

平成28年度 卒業論文

大きな電離損失をする粒子の探索実験

Heavy Ionized Particle

神戸大学 理学部 物理学科
粒子物理学研究室

酒井貴義 堀口楠日

2017年3月28日

目次

目次	1
第1章	
原理	3
1.1	
背景	3
1.2	
探索原理	3
1.3	
目標	5
第2章	
実験装置	6
2.1	
装置のセットアップ	6
2.1.1	
粒子を観測する装置	6
2.1.2	
装置の配線	7
2.2	
電離損失測定	7
2.2.1	
電離損失測定に使用したシンチレータ	7
2.2.2	
MPPC	9
2.2.3	
EASIROC	9
2.3	
TOF 測定	10
2.3.1	
プラスチックシンチレータ	10
2.3.2	
TDC の測定	12
第3章	

	実験方法	16
3.1	測定方法	16
3.1.1	トリガ	16
3.2	電離損失測定装置の較正	17
3.2.1	PMT 用高電圧の決定	17
3.2.2	MIP ピークを用いたゲイン補正の原理	20
3.2.3	ゲイン調整	20
第 4 章		
	解析	23
4.1	クラスタアルゴリズム	23
4.1.1	クラスタアルゴリズムの開発	23
4.1.2	クラスタの個数とエネルギー損失	24
4.2	TOF	25
第 5 章		
	実験結果	27
第 6 章		
	まとめ	29
謝辞		30

第1章 原理

1.1 背景

粒子	電荷
μ	± 1
π	$\pm 1, 0$
K	$\pm 1, 0$
p	1

表 1.1: 既知の宇宙線の電荷

我々の実験の目的は、電離損失の大きい粒子である多電荷の粒子を、宇宙線から探索することである。既知の宇宙線の電荷は $\pm 1, 0$ である（表 1.1）。したがって、多電荷の粒子を宇宙線から探索することは新粒子発見へとつながる可能性があり、これが今回の実験の背景である。新粒子ではない多電荷の宇宙線として、アルファ線、鉄の原子核などがあるが、これらの粒子は速度が小さいため、同じ電離損失であれば、新粒子（速度が大きく、多電荷の粒子）と判別することができる（測定原理にて後述）。

1.2 探索原理

多電荷粒子の探索をするには、まず大きな電離損失をする粒子の探索を行う。電荷を持った粒子が物質に入射すると、物質中の電子と衝突し、その運動エネルギーを電子に奪われる。これを電離損失という。電子との衝突は Coulomb 力によって引き起こされるため、Coulomb 力による影響が大きくなるほど、電離損失量は増加する。Coulomb 力による影響が大きくなるのは、電荷が大きい、または、速度が小さいという 2 つの要因がある。電荷が大きいと、受ける Coulomb 力が大きくなることで電離損失が大きくなり、速度が小さいと、物質の通過時間が長くなり、Coulomb 力による力積が大きくなることで、電離損失が大きくなる。

宇宙線の電離損失は、今回の実験で対象とする宇宙線の場合、図 1.1 で赤く囲まれた範囲で、Bethe-Bloch の式 (1.1) に従う範囲になる。式 (1.1) によると、電離損失は粒子の質量にはほとんど依存せず、電荷と速度に依存する、すなわち、電荷が大きいと増加し、さらに速度が小さいと増加することがわかる。

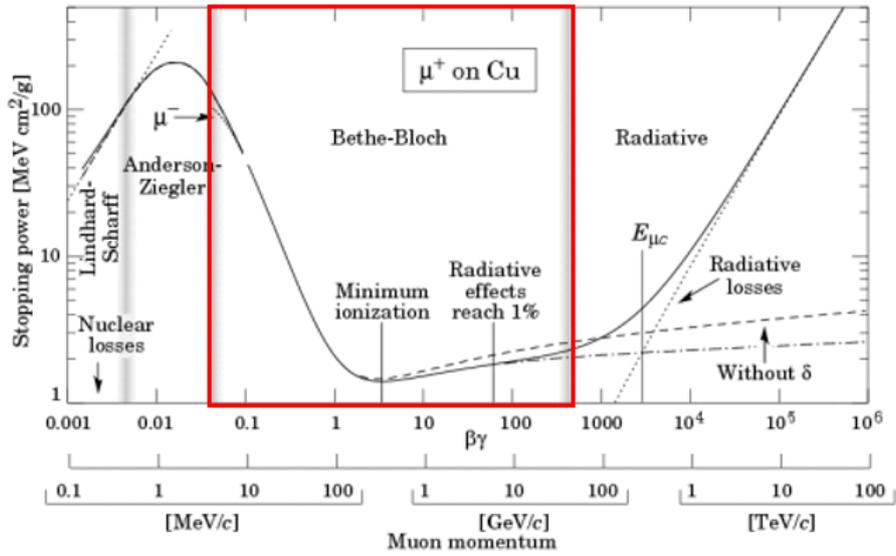


図 1.1: μ 粒子の運動量に対する電離損失

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

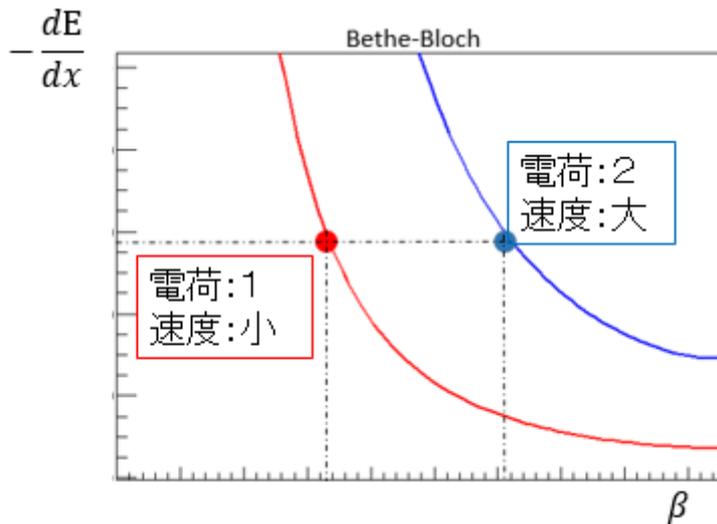


図 1.2: 多電荷の粒子と速度の小さい粒子の電離損失が同じ場合

したがって、多電荷の粒子を見つけるには、大きな電離損失をする粒子を観測し、その中から速度の小さな粒子を判別する必要がある(図1.2)。本実験では、電離損失の計測と同時に、粒子の飛翔時間 (Time Of Flight TOF) の測定も行い、速度の小さな粒子との判別を行う。図1.1の赤く囲まれた範囲を見ると、電離損失は、速度が大きくなるにつれ最初は急激に減少し、あ

る速度からは増加に転じるが、増加量は非常に緩やかになり、一定とみなせる。このほぼ一定とみなせる電離損失を、Minimum Ionization（最小電離損失）といい、多くの宇宙線の電離損失はこの値となる。最小電離損失をする粒子を Minimum Ionizing Particle（MIP）という。宇宙線 μ 粒子の場合、MIP は 1 g/cm^2 の物質当たりでおよそ $1.0 \sim 2.0 \text{ MeV}$ である。特にシンチレータは水素を多く含むため、ほぼ 2 MeV/cm^2 となる。

1.3 目標

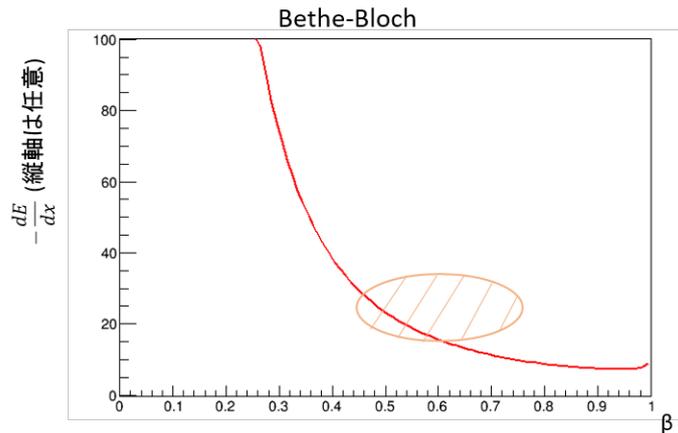


図 1.3: Bethe-Bloch と今回注目した粒子の速度とエネルギー損失

単位電荷よりも大きい電荷をもつ粒子は、その速度が光速に近ければ、電離損失を用いて、電荷が 1 の粒子と区別することができる。

図 1.3 の曲線は、Bethe-Bloch の式から導出した、速度とエネルギー損失の関係である。今回の実験で用いる宇宙線を構成する粒子のほとんどは、光速に比較的近い粒子であるため、電離損失は小さい。単位電荷より大きい電荷をもつ粒子を探す装置の性能を調べるために、図 1.3 の斜線部付近、すなわち光速に対して比較的速度が遅くエネルギー損失の大きい粒子 (単位電荷を含む) があるか調べた。

第2章 実験装置

2.1 装置のセットアップ

2.1.1 粒子を観測する装置

本実験では、粒子の電離損失および速度を測定するため、粒子を捉える実験装置を図 2.1 のように構築した。図 2.2 の装置には図 2.1 の E_1 と E_2 , T_2 が組み込まれている。また、図 2.1 の T_1 は図 2.3 の棚の上に固定されている。 T_1 の中心は E_1 や E_2 , T_2 の中心点を結んだ延長線上にある。

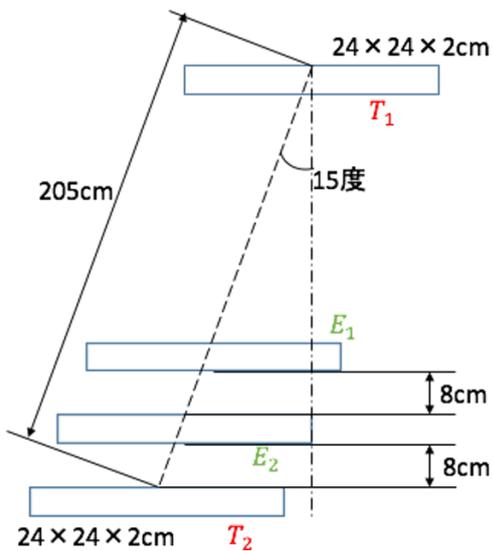


図 2.1: 装置の配置



図 2.2: 粒子を捉える装置



図 2.3: 実験場所

2.1.2 装置の配線

それぞれの測定装置を図 2.4 のようにセットアップした。各測定装置の詳しい説明は後述。

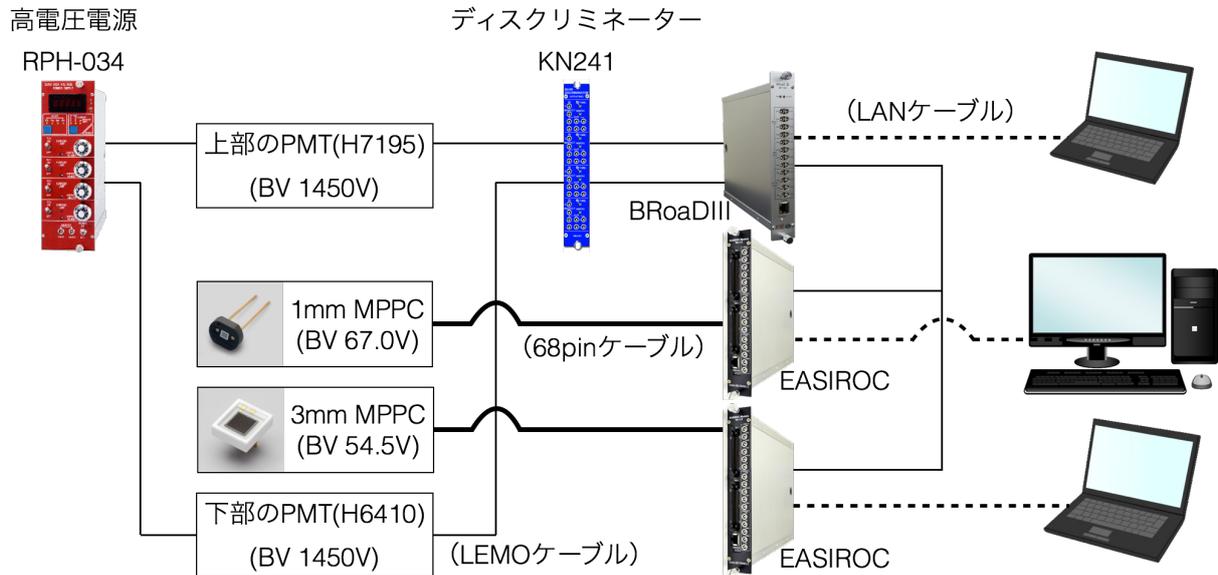


図 2.4: 概念図

なお、図 2.4 における線の種類はケーブルの種類に対応する。また、図 2.4 で使用されている実験装置（モジュール）を表 2.1 に示す。

表 2.1: モジュールの名称，型番，メーカー（販売元）

モジュール	型番	メーカー（販売元）
高電圧電源	RPH-034	REPIC 林栄精器株式会社
ディスクリミネーター	KN241	(株式会社カイズワークス)
BRoaDIII		株式会社 BeeBeansTechnologies
EASIROC		浜松ホトニクス株式会社

PMT に接続されているディスクリミネーターの設定は表 2.2 の通り。

表 2.2: ディスクリミネーターの設定

Threshold	63.0 mV
Width	30ns

2.2 電離損失測定

2.2.1 電離損失測定に使用したシンチレータ

直付け型シンチレータ (図 2.5) 先端に長さ 5 cm の円錐状のライトガイド (アクリル樹脂) を取り付け、光漏れがないように白色の反射塗料を塗った棒状プラスチックシンチレータ、

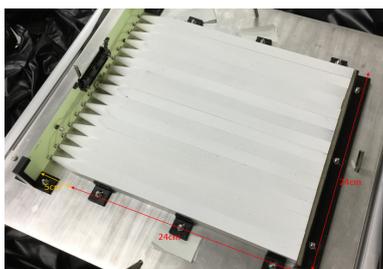


図 2.5: 直付け型シンチレータ

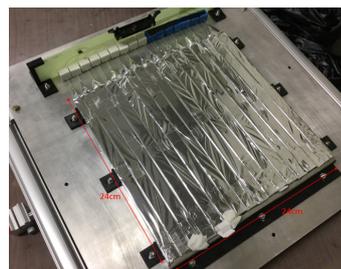


図 2.6: ファイバー型シンチレータ

(厚み 1.5cm × 幅 1.5cm × 長さ 24cm) を 16 本用意した。先が MPPC の受光面が接するように設置する。これを直付け型シンチレータと名付けた。シンチレータの占める面積は 24×24 cm である。

ファイバー型シンチレータ (図 2.6) 今年度、私たちが作成したシンチレータである。穴の開いた棒状のシンチレータ (厚み 1.4cm × 幅 1.5cm × 長さ 24cm) に、波長変換ファイバーを差し込み、反射材で包んだものを 16 本作成した。特に MPPC の受光面から最も遠い面には、同面積 (1.5cm × 1.4cm) のアルマイトを張り、シンチレーション光の漏れに注意した。シンチレーション光は、反射材によって波長変換ファイバー内に入り、全反射を繰り返しながら MPPC の受光面まで進む。光ファイバーが受光面に接するように、3D プリンタを用いてコネクタを作成した。シンチレータの占める面積は 24×24 cm である。

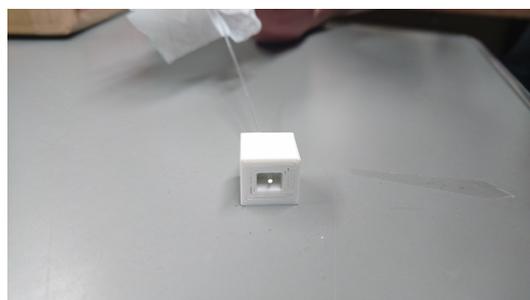
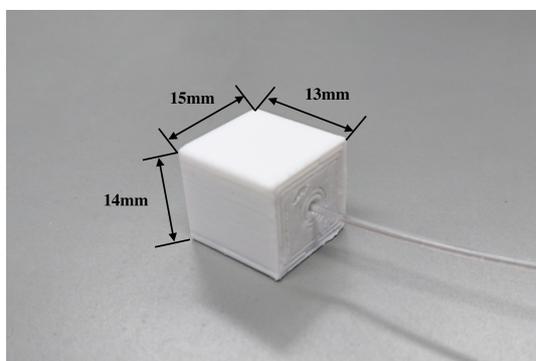


図 2.7: 3D プリンタで作成したコネクタ

2.2.2 MPPC

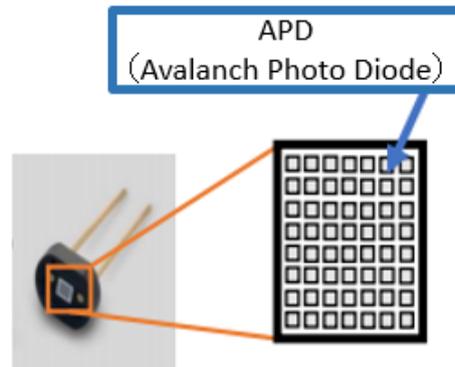


図 2.8: MPPC

MPPCとは Multi Pixel Photon Counter の略称で、浜松ホトニクス社により開発された半導体光検出器である。多数の APD ピクセルが受光面に並んでいて、入射光が微弱な時に優れたフォトカウンティング能力を持つ。半導体検出器であるため磁場による影響を受けず、優れた時間分解能を持つ。

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

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

2.2.3 EASIROC

電離損失を計測するために、EASIROC と呼ばれるモジュールを用いた。このモジュールは MPPC にバイアス電圧を印加したり、MPPC が観測した光量を ADC 値として測定したりできる。TCP をサポートするため、凡用のネットワーク機器として扱いが可能である。



図 2.9: EASIROC

2.3 TOF 測定

2.3.1 プラスチックシンチレーター

今回の実験では、粒子の速度を測定するため、2つのプラスチックシンチレーター（光電子増倍管，PMT）を使用した。これらのPMTは図2.4のように、ディスクリミネーターを通してBRoaDIIIに接続されている。このモジュールでは複数のデジタル信号を（ANDやORなどを取ることで）加工したり，パルスを自由に組み立てたりすることが可能である。TCPによってその動作をコントロールできる。



図 2.10: 装置上部のシンチレーター



図 2.11: 装置下部のシンチレーター

表 2.3: 上部の PMT 型番

メーカー	浜松ホトニクス
型番	H7195
NO.	RD8032

表 2.4: 下部の PMT 型番

メーカー	浜松ホトニクス
型番	H6410
NO.	RD7804

表 2.5: 上部と下部のプラスチックシンチレーターのスペック

アッセンブリ外径	$\phi 60$ mm
PMT 管径	$\phi 51$ mm
内臓 PMT 型名	R329-02
受光面形状	円形
受光面サイズ	$\phi 46$ mm
ダイノード構造	ラインフォーカス
陽極 - 印加電圧	-2000 V

2.3.2 TDC の測定

粒子の速度を測定するため、BRoaDIIIを使用する。このモジュールでは複数のデジタル信号を（ANDやORなどを取ることで）加工したり、パルスを自由に組み合わせたりすることが可能。

また、このモジュールではデジタル信号はクロック信号で時間方向にも離散化されている。そのため、このモジュールは時間分解能を持ち、クロックが1GHzなので、1nsの分解能がある。



図 2.12: BRoaDIII

粒子の速度を測定するための回路をBRoaDIIIで設計したい。①のパルスと②のその時間差の分の幅を持つパルスを出力し、そのTDCを測定する。①と②のパルスのORを取り、③でパルスを2個発生させなければならないため、②は十分にDelayを取る必要がある。また、1つ目のトリガーを測定している間に2つ目のトリガーがかかった際に、その2つ目のトリガーを測定しないようにする必要性もある。そこで、図 2.14 と図 2.15 のように設計した。回路の各素子の詳細は表 2.6～2.10 に示す。

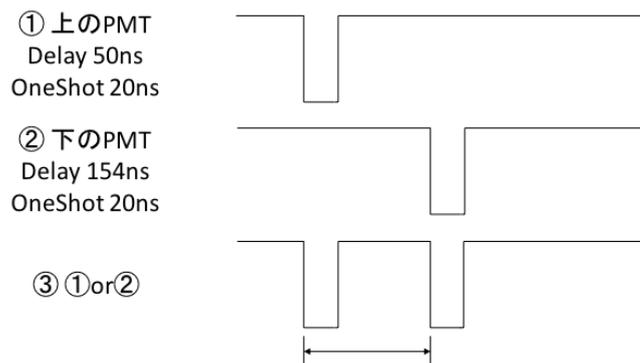


図 2.13: 設計したい TDC の概念図

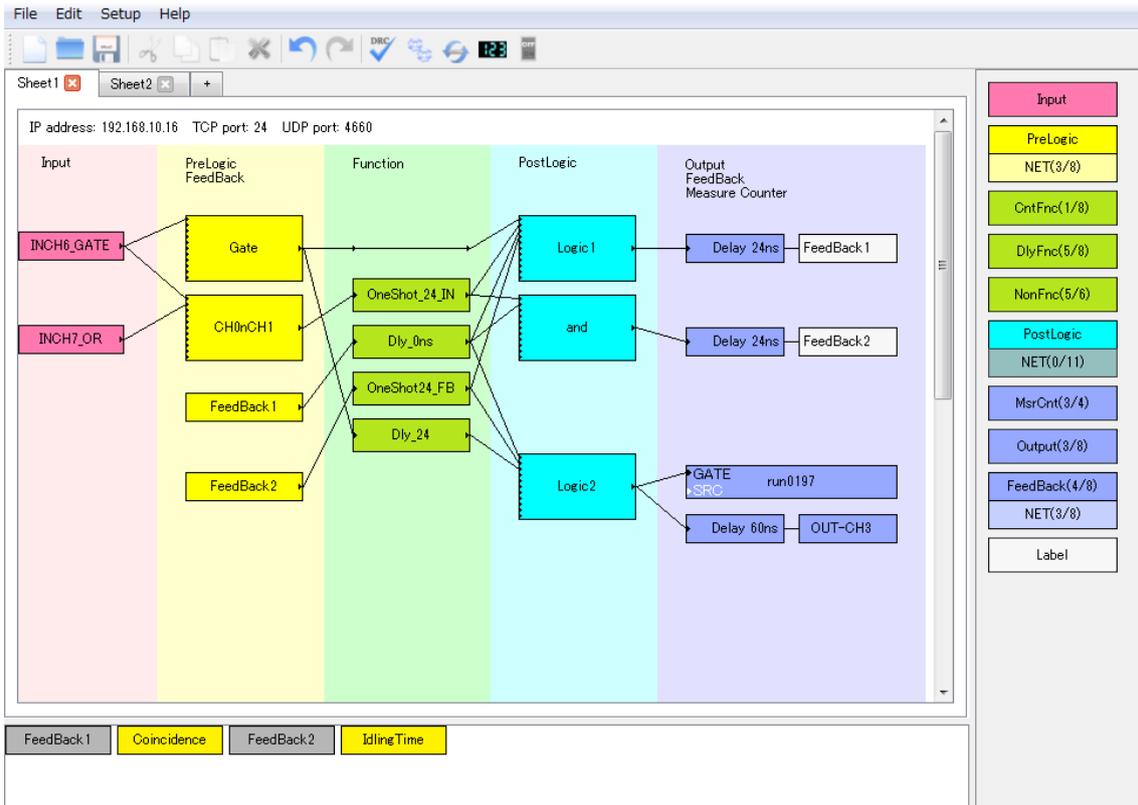


图 2.14: TDC 測定回路 Sheet1

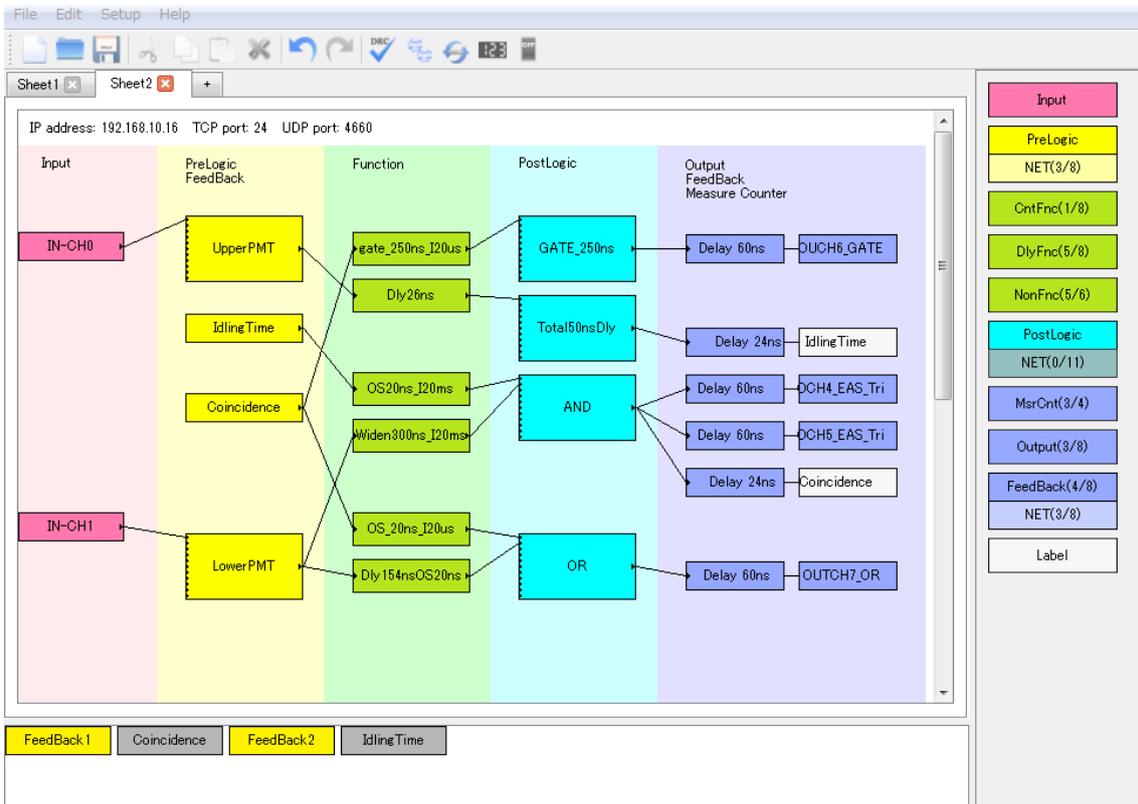


图 2.15: TDC 測定回路 Sheet2

表 2.6: Sheet1, Sheet2 の Input

Input	接続元
INCH6_GATE	OUCH6_GATE
INCH7_OR	OUTCH7_OR
IN-CH0	上部の PMT
IN-CH1	下部の PMT

表 2.7: Sheet1, Sheet2 の PreLogic

PreLogic Feedback	Logic
GATE	INCH6_GATE
CH0nCH1	INCH6_GATE and INCH7_OR

表 2.8: Sheet1, Sheet2 の Function

Function	Logic	
OneShot_24_IN	Mode	One-Shot Function (Non-Retriggerable)
	Pulse Width	24nsec
	Minimum Idle Time	6nsec
Dly_0ns	Delay	0ns
OneShot24_FB	Mode	One-Shot Function (Non-Retriggerable)
	Pulse Width	24nsec
	Minimum Idle Time	5nsec
Dly_24	Delay	24ns
gate_250ns_I20us	Mode	One-Shot Function (Non-Retriggerable)
	Pulse Width	250nsec
	Minimum Idle Time	20 μ sec
Dly26ns	Delay	26ns
OS20ns_I20ms	Mode	One-Shot Function (Non-Retriggerable)
	Pulse Width	20nsec
	Minimum Idle Time	20msec
Widen300ns_I20ms	Mode	One-Shot Function (Non-Retriggerable)
	Pulse Width	300nsec
	Minimum Idle Time	20msec
OS_20ns_20 μ s	Mode	One-Shot Function (Non-Retriggerable)
	Pulse Width	20nsec
	Minimum Idle Time	20 μ sec
Dly154nsOS20ns	Mode	Delayed One-Shot (Non-Retriggerable)
	Delay Time	154nsec
	Pulse Width	20nsec

表 2.9: Sheet1, Sheet2 の Postlogic

PostLogic	Logic
Logic1	(OneShot_24_IN or Dly_0ns) and Gate and (not OneShot24_FB)
Logic2	Dly_0ns and (not OneShot24_FB) and Dly_24

表 2.10: Measure Counter: run0197

GATE	Measure During True
SRC	Gate Time

このように PMT と回路設計のセットアップで2つの PMT に 1,450V のバイアス電圧を印加したとき，オシロスコープで図のような TDC の波形が確認できた。確かに，CH1 の2つの波形の立ち下がりの幅の分だけの幅を持ったパルスが CH4 で見られる。

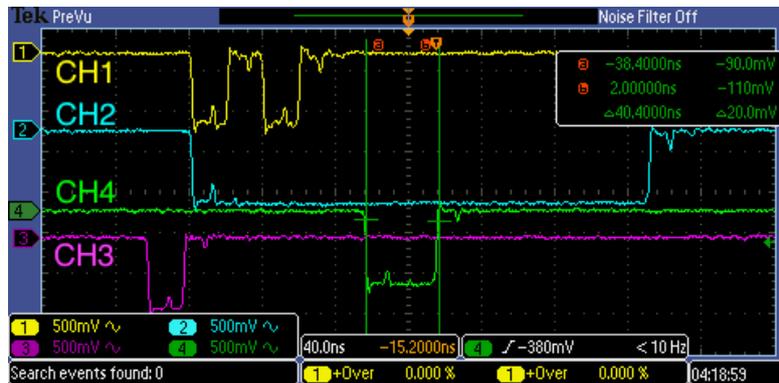


図 2.16: オシロスコープで確認された TDC の波形

表 2.11: 図 2.16 の CH

CH1	2つの PMT の OR
CH4	CH1 の2つのパルスの TDC

第3章 実験方法

3.1 測定方法

3.1.1 トリガ

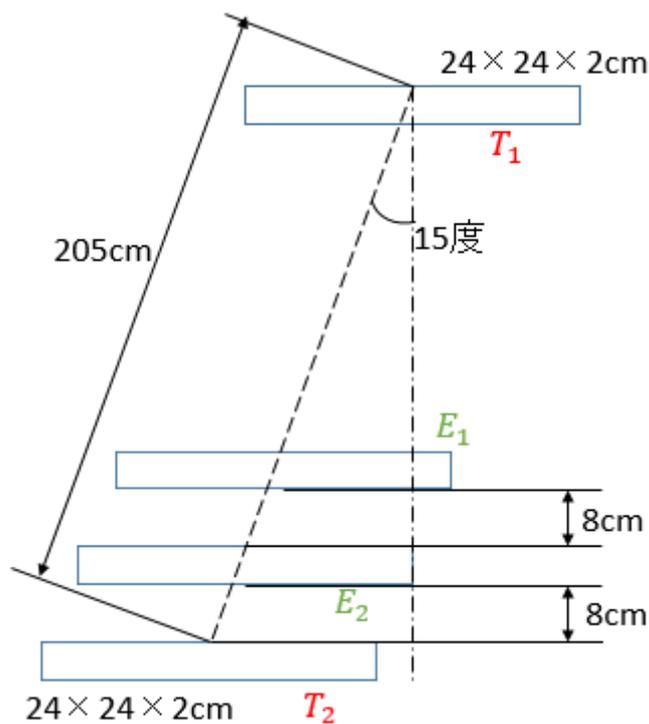


図 3.1: シンチレータの配置

今回の実験では合計4枚の板状プラスチックシンチレータを用いた。TOF測定用のシンチレータ T_1, T_2 及び電離損失測定用のシンチレータの E_1, E_2 であり、図3.1のように配置されている。 T_1, T_2 は E_1, E_2 を挟むように設置されている。 T_1, T_2 を通った宇宙線によるトリガを E_1, E_2 にかけることで、4つすべてのシンチレータを通った宇宙線に対して、TOFと電離損失を測定することができる。また、シンチレータの設置場所として、物置棚を使用したため、4枚のシンチレータの配置が15度の傾きをもっているが、宇宙線のレートは、日本の緯度では $\cos^2 \theta$ (θ は天頂角) に比例するので大きな影響を与えない。

3.2 電離損失測定装置の較正

3.2.1 PMT 用高電圧の決定

本測定において高電圧電源は1,450Vに設定したが、これは宇宙線のレートの測定によって決定した。その測定を以下に述べる。

BRoaDIIIで宇宙線を測定するための動作回路を設計した。また、この時にファイバー読み出し型シンチレータ（図2.6参照）を使用した。

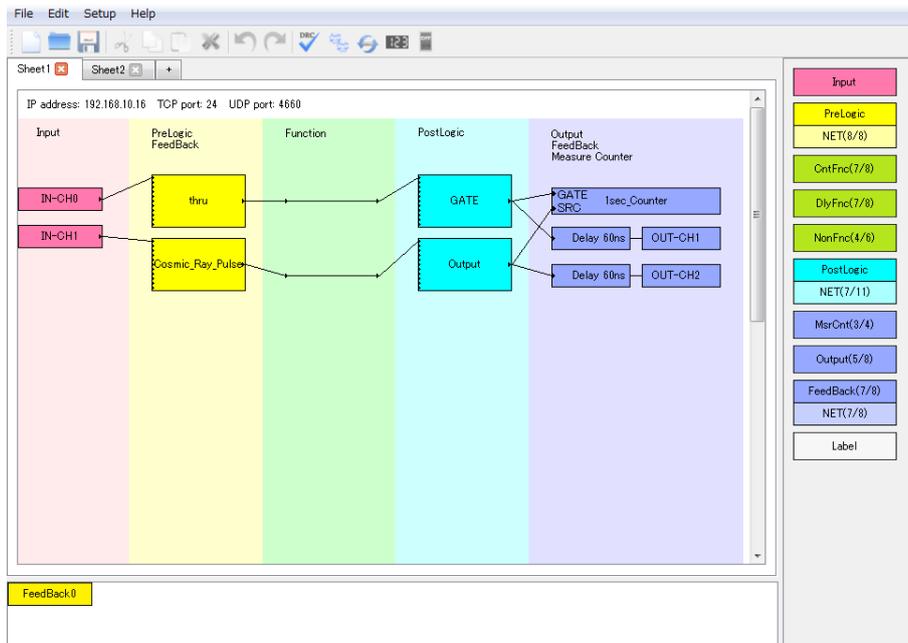


図 3.2: 宇宙線測定回路 Sheet1

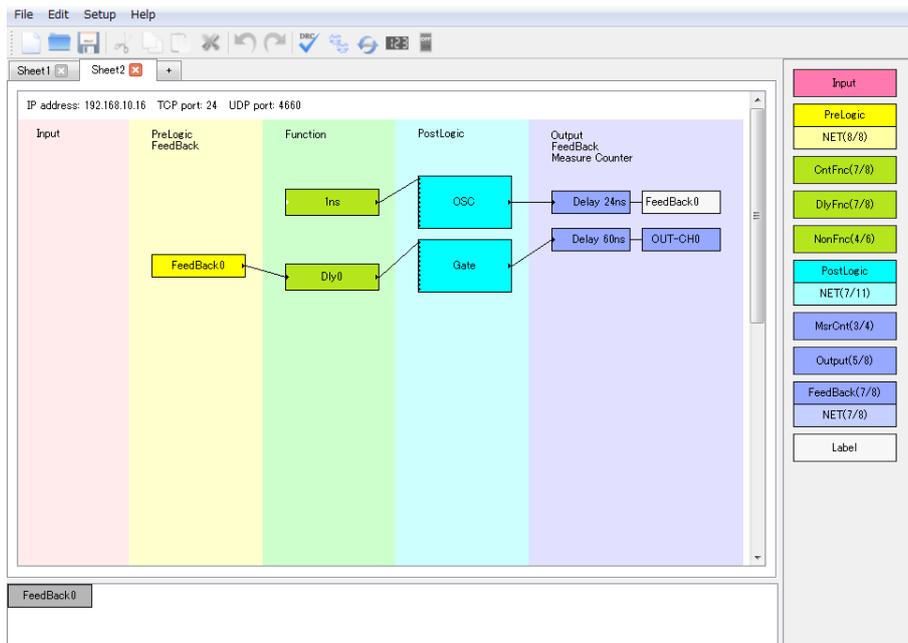


図 3.3: 宇宙線測定回路 Sheet2

表 3.1: Sheet1, Sheet2 の Input

Input	接続元
IN-CH0	OUT-CH0
IN-CH1	シンチレーター

表 3.2: Sheet1, Sheet2 の PreLogic

PreLogic Feedback	Logic
thru	IN-CH0
Cosmic_Ray_Pulse	IN-CH1

表 3.3: Sheet1, Sheet2 の Function

Function	Logic	
1ns	Mode	Oscillator Function
	True Width	1 sec
	False Width	1000000nsec
Dly0	Delay	0ns

表 3.4: Sheet1, Sheet2 の Postlogic

PostLogic	Logic
GATE	thru
Output	Cosmic_Ray_Pulse

表 3.5: Measure Counter: 1sec_Counter

GATE	Measure During True
SRC	Number of times that True appears

この動作回路では、BRoaDIII の OUT-CH0 と IN-CH0 をリモケーブルで繋ぎ、シンチレーターからの信号を IN-CH1 に配線する。なお、OUT-CH1 と OUT-CH2 はオシロスコープで視認するために設けた。回路の各素子の詳細は表 3.1~3.5 に示す。

これにより、図 3.4 の測定結果を得た。実験的に、シンチレーターにかかる電圧が低いと宇宙線を十分に観測しきれず、一方電圧が高いとノイズが多くなってカウント数が大きくなる。そのため、電圧-レート のグラフは、極値を持たない 3 次多項式のようなになる。図 3.4 のプロットを 3 次多項式で近似すると、図 3.4 の曲線になる。その式は、

$$f(x) = 3.59 \times 10^{-6}x^3 - 1.56 \times 10^{-2}x^2 + 22.7x - 1.10 \times 10^4 \quad (3.1)$$

で表される。式 (3.1) の変曲点は,

$$x = -\frac{-1.56 \times 10^{-2}}{3 \cdot 3.59 \times 10^{-6}} \approx 1450 \text{ [V]}$$

である。この変曲点における, 接線の傾きは 0.17 であり, すなわち, $9^\circ \sim 10^\circ$ のプラトーであるが, この変曲点が目的の電圧にふさわしい。よって, 1,450V を本測定の PMT の高電圧とした。

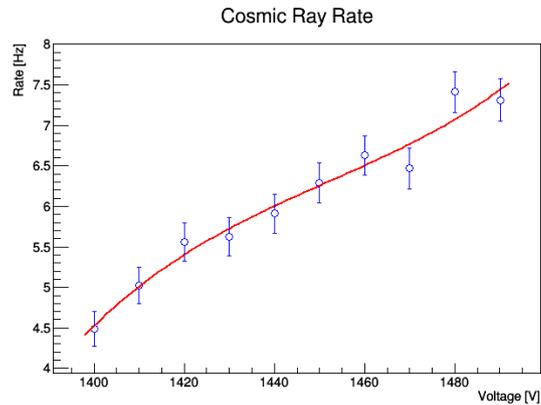


図 3.4: 宇宙線測定

3.2.2 MIP ピークを用いたゲイン補正の原理

前述の MIP によるピークの ADC 値 (以下ゲインとする) は, MPPC およびシンチレータが原因によって異なる。そこで, ある一つのチャンネルのゲインに, ほかのゲインが一致するように較正を行う。またこのゲインを 1MIP という単位とする。本実験では, なるべく大きな電荷の粒子を探索できるように, 1MIP は最も低いゲインである, 印加電圧 67.01V の時の, チャンネル 3 のゲインを 1MIP とした。

ch3

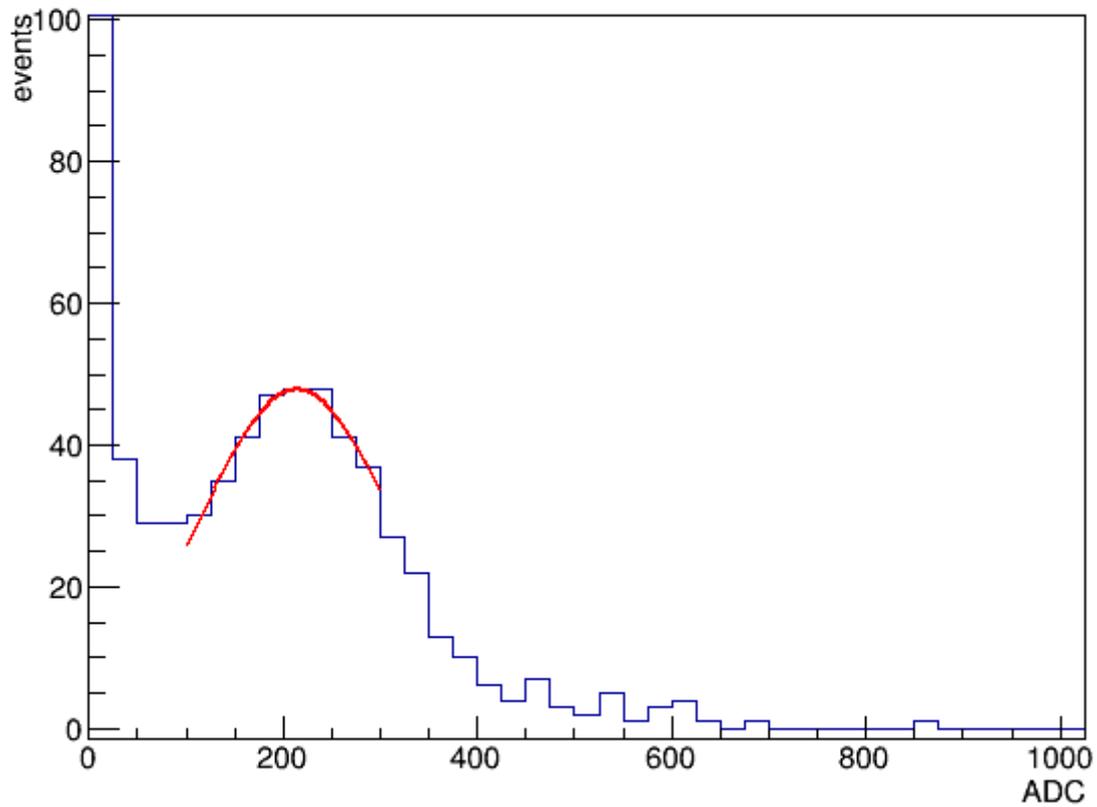


図 3.5: チャンネル 3 の ADC ピーク

3.2.3 ゲイン調整

ゲインは、MPPC への入射光量だけでなく、印加電圧に依存する。MPPC への印加電圧を変化させゲインを変化させ、それぞれのゲインをプロットすると、1 次式を得る (図 3.6)。

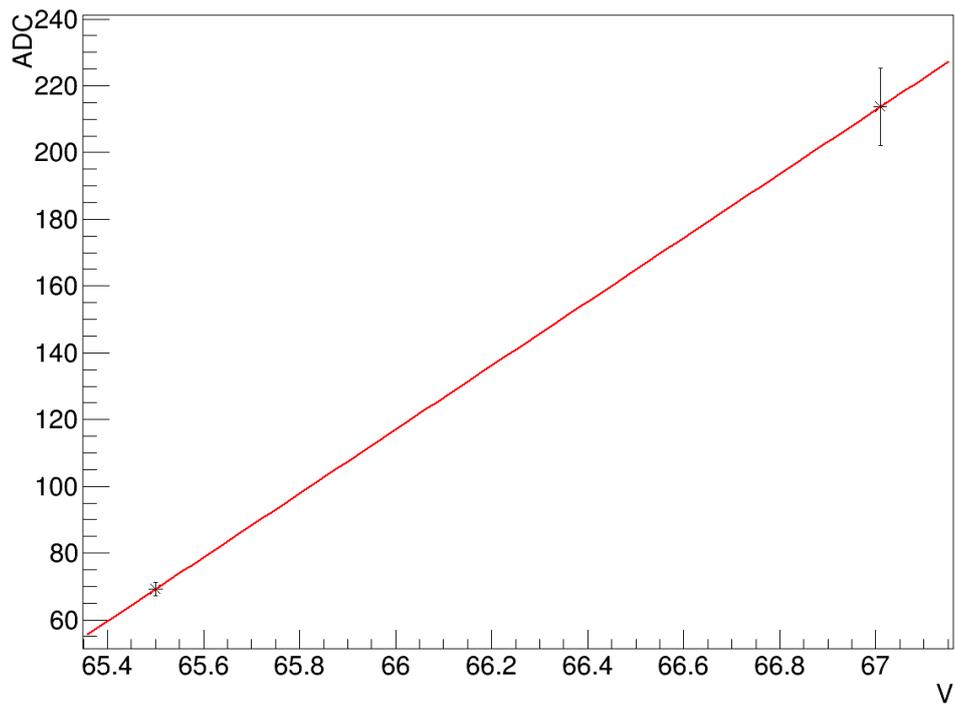


図 3.6: ゲインのプロット

最も低い3チャンネルのゲインをそれぞれのチャンネルの1次式に代入し、適切な印加電圧を得る (図 3.7)。

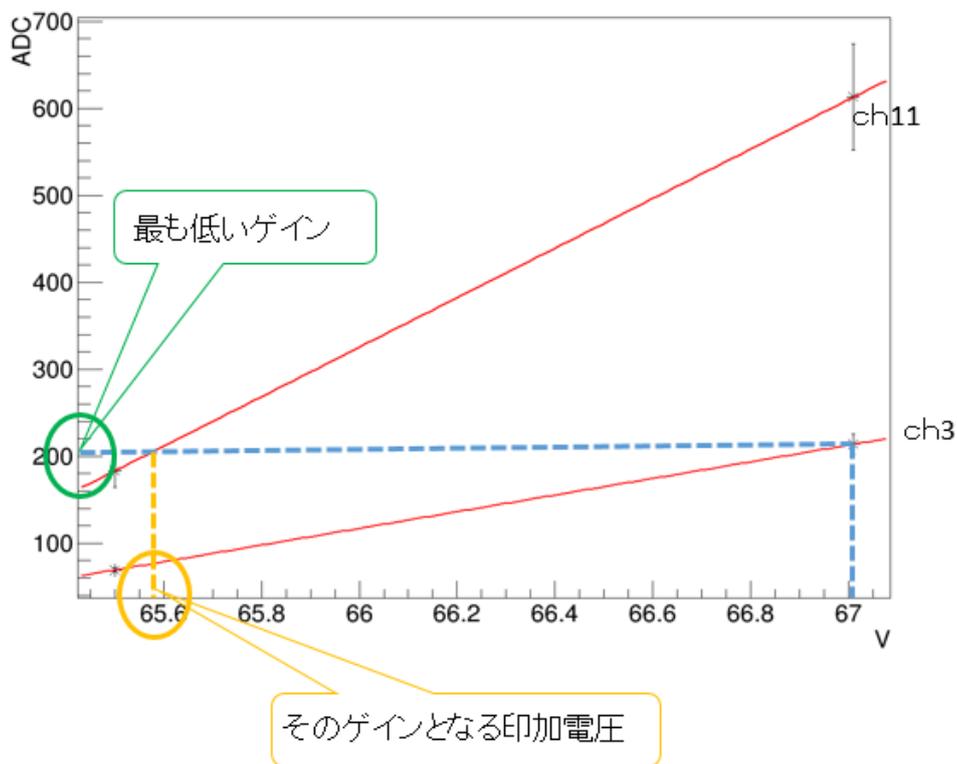


図 3.7: 1次式によるキャリブレーション

結果を図 3.8 に示す。

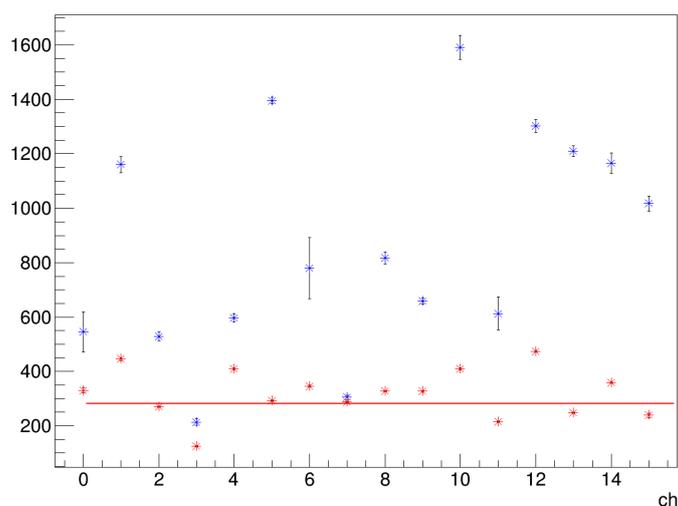


図 3.8: 全 16 チャンネルの印加電圧

印加電圧を調節したが、ゲインのずれはまだ生じていた。67.01V での測定におけるゲインの統計誤差が大きく、正確な 1 次式が得られなかったためだと考えられる。

解析のために、ゲインをそろえる以下の係数を用いた。最も低い 3 チャンネルのゲインを 1 とした係数である。

チャンネル	係数
0	2.64618
1	3.56683
2	2.16376
3	1
4	3.27534
5	2.33877
6	2.76424
7	2.30265
8	2.62238
9	2.61372
10	3.27169
11	1.72043
12	3.78817
13	1.99068
14	2.8746
15	1.90994

表 3.6: ゲイン調整係数

第4章 解析

4.1 クラスタアルゴリズム

図 4.1 は各チャンネルごとのエネルギー損失の例を表している。このように、エネルギー損失を測定する上で、多くのイベントで宇宙線による信号が複数のチャンネルにわたって現れた。これは、宇宙線が斜めに入射することで複数のシンチレータを通過したり、シンチレータ中に発生した光が隣のシンチレータに漏れたりすることが原因である。

赤枠で囲った部分は1粒子のクラスタであり、1粒子のエネルギー損失は各クラスタの積分値で与えられる。そのため、全チャンネルの総和をとるだけでは、1粒子のイベントなのか、2粒子以上のイベントなのか区別できない。1粒子のイベントと2粒子以上のイベントを区別するために、各クラスタを区別しそれぞれで和をとるクラスタアルゴリズムが必要である。

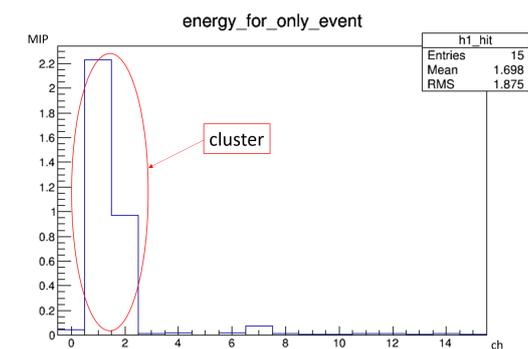


図 4.1: 各チャンネルごとのエネルギー損失

4.1.1 クラスタアルゴリズムの開発

以下の手順で各クラスタを区別するアルゴリズムを組んだ。

1. スレッシュホールド以下のチャンネルをゼロにする。スレッシュホールドはADC値で30とした。
2. ゼロもしくは谷になっている部分でチャンネルを区切る。谷のエネルギーは0とした。
3. 区切られた領域をそれぞれ積分し、クラスタとして保存する。

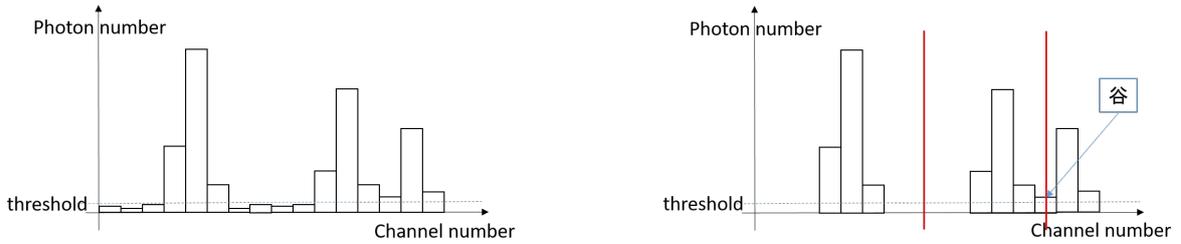


図 4.2: クラスタアルゴリズム

これにより各クラスタを区別して積分することができ、1粒子のエネルギー損失を測定することができる。

4.1.2 クラスタの個数とエネルギー損失

図 4.3 は各イベントのクラスタの個数分布である。クラスタが2個以上入るイベントはクラスタ1個のイベントの2%程度であった。クラスタがないイベントは2つの別の粒子が上下のトリガーシンチレータをそれぞれを通ったイベントが考えられる。

クラスタ1個当たりのエネルギー損失を図 4.4 に示す。横軸は mip 単位で 1mip 付近のピークをランダウでフィットするとこの時のピーク値は

$$0.90 \pm 0.15 \quad (4.1)$$

であり、ゲイン調整により1粒子のエネルギー損失がほぼ1 mip に規格化されている。

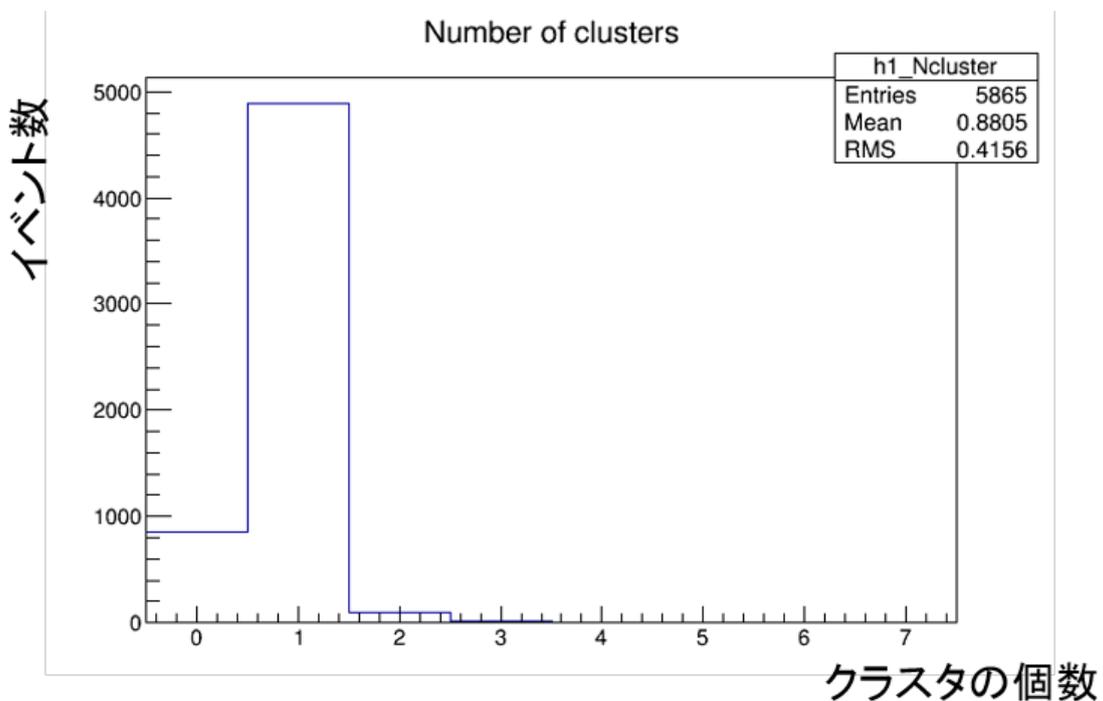


図 4.3: クラスタの個数分布

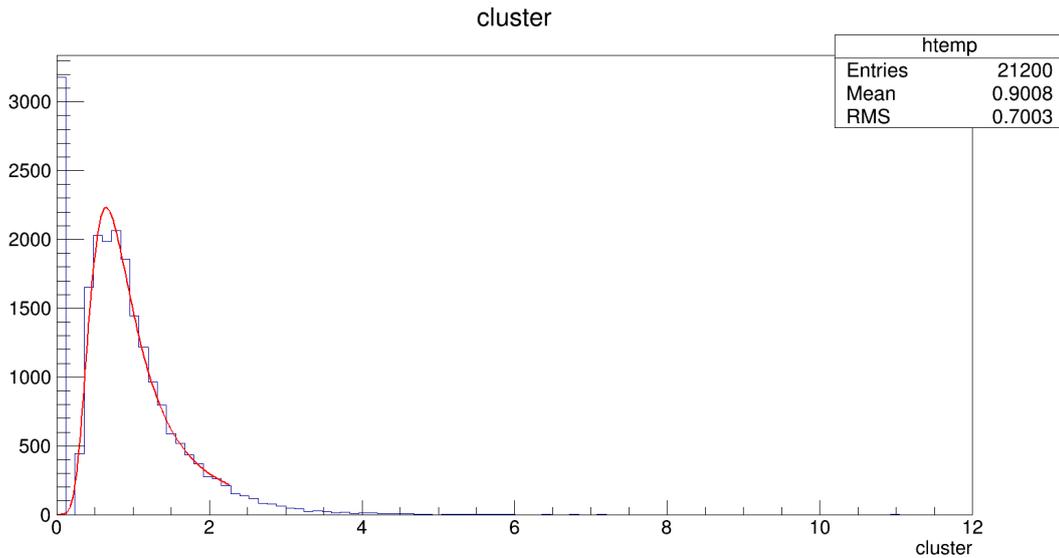


図 4.4: 1 クラスターのエネルギー損失

4.2 TOF

BRoaD で粒子の速度を測定した結果，図 4.5 のイベント数分布を得た。図に示す赤線は横軸 [39.0, 59.0] でガウシアンフィットを行ったものである。また，図 4.6 では，その縦軸（常用対数）を常用対数とした。

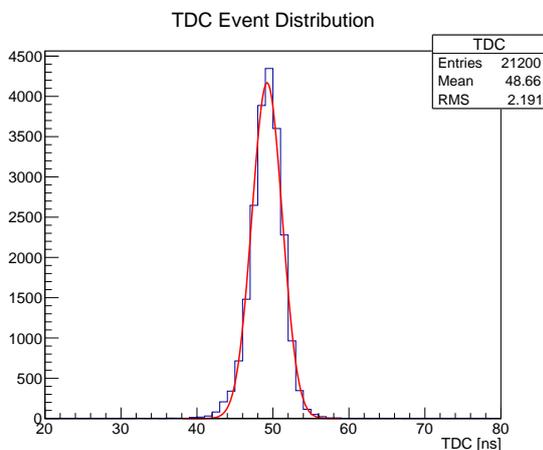


図 4.5: TDC イベント分布数

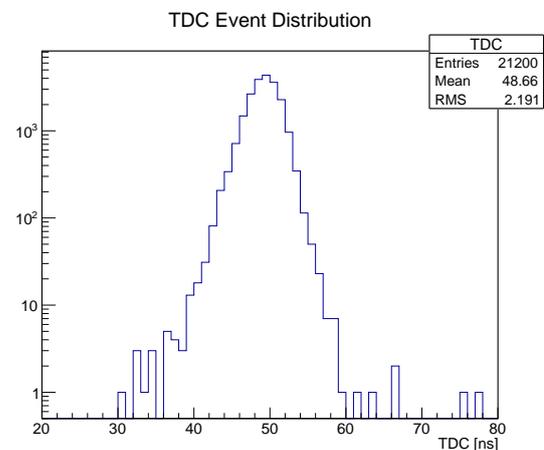


図 4.6: TDC イベント分布数（片対数）

図 4.5 におけるガウス分布の標準偏差は，root によって $\sigma \approx 2.0$ と解析された。この標準偏差を TDC の時間分解能（Time Resolution）とする。粒子の速度を v ，光速を c とすると，粒子の速度が v_σ のとき，相対速度 β_σ は，

$$\beta_\sigma = \frac{v_\sigma}{c} = \frac{2.05 \text{ [m]}}{3 \times 10^8 \text{ [m/s]} \cdot \frac{6.8 + 2.0 \text{ [ns]}}{10^{-9}}} \approx 0.8 \quad (4.2)$$

である。また、粒子の速度が光速から 2σ 離れている速度を $v_{2\sigma}$ としたとき、それに対応する $\beta_{2\sigma}$ は

$$\beta_{2\sigma} = \frac{v_{2\sigma}}{c} = \frac{2.05 \text{ [m]}}{3 \times 10^8 \text{ [m/s]} \times \frac{6.8 + 4.0 \text{ [ns]}}{3 \times 10^8 \text{ [m/s]}}} \approx 0.6 \quad (4.3)$$

である。ここで、式(4.2)と式(4.3)における2.05は、2つのプラスチックシンチレータ間の距離、2.05mである。また、6.8nsは、その距離2.05mを光速 ($3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$) が飛行するのに要する時間である。

$\beta > \beta_{2\sigma}$ の程度の速度では、光速と区別することが難しい。すなわち、本実験では相対速度 $\beta > 0.6$ の粒子を光速と区別することが困難であることがわかった。

この β を別の視点から考察する。図4.5の横軸 (単位 [ns]) を $\beta = \frac{v}{c}$ により β に変換したヒストグラムが図4.7である。図の赤線はrootで行った横軸 [0.58, 1.21] のガウシアンフィットである。この近似のガウス分布の平均値は $\beta_{MEAN} \approx 0.98$ 、標準偏差は $\sigma_\beta \approx 0.178$ である。よって、 β のグラフ (図4.7) から、式(4.2)と式(4.3)が示す結果が得られる。

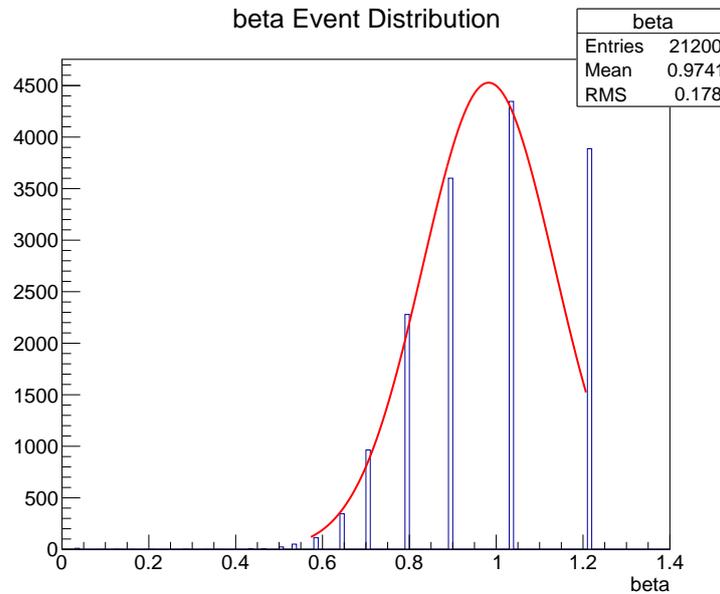


図 4.7: β のイベント分布

第5章 実験結果

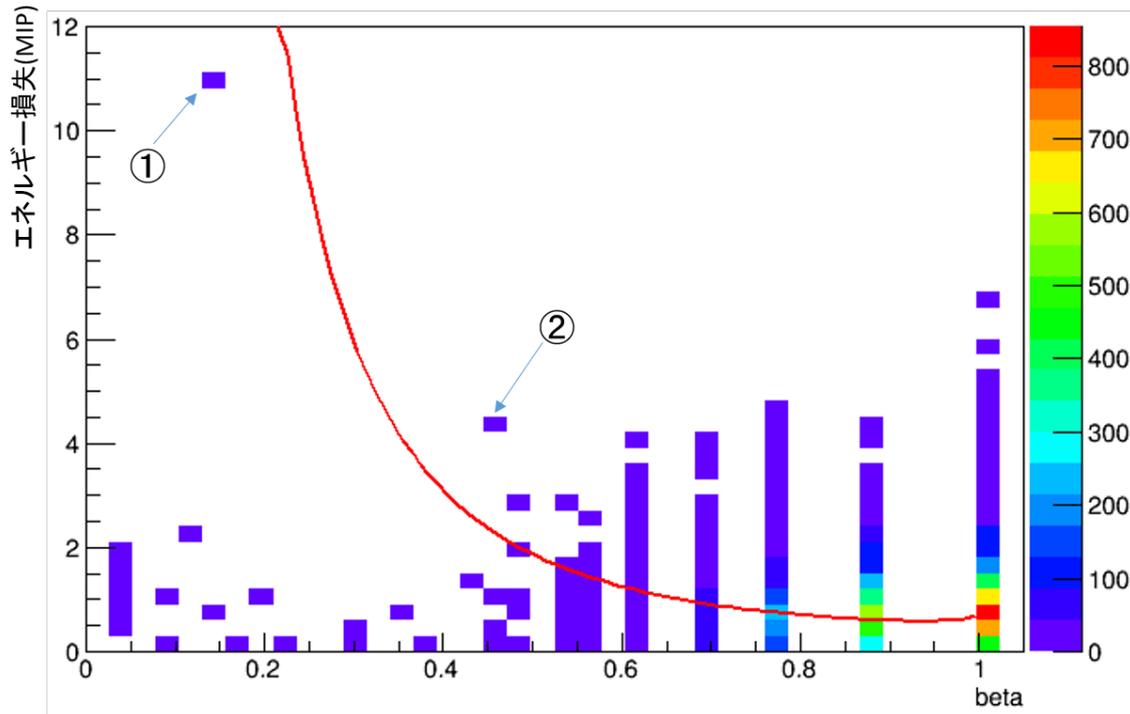


図 5.1: 粒子の速度とクラスターのエネルギーの相関

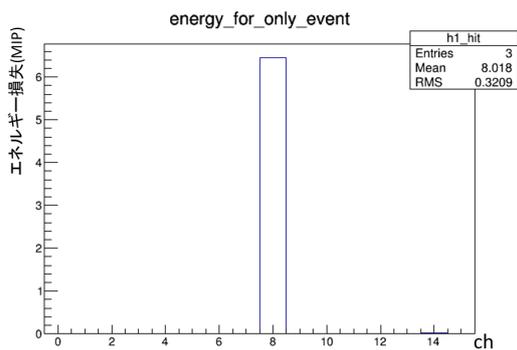


図 5.2: ① のイベントディスプレイ

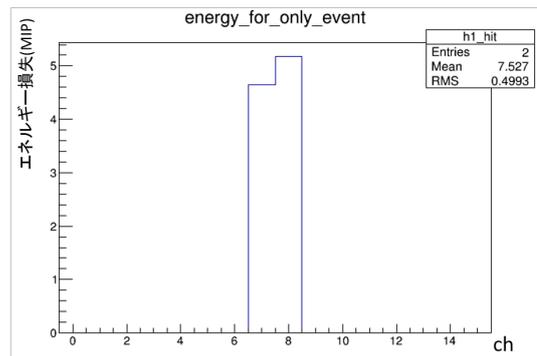


図 5.3: ② のイベントディスプレイ

速度とエネルギー損失の関係を図 5.1 に表す。赤曲線は Bethe-Bloch の式から導出した近似曲線である。 $0 < \beta < 0.6$ の領域でエネルギー損失が大きいイベントと思われるイベントは矢印で示した 2 つが考えられる。それぞれのイベントディスプレイは図 5.2, 5.3 である。これらは速度が小さくエネルギー損失の大きいイベントと言える。より多くの統計を取ることで近似

曲線付近にイベントが見られ、速度が小さくエネルギー損失の大きいイベントを調べることができたかもしれない。

第6章 まとめ

エネルギー損失測定のために、直付け型シンチレータのほかに、新たにファイバー型シンチレータを製作した。ファイバー型シンチレータのゲイン調整を行った。

また TOF を測定するためにプラスチックシンチレータを二枚導入した。両方のシンチレータを通ったイベントについて時間差を調べることで TOF を求めた。

クラスタアルゴリズムを開発し各クラスタを積分することでエネルギー損失を求めた。各イベントのエネルギー損失の1次元ヒストグラムを作成した。その分布は Landau で説明できる。

速度とエネルギー損失の相関図を作成した。速度が小さくエネルギー損失の大きいイベントは見つかったが、統計をためなければ十分性は認められない。

謝辞

本実験を進めるにあたり，ご指導を頂いた指導教員の山崎祐司教授¹に厚く御礼申し上げます。また，議論を通じて多くのご指摘や示唆を頂いた神戸大学粒子物理学研究室の皆様にご場をお借りして謝意を表します。

¹「崎」は旧字体。L^AT_EX では出力できないため代用する。