

平成17年度修士論文

鉄核媒質中の
閾値近傍における中性 π 中間子生成実験

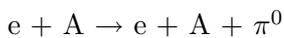
広島大学大学院理学研究科物理学専攻
クォーク物理学研究室
M042576 坂田博和

平成18年2月14日

概要

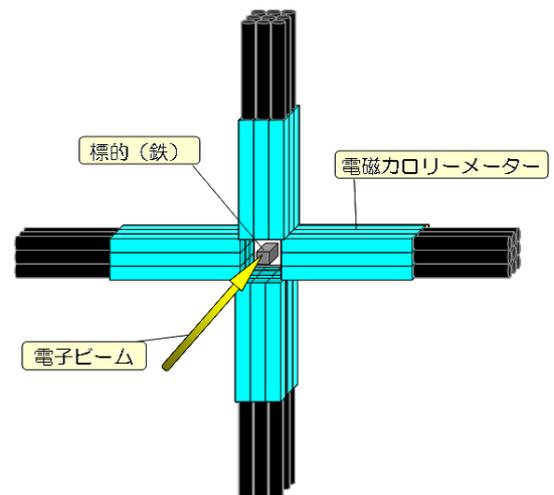
光子と核子の反応による荷電 π 中間子 (π^\pm) の生成断面積は、理論と実験において一致する結果が得られている。中性 π 中間子の生成断面積もまた、反応エネルギーが中性 π 中間子質量 ($135\text{MeV}/c^2$) よりも十分大きいエネルギー領域では、両者は一致している。しかしながら、中性 π 中間子が生成可能な閾値近傍のエネルギー領域においては理論と実験結果の相違が見られ、生成過程は完全に理解されてはいない。そのため、中性 π 中間子の閾値近傍における生成断面積の測定は、生成過程を理解する上で重要である。実際、本研究室においても、 150MeV の電子線を炭素標的核へ入射することによって中性 π 中間子の生成断面積を調べた結果、電子と核子の間において $0.07 \pm 0.04\mu\text{b}$ という結果が得られている。また他方で、粒子はカイラル対称性の破れによって質量を獲得していると考えられているが、核媒質中においてカイラル対称性の部分的回復を示唆する研究結果が報告されている。その観点からも核媒質中で生成された中性 π 中間子の質量を測定することも興味深い。

本研究では、鉄核媒質中における中性 π 中間子の生成断面積測定実験を、昨年引き続き広島大学の超高速電子周回装置 (Relativistic Electron Facility for Education and Research, REFER) にて 150MeV 電子線を用いて行った。電子線による核媒質中における中性 π 中間子の生成は、



という過程が考えられる。中性 π 中間子の寿命は 8.7×10^{-17} 秒であり、約 99% の割合で 2 つの光子へ崩壊する。また、入射粒子として 150MeV の電子線を用いたため、生成された π^0 はほぼ静止しており、崩壊による 2 つの光子は互いにほぼ反対方向へ放出される。

本実験は、高いアクセプタンスを実現することが出来る無機シンチレーター (PWO) を用いた粒子エネルギー測定器を、右図のように標的をはさむようにして配置し、 π^0 の崩壊による 2 つの光子を検出するものである。そして、得られたエネルギー分布より 150MeV 電子線による鉄核媒質中における π^0 の生成断面積の検証を行った。その結果、鉄標的核を使った本実験では、電子と核子の間における π^0 の生成断面積の上限値 $0.043 \pm 0.004\mu\text{b}$ が得られ、昨年度の炭素標的核を使った実験より得られた生成断面積 $0.07 \pm 0.04\mu\text{b}$ を再現しなかった。



目次

第1章	序論	5
1.1	素粒子	5
1.2	素粒子実験	6
1.3	中性 π 中間子 (π^0)	6
1.3.1	運動学的エネルギーしきい値	6
1.3.2	生成断面積	7
第2章	目的	9
2.1	研究目的	9
2.2	背景	9
2.3	本実験の概要	10
2.3.1	4 アーム検出器	11
2.3.2	標的選び	12
第3章	実験	15
3.1	実験装置	15
3.1.1	入射器系	15
3.1.2	検出器系	16
3.1.3	セットアップ系	19
3.1.4	回路系	22
3.1.5	読み出し系	23
3.2	実験方法	24
3.3	エネルギー較正測定	24
3.3.1	検出器の構成	24
3.3.2	読み出し回路の構成	25
3.3.3	測定結果	27
3.4	π^0 生成実験	30
3.4.1	検出器の構成	30
3.4.2	読み出し回路の構成	30
3.4.3	実験結果	31

第4章	解析	37
4.1	データ較正	37
4.1.1	エネルギー較正	37
4.1.2	飛行時間較正	42
4.2	イベント選択	44
4.2.1	プラスチックシンチレーション検出器のオーバーフローカット	44
4.2.2	ベトシンチレーション検出器によるイベント選択	53
4.2.3	2アームのカロリメーターにおける飛行時間差によるカット	54
4.3	考察	61
4.3.1	各アームのトリガー閾値の均一化	61
4.3.2	π^0 イベントのエネルギー範囲	62
4.3.3	結果	64
第5章	議論	65
第6章	まとめと展望	67

第1章 序論

この章では、「素粒子」についての基本的な説明と、一般的な「素粒子実験」の概要を述べる。その後、本研究の対象粒子である「中性 π 中間子」と、中性 π 中間子を生成可能なエネルギーしきい値と生成断面積について述べる。

1.1 素粒子

粒子は、陽子や中性子を含むバリオン (重粒子)、中間子や K 中間子を含むメソン (中間子)、電子を含むレプトンの三種類に大きく分けることができ、これらは励起状態や共鳴状態を含めて 100 種類以上存在する。バリオンとメソンはクォークと呼ばれる基本粒子からできており、バリオンは三つのクォークから、メソンは二つのクォークからなることが分かっている。

クォークとレプトンは現代の物理学において素粒子とされており、表 1.1 のようにそれぞれ 3 つの世代の存在が明らかにされている。また、それに加えて素粒子には、力を媒介する粒子であるゲージボソンが存在し、4 つの力それぞれに対して、4 つのゲージボソンがある。

そして、本実験の研究対象である中性 π 中間子は、 u クォークと \bar{u} クォーク、 d クォークと \bar{d} クォークの混合で出来ているメソンである。

クォーク			レプトン		
第一世代	第二世代	第三世代	第一世代	第二世代	第三世代
u	s	t	e	μ	τ
d	c	b	ν_e	ν_μ	ν_τ

ゲージボソン			
電磁力	弱い力	強い力	重力
光子	弱ボソン	グルーオン	重力子

表 1.1: 三種類の基本粒子

1.2 素粒子実験

物理学は実証科学であり、実験は欠かせないものである。ここでは、素粒子物理学実験についての一般的な概要を述べる。

まず、ある粒子について探るには、その粒子を生成する必要がある。粒子を生成するには、その粒子が生成可能なエネルギーを作り出さなければならない。高エネルギーな状態は、物質同士を高速度で衝突させることにより作り出すことが可能である。この時、エネルギー的に十分であり保存則も満たしていれば、その粒子を生成することが出来る。その際、衝突させる物質を加速する装置を「加速器」と呼ぶ。

次に、その生成された粒子を検出する必要がある。このときに用いられる一連の装置を「検出器」とよび、検出器には、粒子の軌跡や速度やエネルギーなどを調べるため、目的に応じて様々な種類のものがある。

このように、素粒子実験の一般的な流れとしては、物質を「加速器」により加速して衝突を起こし、「検出器」によって検出するというものである。

また、実験では、短時間でより多くの事象を得ることが求められるのに加え、高いエネルギーになればなるほど大量の粒子が生成し、情報量は膨大なものとなる。この膨大な情報を効率良く収集するために、現代の素粒子物理学実験ではコンピューターを用いた情報収集システムは欠かせないものとなっている。

本実験も、まさにここで述べた素粒子物理学実験の一連の流れと全く一致するものである。

1.3 中性 π 中間子 (π^0)

中性 π 中間子 (以降 π^0 と呼ぶ) は先も述べたように、二つのクォークからなるメソンであり、質量は $135 \text{ MeV}/c^2$ 、寿命は 8.7×10^{-17} 秒である。本実験では

$$e^- + A \rightarrow e^- + A + \pi^0 \quad (1.1)$$

の過程による π^0 の生成断面積を測定する。この節では、

$$e^- + A \rightarrow e^- + A + \gamma \quad (1.2)$$

$$\gamma + p \rightarrow \pi^0 + p \quad (1.3)$$

の二段階の過程を考えることにより、電子線を用いた場合に π^0 が生成可能な、運動学的エネルギー閾値と生成断面積について述べる。

1.3.1 運動学的エネルギーしきい値

(1.3) の陽子 (p) と光子 (γ) の反応において、 π^0 が生成されるために必要な光子 (γ) の運動学的エネルギーしきい値について調べる。

まず、 γ と陽子 (p) の 4 元運動量をそれぞれ

$$p_\gamma \equiv (E_\gamma, \mathbf{p}_\gamma) \quad (1.4)$$

$$p_p \equiv (m_p, \mathbf{0}) \quad (1.5)$$

とすると、重心系のエネルギー E_{CM} は

$$E_{CM} = \sqrt{2E_\gamma m_p + m_p^2} \quad (1.6)$$

となり、 E_{CM} が π^0 と p の静止質量の和 $m_{\pi^0} + m_p$ よりも大きければ π^0 の生成はエネルギー的に可能である。よって、

$$\sqrt{2E_\gamma m_p + m_p^2} \geq m_{\pi^0} + m_p \quad (1.7)$$

$$E_\gamma \geq \frac{(m_{\pi^0} + m_p)^2 - m_p^2}{2m_p} \quad (1.8)$$

となり、ここで π^0 と陽子の質量はそれぞれ、 $135.0 \text{ MeV}/c^2$ 、 $938.3 \text{ MeV}/c^2$ なので、上式へ代入すると

$$E_\gamma \geq 144.71 \cdots \text{ MeV} \quad (1.9)$$

と求まる。つまり、(1.3) の過程において、静止した陽子を考えた場合、エネルギー的には 145 MeV 以上の γ によって π^0 の生成が可能である。よって、(1.2),(1.3) の 2 段階の過程では、陽子が静止している (液体水素標的) と考えた場合、制動放射により 145 MeV 以上の γ が放出された際に π^0 が生成可能であることがいえる。

本実験では標的として鉄を用いるため、核子はフェルミ運動をしている。鉄各媒質中の陽子のフェルミ運動量 (原子核中における核子が持てる最大の運動量) は $240 \text{ MeV}/c^2$ であるため、実際には 145 MeV 以下の γ による π^0 生成は可能である。

1.3.2 生成断面積

生成しきい値近傍での中性 π 中間子の生成断面積測定の実験は光子線を用いて数多く行われており [2] [3] [4]、それらによれば、液体水素標的に対して $145 \sim 150 \text{ MeV}$ の光子線を用いた場合の π^0 の生成断面積の平均は約 $0.20 \mu\text{b}$ である。これより、静止した陽子において (1.2)(1.3) の過程における π^0 の生成断面積は、電子線の物質中における制動放射により 145 MeV 以上の γ 線が放出される割合を調べることによって予測することが出来る。以下に、 150 MeV の電子線が物質中での制動放射において 145 MeV 以上の γ 線を放出する割合を計算する。

制動放射は、入射電子が感じる電場の強さに依存するので、標的中の電子による遮蔽効果が重要になってくる [6]。この遮蔽の効果は

$$\xi = \frac{100m_e c^2 h\nu}{E_0 E Z^{1/3}} \quad (1.10)$$

と一般化することができ、 $\xi \simeq 0$ においては完全な遮蔽、 $\xi \gg 1$ においては遮蔽のないことを表している。ここで、 Z : 標的の原子番号、 $r_e = (e^2/mc^2)^2$ 、 E_0 : 電子の全入射エネルギー、 E : 反応後の電子の全エネルギー、 $h\nu$: 放射された光子のエネルギー ($E_0 - E$) である。そして、核子の電場中における電子のクーロン相互作用を組み込んだボルン近似による、クーロン補正関数

$$f(Z) \simeq a^2[(1 + a^2)^{-1} + 0.20206 - 0.0369a^2 + 0.0083a^4 - 0.002a^6] \quad (1.11)$$

を用いて(ここで、 $a = Z/137$)、放射される光子のエネルギーに対しての制動放射の断面積は、遮蔽のない場合 ($\xi \gg 1$) は

$$d\sigma = 4Z^2 r_e^2 \alpha \frac{d\nu}{\nu} \left(1 + \epsilon^2 - \frac{2\epsilon}{3}\right) \left[\ln \frac{2E_0 E}{m_e c^2 h\nu} - \frac{1}{2} - f(Z) \right] \quad (1.12)$$

完全な遮蔽の場合 ($\xi \simeq 0$) は

$$d\sigma = 4Z^2 r_e^2 \alpha \frac{d\nu}{\nu} \left\{ \left(1 + \epsilon^2 - \frac{2\epsilon}{3}\right) [\ln(183Z^{-1/3}) - f(Z)] + \frac{\epsilon}{9} \right\} \quad (1.13)$$

と書ける。ここで、 $\epsilon: E/E_0$ 、 $\alpha: 1/137$ である。つまり、制動放射から高いエネルギーの光子線が放出される断面積は (1.12) 式より、低いエネルギーの光子線が放出される断面積は (1.13) 式より求めることができる。また、制動放射の全断面積は、低いエネルギー領域が支配的なため (1.13) 式を用いて近似的に求めることができ、高いエネルギーの光子線が放出される割合を見積れる。

よって、150MeV の電子線を炭素中に入射した場合に、一度の反応で 145MeV (π^0 生成のエネルギーしきい値) 以上の制動放射をする断面積は (1.12) 式より 84b と求まり、1 ~ 149MeV の制動放射を考えた場合の全断面積は (1.13) 式より、 4.9×10^4 b と求まる。以上より、一度の制動放射で 145MeV 以上の γ を放出する確率は約 0.2% と見積もることが出来る。

これを先に述べた、線による π^0 の生成断面積へ適用すると、150MeV の電子線と静止した陽子との間の (1.2)(1.3) 過程における π^0 の生成断面積は約 $0.0003\mu\text{b}$ となる。

第2章 目的

2.1 研究目的

光子と核子の反応による荷電 π 中間子 (π^\pm) の生成断面積は、理論と実験において一致する結果が得られている。 π^0 の生成断面積もまた、反応エネルギーが π^0 質量 (135MeV) よりも十分大きいエネルギー領域では、両者は一致している。しかしながら、 π^0 が生成可能な閾値近傍のエネルギー領域においては理論と実験結果の相違が見られ [8] [9]、生成過程は完全に理解されてはいない。そのため、 π^0 の閾値近傍における生成断面積の測定は、生成過程を理解する上で重要である。

また他方で、粒子はカイラル対称性の破れによって質量を獲得していると考えられているが、核媒質中においてカイラル対称性の部分的回復を示唆する研究結果が報告されている。その観点からも核媒質中で生成された π^0 の質量を測定することも興味深い。

2.2 背景

昨年、本研究室において初めて π^0 生成実験を行った [1]。その実験とは以下のような内容である。

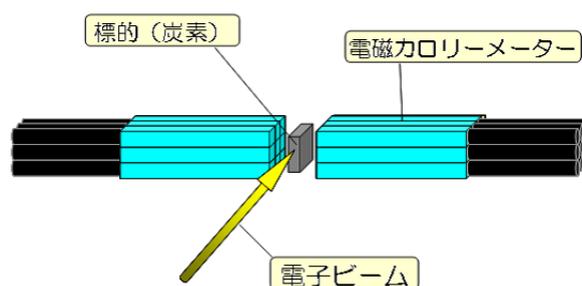


図 2.1: 昨年の π^0 生成実験概要図

図 2.1 のように、

1. ビーム軸上に厚さ 2cm、幅 1cm、高さ 5cm の黒鉛を標的として配置

2. 標的に 150MeV の電子線を照射し、標的中で π^0 を生成させる
3. 標的及びビーム軸をはさむようにして配置している電磁カロリメーターによって、 π^0 の崩壊により反対方向飛び出す 2 つの線のエネルギーを測定し、 π^0 生成イベント数を調べる。

そして、この実験では、ビームを 1.5kHz の頻度で 1.25×10^5 秒間標的に入射し、合計 10 個の π^0 のエネルギーと一致するイベントが検出された。さらに、GEANT4 シミュレーションから、このセットアップにおいては π^0 のエネルギーと一致するバックグラウンドイベントは 4 つ存在すると予測され、計 6 個の π^0 イベントが検出されたとした。その結果、電子と核子の間における π^0 の生成断面積 $0.07 \pm 0.04 \mu\text{b}$ という値が得られ、1.3.2 節より得られた値 $0.0003 \mu\text{b}$ より百倍以上大きな値であった。

2.3 本実験の概要

本実験では、前実験より測定精度を高めるべく、主に次の 2 点に対して改善を行った。

一点は、前実験では図 2.1 のように、ビーム軸及び標的を 2 アームの電磁カロリメーターで覆っていたのに対し、今回は図 2.2 のように、4 アームで覆った点である。このセットアップの変更により、 π^0 が生成されたイベントと同じエネルギー分布を示す区別できないバックグラウンドイベントの数を、前はシミュレーションより見積もっていたのに対し、今回は実験結果より見積ることが可能となる。なぜなら、150MeV の電子線により標的中で π^0 が生成された場合、 π^0 は殆ど静止しており、正反対の方向にしか γ は発生しないため、対称な配置のアームにより検出される。一方で、電子線の標的中におけるコンプトン散乱や制動放射、或いは電子線が標的に入射する前に、空気、検出器、遮蔽ブロックなどと衝突するなどして、2 アームの電磁カロリメーターに π^0 イベントと同じエネルギーを落とすようなバックグラウンドイベント (以降、 π^0 バックグラウンドイベントと呼ぶ) が考えられ、これらは非対称な配置の 2 アームにも起こりうる。つまり、対称な配置における π^0 のエネルギー分布と一致するイベント数から、非対称な配置における π^0 のエネルギー分布と一致するイベント数を差し引くことにより、 π^0 のイベント数を測ることができる。また、アクセプタンスは前回と比べ 2 倍になるため 2 倍の統計量も期待できる。

もう一点は、前は標的として炭素を用いたのに対して、今回は炭素より 6 倍の統計量 (反応率) を期待することが出来る鉄に変更した点である。これによりアクセプタンスを含め計 12 倍の統計量を得ることができると予測される。

以上のように、本研究は去年よりも高い測定精度で、 π^0 の生成断面積について検証するものである。

以下の小節では、2 点それぞれの改良についての経緯を説明する。

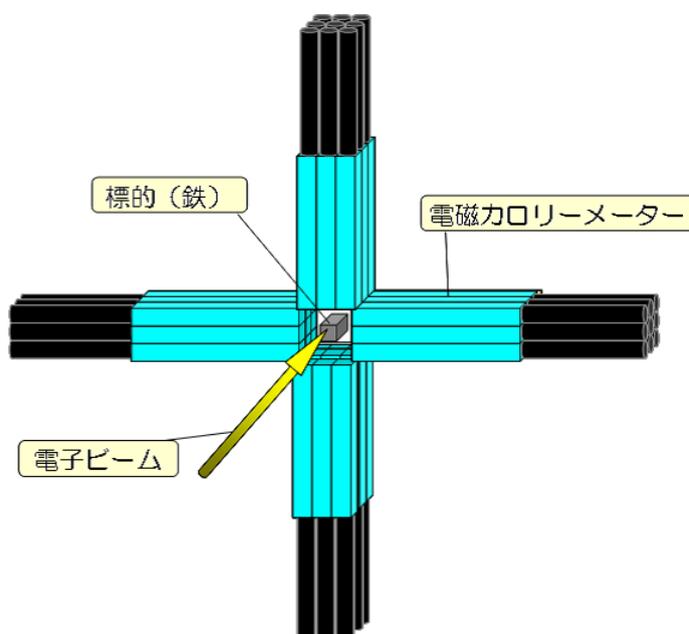


図 2.2: 本研究での π^0 生成実験概要図

2.3.1 4 アーム検出器

π^0 バックグラウンドイベントを見積もる方法としては、生成された π^0 の崩壊する 2 が入らない角度に、一对の電磁カロリメーターを設置すればよい。我々の手元にある電磁カロリメーターは昨年使ったものも含めて約 40 本あり、これらを用いて、 π^0 バックグラウンドイベントも見積る実験方法としては、

1. 2 アームを対称に置いて一定時間測定した後、2 アームを π^0 イベントが検出できない非対称な位置へ動かして同じ時間だけデータを取る
2. 2 アームを対称に置き、それに加え 1 アームを非対称な角度にも設置することにより、 π^0 バックグラウンドイベントも同時に測定する。
3. 2 アームを左右対称に置き、それに加え上下対称にも 2 アームを設置することにより、同時に 4 通りの π^0 バックグラウンドを測定する。

の 3 通りが考えられる。1 の方法では、20 本を 4×5 の配置で並べたアームを 2 アーム用意でき、2 の方法では、12 本を 3×4 の配置で並べたアームを 3 アーム用意できる。また、3 の方法では、9 本を 3×3 の配置で並べたアームを 4 アーム用意できる。以上の 3 通りにおいて、アームの内側に配置されているカロリメーターにヒットした時に π^0 イベントを検出できるとした場合の検出効率を表 2.1 に示す。ここではカロリメーターの素子 1 本は、粒子が入射する面の大きさを $20 \times 20 \text{mm}^2$ としている。よって、方法 1 では、2 アー

ムを対称に配置して測定した後に、 π^0 イベントが検出されない位置に 1 アームを動かすため、ビーム軸とカロリメーターの距離は最も近くできて 4cm である。方法 2 と 3 では、2 アームを対称に配置し、残りのアームを 90 度方向に配置する必要があるため、ビーム軸とカロリメーターの距離は最も近くできてそれぞれ 4cm と 3cm である。また、 π^0 バックグラウンド測定が同時に出来るため、測定時間は方法 1 の半分である。以上より、1 アームが 3×3 配置の 9 本組みカロリメーターを上下左右に設置する 4 アーム配置の検出効率が最も高いため、本実験は 4 アームのセットアップで行うことにした。

	配置	ビーム軸とカロリメーターとの距離 [cm]	検出効率 [%]	測定時間 [方法 1 比]	検出効率 / 測定時間
方法 1	4×5	4	12.0	1	12.0
方法 2	3×4	4	6.0	0.5	12.0
方法 3	3×3	3	8.4	0.5	16.8

表 2.1: 各方法における検出効率

また、今後、各アームについての説明を簡単にするために、Top、Right、Bottom、Left アームと呼ぶこととし、図 2.2 中において、上のアームを Top、左のアームを Right、下のアームを Bottom、右のアームを Left アームとする。図 2.2 の右と左が逆である理由は、実験において、ビーム下流からセットアップを見るためである。

2.3.2 標的選び

4 アーム型へ変更することにより、統計量は倍になると考えられるが、本実験ではさらに統計量を増やす。そのために、前実験は標的として炭素を用いたが、本実験では、より反応率の高い物質に変更する。そして今回は、線との反応断面積が既に知られている C, Si, Fe, Sn, Pb の 5 種類の中から、標的として最適な物質を調べた [7]。ここで、本実験で用いるビームは最大で 1cm まで絞ることが出来るため、標的のビーム軸に垂直な面の大きさは $1 \times 1\text{cm}^2$ にする。また、ビーム軸方向の長さは、 π^0 を 4 アームの中心で生成させて検出効率を上げるために、2cm に設定した。よって以下の標的選びの際も同じ大きさで考える。

電子線を標的に入射して生成された π^0 が電磁カロリメーターで検出されるまでの一つの過程としては、

1. 150MeV の電子線が制動放射をして 145MeV 以上の γ を放出
2. 放出された γ が標的中の陽子と反応して π^0 を生成
3. π^0 の崩壊によって発生する 2 つの γ が検出器へ入射する

が考えられる。そこで、この小節では上記の過程の反応効率を調べるために、

- 150MeV 電子線が標的中で制動放射をする断面積
- 150MeV の電子線が制動放射により 145MeV 以上の γ 線を放出する割合
- γ 線が標的中で反応する断面積
- π^0 の崩壊による 2 つの γ 線が標的を飛び出す断面積

の各過程に対して、5 種類の物質を比較していく。

150MeV 電子線が標的中で制動放射をする断面積

電子が標的中で制動放射をすることなくどれだけ進むことが出来るかを知るために、150MeV 電子線が各物質の標的において制動放射をする断面積を調べる。そして、(1.13) 式より、1 MeV 以上の制動放射をする断面積を計算すると C, Si, Fe, Sn, Pb 原子核それぞれに対して、 $4.9 \times 10^4 \text{b}$, $2.5 \times 10^5 \text{b}$, $8.1 \times 10^5 \text{b}$, $2.9 \times 10^6 \text{b}$, $6.8 \times 10^6 \text{b}$ となる。これより炭素ですら、約 $2 \times 10^{-4} \text{cm}$ で制動放射をすることがわかる。以上より、150MeV 電子線はどの物質に対しても入射して即座に制動放射をするため、物質が異なることによって π^0 の生成率に影響はないと言える。

150MeV の電子線が制動放射により 145MeV 以上の γ 線を放出する割合

π^0 を生成可能な 145MeV 以上の γ が放出される断面積、及び制動放射の全断面積は式 (1.12)、(1.13) より得られ、物質に入射して一度目の制動放射で 145MeV 以上の γ を放出する割合は求まる。それぞれの値を各物質に対して以下の表に示す。その結果、145MeV 以上の γ が放出される確率はどの物質においても約 0.2% であることが分かる。

標的	C	Si	Fe	Sn	Pb
145MeV 以上の制動放射をする断面積 [b]	8.4×10^4	4.6×10^5	1.5×10^6	5.4×10^6	1.3×10^7
1 ~ 150MeV の制動放射をする断面積 [b]	4.9×10^4	2.5×10^5	8.1×10^5	2.9×10^6	6.8×10^6
145MeV 以上の制動放射をする割合 [%]	0.17	0.18	0.19	0.19	0.19

線の標的中における反応率

ここでは、制動放射によって 150MeV の γ が放出されたとして、2cm の厚さの標的中を通過する場合の反応率を、それぞれの物質に対して比較する。

一般に物質中を通過する光の強度は

$$I = I_0 \exp(-t/\lambda) \quad (2.1)$$

と表すことが出来る。ここで I_0 は物質を通過する前の光の強度、 I は物質を通過した後の光の強度、 t は厚み、 λ は吸収長である。それぞれの値と反応率を以下の表に示す。鉛標的なら9割の γ が反応することが分かる。

物質	密度 [g/cm ³]	厚み [g/cm ²]	吸収長 [cm]	強度 [I/I_0]	反応率 [$1 - I/I_0$]
C	2.27	4.54	65	0.93	0.07
Si	2.33	4.66	32	0.86	0.14
Fe	7.87	15.74	21	0.47	0.53
Sn	9.31	18.62	12	0.30	0.70
Pb	11.35	22.7	10	0.10	0.90

π^0 の崩壊による2つの γ 線が標的を飛び出せる確率

標的の中心で反応が起こり、カロリメーターへ入射するまでに最短経路を通過とした場合、2 (67.5MeV) が同時に標的を飛び出せる確率を調べる。ここで、標的の大きさがビーム軸と垂直方向に $1 \times 1\text{cm}^2$ の場合に対して調べる。先と同様に式 (2.1) を用いると、C、Si、Fe、Sn、Pb それぞれに対して、0.96、0.94、0.70、0.60、0.36 と求まる。

以上より、最適な標的は、

「 γ 線の標的における反応率 $\times \pi^0$ の崩壊による2 γ が標的を飛び出せる確率」から決めることができ、C、Si、Fe、Sn、Pb それぞれに対して、0.067、0.13、0.37、0.42、0.32 である。よって、Sn が 0.42 と最も適していることが言える。しかしながら、Fe も 0.37 と Sn に近い値であり、Fe の方が手に入りやすかったため、本実験では Fe を標的とすることとした。

第3章 実験

この章では、本実験で利用する全ての装置と機器について説明した後、実際に行った実験とその結果について述べる。

3.1 実験装置

この節では、ビームを作る「入射器系」、反応を検出するための「検出器系」、検出器を設置するための土台となる「セットアップ系」、検出したシグナルを処理する「回路系」、処理されたシグナルを読み出す「読み出し系」の5項目に分けて実験装置をそれぞれ説明していく。

3.1.1 入射器系

REFER(Relativistic Electron Facility for Education and Research)

広島大学には150MeVの電子を発生させるマイクロトロンがあり、REFERとは、このマイクロトロンから入射される電子線を周回させる、超高速電子周回装置のことである(図3.1)[5]。この周回装置は電子引き出しライン(図3.1中の右下部分のライン)を装備しており、これにより150MeVの電子を周回装置より引き出して実験に使う。実際の実験は、この引き出しラインの下流にセットアップを配置し行う。

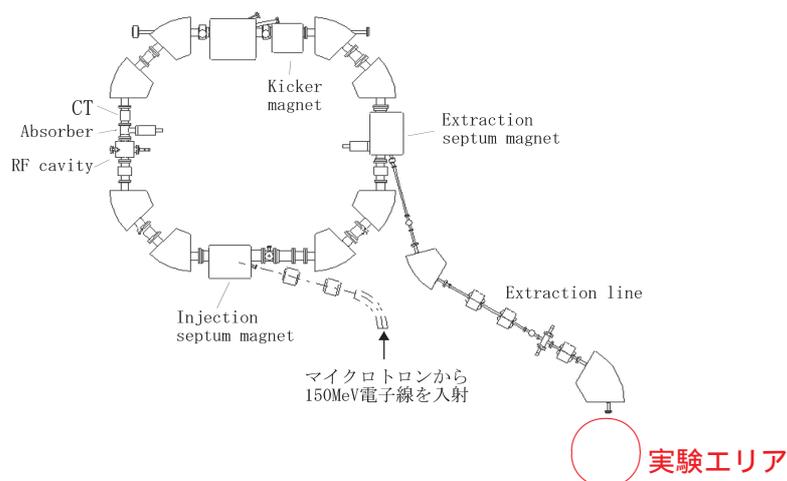


図 3.1: REFER 全体図

3.1.2 検出器系

この節では、電磁カロリメーターとシンチレーション検出器について説明する。

無機シンチレーター

電磁カロリメーターは光子や電子のエネルギーを測定する検出器の総称であり、一般に、イオン結晶に発光するための活性剤を調合した無機シンチレーターと呼ばれるものからなる。無機シンチレーターは、入射してきた電子や光子のエネルギーに比例する量の発光をするものであり、発光量を測ることにより粒子のエネルギーを測定することができる。無機シンチレーターには様々な種類の結晶があり、以下に一例を載せる。密度が大きいものほど、粒子を完全に止めることができ、高精度な粒子の全エネルギー測定が可能である。また、 π^0 の崩壊によって同時に放射される光子を高い時間分解能で検出する際は、蛍光減衰時間が短いことが望まれる。そのため、本実験も昨年と同様に PWO 結晶を用いている。

物質名	密度 [g/cm ³]	放射長 [cm]	Moliere 半径 [cm]	減衰時間 [ns]	光量 [NaI 比]
PWO	8.28	0.89	2.2	5 ~ 15	0.01
BGO	7.13	1.12	2.4	300	0.15
NaI	3.67	2.59	4.5	250	1.00
CsI	4.53	1.85	3.8	565	0.40

PWO は図 3.2 のように無色透明な結晶であり、組成式は「 PbWO_4 」である [10]。今回用いている PWO は、去年利用したものを含め計 36 本である。Top と Bottom アームの 18 本には大きさ $22 \times 22 \times 180\text{mm}^3$ で NC 社製のものを、Right アームの 9 本には $20 \times 20 \times 200\text{mm}^3$ で RI& NC 社製を、そして Left アームの 9 本には $20 \times 20 \times 200\text{mm}^3$ の古河社製の PWO を用いた。

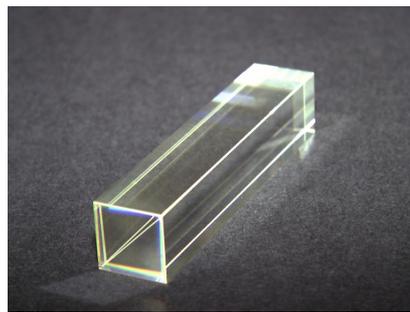


図 3.2: PWO 結晶

プラスチックシンチレーター

プラスチックシンチレーターは、素粒子実験において、荷電粒子がいつどこを通過したか知るために用いられる。プラスチックシンチレーターは有機シンチレーターの一つであり、無機シンチレーターと発光原理は異なるものの、荷電粒子の電離作用によって発光する。プラスチックシンチレーターの特徴としては、電離エネルギーあたりの発光量は無機シンチレーターには到底及ばないものの、蛍光減衰時間がナノ秒の領域であり、加工が簡単なことである。そのため、実験に応じて、大きさや形には様々なタイプのものがあり、荷電粒子の正確な位置や通過時間測定に頻繁に用いられている。

本実験においては、粒子の通過を確認するために、シンチレーション検出器 (図 3.7, 3.8) として $100 \times 100 \times 10\text{mm}^3$ 、 $20 \times 20 \times 1\text{mm}^3$ 、 $20 \times 10 \times 1\text{mm}^3$ と直径 1mm のファイバー状のプラスチックシンチレーターを用いた。

光電子増倍管 (PMT)

測定において、粒子によるシンチレーターの発光信号を電気信号へ変換して処理する必要がある。その際に、多く用いられる機器が光電子増倍管である。光電子増倍管は、図 3.3 のように、光電面と集束電極と増幅部から構成されている。光電面で光電効果を起こすことにより光子が電子をたたき出し、たたき出された電子は集束電極によって、集束かつ加速をされ電子増幅部に達し、高電圧を印加している電子増幅部の電極でさらに光電効果を起こすことにより最終的には 10^8 もの増幅率が得られる。実際には、図 3.4 のように、高電圧を印加し、シグナルを出力するためのプリーダーを取り付けて利用する。また、光電子増倍管は、光電面からたたき出された電子を集束電極で集めている部分が、周辺磁気に過敏であり地磁気の影響すら無視できない。このため、光電面の周りを筒状の磁気シールドで覆う必要がある。今回用いる光電子増倍管は、Top と Bottom アームに用いるものは 0.1mm 厚の鉄を三重に巻き、Right と Left アームに用いるものは 0.2mm 厚の μ -メタルを巻いた。プラスチックシンチレーターに用いるものは 0.8mm 厚の筒状の μ -メタルを取り付けて磁気シールドを施した。

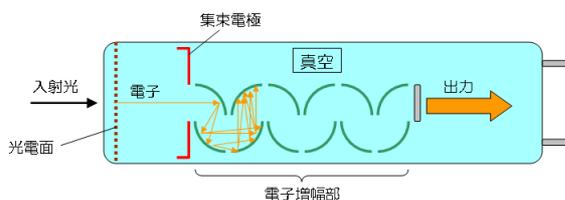


図 3.3: 光電子増倍管の原理

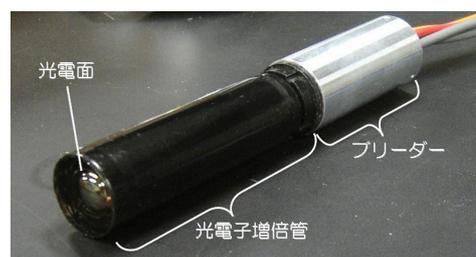


図 3.4: 光電子増倍管とプリーダー

本実験においては、無機シンチレーター (PWO) と光電子増倍管を図 3.5 のように接着し、アルミ фольとテフロンテープで遮光して 1 本の電磁カロリメータを構成した。そして、同じ構成で計 36 本の電磁カロリメータをそろえた後、図 3.6 のように 9 本を

3×3で配置することにより1アームを構成した。また、プラスチックシンチレーターと光電子増倍管を図3.7のようにライトガイドを介して接着して遮光した、3種類の大きさのシンチレーション検出器を用いた。さらに、図3.8のように、直径1mmのプラスチックファイバーシンチレーターを3本束ねて光電子増倍管と接着した検出器の2つを交差させることにより、有効領域 $2 \times 2 \text{mm}^2$ を実現したファイバーシンチレーション検出器を用いた。

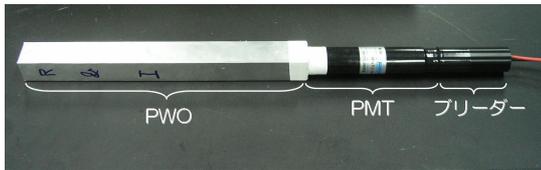


図 3.5: 電磁カロリメーター

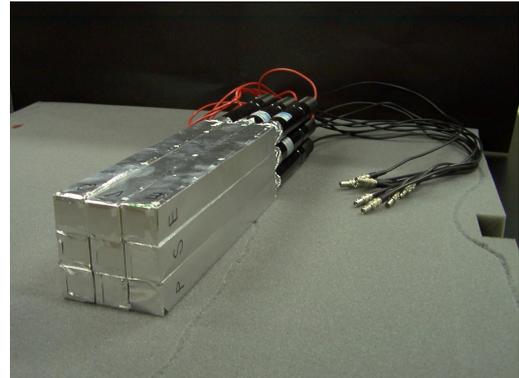


図 3.6: 9本組み電磁カロリメーター

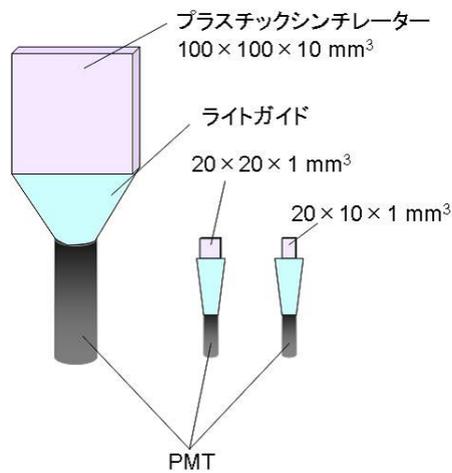


図 3.7: シンチレーション検出器

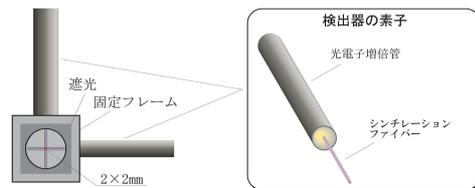


図 3.8: ファイバーシンチレーション検出器

3.1.3 セットアップ系

ペルチェ素子

ペルチェ素子は、電流を流すことによって、温度勾配を作ることができる素子である。本実験で用いるものは、ペルチェ素子の放熱側と冷却側それぞれにファンが取り付けられてあり(図 3.9)、暗箱へ取り付けることによって、外気に対して暗箱内を冷却することが出来る。

電磁カロリメーターとして用いる PWO は温度によって蛍光量が変わることが分かっている [10][12]。本実験では、測定の際、PWO の温度を一定 (20) に保つためにペルチェ素子を用いる。

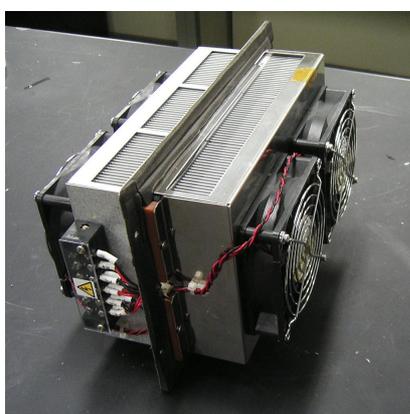


図 3.9: ペルチェ素子 (放熱・冷却ファン付き)

暗箱 (エネルギー較正測定用)

エネルギー較正については、次節で説明する。ここでは、エネルギー較正測定に用いる暗箱について説明する。

暗箱は $32 \times 28 \times 42\text{cm}^3$ の大きさで、両側にペルチェ素子を取り付けることによって、温度コントロールが可能である。中には 9 本の PWO を 3×3 の配置で並べることが出来る。

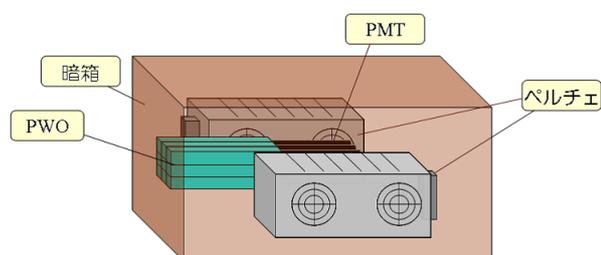
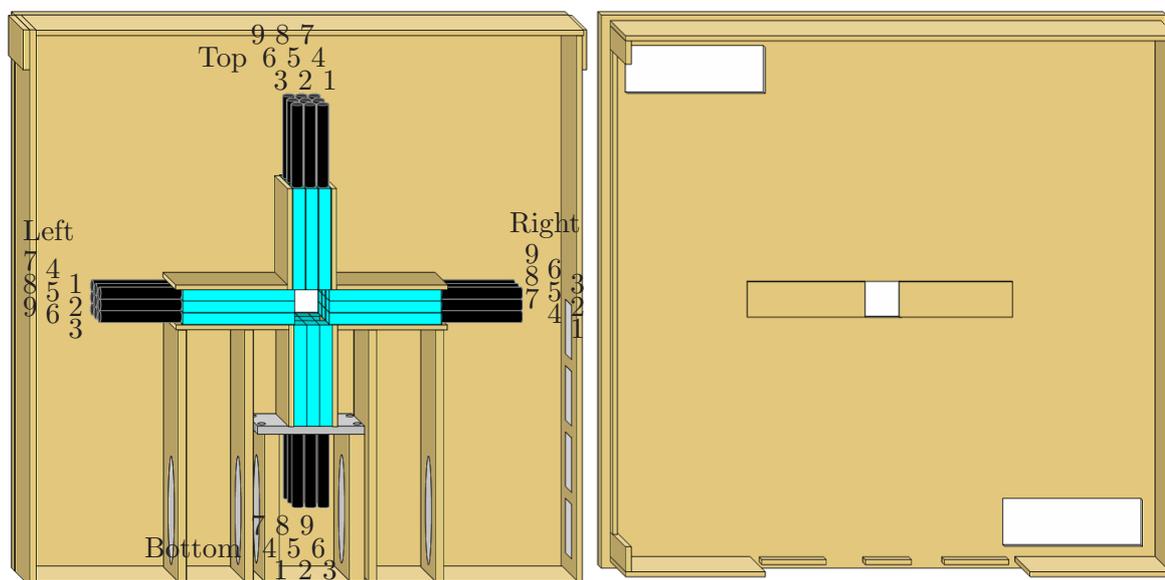


図 3.10: ペルチェ付暗箱 (エネルギー較正用)

暗箱 (π^0 生成実験用)

π^0 生成実験の際、4アームを設置でき、ペルチェ素子を取り付けることによって温度コントロールが可能な暗箱を図 3.11 に示す。大きさは $100 \times 100 \times 10\text{cm}^3$ であり、図中左が、4アームを設置する土台であり、右が蓋である。Bottom アームは、図中のようにステンレス板で PMT を支えることより、Top アームは、Top アーム下に幅 11cm で厚さ 1mm のステンレス板を両側のアームにかかるように敷くことにより落下を防いでいる。また、蓋の左上と右下には、ペルチェ素子取り付け用の穴が開いている。中心のビームが通る穴は遮光テープによって遮光する。

ここで、図 3.11 左の 4アームの配置においては、背面側がビーム上流にあたるため、向かって右が Right アーム、左が Left アームである。以降の説明を明快にするために、各アームのそれぞれのカロリメーターに対して図中のように 1~9 番まで番号付けしておく。

図 3.11: 暗箱 (π^0 生成実験用)

ラボジャッキ

ビームを暗箱内の PWO へ照射する際に、ビームの当てる場所を調整するためにラボジャッキを用いる。ラボジャッキで、ビーム軸に対しての暗箱の高さを調整する。

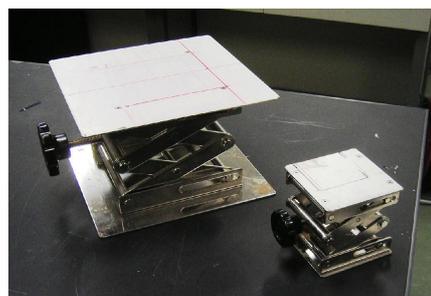


図 3.12: ラボジャッキ

X-ステージ

ビームを暗箱内の PWO へ照射する際に、ビームの当てる場所を調整するために X-ステージを用いる。図 3.13 中の赤枠部分が可動部分であり、この上に暗箱を乗せてアライメント調整をする。

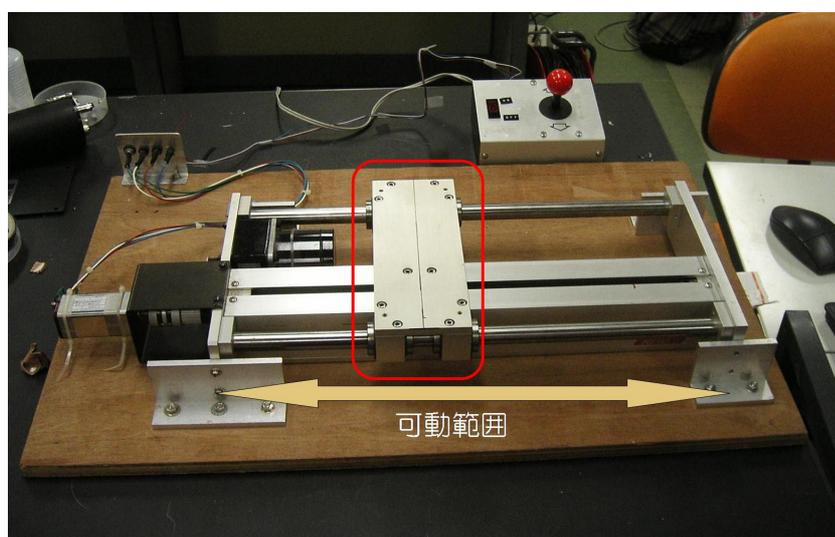


図 3.13: X-ステージ

コリメーター

粒子の検出器への不要な入射を減らし、要求する領域にビームを絞るためにコリメーターを利用する。本実験で用いるコリメーターはビーム軸方向に長さ 10cm の筒状の鉛であり、穴の直径は 8mm である。

鉛ブロック

粒子の検出器への不要な入射を防ぐために、鉛ブロックを用いて遮蔽する。

3.1.4 回路系

NIM(Nuclear Instrument Module)

高エネルギー物理の分野では、検出器から得られた信号を処理するために、NIM という規格化されたモジュールを用いる。NIM モジュールには、信号を増幅するものや、遅らせるもの、整形するものなど様々あり、一般に NIM ビンという特定のラックへ取り付け利用する。個々のモジュール同士は、出力端子と入力端子をケーブルで接続することにより信号処理ができるように規格化されており、特定の実験に合う回路を容易にカスタマイズすることができる。また、NIM で処理する際に用いられる論理信号を NIM 信号と呼ぶ。

以下に本実験において用いた NIM モジュールを説明する。

ディスクリミネーター

ディスクリミネーターは、閾値電圧以上の信号が入力された際に NIM 信号を出力するモジュールである。NIM モジュールで信号処理する場合は、まず初めに必ずディスクリミネーターを通して NIM 信号に規格化する必要がある。閾値電圧と出力される NIM 信号の時間幅は、それぞれ設定することができる。

ディレイ

シグナルを遅らせる場合にディレイを用いる。NIM モジュールではあるが、原理的にはシグナルケーブルで遅らせる方法と同じであるため、NIM ビンに取り付ける必要はなく、NIM 信号でない論理信号にも利用できる。遅延時間は種類にもよるが、1 ~ 100ns である。

コインシデンス

論理信号の同期を取る際に、コインシデンスを用いる。コインシデンスは、複数の NIM 信号が同期して入力された場合に、NIM 信号を出力する。一般に、コインシデンスは Veto 入力端子を持っており、入力信号のレートを意図的に落とすことができる。これにより、入力信号のレートが高い場合に下流の機器への悪影響を防ぐことができる。また、出力される NIM 信号の時間幅を設定することができる。

ゲートジェネレーター

NIM 信号の時間幅を変更する場合にゲートジェネレーターを用いる。ゲートジェネレーターは、NIM 信号が入力された際に、設定した時間幅の NIM 信号を出力する。ディスクリミネーターやコインシデンスは出力信号の時間幅を数十 ns ほど変えることができるのに対して、ゲートジェネレーターは、ms 以上のオーダーの変更ができる。また、一般にディレイの機能も有しており、 μs 以上のディレイが可能である。

マルチプリシティロジック

マルチプリシティロジックは、複数の入力端子に、一定または一定以上の数の NIM 信号が入力された場合に、NIM 信号を出力するモジュールである。

3.1.5 読み出し系

CAMAC

近年、高エネルギー実験の分野において、膨大なイベントデータを効率よく収集するために、コンピューターを用いたデータ収集システムが不可欠となっている。CAMAC は、イベントデータをデジタル処理してコンピューターへ渡す役目を果たす機器の規格である。また、CAMAC は NIM との互換性を持っており、入力信号として NIM 信号を直接入力することが出来る。

以下に本実験において用いた CAMAC モジュールを示す。

ADC

ADC は、入力された電気信号の電荷量をデジタル量に変換する機器である。ADC は、一つの GATE 入力端子と複数の電気信号入力端子を備えている。GATE 入力へは、NIM 信号を入力し、電気信号入力へは、電磁カロリメーターなどからの物理イベントによる電気信号を入力する。この時、電気信号入力端子へ入った電荷量を、GATE 入力端子へ入った NIM 信号の時間幅で積分した値をデジタル処理し、コンピューターへ送る。ADC が出力する値は、ch という単位であり、今回用いる ADC は 1ch につき、約 0.25pC に相当する。また、ADC で収集されるデータは常に、一定のバイアス電荷が付加されており、これをペダスタルと呼ぶ。そのため、解析をする際は、得られた ADC データから必ずペダスタルを差し引く必要がある。

本実験においては、電磁カロリメーターの出力信号の大きさを調べ、粒子のエネルギーを測定するために用いる。

TDC

TDC は、一つのスタート入力端子と複数のストップ入力端子を備えており、スタート入力端子へ入った信号とストップ信号へ入った信号の時間差を測る機器である。そして、その時間差をデジタル処理した後コンピューターへ送る。ADC 同様、TDC も出力する値の単位は ch であり、今回用いる TDC は 1ch が 50ps に相当している。

本実験においては、プラスチックシンチレーターや PWO の発光時間の差を調べるために用いる。

3.2 実験方法

前述のように、本実験は、電子線を用いて標的中で π^0 を生成し、 π^0 の崩壊からの 2 のエネルギーを電磁カロリメーターで測ることによって、 π^0 の生成断面積を調べるものである。このためには、電磁カロリメーターがどれだけのエネルギーの入射に対して、どれだけの大きさの信号を出力するか知っておかなければならない。しかしながら、電磁カロリメーターに用いている PWO と PMT は 36 本それぞれ発光量と増幅率が異なる上に、ADC の示す値も各入力端子ごとにずれがある。そこで、全 36 本それぞれの電磁カロリメーターの中心へ 150MeV 電子線を入射し、出力される電気信号によって ADC が示す値を調べるため、エネルギー較正測定を始めに行う。GEANT4 シミュレーションにより、 $20 \times 20 \times 200\text{mm}^3$ の PWO の中心に 150MeV の電子線を入射した場合は、120.3MeV のエネルギーを 1 本の電磁カロリメーターで落とし、 $22 \times 22 \times 180\text{mm}^3$ の PWO に対しては、122.7MeV を落とすことが分かっている [11]。これにより、各電磁カロリメーターに対して、変換係数 [MeV/ADC ch] を知ることができる。全ての電磁カロリメーターに対してエネルギー較正測定を行った後に、 π^0 生成実験を行う。

3.3 エネルギー較正測定

3.3.1 検出器の構成

エネルギー較正測定は、暗箱 (エネルギー較正測定用) へ 1 アーム (9 本) ずつ設置して行う。また、REFER の電子ビームは、出射口から下流に 80cm の場所に約 1cm まで絞られる。そのため、測定効率を上げるため、図 3.14 のように電磁カロリメーターを出射口から下流に 80cm の場所に設置する。

まず、ビームを要求する場所へ絞るために、一番上流に、中心の穴の直径が 8mm のコリメーターを置く。そして、コリメーター後を粒子が通過したことを確認するために、コリメーター直後に $10 \times 10\text{mm}^2$ のシンチレーション検出器 (図 3.7 参照) を設置する。シンチレーション検出器の下流には、電子線のコリメーター内での反応による、下流の検出器への悪影響を防ぐために、厚さ 10cm の鉛ブロックでビーム軸周辺以外を遮蔽する。さらに下流には、電磁カロリメーターの中心へ $2 \times 2\text{mm}^2$ の範囲で電子線が入射することを要求できるファイバーシンチレーション検出器 (図 3.8 参照) を設置した。最後に、暗箱の中に、1 アーム分 (9 本) の電磁カロリメーターを 3×3 の配置で並べてビーム軸上に設置した。暗箱は、X-ステージとラボジャッキに乗っており、ビームが各電磁カロリメーターの中心へ入射するように調節することが出来る。

以上のセットアップで計 36 本の電磁カロリメーターそれぞれに対して、150MeV 電子線を入射し、エネルギー較正のデータを収集した。

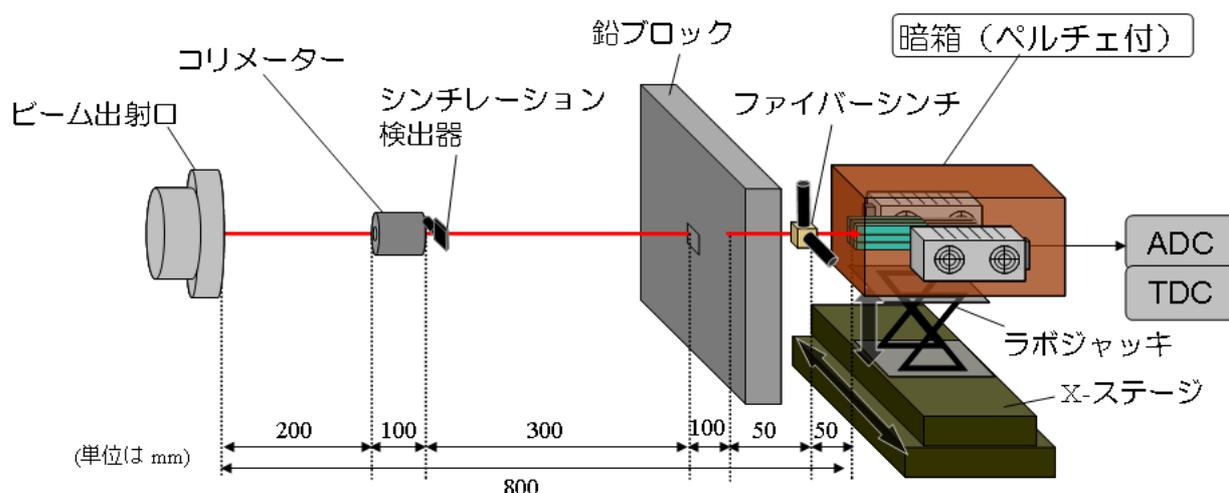


図 3.14: エネルギー較正測定概要図

3.3.2 読み出し回路の構成

ここでは、検出器系から出力されたデータを、回路系と読み出し系の機器によってどのように収集するか述べる。データ収集の流れは、NIM回路を構成し、検出器系から来るシグナルに対して要求するイベントの条件(トリガー条件)を課す。そして、トリガー条件を満たした場合にADCとTDCによってデータを収集するというものである。回路図を図3.15に示す。実際の回路は π^0 生成実験の回路図(図3.21)とモジュールの入出力端子やケーブルは全く同じにしてあるが、ここでは簡単に示すため省略している。トリガー条件としては、

- データ収集システムがデータ記録可能な状態である
- REFERへ電子を入射するタイミングではない
- 荷電粒子がコリメーター直後のシンチレーション検出器とファイバーシンチレーション検出器の両方を通過する。

の3つを要求している。本実験におけるADCのGate入力端子の時間幅は300nsまたは350nsである。

また、Rightアームの8,9番とBottomアームの1~9番に使用したADCの電荷許容量が、150MeVの電子線によって電磁カロリメーターから出力されるシグナルに対して少なかったため(これらのADCの電荷許容量は250pC。一方で他のADCの電荷許容量は全て1000pC)、上記のカロリメーターからの出力はスプリッターにより出力シグナルの大きさを半分になっている。

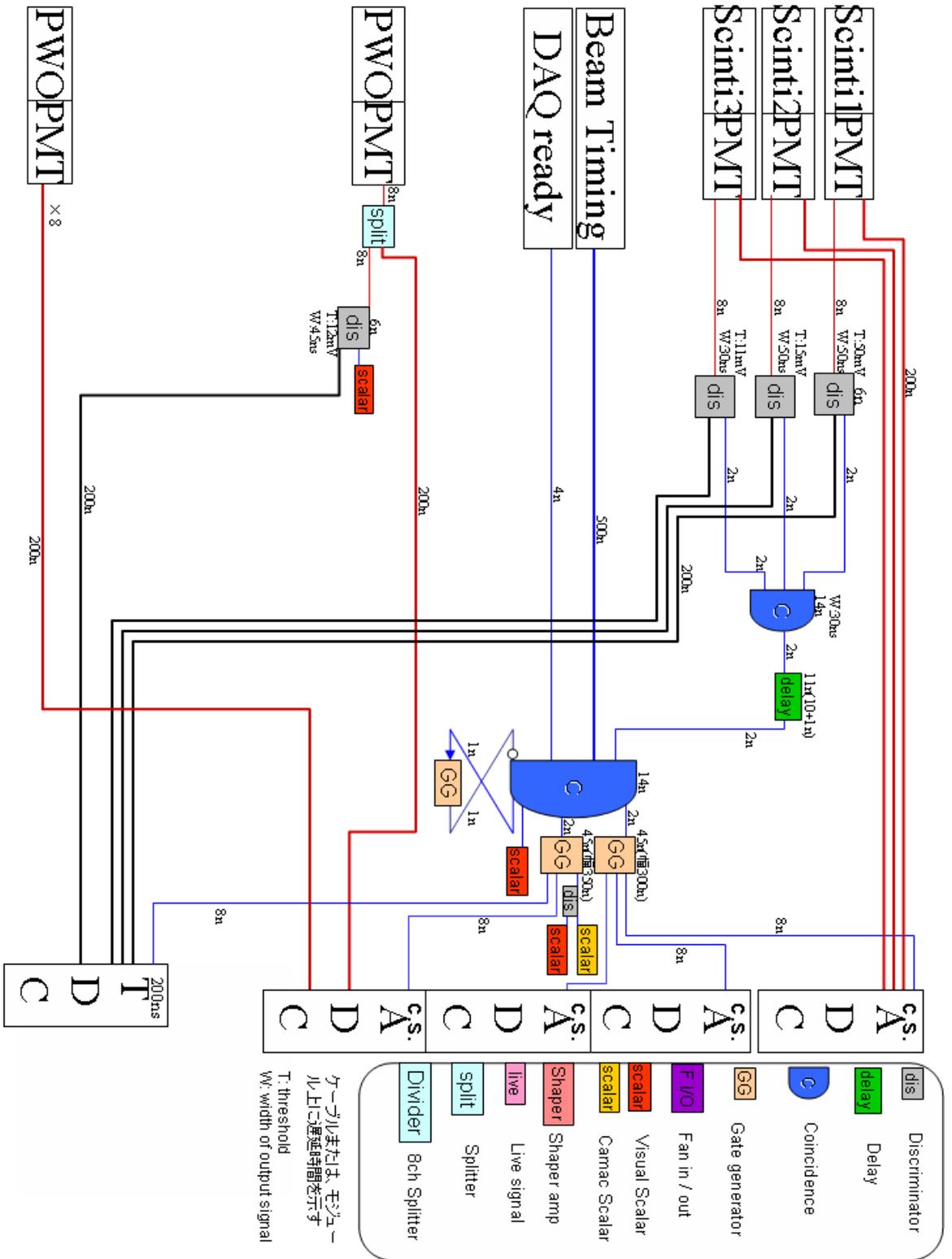


図 3.15: エネルギー校正測定回路図

3.3.3 測定結果

以上の構成及び設定で、150MeV 電子線を各電磁カロリメータに入射したデータを 5×10^4 イベントずつ収集した。各アームごとのヒストグラムを図 3.16、3.17、3.18、3.19 に示す。Right アームの 8,9 番と Bottom アームの 9 本全てのデータにサチレーションが見られるが、前小節で述べたように、これらのカロリメータに用いている ADC だけ、電荷許容量が約 250pC であり、他の ADC の 1/4 しかないためである。しかしながら、ピーク値は十分に電荷許容範囲内なのでエネルギー較正自体に影響はない。

また、Left アームの 7 番だけ極端に出力が小さいことがわかる。このカロリメータはエネルギー較正測定の翌日には信号を一切出力しなくなったため、本研究においては、Left アームに対して残りの 8 本で解析を行っている。

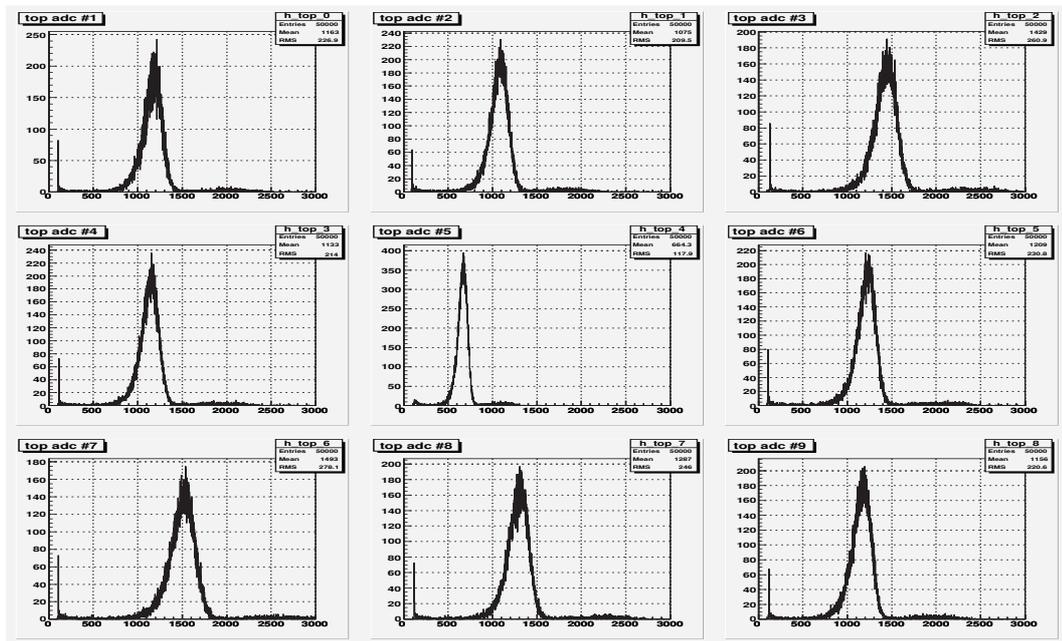


図 3.16: Top アームの各電磁カロリメーター ADC 分布

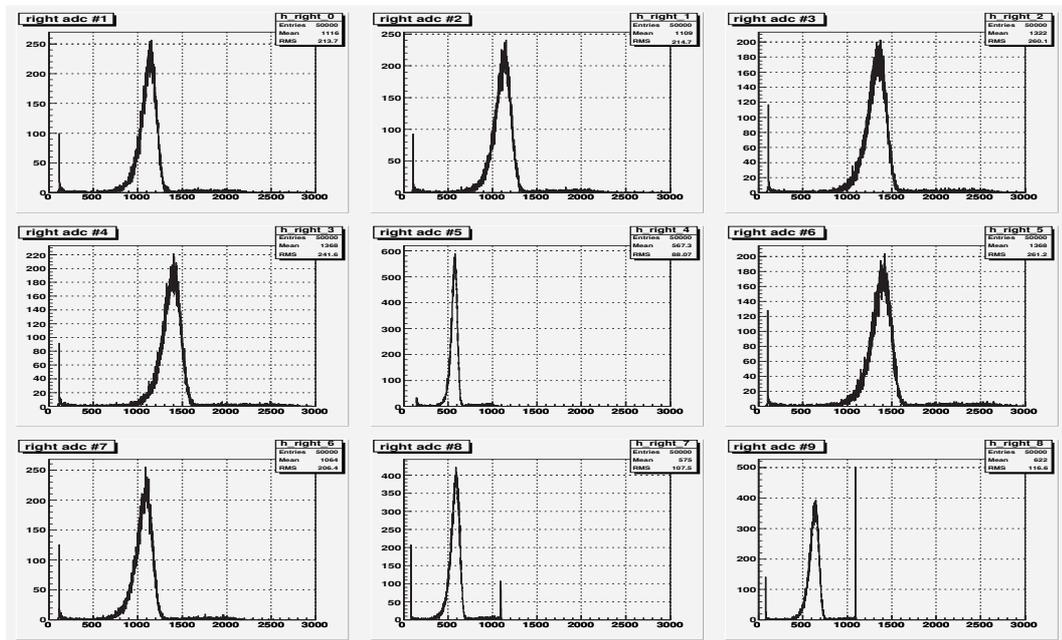


図 3.17: Right アームの各電磁カロリメーター ADC 分布

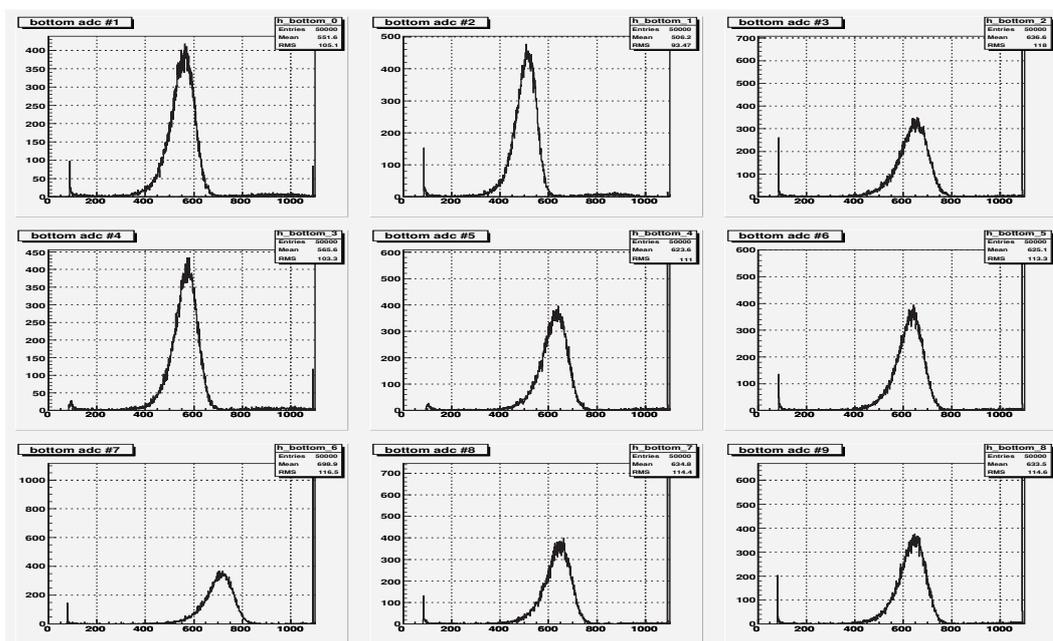


図 3.18: Bottom アームの各電磁カロリメーター ADC 分布

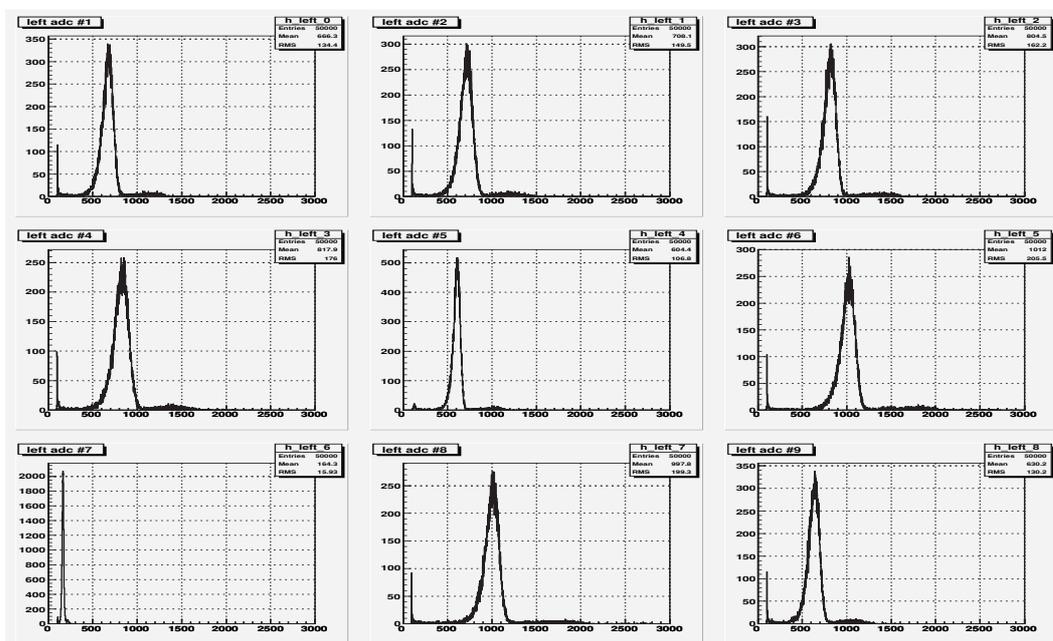


図 3.19: Left アームの各電磁カロリメーター ADC 分布

3.4 π^0 生成実験

3.4.1 検出器の構成

図 3.20 にセットアップ構成を示す。エネルギー構成実験と同じように、上流からコリメーター、 $10 \times 10\text{mm}^2$ のシンチレーション検出器 (シンチ 1)、鉛ブロックの順に設置する。鉛ブロックの下流 20cm に図 3.7 の有効領域 $20 \times 10\text{mm}^2$ のプラスチックシンチレーション検出器の二つ (シンチ 2,3) を交差させて、検出領域 $10 \times 10\text{mm}^2$ のシンチレーション検出器を構成する。さらにその下流 5cm にビーム軸と垂直な面が $10 \times 10\text{mm}^2$ 、ビーム軸方向が 20mm の鉄標的を配置すると同時に、4 アーム検出器を設置する。そして、最下流には、Veto 用として $100 \times 100\text{mm}^2$ (図 3.7 参照) のシンチレーション検出器を置く。

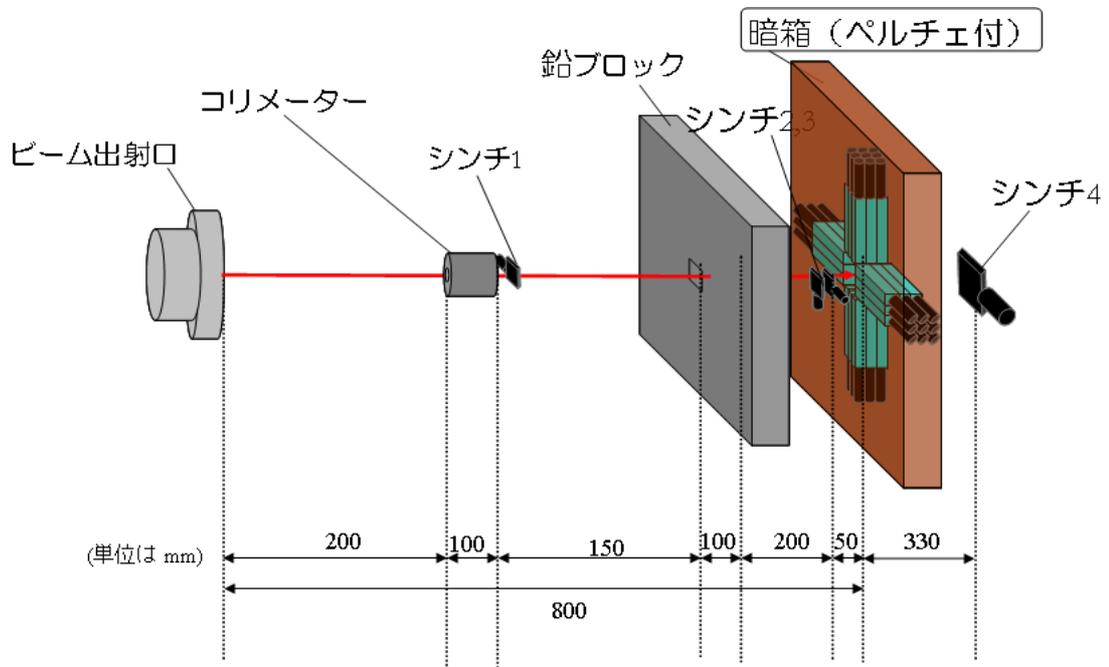


図 3.20: π^0 生成実験概要図

3.4.2 読み出し回路の構成

回路図を図 3.21 に示す。エネルギー較正測定と同様に、トリガー条件を課し、条件が満たされた時に ADC と TDC のデータを収集する。トリガー条件としては、

- データ収集システムがデータ記録可能な状態である
- REFER へ電子を入射するタイミングではない

- 荷電粒子が標的より上流にある 3 つのプラスチックシンチレータ-全てを通過する
- 各アームの中心に配置されている計 4 本のカロリ-メーターのうち 2 本以上が閾値 (以降、この閾値をトリガー閾値と呼ぶ) 以上の信号を出力をする

という 4 つの要求をした。

最下流のシンチレーション検出器は、 π^0 が生成されたイベントにおいては、標的中で殆どのエネルギーを落としているため鳴らないはずであるが、測定のトリガー条件には加えなかった。

3.4.3 実験結果

上記の構成および設定にて合計約 10^5 イベントのデータを収集した。

電磁カロリ-メーターの ADC 分布を図 3.22 ~ 3.25 に Top、Right、Bottom、Left アームの順に示す。各アームにおいて、左上から右の順番に 1 ~ 9 番と載せており、図 3.11 の番号と対応している。1 ~ 3 番がビーム下流側、6 ~ 9 番がビーム上流側にあたる。Left の 7 番は PMT が故障してシグナルを出力しなくなったためペDESTALのみ見える。

電磁カロリ-メーターの TDC 分布を図 3.26 に示す。左上から右の順に Top、Right、Bottom、Left アームの中心に配置されたカロリ-メーターの TDC 分布となっている。ピークがどのアームにおいても 3 つあるのは、測定中に TDC のスタートタイミングを 3 度ずらしたことによるもので、測定結果として支障はない。また、トリガー条件では 2 アーム以上の中心に配置しているカロリ-メーターへのヒットを要求しているため、オーバーフロー (4096ch) が見える。

シンチレーション検出器の ADC 分布を図 3.27 に示す。図中左上から右の順にシンチ 1 (コリメーター後)、シンチ 2、シンチ 3 (標的直前)、シンチ 4 (標的後、Veto 用) の ADC 分布を載せている。ただし、全 10^5 イベントのうち約半分のイベントにおいて、シンチレーション検出器用に用いた ADC が故障したため正常なデータが取れなかった。このため、図 3.27 のデータは正常なデータであった 5 万強のイベントのみをプロットしたものである。シンチ 4 の ADC 分布において、150ch 前後のピークがペDESTALである。そして、500ch 前後のピークが電子の入射を示していると考えられる。

シンチレーション検出器の TDC 分布を図 3.28 示す。カロリ-メーターの TDC 分布と同様に 3 つのピークが見えるが、これも TDC スタートタイミングを 3 度変更したためで測定結果として支障はない。また、トリガー条件としてシンチ 1 ~ 3 の 3 つへのヒットを要求したにも関わらずオーバーフローが存在する。これは、物理イベントと関係のない、データ収集システムの不具合によるものと考えられる。

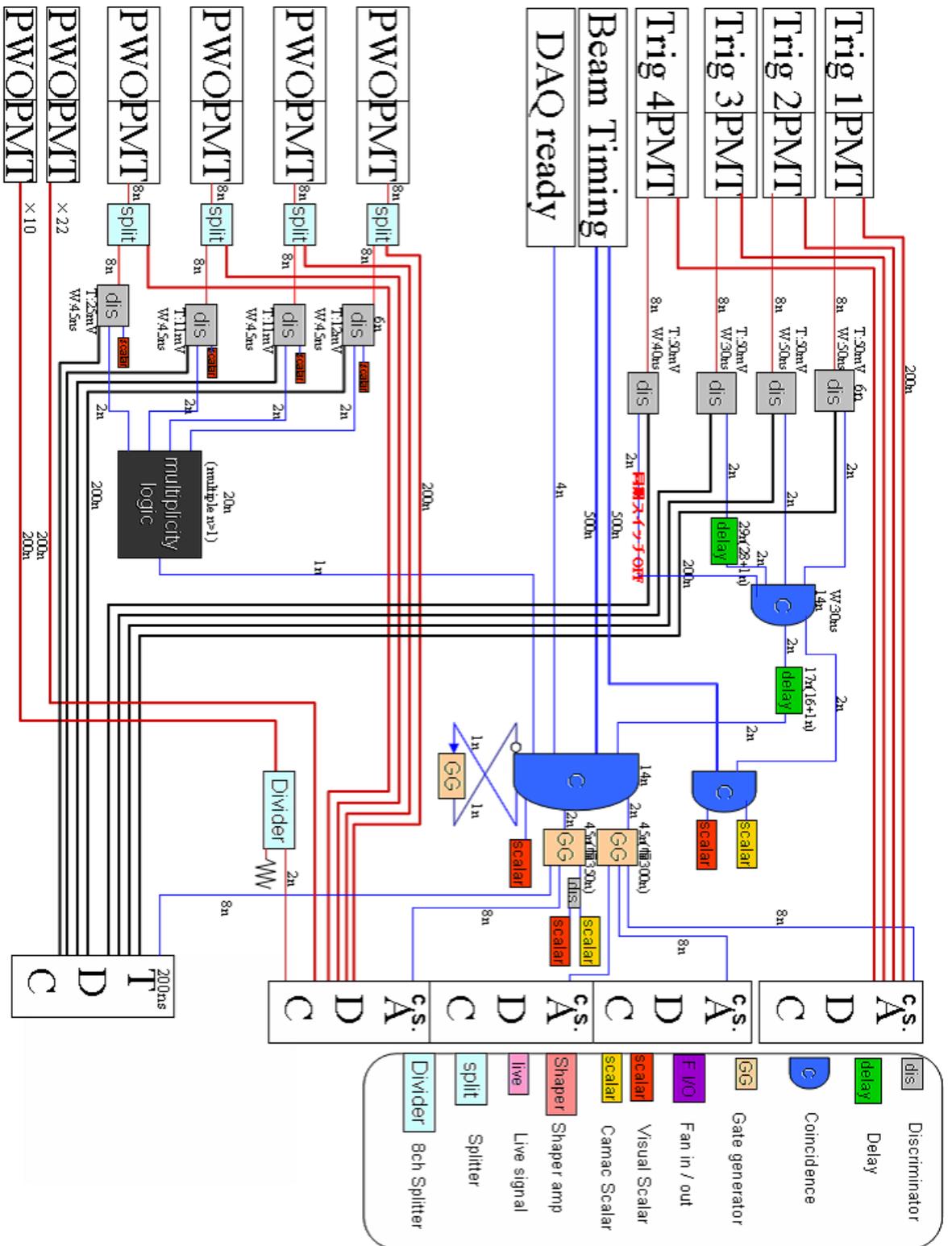


図 3.21: π^0 生成実験回路図

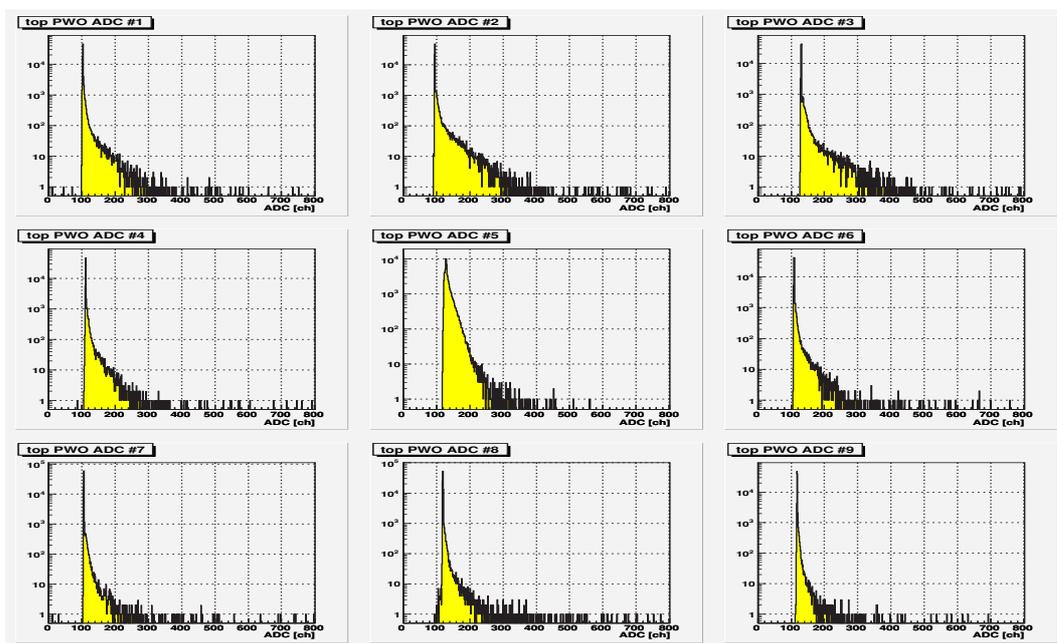


図 3.22: Top アーム ADC 分布

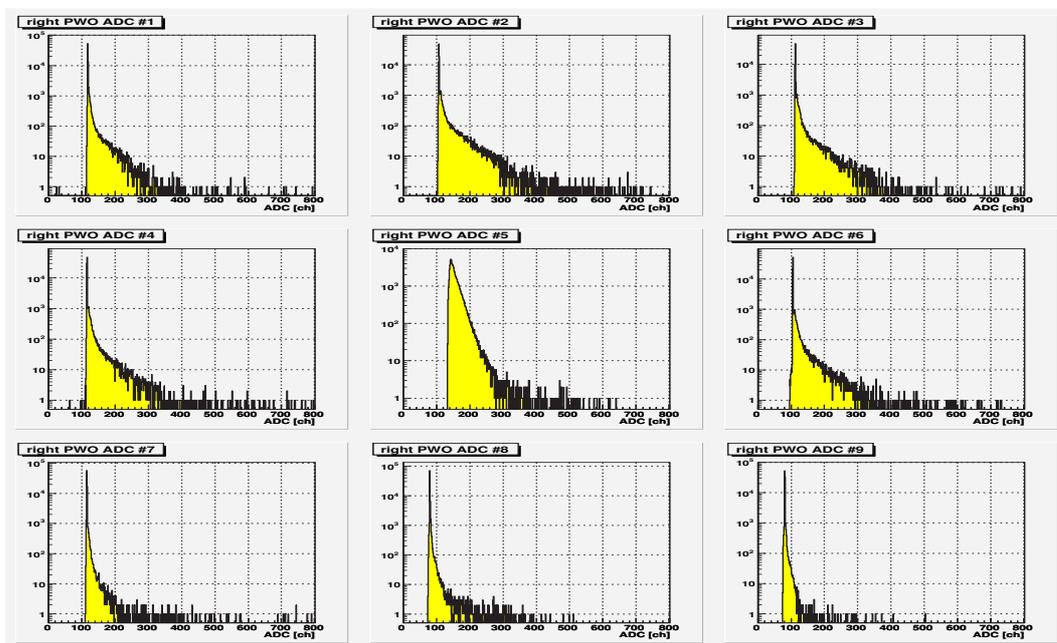


図 3.23: Right アーム ADC 分布

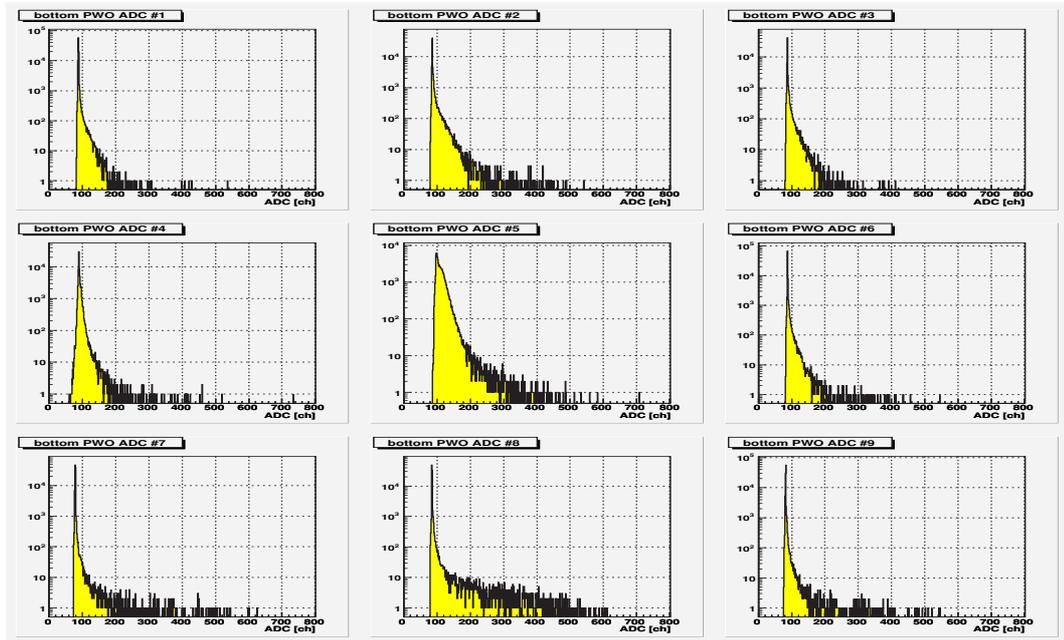


図 3.24: Bottom アーム ADC 分布

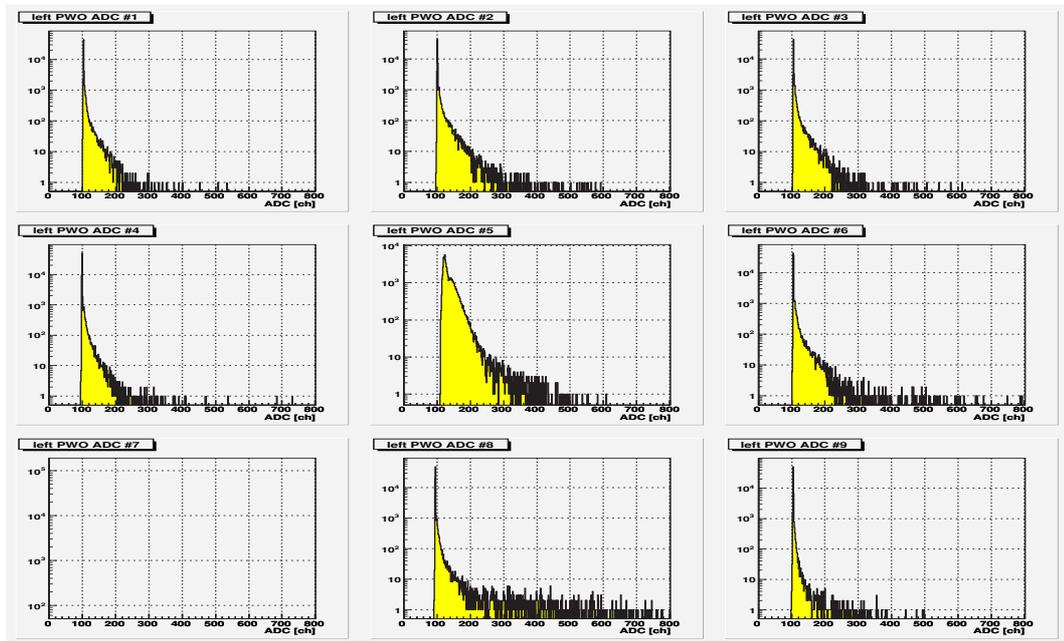


図 3.25: Left アーム ADC 分布

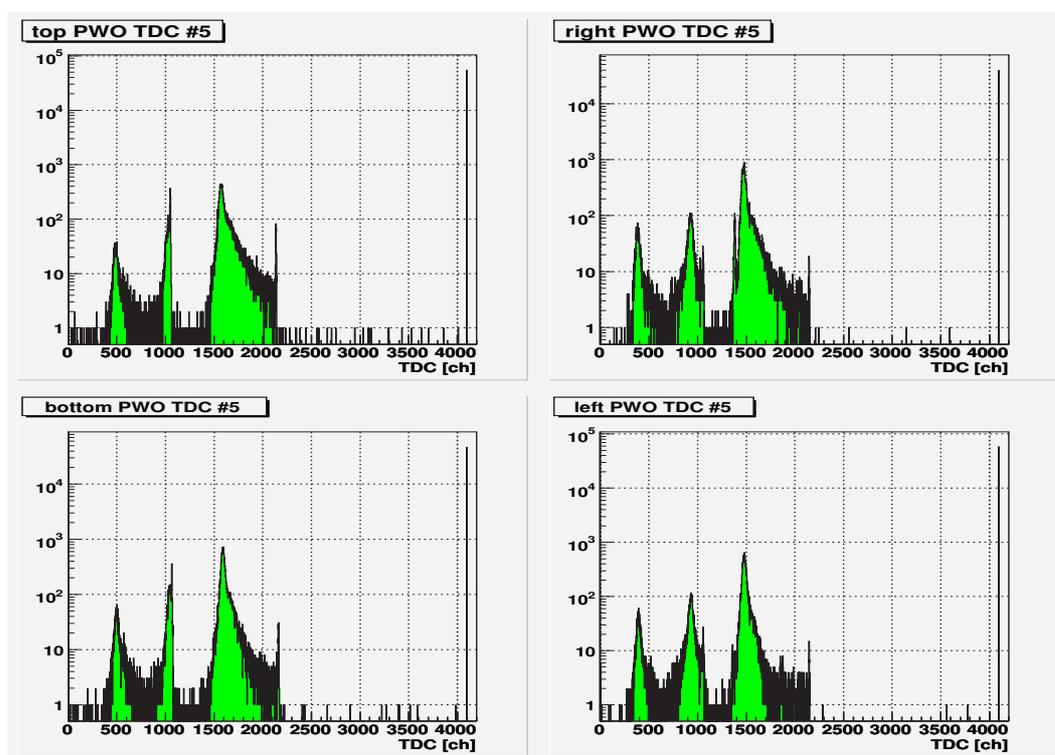


図 3.26: 各アーム中心のカロリメーター TDC 分布

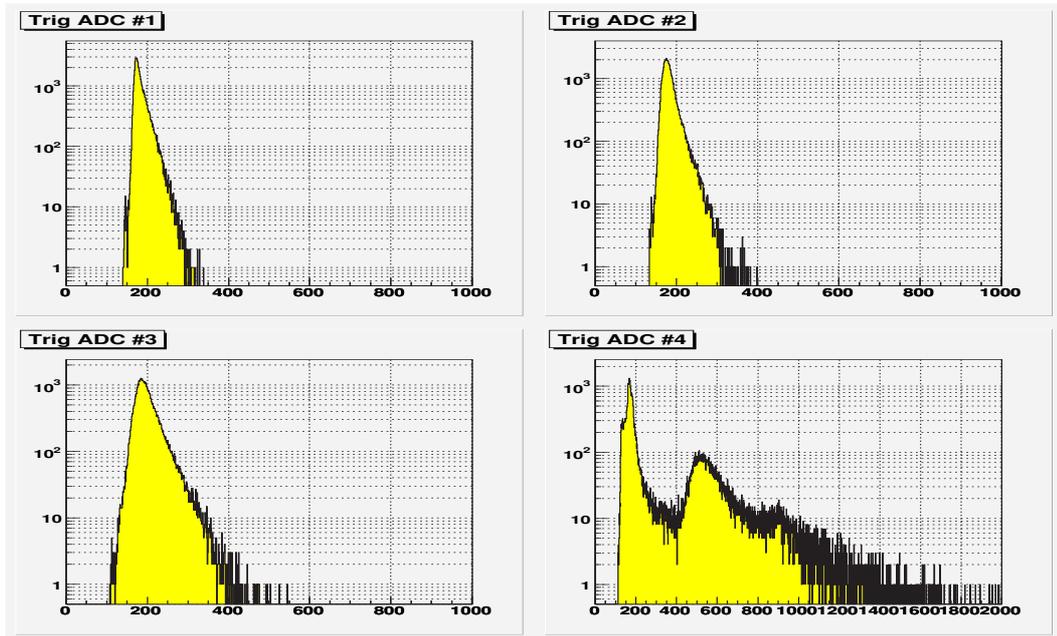


図 3.27: シンチレーション検出器の ADC 分布

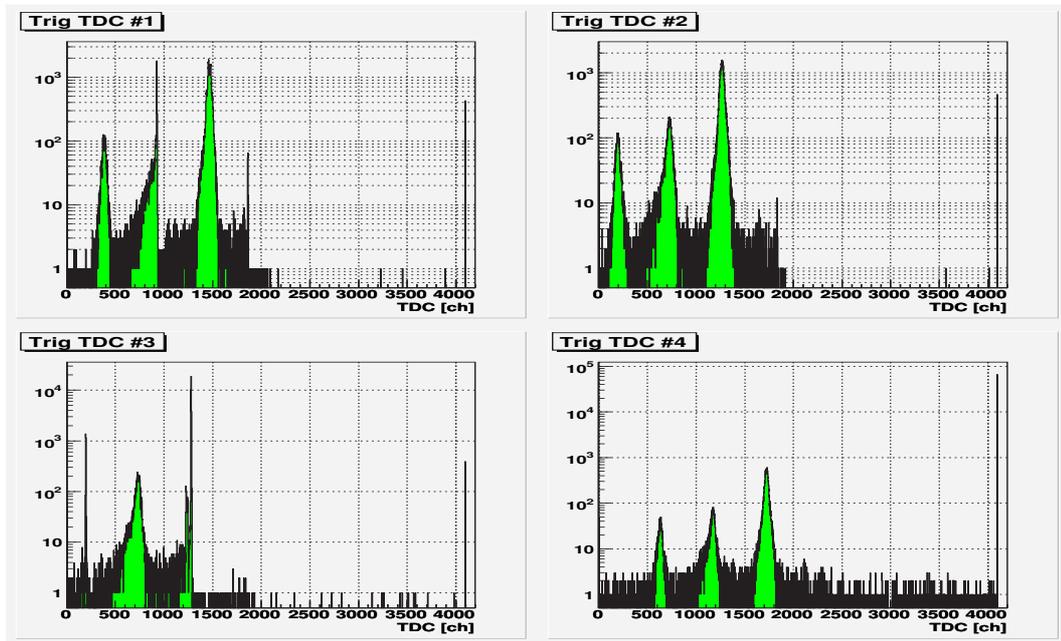


図 3.28: シンチレーション検出器の TDC 分布

第4章 解析

実験により ADC と TDC のデータは得られたが、先に述べているようにカロリメーターの ADC データに対してエネルギー較正を行う必要がある。また、TDC データに関しては、スタートタイミングがどの検出器の出力によるものかがイベントごとに異なる。つまり、イベントごとにスタート基準がバラバラであり何に対しての時間差かが分からない。そこで、粒子が検出器を通過したタイミングと、ある固有の検出器を通過したタイミングとの差をとることにより、TDC データを固有の検出器に対しての粒子の飛行時間に較正する必要がある。

この章ではまず、ADC(エネルギー) データと TDC(時間) データを較正する。その後、全データから有効な物理イベントを絞り、 π^0 生成断面積について検証する。

4.1 データ較正

4.1.1 エネルギー較正

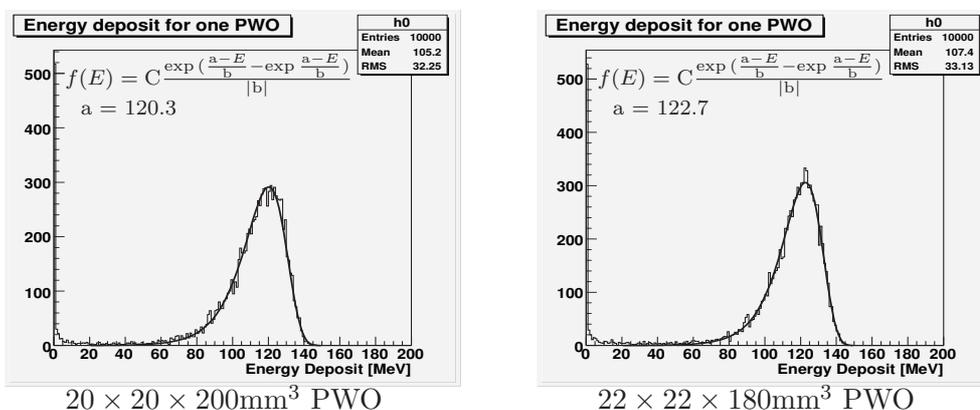


図 4.1: GEANT4 シミュレーションによる PWO のエネルギー分布

GEANT4 シミュレーションによると、 $20 \times 20 \times 200\text{mm}^3$ の PWO の中心へ 150MeV 電子線を入射した場合、電子線が PWO 中で落とすエネルギーの分布は図 4.1 左のようになり、ピーク値は 120.3MeV になることが分かっている [11]。つまり、 $20 \times 20 \times 200\text{mm}^3$ の PWO を用いている、Right アームと Left アームに対して行ったエネルギー較正測定データ (図 3.17, 図 3.19) のピーク値は 120.3MeV に相当すると考えられる。同じように、

$22 \times 22 \times 180 \text{mm}^3$ の PWO に対しての 150MeV 電子線のピーク値 (図 4.1 右) は 122.7MeV であり、Top アームと Bottom アームのエネルギー較正データ (図 3.16, 3.18) のピーク値に相当する。

表 4.1 ~ 4.4 に、各電磁カロリメーターの ADC ペDESTAL、 150MeV の ADC ピーク値、及び ADC の値 [ch] をエネルギー値 [MeV] へ変換する係数を示す。

そして、変換係数を用いて ADC 分布をエネルギー値へ換算したものを図 4.2 ~ 4.5 に、さらに、各アームごとに 9 本のカロリメーターのエネルギー全てを足し合わせた分布を 4.6 に示す。

番号	ペDESTAL [ch]	150MeV ピーク [ch]	変換係数 [MeV/ch]
1	103.9	1183.6	0.139
2	95.6	1084.7	0.152
3	130.4	1446.8	0.114
4	112.3	1145.4	0.145
5	128.6	671.2	0.276
6	108.7	1225.3	0.134
7	106.3	1525.7	0.106
8	119.2	1309.3	0.126
9	118.1	1179.6	0.141

表 4.1: Top アーム 変換係数

番号	ペDESTAL [ch]	150MeV ピーク [ch]	変換係数 [MeV/ch]
1	118.8	1137.0	0.147
2	107.8	1131.9	0.147
3	113.2	1351.3	0.121
4	116.2	1396.0	0.117
5	147.6	574.0	0.352
6	105.5	1401.0	0.116
7	115.7	1092.2	0.154
8	80.3	589.6	0.295
9	81.1	638.8	0.269

表 4.2: Right アーム 変換係数

番号	ペDESTAL [ch]	150MeV ピーク [ch]	変換係数 [MeV/ch]
1	87.6	564.6	0.315
2	84.6	514.7	0.349
3	85.7	653.4	0.264
4	92.9	576.7	0.310
5	101.5	635.2	0.281
6	86.3	636.9	0.272
7	77.3	715.9	0.235
8	83.4	647.9	0.266
9	81.3	649.2	0.264

表 4.3: Bottom アーム 変換係数

番号	ペDESTAL [ch]	150MeV ピーク [ch]	変換係数 [MeV/ch]
1	103.9	677.6	0.262
2	100.4	719.9	0.242
3	105.4	821.3	0.210
4	98.9	833.1	0.204
5	121.8	609.2	0.308
6	104.0	1026.4	0.163
7	—	—	—
8	95.8	1010.1	0.164
9	103.7	642.5	0.278

表 4.4: Left アーム 変換係数

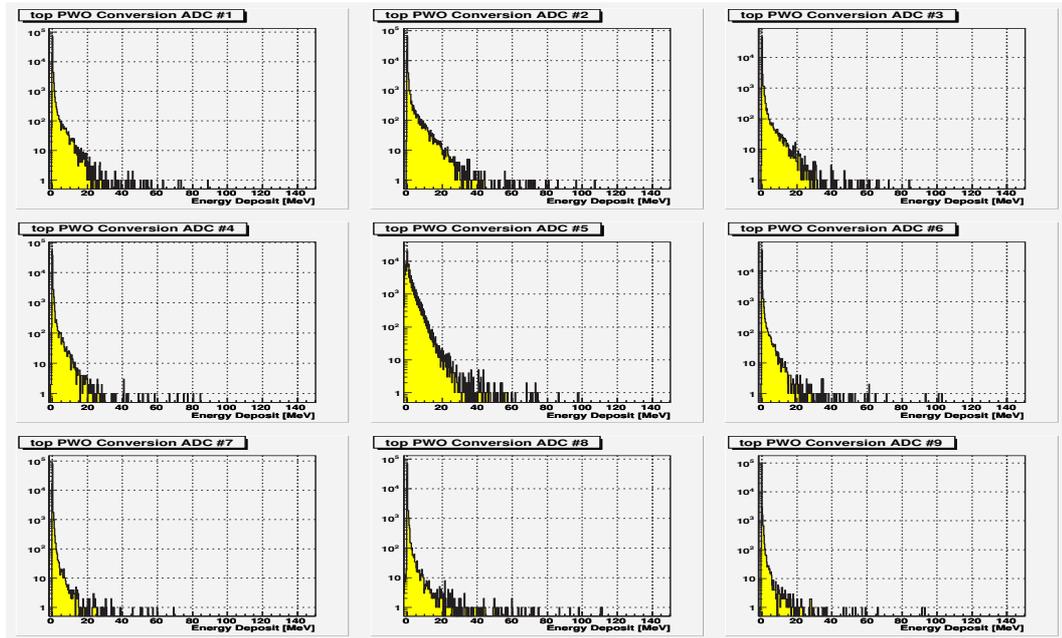


図 4.2: Top アーム エネルギー分布

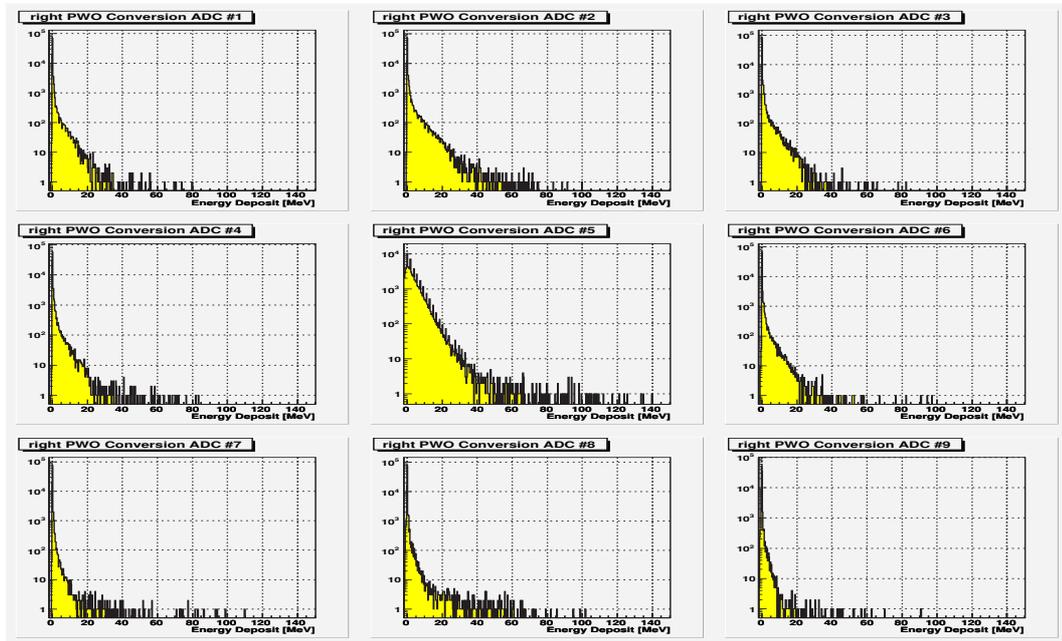


図 4.3: Right アーム エネルギー分布

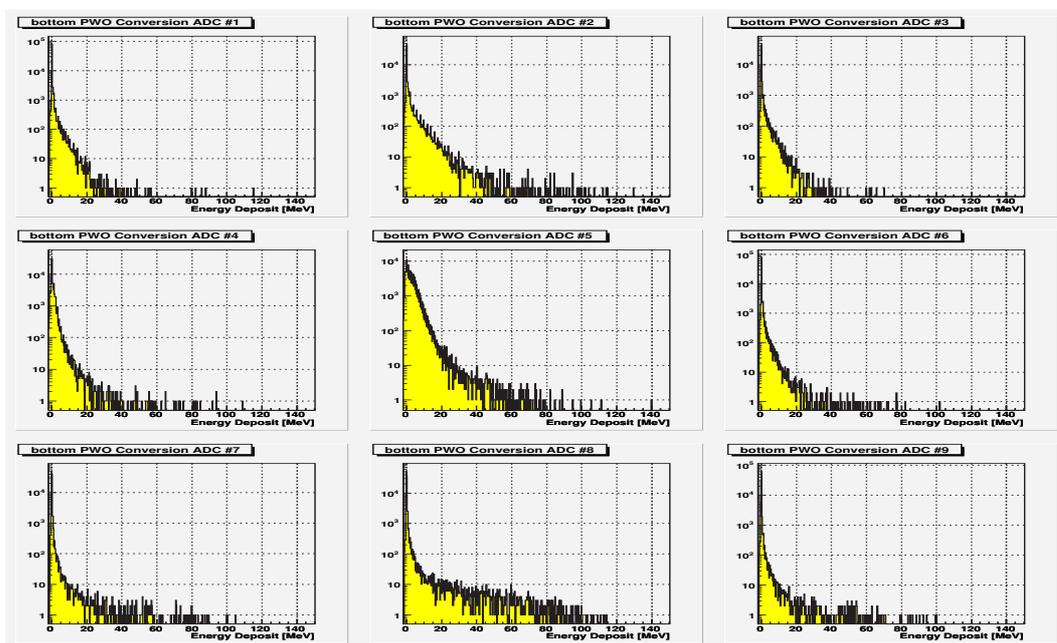


図 4.4: Bottom アーム エネルギー分布

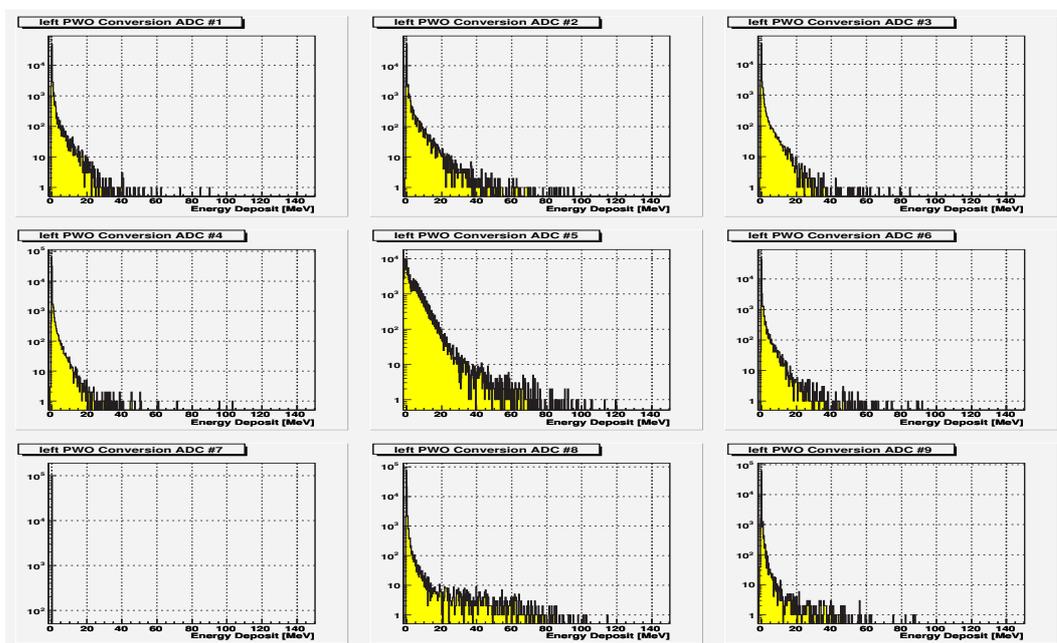


図 4.5: Left アーム エネルギー分布

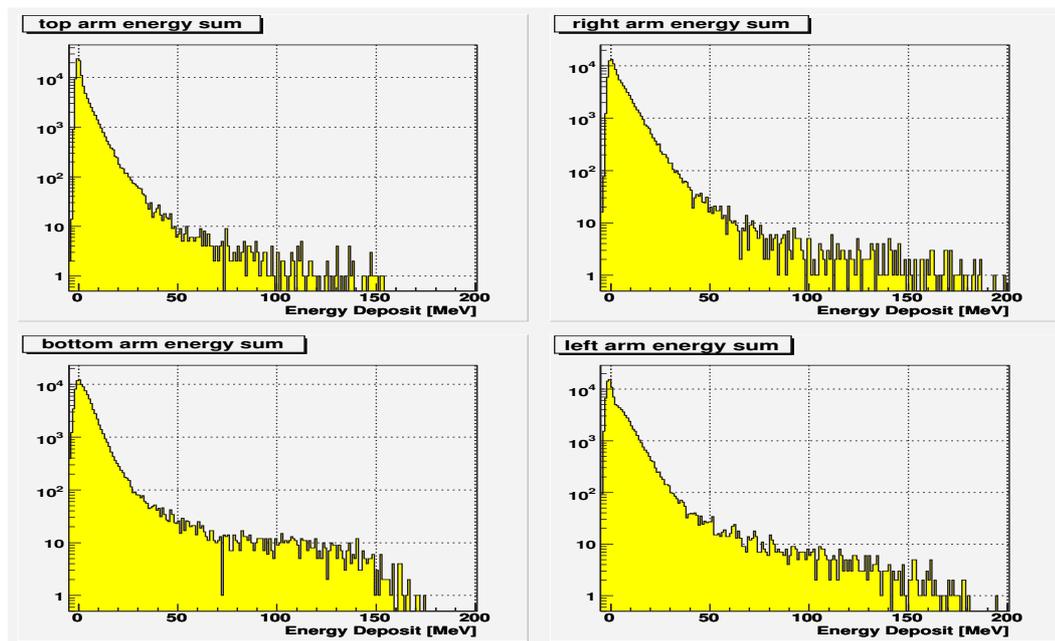


図 4.6: 各アームの合計エネルギー分布

4.1.2 飛行時間較正

先に述べたように、TDC データはイベントごとにスタート基準がバラバラであり何に対しての時間差かが分からない。そこで、今回は標的直前のシンチレーション検出器 (シンチ 3) に粒子が通過するタイミングを基準とした。全ての検出器の TDC データに対して、イベント毎にシンチ 3 の TDC 値との差をとることにより求めた、シンチ 3 から測定した粒子の飛行時間の分布を図 4.7 と図 4.8 に示す。データの並びは、前章と同じ順番である。以降、飛行時間と呼ぶ場合は、常に標的前のシンチレーション検出器から測定した飛行時間のとことを表すこととする。

各アームの TDC 分布とシンチ 4 (Veto 用) のヒストグラムにおいて、右側に 3 つのピークが見える。これは、較正したことによって TDC のスタートタイミングを 3 度変えた影響がオーバーフローイベントで見えているためである。シンチ 3 の飛行時間分布は自身を基準としているため全てゼロである。また、どの分布にもゼロの値に必ずイベントがいくつか存在している。考えられる原因は、TDC 分布 (図 3.28) で見られたシンチ 1、2、3 のオーバーフローピークが消えていることより、3.4.3 節同様データ収集システムの不具合によるものと予測できる。

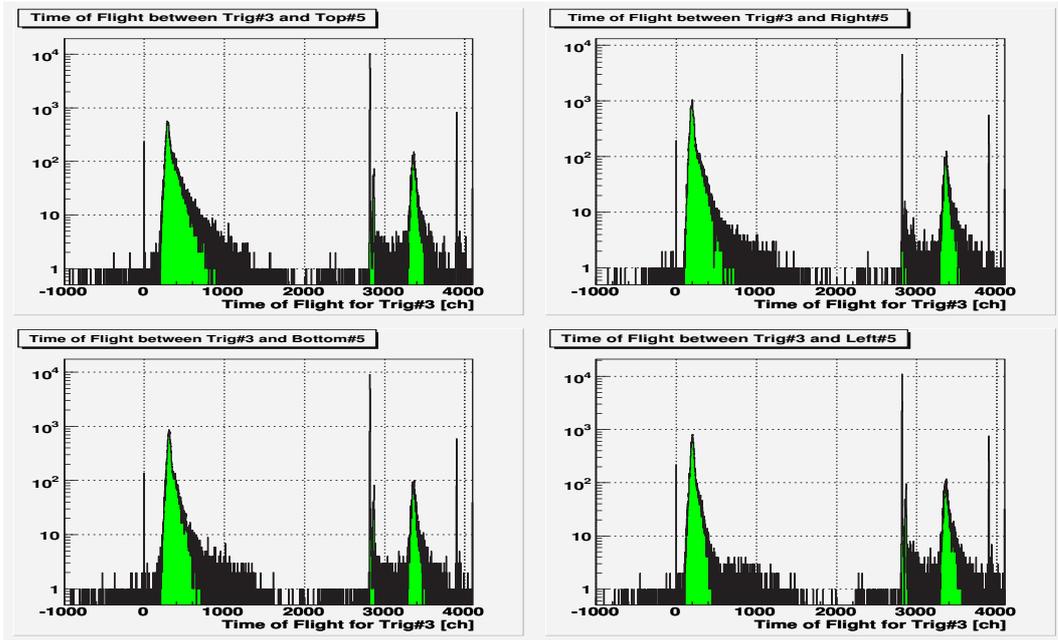


図 4.7: 標的前のシンチレーション検出器を基準とした各アームの飛行時間分布

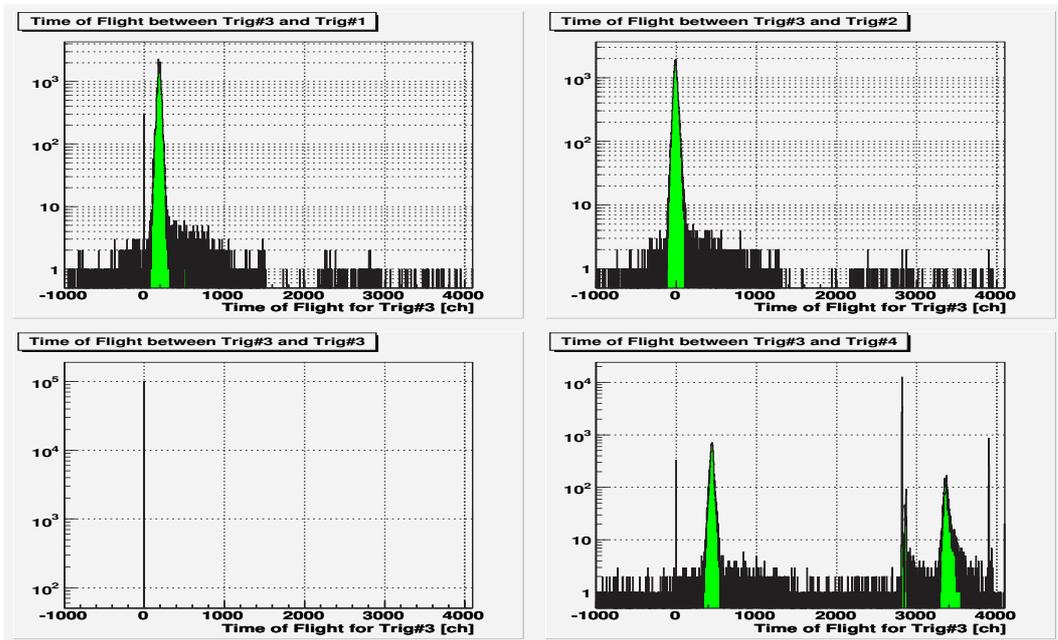


図 4.8: 標的前のシンチレーション検出器を基準とした各シンチレーション検出器の飛行時間分布

4.2 イベント選択

次に、得られたデータから有効な物理イベントへ絞る。

4.2.1 プラスチックシンチレーション検出器のオーバーフローカット

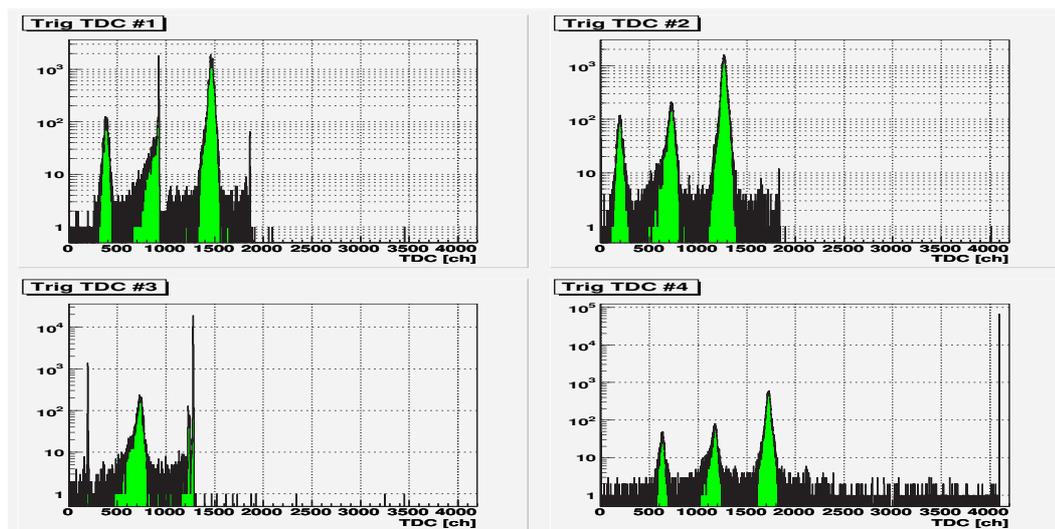


図 4.9: オーバーフローカット後の各シンチレーション検出器 TDC 分布

前で述べているように、トリガー条件として標的前のシンチレーション検出器 3 つへのヒットを要求しているにもかかわらず、ヒットがなかったことを示すオーバーフローイベント (4096ch) が図 3.28 で見られる。これらのイベントは、データ収集システムの不具合によるものと考えられ、物理イベントとは全く関係ないため、図 4.9 のようにカットした。そして、このカットにより予測通り図 4.8 の 0ch のピークは図 4.10 のように無くなった。

カット後の各アームヒットパターンのイベント数を表 4.5 に示す (例 TRBL:Top, Right, Bottom, Left アーム同時にヒットしたイベント数 TB:Top と Bottom アームにだけヒットしたイベント数)。ここで、1 アーム 9 本のカロリメーターのうち 1 本でも ADC の値がペダスタルよりも大きい値を示すものがあつた場合は、そのアームへヒットがあつたとしている。Right アームが関与したイベントが他のアームよりも多いことが分かる。これは、REFER のビームが時間帯によって Right アーム側へ寄る傾向があつたため、Right アームの反応するイベントが増えたためと考えられる。また、測定の際はトリガー条件より、2 アームの中心に配置されたカロリメーターへ反応があつた場合にデータを収集する要求をしていたにも関わらず、Bottom や Left アームにだけヒットしたイベントも存在している。これは、データ収集システムの不具合によるため、物理イベントとは関係ないと考えられるので、後にカットする。

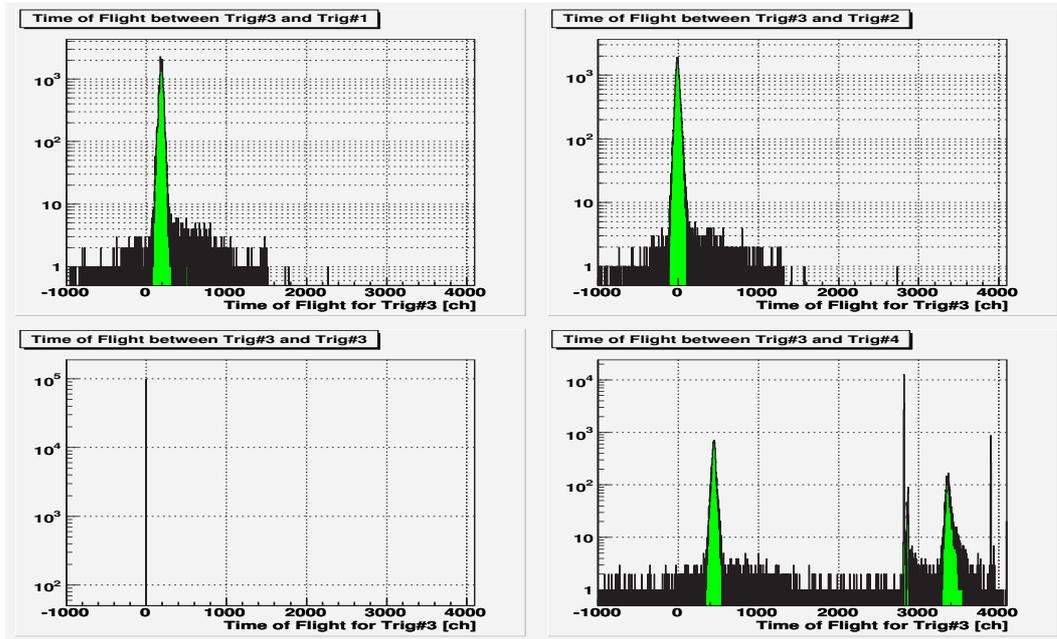


図 4.10: シンチレーション検出器のオーバーフローカット後における各シンチレーション検出器飛行時間分布

パターン	イベント数	total	99930
TRBL	5595		
TRB	13258	RBL	8334
BLT	6493	LTR	6236
TB	6528	RL	6710
TR	13687	RB	17478
BL	8964	LT	6641
T	0	R	0
B	3	L	1

表 4.5: シンチレーション検出器のオーバーフローカット後の各アームヒットパターンにおいてのイベント数

イベントデータの検証

以下に、シンチレーション検出器のオーバーフローカットを加えたデータについて検証していく。検証の方法としては、今実験においては π^0 の崩壊による2のアームと π^0 と同じエネルギー分布であるバックグラウンドイベントがターゲットである。 π^0 が生成されるイベントにおいては、150MeV電子線のエネルギーほぼ π^0 生成に用いられ、3アーム以上にヒットするとは考えにくい。よって、今回は2アームだけのヒットを考察の対象とし、TopとBottom、RightとLeft、TopとRight、RightとBottom、BottomとLeft、LeftとTopアームだけのヒットイベント、計6通りについてのデータを見ていく。図4.11～図4.52に、6通りの組み合わせそれぞれに対して、イベント毎に2つのアーム全体へ落としたエネルギー分布とその相関、2つのアームの中心に配置されたカロリメーターの飛行時間(粒子が入射した時間)分布とその相関、さらに、2つの飛行時間の差を取った分布を示す。

どの組み合わせにおいても、2アームの飛行時間の相関分布より、同時に粒子が入射したことを示す右上45度方向の分布が確認できる。同様に、2アームの飛行時間の差を取った分布より、2アームへ同時に粒子が入射したイベントが作るピークも見える。2アームの飛行時間の差をとった分布のピーク値が0chでないが、これはカロリメーターからTDC入力端子までのシグナルケーブルの長さが違うためである。

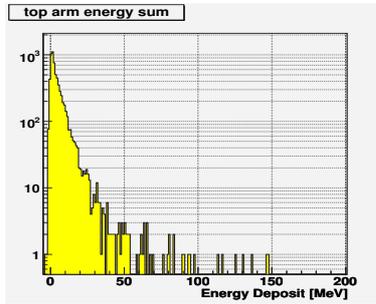


図 4.11: Top アーム エネルギー分布

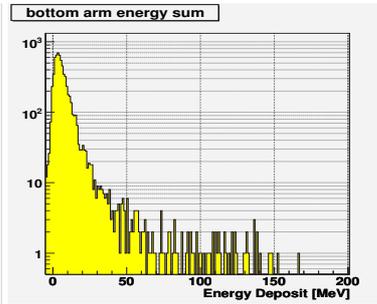


図 4.12: Bottom アーム エネルギー分布

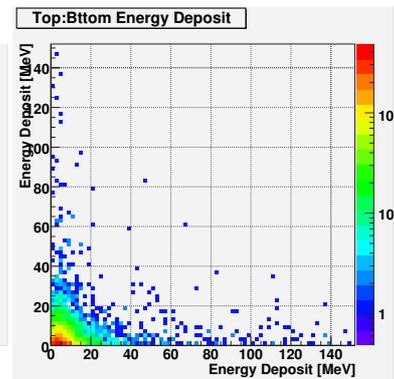


図 4.13: Top と Bottom アームのエネルギー相関

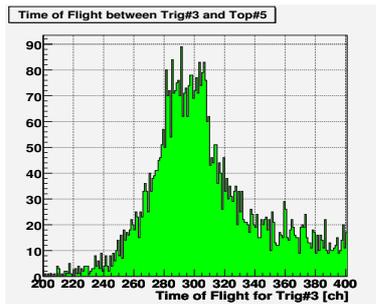


図 4.14: Top アーム における飛行時間分布

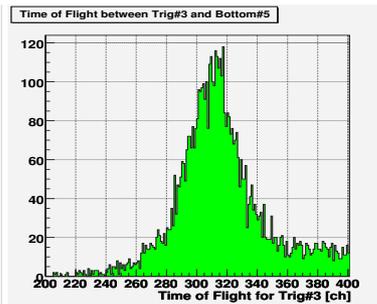


図 4.15: Bottom アーム における飛行時間分布

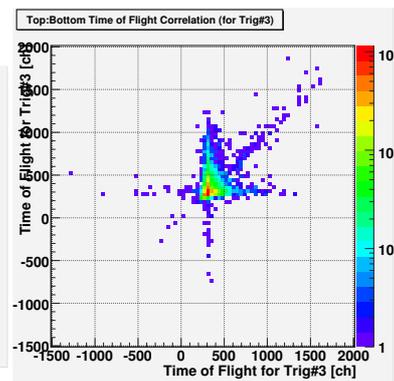


図 4.16: Top と Bottom アームにおける飛行時間相関

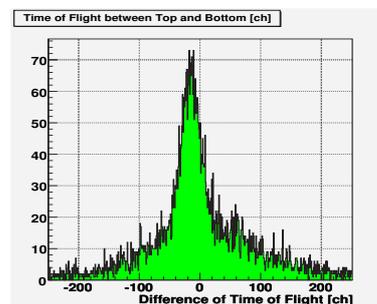


図 4.17: Top と Bottom アーム における飛行時間差

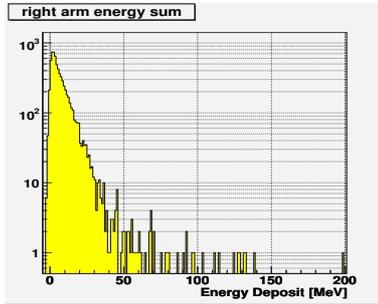


図 4.18: Right アーム エネルギー分布

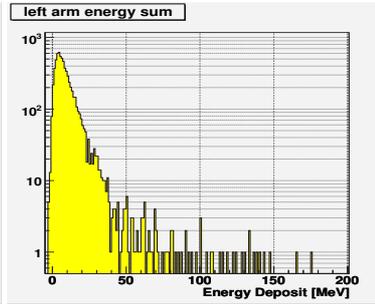


図 4.19: Left アーム エネルギー分布

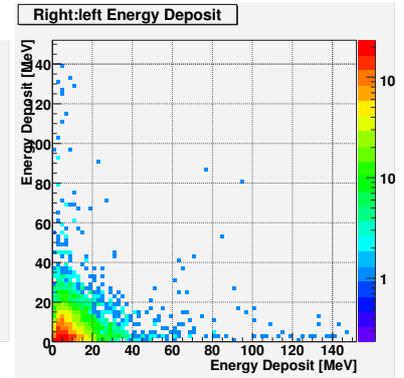


図 4.20: Right と Left アームのエネルギー相関

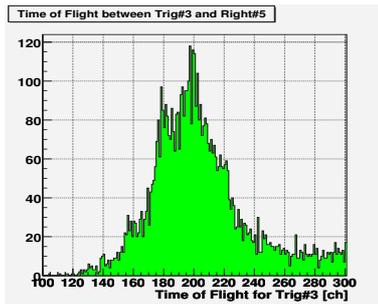


図 4.21: Right アーム における飛行時間分布

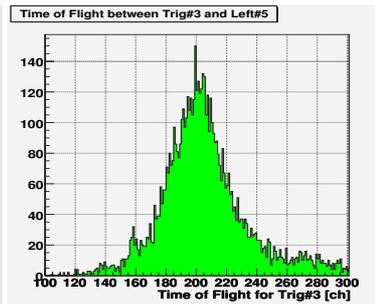


図 4.22: Left アーム における飛行時間分布

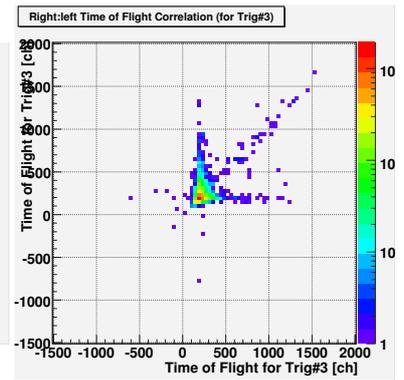


図 4.23: Right と Left アーム における飛行時間相関

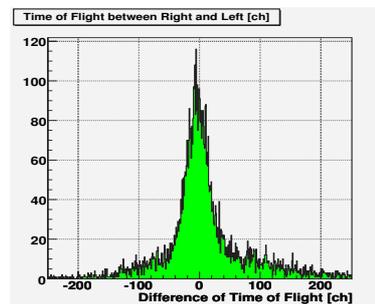


図 4.24: Right と Left アーム における飛行時間差

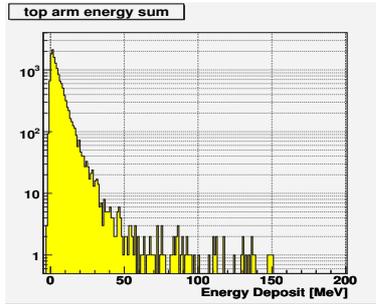


図 4.25: Top アーム エネルギー分布

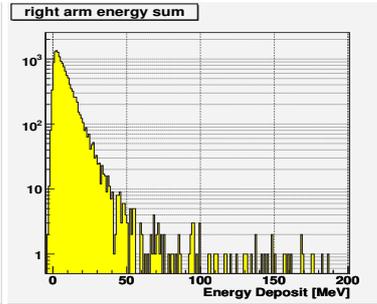


図 4.26: Right アーム エネルギー分布

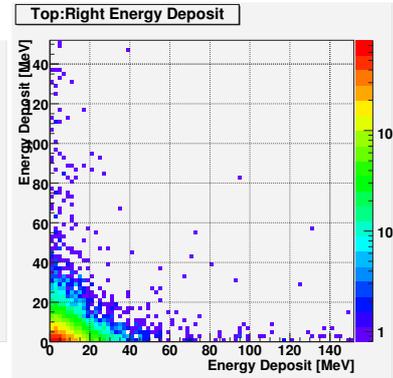


図 4.27: Top と Right アームのエネルギー相関

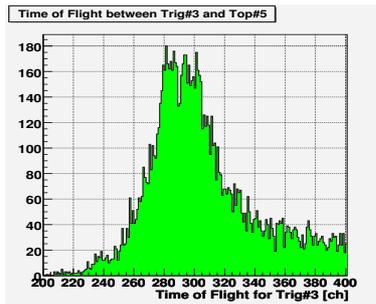


図 4.28: Top アーム における飛行時間分布

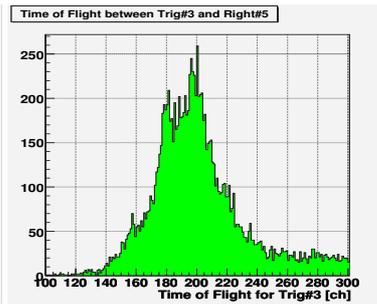


図 4.29: Right アーム における飛行時間分布

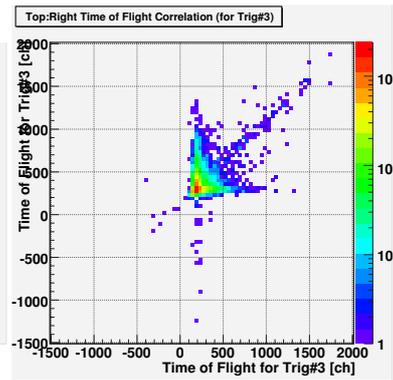


図 4.30: Top と Right アーム における飛行時間相関

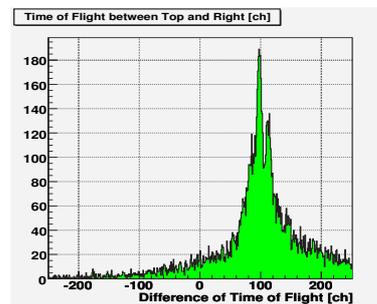


図 4.31: Top と Right アーム における飛行時間差

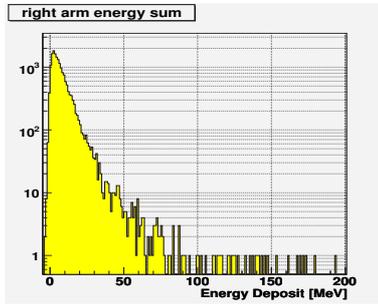


図 4.32: Right アーム エネルギー分布

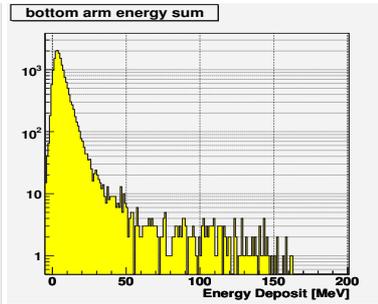


図 4.33: Bottom アーム エネルギー分布

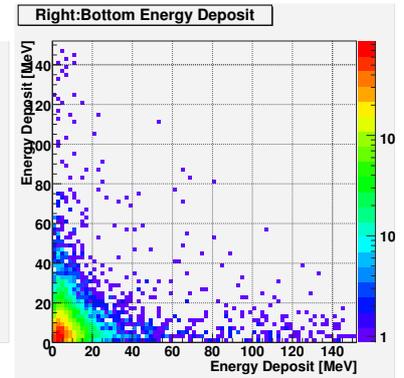


図 4.34: Right と Bottom アームのエネルギー相関

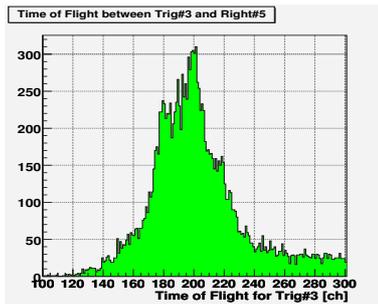


図 4.35: Right アーム における飛行時間分布

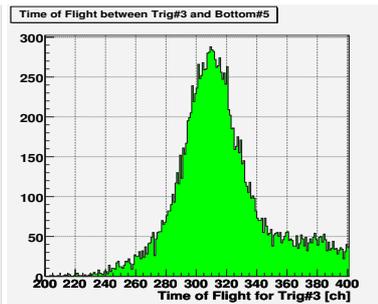


図 4.36: Bottom アーム における飛行時間分布

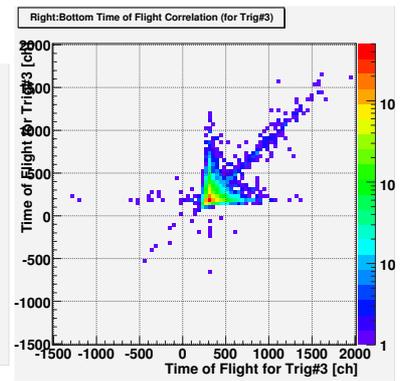


図 4.37: Right と Bottom アーム における飛行時間相関

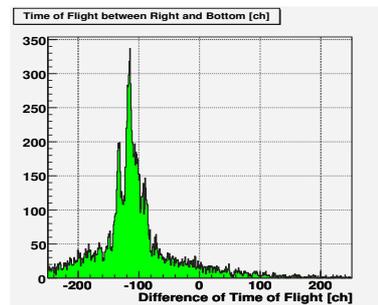


図 4.38: Right と Bottom アーム における飛行時間差

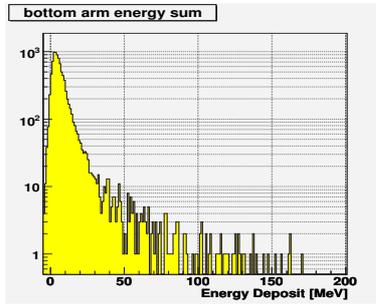


図 4.39: Bottom アーム エネルギー分布

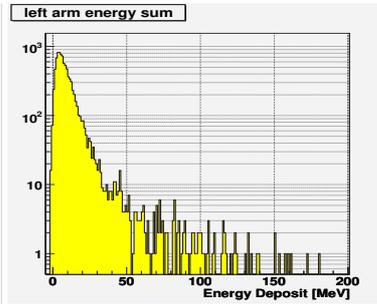


図 4.40: Left アーム エネルギー分布

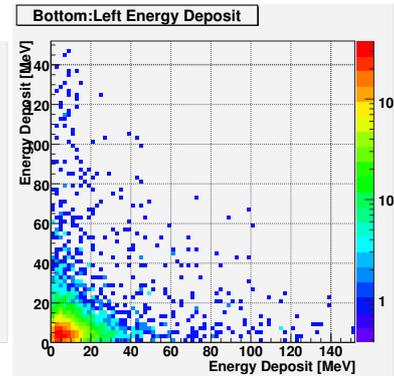


図 4.41: Bottom と Left アームのエネルギー相関

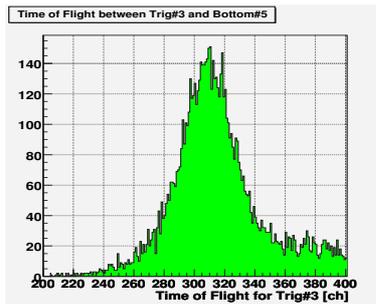


図 4.42: Bottom アーム における飛行時間分布

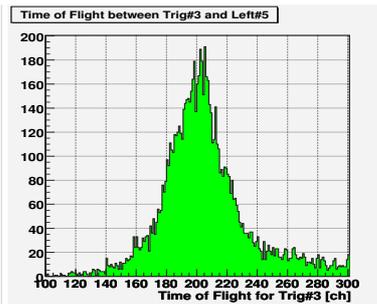


図 4.43: Left アーム における飛行時間分布

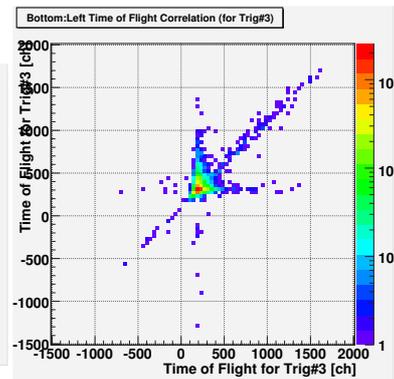


図 4.44: Bottom と Left アーム における飛行時間相関

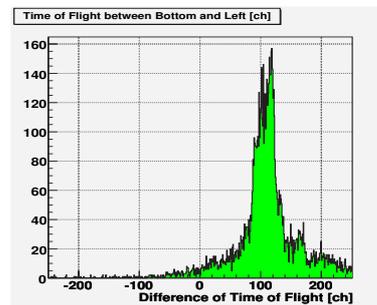


図 4.45: Bottom と Left アーム における飛行時間差

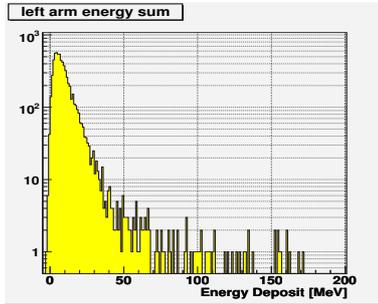


図 4.46: Left アーム エネルギー分布

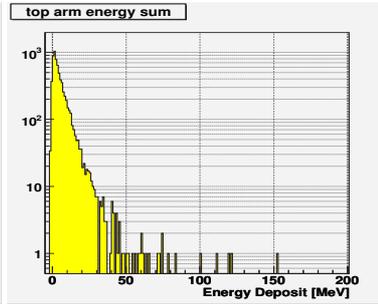


図 4.47: Top アーム エネルギー分布

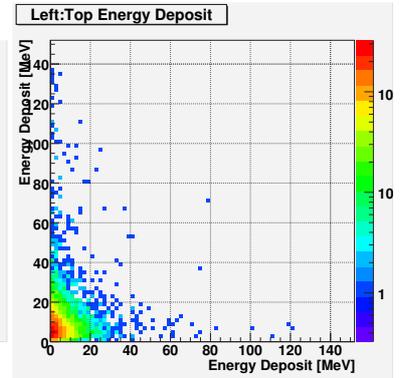


図 4.48: Left と Top アームのエネルギー相関

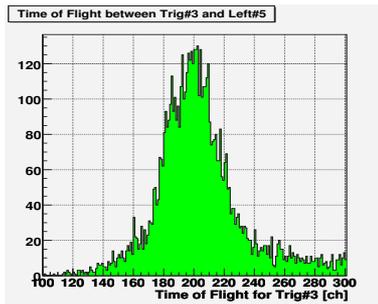


図 4.49: Left アーム における飛行時間分布

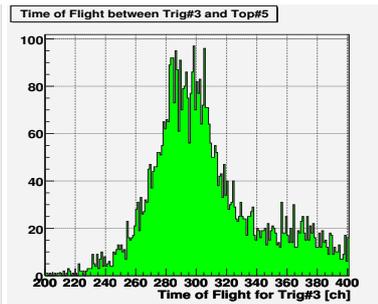


図 4.50: Top アーム における飛行時間分布

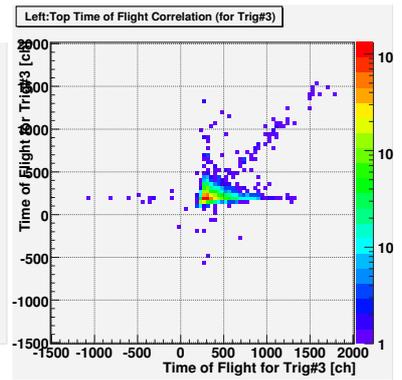


図 4.51: Left と Top アーム における飛行時間相関

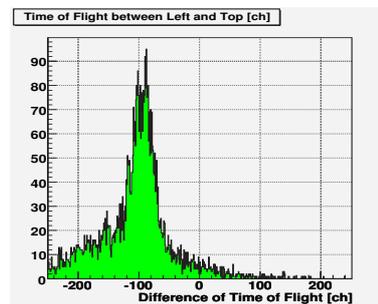


図 4.52: Left と Top アーム における飛行時間差

4.2.2 ベトシンチレーション検出器によるイベント選択

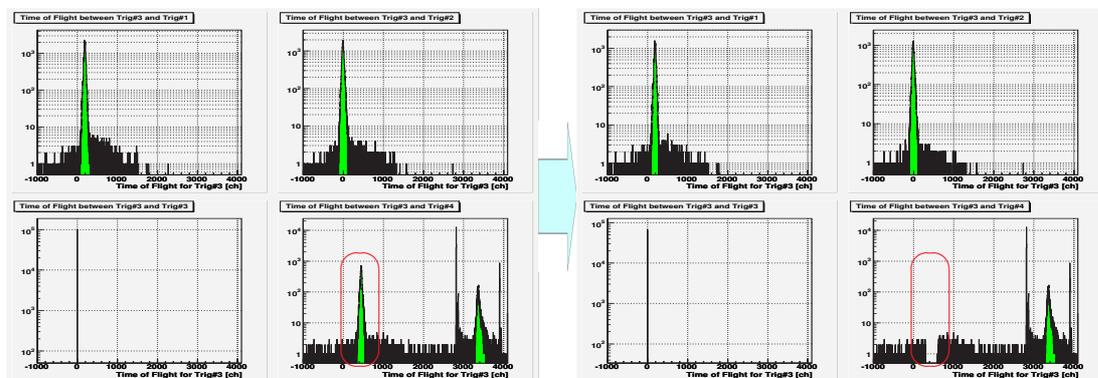


図 4.53: ベトシンチレーション検出器の飛行時間によるカット

π^0 が生成されるイベントにおいて、電子線は標的中で大きな反応を起こすため、標的を突き抜け、ベトシンチレーション検出器 (シンチ 4) にヒットしないと考えられる。そこで、この小節では、前小節のカットに加え、ベトシンチレーション検出器のデータによるカットを加える。カットをする部分は、電子線が標的前の 3 つのシンチレーション検出器 (シンチ 1、2、3) と鉄標的を通り抜けた後にベトシンチレーション検出器へ到達した時間に相当する、ベトシンチレーション検出器の飛行時間分布において 300 ~ 600ch の部分 (図 4.53 中の赤枠部分) である。表 4.6 にカット後の各アームヒットパターンにおけるイベント数を表 4.5 同様に示す。

パターン	イベント数	total	66855
TRBL	4017		
TRB	9038	RBL	5630
BLT	4447	LTR	4324
TB	4270	RL	4438
TR	9084	RB	11238
BL	5817	LT	4518
T	0	R	0
B	2	L	1

表 4.6: ベトシンチレーション検出器の飛行時間データによるカット後の各アームヒットパターンにおけるイベント数

4.2.3 2アームのカロリメーターにおける飛行時間差によるカット

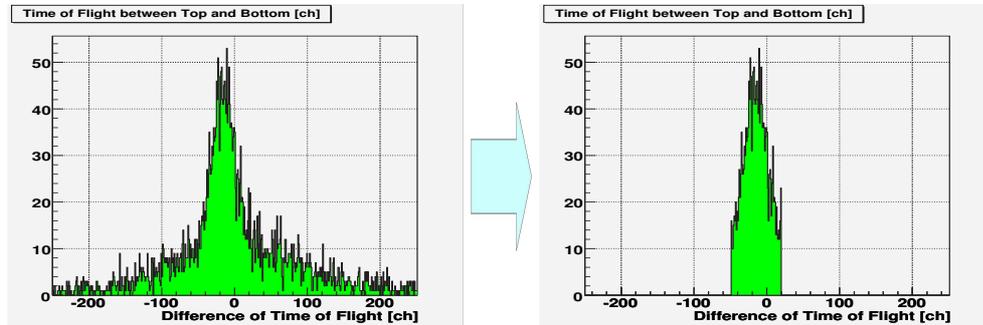


図 4.54: Top と Bottom アームにおける飛行時間差分布。左が飛行時間差によるカット前、右がカット後。

π^0 が生成されるイベントは同時に 2 が 2 つのアームへ入射するため、2 アームのカロリメーターにおける (シンチ 3 から測定した) 飛行時間は同じになる。この小節では、全小節までのカットに続き 2 アームのカロリメーターの飛行時間差によるカットを加え、さらに有効な物理イベントへ絞る。カットする部分は、Top と Bottom アームにのみヒットがあったイベントにおいては、図 4.54 のピーク以外の部分である。残ったピークは、粒子が 2 アームへ同時に入射したイベントに相当している。他の、Right と Left、Top と Right、Right と Bottom、Bottom と Left、Left と Top アームだけのヒットイベントにおいても同じ方法でカットを行った。以下に、全小節までのカットに加え、2 つのアームの飛行時間差によるカットを行ったデータにおける各アームヒットパターンのイベント数を示す。また、次ページより 4.2.1 節同様、2 アームだけにヒットした各 6 通りの組み合わせについて載せる。どの組み合わせでも、飛行時間差でカットされている様子が分かる。

パターン	イベント数	total	36612
TRBL	2310		
TRB	4820	RBL	3391
BLT	2399	LTR	2377
TB	2013	RL	2859
TR	4652	RB	6059
BL	3463	LT	2269
T	0	R	0
B	0	L	0

表 4.7: 2アームのカロリメーターにおける飛行時間差によるカット後の、各アームヒットパターンにおけるイベント数

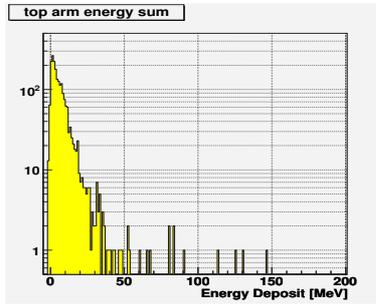


図 4.55: Top アーム エネルギー分布

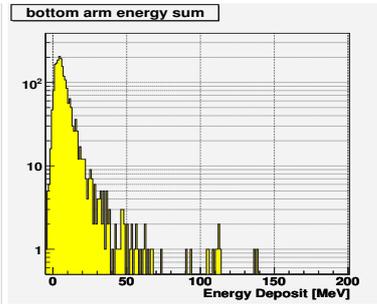


図 4.56: Bottom アーム エネルギー分布

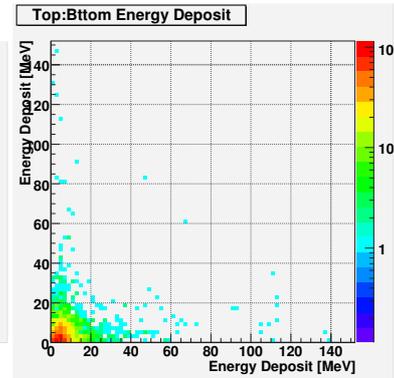


図 4.57: Top と Bottom アームのエネルギー相関

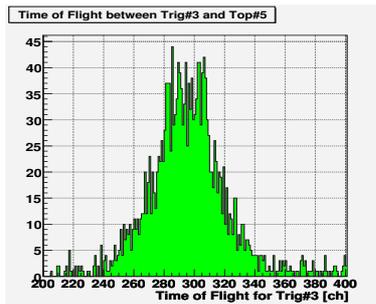


図 4.58: Top アーム における飛行時間分布

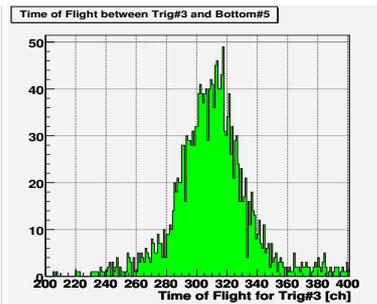


図 4.59: Bottom アーム における飛行時間分布

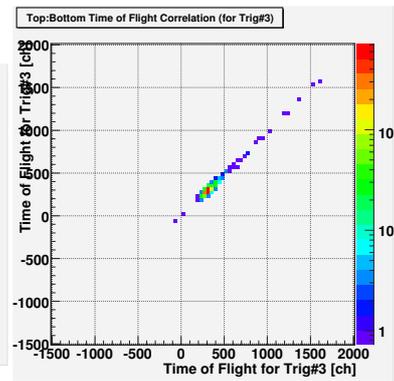


図 4.60: Top と Bottom アーム における飛行時間相関

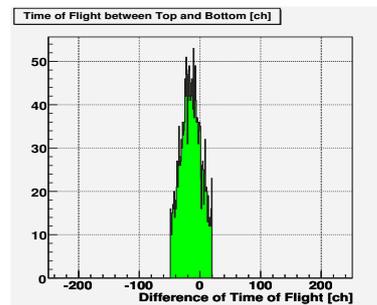


図 4.61: Top と Bottom アーム における飛行時間差

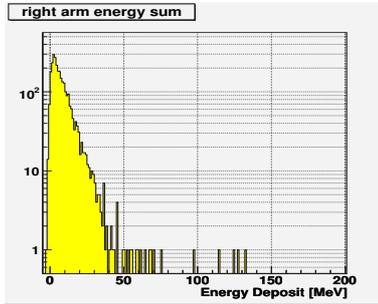


図 4.62: Right アーム エネルギー分布

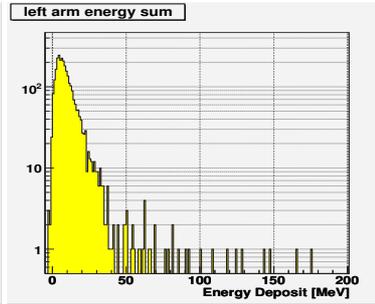


図 4.63: Left アーム エネルギー分布

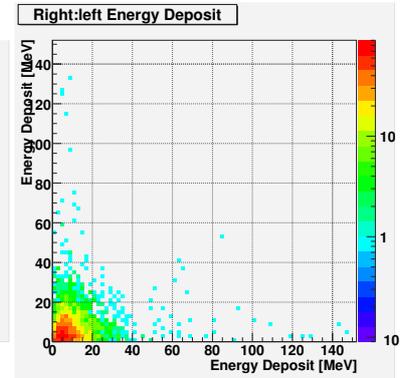


図 4.64: Right と Left アームのエネルギー相関

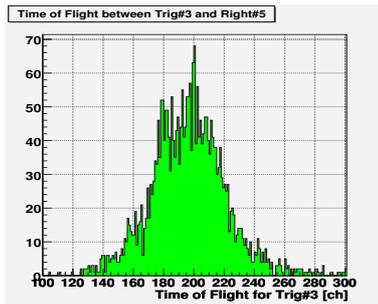


図 4.65: Right アーム における飛行時間分布

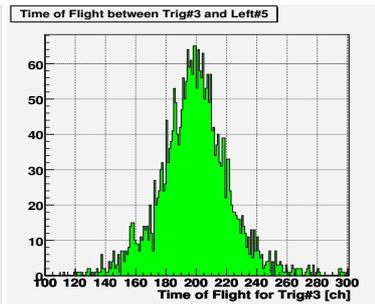


図 4.66: Left アーム における飛行時間分布

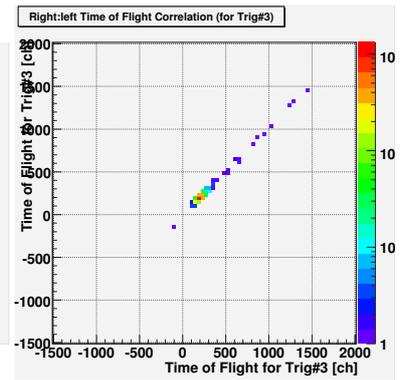


図 4.67: Right と Left アーム における飛行時間相関

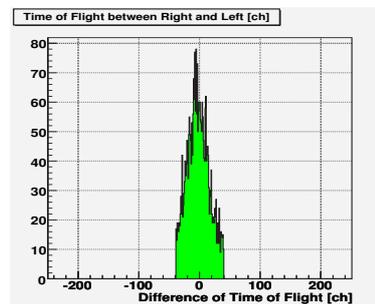


図 4.68: Right と Left アーム における飛行時間差

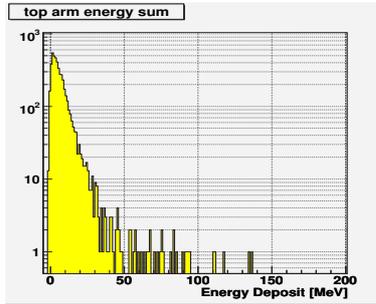


図 4.69: Top アーム エネルギー分布

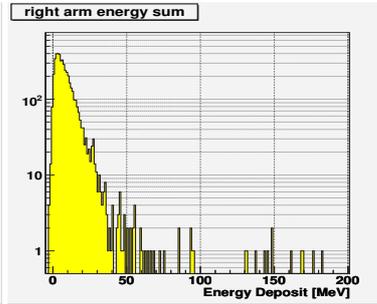


図 4.70: Right アーム エネルギー分布

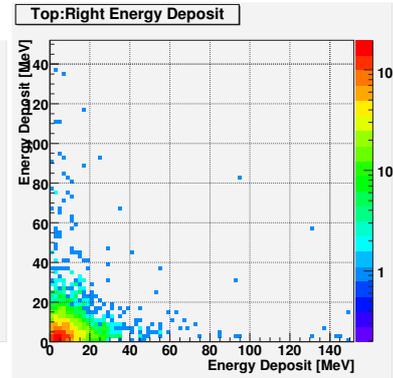


図 4.71: Top と Right アームのエネルギー相関

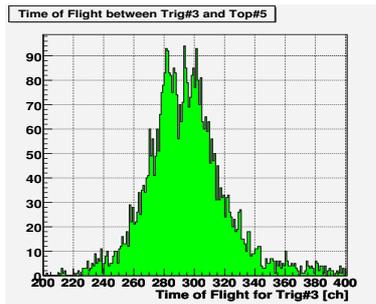


図 4.72: Top アーム における飛行時間分布

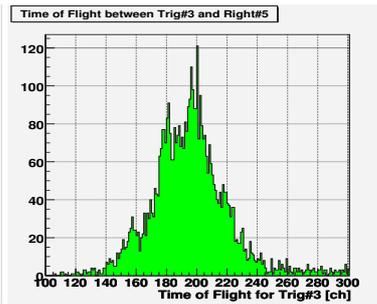


図 4.73: Right アーム における飛行時間分布

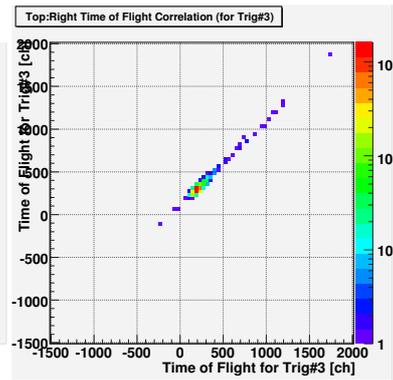


図 4.74: Top と Right アーム における飛行時間相関

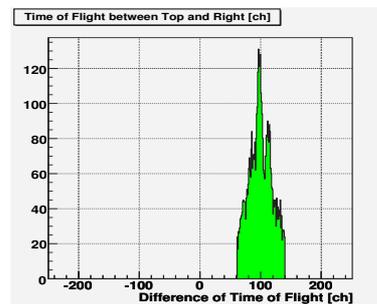


図 4.75: Top と Right アーム における飛行時間差

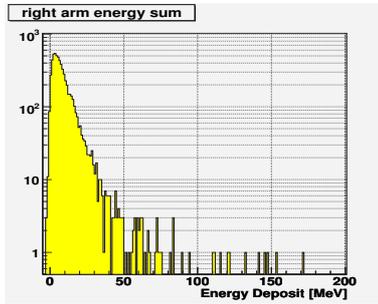


図 4.76: Right アーム エネルギー分布

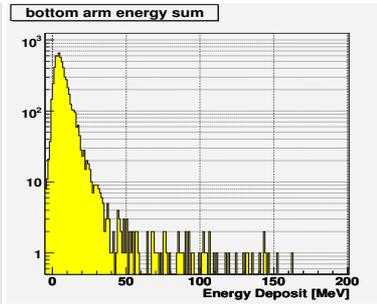


図 4.77: Bottom アーム エネルギー分布

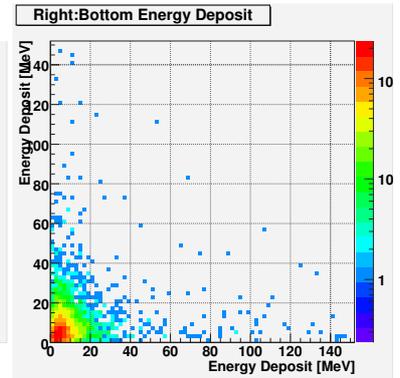


図 4.78: Right と Bottom アームのエネルギー相関

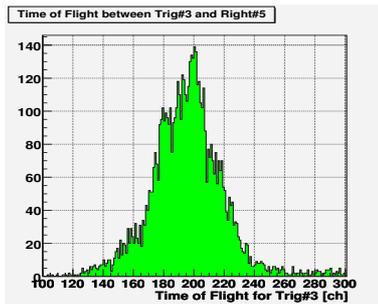


図 4.79: Right アーム における飛行時間分布

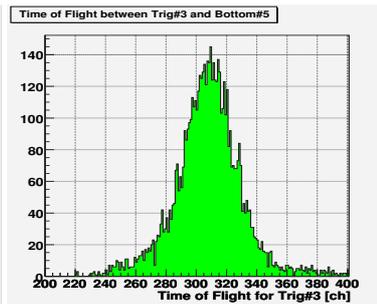


図 4.80: Bottom アーム における飛行時間分布

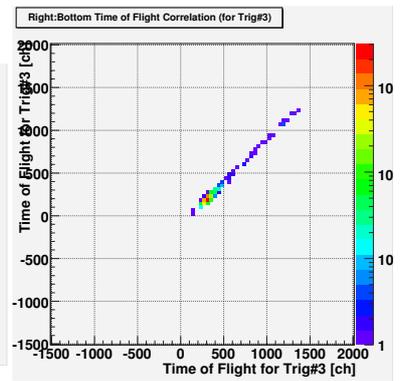


図 4.81: Right と Bottom アーム における飛行時間相関

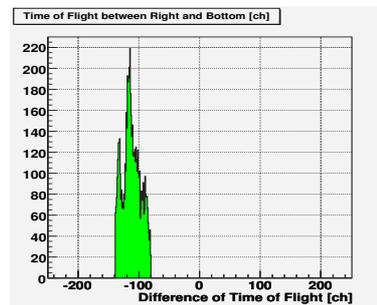


図 4.82: Right と Bottom アーム における飛行時間差

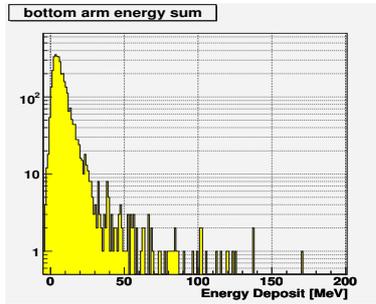


図 4.83: Bottom アーム エネルギー分布

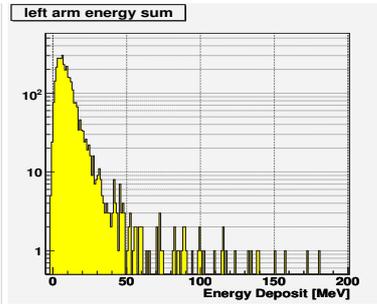


図 4.84: Left アーム エネルギー分布

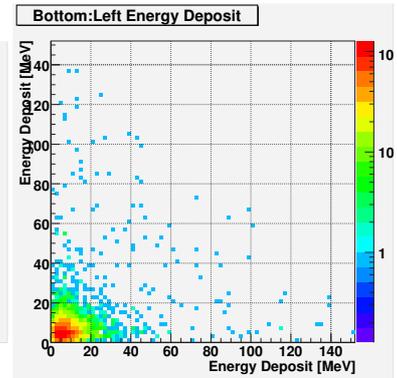


図 4.85: Bottom と Left アームのエネルギー相関

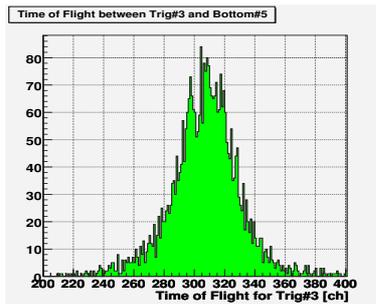


図 4.86: Bottom アーム における飛行時間分布

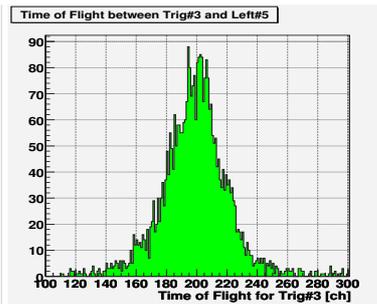


図 4.87: Left アーム における飛行時間分布

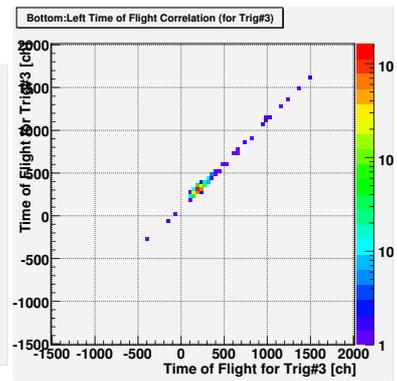


図 4.88: Bottom と Left アーム における飛行時間相関

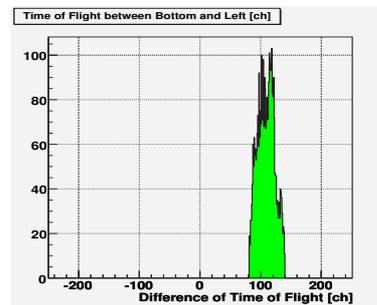


図 4.89: Bottom と Left アーム における飛行時間差

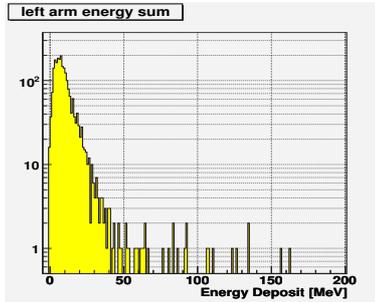


図 4.90: Left アーム エネルギー分布

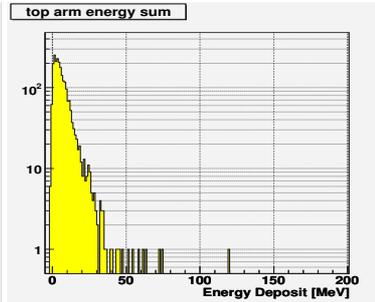


図 4.91: Top アーム エネルギー分布

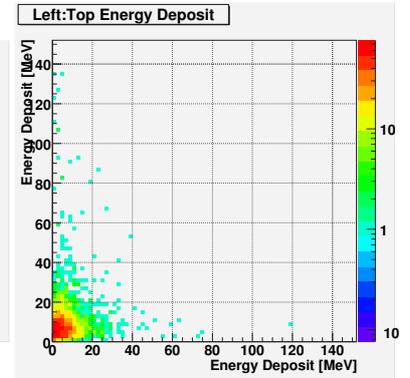


図 4.92: Left と Top アームのエネルギー相関

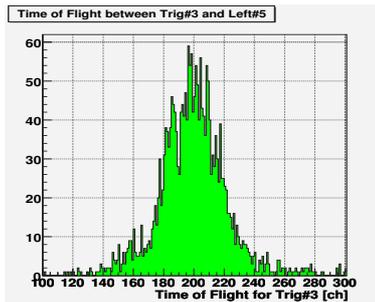


図 4.93: Left アーム における飛行時間分布

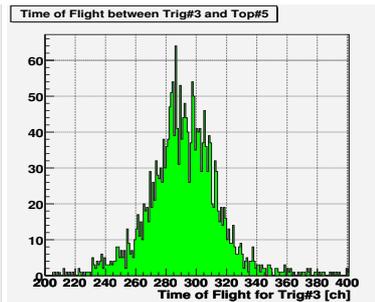


図 4.94: Top アーム における飛行時間分布

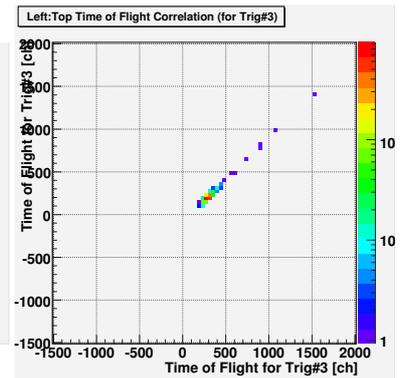


図 4.95: Left と Top アーム における飛行時間相関

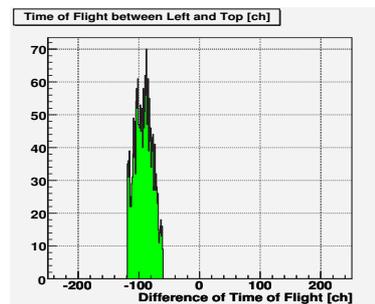


図 4.96: Left と Top アーム における飛行時間差

4.3 考察

この節では始めに、前節までのカット後のデータから、トリガー条件による各アームのヒットイベントの偏りをなくす。そして、 π^0 イベントと見なすエネルギー範囲を設定し π^0 の生成断面積を検証する。

4.3.1 各アームのトリガー閾値の均一化

実験の測定データはトリガー条件 (3.4.2 節参照) によって、各アームでトリガー閾値が異なっている。そのため、各アームのヒットイベント数はトリガー閾値による偏りがある。そこで、各アームに対して同じトリガー閾値を設定することによって、閾値によるイベント数の偏りを消す。

各アームのトリガー閾値は、閾値を知りたいアーム自身の中心カロリメーターにヒットのあるデータから知ることができる。つまり、Top と Bottom アームのトリガー閾値は、Top と Bottom アームの中心カロリメーターにヒットがあるデータにおいて、各中心カロリメーターのエネルギー分布を見たときに、立ち上がりの位置から得られる。この方法より、4 アーム中では、Left アームが最も閾値が高く、値は 4MeV であることが分かった。よって、各アームのトリガー閾値を全て 4MeV に揃える。前節のカットに加え、各アームの中心カロリメーターに 4MeV 以上のヒットを要求したデータのイベント数を表 4.8 に示す。

パターン	イベント数	total	13196
TRBL	957		
TRB	1554	RBL	1445
BLT	945	LTR	934
TB	522	RL	1171
TR	1197	RB	2177
BL	1473	LT	811
T	0	R	0
B	0	L	0

表 4.8: 前節までのカットに加え各アームのトリガー閾値を全て 4MeV に揃えた後の各アームヒットパターンにおけるイベント数

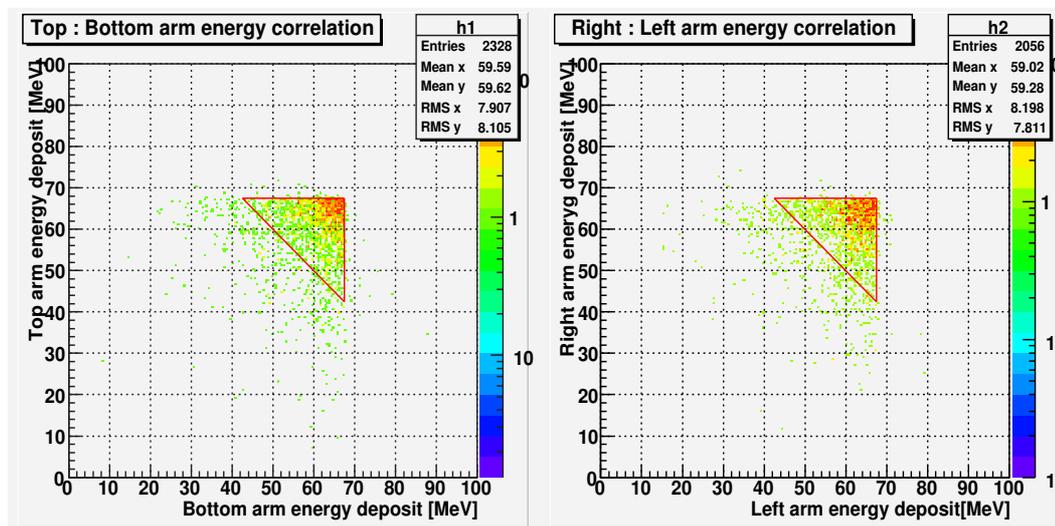
4.3.2 π^0 イベントのエネルギー範囲

図 4.97: GEANT4シミュレーションにおいて、本実験セットアップで同じ測定条件 (4.0MeV のトリガー閾値) を課した場合の、向かい合ったアーム全体に落とすエネルギー分布の相関。左が Top と Bottom アームの相関、右が Right と Left の相関。

エネルギー分布から、 π^0 のイベント数を調べるには、 π^0 のイベントとするエネルギー範囲を設定しなければならない。

GEANT4シミュレーションによれば、本実験セットアップにおいて、標的中で一様に π^0 の崩壊による 2γ を全立体角へ発生させ、2アームの中心カロリメーターに 4.0MeV 以上のヒットを要求した場合、向かい合ったアーム全体に落とすエネルギー分布は図 4.97 のようになる [11]。このうち、2つのアームへ合計 110MeV 以上のヒットがあるイベント (図 4.97 中赤枠部分) は全体の 8 割以上であるため、今回は 2つのアームへ合計 110MeV 以上のヒットがある場合を π^0 のイベントであるとした。そして、カロリメーターの分解能は $3\%/\sqrt{E[\text{GeV}]}$ であるとし、本実験における π^0 イベント数は、図 4.97 中赤枠部分に $3\%/\sqrt{E[\text{GeV}]}$ の分解能を加えた範囲内のイベント数とする。

前節までのカット後のデータにおいて、各アームの中心カロリメーターに 4MeV 以上のヒットを要求したときの、各アーム同士のエネルギー相関図を図 4.98 に示す。左上から右の順に、Top と Bottom、Right と Left、Top と Right、Right と Bottom、Bottom と Left、Left と Top アームにのみヒットがあった場合の、各アームのエネルギー相関図である。先に設定した π^0 イベントの範囲を赤枠で示す。それに加えてカロリメーターの分解能の揺らぎの範囲を緑枠で示してある。

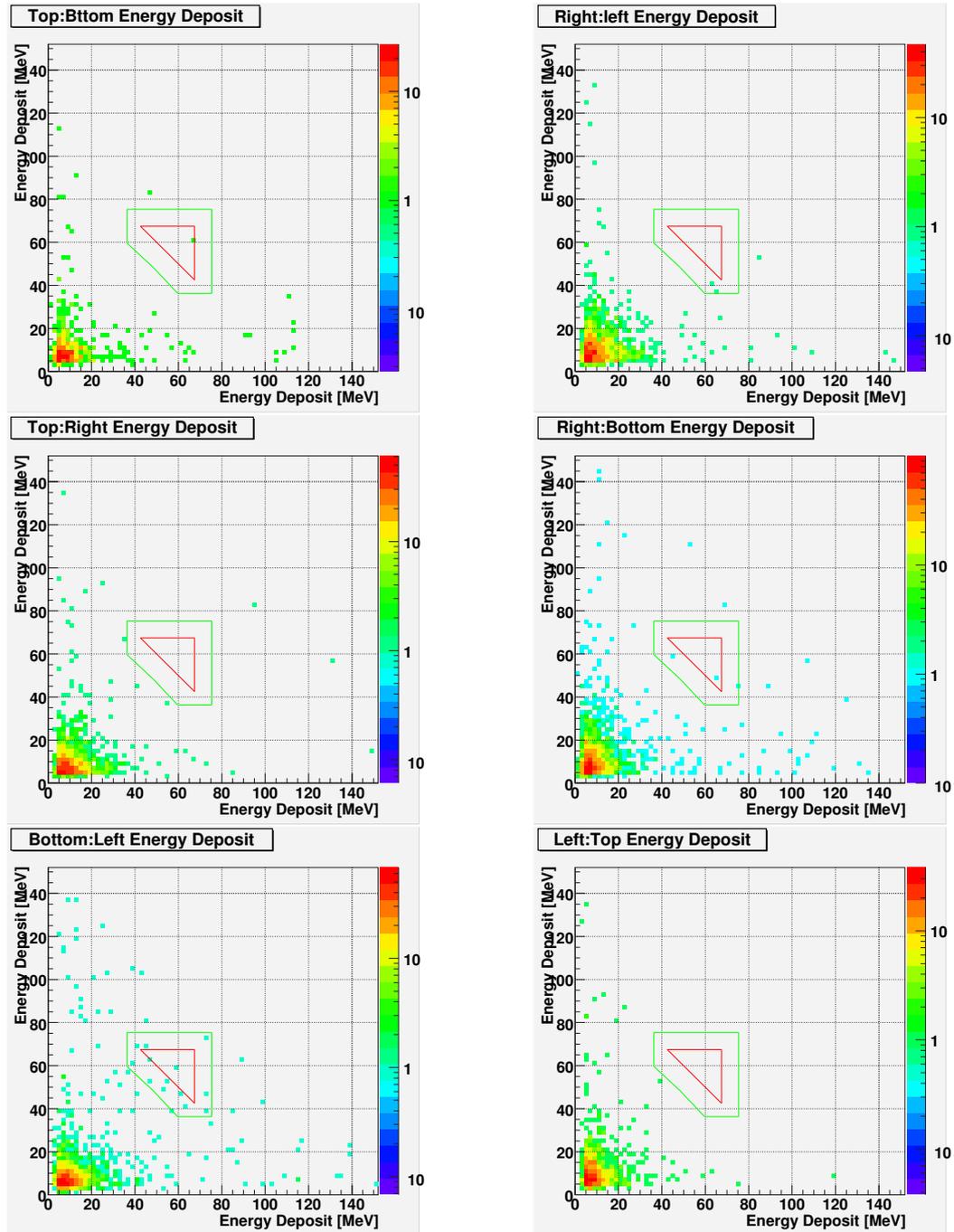


図 4.98: 各 2 アームのエネルギー相関

4.3.3 結果

図 4.98 での、各 2 アームにおけるヒットイベント数と、先に設定した π^0 イベントとするエネルギー領域にカロリメーターの分解能 $3\%/\sqrt{E[\text{GeV}]}$ を加えた範囲内にあるイベント数を表 4.9 に示す。

パターン	イベント数	π^0 like イベント数
TB	522	1
RL	1171	2
TR	1197	0
RB	2177	3
BL	1473	13
LT	811	0

表 4.9: 各アームヒットパターンにおける π^0 イベント数

以上より、 π^0 と考えられるイベント数は、1693(=522+1171) イベント中 3 つであり、 π^0 バックグラウンドイベントは 5658(=1197+2177+1473+811) イベント中 16 個であった。よって

$$3 - (1693 \times \frac{16}{5658}) < 0$$

となり、本実験において π^0 イベントは検出されなかったと考えられる。

また、本実験では、全測定時間 1.304×10^5 秒の間に平均 $1329 \pm 139\text{Hz}$ の頻度にて、照射領域 $1 \times 1\text{cm}^2$ で奥行き 2cm の鉄標的へ電子線を入射した。単位面積当たりの標的中の鉄の核子数は、 $9.44 \times 10^{24}/\text{cm}^2$ であり、アクセプタンスは GEANT4 シミュレーションより 3.55% と予測される [11]。また、検出された事象数が 0 の時、期待される事象数の真値は 90% の信頼性で 2.44 以下である。これより、電子と核子の間における π^0 の生成断面積 $\sigma(e^-, N)$ の上限値は 90% の信頼性で

$$\begin{aligned} \sigma(e^-, N) &\leq \frac{2.44}{1329(\pm 139) \times 1.304 \times 10^5 \times 9.44 \times 10^{24} \times 0.0355} = 4.26 \pm 0.44 \quad 10^{-32}\text{cm}^2 \\ &= 0.0426 \pm 0.0044\mu\text{b} \end{aligned}$$

である

第5章 議論

本実験結果である電子と核子の間における π^0 の生成断面積の上限値 $0.043 \pm 0.004 \mu\text{b}$ (信頼性 90%) と、昨年度の炭素標的核を使った実験より得られた生成断面積 $0.07 \pm 0.04 \mu\text{b}$ の間に矛盾は無いものの再現はしなかった。原因として、一つに、今回は GEANT4 シミュレーションにより π^0 バックグラウンドイベントを見積っていたために、正しくバックグラウンドイベントを差し引くことが出来ていなかったことが考えられる。一方で、本実験結果では Bottom アームと Left アームにだけヒットしたイベントにおいて、 π^0 バックグラウンドイベントは 13 イベントであり、他の組み合わせにおける π^0 バックグラウンドイベントとの差は統計的揺らぎによるものはないと思われる (表 4.9)。この原因として、Bottom アームには標的を介さずして直接電子線が入射したイベントが多く存在することが分かっており、結果として π^0 バックグラウンドイベントが増えたと考えられる。仮に π^0 イベントを見積る際に、Bottom アームが関与した組み合わせ以外、つまり、表 4.9 中において RL、TR、TL の組み合わせだけで考えた場合、 π^0 の生成断面積 $0.034 \pm 0.025 \mu\text{b}$ が得られ、昨年度の結果を再現する。

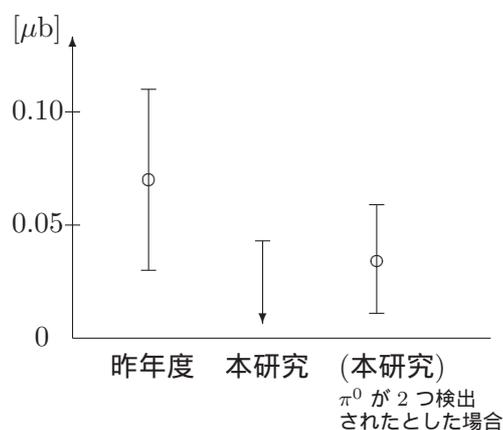


図 5.1: 予測される π^0 生成断面積

第6章 まとめと展望

150MeV 電子線を鉄標的に入射し、電子と核子の間における π^0 生成断面積の上限値 (信頼性 90%) として $0.043 \pm 0.004 \mu\text{b}$ を得た。昨年度の炭素標的核を用いた実験から得られた生成断面積 $0.07 \pm 0.04 \mu\text{b}$ を再現しなかったが、昨年度の結果における新たな上限値を得た。

今後、今回のセットアップで π^0 イベントを検出するためには、まずバックグラウンドイベントを減らす必要がある。そのための方法として、遮蔽用の鉛ブロックの壁に開けているビーム入射用の穴を狭くすることが考えられる。今回は、 $5 \times 10 \times 20 \text{cm}^3$ と $5 \times 10 \times 10 \text{cm}^3$ の鉛ブロックを積み上げたため、構造上ビーム用の穴は、(ビーム軸下流から見て) 上辺がビーム軸より 0.8cm 上、底辺がビーム軸より 4.3cm 下、左辺が $\sim 1.5 \text{cm}$ 、右辺が $1.5 \sim \text{cm}$ (左辺と右辺はビーム軸が時間帯によって動くため数 mm ずれる) となっていた。つまり、Bottom アームにはコリメーター内などで反応した粒子が直接アームへ入射しやすい状況であった。実際、図 4.98 のデータでもエネルギーの大きい範囲におけるバックグラウンドイベントは Bottom アームが関与したものが多く、一方で Top アームが関与したものはバックグラウンドは少ない様子が分かる。よって次回では、鉛ブロック壁のビーム通過用の穴に直径数 cm のコリメーターを用いるなどの工夫が求められる。

また、本実験セットアップによってさらに検出効率を上げることも可能である。今回はトリガー条件として、「各アームの中心カロリメーターにトリガー閾値を越えるヒットを要求」していた。実験を行った当初は、中心カロリメーターへヒットがなければ、殆どのエネルギーを逃してしまい π^0 のイベントは検出できないと予測していた。しかしながら、GEANT4 シミュレーションより、 π^0 の崩壊による γ がアームへ入射した際に、1 本のみ 50MeV 以上のエネルギーを落とすイベントが多く存在し、周辺に配置されているカロリメーターにだけ大きなエネルギーを落とすイベントも多く存在することが現段階で分かっている。よって、上記のトリガー条件を「1 アームのカロリメーター 9 本中に 1 本以上のトリガー閾値を越えるヒットを要求」に変更することにより検出効率は飛躍的に上がる。実際このトリガー条件において、全てのカロリメーターのトリガー閾値が 4MeV 以上で合計 110MeV 以上のヒットを π^0 イベントとした場合の検出効率は、GEANT4 シミュレーションより 11.6% と予測され、本実験の約 3 倍である。

本実験にて、昨年度よりも高い精度での π^0 生成断面積測定が成された。そして、上記のような改善の余地も残されている。

謝辞

本実験を行うにあたり、多くの方々からご支援をして頂きました。指導教官の杉立先生には、実験計画や解析方針など最初から最後まで多くの指導をして頂きました。志垣先生と本間先生からは、ミーティングや研究室にて多くの助言を受け、実験現場にも足を運んで頂きました。ドクターの中村さんと槌本さんには、日ごろから多くの些細な相談にのって頂きました。同期の春名君にはDAQマシンの製作に多くの労力を割いてもらい、本実験にて無事にデータを収集できました。また、4年生の成田君と来島君と門脇君には実際に実験を行うにあたり、授業や自分たちの仕事があるにもかかわらず、多くの時間と労力を割いてもらい、実験を無事終らせることが出来ました。実験を進行させると同時に先輩として指導する立場でしたが、先輩として至らぬ点が多くあったことをここでお詫びしたいと思います。実験のセットアップを製作するあたり、金属の微細加工や、セットアップ製作全体の相談にのって頂いた石飛さんと、細かな注文や製作中での変更、さらには製作後に改良する際も快く引き受けていただき、当初私が考えていたものよりも優れた暗箱を作ってくれた島内さんに感謝します。そして、実験装置の移動や製作に関わってくれた、細川君、中宮君、山浦君、大内田さん、久保君に感謝します。本研究は、皆様の助けがあって成し遂げられたものと強く感じております。

本実験に限らず、昨年度、KEK 実験や解析で多くの指導をして頂いた小原さんに感謝します。KEK 実験の解析の際には、中村さんより解析ソフトから解析手法まで細かな指導をして頂き無事に学会にて発表できました。同期の中宮君、春名君、細川君、原田君には2年間を通して多くの刺激や励ましを貰いました。KEK 実験や解析、学会発表、BNLでのRunの立ち上げ、そして、素粒子実験を自らが計画して実験を行い解析することができる π^0 生成実験、などの希少な機会を与えてくださった研究室のスタッフに改めて感謝致します。最後に、私の学生生活を支えてくれた家族に感謝します。

関連図書

- [1] 平下賢一, 平成 16 年度広島大学修士論文
- [2] E. Mazzucato *et al.*, Phys. Rev. Lett. **57**, 3144 (1986)
- [3] R. Beck *et al.*, Phys. Rev. Lett. **65**, 1841 (1990)
- [4] M.Fuchs *et al.*, Phys. Lett. **B368**, 20(1996)
- [5] 野村信輔, 平成 14 年度広島大学修士論文
- [6] W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments (Springer-Verlag 1987)
- [7] Particle Data Groupe, Review of Particle Physics
- [8] J. C. Bergstrom *et al.*, Phys. Rev. **C53**, R1052(1996)
- [9] H. B. van den Brink *et al.*, Phys. Rev. Lett. **74**, 3561 (1995)
- [10] 小原亮太, 平成 13 年度広島大学修士論文
- [11] 門脇圭介, 平成 17 年度広島大学学士論文
- [12] 成田拓人, 平成 17 年度広島大学学士論文
- [13] T. P. Welch *et al.*, Phys. Rev. Lett. **69**, 2761 (1992)