

平成 22 年度卒業論文

# PWO シンチレータ電磁カロリメータの 発光量位置依存性測定のための研究

広島大学理学部物理科学科

クォーク物理学研究室

B072478 櫻井 貞義

指導教官 杉立徹 教授

主査 三好隆博 助教

副査 八木隆多 准教授

平成 23 年 2 月 10 日

## 要旨

電磁カロリメータは、高エネルギー粒子衝突実験にて生成される光子や電子などのエネルギー測定に特化した検出器である。電磁カロリメータの結晶に入射した光子や電子は、高エネルギー領域でエネルギーを落としながら電磁シャワーを生成し、エネルギーが終息領域に達すると蛍光を発する。電磁シャワーの蛍光量が入射粒子のエネルギーに比例する事から、光量測定により入射粒子のエネルギーを評価できる。一方、光は結晶中で減衰、拡散するため、センサーの読み取る光量は、光源の位置に依存する。従って、入射粒子のエネルギーと実際にセンサーによって測定される信号の大きさには、非線形な関係がある。しかし、PWO シンチレータ電磁カロリメータの応答特性の詳細は未だ明らかではないため、発光量位置依存性を明らかにすることは、高エネルギー物理実験において、より高精度な測定の実現に繋がる。

入射粒子のエネルギーに対する PWO シンチレータ電磁カロリメータの応答特性を明らかにするため、本研究では横置きした PWO 結晶 ( $22 \times 22 \times 180\text{mm}^3$ ) に、宇宙線由来の MIP (最小電離粒子、物質中でのエネルギー損失が一定である) を真上から入射させ、入射区域ごとの蛍光量を測定する実験を考察した。しかし、本実験設定において宇宙線由来の MIP が放つ蛍光量は極めて低く、信号が検出器系の雑音に埋もれる問題がある。そこで、広島大学の PHOS 性能評価機を用いて以下 2 つの予備研究を行った。

- (1) PHOS 性能評価機の動作確認
- (2) PWO 結晶群水平方向横置き時の宇宙線測定データから MIP 情報を取り出す研究

(1) の動作確認では、クラスター法により MIP ピークを求め、一部のチャンネルを除いて過去の MIP ピークと  $\sim 33\text{ADC count}$  で一致した事を確かめた。(2) の研究では、途中、外部雑音による共通雑音が混入するハプニングがあったものの、MIP ピークを単独のチャンネルに対しての解析と、列単位での解析の、独立した 2 つの解析法により各々導き出すことに成功した。



## 目次

1	導入	6
1.1	電離化と MIP	6
1.2	宇宙線とミュオン	7
1.3	制動放射	8
1.4	電子陽電子対生成	8
1.5	電磁シャワー	9
1.6	シンチレーションと電磁カロリメータ	9
1.7	電磁カロリメータの発光位置依存性	10
1.8	本研究の目的	11
2	実験装置	12
2.1	PWO 結晶	12
2.2	APD	13
2.3	PHOS 性能評価機	14
2.4	プラスチックシンチレータと PMT(光電子増倍管)	16
3	測定	17
3.1	宇宙線測定のための実験装置のセッティング	17
3.2	PMT の HV 最適値の決定	19
3.3	LED ランとペDESTALラン	22
4	測定結果と解析 (1)	24
4.1	PWO 結晶群鉛直方向直立時の LED ラン	24
4.2	PWO 結晶群鉛直方向直立時のペDESTALラン	24
4.3	PWO 結晶群鉛直方向直立時の宇宙線測定ラン	26
4.4	ガンマ 2 関数によるフィッティングと $p_0$ ヒストグラム	28
4.5	クラスター法	30
5	測定結果と解析 (2)	32
5.1	PWO 結晶群水平方向横置き時の LED ラン	33
5.2	PWO 結晶群水平方向横置き時のペDESTALラン	34
5.3	PWO 結晶群水平方向横置き時の宇宙線測定ラン	36
5.4	$p_0$ ヒストグラム	38
5.5	単独チャンネルでの解析	40
5.6	列単位での解析	43
5.6.1	XY の相関	43
5.6.2	アイボールフィットによる補正と (X-Y) ヒストグラム	43
5.6.3	(X-Y) を用いたカット	46

6	考察	50
7	結論	51

# 1 導入

はじめに、本研究を知る上で必要な基礎知識について説明する。それを踏まえ、本研究の背景や目的について言及する。

## 1.1 電離化と MIP

10MeV/c ~ 10GeV/c 程度の運動量をもつ荷電粒子は、物質中に入射するとイオン化や原子の励起によってエネルギーを損失する。そのエネルギー損失の割合の平均値は、以下のベータ・ブロッホの式によって与えられる。

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{MAX}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

$E$  は入射粒子のエネルギー、 $K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$  ( $N_A$  はアボガドロ定数、 $r_e$  は古典論的電子半径、 $m_e$  は電子の質量)、 $z$  は入射粒子のもつ電荷量、 $Z$  は物質の原子番号、 $A$  は物質の原子質量、 $\beta = v/c$  ( $v$  は入射粒子の速度)、 $\gamma = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}}$ 、 $T_{MAX}$  は自由電子に対する一回あたりの衝突で与え得る最大の運動エネルギー、 $I$  は物質原子の平均励起エネルギー ( $= 16Z^{0.9} \text{eV}$  ( $Z > 1$ ))、 $\delta$  は密度効果補正の項 (入射粒子の運動量の増加に伴う入射粒子のエネルギー損失の上昇を抑える作用をもつ、図 1 の "Without  $\delta$ " 参照) である。ベータ・ブロッホの式の特徴として、エネルギー損失の大きさが粒子の質量には依らない事、入射粒子のもつ電荷の二乗  $z^2$  に比例する事、入射粒子の速度  $\beta$  についての関数とみなせる事が挙げられる。

図 2 より、 $\beta\gamma$  が 3 から 3.5 の時、入射粒子が物質中の原子を電離化するのに必要なエネルギー損失の最小値をとる。特に、ミューオン、パイ中間子 ( $\pi^\pm$ )、陽子などの荷電粒子は、この最小値に近いエネルギー損失の平均値をもち、最小電離粒子 (MIP、Minimum Ionizing Particle) と呼ばれる。

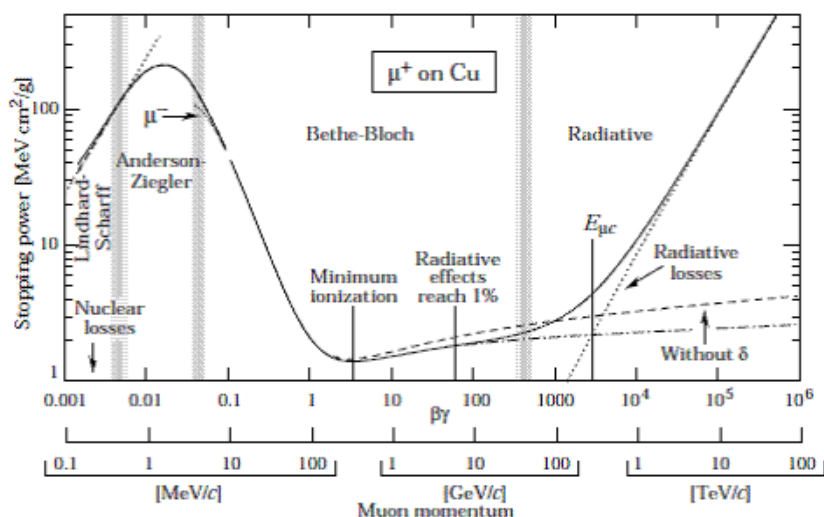


図 1 入射粒子の運動量とエネルギー損失 [1]。電離化によるエネルギー損失が支配的なベータ・ブロッホの領域は 10MeV/c ~ 10GeV/c で、それを超えると制動放射が支配的な領域になる。また、 $\delta$  (密度効果補正の項) があるため、ベータ・ブロッホの領域にてエネルギー損失が平坦に保たれている。

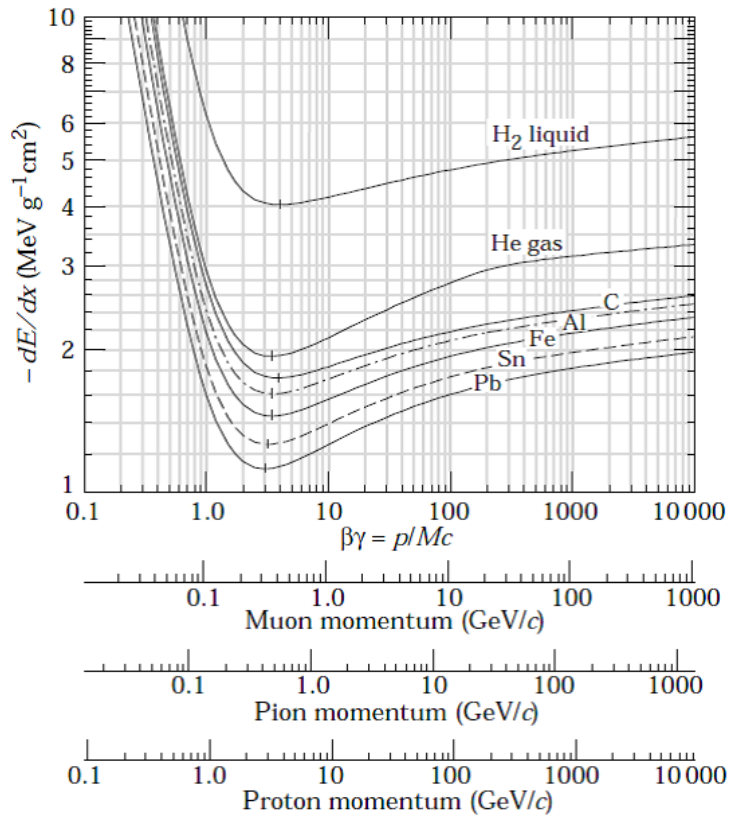


図2 様々な物質における、ベータ・ブロッホ領域での入射粒子の運動量とエネルギー損失 [1]。エネルギー損失の平均値がほぼ最小値な粒子を最小電離粒子 (MIP) と呼ぶ。

## 1.2 宇宙線とミュオン

宇宙からは、主に陽子から成る一次宇宙線という高エネルギー粒子が飛来している。一次宇宙線が大気中に入り、大気中原子と反応を起こす事で、新たな粒子に変わる(二次宇宙線)。その多くがパイ中間子であり、荷電パイ中間子はミュオンに崩壊する。ミュオンは宇宙線の中で、ニュートリノに次いで多く地上で観測され、地上で平均 4GeV のエネルギーをもち、主に上空 15km にて生成される。

ミュオンは電子などの仲間であるレプトンに分類され、静止質量  $105.658369 \pm 0.000009$  MeV、平均寿命  $2.19703 \pm 0.00004$   $\mu\text{sec}$ . であり、レプトンである。 $\mu^-$  の場合、ほぼ 100 % の確率で、電子と反電子ニュートリノとミュニュートリノに崩壊する。また、ミュオンは透過性に優れており、X 線などをはね返す巨大な岩盤も透過する。

先述した通り、宇宙線由来のミュオンは MIP であり、物質中で一定のエネルギー損失を落とす。そのため、ミュオンは高エネルギー物理実験において、エネルギー較正などに頻繁に用いられる。

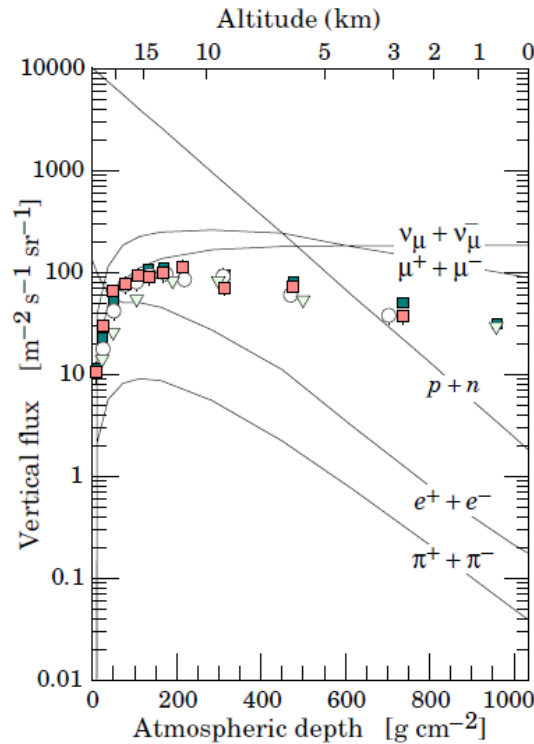


図3 高度と宇宙線の強度 [1]。地上で観測される粒子の中で、ミューオンはニュートリノに次いで多い。また、ミューオンは透過性に優れており、MIP である事から、高エネルギー物理実験においてよく使われる。

### 1.3 制動放射

制動放射とは、高速の荷電粒子が物質中原子核の電場との散乱により、光子を放射する現象である。制動放射の反応断面積は  $(z/m)$  に比例するため、電子のように質量の小さな荷電粒子では、電離化損失よりも制動放射の方がエネルギー損失の寄与が大きい。電子における制動放射によるエネルギー損失は、以下の式のように表せられる。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0} \iff E = E_0 \exp\left(-\frac{x}{X_0}\right)$$

ここで、 $X_0$  は放射長と呼び、物質中にて入射電子のエネルギーを  $1/e$  にする厚さに等しい。また、電子のエネルギーが小さい場合、電離化によるエネルギー損失が支配的となる。電離化によるエネルギー損失と、制動放射によるエネルギー損失の値が等しくなるエネルギーを臨界エネルギーと呼び、 $E_c \sim 580/Z$  MeV と近似できる。

### 1.4 電子陽電子対生成

高エネルギーの光子が電子と陽電子の対に変換される現象を対生成と呼ぶ。対生成は、エネルギーと運動量の保存則により真空中では禁止されるが、物質中の原子核のクーロン場との相互作用によって起き得る。光子のエネルギーが電子と陽電子の質量の和  $2m_e c^2$  を超えると対生成は起きる。



## 1.5 電磁シャワー

物質中に高エネルギーな電子（陽電子）が入射すれば制動放射が起きる事は、前述した通りである。更に、生成された光子もまた、電子陽電子対生成を起こす。このように、物質中で電子（陽電子）光子電子（陽電子）光子...と繰り返す事により、粒子がシャワー状に広がる現象（電磁シャワー）が起きる。電磁シャワーが発達するにつれ、エネルギーは減衰していく。電子は臨界エネルギー  $E_c$  に達するまで電磁シャワーを生成し続け、 $E_c$  を下回ると電磁シャワーの生成は止まり、電離化や励起を起こすようになる。

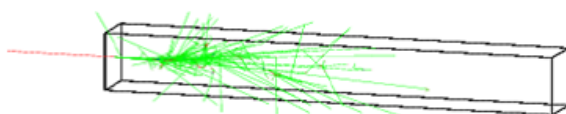


図4 クリスタル内で生成される電磁シャワー。電離化によるエネルギー損失が支配的なエネルギー領域に落ち着くまで、制動放射と電磁シャワーを繰り返す。

また、高エネルギーな光子についても、同様に電磁シャワーを生成するが、平均的には光子が1放射長進んだところで電子陽電子対生成を起こすため、電磁シャワーが発生する深さが電子（陽電子）の場合と比べて1放射長分ずれる。

シャワーの横方向の広がり、低いエネルギーの多重散乱によって決まる。この広がり具合の指標として、以下のようなモリエール半径  $R_M$  が使われる。

$$R_M = X_0 \frac{21.2 \text{ MeV}}{E_c}$$

なお、電磁シャワーのエネルギーの99%は  $3R_M$  内に収まる。

## 1.6 シンチレーションと電磁カロリメータ

荷電粒子が物質中を通過しエネルギー損失を起こすことにより、物質中電子を基底状態から励起状態に遷移させる。その電子が励起状態から基底状態に遷移する時、光を放つ現象、或いはその光の事をシンチレーション（蛍光）と呼ぶ（特に、その光をシンチレーション光と呼ぶ事もある）。例えば、宇宙線由来のMIPや電磁シャワーは、物質中でシンチレーションを起こす。

また、シンチレータ（シンチレーションを起こす蛍光物質）に入射した粒子のエネルギー損失は、シンチレーションの量に比例する。従って、シンチレータは、蛍光量を測定する事で入射粒子のエネルギー損失を評価できる検出器（シンチレーション検出器）として用いられる。

電磁カロリメータは、高エネルギー粒子衝突実験にて生成される光子や電子などのエネルギー測定に特化した検出器である。具体的には、入射してきた電子や光子をシンチレータの結晶内で電磁シャワーを起こさせ、臨界エネルギーに達した粒子の蛍光量の和を測定する。入射粒子のエネルギーの大小は、電子シャワーの発展規模に関わり、シンチレーションの数にも反映されるため、蛍光量の和の測定により入射粒子のエネルギーを測定する事ができる。

## 1.7 電磁カロリメータの発光位置依存性

電磁カロリメータの結晶内での電磁シャワーが、シンチレーションを起こす位置について。もし、入射粒子が高いエネルギーをもつ場合、電磁シャワーを起こしながら臨界エネルギーに達するまで長い距離を進むため、入射してから奥の位置でシンチレーションを起こす。逆に、低いエネルギーをもっていたら、すぐ臨界エネルギーに達するため、手前の位置でシンチレーションを起こす。

このことから、電磁カロリメータによる、入射粒子のエネルギー損失測定の致命的な問題が浮かび上がる。1つ目は、光は物質中で減衰していく性質に寄与する(図5)。物質の種類によって光の減衰の度合いは異なるが、多かれ少なかれ減衰するのは確かである。光が物質中を進む距離が長いほど、物質に遮られる機会が多いため、光量は減る。入射粒子のもつエネルギーが低い場合、シンチレーションを起こす場所はセンサーから離れているため、減衰した光をセンサーが拾う事になる。この場合、電磁カロリメータによる、入射粒子のエネルギー損失の測定値は、実際のエネルギー値よりも低く見積もってしまう。

2つ目は、光は光源から放射線状に拡散する性質に寄与する(図6)。シンチレーションを起こす位置が、センサーから近いかわいかわいかで、センサーが拾う光量は異なる。つまり、センサーと光源との距離が2倍になると、光源から見た立体角は4倍になるため、読み取る光量は1/4倍になる。光がよそへ逃げるのを避けるべく、実際の電磁カロリメータの結晶は、反射しやすくするようにその側面が研磨加工されていたり、結晶の周りが金属枠や集光特性を高める特殊な樹脂で囲まれていたり、様々な工夫が施されている。しかし、これらの工夫によって、拡散による光の漏れを全てカバーできるわけではない。

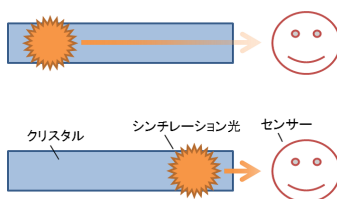


図5 光源位置が遠い場合と近い場合での、クリスタル(結晶)内の光の減衰の様子。距離によって、センサーの読み取り量が変わる。

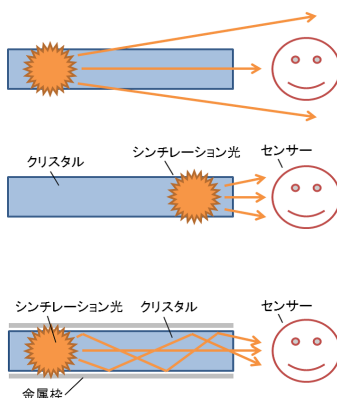


図6 光源位置が遠い場合と近い場合での、光の拡散の様子。距離によって、センサーの読み取り量が変わる。光の拡散対策として、金属枠など、クリスタル(結晶)内で全反射を起きやすくする工夫が施されている。しかし、光の漏れを完全に防ぐ保証はない。

以上2点から、センサーの読み取る光量は、シンチレーションする位置に依存し、入射粒子のエネルギーと実際にセンサーによって測定される信号の大きさには、非線形な関係がある。LHC 加速器の ALICE 実験など、PWO シンチレータ電磁カロリメータ (PWO 結晶を用いたシンチレータ電磁カロリメータ) を用いた実験現場では、その非線形性によるずれを解消するための補正がなされている。しかし、その応答特性の詳細は未だ明らかでないため、発光量位置依存性を明らかにすることは、高エネルギー物理実験において、より高精度な測定の実現に繋がる。

シンチレーションの発光量の位置の依存性を測定する手法として、フィンガーシンチレータという細長いシンチレータの対を PWO 結晶の上下に複数列セットし、各々の対でトリガーをかける。これにより、PWO 結晶の各区域での、入射した宇宙線由来の MIP のエネルギー損失を測定する。

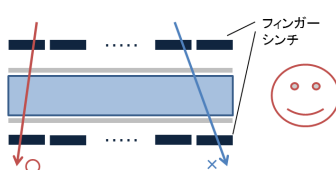


図7 PWO シンチレータ電磁カロリメータの発光量位置依存性測定。PWO 結晶の各区域をフィンガーシンチ (フィンガーシンチレータ) によりトリガーをかけ、各区域での MIP のエネルギー損失を測定する。

## 1.8 本研究の目的

本研究では、PWO シンチレータ電磁カロリメータの発光量位置依存性測定のための研究として、以下2つの予備研究を行った。

- (1) PHOS 性能評価機の動作確認
- (2) PWO 結晶群水平方向横置き時の宇宙線測定データから MIP 情報を取り出す研究

なお、PHOS 性能評価機とは、広島大学にある PWO シンチレータ電磁カロリメータを備えた検出器のことであり、いずれの予備研究も PHOS 性能評価機を用いる。(1) は、従来通りのセットアップで宇宙線測定を行い、従来通りの MIP の情報を得られるかどうかの確認を行った。(2) は、水平方向に横置きした PWO 結晶に真上から MIP が通過した際、わずかなシンチレーションしか起こさないため、そのエネルギー損失の情報を取り出す事が難しい。そこで解析を中心に、雑音を取り除き、MIP の情報を取り出す研究を行った。今後、上記2つの研究の事を (1)、(2) と表記する。

## 2 実験装置

本実験で使用した実験装置について紹介する。

### 2.1 PWO 結晶

PWO 結晶は、無機シンチレータである鉛タングステン酸単結晶 ( $\text{PbWO}_4$ ) を  $22 \times 22 \times 180\text{mm}^3$  に加工した結晶である (図 8)。PWO の性能について、他の無機シンチレータの性能を並べて表 1 に載せる<sup>\*1</sup>。PWO 結晶は、比重は  $8.3\text{g/cc}$  と重く、放射長は  $0.89\text{cm}$  と短いため、コンパクトな電磁カロリメータを構成する事が可能である。また、モリエール半径が  $2.0\text{cm}$  と短い事から、2 粒子分離分解能を追及する GeV 領域の電磁カロリメータ素材として優れている。ただし、蛍光量が他の電磁カロリメータに使われるシンチレータと比較して非常に少ないため、工夫が必要である。図 9 によると、PWO 結晶の発光量は、温度が  $1^\circ\text{C}$  下がるごとに約 3% 増加する。つまり、温度を下げた状態にする事で、発光量の少なさをカバーできる。今回は、大型冷蔵庫を用いて  $-25^\circ\text{C}$  に下げて実験を行う。

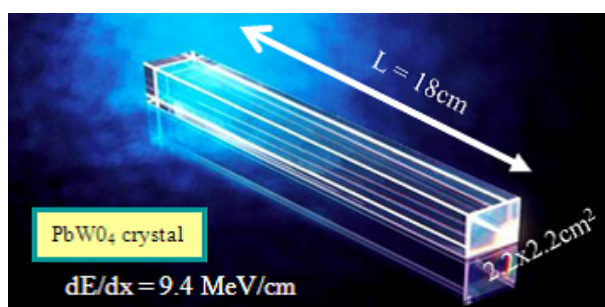


図 8 PWO 結晶 [9]。重い比重、短い放射長、短いモリエール半径をもつ。蛍光量の少なさは、温度を下げる事で解消できる。

表 1 無機シンチレータ [1]

物質	比重 [g/cc]	放射長 [cm]	$R_M$ [cm]	$dE/dx$ [MeV/cm]	減衰時間 [ns]	光量 [NaI] 比
NaI	3.67	2.59	4.14	4.8	230	1
PWO	8.3	0.89	2.00	10.2(PHOS仕様:9.4)	$10^f$ $50^s$	$0.006^f$ $0.001^s$
BGO	1.12	1.12	2.23	9.0	300	0.9
CsI	1.86	1.86	3.57	5.6	$6^f$ $35^s$	$2.3^f$ $5.6^s$

<sup>\*1</sup> 表 1 の  $f$  は fast component、 $s$  は slow component を指す。

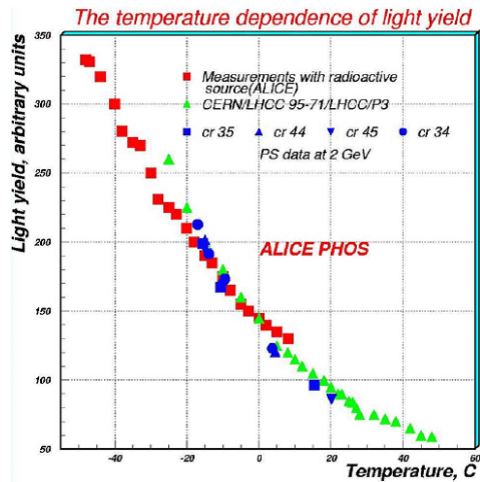


図9 PWO 結晶の発光量の温度依存性 [2]

## 2.2 APD

シンチレーション光を読み取るセンサーとして今回、アバランシェ・フォト・ダイオード (APD) を用いる。電圧印加時に引き起こす電子なだれ (アバランシェ) を利用して光電子を増倍させる。特徴として、外部雑音の影響を受けやすいため受光面積は小さくせざるを得ないが、量子効率が高く、磁場の影響を受けず、温度を下げると増幅率が上がる事が挙げられる。特に、量子効率が高い事は、PWO が発する微弱な光を測定するためには外せない要素である。

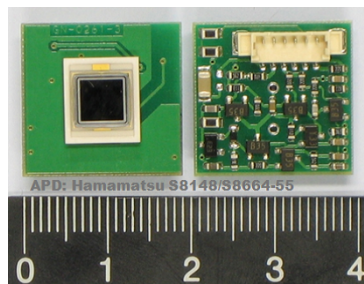


図10 APD[2]。量子効率が高く、磁場の影響を受けないのが強み。

表2 読み出しセンサーの比較

	APD	PMT(光電子増倍管)
量子効率	~0.7	0.15 ~ 0.25
増幅率	$10 \sim 10^8$	$10^3 \sim 10^7$
面積 [mm <sup>2</sup> ]	$10 \sim 10^3$	$10^2 \sim 10^5$
強磁場環境下	影響なし	増幅率が変化

## 2.3 PHOS 性能評価機

PHOS とは、LHC 加速器の ALICE 実験が備える検出器の事である。今回は、広島大学にある、PHOS 性能評価機を使って実験を行った。29本の PWO 結晶で1つの PWO 結晶群を成しており、29本の PWO 結晶に APD が施されてある。29本の PWO 結晶は  $6 \times 5$  個のチャンネル (PWO 結晶の入る便宜上の箱) に収められ、ID を左上のチャンネルから右に (1,1)、(1,2)、(1,3)、... という具合に命名する。なお、(1,5) は PWO 結晶が空なチャンネルである。

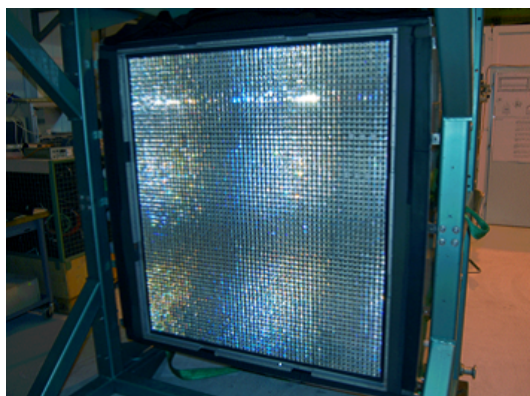


図 11 PHOS[9]。LHC 加速器の ALICE 実験にて使用されている検出器である。1 モジュールにつき、PWO 結晶が 3584 個含まれている。



空っぽ				
(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(1,5)
(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(2,5)
(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(3,5)
(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)	(4,5)
(5,1)	(5,2)	(5,3)	(5,4)	(5,5)
(6,1)	(6,2)	(6,3)	(6,4)	(6,5)

PWO結晶のチャンネルの  
IDは(行,列)に対応。

図 12 29本の PWO 結晶が詰まった PWO 結晶群。それぞれに APD が備えられている。以後、この研究において、チャンネルの呼び方を上記の方法で統一する。

PHOS 性能評価機は各チャンネルでのデータ収集回路は PHOS と同じで、異なる点はトリガー方法、磁場の有無、読み出しチャンネル数 (PHOS: 3584 個/1 モジュール、PHOS 性能評価機: 29 個) である。データ収集回路として、PWO 結晶群から読み出し系が CSP、shaper、High gain/Low gain、ADC と続いている。CSP (Charge Sensitive Preamplifier) は APD の出力の電荷の総量に比例した値を出力する。立ち上がり時間は 15-20ns で、時定数  $100\mu\text{s}$  で減衰する。CSP の出力から時間及び波高情報を次の数値化回路で引き出しやすくするため、shaper で正規分布に近い波形に整形する。整形波形を 2 分割し、High gain (高利得) と Low

gain(低利得)の2つに出力する。これらの利得比は16倍として、High gain側では5MeV~5GeV、Low gain側では80MeV~80GeVのエネルギー領域に適する。High gain側とLow gain側の各々の出力に対しADCをもつ。ADCは10MHzでサンプリングを行い、デジタル処理を施す。PWO結晶で入射粒子が落ちたエネルギーは、最終的にADC count[ch]として変換され、High gain側では1ADC count=5MeV、Low gain側では1ADC count=80MeVである。

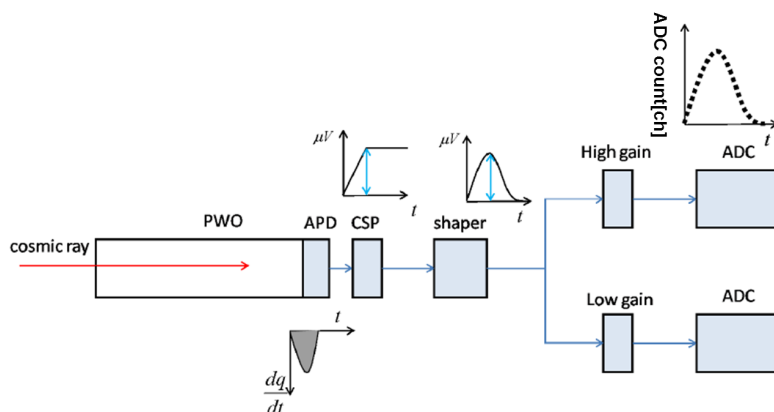


図13 PHOS性能評価機の読み出し系 [5]。CSPでAPDからの電子の電荷量に比例した値を出し、shaperで正規分布に近い波形に整形する。High gain又はLow gainで利得を増やし、ADC出力を行う。

表1から、PWOでの入射粒子のエネルギー損失は10.2MeV/cmであるが、PHOS仕様の場合MIPのエネルギー損失は9.4MeV/cmだから [2]、PHOS性能評価機でも9.4MeV/cmを採用している。よって、High gainを採用して1.88ADC count/cmとなる。

図14のように、ADC countの最大値からペDESTALを引いた分(=AMP)は、入射粒子のエネルギー損失に比例する。但し、結晶の各チャンネルで個体差をもつため、各APDで異なる適正なHVをかける必要がある。また、ペDESTALを特定すべく、はじめの15サンプリングの後に、入射粒子についての情報が反映される構造になっている [2]。

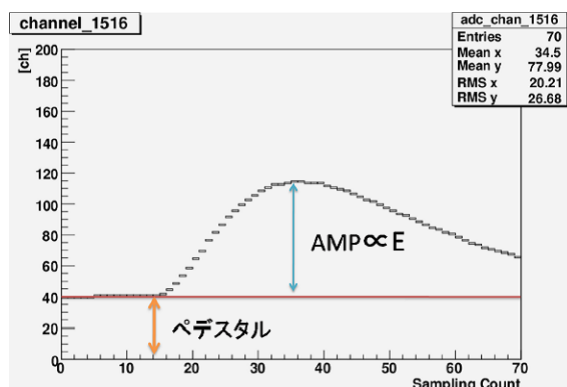


図14 PHOS性能評価機の読み出し系 [5]。PHOS仕様だとMIPのエネルギー損失は9.4MeV/cmより、High gainを用いて1.88ADC count/cmと変換できる。

## 2.4 プラスチックシンチレータと PMT(光電子増倍管)

プラスチックシンチレータは、代表的な有機シンチレータの一つである。プラスチックシンチレータの特徴として、蛍光の減衰時間が  $2\sim 3\text{ns}$  と非常に短いため、宇宙線のような速い粒子の検出に使われる。そして、光量が多い事が特徴として挙げられる。また、プラスチックはその成形のしやすさから、様々な形の検出器が容易に作成できる。1.7 本研究の背景 で出てきたフィンガーシンチレータも、プラスチックシンチレータの一種である。

プラスチックシンチレータで発生したシンチレーション光を、ライトガイドを介して、PMT(光電子増倍管)へと導く。光が PMT 内に入ると、コンプトン散乱・光電効果により光電子に変換される。更に、PMT に負の HV(ハイ・ヴォルテージ、高電圧)を印加する事により光電子は加速し、PMT 内の金属板に複数回衝突する事で、その数を増倍する。今回の実験では、 $20 \times 20\text{cm}^2$  の面積をもつプラスチックシンチレータと PMT を組み合わせたものを 2 組準備し、トリガーシンチレータ (粒子が入射したタイミングを知らせる役割をもつシンチレータ) として使用する。

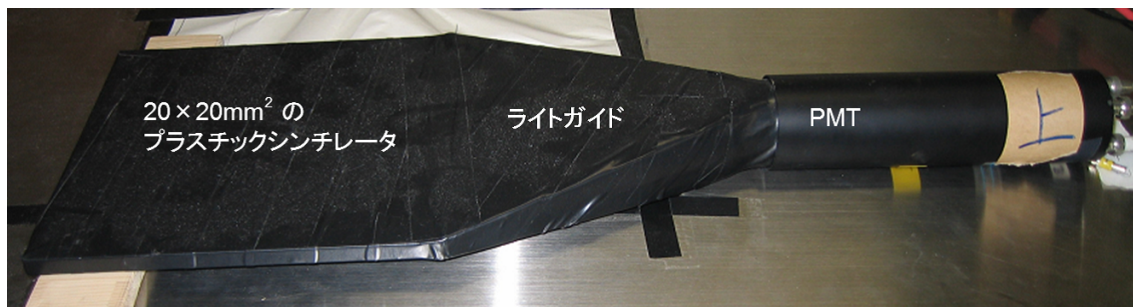


図 15 プラスチックシンチレータと PMT。トリガーシンチレータとして用いる。



### 3 測定

測定のための準備や、測定方法について述べる。

#### 3.1 宇宙線測定のための実験装置のセッティング

PWO 結晶が十分な蛍光量を出すためには、温度が $-25$  度の環境を作る必要がある。そのため、実験用の冷蔵庫の中に PWO 結晶を入れる。また、宇宙線のトリガーシンチレータとして、プラスチックシンチレータを、冷蔵庫の外側で、かつ PWO 結晶の上下になるように各々置く。本研究 (1) での測定では、従来通り、PWO 結晶群を鉛直方向に直立させ、本研究 (2) での測定では、水平方向に横置きする。

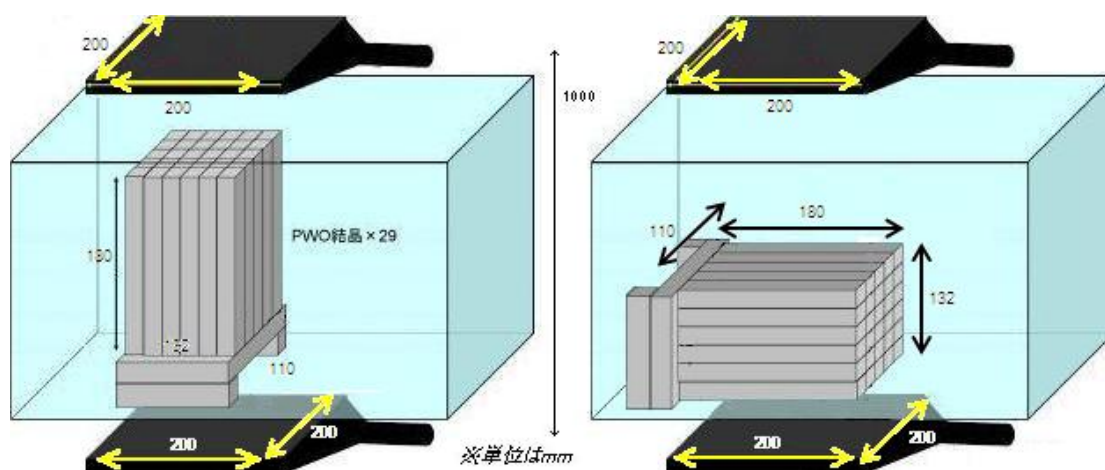


図 16 宇宙線測定のセットアップ。左:PWO 結晶群直立時 (1)/右:PWO 結晶群横置き時 (2)。PWO 群上下にトリガーシンチレータを置く。この図の加工前の図は [9] より。

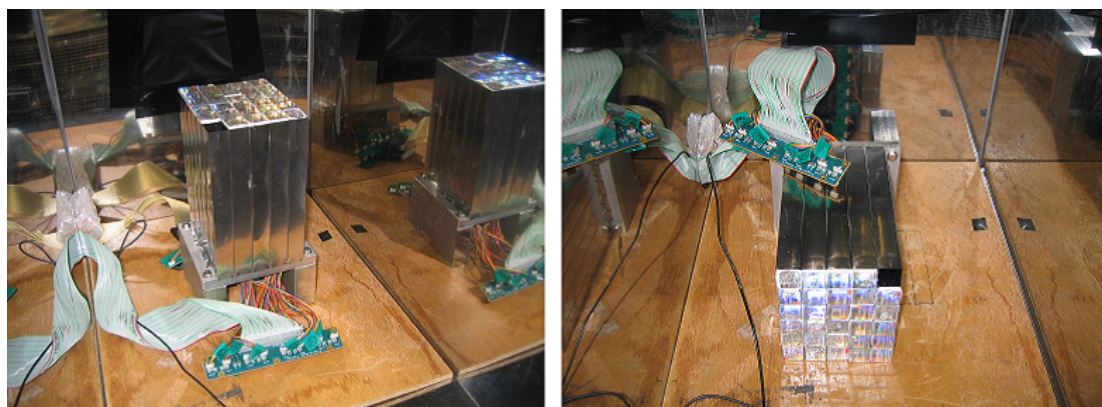


図 17 冷蔵庫内での実際の PWO 群の配置。左:PWO 結晶群直立時 (1)/右:PWO 結晶群横置き時 (2)。左の図は [9] より。

図 18 について。FEE card には、shaper、High/Low gain、ADC など、PWO シンチレータ電磁カロリメータの読み出し系において出力信号の変換・増幅に必要な回路が詰められていて、FEE card の操作やデータ処理を行うのが RCU ボードである。トリガーシンチレータのプラスチックシンチレータが蛍光を発すると、PMT、ディスクリミネータ、コインシデンスを介して RCU に信号が送られ、そのタイミングでの PWO シンチレータ電磁カロリメータでの信号が読み出され、DAQ コンピュータへと蓄積される。ディスクリミネータは、PMT から負のアナログ信号を NIM 信号に変換する NIM モジュールであり、負の閾値がある。例えば閾値が-50mV の時、PMT から信号が-55mV ならば NIM 信号に変換するが、-30mV なら受け付けない。コインシデンスは、2 つ以上の NIM 信号に、論理演算子でいう "AND" の役割を果たす NIM モジュールである。NIM とは、米国原子力委員会 (AEC) において 1966 年に制定された標準規格の事であり、それに準じた信号やモジュールの事を各々、NIM 信号、NIM モジュールと呼ぶ。

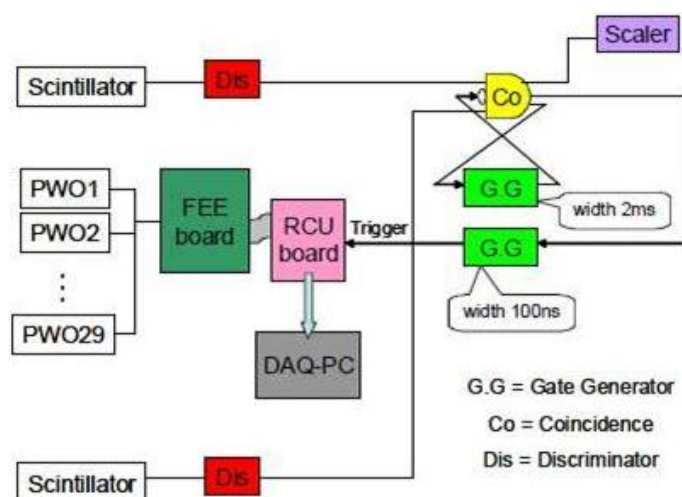


図 18 宇宙線測定の回路図 [9]。上下の scintillator(シンチレータ)からの信号がやがて RCU board へ伝わり、トリガーがかかる。

### 3.2 PMT の HV 最適値の決定

宇宙線測定を行う際、トリガーシンチレータが宇宙線の降ってきたタイミングを情報として伝達する必要がある。そのためには、トリガーシンチレータの PMT の HV を適正な値だけかける必要がある。PMT の HV は負の値をもち、その絶対値が高いほど、光電子の増倍具合も高くなり、ディスクリミネータに送る信号の電圧値の絶対値も高くなる。HV の絶対値が低いと、例えば MIP が通過した時でもその信号の電圧値がディスクリミネータの閾値に達せず、NIM 信号として伝達されず、統計量を損する恐れがある。逆に HV の絶対値が高いと、PMT 内の熱雑音をいたずらに増やしてしまい、アクシデンタルなイベント (MIP が通過してないにもかかわらず、偶然コインシデンスしてしまうイベント) を増やす恐れがある。トリガーを送る頻度 (トリガーレート) が、宇宙線の飛来頻度に一致するように、HV を決める必要がある。

ここで、宇宙線の飛来頻度を算出する。上のトリガーシンチレータのある 1 点を通った宇宙線が下のトリガーシンチレータを通る時の立体角は、以下の様に表せる。

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2}$$

ここで、S は下のトリガーシンチレータの面積、r は上下のトリガーシンチレータの間の長さである。これを積分する事により、以下の様に立体角の値は求まる。

$$\int d\Omega = \int \frac{dx dy}{r^2}$$

$$\begin{aligned}\Omega &= \frac{20\text{cm} \times 20\text{cm}}{(100\text{cm})^2} \\ &= 0.04\text{sr}\end{aligned}$$

宇宙線の飛来頻度は、求めた立体角に宇宙線のミュオン強度 (図 3 から  $90^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1} \times (20\text{cm})^2$ ) と上のトリガーシンチレータの面積をかけて求められる。

$$\begin{aligned}f &= \Omega \times \mu_{flux} \times S \\ &= 0.04\text{sr} \times 90^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1} \times (20\text{cm})^2 \\ &= 0.144\text{Hz}\end{aligned}$$

はじめ、従来通りのセットアップ (3) で、トリガーレートを測定したら、 $0.0824 \pm 0.0007$  Hz だった。これは、本来降ってきた宇宙線の 6 割程度しか拾えない事を意味する。

表 3 トリガーシンチレータについての、従来 of セットアップ

トリガーシンチレータ PMT の HV	(上、下)=(-1500V、-1550V)
ディスクリミネータの閾値	(上、下)=(-50mV、-50mV)
2 枚のトリガーシンチレータとの距離	100cm
上記の条件での従来 of トリガーレート	0.146Hz

トリガーレートが低いのは、従来の PMT の HV の適正値が今回のコンディションにおいて適さないためだと判断した。そこで、今回のコンディションにおける PMT の HV の適正値を決定するための測定を行った。方法として、一方の PMT の HV 値を固定し、他方の PMT の HV を変えてながらトリガーレートを測定した。なお、シングルレート (コインシデンスかけておらず、単独の PMT からの信号が来る頻度) は指数関数的に増加するが、トリガーレートはある領域で頭打ちし、平坦域となる。この平坦域の HV 値を最適値として採用する。なお、更に HV の絶対値が極端に高いと、アクシデンタルなイベントの増加により増える。

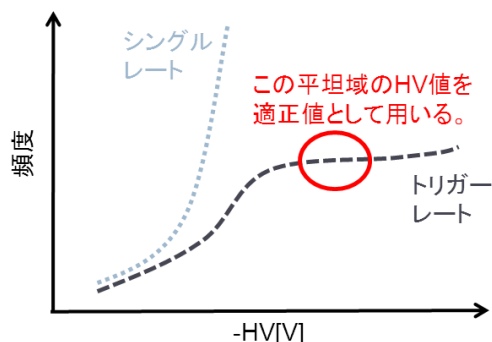


図 19 HV を変えた時のシングルレートとトリガーレート。トリガーレートの平坦域を HV 適正値とする。

まず、上のトリガーシンチレータの PMT の HV を-1500V に固定したまま下のトリガーシンチレータの PMT の HV を変えた時の頻度を測定した。なお、ディスクリミネータの閾値は上下とも-50mV、2つのトリガーシンチレータとの間の距離は 30cm である。この段階で、下のトリガーシンチレータの PMT の HV の適正値を-1550V とした (図 20)。

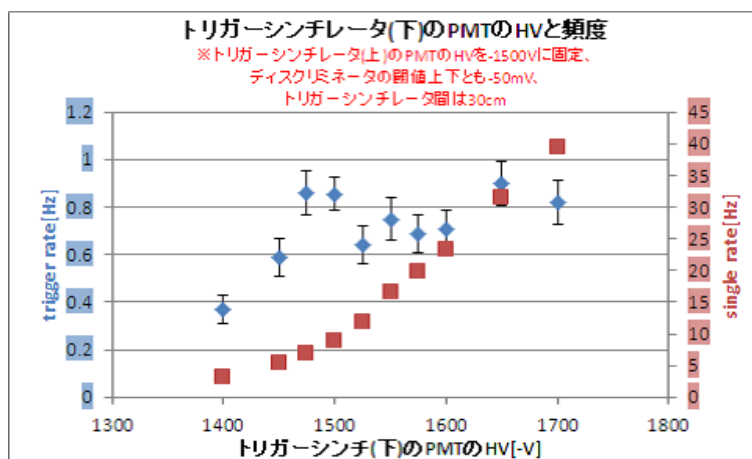


図 20 トリガーシンチ (トリガーシンチレータ) (下) の HV と頻度 (トリガーレートとシングルレート)。トリガーシンチレータ間が 30cm である事に注意。適正値を-1550V とした。

次に、下のトリガーシンチレータの PMT の HV を暫定適正値の-1550V に固定したまま上のトリガーシンチレータの PMT の HV を変えた時の頻度を測定した。この時も、ディスクリミネータの閾値は上下とも-50mV、2つのトリガーシンチレータとの間の距離は 30cm である。下のトリガーシンチレータの PMT の HV の暫定適正値を-1600V とした (図 21)。

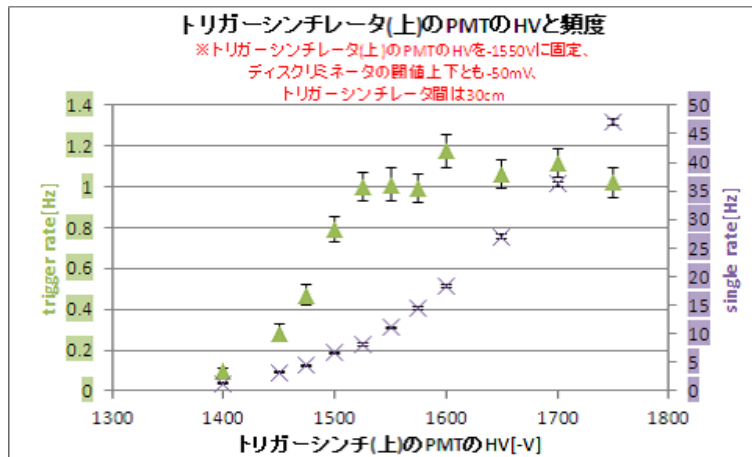


図 21 トリガーシンチ (トリガーシンチレータ)(上) の HV と頻度 (トリガーレートとシングルレート)。トリガーシンチレータ間が 30cm である事に注意。適正値を-1600V とした。

PMT の HV の暫定適正値が (上、下) $=(-1600V、-1550V)$  とし、ディスクリミネータの閾値を上下とも $-50mV$ 、トリガーシンチレータ間の距離を 100cm にして、トリガーレートを測定したら、 $0.1270\pm 0.0006Hz$  となった。見積もり値の  $0.144Hz$  を考慮すると、統計の 1 割弱を損している事になる。そこで後日、2 つのトリガーシンチレータとの間の距離を 100cm、HV を  $(-1600V、-1550V)$  から $-50V$  ずつ増やして頻度を測定した (図 22 参照)。トリガーレートは約  $0.14Hz$  で横ばいになっている事から、アクシデンタルなイベントは含まれていない。また、 $(-1600V、-1550V)$  のトリガーレートは日によって揺らぎが大きい事から、それより $-50V$  大きい  $(-1650V、-1600V)$  を最終的な PMT の HV 最適値として採用した。

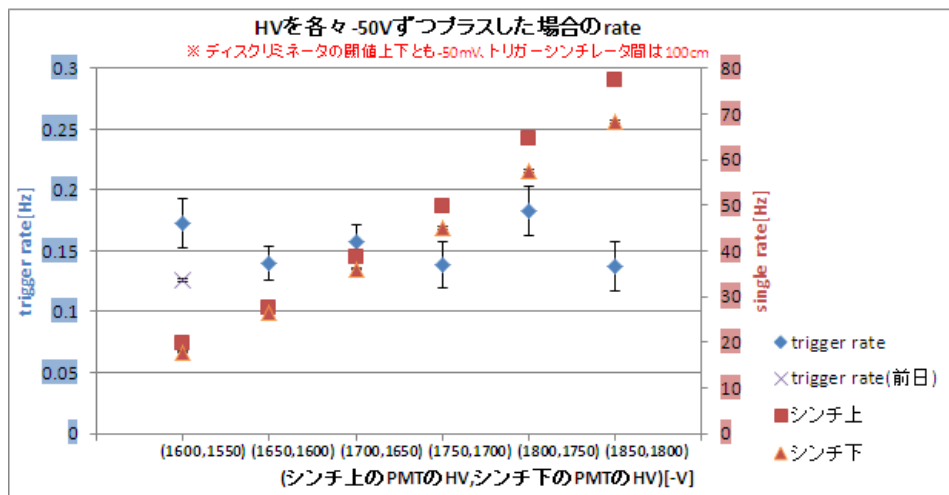


図 22 上下のシンチ (トリガーシンチレータ) の HV と頻度 (トリガーレートとシングルレート)。トリガーレートは約  $0.14Hz$  で横ばいとなり、 $(-1600V、-1550V)$  のトリガーレートは日によって揺らぎが大きいため、 $(-1650V、-1600V)$  を最終的な PMT の HV 最適値とした。

なお、PMT の HV を (上、下) $=(-1650V、-1600V)$  に変更して、改めてトリガーレートを測定したら  $0.146\pm 0.001 Hz$  となった。

表4 トリガーシンチレータについての、今回のセットアップ

トリガーシンチレータ PMT の HV	(上、下)=(-1650V、-1600V)
ディスクリミネータの閾値	(上、下)=(-50mV、-50mV)
2枚のトリガーシンチレータとの距離	100cm
上記の条件での従来のトリガーレート	0.146±0.001 Hz

### 3.3 LED ランとペDESTALラン

本研究では、宇宙線測定のほか、LED ラン、ペDESTALランも行う。

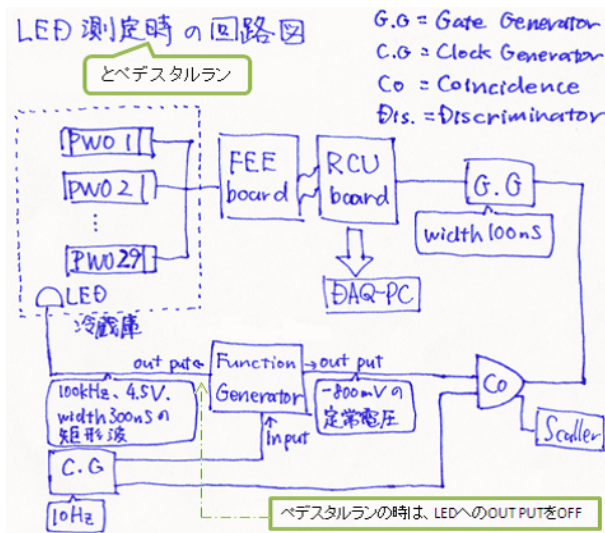


図23 LED測定とペDESTALラン時の回路図。ペDESTALラン時はLEDへのOUT PUTを切る。

LEDランは、冷蔵庫内にセットしたLEDランプを100kHzの光をPWO結晶に入れて測定する。トリガーはトリガーシンチとは無関係な10Hzの信号を用いる。宇宙線がPWO結晶に入った瞬間に、たまたまトリガーをかけてしまう事も考えられるが、非常に小さな確率なので無視できる。宇宙線の飛来頻度が0.146Hzに対し、LEDランのトリガーは10Hzで、1度の点灯で全てのPWO結晶に感知されるため、PHOS結晶のチャンネル別の動作確認に適している。また、LEDはPWO結晶中でエネルギー損失をせず、直接APDに届くため、APDのHV適正値を求めるのに使われる。

APDのHVの最適値については、測定により決定したのではなく、参考文献[9]のものを採用した(図24参照)。<sup>[9]</sup>の研究において、PHOS性能評価機のADC出力値をPHOS仕様の1.88ADC count/cmに合わせるべく、LEDランを用いてAPDのHV最適値を求めていたためである。本研究(1)であるPHOS性能評価機の動作確認の一環として、このHV値でのPHOS性能評価機を用いて、宇宙線測定ランのデータからMIPのADC countを解析により導き、<sup>[9]</sup>の解析結果と比較する<sup>\*2</sup>。

\*2 詳しくは4.5 クラスター法を参照。

(1,1) 335 V	(1,2) 326 V	(1,3) 304 V	(1,4) 367 V	(1,5) ---
(2,1) 335 V	(2,2) 378 V	(2,3) 377 V	(2,4) 377 V	(2,5) 355 V
(3,1) 341 V	(3,2) 369 V	(3,3) 365 V	(3,4) 371 V	(3,5) 353 V
(4,1) 323 V	(4,2) 304 V	(4,3) 324 V	(4,4) 360 V	(4,5) 359 V
(5,1) 325 V	(5,2) 287 V	(5,3) 290 V	(5,4) 313 V	(5,5) 343 V
(6,1) 295 V	(6,2) 292 V	(6,3) 323 V	(6,4) 318 V	(6,5) 303 V

上段:ID / 下段:APDのHV値

図 24 今回採用した、APD の HV 最適値 [9]。PHOS 仕様の 1.88ADC count/cm となるように調整された値である。

ペDESTALランは、PWO 結晶が何も感知していないイベントを集計するランである。ADC 出力としては、ペDESTALのみとなる事から、ペDESTALランと呼ぶ。測定方法について、LED を点灯させない事以外は LED ランとまったく同じである。LED ランと同様、10Hz でトリガーをかけるため、PHOS 結晶のチャンネル別の動作確認に適している。また、ペDESTALランは宇宙線測定ランとの比較や、後の解析の時に必要である。更に、ペDESTALランでの ADC 出力信号が不安定な波を作る場合、外部雑音が入っている可能性があるため、外部雑音の混入の有無を調べる手段としても使える。

実際に行った LED ラン、ペDESTALラン、宇宙線測定ランの統計量の情報を表 5 に記す。本研究 (1) と (2) で、PWO 結晶群の向きを変えて測定する必要があるため、計 6 種類のランを行った。

表 5 各ランでの統計量

	PWO 結晶群鉛直方向直立時	PWO 結晶群水平方向横置き時
LED ラン	100 イベント	80 イベント
ペDESTALラン	13k イベント	280k イベント
宇宙線測定ラン	60k イベント	270k イベント
cf. 過去の宇宙線測定ラン [9]	100k イベント	—————

## 4 測定結果と解析 (1)

第一章で述べた通り、本研究では、(1) PHOS 性能評価機の動作確認、(2) PWO 結晶群水平方向横置き時の宇宙線測定データから MIP 情報を取り出す研究の 2 つの研究を行った。そこで、第 4 章では (1) について、第 5 章では (2) についての測定結果と解析を記載した。

### 4.1 PWO 結晶群鉛直方向直立時の LED ラン

PWO 結晶のチャンネルごとの振る舞いを見るため、はじめに LED ランを行った。各 PWO 結晶に対して入射する光量は異なるため、ADC 信号の波高も異なる。この段階で、PWO 結晶の入ったチャンネルではいずれも山型の信号を作り、動作する事を確認した。

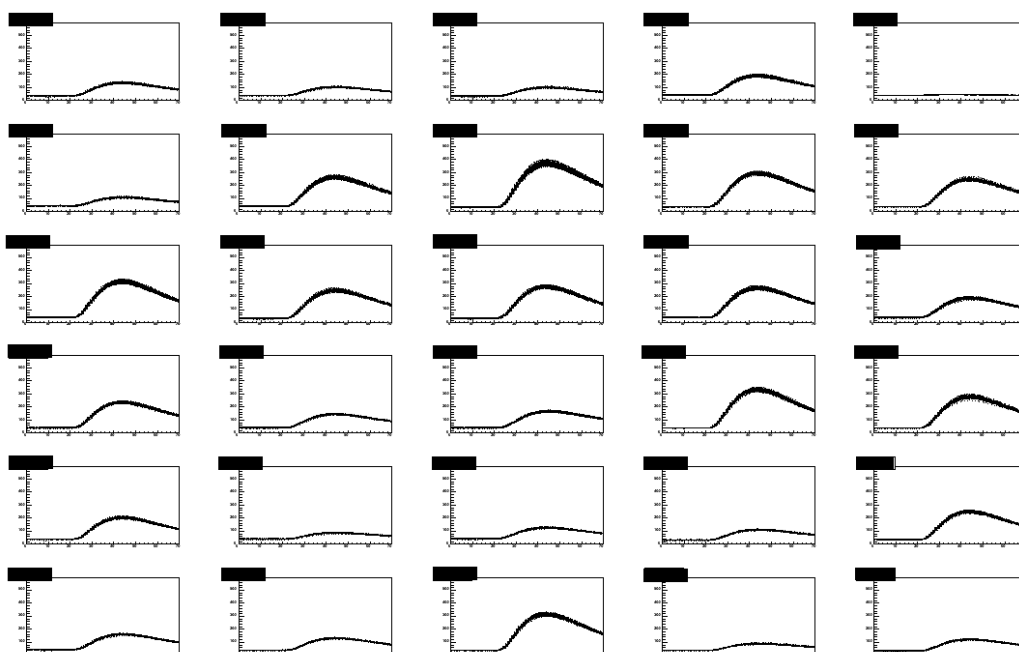


図 25 LED ラン (PWO 結晶群鉛直方向直立時) から、ADC 出力信号を 100 イベント重ね書き。横軸 0 ~ 70 サンプリング (0 ~ 7 $\mu$ s)、縦軸 0 ~ 600ADC count。PWO 結晶を入れたチャンネル全てにおいて、山型の信号を作ったので、動作する事を確認した。

### 4.2 PWO 結晶群鉛直方向直立時のペDESTALラン

次に、ペDESTALランを行った。ペDESTALの信号は安定しており、外部雑音の混入はない。また、このランは、後の解析のクラスター法でも用いる。



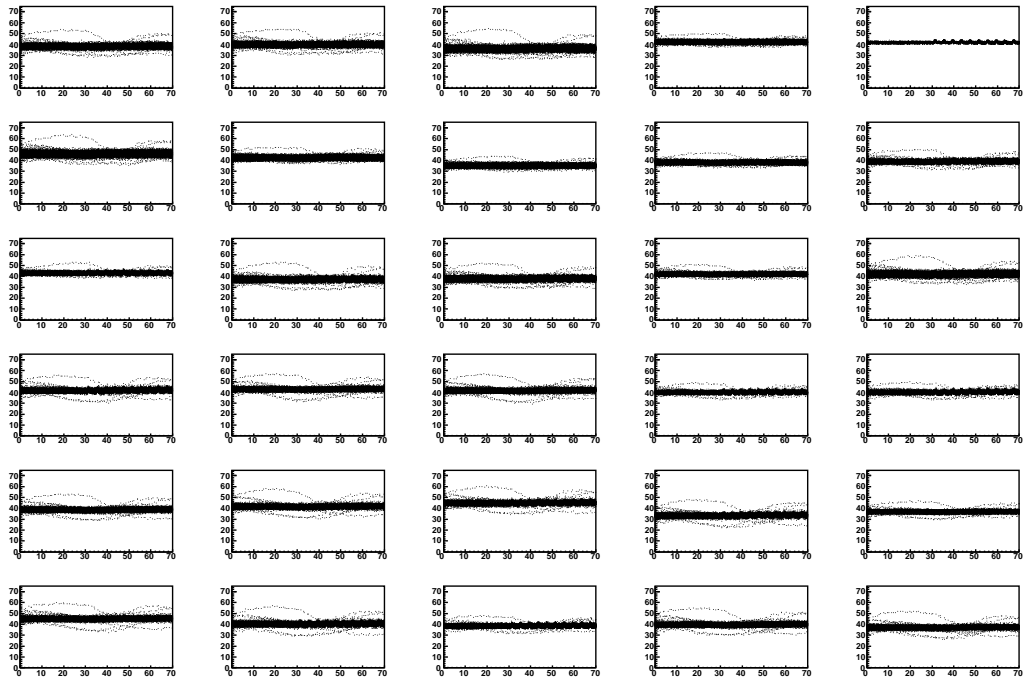


図 26 ペDESTALラン (PWO 結晶群鉛直方向直立時) から、ADC 出力信号 500 イベントを重ね書き。横軸 0 ~ 70 サンプルング (0 ~ 7 $\mu$ s)、縦軸 0 ~ 70ADC count。40ADC count 近傍の値をとる。

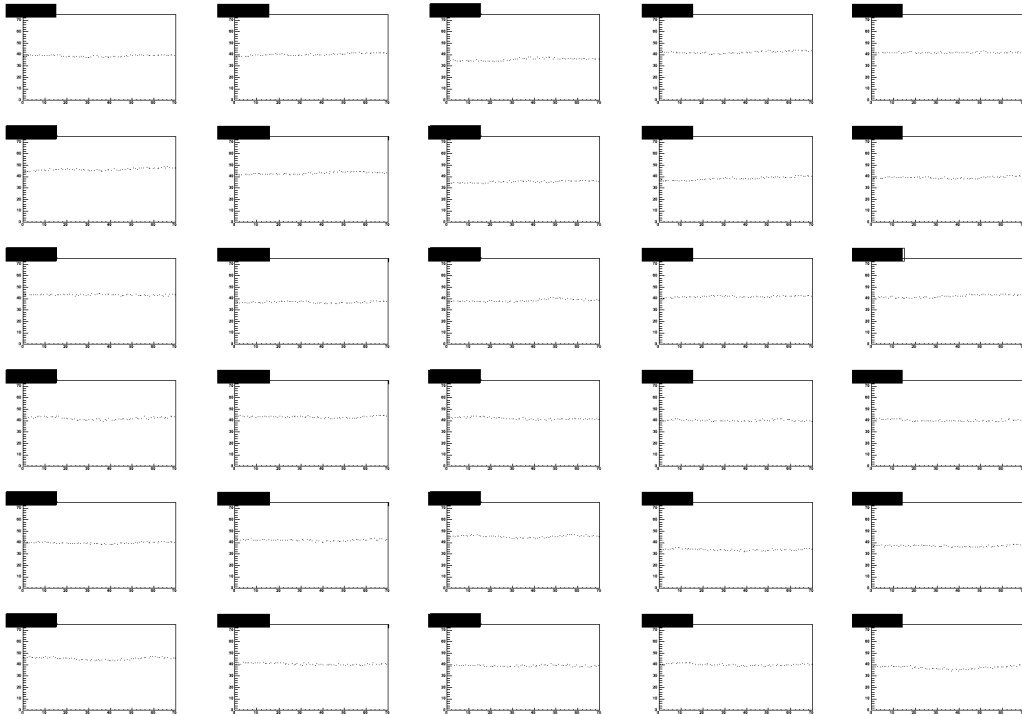


図 27 ペDESTALラン (PWO 結晶群鉛直方向直立時) から、ADC 出力信号 1 イベントをプロット。横軸 0 ~ 70 サンプルング (0 ~ 7 $\mu$ s)、縦軸 0 ~ 70ADC count。40ADC count 近傍の値をとる。

### 4.3 PWO 結晶群鉛直方向直立時の宇宙線測定ラン

宇宙線測定ランは、LED ランの時とは違って、1 イベントで宇宙線が通過するチャンネルと通過しないチャンネルが存在する。中には、2 枚のトリガーシンチレータのみ通過してどのチャンネルにも通過しないイベントや、複数のチャンネルをまたいで斜めに通過するイベントもある。MIP が長さ方向に通過 (180mm) した場合、 $dE/dx=1.88\text{ADC count/cm}$  より  $33.84\text{ADC count}$  の波高をもつ ADC 出力信号ができると見積もられる。図 28 について、(5,2)、(6,4) の 2 チャンネルで、波高をもつ信号を作らない。また、1 つのチャンネルに山型の波形が見えるイベントを図 29 に、どのチャンネルにも山型の波形が見えないイベントを図 30 に載せる。図 29 と図 27 を比較する事で、宇宙線が通過したことがわかり、図 30 と図 27 を比較する事で、どのチャンネルにも宇宙線が通過していないことがわかる。

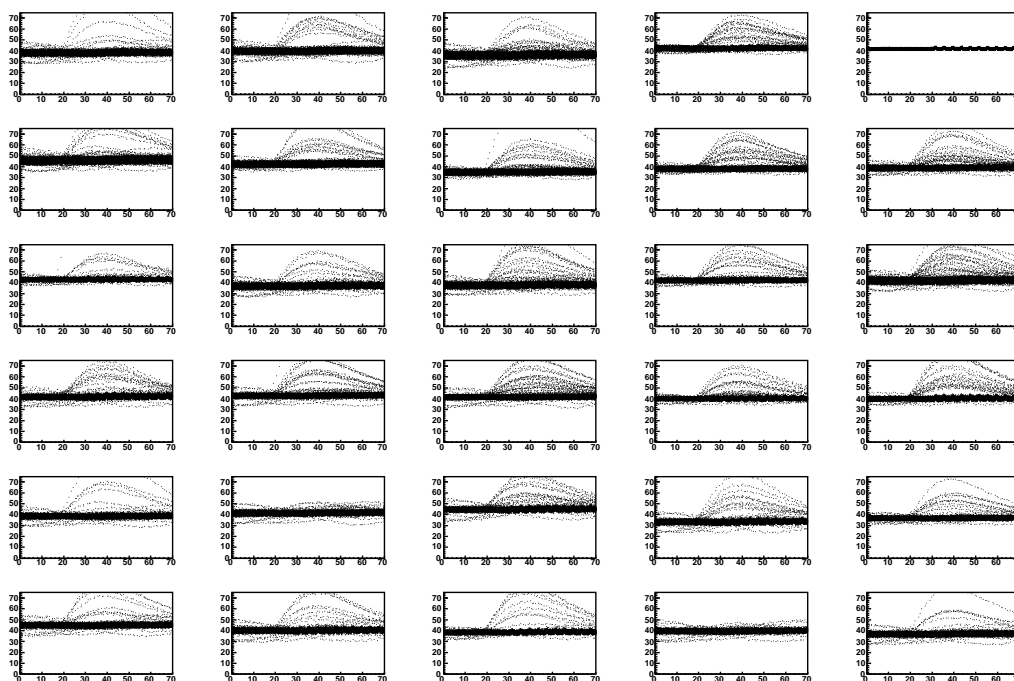


図 28 宇宙線測定ラン (PWO 結晶群鉛直方向直立時) から、ADC 出力信号 500 イベントを重ね書き。横軸 0~70 サンプリング (0~7 $\mu$ s)、縦軸 0~200ADC count。宇宙線が通過するイベントと通過しないイベントが、波高をもつ信号・もたない信号の重ね書きによって表現されている。(5,2)、(6,4) の 2 チャンネルで、大きな波高をもつ信号を作らない。

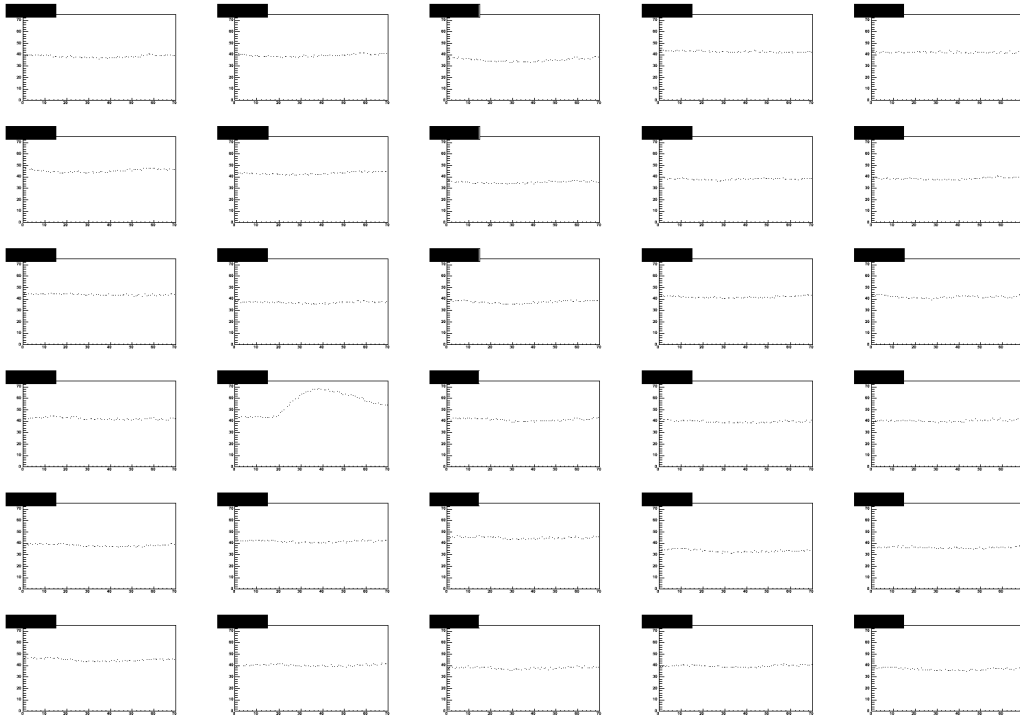


図 29 宇宙線測定ラン (PWO 結晶鉛直方向直立時) から、(4,2) に山型の波形が見える 1 イベント。横軸 0~70 サンプル (0~7 $\mu$ s)、縦軸 0~70ADC count。ペDESTALランの図 27 と比較する事で、(4,2) に宇宙線が通過したことがわかる。

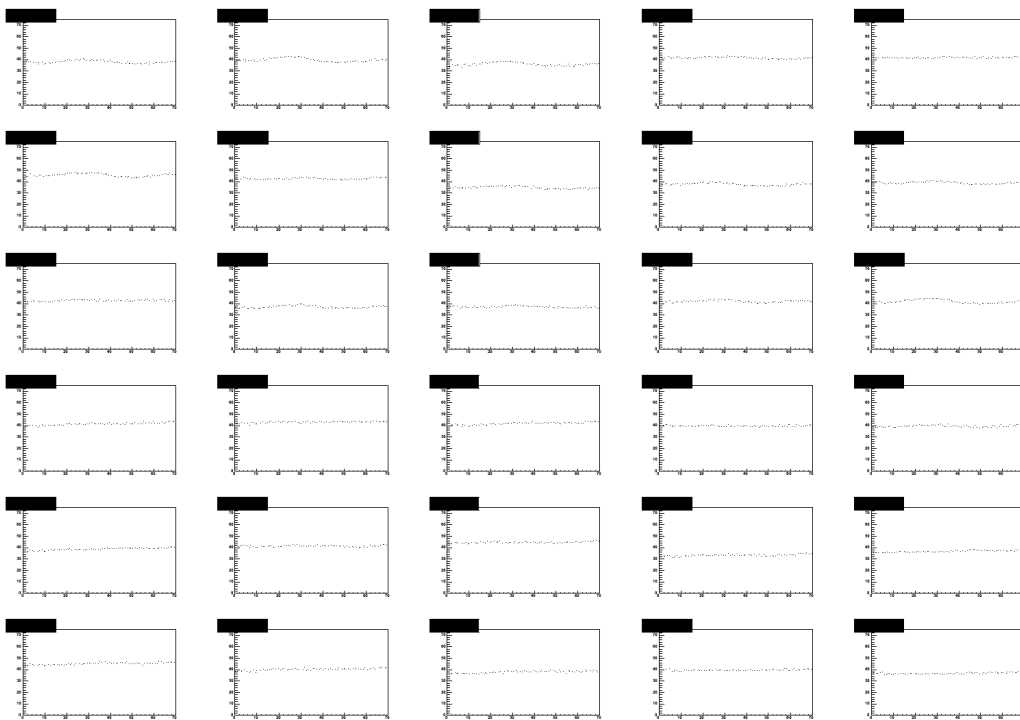


図 30 宇宙線測定ラン (PWO 結晶鉛直方向直立時) から、どのチャンネルにも山型の波形が見えない 1 イベント。横軸 0~70 サンプル (0~7 $\mu$ s)、縦軸 0~70ADC count。ペDESTALランの図 27 と比較する事で、どのチャンネルにも宇宙線が通過していないことがわかる。

#### 4.4 ガンマ 2 関数によるフィッティングと $p_0$ ヒストグラム

PWO 結晶を通過した MIP のエネルギー損失の ADC 変換値を得るため、ADC 出力の信号に対してガンマ 2 関数でフィッティングを行う。ガンマ 2 関数とは、 $x$ :時間 (横軸)、 $p_0$ :入射粒子のエネルギー損失の ADC 変換値、 $p_1$ :立ち上がり時間、 $p_2$ :立ち上がりからピークまでの時間、 $p_3$ :ペDESTAL、 $p_4$ :ガンマ 2 関数係数を用いて、以下の式で表され、ADC 出力の信号によく一致する事が知られている。

$$f(t) = p_0 \times t^{p_4} \times \exp[p_4(1 - t)] + p_3, \quad t = (x - p_1)/p_2$$

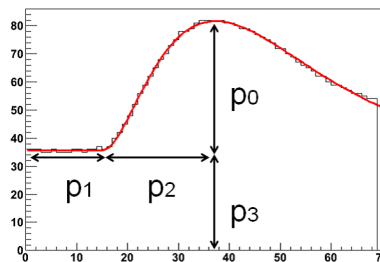


図 31 ガンマ 2 関数 (横軸:サンプリング (時間)、縦軸:ADC count)

宇宙線測定ランとペDESTALランに対して、ガンマ 2 関数フィッティングを行い、得られた  $p_0$  をヒストグラム化する。宇宙線測定ランの内、一つの PWO 結晶に MIP が通過したイベントについては、そのエネルギー損失がフィッティングにより  $p_0$  として与えられ、MIP ピークを作る。一方、宇宙線測定ランの PWO 結晶に MIP が通過しないイベントや、ペDESTALランのイベントについては、本来エネルギー損失がないにも関わらず、フィッティングにより有限な値をもつ  $p_0$  が与えられるため、雑音ピークが作られる。

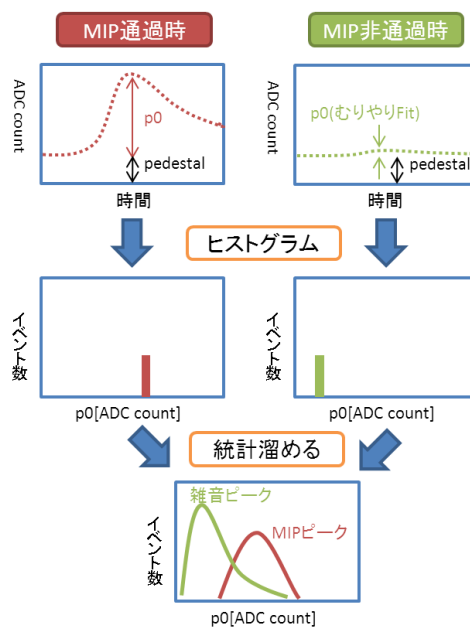


図 32  $p_0$  ヒストグラム

図 33 がその解析結果であり、黒い点が宇宙線測定ラン、青い点がペDESTアルランの  $p_0$  ヒストグラムを示す。統計量は各々 60k イベント、10k イベントであり、縦軸をスケーリング (規格化) する事で比較ができる。2ADC count 付近にフィッティング由来の雑音ピークがある。黒い点が高 ADC count 側にテールを引いていて、MIP が PWO 結晶に真っ直ぐ通過したときのエネルギー損失変換値が 33.84ADC count と予想される事から、このテールは、MIP の情報を含んでいると考えられる。しかし、これだけでは MIP を捕えたと断定できないため、次のクラスター法という解析で明らかにする。また、(5,2)、(6,4) の 2 チャンネルにおいて、高 ADC count 側の黒い点が少ない事は、図 28 で大きな波高をもつ信号を作らない事とからも裏付けられる。

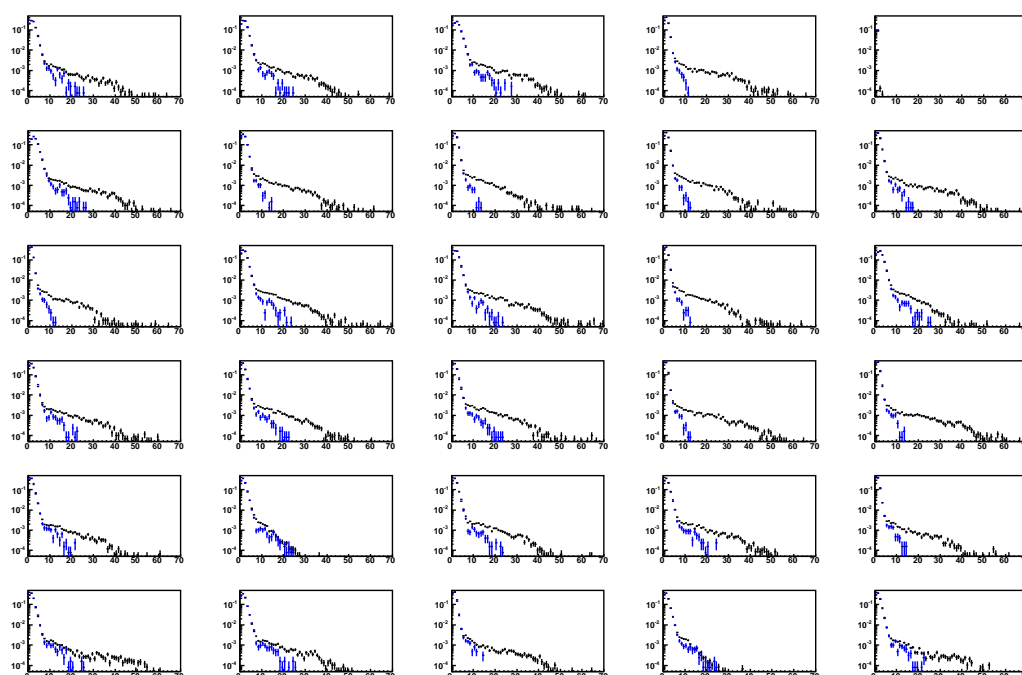


図 33 PWO 結晶群鉛直方向直立時の宇宙線測定ラン (黒)・ペDESTアルラン (青) の  $p_0$  ヒストグラム。横軸が 0~70ADC count、縦軸が存在比 (スケーリングしてある)。2ADC count 付近にフィッティング由来の雑音ピークがある。黒い点が高 ADC count 側にテールを引いていて、これが MIP の情報を含んでいると考えられる。(5,2)、(6,4) の、高 ADC count 側の黒い点が少ない事は、図 28 で大きな波高をもつ信号を作らない事とからも裏付けられる。

なお、フィッティング関数のパラメータの範囲として、 $p_0$ :0~1023ADC count、 $p_1$ :0~30 サンプル、 $p_2$ :10~40 サンプル、 $p_3$ :無制限、 $p_4$ :1.5~2.5 とした。

## 4.5 クラスタ法

PWO 結晶群を鉛直方向に直立させた時の宇宙線測定ランについて、クラスタ法という解析を行った。これは、 $p_0$  ヒストグラムにおいて、MIP 由来のピークを作るための解析法であり、過去の解析結果と比較する事で PHOS 性能評価機の動作確認を行う事ができる。また、その比較から、用いた APD の HV 値が適正かどうか見極める材料にもなる。クラスタ法は、各イベントごとに粒子が複数のチャンネルを通過し、それらをクラスタ（かたまり）と見なして解析する方法である。

ジオメトリ的に宇宙線が斜めに PWO 結晶を通過しても、せいぜい 2~3 本なので ([8] の付録より)、ある 1 つのチャンネル (以下、主要部) と、そのチャンネルの周りに隣接するチャンネル (以下、周辺部) に対して条件をかける。主要部が内側のチャンネルにある場合、周辺部は 8 つあるが、主要部が外側のチャンネルにある場合、周辺部は 3 つないし 5 つしかないため、イベント選別の精度が落ちる。また、主要部が外側のチャンネルの場合、

この解析において、 $p_0$  の閾値を 2 種類を用いる。1 つ目は、各チャンネルのペDESTALランの  $p_0$  ヒストグラムの 99 % に該当する  $p_0$  (~8ADC count) の値である ([8] の付録より)。2 つ目は、アクシデンタルに宇宙線が PWO 結晶の横から通過した時のエネルギー損失の変換値 (4ADC count) である ([8] の付録より)。前者の閾値 (~8ADC count) を主要部の閾値に、後者の閾値 (4ADC count) を周辺部の各々のチャンネルの閾値として用いる。主要部の  $p_0$  が閾値 ~8ADC count を上回り、かつ、周辺部の  $p_0$  と比べて大きい場合、主要部の  $p_0$  と、周辺部で閾値 4ADC count を上回るような  $p_0$  全てとを足し合わせた  $p_0$  の値を主要部における  $p_0$  のクラスタ（かたまり）として取り出す。

この解析法は、多少なりとも個体差のある各チャンネルでの  $p_0$  の足し合わせを行うため、精度に劣る分、少ない統計量でも解析できる。

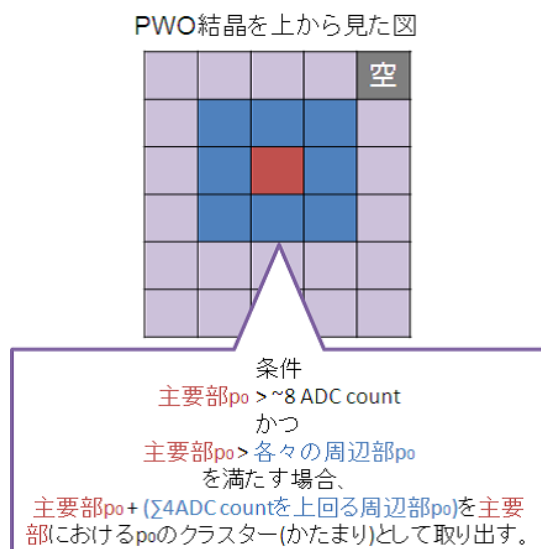


図 34 クラスタ法概念図。図では (3,3) が主要部な場合を示す。主要部の  $p_0$  が閾値 ~8ADC count を上回っていて、かつ、どの周辺部の  $p_0$  よりも上回っている場合、主要部の  $p_0 + (\text{閾値 } 4\text{ADC count を上回るような周辺部の } p_0 \text{ 全て})$  を主要部の  $p_0$  のクラスタ（かたまり）として取り出す。精度が劣るが、少ない統計量でも解析可能。

今回の解析結果 (黒色) と過去の解析結果 (青色) を重ね書きした図を、図 35 に載せる。今回の統計量は 60k イベント、過去の統計量は 103k イベントであり、スケーリングして重ねてプロットした。外側のチャンネルの  $p_0$  ピークは、内側のチャンネルの  $p_0$  ピークと比べ、統計量が少ない傾向にある。これは、外側のチャンネルでは斜めに入射して外へ抜けるイベントがあり、閾値  $\sim 8\text{ADC count}$  を上回れないイベントが存在するからである。また、(5,2)、(6,4) の 2 つのチャンネルの  $p_0$  ピーク値が、今回の解析結果と過去の解析結果とで異なる。(5,2)、(6,4) について、今回の  $p_0$  ピークが  $\sim 10\text{ADC count}$  に対し、過去の  $p_0$  ピークは  $\sim 33\text{ADC count}$  である。他に、(3,1)、(3,5)、(4,2) の  $p_0$  ピーク値が今回と過去のとでずれていて、閾値 ( $\sim 8\text{ADC count}$ ) の設定の仕方に問題があったと考える。(1,5)、(3,1)、(3,5)、(4,2)、(5,2)、(6,4) 以外のチャンネルでは、今回と過去の  $p_0$  ピーク値はいずれも  $\sim 33\text{ADC count}$  であるため、MIP ピークである。

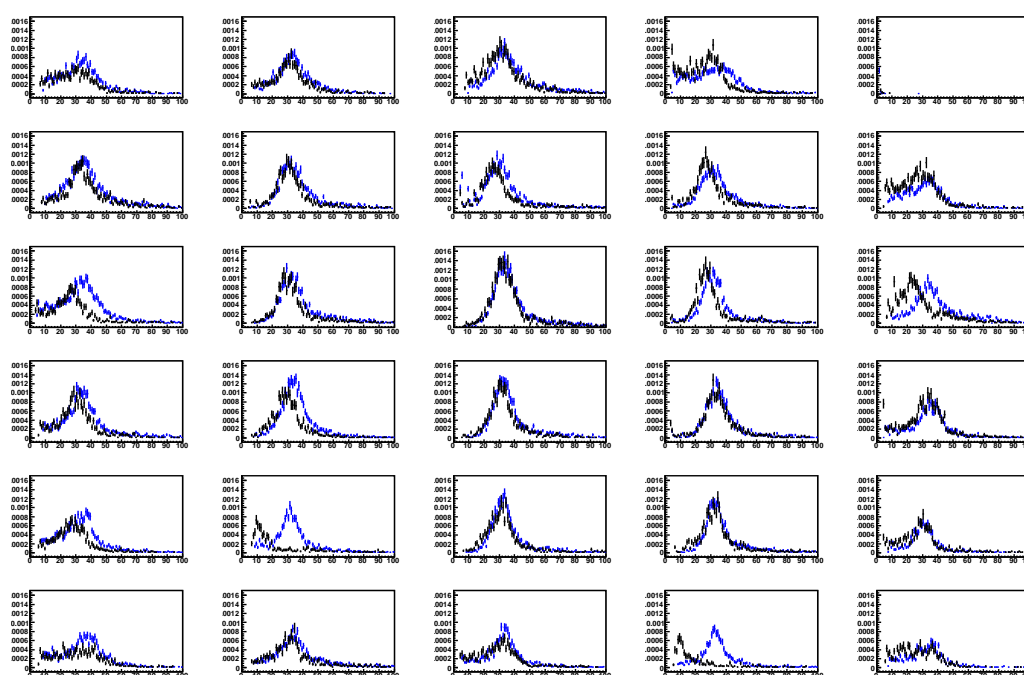


図 35 クラスタ法による解析結果。横軸が 0 ~ 100ADC count、縦軸がイベント比。今回の解析結果を黒色、過去の解析結果を青色で示し、各々 60k イベント、103k イベントの統計量である。(1,5)、(3,1)、(3,5)、(4,2)、(5,2)、(6,4) 以外の PWO 結晶を有するチャンネルにおいて、今回の解析結果、過去の解析結果ともに  $\sim 33\text{ADC count}$  にて MIP ピークが立っている。

以上より、一部の例外を除いて、今回のクラスタ法による解析結果が過去の解析結果を再現していて、APD の HV が適切である事がわかる。PMT の HV は変更したが、PHOS 性能評価機が過去のセットアップで過去と同じ動作ができる事を確認した。なお、(5,2)、(6,4) の 2 つのチャンネルについては、欠陥なのでバッドチャンネルと見なし、今後の解析において除外する。また、(3,1)、(3,5)、(4,2) については、 $p_0$  ピーク値が去年と一致しなかったものの、4.1 ~ 4.4 において不具合はなかったため、今後も使用していく事にする。

## 5 測定結果と解析 (2)

第4章にて、PHOS性能評価機が従来通り動作した事を確認した。しかし、PWO結晶のチャンネル(5,2)、(6,4)については、宇宙線通過時のADC出力信号を示さず、クラスター法による解析でも従来のMIPピークとは異なるピークを作った。その事も踏まえ、今一度、PWO結晶チャンネルの情報を図36に記して整理する。

				空っぽ
(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(1,5)
(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(2,5)
(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(3,5)
(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)	(4,5)
(5,1)	(5,2)	(5,3)	(5,4)	(5,5)
(6,1)	(6,2)	(6,3)	(6,4)	(6,5)

バッドチャンネル

図36 第4章の結果を反映させたPWO結晶チャンネルの情報。(1,5)がPWO結晶が空なチャンネルであり、(5,2)、(6,4)をバッドチャンネルとした。

この章では、PWO結晶群を水平方向に横置きした時の宇宙線測定結果と、そこからMIP情報を取り出すための解析を紹介する。特に、MIP情報を取り出す解析として2つの方法を試みる。1つは、単独のチャンネルについて、その周辺にカット条件をかけることでMIPの情報を取り出す解析である。もう1つは、少ないシンチレーションに由来するMIPの情報を雑音と切り離すべく、 $p_0$ を列内で足し合わせ、列単位で扱い、隣接する列に対してカット条件をかけることでMIPの情報を取り出す解析である。各々、5.5単独チャンネルでの解析、5.6列単位での解析にて取り上げる。



## 5.1 PWO 結晶群水平方向横置き時の LED ラン

前章 測定結果と解析 (1) の時と同様に、はじめに LED ラン、ペDESTALラン、宇宙線測定ランの順で各々の測定結果を示す。PWO 結晶群を横置きにした時の LED ランの測定結果を図 37 に示す。パッドチャンネルの 1 つである (5,2) のチャンネルが、負の波高をもつ ADC 出力信号を示した。それ以外の PWO 結晶のあるチャンネルにおいては、正の波高をもつ ADC 出力信号を示した。そのため、パッドチャンネル (5,2) 以外の PWO 結晶のあるチャンネルでは、横置き時でも動作する。但し、(6,4) は、パッドチャンネル指定を外さない。

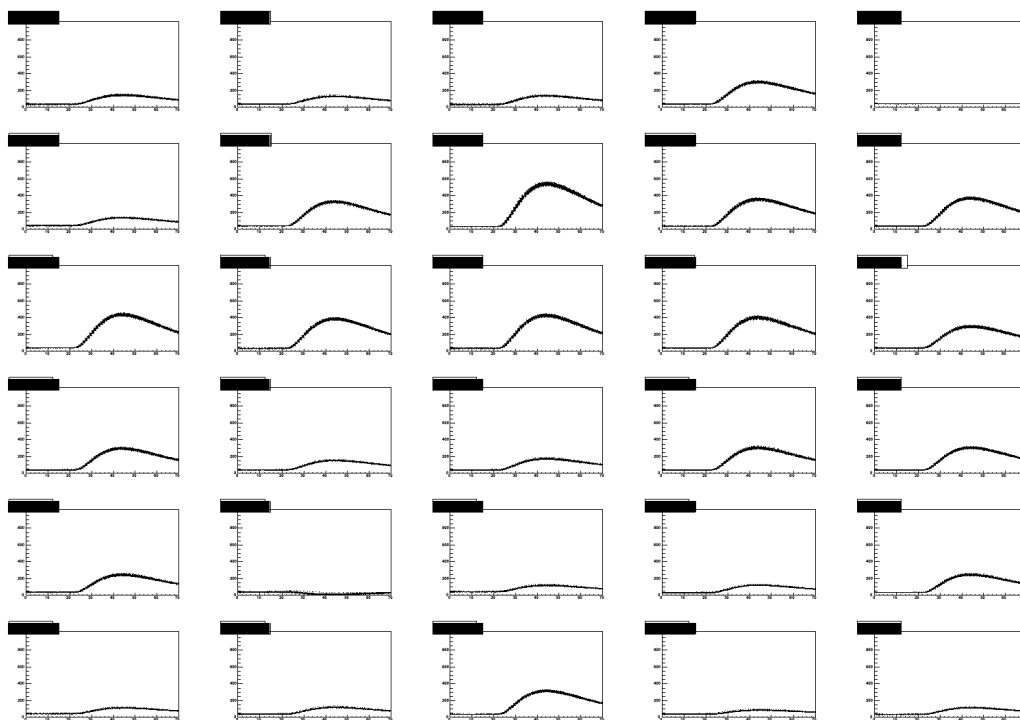


図 37 LED ラン (PWO 結晶水平方向横置き時) から、ADC 出力信号を 80 イベント重ね書き。横軸 0 ~ 70 サンプリング (0 ~ 7 $\mu$ s)、縦軸 0 ~ 1000ADC count。(5,2) が負の波高をもつ信号を作る。そのほかの、PWO 結晶を有するチャンネルでは、正の波高をもつ信号を作る。但し、(6,4) は、今後もパッドチャンネル指定のまま。

## 5.2 PWO 結晶群水平方向横置き時のペDESTALラン

ペDESTALランの測定結果を図 38～40 に示す。図 38 は重ね書きしたもので、PWO 結晶群を立ててた時のペDESTALランを重ね書きした図 26 と比較すると、今回のペDESTALランの ADC 出力信号は、重ね書きによる帯が太くなっている。つまり、1 つ 1 つのイベントのペDESTAL信号が不安定であり、何かしらの雑音が混入したためだと考えられる。中には、(2,2)、(2,3)、(3,4)、(4,5) など、帯の太さがあまり変わらないチャンネルもあり、それらは雑音の影響を受けにくいチャンネルだと考えられる。

図 39 と図 27 と比較すると、両者ともほぼ横一直線な描像をなす。一方で図 40 について、図 27 や図 39 と比較すると、ペDESTALランにも関わらず波打った信号になっている。MIP が PWO 結晶の厚さ方向を通過する (22mm) 時、 $dE/dx=1.88\text{ADC count/cm}$  より、波高 4.136ADC count の ADC 出力信号を作るが、これが図 40 のようなペDESTAL成分と合わさって表示された場合、フィッティングに失敗する恐れがある。

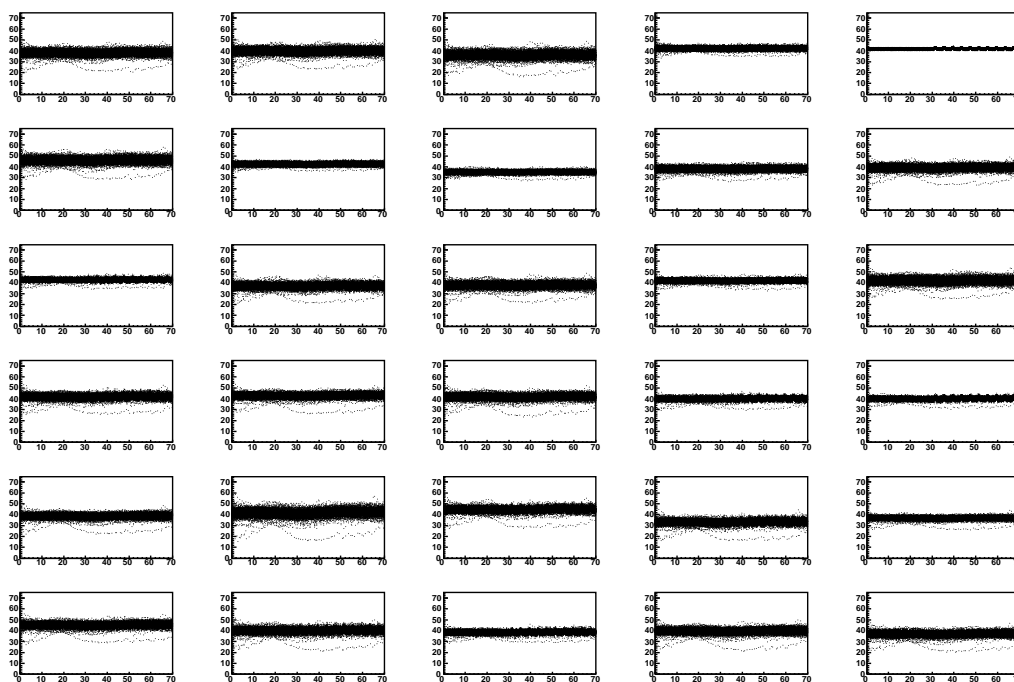


図 38 ペDESTALラン (PWO 結晶群水平方向横置き時) から、ADC 出力信号を 500 イベント重ね書き。横軸 0～70 サンプル (0～7 $\mu$ s)、縦軸 0～70ADC count。図 26 と比較すると、今回のペDESTALランの ADC 出力信号は、重ね書きによる帯が太くなっている。つまり、1 つ 1 つのイベントのペDESTAL信号が不安定であり、何かしらの雑音が混入したためだと考えられる。中には、帯の太さがあまり変わらないチャンネルもあり、それらは雑音の影響を受けにくいチャンネルだと考えられる。

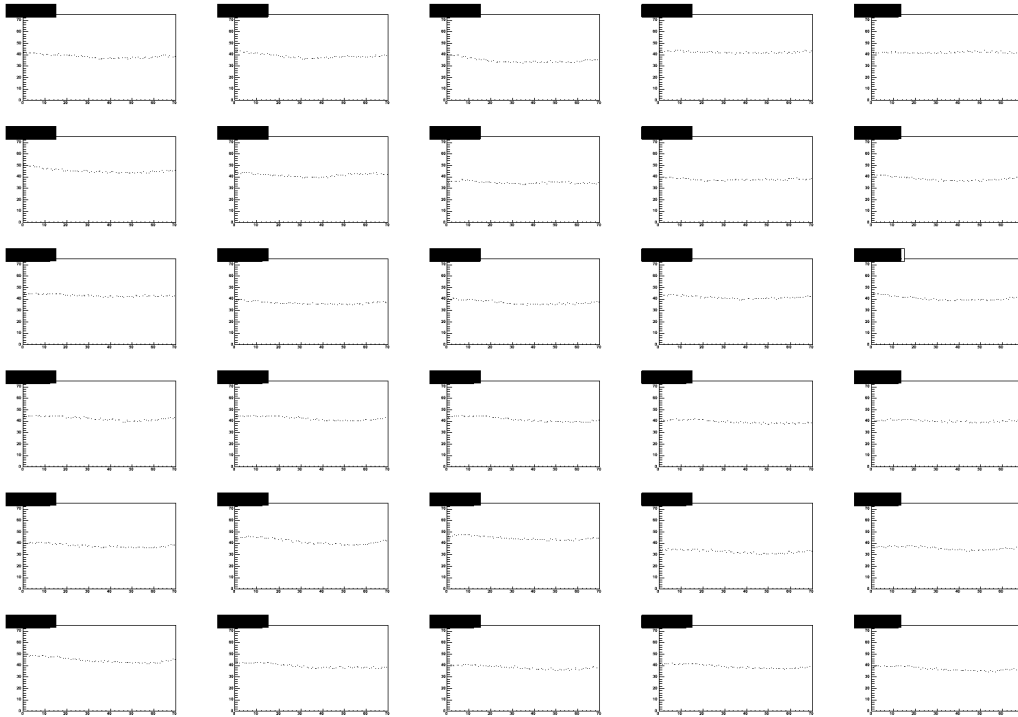


図 39 ペDESTALラン (PWO 結晶群水平方向横置き時) から雑音の影響を受けていない 1 イベント。横軸 0~70 サンプル (0~7 $\mu$ s)、縦軸 0~70ADC count。図 27 と比較すると、両者ともほぼ横一直線な描像をなす。

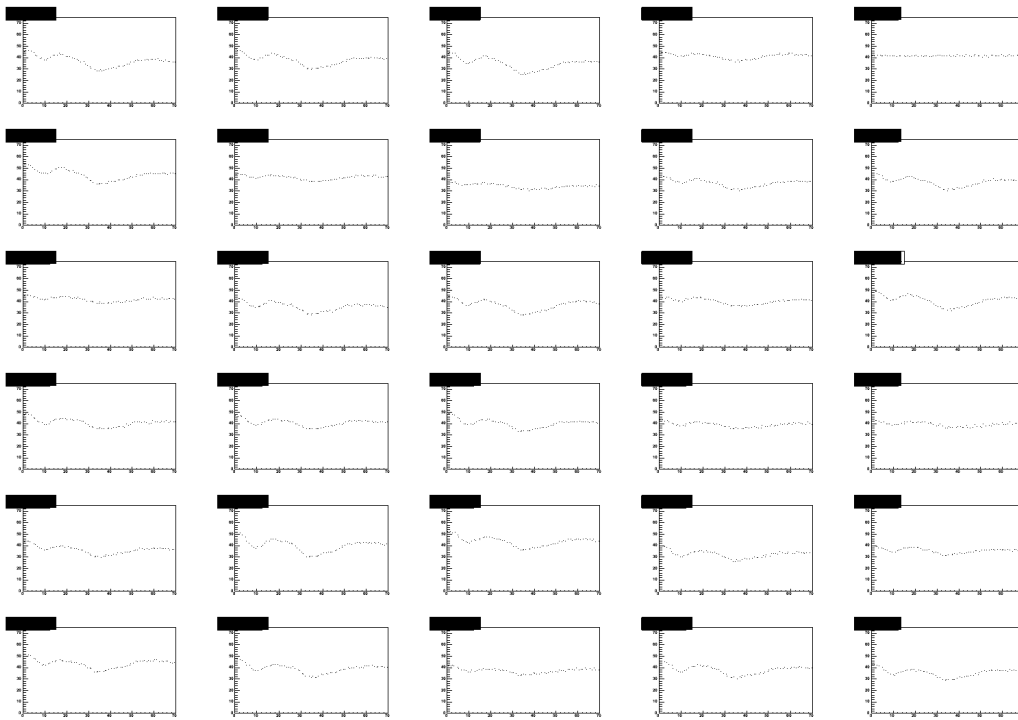


図 40 ペDESTALラン (PWO 結晶群水平方向横置き時) から雑音の混じった 1 イベント。横軸 0~70 サンプル (0~7 $\mu$ s)、縦軸 0~70ADC count。図 27 や図 39 と比較すると、ペDESTALランにも関わらず波打った信号になっている。

### 5.3 PWO 結晶群水平方向横置き時の宇宙線測定ラン

次に、宇宙線測定ランについて、図 41～43 に記す。図 41 は 500 イベント重ね書きプロット、図 42 は 2 列目に MIP が入射したと思われる 1 イベント、図 43 は雑音混じった 1 イベントである。

図 41 について、38 と比較すると、帯の太さが増えている、宇宙線の情報を含んでいるためである。また、一部のチャンネルで見られる 10～30ADC count 程度の波高をもつ信号は、MIP 以外の高エネルギーな宇宙線が通過したために生じたと考えられる。

図 42 について、2 列目のチャンネルが 4ADC count 程度の波高をもつ信号を出している。図 43 について、もはやどのチャンネルに宇宙線が通過したかわからない。PWO を有するチャンネル全てにおいて、10～25ADC count 程度のピークトゥピークをもつ、同じ形の信号が見られる。このことから、共通の雑音が入っていると見て、PHOS 性能評価機は、外部からの雑音を拾っている事を意味する。PWO 結晶群を縦から横にした際、外部からの雑音を拾いやすいセットアップになったと考えられる。外部からの雑音については、第 6 章の考察にて詳しく扱う。なお、雑音によるピークトゥピークが、図 41 における太さに対応している。

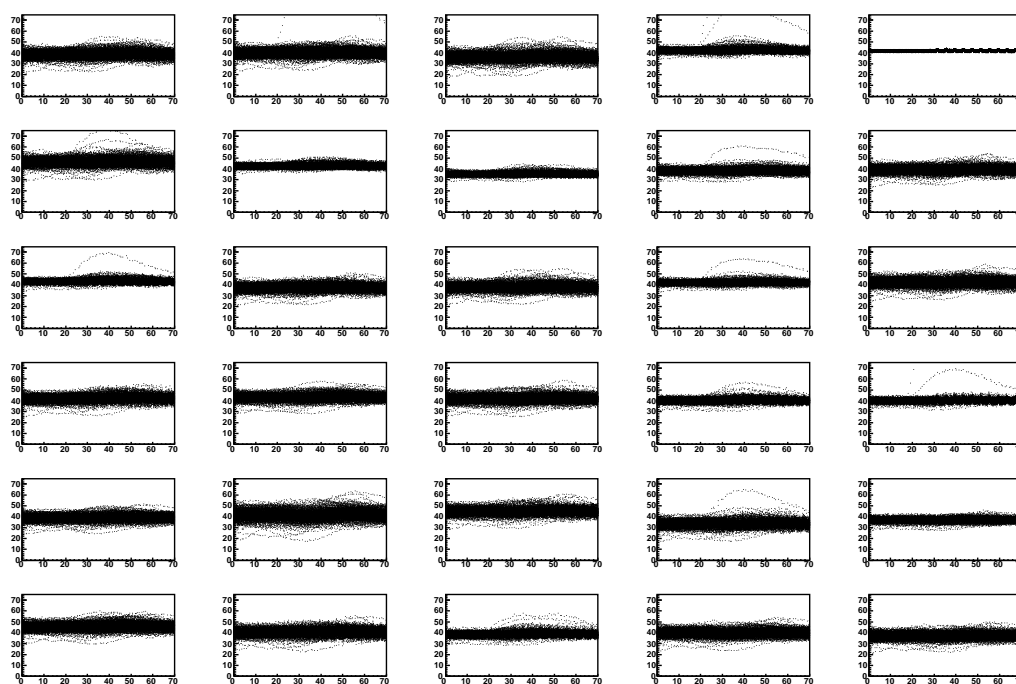


図 41 宇宙線測定ラン (PWO 結晶群水平方向横置き時) から、ADC 出力信号を 500 イベント重ね書き。横軸 0～70 サンプル (0～7 $\mu$ s)、縦軸 0～70ADC count。38 と比較すると、帯の太さが増えている、宇宙線の情報を含んでいるためである。また、この図でチャンネルによっては見える 10～30ADC count 程度の波高をもつ信号は、MIP 以外の高エネルギーな宇宙線が通過したために生じたと考えられる。

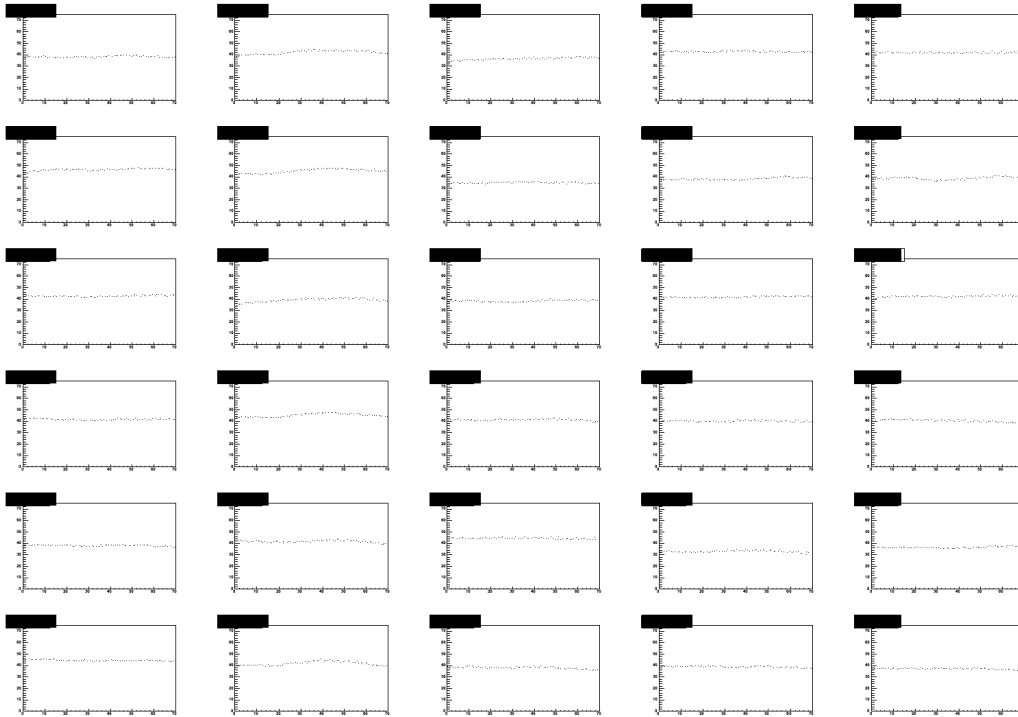


図 42 宇宙線測定ラン (PWO 結晶群水平方向横置き時) から、2 列目に MIP が入射したと思われる 1 イベント。横軸 0~70 サンプルング (0~7 $\mu$ s)、縦軸 0~70ADC count。2 列目のチャンネルが 4ADC count 程度の波高をもつ信号を出している。

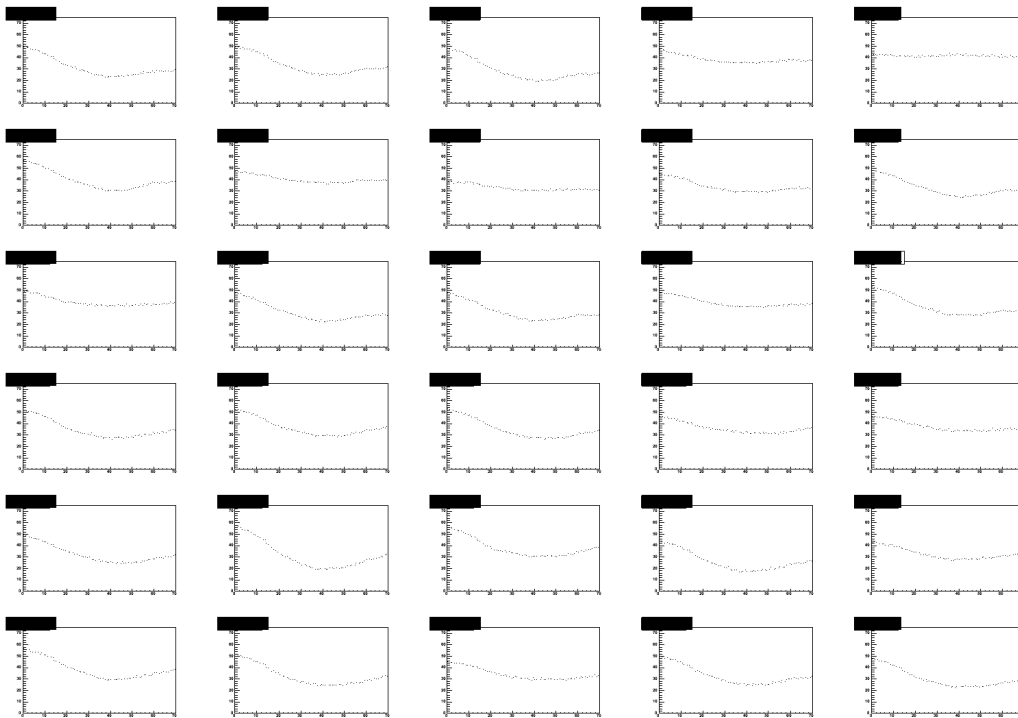


図 43 宇宙線測定ラン (PWO 結晶群水平方向横置き時) から、雑音の混じった 1 イベント。横軸 0~70 サンプルング (0~7 $\mu$ s)、縦軸 0~70ADC count。もはやどのチャンネルに宇宙線が通過したかわからない。共通雑音は、外部からの雑音に由来する (詳細は、第 6 章の考察にて)。

## 5.4 $p_0$ ヒストグラム

第4章と同様、ADC出力信号に対して、ガンマ2関数でフィッティングさせ、 $p_0$ のヒストグラムを出し、図44に記す。黒色の点が宇宙線測定ランのデータ、青色の点がペDESTALランのデータである。

図33と44を比較する。青(ペDESTALラン)は、本来PWO結晶群の配置を変えても、PWO結晶が何も検知していない場合のランなので、変化はない。しかし、全体的に図44のペDESTALランのプロットの方が、高いADC count側でテールを引いている。この事からも、外部雑音による影響を受けている事がわかる。また、図33の黒(宇宙線測定ラン)と青(ペDESTALラン)を比較すると、(1,3)を除いて10ADC count近傍で黒の方が大きく、それ以外の範囲では黒と青は一致している。

比較しやすくしたいため、図33と44を0~10ADC countの範囲に拡大した図を、各々図45と46に載せる。両者を比較すると、後者の方がピーク幅が広い事がわかる。しかし、(2,2)、(2,3)、(3,1)のように、あまりピーク幅が広がっていないチャンネルもあり、このようなチャンネルほど黒と青の差が大きい。

また、図46の(1,3)は、黒が1ADC count近傍でピークを作っている。

これは、回路にvetoを組み込んでいなかった事が原因だと考えられる。回路上でトリガーがごく短い時間に連続してかかると、メモリー不足によりCSPがはたらかなくなる事がある。それを避けるため、連続なトリガー信号のうちはじめの信号のみを拾い、残りの信号を捨てる工夫(veto=拒否)が必要である。図18でいうと、コインシデンスからの信号の一つがG.G(ゲートジェネレータ)によりwidth 2msに変換され、その反転信号がコインシデンスに再び送られる構造がvetoに当たる。つまり、一度トリガーを受けてから2ms以上経たないと、トリガー信号は受け付けられない構造になっている。以後、(1,3)もバッドチャンネルとし、解析の際には除外して考える。なお、回路にvetoを組み込んで測定しなおした所、(1,3)が回復した事を確認した。

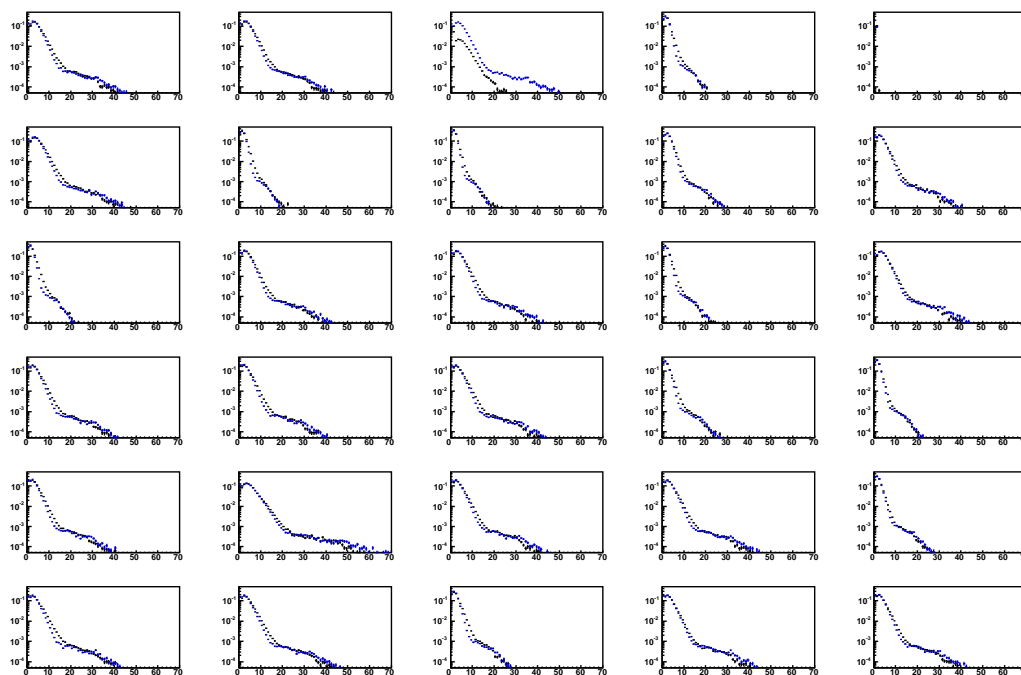


図44 PWO結晶群水平方向横置き時の宇宙線測定ラン(黒)・ペDESTALラン(青)の $p_0$ ヒストグラム。横軸が0~70ADC count、縦軸が存在比(スケールしてある)。図44と比較すると、今回のプロットは高いADC count側でテールを引いている。

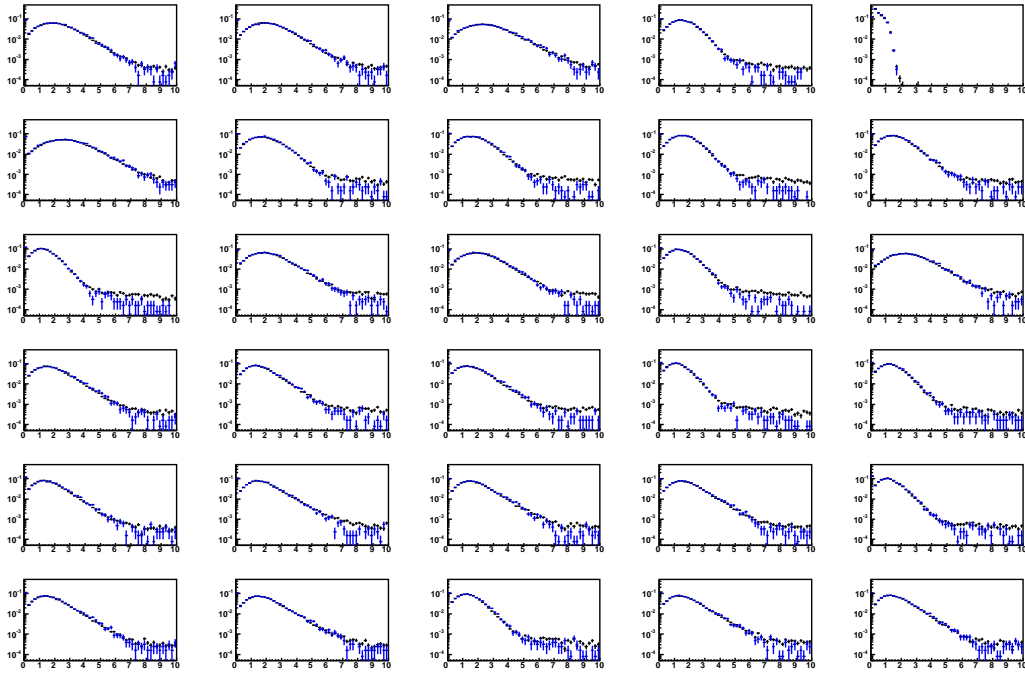


図 45 図 33 の横軸を 0~10ADC count に拡大。図 44 との比較用。黒い点が宇宙線測定ランのデータ、青い点がペDESTALランのデータ。

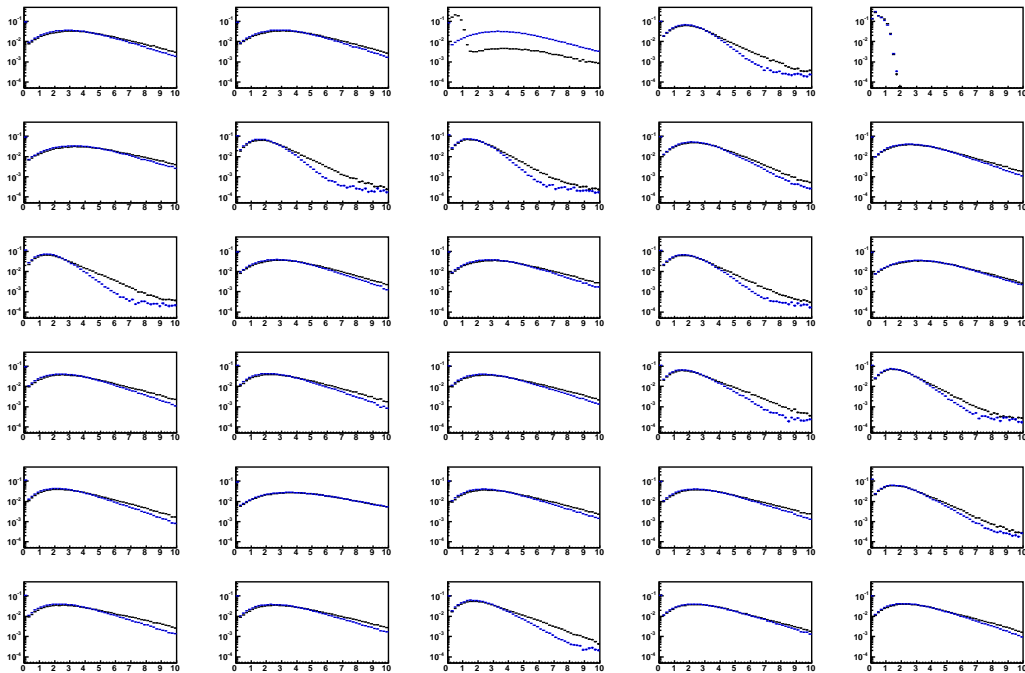


図 46 図 44 の横軸を 0~10ADC count に拡大。図 44 と比較して、ピーク幅が広いチャンネルと、あまりそうでないチャンネルがある。4~10ADC count にて黒(宇宙線測定ラン)の方が青(ペDESTALラン)より多いのは、MIP ピークが 4.14ADC count 近傍にあるため。(1,3) は~1ADCcount にてピークが立つ。原因は、回路に veto(拒否)を組み込んでなかったために、立て続けにトリガーがかかった時に CSP のメモリー不足が生じ、はたらかなくなった事である。

## 5.5 単独チャンネルでの解析

PWO 結晶群横置き時の宇宙線測定ランから、MIP ピークを取り出す解析を試みる。この時、上空から降ってくる宇宙線は、垂直に降る場合、1つの列のチャンネルを通過することを考慮して、次のような条件で解析を行った。

- 3列目の(2,3)、(3,3)、(4,3)、(5,3)、(6,3)の内、(4,3)に着目し、それ以外のチャンネルをトリガー役Aとする
- 更に、2列目の(1,2)、(2,2)、(3,2)、(4,2)、(6,2)、4列目の(1,4)、(2,4)、(3,4)、(4,4)、(5,4)のチャンネルをトリガー役Bとする
- トリガー役Aのチャンネルの $p_0$ が閾値Aを超え、かつ、トリガー役Bのチャンネルの $p_0$ が閾値Bを下回る場合、(4,3)の $p_0$ を取り出してヒストグラムを作るように条件をかける
- トリガー役Aの閾値Aは、予想MIPピーク値(～4ADC count)の50%、75%、100%の3パターンを設定
- トリガー役Bの閾値Bは、雑音ピーク(図32参照)が～2ADC countであることを考慮して2ADC countに設定
- (1,3)、(5,2)、(6,4)はバッドチャンネルなので、除外している。

閾値Aは、3列目のチャンネルを宇宙線が通過するイベントを選ぶために設定した。閾値Bは、共通雑音の大きいイベントを取り除き、かつ、3列目だけを宇宙線が真っ直ぐ通過するイベントを選ぶために設定した。

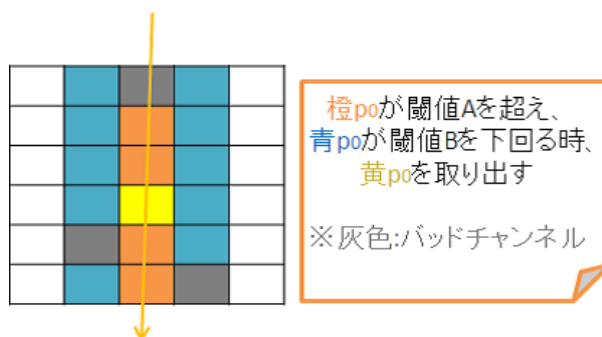


図 48 の左側(宇宙線測定ランのデータ)について、緑(閾値 A=MIP ピークの予想値の 50%)と青(閾値 A=MIP ピークの予想値の 75%)がマゼンダの線(MIP ピーク予想値)にピークが来ているが、赤(閾値 A=0)、緑、青、黄(閾値 A=MIP ピークの予想値の 100%)と変わるにつれピーク的位置や幅や形が変化している。閾値 A が 50%、75%、100%と増えるにつれ、4ADC count より低い側の $p_0$ を拾いにくくなるため、特に黄色のピークは低い側の $p_0$ で統計量が欠損している。また、図 48 の右側(ペDESTALランのデータ)について、緑、青、黄の統計量が極端に少なく、特に黄に関しては0である。このことから、図 48 の左側の緑、青、黄のピークは、いずれも MIP の情報を含んだピークを作っている。更に、今回の解析のカット条件は、外部雑音を含んだイベントの中から外部雑音の影響の少ないイベントを要求しているため、統計量が約 $1/1000 \sim 1/10000$ にまで下がっている。



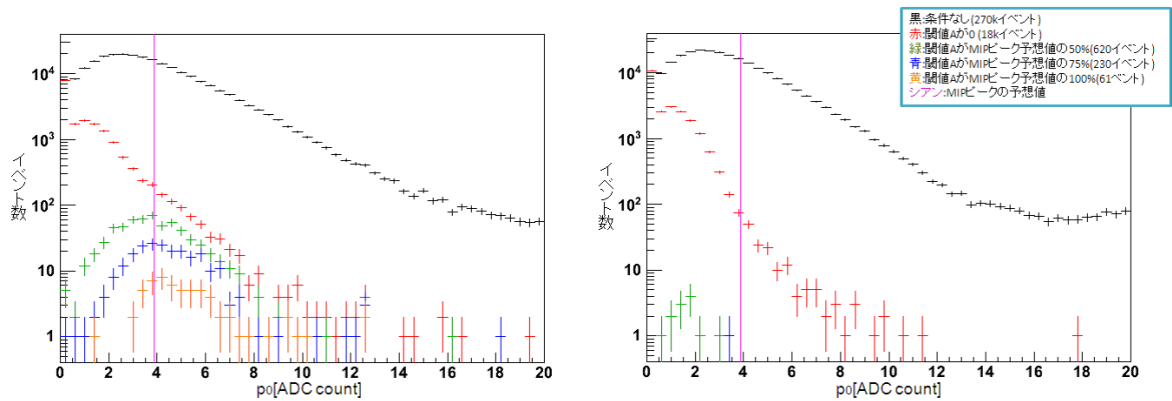


図 48 (4,3) の  $p_0$  ヒストグラム。横軸は  $p_0$ [ADC count]、縦軸はイベント数。左側が宇宙線測定ランのデータ、右側がペDESTALランのデータ。マゼンダの線は、MIP ピークの予想値。左側について、緑 (閾値  $A$ =MIP ピークの予想値の 50 %) と青 (閾値  $A$ =MIP ピークの予想値の 75 %) がマゼンダの線にピークが来ているが、赤 (閾値  $A$ =0)、緑、青、黄 (閾値  $A$ =MIP ピークの予想値の 100 %) と変わるにつれピークの位置や幅や形が変化している。右側より緑、青、黄の統計量が極端に少ないので、左側の緑、青、黄は MIP の情報を含んだピークである。

なお、閾値  $B$  を 0 にして、つまりトリガー役  $B$  を取っ払って解析を行った結果が図 49 である。閾値  $A$  だけだと、共通雑音の大きい、宇宙線の通過していないイベントをも取り出すため、MIP ピークは雑音ピークに埋もれる。また、図 48 と同様に、閾値  $A$  が変化するにつれ、雑音ピークの位置・幅・形も変化する。

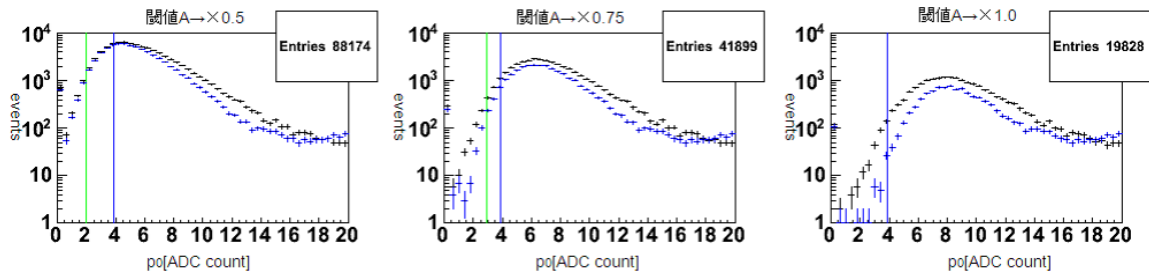


図 49 閾値  $B=0$  とした時の  $p_0$  ヒストグラム。黒い点は宇宙線測定ラン、青い点はペDESTALラン。カット条件が閾値  $A$  だけだと、共通雑音の大きいイベントも取り出すため、MIP ピークを取り出せていない。図 48 と同様に、閾値  $A$  が変化するにつれ、ピークの位置・幅・形も変化する。

厳密に言えば、カットをかける際、本来の MIP ピークの形を歪めてはいけない。図 48 の左側の緑、青、黄のピークは本来の MIP ピークの形でないが、MIP のエネルギー損失の情報を反映させたピークを示すことは確かである。また、これらのピークの幅が広いのは、PWO 結晶の長さ方向に対して制限をかけておらず、APD に近い側のシンチレーションも遠い側のシンチレーションも拾っており、APD が読み取れる光量に幅があるためだと考える。更に、この解析では共通雑音の影響の少ないイベントを選別すべく統計量を犠牲にするため、より統計量が欲しい所でもある。

他のチャンネルについての緑、青、黄のピークも、図 50(宇宙測定ランのデータ)、図 51(ペDESTALランのデータ)に載せる。

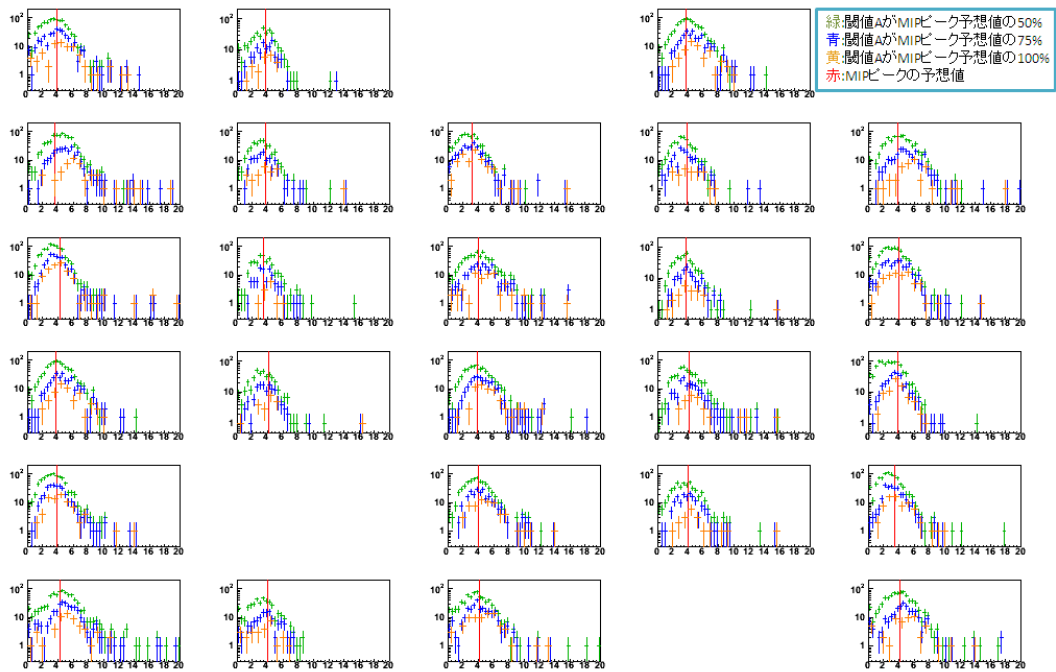


図 50 全チャンネルについての MIP の情報を有するピーク。横軸 0~20ADC count、縦軸イベント数。緑 (閾値  $A = \text{MIP}$  ピークの予想値  $\times 0.5$ )、青 (閾値  $A = \text{MIP}$  ピークの予想値  $\times 0.75$ )、黄 (閾値  $A = \text{MIP}$  ピークの予想値  $\times 1.0$ ) のパターンを載せる。赤の線は、各々のチャンネルでの MIP ピーク予想値。

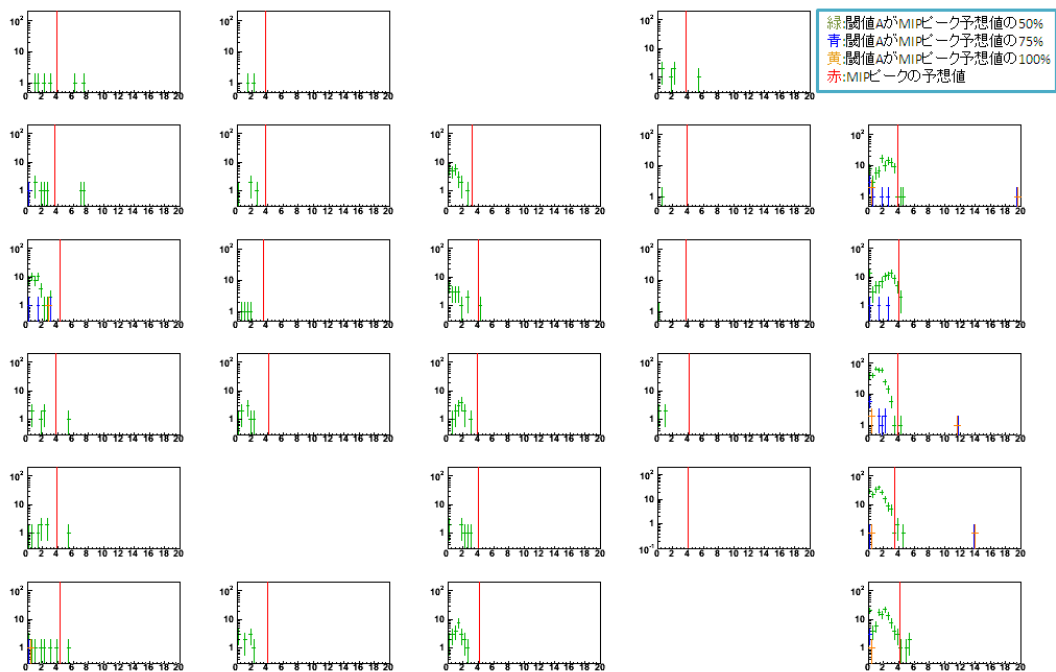


図 51 図 50 のペDESTALラン版。横軸 0~20ADC count、縦軸イベント数。いずれの色の点も極少量のイベントしか存在しないが、5 列目のチャンネルでは緑の点がいくつか存在する。

## 5.6 列単位での解析

解析により共通の雑音を落とし、MIP ピークになるだけ影響をあたえないためには、どうすればよいか。そんな問いに応えるべく、今度は列単位での解析を考える。

### 5.6.1 XY の相関

はじめに、ある列の  $p_0$  と  $X$  と、その両隣の列の  $p_0$  と  $Y$  の相関を図 53、図 54 に示す。使えるチャンネルが 5 個しかない 2~5 列目については、その列の  $p_0$  と  $\times (6/5)$  したものを  $X$  とする。また、 $Y=(X_{\text{左隣}}+X_{\text{右隣}})/2$  とし、隣の列が 1 つしかない場合 (1 列目、5 列目の場合) は、 $Y=X_{\text{隣}}$  とする。

$X$  と  $Y$  の相関を、図 53(宇宙線測定ラン)、図 54(ペDESTALラン) に載せる。両者とも原点を通過する斜めの直線を有し、図 53 の場合、その直線の周りにもやのような分布を有する。直線を作るということは、1 つの列である  $p_0$  の値を出した時、その両隣の  $p_0$  の平均値もそれに比例した値を出す事を意味している。つまり、共通の雑音を示している。また、図 53 のもやの部分は、MIP の情報をもつ。

### 5.6.2 アイボールフィットによる補正と (X-Y) ヒストグラム

図 53、54 において、雑音の情報が直線  $Y=X$  の関係にあれば、1 列の共通の雑音の大きさの和と、それに隣接する列の共通の雑音の大きさの和が等しい。つまり、 $(X-Y)$  を施すことで、雑音の情報を MIP の情報から切り離せられると考えられる。或いは、図 52 のように、 $(X-Y)$  軸に向かって、プロットを斜めに射影した  $(X-Y)$  ヒストグラムを思い浮かべてもよい。

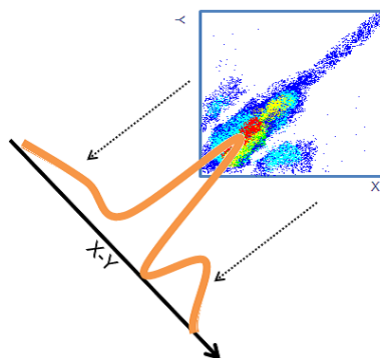


図 52  $(X-Y)$  軸に向かって、プロットを斜めに射影したのが  $(X-Y)$  ヒストグラムとなる。

共通の雑音を示す直線の傾きが 1 でないのは、各チャンネルによって共通の雑音の大きさの度合いが異なるためである。共通の雑音を落とすべく、 $X$  から  $Y$  を引くことをやるのだが、そのためにアイボールフィットによる補正を行う。ここで言うアイボール (=目玉) フィットとは、共通の雑音を示す分布に対して直感的に直線を引くフィットである。アイボールフィットにより直線の傾きを求め、その傾きの逆数を  $Y$  にかけて補正する。

アイボールフィットによる補正後の  $XY$  相関図を、図 55(宇宙線測定ラン)、図 56(ペDESTALラン) に載せる。MIP ピークの予想値が  $\sim 4$ ADC count、雑音ピークが  $\sim 2$ ADC count より、宇宙線が 1 列 (6 チャンネル) に通過した時の  $p_0$  和が  $\sim 24$ ADC count、通過しない時の  $p_0$  和が  $\sim 12$ ADC count となる。図 55 を見てみると、 $(X, Y) = (24\text{ADC count}, 12\text{ADC count})$  付近でイベントの集中 (緑~シアン色) がわかる。

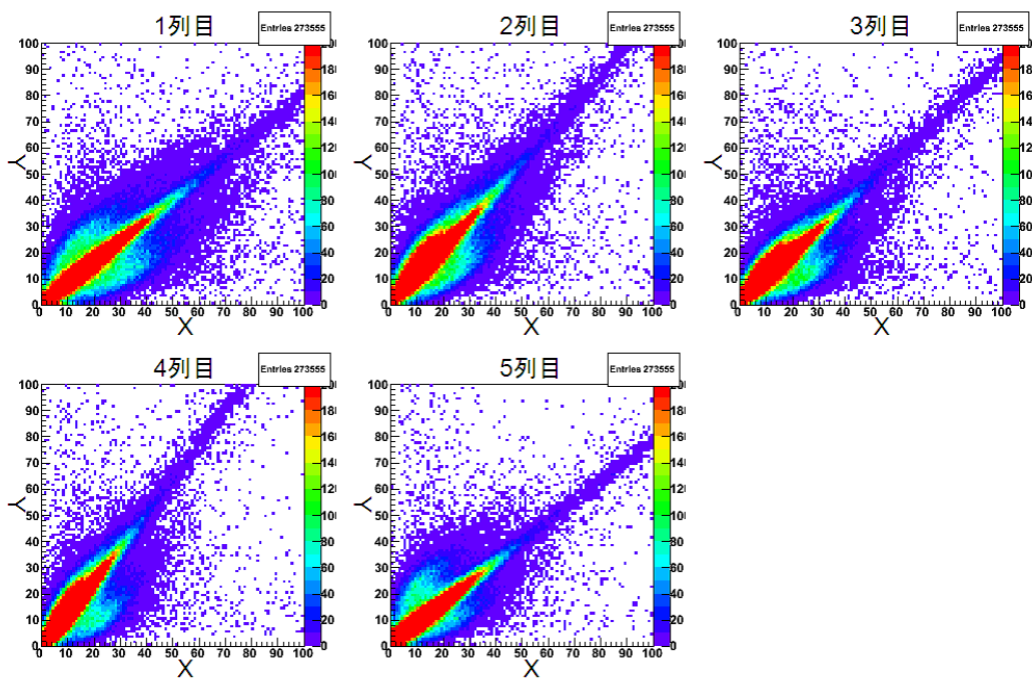


図 53 XY 相関 (宇宙線測定ラン)。X は 1 つの列の  $p_0$  和 [ADC count]、Y は両隣の  $p_0$  和の平均値 [ADC count]。原点を通過する斜めの直線と、その周りにもやのような相関をもつ。前者が共通の雑音を含む雑音の情報を、後者が MIP の情報をもつことが、図 54 と比較することによりわかる。

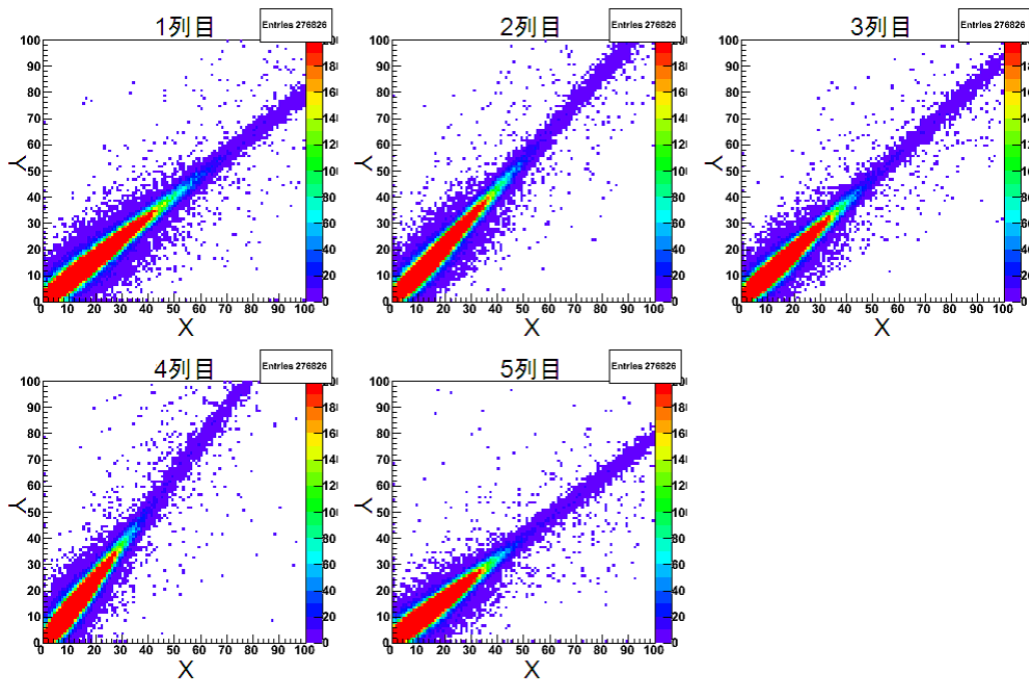


図 54 XY 相関 (ペDESTルラン)。X は 1 つの列の  $p_0$  和 [ADC count]、Y は両隣の  $p_0$  和の平均値 [ADC count]。原点を通過する斜めの直線、つまり共通の雑音を含む雑音の情報のみがしるされている。

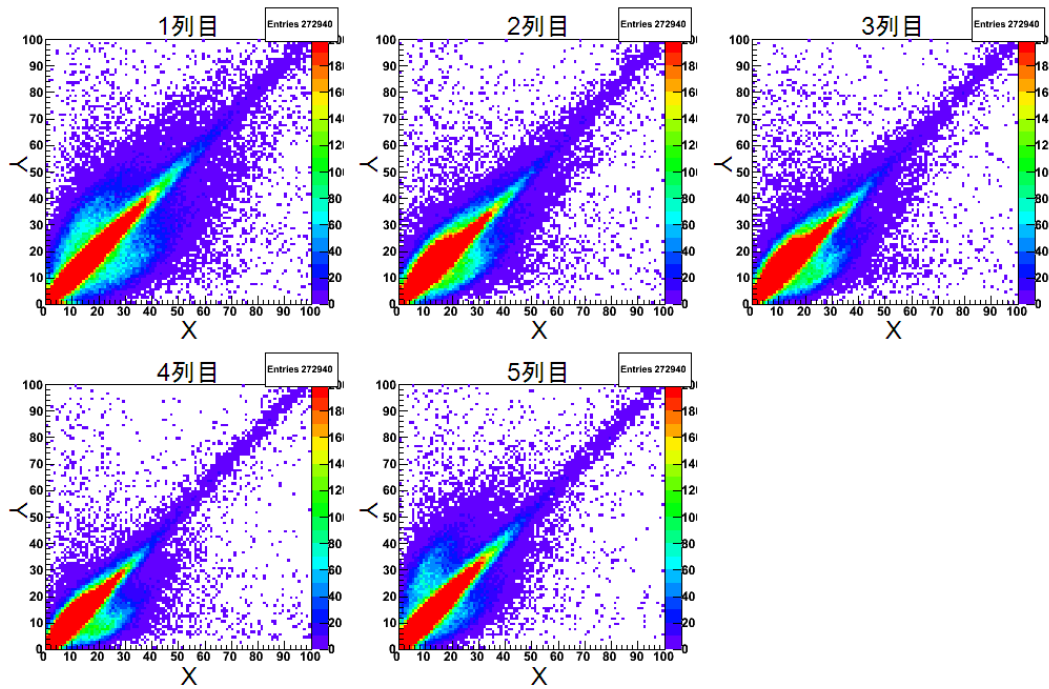


図 55 アイボールフィットによる補正後の XY 相関 (宇宙線測定ラン)。X は 1 つの列の  $p_0$  和 [ADC count]、Y は両隣の  $p_0$  和の平均値 [ADC count]。(X,Y) = (24ADC count,12ADC count) 付近でイベントが集中し (緑~シアン色)、MIP に関する情報である。

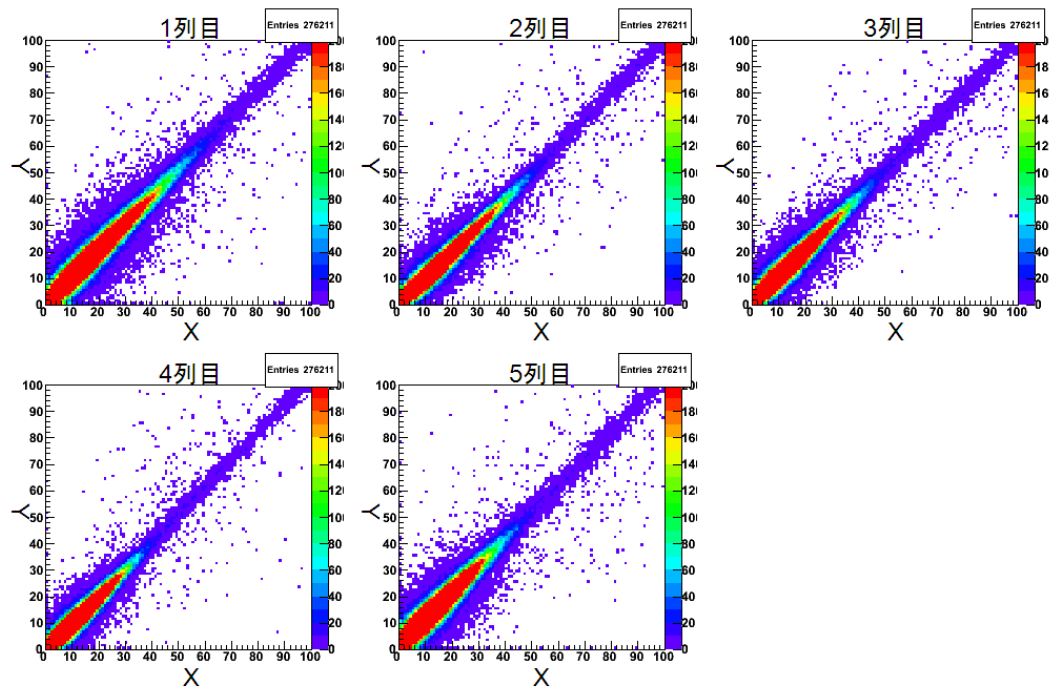


図 56 アイボールフィットによる補正後の XY 相関 (ペダスタルラン)。X は 1 つの列の  $p_0$  和 [ADC count]、Y は両隣の  $p_0$  和の平均値 [ADC count]。

アイボールフィットによる補正後の (X-Y) ヒストグラム (黒:宇宙線測定ラン、青:ペDESTALラン)。青に比べて黒は、 $(X-Y)_{j-5,5_j(X-Y)}$  にて膨らみがあり、これが MIP に関する情報をもつ。この段階では、雑音ピーク ( $\sim 0$ ADC count) と MIP ピーク ( $\sim 12$ ADC count) を完全に分離できていない。

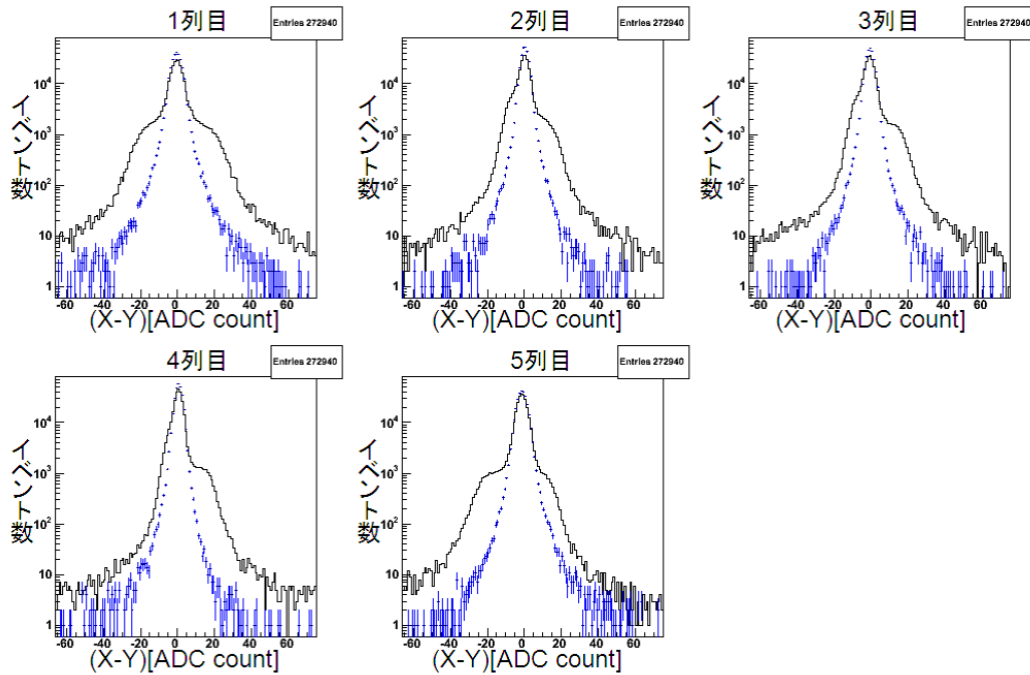


図 57 アイボールフィットによる補正後の (X-Y) ヒストグラム (黒:宇宙線測定ラン、青:ペDESTALラン)。青に比べて黒は、 $(X-Y)_{j-5,5_j(X-Y)}$  にて膨らみがあり、これが MIP に関する情報をもつ。この段階では、雑音ピーク ( $\sim 0$ ADC count) と MIP ピーク ( $\sim 12$ ADC count) を完全に分離できていない。

### 5.6.3 (X-Y) を用いたカット

図 57 の青 (ペDESTALランのデータ) をガウス関数と見なし、(ガウス関数の中心値より  $\pm$  の範囲での積分値が、全範囲の積分値の 68.3 %になる) に相当する値は  $\sim 2$ ADC count である (図 58 参照)。今回は、1つの列以外の (X-Y) が 2ADC count を下回る時に、その列の X、Y の値を取り出すような解析を行う。例えば、2列目について考える時、1列目の  $(X-Y)_{j \geq 2}$ ADC count、3列目の  $(X-Y)_{j \geq 2}$ ADC count、4列目の  $(X-Y)_{j \geq 2}$ ADC count、5列目の  $(X-Y)_{j \geq 2}$ ADC count のカット条件を課す。これは、共通雑音の大小に関わらず、着目している列 (例だと 2列目) 以外で宇宙線が通過していない条件になる。もし、他の列に宇宙線が通過している場合、いずれかの (X-Y) が 2ADC count を上回り、条件を満たさない。その後で、(X-Y) のヒストグラムにすることで、共通雑音を含む雑音ピークと MIP ピークに分ける。

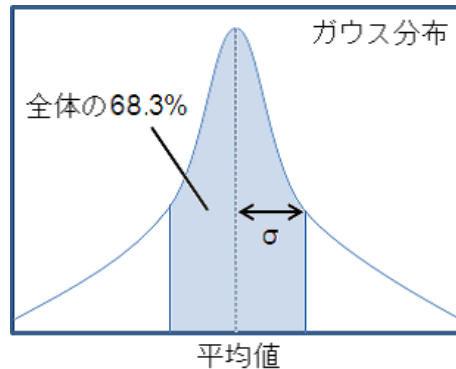


図 58 ガウス分布と  $\sigma$ 。積分値が全体の積分値の 68.3 % になるような幅が  $\sigma$  に相当する。

カットをかけた XY 相関を図 59(宇宙線測定ラン)、図 60(ペDESTALラン) に載せる。カットをかける前と比べ(図 53、図 54 参照)、図 59 では統計量が約  $1/3 \sim 1/4$  に、図 60 では約  $1/2 \sim 1/3$  に減っている。また、図 60 では、共通の雑音を含む雑音のイベントが、直線上になって表されているため、図 59 の直線の右下にあるイベントのかたまりが、MIP の情報を含んでいる。

次に、(X-Y) ヒストグラムを、図 61 に載せる。57 と比較すると、黒(宇宙線測定ラン)の 5ADC count 以上の肩がより際立って見えるが、共通雑音を含む雑音ピークと、MIP ピークを分離できていない。そこで、黒(宇宙線測定ラン)と青(ペDESTALラン)のイベント数をスケールリングして引き算したのが図 62 である。スケールリングの失敗により、負のイベント数の比を示すピンもあるが、 $\sim 12$ ADC count にピークが立つ。MIP の情報は、(X,Y)=(24ADC count,12ADC count) に集中していて、(X-Y) 軸に射影している事を考慮すると、 $\sim 12$ ADC count は MIP ピークの値として妥当である。

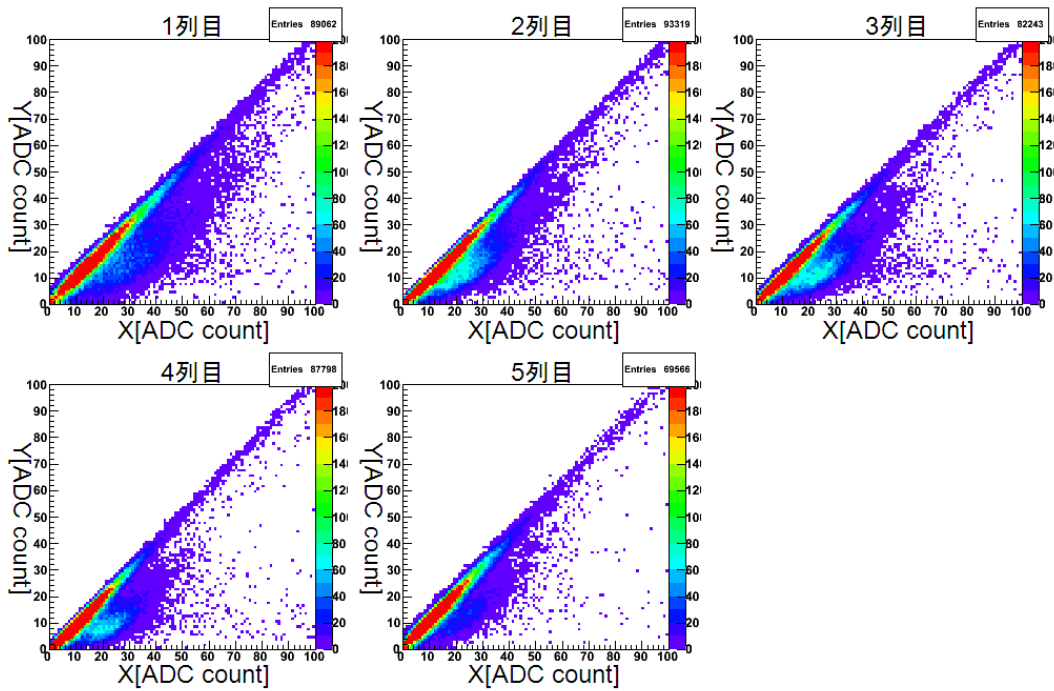


図 59 カットをかけた XY 相関 (宇宙線測定ラン)。統計量は、カットをかける前 (図 53) と比べ約 1/3 ~ 1/4 に減っている。図 60 と比べて、直線の右下にあるイベントのかたまりが、MIP の情報を含んでいる。

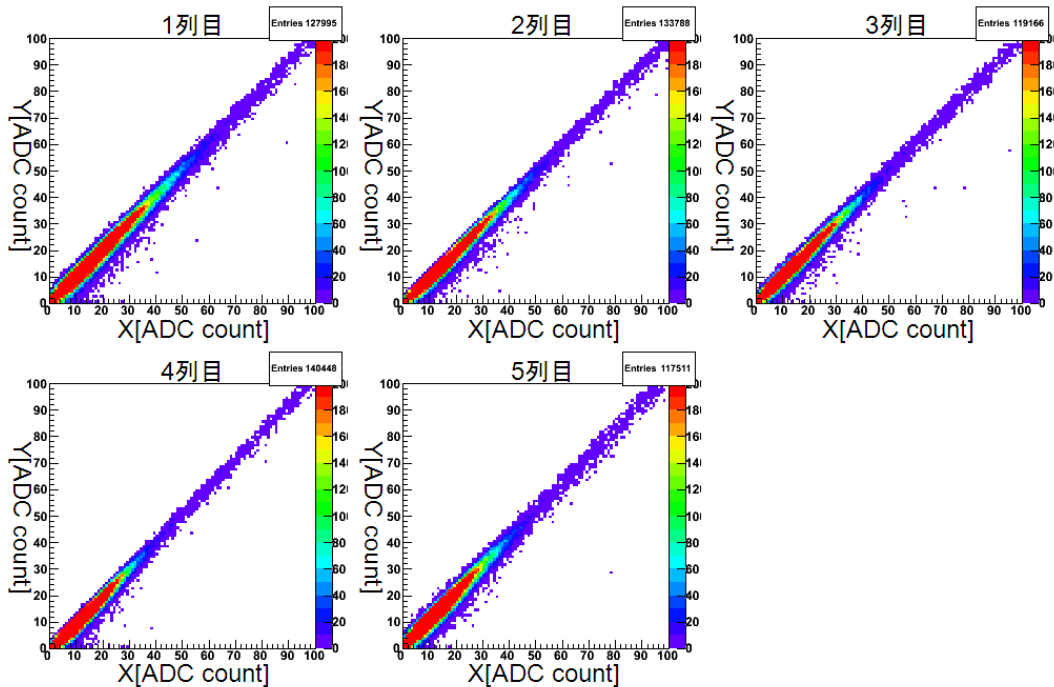


図 60 カットをかけた XY 相関 (ペDESTALラン)。統計量は、カットをかける前 (図 54) と比べ約 1/2 ~ 1/3 に減っている。共通の雑音を含む雑音のイベントが、直線上になって表されている。



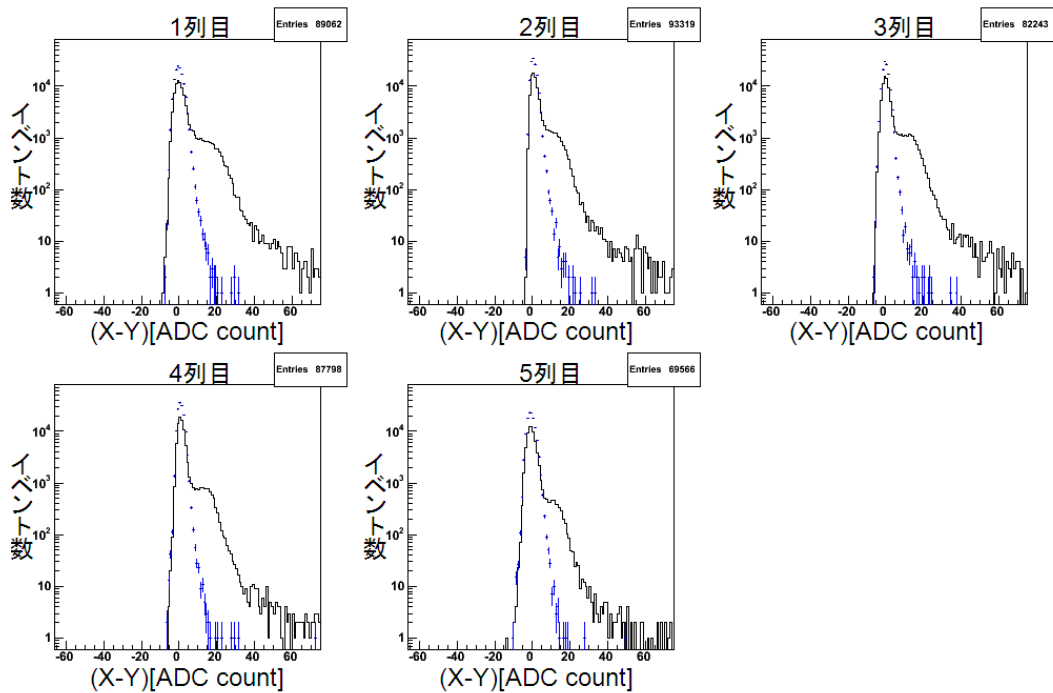


図 61 カットをかけた (X-Y) ヒストグラム (黒:宇宙線測定ラン、青:ペDESTALラン)。57 と比較すると、黒 (宇宙線測定ラン) の 5ADC count 以上の肩がより際立って見える。共通雑音を含む雑音ピークと、MIP ピークを分離できていない。

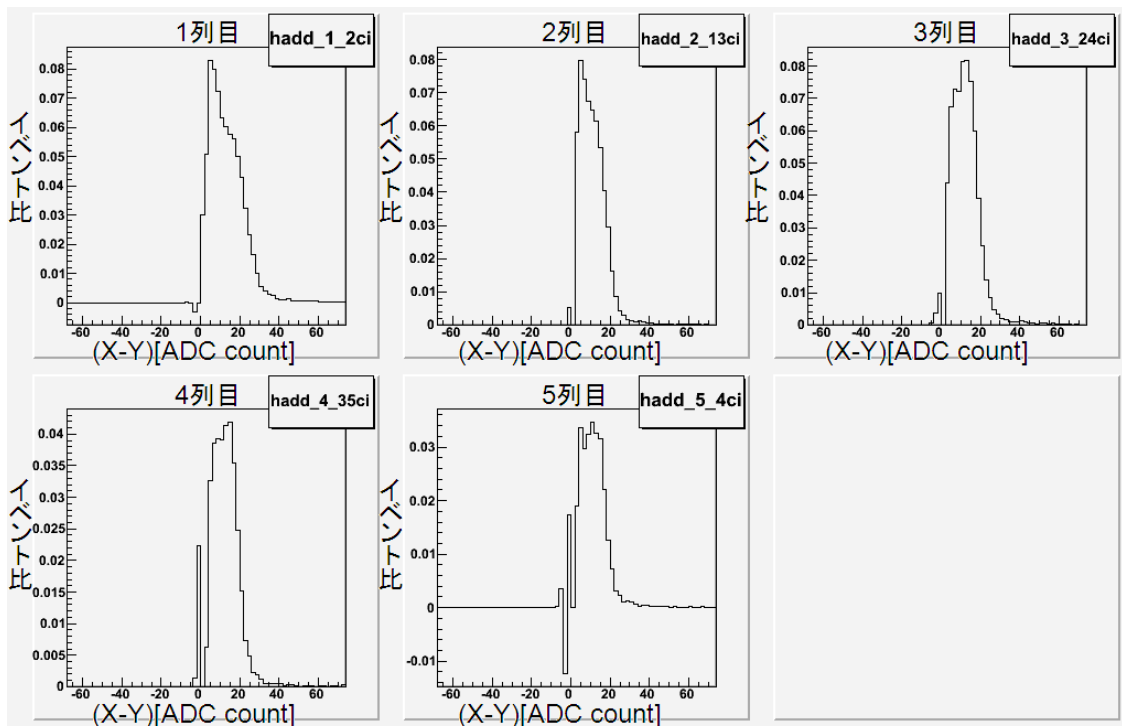


図 62 図 61 の黒 (宇宙線測定ラン) と青 (ペDESTALラン) のイベント数をスケールして引き算。スケールングの失敗により、負のイベント数の比を示すピンもあるが、 $\sim 12$ ADC count にピークが立つ。(X-Y) 軸に射影している事を考慮すると、 $\sim 12$ ADC count は MIP ピークの値として妥当である。

## 6 考察

第5章より、PWO結晶群を水平方向に横置きにしてペDESTALランや宇宙線測定ランを行ったら、PWO結晶を有するチャンネル全てに、上下にブレるADC出力信号を示すようなイベントが観測された(図38)。これは、横置きにした際、外部雑音を拾いやすい回路にしたことが原因だと考えられる。

一方で、(2,2)、(2,3)、(3,1)、(3,4)、(4,5)のように、外部雑音の影響をあまり受けていないチャンネルもある(5.2~5.4参照)。

外部雑音の主な原因の候補として、a) 回路の接地の不安定さ、b) 周辺機器からの電磁波、c) 蛍光灯の光が考えられる。a) は1kHz以下の周波数をもち、安定したグラウンドに接地することで解消できる。b) は数k~MHzの周波数をもち、回路のコードの輪っかを極力小さくしたり(誘導起電力を抑えるため)、アルミホイルで包んだりする(コードを静電遮蔽する)こと解消できる。c) は可視光の場合、400nm~750nmの波長(750THz~400THzの周波数)をもち、蛍光灯の電源を切るか、光が入らないようにすることで解消する。CSPとFEEボードを繋ぐケーブルが外部雑音を拾っていると仮定すると、b)が原因である可能性が高い。そこで、雑音の原因の特定のため、PWO結晶群を寝かせた状態でペDESTALランを行い、サンプリング数を70から400に増やしてADC出力信号を1イベント取り出した(図63)。

図63から、(1,5)以外のチャンネルで共通のジグザグな形をした波を作っている。1サンプリング = 0.1 $\mu$ sより、大まかに100~200kHzの周波数が混じりあっている。これは上記のb)に相当するため、外部雑音の発信源は周辺機器からの電磁波である。

また、(2,2)、(2,3)、(3,1)、(3,4)、(4,5)については、比較的ジグザグ具合が少ないことから、外部雑音の影響をあまり受けていないと言える。

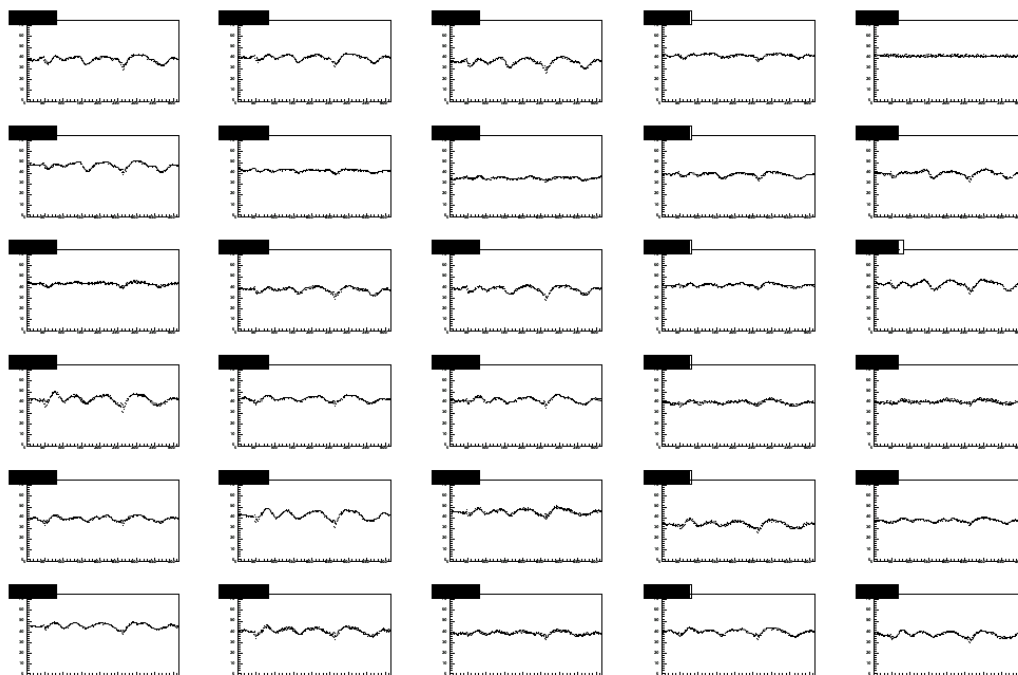


図63 PWO結晶群を寝かせた状態でサンプリング数を400に増やしたADC出力の1イベント。

## 7 結論

本研究では、PWO シンチレータ電磁カロリメータの発光量位置依存性測定のための研究として、広島大学の PHOS 性能評価機を用いた予備研究を 2 つ行った。具体的には、(1) PHOS 性能評価機の動作確認と、(2) PWO 結晶群水平方向横置き時の宇宙線測定データから MIP 情報を取り出す研究である。(1) の動作確認では、クラスター法により MIP ピークを求め、一部のチャンネルを除いて過去の MIP ピークと  $\sim 33$ ADC count で一致した事を確かめた。

(2) の研究では、途中、外部雑音による共通雑音が混入するハブニングがあったものの、MIP ピークを単独のチャンネルに対しての解析と、列単位での解析の、独立した 2 つの解析法により各々導き出すことに成功した。この事実は、発光量位置依存性測定が可能であることを示唆しており、今後この 2 つの解析法が効力を発揮することを期待される。

また、今回の研究を通して得た教訓として、回路のセットアップを変える際、周辺機器からの電磁波を考慮する必要がある。

## 謝辞

今回の卒論を執筆するにあたって、多くの方々のご協力を頂きました。指導教官の杉立先生は、僕の研究の進捗具合を常に気にかけて下さっていて、専門的な知識のほか、研究者としての心得もたくさん教えて頂きました。主査の三好先生には、異なる分野を専門とされていながらも、でもだからこそ第三者的な視点で僕の卒論を熱心に、丁寧にチェックして下さいました。志垣先生には、ミーティングで適切な意見を頂いたほか、自動車で外食に連れて行ってもらい(最遠で呉市まで)、充実した研究生生活を送ることができました。本間先生には、前期のラボエクササイズでお世話になり、C言語やハードウェアなど、研究する上での基礎中の基礎について学ぶ事ができました。特別研究員の鳥井さんには、個人的に非常にお世話になった人の1人で、平日での研究についての議論はもちろん、休日でも海外出張中でも、卒論締め切り直前に何度もメールを通して議論を重ねて頂きました。また、鳥井さんの親父ギャグは個人的にツボで、とても癒されました。

博士課程・修士課程の先輩方にも大変お世話になりました。中宮さんには、卒論の構成についてアドバイスを頂いたり、卒論締め切り間近の時期に、4年生のために弁当の注文をして頂きました。木島さんには、僕ら4年生の事を気にかけて頂いていて、黒瀬の美味しい蕎麦屋に自動車で連れて行ってもらったこともありました。渡辺さんは、同じ部屋の先輩の1人であり、個性の強い僕ら4年生の事を1年間温かく見守って下さいました。二橋さんは、日米を行ったり来たり的生活をされていて、日本にいる時は、某週刊誌を片手に気さくに話しかけて下さる姿が印象的でした。

坂口さんには、研究面のほか、プライベートでもお世話になり、一緒に食事に行ったり、お酒を飲んだり、本当に良くして頂きました。尾林さんには、去年 PHOS 性能評価機を用いた実験をやっていたとの事で、PHOS 性能評価機を扱っていてトラブルが起きた際、常にお世話になりっぱなしでした。また、過去のデータを提供して頂いたお蔭で、PHOS 性能評価機の動作確認を行うことができました。翠さんも、個人的に非常にお世話になった人の1人で、時にやさしく、時に厳しく、一切妥協せずに研究の議論をして下さりました。研究室配属当初、LINUX もろくに使えず途方に暮れる僕に対し、懇切丁寧に導いて下さり、今に至ります。また、共通の趣味である合唱についても熱く議論し、優に1時間を超えることもしばしばでした。

4年生の高田さん、木村さん、星野君、八野君は、それぞれ独自のパーソナリティをもちながら、1つの課題に対してともに向き合っていました。彼らと互いに議論を重ねる内に、様々な価値観がある事を知りました。特に星野君、八野君は、テーマは違えど卒論に向けて、苦楽の日々をともに過ごしてきました。研究の面でわからない事があれば、お互い教え合いっこし、そんな信頼関係を築けたことが、僕にとって今回大きな収穫でした。

そして、親友の城尾君。彼は大学のサークル時代からの親友で、ちょくちょく研究室に来ては、僕を励ましに来てくれました。この一年間、つらい時期もありましたが、それを乗り越えられたのは、彼なくして有り得ません。

最後に、僕が無事卒論を書き上げられたのはもとより、満足な大学生活を送れたのは、常に僕の事を支えてくれた両親のお蔭です。

お世話になった皆様に、心より感謝の気持ちを申し上げます。今後も、感謝の気持ちを忘れずに、研究活動に勤しんで参ります。

## 参考文献

- [1] Particle Data Group. *REVIEW OF PARTICLE PHYSICS*. ELSEVIER, 2004
- [2] Hans Muller, Zhongbao Yin, CCNU Wuhan. *PHOS User Manual*. PHOS Collaboration, 2007  
<http://folk.uio.no/perthi/alice/doc/PHOS-User-Manual.pdf>
- [3] 永江知文・永宮正治『原子核物理学』(裳華房、2000)
- [4] 杉立徹「LHC-ALICE 実験 PWO 結晶電磁カロリメータ読み出し系の開発」(研究成果報告書、2006)
- [5] 中馬文広「ALICE 実験 PHOS 検出器の宇宙線を用いたエネルギー較正」(広島大学卒業論文、2008)
- [6] 坂雅幸「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」(広島大学卒業論文、2009)
- [7] 翠純平「ALICE 実験 PHOS 検出器による運動量凍結温度測定法」(広島大学卒業論文、2010)
- [8] 尾林秀幸「 $\sqrt{s_{NN}}=5.5\text{TeV}$  Pb+Pb 衝突における到達グルーオン密度の決定精度の評価」  
(広島大学卒業論文、2010)
- [9] 尾林秀幸「ALICE 実験のための PWO カロリメータの宇宙線を用いたエネルギー較正」  
(日本物理学会 2010 秋季大会の発表用スライド、2010)  
[http://www.hepl.hiroshima-u.ac.jp/member/record/obayashihideyuki/0322\\_obayashi\\_JPS.pptx](http://www.hepl.hiroshima-u.ac.jp/member/record/obayashihideyuki/0322_obayashi_JPS.pptx)