

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

奈良女子大学 理学部物理科学科
高エネルギー物理学研究室
長坂憲子 横山紗依

平成 27 年 3 月 30 日

概要

MPPC(Multi Pixel Photon Counter) は、ロシアで提案されたアイデアに基づく、PPD(Pixel Photon Detector) と総称される多ピクセルのガイガーモードで動作するアバランシェフォトダイオードの一種で、浜松ホトニクス社が開発した製品である。コンパクトで高ゲインであり、磁場中でも特性が変化しないことなどの様々な理由から、従来までの光電子増倍管などの光検出器に変わる存在として多方面での応用が期待されている。

高エネルギー実験においては、大強度陽子加速器施設 J-PARC からスーパーカミオカンデへのニュートリノビームを観測する T2K 実験の近接検出器に使用されているほか、次世代線型加速器実験 ILC の粒子エネルギーを測定するカロリメータ部への応用が検討されている。

本研究では、データ収集に信号パルスの時間発展も測定できるデジタルオシロスコープによる高速サンプリングしたデータを LAN 経由で PC に読み出す方法を採用した。これにより MPPC の基礎特性を測定し、さらにプラスチックシンチレーターを取り付けたシンチレーションカウンターで荷電粒子入射時の波高と検出効率を測定した結果について記す。

目次

第 1 章	MPPC	6
	(Multi Pixel Photon Counter)	
1.1	MPPC とは	6
1.1.1	APD	6
1.1.2	ガイガーモード	7
1.2	構造と動作原理	7
1.3	仕様	8
1.4	MPPC の基本接続回路	9
1.5	基礎特性	9
1.5.1	ダークパルス	9
1.5.2	クロストーク	10
1.5.3	アフターパルス	10
第 2 章	シンチレーター	11
2.1	有機シンチレーター	11
2.2	無機シンチレーター	12
2.3	シンチレーションカウンター	12
第 3 章	エレクトロニクス	13
3.1	NIM モジュール	13
3.1.1	High Voltage	13
3.1.2	Clock generator	13
3.1.3	AMP	13
3.1.4	Discriminator	13
3.1.5	Coincidence	14
第 4 章	MPPC のデバイス特性評価	15
4.1	原理	15
4.2	セットアップ	15
4.3	実験方法	16
4.4	データ	17
4.5	解析方法	18
4.5.1	段階 1	18
4.5.2	段階 2	19
4.5.3	段階 3	19
4.6	結果	20
4.7	考察	23
4.8	結論	23

第 5 章	荷電粒子通過時のシンチレーションカウンターによる波高測定	24
5.1	β 線および宇宙線の発生原理	24
5.1.1	β 線	24
5.1.2	宇宙線	24
5.1.3	エネルギー損失	25
5.2	β 線を利用した実験	26
5.2.1	実験装置	26
5.2.2	実験方法	26
5.2.3	データ	27
5.2.4	結果・考察	27
5.3	宇宙線を利用した実験	28
5.3.1	実験装置	28
5.3.2	実験方法	29
5.3.3	データ	29
5.3.4	結果・考察	30
5.4	考察	32
第 6 章	まとめ、今後の課題	34
第 7 章	謝辞	35
付 録 A	増倍率データ収集プログラム	36
付 録 B	増倍率データ解析プログラム	37
付 録 C	宇宙線データ収集プログラム	39
	参考文献	41

表 目 次

1.1	MPPC の仕様	8
2.1	有機シンチレーターの例	11
2.2	無機シンチレーターの例	12
4.1	サンプル 618 の、逆電圧 70.6V 時の温度変化による増倍率	20
4.2	サンプル 606 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率	21
4.3	サンプル 607 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率	21
4.4	サンプル 608 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率	21
4.5	サンプル 609 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率	21
4.6	サンプル 614 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率	21
4.7	サンプル 615 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率	21
4.8	サンプル 616 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率	21
4.9	サンプル 617 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率	21
4.10	サンプル 618 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率	22
4.11	図 4.10 における各 MPPC の近似式	22

目 次

1.1	MPPC	6
1.2	空乏化	7
1.3	光電効果	7
1.4	MPPC の 1 ピクセル	7
1.5	1 ピクセルの動作	7
1.6	MPPC の構造	7
1.7	MPPC 外形寸法図	8
1.8	MPPC の基本接続回路	9
1.9	ダークパルス	9
1.10	クロストークの原理	10
1.11	クロストーク	10
1.12	アフターパルス	10
2.1	有機シンチレーターの発光原理	11
2.2	無機シンチレーターの発光原理	12
2.3	シンチレーションカウンター	12
3.1	Leading Edge Triggerring	14
3.2	Fast Zero-Crossing Triggering	14
3.3	Constant Fraction Triggering	14
3.4	Coincidence	14
4.1	LED を点灯させた実験の Block Diagram	15
4.2	アルミケース内のセットアップ	16
4.3	モジュール	16
4.4	恒温槽	16
4.5	デジタルオシロスコープ	16
4.6	サンプル 617 の、温度 25°C、逆電圧 70.5V、LED 点灯をトリガーにしたときの スナップショット	18
4.7	サンプル 617 の、温度 25°C、逆電圧 70.5V のときの信号電荷の分布	19
4.8	サンプル 617 の、温度 25°C、逆電圧 70.5V のときの信号電荷の分布における 個々のピークをガウス分布でフィットしたもの	19
4.9	サンプル 618 の、逆電圧 70.6V 時の温度変化による増倍率	20
4.10	温度 25°C 時の増倍率の印加電圧による変化	22
5.1	Sr の壊変図	24
5.2	一次宇宙線の大気への入射と二次宇宙線の発生の模式図	25
5.3	β 線を利用した実験の Block Diagram	26
5.4	アルミケース内のセットアップ	26
5.5	恒温槽	26
5.6	β 線源ありのスナップショット	27
5.7	β 線源なしのスナップショット	27

5.8	ゼロ点の分散	27
5.9	ゼロ点の平均と分散の相関図	27
5.10	分散 2 以下のパルスの信号電荷	28
5.11	分散 2 以下かつ信号電荷 900 以上の信号パルスのピーク値	28
5.12	宇宙線を利用した実験の Block Diagram	28
5.13	宇宙線を利用した実験のモジュール	29
5.14	宇宙線入射時のスナップショット 1	30
5.15	宇宙線入射時のスナップショット 2	30
5.16	宇宙線入射時のスナップショット 3	30
5.17	宇宙線入射時のスナップショット 4	30
5.18	宇宙線入射時の波高分布	31
5.19	CH2 つまり中段のカウンターの波高分布	31
5.20	宇宙線と β 線の積分値の比較	32

第1章 MPPC (Multi Pixel Photon Counter)

1.1 MPPC とは

MPPCとは、Multi Pixel Photon Counterの略称で、PPDと総称される、いわゆるSiPMとも呼ばれるデバイスの一つであり、浜松ホトニクス社が開発した光半導体素子である。ガイガーモードで動作する数百個から数千個のAPDピクセルを持つ、常温で使用できる新しいタイプのフォトンカウンティングデバイスである。高い印加電圧が必要な光電子増倍管やAPDにくらべ、MPPCは100V以下の低電圧で動作し、ガイガーモードで動作するため $10^5 \sim 10^6$ におよぶ高い増幅率を持つ。半導体光検出器の基本的性質として量子効率が高く、磁場に影響受けないうえ、ピクセル一つの静電容量は小さいために時間分解能にも優れるという特徴を持つ。図 1.1 に本研究で使用したMPPCの画像を示す。

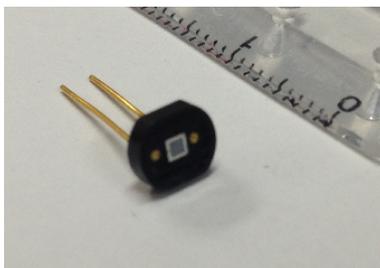


図 1.1: MPPC

1.1.1 APD

MPPCを含むAPD(Avalanche Photodiode)について概観する。まずpn接合のフォトダイオードについて説明する。

フォトダイオードに逆電圧を印加すると、n型半導体の電子が吸い出されるとともに、p型半導体のホールが電子で埋められる。そのため、n側電極にプラス電荷、p側電極にマイナス電荷が蓄積し、ダイオード内で電位差が生じる。このとき、図 1.2 のように、空乏化といって、接合部分はキャリアが存在しない状態になるので素子内の電流が止まる。この空乏層に光子が入射すると、光電効果により電子・ホール対が生成される。生成された電子とホールは、内部電位差により電子がn側に、ホールがp側に移動するので電流が生じる(図 1.3)。これがフォトダイオードの原理である。

APDの場合は、光電効果により生成された電子が内部電圧により加速され、半導体内の電子に衝突し新たな電子・ホール対を生成する。これが可能となるよう、素子の内部構造を工夫して、局所的に非常に強い電場が生じるようにしてある。ここで生じた電子もまた、内部電圧によって加速され、別の新たな電子・ホール対を生成する。これが連鎖的に生じることにより、電子雪崩が形成される。この過程はピコ(10^{-12})秒のオーダーで終了する。APDは、電子雪崩により増幅されたシグナルを検出するフォトダイオードである。

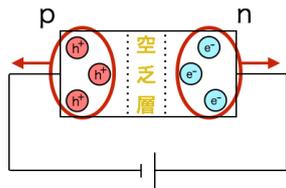


図 1.2: 空乏化

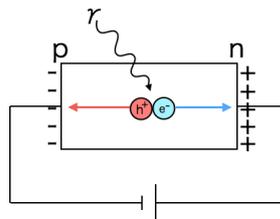


図 1.3: 光電効果

1.1.2 ガイガーモード

APD には、降伏電圧以下で動作するプロポーションナルモードと、降伏電圧以上で動作するガイガーモードがある。プロポーションナルモードでは、光電効果で生じた電子の近傍でのみ電子雪崩が形成されるため、信号パルスは入射して光電効果を起こした光子の数に比例する。ガイガーモードでは、電子雪崩の生じる場所がピクセルの全面に広がる。このことをガイガー放電と呼び、降伏電圧以上の電圧を保っている間は放電が継続する。この放電のため、信号パルスは入射して光電効果を起こした光子数に無関係の、ほぼ一定の大きな出力となる。

1.2 構造と動作原理

MPPC の 1 ピクセルは、図 1.4 に示すように、ガイガーモード APD とクエンチング抵抗が直列に接続されたものである。降伏電圧以上の逆バイアスをかけたガイガーモード APD に光子が入射すると、電子雪崩を形成し電流が流れ (①)、クエンチング抵抗により電圧降下を起こし、ガイガーモードから脱するため電子雪崩が停止する (②)。その後、再充電されガイガーモードとなると (③)、光子を検出可能になる。(図 1.5)

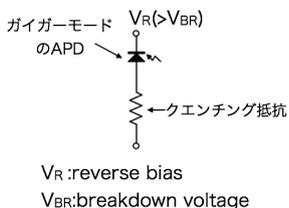


図 1.4: MPPC の 1 ピクセル

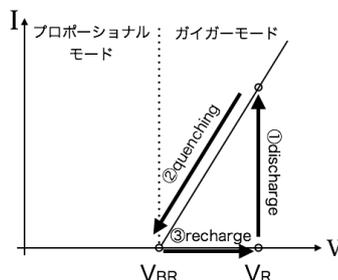


図 1.5: 1 ピクセルの動作

MPPC は、図 1.6 のように、これをピクセル数分、二次元に並列接続をした構造をしている。そのため全てのピクセルには同じ値の逆電圧が印加され、各ピクセルからの信号パルスの重ね合わせが出力される。

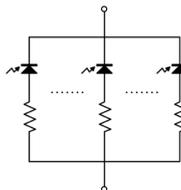


図 1.6: MPPC の構造

1.3 仕様

本実験で使用した MPPC は、S10362-11-050C である。表 1.1 に仕様を、図 1.7 に外形寸法図を示す。[1][2]

表 1.1: MPPC の仕様

項目		単位
有効受光面サイズ	1 × 1	mm ²
ピクセル数	400	-
ピクセルサイズ	50 × 50	μm ²
動作温度	-20 ~ +40	°C
開口率	61.5	%
感度波長範囲	320 ~ 900	nm
最大感度波長	440	nm
検出効率	50	%
動作電圧範囲	70 ± 10	V
ダークカウント	400	kcps
端子間容量	35	pF
時間分解能	200 ~ 300	ps
逆電圧の温度係数	56	mV/°C
増倍率	7.5 × 10 ⁵	-

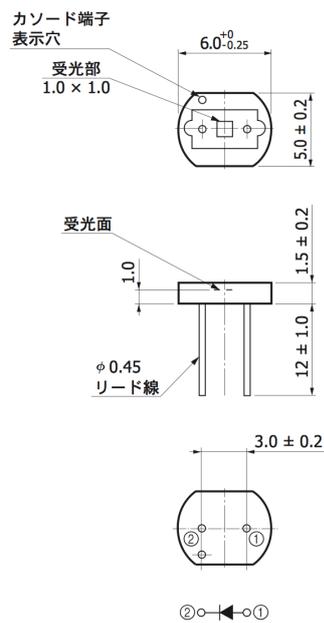


図 1.7: MPPC 外形寸法図

1.4 MPPCの基本接続回路

MPPCの基本接続回路を図1.8に示す。この回路においては、 $47\text{k}\Omega$ の抵抗と $0.1\mu\text{F}$ のコンデンサーを組み合わせたローパスフィルターを2段接続することで、電源から進入するノイズを遮断する。信号を読み出す出力線には結合コンデンサーとして $0.47\mu\text{F}$ を配置して、印可している逆バイアス電圧の直流成分を除去する。

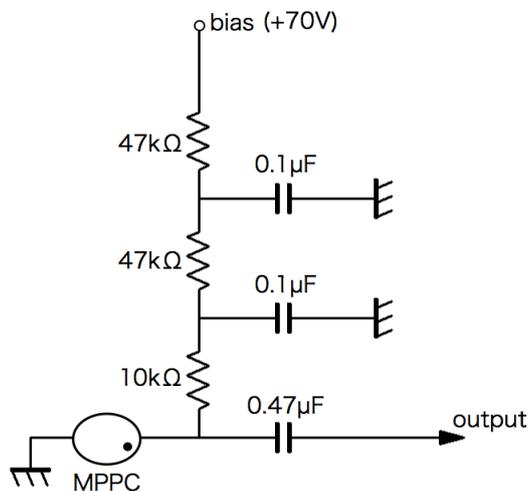


図 1.8: MPPC の基本接続回路。MPPC のシンボル中の黒点は順方向電流の向きを示す表示穴を表す。

1.5 基礎特性

1.5.1 ダークパルス

室温に半導体を置いているので、電子・ホール対は、光電効果だけでなく熱励起によっても発生する。MPPCはガイガーモードで動作しているため、この熱励起によって発生した電子・ホール対も、増幅された信号パルスとして検出され、光電効果で生じる本来の検出したい信号パルスと区別がつかなくなる。この現象はランダムに発生し、これをダークパルスと呼ぶ。ダークパルスが生じるレートはサンプル個体によって異なり、また印加電圧が高いほど増加する。

図1.9は、外部からの光を遮断し、図1.8で示すMPPCの基本接続回路を通じて70Vの逆電圧を印加し、1光子検出時の波高(1p.e.)の半分でトリガーした際にオシロスコープで観測した波形である。

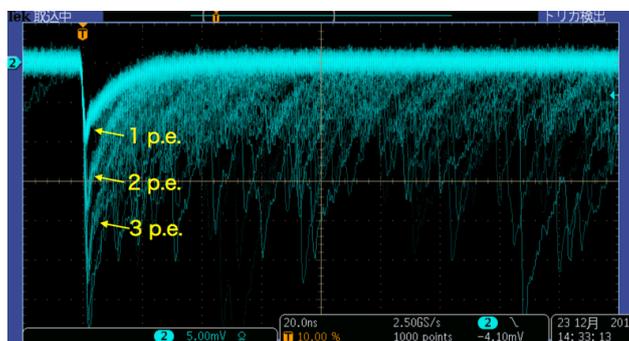


図 1.9: ダークパルス

1.5.2 クロストーク

ある APD ピクセルにおいて、熱電子や光電子に起因して電子雪崩を形成すると、そこから二次的な光子が放出される。このとき、図 1.10 に示すように、この光子が別のピクセルにおいて光電効果を起こして信号パルスを出力することがある。この過程はピコ秒のオーダーで終了するので、二つの信号パルスは事実上同時に出力され、二倍の波高で検出される。すなわちクロストークは、入射した光子数を実際よりも多く見せてしまう効果がある。ダークパルスで 2p.e. または 3p.e. の波高のパルスが出る事象があるのはこのためである。

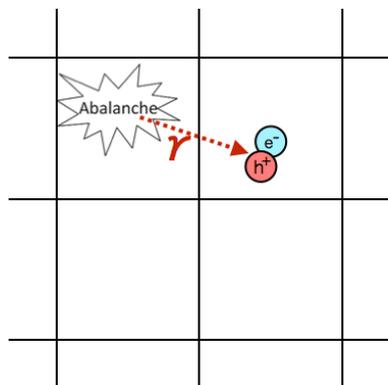


図 1.10: クロストークの原理

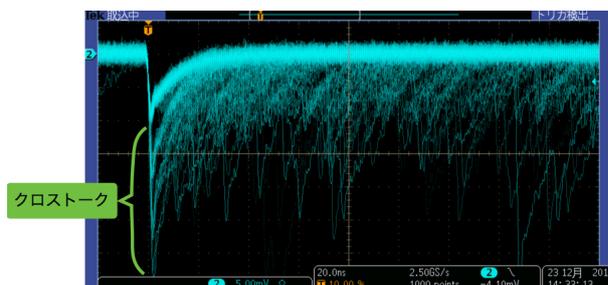


図 1.11: クロストーク

1.5.3 アフターパルス

ある APD ピクセルにおいて、ガイガー放電によって増幅された電子の一部が半導体内の格子欠陥にトラップされることがある。この場合、トラップされた電子は、数十ナノ秒オーダーの時間差で再放出され、再び電子雪崩を形成し、信号パルスが検出される。温度が低いほど熱振動が小さくなるため、電子が格子欠陥にトラップされる確率が高くなり、アフターパルスは増加する。

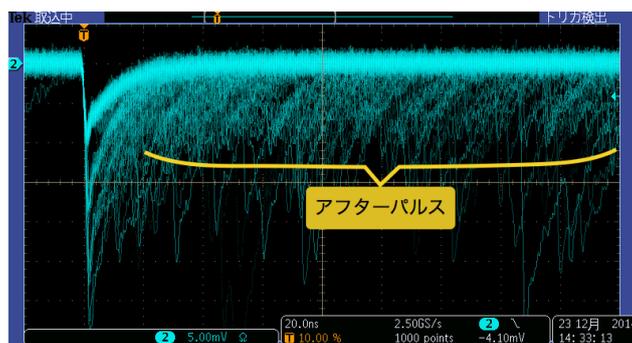


図 1.12: アフターパルス

第2章 シンチレーター

シンチレーターは、放射線の入射により蛍光を発する物質である。有機シンチレーターと無機シンチレーターがあり、以下にその発光の仕組みを説明する。本実験では、有機シンチレーターの一種であるプラスチックシンチレーター NE102A を用いた。

2.1 有機シンチレーター

芳香族系炭化水素化合物の分子内の電子には、共有結合を作り分子の骨格を作る σ 電子と、それ以外の π 電子がある。入射した放射線が分子内の π 電子を励起し、その励起された電子が基底状態に落ちるときに発光する。蛍光減衰時間が比較的短いので、良好な時間分解能を得ることができる。表 2.1 に有機シンチレーターの例を挙げる。[3]

特にプラスチックシンチレーターの場合、もともとの発光は紫外線領域の短波長のものが多く、光検出器の量子効率が高い領域とずれているので、波長変換物質 (wavelength shifter) を混ぜたものが広く用いられる。

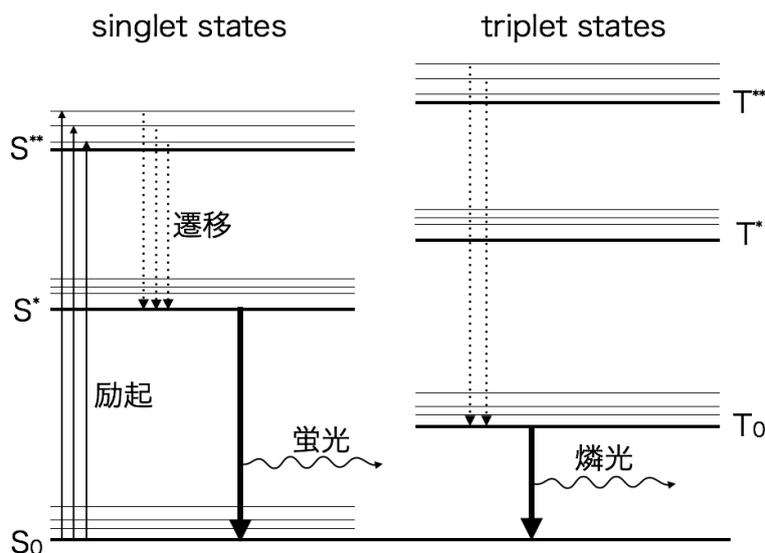


図 2.1: 有機シンチレーターの発光原理

表 2.1: 有機シンチレーターの例

	Anthracene	Plastic (NE 102A)	Liquid (NE 213)
密度 [g/cm ³]	1.25	1.32	0.87
屈折率	1.62	1.58	1.51
蛍光減衰時間 [ns]	32	2.4	3.7
光量最大波長 [nm]	447	423	425

2.2 無機シンチレーター

入射した放射線が結晶中の電子を励起し、その励起された電子が基底状態に落ちるときに発光する。発光量が大きいのでエネルギー分解能がよい測定を行なえる反面、蛍光減衰時間が長いものもあり、それらは高速の測定にはあまり適していない。温度が上昇すると、熱エネルギーが増加し励起状態の分布が空間的およびエネルギー的に広がる。このため、励起された電子が基底状態に落ちる時間が短くなり、蛍光減衰時間が短くなるものも多い。表 2.2 に無機シンチレータの例を挙げる。[4]

本研究では取り扱っていないが、PET や環境放射線モニターを目的としてこれらと MPPC を組み合わせたカウンターの開発例もある。[5]

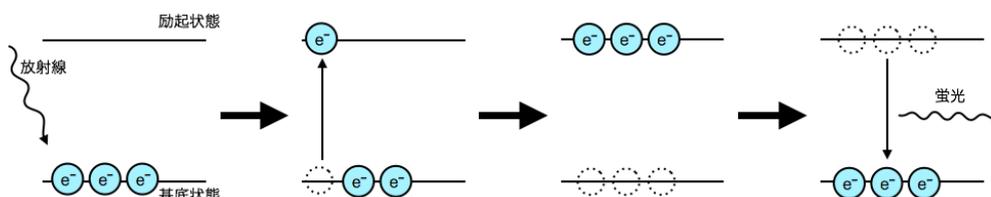


図 2.2: 無機シンチレーターの発光原理

表 2.2: 無機シンチレーターの例

	NaI(Tl)	Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	CsI(Tl)
密度 [g/cm ³]	3.67	7.13	4.51
放射長 [cm]	2.59	1.12	1.86
エネルギー損失 [MeV/cm]	4.8	9.0	5.6
屈折率	1.85	2.15	1.79
蛍光減衰時間 [ns]	245	300	1220
光量最大波長 [nm]	410	480	550

2.3 シンチレーションカウンター

入射粒子のエネルギー損失から発生した蛍光を、電気信号パルスに変換する検出器をシンチレーションカウンターと呼ぶ。荷電粒子の検出にプラスチックシンチレーターを用いる場合、従来までは光検出器として光電子増倍管が一般的であったが、本研究では、表 1.1、図 1.7 に示す、新型半導体検出器である MPPC を用いて、図 2.3 に示すシンチレーションカウンターを製作した。プラスチックシンチレーター内で発生した光の収集効率を改善するために、シンチレーターを反射材としてアルミ箔で包み、その外側に黒の遮光テープを巻いた。また、MPPC は端面に光学グリースで粘着した後、輪ゴムで外れないように固定した。本実験では、プラスチックシンチレーター NE102A を、長さ 81mm、幅 10mm、厚さ 10mm の棒状に加工し、表面を鏡面研磨したものを用いた。

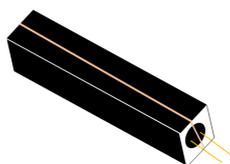


図 2.3: シンチレーションカウンター

第3章 エレクトロニクス

本実験で、MPPC への逆バイアス電圧印加、トリガー論理信号の生成には NIM 規格のモジュールになっているエレクトロニクスを使用した。本章ではそれについて記す。

3.1 NIM モジュール

NIM モジュールとは、Nuclear Instrument Modules の略称で、米国原子力委員会 (Atomic Energy Commission) において、1996 年に制定された”放射線測定モジュール標準規格 TID-20893”に準拠したモジュールのことである。NIM ビンと呼ばれる電源クレートに装着して使用する。

3.1.1 High Voltage

High Voltage は高電圧を印加する電源である。本実験では、半導体検出器向けの最大+100V まで出力できるサトウ電子工業製のものを使用した。

3.1.2 Clock generator

Clock generator は、任意の width と周波数の Fast NIM 信号または TTL 信号を出力するモジュールである。本実験では LED のパルス点灯に使用した。

3.1.3 AMP

AMP は入力信号を一定の割合で増幅させ出力するデバイスである。MPPC は増倍率が十分高いので、光電子増倍管の出力を線形増幅する既製の PM AMP で目的を達する。

3.1.4 Discriminator

Discriminator は入力されたアナログ信号の波高が、ある条件を満たしたときにデジタル信号を出力するデバイスである。Discriminator は主に振幅の小さなノイズを除去することに使われる。以下にトリガーの方法を 3 つ挙げる。

図 3.1 の Leading Edge Triggering では、指定した threshold(しきい値)を超えたときにデジタル信号を出力する。threshold や width は調節することができる。本実験で使用した Discriminator モジュールはこの方式である。

なお、波高の異なる信号 A と信号 B を考えると、Leading Edge Triggering では、信号 A と信号 B で threshold を超えるタイミングが異なるので、検出器に粒子が入射した時刻から Discriminator が出力パルスが発するまでの時間が異なり、出力信号のタイミングがずれる。これを Time Walk と呼ぶ。この問題を解決するのが、図 3.2 の Fast Zero-Crossing Triggering や図 3.3 の Fast Zero-Crossing Triggering である。図 3.2 の Fast Zero-Crossing Triggering では、波形を微分した値が 0 になるときデジタル信号を出力する。Constant Fraction Triggering では、パルスのピークから任意の割合の値を超えるとときデジタル信号を出力する。図 3.3 では割合を 50 % に指定した場合を示している。

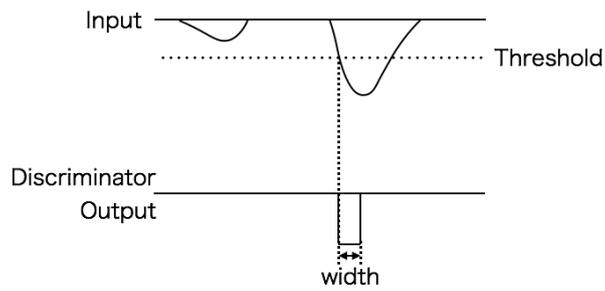


図 3.1: Leading Edge Triggerring

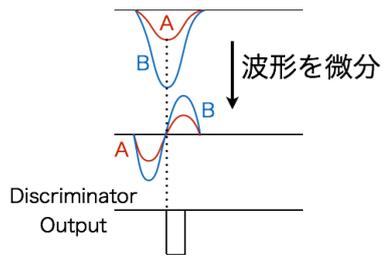


図 3.2: Fast Zero-Crossing Triggerring

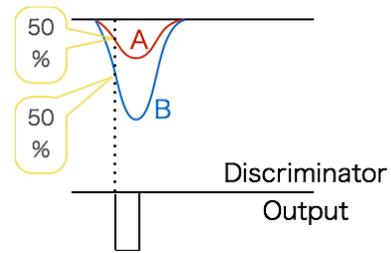


図 3.3: Constant Fraction Triggerring

3.1.5 Coincidence

Coincidence は、二つの入力信号が重なったときのみ信号を出力する AND 機能を持つデバイスである。出力の width は一定である。

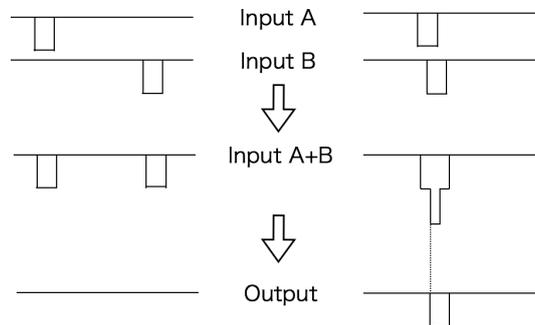


図 3.4: Coincidence

第4章 MPPCのデバイス特性評価

LEDをパルス点灯させ、それを十分に減光して、1パルス当たり平均数個の光子がMPPCの受光部に届く状態にして、MPPCの出力波高分布を得て、そこから増倍率を測定した。信号の数値化にはデジタルオシロスコープを用いた。

4.1 原理

増倍率とは、1ピクセルが1フォトンを検出して発生した信号パルスの電荷量を、1電子あたりの電荷量で割った値である。MPPCの出力パルスは生じた光電子数に応じて波高が離散的になるので、波高分布の近接した2つのピークの差から

$$\text{増倍率} = \frac{\text{2つのピークの電荷量の差}}{\text{1電子あたりの電荷量}} \quad (4.1)$$

と求まる。

温度が上昇すると結晶の格子振動が激しくなり、光電効果で発生したキャリアのエネルギーが次の電離を起こすのに十分なほど大きくなる前に、結晶中のフォノンと衝突する確率が大きくなる。その結果、電子雪崩が起こりにくくなり、増倍率が小さくなる。逆電圧を上昇させると、キャリアに与えるエネルギーが大きくなるため増倍率は大きくなる。増倍率を一定にするためには、周囲の温度に合わせて逆電圧を変化させるか、素子温度を一定に保つ必要がある。

4.2 セットアップ

図4.1にBlock Diagram、図4.2にアルミケース内の写真を示す。LED回路はClock generatorとLEDの間に直列に100Ωの抵抗を入れてTTLパルスを送ってLEDをパルス点灯させた。MPPC回路は図1.8に示した基本接続回路を使用した。図4.3に実験に使用したモジュール、図4.5にデジタルオシロスコープを示す。

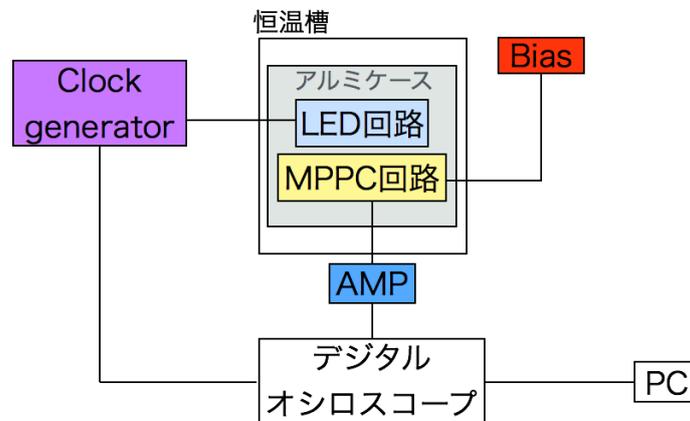


図 4.1: LED を点灯させた実験の Block Diagram

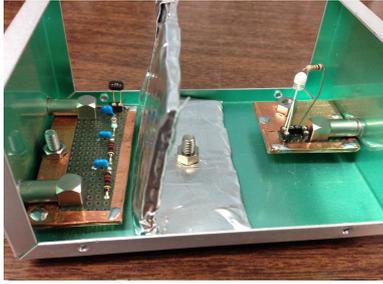


図 4.2: アルミケース内のセットアップ



図 4.3: モジュール



図 4.4: 恒温槽



図 4.5: デジタルオシロスコープ

- Bias : サトウ電子工業製 HV-07WS Dual High Voltage Power Supply
- Clock generator : 株式会社テクノランドコーポレーション製 N-TM 203 100MHz Clock Generator
- AMP : 株式会社海津製作所製 KN2107 12ch PMT AMP
- 恒温槽 : 日本ブローア株式会社製 LS-5 バイオチャンバー
- デジタルオシロスコープ : Tektronix 製 DPO 3034 Digital Phosphor Oscilloscope
- LED : 日亜化学工業株式会社製 NSPB320BS
- PC 環境 : CPU: Intel Pentium4 2.8GHz OS: CentOS 5.11 メモリ: 429MB

4.3 実験方法

Clock generator から LED 回路に繰り返し周波数 100Hz で TTL パルスを送り LED を点灯させる。LED に拡散キャップと白い紙の箱を被せて光量を拡散させながら減らし、LED と MPPC の間に段ボールにアルミテープを貼った仕切りを置き、そこに 1mm 程度の穴をあけて更に光量を絞る。この際、アルミボックス、LED 回路、MPPC 回路、仕切りは一点接地して静電遮蔽する。この LED 点灯による MPPC の出力信号を、デジタルオシロスコープが補そくするように、PC から命令を送信し、TCP/IP ベースの高速でサンプル・アンド・ホールドしたデータを PC に受信する。

デジタルオシロスコープは、LAN インターフェイスを装備し、これを介して PC と命令やデータの送受信が可能である。LXI と呼ばれる通信プロトコルに基づいてコマンドやデータの送受信を行なうソフトウェアパッケージとして VXI11 がある。VXI11 がサポートする関数をコールするデータ収集用プログラムを作成、実行することで、デジタルオシロスコープより波形データを取得する。これをテキスト形式で書き出したものを生データとし、後述する解析処理を行ない、温度変化、電圧変化による MPPC の増倍率を求める。付録 A に、例として、サンプル番号 617 の MPPC(以下、これをサンプル 617 と略記する表記を用いる)を、温度 25°C、逆電圧 70.5V で動作させたときのデータ収集プログラムのソースコードを示す。

本実験では、逆電圧 70.6V をかけたサンプル 618 に、温度を 30°C から 10°C まで 2°C 刻みで変化させたときの増倍率の変化と、温度を恒温槽で 25°C に保ち、9 個の MPPC サンプルについて、逆電圧を 70.0V から 71.5V まで 0.5V 刻みで変化させたときの増倍率を測定した。

4.4 データ

以下に、例として、サンプル 617、温度 25°C、逆電圧 70.5V のときの生データ、図 4.6 にスクリーン上のスナップショットを示す。

```

8.000e-10
  1 1000 78 73 74 74 73 74 71 71 71 76 76 73 72 76 75 75 75 73 72 78 75 75 70 72 74
74 77 72 72 74 74 74 71 72 73 76 73 72 74 78 75 72 74 71 79 78 74 73 72 77 77 76 72 73
77 75 72 69 70 72 75 73 72 72 75 72 73 76 74 74 78 75 72 71 73 75 75 73 75 74 75 75 72
69 73 77 74 70 71 75 75 73 71 75 76 77 74 70 72 77 73 73 71 74 78 74 73 73 72 74 77 72
69 74 75 75 75 71 72 77 79 74 71 72 77 74 73 72 74 77 75 71 68 75 76 76 71 70 72 73 79
74 73 73 74 78 71 70 73 78 78 77 68 71 74 76 74 73 70 70 56 47 49 51 53 59 57 57 56 64
64 62 61 61 68 69 65 54 41 45 47 47 47 50 55 57 57 53 55 65 66 62 61 64 64 70 64 65 65
69 72 66 64 65 69 69 67 67 68 58 46 44 46 50 58 57 57 52 59 61 63 60 58 62 66 68 64 65
64 68 71 68 66 69 72 70 69 70 68 73 75 69 69 69 71 73 70 70 73 77 77 70 72 72 74 75 74
68 70 75 77 74 71 73 75 76 71 68 70 72 75 74 73 72 75 76 75 71 74 75 78 73 71 74 73 77
...
  2 1000 73 69 77 77 71 71 71 74 78 79 69 73 75 77 74 72 71 73 78 76 69 72 75 77 74
69 74 73 74 74 72 71 74 75 72 70 73 75 76 76 71 70 75 75 73 70 72 76 76 76 71 72 75 77
73 70 72 74 75 74 69 73 76 77 75 72 72 77 78 77 70 74 76 79 71 71 74 78 75 76 72 73 78
72 75 70 73 74 73 77 72 72 76 77 71 70 74 79 77 77 74 72 77 74 75 75 70 75 77 75 75 75
79 76 76 72 71 75 75 73 76 77 76 74 72 72 75 74 71 74 74 77 78 75 73 72 77 75 75 72
71 75 78 75 72 71 75 81 75 69 74 75 77 71 74 72 75 79 75 72 74 75 73 75 74 70 74 78 74
75 72 72 77 75 71 71 75 75 71 69 70 74 75 75 70 74 76 75 73 69 69 77 75 75 69 71 75 76
76 70 70 74 74 77 69 70 75 77 74 74 72 76 77 75 69 75 75 77 76 75 72 76 75 72 74 71 79
80 75 69 70 74 75 77 73 73 75 77 74 71 71 76 80 77 71 75 76 77 73 70 71 75 75 74 71 71
73 76 75 72 71 77 78 76 72 74 77 75 76 71 75 76 76 74 70 70 75 75 75 72 71 72 77 73 71
...
  3 1000 66 71 76 76 72 70 77 78 75 75 71 74 77 78 73 74 75 74 79 72 73 73 74 71 70
68 70 76 73 71 67 72 77 77 74 75 74 81 76 72 74 71 78 77 78 74 74 75 77 72 69 71 76 77
72 67 72 75 73 72 68 74 79 77 72 71 76 79 75 74 71 74 77 74 73 70 71 74 77 73 69 73 76
75 72 73 74 78 76 74 73 71 77 78 75 71 73 78 76 72 71 73 77 74 72 73 72 77 77 71 69 75
76 77 72 70 75 78 78 74 69 73 75 74 74 71 72 76 78 71 71 76 79 75 75 69 72 77 76 74 71
71 77 75 72 69 71 77 75 73 72 73 77 75 61 44 46 52 52 51 48 51 55 55 54 56 56 62 61 60
57 60 68 65 61 62 65 68 68 66 66 66 70 70 68 68 70 65 49 42 46 49 51 55 53 54 55 57 61
61 60 59 68 68 66 63 65 69 67 66 64 72 73 73 70 67 72 73 73 73 68 69 73 73 68 70 72 77
73 74 68 73 74 73 72 72 72 77 74 72 71 74 75 75 73 69 71 77 75 72 69 75 75 73 74 73 74
76 75 71 69 72 76 76 71 71 73 75 77 76 72 74 76 75 72 68 73 78 76 72 73 72 75 73 72 73
...

```

- 1 行目は、ラン開始レコード (begin run record) にあたり、デジタルオシロスコープが 1.25GSample/s すなわち時間間隔、

$$\frac{1s}{1.25GSample} = 0.8ns \quad (4.2)$$

で収集されたデータであることを表す。

- 2 行目は、最初のイベントレコード (event record) で、イベント番号、サンプリング数を表し、その後 8bit のデータがサンプリング数 1000 個分続く。DPO3034 型の仕様のため、8bit のデータは符号つき 7bit 整数で表現され、-128 から +127 の値をとる。
- その後、イベントレコードがファイルの末尾まで繰り返される。

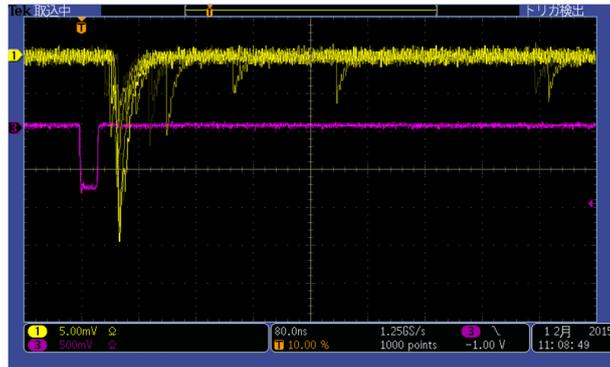


図 4.6: サンプル 617 の、温度 25°C、逆電圧 70.5V、LED 点灯をトリガーにしたときのスナップショット

4.5 解析方法

4.5.1 段階 1

以下に、例として、サンプル 617、温度 25°C、逆電圧 70.5V の生データを、付録 B 増倍率データ解析プログラムで処理したデータを示す。

1	73.780000	4.811600	32.780000	1097.200000
2	73.820000	7.007600	4.820000	-55.200000
3	73.840000	8.794400	31.840000	886.600000
4	73.900000	6.970000	41.900000	1629.000000
5	73.850000	7.987500	91.850000	2667.500000
6	73.780000	6.731600	44.780000	1133.200000
7	73.780000	8.411600	66.780000	3430.200000
8	74.100000	7.910000	74.100000	2778.000000
9	73.550000	6.647500	54.550000	1410.500000
10	73.390000	7.697900	73.390000	3602.100000
...				

- 1 列目は、イベント番号を表す。
- 2 列目は、ゼロ点の値を表す。ここで、ゼロ点は、trigger position を左から 10%、つまり 100 番目に設定しているため、100 番目までの平均と定義する。

$$\text{ゼロ点} = \frac{\sum_{i=1}^{100} x_i}{100} \quad (4.3)$$

ここで、 i はサンプリング数で、 x_i は i 番目のデータである。

- 3 列目は、ゼロ点の分散を表す。

$$\text{分散} = \frac{\sum_{i=1}^{100} (\text{ゼロ点} - x_i)^2}{100} \quad (4.4)$$

trigger position より前で信号パルスが出ているとき、分散が大きくなるため、指標として分散を計算する。

- 4 列目は、ゼロ点からピークまでのパルス高さを表す。
- 5 列目は、信号パルスの積分値 (信号電荷) を表す。積分値は、信号パルスが出ていると思われる 110 番目から 300 番目のデータを、ゼロ点からそれぞれ引いたものを積算する。

$$\text{積分値} = \sum_{i=110}^{300} (\text{ゼロ点} - x_i) \quad (4.5)$$

4.5.2 段階 2

1. 段階 1 で得られたデータを元に、CERN によって開発されているデータ解析用ソフトウェア、ROOT を用いて積分値のヒストグラムを出す。このヒストグラムは検出した光電子の個数 (p.e.) によって等間隔にピークが立っている。(図 4.7)
2. 各 p.e. ピークの中央値を Maximum Likelihood 法によりガウス分布でフィットして求める。(図 4.8)
3. 隣り合う 2 つのピークの間隔の平均、分散を求める。

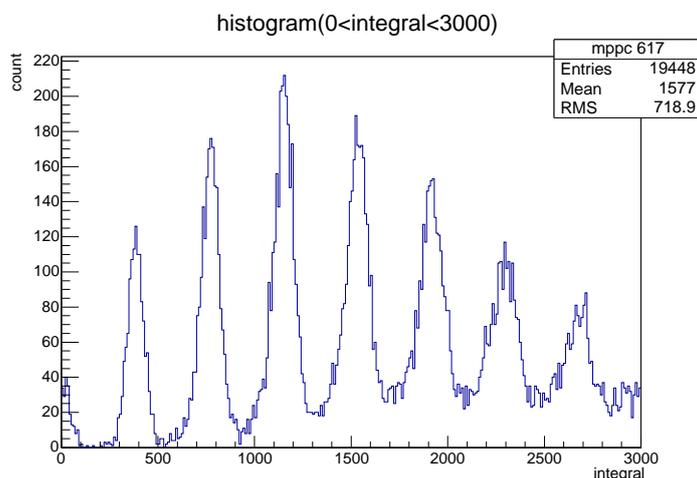


図 4.7: サンプル 617 の、温度 25°C、逆電圧 70.5V のときの信号電荷の分布

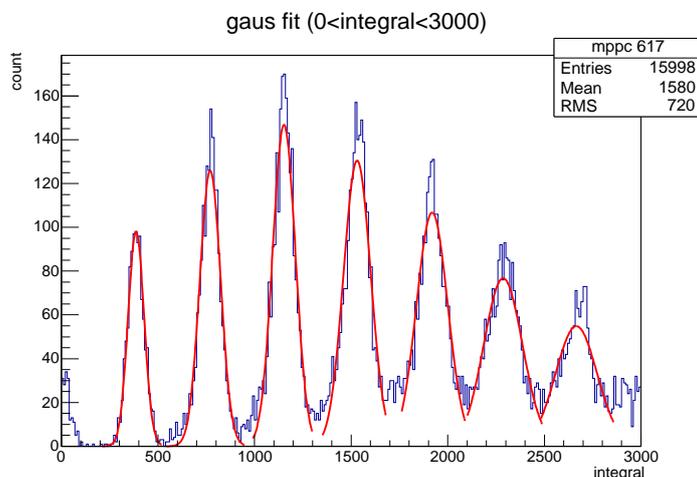


図 4.8: サンプル 617 の、温度 25°C、逆電圧 70.5V のときの信号電荷の分布における個々のピークをガウス分布でフィットしたもの。

4.5.3 段階 3

式 (4.1) より MPPC の増倍率を求める。ここで、

$$2 \text{ つのピークの電荷量の差} = \frac{2 \text{ つのピークの間隔の平均} \times \text{LSB 電圧} \times \text{データの時間間隔}}{\text{デジタルオシロスコープの抵抗値} \times \text{アンプの増幅率}} \quad (4.6)$$

$$\text{LSB 電圧} = \frac{1\text{div 当たりの電圧} \times 8[\text{div}]}{2^8} \quad (4.7)$$

$$\text{データの時間間隔} = 0.8[\text{ns}] \quad (4.8)$$

$$\text{デジタルオシロスコプの抵抗値} = 50[\Omega] \quad (4.9)$$

$$\text{アンプの増幅率} = 2.9 \quad (4.10)$$

$$1 \text{ 電子当たりの電荷量} = 1.602 \times 10^{-19}[\text{C}] \quad (4.11)$$

である。これらの値を式 (4.1) に代入することにより、温度変化、電圧変化による MPPC の増倍率を計算する。

4.6 結果

逆電圧 70.6V をかけたサンプル 618 に、温度を 30°C から 10°C まで 2°C 刻みで下降させる。表 4.11 に 4.5.2 段階 2 より求めた平均のピーク間隔と 4.5.3 段階 3 より求めた増倍率を、図 4.9 に、横軸に温度、縦軸に増倍率をとったグラフを示す。なお、図 4.9 中において、p0、p1 は、フィットさせた関数の切片、傾きを表す。

表 4.1: サンプル 618 の、逆電圧 70.6V 時の温度変化による増倍率

温度 [°C]	30	28	26	24	22
平均ピーク間隔	152.67±12.58	175.68±4.90	183.77±9.32	197.69±4.77	216.52±5.09
増倍率 (×10 ⁶)	1.64±0.14	1.89±0.05	1.98±0.10	2.13±0.05	2.33±0.05

温度 [°C]	20	18	16	14	12	10
平均ピーク間隔	218.06±9.32	225.94±10.75	244.35±6.82	253.27±11.54	277.61±1.01	299.48±8.54
増倍率 (×10 ⁶)	2.35±0.10	2.43±0.12	2.63±0.07	2.73±0.12	2.99±0.01	3.22±0.09

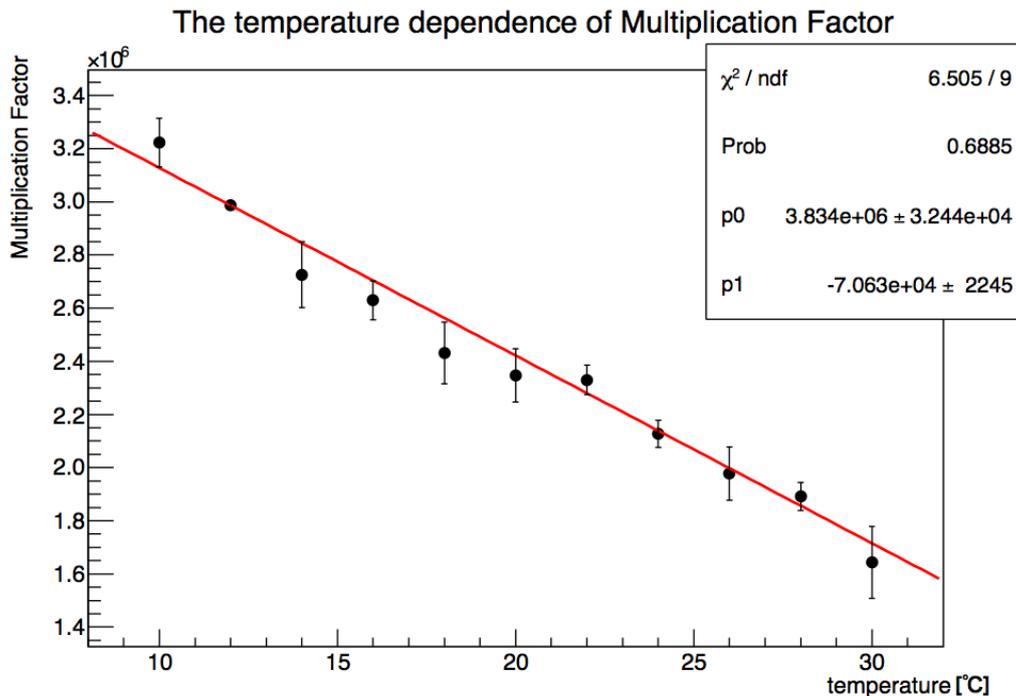


図 4.9: サンプル 618 の、逆電圧 70.6V 時の温度変化による増倍率

さらに、温度を 25°C に保った恒温槽において、9 個の MPPC について、逆電圧を 70.0V から 71.5V ま
で 0.5V 刻みで変化させて測定した結果を示す。表 (4.2)～表 (4.10) に 4.5.2 段階 2 より求めた平均のピーク
間隔と 4.5.3 段階 3 より求めた増倍率を示す。このとき 71.5V においてサンプル 609、615、618 ではアフ
ターパルスの影響で p.e. ピークが不明瞭であるため、増倍率は計算できていない。また、図 4.10 に横軸に
逆電圧、縦軸に増倍率をとったグラフを示す。

表 4.2: サンプル 606 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率

HV[V]	70.0	70.5	71.0	71.5
平均ピーク間隔	128.87±4.28	188.91±4.01	266.83±6.66	323.36±3.42
増倍率 (×10 ⁶)	1.39±0.05	2.03±0.04	2.87±0.07	3.48±0.04

表 4.3: サンプル 607 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率

HV[V]	70.0	70.5	71.0	71.5
平均ピーク間隔	109.41±1.98	181.65±11.16	248.12±4.68	318.67±5.65
増倍率 (×10 ⁶)	1.18±0.01	1.95±0.06	2.67±0.05	3.43±0.06

表 4.4: サンプル 608 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率

HV[V]	70.0	70.5	71.0	71.5
平均ピーク間隔	117.69±3.65	183.39±3.44	258.40±3.23	321.94±11.44
増倍率 (×10 ⁶)	1.27±0.02	1.97±0.02	2.78±0.03	3.46±0.12

表 4.5: サンプル 609 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率

HV[V]	70.0	70.5	71.0	71.5
平均ピーク間隔	187.14±8.83	256.94±3.97	325.65±5.87	-
増倍率 (×10 ⁶)	2.01±0.05	2.77±0.04	3.50±0.06	-

表 4.6: サンプル 614 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率

HV[V]	70.0	70.5	71.0	71.5
平均ピーク間隔	102.60±1.94	172.39±4.86	243.67±1.32	312.68±11.24
増倍率 (×10 ⁶)	1.10±0.01	1.86±0.03	2.62±0.01	3.37±0.12

表 4.7: サンプル 615 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率

HV[V]	70.0	70.5	71.0	71.5
平均ピーク間隔	157.40±4.89	234.67±6.63	311.02±1.85	-
増倍率 (×10 ⁶)	1.69±0.03	2.53±0.07	3.35±0.02	-

表 4.8: サンプル 616 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率

HV[V]	70.0	70.5	71.0	71.5
平均ピーク間隔	99.41±8.18	160.66±3.95	223.50±1.82	283.38±3.59
増倍率 (×10 ⁶)	1.07±0.01	1.73±0.02	2.41±0.02	3.05±0.04

表 4.9: サンプル 617 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率

HV[V]	70.0	70.5	71.0	71.5
平均ピーク間隔	123.41±0.58	190.89±1.08	255.34±8.93	308.71±7.51
増倍率 (×10 ⁶)	1.33±0.00	2.05±0.01	2.75±0.05	3.32±0.08

表 4.10: サンプル 618 の、温度 25°C 時の電圧変化による増倍率

HV[V]	70.0	70.5	71.0	71.5
平均ピーク間隔	142.66±2.13	204.32±1.78	262.31±5.61	-
増倍率 (×10 ⁶)	1.54±0.02	2.20±0.02	2.82±0.06	-

The Voltage dependence of Multiplication Factor

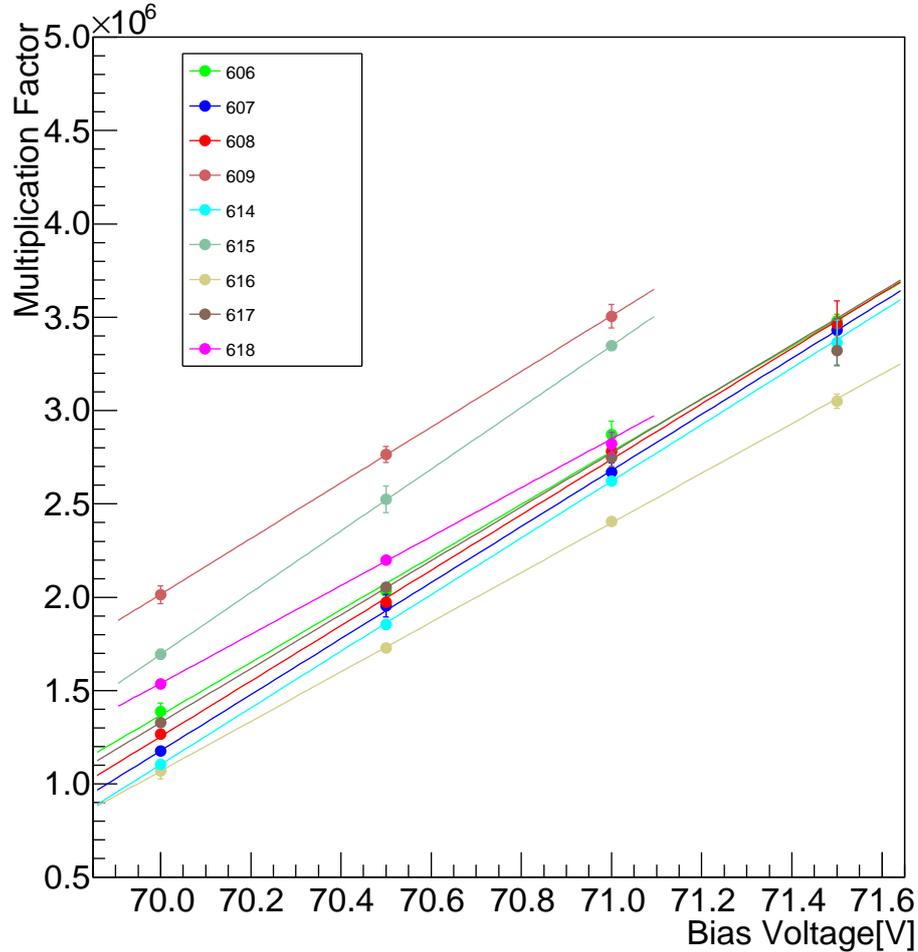


図 4.10: 温度 25°C 時の増倍率の印加電圧による変化

表 4.11: 図 4.10 における各 MPPC の近似式。なお p0 は切片、p1 は傾きを表す

サンプル	χ^2/ndf	p0	p1
606	2.371/2	$(-97.47 \pm 2.64) \times 10^6$	$(1.41 \pm 0.04) \times 10^6$
607	0.2245/2	$(-103.92 \pm 2.24) \times 10^6$	$(1.50 \pm 0.03) \times 10^6$
608	3.414/2	$(-102.69 \pm 2.46) \times 10^6$	$(1.49 \pm 0.03) \times 10^6$
609	0.01007/1	$(-102.44 \pm 5.47) \times 10^6$	$(1.49 \pm 0.08) \times 10^6$
614	0.1006/2	$(-105.11 \pm 1.22) \times 10^6$	$(1.52 \pm 0.02) \times 10^6$
615	0.004468/1	$(-114.03 \pm 2.32) \times 10^6$	$(1.65 \pm 0.03) \times 10^6$
616	0.29947/2	$(-92.00 \pm 2.28) \times 10^6$	$(1.33 \pm 0.03) \times 10^6$
617	5.233/2	$(-99.77 \pm 0.01) \times 10^5$	$(1.44 \pm 0.01) \times 10^6$
618	0.2757/1	$(-90.13 \pm 3.48) \times 10^6$	$(1.31 \pm 0.05) \times 10^6$

4.7 考察

まず温度変化による増倍率について考察する。図 4.10 より、温度が上昇するにつれて増倍率が減少することがわかる。これは、温度が上昇すると結晶の格子振動が激しくなるため、キャリアが十分加速される前に結晶と衝突し、電子雪崩が発生しにくくなることから増倍率が小さくなる。増倍率の温度変化による測定は、本研究室で 2007 年、2008 年に行なわれた例がある。逆電圧や対象の MPPC が異なるため一概には言えないが、10°C と 30°C の増倍率は、本研究は 0.548 倍、2007 年は 0.430 倍、2008 は 0.597 倍となった。[13][12] なお、温度が高い時は各 p.e. ピークが等間隔に立っていたが、温度が低くなるにつれてアフターパルスが増加するために 4p.e. あたりからピークが不明瞭になった。よって、温度が低すぎるとアフターパルスの事象が増え、本来の信号パルスが明確に得られない一方、温度の増加によって増倍率が減少することから、次章の実験において、温度は 25°C で一定にする。

次に電圧変化による増倍率について考察する。図 4.10 より、それぞれの MPPC の増倍率は大きくて 2 倍異なるが、どの MPPC も電圧が増加するにつれてほぼ同じ割合で増倍率が増加することがわかる。増倍率の電圧変化による測定は、本大学では 2008 年、2010 年に行なわれている。温度や対象の MPPC が異なるため一概には言えないが、70V と 71.5V の増倍率は、本研究は 2.56 倍、2008 年は 3.93 倍、2010 年は 2.75 倍になった。[11] 電圧が増加するにつれてアフターパルスが増加するために p.e. ピークが不明瞭になることから、70.0V 時ではそれぞれの MPPC で増倍率にばらつきがあったものが、71.5V 時では増倍率が 3.2×10^6 あたりに集中している。よって電圧が大きすぎるとアフターパルスやクロストークの事象が増え、本来の信号パルスが明確に得られないことから、次章の実験において、逆電圧は 70.0V に統一した。

いま、サンプル 618、温度 25°C、電圧 70.6V 時の増倍率を、温度変化による増倍率の近似式と、電圧変化による増倍率の近似式の双方から求めてみる。

温度と増倍率の関係は、増倍率を M 、温度を $T[^\circ\text{C}]$ とおくと

$$M = (-7.063 \times 10^4)T + 3.834 \times 10^6 \quad (4.12)$$

となり、一方、逆電圧と増倍率の関係は、増倍率を M 、逆電圧を $V[\text{V}]$ とおくと

$$M = (1.310 \times 10^6)V - 9.013 \times 10^7 \quad (4.13)$$

となる。式 (4.12) に $T = 25[^\circ\text{C}]$ 、式 (4.13) に $V = 70.6[\text{V}]$ を代入すると、

$$M = (-7.063 \times 10^4) \times 25 + 3.834 \times 10^6 \quad (4.14)$$

$$\simeq 2.1 \times 10^6 \quad (4.15)$$

$$M = (1.310 \times 10^6) \times 70.6 - 9.013 \times 10^7 \quad (4.16)$$

$$\simeq 2.4 \times 10^6 \quad (4.17)$$

となることから、温度変化による増倍率の実験と電圧変化による増倍率の実験は独立に行なったが、結果は互いに無矛盾で、測定の再現性は荷電粒子の検出には十分であると言える。

4.8 結論

LED を点灯させ、温度変化、電圧変化による MPPC の増倍率の測定を行なうことができた。温度が低くなるにつれてアフターパルスが増え、電圧が高くなるにつれてアフターパルスやクロストークの事象が増えることが確認できた。次章の実験においては、適した条件と考えられる、温度 25°C、電圧 70.0V に設定する。

第5章 荷電粒子通過時のシンチレーションカウンターによる波高測定

第4章でLED点灯による増倍率の温度依存性、逆電圧依存性を測定し、温度を25°C、印加電圧を70Vとするのが適していることがわかった。本章ではMPPCをシンチレーターと組み合わせたシンチレーションカウンターにより、宇宙線入射時の波高測定を行なう。宇宙線に先立って、 β 線を利用した実験を行ない、その結果と比較しながら宇宙線の波高測定を行なった。

5.1 β 線および宇宙線の発生原理

5.1.1 β 線

原子核が β 崩壊する際に高速で飛び出す電子が β 線と呼ばれる。 β 崩壊を式(5.1)に示す。



$^{90}_{38}\text{Sr}$ は半減期29年で $^{90}_{39}\text{Y}$ に β 崩壊し、 $^{90}_{39}\text{Y}$ はさらに半減期64.2時間で安定な $^{90}_{40}\text{Zr}$ に β 崩壊する。 $^{90}_{38}\text{Sr}$ の密閉線源は1か月ほど放置すると1/3900の確率で定常的に $^{90}_{39}\text{Y}$ を含むようになり、放射平衡に達する。図5.1に示す壊変図のように $^{90}_{39}\text{Y}$ から $^{90}_{40}\text{Zr}$ への崩壊の方が速いことと、 $^{90}_{38}\text{Sr}$ から最初に出る β 線はエネルギーが低くてごくわずかな特質でも停止してカウンターの有感領域まで届かないため、実際には $^{90}_{39}\text{Y}$ の β 線を利用する。

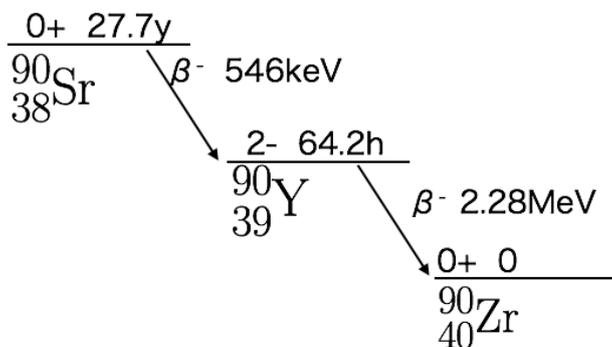


図 5.1: Sr の壊変図

5.1.2 宇宙線

宇宙線は、宇宙空間に存在する高エネルギーの放射線であり、起源は銀河系内だと考えられている。宇宙線中には、一次宇宙線と二次宇宙線がある。一次宇宙線は、最初に地球大気に突入するものを指す。大部分は陽子をはじめとした鉄以上の重さの原子核にいたるあらゆる種類の原子核であり、エネルギーは数 10^6eV から 10^{20}eV 以上にまで及んでいる。二次宇宙線は、一次宇宙線が地球の大気中との相互作用によって二次的に生成した粒子を指す。一次宇宙線が大気中で反応を起こすと、原子核を破壊し中間子を多数発生する。生成された中間子のはうち π^0 中間子は主に2個の光子に崩壊し、光子は陽電子と電子の対生成に

起因する電磁シャワーを作る。 π^+ は主に反 μ 粒子と μ ニュートリノに、 π^- は主に μ 粒子と反 μ ニュートリノに崩壊する。式 (5.2)～式 (5.5) に π 中間子と K^+ 中間子の主な崩壊モードを示す。

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (5.2)$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (5.3)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (5.4)$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (5.5)$$

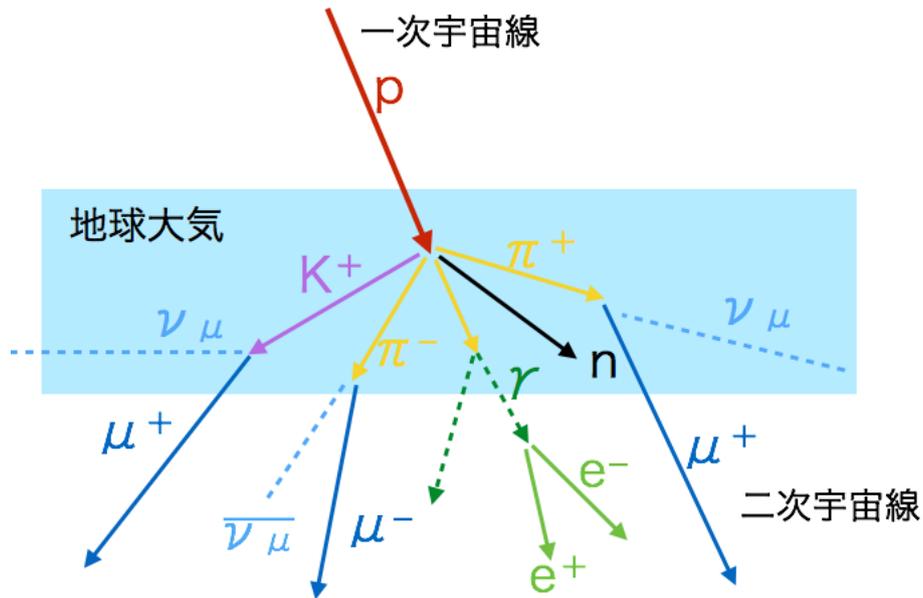


図 5.2: 一次宇宙線の大气への入射と二次宇宙線の発生の模式図

5.1.3 エネルギー損失

宇宙線中の μ 粒子は平均で $1\text{GeV}/c$ 程度の運動量を持つので、ほぼ Minimum Ionization であると考えることができ、プラスチックシンチレーターを通過する際のエネルギー損失は式 (5.6) で与えられる。

$$\Delta E = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\min} \times \rho \times t \quad (5.6)$$

ここで、本実験で使用するプラスチックシンチレーター NE102A の $1\text{g}/\text{cm}^2$ 当たりのエネルギー損失 $\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\min}$ は文献 [7] より $\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\min} = 1.936 \left[\frac{\text{MeV}}{\text{g}/\text{cm}^2} \right]$ 、密度は $\rho = 1.032 \left[\text{g}/\text{cm}^3 \right]$ であり、厚さは $t = 1.0 \left[\text{cm} \right]$ であるため、エネルギー損失は式 (5.6) より

$$\Delta E = 1.936 \times 1.032 \times 1.0 \quad (5.7)$$

$$\simeq 2.00 \left[\text{MeV} \right] \quad (5.8)$$

となる。

5.2 β 線を利用した実験

5.2.1 実験装置

図 5.3 に Block Diagram、図 5.4 にアルミケース内のセットアップ、図 5.5 に本実験より使用する恒温槽を示す。

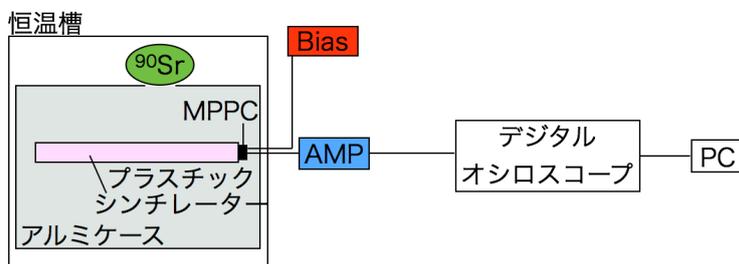


図 5.3: β 線を利用した実験の Block Diagram

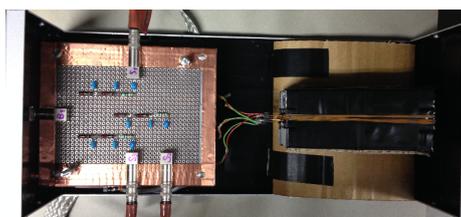


図 5.4: アルミケース内のセットアップ



図 5.5: 恒温槽

- Bias : サトウ電子工業製 HV-07WS Dual High Voltage Power Supply
- AMP : 株式会社海津製作所製 KN2104 12ch PM AMP
- 恒温槽 : エスベック株式会社製 LU-113 ライトスペック恒温恒湿器
- デジタルオシロスコープ : Tektronix 製 DPO 3034 Digital Phosphor Oscilloscope
- PC 環境 : CPU: Intel Pentium4 2.8GHz OS: CentOS 5.11 メモリ: 429MB

5.2.2 実験方法

図 1.8 の MPPC 単体の基本接続回路に、図 2.3 の MPPC 付きシンチレーションカウンターを接続し、アルミケースに入れて接地し、静電遮蔽する。アルミケースの上部に β 線が通るように直径 7mm の穴をあけ恒温槽に入れる。穴の上に ^{90}Sr 線源をのせた時と、線源をのせない時の MPPC の出力信号をそれぞれ読み取る。MPPC はサンプルナンバー 606 を使用し、逆電圧は 70.0V 一定、恒温槽は 25°C で一定にする。

5.2.3 データ

図 5.6 に β 線源をのせる時のデジタルオシロスコープでの出力波形のスナップショット、図 5.7 に線源なしのスナップショットを示す。線源なしの時は MPPC のダークパルスのみを見ているのに対し、 β 線入射時はより高い波高のパルスが認められる。これらを比較し β 線による事象の選別を行なう。

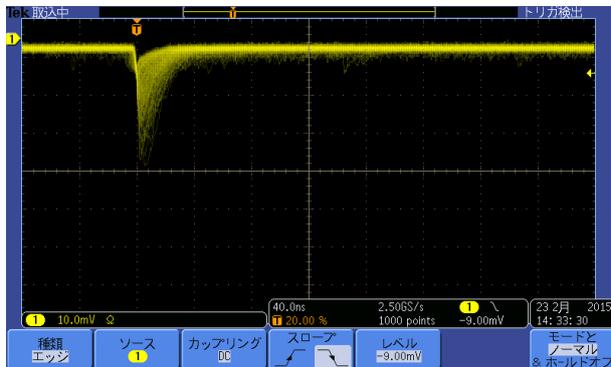


図 5.6: β 線源ありのスナップショット

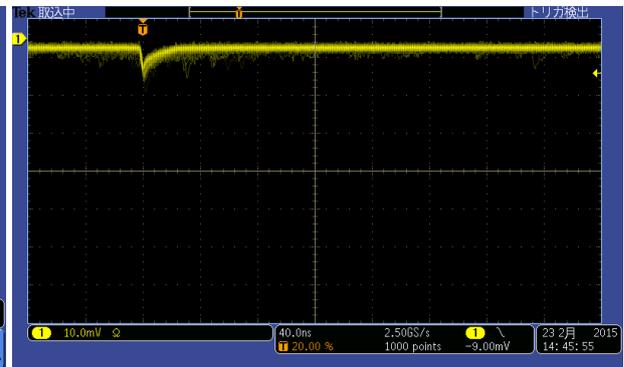


図 5.7: β 線源なしのスナップショット

5.2.4 結果・考察

ゼロ点の分散を横軸にとったヒストグラムを図 5.8 に、ゼロ点の平均を縦軸にとり、分散を横軸にとった相関図を図 5.9 に示す。

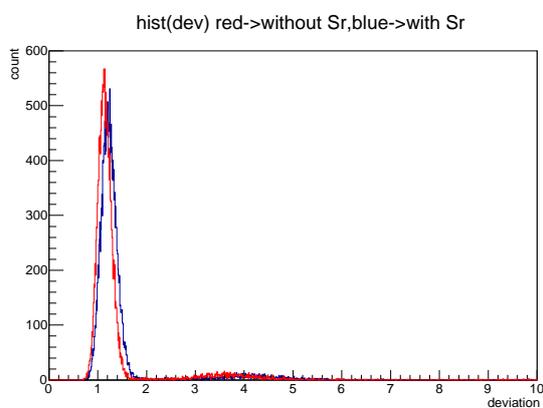


図 5.8: ゼロ点の分散 青:線源有り 赤:線源無し

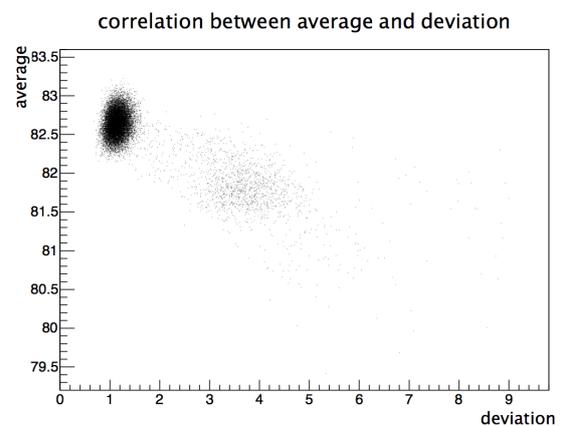


図 5.9: ゼロ点の平均と分散の相関図

図 5.8 において分散が 3~5 にあるものは、図 5.9 を見るとゼロ点の平均値が低くなっていることがわかる。これは設定した Trigger position より前にパルスが出ているためと考えることができるため、分散が 2 以下であることを要求し、この事象をカットする。

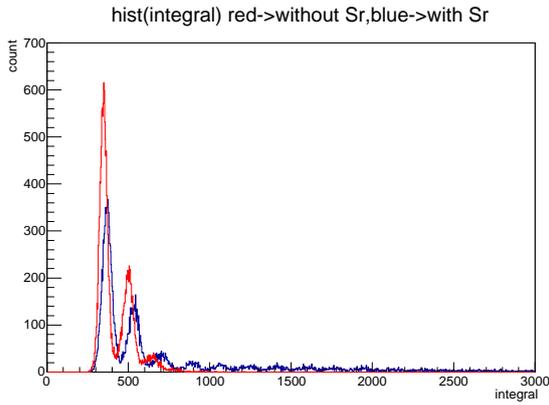


図 5.10: 分散 2 以下の条件を満たした事象の信号電荷 青:線源有り 赤:線源無し

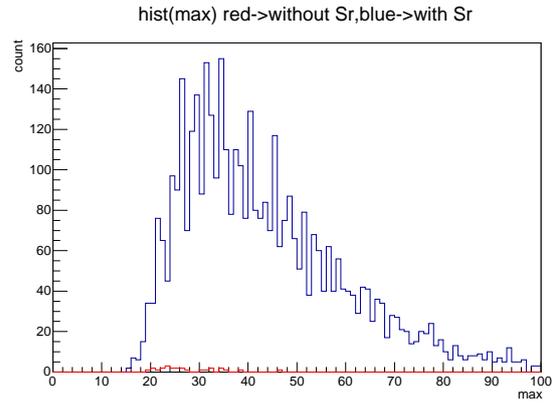


図 5.11: 分散 2 以下を満たし、かつ信号電荷 900 以上の信号パルスのピーク値 青:線源有り 赤:線源無し

図 5.10 より、信号電荷 1000 以上にダークパルスはほとんど生じないため、ダークパルスが生じなくなる信号電荷に対応する信号パルスのピーク値を探す。図 5.11 より、最大値 40 でカットすればダークパルスの事象をほぼ削除できると考えられる。これを電圧値に直すと、

$$40 \times \frac{10[\text{mV/div}] \times 8[\text{div}]}{2^8} = 12.5[\text{mV}] \quad (5.9)$$

となる。使用する Discriminator の threshold の調整範囲の制約も考慮して-15mV に決定した。

5.3 宇宙線を利用した実験

図 5.12 に示すように MPPC 読み出しシンチレーションカウンター三つを積層し、上段と下段のコインシデンスを用いて宇宙線のパルスを観測する。

5.3.1 実験装置

図 5.12 に Block Diagram、図 5.13 に実験に使用するモジュールを示す。

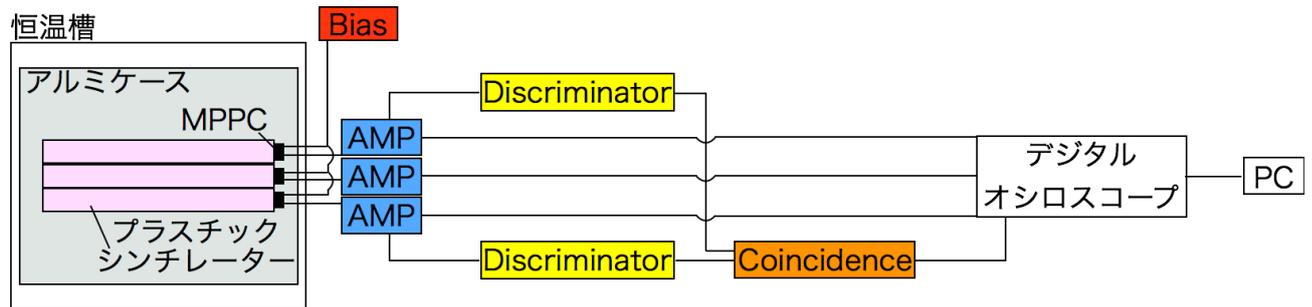


図 5.12: 宇宙線を利用した実験の Block Diagram



図 5.13: モジュール。右から Bias 電源、Discriminator、PM AMP、Coincidence。

- Bias 電源：サトウ電子工業製 HV-07WS Dual High Voltage Power Supply
- AMP：株式会社海津製作所製 KN2104 12ch PM AMP
- Discriminator：株式会社テクノランドコーポレーション製 N-TM 716 4CH Discriminator
- Coincidence：株式会社海津製作所製 KN1250 OCTAL 2-FOLD COINCIDENCE
- 恒温槽：エスベック株式会社製 LU-113 ライトスペック恒温恒湿器
- デジタルオシロスコープ：Tektronix 製 DPO 3034 Digital Phosphor Oscilloscope
- PC 環境：CPU: Intel Pentium4 2.8GHz OS: CentOS 5.11 メモリ: 429MB

5.3.2 実験方法

本実験では MPPC 付きシンチレータを 3 つ使うため、1.8 の基本接続回路を基板上に 3 つ並列に接続し、シンチレーションカウンターを縦に三段重ねる。上段と下段の出力信号は、threshold=-15mV、width=20ns の値に設定した Discriminator にて MPPC 特有のダークパルスのカットし、Coincidence に通す。上段をデジタルオシロスコープの CH1、中段を CH2、下段を CH3、Coincidence からの出力信号を CH4 に接続する。CH4 をトリガー、つまり CH1 と CH3 が同時に信号を出した時をトリガーにして、CH1~CH3 の出力信号を読み取る。逆電圧は 70.0V 一定、恒温槽は 25°C 一定にする。MPPC は電圧、サンプルによりダークパルスのレートが異なるため特性が比較的似たものを三つ選び、サンプル 606、608、616 を使用する。上段に 606、中段に 616、下段に 608 を配置する。

宇宙線は、1cm² あたり 1 分間に 1 回とレートが低いため、付録 A のプログラムでデータをとると、バッファメモリーで未更新の同じデータを取り続けてしまう。そこで一回前にアクセスしたデータ列と比較して、変化したときのみ生データのファイルに出力するように変更した付録 C のプログラムを用いて、データ収集した。

5.3.3 データ

図 5.14~図 5.17 に、宇宙線入射時のスナップショットを示す。これらは、横軸を 20ns/div で見ており、CH1~CH3 の信号パルスがほぼ同時に出ていることから、宇宙線が 3 本のカウンターを貫いたイベントのデータであると確認できる。

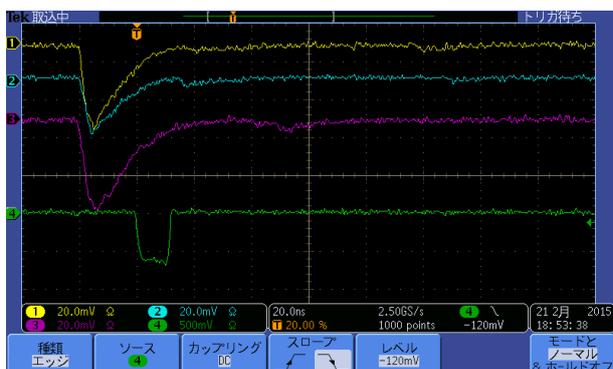


図 5.14: 宇宙線入射時のスナップショット 1

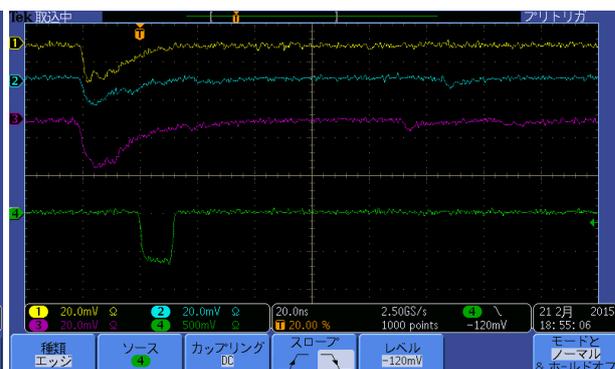


図 5.15: 宇宙線入射時のスナップショット 2

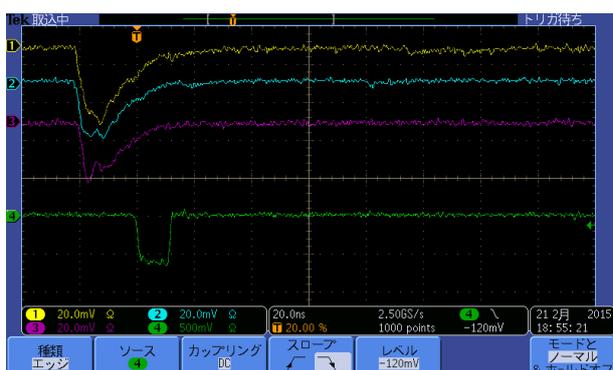


図 5.16: 宇宙線入射時のスナップショット 3

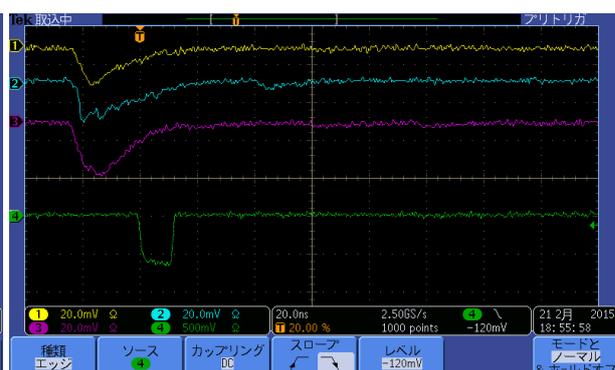


図 5.17: 宇宙線入射時のスナップショット 4

5.3.4 結果・考察

図 5.14～図 5.17 のスナップショットにて、CH4 が約 20ns 遅れて表示されている理由について考える。CH4 は、CH1 と CH2 の Discriminator を Coincidence に通しているが、それぞれの内部 delay について Clock generator を用いてデジタルオシロスコープで測定したところ、Discriminator が 7.08ns、Coincidence が 10.44ns となり、両方を通したところ 18.20ns となった。従って、Discriminator と Coincidence の内部 delay の合計であると説明できる。

図 5.18 に、3 段重ねたプラスチックシンチレーターの宇宙線入射時の積分値を示す。

中段の分布から宇宙線が何 p.e. に相当するかを考える。CH2 はサンプル 616 の MPPC のパルス高さを読み取っており、表 4.8 より、逆電圧 70.0V、温度 25°C におけるサンプル 616 の平均ピーク間隔は 1div 当たりの電圧値をそろえると 49.70 である。宇宙線の中央値をランダウ分布でフィットして求めると 1.023×10^3 となるため、

$$\frac{1.02 \times 10^3}{49.7} \simeq 20.6[\text{p.e.}] \quad (5.10)$$

となり、宇宙線は約 20p.e. に相当することがわかる。

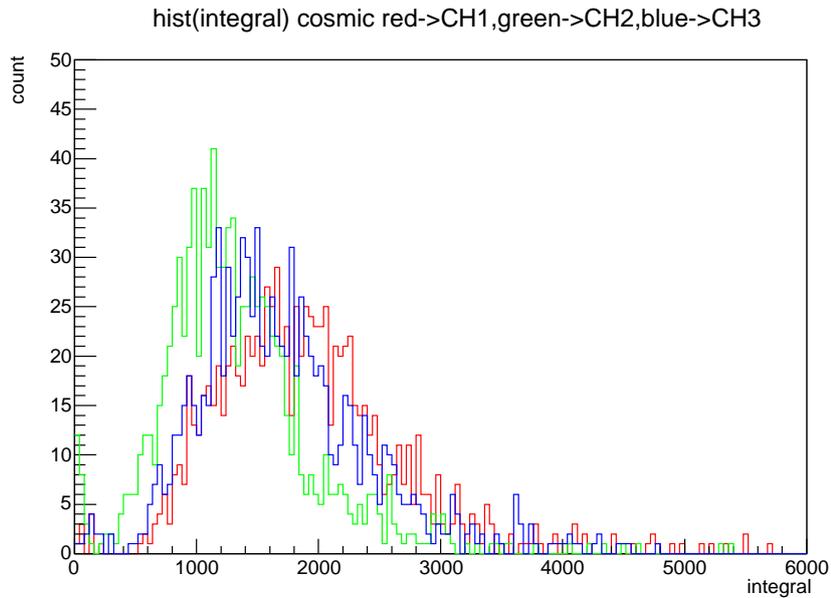


図 5.18: 宇宙線入射時の波高分布 赤:上段 緑:中段 青:下段

次に、中段の MPPC 読み出しシンチレーションカウンターの S/N 比、検出効率を求める。S/N 比とは Signal(真の信号量)と Noise(雑音量)の比のことである。ダークパルスは 4p.e. を越すものはないと考えられるので、

$$S/N = \frac{20}{4} = 5.0 \quad (5.11)$$

となる。また、検出効率を検出したい信号を全信号量で割った値であると考え。CH2 における 4p.e. は積

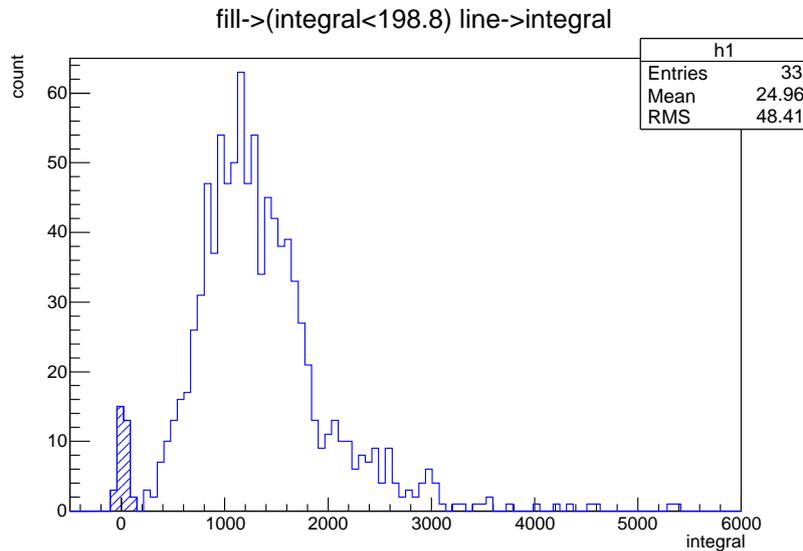


図 5.19: CH2 つまり中段のカウンターの波高分布 積分値 <198.8 を Noise とした

分値 198.8 に対応し、これを越さない信号量は図 5.19 よりは 33 であるため、検出効率は

$$\text{efficiency} = \frac{986 - 33}{986} \quad (5.12)$$

$$\approx 0.966 \quad (5.13)$$

より、97%になる。

5.4 考察

図 5.20 に、宇宙線入射時と β 線入射時の波高分布を示す。

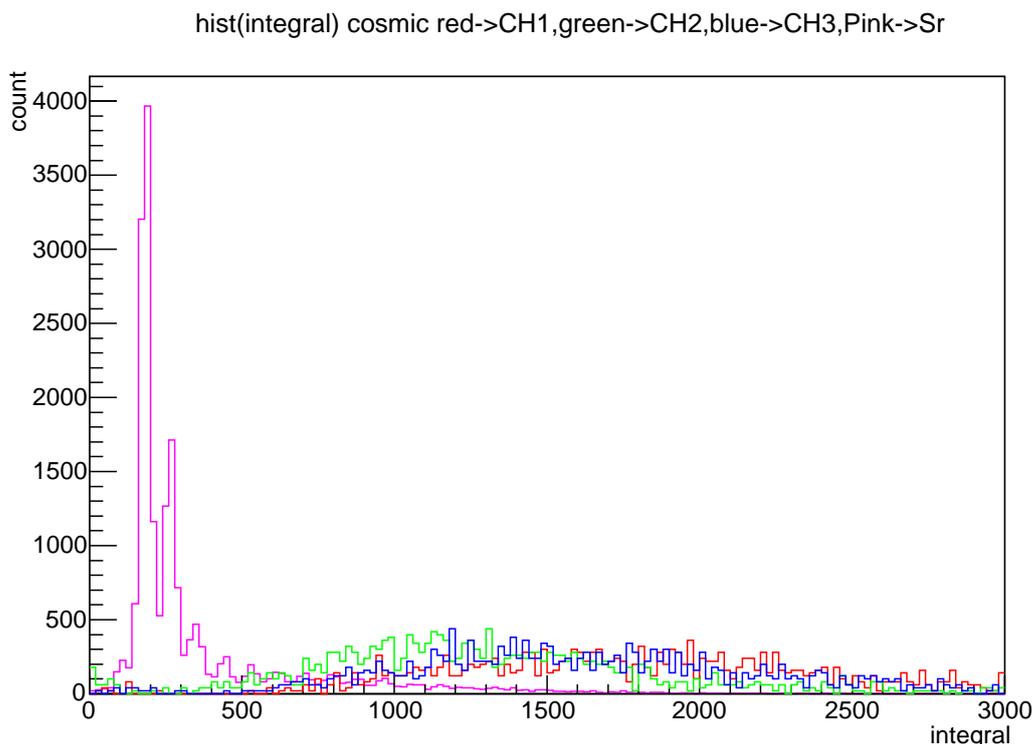


図 5.20: 赤緑青:宇宙線入射時の信号分布 ピンク: β 線入射時の信号分布

図 5.1 より、使用する β 線源の最大エネルギーは 2.28MeV であるため、 β 線の波高分布がなくなる 2.0×10^3 程度が 2.28MeV に相当すると考えられる。また、宇宙線入射時の積分値のピークは 1.02×10^3 であるのでこれをエネルギーに換算すると

$$\frac{1.02 \times 10^3 \times 2.28}{2.0 \times 10^3} \simeq 1.16[\text{MeV}] \quad (5.14)$$

となる。式 (5.8) よりエネルギー損失の平均値は 2.00MeV であるため、これは確かにシンチレーターを宇宙線が通過した事象を観測することができたと考えられる。

この実験では 1000 事象を 1 日半で収集したため、取得データのレートは

$$\frac{1000}{36[\text{h}] \times 60[\text{min}] \times 60[\text{sec}]} \simeq \frac{1}{130[\text{sec}]} \quad (5.15)$$

であり、2 分間に約 1 回観測をした。宇宙線は 1cm^2 に 1 分間に 1 回入射し、上下のカウンターの中心間距離が 2cm と近いこと、トリガーに用いる上下のカウンターの threshold が図 5.11 に示すように荷電粒子通過の波高分布の約半分を除いていることを考慮すると、宇宙線の入射レートと無矛盾と考えられる。

次に、本研究で用いたプラスチックシンチレーターの集光効率について考える。プラスチックシンチレーターの集光効率を $\varepsilon_{\text{coll}}$ 、観測される p.e. を $Q_{\text{p.e.}}$ 、プラスチックシンチレーターを通過する際のエネルギー損失を ΔE 、プラスチックシンチレーターのエネルギーデポジットを ε_{sci} 、MPPC の光子検出効率を ε_{PDE} とおくと、

$$\Delta E \times \varepsilon_{\text{sci}} \times \varepsilon_{\text{coll}} \times \varepsilon_{\text{PDE}} = Q_{\text{p.e.}} \quad (5.16)$$

と表すことができる。ここで、式 (5.8)、文献 [8]、表 1.1、式 (5.10) より

$$\Delta E = 2.00[\text{MeV}] \quad (5.17)$$

$$\varepsilon_{\text{sci}} = 0.01[\text{photons/eV}] \quad (5.18)$$

$$\varepsilon_{\text{PDE}} = 50[\%] \quad (5.19)$$

$$Q_{\text{p.e.}} = 20[\text{p.e.}] \quad (5.20)$$

なので、

$$\varepsilon_{\text{coll}} = \frac{Q_{\text{p.e.}}}{\Delta E \times \varepsilon_{\text{sci}} \times \varepsilon_{\text{PDE}}} \quad (5.21)$$

$$= 2.0 \times 10^{-3} \quad (5.22)$$

となり、本研究で用いたプラスチックシンチレーターの集光効率を 0.20% と見積もった。

第6章 まとめ、今後の課題

今回の実験でデジタルオシロスコープで高速サンプリングした MPPC の出力パルスを時系列データとして記録し、精密に測定する方法を確立した。

MPPC の温度変化、電圧変化による増倍率の変化を測定した。増倍率は、温度変化については 25°C を基準として 1°C につき 3.5% 減少し、電圧変化については 70V を基準として 1V 印加電圧を上昇させると 2.2 倍に大きくなり、MPPC の増倍率は温度と逆電圧それぞれについて線形性を持つことが確認できた。また、温度が低くなるにつれアフターパルスが増加し、電圧が高くなるにつれアフターパルスやクロストークが増えることから、 25°C で 70V 印加するのを標準動作条件と定めた。

荷電粒子の測定では、 β 線源を用いることでダークパルスとシンチレーション光のパルスを区別する threshold を決定し、それを元に宇宙線の観測をした。シンチレーションカウンターを宇宙線が貫通するレートや、エネルギー損失を β 線のエネルギー損失と比較することより、観測したデータが確かに宇宙線であることが確認できた。またこれにより本研究で使用したプラスチックシンチレーターの S/N 比が 5.0 であることや検出効率が 97%、集光効率が 0.20% であると見積もった。

今後の課題として、今回の実験では 3 段のシンチレーションカウンターを使用したのが、2010 年の実験では 3 段 \times 3 列のシンチレーションカウンターで宇宙線の飛跡を ADC を用いて観測している。シンチレーションカウンター 9 本のパルスをデジタルオシロスコープで測定するためには、1 台につき 4CH 装備されているため、9 本とさらにトリガー条件を入れる CH を考慮すると 3 台が必要となり、データ収集のためのソースコードを更に拡張する必要がある。オシロスコープ 1 台を制御するのに clink を使っているので、オシロスコープそれぞれに clink1、clink2、clink3 を割り当てれば 3 台の制御が可能になると考える。

また、今回の実験では集光効率が非常に低いという結論に至ったので、反射材としてアルミ箔以外の素材を用いて改善が見られるか試験することは興味深い取り組みの一つと考えられる。

第7章 謝辞

本論文の執筆に当たり、多くの方々にお世話になりました。指導教官の宮林謙吉先生にははんだ付けすらままならない私たちに、実験の基礎から教えていただきました。忙しい時間を縫って丁寧にご指導いただき、本当に感謝しております。林井久樹先生にはミーティングの際などに多くのご指摘やアドバイスをいただきました。ありがとうございます。下村真弥先生のおかげで猿以下だった ROOT の使い方が、飛躍的に進歩しました。ありがとうございます。研究室の先輩方、喧しい私たちを見守ってくださってありがとうございます。美しい先輩方を見るのが毎日の幸せでした。同回の皆さん、一年間本当に楽しかったです。どの研究室にも負けない、最高のメンバーだったと思います。

この一年間、未熟な私たちにご支援・ご協力いただいたすべての方々へ深く感謝いたします。ありがとうございました。

付録A 増倍率データ収集プログラム

```
#include <unistd.h>
#include "vxi11_user.h"

int main(int argc, char *argv[]){
    int nevt = 20000;
    CLINK *clink;
    clink = new CLINK;
    static char* serverIP = "10.0.1.107";

    //-- open scope
    if (vxi11_open_device(serverIP, clink) != 0){
        printf ("Couldn't open scope.\n");
        exit(1);
    }

    //-- buffer to receive data block.
    static char wf[10000];
    char buffer[40];

    int ret;
    ret = vxi11_send(clink, "DAT:SOU CH1");           //Digitize ch=1 signal.
    ret = vxi11_send(clink, "HOR:SCA 80E-09");       //Horizontal 80 ns/div
    ret = vxi11_send(clink, "CH1:SCA 5E-03");        //ch=1 vertical 5mV/div

    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:EDGE:SOU CH3");   //triger type = edge,ch=3
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:EDGE:SLO FALL"); //slope control=fall
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:LEV:CH3 -1.0");  //triger level = -1.0V
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:MODE NORM");     //trigered data get

    ret = vxi11_send(clink, "CH1:POS 3.0"); //vertical position

    ret = vxi11_send(clink, "HOR:DEL:MOD OFF");      //delay mode off
    ret = vxi11_send(clink, "HOR:POS 10");          //trig pos 10% from left
    ret = vxi11_send(clink, "HOR:RECO 1000");       //record length

    ret = vxi11_send(clink, "ACQ:MOD SAM");          //acquisition mode = 8bit

    double xinc = vxi11_obtain_double_value(clink, "WFMO:XIN?"); //get horizontal range
    printf("%10.3e\n",xinc);

    for (int iev = 0 ; iev < nevt + 1; iev++){
        ret = vxi11_send(clink, "DAT:ENC FAS");       // fastest encoding
        ret = vxi11_send(clink, "WFMO:BYT_N 1");     //reng = -128~127
        ret = vxi11_send(clink, "DAT:STAR 1");
        ret = vxi11_send(clink, "DAT:STOP 1000");
        ret = vxi11_send(clink, "CURV?");           //get data

        long bytes_returned=vxi11_receive_data_block(clink, wf, 10000, 1000);
        if (iev == 0) continue;
        printf(" %5d %5d ", iev, bytes_returned);
        for (int i = 0 ; i < 1000; i++){
            printf("%d ",(char)wf[i]);
        }
        printf("\n");
        if (iev == 0) continue;
    }
    vxi11_close_device(serverIP, clink);
}
```

付録B 増倍率データ解析プログラム

```
#include <stdio.h>

int main(){
    int i, n, j;
    float xdiv;          // horizontal axes range.
    int iev, nsample; // Event number and number of sampling.
    int siny[10000];
    FILE *fp;
    FILE *fpout;

    fp = fopen("hoge.txt", "r");
    if(fp == NULL){
        printf("can't open file \n");
        return 0;
    }

    fpout = fopen("passhoge.txt", "w");
    if(fp == NULL){
        printf("can't open file \n");
        return 0;
    }

    /* Top line is x/div. */
    fscanf(fp, "%e\n", &xdiv );

    printf("xdiv read done.\n");

    /* Read event number unless EOF. */
    while( fscanf(fp, "%d", &iev )!=EOF ){
        printf("event number=%d\n", iev);
        /* Check number of samplings. */
        fscanf(fp, "%d", &nsample );
        /* Read sample and hold data.*/
        for(i=0; i<nsample; i++){
            fscanf(fp, "%d", &(siny[i]) );
            printf("%d ", siny[i]);
        }/* Data read done! */
        printf("\n");
        /* Do needed instructions for the read data. */

        double sum = 0.0;
        double sum2 = 0.0;
        double sum3 = 0.0;
        double dev = 0.0;
        double ave = 0.0;
        double delta = 0.0;
        double max = 0.0;
        const int nped = 100;
        /* sum */
        for(i=0; i<nped; i++){
            sum = sum + (double)siny[i];
        }
        /* average */
        ave = sum / nped;
        /* deviation*/
        for(i=0; i<nped; i++){
            sum2 = sum2 + (ave - (double)siny[i])*(ave - (double)siny[i]);
        }
        dev = sum2 / nped;
        /* delta max integral */
        for(i=nped+10; i<300; i++){
            delta = ave - (double)siny[i];
        }
    }
}
```

```
    if(max < delta){
        max = delta;
    }

    sum3 = sum3 + delta;
}

/* select data */
if(dev<10){
    fprintf(fpout,"%d %f %f %f %f\n" ,iev,ave,dev,max,sum3);
}

}/* Event loop end. */

fclose(fp);
fclose(fpout);
printf("ending ...\\n");
}
```

付録C 宇宙線データ収集プログラム

```
#include <unistd.h>
#include "vxi11_user.h"
#include <stdio.h>

int main(int argc, char *argv[]){
    int nevt = 1000000000;
    int iev = 0;
    int count = 1;
    CLINK *clink;
    clink = new CLINK;
    static char* serverIP = "10.0.1.107";
    FILE *fp;

    if (vxi11_open_device(serverIP, clink) != 0){ //open scope
        printf ("Couldn't open scope.\n");
        exit(1);
    }

    fp = fopen("hoge.txt","w"); //open file
    if(fp == NULL){
        printf("can't open file \n");
        return 0;
    }

    /*buffer to receive data block*/
    static char wf1[10000];
    static char wf11[10000];
    static char wf2[10000];
    static char wf22[10000];
    static char wf3[10000];
    static char wf33[10000];

    int ret;
    ret = vxi11_send(clink, "HOR:SCA 20E-09"); //Horizontal 20 ns/div
    ret = vxi11_send(clink, "CH1:SCA 20E-03"); //ch=1 vertical 20mV/div
    ret = vxi11_send(clink, "CH2:SCA 20E-03");
    ret = vxi11_send(clink, "CH3:SCA 20E-03");
    ret = vxi11_send(clink, "CH4:SCA 500E-03");

    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:EDGE:SOU CH4"); //triger type = edge,ch=4
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:EDGE:SLO FALL"); //slope control=fall
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:LEV:CH1 -120E-03"); //triger level = -120mV
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:MODE NORM"); //trigered data get

    ret = vxi11_send(clink, "CH1:POS 3.5"); //ch=1 vertical position
    ret = vxi11_send(clink, "CH2:POS 2.5");
    ret = vxi11_send(clink, "CH3:POS 1.5");
    ret = vxi11_send(clink, "CH4:POS -1");

    ret = vxi11_send(clink, "HOR:DEL:MOD OFF"); //delay mode off
    ret = vxi11_send(clink, "HOR:POS 20"); //trig pos 20% from left
    ret = vxi11_send(clink, "HOR:RECO 1000"); //record length

    ret = vxi11_send(clink, "ACQ:MOD SAM"); //acquisition mode = 8bit

    double xinc = vxi11_obtain_double_value(clink, "WFMO:XIN?"); //get horizontal range
    fprintf(fp,"%10.3e\n",xinc);

    ret = vxi11_send(clink, "DAT:ENC FAS"); //fastest encoding
    ret = vxi11_send(clink, "WFMO:BYT_N 1"); //range = -128~127
    ret = vxi11_send(clink, "DAT:STAR 1");
    ret = vxi11_send(clink, "DAT:STOP 1000");
}
```

```

ret = vxii1_send(clink, "DAT:SOU CH1");          //Digitize ch=1 signal.
ret = vxii1_send(clink, "CURV?");              //get ch=1 data
long bytes_returned1 = vxii1_receive_data_block(clink, wf11, 10000, 1000);

ret = vxii1_send(clink, "DAT:SOU CH2");
ret = vxii1_send(clink, "CURV?");
long bytes_returned2 = vxii1_receive_data_block(clink, wf22, 10000, 1000);

ret = vxii1_send(clink, "DAT:SOU CH3");
ret = vxii1_send(clink, "CURV?");
long bytes_returned3 = vxii1_receive_data_block(clink, wf33, 10000, 1000);

for (int iev = 0 ; iev < nevt + 1; iev++){
    ret = vxii1_send(clink, "DAT:SOU CH1");
    ret = vxii1_send(clink, "CURV?");
    long bytes_returned1 = vxii1_receive_data_block(clink, wf1, 10000, 1000);

    ret = vxii1_send(clink, "DAT:SOU CH2");
    ret = vxii1_send(clink, "CURV?");
    long bytes_returned2 = vxii1_receive_data_block(clink, wf2, 10000, 1000);

    ret = vxii1_send(clink, "DAT:SOU CH3");
    ret = vxii1_send(clink, "CURV?");
    long bytes_returned3 = vxii1_receive_data_block(clink, wf3, 10000, 1000);

/*if getting data is unequal to got data then fprintf getting data*/
while(wf1[1] != wf11[1] || wf1[2] != wf11[2] || wf1[3] != wf11[3]){

    for (int i = 0 ; i < 1000; i++){
        wf11[i] = wf1[i];
        wf22[i] = wf2[i];
        wf33[i] = wf3[i];
    }
    if (iev == 0) continue;

    fprintf(fp," %5d %5d ", count, bytes_returned1);

    for (int i = 0 ; i < 1000; i++){
        fprintf(fp,"%d ",(char)wf11[i]);
    }
    for (int i = 0 ; i < 1000; i++){
        fprintf(fp,"%d ",(char)wf22[i]);
    }
    for (int i = 0 ; i < 1000; i++){
        fprintf(fp,"%d ",(char)wf33[i]);
    }

    count = count + 1;
    fprintf(fp,"\n");
    if (iev == 0) continue;
}
if (count == 1000) break;
}
vxii1_close_device(serverIP, clink);

fclose(fp);
}

```

参考文献

- [1] 浜松ホトニクス http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/03_handbook.pdf
- [2] 浜松ホトニクス http://akizukidenshi.com/download/ds/hamamatsu/s10362-11_series_kapd1022j05.pdf
- [3] William R.Leo.Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments(1994)p160
- [4] Review of Particle Physics in Jour. Physics,G33(2006)p276
- [5] 山崎 真 修士論文「MPPC を用いた次世代 PET 装置の基礎研究」信州大学 (2010)
- [6] http://www.tequipment.net/assets/1/26/Documents/Tektronix/dpo3000_programmermanual.pdf
- [7] Journal of Physics G:Nuclear and Particle Physics(2006)p104
- [8] <http://pdg.lbl.gov/2014/reviews/rpp2014-rev-particle-detectors-accel.pdf>
- [9] 下雅意 美紀、谷川 祥子 卒業論文「シンチレーションカウンターのデジタルオシロスコープ読み出し」奈良女子大学 (2013 年度)
- [10] 瓜生 奈都美、福井 千尋 卒業論文「デジタルオシロスコープによるシンチレーションカウンターの高速サンプリング読み出しの研究」奈良女子大学 (2012 年度)
- [11] 木原 理美、脇田 紗弥佳 卒業論文「MPPC 読み出しによるシンチレーションカウンターを用いた荷電粒子検出」奈良女子大学 (2010 年度)
- [12] 小池 博子、米山 知佐子 卒業論文「シンチレーションカウンターの MPPC の読み出し」奈良女子大学 (2008 年度)
- [13] 辻 知佳、宮田 香織 卒業論文「MPPC の基本特性およびシンチレーションカウンターへの応用」奈良女子大学 (2007 年度)
- [14] 五味 慎一 修士論文「半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築」京都大学 (2008)