

# 電子ビーム実験による Cerberus の性能測定

山形大理学部物理学科  
クォーク核物理学研究室  
大津亜樹

平成 21 年 3 月 25 日

# 目次

第 1 章	序論 .....	7
1. 1	J-PARC E14 実験の概要.....	7
1. 2	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊分岐比測定実験 (E391a 実験) .....	7
1. 3	電磁シャワー.....	7
1. 4	エネルギー分解能.....	8
1. 5	ポアソン分布.....	8
1. 6	隣接事象間の時間間隔の分布 .....	9
第 2 章	実験装置 .....	11
2. 1	Cerberus.....	11
2. 2	光電子増倍管 (PMT) .....	12
2. 3	シンチレータ .....	13
2. 4	Trigger カウンター .....	13
第 3 章	実験・解析の前準備.....	15
3. 1	本実験の目的.....	15
3. 2	宇宙線による Cerberus#1 の PMT 動作.....	15
3. 3	ビームライン上の装置.....	15
3. 3. 1	Set up.....	15
3. 3. 2	モジュール組み立てと配線 .....	16
3. 4	PAW++による解析.....	18
第 4 章	各依存性の検討.....	19
4. 1	Energy 依存 .....	19
4. 1. 1	実験方法 .....	19
4. 1. 2	解析.....	20

4. 1. 3	Energy 依存の解析結果 .....	20
4. 2	Position 依存.....	21
4. 2. 1	実験方法 .....	22
4. 2. 2	解析.....	22
4. 2. 3	Position 依存の解析結果.....	22
4. 3	Rate 依存 .....	28
4. 3. 1	実験方法 .....	29
4. 3. 2	解析.....	29
4. 3. 3	Rate 依存の解析結果 .....	30
第 5 章	実験を受けてのシミュレーション.....	38
第 6 章	まとめ.....	40
6. 1	実験のまとめ.....	40
6. 2	今後の課題 .....	40
関連図書	.....	42

# 目次

第 1 章	序論	
	図 1 Cerberus 内で起こる $\gamma$ 線の電磁シャワー .....	8
	図 2 指数分布 .....	10
第 2 章	実験装置	
	図 3 Cerberus .....	11
	図 4 Cerberus の構造 .....	12
	図 5 光電子増倍管の内部構造 .....	12
	図 6 使用した Trigger カウンター .....	14
第 3 章	実験・解析の前準備	
	図 7 Set up .....	16
	図 8 実験の様子 .....	16
	図 9 CerberusPMT の logic .....	17
	図 10 Trigger カウンターの logic .....	17
第 4 章	各依存性の検討	
	図 11 ピークの値とエネルギーの関係 エネルギー分解能 $\sigma/E$ の値と エネルギーの関係 .....	21
	図 12 測定した position .....	22
	図 13 Mean と Position の関係 Sigma と Position の関係 .....	23
	図 14 (0,0) での ADC データ .....	24
	図 15 (0,-100) での ADC データ .....	25
	図 16 (150,0) での ADC データ .....	26
	図 17 (150,-100) での ADC データ .....	27
	図 18 (0,0) との各 Position における光量の比 .....	28
	図 19 変更した logic .....	29
	図 20 TDC キャリブレーション測定時の logic .....	30

図 21	ADC1,2,3,4 の Rate 信号比較 .....	31
図 22	ADC5,6,7,8 の Rate 信号比較 .....	32
図 23	ADC9,10,11,12 の Rate 信号比較.....	33
図 24	High Rate 時のビームの様子 .....	34
図 25	Rate 実験におけるピーク位置の比較 .....	37
第 5 章	実験を受けてのシミュレーション	
図 26	シミュレーション結果.....	39

# 表目次

## 第 4 章 各依存性の検討

表 1	Cerberus の PMT に取り付けられた ADC と印加電圧.....	19
表 2	Trigger カウンターに取り付けられた ADC と印加電圧 .....	20
表 3	Trigger に使った PMT .....	20
表 4	Cerberus が観測した High Rate の大きさ .....	35
表 5	Cerberus が観測した通常の Rate の大きさ.....	35
表 6	Trigger カウンターが観測した High Rate の大きさ .....	36
表 7	Trigger カウンターが観測した通常の Rate の大きさ .....	36

# 第1章 序論

## 1. 1 J-PARC E14 実験概要

J-PARC (大強度陽子加速器施設) において予定されている J-PARC E14 実験は以前に高エネルギー加速器研究機構 (KEK) にて行われた  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  稀崩壊分岐比測定実験 (E391a 実験) を引き続き行うものであり、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の分岐比を測定することで CP 対称性の大きさを表す  $\eta$  パラメータを精度よく決定することを目指している。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊実験が難しい理由のひとつは予想される分岐比が  $3 \times 10^{-11}$  という稀な崩壊であり、その中で  $\pi^0$  中間子をひとつ検出しなければならない点である。E391a 実験では  $\gamma$  測定感度が  $\sim 10^{-9}$  であることを得ている。E14 実験ではこの値を標準模型  $\sim 10^{-11}$  にまで近づけ、標準模型が正しいかどうかを判断する。

## 1. 2 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊分岐比測定実験 (E391a 実験)

E391a 実験は高エネルギー加速器研究機構(KEK)の 12GeV 陽子シンクロトロンを用いて行われた。E391a 実験グループは三度にわたる実験において測定時間  $1.3 \times 10^6 \text{spill}$  (1spill=4sec)、 $K_L$  崩壊を  $8.4 \times 10^8$  イベント測定した。そのデータを解析した結果、稀崩壊分岐比の上限値  $6.7 \times 10^{-8}$  を得た。

## 1. 3 電磁シャワー

$\gamma$  線と物質との主な相互作用は3つある。

- ・ 光電効果
- ・ コンプトン散乱
- ・ 電子対生成

この中で、電子対生成とは  $\gamma$  線と原子核との間の相互作用で、その結果  $\gamma$  線は消滅し電子・陽電子対が発生する。対生成に発生した電子・陽電子は制動放射をよび対消滅によって  $\gamma$  線を作り、この  $\gamma$  線がまたさらに対生成を起こし電子・陽電子を発生させる。このような過程が、臨界エネルギーに至るまで繰り返される現象のことを電磁シャワー

という。

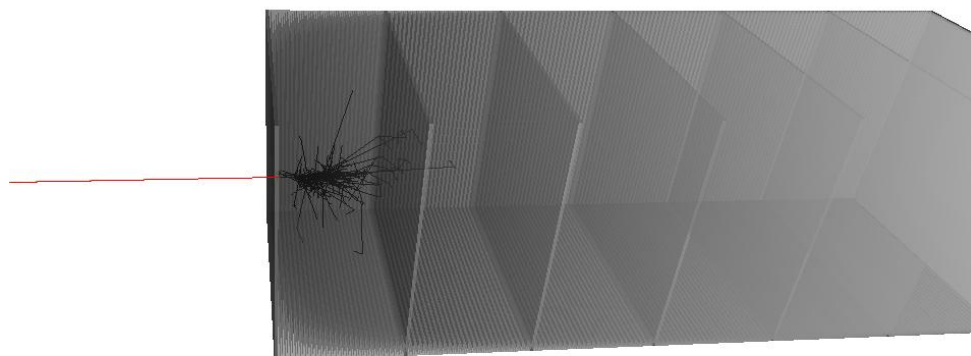


図1 : Cerberus 内で起こる $\gamma$ 線の電磁シャワー  
# 1 モジュールでシャワーを起こしている

## 1. 4 エネルギー分解能

エネルギー分解能とは検出器の性能の一つとして、どれだけエネルギーを細かく分離できるかの目安とされ、一般に得られたエネルギー分布の標準偏差 $\sigma$ をその分布のピーク値エネルギー $E$ で割った $\sigma/E$ という無次元量で表される。 $\sigma$ が小さくなるほど $E$ の分解が可能になり、分解能は良くなる。物質への入射エネルギーとエネルギー分解能の関係は

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_0}{E}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_1}{\sqrt{E}}\right)^2 + \sigma_2^2 \quad (1.1)$$

で表される。 $\sigma_0$ はノイズ項と呼ばれ、低いエネルギーのときに重要となり、主に ADC ペDESTALの太さに依存する。 $\sigma_1$ は統計項と呼ばれ、ポアソン統計に従う過程が影響し、入射粒子が物質に付与するエネルギーのゆらぎや光電子増倍管の光電面から放出される光電子数のゆらぎなどに依存する。 $\sigma_2$ は定数項と呼ばれ、物質からの入射エネルギーの洩れなどが関係する。

## 1. 5 ポアソン分布

ある条件の下では、多数回測定を繰り返して得られる結果を表す分布関数を予測することができる。ある試行の回数からもたらされる当たりの数を数えるような測定を考え、すべての試行に対する当たりの確率が一定であると仮定したとき、当たりの数が少なけ



れば2項分布を簡略化したポアソン分布に従う。ここでの条件は、観測時間を半減期に比べて小さく選んだ場合または検出効率が小さい場合を意味している。例としては放射線測定などがポアソン分布をとる。

## 1. 6 隣接事象間の時間間隔の分布

ランダムな事象を分離している時間間隔は放射線測定で実際に対象になることが多い。単位時間内に発生する確率が一定であるという特性をもつランダムな過程があるときを考える。

当たりの確率が  $p$  であり、試行回数を  $n$ 、このうち  $x$  回が当たりとなる確率を  $P(x)$  と表すとする。原子核ビーム実験などでのイベントは2項分布では次のように表される。

$$P(x) = \frac{(pn)^x e^{-pn}}{x!} \quad (1.2)$$

原子核ビーム実験ではポアソン分布に従うようなデータが得られるため、上の式を数学的に簡略化でき、 $pn = \bar{x}$  となるため次式が得られる。

$$P(x) = \frac{(\bar{x})^x e^{-\bar{x}}}{x!} \quad (1.3)$$

一つの事象が時刻  $t = 0$  に起こり、時間  $t$  を経た後の微小時間  $dt$  の間に次の事象が起こる確率を考える。この場合  $0$  から  $t$  までの時間間隔には事象が起こらず、その後の時間増分  $dt$  の間に一つの事象が起こらなければならない。したがって、全体の確率は二つの過程が起こる確率の積で与えられる。

遅れ時間 $t$ の後 $dt$ の間に次の事象 が起こる確率	=	0から $t$ までに 事象が全然起こらない 確率	×	一つの事象が $dt$ の間に起こる確率
$I_1(t)dt$		$P(0)$		$r dt$

右辺の第1項はポアソン分布に従う。記録された事象の平均の数が  $rt$  となるべき時間間に事象が全然起こらない確率を求める。(1.3)式より、

$$P(0) = \frac{(rt)^0 e^{-rt}}{0!}$$

$$P(0) = e^{-rt} \quad (1.4)$$

この  $P(0)$  より、

$$I_1(t)dt = re^{-rt} dt \quad (1.5)$$

が導かれる。

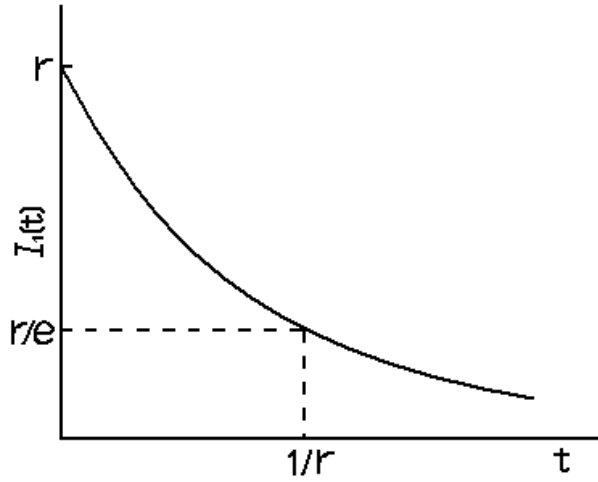


図 2 : 指数分布

$I_1(t)$ は隣接するランダムな事象間の間隔に対する分布関数で、これは指数関数である。つまり、事象が起こった後に次の事象が起こる確率がもっとも高い時間間隔がゼロであるということである

## 第2章 実験装置

### 2.1 Cerberus

Cerberus は E391a の Beam survey 実験で使用された n/ $\gamma$  モニタ検出器であり、Cerberus により求めた neutron と gamma の数・エネルギーの実測値がシミュレーションで求めた値と一致するかを検証する。

Cerberus は6つのモジュールで構成されており、有感領域は  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  となっている。#1のモジュール (EM part) は鉛とプラスチックシンチレータのサンドイッチカロリメータであり、鉛が4mm、プラスチックシンチレータが3.7mmで、この2つを重ね合わせたものが25層並んでいる。#2~6のモジュール (Hadron part) は鉄とプラスチックシンチレータのサンドイッチカロリメータであり、鉄が4mm、プラスチックシンチレータが3.7mmで、この2つを重ね合わせたものが25層並んでいる。それぞれのモジュールには8本の光電子増倍管 (3インチ, R1652-01) が取り付けられており、電磁シャワーにより各シンチレータが感知した光をライトガイドにより光電子増倍管に伝え、光量を増やし信号を大きくしている。主に、#1のモジュールでは、物質量の大きな鉛を用いることで電磁相互作用によって gamma( $\gamma$ )を検出し、#2~6のモジュールでは強い相互作用によって neutron(n)を検出する。今回の実験では Cerberus の #1モジュールを使用し、positron beam を照射してデータを得る。



図3 : Cerberus

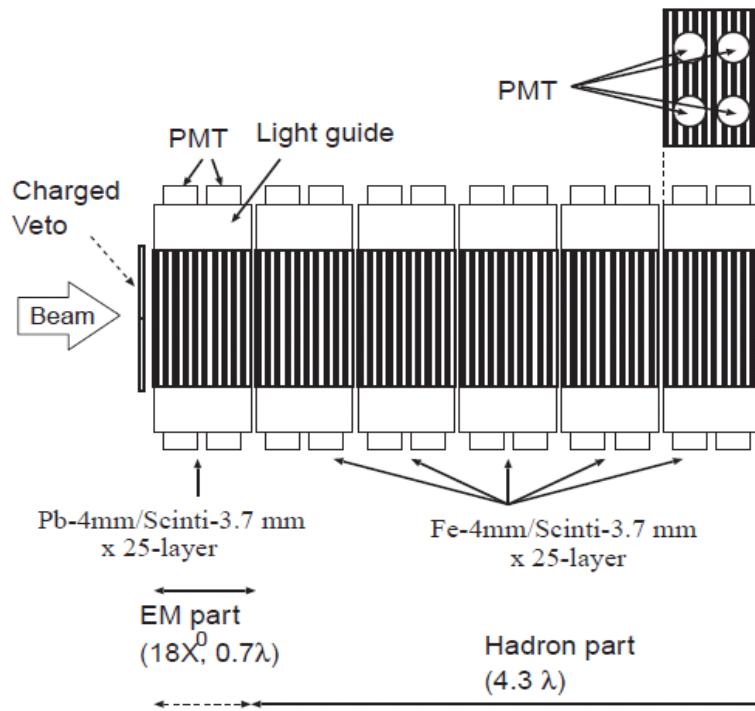


図 4 : Cerberus の構造

## 2. 2 光電子増倍管 (PMT)

光電子増倍管は、光電面、集束電極、電子増倍部、陽極（電子を集める電極）を真空管の中に収めた高感度の光センサで、直径 10mm 程度から直径 50cm のものまで広いバリエーションがある。

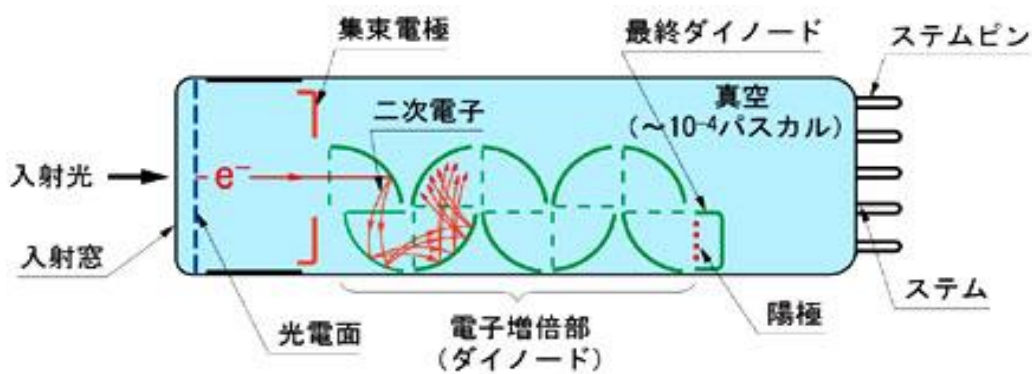


図 5 : 光電子増倍管の内部構造

光電面に光が当たると、光電面から真空中に光電子が放出され、その光電子は集束電極によって電子増倍部に導かれて、2次電子放出効果によって増倍（増加）される。この2次電子放出効果を利用して光電子を増倍（100万倍～1000万倍）することにより、光電子増倍管は光センサの中でも特に際立った高感度を有し、さらに高速時間応答特性など数々の優れた特性を備えている。また、光電子増倍管は、光電管と信号増幅器を用いたものと比較して、真空管内で増幅するためノイズが少ないという特徴を持っており、こうしたことから微弱光の測定に最適な光センサといえる。

### 2. 3 シンチレータ

シンチレータとは放射線が当たると発光する蛍光体のことで、取り込んだ光は一定波長の光に変換される。最もよく使われるのは有機シンチレータであるプラスチックで荷電粒子を捕らえることができる。中性子を捕らえるのによく使われるのは密度の高い無機シンチレータでCsI, NaI, BiSiO, PbWO<sub>4</sub>などがあげられる。その中でもCsIは様々な実験で使用されており、E391a実験やE14実験でも使用される。プラスチックシンチレータの利点は質量が軽く、加工し易いことである。実際に、板上のもの他にファイバー上のものである。

### 2. 4 Trigger カウンター

Cerberusの感知する信号の中には、ある程度のBack Groundからのものが含まれる。ビームライン上に小さなシンチレーションカウンターを置き、このカウンターが信号を観測した時とほぼ同時にCerberusが信号を観測していれば、それが照射ビームであると断定できる。これにより、Back Groundと照射ビームを区別しデータを得る。

本実験で使用したTriggerカウンターは、シンチレータ（10×100×10 mm）の両端に光電子増倍管（H3167）を取り付けたTrigger 1、シンチレータ（10×30×5 mm）の一端に光電子増倍管（H3165）を取り付けたTrigger 2、そして京都大学と共同で使用したTrigger 6（5780）の3つである。



図6 : 使用した Trigger カウンター (中 : Trigger1、下 : Trigger2)

## 第3章 実験・解析の前準備

### 3.1 本実験の目的

東北大学にある核物理研究施設にて行った本実験では、Cerberus における Energy 依存 (入射ビームのエネルギーと検出エネルギーの相関関係、検出エネルギーの分解能)、Position 依存 (ビームの入射位置と PMT 8 本の検出エネルギー合計の関係、ビーム入射位置と各 PMT の検出光量の関係)、Rate 依存 (High Rate によるビーム信号への影響、本実験の Rate の大きさ) について調べ、J-PARC で行われる E14 実験の Beam Survey で Cerberus が使用できるかを検討する。

### 3.2 宇宙線による Cerberus#1 の PMT 動作

2007 年 1 月、宇宙線での Cerberus の PMT の動作チェックと光量測定実験が KEK で行われ、そこで Cerberus の全 PMT が動作することや性能測定、光量測定が終了している。この実験で Cerberus#1 の pedestal run と宇宙線 run のデータを得ている。

### 3.3 ビームライン上の装置

実験当日は京都大学、佐賀大学の研究グループも同じビームライン上で実験を行った。当初は山形大学の実験に使用する Trigger カウンターを 3 台設置する予定だったが、ビームライン上の使用スペースが狭かったため、京都大学の Trigger を共同で使うことになった。

#### 3.3.1 Set up

Trigger カウンターと Cerberus の配置は図 7 のようになる。ビームライン上流から順に、Trigger 1、Trigger 2、Trigger 6 を置き、Cerberus の中心を合わせて置いている。ここで Cerberus 全体には暗幕を掛け遮光しておき、Magnet は Trigger カウンターを置く台として用いているため磁場はかけていない。Cerberus の上流側にある装置は京都大学が、下流側にある装置は佐賀大学が設置したものである。



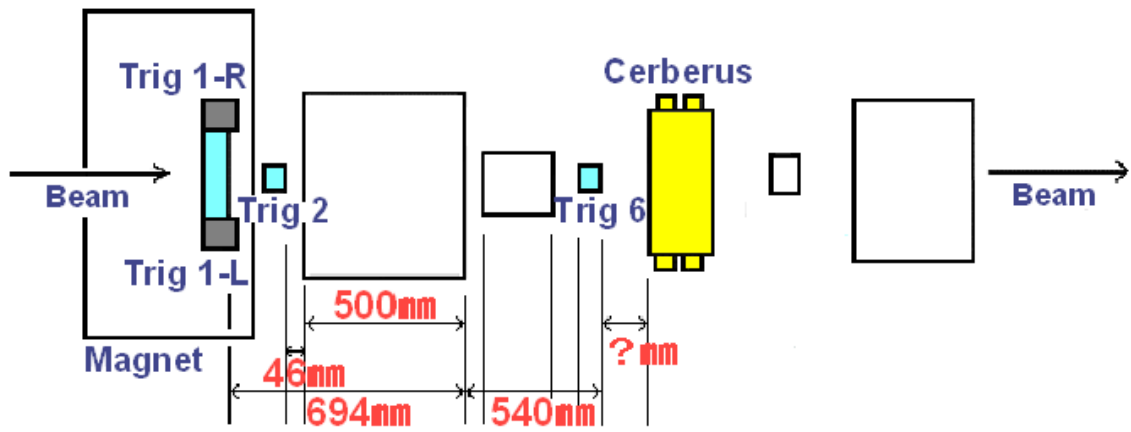


図 7 : Set up



図 8 : 実験の様子



### 3. 3. 2 モジュールの組み立てと配線

実験では以下のようにモジュール組み立て、配線を行っている。

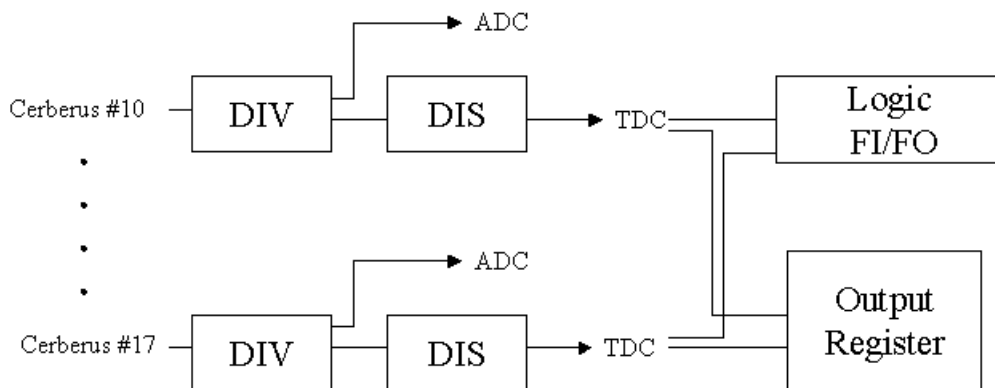


図 9 : CerberusPMT の logic

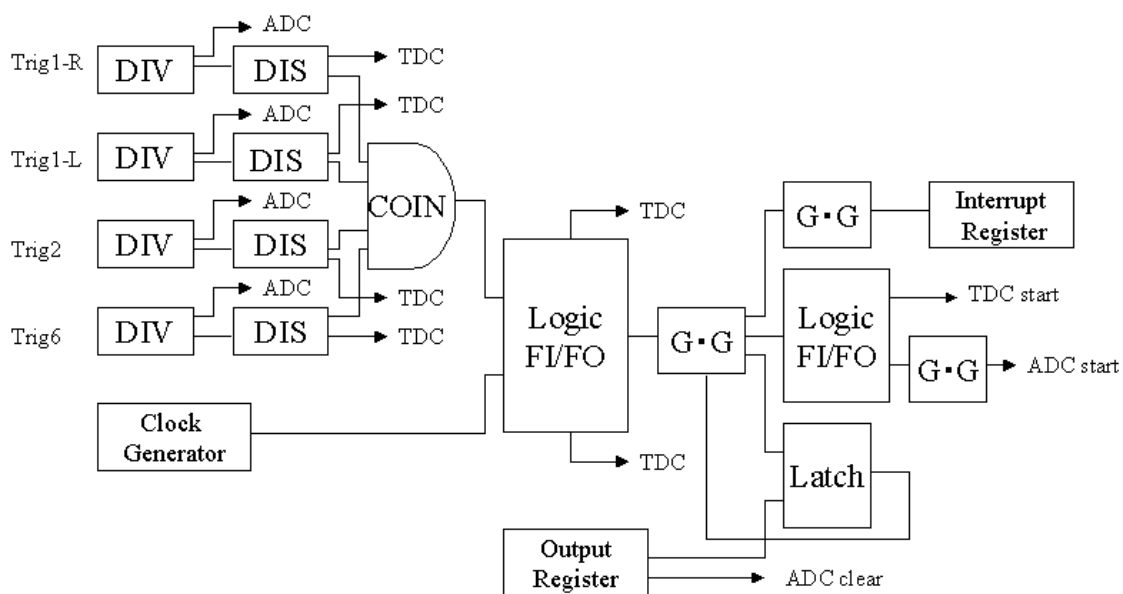


図 10 : Trigger カウンターの logic

### 3. 4 PAW++による解析方法

以下の手順で宇宙線測定データを用いてデータの解析をしていく。

ADC の gain を合わせる

TDC による時間分解能の測定

データの pedestal の削除

ノーマリゼーション (宇宙線ピークを1とする)

## 第4章 各依存性の測定

### 4.1 Energy 依存

入射ビームのエネルギーと検出エネルギーの相関関係、検出エネルギーの分解能がどうであるかを導く。

#### 4.1.1 実験方法

本実験では $\gamma$ 線のエネルギーを 200~800MeV/c まで変化させ、各エネルギーで 50000events 程度までビームを発生させてデータを得た。より正確な相関を見るために、450MeV/c、550MeV/c、650MeV/c のデータも取った。200MeV/c での Run はエネルギーが低くほとんどイベントが来なかったため、converter を今まで使用していた Cu 7 mm から W 200  $\mu$ m に変えた。

各 PMT にかける印加電圧の数値は、2007 年 1 月に行われた宇宙線での Cerberus の PMT の動作チェックと光量測定実験で PMT にかけた数値に設定した。Trigger カウンターにかける印加電圧は、各 Trigger に使用した PMT の製造元である浜松ホトニクス会社のカタログに記載されている最適数値に設定した。

Cerberus Number	ADC Number	印加電圧 (V)
10	1	-1300
11	2	-1160
12	3	-1360
13	4	-1300
14	5	-1200
15	6	-1260
16	7	-1200
17	8	-1200

表1 : Cerberus の PMT に取り付けられた ADC と印加電圧

Trigger Number	ADC Number	印加電圧(V)
1-R	9	-1500
1-L	10	-1500
2	11	-1000
6	12	-1000

表 2 : Trigger カウンターに取り付けた ADC と印加電圧

型名	内蔵光電子増倍管		印加電圧(V)	最大印加電圧(V)
	管径(mm)	型名		
H3165-04	13	R647-01	-1000	-1250
H3167-01	19	R1450	-1500	-1800

表 3 : Trigger に使った PMT

#### 4. 1. 2 解析

ビームの入射位置と Cerberus に取り付けられている 8 本の PMT の検出エネルギー合計の関係をみるために、まず各エネルギーの Run データと宇宙線データをもとに、ADC の SUM データを作り出す。この SUM データにガウスフィットをかけて、ピーク中心となる Mean (E) の値と標準偏差 Sigma ( $\sigma$ ) の値を読みとり、Mean の値とエネルギーの関係をプロットし、線形フィットさせた。さらにエネルギー分解能  $\sigma/E$  を求め、 $\sigma/E$  の値とエネルギーの関係をプロットし、エネルギー分解能へのフィッティングをかけた。

#### 4. 1. 3 Energy 依存の解析結果

以下に Mean (ピーク) の値とエネルギーの関係とエネルギー分解能  $\sigma/E$  の値とエネルギーの関係を示す。

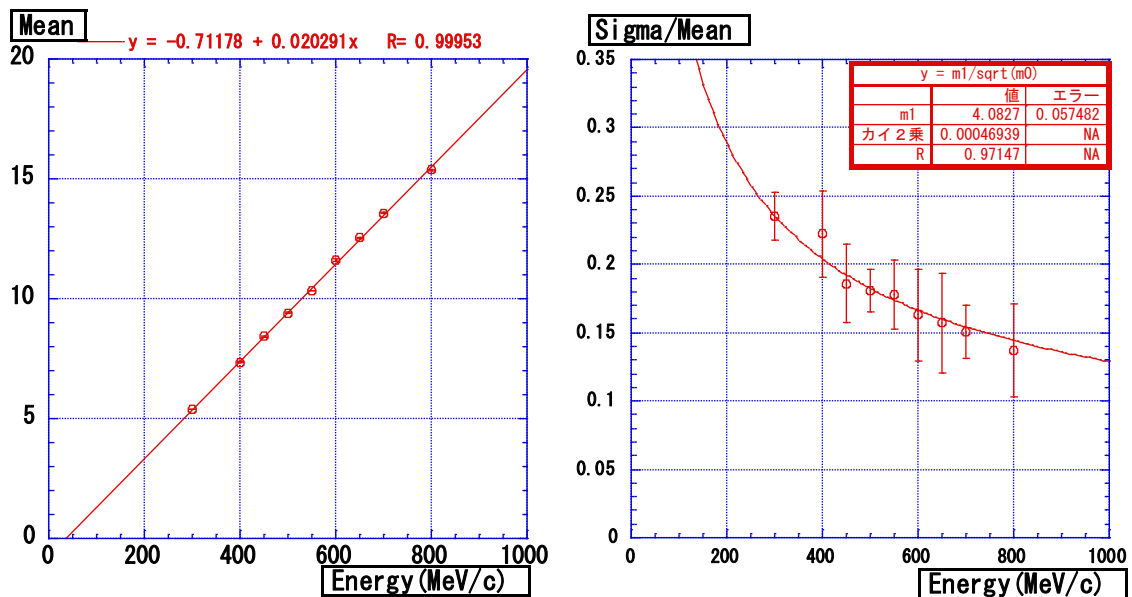


図 11: 左はピーク (Mean) の値とエネルギーの関係 右はエネルギー分解能  $\sigma/E$  の値とエネルギーの関係

converter を換えたが、200MeV/c のデータは良いものが得られなかった。

Mean の値とエネルギーには線形の関係が見られたが、この線形フィットでは原点を通らなかった。原因は調査中であるが、現時点でこれは Calibration に原因があると考えている。また、高エネルギーのビームは Cerberus に入射してすぐにエネルギーを deposit するので、エネルギー分解能  $\sigma/E$  の値とエネルギーは (1. 1) 式からノイズ項と定数項を排除した式

$$\sigma/E = 0.129/\sqrt{E(\text{GeV})} \quad (4. 1)$$

にフィットするような関係が見られ、エネルギー分解能は 1 GeV で約 13%であった。しかしながら、図 11 からは光量、エネルギー分解能はともにエネルギーに依存していることが見て取れる結果が得られた。

## 4. 2 Position 依存

Position 依存の実験では、Cerberus に入射するビームの位置を変えることで、ビームの入射位置と CerberusPMT 8 本の検出エネルギー合計の関係、ビーム入射位置と Cerberus の各 PMT による検出光量の関係を検討する。

## 4. 2. 1 実験方法

ビーム上流から見て、Cerberus の中心を原点にとった時のビーム位置を  $(x, y)$  とし、4 ヲ所  $(0,0)$   $(0,-100)$   $(150,0)$   $(150,-100)$  のデータをとった。ビームラインは変更できないため、Cerberus を上下左右に動かすことで位置を変えた。モジュールの配線や装置の配置などは Energy 依存の実験と同じである。

今回の実験ではクレーンを使って Cerberus を移動させたので正確な位置に置くことが出来ず、ここでの実際のビーム入射位置は  $(0,0) \rightarrow (-2,0)$ 、 $(0,-100) \rightarrow (-2,-100)$  であった。

## 4. 2. 2 解析

ビームの入射位置と CerberusPMT 8 本の検出エネルギー合計の関係をみるためにする事として、まず Position ごとの Run データと宇宙線データをもとに、ADC の SUM データを作り出す。この SUM データにガウスフィットをかけ、ADC の図からピーク中心である Mean の値と標準偏差 Sigma ( $\sigma$ ) の値を読みとり、Position との関係をグラフ化し線形フィットする。ビーム入射位置と Cerberus の各 PMT による検出光量の関係は、Run ごとの PMT の (pedestal を引きノーマライズした) ADC データにガウスフィットをかけてピーク位置を見つけだし、ビームを中心に当てた時の値から相対的に導き出す。

## 4. 2. 3 Position 依存の解析結果

今回測定した Position を図に示す。

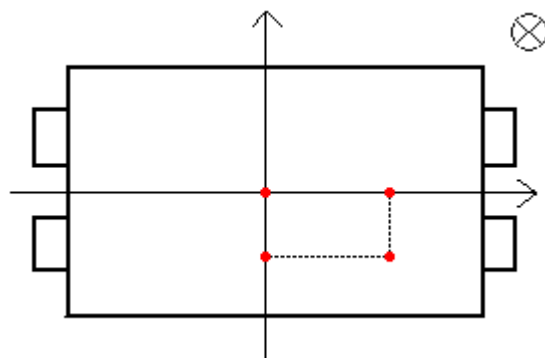


図 12 : 測定した position

図に線形フィットさせると、傾きが0にはならなかった。図からは、垂直方向への移動が光量の増減に関係しているように見てとれる。ほんのわずかではあるが標準偏差にも影響を与えている。しかし、Mean は 10%以内で一致し Sigma は 2.5%以内で一致していることから、それほど大きな値のずれはないと言えるので、Cerberus の中心から鉛直方向 100 mm、垂直方向 150 mmの範囲以内ならビームの検出エネルギーは Position には依存せず、ビームが中心からずれてもある程度妥当な ADC の SUM データを得ることができる。

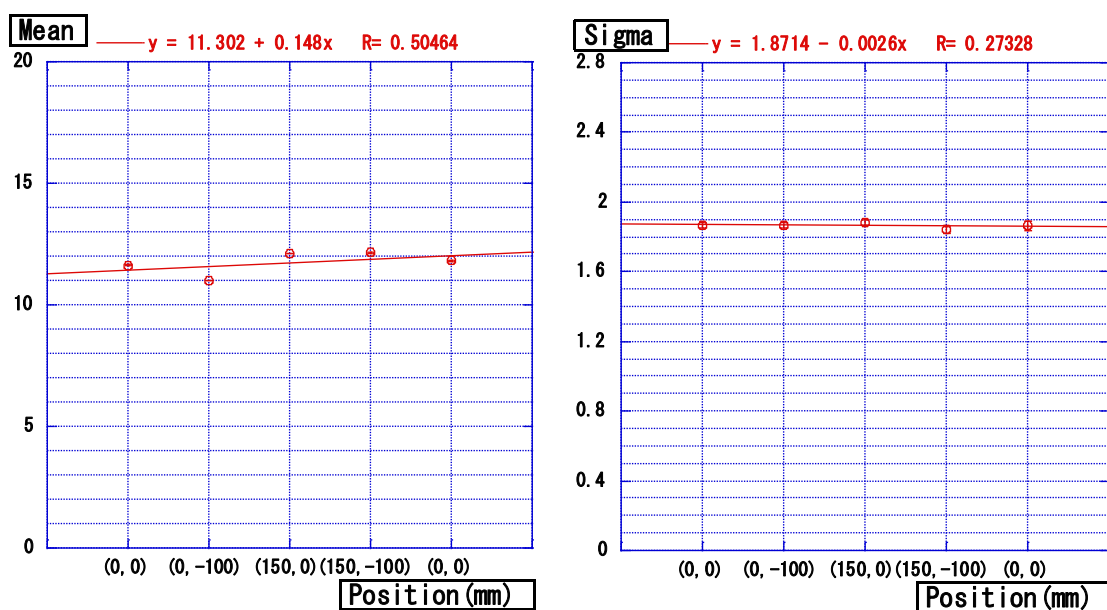
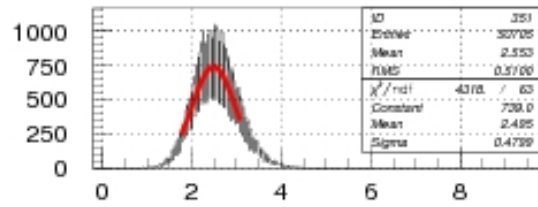
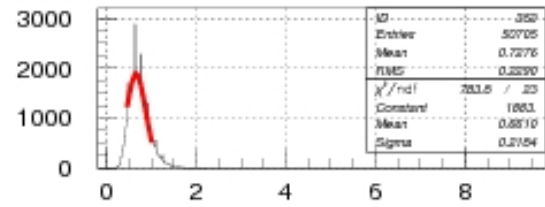


図 13 : 左は Mean と Position の関係 右は Sigma と Position の関係

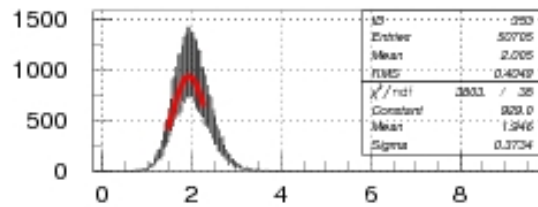
図 14、15、16、17 は Position ごとの各 PMT による検出光量のグラフにガウスフィットをかけたものである。図中の Cerberus1,3,5,7 はビーム上流側の PMT を表し、Cerberus2,4,6,8 はビーム下流側の PMT を表す。



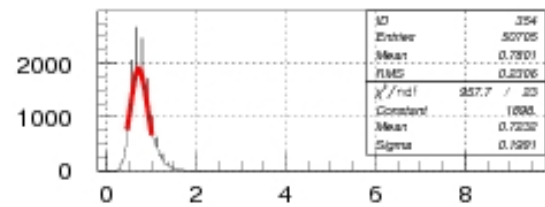
Cerberus 1 (Beam)



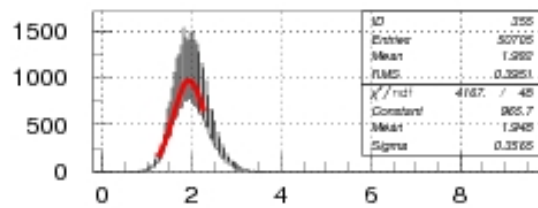
Cerberus 2 (Beam)



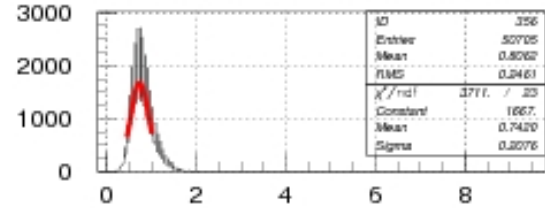
Cerberus 3 (Beam)



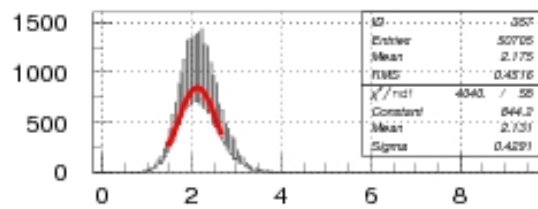
Cerberus 4 (Beam)



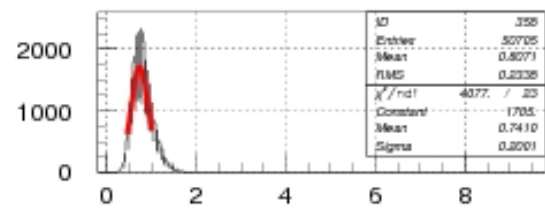
Cerberus 5 (Beam)



Cerberus 6 (Beam)



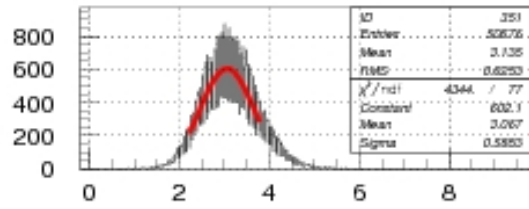
Cerberus 7 (Beam)



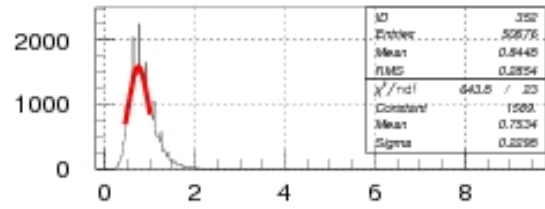
Cerberus 8 (Beam)

図 14 : (0,0) での ADC データ

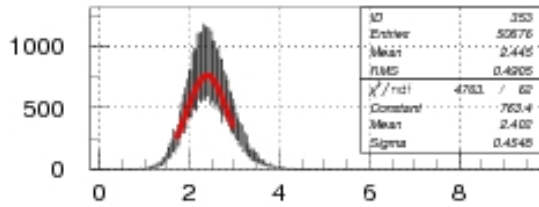




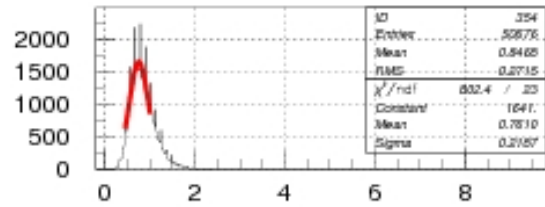
Cerberus 1 (Beam)



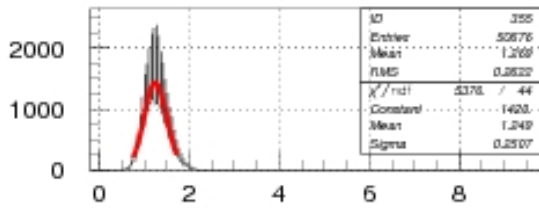
Cerberus 2 (Beam)



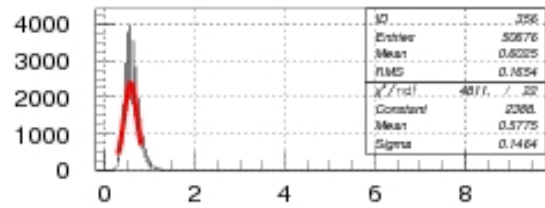
Cerberus 3 (Beam)



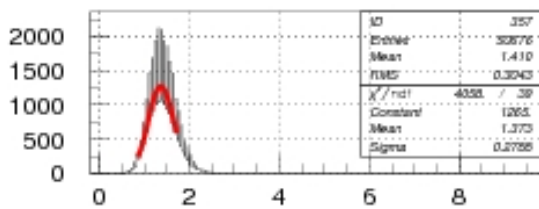
Cerberus 4 (Beam)



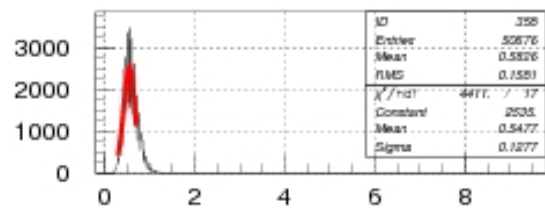
Cerberus 5 (Beam)



Cerberus 6 (Beam)

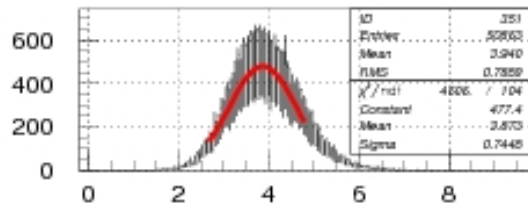


Cerberus 7 (Beam)

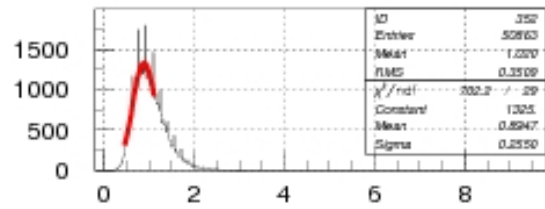


Cerberus 8 (Beam)

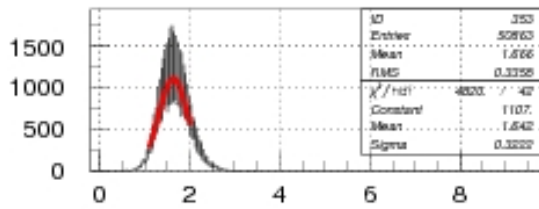
図 15 : (0,-100) での ADC データ



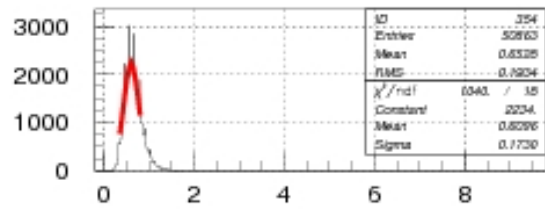
Cerberus 1 (Beam)



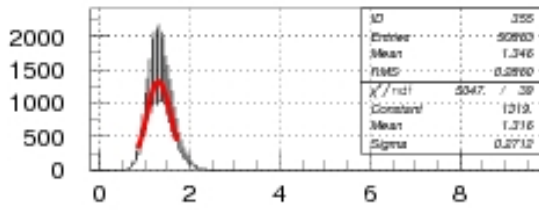
Cerberus 2 (Beam)



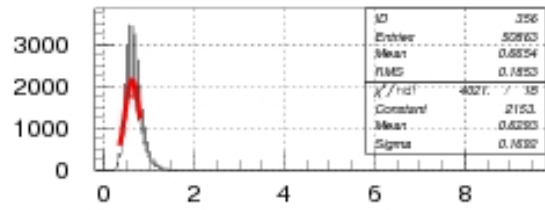
Cerberus 3 (Beam)



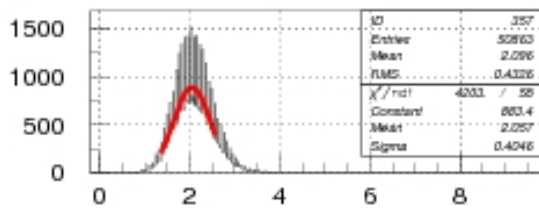
Cerberus 4 (Beam)



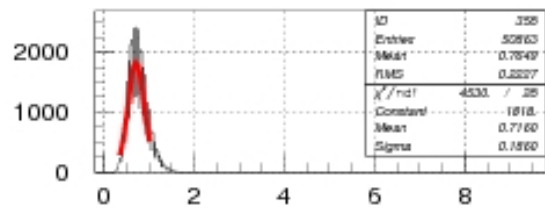
Cerberus 5 (Beam)



Cerberus 6 (Beam)



Cerberus 7 (Beam)



Cerberus 8 (Beam)

図 16 : (150,0) での ADC データ

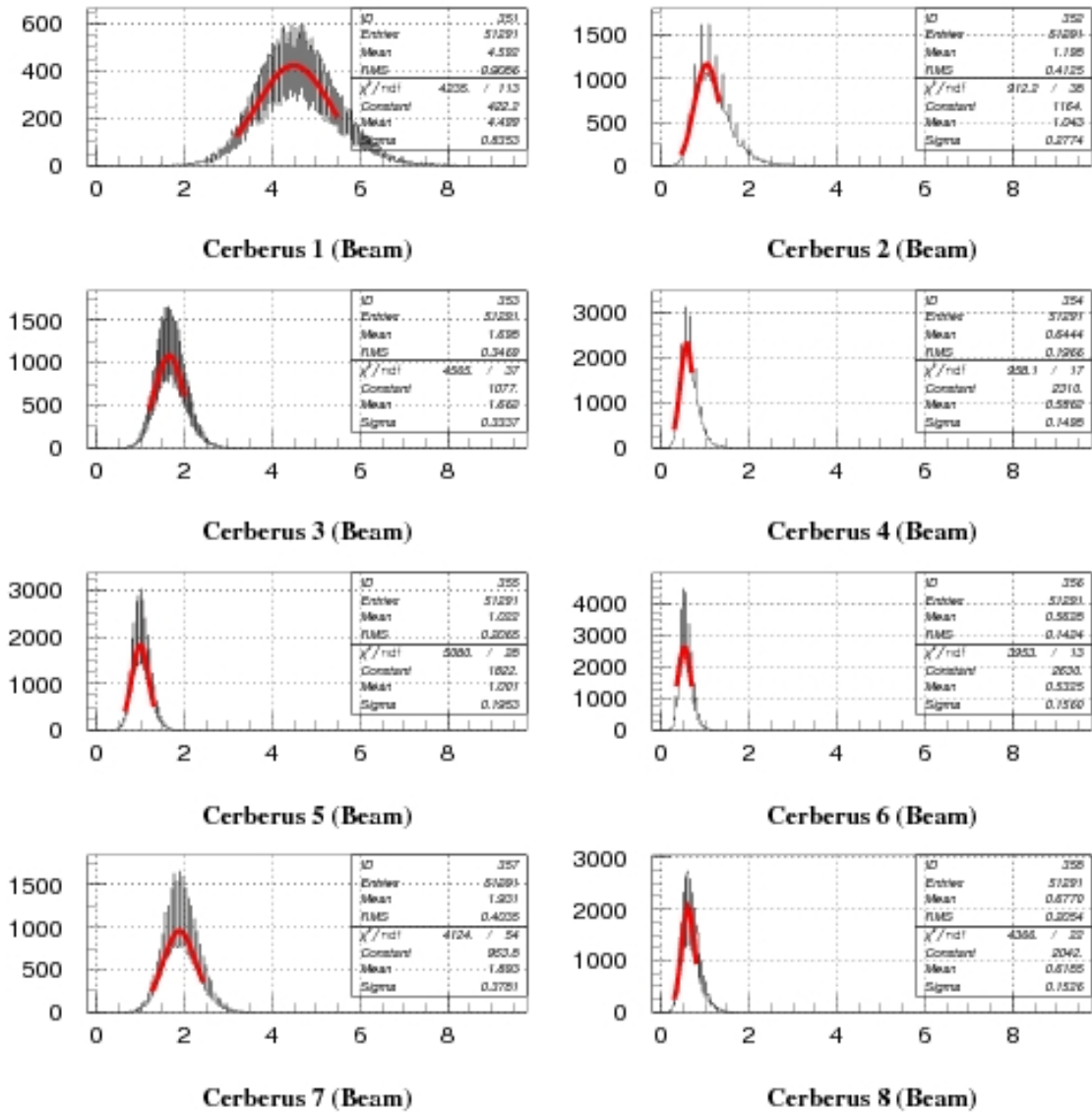


図 17 : (150,-100) での ADC データ

ピークの位置関係を Position ごとの各 PMT による検出光量は、PMT によって信号の増幅率などが若干違ってくるため、中心位置との値の相対で表している。値の比較により、PMT の検出する光量はビーム位置だけに依存しているわけではなく、電磁シャワ

一の起こる位置からの PMT 光電面に対する立体角にも依存しているものと思われるデータを得た。Cerberus の上流面に近い場所で電磁シャワーが起きているので、ほとんどのエネルギーが上流側でエネルギーを失い下流側の PMT では少量のエネルギーしか観測されない。

図 18 に記されている数値は (0,0) での光量を 1 としたときの各 Position の光量を表している。ビームラインからの距離の変化に伴い、PMT での検出光量が増減している。

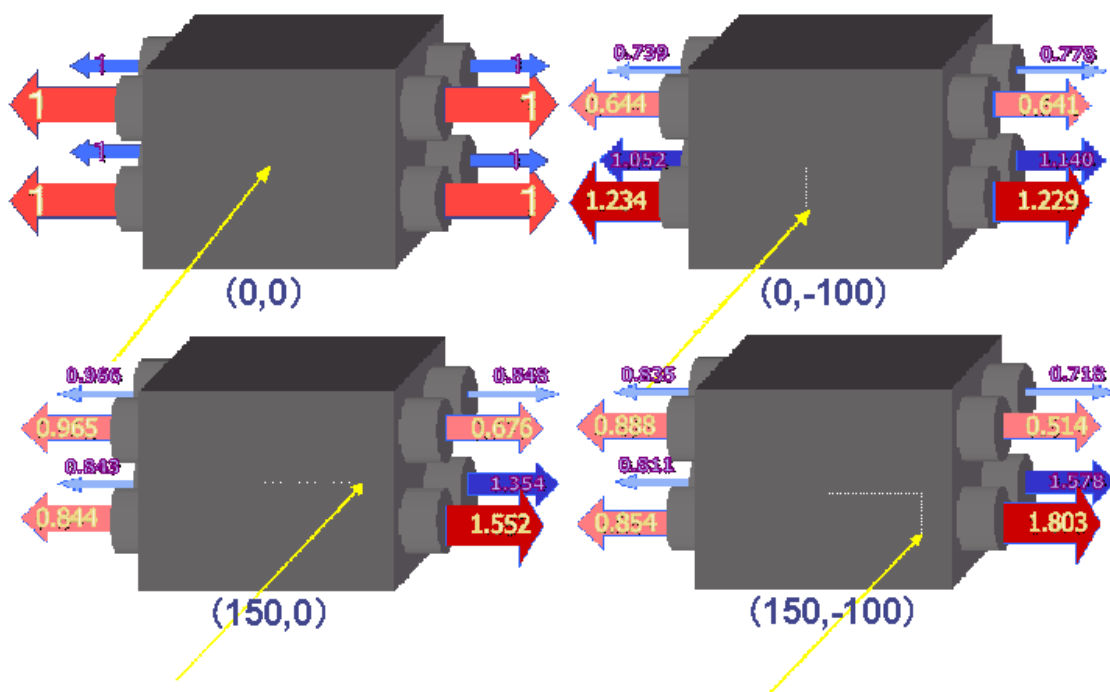


図 18 : (0,0) との各 Position における光量の比

### 4. 3 Rate 依存

Rate を大きくしていくと、PMT 内ではより多くの光電子が増倍される。すると、ダイノード間で仮想抵抗が発生し、抵抗値が小さくなってしまうために PMT からの信号も小さくなる。本実験の Rate の大きさについて計算により求め、今回設定した High Rate では信号に影響があるのかを、解析して求めた時間間隔の分布のピーク位置変化から判断し、Cerberus が J-PARC にて行われる E14 実験の Beam Survey 時に使用できるかを検討する。

### 4. 3. 1 実験方法

加速器内に送り込まれた電子は、ビームとして放出されるまでの間、加速器内で 1.1Gev になるまで加速される。ビームとして取り出すためには、電子の通過するライン上に **wire** を張り、**wire** をビームの進行方向に垂直に動かすことで電子ビームを少しずつ削っていく。そこで生成される  $\gamma$  線を **converter** に当て、陽電子ビームを得る。通常、加速器無内に貯められた電子は 5 sec で全て放出されるのだが、今回の **High Rate** 実験ではこれを 20ms まで速めるためにこの **wire** (**Radiator**) を変更した。

モジュールの配線や装置の配置場所については、**on spill time** を **Scaler** で数えるために **Logic** を少し変更した。また、**Rate** 実験時、**Trigger6** は京都大学が調整をするため外してあり、ビーム位置は中心に戻した。

このときの **TDC** の **Full scale** は  $\sim 200\text{ns}$ 、**Gate** の幅は 100 nsであった。

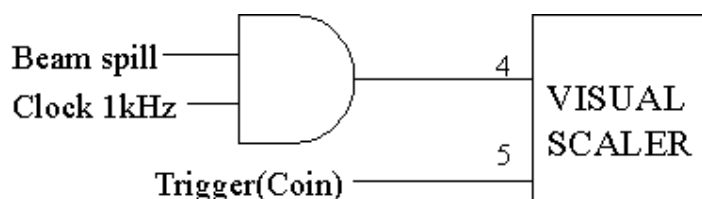


図 19 : 変更した logic

### 4. 3. 2 解析

**TDC** キャリブレーションの結果をプロットし、線形フィットさせた図から、直線の傾きを求める。この傾きからエネルギーを時間に換算することができるので、イベント数と時間の関係をグラフ化する。通常の **Rate** では、信号が来てから次の信号が来るまでの時間間隔が長いので、**Trigger** の **start** 信号から **stop** 信号までの時間にひとつの信号しか入って来ず、**Trigger** の **start** 信号を追い越してしまった信号はすべて **Interrupt Register** 信号の時間の所に組み込まれてしまう。しかし、**High Rate** の場合は **trigger** の **start** 信号から **stop** 信号までの非常に短い時間に複数個の信号が入ってくるので、図のピークのある時間の前に指数分布をとる曲線が現れる。そこで、**High Rate** 時のピーク位置に変化が見られるかを図から検証し、信号への影響があるかを判断する。さらに、指数分布の始まる時間から 20ns までのイベント数を図から求めて、時間間隔の分布関数の式から **Rate** の大きさを計算する。

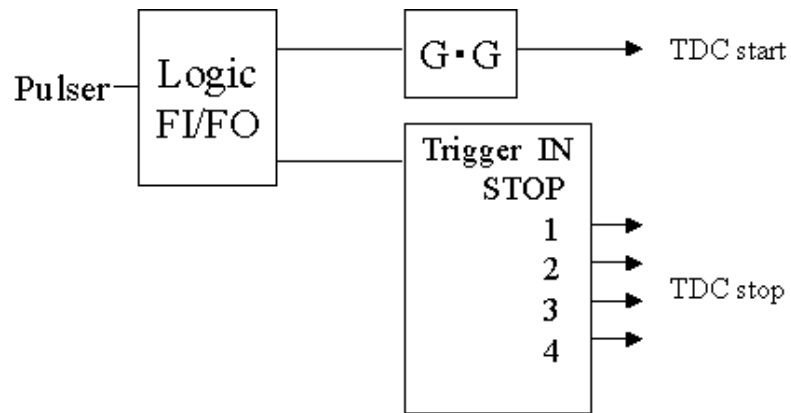


図 20 : TDC キャリブレーション測定時の logic

### 4. 3. 3 Rate 依存の解析結果

TDC キャリブレーションの結果、図の傾きの値から 1 channel は約 50ps であった。  
 図で Cerberus の Rate 実験の結果が示されている。

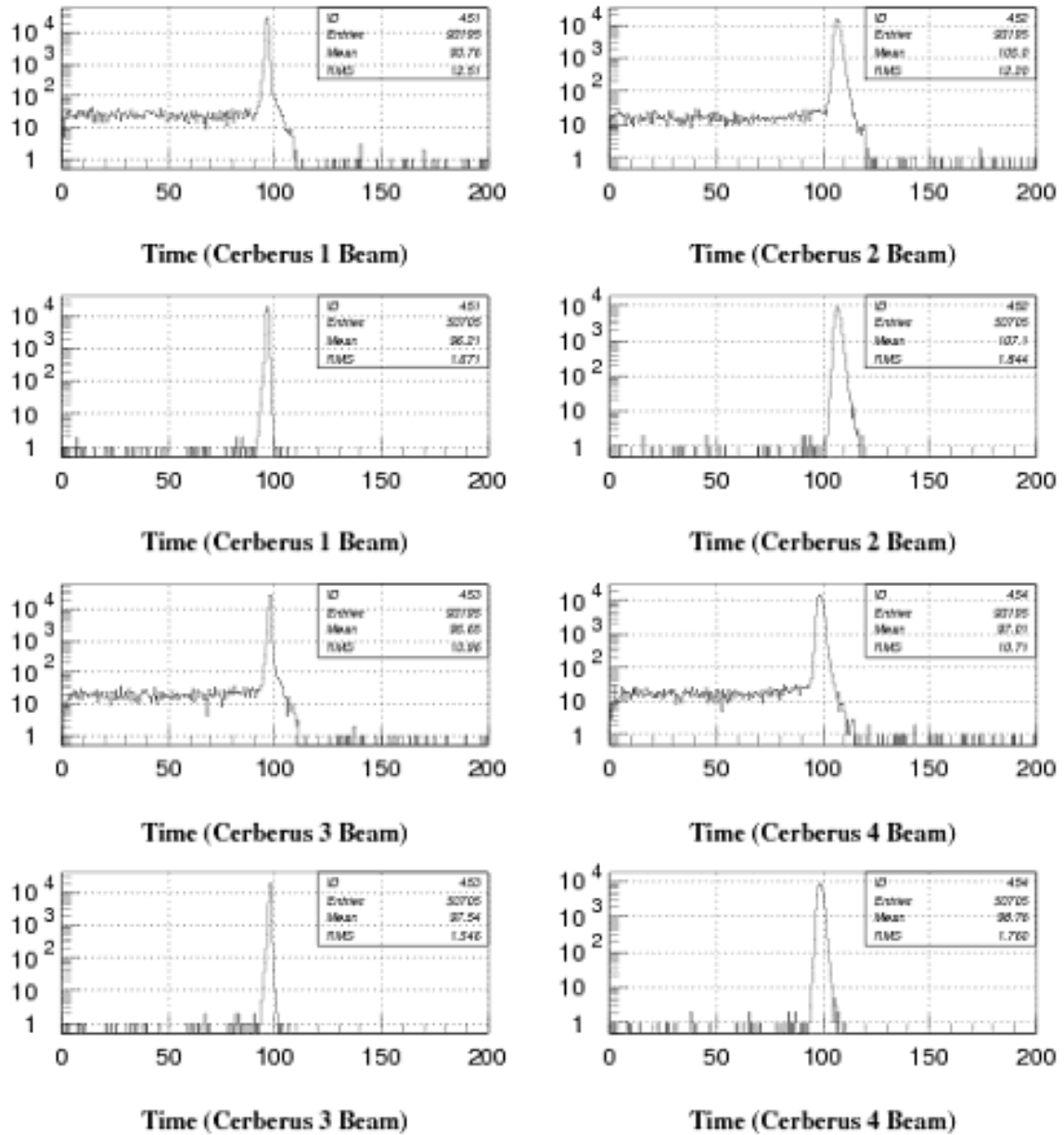


図 21 : ADC1,2,3,4 の Rate 信号比較  
 (1,3 段目 : High Rate 信号、2,4 段目 : 通常の Rate 信号)

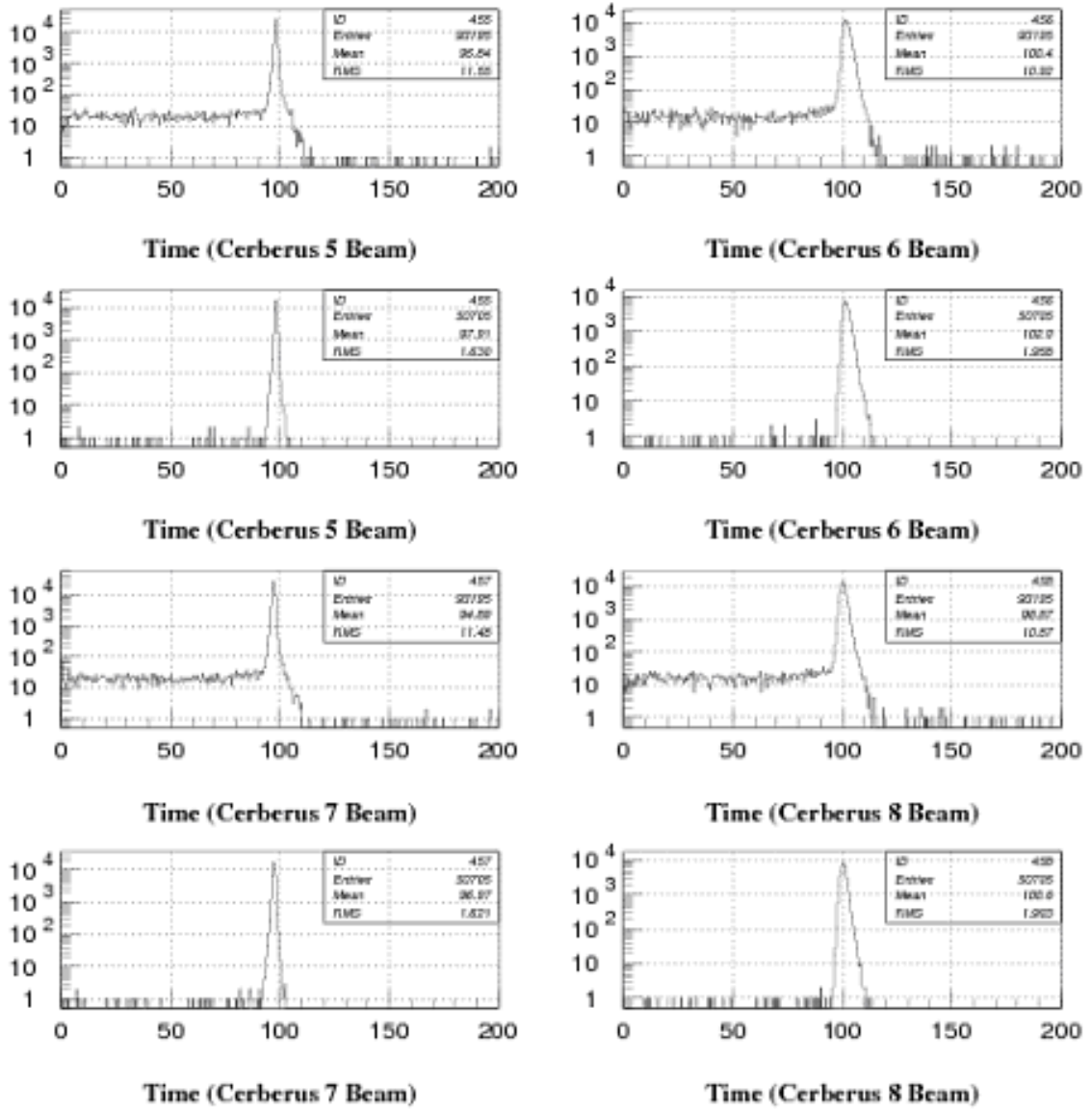


図 22 : ADC5,6,7,8 の Rate 信号比較  
 (1,3 段目 : High Rate 信号、2,4 段目 : 通常の Rate 信号)



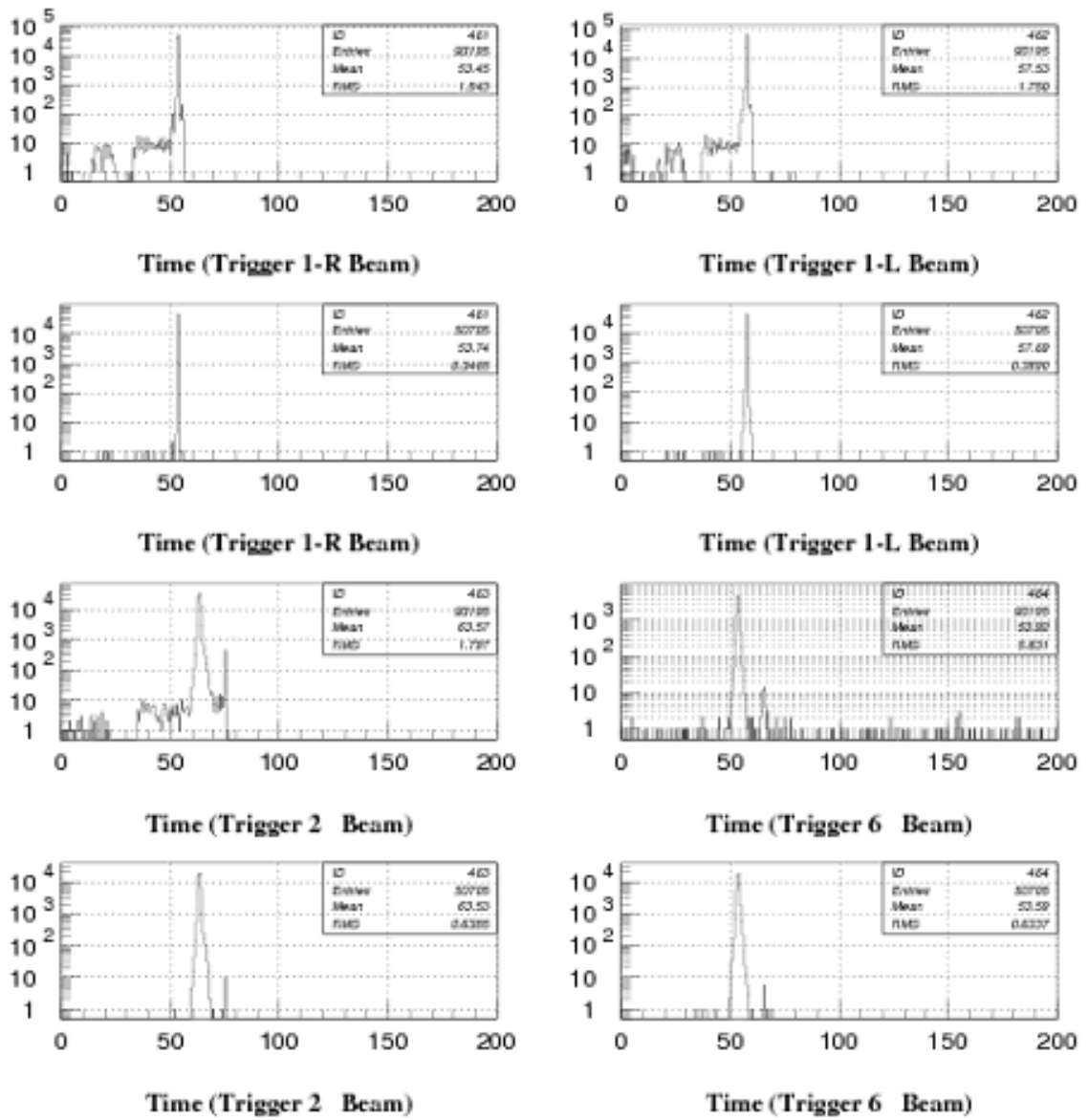


図 23 : ADC9,10,11,12 の Rate 信号比較  
(1,3 段目 : High Rate 信号、2,4 段目 : 通常の Rate 信号)

本実験の event 同士の発生時間間隔は指数分布で表せることから、(1.5)式を応用して以下のような式を用いて計算を行った。

$$(\text{時間が早い event 数})/(\text{total event 数}) = 1 - \exp(-Rt)$$

R : beam rate

t : 時間が早い event の time window

event 比/ time window  $\sim$  beam rate

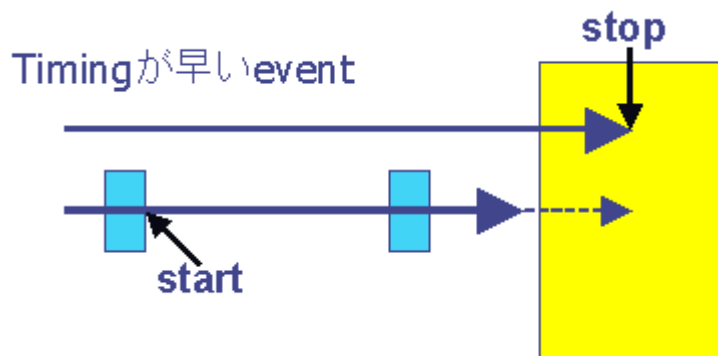


図 24 : High Rate 時のビームの様子

CerberusPMT 8 本の各 Rate の大きさを表 4.5.6.7 に記す。計算で求めた通常の Rate は約  $8.5\text{kHz}$  であるのに対し、High Rate では約  $450\text{kHz}$  であった。しかし、ビーム上流のみの平均値は約  $450\text{kHz}$  であり下流のみの平均値は約  $340\text{kHz}$  であることから、ビーム下流よりも上流の方が Rate の値が大きいことが求められた。これは電磁シャワーにより Cerberus 上流部分でエネルギー損失が起こっているからである。

さらに Trigger カウンターの Rate を示す表を見比べると、Trigger カウンターの示す値よりも CerberusPMT の値が大きいことが分かる。これは、使用しているビーム幅が直径  $5\text{cm}$  であり、Cerberus ではその全領域をカバーできるのに対し、Trigger カウンターは部分的にしかカバーできないことによる。したがって、Trigger カウンターのサイズにより Rate の大きさが異なっている。

High Rate (Run47)

CerberusPMT Number	Rate(KHz)	Entries	Integration	$t_2-t_0$ (ns)
10	530	93195	2916	80-20
11	351.17	93195	1943	80-20
12	416	93195	2289	80-20
13	359.87	93195	1990	80-20
14	431.2	93195	2380	80-20
15	316.15	93195	1751	80-20
16	417	93195	2303	80-20
17	344.71	93195	1908	80-20

表 4 : Cerberus が観測した High Rate の大きさ

Rate (Run32)

CerberusPMT Number	Rate(KHz)	Entries	Integration	$t_2-t_0$ (ns)
10	9.86	50705	35	90-20
11	7.64	50705	31	100-20
12	8.74	50705	31	90-20
13	7.61	50705	27	90-20
14	8.45	50705	30	90-20
15	6.76	50705	24	90-20
16	7.89	50705	28	90-20
17	7.61	50705	27	90-20

表 5 : Cerberus が観測した通常の Rate の大きさ

High Rate (Run47)

Trigger Number	Rate(KHz)	Entries	Integration	$t_2-t_0$ (ns)
1-R	192.71	93195	269	50-35
1-L	192.71	93195	269	52-37
2	93.98	93195	175	55-35
6	7.3	93195	17	45-20

表 6 : Trigger カウンターが観測した High Rate の大きさ

Rate (Run32)

Trigger Number	Rate(KHz)	Entries	Integration	$t_2-t_0$ (ns)
1-R	6.58	50705	10	50-20
1-L	6.58	50705	10	55-25
2	3.94	50705	1	57-52
6	5.92	50705	3	44-34

表 7 : Trigger カウンターが観測した通常の Rate の大きさ

図 25 から分かる通り、Mean の値を見比べてみても大きな違いは無く、今回設定した Rate の大きさ (450 kHz) では、信号にほとんど影響を与えなかった。

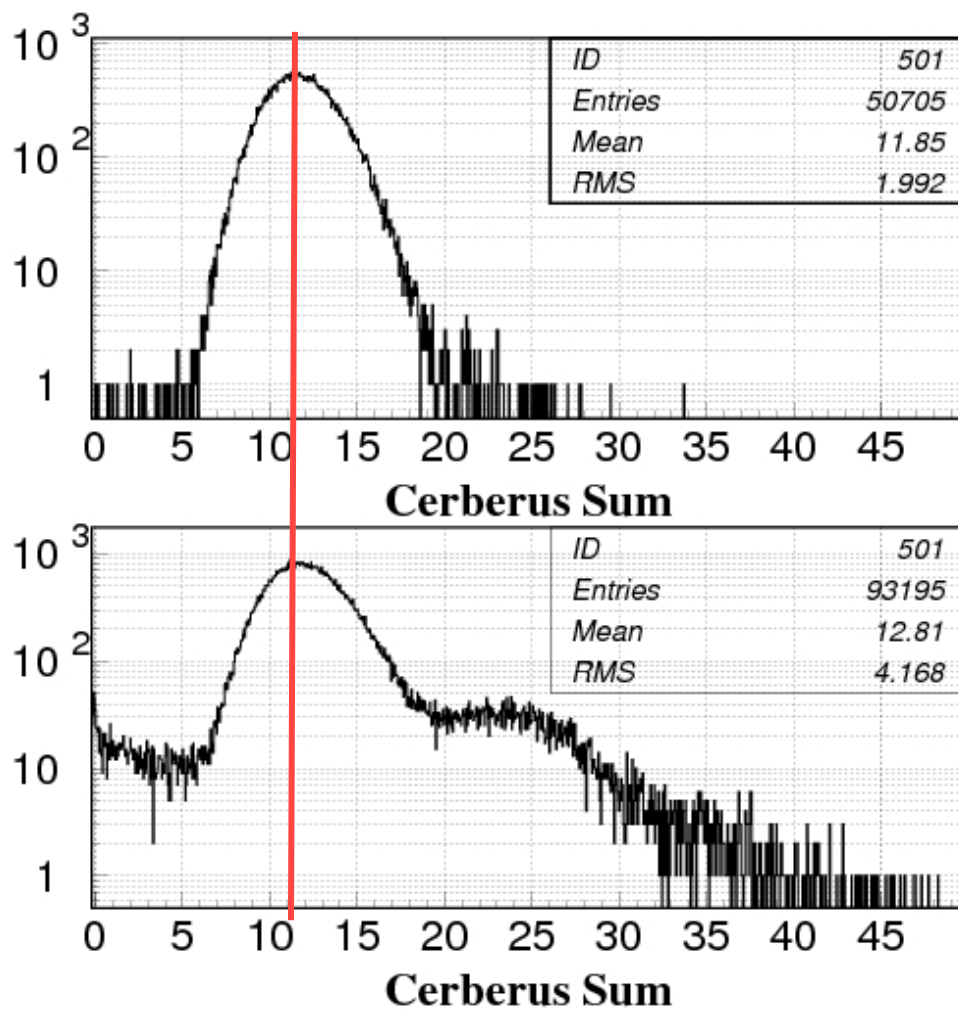


図 25 : Rate 実験におけるピーク位置の比較  
 上図 : 通常の Rate 信号 下図 : High Rate 信号

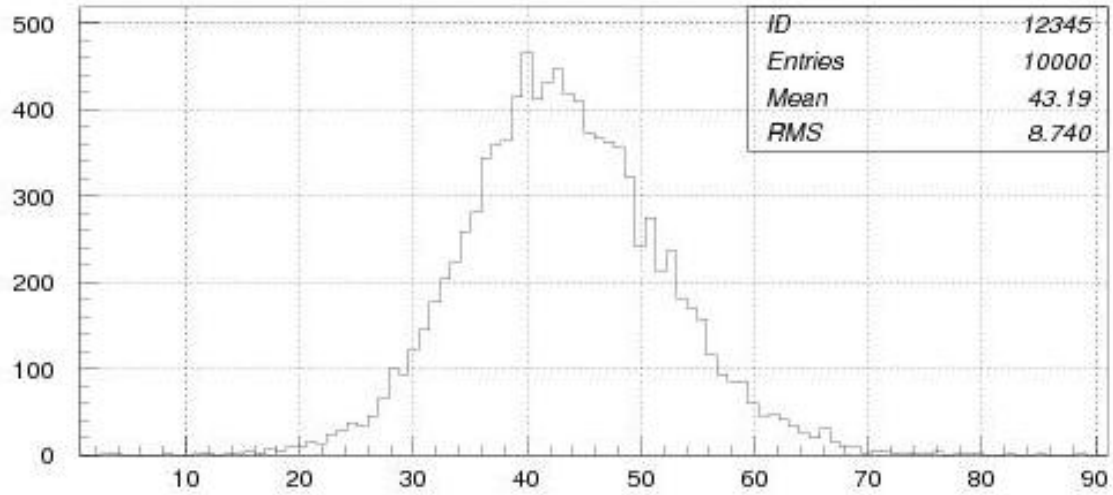
## 第5章 実験を受けてのシミュレーション

Cerberus の中心にビームを当てた時のデータ (図 14) を見ると、Cerberus #10 の ADC データのピークが大きくずれているので、原因を解明すべくシミュレーションを行った。その結果を図 26 に示す。

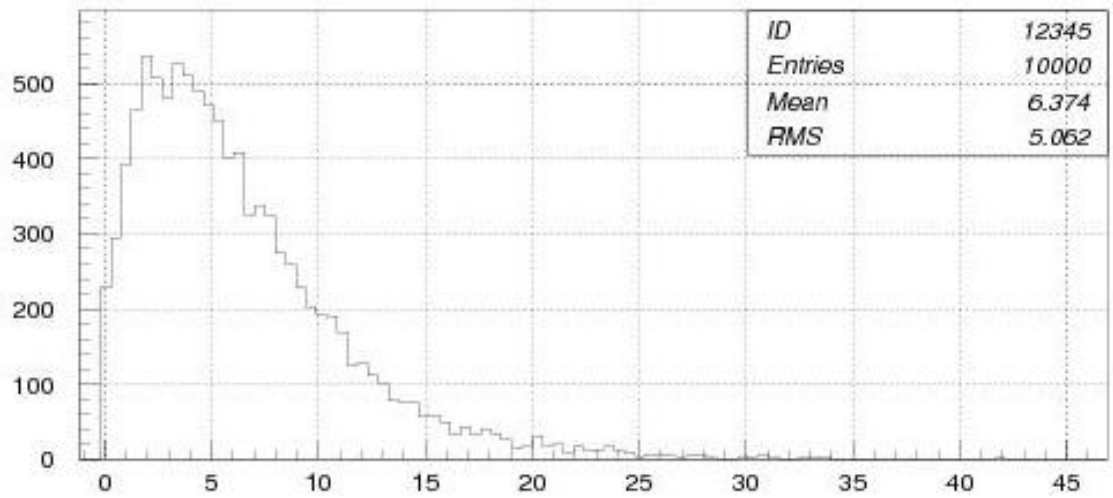
図 26 では Cerberus 前方では約 40MeV のところに、Cerberus 後方では 2~4MeV のところにピークが出ている。Cerberus 内ではビームが入射してすぐに電磁シャワーが起るため、エネルギーも Cerberus の前方で多く deposit して、後方ではあまりエネルギーを感知せずピーク位置に大きな違いが出ることがシミュレーション結果からも分かる。

この原因としては光漏れや光の強度の変化などが考えられる。シミュレーションではプラスチックシンチレータを前 12 層と後ろ 13 層に分け、前 12 層で感知した光は上流側の PMT で検出し後ろ 13 層で感知した光は下流側の PMT で検出するようにプログラミングしているが、Cerberus 内には仕切りがないために前方 PMT で検出されるはずの光を後方 PMT が検出している可能性がある。また、一カ所でも遮光されてない場所があると、そこから光が漏れていた場合すべての PMT に影響を及ぼす。今回は宇宙線により Cerberus の PMT をすべてチェックしており、実験時は Cerberus 全体を暗幕で覆っていたが、それでも光漏れしていた可能性は捨てきれない。

データに問題のある ADC は 8 個中の 1 個であり、そのデータのずれも他の ADC データから 2 割程度であった。つまり、ADC による影響は  $1/8 \times 2/10$  で 2.5% 程度であると思われる。



**H(1)**



**H(2)**

図 26 : シミュレーション結果

# 第6章 まとめ

## 6. 1 実験のまとめ

Cerberus による3つの事柄に対する依存性について検証した。

### ・ Energy 依存

ピーク Mean の値とエネルギーは比例関係であった。

エネルギー分解能  $\sigma/E$  の値とエネルギーは  $\sigma/E = 0.129/\sqrt{E(\text{GeV})}$  にフィットするような関係が見られ、エネルギー分解能は 1 GeV で約 13% であった。

### ・ Position 依存

ビームの入射位置と CerberusPMT 8 本の検出エネルギー合計の関係をみると、Mean は 10% 以内で一致し Sigma は 2.5% 以内で一致していることから、Cerberus の中心から鉛直方向 100 mm、垂直方向 150 mm の範囲以内でビームがずれても、ある程度妥当な ADC の SUM データを得ることができる。

### ・ Rate 依存

通常 Rate 信号と High Rate 信号の Mean の値を見比べてみても大きな違いは無く、今回設定した Rate の大きさは、信号にほとんど影響を与えないことがわかった。計算のより求めた値は、通常 Rate は約 8.5 kHz、High Rate は約 450 kHz であった。電磁シャワーにより Cerberus 上流部分で多くエネルギー deposit が起こっているため、ビーム下流よりも上流の PMT の方が検出する Rate の値は大きい。

## 6. 2 今後の課題

CerberusPMT#10 (ADC 1) のデータの状態が悪いことがわかったので、キャリブレーションをもう一度やり直す必要がある。

High Rate の実験では 450 kHz まで Rate を上げた。しかし、J-PARC にて行われる E14 実験の Beam Survey 時には 700 kHz 程度の Rate に設定されるため、Cerberus が Beam Survey で使用できるかを判断するにもっと高い Rate での実験が必要である。



## 謝辞

本実験を行うにあたり、多くの方に手を差し伸べて頂きました。この場を借りて感謝の言葉を述べさせていただきます。

田島靖久先生には実験に関わる様々なことを指導して頂きました。JUM で実験成果を発表出来たこと、J-PARC でのプロジェクトに少しでも関わる事が出来たことは、自分にとっての大きな財産となりました。

加藤静吾先生、岩田高広先生、吉田浩司先生には授業やゼミを通して物理学や英語を教えて頂き、多くの知識を得ることが出来ました。

同研究室の M2 の先輩方にも日頃から大変お世話になり、植松秀章さんにはコンピュータや物理学の質問にいつも付き合って頂き、上林智亮さんには実験をするにあたり、Cerberus のことを詳しく教えて頂きました。

同学年の岡島学君、久保田尚矢君、酒井琢君、高橋和典君、武蔵晃君、渡辺亮君には悩みや相談に乗って頂き、また研究室内の行事を盛り上げて頂きました。

この1年間、多くの貴重な体験をさせて頂き、充実した日々を過ごすことが出来ました。また、関わったすべての方々からたくさんのことを学ばせて頂き、支えて頂きました。皆さまのおかげで、この4年間で自分自身大きく成長できたと思います。

本当にありがとうございました。

## 関連図書

- (1) 飯嶋晶子 修士論文 『 $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$  結晶の電子線に対する応答特性』 山形大学 (2002)
- (2) 有賀雄一 修士論文 『E391a バレル部カウンターの応答特性の研究』 山形大学(2002)
- (3) 野村卓美 修士論文 『J-PARC における高性能中性 K 中間子ビームラインの設計』 山形大学(2007)
- (4) 木村逸郎、酒井英次 『放射線計測ハンドブック』 日刊工業新聞社
- (5) The European Physical Journal C Vol.3 1998
- (6) 上林智亮 修士論文 『J-PARC  $\text{K}_L$ ビームラインモニタ用 n/y 検出器 Cerberus の改良』 山形大学 (2009)