

平成 20 年度卒業論文

REFER 電子線を用いた ALICE 実験用
光子検出器の時間分解能測定

B054116 坂雅幸

広島大学理学部物理科学科
クォーク物理学研究室

主査 杉立徹 教授
副査 岡本宏巳 教授
指導教官 杉立徹 教授

平成 21 年 2 月 21 日

遠い、祖父に捧げる

概要

2008年9月、欧州原子核研究機構(CERN)において、Large Hadron Collider(LHC)加速器が稼働した。LHCで複数計画されている実験の中、ALICE実験は唯一クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)の探究に焦点を置いた実験である。ALICE実験が備える高性能光子検出器(PHOS)は、QGP相から熱輻射で発生する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おいて、世界最高レベルの精度を誇る。高エネルギー粒子同士の衝突により生成された物質から放射される粒子は、質量の違いによって検出器までの飛行時間が異なる。PHOSでは飛行時間の違いを光子と他の粒子の識別の主要手段とするため、良い時間分解能を必要とする。

本研究では、広島大学に構築したPHOSの性能評価機に広島大学超高速電子周回装置の150MeV電子線を入射して、性能評価実験を行った。入射した電子線が隣り合う2つの検出素子にほぼ均等にエネルギー損失を起こす事象を選別し、その事象に対して記録された出力波形情報から双方の時間分解能を求めた。その結果を踏まえて、PHOS実機の実事象に対する時間分解能の導出方法についても議論する。

目次

1	導入	10
1.1	世界を構成しているもの	10
1.2	高エネルギー加速器実験	12
1.3	実験背景	13
2	実験	15
2.1	PHOS 性能評価機の構築	15
2.2	ミュオン測定	23
2.3	REFER 実験	26
3	解析	30
3.1	conversion factor の決定	31
3.2	事象の選択	38
3.3	時間分解能	41
4	考察	47
4.1	求めた時間分解能の評価	47
4.2	行列計算を用いた時間分解能の導出	51
4.3	課題と展望	52
5	結論	57
6	謝辞	58

図目次

1	宇宙の誕生と進化の様子	10
2	クォークモデル	11
3	クォークグルーオンプラズマ	12
4	LHC の外観	12
5	LHC イメージ図	12
6	ALICE	13
7	ALICE 内部配置図	13
8	性能評価機 (rest-bench)	15

9	PWO 結晶	16
10	性能評価機底部から延びたクロスケーブル	16
11	FEE 及び信号処理回路部分	16
12	シンチレーションのイメージ図	17
13	APD	18
14	PWO と APD、CSP、ソケットの接着	18
15	TB:結晶表面	19
16	LED と性能評価機の配置	20
17	APD ゲインカーブ	20
18	PMT が捉える LED の光	21
19	muon の PWO 通過の図	23
20	測定配置図 1	24
21	測定配置図 2	24
22	25 での宇宙線測定	24
23	25 での宇宙線測定・log scale	25
24	REFER 全体像	26
25	REFER 実験配置図	27
26	REFER 実験 NETWORK system	28
27	ADC に記録される入力波形イメージ図	30
28	25 での宇宙線測定・log スケール	31
29	pedestal run の最大ノイズのヒストグラム	32
30	鳴った PWO の数分布：pedestal run	33
31	鳴った PWO の数分布：muon run	33
32	鳴った PWO の数分布：pedestal 1 run	33
33	鳴った PWO の数分布：muon 1 run	33
34	鳴った PWO の数分布：pedestal 2 run	34
35	鳴った PWO の数分布：muon 2 run	34
36	鳴った PWO の数分布：pedestal 3 run	34
37	鳴った PWO の数分布：muon 3 run	34
38	30 倍の閾値をかけたミュオン測定データ	35
39	ある 1 事象での PWO に落ちたエネルギーの出力波形	36
40	パラメータに条件をかけたミュオンピーク:閾値 5	37
41	ガウス関数と一次関数でフィットしたミュオンピーク	38
42	REFER 実験で得た ADC 波形	39
43	電磁シャワーの様子	40

44	10-13PWO REFER パラメータ	41
45	0-13PWO REFER パラメータ	42
46	PWO に落ちた電子線の energy 分布	43
47	電子線入射に対する 10-13PWO の立ち上がり時間のヒストグラム	43
48	電子線入射に対する 0-13PWO の立ち上がり時間のヒストグラム	43
49	検出素子間の入力反応時間差	44
50	入射エネルギーに対する時間分解能	47
51	PWO へのエネルギーの落ち方に条件をかけたときの p1 : 10-13	48
52	PWO へのエネルギーの落ち方に条件をかけたときの p1 : 0-13	49
53	PWO へのエネルギーの落ち方に条件をかけたときの p1 の差	50
54	入射粒子が作るクラスターの再構築と時間分解能の応用	51
55	電子線入射に対する 10-13PWO の立ち上がり時間のヒストグラム	53
56	電子線入射に対する 0-13PWO の立ち上がり時間のヒストグラム	53
57	フィットの制限を外したときの p2 : 10-13	53
58	フィットの制限を外したときの p2 : 0-13	53

表 目 次

1	PWO と他のシンチレータの比較	16
2	較正係数を 4 に揃えたときの APD の入力電圧	22
3	入射用マイクロトロン主要パラメータ	26
4	全取得事象	28
5	較正曲線の各値	46
6	時間揺らぎ	46
7	エネルギーの落ち方に条件をかけたときの p1 のヒストグラムの値 : 10-13	55
8	エネルギーの落ち方に条件をかけたときの p1 のヒストグラムの値 : 0-13	55

9	エネルギーの落ち方に条件をかけたときの p_1 の差のヒストグラム の値	55
10	エネルギーの落ち方に条件をかけたときの時間分解能 . . .	56

1 導入

ここでは、本実験の契機となった背景やその説明に必要な基礎知識を紹介する。

1.1 世界を構成しているもの

基本粒子の描像 世界を構成する基本粒子の探索は、人間にとって永遠のテーマである。1930年ごろ、原子をなす核である原子核中に基本粒子（陽子、中性子）の存在が確認され、1960年代にはそれらを構成するさらに基本的な粒子の存在を预言する理論が生まれた。そこで用いられたモデル粒子を、クォークという。現在では、世界を構成する粒子はクォークと、電子などのレプトンという2つの種類に分けられると考えられている。



図 1: 宇宙の誕生と進化の様子

クォーク 以前は、陽子や中性子などの粒子はハドロンという粒子群に分類され、基本粒子であると考えられていた。しかし、ハドロンを構成する粒子としてクォークが登場してからは、世界の基本粒子はクォークということになった。クォークは、色荷と呼ばれる自由度や半整数電荷など、これまでの基本粒子にはない特徴をもつ。通常は強い相互作用によって核子内に閉じ込められているが、ある極限状態ではその閉じ込めから解放されることがある。実験結果の積み重ねにより、クォークの存

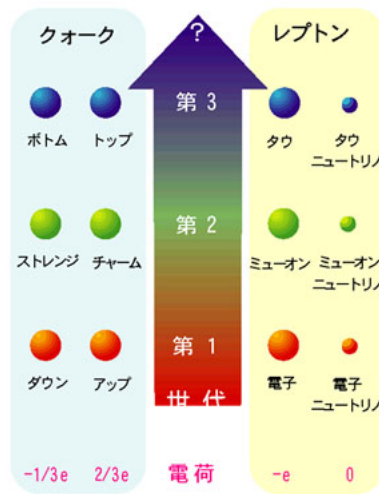


図 2: クォークモデル

存在が信じられるようになってきたが、さらに、クォークを構成するような粒子が現れれば、クォークは基本粒子ではなくなる。現時点での基本粒子がクォークであり、人類の基本粒子探索が終わることはない。

クォーク・グルーオンプラズマ 存在が信じられるようになってきたクォークは、しかしながら単体で地上に存在することはない。それは、強い相互作用によって常にハドロンサイズに閉じ込められているからである。では、クォークを閉じ込めから解放することはできないのか。実はある温度以上に達するとこの閉じ込め現象が消失し、そのような状態では、複合系からクォークとグルーオンが混在する多体系に変化すると予測されている。この状態を、クォーク・グルーオンプラズマ (QGP) と呼ぶ。クォークについて知りたいのなら、まずこのクォーク・グルーオンプラズマについて知ることが必要不可欠である。さらに、クォーク・グルーオンプラズマについての研究は、高温・高密度の極限状態の世界の研究、すなわち宇宙の初期状態の研究にも繋がる。このような極限状態を人工的に再現するために、加速器を用いた高エネルギーの実験が世界中で行われている。

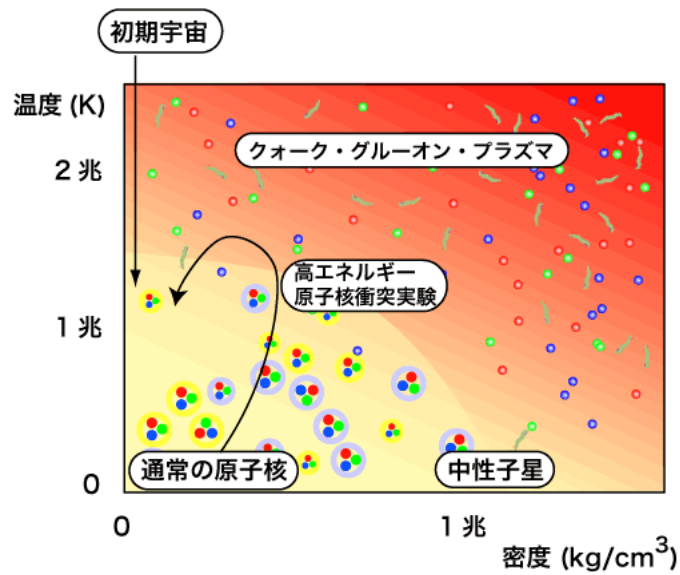


図 3: クォークグルーオンプラズマ

1.2 高エネルギー加速器実験

LHC 加速器 クォークの探索のための極限状態を実際に作ることができる実験として、今もっとも注目されている実験が LHC 加速器での実験である。

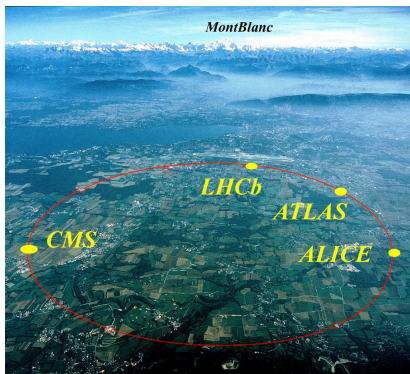


図 4: LHC の外観

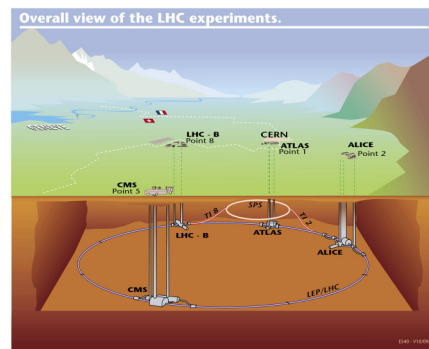


図 5: LHC イメージ図

LHC (Large hadron collider) 加速器とは、欧州原子核機構 (CERN) で行われる人類史上最高エネルギーの粒子衝突実験用加速器である。周長約 27km のリング内を、粒子を逆方向に走らせ、その衝突の様子を観測

する。粒子同士は、ちょうど自動車正面衝突事故を起こすようにぶつかり合い、一時的に衝突点は超高エネルギー状態、いわゆる極限状態の世界となる。LHC 加速器には、探る対象の違いによる複数の実験施設が建設され、2008年9月より稼働を始めた。

ALICE 実験 A Large Ion Collider Experiment(ALICE) 実験とは、LHC 加速器で行われる実験のうち、クォーク物質探究に重点を置いた唯一の実験である。ビーム中心を囲むように、ソレノイド電磁石や本研究で用いた PHOS 検出器をはじめ各種検出器が置かれる。



図 6: ALICE

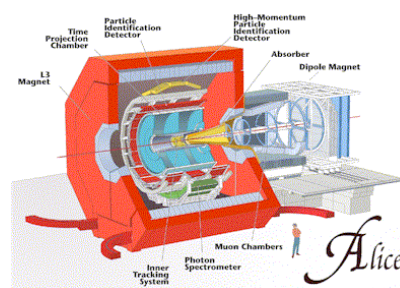


図 7: ALICE 内部配置図

PHO 検出器 photon spectrometer(PHOS) は、ALICE 実験内に設置される検出器の一つで、荷電粒子を捉える結晶部分と、そこから発生する光を捉える検出素子部分からなる電磁カロリメータである。高いエネルギー分解能と位置分解能有し、光子検出において世界最高レベルの精度を持つ。詳しくは、後述の「PHOS 性能評価機の構築」で述べる。

1.3 実験背景

クォークが強い相互作用による核子内の閉じ込めから解放された自由な状態が、QGP である。QGP が現在のような閉じ込め状態に移る時、情報を伝える運び手が閉じ込めの効果を受けてしまうと、QGP の情報が外部へ放出されない。強い相互作用をする粒子、すなわち色荷を持つ粒子は QGP 探索の情報源には使えないが、光子は、色荷を持たないので QGP の情報をそのまま外部へ運び出すと期待される。QGP で生成された光子の持つ生成温度やエネルギー密度の情報を調べることで、間接的に QGP の解明を目指す。

ALICE 実験における PHOS の目的は QGP 起源の光子を捉えることであるが、衝突により生成される光子やハドロンなどの生成粒子の崩壊によって生成される光子が同時に生成されるので、どの光子が QGP 起源の光子であるかを見極めなければならない。そのため、PHOS は、光子検出能力について高い性能を要求されるのである。

PHOS が光子の検出に関して世界最高レベルのエネルギー分解能と位置分解能有することは先に述べたが、その性能を向上させる指標に、PHOS の事象検出に対する時間分解能がある。これは、PHOS 表面の PWO 結晶に高エネルギー粒子が入射してからそのシグナルが記録されるまでどの程度の時間間隔で PHOS が稼働するかということで、時間分解能が良いと、光子が入射した事象の判別を、ビームの衝突点からの飛来時間から行うこともできるようになる。実際、PHOS へ入射した光子の識別は、この飛来時間測定を主軸として行われている。

PHOS の時間分解能に関して、高エネルギー領域に比べ、低エネルギー領域を調べた実験結果は無かった。そこで本研究では、広島大学の超高速電子周回装置を用いて、本研究室に構築した PHOS の性能評価機に 150MeV の電子線を入射し、その時の時間分解能を調べた。

2 実験

本実験は、PHOSの性能評価機を本研究室に構築するところから始まった。性能評価機の構築は、目的に応じてこれまで数回行われており、今回も時間分解能の測定や信号処理回路(FEE)の性能評価などの実験のために構築された。

2.1 PHOS 性能評価機の構築

概要 まず性能評価機の外観から説明する。検出素子は、広い表面積を確保するために、本研究室にある検出器用結晶素子全てを用いて 5×6 の長方形に配置した。そのうち一つは dead channel 判別用に空けているので、全部で29本の結晶が入っている。検出素子の結晶の組成は鉛タンゲ

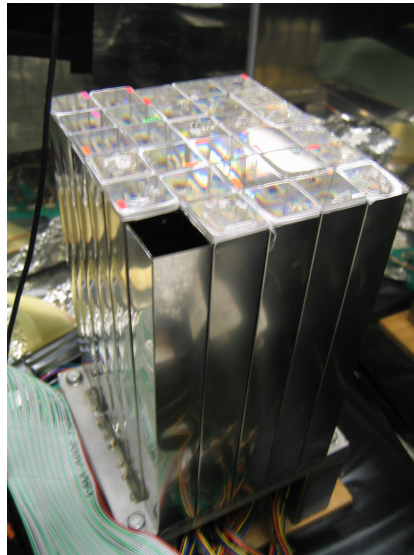


図 8: 性能評価機 (rest-bench)

ステン酸 (PbWO_4 , 以下 PWO) で、シンチレータの一種である。PWO は表 1 のような特徴を持ち、エネルギー分解能と位置分解能を追求するカロリメータとして優れている。ただし、発光量が少ないのでその読み出しに工夫が必要である。

結晶を入れる土台は特注で、結晶間隔が PHOS の結晶間隔と等しく設計されている。裏側には入射信号の増幅を行う charge sensitive preamplifier(CSP) からのクロスケーブルを通すための穴が開けられており、す

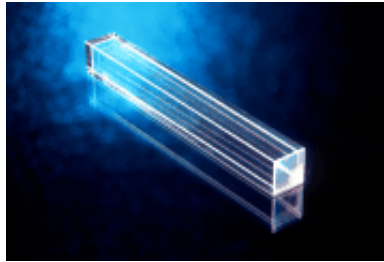


図 9: PWO 結晶

組成	密度	放射長	モリエール半径
$PbWO_4$	8.3	0.89	2.00
NaI	3.67	2.59	4.13
CsI	4.51	1.86	3.57

表 1: PWO と他のシンチレータの比較

ぐにケーブルをまとめる T-card に接続されるようになっている。そこから延びたフラットケーブルは FEE へとつながり、最終的にはシリコンケーブルを通して計算機へと情報が送られる。



図 10: 性能評価機底部から延びたクロスケーブル

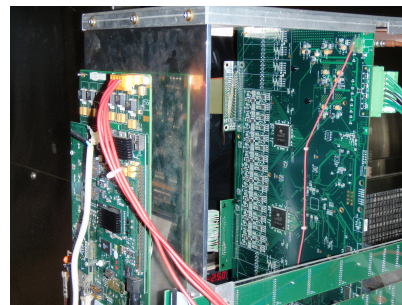


図 11: FEE 及び信号処理回路部分

光子検出原理 PHOS 及び性能評価機の光子検出過程を簡単に説明する。

PWO で起こるエネルギー損失は、主としてシンチレーションによる。シンチレーションとは、高エネルギー粒子がシンチレータに当たったと

き起こす蛍光現象で、粒子のエネルギーはこの蛍光の発光に用いられる。高エネルギー粒子の衝突により、シンチレータの原子核内では電子が励起され一つの軌道へ弾き出されるが、すぐに安定軌道へと戻ってくる。このとき余分なエネルギーを光子として放出するのがシンチレーション光である。

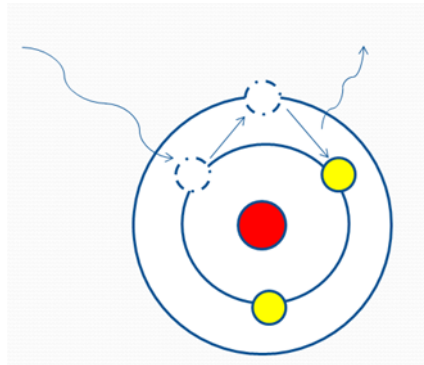


図 12: シンチレーションのイメージ図。光子 (波線) により電子 (黄丸) が励起され、また安定軌道に落ち込む。中心の赤丸は原子核。

シンチレータに入射する粒子が質量の小さな電子などの場合、物質中でのエネルギー損失の優位を占めるのは制動放射と呼ばれる現象になる。制動放射とは、荷電粒子が原子核の電場によってその軌道を曲げられる時、エネルギーの一部を光子として放出する現象である。制動放射によって放出された光子が十分高エネルギーの場合、そこから電子・陽電子対が生成されその電子がまた制動放射を起こし、というようにエネルギーを落としきるまで制動放射が繰り返される。これを電磁シャワーと呼ぶ。PHOS ではこの電磁シャワー全体のエネルギーを測定し、そこから入射粒子の起源を探る。

光子の検出には光電子増倍管 (photon multi tube, PMT) が一般的であるが、PHOS は磁場中での稼働を要求されるため PMT は適当でない。また、PWO は発光量が多くないので光子の読み出し時に信号を増幅する必要がある。十分な増幅率と磁場中での稼働の保証の観点から、PHOS ではアバランシェフォトダイオード (avalanche photo diode, APD) が採用されている。

PMT は光電効果を利用して光子を電子に変換し、電位差を与えた複数のダイノードを用いてその入力信号を増幅するが、磁場がかかるとダイ

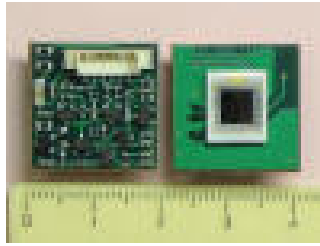


図 13: APD

ノード間を電子が移動する妨げとなることがあり、十分な性能を発揮できない。一方、電子雪崩により検出素子内で信号（電荷）増幅を行う APD は、磁場の影響を受けることなく稼働することができる。

性能評価機構築 性能評価機の光子検出部分の制作過程を説明する。まず、APD と CSP をソケットをはさんではんだづけする。そして ITW 社の DEVCON で PWO と APD 素子を接着する。DEVCON は乾くと透明になるので、少量なら光子の検出に問題はない。結晶の保護と内部での反射を抑える点から、シリコンテープで結晶を覆った。

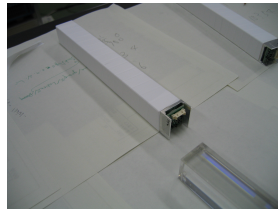


図 14: PWO と APD、CSP、ソケットの接着

29 本の結晶すべてを同様に製作し、専用の土台に挿入する。押し込みすぎるとケーブルの断線につながるので、裏側からケーブルの遊びを確認しつつ、29 本すべてを予定通り挿入した。

この検出部分は、基本的に暗室の中で稼働させる必要がある。光子の検出が目的であり、明るい場所では光子が多すぎて回路が破損してしまう恐れがあるためである。本実験では、以前の性能評価機を用いた実験の際購入した特注冷凍庫を用いて暗室を再現した。今後、性能評価機の導通確認から REFER でのビーム実験まで、性能評価機を用いた実験はすべてこの冷凍庫の中で行う。

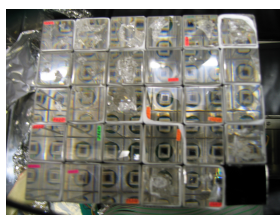


図 15: TB:結晶表面

入力信号の処理 PHOS には、FEE(front end electronics) と呼ばれる専用のデータ処理基盤があり、本実験でも実機と同じものを用いて性能評価機でのデータ処理を行った。

PWO に落ちたエネルギーは APD で電気信号に変換される際、光電効果を起こした分の電荷量として測定される。その電荷量を、CSP で電荷量に比例するチャンネル数に変換し、さらに電気信号の増幅が行われる。そのままでは出力波形が長いテールを引き次の入力信号に重なる可能性があるため、入射信号は FEE に入ったところでテール部分をカットする shaper にかける。これは後のデータ解析の際に行うフィッティングのために、正規分布に近い波形に整形する意味合いも持つ。その後、ADC (analog digital converter) で、ある時間ごとの値としてデジタル信号に変換され、データ取得と同時並行して信号が記録されていく。

APD のゲインカーブ測定 ALICE 実験の際、PHOS は -25 の低温環境で稼働する。PWO の発光量や APD の増幅率 (ゲイン) が低温環境で増加するからである。そのため、性能評価機も当然低温環境での実験を行うのであるが、温度を下げると APD のゲインは指数関数的に増加するため、無暗に測定を行うと APD が壊れる可能性がある。そこで、温度による APA のゲイン変化の様子を APD にかける電圧の関数として、まず最初に調べる。測定としては、冷蔵庫内に性能評価機と LED を図 16 のように配置し、温度を -25 に設定し電圧を変えて LED の光を測定する。

本実験で用いた APD は、浜松ホトニクス株式会社より購入した。APD には 25 で 50 を与える入力電圧の値が同封されており、その値から APD の温度によるゲイン変化を調べた。

PMT で LED の光を測定すると、その信号をデジタル処理し光量に対応したチャンネルを返す。普通、LED の測定で見られる波形はガウス分

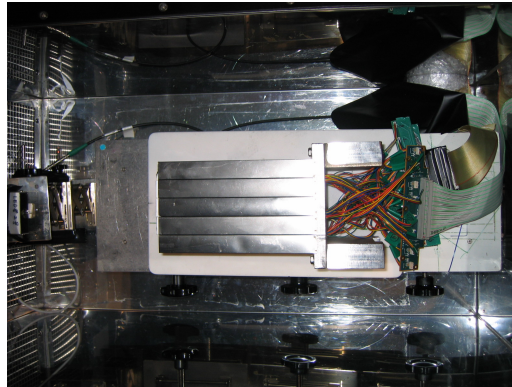


図 16: LED と性能評価機の配置

布のようになるが、光量や PMT にかかる電圧を下げていくと、あるところでわずかなピークを示すようになる。これは光電効果によって発生した光電子一つを PMT が受け取ったときにできるピーク (single photon peak) で、このピークを観察することで温度変化による光量の変化を温度によって変化しない物差しで測ることができ、それを用いて APD ゲインの電圧依存性を調べることができる。このピークをまず 25 で観察し、そのあと-25 で同じピークを観察できれば、その時の入力電圧の値が-25 でゲイン 50 を与える電圧ということになる。この方法で得た APD の増幅率温度依存曲線 (ゲインカーブ) は図 17 のようになった。このゲイン

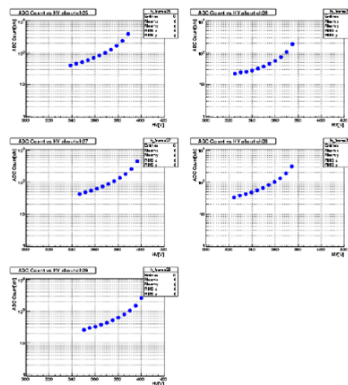


図 17: APD ゲインカーブ。これを 29 本分求めていった。

カーブから求めたゲイン 50 を与える入力電圧をかけて実験を始め、測定

を繰り返す中で conversion factor (較正係数、後述) がずれていることがわかった。その後、REFER 実験でデータを取るときには較正係数が 4 に

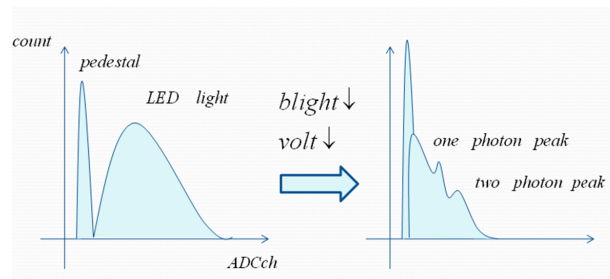


図 18: PMT が捉える LED の光。光量や電圧によって、一つの光子のみを捉える。

そろそろような入力電圧を APD につけ実験を行つた。最終的な入力電圧の値は表 2 に載せた。

ゲインカーブ測定では、冷蔵庫内で距離をとり、各結晶素子になるべく等量の光子が入るように配置したが、波形の高さにはバラつきがある。これは、増幅率のばらつきによるもので、APD の場合、エネルギーを APD のチャンネルに変換する時の係数を、較正係数と言う。これは REFER 実験の際、電子線の落としたエネルギーを読み出すときにも用い、較正係数を正確に求めることが実験の一つのポイントとなる。本実験では、較正係数を宇宙から飛来するミューオン (muon) を用いて求めた。

表 2: 較正係数を 4 に揃えたときの APD の入力電圧

No	検出素子番号	入力電圧 [V]	No	検出素子番号	入力電圧 [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			

2.2 ミューオン測定

概要 ミューオンは宇宙線の中で最も多く、エネルギーの落とし方もよく知られているため、検出器等の較正によく用いられる。本実験でも、過去の研究からミューオンはPWO 通過の間におよそ 199.4MeV のエネルギーを落とすと分かっている¹、これを用いてエネルギー較正を行う。以降、飛来した宇宙線は全てミューオンとみなす。

ミューオンは、物質中をどの程度通過したかで落とすエネルギーが変わってくる。本実験では、199.4MeV の値から較正係数を求めるために、性能評価機通過の際に PWO1 本のみを通過するような事象、すなわち 1 つの PWO に 199.4MeV 全て落としたような事象を選択した。

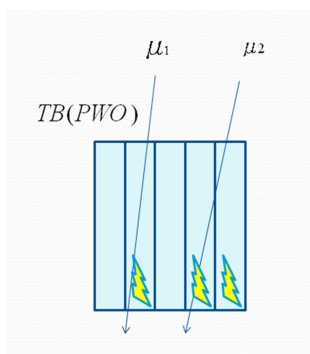


図 19: ミューオンの PWO 通過の図。通過の仕方によって落とすエネルギーが複数の PWO に分散される。

実験装置の配置 図 20,21 のように実験器具を配置した。宇宙線のミューオン測定なので、性能評価機は立てて PWO 表面が上を向くように配置している。図中、数値は全てミリメートルである。

測定結果 二つのシンチレーターをならした事象を、性能評価機を宇宙線が通過した事象とし、1 週間測定を続けて統計を貯めた。各 PWO に入った宇宙線の ADCch 毎の分布は図 22 のようになった。

¹中馬文広 平成 18 年度理学士卒業論文

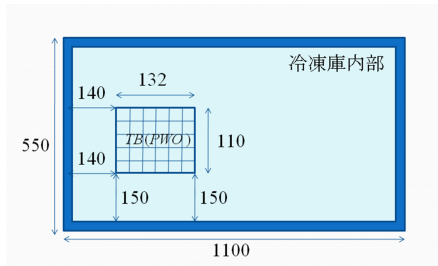


図 20: 測定配置図 1

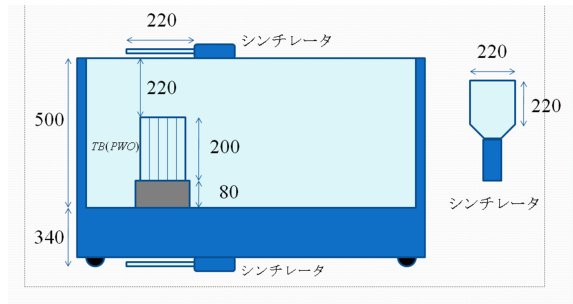


図 21: 測定配置図 2

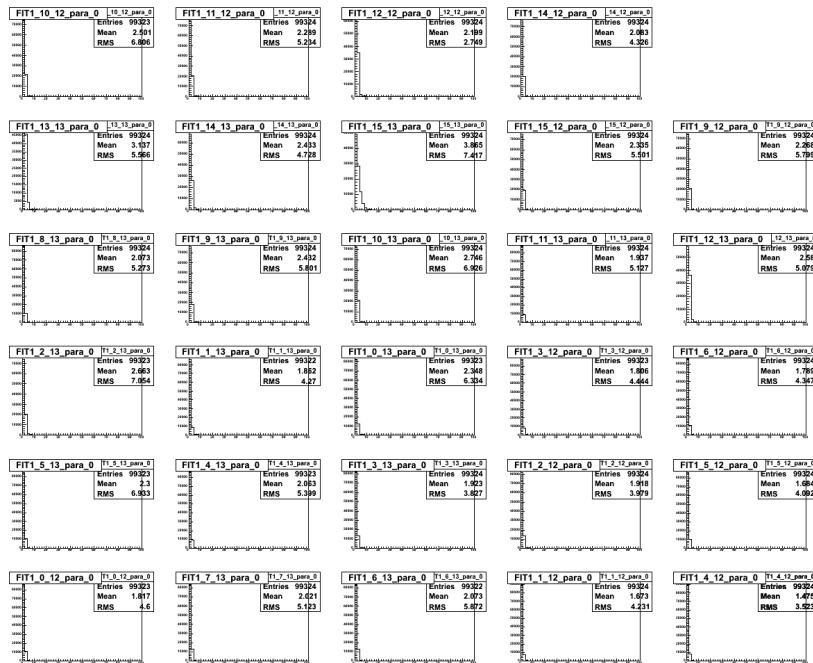


図 22: 25 での宇宙線測定

このままではよくわからないので、同じものの縦軸を log スケールに直したものを図 23 載せる。二つのシンチレータを宇宙線が鳴らすとき

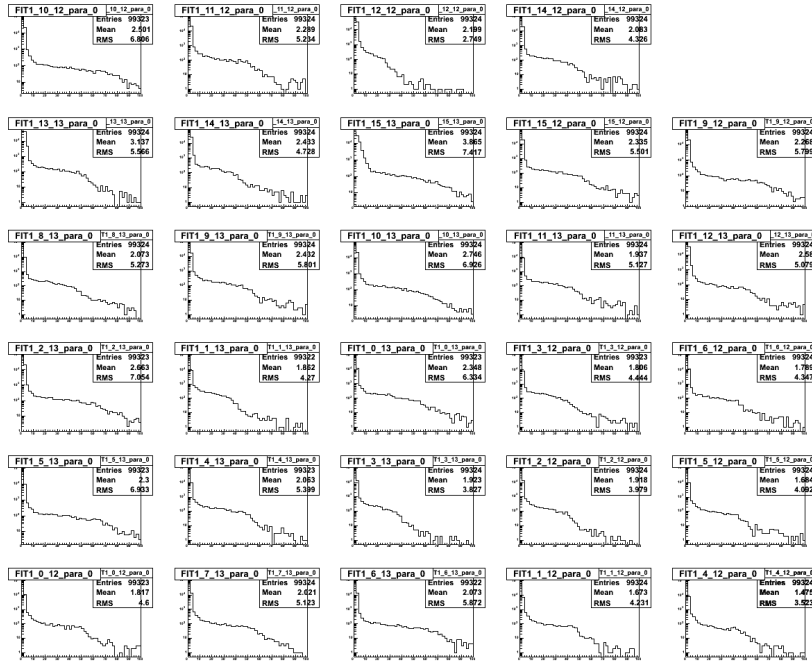


図 23: 25 での宇宙線測定・log scale

ADC に記録されたすべての信号を読み出しているため、ADC チャンネルが 0 の事象が突出して多くなっている。また、宇宙線が複数の PWO を通過し、その各チャンネルにエネルギーを落とした様子が右下がりのなだらかなカーブとして表れていることがわかる。このままでは性能評価機の較正係数は求まらない。この中から宇宙線が PWO 一本だけを通過した事象を選別し、ミュオンが作るピークを解析で求める。

主要パラメータ	スペック
出力ビームエネルギー	150MeV
入射ビームエネルギー	80MeV
エネルギーの広がり	$\pm 0.1(1\%)$
偏向磁場強度	1.23T
磁場勾配	0.14T/m
ビームレート	10Hz

表 3: 入射用マイクロトロン主要パラメータ

2.3 REFER 実験

本実験は数百 MeV 領域での性能評価実験のため、同程度のエネルギーの放射線が必要だった。そこで本実験の入射線に、150MeV の電子線を選択した。

REFER 150MeV 電子線の供給源として、広島大学超高速電子周回装置 (REFER) を用いた。REFER は、広島大学にある全国共同利用施設である。平成 8 年度に国立大学唯一の放射光施設として発足し、平成 14 年度からは全国共同利用施設として数多くの研究活動を推進してきた。REFER の主なパラメータの値を、表 3 にまとめた。

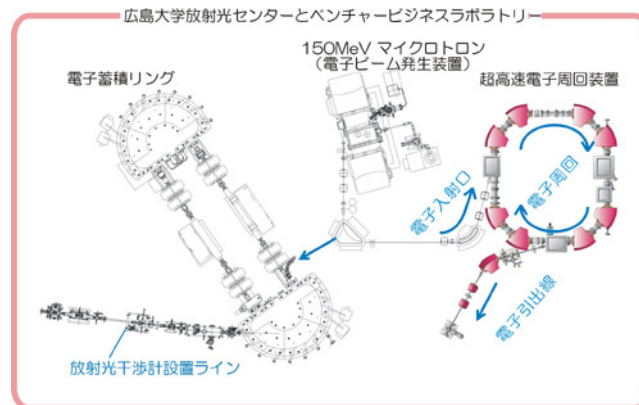


図 24: REFER 全体像

REFERには、マイクロトロンから出た電子線を周回装置に送り超高速電子線として取り出す方法と、蓄積リングに送り放射光を取り出す方法の2通りの実験手法がある。今回は、前者の実験手法を用いる。

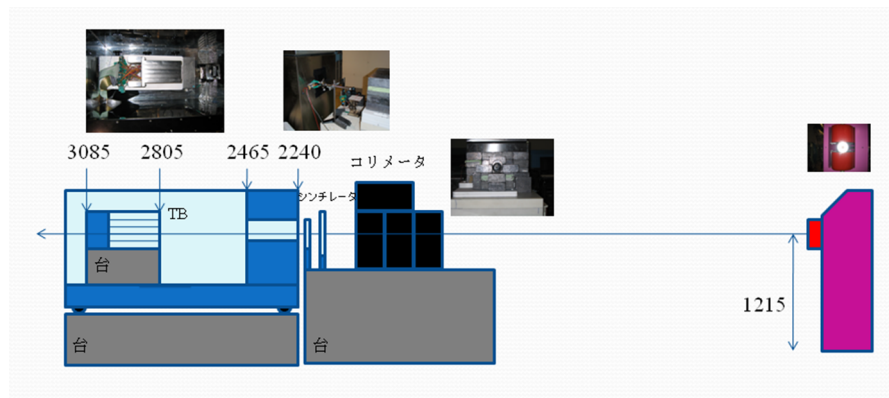


図 25: REFER 実験配置図

実験装置の配置 電子線口は地面から 1215mm の高さであり、電子線はそこから水平に放射される。水平方向に 1530mm のところで、鉛ブロックのコリメータで電子線は直径 30mm 以内に絞られる。その後ろ 2025mm と 2164mm 地点にトリガーとなるシンチレータ 2 枚を置き、2240mm からは冷凍庫内へと入射される。性能評価機表面に電子線が入射するのは、電子線口から 2805mm の地点である。図中 DAQPC とは、実験データを取得し入射器室外の PC へと送るための PC である。図中には示されていないが、外部 PC と LAN ケーブルで繋がれ、データ取得の合図が入射器室外から行えるようになっている。

データ取得時間の考察 本実験を始める前に、実験時間がどの程度になるのかを見積もる必要がある。test run として -25℃ に冷却した冷凍庫内に性能評価機を置き、そこへ電子線を打ち込んだ。電子線の中心が当たっていると思われる PWO とその隣の 2 本に着目し、その 2 本に求める事象がどの程度含まれるかを概算した。求める事象の条件として、着目する PWO 双方に 10% の範囲で同じエネルギーを同時に落とした事象を探した。時間の同時性については、電子線が性能評価機に入った 1 事象中に双方を見ることで保証する。

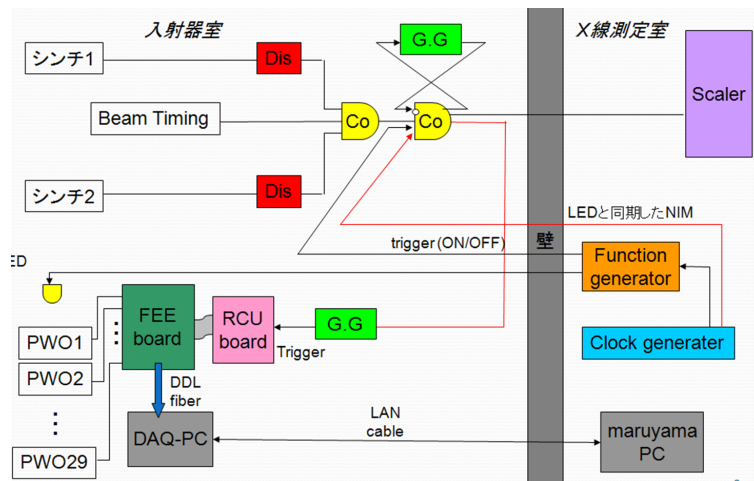


図 26: REFER 実験 NETWORK system

data file	event	time
<i>run2290</i>	85500	25
<i>run2291</i>	181260	53
<i>run2292</i>	338580	99
<i>run2293</i>	215460	63
<i>run2297</i>	304380	89
[92file]	[count]	[min]

表 4: 全取得事象

test run で得たデータの一部を解析し、10,000 事象中、欲しい事象は 97 事象で約 1% 含まれることがわかった。ここから、統計誤差 1% を要求するために、test run の 100 倍の統計をためることにした。統計 100 倍の 1,000,000 事象を得るためには、50Hz で取り続けて約 5 時間半かかる。よって本実験のデータ取得時間を 5 時間半に設定した。

REFER 実験 -25 の冷凍庫の中に置いた性能評価機に 5 時間半電子線を当て続け、時間分解能を求めるためのデータを取得した。長時間の測定時間に及ぶため、他の実験との兼ね合いなどから数回に分けて実験を行った。

以上で必要なデータは取り終えた。次は取得したデータを解析し、どのような情報が含まれているのか探る。

3 解析

実験により取得したデータは、正しく理解して初めて意味のあるものになる。ここでは、これまでに取得したデータの解析を行い、どのような結果が得られたかを見ていく。

本実験の解析では、ADCに記録された入射信号波形をガンマ2関数でフィットし、その各パラメータを読み取って解析を進めていく。

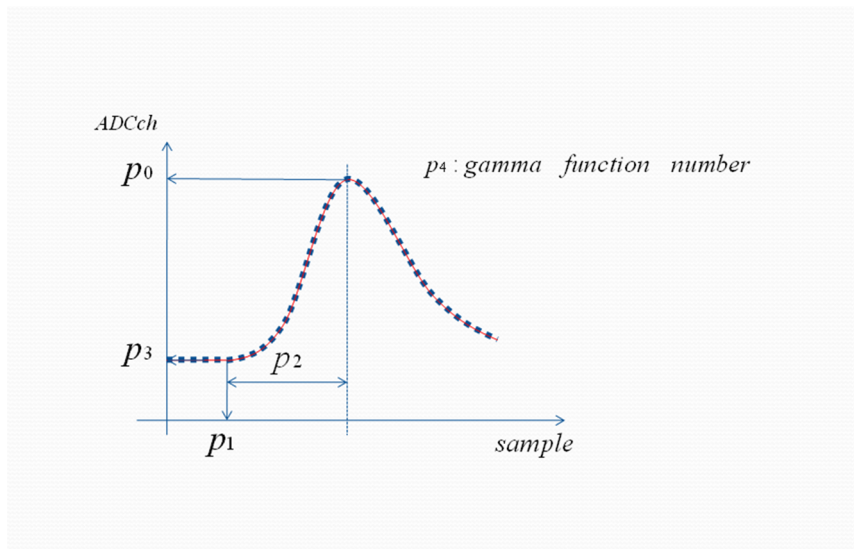


図 27: ADC に記録される入力波形イメージ図

図 27 は、ADC に記録された入力信号を模式的に描いたものである。宇宙線も REFER 電子線も、実験で ADC に記録される波形は図 27 のようになる。縦軸は入力信号のエネルギーに比例した ADC のチャンネルで、横軸はその値を読みだす時間間隔を任意の時間で区切ったものである。本実験では、100ns 間隔で ADC チャンネルを記録していった。その時のプロットの数 は 70 点となっている。

解析に用いる主なパラメータは p_0 、 p_1 、 p_2 の 3 つ。 p_0 は波形のピーク値、 p_1 は波形の立ち上がり時間で、 p_2 は立ち上がり時間とピーク時間の差である。 p_3 は波形の立ち上がり点から 15 点さかのぼって得たペDESTALの平均値、 p_4 はガンマ関数係数である。これらのパラメータに条件を掛けていき、求める事象を選択していく。

3.1 conversion factor の決定

図 23 をもう一度見てみる。

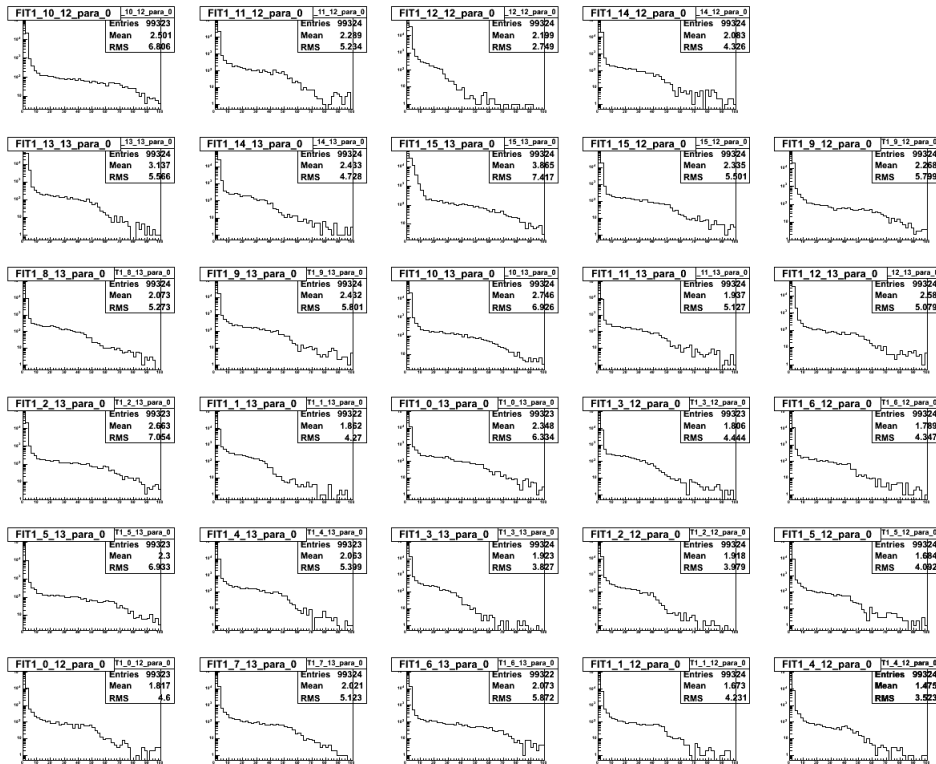


図 28: 25 での宇宙線測定・log スケール

先にも述べたが、このままではフィットするピークが見えず、校正係数は求まらない。適切な条件をかけ、PWO1 本だけを宇宙線が通過したような事象を選び出す必要がある。

ミュオンが入射した条件の考察 図 19 で見たように、複数の PWO を通過したミュオンは、その通過した PWO にそれぞれエネルギーを落とす。性能評価機の PWO にミュオンが落とすエネルギーの最大値は 199.4MeV と決まっているので、複数の PWO を通過すると 1 本当たりに落とすエネルギーが少なくなってしまう。図 23 では、低チャンネル側に複数の PWO を通過したミュオンが落としたエネルギーを数え上げていると思われるなだらかなカーブが見られる。そこで、このカーブを作

ている原因となっている事象を特定し通り除くと同時に、較正係数を決定できる条件を探す。

まずは、ミュオン未入射時のペDESTALのノイズレベルを調べる。シンチレータの代わりに clock generator からの信号をトリガーとし、10000 事象取得時の性能評価機のノイズレベルを調べた。これを pedestal run と呼ぶことにする。

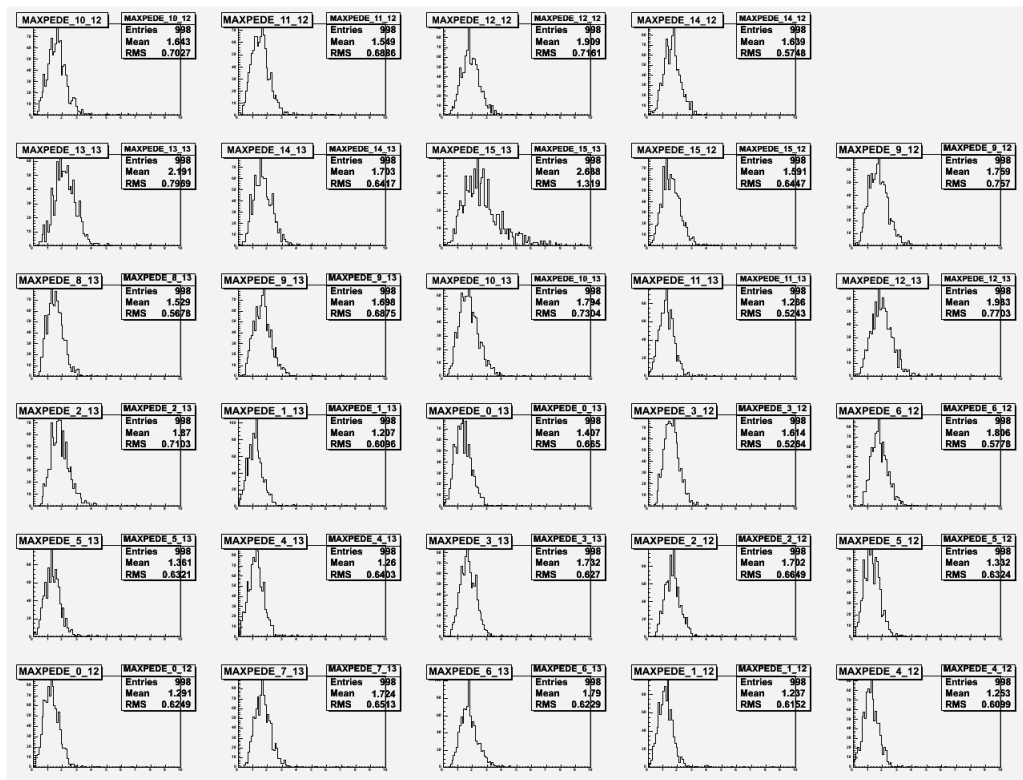


図 29: pedestal run の最大ノイズのヒストグラム

図 29 は pedestal run ノイズについて、1 事象中の最も大きなシグナルの値からペDESTALの値を引き、PWO 毎にプロットしたものである。このヒストグラムの中心値の値を、まず基本の閾値に決めた。

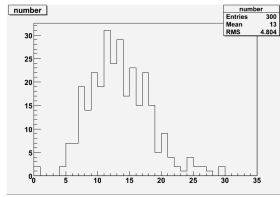


図 30: pedestal run 閾値：中心値

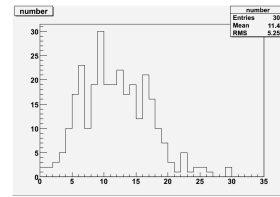


図 31: muon run 閾値：中心値

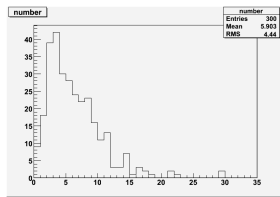


図 32: pedestal run 閾値：中心値 + 1 幅

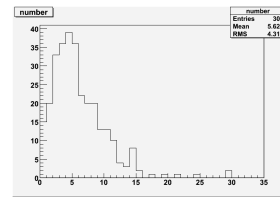


図 33: muon run 閾値：中心値 + 1 幅

図 29 の中心値を閾値にするということは、pedestal run の半分の事象をノイズとして落とすことになり、1 事象中で約半分の PWO が鳴らなくなることが予測される。この予測のもと、各 PWO にそれぞれのピークから得た中心値の値を閾値としてかけ、pedestal run のデータを解析してみた。そのとき鳴った PWO の数をとったのが図 30 である。予想通り 29 本の約半分の 14 本付近にピークを持ち、閾値が正しく機能していることが分かる。次は図 29 の 1 幅から閾値を決め、同じく pedesutal run を解析したのが図 32 である。2 が図 34、3 が図 36 というように閾値のかけ方で鳴る PWO の数の増減を予測する。この幅は 1 で 68%、2 で 85%、3 なら 99% 以上の値を含むことになる。原理的には 3 の閾値をかけることで、ほとんどすべてのノイズを省く。pedestal run の図を見比べると大体そのように推移していることがわかる。これをミュオン測定データに適用し、閾値によるヒストグラムの動きを見た (図 31)。すると pedestal run の時と同じように、鳴った PWO の本数のヒストグラムはピークを 0 方向へ推移させた。pedestal run の時と違う箇所は、若干ではあるが、ピークが膨らみを持つことである。これはミュオンのエネルギーを拾った事象がそこにあり、統計量がペDESTAL に比べて増加したからであると考えられる。

幅による閾値は大方のノイズを取り除いてくれるが、迂闊に上げるとミュオンの入った事象まで取り除く可能性がある。本実験のシンチ

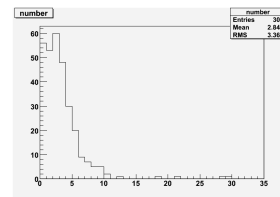
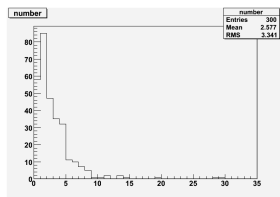


図 34: pedestal run 閾値 : 中心値 + 2 幅 図 35: muon run 閾値 : 中心値 + 2 幅

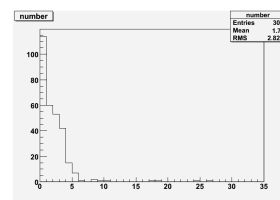
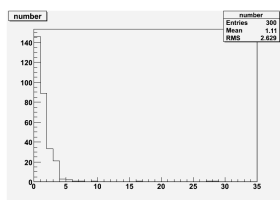


図 36: pedestal run 閾値 : 中心値 + 3 幅 図 37: muon run 閾値 : 中心値 + 3 幅

レータの置き方では、どうしても複数の PWO を通過するミュオンを防ぐことができない。そのような事象は、PWO の通過距離次第でノイズと同じ程度かそれ以下のエネルギーを落とすようなことがあるかもしれない。つまり安易に閾値をかけて事象を取り除くとすると、ミュオンの通過した事象まで切りとってしまいかねないということになる。

例えば、図 38 は閾値を徐々に上げていき、1 事象中に全体で 1 本しか PWO が鳴らなくなったときの p_0 のピークである。確かに 1 事象で PWO は 1 本しか鳴らないかもしれないが、ヒストグラムから明らかなように、ノイズと一緒にミュオンの作ったと思われる部分まで切りとってしまっている。これはもちろん正しい事象を選択したことにはならない。

新たな事象選択法 閾値以外から較正係数を求める方法はないのかと考えたとき、ADC の出力波形のフィット関数との一致から求める方法が考えられた。出力波形のフィットは、ミュオンなどの通過があったときは理論値に近いが、ノイズをシグナルとしてフィットしたときは明らかに異常なパラメータを返す。このフィットのパラメータの条件がけにより、ミュオンが入射した事象を選択できると期待した。

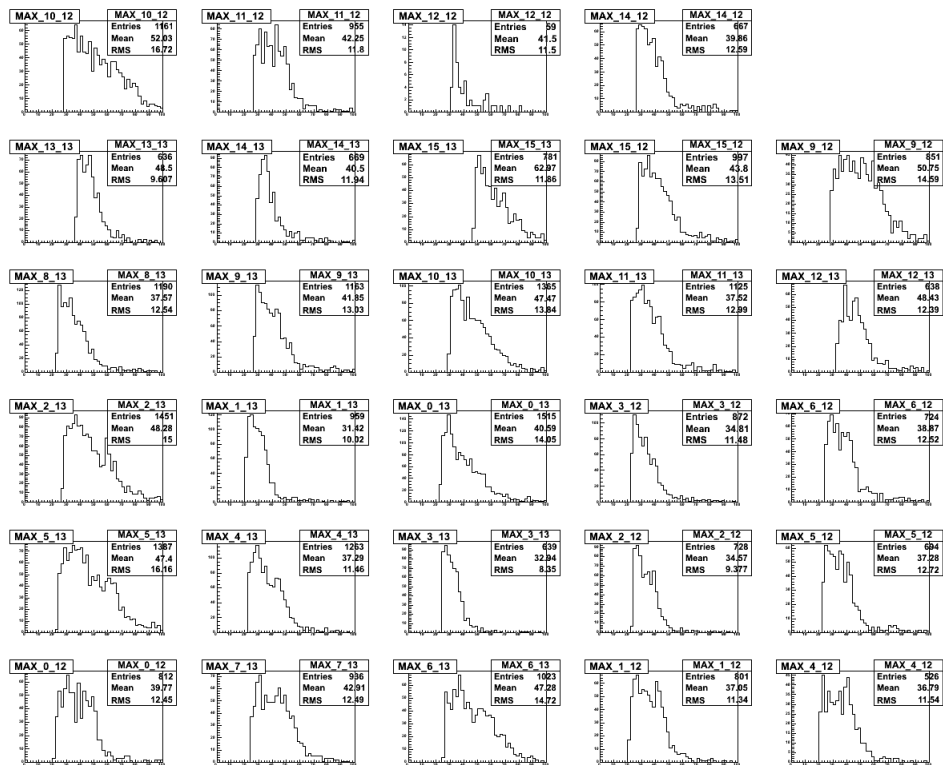


図 38: 30 倍の閾値をかけたミュオン測定データ

本実験で使用したフィットプログラムはよく波形と一致する反面、少し強引なフィットも行うことがある。ノイズの揺らぎを信号と判断してフィットしてしまう場合もあり、統計を貯めるとそのような時は各パラメータに明らかな異常な値が返される。粒子が落としたエネルギーの入力信号はガンマ 2 関数でよくフィットされることが調べられているので、異常なパラメータを返す事象を省くことでミュオンが PWO1 本を通過した事象を選択できると考えられる。

各パラメータにかける条件を決めるため、実際に 1 事象毎に PWO に落ちたエネルギーの出力波形を見ていった。その中で、PWO1 本をミュオンが通過したと思われる事象に着目し、出力波形のパラメータを確認した。例えば、図 39 は、ある 1 事象の各 PWO に記録された入力信号波形を並べたものである。ほとんどのチャンネルで平らなペDESTAL が記録されているが、13_13PWO でミュオンによると思われる波形が記録されている。この波形から読み取れるパラメータは、 p_0 が 44、 p_1 が 16、 p_2 が 23 である。同時にノイズのパラメータの確認も行い、15_13PWO

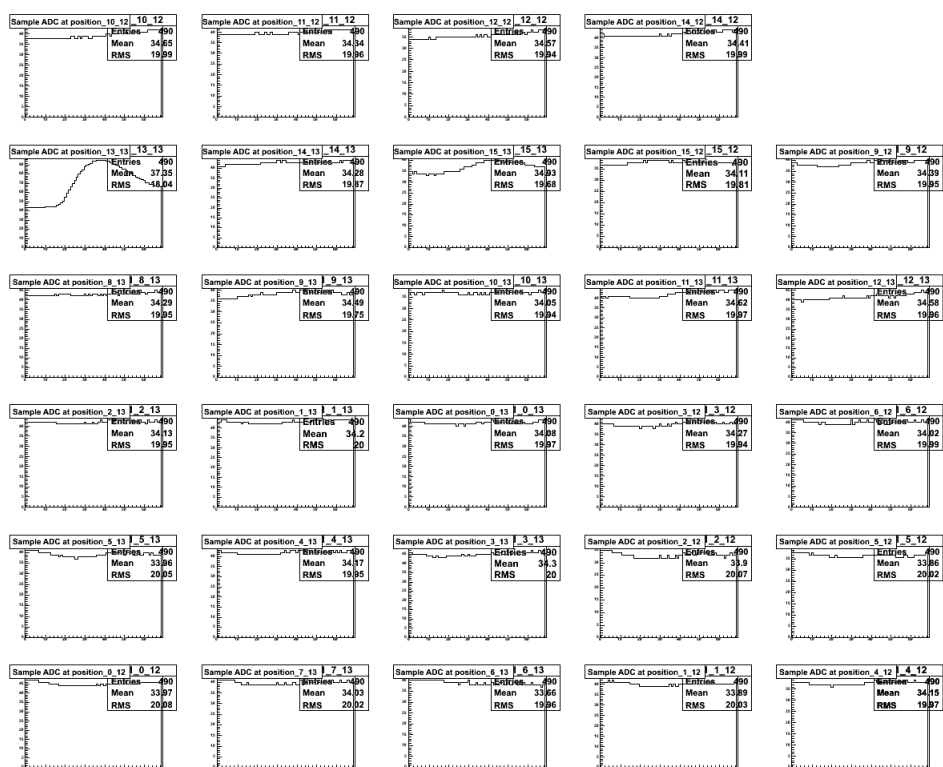


図 39: ある 1 事象での PWO に落ちたエネルギーの出力波形

に見られるような波形のパラメータについても条件の参考にした。この事象では鳴った PWO は 1 本だけであったが、15_13PWO も場合によっては入力信号としてフィットされることがあるかもしれない。しかし、パラメータの値を見てみると、 p_1 がわずかながら 20 を超えていたり、 p_2 が 50 程度だったりすると 13_13 PWO の波形のパラメータと比べ、ミュオンの通過した事象らしからぬ部分が見えてくる。また、この種のノイズは、比較きれいな波形に見えるペDESTALからの高さを持つので、閾値による事象の選択では省ききれない。閾値による条件に、ADC の出力波形のフィットにより得たパラメータについての条件を加えることによって、ミュオンが通過したとする事象を高い精度で求めることができると考える。

100 事象程度の確認から導いたミュオンが通過したといえるパラメータの条件は、 $p_0 : 5 \sim 100$ 、 $p_1 : 13 \sim 20$ 、 $p_2 : 18 \sim 25$ である。この条件を満たす波形が 1 事象中 1 素子にのみ記録された時を、ミュオンが通過

した事象として作ったヒストグラムが図 40 である。

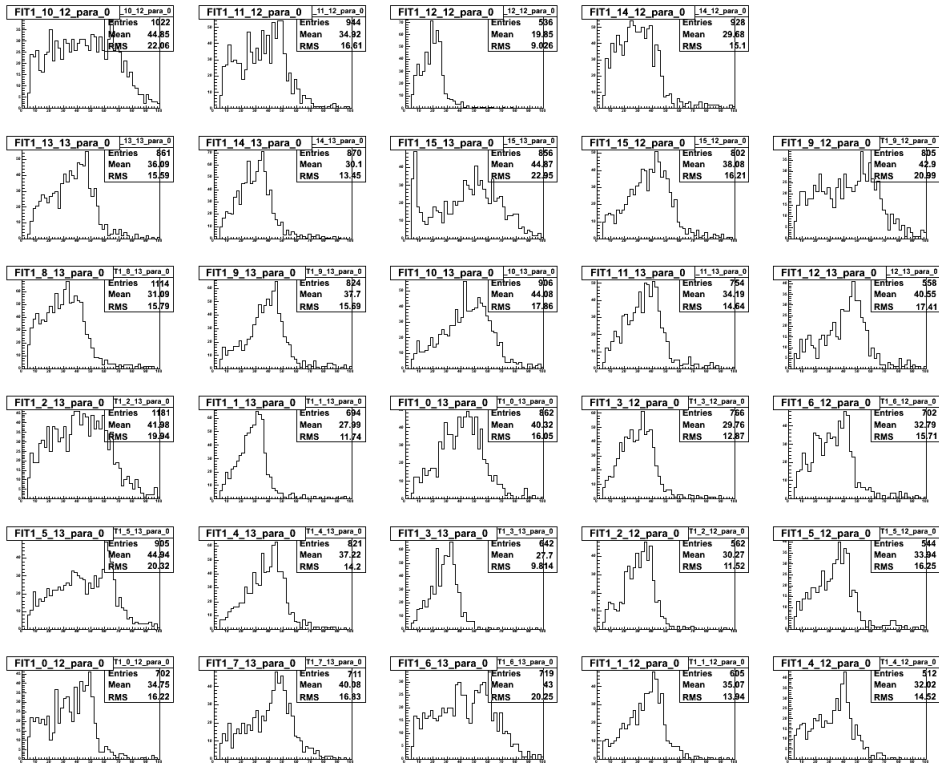


図 40: パラメータに条件をかけたミュオンピーク:閾値 5

図 40 を見ると、フィットによる条件をかけることでミュオンの通過により作られたと思われるピークを図 23 から取り出せたことがわかる。この中の事象をさらに確認していき、 p_0 と p_2 の条件をそれぞれ 3 ~ 100、18 ~ 23 に修正した。

較正係数を求めるためにそれぞれの波形のピークを求める。除ききれなかったノイズの分布を一次関数と仮定し、ガウス関数と一次関数を足し合わせた関数でフィットしたのが図 41 である。そして、フィットにより求めたガウス関数の中心値から較正係数を求めた。

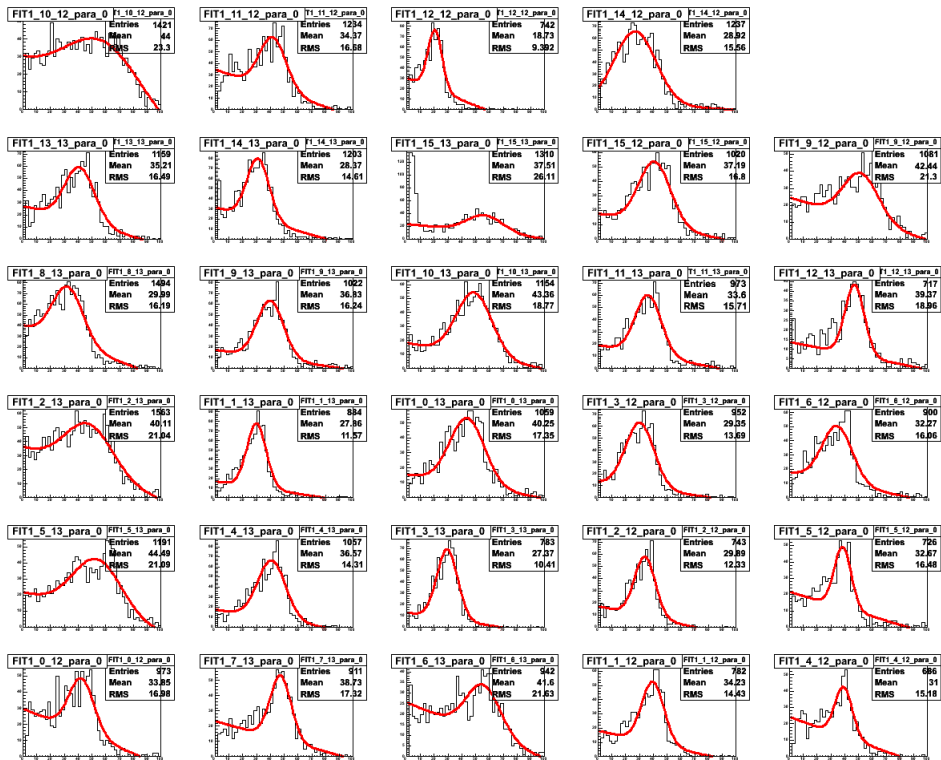


図 41: 一次関数とガウス関数でフィットしたミュオンピーク。修正した条件をかけてある

3.2 事象の選択

5時間半のREFER実験で得た全事象は約112万事象で、ここから欲しい事象である、隣り合うPWOに同時に電子線が入射した事象を選び出していく。

REFERの電子線が性能評価機に入射したときの判定は、その前に置かれたシンチレータによって行う。このシンチレータの置き方により、電子線はほとんどが10_13PWOもしくは0_13PWOに入ったと考えられるが、それだけでは判定が不十分である。REFER実験のデータ解析にも、フィットによる事象の選択を採用する。

事象の選択 REFER実験で実際にADCに記録されたデータを見ると、ミュオン測定データと同じような波形が記録されていることがわかる(図42)。そこで、ミュオン測定の時と同じ解析手法を用いてREFER実

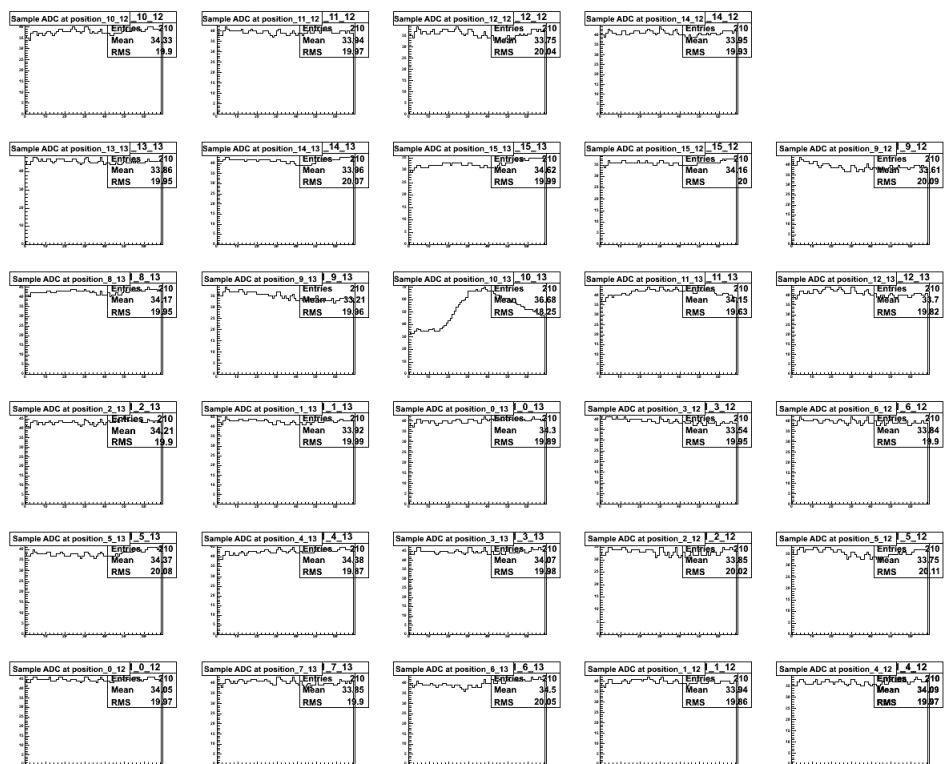


図 42: REFER 実験で得た ADC 波形。PWO にビームシグナルらしき波形が記録されている。

験データを解析していくことにするが、ミュオンと電子の違いから、制動放射の影響を考慮しなければならない。

制動放射で発生した電磁シャワーはモリエール半径内の 20mm 以内に収まると考えてよいが、PWO の 1 辺が 22mm なので、シャワーは複数の PWO に広がるのが予測される。たとえ直接電子線が入射してなくても、このシャワーによって落ちるエネルギーがあるため REFER データ解析では、エネルギーで事象の選択条件をかけることはできない。よって、パラメータにかける条件のうち、 p_0 の条件は REFER データ解析では省き p_1 と p_2 の条件から電子線の入射したイベントを判定する。

REFER 実験で得られたデータにまず、ミュオン測定のとくと同じようにガンマ 2 関数でフィットし、各パラメータを求めた。10_13PWO と 0_13PWO について、得られた各パラメータのヒストグラムをそれぞれ 図 44、45 に載せる。

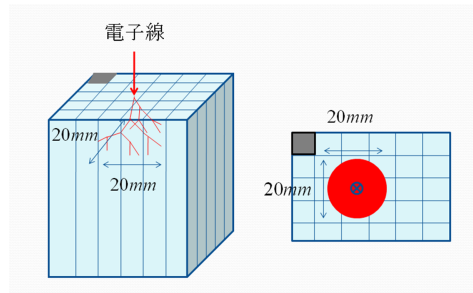


図 43: 電磁シャワーの様子。

図中の para とはパラメータのことで、先ほど説明した p0 から p4 に対応している。縦軸はどれもカウント数で、横軸の単位は p0、p3 が ADCch、p1、p2 が 100ns 刻みのサンプル数である。p0 については電子線の中心を 10 13PWO に合せており、電子線のエネルギーが最も落ちやすい。それによると思われる盛り上がりを確認できるが、これだけでは判断できない。p1 はペDESTALを決めるためのサンプルを入力波形の前に 15 サンプル取る設定のため、その付近以外のはうまくフィットできないノイズがつくる部分と考えられる。うまく電子線の入った事象を選び出してやれば消えると期待する。

ミュオン測定同様、REFER データ解析でも事象選択のための条件の確認を行った。図 42 のような波形を確認していくと、ミュオン測定のとおり条件で電子線の入射によると思われる波形を概ね選び出せることがわかった。そこで p1、p2 の条件はそのままにし複数の PWO が鳴ることを許して全 REFER データを解析して、条件をクリアする事象を選び出した。条件を確認すると、入力波形が p1 が 13 から 18 サンプル、p2 が 18 から 25 サンプルの間の値を持つとき、複数の PWO が鳴ることを許してヒストグラムにするというものである。

REFER 電子線のエネルギーは 150MeV である。Geant4 によるシミュレーションから、電子線は空気やシンチレータにより少し減衰し、性能評価機に落とすエネルギーは 146.5MeV になると予想された。ミュオン測定の解析結果から較正係数が求まったので、入力波形をエネルギーで取り出すことが可能である。上の条件をクリアしてきた事象で、鳴った PWO に落ちたエネルギー全てを足し合わせると、電子線の入射波形を正しく選び出せていれば全部で 146.5MeV になるはずである。図 46 は、上の条件をクリアした事象毎のエネルギーの分布である。ガウス関数でフィット

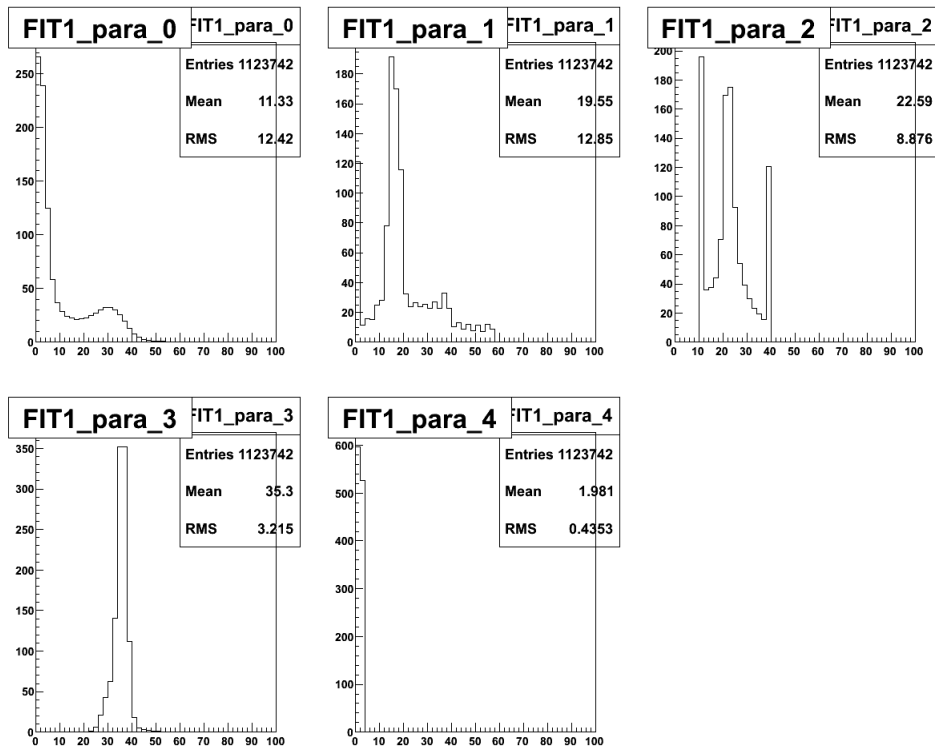


図 44: 10-13PWO のパラメータ

すると、中心値は $131.6 \pm 0.4\text{MeV}$ 、sigma は $38.00 \pm 0.4\text{MeV}$ であった。この結果から、電子線の入射した事象を、ピーク値から 1sigma の幅の事象として選び出した。それぞれの事象内で ADC に記録される p1 の値を調べることで、性能評価機の時間分解能を求めていく。今回は、最も統計が多いと思われる 10 13PWO と 0 13PWO に着目する。

3.3 時間分解能

時間分解能を求めるためには、時間的に同じ入力に対して信号を出力するまでの任意の検出素子間の反応時間差が必要になる。本実験では同じ入力信号を得るために、1つの電子線が複数の PWO にエネルギーを落とす事象を用いる。電子線の入射で発生する電磁シャワーによって複数の PWO にエネルギーが落とされていくため、原理的に離れた PWO 間で同じ電子線からエネルギーを落ちることはない。隣同士の PWO 間で

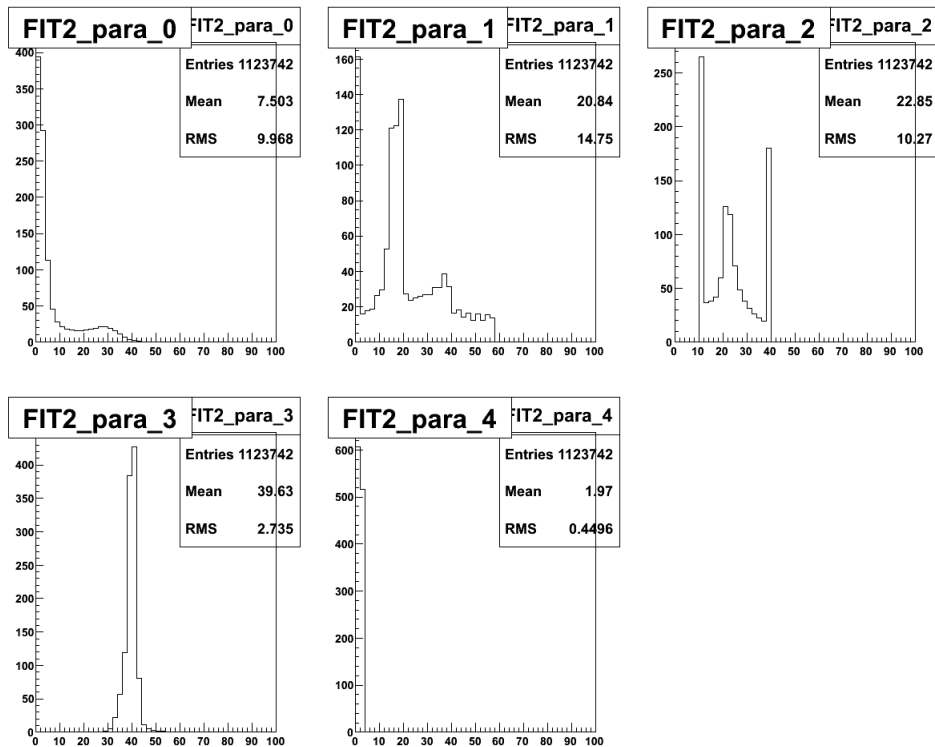


図 45: 0-13PWO のパラメータ

のみシャワーの広がりは起こり得る。10 13PWO と 0 13PWO は隣合、統計量も多いので、本実験を行う検出素子の組み合わせとして最も適している。

検出時間の揺らぎ 上の条件をクリアしてきた事象に、さらに10-13PWO と 0-13PWO のみ鳴ったという条件をかける。事象毎に全チャンネルのフィットを行っているので、フィットの判定より常に何本の PWO が鳴っているか把握できる。その中から、もしこの条件もクリアした事象があったとき、それぞれの $p1$ の値を選んでヒストグラムにしその値の揺らぎを調べる。ここで言う揺らぎとは、条件をクリアしてきた 10_13、0_13PWO の $p1$ の値でヒストグラムを作ったときの 1 の幅に相当するものである。理想的にはこのような幅は無いのだが、性能評価機の検出部分の寄与、データ処理回路部分の寄与など様々な要因が重なりあって、ある有限な値を持つと考えられる。

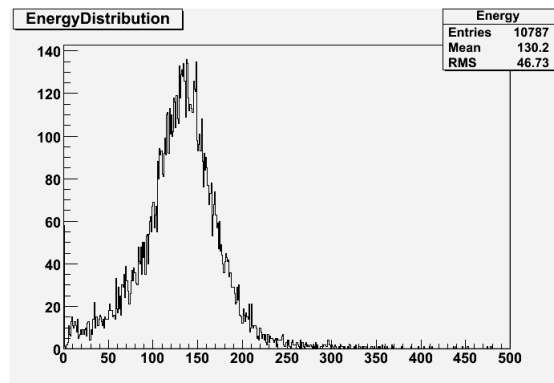


図 46: PWO に落ちた電子線のエネルギー分布。横軸の単位は MeV。

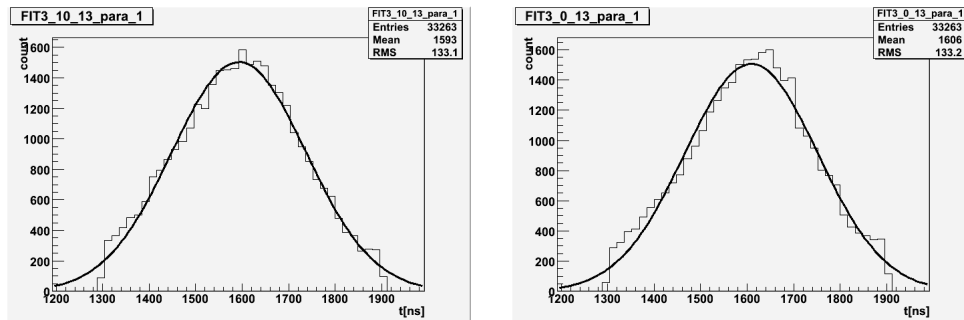


図 47: 10-13PWO の p1 のヒストグラム 図 48: 0-13PWO の p1 のヒストグラム

図 47、図 48 を見ると、事象を選び出すときにかけた条件により、左右のテールが切り取られている。さらにこの二つの検出素子間の立ち上がり時間差を ΔT とすると、その値は図 49 のようなヒストグラムを作った。それぞれの中心値と σ の値は表 6 のようになった。

時間分解能の決定 ここまで求めたら、あとは計算により求めたい時間分解能は出てくる。整理すると、今までに求めたのは 10_13、0_13 検出素子の検出時間の揺らぎ、この二つの検出素子の検出時間差の揺らぎの 3 つである。そして、求めたいものは 10_13、0_13 検出素子の時間分解能である。これに検出器のトリガーの時間分解能を加えた 6 つのパラメータの間には、次のような関係式が成り立つ。

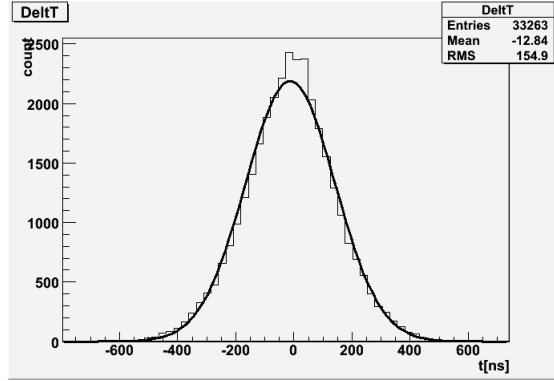


図 49: 10-13PWO と 0-13PWO の p1 の差。単位は ns。

$$\sigma_{\Delta t_1}^2 = \sigma_{t_1}^2 + \sigma_{trig}^2 \quad (1)$$

$$\sigma_{\Delta t_2}^2 = \sigma_{t_2}^2 + \sigma_{trig}^2 \quad (2)$$

$$\sigma_{\Delta t_{12}}^2 = \sigma_{t_1}^2 + \sigma_{t_2}^2 \quad (3)$$

$\sigma_{\Delta t_1}$ は 10_13 検出素子の時間揺らぎ、 $\sigma_{\Delta t_2}$ は 0_13 検出素子の時間揺らぎ、 $\sigma_{\Delta t_{12}}$ は二つの検出素子の検出時間差の揺らぎ、 σ_{t_1} は 10_13 検出素子の時間分解能、 σ_{t_2} は、0_13 検出器の時間分解能、 σ_{trig} は検出器のトリガーの時間分解能である。各検出素子の時間揺らぎは、時間分解能によって決まっている。3つの変数に3つの方程式が得られているので、原理的にはこの方程式は解ける。先ほどの式を書き換えると、

$$\begin{pmatrix} \sigma_{\Delta t_1}^2 \\ \sigma_{\Delta t_2}^2 \\ \sigma_{\Delta t_{12}}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{t_1}^2 \\ \sigma_{t_2}^2 \\ \sigma_{trig}^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

という行列で表せ、この逆行列

$$\begin{pmatrix} \sigma_{t_1}^2 \\ \sigma_{t_2}^2 \\ \sigma_{trig}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sigma_{\Delta t_1}^2 \\ \sigma_{\Delta t_2}^2 \\ \sigma_{\Delta t_{12}}^2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

を解くことで、時間分解能が求まる。表6の各値を式(4)に代入すると、

$$\sigma_{t_1} = 109.8 \pm 0.5 \quad (6)$$

$$\sigma_{t_2} = 108.1 \pm 0.5 \quad (7)$$

$$\sigma_{trig} = 93.7 \pm 0.6 \quad (8)$$

となり、これらがそれぞれ 10_13、0_13、トリガーの時間分解能である。最終的に、10_13、0_13 検出素子の時間分解能の平均値 108.9 ± 0.5 [ns] を性能評価機の時間分解能とした。

以上により、REFER 電子線を用いて行った実験の結果、150MeV の入射粒子に対する性能評価機の時間分解能は、

$$\sigma_t = 108.9 \pm 0.5[ns] \quad (9)$$

となることが分かった。

ID	12	13	ID	12	13
0	4.7020	4.5466	8	0	6.1477
1	5.0293	6.6646	9	3.7836	4.9934
2	5.8837	4.1664	10	3.4046	4.0762
3	6.6049	6.7747	11	4.7790	5.4929
4	5.0876	4.8724	12	9.7267	4.2099
5	5.1781	3.6974	13	0	4.8633
6	5.7806	3.5872	14	7.4255	6.4313
7	0	4.2119	15	4.8678	3.5252

表 5: 較正曲線の各値

検出素子	mean	error	sigma	error
<i>10-13</i>	1592.9	0.9	144.3	0.8
<i>0-13</i>	1608.8	0.9	143.0	0.8
<i>DeltaT</i>	-12.4	0.9	154.1	0.7

表 6: 10-13,0-13 検出素子の時間の揺らぎ。単位は ns。

4 考察

4.1 求めた時間分解能の評価

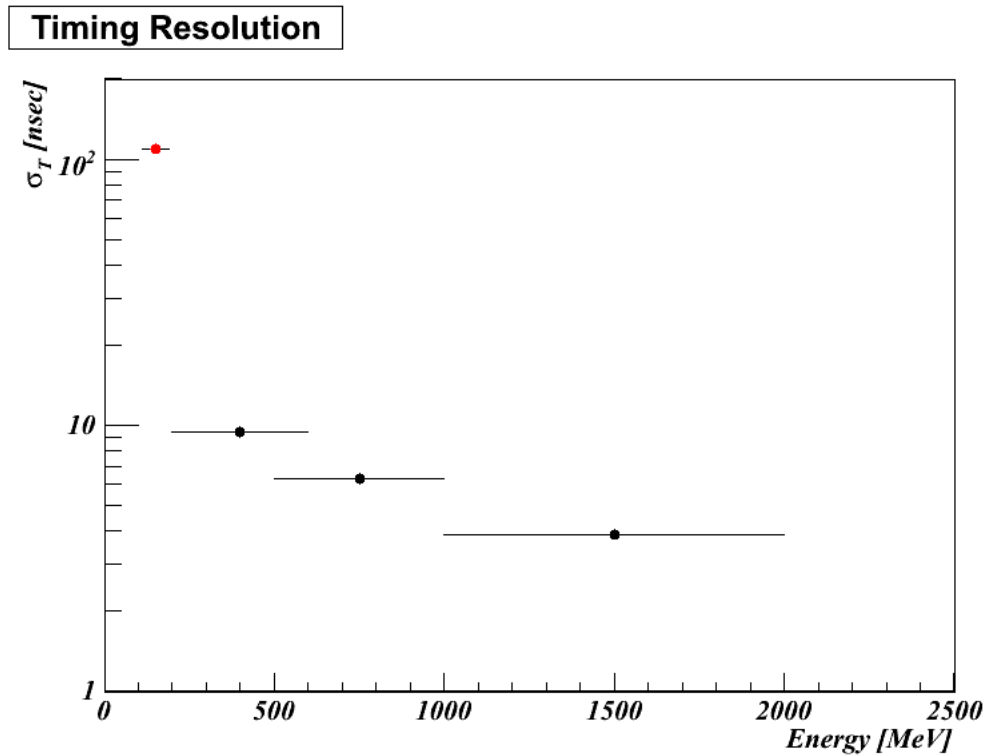


図 50: 入射エネルギーに対する時間分解能。赤い点が、本実験で求めた値である。

ADC に記録された波形と時間分解能 図 50 は、入射ビームのエネルギーに対する検出素子の時間分解能をまとめたものである²。本実験で求めた値は、左端の 150MeV のエネルギーに対する時間分解能で、 108.9 ± 0.5 [ns] である。この結果から、低エネルギー領域では、時間分解能が著しく低下することがわかった。これは、低エネルギーの入射信号では出力波形の立ち上がりが緩やかになり、ガンマ 2 関数でフィットした波形とペDESTAL との交点を求める際に広がりを持ってしまうためと考えられる。そ

²D.Peressounko, Offline analysis of 2007 cosmic data

のことから逆に、高エネルギー領域で時間分解能がある極値に収束していくことも予測される。

上記の結果を得た事象の中でさらに、2つのPWOへのエネルギーの落ち方に条件をかけて各素子の p_1 及びその差をヒストグラムにしたものが図51,52,53である。

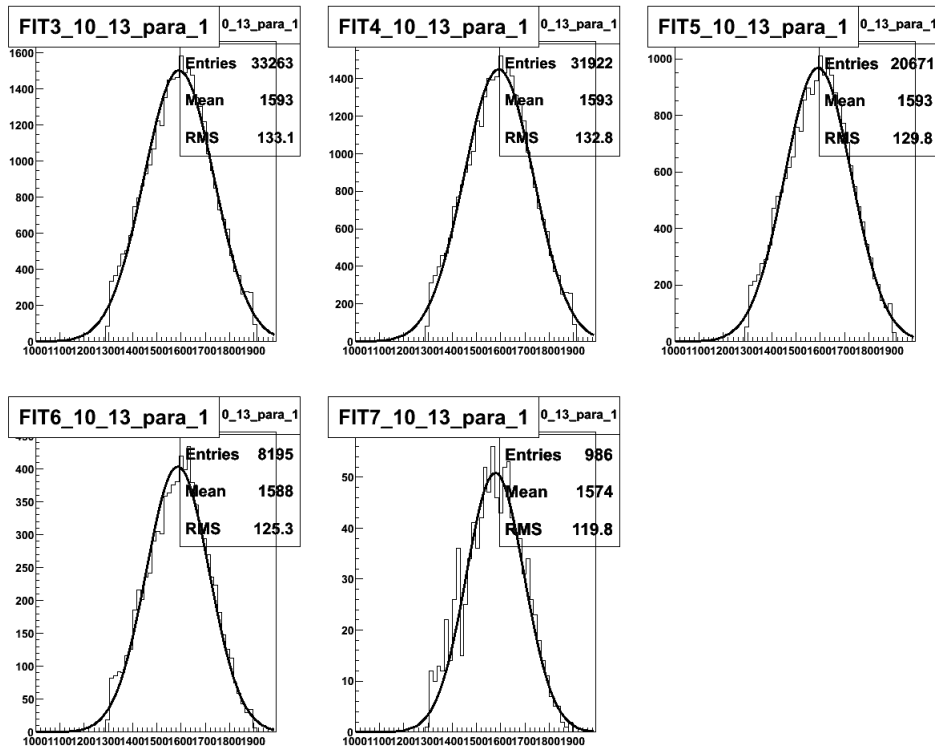


図 51: PWO へのエネルギーの落ち方に条件をかけたときの p_1 : 10-13

横軸の単位は全て ns である。左上のヒストグラムから右へ順に制限なし、両方に 10MeV 以上落とした事象、両方に 30MeV 以上落とした事象、両方に 50MeV 以上落とした事象、両方に 70MeV 以上落とした事象という条件がかけられている。表 7,8,9 にはその時の中心値と立ち上がり時間の揺らぎとなる 1σ の幅をまとめた。その値を見比べると、落としたエネルギーが高くなるにつれて明らかに 1σ 幅が小さくなり、表 10 にまとめた時間分解能も良くなっている。本実験においてエネルギーの高さは、ADC に記録される入力波形の高さに相当するものである。この結果から入力波形の高さが高いほど時間分解能が良くなることが分かり、先ほど

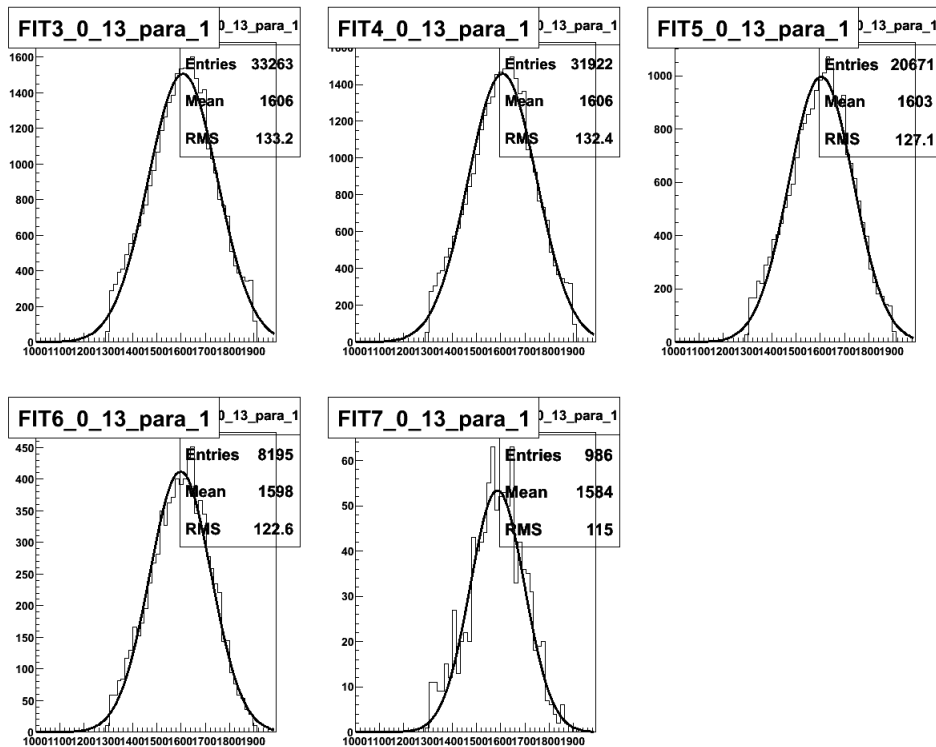


図 52: PWO へのエネルギーの落ち方に条件をかけたときの p1 : 0-13

の考察が正しかったことが裏付けられたと言える。

表 10 で、時間分解能が 10-13 素子より 0-13 素子の方が良かった理由も入力波形の高さから理解できる。各素子に落ちたエネルギーは共に条件の値以上であるが、前出の較正係数が異なるため実際の入力波形の高さも異なっている。具体的には、例えば 70MeV 以上の条件の場合、10-13 素子にかかる条件は ADCch で 15.396 なのに対し、0-13 素子には 17.1729 の条件をかけている。つまり、同じエネルギーの落ち方を要求しても、条件をくぐりぬけてる出力波形の高さが 0-13 素子の方が高いためフィットした関数のグラフとペDESTAL との交点がより正確に求まり、結果として時間分解能が良く求められたと考えられる。

時間分解能が ADC に記録される入力波形の高さに依存するのなら、その精度を高めるために APD の増幅率を上げる方法が考えられる。高い増幅率で、小さな波形も立ち上がりの鋭いピークを持った波形にしてやれば、時間分解能は、例え低エネルギー領域においても良い精度を示すと

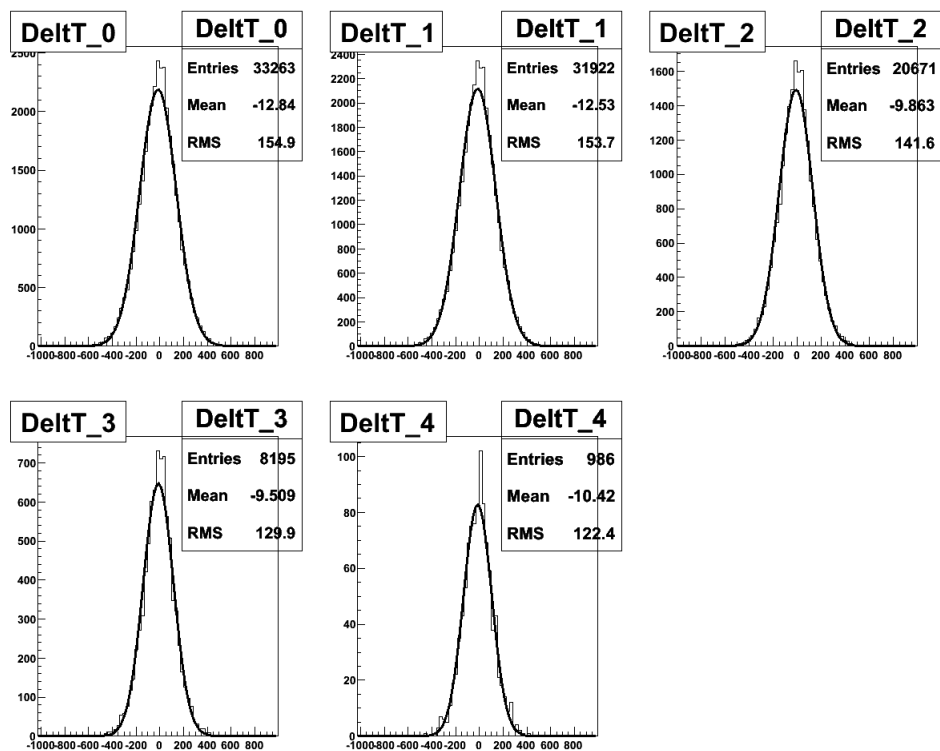


図 53: PWO へのエネルギーの落ち方に条件をかけたときの p_1 の差

考えられる。ただし、PHOS が置かれる ALICE 実験では、上は TeV 領域に達する程の広いエネルギー領域での測定を要求されるので、すべての測定範囲をカバーするためには、増幅率を引き上げることは現実的には難しいと言わざるをえない。

光子測定への応用 本実験の結果から、入射粒子が作るクラスターの再構築に関して、エネルギーによる再構築の重みのかけ方の低エネルギー領域の指標が求まったといえる。クラスターとは、1入射粒子がPWOで起こす電磁シャワーの総量のことであるが、入射粒子が落としたエネルギーをこのクラスターから求めることができる。

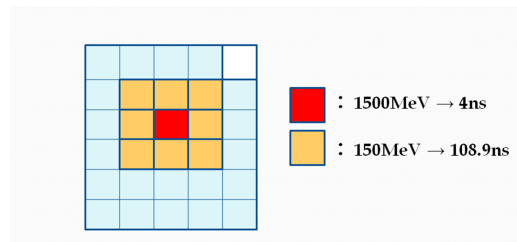


図 54: 入射粒子が作るクラスターの再構築と時間分解能の応用

ある事象でPWOにクラスターが生じたとき、高いエネルギーが落ちた素子と低いエネルギーが落ちた素子について、時間分解能がADC波形の高さに依存するために同じ事象で発生したクラスターでも再構築の際の信頼度にずれが生じる。図54で1500MeVのエネルギーが落ちた素子ではその事象を4nsの精度で判別できるのに対し、150MeVのエネルギーが落ちた素子では約100nsの精度でしか事象を判別できない。時間分解能の比較から、信頼性の低いクラスターは切り捨てることもできるが、本実験の結果求められた値を用いることでクラスター再構築の際のエネルギーの足し合わせに重みをかけ、切り捨てるよりも正確な再構築を行えると期待できる。その結果、入射粒子が落としたエネルギーも精度よく求まり、光子検出の精度も向上すると考えられる。極端に時間分解能が悪く同事象かどうかの判断がつかないときは、クラスターの一部を切り捨てて再構築を行うしかないが、その判断の指標としても、本実験の結果は有意義である。

4.2 行列計算を用いた時間分解能の導出

本実験以外の時間分解能の測定点は、個々の検出素子の時間分解能の差は小さいとした仮定をたてて求められており、素子単体の時間分解能は求められていなかった。しかし本実験で用いた手法では、個々の素子の時間分解能だけでなく、トリガーの時間分解能も求めることに成功し

た。この手法ならば、検出素子1本1本の時間分解能を求めることが可能であり、測定本数を増やしていくことでより精度のよい時間分解能の導出が行える。また、場合によっては何らかの原因で本来の時間分解能を発揮できない素子が検出器の中に含まれる可能性がある。そのようなときにも、本手法の結果から時間分解能の低い素子を選び出し、交換する等の対処が行えると期待する。

4.3 課題と展望

較正係数 本実験を行い出てきた課題の一つに、較正係数の求め方がある。今回行ったミュオンによる較正係数の決定手法は、性能評価機の構造上不向きであった。性能評価機とシンチレータの間に距離があるため、どうしても不必要な事象を拾ってしまうからである。幾何学的な位置関係から、上下のシンチレータを通過したミュオンは、性能評価機間で約52mmの範囲を横切ることになる。つまり最高3つのPWOを通過することは自明で、PWO1本のみを通過する事象を狙う実験の配置としては、不適であったことを認めざるを得ない。また、性能評価機を組み上げてからの実験も測定を困難にしていたと思われる。深さを持つ検出器のため、隣接させてしまうと隣どうして影響を及ぼしあい、複数のPWOを通過する事象を拾いやすくする。本性能評価機の検出素子の場合、例えば1本ずつ較正係数を求めた上で組み立てることや、電子線を全ての素子に打ち込み直接較正係数を求めるなどの対策が必要であった。

一方で、新たな方法も提示された。ミュオンのつくるピークのフィットによる較正係数の決定は、今回大きな成果を挙げたといえる。始めlogスケールでもノイズや低エネルギーのテールに隠れていたミュオンのピークが、数事象の確認から求めた条件をかけたフィッティングにより、logスケールでなくともはっきりとピークを確認できるまでになった。まだまだ確立された手法ではないが、今回のように出力波形がある程度の範囲でそろっている場合には、有効な手段であるといえる。

性能評価機は今後も製作は続けられ、場合によっては大型化することも考えられる。検出素子の較正係数を求める作業は、今後大きな課題となることが予測される。

出力波形のフィットに関して 本実験では様々なデータの解析について、フィッティングが重要な位置を占めていた。そのフィットの関数は既存の

マクロが存在しそれを流用したが、図 55, 56 のヒストグラムで明らかに REFER データではない事象の統計が溜まっている。

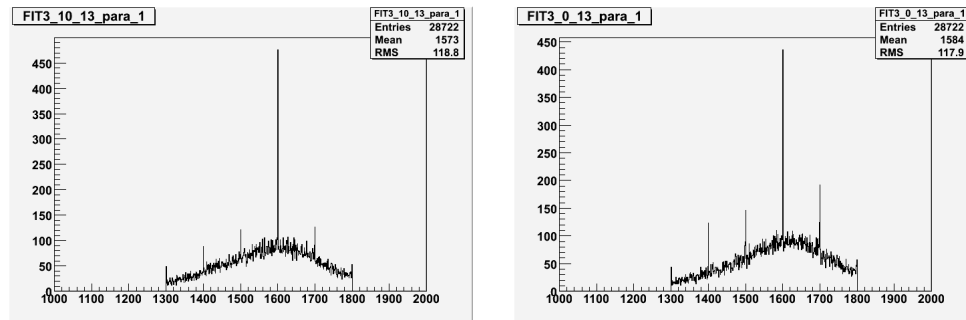


図 55: 10-13PWO の p1 のヒストグラム 図 56: 0-13PWO の p1 のヒストグラム

このマクロを精査していくと、ある個所でフィッティングに制限をかけているのを見つけた。そこでは、期待する event の波形からずれたものに整数値の制限で少し強引なフィットを行っていた。その制限を超えるような場合は、付近の整数値にまとめられるように書かれていたため、先の図のように整数値に鋭い peak を持つ histogram が作られた。図 55,56 は図 47,48 の、制限を取り除く前のヒストグラムである。図 44,45 に見られる p2 の不可解なピークも同じ理由により作られたと考えられる。制限を外して素子ごとに p2 の値を取り直すと図 58,59 のようになり、不可解なピークは消えた。ADC に記録された入力波形のフィットを行う時の制限のかけ方は、今後の解析で見直すべき点である。

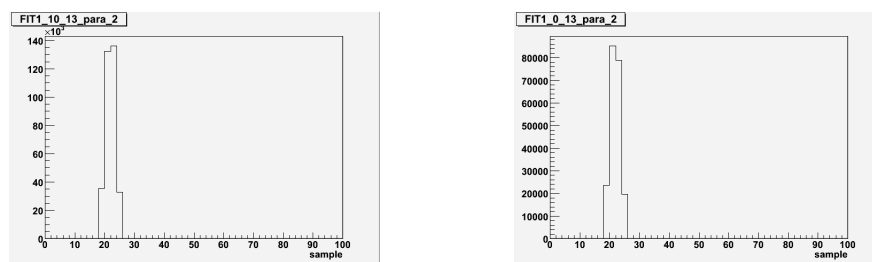


図 57: フィットの制限を外したときの p2 : 10-13 図 58: フィットの制限を外したときの p2 : 0-13

ノイズレベル 図 46 のエネルギーの分布で、中心値が $131.6 \pm 0.4\text{MeV}$ で 146.5MeV にならず少し低エネルギー側にずれているのは、事象選択

の条件をかけたときに電磁シャワーによって複数の PWO に広がって落ちた電子線のエネルギーを全て拾い切れていないことによると考えられる。図 44 などからわかるように、本実験のノイズは数 ADC チャンネル分の揺らぎを持ち、エネルギーにすると 10MeV 程度の信号はノイズと区別できない。そのため、同程度の ADC 波形の高さしか持たない入力信号は、どうしてもフィットによる選択にはかからない。解決策としてはノイズ除去が挙げられるが、本性能評価機のエネルギー分解能は PHOS と同程度で世界最高レベルであり、これ以上の性能の向上は現時点では難しい。

時間の揺らぎを生み出す場所 本実験の結果から、性能評価機の時間分解能は、ADC に記録される入力波形の高さに依存することが示された。また、増幅率を上げて ADC 波形の高さを高くすれば、時間分解能が良くなる可能性も示された。これは、素子の時間分解能を決める上で、どの部分の寄与が支配的であるかを探るのにとっても重要な指標となる。

時間の揺らぎを生み出す箇所として、例えば APD の光子の入力に対する反応時間の揺らぎも考えられる。APD の反応時間の揺らぎは、ADC 波形で言うとフィットした波形とペDESTAL の交点そのものが揺らぐことを意味するので、その揺らぎは時間分解能に大きく影響すると考えられる。一方で、素子の時間分解能は、光子検出部分よりも FEE などの信号処理回路部分での処理時間の揺らぎによる影響が支配的であるとする意見もある。FEE の時間分解能を調べるだけなら、電子線などの入力を必要とすることなく、人工的なパルス信号の入力で調べることができる。今後の課題として、素子の時間分解能がどの部分の寄与により支配的に決められているかをつきとめ、その部分の改良を行うことで、素子の時間分解能を良くしていくことが挙げられる。

条件	mean	error	sigma	error
なし	1592.9	0.9	144.3	0.8
10MeV以上	1593.3	0.9	143.8	0.8
30MeV以上	1592.4	1.1	138.0	0.9
50MeV以上	1587.4	1.6	129.6	1.2
70MeV以上	1578.9	4.1	119.2	3.0

表 7: エネルギーの落ち方に条件をかけたときの p1 のヒストグラムの値 : 10-13

条件	mean	error	sigma	error
なし	1608.8	0.9	143.0	0.8
10MeV以上	1608.6	0.9	141.5	0.8
30MeV以上	1604.9	1.0	132.7	0.9
50MeV以上	1598.8	1.5	126.7	1.2
70MeV以上	1587.9	3.9	112.0	3.1

表 8: エネルギーの落ち方に条件をかけたときの p1 のヒストグラムの値 : 0-13

条件	mean	error	sigma	error
なし	-12.4	0.9	154.1	0.7
10MeV以上	-12.2	0.9	152.8	0.7
30MeV以上	-9.5	1.0	140.0	0.8
50MeV以上	-9.3	1.4	127.5	1.2
70MeV以上	-11.8	3.9	118.7	3.3

表 9: エネルギーの落ち方に条件をかけたときの p1 の差のヒストグラムの値

条件	σ_{t_1}	error	σ_{t_2}	error	σ_{trig}	error
なし	109.8	0.5	108.1	0.5	93.7	0.6
10MeV以上	109.5	0.5	106.6	0.5	93.1	0.6
30MeV以上	102.5	0.6	95.3	0.5	92.3	0.6
50MeV以上	92.2	0.9	88.1	0.9	91.0	0.8
70MeV以上	88.8	2.4	78.8	2.3	79.6	2.0

表 10: エネルギーの落ち方に条件をかけたときの時間分解能。 σ_{t_1} が 10-13 素子、 σ_{t_2} が 0-13 素子、 σ_{trig} がトリガーの時間分解能に対応。

5 結論

本研究では、広島大学に構築した PHOS の性能評価機に、広島大学超高速電子周回装置の 150 MeV 電子線を入射して性能評価実験を行った。その結果、性能評価機は、150 MeV の電子線の入射に関して、 108.9 ± 0.5 [ns] の時間分解能を持つことが分かった。また、行列計算による時間分解能の導出手法を確立し、検出素子 1 つ 1 つの時間分解能を導出することにも成功した。本結果から、1 GeV を下回る低エネルギー領域での素子への入射信号の扱い等に定量的な指標を与えることができ、これを用いて、PHOS の目的である光子検出の精度の向上が期待される。

6 謝辞

本研究を行うにあたり、担当指導教官である杉立先生をはじめ、志垣先生、本間先生、学振PDの鳥井さん、特任助教の洞口さんには多くのご指導を賜りました。また、クォーク物理学研究室の先輩方からは、昼夜問わず多くの助言を戴きました。特に原田さんには、ご自身の博士論文執筆でお忙しい中、解析手法や論文の方向性などについて、貴重なご意見を多数戴きました。そして、共にクォーク物理学研究室に配属された坂口君と山本さんにも、研究室生活を送る上で大変お世話になりました。皆様には私の知識不足、説明不足のためお掛けしたご迷惑を謝罪すると共に、改めてここに感謝の意を表します。

この論文を書き上げる中だけでなく、クォーク物理学研究室で学んだことを今後の研究に生かし、一層努力していきたいと思えます。本当に有難うございました。

参考文献

- [1] 永江・永宮 『原子核物理学』 裳華房
- [2] 原 康夫 『素粒子物理学』 裳華房
- [3] Hans Muller 『PHOS basics for the users』
- [4] D.Peressounko 『Offline analysis of 2007 cosmic data』
- [5] 杉立 徹 『平成 15 年度～平成 17 年度科学研究費補助金 基盤研究 (B)(2) 研究成果報告書』
- [6] 丸山 悠 『平成 18 年度理学士卒業論文』
- [7] 溝口 謙太 『平成 18 年度理学士卒業論文』
- [8] 中馬 文広 『平成 19 年度理学士卒業論文』
- [9] 日栄 綾子 『平成 19 年度理学士卒業論文』