

卒業論文

# MPPCによる大型プラスチックシンチレータの光量測定

信州大学 理学部 物理科学科 4年

高エネルギー研究室

小須田創

平成 25 年 1 月 30 日

## 目次

### 第1章 概要と目的

### 第2章 測定原理

#### 2-1 ベータ崩壊

#### 2-2 波長変換ファイバー

#### 2-3 プラスチックシンチレータ

#### 2-4 MPPC

### 第3章 測定内容

#### 3-1 MPPCの基本性能

#### 3-2 MPPC 一個での大型プラスチックシンチレータの光量測定

### 第4章 結果と考察

#### 4-1 結果

#### 4-2 考察

#### 4-3 今後の課題

### 第5章 参考文献

## 第1章 概要と目的

現在、MPPC(Multi Pixel Photon Counter)は浜松ホトニクス社が開発した新しい光検出器で信州大学などを始め、多くの研究機関で研究開発されている。

MPPCとは、アバランシュフォトダイオード(APD)という半導体光検出器を1ピクセルとして敷き詰めた光検出デバイスである。

MPPCを使用する利点としては、光電子増倍管に比べて非常に小さく、優れたフォトカウンティング能力を持ち、常温、低バイアス電圧で動作し、磁場中で使用可能であることや、多チャンネル化にともなうコストパフォーマンスが良い等といった特徴をもつ。

しかし、MPPCは受光面も小さいので、その限られた受光面に粒子検出の反応で得た光を効率よく集める必要がある。そこで今回は、大型測定器を作る為に大型プラスチックシンチレータに波長変換ファイバーを通し、より多くの光量を得ることを目的に実験を進めた。

## 第2章 測定原理

### 2-1 β崩壊

β崩壊は、原子核内の陽子や中性子が弱い相互作用により陽電子とニュートリノ、または電子と反ニュートリノを放出して、安定な状態に遷移する過程を言う。

このβ崩壊のエネルギー分布は連続分布であり、基底状態へ直接遷移する場合の最大エネルギーは崩壊エネルギーに等しい。β崩壊でのエネルギー変化は等しいが、放出される運動エネルギーには個々の崩壊ごとに異なる。これは、電子とともに観測できない他の粒子が放出しているからである。この粒子がニュートリノである。また陽子の質量は中性子の質量より軽いので、陽子単独で崩壊するということはない。

陽子と中性子の安定な組み合わせより、中性子の数が多い場合、中性子が陽子に変化して、電子線が放出される。この崩壊をβマイナス崩壊という。親核が質量数Aで原子番号Zのとき $(A, Z) \rightarrow (A, Z+1)$ と変化する。

逆に安定核より陽子が多い場合、クーロン力によるエネルギー反発が高くなり、陽子が中性子に変化して陽電子を出す。この崩壊をβプラス崩壊という。親核が質量数Aで原子番号Zのとき $(A, Z) \rightarrow (A, Z-1)$ と変化する。

陽子の数Zがβ安定核の $Z_{\min}$ より小さい場合は、中性子を陽子に変換してβ安定核に落ち着く。

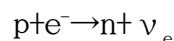


逆にZが $Z_{\min}$ により大きい場合は、



この崩壊が起こる条件は、

この崩壊の際、陽電子を放出する際に、電荷を保存するために、電子を周りから吸収する(軌道電子捕獲)がおこる。



その場合の満たすべき不等式は、

$$m_p + m_{e^{-}} > m_n + m_{\nu_e}$$

がおこる。これら反応は、ニュートリノが関与しているので弱い相互作用で起こることが分かる。

以下がβ崩壊の線源の表である。

核種	半減期	最大エネルギー(MeV)
${}^3\text{H}$	12.26 年	0.0186
${}^{14}\text{C}$	5730 年	0.156
${}^{32}\text{P}$	14.28	1.71
${}^{33}\text{P}$	24.4 日	0.248
${}^{35}\text{S}$	87.9 日	0.167
${}^{36}\text{Cl}$	$3.08 \times 10^5$ 年	0.714
${}^{45}\text{Ca}$	165 日	0.252
${}^{90}\text{Sr}$	27.7 年	0.546
${}^{99}\text{Tc}$	$2.12 \times 10^5$ 年	0.292
${}^{147}\text{Pm}$	2.62 年	0.224
${}^{204}\text{Tl}$	3.81 年	0.766

表 1. 代表的な  $\beta$  崩壊する核種

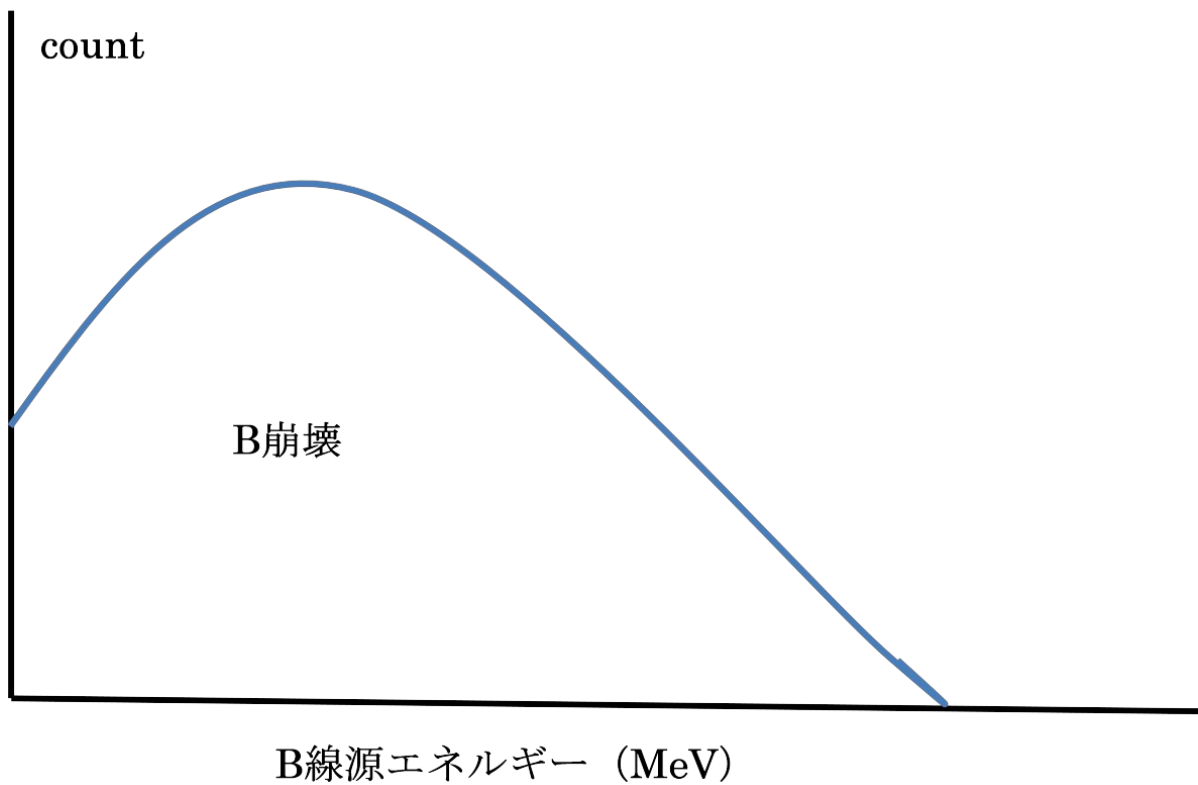


図 1:  $\beta$  崩壊のエネルギー分布

## 2-2 波長変換ファイバー(WLS)

光ファイバーは、コア部分に波長変換材(ある波長域の光を吸収してそれより長い波長域の光を等方的に再発光する物質)が混ぜ込まれたプラスチック製の光ファイバーである。

波長変換材があることにより、通常反射条件を満たさずファイバーの外に出ていく光を波長変換材が吸収し、等方的に再発光することにより全反射の条件を満たすもののみファイバーの中を伝搬していく。

緑色の波長変換ファイバーのほうが一般的に減衰長が長いとされ、大型検出器に使用する際には、緑色が適しているとされている。緑色以外にも、青や、今回使用した Y11 の WLS はクラッドが2重におおわれており、反射条件が緩くなっており、収集効率がクラッドが1つのものより良くなっている。

	密度( $g/cm^3$ )	減衰自定数(ns)	発光ピーク(nm)	励起ピーク(nm)	減衰長(m)	放射線耐性(Gy)	
Y-11	1.05	12	485	380~470	>3.5	~	青→緑

表 2. 実験に用いたファイバーの性能

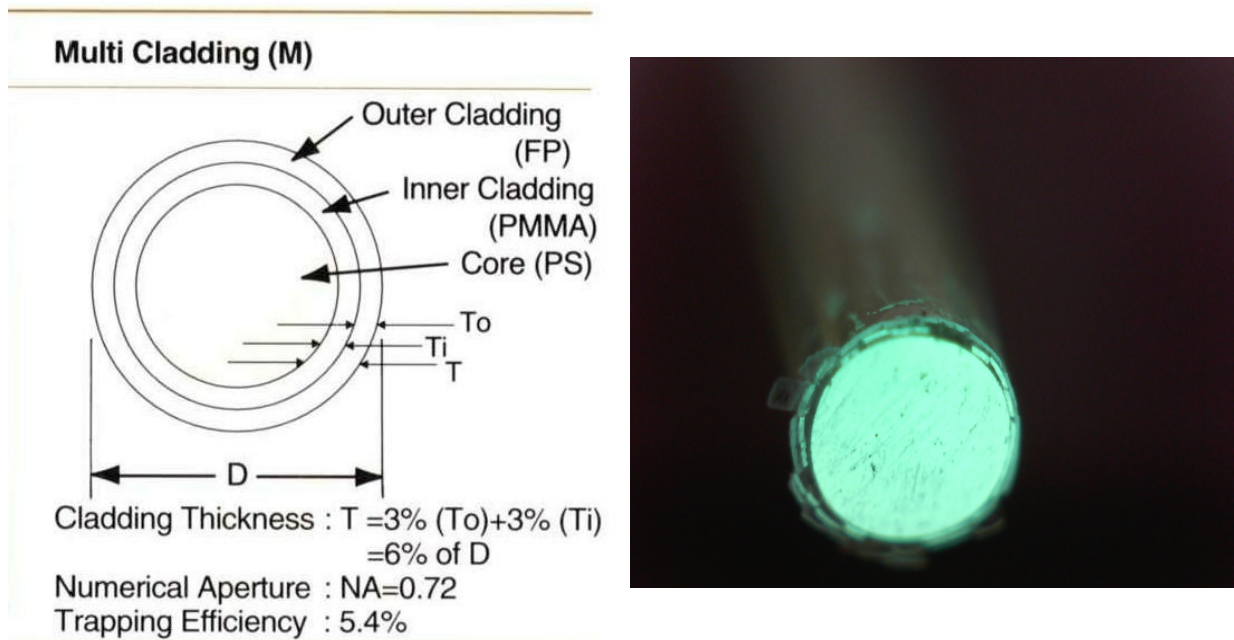


図 2. 波長変換ファイバー(Y-11)の断面の図と写真

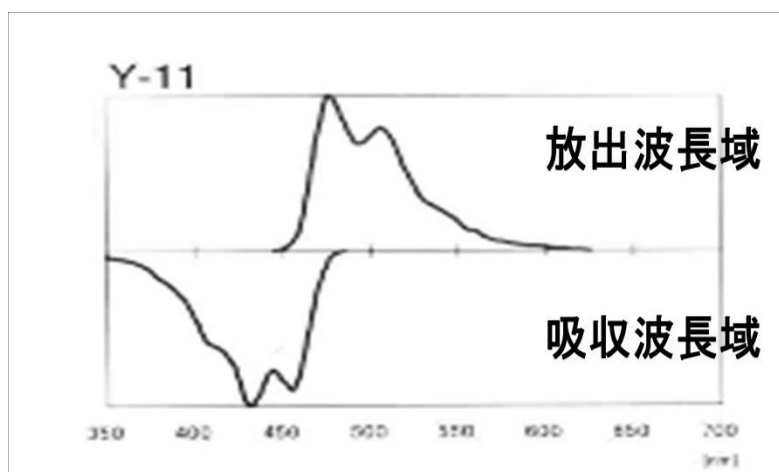


図3. 放出波長域と吸収波長域

### 2-3 プラスチックシンチレータ

シンチレータとは、荷電粒子が物質中を通り抜ける際にエネルギー準位をあげ、また安定核に戻る際に放出する微弱な光(シンチレーション光)を蛍光物質混入することにより、より観測しやすくした装置である。

#### 発光機構

有機シンチレータの大半は $\pi$ 電子構造という電子構造を持っている。室温では、基底状態に存在し、荷電粒子が通り抜けると、運動エネルギーを吸収し、エネルギー準位が遷移する。より高いエネルギー準位にも遷移するが、放射を伴わない内部転換により、PS程度の高速度でBへ遷移する。

主要な発光は、遷移した状態から基底状態への状態遷移によって発生する。

このエネルギー差に伴った光がでるが、このエネルギーを蛍光物質に移行することにより蛍光物質が発光する。

実際プラスチックシンチレータには、代表的な無機シンチレータの1つである。NaIと比較した表が下の表である

	密度[g/cm <sup>3</sup> ]	減衰長 $\tau$ [cm]	発光ピーク	光量(NaIを100とする)
プラスチック	1.03	2.4	423	26
NaI	3.67	230	303	100

表3. プラスチックシンチレータとNaIシンチレータの比較

有機シンチレータの発光機構

内在型シンチレータで発光中心は個々の分子に局在し、Frenal 励起子の輻射再結合で発光を行う。プラスチックシンチレータなどでは、溶媒に溶質を加えて、波長変換を行う。溶質の発光中心での発光機構は有機結晶に近似する。

有機シンチレータと無機シンチレータと比べると、電子が励起されて基底状態にもどるときの輻射遷移という点では同じであるが、本質的には相違がある。

(1) 共役二重結合をもつ芳香族化合物炭素分子の電子構造によるルミネセンスである。気体、液体、固体、プラスチック、ガラス、結晶の状態でもルミネセンスが可能。

無機では、周囲のイオンがお互いに強く結合しているが、有機シンチレータでは、弱いファンデルワールス力で結合した個々の分子の中で発光する。

(2) シンチレーションに関与するのは、炭素の電子である。C 原子の基底状態  $1s^2, 2s^2, 2p^3$  であるが、化合物を作るために 2s 電子 1 個が 2p に上がってベンゼン環の例では、 $1s^2, 2s^1, 2p^3$  の状態になっている。4 個は H や隣の C と  $\sigma$  結合を行っている。残り 2p 電子 2 個が隣り合う C 原子隣の C の 2p 電子と電子対を 作成し、 $\pi$  結合と呼ばれる共有結合を作る。隣り合う C 電子間の二重結合は  $\sigma$  結合と  $\pi$  結合からなる。この  $\pi$  電子の軌道はベンゼン環の平面と直角の面内にあり結合力は弱い。 $\pi$  電子が放射線で励起され、基底状態にもどるとき、シンチレーション光を発する。 $\sigma$  結合は結合が強く 6eV 以下では励起されず、シンチレーションは寄与しない。

$\pi$  電子の励起構造を考える。アントラセンの例では、14 個の  $\pi$  電子は 3 つのベンゼン環のどの C 原子にも局在せず、長さ L の環全体の周囲を一次的に運動すると環がる事が出来る。それぞれの準位は  $E_q$  に対応する運動量の方向と電子のスピンの向きの計 4 状態に縮退している。従って  $\pi$  電子構造  $q=0\sim 3$  の順位を全部埋めることになる。

事項	無機シンチレータ	有機シンチレータ
シンチレーション機構	発光中心イオンの価電子の励起と輻射再結合	ベンゼン環 C 原子の $\pi$ 電子の励起と輻射再結合
エネルギー移行	発光中心へのエネルギー移	分子間の移行が混合結晶や



	行は発光特性を決めるうえで重要な役割を果たす	プラスチックと同様
シンチレーション効率	0.13~0.001 と広くばらつく	0.02~0.04
電離消光	小さい	大きい
励起電子の無輻射遷移、及び温度消光	多い	輻射遷移が早いため少ない
早い蛍光の減衰	有機より 10~100 倍遅い	早い(2~30ns)
光量や減衰の温度依存	大きい	小さい
放射線損傷	着色が主。紫外線照射や加湿などで回復がある	シンチレーション効率が減少。プラスチックでは着色もある。回復なし。
密度	重いものが存在	C、Hなどが主な構成要素なので軽い
γ線検出	主な目的の一つ	あまり用いられない
粒子弁別	シンチレータによって異なり、有機より複雑	Fast/Slow 比が電子やγ線ではα線より大きい

表 4. 無機シンチレータと有機シンチレータの特徴

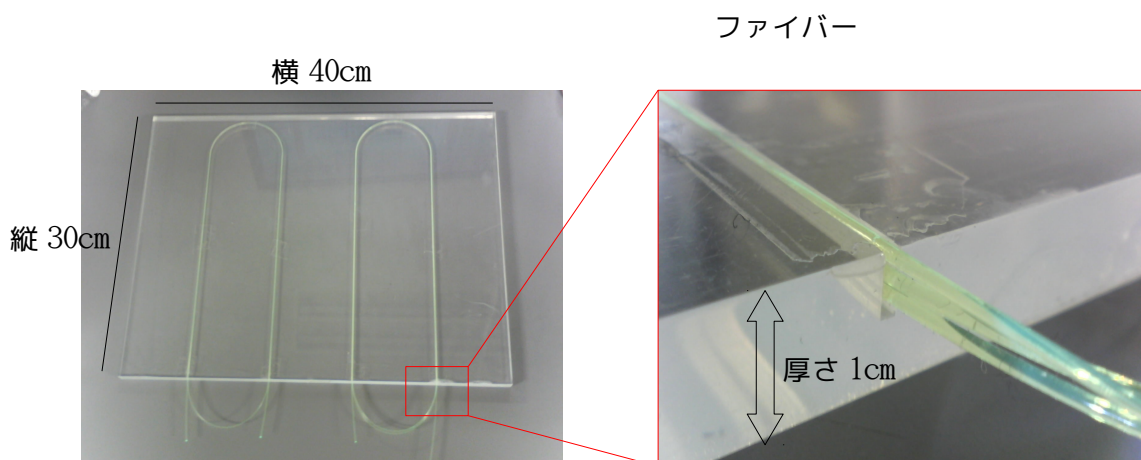


図 4. 実験で使用したプラスチックシンチレータ

## 2-4 MPPC

MPPCとは、現在研究開発されているPPD(Pixelated Photon Detector)とよばれるデバイスの一種である。アバランシュフォトダイオード(APD)と呼ばれる半導体光検出器を1ピクセルとし敷き詰めた光検出器である。

APDという検出器は、N型とP型の半導体をPNで接合し、そこに逆バイアスの電圧をかけることによりアバランシェ増幅を起こし、高い増幅率を得ることができる検出器である。PN接合の半導体は通常は電流を流さないが、ある一定値以上の逆バイアスの電圧をかけると大電流が流れるようになる。これをブレイクダウンといい、その値の電圧をブレイクダウン電圧という。

APDに一定以上の逆バイアス電圧をかけて、動作させると同時に入射させるフォトン数に関係なく一定の信号が検出される。このようなモードをガイガーモードという。

MPPCはこのガイガーモードのAPDを敷き詰めることにより、の性能を維持している。

PMTと比べ非常に小さく、磁場の影響を受けにくい。優れたフォトンカウンティング能力、常温、低バイアス電圧での動作、高い増倍率が得られる。ただ、ノイズが大きく、温度依存性が存在する。現在、信州大学など様々な研究機関で研究開発を進めている。高エネルギー実験分野では、用途に応じて様々なピクセル数のMPPCが実験に使用されている。

今回の実験ではファイバーの断面と図3ののようなMPPCの受光面の中心軸を合わせるために図2のような器具を用いた。

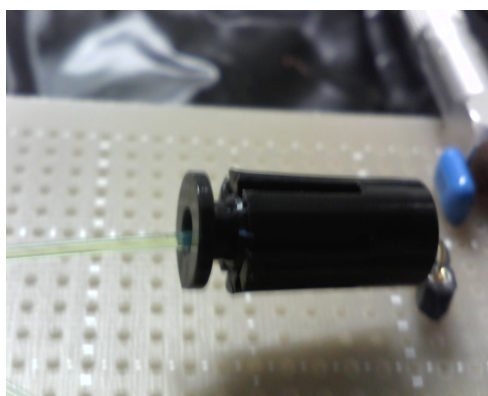


図5. 中心軸を合わせる器具

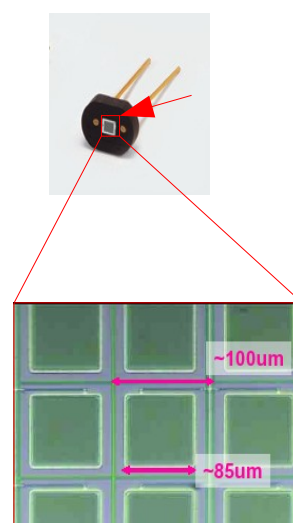


図6. 実験に使用したMPPC

## MPPC の基本性能

- Gain

Gain とは光子が入り電子を叩き出したときのアバランシェ増幅によって増幅された信号の増幅率を指す。電荷量の増幅率を  $G$ 、出力信号の積分電荷量を  $Q$  とおくと、

$$Q = e \times G$$

と表せる。ここで、 $e$  は素電荷  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  である。またこの増幅率  $G$  は MPPC にかける逆バイアス電圧  $V_{bias}$  とブレイクダウン電圧  $V_0$  の差  $dV$  と APD ピクセルの静電容量  $C$  に比例している。つまり次式

$$G = \frac{C}{e} (V_{bias} - V_0)$$

で表せる。

- Noise Rate

MPPC は光子が入射しなくても主に半導体内の熱電子が原因で信号を出してしまう。これをダークノイズと呼び、Noise Rate とは 1 秒間当たりのダークノイズの数のことである。測定の方法としては、Discriminator の Threshold を変えていき、各点で Noise Rate を測定し、Threshold Curve を描く。Threshold 電圧が 1p.e. ピークに対応する所で Noise Rate は急激に下がる。その値を参考にして、ガウス関数がある下限以上で積分した相補誤差関数で Fitting を行うと 1p.e.threshold が決まる。そこから 0.5p.e.threshold を求めると、そのときの Count Rate が Noise Rate となる。

## 第三章 測定内容

### 3-1. MPPC の基本性能

#### 測定機器の基本性能測定

MPPC の基本性能の測定結果を以下に示す。

以下に示す MPPC は浜松ホトニクス社の MPPC で、にそれぞれ 100 ピクセル (S10362-11-100C), 400 ピクセル (S10362-11-050) のものを測定した。

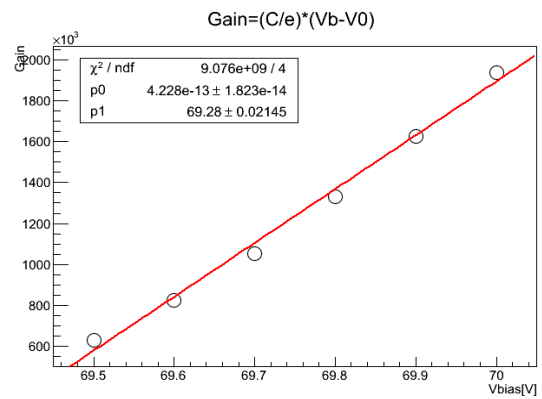
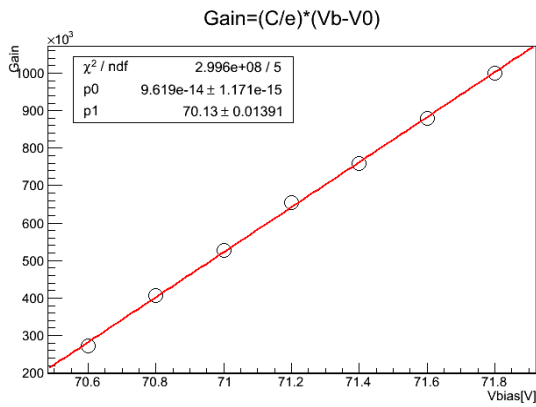


図8. Type No. S10362-11-050(左)と S10362-11-100C(右)の縦軸が Gain、横軸に Bias Voltage でプロットしたグラフ

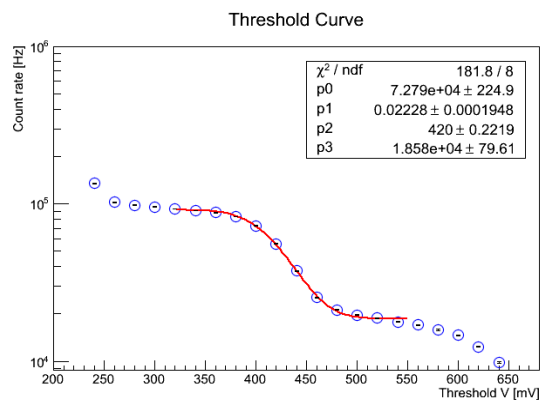
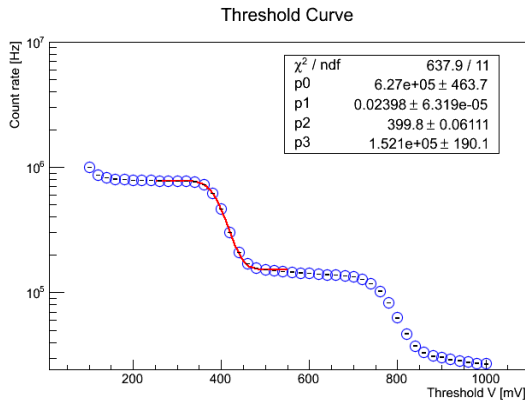


図9. Type No. S10362-11-050(左)と S10362-11-100C(右)の Threshold Curve。横軸は Discriminator の Threshold Voltage、縦軸は Dark Noise の 1 秒当たりのカウント数。

Type No.	S10362-11-050C	S10362-11-100C
Breakdown Voltage $V_0$ [V]	$70.13 \pm 0.01$	$69.28 \pm 0.02$
Noise Rate [Count]	$6.27E+05$	$7.28E+05$
Cross Talk	0.243	0.255
C[F]	$9.4 \times 10^{-14}$	$4.5 \times 10^{-13}$

表5. MPPC の基本性能のまとめ

### 3-2 MPPC 一個での大型プラスチックシンチレータの光量測定

この実験では(縦 40cm) × (横 30cm) × (厚さ 1cm)のプラスチックシンチレータにファイバーを通してより多くの光量を得るために次のような実験をした。

まずシンチレータに以下の図 4 のようにファイバーを通すために 4mm の溝を 8 センチ間隔で掘った。そこにファイバーを通してその先端に MPPC を接続し、図 5 のようにセットアップして Discriminator の Threshold Voltage を変化させながら ADC 分布を作成する。

実験内容としてはまずシンチレータ(30cm × 40cm × 1cm)にファイバーを 3 重に通し、その上に鉛でコリメートした Sr90 を置いて ADC 分布を作成する。そして 3 重の時に使用したファイバーを同じ長さのまま巻き方だけ変えて 2, 1 重に巻き、同様に ADC 分布を作成する。こうして得られた ADC 分布を元に平均光量を計算する。

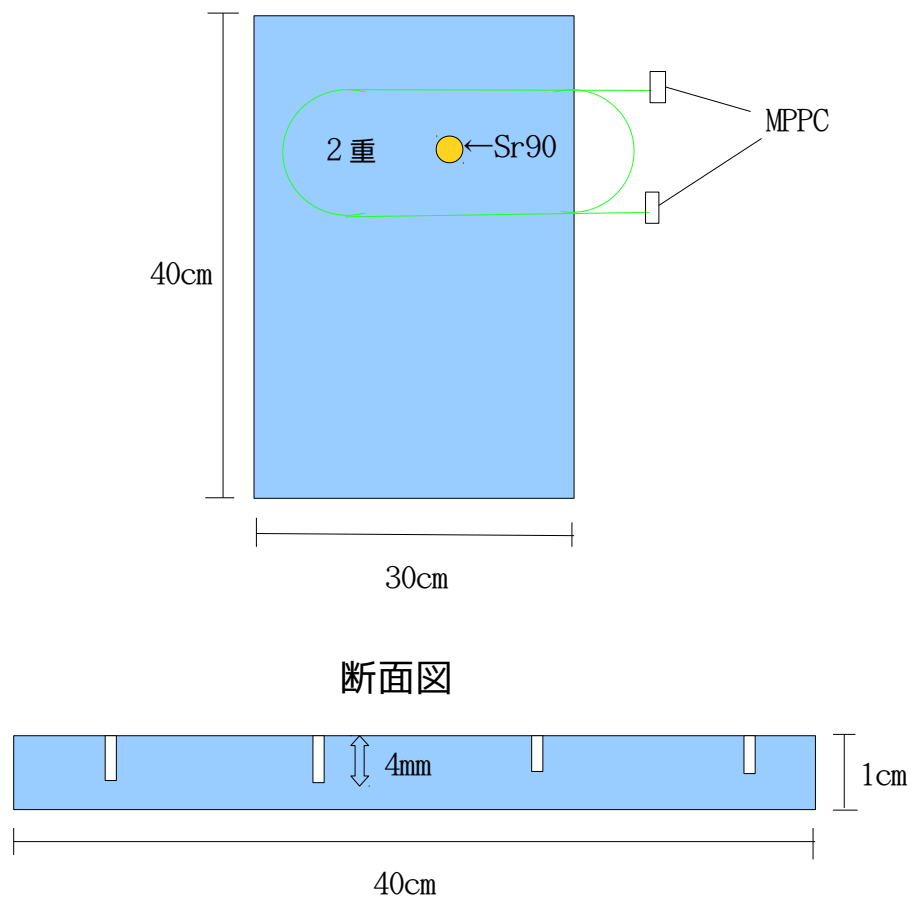


図 9. ファイバーを通したシンチレータの図とその断面図

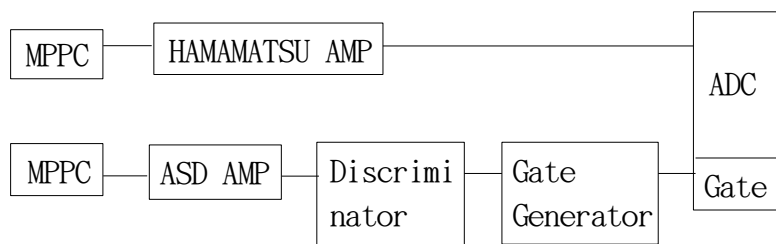


図 10. セットアップ図

このセットアップに使用したモジュールの説明

- ASD AMPLIFIER: 電気信号を 596.4 倍に増幅する。増幅された信号は同軸ケーブルで読み出す必要があるため、ASD バッファと併せて使用する必要がある。今回の実験ではトリガーに使用した MPPC の電気信号を増幅するのに使用した。
- HAMAMATSU AMPLIFIER(c5594): +12~+16[V] の印加電圧で作動し約、63 倍の増幅率がある。
- DISCRIMINATOR: 入力されたアナログ信号の電圧が設定した閾値 (Threshold) 電圧を越えたとき NIM パルスを出力する。
- GATE GENERATOR: 入力された NIM パルスのパルス幅の変更と遅延をさせる。パルス幅と遅延時間は調節が可能であり、ADC に入力する適切なゲートパルスを作成することができる。
- gate に NIM パルスが侵入した際にチャンネルに入るアナログ信号の積分電荷量を計算する。その積分電荷量の値の頻度分布を作成する。

## 第4章 結果と考察

### 4-1 結果

この大型シンチレータにファイバーをそれぞれ1,2,3重に通したときに得られたADC分布を元に平均光量を以下の式より算出する。この実験ではファイバーの巻き数の効果を明瞭にするために Discriminator の Threshold Voltage を変化させながら測定した。

平均光量計算式

$$\frac{\text{mean値} - 0\text{p.e.}}{d}$$

d : 0p.e.と1p.e.の積分電荷量の頻度分布のチャンネル数の差

mean 値 : 1p.e.以上の得られた ADC 分布の平均値

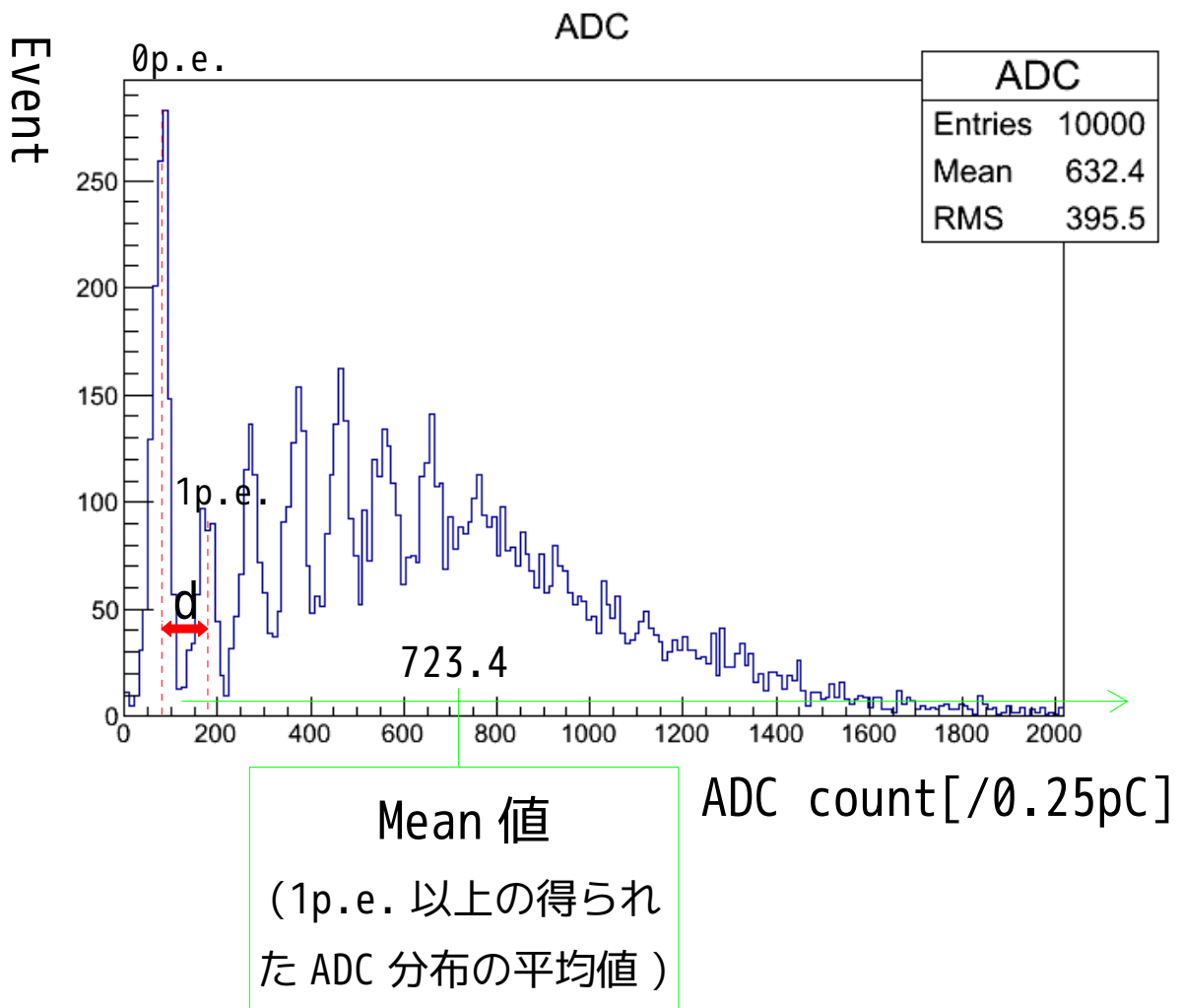


図 11. ADC 分布からの平均光量算出

図 11 の ADC 分布から平均光量を算出すると次のようになる。

$$\frac{\text{mean値}-0\text{p.e.}}{d} = \frac{723.4-79.56}{97.24} \simeq 6.6$$

このようにして、ファイバーを 1,2,3 重に通したときのそれぞれの平均光量を算出したものが以下の結果である。

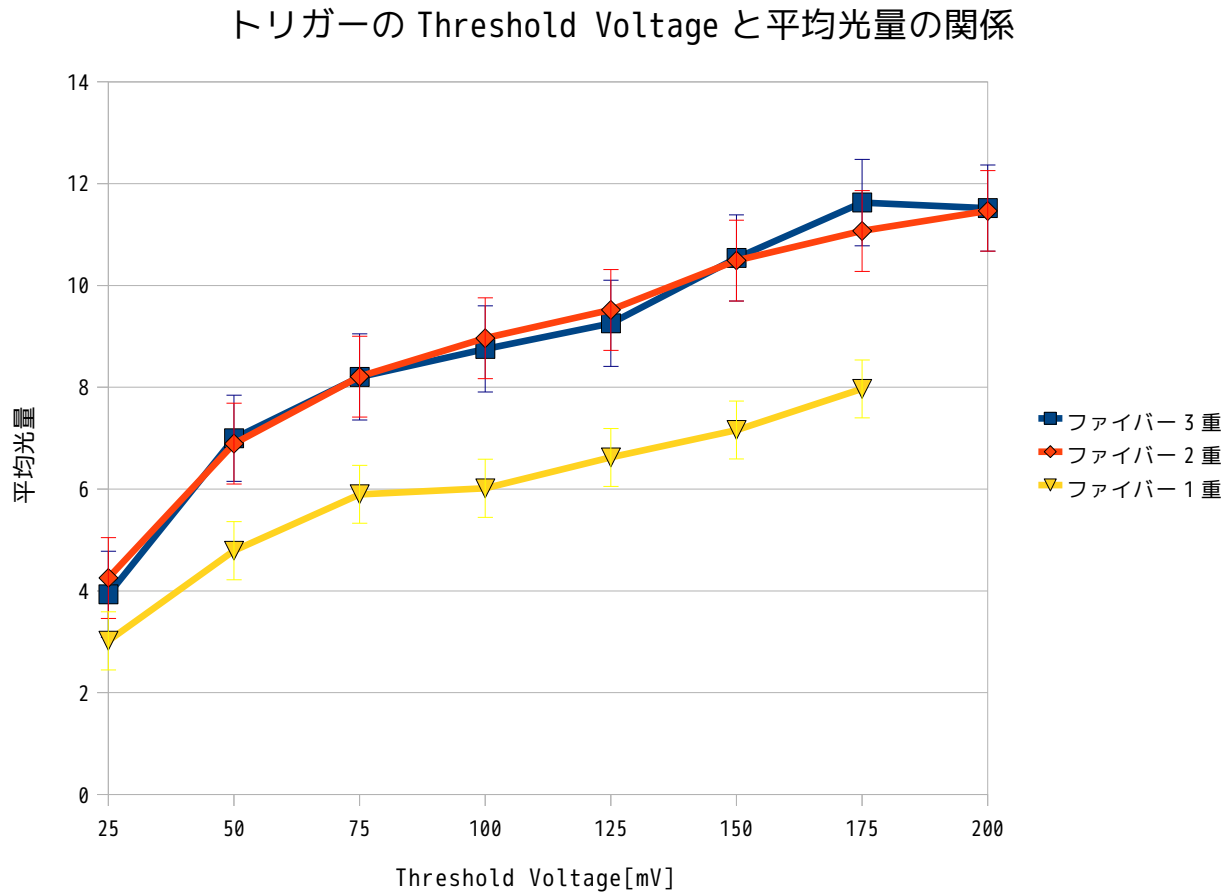


図 12. 横軸が Discriminator の Threshold Voltage、縦軸が平均光量のグラフ

このように、多いもので平均光量が 11 フォトン以上得られたが、ファイバーを 2 重に巻いたものと 3 重に巻いたものとは得られる光量にほとんど差がなかった。



## 4-2 考察

今回はファイバーの巻き方を変えることによって大型シンチレータでMPPCの受光面に効率よく光を集めることが可能かという実験を行った。結果としては、図12より、ファイバーを2重と3重に巻いたものがほとんど同じで得られる光量が多かった。

このような現象が起こった理由として考えられること

- この実験では、同じ長さの1つのファイバーを巻き方だけ3,2,1重と変えて測定しているため、ファイバーを2,1重に巻いているときはトリガー側に余らせて測定していた。以下の図がファイバーを1重に巻いたときの様子である。

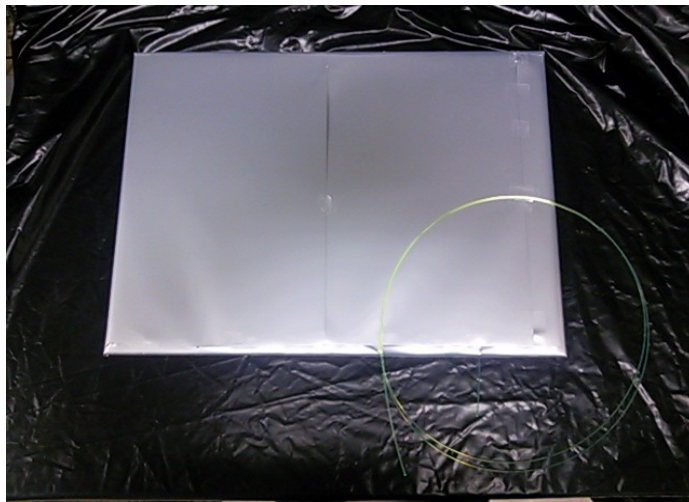


図13. シンチレータにファイバーを1重に巻いて、余った分の長さはトリガー側に余らせてある写真

3重に通したファイバーの長さは240cmあり、2重に通すと80cm余り、1重に通すと160cm余る。

ここで、ファイバーの減衰長が約3mであるので、トリガー側では余った分だけ減衰した信号でゲートを開いていることになる。つまり、1,2重巻きの場合は設定した Threshold Voltage より減衰した分小さく補正しなければならない。ここで、減衰長を3mとすると、80cmで16.8%減衰し、160cmで33.6%減衰する。よって以下の式で Threshold Voltage を補正する必要がある。

$$\text{ファイバーを2重に通したとき}$$
$$Threshold_{\text{補正後}} = \frac{100}{100 - 16.8} \times Threshold_{\text{補正前}}$$

ファイバーを1重に通したとき

$$Threshold_{補正後} = \frac{100}{100-33.6} \times Threshold_{補正前}$$

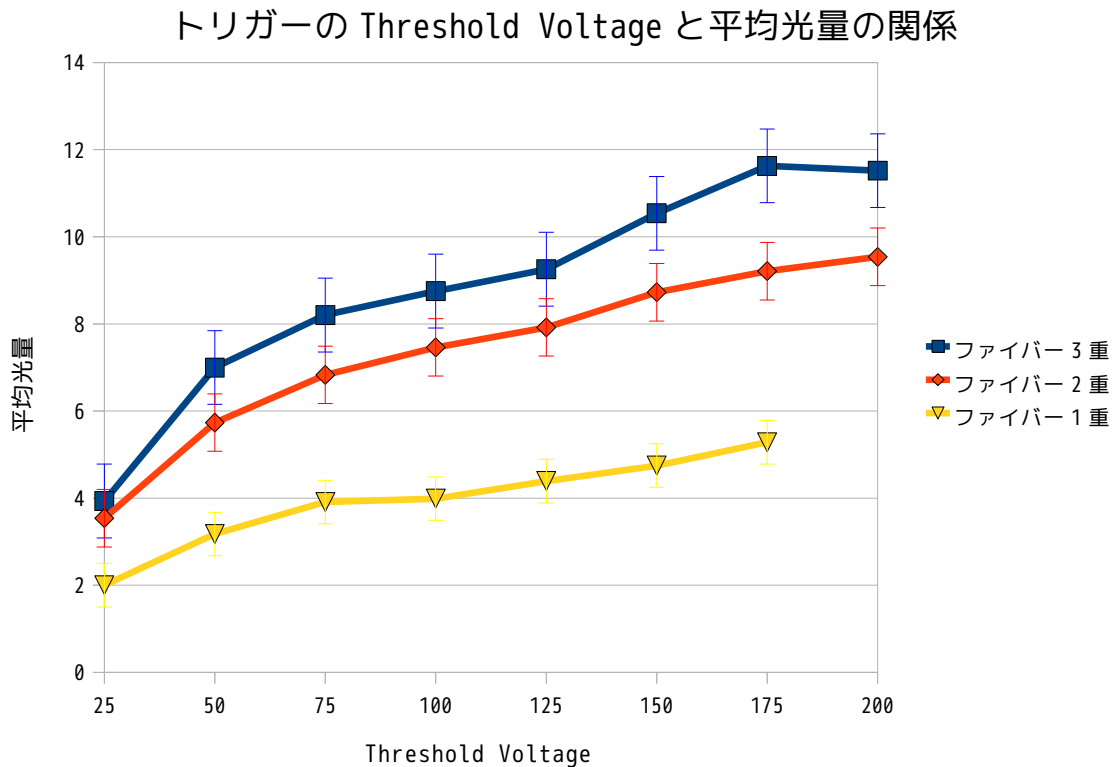


図 14. 図 12 の平均光量を Threshold Voltage に合わせて補正したグラフ

図 14 の結果を見ると、ファイバーを通した数が1重、2重、3重と増えると得られる光量も増えてはいくが、増え方は小さくなっている。これはファイバーの巻き数が増えると得られる光量も増えるが、減衰する光も増えるためだと考えられる。

この実験から、3重に通したものは平均光量を 10p.e. 以上得ることができたので、ファイバーをシンチレータに重複して通し、効率よく光を MPPC に集めることに成功したといえる。

#### 4-3 今後の課題

今回の実験では  $\beta$  線源である  $90\text{Sr}$  をシンチレータの中心に置き、鉛でコリメートして測定を行ったが、線源の位置によって得られる光量に変化があると測定装置として使えるかは判定できないので、平均光量の位置依存性を確かめる必要がある。

## 第5章 参考文献

卒業論文 プラスチックシンチレータを用いての原子炉ニュートリノ測定機器に関する基礎研究 玉川 耕介

修士論文 プラスティックシンチレーター・波長変換ファイバー、読みだし検出器開発の為の基礎的研究 横山弘和

修士論文 ATLAS 実験におけるシリコン検出器の性能評価と高度化に向けたシリコンセンサーの研究開発 永井 遼

卒業論文 MPPC とストリップ型プラスチックシンチレータの研究 戸塚俊介

卒業論文 新型 MPPC の性能評価 小林秋人

## 謝辞

この研究をした一年間で、高エネルギー物理学研究室の皆様には本当にお世話になりました。指導教員の竹下徹先生を始め、長谷川庸司先生、研究員の小寺克茂さん、研究室の友人、先輩方など、多くの人に支えていただいたからこそ1年間研究を続けることができました。お世話になった皆様にこの場を借りて御礼申し上げます。

そして最後にこれまでずっと支えてくれた両親に感謝の気持ちを申し上げたいと思います。本当にありがとうございました。