

GEANT4 シミュレーターによる  
0 中間子スペクトロメーターの性能評価

広島大学 理学部物理科学科

クォーク物理学研究室

門脇 圭介 1079015K

平成 18 年 2 月 10 日

## 概要

電子、光子と物質との相互作用において生成される  $\pi^0$  中間子は、その質量である 135MeV近傍のエネルギー領域ではその生成過程について理論と実験の一致がなされず、明確にされていない。

広島大学のREFER(超高速電子周回装置)にて行った  $\pi^0$  中間子生成実験は、この  $\pi^0$  中間子の生成過程を知る上で重要である生成断面積を求めようとするものである。今研究では、シミュレーションソフトウェアGEANT4を用いて、この実験のために作られた  $\pi^0$  中間子スペクトロメーターの、 $\pi^0$  中間子に対する検出効率などの性能を評価し、また生成されるバックグラウンドイベントへの理解を深める。

# 目次

1 . 序論	4
2 . 導入	5
2.1 素粒子	
2.2 $\pi^0$ 中間子	
2.3 電磁シャワー	
2.4 GEANT4	
3 . 実験及びシミュレーション	9
3.1 粒子検出器	
3.2 測定用モジュール	
3.3 $\pi^0$ 中間子生成断面積測定実験	
3.4 GEANT4シミュレーション	
4 . 結果	19
5 . 結論	33
謝辞	34
参考文献	35

# 1 . 序論

電子や光子による核媒質中での  $\pi^0$  中間子生成において、入射粒子のエネルギーが  $\pi^0$  中間子の質量 135MeV の近傍の場合での、荷電  $\pi^{\pm}$  中間子の生成過程は、実験により測定され理論によって予測もされている。しかし、そのエネルギー範囲での  $\pi^0$  中間子の生成過程は完全には理解されておらず、理論と実験の一致がまだ見られていない。そのため、このエネルギー閾値近傍での  $\pi^0$  中間子の生成断面積を測定することは  $\pi^0$  中間子の生成過程を明らかにする上で重要な意味を持っている。

今年、広島大学のREFER（超高速電子周回装置）にて鉄標的に 150MeV 電子線を入射しての  $\pi^0$  中間子生成断面積測定実験を行った。この実験において、タングステン酸鉛（PWO）結晶を  $3 \times 3$  の配列に並べて標的の四方を囲んだスペクトロメーターを用いて標的から飛び出す粒子を測定した。

本研究では、粒子と物質の相互作用を扱うシミュレーションソフトウェアGEANT 4 を用いて行った  $\pi^0$  中間子生成断面積測定実験のシミュレーションから、スペクトロメーターの粒子検出効率の導出、シミュレーションのバックグラウンド事象についての考察を行い、 $\pi^0$  中間子に対する検出性能を評価した。

## 2. 導入

### 2.1 素粒子

素粒子は電子などのレプトン、陽子や中性子の元であるクォーク、光子などの力を媒介するゲージボソンに分類される。そのうちレプトンとクォークは以下のような3世代6種とその反粒子から構成される。

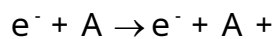
	第1世代	第2世代	第3世代
レプトン	e	μ	
	e	μ	
クォーク	u	c	t
	d	s	b

図 2.1 クォーク、レプトンの種類

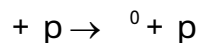
クォークは単体で取り出すことはできず、複数集まってハドロンと呼ばれる粒子として存在している。ハドロンの中で、クォークと反クォークのペアからなるものをメソン（中間子）、3つのクォークからなるものをバリオン（重粒子）と呼ぶ。今実験で扱う<sup>0</sup>中間子はメソンであり、u・反uクォークとd・反dクォークの組み合わせで成り立っている。

### 2.2 <sup>0</sup>中間子

電子線の入射による<sup>0</sup>生成の過程は、制動放射による光子の放出



と、放出された光子と物質中の陽子との反応



で表される。

<sup>0</sup>中間子の質量、135MeVよりわずかに大きい150MeVの電子線を入射して<sup>0</sup>中間子を作る場合、生成された<sup>0</sup>中間子はほぼ静止している。さらに<sup>0</sup>中間子の寿命は $8.7 \times 10^{-17}$ 秒と非常に短く、98.8%の確率で2に崩壊し反対方向に飛び出す。

ここで、<sup>0</sup>中間子が生成されるのに必要なエネルギーの閾値について考える。光子と陽子の4次元運動量をそれぞれ、

$$p \equiv (E, p)$$

$$p_p \equiv (m_p, 0)$$

とすると、重心系のエネルギー  $E_{CM}$  は

$$E_{CM} = \sqrt{2E m_p + m_p^2}$$

で表される。このエネルギーが  $\pi^0$  と陽子の静止質量の和より大きければ  $\pi^0$  の生成は可能である。

$$\sqrt{2E m_p + m_p^2} \geq m_{\pi^0} + m_p$$

$\pi^0$  中間子、陽子の質量を 135.0MeV、938.3MeV とすると  $E$  は

$$2E m_p \geq (m_{\pi^0} + m_p)^2 - m_p^2$$

$$E \geq \frac{(m_{\pi^0} + m_p)^2 - m_p^2}{2m_p}$$

$$= \frac{(135.0 + 938.3)^2 - 938.3^2}{2 \times 938.3}$$

$$E \geq 144.71 \dots [\text{MeV}]$$

よって、150MeVの電子線を用いた場合には 145MeV以上の光子の放出により  $\pi^0$  生成は可能であるといえる。

### 2.3 電磁シャワー

物質に高エネルギーの電子や光子が入射すると、電子は制動放射により光子を放出し、光子は対生成によって電子陽電子対を生成する。これらの過程が繰り返されることによって粒子数は増大し、右図のようなシャワーが形成される。粒子数が増大するにつれ粒子あたりの持つエネルギーは小さくなり、粒子を作ることができなくなって物質に吸収されたりする。

このシャワーの拡がりを表す単位として放射長( $X_0$ )とモリエール半径( $R_M$ )がある。放射長は入射粒子のエネルギーが  $1/e$  になる縦方向の深さで

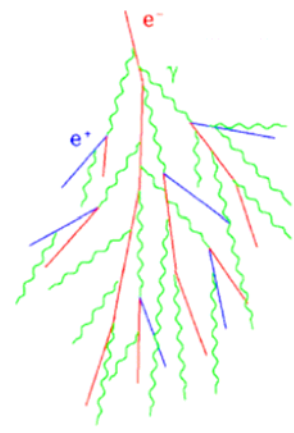


図 2.2 電磁シャワー

$$X_0 = \frac{716.4 \text{ g/cm}^{-2} * A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$

と表される。A は質量、Z は原子番号である。そのときの横の広がりはモリエール半径で表され

$$R_M = \frac{E_s}{E_c} X_0$$

である。Esはスケールエネルギー21.2MeV、Ecは臨界エネルギーである。

## 2.4 GEANT 4

GEANT 4 は粒子と物質の相互作用のシミュレーションを行うためのソフトウェアである。このシミュレーションは、測定器に入射する粒子を、測定器の幾何学的な配置や材質などに応じてどのような物理反応が起きるかを追跡していき、反応の起きる様子を統計的に再現するというものである。

GEANT4 は高エネルギー実験の分野で 1970 年代から使われていた GEANT3 の後継として開発された。しかし、実験装置の規模の拡大、装置の複雑化などから、新しい機能を盛り込んだシミュレーションプログラムの開発が徐々に難しくなっていき、ついに 1994 年に高エネルギー加速器研究機構 (KEK) をはじめとする日本の高エネルギー研究機関の研究者とヨーロッパの高エネルギー実験研究所である CERN の研究者が中心になって Geant4 の共同開発が始まった。GEANT4 ではオブジェクト指向言語の C++ が使われるようになり、1998 年に ver0.0 がリリースされて以降、バージョンアップが繰り返されている。現在では従来の加速器を用いた高エネルギー実験だけでなく、人工衛星や放射線医学、半導体製造などの分野でも応用されるようになっている。

GEANT 4 はオブジェクト指向にもとづいたプログラムであり、ユーザーはプログラムの全てを知る必要はない。GEANT でユーザーがしなければならないことはおおまかに、検出器などの物体の構造情報、扱う粒子の種類、その粒子に関する相互作用などの情報を入力することである。GEANT 4 はそれらの情報を考慮しながら、粒子の運動エネルギーが 0 になる、相互作用により消滅する、ユーザーが設定した空間の果てに到達する、のいずれかに該当するまで粒子を移動させる。

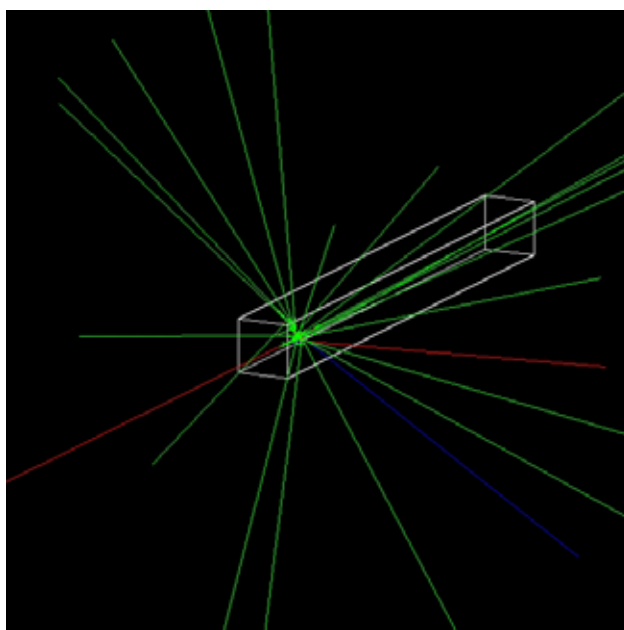


図 2.3 GEANT シミュレーションの例  
電子線（赤色）が結晶に入り、光子（緑色）が出てくる様子

物体を有感な検出器として登録することにより、粒子の位置、エネルギーの変化や生成された 2 次粒子の情報など検出器内のさまざまな情報を引き出すことができる。

今研究では、バージョン 4.5.2 の GEANT を使い、タンゲステン酸鉛 (PWO) 結晶を 36 本配置して有感にし、シミュレーションを行った。



### 3 . 実験及びシミュレーション

この章ではREFERで行われた<sup>0</sup>中間子生成実験とGEANTシミュレーションの概要について説明する。REFER (Relativistic Electron Facility for Education and Research) とは広島大学にある超高速電子周回装置である。隣接する放射光施設のマイクロトロンから入射した 150MeVの電子線を周回させる、周長約 13.8mの電子リングでできている。今実験では付随する電子線の引き出しラインから取り出した電子線を使用した。

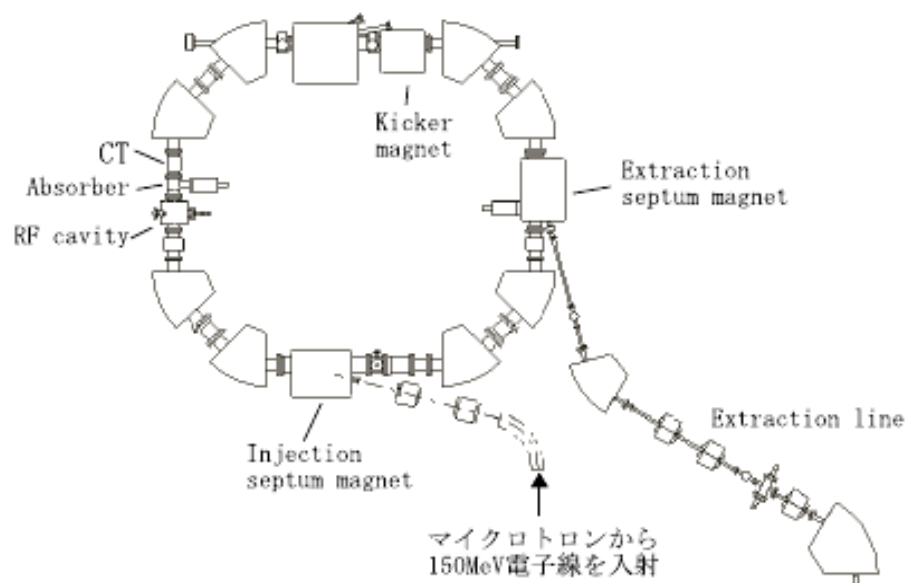


図 3.1 REFER 概略図

#### 3.1 粒子検出器

##### 光電子増倍管 (PMT)

光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube) は光センサの中でも極めて高感度、高速応答な検出器である。光が光電面に入ると、光電効果により光電面から光電子が放出される。その光電子が加速、収束され、ダイノード二次電子が放出され電子数が増倍していく。最後にそれらの電子は陽極に収束され信号として出力される。

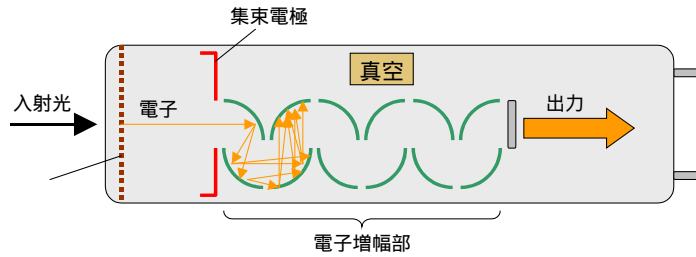


図 3.2 光電子増倍管

### シンチレーション検出器

物質に光子や電子が入射すると、物質内の電子が励起状態となり、これが基底状態に戻るときにそのエネルギー差を光として放出する。このような物質をシンチレータと言う。シンチレータには無機シンチレータと有機シンチレータがある。

無機シンチレータはほぼ透明な結晶であり、PWOやNaIがある。これらの特徴として原子番号が大きく密度が大きいため、物質内で粒子のエネルギーを閉じ込めやすい。

また、有機シンチレータにはプラスチックシンチレータ、液体シンチレータなどがある。これらの特徴として、無機シンチレータに比べて減衰時間が非常に速いため、頻度の高い測定に多く用いられる。今実験では標的への電子線の入射を検出するために4種のプラスチックシンチレータを用いた。

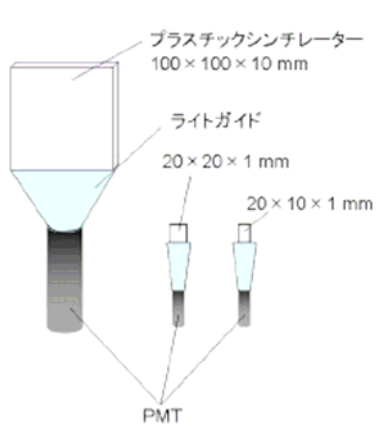


図 3.3 シンチレータ

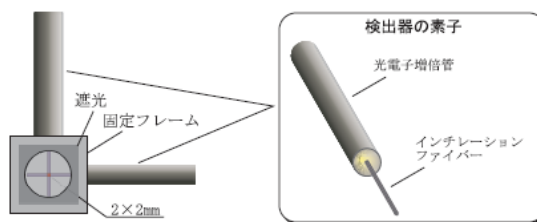


図 3.4 フィンガーカウンタ

### PWO電磁カロリメーター

シンチレータの中で、粒子のエネルギーを測定するのに用いられるものをカロリメーターと呼ぶ。光子や電子が物質中で作る電磁シャワーを閉じ込めることにより入射粒子の

エネルギーを測ることができる。シャワーを止めるには密度の高い物質が適しており、PWOなどの無機シンチレータが使われる。

タングステン酸鉛結晶 ( $\text{PbWO}_4$ 、通称PWO) は透明な結晶で、下表のように他の無機シンチレータ材と比べ密度が高いため、結晶内での粒子の拡がりや抑えられ、減衰時間も短いため頻度の高い計測を行うことができる。欠点として、発光量が少ないために高エネルギー実験以外にあまり適さないことが挙げられる。

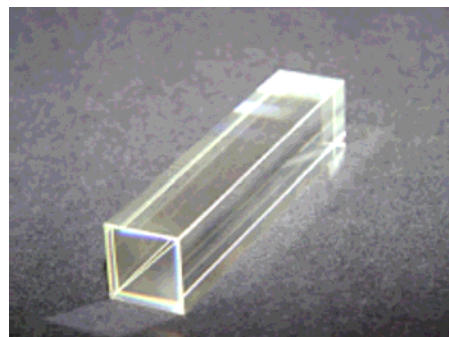


図 3.5 鉛タングステン酸結晶

物質	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	放射長 [cm]	減衰時間 [ns]	モリエール半径 [cm]	相対発光量 [1/NaI]
PWO	8.28	0.89	5 ~ 15	2.0	0.001
BGO	7.13	1.12	300	2.4	0.15
NaI	3.67	2.59	250	4.5	1.00
CsI	4.53	1.85	565	3.8	0.40

表 3.1 無機結晶シンチレータの性質

今実験では  $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 20\text{cm}$  と  $2.2\text{cm} \times 2.2\text{cm} \times 18\text{cm}$  の PWO 結晶をそれぞれ 18 本ずつ用いる。この結晶にシンチレーション光を閉じ込めるためのアルミホイルを巻き、PMT をつけて電磁カロリメーターを作り、 $3 \times 3$  の配列に並べる。

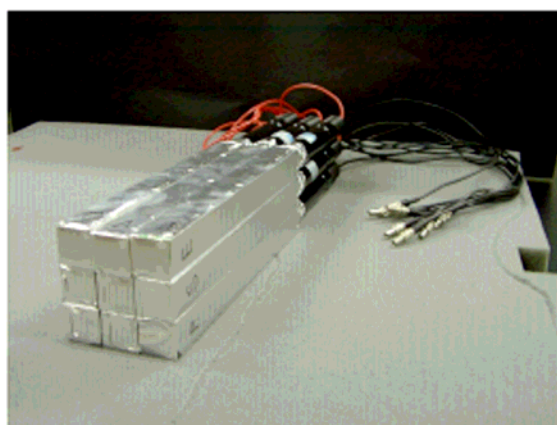


図 3.6 PWO 電磁カロリメーター

## 3.2 測定用モジュール

### NIM

NIM とは原子核・素粒子実験などに用いられる核計測モジュール( Nuclear Instrument Modules ) の略称である。これらのモジュールは端子をケーブルでつなぐだけで信号処理ができるように規格化されている。これを NIM 規格といい、モジュール間で扱われる信号を NIM 信号という。

### Discriminator

入力された信号の波高が設定した閾値 ( threshold ) より高い場合に、一定の時間幅のデジタル信号を出力する波高弁別回路である。

### Coincidence

複数の入力端子とそれぞれに対応するスイッチ、Veto 信号の入力端子をもつ同時計数回路である。スイッチが ON になっている端子全てに同時に NIM 信号が入力されている間に信号を出す。ただし Veto 信号が入っている間は全ての端子に信号が入っても、信号は出力されない。

### Gate Generator

入力された論理パルスを任意の幅に広げたり、任意の時間遅らせて出力することができる。また ADC の gate を作るのに使われる。

### CAMAC

CAMAC( Computer Automated Measurement And Control )とはコンピュータと制御、測定系とのデータ交換に対する規格で、高エネルギー分野などで大量のデータを効率よく収集するために用いられている。CAMAC 規格に基づいた CAMAC モジュール は NIM 規格との互換性があり、NIM 信号を入力することができる。以下の ADC、TDC も CAMAC モジュールである。

### ADC ( Analog to Digital Converter )

入力されたアナログ信号をデジタル信号に変換するモジュールで、Gate 端子に信号が入っている間の入力信号の積分値をデジタル信号に変換する。波高情報をデジタル信号に変換する Peak Sensitive ADC と、パルスを積分して電荷量をデジタル信号に変換する Charge Sensitive ADC がある。また ADC は、入力パルスがない時でも値を持つ。これは Pedestal と呼ばれるオフセット値で、これを引いたものが真の値である。

## TDC (Time to Digital Converter)

START 信号入力端子と複数の STOP 信号入力端子を持ち、START 信号入力端子に信号が入ってから各々の端子に STOP 信号が入るまでの時間差をデジタル信号に変換する。測定できる最大の時間を過ぎても STOP 信号が入らなかった場合は、その最大の時間を出力する。

### 3.3 $^{0}$ 中間子生成断面積測定実験

下の図はREFERにて行った  $^{0}$ 中間子生成実験のセットアップ図である。

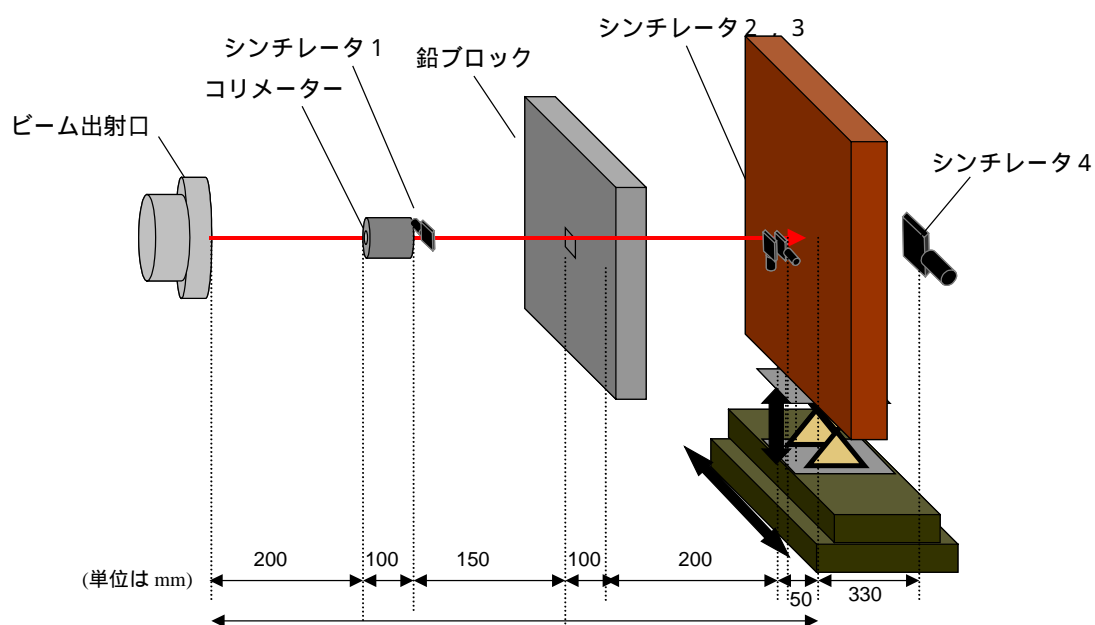


図 3.7  $^{0}$ 中間子生成実験セットアップ図

ビームを細く絞るために出射口から 200mm 下流に内径 4mm のコリメータを、他の粒子の入射を防ぐため 450mm 下流に鉛ブロックを積んだ。また図の位置に有効領域が  $10 \times 10$ mm のシンチレータ、 $20 \times 10$ mm のシンチレータ 2, 3、 $100 \times 100$ mm のシンチレータ 4 を置いた。

また、木箱の中に 9 本組みのカロリメーターを上下左右に向い合わせに配置し、中心に  $1 \times 1$  cm、奥行き 2 cm の鉄標的を置いた。

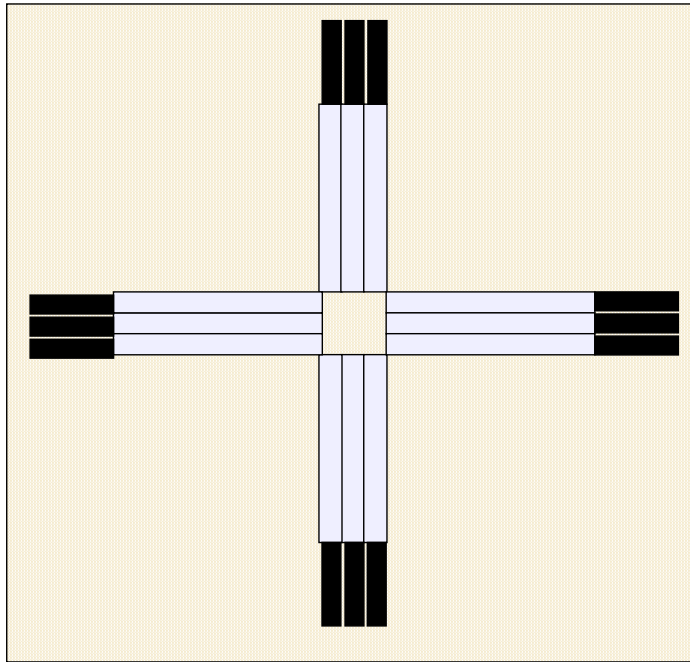


図 3.8 正面からの PWO 電磁カロリメーター設置図

9 本組みカロリメーターを、ビームの発射口に向かって上から時計回りに Top, Right, Bottom, Left と呼ぶ。Top, Bottom アームは  $2.2 \text{ cm} \times 18 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$ 、Right, Left アームは  $2 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  の PWO 結晶を用いる。各アームの中心 PWO と標的を置く原点との距離を  $3 \text{ cm}$  に合わせるため Right, Left アームを中心方向に  $0.3 \text{ cm}$  近づけた。

次ページのような回路を組み測定を行った。

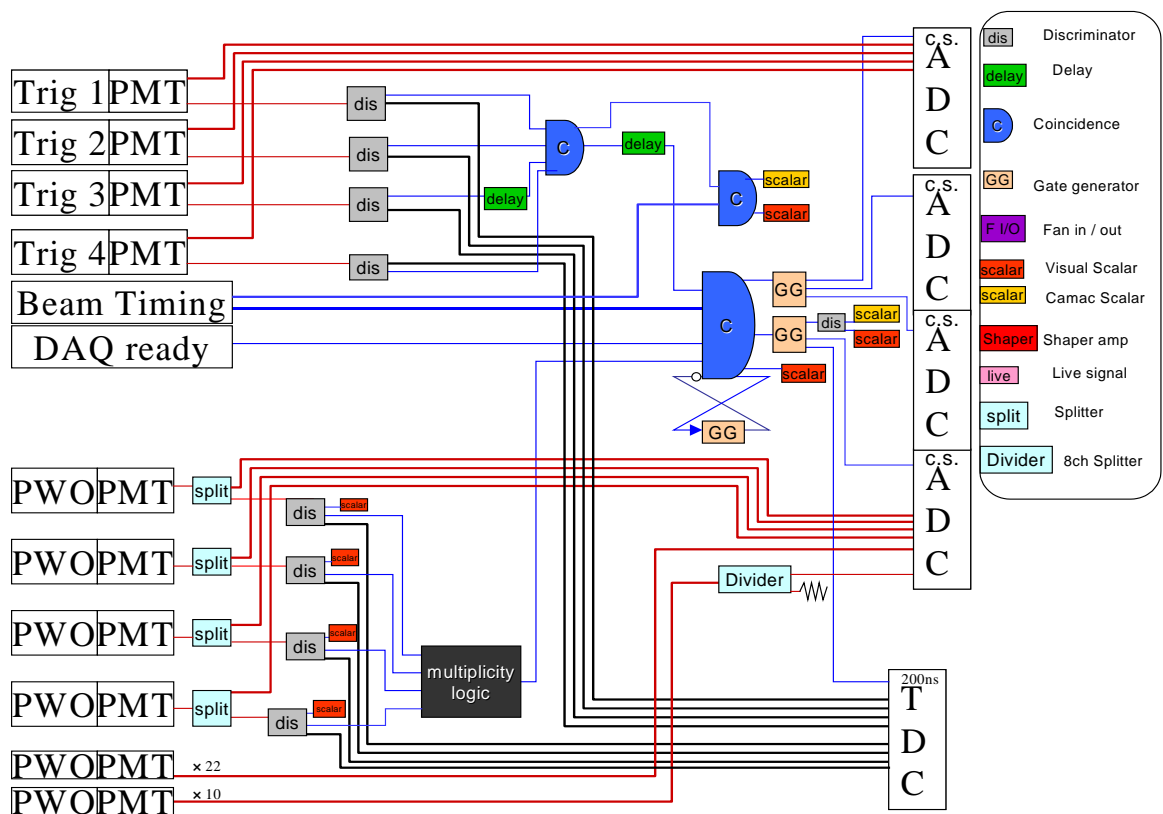


图 3.9  $^0$ 生成实验回路图

### 3.4 GEANT4 シミュレーション

#### PWO エネルギーピークの導出

実験において各 PWO から得られた ADC 分布をエネルギー分布にするには、ADC のチャンネルが何 MeV に対応しているかを調べる必要がある。ここでシミュレーションを行い、PWO 結晶に電子線を入射してピーク値を求め、ADC でのピーク値と一致させてエネルギー分布への変換係数を求めた。

$2.0 \times 2.0 \times 20 \text{ cm}$ 、 $2.2 \times 2.2 \times 18 \text{ cm}$ の二種の PWO 結晶に対し、80 cm 離れた正面から 150 MeV 電子線を照射し、エネルギー損失のピーク値を求めた。

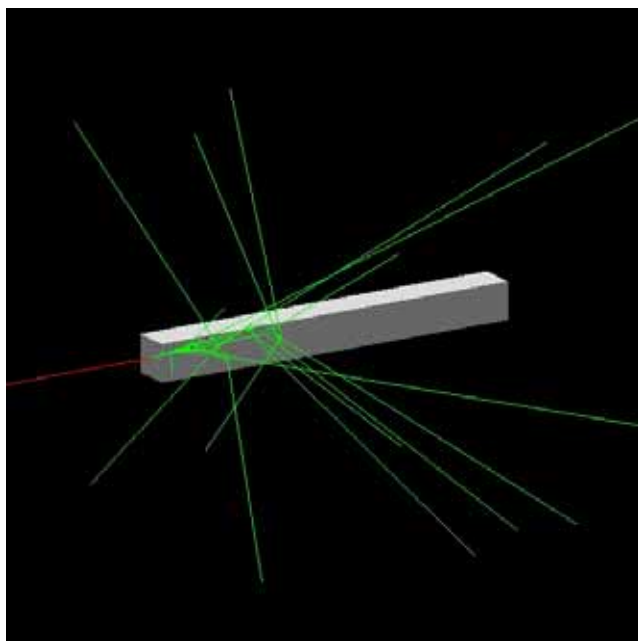


図 3.10 GEANT4 において PWO 結晶に 150 MeV の電子を入射した様子

次に  $3 \times 3$  の配列に並べた PWO の中心に、150 MeV の電子線を入射するシミュレーションを行った。



REFER での実験と同様のセットアップで電磁カロリメーターと標的を GEANT 上に配置した。シミュレーションでは検出器単独での性能を測るために、鉛ブロック、コリメータ、シンチレータは配置していない。

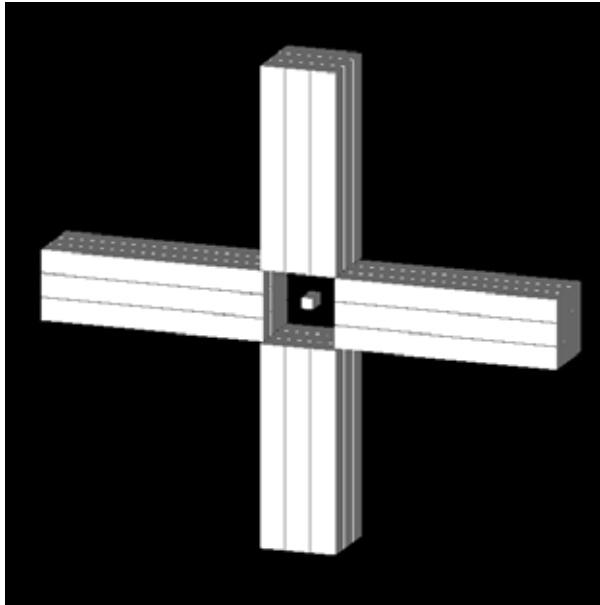


図 3.11 GEANT 4 シミュレーションにおける  
 $^0$ 中間子スペクトロメーター

GEANT のシミュレーション内ではあらかじめ登録した相互作用のみが起こる。今シミュレーションでは起こり得る電磁相互作用を、電子・陽電子において電離、制動放射、多重散乱、電子対消滅、光子においては光電効果、コンプトン散乱、電子対生成とした。

#### 検出効率の導出

検出効率とは、粒子が検出器を通り、入射した粒子が検出される割合をあらわす。原点から全方向にランダムに粒子が飛び出す場合、立体角を考慮すると粒子の 3 分の 2 ほどが PWO に当たると考えられる。しかし標的である鉄や空気との相互作用により PWO に達するまでに粒子の方向や種類、エネルギーなどの変化が起こるものもある。また、たとえ PWO に入射しても相互作用をしないで通過する粒子も考えられ、これはシミュレーションでも PWO 内でエネルギーを落とさないため検出されない。

粒子を  $^0$  に設定し、0 MeV の運動量で GEANT 上に配置すると自然に崩壊して反対方向に 2 光子が飛び出す。以下の条件でそれぞれ 10 万イベントのデータを集めた。

- ・真空中で原点に  $^0$  を配置
- ・空気中で原点に  $^0$  を配置
- ・標的中で原点に  $^0$  を配置
- ・標的中のランダムな位置に  $^0$  を配置

実際の実験では、2本以上のアームの中心 PWO で 4 MeV 以上のエネルギー損失がなければ計測されないように閾値を設定している。この閾値のない検出器と閾値を持つ検出器の2通りでこれらの条件での粒子検出イベント数を求めた。

また、実際の実験ではバックグラウンドと混ざってしまい、低エネルギーのものは  $^0$  と判断できなくなる。よって検出されたイベント中、バックグラウンドと混ざっても  $^0$  であると考えられる条件を設定してカウントし、 $^0$  の検出効率として求めた。

#### バックグラウンドの測定

$^0$  中間子を検出する上でバックグラウンドの見積もりは重要である。今実験で使われた4アームのPWOスペクトロメーターでは、 $^0$  が生成されたイベントと区別できないエネルギー分布を持つバックグラウンドを、向かい合うアームのエネルギー分布と隣接するアームのエネルギー分布とを比べることにより見積もることができる。今研究ではシミュレーションでもバックグラウンドを見積もり、実験での見積もりとの比較、考察を行う。またバックグラウンドで生成されるイベントの中の  $^0$  に近い分布のイベントから、 $^0$  であるかどうか判別できる断面積の限界を求めた。

## 4 . 結果

### PWO エネルギーピークの導出

2 種のサイズの PWO 結晶に 150MeV 電子を入射するシミュレーションを 1 万イベント行い、以下のようにヒストグラム化して関数でフィットし、ピーク値を求めた。

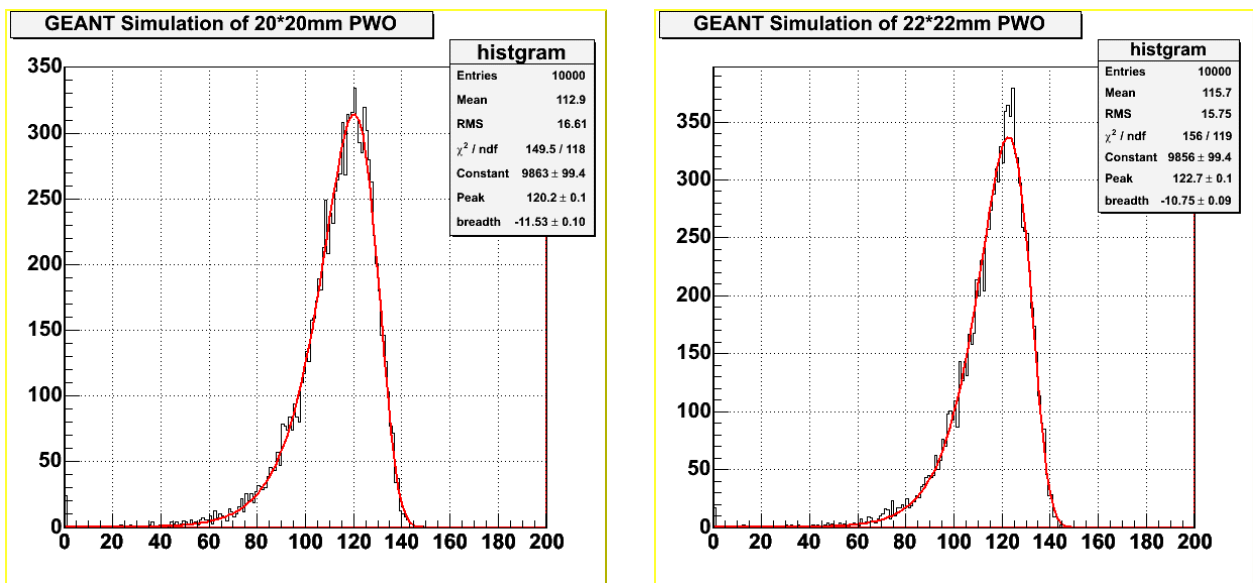


図 4.1 GEANT による PWO 結晶のエネルギー分布  
(左) 2.0 × 2.0 × 20cm (右) 2.2 × 2.2 × 18cm

フィットに使った関数は

$$f(E) = C \frac{\exp\left(\frac{a-E}{b} - \exp\left(\frac{a-E}{b}\right)\right)}{|b|}$$

であり、 $a$  はピーク値を表す。2.0 × 2.0 × 20cm の結晶で  $a = 120.2\text{MeV}$ 、2.2 × 2.2 × 18cm の結晶で  $a = 122.7\text{MeV}$  となった。<sup>0</sup> 生成実験においてこのピーク値と、使用する 36 本の PWO のピーク値を重ねてエネルギー分布に変換する変換係数を求めた。

次に  $2.0 \times 2.0 \times 20\text{cm}$  の PWO 結晶を  $3 \times 3$  の配列に組んだカロリメーターに対して同様に電子線を入射してシミュレーションを行った。結果、ピーク値は  $142.5\text{MeV}$  となった。

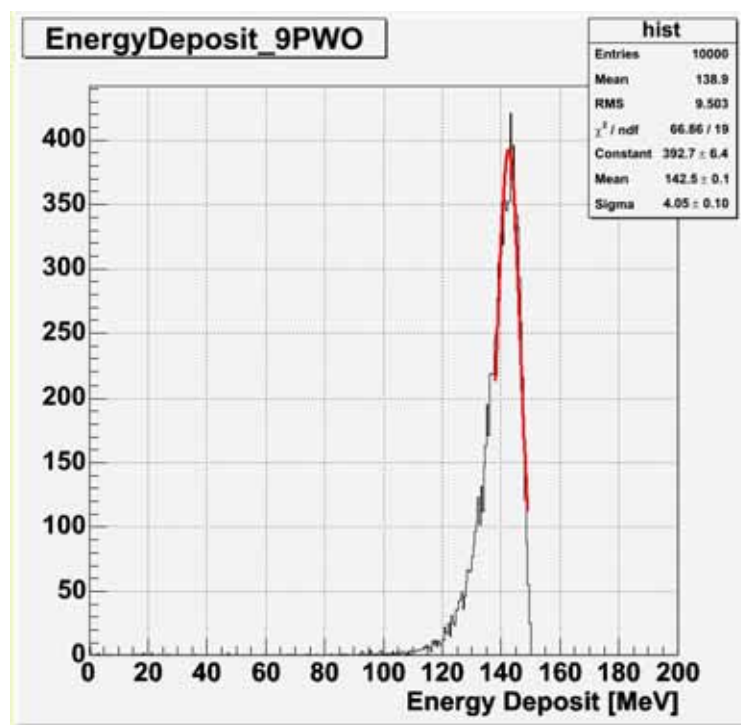


図 4.2 GEANT による 9 本組 PWO 結晶のエネルギー分布

## 検出効率の導出

以下の条件でシミュレーションを 10 万イベント行い、粒子検出イベント数を求めた。

- ・真空中で原点に  $^0$  を配置
- ・空気中で原点に  $^0$  を配置
- ・標的中で原点に  $^0$  を配置
- ・標的中のランダムな位置に  $^0$  を配置

まずは閾値のない状態でのシミュレーションを行った。結果が次ページの表である。エネルギー損失があったことをヒットしたと表現することにして項目について説明すると、4arm,3arm などはヒットのあったアームの本数による区分、その下の項目はヒットのあったアームによる区分である。T,R,B,L はそれぞれ Top,Right,Bottom,Left のアームを表す。2arm ではアームによる区分の前に、symmetry (対称な位置、Top と Bottom,Right と Left の 2 通り), asymmetry (非対称な位置、Top と Right,Bottom と Left など計 4 通り) で区分される。Hit は 1arm から 4arm までの検出イベントの和であり noHit は全イベントから Hit を引いたものである。

また、その次のページでは各中心 PWO に 4 MeV の閾値を設定したシミュレーションの結果を示した。ここでは各中心 PWO に閾値以上のエネルギー損失があったものをヒットとした。水色で示した部分は、中心で閾値以上の損失があったものの 1arm のみのヒットであったため、noHit として扱われたイベントである

	真空中生成	空気中生成	標的中生成	標的中 ランダム生成
4arm =	4579	4533	9121	7661
3arm =	16659	16746	22565	20731
TRB =	4406	4397	6041	5465
RBL =	4127	4025	5333	4886
BLT =	4264	4280	5899	5493
LTR =	3862	4044	5292	4887
2arm =	25583	25438	28392	27168
symmetry =	21015	20907	20231	18307
TB =	11757	11748	11290	10295
RL =	9258	9159	8941	8012
assymetry =	4568	4531	8161	8861
TR =	1136	1120	2020	2156
RB =	1156	1185	2019	2259
BL =	1149	1069	2033	2200
LT =	1127	1157	2089	2246
1arm =	11709	11681	13882	16032
T =	3084	3114	3782	4267
R =	2791	2784	3261	3723
B =	3149	3051	3629	4248
L =	2685	2732	3210	3794
Hit =	58530	58398	73960	71592
noHit =	41470	41602	26040	28408

表 4.1 閾値なしでの各アームの粒子検出イベント数

	真空中生成	空気中生成	標的中生成	標的中 ランダム生成
4arm =	0	0	0	0
3arm =	9	15	29	16
TRB =	0	4	5	2
RBL =	0	5	10	5
BLT =	3	4	7	3
LTR =	6	2	7	6
2arm =	6406	6419	6992	4425
symmetry =	6396	6398	6952	4368
TB =	3438	3475	3810	2323
RL =	2958	2923	3142	2045
assymetry =	10	21	40	57
TR =	2	4	12	15
RB =	2	6	10	9
BL =	2	4	9	17
LT =	4	7	9	16
1arm =	5158	5279	8178	12167
T =	1351	1310	2191	3226
R =	1205	1178	1916	2893
B =	1390	1446	2210	3177
L =	1212	1345	1861	2871
Hit =	6415	6434	7021	4441
noHit =	93585	93566	92979	95559

表 4.2 閾値あり (4MeV) での各アームの粒子検出イベント数

次に、 $\pi^0$ は反対方向に崩壊するため、閾値ありのイベントの中で対向するアームでの相関を求めた。実験の状況と最も近いと思われる標的中でランダムに $\pi^0$ が生成されたシミュレーションから、 $\pi^0$ として数えるイベントの抽出条件を考える。

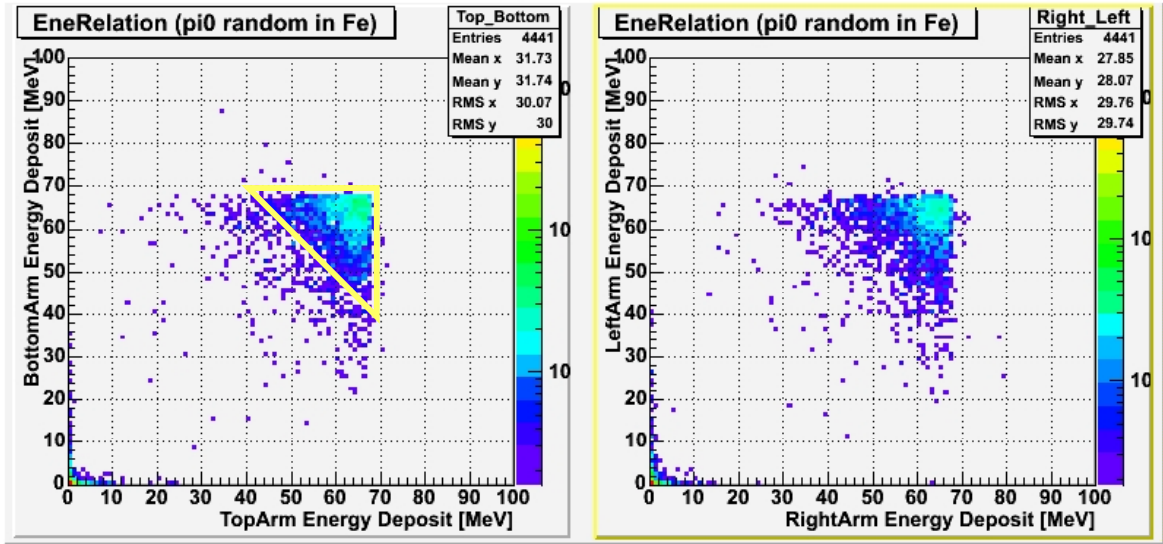


図 4.2 標的中でランダムに $\pi^0$ 生成を行ったシミュレーションでの対向アームのエネルギー相関

両アームの値が近く、イベントが多く見られることから両アームの合計が110MeV以上、各アームが70MeV以下という条件でまず抽出する。範囲は上図の三角で囲った部分である。この条件で抽出すると、(1915+1630)/4441は80%ほどになるのでこの条件で他のシミュレーションも抽出した。

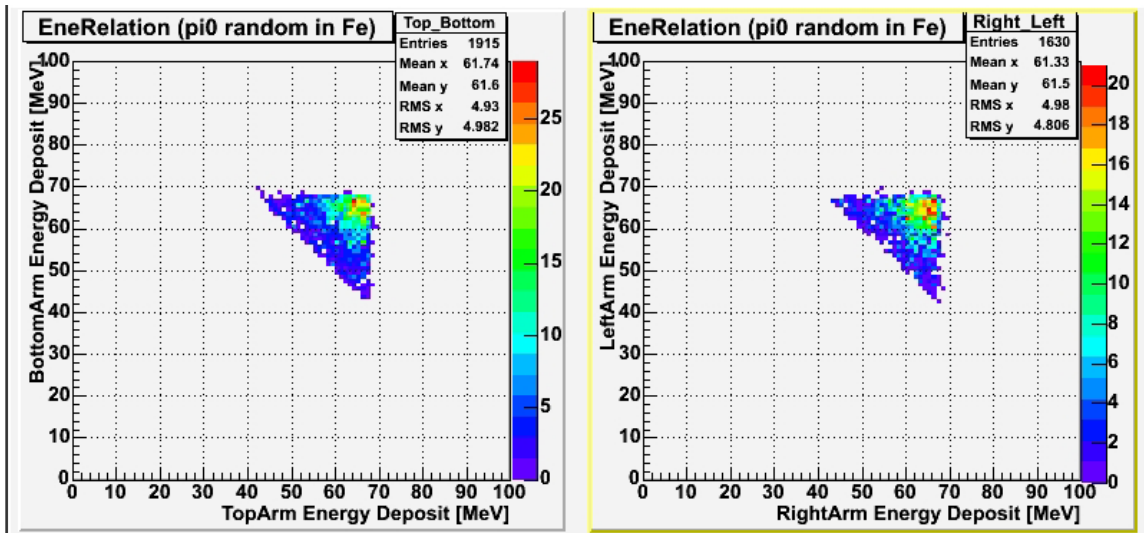


図 4.3 図 4.2 からアーム合計110MeV以上、各アーム70MeV以下で抽出したイベントのエネルギー相関



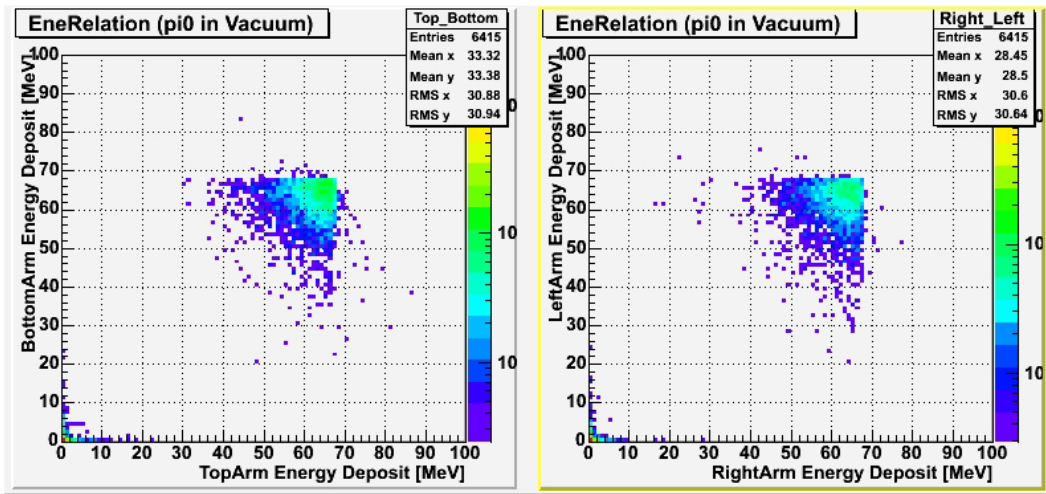


図 4.4 真空中での  $\pi^0$  生成の対向アームエネルギー相関

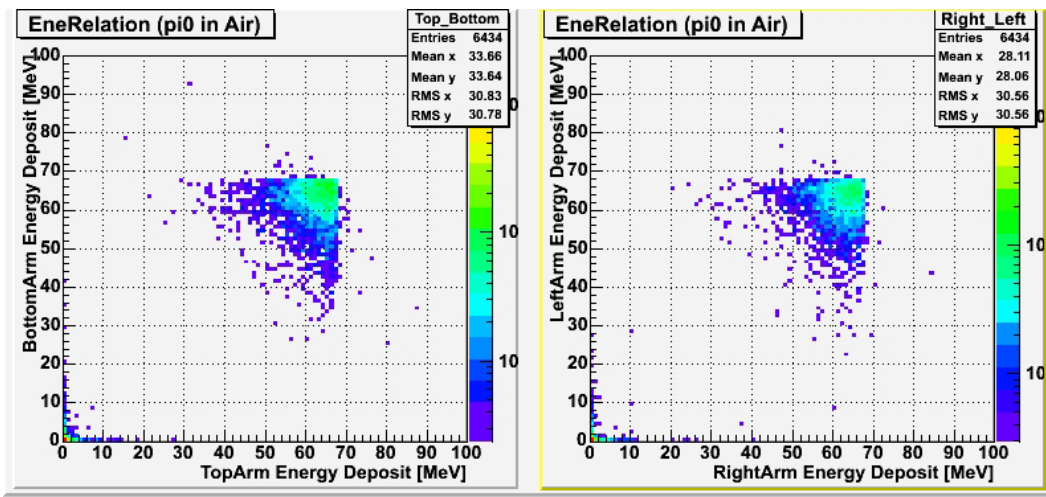


図 4.5 空気中での  $\pi^0$  生成の対向アームエネルギー相関

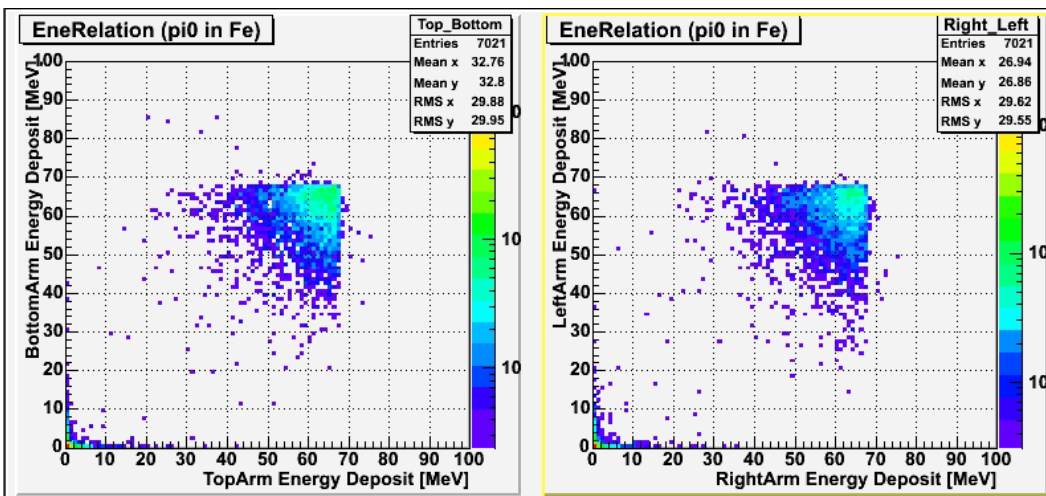


図 4.6 鉄標的中の  $\pi^0$  生成の対向アームエネルギー相関

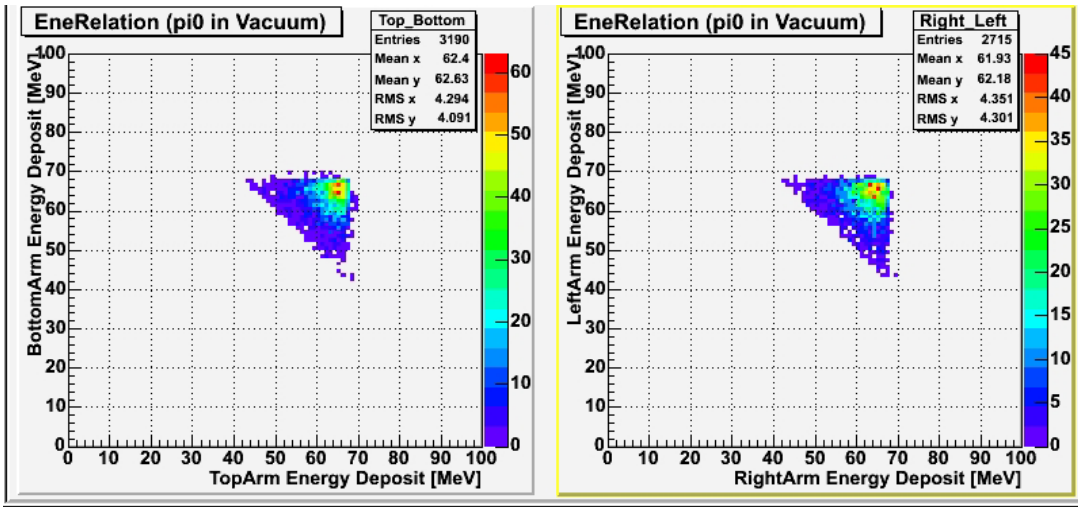


図 4.7 真空中での  $\pi^0$  生成の対向アームエネルギー相関 (抽出後)

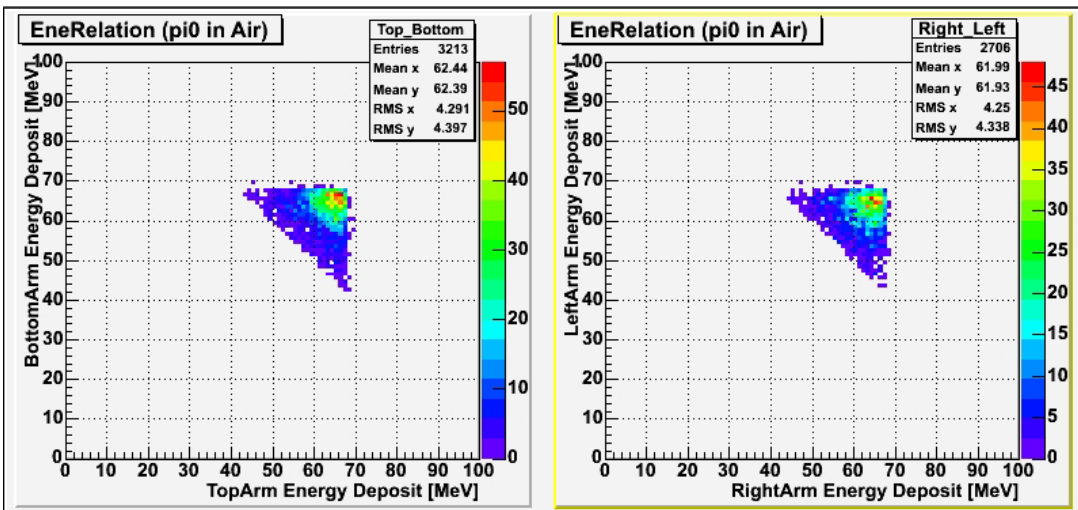


図 4.8 真空中での  $\pi^0$  生成の対向アームエネルギー相関 (抽出後)

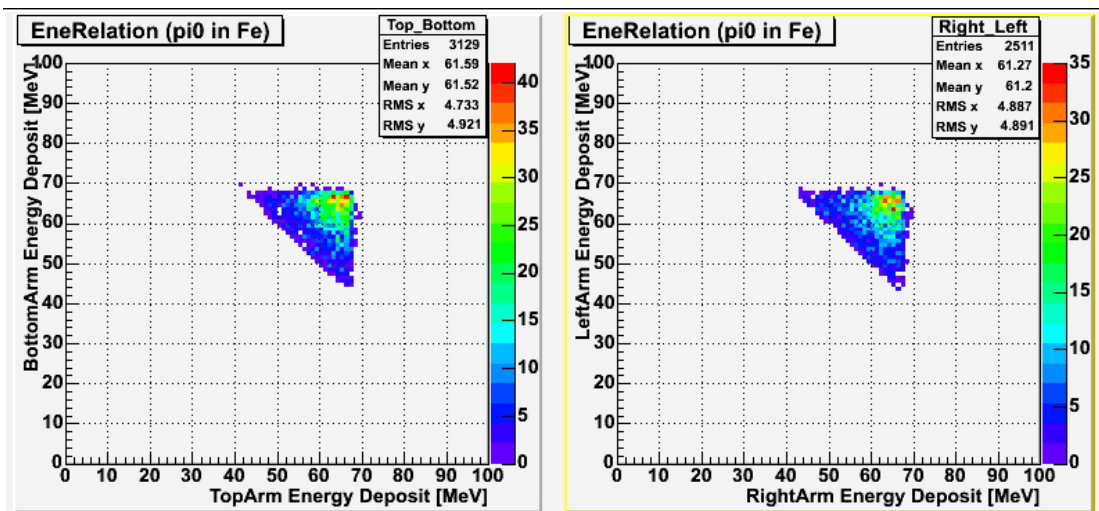


図 4.9 真空中での  $\pi^0$  生成の対向アームエネルギー相関 (抽出後)

各条件について求めた検出効率は以下の通りである。

真空中生成	5.91%
空気中生成	5.92%
標的中生成	5.64%
標的中ランダム生成	3.55%

$\pi^0$  から出る光子がPWO内で大きくエネルギーを落とすときには中心PWOにもいくらかのエネルギーが入り込むと考えていた。しかしシミュレーションにて、端のPWOで制動放射を起こして中心PWOにエネルギーを落とさないイベントが多く見られた。このために多くの  $\pi^0$  イベントを逃していると思われるので、各アーム全てのPWOにトリガーをつけ、4MeVの閾値を設けて抽出を行い、効率を求めた。

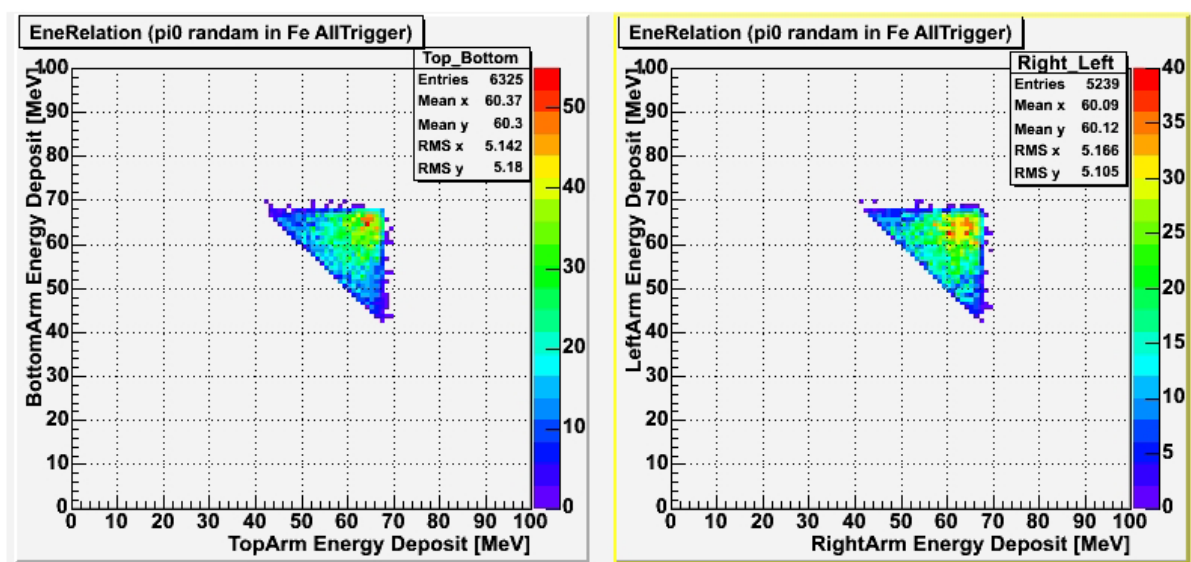


図 4.10 全てのPWOをトリガーにしたときの標的中でのランダム  $\pi^0$  生成の対向アームエネルギー相関（抽出後）

効率は格段に上がり以下のような結果となった。

真空中生成	14.49%
空気中生成	14.65%
標的中生成	12.78%
標的中ランダム生成	11.56%

## バックグラウンドイベント生成

鉄標的に 150MeV 電子線を入射するシミュレーションを 10 万イベント行った。このとき電子線を標的中心に向けて発射する場合と、標的前面のランダムな位置に向けて発射する場合と 2 通りの測定を行った。

最初に、標的から出される粒子に対する PW0 の粒子検出数を求めた。

	閾値なし		閾値あり	
	150MeV電子線	電子線 ランダム発射	150MeV電子線	電子線 ランダム発射
4arm =	10387	7363	0	0
3arm =	22880	17769	0	0
TRB =	6087	4933	0	0
RBL =	5323	3978	0	0
BLT =	6284	4736	0	0
LTR =	5186	4122	0	0
2arm =	28918	23113	8	6
symmetry =	10314	7531	2	1
TB =	5901	4285	1	0
RL =	4413	3246	1	1
asymmetry =	18604	15582	6	5
TR =	4667	3881	0	0
RB =	4588	3966	2	1
BL =	4687	3850	0	1
LT =	4662	3885	4	3
1arm =	24694	20936	1211	1087
T =	6536	5562	318	267
R =	5773	4858	276	272
B =	6688	5624	313	306
L =	5697	4892	304	242
Hit =	86879	69181	8	6
noHit =	13121	30819	99992	99994

表 4.3 150MeV 電子線を鉄に入射したときの粒子検出イベント数

次に各アームのスペクトルを閾値の有無で2通り求めた。

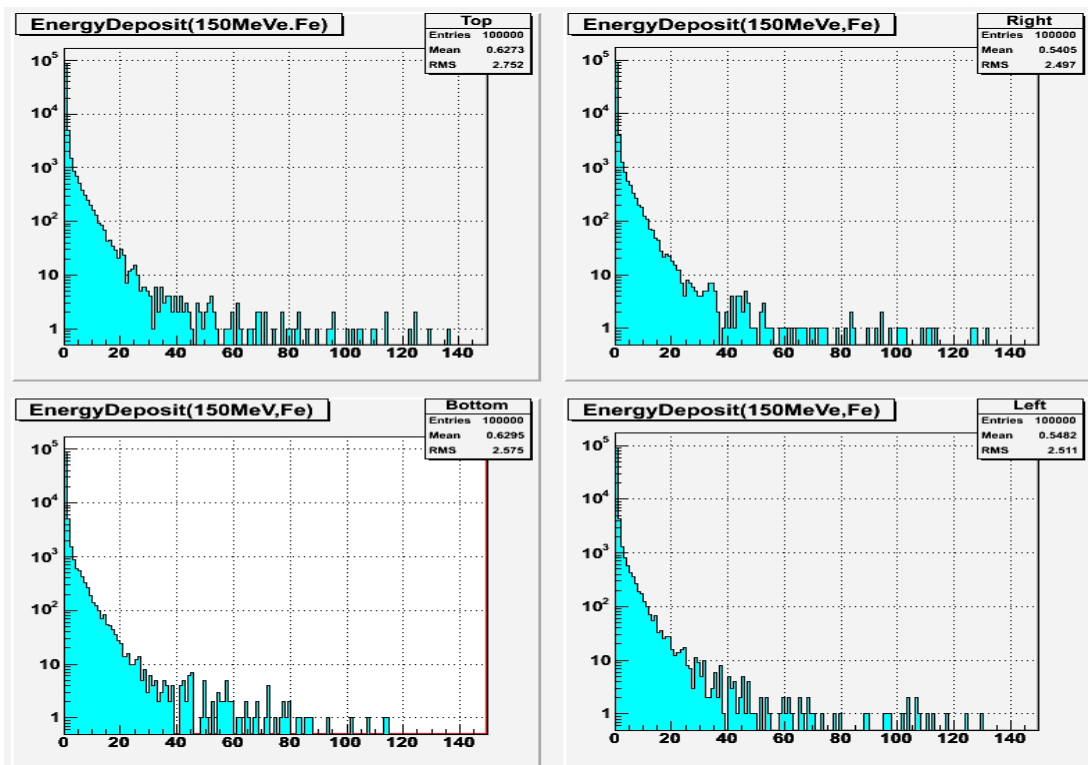


図 4.11 閾値なしでのアームスペクトル

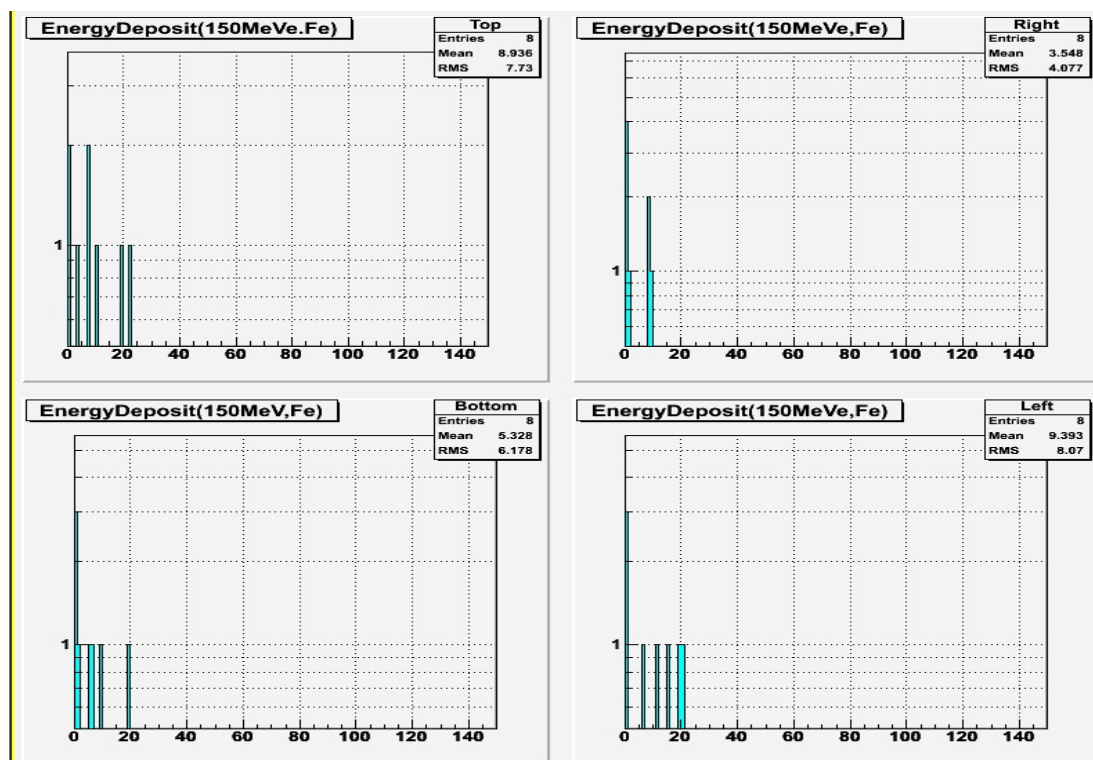


図 4.12 閾値ありでのアームスペクトル

閾値をつけることによってイベント数が激減している様子がわかる。鉄標的で散乱された粒子では、エネルギーが多くの粒子に分散され、2本以上の中心 PWO で 4 MeV 以上のエネルギーを損失することは難しいと考えられる。

対向する 2 アームの合計が 110MeV以上、各アーム 70MeV以下のイベントを  $\theta$  とした。この  $\theta$  の範囲にバックグラウンドで達したイベントの数から、 $\theta$  と判断できる断面積の限界を求めた。

$$N = \theta \times I \times n \times \Delta x$$

N : イベント数

I : 単位面積あたりの総ビーム数

n : 単位面積あたりの核子数

$\theta$  とされる範囲にバックグラウンドは 1 イベントも起こらなかったので  $N = 0$ 。

$$\theta = \frac{N}{I \times n \times \Delta x} \leq \frac{1}{10^5 \times 94.7 \times 10^{23}} = 1.056 \times 10^{-31}$$

よって  $1.056 \times 10^{-31} [\text{cm}^2]$  以下の断面積は測ることができない。

<sup>0</sup>生成実験結果との比較のため、実際の実験の10分の1にあたる1560万イベントのシミュレーションを行った。対向アーム、隣接するアームのエネルギー相関を求めると下の図のようになった。

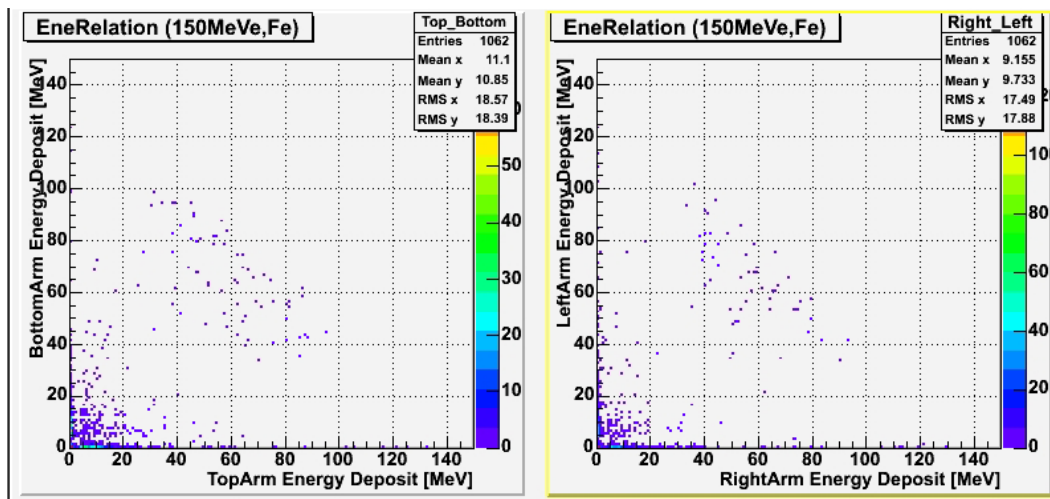


図 4.13 対向アームにおけるエネルギー相関

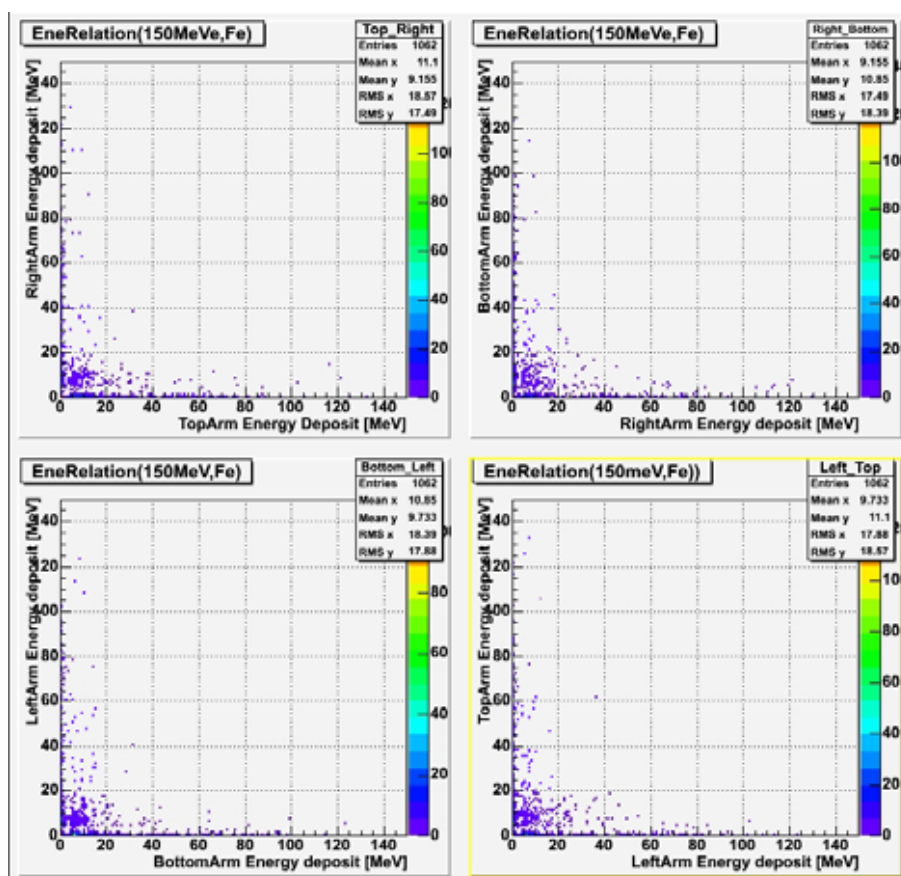


図 4.14 隣接するアームのエネルギー相関

対向アームのエネルギー相関図において<sup>0</sup>であると決めた部分に、標本数が 10 万イベントのときはなかった多数のイベントが存在した。これは 150MeV電子線により、電磁相互作用のみでこのような分布のイベントが起こったことを示す。しかし、この 10 倍の標本数で行った<sup>0</sup>中間子生成実験にはこのようなイベントは存在しなかった。

GEANT では 1 つ 1 つのイベントに対し、どのような反応過程でエネルギーを失っていたかを調べることができるが、このシミュレーションにおいては生成過程を記録するようにはしていなかったため、現時点ではわかっていない。また、これらのイベントは 100 万回に 1 回ほどの少ない頻度であり、このようなイベントを特定し、多く採集することは私の GEANT に対する現時点での理解度では難しい。

GEANT の理解を深めるとともに、シミュレーション内でのこのようなイベントを採取し、その生成過程を理解することが次の課題である。



## 5 . 結論

PWO 電磁カロリメーターのエネルギーピークは  $2.0 \times 2.0 \times 2.0 \text{ cm}$  で  $120.2 \text{ MeV}$ 、 $2.2 \times 2.2 \times 18 \text{ cm}$  で  $122.7 \text{ MeV}$  だった。これは入射エネルギーの約 8 割にあたる。また 9 本の PWO を組にしたカロリメーターのピークは  $142.5 \text{ MeV}$  であり、1 本の PWO で入射エネルギーの約 9 割強を閉じ込めることができ PWO のカロリメーターとしての高い性能をよくあらわしている。

実際の実験に最も近いと思われる、鉄標的中のランダムな位置で  $\pi^0$  を発生させたシミュレーションでの検出効率は  $3.55\%$  であった。ここでトリガー条件を、 $4.0 \text{ MeV}$  以上のヒットのある PWO を持つアームが 2 本以上あるという条件に緩和すると、検出効率は  $11.56\%$  まで跳ね上がることがわかった。

最後にバックグラウンド事象であるが、先に書いたとおりまだ考える余地があるので結論とするのは控え、今後の課題とする。

## 謝辞

杉立先生、志垣先生、本間先生には、本研究を行うにあたって数々のご助言やご指摘を頂きました。また研究室の先輩方にも日頃から質問に答えていただくなどして頂き、大変お世話になりました。皆様に助けていただきながらこうして論文を書き上げることができました。本当に有難うございました。

## 参考文献

平下賢一 平成十六年度広島大学修士論文

小原亮太 平成十三年度広島大学学士論文

浜松ホトニクス株式会社ホームページ <http://www.hpk.co.jp/>

高橋 徹 広島大学電子周回装置における教育研究

坂田博一 平成十七年度広島大学修士論文