

修士論文

LHC 加速器 ALICE 実験での重心系エネルギー $\sqrt{s} = 900\text{GeV}$
陽子陽子衝突における中性 中間子の先駆的測定

広島大学理学研究科物理科学専攻

クォーク物理学研究室

岩崎 天 M084844

主査 杉立 徹 教授

副査 石川 健一 准教授

指導教官 杉立 徹 教授

平成 22 年 2 月 10 日

2009年11月、欧州原子核研究機構 (CERN) において世界最大のハドロン衝突型加速器である LHC 加速器が本格的に稼働を開始した。LHC では将来的に $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ の陽子陽子衝突及び、 $\sqrt{s_{NN}} = 5.5\text{TeV}$ の鉛鉛衝突を予定している。我々研究グループは高エネルギー重イオン衝突実験 (ALICE) に参加しており、その主な目的は量子色力学 (QCD) によって予言されているクォークグルーオン・プラズマ (QGP) 相の探索および強い相互作用するクォーク物質の基礎的な性質の研究である。QGP 相はビッグバンから数マイクロ秒後の初期宇宙において存在していたと考えられており、その研究は宇宙開闢の謎、物質の起源についての理解につながると期待される。QGP 相探究のための有効な方法として 0 中間子の収量測定があげられる。衝突により生成したパートンは QGP 相を通過する際にエネルギーを失い、そのパートンによって作られた 0 中間子の高横方向運動量領域での抑制が期待されているからである。

ALICE 実験では光子測定に特化した検出器として Photon Spectrometer (PHOS 検出器) が用いられている。 0 中間子は 99% が 2 へ崩壊する。その 2 を PHOS で観測し再構成することで 0 中間子の収量を測定する。PHOS 検出器は鉛タングステン結晶 (PWO) とアバランシェ・フォトダイオード (APD) からなる電磁カロリメータであり、高いエネルギー分解能と 2 粒子位置分解能を有する。

実験で得られたデータから 0 中間子の収量を計算するために様々な補正を考慮しなければならない。本研究では、以下の効果についてシミュレーションを用いて補正係数を求めた。まず 0 中間子の横方向運動量に依存する PHOS 検出器の検出効率の効果。次に光子が他検出器と相互作用することによって電子陽電子対生成を起し 0 中間子が再構成できなくなる効果。最後に荷電粒子と他検出器の相互作用により生成される衝突中心起源ではない 0 中間子による効果である。本研究では、重心系エネルギー $\sqrt{s} = 900\text{GeV}$ 陽子陽子衝突における測定データから 0 中間子の収量を測定するための補正係数を求めた。

目次

第1章 導入	4
1.1 クォークとレプトン	4
1.2 4つの力	4
1.3 クォーク・グルーオン・プラズマ	6
1.4 ジェット抑制	7
1.5 研究の目的	8
第2章 A Large Ion Collider Experiment(ALICE 実験)	10
2.1 欧州原子核研究機構 (CERN 研究所)	10
2.2 LHC 加速器	10
2.3 ALICE 実験	11
2.4 PHOS 検出器	11
2.4.1 鉛タングステン酸 (PWO) 結晶	13
2.4.2 Avalanche Photodiode(APD)	14
第3章 シミュレーション・解析	16
3.1 イベントジェネレータ PYTHIA	16
3.2 GEANT3	16
3.3 シミュレーションの流れ	16
3.4 ローレンツブースト	18
3.5 不変質量の計算	18
3.6 幾何学的な検出効率	18
3.7 0 起源の光子の電子陽電子対生成による効果	19
3.8 非衝突中心起源の 0 による効果	19
第4章 結果・考察	20
4.1 結果	20
第5章 結論・展望	27

第 1 章 導入

1.1 クォークとレプトン

私たちの身の回りにあるものは全て、1 億分の 1 センチメートル程度の大きさの原子から構成されており、原子はその大きさのさらに 1 万分の 1 の原子核と電子より構成されている。陽子と中性子を結び付ける粒子として 中間子がある。陽子、中性子、

中間子はハドロンと呼ばれ、電子はレプトンと呼ばれる。さらにハドロンの中でも陽子、中性子等の粒子はバリオンと呼ばれクォークと呼ばれる素粒子 3 つ、中間子はメソンと呼ばれクォーク 2 つから構成されている。

現在のところ、クォークとレプトンは物質を構成する最小の素粒子であると考えられており、それぞれ 3 つの世代に分類されている。クォークは質量の小さいほうから $2/3e$ の電荷をもつアップ、チャーム、トップと $-1/3$ の電荷をもつダウン、ストレンジ、ボトム の 6 種類からなり、レプトンは $-e$ の電荷をもつ電子、ミューオン、タウオンと電荷をもたない電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの 6 種類からなる。

1.2 4 つの力

クォークとレプトンが行う相互作用が素粒子の基本的な 4 つの相互作用である。これらの相互作用は前述の素粒子間でゲージボソンがやり取りされることにより働く。

強い相互作用はカラー荷と呼ばれる量子数を持つ素粒子間で作用する。ゲージボソンはグルーオンである。強い相互作用は電磁相互作用に比べて 100 倍ほど強い。クォークのカラー荷には赤、青、緑の三原色の 3 つが考えられている。グルーオンは色の組み合わせが 8 種類あり、いずれも質量をもたない。グルーオン自体もカラー荷を持つので強い力は距離が離れれば強くなり、距離が核子程度の大きさになると全体として白色の状態しか安定することができない。

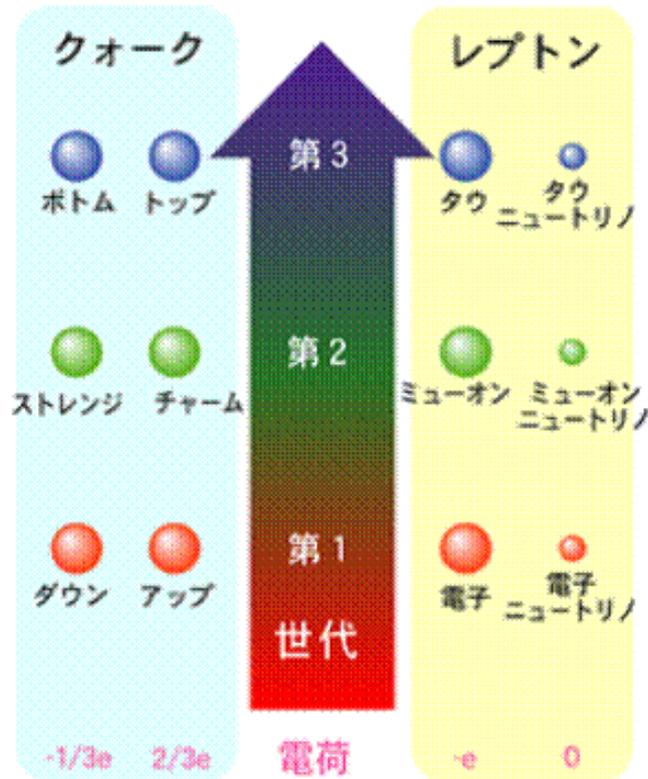


図1 クォークとレプトン

弱い相互作用はクォークとレプトン間で作用する。ゲージボソンはウィークボソンと呼ばれ、正、あるいは負の電荷をもつ W ボソンと電荷をもつ Z ボソンがある。この相互作用は原子核の崩壊、中性子、中間子の崩壊の原因となる。この相互作用は強い相互作用や電磁相互作用と比較してはるかに弱いので、弱い相互作用と呼ばれる。

電磁相互作用は荷電粒子間に作用する。ゲージボソンは光子である。光子は質量をもたない。電磁気力相互作用は電荷に比例する。電磁相互作用の例として、電子と原子核を結びつけ原子を作る力、原子同士を結び付け分子を作る力がある。

重力相互作用は全ての素粒子に作用する。ゲージボソンはグラビトンと呼ばれている。重力は天体の運行をつかさどり、宇宙の構造を作り出す。重力は質量に比例する。素粒子の質量は非常に小さく、現在の加速器で到達できるようなエネルギーでは素粒子間の重力は無視できるが、ビッグバンのような超高エネルギー領域では重要になってくる。

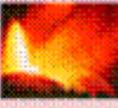
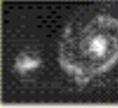
力の種類	強い力	電弱力 電磁気力 弱い力		重力
力の伝達粒子	グルーオン	光子	W,Zボソン	重力子
力の大きさの目安	1 原子核 ハドロン 核融合 太陽エネルギー	0.01 分子、原子 エレクトロニクス 放射光 オーロラ	10^{-5} 中性子崩壊 原子核崩壊 ニュートリノ 地熱	10^{-40} 万有引力 銀河系 ブラックホール 渦巻き星雲
				

図2 4つの相互作用

1.3 クォーク・グルーオン・プラズマ

量子色力学で予言されているように物質相は高温・高密度状態ではクォークとその媒介粒子であるグルーオンは強い相互作用による束縛から解放され、クォーク・グルーオン・プラズマ相 (QGP) へと相転移する。この QGP 相が自然に存在する (した) とされるのは、ビッグバン直後の 10 マイクロ秒以内の初期宇宙や中性子内部である。

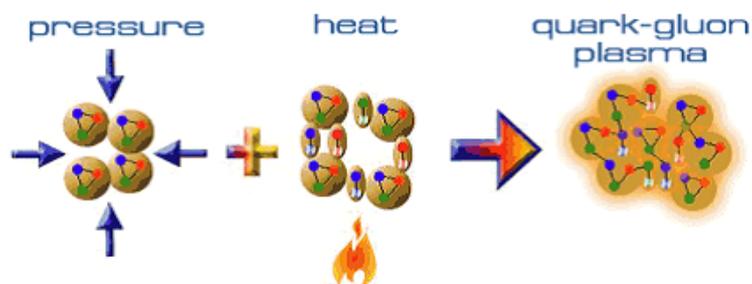


図3 高温・高密度状態ではクォークの閉じ込めから解放されて QGP 相へ相転移する

この QGP を現在地球上で再現できる手段は、原子核を高速付近まで加速して衝突させる高エネルギー重イオン衝突実験であると考えられている。CERN における ALICE 実験では陽子相互衝突、鉛原子核相互衝突により高エネルギー密度の状態を作り QGP の性質の探究を試みている。

1.4 ジェット抑制

高エネルギー粒子衝突において、ジェットと呼ばれる初期衝突で強く弾かれたパートンが起源となる現象がある。強く弾かれ高い横方向運動量をもったクォークは、真空方のグルーオンによって結びつけられたクォークの複合粒子 (ハドロン) 群を作り出す。このハドロン群をジェットと呼ぶ。

衝突初期に強く弾かれたパートンは、原子核衝突によってできた QGP 相を通過する際に QGP 相との強い相互作用によってエネルギーを失う。その結果、QGP 相が形成される衝突エネルギーにおける原子核衝突では、ジェットの抑制が観測できる。つまりジェットの抑制は、QGP 相形成の有効な信号となる。

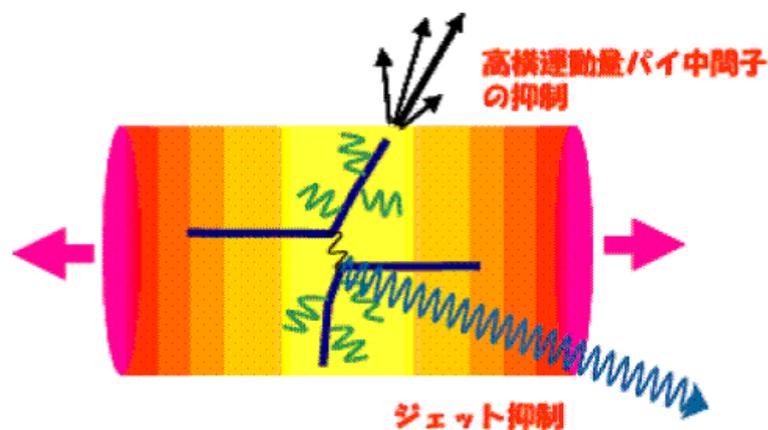


図 4 ジェット抑制

ジェット抑制はすでに米国のブルックヘブン国立研究所 (BNL) の RHIC 加速器に置いて観測されている。たとえば中性中間子は図に示すように、横方向運動量 $20\text{GeV}/c$ までの高い横方向運動量領域において $R_{AA}=0.2$ という強い抑制が観測された。 R_{AA} とは原子核衝突における、ある横方向運動量での収量を陽子 + 陽子衝突に

おけるある横方向運動量での収量で規格化した値である。

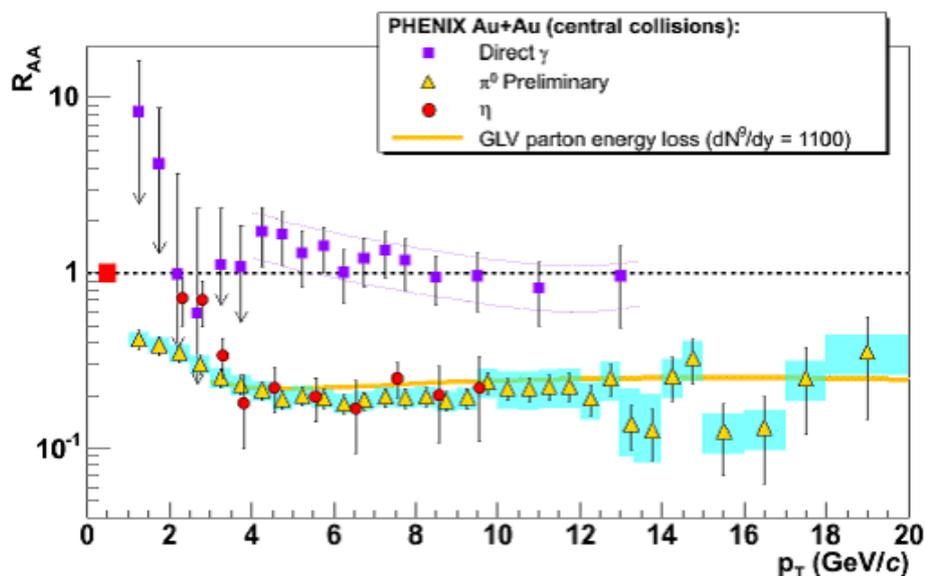


図5 BNLのRHICにおいて観測された R_{AA}

1.5 研究の目的

2009年11月、欧州原子核研究機構(CERN)において世界最大のハドロン衝突型加速器であるLHC加速器が本格的に稼働を開始した。LHCで予定されている実験の一つであるALICE実験は唯一高エネルギー重イオン衝突に特化した実験で、その目的は量子色力学によって予言されるQGP相の基礎的な性質の探究である。その性質解明のための方法として衝突により生成される π^0 中間子の収量測定がある。衝突により生成されたパートンはQGP相を通過する際にエネルギーを失い、そのパートンによって作られた π^0 中間子の高横方向運動量領域での抑制が期待されているからである。

本研究の目的は、実験で得られたデータから π^0 中間子の収量を計算するための様々な補正を求めることである。まず π^0 中間子の横方向運動量に依存するPHOS検出器の剣水津効率の効果。次に光子が他の検出器と相互作用することによって電子陽電子対生成を起こし π^0 中間子が再構成できなくなる効果。最後に荷電粒子と他の検

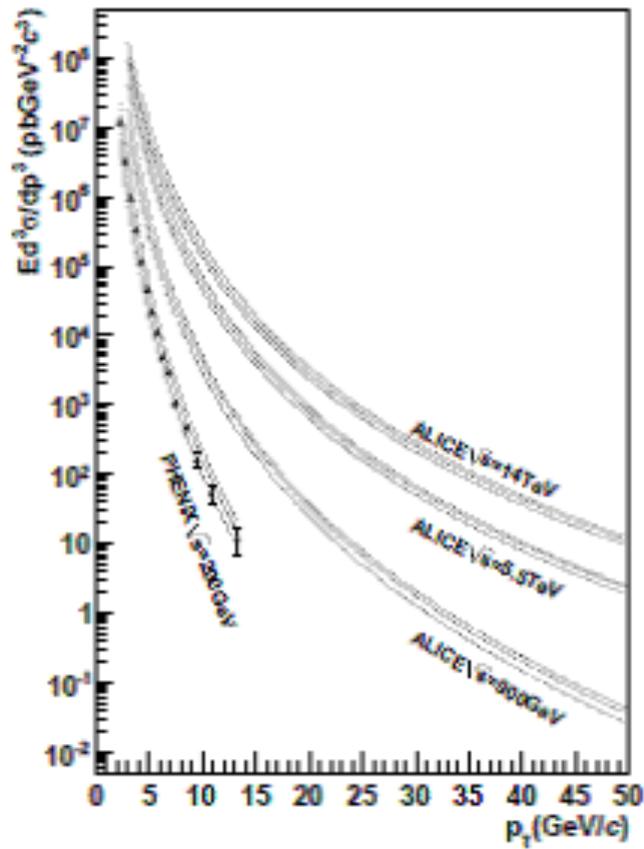


図6 予想される π^0 中間子の微分断面積の横方向運動量

出器の相互作用により生成される衝突中心起源ではない π^0 中間子による効果である。将来的には本研究で得られた結果を用いて $\sqrt{s}=900\text{GeV}$ の陽子陽子衝突における π^0 中間子の収量得ることができる。さらにその結果と、2010年秋に予定している鉛鉛衝突での π^0 中間子の収量の測定結果との比較による QGP 相の性質探究が期待される。

第2章 A Large Ion Collider Experiment(ALICE 実験)

Large Ion Collider Experiment(ALICE 実験).tex

2.1 欧州原子核研究機構 (CERN 研究所)

CERN 研究所はスイスのジュネーブ近郊にある世界最大規模の素粒子物理学研究所である。素粒子加速器を用いた素粒子物理学および原子核物理の研究を主に行っているが、その他にも Scientific Linux というオペレーティングシステムの開発も行っている。

2.2 LHC 加速器

LHC(Large Hadron Collider) は、2000 年に実験を終了した LEP(Large Electron-Positron Collider) の地下トンネル (地下 100m、全周 27km) に、新たに設置して建設された世界最大の衝突型粒子加速器である。



図7 LHC 概観

加速手順は、陽子イオン源からスタートし、線形加速器、陽子シンクロトロンブースター、SPS(Super Proton Synchrotron) を経由し、バンチと呼ばれる状態になった陽子ビームを LHC 本体へ注入し、最終加速を行う。

LHC では、まず衝突エネルギー $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ の陽子相互衝突、次いで $\sqrt{s} = 5.5\text{TeV}$ の鉛原子核相互衝突を行う予定であり、ALICE、ATLAS、CMS、LHCb、TOTEM、LHCf の 6 つの主な実験グループがある。

ALICE 実験は、LHC で行われる実験の中で唯一高エネルギー原子核物理学に特化した検出器を持つ。ALICE 実験では、RHIC 加速器における物理的成果を踏まえて、より高温の QGP 相を生成し、その性質の探究を展開する。日本からは広島大学、東京大学原子核科学研究センター、筑波大学が正式加盟機関として参加している。

2.3 ALICE 実験

ALICE 実験は (A Large Ion Collider Experiment) は史上最高の衝突エネルギーをもってして高エネルギー物理の全景を明らかにできると期待されている実験である。そのためには高い検出効率、エネルギー分解能、位置分解能を持ち、広範囲の運動量の粒子をカバーし、さらに粒子の同定をよりよい精度で行うことのできる検出器が必要となる。

ALICE 実験では、粒子ビームの衝突点を巨大な L3 電磁石の中央に設置し、その衝突点を囲むように各検出器が配置されている。ALICE 実験は各検出器で得られる情報を統合して、クォーク物質相である QGP 相の性質解明を目指す。ALICE 実験では ALICE 座標系という一つの座標系があり、ビーム軸方向のミュオン検出器と反対方向が z 軸方向である。 z 軸方向に対して垂直に上の方向が y 方向で、右手系になるように x 軸方向が定義されている。

2.4 PHOS 検出器

PHOS は重イオン衝突実験によって形成される QGP からの熱輻射による光子測定を主な目的としている。PHOS は入射粒子の落としたエネルギーを測定することができる。おもには、光子や電子が電磁シャワーによって落とすエネルギーを測定するが、PHOS は光子のエネルギーの測定に最適化してある。光子のエネルギーを測定することで、光子へ崩壊する粒子を再構成することができる。たとえば、 $0.5 - 10\text{GeV}/c$ の

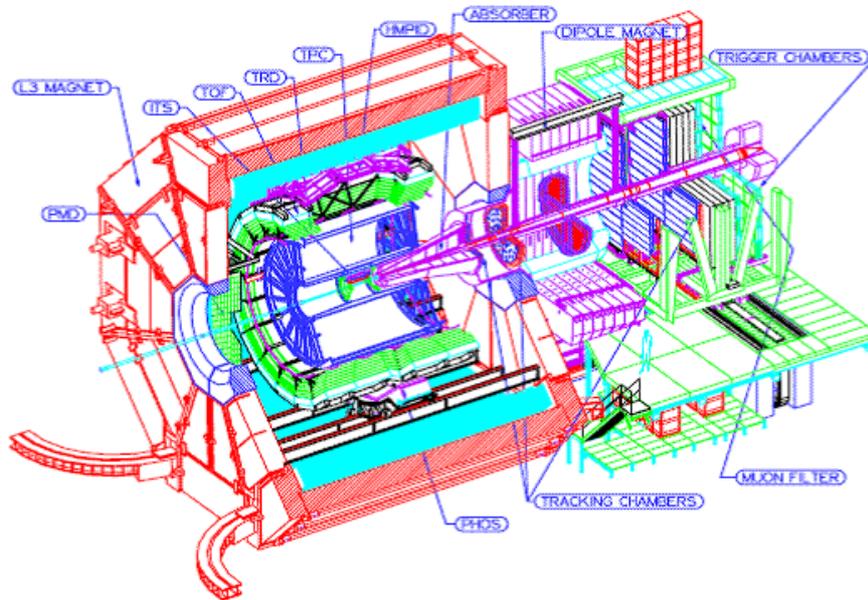


図 8 ALICE 検出器概観

光子、 $1 - 10\text{GeV}/c$ の $0 - 10\text{GeV}/c$ の測定が可能である。また、高横運動量 0 の測定により、QGP 相形成の有効な信号であるジェット抑制を観測することが可能である。

PHOS は同型モジュール 5 基から構成されており、1 モジュールには 6456 の検出素子がある。1 つの検出素子につき、1 つの検出チャンネルがあるので、5 基で計 17920 個の検出チャンネルになる。PHOS のアクセプタンスは、ラピディティー方向に $-\eta \sim 0.12$ を覆い、方位角方向に 100° を覆う。2009 年 11 月に行われた Run では 3 基の PHOS モジュールを使用している。

PHOS の検出素子は鉛タングステン結晶 (PbWO_4) 結晶と、光子検出のための Avalanche Photodiode (APD) から構成されている。これらの検出素子の性能により、PHOS は高いエネルギー分解能 (3

PHOS の読み出しシステムにおける特徴は、sampling ADC による電荷測定 (エネルギー測定) と Detector Control System (DCS) によりネットワークを通して遠隔操作が可能ということである。遠隔操作では、電子回路系の電源の ON/OFF、温度管理などを行うことができる。

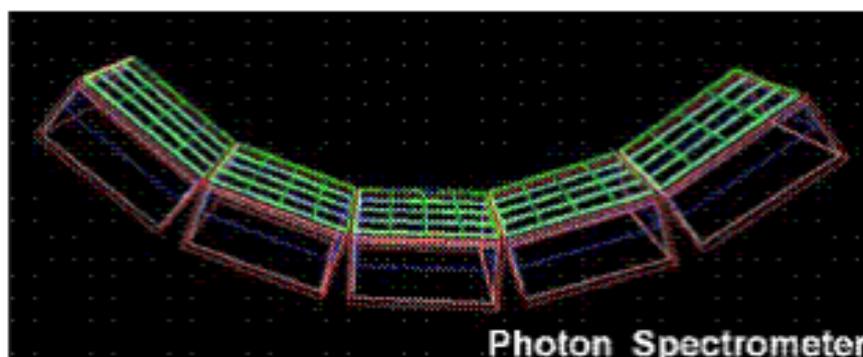


図9 PHOS 概観

PHOS のトリガーシステムは大きく分けて 3 種類ある。1 つ目は、ビーム実験でのセルフトリガーである。2 つ目は、地下での宇宙線測定のための ALICE 全体のトリガーシステムである。3 つ目は、プラスチックシンチを用いた地上での宇宙線測定用トリガーシステムである。

2.4.1 鉛タングステン酸 (PWO) 結晶

PWO 結晶とは無色透明な結晶で、組成式は PbWO_4 である。ALICE 実験では使用する pWO 結晶はロシアの North Crystal 社製のもので、サイズは $22 \times 22 \times 180\text{mm}^3$ である。

PWO 結晶は無機シンチレータの一種である。無機シンチレータは入射してきた光子や電子に対し電磁シャワーを起こさせ、そのエネルギーに比例した発光をする物質である。その発光量を測定することで入射してきた粒子のエネルギーを測定することができる。

ALICE 実験に使用する PWO 結晶は、発光量は少ないものの、有機シンチレータ並みに早い減衰時間を持つ。そのため、高い時間分解能、エネルギー分解能を得ることができる。また、密度も非常に高いため PWO 結晶は高エネルギー粒子を狭い範囲に閉じ込めることができ、電磁カロリメータ素材としてきわめて適している。PWO 結晶は温度を下げると発光量が増えることがわかっており、 -25 度まで冷却して使用する。

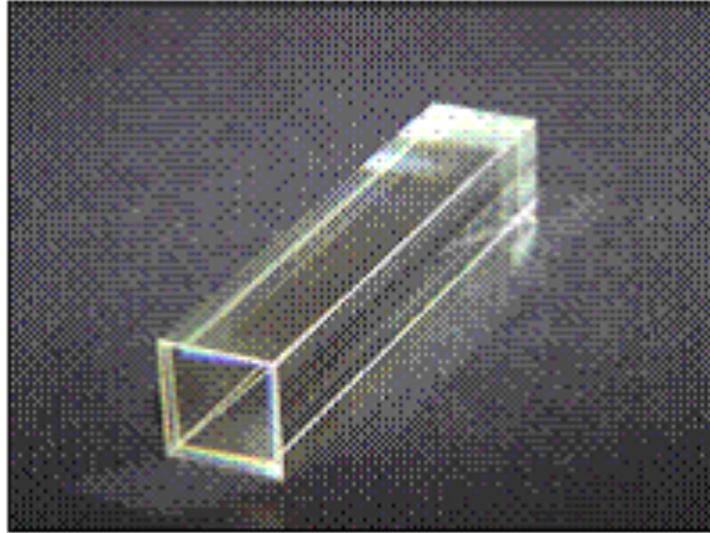


図 10 PWO 結晶

2.4.2 Avalanche Photodiode(APD)

APD とは、アバランシェ増幅による信号増幅装置を持つシリコンフォトダイオードである。これにより微弱な光の検出に適している。増幅率は $10 - 10^4$ 倍であるが、ショットノイズを考慮すると、 $10 - 10^4$ 倍で使用することが適切とされている。。APD を動作させるためには、高電圧 (-25 度で 350V) をかける必要があり、各素子の APD の増幅率をそろえるためにはこの高電圧を正確に制御することが必要である。一般的に光検出器に使用される Photomultiplier Tube(PMT) に比べ、APD は小型で強磁場中でも影響を受けることなく使用できるという利点がある。また量子効率が 70 - 80

APD からの信号は前置増幅器 (Charged Sensitive Pre-amplifier、通称 CSP) によってさらに増幅される。プリアンプは積分回路で APD から出力される電荷を積分する。CSP の設計・製作では以下の点に留意している。

- APD の動作ゲインを 50 倍と設定し、出力感度を 1V/pc、最大出力を 5V とする。
- 100pF の APD 素子取り付け時、回路によるノイズを 500ENC とする。

- 環境温度 - 25 度で運用するため、消費電力を 100mW 以下に抑える。
- 2 万個の量産を念頭に製造コストおよび回路部品の供給の安定性を重視する。

第3章 シミュレーション・解析

3.1 イベントジェネレータ PYTHIA

本研究で用いたイベントジェネレータ PYTHIA は、高エネルギーの物理事象を生成することができるプログラムである。PYTHIA では電子、陽電子、陽子、反陽子のよ
うな基本的な粒子間の、様々な組み合わせの衝突を記述することができる。このプロ
グラムは、パートン分布やハドロン崩壊といったさまざまな理論や物理モデルを含ん
でいて、おもにそれらは実験事実に基づいている。本研究では PYTHIA において陽子
を二つ生成し、それらを加速し正面衝突させることで重心系エネルギー $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$
の陽子・陽子衝突を再現した。

3.2 GEANT3

GEANT3(Geometry and tracking 3) とは、粒子が物質中を通るときの相互作用
を記述することのできるプログラムである。このプログラムは基本的には高エネル
ギー物理実験のために作られたが、今日では医療、生物科学、放射線防護、宇宙航行
学など様々分野でも応用されている。GEANT3 の高エネルギー物理学における利用
方法は以下の二つである。

1. 実験装置内の粒子を追尾し、測定器応答シミュレーションを行う。
2. 実験機器のセットアップおよび粒子の軌跡を表示する。

本研究では、GEANT3 を用いて ALICE 検出器を再現した。

3.3 シミュレーションの流れ

シミュレーションの流れを 4 つに分けて説明する。

- Event Generation

特定の物理事象に対して粒子を発生させる。

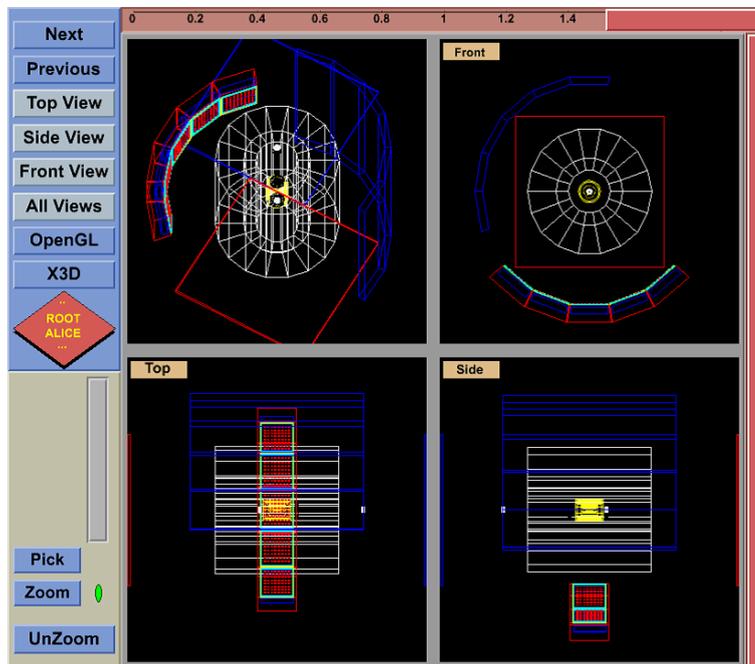


図 11 GEANT3 により再現された ALICE 検出器

- Simulation

発生粒子が測定器を通る際の相互作用による他粒子発生や、測定器に落とすエネルギーなどをシミュレートする。さらにその落としたエネルギーが検出器に伝わり、検出器からのアナログシグナルを、読み出し電子回路の出力であるデジタル情報に変換するまでをシミュレートする。

- Reconstruction

読み出し電子回路からのデジタル情報から、検出粒子情報を引き出す。

- Analysis

検出粒子情報から物理結果となるヒストグラムに変換する。

3.4 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速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 ϕ^0 が崩壊するとき、重心系における ϕ^0 の進行方向に対して θ の角度で飛び出す光子を考える。

崩壊光子は ϕ^0 の進行方向にローレンツブーストされる。その時のエネルギー E_1 は

$$\begin{aligned} E_1 &= \gamma (E_1' + p_1' \cos \theta) \\ &= \gamma m_0 c^2 (1 + \beta \cos \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

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

3.5 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。 ϕ^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。崩壊した ϕ^0 が崩壊して生成された 2 つの崩壊光子 ϕ_1 、 ϕ_2 のエネルギーを E_1 、 E_2 、ある 2 つの光子のなす角度を θ とすると、 ϕ^0 の質量 m_0 は次式で表される。

$$m_0 c^2 = \sqrt{2E_1 E_2 (1 - \cos \theta)} \quad (2)$$

3.6 幾何学的な検出効率

衝突により生成した ϕ^0 を測定するために、その ϕ^0 が崩壊してできた 2 つの光子のエネルギーを PHOS で測定し ϕ^0 の質量を再構成するという手法を用いる。ここでは PHOS の幾何学的な検出効率による効果をシミュレーションにより考える。衝突に

より生成する ϕ^0 は、低い横方向運動量を持つ場合、生成される 2 つの光子のなす角度が大きくなるためどちらか一方、あるいは両方が PHOS で検出されないことがある。そのため低い横方向運動量領域では検出効率は低くなると考えられる。また生成する ϕ^0 が高い横方向運動量を持つ場合生成される 2 つの光子はローレンツブーストによりほぼ同じ方向へ向かって飛ぶ。そのため PHOS においては 1 つの粒子として測定されてしまい、やはり検出効率は低くなると考えられる。このシミュレーションにおいては GEANT3 を用いて、PHOS のみを設置し ϕ^0 を生成させその検出効率を求めた。シミュレーションの詳細は以下である。

生成した粒子	検出器	イベント数
ϕ^0	PHOS のみ	200000
動径角度範囲	擬ラピディティ範囲	横方向運動量範囲
$220^\circ < \phi < 320^\circ$	$-0.15 < \eta < 0.15$	$1[\text{GeV}/c] < p_T < 50[\text{GeV}/c]$

本来 PHOS は 5 基が設置されるが、現在 3 基のみが設置されているので解析はその範囲のみを考慮している。

3.7 ϕ^0 起源の光子の電子陽電子対生成による効果

3.8 非衝突中心起源の ϕ^0 による効果

第 4 章 結果・考察

4.1 結果

まず幾何学的な検出効率について考える。

シミュレーションデータより、 ϕ の質量を再構成した。

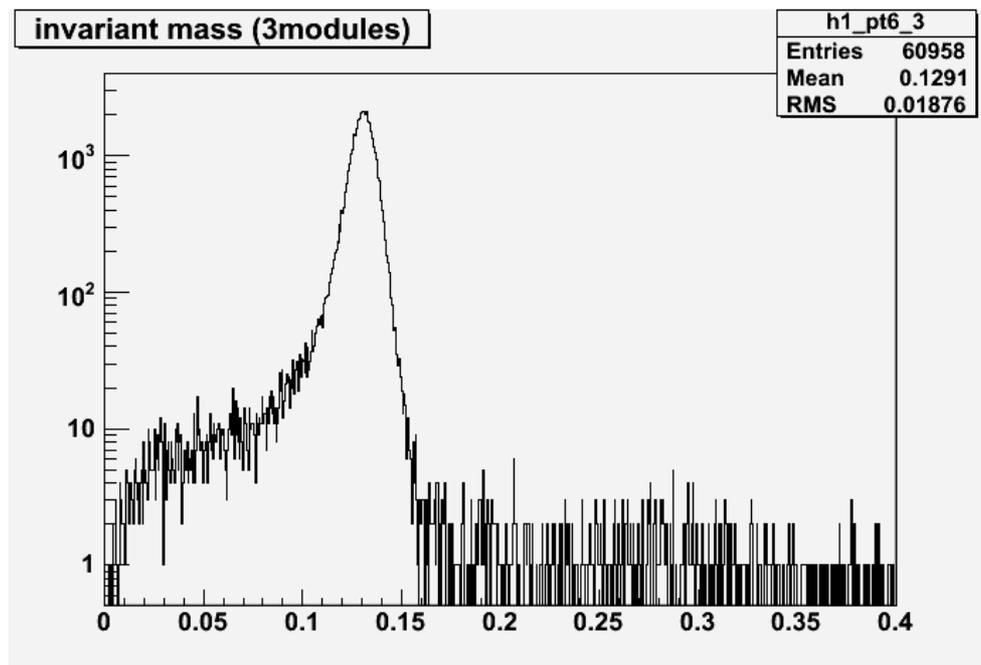


図 12 シミュレーションから得た ϕ の不変質量分布

π^0 の質量である 135MeV を中心として分布している。ピークの左にある分布は、不変質量を計算する際に用いるクラスターが PHOS 実機の端にある場合、光子のエネルギーをすべて落とす前に通過してしまい実際よりも小さなエネルギーが測定される。その結果として計算される質量は π^0 の質量よりも小さくなる。そのため不変質量の範囲が 0.12GeV-0.14GeV の範囲の π^0 を用いて幾何学的な検出効率の計算に用いた。検出効率を求めるために以下の式を用いた。

$$\frac{\pi^0 \text{ の個数 (個/bin)}}{\text{PHOS を含む適当な範囲に投げた個数 (個/bin)}} \times \frac{\text{PHOS を含む適当な範囲 ()}}{4 \text{ ()}} \quad (3)$$

以上の式を用いて、幾何学的な検出効率を求めた。

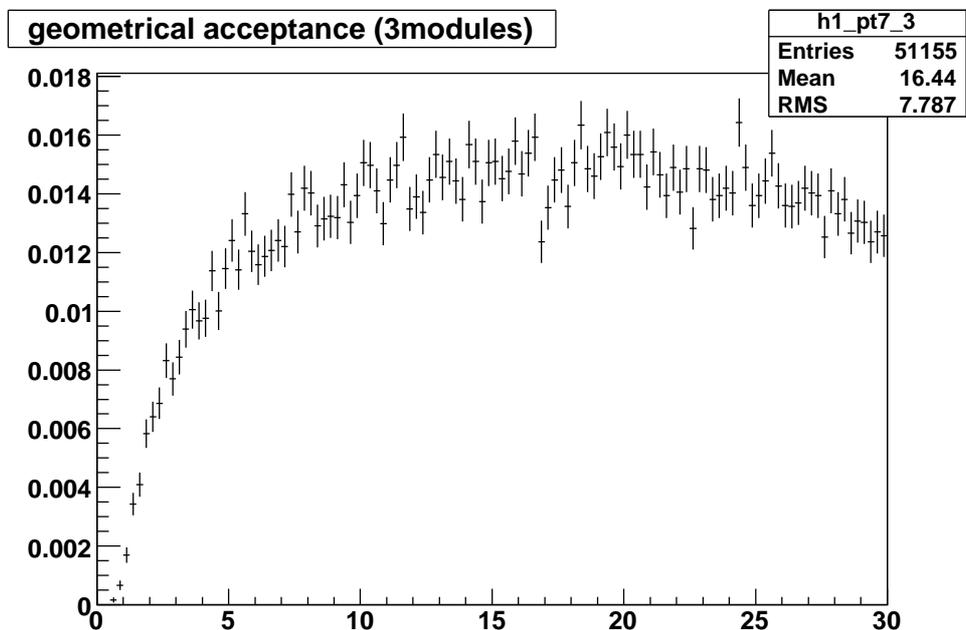


図 13 π^0 の幾何学的な検出効率の横方向運動量依存性

得られた結果を見ると低横方向運動領域での立下りが見られる。これは低い横方向運動量を持った γ の崩壊光子が二つとも PHOS 検出器で検出されることが少ないということを示している。また高横方向運動量領域でも立下りが起こり始めている。これは高い横方向運動量を持った 2 つの崩壊光子が PHOS 検出器の近い位置に当たるため、一つのクラスタとして検出されるからである。

次に崩壊光子の電子陽電子対生成の効果について考える。

全検出器を設置した場合と PHOS のみを設置した場合で γ の不変質量を計算した

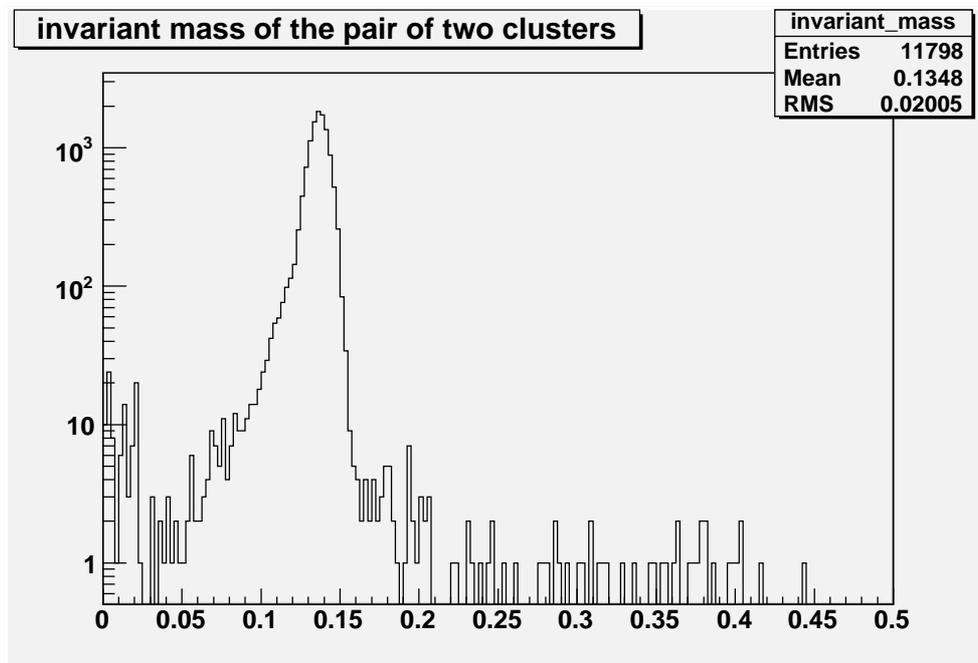


図 14 シミュレーションから得た γ の不変質量分布 (全検出器)

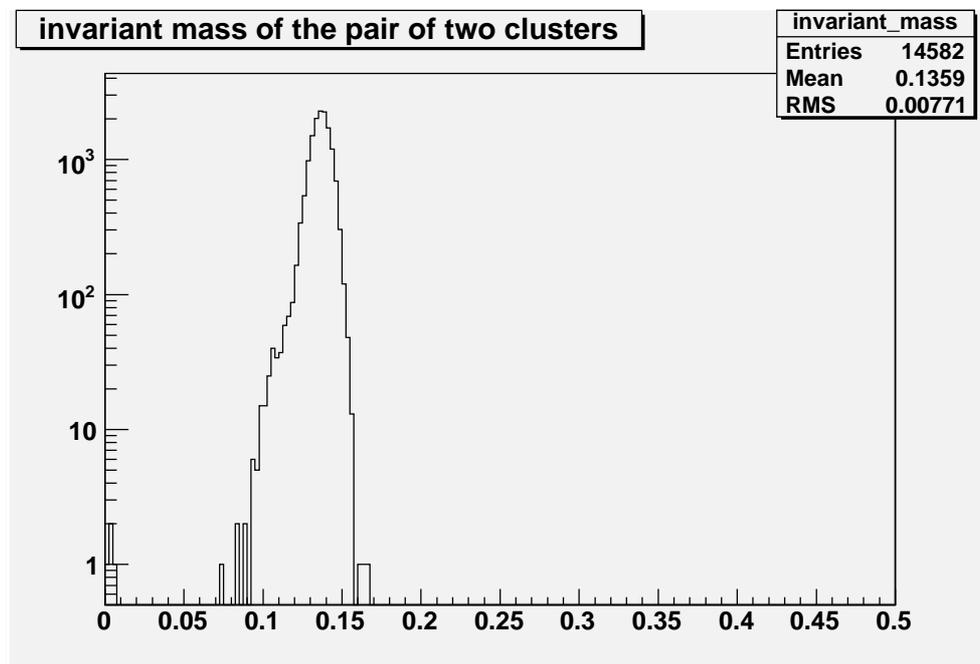


図 15 シミュレーションから得た γ の不変質量分布 (PHOS のみ)

全検出器を設置したシミュレーションでは崩壊光子が検出器と相互作用を起こして電子陽電子対生成が起きるため γ の不変質量を正しく計算できない。さらに他の検出器を通過する際の相互作用で光子がエネルギーを損失することもあるため γ の不変質量よりも低い値が計算されやすくなる。上の二つの不変質量分布について不変質量の範囲が 120MeV - 155MeV の範囲の γ の数を比較して電子陽電子対生成による効果を計算した。

- 検出器をすべて設置した場合の γ の数 ...14252
- PHOS 鑿を設置した場合の γ の数 ...11043

以上の数値をを比較すると、他検出器との相互作用によって本来 PHOS で測定される γ のうち、約 22.5% が崩壊光子の電子陽電子対崩壊によって失われることが分かった。

最後に非衝突中心起源の π^0 の効果について考える。生成した荷電粒子に対してそれぞれ生成された非中心衝突からの π^0 の横方向依存性を示す

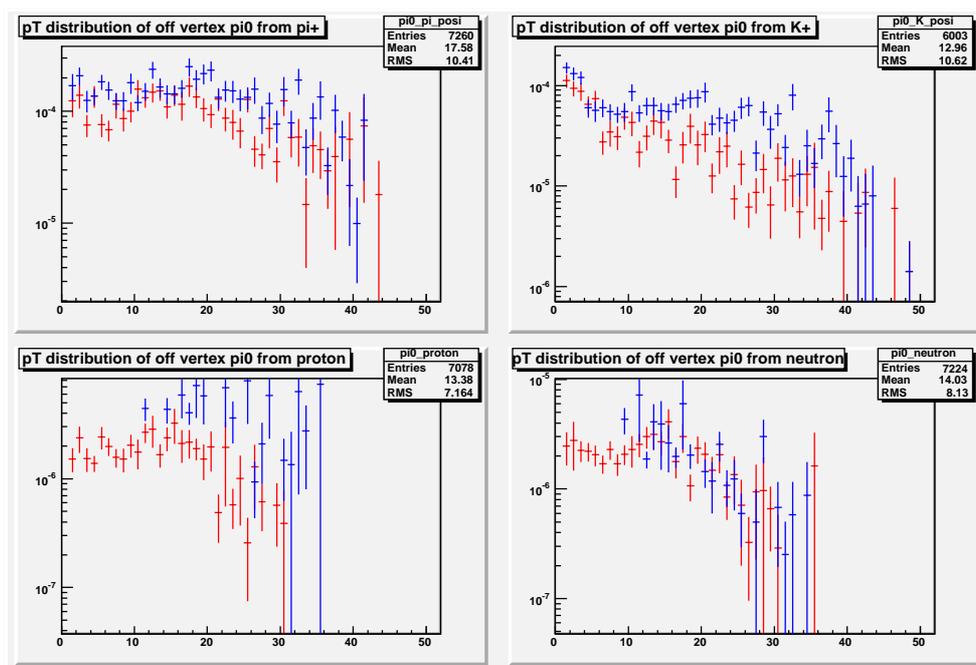


図 16 各荷電粒子により生成された非衝突中心の π^0 の横方向依存性、左上 [赤： π^+ 中間子、青： π^- 中間子]、右上 [赤： K^+ 中間子、青： K^- 中間子]、右下 [赤：陽子、青：反陽子]、右左 [赤：中性子、青：反中性子]

以上のヒストグラムをすべて足し合わせ、衝突中心から来る π^0 の数で割ることで非衝突中心起源の π^0 の効果を考える。この時 K^0 中間子を、 K^+ 中間子と K^- 中間子の平均として仮定して考えた。

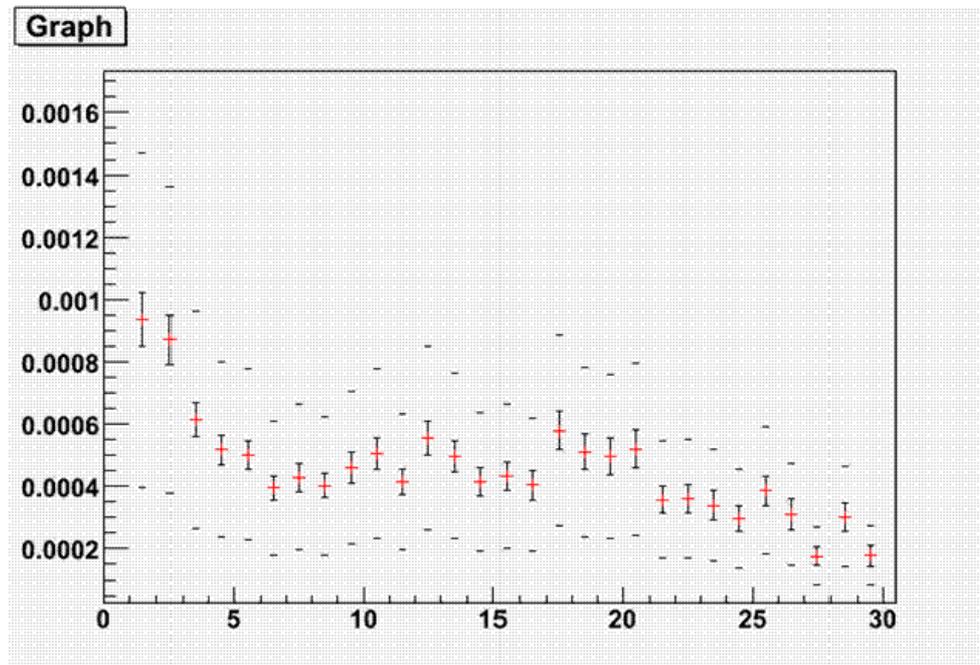


図 17 非衝突中心からの 0 の寄与

この結果、非衝突中心の 0 中間子の寄与は約 0.04% であることが分かった。この数値はその他の効果、たとえば崩壊光子による電子陽電子対生成による効果に比べてはるかに小さい事が分かる。さらにその精度は、実際の 0 中間子の収量測定の精度に対してはるかに良い。

第5章 結論・展望

本研究では、陽子陽子衝突により生成される π^0 中間子の収量を測定するための補正係数として、PHOS 検出器の幾何学的な検出効率の効果、崩壊光子が他検出器と相互作用することにより電子陽電子対生成が起こり π^0 中間子が再構成できなくなる効果、さらに非衝突中心からやってくる π^0 中間子による効果について計算した。幾何学的な検出効率による効果については、予想した通り低横方向運動量領域および高横方向運動量領域において立下りが見られた。崩壊光子の電子陽電子対生成による効果について、全検出器を置いた場合では、PHOS 検出器のみの場合と比較して約 22.5% の π^0 中間子の測定数の減少が予測された。さらに非衝突中心の π^0 中間子による効果は、衝突中心から来る π^0 中間子の測定量に対して 0.04% の寄与があった。この数値はその他の影響、たとえば崩壊光子の電子陽電子対生成による寄与と比較してはるかに小さい。さらにこの精度は π^0 中間子の測定精度よりもはるかに小さい。以上の結果を用いることで実験のデータから π^0 中間子の収量の横方向運動量依存性を求めることができる。

今後の展望としては得られたデータから、測定された π^0 中間子の数を計数する必要がある。しかし、現在あるデータでは低横方向運動量の領域にしかデータがないため、今後の実験の進行に伴う統計の増加が待たれる。また現在の衝突エネルギーも今後上昇するので、高横方向運動量領域における π^0 中間子の生成量も増加することが期待できる。その結果と金金衝突の結果との比較により π^0 中間子の収量が抑制されるかどうか、されるならどの程度抑制されるのかという議論が期待される。

謝辞

最後に、本研究を行うにあたって私に関わりのあった方々に感謝の意を述べたいと思います。

杉立先生には、原子核物理学の基礎から教授していただきました。杉立先生は高エネルギー物理学の発展を体験しておられ、素粒子物理学の起源から最先端の研究の事情まで幅広く教えてくださいました。合計6か月の海外での研究活動は今後の人生の糧になると思います。志垣先生、本間先生は私の意見に対して、研究者として鋭い意見を投げかけていただき研究を進める上で非常に参考になりました。鳥井さんには、本研究のシミュレーションに関する助言、研究の方針、シミュレーション解析方法、社会人としてあるべき姿など幅広い助言をしていただきました。大学院生の中宮さん、大内田さん、来島さん、渡辺さんには研究室に配属された当初から、物理やコンピュータのことについて初歩的なことから教えていただき大変お世話になりました。そして同じ修士2年生の植木君、中馬君、二橋君、日栄さんは夜の勉強会や、英会話練習を開くなど、研究に対するモチベーションが非常に高く、私自身見習わなければならぬと思うところがたくさんありました。この4人と一緒に研究することはいいとても刺激になりました。最後に、ここまで私を育ててくださった家族、ともに過ごしてきた友人、生き詰っていたときに相談に乗ってくれた人たち、そしていつも私をを励ましてくれた人に感謝の意を示したいと思います。みなさん本当にありがとうございました。

付録・ラピディティ

ここで原子核実験において都合のよい、ラピディティ y という物理量を導入する。入射粒子の全エネルギーを E 、入射粒子のビーム軸に平行な運動量を p_z とすると

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

と定義する。この式は入射粒子の速度を v_z とすると、次のように書きかえることが出来る。

$$y = \ln\left(\frac{1 + v_z}{1 - v_z}\right)$$

つまりラピディティは、粒子の入射方向の速度を表す目安のような量である。

また、衝突後に放出される粒子の入射ビーム軸に対する方位角を θ とする。 y は入射エネルギーや運動量によるので、これにかわる物理量を導入する。 y はビーム軸に垂直な方向の運動量 p_T 、横質量 m_T から

$$y = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{E + p_z}{E - p_z}\right) = \ln\left(\frac{E + p_z}{m_T}\right) = \tanh^{-1}\left(\frac{p_z}{E}\right)$$

とかける。ここで

$$p_T = p \sin \theta$$

$$m_T = (m^2 + p_T^2)^{1/2} = (E^2 + p_z^2)^{1/2}$$

とする。また、ラピディティは次のようにも書ける。

$$E = m_T \sinh y$$

$$p_z = m_T \cosh y$$

今、高エネルギーのため、 $p \gg m$ とすると、

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{\cos^2(\frac{\theta}{2}) + \frac{m^2}{4p^2} + \dots}{\sin^2(\frac{\theta}{2}) + \frac{m^2}{4p^2} + \dots} \simeq -\ln \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) =$$

と表せる。入射ビームの放射角のみに依存するこの y を擬ラピディティと呼ぶ。

参考文献

1. KEK ホームページ (<http://www.kek.jp/ja/index/html>)
2. 杉立徹、日本物理学会 2007 春季大会、素粒子物理領域・素粒子領域・実験核物理領域合同シンポジウム「LHC が拓く新たな地平」
3. 永江知文、永宮正治 共著、原子核物理学、裳華房
4. 原康夫、素粒子物理学、裳華房
5. 丸山悠、2009 年度修士論文「ALICE 実験のための PHOS 性能評価機の開発研究」
6. 溝口謙太、2009 年度修士論文「荷電粒子を用いた ALICE 実験の PHOS 検出器のエネルギー較正手法の確立」
7. 久保武史、2008 年度修士論文「ALICE 実験における PHOD 検出器システムの性能評価」
8. 鳥井久行、2004 年度博士論文、「Midrapidity Neutral-Pion Production in Proton-Proton Collision at $\sqrt{s}=200\text{GeV}$ 」
9. 洞口拓磨、2006 年度博士論文、「Prompt Photon Production in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s}=200\text{GeV}$ 」