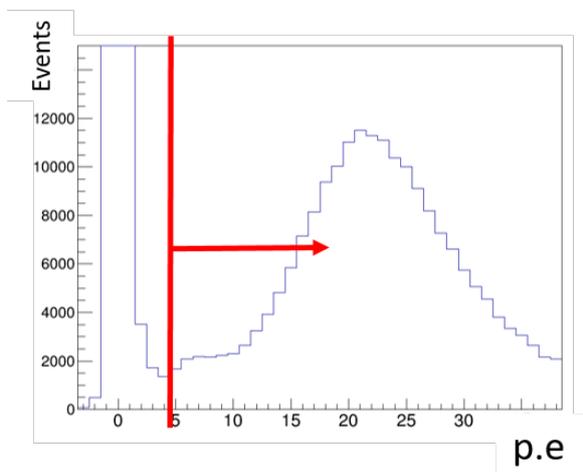


図 6.16 平均光電子数が多いチャンネルの例。  
平均光電子数は、22.3 p.e. である。

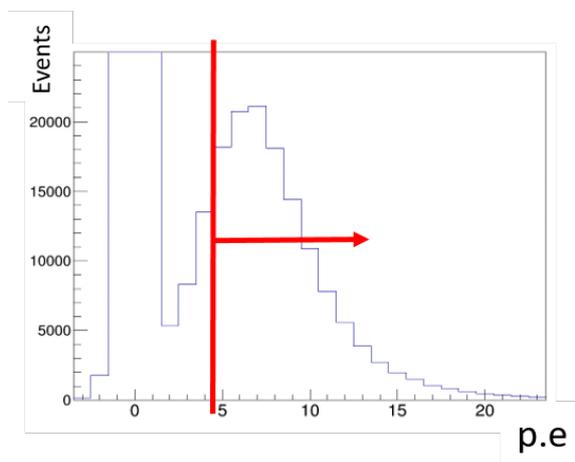


図 6.17 平均光電子数が少ないチャンネルの例。  
平均光電子数は、5.8 p.e. である。

### 6.3.2 各チャンネルの平均光電子数

各チャンネルの平均光電子数を調べるために、EASIROC のトリガー条件としては上の層 32ch と下の層 32ch でそれぞれ論理和をとり、そのあと上下の層で論理積をとって Trigger とする (図 6.18)。

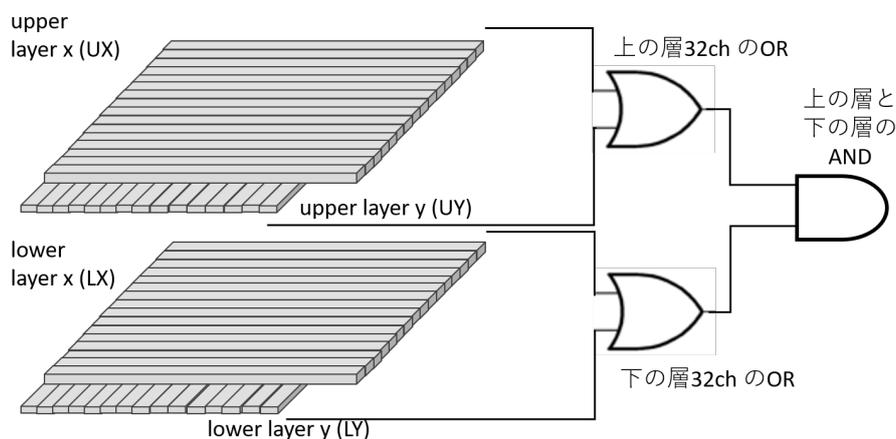


図 6.18 物質の透視実験のトリガー条件

図 6.18 のトリガー条件の下で測定したデータから得た ADC 分布 (図 6.14) を光電子数分布 (図 6.15) へ変換し、ペDESTAL付近でないピークをガウス分布で Fit することで、平均光電子数を求める。実際に測定された各チャンネルの平均光電子数を図 6.19 に示す。

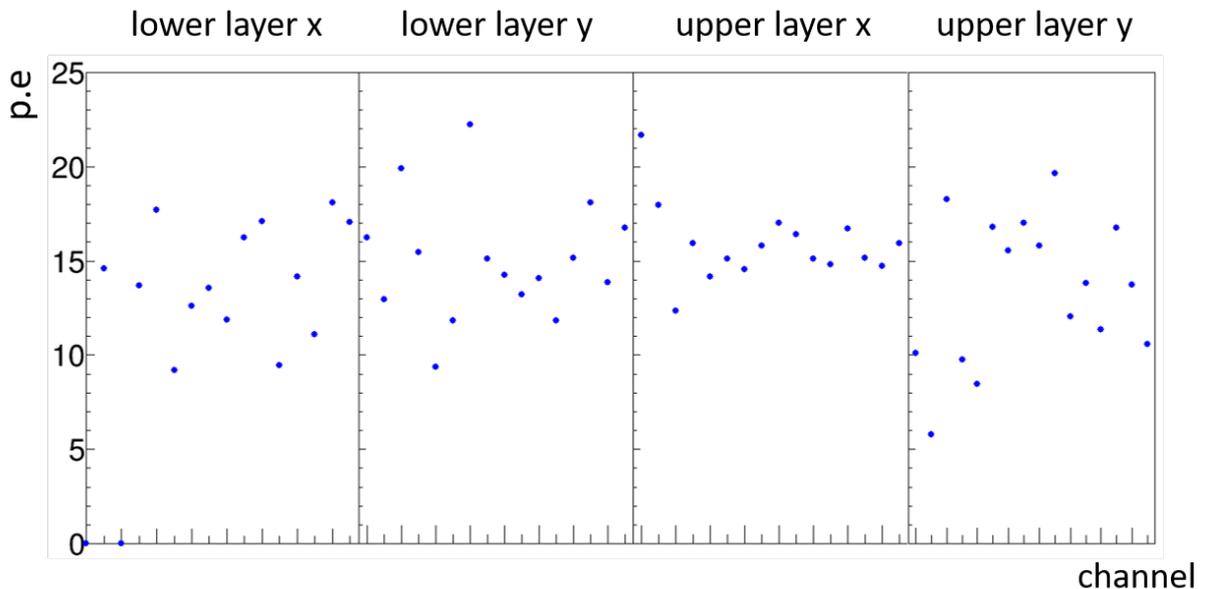


図 6.19 各チャンネルの平均光電子数

全チャンネルの平均光電子数は 14.8 p.e. (前年度の 2 倍近く) に光量が増えた。しかし、依然光電子数のばらつきがある。これによって生じる非効率分は 6.6 節で述べるような方法で補正する。その前に以下では光量が低下する要因について調べる。

## 6.4 天頂角分布ごとの光量

天頂からくる宇宙線よりも斜めに入射する宇宙線のほうがシンチレータ内を通る距離が長いので、光量が多いことが考えられる。そこで、各天頂角における平均光電子数を調べ、天頂角と平均光電子数との関係を調べた。

### 6.4.1 イベントセレクション

天頂角を求めるために、1つの宇宙線が装置を通過したと思われるイベントのみを用いる。以下の条件を満たすとき、1つの宇宙線が装置を通過したとする。

- 各層に対する選別
  - (a) 1つのシンチレータに 4.5 p.e. 以上のヒット、または
  - (b) 隣り合うシンチレータでそれぞれ 4.5 p.e. 以上のヒット

○ 宇宙線の選別

- ・ 各層が (a) または (b) である場合

例を図 6.20 に示す。

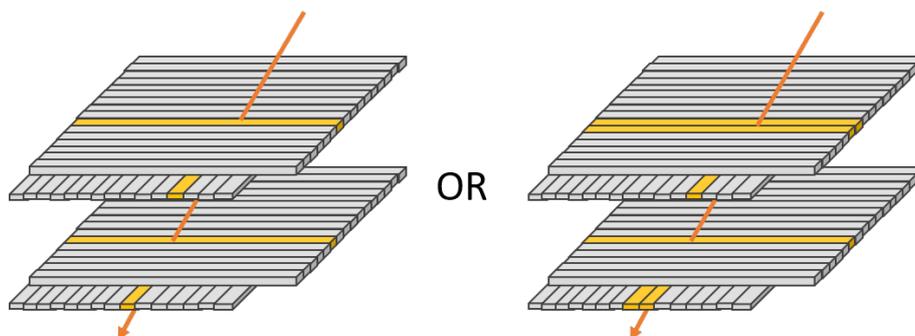


図 6.20 宇宙線イベントの例

6.3.2 節のトリガー条件で 5,000,000 イベントデータをとった時、このイベントセレクションにおいて、検出された宇宙線イベントの割合と内訳を表 6.3 に示す。

表 6.3 宇宙線イベントの割合と内訳

総イベント数	5,000,000	-
宇宙線イベント数	1,411,150	100%
すべて (a) であるイベント	1,323,200	93.77%
1 層が (b) であるイベント	77,991	5.53%
2 層が (b) であるイベント	6,934	0.49%
3 層が (b) であるイベント	398	0.028%
全層が (b) であるイベント	73	0.0052%

(a) の場合はシンチレータの中心を (b) の場合はシンチレータの境界を宇宙線が通ったとして飛跡を再構成し、天頂角を求める。天頂角分布を図 6.21 に示す。

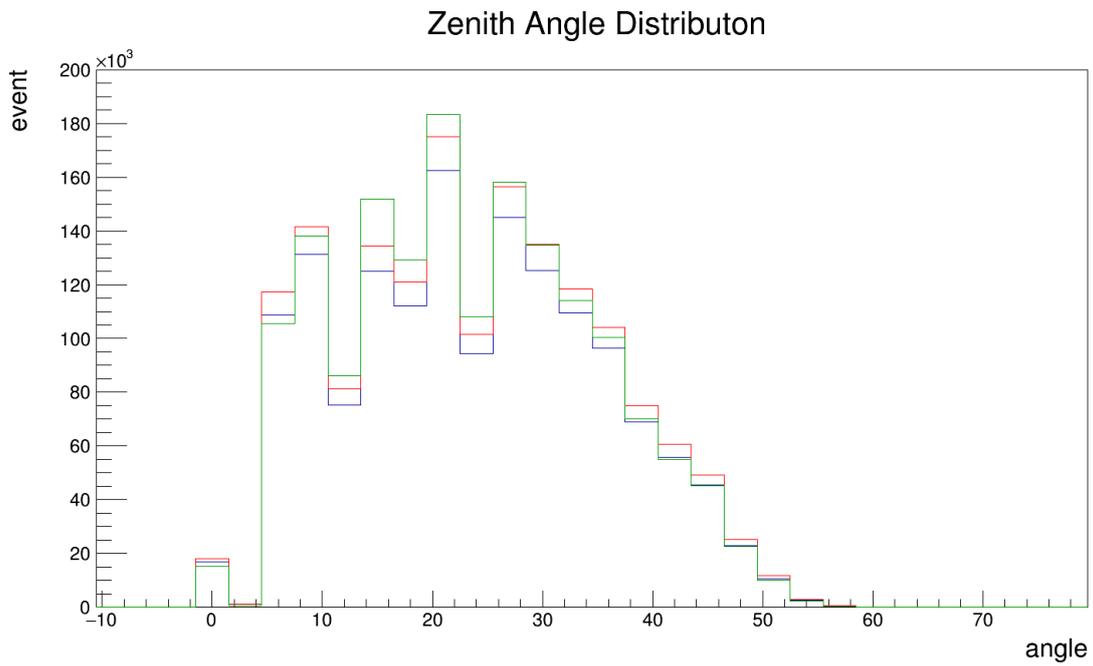


図 6.21 天頂角分布。青線が実データ。赤線は 6.6 節で求めた efficiency を用いて補正したデータ。緑線はシミュレーションから求めたデータである。

天頂角が 3 度付近のイベント数が少ないのは、シンチレータの幅が 4cm であり、(b) の場合が 1 つ以上含まれる時のみその範囲の天頂角になるからである。

#### 6.4.2 天頂角分布ごとの光量

天頂角が 0 度から 1.5 度、それ以降は 3 度間隔で区切り、それぞれの範囲で平均光電子数を求めた。その結果を図 6.22 に示す。

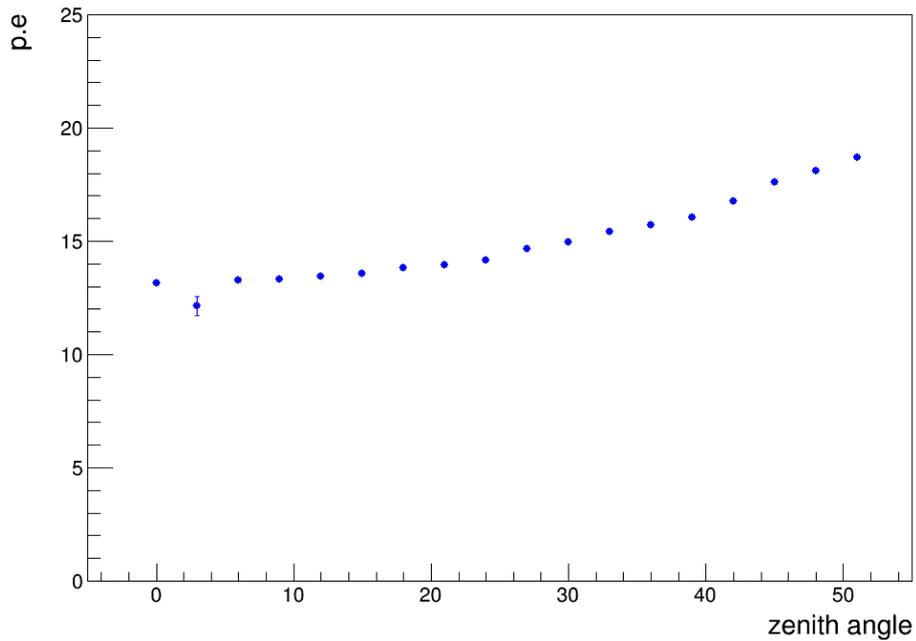


図 6.22 天頂角分布ごとの光量

天頂角が 3 度付近の光量がほかの角度に比べて誤差が多いのは、イベント数が少ないためであり、光量が少ないのは、4 層のうち少なくとも 1 層は隣り合うシンチレータがヒットしており、光量が 2 つのシンチレータに分散しているためであると考えられる。

天頂角が大きいほど宇宙線がシンチレータの中を通過する距離が長いため、光量が増えることがわかる。

## 6.5 波長変換ファイバーによる光の減衰

本実験の装置は、縦、横方向に 16 本のシンチレータを並べているため、縦、横方向で 1 本ずつ論理和をとることで、4cm ごとの光電子数分布を見ることができる。このことを用いて、波長変換ファイバーによる光の減衰を調べた。図 6.23 に測定結果を示す。

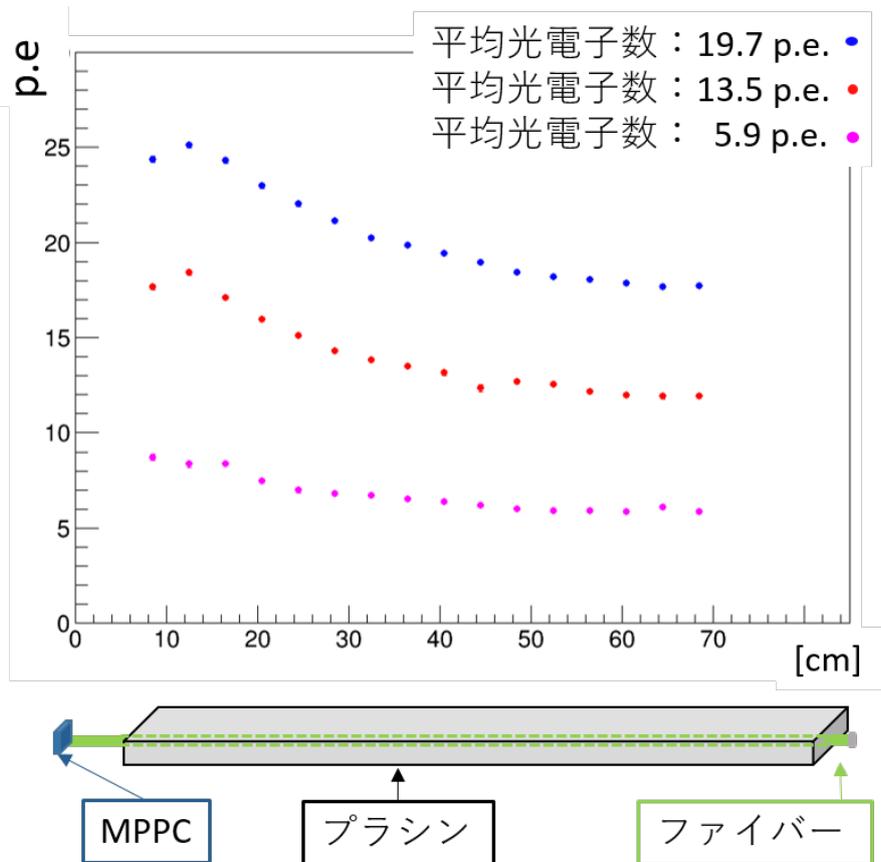


図 6.23 MPPC からの距離と平均光電子数の関係

平均光電子数は、MPPC に遠いところは近いところと比べて、25% 程度減衰している。

ファイバー長は 82cm である。端面にミラースプレーを施しているため、1 回の反射までを想定して、式 6.5.1 で Fit することにより減衰長を求めた。

$$N(x) = N_0(e^{-\frac{x}{A}} + e^{-\frac{164-x}{A}}) \quad (6.5.1)$$

$N_0$  は 0cm における光電子数、 $A$  は減衰長である。

Fit 結果を図 6.24 と表 6.4 に示す。

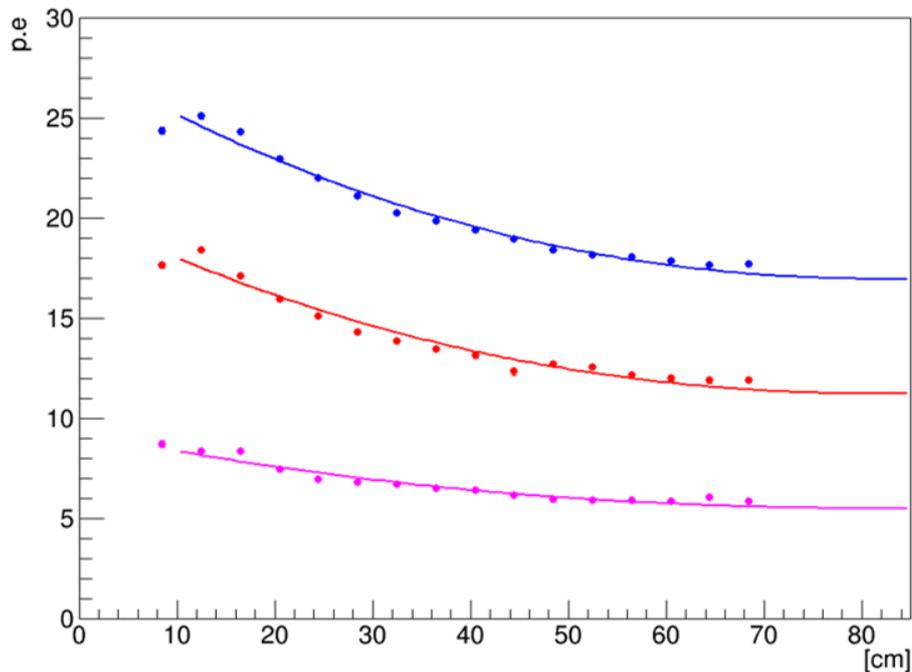


図 6.24 Fit 結果。一番近いところのデータは、外れ値であると考え Fit 範囲から除外している。

表 6.4 Fit 結果

	$N_{0[p.e.]}$	$A_{[cm]}$
平均光電子数が 19.7 p.e. のチャンネル	25.0	75.9
平均光電子数が 13.5 p.e. のチャンネル	18.6	68.4
平均光電子数が 5.9 p.e. のチャンネル	8.4	73.3

減衰長は全チャンネルで 65cm–100cm であった。しかし、製品の規格値は 350cm 以上である [7]。これは、製品の規格値を測定するときの Fit 範囲が 100cm–300cm であるためであると考えられる。また、図 6.24 をみると、あまり Fit がうまくいっていないように見える。これは、真上からの宇宙線よりも斜めに入射してきた宇宙線（天頂角の大きい宇宙線）のほうが平均光電子数が多いため、シンチレータの中央よりも両端のほうが光量が大きく出ている可能性が高いことがあげられる。天頂角を一定の角度に固定して調べれば、より正確な結果が得られると思われる。

平均光子数が多いチャンネルでは波長変換ファイバーの減衰問題ないと思われる。しかし、平均光子数が少ないチャンネルでは 6.3.1 節で述べたように検出効率が落ちていると思われる。物質の透視実験を行うときは、この減衰が重要であるかどうか装置の向きを回転させて確認することにした。

## 6.6 チャンネルごとの efficiency

6.3 節より、GOMI connector を用いることで、光量は増えたが平均光電子数のばらつきが依然存在することが分かった。平均光電子数が多いチャンネルはあまり問題ではないが、平均光電子数が少ないチャンネルは threshold を設けた時に、イベントをカットしている可能性がある。

そこで、efficiency を求めて、チャンネルごとの平均光電子数のばらつきを補正することにした。

### 6.6.1 efficiency の求め方

efficiency を求めるために、threshold を 2.5 p.e. に設定して、データを取得することにした。通常はトリガーレートが高すぎるため、threshold を 4.5 p.e. に設定している。従って、2.5 p.e. 以上 4.5 p.e. 未満の inefficiency を補正する。efficiency を式 6.6.1 で定義する。 $N_{\geq 2.5p.e.}$  は 2.5 p.e. 以上のヒット数、 $N_{\geq 4.5p.e.}$  は 4.5 p.e. 以上のヒット数である。

$$efficiency = \frac{N_{\geq 4.5p.e.}}{N_{\geq 2.5p.e.}} \quad (6.6.1)$$

4 層で 2.5 p.e. 以上のヒットを要求すると、ノイズはほとんど無視できた。2.5 p.e. 以下のイベントは補正できないが、その割合は小さいことから無視した。図 6.25 の緑の斜線で囲まれた部分が無視した箇所である。ほとんどのチャンネルは 1% 未満であるが、平均光電子数が小さくなるにつれて増加し、図 6.25 で示したチャンネルでは、数% 存在するように思われる。

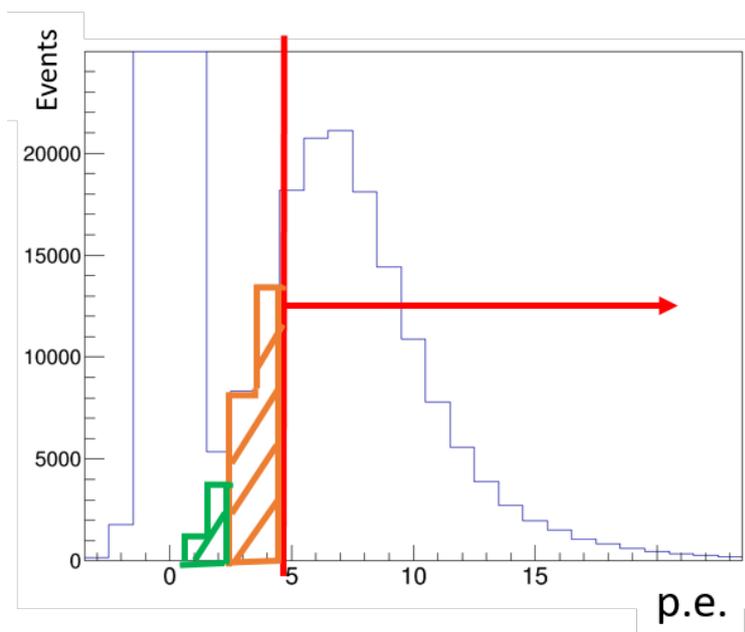


図 6.25 inefficiency の補正。オレンジの領域を補正する。緑の領域は補正できない。

## 6.6.2 チャンネルごとの efficiency

チャンネルごとの efficiency を図 6.26 に示す。

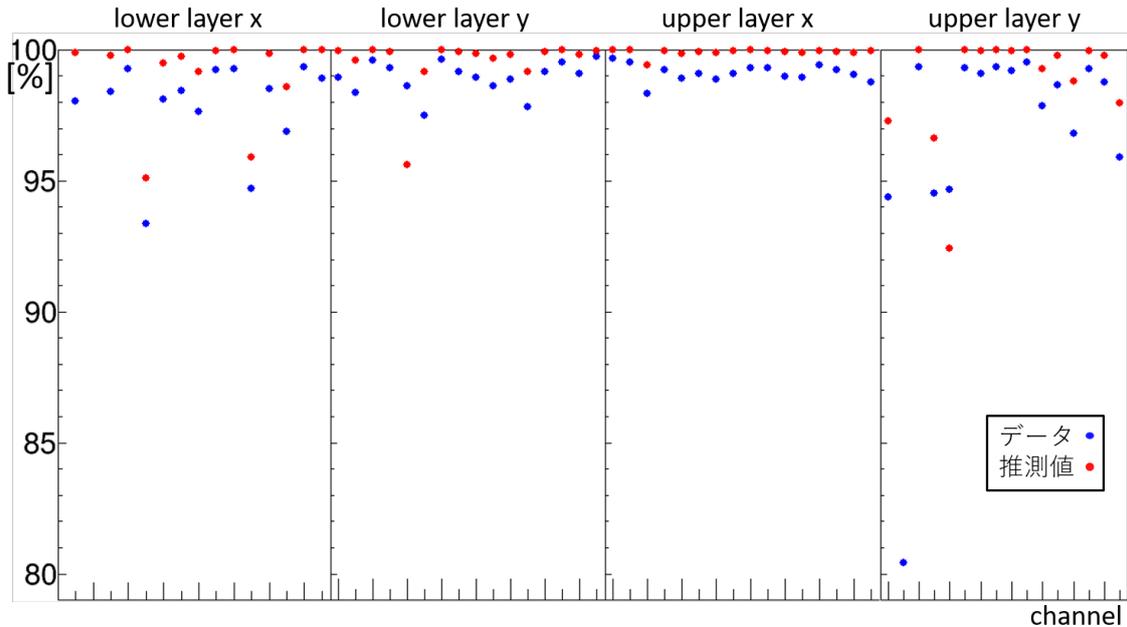


図 6.26 チャンネルごとの efficiency。青が実験で測定した efficiency。赤は光電子数分布がポアソン分布に従うと仮定して、平均光電子数から求めた efficiency。

75% 以上のチャンネルで efficiency は 98% 以上である。各ヒットにつき  $\frac{1}{\text{efficiency}}$  の重みをつけて補正する。図 6.26 の赤は光電子数がポアソン分布に従うと仮定して、平均光電子数から求めた efficiency である。実際の efficiency が期待される efficiency よりも小さい理由として、宇宙線が通過した距離が一定ではないことが考えられる。またもう一つの理由として、エネルギー損失の分布は Landau 分布に従いこれは長いテールを持つためであることが考えられる。

例として実際の光電子数分布とポアソン分布を比較した図を図 6.27 に示す。

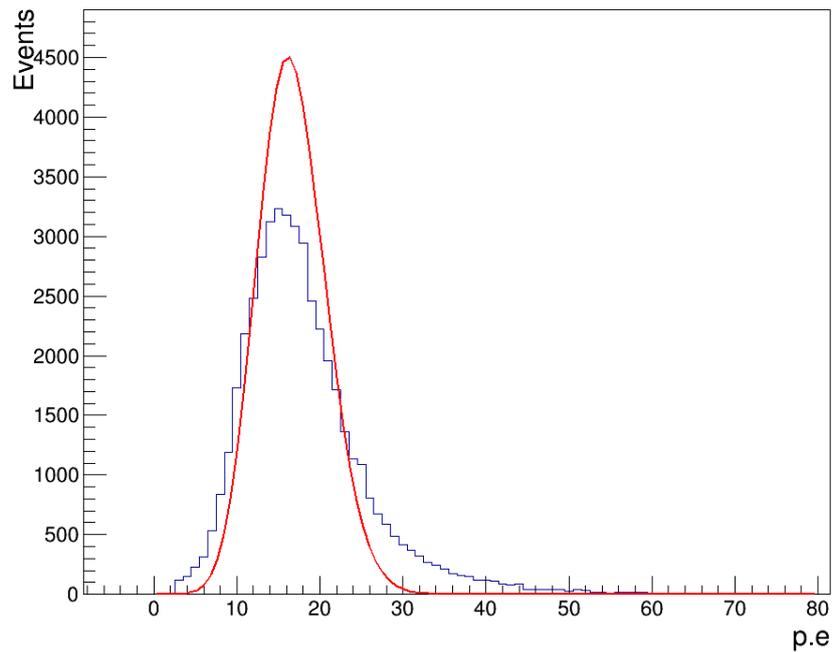


図 6.27 実際の光電子数分布とポアソン分布の比較

## 6.7 物質の透視実験に用いるチャンネル

各チャンネルごとの平均光電子数や efficiency を調べていくにつれて、信号が見えないチャンネルや、ノイズの多いチャンネルが存在することが分かった。それらのチャンネルは以降の解析から除外することとした。

### 6.7.1 信号が見えないチャンネル

正常なチャンネルを図 6.28 に、信号が見えないチャンネルの例を図 6.29 に示す。

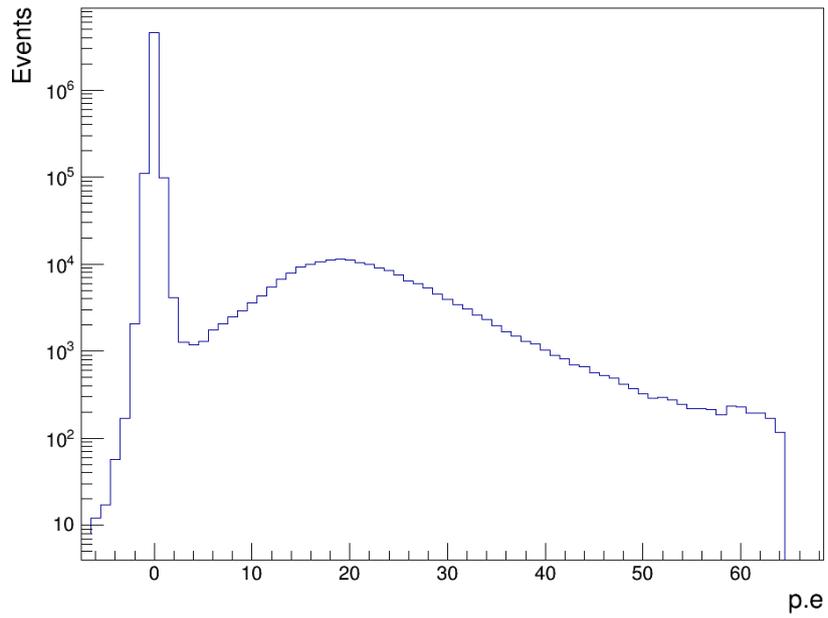


図 6.28 正常なチャンネル

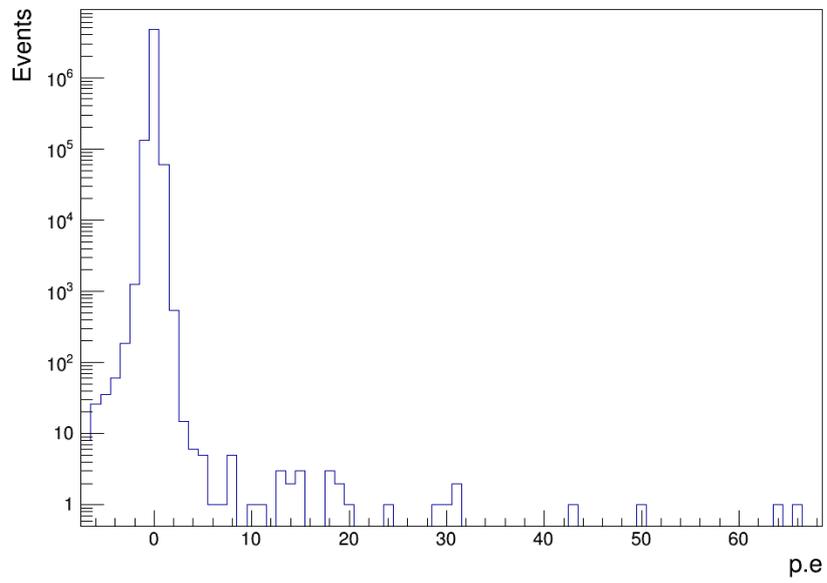


図 6.29 信号が見えないチャンネル

光電子数が 5 p.e 以上のヒットがほとんど存在しないことが分かる。

信号が見えないチャンネルの位置を図 6.30 に示す。

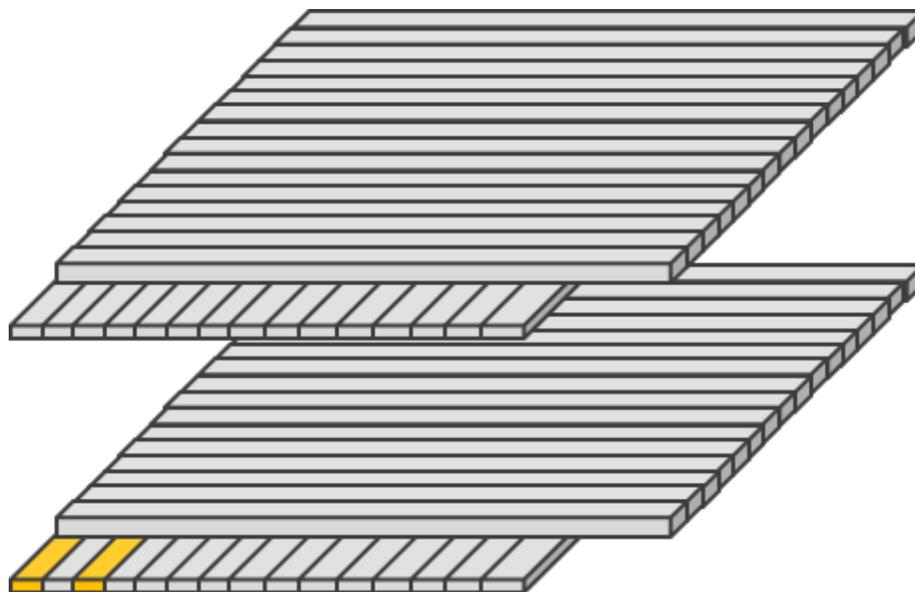


図 6.30 信号が見えないチャンネルの位置

下の段の  $x$  側の層に 2 つ存在する。このチャンネルは、MPPC を予備のものと入れ替えても変わらなかった。また、MPPC と EASIROC をつなぐツイストケーブルは 2 つ使用しており、入れ替えるとそれに伴って信号が見えないチャンネルの位置が移動した。従って、信号が見えない原因は、ツイストケーブルであると考えられる。信号が見えないため、解析から除外することとした。

### 6.7.2 ノイズの多いチャンネル

正常なチャンネルを図 6.31 に、ノイズの多いチャンネルの例を図 6.32 に示す。

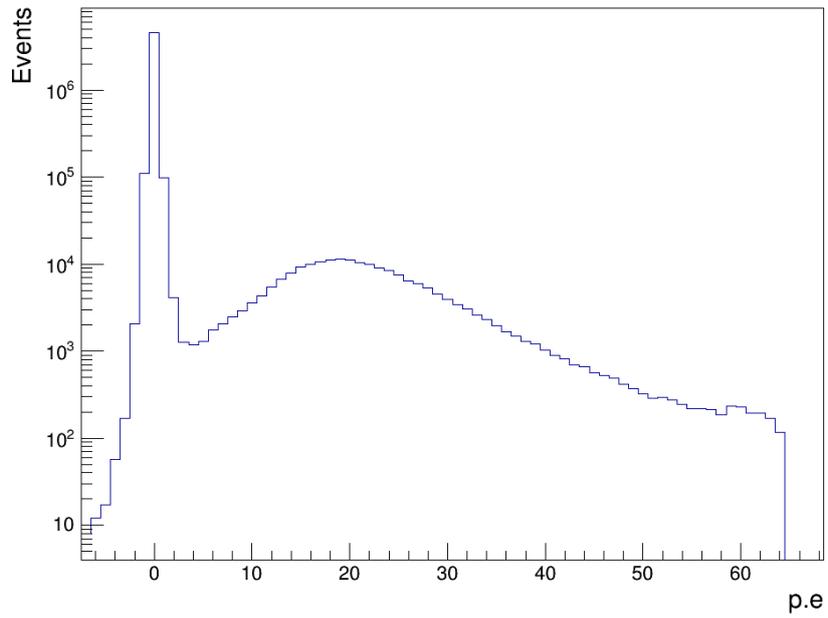


図 6.31 正常なチャンネル

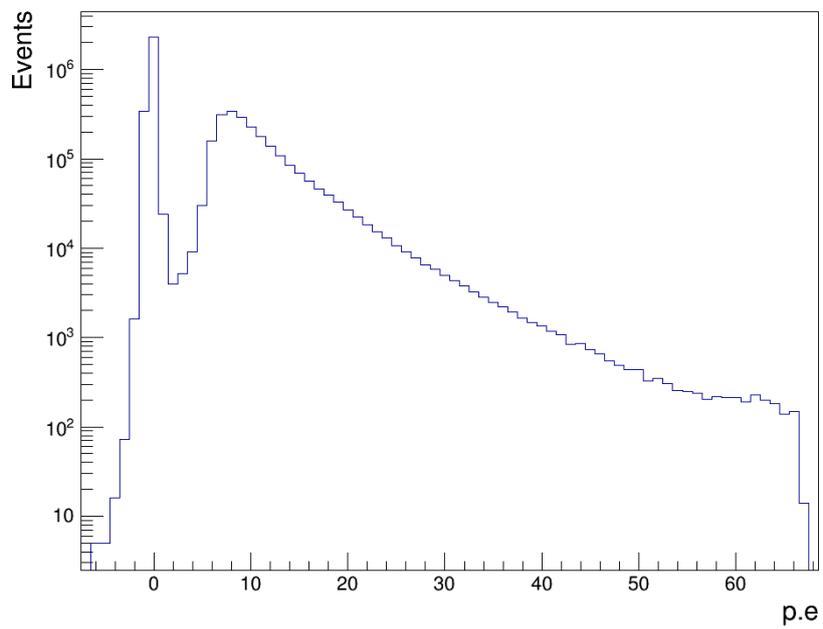


図 6.32 ノイズの多いチャンネル

ペDESTAL付近ではないピークのレートが同じ run のデータであるにもかかわらず1桁違うことが分かる。

ノイズの多いチャンネルの位置を図 6.33 に示す。

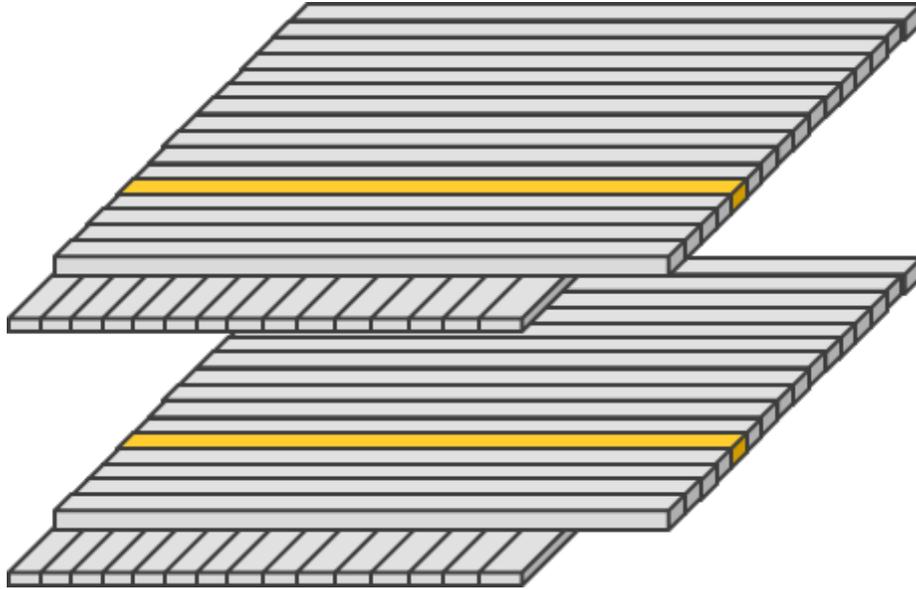


図 6.33 ノイズの多いチャンネルの位置

上の層と下の層に 1 つずつ存在する。本実験のトリガー条件より、上の層と下の層に Threshold 以上の信号があるとデータを取得してしまう。従って、この 2 つのチャンネルによりトリガーがかかってしまったイベントが全体の 45.9% 存在する。また、信号が見えないチャンネルと同様に、MPPC を予備のものと入れ替えても変わらず、ツイストケーブルを入れ替えるとそれに伴って、ノイズの多いチャンネルの位置が移動した。従って、ノイズが多い原因は、ツイストケーブルであると考えられる。宇宙線による信号も存在するが、ノイズの上に載っており、efficiency をほかのチャンネルと同じ条件で求めることができたとは言えないので、信号が見えないチャンネルと同様に以降の解析から除外することとした。

## 6.8 装置の均一性の評価

実データと efficiency を用いて補正したデータを比較し、均一性について評価する。

### 6.8.1 イベントセレクション

イベントセレクションは 6.4.1 節と同様の条件で行う。

## 6.8.2 比較結果

宇宙線のヒットの位置分布を比較する。実データと補正後データの比較を図 6.34 と図 6.35 に示す。

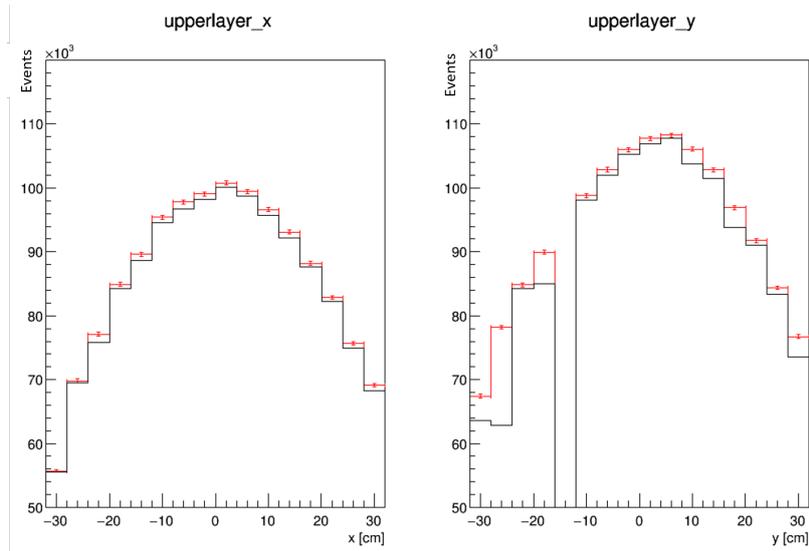


図 6.34 上の層の比較結果。黒線が実データで、赤線が補正後のデータである。

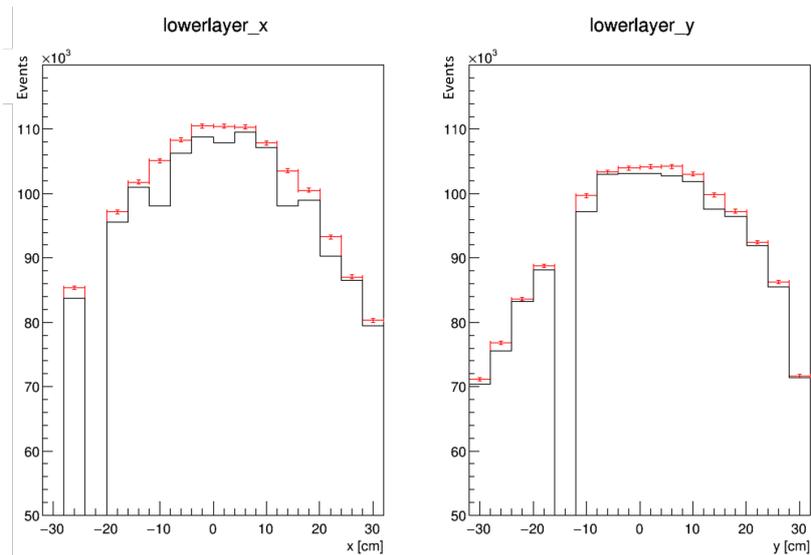


図 6.35 下の層の比較結果。黒線が実データで、赤線が補正後データである。

補正することで実データが滑らかな層はそのまま、実データに見られた凹凸が滑らかになり、平均光電子数のばらつきがおおむね補正できたと考えられる。

次に、物質を何も置いてない時のシミュレーションのデータと比較する。補正後のデータとシミュレーションのデータの比較を図 6.36 と図 6.37 に示す。

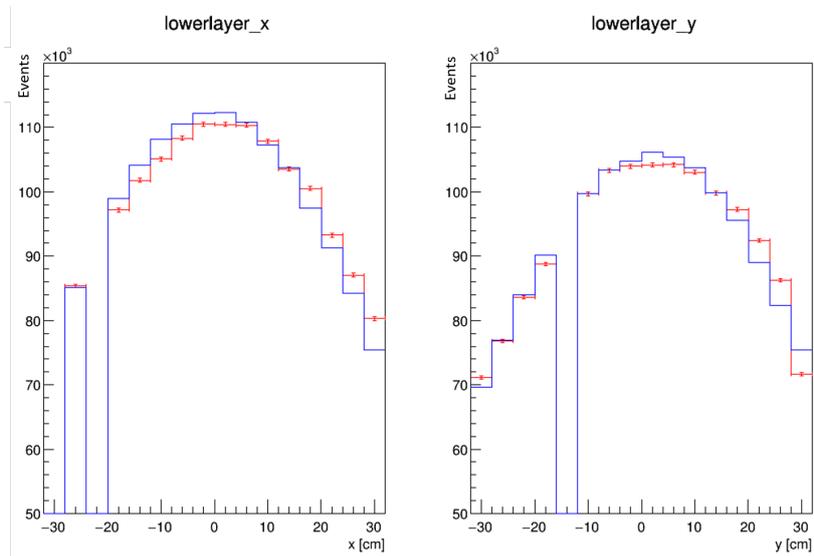


図 6.36 上の層の比較結果。赤線が補正後のデータで青線がシミュレーションのデータである。

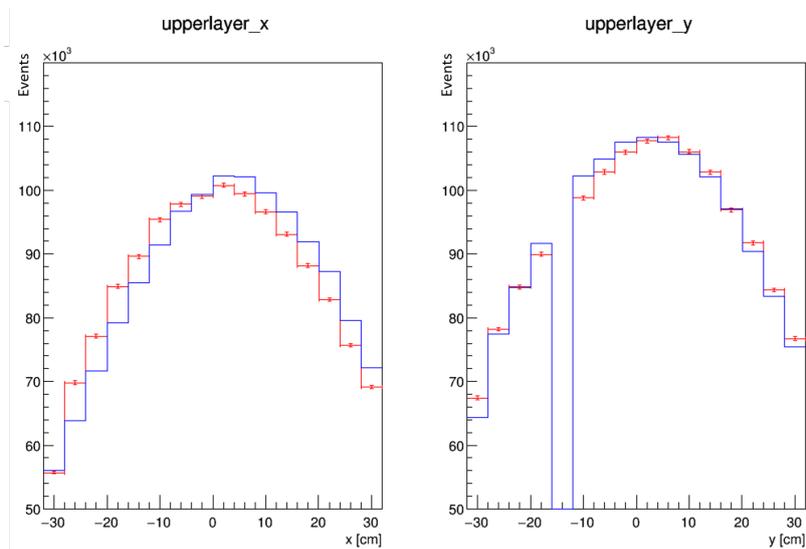


図 6.37 下の層の比較結果。赤線が補正後データで青線がシミュレーションのデータである。

補正後のデータの全体的な形はシミュレーションのデータと同様である。イベント数に違いがあるのは、シミュレーションが物質を何も置いていないときであると考えられる。このデータの解析結果は次の章で述べる。

## 第7章

# 宇宙線ミュオンを用いた透視実験の解析

### 7.1 透視実験の概要

ミュオントモグラフィー実験では、対象物の内部構造を見るために、対象物に対して様々な方向からミュオンの透過頻度を測定する必要がある。この前段階として、作成したミュオン飛跡検出器で一方向からミュオンの到来頻度を測定した際に、周囲の建造物による頻度の減少が測定できているかを確認する。測定は、神戸大学自然科学棟3号館(図7.1)の3階にある組立試験室1の内部と廊下の2箇所で行なった(図7.2)。これより、自然科学棟3号館のことを3号館と呼ぶことにする。3号館は8階まであり、1階おきの高さはおよそ3mで各階の構造はほぼ同じである。3号館を対象物とし、宇宙線ミュオンの到来頻度の減少を見る。到来頻度の高低を調べるために、検出器から得られるミュオンの通過位置を元に飛跡を再構成し、角度分布図を作成した。これと、検出器周辺に何も対象物がない場合のシミュレーションから得た角度分布図とを比較する。角度分布の作成とその結果についてを第7.2節、シミュレーションの設定と、シミュレーションから作成した角度分布についてを第7.3節に示す。次の第7.4節にて、実際の検出器から得た角度分

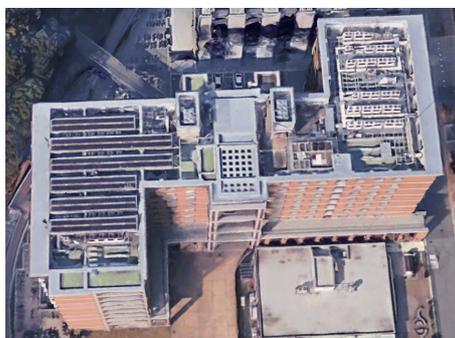


図 7.1 自然科学棟 3 号館



図 7.2 測定位置

布とシミュレーションから作成したものととの比較の結果を示し、ミューオンの到来頻度がどのように分布しているかを確認する。また、比較結果として何らかの事象数の偏りが見えたとしても、検出器の検出効率の違いによるもので周囲の環境によるものが測定できていない可能性がある。それを考慮し、どの程度検出器に起因する事象数の偏りがあるかを調べた。この解析についてと、結果として偏りが主に周囲の環境によるものであったことを第 7.5 節で示す。最後に、3 号館の構造と得られた比較結果を対応づけ、建造物によるミューオンの到来頻度の減少が測定できているかを第 7.6 で確認する。

## 7.2 角度分布の作成と結果

角度分布図を作成するにあたり、以下の図 7.3 のように検出器の下の層の中心を原点に取り、地面に対して垂直上方向を  $z$  軸とおいたとき  $z = 15 \text{ m}$  となるように仮想平面を設定した。この高さはおよそ自然科学棟 3 号館の 8 階の床に相当する。その面でのミューオン通過位置を算出、イベント数をマッピングする。仮想平面上でのミューオンの通過位置を算出する際、検出器から得られる各シンチレータ (以降、チャンネルと呼ぶ) の hit 情報<sup>\*1</sup>からミューオンの飛跡を再構成する必要がある。以下では、宇宙線ミューオンの事象選別と、飛跡の再構成について説明する。また各チャンネルによって検出効率が異なるため、その補正方法についても示す。

### 7.2.1 宇宙線ミューオンの事象選別

以降、検出光電子数が 4.5 以上のチャンネルのことを hit チャンネルと呼ぶことにする。再構成に用いる事象を選別する上で、前提としてすべての層に hit チャンネルが存在している事象を選んだ。その中で、6.4.1 節で述べたように検出器の 4 層のシンチレータストリップ中、各ストリップの hit チャンネルが

- (a) 1 つだけ
- (b) 隣り合う 2 つの hit チャンネルだけ

のときを再構成の対象とした。1 つの層に 2 つ以上の離れた hit チャンネルが存在していた場合、ミューオンの通過座標が 1 つに特定できないからである。一方で hit チャンネルが隣り合っていた場合、1 つのミューオンが 2 つのチャンネルを通るものが多いと考えられ、また通過座標も 1 つに決定できるため再構成の対象とした。

---

<sup>\*1</sup> あるチャンネルの検出光電子数が 4.5 以上のとき、ミューオンがそのチャンネルを通過したとみなし、そのチャンネルに hit したと表現する。

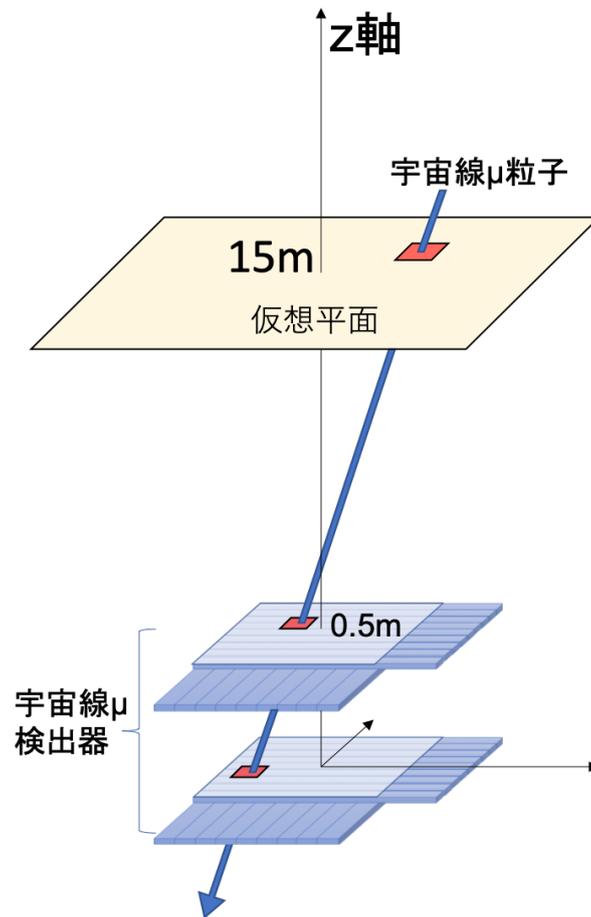


図 7.3 仮想平面の概略図

## 7.2.2 飛跡の再構成

再構成を行うにあたり、ミューオンの通過位置を決定するための座標を定義する。のちの章で 3 号館を含めた周囲の環境との比較を行うため、単純に理解できるように方角を用いて座標を図 7.4 のように定義した。原点を検出器の下の層の中心にとり、西北西方向 ( $290^\circ$  W) と北北東方向 ( $350^\circ$  N) をそれぞれ North 軸、East 軸の正の方向とした。実際の方角と座標の軸の呼称が違う理由は、検出器のストリップの向きを 3 号館の構造と比較しやすいように合わせたからである。具体的な対応を表すイメージを図 7.5 にて示す。また、地面に対して垂直上方向を  $z$  軸正の方向にとった。座標の単位は m で表す。定義した座標軸上にてミューオンの通過した位置の決定方法は次の通りである。上記の事象選別の際に分類した 2 つの事象 a) と b) によって決定方法を変えた。hit チャンネルが 1 つだけの事象 a) では、そのチャンネルの中心を座標として定義した。また、隣接する 2 つの hit チャンネルのみの事象 b) では、その 2 つのチャンネルの境界線上を座標とした。以上の過程により検出器の上の層と下の層でミューオンの通過座標を決定する。その 2 つの (N,E)

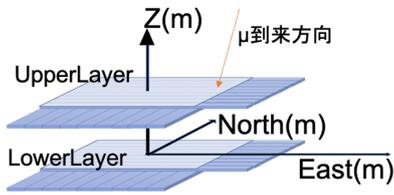


図 7.4 座標の定義



図 7.5 座標と建造物との対応

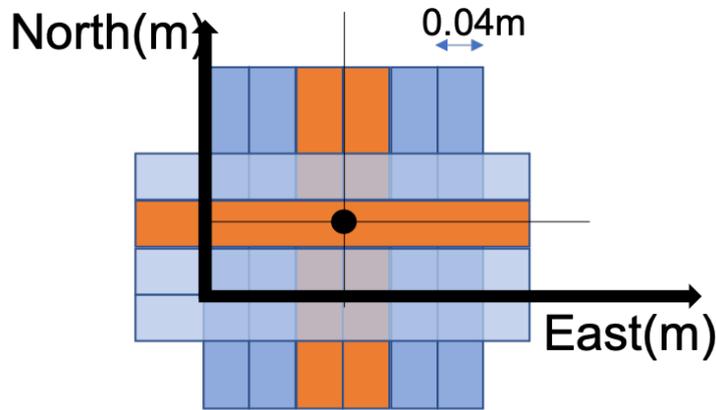


図 7.6 橙色のチャンネルが hit チャンネルを表し、細い黒が各ストリップ毎の通過座標を示している。黒点がミューオンの通過座標であり、この例では (East, North)=(0.12 m, 0.06 m) となる。

座標を用いて直線を結び、これをミューオンの飛跡とする。この飛跡から  $z = 15$  m における仮想平面上でのミューオンの通過位置を算出する。仮想平面上 ( $z = 15$  m) の通過位置  $s$  は、検出器の上の層の通過位置を  $t$ 、下の層の位置を  $u$  とおき、検出器の上下層の間隔が 0.5 m であることを考慮すると、 $s = 30(t - u) + u$  とかける。

### 7.2.3 チャンネル応答の補正

各チャンネル間で検出効率が違うため、角度分布図を作成した際にそれによる事象数の偏りが発生する。それを補正するために、各イベント毎に各チャンネルの検出効率  $\epsilon$  を用いて

$$f(\epsilon) = \prod_i \frac{1}{\epsilon_i}$$

を掛ける。ここで  $i$  は、各イベント毎の hit チャンネル番号を表す。ただし、隣接した2つのチャンネルに hit した場合、 $\varepsilon_i$  の大きい方のみを選択する。またノイズの多いチャンネルや hit のほとんどないチャンネル (以降 masked チャンネル) は再構成に用いないことにする。masked チャンネルの位置を以下の図 7.7 に示す。

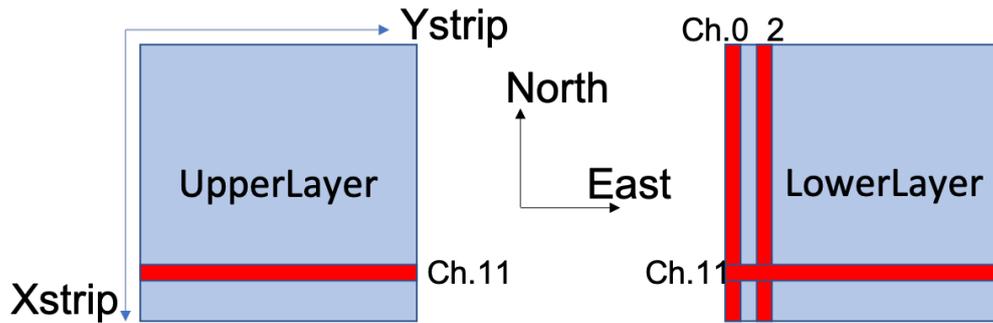


図 7.7 赤で示されたストリップが masked チャンネル、Ch. がチャンネル番号。

### 7.2.4 角度分布の作成結果

$z = 15\text{ m}$  における仮想平面上での角度分布を以下の図 7.8 に示す。総事象数は  $5.00 \times 10^6$  で、事象選別後の事象数はおよそ  $1.32 \times 10^6$  であった。各ピクセル毎の高さが事象数を表しており、原点を中心に非対称性があることが確認できる。この偏りの原因は検出器を取り囲む建造物によるミューオンの到来頻度の減少や、検出器の各チャンネル毎の検出効率の違いを補正しきれていないこと、masked チャンネルによるものだと考えられる。

## 7.3 シミュレーションの設定と角度分布の結果

検出器を取り囲む 3 号館によるミューオンの吸収を見るために、Geant4 と CRY を用いて検出器の周囲に何も対象物や障害物がない場合のシミュレーションを行い、角度分布図を同じく  $z = 15\text{ m}$  にて作成する。シミュレーションにて、実際の検出器の masked チャンネルに相当するチャンネルは同じく再構成には用いないことで、実際の検出器に近い状態にした。シミュレーションの設定は 3.3 で議論したものをを用いる。総事象数は  $10.0 \times 10^6$  であり、事象選別後の再構成に用いた事象数は  $1.62 \times 10^6$  であった。シミュレーションの再構成に用いられた総事象数は検出器で再構成された事象数で規格化した。図 7.9 に角度分布の結果を示す。原点对称な分布ではなく、到来頻度に位置依存性が見られる。これは masked チャンネルを考慮したことによる事象数の偏りである。それを確認するため、シミュレーション上の masked チャンネルを考慮せず、すべてのチャンネルを事象選別の対象としたときの角度分布図を作成した。図 7.10 を見ると、原点を中心に対称的な事象分布をしている。masked チャンネルの有無での事象数の変化を比較するために、各条

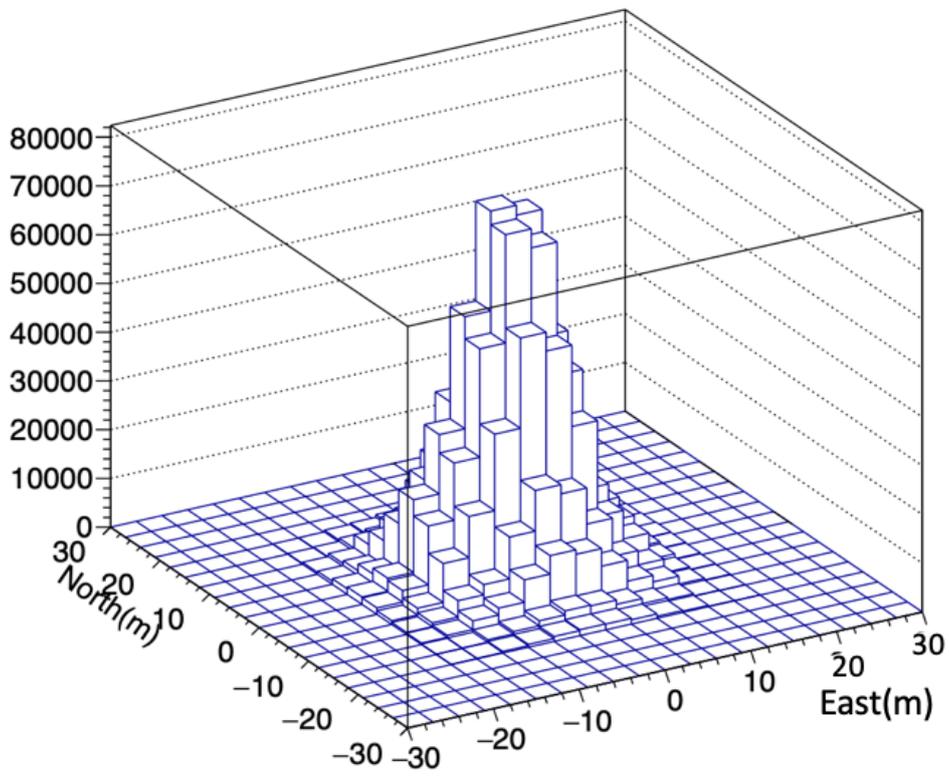


図 7.8  $z = 15$  m の地点における仮想平面上の角度分布

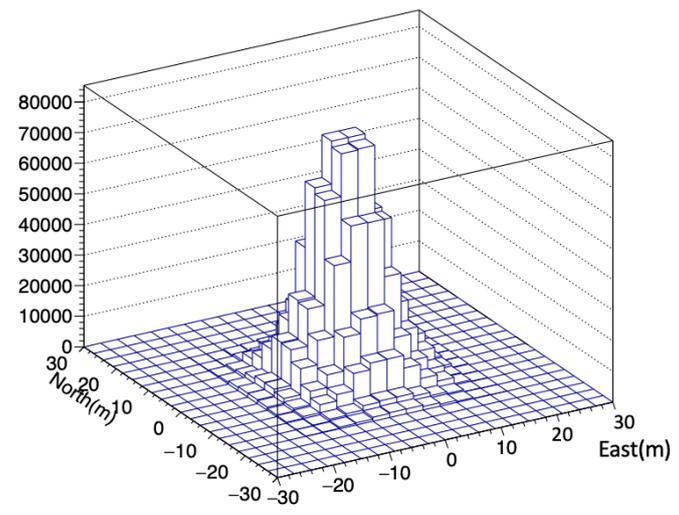


図 7.9  $z = 15$  m の地点における仮想平面上の角度分布 (シミュレーション)

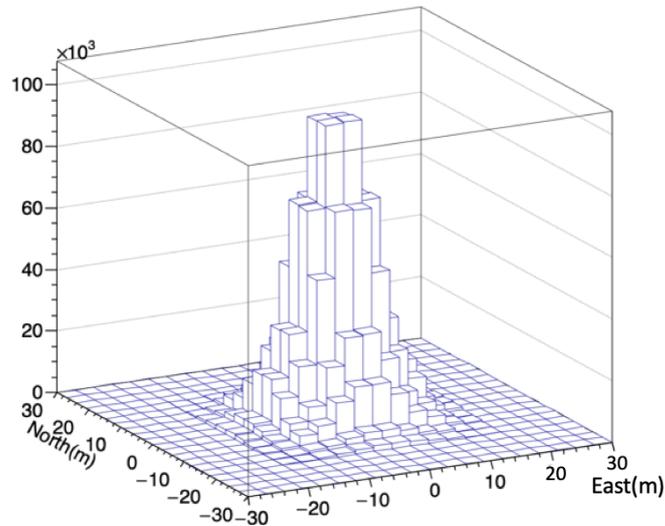


図 7.10 すべてのチャンネルを再構成の対象とした時のシミュレーションにおける角度分布

件での角度分布を East 軸と North 軸に沿って射影し、各軸座標-事象数のヒストグラムを作成した結果、図 7.11 のようになった。ここから、masked チャンネルによる事象数の偏りが各軸に沿って最大 10 %程度生じていることがわかる。

## 7.4 角度分布の比較結果

シミュレーションと実際の検出器から得たそれぞれの角度分布図を比較し、事象数がどのように分布しているかを確認する。そのために、シミュレーションにおける事象数  $N_s$  に比べて、実際の検出器から得られた事象数  $N_d$  がどの程度差を持つかを各ピクセル毎に見る。これを表す指標  $\Delta$  を以下のように定義する。

$$\Delta = \frac{N_d - N_s}{N_d} (\%)$$

$\Delta$  を用いて、到来頻度分布図 7.12 を作成した。色の違いによって到来頻度の高低を表している。北西方向は比較的頻度が高く、南方向は低いことがわかる。また、シミュレーションの総事象数を実際の検出器から得た総事象数で規格化しているため、相対的にミューオンが建造物によって吸収されない領域の事象数はシミュレーションよりも多くなる。本研究内では行えなかったが、データ取得時間で規格化することで、ミューオンが障害物に干渉しない領域では  $\Delta \sim 0$  となり、干渉する領域では  $\Delta < 0$  となるようにできる。そのため、より正確に到来頻度の減少が確認できると期待できる。

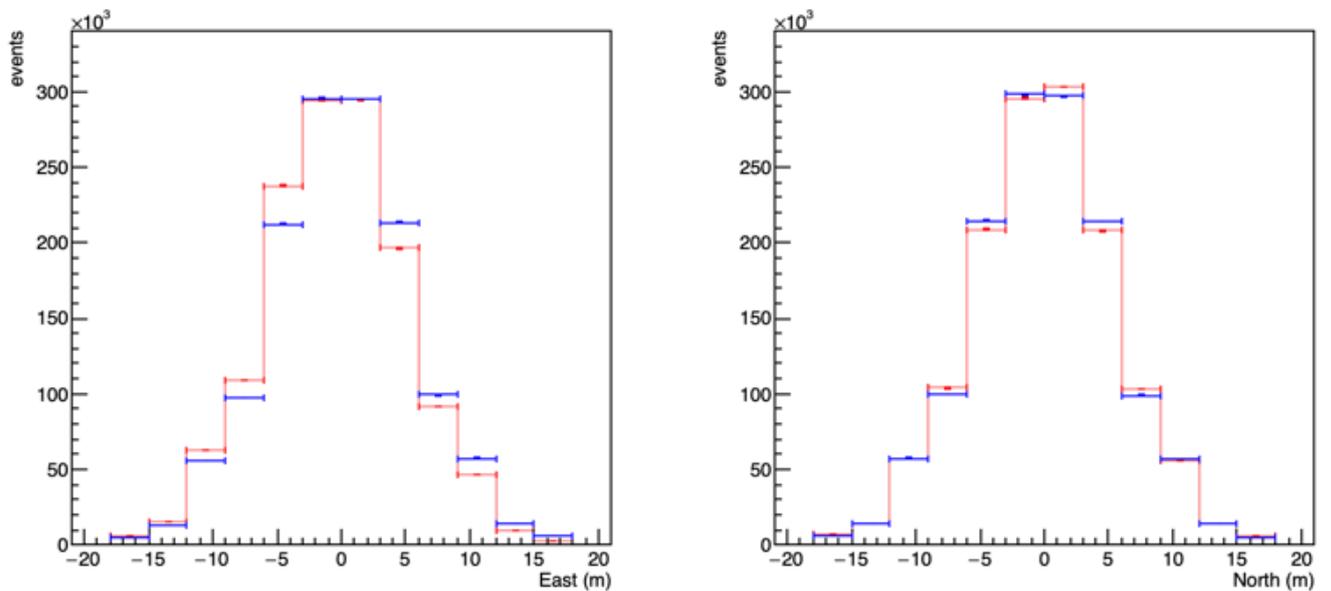


図 7.11 East, North 軸に沿った射影図。縦軸が事象数を表す。青色のヒストグラムが masked チャンネルを考慮しなかった場合のシミュレーションで、赤色が masked チャンネルを考慮し再構成に用いない場合。事象数は検出器から得た総事象数で規格化している。

## 7.5 検出器起源の偏り

前節で到来頻度の偏りを見たが、これらの偏りのうち、周囲の環境によるものに比べて各チャンネルの検出効率のばらつきによるものの割合が大きい可能性がある。これを調べるために、検出器を  $z$  軸周りに時計回りに 90 度単位で回転させ、事象数の偏りが変化するかを見た。回転に伴って分布が対称的に変化していれば、チャンネル間の個体差による偏りの割合が大きいことになる。初めに測定から得た角度分布を East 軸、North 軸に沿って射影し、 $\Delta$  を用いてシミュレーションと比較することで、各軸に沿った事象数の偏りをヒストグラムに示す。次に検出器を回転させ、同様のヒストグラムを示し、回転前後の分布の変化を比較する。結果は以下の図 7.13 のようになった。

回転後の測定にて、いずれも測定事象数は回転前と同じく  $5.00 \times 10^6$  とした。黒色が回転前、緑が 90 度回転、赤が 180 度回転させた場合の分布である。全体的な分布の傾向は概ね一致していることから、主に周囲の環境による到来頻度の減少が測定できていることがわかる。より細かく見ると、North 軸の  $-16.5 \text{ m}$  地点では検出器の回転によって  $\Delta$  の値が大きく違う。この原因を見るために、射影図でなく到来頻度分布図を用いて回転による分布の変化を見た (図 7.14 から 7.16)。

この結果から確認できるように、回転に伴って橙色の長方形で囲った到来頻度の高いピクセルが移動している。一方で全体的な分布は比較的变化が少ない。ゆえに、検出器由来の事象数の偏りが

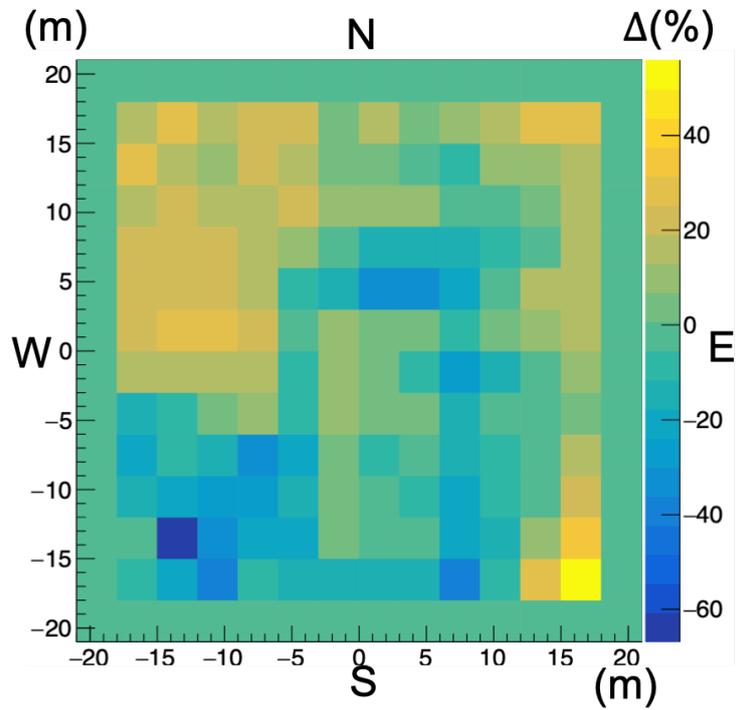


図 7.12 到来頻度分布図。 $\Delta(\%)$  の大きさは色の違いで示し、青色のピクセルはミューオンの到来頻度が低く、黄色のピクセルは頻度が高い場所。NSEW はそれぞれ方角を表している。

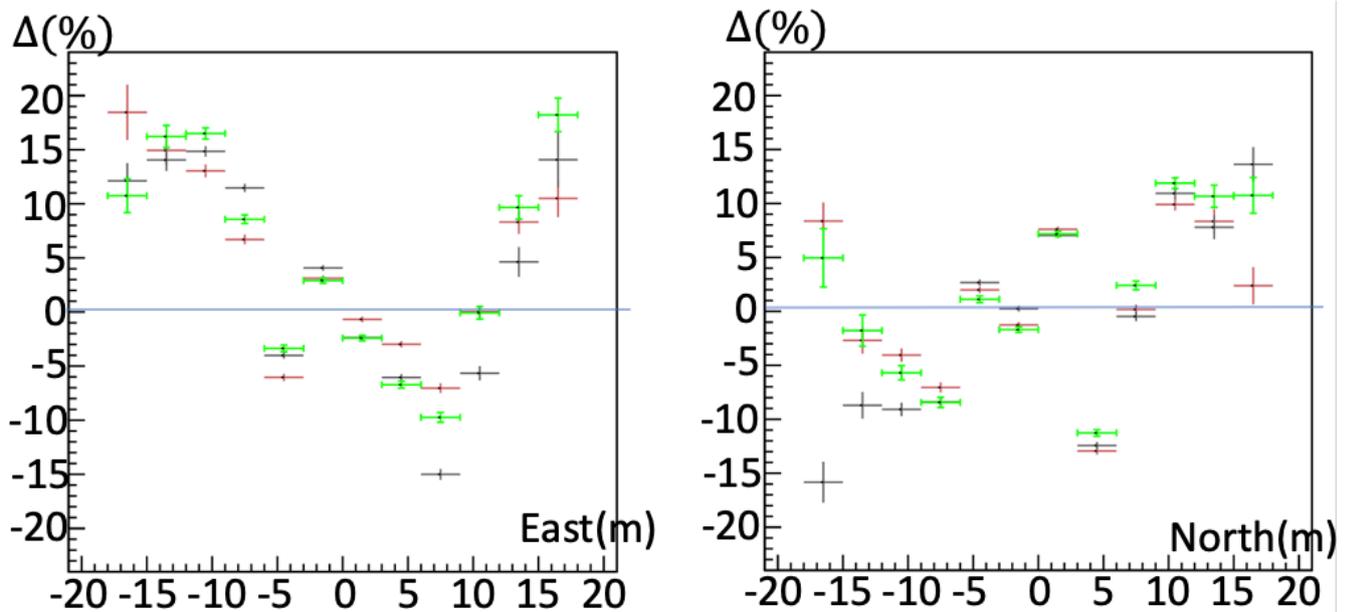


図 7.13 East 軸、North 軸にそって射影した場合の  $\Delta(\%)$  の値。黒色が回転前、緑が 90 度回転、赤が 180 度回転させた場合のヒストグラム。

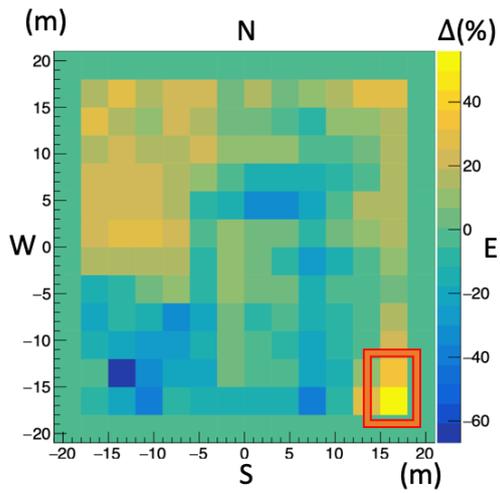


図 7.14 回転前の  $\Delta$  分布図

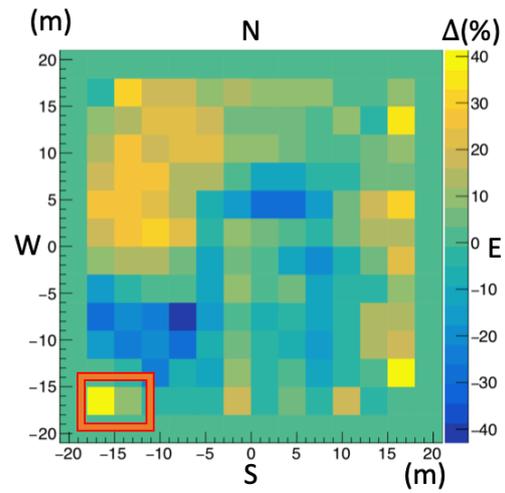


図 7.15 90度回転後の  $\Delta$  分布図

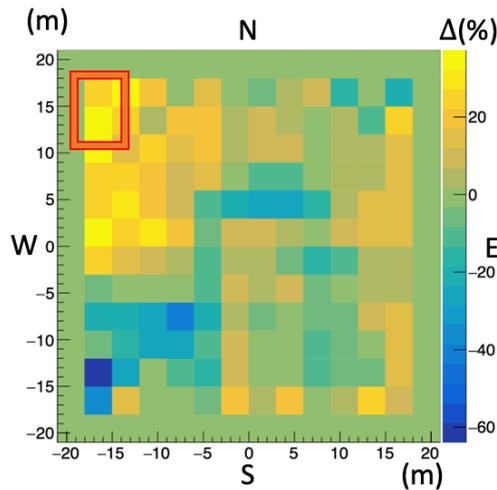


図 7.16 180度回転後の  $\Delta$  分布図

無視できないピクセルが数箇所存在し、それが射影図の値の差をもたらしていることが分かる。解決策としては、周囲に障害物がない環境で測定を行い、同じ条件下でのシミュレーションの分布図と比較して検出効率を調節することが挙げられる。本研究では、主に周囲の環境による到来頻度の変化が主であることから、これらのピクセルの影響は補正せず3号館との比較を行う。

## 7.6 建造物との比較

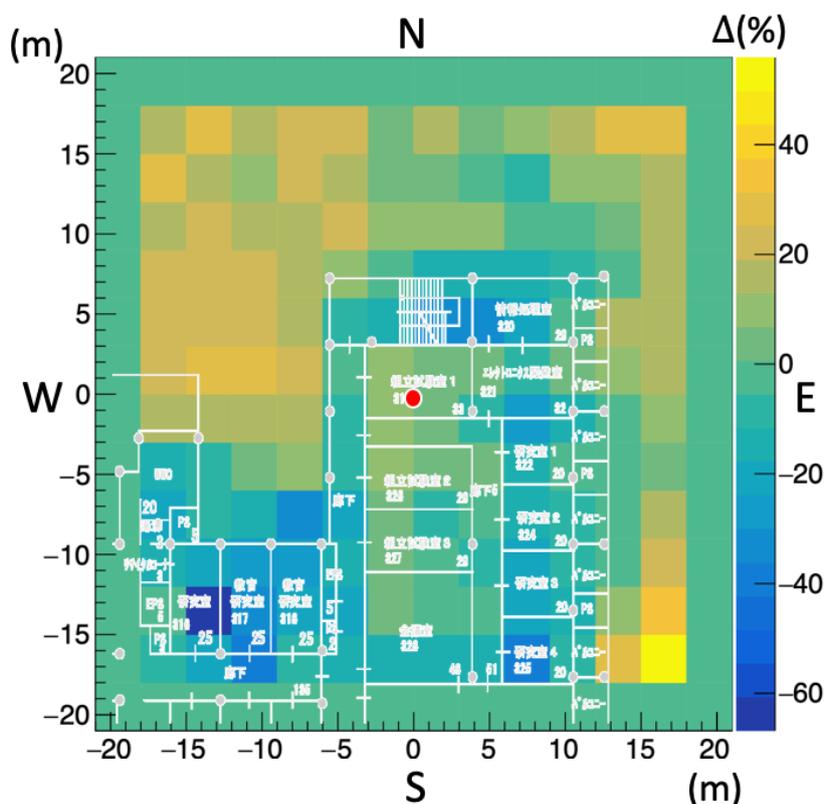


図 7.17 到来頻度分布図と建造物の配置の比較

以上の過程で作成した  $z = 15\text{ m}$  の地点での仮想平面上の到来頻度分布図に、周囲の建造物の配置を重ねて示す。分布図は検出器の回転前の測定データを用いた。

白色で描かれている見取り図が検出器を囲む3号館3階の構造の一部を示している。また、赤色の点が検出器の位置を表している。白色の見取り図の外部には建造物は存在しない。図から、建造物のない北西の領域は黄色で到来頻度が高く、南西方向の3号館内にあたる領域付近では青色の分布で到来頻度が低いことが分かる。一方で、東西方向の  $-5\text{ m}$  から  $+8\text{ m}$ 、南北方向  $-18\text{ m}$  から  $+5\text{ m}$  の領域に長方形型に青色が濃い箇所が見られる。3号館の見取り図と比較すると、著しく逸脱した到来頻度の偏りは見られないことから、この領域の到来頻度の減少は建造物によるものであり、その効果が見えていると考えられる。

次に、検出器を移動させ、同じように測定を行なった。移動後の位置は図 7.17 における東西方向  $-5\text{ m}$  付近に縦に伸びる廊下である。また検出器のトリガー条件を移動前から変更した。4層のシンチレータストリップと同時に hit があった場合のみをデータとして取得する。理由として廊下に位置を変えた際、従来のトリガー条件では、期待される事象頻度が  $20$  から  $40\text{ Hz}$  であるのに対し

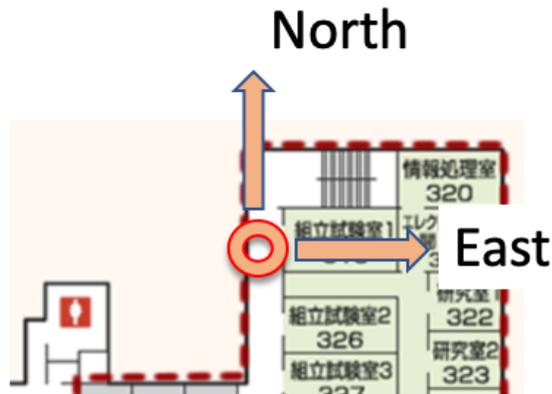


図 7.18 移動後の検出器の位置

その 500 倍の約 10000Hz となったからである。原因である要因として、フラットケーブルに関するノイズが増えたことが挙げられる。この対策として新しいトリガー条件に変更したことで、事象周期を 10Hz 程度に抑えることができた。移動後の測定から得られる到来頻度分布を建造物と比較する前に、検出器を  $\approx$  軸周りに 90 度単位で回転させて検出器由来の事象数の偏りが増えていないか確認した。測定した事象数は回転前で  $4.0 \times 10^5$ 、90 度回転後で  $2.0 \times 10^5$ 、270 度回転後で

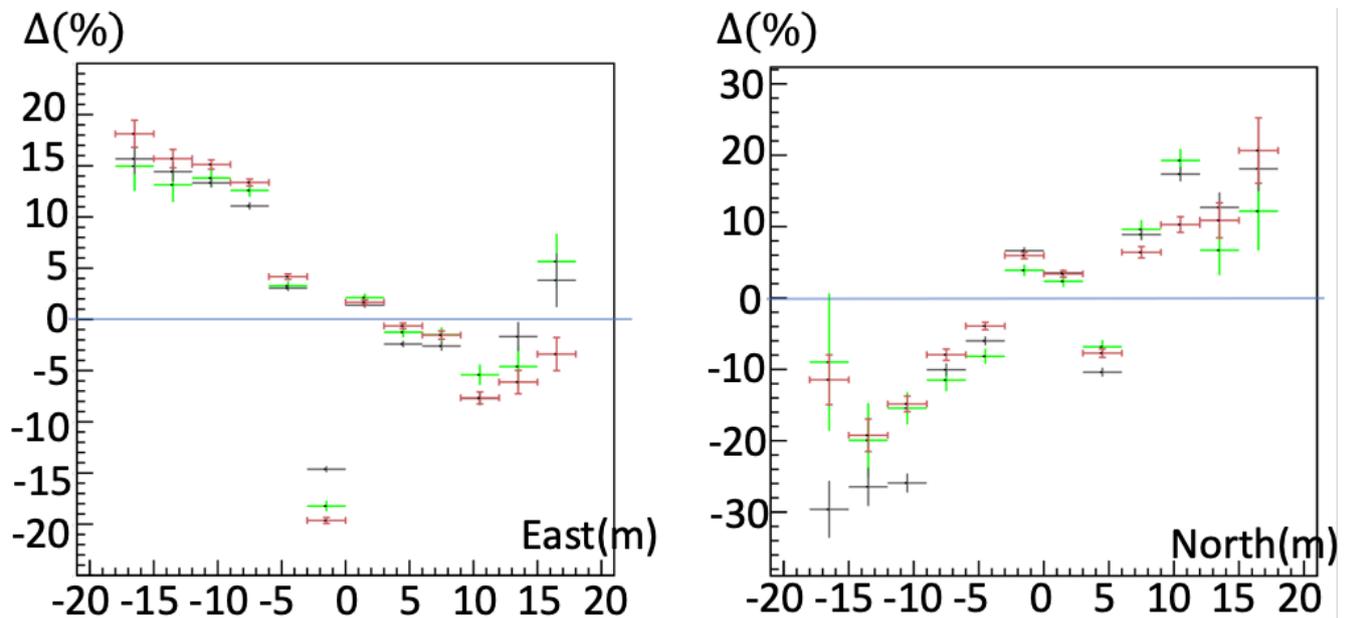


図 7.19 East 軸、North 軸にそって射影した場合の  $\Delta(\%)$  の値。黒色が回転前、緑が 90 度回転、赤が 270 度回転させた場合のヒストグラム。

$3.0 \times 10^5$  である。移動前と同じく North 軸  $-16.5$  m における値は検出器の回転によってばらつきが見られるが、その他の値の多くは 5% 以内のばらつきで収まっており、周囲の影響による到来頻

度の偏りが見れていることが確認できた。

回転前の測定データを用いた  $z = 15\text{ m}$  の地点における  $\Delta$  の分布は図 7.20 のようになった。移動前の分布図の際と同じく、白色の見取り図が 3 号館 3 階の構造を表したものである。また、赤色の点が検出器の位置を表している。図を見ると全体的な分布の傾向に変化はない。建造物のない北西

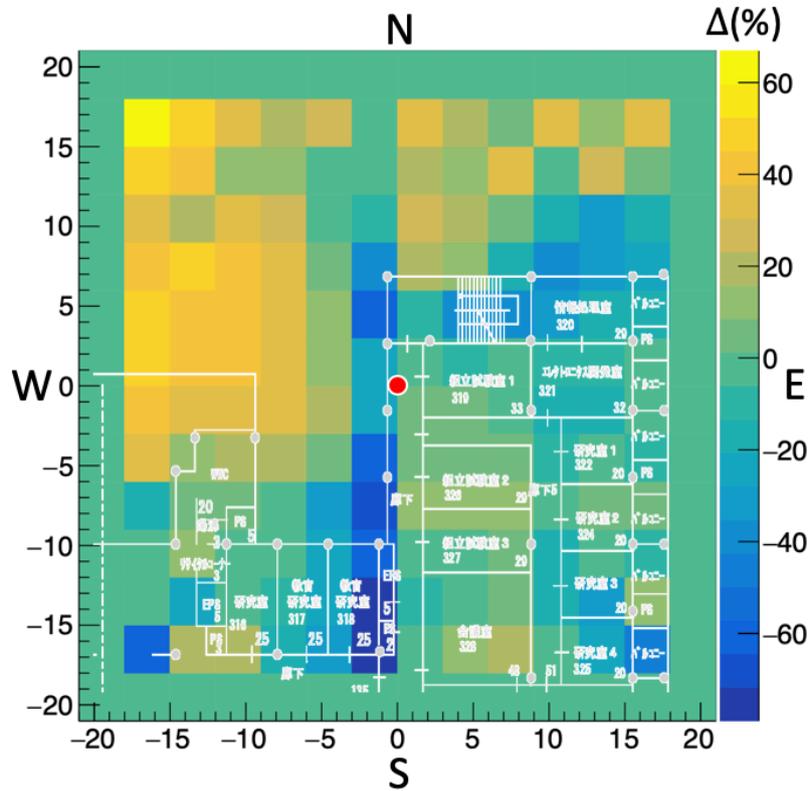


図 7.20 到来頻度分布図と建造物の配置の比較 (移動後)

方向の到来頻度が高く、3 号館内部に当たる領域周辺では到来頻度が低いことが分かる。また、移動後の検出器の位置は廊下であり、東西方向  $-1\text{ m}$  において縦に伸びる外壁に相当する領域の真横に位置する。したがって、東西方向  $-3\text{ m}$  から  $0\text{ m}$  までの到来頻度が極めて低い領域では、ミュオンが外壁部分を多く通過することによって頻度が減少していると考えられる。

## 第 8 章

### まとめ

本実験では、宇宙線の到来方向を測定するための実験装置を作成し、位置測定における均一性を調べた後、実際に神戸大学自然科学棟 3 号館による宇宙線の到来頻度の減少が測定できているかを確認した。

Geant4 を用いたシミュレーションを行い、障害物が存在すると宇宙線ミュオンの検出数にどの程度変化が生じるかを見積もった。障害物として自然科学棟 3 号館に相当するコンクリートを設置すると、検出数はおよそ 25% 減少した。

MPPC の 1 p.e. あたりの ADC 値の電荷依存性や各 MPPC の個体差を調べることで、ADC 値とそれに相当する光子数をほぼ一定にすることができた。

ファイバーの端面に反射材を塗装し、波長変換ファイバーと MPPC の光学的接続を改良したところ、平均光子数は 14.8 p.e. と前年度の 2 倍近くに増加した。チャンネルごとの平均光電子数のばらつきは GOMI connector を用いても存在したが、チャンネルごとに efficiency を求めて補正することで、実データに見られた凹凸が滑らかになり、平均光子数のばらつきがおおむね補正できた。

測定データと障害物を何も置いていないときのシミュレーションのデータを比較することで、自然科学棟 3 号館の構造に対応した宇宙線ミュオンの検出数の減少が確認できた。検出器の方向を変えて測定しても同様の結果が得られたことから、検出数の減少は検出器によるものではなく自然科学棟 3 号館によるものであることが確認できた。

以上から、この検出器で宇宙線ミュオンを用いた物質の透視が可能であることが示せた。

# 謝辞

本実験を進めるにあたり、山崎祐司教授には指導教官として研究の実施の機会を与えていただき、その遂行にあたって終始、ご指導をいただいた。ここに深謝の意を評する。粒子物理研究室の各位には研究遂行にあたり日頃より有益なご討論ご助言をいただいた。ここに深謝の意を評する。

## 参考文献

- [1] <http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/seminar/pdf/muontomography.2017.pdf>
- [2] Chris Hagemann, David Lange, Doug Wright, "Monte Carlo Simulation of Proton-induced Cosmic-ray Cascades in the Atmosphere," Lawrence Livermore National Laboratory, February 12, 2012.
- [3] P. Papini, C. Grimani, and S.A. Stephens, Nuovo Cim C 19 , 367 (1996).
- [4] 小田 稔, 『宇宙線』 (1975).
- [5] [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/03\\_handbook.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/03_handbook.pdf)
- [6] <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/support/glossary/ja-ka/index.html>
- [7] [https://www.kuraray.co.jp/uploads/5a717515df6f5/PR0150\\_psf01.pdf](https://www.kuraray.co.jp/uploads/5a717515df6f5/PR0150_psf01.pdf)
- [8] <https://belle.kek.jp/~isamun/easiroc/manual.pdf>
- [9] [https://belle.kek.jp/~isamun/easiroc/easiroc\\_board\\_manual\\_20130331.pdf](https://belle.kek.jp/~isamun/easiroc/easiroc_board_manual_20130331.pdf)
- [10] [https://belle.kek.jp/~isamun/easiroc/20140318\\_nakamura.pdf](https://belle.kek.jp/~isamun/easiroc/20140318_nakamura.pdf)
- [11] [https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/theses/master/gomi\\_mt.pdf](https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/theses/master/gomi_mt.pdf)
- [12] [www.jahep.org/hepnews/2010/Vol129No1-2010.4.5.6.Minamino.pdf](http://www.jahep.org/hepnews/2010/Vol129No1-2010.4.5.6.Minamino.pdf)