

アバランシェフォトダイオードを用いた 位置感応型粒子検出器の開発

広島大学理学研究科クォーク物理学研究室 4 年
日浅 貴啓

2010 年 2 月

主査 杉立 徹 教授
副査 岡本 宏己 教授
指導教官 杉立 徹 教授

Abstract

そもそも素粒子物理学は 1911 年のラザフォードの原子核の発見から始まった。当時原子の内部に電子が均一に分布していると考えられていたのだからこの発見はかなり画期的なものであただろう。ラザフォードの発見から、レントゲンやキュリー夫妻、ベクレルの放射線の発見などに続き、今では共鳴粒子の γ や π などの粒子や QGP(クォークグルーオンプラズマ) などの物理現象の発見などがある。このほんの約 100 年たらずの間で様々な粒子が発見され、素粒子物理学や高エネルギー物理学が飛躍的な進歩を遂げたことは非常に素晴らしいことである。またそれらと同時に飛躍的な発展を果たしたのが検出技術である。現在世界中には様々な加速器とそれに伴う様々な検出器が存在し、検出する物理に応じて多種多様に利用されている。そしてそれらの検出器は現代の先端技術の宝庫である。

本研究では、PMT(光電子増倍管) にとって代わる次世代の増倍装置である APD(アバランシェフォトダイオード) と素粒子実験においてよく用いられる、安価で成形のしやすいプラスチックシンチレータを用いた位置感応型粒子検出器の開発を目的としている。一般的にプラスチックシンチレータの信号を増倍するには PMT がよく用いられる。そのため、今回のように APD を用いた位置感応型粒子検出器の実験はほとんど例がない。なぜ PMT でなく APD を用いて実験を行うかという、APD は高い量子効率を持っていて、磁場に強い性質があり、受光面が小さいため汎用性が高い。そのため本研究のように複数の読み出しを使用することによる位置感応型粒子検出器に適しているのである。

Contents

Chapter 1	INTRODUCTION	1
1.1	半導体	1
1.2	CSP(Charge sensitive preamplifier)	5
1.3	プラスチックシンチレータ	6
1.4	PMT(Photo Multiplier Tube)	8
1.5	LED(Light Emitting Diode)	10
1.6	宇宙線	11
Chapter 2	EXPERIMENT	15
2.1	CSP-out のペDESTAL観測と LED 入射時の観測	15
2.2	プラスチックシンチレータ ($20 \times 20 \times 10\text{mm}^3$) を使用したペDESTAL 測定、LED 測定、宇宙線測定	17
Chapter 3	ANALYZE	27
3.1	宇宙線測定 (T-card なし)	27
3.2	宇宙線測定 (T-card あり)	27
Chapter 4	CONCLUSION	30
	付録	32
	Appendix A	32
	付録 A 素粒子物理学基礎	32
	Appendix B	39
	付録 B 実験機器やモジュールに関して	39
	Appendix C	41
	付録 C 他実験 : TestBench 実験に関して	41
	Bibliography	48

List of Figures

1.1	フォトダイオードの原理	2
1.2	pin の増倍原理	2
1.3	APD の増倍原理	3
1.4	APD の原理	3
1.5	APD	3
1.6	APD の分光感度極性	4
1.7	APD の量子効率	4
1.8	APD の Gain	4
1.9	APD の暗電流	4
1.10	CSP と各 pin の説明	5
1.11	APD と CSP を接合した写真	5
1.12	CSP の回路	6
1.13	CSP の簡略回路	6
1.14	プラスチックシンチレータの原理	8
1.15	PMT	9
1.16	PMT R3478	9
1.17	LED 指向特性	10
2.1	LEDSignal を見る setup	15
2.2	LED を光らす回路	15
2.3	ペDESTAL時の CSP-out の出力 Noise	16
2.4	ペDESTAL時の LED 入力 pulse	16
2.5	LED からの光子を入射したときの CSP-out の応答	17
2.6	シンチレーションカウンタ	18
2.7	HV-1000V のときの PMT の反応	18
2.8	HV-1500V のときの PMT の反応	18
2.9	ライトガイド	19
2.10	トリガー用のプラスチックシンチレータ	19
2.11	作成したトリガーカウンタ	20
2.12	$20 \times 20 \times 10\text{mm}^3$ のシンチレータで宇宙線を見るための Logic	20
2.13	PMT の HV 値を決定するための Logic	21
2.14	PMT1 の HV とコインシデンス rate	21
2.15	PMT2 の HV とコインシデンス rate	22
2.16	APD の BiasVoltage と LEDSignal または Noise	22
2.17	APDBiasVoltage と S/N 比	23

2.18	20 × 20 × 10mm ³ のシンチレーションカウンタでの宇宙線測定に関する ジオメトリー	23
2.19	オシロスコープで測定した宇宙線	24
2.20	T-card 写真	24
2.21	複数の BiasVoltage, LV 同時供給機器写真 (表側)	25
2.22	複数の BiasVoltage, LV 同時供給機器写真 (裏側)	25
2.23	複数の BiasVoltage, LV 同時供給機器接続写真	25
2.24	T-card を利用した機器導入時のペDESTAL時の CSP-out の出力 Noise	25
2.25	T-card を利用した機器を導入後の宇宙線測定	26
3.1	1 次元位置感応型粒子検出器	28
A.1	ハドロンの例	33
A.2	muon のエネルギー領域でのベータプロットのエネルギー損失のグラフ	35
A.3	Compton 効果	36
A.4	光電効果	37
A.5	対生成	37
B.1	NIM 信号	39
C.1	ALICE 実験の概要図	42
C.2	PHOS モジュール	43
C.3	TestBench の読み出し概略	45
C.4	Fee の読み出し概略	45

List of Tables

1.1	APD のゲインが 50 になる BiaseVoltage と BreakDown する Biase-Voltage	4
1.2	EJ-200 のスペック	7
1.3	R3478 のスペック	9
1.4	標準模型	12
1.5	muon のステータス	12
1.6	宇宙線の運動量	14
2.1	LED 入力 pulse のデータ	16
2.2	PMT への LED 入力 pulse のデータ	19
3.1	位置分解能と Signal の電圧値との対応表	29
A.1	標準模型	33
A.2	4 つの相互作用	34
A.3	sumarry of variables	35
B.1	NIM 信号	39
C.1	PWO スペック	44
C.2	宇宙線を測定するためのトリガーの Logic	46
C.3	宇宙線を測定するためのトリガー	46

Chapter 1

INTRODUCTION

現在高エネルギー物理学において粒子加速器は大きな役割を示している。なぜなら粒子加速器によって新たな物理の確立や新たな粒子の発見がなされているからである。世界中に粒子加速器はいくつも存在している。現在稼動している高エネルギー粒子加速器として、スイスの LHC や BNL の RHIC などがある。日本にもいくつか加速器があり、KEK や J-PARK、Spring-8 がそれにあたり、計画段階として ILC も存在する。そしてこれら粒子加速器にとって重要な位置を占めているのが検出器である。現在では多視点から見たい物理を観測するために、粒子の運動量測定、エネルギー測定、粒子飛跡測定、粒子識別がなされている。これに応じて様々な検出器が存在し、例えば粒子飛跡測定や粒子識別を行う TPC(Time Projection Chamber) の一部として役割を持つ GEM やドリフトチェンバー、チェレンコフカウンターなどがあり、エネルギーや運動量を測定するものとしてカロリメータなどがある。

最近これらの検出器には半導体を利用することが多い。なぜなら半導体は応答時間が速く感度が良いためである。

本研究は APD(アバランシェ・フォトダイオード) という半導体増倍器を読み出し部分に利用して、プラスチックシンチレータの位置感応型粒子検出器を開発を目的としている。これは APD の汎用のし易さを利用し、複数の読みだし部分の信号の時間比から位置を特定するというものである。

1.1 半導体

半導体とは導体と絶縁体の中間の性質を示す物質である。一般的に半導体は n 型半導体と p 型半導体があり、私たちの身の回りにある機器のダイオードやトランジスタに使用されている。ダイオードは p 型半導体と n 型半導体を接合した p-n 型半導体である。トランジスタは n 型半導体を p 型半導体で挟んだものや、p 型半導体を n 型半導体で挟んだものである。代表的なダイオードはフォトダイオードや LED(発光ダイオード) である。

1.1.1 フォトダイオード (p-n 接合体と p-i-n 接合体) の原理

逆バイアス電圧をかけておく。すると光子が入射してきたとき空乏領域やその近傍に発生したキャリアによって逆方向の電流が発生する。このような逆方向の電流に反応する 2 端子受光デバイスをフォトダイオードという。一般的に光学的または高エネルギー検出器の応答や感度を改良するために使用される。応答時間を上げるためには光子入射側の中性領域 (p 領域や n 領域) の幅を薄くして、吸収される光子を減らし、空乏領域の幅を長くし

て接合容量を下げなければならない。これらを行うことによってキャリアの拡散による応答時間の遅れを改善することができる。しかし、中性領域で吸収される光子の量を減らすということは感度を下げるとのこと同義である。つまり応答時間と感度の妥協案によって空乏領域の幅が決められる。この観点からさらに発展したものととして、p-n 接合の間に高抵抗率の真性半導体 i という領域を Fig.1.1 のようにドーピングしたものである。そうすることによって空乏領域の幅を制御することができ、高抵抗率 i 領域自身の存在により接合要領を小さくすることができる。今回使用する APD はこの p-i-n 接合の概念ををさらに発展したものである。

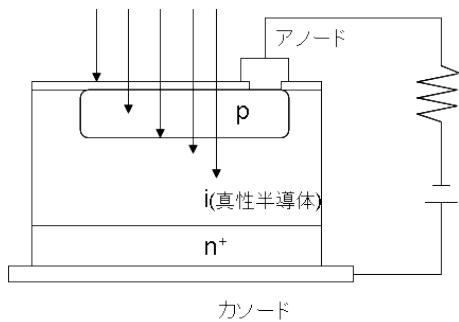


Fig. 1.1 フォトダイオードの原理

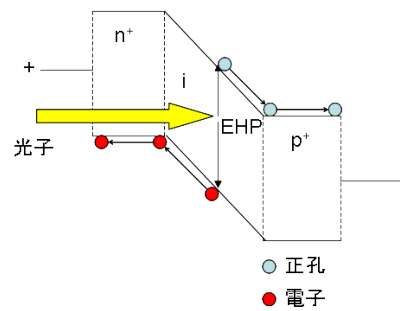


Fig. 1.2 pin の増倍原理

1.1.2 APD(アバランシェフォトダイオード)の原理

低レベルの光信号を検出するためにアバランシェ領域で動作させるフォトダイオードを特に APD という。Fig.1.3 は増幅原理を表している。APD の構造は n^+p-p^+ であり、 n^+ 領域と p 領域はアバランシェ領域といわれる。このアバランシェ領域は高電圧で非常に薄いため光子をほとんど吸収しない。まず Fig.1.4 のように光子は p^+ 領域から侵入する。ほとんどの光子は厚い i 領域に入り EHP を発生させる。この i 領域は逆バイアス電圧により空乏領域となっており、発生した EHP は高電界によってドリフトし加速される。このうち加速された電子は n^+p 結合領域に侵入し、高電圧のため衝突電離を繰り返し EHP を発生させながら増幅する。これが APD の自己増殖機能である。アバランシェ増倍が行われる高電界では電子も飽和速度でドリフトするので応答が速い。一般的にこれらのデバイスは光ファイバー用の受光素子として使用される。今回実験で使用する APD は Si-APD である。APD は本来逆電圧をかけている分、暗電流によりノイズが大きいという短所がある。しかし Si-APD の場合は衝突電離で電子が EHP を作る能力は正孔のそれよりも大きい。よって Si-APD は高利得でノイズが小さいため、かなり小さい信号も検出することができる。

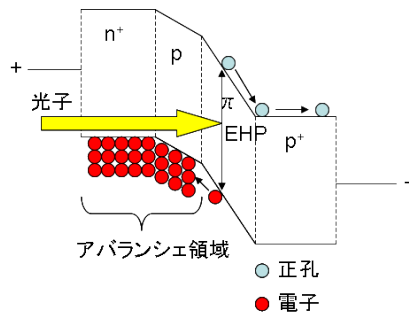


Fig. 1.3 APD の増倍原理

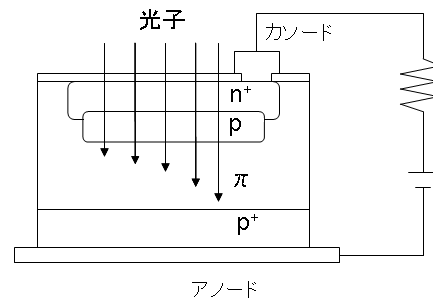


Fig. 1.4 APD の原理

今回の実験で使用する受光面が $5 \times 5 \text{mm}^2$ の S8664-55(浜松フォトにクス製) を使用する。Fig.1.5 は APD の写真である。見てわかるように非常に小さいものである。

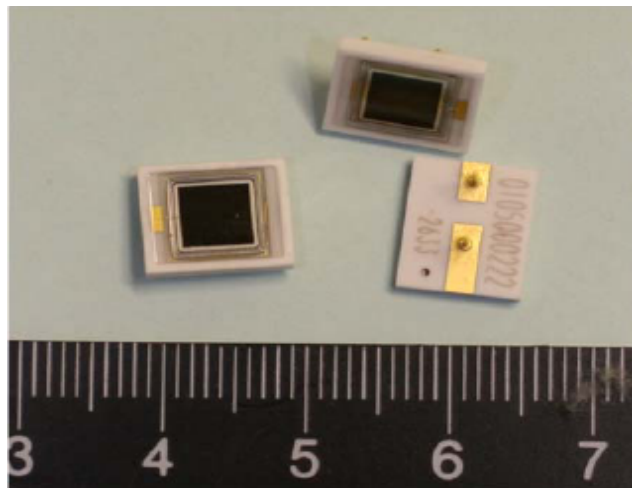


Fig. 1.5 APD Ref.[6]
黒い部分が受光面である。

■ 分光感度特性

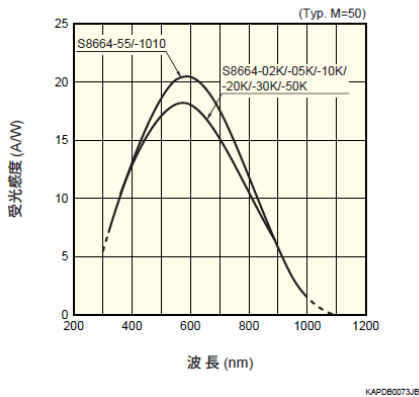


Fig. 1.6 APD の分光感度極性 Ref.[10]
最大感度波長は 600nm である。

■ 量子効率-波長

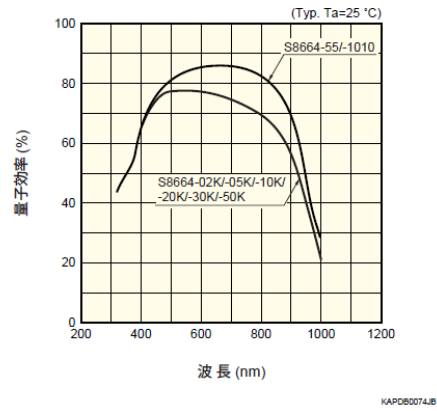


Fig. 1.7 APD の量子効率 Ref[10]
波長が 420nm のとき量子効率は 70 % である。

■ 増倍率-逆電圧

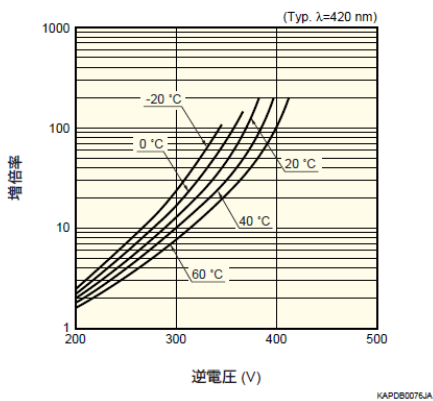


Fig. 1.8 APD の Gain Ref.[10]
=420 のとき平均増倍率は 50 である。

■ 暗電流-逆電圧

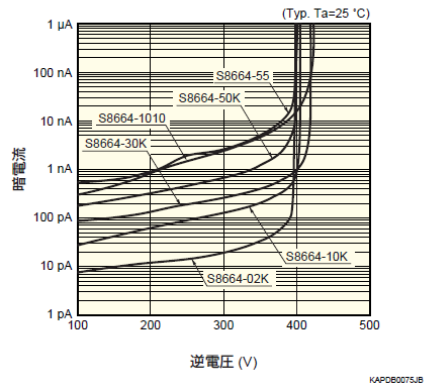


Fig. 1.9 APD の暗電流 Ref.[10]
典型的な暗電流は 5nA で最大暗電流は 50nA である。

Fig6~9 は浜松ホトニクスのおすすめ値であるが、一般的に個体差が生じる。今回使用する APD は Gain が 50 になる BiaseVoltage[VR] と BreakDown する BiaseVoltage[VB] に関して事前に業者に検査してもらっている。その値は使用する APD の製造番号と共に Table.1.1 に示している。

APD	製造番号	VB(V)	VR(V)
s8664-55	0106000269	413	369.1

Table. 1.1 APD のゲインが 50 になる BiaseVoltage と BreakDown する BiaseVoltage

1.2 CSP(Charge sensitive preamplifier)

CSP は APD からくるアナログ信号それ自体やそのインピーダンスを整えたりする前置増幅器である。今回の実験では fig.1.10 の写真のような CSP を使用する。APD と CSP を接合すると Fig.1.11 のようになる。

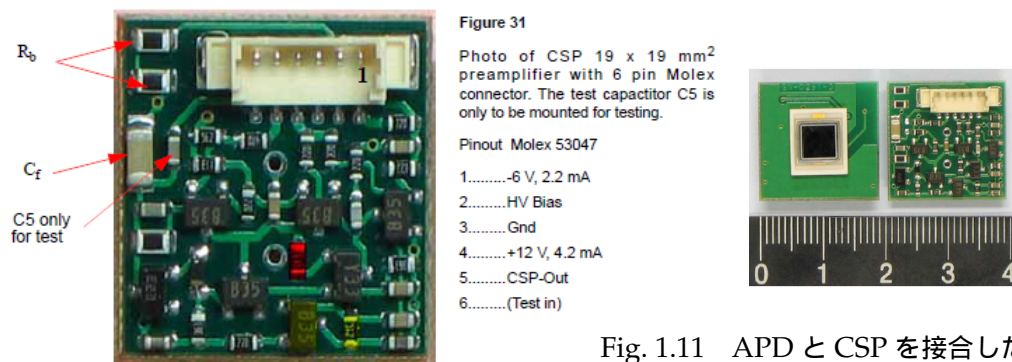


Fig. 1.11 APD と CSP を接合した写真 Ref.[6]

Fig. 1.10 CSP と各 pin の説明 Ref.[12]

CSP の回路は Fig.1.12 で表しており、それを簡単にしたものが Fig.1.13 である。この回路はフィードバックの部分のコンデンサーと抵抗の並列回路で増幅される。

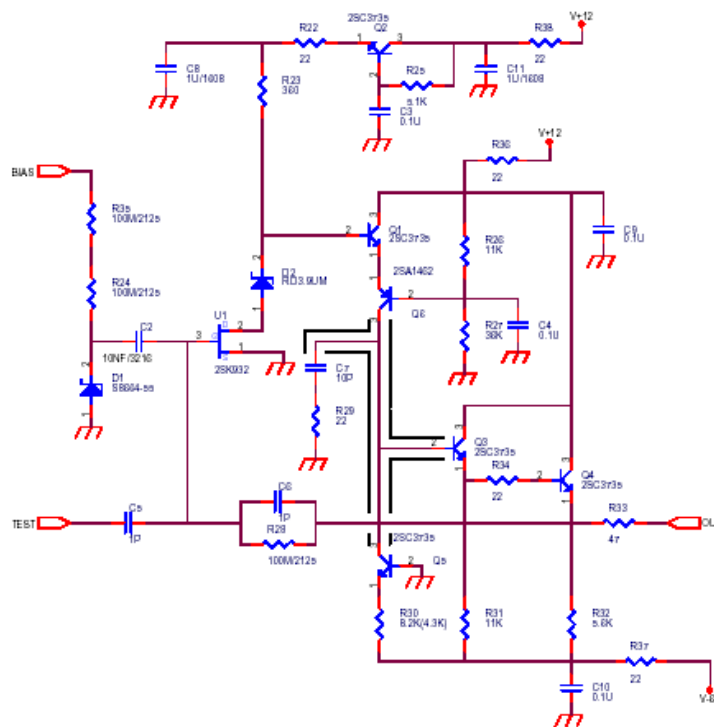


Fig. 1.12 CSP の回路 Ref.[6]

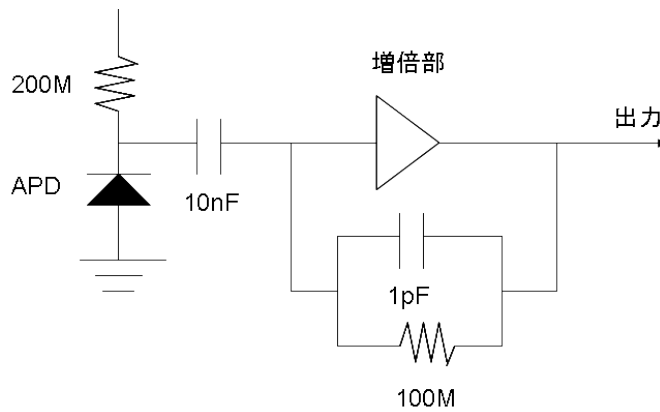


Fig. 1.13 CSP の簡略回路
負帰還回路が増倍率の安定やノイズの軽減などを担っている

1.3 プラスチックシンチレータ

プラスチックシンチレータは有機シンチレータの1つである。荷電粒子がシンチレータ中では 1.3.1 のシンチレーションの原理によってシンチレーション光を発生させる。シン

チレーション光は粒子が落とすエネルギー^{*1} にほぼ比例しているため、粒子の通過の時間情報わかるだけではなく、エネルギーの測定も可能となる。シンチレータには有機シンチレータと無機シンチレータが存在している。プラスチックシンチレータは有機シンチレータの1つで利用する利点として以下のようなものが挙げられる。

高速である。(時間分解能が数十 psec である。)
 コンプトン散乱後の電子に関して感度がよい。つまり光量が多い。
 加工がしやすい
 値段が安い

などがある。

今回の実験で使用するプラスチックシンチレータは EJ-200(BC-408 相当) を使用する。Table4 は EJ-200 のスペックを表している。

基礎	ポリビニルトルエン
密度 (g/cm^3)	1.023
屈折率	1.58
放射能検出	5MeV ~ 100MeV(γ 線)
立ち上がり時間 (ns)	0.9
遅延時間 (ns)	2.1
パルス幅 (ns)	~ 2.5
光減衰長 (cm)	210
光最大放出波長 (nm)	425

Table. 1.2 EJ-200 のスペック
 は BC-408 のデータシートである。

今回の実験用のプラスチックシンチレータは有限会社ジーテック社に製作してもらった。

^{*1} Appendix A : 物質と荷電粒子の相互作用を参照

1.3.1 シンチレータの原理

荷電粒子が物質を横切るとき、軌跡をその後に励起された分子の後を残す。励起された分子が基底状態に戻るとき、通過した荷電粒子が落としたエネルギーに比例したシンチレーション光を放出する。その光子は分子に吸収され2次励起を発生させる。その分子が基底状態に戻るとき発生するとき再びシンチレーション光は放出する。この分子は波長シフターとして使用されている。

Fig.1.14 はシンチレータの原理を示している。シンチレータを通過した荷電粒子はまずベースプラスチックにエネルギーを落とす。そのとき、ベースプラスチックでの分子のイオン化は短い減衰長に伴って紫外線領域の光子を発生させる。その光子は第1発光体に吸収され、同様に長い減衰長に伴う紫外線領域の光子を発生させる。つまり発光体によって波長が変換される構造をとっている。この波長変換はいくつかの段階構造をとっているため、最終的に可視光領域の光子に変換され光検出器に入る。最終的に青色の波長域の光が放出される。

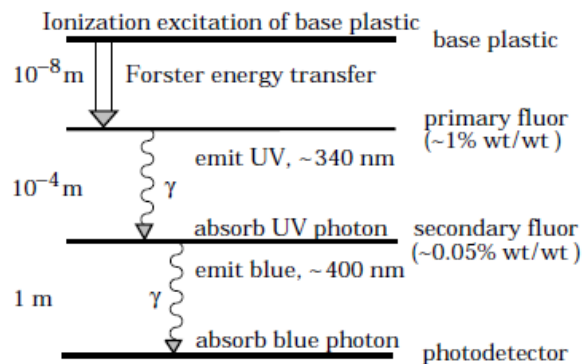


Fig. 1.14 プラスチックシンチレータの原理 [Ref.2]

プラスチックシンチレータのメカニズムを描いた図である。おおよその発光体の集合やエネルギー移送距離が示されている。

1.4 PMT(Photo Multiplier Tube)

PMT は入射面に入る光子を電気信号に変換し、その電気信号を増幅する装置である。Fig.1.15 は PMT の構造を表している。光が入射されると陰極で光電効果を起こし電子に変換される。光電子は電場により加速されながら次の電極 (ダイノード) で電極物質と衝突し複数の2次電子を発生させる。同様に何個もの電極と衝突し、その増幅された光電子を陽極 (アノード) でアナログ信号として得るのである。一般的に PMT の約 90 % が浜松ホトニクス製の製品である。今回の実験では PMT をトリガーカウンターの読み出しに使用する。製品は Fig.1.16 にあるように浜松ホトニクスの R3478 という PMT である。R3478 のスペックは Table.1.3 に示している。

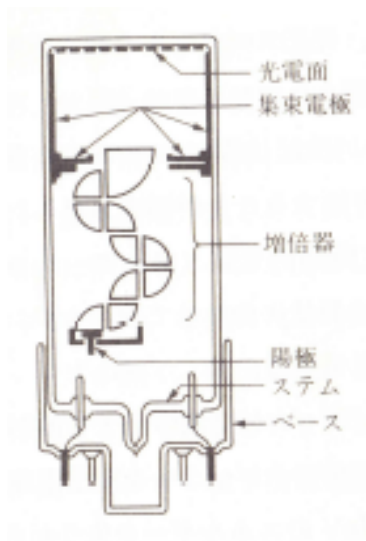


Fig. 1.15 PMT の増倍原理 [Ref.10]

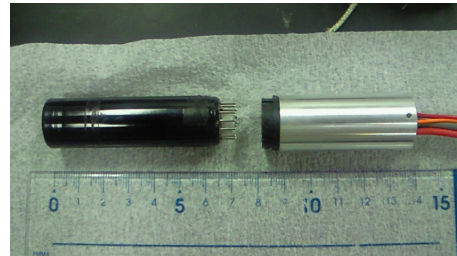


Fig. 1.16 PMT R3478[Ref.10]

管径 (mm)	$\phi 19$
受光面 (mm)	$\phi 15$
感度波長 (nm)	300 ~ 650
最高感度波長 (nm)	420
印加電圧 (V)	-1700
ゲイン	1.7×10^6
典型的な立ち上がり時間 (ns)	1.3
典型的な走行時間 (ns)	14

Table. 1.3 R3478 のスペック [Ref.10]

1.4.1 ライトガイド

シンチレータで発光した光を全反射により PMT に導くためのものである。ライトガイドはガラスまたはアクリル樹脂で作られることが多い。一般的に全反射の法則から、PMT への出力面から覗いてシンチレータからの入力面がすべて見えるものが良いとされる。

1.5 LED(Light Emitting Diode)

一般的に pn 接合の発光ダイオードである。アノード (陽極) とカソード (陰極) があり、順方向つまりアノードに電圧をかけたとき、エレクトロルミネセンス効果^{*2}によって発光する。LED には指向特性があり Fig.1.17 のようになる。ここで縦軸は相対発光強度で横軸は放射角度である。

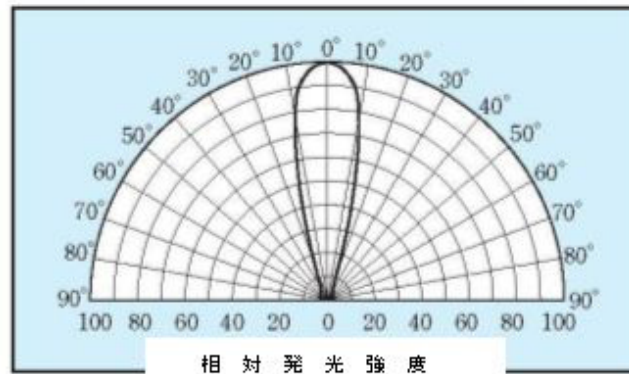


Fig. 1.17 LED 指向特性 [Ref.11]

1.5.1 s/n 比 (signal noise 比)

s/n 比とは signal と noise の比であり、立ち上がり時間からくる精度に寄与してくる。このような点で s/n 比が重要になってくる。

オシロスコープでの精度の原理

オシロスコープにはそれぞれ性能があり、今回使用するものでは 30Ms/s のものを使用している。これは 1 秒間に 30M 個の sample がありその近似曲線を表示するような仕様である。そしてその sample それぞれに誤差があるため、オシロスコープの立ち上がり時間の近似曲線を線形と仮定すると t=0 における平均誤差は以下のように求めることができる。

例えば sample 数を N 個とし、それぞれの誤差を $n_1 = n_2 = \dots = n_N$ と置くと、その近似曲線からくる $y = 0$ の平均誤差は

$$\frac{\sqrt{n_1^2 + n_2^2 + \dots + n_N^2}}{N} = \frac{n}{\sqrt{N}}$$

ここから t=0 の平均誤差は

$$\frac{1}{\tan \theta} \frac{n}{\sqrt{N}} = \frac{N}{S} \frac{n}{\sqrt{N}} = \frac{n}{s} \sqrt{N}$$

以上より s/n 比が直接時間分解能に効いてくることがわかる。

^{*2} エレクトロルミネセンス効果：電子と正孔の再結合によって発光する効果である。

1.6 宇宙線

本研究ではトリガー粒子に宇宙線である muon を利用する。そのためここで muon の説明をする。

1.6.1 宇宙線 (cosmic ray)

1 次宇宙線 (primary cosmic ray)

超新星や中性子星などから発せられる放射線である。その内、地球に飛来してくる 1 次宇宙線は約 90 % が陽子で、約 8 % が π 粒子、残りが電子などの軽い粒子で構成されている。

2 次宇宙線 (secondary cosmic ray)

地球に降り注ぐ 1 次宇宙線は高エネルギーのため、大気中の窒素や酸素の原子核と衝突を繰り返しながら崩壊する。この過程を経てできた π 中間子や K 中間子、muon や電子、ニュートリノ、 γ 線を二次宇宙線と呼ぶ。さらにこの中で地上に降り注ぐ 2 次宇宙線の約 75 % が muon である。

1.6.2 muon

Table.1.4 は標準模型である。muon は電荷 $-1e$ を持ち、スピン $1/2$ を持つ第 2 世代の荷電レプトンである。また muon のステータスは Table.1.5 にである。

クォークとレプトン (スピン = 1/2)

	クォーク		レプトン	
	アップ	ダウン	電子	電子ニュートリノ
第1世代	u	d	e	ν_e
第2世代	チャーム	ストレンジ	ミュオン	ミュオンニュートリノ
	c	s	μ	ν_μ
第3世代	トップ	ボトム	タウ	タウニュートリノ
	t	b	τ	ν_τ
電荷	+ 2/3	- 1/3	- 1	0
バリオン数	1/3	1/3	0	0
レプトン数	0	0	1	1
色荷	赤, 緑, 青		無色	
強い相互作用	あり		なし	
電磁相互作用	あり			
弱い相互作用	あり			

ゲージボソン (スピン = 1)

	光子 (γ)	弱ボソン			グルーオン (8種類)
		W ⁺	Z ⁰	W ⁻	
電荷	0	+ 1	0	- 1	0
バリオン数	0	0			0
レプトン数	0	0			0
媒介する力	電磁相互作用	弱い相互作用			強い相互作用

Table. 1.4 標準模型 Ref.[13]

μ

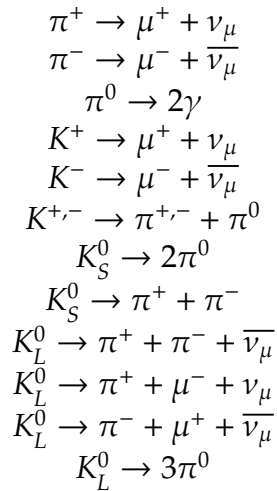
$$J = \frac{1}{2}$$

Mass $m = 0.1134289256 \pm 0.0000000029$ u
 Mass $m = 105.658367 \pm 0.000004$ MeV
 Mean life $\tau = (2.197019 \pm 0.000021) \times 10^{-6}$ s (S = 1.1)
 $\tau_{\mu^+} / \tau_{\mu^-} = 1.00002 \pm 0.00008$
 $c\tau = 658.650$ m
 Magnetic moment anomaly $(g-2)/2 = (11659208 \pm 6) \times 10^{-10}$
 $(g_{\mu^+} - g_{\mu^-}) / g_{\text{average}} = (-0.11 \pm 0.12) \times 10^{-8}$
 Electric dipole moment $d = (3.7 \pm 3.4) \times 10^{-19}$ ecm

Table. 1.5 muon のステータス Ref.[2]

2 次宇宙線中の muon の発生

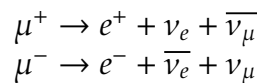
まず 1 次宇宙線である陽子と大気中の原子核とのハドロン相互作用で生成する主な粒子は 中間子と K 中間子である。この 中間子や K 中間子は主に



へと崩壊する。1次粒子からの崩壊モードにおいて、中間子とK中間子の存在率は9:1なので、muonへの崩壊はほとんど陽子から崩壊した中間子によるものが多い。このようにして発生したmuonが地上へと降り注ぐのである。

muonの寿命と崩壊率

muonは弱い相互作用により、以下のような崩壊をする。



このように崩壊するmuonの静止平均寿命を τ とする。 τ は実験的に求められており

$$\tau = (2.19703 \pm 0.00004) \times 10^{-6} \text{s}$$

と表せる。また、muonの崩壊はそれぞれ独立事象と考えられるので、崩壊率は以下のような全散乱断面積と同様の公式で表すことができる。

$$\frac{N(t)}{N_0} = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

ここで $N(t)$ は時刻 t で崩壊したmuonの数であり、 N_0 は $t=0$ のときのmuonの数である。

Muonが地上に到達する理由

muonの静止平均寿命は前述にあるように

$$\tau = (2.19703 \pm 0.00004) \times 10^{-6} \text{s}$$

である。しかし、2次宇宙線のmuonは任意の速度で降り注ぎ相対論的效果を受けるので寿命が延びる。ここで相対速度 $\beta = v/c$ とすると、相対論的な寿命 $\hat{\tau}$ はローレンツ変換により、

$$\hat{\tau} = \tau / \sqrt{1 - \beta^2}$$

となる。これを考慮すると崩壊するまでにmuonが降り注ぐ距離 z は

$$z = \beta c \hat{\tau} = \beta c \tau \gamma = p \tau / m_0$$

となる。ここで $\gamma = 1 / \sqrt{1 - \beta^2}$ 、 p は運動量、 m_0 はmuonの静止質量である。

核反応平均行路

陽子は種類に関係なく大気の核反応平均行路が 90g/cm^2 の高度になるとハドロン相互作用により核反応を起こす。丁度核反応が起こる距離が鉛直距離約 40km の高度となる。Table.1.6 より muon への崩壊時の運動量が約 $10\text{GeV}/c$ 以上の muon ならば地上に到達できることとなる。

表 5・2 運動量と β と寿命の延び

	μ	π	K
mc^2 [MeV]	105.65916	139.5685	493.667
寿命 τ [s]	2.19703×10^{-8}	2.6030×10^{-8}	1.2371×10^{-8}
運動量 $1\text{ GeV}/c$			
β	0.9944644	0.9904003	0.8966871
$\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$	9.517	7.234	2.259
$\tau\gamma$ [s]	20.909×10^{-8}	18.831×10^{-8}	2.7947×10^{-8}
$z = \beta c \tau \gamma$ [m]	6.234×10^3	55.91	7.513
運動量 $10\text{ GeV}/c$			
β	0.9999442	0.9999026	0.9987837
γ	94.649	71.656	20.281
$\tau\gamma$ [s]	207.95×10^{-8}	186.52×10^{-8}	25.09×10^{-8}
z [m]	62.34×10^3	0.5591×10^3	75.13
運動量 $100\text{ GeV}/c$			
β	0.9999994	0.9999903	0.9999878
γ	946.603	716.484	202.570
$\tau\gamma$ [s]	2079.7×10^{-8}	1865.0×10^{-8}	250.6×10^{-8}
z [m]	623.4×10^3	5.591×10^3	0.7513×10^3

Table. 1.6 宇宙線の運動量 [1]

1 次宇宙線が初めての核反応を起こす高度は約 $40 \times 10^3 [m]$ の程度であるため、地上に降り注ぐ 2 次粒子は $100\text{GeV}/c$ 程度の muon である

偏極

一般的に 中間子は muon に約 99.98 % に電子に約 0.02 % 崩壊する。しかし、muon より電子のほうが質量が小さく Q 値が大きいため崩壊しやすいように思われる。だが、

$$\begin{aligned}\pi^- &\rightarrow e^- + \nu_e \\ \pi^+ &\rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e\end{aligned}$$

はフェルミオンが左巻きで反ニュートリノが右巻きで、CP は保存はしているが P が保存していないため抑制される。そのため 中間子からの崩壊はほとんど muon である。また私たちのところに届く荷電レプトンは muon がほとんどである。なぜなら電子は muon に比べて非常に質量が小さく、シンクロトロン輻射でかなりエネルギーを失ってしまい地上に到達する前に上空で静止してしまうからである。

Chapter 2

EXPERIMENT

2.1 CSP-out のペDESTAL観測と LED 入射時の観測

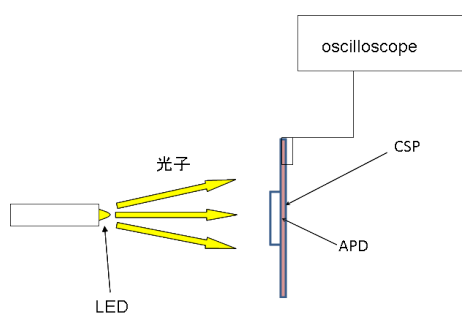


Fig. 2.1 LEDSignal を見る setup
APD は製造番号 0106000269 を使用する

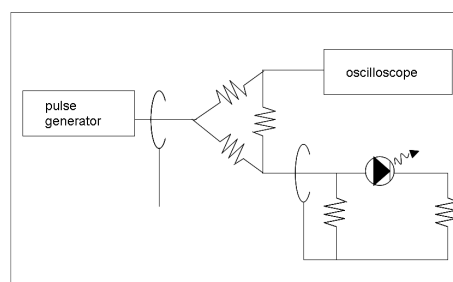


Fig. 2.2 LED を光らす回路

今回の主題に大きく関与する位置分解能は Signal/Noise 比 (以下 S/N 比) に大きく依存する。そのため Noise の大きさや Signal の大きさを把握し、分解能ができるだけよくなるような S/N 比にしなければならない。まずペDESTALとして Fig.2.1 の setup を暗箱内に設置し LED を点灯させずに Noise を見てみる。オシロスコープで観測できた Noise は Fig.2.3 である。このとき、APD の BiasVoltage 値は 400V、電流値は 0.08mA である。また、CSP の LV 値は 12.01V と -5.97V で各々の電流値は $-1.70mA$ と $3.9mA$ である。オシロスコープの画面を見ると Noise の大きさは $1.1492 \pm 0.0005mV$ ^{*3} であることがわかる。Ref.[12] によると、CSP から出力される Noise は 520electron である。電圧に換算すると $520[electron] \times 1.6 \times 10^{-19}[C] \times 0.833[V/pC] \approx 6.93 \times 10^{-2}[mV]$ となる。この数値と比較すると 100 倍近く大きいことがわかる。本研究はこの Noise を減らすことが大きな問題になるであろう。

*3 今回はオシロスコープの画面上の Std Dev(mV) が Noise の電圧に当たる。

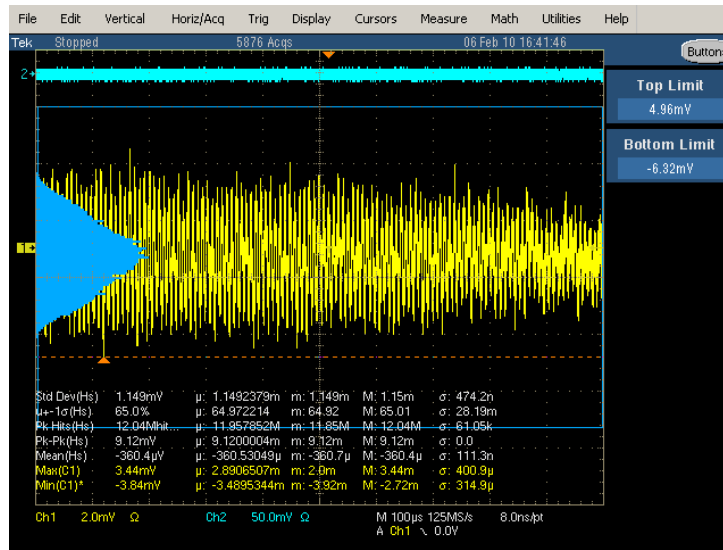


Fig. 2.3 ペDESTAL時の CSP-out の出力 Noise
Noise の大きさは $1.1492 \pm 0.0005mV$ である

次に pulse generator を使用して、ある一定の時間間隔で LED を点灯させ、シンチレーション光の代わりに擬似的に光子を APD に入射し応答を観察する。pulse generator から LED に信号を入れる回路は Fig.2.2 である。オシロスコープで LED に入れる信号を確認するためにスプリッター (デルタ回路) を利用する。またここで、擬似的に光子を入射すると書いたが、プラスチックシンチレータが発するシンチレーション光の光子数を想定して LED からの光子数を制限して入射するという意味ではない。ただ単に光子入射に対して CSP から出力される波形を確認したいだけである。今回 pulse generator で入力した pulse の説明は Fig.2.4 で入力したステータスは Table.2.1 である。

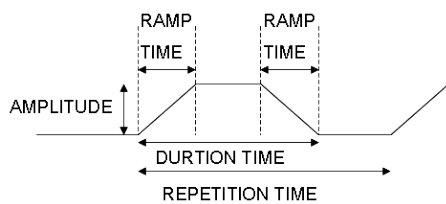


Fig. 2.4 ペDESTAL時の LED 入力 pulse

入力した信号

REPETITION TIME	100ms
DURATION TIME	100ns
RAMP TIME	6ns
DELAY TIME	10ns
AMPLITUDE	2.5V

Table. 2.1 LED 入力 pulse のデータ

Fig.2.5 で得られた Signal の電圧は 39.6mV である。Ref.[12] より、CSP-out からの信号のテールは数 μs である。今回の CSP-out からの信号はテールが約 $2 \mu s$ 程度なので正しい反応が観測できているとわかる。

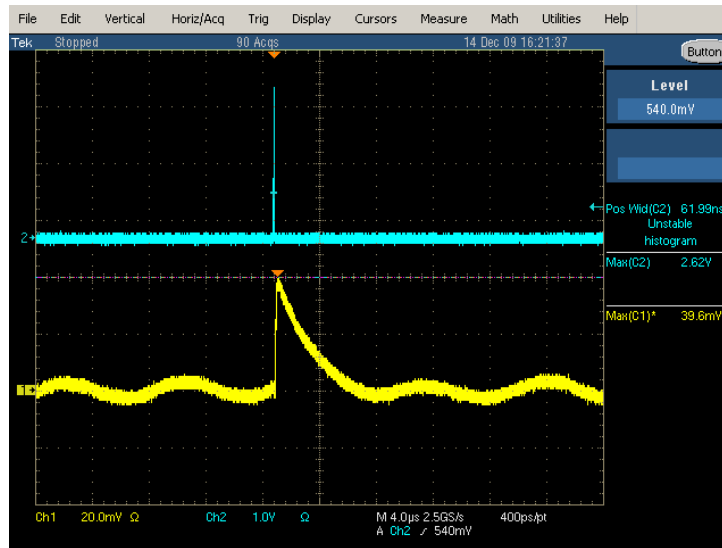


Fig. 2.5 LED からの光子を入射したときの CSP-out の応答
ch1 が CSP-out の信号で ch2 が LED への入力信号である。

2.2 プラスチックシンチレータ ($20 \times 20 \times 10\text{mm}^3$) を使用したペDESTAL測定、LED 測定、宇宙線測定

この実験ではシンチレーションカウンターからの宇宙線 Signal を観測することを目的としている。今実験で使用するプラスチックシンチレータは $20 \times 20 \times 10\text{mm}^3$ である。

2.2.1 シンチレーションカウンタの作成

Fig.2.6 は最終的に作成されたものである。プラスチックシンチレータは $20 \times 20 \times 10\text{mm}^3$ を使用し、で使用した読み出しを取り付けたものである。1~4の過程で作成する。

- 1: プラスチックシンチレータをアルコールで拭く。
 - 2: プラスチックシンチレータの向かい合う $20 \times 10\text{mm}^2$ の 2 面を残して、4 面にアルミ箔を巻く。2 面を残しているのは、1 面を読み出し部分に使い、もう一方の 1 面を LED 入射面に使用するためである。
 - 3: 黒のビニールテープをアルミ箔の上から巻き固定する。
 - 4: APD の表面とプラスチックシンチレータの読み出し部分の 1 面をアルコールで拭き、両者を合わせテフロンテープで固定する。
- これは後に APD とプラスチックシンチレータを取り外すためである。

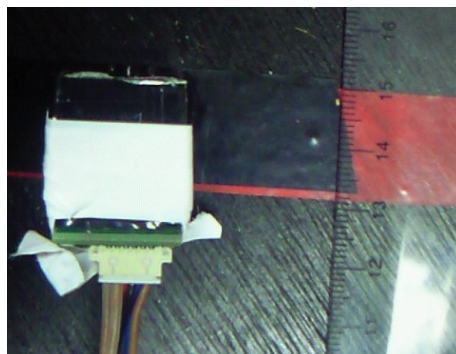


Fig. 2.6 シンチレーションカウンタ

2.2.2 トリガーカウンタの作成

PMT の動作確認

PMT の動作確認を行う。PMT の HV を徐々に上げていきペDESTAL と LED からの Signal をオシロスコープで見してみる。ペDESTAL でサーマル Noise が増えていくことを目で確認した。Fig.2.7 と Fig.2.8 は HV が 1000V と 1500V の LED からの Signal に対する応答を示している。このとき Table.2.2 の値をパルスジェネレータから出力し LED を光らせている。周期的に LED の Signal と同じタイミングで PMT が反応していることがわかる。以上の方法によって 2 つの PMT が動作することを確認した。

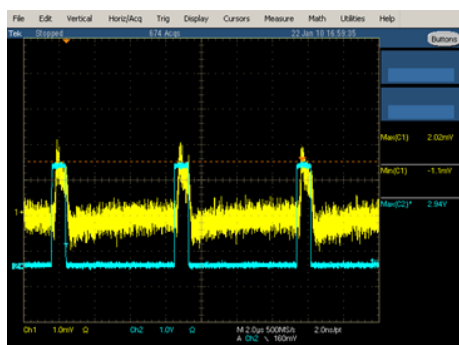


Fig. 2.7 HV-1000V のときの PMT の反応：
LED 電圧 2.94V
検出される Signal 電圧 2.02mV

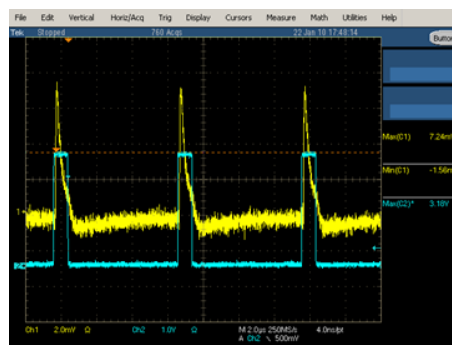


Fig. 2.8 HV-1500V のときの PMT の反応：
LED 電圧 3.18V
検出される Signal 電圧 7.24mV

入力した信号	
REPETITION TIME	10 μ s
DURTION TIME	1 μ s
RAMP TIME	6ns
DELAY TIME	10ns
AMPLITUDE	3V

Table. 2.2 PMT への LED 入力 pulse のデータ

カウンタの作成

Fig.2.9 のライトガイドと Fig.2.10 のプラスチックシンチレータ (10 × 10 × 3mm³) を使用する。1~3 の過程で作成すると Fig.2.11 のトリガーカウンタができる。

- 1: ライトガイドとプラスチックシンチレータの互いが接着する面をアルコールで拭く。
- 2: ライトガイドとプラスチックシンチレータの接着する面に接着剤を塗り接着し乾くまで待つ。
このとき接着剤の中に気泡が入らないようし、できるだけ均一になるように注意して塗る。
- 3: ライトガイドと PMT の接着面をアルコールで拭き、接着剤を塗り接着し乾くまで待つ。
- 4: プラスチックシンチレータとライトガイドにアルミ箔を巻き、上から黒のビニールテープを巻き遮光する。

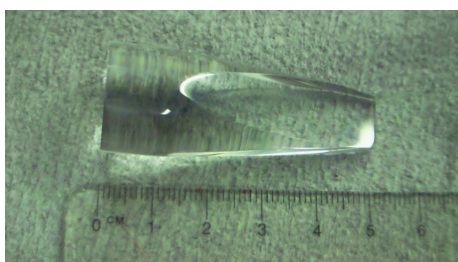


Fig. 2.9 ライトガイド

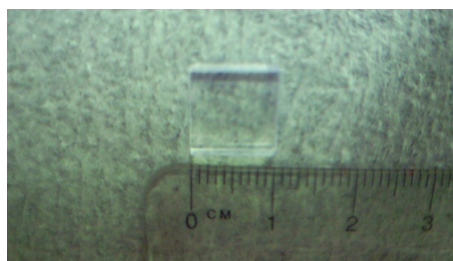


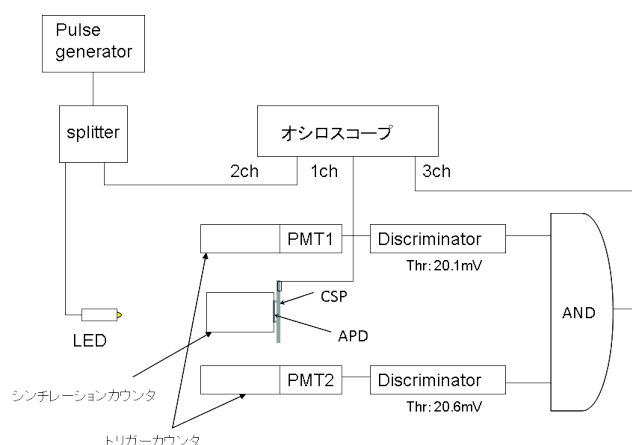
Fig. 2.10 トリガー用のプラスチックシンチレータ



Fig. 2.11 作成したトリガーカウンタ

2.2.3 宇宙線測定

APD と CSP の HV と LV を供給し、Fig.2.12 のような Logic で PMT1 と PMT2 のコインシデンスをトリガーし、そのときの CSP-out からの宇宙線 Signal をオシロスコープで観測する。また本研究では PMT 読み出しのカウンタをトリガーカウンタと呼び、APD 読み出しのカウンタをシンチレーションカウンタと呼ぶことにする。

Fig. 2.12 $20 \times 20 \times 10\text{mm}^3$ のシンチレータで宇宙線を見るための Logic

まずはじめに機器の最適値を見積もる必要がある。そのため PMT の HV の最適値の決定と APD の BiasVoltage の最適値の決定を行う。

PMT の HV 値の決定

PMT の HV の最適値を探し、できるだけサーマル Noise が小さく宇宙線が多く検出できるようにする。器具としては NIM モジュールのスケアラを利用し、Fig.2.13 のような logic で求める。

< 方法 >

- 1: 1 つの PMT の HV を固定し、もう一方の PMT の HV を変化させる。
- 2: 2 つの PMT をコインシデンスをとり event に関して rate を数える。
(宇宙線が通過したことを要求する。)

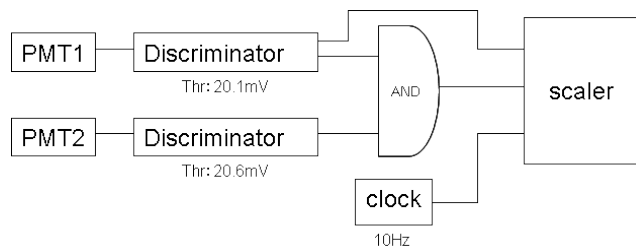


Fig. 2.13 PMT の HV 値を決定するための Logic
 PMT2 の HV 値の決定する場合の Logic は、PMT1 の Discriminator から scaler への道を PMT2 の Discriminator から scaler への道に変更するだけである。

今回は HV を $-1000\text{V} \sim -1750\text{V}$ で変化させた。PMT1 の HV を変化させたときに得られた結果のグラフは Fig. である。Fig.2.14 を見るとコインシデンス rate で -1500V に大きな揺らぎがある。 -1500V での PMT1 のシングル rate を見ると前後より rate が大きくなっている。つまり PMT1 のシングル rate の揺らぎによってコインシデンス rate が大きくなってしまったと考えられる。 -1500V の rate を除くと、 $-1450 \sim -1600\text{V}$ の間でだいたいフラットになっている。このことから PMT1 の HV を -1525V に設定する。

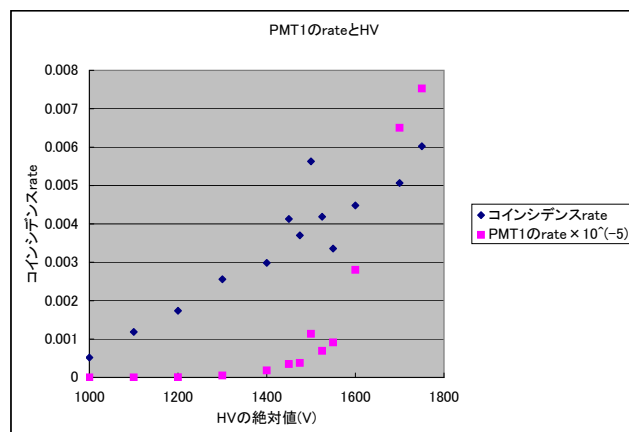


Fig. 2.14 PMT1 の HV とコインシデンス rate
 PMT1 の rate は 10^{-5} でスケールされている。

同様に PMT2 についても行う。Fig.2.15 は PMT2 のシングル rate とコインシデンス rate の HV 依存性のグラフである。ここから PMT2 の HV を -1550V に設定する。

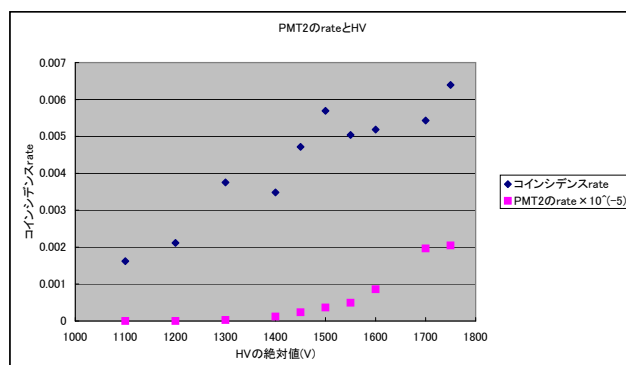


Fig. 2.15 PMT2 の HV とコインシデンス rate
PMT2 の rate は 10^{-5} でスケールされている。

APD の最適 Bias Voltage の値の決定

S/N 比が一番良くなるように APD の最適 Bias Voltage の値を決定する。機器は LED とオシロスコープを使用し、Fig. のような Logic で求める。Fig. は 400V のときの Fig. の Logic で得られるオシロスコープの表示である。Noise に関して、Noise の個数に対して Signal の個数は非常に小さいため、得られる電圧のヒストグラムの σ は Noise として扱うことができる。Noise または Signal の Bias Voltage 依存性のグラフは Fig.2.16 で、そこから S/N 比に直して得られたグラフが Fig.2.17 である。以上によって APD の Bias Voltage を 410V に決定する。

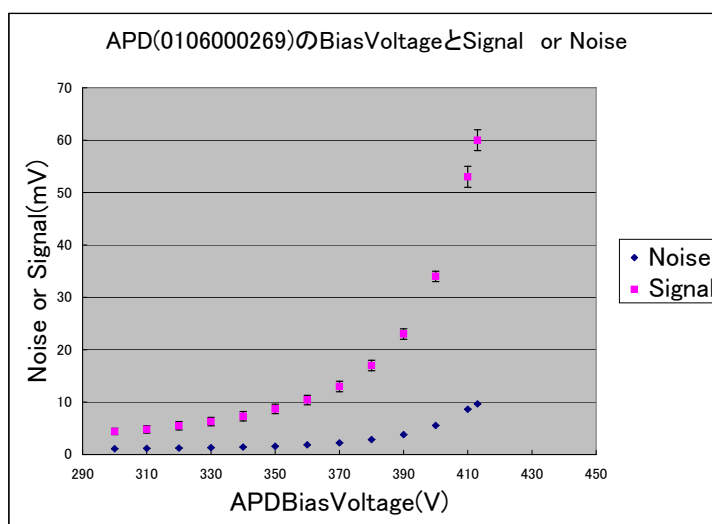


Fig. 2.16 APD の Bias Voltage と LED Signal または Noise

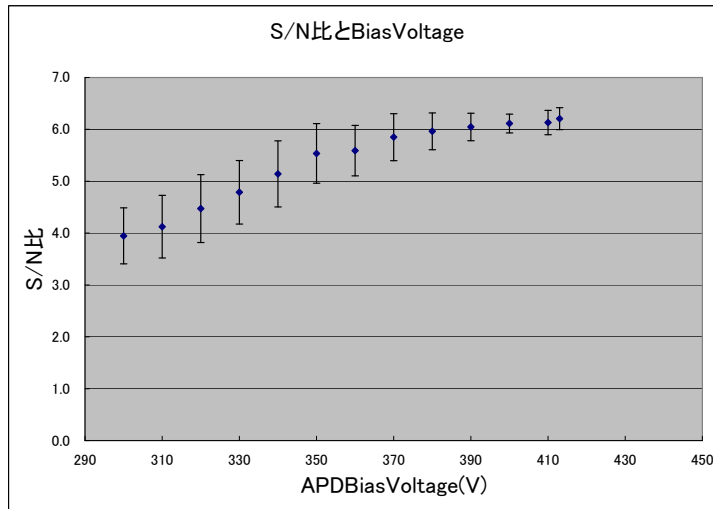


Fig. 2.17 APDBiasVoltage と S/N 比

宇宙線のオシロスコープ測定

Fig.2.18 のようなジオメトリーで実験を行っている。トリガーカウンタはシンチレーションカウンタによりも小さい。またトリガーカウンタでトリガーされた event はすべて宇宙線である。つまり、トリガー時にシンチレーションカウンタで得られた event はすべて宇宙線である。このことを前提とし宇宙線をオシロスコープで測定する。Fig.2.19 は宇宙線を測定した時のオシロスコープの画面である。ch3 のトリガーカウンタからの信号をオシロスコープでトリガーし測定している。Signal は $8 \pm 12[mV]$ で明らかに統計数が少ないことがわかる。Noise は 2.01 ± 0.02 でペDESTAL時の Noise に比べて約 2 倍になっている。

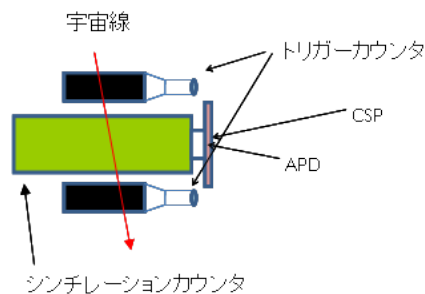


Fig. 2.18 $20 \times 20 \times 10mm^3$ のシンチレーションカウンタでの宇宙線測定に関するジオメトリー
トリガーできる宇宙線の最大入射角度は約 15° 程度である

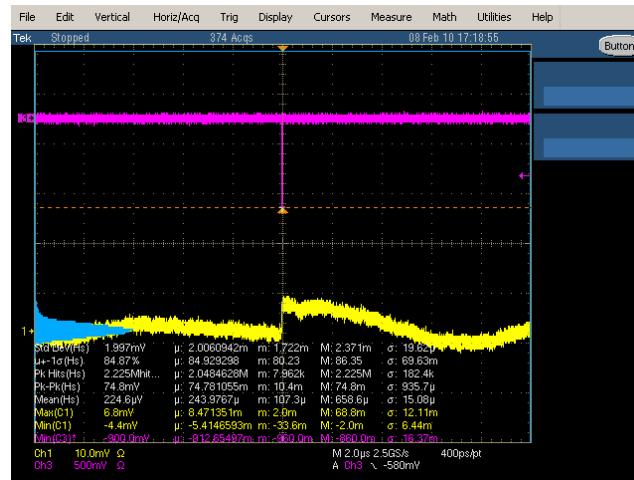


Fig. 2.19 オシロスコープで測定した宇宙線
ch1:CSP-out からの Signal、ch3 : トリガーカウンタのトリガー信号

2.2.4 T-card を利用した複数の BiasVoltage, LV 同時供給機器の作成

実験において複数の読み出しを使用するため、Fig.2.21、Fig.2.22] のような一度にすべての APD に HV を、CSP に LV を供給できるような供給機器を作成した。このために T-card という回路を使用した。T-card は Fig.2.20 の写真のようなものである。CSP にかける LV、APD に HV をかける部分に関しては電源からの noise を減らすために抵抗やコンデンサが組み込まれている。この T-card から Fig. のようにフラットケーブルで pin ごとに HV、LV をかけ、各々の CSP から吐き出される Signal をオシロスコープや NIM モジュールで読み出す。この回路に使用した銅線は外的な電磁波からの noise を減らすためにすべてアルミ箔を巻いている。

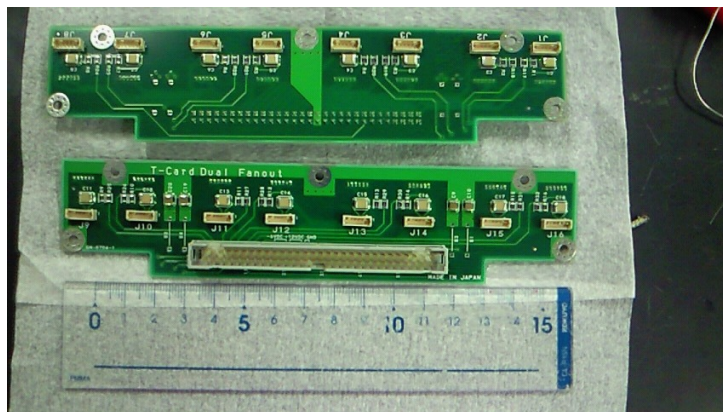


Fig. 2.20 T-card 写真

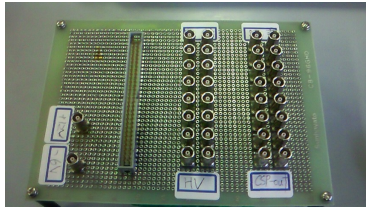


Fig. 2.21 複数の BiasVoltage, LV 同時供給機器写真 (表側)
最大 16ch の BiasVoltage と LV を供給できる

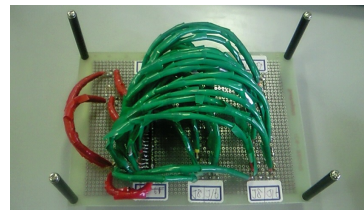


Fig. 2.22 複数の BiasVoltage, LV 同時供給機器写真 (裏側)

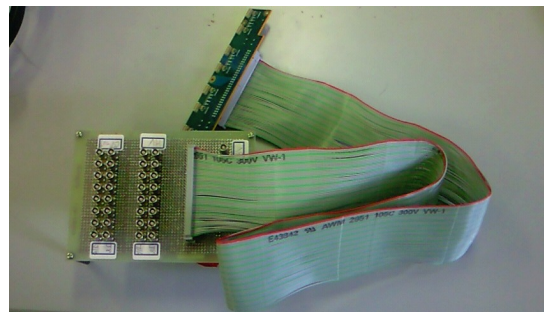


Fig. 2.23 複数の BiasVoltage, LV 同時供給機器接続写真

T-card を利用した機器を使用したオシロスコープでの noise 測定

2.1 節で Noise を測定した方法と同様の手法をとる。結果のオシロスコープの画面は Fig.2.24 である。

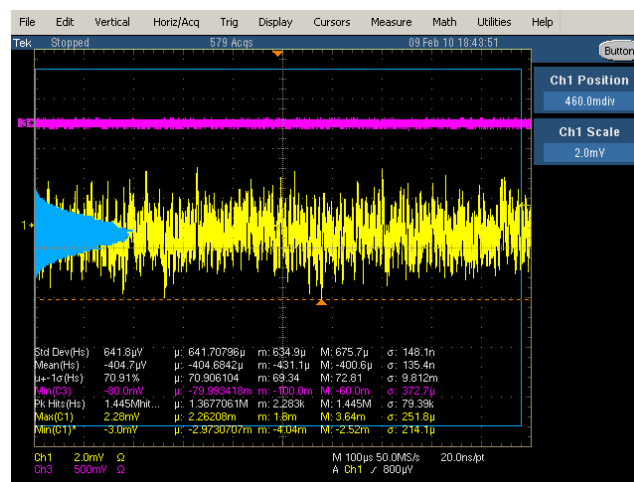


Fig. 2.24 T-card を利用した機器導入時のペデスタル時の CSP-out の出力 Noise
Noise の大きさは $0.6417 \pm 0.0001mV$ である

Fig.2.3(T-card を使用しない場合) では Noise は $1.1492 \pm 0.0005mV$ であった。今回の T-card を利用した場合での Noise は $0.6417 \pm 0.0001mV$ である。明らかに役 50 % の Noise が軽減できたことになる。しかし Ref.[12] による Noise 値 ($6.93 \times 10^{-2}mV$) と比較するとまだ 10 倍近く大きいことがわかる。

2.2.5 宇宙線測定

前回と同様の setup で T-card を利用した機器を導入し宇宙線測定を行った。結果のオシロスコープの画面は Fig.2.25 である。

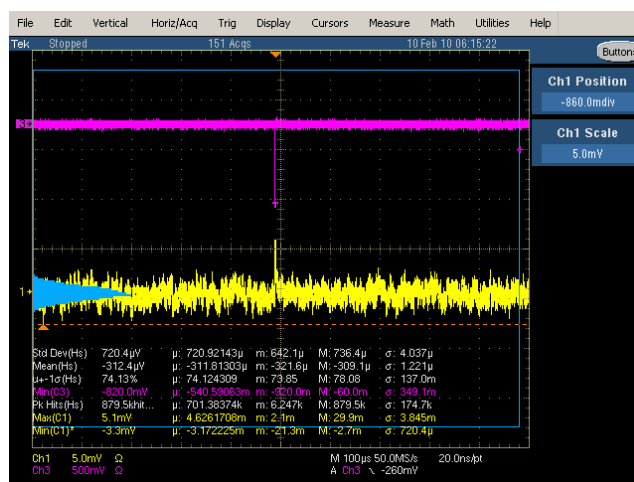


Fig. 2.25 T-card を利用した機器を導入後の宇宙線測定

結果は Signal は $5 \pm 4[mV]$ であった。Noise は $721 \pm 4[\mu V]$ であった。

Chapter 3

ANALYZE

3.1 宇宙線測定 (T-card なし)

まず、理論値を計算で出す。シンチレーションカウンタの中心に muon が通過したとき CSP-out から出力される電圧を近似的に計算する。計算は以下の式で表される。(アルミの反射は考慮に入れていない。)

$$2[\text{MeV/cm}] \times 1[\text{cm}] \times 1.2 \times 10^4[1/\text{MeV}] \times \frac{5 \times 5}{4\pi \times 10^2} \\ \times 0.7 \times 200 \times 1.6 \times 10^{-19}[\text{C}] \times 0.833 \times 10^{12}[\text{V/C}] \approx 8.9[\text{mV}]$$

である。一般的に muon が落とすエネルギーは平均すると中心に落とすエネルギーと同じと考えてよいので、CSP-out の Signal の平均電圧は理論値に近い値を示すはずである。Signal の平均値は約 8mV で一見正しそうに見えるが誤差が約 12mV と大きい。これは単に統計不足から誤差が大きくなったものであるため、統計数を増やす必要があることを示唆している。また宇宙線測定の Noise に関して Fig.2.18 上 StdDiv(Hs)(Noise) は $2.01 \pm 0.02[\text{mV}]$ を示している。

3.2 宇宙線測定 (T-card あり)

T-card を用いた機器を使用した結果、Noise は $721 \pm 4[\mu\text{V}]$ で、Signal は $5 \pm 4[\text{mV}]$ で共に減少した。Signal の誤差が大きい理由としては統計数不足が上げられる。この実験では 165event しかとっていないためである。

3.2.1 宇宙線 rate に関して

本実験では宇宙線の rate はトリガーカウンタによって決められている。そのため、2つのトリガーカウンタを通過する宇宙線の rate をモンテカルロで計算した。muon のフラックスは無視し、角度依存がないモデルで行った。手順は以下である。

1: muon が上のトリガーカウンタを通過する位置をランダムに決定する。2: 角度 $\theta\phi$ をランダムに定義する。3: 下のトリガーカウンタを通過する event のみを取り出す。

こうして得られた rate は約 6×10^{-3} であった。muon のフラックスの寄与を考えるとこの rate より多少大きな値となる。また実験値は 41430s に対して 165 個得られたので rate は約 4×10^{-3} である。オーダーとしては合っているが実験値はえらく少ない。これ

は建物のコンクリートなどの障害物でエネルギーを失って実験室まで到達しない muon が存在するからである。

3.2.2 位置感応型 1 次元粒子検出器に向けて

理想値

例として Fig.3.1 のような $150 \times 20 \times 10\text{mm}^3$ の長いシンチレーションカウンタを考える。Fig.3.1 上の A 面、B 面が APD による読み出し面になる。Fig. のように中心の座標を 0 とし、X 座標に muon が通過したとする。単純にオシロスコープで中心から $1\text{cm}(0.1\text{ns}^{*4})$ の違いを見分ける (つまり 1cm の位置分解能がある) ためにはどの程度の S/N 比が必要か見積もる。ここで、Noise は Ref.[12] の実験値である Noise=520electron という本研究において理想的である値を使用する。まず $X = 1\text{cm}$ のとき読み出し面へ到達する時間差は 0.1ns である。このとき、オシロスコープは $5\text{Gsample/s}(0.2\text{ns/sample})$ なので、CSP の立ち上がり時間が約 15ns であることを踏まえると、立ち上がり時間に対する時間分解能 σ_t は

$$\sigma_t = \frac{\sqrt{75N}}{S}$$

で表される。ここで、 σ_t に 0.1ns をオシロスコープの sample 数に変換した値を代入すると、

$$\frac{S}{N} \approx 17.3$$

となり、Noise に 520electron を代入し電圧に直すと Signal は

$$S \approx N[\text{electron}] \times 17.3 \times 1.6 \times 10^{-19}[\text{C}] \times 0.833 \times 10^{12}[\text{V/C}] \approx 1.2[\text{mV}]$$

となる。同様な計算を行って得られた位置分解能と Signal の電圧値との対応表は Table.3.1 である。

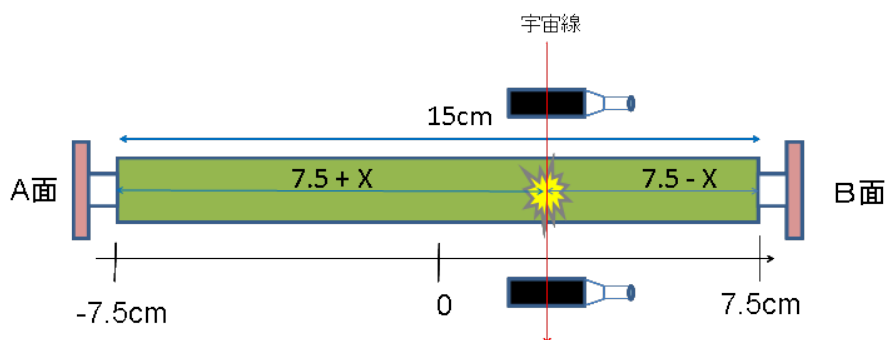


Fig. 3.1 1次元位置感応型粒子検出器

*4 プラスチックシンチレータ内の光の速度は屈折率から $2.0 \times 10^8[\text{m/s}]$ であるため。

	A面7.5 + X(cm)	到達時間(ns)	B面7.5 - X(cm)	到達時間(ns)	A-B(ns)	sample数	S/N	S(electron)	S(mV)
X=0	7.5	0.375	7.5	0.375	0	0	0.00	0.00	0.00
X=1	8.5	0.425	6.5	0.325	0.1	0.5	17.32	9006.66	1.20
X=2	9.5	0.475	5.5	0.275	0.2	1	8.66	4503.33	0.60
X=3	10.5	0.525	4.5	0.225	0.3	1.5	5.77	3002.22	0.40
X=4	11.5	0.575	3.5	0.175	0.4	2	4.33	2251.67	0.30
X=5	12.5	0.625	2.5	0.125	0.5	2.5	3.46	1801.33	0.24
X=6	13.5	0.675	1.5	0.075	0.6	3	2.89	1501.11	0.20
X=7	14.5	0.725	0.5	0.025	0.7	3.5	2.47	1286.67	0.17

Table. 3.1 位置分解能と Signal の電圧値との対応表

現状の値からの導出

単純に Fig.2.25 の Signal と Noise の値から導出する。20 × 20 × 10mm³ のシンチレーションカウンタの Signal の大きさと 150 × 20 × 10mm³ のシンチレーションカウンタの Signal の大きさは acceptance の違いだけである。つまり muon が 150 × 20 × 10mm³ の中心を通過したと場合

$$5 \times \frac{4\pi 10^2}{5^2} \times \frac{5^2}{4\pi 75^2} = 0.089[mV]$$

の Signal となる。Noise の値のほうが大きいため 1次元位置感応型粒子検出器は成立しないことがわかった。

Chapter 4

CONCLUSION

今回の実験では S/N 比の有効な値を求めることができなかったため位置感応型粒子検出器の開発までには至らなかった。改善策としては、Noise を軽減させる機器を開発する。または Signal を大きくする。Signal を大きくする方法は様々あり、例えば、本実験では $5 \times 5\text{mm}^2$ の受光面の APD を使用したが、 $10 \times 10\text{mm}^2$ の受光面の APD を使用すればよい。単純にアクセプタンスから $10 \times 10\text{mm}^2$ の受光面の APD のほうが 4 倍の Signal 電圧を測定することができるだろう。また shaper を使用して Signal 信号を大きくする方法もある。しかし shaper は時間分解能を悪くするので本研究のような時間比による位置測定はできない。そのため、この方法は電荷比による位置測定をする他ない。現状のような時間比で位置を測定するために Signal を大きくするのであれば、プラスチックレータを冷やし発光量を増すという方法がある。以上を踏まえると、まだまだ位置分解能の導出の可能性を秘めている。

謝辞

実験の方針や案、様々な手配の仕方等ご指導して下さった指導教官でもある杉立先生、並びに今回の実験に関する APD や CSP、オシロスコープに関する基礎知識を指導して下さった鳥井先生、Meeting 時に的確な意見を下さった志垣先生、本間先生、先輩の方々もありがとうございました。また、私のふとした疑問に対して、自分の卒業研究に忙しいにもかかわらず一緒に考えて下さった同学年の尾林君、岡崎君、翠君ありがとうございました。今回の実験を次に生かせることができるようにこれからも頑張ります。

Appendix A

付録 A 素粒子物理学基礎

付録 A.1 素粒子とは

私たちが構成している素粒子にはクォークとレプトン、力を媒介するゲージ粒子がある。クォークとレプトンはフェルミオン (spin が半整数) でゲージ粒子はボゾン (spin が整数) である。クォークは全部で 12 個存在していて、それぞれの粒子は電荷とフレーバーの違いによって Fig.A.1 のように分類することができる。さらにこれらの粒子には反粒子や色荷が存在し、計 72 個のクォークが存在し、その組み合わせによって物質は構成されている。例えば Fig.A.1 のように陽子や中性子は u クォークが 2 個と d クォークが 1 個の計 3 個のクォークで構成されている。中間子はクォークと反クォークで構成されている。このような 3 個のクォークで構成される粒子をバリオン、2 個のクォークで構成される粒子をメソンといい、総称をハドロンと言う。これらの粒子によって物質は構成されているのである。

表 5・2 運動量と β と寿命の延び

	μ	π	K
mc^2 [MeV]	105.65916	139.5685	493.667
寿命 τ [s]	2.19703×10^{-8}	2.6030×10^{-8}	1.2371×10^{-8}
運動量 1 GeV/c			
β	0.9944644	0.9904003	0.8966871
$\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$	9.517	7.234	2.259
$\tau\gamma$ [s]	20.909×10^{-8}	18.831×10^{-8}	2.7947×10^{-8}
$z = \beta c\tau\gamma$ [m]	6.234×10^3	55.91	7.513
運動量 10 GeV/c			
β	0.9999442	0.9999026	0.9987837
γ	94.649	71.656	20.281
$\tau\gamma$ [s]	207.95×10^{-8}	186.52×10^{-8}	25.09×10^{-8}
z [m]	62.34×10^3	0.5591×10^3	75.13
運動量 100 GeV/c			
β	0.9999994	0.99999903	0.9999878
γ	946.603	716.484	202.570
$\tau\gamma$ [s]	2079.7×10^{-8}	1865.0×10^{-8}	250.6×10^{-8}
z [m]	623.4×10^3	5.591×10^3	0.7513×10^3

Table. A.1 標準模型 Ref.[13]

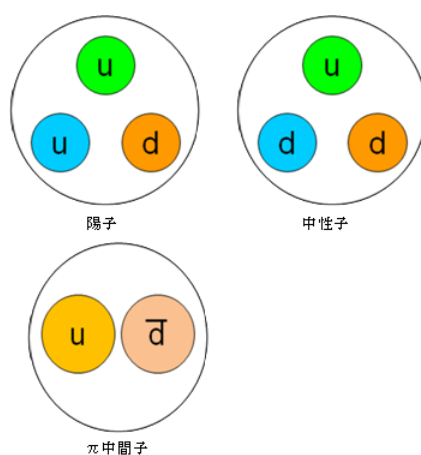


Fig. A.1 ハドロンの例

付録 A.2 4つの相互作用

すべての粒子にはそれぞれ4つの相互作用が働く。この4つの相互作用は Table.A.2 に示されてあるように、それぞれゲージ粒子を媒介として作用する。

相互作用	力の到達距離[m]	典型的な寿命(sec)	結合の強さ	粒子
強い相互作用	10^{-15}	10^{-23}	1	グルーオン
弱い相互作用	10^{-18}	10^{-11}	10^{-5}	W^{\pm}, Z^0
電磁相互作用	∞	$10^{-20} \sim 10^{-16}$	$\sim 10^{-2}$	フォトン
重力相互作用	∞		10^{-39}	グラビトン

Table. A.2 4つの相互作用
強さは強い相互作用を1とした相対値となっている

電磁相互作用

電磁相互作用はゲージ粒子である光子 (photon) を媒介として荷電粒子間で作用する。力はクーロンポテンシャルによるため、力の到達距離は $1/r^2$ に比例する。

弱い相互作用

弱い相互作用はゲージ粒子である W ボゾンや Z ボゾンを媒介とし、すべてのクォークとレプトンに作用する。一般的に C(チャージ) や P(パリティ)、CP の保存・非保存はこの相互作用による。また代表的な崩壊は 崩壊である。

強い相互作用

強い相互作用はゲージ粒子であるグルーオンを媒介とし、色荷を持つ粒子 (クォークやグルーオン) 間で作用する。一般的に核力やクォークの閉じ込めはこの相互作用によるものである。この相互作用は QCD(量子色力学) の発現によって確立し、代表的な崩壊は崩壊である。

重力相互作用

重力相互作用はゲージ粒子であるグラビトンを媒介としすべての粒子に作用する。しかしグラビトンは未だに発見されていない。また、ニュートンの万有引力の方程式より素粒子間では力の大きさはかなり小さいことがわかる。

付録 A.3 荷電粒子と物質の相互作用

ベータ・ブロッホの法則

物質中に入る荷電粒子の平均エネルギー損失は以下の式で表すことができる。

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

記号	定義	単位又は値
N_A	アボガドロ数	$6.0221415(10) \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$
ze	入射する荷電粒子の電荷	
Z	物質の原子番号	
A	物質の質量数	g mol^{-1}
K/A	$4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 / A$	$\text{MeV g}^{-1} \text{cm}^2$

Table. A.3 summary of variables

一般的な muon のエネルギー損失は Fig.A.2 にある。

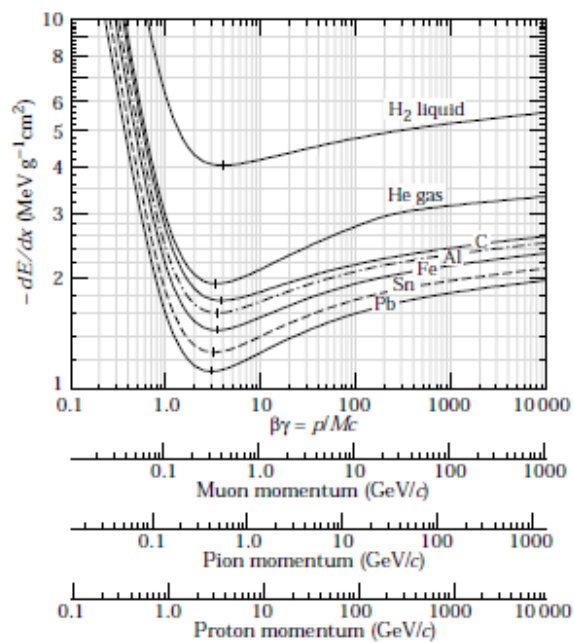


Fig. A.2 muon のエネルギー領域でのベータプロットのエネルギー損失のグラフ Ref[2]

よって muon がプラスチックシンチレータに落とすエネルギーは約 2MeV/cm であることがわかる。

弾性衝突

衝突前後の粒子は同一で、始状態と終状態は運動量とエネルギーが異なる衝突である。

非弾性衝突

衝突前後の粒子は異なり、衝突によって粒子がより高い状態に励起され、光子や中間子を放出しながら基底状態に戻ったり、2 つ以上の粒子に崩壊する衝突である。

制動放射

電子 (陽電子) のエネルギー損失には電離以外にも制動放射が重要になってくる。電子 (陽電子) が原子核の電場によってエネルギーを受け取る。しかし、原子核に対し電子 (陽電子) は非常に質量が小さいため原子核は動かないと近似できる。よってエネルギー保存則と運動量保存則が成り立つために、電子 (陽電子) はそのエネルギーを光子として放出する。この過程を制動放射という。またこの過程は荷電粒子エネルギーと物質の種類に依存する。なぜなら電子のエネルギー損失の式は以下のように表される。

$$-\frac{dE}{dx} = 4\alpha\frac{N}{A}Z^2r_e^2E_0[18 + \log(183Z^{-\frac{1}{3}})]$$

このことから、電子の損失エネルギー損失は粒子のエネルギーに比例し、媒質の荷電数 Z^2 に比例しているのがわかるからである。また、electron のエネルギーが臨界エネルギー $E_c \sim 600\text{MeV}$ を超えると電離よりも制動放射のエネルギー損失が大きくなる。

付録 A.4 光と物質の相互作用

Compton 効果

原子中の電子の束縛エネルギーを無視できるほど大きなエネルギーを持つ光子が電子と衝突し、電子は光子を吸収できないために散乱される。

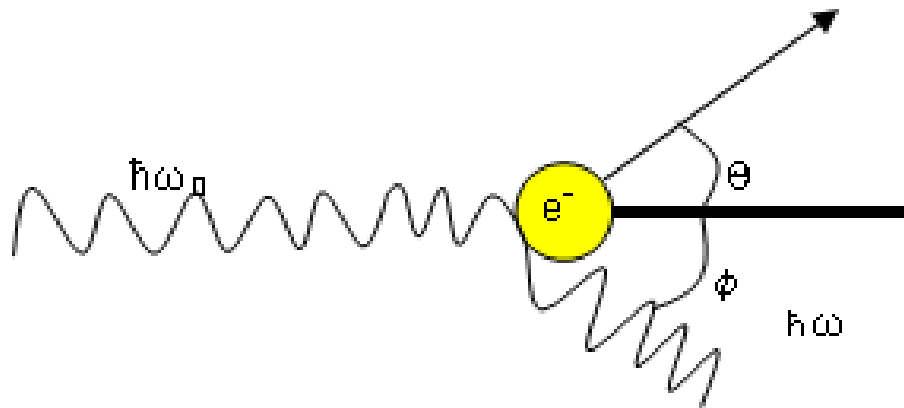


Fig. A.3 Compton 効果

光電効果

あるエネルギー以上のエネルギーの photon が原子とぶつかり吸収されたとき、物質中の electron が束縛エネルギーに打ち勝ち飛び出してくる現象である。入射される photon のエネルギーを $h\omega_0$ 、束縛エネルギーを I とおいたとき、飛び出す electron のエネルギーは $E = h\omega_0 - I$ となる。光電効果は他の Compton 効果や対生成と比べて、光子がエネルギーの低い領域に関して顕著に見える。

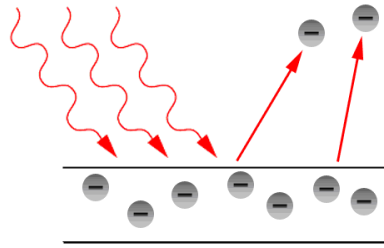


Fig. A.4 光電効果

対生成

photon のエネルギー ω_0 が $2mc^2=1.02\text{MeV}$ 以上であるとき、主に核によるクーロン場との相互作用により photon から electron と positive electron が生成される。このときの 2 つの Lepton のエネルギーの合計 E_{tot} は $E_{tot} = \omega_0 + 2mc^2$ となる。以上の 3 つの相互作用はそれぞれ入射される photon のエネルギーの強さによって決まっている。以下のグラフを見ると、エネルギーが小さい領域では光電効果を起こしている、約 50eV のところから Compton 散乱を、約 1MeV のところから対生成を起こしているのがわかる。

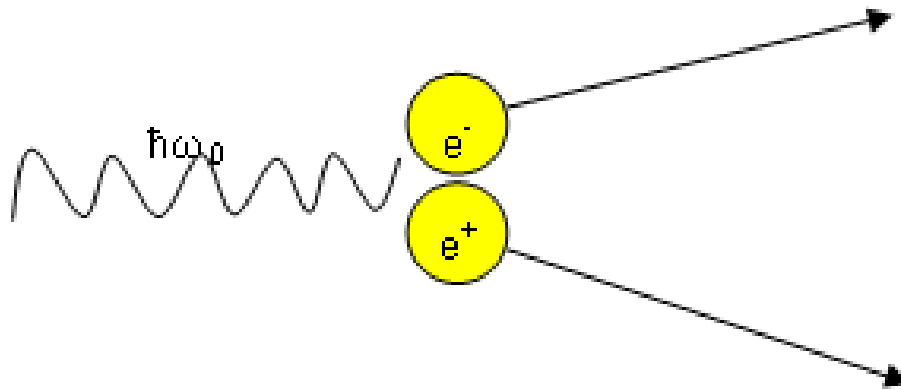


Fig. A.5 対生成

付録 A.5 ローレンツ変換

Maxwell 方程式

$$\Delta E = \frac{1}{c^2} \times \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

から光速 c は次元を含んでいることがわかり、実際の世界でも光速 c は不変な物理量であるのに Galilei 変換では静止系 K 系と運動系 K' 系とは異なってしまふ。そのため実際の光速 c が不変であるという事実を礎とし、 K 系と K' 系を結びつける変換 Lorentz 変換といい、以下のように変換される。

$$\begin{aligned}\hat{x} &= \frac{x-vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \\ t &= \frac{t-\frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \\ \hat{y} &= y \\ \hat{z} &= z\end{aligned}$$

また、Lorentz 変換に対して不変な量を Lorentz 不変量という。上の式を用いると

$$S^2 = (ct)^2 - (x^2 + y^2 + z^2) = (mc^2)^2 = E^2 - (pc)^2$$

より、距離不変性と静止質量不変性がわかる。より簡単にするために以下のような式を導入するのが一般的である。

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{v}{c} \\ \gamma &= \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\end{aligned}$$

Appendix B

付録 B 実験機器やモジュールに関して

付録 B.1 NIM 規格 (Nuclear Instrument Modules Standard)

NIM 規格とは、機械的・電気的使用を規定している規格であり、素粒子・原子核実験で広範囲に渡って使用されている。NIM 規格ではケーブルのインピーダンスは 50 Ω であり、Fig.B.1 のような電圧値をとり Fig.B.1 のような波形を成形する。

状態	電圧
0(NO)	0V
1(YES)	-8V

Table. B.1 NIM 信号

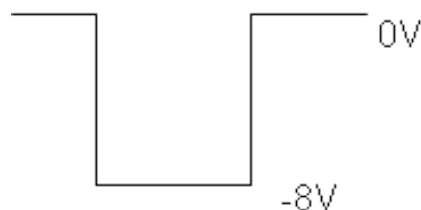


Fig. B.1 NIM 信号

付録 B.2 NIM モジュールの説明

1:discriminator

光電子増倍管から出たアナログ信号の電圧が discriminator の設定した閾値を超えたときに、デジタル信号としてある一定の幅をもってたち下がるような論理信号が出力されるモジュールである。

2:coincidence

複数のデジタル信号を足し合わせる回路である。それぞれたち下がっている部分で重なっている場合は、共通してたち下がっている部分だけがデジタル信号として出力される。

3:clock

設定した周波数で一定の時間幅のパルス信号を出力する回路である。

4:gate generator

入力したデジタル信号に対し、設定した遅延時間後に設定した幅をもつ論理信号を出力する回路である。比較的大きな遅延時間 (delay) や幅 (width) を実現したい場合に使用する。

5:Delay

信号を遅延させるモジュールである。例えば coincidence を要求するとき、2 つ以上の信号を合わすために利用したりする。また、同軸ケーブル内でも遅延が起こる。同軸ケーブル内では伝播速度が光速の約 66 % なのでケーブル 20cm で約 1ns 遅れる。

6:Attenuator パルスの反射を引き起こすことなく信号の大きさを小さくすることができるモジュールである。減衰度は以下のように表される。

$$dB = 20 \ln \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

ここで dB は減衰度、 V_{in} は入力電圧、 V_{out} は出力電圧である。

Appendix C

付録 C 他実験：TestBench 実験に関して

今回 TestBench 宇宙線測定 4 年生グループとしての研究成果を尾林秀幸・日浅貴啓・翠純平で内容を分担しそれぞれ卒業論文に載せることになった。ここでいう TestBench とは、スイスの CERN 研究所で行われている ALICE 実験のカロリメータの TestBench である。実験成果としては宇宙線測定における解析のエネルギー較正法である。分担割としては尾林君がクラスター法による解析、私が TestBench の構成と実験時の問題の解決、翠君がアイソレーションカット法による解析に関してである。

尾林君と翠君の実験成果の内容は以下の論文を参照 ○ 『 sNN=5.5TeV Pb+Pb 衝突における到達グルーオン密度の決定精度の評価』 尾林秀幸 著

○ 『ALICE 実験 PHOS 検出器による運動量凍結温度測定法』 翠純平 著

付録 C.1 ALICE(A Large Ion Collider Experiment) 実験

スイスの CERN 研究所の LHC 加速器で行われている主要な 4 実験の 1 つである。^{*5} LHC は 2009 年 11 月下旬に first collision を迎え本格稼働を始めた。すでに陽子陽子衝突に関して世界最高のエネルギーに達し、最もエキサイトしている加速器だといえるだろう。では ALICE 実験とはどのような物理を研究しているのだろうか。ALICE 実験は QGP(Quark Gluon Plasma) と言われる現象及びその周辺現象を明確に調べることを目的としている。QGP とは高温・高密度状態で引き起こされるクォーク物質であり、ALICE 実験は鉛 + 鉛原子核衝突による QGP の研究を主としている。ALICE の概要図は Fig.C.1 である。

^{*5} 他 ATRAS 実験と CMS 実験はヒッグス粒子発見を目的とし、LHCb 実験は CP 非保存の素粒子物理現象の解明を目的としている。また、LHCf は超高エネルギー宇宙線観測やハドロン相互作用の研究を目的としている。

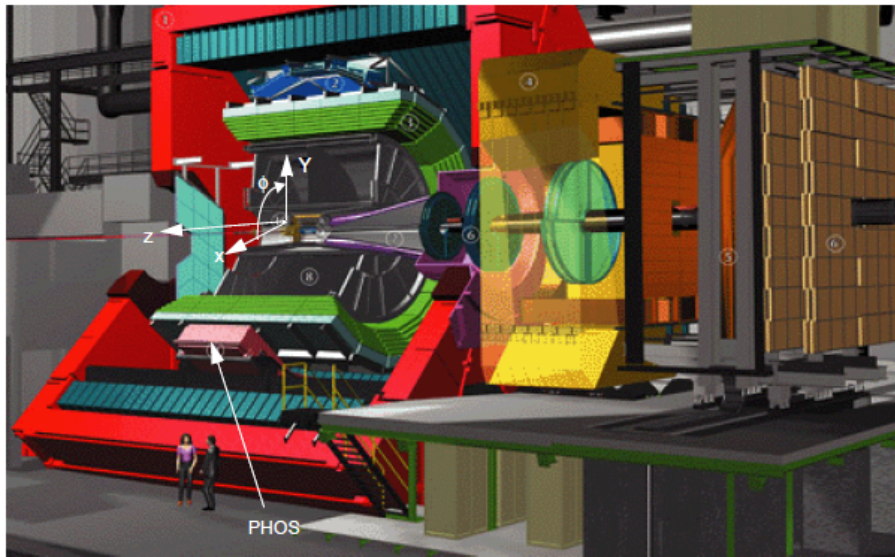


Fig. C.1 ALICE 実験の概要図
PHOS とは ALICE 実験の検出器の 1 つである。

付録 C.2 PHOS(PHOton Spectrometer)

Fig.C.2 は ALICE に使用されるカロリメータである PHOS を表している。PHOS は PWO 結晶 (タングステン酸鉛結晶) を使用している。しかし PWO 結晶は大きさに限界があるため $180 \times 22 \times 22 \text{ mm}^3$ の大きさを使用している。1 モジュールは 3584 個の PWO 結晶を 64×56 列に配置したもので、PHOS はそれを 5 モジュール使用し $\pm 100^\circ$ をカバーしている。

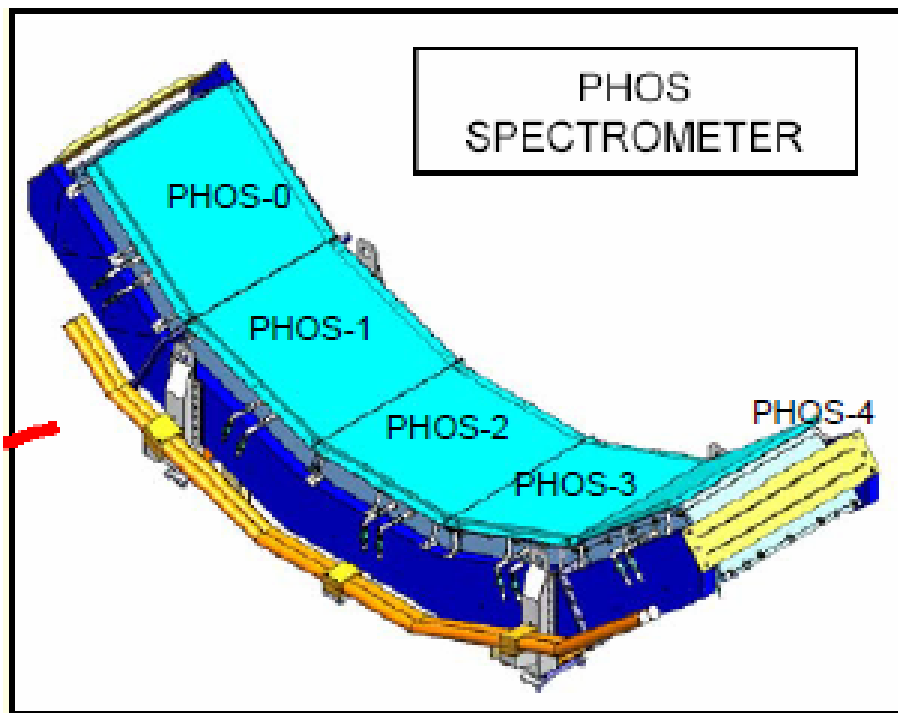


Fig. C.2 PHOS モジュール

付録 C.3 TestBench

TestBench は ALICE 実験のカロリメータと同様な読み出し構造をとっている。ALICE 実験のカロリメータと TestBench では PWO 結晶 (タングステン酸鉛結晶) と読み出し部分には APD が使用されている。

PWO

PWO の結晶は無色透明で Table.C.1 を見てわかるように密度が高くモリエール半径が小さいため検出効率が非常に良い。

	PWO	NaI	プラスチックシンチレータ
相対発光量 (NaI を 100 とする)	1	100	30
モリエール半径 [cm]	0.89	2.59	42.5
減衰時間 [ns]	3 ~ 40	230	2 ~ 4
密度 [g/cm^3]	8.28	3.67	1.032
発光波長 [nm]	430	413	350 ~ 450

Table. C.1 PWO スペック

しかし、発光量が非常に小さいため、-25 に温度を下げることにより発光量を上昇させることによってこの問題を解決している。PHOS や TestBench は-25 で動作させ、発光量を約 2 倍程度上げた状態で測定している。

読み出し部分

TestBench の読み出し部分は Fig.C.3 のようになっている。まず粒子通過に伴い PWO から光子が発生し APD と CSP により増倍及び成形される。次に Fee に入り、Fee 内の shaper(アンプ) により Altro チップ内の ADC で読み取ることができるような大きい信号にする。そしてこの Altro チップによってアナログ信号がデジタル信号へと変換されデータが蓄積される。トリガーカウンタから RCU にトリガー信号が入ると、PCI カードを介し DAQPC にデータが吐き出され読みだすことができる。また、Fee は読み出しを担っているだけでなく、HV や LV を供給するための重要な役割を果たしている。各々の APD の HV の値とゲインの関係は個体差があるため、同じゲインに揃えるには各々の APD に異なる HV の値をかける必要がある。Fee は各々の HV の値を DAQPC 上で制御し、各 APD に供給することができる。Fee の回路は Fig.C.4 である。

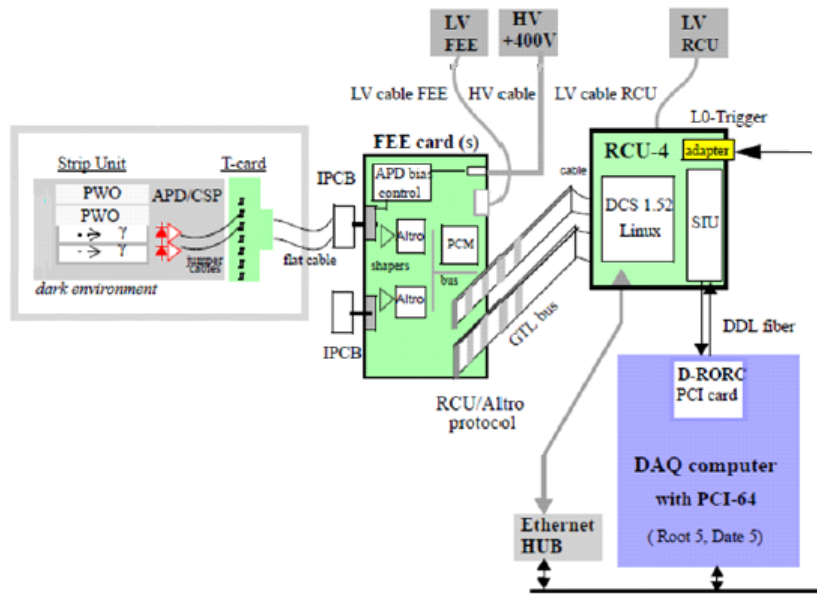


Fig. C.3 TestBench の読み出し概略

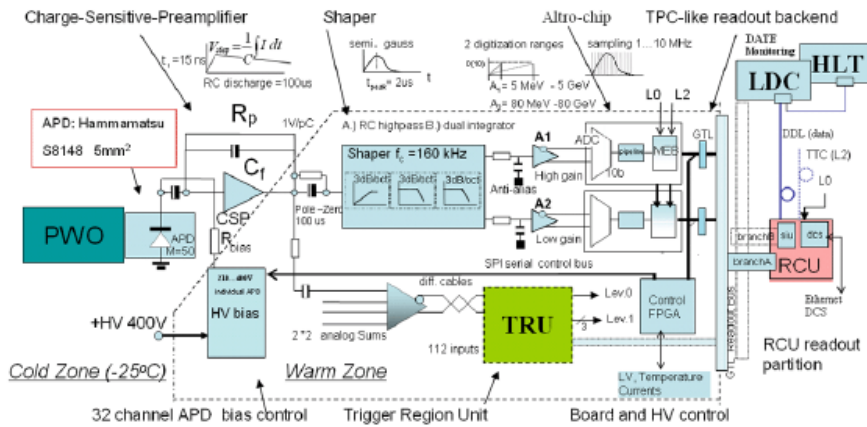


Fig. C.4 Fee の読み出し概略

付録 C.4 宇宙線測定法

まず、各々の APD には個体差があるため、LED を APD に入射することでゲインが 50 となるような Bias Voltage を決める。LED 測定のトリガーの Logic は clock(10Hz) と FunctionGenerator(出力 pulse10kHz) のコインシデンスを取っているのみである。次に宇宙線測定の Logic を Fig.C.2 に示す。Fig.C.3 のように TestBench の上下のトリガーカウンタ (プラスチックシンチレータ) のコインシデンスによって宇宙線が通過するタイミングを要求している。しかし、トリガーカウンタは通過した粒子の位置情報を与えてくれないため、測定で得たデータからある特殊な条件の粒子のみを取り出してエネルギー分

布を解析する。今回の実験ではアイソレーションカット法とクラスター法の2種類の解析方法によりエネルギー分布を見る。アイソレーションカットとはある1つのPWO結晶のみを通過した宇宙線のみに着目し、その宇宙線のエネルギーを解析する方法である。クラスター法は宇宙線が落としたエネルギーが一番高いPWO結晶と、その周りの8つの結晶に対してある閾値以上のエネルギーを吸収した結晶に着目し、その複数の結晶のエネルギーの足し合わせによってエネルギー分布を解析する。

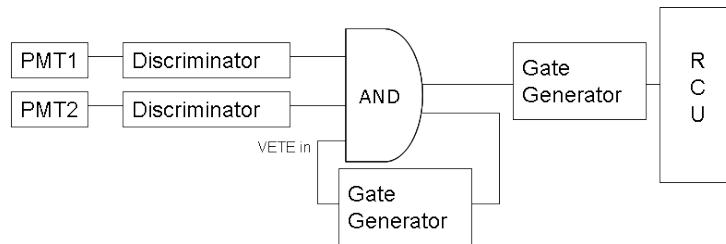


Table. C.2 宇宙線を測定するためのトリガーのLogic

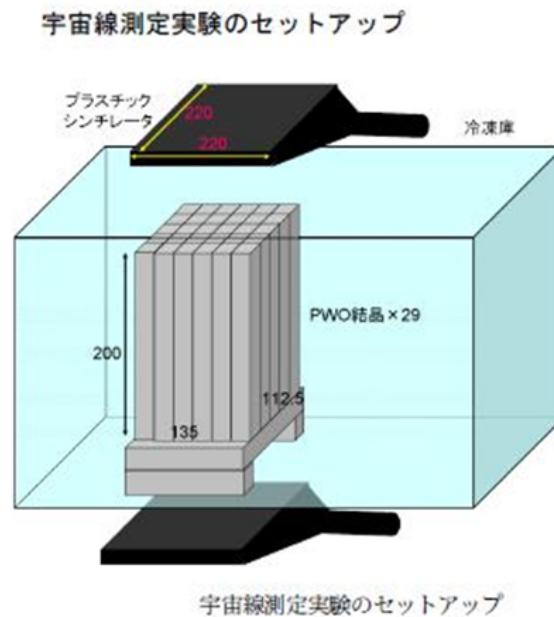


Table. C.3 宇宙線を測定するためのトリガー

付録 C.5 実験中の問題

ここでは実験中に起こった問題を記述する。TestBenchを稼動する際、粒子測定にはPWO結晶の発光量と温度の関係から、PWO結晶の入っている冷蔵庫を-25℃に冷やして測定を行わなければならない。しかし、冷蔵庫の内部で作業をする場合は温度を常温にまで上げる必要がある。私たちが冷蔵庫の温度を常温まで上げる際、結露して冷蔵庫内が

水浸しになる問題が発生した。原因は温度を上げる際、冷蔵庫内の湿気の排気口から逆流し結露するようである。

付録 C.6 再起法

冷蔵庫内部の水滴をふき取り、冷蔵庫を 10 度の設定温度で除湿を行う。この状態で約 1 日ほど運転し、その後常温まで上昇させる。この方法で水滴は完全になくなり、LED 測定を行ったところ TestBench が正常に動作することを確認した。

Bibliography

- [1] 『粒子物理計測学入門』
福井崇時 著
共立出版株式会社
- [2] 『Particle Data Group ホームページ』
<http://ccwww.kek.jp/pdg/>
- [3] 『物理学辞書』
物理学辞書編集委員会 著
株式会社培風館
- [4] 『クォークとレプトン 現代素粒子物理学入門』
F. ハルツェン A.D. マーチン 共著 小林朗 広瀬立成 共訳
株式会社培風館
- [5] 『素粒子物理学入門』
渡邊靖志 著
株式会社培風館
- [6] 『LHC-ALICE 実験 PWO 結晶電磁カロリメータ読み出し系の開発』
広島大学大学院理学研究科教授 杉立徹 著
- [7] 『岩波講座物理の世界半導体エレクトロニクス』
石原宏 著
岩波書店
- [8] 『接合型半導体 Solid State Electronic Devices』
Ben G. Streetman 菊池 誠 監訳 大串秀世・黒須楯生・松本和彦 訳
東海大学出版会
- [9] 『半導体工学』
白藤純嗣 著
共立出版株式会社
- [10] 『浜松ホトニクス株式会社ホームページ』
<http://jp.hamamatsu.com/>
- [11] 『アバランシェ・フォトダイオードの低温領域における特性』
丸山悠 著
- [12] 『PHOS Manual』
Hans Muller CERN PH・Zhongbao Yin・CCNU Wuhan 著

-
- [13] 『原子核物理学』
永江知文 永宮正治 著株式会社裳華房 付録 C に関する参考資料
- [14] 『ALICE 実験における PHOS 検出器システムの性能評価』
久保武史 著