

平成 26 年度

卒業論文

# 大きな電離損失をする新粒子探索実験

神戸大学 理学部 物理学科

阿部 圭悟

池之上 果澄

稲田 知大

前久 景星

# 目次

1	概要	4
1.1	実験の目的	4
1.2	実験の方法	4
1.3	荷電粒子の電離損失	4
1.4	モノポールの電離損失	5
2	装置設計	6
2.1	装置内部	6
2.2	装置全体	7
2.3	留め具の作成	8
3	データ取得装置	11
3.1	Easiroc board	11
3.2	セットアップ	15
4	Multi Pixel Photon Counter(MPPC)	17
4.1	特徴	17
4.2	APD の動作原理	17
4.3	MPPC の性能評価における Setup	18
4.4	1photon 間隔の測定	20
5	MPPC の Gain 測定	24
5.1	目的	24
5.2	測定方法	24
5.3	Gain Curve	25
5.4	測定結果	26
5.5	Gain 補正	27
6	プラスチックシンチレータの性能評価	28
6.1	プラスチックシンチレータ	28
6.2	光量測定	29
6.3	ライトガイドと宇宙線の電離損失	31
6.4	トリガーシンチレータを用いた位置依存測定	34
6.5	まとめ	36

7	データ解析	37
7.1	測定 . . . . .	37
7.2	ノイズ対策 . . . . .	38
8	結論	42
	参考文献	43
	謝辞	44

# 1 概要

## 1.1 実験の目的

大きな電離損失をする粒子の探索を行う。大きな電離損失をする粒子の探索を行うことで例えばモノポールの質量に制限をかけることが可能である。

## 1.2 実験の方法

宇宙から飛来する荷電粒子が物質を通過した際の電離によるエネルギー損失 ( $dE/dx$ ) を調べるためにプラスチックシンチレータを用いる。プラスチックシンチレータを通過した際のシンチレーション光を捉えることで ( $dE/dx$ ) を測定することができる。今回はシンチレーション光を捉えるために半導体光検出器である MPPC を用いる。

## 1.3 荷電粒子の電離損失

荷電粒子が物質を通過すると物質中の電子と荷電粒子間のクーロン力によって電子が原子から電離され荷電粒子のエネルギーの一部 ( $dE/dx$ ) が電離した電子に与えられる。入射粒子の速度、電荷のみに依存し粒子の質量にはよらない。エネルギー損失は Bethe-Bloch の式で表される。

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

$K = 4\pi N_A r^2 m_e c^2 A$ ,  $I$ : イオン化ポテンシャル、 $T_{max}$ : 散乱による energy transfer

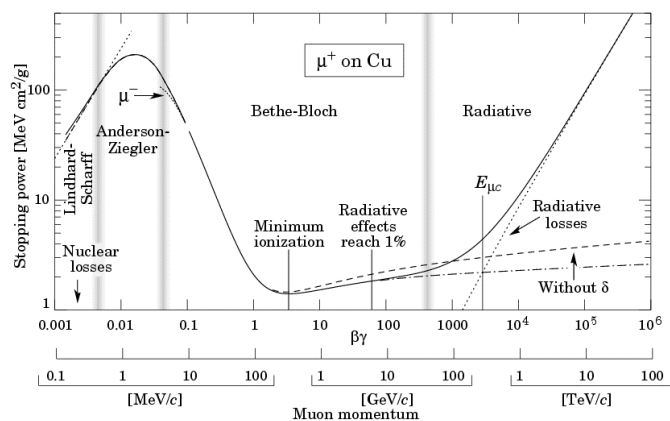


図 1: muon のエネルギー損失 ( $-dE/dx$ ) と運動量の関係

## 1.4 モノポールの電離損失

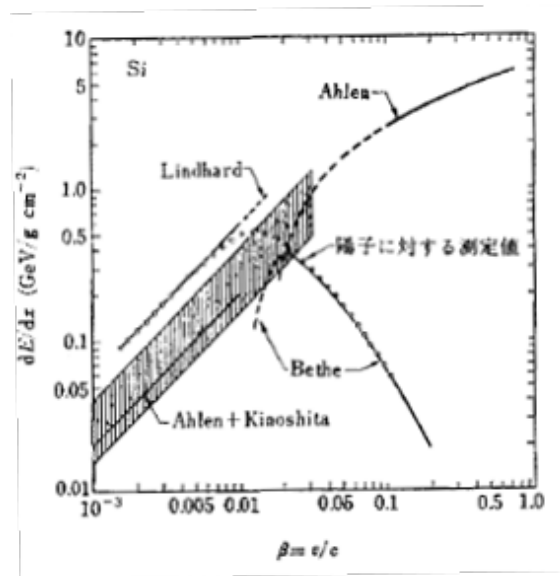


図 2: モノポールのエネルギー損失 ( $-dE/dx$ ) と運動量の関係

モノポールは荷電粒子と異なった過程で電離損失を行う。定性的にはモノポールの運動によって磁場が変動することで電磁誘導による誘導起電力が生じる。それによって電場が生じ電子損失を行う。電場は誘電体によってシールドされ有効半径が決まるが、磁場は透磁率のある物質が少ないためシールドされにくい。そのため  $\beta$  が大きくなるにつれて電磁誘導による誘導起電力も大きくなり、電離損失が大きくなっている。

## 2 装置設計



図 3: 装置全体図

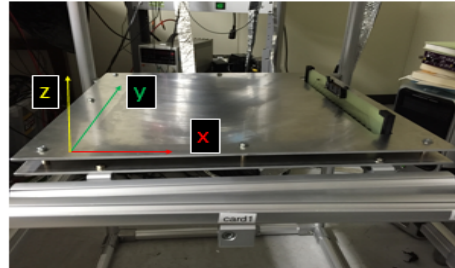


図 4: 装置 (黒シートなし)

本実験は宇宙から飛来する荷電粒子がプラスチックシンチレータ内で相互作用することにより生じるシンチレーション光を半導体光検出器 MPPC を用いて測定するものである。測定のため図 3 のような装置を用いた。この章では、装置の細かい説明を行う。

### 2.1 装置内部

装置の組み立てにあたり、以下のものを用意した。

- プラスチックシンチレータ (15×15×240 mm)×16 本
- MPPC(32 個)
- アルミニウム架台 (528×528×833 mm)
- アルミニウム板 (400×400×3 mm)
- 16ch 読み出し基板
- 34pin フラットケーブル
- 各部品の留め具
- 黒ビニールシート

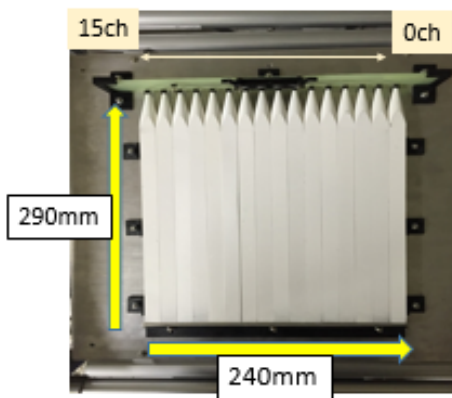


図 5: 装置内部

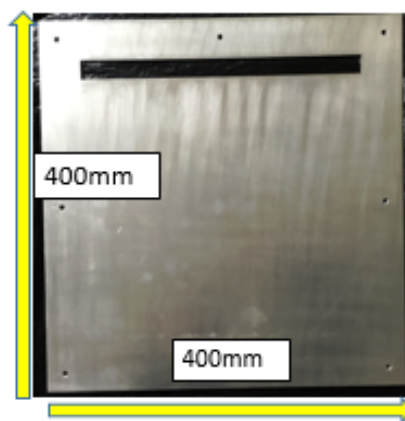


図 6: アルミ板 (上)

アルミ板の上に 16 個の MPPC を取り付けた基板を立て、ライトガイドの先端が MPPC と向かい合うようにプラスチックシンチレータを 16 本並べた (図 5)。プラスチックシンチレータは  $xy$  方向には複数の留め具で固定し、MPPC とライトガイドの先端がずれないようにしている。基板はアルミ板 (下) に対して垂直に立て、留め具のみで固定している。上のアルミ板は図 5 の装置に上からかぶせるように取り付け、四辺四隅をネジで固定し、プラスチックシンチレータが  $z$  方向にずれないようにした。設計上、プラスチックシンチレータより、基板の方が高くなっているため、アルミ板上部には基板がはみ出るように四角い穴が開いている (図 6)。

これらに、光漏れ防止のため黒ビニールシートをかけて、アルミパイプ架台に取り付けた。

## 2.2 装置全体

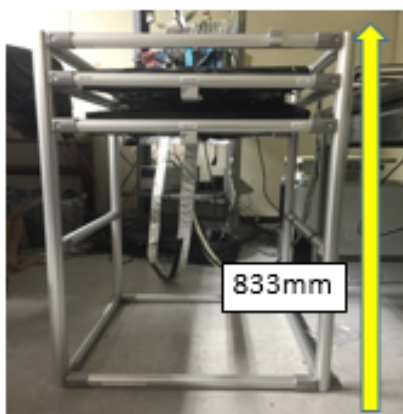


図 7: 装置全体 (zx 面)

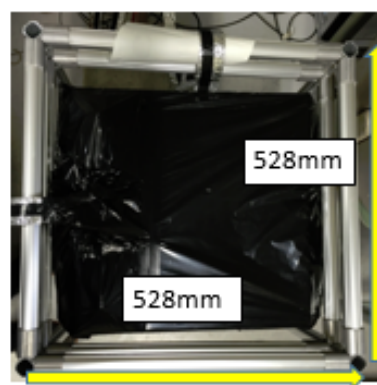


図 8: 装置全体 (xy 面)

装置は2層式になっており、シンチレータ方向が90度向きを変え交差するように重なっている。上下のコインシデンスを取ることで通過する粒子が落とすエネルギーを2次元的に解析できるようにした。2層間隔は100~700 mmまで変えられる。今回の実験では利用しなかったが、今後のことを考え、各層 y 軸方向に回転できるように組み立てた。

## 2.3 留め具の作成

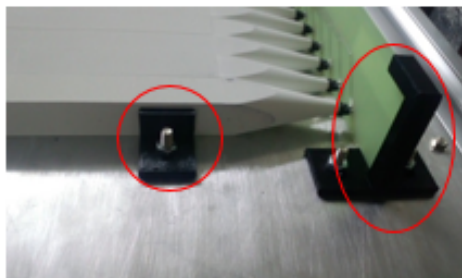


図 9: 3D プリンターで作成した留め具

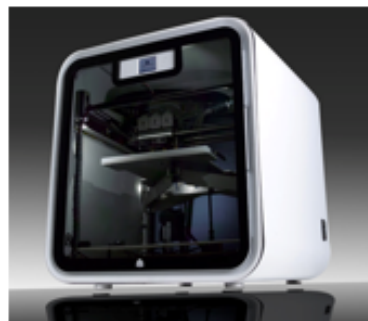


図 10: Cube Pro 3D プリンター

今回図のようなプラスチックシンチレータと基板の留め具は3Dプリンターを用いて作成した。使用したプリンターは、Cube Pro 3Dprinter である。最大プリントサイズは275×265×230 mm、プリント材料はPLA<sup>\*1</sup>,ABS<sup>\*2</sup>である。今回は小型の留め具を作成するため、ABSをプリント材料として用いた。

### 2.3.1 3D プリントの手順

今回用いた Cube Pro 3Dprinter でのプリントまでの手順を紹介する。2つのソフトを用いた。

- 123Ddesign

3D の設計図を作る CAD ソフト (フリーソフト)。立方体や直方体などの基本的な立体を1つずつ変形、組み合わせることで作成する。遠近感や陰影が見やすく、完成図をイメージしやすいのでとても便利である。3D ファイル (STL<sup>\*3</sup>) として出力するものなら代用可能。

<sup>\*1</sup> polylactic acid(ポリ乳酸):強度が高く、大型のプリント材料に適している。

<sup>\*2</sup> アクリロニトリル (Acrylonitrile)、ブタジエン (Butadiene)、スチレン (Styrene) 共重合合成樹脂の総称。サポート用のプリント材料に適している。

<sup>\*3</sup> Standard Trianglated Language:三次元形状を小さな三角形の集合体として出力するシステム



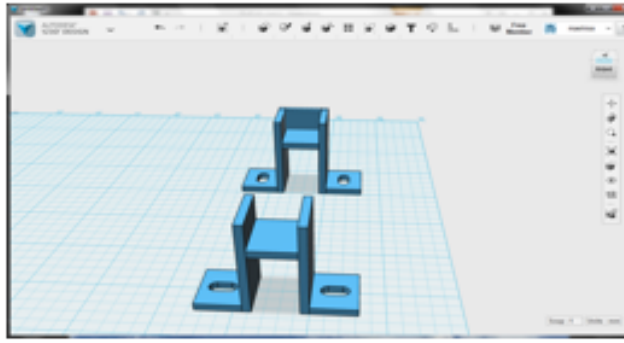


図 11: 123D Design

- CubeProSystems

3D の設計図をスライスして印刷可能な形に変換する CubePro 専用ソフト。台の上での設計図の位置や向き、倍率を変えられる。ここでは設計図の向きに特に注意した。2 次元的な層を何度も重ねることで立体を作っていくので、屋根になるような中空構造ができないような向きでプリントすることが大切である。また、この変換の際に、3D プリントにかかる時間が表示される。



図 12: Cube Pro Systems

Cube Pro Systems で変換したファイルを Cube Pro 3Dprinter に送信し、3D プリンターのタッチパネルで操作することで 3D プリントを開始できる。

### 2.3.2 3Dプリンターの利点

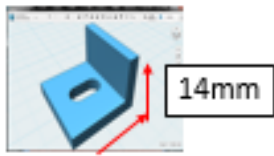


図 13: 留め具 1

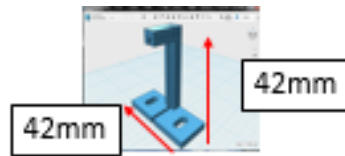


図 14: 留め具 2

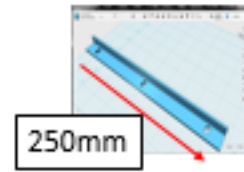


図 15: 留め具 3

今回の装置 1 層分の留め具の作成には、計 273 分かかった。設計等の時間を合わせるともっと時間はかかっているが、業者に部品を発注することと比べると、手間や時間的な面でメリットがあると思われる。また、一度設計図を作ればいくつも複製可能であること、さらに材料の単価が比較的安いことから、作り直しや予備の作成が容易にできる点もメリットとして挙げられる。

## 3 データ取得装置

### 3.1 Easiroc board

#### 3.1.1 概要

本実験では、MPPC 専用の読み出し NIM モジュールである Easiroc board を用いた。EASIROC はフランスの OMEGA グループによって開発された ASIC である。当モジュールはこのチップを 2 個搭載している。主な機能を以下に示す。

- 64 個の MPPC の同時駆動・読み出しが可能
- MPPC へ印加する電圧 (0 – 90 V) を内蔵
  - さらに各チャンネルのオフセット電圧を 0 – 4.5 V の間で変化させることで、各 MPPC への印加電圧を調節
- アンプを内蔵しており、MPPC の信号の増幅が可能
- Ethernet ケーブルで PC と接続することでモジュールの制御とモニタリング、データ取得が可能
- 内部トリガーと外部トリガーの両方でのデータ取得が可能

#### 3.1.2 Easiroc board 内部回路

Easiroc board の内部回路を図 16 に示す。EASIROC チップは主にアナログ信号の成形増幅と電圧制御、FPGA はデータ取得と ASIC の制御を行う。MPPC からのアナログ信号の入力にはツイストペアケーブルを用いる。EASIROC チップに入力された信号は電荷測定に使用されるほか、内部の Discriminator を通してトリガー信号に使用される。EASIROC で成形増幅された信号および内部または外部からのトリガー信号が FPGA に入力され、そこでデータ取得が行われる。

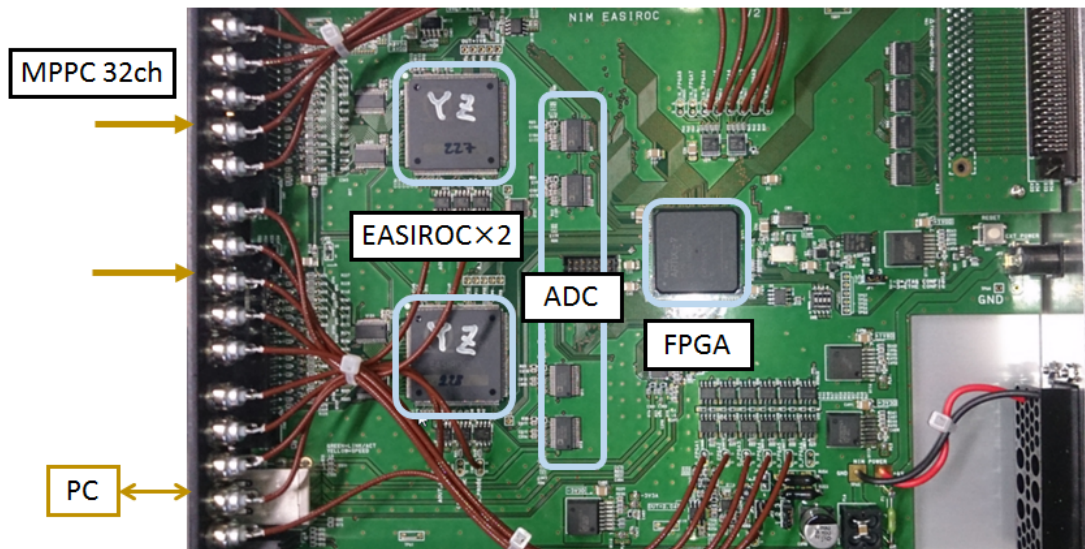


図 16: Easiroc board

### 3.1.3 EASIROC チップ

EASIROC に入力された信号の処理について述べる。EASIROC には波形の成形増幅器や Discriminator が備わっている。信号の流れを以下の図 17 に示す。信号は high gain 側と low gain 側に分割され、それぞれのプリアンプで増幅される。Slow shaper と Fast shaper という 2 種類の成形器が内蔵されている。Fast shaper は high gain 側にのみ配置されており、Discriminator を通してトリガー信号に利用される。Slow shaper は high gain 側と low gain 側の両方に配置されており、電荷測定に使用される。具体的な測定方法については次項で述べる。

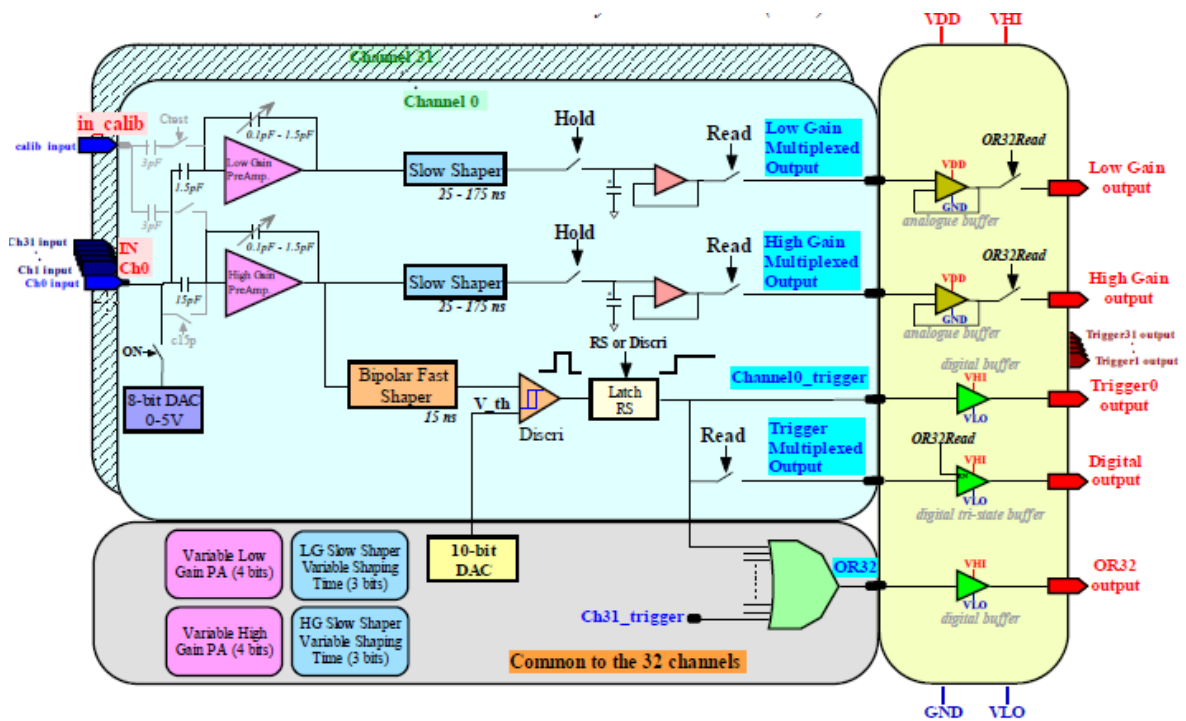


図 17: EASIROC 内部回路

### 3.1.4 電荷測定方法

本モジュールの電荷測定方法は波高測定型である。Sample-Hold という方式で、IN-HOLD という端子にトリガー信号が入力されたタイミングでの波高を保持し、その波高を測定する。そのためピークとなる位置でトリガー信号が入力されるようにタイミングを調整する必要がある。以下ではその方法について説明する。

high gain 側の生信号、Fast shaper ・ Slow shaper により成形増幅された信号の波形をそれぞれ以下の図 18 に示す。EASIROC が持つ成形増幅器のひとつである Fast shaper は信号を微分するため短い peaking time を持つ。この信号が Discriminator の threshold を超えた時に EASIROC はトリガー信号を出力する。一方 Slow shaper は信号を積分するため peaking time が長く、その波高は電荷と対応している。この長い peaking time を利用し、トリガー信号を Delay させてピーク位置を Hold できるように調整する。その様子を以下の図 19 に示す。Hold 位置が早すぎたり遅すぎたりするとピークより低い位置で Hold され、正しい電荷が測定できないことがわかる。

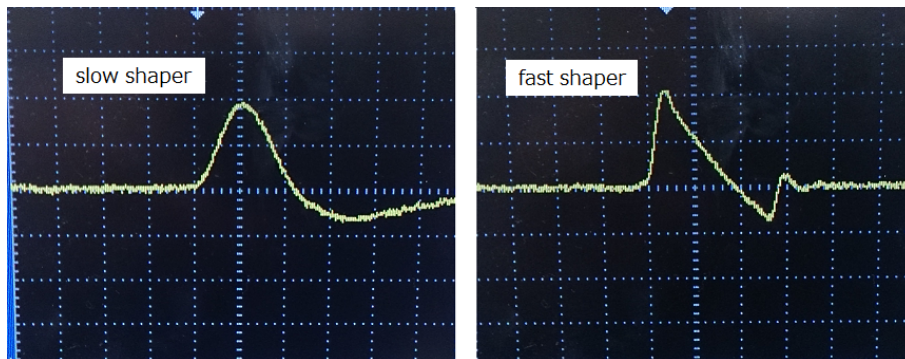


図 18: 各過程における波形

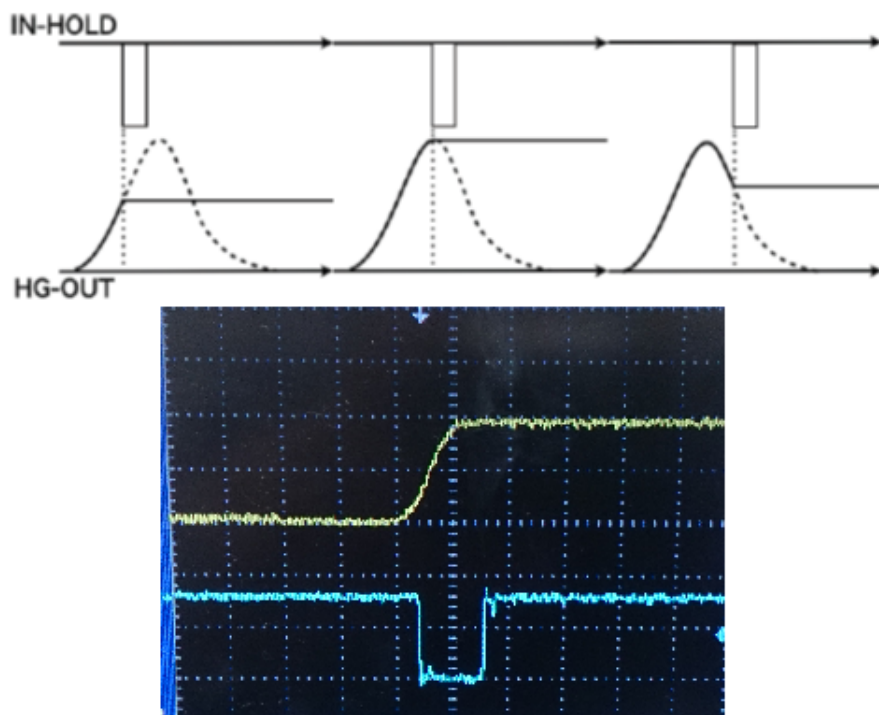


図 19: Sample-Hold の様子

## 3.2 セットアップ

### 3.2.1 Easiroc board 単体で測定する際のセットアップ

Delay 以外の外部モジュールを介さずに Easiroc board 単体で測定を行う際のセットアップを以下の図 20 に示す。HG-OUT から出力される Slow shaper の信号と、TRIG-OUT から出力されるトリガー信号をオシロスコープで確認し、Delay 時間を調整することでトリガー信号のタイミングをピーク位置に合わせる。そうして Delay させた信号を IN-HOLD に入力する。

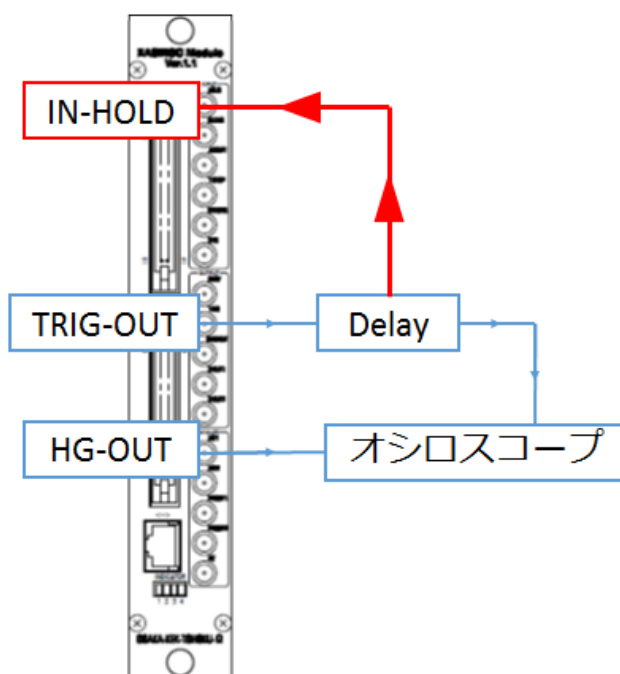


図 20: Easiroc board 単体でのセットアップ

### 3.2.2 宇宙線測定の際のセットアップ

宇宙線を測定した際のセットアップを以下の図 21 と図 22 に示す。図 21 に示したセットアップでは、測定に 2 台の Easiroc board を使用し、それぞれの TRIG-OUT から出力される信号の Coincidence をとった。その信号をトリガー信号として片方の Easiroc board の IN-HOLD 端子に入力し、データを取得した。図 22 は、測定に PMT を用いた際のセットアップである。PMT の信号を外部モジュールの Discriminator に入力し、その出力信号と Easiroc board の TRIG-OUT の出力信号との Coincidence をとった。その信号をトリガー信号として Easiroc board でデータを取得した。当初は Easiroc board 2 台で同時にデータの取得を行う予定であった

が、測定の都合などからデータ取得プログラムの改良が間に合わなかったため今回はこのようにデータ取得をした。

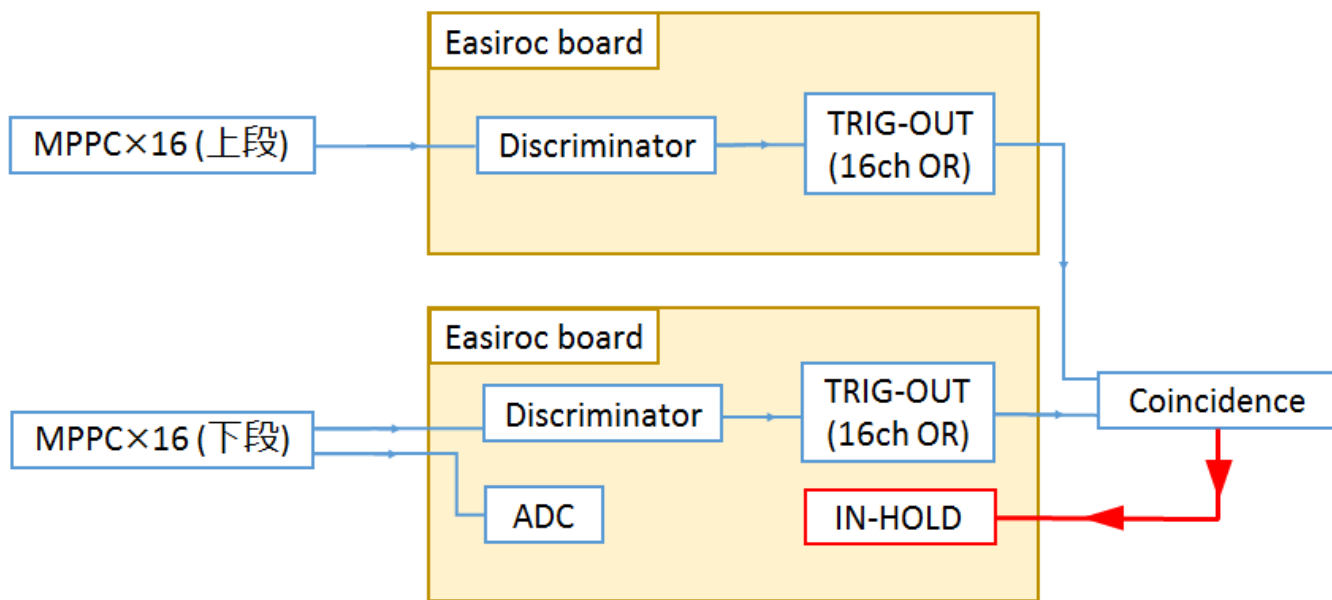


図 21: Easiroc board2 台を用いたセットアップ

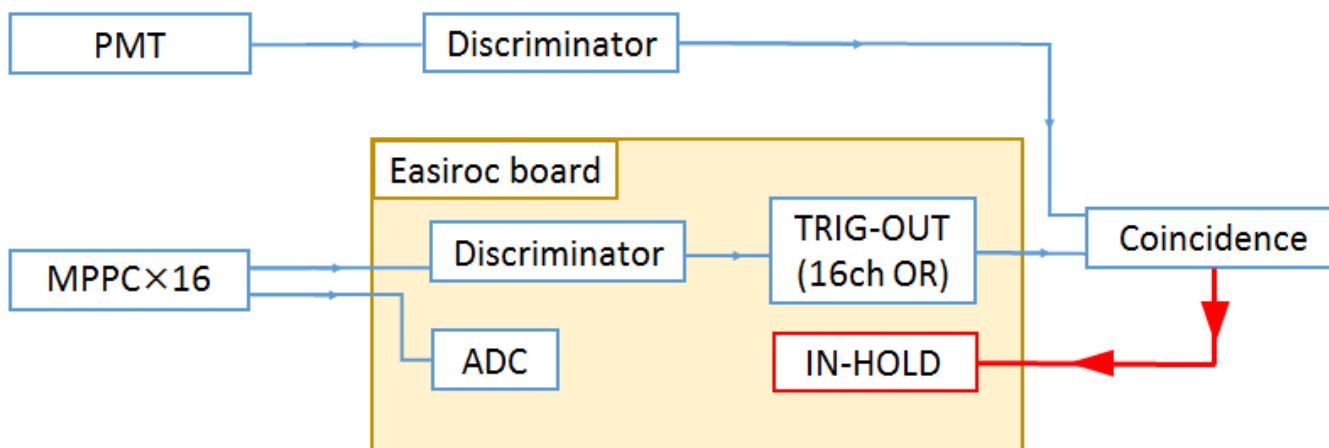


図 22: PMT を用いたセットアップ



## 4 Multi Pixel Photon Counter(MPPC)

### 4.1 特徴

- Geiger mode で動く photo sensor(APD<sup>\*4</sup>) が受光面に沢山並んでいる。
- 各 pixel の波高は入射光子数によらず一定である。
- 素子の出力は各 pixel の Wired-OR。

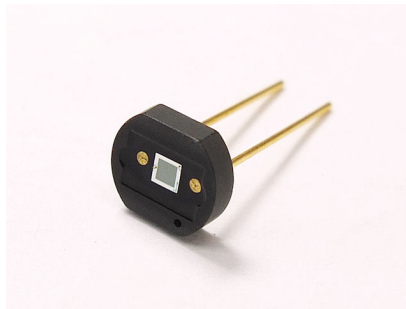


図 23: mppc

- 光量が十分に小さいと pixel 数 = 入射光子数 が成り立つ。入射光子数と pixel 数が対応しているので MPPC で測定できるダイナミックレンジ (最大光子数) は pixel 数よりも小さくなる。光子数が多くなると同じ pixel に複数の光子が入射する事象が多くなり信号が光子数に比例しなくなり飽和する。
- 本実験では 1600pixel 数の MPPC を用い信号がどのように飽和するのかを調べた。図 24 は横軸が入射光子数、縦軸が検出光子数を表しており、1600pixel の MPPC に入射する光子数が多くなるにつれて pixel が飽和するさまを表す理論曲線である

### 4.2 APD の動作原理

APD は pn 接合した半導体による光検出器である。pn 接合半導体は、逆電圧をかけた状態では電流は流れないが、特定の電圧 (降伏電圧) を超えると光子が入射した時に Avalanche 増幅を起こし電流が流れる。降伏電圧を超える高い逆電圧をかけた APD には、空乏層に高電場がかかる。この状態で光子が入射し、電子ホール対が生

---

<sup>\*4</sup> APD = Avalanche Photo Diode

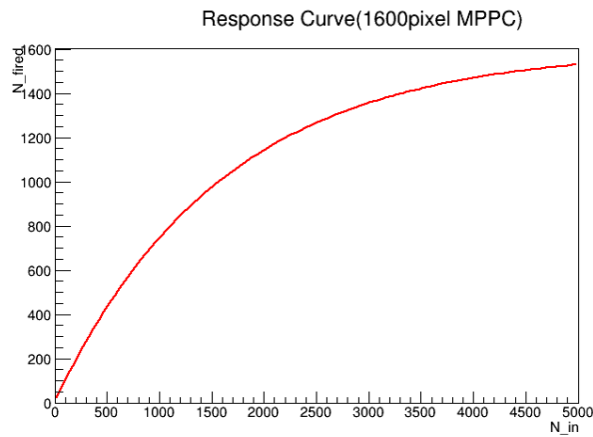


図 24: 1600pixelMPPC 応答曲線の理論曲線

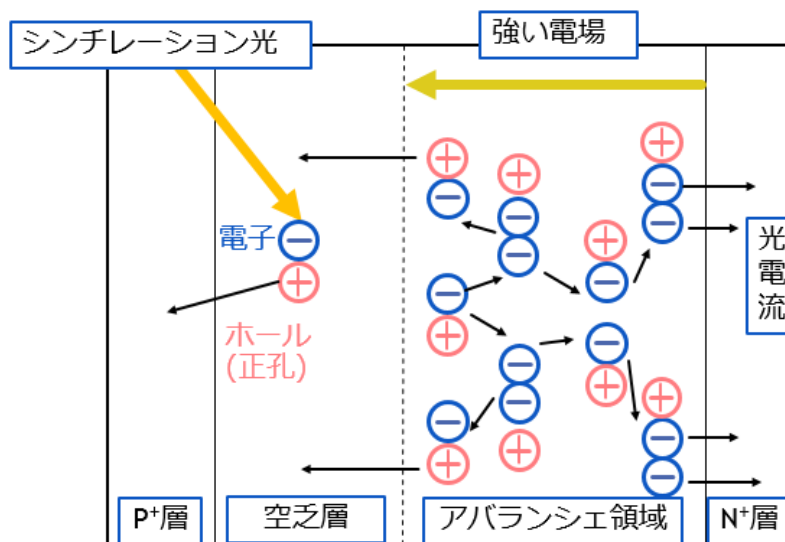


図 25: APD 動作原理

じると高電場により加速された電子が2次の電子ホール対を生成する。この過程を繰り返して増幅することを Avalanche 増幅といい、増幅された信号が信号として読み出しされる。このような状態で APD を動作させることを Geiger mode という。

### 4.3 MPPC の性能評価における Setup

MPPC の特性を測定するためパルスジェネレーターで LED を点灯させ MPPC の出力を Easiroc モジュールでデータ取得した。LED の光量のリファレンスとして用いるために光量に対して線型性を持つ光電子増倍管 (PMT) を暗箱内に設置し、LED の光量を PMT と MPPC で測定した。LED の光量はパルスジェネレーターの Amplitude と抵抗の大きさを変えることで調整した。パルスジェネレーターの設定

で Frequency 1kHz、width 100ns は固定して行った。光量の調整を行えるように抵抗を 4 種類 (100Ω、1kΩ、10kΩ、100kΩ) 用意しつなぎ変えられるようにした。パルスジェネレーターの width を 100ns で固定した理由としては Easiroc モジュールのペDESTAL と分離しやすかったからである。今回はできなかったが後述の Easiroc モジュールの Slowshaper を調節することでより短い width で測定できるかもしれない。

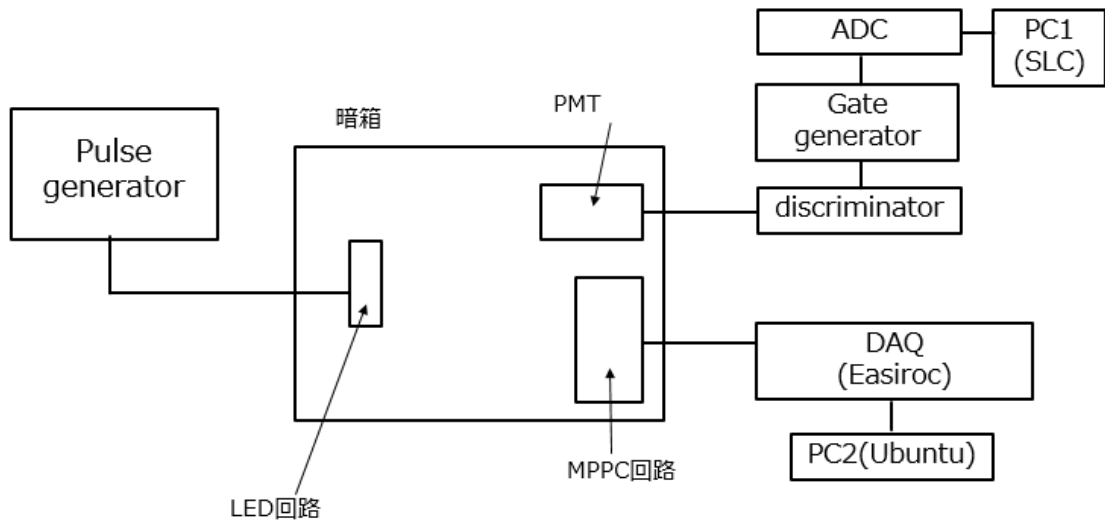


図 26: Block diagram

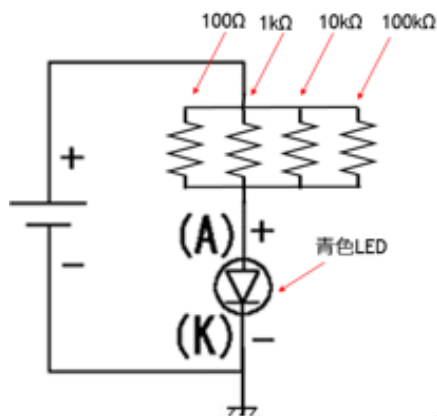


図 27: LED 抵抗回路

#### 4.4 1photon 間隔の測定

MPPC の特徴として 1pixel に多数の光子が入っても 1 光子の時と同じ信号が出力され、光子数が多くなると信号が光子数に比例せず飽和する。実験の目的である大きな電離損失をする粒子は光子数が多いシンチレーション光を起こすと考えられるので pixel 数と検出光子数の関係を調べる必要がある。そのために 1 光子あたりの ADC カウント (ADC/photon) を測定した。図 28 のヒストグラムのピークはそれぞれ光子の相当する。枠の中の数字は光子数ではなくピークの番号を示している。ピークをガウシアンでフィットし、その mean の値をプロットしたのが図 29 である。横軸 photon は図 28 の光子数の番号と一致している。プロットした点を直線でフィットしたところ 67.1[V] での photon/ADC は 20.62 という値が得られた。

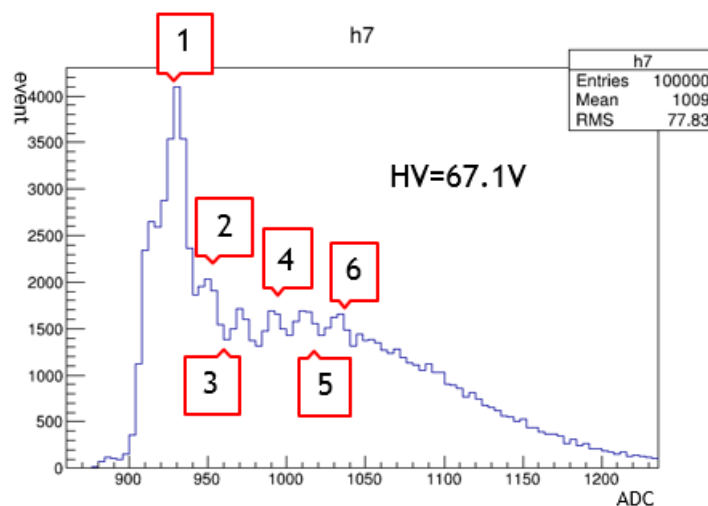


図 28: photon space counting

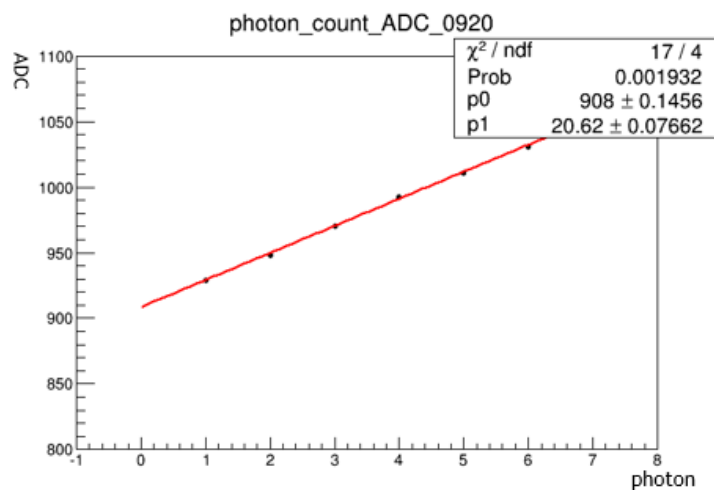


図 29: photon ピークと ADC 値との関係

#### 4.4.1 測定の注意点

光量を上げると pixel が飽和を起こさなくなる前に Easiroc モジュールの Amp が飽和することがわかった。そのため Amp が飽和しないように MPPC のゲインを調整する必要がある。

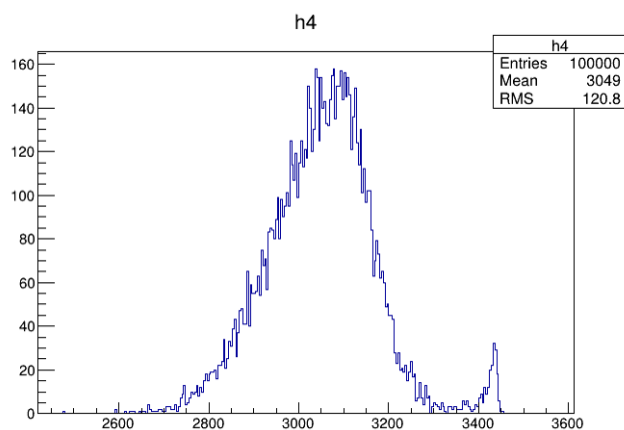


図 30: Amp が飽和を起こしているヒストグラム

ゲインと ADC の関係を示したものが図 31、図 32 である。印加電圧を上げて MPPC のゲインを調整すると ADC 値が小さくなることがわかる。

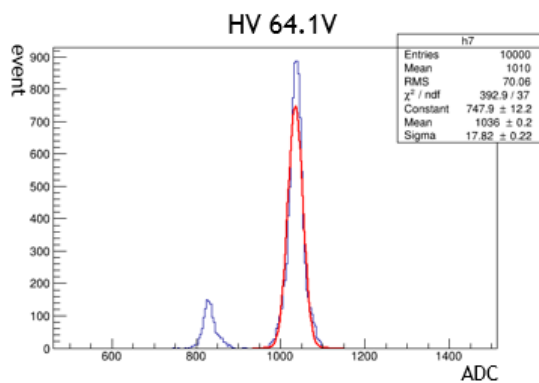


図 31: 電圧 低

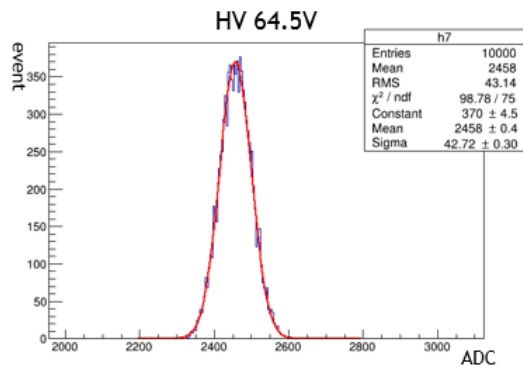


図 32: 電圧 高

#### 4.4.2 MPPC の応答曲線

ゲインと光量を調節しながら MPPC の応答曲線の測定を行った。ゲインは印加電圧 5 種類 (64.3V, 64.45V, 64.8V, 65.8V, 67.8V) を用いた。ゲインを変えた光量は変更前と変更後の印加電圧両方で測定し (ADC-ペDESTAL) の値の比を取ってゲインの変更した際の ADC 値の調整を行った。

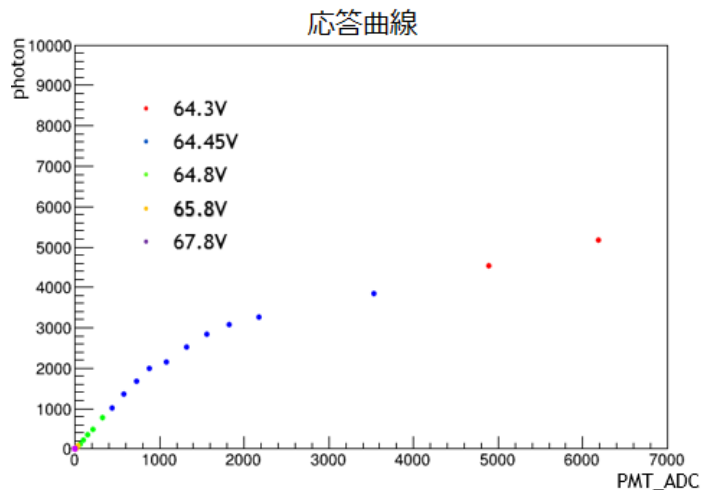


図 33: response curve

図 33 より以下のことがわかった。

- 応答曲線は光子数が少ないところでは線型となっているが光子数が多くなるに連れて傾きが変化している。
- pixel 数 (1600) 以上の光子数を検出している。

pixel 数 (1600) 以上の光子数が検出されている原因としてはパルスジェネレーター

の width が問題であると考えられる。MPPC に並んでいる APD は光子の入射により放電した後、数 ns の時間において pixel の電圧が降伏電圧まで回復し、再度光子が検出可能な状態となる。本測定ではパルスの width が 100ns と長いため放電を何度も繰り返してしまった可能性がある。放電を繰り返した結果 pixel 数以上の光子を検出してしまったと考えられる。今後の対策としてはパルス短い width するという方法があるがこの場合はパルスジェネレータの Amplitude で光量を調整すると時定数に変化する可能性があるため ND フィルターなどの減光措置を行い光量を調整する必要がある。

## 5 MPPC の Gain 測定

### 5.1 目的

MPPC の Gain は APD ピクセル内部で発生した電子-ホール対がガイガー放電によってどれだけ増幅するかで定義される。この値は APD ピクセルのキャパシタンス  $C$  と素電荷  $e$ 、また印加電圧  $V_{bias}$  と降伏電圧  $V_{bd}$  を用いて

$$\text{Gain} = \frac{C}{e}(V_{bias} - V_{bd}) \quad (2)$$

と表される。(2) 式から分かるように MPPC の Gain は印加電圧と降伏電圧の差で決まる。この降伏電圧には MPPC ごとに個体差があるため、同じ電圧を印加しても Gain にばらつきが生じる。本実験では複数の MPPC を用いて同時に測定し、信号の大きさの違いについて議論することを目的としているので、この Gain のばらつきを補正して揃える必要がある。以上が Gain を測定する目的である。

### 5.2 測定方法

パルスジェネレータを用いて LED を光らせ、図 34 のような配置で MPPC に LED の光を当てて測定を行った。ADC 値を横軸にとったヒストグラムを作成し、電圧を変えた時のピーク位置の変化をプロットすることにより Gain Curve を作成した。

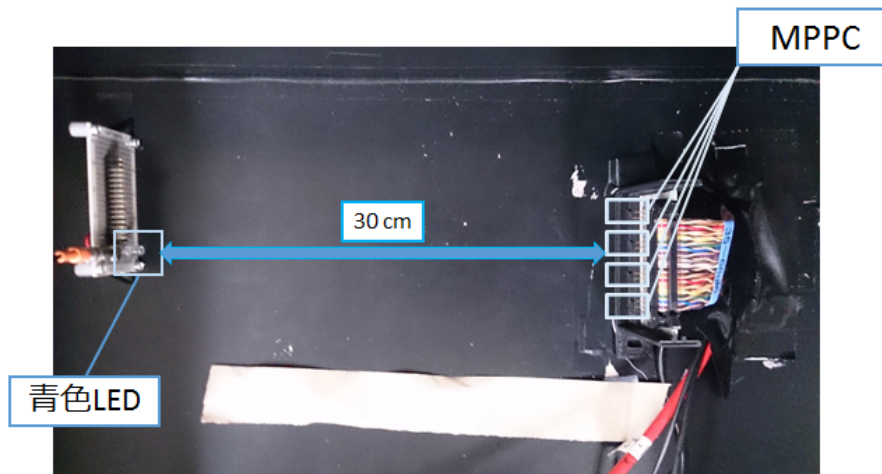


図 34: LED と MPPC の配置



### 5.3 Gain Curve

パルスジェネレータの設定を以下のようにして測定を行い、電圧を 0.2 V ずつ変化させたときのピーク位置を 4 または 5 点プロットして直線 fit した。ひとつの MPPC について印加電圧を 66.0 V にして測定したヒストグラムの例が図 35、Gain Curve の例が図 36 である。

300 番台

Frequency 100 Hz

Width 20 ns

LED の抵抗 100  $\Omega$

900 番台

Frequency 100 Hz

Width 100 ns

LED の抵抗 1 k  $\Omega$

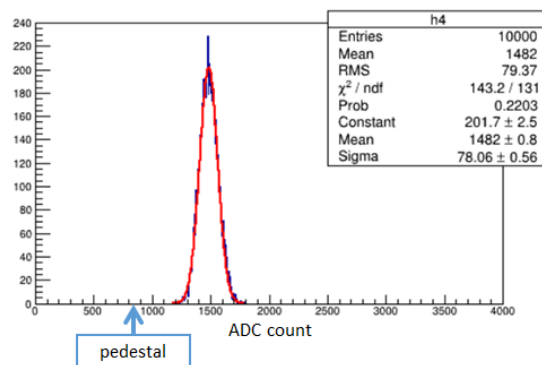


図 35: ヒストグラムの例

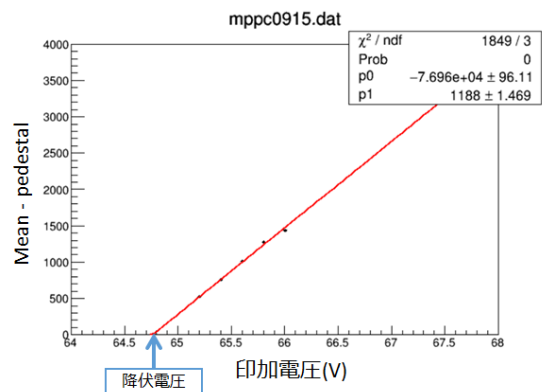


図 36: Gain Curve の例

## 5.4 測定結果

各個体番号について、37はGain Curveの傾き、38は降伏電圧をプロットしたものである。今回使用したMPPCには大きく分けて2種類の個体番号(300番台、900番台)がある。その性質もこの番号によって2種類にわかれているように見えるが、これはパルスジェネレータやLEDの抵抗の違いなどからくる差であると考えられる。詳しい原因は未知であるが、正しく補正するには設定を揃える必要があった。そのため、今回の宇宙線測定には900番台のみを用いて測定している。

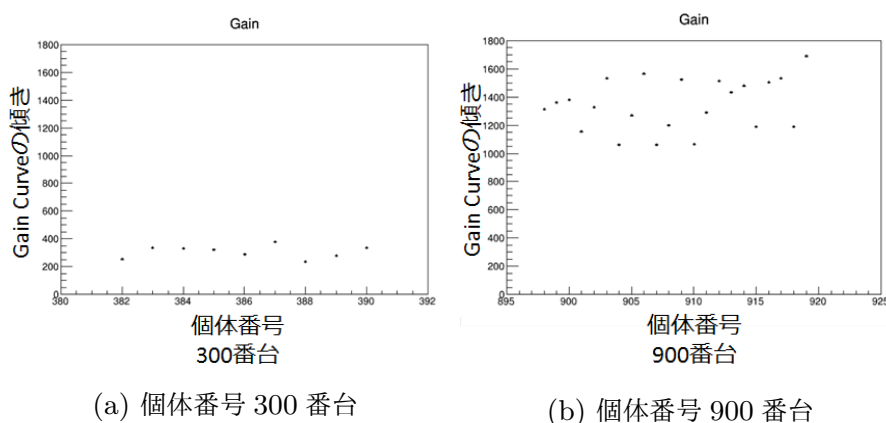


図 37: Gain Curve の傾き

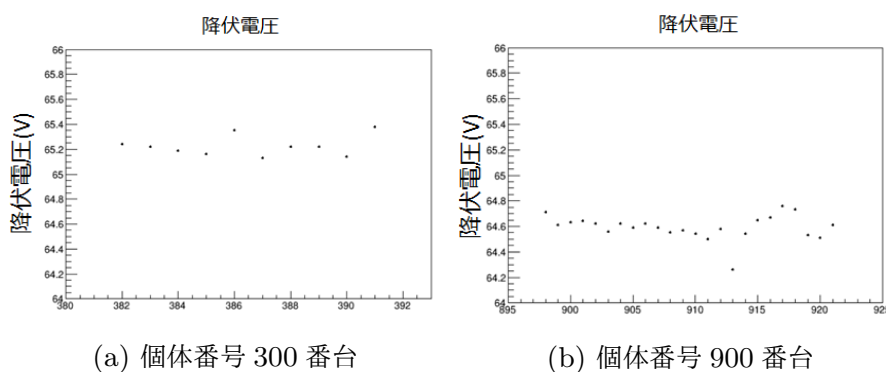
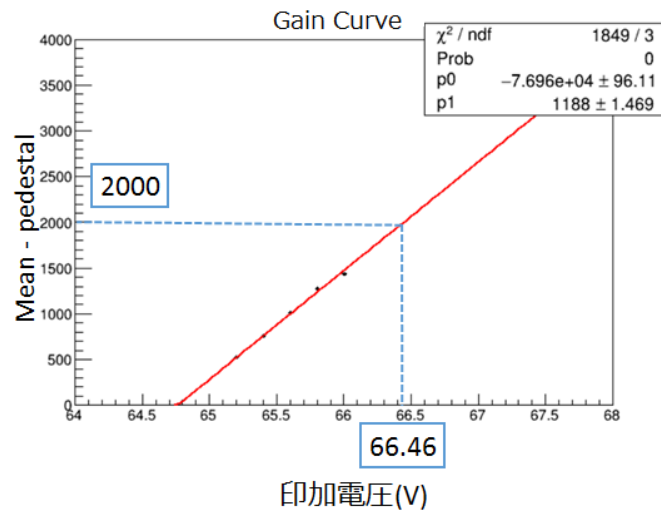


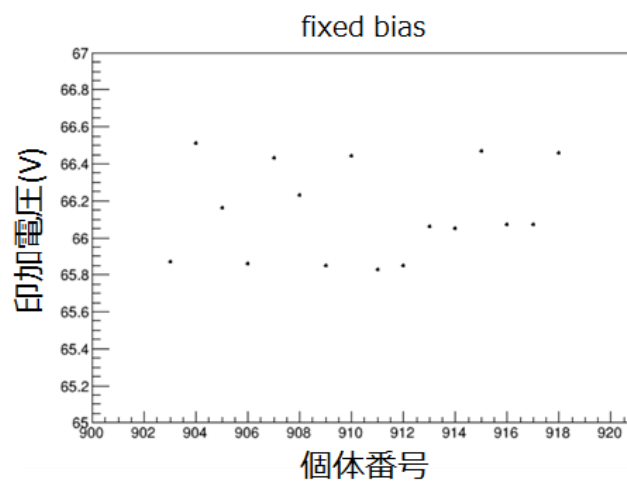
図 38: 降伏電圧のばらつき

## 5.5 Gain 補正

Gain Curve (図 36) を用いて各 MPPC の Gain 補正を行った。縦軸の ADC count がある特定の値になるような印加電圧を全 MPPC について個別に求め、設定した。例として、ある光量に対して 2000 ADC count となるような印加電圧をひとつの MPPC について求めたのが図 39a である。全 MPPC について求めた結果を図 39b に示す。



(a) Gain 補正の例



(b) Gain 補正で求めた電圧

## 6 プラスチックシンチレータの性能評価

### 6.1 プラスチックシンチレータ

シンチレータとは粒子が物質を通過する際に、励起状態になった物質中の原子が基底状態に戻るときにそのエネルギー差分の一部を光として放出する物質のことである。( [8], [9], [7], [10])

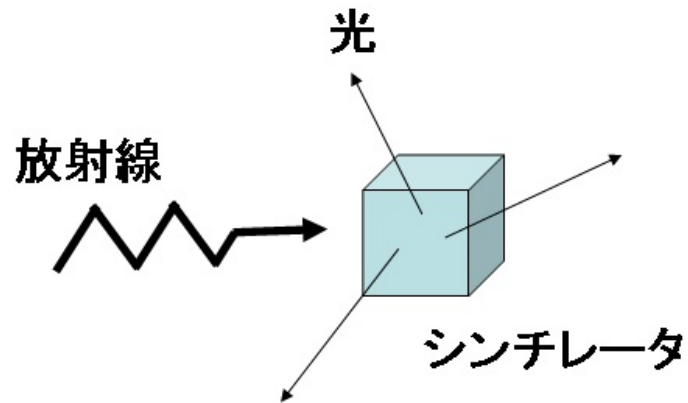


図 40: シンチレーション

本実験では電離損失の測定にプラスチックシンチレータを用いる。これは有機シンチレータで、無機シンチレータに比べて早い減衰時間を有しており時間分解能が優れている。この早い応答を利用して、放射線の測定等に用いられる。



図 41: プラスチックシンチレータ

## 6.2 光量測定

線源 ( $^{90}\text{Sr}$ ) や宇宙線を用いてシンチレータから光子数をどれほど検出できるか調べ、またその光量を増やせるかどうか探った。

$^{90}\text{Sr}$  の  $\beta$  崩壊は以下のようなものである。

$^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y}$  ( $\beta$  線の最大エネルギー : 0.546MeV)

$^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Zr}$  ( $\beta$  線の最大エネルギー : 2.280MeV)

### 6.2.1 シンチレータに施した工夫と測定方法

そのままのプラスチックシンチレータでは、端面に MPPC をつけて測定すると粒子の入射位置により光量差が生じる可能性がある。そのため粒子の入射位置による光量差を減らし光量を増やす目的でアルミマイラーをまいた。10photon 程度得ることを目的としており、先端には 1mm 角で穴を空け MPPC の受光面に光が集まるようにした (図 42)。使用したシンチレータは長さ 250mm × 幅 10mm × 厚さ 10mm である。



図 42: アルミマイラーをまいたプラスチックシンチレータ

### 6.2.2 測定方法

暗箱の中にシンチレータをいれ、MPPC1ch で測定した。線源はシンチレータの中心にくるように置いた。トリガーは Easiroc board の内部にある、Fast shaper に threshold をかけたものとした。

線源 :  $^{90}\text{Sr}$

HV : 68V

event 数 : 100000

### 6.2.3 測定結果

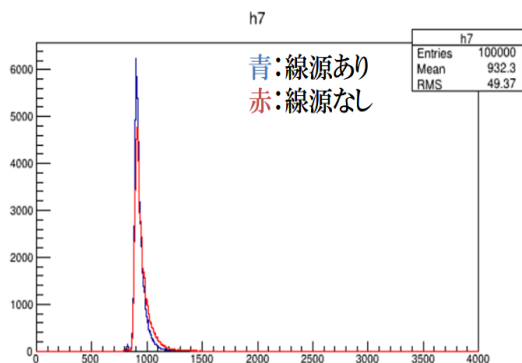


図 43: 線源ありと線源なしの結果を重ねたヒストグラム

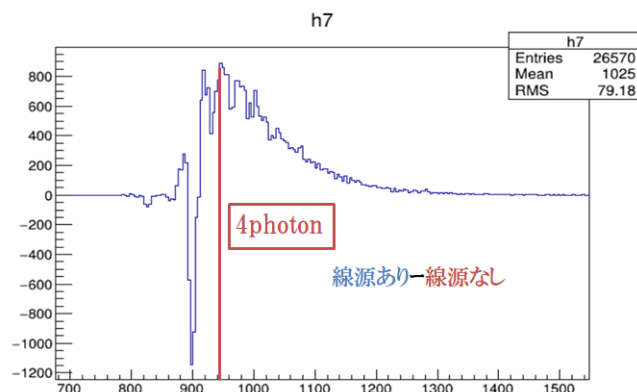


図 44: 線源ありから線源なしを引いたヒストグラム

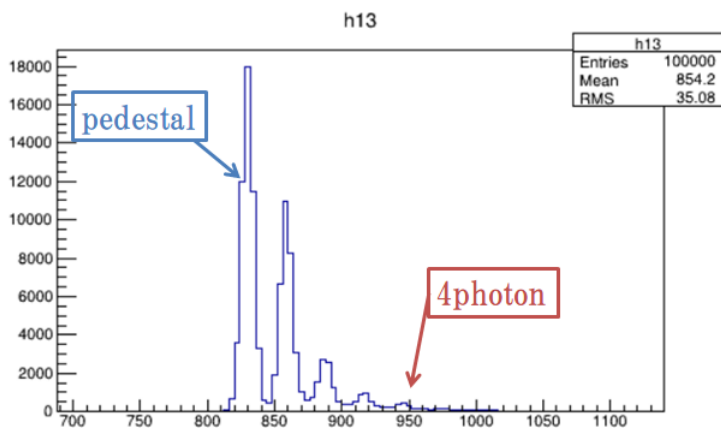


図 45: 得られた光子数の基準となるヒストグラム

図 43 では光量を得られているか分かりにくいいため、図 44 のように線源なしの pedestal の Entry 数を基準として線源ありの結果から線源なしの結果を引いた。図 45 は光量測定実験と同じ Gain(photon 間隔) の光子数のヒストグラムである。図 44 のピークの ADC 値は大体 940 で、図 45 の ADC 値 940 の 4photon に対応しているのでアルミマイラーをまいたシンチレータでは平均して 4photon 程度見えることが分かる。

#### 6.2.4 まとめ

シンチレータから光量が多く得られなかった原因として、シンチレータの先端の穴は目視で空けたため MPPC の受光面にうまくあっていなかったのではないかと考えた。また、シンチレータ側面とアルミマイラーとの間には隙間があったため、うまく光が反射されなかったからではないかと考えた。これを受けて、シンチレータからの光を MPPC に集めるため、表面を塗装しライトガイドをつけた。さらに、線源からの光量が少なく MPPC 自体のノイズによる信号と線源からの信号を区別できないため、以下の粒子の位置依存測定実験からは宇宙線で測定を行った。

### 6.3 ライトガイドと宇宙線の電離損失

#### 6.3.1 ライトガイド

発光した光を誘導するためにライトガイドを設計した。

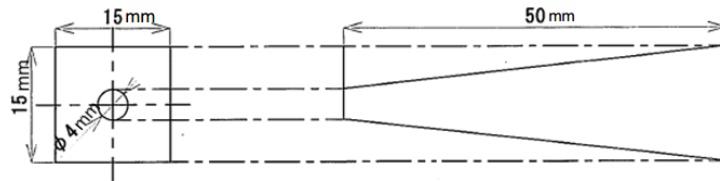


図 46: ライトガイドの設計図

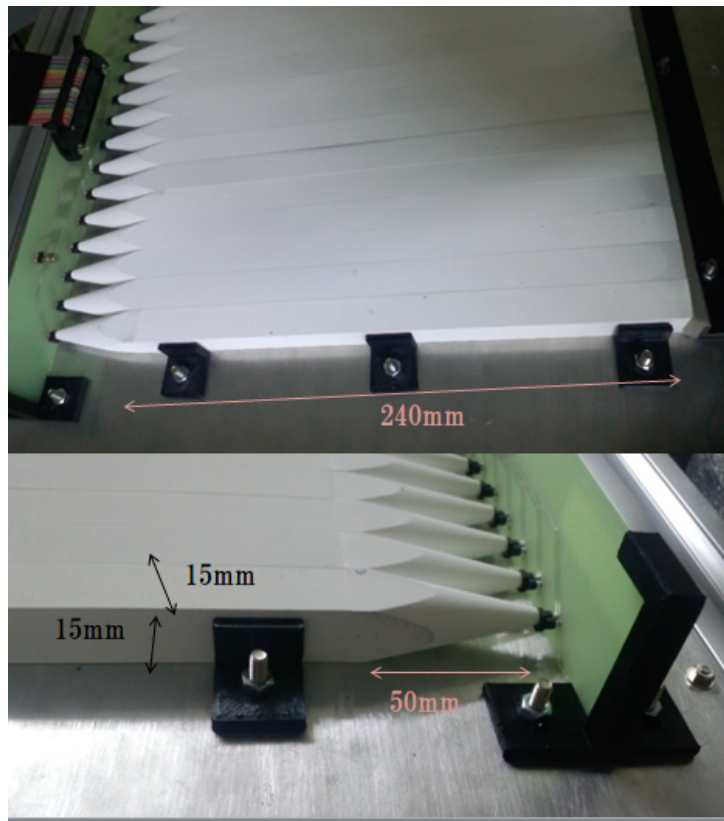


図 47: 実際のライトガイド

- ライトガイドの先端：4mm 径
- MPPC の受光面：1mm
- 塗装に用いた物質：酸化チタン
- シンチレータの後部にはアルミマイラーを貼った。

ライトガイドの先端の直径は、MPPC の受光面の大きさに合わせるとライトガイドと受光面が接触し受光面を傷つけてしまう可能性があるため、MPPC の縁の幅 (4mm) に直径が合うように決めた。その結果、ライトガイドの先端の面積は受光面の約 13 倍となった。またライトガイドの先端と受光面との間にわずかな隙間が生じるため、そこから光漏れする可能性がある。



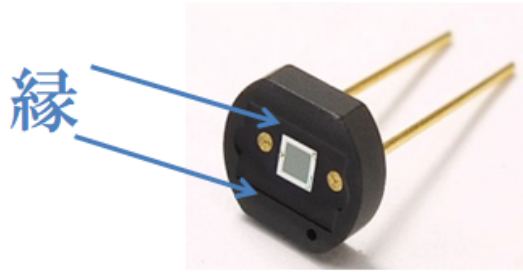


図 48: MPPC

### 6.3.2 宇宙線の電離損失

宇宙線がプラスチックシンチレータに落とすエネルギーは、Bethe-Bloch の式

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{Dq^2n_e}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\gamma)}{2} \right] [\text{MeVcm}^2/\text{g}] \quad (3)$$

から計算できる。( [5]、[6] )

このとき、

$$D = \frac{4\pi\alpha^2 h^2}{m_e} = 5.1 \times 10^{-25} [\text{MeVcm}^2] \quad (4)$$

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (5)$$

$$\gamma = (1 - \beta^2)^{0.5} \quad (6)$$

$$I = 10Z[\text{eV}] \quad (7)$$

である。

また、 $q$  は電子素量、 $n_e$  は電子の密度、 $I$  は平均イオン化ポテンシャル、 $Z$  はエネルギー吸収体の原子量、 $m_e c^2$  は電子の静止質量 0.511[MeV]、 $\delta(\gamma)$  は密度補正と呼ばれるもので高々数パーセントの補正項である。

プラスチックの原子量  $Z=12$  として計算すると、プラスチック内で粒子が落とす最小電離損失は 2.18[MeV/cm] となる。(図 49)

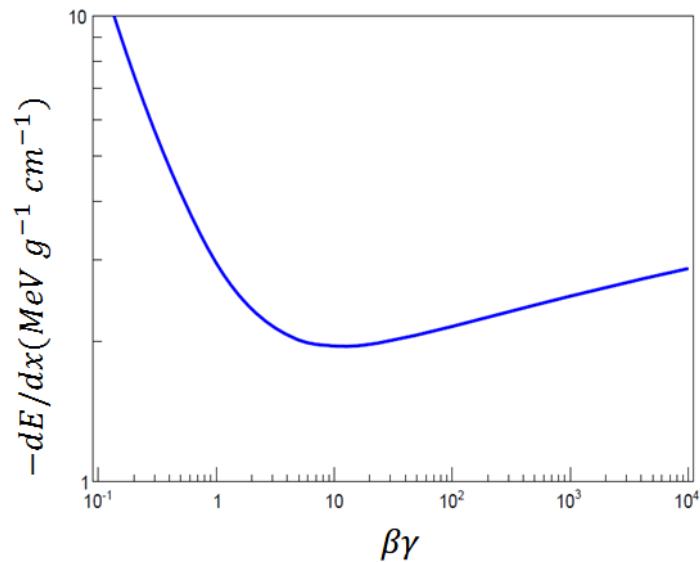


図 49: 粒子のプラスチック内での電離損失

今回の実験に用いるプラスチックシンチレータは長さ 240mm × 幅 15mm × 厚さ 15mm より、粒子が落とすエネルギーは  $2.18[\text{MeV}/\text{cm}] \times 1.5[\text{cm}] = \text{約 } 3[\text{MeV}]$  と計算できる。

## 6.4 トリガーシンチレータを用いた位置依存測定

ライトガイドをつけたシンチレータに粒子が入射する位置によって光量差が生じるのか調べた。

### 6.4.1 測定方法

トリガーシンチレータ (70mm × 250mm × 10mm) と上段シンチレータ (240mm × 240mm × 15mm) を重ねて交差させる。トリガーシンチレータと上段シンチレータでコインシデンスを取り、上段シンチレータの MPPC データを取得する。これにより、特定の位置に入射した粒子を測定する。また MPPC によるノイズイベントを減らすため、トリガーシンチレータの出力モジュールに下段の MPPC ではなく PMT を用いた。トリガーシンチレータと上段シンチレータとの間は 100mm であり、観測点は MPPC からの距離 50mm の点と 200mm の点の 2 点である。

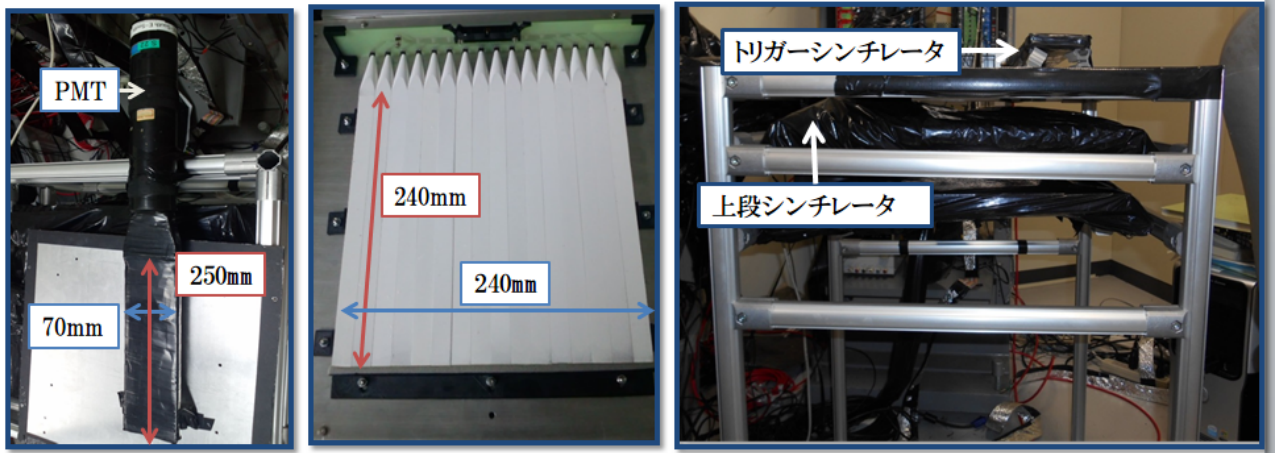


図 50: 用いた装置の写真

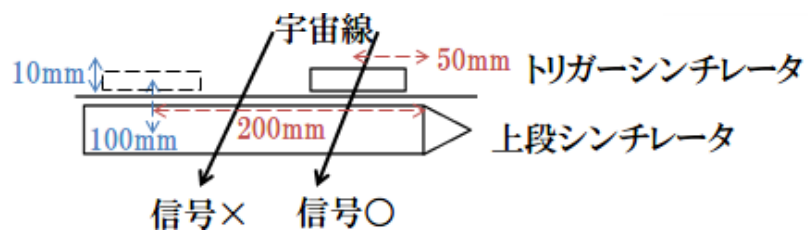


図 51: 横から見た装置の模式図

## 6.4.2 測定結果

### 解析方法

得られたデータから event 毎に 16ch から ADC 値の大きい 3 つの ch を選択する。選んだ 3 つの ch それぞれからその他の 13ch の平均 ADC 値 (pedestal とする) を引き、3ch の ADC 値を足した。解析したヒストグラムが図 52 である。

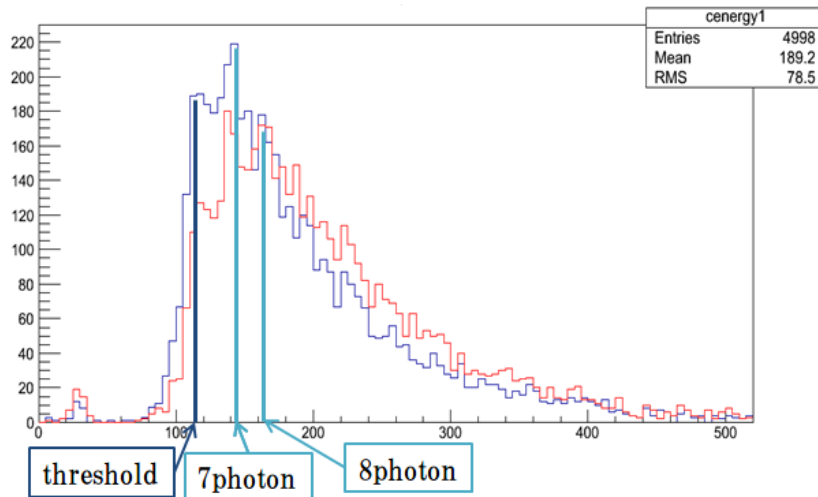


図 52: 得られたデータを解析したヒストグラム

赤線 : MPPC からの距離 (50mm)  
 青線 : MPPC からの距離 (200mm)  
 event 数 : 5000

trigger rate : 0.3Hz

詳しい解析は後の章で行う。

この測定では MPPC の Gain を 1photon 間隔を 20ADCcount に設定しているので図 52 より、宇宙線は平均して 7~8photon のエネルギーを落としており、MPPC に近い方が遠い方よりも photon 数の大きい信号が多く入っていることが分かる。したがって、ライトガイドをつけたシンチレータに入る粒子の位置によって光量に差が生じていることが分かった。

## 6.5 まとめ

シンチレータから得られる光量を増やすためにシンチレータを塗装し、ライトガイドをつけた。また粒子がシンチレータに入射する位置によって光量の差があることが分かった。今後の課題としては、シンチレータから光量が多く得られていないため、さらに改善が必要である。位置依存の補正が必要であるが、現時点で統計数が 5000event と少なく計算することは難しいため統計数を増やすこと、また位置依存測定に用いた観測点が 2 点と少ないため、さらに細かい点で観測することが挙げられる。

## 7 データ解析

MPPC やプラスチックシンチレータの性能評価を行った後、Section2 で説明した装置を用いて宇宙線の測定を行った。各 MPPC のゲインは、20ADC カウント/pixel となるように揃えた。

### 7.1 測定

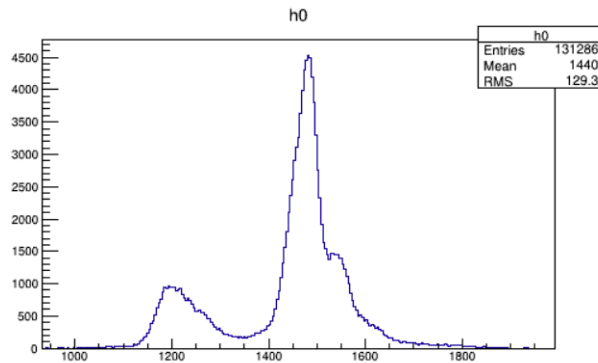


図 53: 0ch のヒストグラム

2 層の装置のうち、上段の装置でデータを取得した。まずトリガーとして 2 段目の装置を用いた。34pin ケーブルの長さは 3 m、Easiroc board 内の Discriminator の width は上段 : 25ns, 下段 : 200ns とした。各層のセルフトリガーのレートは上段下段ともに数百 kHz、コインシデンスのレートは 30Hz ほどであった。イベント数は 131286 イベントで、得られたヒストグラムを図 53 に示した。

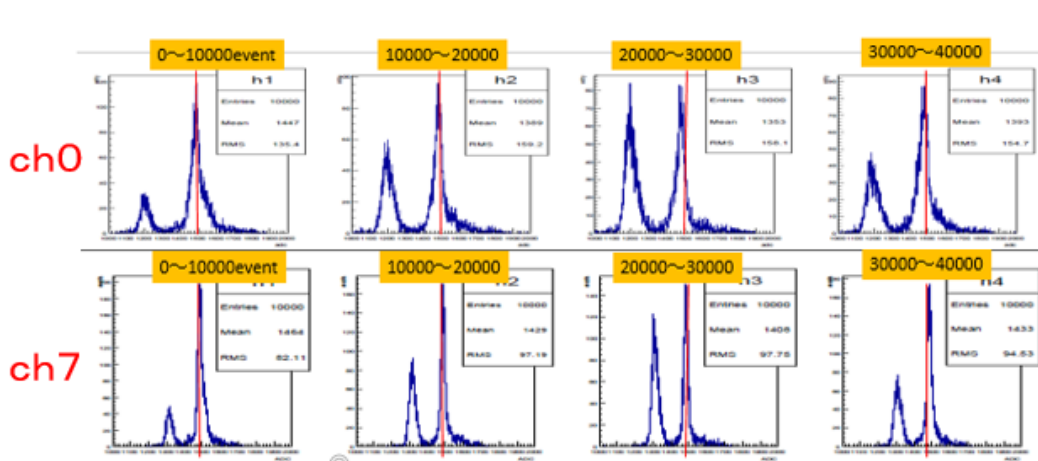


図 54: 0ch と 7ch のペDESTAL 時間変動の比較

図 53 には 3 つの山が見えるが、MPPC が付いていない ch のヒストグラムから、中央の山がペDESTAL のものであると思われる。左右の山について考察する。まず左の山は、ペDESTAL より小さい信号である。ゲート積分型の ADC の場合は説明が見つからないが、今回は sample-hold 型の ADC を用いていることから説明できる。オシロスコープで見た信号の形は下図のようなものであるが、信号の立ち下がりがペDESTAL より小さい領域までであることがわかる。この位置で波形が hold されてしまうと、ペDESTAL よりも小さい ADC 値となる。

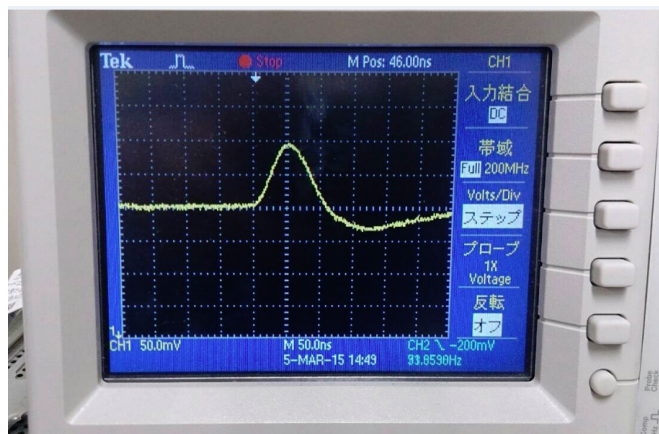


図 55: オシロスコープでの信号の波形

また、右の山はノイズおよび宇宙線の信号が重なっている部分だと考えられる。さらに、(図 55) は得られたデータを 10000 イベントずつに区切ってヒストグラムにしたものの一部である。これを見ると、左のピークの高さが時間変動していることがわかる。全チャンネル同じような変動をしていることから、宇宙線の信号によるものではなく、電気的なノイズであると考えられる。

## 7.2 ノイズ対策

ノイズのイベントを減らすため、装置面で 2 点改善をした。

### 7.2.1 ケーブルに関する変更

34pin ケーブルの長さを 3 m から 1 m へと短くし、ケーブル全体をシールドで覆った。この結果、セルフトリガーのレートが数百 kHz から数 kHz へと 2 ケタ減少した。コインシデンスのレートはおおよそ 3Hz であった。この装置で 44323 イベント取得。得られたデータを再び 10000 イベントずつ区切ってヒストグラムを重ねた。

図 56 を見ると、ペDESTAL 周りのノイズが減り、時間変動を抑えられていることがわかる。

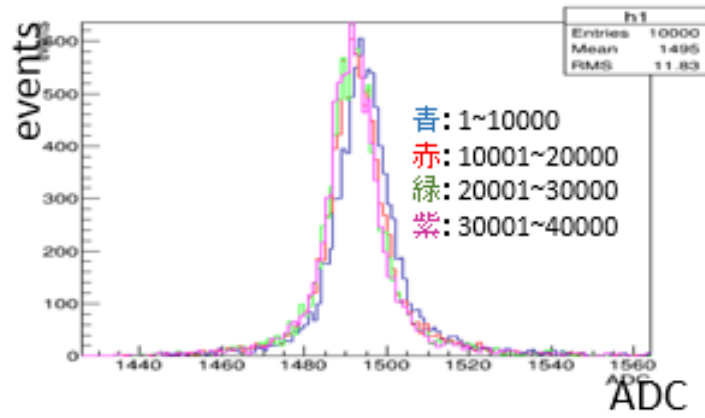


図 56: 10000 イベントごとに区切って重ねたヒストグラム

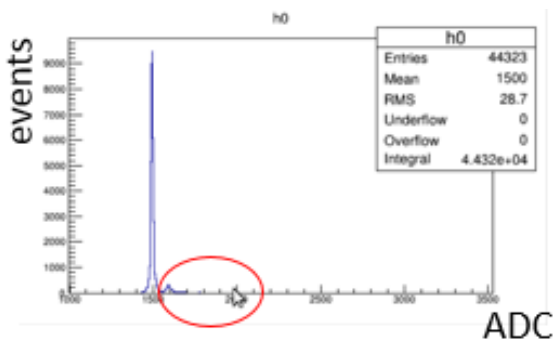


図 57: 0ch のヒストグラム (ケーブル変更後)

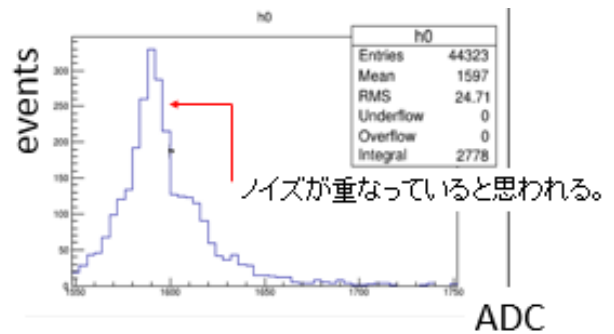


図 58: 図 57 の拡大

図 57 はその時の 0ch のヒストグラム。宇宙線の信号があると思われる部分を拡大して見ると、ピークの部分にノイズと思われる信号が重なっていた。

## 7.2.2 トリガーシンチレータに関する変更

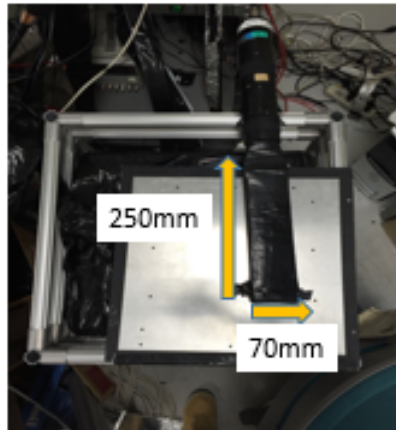


図 59: 変更したトリガーシンチレータ

さらにノイズを減らすために、トリガーを下段の装置ではなく、図 59 のように新しくトリガーシンチレータ (70×250×10 mm) を置き、PMT の信号を使って、トリガー信号を出力した。

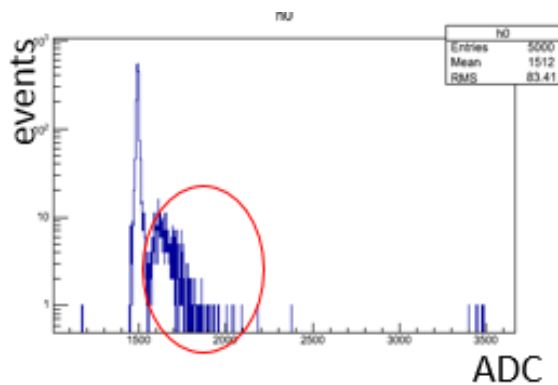


図 60: 0ch のヒストグラム (トリガーシンチレータ変更後)

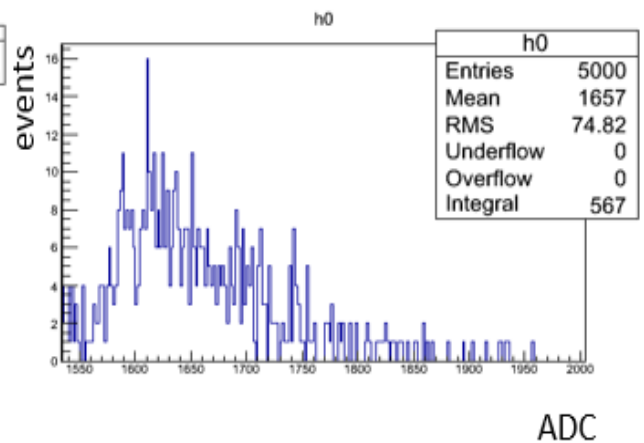


図 61: 図 60 の拡大

PMT を用いたトリガーレートは、およそ 60Hz。コインシデンスレートは、およそ 0.05Hz であった。PMT をトリガーとしたときの上段装置で得られたデータをヒストグラムにしたものを図 60 に示した。図 60 の縦軸は、log スケールで表示してある。イベント数は 5000 イベント。拡大したヒストグラム (図 61) を見ると、重なっていたノイズが減少しているように見える。



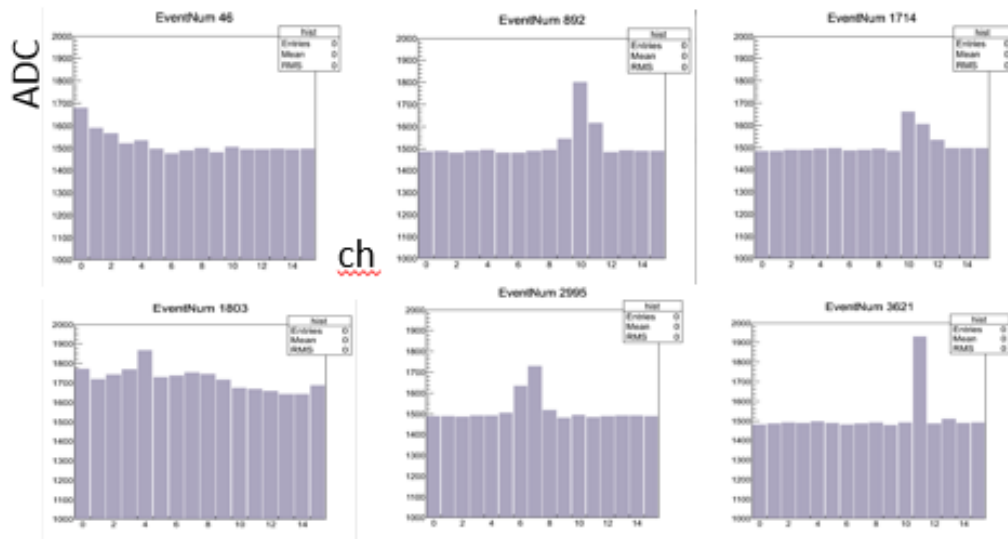


図 62: 1 イベントごとの ADC 値の比較

続いて、得られたデータを 1 イベントごと ADC 値を比較して見てみた (図 62)。ペDESTALがまだ変動していること、また連続したチャンネルに信号が入っているイベントと、そうでないイベントがあることがわかる。このことから、シンチレータ内で落としたエネルギーを評価できる形で表す必要がある。

ここからは、宇宙線由来の信号とノイズ由来の信号をどう区別していくか、ということが課題となる。1 チャンネルのみ大きな信号が来ているようなイベントは、突発的な電氣的ノイズである可能性が考えられた。逆に、隣り合う複数のチャンネルに信号が入っているイベントは、粒子が複数のシンチレータを通過したことによる信号である可能性が高いと考えた。また、ライトガイドの先端と MPPC の表面の形状の違いによるわずかな隙間から光漏れする可能性も考え、このことから隣り合ったチャンネルが鳴っているイベントのみを選んで評価することにした。

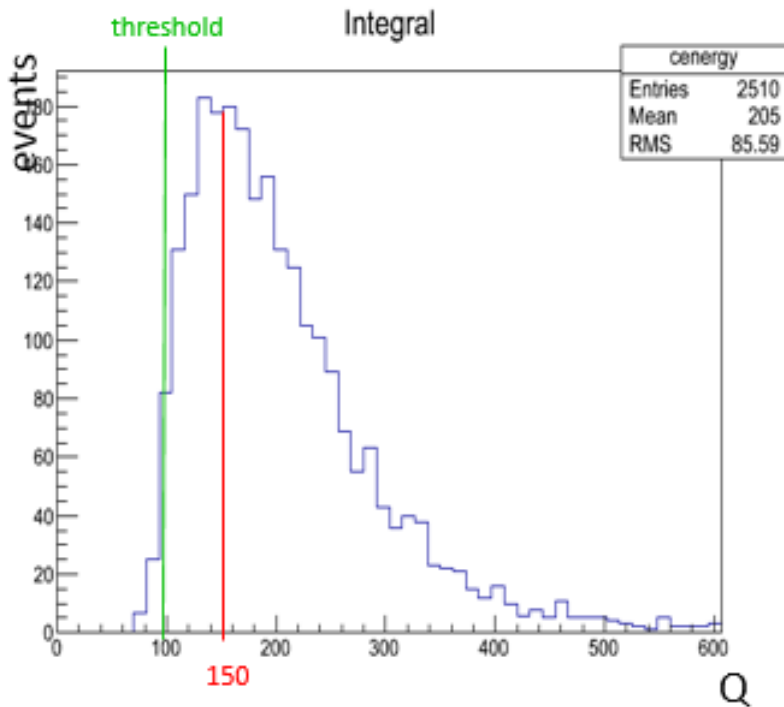


図 63: セレクト後のヒストグラム

2ch 連続して平均値 (16 ch の ADC 値の平均値) を超えたイベントのみをセレクト。その後、各イベントごとに ADC 値の大きい 2 つのチャンネルからそれぞれのペDESTAL を引き、2 つ足し合わせたものを 1 イベントとしてプロットした。(ペDESTAL は残りの 14ch の平均値とした。) そのヒストグラムを図 63 に示した。

見えているピークが、指数関数的分布がしきい値で切れたものか、ランダウ分布のピークかはわからないが、この信号は大まかに 3MeV に対応していると考えている。しかしそれを確かめるには検証が必要である。また 1 photon 間隔 20ADCcount としているので宇宙線はおよそ 7~8photon のエネルギーを落としたと考えられる。

## 8 結論

新しく組み立てた検出器で、数 MeV の電離損失をする宇宙線と思われる信号を観測できた。MPPC の性能、Easiroc board の仕組みを理解することができた。MPPC をトリガーとするとノイズレートが高い。プラスチックシンチレータの位置による光量変化、チャンネルごとによる信号のばらつきがあるため、エネルギーキャリブレーションが課題となる。

## 参考文献

- [1] 五味慎一 (2008) 『半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築』 京都大学大学院理学研究修士論文
- [2] 本多良太郎 (2013) 『EASIROC テストボード仕様書』 東北大学
- [3] 石島直樹・仲居勇樹 (2014) 『EASIROC MODULE User Guide』 大阪大学山中研究室・九州大学素粒子実験研究室
- [4] Stéphane Calliera, Christophe de La Taille, Gisle Martin-Chassarda, Ludovic Rauxa (2011). EASIROC, an easy & versatile ReadOut device for SiPM, France : ScienceDirect
- [5] 岡村勇介 (2008) 『『荷電粒子の物質中でのエネルギー損失と飛程』 東京工業大学理学部物理学科卒業研究
- [6] 鰐原孝康・曳田俊介 (2009) 『WLS と MPPC を用いた位置測定能を持つ検出器の開発』 大阪大学理学部物理学科卒業研究
- [7] 和田秀雄 (2007) 『プラスチックシンチレータを用いた原子炉ニュートリノ測定の基礎』 信州大学理学部物理学科卒業研究
- [8] 一般社団法人 日本電気計測器工業会 2.2.6 シンチレーション検出器 (<http://tech.jemima.or.jp/5020306.html>)
- [9] 高エネルギー加速器研究機構 『光で図る素粒子～シンチレーションカウンターとは～』 (<http://legacy.kek.jp/newskek/2004/janfeb/scintillator.html>)
- [10] 東北大学大学院工学研究科・工学部 化学・バイオ系 (<http://www.che.tohoku.ac.jp/~qpc/scintillator.html>)

## 謝辞

本実験を行うにあたり多くの方々のご指導、ご協力を賜りましたので、この場を借りて厚く御礼申し上げます。指導教員である山崎先生にはこの実験の機会を与えていただいたことに加え、お忙しい中、要領を得ない私たちにいつも丁寧にご指導していただきました。また、私たちが行き詰まった時には、粒子物理研究室の蔵重先生をはじめとするたくさんの先生方や、先輩方にも助けていただきました。同期のメンバーとは、わからないことを議論し合ったり、励まし合いながら実験を進められたおかげで、研究生生活をとても有意義なものにすることができました。本当に多くの方々のご助力のおかげで、本実験が行えたことに深く感謝いたします。ありがとうございました。