

卒業論文

LHC 加速器での核子対あたりの重心系衝突エネルギー 2.76TeV
鉛鉛衝突における生成エネルギー密度測定のための研究

広島大学理学部物理科学科
クォーク物理学研究室
学籍番号 B072337

八野 哲

2011年2月10日

指導教官 杉立 徹 教授
主査 杉立 徹 教授
副査 栗木 雅夫 教授



概要

2010年11月に欧州合同原子核機構(CERN)の大型ハドロン衝突型加速器(LHC)において、核子対あたりの重心系衝突エネルギー($\sqrt{s_{NN}}$) 2.76TeVでの鉛鉛衝突実験を行った。この高エネルギー原子核衝突実験は、過去最高の衝突エネルギーであり、様々な物理が期待されている。高エネルギー原子核衝突実験を行うと、クォークやグルーオンが閉じ込めから解放された相である、クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)相に相転移することが期待されている。我々、広島大学はこのQGP相の研究を主な目的とした国際実験グループである、ALICE(A Large Hadron Collider Experiment)実験に正式加盟している。

本研究は、ALICE実験のPHOS検出器のみを用いて、高エネルギー原子核衝突の生成エネルギー密度を測定し、今後の高精度な生成エネルギー密度測定の基礎を築くことが目的である。生成エネルギー密度とは、高エネルギー原子核衝突が起こった直後の衝突点でのエネルギー密度である。格子QCDの計算によると、エネルギー密度が $1\text{ GeV}/\text{fm}^3$ 以上になるとQGP相に相転移すると考えられている。このエネルギー密度は、横方向エネルギーとBjorkenの式で関係付けられており、横方向エネルギーを測定することで実験的に求めることができる。そのため、今回はPHOS検出器を用いて横方向エネルギーを測定し、生成エネルギー密度を解析した。具体的には、 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$ の鉛鉛衝突のシミュレーションより、PHOS検出器での横方向エネルギーの測定を再現し、そこで得た補正係数を2010年11月にLHCで行った $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$ の鉛鉛衝突の実データに適用し、生成エネルギー密度を求めた。その結果、 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$ の鉛鉛衝突の生成エネルギー密度は $\dots \pm 0.8\text{GeV}/\text{fm}^3$ となった。

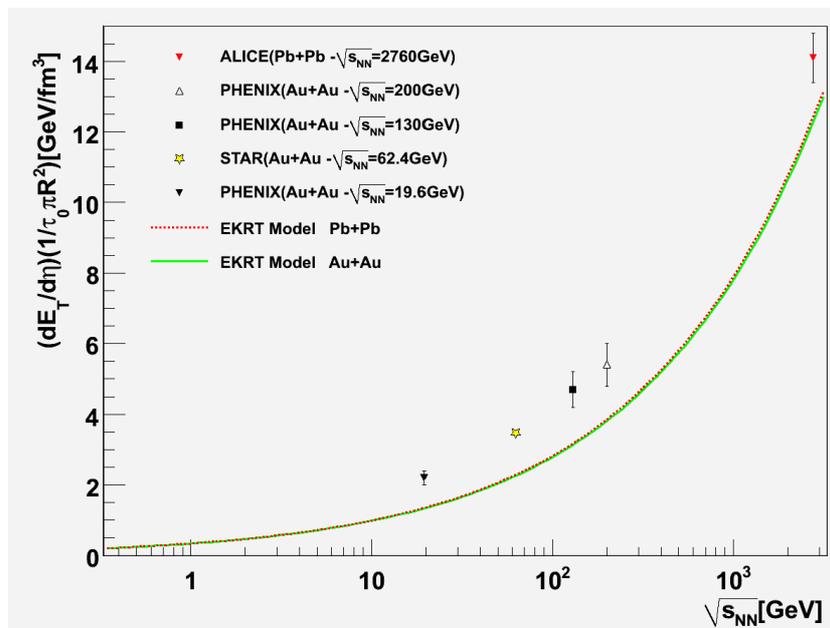


図1 生成エネルギー密度分布

目次

1	序論	7
1.1	導入	7
1.2	クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相	8
1.3	高エネルギー原子核衝突	9
1.4	横方向エネルギー	10
1.5	Bjorken の生成エネルギー密度	10
1.6	本研究の目的	11
2	実験背景	12
2.1	LHC 加速器	12
2.2	ALICE (A Large Ion Collider Experiment)	13
2.3	PHOS(PHOnon Spectrometer)	14
2.4	ITS(Inner Tracking System)	16
2.5	V0	16
2.6	シミュレーション	17
2.7	ミニマムバイアストリガー	18
3	解析	19
3.1	シミュレーションの設定	19
3.2	使用しないクリスタルの決定方法	20
3.3	測定方法と補正係数	20
3.4	補正係数の決定方法	20
4	解析結果	22
4.1	反応しないクリスタルの決定	22
4.2	ノイズの除去	22
4.3	使用しないクリスタルの決定	23
4.4	電磁力ロリーメータの性質による補正の結果	24
4.5	検出器の幾何学的アクセプタンスによる補正係数	25
4.6	横方向エネルギー分布	26
5	考察	27
5.1	横方向エネルギー分布と生成粒子数	27
5.2	生成粒子数と補正係数	29
5.3	生成エネルギー密度	31

6	結論	34
7	付録	35
7.1	重心系衝突エネルギー \sqrt{s}	35
7.2	ラピディティ y と擬ラピディティ η	36
7.3	電磁カロリメータと MIP(Minimum Ionizing Particle)	36
8	謝辞	39

図目次

1	生成エネルギー密度分布	2
2	素粒子の階層構造。水原子は原子核と電子から出来ており、原子核は陽子と中性子から構成されている。さらに陽子と中性子はクォークから出来ている。[2] . . .	8
3	QGP 相の略図 [4]	9
4	高エネルギー原子核衝突の時間経過のイメージ。[4]	10
5	CERN の LHC 加速器 [7]	12
6	ALICE 実験に参加している国々。[8]	14
7	ALICE 検出器のイメージ図。[8]	14
8	PHOS 検出器のイメージ図。最終的には 5 モジュール搭載予定で、現在は右から 3 つのモジュールが搭載済みである。[9]	15
9	クリスタルの座標。横軸を row、縦軸を col と呼び、座標でクリスタルの位置を特定出来るようになっている。この座標は各モジュールごとにある。[10]	15
10	PHOS 検出器のクリスタルの写真。左図の座標は実際にこの写真のようになっており、一番左下 (row,col)=(0,0)、左上が (row,col)=(63,55) となっている。[10] .	15
11	GEANT3 で再現された ALICE 検出器 [11]	17
12	現在装備されている検出器で黒の部分が ITS,TPC で、その周りの濃い緑色が TRD が装備されている箇所、薄い緑の部分はまだ装備されていない部分である。さらに外側の青色の部分に TOF が装備されている。そして底部の赤色の検出器が PHOS である。	19
13	PHOS 検出器で再構成された不変質量分布 [10]。	22
14	ミニマムバイアスイベントで各クリスタルの反応した回数。この図を見ると、100 回以上反応しているクリスタルと 1 回も反応していないクリスタルに二極化している。全イベントを通して偶然粒子が入射してこなかった確率は非常に低い。よって、この図の白いクリスタルは反応しないクリスタルである。	23
15	ミニマムバイアスイベントを通して、一度もエネルギーを検出しなかったクリスタルの結果。赤色の部分が使用できないクリスタルである。	24
16	全てのイベントを通して一つのクリスタルが測定したノイズ数。QED 反応で PHOS に入射する粒子は全イベントで数十個程度であり、統計的にあるところにピークを作る。この青い部分はその QED 反応のピークである。横軸の左端にピークと同じ程度の高さのピンがある。これは先に説明した反応しないクリスタルは、常に何も信号を出さないの、その信号数 0 のピークである。	25
17	ノイズクリスタルのマップ	26
18	使用しないクリスタルのマップ。赤い部分のクリスタルは今回の実験では使用しなかったクリスタルである。	27

19	電磁カロリメータの性質による補正係数。セントラリティー 0~100 %の全衝突 のである補正係数を使用した。	28
20	PHOS 検出器の幾何学的性質による補正係数。セントラリティー 0~100 %の全 衝突のである補正係数を使用した。この補正係数は検出器の幾何学的アクセプタ ンスに由来しているので、検出器の立体角に大きく依存している。	28
21	実データの横方向エネルギー分布。縦軸を対数にしてある。この図の小さい横方 向エネルギーの収量が非常に多い。これは、前に説明した QED 反応が原因で、 検出器が衝突が起きたと判断したが、実際は強い相互作用による非弾性散乱が起 こっており、粒子が一つも PHOS に入射しなかったイベントである。	29
22	100MeV 以上のイベント数で規格化したシミュレーションと実データの横方向エ ネルギー分布	30
23	反応クリスタル 10 個以上のイベント数で規格化したシミュレーションと実データ の反応クリスタル数分布。	30
24	図 22 のシミュレーションを 100GeV 以上の平均値が一致するように規格化した 図である。色が付いている部分は、中心衝突イベントの横方向エネルギーを示し ている。	32
25	今までの実験結果と本研究結果を同時にプロットした。鉛鉛衝突と金金衝突の MKRT モデル曲線はほぼ同じと見なしてよい。この MKRT モデル曲線は、絶対 値は小さく見積もっているが、増加の傾向は再現している。[3][13][15]	33
26	電磁シャワーのイメージ [10]	37
27	粒子種別の物質中を通過するときの損失エネルギー [12]	38

1 序論

この章では、本研究の理解に必要な基礎知識や物理的背景を説明し、さらに、研究の動機と目的について述べる。

1.1 導入

世界を形成する最も基本的な物質（素粒子）は何か。人間は古くからこの問題を考えてきた。紀元前の古代ギリシャの哲学者たちは、すべての物質は空気、火、水、土の4つからできているという考えを唱えたが、それから約2000年後、人類は科学を大いに発展させ、物質は原子から構成されていることがわかった。しかし、その原子も陽子、中性子、電子から構成されていることがわかった。このように、時代が進むにしたがって、人類にとっての素粒子は変化していき、現在では、素粒子についての考えは「標準模型」[1]としてまとめられている。

標準模型とは現代の素粒子物理学が基本としているモデルである。標準とは素粒子物理学の標準規格という意味であり、電磁相互作用と弱い相互作用を統一して記述する電弱統一理論と、強い相互作用を記述する量子色力学(QCD)がその内容である。このモデルでは、力はゲージボソンという粒子によって伝えられるとしている。相互作用の種類によってこのゲージボソンの種類も異なっていて、電磁相互作用は光子、弱い相互作用はウィークボソン、強い相互作用はグルーオンがそれぞれの相互作用に対応したゲージボソンである。このモデルでの素粒子はレプトンとクォークであり、それぞれ6種類存在する。

レプトンは電荷を持っている種類と、電荷を持っていない種類が存在する。電荷を持っているものは電磁相互作用と弱い相互作用が働き、持っていないものは弱い相互作用のみが働く。一番有名なのは原子の構成物質である電子である。他にミューオン、ニュートリノなどが存在する。

クォークは電荷と色荷を持っており電磁相互作用、強い相互作用が働く。この色荷は3色存在し(反色荷を含むと6種類)、クォークから作られる構成物は、色荷が混ざり合い、自然界では無色になっている。このように色荷を持っており、強い相互作用が働く粒子をハドロンと呼んでいる。ハドロンをさらに細かく分けると、バリオンとメソンに分けられる。バリオンとはクォーク3つから構成されているフェルミオンである。メソンとはクォークと反クォークから構成されたボソンである。先ほど述べたようにハドロンはクォークから構成されており、それぞれのクォークは強い相互作用で結合している。この強い相互作用は漸近的自由性と呼ばれる性質をもっている。電磁相互作用や弱い相互作用は、作用し合う粒子の距離が離れれば離れるほど弱くなる。一方、この漸近的自由性をもつ強い相互作用は、作用し合う粒子の距離が離れれば離れるほど引力が強くなる。その結果、強い相互作用で結合しているクォークは決してハドロンから単独で取り出すことができない。このことをクォークの閉じ込めという。しかし、超高温、高密度状況下では、クォークがこの閉じ込めから解放される状態へ相転移すると考えられている。この状態をクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)相と呼ぶ。

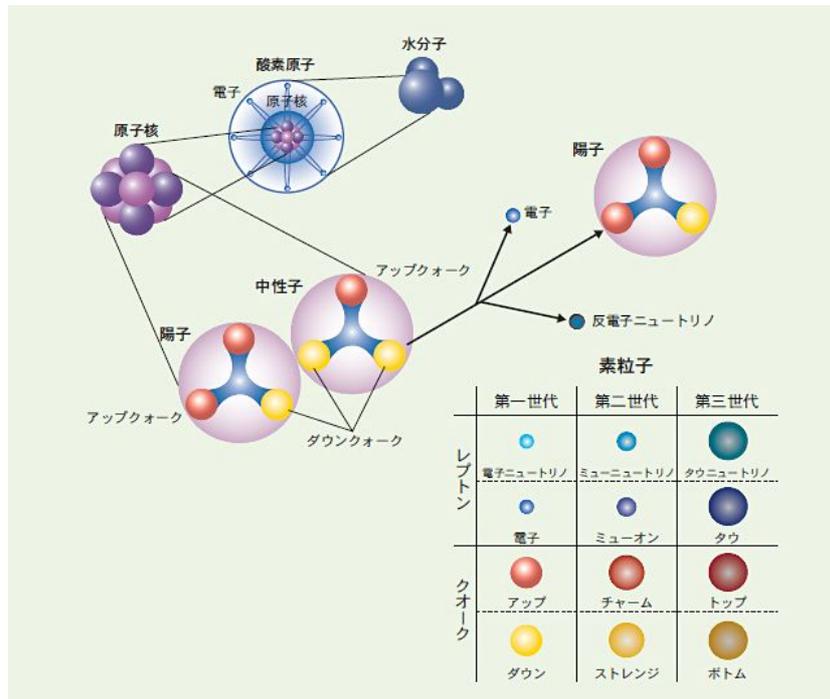


図 2 素粒子の階層構造。水原子は原子核と電子から出来ており、原子核は陽子と中性子から構成されている。さらに陽子と中性子はクォークから出来ている。[2]

1.2 クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相

先も述べたように、クォークは強い相互作用の性質のためにハドロンの中に閉じ込められている。しかし、高密度にすると、ハドロンとハドロンの境界がなくなり、その系で基本となる粒子がハドロンからクォークに変化する。この状態はクォークが閉じ込めから解放されていると考えることができる。

また高温にするとハドロンの熱運動が激しくなり、ハドロン同士が非弾性散乱をする回数が増え、中間子を生成して粒子数が増えていく。すると密度が増大し、先ほどの理由でクォークが閉じ込めから解放されると期待できる。

QGP 相に相転移する指標にエネルギー密度がある。エネルギー密度が $\epsilon_c \sim 1\text{GeV}/\text{fm}^3$ 以上になるとクォークが解放されていると考えられている [3]。

QGP 相はクォークとグルーオンの多体系で、気体に似た性質を示すだろうと考えられていた。しかし、Brookhaven National Laboratory(BNL) の RHIC での実験結果は、QGP は完全流体のように振舞うことを示唆した。この発見で、QGP 相は通常の状態 (ハドロン相) の物性とまったく異なっていると考えられている。

自然界ではビッグバンの数マイクロ秒後の超高温、高密度であった初期宇宙が、この QGP の状態であったのではないかと考えられている。現在、このような超高温、高密度は高エネルギー原子

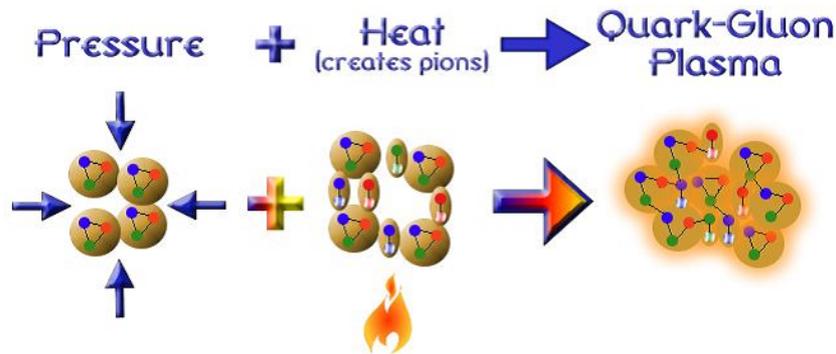


図3 QGP相の略図 [4]

核衝突で再現可能である。

1.3 高エネルギー原子核衝突

高エネルギー原子核衝突実験の目的は、実験室で QGP 相を生成し、その性質を調べることにより、摂動、非摂動論的量子色力学の実験的検証及び、宇宙誕生後の時空発展の理解である。

衝突実験のエネルギーの尺度としてよく用いられているのが、陽子、反陽子の場合は、重心系衝突エネルギー \sqrt{s} で、重イオン同士の場合は、核子対あたりの重心系衝突エネルギー $\sqrt{s_{NN}}$ の値を用いる。これらの値で衝突エネルギーの比較をする。(付録 7.1 参照)

1.3.1 高エネルギー原子核衝突の時間経過

高エネルギー原子核衝突は Bjorken 描像 [5] がよく実験結果と一致しており、現在は衝突の経過はこの描像で示されている。Bjorken 描像での高エネルギー原子核衝突の経過を説明する。

- 高エネルギー原子核衝突実験では、原子核の集団（バンチ）をほぼ光速まで加速させる。このとき、ほぼ光速のために相対論的効果が現れ、バンチがローレンツ収縮により進行方向に収縮しディスク状になる。
- ディスク状のバンチ同士が衝突すると互いにすり抜け、その間の領域に高温、高密度状態ができ、多数のクォークや反クォーク、グルーオンが生成される。この時が QGP 相と呼ばれる状態である。この領域は内部の圧力により光速に近い速さで、進行方向と垂直方向に膨張していく。
- 急激な膨張より温度と密度下がっていく。すると解放されていたクォークやグルーオンが再結合しハドロンを形成しはじめる。しかし、まだ一部のクォークは散乱などの相互作用をしている。
- さらに膨張が進み温度が下がってくると、新しい粒子生成、粒子崩壊を引き起こすハドロン間の非弾性散乱を起こさなくなり、粒子数が固定される。このことを化学的凍結 (chemical freeze-out) と呼ぶ。

- さらに膨張が進み、粒子間距離が大きくなり平均自由行程を超えると、ハドロン間の弾性散乱さえもなくなる。弾性散乱がなくなるということは、粒子の運動量が固定され、変化しなくなるということで、このことを運動量凍結 (Kinematical freeze-out) と呼ぶ。
- 運動量凍結後の粒子は、すべてハドロンの状態で拡散していく。我々が直接観測できるのは最終的な運動量凍結後のハドロンである。

Bjorken 描像では以上の行程で高エネルギー原子核衝突が起こっているとされている。上で述べたように、最終的に観測できるのは、凍結した後の粒子のみである。しかし、この粒子たちは多くの物理的情報を持っており、この粒子を調べることによって QGP 相の性質の測定を行うことができる。

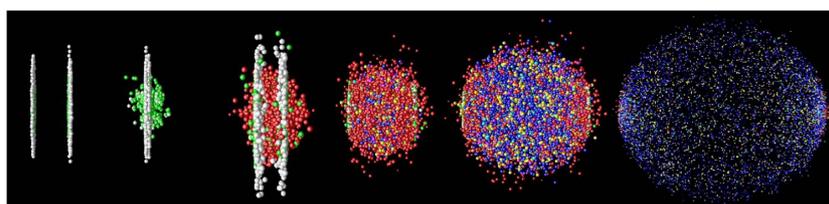


図 4 高エネルギー原子核衝突の時間経過のイメージ。[4]

1.4 横方向エネルギー

原子核衝突が起こる前は、エネルギーの流れはビーム軸方向のみである。しかし、先に説明したように衝突後の QGP 相領域は、ビーム軸方向と垂直の方向に膨張していく。この垂直方向に流れるエネルギーを横方向エネルギー E_T と呼び、

$$E_T = \sum_i E_i \sin \theta_i \quad (1)$$

で定義される。ここで E_i は 1 イベント中の粒子一つ一つのエネルギー、 θ_i はそれらの粒子とビーム軸の間の角度であり、この積を 1 イベントごとに和をとる。

1.5 Bjorken の生成エネルギー密度

Bjorken 描像では、横方向エネルギーと生成エネルギー密度とが密接に関係しており、横方向エネルギーを測定することによって、このエネルギー密度を実験的に求めることができる。その関係式は

$$\epsilon_{0,B_j} = \frac{dE_T}{dy} \frac{1}{\tau_0 \pi R^2} \quad (2)$$

と表される [5]。この ϵ_{0,B_j} は生成エネルギー密度、 dE_T/dy は単位ラピディティあたりの横方向エネルギー、 τ_0 は衝突から熱平衡に達した固有時間で、高エネルギー衝突では $\tau_0 \sim 1\text{fm}/c$ と近

似できる。 R は原子核同士が衝突した領域の半径である。

生成エネルギー密度は、ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の重イオン衝突型加速器 (RHIC) で行なった、 $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ の金金衝突実験において、 $\epsilon_{0,B_j} = 4.9 \pm 0.3 \text{GeV}/\text{fm}^3$ と測定された [3]。このエネルギー密度は QGP 相の臨界エネルギー密度 ϵ_c を超えており、生成エネルギー密度の面からも QGP 相生成が強く示唆された。

1.6 本研究の目的

本研究では、2010 年 11 月に行った $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$ の鉛鉛衝突のシミュレーションを行い、ALICE 検出器の電磁カロリメータである PHOS を用いて中心衝突の生成エネルギー密度を測定する。シミュレーションで生成エネルギー密度の測定を再現するときに必要な補正係数を、2010 年 11 月に LHC において ALICE 検出器が検出した実データに適用し、生成エネルギー密度を求めた。しかし、一般に生成エネルギー密度を測定するときは、電磁カロリメータ以外の検出器も使用する。今回は電磁カロリメータのみを用いて生成エネルギー密度を求め、今後行う精密測定の基礎を築くことを目的とした。

2 実験背景

この章では、本実験の舞台となる加速器、検出器、さらに我々が参加している実験グループの概要を説明する。

2.1 LHC 加速器

LHC とは欧州合同原子核機構 (CERN) が建設した大型ハドロン衝突型加速器 (Large Hadron Collider) の略で、世界最大の衝突型円型加速器である。この加速器は、スイスとフランスの国境上に、地上から約 100 メートル地下のトンネル内に設置され、周長が約 27km もある。LHC は世界最大の衝突エネルギーを実現でき、陽子 + 陽子衝突で $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ 、鉛 + 鉛衝突では $\sqrt{s_{NN}} = 5.5\text{TeV}$ の衝突エネルギーに到達できるように設計されている。LHC が稼働するまでのハドロン衝突型加速器の世界最高衝突エネルギーは、RHIC で記録した、陽子 + 陽子衝突の $\sqrt{s} = 500\text{GeV}$ 、原子核衝突では金 + 金、銅 + 銅の $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ であるが、2009 年 11 月、この加速器は本格稼働を始め、2010 年 3 月に陽子 + 陽子衝突で衝突エネルギーが 7 TeV に達した。そして、ついに 2010 年 11 月、鉛 + 鉛衝突が重心系衝突エネルギー 2.76TeV で行った。この LHC では大きく 6 つの実験グループが研究を行っており、ここで紹介しておく。[6]

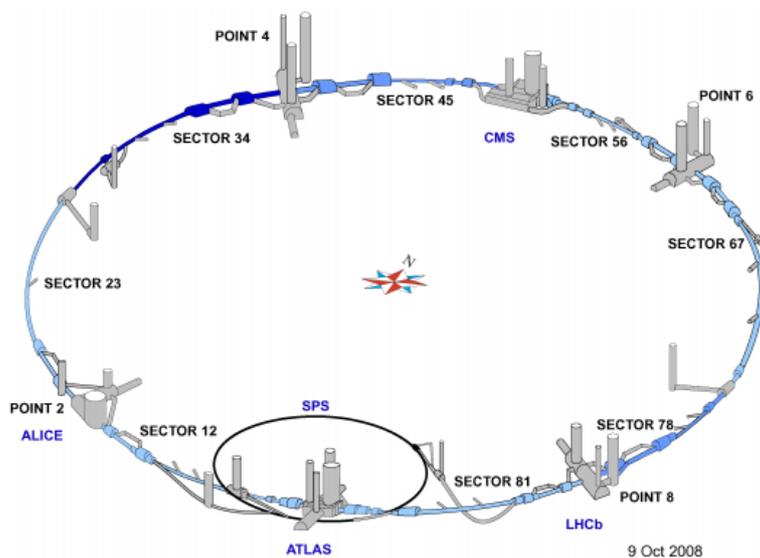


図 5 CERN の LHC 加速器 [7]

- ATLAS(A Toroidal LHC Apparatus)

このグループの主な目的は、ヒッグス粒子や超対称性粒子 (SUSY 粒子) を発見することである。この実験の検出装置は高さ 22 m、全長 44 m、重さ 7000 t という巨大な汎用型検出

器で、世界 37 カ国から約 1800 人の研究者が参加している。

- CMS(Compact Muon Solenoid)

このグループの目的は ATLAS とほぼ同じであるが、ATLAS とは異なった視点から研究を進めている。この実験の検出装置も広範囲の調査が可能な汎用型であり、世界 37 の国々から 2000 人以上もの研究者で研究を進めている。

- ALICE(A Large Ion Collider Experiment)

我々広島大学が参加している実験グループである。LHC の実験グループで唯一重イオン衝突実験に特化した検出器を用いているのがこの ALICE グループである。詳しい説明はのちほど行う。

- LHCb(LHC-beauty)

このグループは対称性の破れの解明、標準理論の検証を行うことを目的としている。世界 13 カ国から 650 人の研究者が実験を行っている。

- TOTEM(TOtal Cross Section,Elastic Scattering and Difference Dissociation)

LHC のビームの非常に近いところで生成される粒子を検出する。規模は先ほどまでのグループより小規模で 8 カ国から 50 人の研究者が研究をしている。

- LHCf(LHC-forward)

この実験は、実験室で宇宙線をシミュレートするために必要なデータ収集を主な目的としている。それにより宇宙線実験の理解を深めることに役立つとされている。このグループは LHC の中で一番小規模で、4 カ国から 22 名の研究者が参加している。

2.2 ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

2.2.1 ALICE Collaboration

ALICE 実験は LHC 加速器で唯一重イオン衝突実験に特化した実験である。ALICE 実験の主な目的は、RHIC 加速器で確認された QGP の定量的な性質の理解であるが、より多くの物理をできる限り測定できるように設計されている。この実験には世界 30 カ国、97 研究機関の約 1000 人の研究者が研究を行っている。日本からは広島大学、東京大学、筑波大学が参加している。

2.2.2 ALICE 検出器

ALICE 検出器全体の大きさは、高さ 16 m、幅 16 m、全長 26 m、重さ 10000 t という大きな検出器である。検出器を小分けにすると、性能、目的の違う 18 種もの検出器に分けられる。その中でも PHOS と呼ばれる検出器は、広島大学が開発した電磁カロリメータである。電磁カロリメータは PHOS の他に EMCal が搭載されている。それと粒子が衝突したかどうかを測る、ITS(Inner Tracking System) と V 0 が装備されている。PHOS,ITS,V 0 については本研究で用いた検出器なので後で詳しく説明する。その他に、粒子種の判別と運動量を測定する TPC(Tracking Projection Chamber)、TPC で判別できない範囲の運動量を持った粒子の判別を行う TOF(Time

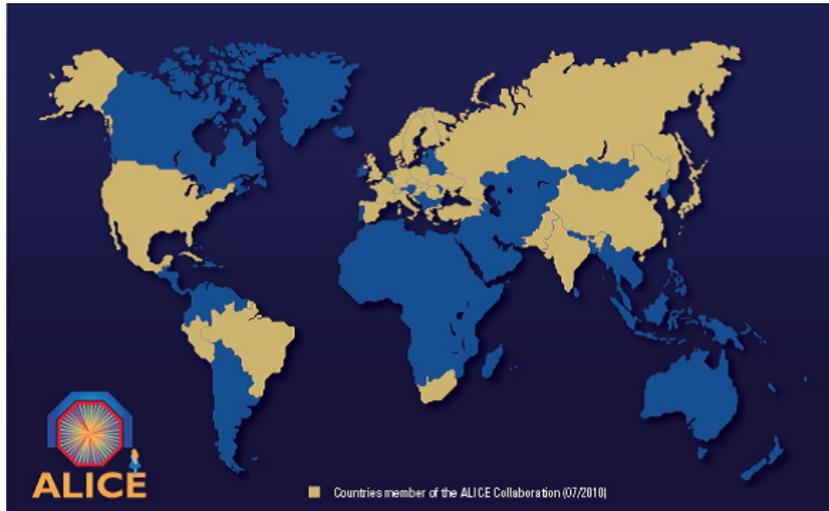


図 6 ALICE 実験に参加している国々。[8]

Of Flight)、電子を正確に同定する TRD(Transition Radiation Detector) などがある。これらの検出器を組み合わせると様々な現象を測定することができる。

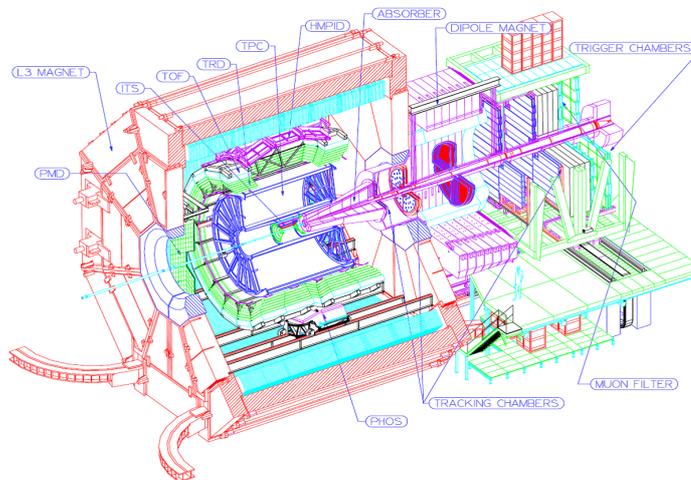


図 7 ALICE 検出器のイメージ図。[8]

2.3 PHOS(PHOton Spectrometer)

PHOS は広島大学が開発した電磁カロリメータである。1 モジュールあたり 3584 チャンネルあり、今現在は 3 モジュール搭載されており、最終的には 5 モジュール搭載予定である。5 モジュール搭載されると方位角で $220^\circ < \phi < 320^\circ$ 、擬ラピディティ領域 (付録 7.2) で $-0.12 < \eta < 0.12$ の領域をカバーできる。PHOS は二粒子位置分解能に優れており、エネルギー分解能については

世界最高の精度を誇っている。よって原子核衝突のような多くの粒子が生成される衝突において、衝突時に出てきた光子一つ一つの正確な位置、エネルギーを測定することができる。

PHOS は鉛タングステン酸 (PWO) のクリスタルから構成されており、1 モジュールあたり 3584 本のクリスタルがある。クリスタルは識別できるように座標で表される。横軸、縦軸を row,col と呼び、1 モジュールに row は 0 ~ 63、col は 0 ~ 55 までである。どのクリスタルを示しているかわかるようになっている。

一般的に無機から作られている電磁カロリメータは、有機から作られているそれよりも光量が少ない。しかし、PWO の場合は温度が 1 下がるごとに光量が約 3 % 上がる。このため ALICE 実験では PHOS を -25 に保って稼働させている。



図 8 PHOS 検出器のイメージ図。最終的には 5 モジュール搭載予定で、現在は右から 3 つのモジュールが搭載済みである。[9]

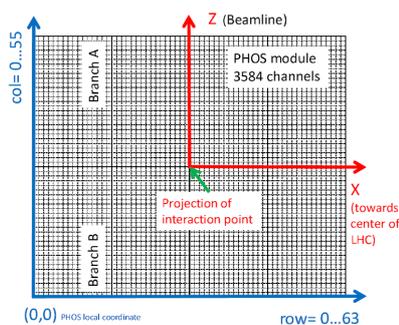


図 9 クリスタルの座標。横軸を row、縦軸を col と呼び、座標でクリスタルの位置を特定出来るようになっている。この座標は各モジュールごとにある。[10]



図 10 PHOS 検出器のクリスタルの写真。左図の座標は実際にこの写真のようになっており、一番左下 (row,col)=(0,0)、左上が (row,col)=(63,55) となっている。[10]

2.4 ITS(Inner Tracking System)

ITS は、粒子の衝突点を測定することが目的で、 $100\mu\text{m}$ よりも高い精度で測定出来る。さらに $200\text{MeV}/c$ 以下の低運動量の粒子の飛跡を検出して粒子識別もし、ITS の外側にある TPC の情報と組み合わせて、運動量と角度分解能を向上させる。V0 検出器と組み合わせてミニマムバイアストリガーとしても使用する。ミニマムバイアストリガーについては後で詳しく説明する。ITS はビームパイプに一番近い検出器で、擬ラピディティ領域で $-0.9 < \eta < 0.9$ を覆っている。

2.5 V0

V0 は二枚の円盤状のシンチレータから構成されており、ミニマムバイアストリガーになる。二枚のシンチレータはそれぞれ V0-A, V0-C と呼ぶ。この二枚のシンチレータは、ALICE 検出器の前方と後方にあり、V0-A は擬ラピディティ領域で $2.8 < \eta < 5.1$ 、V0-C は $-3.7 < \eta < -1.7$ を覆っている。

2.6 シミュレーション

この章では使用したシミュレーションソフトとシミュレーションの流れを説明する。

2.6.1 HIJING(Heavy Ion Jet INteraction Generator)

HIJING とは陽子陽子、原子核原子核、陽子原子核衝突のジェットや粒子生成を再現するイベントジェネレータである。標準模型を基に設計されており、Monte Carlo 法を用いて計算され、今まで確認された粒子崩壊モード、様々な物理量分布の実験結果を再現する様に設計されている。さらに衝突原子核種、Impact parameter、 $\sqrt{s_{NN}}$ などのパラメータを設定することができる。

2.6.2 GEANT3 (GEometry ANd Tracking 3)

GEANT3 とは粒子が物質中を通過する際の様々な相互作用を再現するシミュレーションソフトである。このシミュレーションは高エネルギー物理実験のために作られたが、今日では医療などの日常生活にも応用されている。この GEANT3 で ALICE 検出器を再現し、HIJING と組み合わせることによって、ALICE 実験を再現することができる。さらに検出器を有無を設定でき、検出器の実験結果への影響を調べることができる。

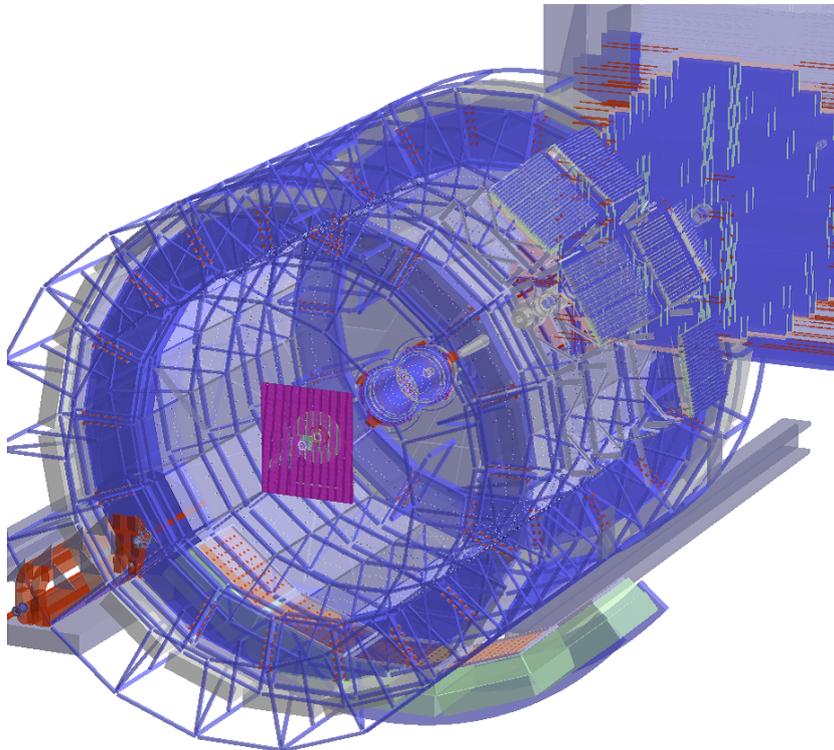


図 11 GEANT3 で再現された ALICE 検出器 [11]

2.6.3 シミュレーションの流れ

シミュレーションについて手順を追いながら説明する。本研究では $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$ の鉛 + 鉛衝突をシミュレーションした。

- イベントジェネレータである HIJING で $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$ の鉛鉛衝突を再現し、衝突後の粒子を生成させる。そして GEANT3 で、これらの粒子が検出器などを通過する際に起こす、エネルギー損失、粒子生成などの相互作用を再現する。この段階で、生成粒子の種類、運動量、エネルギーなどの情報すべてが保存される。
- 再現された損失エネルギーなどの情報が検出器に伝わる。本物と同様に、そのアナログ信号がデジタル信号に変換される。
- 検出器が検知したデジタル情報から、検出粒子、検出位置、検出エネルギー情報などを再構成する。これらの情報は ESD(Event Summary Data) ファイルとして保存される。
- ESD から自分の知りたい情報を引き出し解析する。この時使用するマクロは実データ解析時にも使えるようになっている。

以上がシミュレーションの大きな流れである。

シミュレーションを行う大きな利点は、検出器からの情報と、実際の真値の両方を知ることが出来ることである。これより、相方を比較し補正係数などを求めることができる。

2.7 ミニマムバイアストリガー

ミニマムバイアストリガーとは、粒子と粒子が衝突したイベントのトリガーであり、他に何も条件をかけていない。本研究では、ITS と V0-A, ITS と V0-C, V0-A と V0-C の組み合わせの少なくとも一つに反応があれば、ミニマムバイアスイベントとしてそのデータを解析した。今回使用した実データのミニマムバイアスイベント数は 9893 イベントである。

3 解析

この章では本研究で行った解析の手法を説明する。

3.1 シミュレーションの設定

本研究で使用した HIJING と GEANT3 の諸設定を説明する。まずシミュレーション上で搭載する検出器であるが、本研究は $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$ の鉛 + 鉛衝突の実データの解析までを目標としているので、解析するデータ取得時の ALICE 検出器の情報を出来る限り再現するように設定した。しかし、本研究において影響を与えない検出器は、シミュレーション時間とデータ量を考慮し搭載を見送った。

今回使用した検出器は PHOS である。使用した実データ取得時は、PHOS は 3 モジュール搭載していた。PHOS に直接影響を与えるのは、ビーム軸と PHOS の間にある検出器である。図 12 は中央の白い部分がビームバレル、それを覆っている黒い部分が ITS と TPC である。それより外側の緑色の濃い部分が実際に TRD が装備されており、薄い緑が今後する箇所である。青色の部分には TOF が装備されている。一番外側の赤い部分に PHOS が装備されている。この図より、PHOS に影響を与える検出器は ITS、TPC、TOF である。よって、PHOS 以外にこの 3 つの検出器を搭載してシミュレーションを行った。さらに、実データ解析で使用しないクリスタルを、シミュレーション内でも再現する。この使用しないクリスタルの決定方法は後で詳しく説明する。

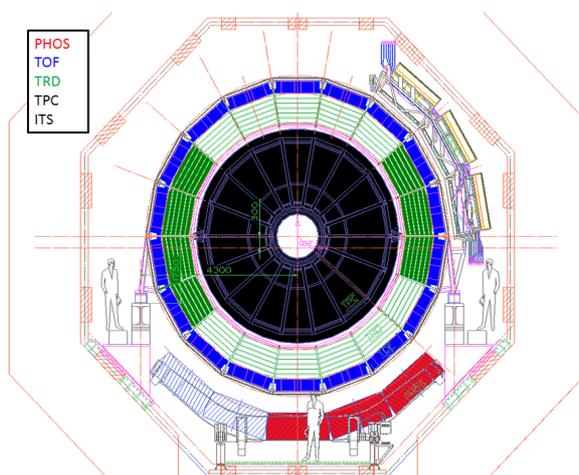


図 12 現在装備されている検出器で黒の部分が ITS,TPC で、その周りの濃い緑色が TRD が装備されている箇所、薄い緑の部分はまだ装備されていない部分である。さらに外側の青色の部分に TOF が装備されている。そして底部の赤色の検出器が PHOS である。

3.2 使用しないクリスタルの決定方法

検出器には何らかの技術的理由で正常に作動していないクリスタルが存在する。そのクリスタルは正確なエネルギーを測定できないので解析時に取り除かなくてはならない。今回の使用しないクリスタルは、次の二つの条件で決めた。

- すべてのイベントを通して一度もエネルギーを検出しなかったクリスタル。
- 粒子衝突が起きていないイベントで、閾値を超えるエネルギーを検出しているクリスタル。

上のどちらか一方の条件を満たしているクリスタルはシミュレーションと実データの両方で解析をせずに排除した。今回、30MeV 以上のエネルギーから横方向エネルギーを測定するので、二つ目の条件の閾値は 30MeV に設定した。

3.3 測定方法と補正係数

今回は PHOS のクリスタル (cell) 単位でエネルギーを測定した。エネルギーの測定結果とその真値の値は異っており、その原因はさまざまである。その PHOS の測定値と真値との関係式は、

$$\frac{E_T}{dy}|_{\text{真値}} = C_0 \sum_i E_{Ti}|_{\text{PHOS}} \quad (3)$$

$$E_{Ti}|_{\text{PHOS}} = \sum_{\text{cell}} C_1 E_{\text{cell}} \sin \theta_{\text{cell}} \quad (4)$$

と表せる。ここの C_0 と C_1 は補正係数である。この C_0 をもう少し詳しく見ると、

$$C_0 = \frac{1}{f_{EM}} \frac{1}{f_{acc}} \quad (5)$$

と示せる。ここの f_{EM} は電磁カロリメータの性質による補正係数、 f_{acc} は検出器の幾何学的性質による補正係数である。次に C_1 はエネルギー較正の補正係数と呼ばれているものである。

3.4 補正係数の決定方法

先ほど示した補正係数の求め方を説明する。

3.4.1 電磁カロリメータの性質による補正

電磁カロリメータは光子と電子・陽電子しか正確なエネルギーを測れず、ハドロン粒子などの MIP が入射した時は正確なエネルギーを測れない(付録 7.3 参照)。そこで必要になってくるのが、測定した値と真値の違いを埋める補正係数である。この補正係数は 1 イベントごとに、電磁カ

ロリーメータが測定した値と、電磁カロリメータに入射したすべての粒子のエネルギーの比をとる。

$$f_{EM} = \frac{\text{PHOS が測定したエネルギー } (|\eta| < 0.12, \phi = 60^\circ)}{\text{PHOS に入射した全ての粒子のエネルギー } (|\eta| < 0.12, \phi = 60^\circ)} \quad (6)$$

この比をシミュレーションで求め、ヒストグラムにして、その平均値を補正係数とした。

3.4.2 検出器の幾何学的性質による補正

検出器の構造上、生成粒子の收容範囲は限られており、全粒子を受けることができない。この検出器に入らなかった粒子の数を見積もり、補正を行わなければならない。

現在の PHOS は 3 モジュールで、方位角を $260^\circ < \phi < 320^\circ$ 、擬ラピディティは $-0.12 < \eta < 0.12$ をカバーしている。しかし、生成粒子は $0^\circ < \phi < 360^\circ$ 満遍なく生成し、飛散する。よって方位角で $0^\circ < \phi < 360^\circ$ に飛散する全粒子のエネルギーと、検出器に入射した粒子のエネルギーの比が補正係数になる。その補正係数は、

$$f_{acc} = \frac{\text{PHOS に入射した全ての粒子のエネルギー } (|\eta| < 0.12, \phi = 60^\circ)}{\text{全生成粒子のエネルギー } (|\eta| < 0.5, \phi = 360^\circ)} \quad (7)$$

となる。この補正係数も電磁カロリメータの性質による補正と同様の方法で求めた。

3.4.3 エネルギー較正の補正

電磁カロリメータはエネルギーを正確に測定するために、入力信号と出力エネルギー値を較正しなければならない。PHOS 検出器の較正作業は現在も進行中で、まだ完全に較正出来ていない。今回使用した実データのエネルギーも較正途中のデータであり正確性に欠けている。しかし、全クリスタルで平均した較正係数の平均値を出すことができる。その方法は、測定データから π^0 中間子の不変質量を再構成し、 π^0 中間子の不変質量の真値と比較する方法である。 π^0 中間子の不変質量は 135MeV [12] と知られており、そこからのずれが較正のずれということになる。図 13 は実際に PHOS 検出器で測定された不変質量分布である。この図では π^0 中間子の不変質量は $125 \pm 2\text{MeV}$ となっており、真値より 7.4 %低い値となっている。つまり、エネルギー較正が全クリスタルの平均で 7.4 %ずれている。これらより本実験では、エネルギー較正の補正係数は、

$$C_1 = 1.07 \pm 0.01 \quad (8)$$

となる。[10]

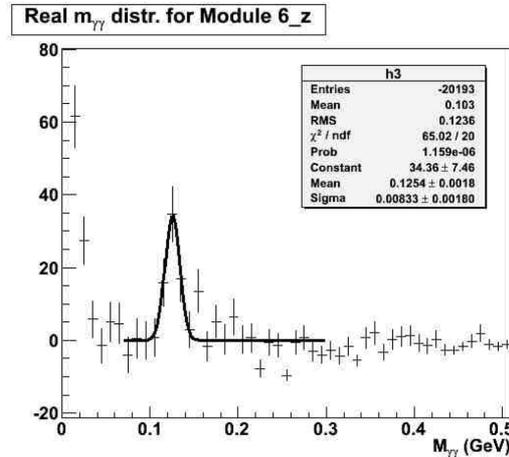


図 13 PHOS 検出器で再構成された不変質量分布 [10]。

4 解析結果

この章では、解析の結果を順を追って説明する。

4.1 反応しないクリスタルの決定

図 14 は PHOS のところで説明した座標で示されており、横軸が row, 縦軸が col で表されている。この図はすべてのミニマムバイアスイベントを通して反応したクリスタル分布である。色がついたクリスタルがエネルギーを検出したクリスタルで、全て 100 回以上エネルギーを検出している。一方、白い部分は 1 回もエネルギーを検出しなかったクリスタルである。この結果から、全てのイベントを通して正常にエネルギーを検出出来るにも関わらず、偶然粒子が飛んで来ずにエネルギーを検出しなかった確率は非常に低い。よって、この図 14 で一度もエネルギーを検出しなかったクリスタルを、反応しないクリスタルとした。その結果が図 15 である。

4.2 ノイズの除去

ノイズクリスタルを決定するために、衝突が起きていないトリガーを用いた。しかし、衝突が起こらずに重イオン同士がすれ違った際に、QED 反応を起こすことがある。この反応は、重イオンは原子核の周りに電磁気的な空間が存在しており、この空間同士が光速で重なり合ったとき、光子や電子などを放出する現象である。この光子や電子が PHOS 検出器と反応しノイズとされてしまう。しかし、この反応で生成した粒子が、全イベントを通して PHOS に入射するのは数十個程度である。一方クリスタルが原因のノイズは常にノイズを出すので、先の QED 反応で PHOS に入射する粒子より多くなる。この違いを示したのが図 16 である。

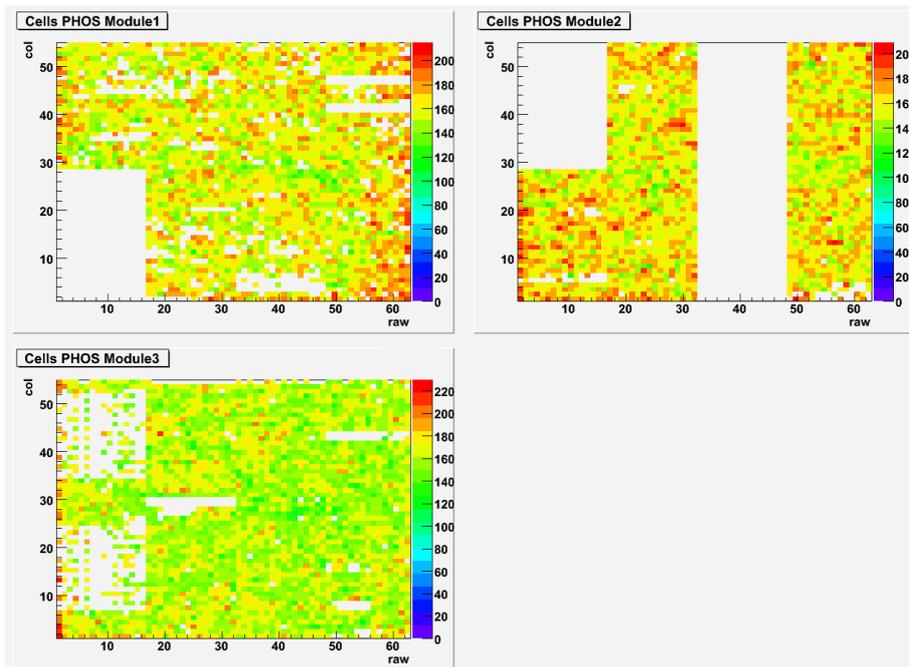


図 14 ミニマムバイアスイベントで各クリスタルの反応した回数。この図を見ると、100 回以上反応しているクリスタルと 1 回も反応していないクリスタルに二極化している。全イベントを通して偶然粒子が入射しなかった確率は非常に低い。よって、この図の白いクリスタルは反応しないクリスタルである。

この図の青色の部分は QED 反応によってノイズに数えられたもので、赤色の部分がクリスタル由来のノイズである。この図より、ノイズを検出した回数が 100 回以上のクリスタルをノイズクリスタルとした。決定したノイズクリスタルのマップを図 17 に示す。

4.3 使用しないクリスタルの決定

使用しないクリスタルはすべてのイベントで反応のなかったクリスタルと、ノイズのために正確にエネルギーを測定できないクリスタルである。この二つの条件を合わせたクリスタル数はモジュール 1 で 1064 本、モジュール 2 は 1528 本、モジュール 3 は 729 本であった。各モジュールの総クリスタルに対する使用しないクリスタルの割合は、モジュール 1 は 30 %、モジュール 2 は 43 %、モジュール 3 は 20 % である。使用しないクリスタルのマップを図 18 に示す。

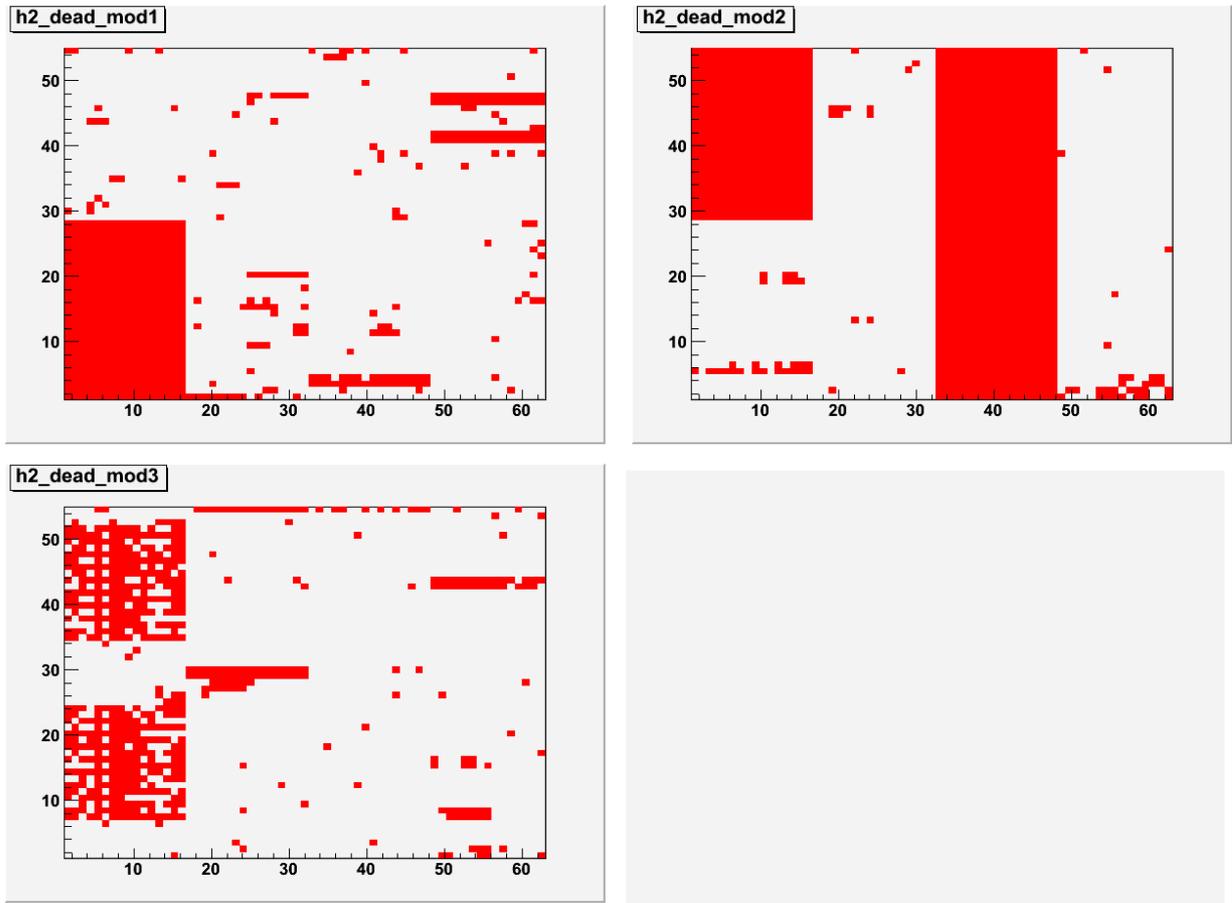


図 15 ミニマムバイアスイベントを通して、一度もエネルギーを検出しなかったクリスタルの結果。赤色の部分が使用できないクリスタルである。

4.4 電磁カロリメータの性質による補正の結果

図 19 は電磁カロリメータの性質による補正の結果である。ヒストグラムの数字は、セントラリティーという尺度で、0 % が正面衝突で、インパクトパラメータが 0 fm の時である。セントラリティーが 5 % 以下の衝突を中心衝突という。

今回は、全衝突のセントラリティーが 0 ~ 100 % の補正係数を使用する。その値は、

$$f_{EM} = 0.3430 \pm 0.0005 \quad (9)$$

となり、この値を電磁カロリメータの性質による補正係数とする。

重イオン衝突の場合、生成される粒子の 80 % 以上が π^0 、 π^+ 、 π^- 中間子である。そのうち π^0 中間子は 99 % の確率ですぐに二つの光子に崩壊するが、 π^+ 、 π^- 中間子は崩壊せずに PHOS に入射する。電磁カロリメータの性質上、光子と電子・陽電子のエネルギーは正確に測れるが、その他の荷電粒子は正確に測れずに最小電離損失エネルギーを測定してしまう。(付録 7.3 参照) よって

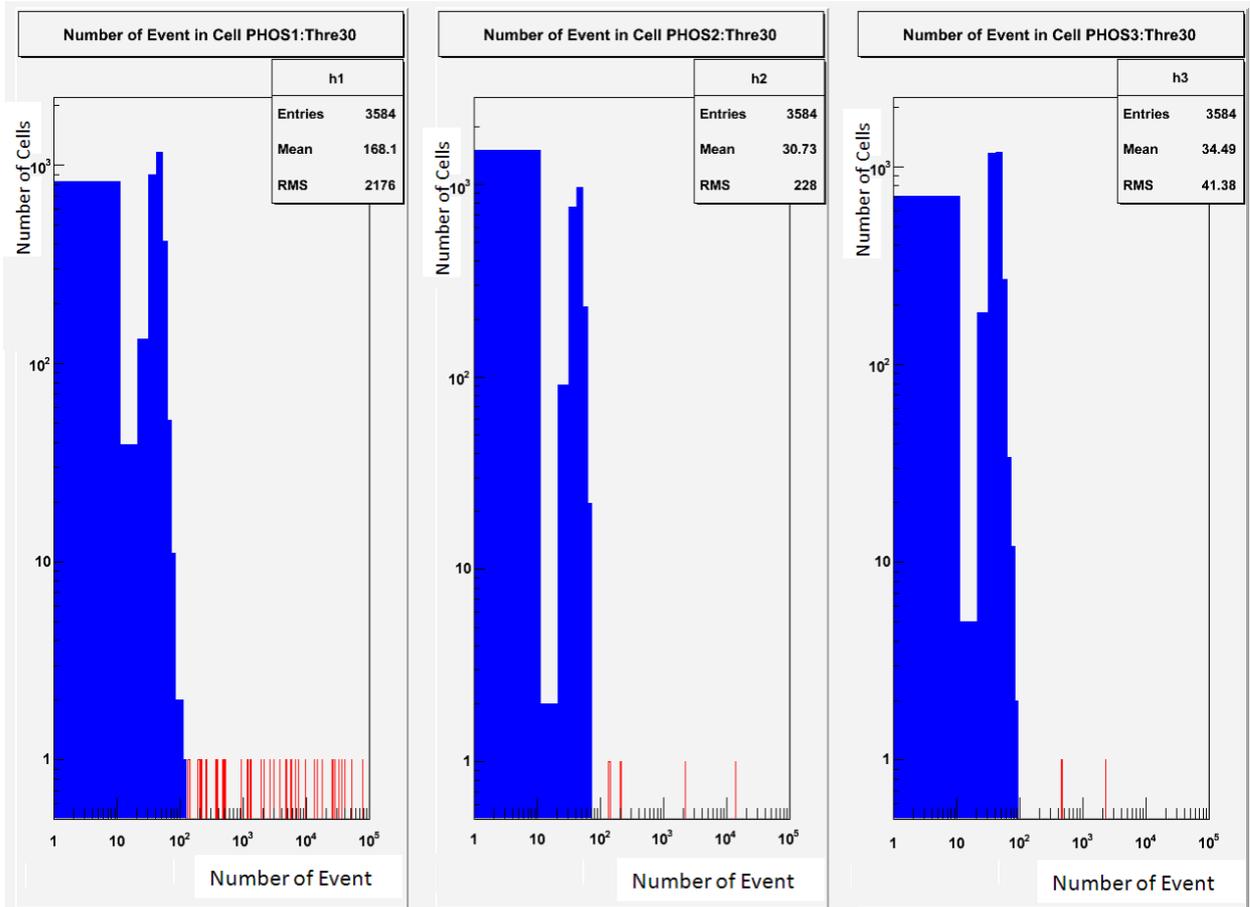


図 16 全てのイベントを通して一つのクリスタルが測定したノイズ数。QED 反応で PHOS に入射する粒子は全イベントで数十個程度であり、統計的にあるところにピークを作る。この青い部分はその QED 反応のピークである。横軸の左端にピークと同じ程度の高さのピンがある。これは先に説明した反応しないクリスタルは、常に何も信号を出さないの、その信号数 0 のピークである。

実際に PHOS で測定できるエネルギー量は、全体の 1/3 程度である。シミュレーションによって出した電磁カロリメータの性質による補正係数は 1/3 程度なので、この結果は妥当だと判断した。

4.5 検出器の幾何学的アクセプタンスによる補正係数

この補正係数も全衝突の平均である、セントラリティが 0 ~ 100 % を使用し、図 20 より、

$$f_{acc} = 0.04066 \pm 0.00007 \quad (10)$$

となり、この値を検出器の幾何学的アクセプタンスによる補正係数とする。

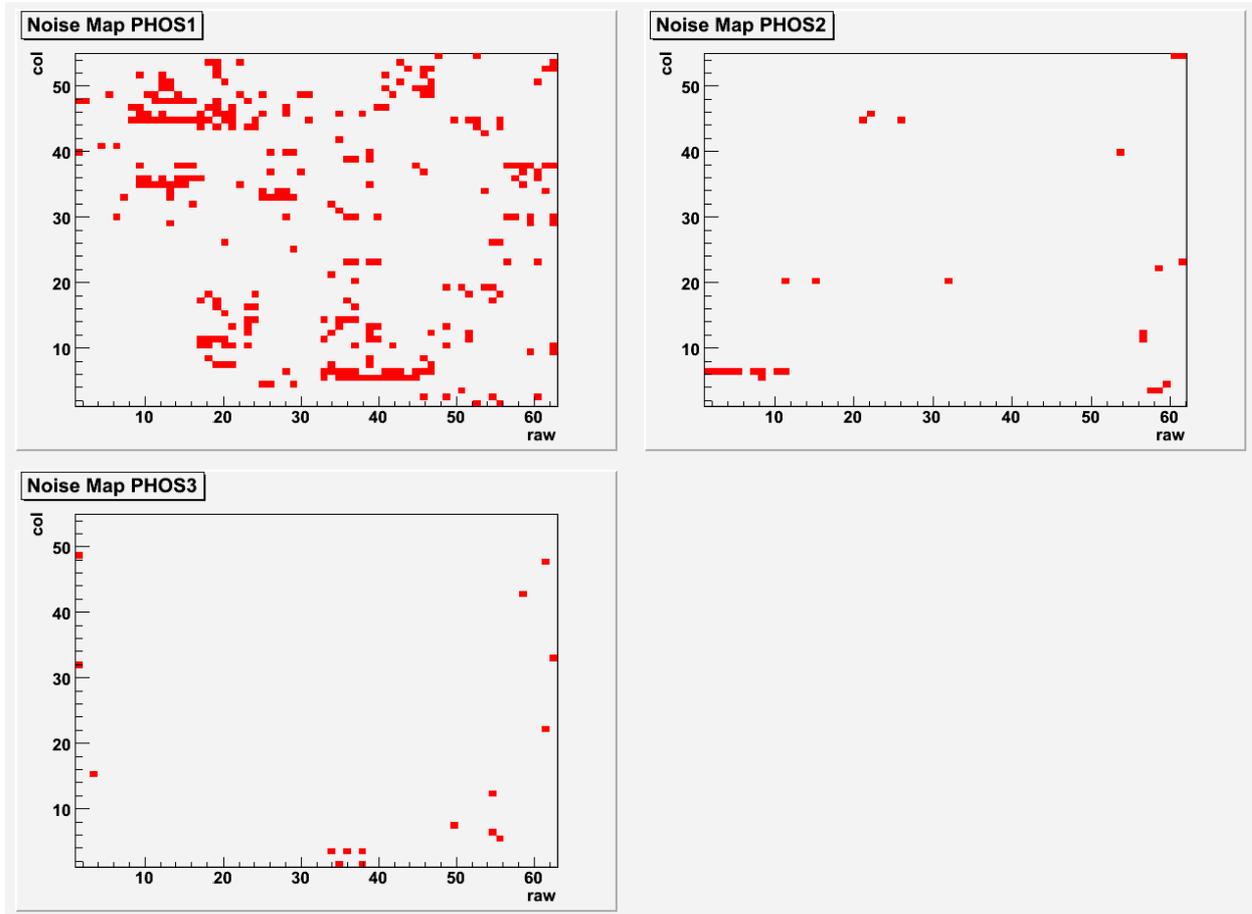


図 17 ノイズクリスタルのマップ

この補正係数は式 (8) で定義したが、この式は立体角のみに依存しているので、

$$f_{acc} = \frac{|\eta| < 0.12, \phi = 60^\circ \text{ の立体角}}{|\eta| < 0.5, \phi = 360^\circ \text{ の立体角}} \quad (11)$$

となる。分子は PHOS の立体角で $0.25sr$ 、分母は単位擬ラピディティあたりの立体角で $5.80sr$ である。この値を代入すると

$$f_{acc} = \frac{0.25sr}{5.80sr} = 0.043 \quad (12)$$

この値はシミュレーション結果とほぼ同じであり、シミュレーション結果は妥当だと判断した。

4.6 横方向エネルギー分布

先に求めた補正係数を実データに適用して、横方向エネルギー分布を求めた。その結果が図 21 である。この図は縦軸を対数にしてある。

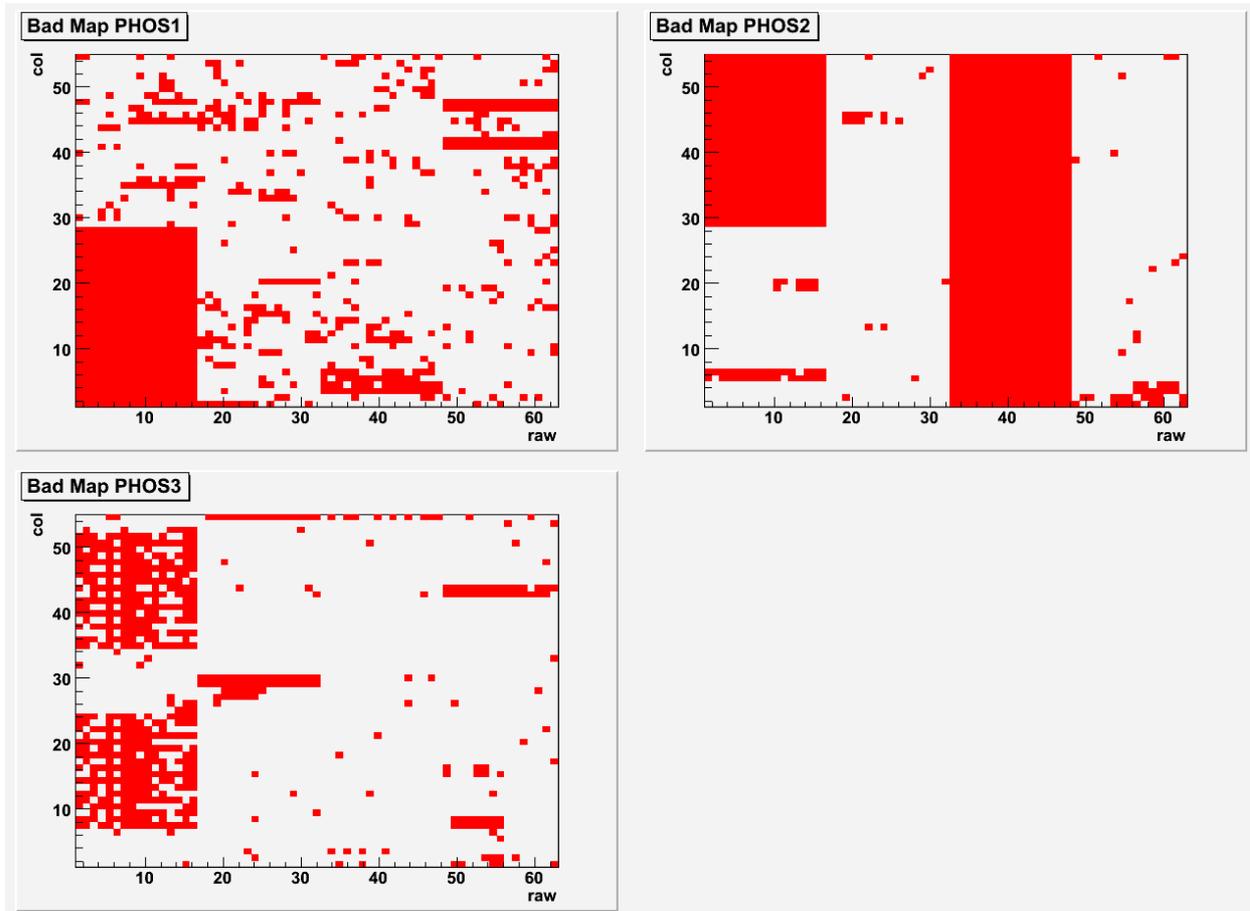


図 18 使用しないクリスタルのマップ。赤い部分のクリスタルは今回の実験では使用しなかったクリスタルである。

5 考察

5.1 横方向エネルギー分布と生成粒子数

横方向エネルギーをシミュレーションと実データを比較できるように、両方のヒストグラムを各イベント数で割り規格化する。ここで考慮しなければならないのが QED 反応である。QED 反応によって飛び出た光子や電子が、衝突トリガー検出器に入射して、強い相互作用による非弾性散乱が起きていないにもかかわらず、衝突が起これたと間違っただ判断をすることが多々ある。この結果、横方向エネルギー分布の低い部分 (100GeV 以下) のイベント数は信用できない。よって解析した実データのイベント数は 9893 となっているが、実際に強い相互作用による非弾性衝突が起これたイベントは少ない。これを考慮して、QED 反応イベントの横方向エネルギーが 100GeV 以下であるとし、100GeV 以上のイベント数でシミュレーションと実データを割って規格化した。そ

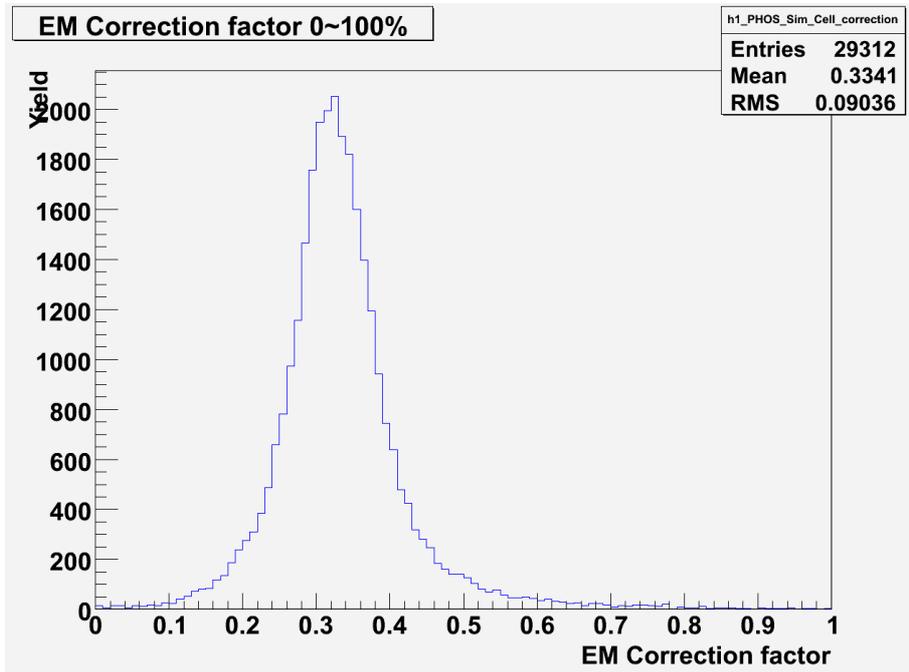


図 19 電磁カロリメータの性質による補正係数。セントラリティー 0~100 %の全衝突のである補正係数を使用した。

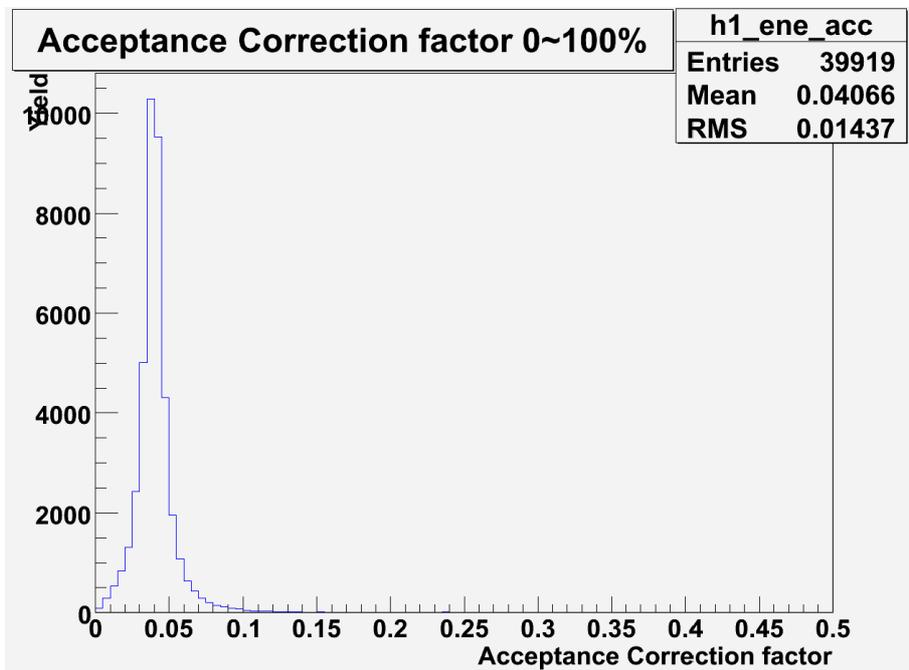


図 20 PHOS 検出器の幾何学的性質による補正係数。セントラリティー 0~100 %の全衝突のである補正係数を使用した。この補正係数は検出器の幾何学的アクセプタンスに由来しているので、検出器の立体角に大きく依存している。

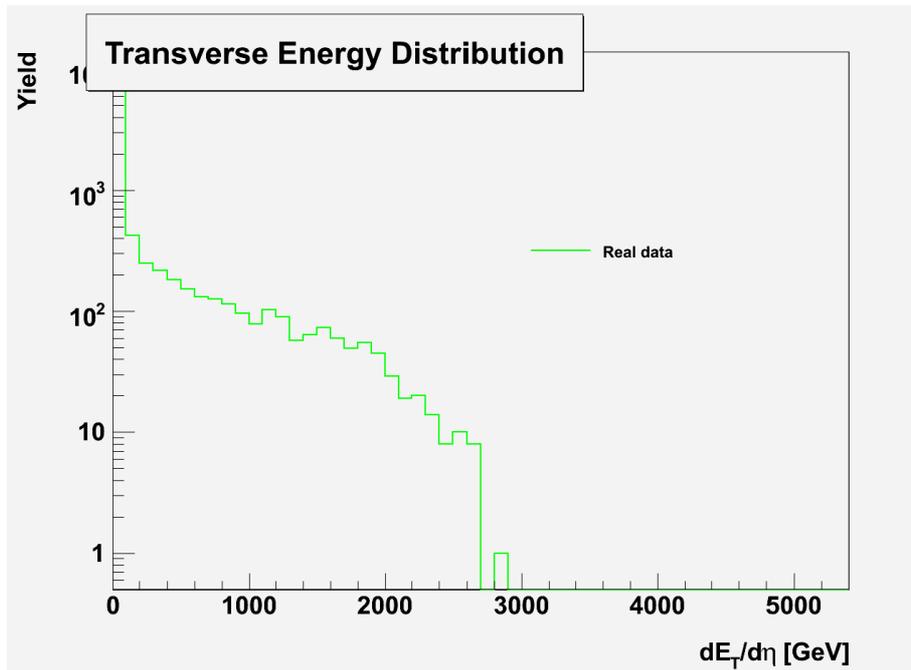


図 21 実データの横方向エネルギー分布。縦軸を対数にしてある。この図の小さい横方向エネルギーの収量が非常に多い。これは、前に説明した QED 反応が原因で、検出器が衝突が起きたと判断したが、実際は強い相互作用による非弾性散乱が起こっておらず、粒子が一つも PHOS に入射しなかったイベントである。

の結果が図 22 である。

図 22 から、横方向エネルギーの最大値はシミュレーションの方が実データより大きいことがわかる。この違いはシミュレーションと実データの 1 イベントあたりにエネルギーを検出したクリスタル数の違いによって生じている。規格化後の実データとシミュレーションの平均値 (100MeV 以上) は $789 \pm 6 \text{ GeV}$ と $1066 \pm 9 \text{ GeV}$ である。実データの平均値はシミュレーションの $74.0 \pm 0.8 \%$ に相当する。

図 23 の横軸は、1 イベントに反応したクリスタル数である。縦軸は QED 反応イベントを考慮して、反応クリスタル数が 10 個以上のイベント数で規格化した。。規格化後の実データとシミュレーションの平均値は 120 ± 1 本と 161 ± 2 本である。実データの平均値はシミュレーションの $75 \pm 1 \%$ である。これは初めの衝突で、実際の実験よりもシミュレーションの方が約 25 % 多く粒子を生成しているため生じた違いである。この結果、横方向エネルギー分布も、シミュレーションは実際の値よりも約 25 % 大きくなってしまった。

5.2 生成粒子数と補正係数

電磁カロリメータの性質による補正係数において、分母の PHOS に入射した全ての粒子のエネルギーは、PHOS に入射した粒子数に比例している。さらに、PHOS に入射する粒子数は衝突で

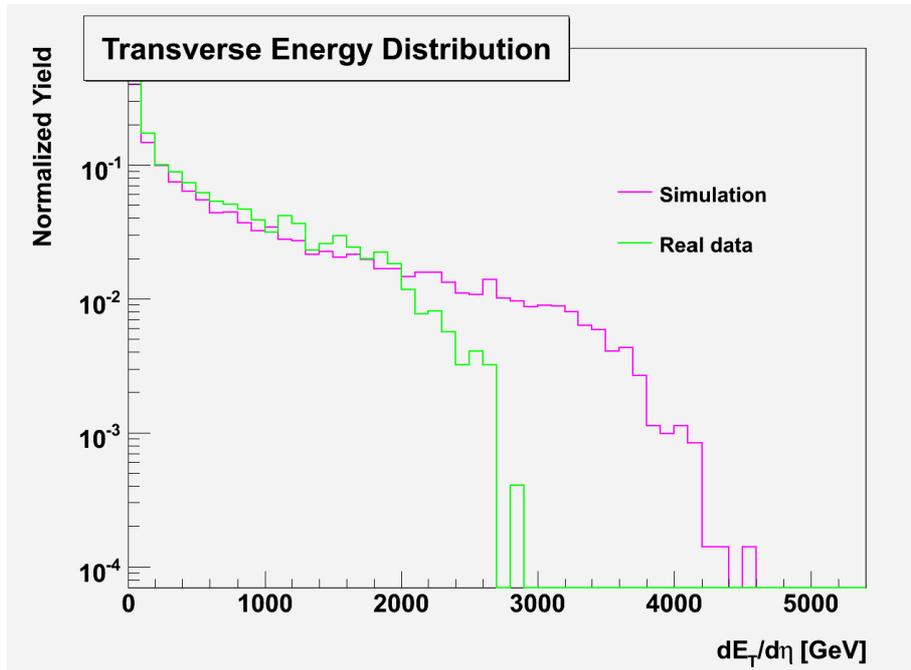


図 22 100MeV 以上のイベント数で規格化したシミュレーションと実データの横方向エネルギー分布

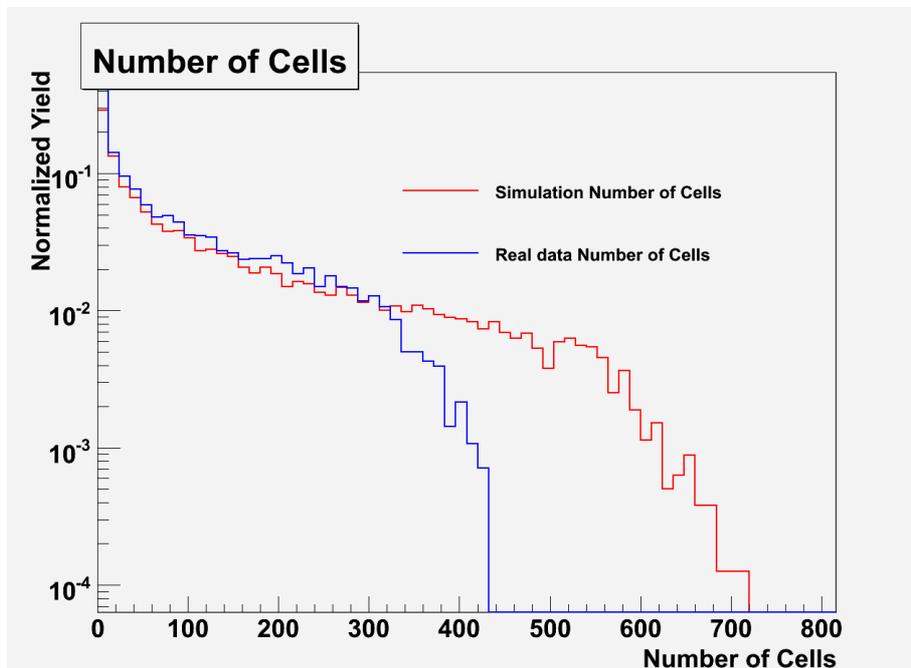


図 23 反応クリスタル 10 個以上のイベント数で規格化したシミュレーションと実データの反応クリスタル数分布。

生成される粒子数に比例する。分子の PHOS が測定したエネルギーも PHOS に入射する粒子数に比例し、そして、衝突で生成される粒子数に比例する。つまり、この補正係数は生成粒子数を変数に含んでいない関数 g_1, g_2 を用いて表すと

$$f_{EM} = \frac{g_1 \cdot \text{生成粒子数}}{g_2 \cdot \text{生成粒子数}} = \frac{g_1}{g_2} \quad (13)$$

と表せて、生成粒子数に依存しない。

次に、検出器の幾何学的性質による補正係数は、分母の全生成粒子のエネルギーは生成粒子数に比例する。分子の PHOS に入射した全ての粒子のエネルギーは PHOS に入射する粒子数に比例する。先ほどと同様に、PHOS に入射する粒子数は生成粒子数に比例する。この補正係数を生成粒子数を変数に含んでいない関数 g_3, g_4 を用いて表す

$$f_{acc} = \frac{g_3 \cdot \text{生成粒子数}}{g_4 \cdot \text{生成粒子数}} = \frac{g_3}{g_4} \quad (14)$$

となり、生成粒子数には依存しない。

以上より今回シミュレーションで求めた 2 つの補正係数は、シミュレーションの衝突によって生成する粒子数が実際の実験と異なっても、生成粒子数に依存しないので値は変化しないと考えられる。よって、これらの補正係数を実データに適用しても問題ないと判断した。

5.3 生成エネルギー密度

5.3.1 中心衝突の横方向エネルギー

今回は、中心衝突の生成エネルギー密度を測定する。しかし、衝突中心度を測定する検出器をまだ扱えず、実データで衝突重心度を測定することは出来ない。そこでシミュレーションを用いて、実データの中心衝突イベントを選び出すことにした。

方法は、実データとシミュレーションデータの、100GeV 以上の横方向エネルギーの平均を合わせる方法である。図 24 がその結果である。この図の影のある部分が中心衝突イベントの横方向エネルギーで、この方法で求めた中心衝突の横方向エネルギーは、

$$\frac{dE_T^{central}}{d\eta} = 2234 \pm 14 \text{ GeV} \quad (15)$$

となった。

ここで実データとシミュレーションの平均値を合わせるときに、今回は 100GeV 以上の横方向エネルギーの平均を合わせる方法を採用したが、その平均値の選び方には様々あり、その選び方に不定性が生じる。この不定性を系統誤差として見積もらなければならない。表 1 は横方向エネルギー分布の大きいところの 10 %、20 % の平均値を合わせた結果と、今回採用した 100GeV 以上の横方向エネルギーの平均を合わせた結果との違いである。この表 1 より系統誤差を 5 % と見積もった。

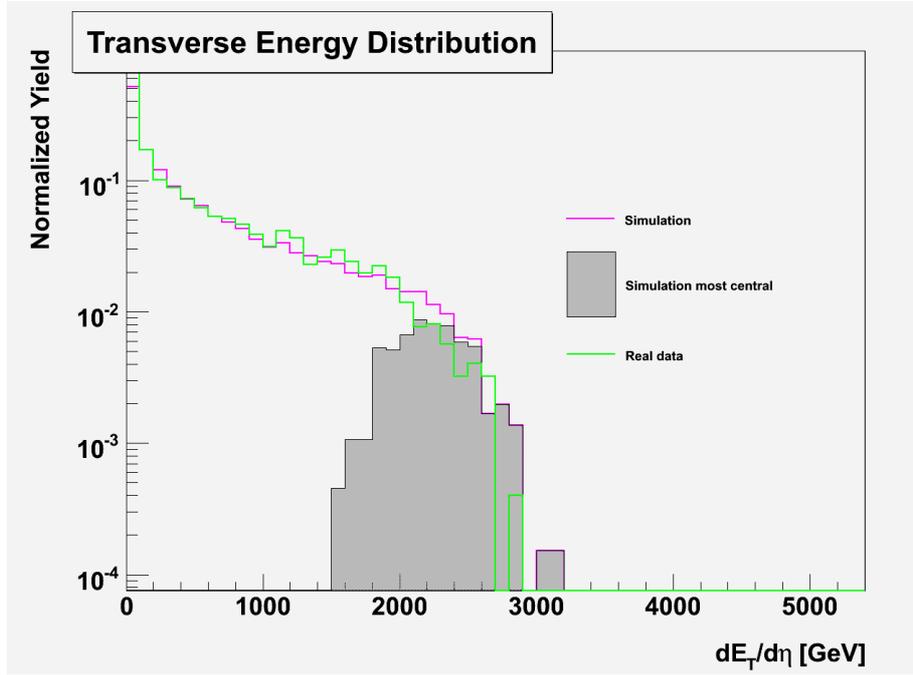


図 24 図 22 のシミュレーションを 100GeV 以上の平均値が一致するように規格化した図である。色が付いている部分は、中心衝突イベントの横方向エネルギーを示している。

表 1 系統誤差を見積もるため、Top10 %,Top20 %の平均値と、100GeV 以上の平均値の比を示した。

	Top10 %の平均値	100GeV 以上の平均値	Top20 %の平均値
$dE_T^{central}/d\eta$ [GeV]	2140 ± 15	2234 ± 14	2174 ± 13
100GeV 以上の平均値との比	1.04 ± 0.01	1	1.03 ± 0.01

これらより、中心衝突の横方向エネルギーは、

$$\frac{dE_T^{central}}{d\eta} = 2234 \pm 14(\text{stat}) \pm 112(\text{sys}) \text{ GeV} \quad (16)$$

となり、この結果を式 (2) に代入すると生成エネルギー密度は、

$$\epsilon_{0,B_j} = \dots \pm 0.1(\text{stat}) \pm 0.7(\text{sys}) \text{ GeV}/\text{fm}^3 \quad (17)$$

となった。

この値は $1\text{GeV}/\text{fm}^3$ を大きく上回っており、この値よりもずっと小さな RHIC のデータでも、他の観測量と総合して QGP 相への転移が観測されている [14]。したがって、QGP 相に相転移していないとは非常に考えにくく、LHC 加速器における $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$ 鉛鉛衝突でも QGP 相に相転移していると考えられる。

図 25 は、今までの実験結果と今回の実験結果をプロットしたものである。本実験以外はすべて金金衝突実験であり、赤の点線が鉛鉛衝突、緑の実線が金金衝突の EKTR モデル曲線 [15] である。以下では、鉛鉛と金金衝突の EKTR モデル曲線はほぼ同じと見なし鉛鉛衝突、金金衝突を区別せずに議論する。EKTR モデルの曲線は、絶対値は小さくなっているが、傾向は再現出来ている。この図より衝突エネルギーが 200GeV から約 14 倍の 2.76TeV に上がったとき、生成エネルギー密度は約 3 倍大きくなっている。衝突エネルギーが 62.4GeV から約 3 倍の 200GeV に大きくなったときは、生成エネルギー密度は約 1.6 倍になっている。つまり、衝突エネルギーが大きくなるにつれて、生成エネルギー密度の変化率が小さくなっていることを示している。衝突エネルギーと生成エネルギー密度の関係をさらに詳しく知るためには、LHC で将来行われる予定の $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$ よりも大きな鉛鉛衝突実験を行い、その結果を知る必要がある。

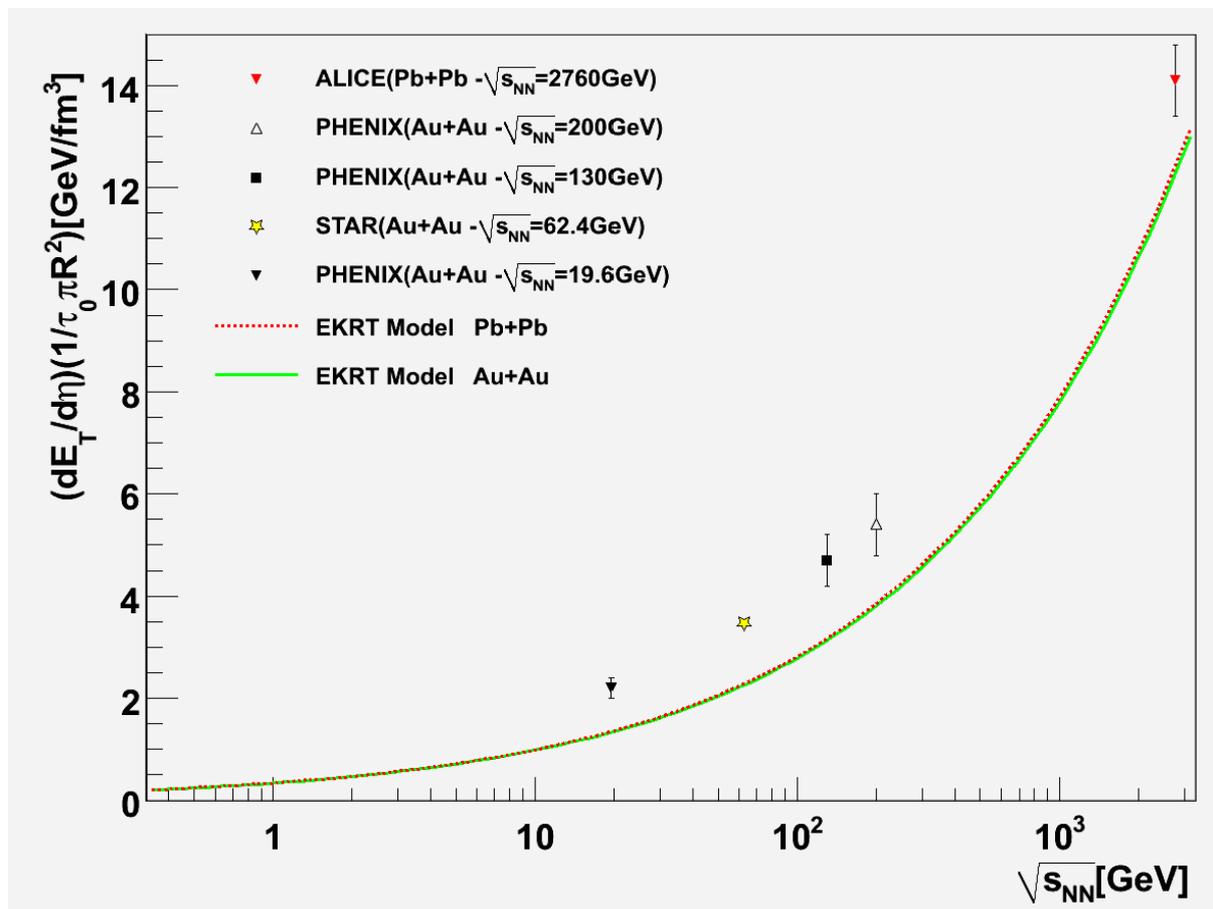


図 25 今までの実験結果と本研究結果を同時にプロットした。鉛鉛衝突と金金衝突の MKRT モデル曲線はほぼ同じと見なしてよい。この MKRT モデル曲線は、絶対値は小さく見積もっているが、増加の傾向は再現している。[3][13][15]

6 結論

本研究では、ALICE 実験の PHOS 検出器のみを用いた、生成エネルギー密度の測定法を研究した。その結果、シミュレーションは $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$ 鉛鉛衝突において、実際よりも多くの粒子を生成していることがわかり、その影響で横方向エネルギー分布の平均値が実データより大きくなった。しかし、シミュレーションの生成粒子数が正しくなくても、本研究で求めた補正係数に影響がないことを示し、実データに適用して横方向エネルギー分布を求めた。その実データの横方向エネルギー分布より、Bjorken の式を用いて中心衝突のエネルギー密度も求めた。その結果は、RHIC 加速器の $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ 金金衝突における生成エネルギー密度 $4.9 \pm 0.3\text{GeV}/\text{fm}^3$ [3] より約 3 倍大きい $15.7 \pm 0.8\text{GeV}/\text{fm}^3$ となった。この値は $1\text{GeV}/\text{fm}^3$ を大きく上回っており、生成エネルギー密度は LHC 加速器でも QGP に相転移していることを示唆している。

しかし、本研究はトリガー以外には PHOS 検出器しか使用しておらず、衝突中心度などはシミュレーションを用いて求め、系統誤差は衝突中心度を測るときにのみ考慮した。しかし、PHOS は切れ端がある検出器なので、衝突点から出た粒子が、本当は PHOS の検出範囲外であるにもかかわらず PHOS の側面にあたり、エネルギーを検出してしまうことがある。さらに、補正係数に関して、生成粒子数が違ふとどの程度補正係数が変化するか議論していない。この議論により補正係数の系統誤差が導ける。本研究では系統誤差についてあまり考慮しておらず、実際には系統誤差が本研究の結果より大きくなると推測される。

本研究はまだ系統誤差についての考察が出来ておらず、検出器は PHOS しか用いていない。今後、PHOS 以外の検出器も用いて、より精度の高い測定を行わなければならない。しかし、2011 年現在、過去最高の衝突エネルギー実験である、 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$ 鉛鉛衝突の横方向エネルギー分布と生成エネルギー密度測定に世界で初めて成功した。この成果は、これからの高エネルギー原子核衝突実験における、横方向エネルギー分布、生成エネルギー密度測定の目安となる意味で、この論文は人類にとって重要である。

7 付録

7.1 重心系衝突エネルギー \sqrt{s}

衝突実験を行う場合は、2体系の静止座標系である重心系に移ると便利なことが多い。なぜなら重心系なら全運動量が0になるからである。衝突する粒子を粒子1、粒子2とし、散乱粒子、反跳粒子をそれぞれ粒子3、粒子4とする。実験室系の場合、粒子1は入射粒子で、粒子2は標的粒子になる。

これらの粒子の4次元エネルギー-運動量を p_1, p_2, p_3, p_4 とすると、実験系では

$$\begin{aligned} p_1 &= (E_1; \mathbf{p}_1), & p_2 &= (E_2 = m_2; \mathbf{0}) \\ p_3 &= (E_3; \mathbf{p}_3), & p_4 &= (E_4; \mathbf{p}_4) \end{aligned} \quad (18)$$

重心系では、

$$\begin{aligned} p_1^* &= (E_1^*; \mathbf{p}^*), & p_2^* &= (E_2^*; -\mathbf{p}^*) \\ p_3^* &= (E_3^*; \mathbf{p}'^*), & p_4^* &= (E_4^*; -\mathbf{p}'^*) \end{aligned} \quad (19)$$

となる。この実験系と重心系を対応付けると、エネルギー-運動量保存即によって、

$$p_1 + p_2 = p_3 + p_4 \quad (20)$$

この2体系をまとめて、散乱前は実験室系での全エネルギー-運動量が $(E_1 + E_2; \mathbf{p}_1)$ の1体系と見なすことができる。すると、重心系では全運動量が0になるので、重心系でのエネルギー $E_1^* + E_2^*$ は、この2体系の静止質量と見なせる。この静止質量を W とし、この2体系の実験室系に対する速度 β とローレンツ因子 γ は、 $\beta = p/E, \gamma = E/m$ という関係式より、

$$\beta = \frac{p_1}{E_1 + m_2}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{E_1 + m_2}{W} \quad (21)$$

が導け、この式から、

$$W = \sqrt{m_1^2 + 2E_1m_2 + m_2^2} \quad (22)$$

と解ける。

次に、ローレンツ不変量である、

$$s \equiv (p_1 + p_2)^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2 \quad (23)$$

を定義する。この s を重心系と実験室系で評価すると、

$$s = \begin{cases} (E_1^* + E_2^*)^2 & \text{(重心系)} \\ (E_1 + m_2)^2 - \mathbf{p}_1^2 = m_1^2 + 2E_1m_2 + m_2^2 & \text{(実験室系)} \end{cases} \quad (24)$$

となり、 W^2 に一致する。すなわち、 s は二体系の不変質量の自乗と見なせる量で、

$$\sqrt{s} = W = E_1^* + E_2^* = \sqrt{\mathbf{p}^{*2} + m_1^2} + \sqrt{\mathbf{p}^{*2} + m_2^2} \quad (25)$$

を重心系衝突エネルギーと呼ぶ。

以上より重心系衝突エネルギーとは、重心系から見たローレンツ不変のエネルギーのことである。重イオン同士の衝突の場合はこの重心系衝突エネルギーを核子対あたりで定義し、この核子対あたりの重心系衝突エネルギーは $\sqrt{s_{NN}}$ と表記する。[1]

7.2 ラピディティ y と擬ラピディティ η

ラピディティ y とは、

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

で定義される物理量で、ここの E は粒子の全エネルギー、 p_z はその粒子のビーム軸方向の運動量である。この y はローレンツ変換に対し不変である。そのために相対論の適用範囲となる高エネルギー原子核衝突実験において、粒子生成のラピディティ分布 dN/dy は、ローレンツ不変である。さらに高エネルギー原子核衝突では、 $p \ll m$, $p_z = p \cos \theta$ となるので y は、

$$y \sim \eta = -\ln\left(\tan \frac{\theta}{2}\right)$$

と近似できる。この η を擬ラピディティと呼び、高エネルギー原子核衝突実験では、この η を用いることが多い。[10]

7.3 電磁カロリメータと MIP(Minimum Ionizing Particle)

7.3.1 測定原理

電磁カロリメータとは光子と電子のエネルギーを測定できる検出器である。原理は、光子が入射した場合は、光子が対生成をして電子・陽電子を生成する。生成された電子・陽電子は物質中の原子核からクーロン力を受け加速され、制動放射が起き光子が生成される。対生成により発生した光子が、また対生成をして電子・陽電子を生成する。この一連の反応を電磁シャワーと呼び、電磁シャワーより生成される光子の数は、初めに入射してきた光子のエネルギーが大きくなればなるほど多くなる。初めに入射粒子が電子・陽電子の場合も光子同様に電磁シャワーが起こる。この電磁シャワーにより生成された光子の数とエネルギー量を関係づけるためにエネルギー較正が必要である。

7.3.2 Minimum Ionizing Particle(MIP)

電磁カロリメータに電子・陽電子以外の荷電粒子が入射してきた場合は、電磁シャワーが起きないため正確にエネルギーを測ることが出来ない。電磁シャワーが起きない理由は、電子・陽電子

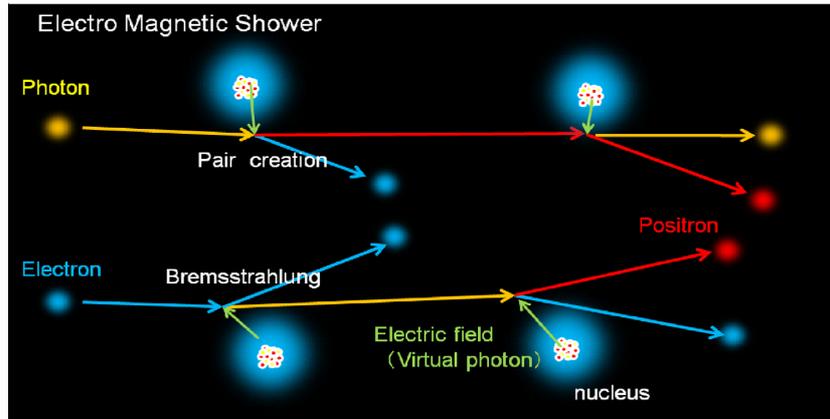


図 26 電磁シャワーのイメージ [10]

は質量が非常に小さいので原子核からのクーロン力に影響を受けやすい。制動放射で放出する光子のエネルギーは加速度の大きさの 2 乗に比例するので、質量が小さいほどエネルギーの高い光子を放出する。しかし、他の荷電粒子だと質量が大きいため、高エネルギーの光子が放出できない。電磁シャワーは制動放射で放出された光子のエネルギーが大きいため、その光子が対生成することができた。しかし、制動放射で放出された光子のエネルギーが小さいと対生成出来ず、電磁シャワーが起きない。電子以外の荷電粒子は電磁シャワーを起こせないため電磁カロリメータで正確な値が測定できない。

荷電粒子が物質中を通過する際に、物質中の原子をイオン化してエネルギーを失う。この損失を電離損失と呼び、荷電粒子が物質中を通過する際のエネルギー損失は Beth-Bloch の式、

$$-\frac{dE}{d\xi} = D \frac{Z}{A} \left(\frac{z}{\beta}\right)^2 \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (26)$$

で表すことが出来る。この $-\frac{dE}{d\xi}$ は単位質量あたりのエネルギー損失、 D は $4\pi N_A r_e m_e c^2$ 、 N_A はアボガドロ数、 r_e は電子の古典半径、 m_e は電子の静止質量、 Z, A は物質の原子番号と原子質量、そして、 I は平均イオン化ポテンシャルである。この式からわかることは、電離損失は Z/A に比例して物質の種類によらない、入射粒子の速度 $\beta (= v/c)$ のみの関数である、という二点がある。図のように β の小さい時はエネルギー損失は $(-\frac{dE}{d\xi})$ は $1/\beta$ に比例する。そして $\gamma (= 1/\sqrt{1-\beta^2}) \simeq 3$ あたりで最小値 (Minimum Ionizing Loss: 最小電離損失) に達する。このような荷電粒子を最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle (MIP)) と呼ぶ。宇宙線の荷電粒子はほとんど MIP である。

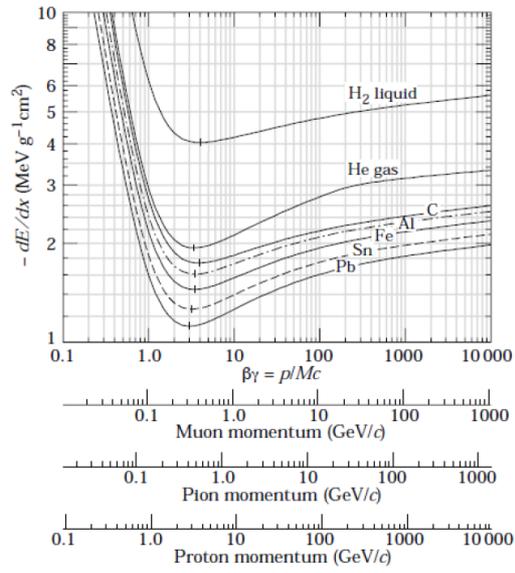


図 27 粒子種別の物質中を通過するときの損失エネルギー [12]

8 謝辞

本研究を行うにあたって、様々なご支援を下さった方々に感謝します。杉立先生は答えを求めただけでなく、その過程の大事さを私に教えていただき、一層物理の理解が深まりました。志垣先生は学生部屋に足を運んで下さり、研究方針に対するアドバイスなどをして下さりました。さらに精神的に落ち込んでいるときに、誰よりも先に声をかけて下さり、励ましてもらいました。この研究が最後までやり遂げられたのは志垣先生のおかげです。本間先生は、前期の研究実習の指導から私達と密接に関わり、海外から、この論文の方針を考えてくださりました。鳥井さんには、本研究を進める上で必要不可欠な、コンピュータ言語を基礎から応用までしっかり教えていただき、時には海外からメールで私の質問に答えて下しました。鳥井さんのおかげでこの研究がこの水準に達しました。さらに鳥井さんには将来研究者を目指すものとしての、研究への態度も教えて下さりました。本当に鳥井さんに感謝しています。研究室の先輩方には解析方法や論文添削、さらにコンピュータの基礎知識などを懇切丁寧に教えていただきました。そして物理や解析のアドバイスだけでなく、今後、研究生活を送る上で必要な多くの知識を頂きました。最後に、解析が進まず苦しい時に櫻井君と星野君に冗談を言い合ったり、苦しい雰囲気を楽しい雰囲気に変換してくれ助けられました。これからも頼みます。皆様のご支援があったので、本研究を終えることが出来ました。まだ研究者として未熟な私をサポートしていただき、本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] 長島 順清、素粒子物理学の基礎、朝倉書店
- [2] 文部科学省ホームページ,
http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa200701/008.htm
- [3] STAR Collaboration, Phys.Rev.C 70,054907(2004)
- [4] 中條達也, 加速器で探るビックバン直後の宇宙と QCD 相転移」
- [5] J.D.Bjorken, Phys.Rev.D 27,140(1983)
- [6] 翠 純平 「ALICE 実験 PHOS 検出器による運動量凍結温度測定法」(2010)
広島大学理学部オーク物理学研究室卒業論文
- [7] CERN's LHC home page, <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>
- [8] ALICE Collaboration, IOPscience jinst 3,S08002(2008)
- [9] ALICE Collaboration,
Project overview and status Presentation LHCC ALICE review(2009)
- [10] 中馬 文広 「LHC 加速器での重心系衝突エネルギー 900GeV 陽子陽子衝突における平均横方向生成エネルギーの最初の測定」(2010)
広島大学大学院理学研究科物理科学専攻オーク物理学研究室
- [11] ALICE Offline Pages, <http://aliweb.cern.ch/Offline/>
- [12] Particle Data Group, W.-M. Yao et al, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.33(2006) 1
- [13] PHENIX Collaboration, Phys.Rev.C 71,034908(2005)
- [14] PHENIX Collaboration, Phys. Rev. Lett. 88, 022301(2002)
- [15] K.J.Eskola, Nucl Phys.B570,379(2000)