平成20年度修士論文

ALICE実験のための PHOS性能評価機の開発研究

広島大学理学研究科物理科学専攻

クォーク物理学研究室

丸山悠

学籍番号 M075523

平成21年2月10日

Abstract

宇宙の始まりと言われるビックバン直後、わずか数十万分の一秒の間、宇宙はクォークやクォークの糊付けの役割をしていたグルーオンが自由に飛び回る状態であり、現在の宇宙とは全く異なる物質状態であった。この物質状態はクォークグルーオン・プラズマ（QGP）と呼ばれる。現在、私達の日常世界においては、クォークは核子内に閉じ込められているが、高エネルギー重イオン衝突によってその閉じ込めが破れ、QGP 相に相転移すると期待されている。

2008 年 9 月より欧州原子核研究機構（CERN）において大型ハドロン衝突型加速器（LHC）が稼動した。LHC では、標準モデル理論が予言する「ヒッグス粒子」の発見、及び QGP の探求を目的とした実験が同時に稼動する。LHC で行われる実験の中で、高エネルギー重イオン衝突実験（ALICE）は唯一 QGP 探求を目的とした実験である。ALICE 実験が備える電磁カロリメータの一つである高性能光子検出器（PHOS）は QGP 相から熱輻射で発生する熱光子のエネルギー測定を目的として開発されており、光子のエネルギー分解能及び位置分解能の双方に世界最高分解能を実現する。検出素子は鉛タングステン酸（$PbWO_4$）結晶とわが国の最先端技術を誇るアバランシェ・フォトダイオード（APD）光学素子から構成される。

本研究では、PHOS の更なる研究開発を目的として PHOS 性能評価機を広島の実験室に構築した。そして、広島大学内の放射光施設電子周回装置（REFER）における 150MeV 電子ビームを用いて、性能評価機のエネルギー分解能を求めた。その結果、性能評価機の 150MeV でのエネルギー分解能 σ/E は 20.7±1.3（系統誤差）±1.3（統計誤差）%であった。この結果は図 1 のエネルギー分布より求めた。今回のテスト実験で測定したエネルギー分解能は、現在までに行われた PHOS 性能評価実験の結果から期待される値と誤差の範囲内で一致する。（図 2 参照）よって、性能評価機は PHOS とほぼ同等の性能を有する事が証明された。この結果より、現在この性能評価機を用いて、時間分解能の測定、電磁シャワーの深度の測定などの PHOS の更なる研究を進行している。

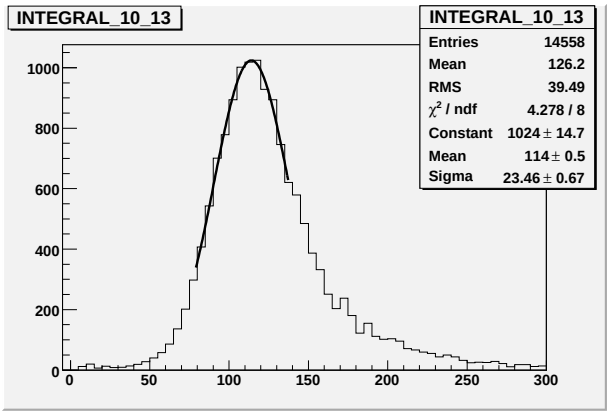

Figure 1: 電子線のエネルギースペクトル　縦軸：カウント、横軸： エネルギー [MeV]

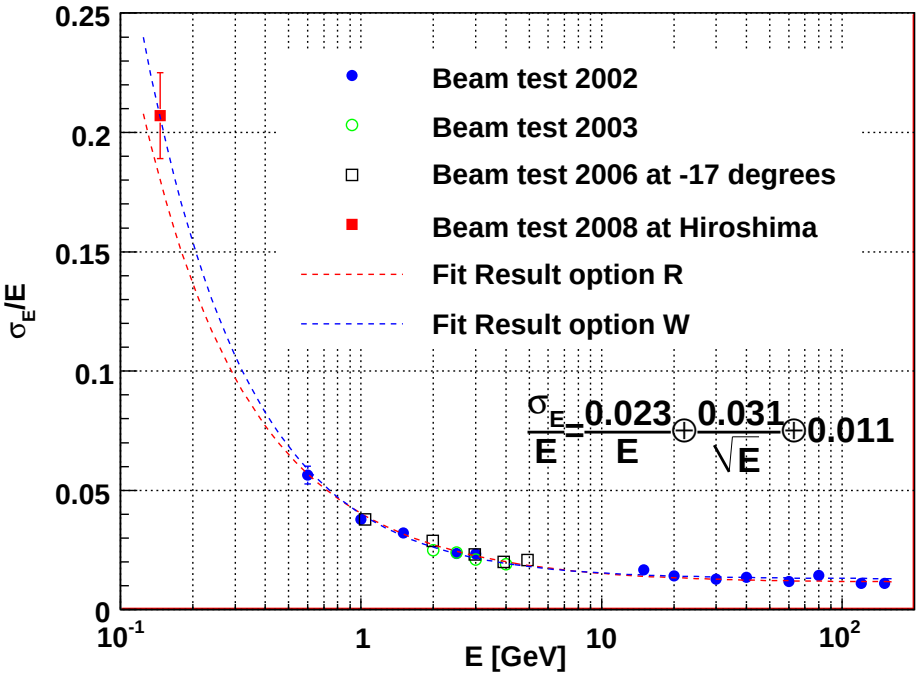

Figure 2: 各エネルギーでのエネルギー分解能　赤い点線：測定点の誤差を加味したフィット。　青い点線：測定点の誤差を無視したフィット。

Contents

1 序論 **12**

1.1 背景 12

1.1.1 クォークとレプトン 12

1.1.2 ４つの相互作用 13

1.1.3 クォークグルーオン・プラズマ（QGP） 15

1.1.4 LHC(Large Hadron Collider) 15

1.1.5 ALICE(A Large Ion Collicer Experiment) 16

1.1.6 PHOS(PHOton Spectrometer) 16

1.2 実験の目的 18

1.3 実験の概要 18

2 導入 **19**

2.1 高性能光子検出器 (PHOS) 19

2.1.1 光子測定 19

2.1.2 鉛タングステン酸 (PWO) 結晶 19

2.1.3 アバランシェ・フォトダイオード (APD) 22

2.1.4 FEE(Front End Electronics) 25

2.2 Test-bench 27

2.2.1 Test-bench の概要 27

2.3 エネルギー較正 32

2.3.1 宇宙線 32

2.3.2 制動放射とイオン化損失 33

3 実験 **36**

3.1 APD の印加電圧依存性、及び温度依存性の測定 36

3.1.1 実験のセットアップ 37

3.1.2 測定結果 40

3.2 宇宙線によるエネルギー較正 49

3.2.1 宇宙線測定実験のセットアップ 49

3.2.2 宇宙線データの解析 51

3.2.3 APD の増倍率補正 56

3.2.4 宇宙線測定によるエネルギー較正の結果 57
3.3 電子ビームによるエネルギー分解能の測定 61
3.3.1 超高速電子周回装置（REFER） 61
3.3.2 REFER 実験のセットアップ 61
3.3.3 ビームレート 68

4 結果・考察 69
4.1 エネルギー分解能の測定結果 69
4.1.1 測定結果の解析 71
4.2 電子線シミュレーション 76
4.3 Fitting による解析 79
4.3.1 Gamma-2 関数の Fitting 79
4.3.2 イベント選択 82
4.3.3 閾値とフィットパラメータの制限 86
4.4 系統誤差の見積もり 90
4.4.1 電子線による影響 90
4.4.2 各チャンネルの不均一性による影響 90
4.4.3 Conversion factor を求める解析による影響 91
4.4.4 系統誤差を含めたエネルギー分解能 95
4.5 エネルギー分解能の考察 100
4.5.1 エネルギー分解能の式の各項 100
4.5.2 エネルギー分解能の導出 103
4.6 その他の測定 104
4.6.1 エネルギー分解能の温度依存性 104
4.6.2 エネルギー分解能の APD 増倍率依存性 111
4.6.3 電子線の電磁シャワー深度測定 119

5 結論 123

6 謝辞 125

A 127
A.1 モジュールについての解説 127

List of Tables

2.1 無機シンチレータの性質 [9] 20
2.2 APD の性能表 [7] 24

3.1 APD の印加電圧特性表（+25 ℃）[12] 37
3.2 −25 ℃で APD に増倍率 50 倍を与える印加電圧 47
3.3 宇宙線データ解析によって求めた CF = Conversion Factor（一度目の宇宙線測定） 56
3.4 Conversion Factor を 4 に揃えたときの APD の印加電圧 57
3.5 宇宙線データ解析によって求めた CF = Conversion Factor（二度目の宇宙線測定） 60

4.1 電子線シミュレーションの条件 76
4.2 フィットのパラメータ制限 86
4.3 閾値、フィットパラメータ制限の解析結果 89
4.4 中心付近の 9 本の結晶のエネルギー分解能：閾値無し 91
4.5 中心付近の 9 本の結晶のエネルギー分解能：閾値有り 91
4.6 各方法で求めた Conversion Factor[MeV/ch] 93
4.7 Conversion Factor の系統誤差 93
4.8 APD 増倍率の変化率と方法 ① ／方法 ③ の値 94
4.9 誤差を含めたエネルギー分解能 95
4.10 70sample の RMS の 165 イベント分の平均（エネルギー分解能を求める解析に用いている 9 本の結晶） 102
4.11 宇宙線データ解析によって求めた −15 ℃での CF = Conversion Factor 106
4.12 宇宙線データ解析によって求めた 0 ℃での CF = Conversion Factor 107
4.13 各温度のエネルギー分解能 110
4.14 宇宙線データ解析によって求めたでの APD 増倍率 240 倍の CF = Conversion Factor 113
4.15 宇宙線データ解析によって求めた APD 増倍率 360 倍の CF = Conversion Factor 114

4.16 各増倍率でのエネルギー分解能 118
4.17 各層に落としたエネルギーの割合 122

List of Figures

1 電子線のエネルギースペクトル　縦軸：カウント、横軸： エネルギー [MeV] 2
2 各エネルギーでのエネルギー分解能　赤い点線：測定点の誤差を加味したフィット。　青い点線：測定点の誤差を無視したフィット。 2

1.1 物質の構成 12
1.2 3 世代のクォークとレプトン [1] 13
1.3 4 つの相互作用 [1] 13
1.4 QGP 略図 15
1.5 LHC を上空から見た写真 [4] 16
1.6 ALICE 実験概観図 [5] 17
1.7 PHOS 概観図 [6] 17

2.1 観測される光子分布概念図 [7] 20
2.2 PWO 結晶 [7] 21
2.3 PWO 結晶の発光波長分布 [8] 21
2.4 PWO 結晶の発光量温度特性 [9] 22
2.5 フォトダイオードのエネルギーバンド図とモデル図 [10] 23
2.6 APD のエネルギーバンド図とアバランシェ領域における電子ホール対生成の図 [10] 23
2.7 APD 及び前置増幅器 [7] 24
2.8 FEE ブロック図 [6] 25
2.9 FEE 基板 [6] 26
2.10 テストベンチの概要図 [6] 27
2.11 固定フレームに入った 5×6−1 本の PWO 結晶 28
2.12 冷凍庫内の写真：PWO 結晶の上方にテスト用の LED を置く。 29
2.13 冷凍庫外の写真：冷凍庫の左側面に Flat cable 等のケーブル取り出し穴がある。 29
2.14 FEE 基板、RCU 基板、及び GTL-bus 30
2.15 DAQ-PC の画面：RUN Control の GUI、DCS へのログイン . 31

2.16 周辺機器:写真左側にDAQ-PCを置く。手前にFEE及びRCU、そしてLV 電源を置く。 31
2.17 宇宙線概念図 32
2.18 大気圏内の1GeV以上のエネルギーの宇宙線のフラックス [11] 33
2.19 各物質における平均エネルギー損失 [11] 34

3.1 印加電圧依存性、及び温度依存性の測定実験のセットアップ . 38
3.2 光量を変化させて1光電子を確認 縦軸:カウント 横軸:$ADCch$ 39
3.3 光電子増倍管で測定した光量の温度依存性 縦軸：ADCch 横軸：温度 [℃] 40
3.4 光電子増倍管で測定した1光電子の温度依存性 縦軸:ADCch 横軸：温度 [℃] 41
3.5 光電子増倍管で測定した光電子数の温度依存性 縦軸:光電子数 横軸：温度 [℃] 41
3.6 25 ℃における印加電圧依存性 縦軸：$ADCch$ 横軸：印加電圧 [V] 42
3.7 0 ℃における印加電圧依存性 縦軸：$ADCch$ 横軸：印加電圧 [V] 43
3.8 −15 ℃における印加電圧依存性 縦軸：$ADCch$ 横軸：印加電圧 [V] 44
3.9 −25 ℃における印加電圧依存性 縦軸：$ADCch$ 横軸：印加電圧 [V] 45
3.10 印加電圧 V_R での温度依存性 縦軸:$ADCch$（温度による光電子数補正有り） 横軸：温度 [℃] 46
3.11 −25 ℃での増倍率の印加電圧特性 縦軸：増倍率50倍を1とした増倍率 横軸：印加電圧 [V] 48
3.12 宇宙線測定実験のセットアップ 49
3.13 宇宙線測定実験の回路図 50
3.14 宇宙線測定データ $ADCch$ 分布 縦軸：対数表示のカウント 横軸：$ADCch$ 51
3.15 PWO結晶に入射する宇宙線概念図 52
3.16 アイソレーション解析手法の宇宙線測定データ $ADCch$ 分布 縦軸：対数表示のカウント 横軸：$ADCch$ 53
3.17 足し合わせ解析手法の宇宙線エネルギー分布 縦軸:対数表示のカウント 横軸：$ADCch$ 55
3.18 2度目の宇宙線測定結果。足し合わせ解析手法によるエネルギー分布 縦軸：対数表示のカウント 横軸：$ADCch$ 58
3.19 2度目の宇宙線測定結果。足し合わせ解析手法によるエネルギー分布（全チャンネル） 縦軸:対数表示のカウント 横軸:$ADCch$ 59
3.20 放射光センターとVBL全体図 [16] 61
3.21 REFER実験セットアップ（数値の単位はcm） 62

3.22 上から見たREFER実験セットアップ（数値の単位はcm） . . 62
3.23 ビームパイプ側から見た鉛ブロック、冷凍庫、及びDAQ-PC . 63
3.24 冷凍庫側から見たビームパイプ方面 64
3.25 冷凍庫内：PWO結晶のアップ、29本のPWO結晶をフレームに入れている。フレームの右上のスペースには何も入れていない。 64
3.26 冷凍庫内全体：PWO結晶を入れているフレームの後ろよりjumper cableが出ており、それが2枚のT-cardにささっている。T-cardに繋がっているFlat cableは冷凍庫の外でFEEと接続される。 64
3.27 左側が鉛ブロック、右側が冷凍庫、真ん中にシンチレータ2cm × 2cm と 5cm × 5cmを置く 65
3.28 REFER実験回路図 66
3.29 PWO結晶表面に電子が当たるポイント 67
3.30 得られるビームレートの導出図 68

4.1 ビームパイプ側から見たPWO結晶の並び順に対応するテストベンチID 69
4.2 電子線測定より得られた得られたRAWデータ　縦軸：ADCch　横軸：sample数[100ns] 70
4.3 RAWデータ1イベント(Sampling ADC)　縦軸：ADCch　横軸： sample数[100ns] 71
4.4 MAX-ペデスタル　縦軸：カウント　横軸： *ADCch* 72
4.5 エネルギースペクトル　縦軸：カウント　横軸： エネルギー[MeV] 72
4.6 全チャンネルのエネルギースペクトル　縦軸：対数表示のカウント　横軸： エネルギー[MeV] 73
4.7 足し合わせ解析手法後の全チャンネルのエネルギースペクトル　縦軸：カウント　横軸： エネルギー[MeV] 74
4.8 足し合わせ解析手法後のエネルギースペクトル　縦軸：カウント　横軸： エネルギー[MeV] 75
4.9 GEANTによる150MeV電子線のシミュレーション 76
4.10 150MeV電子線のシミュレーションの結果　縦軸：カウント　横軸：エネルギー[MeV]　左上：空気なし、シンチレータなし　右上：空気なし、シンチレータあり　左下：空気あり、シンチレータあり　右下：空気あり、シンチレータあり 77
4.11 空気あり、シンチレータありで理想検出器によるエネルギー測定　縦軸：カウント　横軸：エネルギー[MeV] 78
4.12 Sampling ADCへのGamma-2関数のFitting　縦軸：ADCch　横軸：sample数[100ns] 79

4.13 フィットによる解析後の全チャンネルのエネルギースペクトル 縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV] 80
4.14 フィットによる解析後のエネルギースペクトル　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV] 81
4.15 シグナルイベント（Gamma-2 関数で Fitting）　縦軸：$ADCch$ 横軸：Sample 数 82
4.16 ノイズイベント（Gamma-2 関数で Fitting）　縦軸：$ADCch$ 横軸：Sample 数 83
4.17 Gamma-2 関数でフィットした時の χ^2/NDF（各チャンネルの平均）　縦軸：対数表示のカウント　横軸：χ^2/NDF 84
4.18 離れた 2 ピークイベント（Gamma-2 関数で Fitting）　縦軸：$ADCch$　横軸：Sample 数 85
4.19 閾値なし、フィットパラメータ制限なしのエネルギースペクトル　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV] 87
4.20 閾値なし、フィットパラメータ制限ありのエネルギースペクトル　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV] 87
4.21 閾値あり、フィットパラメータ制限なしのエネルギースペクトル　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV] 88
4.22 閾値あり、フィットパラメータ制限ありのエネルギースペクトル　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV] 88
4.23 各エネルギー領域でのエネルギー分解能（本実験の測定結果を加えた。）：閾値無し　赤い点線：測定点の誤差を加味したフィット。　青い点線：測定点の誤差を無視したフィット。 96
4.24 各エネルギー領域でのエネルギー分解能（本実験の測定結果を加えた。）：閾値有り　赤い点線：測定点の誤差を加味したフィット。　青い点線：測定点の誤差を無視したフィット。 97
4.25 誤差の重みを反映したフィット（赤いライン）と測定点の差。 98
4.26 誤差の重みを無視したフィット（青いライン）と測定点の差。 98
4.27 誤差の重みを反映したフィット（青いライン）と測定点の差。本実験の測定点は外している。 99
4.28 ペデスタル RUN のエネルギースペクトル　縦軸：カウント 横軸：エネルギー [MeV] 101
4.29 −15 ℃での宇宙線測定結果　縦軸：対数表示のカウント　横軸：エネルギー [MeV] 105
4.30 0 ℃での宇宙線測定結果　縦軸：対数表示のカウント　横軸：エネルギー [MeV] 105
4.31 −15 ℃での全チャンネルのエネルギー分布　縦軸：カウント 横軸：エネルギー [MeV] 108
4.32 −15 ℃での ID10_13 のエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV] 108

4.33 0 ℃での全チャンネルのエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV] 109
4.34 0 ℃での ID10_13 のエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV] 109
4.35 エネルギー分解能の温度依存性　縦軸：エネルギー分解能 [%]　横軸：温度 [℃] 110
4.36 APD 増倍率 240 倍での宇宙線測定結果　縦軸：対数表示のカウント　横軸：エネルギー [MeV] 112
4.37 APD 増倍率 360 倍での宇宙線測定結果　縦軸：対数表示のカウント　横軸：エネルギー [MeV] 112
4.38 増倍率 240 倍で閾値なしの解析を行った全チャンネルのエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV] 115
4.39 増倍率 240 倍で閾値なしの解析を行った ID0_13 のエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV] 115
4.40 増倍率 240 倍で閾値ありの解析を行った全チャンネルのエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV] 116
4.41 増倍率 240 倍で閾値ありの解析を行った ID0_13 のエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV] 116
4.42 増倍率 360 倍で閾値ありの解析を行った全チャンネルのエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV] 117
4.43 増倍率 360 倍で閾値ありの解析を行った ID0_13 のエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV] 117
4.44 エネルギー分解能の APD 増倍率依存性　縦軸：エネルギー分解能 [%]　横軸：APD の増倍率　赤い点が閾値ありの解析結果。青い点が閾値なしの解析結果。 118
4.45 PWO 結晶における電磁シャワー概念図 119
4.46 PWO 結晶 90 °回転後の冷凍庫内の写真 120
4.47 電磁シャワー深度測定 29 チャンネルのエネルギー分布　縦軸：対数表示のカウント　横軸：エネルギー [MeV] 120
4.48 29 本の PWO 結晶を層 1∼5 まで分ける 121
4.49 層 1∼5 まで分けたエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV] 122

5.1 各エネルギー領域でのエネルギー分解能（本実験の測定結果を加えた。）：閾値あり　赤い点線：測定点の誤差を加味したフィット。　青い点線：測定点の誤差を無視したフィット。 124

Chapter 1

序論

1.1 背景

1.1.1 クォークとレプトン

私達の身の回りにあるものは全て、1 億分の 1 センチメートル程度の大きさの原子から構成されており、原子はその大きさの 1 万分の 1 の原子核と電子より構成されている。そして、原子核とは陽子と中性子より構成されている。陽子と中性子を結びつけるのが π 中間子である。陽子、中性子、π 中間子はハドロンと呼ばれ、電子はレプトンと呼ばれる。ハドロンの中でも陽子、中性子等のバリオンはクォークと呼ばれる素粒子 3 つ、中間子はクォーク 2 つから構成される。(図 1.1 参照)

現在のところ、このクォークとレプトンが物質を構成する最小の素粒子である。クォークとレプトンはそれぞれ三世代に分類される。クォークは質量の小さい方から $2/3e$ の電荷を持つアップ、チャーム、トップと $-1/3e$ の電荷を持つダウン、ストレンジ、ボトムの 6 種類が存在し、レプトンは $-e$ の電荷を持つ電子、ミューオン、タウと、電荷を持たない電子ニュートリノ、ミューオンニュートリノ、タウニュートリノの 6 種類が存在する。(図 1.2 参照)

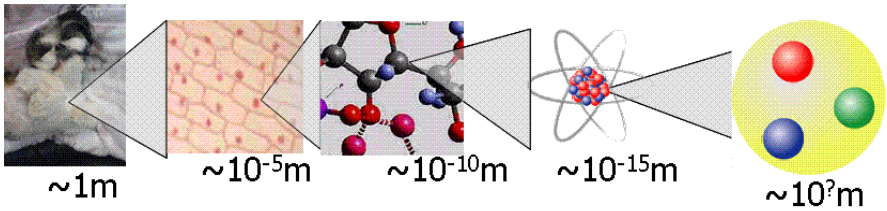

Figure 1.1: 物質の構成

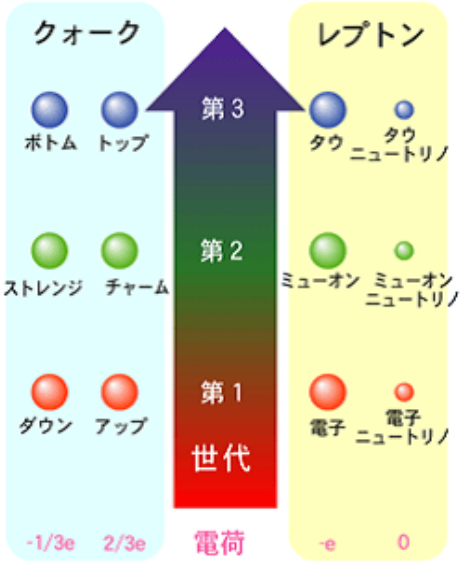

Figure 1.2: 3 世代のクォークとレプトン [1]

1.1.2 4つの相互作用

クォークとレプトンがそれぞれ行う相互作用が素粒子の基本的な4つの相互作用である。これらの相互作用はゲージボソンと呼ばれる粒子の媒介によって働く。図 1.3 に 4 つの力の種類とゲージボソン、力の大きさの目安を載せる。

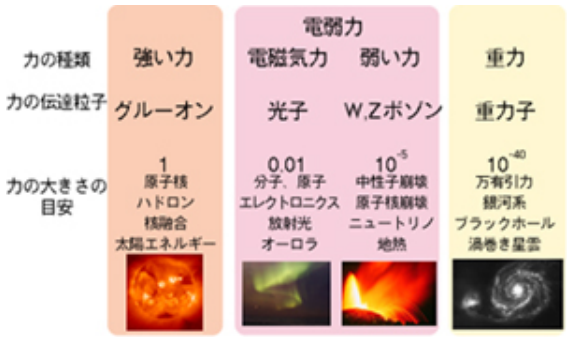

Figure 1.3: 4 つの相互作用 [1]

電磁相互作用

電磁力は荷電素粒子の間に作用する。ゲージボソンは光子である。光子は質量を持たないので、遮るものが無ければ電磁気力は遠くまで到達する。また、電磁気力は電荷に比例する。電磁気力の例としては電子と原子核を結びつけ原子を作る力、原子同士を結びつけ分子を作る力などがある。

強い相互作用

強い力はカラー荷を持つ素粒子の間で作用する。ゲージボソンはグルーオンである。核子の間に作用して原子核を構成する核力は強い相互作用の一例である。電磁気力の 100 倍ほど強い力なので、この名称が付けられた。クォークのカラー荷には赤、青、緑の三原色（実際に色を持っているわけではない）がある。グルーオンには白を除く色の組み合わせとして 8 種類があり、いずれも質量を持たない。そして、グルーオン自体、カラー荷を持っているので強い力は距離が離れれば離れるほど強くなり、核子の大きさ程度の距離になると全体として白色の状態しか安定出来ない。つまり赤、青、緑の 3 つのクォークが閉じ込められる。

弱い相互作用

弱い力は全てのクォーク、レプトンの間で作用する。ゲージボソンはウィークボソンと呼ばれ、正、あるいは負の電荷を帯びている W ボソンと電荷を帯びていない Z ボソンがある。原子核のベータ崩壊、中性子、π 中間子の崩壊の原因となる力である。この相互作用は原子核の内部では核力や電磁気力よりもはるかに弱いので、弱い相互作用と呼ばれる。中性子のベータ崩壊において、W ボソンの質量が大きいためにこの崩壊はゆっくりと起こる。

重力相互作用

全ての素粒子に作用する。ゲージボソンはグラビトンと呼ばれる。重力は地球、太陽等の天体の運行をつかさどり、巨大な宇宙の構造を作り出す。重力は質量に比例する。素粒子の質量は非常に小さく、現在の加速器で到達できるようなエネルギーでは素粒子間の重力は無視できるが、ビッグバンのような超高エネルギー領域では重要なってくる。

1.1.3 クォークグルーオン・プラズマ（QGP）

宇宙の始まりと言われるビックバン直後、わずか数十万分の一秒の間、宇宙はクォークグルーオン・プラズマ（QGP）相と言われる現在の宇宙とは全く異なった物質状態であった。私達の日常世界では、先に述べたように核子は強い力によって、クォーク 3 つが結びついて閉じ込められた状態を作っているが、高温高圧の状態（図 1.4 参照）になると、その閉じ込めが破れクォークやクォークの糊付けの役割をしていたグルーオンが自由に飛び回る状態、つまり物質の新しい形態に相転移する。この新しい物質形態を QGP と言う。

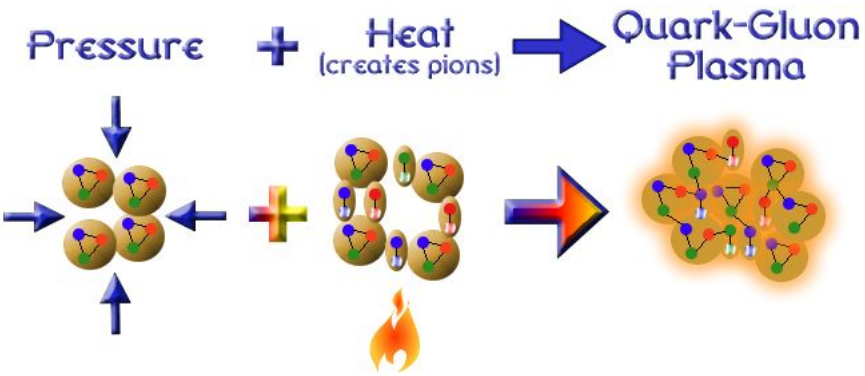

Figure 1.4: QGP 略図

QGP の物質形態、つまり非摂動的領域の強い相互作用によるクォーク多体系現象を解明する事は、量子色力学（QCD）によるクォーク力学の理解を極めるだけでなく、宇宙誕生の謎に迫り、物質宇宙の起源と時空発展の解明に向けての重要な足がかりとなる。

1.1.4 LHC(Large Hadron Collider)

大型ハドロン衝突型加速器（LHC）とは、高エネルギー物理実験を目的として、欧州原子核研究機構（CERN）に建設された世界最大の衝突型円形加速器である。ジュネーブの近くのスイスとフランスの国境に渡って、地下 100m 程のところに設置されている。周長約 27km に及ぶ円形の加速器である。LHC はハドロンと呼ばれる、陽子もしくは鉛イオンの 2 つのビームを円形加速器内部で反対方向に走らせて一周ごとにエネルギーを獲得させ、高エネルギー状態になったところで 2 つのビームの正面衝突させる。LHC 加速器は世界最大衝突エネルギーとなる格子対あたり衝突エネルギー 5.5TeV の鉛＋鉛原子核衝突を実現する。図 1.5 に LHC の上空から見た写真と実験の行われている場所を示した絵を載せる。

Figure 1.5: LHC を上空から見た写真 [4]

1.1.5 ALICE(A Large Ion Collicer Experiment)

現在、LHC 加速器において、重イオン衝突実験（ALICE）が行われている。LHC 加速器には、ALICE、ATLAS、CMS、LHC b という 4 つの実験があるが、ALICE は 4 つの実験の中でもクォーク物質探求に最適化した唯一の実験装置である。ALICE は巨大なソレノイド電磁石の中心にビーム衝突点を置き、衝突点を囲むように中心飛跡検出器、電子同定検出器、飛行時間差検出器、電磁カロリメータ、チェレンコフ検出器を配置する。更に、衝突点のビーム軸下流に複数の事象識別検出器と μ 粒子検出器を置く。ALICE はこれらの検出器より得られる複数の情報を総合してクォーク物質についての高精度の探索を行う最新鋭の複合型スペクトロメータである。図 1.6 が ALICE 実験装置の概観図である。

1.1.6 PHOS(PHOton Spectrometer)

高性能光子検出器（PHOS）は約 2 万チャンネルの検出素子からなる電磁カロリメータであり、エネルギー分解能と 2 粒子分解能が世界最高の分解能を有する。検出素子は鉛タングステン酸結晶（PWO 結晶）とアバランシェ・フォトダイオード（APD）から構成される。PWO 結晶が発光する蛍光を APD が捉え、電気信号として読み出す。図 1.7 は PHOS の 1Module 約 3500ch の

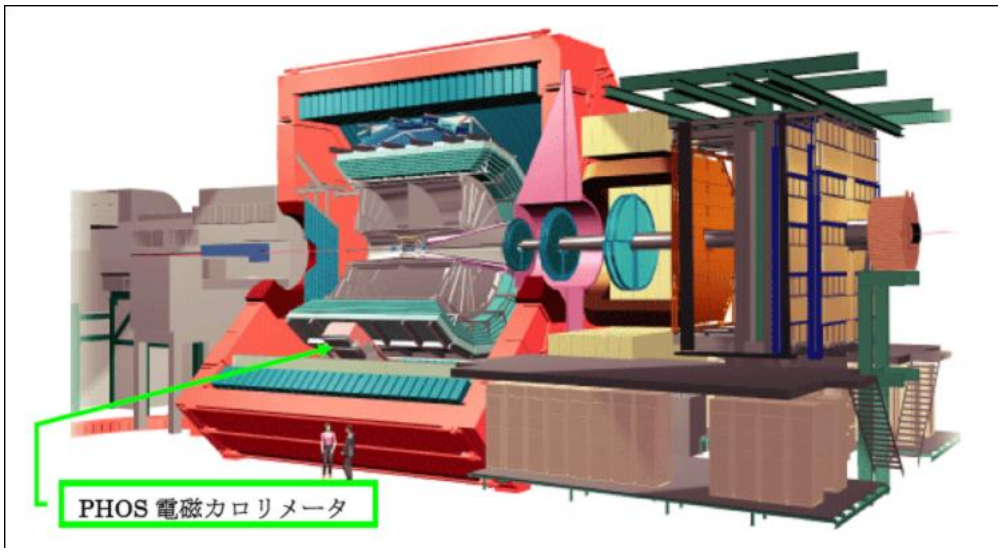

Figure 1.6: ALICE 実験概観図 [5]

5Module 分の概観図である。

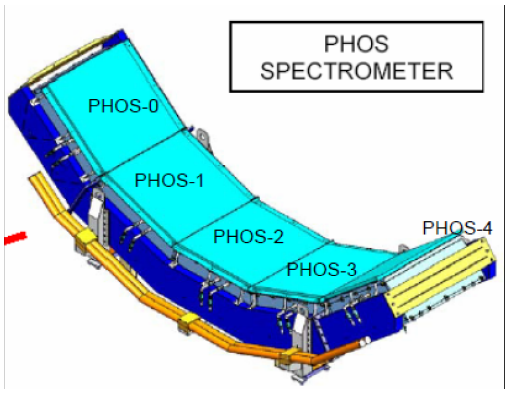

Figure 1.7: PHOS 概観図 [6]

1.2 実験の目的

本研究は、PHOS 検出器の再現機（テストベンチ）を広島の実験室に構築し、その性能評価及び検出器の研究開発を目的とした。性能評価を行うことで PHOS 実機と同等の性能を有する事を示し、その後 PHOS 検出器の研究開発を行っていく。一昨年の 5 月に CERN より PHOS 検出器のテストベンチを構築するための機器を入手し、現在、広島の実験室内にてテストベンチの構築を終えた。テストベンチは PWO 結晶、APD、前置増幅器（CSP）、そして読み出し回路である FEE 基板より構成される。

本研究における第一のゴールは、広島大学の放射光科学センター REFER 施設において、テストベンチのエネルギー分解能の測定する事によりテストベンチの性能評価を行うことであった。そしてエネルギー分解能を測定し、PHOS 検出器として性能を有する事を示した後は、PHOS 検出器の研究開発の一環として PHOS 検出器の時間分解能を求める、また、150MeV の電子線による PWO 結晶で起こる電磁シャワーの深度を求める事を目的として本実験を行った。

1.3 実験の概要

ここで本実験の概要を述べる。PHOS テストベンチを実験室内に構築した後、APD の増倍率の印荷電圧依存性、及び温度依存性を求めるために LED によって APD の増倍率特性曲線を作った。この増倍率特性曲線を用いて −25 ℃における APD の増倍率 50 倍を与える印加電圧を求めた。その電圧を印加した状態で、エネルギー較正のために −25 ℃における宇宙線を測定した。エネルギー較正後、テストベンチのエネルギー分解能、時間分解能、PWO 結晶における電磁シャワーの深度を求めるために電子周回装置にて 150MeV の電子線をテストベンチで測定した。最後に、−25 ℃、−15 ℃、0 ℃において宇宙線を測定し直した。これにより、エネルギー分解能測定、及び、電磁シャワーの深さ測定における最終的なエネルギー較正を終わらせた。

Chapter 2

導入

この章では本実験を行う上での基礎知識をまとめた。まず、PHOS 検出器についてその役割、及び検出素子である PWO 結晶と APD についての説明をする。また FEE についても簡単に述べておく。その後、テストベンチの概要を説明する。最後に、エネルギー較正のために必要な宇宙線、及びカロリメータにおける放射損失とイオン化損失について述べる。

2.1 高性能光子検出器 (PHOS)

2.1.1 光子測定

QGP の基本物性を特定する最も理想的な信号は、QGP の熱輻射による熱光子を捉える事である。しかし、その輻射確率がとても小さいため、高エネルギー原子核衝突により生成される短寿命の小さな系からの熱光子測定は容易くない。平衡状態に達したクォーク物質が熱輻射する熱光子以外に、原子核衝突が生成する莫大な中性中間子の崩壊に伴う崩壊光子、並びに衝突瞬間に起こる摂動的クォーク散乱が放出する直接光子が生成される。これらの光子を個々に区別する事ができないため、目的とする熱光子とこれらの光子が混ざるエネルギー分布から如何にして必要の無い光子成分を差し引き、熱光子エネルギー分布を正確に抽出できるかが重要なポイントである。（図 2.1 参照）そのためには検出器に入射するひとつ一つの粒子を、ひとつ一つ分離してそれぞれのエネルギーを精度よく測定する事が要求される。PHOS 検出器は近接する 2 つの粒子を分離する 2 粒子分解能に優れた検出器であり、QGP の熱輻射による熱光子を捉える事に重点を置いた検出器である。

2.1.2 鉛タングステン酸 (PWO) 結晶

PHOS 検出器の末端部、つまり光子が入射する素子が PWO 結晶である。光子が PWO 結晶において電磁シャワーを起こし、PWO 結晶が発光する。

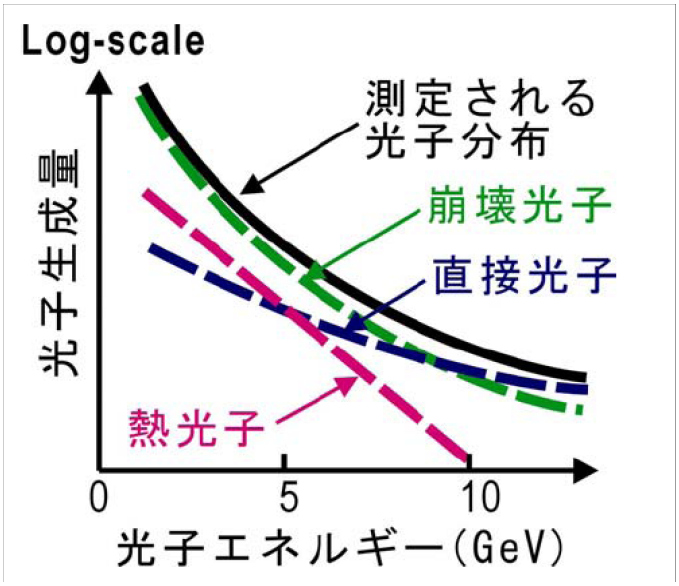

Figure 2.1: 観測される光子分布概念図 [7]

PWO 結晶の発光波長分布を図 2.3 に載せる。PWO 結晶の特性の一つとして他の無機シンチレータと比較して短い放射長を持つ。放射長とは電子が入射してから、そのエネルギーが $1/e$ になる長さである。また、PWO 結晶は荷電粒子の制動放射による電磁シャワーの横の広がりであるモリエール半径が小さい。この二つの特性によって、PWO 結晶は近接して入射する 2 つの粒子を識別して測定する事ができるので、2 粒子分解能に優れていると言える。

一方、PWO 結晶の不利点として他の無機シンチレータと比べて発光量が小さい。(表 2.1 参照) この不利点を補うために、PHOS 検出器は冷却して稼動される。PWO 結晶は温度が下がるほど発光量が増える事が知られているからである。PWO 結晶の発光量温度特性を図 2.4 に載せる。

Table 2.1: 無機シンチレータの性質 [9]

物質名	密度 [g/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

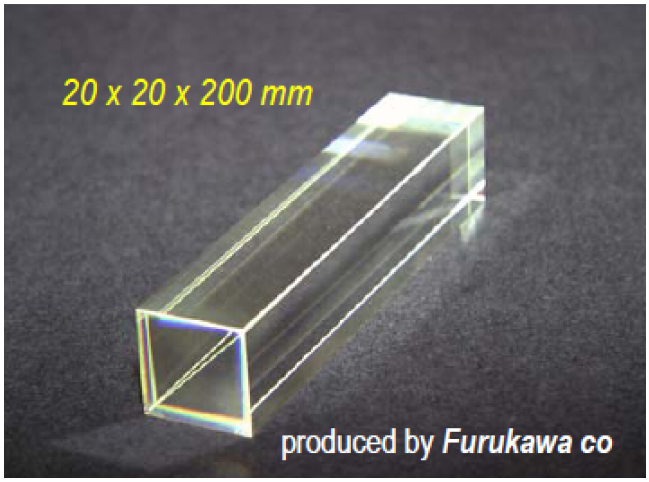

Figure 2.2: PWO 結晶 [7]

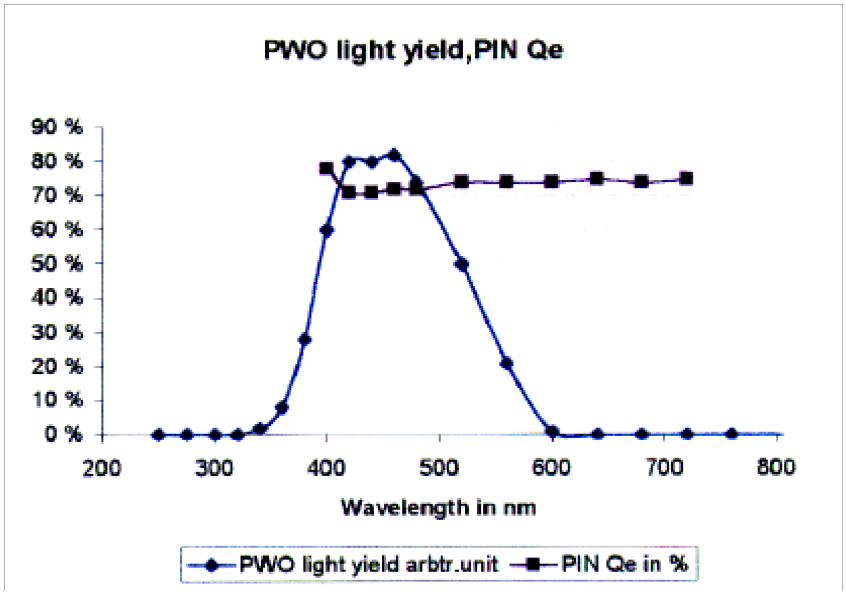

Figure 2.3: PWO 結晶の発光波長分布 [8]

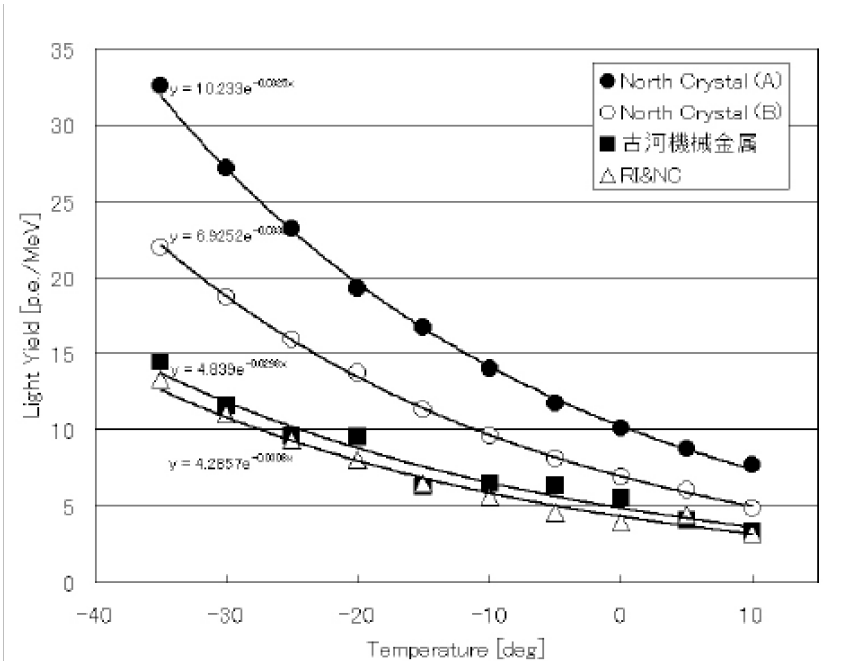

Figure 2.4: PWO 結晶の発光量温度特性 [9]

2.1.3 アバランシェ・フォトダイオード (APD)

PWO 結晶の蛍光を捉え、増幅して電気信号として読み出すのが APD である。APD は正式名称をアバランシェ（なだれ）光半導体素子と言い、電圧を印加する事により増幅機能を持つフォトダイオードである。10^2 程度の増幅率を持ち、通常のフォトダイオードよりも微弱な光の検出に適している。APD の特性として、PMT と違って磁場中でも正確な読み出しができ、高い量子効率を持っている。APD により PHOS 検出器の高エネルギー分解能が実現される。

APD の原理

フォトダイオードは逆方向バイアスで使用される半導体である。pn 接合部に禁制帯の幅以上のエネルギーの光子が当たると、電子とホールが発生する。空乏層には逆方向バイアスがかかっているので、電子が n 型領域に、ホールが p 型領域に流れ込み、電流が流れる。（図 2.5 参照）

ここで i 領域とは半絶縁体の領域であり、このデバイスが逆方向バイアスされると、印加電圧はほとんど i 領域に加わる。このため電子とホールはそれぞれ n 型領域、p 型領域にドリフトしやすくなる。これがフォトダイオードの光を検出する動作原理である。

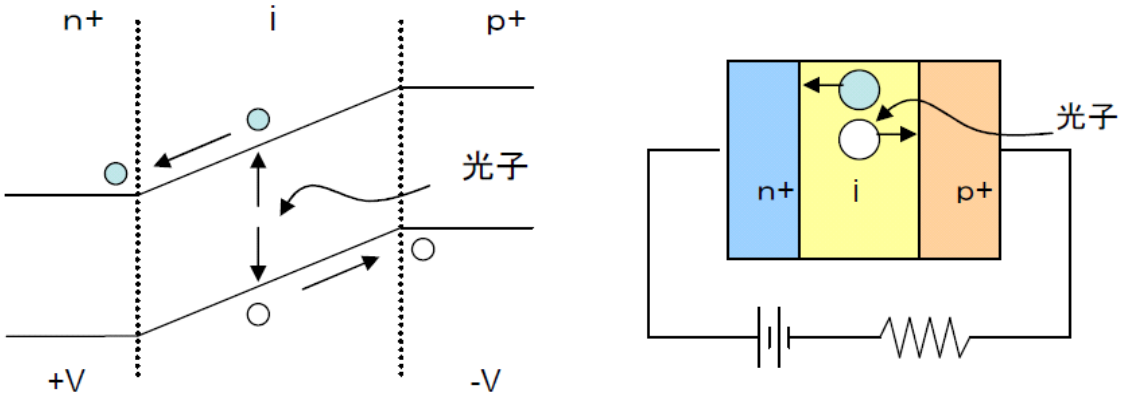

Figure 2.5: フォトダイオードのエネルギーバンド図とモデル図 [10]

APD の原理はフォトダイオードと変わらないのだが、アバランシェ領域が新たに加わっている。光子が入射するとやはり、電子とホールができる。電圧が印加されているので、それぞれは加速され電子は n+p 領域へと入る。この領域に入ると、図 2.6 のように加速された電子が格子とイオン化衝突を起こし、電子ホール対を生成する。そして、その生成されたホールがまた格子と衝突し、電子ホール対を生成するというなだれ現象を引き起こす。そしてこの増幅された電子が電気信号として検出される。これが APD の原理である。

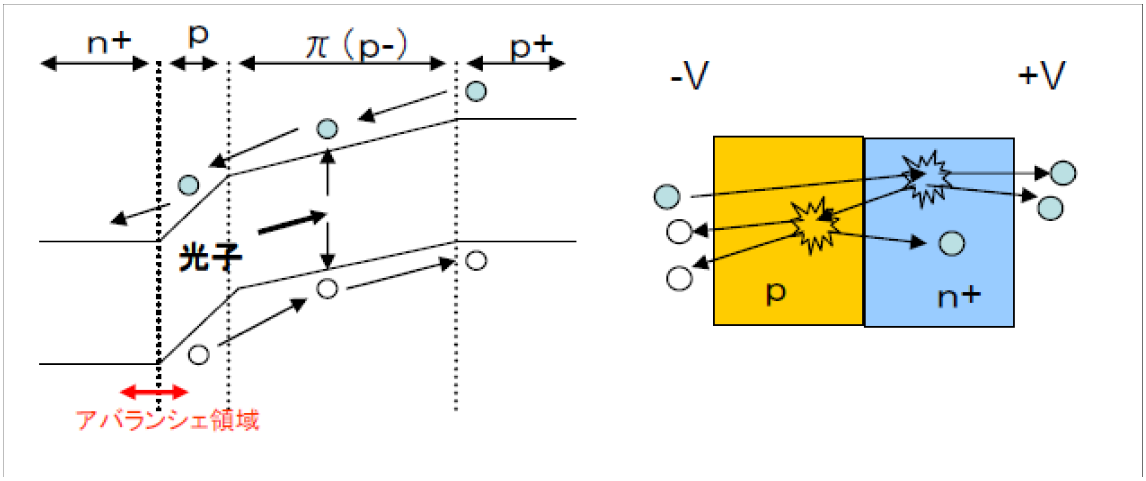

Figure 2.6: APD のエネルギーバンド図とアバランシェ領域における電子ホール対生成の図 [10]

図 2.7 と表 2.2 に APD の写真と、基本的な性能を載せた。

図の APD は CSP（前置増幅器）に取り付けられているが、CSP は APD から信号を読み出すのに用いられている。CSP は APD の電荷量を電圧値に変換して出力している。

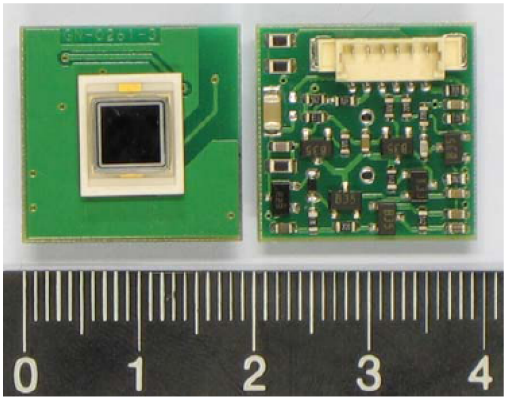

Figure 2.7: APD 及び前置増幅器 [7]

Table 2.2: APD の性能表 [7]

項目	諸元
パッケージ	セラミック
外形寸法	10.5×9.0mm
感受寸法	5×5mm 正方形
最短感応波長	320nm
最長感応波長	1000nm
最大感応波長	600nm
量子効率	70% @420nm
最大暗電流	50nA
標準暗電流	5nA
降伏電圧	400V
利得	50 @420nm

2.1.4 FEE(Front End Electronics)

高エネルギー原子核衝突実験研究が掲げる物理目標から低い測定エネルギー下限が要求され、また世界最高エネルギーの LHC 加速器実験である事から非常にエネルギーの高い光子までも測定される事が要求される。これらの要求から検出素子の感応エネルギー領域は 5MeV から 80GeV という 4 桁もの動作領域と 14bits のエネルギー分解能が要求される。これらは光感応部や前段増幅部だけでなく、FEE 回路の数値化部分にも要求が課される。FEE 回路の設計思想では、広いエネルギー受入領域で高分解能を保障するため、感応エネルギー領域を 2 系統に分割し、それぞれに波形整形回路と数値化回路を実装する。その対価として、波形測定する事により、ひとつの数値化回路で波高数値化と時間数値化を同時に実現する。回路ブロック図を図 2.8 に示す。

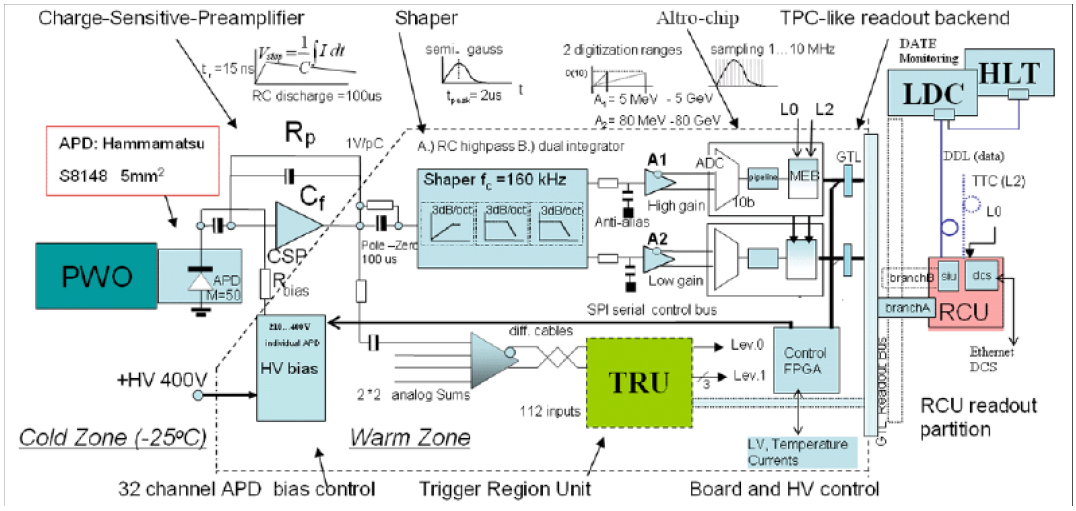

Figure 2.8: FEE ブロック図 [6]

CSP で増幅した APD 信号は立ち上がり時間 15〜20ns で、時定数 100μs の帰還ループにより減衰する信号である。この信号情報から時間及び波高情報を後段の数値化回路で引き出しやすくするため、波形整形回路（Shaper）にて正規分布に近い波形に整形する。波形整形回路の微積分の時定数は 1μs としている。整形波形を 2 段目の積分回路入力部で 2 分割し、高利得積分器（High Gain）と低利得積分器（Low Gain）の 2 系統を同時に出力する。両積分回路の利得比は 16 倍とし、高利得積分器は 5MeV から 5GeV、低利得積分器は 80MeV から 80GeV のそれぞれ 3 桁のエネルギー領域をカバーする。

数値化回路の中核に ALTRO16 素子を用いている。16 系統の独立した ADC と 600 万個以上のトランジスタにより構成した専用デジタル処理回路及び 800kbits のデータ蓄積メモリを搭載し、毎秒 1〜40Ms（Mega-Sampling）の繰り返しで入力信号をサンプリング計測を行う。PHOS 検出器読み出しでは

入力信号波形を 10MS/s で数値化し、デジタル処理回路において波高値と時間を計算しデータ蓄積メモリに一時蓄える。

上記機能を載せた FEE 基板の写真を図 2.9 に載せる。10 層基板で、2mm 厚、35×21cm のサイズである。写真上部のピンコネクタから T 型変換基板（T-card）を通して検出素子と結線する。上部中央表裏面にそれぞれ 16ch の波形整形回路、表裏面にそれぞれ 2 個の ALTRO 素子で FEE1 ボードで 32ch×2 系統の波形を数値化する。中央の集積素子は FEE 機能を制御するための FPGA である。写真下端に、GTL-bus（データ送信及び制御用）、電源入力の各種コネクタが配置されている。外部電圧を受け、10bits の DAC 素子を使って 32 個の独立した逆バイアス電圧を供給する回路が波形整形回路の両端に配置されている。FEE 基板の全消費電力は 5.5W となっている。

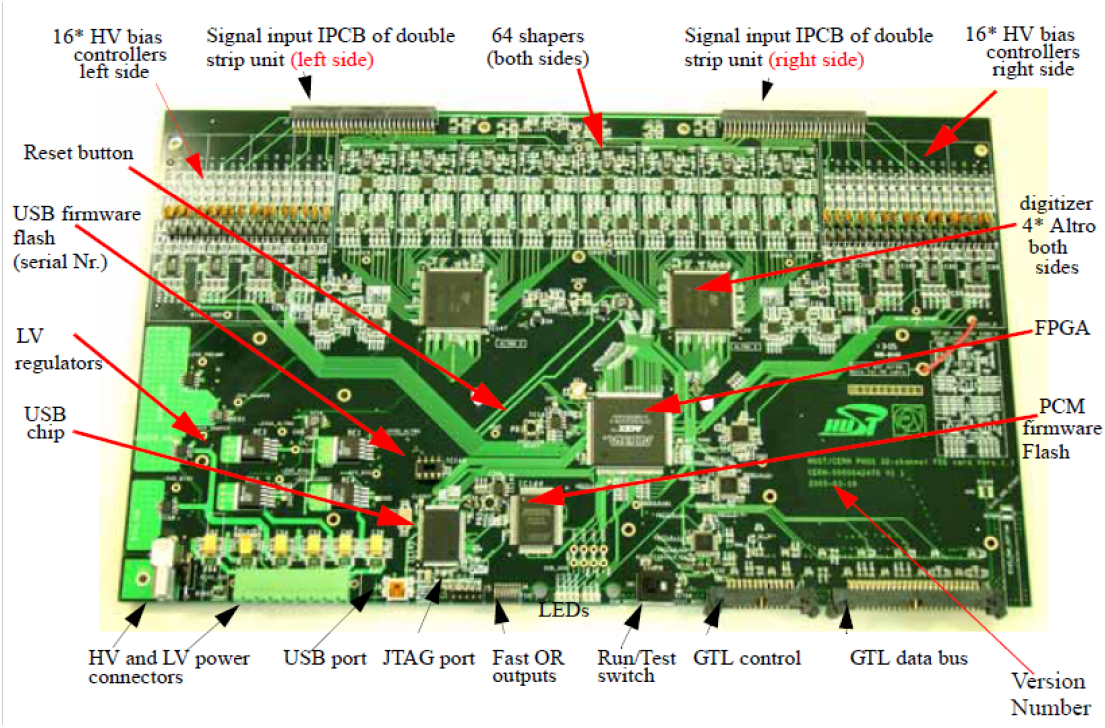

Figure 2.9: FEE 基板 [6]

2.2 Test-bench

PHOS テストベンチとは PHOS の debugging 機能と、FEE 基板に載せるファームウェアなどの研究開発を継続するため、広島大学に構築した読み出し回路を含む PHOS 検出器システムの事である。2007 年の 5 月より CERN 研究所からテストベンチに必要な装置を取得し、広島の実験室内にて PHOS 検出器システムを構築し、性能評価を行うに至った。

2.2.1 Test-bench の概要

図 2.10 に広島の実験室内に構築した PHOS 検出器システム（テストベンチの概要図）を示す。

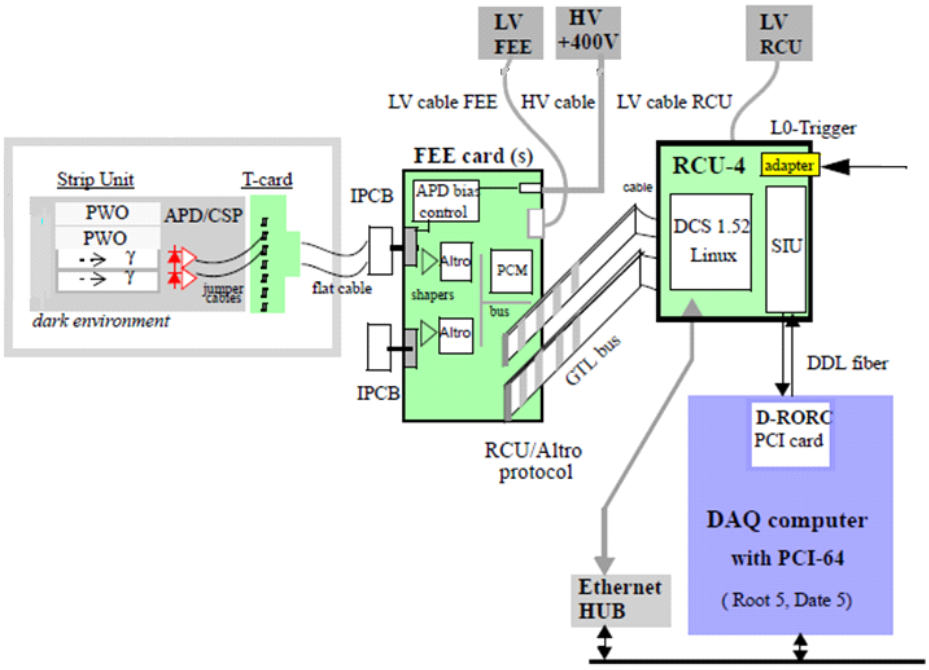

Figure 2.10: テストベンチの概要図 [6]

テストベンチ末端部は、図 2.11 の写真のように 5×6−1 の 29 本の PWO 結晶から構成される。現在、広島の実験室にある North Crystal 社の PWO 結晶は最大で 29 本ある。使用する 29 本という数は PWO 結晶の最大個数によって決まっているが、29 本の結晶を用いることで以下の利点がある。

PWO 結晶の電磁シャワーの広がりは 2cm 程度であり、電磁シャワーを外にもらさない様にするためには 3×3 の 9 本で事足りる。しかしエネルギー較

正を考えると、エネルギーを知りたい結晶の周りに結晶があった方がエネルギー較正しやすい。これについては次のセクションで詳しく説明する。よって、29 本の PWO 結晶を用いる事によりエネルギーを知りたい 3×3 の結晶をカバーする事ができる。

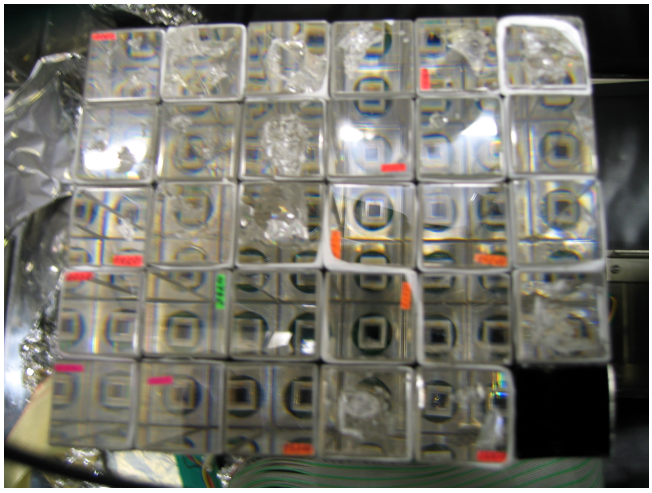

Figure 2.11: 固定フレームに入った 5×6−1 本の PWO 結晶

続いて、APD と CSP が PWO 結晶の後ろに取り付けられる。APD 及び CSP からの信号は jumper cable を通して T-card に送られる。T-card からの信号は flat cable を通して FEE 基板に送られる。PWO 結晶から T-card までが冷凍庫内に配置される。冷凍庫内及び外の写真を図 2.12 と図 2.13 に示す。

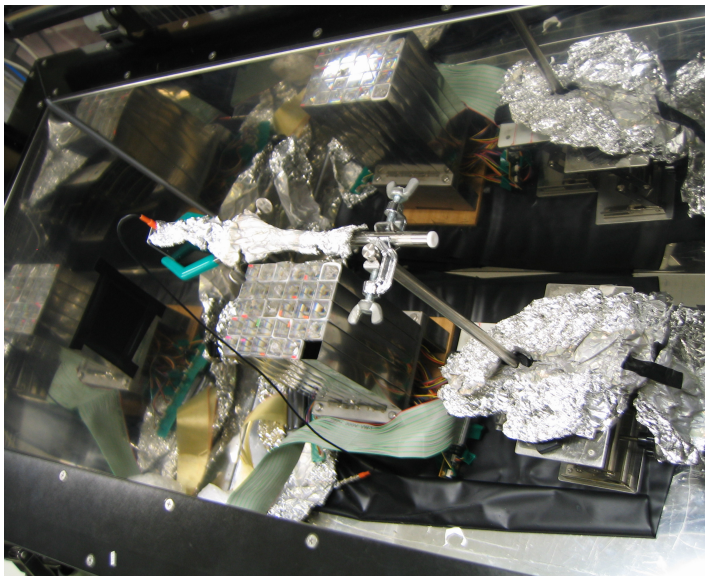

Figure 2.12: 冷凍庫内の写真：PWO 結晶の上方にテスト用の LED を置く。

Figure 2.13: 冷凍庫外の写真：冷凍庫の左側面に Flat cable 等のケーブル取り出し穴がある。

FEE 基板に送られた信号は波形整形回路（Shaper）で波形整形された後、ALTRO でデータとして蓄積される。トリガーが入るとデータは GTL-data-bus を通って RCU（Readout Control Unit）に伝わり、データフォーマットされ DDLfiber cable より DAQ-PC に送られ、データファイルとして記録される。テストベンチにおけるトリガーは、RCU に入力された後、FEE 基板に伝わる。また RCU には DCS（Detector Control Unit）が搭載されている。DCS には Linux が入っており、DAQ-PC より LAN cable を介して DCS にログインした上で FEE のコントロールを行っている。具体的には FEE のスイッチの ON/OFF、APD に印加される電圧の調節、ALTRO におけるデータの Sampling 数の調節などをコントロールする。図 2.14 に FEE、RCU、及び GTL-bus の写真を載せる。

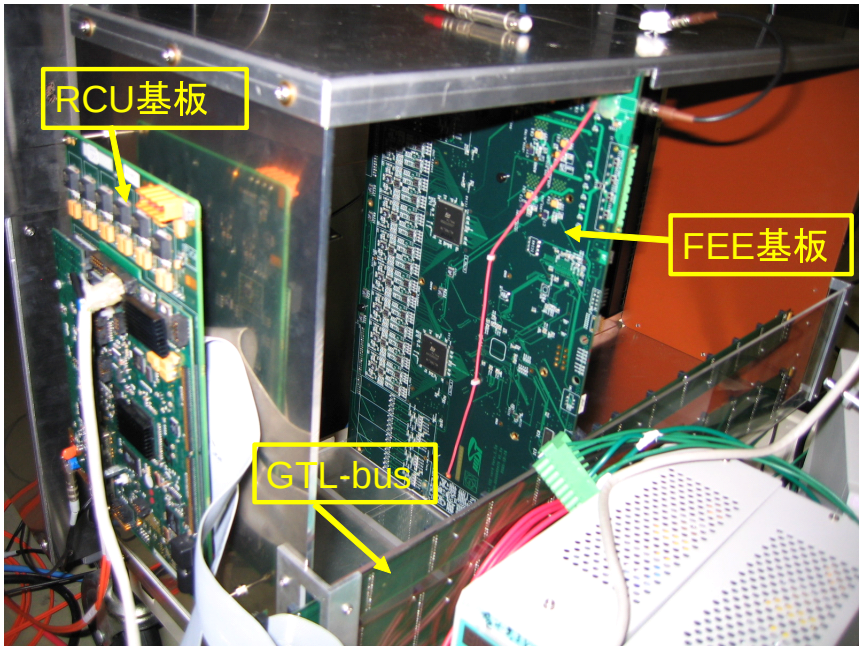

Figure 2.14: FEE 基板、RCU 基板、及び GTL-bus

テストベンチの最下流に当たる DAQ-PC ではデータを貯蔵する他、データ読み出しのコントロールを行う。図 2.15 はデータ取得時の DAQ-PC の画面である。GUI より読み出し系の操作を行う。

最後にテストベンチの周辺機器の写真を図 2.16 に載せる。

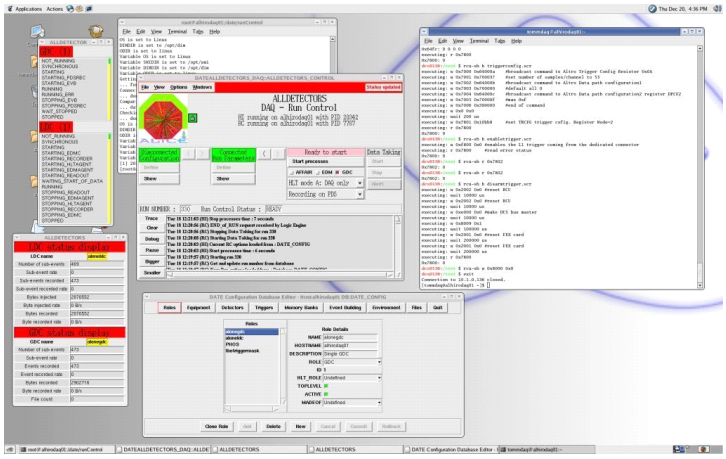

Figure 2.15: DAQ-PC の画面：RUN Control の GUI、DCS へのログイン

Figure 2.16: 周辺機器：写真左側に DAQ-PC を置く。手前に FEE 及び RCU、そして LV 電源を置く。

2.3 エネルギー較正

本実験では、測定されたエネルギーは $ADCch$ でデータとして保存される。この $ADCch$ を物理的な値（eV など）に置き換えるためには、テストベンチの各 29ch に独立した Conversion Factor$[MeV/ch]$ を知る必要がある。本実験では Conversion Factor を求めるに当たって宇宙線の測定を行った。以下でエネルギー較正を行う上での宇宙線の役割とその原理を述べる。

2.3.1 宇宙線

大気圏外から地球大気の中にやってくる透過性の強い放射線を宇宙線と呼ぶ。宇宙線の発生源については未知な点も多いが、超新星は主な発生源の一つだと考えられている。地球の大気圏に降り注ぐ宇宙線（1 次宇宙線）の 90% 以上は陽子である。1 次宇宙線が大気の原子核と衝突して発生する素粒子を２次宇宙線という。2 次宇宙線としては、まず π 中間子が大量に作られ、π 中間子の崩壊で μ 粒子が大量に生成される。μ 粒子は地表 $10\mathrm{cm}^2$ に 1 秒間に約 1 個の割合で降り注いでいる。2 次宇宙線として作られた π 中間子は、

$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu, \qquad \pi^- \to \mu^- + \bar{\nu_\mu}$

と崩壊して、μ 粒子と μ ニュートリノになり、μ 粒子は、

$\mu^+ \to e^+ + \bar{\nu_\mu} + \nu_e, \qquad \mu^- \to e^- + \nu_\mu + \bar{\nu_e}$

と崩壊する。図 2.17 に宇宙線の発生の概念図を示す。

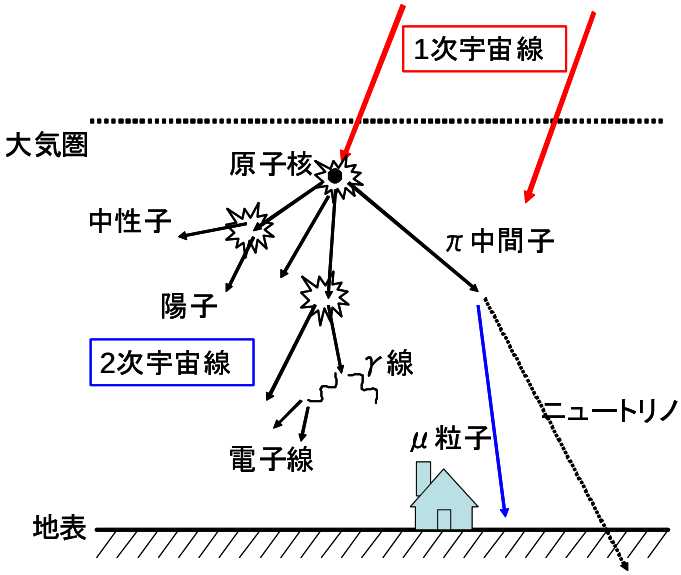

Figure 2.17: 宇宙線概念図

また、図 2.18 に二次宇宙線の粒子別のフラックスを示す。図を見て分かるように地表付近では観測されやすい粒子としては μ 粒子が最も割合が多い。地表付近での μ 粒子の平均エネルギーは約 4GeV となる。宇宙線は検出器に入射するとエネルギーを落とす。そのエネルギーは計算すると求められるので、宇宙線のエネルギーを測定する事は検出器のエネルギー較正を行う上で良い手段の一つであると言える。続いて、荷電粒子と物質の相互作用について述べる。

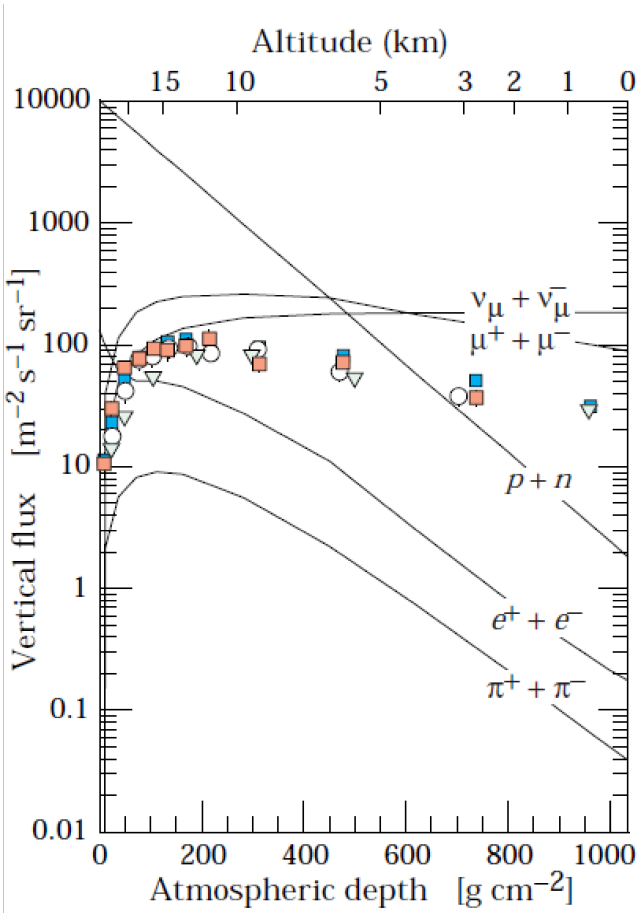

Figure 2.18: 大気圏内の 1GeV 以上のエネルギーの宇宙線のフラックス [11]

2.3.2 制動放射とイオン化損失

イオン化損失

荷電粒子が物質を通過する際には、物質との相互作用の結果、エネルギーを失い、かつその進行方向も曲げられる。荷電粒子と物質の相互作用の中で最

も重要な作用はイオン化損失である。この作用では原子中の電子が荷電粒子からエネルギーを受け取る。受け取ったエネルギーが電子の束縛エネルギーよりも十分大きい場合には、電子は原子から弾き飛ばされる（イオン化）が、受け取るエネルギーが小さい場合には、原子の励起状態へと電子が励起される。荷電粒子の物質中でのエネルギー損失は以下のベーテ-ブロッホの式より求める事ができる。

$$-\frac{dE}{dx} = nZz^2\frac{4\pi\alpha^2(\hbar c)^2}{m_e c^2\beta^2}(In\frac{2m_e c^2\beta^2\gamma^2}{I} - \beta^2) \tag{2.1}$$

ここで $-dE$ は距離 dx を進む間に失うエネルギーの大きさ、n は物質中の原子の密度、Z は物質原子の電荷、m_e は電子の質量、βc と z は荷電粒子の速度と電荷を表す。I は物質原子の平均励起ポテンシャルと呼ばれるパラメータであり、物質ごとに測定値から求められる量である。図 2.19 に物質ごとのエネルギー損失を示す。

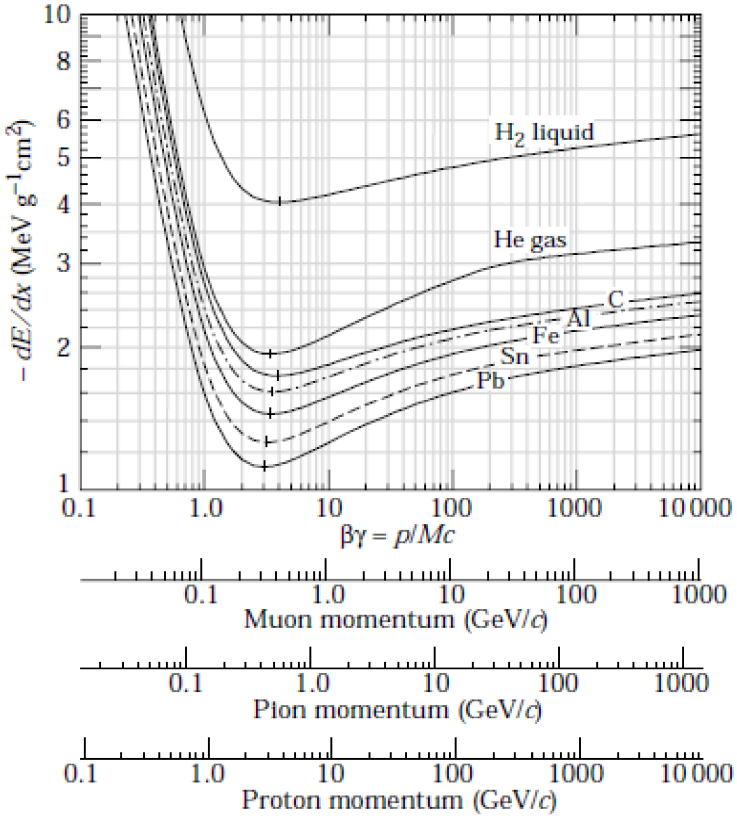

Figure 2.19: 各物質における平均エネルギー損失 [11]

宇宙線もまた荷電粒子であるのでPWO結晶中でイオン化損失を起こし、PWO結晶中の電子を励起させる。その励起した電子が基底状態に戻る時にシンチレーション光を発する。これがPWO結晶を含むシンチレータが発光する原理である。その後、APDがシンチレーション光を捉える事で信号を読み出すことが出来るのである。宇宙線によるエネルギー較正については以上だが、本実験では電子線を用いているので、ここで電子と物質との相互作用についても触れておく。

制動放射

電子や陽電子も他の荷電粒子と同様に、物質の原子中の電子と散乱によってエネルギーを損失する。しかし、その小さな質量のために、制動放射によるエネルギー損失が大きな役割を持つ。制動放射は、原子核の電場との散乱で放射される電磁波である。低いエネルギーではこの寄与は小さいが、数十eVを超えた高エネルギー領域ではイオン化によるエネルギー損失より重要になってくる。制動放射の断面積は$\sigma_{rad} \propto Z^2\alpha^3/{m_e}^2c^4$である。このため、電子・陽電子より質量の大きな粒子ではほとんど無視できる。電子のエネルギーは物質の厚さに対して指数関数的に減少する。エネルギーが$1/e$に減衰する長さを放射長と呼ぶ。

制動放射によって放出された高エネルギーの光子は電子・陽電子対を生成する。この電子・陽電子のエネルギーが制動放射に十分なエネルギーを保っている場合には、電子・陽電子のそれぞれが制動放射で光子を放出する。そして、その光子がまた電子・陽電子対を生成する。この過程が繰り返され、電子・陽電子と光子がネズミ算式にたくさん生成されていく。この過程は、電子・陽電子のエネルギーが制動放射よりイオン化によるエネルギーが大きくなるような低エネルギーまで繰り返される。これを電磁シャワーと呼ぶ。

電子がPWO結晶に入射すると、上記の電磁シャワーが起こり、電子のほとんどのエネルギーがPWO結晶内で落ちる。電磁シャワーの縦の広がりの指標となるのが放射長であり、横の広がりがモリエール半径である。（表2.1参照）PHOSの場合、電磁シャワーの末端において発生した光子をAPDが捉えて信号を読み出すのである。

Chapter 3

実験

この章では、エネルギー分解能測定実験に至るまでの実験、及びその結果について説明する。まず、APD の増倍率の特性曲線を求める実験から始まる。特性曲線により −25 ℃での印加電圧を決めるためである。その後、エネルギー較正のための宇宙線測定に入る。宇宙線測定によりエネルギー較正が終わった後、エネルギー分解能を求めるための電子線測定実験に入る。ここでは電子線測定実験までを説明する。

3.1 APDの印加電圧依存性、及び温度依存性の測定

PHOS テストベンチの性能評価は、エネルギー分解能を求める事である。PHOS 実機が稼動する温度は −25 ℃であるので、テストベンチのエネルギー分解能も −25 ℃にて測定する。一方、PHOS の検出素子である APD は印荷電圧をかける事で信号の増倍率が増加する。また、APD は温度を下げる事によっても信号の増倍率が増加する。APD は増倍率が増すに従って、出力信号が大きくなると共に雑音（ノイズ）も大きくなる。そして、信号を雑音で割った値が大きいほど信号を確認しやすいといえる。APD は増倍率 50 倍が最も信号／雑音の比が大きくなる。APD は浜松ホトニクス社の製品であり、+25 ℃での 50 倍の増倍率を与える印加電圧は個体ごとに保証されている。表 3.2 に、本実験に用いた APD のテストベンチ ID、増倍率 50 倍を与える印加電圧（V_R）、及び最大印加電圧（V_B）を載せる。

Table 3.1: APD の印加電圧特性表（+25 ℃）[12]

No	Testbench ID	V_R[V]	V_B[V]	No	Testbench ID	V_R[V]	V_B[V]
1	0_13	364	408	16	8_13	371	415
2	1_13	364	408	17	9_13	407	452
3	2_13	361	405	18	10_13	401	446
4	3_13	367	411	19	11_13	407	451
5	4_13	367	411	20	12_13	392	435
6	5_13	363	407	21	13_13	406	452
7	6_13	357	401	22	14_13	409	454
8	7_13	368	412	23	15_13	400	443
9	0_12	359	404	24	15_12	411	456
10	1_12	397	440	25	9_12	389	433
11	2_12	394	437	26	10_12	375	419
12	3_12	388	432	27	11_12	397	440
13	4_12	384	427	28	12_12	375	419
14	5_12	382	426	29	14_12	400	444
15	6_12	390	434				

本実験では、−25 ℃においてエネルギー分解能の測定を行う。そこで、−25 ℃において信号／雑音が最も良くなる増倍率 50 倍を与える印荷電圧を知る必要がある。今回、LED の光を APD で読み出す測定を印荷電圧、及び温度を変化させて行った。これで APD の印加電圧依存性、及び温度依存性を知る事ができる。そして、そこから −25 ℃における増倍率 50 倍を与える印荷電圧を求める事ができる。

3.1.1 実験のセットアップ

APD の印加電圧依存性、及び温度依存性の測定実験のセットアップ（冷凍庫内）を以下の図 3.1 に示す。

冷凍庫内に光電子増倍管（PMT）を置いている。ここで光電子増倍管の簡単な説明を加える。まず、入射した光子が光電子増倍管の表面で光電効果によって電子を弾き出す。そして、光電子増倍管の中で電子は増幅し、電気信号として読み出すことが出来る。本実験において光電子増倍管は LED の光を監査するために用いた。なぜならば、LED の発光量は温度によって変化するので LED の光量を光電子増倍管でチェックする必要があるからである。また、光電子増倍管の増倍率が温度に依存しないか問題になるが、それは光電子増倍管で測定された光量を 1 光電子の電荷量で補正する事により解決した。続いて、1 光電子の測定について説明する。

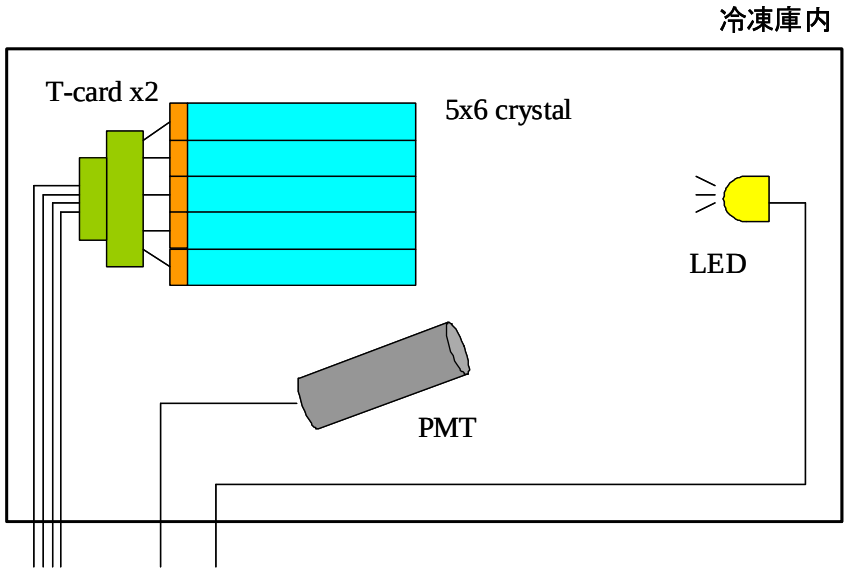

Figure 3.1: 印加電圧依存性、及び温度依存性の測定実験のセットアップ

1 光電子測定

1 光電子とは、光子が光電子増倍管で光電効果を起こした時に 1 個だけ発生させた電子の事である。1 光電子が光電子増倍管で増倍された増倍率は温度によって変わる。光電子増倍管で測定した光量もまた温度によって変わる。しかし、この測定した光量を 1 光電子の電荷量で割る事によって、測定した光量を光電子数に置き換えることが出来る。光電子数とは増倍率の温度変化に依らない量である。つまり、測定した光量を光電子数に置き換えることによって、増倍率の温度変化を補正する事ができる。この光電子数の温度依存性を見るということは LED の発光量の温度依存性をみていると言える。しかし、ここで光電子増倍管の量子効率の温度依存性は考慮に入れていない。量子効率の温度依存性は無視できるとして本実験を行った。

1 光電子を特定するには、図 3.2 のように光量のヒストグラムを取って光量を変化させてみると良い。1 光電子ならば光量を増やしたとしてもピークの位置は変わらない。また図 3.2 の左下のヒストグラムに見える右側の 2 つのピークは 1 光電子と 2 光電子である。

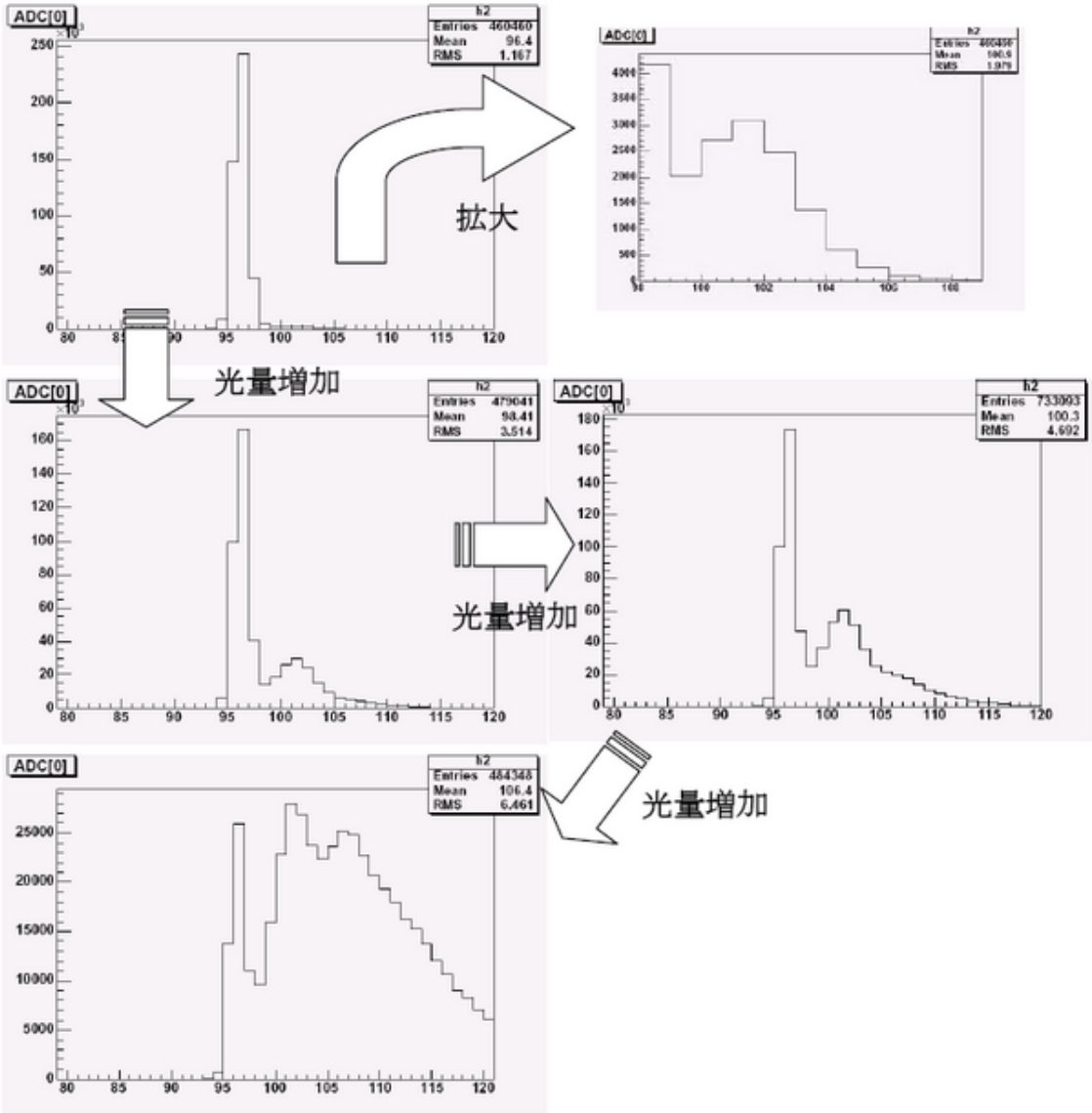

Figure 3.2: 光量を変化させて１光電子を確認　縦軸：カウント　横軸：$ADCch$

3.1.2 測定結果

光電子増倍管による光量測定

以下に光電子増倍管による測定の結果を載せる。まず、図 3.3 は光電子増倍管で測定した光量の温度依存性である。縦軸は ADC ch、横軸は温度である。温度が下がるにつれて光電子増倍管で測定された光量が大きくなっている事が分かる。

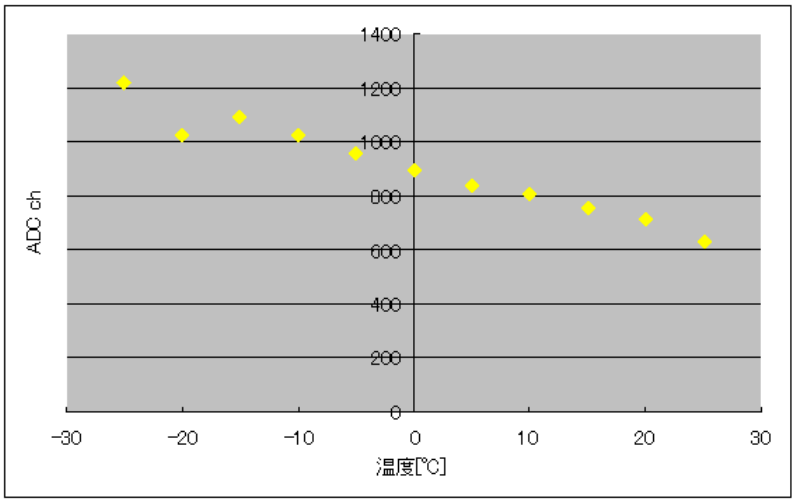

Figure 3.3: 光電子増倍管で測定した光量の温度依存性　縦軸：ADCch　横軸：温度 [℃]

図 3.4 は光電子増倍管で測定した 1 光電子のピーク ch の温度依存性である。そして、図 3.5 は光電子増倍管で測定した光量を 1 光電子のピークで割った値、つまり光電子数の温度依存性である。これが LED の発光量の温度依存性である。温度が下がるにつれ、LED の発光量が増えている事がわかる。図 3.5 の LED の発光量は、APD の温度依存性を求める際の温度ごとの補正のために用いる。

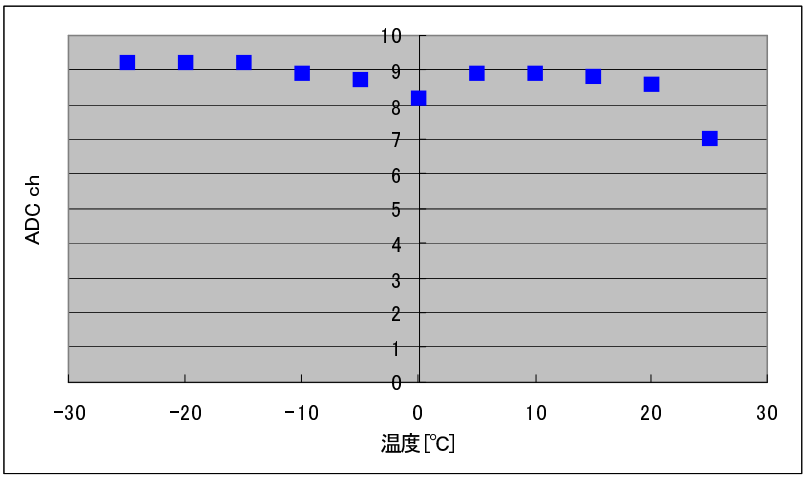

Figure 3.4: 光電子増倍管で測定した 1 光電子の温度依存性　縦軸：ADCch 横軸：温度 [℃]

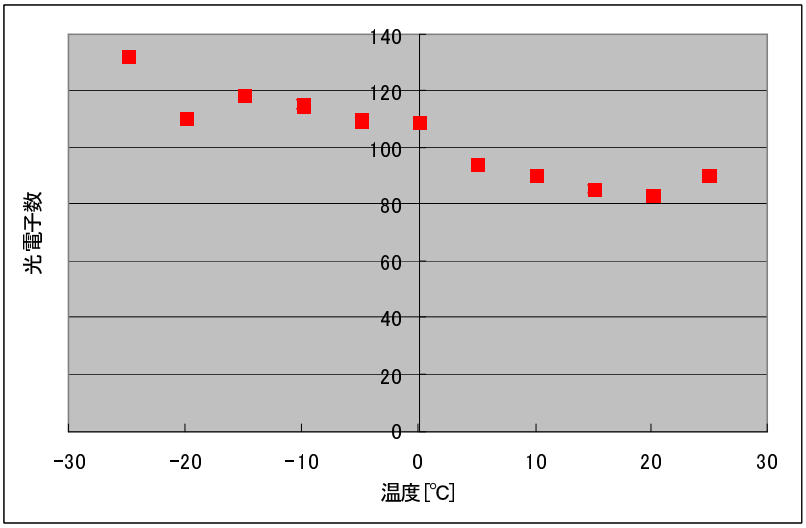

Figure 3.5: 光電子増倍管で測定した光電子数の温度依存性　縦軸：光電子数 横軸：温度 [℃]

APD の増倍率印加電圧依存性の結果

まずは、25 ℃における APD の増倍率の印加電圧依存性を図 3.6 に載せる。縦軸は対数表示の $ADCch$ であり、横軸は印加電圧である。各々の素子には別々の印加電圧をかけている。以下のデータについて 29ch の素子を調べたが、簡単のため適当な 1∼6ch の素子にのみ着目する。このグラフの $ADCch$ を得るには得た RAW データからの解析が必要だがここでは省略する。解析の詳しい手順は 4.1.1 節を参照。

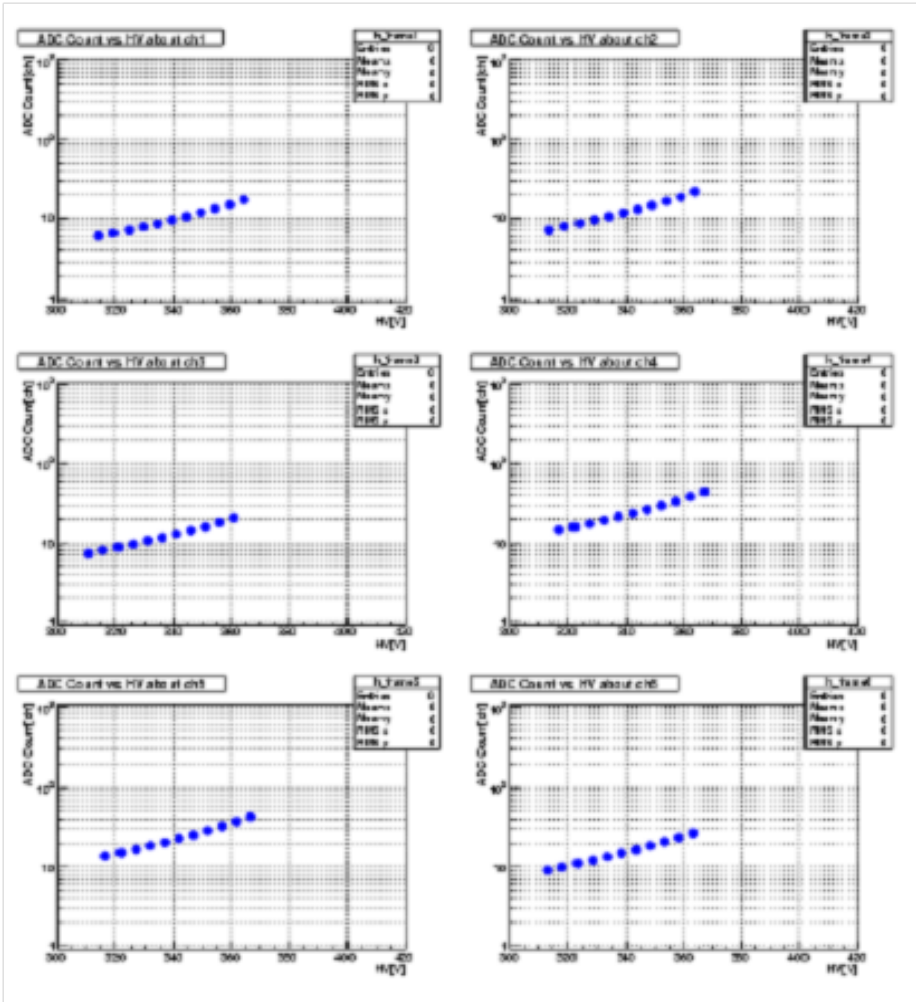

Figure 3.6: 25 ℃における印加電圧依存性　縦軸：$ADCch$　横軸：印加電圧 [V]

続いて、0 ℃における APD の増倍率の印加電圧依存性を図 3.7 に載せる。

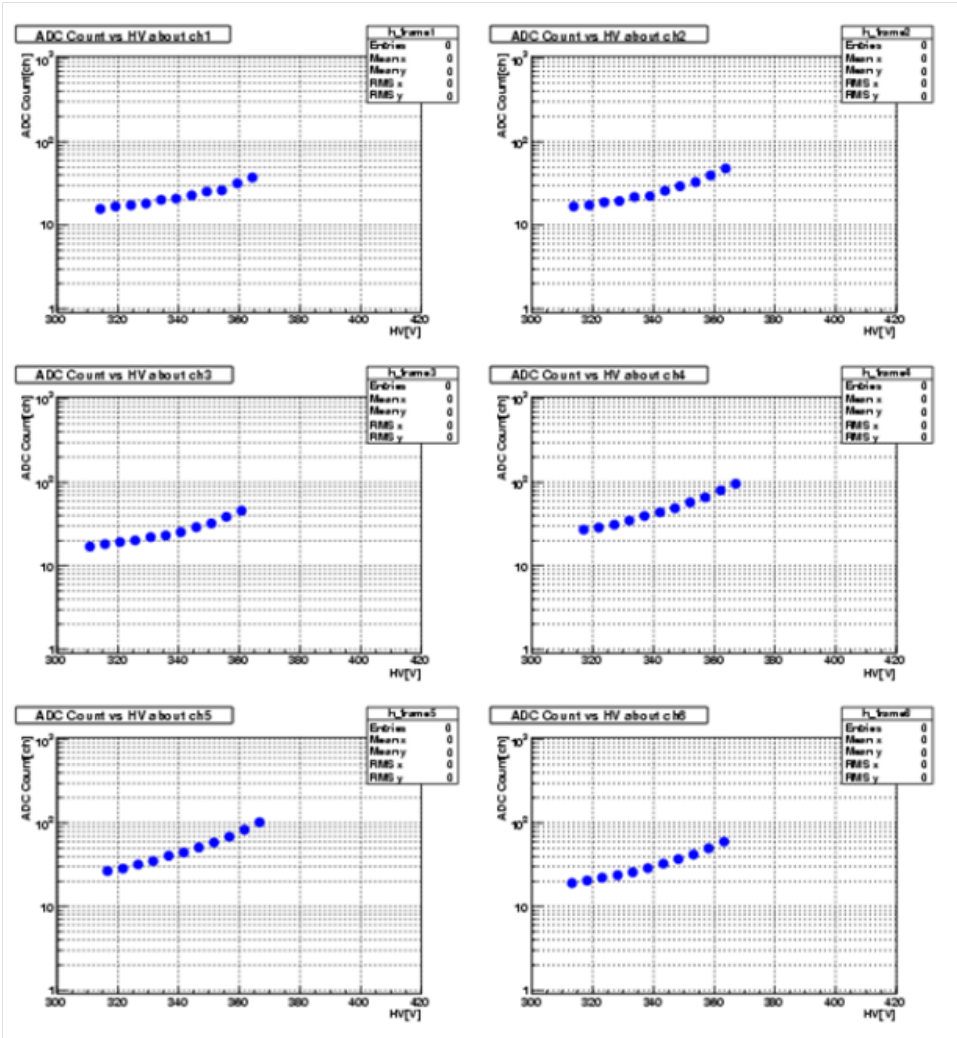

Figure 3.7: 0 ℃における印加電圧依存性　縦軸：$ADCch$　横軸：印加電圧 [V]

続いて、−15 ℃における APD の増倍率の印加電圧依存性を図 3.8 に載せる。

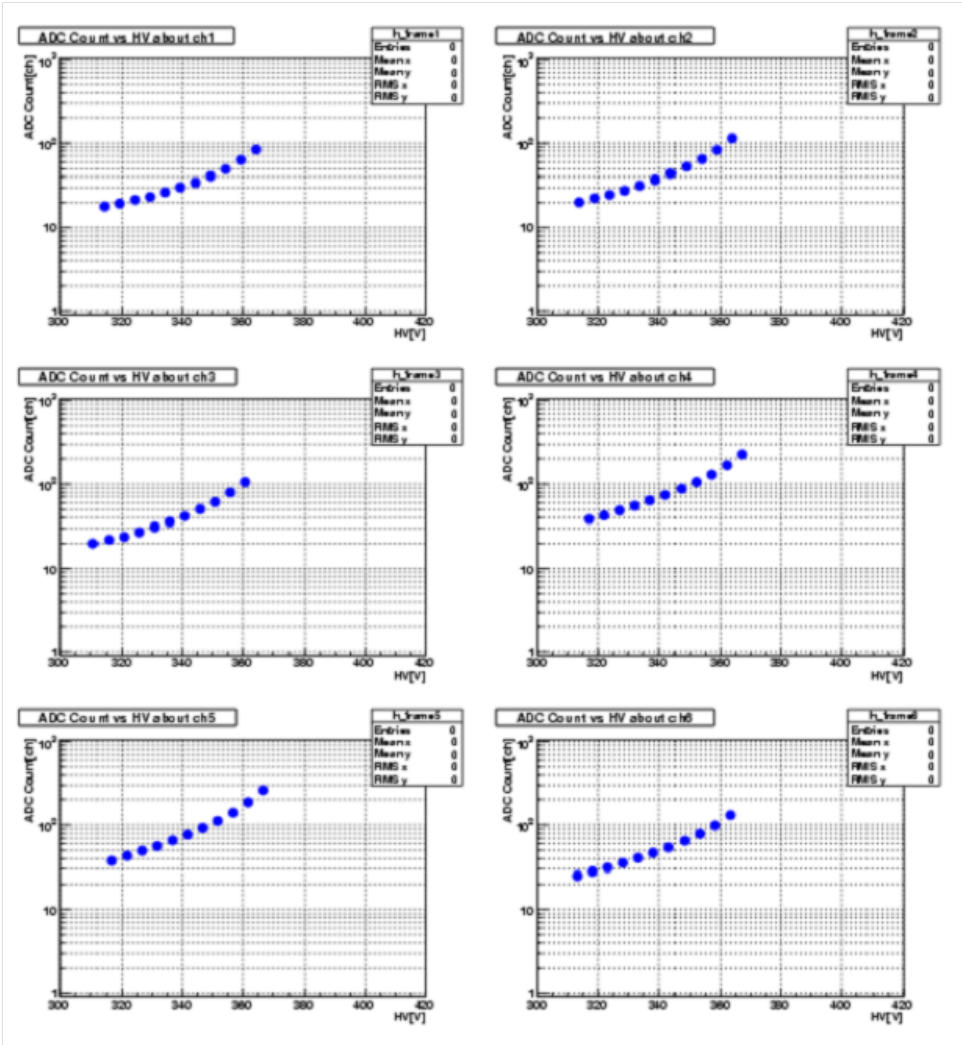

Figure 3.8: −15 ℃における印加電圧依存性　縦軸：$ADCch$　横軸：印加電圧 [V]

続いて、−25 ℃における APD の増倍率の印加電圧依存性を図 3.9 に載せる。

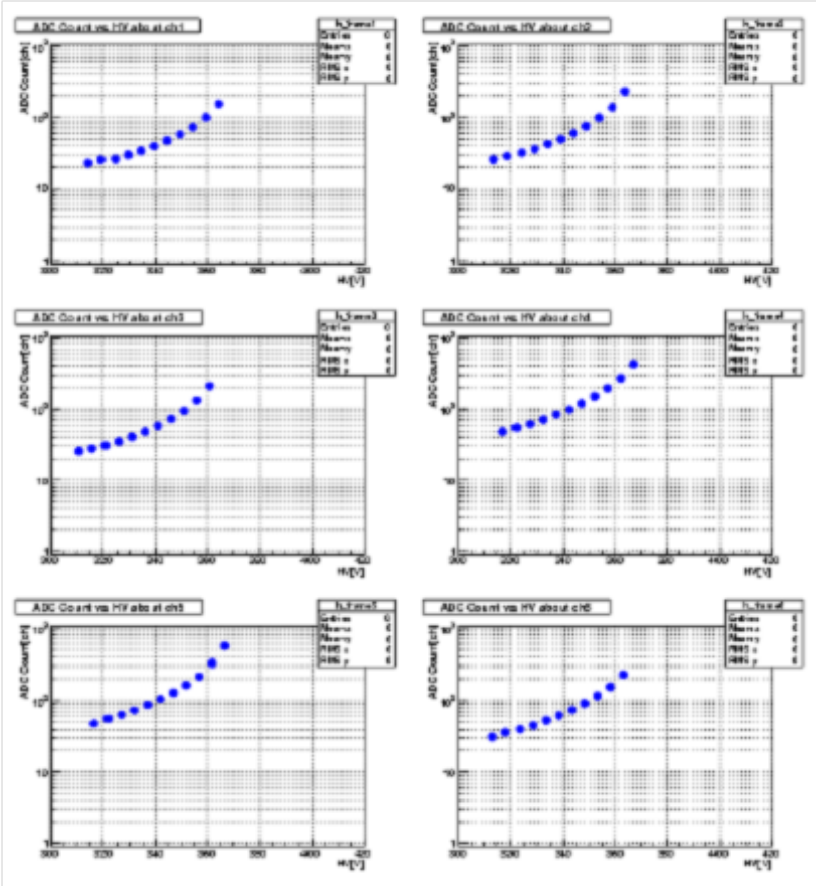

Figure 3.9: −25 ℃における印加電圧依存性　縦軸：$ADCch$　横軸：印加電圧 [V]

以上が各温度における APD の増倍率の印加電圧依存性である。

APD の増倍率温度依存性の結果

続いて、APD の増倍率の温度依存性をを図 3.10 に載せる。各温度における LED の発光量を補正するために、縦軸は ADCch を図 3.5 の光電子数で割ったものとなっている。横軸は温度である。印加電圧は温度ごとで一定であり、全ての温度において 25 ℃で増倍率 50 倍を与える印加電圧をかけている。

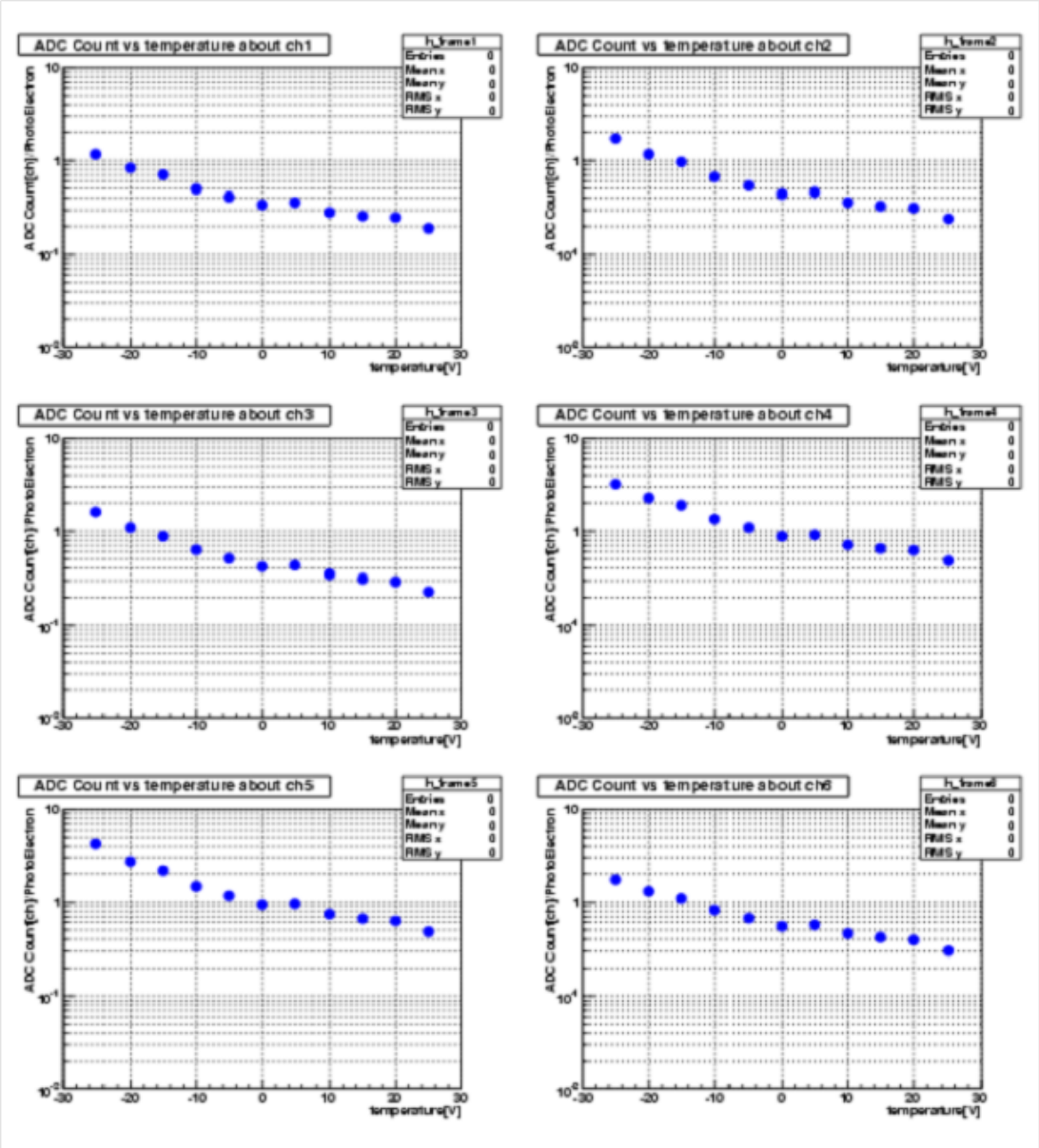

Figure 3.10: 印加電圧 V_R での温度依存性　縦軸：$ADCch$（温度による光電子数補正有り）　横軸：温度 [℃]

また、25 ℃で V_R を与える印加電圧をかけた時の ADCch を元に −25 ℃でその ADCch を返す印加電圧を求めた。（温度を変化させる時には光電子数の補正を行っている。）これが本実験で使用する −25 ℃で増倍率 50 倍を返す印加電圧である。表 3.2 に 29 個の APD に対する −25 ℃で増倍率 50 倍を返す印加電圧をまとめた。また、図 3.11 は −25 ℃での増倍率 50 倍を返す印加電圧をかけた時の ADCch を 1 と置いたグラフである。このグラフを用いる事で −25 ℃での増倍率 100 倍を返す印加電圧や増倍率 150 倍を返す印加電圧を求める事ができる。

Table 3.2: −25 ℃で APD に増倍率 50 倍を与える印加電圧

No	Testbench ID	印加電圧 [V]	No	Testbench ID	印加電圧 [V]
1	0_13	321	16	8_13	331
2	1_13	324	17	9_13	371
3	2_13	320	18	10_13	363
4	3_13	329	19	11_13	367
5	4_13	326	20	12_13	353
6	5_13	323	21	13_13	367
7	6_13	317	22	14_13	373
8	7_13	327	23	15_13	361
9	0_12	314	24	15_12	375
10	1_12	357	25	9_12	351
11	2_12	357	26	10_12	324
12	3_12	350	27	11_12	357
13	4_12	343	28	12_12	334
14	5_12	346	29	14_12	361
15	6_12	353			

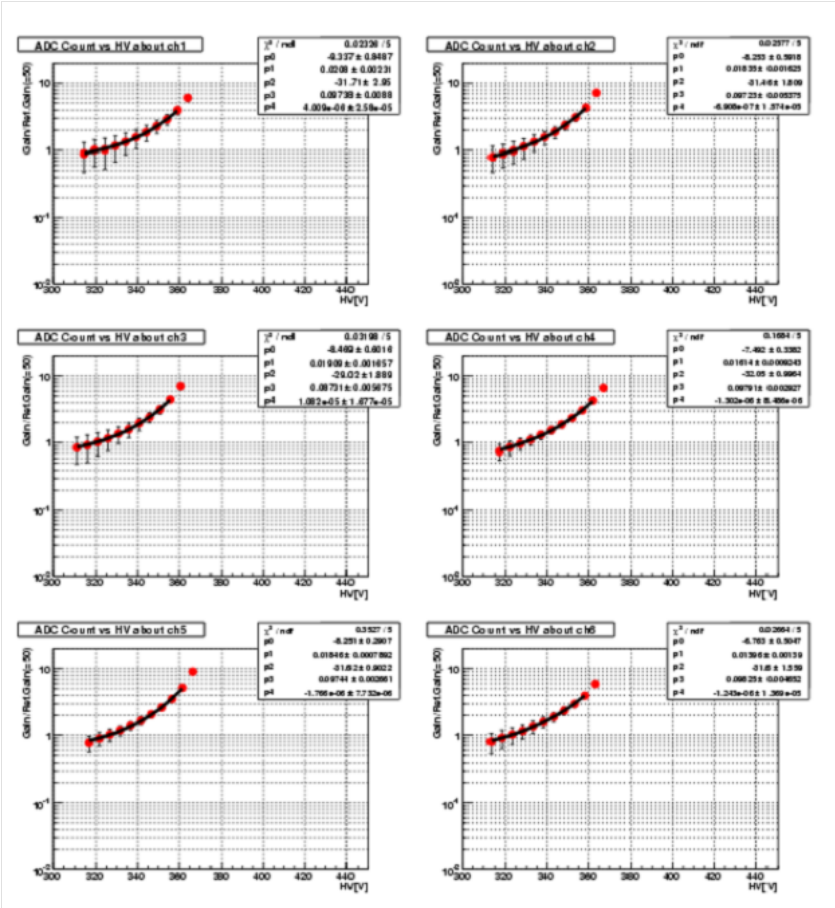

Figure 3.11: −25 ℃での増倍率の印加電圧特性　縦軸：増倍率 50 倍を 1 とした増倍率　横軸：印加電圧 [V]

APD の増倍率の印加電圧依存性と温度依存性を調べる事により、本実験に使用すべき印加電圧、つまり、−25 ℃で増倍率 50 倍を返す印加電圧を求める事ができた。続いて、次のセクションではこの印加電圧をかけた状態の Conversion Factor を宇宙線測定により求めていく。

3.2 宇宙線によるエネルギー較正

エネルギー分解能を知るためには、測定されたエネルギーを知る必要がある。測定されたエネルギーはテストベンチの場合、$ADCch$ という単位を持っている。そして、$ADCch$ を物理量（eV）などに変換する必要がある。ここでエネルギー較正とは得られた $ADCch$ を eV に変換する事を意味する。本実験では、この変換係数（Conversion Factor）を求めるのに宇宙線を用いた。宇宙線は 2.3 節で述べたように、決まったエネルギーを検出器に落とすので、そのエネルギーを使って Conversion Factor を求める事ができる。ここで宇宙線を測定する時の温度はエネルギー分解能を測定する時と同じ −25 ℃、−15 ℃、及び 0 ℃で、印加電圧は APD の増倍率 50 倍、100 倍、150 倍を与える電圧をかけて測定した。ここでは −25 ℃、印加電圧増倍率 50 倍の電圧の場合の宇宙線測定について説明する。

3.2.1 宇宙線測定実験のセットアップ

宇宙線測定実験のセットアップを以下の図 3.12 に示す。冷凍庫は −25 ℃で運転する。冷凍庫の上下にプラスチックシンチレータを置き、上と下のシンチレータに宇宙線が入射したときをトリガーとした。

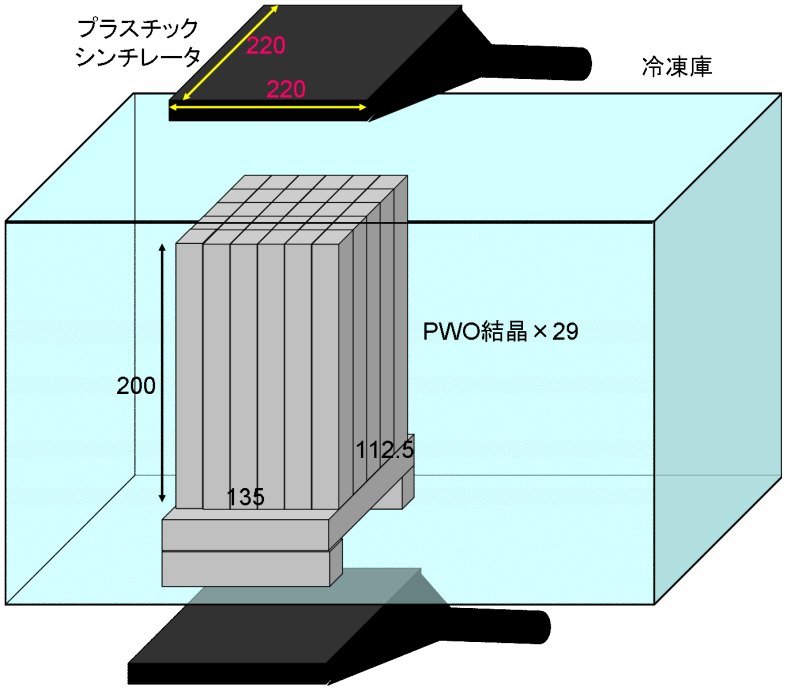

Figure 3.12: 宇宙線測定実験のセットアップ

宇宙線測定実験の回路図

図 3.13 に宇宙線測定実験の回路図を載せる。

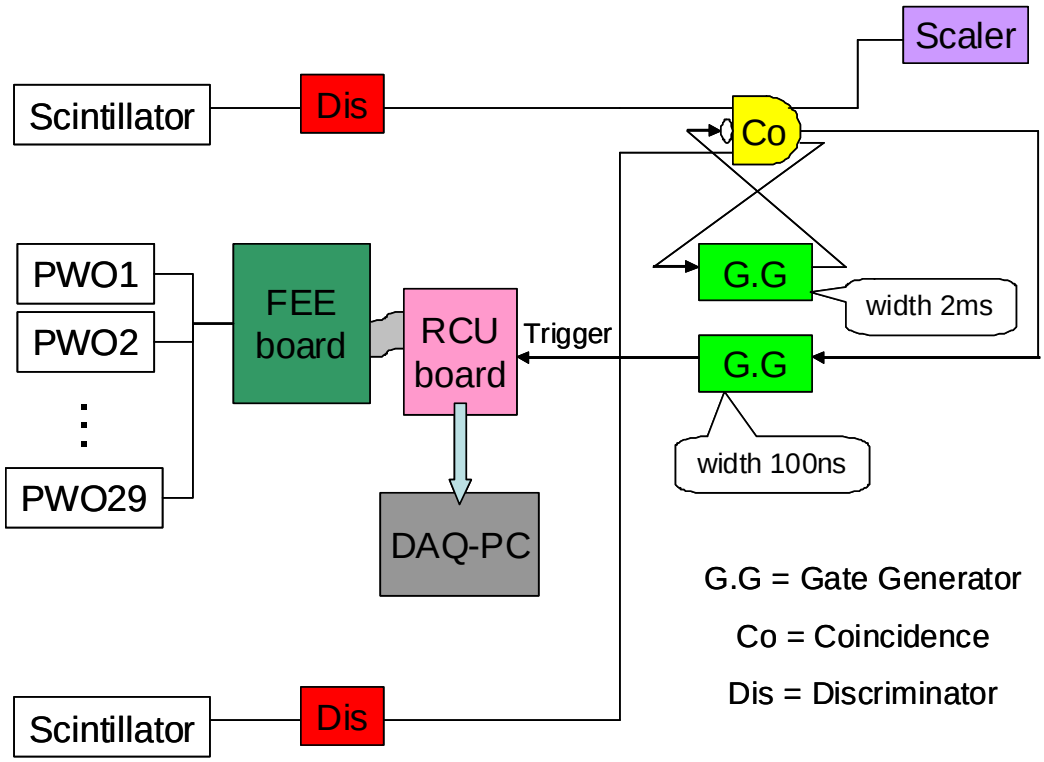

Figure 3.13: 宇宙線測定実験の回路図

ここでは各モジュールの説明は省略する。各モジュールの説明は付録 A.1 を参照。データを取るタイミングはトリガーによって決められる。宇宙線測定実験でのトリガーとは即ち宇宙線が来たタイミングを意味する。セットアップの項でも述べたように上下のプラスチックシンチレータに宇宙線が入射したタイミングをトリガーのタイミングとしている。この回路ではシンチレータからのシグナルを Discriminator にて NIM シグナルに変換し、Coincidence において上下のシンチレータから同期したシグナルが来た時にシグナルを出力している。Coincidence の出力と入力に繋がっている GateGenerator では、2ms のシグナルの Veto（反転シグナル）を Coincidence に入力する事で、周期 2ms よりも短い周期で信号が来ないようにしている。この 2ms というのは DAQ のトリガー読み込みの性能の限界で決まっている。Coincidence からの出力を Scaler に入力しているのは宇宙線の入射数をカウントするためである。そして、Coincidence からの出力を 2 つ目の GateGenerator で信号の幅を 100ns にして、そのシグナルを RCUboard からトリガーとして入力してい

る。回路図についての説明は以上である。続いて、宇宙線データの解析について説明していく。

3.2.2 宇宙線データの解析

ここでは宇宙線を測定して得られたデータの解析手法について説明する。まずは得られたそのままのデータを載せる。図 3.14 の縦軸は対数表示のカウント、横軸は $ADCch$ である。

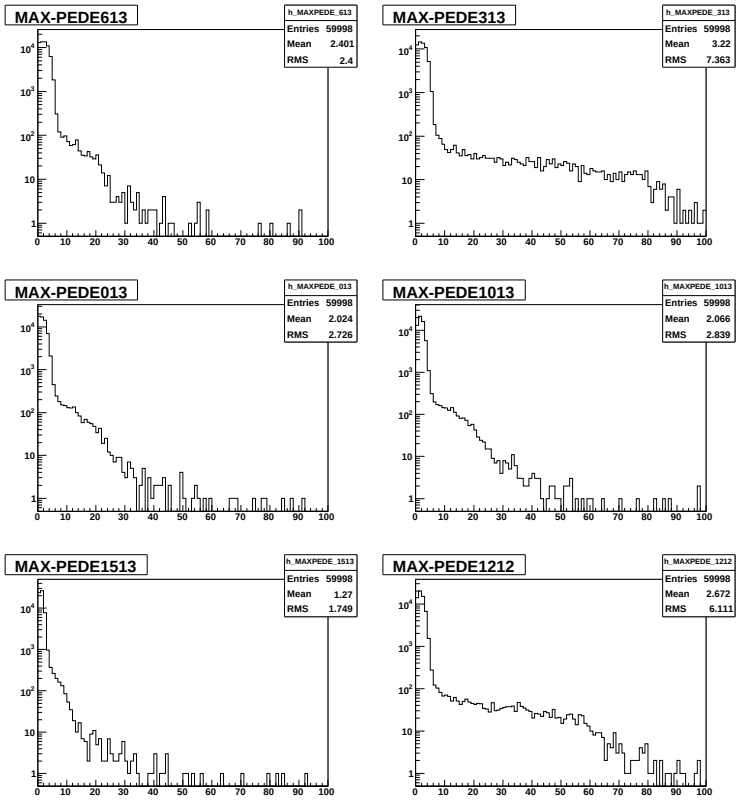

Figure 3.14: 宇宙線測定データ $ADCch$ 分布　縦軸：対数表示のカウント　横軸：$ADCch$

宇宙線によってエネルギー較正をするという事は、宇宙線のエネルギーと $ADCch$ の相関を付ける事であり、そのためには上のヒストグラムの中で宇宙線のスペクトルを見つけなければならない。ヒストグラムを見て分かるようにこの状態では宇宙線のスペクトルを見つける事は困難である。上のヒストグラムがこのように見えているのはなぜかと言うと、上下のシンチレータに宇宙線が入射した時をトリガーとしているので、トリガーが来たからといっ

て宇宙線が 29 つの PWO 結晶全てを通るわけではない。1 回のトリガーの中で宇宙線が入射した結晶は 1 つか 2 つであり、他の結晶にはシグナルが入っていない。そのチャンネルにはペデスタルと呼ばれる何もシグナルが入ってない状態 $ADCch$ 分布が現れる。このペデスタルは PWO 結晶、APD、CSP、FEE での雑音（ノイズ）を反映している。

つまり、図 3.14 で見えている 0 付近のピークはペデスタルであり、$ADCch$ の高い方に引いているテールが宇宙線のシグナルである。このヒストグラムでは宇宙線のシグナルがペデスタル（ノイズ）に埋もれてしまっており、宇宙線のスペクトルを見つける事ができないのである。そして、宇宙線のスペクトルを見つけるためにはノイズを取り除く必要がある。ここからノイズを取り除く解析手法について説明していく。

アイソレーション解析手法

図 3.14 で宇宙線のスペクトルを見つけれない要因の一つとして、入射した宇宙線が落とすエネルギーに問題がある。図 3.15 は PWO 結晶を側面方向から見た入射する宇宙線の概念図である。図 3.15 の左図では宇宙線が PWO2 のみを通る。この時宇宙線は PWO1 にのみエネルギーを落とす。しかし、3.15 の右図では宇宙線は PWO2 と PWO3 に跨って通る。この時宇宙線は PWO2 と PWO3 にエネルギーを分割して落としてしまう。つまり、3.15 の右図のようなイベントがあるせいで、図 3.14 の宇宙線スペクトルが $ADCch$ の低い方へ広がってしまうのである。

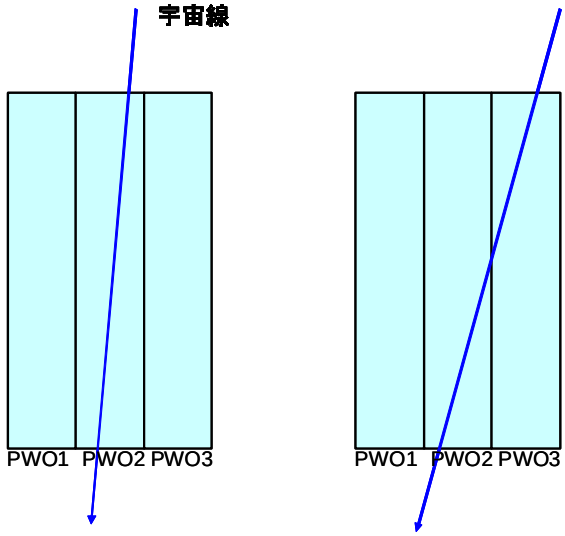

Figure 3.15: PWO 結晶に入射する宇宙線概念図

ここでは図 3.15 の右図のようなイベントを取り除く解析を行う。図 3.14

を見ると、宇宙線の入射していない $ADCch$（ペデスタル）は約 5ch である。つまり、5ch 以上の $ADCch$ は宇宙線が来たイベントという事になる。ある結晶に注目して $ADC5ch$ 以上のイベントの場合、その他の結晶の $ADCch$ を見た時に $ADC5ch$ 以上の結晶があるならば、それは宇宙線が結晶 2 本以上に跨って入射するイベントと判断して、そのイベントは取り除く。これをアイソレーション解析手法と呼ぶ。アイソレーション解析手法を用いた解析結果は以下の図 3.16 のようになった。図 3.16 の縦軸は対数表示のカウント、横軸は $ADCch$ である。図 3.16 に載せているチャンネルは図 3.14 に載せているチャンネルと同じ配置である。

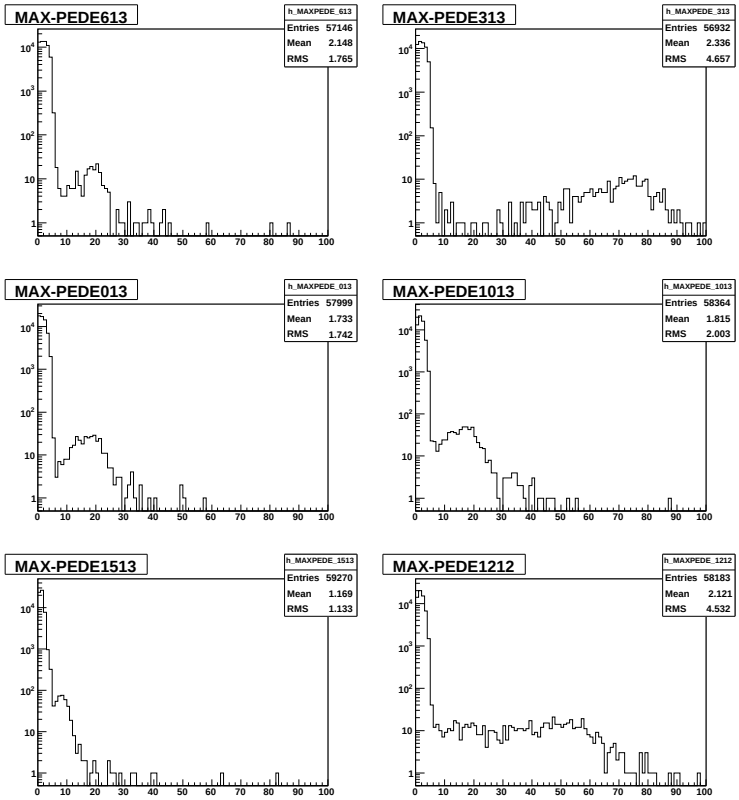

Figure 3.16: アイソレーション解析手法の宇宙線測定データ $ADCch$ 分布
縦軸：対数表示のカウント　横軸：$ADCch$

上のヒストグラムを見てみると、図 3.14 のヒストグラムと比べて、宇宙線スペクトルのエネルギーが低い方のテールが少なくなり、明らかに宇宙線のスペクトルが見えるようになった。このヒストグラムの宇宙線のピーク $ADCch$ を宇宙線のエネルギーとみなす事で Conversion Factor[MeV/ch] を求める事ができる。多くのチャンネルで宇宙線スペクトルは確認できたが、例えば、

図 3.14 の右下のチャンネルについては宇宙線スペクトルがどこにあるかまだはっきりしていない。つまり、このアイソレーション解析手法では宇宙線スペクトルを見つける上でまだ不十分ということである。続いて、もう一つの解析手法、足し合わせ解析手法について説明する。

足し合わせ解析手法

アイソレーション解析手法のセクションでも述べたように宇宙線が PWO 結晶 2 本以上に跨って入射してくる事もある。アイソレーション解析手法の欠点としてそのイベントを捨ててしまう事で統計的に不利になるという点がある。足し合わせ解析手法とは 2 本以上に跨って入射するイベントも宇宙線のイベントとして取り扱う方法である。まず、宇宙線の入射角度は上下のプラスチックシンチレータによって決まっている。その角度は 72 °である。宇宙線が PWO 結晶を跨ぐ最大本数をこの入射角度から計算すると、最大本数は 2 本であるという事が分かる。つまり宇宙線は PWO 結晶を 2 本以上は跨って通らないのである。宇宙線のエネルギーは、注目する結晶とその周りの 8 本（中心付近の場合）の中に全て収まる。

ここで行った足し合わせ解析手法とは、まず宇宙線が入射したイベントの中で 29 本の結晶の中最もエネルギーを落とした結晶を選び出す。そして、その結晶の周りの結晶（中心付近では 8 本、端では 3∼5 本）とその最もエネルギーを落とした結晶のエネルギーを足し合わせる。すると、必ず足し合わせたエネルギーの中で宇宙線のスペクトルが見えるはずである。この解析手法では最もエネルギーを落とした結晶とその周りの結晶を選んでいるので原理的には必ず宇宙線の入射したイベントのみを選んでいる事になりペデスタルは含まない。また、この解析を行う上で、各チャンネルに対するエネルギーの相対値は知っておく必要があるので、エネルギーの相対値はアイソレーション解析手法によって与えた。図 3.17 は足し合わせ解析手法を用いた結果のヒストグラムである。縦軸は対数表示のカウント、横軸はエネルギー [MeV] である。

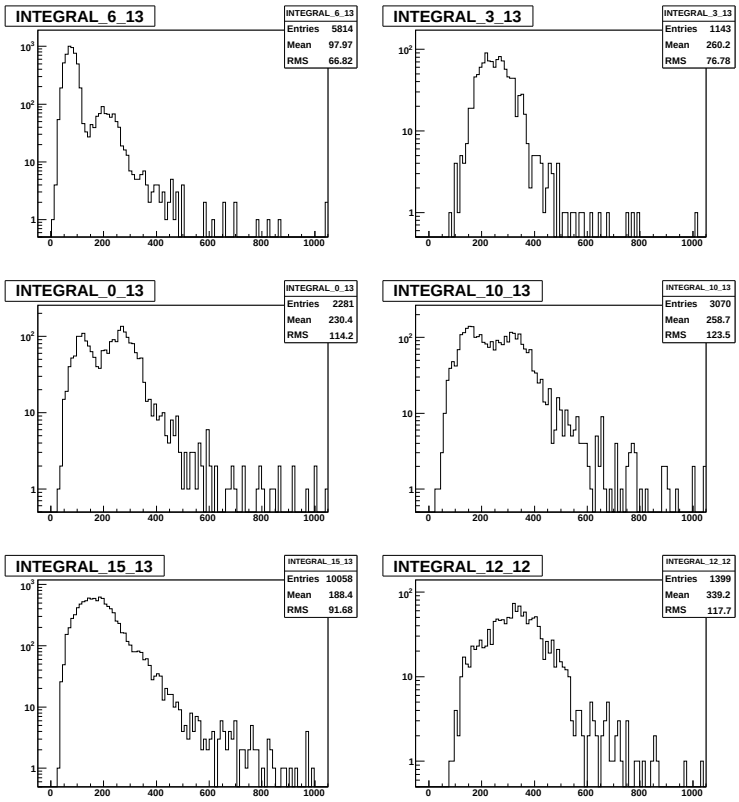

Figure 3.17: 足し合わせ解析手法の宇宙線エネルギー分布　縦軸：対数表示のカウント　横軸：$ADCch$

図 3.17 を見ると、宇宙線スペクトルが見えるチャンネルもあるが、やはり確認するのが難しいチャンネルもある。アイソレーション解析手法と足し合わせ解析手法を使えば、だいたいの Conversion Factor を求める事ができるが、いくつかのチャンネルにおいて厳密な値を決定できない。本実験において、電子線エネルギー測定実験後に厳密な Conversion Factor を知るためにもう一度宇宙線測定実験を行った。

図 3.16 と図 3.17 でいずれも宇宙線スペクトルを確認できないチャンネルが存在したが、その原因は APD の増倍率が低い事であると思われる。3.1 節にて全てのチャンネルで APD の増倍率が 50 倍となるように APD に電圧を印加したはずだが、図 3.16 を見て分かるように、宇宙線のピーク $ADCch$ がばらついていて APD の増倍率は一様でなく見える。ここでは PWO 結晶の発光量の違いはほとんど無いとしている。よって、APD の増倍率が一定でないため宇宙線のピーク $ADCch$ がばらついている、つまり、Conversion Factor がばらついていると考えられる。2 度目（電子線エネルギー測定実験後）の宇宙線測定実験では全チャンネルで宇宙線のスペクトルがはっきりと見える

ようにするためにConversion Factorを揃える、つまりAPDの増倍率を揃えるという補正を行った。

3.2.3 APDの増倍率補正

2度目の宇宙線測定実験で使用するAPDの印加電圧を決定するために、3.1節にて求めたAPD増倍率の印加電圧依存性特性曲線（図3.9）を用いた。まずは表3.3に前のセクションの解析手法で求めたConversion Factorを載せる。このConversion Factorを求めるためにPWO結晶に落とした宇宙線のエネルギーを199.4MeVと与えた。この結果は参考文献[13]より得られた。

Table 3.3: 宇宙線データ解析によって求めたCF = Conversion Factor（一度目の宇宙線測定）

No	Testbench ID	CF[MeV/ch]	No	Testbench ID	CF[MeV/ch]
1	0_13	10.4	16	8_13	11.5
2	1_13	4.2	17	9_13	10.5
3	2_13	12.6	18	10_13	11.6
4	3_13	2.7	19	11_13	11.9
5	4_13	3.8	20	12_13	11.1
6	5_13	12.6	21	13_13	4.3
7	6_13	13.5	22	14_13	12.5
8	7_13	4.2	23	15_13	27.8
9	0_12	4.8	24	15_12	14.2
10	1_12	3.8	25	9_12	12.1
11	2_12	3.2	26	10_12	13.6
12	3_12	12.4	27	11_12	4.3
13	4_12	3.6	28	12_12	2.7
14	5_12	8.6	29	14_12	10.7
15	6_12	10.6			

ここでConversion Factorを4に揃えるように各APDの印加電圧を調整する。その調整には図3.9の印加電圧依存性特性曲線を用いた。上の表の全てのチャンネルのConversion Factorを4に揃えたときの各チャンネルの印加電圧を表3.4に載せる。

この印加電圧の補正により、各チャンネルのAPDの増倍率は揃ったと思われる。もちろん、全てのチャンネルのConversion Factorを4に揃えたと言っても誤差はあるので、もう一度宇宙線測定を行い、Conversion Factorを求める必要がある。続いて、3.4節のAPD印加電圧で行った宇宙線測定の結果を載せる。

Table 3.4: Conversion Factor を 4 に揃えたときの APD の印加電圧

No	Testbench ID	印加電圧 [V]	No	Testbench ID	印加電圧 [V]
1	0_13	348	16	8_13	357
2	1_13	315	17	9_13	391
3	2_13	347	18	10_13	389
4	3_13	300	19	11_13	392
5	4_13	312	20	12_13	375
6	5_13	350	21	13_13	360
7	6_13	345	22	14_13	396
8	7_13	319	23	15_13	399
9	0_12	312	24	15_12	400
10	1_12	340	25	9_12	374
11	2_12	331	26	10_12	362
12	3_12	376	27	11_12	350
13	4_12	321	28	12_12	300
14	5_12	362	29	14_12	383
15	6_12	375			

3.2.4 宇宙線測定によるエネルギー較正の結果

電子線エネルギー測定実験が終わった後に、もう一度宇宙線測定を行った。宇宙線測定のセットアップは以前と同じである。解析手法について、今回の宇宙線測定は電子線測定実験の後に行ったので、宇宙線データの解析において電子線のデータを使用することが出来た。よって、電子線測定実験のところでまた説明するが、電子線が入射しエネルギーを落とした PWO 結晶 9 本のチャンネルについては電子線によるエネルギー較正ができ、Conversion Factor を与える事ができた。そして、それ以外のチャンネルには Conversion Factor = 4 を与えた。とりあえず、この Conversion Factor を与えて、続いて 3.2.2 節で説明した足し合わせ解析手法を用いて解析を行った。その結果を図 3.9 に載せる。図 3.18 の縦軸は対数表示のカウントで、横軸はエネルギー [MeV] である。また図 3.19 に全チャンネルの足し合わせ解析手法による結果を載せる。

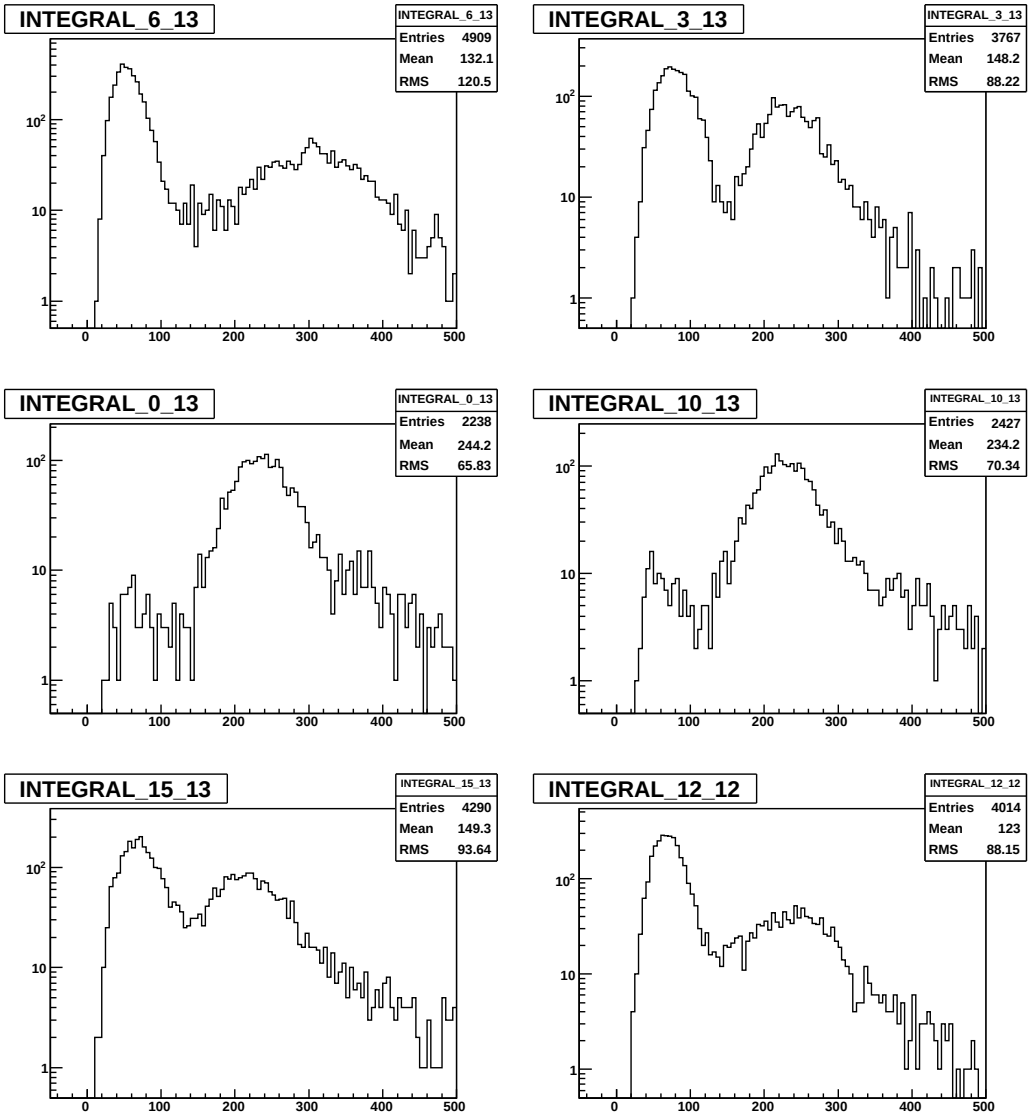

Figure 3.18: 2度目の宇宙線測定結果。足し合わせ解析手法によるエネルギー分布　縦軸：対数表示のカウント　横軸：$ADCch$

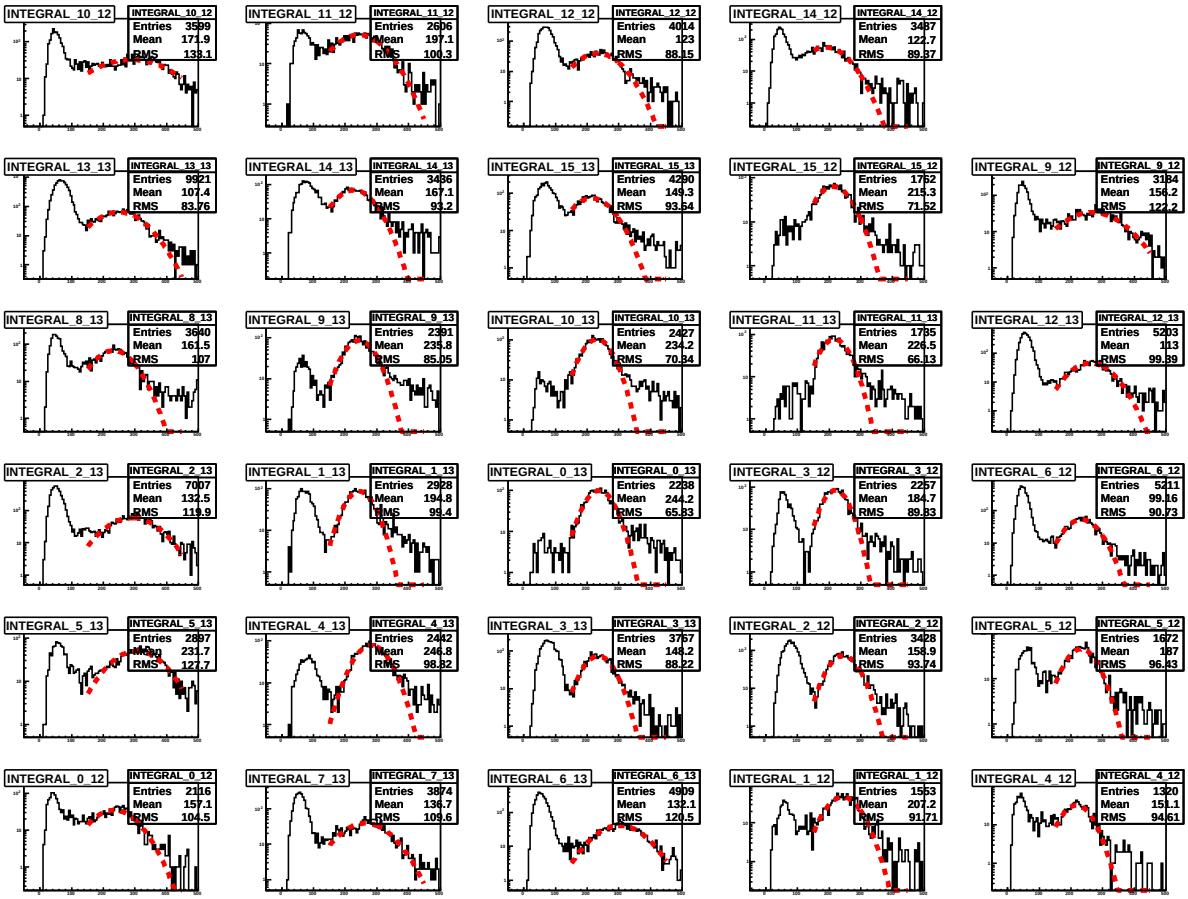

Figure 3.19: 2度目の宇宙線測定結果。足し合わせ解析手法によるエネルギー分布（全チャンネル）　縦軸：対数表示のカウント　横軸：$ADCch$

図3.19を見て分かるように今回の宇宙線データの解析結果では全てのチャンネルで宇宙線のスペクトルを確認できる。ヒストグラム中の赤い点線は宇宙線のスペクトルにガウス関数をフィットしたものである。

図3.19の宇宙線のスペクトルからConversion Factorを求めた結果を表3.5にまとめた。

Table 3.5: 宇宙線データ解析によって求めた CF = Conversion Factor（二度目の宇宙線測定）

No	Testbench ID	CF[MeV/ch]	No	Testbench ID	CF[MeV/ch]
1	0_13	3.1	16	8_13	4.3
2	1_13	4.6	17	9_13	3.4
3	2_13	3.4	18	10_13	3.0
4	3_13	3.8	19	11_13	3.5
5	4_13	3.5	20	12_13	3.0
6	5_13	3.3	21	13_13	4.0
7	6_13	3.3	22	14_13	4.0
8	7_13	3.8	23	15_13	2.5
9	0_12	4.3	24	15_12	3.3
10	1_12	4.1	25	9_12	3.7
11	2_12	4.1	26	10_12	3.5
12	3_12	3.8	27	11_12	4.1
13	4_12	4.6	28	12_12	4.3
14	5_12	4.3	29	14_12	5.3
15	6_12	4.3			

表 3.5 の Conversion Factor を使って電子線のエネルギー較正を行った。続いて、電子線によるエネルギー分解能測定実験に入る。

3.3 電子ビームによるエネルギー分解能の測定

ここでは、PHOS テストベンチのエネルギー分解能を測定するための実験について説明する。本実験ではテストベンチに 150MeV の電子線を入射し、そのエネルギーを測定する事によりエネルギー分解能を求めた。その実験は広島大学の付属施設である放射光科学研究センターの電子周回装置にて行った。ここで実験施設について簡単に触れておく。

3.3.1 超高速電子周回装置（REFER）

超高速電子周回装置（Relativistic Electron Facility for Education and Research）のある放射光センターと VBL の全体図を図 3.20 に示す。この実験施設では、マイクロトロンより電子を引き出し、図 3.20 の超高速電子周回装置のリングで周回させ、右下の電子線引き出しラインより電子線を引き出して実験することが出来る。本実験ではこの引き出しラインの下流に実験装置をセットアップし、実験を行った。

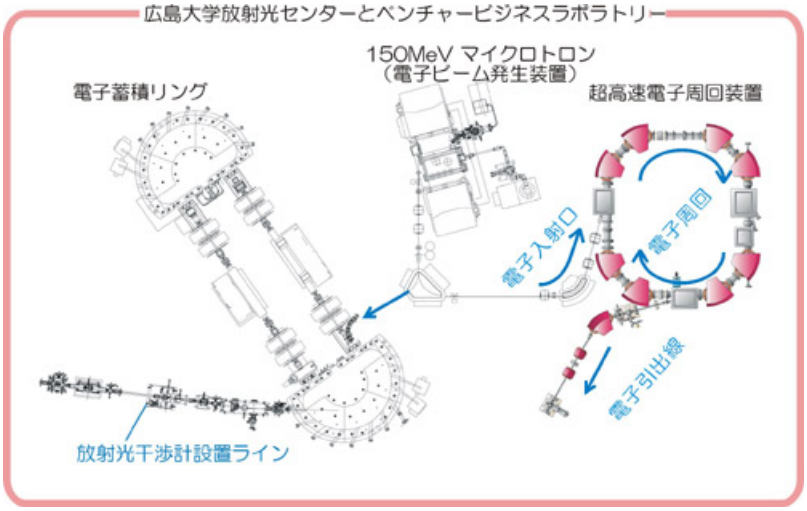

Figure 3.20: 放射光センターと VBL 全体図 [16]

3.3.2 REFER 実験のセットアップ

続いて、REFER におけるエネルギー分解能測定実験のセットアップについて説明する。セットアップ図は図 3.21 に載せる。また、上から見たセットアップ図を図 3.22 に載せる。

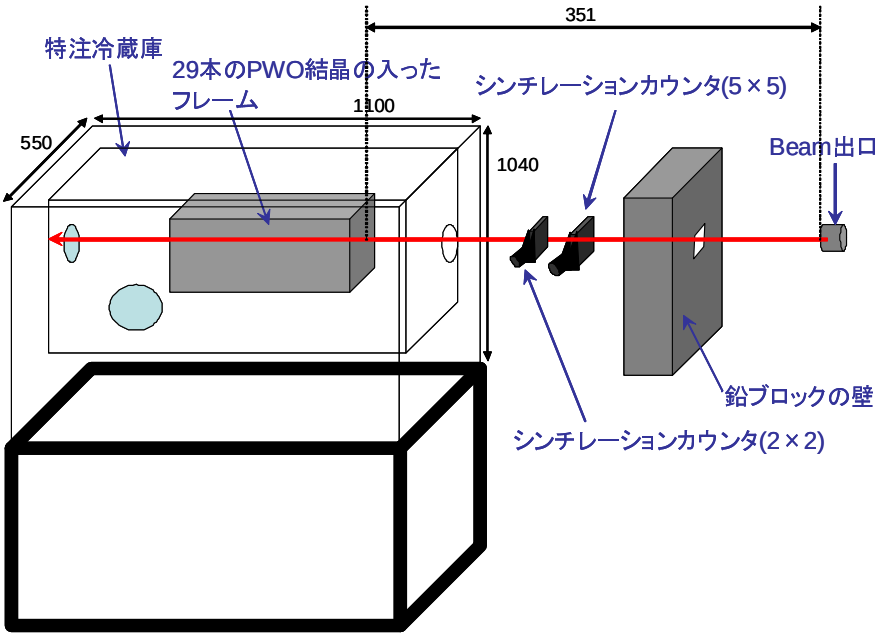

Figure 3.21: REFER 実験セットアップ（数値の単位は cm）

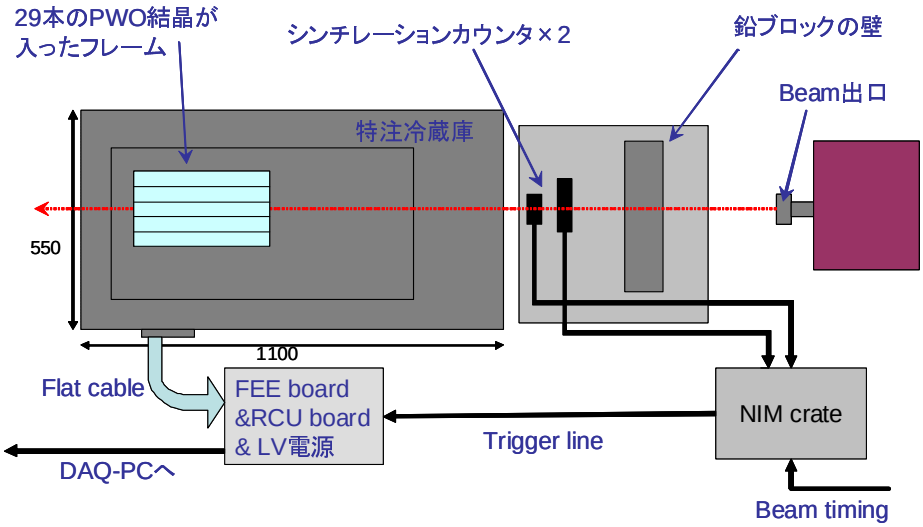

Figure 3.22: 上から見た REFER 実験セットアップ（数値の単位は cm）

本実験ではPWO結晶をビームパイプから約351cm離して置いた。このように離して置いたのは冷凍庫の外形と実験施設の配置禁止箇所のためである。ビームパイプから電子線が出力すると、まず鉛ブロックに差し掛かる。この鉛ブロックでは軌道が外れた電子を止める役割を持つ。鉛ブロックの間を抜けた電子は2つのシンチレーションカウンタに当たる。電子はここで止まる事はないが、シンチレーションカウンタにてエネルギーを落とすことで電子線が通ったというトリガーを作ることが出来る。トリガーについては図3.22のNIMCrateに入り、トリガーシグナルを作り出し、RCUboardに入力する。トリガーについては回路図のセクションで詳しく説明する。そして、二つ目のシンチレーションカウンタ（2cm × 2cm）を通った電子だけを選別している。そして、シンチレーションカウンタを通り抜けた電子はPWO結晶にぶつかり電磁シャワーを起こす事でそのエネルギーを測定できる。

ビームパイプの上流にビームのインテンシティを調節するためのスリットがある。本実験ではビームのインテンシティを上げるためにスリットを限界まで開けた。右スリット39.8[mm]、左スリット39.4[mm]にした。

図3.23、図3.24、図3.25、図3.26、図3.27はREFERでのセットアップの写真である。

Figure 3.23: ビームパイプ側から見た鉛ブロック、冷凍庫、及びDAQ-PC

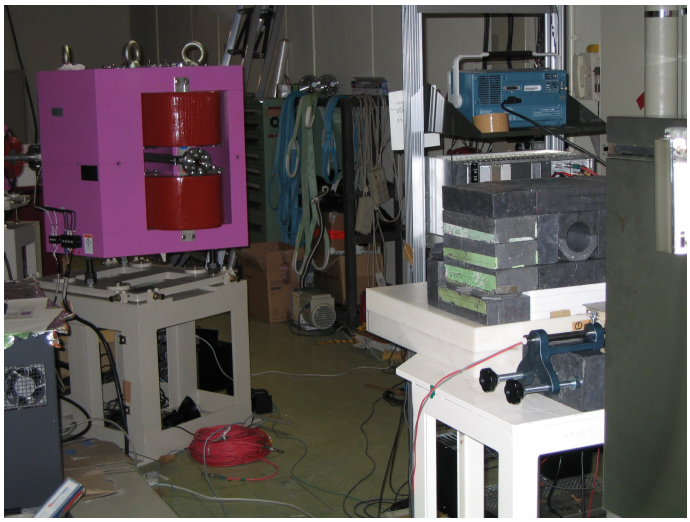

Figure 3.24: 冷凍庫側から見たビームパイプ方面

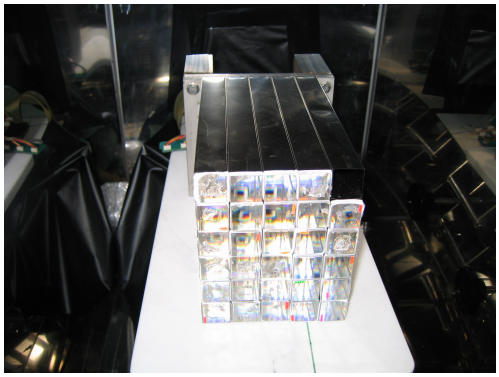

Figure 3.25: 冷凍庫内：PWO 結晶のアップ、29 本の PWO 結晶をフレームに入れている。フレームの右上のスペースには何も入れていない。

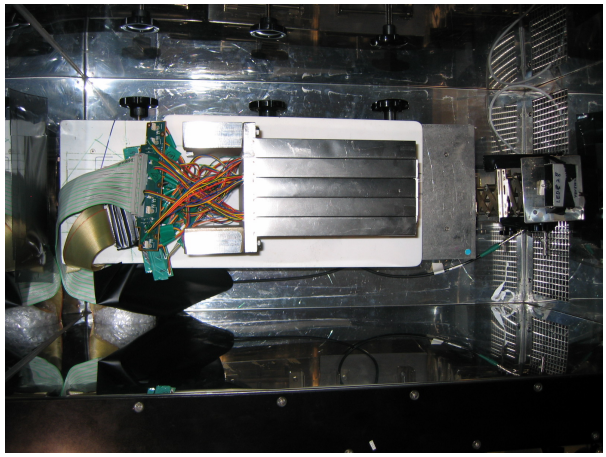

Figure 3.26: 冷凍庫内全体：PWO 結晶を入れているフレームの後ろより jumper cable が出ており、それが 2 枚の T-card にささっている。T-card に繋がっている Flat cable は冷凍庫の外で FEE と接続される。

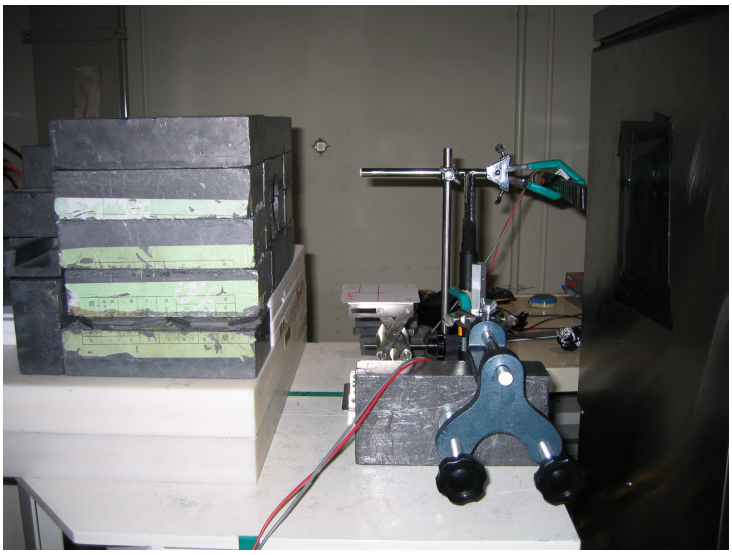

Figure 3.27: 左側が鉛ブロック、右側が冷凍庫、真ん中にシンチレータ 2cm × 2cm と 5cm × 5cm を置く

ノイズ対策

ここで測定時に $ADCch$（エネルギー）に乗るノイズとそのノイズを落とすために行った事について簡単に説明する。まず、何もノイズ対策をせずに $ADCch$ を見ると、最大幅で約 $10ADCch$ であった。ノイズのレベルは PHOS 実機と同等となるようにしたい。PHOS 実機のノイズレベルはエネルギー分解能のノイズ項より計算できる。ノイズ項より分解能 13%が要求されるので 150MeV のエネルギーの場合 18MeV となる。ここで PHOS の Conversion Factor=5 を用いると、3.6[$ADCch$] となる。これに Fanofactor=2 で割った値 1.8[$ADCch$] が本実験で目標とするノイズレベルである。これと比べるテストベンチのノイズレベルとして、Sampling ADC の 70sample の RMS を指標とした。

本実験でノイズ対策として行った事を述べる。まず、CSP、APD からノイズが乗っていると想定して、印加電圧を変えてみたが、ノイズレベルに変化はなかった。そして、各種電源の GND を大元から取るために電源タップを大元の GND に繋いだが、逆にノイズが大きくなった。最終的に APD の HV 電源、LV 電源、冷凍庫の電源を近くの同じ電源タップから取るというセットアップにした。本実験ではアルミ箔で遮蔽する等は行っていない。

最終的なセットアップでノイズレベルは 1.7~1.8$ADCch$ となり、PHOS 実機が要求するノイズレベル 1.8[$ADCch$] を満たす事ができた。このノイズレベルでエネルギー分解能測定実験を行った。

REFER 実験の回路図

続いて、実験の回路図を図 3.28 に載せる。

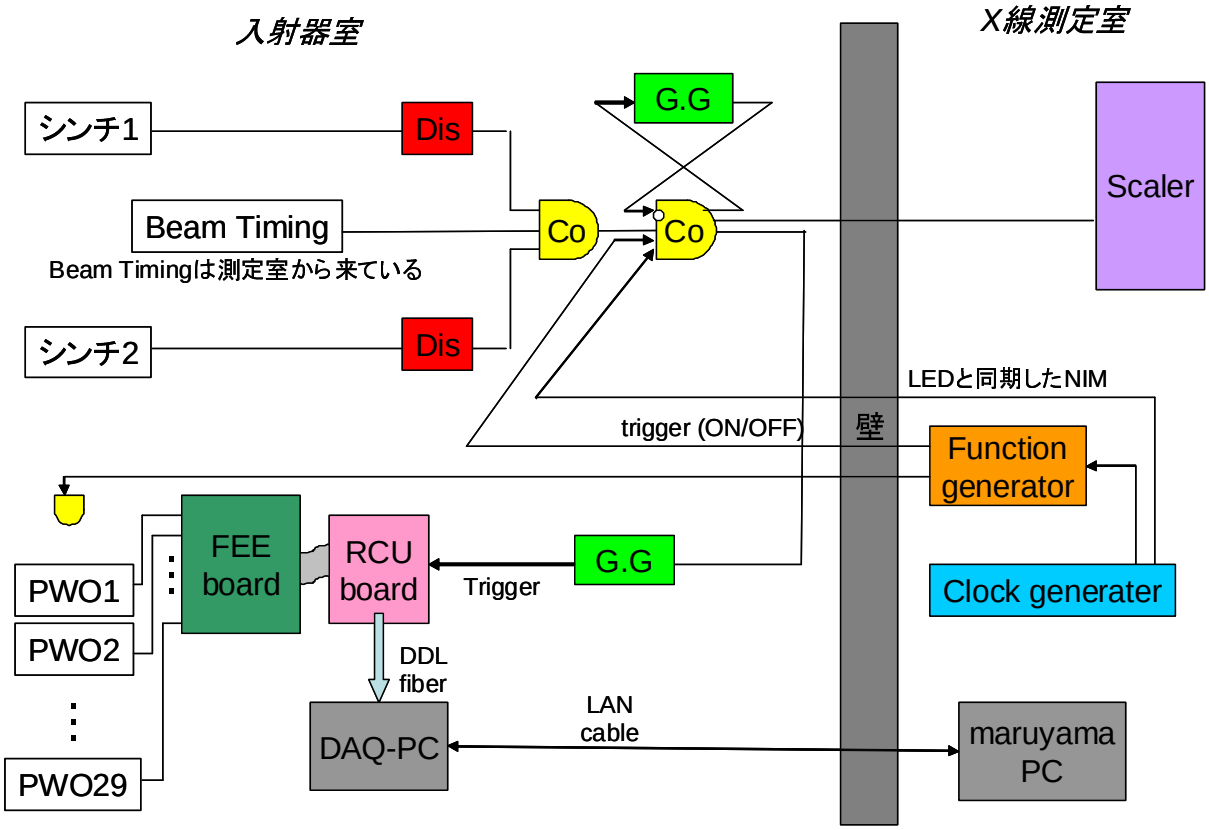

Figure 3.28: REFER 実験回路図

電子線が入射するとシンチレーションカウンタ 1,2 よりシグナルが出力される。そのシグナルは Discriminator により NIM シグナルに変換され、Coincidence にて同時に来た事を要求する。またこの Coincidence でビームバンチが来たタイミング（ビームタイミング）も同時に来ることを要求する。この Coincidence の出力シグナルは次の Coincidence へ入力する。この Coincidence の出力と入力に繋がっている GateGenerator では、宇宙線測定実験の回路図で説明したのと同じように 2ms のシグナルの Veto（反転シグナル）を Coincidence に入力する事で、周期 2ms よりも短い周期で信号が来ないようにしている。この 2ms というのは DAQ のトリガー読み込みの限界が 500Hz である事により決まっている。また、この Coincidence には Function generator から DC 電圧を入力している。これは測定室からトリガーの ON/OFF を切り替えるためのスイッチの役割を果たす。また、この Coincidence には Clock

generator から 100Hz の NIM シグナルを入力している。これはビームを使わないテストのための LEDRUN や、PWO 結晶にビームを入射しないペデスタル RUN に用いた。そして、2 つ目の Coincidence ではビームを使う時の RUN、LED での RUN、ペデスタル RUN の 3 通りを切り替えられるようにしている。この Coincidence から出力されるシグナルは Scaler に行きビームレートを測る方と、Gate Generator を通り、トリガーとして RCU に入力される方に分かれている。また、ビーム測定時は入射器では電子線が出力されるので、人は必ず入射器室から出るようにしている。そのため、ビーム RUN のコントロールは測定室の maruyama-PC よりネットワークで越しに入射器室の DAQ-PC を操作する事により行った。

PWO 結晶表面の電子線入射ポイント

ここでは PWO 結晶表面に電子が入射するポイントを説明する。まず、実験装置のセットアップの段階で 29 本の結晶の中で真ん中の結晶にビームパイプからのラインが揃うようにアライメントした。そして、結晶の中心ではなく、中心と端の真ん中に電子が入射するようにした。これはエネルギー分解能を測定するのには関係ないが、本実験はエネルギー分解能の測定と同時にテストベンチの時間分解能も測定する。時間分解能の測定のためには 2 つの隣り合う結晶に同じエネルギーを落とすことを要求しなければならない。すなわち結晶と結晶の間に電子が入射するイベントも取りたいという事である。よって、結晶の中心を外したところに電子を入射させるようにした。図 3.29 の赤丸は実際に電子が結晶の表面に当たった時のポイントであり、結晶の前に置いた感光板の電子が当たったポイントより求めた。図 3.29 の赤丸の周りの薄い赤枠は電子が当たるであろう範囲を示しており、それは結晶の前に置いているシンチレータの大きさで決まっている。

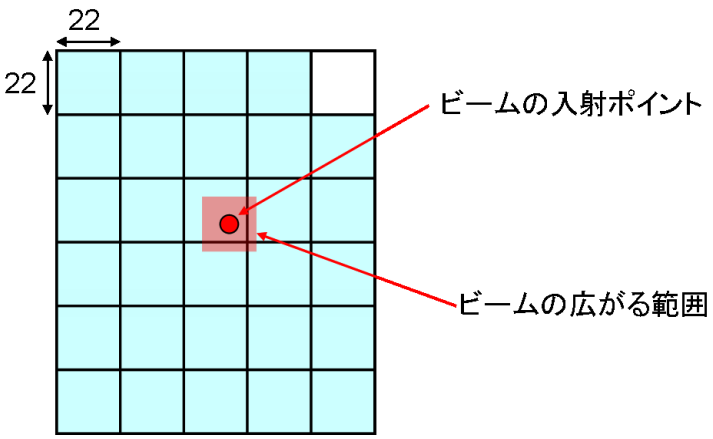

Figure 3.29: PWO 結晶表面に電子が当たるポイント

3.3.3 ビームレート

ここで電子線の入射する頻度（ビームレート）について説明する。なぜビームレートを問題にするかというと、REFER 施設での実験は無限に時間があるわけではなく、限られた時間の中で必要なだけのデータを取得しなければならない。ビームレートとは、即ちデータを取得できる統計量を意味し、ビームレートが少なすぎて必要な統計を得るのに莫大な時間がかかると、実験内容が限られてしまうのである。ここでは、本実験でのビームレートがどのくらいかを述べる。

まず、ビームタイミングを要求しない場合のビームレートは実際に測定すると約 2.6kHz であった。このビームレートは 2 つのシンチレーションカウンタを通った電子の頻度を示している。しかし、DAQ のトリガー読み込みの限界が 500Hz なのでこれ以上のビームレートではデータを取らない。続いて、ビームタイミングを要求する。ビームタイミングとは 10Hz で来るビームバンチの事であり、測定に使いたい電子はこのバンチの中にある。また、このバンチは約 10ms 間の広がりを持っている。つまり、測定に使うべき電子のレートとはこの 10ms のバンチの中で来る 500Hz の電子のレートである。計算すると測定に使うビームレートは 50Hz になるはずである。図 3.30 に 10Hz のビームタイミングと DAQ が決める 500Hz のビームレート、そして測定に使うビームレートを示す。

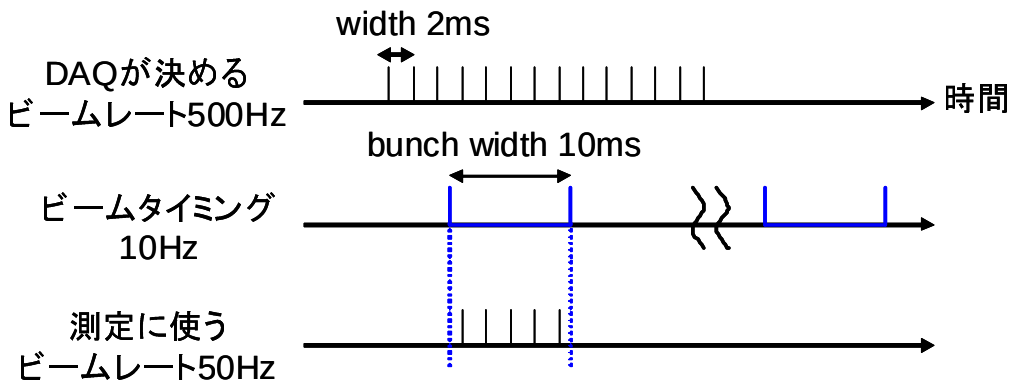

Figure 3.30: 得られるビームレートの導出図

図 3.28 の回路の Scaler で実際にビームレートを測定すると 47Hz であり、計算されたビームレートとほぼ合っていた。47Hz のビームレートでエネルギー分解能測定実験を行った。

続いて、エネルギー分解能の測定における実験の結果に入る。

Chapter 4

結果・考察

4.1 エネルギー分解能の測定結果

エネルギー分解能とは、電子線のエネルギーを測定し、その測定されたエネルギー値 E とエネルギースペクトルに対する標準偏差 σ を求め、σ/E の式に代入して得られた値の事である。つまり、電子線のエネルギースペクトルを求める事がエネルギー分解能を導出する事に繋がる。これから、得られた RAW データからエネルギースペクトルを求めていく。

まず、電子線測定より得られた RAW データを図 4.2 に示す。そして、図 4.1 に図 4.2 に対応するテストベンチの ID を示す。図 4.2 と図 4.1 の並び順はビームパイプから見た結晶の配置となっている。右上には結晶は入っていない。

10_12	11_12	12_12	14_12	
13_13	14_13	15_13	15_12	9_12
8_13	9_13	10_13	11_13	12_13
2_13	1_13	0_13	3_12	6_12
5_13	4_13	3_13	2_12	5_12
0_12	7_13	6_13	1_12	4_12

Figure 4.1: ビームパイプ側から見た PWO 結晶の並び順に対応するテストベンチ ID

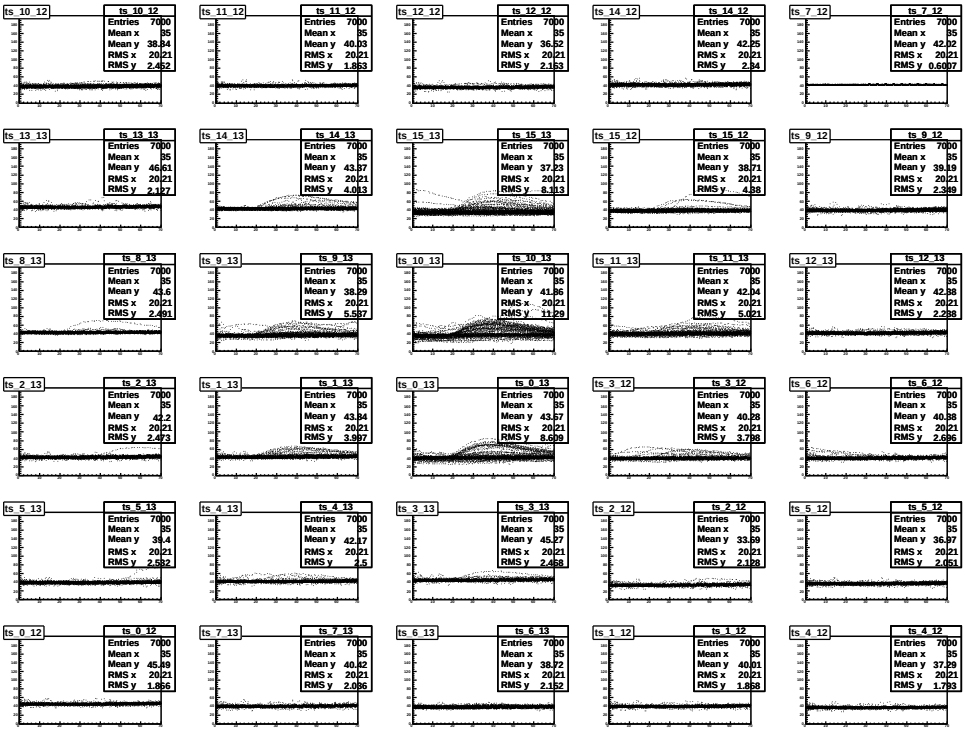

Figure 4.2: 電子線測定より得られた得られた RAW データ　縦軸：ADCch 横軸：sample 数 [100ns]

図 4.2 は縦軸が $ADCch$、横軸がサンプル数と呼ばれる時間情報であり、100 イベントを足し合わせたプロットを見ている。これをを見る限り、何らかのシグナルがテストベンチ ID_10_13 とその周辺に入っている事が分かる。続いて、この RAW データの意味及び、ここからどのようにエネルギーを求めていくかについて説明していく。

4.1.1 測定結果の解析

図 4.3 は図 4.2 のテストベンチ ID_10_13 の 1 イベントを抜き出したものである。このプロットを Sampling ADC と呼ぶ。

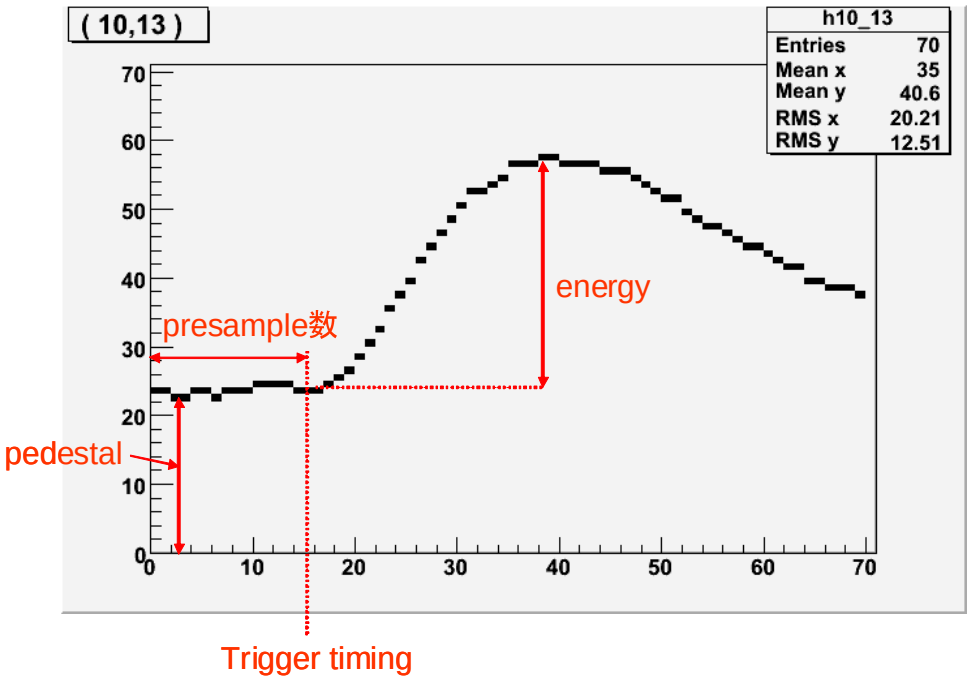

Figure 4.3: RAW データ 1 イベント (Sampling ADC)　縦軸：ADCch　横軸：sample 数 [100ns]

図 4.3 の横軸は sample 数と呼ばれる、1sample が 100ns の時間情報である。現在、DCS 上で 70sample データを取得するように設定している。図 4.3 で赤字で presample 数と書かれているところは、トリガーが入る前の sample 数であり、その $ADCch$ はペデスタルとして使用する。ペデスタルとは電子線を PWO 結晶に入射していないときの $ADCch$ である。ペデスタルの sample 数を決めているのはトリガーのタイミングである。トリガータイミングは DCS 上で 15sample と設定している。赤い点線でトリガータイミングと書かれて分けられてる右側が実際に電子線が入射したときの $ADCch$ である。ここでは電荷量を積分した情報が $ADCch$ として現れている。つまり、高さ（$ADCch$）が最も高くなるところ（MAX）が電荷量を積分しきった値であり、測定されたエネルギーに相当する。そして、エネルギーとして扱うところはこの MAX からペデスタルを引いた値である。MAX からペデスタルを引いた値をヒストグラムとしたのが図 4.4 である。図 4.4 の縦軸はカウント、横軸は $ADCch$ である。

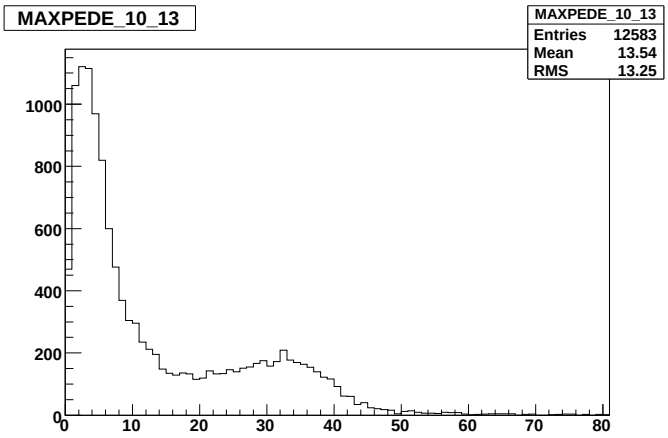

Figure 4.4: MAX-ペデスタル　縦軸：カウント　横軸： $ADCch$

図 4.4 の横軸は $ADCch$ であるので、エネルギーに換算する必要がある。$ADCch$ をエネルギー [MeV] に換算する際に表 3.5 の Conversion Factor を用いた。エネルギーに換算したものが図 4.5 である。図 4.5 の縦軸はカウント、横軸はエネルギー [MeV] である。

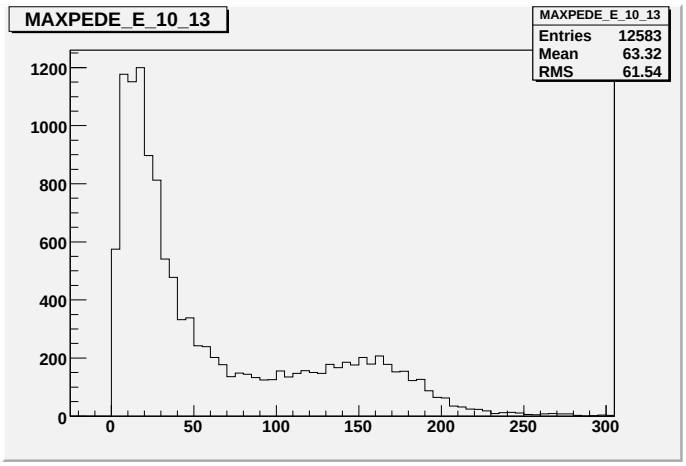

Figure 4.5: エネルギースペクトル　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

図 4.5 はテストベンチ ID_10_13 だけをプロットしたものである。これの全てのチャンネルをプロットしたのが図 4.6 である。縦軸は対数表示のカウント、横軸はエネルギー [MeV] である。ここでは見やすくするため縦軸を対数表示にした。

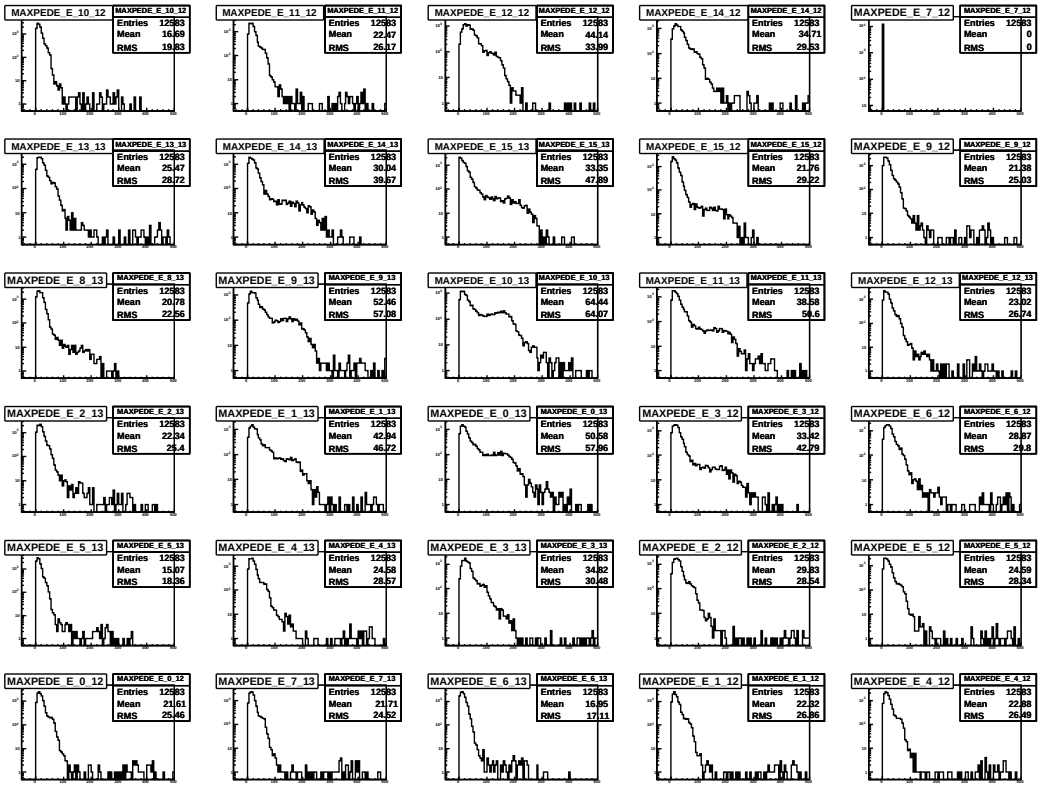

Figure 4.6: 全チャンネルのエネルギースペクトル　縦軸：対数表示のカウント　横軸： エネルギー [MeV]

図 4.5 で 150MeV 付近にピークがあるがこれが電子線が落としたエネルギーと思われる。図 4.6 を見ると、やはりビームを当てているポイント付近にエネルギーを多く落としていることが分かる。図 4.5、図 4.6 を見て分かるように電子線を入射しているイベントをプロットしているのだが、0 付近にピークがある。これは注目している結晶以外の結晶に電子線が入射したイベントを現している。エネルギー分解能の議論をするならば、電子線が注目している結晶に入射したイベントのみを扱いたい。また、電子線が落とすエネルギーは結晶に 1 本に収まるとは限らない。PWO 結晶のモリエール半径が 2cm である事から電磁シャワーは結晶 1 本には収まらず、多少エネルギーがはみ出す事が予想される。そこで、電子線のエネルギーをより正確に求めるために、3.2.2 節で説明した足し合わせ解析手法を用いる。

足し合わせ解析手法を用いると、最もエネルギーを落とした結晶、つまりここでは電子線が当たった結晶を選び出し、その周りの結晶を足し合わせる事により、電子線が落としたエネルギーを全てカバーできる。足し合わせ解析手法により、電子線のエネルギーを正確に求める事ができる。足し合わ

せ解析手法を行った後の結果を図 4.8 と図 4.7 に示す。図 4.8 はテストベンチ ID_10_13 のみであり、図 4.7 は全てのチャンネルをプロットしたものである。両図とも縦軸はカウント数、横軸はエネルギー [MeV] である。

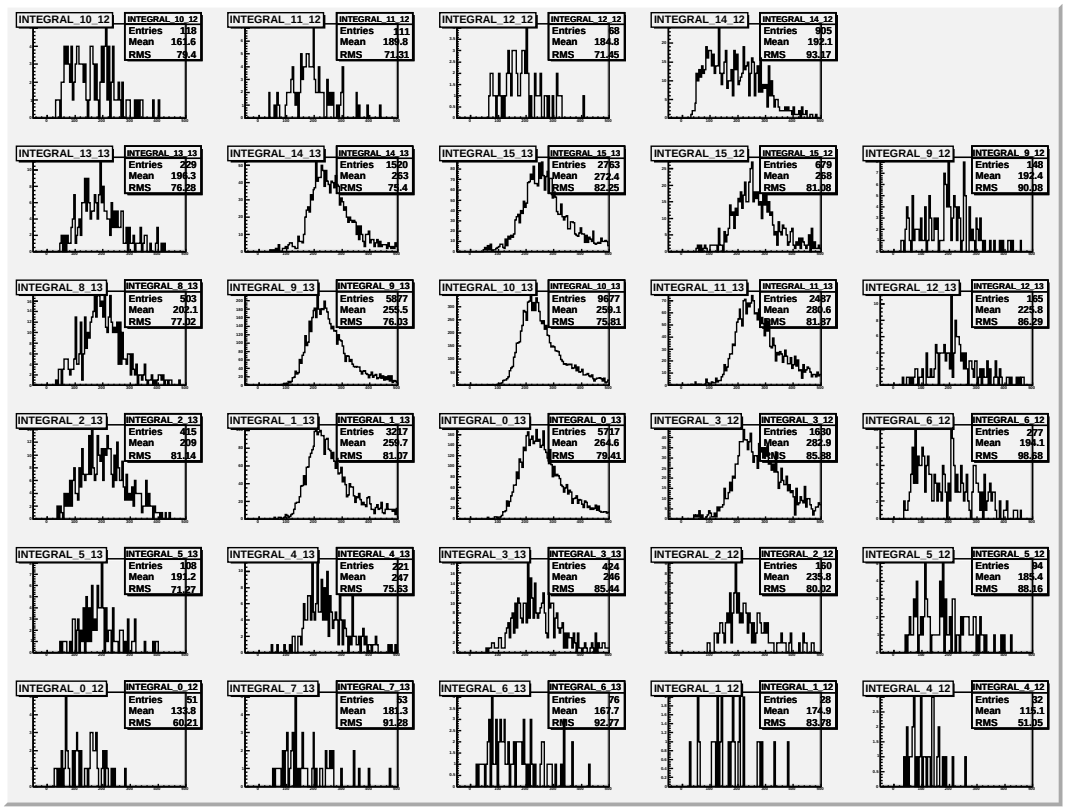

Figure 4.7: 足し合わせ解析手法後の全チャンネルのエネルギースペクトル
縦軸：カウント　横軸： エネルギー [MeV]

図 4.7 では、真ん中当たりがイベント数が多い。これはビームが当たる周辺の方がよりエネルギーを多く落とすことを示している。端の方でもイベントがある事は、PWO 結晶に電子線が入射していないイベント、もしくは宇宙線、電子線が外れてきたもの等を捉えていると思われる。

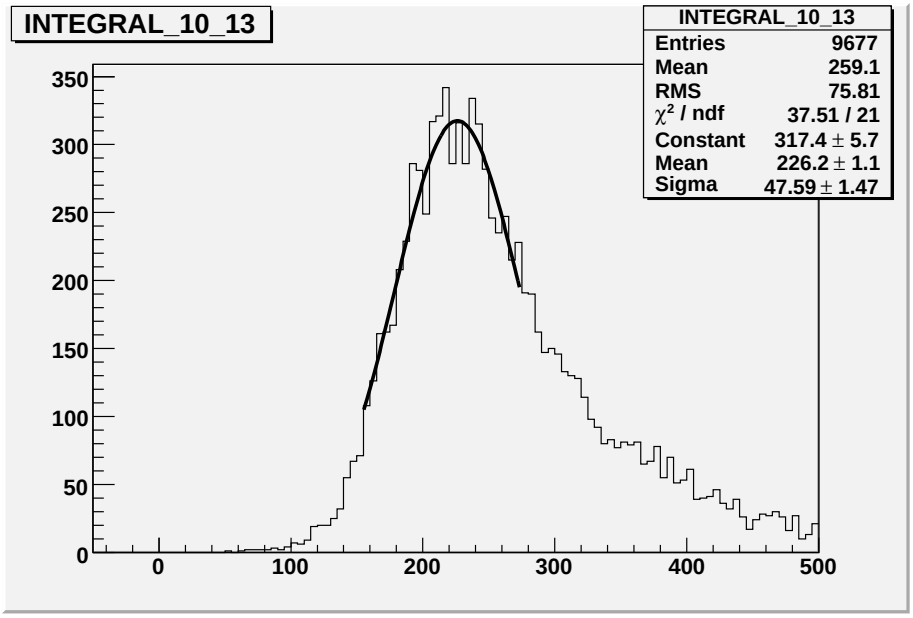

Figure 4.8: 足し合わせ解析手法後のエネルギースペクトル　縦軸：カウント　横軸： エネルギー [MeV]

図 4.8 では電子線のエネルギースペクトルに Gaus 関数をフィットした。この時の電子のエネルギーピーク値は 226.2MeV である。電子線のエネルギーは 150MeV のはずである。この違いが現れるのはエネルギーを間違えて見積もっているためであると思われる。原因は色々考えられるが、最も寄与の大きいところは足し合わせ解析手法ゆえにノイズを多く入れてしまっていることにある。また、Conversion Factor を求めた時の宇宙線のエネルギーの誤差が大きいと言う事も考えられる。

ここで得られた結果より、エネルギー分解能を求めると、$\sigma/E = 21.0 \pm 0.8\%$ となった。そして、今までのエネルギー分解能を測定した実験より予想される 150MeV でのエネルギー分解能は 15.1%である。本実験で得られたエネルギー分解能と今までの実験結果より予想されるエネルギー分解能には明らかに差がある。続いて、得られた結果の解析手法の見直し、及びエネルギー分解能の測定値と計算値の違いの原因を探る。

4.2 電子線シミュレーション

現在、実験結果として、電子線のエネルギーは150MeVであるとしているが、実際の実験では、3.3.2節の実験のセットアップを見て分かるように、電子がビームパイプを出てから空気中を進み、2つのシンチレーションカウンタにぶつかった後にPWO結晶へと入射している。よって、電子は空気中を通ることによりエネルギーが150MeVより減衰していることが考えられる。電子がどのくらい減衰しているかを確かめるためにGEANTによりシミュレーションを行った。シミュレーションの条件は表4.1の通りである。

Table 4.1: 電子線シミュレーションの条件

条件	詳細
入射粒子	150MeVの電子
空気	351.3cm
シンチレーションカウンタ1	0.6cm
シンチレーションカウンタ2	0.3cm
検出器	PWO結晶 or 理想検出器 (密度 $10^4 g/cm^3$)

また、この条件で行ったシミュレーションの絵を図4.9に載せる。図4.9における赤い線が電子、緑の線が光子である。

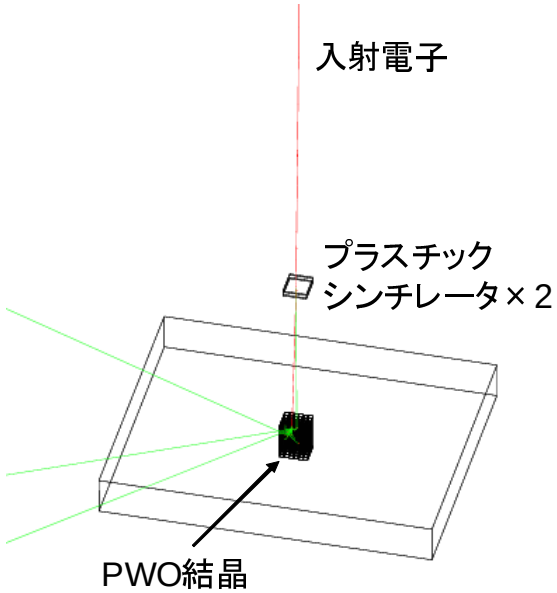

Figure 4.9: GEANTによる150MeV電子線のシミュレーション

今、知りたいのは電子がPWO結晶表面まで飛んできた時のエネルギーである。ここではその先の検出器によってどのくらいのエネルギーを落としたか調べた。まずテストベンチを再現した場合、つまりPWO結晶でエネルギーを測定したシミュレーションの結果を図4.10に載せる。

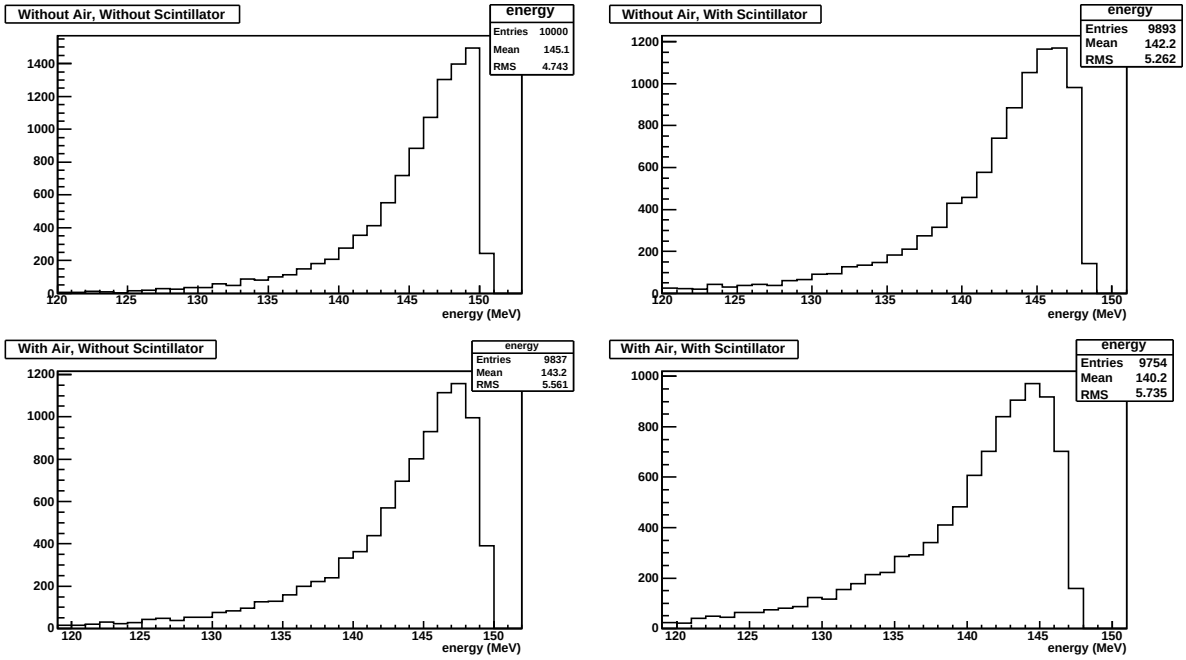

Figure 4.10: 150MeV電子線のシミュレーションの結果　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]　左上：空気なし、シンチレータなし　右上：空気なし、シンチレータあり　左下：空気あり、シンチレータあり　右下：空気あり、シンチレータあり

続いて、PWO結晶を理想検出器（密度$10^4 g/cm^3$の検出器）でエネルギーを測定した結果を図4.11に載せる。理想検出器とは密度を大きくした検出器である。つまり、理想検出器でエネルギーを全て落とすので、ここで落としたエネルギーとは、実際の実験での電子のPWO結晶直前のエネルギーにより近いはずである。

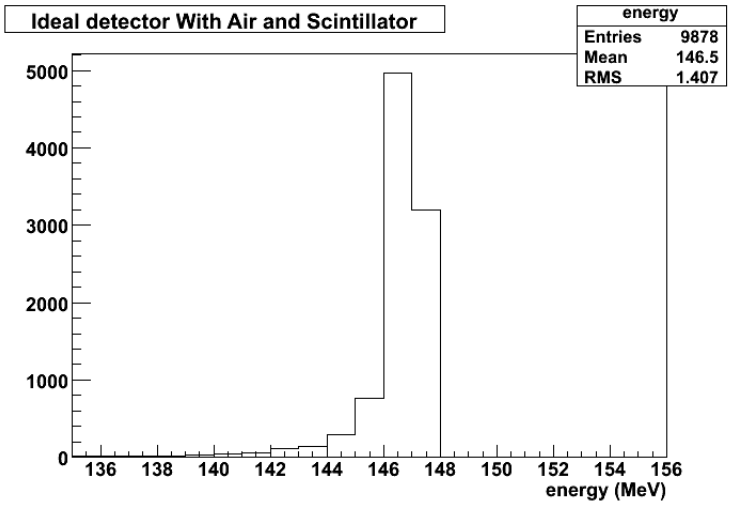

Figure 4.11: 空気あり、シンチレータありで理想検出器によるエネルギー測定　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

図 4.11 を見ると、測定エネルギーのピーク値は 146MeV にあることが分かる。つまり、ビームパイプから出た電子は空気とシンチレータにより 4MeV のエネルギーを落としたと分かる。そして、電子が PWO 結晶表面に到着する時には 146MeV のエネルギーに減衰していることがこのシミュレーションの結果より分かる。また、図 4.11 の RMS は 1.4MeV である。これより、電子は空気中での減衰により、エネルギーのピーク値に約 1.0% の揺らぎを持っている事が分かる。

4.3 Fitting による解析

4.3.1 Gamma-2 関数の Fitting

4.1.1 節で得られたエネルギー分解能の結果は予想される値とは異なっていた。測定されたエネルギー分解能を理解する上で、ノイズの寄与を除去するような解析手法を考える。ここでは Sampling ADC に対してフィットし、フィットの情報よりエネルギー分解能を求める解析を行う。

Sampling ADC とは図 4.3 に載せたような横軸 sample 数、縦軸 $ADCch$ のプロットの事である。この Sampling ADC に Gamma-2 関数でフィットを行う。Gamma-2 関数とは FEE の回路の仕様より導き出される関数であり、測定される Sampling ADC によく当てはまる事が知られている。Gamma-2 関数を式 4.1 に載せる。

$$V(t) = \left[\frac{2QA^2}{C_f}\right]\left[\frac{t}{\tau_p}\right]^2 e^{-2\frac{t}{\tau_p}} \tag{4.1}$$

Q は APD で発生する電荷量、A は積分器の増倍率、C_f は CSP のコンデンサの電気容量、τ_p は出力波形がピークになるまでの時間であり shaping time(τ_0) によって与えられる。この関数を Samping ADC に適用する。図 4.12 は模擬的な Sampling ADC に Gamma-2 関数をフィットさせたプロットである。

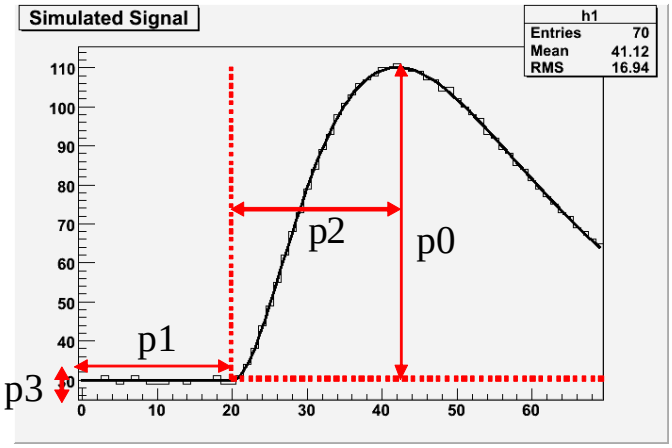

Figure 4.12: Sampling ADC への Gamma-2 関数の Fitting　縦軸：ADCch 横軸：sample 数 [100ns]

Gamma-2 関数は 5 つのパラメータを持っている。図 4.12 中に書かれている $p0 \sim p3$ までが Gamma-2 関数のパラメータである。パラメータ 0 はエネルギーに対応し、パラメータ 1 は presample 数、パラメータ 2 は立ち上がり

の時間（τ_p）、パラメータ 3 はペデスタル、パラメータ 4 は Gamma-2 関数の指数項である。

今までエネルギーを求めるのに最大の ADC（MAX）とペデスタルの平均値しか使わなかったが、エネルギーにフィットのパラメータ 0 を使うことにより 70sample 全ての情報を使って解析を行うことが出来る。フィットさせる事により情報を取ってくる事で電子線のエネルギーを正確に求める事ができると期待される。

解析結果

以上のフィットによる解析を行った後の結果を以下の図 4.14 と図 4.13 に載せる。図 4.14 はフィットによる解析を行った後、足し合わせ解析を行ったテストベンチ ID_10_13 のエネルギースペクトルである。図 4.13 は全てのチャンネルのエネルギースペクトルである。

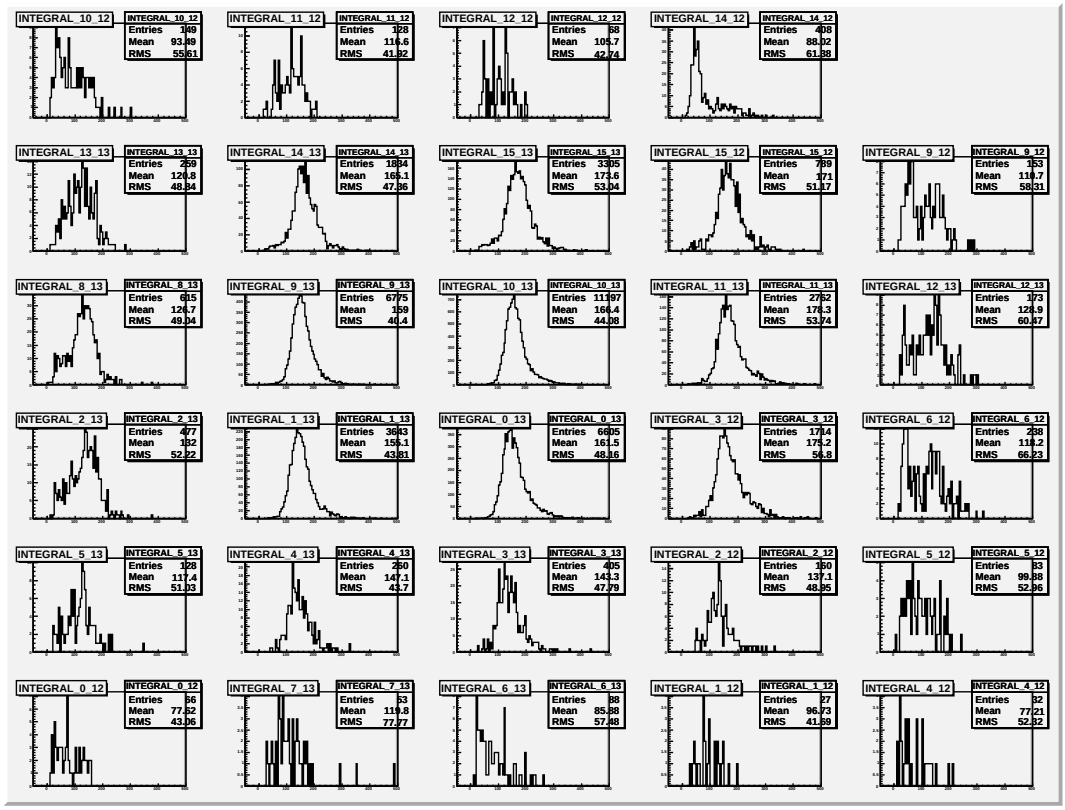

Figure 4.13: フィットによる解析後の全チャンネルのエネルギースペクトル
縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

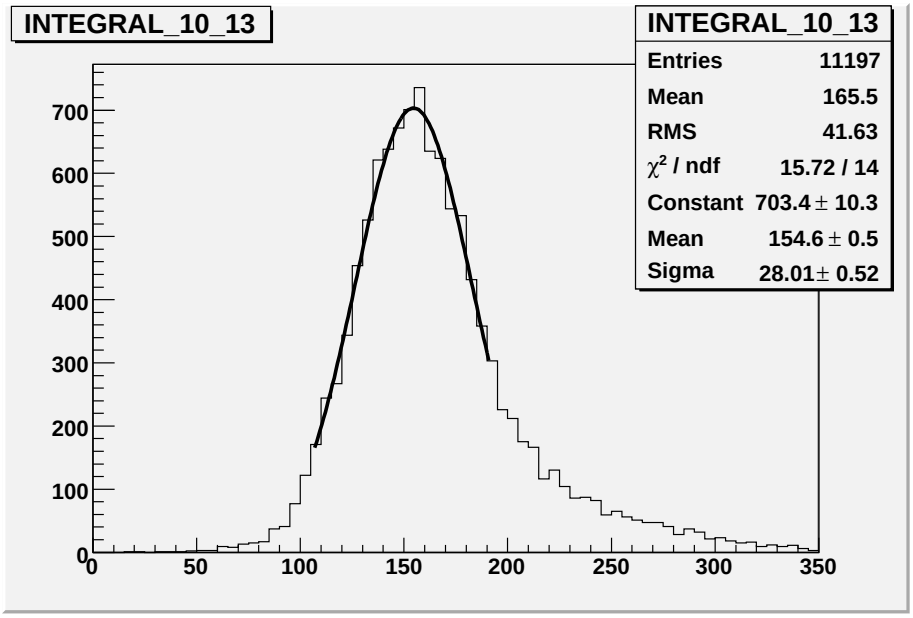

Figure 4.14: フィットによる解析後のエネルギースペクトル　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

図 4.14 は図 4.8 と同様にエネルギースペクトルにフィットした。エネルギーピーク値は 155MeV である。Sampling ADC へのフィットによる解析を行う前の結果（図 4.8）のエネルギーピーク値 226.2MeV からは落ちている。これはノイズによる寄与が Sampling ADC へのフィットによる解析を行う事により少なくなったためである。しかし、まだ 150MeV よりも大きい。まだノイズの寄与を完全に除去できていない。または Conversion Factor の誤差がある事は考えられる。

得られた結果より、エネルギー分解能を求めると、$\sigma/E = 18.1 \pm 0.5\%$ となった。Sampling ADC へのフィットによる解析を行う前のエネルギー分解能 21.0% より 2.9% 落ちている。やはり、フィットによる解析のためノイズの寄与を含まなくなった分エネルギーピークの揺らぎが小さくなっている。しかしまだ、今までの実験からの計算により得られたエネルギー分解能 15.1% では説明できない。解析手法について、及びエネルギー分解能の実測値と計算値の違いについて考察していく。

次のセクションでは、フィットした時の各イベントについて、そして、そのイベント選択について述べる。

4.3.2 イベント選択

4.3.1 節では得られた Samplimg ADC に Gamma-2 関数をフィットしたが、ここでは 1 イベント 1 イベント確認する事で実際に Sampling ADC にどのようにフィットされてるのか、またどのようなイベントがありイベント選択の条件をどうするかを決めていく。

まずは実際にフィットされた 1 イベントを見てみる。以下の図 4.15 はとある 1 イベントの Sampling ADC に Gamma-2 関数をフィットしたものである。

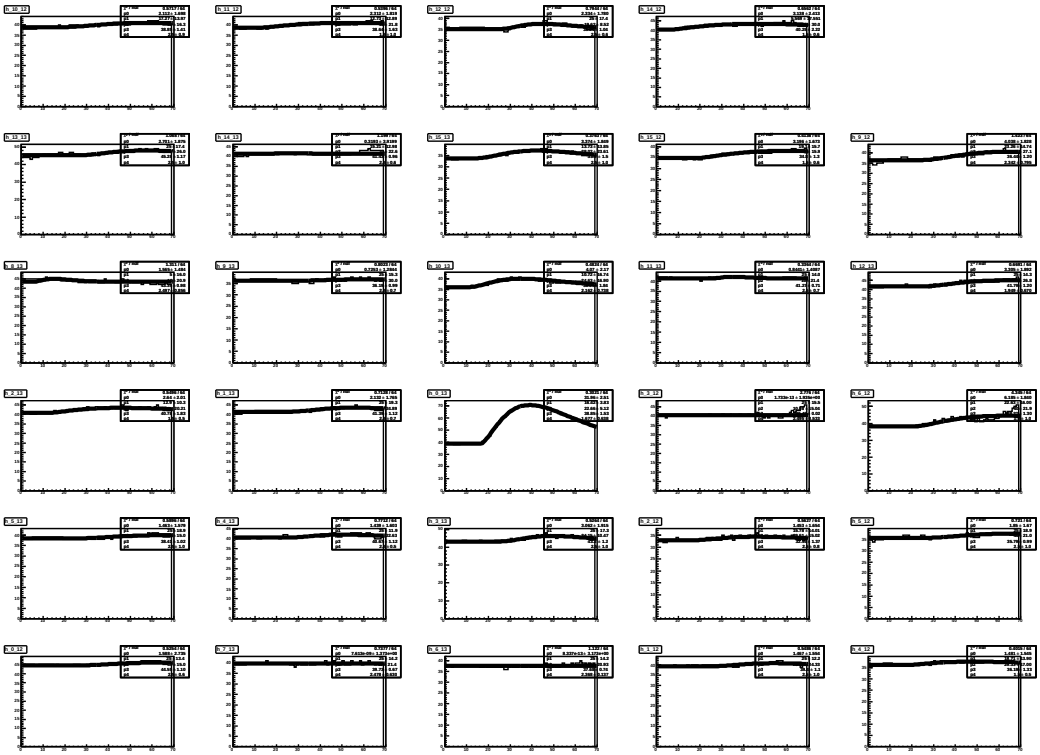

Figure 4.15: シグナルイベント（Gamma-2 関数で Fitting） 縦軸：*ADCch* 横軸：Sample 数

図 4.15 中の黒い線がフィットの線である。ちなみに縦軸のスケールはチャンネルごとに変えている。このイベントでは真ん中辺りにシグナルが来ているのが見て取れる。そして、フィットも上手くいっており、このイベントに関しては問題なくエネルギーを求める事が出来ていると思われる。

続いて、図 4.16 もとある 1 イベントの Sampling ADC に Gamma-2 関数をフィットしたものである。

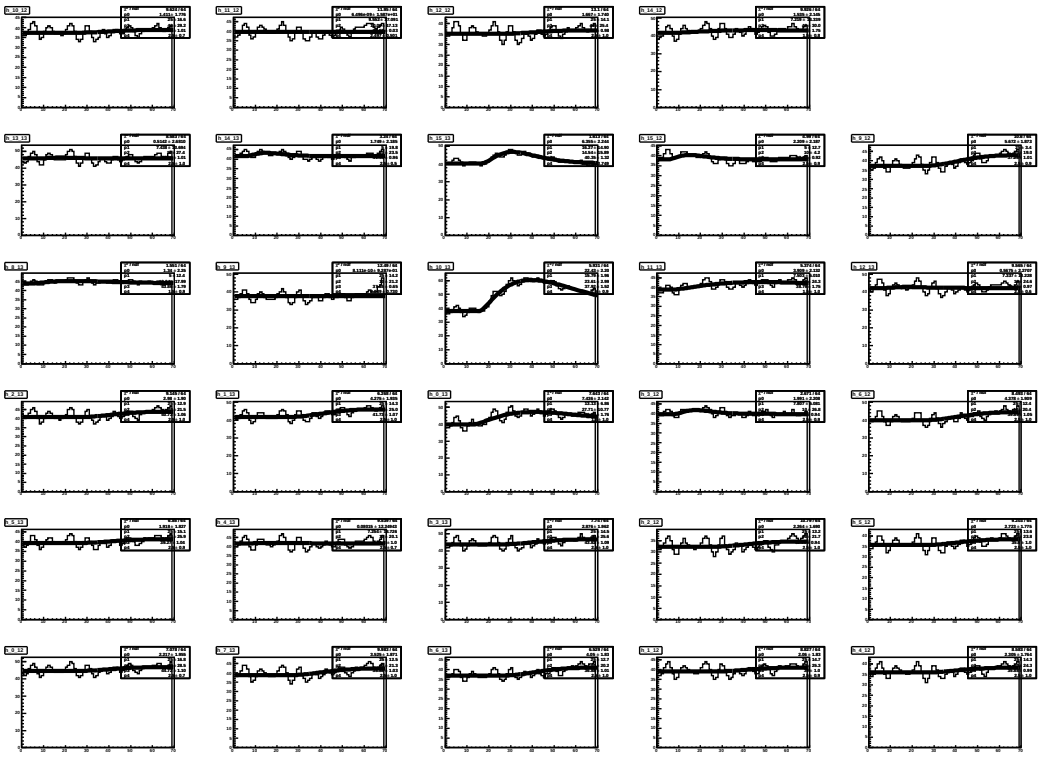

Figure 4.16: ノイズイベント（Gamma-2 関数で Fitting）　縦軸：$ADCch$
横軸：Sample 数

図 4.16 を見ると、全てのチャンネルに短周期のノイズが乗っていることが分かる。これはテストベンチ特有のノイズであり、このノイズが乗ったイベントでは正確にエネルギーを求められないと思われるので、このノイズが乗ったイベントは除去したい。このイベントを除外するには全てのイベントに対して条件をかける必要がある。そこで、まず各イベントの χ^2/NDF に注目した。

χ^2/NDF とは簡単に説明すると、フィットが実測値とどの程度合っているかを示す目安であり、フィットした線と実測値が大きくずれていれば χ^2/NDF の値は大きくなる。ここで、各イベントに対する χ^2/NDF（各チャンネルの平均）を図 4.17 にプロットしてみた。

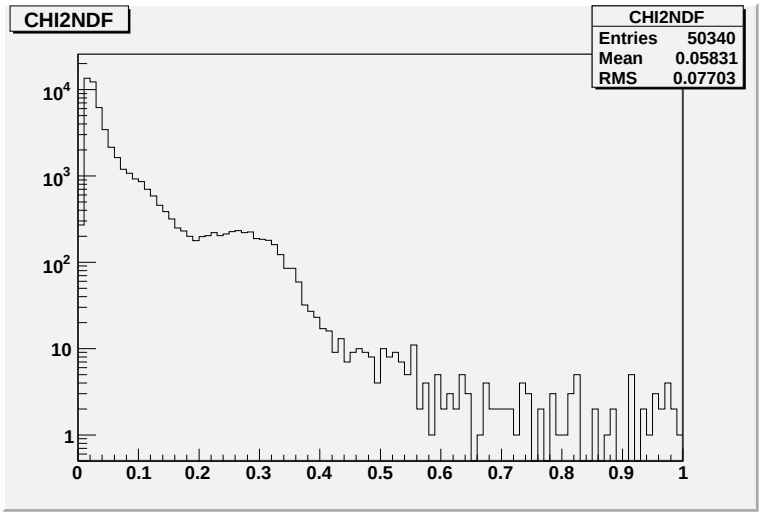

Figure 4.17: Gamma-2 関数でフィットした時の χ^2/NDF（各チャンネルの平均）　縦軸：対数表示のカウント　横軸：χ^2/NDF

図 4.17 の縦軸は対数表示のカウント、横軸は χ^2/NDF の値である。図 4.17 を見てもテストベンチ特有のノイズがどこで乗っているか判断するのは難しい。そこで、100 イベント程度図 4.16 のような 1 イベントのプロットを確認しながら、χ^2/NDF にどのような傾向があるか確認した。すると、図 4.16 のようなテストベンチ特有のノイズが乗っているイベントは大抵 $\chi^2/NDF \geq 1$ である事が分かった。よってテストベンチ特有のノイズが乗っているイベントを除去するための条件を $\chi^2/NDF \geq 1$ とした。今後の解析の中では $\chi^2/NDF < 1$ のイベントのみを選択するという条件を組み込んで解析を行う。

また、図 4.18 も、とある 1 イベントの Sampling ADC に Gamma-2 関数をフィットしたものである。

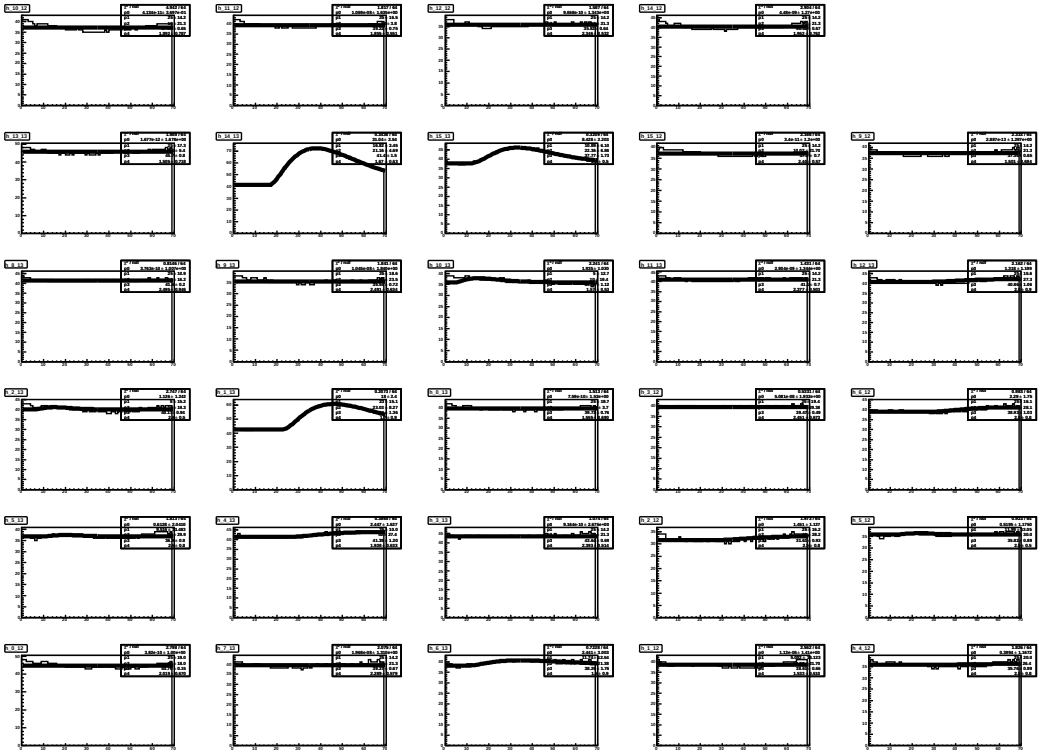

Figure 4.18: 離れた 2 ピークイベント（Gamma-2 関数で Fitting）　縦軸：*ADCch*　横軸：Sample 数

図 4.18 を見ると、離れた 2 箇所にシグナルが来ているように見える。電磁シャワーは近接するチャンネルにエネルギーを漏らす事はあってもこのように結晶を跨いでエネルギーが浸透する事は考えにくい。電子が結晶表面に辿り着く前に制動放射により光子を放出し、光子が結晶を跨いで PWO 結晶に入射した可能性はある。このイベントに関しては取り除くのは難しく、100 イベント中に 6 つと頻度の少ないイベントであるので、今回の解析においては除去せずに扱う事にした。

4.3.3 閾値とフィットパラメータの制限

4.3.1 節では、Sampling ADC に Gamma-2 関数をフィットする事により解析し、エネルギー分解能を求めた。ここでは、閾値とフィットのパラメータの制限の条件をかけて解析を行う。

閾値（しきいち）

まず、閾値について説明する。足し合わせ解析手法を用いる限り、9 本の結晶のエネルギーを足し合わせる事になる。9 本の結晶のエネルギーを足す限り、どうしても電子のエネルギーとは関係のないノイズまで拾ってしまう可能性がある。そこで、足し合わせるエネルギーに対して閾値をかける。つまり、あるエネルギー以下はノイズと判断して足し合わせに加えないと言う事である。閾値はペデスタルの広がりの指標として $2\sigma = 4.7[ch]$ とした。つまり、9 本の結晶のエネルギーを見た時にエネルギー $[ch]>4.7[ch]$ の時のみ足し合わせて、その和を電子のエネルギーとするという解析方法である。

フィットパラメータの制限

続いて、フィットパラメータに制限を与えるという条件を説明する。Sampling ADC へ Gamma 関数をフィットさせたが、フィットさせるとそのパラメータが与えられる。今回ならば、図 4.12 のパラメータ 0~4 までの値である。そして、FEE の回路の仕様とトリガーの設定により、いくつかのパラメータの値は制限される。FEE の回路の仕様とトリガーの設定により決まるフィットパラメータの制限を以下の表 4.2 に載せる。

Table 4.2: フィットのパラメータ制限

パラメータ	制限値
Parameter1[presample 数]	$10 < p1 < 21$
Parameter2[立ち上がりまでの sample 数]	$16 < p2 < 28$
Parameter4[Gamma-2 関数の指数項]	$p4 = 2$

閾値とフィットパラメータの制限をかけた解析の結果

以上の閾値の条件がけとフィットパラメータの制限による解析をエネルギー分解能測定実験の結果に適用する。閾値の条件がけをしない場合で、フィットパラメータの制限をかける場合、かけない場合、閾値の条件がけをする場合で、フィットパラメータの制限をかける場合、かけない場合の 4 パターンの解析を行った。それぞれの解析でエネルギー分解能を求める。

まず、図 4.19 は閾値をかけない、フィットパラメータの制限をつけない場合のエネルギースペクトルである。テストベンチ ID_10_13 にのみ着目する。縦軸はカウント、横軸はエネルギー [MeV] である。

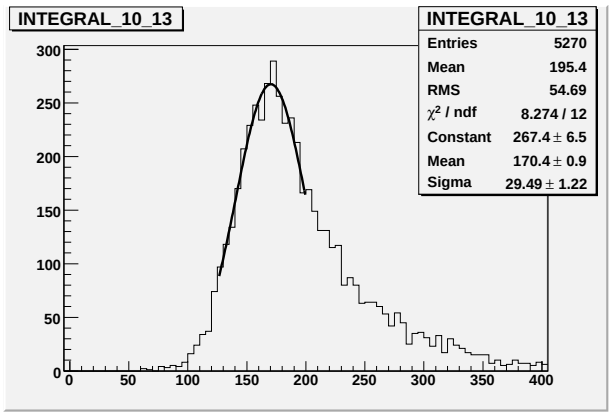

Figure 4.19: 閾値なし、フィットパラメータ制限なしのエネルギースペクトル
縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

図 4.19 のエネルギーピーク値は 170[MeV] であり、エネルギー分解能 σ/E を計算すると、$17.3 \pm 0.8\%$ となる。同様に図 4.20 は閾値をかけない、フィットパラメータの制限をつけた場合のエネルギースペクトルであり、図 4.21 はスレッショルドをかけて、フィットパラメータの制限をつけない場合のエネルギースペクトルであり、図 4.22 は閾値をかけて、フィットパラメータの制限をつけた場合のエネルギースペクトルである。

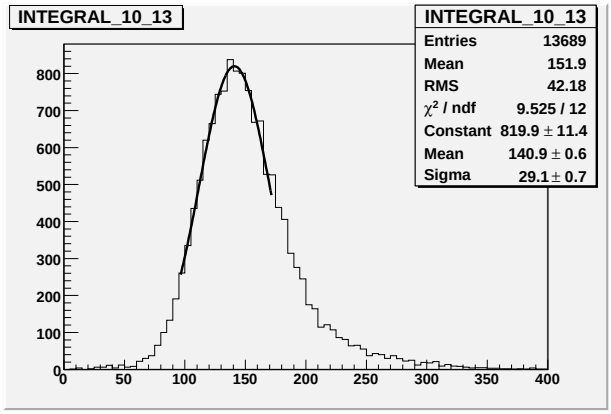

Figure 4.20: 閾値なし、フィットパラメータ制限ありのエネルギースペクトル
縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

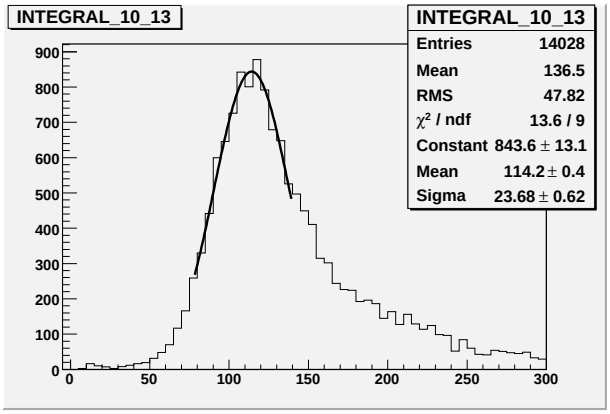

Figure 4.21: 閾値あり、フィットパラメータ制限なしのエネルギースペクトル
縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

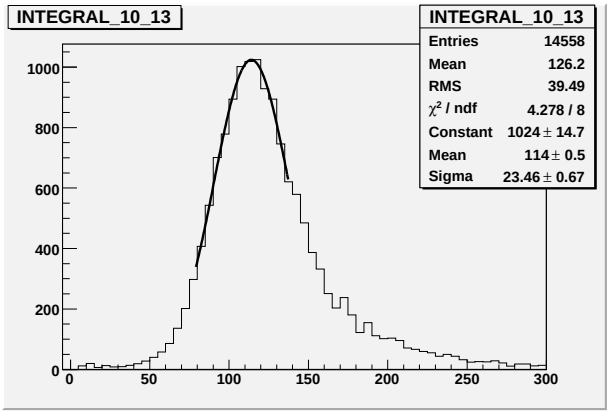

Figure 4.22: 閾値あり、フィットパラメータ制限ありのエネルギースペクトル
縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

以上の結果をまとめると以下の表 4.3 のようになった。

Table 4.3: 閾値、フィットパラメータ制限の解析結果

条件	Energy[MeV]	σ[MeV]	Energy Resolution[%]
閾値なし、パラメータ制限なし	170.4±0.9	29.5±1.2	17.3±0.8
閾値なし、パラメータ制限あり	140.9±0.6	29.1±0.7	20.7±0.6
閾値あり、パラメータ制限なし	114.2±0.4	23.68±0.6	20.7±0.6
閾値あり、パラメータ制限あり	114.0±0.5	23.46±0.7	20.6±0.7

図 4.19 と図 4.20、図 4.21 と図 4.22 を比べると、フィットのパラメータの制限をかけた場合とかけない場合では、パラメータの制限をかけた方がエネルギーの大きい方のテールが小さくなっている事が分かる。これはフィットのパラメータの制限をかける事でノイズにフィットしない、つまりシグナルと判断しなくなり、正確なエネルギーを求める事ができるようになったと思われる。また閾値をかけた場合とかけない場合では、閾値をかけた方がエネルギーが落ちている。これはノイズを拾わなくなったとも考えられるが、電子のエネルギーも落としてしまっている可能性がある。

閾値を付ける事により、ノイズは小さくなりエネルギー分解能は小さくなるが、一方で電子のエネルギーを落としてしまう可能性もある。電子のエネルギーを落としてしまうとエネルギー分解能は大きくなる。閾値の有無については考慮すべきであるので、この先の結果は閾値を付けた結果と付けていない結果の両方を述べる。

続いて、測定されたエネルギー分解能に影響を与える要素を見積もり、測定されたエネルギー分解能の誤差を求める。

4.4 系統誤差の見積もり

エネルギー分解能の系統誤差を求めるに当たって本測定の上流よりエネルギー分解能に与える影響について考えていく。

4.4.1 電子線による影響

まず、電子線がエネルギー分解能に与える影響について考える。電子線のイベントを 1 イベントずつ確認した際に、テストベンチ特有のノイズが乗っていた。（4.3.2 節参照）これはエネルギー分解能に影響を与えると思われるが、4.3.2 節で述べたように χ^2/NDF でカットをかける事によりテストベンチ特有のノイズは取り除く事ができた。よってこれはエネルギー分解能へは影響を与えない。

また、ビームのエネルギーについては、4.2 節で GEANT により電子が空気中を走る時にどの程度減衰するか計算した。その結果、電子線のエネルギーは 146MeV となる事が分かった。また、GEANT とは別に手計算により電子線の空気中での減衰について計算した。その結果、電子のエネルギーは 144MeV となった。この 2 通りの結果より、電子線のエネルギーは 146±2MeV とする。

4.4.2 各チャンネルの不均一性による影響

続いて、PWO 結晶、APD、CSP、FEE の各チャンネルの不均一性がエネルギー分解能に与える影響について考える。ここではその影響を系統誤差として、29 つの各チャンネルのエネルギー分解能の違いを見る事により見積もる。閾値をかけた場合と閾値をかけていない場合の 2 通りの解析方法での 29 本の結晶の中心付近の 9 チャンネルのエネルギー分解能を以下の表 4.4 と表 4.5 にまとめる。

Table 4.4: 中心付近の 9 本の結晶のエネルギー分解能：閾値無し

ID	Energy Resolution[%]
14_13	25.8
15_13	23.7
15_12	23.3
9_13	22.1
10_13	20.7
11_13	21.4
1_13	25.0
0_13	25.4
3_12	21.3

Table 4.5: 中心付近の 9 本の結晶のエネルギー分解能：閾値有り

ID	Energy Resolution[%]
14_13	22.3
15_13	22.8
15_12	23.4
9_13	21.1
10_13	20.6
11_13	21.0
1_13	20.6
0_13	19.7
3_12	20.0

これよりエネルギー分解能のチャンネル依存性を見積もる。まず、9 チャンネルの平均値を求め、そして 9 チャンネルの RMS をその誤差とする。表 4.4 と表 4.5 より、エネルギー分解能のチャンネル依存性を考慮した結果、エネルギー分解能は閾値なしの方はσ/E =23.2±1.8[%]、閾値ありの方はσ/E =21.3±1.2[%] となった。

4.4.3 Conversion factor を求める解析による影響

最後に Conversion Factor を求める解析がエネルギー分解能に与える影響について考える。

エネルギー分解能を求める際に $ADCch$ をエネルギー [MeV] に変換した。この時に Conversion Factor を用いたが、Conversion Factor を求める際の解析によって系統誤差が入ると考えられる。ここでは Conversion Factor の解析による系統誤差を見積もる。この結果は以下の最終結果の系統誤差、及び測定されたエネルギー分解能の理解の際に用いる。

Conversion Factor の求め方はいくつかあった。まず、REFER でのエネルギー分解能測定実験前に取得した宇宙線を解析し（足し合わせ解析手法)、Conversion Factor を求めた。この時、Conversion Factor は不均一だったので、Conversion Factor を 4 に揃えるように APD の印加電圧を調節した。そして、この印加電圧で電子線を測定した。Conversion Factor を 4 に揃えた方法を方法 ① とする。

続いて、REFER でのエネルギー分解能測定実験後に取得した宇宙線を解析し、Conversion Factor を求めた。この時の解析手法として、アイソレーション解析手法と足し合わせ解析手法の 2 通りの方法がある。それぞれ方法 ②、方法 ③ とする。

また、REFER 実験中に電子線のエネルギー 150MeV を使って Conversion Factor を求めた。この方法によって電子線の入射する結晶の周辺 9 チャンネ

ルの Conversion Factor を求める事ができた。以上の Conversion Factor を求める 4 通りの方法を次のようにまとめる。

方法 ①：REFER 実験前の宇宙線（足し合わせ解析手法）
方法 ②：REFER 実験後の宇宙線（アイソレーション解析手法）
方法 ③：REFER 実験後の宇宙線（足し合わせ解析手法）
方法 ④：電子線（足し合わせ解析手法）

そして、それぞれの方法で求めた Conversion Factor を以下の表 4.6 にまとめた。この 4 通りの Conversion Factor を使って系統誤差を求めていく。

まず、全てのチャンネルにおいて方法 ① の Conversion Factor を方法 ③ の Conversion Factor で割る。全てのチャンネルの方法 ① ／方法 ③ の値のふらつきを示す量として 1 つの RMS が求まる。この RMS が何を意味するかを述べる。方法 ① とは REFER 実験前の宇宙線データを解析した Conversion Factor であり、方法 ③ とは REFER 実験後の宇宙線データを解析した Conversion Factor である。方法 ① と方法 ③ は解析手法は同じであるので、違いがあるのは時間だけである。つまり方法 ① ／方法 ③ は Conversion Factor の実験前と実験後の時間依存性を見ていると言える。そして、その RMS は時間依存性のふらつきを示す量である。方法 ① と方法 ③ による系統誤差（Conversion Factor の時間依存性）は 20.6%となった。

続いて、上記と同様に方法 ② の Conversion Factor を方法 ③ の Conversion Factor で割った。そして、また方法 ② ／方法 ③ の RMS を求める。ここで求めた RMS が意味するところは、方法 ② はアイソレーション解析手法、方法 ③ は足し合わせ解析手法を使って解析しているので、解析手法による Conversion Factor の相対誤差を表していると言える。方法②と方法 ③ による系統誤差（Conversion Factor の解析手法による違い）は 5.5%となった。

続いて、同様に方法 ③ と方法 ④ を比較した。ここで同様に方法 ③ ／方法 ④ の RMS を求める。方法 ③ は REFER 実験後に取得した宇宙線により解析して求めた Conversion Factor であり、方法 ④ は REFER 実験中に電子線により解析して求めた Conversion Factor である。よって、方法 ③ ／方法 ④ の RMS が意味するところは、REFER 実験中と実験後の Conversion Factor の時間依存性を表していると言える。方法 ③ と方法 ④ による系統誤差（Conversion Factor の時間依存性）は 4.5%となった。

以上の結果を表 4.7 にまとめる。

Table 4.6: 各方法で求めた Conversion Factor[MeV/ch]

Testbench ID	方法 ①	方法 ②	方法 ③	方法 ④
0_13	4.0	4.0	3.1	3.7
1_13	4.0	6.1	4.6	5.7
2_13	4.0	3.3	3.4	
3_13	4.0	6.0	4.2	
4_13	4.0	4.4	3.5	
5_13	4.0	3.2	3.3	
6_13	4.0	3.4	3.3	
7_13	4.0	3.9	3.8	
0_12	4.0	4.2	4.3	
1_12	4.0	4.7	4.1	
2_12	4.0	5.3	4.1	
3_12	4.0	5.3	3.8	4.2
4_12	4.0	4.9	4.6	
5_12	4.0	5.1	4.3	
6_12	4.0	4.9	4.3	
8_13	4.0	5.4	4.3	
9_13	4.0	4.5	3.4	4.1
10_13	4.0	3.6	3.0	3.5
11_13	4.0	4.8	3.5	3.8
12_13	4.0	4.1	3.8	
13_13	4.0	4.3	4.0	
14_13	4.0	5.6	4.0	4.5
15_13	4.0	3.3	2.5	2.7
15_12	4.0	4.3	3.3	3.5
9_12	4.0	3.6	3.7	
10_12	4.0	3.0	3.5	
11_12	4.0	4.4	4.1	
12_12	4.0	8.5	4.3	
14_12	4.0	6.0	5.3	

Table 4.7: Conversion Factor の系統誤差

系統誤差の種類	誤差 [%]
方法 ① ／方法 ③（実験前後の時間依存性）	20.6
方法 ② ／方法 ③（解析手法による違い）	5.5
方法 ③ ／方法 ④（実験中後の時間依存性）	4.5

表 4.7 の中で、方法 ② ／方法 ③（解析手法による違い）と方法 ③ ／方法 ④ （実験中後の時間依存性）の系統誤差はエネルギー分解能の予想値よりも十分小さいので理解できる。しかし、方法 ① ／方法 ③（実験前後の時間依存性）の系統誤差は 20.6%と大きい。なぜこのように大きな値となったのかを考察する。

実験前と実験後では Conversion Factor を揃える為に増倍率特性曲線を用いて APD の印加電圧を変えている。ここで、増倍率特性曲線の誤差が大きい事を疑ってみる。つまり、印加電圧を変える際に特性曲線の誤差が大きいならば、方法 ① と方法 ③ で求めた Conversion Factor にかなりの差が生じるはずである。以下の表 4.8 は各チャンネルに対して増倍率特性曲線を用いた APD 増倍率の変化率と、それに対応する方法 ① ／方法 ③ の値を示す。Gain 変化率が 2 とは、REFER 実験の前と後で印加電圧を変更した際に増倍率が 2 倍変わったと言う事である。

ここで変化率が 2 以上のチャンネルの方法 ① ／方法 ③ の系統誤差と、2 より小さいチャンネルの方法 ① ／方法 ③ の系統誤差を比べる。変化率が 2 以上の系統誤差は 18.6%、変化率が 2 より小さいものの系統誤差は 7.1%であった。この結果より、特性曲線を使って増倍率を大きく変えたものほど誤差が大きくなっていると言える。つまり、特性曲線の誤差が大きいため、増倍率の変化率を大きくすると誤差が大きくなってしまったと思われる。

Table 4.8: APD 増倍率の変化率と方法 ① ／方法 ③ の値

ID	Gain 変化率	方法 ① ／方法 ③	ID	Gain 変化率	方法 ① ／方法 ③
0_13	2.1	1.3	8_13	2.3	0.9
1_13	0.8	0.9	9_13	2.1	1.2
2_13	2.5	1.2	10_13	2.3	1.3
3_13	0.5	0.9	11_13	2.4	1.1
4_13	0.8	1.1	12_13	2.2	1.0
5_13	2.5	1.2	13_13	0.9	1.0
6_13	2.7	1.2	14_13	2.5	1.0
7_13	0.8	1.1	15_13	5.6	1.6
0_12	1.0	0.9	15_12	2.8	1.2
1_12	0.8	1.0	9_12	2.4	1.1
2_12	0.6	1.0	10_12	2.7	1.2
3_12	2.5	1.0	11_12	0.9	1.0
4_12	0.7	0.9	12_12	0.5	0.9
5_12	1.7	0.9	14_12	2.1	0.8
6_12	2.1	0.9			

増倍率特性曲線の誤差についてはもう一度、LED により増倍率特性曲線を測定し直せば見積もれるが、今回は方法 ① ／方法 ③ の系統誤差は増倍率特性曲線の誤差と考え、エネルギー分解能の系統誤差には含まない事にする。

また、解析方法の違いによる Conversion factor の相対誤差について補足しておく。表 4.7 で求めた系統誤差とは現在、エネルギー分解能の解析に用いている 9 本のみで計算している。そこで、この解析方法の違いによる誤差を 29 本の結晶の外側（淵）の 17 本と内側の 12 本で比べてみる。すると、淵の結晶 17 本の誤差は 23.7%、内側の結晶 12 本の誤差は 5.7%となった。この結果は、淵の結晶の方が解析方法の違いによる Conversion Factor の違いが大きくなっている事を示している。これはアイソレーション解析手法も足し合わせ解析手法も淵の結晶の Conversion factor に対しては正確に求めれない事が原因として挙げられる。

ここで説明してきた Conversion Factor を求める解析による系統誤差の内、エネルギー分解能に影響を与えるのは、Conversion Factor の REFER 実験中後の時間依存性による誤差と、足し合わせ解析手法とアイソレーション解析手法の解析手法の違いによる誤差である。それぞれ、時間依存性は 5.5%、解析手法の違いは 5.5%の誤差をエネルギー分解能に与える。この誤差をエネルギー分解能に伝播させると、閾値無しの方は σ/E =22.6±1.8[%]、閾値有りの方は σ/E =20.7±1.3[%] となった。

4.4.4 系統誤差を含めたエネルギー分解能

測定されたエネルギー分解能に影響を与える要因を考え、系統誤差を見積もってきた。まず、電子線を考えて電子線がエネルギー分解能に影響を与える要因は取り除いた。また、電子は GEANT シミュレーションよりエネルギーは 146±2MeV になると分かった。そして、PWO 結晶、APD、CSP、FEE の各チャンネルの不均一性によるエネルギー分解能の系統誤差を考慮した。最後に Conversion Factor の解析によるエネルギー分解能の系統誤差を考慮した。全ての系統誤差を含めたエネルギー分解能を表 4.9 にまとめる。3 種類の系統誤差を二乗和したものをエネルギー分解能の系統誤差とした。また、各チャンネルのエネルギー分解能の統計誤差を伝播させたものを表 4.9 の統計誤差とした。

Table 4.9: 誤差を含めたエネルギー分解能

閾値	Energy Resolution[%]	系統誤差 [%]	統計誤差 [%]
有り	20.7	±1.3	±1.3
無し	22.6	±1.8	±1.5

閾値の有無の 2 通りのエネルギー分解能を求めたのは、閾値をかけた場合と閾値をかけてない場合の解析の違いはエネルギー分解能を求める上で考慮

すべき系統誤差である事を意味する。

このエネルギー分解能はテストベンチの 150MeV でのエネルギー分解能である。PHOS には今回の 150MeV でのエネルギー分解能とは別のエネルギー領域でのエネルギー分解能の結果がある。本実験の測定結果を今までのエネルギー分解能の測定実験の結果のデータポイントに加えたのが、図 4.23 と図 4.24 である。図 4.23 は閾値をかけずに解析した結果をプロットしており、図 4.24 は閾値をかけて解析した結果をプロットした。図 4.23 と図 4.24 のプロットの本実験の測定点の誤差は、統計誤差と系統誤差を二乗和したものを使っている。

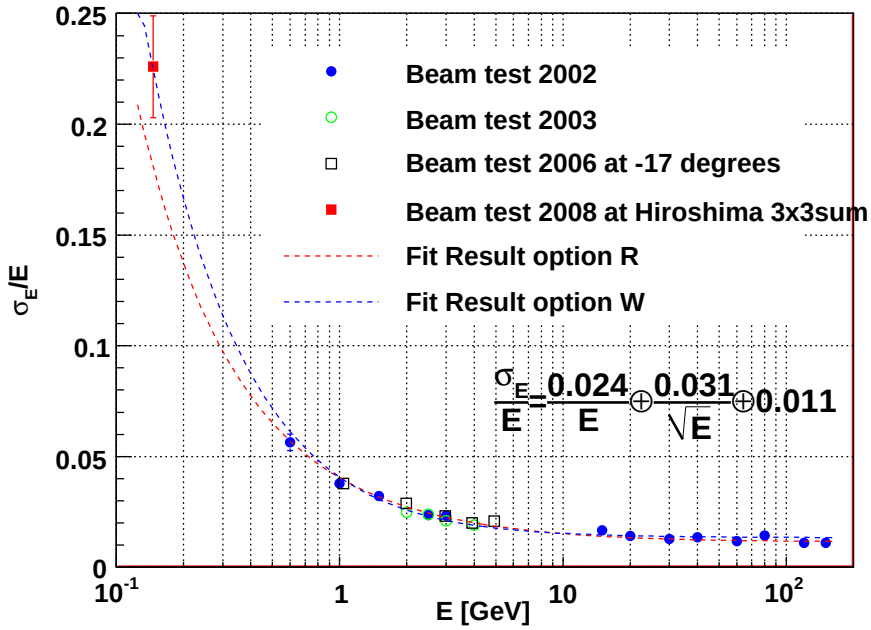

Figure 4.23: 各エネルギー領域でのエネルギー分解能（本実験の測定結果を加えた。）：閾値無し　赤い点線：測定点の誤差を加味したフィット。　青い点線：測定点の誤差を無視したフィット。

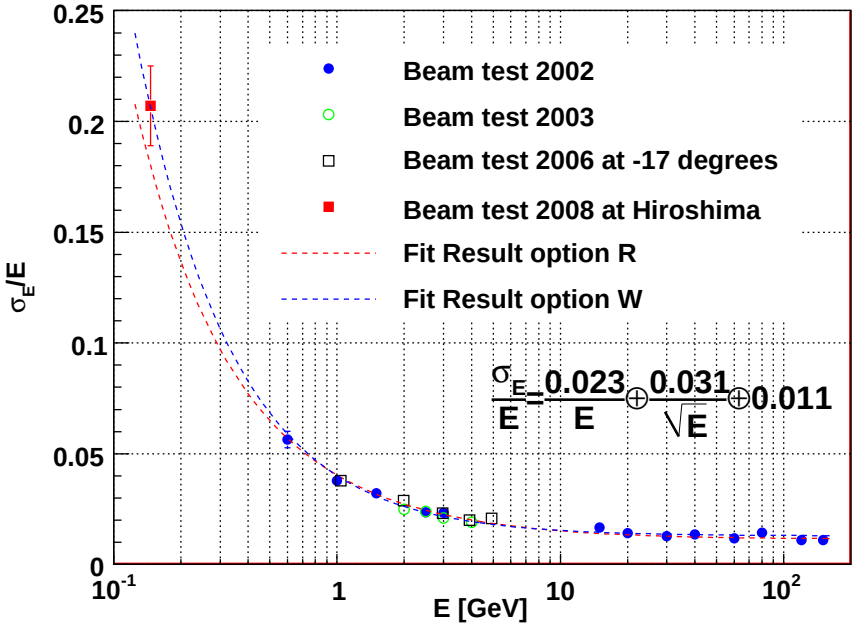

Figure 4.24: 各エネルギー領域でのエネルギー分解能（本実験の測定結果を加えた。）：閾値有り　赤い点線：測定点の誤差を加味したフィット。　青い点線：測定点の誤差を無視したフィット。

今回の解析では閾値の有無の 2 通りの測定結果を載せた。本実験以外のエネルギー分解能測定実験では閾値をかけて解析している。しかし、閾値の値が本実験とは異なっているので単純には比べることは出来ない。

図 4.23 と図 4.24 の赤い点が本実験の測定結果である。フィットした関数はエネルギー分解能を求める関数である。これについては次のセクションで詳しく説明する。図 4.24 の赤い点線は各測定点の誤差の重みを反映させたフィットのラインであり、青い点線は各測定点の誤差の重みを無視したフィットのラインである。

図 4.24 のフィットが正しく出来ているか判断するために、赤いフィットラインと各測定点の差を図 4.25 に、青いフィットラインと測定点の差を図 4.26 にプロットする。

図 4.25 と図 4.26 を見ると、誤差の重みを無視したフィットと測定点の差（図 4.26）は、本実験の測定点のみ見るとフィットと合っているが、その他の測定点は、誤差の重みを反映したフィットと測定点の差（図 4.25）の方がフィットと合っている事が分かる。

また、図 4.27 は本実験の測定点を外した状態で、誤差の重みを反映させてフィットし、そのフィットと測定点の差をプロットしたものである。

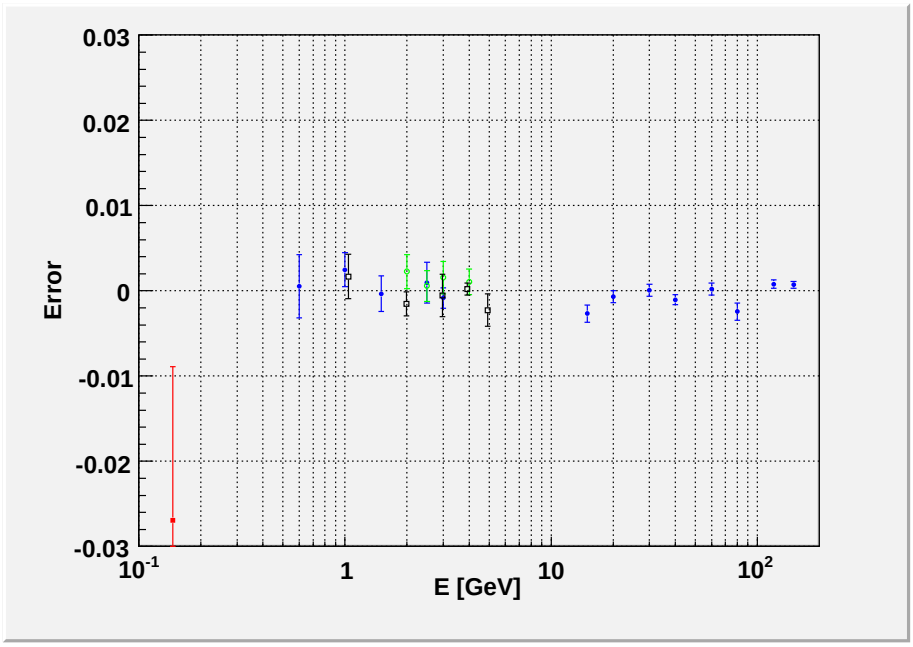

Figure 4.25: 誤差の重みを反映したフィット（赤いライン）と測定点の差。

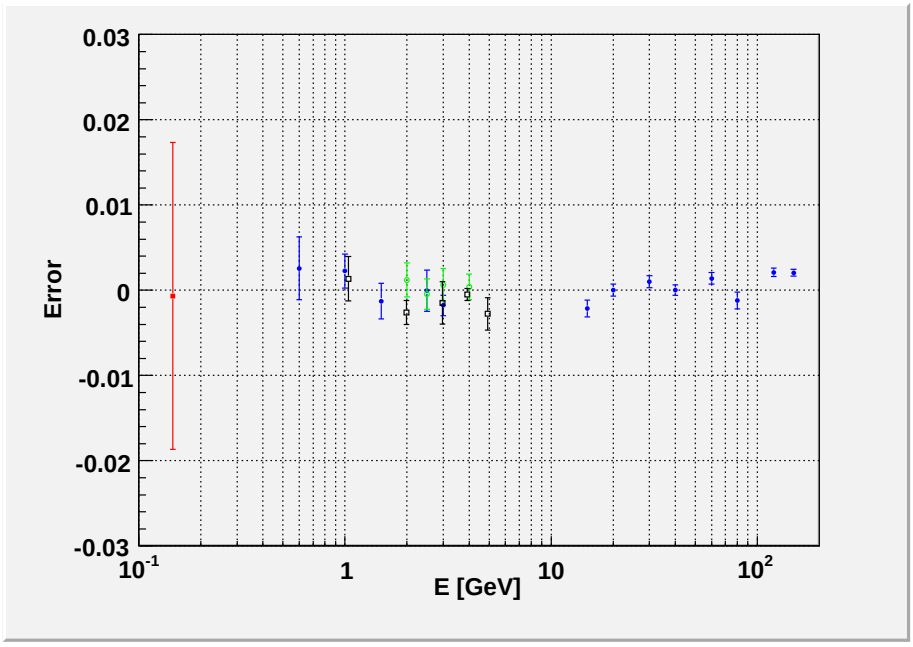

Figure 4.26: 誤差の重みを無視したフィット（青いライン）と測定点の差。

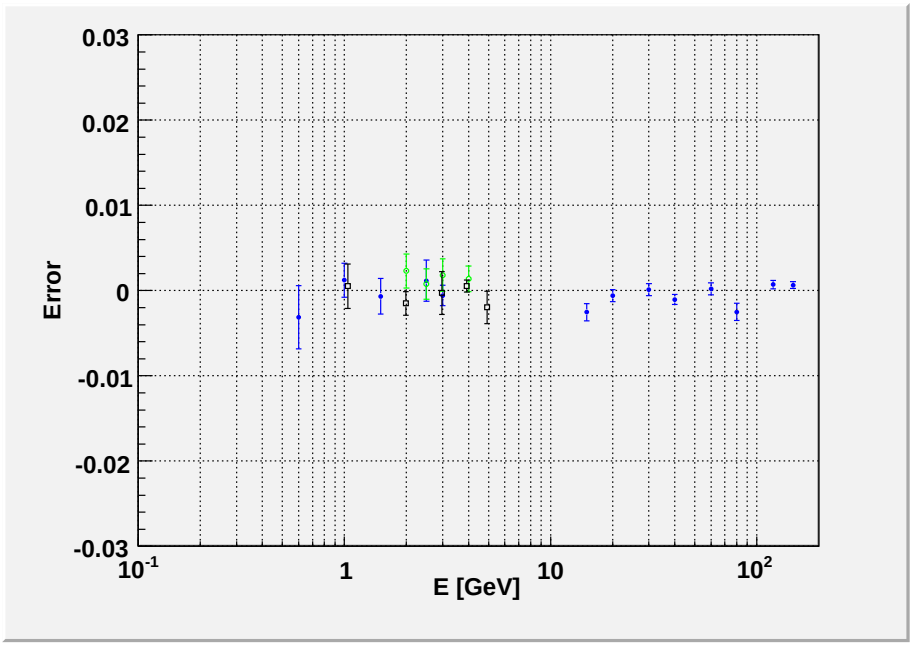

Figure 4.27: 誤差の重みを反映したフィット（青いライン）と測定点の差。本実験の測定点は外している。

フィットが測定点とどれだけ合っているかの指標として、χ^2/NDF を見ると、誤差の重みを反映したフィット（図 4.24）は、$\chi^2/NDF = 1.7$ であったので、図 4.24 のフィットの精度は良いと言える。また、本実験の測定点を外して、各測定点に誤差の重みを反映したフィットをした時、$\chi^2/NDF = 1.5$ となったので、本実験の測定結果は他の測定結果と矛盾していないと考えられる。

本実験の測定結果はその他の実験の測定結果と矛盾していない事から、本実験で測定したテストベンチのエネルギー分解能は PHOS のエネルギー分解能を示していると言える。よって、本実験結果よりテストベンチは PHOS と同等の性能を有すると言える。

次のセクションでは、この得られたエネルギー分解能の結果を理解するための考察を行う。

4.5 エネルギー分解能の考察

4.3.3 節では最終結果としてのエネルギー分解能を求めた。ここでは得られたエネルギー分解能がどのような因子で構成されるかエネルギー分解能の式を用いて理解する。まず、エネルギー分解能の式を説明する。以下の式にパラメータを入れることでカロリメータのエネルギー分解能を求めることが出来る。

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\frac{a^2}{E^2} + \frac{b^2}{E} + c^2} \tag{4.2}$$

式 4.2 の Noise term “a” は低エネルギー領域で支配的であり、電気的なノイズによるものである。Stochastic term “b” は中から高エネルギー領域で支配的であり、カロリメータの分解能の特性に従う。Constant term “c” は全てのエネルギーにおいて制限され、カロリメータのクオリティや検出損失によって与えられる。

ここでは、このエネルギー分解能の式より、測定されたエネルギー分解能を説明する。つまり、a、b、c の値を測定の条件より与えて式 4.2 を計算する事で測定されたエネルギー分解能を導出する。

a の項については、本実験におけるペデスタル RUN より求める事が出来る。ペデスタル RUN とは電子線を入射していない時のデータの事である。ペデスタル RUN を解析すれば電子線に由来しないカロリメータに乗るノイズだけを見る事が出来る。

4.5.1 エネルギー分解能の式の各項

Noise term “a”（ペデスタル RUN の解析）

ペデスタル RUN の解析には Sampling ADC への Gamma-2 関数のフィットした後、そのパラメータ 0 をエネルギーとして、足し合わせ解析手法により解析した。閾値をかけずにフィットのパラメータの制限を入れて解析した。電子線を入射させたエネルギー分解能の測定結果と同じ条件にするため、ペデスタル RUN でも足し合わせ解析手法を用いて解析した。ただし、最もエネルギーを落とした時という条件はペデスタル RUN の場合意味がないので、テストベンチ ID_10_13 のみに着目し、全てのイベントにおいて 9 本の結晶の足し合わせを行った。ペデスタル RUN の解析結果は図 4.28 のようになった。

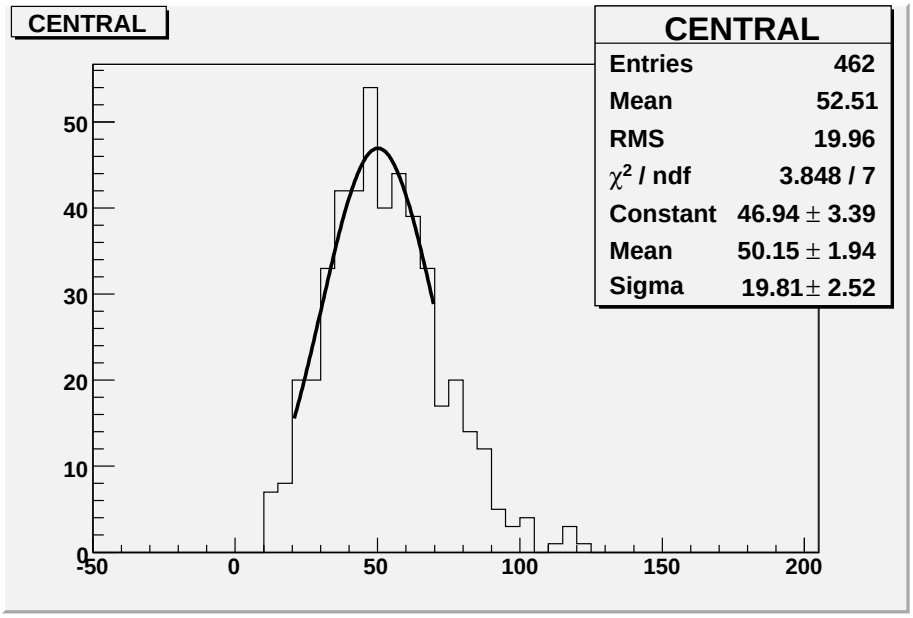

Figure 4.28: ペデスタル RUN のエネルギースペクトル　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

この図 4.28 のエネルギーピークの σ は電子線に依存しない、テストベンチのノイズのみを示す値である。よって、この $\sigma = 19.8$[MeV] が式 4.2 の Noise term "a'' の値に対応する。

ここでは閾値をかけない場合の解析を行った。閾値をかけると、足し合わせるチャンネルの数を見積もる必要がある。今回の考察では閾値をかける場合の解析は行わない。

補足：ペデスタル RUN の解析

このセクションではペデスタル RUN の解析を電子線 RUN と比較するために足し合わせ解析手法を用いたが、ここでは 9 本分のペデスタルの揺らぎを求めるもう一つの解析方法を説明する。

Sampling ADC には 1 イベント 70sample のデータポイントが存在する。この 70sample の中での揺らぎを見ようとするならば、70sample の RMS を求めるのが良い。現在、エネルギー分解能を求める解析において用いている 9 本の結晶についてそれぞれ RMS を求めた。その結果を表 4.10 にまとめる。

Table 4.10: 70sample の RMS の 165 イベント分の平均（エネルギー分解能を求める解析に用いている 9 本の結晶）

テストベンチＩＤ	RMS[MeV]
14_13	4.5
15_13	4.7
15_12	4.1
9_13	5.4
10_13	5.1
11_13	5.1
1_13	6.7
0_13	5.0
3_12	4.4

この結果より、9 本の結晶の RMS の二乗和を計算する。その値は 15.2MeV となった。この値が電子線を入射していない時の 9 本分の結晶の足し合わせの揺らぎに相当する。本実験のエネルギー分解能を求める解析では、足し合わせの解析手法を用いているため、ペデスタルの揺らぎを求めるのに今回はこの解析方法は妥当ではない。

Stochastic term “b”（APD の増倍率の見直し）

本実験は低エネルギーでの実験なので、b の項には依存しないと思われるので、b の項には今までの他のエネルギー分解能測定実験より得られた値を用いるべきである。しかし、APD の増倍率によっては b の値が変わる。増倍率が予想される倍率（50 倍）ならば $b = 0.033$ であるが、本実験での APD の増倍率は実は 50 倍ではないと思われる。

REFER 実験中に用いた Conversion Factor は 4 に揃えるように印加電圧を変えた。3.2.3 節では、APD の増倍率を揃える為に印加電圧を変えたと述べたが、Conversion Factor を 4 に揃える前は Conversion Factor が 5 倍以上も違うチャンネルもあった。増倍率の特性曲線を用いて -25 ℃で APD の増倍率が 50 倍となるように設定したはずだが、Conversion Factor が 5 倍以上も違うと言う事は、APD の増倍率のばらつきだけでは説明できない。この Conversion Factor のばらつきの原因として、PWO 結晶の発光量、APD の受光面に問題があるのではないかと思われる。本実験で使用した PWO 結晶には個体差があり、表面が均一ではない結晶もあった。また APD と PWO 結晶の接続面に空気が入っているものもある。このような原因で Conversion Factor に 5 倍以上の差が生じてしまったのではないかと思われる。

そうすると、実は APD の印加電圧を変える前に APD の増倍率は 50 倍で揃っている事になる。Conversion Factor は 4 に揃えるように印加電圧を変えた事による APD の増倍率は表 4.8 を見れば分かる。エネルギー分解能を求め

ている 9 つのチャンネルに着目すると APD の増倍率は平均すると 115 倍となっている。

ここで b の値を求める。b は以下の式によって与えられる。

$$b = 0.033 \times \sqrt{\frac{N_{gain}}{50}} \times \sqrt{\frac{A_{fano}}{2.0}} \tag{4.3}$$

N_{gain} は APD の増倍率である。A_{fano} は Fano Factor と呼ばれる量である。式 4.3 の第 2 項は結晶に入る光子数のふらつきの変化率である。第 3 項は Fano Factor の変化率である。Fano Factor とは APD の増倍率に起因する量であり、参考文献 [15] によると、APD の増倍率が 115 倍であると A_{fano} は約 2.4 となる。式 4.3 に値を入れて計算すると、$b = 0.055$ となった。

Constant term “c”（Conversion Factor の系統誤差）

4.4.3 節で Conversion Factor の解析による系統誤差を見積もった。この系統誤差が式 4.2 の c の項に入る。c に含まれる系統誤差は、エネルギー分解能の最終結果に含ませた誤差と同じ、REFER 実験中後の Conversion Factor の時間依存性によるもの、及び ConversionFactor を求める解析手法の違いによるものの 2 種類である。

時間依存性による誤差を $c_1 = 0.055$、解析手法の違いによる誤差を $c_2 = 0.045$ とする。

4.5.2 エネルギー分解能の導出

ここでは、今まで求めた a、b、c の値を使ってエネルギー分解能を求める。a とはペデスタル RUN で求めた $\sigma = 19.8[MeV]$ である。b は今まで測定されたエネルギー分解能から予測される値と APD の増倍率により予想される値より $b = 0.055$ である。c は 2 種類あり、Conversion Factor の時間依存性よる誤差 $c_1 = 0.055$ と、Conversion Factor の解析方法の違いによる誤差 $c_2 = 0.045$ がある。a、b、c の値を式 4.2 に代入すると、

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\frac{0.020^2}{0.141^2} + \frac{0.055^2}{0.146} + 0.055^2 + +0.045^2} \tag{4.4}$$

となる。第 1 項のエネルギー E は、閾値をかけずに解析しているエネルギー分解能と比べたいので、測定されたエネルギー 0.141[GeV] を用いた。第 2 項のエネルギー E は、入射する光子のエネルギー予想値 0.146[GeV] を用いた。以下に計算結果を示す。

$$\frac{\sigma}{E} = 0.214 \tag{4.5}$$

つまり、今分かっている寄与だけで説明すると、閾値をかけずに解析したエネルギー分解能は21.4%となるはずである。ペデスタルのfittingによる誤差を伝播させると、21.4±0.4[%]となった。

実測されたエネルギー分解能は、表4.9より閾値をかけないもので22.6±1.8[%]となっている。よって、閾値をかけないエネルギー分解能は、エネルギー分解能の式で計算された値と誤差の範囲内で一致する。つまり、測定されたエネルギー分解能はこのセクションで考慮したエネルギー分解能に影響する寄与により説明できるという事である。

閾値をかけた場合のエネルギー分解能についても、同様に議論しなければならないが、cの項に閾値をかけた事による効果を入れなければならない。この効果を見積もろうとするとシミュレーションが必要である。本論文では時間が足りないために閾値をかけた場合のエネルギー分解能については議論できなかった。

補足として、本実験のエネルギー分解能の測定におけるStochastic term bの値は、今までの他のエネルギー領域におけるエネルギー分解能の測定のbの値と違う。これにより、本実験のエネルギー分解能の結果は図4.24の他のエネルギーにおける結果と厳密には比べることは出来ない。しかし、ここでは参考のために本実験結果を今までの測定点に組み込んだ。

4.6 その他の測定

このセクションではREFERでの実験において、−25 ℃でのエネルギー分解能測定実験に付随して行った実験について述べる。

4.6.1 エネルギー分解能の温度依存性

エネルギー分解能の測定はPHOS実機が運転する温度 −25 ℃と共に温度を−15 ℃と 0 ℃に変えたエネルギー分解能も測定した。ここでは −15 ℃と 0 ℃での宇宙線測定結果とエネルギー分解能測定結果について述べる。

−15 ℃と 0 ℃でのエネルギー分解能測定実験では、APDには温度変化に対して増倍率は一定となるような電圧を印加させた。つまり、温度変化に対してはPWO結晶の発光量の温度依存性が見えるはずである。

まずは、$ADCch$をエネルギーに変換するためのConversion Factor[MeV]を求めた −15 ℃と 0 ℃での宇宙線測定の結果をそれぞれ図4.29と図4.30示す。

図4.29と図4.30の宇宙線スペクトルのエネルギーピーク値を用いて、各温度におけるConversion Factorを求めた。解析手法はどちらとも足し合わせ解析手法を用いた。その結果を表4.11と表4.12にまとめた。

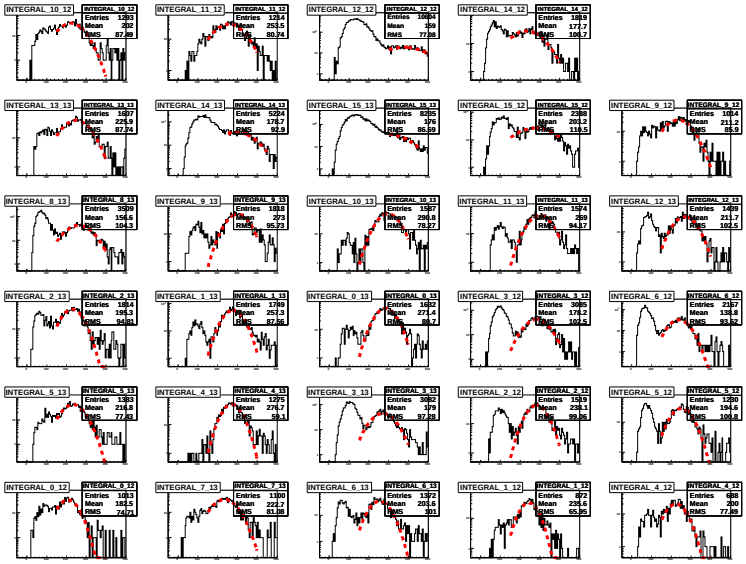

Figure 4.29: −15 ℃での宇宙線測定結果　縦軸：対数表示のカウント　横軸：エネルギー [MeV]

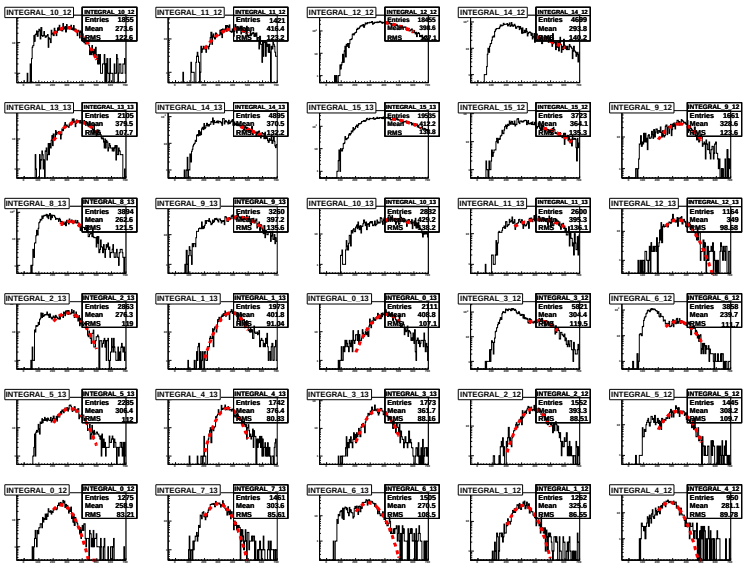

Figure 4.30: 0 ℃での宇宙線測定結果　縦軸：対数表示のカウント　横軸：エネルギー [MeV]

Table 4.11: 宇宙線データ解析によって求めた −15 ℃での CF = Conversion Factor

No	Testbench ID	CF[MeV/ch]	No	Testbench ID	CF[MeV/ch]
1	0_13	4.0	16	8_13	5.7
2	1_13	5.4	17	9_13	4.3
3	2_13	3.7	18	10_13	3.4
4	3_13	5.8	19	11_13	4.9
5	4_13	3.6	20	12_13	4.7
6	5_13	3.8	21	13_13	4.6
7	6_13	3.7	22	14_13	7.0
8	7_13	4.3	23	15_13	6.9
9	0_12	4.8	24	15_12	6.9
10	1_12	4.5	25	9_12	4.3
11	2_12	4.5	26	10_12	3.7
12	3_12	5.2	27	11_12	4.2
13	4_12	4.8	28	12_12	6.2
14	5_12	5.7	29	14_12	6.3
15	6_12	5.2			

Table 4.12: 宇宙線データ解析によって求めた 0 ℃での CF = Conversion Factor

No	Testbench ID	CF[MeV/ch]	No	Testbench ID	CF[MeV/ch]
1	0_13	3.6	16	8_13	5.3
2	1_13	6.5	17	9_13	8.1
3	2_13	4.4	18	10_13	6.7
4	3_13	6.6	19	11_13	9.4
5	4_13	4.6	20	12_13	4.4
6	5_13	5.1	21	13_13	6.4
7	6_13	4.0	22	14_13	10.8
8	7_13	5.9	23	15_13	14.7
9	0_12	7.8	24	15_12	13.4
10	1_12	7.0	25	9_12	5.2
11	2_12	5.8	26	10_12	3.4
12	3_12	6.5	27	11_12	4.9
13	4_12	7.9	28	12_12	14.7
14	5_12	7.0	29	14_12	8.8
15	6_12	7.0			

図 4.29 と図 4.30 を見て分かるように、宇宙線のピークは −25 ℃に比べると分かりにくくなっている。特に 0 ℃は宇宙線のピークがはっきりしないチャンネルが多い。

表 4.11 と表 4.12 の Conversion Factor より電子線のエネルギーを求めた。その結果を −15 ℃と 0 ℃それぞれ図 4.31 と図 4.33 に載せる。また、テストベンチ ID10_13 のみを拡大して Gaus 関数でフィットしたものを −15 ℃と 0 ℃それぞれ図 4.32 と図 4.34 に載せる。測定されるエネルギーに対して閾値をかけずに解析を行った。

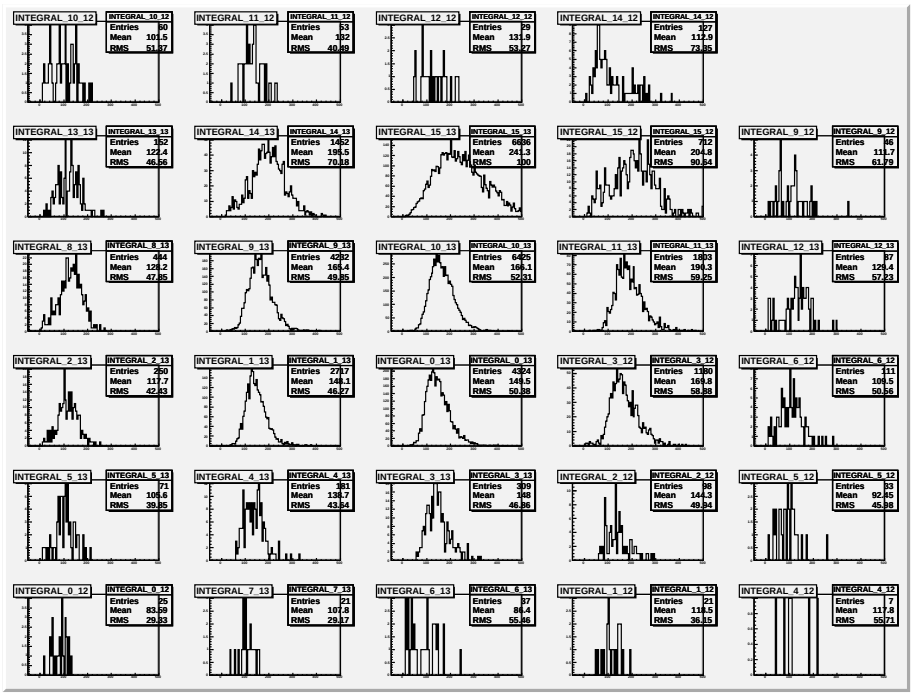

Figure 4.31: −15 ℃での全チャンネルのエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

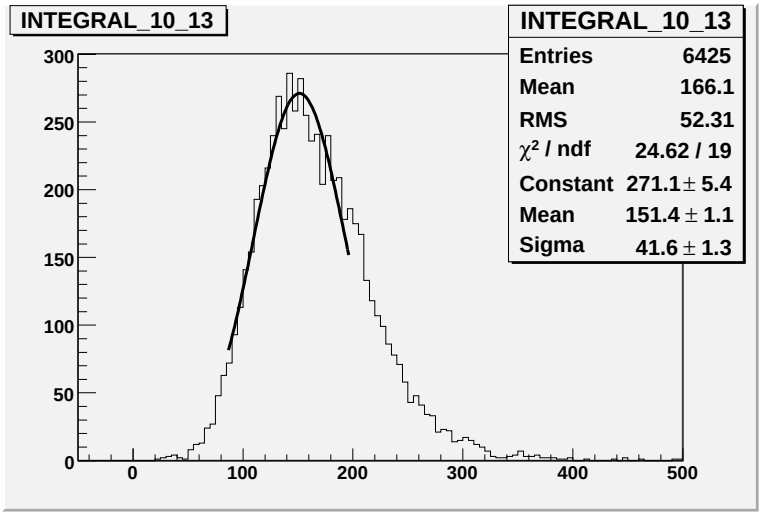

Figure 4.32: −15 ℃での ID10_13 のエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

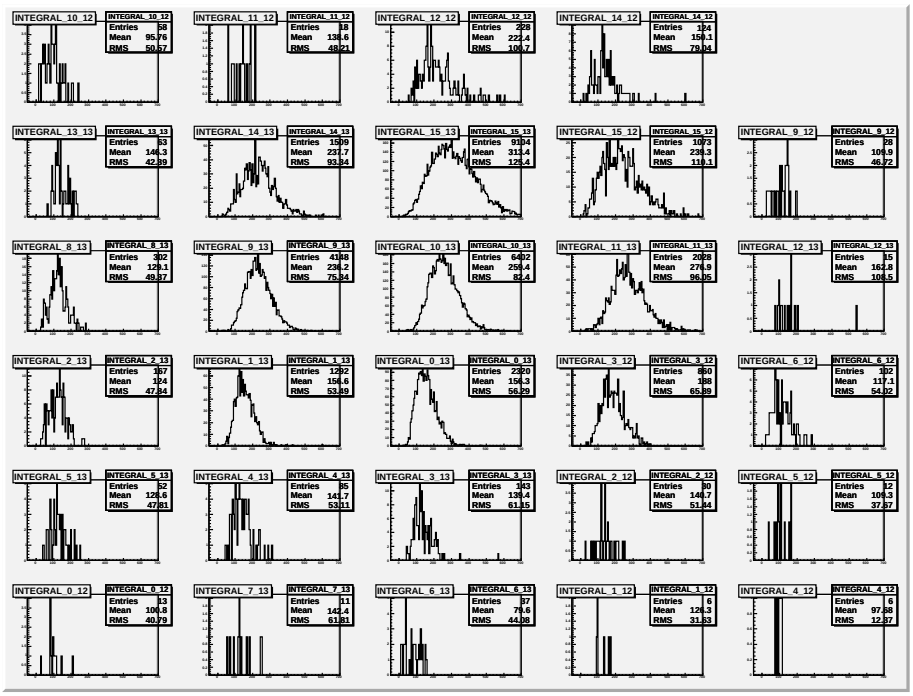

Figure 4.33: 0 ℃での全チャンネルのエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

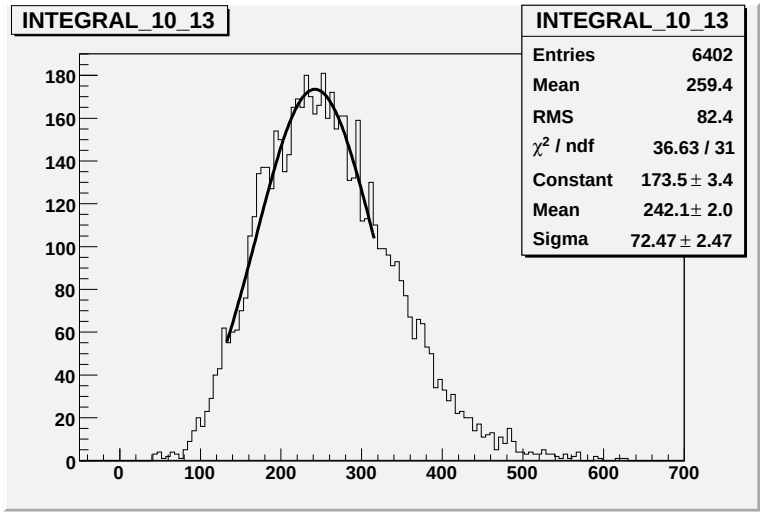

Figure 4.34: 0 ℃での ID10_13 のエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

図 4.32 と図 4.34 より、−15 ℃と 0 ℃のエネルギー分解能を以下の表 4.13 にまとめる。

Table 4.13: 各温度のエネルギー分解能

温度	Energy Resolution[%]
−15 ℃	27.5 ±1.1
0 ℃	29.9 ±1.3

表 4.13 の結果に −25 ℃でのエネルギー分解能を合わせてグラフにプロットしたのが図 4.35 である。縦軸がエネルギー分解能 [%]、横軸が温度 [℃] である。

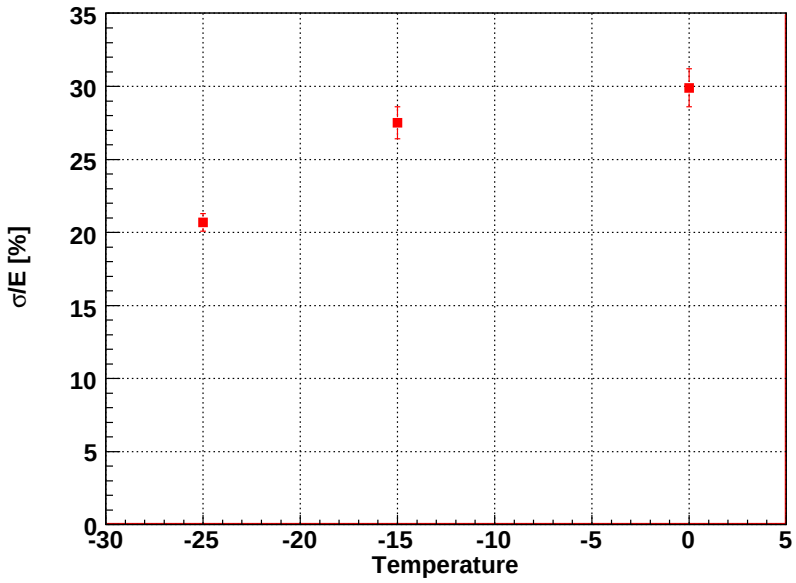

Figure 4.35: エネルギー分解能の温度依存性　縦軸：エネルギー分解能 [%] 横軸：温度 [℃]

図 4.35 の誤差はフィットの誤差をエネルギー分解能に伝播させた。しかし、Conversion Factor を求める際に、宇宙線のピーク値が正確に求められていない。よって、解析における系統誤差がまだ含まれるが、図 4.35 のプロットには載せていない。エネルギー分解能の温度依存性の議論をするならば、−15 ℃と 0 ℃における Conversion Factor をもっと精度よく求める必要がある。

4.6.2 エネルギー分解能の APD 増倍率依存性

エネルギー分解能の測定はシグナルとノイズの比（S/N）が一番大きくなると言われる APD の増倍率が 50 倍の印加電圧で行うと共に、APD の増倍率が 100 倍、150 倍、200 倍となる印加電圧でもエネルギー分解能の測定を行った。

増倍率が 100 倍、150 倍、200 倍となる印加電圧は APD の増倍率特性曲線より求めたが、実際にその増倍率となっているかは分からない。よって、宇宙線測定により各印加電圧において PWO 結晶の発光量も含む Conversion Factor を求めた。ただし、増倍率が 200 倍となる電圧を APD に印加すると、ほとんどの APD が Saturate（飽和）し、正確なエネルギーが取り出せなくなった。よって、宇宙線測定は APD の増倍率が 100 倍、150 倍のデータのみ載せる。

増倍率が 100 倍と 150 倍の宇宙線測定結果をそれぞれ図 4.36 と図 4.37 に載せる。この結果よりそれぞれの印加電圧での Conversion Factor を求めた。その Conversion Factor を表 4.14 と表 4.15 にまとめた。

また、ここでは増倍率が 100 倍、150 倍と書いたが、4.4.3 節で述べたように増倍率が 50 倍と思っているのが実際には違っていると思われる。よって、100 倍、150 倍というのも実際には正しくないと思われる。この先、注目するチャンネルはテストベンチ ID0_13 である。表 4.8 よりテストベンチ ID0_13 の APD の増倍率は増倍率 50 倍のつもりでも、実際には増倍率 120 倍である。そして、増倍率 100 倍、150 倍はテストベンチ ID0_13 の場合、それぞれ 240 倍、360 倍となっているはずである。この先、増倍率 100 倍、150 倍については 240 倍、360 倍と書くことにする。断っておくと、120 倍となるのはテストベンチ ID0_13 のみである。全てのチャンネルに対して適用できるわけではない。

増倍率 360 倍ではテストベンチ ID6_13 の APD は Satulate してしまっているので、足し合わせ解析手法の際には除外させて考えた。エネルギー分解能の解析ではこのチャンネルは使用しない。

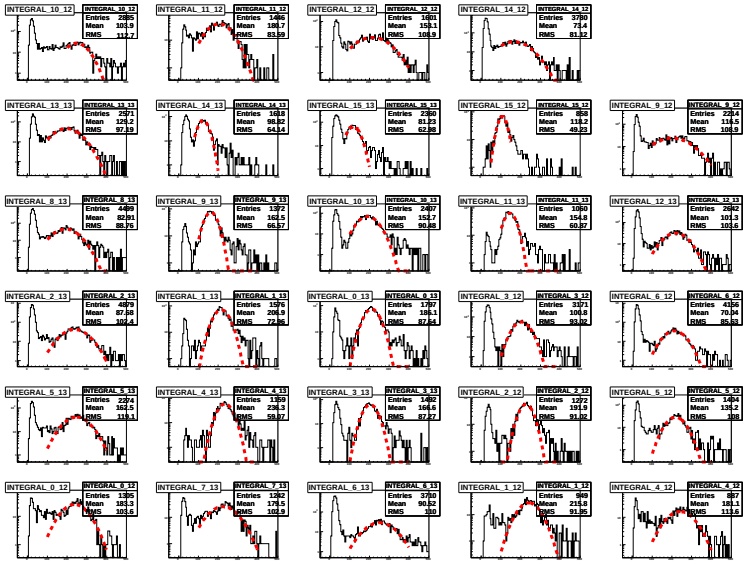

Figure 4.36: APD 増倍率 240 倍での宇宙線測定結果　縦軸：対数表示のカウント　横軸：エネルギー [MeV]

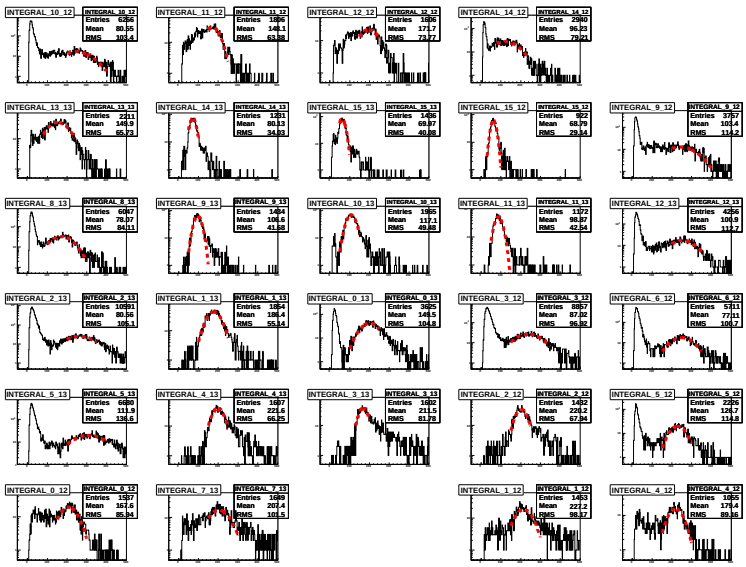

Figure 4.37: APD 増倍率 360 倍での宇宙線測定結果　縦軸：対数表示のカウント　横軸：エネルギー [MeV]

Table 4.14: 宇宙線データ解析によって求めたでの APD 増倍率 240 倍の CF = Conversion Factor

No	Testbench ID	CF[MeV/ch]	No	Testbench ID	CF[MeV/ch]
1	0_13	1.5	16	8_13	2.2
2	1_13	2.1	17	9_13	2.1
3	2_13	1.4	18	10_13	1.6
4	3_13	2.1	19	11_13	2.4
5	4_13	1.5	20	12_13	1.7
6	5_13	1.3	21	13_13	2.0
7	6_13	1.3	22	14_13	3.2
8	7_13	1.7	23	15_13	2.1
9	0_12	1.8	24	15_12	3.0
10	1_12	1.7	25	9_12	1.9
11	2_12	1.8	26	10_12	1.4
12	3_12	1.9	27	11_12	2.0
13	4_12	1.9	28	12_12	2.0
14	5_12	2.0	29	14_12	3.2
15	6_12	2.0			

Table 4.15: 宇宙線データ解析によって求めた APD 増倍率 360 倍の CF = Conversion Factor

No	Testbench ID	CF[MeV/ch]	No	Testbench ID	CF[MeV/ch]
1	0_13	0.8	16	8_13	1.3
2	1_13	1.4	17	9_13	1.9
3	2_13	0.7	18	10_13	1.5
4	3_13	1.3	19	11_13	2.1
5	4_13	0.9	20	12_13	0.8
6	5_13	0.6	21	13_13	1.4
7	6_13	0.9	22	14_13	3.0
8	7_13	1.0	23	15_13	2.1
9	0_12	1.1	24	15_12	2.8
10	1_12	1.0	25	9_12	0.8
11	2_12	1.1	26	10_12	0.7
12	3_12	0.9	27	11_12	1.3
13	4_12	1.1	28	12_12	1.2
14	5_12	1.0	29	14_12	2.3
15	6_12	0.9			

表 4.14 と表 4.15 の印加電圧は、Conversion Factor=4 の印加電圧からそれぞれ 2 倍と 3 倍になるように設定したはずである。よって、表 4.14 と表 4.15 の Conversion Factor は、Conversion Factor=4 の 1/2 倍、1/3 倍になるはずである。しかし、実際にはそうはなっていない。増倍率の補正のために用いた印加電圧の特性曲線の誤差が大きいためであると思われる。

そして、表 4.14 と表 4.15 の Conversion Factor よりそれぞれ電子線のエネルギーを求めた。増倍率が 240 倍と 360 倍の結果を以下に載せる。増倍率が 240 倍で閾値なしの解析を行ったものが、図 4.38 と図 4.39 である。閾値ありの解析を行ったものが図 4.40 と図 4.41 である。増倍率が 360 倍で閾値ありの解析を行ったものが図 4.42 と図 4.43 である。

ここでは増倍率が 360 倍で閾値なしの解析を行ったものを書いていない。まだ原因は分からないが、増倍率が 360 倍で閾値なしの足し合わせ解析手法を使うと、測定エネルギーのエントリー数が極端に少なくなった。よって、ここでは増倍率が 360 倍で閾値なしの解析を行った結果は無い。

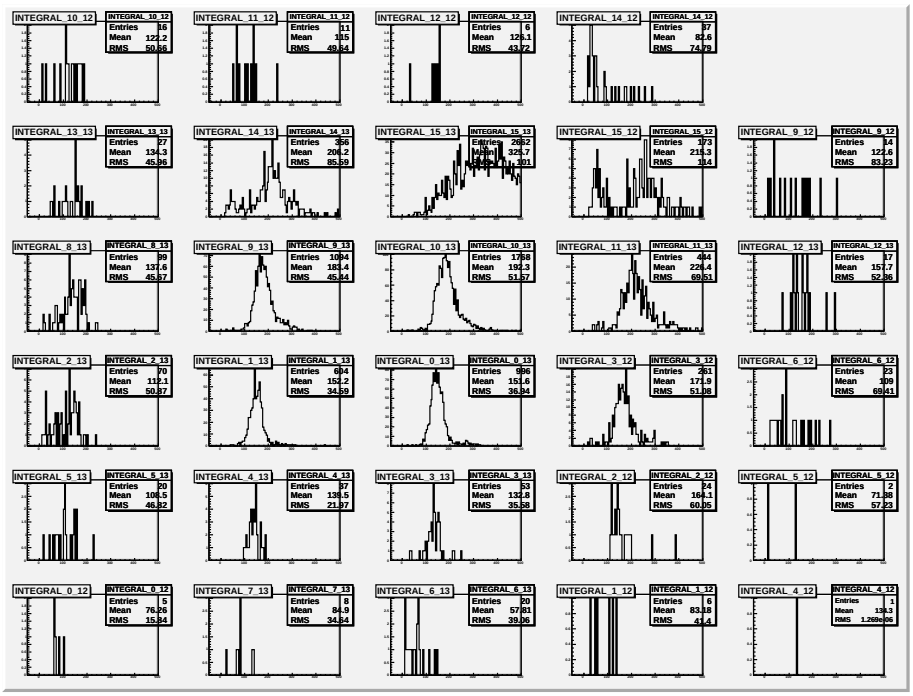

Figure 4.38: 増倍率 240 倍で閾値なしの解析を行った全チャンネルのエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

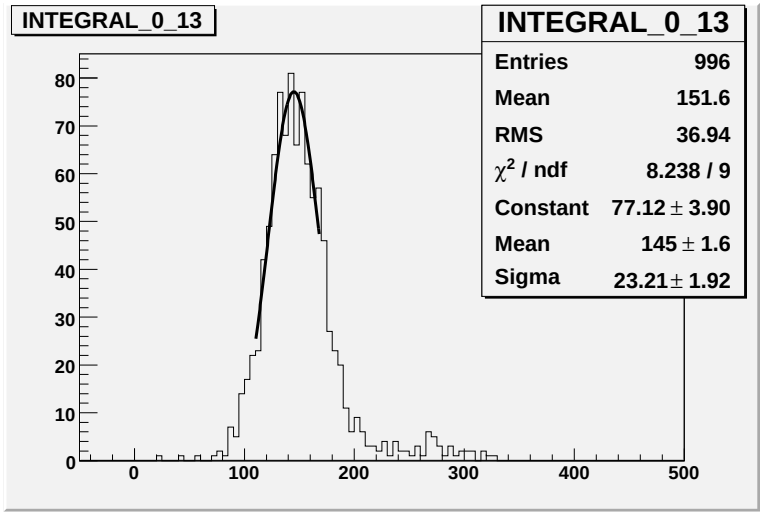

Figure 4.39: 増倍率 240 倍で閾値なしの解析を行った ID0_13 のエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

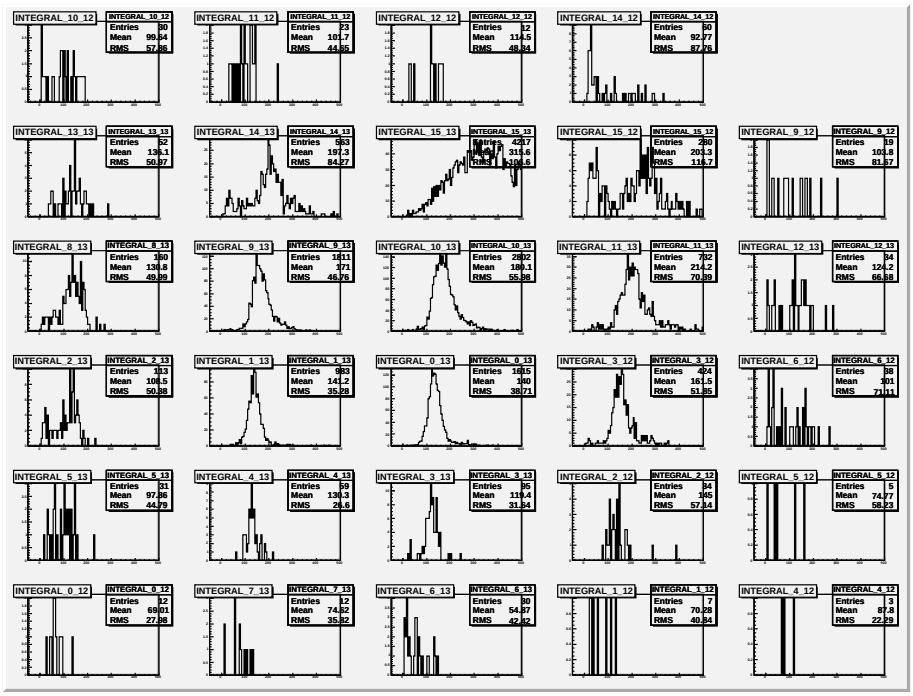

Figure 4.40: 増倍率 240 倍で閾値ありの解析を行った全チャンネルのエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

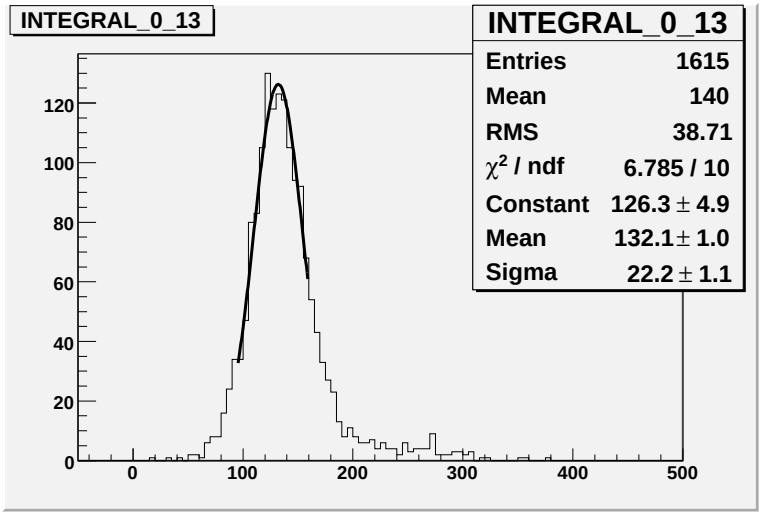

Figure 4.41: 増倍率 240 倍で閾値ありの解析を行った ID0_13 のエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

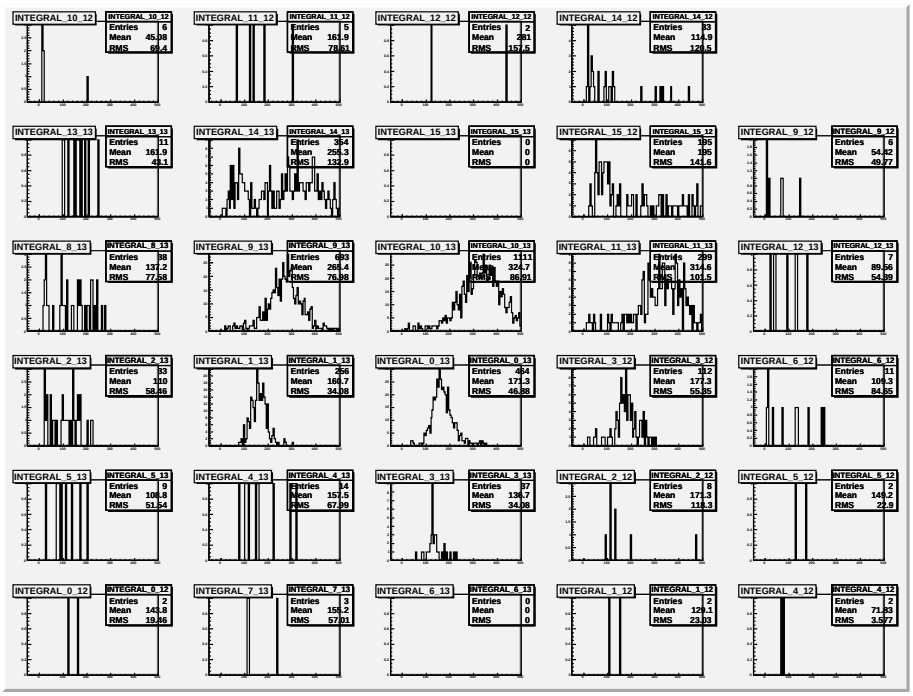

Figure 4.42: 増倍率 360 倍で閾値ありの解析を行った全チャンネルのエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

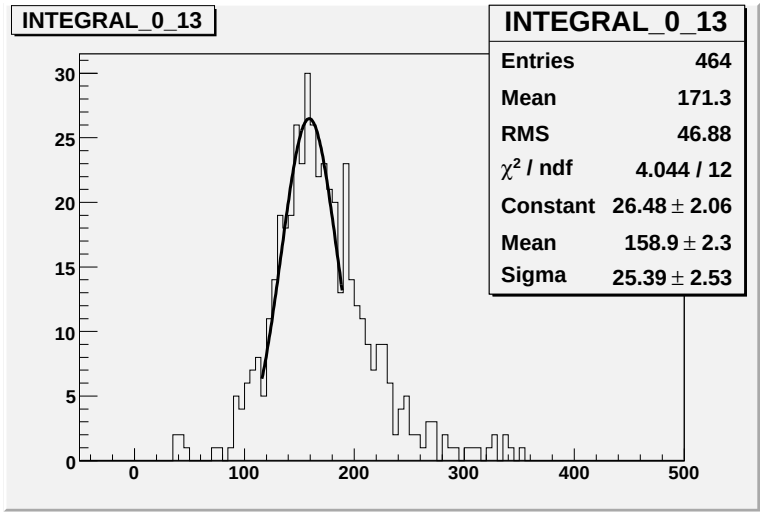

Figure 4.43: 増倍率 360 倍で閾値ありの解析を行った ID0_13 のエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

以上の結果より、エネルギー分解能を求め、以下の表 4.16 にまとめる。

Table 4.16: 各増倍率でのエネルギー分解能

増倍率	閾値	Energy Resolution[%]
120 倍	無し	20.6±0.9
120 倍	有り	19.6±0.6
240 倍	無し	16.0±1.5
240 倍	有り	16.8±1.0
360 倍	有り	16.0±1.8

表 4.16 の結果と −25 ℃での増倍率 120 倍のエネルギー分解能を比べようとすると、閾値ありでの解析結果を比べることになる。図 4.44 が増倍率 120 倍、240 倍、360 倍のエネルギー分解能をプロットしたグラフである。縦軸がエネルギー分解能 [%]、横軸が増倍率である。

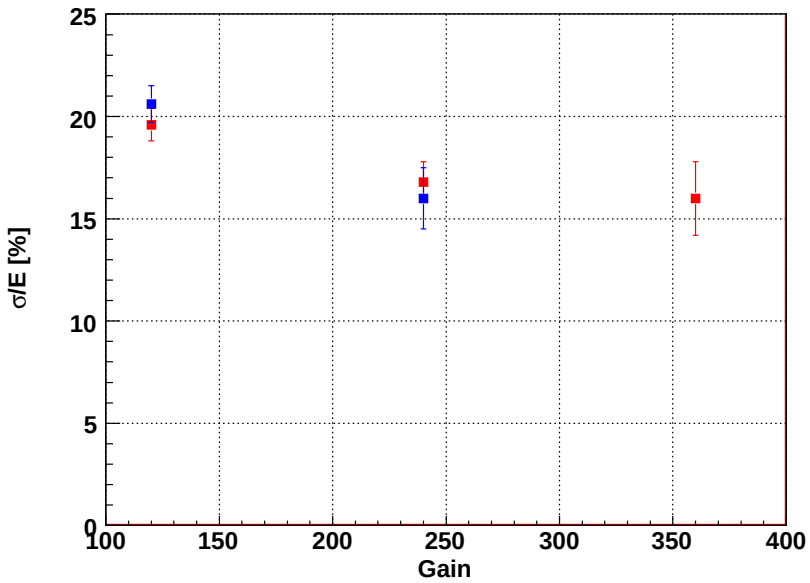

Figure 4.44: エネルギー分解能の APD 増倍率依存性　縦軸：エネルギー分解能 [%]　横軸：APD の増倍率　赤い点が閾値ありの解析結果。青い点が閾値なしの解析結果。

図 4.44 を見ると増倍率が上がるにつれ、エネルギー分解能が良くなっているのが分かる。

4.6.3 電子線の電磁シャワー深度測定

REFER でのエネルギー分解能測定実験において、一番最後に行った測定が電子線の PWO 結晶における電磁シャワー深度測定である。

電子が PWO 結晶で起こす電磁シャワーとは、2.3.2 節で説明したように電子の制動放射と光子の電子対生成によって引き起こされる。その深さは入射電子のエネルギーが分かっていれば計算できる。しかし、実際に電磁シャワーが PWO 結晶のどの程度の長さで止まるか誰も知らない。本実験が 150MeV という低エネルギー領域で初めて電子が PWO 結晶で起こす電磁シャワーの深度を測定した実験である。

セットアップ

本測定は、REFER 実験の中の一環として行った。よって、3.3.2 節のセットアップとほとんど変わっていない。しかし、図 3.21 のようなセットアップでは上記の測定を行うことが出来ない。そこで、本測定では図 3.21 の PWO 結晶を 90 °回転させた。エネルギー分解能測定実験からセットアップで変更したのはこれだけである。

PWO 結晶の側面から電子線を入射させると、図 4.45 のように電磁シャワーが結晶を跨って通る。PWO 結晶が 5 層に分かれているので、それぞれの層でどの程度エネルギーを落としたか分かるはずである。

PWO 結晶を回転させた後の冷凍庫内の写真を図 4.46 に載せる。また、回路系は図 3.28 と同じである。

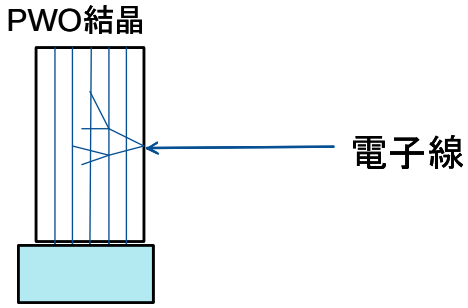

Figure 4.45: PWO 結晶における電磁シャワー概念図

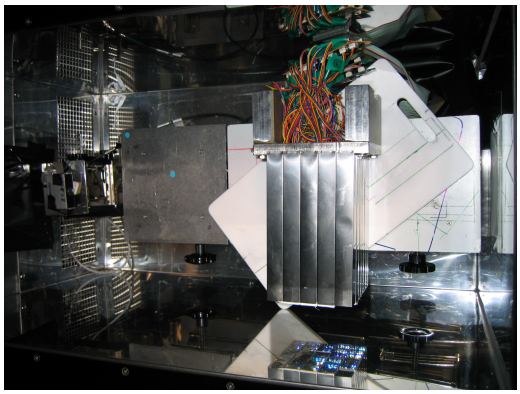

Figure 4.46: PWO 結晶 90 °回転後の冷凍庫内の写真

測定結果

続いて、電磁シャワー深度測定の結果を述べる。まず、29 本分の結晶のエネルギー分布を図 4.47 に載せる。縦軸は対数表示のカウント、横軸はエネルギー [MeV] である。閾値を入れずに解析を行った。

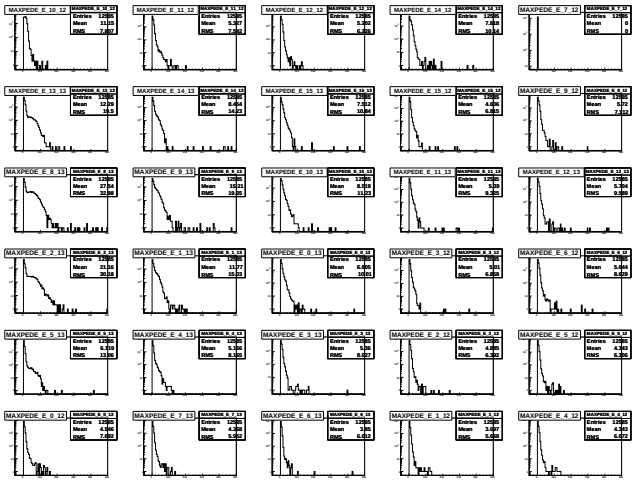

Figure 4.47: 電磁シャワー深度測定 29 チャンネルのエネルギー分布　縦軸：対数表示のカウント　横軸：エネルギー [MeV]

電子線が入射してくる方向は、図 4.47 の左側からである。図 4.47 を見ると、確かに左側のチャンネルに多くのエネルギーを落としていることが見て取れる。

この先の解析方法として、まず PWO 結晶 29 本を図 4.48 のように層 1~5 まで分ける。

layer1	layer2	layer3	layer4	layer5
10_12	11_12	12_12	14_12	
13_13	14_13	15_13	15_12	9_12
8_13	9_13	10_13	11_13	12_13
2_13	1_13	0_13	3_12	6_12
5_13	4_13	3_13	2_12	5_12
0_12	7_13	6_13	1_12	4_12

Figure 4.48: 29 本の PWO 結晶を層 1~5 まで分ける

その後、1 イベント中、各層で最もエネルギーを落とした結晶を 1 つ選び出す。そして、その結晶と隣り合う 2 本（もしくは 1 本）のエネルギーを足し合わせ、それを各層のエネルギーとする。

層 1~5 まで分けて、エネルギーを求めたヒストグラムが図 4.49 である。縦軸はカウント（スケールは各ヒストグラムで変えている）、横軸はエネルギー [MeV] である。図 4.49 を見ると、層 2~5 の 0 付近にピークが立っている。これはどこにもエネルギーを落とさなかったことを意味する。図 4.49 を見る限り、層 3 までは電磁シャワーが続いている事が分かる。また、層 4、5 では電磁シャワーのエネルギーをほとんど落としていない事が分かる。ここで、層 1~3 について各層に落としたエネルギーの割合を表 4.17 にまとめた。

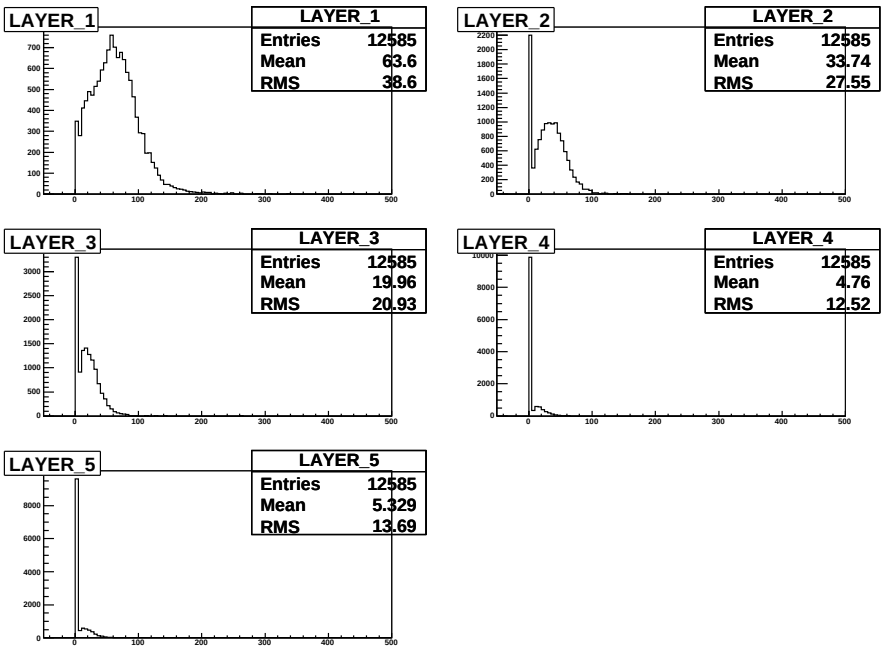

Figure 4.49: 層 1~5 まで分けたエネルギー分布　縦軸：カウント　横軸：エネルギー [MeV]

Table 4.17: 各層に落としたエネルギーの割合

層	落としたエネルギーの割合 [%]
1	54.2
2	28.8
3	17.0

表 4.17 に書かれている事を言い換えると、電子は PWO 結晶に入射し電磁シャワーを起こし、PWO 結晶表面からの深さが 2.2cm の所まででエネルギーの約 50% を落とす。深さが 4.4cm の所まででエネルギーの約 80% を落とす。そして、深さが 6.6cm の所までで電磁シャワーのほぼ全てのエネルギーを落とすという事である。

そして、電子が PWO 結晶のどの辺りでどの程度エネルギーを落とすかは計算で求める事ができるので、その計算により本測定結果を説明する事が出来るかを今後の考察として挙げておく。

Chapter 5

結論

本研究では、PHOS 性能評価機を広島の実験室内に構築し、その性能評価のために電子線測定実験を行った。その結果として、PHOS 性能評価機の 150MeV でのエネルギー分解能を与える事ができた。そして、その測定結果より PHOS 性能評価機は PHOS 実機と同等の性能を有する事が分かった。つまり性能評価機は PHOS 再現機と言う事ができる。

また、本実験で初めて PHOS の低エネルギー領域におけるエネルギー分解能を与えることが出来た。図 5.1 に、本実験の測定結果を他のエネルギー領域での PHOS のエネルギー分解能測定結果に加えたプロットを載せる。図 5.1 を見て分かるように、本実験の測定結果により PHOS のエネルギー分解能に重要な一点を与える事が出来たと言えるだろう。

本実験では、エネルギー分解能の温度依存性、APD 増倍率依存性を求める事ができた。また、電子が PWO 結晶で起こす電磁シャワーの深度も測定する事ができた。これらもまた PHOS の重要なデータである。

そして、本実験により PHOS 再現機は PHOS と同等の性能を持つ事が分かったので、再現機を用いて今後 PHOS のデバッグ作業や研究開発を行うことが出来るだろう。現在、PHOS の研究として、この再現機のデータを用いての PHOS の時間分解能の解析が行われている。今後、再現機による PHOS の更なる理解、そして PHOS の新たなる開発研究が期待される。

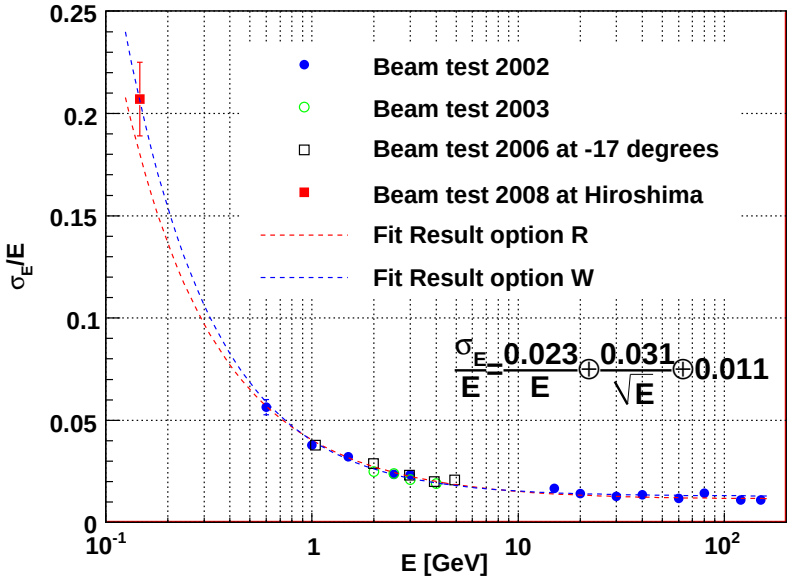

Figure 5.1: 各エネルギー領域でのエネルギー分解能（本実験の測定結果を加えた。）：閾値あり　赤い点線：測定点の誤差を加味したフィット。　青い点線：測定点の誤差を無視したフィット。

Chapter 6

謝辞

本論文を執筆するに当たり、多くの方のご支援、ご協力を頂きました。杉立先生には研究室に入ってから今に至るまで研究における様々な面でのご指導いただきました。杉立先生に研究の出来る環境を頂けなければ、本研究は有り得ませんでした。このような素晴らしい研究の出来る環境を頂けた事に本当に感謝します。

研究室のスタッフである志垣先生、本間先生、鳥井さん、洞口さんには研究のご指導や援助をいただき、本当に有難うございました。特に鳥井さんには並々ならぬご協力、及びご指導を頂きました。志垣先生、本間先生にはミーティングなどで数々のご助言を頂きました。洞口さんには空いた時間を頂いては研究について様々な事を教わりました。このような素晴らしいスタッフの方々に恵まれ、自身が成長出来たと実感しております。そして、スタッフの方々には本当に感謝しております。

研究室の先輩方、同輩後輩の皆様にもお世話になりました。特に共同実験者である坂君には大変お世話になりました。様々な面で手助けしていただき有難うございます。そして、テストベンチの構築から一緒に実験をしてきた溝口君、岡田君にもお世話になりました。溝口君には実験において多くの助言をしていただき、本当に感謝しております。そして、忙しい中でも REFER 実験を手伝っていただいた皆様、本当に有難うございます。皆様のご協力がなければこの実験も論文も成し得なかったことでしょう。研究室の皆様方には感謝してもし切れない思いであります。皆様、3 年という短い間でしたが、本当に有難うございました。

また、REFER 施設の使用許可を出して頂いた高エネルギー物理学研究室の高橋先生、及び REFER 施設でお世話になった飯沼先生、後藤さん、セルゲイさんにも感謝致します。そして、テストベンチの器具の一部の製作をして頂いた金属加工室の石飛さんにも感謝致します。その他、多くの方のご支援、ご協力があったからこそ本研究を行なうことが出来ました。皆様、本当に有難うございました。

最後になりましたが、私の大学生活 6 年間を支えてくれた両親に深く感謝

を申し上げます。

付録 A

A.1 モジュールについての解説

回路図中に載せたモジュールについて簡単に解説する。

- ***Discriminator***
  アナログシグナルが Discriminator に入力されると、ある電圧の閾値を超えいると NIM シグナルを出力する。閾値と NIM シグナルの幅は調節できる。出力する NIM シグナルの幅は 4∼150ns の範囲で設定する事ができる。本実験では NIM シグナルの幅は 100ns とした。また、入力シグナルに対する閾値電圧は-25mV∼-1V の範囲で設定できる。出力される NIM シグナルの電圧は-800mV である。

- ***GateGenerator***
  NIM シグナルが Gate Generator に入力されると、遅延時間と幅を持ったシグナルを出力する。遅延時間と幅は調節できる。出力されるシグナルの幅は数十 ns 程度調節できる。

- ***Coincidence***
  NIM シグナルの同期を取る事のできるモジュールである。複数の入力端子に同期したシグナルが入力されると NIM シグナルを出力する。また、Veto 入力端子を持っており、反転シグナルの同期を取る事もできる。

- ***Scaler***
  入力された NIM シグナルをカウントするモジュールである。一般的にはカウントを表示するようになっている。

- ***ClockGenerator***
  決まった周波数の NIM シグナルを出力させるモジュールである。本実験で用いた Clock Generator は周波数を 1Hz∼10MHz まで調節できる。

- ***FuctionGenerator***
  様々な波形を出力させる装置である。本実験では、LED に入力するパルス、トリガーとして Coincidence に入力する DC シグナルを作った。また、外部からシグナルを入力する事でそのシグナルの周期と同期した波形を出力できる。本実験では Clock Generator の周期と同期させて使用した。

参考文献

[1] KEK ホームページ (URL: “http://www.kek.jp/kids”)

[2] 原康夫 著　　『素粒子物理学』　裳華房

[3] 永江知文・永宮正治 著　　『素粒子物理学』　裳華房

[4] CERN ホームページ
（URL: “http://ts-dep.web.cern.ch/ts-dep/groups/lea/int/workshopst”）

[5] ALICE ホームページ
（URL: “http://aliceinfo.cern.ch/export/pics/ALICE_Global_Layout_images”）

[6] Hans Muller, Zhongbao Yin for PHOS Collaboration
『PHOS User Manual』

[7] 杉立徹　研究成果報告書
『LHC-ALICE 実験 PWO 結晶 電磁カロリメータ読み出し系の開発』

[8] B. Skaali, Department of Physics, University of Oslo, POB 1048 Blindern, 0316 Oslo, Norway
『Photodiode read-out of the ALICE Photon Spectrometer PbWO4 crystals』

[9] 成田拓人　2005 年度卒業論文
『鉛タングステン酸結晶の蛍光温度特性』

[10] 丸山悠　2006 年度卒業論文
『アバランシェ・フォトダイオードの低温領域における特性』

[11] Journal of Physics G
Nuclear and Particle Particle Physics

[12] 浜松ホトニクス　APD 検査成績表

[13] 中馬文広　2007 年度卒業論文
『ALICE 実験 PHOS 検出器の宇宙線を用いたエネルギー較正』

[14] 溝口謙太　2006 年度卒業論文
『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』

[15] Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen-PSI, Switzerland
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 453 (2000) 223 226

[16] REFER User's Group ホームページ
（URL: "http://photon.adsm.hiroshima-u.ac.jp/lab/vbl/refer1.htm"）