

卒業論文

重心系エネルギー $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ の陽子・陽子衝突
における直接光子測定方法の考察

広島大学理学部物理科学科

クォーク物理学研究室

岩崎 天 B044232

主査 杉立 徹 教授

副査 城 健男 教授

指導教官 杉立 徹 教授

平成 20 年 2 月 29 日

概要

2008年に稼動を開始する欧州合同原子核機構 (CERN) の LHC 加速器では、衝突エネルギー $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ の陽子・陽子 (p-p) 衝突実験を予定している。われわれの研究グループは ALICE 実験に参加しており、この実験はクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の探求を目的としている。QGP の研究において、初期高温状態の情報を探る有効な手段として直接生成光子測定がある。直接光子を測定する上で、直接光子以外のバックグラウンド光子の定量的除去を行う必要がある。

具体的には、 $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ の陽子・陽子衝突シミュレーションを行い、以下の式を用いて PHOS で測定されるバックグラウンド光子の横方向運動量分布を求めた。

$$N_{BG} = N_0 \times \frac{N_{from\ 0}}{N_0} \times \frac{N_{BG}}{N_{from\ 0}} \times \text{Acceptance}$$

第1項は 0 の横方向運動量分布、第2項は1個の 0 から生成されるバックグラウンド光子の数、第3項はハドロン衝突における 0 生成断面積、第4項は PHOS 検出器の検出効率である。以上より、測定されたすべての光子の横方向運動量分布からバックグラウンドの光子の横方向運動量分布を差し引くことにより直接光子の横運動量分布を考察した。

目次

第 1 章	序論	4
第 2 章	導入	5
2.1	量子色力学	5
2.2	クォーク・グルーオン・プラズマ	5
2.3	光子生成	6
2.4	目的	7
第 3 章	ALICE 実験	8
3.1	LHC 加速器	8
3.2	ALICE 検出器	9
第 4 章	シミュレーション	12
4.1	イベントジェネレータ PYTHIA	12
4.2	GEANT3	12
4.3	シミュレーションの流れ	13
4.4	シミュレーションデータ	14
4.5	シミュレーション解析	14
4.5.1	PDGCode	14
4.5.2	バックグラウンド光子の見積もり	15
第 5 章	結果と考察	16
5.1	N_0	16
5.2	$N_{from 0}/N_0$	17
5.3	$N_{BG}/N_{from 0}$	19
5.4	Acceptance	22
5.5	PHOS において測定される直接光子の見積もり	24
第 6 章	結論	28

第 1 章 序論

現在物質を構成する基本粒子は、クォークとレプトンだと考えられている。これらの素粒子には基本的な 4 つの相互作用、強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用、重力相互作用が働く。通常クォークは強い相互作用によって陽子や中性子の中に閉じ込められている。強い相互作用は量子色力学 (QCD) によって記述され、その中でクォークは色荷をもち、同じく色荷をもつグルーオンを媒介粒子としている。しかし高温・高密度状態ではクォークとグルーオンが閉じ込めから解放され自由に飛びまわることのできるクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相に相転移すると考えられている。QGP はビッグバンから 10 マイクロ秒後の初期宇宙において存在したと考えられており、QGP について研究することは、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。

2000 年に稼働を開始した米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の衝突型高エネルギー原子核加速器 RHIC において QGP 相の生成はほぼ検証された。しかし、その性質の解明のためにはまだ課題が残る。2008 年に稼働を開始する欧州合同原子核研究機構 (CERN) の LHC 加速器では、RHIC 加速器の 28 倍の衝突エネルギーを利用して QGP の性質解明のための有効なシグナルを得ることができると期待されている。LHC 加速器において 6 実験中、高エネルギー原子核衝突物理学に特化した検出器をもつ ALICE 実験では、RHIC 加速器における物理成果を踏まえてより高温の QGP 相を生成しパートン多体系の性質探究を展開する。

QGP の研究において、初期高温状態の情報を探る有効な手段として直接光子測定がある。しかし、直接光子測定におけるバックグラウンドとして、高エネルギー衝突によって発生した π^0 や η などのハドロンが崩壊して生成した崩壊光子が大量に測定されてしまう。そこでそのバックグラウンド光子を定量的に除去する必要がある。本研究では、 $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ の陽子・陽子衝突シミュレーションを行いそのデータを用いてすべての光子の横方向運動量分布からバックグラウンド光子の横方向運動量分布を差し引くことにより直接光子測定法を考察した。

第2章 導入

この章では、本研究を行うにあたって必要となる基礎知識、物理的背景を説明し、研究の動機、目的を述べる。

2.1 量子色力学

量子色力学とは強い相互作用を説明する基本法則である。クォークは色荷と呼ばれる量子数をもっていて、色荷はグルーオンを交換することでやり取りされ、これが強い相互作用の源になっている。強い相互作用は色荷間の距離が大きくなると弱くなり、逆に距離が大きくなると相互作用が強まる。このため通常クォークは、陽子や中性子といったハドロンの中に閉じ込められて存在している(クォークの閉じ込め)。ただ、高エネルギーの領域では相互作用が弱くなる現象(漸近的自由性)が起こり、クォークとグルーオンが自由に飛びまわることのできる状態になると言われている。

2.2 クォーク・グルーオン・プラズマ

QCD 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力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相が自然に存在できる(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星内部である。

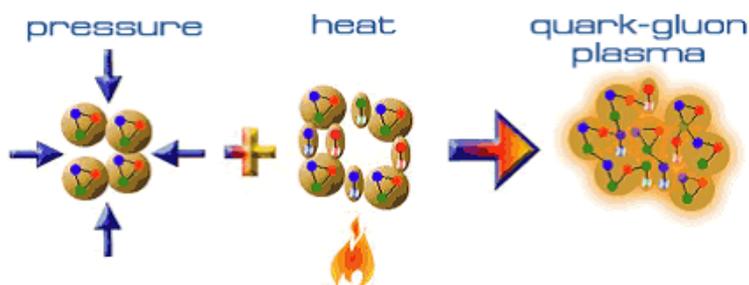


図1 高温・高密度状態ではクォークの閉じ込めから解放されて QGP 相へ相転移する

この QGP を現在地球上で再現できる手段は、原子核を光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、鉛原子核相互衝突より高エネルギー密度の状態をつくりQGPの性質の探究を試みる予定である。

2.3 光子生成

高エネルギー重イオン衝突においてQGPが生成されたとしても、実際に観測されるのはほとんどが膨張・冷却後のハドロンが崩壊してできた光子である。またハドロン崩壊による光子以外にもいろいろな情報をもった光子が検出される。これらの光子はQGPを探求する上で重要な情報をもっていると考えられる。なぜなら、光子は強い相互作用による影響をほとんど受けないため、衝突過程の情報を損ねることなく検出器まで届くからである。測定される光子は生成する過程によって以下の3種類に分けられる。

- 初期直接生成光子

重イオン衝突初期に生成される光子。コンプトン散乱、対生成、制動放射によって生成される。pQCDで記述される初期パートンの情報を含んでいる。

- 熱輻射光子

QGP相中でクォークとグルーオンが衝突する過程において生成される。発生する量が少ないため検出するのは難しいが、系の温度状態や時間発展の情報を持っているため、熱輻射光子を検出することはQGPを解明するために不可欠である。

- 崩壊光子

衝突により生じた π^0 や η といったハドロンが崩壊した際に生成される。ハドロンは衝突のどの過程においても生ずるのでその都度生成される。崩壊光子を観測することで、衝突により生じた粒子を同定することが可能である。

本論文では、初期直接生成光子と熱輻射光子をまとめて直接光子と称する。これは検出されたすべての光子から崩壊光子を除いたものである。直接光子は衝突から生じた光子の集まりなので、衝突初期の情報を含んでいる。

検出器においてはこれらすべての光子が検出されるため、QGP 探索のためには、まずハドロン由来の崩壊光子のデータを除き、次いで残った直接光子のデータからさらに初期直接生成光子のデータを除き、熱輻射光子のデータを読み取る必要がある。

2.4 目的

ここまで述べてきたように、得られた光子のデータから直接光子と崩壊光子を区別することは、QGP を探索する上で必要不可欠である。本研究の目的は、重心系エネルギー $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ の陽子・陽子衝突をシミュレーションにより再現し、測定される崩壊光子の横方向運動量分布を求め、測定されたすべての光子の横方向運動量分布からそれを差し引くことにより、直接光子の横方運動量分布を考察することである。2008 年に CERN・LHC 加速器において予定されている ALICE 実験で得られる光子データ解析の際にも本研究は重要な役割を果たすと考えている。

第3章 ALICE 実験

この章では ALICE 実験の概要、実験設備、測定機器について説明する。

3.1 LHC 加速器

CERN(欧州合同原子核研究機構) は、スイスとフランスの国境をまたぐ世界最大規模の原子核研究所である。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した世界最大の衝突型粒子加速器である。



図2 CERN 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 $\sqrt{s_{NN}} = 5.5\text{TeV}$ 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。

3.2 ALICE 検出器

ALICE 実験 (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学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、広範囲の運動量を粒子をカバーし、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。ここでは、ALICE 実験において用いられる検出器について説明する。

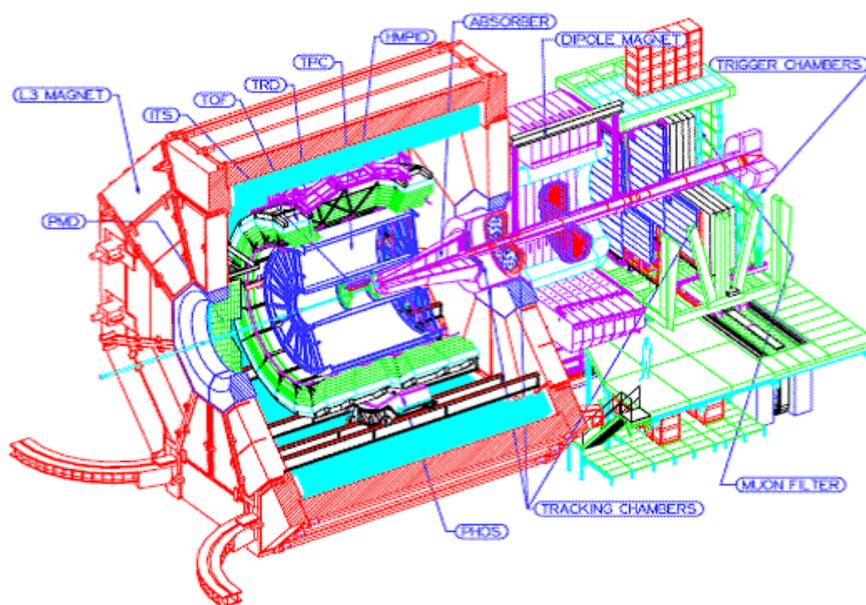


図 3 ALICE 検出器概観

- Inner Tracking System (ITS)

ITS は、衝突点に最も近い位置にある検出器である。ITS では、ビームの衝突点や 2 次的な衝突の位置を決定する。また、粒子の種類を同定し、低運動量の粒子の飛跡を測定することができる。また TPC における運動量、角度測定の精度向上の役割も担っ

ている。カバー領域はビーム軸に対して $|\eta| < 0.9$ である。 の定義は後述する。

- Time Projection Chamber (TPC)

TPC は、ALICE 実験において主要な飛跡検出器である。飛跡の検出機能の他に、荷電粒子の運動量測定、粒子同定、二つの飛跡の分離など様々な機能をもつ。カバー領域は $|\eta| < 0.9$ である。

- Transition Radiation Detector (TRD)

TRD の役割は、ハドロン衝突において生成される電子を同定することである。それに加えて $2\text{GeV}/c$ 以上の横方向運動量をもつ電子のためのトリガーを与える。カバー領域はビーム軸に対して $|\eta| < 0.9$ である。

- Time of flight (TOF)

衝突点付近の粒子同定に加えて、補足的な粒子同定を行う検出器が TOF である。TOF は粒子の飛行時間を測定することにより粒子を識別する。ALICE 実験においては最大 $2.5\text{GeV}/c$ まで π と K 粒子の識別を、 $4\text{GeV}/c$ まで K と p 粒子の識別をする。カバー領域はビーム軸に対して $|\eta| < 0.9$ である。

- High Momentum Particle Identification Detector (HMPID)

HMPID の役割は TOF と同じく粒子の同定だが、こちらは粒子のチェレンコフ光を観測することにより粒子の識別を行う。HMPID では高い横方向運動量をもつ粒子の識別が可能であり、最大 $3\text{GeV}/c$ まで π と K 粒子の識別を、最大 $5\text{GeV}/c$ まで K と p 粒子の識別をする。

- Photon Spectrometer (PHOS)

PHOS は、QGP を探る上で有効なシグナルである直接光子を検出するための電磁カロリメータである。直接光子以外にも、ハドロン崩壊してできた光子も検出し、そこから π^0 や η を再構成することができる。検出部は鉛タングステン (PWO) 結晶で構成され、エネルギー E の入射光子に対して約 $3\%/\sqrt{E}$ のエネルギー分解能をもつ。PWO 結晶は低温で発光量が増えるので、PHOS は -25°C の低温下で運用される。

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、粒子の速さ v が光速に対して十分小さいとき、次のように書きかえることができる。

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

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。

第 4 章 シミュレーション

この章では、研究を行うにあたって用いたイベントジェネレータ、シミュレーションデータについて説明する。

4.1 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、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。

4.2 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、宇宙航空学など様々な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、測定器応答の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。

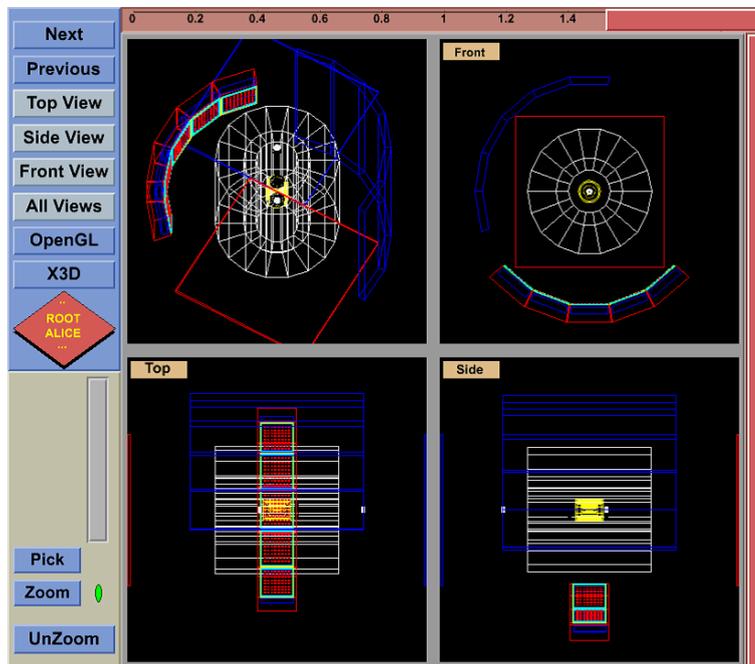


図 4 GEANT3 により再現された ALICE 検出器

4.3 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。

- 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信号を、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。

4.4 シミュレーションデータ

本研究では、陽子と陽子を重心系エネルギー $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ で衝突させるシミュレーションを行った。このとき衝突点から出てくる粒子 (他の検出器との相互作用による 2 次粒子を含まない) のうち $|\eta| < 1$ の範囲ものを生成粒子と称し、PHOS において測定される粒子を測定粒子と称する。

シミュレーションは 2 種類行った。

- Run130xxx...38750 イベント

衝突において生成した π^0 を生成粒子として判断するシミュレーション

- Run132xxx...31200 イベント

衝突において生成した π^0 が崩壊してできた光子を生成粒子として判断するシミュレーション

1 イベントとは衝突一回のことである。また、どちらのシミュレーションも ALICE 検出器のうち TOF、TRD は設置していない。これは当初の設計では TOF、TRD 合わせて約 85% の光子の放射長の厚みを持つため、直接光子測定において必須である低～中横方向運動量領域での測定が困難になるという問題があった。この問題を解決するため ALICE 実験首脳会議において TOF、TRD に穴をあけるという案が採択された。本研究では穴をあけるという設定ができなかったので TOF、TRD をすべて除去する方法を採った。

4.5 シミュレーション解析

4.5.1 PDGCode

シミュレーションより得たデータを解析する際に PDGCode というコードを用いた。これは粒子の種類を判別するラベルで、クォーク、レプトン、ゲージボソン、ハドロンに対応している。PDGCode は一般的には 7 つの数字から成り、その数字は粒

子のスピン、フレーバー (クォークとレプトンの種類)、内部量子数などの情報を含み、正の数なら粒子、負の数なら反粒子となっている。この数字を指定することで、特定の種類の素粒子の物理情報を得ることができる。

粒子の種類	d-クォーク	u-クォーク	電子	陽子	反陽子
PDGCode	1	2	11	2212	-2212

4.5.2 バックグラウンド光子の見積もり

シミュレーションのデータから PHOS において測定されるバックグラウンド光子 (直接光子以外の光子) の横方向運動量分布を求める際に、以下の式を用いた。なお N_0 、 $N_{from 0}$ 、 N_{BG} は 1 イベントごとの値に規格化してある。

$$N_{BG} = N_0 \times \frac{N_{from 0}}{N_0} \times \frac{N_{BG}}{N_{from 0}} \times \text{Acceptance} \quad (1)$$

第 1 項 N_0 は、衝突において生成する 0 の pT 分布である。このデータは本研究ではシミュレーションのものを用いるが、ALICE 実験では実際に測定した 0 の pT 分布を用いる。第 2 項 $N_{from 0}/N_0$ は 0 の pT 分布と、 0 が崩壊して生成した光子の pT 分布の比、第 3 項 $N_{BG}/N_{from 0}$ はバックグラウンド光子の pT 分布と、 0 が崩壊してできた光子の pT 分布の比を表す。第 2 項と第 3 項は得られたグラフを任意の関数でフィッティングした。第 4 項 Acceptance は PHOS 検出器の幾何学的な配置の要因と、PHOS の前にある検出器による光子の減衰の要因を考慮することにより、衝突から生成される粒子のうちいくらが PHOS において検出されるかを求めた。

第5章 結果と考察

この章ではシミュレーションの解析結果より、 N_{π^0} 、 $N_{from \pi^0}/N_{\pi^0}$ 、 $N_{BG}/N_{from \pi^0}$ 、Acceptance の4つの項を導き、 N_{BG} を求める。そしてPHOSにおいて測定された光子のすべてのシグナルから N_{BG} を差し引くことで、PHOSにおいて測定される直接光子を求める。

5.1 N_{π^0}

まず衝突によって生成される π^0 のpT分布を得た。

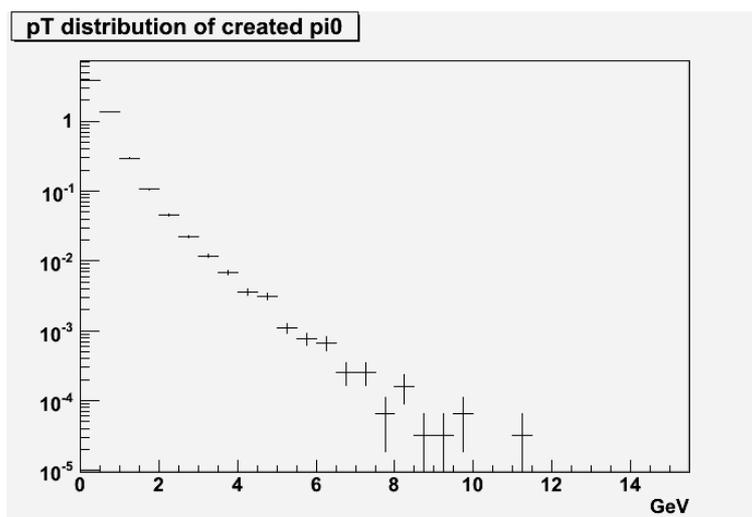


図5 衝突により生じる π^0 のpT分布 $N(\pi^0)$ (1 イベント)

π^0 のpT分布を見てみると低いpT領域ではスロープが急になっており、高いpT領域ではスロープがなだらかになっている。この理由にはいくつか仮説がある。まず、メインのパートン衝突に参加していないほかのパートン衝突による影響が考えられる。これは実験事実としてよく知られていて Underlying Event という。PYTHIA ではこの取り扱いにいくつかのモデルを選択できるようになっており、その影響がまず一つ考えられる。それともうひとつ、経験的なソフトな粒子生成を入れている可能性があ

る。いずれにしても PYTHIA がどのような物理モデルを用いて粒子生成を再現しているか調べれば判定できることだがここでは仮説を述べるにとどまる。また、先にも述べたが ALICE 実験では π^0 の pT 分布は実験から得たデータを用いる。

5.2 $N_{from \pi^0}/N_{\pi^0}$

$N_{from \pi^0}/N_{\pi^0}$ は、 $N_{from \pi^0}$ を Run132xxx から、 N_{π^0} を Run130xxx から導き、それぞれのヒストグラムの演算をすることにより求めた。

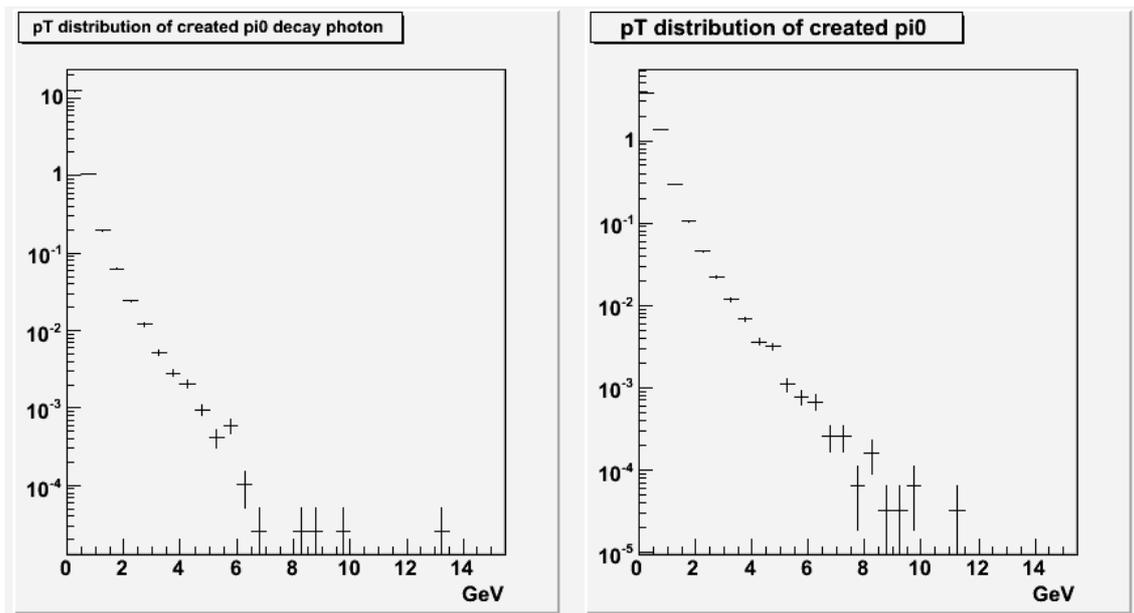


図 6 左： π^0 崩壊により生成した光子の pT 分布 $N_{from \pi^0}$ (1 イベント)、右：衝突により生じる π^0 の pT 分布 N_{π^0} (1 イベント)

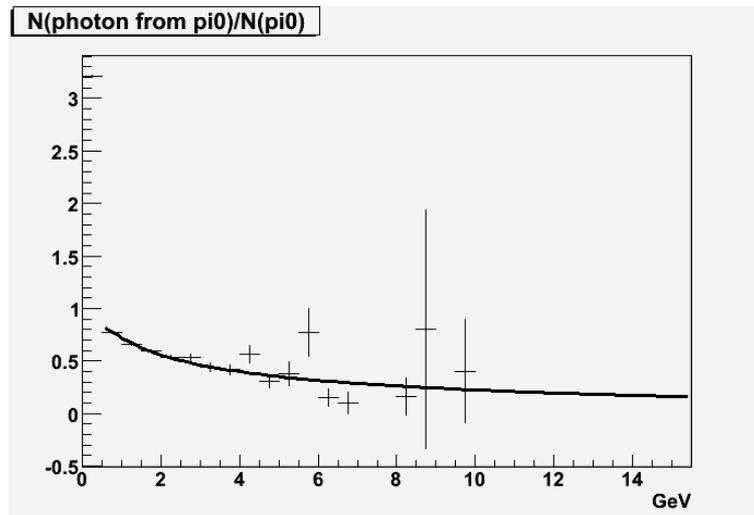


図 7 $\frac{N_{from \ 0}}{N_0}$

フィッティング関数は

$$f(pT) = \frac{a}{pT} + \frac{b}{pT^2} + c \quad (2)$$

$$a = 0.752 \pm 0.091$$

$$b = -0.262 \pm 0.049$$

$$c = 0.239 \pm 0.036$$

5.3 $N_{BG}/N_{from \ 0}$

$N_{BG}/N_{from \ 0}$ は、 N_{BG} 、 $N_{from \ 0}$ とともに Run132xxx から導き、それぞれのヒストグラムを演算することにより求めた。

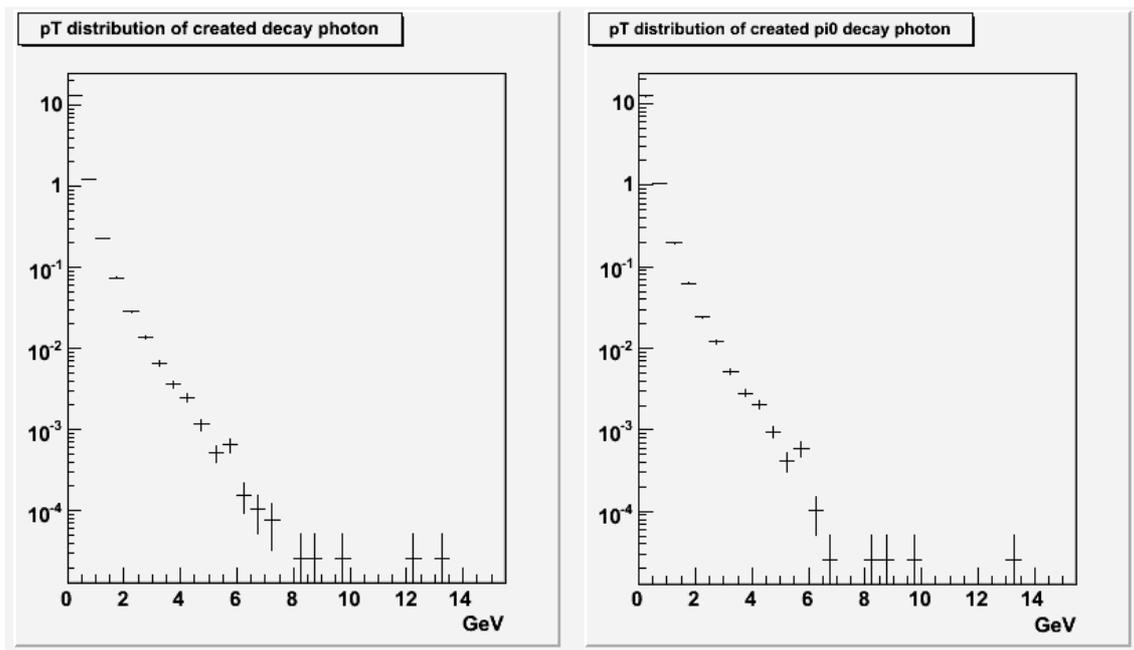


図 8 左：衝突より生成されるバックグラウンド光子の pT 分布 N_{BG} (1 イベント)、右： 0 崩壊により生成した光子の pT 分布 $N_{from \ 0}$ (1 イベント)

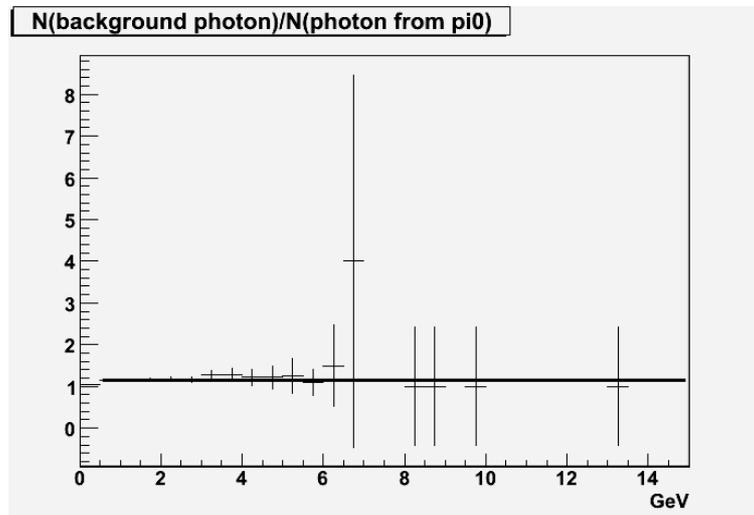


図 9 $\frac{N_{BG}}{N_{from \pi^0}}$

フィッティング関数は

$$d = 1.16 \pm 0.01 \quad (3)$$

$N_{BG}/N_{from \pi^0}$ は、バックグラウンド光子に対する π^0 崩壊により生成した光子の割合を表す。グラフは pT に対して一定に推移している。このことから、バックグラウンド光子に対する π^0 崩壊により生成した光子の割合は pT によらず一定だと見てとれる。ここで、他のハドロン崩壊により生成した光子に対してもバックグラウンド光子に対する割合を求めてみた。

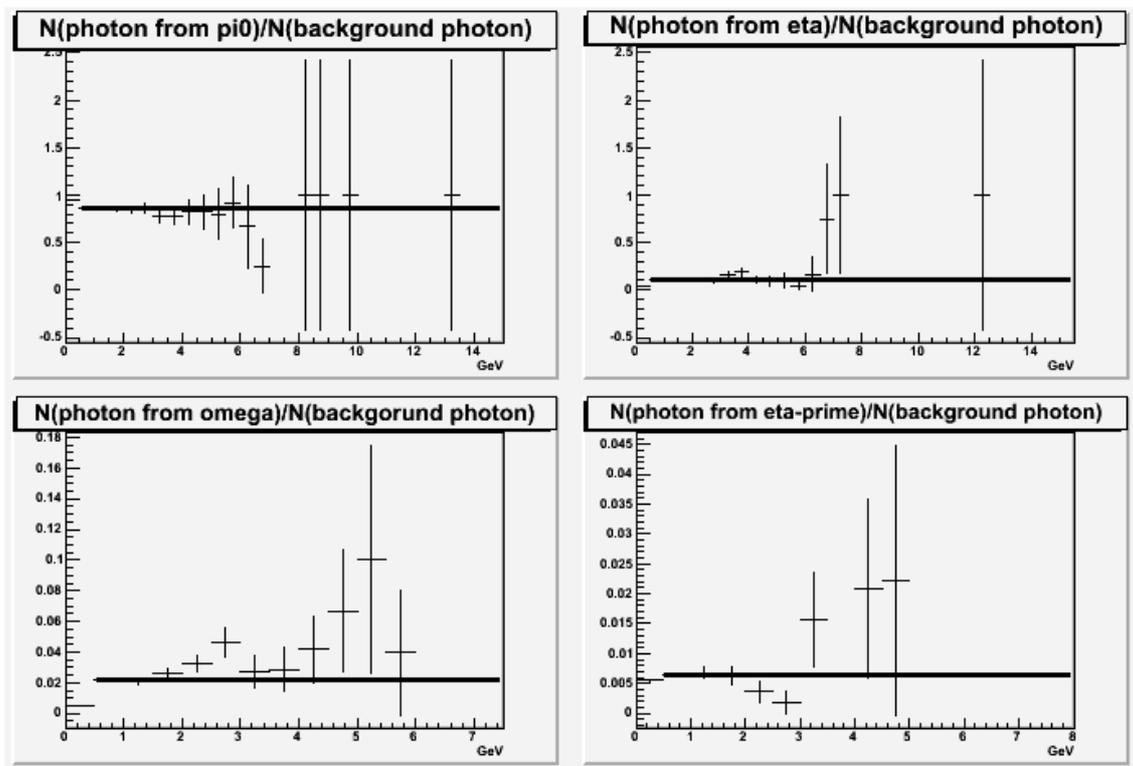


図 10 左上：バックグラウンド光子に対する π^0 が崩壊したことにより生成した光子の割合 (1 イベント)、右上：バックグラウンド光子に対する η が崩壊したことにより生成した光子の割合 (1 イベント)、左下：バックグラウンド光子に対する ω が崩壊したことにより生成した光子の割合 (1 イベント)、右下：バックグラウンド光子に対する η' が崩壊したことにより生成した光子の割合 (1 イベント)

フィッティング関数は

$$Const(\pi^0) = 0.865 \pm 0.005$$

$$Const(\eta) = 0.103 \pm 0.001$$

$$Const(\omega) = 0.0225 \pm 0.0006$$

$$Const(\eta') = 0.00629 \pm 0.00032$$

π^0 、 η 、 ω 、 η' について特に統計誤差の小さい低 p_T 領域で p_T によらず一定となる結果を得た。さらにグラフのフィッティング関数から、 π^0 、 η 、 ω が崩壊してできた光子がバックグラウンド光子のうち 99% を占め、特に π^0 が崩壊してできた光子はバックグラウンド光子のうち 86% と大部分を占めることがわかった。

5.4 Acceptance

Acceptance は、衝突において生成した粒子が、いくら PHOS において測定されるかを示す指標である。本研究では、ALICE 検出器を想定したシミュレーションにおいて光子を衝突点から 10 個一度に飛ばす試行を 100 回行い、合計 1000 個の光子のうちいくら PHOS において測定されるかを求めることで Acceptance を計算した。なおこのとき振る光子の範囲は、 $|\eta| < 0.13$ 、 $220^\circ < \phi < 340^\circ$ で光子は η に対して一定に振られている。さらに飛ばす光子の pT を 1~15GeV まで 1GeV ずつ変えながらシミュレーションを行った。

まず、p-p14TeV 衝突による生成粒子の範囲と Acceptance のシミュレーションで振る光子の範囲の幾何学的な比較を行う。p-p14TeV 衝突のシミュレーションによる生成粒子の範囲は $|\eta| < 1$ 、 $0^\circ < \phi < 360^\circ$ で、Acceptance のシミュレーションで振る光子の範囲は $|\eta| < 0.13$ 、 $220^\circ < \phi < 340^\circ$ である。これらを比較すると

$$\frac{\int_{-0.13}^{0.13} d\eta \int_{220^\circ}^{340^\circ} d\phi}{\int_{-1}^1 d\eta \int_{0^\circ}^{360^\circ} d\phi} = 0.0433 \quad (4)$$

次に、シミュレーションで振った 1000 個の光子のうち、PHOS において測定された光子の数の割合を pT ごとにプロットしたグラフを示す。

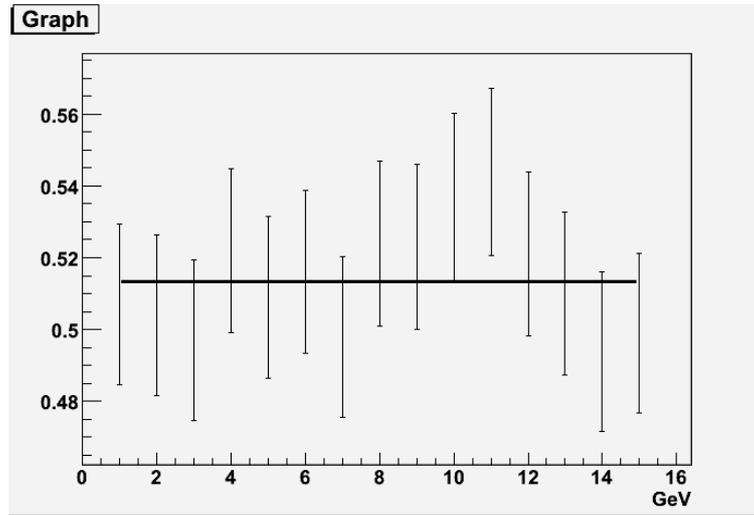


図 11 シミュレーションで $|\eta| < 0.13$ 、 $220^\circ < \phi < 340^\circ$ の範囲に振った 1000 個の光子のうち、PHOS で測定された光子の割合

フィッティング関数は

$$e = 0.513 \pm 0.006 \quad (5)$$

よって、Acceptance は

$$\text{Acceptance} = 0.0433 \times (0.513 \pm 0.006) = 0.222 \pm 0.0003 \quad (6)$$

ここで、他の検出器の効果によっていくらの光子が除去されているか考察してみる。まず、シミュレーションで投げた 1000 個の光子のうち、いくらの光子が PHOS に向かっているかを計算する。PHOS の範囲は $|\eta| < 0.128$ 、 $226^\circ < \phi < 313^\circ$ で、シミュレーションで振る光子の範囲と比較して

$$\frac{\int_{-0.128}^{0.128} d\eta \int_{226^\circ}^{313^\circ} d\phi}{\int_{-0.13}^{0.13} d\eta \int_{220^\circ}^{340^\circ} d\phi} = 0.714 \quad (7)$$

つまり、1000 個の光子のうち 714 個は PHOS へ向かって飛んでいる。(5) 式より PHOS では約 513 個の光子が測定されているので

$$513 \div 714 = 0.718$$

前の検出器の影響で約 28% の光子が除去されている。

5.5 PHOS において測定される直接光子の見積もり

以上より、PHOS において測定されるバックグラウンド光子を求めるための項が求まった。バックグラウンド光子を求める式は

$$N_{BG} = N_0 \times \left(\frac{a}{pT} + \frac{b}{pT^2} + c \right) \times d \times \text{Acceptance} \quad (8)$$

$$a = 0.752 \pm 0.091$$

$$b = -0.262 \pm 0.049$$

$$c = 0.239 \pm 0.036$$

$$d = 1.16 \pm 0.01$$

$$\text{Acceptance} = 0.0222 \pm 0.0003$$

この式より、バックグラウンド光子の pT 分布をプロットした。同時に、Run132xxx で PHOS において測定された全ての光子の pT 分布も示す。

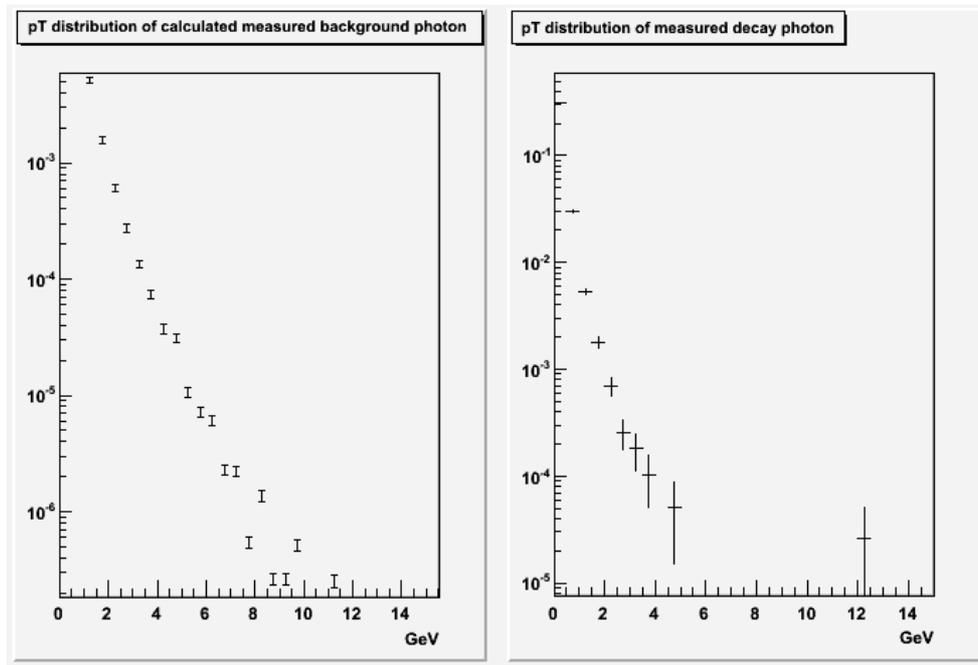


図 12 左：計算より求めた PHOS において測定されるバックグラウンド光子の pT 分布 N_{BG} 、右：Run132xxx より得た PHOS において測定されたすべての光子の pT 分布

直接光子のシグナルは、PHOS において測定されたすべてのシグナルから、バックグラウンド光子のシグナルを引くことにより求まる。

$$N_{dir} = N_{all} - N_{BG} \quad (9)$$

誤差伝搬の式は $dN_{dir}^2 = dN_{all}^2 + dN_{BG}^2$

上の式より、直接光子のシグナルをプロットした。

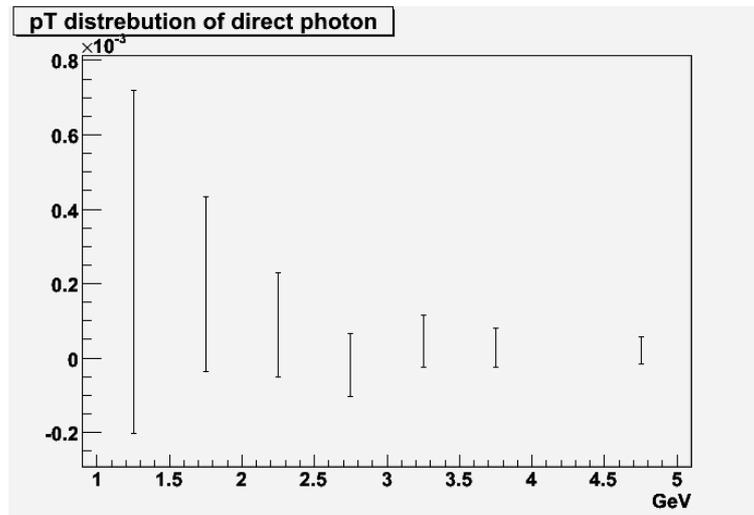


図 13 PHOS で測定される直接光子の pT 分布

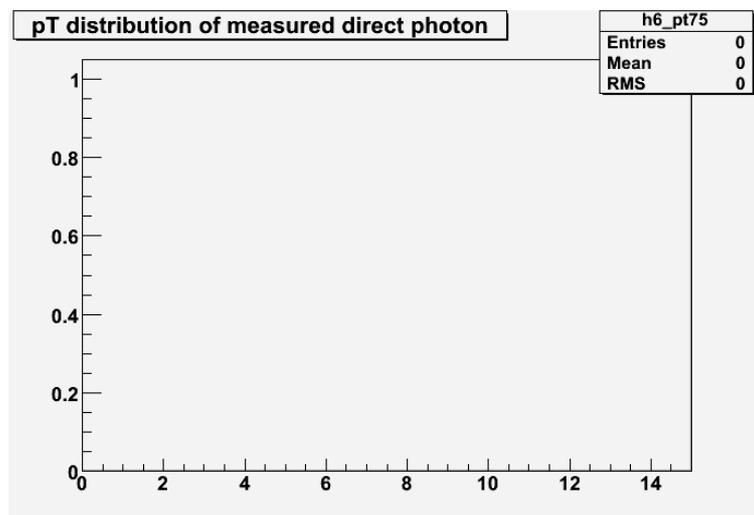


図 14 Run132xxx において PHOS で測定された直接光子の pT 分布 (全 38750 イベント)。エントリー数は 0 である。

Run132xxx のシミュレーションにおいて、直接光子は PHOS において測定されていない。一方、計算より求めた PHOS において測定される直接光子の pT 分布を見ると、誤差棒の範囲ですべて 0 を含んでいる。この結果は Run132xx のデータと矛盾しない。この時点では

$$N_{BG} = N_0 \times \frac{N_{from\ 0}}{N_0} \times \frac{N_{BG}}{N_{from\ 0}} \times \text{Acceptance} \quad (10)$$

による直接光子測定は妥当な方法だと判断する。

第 6 章 結論

本研究では、陽子・陽子 14TeV 衝突のシミュレーションを行い、バックグラウンド光子の p_T 分布を計算より求めて、PHOS で測定されたすべての光子のシグナルからそれを引くことで直接光子の p_T 分布が求まるか考察を行った。今回用いたシミュレーションデータでは PHOS において直接光子は測定されていない。計算から求めた直接光子の p_T 分布は誤差の範囲で 0 を示しており、シミュレーションデータと矛盾しない妥当な結果を得たものと判断した。しかし、直接光子を測定できるかどうかを検証するためには、意図的に直接光子を発生させたシミュレーションにおいて、直接光子の p_T 分布を再現できるかどうか再度検証を行う必要がある。また PYTHIA で想定されている物理モデルや、検出器内で起きている物理事象について学び、測定される直接光子の数の系統誤差についてさらに研究していく必要もある。本研究では、そのための第一段階は達したものととらえている。

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、4年生ゼミに参加していただき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。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データを作っただけで、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。洞口さんは、鳥井さんがいなくて行き詰っていたときに的確なアドバイスを与えていただきました。大学院生の槌本さん、中宮さん、原田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。来島さん、久保さん、成田さん、渡辺さんは自身の修士論文が忙しい中、アドバイスして下さったり、悩んでいる時に声をかけて下さったりして勇気づけられました。岡田さん、丸山さん、溝口さん、岩永さん、田部さんは研究室で課された課題に対して一緒に考えていただいて大変助かりました。そして同じ4年生の中馬君、二橋君、日栄さんは夜の勉強会や、朝の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ないと思うところがたくさんありました。この3人と一緒に研究することはとてもいい刺激になりました。みなさん本当にありがとうございました。

参考文献

1. 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
2. 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
3. 岡田 裕介 ALICE 実験 PHOS 検出器による π^0 検出効率 (2007) 広島大学理学部クォーク物理学研究室卒業論文
4. 志垣 賢太 Physics in Initial Years at ALICE
5. C.Fabjan CERN,PH,ALICE at LHC Detector and Physics,Nucl.Phys.A752(2005)439c-446c
6. 永江 知文、永宮 正治 共著 原子核物理学 裳華房 (2000)
7. F. ハルツェン、A.D. マーチン 共著 クォークとレプトン - 現代素粒子物理学入門 - (1986)
8. <http://www.kek.jp/newskek/2003/julaug/rhic.html>
9. <http://www.thep.lu.se/~torbjorn/Pythia.html>
10. <http://wwwasd.web.cern.ch/wwwasd/geant/index.html>
11. 鳥井 久行 ALICE Simulation Hands-on Class