

2023年度 卒業論文

ALICE実験における電磁カロリメータによる
反中性子同定可能性評価

2024年2月8日

指導教員 山口頼人 准教授

主査 山口頼人 准教授

副査 高橋弘充 准教授

広島大学

クォーク物理学研究室

学籍番号 B203516

氏名 和田滯太

要旨

量子色力学ではハドロン形成のルールはカラー中性状態のみであると考えられているにもかかわらず、クォーク4個以上のエキゾチックハドロンは未発見である。エキゾチックハドロン探索はクォーク閉込機構の解明につながる。近年、高エネルギー重イオン衝突実験での相関関数測定によりダイバリオンの存在可否の議論が活発化している。2粒子相関測定は相互作用を研究する強力な手法であり、異なるソースサイズでの相関の振舞から散乱パラメータ(散乱長、有効距離)の決定ができると考えられている。2粒子の散乱パラメータが決まればその系での束縛状態の存在を判断することができる。

実際に実験で測定する相関関数から散乱パラメータ決定が可能であるか、唯一の2バリオン束縛系である重陽子がある p - n 系で検証する。 p - n 系の相関関数測定実現のためには中性子検出が鍵となる。測定困難な中性子に対し、反中性子は電磁カロリメータ内での対消滅により特徴的な信号を残すと考えられる。本研究では ALICE 実験の電磁カロリメータを用いて、反中性子同定可能性について評価した。

目次

第 1 章	序論	3
1.1	量子色力学におけるクォークの色荷	3
1.2	クォークの閉じ込めとエキゾチックハドロン	3
1.3	相関関数	3
1.4	本研究の目的	5
第 2 章	実験背景	6
2.1	LHC 加速器	6
2.2	ALICE 実験	6
2.3	カロリメータ	7
2.3.1	電磁シャワー	7
2.3.2	ハドロンシャワー	8
2.4	EMCal	8
2.5	PHOS 検出器	9
第 3 章	解析手法	10
3.1	MC simulation	10
3.2	Cluster cells	10
3.3	Shower shape	11
3.4	Sphericity	12
3.5	Dispersion	12
3.6	Cluster definitions	12
第 4 章	解析	13
4.1	π^0 由来の γ Cut	14
4.1.1	invariant mass	14
4.1.2	π^0 cut parameter 決定	14
4.2	CPV cut	16
4.3	Cluster cells	17
4.4	Sphericity	18
4.5	Dispersion	19
4.6	Energy 依存性	19
4.6.1	Cluster cells vs Energy	20
4.6.2	Dispersion vs Energy	21
4.7	分布の違いによる Cluster cut	22
4.7.1	Cluster Cells cut	22
4.7.2	Sphericity cut	22

4.7.3 Dispersion cut	23
第 5 章 電磁カロリメータを用いた \bar{n} 同定結果	24
第 6 章 結論・今後の展望	25
謝辞	26
参考文献	26

第1章 序論

1.1 量子色力学におけるクォークの色荷

量子色力学 (QCD : Quantum Chromodynamics) とは色荷を持つクォークとグルーオンの強い相互作用を記述するゲージ場の理論であり、素粒子物理学の標準模型 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ の $SU(3)$ 成分である。クォークは色荷と呼ばれる量子数である R(赤), B(青), G(緑) の3つ、反クォークは $\bar{R}, \bar{B}, \bar{G}$ の3つを持つ。また、ハドロン内での強い相互作用を媒介するゲージボソンをグルーオンと呼ぶ。グルーオンは、クォークの持つ色荷と反クォークの持つ反色荷を1つずつ持つため8種類が存在する。QCD を用いるとクォークの性質から核子, π 中間子の性質を理論的に求めることができ、さらに核子間に作用する核力も導き出せるのである。しかし、現実的にはQCDは低エネルギー領域で相互作用が強くなるため、物理量を連続空間上で直接計算する手法が知られておらず連続的な空間を格子点に分解した格子 QCD と呼ばれる手法で理論計算が行われている [1]。

1.2 クォークの閉じ込めとエキゾチックハドロン

クォークは通常は単独で自由な粒子として存在はできず、色荷の組み合わせでうまれる白色状態 (R,G,B や $R-\bar{R}$) として存在する。3つのクォークで構成されるものをバリオン、クォークとその反クォークの2個で構成されるものをメソンと呼ぶ。QCD ではクォークの色荷の組み合わせがこの白色状態となる状態で存在することのみ要請している。すなわち、バリオンとメソン以外に白色状態の組み合わせとなるクォーク6個 ($qqqqqq$) で構成されるダイバリオンや ($qq\bar{q}\bar{q}$) の構成のテトラクォーク、($qqqq\bar{q}$) のペンタクォークもその存在は禁止されていないのである。しかし、バリオンとメソン以外の白色状態 (エキゾチックハドロン) は見つかっていない。Belle 実験で見つけられた4つのクォークから構成されるテトラクォークの $X(3872)$ をはじめとしてバリオンやメソンとは解釈できない存在が確認されているが、あくまでもエキゾチックハドロンの”候補”であり、ダイバリオン ($qqqqqq$) が (qqq, qqq) と記述できるように全てのエキゾチックハドロンの内部構造は明らかになっていないためその存在は確立されていない [2]。

1.3 相関関数

バリオン - バリオン相互作用は、ダイバリオンの存在を考える上で必要不可欠な情報であり理論、実験の両面から研究を進められてきた。バリオン - バリオン相互作用を理解することは、2つのバリオン間が結合状態を形成するために十分な引力を取りうるかを判断につながるのである。実験的には、高エネルギーハドロン衝突を用いた2粒子相関測定が主要な方法である。2粒子相関関数は式 (1.1) で表される。

$$C(k^*) = \int S(r^*) |\psi(k^*, r^*)| \quad (1.1)$$

$$\left(\begin{array}{ll} S(r^*) & \text{粒子放出源の分布関数} \\ \psi & \text{2粒子波動関数} \\ r^* & \text{2粒子相対距離} \\ k^* & \text{2粒子相対運動量} \end{array} \right)$$

$C(k^*)$ は同じ衝突で生成された粒子について、ある k^* を満たすペア数 N_{same} , 異なる衝突で生成された粒子についてある k^* を満たすペア数 N_{mixed} を用いて以下の式で求めることができる。

$$C(k^*) = \zeta(k^*) \frac{N_{same}(k^*)}{N_{mixed}(k^*)} \quad (1.2)$$

また、 $\zeta(k^*)$ は実験効果による補正係数である。

この $C(k^*)$ を測定することにより、2粒子間の相互作用を調べることができる。 $C(k^*) > 1$ であれば2粒子間に引力、 $C(k^*) < 1$ であれば2粒子間に斥力が働いていることになるのである [3]。

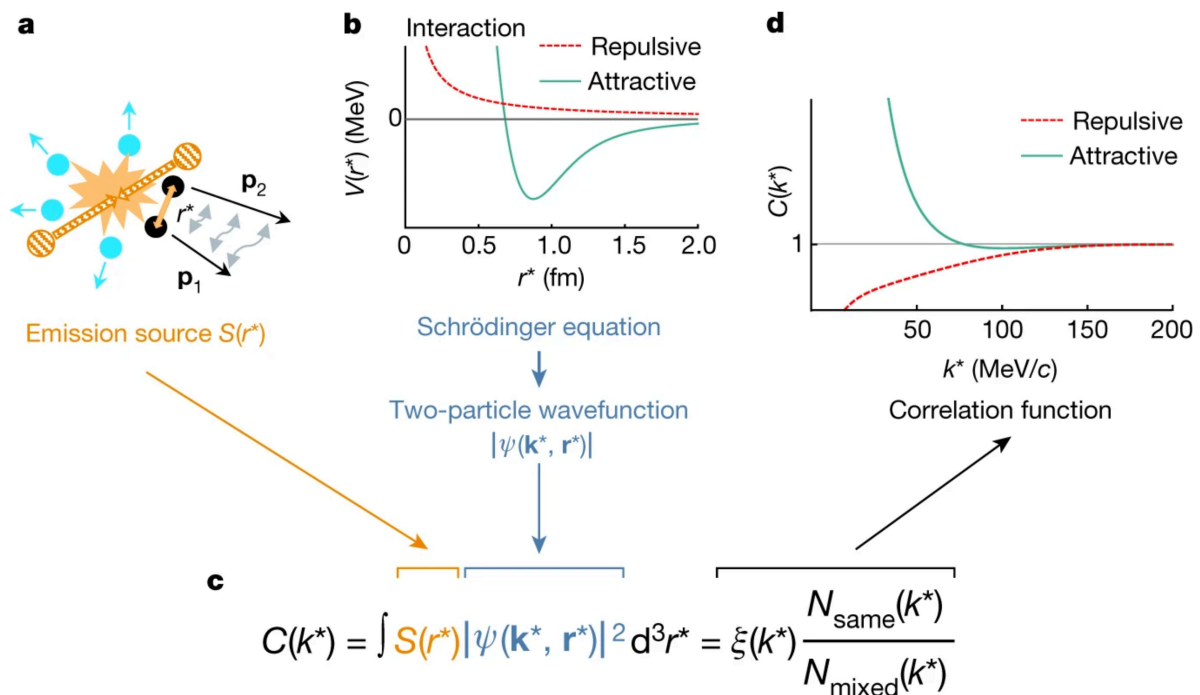


図 1.1: 相関関数 [4]

1.4 本研究の目的

量子色力学ではハドロンを形成するルールはカラー中性状態のみであると考えられている。すなわち、メソン、バリオン以外の白色の組み合わせも理論的には禁止されていない。しかし、クォーク 4 個以上のエキゾチックハドロンは未発見である。すなわち、これらの探索はクォークの閉じ込め機構、強い相互作用の本質につながるという重要性を持つのである。エキゾチックハドロン候補の中でも s クォークを含む 2 バリオン束縛状態 (ダイバリオン) は長年の探索対象であり、格子 QCD 計算、高エネルギー重イオン衝突実験での相関関数測定と理論的、実験的な進歩によりダイバリオンの存在可否が活発に議論されている。散乱パラメータ (散乱長、有効距離) が決まれば束縛状態の存在可否が分かるため、相関関数のソースサイズ依存性から散乱パラメータの決定を行いたい。本研究では実際に相関関数から散乱パラメータが決定できるのかを唯一の 2 バリオン束縛系である重陽子 (p - n) 系での検証を目的として、実際には中性子の測定は困難であることから反中性子の同定可能性について評価した。

第2章 実験背景

2.1 LHC 加速器

LHC 加速器 (Large Hadron Collider) はヨーロッパ共同原子核研究機構 (CERN) により建設され、2009 年より物理運転を開始した世界最大のハドロン衝突型加速器である。LHC 加速器の円周の長さは 27km にもおよぶ。光速近くまで加速させた 2 本の高エネルギー粒子のビームを衝突させ発生した物理現象を、ALICE, ATLAS, CMS, LHCb 実験によって研究している。

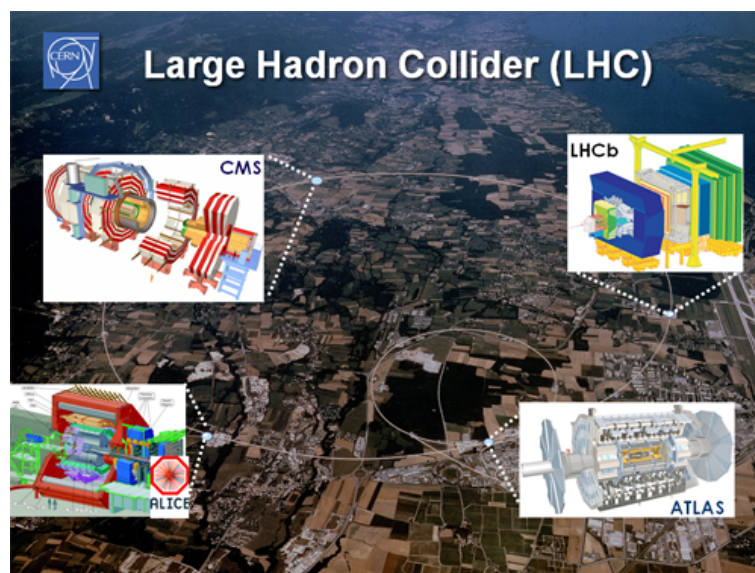


図 2.1: LHC 加速器 [5]

2.2 ALICE 実験

LHC-ALICE 実験は、スイス・ジュネーブ近郊のヨーロッパ共同原子核研究機構 (CERN) にある世界最大のハドロン衝突型加速器 LHC を用いて重イオンを加速、衝突させ、ビッグバン直後の宇宙初期に存在していたとされる物質相「クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)」を生成し、その性質の解明を目的としている実験である。クォークとグルーオンは「クォークの閉じ込め」という、量子色力学の性質により単体で核子から取り出すことができない。しかし、量子力学のもう一つの特徴として、超高温、超高密度下ではその閉じ込めが破れるのである。これを重イオン衝突によって実験室で再現させ、その性質を調べる研究をおこなっており、LHC 実験の中で唯一高エネルギー重イオン衝突に特化した実験チームである [5]。

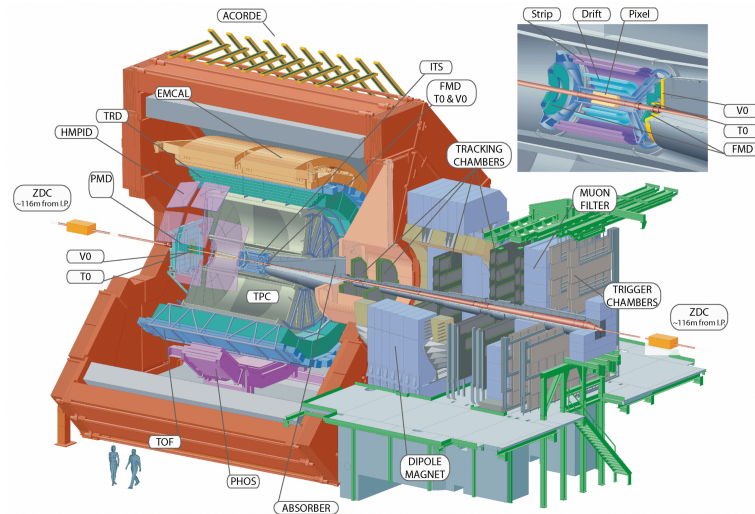


図 2.2: ALICE 実験検出器 [6]

2.3 カロリメータ

カロリメータは粒子のエネルギーを測定するための検出器である。電荷を持たない粒子はそのままでは電磁相互作用をしないため、一度電荷を持った粒子に変える必要がある。カロリメータは、「シャワー」という現象を用いてこの変換を行いシャワー過程には高いエネルギーの粒子が止まるまでの距離を短くする効果があり、測定器の大きさを小さくするのに役立つ。電磁シャワーでの生成粒子数と入射エネルギーが比例するようにカロリメータから取り出される電気信号の総量が調整されている [7]。

カロリメータには電磁シャワーを利用してエネルギーを測定する電磁カロリメータと、大きな物質で作られハドロンシャワーを起こしそのエネルギーを測定するハドロンカロリメータが存在する。本来、カロリメータで \bar{n} を測定したい時はハドロンカロリメータが適しているが、ALICE 実験ではセントラルバレルと呼ばれる衝突点付近を覆うエリアにはハドロンカロリメータが設置されていない。そのため、本研究は電磁カロリメータでハドロンをどれだけ精度良く測定できるかということを確認したのである。

先の説明にあったように、シャワー過程には電磁シャワー、ハドロンシャワーが存在する。以下に説明を書く。

2.3.1 電磁シャワー

高エネルギーの光子は物質に入射すると、物質を構成する原子の原子核が作る強い磁場によって高エネルギーの電子と陽電子の対を生成する。この電子・陽電子のエネルギーが制動放射に十分なエネルギーを保っている場合には、電子・陽電子のそれぞれが制動放射で光子を放出する。この光子が再び電子・陽電子の対を生成をし、この過程がくり返されることによって電子・陽電子と光子がネズミ算式に生成される。この過程は、電子・陽電子のエネルギーが制動放射よりイオン化によるエネルギー損失の寄与が大きくなるような低エネルギーになるまでくり返される。この現象を電磁シャワーという [8]。

2.3.2 ハドロンシャワー

100MeV を超えるような高エネルギーのハドロンで起こる反応。1回の原子核との反応で、多くの高エネルギーの π 中間子、陽子、中性子などを発生させ、これらの発生粒子がさらに他の原子核と反応して多くの粒子を発生させることが連続的に起こるものである。電磁シャワーとの類似でハドロンシャワーと呼ばれる [8]。

2.4 EMCal

EMCal (Electro-Magnetic Calorimeter) は、鉛の吸収体とシンチレータによる発行部が各々77層からなるサンプリング型電磁カロリメータ検出器である。エネルギー分解能は約 $\sim 10\%/\sqrt{E_\gamma}$ と PHOS に比べてエネルギー分解能は劣るが $\phi = 80^\circ \sim 187^\circ$ ($\Delta\eta = 1.4$) という広範な領域をカバーし、高エネルギーの光子、電子、 π^0 中間子、ジェット粒子、及びそれらに働く相関関係を測定する [5]。

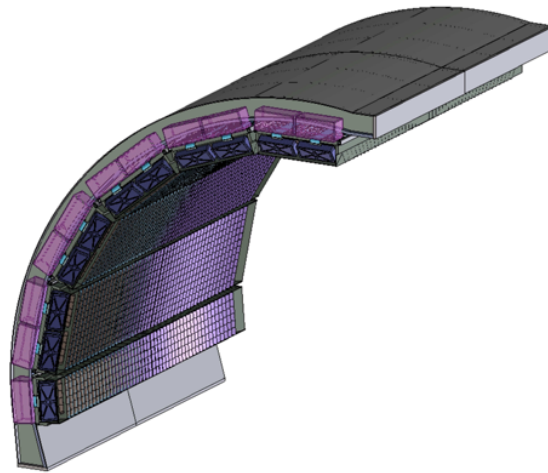


図 2.3: EMCal [9]

2.5 PHOS 検出器

PHOS (PHOton Spectrometer) は、鉛タングステン結晶 (PbWO_4) を用いた電磁カロリメータ検出器で、衝突で生成される光子のエネルギーを高精度で測定する検出器であり、 $\sim 3\%/\sqrt{E_\gamma}$ という高いエネルギー分解能を持ち、中性中間子からの崩壊光子や直接光子のエネルギーを高精度で測定できる性能を持つが、方位角に対し $260^\circ \sim 320^\circ$ ($\Delta\eta = 0.24$) の領域しかカバーせず、原子核衝突によって発生した \bar{n} が十分に PHOS 内に入りづらいため、今研究では EMCal のみを解析に利用した。

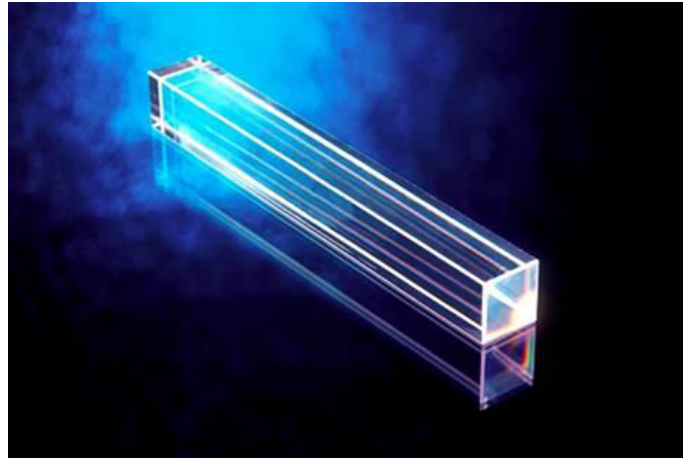


図 2.4: PHOS [9]

第3章 解析手法

LHC-ALICE 実験での \bar{n} 同定手法として ALICE 実験 Run 2 pp 衝突の MC simulation での EMCal からの情報を解析した。

カロリメータ内では入射粒子がシャワー過程により無数の粒子に崩壊していくため1粒子の入射につき、電磁カロリメータを構成する複数のセルに同時にエネルギーを落とす。このセルのまとまりをクラスターと呼ぶ。本解析では各クラスターごとに解析をしている。

3.1 MC simulation

本解析で使用したデータは MC(Monte Carlo) によって高エネルギー原子核衝突によって発生した粒子を再現し、その粒子が ALICE 実験検出器にどのような信号を残したかを AOD(Analysis Object Data) ファイルに詰めたものである。そのため、EMCal でクラスターが発生した時、そのクラスターが何の粒子の入射によって生じたものかということを追跡することができるのである。以下に示す解析に用いた物理量はこの特性を利用して、 \bar{n} 由来のクラスターの同定を目指した。

3.2 Cluster cells

カロリメータは複数の cell によって構成されている。カロリメータ内で発生したシャワーは複数の cell に広がる。多くのシャワー過程が生じる高エネルギーの粒子が入射した場合、1つのクラスターを構成する cell の数は多くなる。以下の図に示すように、緑の四角がカロリメータの 1cell、信号を検知した cell を黄色に塗りつぶした cell とすると、この cluster の構成 cell 数は 15 となる。

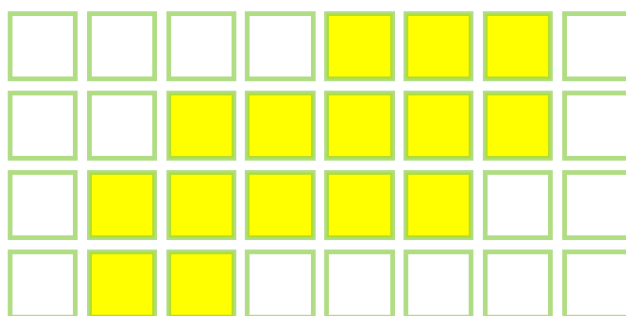


図 3.1: Cluster cells

3.3 Shower shape

カロリメータ内でのシャワーの広がりも粒子依存性を持つ重要な指標である。以下のように Shower の広がりを楕円で近似したとき、短軸を M20, 長軸を M02 と表し Shower の形をしめす。

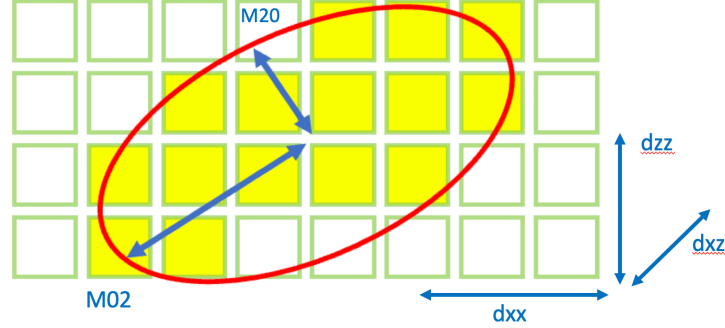


図 3.2: Shower shape

M20, M02 の 2 次モーメントまでの計算方法は次の通りである [10]。

$$d_{xx} = \frac{\sum w_i (x_i - x_{mean})^2}{\sum w_i} = \frac{\sum (w_i \times x_i^2)}{\sum w_i} - x_{mean}^2 \quad (3.1)$$

$$d_{zz} = \frac{\sum w_i (z_i - z_{mean})^2}{\sum w_i} = \frac{\sum (w_i \times z_i^2)}{\sum w_i} - z_{mean}^2 \quad (3.2)$$

$$d_{xz} = \frac{\sum w_i (x_i - x_{mean})(z_i - z_{mean})}{\sum w_i} = \frac{\sum (w_i \times x_i \cdot z_i)}{\sum w_i} - x_{mean} \cdot z_{mean} \quad (3.3)$$

$$\begin{pmatrix} d_{xx} & d_{xz} \\ d_{xz} & d_{zz} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

式 (3.4) を対角化した時の固有値が M20, M02 となる。

$$\begin{pmatrix} d_{xx} & d_{xz} \\ d_{xz} & d_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

$$M20 = \frac{d_{xx} + d_{zz}}{2} - \sqrt{\frac{(d_{xx} - d_{zz})^2}{4} + d_{xz}^2} \quad (3.6)$$

$$M02 = \frac{d_{xx} + d_{zz}}{2} + \sqrt{\frac{(d_{xx} - d_{zz})^2}{4} + d_{xz}^2} \quad (3.7)$$

$$\begin{pmatrix} x, z & \text{電磁シャワーの重心位置座標} \\ x_i, z_i & \text{各 cell の位置座標} \end{pmatrix}$$

3.4 Sphericity

上でもとめた M20, M02 よりシャワーの形を計算することができる。以下の式で定義された値を Sphericity (真円度) という。荷電粒子は ALICE 検出器中に設置されているソレノイド電磁石により円軌道を描きながらカロリメータに入射する。そのため、カロリメータ表面に斜めに入射する荷電粒子と電磁相互作用を起こさずカロリメータに垂直に入射する中性粒子ではシャワーの円度が変わってくる。

$$\text{Sphericity} = \frac{|M02 - M20|}{M02 + M20} \quad (3.8)$$

また、クラスターの構成 cell 数が 2 個もしくは 3 個以上で横一列の広がりであった場合 M20 の定義よりその値は 0 となるため、Sphericity も 1 の値を取るようになる。

3.5 Dispersion

電磁シャワーの横方向への広がりを表す度合いを Dispersion という。以下のように定義される。

$$\text{Dispersion} = \frac{\sum_{N_{\text{cells}}} w_i [(x_i - x)^2 + (z_i - z)^2]}{\sum_{N_{\text{cells}}} w_i} \quad (3.9)$$

Ncells クラスターの構成 cell 数

また $w_i = \max[0, p + \log(\frac{e_i}{E})]$ で定義され、各結晶で測定されたエネルギー e_i , クラスターエネルギー E , 実験的に決められる p (EMCal は $p=4.5$) である [11]。

3.6 Cluster definitions

本解析におけるクラスターの定義は以下の通りである。

$$\text{Cluster cells} \geq 3$$

かつ

$$\text{Cluster Energy} \geq 0.3 \text{ GeV}$$

Cluster cells に関しては、Real data を扱う際には電気回路等に起因するノイズによって cell が反応してしまうことがあるため、粒子の入射によって発生したクラスターである可能性を十分に高めるため、反応 Cell 数 3 以上のものを粒子の入射によって発生した cluster と定義した。また、荷電粒子の多くは MIP (Minimum Ionization Particle) と呼ばれる物質中でのエネルギー損失が最小になるエネルギーを持つ。この値は物質ごとに固有の値を持つが ALICE 実験で使われる EMCal での MIP energy は $235.6 \pm 0.9 \text{ MeV}$ である。そのため本解析ではバックグラウンドとなる荷電粒子由来のクラスターを効率よく除去するために Cluster Energy が 0.3 GeV 以上であることを要求した [12]。

第4章 解析

今回、解析に用いた EMCal の入射粒子別のクラスター数、及びその割合は以下のとおりである。

	γ 由来	e^\pm 由来	中性ハドロン	荷電ハドロン
クラスター数	91092	38124	43035	263634
割合	20.9%	8.7%	9.9%	60.5%

表 4.1: EMCal のクラスター数

本解析で用いたデータにおいて、 \bar{n} 由来のクラスターについては 17912 個で 4.1% であった。

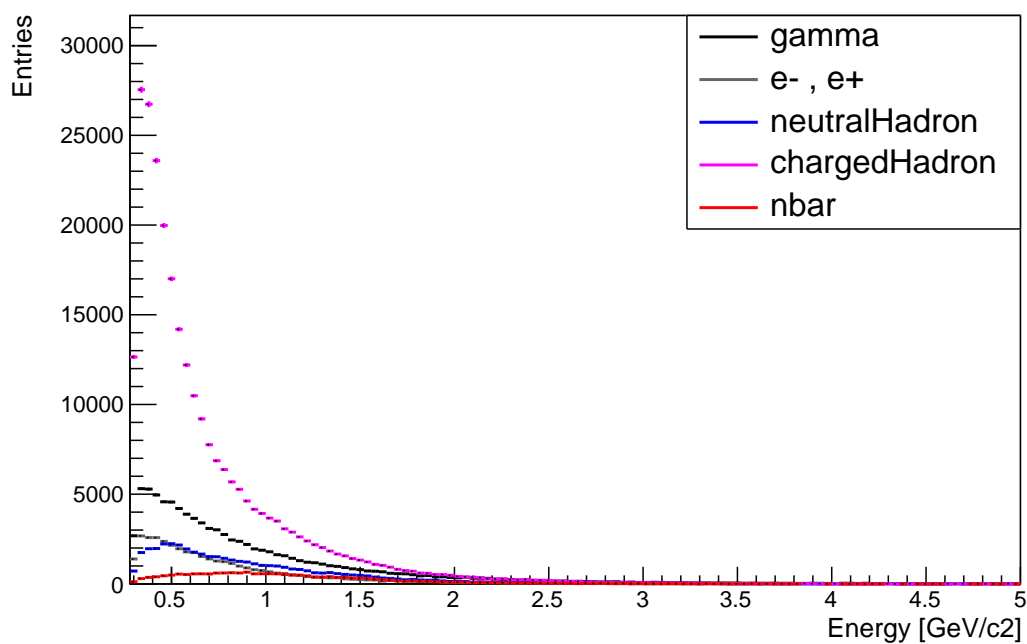


図 4.1: 1 クラスターの Energy

図 4.1 が示すように EMCal 内で発生したクラスターのうち本解析ではバックグラウンドとなる γ, e^-, e^+ , 荷電ハドロン由来のクラスターが多すぎるため、まずはそれらを除きしていくことにした。

4.1 π^0 由来の γ Cut

カロリメータに入射してくる γ の多くが $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ によって生まれる。そのため、2つのクラスターから不変質量を計算し π^0 の質量域に入ったクラスターを除去した。

4.1.1 invariant mass

ある 4 元運動量 $p = (E, \mathbf{p})$ を持つ親粒子が 2 つの粒子 (a,b) に崩壊する時、崩壊後の粒子の 4 元運動量をそれぞれ $p_a = (E_a, \mathbf{p}_a), p_b = (E_b, \mathbf{p}_b)$ とすると不変質量は以下のように計算できる。

$$M_{inv} \equiv \sqrt{(E_a + E_b)^2 - (\mathbf{p}_a + \mathbf{p}_b)^2} \quad (4.1)$$

π^0 から崩壊した 2 つの γ でこの計算を行うと M_{inv} は π^0 の質量である $135 \text{ MeV}/c^2$ になる。

4.1.2 π^0 cut parameter 決定

理論上は上の計算で π^0 から崩壊した 2 つの γ を特定できる。しかし、実際は検出器の energy 分解能や統計誤差により不変質量の分布は幅を持つ。実際に解析した検出器の分解能などの影響を受けたデータで 2 γ から π^0 の不変質量を計算するとどのような値を取るのかを計算した。実際の計算手順を以下に示す。(* は MC 情報を使った手順である)

- (i) γ 由来のクラスター選別 *
- (ii) (i) の全クラスターの組み合わせから同一の親粒子 π^0 を持つ 2 つのクラスターの対を選別 *
- (iii) 2 つのクラスターの Energy と運動量から親粒子の不変質量を計算

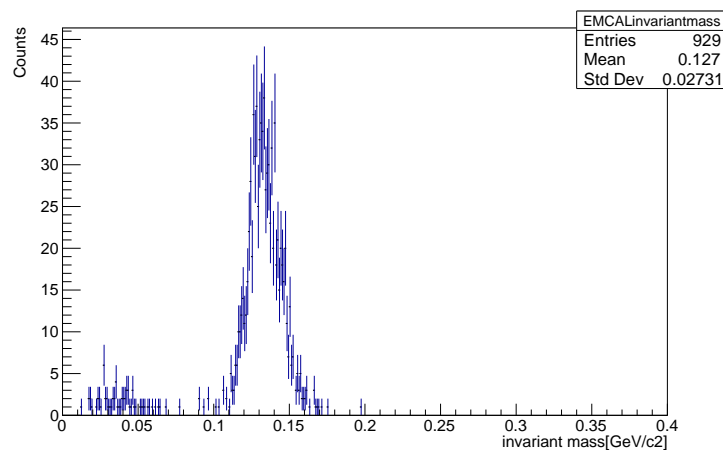
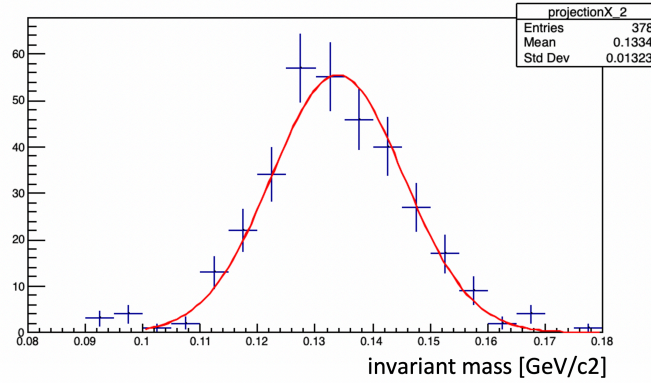


図 4.2: EMCal のクラスター情報から再構成した π^0 の不変質量

π^0 の質量である $135 \text{ MeV}/c^2$ 付近に peak を持つ分布になった。

しかし、この分布の平均値と幅はクラスターの運動量依存を持つ。そのため運動量ごとの不変質量を計算した。

図 4.3: pT ごとの π^0 不変質量 ($1.0 \leq pT < 2.0$ GeV/c)

これらの Fitting より、本解析での π^0 の不変質量の pT 依存性を式 (5.2) と (5.3) で定める。

$$\text{Mean} = f(pT) = \exp[-2.00772 - 0.0011643pT] \quad (4.2)$$

$$\text{Sigma} = f(pT) = \exp[-3.89396 - 0.234865pT] \quad (4.3)$$

本解析では不変質量が $\text{Mean} \pm 3\text{Sigma}$ の領域を π^0 質量域と定義した。この範囲に入ったクラスターは π^0 由来の γ とみなしカットした。

カットした後のクラスター数は以下の通りとなった。

カット条件		γ 由来	e^\pm 由来	中性ハドロン	荷電ハドロン
Without pi0 cut	クラスター数	91902	38124	43035	263634
	割合	20.9%	8.7%	9.9%	60.5%
pi0 cut	クラスター数	87655	36378	41970	254513
	割合	20.8%	8.7%	10.0%	60.5%

表 4.2: π^0 cut 後の EMCal のクラスター数

\bar{n} 由来のクラスターは 17584 個で 4.2%であった。

この結果が示すように本解析では π^0 由来の γ をうまく除去することができなかつた。考えられる原因としては、本解析の手法における π^0 由来の γ であることの判定は、同じイベントで生じた 2つの γ が共にカロリメータに入射することが前提である。 π^0 の崩壊によって生じる 2γ の進路は π^0 の座標系において運動量保存を満たす方向に飛ぶことのみ要請されるため、実験室系に置いて全方位に飛ぶことが可能であるが、EMCal は設置領域が $\phi = 80^\circ \sim 187^\circ$ ($\Delta\eta = 1.4$) であるため、生成した 2γ がともに EMCal に入射する事象が低確率であることとされる。

また、EMCal はサンプリング型カロリメータであるため ALICE 実験の全吸収型カロリメータ PHOS(PHOTon Spectrometer) に比べてエネルギー分解能の精度に欠ける特徴がある。本解析ではすべてのクラスターの 2 対の組み合わせで不変質量を組んでいるため π^0 由来の 2γ 以外の組み合わせでも π^0 の質量領域に入ってしまう γ 由来でないクラスターも多く取り除いてしまったのであろう。

4.2 CPV cut

CPV (Charged Particle Veto) cut とは荷電粒子を識別するための方法である。カロリメータのクラスターの位置と、最近接の飛跡をカロリメータ表面まで延長しその差を cut 条件に用いるのである。荷電粒子はローレンツ力による軌道を計算できるが中性粒子に関してはカロリメータでのクラスターに対応する飛跡が存在しないため、本来対応しない飛跡との差を計算するため値が大きくなる。この差の違いを利用するのである。本解析では差が 10cm 以内のクラスターを荷電粒子由来のものとしカットした。

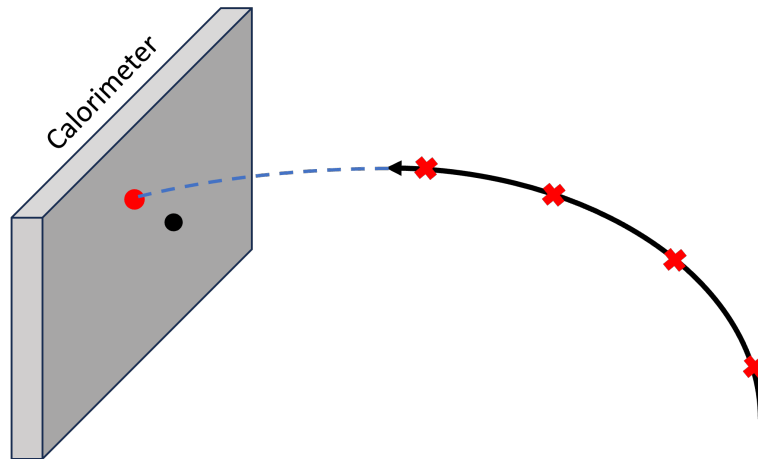


図 4.4: CPV cut の模式図

トラック情報 \times をもとにカロリメータ表面まで飛跡を外挿 (----) する。外挿先 \bullet と実際のクラスター座標 \bullet の誤差が 10cm 以内のクラスターを荷電粒子由来とみなし除去した。

カットした後のクラスター数は以下の通りとなった。

カット条件		γ 由来	e^\pm 由来	中性ハドロン	荷電ハドロン
Without CPV cut	クラスター数	91902	38124	43035	263634
	割合	20.9%	8.7%	9.9%	60.5%
With CPV cut	クラスター数	90959	36803	42795	187963
	割合	25.4%	10.3%	11.9%	52.4%

表 4.3: CPV cut 後の EMCal のクラスター数

\bar{n} 由来のクラスターは 17872 個で 5.0%であった。

また、 π^0 cut と CPV を組み合わせたときの EMCcal のクラスター数は以下の通りである。

カット条件		γ 由来	e^\pm 由来	中性ハドロン	荷電ハドロン
Without CPV cut	クラスター数	91902	38124	43035	263634
	割合	20.9%	8.7%	9.9%	60.5%
pi0 + CPV cut	クラスター数	87526	35069	41911	181041
	割合	25.3%	10.1%	12.1%	52.4%

表 4.4: CPV cut 後の EMCcal のクラスター数

\bar{n} 由来のクラスターは 17545 個で 5.1%であった。

可能な限りのバックグラウンドを除去したため、クラスターのもつ情報から \bar{n} の同定を目指していく。

4.3 Cluster cells

カロリメータに粒子が入射して発生したクラスターの構成 cell 数

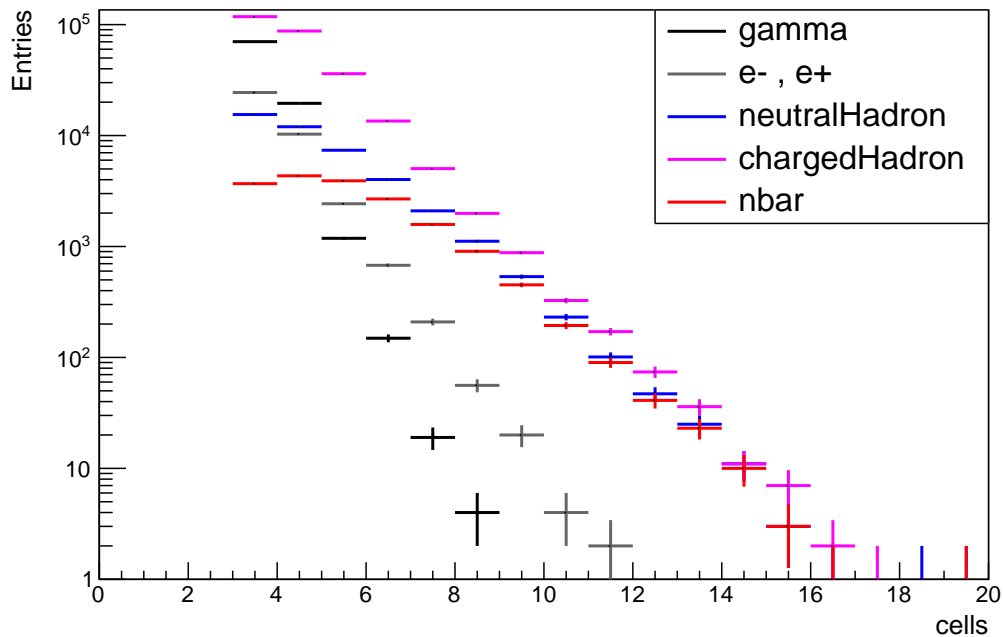


図 4.5: 1 クラスターの構成 cell 数

図 4.4 が示すように、ハドロン由来のクラスターは γ, e^\pm 由来のクラスターに比べて構成する cell の数が大きいことが確認できる。

4.4 Sphericity

カロリメータ内でのシャワーの広がり方の真円度 (真円の時 0 となる)

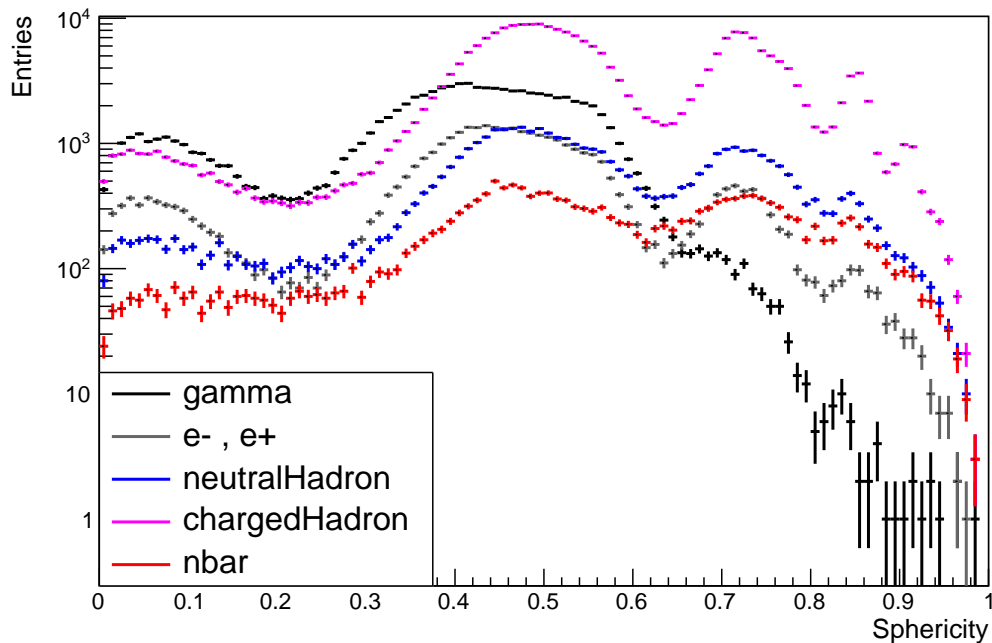


図 4.6: Sphericity

γ, e^\pm とハドロン由来のクラスターによる分布の違いはみられるが、もともとの予測である電荷の有無による入射角度から生まれるはずの分布の違いは見られなかった。考察として Sphericity はシャワーの広がり方のみを変数に持つ量であり、ハドロン由来のシャワーは γ, e^\pm 由来と比べて非常に大きくなる傾向になるため、入射角度による特徴が失われたのではないかと考えた。実際にシャワーのサイズが小さい γ と e^\pm では分布の違いが見えている。

4.5 Dispersion

値が大きいほどシャワーの横方向の広がりが大きいことを表す。

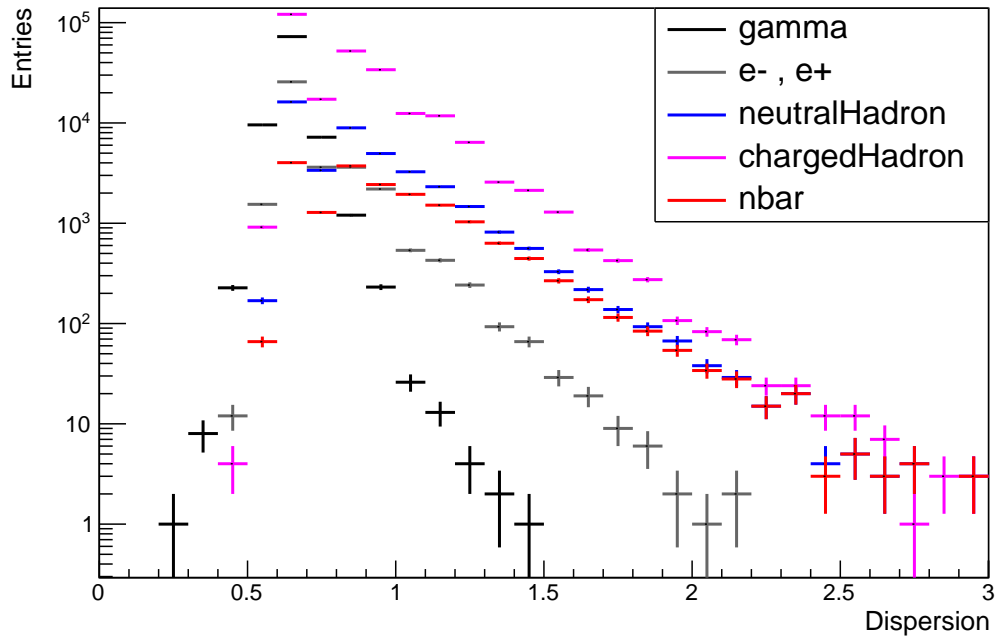


図 4.7: Dispersion

4.6 Energy 依存性

結果より、クラスターの構成 cell 数, Sphericity, Dispersion がカロリメータへの入射粒子ごとに異なる分布をもつことを示している。しかし、入射粒子の Energy が大きいほどシャワーが大きくなるのは当然であるため、クラスターの構成 cell 数やシャワーの広がり具合を表す Dispersion が入射粒子の Energy のみに影響される可能性もある。そのためこれらの物理量が入射粒子の判別材料となり得るかを判断するために、Energy 依存性の度合いを確認した。

4.6.1 Cluster cells vs Energy

まずは、クラスターの cell 数と Energy の関係を見る。

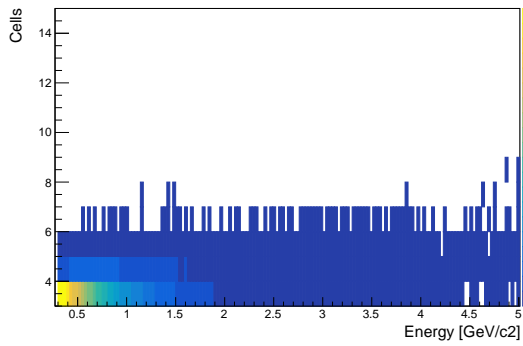


図 4.8: cell 数の energy 依存性 γ

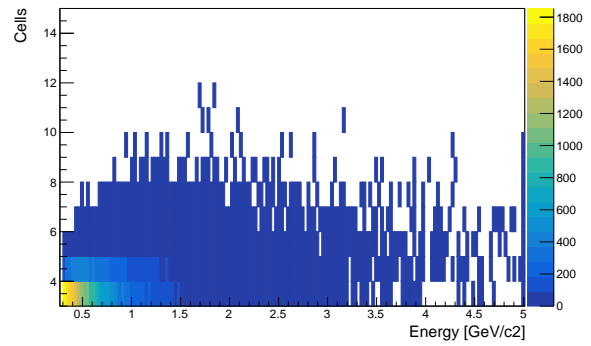


図 4.9: cell 数の energy 依存性 e^\pm

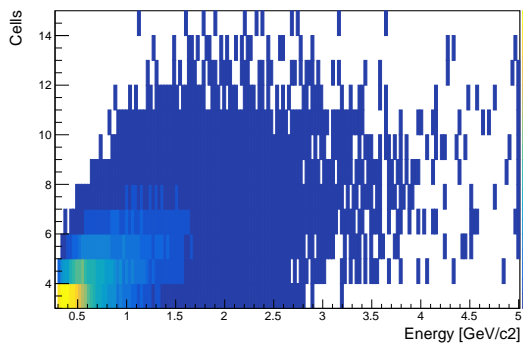


図 4.10: cell 数の energy 依存性中性ハドロン

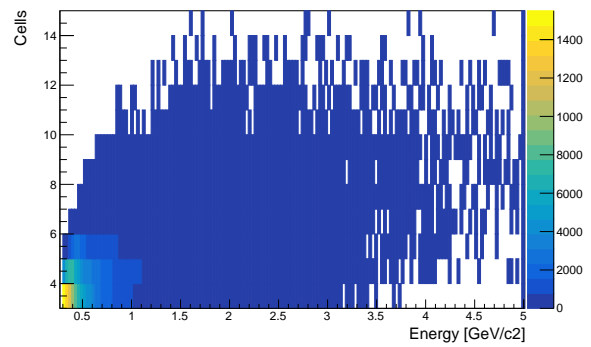


図 4.11: cell 数の energy 依存性荷電ハドロン

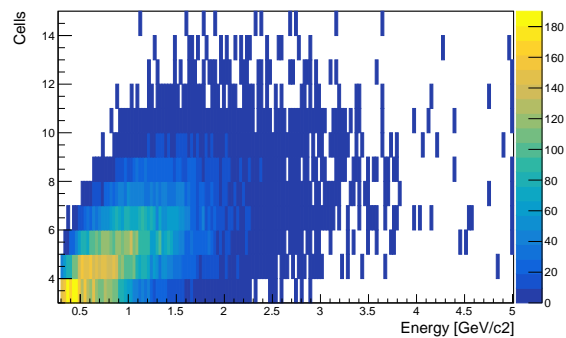
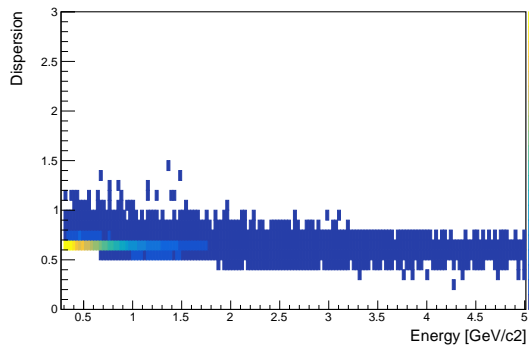
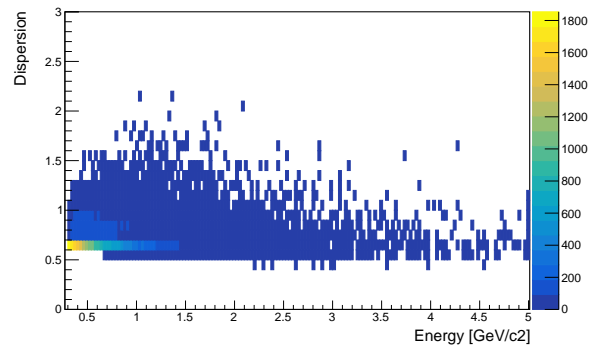
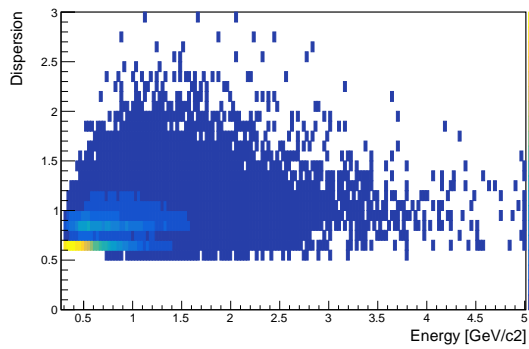
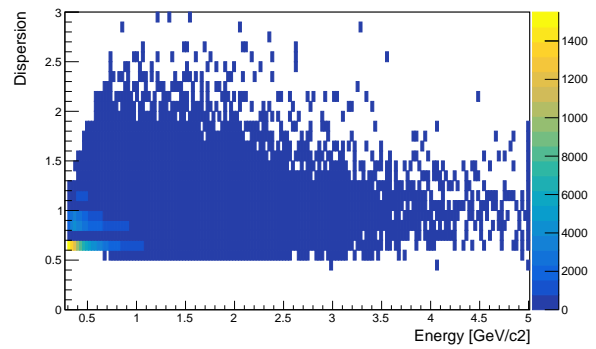
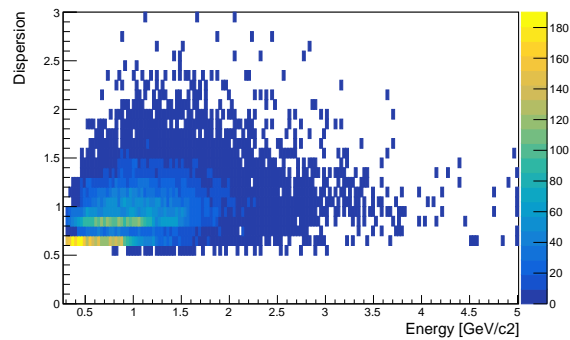


図 4.12: cell 数の energy 依存性 \bar{n}

4.6.2 Dispersion vs Energy

図 4.13: Dispersion の energy 依存性 γ 図 4.14: Dispersion の energy 依存性 e^\pm 図 4.15: Dispersion の energy 依存性
中性ハドロン図 4.16: Dispersion の energy 依存性
荷電ハドロン図 4.17: Dispersion の energy 依存性 \bar{n}

4.7 分布の違いによる Cluster cut

4.6 章より、クラスターの各物理量はエネルギー依存よりも入射粒子の種類そのもので違いが見られることが確認できた。上述の π^0 cut と CPVcut に加え、この分布の違いを利用し、 \bar{n} の同定を目指した。

4.7.1 Cluster Cells cut

まずは、Cluster Cells に着目していく。Hadron 由来のクラスターほど 1 クラスターの構成 cell 数が多くなるので、cell 数 cut をかけた時の \bar{n} 由来のクラスターを計算した。

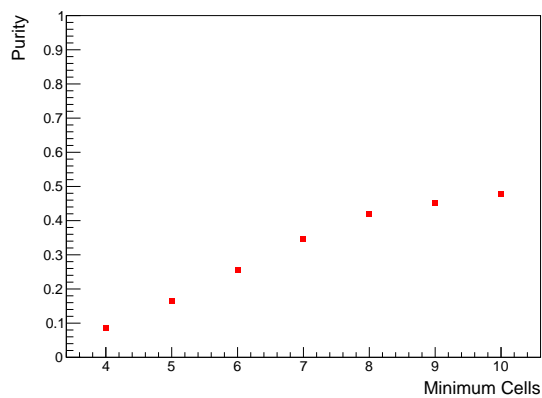


図 4.18: Cell 数でカットをかけた時の \bar{n} 由来のクラスターの purity

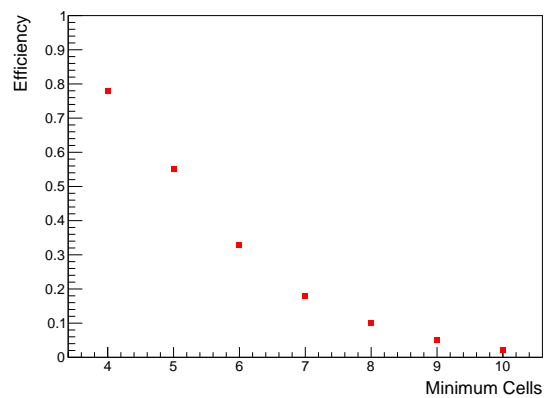


図 4.19: Cell 数でカットをかけた時の \bar{n} 由来のクラスターの efficiency

4.7.2 Sphericity cut

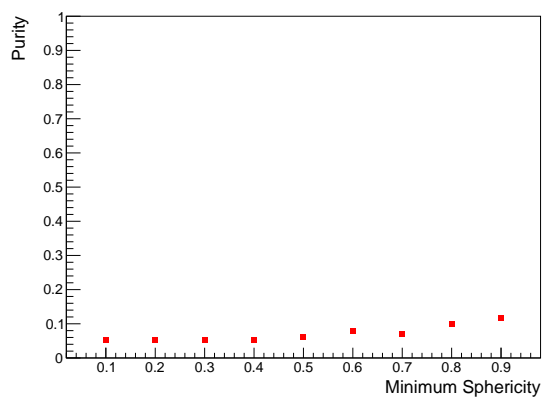


図 4.20: Sphericity でカットをかけた時の \bar{n} 由来のクラスターの purity

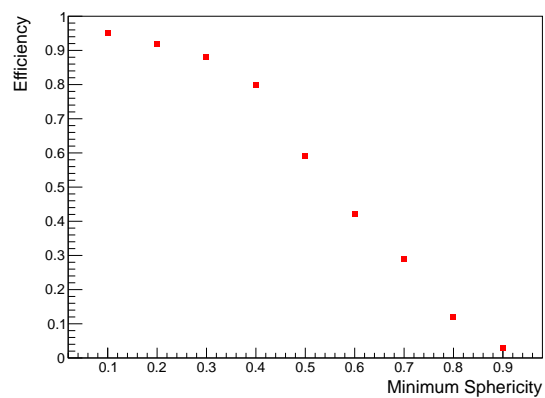


図 4.21: Sphericity でカットをかけた時の \bar{n} 由来のクラスターの efficiency

4.7.3 Dispersion cut

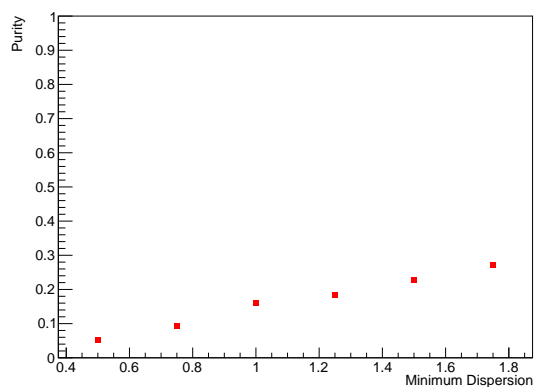


図 4.22: Dispersion でカットをかけた時の \bar{n} 由来のクラスターの purity

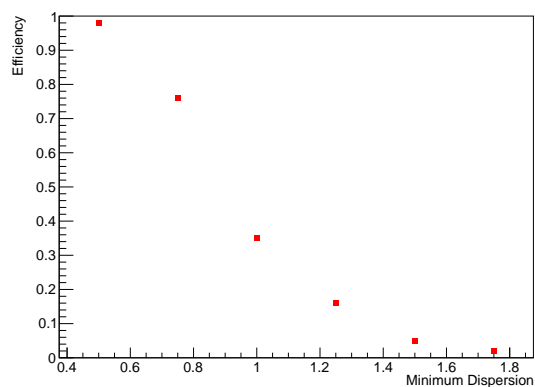


図 4.23: Dispersion でカットをかけた時の \bar{n} 由来のクラスターの efficiency

第5章 電磁カロリメータを用いた \bar{n} 同定結果

EMCalでの解析では \bar{n} の純度を上げるためにはどうしても収集効率が低くなってしまった。本来は収集効率も解析における重要な指標であるが、今回は純度のみを考えて π^0 cut, CPVcutに加え Cluster Cells, Sphericity, Dispersion の3項目から単独の cut をかけた時に純度が最大となった条件を組み合わせることで EMCal での \bar{n} 同定結果を示す。

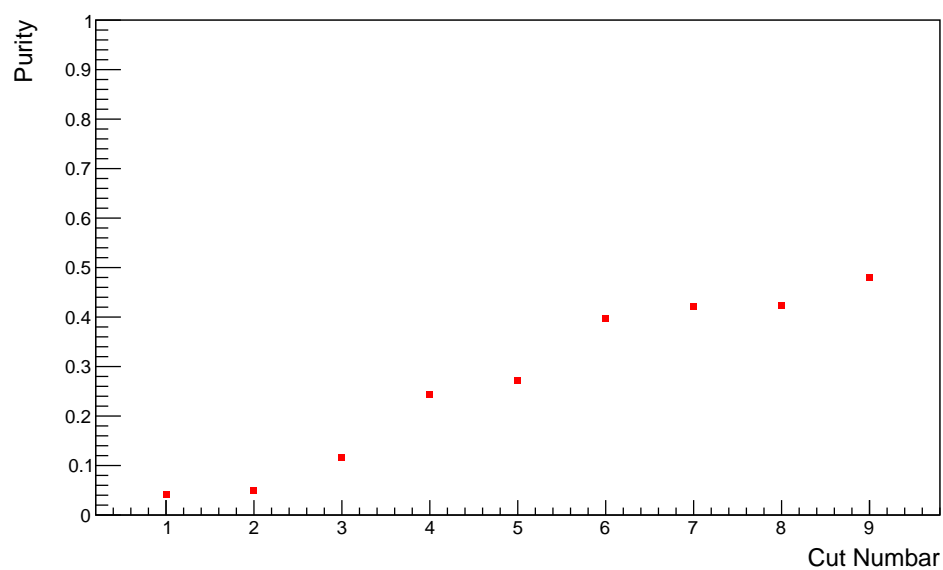


図 5.1: cut 条件ごとの \bar{n} の Purity

Cut Number
1. No Cut
2. CPV cut
3. $BG + S \geq 0.9$
4. $BG + S \geq 0.9 + D \geq 1.75$
5. $BG + D \geq 1.75$
6. $BG + N \geq 10 + S \geq 0.9$
7. $BG + N \geq 10 + S \geq 0.9 + D \geq 1.75$
8. $BG + N \geq 10 + D \geq 1.75$
9. $BG + N \geq 10$

また、cut 条件について下の BG cut とは本解析での $\pi^0 + \text{CPVcut}$ のことを示し、N,S,Dとはそれぞれ Ncells, Sphericity, Dispersion を指す。

第6章 結論・今後の展望

本解析では \bar{n} 由来のカロリメータのクラスターを高い純度で同定することは不可能であった。ALICE 実験において、EMCal が本来、光子や電子、陽電子のエネルギーを測定することを主な目的として作られた電磁カロリメータであるためバックグラウンドとなる γ 由来のクラスターが多く存在し \bar{n} の純度を高めようとするとしても efficiency は小さな値をとってしまう。しかし、 γ, e^\pm が起こす電磁シャワーとハドロンが起こすハドロンシャワーの違いからクラスターの構成 Cell 数や Shower の広がり具合に入射粒子ごとの特徴が見られることがわかった。その特徴を利用し、 \bar{n} 由来のクラスターを絞り込むことで、本来、カロリメータでクラスターを発生させる粒子の数% しか存在しない \bar{n} を 50% ほどの純度まで上げることができた。

今後の展望としては、カロリメータ内で対消滅を起こした \bar{n} に着目するという方法が考えられる。 \bar{n} の静止質量 $940\text{GeV}/c^2$ であることより、Cluster energy が $2\text{GeV}/c^2$ 程度のより大きいところのみ解析をすることも \bar{n} 同定の有効な手段であると考えられる。

また、EMCal をはじめとするサンプリング型カロリメータの特徴である、1cell が縦方向に分割された層の構造をもつと言う特徴も利用できるであろう。本研究で解析した ALICE 実験のデータが格納された AOD (Analysis Object Data) ファイルでは容量の問題で各層での Energy deposit の情報は失われてしまっているが、1層ごとの情報を解析できれば対消滅による $2\text{GeV}/c^2$ 付近のピークをもつ層を特定することで、 \bar{n} 同定の可能性があがると思われる。さらに、クラスターの分布の違いによる cut の組み合わせに機械学習の導入など、本解析にはさらなる展望が考えられるため電磁カロリメータを用いた \bar{n} の同定をすることは決して無謀なことではないと考えられる。

謝辞

本研究を締め括るにあたり、まずは何よりも指導教員である山口頼人准教授に感謝申し上げます。山口准教授には毎日朝早くから夜遅くまで進捗の相談に乗ってくださいました。時には解析がうまくいかず悩むことも多くありましたがその悩みをとにかく親身に一つ一つ丁寧に聞いてくださり解決に向けてのアドバイスをいつもしていただきました。時には国境と時間を超えるような環境でも変わらず研究を支えていただきました。本当にありがとうございました。これからも何卒よろしく願いいたします。

次に博士課程2年の徳本涼香さんにも感謝を伝えたいと思います。徳本さんには本研究に必須のALICE実験のデータを取得するためのコードについて詳しく教えていただいたり、GRID計算にご協力いただいたりとお忙しい中いつも助けてくださいました。ありがとうございました。このお二人がいなければこの論文は何も書けなかったことだと思います。

修士課程2年の添田拓さんには研究のアドバイスだけでなく、たくさんの笑顔と元気をもらいました。添田さんのおかげで笑顔を忘れることなく卒論を乗り越えられたと思います。卒業されるのはとても寂しいですが、たまには研究室を明るくしに顔を出していただけたら嬉しいです。ありがとうございました。

同じく修士課程2年の副田幸暉さんは、たくさん飲み連れて行ってくださいました。副田さんのおかげで先輩たちと楽しく交流しながら研究活動ができたと思います。2年後ともに社会人になって東京で美味しいお店を巡りましょう。ありがとうございました。

修士課程1年の山田蓮斗さんにはスライドやポスターの作成でたくさんのアドバイスをとても丁寧にいただきました。山田さんのように洗練された発表資料をいつも目標にしています。これからもよろしく願いします。

そして、カロリメータについての情報やcutに対するアドバイスをいつも丁寧に教えてくださった八野哲助教、志垣賢太教授をはじめとするクォーク物理学研究室のスタッフの皆様、先輩方、そして一緒に戦い抜いた同期の皆、全員に感謝いたします。ありがとうございました。これからもよろしく願いいたします。

最後に、卒論期間だけでなく大学生活4年間を有意義に過ごすために精神的、身体的、経済的にいつも支えてくれた何よりも大切な家族に感謝を伝えて私の卒業論文といたします。

いつもありがとう。これからもよろしく。

参考文献

- [1] 計算基礎科学連携拠点 月刊 JICFuS <https://www.jicfus.jp/jp/promotion/pr/mj/2013-2/>
- [2] Exotic hadrons bend the rules , CERN COURIER volume57 Number2 March 2017
<https://cerncourier.com/a/exotic-hadrons-bend-the-rules/>
- [3] 徳本 涼香 広島大学大学院 2021 年度修士論文
https://www-internal.quark.hiroshima-u.ac.jp/restricted/thesis/master/22tokumoto_thesis.pdf
- [4] ALICE Collaboration, Nature volume 588, pages 232 - 238 (2020).
- [5] LHC ALICE 実験 日本グループ 公式サイト <http://alice-j.org>
- [6] ALICE 検出器 <https://academic-accelerator.com/encyclopedia/jp/alice-experiment>
- [7] Physics and Detector Study for International Linear Collider in Japan
カロリメータとは何か? <https://www-jlc.kek.jp/subg/cal/CAL-JPN/CAL.html>
- [8] 永江知文/永宮正治 原子核物理学 裳華房 2000, 裳華房テキストシリーズ-物理学
- [9] ALICE カロリメータ <http://alice-j.org/alice> 実験 (検出器)
- [10] 尾林 秀幸 広島大学大学院 2011 年度修士論文
https://www.quark.hiroshima-u.ac.jp/thesis/m201203_obayashi.pdf
- [11] 溝口 謙太 広島大学大学院 2008 年度修士論文
https://cds.cern.ch/record/2244923/files/09mizoguti_thesis.pdf
- [12] Performance of the ALICE ElectroMagnetic Calorimeter
<https://cds.cern.ch/record/2825648/files/2209.04216.pdf>