

平成 27 年度

卒 業 論 文

大きな電離損失をする新粒子探索実験

大園 拓未  
川端 智樹  
谷口 幹幸  
若松 恭行

神戸大学理学部物理学科

# 目次

第1章 序論	1
1.1 実験概要	1
1.1.1 実験の目的	1
1.1.2 実験の方法	1
1.2 実験装置	2
1.2.1 装置内部	2
1.2.2 装置全体	3
1.2.3 暗箱	4
1.2.4 3D プリンター	5
1.3 Multi Pixel Photon Counter (MPPC)	7
1.3.1 特徴	7
1.3.2 APD ピクセル	7
1.3.3 本実験で用いた MPPC	8
1.4 EASIROC MODULE	10
1.4.1 電荷測定方法	10
1.4.2 EASIROC	11
1.4.3 EASIROC の threshold 較正	12
1.4.4 FPGA	13
1.4.5 ファームウェアの書き換え	13
第2章 MPPC の性能評価	15
2.1 1mm 角と 3mm 角 MPPC の光量測定	15
2.1.1 光量の測定方法	15
2.1.2 1photon あたりの ADC 値	15
2.1.3 光量比較の結果	16
2.1.4 1mm 角 MPPC の光量について	16
2.1.5 光量測定の際の問題点	17
2.2 ゲイン測定	19
2.2.1 ゲイン測定方法	19
2.2.2 ゲイン測定の結果	20
2.3 応答曲線	23
2.3.1 検出光子数の測定方法	23
2.3.2 検出光子数の測定結果	25
第3章 実験装置の較正とトリガー	27
3.1 MPPC への印加電圧の決定	27
3.2 MPPC による宇宙線のセルフトリガー	27
3.2.1 MPPC の特性	27
3.2.2 セルフトリガーレートの見積もり	27

第 4 章	データ解析	29
4.1	宇宙線測定	29
4.2	クラスターアルゴリズム	30
4.3	解析結果	30
4.3.1	宇宙線イベントの解析結果	30
4.3.2	1つの粒子による大きな電離損失イベントの探索	31
第 5 章	まとめと展望	34
付録 A	データ取得の効率化	37
付録 B	光量比較での解析	38

# 第 1 章 序論

## 1.1 実験概要

### 1.1.1 実験の目的

荷電粒子が物質を通過すると、荷電粒子と物質中の電子間のクーロン力により原子から電子が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。このエネルギー損失の式は Bethe-Bloch の式で表される。

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{2\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\beta\gamma}{2} \right] \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g} \quad (1.1)$$

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

式 (1.1) から分かるように、エネルギー損失は入射粒子の速度が一定のときその質量によらない。宇宙線ミュオンのような MIP\*<sup>1</sup> 粒子の電離損失は  $1\text{g}/\text{cm}^2$  あたり約  $2\text{MeV}$  であるのに対して、ミュオンよりもはるかに速度の遅く大きな電離損失をする粒子 HIP\*<sup>2</sup> は  $\mathcal{O}(100\text{MeV})$  の電離損失をする。これらの領域の荷電粒子探索を行う。

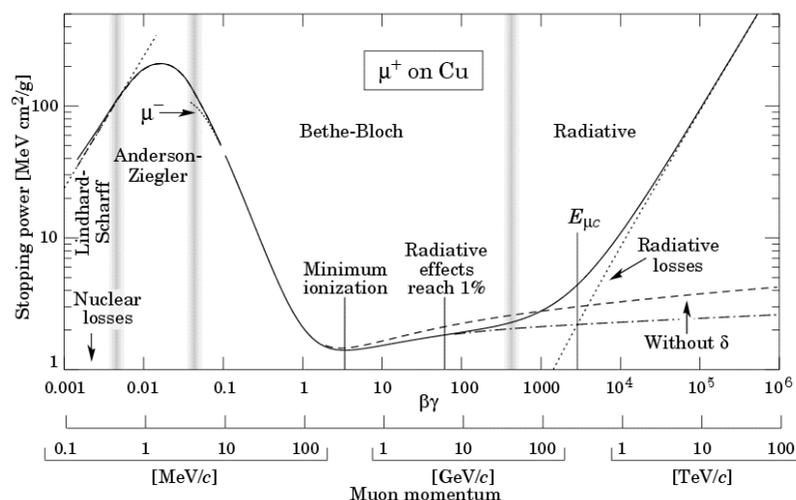


図 1.1: ミューオンのエネルギー損失 ( $-dE/dx$ ) と運動量の関係

### 1.1.2 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。本実験で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 Minimum Ionization Particle

\*2 Heavy Ionization Particle

## 1.2 実験装置

本実験の実験装置は、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を通過する際に生じるシンチレーション光を捉えることで電離によるエネルギー損失を調べることが出来るように設計されている。このシンチレーション光を捉えるために半導体光検出器 MPPC を用いた。16ch 2 層の MPPC をセッティングし、上に 3mm 角 MPPC、下に 1mm 角 MPPC (後述) を使用した。1mm 角 MPPC と 3mm 角 MPPC では印加電圧が 10V 近く異なるため 2 台の EASIROC モジュールを用いた。実際の装置と回路図を図 1.2, 1.3 に示す。



図 1.2: 装置全体図

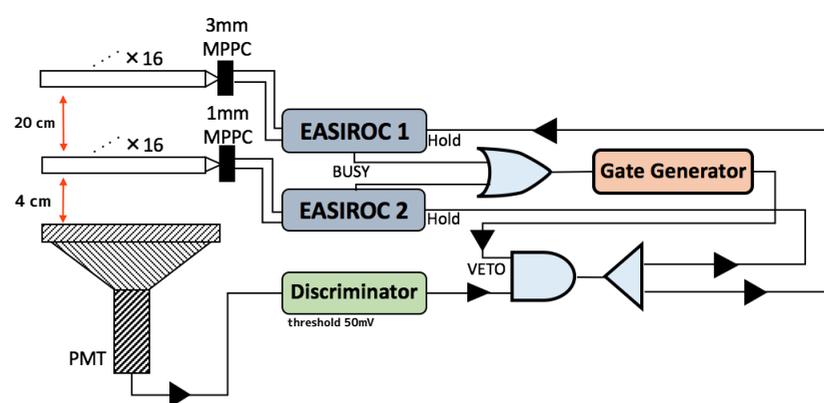


図 1.3: 実験装置の回路図

### 1.2.1 装置内部

装置は以下のもの組み立てられている。

- プラスチックシンチレータ 16 本 2 層  
(1 本  $15 \times 15 \times 240 \text{ mm}^3$ )
- MPPC 32 個 (1 層につき 16 個)
- アルミニウム架台 ( $528 \times 528 \times 833 \text{ mm}^3$ )
- アルミニウム板 ( $400 \times 400 \times 3 \text{ mm}^3$ )
- 16ch 読み出し基板 2 個
- 34pin フラットケーブル
- 黒ビニールシート
- プラスチックシンチレータ  
( $240 \times 240 \times 20 \text{ mm}^3$ )
- PMT (印加電圧 1350V)

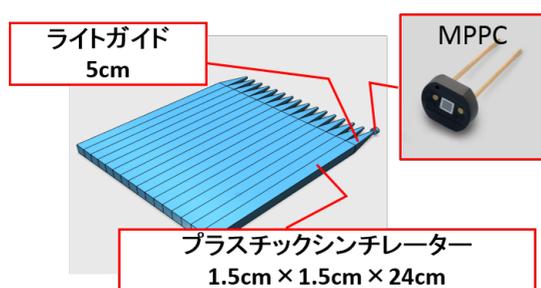


図 1.4: 16本のプラスチックシンチレーターと MPPC

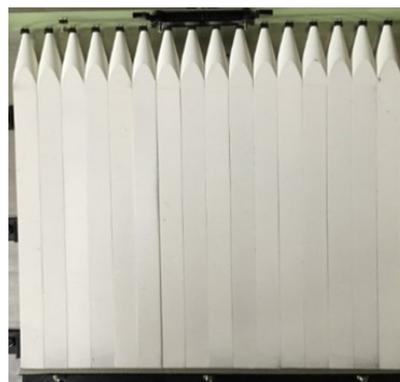


図 1.5: 白く塗られたプラスチックシンチレーター

シンチレーション光を捉えるために、ライトガイドの先端と MPPC の受光面が向かい合うように設置した。また、プラスチックシンチレーターはシンチレーター内で発生する光が外に漏れないように白い塗料で塗られている。これをアルミ板 2 枚で挟み、図 1.6 のように隙間はテープで止めてある。さらに、光漏れ防止のためアルミ板で挟んだ基盤を黒いビニールシートをかけた。部屋の電気を消して、光漏れがしていないことをオシロスコープで確認した。



図 1.6: 2枚のアルミ板

### 1.2.2 装置全体

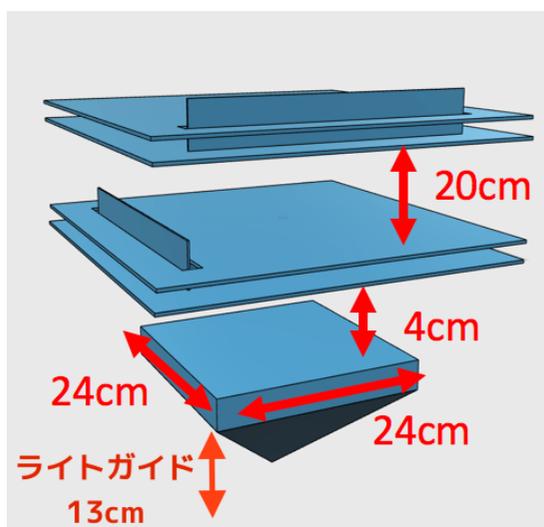


図 1.7: 装置全体

装置は3層になっており、上2層がMPPC読み出し用のプラスチックシンチレータ、最下層がPMT読み出し用のプラスチックシンチレータである。上2層のシンチレータは90度向きを変え交差するように重なっている。そうすることで電離損失が1つの粒子によるものか電離シャワーによるものかを区別することができる。また3層のコインシデンスをとることで縦に貫く宇宙線だけを捉えることが出来る。

### 1.2.3 暗箱

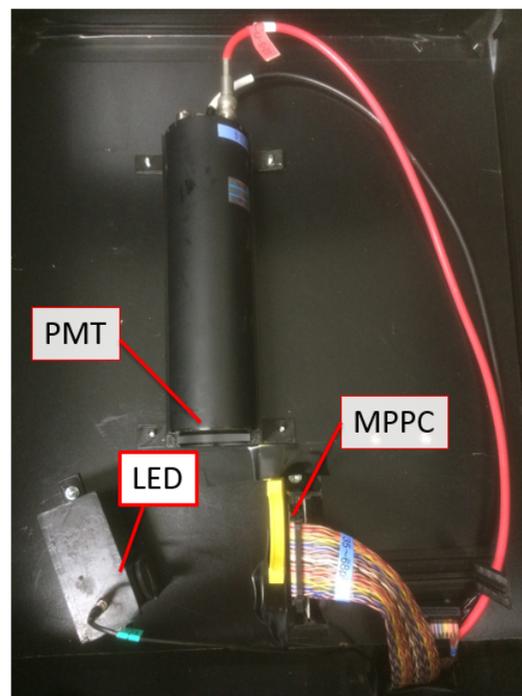


図 1.8: 暗箱内

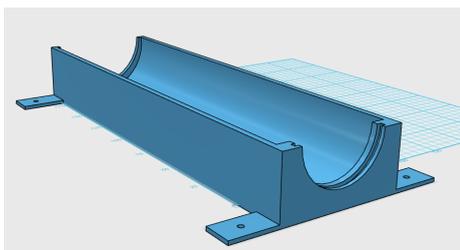


図 1.9: 3D プリンターによる PMT の土台

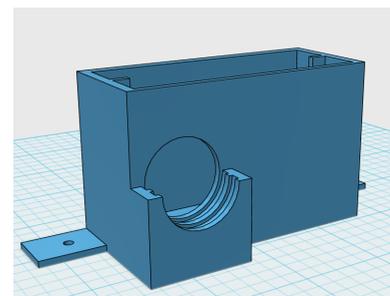


図 1.10: 3D プリンターによる LED の土台

本実験で用いた 32 個の MPPC のゲインを測定するために図 1.8 のような暗箱を用意した。光源には LED を用いて測定を行った。また LED の光量を測定するために PMT も用いた。MPPC と PMT の受光面は LED の光が真っ直ぐ入るように固定されている。また、LED の光量が大きすぎて MPPC や PMT が壊れないように ND フィルターを用いた。LED からの光の減光には透過率が 10% 減光のものと 25% 減光のものを、PMT と MPPC へ入る光の減光には 10% のものを用意した。この際用いた固定のための土台やフィルター置きは 3D プリンターで作成した。

## 1.2.4 3D プリンター



図 1.11: Cube Pro

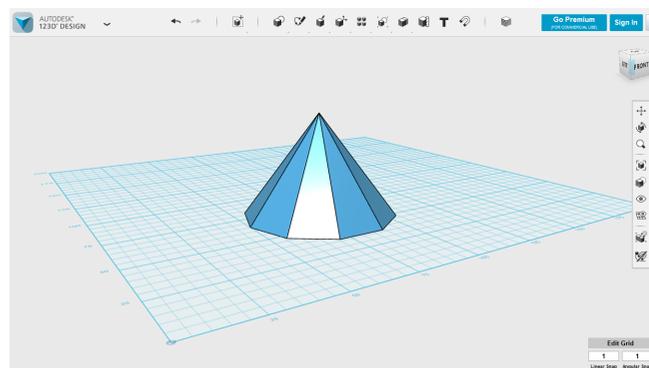


図 1.12: 123DDesign

本実験では Cube Pro という 3D Printer で土台やフィルター置きなどを作成した。プリントまでの手順を説明する。

用意するソフトウェア

- 123D Design: 3D で設計図を作成するソフト ( [1] でダウンロード可)
- Cube Pro Systems: Cube Pro 専用の読み出しソフト

手順 1

まず、123D Design で作成したい形の 3D 設計図を作る。直方体や円柱などを組み合わせたりくりぬいたりする事で自由に模型を作成することができる。また、遠近感や陰影が見やすいため完成図がイメージしやすい。

手順 2

123D Design で設計図を STL<sup>\*3</sup>ファイルで保存する。

手順 3

続いて Cube Pro Systems で Cube Pro 読み出し専用のファイルを作成する。まず図 1.13 のように「Open Model」を押し 123D Design で作成した STL ファイルを開く。そして、図 1.14 のように「Build」を押す。

<sup>\*3</sup> Standard Trianglared Language : 3 次元の図形を小さな三角形の集合体で表現・出力するシステム

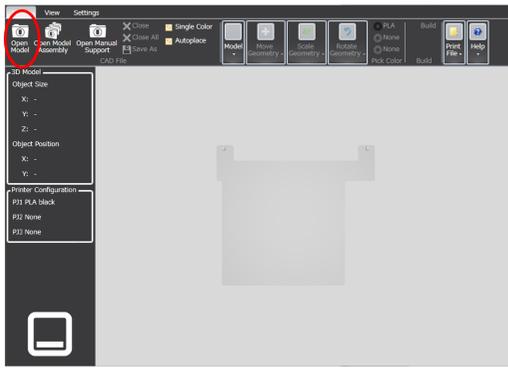


図 1.13: Open Model

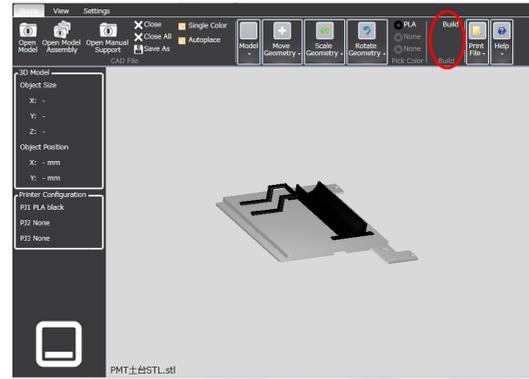


図 1.14: Build

手順 4

続いて図 1.15 のようなメニューで「Print Strength」や「Print Pattern」で好みの硬さに変更することが出来る。これを USB に「.cubepro」で保存すれば、Cube Pro に読み込ませることができる。

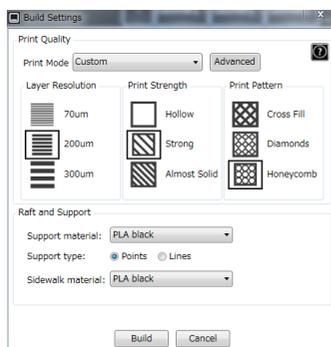


図 1.15: Build Setting

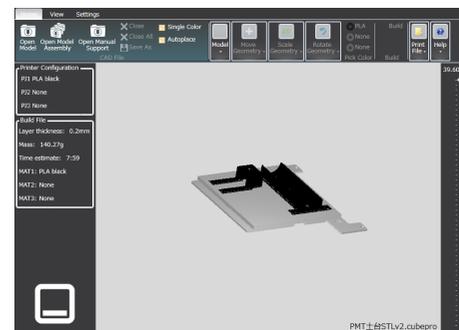


図 1.16: 完成図

手順 5

最後に先ほどの USB を Cube Pro に差込み、タッチパネルで操作することでプリントが始まる。

## 1.3 Multi Pixel Photon Counter (MPPC)

### 1.3.1 特徴

MPPC [8] とは Multi Pixel Photon Counter の略称で、浜松ホトニクス社により開発された半導体光検出器である。多数の APD<sup>\*4</sup>ピクセルが受光面に並んでいて、入射光が微弱な時に優れたフォトカウンティング能力を持つ。常温・低電圧 (100V 以下) で動作し、 $10^5 - 10^6$  の高いゲインを有する。また、半導体検出器であるため磁場による影響を受けず、優れた時間分解能を持つ。

欠点としては、MPPC 由来のノイズが多いことが挙げられる。MPPC は半導体光検出器であるため熱励起によるノイズが発生し、ガイガーモードで動作するためノイズ成分も増幅され、本来のフォトン検出信号と区別がつかなくなる。そのため MPPC に光を当てなくても信号が出力される。この信号をダークパルスと呼び、そのレートをダークカウントという。さらに、受光面には APD ピクセルが配列されているため図 1.17 のようにガイガー放電による 2 次電子によるクロストークが生じる。これにより 1 つの光子が 2、3 光子と誤って検出されることがある。

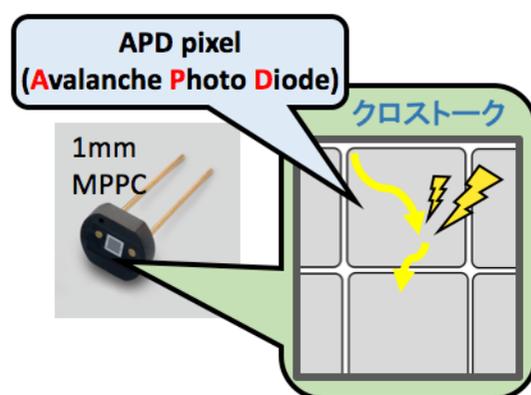


図 1.17: クロストークのイメージ

### 1.3.2 APD ピクセル

APD は pn 接合をした半導体光検出器である。逆電圧がある特定の電圧値 (降伏電圧) を超えると雪崩増幅を起こし電流が流れる。高い逆電圧下では pn 接合部の空乏層に高電場がかかる。そこに光子が入射すると電子ホール対が生じ、電子は電場により加速される。その過程で原子と衝突し新しい電子ホール対を生成する。これを繰り返すことで増幅が飽和し、入射光量によらず電圧に比例した信号を出す。この状態をガイガーモードという。

\*4 Avalanche Photo Diode

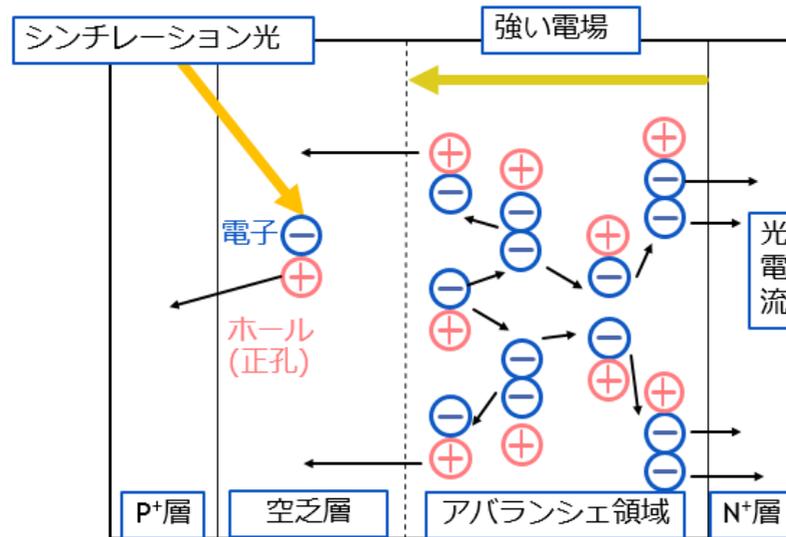


図 1.18: APD 動作原理

### 1.3.3 本実験で用いた MPPC



図 1.19: 1mm×1mm ( 1600 pixel ) [6]

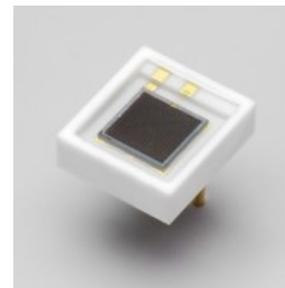


図 1.20: 3mm×3mm ( 3200 pixel ) [7]

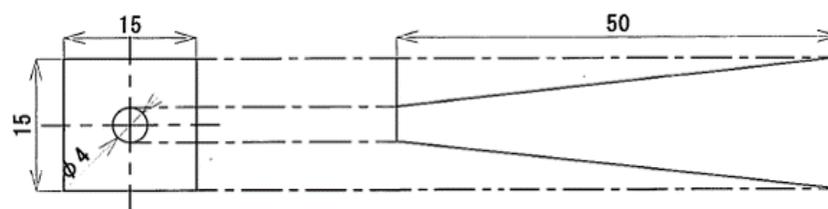


図 1.21: ライトガイド

本実験では受光面が 1mm × 1mm の MPPC と 3mm × 3mm の MPPC を使用した。16 個のプラスチックシンチレータにつけたライトガイドの先端の直径は 4 mm で、受光面より少し大きい。

1mm 角 MPPC の受光面とライトガイドの先端との接着面はわずかに隙間ができてシンチレーション光が散乱されてしまうため、シンチレータと屈折率の近いグリス (SILICONE OPTICAL COMPOUND V-788, 図 1.22) を塗って隙間を防いだ [5]。



## 1.4 EASIROC MODULE

本実験では、MPPC 専用の読み出し NIM モジュールである EASIROC モジュールを用いた。EASIROC モジュールは 2 つの ASIC (EASIROC) と 1 つの FPGA<sup>\*5</sup> を内蔵しており最大 64 個の MPPC の同時駆動・読み出しが可能。また MPPC へ 0 – 90 V の電圧を印加する電源を内蔵していて、Ethernet ケーブルで PC と接続することでモジュールの制御とデータ取得ができる。さらに、温度計を接続することで温度も測定できるが温度計の較正はまだ行っていない。

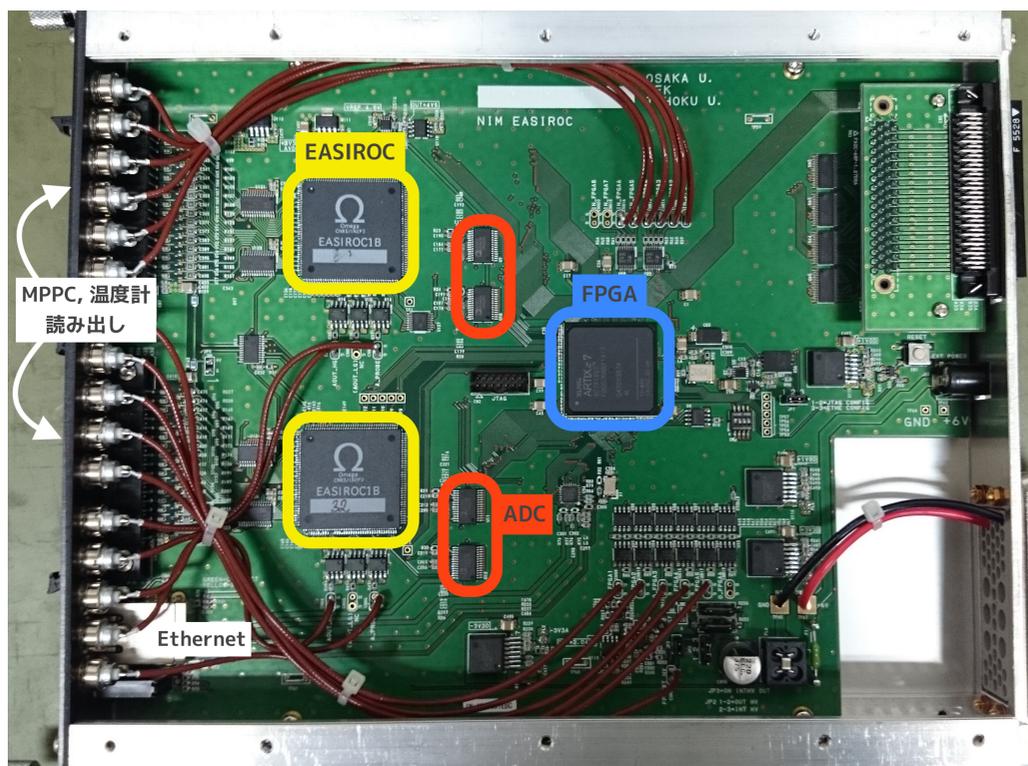


図 1.23: EASIROC MODULE 内部基盤

### 1.4.1 電荷測定方法

EASIROC モジュールの電荷測定方法は波高測定型であり、図 1.24 の点線のように整形されたパルスのピークが電荷に比例することを利用する。モジュールの 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この波高を保持し、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。

タイミングの調節方法は 2 つあり、一つは Delay モジュールやケーブルなどでトリガー信号を遅らせる方法。もう一つは設定ファイルのパラメータを編集し、整形されたパルスの立ち上がり時間を調節する方法がある。

\*5 EASIROC と FPGA についての詳細は後述

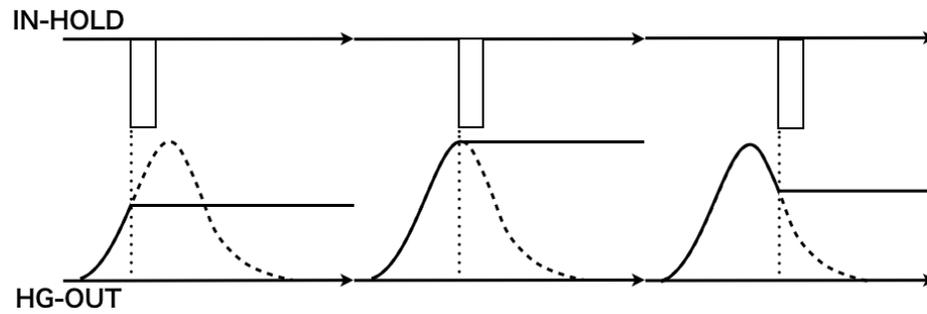


図 1.24: ピークホールドのタイミング

IN-HOLD はトリガー信号、HG-OUT はあるチャンネルの整形されたパルス

#### 1.4.2 EASIROC

EASIROC [2] とは Extended Analogue Silicon pm Integrated Read Out Chip の略称で、フランスの  $\Omega$  グループが開発した汎用 MPPC 読み出し用 ASIC であり、図 1.23 のように一つの EASIROC MODULE に 2 つ搭載されている。32 個の MPPC を同時に読み出すことができ、増幅率調整可能なアンプ、波形整形増幅器、ディスクリミネーターを各 MPPC に対して持つ。さらに、内蔵 DAC (Input DAC) により 0 – 4.5V の範囲で 32 個の MPPC に印加するバイアス電圧を個別に調節できる。

1ch あたりの内部回路の概要を図 1.25 に示す。入力信号は 2 つのコンデンサによって High gain と Low gain に 10 : 1 の割合で分割される。その後に置かれた PreAmp によりそれぞれの信号を増幅し、波形整形器 (fast shaper: 時間測定用, slow shaper: 電荷測定用) へと送り出す。PreAmp には可変コンデンサが取り付けられており、電気容量を 15 段階で調節できる。fast shaper で整形された信号はディスクリミネーターへと送られ、セルフトリガー信号として出力される。一方、slow shaper で整形された信号は図 1.25 の Hold に HOLD 信号が入ったタイミングで断線され、その後にあるコンデンサに蓄えられた電荷により断線される前の電圧がかかり続ける。これを使って peak hold を行う。また、図 1.25 の Read で EASIROC MODULE のアナログ信号出力へ信号が送られる (DAQ 中は見えない)。

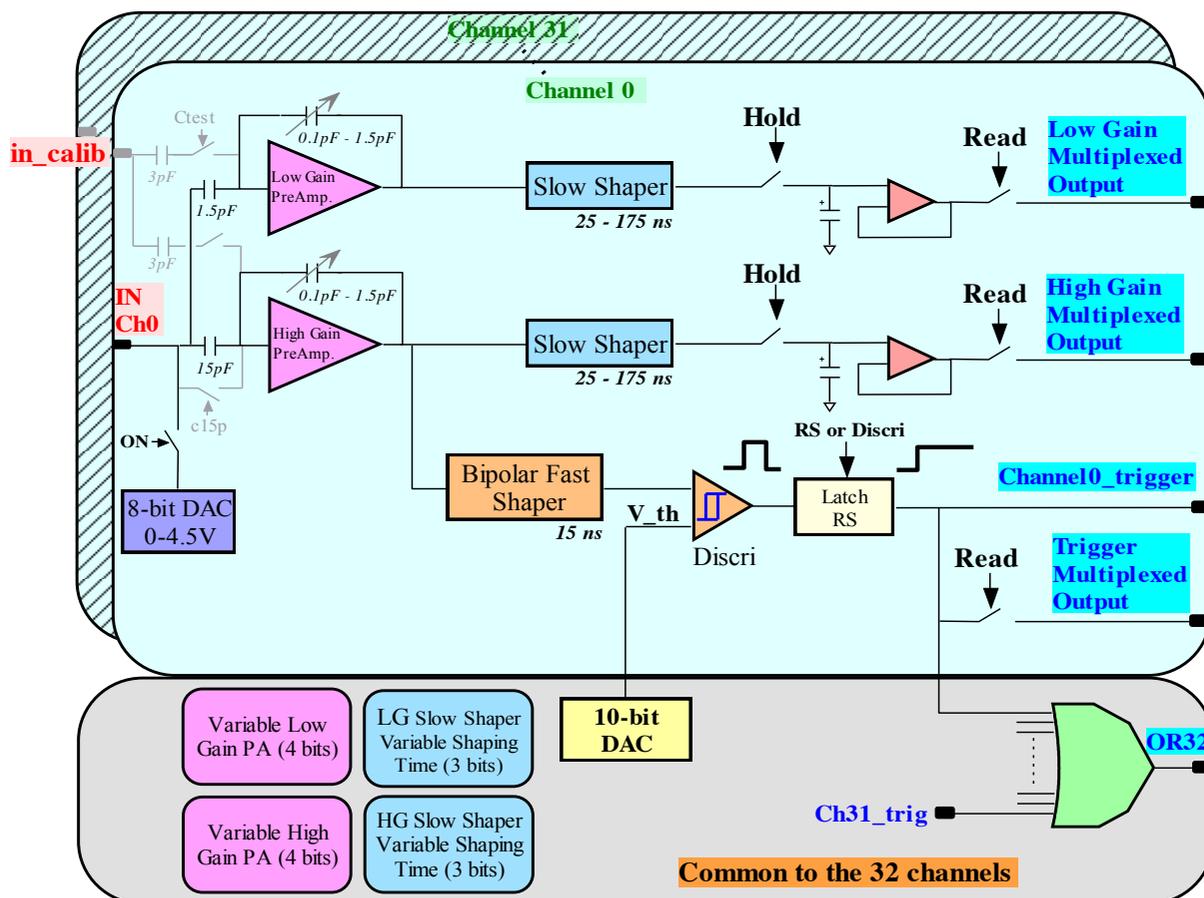


図 1.25: 1ch あたりの EASIROC 内部回路概略

### 1.4.3 EASIROC の threshold 較正

EASIROC は内蔵のディスクリミネーターで MPPC からのアナログ信号に threshold をかけることができる。この threshold の値は 10bit の DAC 値で決まっています。値が大きくなるほど下がる。DAC 値と ADC 値の対応は EASIROC チップ毎に異なるため、チップ毎に較正が必要である。以下では KEK で借りた EASIROC モジュールの較正を行った。

較正の方法は暗箱内で光量を絞った LED 光 (frequency: 100Hz, Voltage: 4.7V, ND フィルター: LED の前に 2 つと MPPC の前に 1 つ) を MPPC に当てる。DAC 値を変えながらセルフトリガーをかけてデータを取り、ヒストグラムを書く。ヒストグラムの変化を見ながら threshold の位置を決めた。図 1.26 は DAC 値が 780 のときのあるチャンネルのヒストグラムで、赤線を threshold と決めて図 1.27 のように各点プロットして較正直線を求めた。ヒストグラムの左側に小さなピークが見えているのは MPPC のノイズによるものなので無視した。この結果を用いて threshold を決定した。

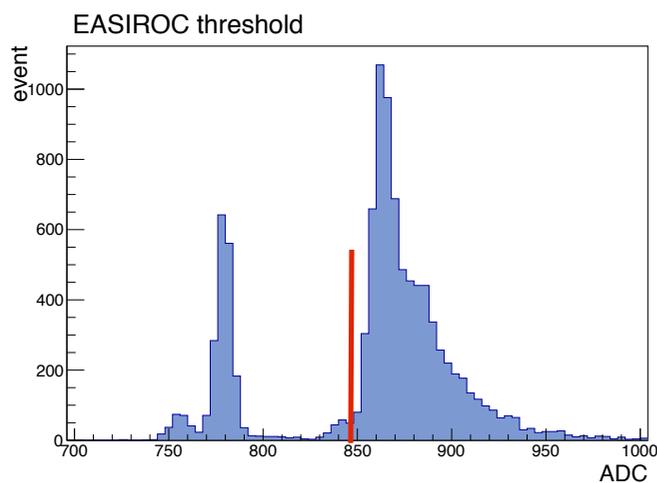


図 1.26: DAC 値が 780 のときのあるチャンネルのヒストグラム

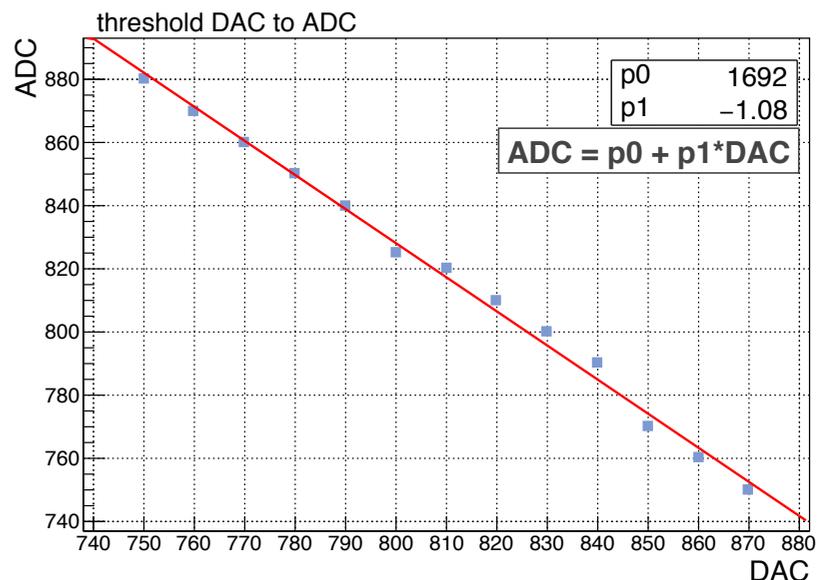


図 1.27: 3mm 角 MPPC1 層のトリガーレート

#### 1.4.4 FPGA

FPGA とは Field-Programmable Gate Array の略称で、FPGA では EASIROC の制御、EASIROC・ADC からのデータ取得、FPGA の機能全体の制御、外部との通信 (SiTCP<sup>\*6</sup>) を行い、以下のようなモジュールが用意されている。

表 1.1: FPGA モジュール名

EASIROC 制御部	SlowControl_SpirocA_ver2
DAQ 部	ADC_AD9220_dual_ver3 MHTDC
インターフェース部	SiTCP_IF_ver5
SiTCP 部	SiTCP_RECV SiTCP_WRITE SiTCP_Global

まず、EASIROC 制御部では設定ファイルの bit 配列を Slow Control 用のデータ形式に復元して EASIROC へ送信し、EASIROC の動作とどのチャンネルを読み出すかを定める。DAQ 部では A/D 変換したデータの収集を行う。ただし MHTDC (Multi-hit TDC) は現行のファームウェアでは使用できないが、現在 KEK にて開発中。インターフェース部では FPGA 全体の制御、SiTCP 部でデータの送受信を行う。モジュールについての詳細は [9] 参照。また、FPGA からテストチャージを出力することもできる。

#### 1.4.5 ファームウェアの書き換え

本実験では当初、1mm 角 MPPC2 層でのコインシデンスを取ることを想定しており、EASIROC モジュール購入時の FPGA ファームウェアでは上下 16ch の OR のトリガー信号しか出力できないため、これを AND

\*6 FPGA を Ethernet に接続する技術

としたトリガー信号を出力するようにする必要があった。そのために FPGA のファームウェア書き換えを行った。

書き換えには Xilinx のソフトウェアとして ISE Design Suite v14.7 とそれに付属の iMPACT v14.7 と Platform Cable USB II (図 1.28) を使った。書き換えの手順を簡単に説明すると、Verilog-HDL<sup>\*7</sup>により回路情報が記述されたテキストファイルを EASIROC モジュールの使われていないデジタル信号出力 SYNC OUT に上下 16ch の AND トリガー信号が出力されるように編集し、そのファイルを ISE Design Suite で論理合成と bit ファイルの作成を行う。FPGA と PC をプラットフォームケーブルで接続し、iMPACT で書き込みを行なった。書き込んだ後はテストチャージを用いて SYNC OUT から AND 信号が正しく出ていることを確認した。



図 1.28: プラットフォームケーブル

<sup>\*7</sup> Hardware Description Language, ハードウェアを作成するための言語

## 第 2 章 MPPC の性能評価

昨年度の研究 [3] での問題点として 1mm 角 MPPC では十分な光量が得られないということがあった。参考文献 [4] によると受光面積を大きくすることで獲得光量が増えることが分かっているため今年度は 3mm 角 MPPC を購入し、その光量の比較を行った。

### 2.1 1mm 角と 3mm 角 MPPC の光量測定

#### 2.1.1 光量の測定方法

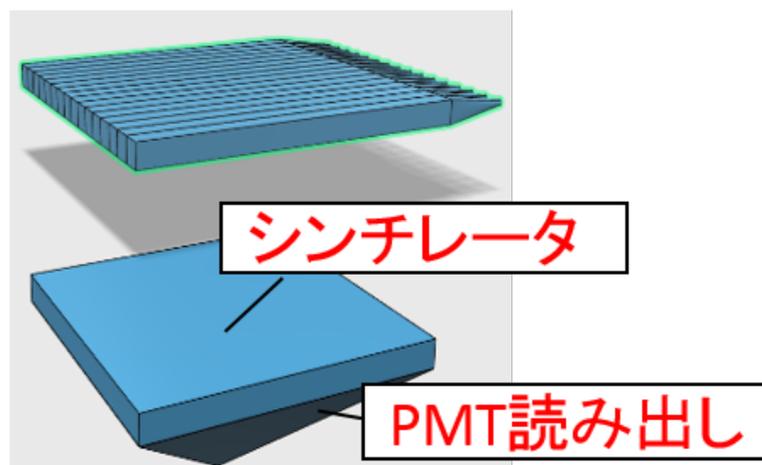


図 2.1: 光量比較の際の装置

宇宙線はプラスチックシンチレータを貫く際一定のエネルギーを落とすことを利用して、宇宙線ミュオンを用いて MPPC の違い、特に受光面の大きさによる光量の違いを比較した。図 2.1 のように、16 本のプラスチックシンチレータと 16 個の MPPC 層とこれとは独立な最下層のプラスチックシンチレータで宇宙線をトリガーした。宇宙線ミュオンは 20 万イベント観測した。また、16 個の MPPC の信号に違いが出ないようにゲインは揃えてある。

#### 2.1.2 1photon あたりの ADC 値

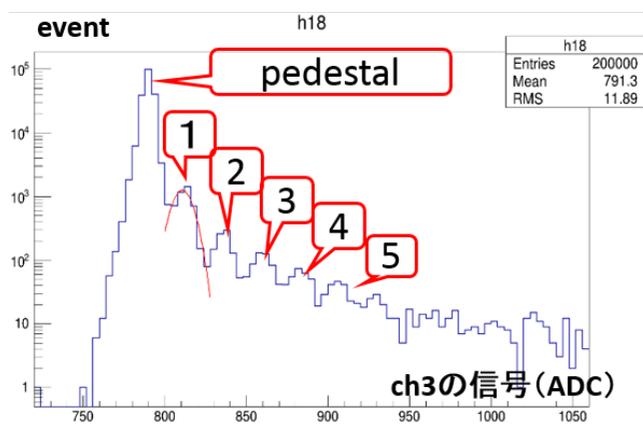


図 2.2: 3mm 角 MPPC のチャンネル 3 の場合

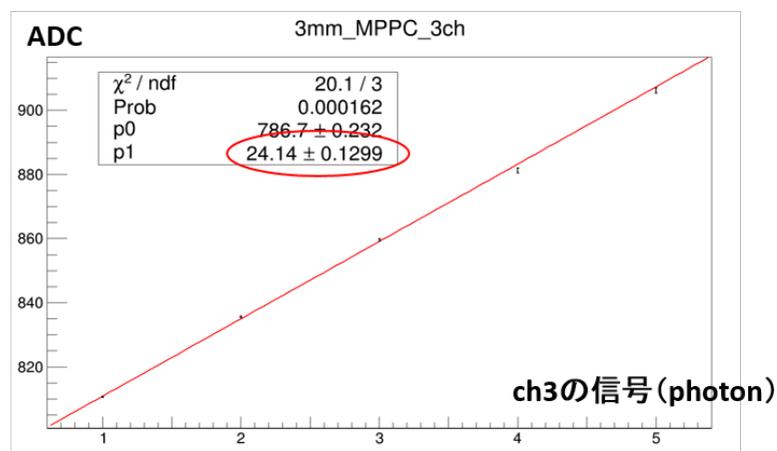


図 2.3: チャンネル 3 の ADC/photon

16 個の MPPC のゲインが実際に揃っているかを確認するため、また 16ch の信号の和を photon 数に換算できるように 1photon あたりの ADC 値を 1mm 角、3mm 角それぞれについて求めた。図 2.2 は 3mm 角 MPPC のチャンネル 3 の信号である。各 photon 毎にピークがあることが見て取れる。それぞれのピークの ADC 値から 1photon あたりの ADC 値（傾き）を求めたのが図 2.3 である。チャンネル 3 以外にもチャンネル 1、チャンネル 2、チャンネル 4 について ADC 値/photon を求め平均をとると  $23.55 \pm 0.15$  となった。これと同様のことを 1mm についても行った。

### 2.1.3 光量比較の結果

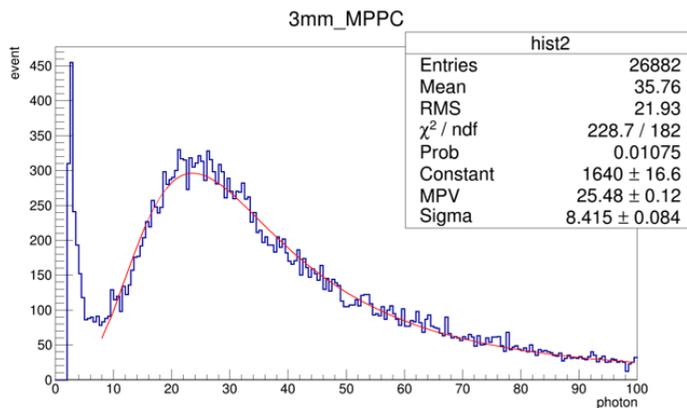


図 2.4: 16ch の信号の和 (3mm 角の場合)

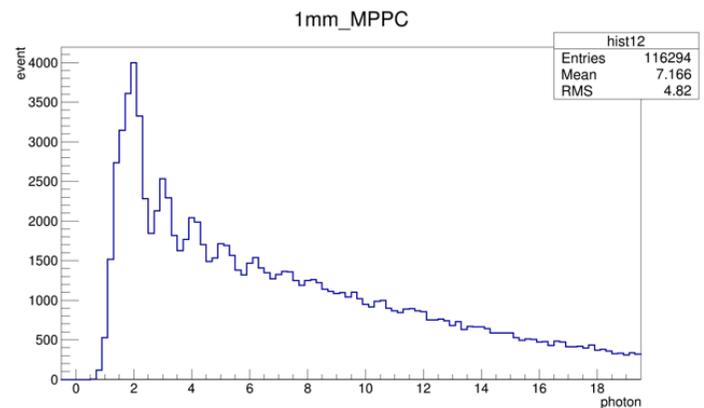


図 2.5: 16ch の信号の和 (1mm 角の場合)

先ほど求めた 1photon あたりの ADC 値を使い、全 16ch の信号の和を横軸 photon に換算したものが図 2.4 と図 2.5 である。3mm 角の場合、ランダウ分布で記述でき、ピークの値は  $25.48 \pm 0.12$  だったので、宇宙線がプラスチックシンチレータを通ったときの 3mm 角 MPPC の受光数はおよそ 25photon だと分かる。それに比べて 1mm 角の場合は、ランダウ分布にもポアソン分布にも従わず 3mm 角のような宇宙線が通ったときのピークが見えない。この理由について以下に詳しく考察する。

### 2.1.4 1mm 角 MPPC の光量について

1mm 角 MPPC の信号に 3mm 角のようなピークが見えなかったのは、ノイズが多いためと推測した。そのため 1mm 角の全チャンネルのデータからノイズを取り除く解析プログラムを作成した。

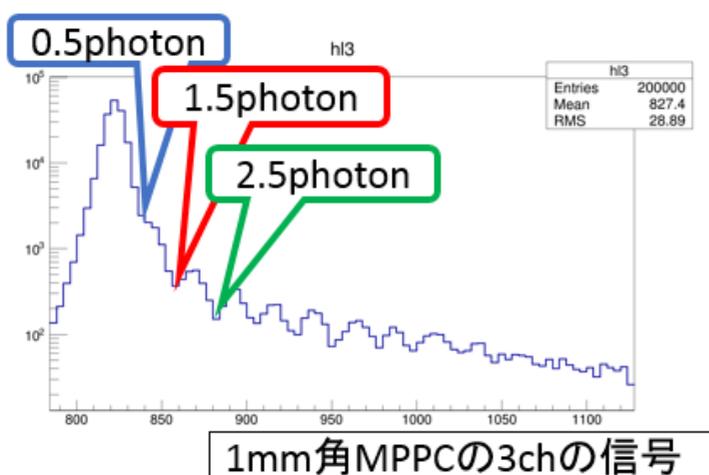


図 2.6: 1mm 角 MPPC の 3ch の信号

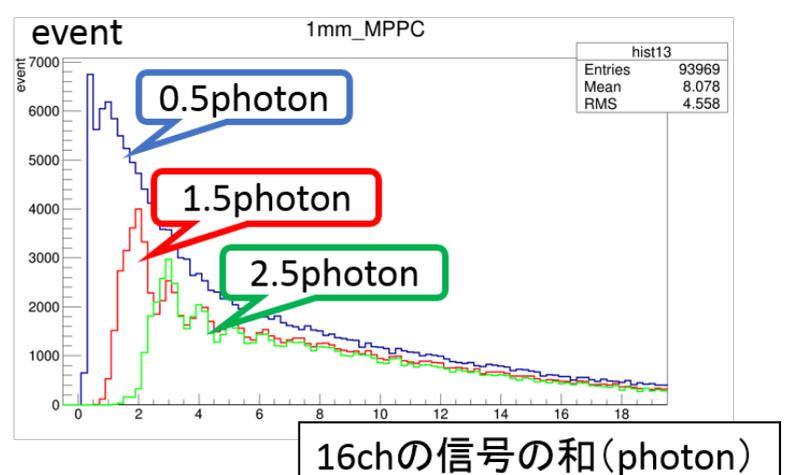


図 2.7: threshold を変えたときの結果

図 2.6 のように、信号と見なす threshold を 0.5photon、1.5photon、2.5photon と変化させた。その結果を図 2.7 に示す。threshold を変化させても、3mm のような宇宙線が通ったときのピークが見られない。3mm 角の受光数が 25photon あたりにピークを持つので、受光面が 1/9 である 1mm 角は 3photon あたりにピークをもつと予測された。しかし、ノイズと信号をうまく分離出来なかったため、その評価は難しい。

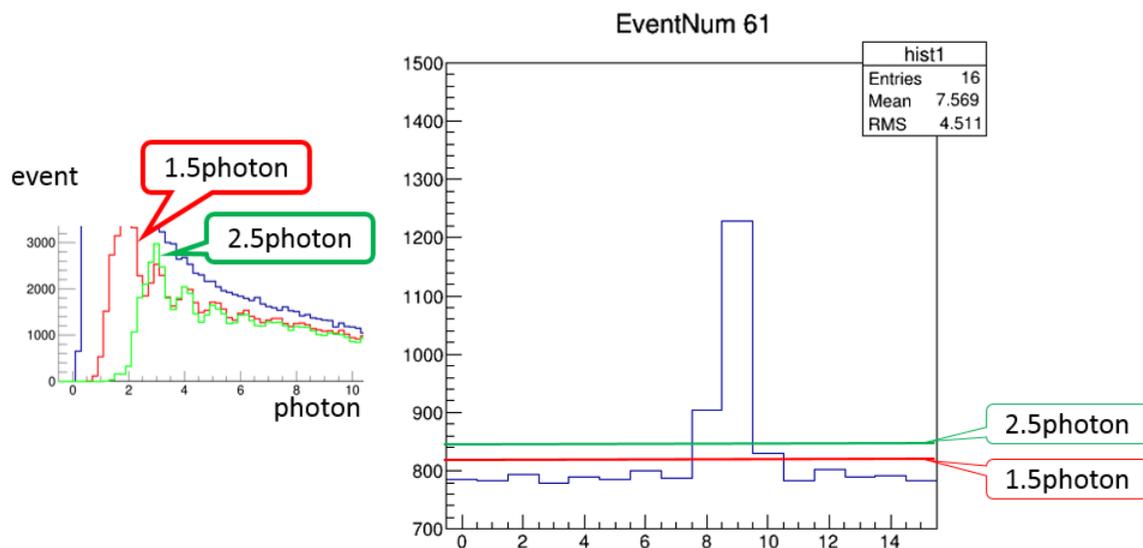


図 2.8: threshold を変えたときの 3photon のピーク

また、図 2.8 の左のように threshold が 1.5photon と 2.5photon それぞれの 3photon のピークのイベント数を比較すると threshold が 2.5photon の方が大きいのが分かる。通常 threshold を上げているので 3photon に相当するイベントの数も減り山は小さくなるように思われた。

しかし、図 2.8 の右のようなイベントの場合、threshold が 2.5photon の信号は

- 1.5photon に比べて pedestal が大きくなる。( threshold 以下の ADC 値の平均が pedestal のため。)
- 1.5photon に比べて信号と見なされる ADC 値が小さくなる。

このようなイベントが多かったため、ピークの逆転が起こったと考えられる。

### 2.1.5 光量測定の際の問題点

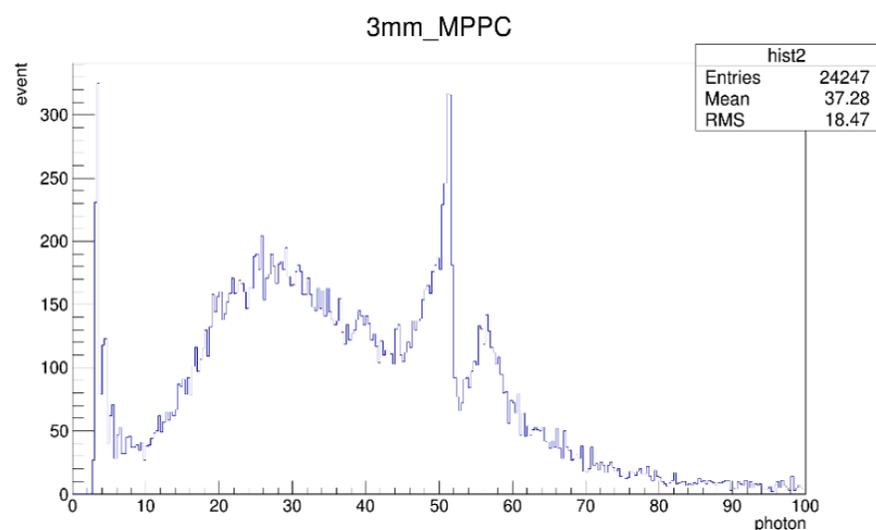


図 2.9: 3mm 角 MPPC の異常なピーク

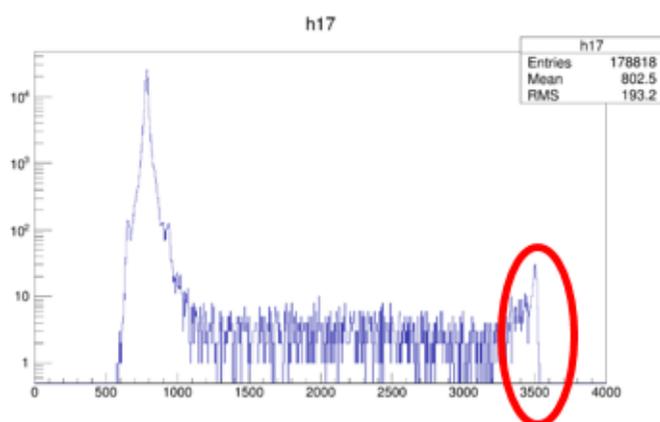


図 2.10: 3mm 角 MPPC のチャンネル 2

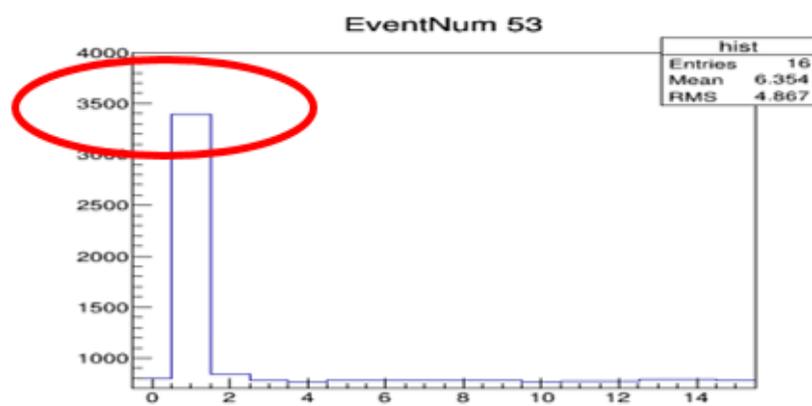


図 2.11: 3mm 角 MPPC のチャンネル 2 のあるイベント

初め 3mm で実験を行った際、図 2.9 のように 50photon あたりに異常なピークが見られた。これについて考察する。

この測定の際、EASIROC 内の PreAmp のゲインは最大値の 150 となっていたが、この場合図 2.10 のように ADC 値が 3200 あたり以上で飽和しているのが分かる。これは全チャンネルで見られた。そのため図 2.11 のような ADC 値が 3200 を超えるようなイベントは正しく計算されず、図 2.9 の 50photon あたりに溜まると考えられる。そこで PreAmp のゲインを設定ファイルを編集して 1/4 に下げて同様の測定を行ってみるとすべてのチャンネルで飽和しないことが確認できた。そのときの結果が図 2.4 である。また 1photon あたりの ADC 値を確認すると 54 から 23.6 に変化した。1/4 にはなっていないが、ゲインは下がり飽和しなくなった。

## 2.2 ゲイン測定

MPPC のゲインは APD ピクセルのキャパシタンス  $C$ 、素電荷  $e$ 、印加電圧  $V_{\text{bias}}$ 、降伏電圧  $V_{\text{bd}}$  として、

$$\text{Gain} = \frac{C}{e}(V_{\text{bias}} - V_{\text{bd}}) \quad (2.1)$$

のように表される。式 (2.1) からわかるように、MPPC のゲインは印加電圧と降伏電圧の差で決まるが、この降伏電圧には MPPC ごとに個体差がある。本実験では複数の MPPC を同時に用いて測定するので、各 MPPC のゲインを揃えなければならない。そのために各 MPPC ごとのゲインを測定し、個体差を調べた。

### 2.2.1 ゲイン測定方法

ゲイン測定は 1.2.3 節で述べた暗箱を用いて行った。図 1.8 のように暗箱の中に青色 LED、MPPC、PMT を配置し、LED からの光が MPPC と PMT に同時に当たるようにした。ゲイン測定において、PMT はトリガ信号を取るために用いた。

パルスジェネレータを用いて LED からパルス光を出し、それを MPPC に当てた。LED からの光量を一定にしたまま、MPPC への印加電圧を変えながら MPPC のゲインを記録し、横軸に印加電圧、縦軸にゲインを取ってプロットし利得曲線を作成した。MPPC の個体差はこの利得曲線の傾きと降伏電圧から調べることができる。また、光量の調節はパルスジェネレータの Amp と ND フィルターを用いて行った。

ゲイン測定は 1mm 角 MPPC と 3mm 角 MPPC それぞれで行った。以下が、それぞれの測定におけるパルスジェネレータ等の設定である。

1mm 角 MPPC

Frequency 100 Hz

Width 35 ns

Amp 7 V

LED の抵抗 100

LED の前にフィルターを 2 枚、PMT の前にフィルターを設置

3mm 角 MPPC

Frequency 100 Hz

Width 35 ns

Amp 5.2 V

LED の抵抗 100

LED の前にフィルターを 2 枚、MPPC の前に PMT 用のフィルターを設置

### 2.2.2 ゲイン測定の結果

図 2.12 が印加電圧 65.52 V のときのある MPPC のヒストグラムの例である。このヒストグラムをガウス関数でフィットし、平均値をとってゲインを記録した。MPPC への印加電圧を 0.2V ずつ変化させ、ゲインを 4 点または 5 点プロットして直線でフィットした利得曲線の例が図 2.13 である。

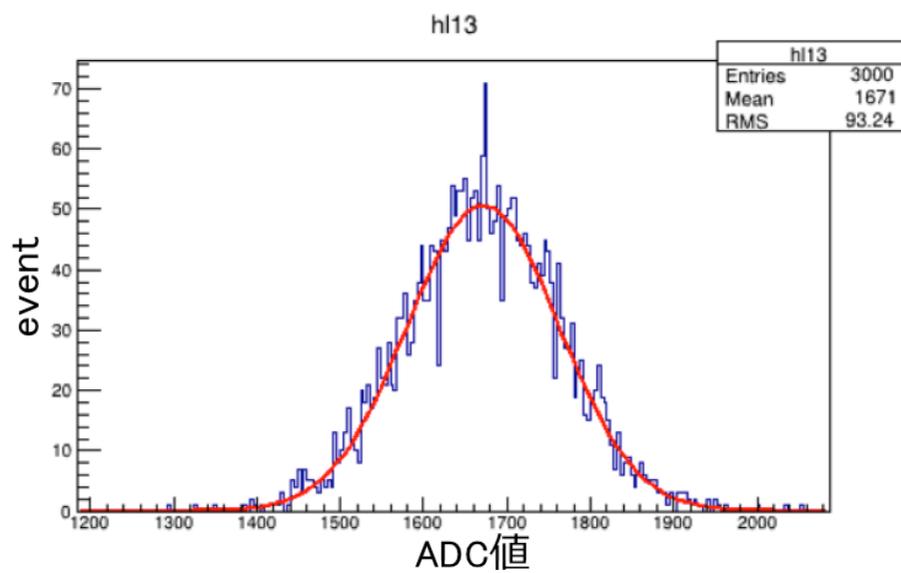


図 2.12: ヒストグラムの例

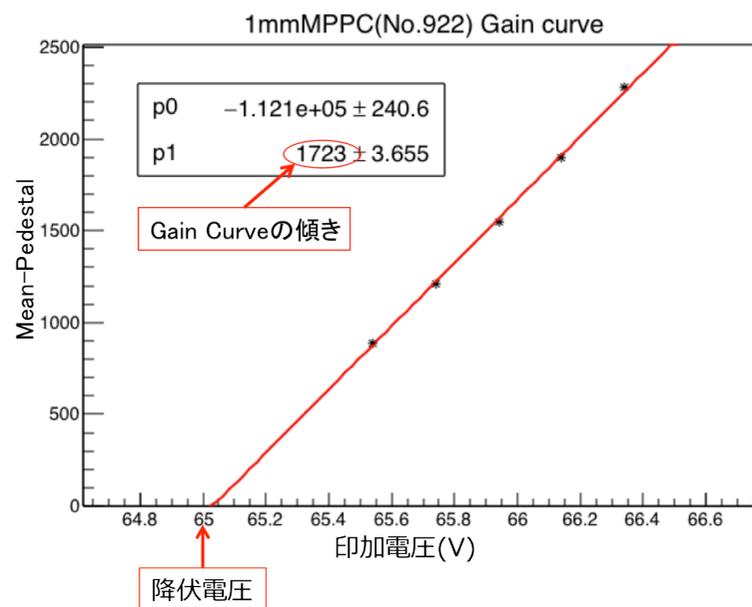
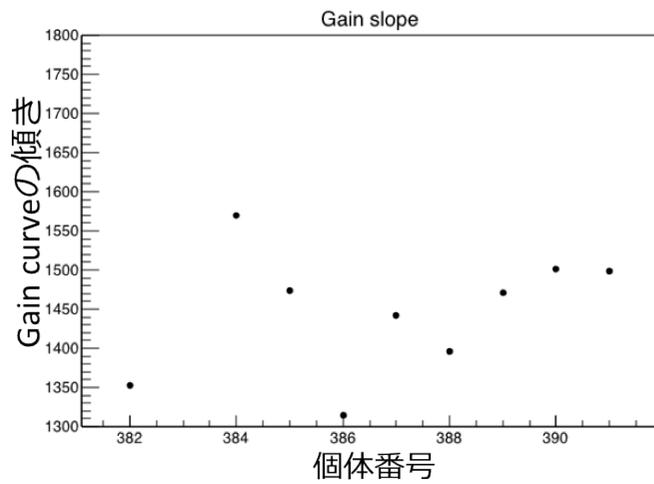
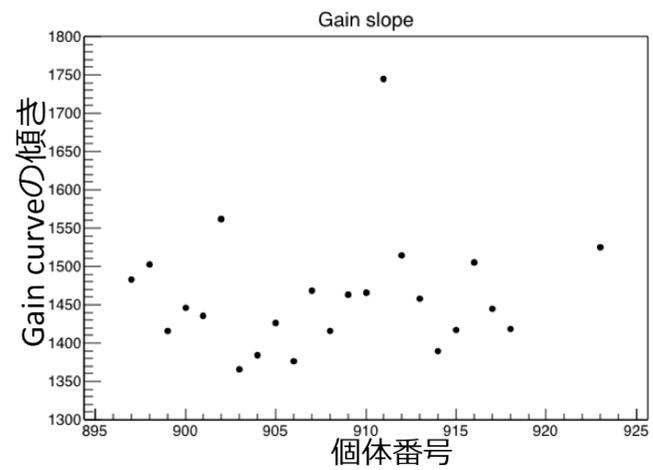


図 2.13: 利得曲線の例

以下が 1mm 角 MPPC の利得曲線の傾きと降伏電圧の測定結果である。今回測定した 1mm 角 MPPC には 個体番号 300 番台のものと 800・900 番台のものがあるが、測定結果からそれぞれの個体差はあまりなく補正可能な範囲内である。

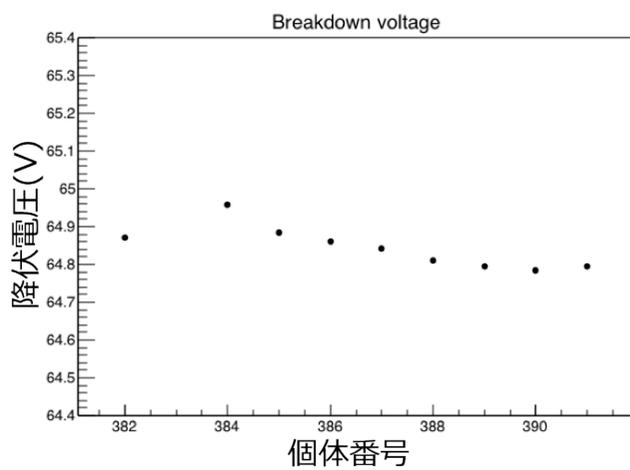


(a) 300 番台 MPPC

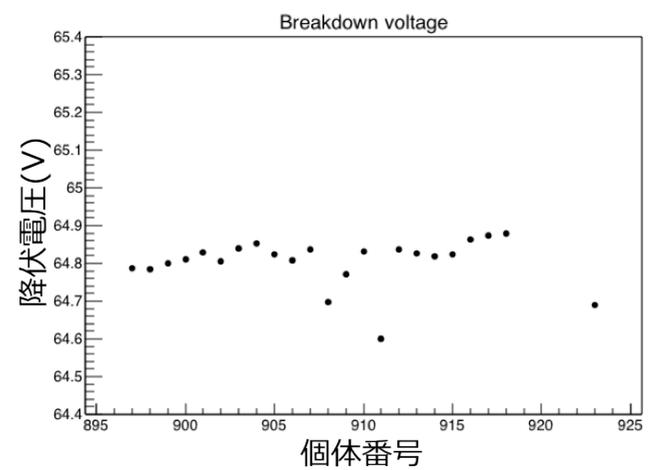


(b) 800・900 番台 MPPC

図 2.14: 利得曲線の傾き



(a) 300 番台 MPPC



(b) 800・900 番台 MPPC

図 2.15: 降伏電圧

以下が 3mm 角 MPPC の利得曲線の傾きと降伏電圧である。測定から個体差は 1mm 角 MPPC と同様であり、1mm 角 MPPC と同じように使用できることがわかった。

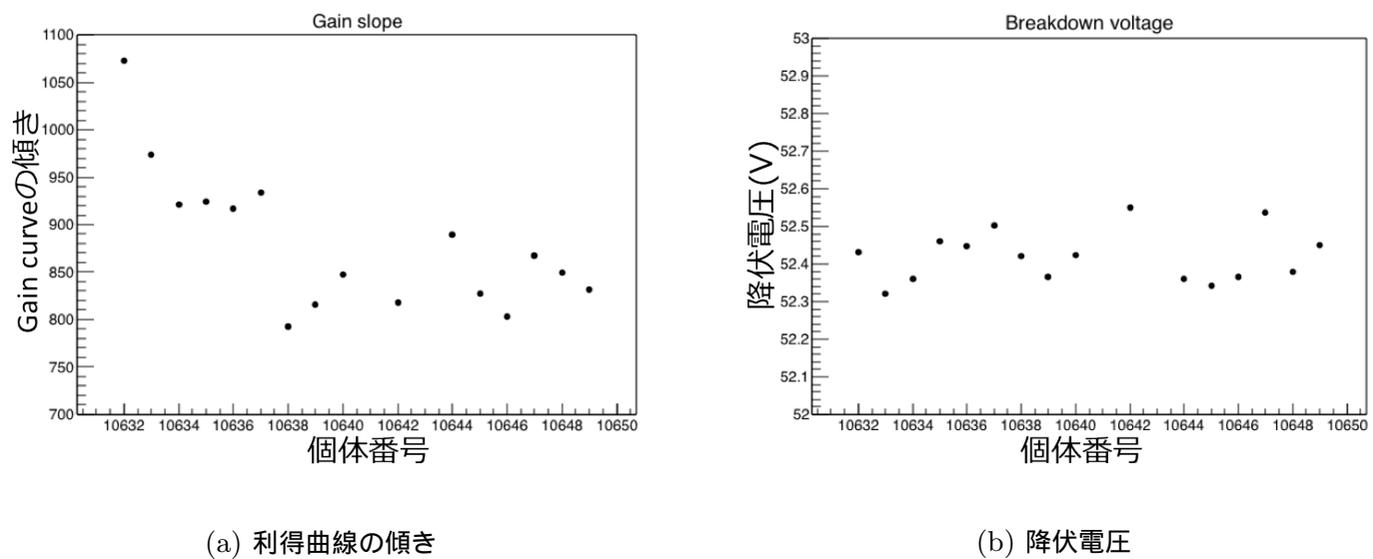


図 2.16: 3mm 角 MPPC

## 2.3 応答曲線

MPPC をガイガーモードで使用する場合、MPPC の出力信号の大きさは APD ピクセルへの入射光子数にはよらず、光子が入射したピクセル数に依存する。つまり、MPPC への入射光子数が少ないときは入射光子数と検出光子数は一致するが、入射光子数が多くなると検出光子数が飽和し、出力信号は一定値に漸近すると考えられる。この入射光子数が多いところでの MPPC の出力信号の振る舞いを調べた。

### 2.3.1 検出光子数の測定方法

今回は 1mm 角 MPPC(1600 pixel) を用いて応答曲線を作成した。MPPC へある電圧を印加し、パルスジェネレータの Amp を上げて光量を増やしながらゲインを記録した。光量が増えすぎると EASIROC モジュールの Amp が飽和するので、飽和する前に MPPC への印加電圧を下げて飽和しないようにした。このとき、MPPC への印加電圧を変えるとゲインも変わるので、同じ光量で印加電圧を変える前と変えた後でゲインを測定し、両方の光量が等しいとしてゲインの補正を行った。

ゲインの ADC 値から光子数への変換については、2.1.2 節で述べたのと同様に 1photon 間隔を測定して行った。以下が、測定におけるパルスジェネレータ等の設定とヒストグラムである。

#### 1mm 角 MPPC

Frequency 100 Hz

Width 35 ns

Amp 4.7 V

LED の抵抗 100

LED の前にフィルターを 2 枚、MPPC の前に PMT 用のフィルターを設置

MPPC への印加電圧 67.34 V

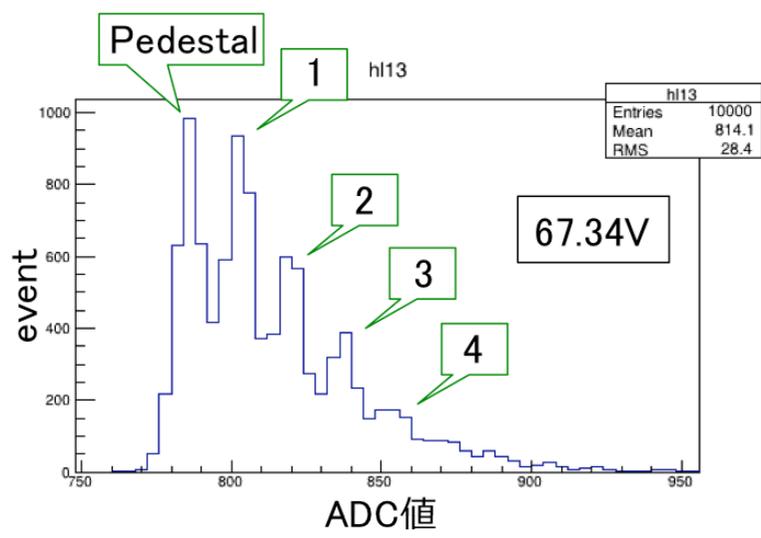


図 2.17: 1photon 間隔のヒストグラム

図 2.17 において、それぞれのピークがペDESTALと MPPC に入射した光子数に対応するゲインである。これらのピークをガウス関数でフィットし、平均値をとってゲインを記録した。そして、縦軸に平均値、横軸に対応する光子数を取ってプロットし、直線でフィットして 1photon あたりの ADC 値 (ADC/1photon) を求めた。フィットしたものが図 2.18 で、その結果から印加電圧が 67.34 V のときの ADC/1photon は 16.4 となった。印加電圧を変えたときのゲイン補正にもこの値を用いた。また、今回は光量の参照として PMT を用いた。

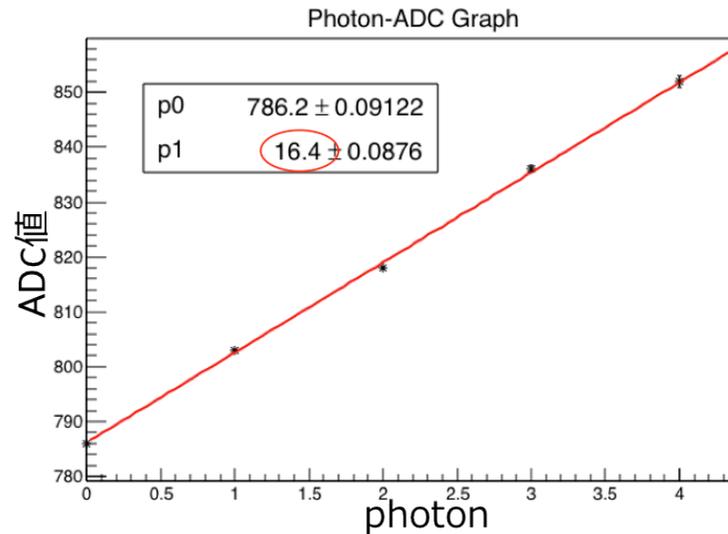


図 2.18: ADC/1photon

### 2.3.2 検出光子数の測定結果

図??が今回測定した 1mm 角 MPPC の応答曲線である。印加電圧を 6 種類 (67.32 V、66.35 V、65.38 V、65.10 V、64.91 V、64.88 V) 用いてゲインを測定した。印加電圧が 67.32 V のときの ADC/1photon が 16.4 であるとし、縦軸を MPPC の検出光子数に換算した。また、横軸は光量が少ない領域で PMT の検出光子数が MPPC の検出光子数と等しいと仮定して、PMT の出力信号の大きさを光子数に換算した。

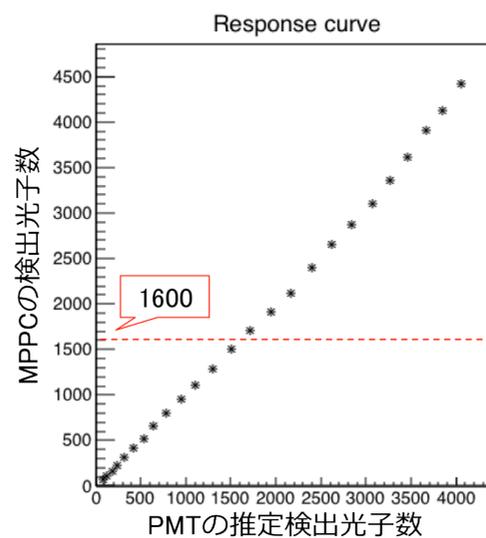


図 2.19: 1mm 角 MPPC の応答曲線

図 2.19 より、1mm 角 MPPC の検出光子数が 1mm 角 MPPC のピクセル数である 1600 付近で飽和せず、それより光子数の多い領域で線形に増加していることがわかる。

この原因として、パルスジェネレータのパルス幅 (Width) が長すぎたことに問題があったと考えられる。MPPC の APD ピクセルは一度光子を検出した後、数 ns 経過すると再び光子を検出できるようになるのに対し、今回はパルス光のパルス幅を 35ns と長く設定していたため、一度のパルス光に対してひとつの APD ピクセルが何度も光子を検出した可能性がある。ひとつのピクセルが何度も光子を検出した結果、MPPC のピクセル数以上の光子が検出され、図 2.19 のようにピクセル数付近でも検出光子数が飽和せずに増加していったと考えられる。今後の対応策としては、例えば LED を用いた回路自体にコンデンサーを組み込んで微分回路を作ること、パルスジェネレータの Width が同じでもよりパルス幅の短いパルス光が取り出せるようにする等の改良が考えられる。

## 第 3 章 実験装置の較正とトリガー

### 3.1 MPPC への印加電圧の決定

MPPC への印加電圧と 1p.e. あたりの ADC 値には個体差がある。しかし、解析では ADC 値を光電子数に変換する必要があるため全 MPPC の 1p.e. あたりの ADC 間隔を揃える必要がある。EASIROC は 32 個の MPPC への印加電圧を 0 – 4.5V の範囲で個別に微調整することができるので、これを利用して全 MPPC のある光量に対する ADC 値を揃える。

MPPC の Gain 測定 (2.2) で書いた全 MPPC の利得曲線に対して、適当な ADC 値を決めてそのときの印加電圧を逆算した。このときの ADC 値は全 MPPC に対して適正電圧 (降伏電圧 +3V 程度) となるように決定した。

### 3.2 MPPC による宇宙線のセルフトリガー

MPPC1 層では以下で述べるように MPPC 自身から生じるノイズが多いためセルフトリガーを宇宙線トリガーとして用いることができない。そのため、MPPC2 層のセルフトリガー信号のコインシデンスを宇宙線トリガーとして用いることができるかどうかの見積もりを行った。

#### 3.2.1 MPPC の特性

MPPC の欠点の一部として固体素子であるため室温では熱励起によるノイズが多いことと、多数の APD ピクセルが並んだ構造をしているため、クロストークが生じることが挙げられる。前者は 1 pixel あたりに生じるノイズなのでほとんどが 1 p.e.。後者はガイガー放電による 2 次電子が原因なので熱電子によるクロストークは 2 p.e. であると考えられるので、これらのノイズを抑えてトリガーをかけたい。実際に 0.5 p.e. と 1.5 p.e. でスレッシュホールドをかけたときのダークレートを計測を行う。方法としては Gain 測定で用いた暗箱内で、光を当てずに 1mm・3mm 角 MPPC に電圧をかけて threshold を 0.5 p.e. と 1.5 p.e. としたときのセルフトリガー信号を scaler で計測した。結果は表 3.1 のようになった。

1, 2 p.e. ではノイズレートが高いので 2.5 p.e. で threshold をかけることに決めた。

表 3.1: MPPC のダークレート

size	pixel 数	threshold [p.e.]	dark rate [kHz]
1mm	1600	0.5	300
		1.5	10
3mm	3600	0.5	200
		1.5	20

#### 3.2.2 セルフトリガーレートの見積もり

MPPC1 層 (16ch) でのセルフトリガーはノイズにより非常に高いレートとなっているので本実験では、2 層のセルフトリガーのコインシデンスをとったときのトリガーレートを見積もった。方法としては 1 層の MPPC のセルフトリガーレートを threshold を変えながら scaler で計測する。その結果から、ある threshold でのトリガーレートから時間あたりにトリガー信号のゲートが開いている割合 (占有率) がわかる。ゲート幅

は 100 ns として、2つのトリガー信号のゲートが同時に開いているレートは(1層でのトリガーレート)×(占有率)で計算した。以下に計測結果(図 3.1, 3.2)と計算結果(表 3.2)を載せる。図 3.1 を見ると 1mm 角 MPPC のトリガーレートが非常に高くなっていることがわかる。これはオシロスコープで信号の波形を見ると電気的なノイズが原因であることが分かった。そのため、1mm 角 MPPC での測定にはノイズ対策が必要。

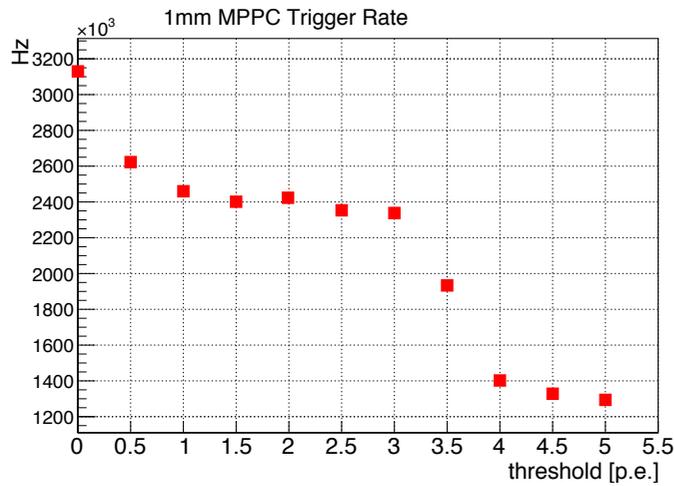


図 3.1: 1mm 角 MPPC1 層のトリガーレート

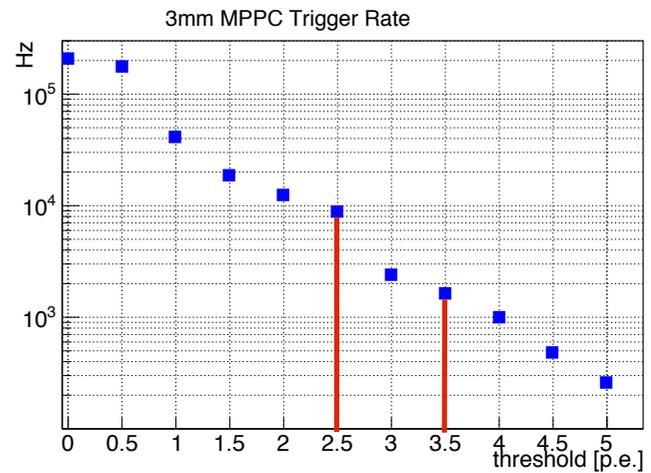


図 3.2: 3mm 角 MPPC1 層のトリガーレート

表 3.2: セルフトリガーレート

size	pixel 数	threshold	self-trig rate (1 layer)	occupancy	self-trig rate (2 layer)
3mm	3600	2.5 p.e.	10 kHz	0.1 %	10 Hz
		3.5 p.e.	1 kHz	0.01 %	0.1 Hz

以上から 3mm 角 MPPC2 層のセルフトリガーは 3.5 p.e. で threshold をかけると宇宙線レートに比べて低いレートのトリガーとなることが期待できて、宇宙線トリガーとして用いることができることが分かった。今回、3mm 角 MPPC は 1 層分しか個数が無かったため PMT を宇宙線トリガーとして用いた。

## 第 4 章 データ解析

### 4.1 宇宙線測定

第 1.2 節および第 3 章で説明した実験装置を用いて宇宙線イベントを取得した。このとき、2 層の MPPC 層のうち上層には 3mm 角 MPPC を、下層には 1mm 角 MPPC を設置し、それぞれ光電子増倍管を読み出しにもつプラスチックシンチレータで取得した宇宙線イベントをトリガーとして独立に 200000 イベントを取得した。光電子増倍管への印加電圧は 1350V であった。

下図 4.1 に 3mm 角 MPPC 層で取得したあるイベントのイベントディスプレイを示す。ここで、横軸はチャンネル番号 (0–15 まで全 16 チャンネル)、縦軸は ADC の pedestal に光子数が載ったものを表している。また、図中において MIP と書かれた赤色の点線は、pedestal からおよそ 25photon の位置に引いてあり、宇宙線が 1 本のプラスチックシンチレータのみを通過し、最小電離損失をしたときに予想されるヒストグラムの高さに対応している。

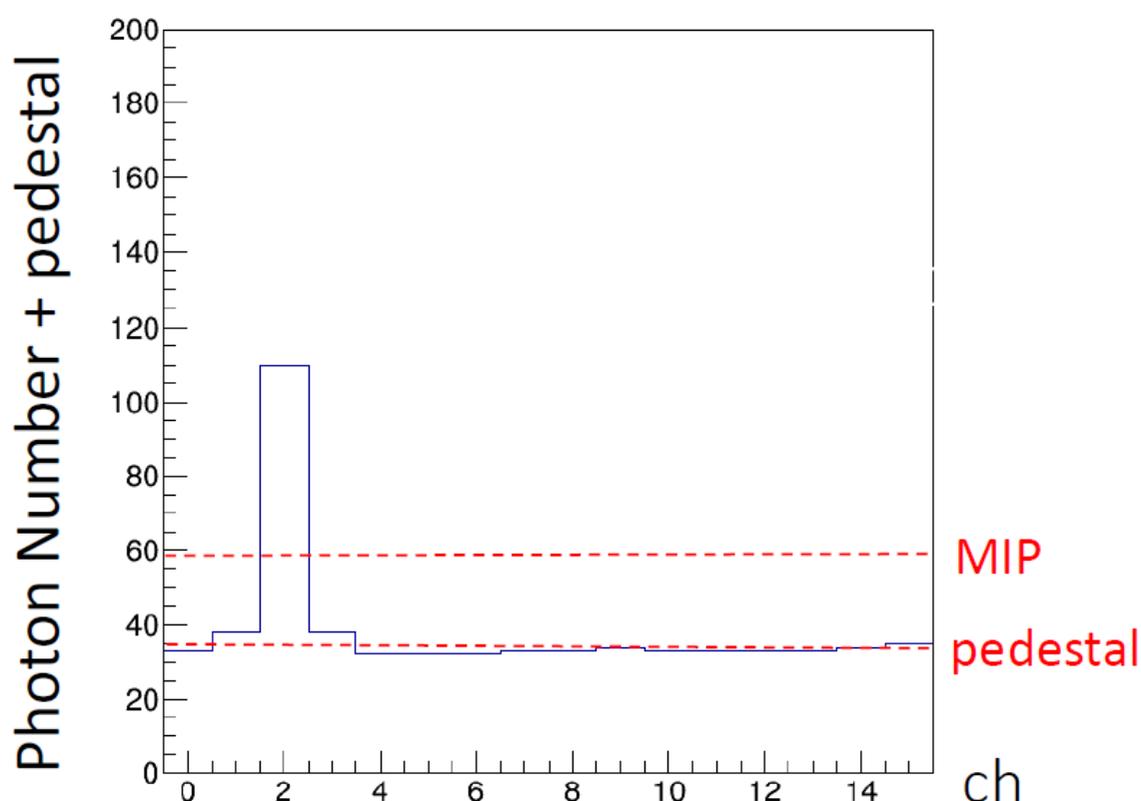


図 4.1: 宇宙線の測定結果の例 (3mm 角 MPPC 層)

得られたイベントのイベントディスプレイをチェックしてみると、多くのイベントで図 4.1 のように 1 粒子によるものと思われる信号が複数のチャンネルにわたって現れることが判明した。その原因としては以下のことが考えられる。

- シンチレータ中に発生した光が側面から漏れ、その光を隣のシンチレータが検出した
- 1 本の宇宙線が複数のチャンネルにわたって通過した

したがって、正しくエネルギー損失や通過した粒子数を評価するために隣り合うシンチレータからの信号を足し合わせるクラスターアルゴリズムが必要であり、その開発を行った。

一方、1mm 角 MPPC 層の場合については、光量が少なく、信号とノイズが分離できなかったので解析を行

わなかった。

## 4.2 クラスタアルゴリズム

本研究では、宇宙線の信号が3つのチャンネルにわたっている場合に注目した。

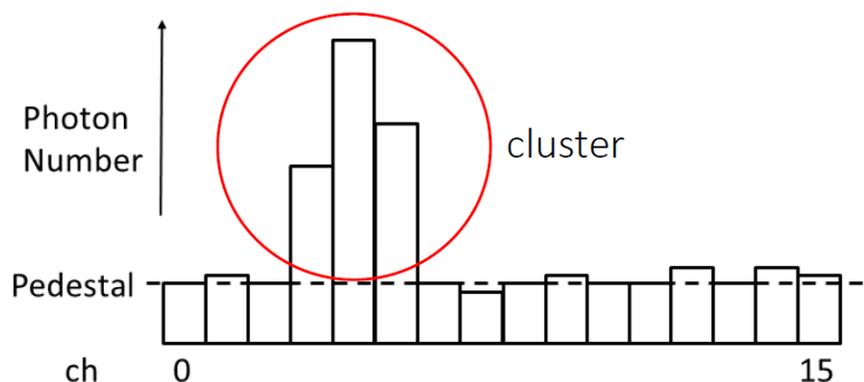


図 4.2: クラスタアルゴリズムの概念図

開発したアルゴリズムのながれは以下のものである。

1. 全 16 チャンネルの中で信号が大きな順に 3 チャンネル選び出す
2. 残りの 13 チャンネルの平均を pedestal とする
3. もし、選んだ 3 つのチャンネルが隣り合うチャンネルなら信号を足し合わせ、ヒストグラムにプロットする。それ以外のイベントは捨てる

このアルゴリズムでは宇宙線が検出器中の 1 つまたは 2 つの隣接したチャンネルのみを通過しそのチャンネルだけが信号を出しているイベントは捨ててしまっている。しかし、そのようなイベントは多くない。その理由としては、1 つのチャンネルのみを通過している場合でも上記のように隣のチャンネルに光が漏れている可能性が考えられる。また、検出器を斜めに横切るイベントも多いので、このアルゴリズムによりヒストグラムのおおよその形はわかると言える。

## 4.3 解析結果

### 4.3.1 宇宙線イベントの解析結果

下図 4.3 にクラスタアルゴリズムを用いて得られたヒストグラムを示す。横軸は光子数、縦軸はイベント数になっており、ある光子数を発生させた宇宙線イベントがどれだけあるかを表している。このとき、クラスタ後の光子数が 2.5 以下のイベントはノイズであると判断し、除いている。

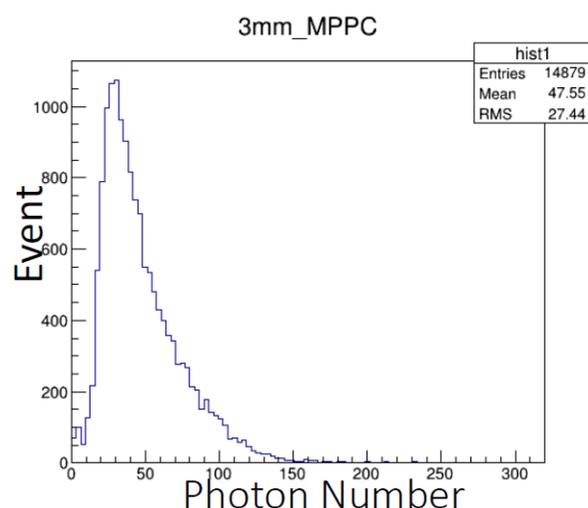


図 4.3: クラスタアルゴリズムを用いて得られたヒストグラム

図 4.3 のヒストグラムはランダウ分布によく似た形になっていることがわかる。実際に光子数 2.5–200 までと 2.5–170 まででランダウ分布でフィットした結果を下図 4.4 と 4.5 に示す。

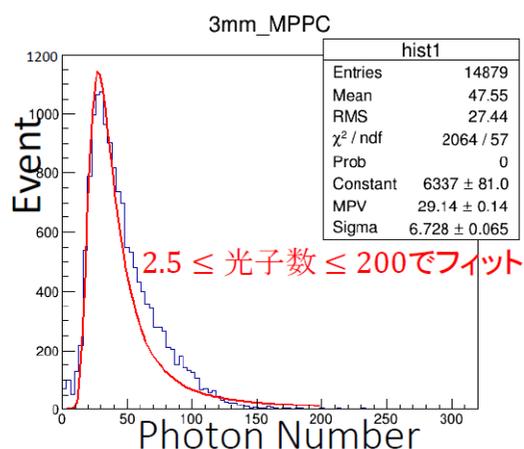


図 4.4: ランダウ分布によるフィット結果  
(光子数 2.5–200)

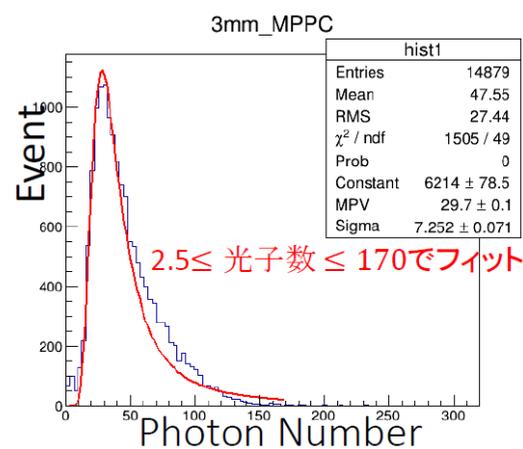


図 4.5: ランダウ分布によるフィット結果  
(光子数 2.5–170)

図 4.4 と図 4.5 を見ると、どちらの場合も光子数が少ない領域ではフィットが良いが、光子数が多い領域では悪いことがわかる。この理由としては以下のことが考えられる。

- 検出器中の 1 つまたは 2 つの隣接したチャンネルのみを通過し、光漏れせずにそのチャンネルだけ光を検出したイベントを捨ててしまっているため、光子数が少ないイベントは減っているが、電離損失の大きな斜めに通過したイベントは拾っているため
- 1 つのシンチレータに同時に複数の粒子が入射することで光子数が多いイベントが増加したため
- 多数の粒子が同時に通過したと思われるイベントに対しては、ある 1 つの 1 粒子候補が 3 チャンネルにわたっていればそのイベントを拾ってしまうので、光子数が多いイベントを多く拾ったため

#### 4.3.2 1 つの粒子による大きな電離損失イベントの探索

本研究の目的は、1 つの粒子が大きな電離をしたイベントを探索することである。そこで得られたヒストグラム (図 4.3) に対して、光子数が 200 (約 8MIP) より大きいイベントに注目し、この領域のすべてのイベントをイベントディスプレイで確認することにした。

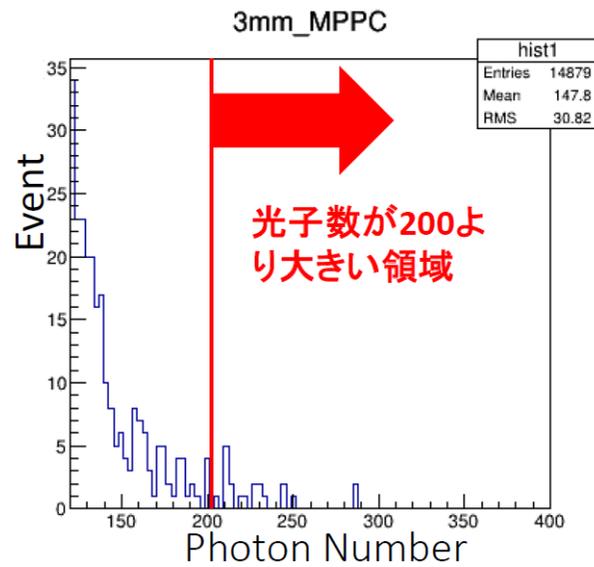


図 4.6: 本研究で注目した光子数領域

光子数が 200 より多いイベントとして全部で 22 イベントが得られ、それらは検出器を 1 粒子が通過したと思われるイベント、2 粒子が同時に通過したと思われるイベント、それ以上の多数の粒子が同時に通過したと思われるイベントの 3 パターンに分類することができた。各パターンのイベント数は、1 粒子が通過したと思われる場合が 17 イベントと最も多く、続いて 2 粒子が同時に通過したと思われる場合が 4 イベント、多数の粒子が同時に通過したと思われる場合が 1 イベントであった。

各パターンの典型的なイベントディスプレイを図 4.7 に示す。

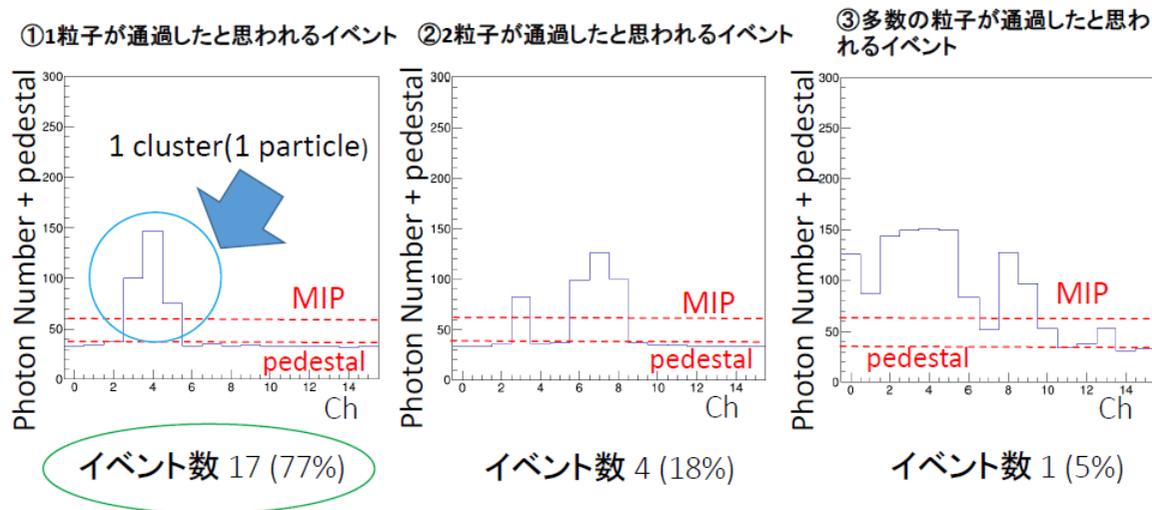


図 4.7: 各パターンの典型的なイベントディスプレイ

上図 4.7 で示した 1 粒子が通過したと思われるイベントの中には、下図 4.8 のように 1 つのチャンネルに同時に 2 粒子以上が通過したイベントも含まれている可能性があり、それについて考察する。

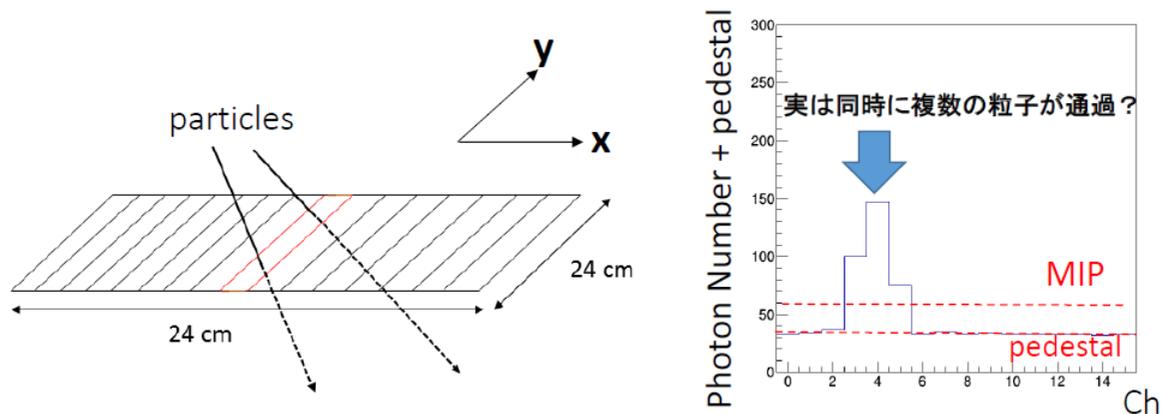


図 4.8: 1 つのチャンネルに同時に 2 粒子以上が通過するイベントの例

上図 4.7 で示したように、上図 4.8 の x 軸方向に対して複数の粒子が同時に通過したと考えられるイベントは 1 粒子が通過したと考えられるイベントに比べて少ない。したがって、軸対称性より図 4.8 の y 軸方向、すなわち 1 本のシンチレータを同時に複数の粒子が通過するイベントは 1 粒子が通過するイベントよりも少ないことが期待される。

よって、すべてのクラスターが 2 粒子以上を含むとは考えにくく、有意に MIP の電離損失より大きい電離損失をしている 1 粒子と思われるイベントが含まれている可能性が高い。

これらの候補としては既知の粒子である遅い  $\mu$  粒子や  $\pi$  中間子、陽子などが考えられるが、本研究の結果からだけでは粒子の種類を同定することはできない。粒子の種類を同定するには、スペクトロメータを導入して粒子の運動量を測定したり、TDC を使用できるファームウェアに書き換えて粒子の TOF を測定することで粒子の速度を求めたりといった装置の改良が必要である。

また、本研究では 3mm 角 MPPC が 1 層分しかなかったが、もう 1 層も 3mm 角 MPPC 層にすることでより正確に 2 粒子と 1 粒子のイベントを区別できると期待される。

## 第5章 まとめと展望

本実験では、半導体光検出器 MPPC を読み出しにもつシンチレーションカウンターを用いて宇宙線を捉え、その中に1つの粒子による大きな電離損失イベントがあるか探索した。

プラスチックシンチレータからのシンチレーション光を正確に評価するために、読み出しに用いた MPPC のゲイン測定などの性能評価を行った。その結果、各 MPPC の印加電圧に対する1光子あたりの信号の大きさ、信号がゼロとなる印加電圧のばらつきは十分小さく、用いた装置にある各チャンネルごとの印加電圧調整で十分補正できることがわかった。さらに、それらの結果を用いて MPPC に印加する電圧を決定した。加えて、検出に用いたシンチレータの最小電離粒子に対する MPPC の光電子数を測定し、3mm 角の MPPC では20以上の十分な光電子を取得していることがわかった。また、MPPC からの信号がノイズによるものか宇宙線によるものかの threshold を決定する測定を行い、MPPC 層が1層の場合は2.5photon を threshold とすることに決めた。この threshold を用いたときのトリガー系のノイズによるトリガーレートは、2層のコインシデンスにより無視できるレベルに抑えられることがわかった。

最後に、クラスターアルゴリズムを用いて宇宙線データを解析し、有意に最小電離損失よりも大きい電離損失をしていると思われる1粒子イベントを捉えた可能性が高いことがわかった。これらの候補としては既知の粒子である遅い  $\mu$  粒子や  $\pi$  中間子、陽子などが考えられるが、この実験からだけでは粒子の種類を同定することはできず、さらなる装置の改良により粒子の運動量や速度を測定することで質量に関する情報を得る必要がある。

また、本実験では MPPC の温度制御を行わなかったが、参考文献 [4] から MPPC は温度によってゲインやノイズレートといった基礎特性が変わることが示されているため、温度制御を行うことでより正確なデータが得られると考えられる。

さらに、本実験で用いたクラスターアルゴリズムを改良することでより正確にエネルギー損失や通過した粒子数を評価できると期待される。

## 参考文献

- [1] 123D Design. <http://www.123dapp.com/design>.
- [2] OMEGA. *EASIROC DATASHEET*, april 2011.
- [3] 阿部 圭悟, 池之上 果澄, 稲田 知大, 前久 景星. 大きな電離損失をする新粒子探索実験, 2015.
- [4] 五味慎一. 半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築, 2008.
- [5] 長坂 憲子, 横山 紗依. デジタルオシロスコープによる高速サンプリング記録を用いた MPPC 読み出しシンチレーションカウンターの特性評価, 2015.
- [6] 浜松ホトニクス. 1mm MPPC データシート.
- [7] 浜松ホトニクス. 3mm MPPC データシート.
- [8] 浜松ホトニクス. MPPC (Multi Pixel Photon Counter). Technical report, 浜松ホトニクス, 2009.
- [9] 本田良太郎. EASIROC テストボード仕様書. 東北大学, 3 2013.

# 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方からご指導、ご支援をいただきました。この場をお借りしてお礼申し上げます。

指導教員である山崎祐司先生にはどんな些細な質問でも丁寧に解説していただき、研究が行き詰ったときにはたいへん明快な指示で私たちを導いてくださいました。また、4年生であるにも関わらず、出張にも行かせていただき、貴重な経験をすることができました。心から感謝申し上げます。

KEKの中村勇先生には、EASIROC モジュールの講習会を引き受けていただいただけでなく、我々のもっているモジュールの調子が悪いことを知ると、別のモジュールを貸していただきました。本当にありがとうございました。

九州大学の先生方、KEKの内田先生にはFPGA講習会でお世話になりました。とてもわかりやすい解説で楽しくFPGAの基礎を学ぶことができました。講習会をいっしょに受けた九州大学の学部生の方々には大学内を案内していただいたり、昼食を一緒に食べたりと楽しい時間を過ごせました。ありがとうございました。

阿部さんには装置のソフトウェア、プログラミングについて教えていただき、とても助かりました。山崎先生が不在のときは阿部さんに頼りっぱなしでした。ありがとうございました。

また、藏重先生、竹内先生、身内先生には経過報告にて鋭い質問、ご指摘をいただき、発表に向けてたいへん参考になりました。

越智先生、鈴木先生、矢野先生にはゼミでお世話になりました。解説がわかりやすく、素粒子物理学の基礎から教えていただきました。

秘書の横山さん、PDの岸本さん、博士後期課程の細川さん、岡さん、陳さん、長谷川誠さん、矢ヶ部さん、山根さん、博士前期過程の木戸さん、橋本さん、藤田さん、山内さん、池田さん、斉藤さん、帝釋さん、谷岡さん、長坂さん、長谷川大晃さんには気さくに接していただいたとともに、本実験を進めるにあたってたくさんのアドバイスをいただき、たいへんお世話になりました。

同期の小川くん、竹田くん、都留くん、中澤さん、野崎くん、又吉くん、若宮くん、山元くん、みんなと切磋琢磨し、成長できた1年でした。みんなと同じ研究室になれたことに感謝します。別々の道に進む人も多いですが、これからも頑張っていきましょう。

最後に、ここまで私たちを育てて支えてくれた家族に心から感謝します。

## 付録 A データ取得の効率化

EASIROC でのデータ取得は、実行ファイル easiroc のメニューの [6.Start DAQ] で開始される。従来では、データファイル名を入力したのちイベント数の入力でデータ取得が開始されていた。しかし 32 個の MPPC の Gain 測定の際、1 つの MPPC に対して 5 つのデータを取る必要があったため、データ取得の度に手で打ち込むのは時間の浪費になると考えた。そこで、データファイル名を打ち込まず「提案」するプログラムを作成した。

我々 4 人は、Gain 測定組 2 名（大藪、若松）と宇宙線データ取得組 2 名（川端、谷口）に分かれて実験を行った。Gain 組のデータファイル名は「p\*\*\*\*.dat」（\*は数字）、宇宙線データ取得組は「r\*\*\*\*.dat」でデータを取得した。

ここではじめに「p or r」の選択をさせたのち、「p」なら「p\*\*\*\*.dat」の p 以下の数字で最大の数字に 1 を加えたものをファイル名として提案するようなプログラムを作成した。以下例を挙げる。

- 最新のデータ「p0125.dat」
- 次回提案されるファイル名「p0126.dat」

このように提案型にすることで、データ取得での時間削減に成功した。以下に、従来のものから提案型に変えた方法を説明する。

### 手順 1

sug.cpp で提案型プログラムを作成。このときの関数は sug() で定義した。

### 手順 2

hips@hips-VirtualBox:~/easiroc で ConnectSiTCP.cc を開き、関数 ContinuousADC\_ver2() の変数 file\_name に関数 sug() の引数を代入した。

## 付録 B 光量比較での解析

hips@hips-VirtualBox:~/ozono/src にある光量比較のための解析プログラムについて説明する。

- ChDisp.h で定義した関数について

int PED

どこからを信号と見なすかの threshold の ADC 値。

int ADC1PH

1photon あたりの ADC 値。求め方は 2.1.2 を参照。

ChDisp\_cxx

ここで解析したいデータファイルを選択できる。FindObject にデータファイル名を入力。

AveCut

64 個の ADC 値の配列のうち 16-32 番目の信号に対して、最大値が上で定義した PED 以下のものはカットしイベントとしてカウントしない。

AveCut\_l

64 個の ADC 値の配列のうち 32-48 番目の信号に対してカットをかける。「1」は 2 層の内、下の層 (low) を表す。

PhotonNumber

16ch の内 PED 以上の ch を信号とし、PED 以下の ch の平均を Pedestal とする。信号の ch から Pedestal を引き、これらを足し合わせる。そして 1photon あたりの ADC 値 (ADC1PH) で割ることであるイベントの信号の photon 数を計算する。

PhotonNumberv2

16ch の内 PED 以上のも ch が 1 つだけのときこれを信号 ch とし、PED 以下の ch の平均を Pedestal とする。信号 ch から Pedestal を引き、1photon あたりの ADC 値 (ADC1PH) で割ることであるイベントの信号の photon 数を計算する。

ChPhotonNumber

各 ch でなった信号の平均 photon 数を出力する。各 ch で信号に偏りが無い (よく信号を出す、出さない) かを確認することが出来る。

PhotonNumber\_l

64 個の ADC 値の配列のうち 32-48 番目の信号に対して、PhotonNumber と同じことを行う。「1」は 2 層の内、下の層 (low) を表す。

PhotonNumber\_lv2

64 個の ADC 値の配列のうち 32-48 番目の信号に対して解析する。16ch の内 PED 以上の ch が 2 つ以上あるイベントだけをカウントする。これはノイズを信号と誤認したイベントを排除するために作成したものだが、隣り合わない ch でも 2 つ以上信号 ch があればカウントしてしまうため、ノイズをすべてカットすることは出来ない。

PhotonNumber\_lv3

64 個の ADC 値の配列のうち 32-48 番目の信号に対して、隣り合う 2 つの ch が PED 以上のイベントだけをカウントする。

PhotonNumberlv3

64 個の ADC 値の配列のうち 16-32 番目の信号に対して、隣り合う 2 つの ch が PED 以上のイベントだけをカウントする。

#### PhotonNumber\_l0\_5ph

64 個の ADC 値の配列のうち 32-48 番目の信号に対して、threshold を 0.5photon として PhotonNumber と同じ解析を行う。しかし、0.5photon に対応する ADC 値を求め、直接 if 文に入力する必要があつ。

#### PhotonNumber\_l1\_5ph

64 個の ADC 値の配列のうち 32-48 番目の信号に対して、threshold を 1.5photon として PhotonNumber と同じ解析を行う。しかし、1.5photon に対応する ADC 値を求め、直接 if 文に入力する必要があつ。

#### PhotonNumber\_l2\_5ph

64 個の ADC 値の配列のうち 32-48 番目の信号に対して、threshold を 2.5photon として PhotonNumber と同じ解析を行う。しかし、2.5photon に対応する ADC 値を求め、直接 if 文に入力する必要があつ。

- Chdisp.C について

#### Loop()

16ch の信号 (ADC 値) をイベントごとに見ることが出来る。「n」で次のイベント、「q」で閉じるように設定されている。どの ch に宇宙線が通ったかが分かりやすいが、どこを信号の threshold とするかを決めるには目視では難しい。

#### hist()

root 上で PhotonNumber を作動させる。横軸 photon 数、縦軸 event でヒストグラムを出力することが出来る。また、横軸の最大値・ビン数を変更することが出来る。

#### chhist()

root 上で ChPhotonNumber を作動させる。

#### histv2()

root 上で PhotonNumberv2 を作動させる。横軸 photon 数、縦軸 event でヒストグラムを出力することが出来、横軸の最大値・ビン数を変更することが出来る。1 つの ch だけがなった (宇宙線が 1 つのシンチレータだけを縦に貫いた) ときのイベントをヒストグラムに出力する。

#### Loop\_l()

64 個の ADC 値の配列のうち 32-48 番目の信号に対して、16ch の信号 (ADC 値) をイベントごとに見ることが出来る。「n」で次のイベント、「q」で閉じるように設定されている。どの ch に宇宙線が通ったかが分かりやすいが、どこを信号の threshold とするかを決めるには目視では難しい。

#### hist\_l()

root 上で PhotonNumber\_l を作動させる。64 個の ADC 値の配列のうち 32-48 番目の信号に対して、横軸 photon 数、縦軸 event でヒストグラムを出力することが出来る。また、横軸の最大値・ビン数を変更することが出来る。

#### hist\_lv2()

root 上で PhotonNumber\_lv2 を作動させる。64 個の ADC 値の配列のうち 32-48 番目の信号に対して、2 つの ch で信号がなったイベントを横軸 photon 数、縦軸 event でヒストグラムを出力することが出来る。また、横軸の最大値・ビン数を変更することが出来る。

#### hist\_lv3()

root 上で PhotonNumber\_lv3 を作動させる。64 個の ADC 値の配列のうち 32-48 番目の信号に対して、隣りあう 2 つの ch で信号がなったイベントを横軸 photon 数、縦軸 event でヒストグラム

を出力することが出来る。また、横軸の最大値・ビン数を変更することが出来る。

histv3()

root 上で PhotonNumberv3 を作動させる。64 個の ADC 値の配列のうち 16-32 番目の信号に対して、隣りあう 2 つの ch で信号がなったイベントを横軸 photon 数、縦軸 event でヒストグラムを出力することが出来る。また、横軸の最大値・ビン数を変更することが出来る。

1mm0\_5ph()

root 上で PhotonNumber\_l0\_5ph を作動させる。

1mm1\_5ph()

root 上で PhotonNumber\_l1\_5ph を作動させる。

1mm2\_5ph()

root 上で PhotonNumber\_l2\_5ph を作動させる。

- root で関数を使う手順 [ (ex)hist() の場合]

手順 1

root を起動し、「.L ChDisp.C」と入力。

手順 2

続いて「ChDisp t」を入力。

手順 3

最後に「t hist()」を入力。ChDisp\_cxx で選択したデータファイルに対して hist() が作用する。

以上の付録に載せたプログラムは神戸大学粒子物理研究室内部向けサイト (<http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/ppwiki-internal/>) の /InternalB4experimens/Heavy Ionized Particle/2015 年度/プログラム/ に置いた。