

平成24年度 卒業論文

ALICE実験における高横運動量中性中間子の  
最適な測定方策の考察

広島大学理学部物理科学科

クォーク物理学研究室

B091898

湯浅友裕

2013年2月8日

指導教官 杉立徹 教授

主査 志垣賢太 准教授

副査 小畠 康史 教授

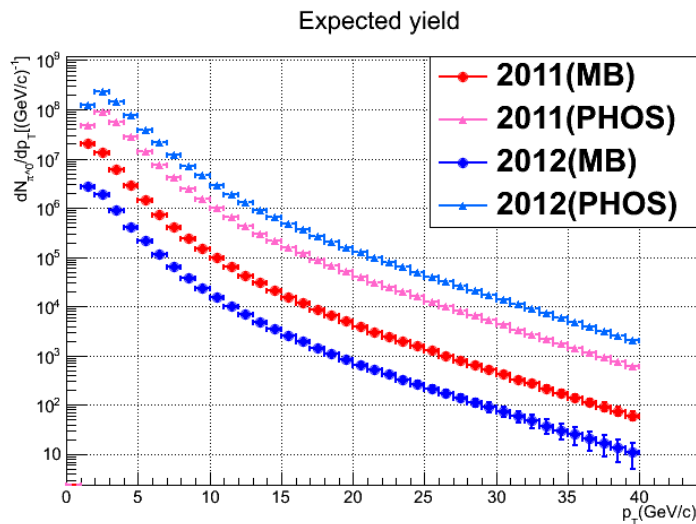
## 概要

我々広島大学グループはスイスにある欧州合同原子核機構 (CERN) によって設立された LHC 加速器で原子核衝突実験に特化した ALICE 実験に参加しており、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) と呼ばれる物質相の解明を目的に研究を行っている。クォークとグルーオンはその強い相互作用ゆえに互いを束縛しあい、単一ではそれらを取り出す事ができず閉じ込められている状態にあるが、超高温、高密度状態においては束縛から解放され、この状態を QGP と呼んでいる。QGP 相の解明に有効な手段の一つとして高エネルギー原子核衝突がある。高エネルギー原子核衝突は原子核同士を高エネルギーで衝突させることにより高温高密度状態を人工的に作りだし、QGP 相を再現することが可能である。また QGP は宇宙誕生直後の状態を表しており、そのため QGP 解明は極初期宇宙の解明にもつながる。

QGP 相が生成されたことを裏付ける証拠が複数存在する中で、高横運動量粒子の収量抑制という現象がある。この現象は原子核衝突と陽子衝突を比較した際に観測され、原子核衝突が陽子衝突の単純な重ね合わせでは記述できず、衝突により発生したパートンが QGP 内を通過する際クォークやグルーオンと相互作用することでエネルギーを失うことで引き起こされる現象と考えられている。この収量抑制が観測されるということは衝突直後に新たな物質相ができていたことを示唆することになる。

この抑制機構の理解には陽子衝突における測定収量をベースラインとして確立する必要がある。そのため本研究では粒子生成機構が限られている高横運動量領域において系統的にどれくらいの収量があるかを考察した。具体的には現在までに ALICE 実験で取られている陽子衝突 7TeV, 8TeV のトリガー別でのデータ量を考慮し、各中間子の崩壊モード別の収量比、また測定検出器による検出効率をシミュレーションに行い求め、高横運動量領域においてもっともよく測定される組み合わせを求めた。その結果高横運動量領域においてはどの崩壊モードにおいても陽子衝突 8TeV の PHOS トリガーデータを用いた場合がもっとも得られる収量が良いことが判明した。

$\pi^0$  expected yield



# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>6</b>
1.1	クォークとレプトン	6
1.1.1	素粒子とは	6
1.1.2	中性中間子	6
1.2	クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)	7
1.3	高エネルギー原子核衝突実験	7
1.4	高横運動量の収量抑制	8
1.5	研究目的	9
<b>第 2 章</b>	<b>実験背景・装置</b>	<b>12</b>
2.1	LHC 加速器	12
2.2	ALICE 実験	13
2.2.1	ALICE 検出器	14
2.2.2	PHOton Spectrometer	15
2.2.3	EMCAL(Electro Magnetic Calorimeter)	15
2.2.4	PHOS トリガー	16
<b>第 3 章</b>	<b>研究内容</b>	<b>17</b>
3.1	シミュレーション	17
3.1.1	イベントジェネレーター	17
3.1.2	PYTHIA	17
3.1.3	Single Simulation	17
3.2	解析	19
3.2.1	粒子生成スペクトル/Tsallis フィッティング	19
3.2.2	中性中間子測定手法	19
3.2.3	測定効率	20
3.2.4	モジュールのコンディション	24
3.2.5	データセット	25
3.3	収量の見積もり	25
<b>第 4 章</b>	<b>解析結果</b>	<b>26</b>
4.1	Tsallis フィッティングの結果	26
4.2	崩壊チャンネル別でのアクセプタンス	27
4.3	崩壊チャンネル別での再構成効率	28

4.4	中性中間子の収量の見積もり . . . . .	34
<b>第 5 章</b>	<b>考察、結論</b>	<b>37</b>
5.1	アクセプタンスの横運動量依存性 . . . . .	37
5.2	再構成効率に関する考察 . . . . .	37
5.2.1	補正係数が 1 にならない原因 . . . . .	37
5.2.2	$\pi^0$ の高横運動量領域における補正係数が下がる原因 . . . . .	37
5.3	結論、見通し . . . . .	38
<b>第 6 章</b>	<b>謝辞</b>	<b>39</b>

# 目次

1.1	物質の階層構造 [1]	6
1.2	QGP 相の略図 [2]	7
1.3	高エネルギー原子核衝突のイメージ図 [2]	8
2.1	LHC 加速器の概観図 [3]	12
2.2	ALICE 実験検出器群 [4]	14
2.3	PHOton Spectrometer[5]	15
3.1	PYTHIA による粒子生成スペクトル図	18
3.2	シングルシミュレーションによって作成したプロット	18
3.3	$\pi^0$ の質量をガウスフィットした結果	21
3.4	陽子陽子衝突 8TeV における PHOS トリガー効率をフィットしたグラフ	23
3.5	PHOS 検出器のモジュール別でのクラスターの反応	24
4.1	PYTHIA における重心系エネルギー 7TeV での粒子生成スペクトル (左図) とフィッティングした結果 (右図)	26
4.2	横運動量別にみた発生した $\pi^0$ の数 (左図) と PHOS 方向に飛んでいった数 (右図)	27
4.3	崩壊モード別に見た Acceptance	27
4.4	PHOS 方向に飛んでいった数 (左図) と横運動量別での質量分布曲線 (右図)	28
4.5	$\pi^0$ の再構成効率	28
4.6	$\pi^0$ の再構成効率を見積もる際に用いた横運動量毎での質量分布	29
4.7	$\eta$ の再構成効率と 2 つの崩壊モードにおける質量分布曲線	30
4.8	$2\gamma$ 崩壊の横運動量毎の質量分布 (上 5 行)、 $6\gamma$ 崩壊の横運動量毎の質量分布 (下 5 行)	31
4.9	$\omega$ の再構成効率と 2 つの崩壊モードにおける質量分布曲線	32
4.10	$\pi^0\gamma$ 崩壊の横運動量毎の質量分布 (上 5 行)、 $\pi^0\pi^+\pi^-$ 崩壊の横運動量毎の質量分布 (下 5 行)	33
4.11	$\pi^0$ における各データセットで期待される収量	34
4.12	$\eta$ における各データセット、崩壊モード別で期待される収量	35
4.13	$\omega$ における各データセット、崩壊モード別で期待される収量	36
5.1	横運動量とクラスターの数の相関	38

# 表 目 次

1.1	中性中間子の粒子情報 . . . . .	7
1.2	$\pi^0$ における各セットアップの組み合わせ . . . . .	9
1.3	$\eta$ における各セットアップの組み合わせ . . . . .	10
1.4	$\omega$ における各セットアップの組み合わせ . . . . .	11
3.1	図 3.4 におけるフィットされたトリガー効率の各中間子のフィットパラメーター . . . . .	23
3.2	エネルギー、トリガー別での各データ量 . . . . .	25
4.1	フィッティングパラメーター一覧と $\chi^2/NDF$ . . . . .	26

# 第1章 序論

## 1.1 クォークとレプトン

### 1.1.1 素粒子とは

世界を構成する最も基本的な粒子は何か。この疑問に対する回答、定義は時代ごとに異なっている。古代ギリシャ時代におけるデモクリトスが自ら提唱した原子論に基づいてアトム (原子) と定義されていた時もある。20世紀初頭におけるラザフォードが発見した陽子、中性子こそが素粒子と呼ばれていた時もある。では現在における素粒子とは一体何なのか。2013年における素粒子は標準模型に基づき、クォークとレプトンと呼ばれるものと定義されている。

クォークとレプトンは現在ともに6種類存在しており、ともに三世代に分けられ、一世代に2種類存在する。これらは世代が大きくなるにつれてその粒子がもつ質量は重くなっていく。自然界に存在する物質はほとんどが第一世代で構成されている。

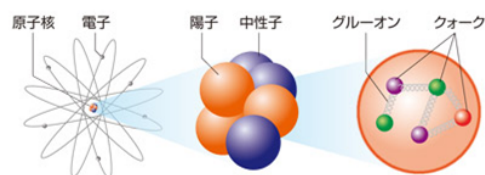


図 1.1: 物質の階層構造 [1]

### 1.1.2 中性中間子

中間子とはハドロン的一种であり、英語ではメソン (meson) と呼ばれる。クォークと反クォークによって構成されており、バリオン数はない。また電荷が0であるため、電磁相互作用を受けず強い相互作用のみに絞られる。そのため原子核衝突において重要なプローブとして扱われる。また非常に不安定なため寿命は短く、すぐに光子、または軽い中性中間子に崩壊するか、荷電粒子に崩壊する。

中間子	PDG	質量 ( $MeV/c^2$ )	崩壊モード	崩壊幅 ( $MeV/c^2$ )	分岐比 (BR)
$\pi^0$	111	134.9766	$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$		$98.823 \pm 0.034 \%$
			$\eta \rightarrow 2\gamma$		$39.31 \pm 0.20 \%$
$\eta$	221	547.853	$\eta \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$	$0.0013 \pm 0.00007$	$32.57 \pm 0.23 \%$
			$\omega \rightarrow \pi^0\gamma$		$8.28 \pm 0.28 \%$
$\omega$	223	782.65		8.46	
			$\omega \rightarrow \pi^0\pi^+\pi^-$		$89.2 \pm 0.7 \%$

表 1.1: 中性中間子の粒子情報

## 1.2 クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

クォーク・グルーオン・プラズマとは本来強い相互作用によってお互いを束縛していたクォークやグルーオンが状態が高温・高エネルギー密度状態において閉じ込めから解放された状態の事をいう。QGP 相は非摂動論的領域の QCD に支配されている。それゆえに QGP の性質を知ることはこの非摂動論的な QCD を理解することにつながる。また QGP 相はビッグバン直後の宇宙の状態にも存在していたとされているため、異なった視点から見ても興味深い物質相であると言える。

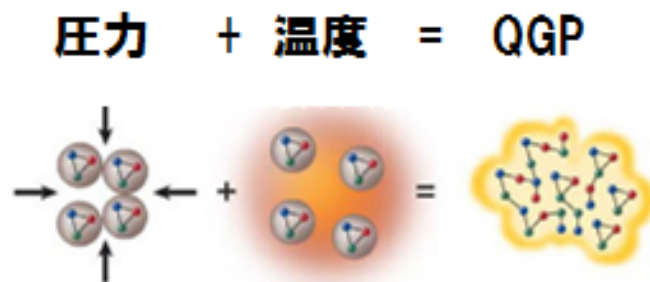


図 1.2: QGP 相の略図 [2]

## 1.3 高エネルギー原子核衝突実験

高エネルギー原子核衝突実験は現在の地球において QGP を人工的に生成できる有効な方法である。これは原子核が地球上でもっとも高密度であり、高エネルギーで衝突させることでより高温・高エネルギー密度状態を再現できるためである。高エネルギー原子核衝突はその時間発展によって物理過程が大きく異なってくる。以下にその時間発展における物理現象の流れを以下にまとめる。

1. 高エネルギー原子核衝突では、原子核を光速まで加速させる。この時速度が光速ゆえに相対論的效果が現れ、原子核はローレンツ収縮することで球状ではなくパンケーキ状に変形する。



2. パンケーキ状に変形された原子核同士が衝突すると、高エネルギーを持っているため、それらは留まらずにすり抜けていく。このすり抜けた空間は高温、高密度状態であるため、閉じ込めから解放されたクォークや反クォーク、またグルーオンなどが生成されている。またそれらは互いに散乱を繰り返すことで新たなクォークやグルーオンが生まれる。この状態をクォーク・グルーオン・プラズマと呼ぶ。
3. クォーク・グルーオン・プラズマ状態において反応領域は内部の圧力によりビーム軸方向と垂直方向に光速に近い速度で膨張していく。
4. この急激な膨張により、温度が下がっていき、やがてクォークとグルーオンは再結合により部分的にハドロ化していく。ここではクォーク非閉じ込め相とハドロ相の二つが存在するため高エネルギーハドロンガスを形成していく。
5. 膨張がさらに続くことで温度は下がっていき、ハドロン間での非弾性散乱が発生しなくなる。これによりエネルギーの受け渡しがなくなり、粒子の生成が行われなくなり、粒子ごとの生成数が決定する。このことを化学的凍結と呼ぶ。
6. 以降も膨張は続きやがて弾性散乱もなくなる。これにより粒子ごとの運動量は固定され、凍結時の運動量のまま放出されていく。これを熱的凍結と呼ぶ。
7. このような過程を踏んだ上で、ハドロンとして粒子は拡散していく。私たちが直接観測できるのは、この終状態における粒子である。

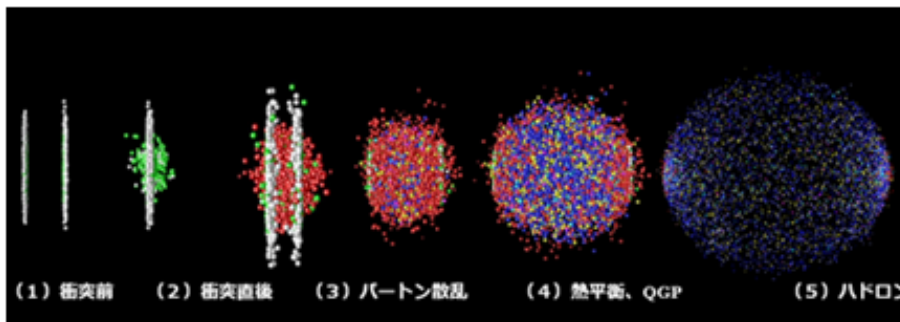


図 1.3: 高エネルギー原子核衝突のイメージ図 [2]

## 1.4 高横運動量の収量抑制

クォークグルーオンプラズマ生成の証拠とされるものなかに高横運動量の収量抑制というものがある。これはクォークグルーオンプラズマができた状態の中を粒子が通り抜ける際に、そこに存在するクォーク、グルーオンから相互作用を受けエネルギー損失をし、運動量を失って検出されるという現象である。このため本来得られるべき数に比べて収量が減っている場合、QGP相が生成されたという証拠になりうる。

収量抑制を表す指標に原子核補正係数というものがある。これは陽子衝突による収量の単純な重ね合わせに対して原子核衝突による収量がどのくらいなのかを表すもので式は以下の通りになっている。この  $R_{AA}$  が 1 より小さい場合収量抑制があったことが示唆される。

$$R_{AA} = \frac{A + A \text{ 衝突による収量}}{\langle N_{coll} \rangle \times (p + p \text{ 衝突による収量})} \quad (1.1)$$

## 1.5 研究目的

本研究の目的はうえで述べた高横運動量の収量抑制の前段階として陽子陽子衝突における収量を解析するためにもっともよい解析状態が一体何かというのを突き止める事である。現在までに LHC 加速器において陽子陽子衝突、原子核衝突が行われ、そこで取られたデータをもとに科学者が解析を行っているが、解析のためにどのチャンネル、データ、用いる検出器等が最適かどうかはあまり知られていない。そのため本研究において崩壊チャンネルごとにどこまで高横運動量が見えてくるのか、またデータセットによる統計的な問題も踏まえ、かつ検出器の性能による収量の比などをもとにもっとも最適な測定環境を整えるというのが本研究の主たる目的である。具体的には下表に載せた表を一つ一つにおいて各中性中間子の中でもっともよく高横運動量粒子が測定される組み合わせを求めることである。

表中に含まれるトリガーセレクション、また測定検出器の詳しい説明は次章において説明をする。

$\pi^0$

データセット	トリガーセレクション	崩壊モード	測定検出器	本研究の対象
pp7TeV	MB トリガー	$2\gamma$	PHOS	○
pp7TeV	MB トリガー	$2\gamma$	EMCAL	
pp7TeV	MB トリガー	$2\gamma$	TPC	
pp7TeV	MB トリガー	$2\gamma$	PHOS TPC	
pp7TeV	MB トリガー	$2\gamma$	EMCAL TPC	
pp7TeV	PHOS トリガー	$2\gamma$	PHOS	○
pp7TeV	PHOS トリガー	$2\gamma$	PHOS TPC	
pp8TeV	MB トリガー	$2\gamma$	PHOS	○
pp8TeV	MB トリガー	$2\gamma$	EMCAL	
pp8TeV	MB トリガー	$2\gamma$	TPC	
pp8TeV	MB トリガー	$2\gamma$	PHOS TPC	
pp8TeV	MB トリガー	$2\gamma$	EMCAL TPC	
pp8TeV	PHOS トリガー	$2\gamma$	PHOS	○
pp8TeV	PHOS トリガー	$2\gamma$	PHOS TPC	

表 1.2:  $\pi^0$  における各セットアップの組み合わせ

$\eta$ 

pp7TeV	MB トリガー	$2\gamma$	PHOS	○
pp7TeV	MB トリガー	$2\gamma$	EMCAL	
pp7TeV	MB トリガー	$2\gamma$	TPC	
pp7TeV	MB トリガー	$2\gamma$	PHOS TPC	
pp7TeV	MB トリガー	$2\gamma$	EMCAL TPC	
pp7TeV	PHOS トリガー	$2\gamma$	PHOS	○
pp7TeV	PHOS トリガー	$2\gamma$	PHOS TPC	
pp7TeV	MB トリガー	$3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$	PHOS	○
pp7TeV	MB トリガー	$3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$	EMCAL	
pp7TeV	MB トリガー	$3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$	TPC	
pp7TeV	MB トリガー	$3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$	PHOS TPC	
pp7TeV	MB トリガー	$3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$	EMCAL TPC	
pp7TeV	PHOS トリガー	$3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$	PHOS	○
pp7TeV	PHOS トリガー	$3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$	PHOS TPC	
pp8TeV	MB トリガー	$2\gamma$	PHOS	○
pp8TeV	MB トリガー	$2\gamma$	EMCAL	
pp8TeV	MB トリガー	$2\gamma$	TPC	
pp8TeV	MB トリガー	$2\gamma$	PHOS TPC	
pp8TeV	MB トリガー	$2\gamma$	EMCAL TPC	
pp8TeV	PHOS トリガー	$2\gamma$	PHOS	○
pp8TeV	PHOS トリガー	$2\gamma$	PHOS TPC	
pp8TeV	MB トリガー	$3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$	PHOS	○
pp8TeV	MB トリガー	$3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$	EMCAL	
pp8TeV	MB トリガー	$3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$	TPC	
pp8TeV	MB トリガー	$3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$	PHOS TPC	
pp8TeV	MB トリガー	$3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$	EMCAL TPC	
pp8TeV	PHOS トリガー	$3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$	PHOS	○
pp8TeV	PHOS トリガー	$3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$	PHOS TPC	

表 1.3:  $\eta$  における各セットアップの組み合わせ

$\omega$

pp7TeV	MB トリガー	$\pi^0\gamma$	PHOS	○
pp7TeV	MB トリガー	$\pi^0\gamma$	EMCAL	
pp7TeV	MB トリガー	$\pi^0\gamma$	TPC	
pp7TeV	MB トリガー	$\pi^0\gamma$	PHOS TPC	
pp7TeV	MB トリガー	$\pi^0\gamma$	EMCAL TPC	
pp7TeV	PHOS トリガー	$\pi^0\gamma$	PHOS	
pp7TeV	PHOS トリガー	$\pi^0\gamma$	PHOS TPC	
pp7TeV	MB トリガー	$\pi^0\pi + \pi^-$	PHOS TPC	○
pp7TeV	MB トリガー	$\pi^0\pi + \pi^-$	EMCAL TPC	
pp7TeV	PHOS トリガー	$\pi^0\pi + \pi^-$	PHOS TPC	○
pp8TeV	MB トリガー	$\pi^0\gamma$	PHOS	○
pp8TeV	MB トリガー	$\pi^0\gamma$	EMCAL	
pp8TeV	MB トリガー	$\pi^0\gamma$	TPC	
pp8TeV	MB トリガー	$\pi^0\gamma$	PHOS TPC	
pp8TeV	MB トリガー	$\pi^0\gamma$	EMCAL TPC	
pp8TeV	PHOS トリガー	$\pi^0\gamma$	PHOS	○
pp8TeV	PHOS トリガー	$\pi^0\gamma$	PHOS TPC	
pp8TeV	MB トリガー	$\pi^0\pi + \pi^-$	PHOS TPC	○
pp8TeV	MB トリガー	$\pi^0\pi + \pi^-$	EMCAL TPC	
pp8TeV	PHOS トリガー	$\pi^0\pi + \pi^-$	PHOS TPC	○

表 1.4:  $\omega$  における各セットアップの組み合わせ

## 第2章 実験背景・装置

この章では実験の舞台である LHC 加速器、またそこで行われている実験等に関する説明を述べる。

### 2.1 LHC 加速器

LHC 加速器はヨーロッパ共同原子核研究機構 (CERN) が設立したスイス、ジュネーブ郊外の地下 100m に存在する Large Hadron Collider の略称である。LHC はその周長が約 27km にもおよび、現在において世界最大の大型円形加速器であり、そのため衝突エネルギーも世界最大となっている。2010 年からこの LHC 加速器を用いて高エネルギー原子核衝突実験が開始され、2011 年には重心系エネルギー 7 TeV での陽子陽子衝突、重心系エネルギー 2.76TeV での鉛鉛衝突、2012 年には 8TeV での陽子陽子衝突が行われている。現在この加速器では高エネルギー衝突実験として、4 つの素粒子実験と小実験として TOTEM, LHCf 実験が行われている。以下ではそれらの実験についての簡単な説明をまとめる。

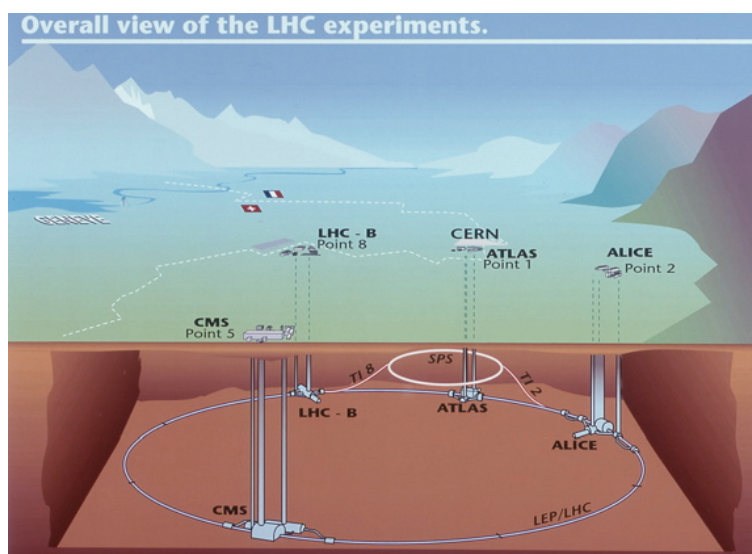


図 2.1: LHC 加速器の概観図 [3]

- ATLAS 実験

LHC 加速器で行われている実験の中で規模の大きい実験の一つであり、その目的はヒッグス粒子、超対称性粒子の探索である。実験の規模は LHC の中でももっとも大きく世界 37 カ国から約 1800 人の物理学者が参加している。また ATLAS 検出器は高さ 22m、全長 44m、重さ 7000 トンの巨大検出器であり、これらの検出器の中から

- CMS 実験

ATLAS 実験同様、LHC 加速器の中で規模の大きい実験であり、その実験目的は ATLAS 実験と同様であるが、検出器群は異なっている。

- ALICE 実験

LHC 加速器の中で唯一重イオン衝突に特化した検出器を用いている。その詳しい説明は後の ALICE 実験において述べる。

- LHCb 実験

LHCb では対称性の破れをはじめとした標準理論の検証を目的として実験であり、世界で 52 機関、約 700 人の科学者により構成されている。

- TOTEM 実験

粒子の弾性散乱を正確に測定することを実験目的としており、規模は 4 つの実験に比べ小さい。

- LHCf 実験

超前方へのガンマ線、中性子などの宇宙線の観測を目的とした実験で 6 カ国、30 人あまりの国際共同実験である。LHC 領域での高エネルギーな実験データが存在していなかったために今まで未解明だった最高エネルギー宇宙線の問題や一時宇宙線組成の問題の解決を目的として研究が進められている。

## 2.2 ALICE 実験

前セクションにもあるように ALICE 実験は LHC 加速器で行われている実験の中で唯一重イオン衝突に特化した加速器であり、その特徴は検出器群に現れている。国際協力の規模も大きく、世界から 36 カ国、132 機関が参加しており、我々広島大学グループもこのうちの一つである。

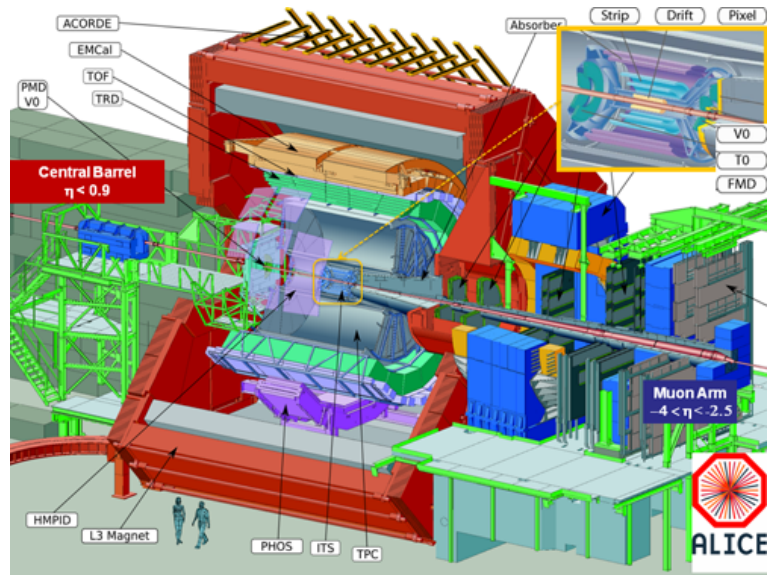


図 2.2: ALICE 実験検出器群 [4]

### 2.2.1 ALICE 検出器

- ITS (Inner Tracking System)

ITS は粒子の衝突点を測定することが目的である。また低運動量の粒子の飛跡を検出して粒子識別をし、ITS の外側にある TPC と情報を組み合わせることで運動量と角度分解能を向上させる。

- TPC (Time Projection Chamber)

ALICE 検出器の中でも内側に位置する円筒型の 3 次元飛跡検出器である。覆っている領域は広く全方位角、またラピディティ方向には  $|\eta| < 0.9$  を占めている。TPC は荷電粒子の検出器であり、中に存在する混合ガス中を荷電粒子が通過する際にエネルギー損失し、そこから得られた二次元の位置情報と、エネルギー損失の際に発生した電離電子の到達時間から飛跡の 3 次元情報を得ることができる。

- V0 検出器

メインとなるミニマムバイアストリガーとして用いられる検出器であり、2 枚の円盤状のシンチレータから構成されている。2 枚のシンチレータは V0-A, V0-C と呼ばれており、検出器の覆っている領域は擬ラピディティ方向に V0-A は  $2.8 < \eta < 5.1$ 、V0-C は  $-3.7 < \eta < -1.7$  となっている。

## 2.2.2 PHOton Spectrometer

通称 PHOS と呼ばれる検出器で、広島大学グループが開発した光子検出に特化した電磁カロリメーターである。光子は電磁相互作用のみを媒介するボース粒子であり、衝突により発生した後、衝突直後の初期状態、あるいは超高温高密度場を通過することで、その時間発展の情報を持っている。PHOS の目的はこれらの光子を検出することで衝突によってできるであろう QGP の情報を得ることである。また光子同様に電子なども測定可能であり、これら光子、電子を測定することでその背景にある中性中間子、荷電粒子などを間接的に測定することもできる。

PHOS の測定原理は電磁シャワーを利用したシンチレーション光の測定である。シンチレーターの内部を粒子が通過する際にエネルギーの一部を蛍光発光する。光子は原子核などによってコンプトン散乱し電子・陽電子に対生成する。電子は制動放射でエネルギーの一部を光子という形で放出する。これを繰り返すことで電磁シャワーを引き起こす。これにより粒子が飛んできたところのまわりの素子も一体となって蛍光する。これらの反応した素子一体となったものをクラスターと呼んでいる。

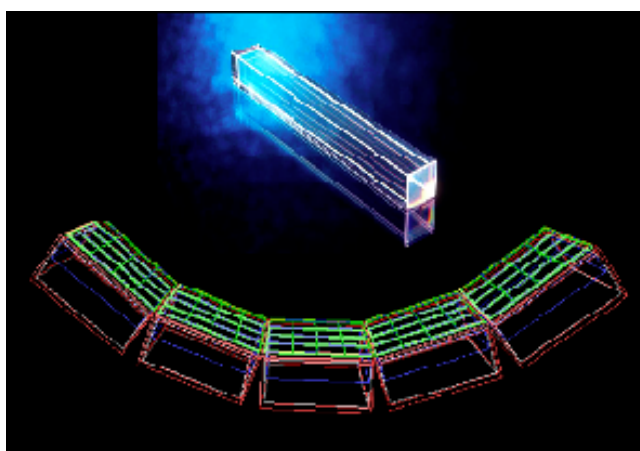


図 2.3: PHOton Spectrometer[5]

PHOS は位置分解能、エネルギー分解能に優れており、これにより高横運動量領域においても崩壊後の粒子を区別することが可能になっている。この特徴は高横運動量粒子の収量抑制を測る上で重要である。現在は 3 モジュール搭載済みで 2013 年から 2015 年にかけてのロングシャットダウンで 4 つ目のモジュールを搭載予定である。

## 2.2.3 EMCAL(Electro Magnetic Calorimeter)

PHOS 同様光子、電子を測定する電磁カロリメーターであり、ビーム衝突点を中心に PHOS とは対称の位置に設置されている。EMCAL は覆っている領域が広い。1 つのモジュール辺り方位角に  $20^\circ$ 、また擬ラピディティ方向には  $|\eta| \leq 0.7$  の範囲を覆っており、現在 5 つのモジュールを搭載しているため、全体で  $100^\circ$  を覆っている。結晶は鉛シンチレータ (PbSc) を用いており、その構造は一つのタワーが 77 層の鉛とシンチレータのサンドウィッチ型サンプリングカロリメーターとなっている。タワーの大きさは  $6 \times 6 \times 28 \text{cm}^3$  である。



#### 2.2.4 PHOS トリガー

トリガーとは特定の条件、または閾値を課すことでそれらを満たす事象のみを選別することである。もっとも一般的なトリガーとしてミニマムバイアストリガーというものがあり、これは衝突が保障されたイベントをすべて取ってくるというトリガーである。ALICE 実験ではこのミニマムバイアストリガーとは別に PHOS トリガーというものがある。これは PHOS がトリガーとしての役割も担っており、ALICE 実験におけるイベントのセレクションを行っている。PHOS におけるトリガーは PHOS 検出器で反応したクラスターにエネルギー閾値を課し、その閾値を超えた粒子が検出されたときのみイベントを取得するというものである。これによりより高エネルギーをもった粒子が発生したイベントを選別することができ、高横運動量領域の粒子を低統計で得ることが可能になる。

## 第3章 研究内容

この章では本研究における解析手法、また解析をするためのデータ作成にあたり行ったシミュレーションについて言及する。

### 3.1 シミュレーション

#### 3.1.1 イベントジェネレーター

イベントジェネレータとは高エネルギー加速器実験における物理事象をモンテカルロ法を用いて再現するソフトウェアであり、その物理現象に合わせていろいろなイベントジェネレータが存在する。陽子陽子衝突シミュレーション用ソフトウェアには PYTHIA というものがある。

#### 3.1.2 PYTHIA

陽子陽子衝突実験の物理過程に則したイベントジェネレータであり、PYTHIA でのシミュレーションでは粒子の衝突におけるパートン分布、その後のハドロンの生成現象などが再現されている。そのため本研究では PYTHIA を陽子陽子衝突イベント作成に用いた。下の図 3.1 のグラフは PYTHIA によるシミュレーションから得られたパートン分布である。物理過程を組み込んでおり、高横運動量になるにつれて発生数が減っているのが分かる。

#### 3.1.3 Single Simulation

単一粒子のみを特定の制限をかけて飛ばすことが可能なイベントジェネレータであり、CERN が開発した計算用ソフトウェア「ROOT」を ALICE 実験仕様に変更した AliROOT と呼ばれるものの中の AliGenBox と呼ばれるクラスの事を言う。本研究においては主に粒子の検出効率を出す際に用いた。このイベントジェネレータの目的は本来の物理現象においてバックグラウンドにより見失われるであろう信号を抽出することであり、利点として単一粒子のみ発生させることができる、また衝突によるあらゆる物理量を自由に設定することができ、かつ物理現象を加味していないため、シミュレートする時間を短くすることが可能という事が挙げられる。図 3.2 のグラフはシングルシミュレーションによって得られたパートン分布とその粒子の飛ばした方向の 2 次元ヒストグラムである。

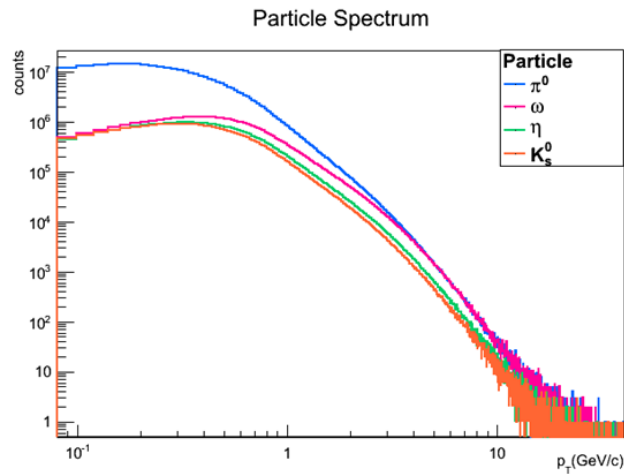


図 3.1: PYTHIA による粒子生成スペクトル図

陽子陽子衝突が再現されており、そのため各中性中間子のスペクトルが異なっており、またその生成量が横運動量に依存している。

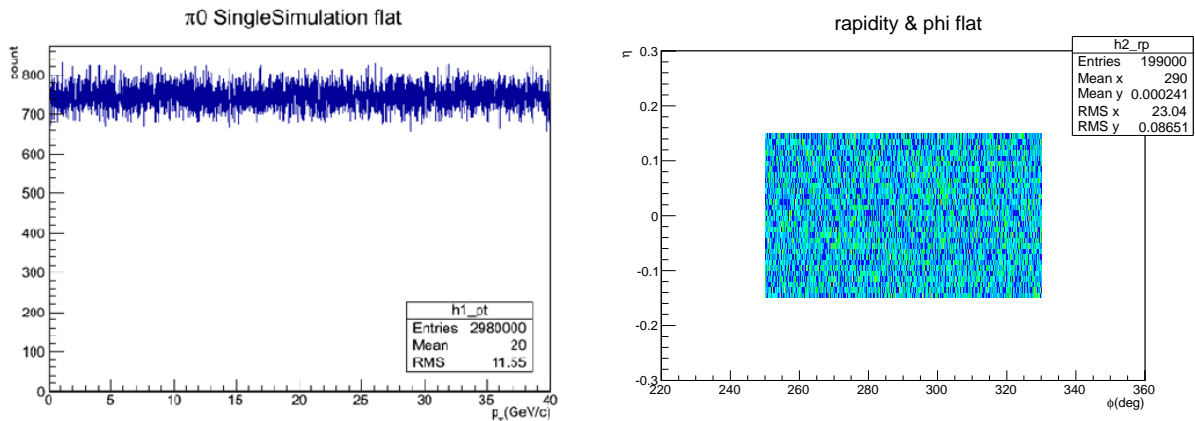


図 3.2: シングルシミュレーションによって作成したプロット

左図が横運動量ごとの  $\pi^0$  の数を 1 次元ヒストグラムにしたもの、右図が単一粒子の方位角、擬ラピディティ方向を 2 次元ヒストグラムにしたもの。これらのグラフから分かる通り、このシミュレーションでは横運動量を  $0 \sim 40 \text{ GeV}/c$  に均一に粒子を飛ばしており、その方向は右図の  $250^\circ < \phi < 330^\circ$ 、 $|\eta| < 0.7$  の領域内のみ飛ばしていることが分かる。

## 3.2 解析

### 3.2.1 粒子生成スペクトル/Tsallis フィッティング

衝突による粒子の生成量は粒子が持つ横運動量ごとに異なっており、依存性がある。そのため横運動量でヒストグラムを作るとするとスペクトルを描く。このことから収量はこの粒子生成スペクトルに大きく関わっており、このスペクトルのもと収量を見積もる必要がある。イベントジェネレータである PYTHIA には粒子生成の横運動量依存性が組み込まれており、本研究では PYTHIA におけるシミュレーションによりそのスペクトルを再現した。用いた PYTHIA のバージョンは v5-02-Rev-09 であり、これは現在 ALICE 実験で行われている実際の PYTHIA のバージョンとは異なっている。それは ALICE 実験で取られたデータにより PYTHIA が実験結果に合うようにチューニングされていくためであり、それゆえ本研究に用いた PYTHIA のバージョンでは実際の ALICE の実験データに比べ高横運動量粒子の収量が 100 倍程度多く見積もられている。

粒子生成スペクトルに関連して Tsallis フィッティングというものがある。これは上で述べた粒子生成スペクトルを精度よく再現できるフィッティング関数である。Tsallis フィットの利点として粒子の生成量には高エネルギー原子核実験の歴史の中で多くの統計モデルが適用されてきたが、低横運動量領域をうまく再現しつつ、かつ本解析で重要となる高横運動量領域までを一つの関数によってつくるのが可能であることがあげられる。

$$E \frac{d^3\sigma}{dp^3} = \frac{1}{2\pi} \cdot A \cdot \frac{(n-1) \cdot (n-2)}{nC[nC + m(n-2)]} \cdot \left(1 + \frac{m_T - m}{nC}\right)^{-n} \quad (3.1)$$

Tsallis 関数には 3 つのパラメーターが表れてくる。

A : 微分生成断面積

C : 系の温度

n : 衝突エネルギー

### 3.2.2 中性中間子測定手法

中性中間子の測定方法として再構成という手法を使う。その理由は原子核衝突後における見たい粒子が他の多くの粒子の情報により埋もれる、またはその寿命の短さゆえに崩壊することで、直接確認できないからである。そのため崩壊後の光子からもとの粒子を再構成することで測定する。ここで光子を用いた理由として光子は質量、電荷、色荷をもたず電磁相互作用のみを起こすボーズ粒子であり、生成時の情報を失うことないため、強い相互作用をもつ中性中間子を測定するための重要なプローブとなるためである。

#### 不変質量の計算

PHOS において測定される物理量はエネルギー、位置等であり、質量は求めることはできない。なので質量は計算により求める必要がある。高エネルギー衝突において粒子は光速近くまで加速されているため、

相対論的な効果を考慮に入れる必要があり、ローレンツ不変量として質量を求める。以下がその定義式である。

$$M = \sqrt{|E|^2 - |\vec{P}|^2} \quad (3.2)$$

この定義式は一つの粒子に対して成り立つ式であり、ここで測定する中性中間子はその崩壊後の2体あるいは3体から再構成する。それらの計算式は以下に示す通りである。2体崩壊では式(3.3)

$$\begin{aligned} M_{A_1 A_2} &= \sqrt{|E_{A_1} + E_{A_2}|^2 - |\vec{P}_{A_1} + \vec{P}_{A_2}|^2} \\ &= \sqrt{(E_{A_1}^2 + 2E_{A_1}E_{A_2} + E_{A_2}^2) - (|\vec{P}_{A_1}|^2 + 2\vec{P}_{A_1} \cdot \vec{P}_{A_2} + |\vec{P}_{A_2}|^2)} \\ &= \sqrt{M_{A_1}^2 + M_{A_2}^2 + 2(E_{A_1}E_{A_2} - \vec{P}_{A_1} \cdot \vec{P}_{A_2})} \end{aligned} \quad (3.3)$$

上に書いてある式に各粒子のエネルギー、4元運動量の値を代入することで不変質量は求まる。例えば  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  崩壊の時、光子は質量を持たないので、 $M_{AA} = 0$  より  $E = |\vec{P}|$  が導かれ、上の式はより簡略化され

$$M_{A_1 A_2} = \sqrt{2E_{A_1}E_{A_2}(1 - \cos\theta)} \quad (3.4)$$

となる。この式における  $\cos\theta$  は2つの光子が飛んでいく間の角度を示している。

3体崩壊では式(3.5)

$$\begin{aligned} M_{123} &= \sqrt{|E_1 + E_2 + E_3|^2 - |\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3|^2} \\ &= \sqrt{\sum_{i=1}^3 M_i^2 + 2 \sum_{i \neq j}^3 (E_i E_j - \vec{P}_i \cdot \vec{P}_j)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

### 3.2.3 測定効率

#### 幾何学的検出効率 (Acceptance)

アクセプタンスとは幾何学的な検出効率の事を指す。ALICE 実験における検出器はすべての方位各、ラピディティを覆っているわけではなく、衝突後の発生粒子をすべて検出することは不可能である。そのため実際に検出器に入ってきた粒子数が発生した粒子数になることはなく、検出できたのは一部にとどまるので、検出効率から求めることで実際に発生した粒子数を見積もることが可能である。アクセプタンスの補正係数  $\epsilon_{acc}$  の定義は以下の通りである。

$$\epsilon_{acc} = \frac{N(p_T)_{acc}(260^\circ < \phi < 320^\circ, |\eta| < 0.12)}{N(p_T)_{gen}(\Delta\phi = 360^\circ, |\eta| < 0.5)} \quad (3.6)$$

$N(p_T)_{acc}$ は検出器方向に飛んできた粒子の数を示し、 $N(p_T)_{gen}$ はシミュレーションで発生させた粒子の数を示している。

式 (3.6) は PHOS 検出器のみで測定した場合での幾何学的検出効率を示しており、崩壊モードに荷電粒子を含む  $\omega$  などの場合には上式の分母に TPC 方向 ( $\Delta\phi = 360^\circ$ 、 $|\eta| < 0.9$ ) という条件が加わる

### 再構成効率 (Reconstruction Efficiency)

上で述べた幾何学的な検出効率とは異なり、再構成効率というものがある。これは検出器方向に粒子が飛んできた場合でも、実際にクラスターから不変質量を組む時に、測定しようとしている中性中間子起源の光子によって作られたクラスターで組めているとは限らない事による。PHOS、EMCAL どちらでも言えることであるが、陽子衝突、原子核衝突において電磁カロリメーターは光子、電子を検出する際その光子や電子の親が誰なのかといった情報を一切持たない。そのため、不変質量を組む時、親粒子からの崩壊光子以外の光子を選択してしまった場合、本来の質量とは異なった値を取ってしまう。これは本研究でのシングルシミュレーションにおいても検出器の効果、また崩壊粒子がさらなる崩壊をする事で起きうる。そのため本研究では正しく粒子同定するために組まれた不変質量の分布曲線を作り、本来の不変質量付近にピークが立つ数とその粒子と同定する事にした。これを検出されるであろう粒子の数とし、その数から再構成効率が出される。再構成の補正係数  $\epsilon_{rec}$  式は以下のとおりである。

$$\epsilon_{rec} = \frac{N(p_T)_{rec}}{N(p_T)_{acc}} \quad (3.7)$$

$N(p_T)_{rec}$ は再構成された数で、であり、 $N(p_T)_{acc}$ は検出器方向に飛んでいった数である。またこの粒子同定の際にフィッティングという手法を用いた。これは質量分布曲線にうまく合うような関数を定義するというもので、これにより、粒子同定する領域をフィッティング関数による半値幅の2倍を取った。これにより95%の確率でそれらが正しい粒子ということを示すことになる。以下にフィッティングの例と本研究で用いた関数を示しておく。

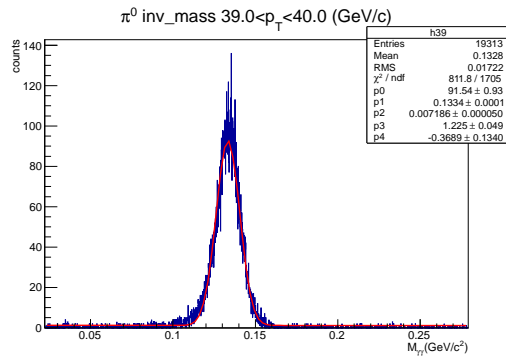


図 3.3:  $\pi^0$  の質量をガウスフィットした結果

- ガウス関数におけるパラメータは式 (3.8) の中の  $A, \sigma, \mu$  の3個である。それらの  $\pi^0$ 、 $\eta$  の粒子同定の際に用いた。式は以下のとおりである。

$$f(x) = A \exp\left(\frac{-(x - \mu)^2}{2\pi\sigma^2}\right) \quad (3.8)$$

A : 曲線ピーク高さ

$\mu$  : ピークの中心値

$\sigma$  : 半値幅

- ブライト・ウィグナー関数  $\omega$  の粒子同定の際に用いた。この関数はガウス関数に比べ、長くテイルを引くのが特徴となっている。 $\omega$  にこちらの式を適用したのは  $\omega$  の質量分布が大きな幅を持ち、ガウス関数に比べ、ブライトウィグナー関数の方がよりうまくフィットできたためである。式は以下のとおりである。

$$f(x; x_0, \gamma) = A \times \frac{1}{\pi} \frac{\gamma}{(x - x_0)^2 + \gamma^2} \quad (3.9)$$

A : 曲線ピークの高さ

$x_0$  : ピークの中心値

$\gamma$  : RMS

## トリガー効率

トリガーを課す事で粒子の収量が減ってしまう。この度合いを示すものがトリガー効率と呼ばれるものである。本研究におけるトリガー効率は広島大クォーク物理学研究室平成 24 年度修了生 (予) の八野氏によって求められたトリガー効率を採用している。そのトリガー効率を求める具体的な手法は八野氏の修士論文 [6] を参照していただきたい。以下に採用したトリガー効率をフィットしたグラフとフィット関数、またフィットパラメータを載せている。

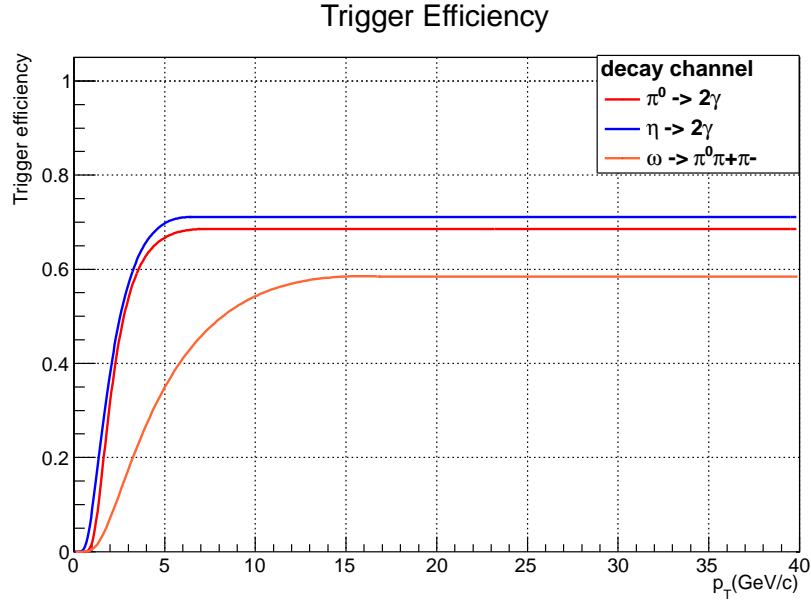


図 3.4: 陽子陽子衝突 8TeV における PHOS トリガー効率をフィットしたグラフ

このトリガー効率は陽子陽子 8TeV における PHOS トリガーによるもので本解析では、このトリガー効率を収量の見積りに大きな影響がないものとして陽子陽子 7TeV における PHOS トリガーデータにも適用している。

$$f(x) = \frac{\exp(-A + Bx + Cx^2)}{1 + Dx + Ex^2} \quad (3.10)$$

中間子	A	B	C	D	E
$\pi^0$	$6.10 \times 10^5$	$-1.48 \times 10^5$	$4.29 \times 10^4$	$4.42 \times 10^4$	$8.41 \times 10^4$
$\eta$	$3.74 \times 10^5$	$-7.88 \times 10^4$	$1.41 \times 10^4$	$1.13 \times 10^5$	$1.46 \times 10^4$
$\omega$	$3.62 \times 10^5$	$-1.04 \times 10^4$	$1.40 \times 10^3$	$6.58 \times 10^4$	$-6.36 \times 10$

表 3.1: 図 3.4 におけるフィットされたトリガー効率の各中間子のフィットパラメーター



またトリガーを課したデータを扱う際に考慮に入れなければいけないファンクションが一つあり、リジェクションファクター (Rejection factor) と呼ばれるものがある。これはトリガーをかけた際のイベント数というのはトリガーによるバイアスがかかっており、陽子陽子衝突のイベント数と大きく異なってくる。そのため MB トリガーと比較する際にそれらを単純比較はできず、規格化する必要がある。ここでは本研究の主題でないため、計算手法は省く。詳細に関しては先ほど述べた八野氏の修士論文、また陽子陽子衝突 7TeV におけるリジェクションファクターは平成 23 年度広島大クォーク研修了生である翠氏の修士論文 [7] を参照していただきたい。ここではファクターの値のみを取ってきた。陽子陽子衝突 7TeV における RF は RF=1189、8TeV における RF は RF= 3 125 である。これらの値はランごとに異なってくるため平均化された値となっている。

### 3.2.4 モジュールのコンディション

本来検出器はすべての粒子を検出できる事が理想であるが、検出器を構成している一つ一つの素子が何らかの理由によって光子や電子に対して正しい応答を返さなくなっていることがあることであり、この応答が行われない領域をデッドエリアと呼んでいる。これにより本来粒子が飛んできたにもかかわらず反応しない素子に飛んできたため検出できない事が起こりうる。本研究ではそのような実際の PHOS の状態ではなく、あくまで理想的な状態の PHOS 検出器における研究を行った。図 3.5 がモジュール毎の素子の反応を色で示したものである。

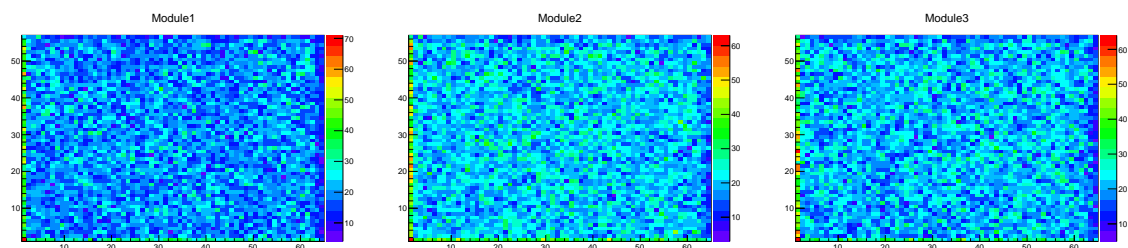


図 3.5: PHOS 検出器のモジュール別でのクラスターの反応

色のついているところが素子が正しく反応しているところであり、すべての素子がもれなく反応していることが分かる。

### 3.2.5 データセット

現在までに ALICE 実験で、取られているデータのうちトリガーごとでデータ量は異なってくる。本研究において用いたのは 2011 年、2012 年のそれぞれで取られた MB トリガー、PHOS トリガーでのデータの計 4 つである。以下がその年、トリガー別でのデータ量である。

エネルギー	トリガー	データセット	データ量(イベント)
7TeV	MB トリガー	LHC11a-f	555M(ミリオン)
7TeV	PHOS トリガー	LHC11a-f	6.9M
8TeV	MB トリガー	LHC12c,d,i	70M
8TeV	PHOS トリガー	LHC12c,d,i	6.1M

表 3.2: エネルギー、トリガー別での各データ量

### 3.3 収量の見積もり

収量は不変生成断面積に比例している。不変生成断面積とは衝突による粒子の生成確率を表す物理量である。以下が収量と不変生成断面積の関係式である。

$$\frac{d^2 N}{dy dp_T} = 2\pi p_T \cdot L_{int} \cdot \epsilon_{acc} \cdot \epsilon_{rec} \cdot Br \cdot E \frac{d^3 \sigma}{dp^3} \quad (3.11)$$

$L_{int}$  : 実験で取られたデータ量 (積分ルミノシティ)

$\epsilon_{acc}$  : アクセプタンスによる補正係数

$\epsilon_{rec}$  : 再構成による補正係数

$Br$  : 崩壊モードの分岐比 (%)

$E \frac{d^3 \sigma}{dp^3}$  : 不変生成断面積

式 (3.11) から収量の見積もりを計算するには不変生成断面積に取られたイベント数をかけることで粒子生成スペクトルを出し、崩壊モードによる分岐比、検出器の効果を積として組み込むことで見積もられる。

## 第4章 解析結果

### 4.1 Tsallis フィッティングの結果

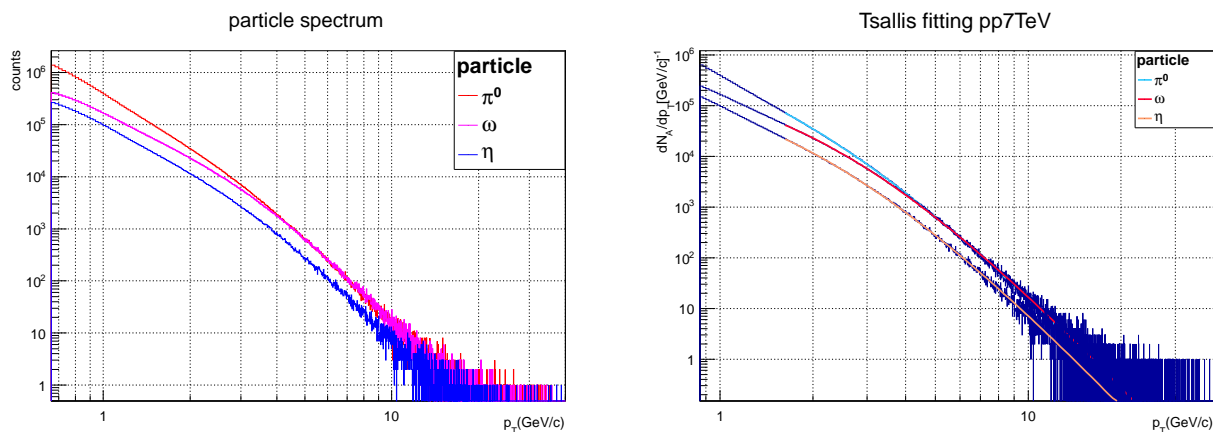


図 4.1: PYTHIA における重心系エネルギー 7TeV での粒子生成スペクトル (左図) とフィッティングした結果 (右図)

エネルギー	中間子	$C(MeV/c^2)$	$n$	$\chi^2/NDF$
7TeV	$\pi^0$	$263.9 \pm 1.59$	$6.63 \pm 0.02$	1.10
7TeV	$\eta$	$366.1 \pm 2.60$	$6.77 \pm 0.04$	1.13
7TeV	$\omega$	$412.7 \pm 1.743$	$6.82 \pm 0.03$	1.06
8TeV	$\pi^0$	$269 \pm 1.06$	$6.53 \pm 0.01$	1.16
8TeV	$\eta$	$373.9 \pm 1.73$	$6.67 \pm 0.03$	1.09
8TeV	$\omega$	$421.8 \pm 1.19$	$6.72 \pm 0.02$	1.49

表 4.1: フィッティングパラメーター一覧と  $\chi^2/NDF$

表 4.1 から重心系エネルギー 7TeV、8TeV においてパラメーターの値は異なっているが、中間子ごとの値に同じ傾向をもつことがわかる。

## 4.2 崩壊チャンネル別でのアクセプタンス

アクセプタンスの条件は崩壊過程で発生するすべての粒子が測定検出器方向に飛んでいく場合に行っている。

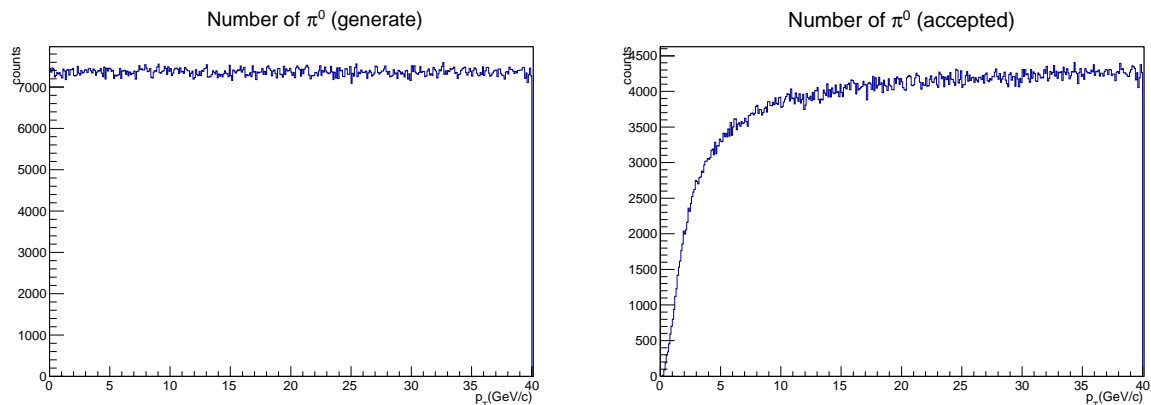


図 4.2: 横運動量別にみた発生した  $\pi^0$  の数 (左図) と PHOS 方向に飛んでいった数 (右図)

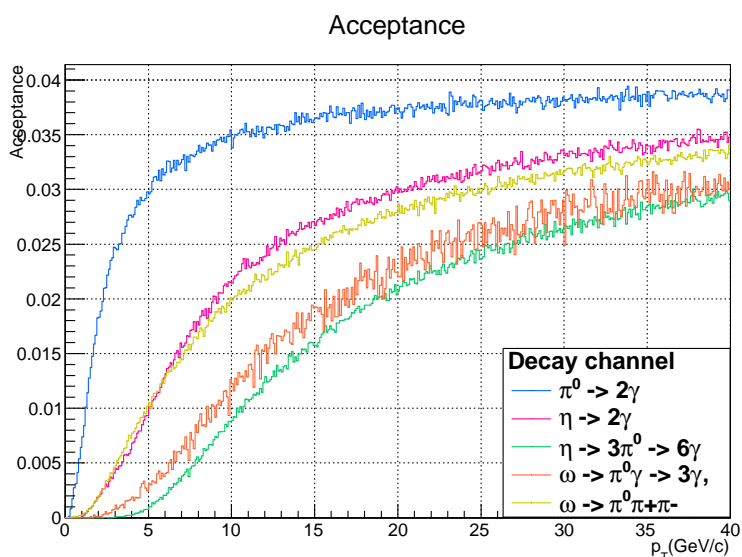


図 4.3: 崩壊モード別に見た Acceptance

複数回崩壊過程を含むチャンネルほど Acceptance が低くなっているのが分かる。またすべての粒子について高横運動量になるにつれて幾何学的検出効率は上がっていき、ある一定値に漸近していく。

### 4.3 崩壊チャンネル別での再構成効率

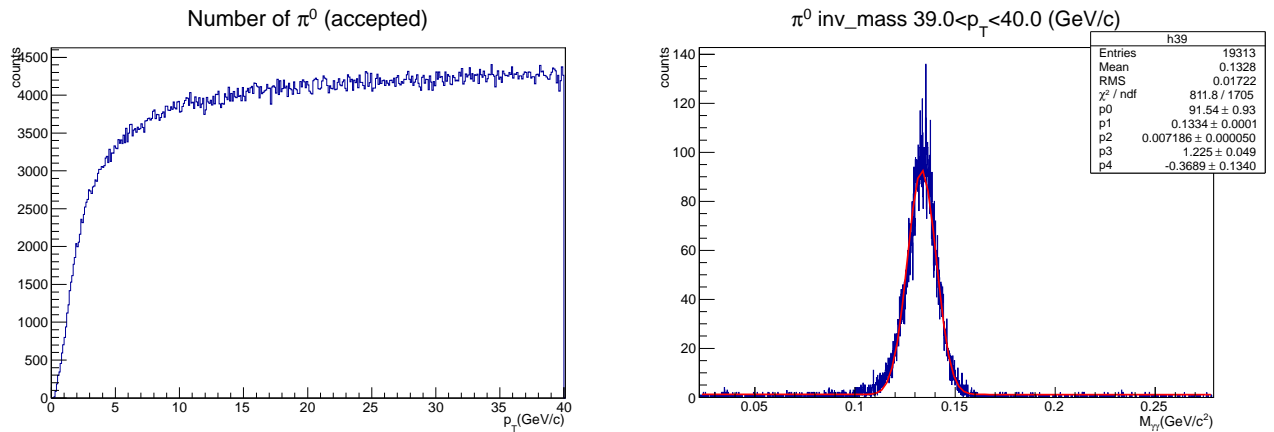


図 4.4: PHOS 方向に飛んでいった数 (左図) と横運動量別での質量分布曲線 (右図)

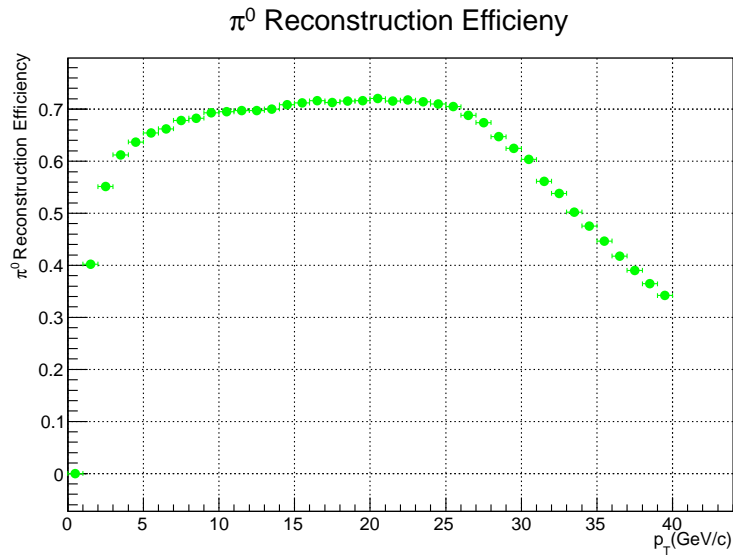


図 4.5:  $\pi^0$  の再構成効率

図 4.3 の数を図 4.3 横運動量毎に分けた数で割ったものをプロットしたものが図 4.4 である。

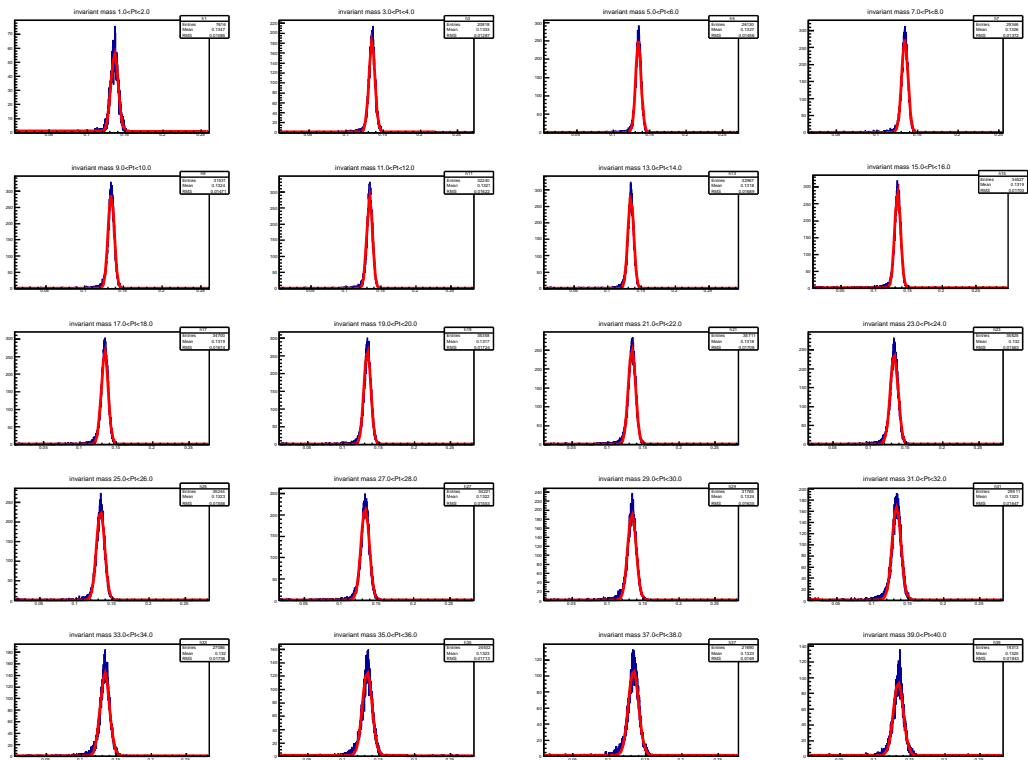


図 4.6:  $\pi^0$  の再構成効率を見積もる際に用いた横運動量毎での質量分布

### $\eta$ Reconstruction Efficiency

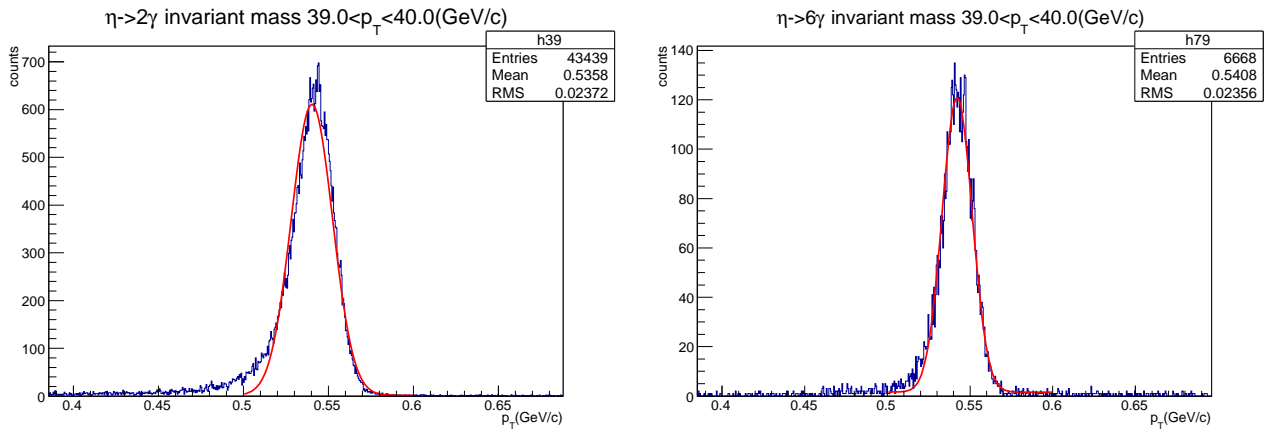
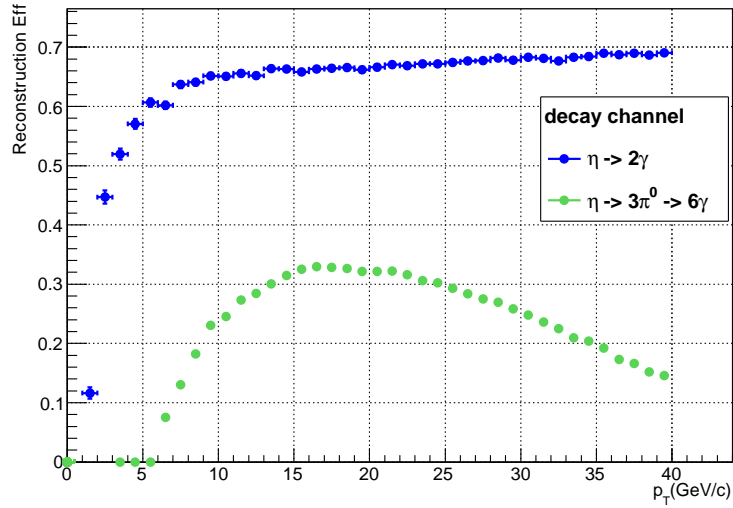


図 4.7:  $\eta$  の再構成効率と 2 つの崩壊モードにおける質量分布曲線

下左図が  $2\gamma$  崩壊の質量分布曲線、右図が  $6\gamma$  崩壊の質量分布曲線を表している。

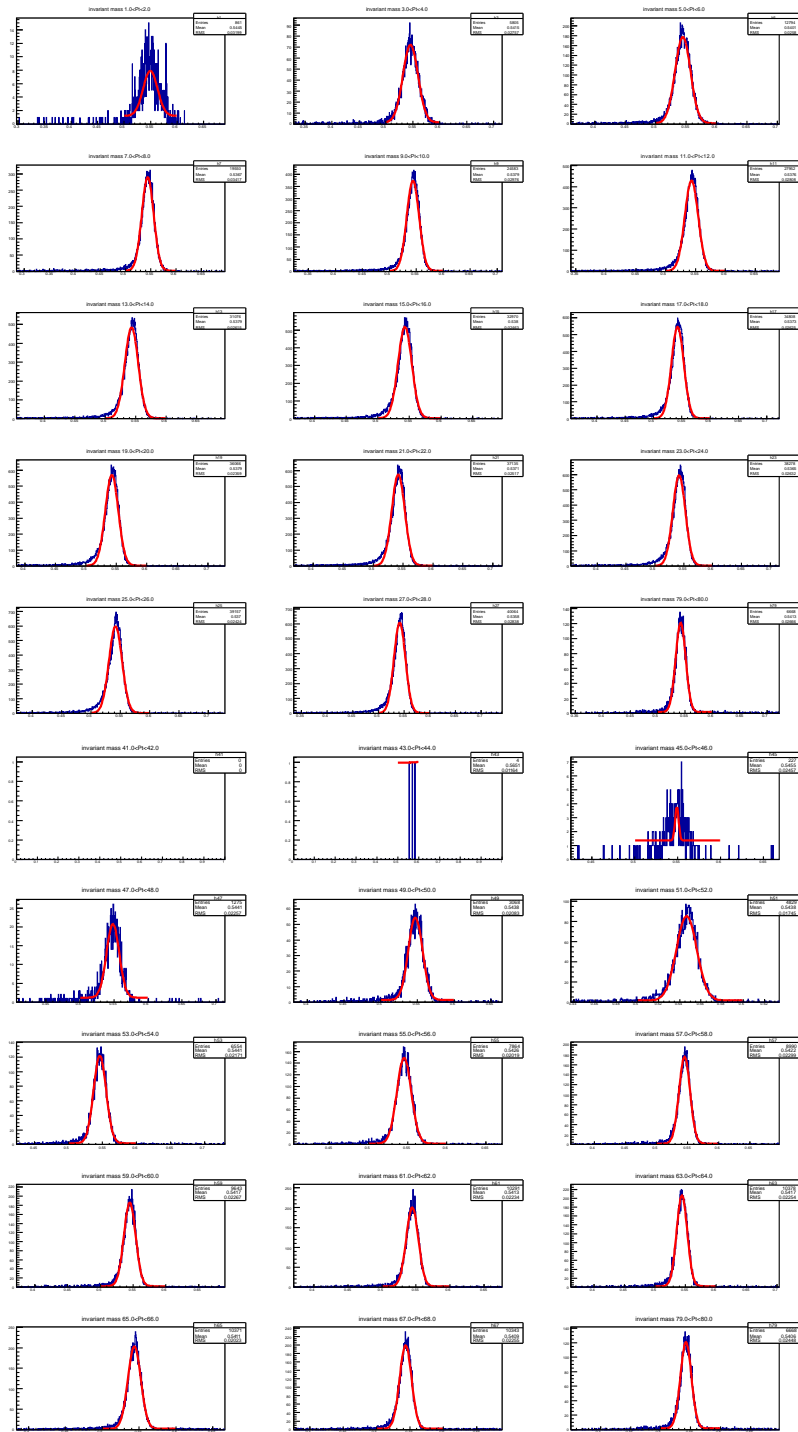


図 4.8:  $2\gamma$  崩壊の横運動量毎の質量分布 (上 5 行)、 $6\gamma$  崩壊の横運動量毎の質量分布 (下 5 行)



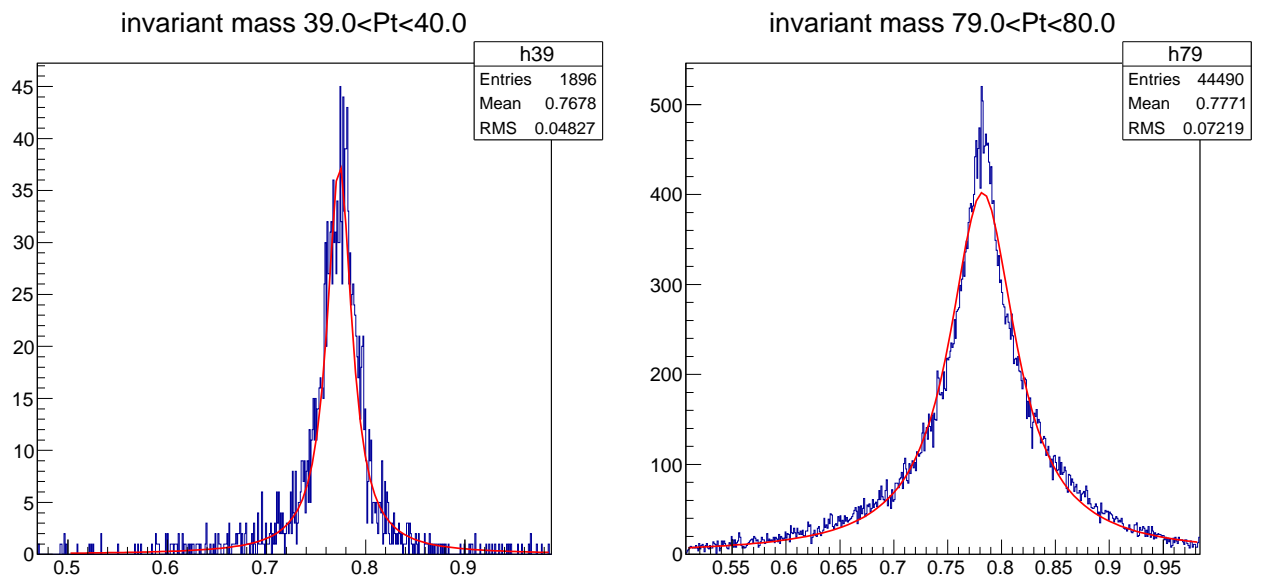
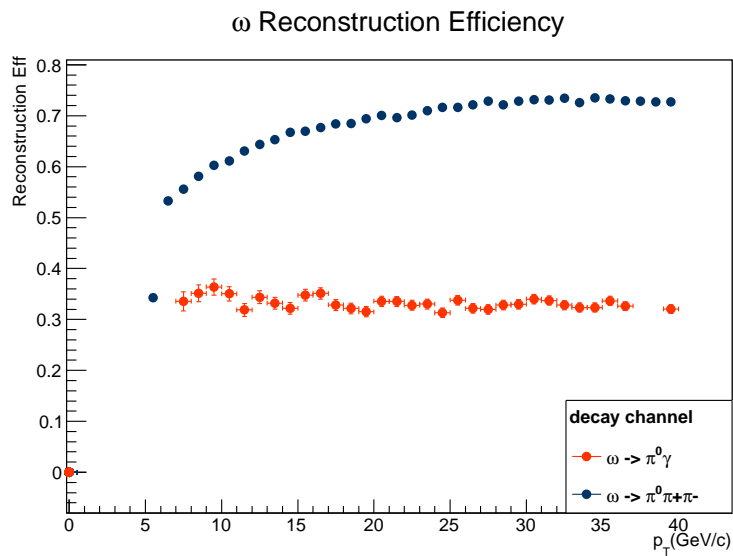


図 4.9:  $\omega$  の再構成効率と 2 つの崩壊モードにおける質量分布曲線

下左図が  $\pi^0 \gamma$  崩壊の質量分布曲線、右図が  $\pi^0 \pi^+ \pi^-$  崩壊の質量分布曲線を表している。

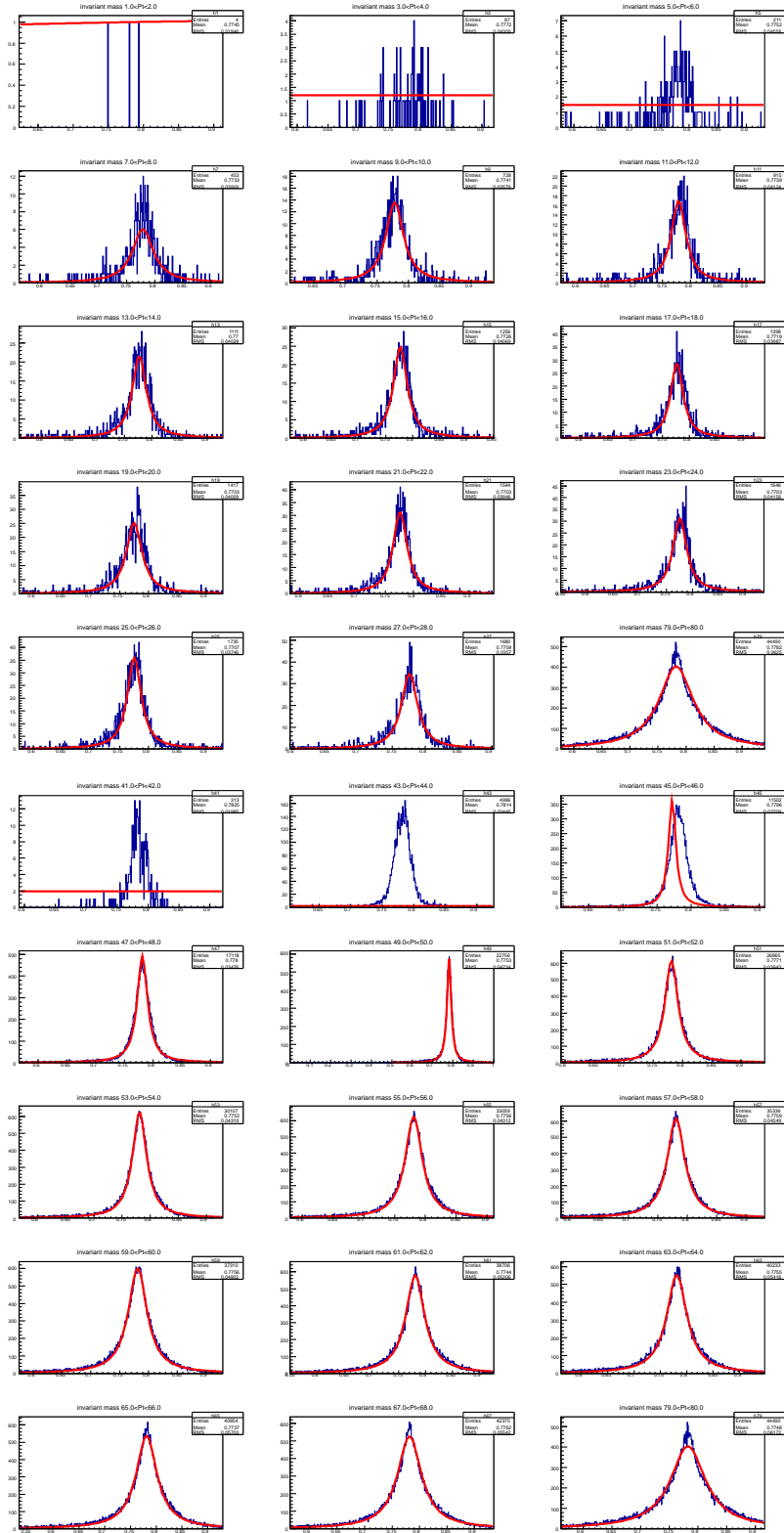


図 4.10:  $\pi^0 \gamma$  崩壊の横運動量毎の質量分布 (上 5 行)、 $\pi^0 \pi^+ \pi^-$  崩壊の横運動量毎の質量分布 (下 5 行)

#### 4.4 中性中間子の収量の見積もり

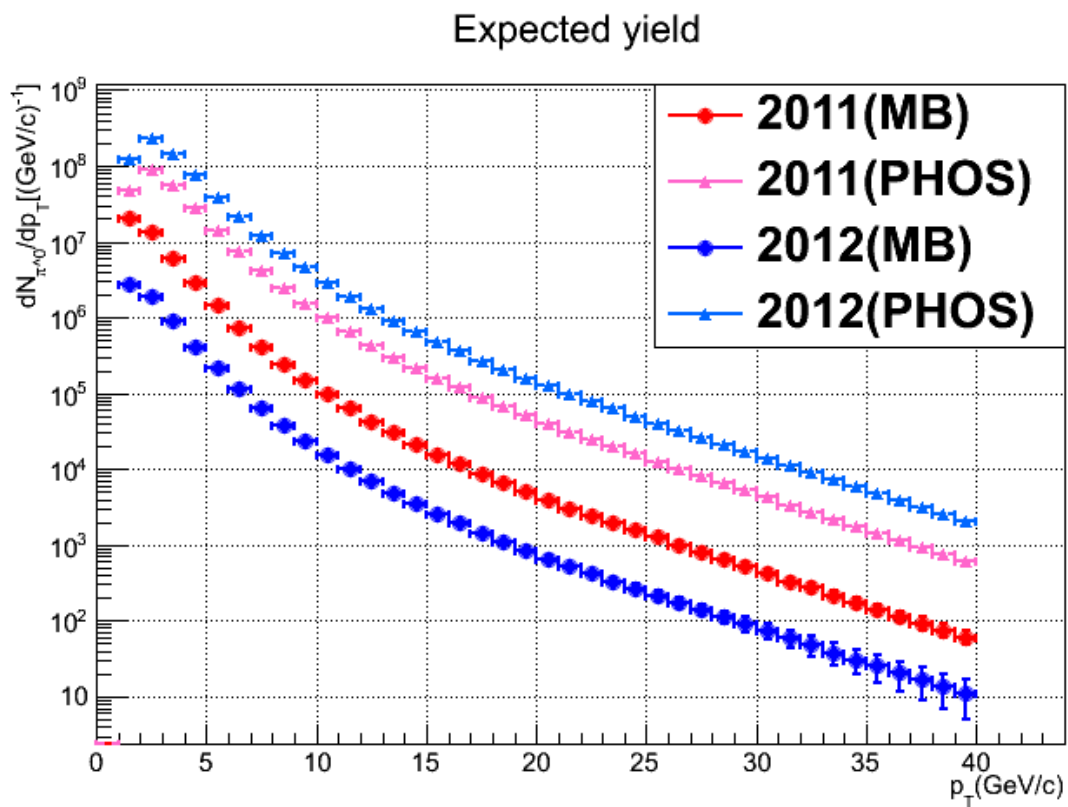


図 4.11:  $\pi^0$  における各データセットで期待される収量

### Expected yield

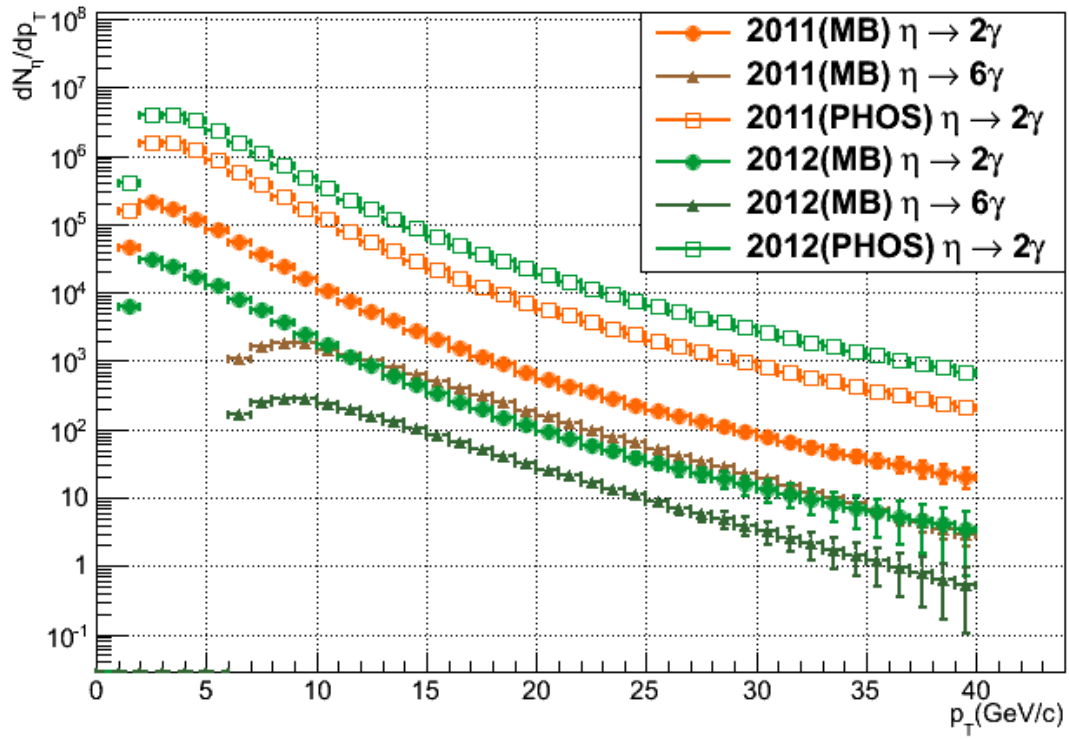


図 4.12:  $\eta$  における各データセット、崩壊モード別で期待される収量

## Expected yield

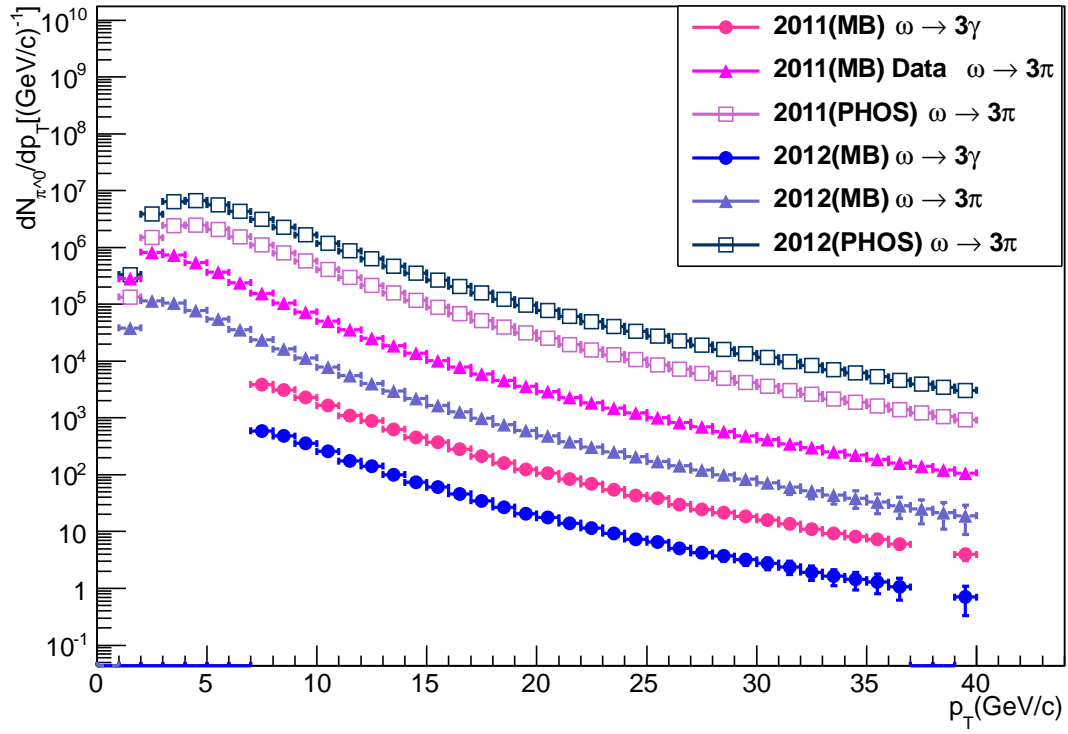


図 4.13:  $\omega$  における各データセット、崩壊モード別で期待される収量

## 第5章 考察、結論

### 5.1 アクセプタンスの横運動量依存性

解析結果にあるアクセプタンスのグラフからすべての粒子に対し横運動量が上がるにつれて補正係数が大きくなっていく傾向が見られた。これは粒子の崩壊角が横運動量に依存しているためであり、低い横運動量だとその崩壊角は大きくなる。そのため崩壊後の粒子が検出器に入りにくくなり、検出効率が悪くなってしまう。

### 5.2 再構成効率に関する考察

#### 5.2.1 補正係数が1にならない原因

図??における各中間子の再構成効率について、これらはすべてシングルシミュレーションにより見積もっているため効率の最大値は1になるはずであるが解析結果の最大値は0.7あたりまでしか到達しない。この理由として考えられるのは崩壊後の粒子が PHOS 方向に飛んできたにも関わらず必要十分なクラスター数がなく、不変質量が組めなかったということである。これは主に PHOS 検出器のモジュール間の隙間からくるものであり、系統誤差に分類される。実際にクラスターの数かどのくらいなのかを確かめたものが、図 5.1 は  $\pi^0$  であり、再構成効率と同じように横運動量依存性を 2 次元ヒストグラムにした。この結果から言えるのは  $\pi^0$  の不変質量を組むために必要なクラスター数は 2 つであるにもかかわらずクラスター数が 1 つのところにも分布している。そのため不変質量が組めず、再構成効率を全体的に落とす要因となっていた。

#### 5.2.2 $\pi^0$ の高横運動量領域における補正係数が下がる原因

高横運動量領域において効率が落ちるのはマージング効果というものが考えられる。高横運動量領域において崩壊した 2 つの光子は崩壊各が狭い状態で検出器に飛んでいく。これにより検出器でクラスターが重なってしまい、1 つの大きなクラスターを形成することがある。実際に図 5.1 で高横運動量領域をみると横運動量が 25~30 GeV/c 辺りからクラスター数 1 の統計が増えてきているのが分かる。これを定量的に考察してみる。

$\pi^0$  が 2 つの光子に崩壊する時それらの距離がもっとも近くなるのはビーム軸垂直方向に崩壊した場合である。この時それら 2 つの光子の崩壊角を  $\theta$  とすると以下の関係式が成立する。

$$\tan \theta = \frac{m}{p_T} \quad (5.1)$$

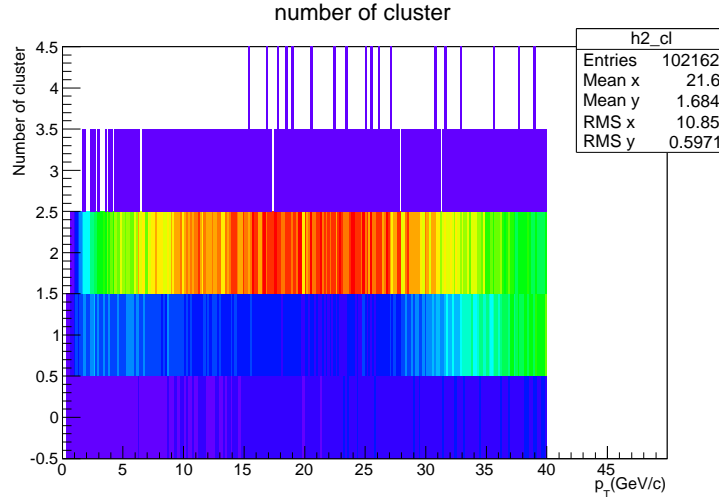


図 5.1: 横運動量とクラスターの数の相関

$m, p_T$  は崩壊前の粒子の質量、横運動量である。

またビーム衝突点から PHOS までの距離は 4.6m である。マーキング効果は 2 つの光子が一つの素子の中に入る際に起こると考えられる。つまり上式に 4.6m をかけることで 2 光子間の距離が求められ、その距離が PHOS の 1 素子の大きさ 2.2cm 以内に収まってしまふあたりでマーキングが発生し始める。その時の横運動量を計算すると 26GeV/c あたりになり、再構成効率が下がり始めるところと一致する。以上により高横運動量領域では再構成効率が低くなってしまふ事が分かる。

### 5.3 結論、見通し

以上の解析結果から各中性中間子においてもっともよく収量が測定されるは  $\pi^0$  に関しては陽子陽子衝突 8TeV における PHOS トリガーがかけられたデータセット、 $\eta$  に関しては崩壊モードが  $\eta \rightarrow 2\gamma$  における陽子陽子衝突 8TeV における PHOS トリガーがかけられたデータセット、 $\omega$  に関しては崩壊モードが  $\omega \rightarrow \pi^0\pi + pi-$  における陽子陽子衝突 8TeV における PHOS トリガーがかけられたデータセットということが分かった。また本研究では EMCAL での測定量を求めるに至らなかったが、EMCAL はタワーのサイズが大きく  $\pi^0$  のマーキング効果が表れるのが横運動量 10GeV/c 付近であるため、PHOS よりも低い横運動量領域で収量が得られなくなることが予想される。一方  $\eta, \omega$  に関しては不変質量が  $\pi^0$  に比べ重いためマーキング効果が近い距離に崩壊しにくくなり、高横運動量においても再構成効率が落ちないため、PHOS に比べ収量が得られる可能性があると思定される。ここに EMCAL トリガーが加えられた場合本研究における PHOS 検出器での収量の結果から MB トリガー時に比べ収量が増えたことを踏まえると同様に収量が増える事が見込まれるため、 $\eta, \omega$  における EMCAL における収量の系統的な考察は今後実データを解析するために必要な事であると言える。

## 第6章 謝辞

本研究をするにあたりお世話になった方々に心より感謝いたします。杉立先生にはミーティングでの僕の至らない説明によりみんなを混乱させてしまっている状況などを質問を重ねることで一つ一つ紐解いてくださりました。これは僕自身の知識の理解、整理につながりました。志垣先生には研究の方向性について毎週のミーティング時に示していただいたり、また答えばかりを出そうとしてしまいがちな僕に一つ一つ順を追っていくことの大切さを教えていただきました。本間先生には物理への情熱ゆえの厳しいお叱り、意見を幾度か受けました。まだまだ未熟な僕の研究に真剣に意見を下さった事は本当にありがたいことだと思います。三好先生には4年生セミナーでお世話になりました。またラボエックでコンピューティング関連で詰まっているときに助けて下さりありがとうございました。研究室の先輩方には常にお世話になりっぱなしでした。中でも中宮さんは僕の研究の方向性を誤った方向に進まないように定期的に見てくださいました。時には僕の説明不足により意図した事が伝わらず声を大にして議論することもありました。しかしどんなときにも話を一通り聞いてくださり、その上で足りないところややっておいたほうが良いことなどをアドバイスしてくださり、本当に助かりました。また渡邊さんには同じ部屋に居ながらなかなか話す機会があまりなかったのですが、時にはコードを一晩かけて1から見ていただいたこともあれば本論文における添削もしていただきました。一晩中僕のデバッグにつきあっていただいた事には感謝に尽きます。八野さんには幾度となく部屋へ押し掛けてしまいました。大体間が悪く、修論が忙しい中での質問で大変迷惑だったと思われそうですが、そんな中でもしっかり答えてくださいました。また僕の研究内容を意味のあるものにしてくださったのも八野さんのおかげだと思います。本当にありがとうございました。同じく修論が忙しい中定期的に僕の解析を見てくださったのが星野さんです。星野さんからはコードの書き方を一番初めに教わりました。また時には夜遅くまで僕のコードのバグを見てくださった事もありました。坂口さんはお忙しい中僕の身勝手な予定に合わせてALICEのRunの情報について親身になって教えてくださりました。また卒業論文の締め切りぎりぎりにもかかわらず添削もしていただきました。あの時は助かりました。他にもいろいろお世話、そして迷惑をかけたと思います。中でももっとも迷惑をかけてしまったのは同期である4年生だと思います。僕が研究がうまくいかない時には、必ずと言っていいほどみんな手助けをしてくれました。関畑君にはよくコードのバグの意味やtex関係など小さなことを何度も聞きましたが、たとえどんな時でも必ず答えてくれました。永嶋君にはプロットから意味することなどよく議論しました。谷崎さんにはプログラムの書き方、意味などを教わりました。中里君、市間君、江川君には夜中遅くまで残っているときなどにいろいろ助けあったこともありました。

最後の最後まで説明が下手になってしまいましたが、皆様僕の研究を支えてくださりありがとうございました。



## 参考文献

- [1] 理化学研究所 [http://www.riken.go.jp/r-world/info/release/news/2010/apr/spo\\_01.html](http://www.riken.go.jp/r-world/info/release/news/2010/apr/spo_01.html)
- [2] LHC ALICE 実験 -ALICE JAPAN- <http://alice-j.org/>
- [3] Large Hadron Collider beauty experiment <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/en/detector/Detector-en.html>
- [4] A Large Ion Collider Experiment <http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2InsideAlice-en.html>
- [5] Hans Muller .” PHOS Users Manual ” (2007) ALICE internal note.
- [6] 八野 哲 「Analysis of  $\pi^0, \eta,$  and  $\omega$  mesons in pp collisions with a high energy photon trigger at ALICE」
- [7] 翠純 平 「重心系衝突エネルギー 7TeV 陽子陽子衝突における ALICE 実験 PHOS トリガーデータを用いた中性中間子生成の研究」
- [8] 横山 広樹 「LHC-ALICE 実験における QGP 研究のためのクォーク/グルーオン・ジェット識別能力の評価」