大型BSO結晶の応答特性の研究

山形大学理工学研究科 修士課程 2 年
針生 智夫

平成 15 年 2 月 17 日

目 次

第 1 章　序論 **4**
1.1　研究の背景 4
1.2　研究の目的 4

第 2 章　BSO クリスタルの基本的特性 **5**
2.1　無機シンチレータ 5
2.2　BSO クリスタルの特徴 5
2.2.1　他のシンチレータとの比較 6

第 3 章　Beam test **7**
3.1　実験の目的 7
3.2　実験場所 7
3.3　Setup 9
3.3.1　大型 BSO クリスタル 10
3.3.2　Light Guide 11
3.3.3　MWPC 12
3.3.4　チェレンコフカウンター 13
3.3.5　トリガーカウンター 13
3.3.6　Trigger 条件 14
3.3.7　TOF 16
3.3.8　チェレンコフカウンターによる粒子識別 17

第 4 章　データ解析 **18**
4.1　Beam tracking 18
4.1.1　座標軸の定義 18
4.1.2　MWPC 18
4.1.3　Beam tracking の手順 21
4.2　MWPC の位置の補正 23
4.3　クリスタルの位置の補正 25
4.4　Energy calibration 30
4.4.1　ADC cut 30
4.4.2　GEANT4 による simulation 31

4.4.3 factor の算出 34
4.5 各 momentum 毎の Energy sum 37
4.6 3 × 3 クリスタルマトリックスの各応答 40
4.7 Double gauss fit による結果 45
4.8 Linearity 46
4.9 Energy resolution 47
4.9.1 Energy resolution を決める要素 47
4.9.2 Energy resolution 47
4.10 まとめと考察 48

第 5 章 今後の課題 **50**

第1章　序論

1.1　研究の背景

現代の高エネルギー領域に於ける実験では様々なシンチレータが使用されている。

特に、数百 MeV 程度の γ 線を測定するための大型の電磁カロリメータ用のシンチレータとしては、価格の面を考慮すると pure CsI クリスタルが用いられる場合が多い。

しかしながら、この pure CsI クリスタルには、潮解性がみられ、また、発光波長も紫外領域に入っており、崩壊定数も大きく応答が遅いという欠点がある。

また、pure CsI の他に、$Bi_4Ge_3O_{12}$(BGO) が使用される場合もある。

BGO は高密度で潮解性もなく、古くからその優れた特性が指摘されていたが、崩壊定数が大きい事と、高価である事が難点であった。

本論文中で発表する $Bi_4Si_3O_{12}$(BSO) クリスタルは、本来はこの $Bi_4Ge_3O_{12}$(BGO) クリスタルの代用となる候補の一つとして研究が始められた物であり、BGO の Ge を Si で置換したものである。したがって、密度や輻射長、発光波長は BGO とほぼ同じである。

この BSO クリスタルは、発光量に関しては pure CsI の約 1/2 で、BGO に対しては約 1/4 程度ではあるが、潮解性は全く見られず、崩壊定数に関しても、BGO を凌ぐ性能を持っている。

したがって、BSO クリスタルは pure CsI や BGO の持つ欠点を克服する優れた特性をもったクリスタルと考えられるが、これまで BSO クリスタルの大型化は技術的に困難であったため、大型 BSO クリスタルの電磁カロリメータとしての性能はまったく知られていないのが現状である。

しかし、最近になって、企業との連携により、大型の BSO クリスタル (22mm × 22mm × 180mm) を安定して大量に生産する方法が確立され、ようやく数百 MeV の電子/光子に対する応答が調べられようとしている。

そこで、今回この大型 BSO クリスタルの電磁カロリメータとしての性能を実験的に調べるという目的をたて、研究を行うことにした。

1.2　研究の目的

今回作成された大型の BSO クリスタル 9 本 (1 本当たりの大きさは 22mm × 22mm × 180mm) に electron/hadron beam を当てて、大型 BSO クリスタルの性能 (Linearity、Energy resolution 等) を調べるのが研究の目的である。

第2章　BSOクリスタルの基本的特性

2.1　無機シンチレータ

シンチレータとは、電離性放射線が通過したときに、光が発生する特別な物質の事で、古くからこの光をとらえることで放射線計測が行なわれてきた。

理想的なシンチレータとして、次のような特徴が挙げられる。

1. 荷電粒子の運動エネルギーを高いシンチレーション効率で検出可能な光に変換すること。
2. この変換が直接的に行なわれ、広範囲にわたって光の収量が荷電粒子の運動エネルギーに比例する事。
3. より多くの光を収集するため、発生する光の波長に対して透明であること。
4. 誘起したシンチレーション光の崩壊時間が短く、高速のパルスを発すること。
5. 実際の検出器として使用するのに十分な大きさのクリスタルが精製出来ること。
6. シンチレーション光の波長が光電子増倍管に対して良好な感度領域に入っていること。

などである。[1]

ほとんどの無機シンチレータは活性化物質として少量の不純物を含む結晶であるが、BSOやBGOは活性物質を含まない、純粋なシンチレータである。

2.2　BSOクリスタルの特徴

BSOクリスタルは、正確には$Bi_4Si_3O_{12}$と表示され、$Bi_4Ge_3O_{12}$のGeをSiで置換したものである。そのため、基本的な性質はBGOと非常に良く似ているが、相異点もあることに注目したい。

BSOクリスタルの主な特徴として、以下の点が挙げられる。

1. シンチレータとしての性質はBGOと良く似ているが、崩壊定数はBGOより小さく、価格もBGOより安い。

2. シンチレーション光の収量は PWO の約 7 倍あり、荷電粒子の入射のエネルギーが高い場合は十分な発光量が得られる。

3. CsI や NaI がもつ潮解性は BSO には見られない。

以下に、主要な無機シンチレータの特徴を示す。[8]

2.2.1 他のシンチレータとの比較

	BSO	BGO	pure CsI	PWO	NaI(Tl)
密度 (g/cm^3)	6.80	7.13	4.53	8.28	3.67
輻射長 (cm)	1.15	1.12	1.86	0.92	2.59
発光波長 (nm)	480	480	300	430	415
励起波長 (nm)	285	295		325	
光量 (相対値)	2	10	3.7	0.26	100
光の減衰時間 (ns)	100	300	∼10,36	10	230
屈折率	2.06	2.15	1.8	2.2	1.85
潮解性	無し	無し	少し有り	無し	有り

表 2.1: BSO とその他主要な無機シンチレータの特徴。

第3章　Beam test

以上のような経緯から、今回我々はBeamを用いて大型BSOクリスタルの電磁カロリメータとしての性能を調べる実験を行った。

なお、大型BSOクリスタルを9本用いたBeam testとしては、今回が世界初の実験となる。

3.1　実験の目的

22mm × 22mm × 180mm($15.6X_0$)のBSOクリスタルを3 × 3のmatrixに組み、0.5 ~ 3.0GeV/cのelectron beam/hadron beamを照射し、BSOクリスタルのlinearity、energy resolution等を調べる。

3.2　実験場所

今回の実験は高エネルギー加速器研究機構12GeV陽子シンクロトロン
$\pi 2$ beam lineで行なった。

$\pi 2$ beam lineの特徴を列挙すると、以下の様になる。

1. 内部標的から10°方向に二次beamを取り出すbeam lineである。
2. Momentum biteは± 1.0 % (公称値)ある。
3. 最高4GeV/cのBeamを供給可能。

構成要素は、4極電磁石(Q)と双極電磁石(D)を用いて、内部標的から順番に、Q1-Q2-D1-D2-D3-Q4-D4となっている。(下図参照。)

なお、主リング加速管内に設置されている内部標的は、現在Be製とW製の2本が使用可能である。(共に、直径1mm、長さ20mm)

beam lineの図は以下の通りである。

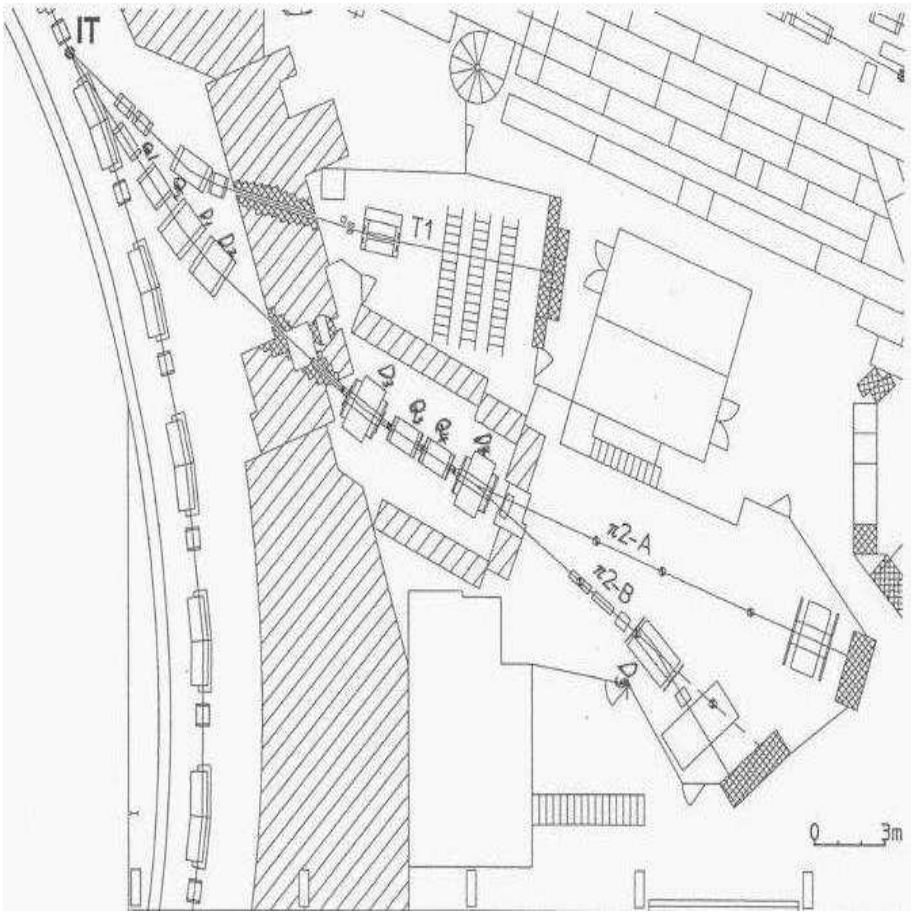

図 3.1: $\pi 2$ beam line

図中には、$\pi 2$-A と $\pi 2$-B の 2 つの beam line が描かれているが、今回使用したのは、$\pi 2$-A の方の beam line である。

3.3 Setup

今回の実験は、以下のような setup で行った。

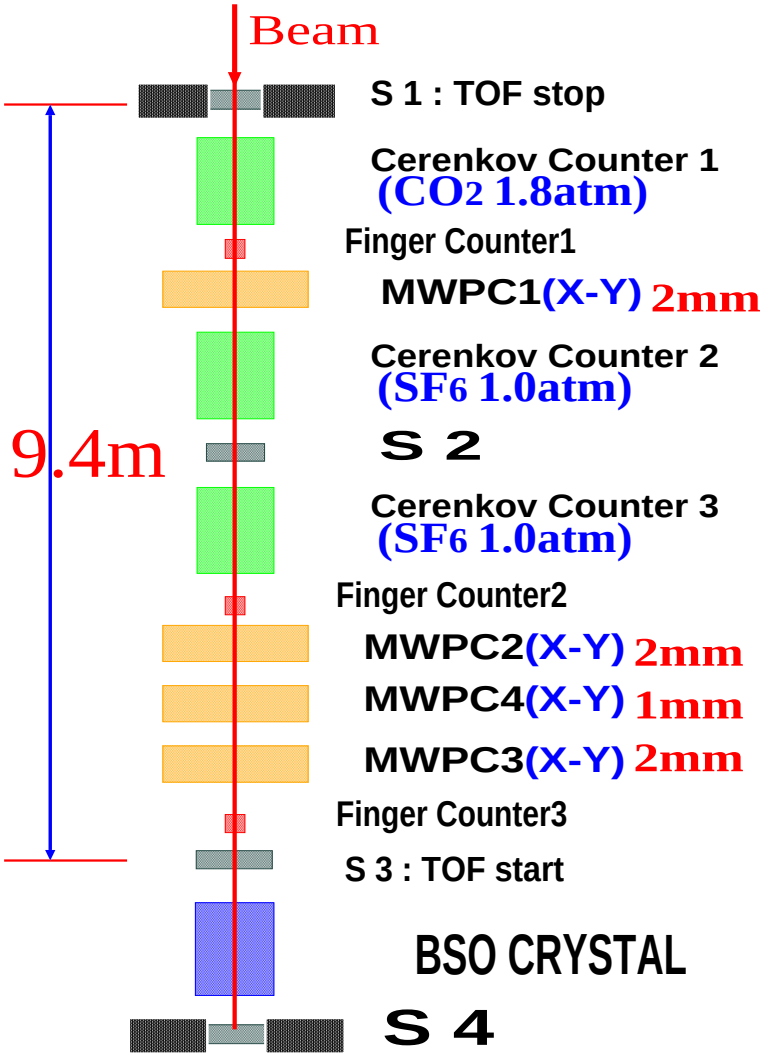

図 3.2: 実験時の setup 図。MWCP1,2,3 は Wire 間隔 2mm、MWPC4 は Wire 間隔 1mm となっている。

3.3.1 大型 BSO クリスタル

今回実験で用いた大型 BSO クリスタルは以下に示すように 3 × 3 の matrix に組み上げられている。各クリスタルにはテフロンテープが巻かれており、接着材 (OKEN 6262A) でライトガイドを介して光電子増倍管 (以下 PMT と略す) と接着されている。(PMT は R4125(G) を使用。)

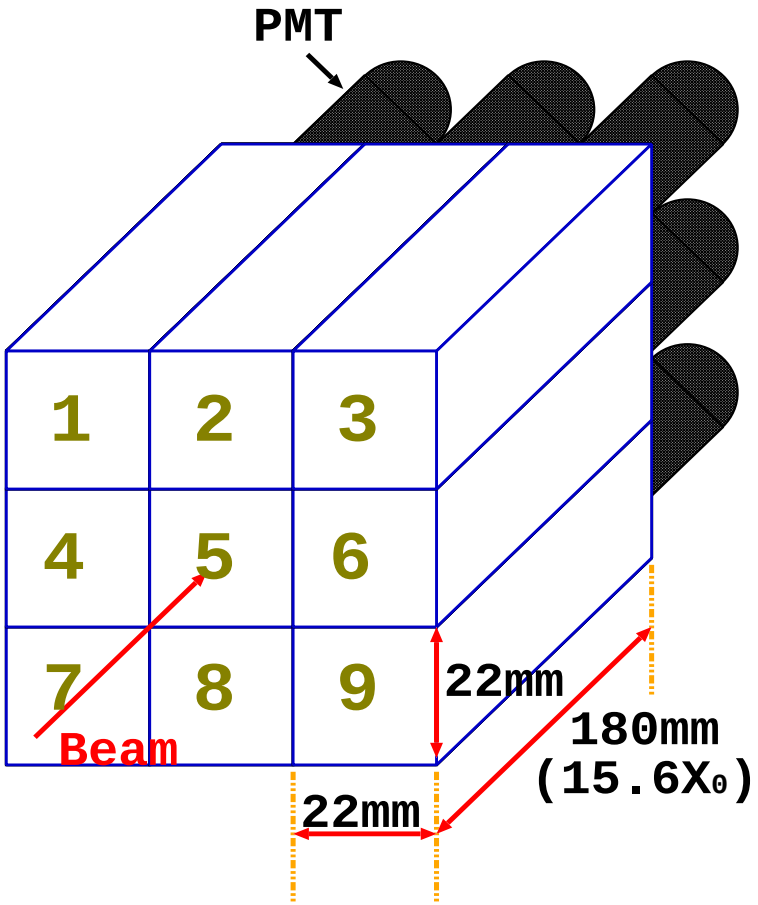

図 3.3: 大型 BSO クリスタルを組み上げたときの様子。各クリスタルには便宜上クリスタル番号がついている

3.3.2 Light Guide

今回の実験では、クリスタルの後面に Light Guide を接着し、PMT へと光が導かれる構造になっている。Light Guide の形状は、クリスタル後面が正方形で PMT の光電面が円形となっていることから、以下のような形をしている。

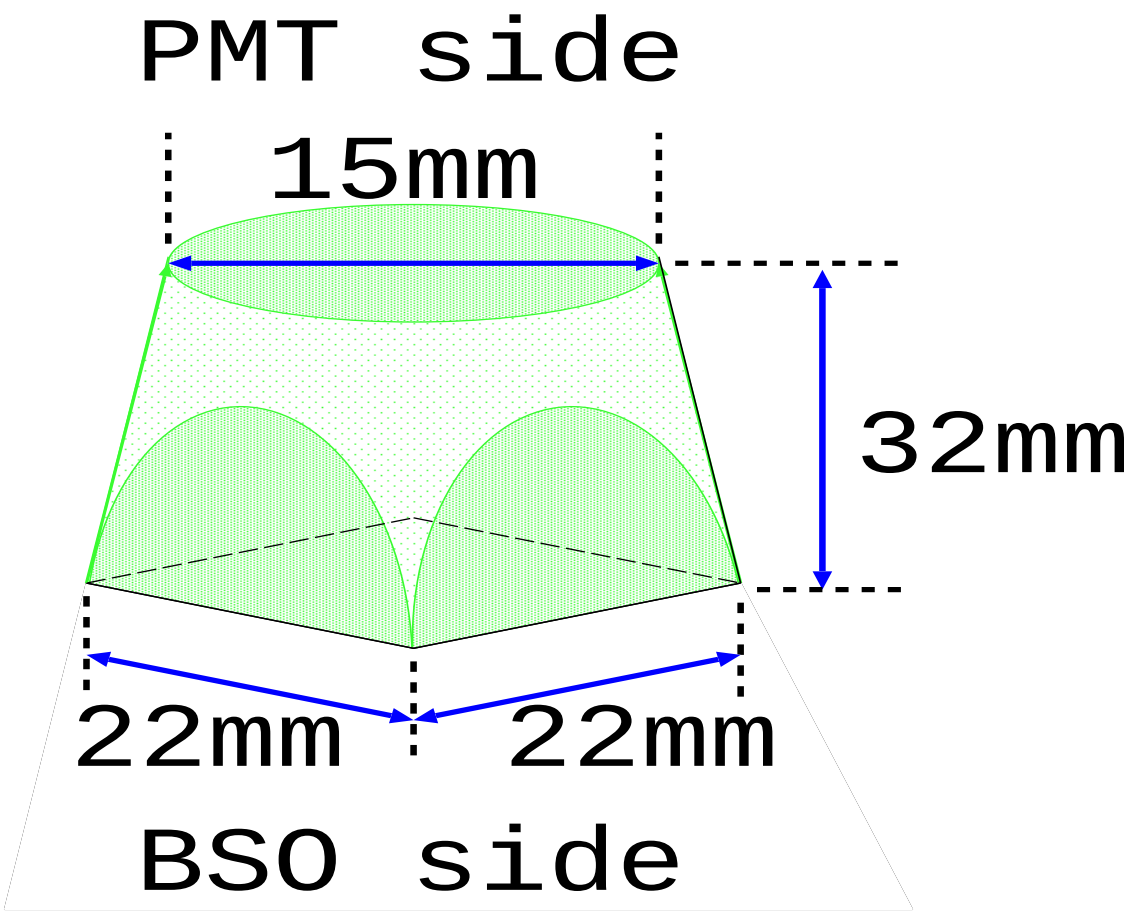

図 3.4: ライトガイドの形状。アクリルで出来ている。

3.3.3 MWPC

MWPC は Multi Wire Propotional Chamber の略で、ビームの通過位置を測定する目的で置かれており、今回の実験では Wire 間隔の異なる MWPC が用いられている。(詳しくは後述する。) また、内部には X 軸方向、Y 軸方向の Wire が張られていて、それぞれの Wire には高電圧が印加されている。(X 軸、Y 軸の取り方は以下の図を参照。)

MWPC には Ar と CO_2 が 65：35 の混合比でガスが入っており、Beam が内部を通過すると粒子近傍のガスを電離し、電離されて発生した electron は高電圧をかけられた近くの Wire へと引き付けられ、信号を発する仕組みになっている。

MWPC の内部の構造は、模式図で示すと以下のようになる。

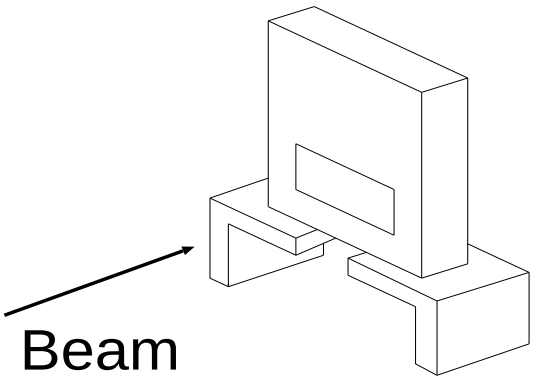

図 3.5: MWPC の外観図。

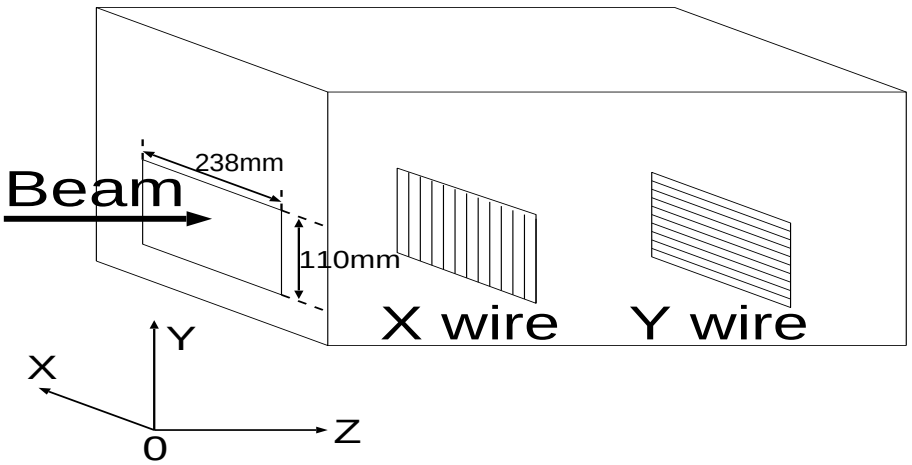

図 3.6: MWPC の内部の概念図。

3.3.4　チェレンコフカウンター

今回の実験で使用しているチェレンコフカウンターは全部で 3 台使用されている。(それぞれ、beam line 上流から C1、C2、C3 と名前を付けた。) 3 台ともすべてガスチェレンコフカウンターで、electron と hadron を識別するトリガーカウンターとして使用した。

カウンターに入っている気体の種類と気圧は以下の通りである。

counter	気体の種類	気圧 (atm)
チェレンコフカウンター 1	CO_2	1.8
チェレンコフカウンター 2	SF_6	1.0
チェレンコフカウンター 3	SF_6	1.0

表 3.1: チェレンコフカウンターに入っている気体の種類と気圧

3.3.5　トリガーカウンター

今回使用しているトリガーカウンターは全部で 7 台ある。カウンターにはそれぞれ S1,S2,... のように名前がついている。(setup 図参照) これらのうち、トリガーに参加するのは S1、S2、S3 の 3 台である。S4 は Beam の突き抜けを測定する目的で置かれている。また、F1 ~ F3 は finger counter で、小さめのシンチレータがついており、実験時に Beam 認識用のカウンターとして使用した。

シンチレータのサイズは以下の通りとなっている。

counter	サイズ (縦× 横× 厚さ)cm^3	PMT の型番
S1	5 × 5 × 1	H1161
S2	5 × 5 × 0.5	H1161
S3	10 × 10 × 0.8	H1161
S4	5 × 10 × 3	H2431
F1	3 × 1.8 × 0.5	H3167
F2	3 × 1.8 × 0.5	H3167
F3	3 × 1.8 × 0.6	H3165

表 3.2: 各 counter のシンチレータのサイズ

なお、S1 と S4 はシンチレータの両側に PMT が付いた両読み出しのカウンターとなっている。

3.3.6 Trigger 条件

トリガーは主に electron mode と hadron mode の 2 つの mode がある。それぞれ、
electron mode: (S1 * S2 * S3) * (C1 * C2 * C3)
hadron mode : S1 * S2 * S3
となっていて、いずれの場合も S3 の信号の立ち上りがトリガータイミングを決めるようにした。

S3 でトリガータイミングを決めた理由は、仮に S1 でトリガータイミング取るようにすると、S1 以降のカウンターの信号を全ておくらせる必要があり、delay が足りなくなるという理由が一つと、なるべくクリスタルに近いカウンターで ADC ゲートを開く様にした方が確実にクリスタルに当たる Beam で測定が出来ると考えたためである。

なお、実験時の回路図は以下の通りである。

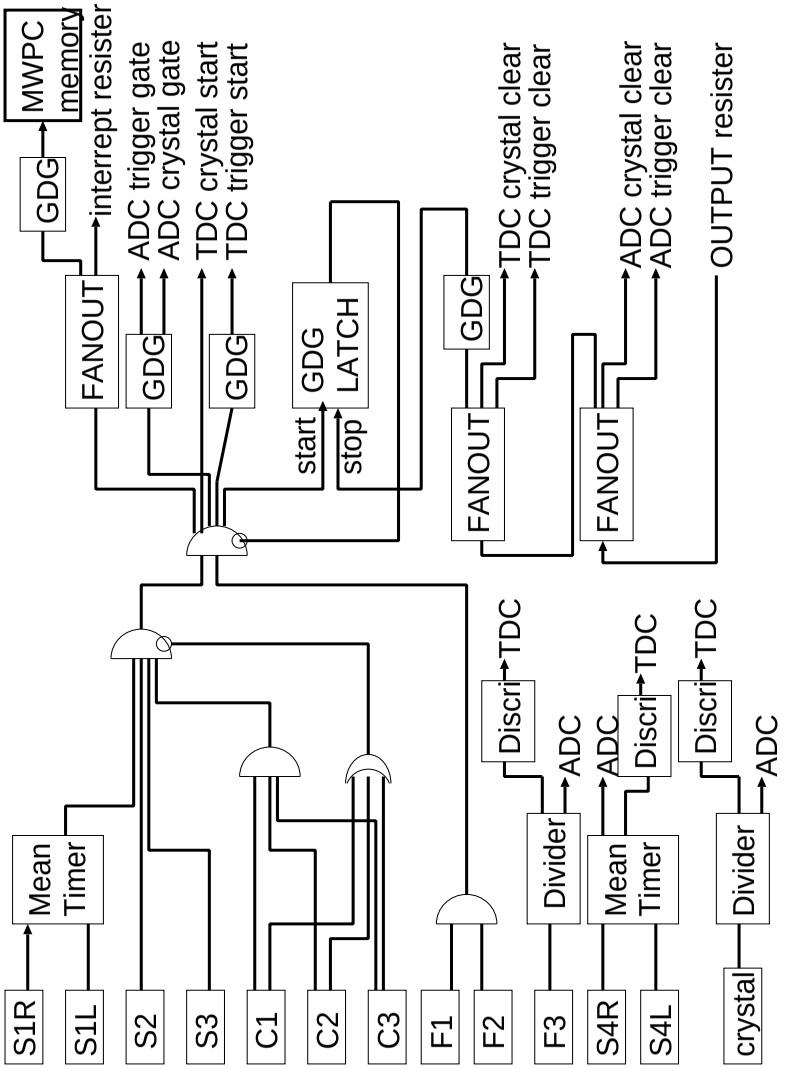

図 3.7: 実験時のデータ集収用回路のダイアグラム。尚、GDG は Gate Delay Generater の略である。

3.3.7 TOF

今回の実験では、粒子の飛行時間 (Time Of Flight) によって粒子識別を行なった。TOF は S1 ~ S3 までの距離 (約 9.4m) に対応する TOF を測定している。なお、測定の際には S3 で TOF の start、S1 で TOF の stop となるようにした。以下に、hadron(極性は +)1GeV/c を入射した場合の TOF 分布を示す。

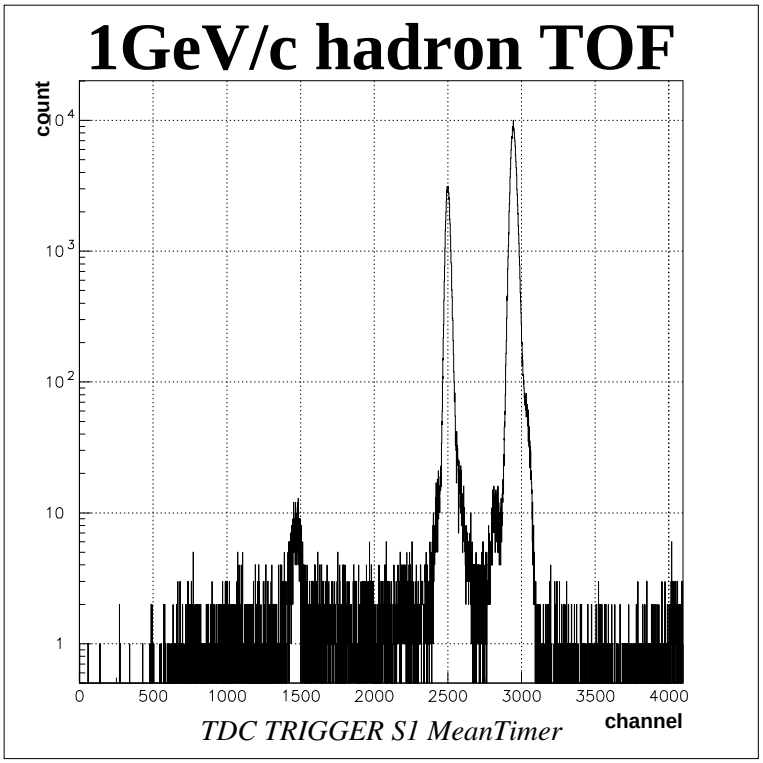

図 3.8: 1GeV/c hadron 入射時の TOF 分布。横軸は TDC の channel。

上記のタイミングの合わせ方だと、速度の遅い粒子 (質量の大きい粒子) が TOF 分布の左側にくる。よって、3 つの顕著な peak は、左から順番に deuteron、proton、pion になる。

3.3.8　チェレンコフカウンターによる粒子識別

チェレンコフカウンターによる hadron と electron 粒子識別の一例として 3GeV/c の electron と hadron(極性は−) を入射した際の様子を以下に示す。

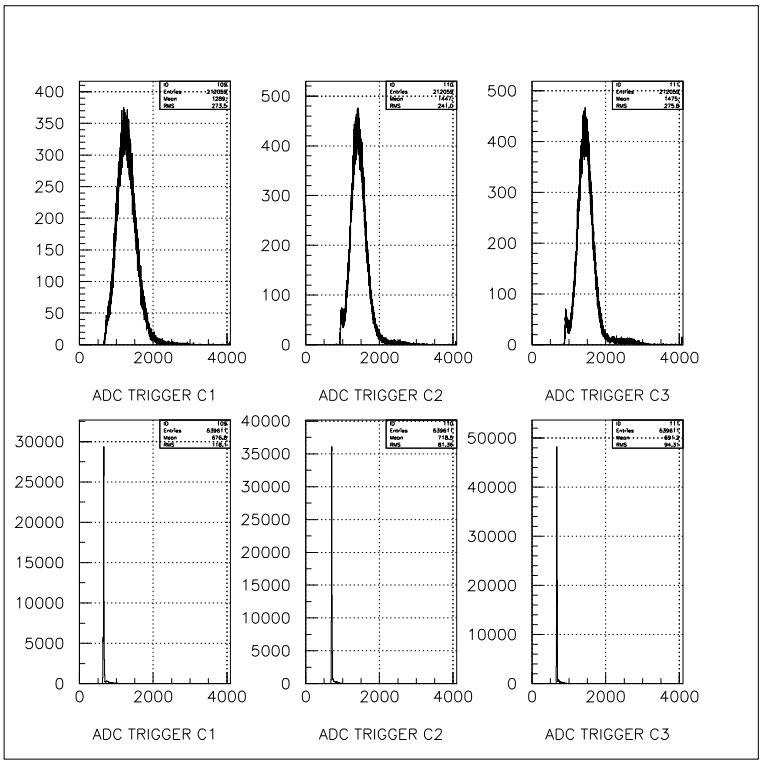

図 3.9: 上段が 3GeV/c electron を入射した時、下段が 3GeV/c の hadron を入射した時の ADC スペクトル。横軸は ADC channel

図より明らかなように、electron mode と hadron mode で識別が正しく行なわれていることがわかる。

第4章　データ解析

実験から得られたデータを用いてデータ解析を行った。解析を始める前段階として、まずBeam trackingを行なった。以下の節より少し詳しく解析の手順を説明していくことにする。

4.1 Beam tracking

4.1.1 座標軸の定義

座標軸はBeam上流側から下流へ向かってZ軸が正となる方向にとり、X軸を水平方向、Y軸を垂直方向に取った。[1]

以下のデータ解析に於いては特に断りが無い限りはすべてこの座標系で議論していくものとする。

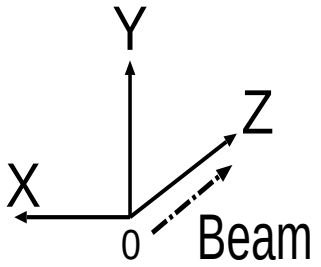

図 4.1: 座標軸の取り方。Beamの向きをZ軸に取っている。

4.1.2 MWPC

MWPC4台によってBeamの飛跡を推定することができる。[2]前述したように、今回の実験で使用したMWPC4台はWire間隔が異なるものを使用している。

MWPCにはそれぞれ1 ~ 4まで番号がついているが、beam line上流側からMWPC1、MWPC2、MWPC4、MWPC3、という少し不自然な順番で並んでいるのは、実験当初は使用するMWPCは3台の予定であったが、各カウンターを置いた後に、MWPC2とMWPC3の間の空いている空間に急拠Wire間隔が異なるMWPCを設置したためである。

[1] Beamの高さは測量により1663.0mmであることが分かっている。
[2] Beamがbeam lineに対してまっすぐに来ていることを仮定している。

以上のような経緯から MWPC の並んでいる順番と、Wire 間隔には違いがあることを注意されたい。

各 MWPC の内部の構造は共通している。しかし、張られている Wire の本数には違いがあるので、ここで確認しておく。

MWPC	Wire 間隔 (mm)	X 方向の Wire の本数	Y 方向の Wire の本数
MWPC1	2	48	48
MWPC2	2	48	48
MWPC4	1	64	64
MWPC3	2	48	48

表 4.1: 各 MWPC と Wire 間隔、Wire の本数の関係

次に具体的に、Beam が通過した際に MWPC がどの様な応答をするか見てみる事にする。

まず、各 MWPC の Wire1 本毎に番号を付ける。そして Wire の番号を横軸にして、その番号の Wire が信号を出した回数を histgram にして表したもの (以下、MWPC の hit pattern と呼ぶ) を見てみる。例として以下のようなデータが得られている。

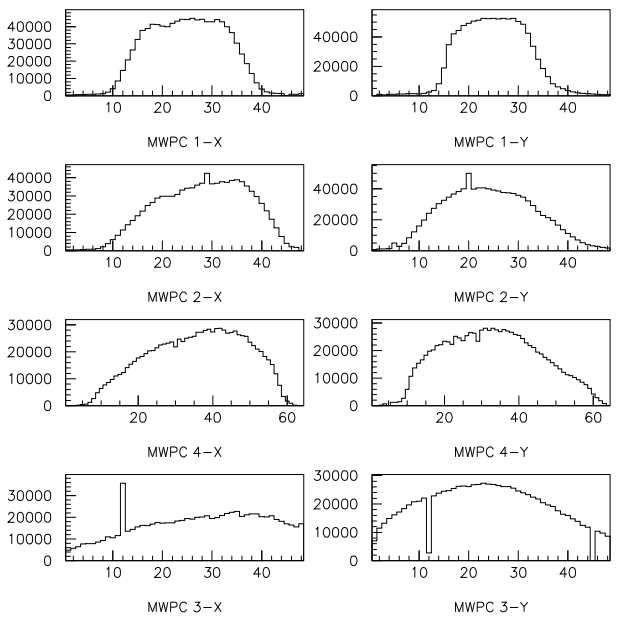

図 4.2: MWPC の hit pattern の一例。

histgram を見る限りでは、多少発振気味の Wire が数本あり、又全く応答しない Wire もあるが、全般的に MWPC はきちんと機能していると言えるだろう。

また、信号を出した Wire のトリガー当たりの本数を横軸にして histgram にしたもの (以下、MWPC の multiplicity と呼ぶ) を見てみると、一例として次のようになった。

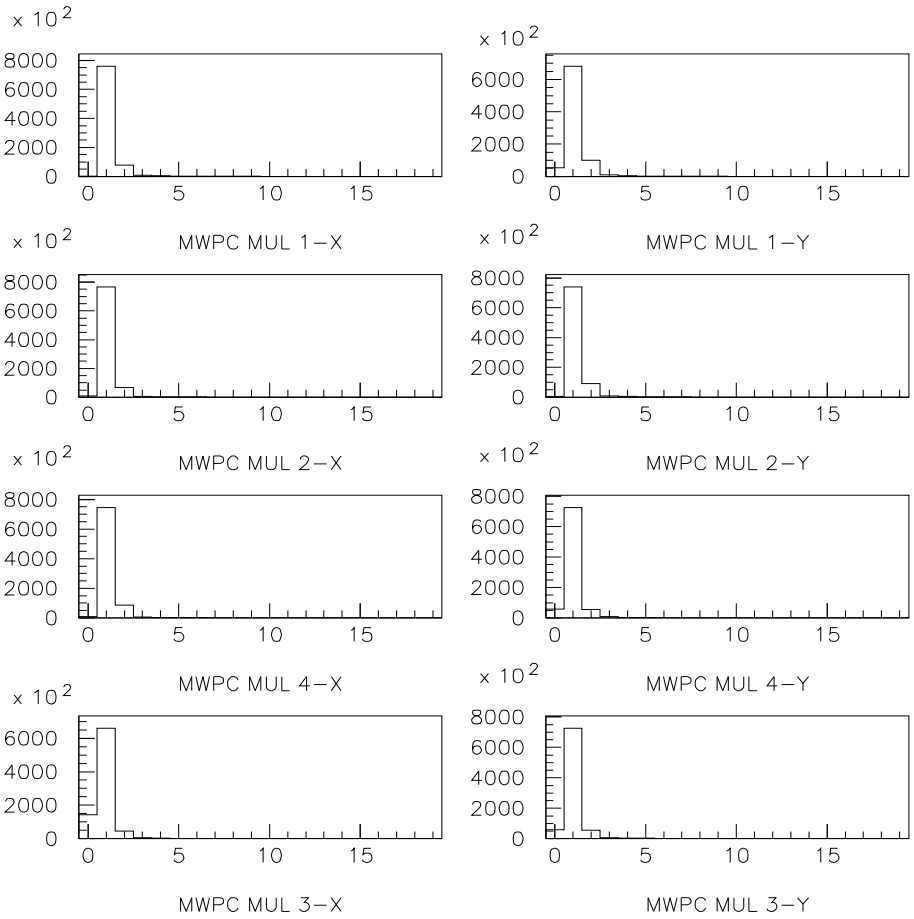

図 4.3: MWPC の multiplicity の一例。

理想としては、Multiplicity は 1 であることが望ましい。そのことを踏まえて上図を見てみると、信号を出す Wire の本数は各 MWPC でほとんど 1 本であることがわかる。

4.1.3 Beam tracking の手順

Beam tracking をする際に、最も注意すべき事は、各 MWPC に於ける粒子の通過位置をどうとらえるか、である。

詳しく説明すると、Beam が通過した際には信号を出した Wire(以下、鳴った Wire と呼ぶ) と、信号を出さなかった Wire(以下、鳴らなかった Wire と呼ぶ) の 2 種類が存在していることになる。

例えば、Beam が通過して鳴った Wire が 2 本あったとすれば、Beam がどちらの Wire を通過したのかは、今の段階でははっきりと求めることが出来ない。

また、MWPC の Wire には Beam が来ようと来まいと信号を出し続けている Wire もある (以下、発振した Wire と呼ぶ)。この発振した Wire に於いては、本当に Beam が通過しているのかどうかは、現段階ではわからない。

そこで、以下のような一定の規則を定めてイベント選択を行ない、各 MWPC に於ける粒子の通過位置を求める事にした。

1. 鳴った Wire が 1 本の時は、Beam は鳴った Wire の位置を通過したと考える。
2. 隣り合って鳴った Wire が 2 本ある時は、Beam はその中間の位置を通過したと考える。
3. 隣り合って鳴った Wire が 3 本ある時は、Beam は真ん中の Wire の位置を通過したと考える。
4. それ以外のパターンのデータは捨てる。

ただし現段階では、鳴った Wire の本数に関わらず、鳴った Wire の中に発振している Wire が含まれる場合は、そのデータも捨てる事にした。

以上のような準備を踏まえた上で、Beam tracking は以下のような手順で行なうことにした。

1. 各 MWPC に於ける粒子の通過位置を求める。
2. 求めた 4 点を最小自乗法で直線近似して粒子の飛跡を推定する。
3. 粒子の飛跡からクリスタル前面での Beam の入射位置を求める。

以上のようにして Beam tracking を行なった結果、クリスタル前面での Beam の分布は以下のようになった[3]。

[3]図中の枠線はクリスタル面を表している。

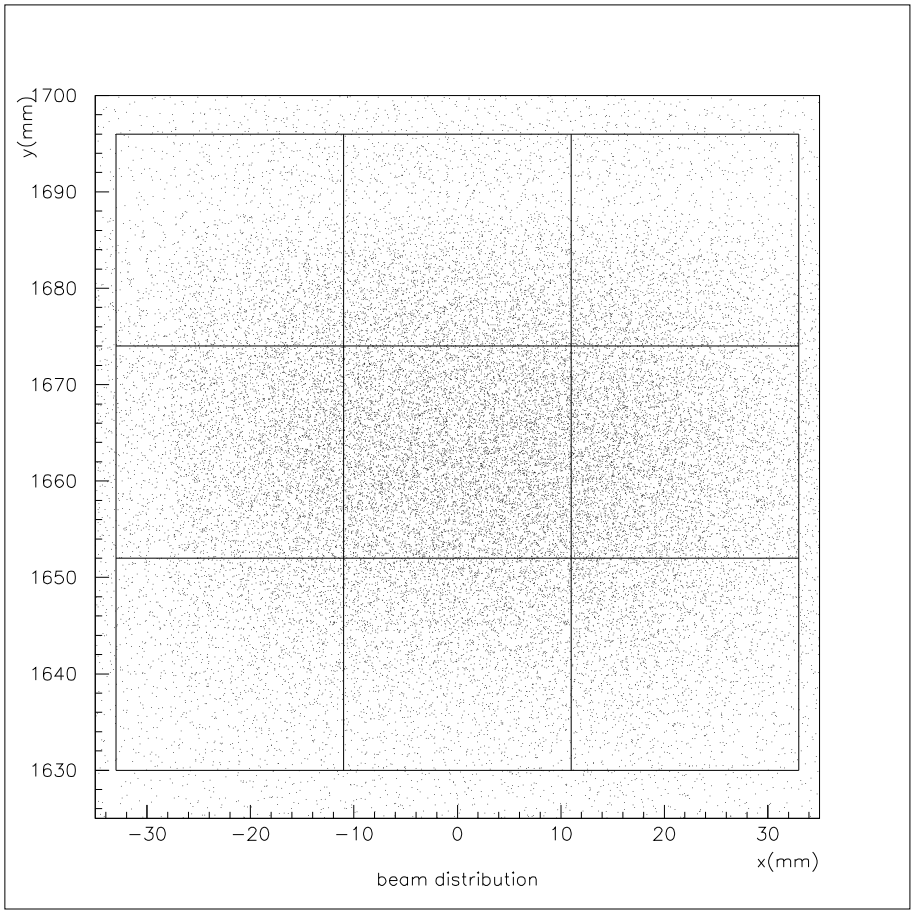

図 4.4: Beam 下流側から見た時のクリスタル前面での Beam 分布の例。

4.2 MWPC の位置の補正

各 MWPC の情報から Beam のクリスタル前面での入射位置が推定できるが、実験時に MWPC を設置した際には、MWPC の外箱の中心が beam line 上に来るように設置しただけで、Wire の位置を確認しながら設置した訳ではない。

そのため、X 軸方向と Y 軸方向の Wire の位置に、設置位置の誤差が生じている可能性がある。

そこで、この MWPC の位置のずれを以下のように統計的な手法を用いて補正し、より正確な Beam tracking を行なうことにした。やり方としては、

1. 測量で得た MWPC4 台の位置を用いて、各 MWPC の Wire の位置を座標に変換する。
2. 各 MWPC で Wire を 1 本だけを鳴らした event(以下、single hit event と呼ぶ) を選び出す。
3. single hit event が発生したときに鳴っている Wire の座標から、最小自乗法により Beam の飛跡を直線近似する。
4. 直線近似した Beam と各 MWPC 上での交点の座標を求める。
5. (残差) = (直線と MWPC が交わる座標) ー (実際に鳴っている Wire の座標) を histgram にする。

この手法を用いた場合、残差の平均値が 0 近傍にあり、さらに、標準偏差が位置をずらした後で小さくなっていれば MWPC の位置としては最も確からしいと考えられる。

その結果、測量により求めた MWPC の位置に以下の補正を加えると良いことがわかった。

MWPC	X 軸方向への補正 (mm)	Y 軸方向への補正 (mm)
MWPC1	1.0	0.0
MWPC2	-1.2	-0.5
MWPC4	1.2	0.5
MWPC3	1.0	-0.5

表 4.2: 各 MWPC に必要な補正距離

以上の補正を加える前と後とで、histgram の変化を見てみると以下のようになる。

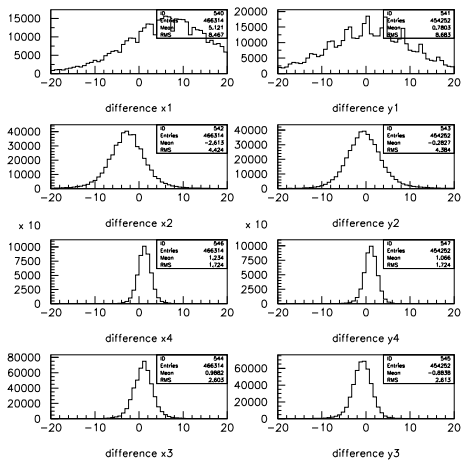

図 4.5: 位置の補正を行なう前の残差の histgram

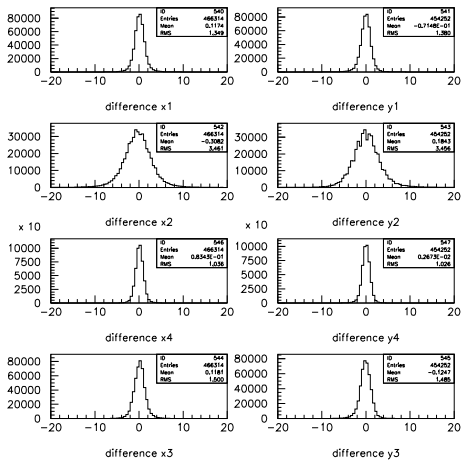

図 4.6: 位置の補正を行なった後の残差の histgram

4.3　クリスタルの位置の補正

MWPC の位置の補正を行なった後、今度はクリスタルの位置の補正を行なった。

クリスタルの位置は、9 個あるクリスタルのうち、中央 (No.5) のクリスタルの位置が求まれば、クリスタルは全て 22mm × 22mm × 180mm の大きさであるから、必然的に全てのクリスタルの位置が求まることになる。

そこで、次のような手法で、中央のクリスタルの位置を割出すことにした。

1. No.5 の中心に hadron beam をあてた時の run から、Beam がクリスタルを突き抜けた event を取り出す。

2. 取り出した event から、クリスタル前面に於ける Beam の入射位置とクリスタル後面に於ける Beam の突き抜けた位置を求める。

3. (位置の差) = (入射位置) ー (突き抜けた位置) を histgrm であらわす。

なお、今回の tracking では、event の数を稼ぐために、single hit event だけではなく、MWPC の複数の Wire を鳴らした event(以下、multi hit event と呼ぶ) も使用している。結果は、以下のようになった。

なお、histgram の横軸の単位は mm で表されている。

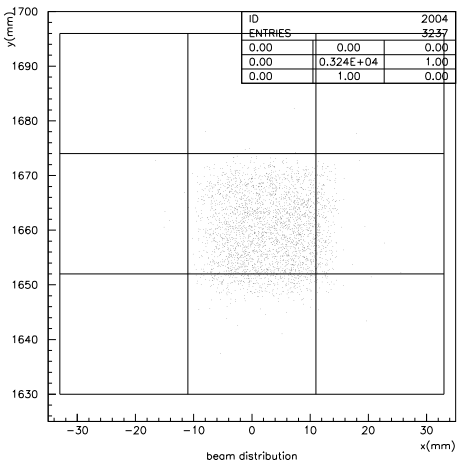

図 4.7: 位置の補正を行なう前のクリスタル前面での Beam 入射位置

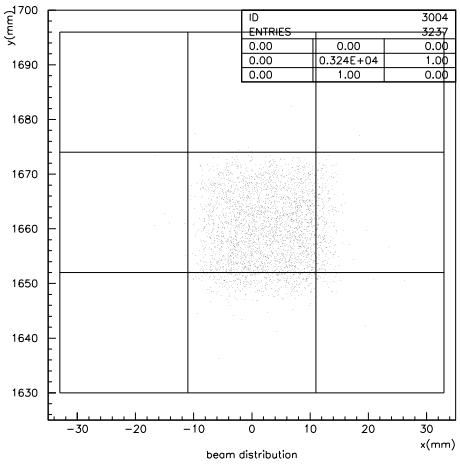

図 4.8: 位置の補正を行なう前のクリスタル後面での Beam 通過位置

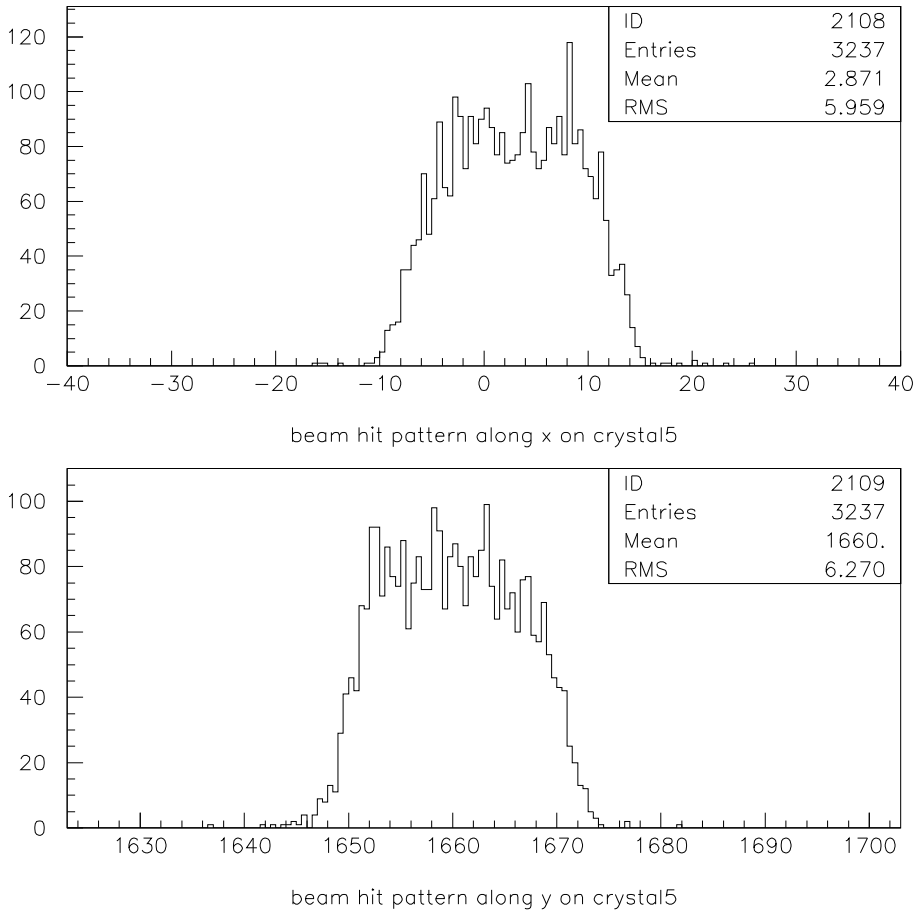

図 4.9: 位置の補正を行なう前の (位置の差) の histgram

No.5 のクリスタルは、大型 BSO クリスタルを 3 × 3 に組み上げた時の中心にあるクリスタルである。従って、今の場合 No.5 のクリスタルの中心に hadron beam を照射しているから、測量により得た Beam の高さ (1663.0mm) より、No.5 のクリスタル中心は (X,Y)=(0.0,1663.0)[mm] にあるはずである。

したがって、この histgram を見ると測量のデータに X 軸方向に-2.8mm、Y 軸方向に 3mm 程の補正を加える必要があると考えられる。

そこで、この補正を考慮して、同じ作業をすると、結果は以下のようになった。

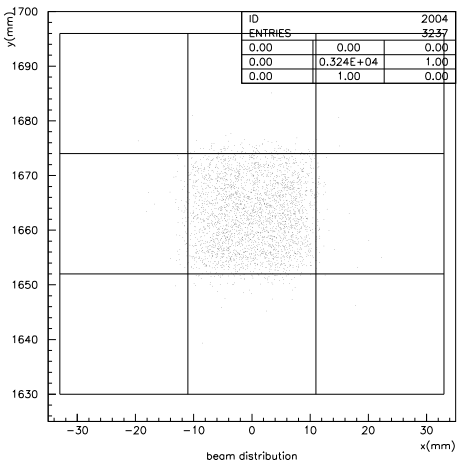

図 4.10: 位置の補正を行なった後のクリスタル前面での Beam 入射位置

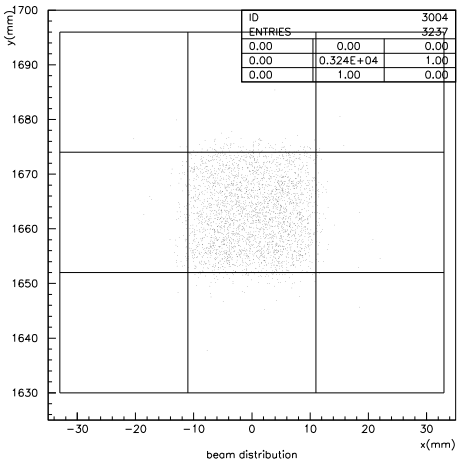

図 4.11: 位置の補正を行なった後のクリスタル後面での Beam 通過位置

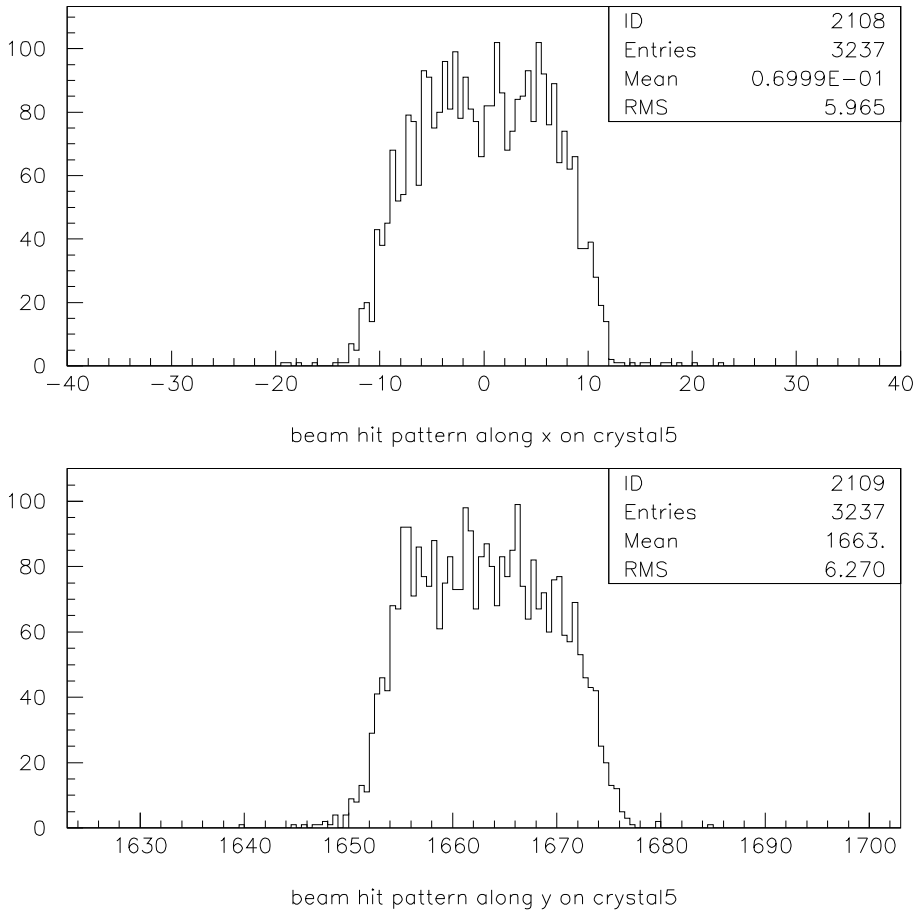

図 4.12: 位置の補正を行なった後の (位置の差) の histgram

以上の図から、位置を補正する前と後で、クリスタルを通過する Beam の位置が中央に揃ってきていることがわかる。

4.4 Energy calibration

今回の実験の目的は、大型 BSO クリスタルの電磁カロリメータとしての性能を評価することにある。つまり、今回使用した大型 BSO クリスタルに Beam を当てた時に、9 本全体のクリスタルが受け取る energy はどの位かを知る必要がある。

そのためには、実験データとしての ADC channel から energy へと変換する factor を求める必要がある。

実験の時は、calibration 用の run として各クリスタルの中心に 3GeV/c の electron beam を当てているので、この時のデータを使用して caribration することにした。

手順は、以下の通りである。

1. 実験時のデータから、各クリスタル前面で 5mm × 5mm の領域に入る event を選び出す。
2. 選び出した event の ADC データから pedestal 分を引いたデータ分布を作る。
3. GEANT4 を用いて、3GeV/c の electron が BSO クリスタル 1 本に落とす deposit energy を計算する。
4. GEANT4 の deposit energy を基準にして、各クリスタルの変換 factor を求める。

なお、各クリスタル前面で 5mm × 5mm の領域に入る event を選び出す際は、event 数を稼ぐため、MWPC で複数の Wire をならした event(以下、multi hit event と略す) も使用することにした。

以下より、calibration の手順を少し詳しく説明していくことにする。

4.4.1 ADC cut

まず、Beam tracking の結果を用いて、5mm × 5mm の領域に入る event を選び出す。

その後、pedestal 分の ADC channel を引いて、各クリスタルの ADC 値 (絶対値) を求めた。(pedestal の大きさは以下の一覧表を参照。)

以下に、pedestal 分を引いた各クリスタルの ADC 値を載せておく。

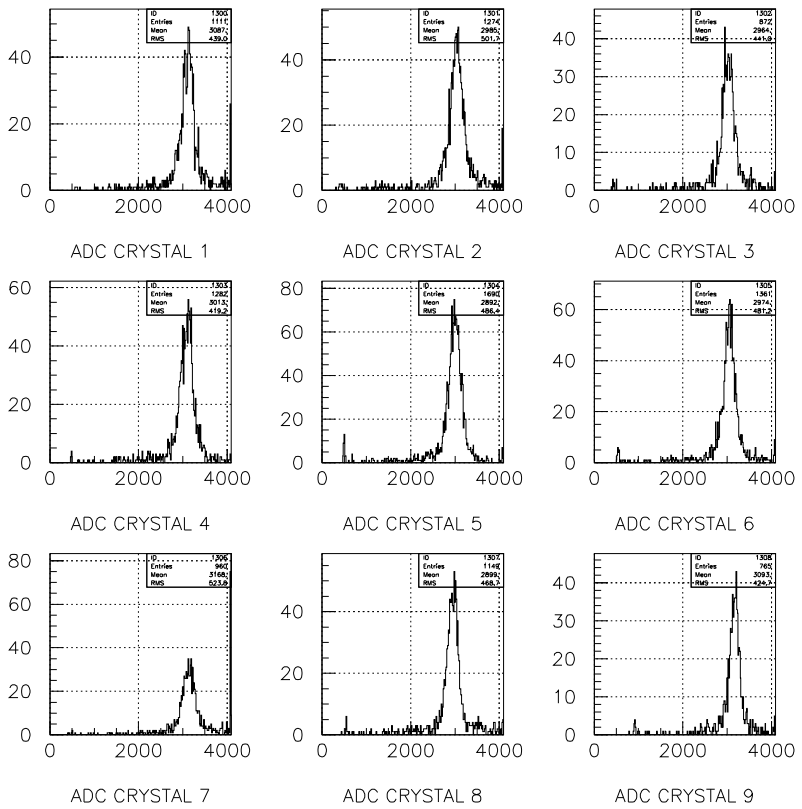

図 4.13: pedestal 分を引いた各クリスタルの ADC 値

この ADC histgram を基に、次は GEANT4 を利用しながら ADC channel を energy へと変換する factor を求めていく。

4.4.2 GEANT4 による simulation

ADC channel から energy へと変換する factor を求めるために、あらかじめ、GEANT4 により simulation を行なった。

simulation をする際の主な setup は以下の様になっている。

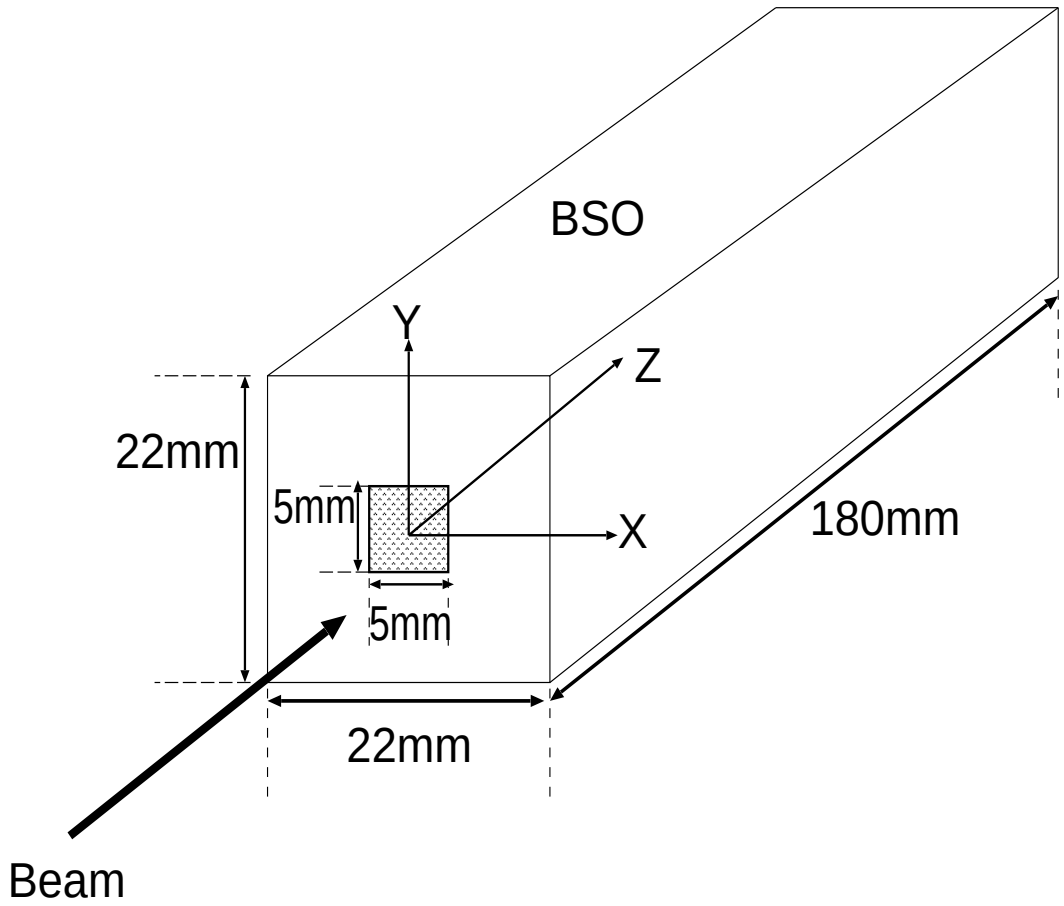

図 4.14: GEANT4 で simulation した際の setup

上図は、大型 BSO クリスタルの中心から X(-2.5:2.5),Y(-2.5:2.5) の 5mm 四方の領域に、乱数を発生させて electron を入射させている様子を表している。electron は Z 軸に対して全て水平に入射させた。

この時、GEANT4 の座表系は、Beam を Z 軸に取ったとき左手系で X、Y 軸が決まるので、今まで用いてきた実験時の右手系の座標系とは異なる。しかし、この simulation で知りたいのは、3GeV/c の electron を入射したときクリスタル 1 本が受け取る energy であるので、座標系の違いによる deposit energy の影響は無い。

この setup で実験時と同じ 3GeV/c の electron を約 100 万 event 入射させた結果、得られた deposit energy の分布は次の様になる。

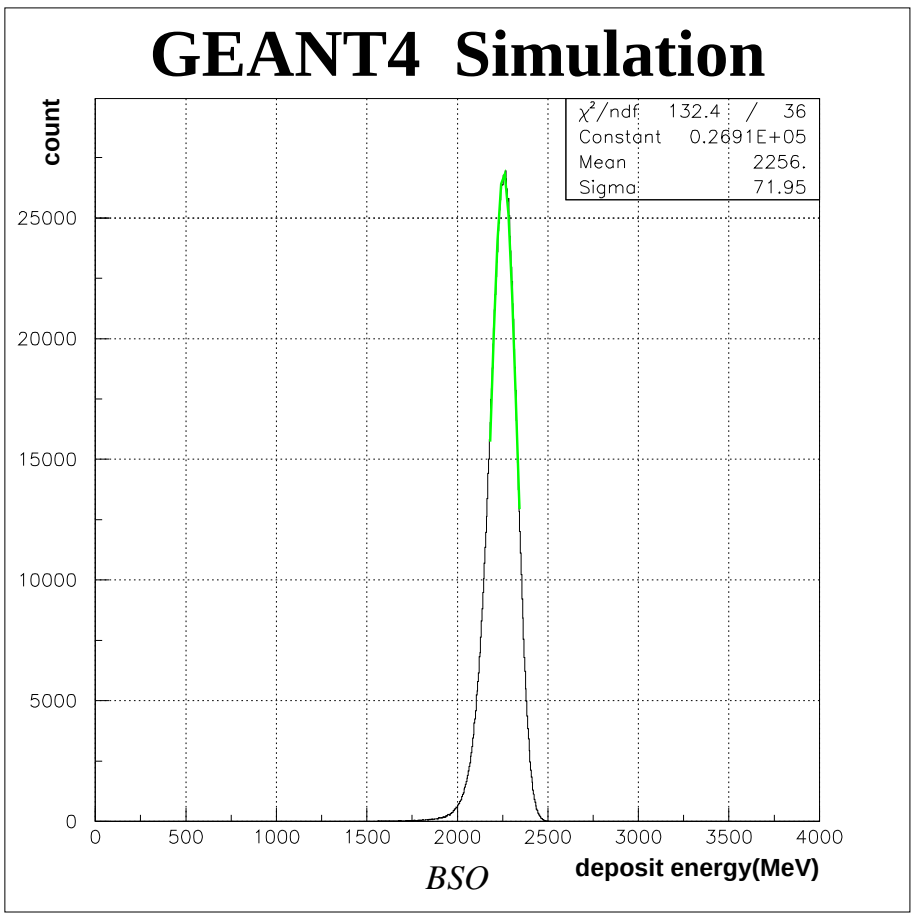

図 4.15: GEANT4 で simulation した結果得られた deposit energy 分布。

なお、この時の GEANT4 による simulation では、cutoff の値は 0.1mm で計算させている。

この histgram に gauss fit をかけて peak の中心位置を割出した結果、大型 BSO クリスタル 1 本当たり 2256MeV の energy を落としていることが分かった (3GeV/c electron 入射時)。これは、3GeV/c の electron が持つ energy の約 85 %を大型 BSO クリスタル 1 本が吸収したことになる。

4.4.3 factor の算出

以上で、Energy calibration に必要な準備は整ったので、最後に ADC channel を energy へと変換する factor を求める。

factor の算出は、GEANT4 によって求められた deposit energy と ADC 値 (pedestal を引いたもの) 分布の peak が対応すると考えて、以下の式により算出した。

$$factor = \frac{ADC\ 値}{deposit\ energy}$$

により算出した。

この時、右辺の分子は pedestal 分を引いた ADC 値で、右辺の分母は GEANT4 により得られた 3GeV/c の electron 入射時の大型 BSO クリスタル 1 本当たりの deposit energy である。

以下に、各クリスタルに対する factor を一覧にしてまとめる。

番号	deposit energy(MeV)	peak	pedestal	(peak) − (pedestal)	factor
No.1	2256	3108.2	328.2	2780	0.811511
No.2	2256	3041.9	166.9	2875	0.784696
No.3	2256	3023.7	206.7	2817	0.800852
No.4	2256	3089.3	252.3	2837	0.795206
No.5	2256	2998.1	286.1	2712	0.831858
No.6	2256	3051.0	340.0	2711	0.832165
No.7	2256	3127.4	166.4	2961	0.761905
No.8	2256	2947.6	349.6	2598	0.868360
No.9	2256	3168.6	709.6	2459	0.917446

表 4.3: calibration の結果求まった factor。なお、peak と pedestal は ADC の channel である。

以上のようにして求めた factor を用いて、前節で示したクリスタルの ADC histgram を energy scale の histgram にすると以下のようになる。

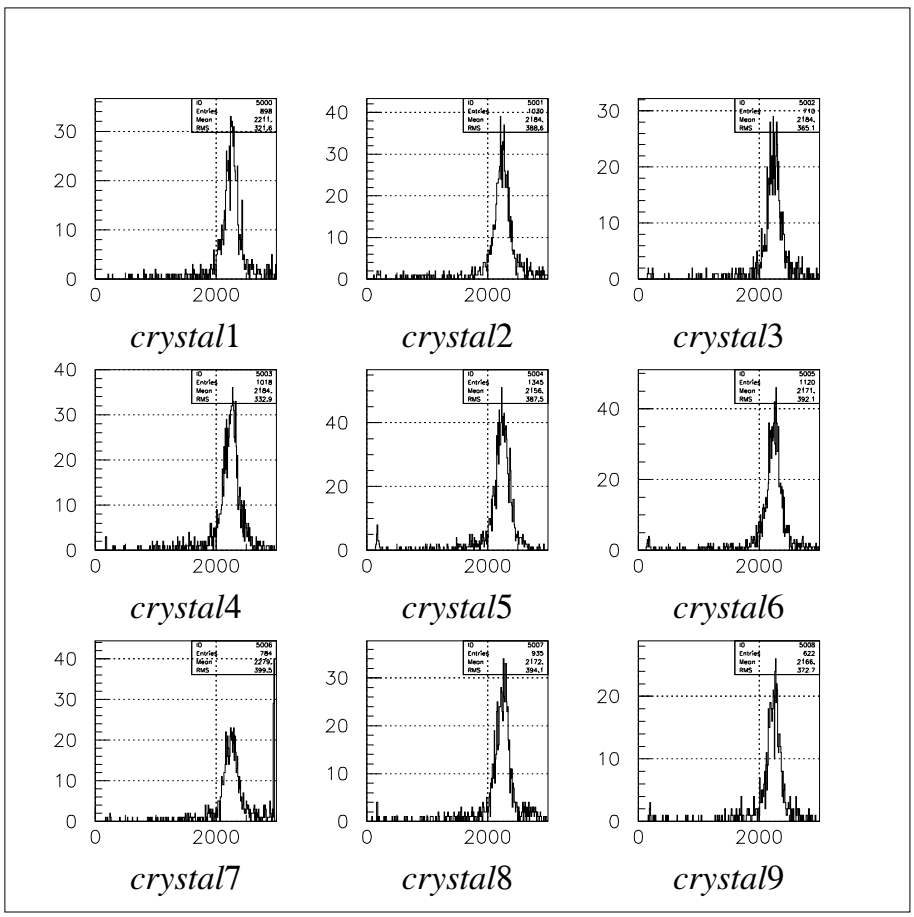

図 4.16: ADC 値を energy に変換した時の histgram。横軸の単位は MeV。

この図は、3GeV/c の electron を入射した場合の図であるが、各 histgram の peak が揃っている事がわかる。

また、calibration 後にクリスタルに対する Beam の分布を調べた結果、以下のようになった。

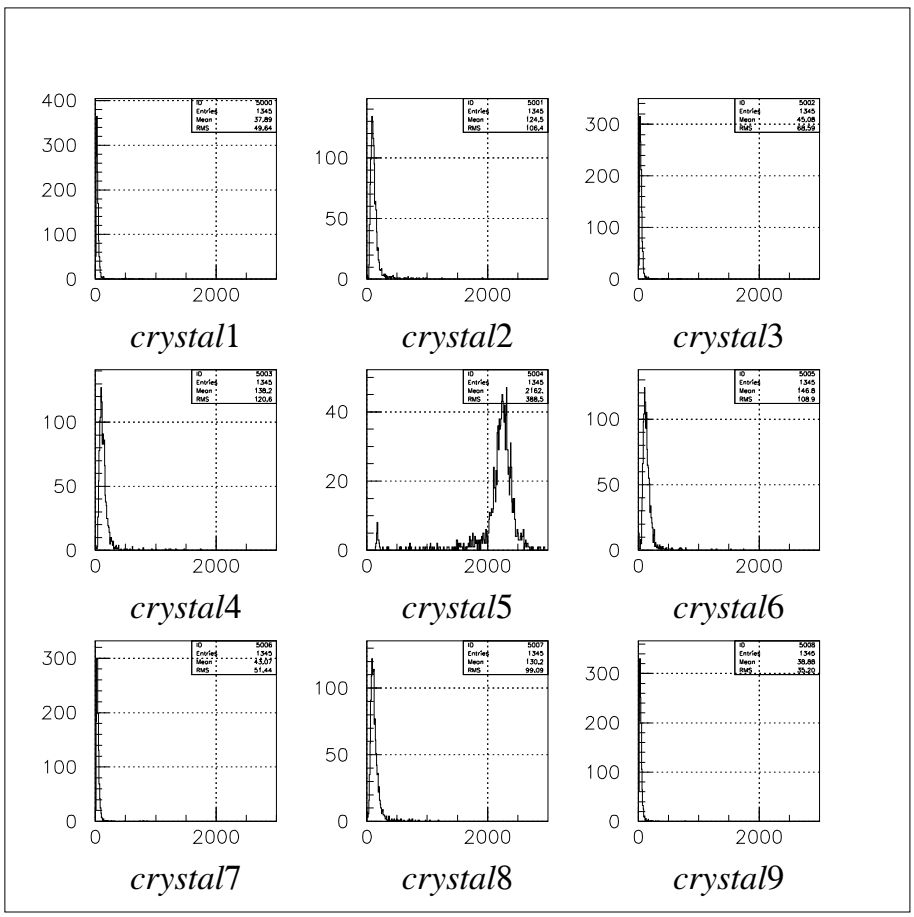

図 4.17: 3GeV/c の electron をクリスタル 5 番に入射した時の histgram。横軸の単位は MeV。

この図から、Beam が 5 番のクリスタルに正しく照射されていることが分かる。

4.5 各 momentum 毎の Energy sum

この factor を利用して、0.5 ~ 3.0GeV/c の momentum で、electron を入射した時のクリスタル 9 本分の energy を足し合わせると、以下のようになる。

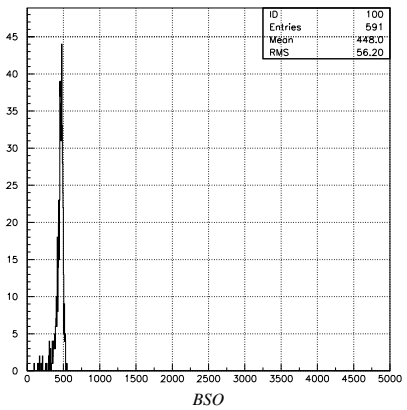

図 4.18: electron 0.5GeV/c を入射した場合の energy sum の分布。

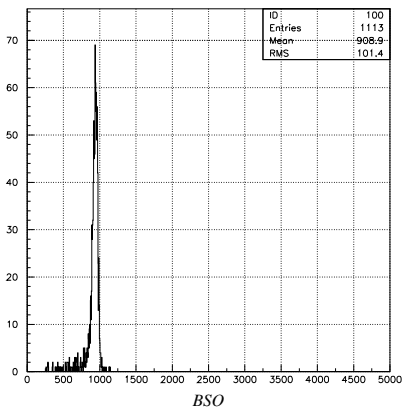

図 4.19: electron 1.0GeV/c を入射した場合の energy sum の分布。

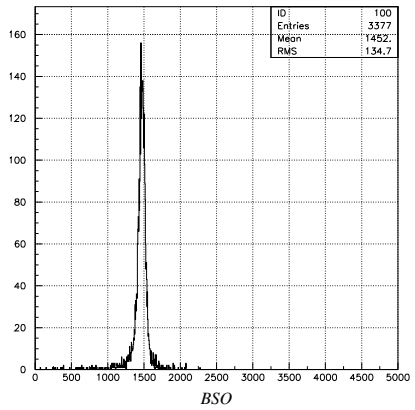

図 4.20: electron 1.5GeV/c を入射した場合の energy sum の分布。

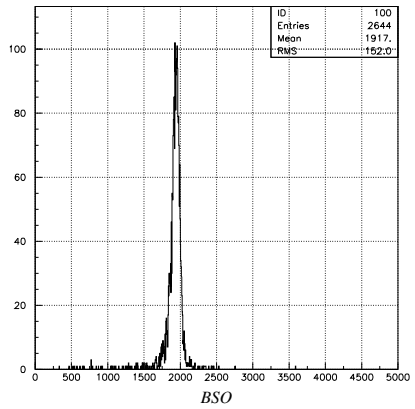

図 4.21: electron 1.5GeV/c を入射した場合の energy sum の分布。

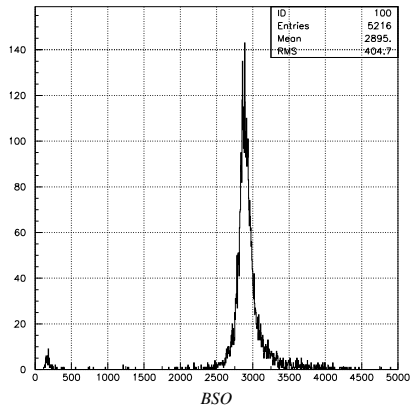

図 4.22: electron 3.0GeV/c を入射した場合の energy sum の分布。

以上の energy sum の histgram を一つの histgram で表すと以下のようになる。

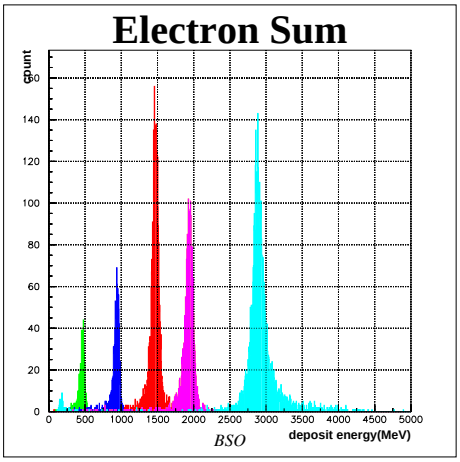

図 4.23: 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0GeV/c の electron を入射させた場合の energy sum の分布。なお、2.5GeV/c は実験時にはデータとして取っていない。

次の節より、各 momentum 毎の energy sum を詳しく解析していくことにする。

4.6　3× 3 クリスタルマトリックスの各応答

上節で、各 momentum 毎のクリスタルの energy sum の分布がわかったことになるが、この histgram に gauss fit をかけたときの peak energy に相当するものが大型 BSO クリスタルの各 momentum に対する応答である。

試しに上節で求めた 3GeV/c の Beam に対する energy sum の histgram に gauss fit をかけてみると、以下のようになる。

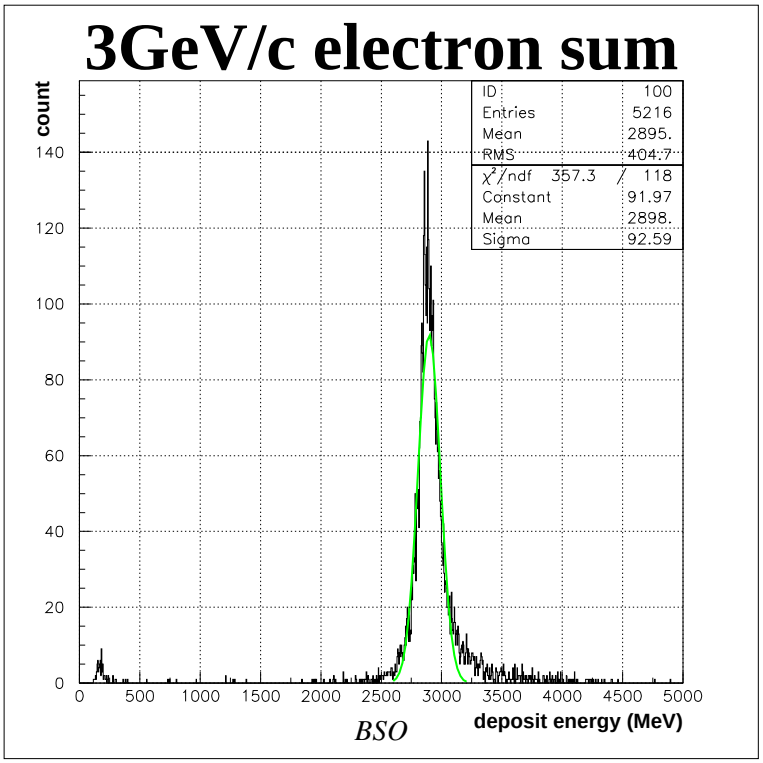

図 4.24: 3.0GeV/c を入射させた場合の energy sum に gauss fit をかけたときの様子。

この時、

$$\text{ガウス関数 } f(x) = f_0 \times \ exp\frac{-(x-x_0)^2}{2(\sigma_0)^2}$$

で fitting している。

この histgram を見ると、3GeV/c の electron を入射しているのにも関わらず、deposit energy が 3GeV を越える event が多数見受けられる。(χ^2 もあまり良くない。)

そこで、Beam の momentum resolution が悪く、実は histgram に複数の成分があるのではないかと考えて、単純な gauss fit により peak を求めるのではなく、double gauss fit により peak を割出すことにした。

その結果、3GeV/c の energy sum の histgram に関しては、以下のような結果になった。この時、

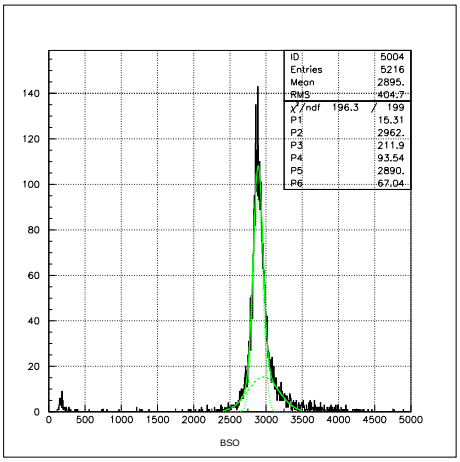

図 4.25: 3.0GeV/c を入射させた場合の energy sum に double gauss fit をかけたときの様子。

$$fittingfunction = P1 \times \ exp\frac{-(x-P2)^2}{2(P3)^2} + P4 \times \ exp\frac{-(x-P5)^2}{2(P6)^2}$$

で fitting している。

この時、P1、P4 が normalization factor、P2、P5 が mean、P3、P6 が σ に相当する。

χ^2 で比較しても、single gauss fit の時より明らかに double gauss fit の方が fitting が良く乗っていることがわかる。

そこで、3GeV/c に限らず、全ての momentum で double gauss fit をかけて見ると以下のような結果になった。

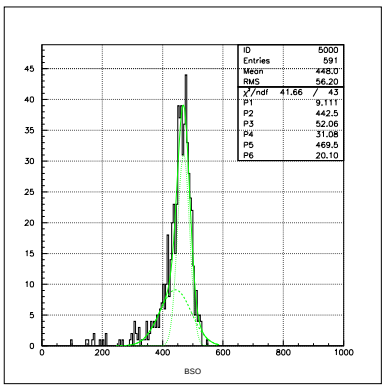

図 4.26: 0.5GeV/c を入射させた場合の energy sum に double gauss fit をかけたときの様子。

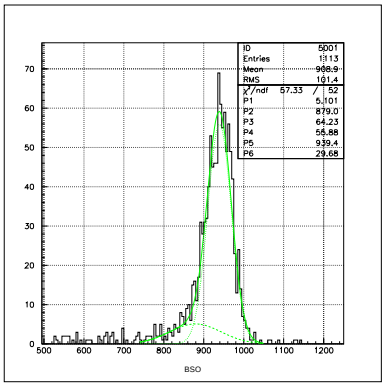

図 4.27: 1.0GeV/c を入射させた場合の energy sum に double gauss fit をかけたときの様子。

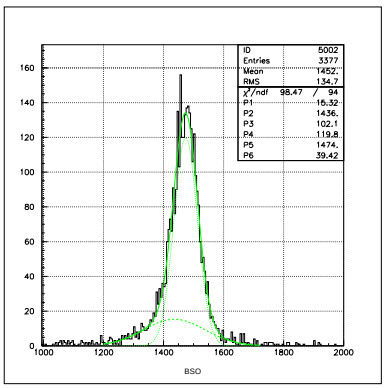

図 4.28: 1.5GeV/c を入射させた場合の energy sum に double gauss fit をかけたときの様子。

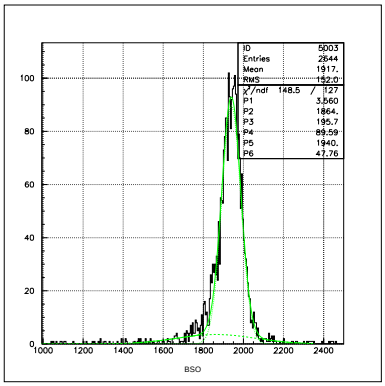

図 4.29: 2.0GeV/c を入射させた場合の energy sum に double gauss fit をかけたときの様子。

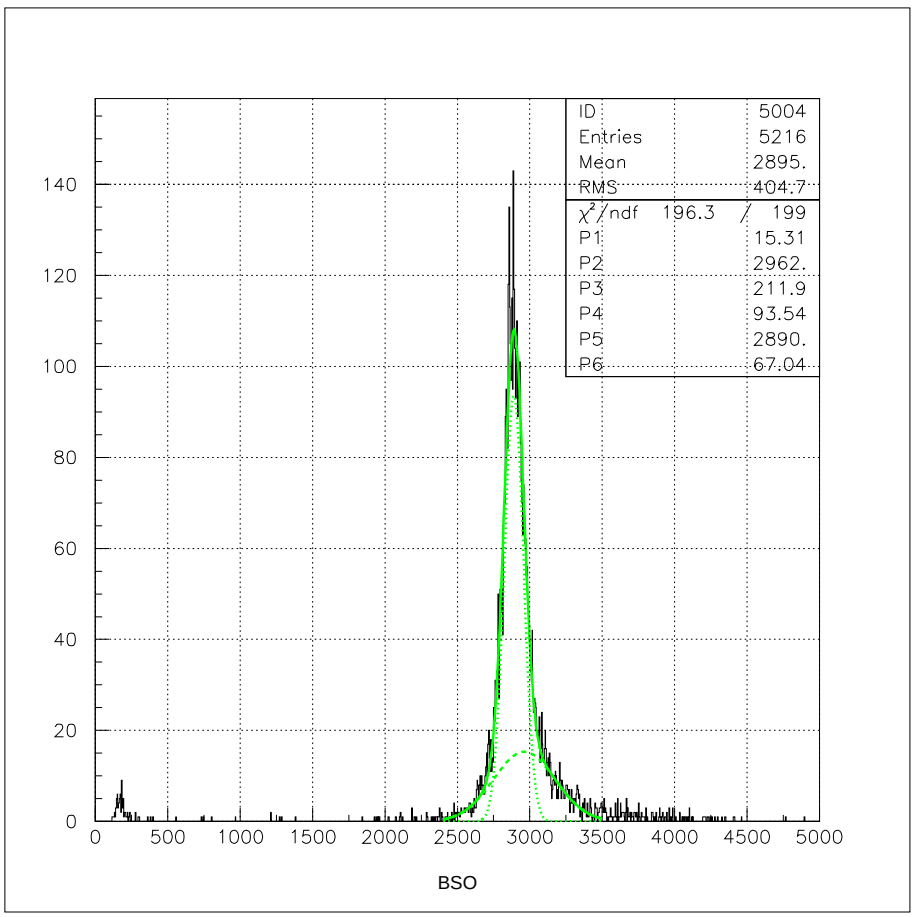

図 4.30: 3.0GeV/c を入射させた場合の energy sum に double gauss fit をかけたときの様子。(再掲)

4.7 Double gauss fit による結果

以上の図より P1 ~ P6 までをまとめて表にすると、以下のようになる。

Momentum(GeV/c)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
0.5	9.111	442.5	52.06	31.08	469.5	20.10
1.0	5.101	879.0	64.23	55.88	939.4	29.68
1.5	15.32	1436.0	102.1	119.8	1474.0	39.42
2.0	3.560	1864.0	195.7	89.59	1940.0	47.76
3.0	15.31	2962.0	211.9	93.54	2890.0	67.04

表 4.4: double gauss fit の結果求まった parameter。

electron を入射した際に、histgram に 2 成分目が見えている理由は実験を行なった π2 beam line は electron beam の分解能が悪いからではないかと考えられる。

ここで、2 成分あるうち、どちらが本来の BSO の応答であるかを考えると、ここでは peak の鋭さから考えて、P4 ~ P6 で表される gauss 分布が本来の大型 BSO の応答と考えられる。

そこで、P4 ~ P6 を基に Linearity、Energy resolution を求めていくことにする。

4.8 Linearity

以上の fitting により、各 momentum に対するクリスタル 9 本分の応答が分かったので、それを基にして直線性を調べてみた。理想的なシンチレータとしては、入射した beam energy に対し、同じ大きさの energy を落とすのが望ましい。

そのことを踏まえて、横軸に入射した electron の energy を取り、縦軸に大型 BSO9 本の deposit energy を取ると、結果は以下の様になった。

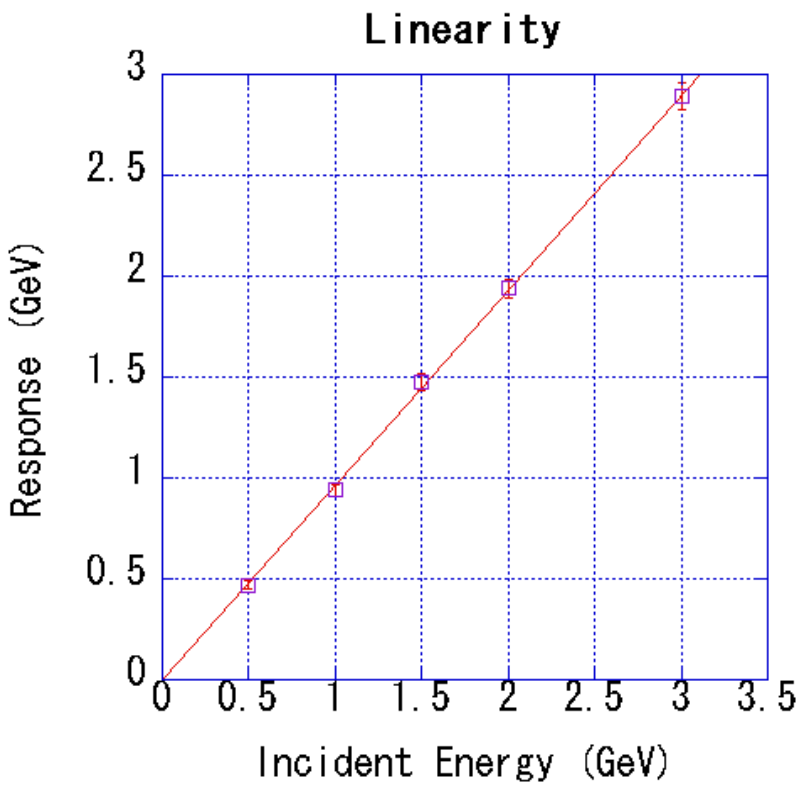

図 4.31: electron 入射時の linearity。error bar は fitting 時の σ(P6) でつけてある。

fitting は原点を通過するようにかけている。

この図を見ると、入射する beam energy が高くなると若干 response が悪くなるが、全体的に見て応答特性の良い直線性が得られているといえるだろう。

4.9 Energy resolution

4.9.1 Energy resolution を決める要素

検出器の性能を表す一つの指標として、Energy resolution がある。この Energy resolution は、double gauss fit により求めた P6(σ) と peak の値である P5(E) を用いて、σ/E で求めた。従って、分解能の単位は無次元量であり、百分率で表される。

energy を足し合わせた時の histgram が横に大きく広がっている場合は、分解能は悪くなるが、histgram が鋭い peak をもっているなら、分解能は小さく、検出器としての性能が良いことが分かる。

入射エネルギー E に対する energy resolution の関係は、

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

で表される。

この時、σ_0 はノイズ項と呼ばれるもので、低エネルギーで測定をしている際に重要になるが、今回は高いエネルギー領域で測定をしていることから、ほとんど無視できると考えられる。

また、σ_1 は統計項と呼ばれ、信号自体の離散的な性質からくる統計的な雑音を示す。この項は、他の測定装置を完全に作ったとしても、雑音が検出器からの信号中に常に存在してしまう最小量の変動となることから、検出器の性能に大きく影響する。

σ_2 は定数項と呼ばれ、結晶間の calibraion error や結晶からの入射エネルギー洩れなどが関係する。

4.9.2 Energy resolution

次に、energy resolution を求めた結果、以下の様になった。

この時の fitting の式は以下の通りである。

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

なお、この時の各 momentun での error bar、$\Delta(\frac{\sigma}{E_i})$ は、energy sum の histgram に gauss fit をかけた時の、σ の fitting error で付けている。

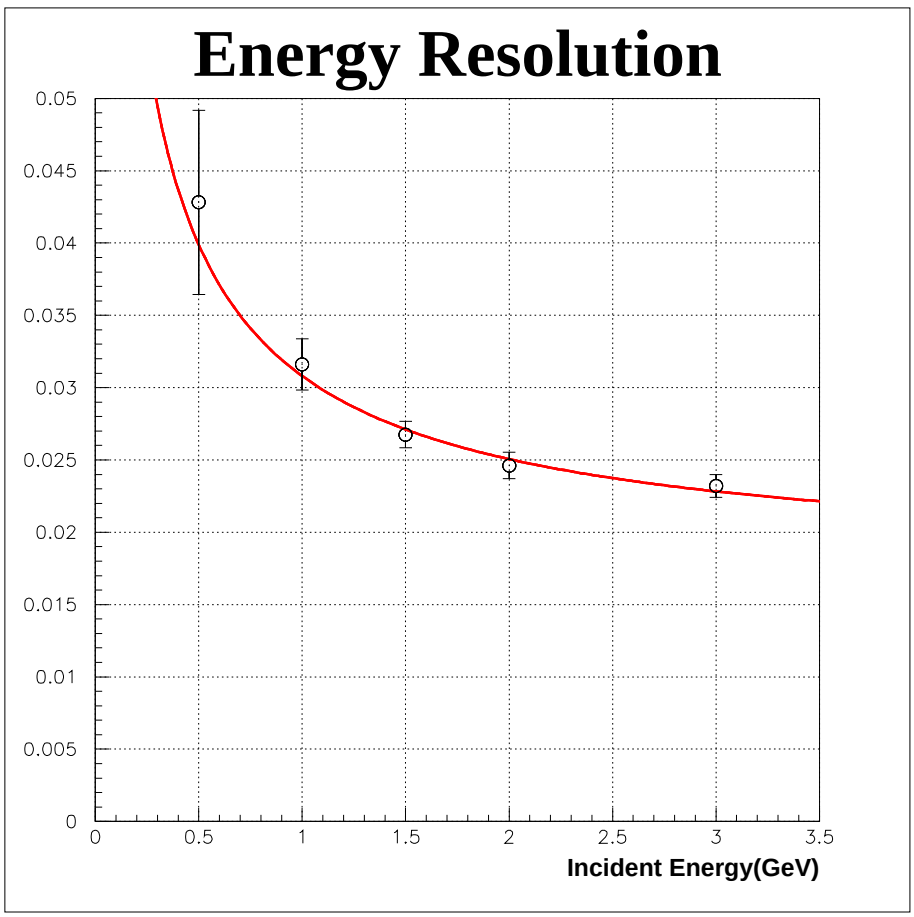

図 4.32: electron 入射時の energy resolution。

この式を fit させた結果、

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\left(\frac{(2.5 \pm 0.3) \times 10^{-2}}{\sqrt{E}}\right)^2 + ((1.8 \pm 0.2) \times 10^{-2})^2}$$

となり、統計項として 2.5 %、定数項として 1.7 %を得た。

4.10 まとめと考察

以上のことを簡単にまとめると以下のようになる。

1. 大型 BSO クリスタル (22mm × 22mm × 180mm(15.6X_0)) を大量に生産する方法が確立された。

2. その大型 BSO クリスタルを用いて Beam test を行なった。
   ⇒ 実験場所 高エネルギー加速器研究機構 12GeV 陽子シンクロトロン $\pi 2$ beam line
   ⇒ 0.5 ~ 3.0GeV/c の electron/hadron beam を照射してデータを取った。

3. 現在までのデータ解析の結果
   ⇒ エネルギー応答の良い直線性が得られている。
   ⇒ 優れた分解能が得られた。

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\left(\frac{(2.5 \pm 0.1) \times 10^{-2}}{\sqrt{E}}\right)^2 + ((1.7 \pm 0.1) \times 10^{-2})^2}$$

したがって、energy resolution の観点から見ると、大型 BSO クリスタルは電磁カロリメータとしての性能を十分に備えている事がわかる。

また、今回の実験で、$\pi 2$ beam line から出てくる electron beam に複数の成分が見られた現象について考察してみる。

そもそも、$\pi 2$ beam line を使用して感じたのは、hadron に対する electron の event rate の低さである。

特に低エネルギー (500MeV/c) の Beam を使用している際には、electron が 1spill 当たり数発程度であった。

これは、おそらく内部標的では pn 反応が優勢なので、2 次ビームとして生み出される hadron の数に対しては、electron の数が圧倒的に少ないということが原因と考えられる。

この場合、hadron は数が多くても、magnet で曲げられてスリットを通過する際に周りの障害物とぶつかるなどしてエネルギーを失い、beam line に到達する数は減ってしまうが、結果としては Beam が絞られたことになる。

しかし、electron の場合はスリットを通過する際に障壁とぶつかっても、大きくエネルギーを失う事無く beam としてやって来ることが考えられるので、この場合、electron 自体が様々な方向からやって来る事になる。

また、D3 magnet の設定に関しても、モニターで設定した値と beam line が表示する値が一致していなかった事も beam の分解能を悪くする要因ではないかと考えられる。

第5章　今後の課題

今回の実験データには simulation を含めて、解析すべき点が数多く残っている。以下に列挙すると、

1. beam の入射位置の検出性能の解析
2. GEANT4 による simulation
   ⇒ 入射ビームに対する energy の洩れだしの評価
   ⇒ クリスタル中での電磁シャワーのふるまい
   ⇒ 位置分解能の限界値
3. hadron に対する response

などが課題として残っている。

　また、今回の実験の setup で用いた Light Guide の形状についても不具合が指摘されているので、今後の実験に於いては材質、形状に関して工夫が必要になると思われる。

謝辞

本論文を製作するにあたり、数多くの方々にお世話になりました。この場を借りて、お礼を申し上げます。

核理学研究所の清水 肇先生には、この研究のテーマを与えて頂き、心より感謝しております。

また、山形大学大学院の加藤 静吾先生には、セミナーを通じて物理の基本的な事から応用まで数多くのことを教えて頂きました。

岩田 高広先生には、論文の製作の際に、きめ細やかな指導をして頂き、本当にありがとうございました。

吉田 浩司先生には、セミナーや研究、実験の際にお世話になりました。また、大学生活全般において、色々とサポートして頂きました。

田島 靖久先生には、データ解析を行なう時に、PC の初歩的な扱い方から、ソフトウェアの使用方法まで、幅広くお世話になりました。

また同じ研究室の、板谷 道隆君、森谷 昌輝君、山本 正和君、吉田 祐樹君にはプライベートな面も含めて、お世話になりました。

東北大学大学院の宮原君には、同じ BSO の解析について、相談に乗ってもらって頂き、本当に助かりました。

また、途中で体調を崩して大学を休んだ際に、見守って頂いた方々に心から感謝しております。本当にありがとうございました。

参考文献

[1] グレン F ノル 著 木村 逸郎 、阪井 英次 訳 「放射線計測ハンドブック (第 2 版)」(日刊工業新聞社、1991)

[2] Proceedings of the Workshop onScintillating Crystals(KEK 1997)

[3] D.F.Anderson,Nucl.and Meth A287 (1990) 606-612

[4] 千葉竜一 、修士論文 「電磁シャワー検出器への実用化に向けた CeF_3 結晶の基本性能の研究」、山形大学 (2001)

[5] 三浦明夫 、修士論文 「K 粒子稀崩壊実験の VETO 用カウンターの試作と性能評価」、山形大学 (2001)

[6] 乃万智洋 、修士論文 「PWO(KEK) の性能評価」、山形大学 (2001)

[7] 飯嶋晶子 、修士論文 「BSO の電子線に対する応答特性」、山形大学 (2001)

[8] F.YITING、S.RENYING、F.SHINJI、X.JIAYUE、Cryst.Res.Techol 「Vertical Bridgman Growth and Scintillation Properties of Doped BSO Crystals」