

アバランシェ・フォトダイオード読み出しによる  
鉛タングステン酸結晶を用いた  
電磁カロリメータの性能評価

広島大学理学部物理科学科  
クォーク物理学研究室  
B034444 溝口謙太

主査 杉立 徹 教授  
副査 高畠 敏郎 教授  
指導教官 杉立 徹 教授

平成19年2月9日

## 概要

我々の研究グループはアバランシェ・フォトダイオード (APD) と鉛タングステン酸結晶 (PWO) を組み合わせた電磁カロリメータを開発し、これを欧州原子核研究機構 (CERN) において建設中の ALICE 実験における高性能光子測定器 PHOS の素子として採用した。

PHOS 検出器では受光面積  $5 \times 5 \text{mm}^2$  の APD を採用したが、本研究では、新たに開発された受光面積  $10 \times 10 \text{mm}^2$  の APD を用いた電磁カロリメータの性能評価を行なった。受光面積が4倍になることで、光電子の統計的揺らぎに起因するエネルギー分解能が2倍よくなると期待され、その結果、より精密な測定が可能になるからである。

PWO+APD 素子9本を  $3 \times 3$  のブロックにして、電磁カロリメータを製作した。PHOS 検出器は、半導体ノイズの低減とPWOの発光量増大のため、 $-25$  で使用される。本研究でもその比較のため、特注の冷凍機にて $-25$  まで冷却し、受光面積  $10 \times 10 \text{mm}^2$  の APD と  $5 \times 5 \text{mm}^2$  の APD について宇宙線測定を行なった。その後、広島大学の超高速電子周回装置 (REFER) にて、 $150 \text{MeV}$  の電子ビームを使って、高エネルギー電子に対する性能評価を行なった。

# 目次

第1章	はじめに	11
第2章	背景	13
2.1	実験の目的	13
2.2	実験の概要	14
第3章	実験	15
3.1	実験装置	15
3.1.1	REFER	15
3.1.2	検出器系	16
3.1.3	セットアップ系	21
3.1.4	回路系	23
3.1.5	読み出し系	24
3.2	実験方法	25
3.2.1	宇宙線	25
3.2.2	実験準備	25
3.2.3	宇宙線測定	30
3.2.4	LEDを用いたAPDのゲイン測定	36
3.2.5	150MeV電子測定	36
第4章	解析	51
4.1	宇宙線測定	51
4.1.1	準備実験での宇宙線確認の定量化	51
4.1.2	受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ APD 付電磁カロリメータ	53
4.1.3	受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ APD 付電磁カロリメータ	53
4.2	150MeV電子線測定	57
4.2.1	ムーバーの位置較正	57
4.2.2	エネルギー較正	57
4.2.3	エネルギー分解能測定	61
4.2.4	電磁カロリメータのHV依存の測定	63
4.2.5	電磁カロリメータの位置依存の測定	64
4.2.6	電磁カロリメータの温度依存の測定	64
第5章	結果と考察	65
5.1	宇宙線測定	65
5.1.1	受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ APD 付き電磁カロリメータ	65

5.2	150MeV 電子線測定 . . . . .	67
5.3	誤差の伝播 . . . . .	73
第 6 章	結論	77

# 表目次

3.1	無機シンチレータの性質 ([1]) . . . . .	17
3.2	受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ の APD の宇宙線測定における適正 HV . . . . .	35
3.3	受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ の APD の宇宙線測定における適正 HV . . . . .	36
3.4	受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ の APD のムーバーの位置較正における適正 HV . . . . .	39
3.5	素子への HV とゲインの相関表 . . . . .	42
4.1	ゲイン 100 倍でのエネルギー較正の結果 (変換係数) . . . . .	58
4.2	ゲイン 300 倍でのエネルギー較正の結果 (変換係数) . . . . .	59
4.3	ゲイン 600 倍でのエネルギー較正の結果 (変換係数) . . . . .	59
4.4	ゲイン 700 倍でのエネルギー較正の結果 (変換係数) . . . . .	59
4.5	ゲイン 800 倍でのエネルギー較正の結果 (変換係数) . . . . .	60
4.6	電池で LV を印加した測定でのエネルギー較正の結果 (変換係数) . . . . .	60
4.7	-35 でのエネルギー較正の結果 (変換係数) . . . . .	60
4.8	宇宙線測定での変換係数 [MeV/P.H.ADC ch] . . . . .	61
4.9	宇宙線測定時の受光面積 APD のゲイン . . . . .	63
5.1	ゲイン 300 倍を与える HV 値でのペDESTALの幅 [MeV] . . . . .	67
5.2	HV スキャンの結果 . . . . .	68
5.3	エネルギー分解能の位置依存性:単位は [%] . . . . .	73

# 目次

1.1	クォークとレプトン	11
1.2	ゲージボソン	11
3.1	REFER 全体図:本実験は図中右下の実験エリアにて行なった。	15
3.2	PWO 結晶	17
3.3	ファイバーカウンター:金属の固定フレーム中に十字に交差する直径 2mm のファイバー状のプラスチックシンチレータ見える。	18
3.4	ファイバーカウンター (略図)	18
3.5	5 × 5mm <sup>2</sup> APD(左) と 10 × 10mm <sup>2</sup> APD(右)	19
3.6	プリアンプの仕様	19
3.7	PWO 結晶に接着された APD+プリアンプ:図のように PWO と APD を接着した。	20
3.8	PWO 結晶に接着された APD+プリアンプ:図のように PWO と APD を接着した	20
3.9	素子の完成形:側面は PWO の蛍光を閉じ込めるためと電磁遮蔽の目的でアルミ箔で覆っているが、前面は LED を用いた APD の動作確認を行なうことができるように開けてある。	20
3.10	PMT の原理 ([9])	20
3.11	特注の冷凍庫:図に示すように、冷凍庫にはビーム実験用の貫通穴とケーブル引出し穴がある。また冷凍庫下部のディスプレイにおいて温度設定などを行なう。	21
3.12	冷凍庫の中:冷凍庫内に貫通穴が確認できる。	21
3.13	ムーバーと PWO 結晶:ムーバーに 9 本の素子が乗っている。画面奥の青い装置がムーバーの制御装置で、付属のコントローラを接続することでムーバーを移動させることができる。	22
3.14	ムーバー in 冷凍庫:ムーバーに結晶 9 本分と同程度の重りを乗せている。実際の実験でもムーバーはこの図のように配置した。	22
3.15	ビーム軸 (上流) から見たムーバーの動作範囲	22
3.16	大気の厚さと宇宙線のフラックス:大気が厚くなるにつれて、質量の軽い粒子 (e など) はフラックスが急激に減少し、透過性の高い $\mu$ などはあまりフラックスの変化がない。	26
3.17	荷電粒子のエネルギー損失: $\mu$ や $\pi^\pm$ など、荷電 1 の粒子の MIP の値は、約 $2\text{MeV}/\text{gcm}^{-2}$ である。	26

3.18	受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ の APD による、LED シグナルの読み出し結果: 図の黄色い線が APD からのプリアンプ出力で、青い線が LED を光らせるために入力しているシグナルである。このとき、APD の出力シグナルの高さは 160mV である。 . . . . .	27
3.19	受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ の APD による、LED シグナルの読み出し結果: 図の黄色い線が APD からのプリアンプ出力で、青い線が LED を光らせるために入力しているシグナルである。このとき、APD の出力シグナルの高さは 260mV である。 . . . . .	28
3.20	HV スキャンによるプリアンプ出力の変化: 図の赤い点は APD に直接 LED の光を当てたときのゲイン変化。青い点は PWO+APD の PWO の前方から LED の光を当てたときのゲインの変化である。PWO と接着後も APD は正常に動作していることがわかる。 . . . . .	29
3.21	pre 宇宙線測定セットアップ: 受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ の APD が付いた素子(上)と $5 \times 5\text{mm}^2$ の APD が付いた素子(下)を上下に重ねて配置した。その上下を $20 \times 20\text{mm}^2$ のプラスチックシンチレータ(上)と $50 \times 50\text{mm}^2$ のプラスチックシンチレータ(下)で挟んだ。また、結晶の前方には LED を配置している。 . . . . .	29
3.22	初めて宇宙線を確認したオシロスコープの記録: 黄色の線が受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ の APD 付き素子、青色の線が受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ の APD 付き素子、ピンク色の線がトリガーのタイミングである。トリガーと同時に二つの素子から宇宙線のシグナルが出ている。 . . . . .	30
3.23	宇宙線確認実験での回路図: Dis は DISCRIMINATOR、Co は COINCIDENCE、Shaper は SHAPER AMPLIFIER、G.G は GATE GENERATOR である。 . . . . .	31
3.24	受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ の APD のシグナル@ $V_r$ 値: 縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の出力 ch である。 . . . . .	31
3.25	受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ の APD のシグナル@ $V_r-10V$ : 縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の出力 ch である。 . . . . .	32
3.26	受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ の APD のシグナル@ $V_r-20V$ : 縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の出力 ch である。 . . . . .	32
3.27	受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ の APD のシグナル@ $V_r$ 値: 縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の出力 ch である。 . . . . .	32
3.28	受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ の APD のシグナル@ $V_r-10V$ : 縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の出力 ch である。 . . . . .	33
3.29	受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ の APD のシグナル@ $V_r-20V$ : 縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の出力 ch である。 . . . . .	33
3.30	受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ の APD のシグナル@ $V_r$ : 縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の出力 ch である。クリアな宇宙線の MIP ピークが確認できる。 . . . . .	33
3.31	受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ の APD のシグナル@ $V_r-10V$ : 縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の出力 ch である。受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ ほどではないが、クリアな宇宙線の MIP ピークが確認できる。 . . . . .	34

3.32	宇宙線測定における冷凍庫内でのセットアップ: . . . . .	34
3.33	宇宙線測定における冷凍庫内のセットアップ2 . . . . .	34
3.34	宇宙線測定での回路図:Dis は DISCRIMINATOR、Co は COINCIDENCE、Shaper は SHAPER AMPLIFIER、G.G は GATE GENERATOR である。 . . . . .	35
3.35	150MeV 電子線測定実験でのセットアップ(概略図) . . . . .	37
3.36	冷凍庫内のカロリメータの様子(横から):カロリメータは電磁遮蔽のため、アルミ箔で覆っている。前面は LED での APD の動作確認を行なうことができるように開けている。 . . . . .	38
3.37	冷凍庫内のカロリメータの様子(斜め後ろから):ビーム実験用の貫通穴は遮光シートで遮光している。 . . . . .	38
3.38	ビーム出口と冷凍庫の間の様子(横から):ビーム起源のノイズを遮蔽するための壁。 . . . . .	39
3.39	ビーム出口と冷凍庫の間の様子(斜め前から):コリメータはビームを絞れる一方で散乱された電子を作ってしまうので、コリメータは置いていない。 . . . . .	39
3.40	150MeV 電子線実験での回路:Dis は DISCRIMINATOR、Co は COINCIDENCE、Shaper は SHAPER AMPLIFIER、G.G は GATE GENERATOR、AMP は AMPLIFIER、Scaler は CAMAC Scaler である。 . . . . .	40
3.41	ムーバーの位置較正時の ADC 分布(1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。ビームの照射されている 2 番素子の 300ch 付近にピークが見える。 . . . . .	41
3.42	ペDESTアルランのときの ADC 分布(1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . . . .	43
3.43	1 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布(1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . . . .	44
3.44	2 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布(1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . . . .	44
3.45	3 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布(1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . . . .	45
3.46	4 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布(1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . . . .	45
3.47	5 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布(1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . . . .	46
3.48	6 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布(1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . . . .	46
3.49	7 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布(1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . . . .	47
3.50	8 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布(1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . . . .	47
3.51	9 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布(1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . . . .	48



3.52	位置依存性測定を行なった場所:赤い点の位置にビームを照射した。位置感覚は5.5mmである。 . . . . .	49
3.53	LV を乾電池で代用した様子:乾電池を直列につなげて+12V、-6Vを作った。 . . . . .	50
4.1	準備実験での散布図:縦軸が受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ の APD の付いた素子 ADC ch、横軸が $5 \times 5\text{mm}^2$ の APD の付いた素子の ADC ch である。また印加した HV はそれぞれ $V_r-20\text{V}$ である。 . . . . .	51
4.2	準備実験での散布図:縦軸が受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ の APD の付いた素子 ADC ch、横軸が $5 \times 5\text{mm}^2$ の APD の付いた素子の ADC ch である。また印加した HV はそれぞれ $V_r-10\text{V}$ である。 . . . . .	52
4.3	準備実験での散布図:縦軸が受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ の APD の付いた素子 ADC ch、横軸が $5 \times 5\text{mm}^2$ の APD の付いた素子の ADC ch である。また印加した HV はそれぞれ $V_r$ である。 . . . . .	52
4.4	準備実験での散布図:縦軸が受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ の APD の付いた素子 ADC ch、横軸が $5 \times 5\text{mm}^2$ の APD の付いた素子の ADC ch である。また印加した HV は受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ の APD の付いた素子が $V_r$ 値 (406V)、横軸が $5 \times 5\text{mm}^2$ の APD の付いた素子が $V_r-10\text{V}$ (390V) である。 . . . . .	53
4.5	受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ の APD の付いたカロリメータの $4 \times 10^4$ イベントの宇宙線測定の ADC 分布:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . . . .	54
4.6	受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ の APD の付いたカロリメータの $4 \times 10^4$ イベントの宇宙線測定の ADC 分布:縦軸は log スケール . . . . .	55
4.7	1 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . .	55
4.8	2 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . .	55
4.9	3 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . .	55
4.10	4 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . .	56
4.11	5 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . .	56
4.12	6 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . .	56
4.13	7 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . .	56
4.14	8 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . .	56
4.15	9 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。 . . .	56
4.16	各素子に LED を照射したときの各素子のゲインカーブ:縦軸は P.H.ADC の出力 ch、横軸は各素子へ印加した HV 値 . . . . .	56
4.17	ムーバーの位置と 5 番素子の P.H.ADC の分布:垂直方向、中心は 1469 パルスであった。 . . . . .	57
4.18	ムーバーの位置と 5 番素子の P.H.ADC の分布:水平方向、中心は 1207 パルスであった。 . . . . .	57
4.19	GEANT4 で再現した PWO 結晶中での 150MeV 電子線のエネルギー損失分布 [7] . . . . .	58
4.20	ゲインカーブに用いた係数表 . . . . .	61

4.21	1 番の素子のゲインカーブ:縦軸が APD のゲイン [倍]、横軸が HV 値 [V] . . . . .	62
4.22	2 番の素子のゲインカーブ:縦軸が APD のゲイン [倍]、横軸が HV 値 [V] . . . . .	62
4.23	3 番の素子のゲインカーブ:縦軸が APD のゲイン [倍]、横軸が HV 値 [V] . . . . .	62
4.24	4 番の素子のゲインカーブ:縦軸が APD のゲイン [倍]、横軸が HV 値 [V] . . . . .	62
4.25	5 番の素子のゲインカーブ:縦軸が APD のゲイン [倍]、横軸が HV 値 [V] . . . . .	62
4.26	6 番の素子のゲインカーブ:縦軸が APD のゲイン [倍]、横軸が HV 値 [V] . . . . .	62
4.27	7 番の素子のゲインカーブ:縦軸が APD のゲイン [倍]、横軸が HV 値 [V] . . . . .	62
4.28	8 番の素子のゲインカーブ:縦軸が APD のゲイン [倍]、横軸が HV 値 [V] . . . . .	62
4.29	9 番の素子のゲインカーブ:縦軸が APD のゲイン [倍]、横軸が HV 値 [V] . . . . .	62
5.1	受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ APD の付いた 8 番素子の P.H.ADC 分布:宇宙線 $4 \times 10^4$ イベント測定時の HV 値より、1V だけ高い 397V を印加している。 . . . . .	65
5.2	6 番素子のシェイパーアウトのシグナル:印加している HV 値は $4 \times 10^4$ イベント測定時+1V(403V) である。シグナルが一つだけ見えている。 . . . . .	66
5.3	6 番素子のシェイパーアウトのシグナル:印加している HV 値は $4 \times 10^4$ イベント測定時+2V(404V) である。ノイズが多すぎてオシロスコープが計測できていない。 . . . . .	66
5.4	ゲイン 300 倍を与える HV 値を印加したときのエネルギー分布: 縦軸は測定したイベント数、横軸はビームのエネルギーである。 . . . . .	67
5.5	ゲイン 100 倍を与える HV 値を印加したときのエネルギー分布: 縦軸は測定したイベント数、横軸はビームのエネルギーである。 . . . . .	69
5.6	ゲイン 600 倍を与える HV 値を印加したときのエネルギー分布: 縦軸は測定したイベント数、横軸はビームのエネルギーである。 . . . . .	69
5.7	ゲイン 700 倍を与える HV 値を印加したときのエネルギー分布: 縦軸は測定したイベント数、横軸はビームのエネルギーである。 . . . . .	70
5.8	ゲイン 800 倍を与える HV 値を印加したときのエネルギー分布: 縦軸は測定したイベント数、横軸はビームのエネルギーである。 . . . . .	70
5.9	ゲイン 300 倍@-25 を与える HV 値を印加したときのエネルギー分布: 縦軸は測定したイベント数、横軸はビームのエネルギーである。 . . . . .	71

5.10	ゲイン 300 倍を与える HV 値を印加し、LV を電池で印加したときのエネルギー分布: 縦軸は測定したイベント数、横軸はビームのエネルギーである。 . . . . .	71
5.11	$\sigma/E$ と $b/E$ の HV スキャンの結果。:赤い点が $\sigma/E$ で、青が $b/E$ である。また縦軸は 150MeV に対するパーセンテージで、横軸はゲイン [倍] である。 . . . . .	72
5.12	HV スキャンによる $a$ の変化:縦軸は $a$ のパーセンテージで、横軸はゲイン [倍] である。 . . . . .	72
5.13	エネルギー分解能の位置依存性: $\sigma/E$ の値を 5 番素子の位置ごとに区切って色分けした。 . . . . .	74
6.1	-25 においてゲイン 800 倍を与える HV 値での 150MeV 電子線測定でのエネルギー分布。:縦軸は測定のイベント数で、横軸はエネルギーである。 . . . . .	77

# 第1章 はじめに

素粒子の研究は、紀元前 400 年頃、ギリシャの哲学者であるデモクリトスの原子論から始まった。その後、我々の世界を構成している分子や原子が発見された。原子は原子核とその回りを周回する電子から構成されている。原子核は、陽子・中性子から構成されている。陽子・中性子はバリオンという種類に分類され、バリオンはクォーク 3 つから構成されている。また、メソンというクォーク 2 つからなる粒子も発見されている。

現在では、物質を構成する最小単位として、クォークとレプトンという 2 種類の基本粒子に分けられている (表 1.1)。この基本粒子には相互作用がはたらく。自然界のすべての相互作用は 4 つの相互作用で説明でき、強い相互作用・弱い相互作用・電磁相互作用・重力相互作用である。それぞれの相互作用を媒介する粒子をゲージボソンといい、表 1.2 にまとめる。

図 1.1: クォークとレプトン

	クォーク		レプトン	
第 1 世代	u	d	e	$\nu_e$
第 2 世代	c	s	$\mu$	$\nu_\mu$
第 3 世代	t	b	$\tau$	$\nu_\tau$

図 1.2: ゲージボソン

媒介する相互作用	ゲージボソン
強い相互作用	g
弱い相互作用	$Z^0, W^\pm$
電磁相互作用	$\gamma$
重力相互作用	重力子

宇宙が誕生して 140 億年が経った現在、宇宙の誕生の謎を解明すべく、全世界の科学者が協力し、実験的、理論的両面から研究を進めている。現在 CERN では LHC 加速器を用いた ALICE・ATLAS・CMS・LHCb の 4 つの実験が進行中である。ATLAS 実験と CMS 実験は、素粒子理論の標準模型の中で存在が予言されている、ヒッグス粒子の発見を目標にしている。LHCb 実験はボトムクォーク生成に關与する物理現象に焦点をあて、CP 非保存の物理学現象を解明することを目的としている。ALICE 実験は鉛+鉛原子核衝突による高温・高密度クォーク物質の研究を主題とした実験であり、クォーク・グルーオン・プラズマ相で引き起こされる現象を明確に調べることができる。

我々の研究グループは、アバランシェ・フォトダイオード (APD) と鉛タングステン酸結晶 (PWO) を組み合わせた電磁カロリメータを開発し、欧州原子核研究機構 (CERN) において建設中の ALICE 実験における高性能光子検出器 PHOS の素子として採用した。

APD は、小型で高い量子効率 (70~80%) を持つ。また光電子増倍管 (PMT) とは違い、磁場による増幅率の変化がないため、強磁場中で使用される PHOS の素子として大変適している。しかし一方で、外部ノイズの影響を受けやすいこと

や、技術的問題により、受光面積がPMTほど大きくできないことがあげられる。ALICE 実験 PHOS 検出器として導入した APD の受光面積は当時最大の  $5 \times 5 \text{mm}^2$  である。本研究では、新開発である受光面積  $10 \times 10 \text{mm}^2$  をもつ APD を新たに用い、-25 において電磁カロリメータの性能評価を行なった。

本論文では、第 2 章で本実験の目的と概要を説明する。第 3 章では、実験装置の説明をし、実際に行なった実験セットアップを説明する。第 4 章では、実験で得られたデータ解析の方法を述べる。第 5 章では解析により得られたデータについてその結果を示したあと、考察を行なう。第 6 章では、本実験での最終的な結論と、今後の展望について述べる。

## 第2章 背景

この章では本実験にいたった動機と背景を、実験の目的、実験の概要と、2つの節に分けて説明する。

### 2.1 実験の目的

CERNで行なわれる ALICE 実験での高性能光子検出器として、我々は、鉛タングステン酸結晶 (PWO) とアバランシェ・フォトダイオード (APD) を組み合わせた電磁カロリメータを採用した。

PWO の比重は  $8.3\text{g/cm}^3$  であり、他のシンチレータに比べて重い (3.1)。また、放射長  $0.89\text{cm}$  と短く、モリエール半径は  $2\text{cm}$  で小さい。つまり、高エネルギーの粒子を小さい領域に閉じ込めることができる。それにより、GeV 領域において、高いエネルギー分解能と高い2粒子分離分解能を同時に満たす電磁カロリメータを製作することができる。PWO は従来高エネルギー実験で使用されていた素材にくらべその発光量は少ないが、PWO は温度を下げることで発光量が増幅するという性質をもっている。実際の ALICE 実験では  $-25^\circ\text{C}$  にて使用する。発光量が増えても、その光を検出する光センサーには、高い量子効率、もしくは光電子増幅率が要求される。代表的なものに、光電子増倍管 (PMT) がある。光電子増倍管は、量子効率  $25 \sim 35\%$  とあまり良くはないが、その増幅率が  $10^7 \sim 10^8$  倍もあるのが利点である。また、高感度で高速応答であるため、非常によく使われている。ただし、PHOS では強磁場中で使用される。PMT はその増幅メカニズムから強磁場中では増幅率に影響がでてしまうので、適さない。

そこでアバランシェ・フォトダイオードが採用された。アバランシェフォトダイオードは電子なだれによる自己増幅機能をもっており、 $10 \sim 10^4$  程度の増幅率を有する。PMT には劣るが、量子効率は  $70 \sim 80\%$  と非常に高く、大きな利点である。欠点としては、受光面積が小さいということである。技術的問題から  $5 \times 5\text{mm}^2$  までしか製作することができなかった。PHOS ディテクターにおいても、受光面積  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD を採用している。

近年、受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD が開発され、その入手に成功した。APD の受光面積が4倍になると、その光電子の統計的揺らぎに起因するエネルギー分解能が2倍良くなることが期待される。PHOS 実験ではより高いエネルギー分解能も要求されるので、これは検証してみる価値のあるものである。以上のことを踏まえ、本実験の目的は、 $-25^\circ\text{C}$  において、受光面積  $10/ \times 10\text{mm}^2$  を持つ APD と PWO 結晶を組み合わせた電磁カロリメータを製作し、エネルギー分解能の測定を行なうことである。

## 2.2 実験の概要

本実験の目的は、 $-25^\circ\text{C}$  における受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD 読み出しによる PWO 結晶を用いた電磁カロリメータの性能評価 (エネルギー分解能の測定) である。

まずは、カロリメータを製作し、その動作確認を行なった。ALICE 実験で使用されている、受光面積  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD と PWO 結晶を組み合わせた電磁カロリメータも使用し、宇宙線測定実験を行なった 3.2.3。

続いて、広島大学にある超高速電子周回装置 (通称 REFER) の  $150\text{MeV}$  電子線を用い、受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD 付きの電磁カロリメータのエネルギー分解能の測定を行なった (3.2.5)。同時に、外部ノイズの見積もりも行い、エネルギー分解能を表す、各成分の値の見積もりも行なった。また、エネルギー分解能の HV 依存 (3.2.5)、温度依存 (3.2.5)、位置依存 (3.2.5) についても、測定を行なった。

## 第3章 実験

この章では、本実験で利用した実験機装置等について説明した後、実際に行なった実験方法について述べる。

### 3.1 実験装置

この節では、最初に 150MeV 電子線実験を行なった REFER についての説明を行なう。次に荷電粒子の反応を検出するための検出器系、検出器や結晶などを設置したり温度条件などの調節をするセットアップ系、検出したシグナルを処理する回路系、処理されたシグナルを読み出す読み出し系の 5 項目にわけて実験装置をそれぞれ説明していく。

#### 3.1.1 REFER

正式名称を超高速電子周回装置 (Relativistic Electron Facility for Education and Research) といい、概略図は図 3.1 に示すとおりである [5] [8]。広島大学には 150MeV マイクロトロンがあり、REFER とはこのマイクロトロンから電子線を引き出し、周回させる電子リングである。REFER は電子線引き出しライン (3.1 中の右下部分のライン) を持っており、これにより 150MeV の電子線を周回装置から引き出して実験することができる。本実験ではこの引き出しラインの下流に実験セットアップを設置し、測定を行なった。

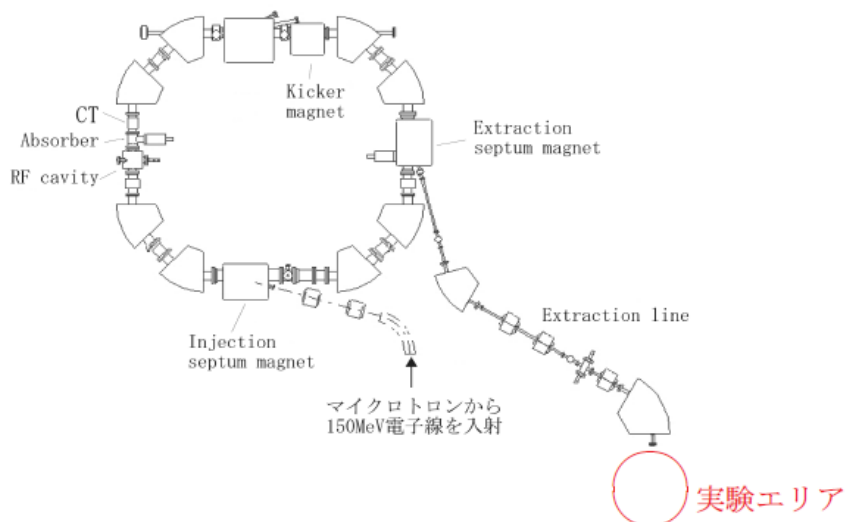


図 3.1: REFER 全体図:本実験は図中右下の実験エリアにて行なった。



### 3.1.2 検出器系

#### シンチレータ

シンチレータとは、入射してきた荷電粒子などの励起エネルギーを、紫外から可視光領域の光(シンチレーション光)に変換する性質をもった物質である。シンチレータは無機結晶シンチレータと、有機シンチレータに分けられる。本実験で使用したシンチレータは、PWO結晶(無機結晶シンチレータ)と、プラスチックシンチレータ(有機結晶シンチレータ)である。

シンチレータの性質を表すものの一つとして、減衰時間がある。減衰時間 $\tau$ は、シンチレーション光の強度を $I$ とすると、

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (3.1)$$

と書ける。ここで $t$ は時間である。減衰時間 $\tau$ が短ければ短いほど、発光時間は短くなり、時間分解能が良くなる。一般に無機シンチレータと有機シンチレータを比べると、無機シンチレータの方が減衰時間が長く、発光量が多い。

#### 電磁カロリメータ

電磁カロリメータとは、光子や電子などのエネルギーを測定する検出器の総称であり、一般無機シンチレータ(3.1.2)からできている[5]。無機シンチレータに光子や電子が入射すると電磁カスケードシャワーを起こし、エネルギーを失う。そのシャワーを測定することで入射してきた光子や電子のエネルギーを測定することができる。

電磁カスケードシャワーとは、制動放射と電子陽電子対生成の連鎖反応からなる現象である。電子が物質中を通過するとき、その物質中の電磁場によって制動を受ける。そのとき電子は光子を放出し、エネルギーを失う。この現象を制動放射という。また、光子が物質中を通過するときは、物質中の電磁場により電子陽電子対生成を起こす。この制動放射と電子陽電子対生成の連鎖反応を電磁カスケードシャワーという。

電磁カロリメータの性能を表すものにエネルギー分解能がある。入射ビームのエネルギーを $E[\text{GeV}]$ として、エネルギー分解能 $\sigma/E$ は次式で表される。

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{b}{E}\right)^2 + c^2} \quad (3.2)$$

この式は、 $\oplus$ を用い、

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c \quad (3.3)$$

と書ける。ここで、 $a \sim c$ は各項のパラメータで、第1項はAPD素子とプリアンプの性能が顕著に表れる項で、光電子の統計的揺らぎが寄与してくる項である。。第2項は検出器や外部から流入してくるノイズが寄与してくる項である。第3項は、入射ビームの運動量分解能が主として寄与してくる項である。

## 鉛タンゲステン酸結晶 (PWO)

PWO 結晶とは、図 3.2 のように無色透明な結晶で、組成式は  $\text{PbWO}_4$  である。本実験で使用した PWO 結晶は、ALICE 実験で使用しているものと同じく、ロシアの North Crystal 社製のもので、サイズは  $22 \times 22 \times 180\text{mm}^3$  である。

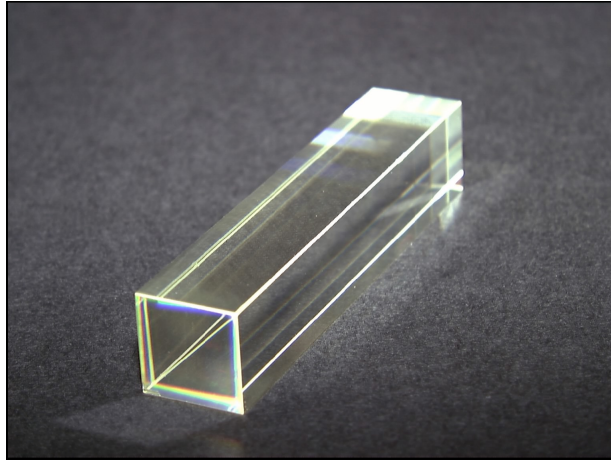


図 3.2: PWO 結晶

表 3.1: 無機シンチレータの性質 ([1])

物質名	密度 [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ]	放射長 [cm]	モリエール半径 [cm]	減衰時間 [ns]	光量 [NaI 比]
PWO	8.28	0.89	2.0	5~15	0.01
BGO	7.13	1.12	2.4	300	0.15
NaI	3.67	2.59	4.5	250	1.00
CsI	4.53	1.85	3.8	565	0.40

PWO 結晶は無機シンチレータの一種である。無機シンチレータは、入射してきた光子や電子に対し電磁カスケードシャワーを起こさせ、そのエネルギーに比例した発光をする物質である。その発光量を測定することで、入射してきた粒子のエネルギーを測定することができる。表 3.1 に代表的な無機シンチレータの物質とその性質を載せる。

放射長とは、物質に入射した粒子が、入射したときのエネルギーの  $1/e$  ( $e$ : オイラー数) になるときの物質の厚さのことである。モリエール半径とは、光子や電子が物質中を放射長だけ進んだときの電磁シャワーの横方向への広がりを示すものであり、一般にモリエール半径の 3 倍の範囲に入射した光子や電子のエネルギーの 99% が含まれる。一般に無機シンチレータは、有機シンチレータに比べ、減衰時間が長く、発光量は少ない。しかし、本実験で使用した PWO 結晶は、発光量は少ないものの、有機シンチレータ並に早い減衰時間をもつ。そのため、高い時間分解能、エネルギー分解能を得ることができる。また密度も最も高いため PWO はエネルギーの高い粒子などを狭い範囲に閉じ込めることができ、電磁力ロリメータ素材としてきわめて適している。PWO は温度を下げると発光

量が増えるこのがわかっており、本実験では ALICE 実験と同じ、 $-25^\circ$  で測定を行なった。

### 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一種である。プラスチックシンチレータは、入射してきた粒子による電離作用によって発光する。特徴としては、電離エネルギーあたりの発光量は一般の無機シンチレータには及ばないが、減衰時間がナノ秒のオーダーと短く、また加工も容易なことから、実験に応じて大きさや形にはさまざまなものがある。これにより、正確な位置や通過時間の測定に頻繁に用いられている。

本実験では、150MeV 電子線の通過を確認するために、直径2mmのファイバー状のプラスチックシンチレータを使用した。ファイバーカウンターの絵は図3.3と図3.4である。また、このファイバーカウンターを以下、フィンガーカウンターと呼ぶ。

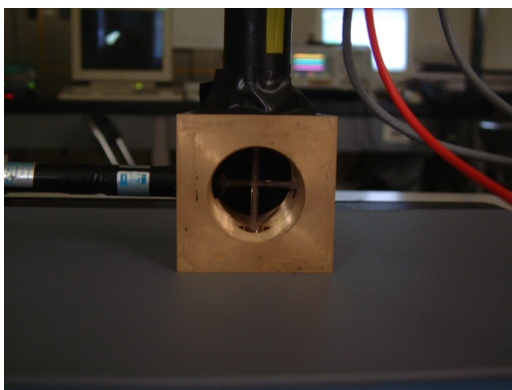


図 3.3: ファイバーカウンター:金属の固定フレーム中に十字に交差する直径2mmのファイバー状のプラスチックシンチレータ見える。

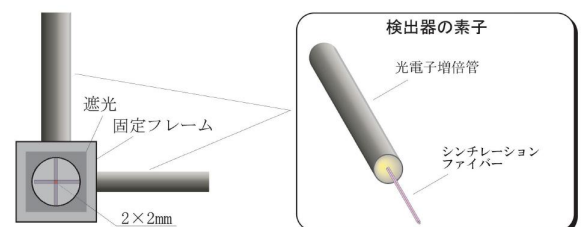


図 3.4: ファイバーカウンター (略図)

### アバランシェ・フォトダイオード (APD)

APD とは、アバランシェ増幅による信号増幅機能をもつシリコンフォトダイオードである。これにより、微弱な光の検出に適している。増幅率は  $10 \sim 10^4$  倍であるが、ショットノイズを考慮すると、 $10 \sim 10^2$  倍で使用することが適切とされている。PMT(3.1.2)に比べ、APDは小型で強磁場中でも影響を受けることなく使用できるという利点がある。また量子効率が70~80%と高い。技術的問題より受光面積が小さいが、PMTの量子効率に比べて非常に大きいことを考えると大きな利点である。受光面積はALICE実験に採用したAPDでは $5 \times 5 \text{mm}^2$ であるが、当時はこれが最大有感面積であった。しかし、先述のとおり受光面積 $10 \times 10 \text{mm}^2$

の APD の入手に成功したので、本実験では受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD を使用し、受光面積  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD と比較した (図 3.5)。

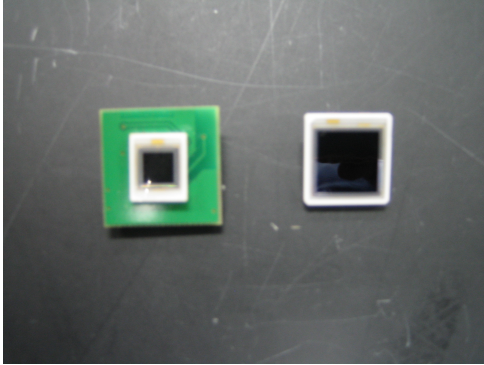


図 3.5:  $5 \times 5\text{mm}^2$  APD(左) と  $10 \times 10\text{mm}^2$  APD(右)

図 3.6: プリアンプの仕様

項目	仕様
初段増幅 JFET	2SK932(IDSS=23) by SANYO
感度	0.833 V/pC
立ち上がり時間	15~20 ns
雑音(ノイズ)	$200e+3.2e / \text{pF} \times C_{in}$ (pF)
出力	正極
帰還ループ	1 pF // 100 MΩ
電源電圧	+12 V (4.2mA), -6 V (2.2mA)
消費電力	64 mW

図 3.5 で、受光面積  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD の後ろにあるものが、プリアンプ(前置増幅器)といい、以下の点に留意して設計、製作をしたものである(以下 [4] より一部抜擢)。

- ・ APD の動作ゲインを 50 倍と設定し、出力感度を 1V/pc、最大出力を 5V とする。
- ・ 100pF の APD 素子取り付け時、回路によるノイズを 500ENC とする。
- ・ 環境温度 -25 で運用するため、消費電力を 100mW 以下に抑える。
- ・ 2 万個の量産を念頭に製造コストおよび回路部品供給の安定性を重視する。

その結果、本実験で使用したプリアンプの仕様は表 3.6 に示すとおりである。

本実験で製作した電磁カロリメータの素子を図 3.7 と 3.8 に示す。左が受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD を接着したもので、右が受光面積  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD を接着したものである。実験では、両者ともにアルミ箔を巻き、電磁遮蔽した(図 3.9)

### フォト・マルチプライヤー・チューブ(PMT)

PMT は図 3.10 に示すような構造になっており、光電面に光が当たると、そのエネルギーに比例した量の光電子を放出する。その光電子が加速されダイノードにあたり、多量の二次電子を生じる。ダイノード間には高電圧が印加されており、ダイノードから生じた二次電子も加速され、次のダイノードにあたり、また多量の電子が生じる。このようなサイクルを経て、光電子は増幅され、最終的には  $10^7 \sim 10^8$  倍にまで増幅される。これにより、APD 同様微弱な光の検出に適している。しかし、ダイノード間を加速される電子の軌道は磁場中ではその影響を受け、加速途中で軌道を曲げられてしまうため、磁場中での使用に適さないのが欠点である。

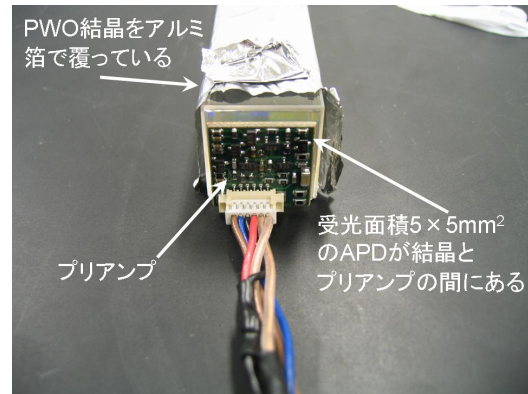
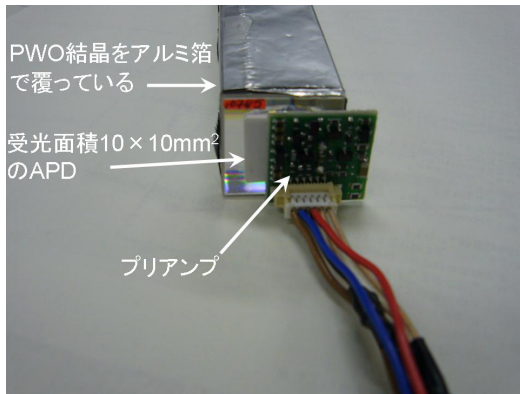


図 3.7: PWO 結晶に接着された APD+プリアンプ : 図のように PWO と APD を接着した。  
 図 3.8: PWO 結晶に接着された APD+プリアンプ : 図のように PWO と APD を接着した

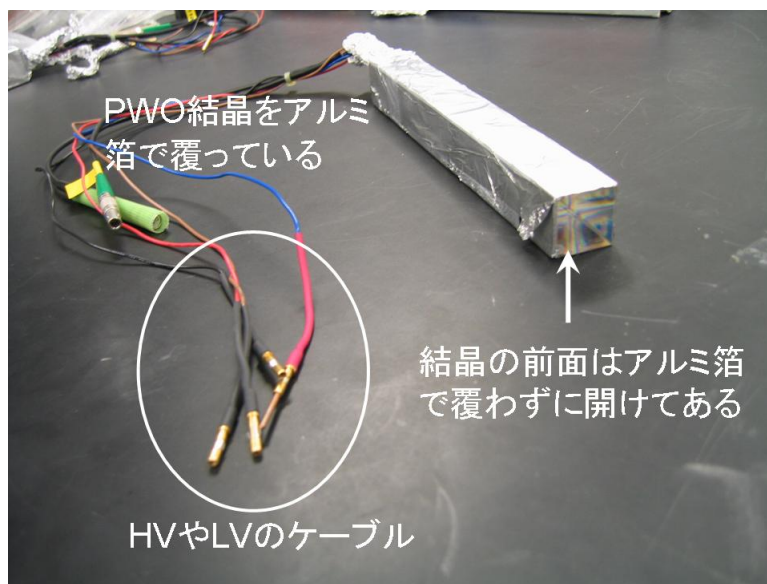


図 3.9: 素子の完成形 : 側面は PWO の蛍光を閉じ込めるためと電磁遮蔽の目的でアルミ箔で覆っているが、前面は LED を用いた APD の動作確認を行なうことができるように開けてある。

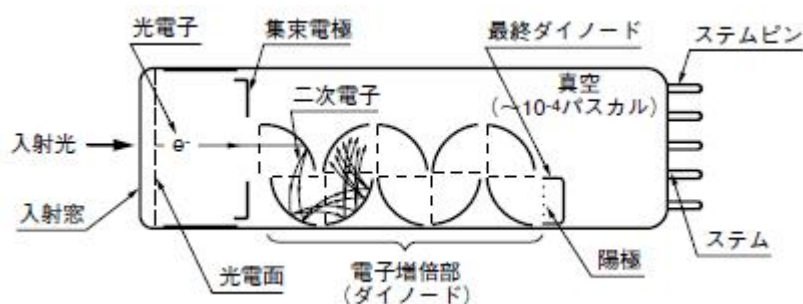


図 3.10: PMT の原理 ([9])

### 3.1.3 セットアップ系

#### 冷凍庫

PWO 結晶は、前述 (3.1.2) の通り、低温にするとその発光量が増える。そこで ALICE 実験と同じく、最低-25℃ までは冷却できることが望まれた。また、ビーム実験を見越すと、結晶を冷却したままビーム実験ができるような冷凍庫が必要であった。そこで、図 3.11,3.12 のような冷凍庫を用意した。この冷凍庫には、ビーム実験用の直径 5cm の貫通穴が冷凍庫の両側面に 1 個ずつと、ケーブルを引き出すための直径 10cm の貫通穴が 1 つ開いている。また、冷却時に冷凍庫の内壁などに霜が付かないような仕様にした。この冷凍庫は+50℃ ~-50℃ の範囲で温度調節できることが保障されている。



図 3.11: 特注の冷凍庫:図に示すように、冷凍庫にはビーム実験用の貫通穴とケーブル引出し穴がある。また冷凍庫下部のディスプレイにおいて温度設定などを行なう。

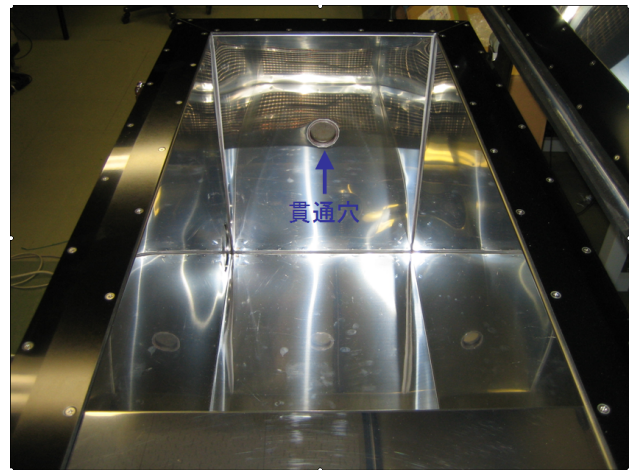


図 3.12: 冷凍庫の中:冷凍庫内に貫通穴が確認できる。

#### ムーバー

-25℃ まで冷やして測定をするとなると、その冷却とウォームアップには最低 4~5 時間かかってしまう。本実験のビーム実験ではビームタイムをできるだけ有効につかえるように、冷凍庫内の結晶の位置を遠隔操作できるようにした。これにより、実験のキャリブレーションなどにかかる時間を大幅に短縮できた。ムーバーは図 3.13 と 3.14 に示す。また、ムーバーの動作範囲を図 3.15 に示す。

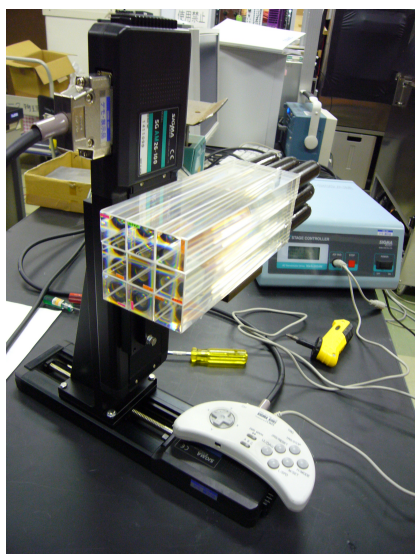


図 3.13: ムーバーとPWO結晶:ムーバーに9本の素子が乗っている。画面奥の青い装置がムーバーの制御装置で、付属のコントローラを接続することでムーバーを移動させることができる。

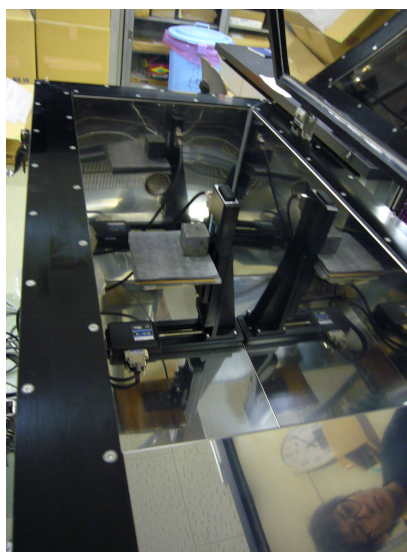


図 3.14: ムーバー in 冷凍庫:ムーバーに結晶9本分と同程度の重りを乗せている。実際の実験でもムーバーはこの図のように配置した。

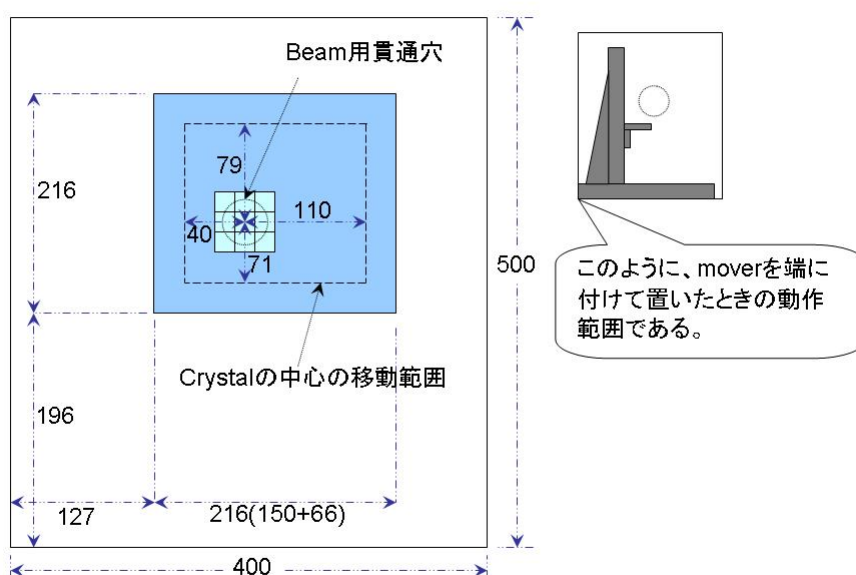


図 3.15: ビーム軸(上流)から見たムーバーの動作範囲

### 3.1.4 回路系

#### Nuclear Instrument Module(NIM)

原子核・素粒子実験など、高エネルギー実験の分野では、検出器などからの信号を処理するために規格化されたモジュールを使う。この規格を NIM 規格といい、モジュールを NIM モジュールという。NIM モジュールには様々な機能を持ったものがあり、一般に NIM ピンというラックに装備し、使用する。NIM モジュール同士は入力端子と、出力端子があり、それぞれをケーブルで接続することで、信号を処理していく。NIM モジュールから出力される信号は NIM 信号という規格化された信号で、NIM モジュール同士は NIM 信号をやり取りして、信号を処理する。

以下に本実験で使用した NIM モジュールの説明を記す。

#### DISCRIMINATOR (Dis)

DISCRIMINATOR は、設定した閾値電圧以上の信号が入力された時に NIM 信号を出力するモジュールである。一般に NIM モジュールの入力端子には NIM 信号を入れなければならないが、DISCRIMINATOR は入力信号を NIM 信号に特定しない。それゆえ、NIM モジュールで信号を処理するときは、まずディスクリミネーターを通し、信号を NIM 信号に規格化する必要がある。出力する NIM 信号の幅(時間幅)は 4ns ~ 150ns の範囲で設定することができる。また、入力信号に対する閾値電圧は -25mV ~ -1V の範囲で設定できる。

#### SHAPER AMPLIFIER (Shaper)

SHAPER AMPLIFIER は、入力信号を増幅するモジュールである。ディスクリミネーター同様、入力信号は NIM 信号に特定しない。DISCRIMINATOR の閾値電圧を超えない信号などを処理したいときなど、に DISCRIMINATOR に入力する前に SHAPER AMPLIFIER を介す。

#### COINCIDENCE (Co)

COINCIDENCE は、NIM 信号の同期を取ることのできるモジュールである。複数の入力端子に同期して NIM 信号が入力されると NIM 信号を出力する。一般に COINCIDENCE モジュールは veto 入力端子を持っており、入力信号のレートが多いときに、意図的にそのレートを落とすことができる。これにより、入力レートが高すぎるときに、下流の機器への悪影響を防ぐことができる。

#### GATE GENERATOR (G.G)

GATE GENERATOR は、入力された NIM 信号の幅(時間幅)を長くして出力することができる。DISCRIMINATOR などは NIM 信号の幅を数十 ns 程度調節できるのに対し、GATE GENERATOR は ms のオーダーまで調整することができる。



また、一般に、GATE GENERATOR はディレイという機能も有している。ディレイとは、入力信号が入ってから、一定時間後に出力信号を出すという機能で、 $\mu s$  オーダーのディレイが可能である。

### 3.1.5 読み出し系

この小節では、処理された信号を読み出す装置についての説明を行なう。

#### CAMAC

高エネルギー実験の分野では、技術的進歩などにより、膨大なデータ処理をする必要が出てきた。そこでその膨大なデータをコンピュータを利用して効率良く処理していくことが不可欠となった。その際、データをデジタル処理し、コンピュータへ渡す役割を果たす機器の規格が CAMAC 規格である。CAMAC にも様々な機能を持ったモジュールがある。CAMAC と NIM は互換性を持っており、NIM 信号を直接 CAMAC モジュールに入力することができる。

以下に本実験で使用した CAMAC モジュールの説明を記す。

#### Charge Sensitive ADC(C.S.ADC)

C.S.ADC は、入力された信号の電荷量のある時間積分し、デジタル量に変換する機能を持ったモジュールである。このモジュールには、GATE 入力と、複数の信号入力端子がある。GATE には NIM 信号を入力する。信号入力端子には、電荷量を測定したい物理イベントの信号を入れる。この時 GATE に入力した NIM 信号の幅の時間だけ、信号入力端子に入力された信号の電荷量を積分し、それをデジタル量に変換する。C.S.ADC の出力値の単位は ch といい、本実験で使用した C.S.ADC は 1ch あたり、 $-0.25pC$  に相当する。また、C.S.ADC で処理される信号には、常にバイアス電荷が足されているので、この値を差し引かなければ、測りたい電荷量を知ることはできない。このバイアス電荷のことをペDESTAL という。

本実験では、トリガーとして使用したフィンガーカウンターの信号を測定するためにこの C.S.ADC を使用した。

#### Peak Hold ADC(P.H.ADC)

C.S.ADC と同様に、GATE 入力と複数の物理イベントからの信号入力端子がある。C.S.ADC と違うところは、C.S.ADC が GATE 幅での電荷量の積分値を測るのに対し、P.H.ADC は、GATE 幅中に入ってきた信号のうち、振幅の最も大きいものの値をデジタル処理し、コンピュータへ出力する。つまり、入力した信号のうち、最もパルスハイトの高いものの値に比例した ch 数を出力するのである。本実験で用いた P.H.ADC の 1ch は  $0.625mV$  に相当する。

本実験では、PWO 結晶の発光による光子を、APD により電気信号に変換し、その電気信号をこの P.H.ADC で測定した。

## TDC

TDCには、ひとつのスタート信号入力端子と、複数のストップ信号入力端子がある。スタート信号を入力してから、ストップ信号が入力されるまでの時間を測り、それをデジタル処理し、コンピュータへ出力する。TDCの出力する値の単位は、ADC同様、chで、本実験で使用したTDCは1chが35pSecに相当する。

本実験では、トリガーとして使用したフィンガーカウンターの信号のタイミングを測定するために使用した。

## 3.2 実験方法

この節では、本実験で行なった宇宙線測定と、150MeV電子線を用いた電磁カロリメータの性能評価実験の方法を述べる。

宇宙線測定では、飛来してくる $\mu$ 粒子を検出することを目的に、150MeV電子線での実験では、電磁カロリメータのエネルギー分解能の測定を主な目的に行なった。

### 3.2.1 宇宙線

宇宙線とは、宇宙空間から地球に降り注いでいる高エネルギーの放射線の総称である。地球に入射してきている宇宙線を一次宇宙線とよぶ。一次宇宙線は $10^9 \sim 10^{20}$  eVのエネルギーを持っており、主には陽子である。他にはHeの原子核などさまざまな原子核を含んでいる。この一次宇宙線は、地球の大気圏に突入すると、大気中の原子核と相互作用し、二次粒子を発生させる。この二次粒子を総称して二次宇宙線という。地上まで届く宇宙線のフラックスを表す分布を図3.16に示す。

そして $\mu$ などの荷電粒子は地上付近で建物などのコンクリートと相互作用し、図に示すようにエネルギーを失う。

### 3.2.2 実験準備

宇宙線測定の前に、APDの動作確認、宇宙線のシグナルが本実験で製作した電磁カロリメータで測定できるかの確認を行なった。

#### APDのHV依存

まず本実験で使用する受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ のAPDが正常に動作するかを確認する必要があったので、発光量を一定に保ったLEDの光をAPDに照射し、APDに印加するバイアス電圧(以下HV)を変化させ、その出力信号の高さを測定した。宇宙線測定では、APDに印加するHV値は、常温でゲイン50倍を与えるHV値( $V_r$ 値)を基準として行なった。

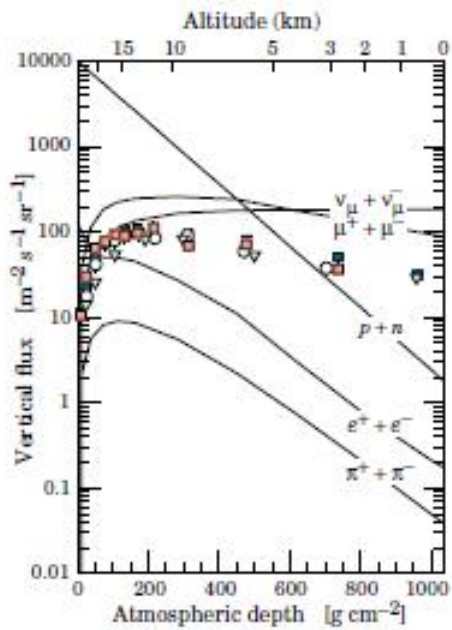


図 3.16: 大気の厚さと宇宙線のフラックス:大気が厚くなるにつれて、質量の軽い粒子 (e など) はフラックスが急激に減少し、透過性の高い  $\mu$  などあまりフラックスの変化がない。

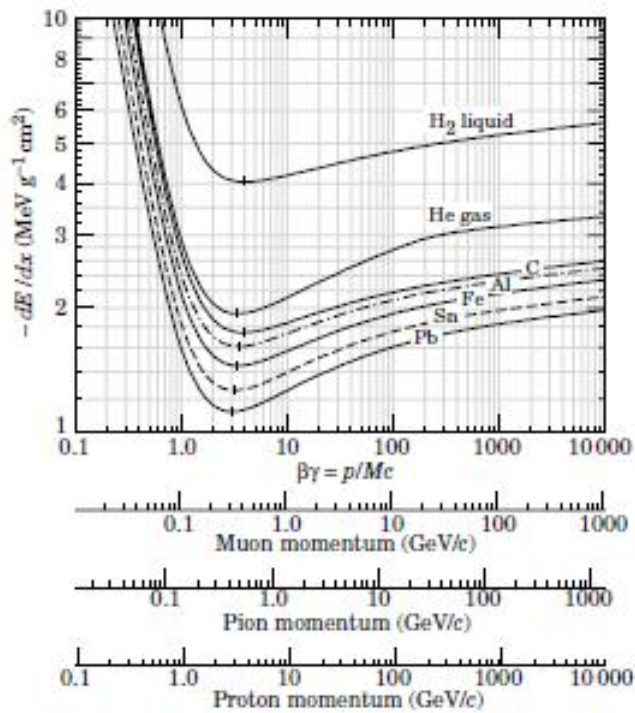


図 3.17: 荷電粒子のエネルギー損失: $\mu$  や  $\pi^\pm$  など、荷電 1 の粒子の MIP の値は、約  $2\text{MeV/gcm}^{-2}$  である。

測定ではまず、動作確認のできている受光面積  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD とプリアンプのセットを暗箱に設置して行なった。プリアンプには +12V と -6V の電圧 (以下 LV) を印加した。APD には  $V_r$  値である、400V を印加した。次に、APD の受光面から約 5mm の位置に、500nm の波長の光を出す LED (砲弾型) を設置し、光を照射した。その結果、図 3.18 のようなシグナルが観測できた。シグナルの高さは約 160mV である。

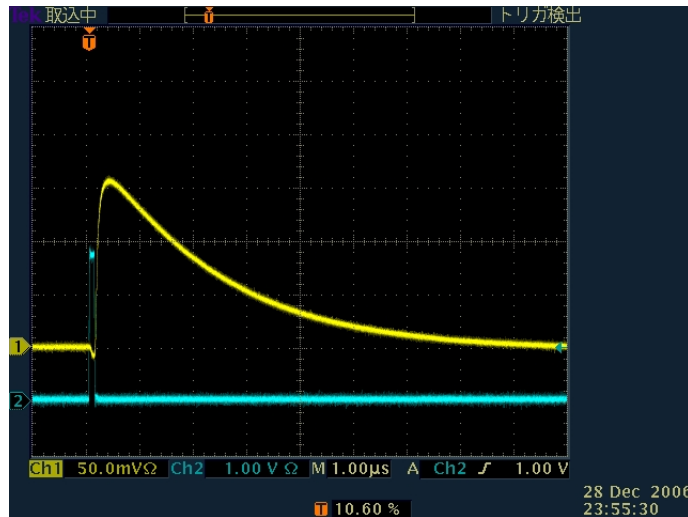


図 3.18: 受光面積  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD による、LED シグナルの読み出し結果: 図の黄色い線が APD からのプリアンプ出力で、青い線が LED を光らせるために入力しているシグナルである。このとき、APD の出力シグナルの高さは 160mV である。

次に、受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD について行なった。受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  APD とプリアンプをはんだ付けし、それを暗箱に設置した。受光面積  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD と同じ光量を受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD に照射した (3.19)。HV 値は、 $V_r$  値である 406V を印加した。シグナルの高さは、260mV で、 $5 \times 5\text{mm}^2$  のときの、 $260/160 = 1.6$  倍になっている。

しかし、受光面積が 4 倍になったことを考慮すると、その出力電圧値も 4 倍になることが予測される。これは、LED の位置が近かったために、 $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD の方では、LED の光の広がりに対し、APD の受光面がすべてカバーしてしまったからと考えられる。つまり、 $5 \times 5\text{mm}^2$  のほうでは、受光面全体に LED の光が当たっていたのに対し、 $10 \times 10\text{mm}^2$  のほうでは、受光面全体に光が当たっていなかったのである。これについてはもっと遠くから光を当て、広範囲に一樣に照射されたセットアップでなければならない。APD には、 $V_r$  値という常温でゲイン 50 倍となる HV 値と、 $V_b$  値という HV 値がある。 $V_b$  値とは、素子耐圧で、これ以上の HV を印加すると APD はブレークダウンしてしまう。そこで、この HV スキャンでは、 $V_b$  値から 10V 刻みで HV 値を下げていき、プリアンプからの出力信号のパルス高さを記録していった。そのグラフが図 3.20 である。測定結果は赤色の点である。これから  $V_r$  値を越えた領域では、HV の変化に対する APD のゲインの変化が非常に大きいことがわかる。

APD を PWO 結晶に接着後、同様に暗箱に素子をいれ、LED の光を用いて APD

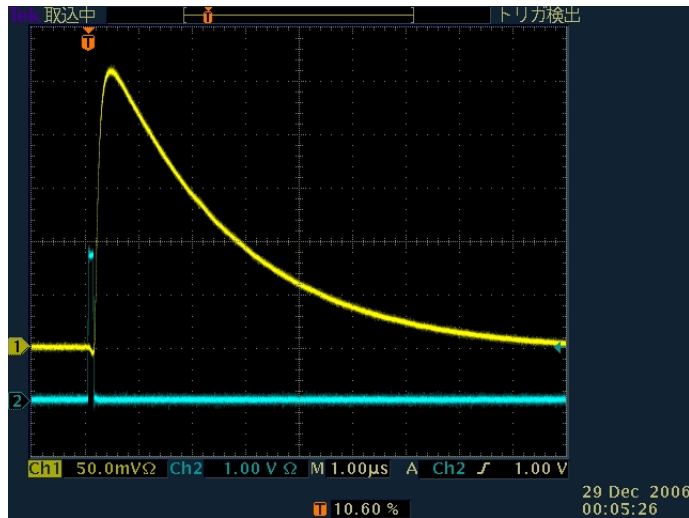


図 3.19: 受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD による、LED シグナルの読み出し結果:図の黄色い線が APD からのプリアンプ出力で、青い線が LED を光らせるために入力しているシグナルである。このとき、APD の出力シグナルの高さは  $260\text{mV}$  である。

のゲインの変化を調べた (図 3.20)。測定結果は青い点である。PWO 結晶と APD を接着後も APD は正常に光を感知していることがわかった。

### 宇宙線の確認

PWO 結晶の蛍光を APD で読み出し、カロリメータとしての動作確認をするために、受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD と  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD の付いた電磁カロリメータを 1 本ずつ使い、宇宙線測定のための、宇宙線確認実験を行なった。常温では宇宙線のシグナルを観測することはできなかった。そこで、PWO の発光量増大とノイズ低減のため、温度を  $-25$  にし測定した。冷却には特製の冷凍庫を用いるのだが、冷却には最低半日かかることが予測され、また、ウォームアップにも同じだけの時間がかかるので、セットアップのをよく確認し冷却を開始した。そのセットアップを図 3.21 に示す。冷却後に APD とプリアンプの動作確認を行なえるように、結晶の前面にはアルミホイルは巻かず、そこから LED の光を入射できるようにした。これにより、冷却後、LED の信号を APD で読み出すことが可能である。

測定は、電磁カロリメータを 2 本重ねて置き、その上下にプラスチックシンチレータを設置した。上のプラスチックシンチレータが縦  $\times$  横  $\times$  厚さで、 $20 \times 20 \times 1\text{mm}^3$  で、下のプラスチックシンチレータが  $50 \times 50 \times 5\text{mm}^3$  である。この 2 つのシンチレータが同時に反応したときは、宇宙線が上下のシンチレータを同時に通過したときである。そのときは、2 つの結晶も同時に通過したときであるから、この 2 つのシンチレータの COINCIDENCE をトリガーとした。

$-25$  に冷却後、LED を光らせ、2 本の電磁カロリメータの APD とプリアンプの動作確認をした。オシロスコープを使って、2 本のカロリメータのプリアンプアウトのシグナルを見ると、宇宙線と思われる信号を確認 (図 3.22)。図 3.22 で、

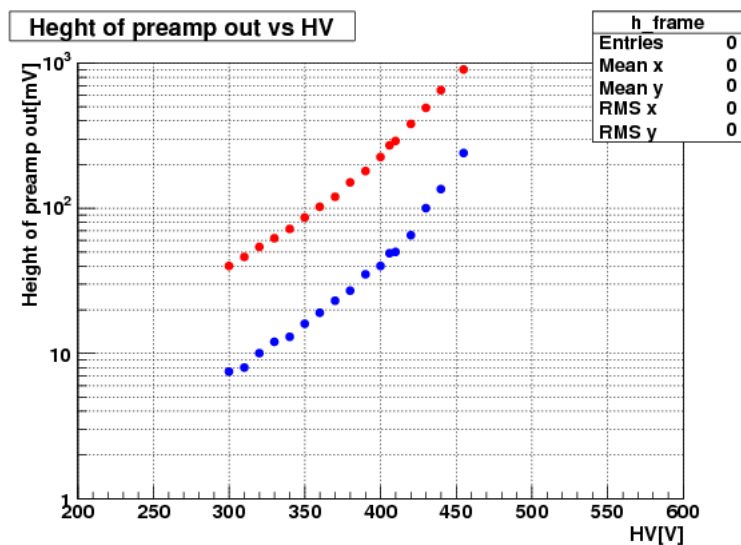


図 3.20: HV スキャンによるプリアンプ出力の変化:図の赤い点は APD に直接 LED の光を当てたときのゲイン変化。青い点は PWO+APD の PWO の前方から LED の光を当てたときのゲインの変化である。PWO と接着後も APD は正常に動作していることがわかる。

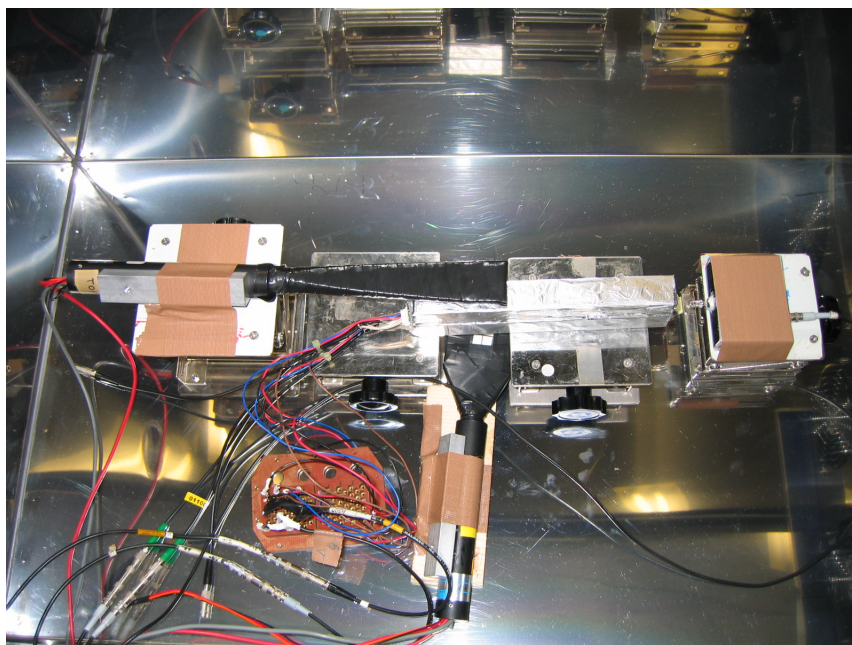


図 3.21: pre 宇宙線測定セットアップ:受光面積  $10 \times 10 \text{mm}^2$  の APD が付いた素子 (上) と  $5 \times 5 \text{mm}^2$  の APD が付いた素子 (下) を上下に重ねて配置した。その上下を  $20 \times 20 \text{mm}^2$  のプラスチックシンチレータ (上) と  $50 \times 50 \text{mm}^2$  のプラスチックシンチレータ (下) で挟んだ。また、結晶の前方には LED を配置している。

1ch(黄色)は受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ のAPDの付いた素子のシグナルで、2ch(青色)は $5 \times 5\text{mm}^2$ のAPDの付いた素子のシグナルである。また、3ch(桃色)はトリガーのタイミングである。これを見ると宇宙線が上下のシンチレータを通過し、2つの素子でエネルギーを落とした様子がわかる。

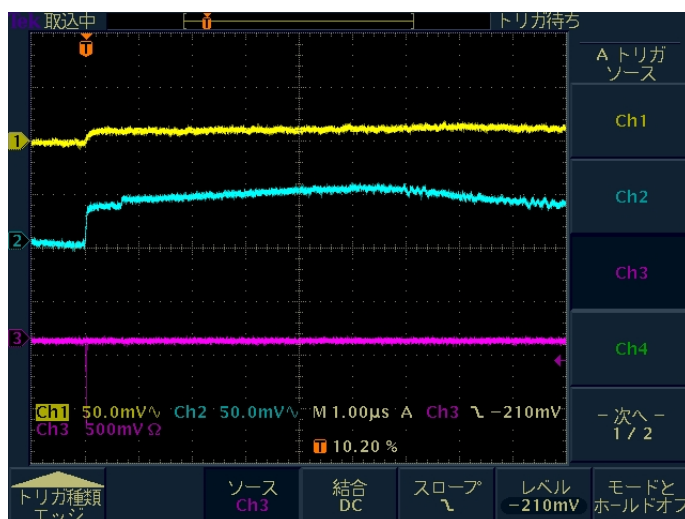


図 3.22: 初めて宇宙線を確認したオシロスコープの記録:黄色の線が受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ のAPD付き素子、青色の線が受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ のAPD付き素子、ピンク色の線がトリガーのタイミングである。トリガーと同時に二つの素子から宇宙線のシグナルが出ている。

宇宙線の確認を定量的にするために、APDのHVを変化させ、そのシグナルの変化を確認した。測定の回路図を図 3.23 に示す。

受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ のAPDと $10 \times 10\text{mm}^2$ のAPDについて、共に、HVを $V_r, V_r-10\text{V}, V_r-20$ と変化させ、宇宙線のシグナルの変化を測定した。その結果、受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ のAPDについては、図のような結果になった。また受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ のAPDについての結果は、図のようになった。このときの測定のイベント数は300イベントである。

両方の素子について、HVを下げるにつれて下がっていくピークを確認できた。

最後にもっとも適正なHVをかけて1000イベント測定した(図)。印加したHVは、受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ のAPDについては $V_r$ 値である406V、受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ のAPDについては、 $V_r-10\text{V}$ である390Vを印加した。

### 3.2.3 宇宙線測定

宇宙線のシグナルを確認できたので、続いて、9本を $3 \times 3$ のブロックになれば、宇宙線の測定を行なった。結晶は受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ のAPDについても、 $5 \times 5\text{mm}^2$ のAPDについても、同じようになれば、図 3.32 のようにセットアップし、結晶には番号付けをした。この状態を冷凍庫内でも再現した(図 3.33)。冷凍庫は一度冷却すると、次開けるまでには1日を要してしまうので、APDとプリア

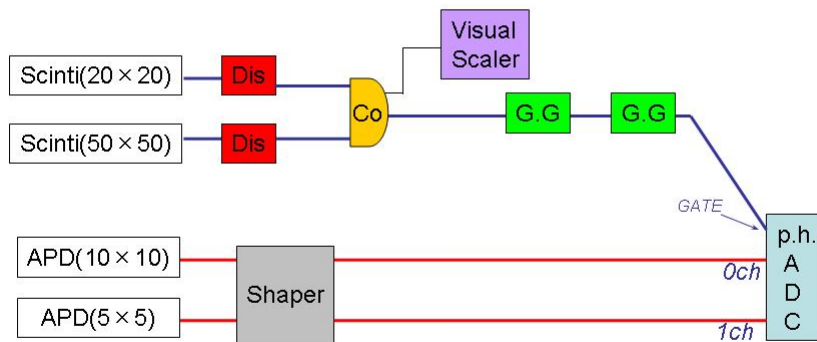


図 3.23: 宇宙線確認実験での回路図:Dis は DISCRIMINATOR、Co は COINCIDENCE、Shaper は SHAPER AMPLIFIER、G.G は GATE GENERATOR である。

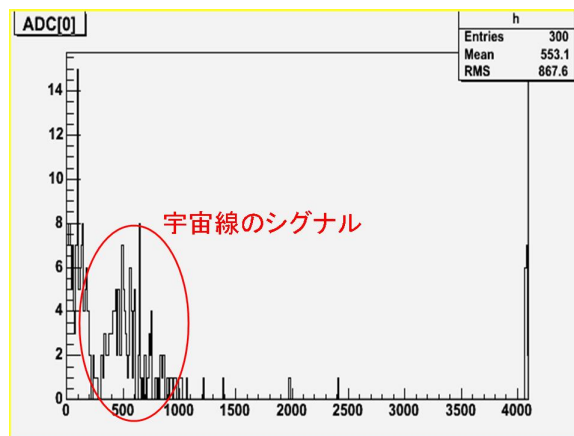


図 3.24: 受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD のシグナル@ $V_r$  値:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の出力 ch である。



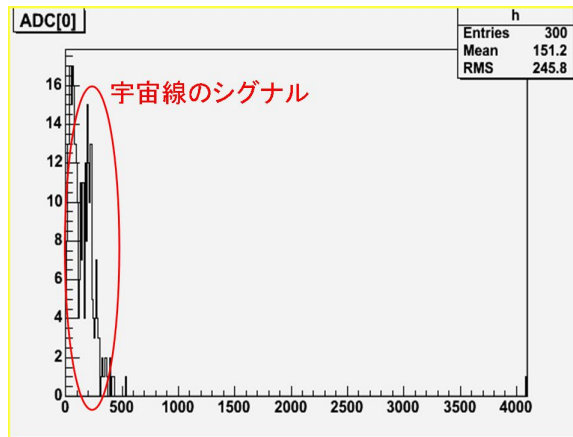


図 3.25: 受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD のシグナル@ $V_r=10\text{V}$ :縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の出力 ch である。

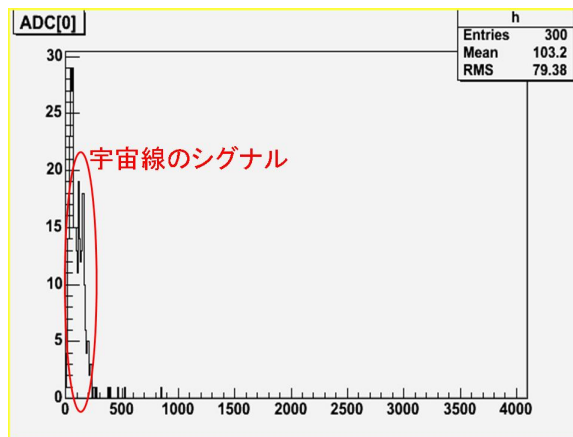


図 3.26: 受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD のシグナル@ $V_r=20\text{V}$ :縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の出力 ch である。

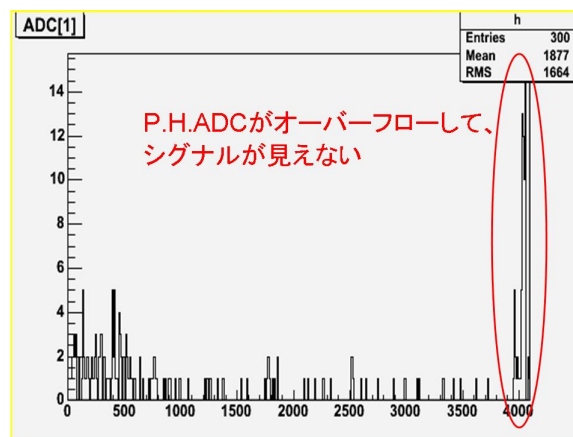


図 3.27: 受光面積  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD のシグナル@ $V_r$  値:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の出力 ch である。

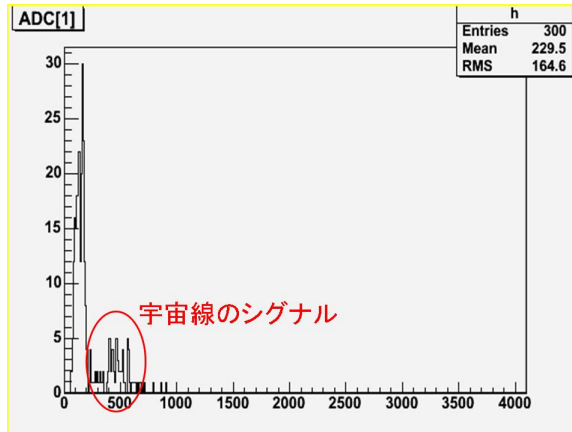


図 3.28: 受光面積  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD のシグナル@  $V_r=10\text{V}$ :縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の出力 ch である。

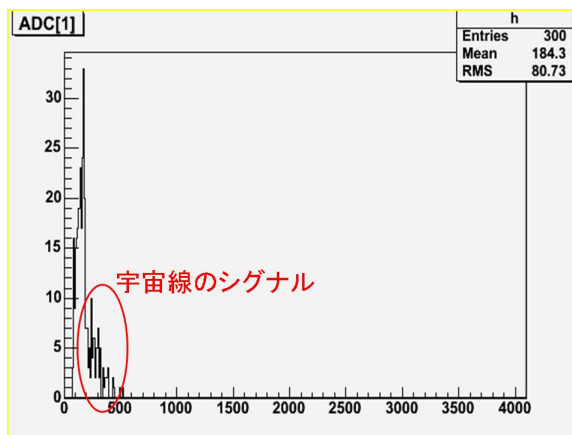


図 3.29: 受光面積  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD のシグナル@  $V_r=20\text{V}$ :縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の出力 ch である。

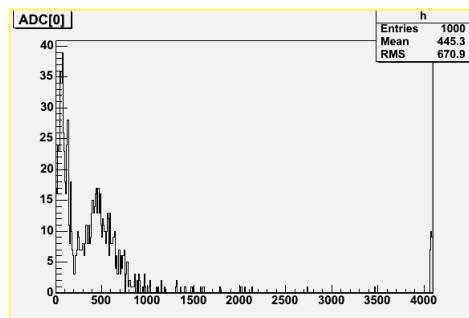


図 3.30: 受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD のシグナル@  $V_r$ :縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の出力 ch である。クリアな宇宙線の MIP ピークが確認できる。

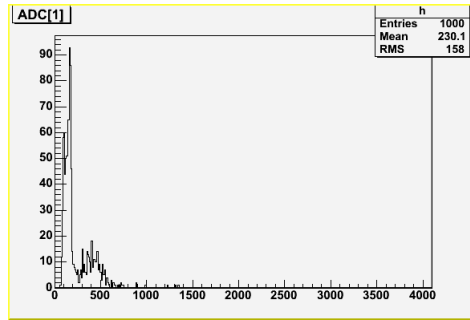


図 3.31: 受光面積  $5 \times 5 \text{mm}^2$  の APD のシグナル@ Vr-10V:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の出力 ch である。受光面積  $10 \times 10 \text{mm}^2$  ほどではないが、クリアな宇宙線の MIP ピークが確認できる。

ンプの動作確認をいつでも行なえるように、準備実験同様に LED を設置した。このとき、9 本に一樣に光が入るように、できるだけ結晶の表面から離して置いた。

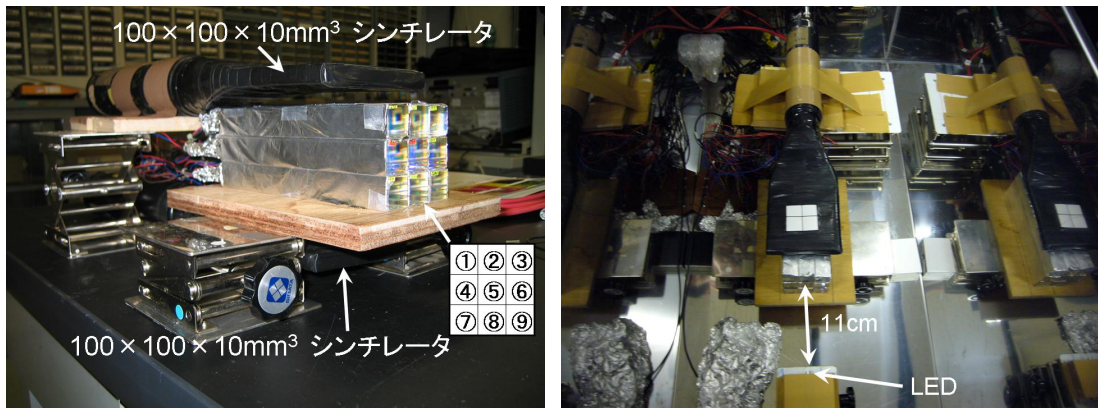


図 3.32: 宇宙線測定における冷凍庫内のセットアップ:      図 3.33: 宇宙線測定における冷凍庫内のセットアップ 2

測定回路は図 3.34 示す。

### 受光面積 $10 \times 10 \text{mm}^2$ APD 付電磁カロリメータ

まずは、電磁カロリメータの製作を行なった。受光面積  $10 \times 10 \text{mm}^2$  の APD とプリアンプをはんだ付けし、次に、 $22 \times 22 \times 180 \text{mm}^3$  の PWO 結晶に、APD の表面を接着剤で接着した。また、電磁遮蔽と、結晶中で発生した光を閉じ込める目的で PWO 結晶をアルミ箔で巻いた。冷却中でも APD とプリアンプの動作確認ができるように PWO 結晶の前面は開けておいた。APD と結晶の接着部分の写真は図 3.7 に示した。

電磁カロリメータが完成すると、9 本の素子を冷凍庫内にセットアップし、すべての素子の APD とプリアンプの動作確認をした。すべての動作確認ができたので、-25 まで冷却を開始した。

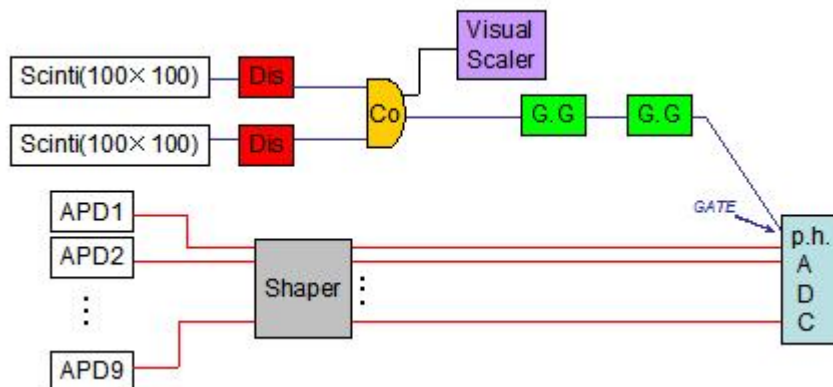


図 3.34: 宇宙線測定での回路図:Dis は DISCRIMINATOR、Co は COINCIDENCE、Shaper は SHAPER AMPLIFIER、G.G は GATE GENERATOR である。

1 日経ち、-25℃まで冷却が完了したので、適正 HV 値の決定を行なった。HV を Vr, Vr-10V, Vr-20V, Vr-30V と変え、それぞれ 1000 イベントずつ測定した。準備実験同様、宇宙線のピークが移動していくことを確認した。適正 HV を表のように決め、40000 イベント測定した。

表 3.2: 受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD の宇宙線測定における適正 HV

素子番号	適正 HV 値 [V]
1	396 (Vr-10)
2	413 (Vr-20)
3	440 (Vr-10)
4	389 (Vr-10)
5	408 (Vr-10)
6	387 (Vr-10)
7	436 (Vr-10)
8	431 (Vr-10)
9	426 (Vr-20)

### 受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ APD 付電磁カロリメータ

受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD のついた素子の宇宙線測定同様の手順で行なった。まず、9 本の素子を用意し、LED の光を照射する前面以外をアルミ箔で遮蔽した。9 本組みの素子を冷凍庫内にセットアップし、すべての APD とプリアンプの動作確認を行なった。確認後、カロリメータの冷却を開始し、再び、半日かけて冷却した後、すべての APD とプリアンプの動作確認を行なった。

すべての装置の動作確認ができたなら、宇宙線測定のための適正 HV 値の決定を行なった。すべての APD に印加する HV を Vr 値  $\pm 10\text{V}$  の範囲で変化させ、適

正 HV を表 3.3 に示すように決定した。この HV 値で 4000 イベントのデータを取った。

表 3.3: 受光面積  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD の宇宙線測定における適正 HV

素子番号	適正 HV 値 [V]
1	400 (V <sub>r</sub> )
2	400 (V <sub>r</sub> )
3	400 (V <sub>r</sub> )
4	400 (V <sub>r</sub> )
5	410 (V <sub>r</sub> +10)
6	402 (V <sub>r</sub> +2)
7	400 (V <sub>r</sub> )
8	396 (V <sub>r</sub> -4)
9	400 (V <sub>r</sub> )

### 3.2.4 LED を用いた APD のゲイン測定

受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD と 受光面積  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD について、-25 におけるゲインと HV の関係を明らかにしておく必要があった。APD はゲインによって、信号/雑音の比 (S/N 比) のもっともよいところがあるのである。宇宙線測定のセットアップのまま、-25 で、用意しておいた LED の光を照射して、各 APD のゲインと HV の相関を求めた。

まず受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD について、LED の光が全 APD まで届いていることを確認した。今後の実験では、宇宙線測定で使った HV 値を NV<sub>r</sub> 値 (New V<sub>r</sub> 値) として基準にしていく。LED の光が全 APD に届いていることを確認したので、HV を NV<sub>r</sub> 値から、10V 刻みで下げていき、NV<sub>r</sub>-50V まで測定した。これで受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD については、ゲインと HV の関係が 6 点測定できたことになる。

受光面積  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD については、受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD についてと同様に、宇宙線測定で APD に印加した HV を NV<sub>r</sub> 値として基準とすると、HV を NV<sub>r</sub> 値から、10V 刻みで下げていき、NV<sub>r</sub>-40V まで測定した。

### 3.2.5 150MeV 電子測定

広島大学の REFER で、150MeV の電子線を用いて、電磁カロリメータの性能評価実験を行なった。受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD のついたカロリメータについて、そのエネルギー分解能の測定、HV 依存、位置依存、温度依存を測定することができた。

## セットアップ

まず、実験セットアップの概略図を図 3.35 に示す。

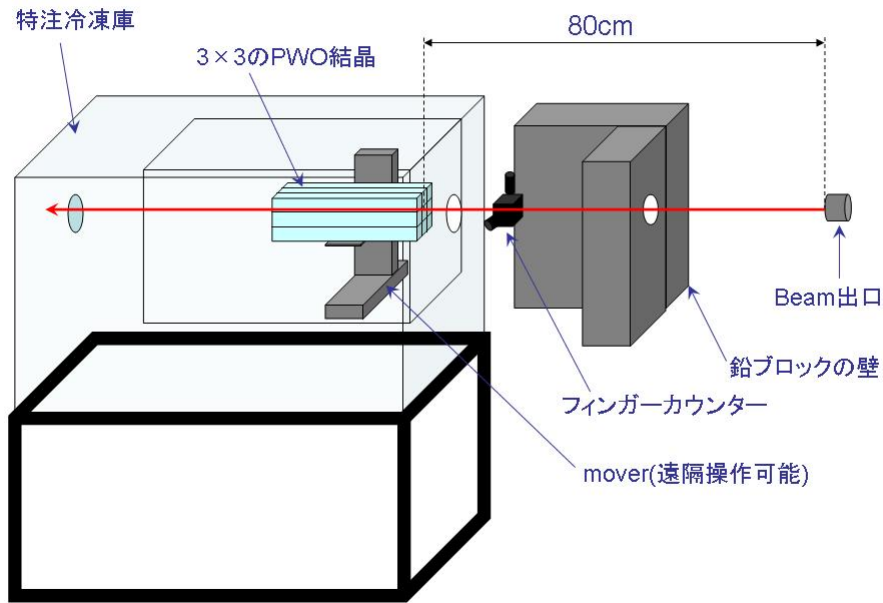


図 3.35: 150MeV 電子線測定実験でのセットアップ (概略図)

REFER のビームのフォーカスポイントはビーム出口から 80cm のところである。その場所の近くには、ビームの電磁石などの電源があり、外部ノイズがのる可能性があったが、冷凍庫の中にカロリメータを設置するので、電磁遮蔽はある程度できているし、カロリメータの性能評価で、あまり広がったビームでの測定は誤差を大きくするので、このフォーカスポイントにカロリメータを設置することにした。カロリメータの約 20cm 前方にフィンガーカウンターを置いた。フィンガーカウンターは、前述のプラスチックシンチレータで、2mm のファイバー状のシンチレータである。これを 2 本十字に重ね、その 2 つの信号の COINCIDENCE を取ることで、 $2 \times 2\text{mm}^2$  の交点を通過した電子だけを選び、測定することができる。

REFER ではノイズ対策が以前からの課題であった。本実験においてもノイズ対策にはかなりの時間を費やした。その結果、振幅が数 V あったノイズを、10~20mV まで抑えることができた。REFER ではビーム実験行なう入射器室と、測定機器などを置いている測定室の 2 つの部屋を使った。REFER には大きなグラウンドがあり、ムーバー電源と冷凍庫のグラウンドはその大きなグラウンドに落とすとした。その他の測定系の電源は測定室でグラウンドを共通にした。冷凍庫内では、冷凍庫の内壁とムーバーとカロリメータのグラウンドがつながってグラウンドが共通になってしまわないように注意した。その様子を図 3.36 と 3.37 に示す。カプトンなどを使い、冷凍庫内でグラウンドが共通にならないように注意した。すべての装置のグラ

ンドを一点で共通にしたのは、装置と装置のいたるところでグラウンドを共通にすると、そこで小さいループができて、それがノイズ源にもなりうるからである。



図 3.36: 冷凍庫内のカロリメータの様子(横から):カロリメータは電磁遮蔽のため、アルミ箔で覆っている。前面はLEDでのAPDの動作確認を行なうことができるように開けている。

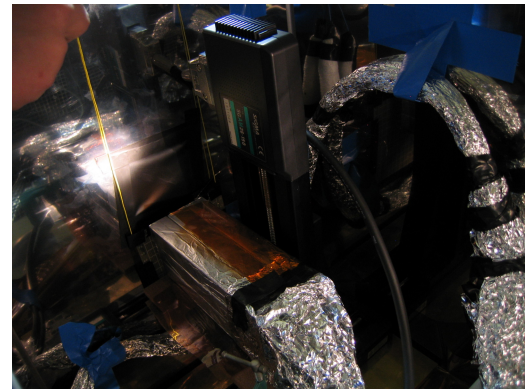


図 3.37: 冷凍庫内のカロリメータの様子(斜め後ろから):ビーム実験用の貫通穴は遮光シートで遮光している。

また、ビームパイプなどからも電子が飛来してきており、それがノイズになっていたので、フィンガーカウンターの周りを鉛ブロックを積んで、遮蔽した。また、コリメータをおくと、コリメータを通過するときに電子ビームが散乱され、ビームの精度が落ちることが考えられたので、コリメータは設置しなかった。そのかわりに、ビームの強度を下げるために、ビームパイプの上流にある、スリットを狭めた。具体的な値は、左右両方とも、25 から 35.5 へ変えた。これにより、ビーム上流で強度を下げていたので、カロリメータに入る電子ビームが、その間で散乱される可能性はかなり低くなったと言える。その遮蔽の様子を図 3.38 と 3.39 に示す。

セットアップの最後として、図 3.40 に 150MeV 電子線測定での回路図に示す。トリガー条件は以下のようにになっている。

1. データ収集システムがデータ記録可能な状態である。これを満たすために、トリガーの veto に  $1\mu\text{s}$  のゲートを入力している。
2. REFER へ電子を入射するタイミングではない。これは、REFER へ電子を入射する際、非常に大きいノイズが乗る。このノイズは周期的なので、入射タイミングの反対のゲートとコインシデンスを取ることで影響をなくすることができる。
3. 電子ビームが、フィンガーカウンターの十字に交差しているところを通過したとき。

#### ムーバーの位置較正

本実験で使用したムーバーは  $2\mu\text{m}$  単位で位置の調節ができる。また、このムーバーは、コントローラを PC と接続することで、その PC 上から遠隔操作すること

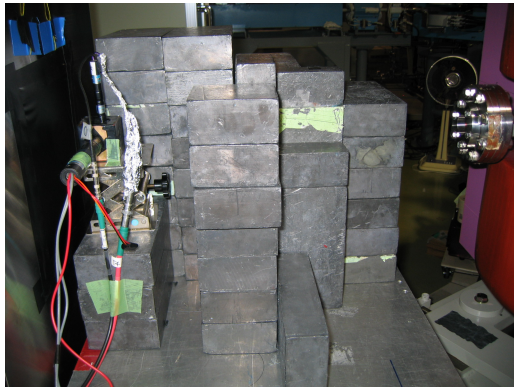


図 3.38: ビーム出口と冷凍庫の間の様子 (横から):ビーム起源のノイズを遮蔽するための壁。



図 3.39: ビーム出口と冷凍庫の間の様子 (斜め前から):コリメータはビームを絞れる一方で散乱された電子を作ってしまうので、コリメータは置いていない。

ができる。ムーバーの位置を変えたいときは、PCのハイパーターミナル上で、座標を指定することで可能である。ビームをカロリメータの中心、つまり5番の素子の中心に当てたいとき、ムーバーの座標の値を何にすればいいのか、そのムーバーの座標とカロリメータの位置とビームとの対応関係を明らかにしておくことは、当然必要である。そこで、ムーバーの位置較正を行なった。

APDに印加する適正HVの決定については、次の3.2.5を参考。実際に印加したHV値は表3.4に示す。

表 3.4: 受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD のムーバーの位置較正における適正 HV

素子番号	HV 値 [V]
1	376
2	357
3	417
4	367
5	387
6	360
7	418
8	407
9	405

まず、上下方向の中心から求める。冷凍庫の冷却前に、ビームラインと思われる位置にムーバーを移動させておくことが必要である。-25 までの冷却後、その位置からムーバーを 23mm 下へ移動させた。各素子の一辺の長さは 22mm であるが、各素子をアルミ箔で包んでおり、各素子の間にはそのアルミ箔が 2 層あるので、各素子の中心間距離を 23mm として実験を進めた。今、ムーバーの位置は下に移動しているので、ビームは結晶の 2 番に当たるはずである。この状態で、





ビームを照射し、1000 イベントデータをとる。データは、図 3.41 に示す。

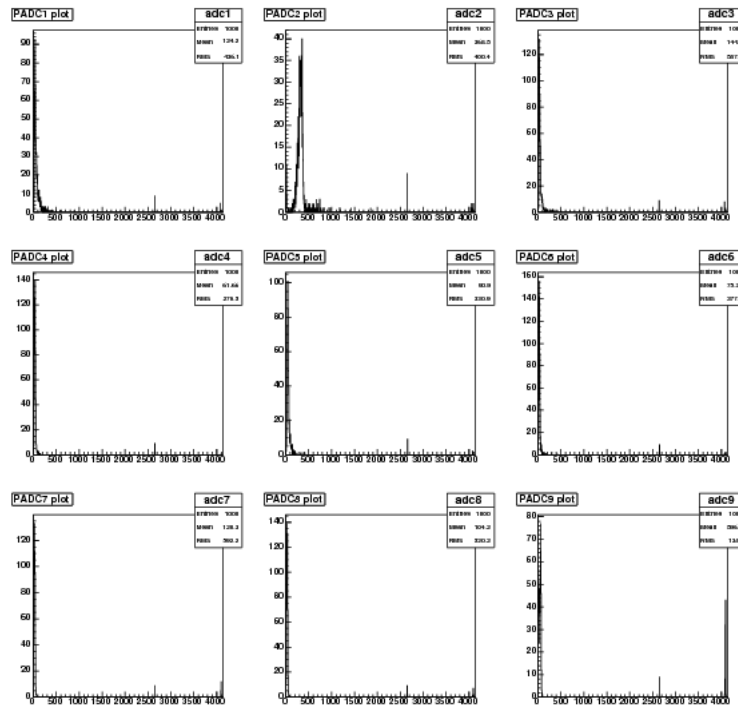


図 3.41: ムーバーの位置較正時の ADC 分布 (1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。ビームの照射されている 2 番素子の 300ch 付近にピークが見える。

次に、この位置からムーバーを 2mm 上へ移動させ、再びビームを照射し、1000 イベントデータをとる。また上へ 2mm 移動させ、1000 イベントデータを取る。これを、冷却前に中心と仮定しておいた位置から上へ 23mm の位置まで繰り返す。

つまり、仮定したビーム中心位置座標から  $\pm 23\text{mm}$  を 2mm 刻みでデータを取ったので、24 個のデータを取ることができた。このデータから、5 番の素子に落としたエネルギーを抜き取り、各座標での、位置とエネルギーのヒストグラムを作った。このヒストグラムからカロリメータの中心とムーバーの座標との関係を明らかにした。

左右方向も、上下方向と同様の方法で、カロリメータの中心とムーバーの座標との対応関係を明らかにした。左右方向の仮想中心から左右に  $\pm 23\text{mm}$  の範囲を 2mm 刻みでムーバーを移動させ、各座標で 1000 イベントずつデータを取った。左右の座標と 5 番の素子にビームが落としたエネルギーとの関係をヒストグラムにし、カロリメータの中心とムーバーの座標との対応関係を明らかにした。

## エネルギー較正

エネルギー較正は 1 本ずつ、各素子の中心にビームを照射し行なう。22 × 22 × 180mm<sup>3</sup> の PWO 結晶の中心に 150MeV の電子線を照射すると、122.7MeV のエネルギーを落とすことが GEANT4 のシミュレーションによりわかっている [7]。

これにより、各素子からの信号を処理する P.H.ADC の ch とエネルギーとの関係がわかる。つまり、ch から MeV へと変換するための、変換係数 [MeV/P.H.ADC ch] がわかる。ただし、P.H.ADC にはオフセットがあり、シグナルを入れない場合でも、ある ch にピークが立つ。これをペDESTAL という。122.7MeV を落としたときの ch 数に相当するものは、ビーム入射時の P.H.ADC の ch 数からペDESTAL ch を差し引いたものである。故にエネルギー較正を行なうとき、各素子にビームを照射したデータとペDESTAL ランのデータが必要である。

ペDESTAL ランでは、トリガー条件を CLOCK GENERATOR<sup>1</sup>からのシグナルにして測定を行なった。そのため、P.H.ADC に GATE 信号が入り、シグナルを計測しているときは、何もインプット信号がない状態である。これをペDESTAL ランとして、エネルギー較正毎に行なったランである。

また、APD に印加する HV 値にも考慮が必要である。このエネルギー較正は較正後のエネルギー分解能測定のためのものなので、できるだけエネルギー分解能の良い HV 値を印加しなければならない。分解能は APD のゲインに依存しているので、各 APD の HV 値とゲインの関係を知る必要があった。

宇宙線測定後に、-25 で LED の光を用いて、各 APD のゲインカーブを求めた。しかし、これは荷電粒子が PWO 結晶中に入り、PWO が蛍光してその光を APD が受け、あるゲインでシグナルを出力したものではない。しかし、この測定のとくと温度が同じであるので、このゲインカーブをスケールリングすることで、150MeV 電子線測定における APD の HV とゲインの関係がわかる。そこで、受光面積  $10 \times 10 \text{mm}^2$  の APD の付いたカロリメータでの宇宙線測定でのデータをもとに、APD の HV とゲインの関係を求めた。例としてカロリメータの中心の素子である 5 番のゲインカーブを図 4.25 に載せる。また、すべての素子のゲインと HV の関係を表 3.5 に載せる。

表 3.5: 素子への HV とゲインの相関表

素子番号	ゲイン [倍]							
	100	200	300	400	500	600	700	800
1	339	364	376	383	388	391	394	396
2	303	337	357	371	381	389	395	400
3	377	404	417	425	429	433	436	438
4	326	355	367	374	379	383	385	387
5	350	374	387	394	399	402	405	407
6	322	347	360	369	374	378	381	383
7	392	409	418	423	428	431	434	436
8	356	393	407	415	420	423	426	429
9	369	393	405	412	416	419	421	423

この表をもとに、APD に HV を印加していき、それぞれの素子のノイズのレートと振幅をオシロスコープで観察した。すると、ゲインが 300 倍のときからノイ

<sup>1</sup>NIM モジュールのひとつで、指定した周期で NIM 信号を出力することができる。

ズの振幅はほとんど変化しなくなった。以上から分解能の測定ではゲイン 300 倍を与える HV 値で測定をすることにした。

HV 値を決定し、印加したので、各素子のペDESTALランを開始し、続いてエネルギー較正を行なった。以下にペDESTALランのときのデータ(図 3.42)と、各素子を照射したときのデータを載せる(図 3.43~3.51)。

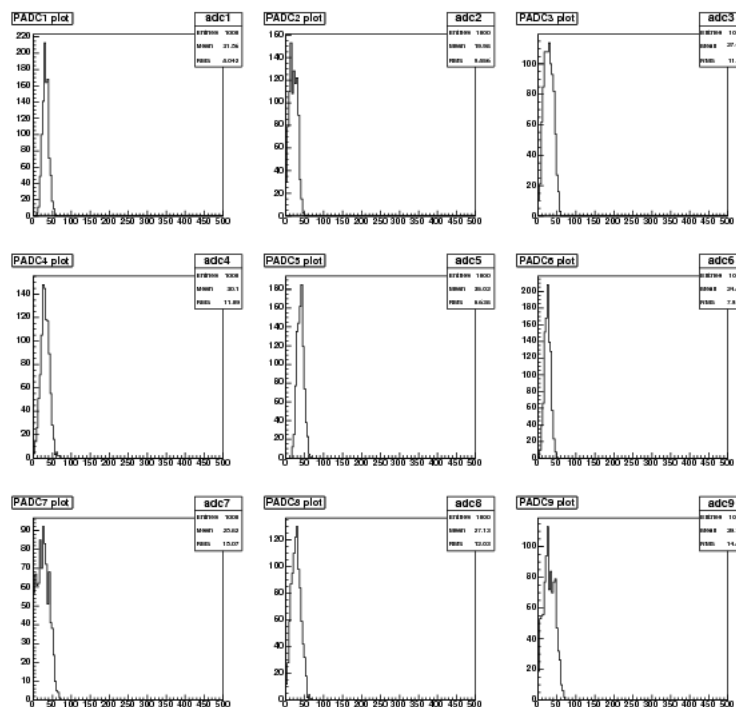


図 3.42: ペDESTALランのときの ADC 分布 (1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。

### 電磁カロリメータのエネルギー分解能測定

エネルギー較正を行ない、各素子の変換係数 [MeV/P.H.ADC ch] が求められることができた。なので、電磁カロリメータのエネルギー分解能の測定を行なった。中心の 5 番の素子の中心に電子ビームを照射し、2 万イベントのデータを取った。続いて 1 万イベントのデータも取った。このとき、各 APD へ印加している HV は表 3.5 のゲイン 300 倍を与える HV 値である。

### エネルギー分解能の HV 依存の測定

APD のゲイン 300 倍でのエネルギー分解能測定を行なうことができた。次は、このエネルギー分解能の HV 依存性を測定した。APD に印加する HV 値を表 3.5 を元に、ゲインが 100 倍、600 倍、700 倍、800 倍を与える HV 値でそれぞれ測定した。測定方法はゲイン 300 倍のときと同様に行なった。

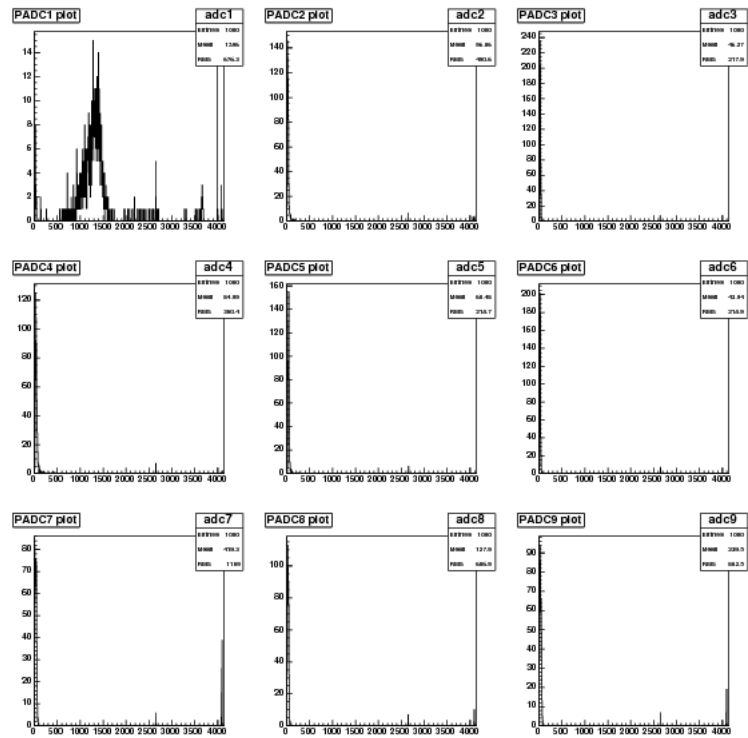


図 3.43: 1 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布 (1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。

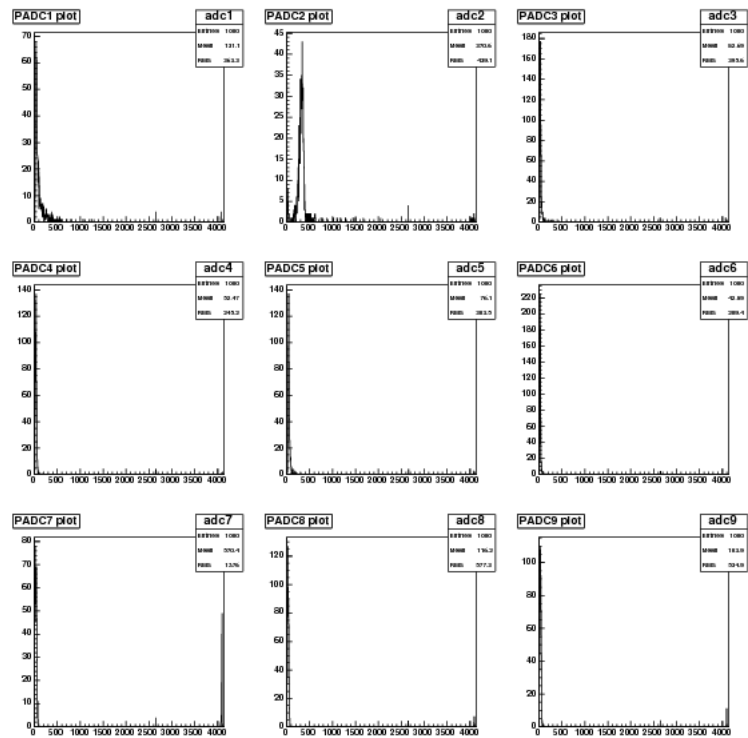


図 3.44: 2 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布 (1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。

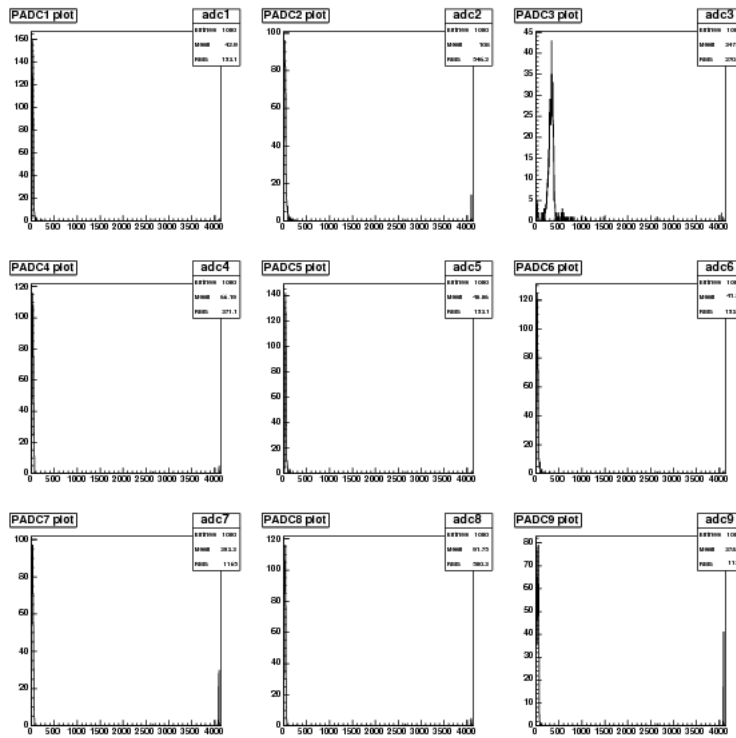


図 3.45: 3 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布 (1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。

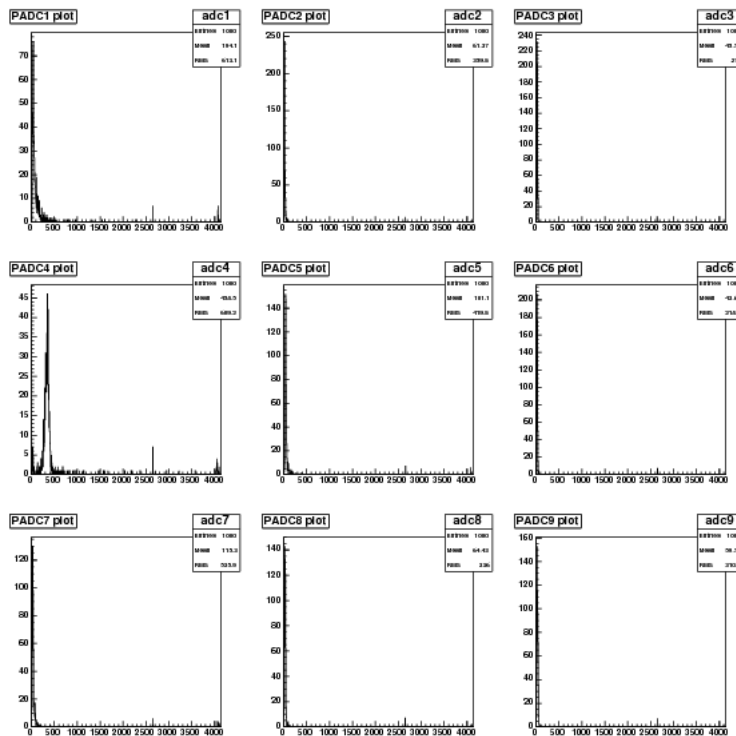


図 3.46: 4 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布 (1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。

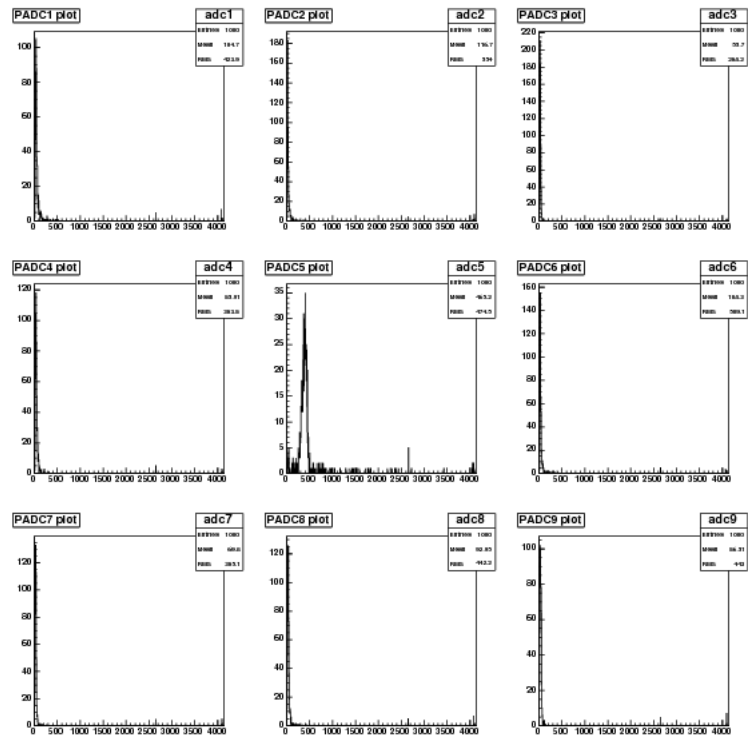


図 3.47: 5 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布 (1000 イベント): 縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。

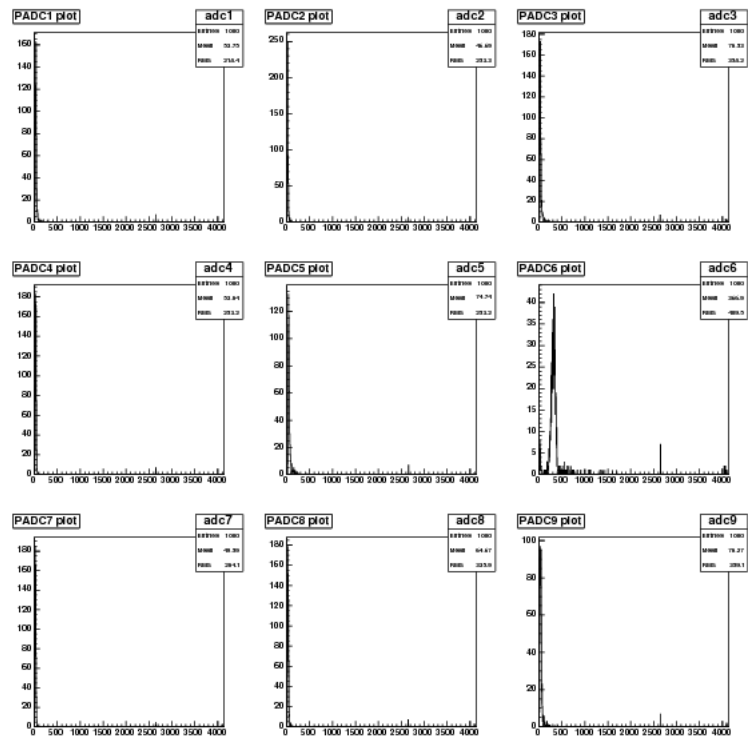


図 3.48: 6 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布 (1000 イベント): 縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。

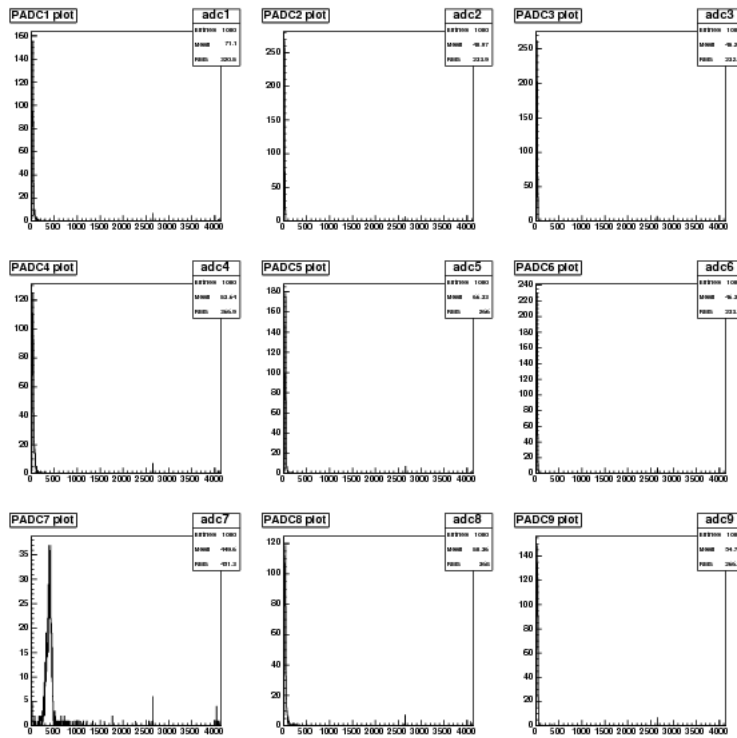


図 3.49: 7 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布 (1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。

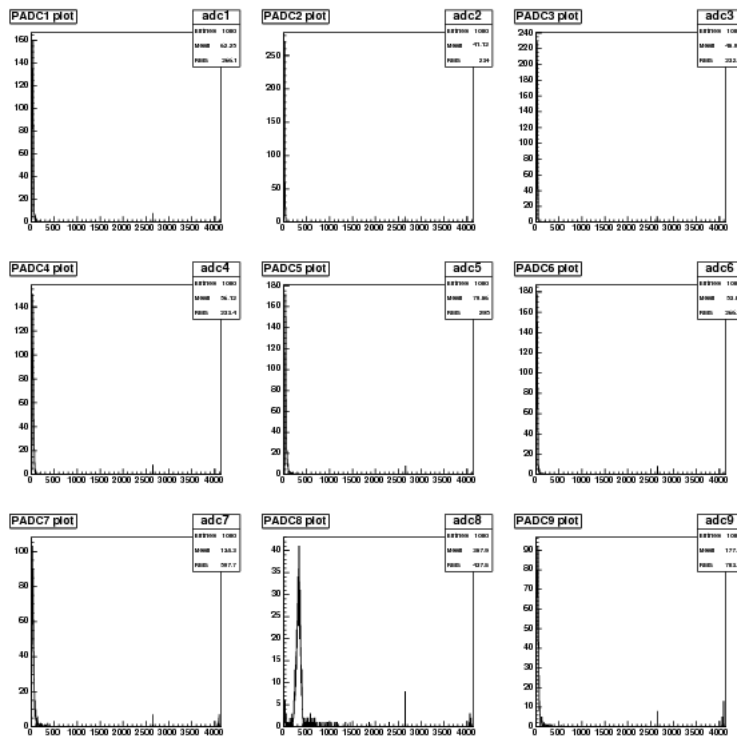


図 3.50: 8 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布 (1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。



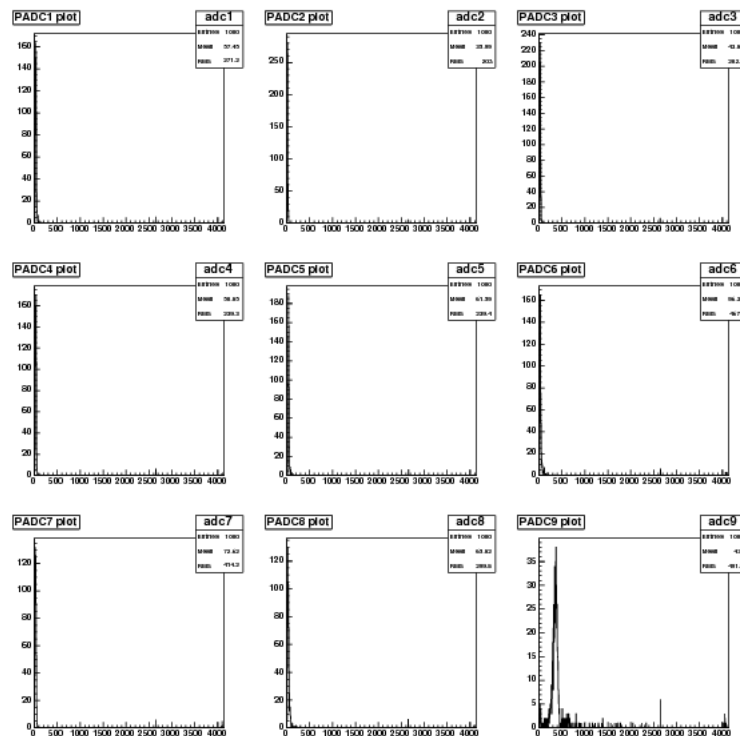


図 3.51: 9 番に電子ビームを照射したときの ADC 分布 (1000 イベント):縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。

まず、それぞれの素子のエネルギー較正を行い、それぞれのカロリメータの変換係数を求めた。そして、5 番の素子の中心に 150MeV 電子線を照射し、1 万イベントのデータを取った。

#### エネルギー分解能の位置依存の測定

素子に印加する HV 値を APD のゲイン 700 倍の値にし、エネルギー分解能の位置依存性の測定を行なった。測定を行なった場所は、図 3.52 の赤い点の示す場所である。図に示す、計 25 点にそれぞれビームを照射し、1000 イベントずつデータを取った。

#### エネルギー分解能の温度依存の測定

エネルギー分解能の HV 依存、位置依存を測定できたので、最後に温度依存の測定を行なった。今までは ALICE 実験と同じ、-25 での測定を行なってきた。次は、-35 にてエネルギー分解能の測定を行なった。各素子に印加する HV 値は、-25 でのゲイン 300 倍を与える値にした。この状態で、エネルギー較正を各素子について行い、最後にカロリメータの中心にビームを照射し、1 万イベントのデータを取った。

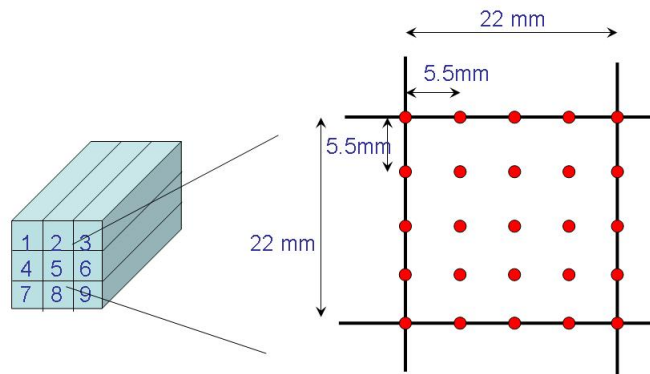


図 3.52: 位置依存性測定を行なった場所:赤い点の位置にビームを照射した。位置感覚は 5.5mm である。

#### LV 電源を電池にしての測定

本来ならば APD の設計上ゲイン 100 倍のときがもっとも S/N 比が良い。しかし、APD 起源のノイズより振幅の大きいノイズがあり、測定に、APD 起源のノイズがもっとも寄与する状況には至っていなかった。

そこで、LV 電源からのノイズの影響を減らすために、LV 電源を 1.5V の単一電池で代用した。+12V には電池 8 本、-6V には電池 4 本を使用した。その様子を図 3.53 に示す。また、各素子に印加する電圧はゲイン 300 倍をあたえる値にした。この状態で、各素子のエネルギー較正を行ない、最後にカロリメータの中心にビームを照射し、1 万イベントデータを取った。

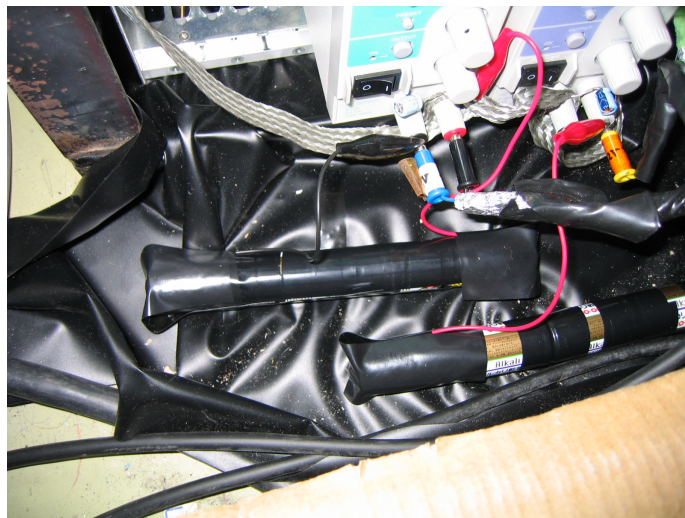


図 3.53: LV を乾電池で代用した様子:乾電池を直列につなげて+12V、-6Vを作った。

## 第4章 解析

各測定において、P.H.ADCでのデータは取ることができた。しかし、各P.H.ADCにはペDESTALがあるのので、その値を差し引き、物理量とP.H.ADCのch数との対応関係を求めなければならない。また、150MeV電子線測定実験においては、実験のパラメータを変える度にエネルギー較正を行う必要があり、それに伴い、各素子の変換係数を求める必要があった。

この章では各測定において行なった解析について述べる。

### 4.1 宇宙線測定

#### 4.1.1 準備実験での宇宙線確認の定量化

準備実験でとれたADC分布(図3.24~3.29)を見ると印加するHVを下げるとそのピークが左に移動している様子があった。2つの素子は上下に重ねて置いておる。また、トリガー条件は、2つの素子を上下にはさんだシンチレータの同期である。つまり、2つの素子のAPD分布には相関があるはずである。それを確認するために、2つの素子の相関を見るために、その散布図を作成した(図4.1~4.3)。また、最適HVをかけたときの散布図をに図示す。

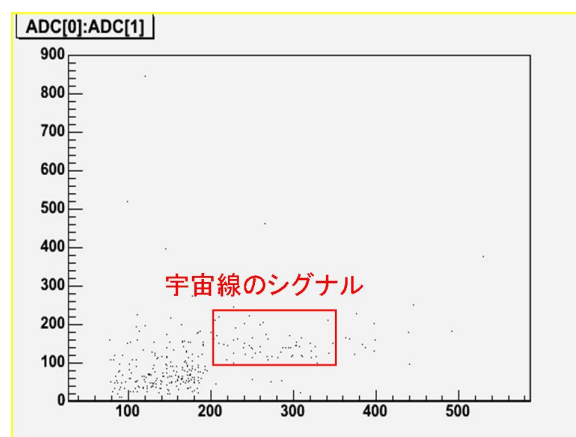


図 4.1: 準備実験での散布図:縦軸が受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD の付いた素子 ADC ch、横軸が  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD の付いた素子の ADC ch である。また印加した HV はそれぞれ  $V_{T-20V}$  である。

散布図から、相関のある宇宙線の分布の移動が確認でき、最適HVを印加したときの測定では、宇宙線の分布がはっきりとノイズ成分から離れて確認することができる。

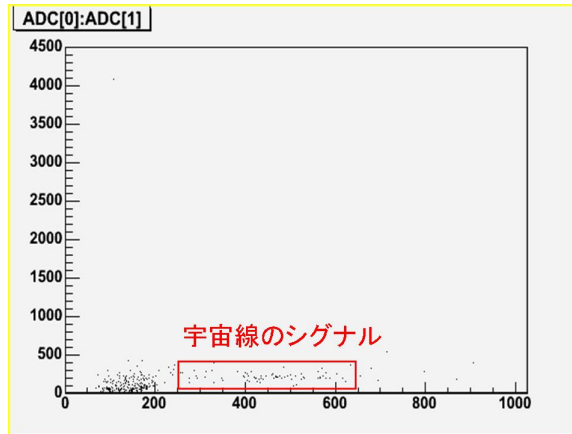


図 4.2: 準備実験での散布図:縦軸が受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD の付いた素子 ADC ch、横軸が  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD の付いた素子の ADC ch である。また印加した HV はそれぞれ  $V_r-10\text{V}$  である。

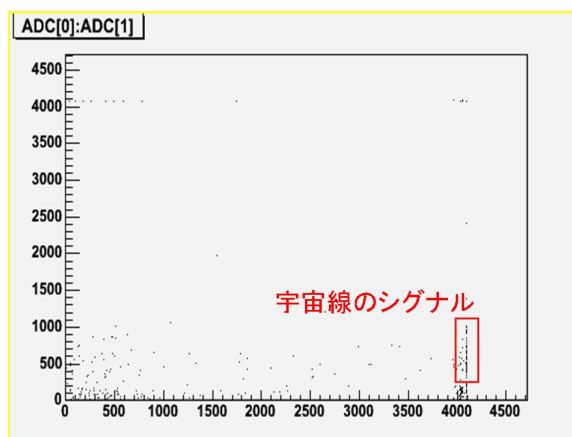


図 4.3: 準備実験での散布図:縦軸が受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD の付いた素子 ADC ch、横軸が  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD の付いた素子の ADC ch である。また印加した HV はそれぞれ  $V_r$  である。

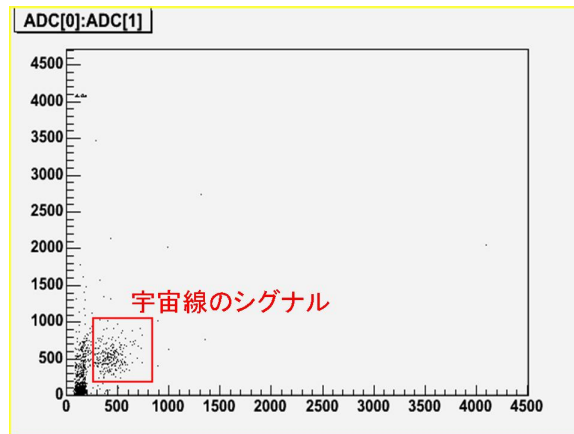


図 4.4: 準備実験での散布図:縦軸が受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD の付いた素子 ADC ch、横軸が  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD の付いた素子の ADC ch である。また印加した HV は受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD の付いた素子が  $V_r$  値 (406V)、横軸が  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD の付いた素子が  $V_r-10\text{V}$  (390V) である。

#### 4.1.2 受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ APD 付電磁カロリメータ

$4 \times 10^4$  イベントの ADC 分布を図 4.5 に載せる。グラフの位置が各素子の位置と対応してある。

宇宙線の測定では、上下に  $100 \times 100\text{mm}^2$  と、カロリメータに対しては少し大きめなシンチレータを設置し、その同期をトリガーとしたので、トリガーが 1 イベント測定したとき、9本のうち何本かは宇宙線が通過していない状況で P.H.ADC が測定することになる。すると宇宙線ではないシグナルのピークが高くなってしまい、宇宙線のピークが見えにくいので、縦軸を log にした分布を図 4.6 に載せる。

#### 4.1.3 受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ APD 付電磁カロリメータ

$4 \times 10^4$  イベントの ADC 分布を図 4.7~4.15 に載せる。

#### LED を用いたゲインカーブプロットの作成

LED の光を 9本の素子に照射し、その P.H.ADC の出力 ch を縦軸に、印加した HV 値を横軸に、そのプロットを作った (図 4.16)。ここで縦軸に用いた P.H.ADC からの ch 数はペDESTAL の ch 数を引いたものではない。しかし、ペDESTAL の値を引かなかったことによるプロットの傾きへの影響はないのでこのプロットの作成にあたっては無視できる。

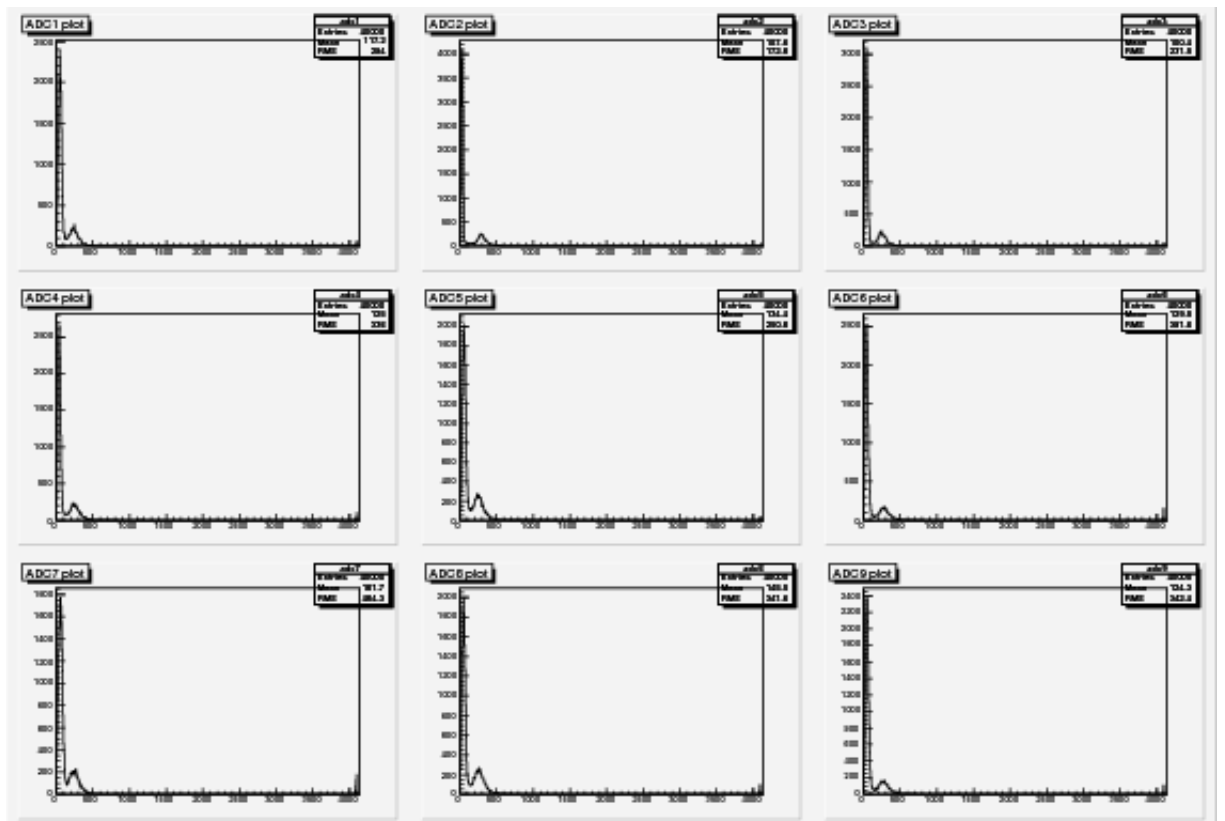


図 4.5: 受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD の付いたカロリメータの  $4 \times 10^4$  イベントの宇宙線測定の ADC 分布:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。

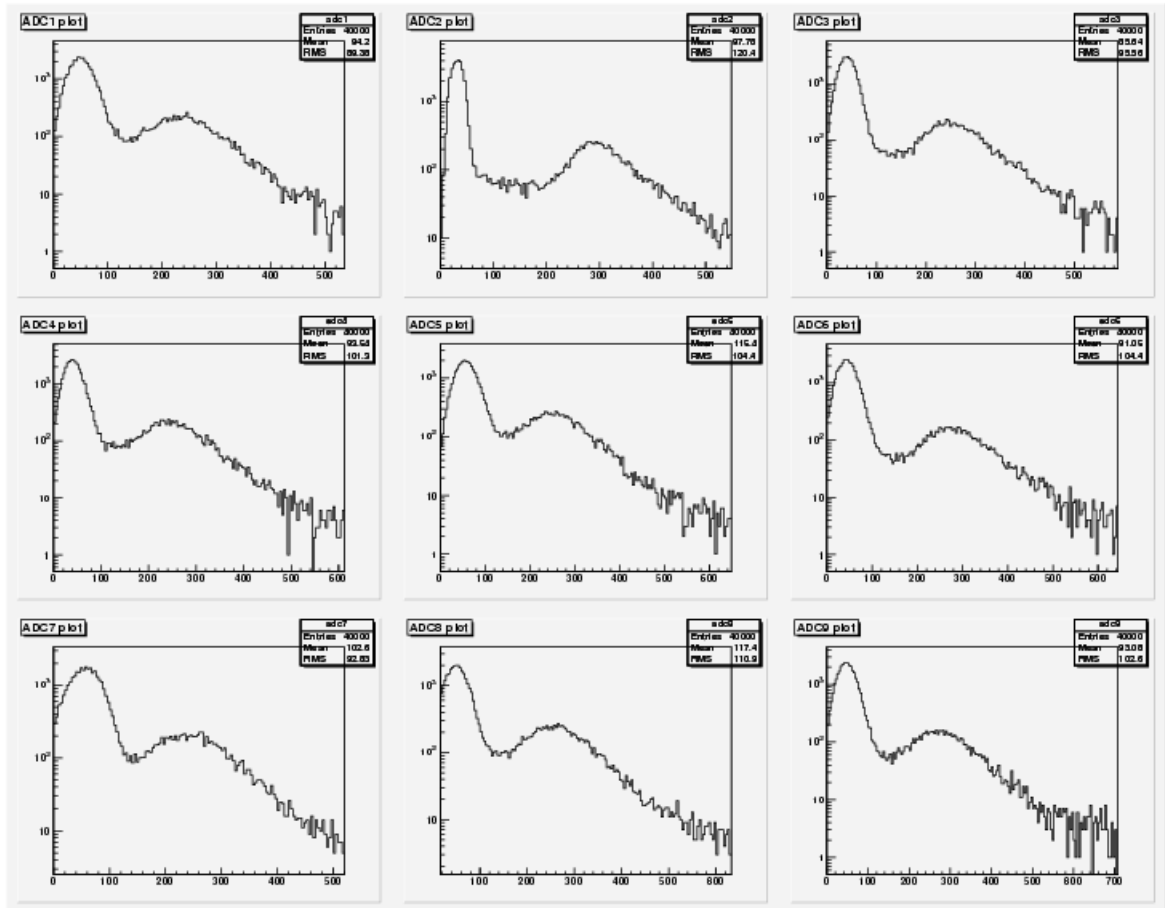


図 4.6: 受光面積  $10 \times 10 \text{mm}^2$  の APD の付いたカロリメータの  $4 \times 10^4$  イベントの宇宙線測定の ADC 分布:縦軸は log スケール

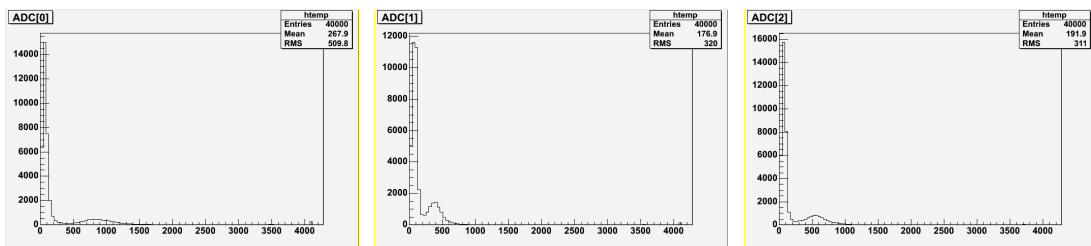


図 4.7: 1 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H. ADC の ch である。  
 図 4.8: 2 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H. ADC の ch である。  
 図 4.9: 3 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H. ADC の ch である。



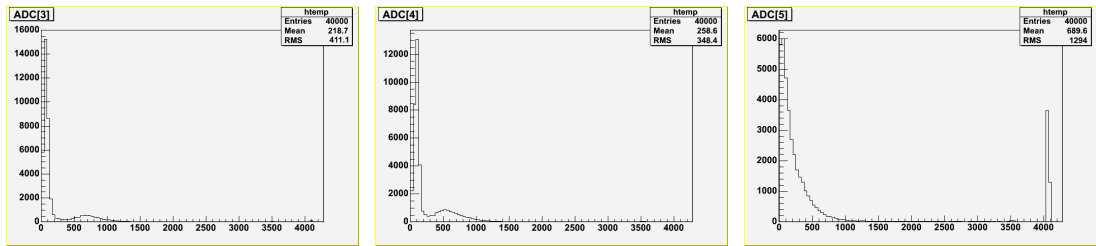


図 4.10: 4 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。  
 図 4.11: 5 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。  
 図 4.12: 6 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。

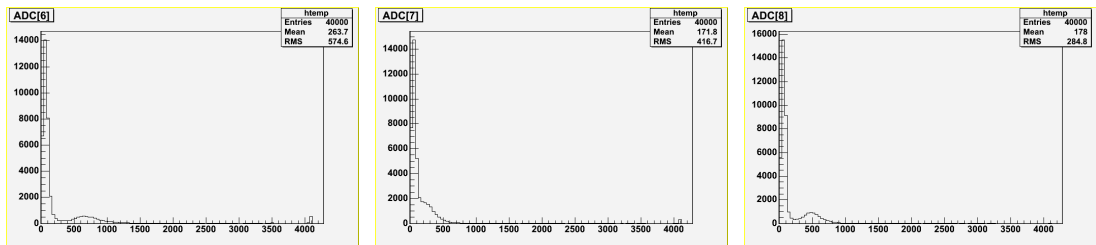


図 4.13: 7 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。  
 図 4.14: 8 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。  
 図 4.15: 9 番素子:縦軸はイベント数、横軸は P.H.ADC の ch である。

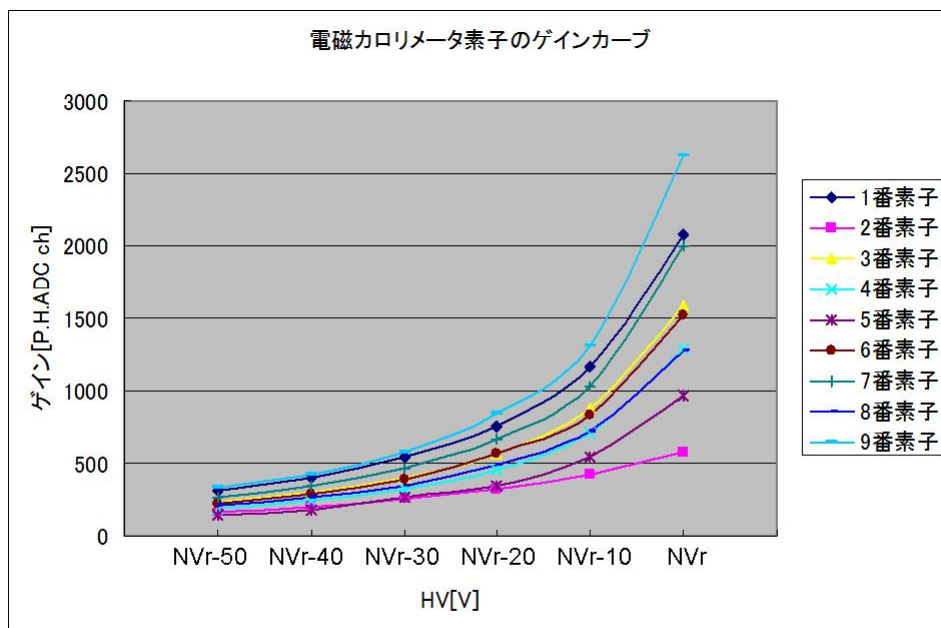


図 4.16: 各素子に LED を照射したときの各素子のゲインカーブ:縦軸は P.H.ADC の出力 ch、横軸は各素子へ印加した HV 値

## 4.2 150MeV 電子線測定

### 4.2.1 ムーバーの位置較正

本実験で使用したムーバーを動かす際、PCのハイパーターミナル上に座標を入力するということはすでに述べた。この際、入力する座標の値は、ムーバー固有の数値を入力する。単位をパルスといい、1パルス $2\mu\text{m}$ に相当する。

ムーバーの位置較正では、座標とその座標での5番素子のP.H.ADCの出力chを対応させ、プロットを作成した(図4.17と図4.18)。また、このプロットにある関数<sup>1</sup>をフィットさせ[2]、ムーバーの中心位置を求めた。このプロットでは、横軸をパルスで表している。

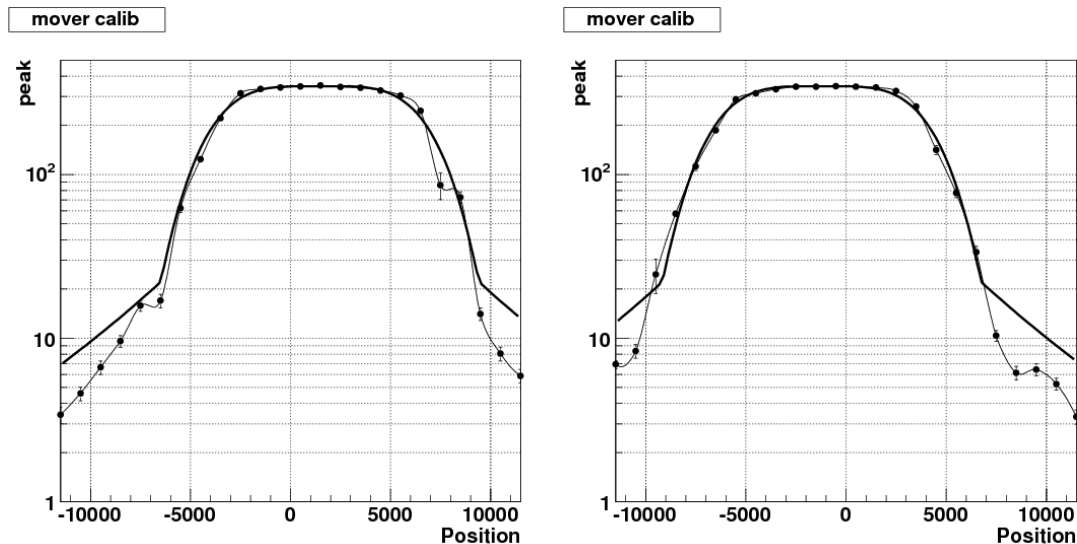


図 4.17: ムーバーの位置と 5 番素子の P.H.ADC の分布:垂直方向、中心は 1469 P.H.ADC パルスであった。  
図 4.18: ムーバーの位置と 5 番素子の P.H.ADC の分布:水平方向、中心は 1207 パルスであった。

この結果、始めに目分量で仮決めしていた中心点よりムーバーの座標は、ビーム上流から見て、1469パルス(2.938mm)右へ、1207パルス(2.414mm)下へ移動させた。

### 4.2.2 エネルギー較正

GEANT4のシミュレーションによると、 $22 \times 22 \times 180\text{mm}^3$ のPWO結晶の中心へ150MeVの電子線を入射した場合、電子線がPWO結晶中で落とすエネルギー分布は図4.19のようになり、ピーク値は122.7MeVとわかっている[7]。

つまり、本実験で行なったエネルギー較正のための測定で得られたP.H.ADCデータのピーク値とペDESTALランでのピーク値の差分のch数が122.7MeVに

<sup>1</sup> $f(x) = A \exp\left(\frac{-(x-x_0)^4}{2.32}\right)$ 、ここで、Aは関数の最大値、 $x_0$ は関数の横軸の中心値である。

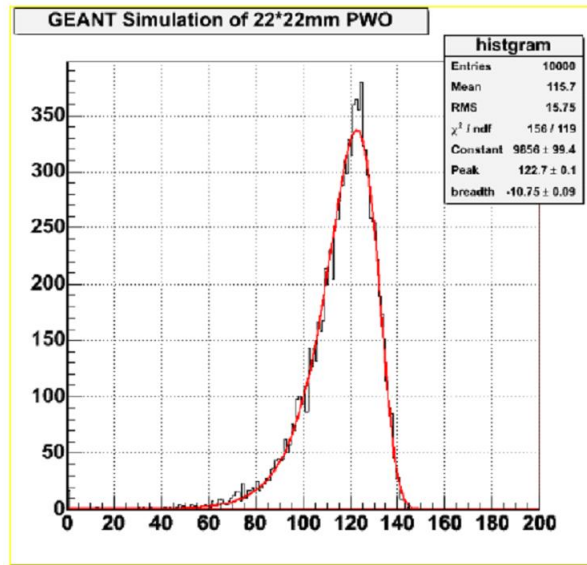


図 4.19: GEANT4 で再現した PWO 結晶中での 150MeV 電子線のエネルギー損失分布 [7]

相当すると考えられる。本実験では、P.H.ADC のピーク値を求めるとき、ペDESTALランも 150MeV 電子線測定もガウス関数をフィットし、その中心値をピーク ch とした。以下、本実験で測定した、APD のゲイン 100 倍、300 倍、600 倍、700 倍、800 倍、LV を電池を使って印加した測定、-35 での測定のすべてのデータでのペDESTAL のピーク ch と電子線を入射したときのピーク ch とそれらから求めた変換係数を表に載せる。

表 4.1: ゲイン 100 倍でのエネルギー較正の結果 (変換係数)

ゲイン 100 倍			
素子番号	ペDESTALピーク [ch]	電子線ピーク [ch]	変換係数 [MeV/ch]
1	30.4	422.0	0.313
2	19.9	136.5	1.05
3	26.9	125.3	1.25
4	29.7	121.7	1.33
5	35.1	155.1	1.02
6	24.4	131.6	1.14
7	21.5	172.7	0.811
8	26.2	108.4	1.49
9	27.5	138.0	1.11

ここで、受光面積  $10 \times 10 \text{mm}^2$  の APD のゲインカーブを作成した。これは、-25 において、LED を用いて作成したゲインカーブを、宇宙線測定で得たデータにスケールしたものである。宇宙線測定で得たデータは図 4.5 である。この分布の横軸の 50~100ch 付近のピークをペDESTALピークとし、300ch 付近のピーク

表 4.2: ゲイン 300 倍でのエネルギー較正の結果 (変換係数)

ゲイン 300 倍			
素子番号	ペDESTALピーク [ch]	電子線ピーク [ch]	変換係数 [MeV/ch]
1	32.0	1297	0.0970
2	19.7	319.1	0.410
3	27.7	326.4	0.411
4	30.3	338.9	0.398
5	38.4	382.0	0.357
6	25.4	313.0	0.427
7	22.7	381.4	0.342
8	26.9	321.0	0.417
9	28.9	354.7	0.377

表 4.3: ゲイン 600 倍でのエネルギー較正の結果 (変換係数)

ゲイン 600 倍			
素子番号	ペDESTALピーク [ch]	電子線ピーク [ch]	変換係数 [MeV/ch]
1	33.8	2173	0.0574
2	19.4	615.6	0.206
3	28.2	619.7	0.207
4	31.6	650.1	0.198
5	36.1	711.7	0.182
6	26.1	619.9	0.207
7	23.3	674.2	0.189
8	28.7	592.1	0.218
9	30.4	694.3	0.185

表 4.4: ゲイン 700 倍でのエネルギー較正の結果 (変換係数)

ゲイン 700 倍			
素子番号	ペDESTALピーク [ch]	電子線ピーク [ch]	変換係数 [MeV/ch]
1	35.0	2555	0.0487
2	19.5	710.5	0.178
3	29.3	715.9	0.179
4	31.9	692.1	0.186
5	36.0	804.2	0.160
6	27.0	739.6	0.172
7	24.5	796.3	0.159
8	29.4	693.1	0.185
9	32.7	758.1	0.169

表 4.5: ゲイン 800 倍でのエネルギー較正の結果 (変換係数)

ゲイン 800 倍			
素子番号	ペDESTALピーク [ch]	電子線ピーク [ch]	変換係数 [MeV/ch]
1	35.7	Break Down	0
2	19.5	826.5	0.152
3	30.4	786.7	0.162
4	33.1	787.3	0.163
5	37.8	910.1	0.141
6	28.7	810.7	0.157
7	26.0	926.4	0.136
8	31.2	849.7	0.150
9	33.9	866.9	0.147

表 4.6: 電池で LV を印加した測定でのエネルギー較正の結果 (変換係数)

ゲイン 300 倍			
素子番号	ペDESTALピーク [ch]	電子線ピーク [ch]	変換係数 [MeV/ch]
1	31.0	1343	0.0935
2	18.9	320.7	0.407
3	27.1	335.3	0.398
4	29.8	331.0	0.407
5	35.3	386.1	0.350
6	24.4	315.7	0.421
7	22.0	380.9	0.342
8	26.0	327.1	0.407
9	27.6	361.2	0.368

表 4.7: -35 でのエネルギー較正の結果 (変換係数)

ゲイン 300 倍@-25			
素子番号	ペDESTALピーク [ch]	電子線ピーク [ch]	変換係数 [MeV/ch]
1	31.3	Break Down	0
2	19.4	505.8	0.252
3	27.3	609.4	0.211
4	29.1	Break Down	0
5	35.6	679.6	0.191
6	25.5	Break Down	
7	22.3	732.6	0.173
8	26.8	576.5	0.223
9	29.8	667.0	0.193

クを宇宙線のシグナルのピークとした。それぞれのピークにガウス関数をフィッティングして、そのピークを差し引いた。その P.H.ADC の ch 数を宇宙線が PWO 結晶中で落としたエネルギー相当として、この測定での変換係数を求めた。そのときの変換係数 [MeV/P.H.ADC ch] を表 4.8 に載せる。

表 4.8: 宇宙線測定での変換係数 [MeV/P.H.ADC ch]

NVr 値			
素子番号	ペDESTALピーク [ch]	電子線ピーク [ch]	変換係数 [MeV/ch]
1	50.2	232.5	0.165
2	32.0	295.8	0.114
3	40.7	250.2	0.143
4	40.7	243.9	0.148
5	56.6	247.9	0.157
6	43.8	277.2	0.129
7	56.4	238.3	0.165
8	50.0	256.8	0.145
9	47.4	270.0	0.135

この変換係数を使って、宇宙線測定時の APD のゲインを求める。ここで、変換に用いた係数を表 4.20 にまとめる。APD yeild については、本実験で用いた APD は受光面積が  $10 \times 10 \text{mm}^2$  なので  $17.6 [\text{pe}/\text{MeV}]$  として計算した。この [pe] という単位は、“PhotoElectron” を表しており、APD yeild  $17.6 [\text{pe}/\text{MeV}]$  という値が意味することは、PWO 結晶中を光子や電子などが通過し、 $1 \text{MeV}$  のエネルギーを落としたとき、APD の受光面からは量子効果により、 $17.6$  個の光電子が放出されるということである。また、図 3.17 より、宇宙線が落とす MIP のピーク値が、約  $2 \text{MeV}$  で、PWO 結晶の密度が  $8.28 \text{g}/\text{cm}^3$  で、結晶の垂直方向の距離は  $22 \text{mm}$  なので、結晶中で宇宙線は約  $30 \text{MeV}$  のエネルギーを落とすとした。その結果、図 4.21~4.29 に示すようなゲインカーブを得た。

図 4.20: ゲインカーブに用いた係数表

APD yeild	$4.4 [\text{pe}/\text{MeV}] @ \text{受光面積 } 5 \times 5 \text{mm}^2$
プリアンプ感度	$0.133 [\mu\text{V}/\text{electron}]$
シェイパーゲイン	2 [倍]
P.H.ADC	$2.5 [\text{V}]/4000 [\text{ch}]$

ちなみに、このときの各素子のゲインを表にまとめる。

### 4.2.3 エネルギー分解能測定

エネルギー較正において、各測定時の変換係数を求めることができた。その係数を用いて、エネルギー分解能の導出を行なった。

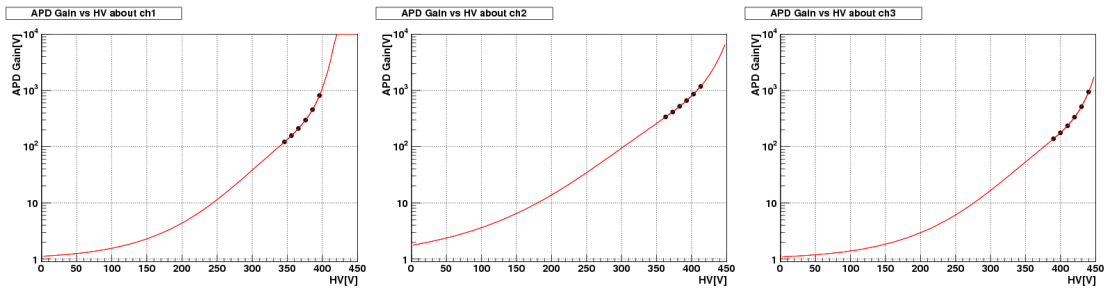


図 4.21: 1 番の素子のゲインカーブ:縦軸が APD のゲイン [倍]、横軸が HV 値 [V] イン [倍]、横軸が HV 値 [V] イン [倍]、横軸が HV 値 [V] イン [倍]

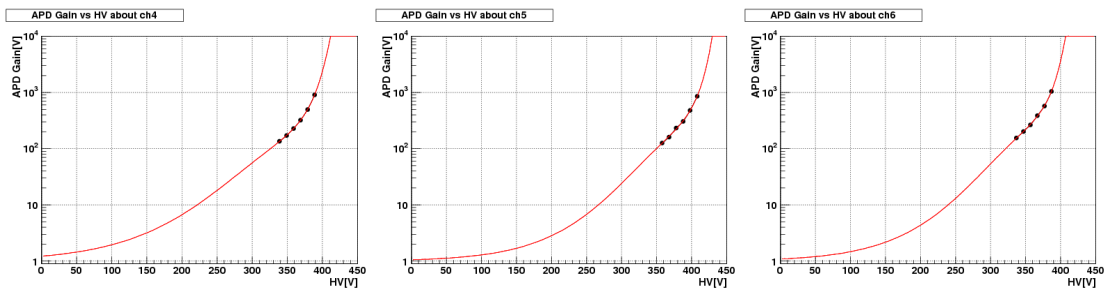


図 4.24: 4 番の素子のゲインカーブ:縦軸が APD のゲイン [倍]、横軸が HV 値 [V] イン [倍]、横軸が HV 値 [V] イン [倍]、横軸が HV 値 [V] イン [倍]

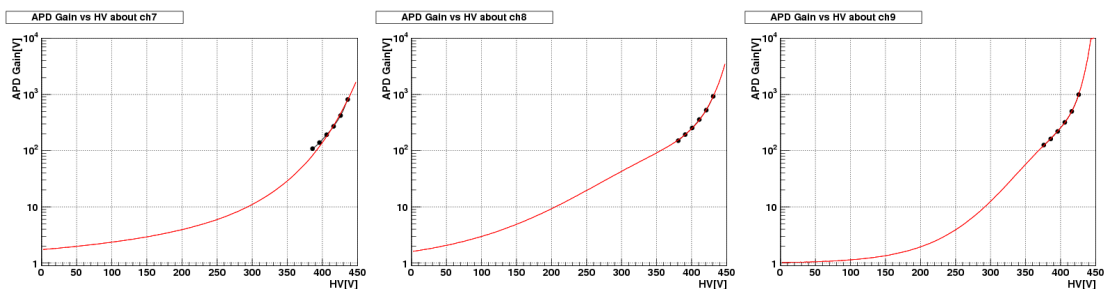


図 4.27: 7 番の素子のゲインカーブ:縦軸が APD のゲイン [倍]、横軸が HV 値 [V] イン [倍]、横軸が HV 値 [V] イン [倍]、横軸が HV 値 [V] イン [倍]

表 4.9: 宇宙線測定時の受光面積 APD のゲイン

素子番号	ゲイン [倍]
1	811.2
2	1174
3	932.3
4	904.2
5	851.3
6	1039
7	809.5
8	920.3
9	990.6

まずは、ビームを照射して得られたデータから、イベント毎にエネルギーを計算し、そのエネルギーの分布図を作った。イベント毎の各素子の ch 数からペDESTALランのピーク値の差を取り、その ch 数に変換係数をかけ、その素子で落とされたエネルギーを算出する。その各素子について求めたエネルギーを 9 本分足し合わせ、イベント毎に 150MeV の電子線が落とエネルギーを求めた。

つまり、ペDESTALランで各素子の P.H.ADC 分布にガウス関数

$$f(x) = A \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4.1)$$

でフィットし、そのピーク値  $m$  を求めた。そして、ある  $n$  番目のイベントでの  $i$  番目の素子の P.H.ADC ch 数を  $p_i$  とし、ペDESTALランで求めたピーク ch を  $m_i$  すると、その  $n$  番目のイベントで 150MeV 電子線が落としたエネルギー  $E_n$  は

$$E_n = \sum_{i=1}^9 (p_i - m_i) \quad (4.2)$$

とかける。そして、求める分布は、測定でのイベント数を  $N$  とすると、

$$E = \sum_{n=1}^N E_n \quad (4.3)$$

である。

作成したエネルギー分布図に再び、ガウス関数をフィットし、その中心値をその測定で 150MeV 電子線がカロリメータ中で落としたエネルギーとした。そして、そのガウスフィットの幅  $\sigma$  をそのエネルギーで割った値をその測定のエネルギー分解能  $\sigma/E$  として求めた。

#### 4.2.4 電磁力カロリメータの HV 依存の測定

本実験におけるエネルギー分解能の算出方法は述べた。同様の方法で、エネルギー分解能の HV 依存を求めた。各 HV 値におけるエネルギー分解能を算出した。



また、HV 依存測定では、その  $\sigma/E$  を式 5.8 に示したように分解し、各項の値を求めた。

#### 4.2.5 電磁カロリメータの位置依存の測定

位置依存の測定では、測定を行なった位置でのエネルギー分解能をそれぞれ求め、また、5 番素子で落としたエネルギーの分布も作成した。

#### 4.2.6 電磁カロリメータの温度依存の測定

冷凍庫の温度を  $-25$  から  $-35$  までさげ、エネルギー分解能測定を行なった。今までの実験同様に、まずは各素子に  $150\text{MeV}$  の電子線を照射し、エネルギー較正を行なった。このとき、APD に印加した HV 値は  $-25$  において、ゲイン 300 倍をあたえる値であった。しかし、P.H.ADC の分布を見てわかったことだが、 $-25$  でのゲイン 300 倍を与える HV 値というのは、 $-35$  においては高すぎたせい、ブレイクダウンしてしまい、出力信号をださなくなっていた。これはシグナルをしばらくオシロスコープで観測していると、少しずつ、ビームに対する出力信号を出すようになり、数分も立てば、もど通りの出力反応を示すようになった。この、ブレイクダウンしてしまい、エネルギー較正を行なえなかったものに対しては、イベント毎にエネルギーを足し合わせるときに除外した。この測定では、1 番と 4 番と 6 番の素子がブレイクダウンしてしまった。

#### LV 電源を電池にしての測定

本実験において、ノイズ対策というのは大きな課題の一つであった。実際、APD に印加する HV 値を下げていってもノイズ成分があまり変化しなかった。そこで、LV の電源がスイッチング電源なので、そこからノイズが載っているのではないかと疑い、LV 電源を電池に変えた。この P.H.ADC からのシグナルをもとに、エネルギー分解能を求めた。

## 第5章 結果と考察

この章では、本実験で行なった測定より得られた結果を表示し、その解析結果を元に考察を行なっていく。

### 5.1 宇宙線測定

#### 5.1.1 受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ APD 付き電磁カロリメータ

図 4.7~4.15 に  $4 \times 10^4$  イベントの宇宙線測定で得られた P.H.ADC の分布を載せた。ここで、図 4.12 の 6 番素子と、図 4.14 の 8 番素子に注目したい。この 2 つ以外の素子はノイズによるピークと宇宙線と思われるピークを確認できる。

しかし、6 番と 8 番素子には、はっきりとしたその 2 つの分布が見受けられない。8 番素子については、宇宙線らしきピークが見えかけてはいるが、それを確認するものはない。確認するために、印加する HV 値を 1V あげた、397 にて、宇宙線を 1000 イベント取った。その結果を図 5.1 に載せる。

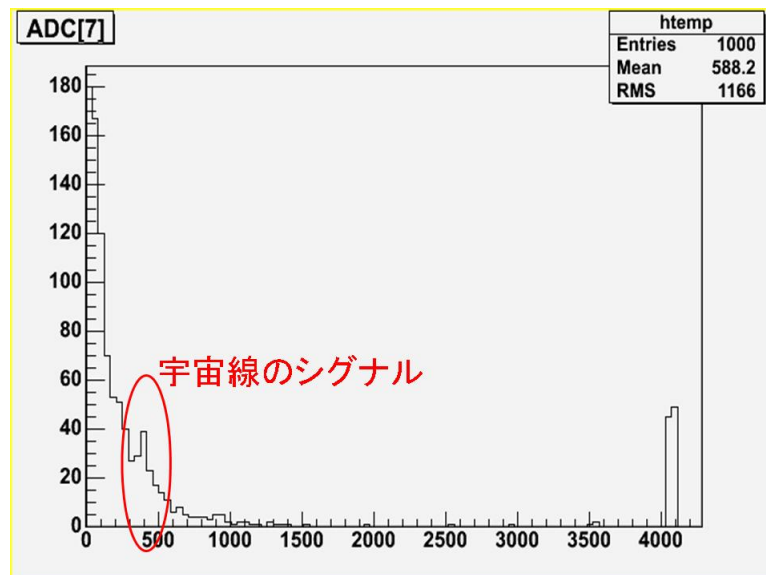


図 5.1: 受光面積  $5 \times 5\text{mm}^2$  APD の付いた 8 番素子の P.H.ADC 分布:宇宙線  $4 \times 10^4$  イベント測定時の HV 値より、1V だけ高い 397V を印加している。

8 番素子については印加する HV 値を 1V あげただけで、宇宙線のピークが見えた。

6番素子については、8番素子と同様に印加するHV値を1V上げて測定を試みたが、分布図に変化はなかった。そこで、実際にどのようなシグナルが出ているのかオシロスコープで確認を試みた。

印加するHV値を1V変えただけで図5.2と5.3のような変化があった。

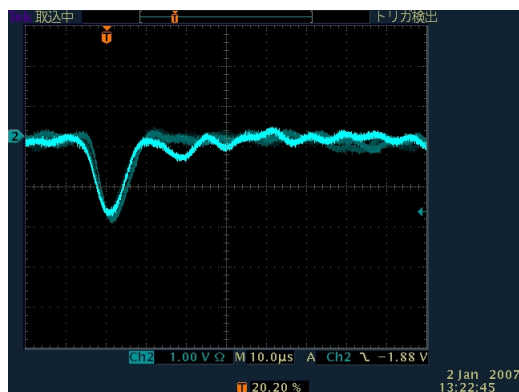


図 5.2: 6番素子のシェイパーアウトのシグナル:印加しているHV値は $4 \times 10^4$  イベント測定時+1V(403V)である。シグナルが一つだけ見えている。

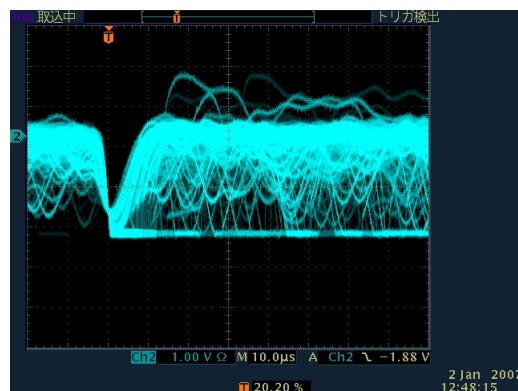


図 5.3: 6番素子のシェイパーアウトのシグナル:印加しているHV値は $4 \times 10^4$  イベント測定時+2V(404V)である。ノイズが多すぎてオシロスコープが計測できていない。

APDに印加するHV値を1V変化するだけでこれだけのノイズが増大することは、今印加しているHV値が非常に高いことを表している。つまり、APDのゲインというのは、図4.16や、図4.21~4.29に示すように、印加するHV値があがるにつれ、指数関数的に上昇するので、HVの高いところで使えば、それだけ小さいHV値の変化でもゲインに与える影響が大きくなってくる。宇宙線を測定するというのは、つまり、PWO結晶中に30MeVのエネルギーを落としたときのPWO結晶の発光量を測定することであり、6番素子のAPDの仕様上、Vb値にHVで測定を行っていたのだと考えられる。

今後の展望としては、PWO結晶の発光量を増大させるために、-25よりもさらに温度を下げて測定を行なうことで、宇宙線のピークははっきりと見えるようになるだろう。もしくは、宇宙線の飛来する角度は垂直方向が多いので、結晶を縦に置き、宇宙線のエネルギー損失を大きくし、発光量をあげることにより、宇宙線のピークをはっきりとみることができよう。

また、受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ というのは、PWO結晶と接着している表面の面積の約5%程度に過ぎない。受光面積がカバーしている面積を広げることで、PWOの発光量を無駄にすることなく、測定できることのできる。受光面積を広げることは、宇宙線のピークをはっきり観測するために、有効な手段であろう。その証拠に、本実験では、受光面積 $10 \times 10\text{mm}^2$ のAPDのついたカロリメータでの宇宙線測定を行ない、すべての素子において、宇宙線のピークをはっきりと測定することができた(図4.5, 4.6)。

## 5.2 150MeV 電子線測定

150MeV 電子線測定において、受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD のエネルギー分布図を作成した。ゲイン 300 倍を与える HV を印加したときの結果を図 5.4 に示す。

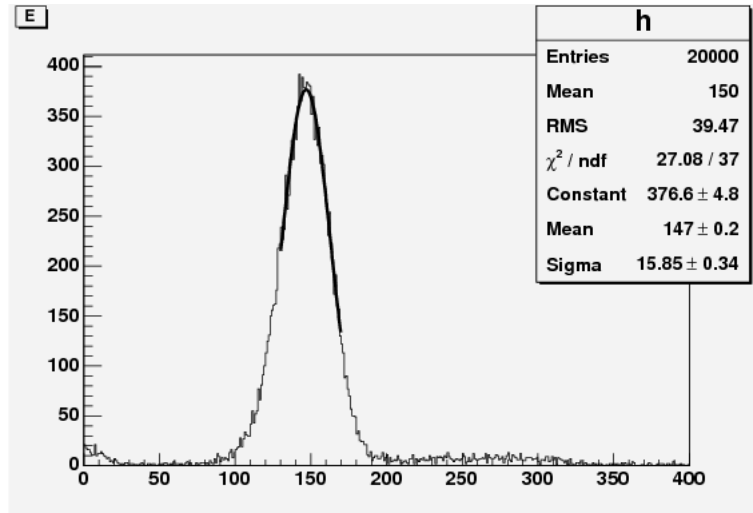


図 5.4: ゲイン 300 倍を与える HV 値を印加したときのエネルギー分布: 縦軸は測定したイベント数、横軸はビームのエネルギーである。

これより、エネルギー分解能  $\sigma/E = 15.9 \pm 0.3[\text{MeV}] / 147.0 \pm 0.2[\text{MeV}] = 10.748 \pm 0.002[\%]$  である。

この測定のペDESTALランにおいて、各素子での P.H.ADC の分布にガウス関数をフィットし、その幅を求めた。その値に変換係数をかけ、ペDESTALランのときの幅を MeV 単位で求めた。各素子のペDESTALラン時の幅を表 5.1 にまとめる。

表 5.1: ゲイン 300 倍を与える HV 値でのペDESTALの幅 [MeV]

素子番号	ペDESTALの幅 [MeV]
1	0.786
2	4.38
3	5.14
4	4.37
5	3.18
6	3.41
7	6.12
8	5.13
9	6.18

ペDESTALランのときの P.H.ADC の分布の幅について考察する。P.H.ADC にはそれぞれのインプット端子にオフセットがあり、たとえ入力信号がなくても、

ある ch にピークが立つようになっている。本実験において測定したペDESTALランでのピーク値はそのオフセット値に相当している。ペDESTALランにおいて、そのピーク値からの揺らぎはその測定時の外部、または検出器等からのノイズの揺らぎに相当すると考えられる。このノイズの影響からエネルギー分解能の式

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c \quad (5.1)$$

の第2項の  $b$  を求めることができる。1つのイベントでのエネルギー  $E_n$  は式4.2にもあるように、

$$E_n = \sum_{i=1}^9 (p_i - m_i) \quad (5.2)$$

として求めているので、各素子のノイズの足し合わせがエネルギー分布の幅に影響している。各素子のノイズは独立で、互いに相関はないので、このノイズ成分の2乗和のルートを取ったものが、第2項に相当するものと考えられる。つまり、

$$\sqrt{0.786^2 + 4.38^2 + 5.14^2 + 4.37^2 + 3.18^2 + 3.41^2 + 6.12^2 + 5.13^2 + 6.18^2} = 13.75[\text{MeV}] \quad (5.3)$$

が実際のエネルギー分布の幅に影響を与えているものである。この13.75MeVという値は、ビームのエネルギーによらない。したがって、 $b = 1.375\%$  と求まる。故に本実験で注目している  $a$  は、

$$a = \sqrt{0.15} \sqrt{10.74^2 - 1.375^2} = 4.129[\%] \quad (5.4)$$

である。

同じ方法でゲイン100倍、600倍、700倍、800倍、電池でLVを印加した測定、-35での測定での  $\sigma/E$  と  $b/E$  と  $a$  の結果を表エネルギー分布の結果を載せる。

表 5.2: HV スキャンの結果

HV などの条件	$\sigma/E$ [%/GeV]	$b/E$ [%/GeV]	$a$ [%]
ゲイン 100	18.18	2.046	6.995
ゲイン 300	10.75	1.375	4.129
ゲイン 600	8.209	0.6034	3.171
ゲイン 700	8.154	0.6566	3.148
ゲイン 800	7.962	0.6043	3.075
ゲイン 300, LV を電池にて印加した場合	9.14	0.89	3.523
ゲイン 300@-25 で、-35 の場合	9.32	0.48	3.605

それぞれの条件でのエネルギー分布は以下図 5.5~5.10 に載せる。HV スキャンの結果から、 $\sigma/E$  と  $b/E$  のグラフを書くと図 5.11 のようになる。そして最後に  $a$  のグラフを描くと、図 5.12 のようになる。

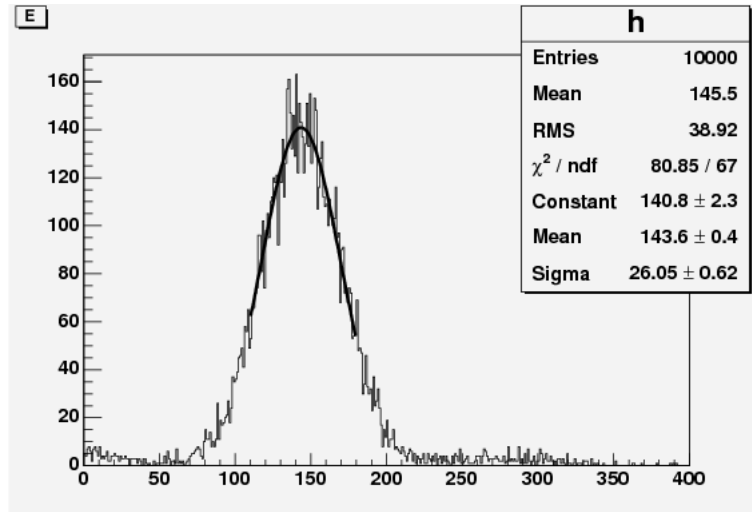


図 5.5: ゲイン 100 倍を与える HV 値を印加したときのエネルギー分布: 縦軸は測定したイベント数、横軸はビームのエネルギーである。

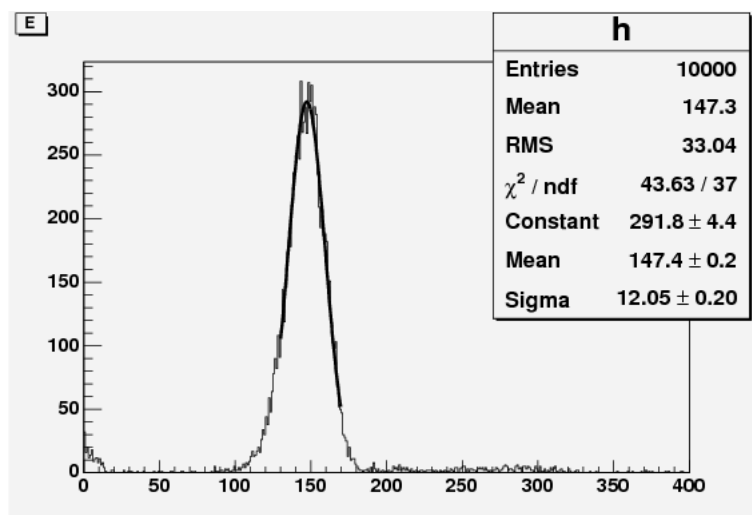


図 5.6: ゲイン 600 倍を与える HV 値を印加したときのエネルギー分布: 縦軸は測定したイベント数、横軸はビームのエネルギーである。

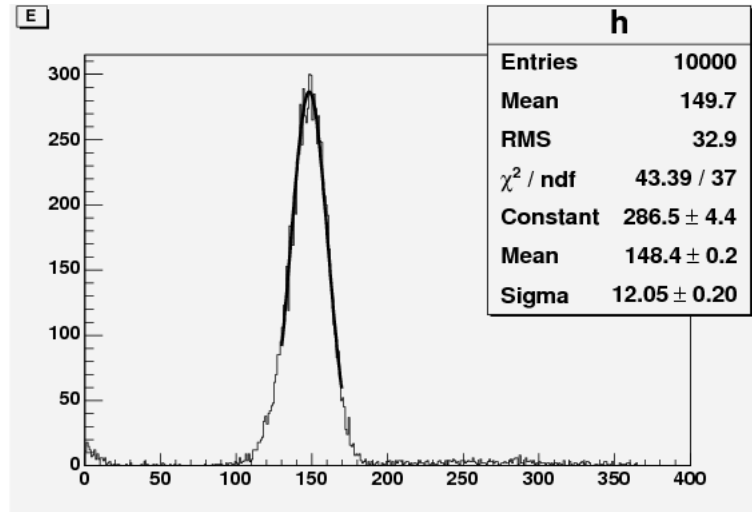


図 5.7: ゲイン 700 倍を与える HV 値を印加したときのエネルギー分布: 縦軸は測定したイベント数、横軸はビームのエネルギーである。

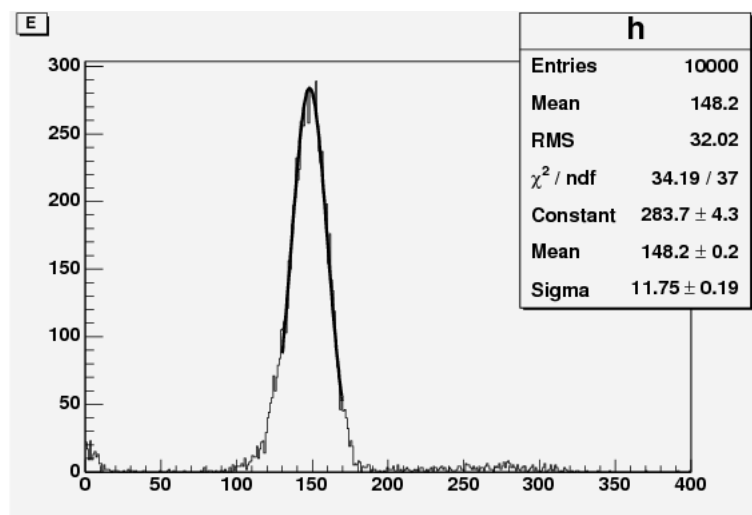


図 5.8: ゲイン 800 倍を与える HV 値を印加したときのエネルギー分布: 縦軸は測定したイベント数、横軸はビームのエネルギーである。

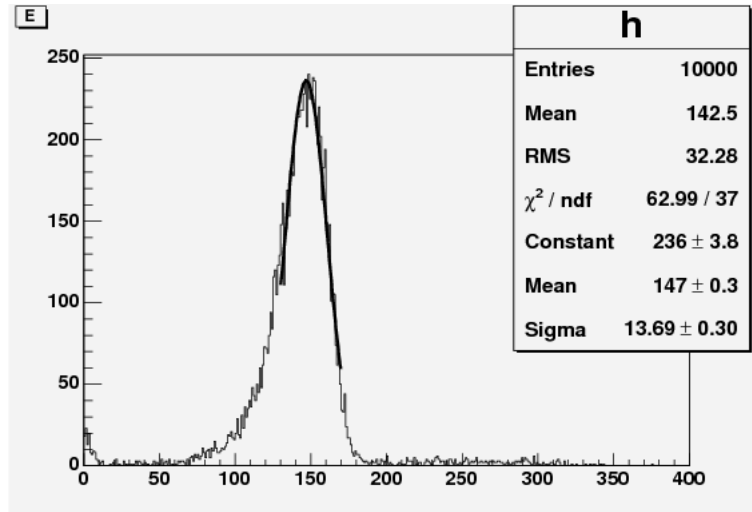


図 5.9: ゲイン 300 倍@-25 を与える HV 値を印加したときのエネルギー分布: 縦軸は測定したイベント数、横軸はビームのエネルギーである。

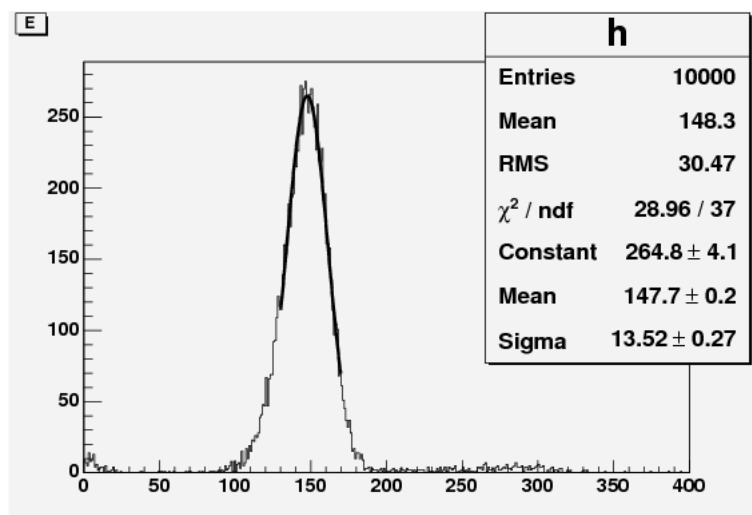


図 5.10: ゲイン 300 倍を与える HV 値を印加し、LV を電池で印加したときのエネルギー分布: 縦軸は測定したイベント数、横軸はビームのエネルギーである。



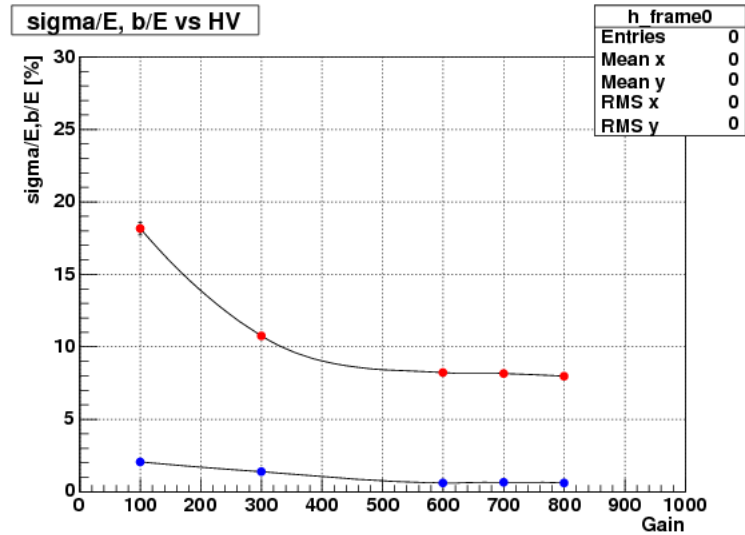


図 5.11:  $\sigma/E$  と  $b/E$  の HV スキャンの結果。:赤い点が  $\sigma/E$  で、青が  $b/E$  である。また縦軸は 150MeV に対するパーセンテージで、横軸はゲイン [倍] である。

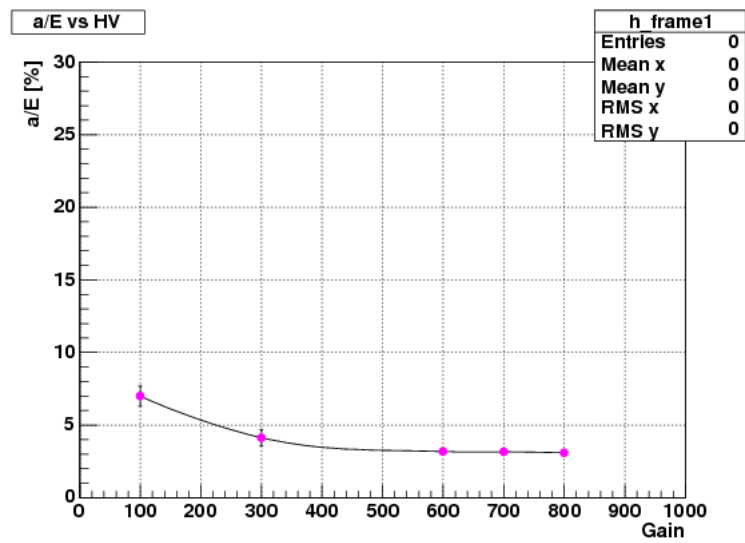


図 5.12: HV スキャンによる  $a$  の変化:縦軸は  $a$  のパーセンテージで、横軸はゲイン [倍] である。

文部科学省高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行なった PMT 読み出しによる実験では、受光面積  $5 \times 5\text{mm}^2$  の APD について、このエネルギー分解能の式のパラメータは

$$a = (3.1 \pm 0.1)\% / \sqrt{E}[\text{GeV}] \quad (5.5)$$

$$b = (4.6 \pm 0.9)\% / E[\text{GeV}] \quad (5.6)$$

$$c = (2.8 \pm 0.04)\% \quad (5.7)$$

である [4]。

本実験では、受光面積  $10 \times 10\text{mm}^2$  の APD を使用して、統計的揺らぎが最も寄与する  $a$  の値に注目した。そしてその値の HV 依存性を測定することができた。

HV 依存、温度依存、LV 電源の交換による測定の結果は以上である。最後に、位置依存の表を載せる。5 番素子のどの位置にビームを照射するかでそのエネルギー分解能に変化があるかを調べた。その結果、位置とエネルギー分解能は表のようになった。結晶をビーム上流から見た位置と分解能の数値を書いている位置が対応している。また、その分布図を図に示す。

表 5.3: エネルギー分解能の位置依存性:単位は [%]

9.012	7.983	8.781	7.537	8.662
8.522	8.724	8.118	7.833	8.304
8.424	8.296	8.081	8.501	8.118
8.946	8.668	8.601	8.157	8.846
8.924	8.386	8.084	9.065	8.668

エネルギー分解能を上げるためには、落とすエネルギーを余すことなく検出する必要がある。そこで、5 番素子の中心だけに照射していたら、周りの結晶には少しのエネルギーしか落とさない。単純に計算すると、中心の結晶では  $122\text{MeV}$  落とすので、残りは  $28\text{MeV}$  である。この 8 等分の約  $3.5\text{MeV}$  を各素子で検出しようとするのには、工夫が必要である。

そこでこの位置依存の測定を行なった。ビームの照射位置がカロリメータの中心から外側に偏ると、その分回りの素子で落とすエネルギーが増える。するとビームの落とすエネルギーを余すことなく測定できるように思える。しかし、この結果はそうではない。この結果からは回りのほうが分解能が良いという傾向は見受けられない。この結果からいえることは、電子線のエネルギーを閉じ込めることのできるだけの大きさのあるカロリメータであれば、ビームの照射位置によらずエネルギー分解能で測定を行なえるということである。

### 5.3 誤差の伝播

本実験で得られた  $\sigma/E$  への誤差、 $\sigma/E$  から求めた、 $a/\sqrt{E}$  への誤差について考察する。

エネルギー分解能  $\sigma/E$  以下の式のように書ける。

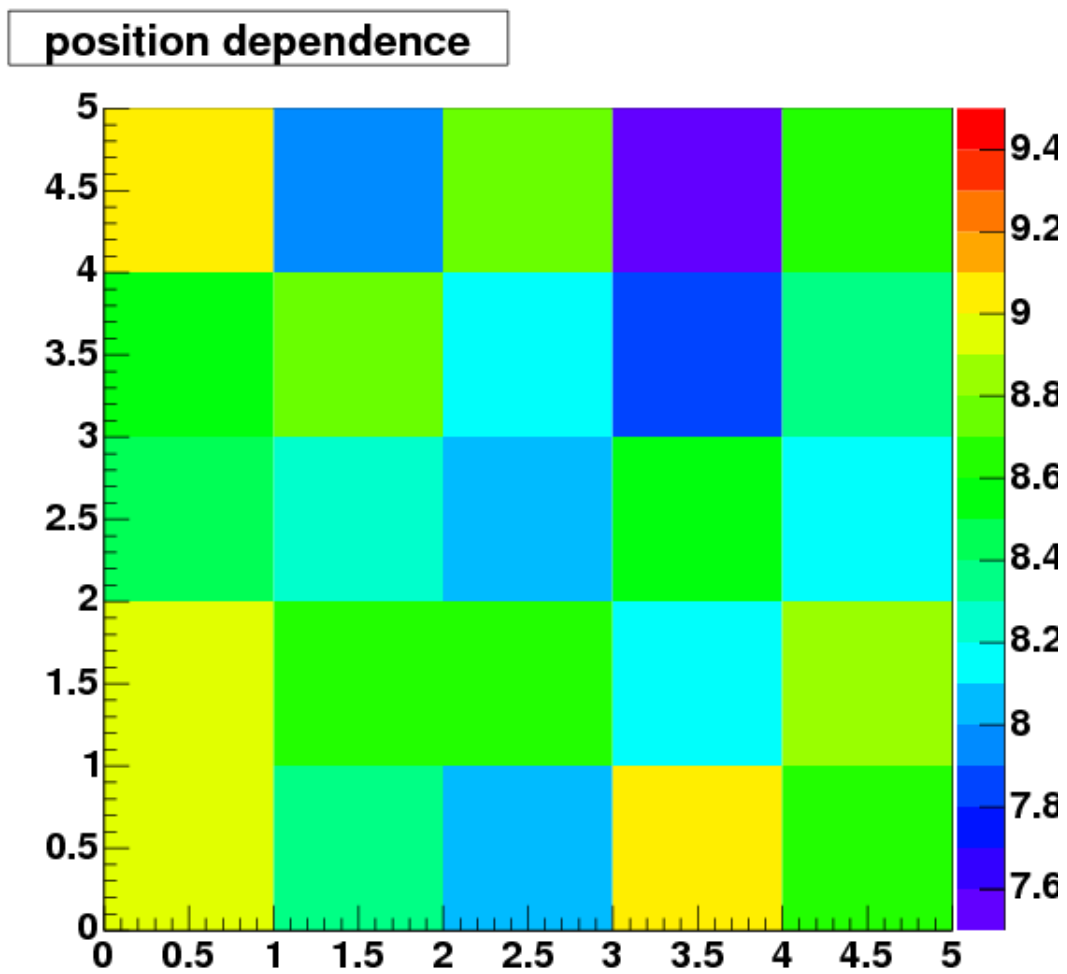


図 5.13: エネルギー分解能の位置依存性: $\sigma/E$  の値を 5 番素子の位置ごとに区切って色分けした。

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c \quad (5.8)$$

ここで、左辺の  $\sigma/E$  は、図 5.4 のようなエネルギー分布図から求めることができる。エネルギー分布に式 4.1 のようなガウス関数をフィットし、その中心の値  $m$  を  $E$  とし、そのフィッティングの誤差を  $\delta E$  とする。そして、 $\sigma$  を  $\sigma_E$  とし、その誤差を  $\delta\sigma_E$  とする。すると、エネルギー分解能を  $R$  とすると、

$$R = \frac{\sigma_E}{E} \quad (5.9)$$

と書ける。そしてこの誤差  $\delta R$  は誤差の伝播を考慮し、

$$\delta R = \frac{\partial R}{\partial \sigma_E} \delta \sigma_E \oplus \frac{\partial R}{\partial E} \delta E \quad (5.10)$$

と書ける。これを計算して、

$$\delta R = \frac{1}{E} \delta \sigma_E \oplus \frac{\sigma_E}{E^2} \delta E \quad (5.11)$$

と計算できる。

次は、式 5.8 の右辺について述べる。右辺の第 3 項目である  $c$  は、ビームの運動量の分解能が聞いてくる項である。本実験を行なった REFER では、周回装置から引き出して、カロリメータに照射するまでに 2 回電磁石に曲げられる。電磁石で曲げられるときに、運動量が 150MeV から大きくはずれたものはローレンツ力により違う軌道へ曲げられ、カロリメータまでは届かない。また、トリガー条件として、 $2 \times 2\text{mm}^2$  の範囲を通過したものしか選んでいないので、ビームの運動量の揺らぎはきわめて小さいと考えられる。以上から、第 3 項目の  $c$  は省略し、計算した。また、それにより、右辺での  $E$  の誤差はないものとした。

では、第 2 項目の  $b/E$  の考察に入る。この項は主に外部や検出器からのノイズが主に寄与してくるので、そのノイズ成分をこの項の値だと仮定し、誤差を見積もった。本実験でのノイズの揺らぎというのは、ペDESTALランでの各素子のピーク値の幅である。そして、イベント毎のエネルギーは式 4.2 に示す式で求めた。つまり、各素子のノイズの成分がイベント毎に足し合わせられ、エネルギー分布の幅に影響をあたえているのである。各素子でのノイズには相関はなく、独立したノイズであったので、その幅  $\sigma_p$  は以下の式で表すことができる。

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{p1}^2 + \sigma_{p2}^2 + \sigma_{p3}^2 + \sigma_{p4}^2 + \sigma_{p5}^2 + \sigma_{p6}^2 + \sigma_{p7}^2 + \sigma_{p8}^2 + \sigma_{p9}^2} \quad (5.12)$$

ここで、 $\sigma_{pi}$  は  $i$  番目の素子のペDESTALの幅である。 $b = \sigma_p$  とすると、 $b$  は  $\sigma_{p1} \sim \sigma_{p9}$  の 9 つの変数を含んだ関数である。それゆえに誤差の伝播を考えると、 $\sigma/E$  のときと同様に、以下の式で書き表せる。

$$b + \delta b = \sigma_p \pm \sqrt{\frac{(\sigma_{p1}\delta\sigma_{p1})^2 + (\sigma_{p2}\delta\sigma_{p2})^2 + \cdots + (\sigma_{p9}\delta\sigma_{p9})^2}{\sigma_{p1}^2 + \sigma_{p2}^2 + \cdots + \sigma_{p9}^2}} \quad (5.13)$$

すると、 $b/E$  は測量量で求まるので、 $B = b/E$  とすると、 $\delta B = \delta b/E$  と書ける。

以上から、

$$R^2 = \frac{a^2}{E} + B^2 \quad (5.14)$$

すなわち、

$$a^2 = E(R^2 - B^2) \quad (5.15)$$

であり、 $a \pm \delta a$  は測定量  $R, B$  を用いて、

$$a \pm \delta a = \sqrt{E(R^2 - B^2)} \pm \sqrt{\frac{E}{R^2 - B^2} \{(R\delta R)^2 + (B\delta B)^2\}} \quad (5.16)$$

と書くことができる。本実験で求めた  $a$  の値の誤差は以上の方法で求めたものである。

## 第6章 結論

本実験では受光面積  $10 \times 10 \text{mm}^2$  の APD を用いた電磁カロリメータを製作し、-25 においてそのカロリメータの動作に初めて成功した。APD を用いた電磁カロリメータを正常に動作させることは非常に困難であるので、この結果はきわめて貴重な結果である。

宇宙線測定実験では、ALICE 実験と同じ受光面積  $5 \times 5 \text{mm}^2$  の APD の付いた電磁カロリメータと同じ条件で測定を行い、よりクリアな宇宙線のピークを観測することができ、本実験で作成した電磁カロリメータで、電磁シャワーによるエネルギー測定を行なえることがわかった。

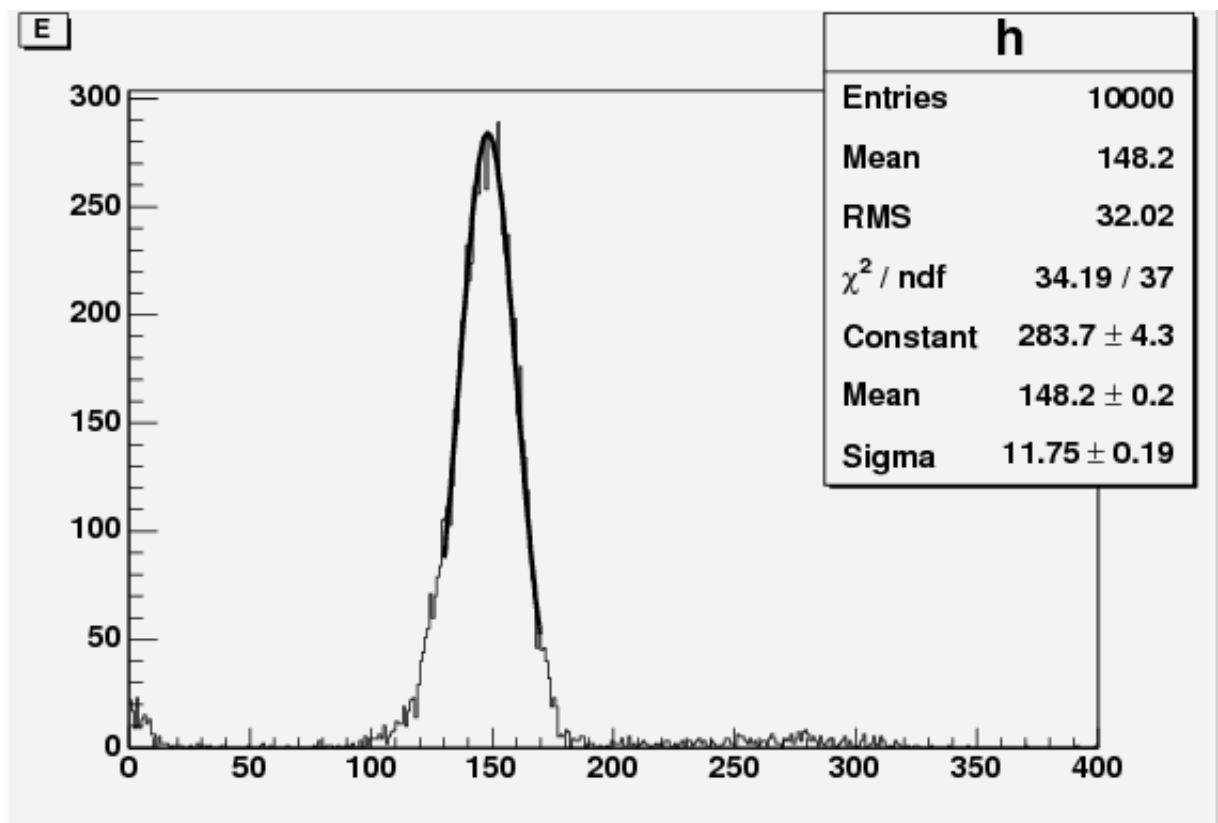


図 6.1: -25 においてゲイン 800 倍を与える HV 値での 150MeV 電子線測定でのエネルギー分布。縦軸は測定のイベント数で、横軸はエネルギーである。

150MeV 電子線測定では、図 6.1 に示すようなエネルギー分布を得ることができ、エネルギー分解能  $\sigma/E = 7.96 \pm 0.1\%$  を得た。これは、一昨年、-17 ではあるが、本実験と同じ、広島大学の REFER にて行なった、受光面積  $5 \times 5 \text{mm}^2$  の APD 付きの電磁カロリメータの性能評価実験で得たエネルギー分解能  $\sigma/E = 23.6 \pm 0.2\%$

に比べ、約3倍良くなっている。

エネルギー分解能を

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c \quad (6.1)$$

として表すと、 $a$ は主にAPDの光電子の統計的揺らぎが寄与するパラメータで、 $b$ は外部などからのノイズが寄与してくるパラメータで、 $c$ は主にビームの運動量の揺らぎが寄与してくるパラメータである。本実験においては、REFERのビームの運動量揺らぎが非常に小さく、無視できるものであったため、

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \quad (6.2)$$

と表せるとし、外部ノイズをペDESTALランから見積もり、 $b$ を求めることで、 $a$ を求めた。その結果、 $a = 3.07 \pm 0.05\%$ を得ることができた。このエネルギー分解能の統計的揺らぎが寄与する項の分解能3%は世界でも最高レベルである。

今後の展望としては、 $b$ の成分である外部からのノイズを減らすことにより、エネルギー分解能をさらに高めることができる。また、同じ条件で受光面積 $5 \times 5 \text{mm}^2$ のAPDのついた電磁カロリメータで150MeV電子線測定を行い、その性能を比較することで、系統誤差をキャンセルでき、受光面積 $10 \times 10 \text{mm}^2$ のAPDの有用性が実証されるだろう。

# 謝辞

始めに、本論文のテーマを与えてくださり、年末年始にも関わらず、毎日実験のご指導をして頂いた指導教官の杉立先生に心から感謝致します。杉立先生は、REFER 実験中も毎日現場まで足を運んで頂き、実験に足りないものなどをその都度補充していただき、とても恵まれた環境で実験を行なうことができました。また、志垣先生、本間先生には、日ごろからミーティングや昼食時などに多くの助言を頂きました。また、REFER での実験中は現場に足を運んで頂きました。スタッフの鳥井さんと洞口さんには REFER での実験中、それぞれの仕事がある中、昼夜問わず、実験のご指導をして頂きました。鳥井さんには実験を開始する前からたくさんのアイデアを頂きました。洞口さんには、実験中一緒に徹夜をしてまで解析マクロのご指導やノイズ落としをしてくださいました。そして、研究室のみなさんには実験を行なう上で多大なる手助けをして頂きました。修士2年渡辺さん、修士1年の門脇さん、久保さん、成田さんには、授業などでお忙しい中、実験にシフトとして参加して頂き、実験を手伝って頂きました。特に渡辺さんと成田さんはシフト以外の日にまで実験を手伝って頂きました。4年生の岩永君、岡田君、丸山君には、それぞれの卒業論文がある中、シフトとして参加してもらい、多くの手助けをしてもらいました。特に岡田くんには本当にたくさんのお手伝ってもらい、本当に感謝しています。実験中に限らず、榎本さんには常日ごろから実験のことだけでなく、物理のことやプログラミングのことなど本当に多くのことを教えて頂きました。また、中村さんには夜中にも関わらず、実験やプログラミングなどについてご指導をして頂きました。この論文を書くにあたり、ご支援を頂いたすべての人に心から感謝致します。ありがとうございました。



## 参考文献

- [1] W. M. Yao et al., Jour. Phys. G 33, 1 (2006)
- [2] CERN/LHCC99-4, ALICETDR 2
- [3] 広島大学クォーク物理学研究室ホームページ
- [4] 杉立徹, LHC-ALICE 実験 PWO 結晶電磁カロリメータ読み出し系の開発
- [5] 坂田博和, 2005 年度広島大学修士論文
- [6] 渡辺大輔, 2005 年度広島大学卒業論文
- [7] 門脇圭介, 2005 年度広島大学卒業論文
- [8] 野村信輔, 2004 年度広島大学修士論文
- [9] 浜松ホトニクスホームページ,
- [10] 室井章、宮本紀之、荒木慎也、2005 年度大阪大学卒業論文