

# ALICE 実験 PHOS 検出器による $\pi^0$ 検出効率

広島大学理学部物理科学科

クォーク物理学研究室

岡田 裕介 B034021

主査 杉立 徹 教授

副査 小口 多美夫 教授

指導教官 杉立 徹 教授

平成 19 年 2 月 28 日

## 要 旨

私たちの研究グループは、欧州原子核研究機構 (CERN) で 2007 年から行う重イオン衝突実験のひとつである ALICE 実験に向けて、高性能光子検出器 (PHOS 検出器) を開発している。ALICE 実験は、クォークグルーオン・プラズマ (QGP) の探索を目的とした実験である。本研究の目的は、この PHOS 検出器の性能を、シミュレーションにより評価することである。QGP の検証には、熱輻射による熱光子の測定が有効である。熱光子の測定には主に中性  $\pi$  中間子 ( $\pi^0$ ) の二体崩壊 ( $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ ) によって生じる膨大な数の光子を除く必要があり、そのため ALICE 実験において生じる  $\pi^0$  の数を正確に見積もることは極めて重要である。

本研究では、シミュレーションにより  $\pi^0$  を発生させ、 $\pi^0$  の崩壊によって発生した光子を PHOS 検出器で測定した。測定したエネルギーと検出位置を用いて不変質量を計算することにより、 $\pi^0$  の再構成を行い、PHOS 検出器の  $\pi^0$  検出効率を求めた。さらに発生させる  $\pi^0$  の横方向運動量を変化させ、検出効率の横方向運動量依存性を調べた。その結果、ALICE 実験で精密測定が期待される高運動量領域 ( $p_T > 5 \text{ GeV}$ ) では、低運動量領域に比べ  $\pi^0$  検出効率が高くなっていることが確認された。これは、 $\pi^0$  の運動量が大きいほど 2 つの崩壊光子の互いになす角が小さくなり、PHOS 検出器で検出しやすくなることから理解できる。

# 目次

第 1 章	序論	5
1.1	量子色力学 (QCD)	5
1.2	クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)	5
1.3	光子生成過程	6
1.3.1	直接生成光子	6
1.3.2	熱光子	6
1.3.3	崩壊光子	7
1.4	$\pi^0$ 崩壊過程	7
1.5	目的	7
第 2 章	研究施設及び測定機器	8
2.1	LHC 加速器	8
2.2	ALICE 実験	9
2.3	PHOS 検出器	9
第 3 章	シミュレーション・解析	12
3.1	シミュレーション	12
3.1.1	Event generator	12
3.1.2	GEANT3	12
3.1.3	Responce	12
3.1.4	Reconstruction	13
3.2	シミュレーションの条件	13
3.2.1	ALICE シミュレーション	13
3.2.2	PHOS のみを用いたシミュレーション	13
3.2.3	多重度を上げたシミュレーション	13
3.3	解析の方法	13
3.3.1	ローレンツブースト	13
3.3.2	不変質量の計算	14
3.3.3	フィッティング	15

3.3.4	検出効率 . . . . .	15
第 4 章	結果と考察	16
4.1	不変質量 . . . . .	16
4.1.1	PHOS 検出器のエネルギー線形性 . . . . .	16
4.1.2	PHOS 検出器のエネルギー分解能 . . . . .	16
4.1.3	PHOS の位置分解能 . . . . .	20
4.2	検出効率 . . . . .	21
4.3	p-p 衝突実験 ( $\sqrt{s} = 900\text{GeV}$ ) における $\pi^0$ 検出数 . . . . .	23
第 5 章	結論	26

# 第1章 序論

この章では、本研究を行うにあたって必要となる素粒子物理学の基本的知識や背景を説明する。

## 1.1 量子色力学 (QCD)

この宇宙は、物質を構成する粒子であるクォークやレプトンと、物質の基本相互作用を伝達するゲージ粒子からなっている。クォークとゲージ粒子の1つであるグルーオンは色荷と呼ばれる量子数を持ち、クォークはグルーオンを交換することで色荷をやりとりしている。物質の基本相互作用には強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用、重力相互作用の4つがあるが、色荷を持つクォークとグルーオンは強い相互作用を起こし、これは量子色力学 Quantum Chromodynamics(QCD) で記述することができる。

強い相互作用には、色荷同士の間距離が小さくなると弱くなり、距離が大きくなると強くなるという特徴がある。これを漸近的自由性と呼ぶ。

## 1.2 クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

核子中のクォークやグルーオンは常温・常圧では閉じ込めのため、中性子や陽子の中から単独で取り出すことはできない。しかし、漸近的自由性によると、ビッグバン直後の高温・高圧状態ではこの閉じ込めが破れて、それぞれの素粒子が自由に動き回ると考えられている。

本研究でシミュレートする ALICE 実験は陽子-陽子衝突で  $1.4 \times 10^{13} eV (14 TeV)$  を実現する LHC 加速器を用いるため、衝突点にビッグバンから数  $\mu$  秒後程度の高温・高圧状態を作り出すことが可能である。この環境下ではクォークの非閉じ込め相 (QGP 相) への相転移の観測が期待されている。

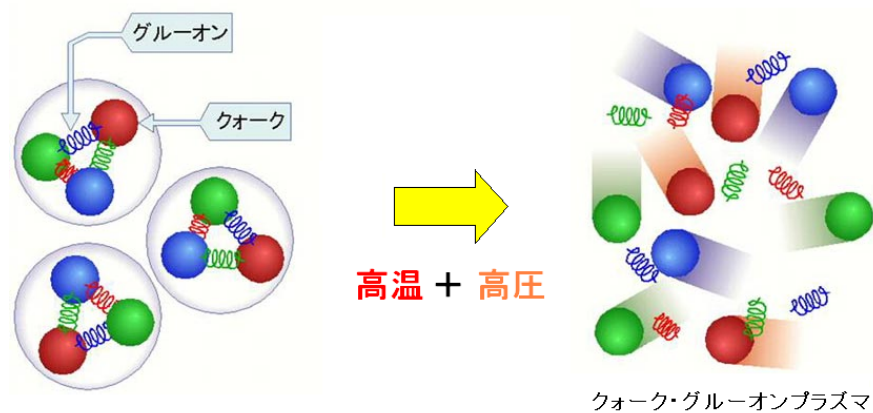


図 1.1: QGP 相への相転移

赤青緑の球がクォークを、ばねがグルーオンを表す。高温・高圧によってクォークが閉じ込めから開放され、QGP 相へ相転移している。

## 1.3 光子生成過程

高エネルギー重イオン衝突実験では多くの粒子が発生するが、その中でも光子は強い相互作用を受けないので、衝突時の情報を含んだまま検出することが可能である。高エネルギー重イオン衝突実験で生じる光子には次の3種類がある。

### 1.3.1 直接生成光子

重イオン衝突初期に直接生成される光子。コンプトン散乱や対生成、制動放射によって生成される。

### 1.3.2 熱光子

QGP 相中のクォークやグルーオンが衝突・散乱することによって発生する光子。QGP 相中の熱統計状態の情報を含んでいるため、熱光子を観測することが QGP 観測への重要な手段であるが、発生量が少ないため観測することは難しい。熱光子の観測は ALICE 実験の重要な目的のひとつである。

### 1.3.3 崩壊光子

高エネルギー粒子衝突によって発生した  $\pi^0$  や  $\eta$  などのハドロンが崩壊して生成される光子。崩壊光子の観測から、衝突で発生した粒子の同定が可能になる。

これらの光子は混ざりあって観測されるため、QGP 相を確認するためにはこれらの光子を識別することが必要である。

## 1.4 $\pi^0$ 崩壊過程

本研究で主に扱う粒子である  $\pi^0$  は、そのほとんどが  $2\gamma$  に崩壊する。

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad (98.8\%) \quad (1.1)$$

しかし、まれに 1 つの  $\gamma$  と電子・陽電子対に崩壊するものがある (ダリツ崩壊)。

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + e^- + e^+ \quad (1.2\%) \quad (1.2)$$

本研究では、 $2\gamma$  への崩壊のみを扱う。

## 1.5 目的

本実験ではまず第一に、PHOS 検出器の検出効率をシミュレーションによって算出することによって、2007 年 12 月に CERN・LHC 加速器で予定されている陽子 - 陽子 (p-p) 衝突実験において、ALICE 実験で PHOS 検出器が検出するであろう  $\pi^0$  の数を見積もることを目的とする。これを見積もることによって、p-p 衝突実験、さらには p-p 衝突実験後に予定されている重イオン衝突実験において生成される光子の識別、熱光子の検出を可能にし、QGP 相の観測を決定的なものにすることができる。

また、ALICE 実験は複数の検出器を使用した実験であり、衝突点と PHOS 検出器の観測点との間にも他の検出器が設置される。本研究では、そのような PHOS 検出器以外の機器が PHOS 検出器のデータに与える影響を調べる。

さらに、重イオン衝突実験では一度に多くの粒子が衝突する、多重度の高い衝突が起きる。本研究では、多重度の高い事象が PHOS 検出器に与える影響を調べることも目的とする。

## 第2章 研究施設及び測定機器

この章では、本研究でシミュレートする実験施設や、実験に使用する機器の概要を説明する。

### 2.1 LHC 加速器

Large Hadron Collider(LHC) は、スイスとフランスの国境地域にある欧州原子核研究機構 (CERN) の地下 100m に建設された周長 27km の衝突型粒子加速器であり、重心衝突エネルギーは鉛-鉛衝突で 5.5TeV、陽子-陽子衝突で 14TeV に達する。現在 4 つの実験が計画されており、ALICE 実験はその 1 つである。

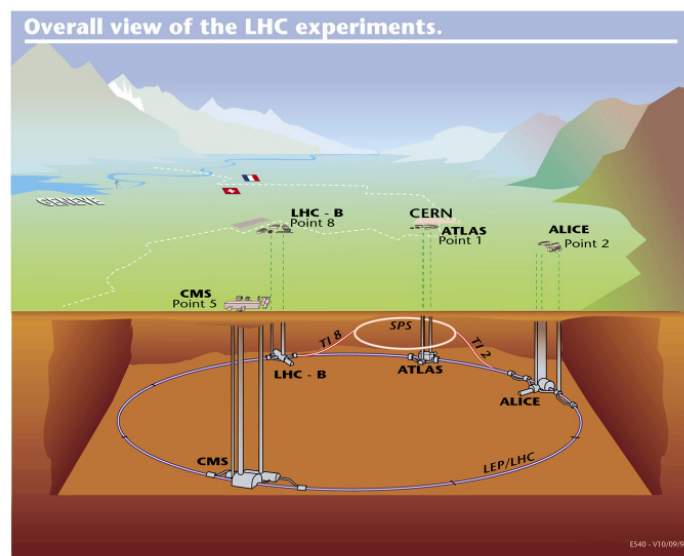


図 2.1: LHC 加速器と 4 つの各実験の位置関係



## 2.2 ALICE 実験

A Large Ion Collider Experiment(ALICE) は、ビッグバンから数  $\mu$  秒後の高温・高圧状態を LHC 加速器によって人工的に作り出し、QGP 相を確認することを目的とした実験であり、15 の検出器・測定器で構成されている。

複数の円筒形飛跡検出器 ITS,TPC,TRD で電荷を持つすべての粒子の飛跡を捉える。TOF は粒子の飛行時間を計測し、HMPID は特に高速で飛行する粒子の発する光を捉え、ITS,TPC,TRD と、高い横方向運動量をもつ荷電粒子を識別する RICH とあわせて衝突で発生した粒子を同定する。また muon absorber と MUON 検出器を用いてミュオンを測定する。FMD は荷電粒子の擬ラピディティ分布を、PMD は光子の多重度を測定する。また ZDC は衝突で発生した中性子数を測定し、中心衝突度の決定に使われる。

## 2.3 PHOS 検出器

Photon Spectrometer(PHOS) は ALICE 実験の検出器類の最も外側に位置し、粒子衝突で発生した光子の運動量を測定する。検出部には鉛タンゲステン酸結晶 (PWO) が用いられ、エネルギー  $E$  の入射光子に対しておよそ  $3\%/\sqrt{E}$  のエネルギー分解能を持つ。本研究では、シミュレーションによって得られた PHOS のデータを用いて解析を行った。

その際、衝突点を原点として図 2.3 のように座標系を定義し、運動量方向を表す量であるラピディティを導入した。ラピディティ  $y$  は以下の式で表される。

$$y = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{E + P_z}{E - P_z} \right) \quad (2.1)$$

ここで、 $P_z$  は光子の運動量のビーム軸方向成分である。ただし高運動量領域では、 $P_z$  は  $E$  に近づくため、 $P_z/E$  は  $\cos\theta$  に近似できる。これを用いると、

$$\begin{aligned} y &= \frac{1}{2} \ln \frac{1 + P_z/E}{1 - P_z/E} \\ &= \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \cos\theta}{1 - \cos\theta} \\ &= \frac{1}{2} \ln \frac{\cos^2(\theta/2)}{\sin^2(\theta/2)} \\ &= -\frac{1}{2} \ln \left( \tan \frac{\theta}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

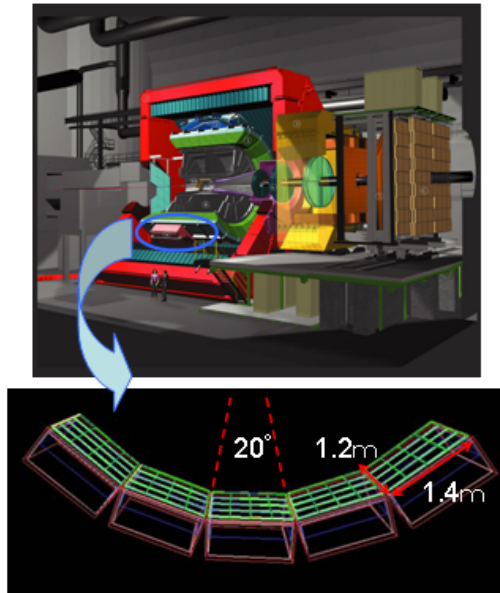


図 2.2: PHOS 検出器の外観

これを擬ラピディティと呼び、 $\eta$  で表す。

$$\eta = -\frac{1}{2} \ln \left( \tan \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.3)$$

以下に PHOS の仕様を示す。

モジュール数	5
チャンネル数	17280 (3456 × 5)
衝突点からの距離	R=4.6m
$\phi$ 範囲	220° ~ 320°
$\eta$ 範囲	-1.2~1.2

表 2.1: PHOS の仕様

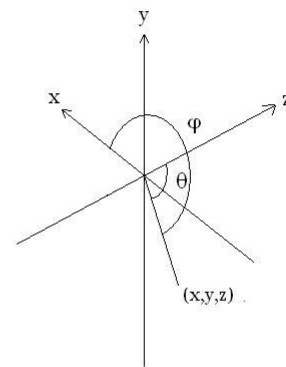
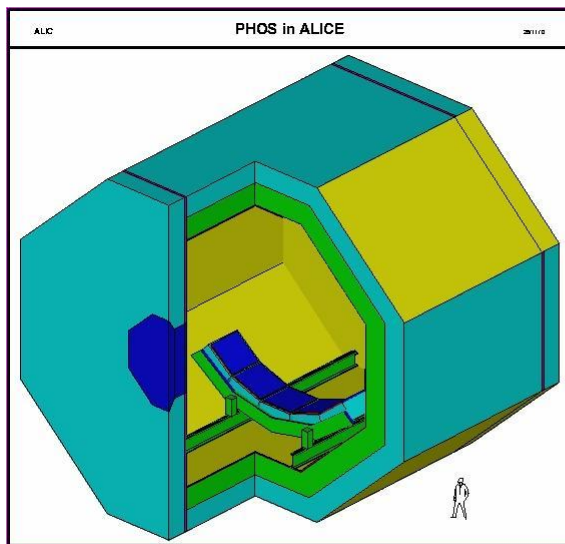


図 2.3: PHOS 検出器の ALICE 実験における配置

## 第3章 シミュレーション・解析

この章では、シミュレーションの条件や、シミュレーションによって得られたデータの解析方法などを述べていく。

### 3.1 シミュレーション

シミュレーションは、ALICE 実験で使用される環境を広島大学クォーク物理学研究室の PC に構築して行った。シミュレーションに使用した主なプログラムを紹介する。

#### 3.1.1 Event generator

衝突実験における衝突事象を発生させるプログラム。p-p 衝突を発生させる PYTHIA, 重イオン衝突を発生させる HIJING などがあるが、本研究では単一粒子を発生させた。ある一定の横方向運動量  $p_T$  を持つ単一粒子を、PHOS 検出器を被うように擬ラピディティ  $\eta$  が  $-0.12 \sim 0.12$ , 方位角  $\phi$  が  $220^\circ \sim 340^\circ$  に均一に発生させた。

#### 3.1.2 GEANT3

粒子が PHOS などの検出器やビームパイプなどの実験施設を通過したときに起こす反応を再現したプログラムである。各検出器素子に対して落としたエネルギーなどを得ることができる。

#### 3.1.3 Responce

GEANT3 より得られたエネルギー情報から、読み出し回路をシミュレートして Analog-to-Digital Converter(ADC) などの出力情報に変換する。実際の実験により得られるデータ形式と同じ形で出力する。

### 3.1.4 Reconstruction

Responseによって得られたデータを、粒子のエネルギーや位置情報などに換算するプログラム。

## 3.2 シミュレーションの条件

### 3.2.1 ALICEシミュレーション

本研究では1回のRunで1個の $\pi^0$ を発生させ、ALICE実験で使用されるすべての検出器・測定器などを設置して、 $220^\circ \leq \phi \leq 340^\circ$ ,  $-0.12 \leq \eta \leq 0.12$ の範囲に一樣に飛ばした。 $p_T = 1, 3, 5, 10, 15, 20\text{GeV}$ の6点で各4000Runずつシミュレーションを行った。

### 3.2.2 PHOSのみを用いたシミュレーション

他の検出器がPHOS検出器に与える影響を調べるため、真空中にPHOS検出器のみを置いてシミュレーションを行った。 $p_T = 1, 3, 5, 10, 15, 20\text{GeV}$ の6点で各500Runずつシミュレーションを行った。

### 3.2.3 多重度を上げたシミュレーション

多重度の高い事象に対するPHOS検出器の反応を調べるため、1回のRunで100個の $\pi^0$ を発生させ、真空中にPHOSのみを置き、 $0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$ にしてシミュレーションを行った。 $p_T = 1, 3, 5, 10, 15, 20\text{GeV}$ 6点で各10Runずつシミュレーションを行った。

## 3.3 解析の方法

### 3.3.1 ローレンツブースト

質量をもつ粒子が実験室系において高運動量で運動している場合、その粒子は運動方向に相対論的効果を受ける。これを考慮して重心系での運動を実験室系に変換することをローレンツブーストという。速度 $v$ で運動している $\pi^0$ が崩壊するとき、重心系における $\pi^0$ の進行方向に対して $\theta'$ の角度で飛び出す光子を考える。

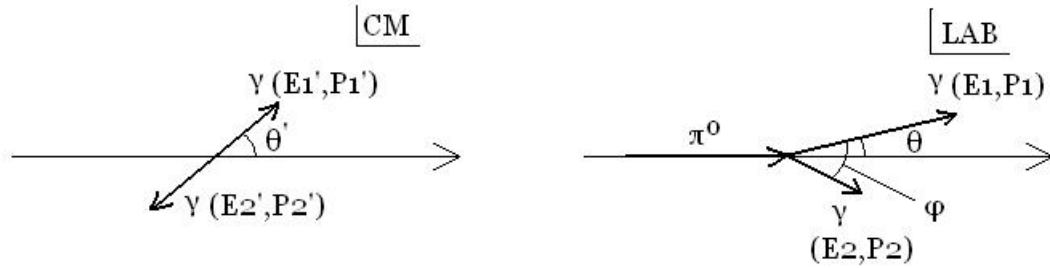


図 3.1: ローレンツブースト  
高速で飛行する  $\pi^0$  の重心系で見た図 (左) と、実験室系で見た図 (右)

崩壊光子は  $\pi^0$  の進行方向にローレンツブーストされる。そのときのエネルギー  $E_1$  は

$$\begin{aligned} E_1 &= \gamma(E_1' + \beta p_1' \cos\theta') \\ &= \frac{1}{2} m_{\pi^0} \gamma (1 + \beta \cos\theta') \end{aligned} \quad (3.1)$$

で表される。(ただし  $\beta = v/c, \gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ )

### 3.3.2 不変質量の計算

PHOS 検出器に光子が入射した場合、PHOS は光子が入射したクリスタルのあるクラスタの位置と、入射した光子のエネルギーを返す。 $\pi^0$  の寿命は非常に短い ( $c\tau = 25.1\text{nm}$ ) ので、ほぼ原点で崩壊すると考えてよい。ある  $\pi^0$  が崩壊して生成された 2 つの崩壊光子  $\gamma_1, \gamma_2$  のエネルギーを  $E_1, E_2$ 、2 つの光子のなす角を  $\phi$  とすると、 $\pi^0$  の質量  $m_{\pi^0}$  は次式で表される。

$$m_{\pi^0} = \sqrt{2E_1 E_2 (1 - \cos\phi)} \quad (3.2)$$

光子を検出した2つのチャンネルのデータを用いて  $m_{\pi^0}$  を計算した。どちらか1つの、あるいは両方の崩壊光子が検出できなかった場合は  $m_{\pi^0}$  を計算することができないので、ヒストグラムには加えられない。

検出された光子の中から2つを選び出し、その2つの光子のデータを用いて  $m_{\pi^0}$  を計算するという作業を、得られたすべての光子の組み合わせで行った。

### 3.3.3 フィッティング

解析によって得られた  $m_{\pi^0}$  のヒストグラムを、任意の関数でフィットする。1つの  $\pi^0$  から発生した2つの光子を選んだ場合は、求められた不変質量はある一定値の周りに分布する。しかし、異なる  $\pi^0$  から発生した光子を選んだ場合、あるいはどちらかの光子が1つのクラスタ内で全エネルギーを落とさなかった場合、求められた値は不変質量とはならない。これを Combinatorial Background(C.B.) と呼ぶ。C.B. は狭い  $pT$  の範囲では直線でフィットできると考えてよいので、今回のフィッティングにはガウス関数 + 一次関数を用いた。  $\chi^2/\text{ndf}$  が最小値をとるようにフィッティングパラメータを調節した。

### 3.3.4 検出効率

フィッティングによって得られたガウス関数の平均値から  $\pm 3\sigma$  (99%) (ここでは  $0.1 \sim 0.15\text{GeV}$  とした) のイベントを数え上げ、足し合わせる。この数から、フィットした一次関数を先の範囲で積分した値 (C.B.) を引いたものが再構成された  $\pi^0$  の数である。この数と発生させた  $\pi^0$  の比をとることによって、PHOS の検出効率を求めた。

## 第4章 結果と考察

この章では、前章までの実験によって得られた結果を示すとともに、その内容について議論していく。

### 4.1 不変質量

発生した崩壊光子から求められた  $\pi^0$  の不変質量  $m_{\pi^0}$  (図 4.1,4.2) の中心値をみると、文献値 (135.0MeV) [6] と比べて 10MeV 程度の過小評価が見られる。この原因について考察する。

#### 4.1.1 PHOS 検出器のエネルギー線形性

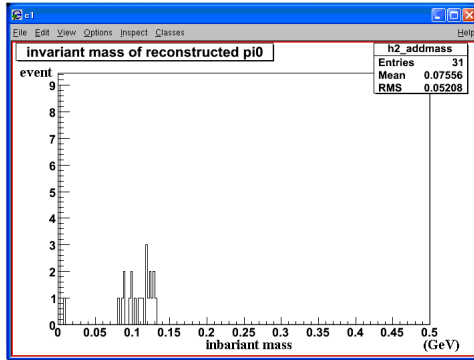
あるエネルギーの光子が PHOS 検出器に入射したとき、PHOS 検出器は入射した光子のエネルギーにほぼ比例した出力を返す。しかし、ある程度比例からのずれが生じる。このずれは入射した光子のエネルギーに依存しており、それを示したのが図 4.3 である。

#### 4.1.2 PHOS 検出器のエネルギー分解能

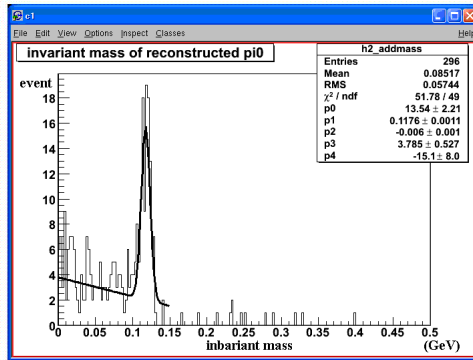
PHOS 検出器は入射光子のエネルギーに比例した電気信号を発する。しかし、同じエネルギーの光子を入射した場合でも、PWO や読出しシステムの反応には揺らぎがあるため、PHOS 検出器が返す値は分布をもってしまう。この分布はガウス関数でよくフィットできるが、そのときの幅  $\sigma$  を測定器のエネルギー分解能という。

図 4.4 は PHOS のエネルギー分解能を示したものである。

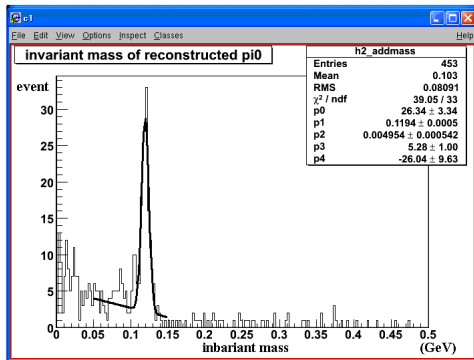




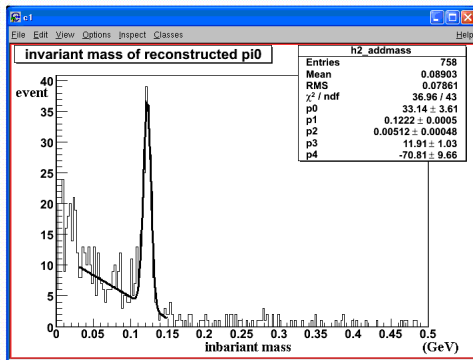
$p_T$  1GeV



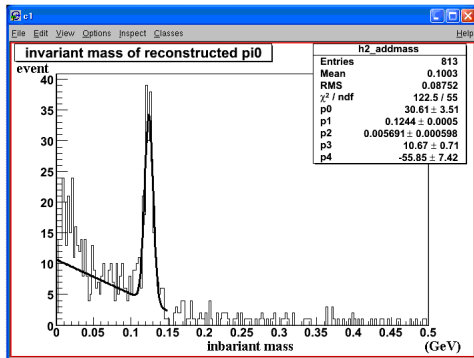
3GeV



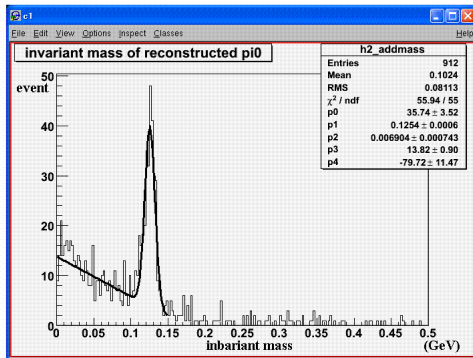
5GeV



10GeV



15GeV



20GeV

図 4.1: ALICE シミュレーションにおける各  $p_T$  での  $\pi^0$  の不変質量  
ALICE シミュレーションによって得られた  $m_{\pi^0}$  の不変質量のヒストグラムに、ガウス関数 + 一次関数でフィッティングをした。

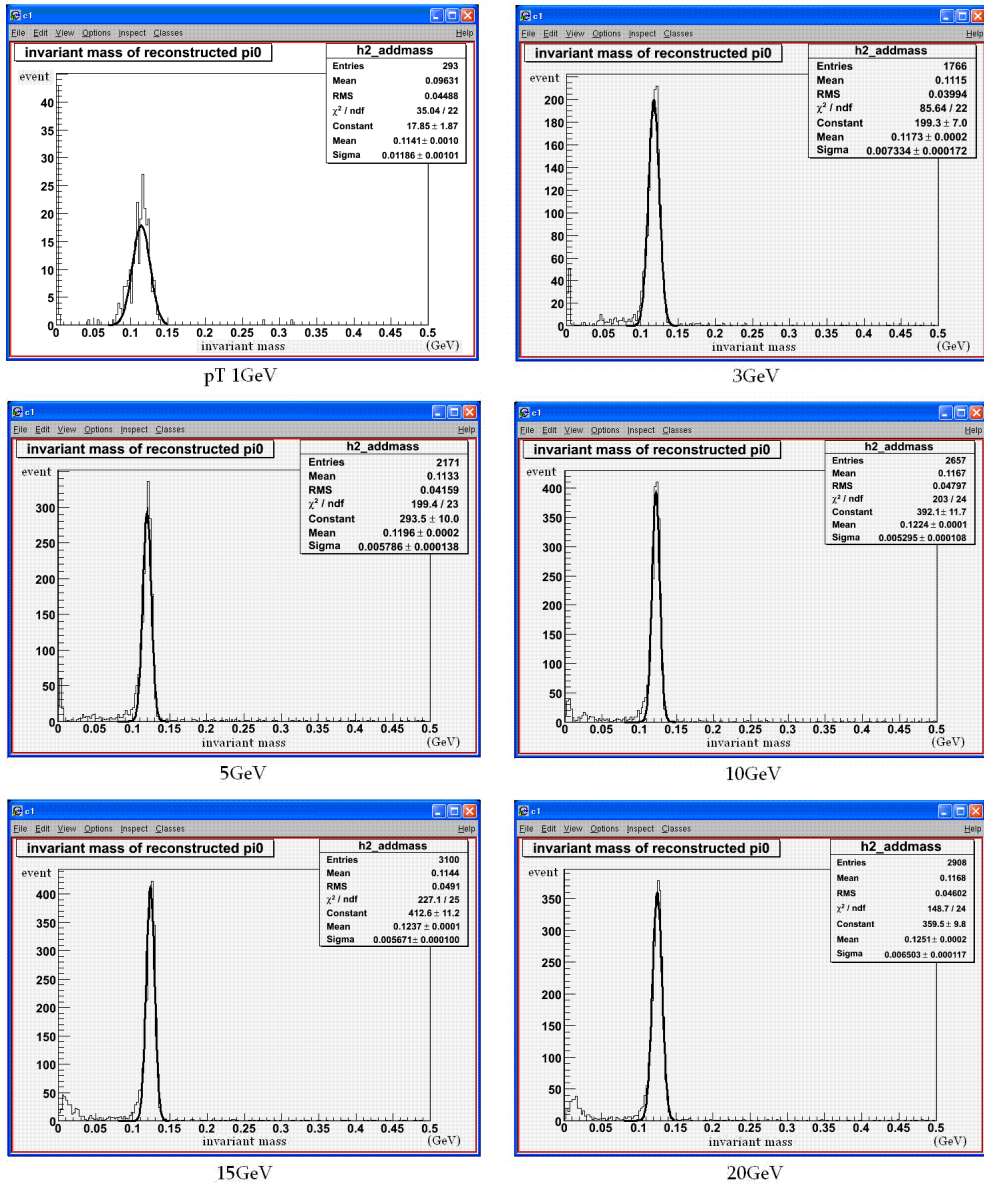


図 4.2: PHOS 検出器のみを用いたシミュレーションにおける各  $p_T$  での  $\pi^0$  の不変質量

PHOS 検出器のみを用いたシミュレーションによって得られた  $m_{\pi^0}$  の不変質量のヒストグラムに、ガウス関数+一次関数でフィッティングをした。

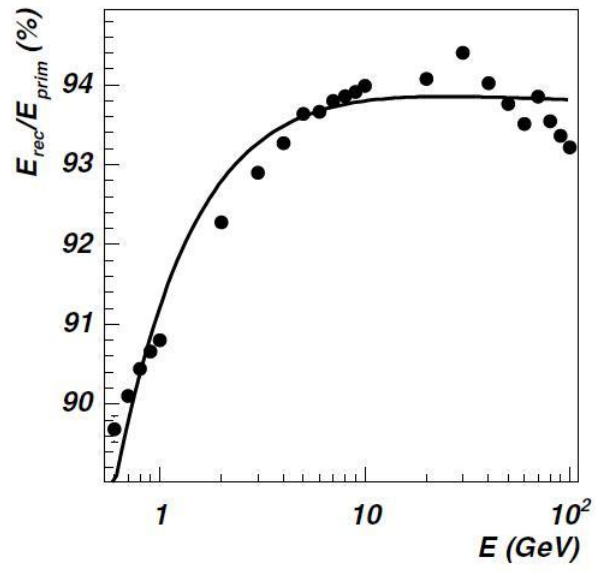


図 4.3: PHOS のエネルギー線形性  
[8]

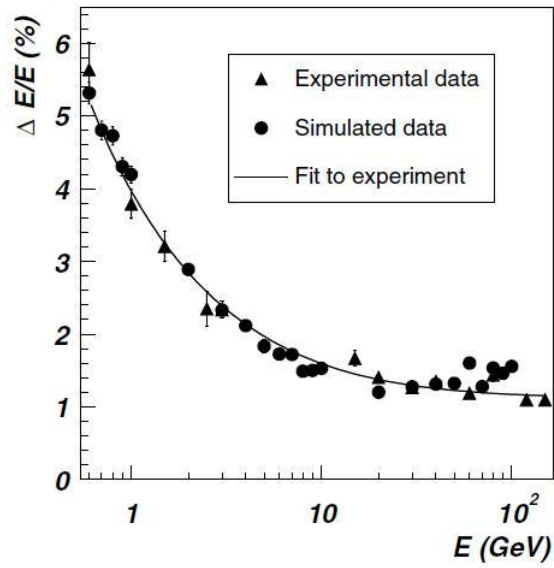


図 4.4: PHOS のエネルギー分解能  
[8]

### 4.1.3 PHOS の位置分解能

また、2つの光子が互いに非常に近い位置に入射したとき、PHOS はそれらを1つの光子として認識してしまうことがある。2つの光子として認識できる最小距離を位置分解能といい、図 4.5 に示す。

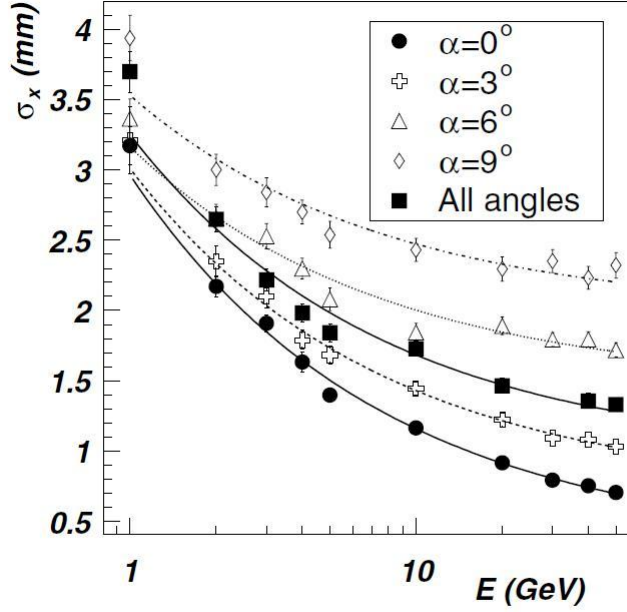


図 4.5: PHOS の位置分解能  
[8]

$\pi^0$  の質量  $m_{\pi^0}$  は  $\sqrt{2E_1E_2(1 - \cos\phi)}$  で表されるので、誤差伝播を考慮すると  $m_{\pi^0}$  の幅  $\sigma_{m_{\pi^0}}$  は

$$(\sigma_{m_{\pi^0}})^2 = \left(\frac{\partial m_{\pi^0}}{\partial E_1}\right)^2 \sigma_{E_1}^2 + \left(\frac{\partial m_{\pi^0}}{\partial E_2}\right)^2 \sigma_{E_2}^2 + \left(\frac{\partial m_{\pi^0}}{\partial \phi}\right)^2 \sigma_{\phi}^2 \quad (4.1)$$

これらを用いて、 $p_T 10 \text{ GeV}$  の  $\pi^0$  の重心系での崩壊方向と  $\pi^0$  進行方向のなす角  $\theta' = 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  で計算した結果を示す。

これを見ると、 $\theta$  の値を変化させたとき、 $m_{\pi^0}$  の中心値は崩壊角度によって変化し、シミュレーションから求められた中心値付近の値をとることがわかる。シミュレーションにおける  $m_{\pi^0}$  の幅が計算値に比べて大きいのは、中心値が崩壊角度によって変化するためであると予測することができる。

	$\theta' = 30^\circ$	$\theta' = 45^\circ$	$\theta' = 90^\circ$	$m_{\pi^0}$ (実験値)
$m_{\pi^0}$ (GeV)	0.123, $\sigma = 0.005$	0.123, $\sigma = 0.017$	0.123, $\sigma = 0.010$	0.114, $\sigma = 0.012$

表 4.1:  $m_{\pi^0}$  の文献値 (0.135GeV) からのずれを PHOS の Linearity, Energy resolution, Position resolution を含めて計算した結果と、実験値との比較

## 4.2 検出効率

図 4.6, 4.7, 4.8 の全てにおいて、低運動量領域で検出効率が低く、高運動量領域になるにつれて検出効率が上がっている。これは  $\pi^0$  の運動量が大きくなるにつれて  $\pi^0$  の崩壊時の崩壊光子のなす角が小さくなり、崩壊光子が 2 つとも検出される確率が上がることから理解できる。また、ALICE シミュレーションと PHOS 検出器のみを用いたシミュレーションを比べると、ALICE シミュレーションのほうが検出効率が下がっている。これは入射粒子が前方の検出器と反応し、エネルギーを失うためであると考えられることができる。

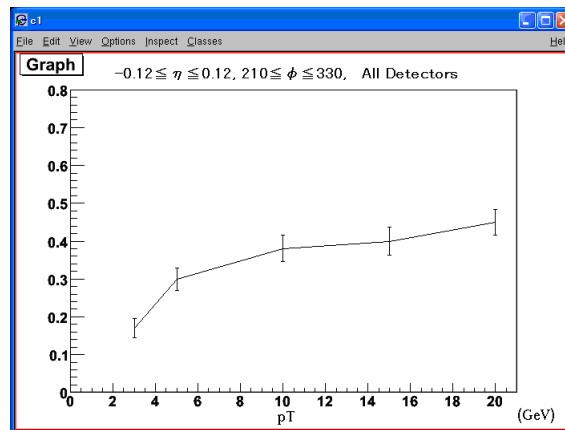


図 4.6: ALICE シミュレーションにおける PHOS 検出器の  $\pi^0$  検出効率  
 実際の ALICE 実験の環境に合わせ、 $\pi^0$  を  $220^\circ \leq \phi \leq 340^\circ$ ,  $-0.12 \leq \eta \leq 0.12$  の範囲に 1 個ずつ 500 回飛ばしたときの PHOS 検出器の  $\pi^0$  検出効率

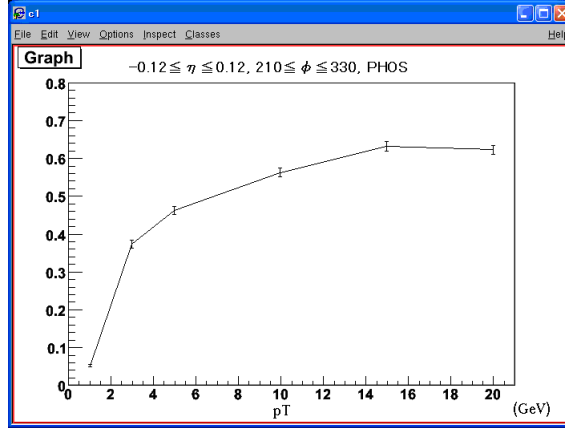


図 4.7: PHOS のみを用いたシミュレーションにおける PHOS 検出器の  $\pi^0$  検出効率  
 PHOS 検出器のみを設置し、 $\pi^0$  を  $220^\circ \leq \phi \leq 340^\circ$ ,  $-0.12 \leq \eta \leq 0.12$  の範囲に 1 個  
 ずつ 4000 回飛ばしたときの PHOS 検出器の  $\pi^0$  検出効率

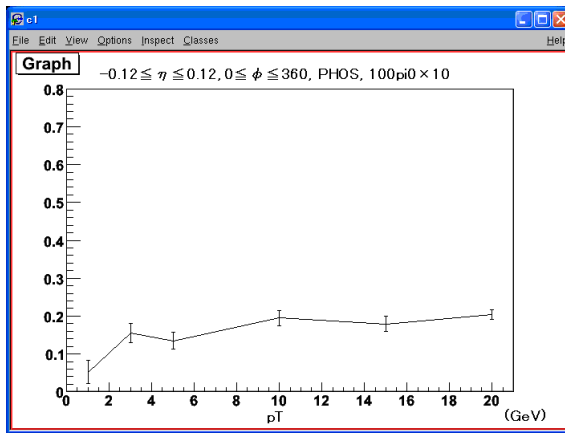


図 4.8: 多重度を上げたシミュレーション  
 PHOS 検出器のみを設置し、 $\pi^0$  を  $0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$ ,  $-0.12 \leq \eta \leq 0.12$  の範囲に 100 個  
 ずつ 10 回飛ばしたときの PHOS 検出器の  $\pi^0$  検出効率

### 4.3 p-p 衝突実験 ( $\sqrt{s} = 900\text{GeV}$ ) における $\pi^0$ 検出数

求めた検出効率を用いて、p-p 衝突実験で検出される  $\pi^0$  の数を見積もる。  
 $\pi^0$  の生成微分断面積は

$$E \frac{d^3\sigma}{dp^3} [pb \cdot \text{GeV}^{-2} \cdot c^3] = \frac{1}{2\pi p_T dp_T d\eta} \frac{dN_{cre}^{\pi^0}}{L} \quad (4.2)$$

より、生成される  $\pi^0$  の個数  $dN_{cre}^{\pi^0}$  は

$$dN_{cre}^{\pi^0} = L \times 2\pi p_T dp_T d\eta \times E \frac{d^3\sigma}{dp^3} \quad (4.3)$$

ここで、 $N$  は  $\pi^0$  の生成数、 $L$  はルミノシティである。ルミノシティは p-p 衝突回数  $N_{evt}$  生成断面積  $\sigma_t$  を用いて

$$N_{evt} = L\sigma_t \quad (4.4)$$

と表される量である。2007年2月現在、p-p 衝突実験では毎秒1000回の陽子-陽子衝突が予定されている。1日12時間実験が行われるとすると、1ヶ月間の実験での衝突回数は  $1.21 \times 10^9$  回となる。これと  $\sqrt{s} = 900\text{GeV}$  での p-p 衝突の生成断面積 56[6](Figure 40.11) を用いると、 $dN_{cre}^{\pi^0}$  を求めることができる。ただし実際に検出できる数  $dN_{rec}$  は  $dN_{cre}^{\pi^0}$  に全  $\phi$  範囲における検出効率  $Acc_{PHOS}$  を乗じた数になる。

$$dN_{rec} = dN_{cre}^{\pi^0} \times Acc_{PHOS} \quad (4.5)$$

全ての PHOS モジュールと全ての検出器が搭載された場合、検出されると予想される  $\pi^0$  の個数を表したのが図 4.9 である。

また、NLO<sub>p</sub>QCD 計算によって求められた  $\pi^0$  検出数に、本研究で求めた値から得た誤差を付加したグラフを図 4.10 に示す。

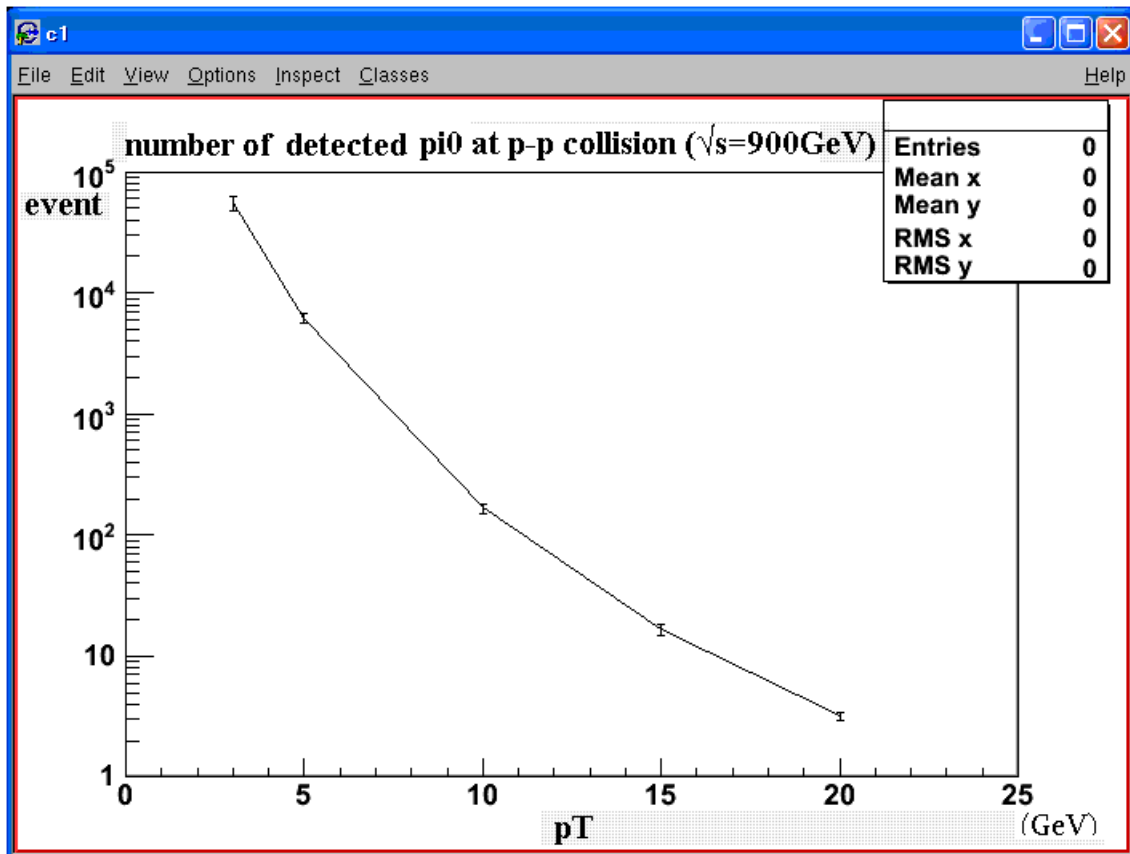


図 4.9: p-p 衝突実験 ( $\sqrt{s} = 900\text{GeV}$ ) における PHOS 検出器の  $\pi^0$  検出数  
 NLOpQCD 計算から求められた  $\pi^0$  生成数を基に、2007 年 12 月に予定されている  
 p-p 衝突実験において PHOS 検出器が検出すると予想される  $\pi^0$  の個数



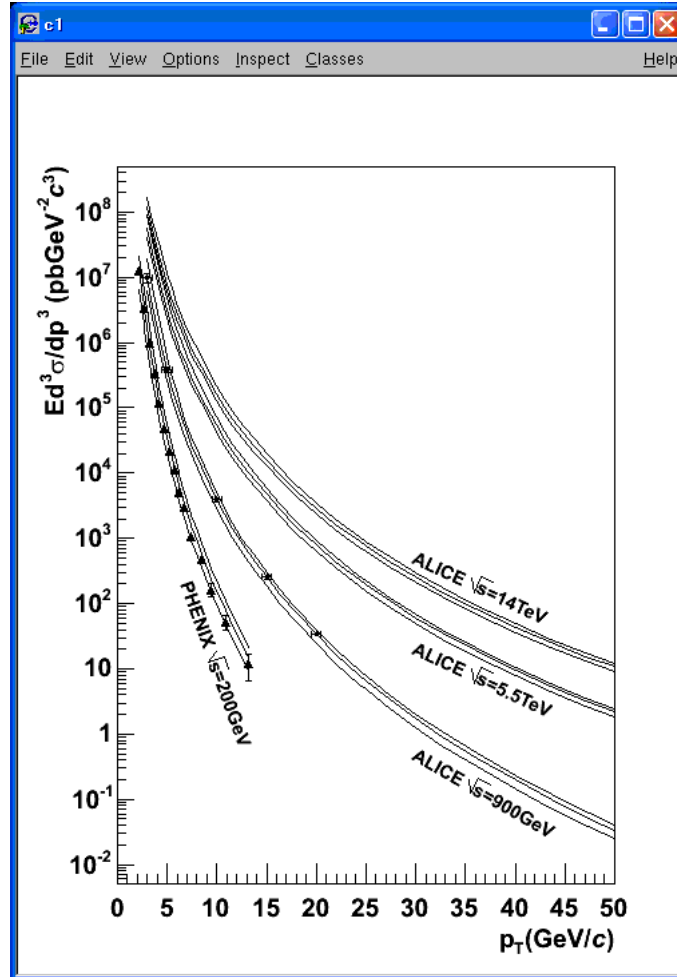


図 4.10:  $\pi^0$  生成断面積

NLO<sub>p</sub>QCD 計算で求められた値との比較。各  $p_T$  の真ん中の実線が理論値、上下の実線は理論値の誤差、三角の点は米国BNLにて行われた重イオン衝突実験での実験値、丸点は本研究で使用したデータ点に、本研究にてシミュレートされた値から求めた誤差を付加したものである。

## 第5章 結論

シミュレーションで作成した PHOS 検出器に入射した  $\pi^0$  崩壊光子のデータを解析することにより、実際の実験で測定されるであろう  $\pi^0$  の不変質量を求めた。不変質量の分布から検出された  $\pi^0$  の数を求め、発生した  $\pi^0$  に対する PHOS 検出器の検出効率を求めた。その結果、高運動量領域では PHOS 検出器の検出効率はほぼ一定になること、ALICE 実験に使用される他の検出器を含めると、PHOS 検出器のみのシミュレーションに比べて検出効率がおよそ 30% 下がることがわかった。さらには重イオン衝突実験のときに見られる多重度の高い事象のときの PHOS 検出器の検出効率を求めることができた。これは、実際の実験結果を解析する上で非常に重要な成果であると言える。また、求められた検出効率を用いた計算によって、2007 年 12 月に CERN・LHC にて予定されている陽子 陽子衝突実験 ( $\sqrt{s} = 900 \text{ GeV}$ ) において PHOS 検出器が検出する  $\pi^0$  の数を、条件付きではあるが見積もることができた。実際の実験の解析にこれを用いることによって、崩壊光子の正確な判別が可能となり、QGP 相の確認へ向けて大きく前進した。

今後の課題として、本研究のシミュレーションで仮定した条件を実際の実験の条件に近づける必要がある。これによって、より一層正確に実際の実験での  $\pi^0$  の検出数を求めることができる。また、直接生成光子の判別が課題として挙げられる。本研究によって得られた情報を基に直接生成光子を判別し、熱光子を測定することによって、QGP 相の観測をより確実なものにすることができると考えられる。

# 謝辞

本研究を行うにあたって、スタッフの方々から多大な指導と議論をいただきました。指導教官の杉立先生は高エネルギー物理学実験について何の知識もない私に、実験物理学の基礎から丁寧に教えて下さいました。また研究を行うために必要最低限の知識を養うためのゼミに、貴重な時間を割いて毎週参加していただきました。志垣先生、本間先生には、私が気づかないところからの視点を与えていただき、研究を進める上での的確な助言をいただきました。鳥井さんと洞口さんには一緒に研究の方針をたてていただき、毎日夜遅くまで議論に付き合っていていただき、研究を行うための基本的な考え方、解析を行ううえで必要な知識や技術、そして高エネルギー物理学の面白さと奥深さを教えていただきました。また、大学院生の槌本さん、中村さん、大内田さん、山浦さん、渡辺さんには、初歩的な質問にも快く答えていただき、多くのアドバイスをいただきました。同じく大学院生の久保さん、成田さん、来島さん、門脇さんには、私が研究で悩んでいるときに声をかけていただき、気持ちを和ませることができました。同じ4年生の溝口くん、岩永くん、丸山くんとは、一緒に頑張っていくことで互いに刺激しあい、研究に対するモチベーションを保つてくれることができました。その他、私を研究期間中支えてくださった全ての皆様のおかげで、本論文を執筆することができました。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] 洞口 拓磨 Prompt Photon Production in Proton-Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 200\text{GeV}$  (2006) 東京工業大学理学研究科博士論文
- [2] 長谷川 智子 大型ハドロン加速器 LHC における超高エネルギー重イオン衝突の物理 (2002) 広島大学理学部高エネルギーハドロン実験研究室卒業論文
- [3] 春名 孝太 高エネルギー原子核衝突における前方領域での荷電粒子生成 (2004) 広島大学理学部クォーク物理学研究室卒業論文
- [4] 大内田 美沙紀 高エネルギー重イオン衝突実験 PHENIX における光子データ解析 (2005) 広島大学理学部クォーク物理学研究室卒業論文
- [5] 来島 孝太郎 核子対あたり衝突エネルギー 200GeV での  $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$  衝突における短寿命ハドロン生成 (2006) 広島大学理学部クォーク物理学研究室卒業論文
- [6] W.M.Yao *et al.*, Jour. Phys. G33.1 (2006)
- [7] P. Aurenche *et al.*, Eur. Phys. J. **C13** (2000) 347, hep-ph/9910252
- [8] ALICE Collavoration ALICE:Physics Performance Report, Volume (2006)
- [9] CTEQ collaboration: H. Lai *et al.*, Eur. Phys. J. **C12** (2000) 375, H. Lai *et al.*, Phys. Rev. **D51** (1995) 4763.
- [10] B. Kniehl *et al.*, Nucl. Phys. **B582** (2000) 514, hep-ph/0010289
- [11] 山本 祐靖 高エネルギー物理学 培風館 (1973)
- [12] 永江 知文, 永宮 正治 共著 原子核物理学 裳華房 (2005)
- [13] 原 康夫 素粒子物理学 裳華房 (2003)

[14] <http://aliceinfo.cern.ch>

[15] [http://wwwlapp.in2p3.fr/lapth/PHOX\\_FAMILY/readme\\_inc.html](http://wwwlapp.in2p3.fr/lapth/PHOX_FAMILY/readme_inc.html)