

2025 年度 卒業論文

NINJA 実験における改良型原子核乾板検出器 ECC のシミュレーションによる性能評価

横浜国立大学理工学部
数物・電子情報系学科物理工学 EP
南野・Bronner 研究室

学部 4 年
学籍番号 2264204

橋戸 詞音

2026 年 2 月 23 日

概要

NINJA 実験は、茨城県東海村にある J-PARC（大強度陽子加速器施設）において、原子核乾板を用いてニュートリノと原子核の反応を精密に測定する実験である。本実験の主要な検出器である ECC (Emulsion Cloud Chamber) は、原子核乾板とターゲット物質を交互に積層した構造を持ち、ニュートリノビーム方向に垂直に配置されている。この構造はビーム方向に放出される荷電粒子に対しては高い検出能を持つ一方で、ビームに対して大きな角度で放出される粒子に対しては検出効率が低下するという課題がある。本研究ではこの課題を解決するために、従来の ECC の側面に検出器を追加した「改良型 ECC」を考案し、物質中を通過する粒子の物理相互作用をシミュレーションするソフトである Geant4 を用いて性能評価を行った。シミュレーションの結果、従来の ECC では検出効率の低かった角度帯の荷電粒子に対して、改良型 ECC では検出効率が大幅に改善されることを確認した。

本研究の結果は、NINJA 実験におけるニュートリノ反応の測定精度向上に寄与するものである。

目次

第 1 章	ニュートリノ	1
1.1	ニュートリノの歴史	1
1.2	ニュートリノ反応	1
1.2.1	CCQE 反応	1
1.2.2	2p2h 反応	2
第 2 章	NINJA 実験	3
2.1	実験の概要	3
2.1.1	原子核乾板	3
2.1.2	検出器	4
2.2	ECC	5
第 3 章	従来型 ECC での検出効率	6
3.1	Geant4	6
3.2	従来型 ECC の構造	6
3.3	シミュレーション条件	8
3.4	シミュレーション結果	9
第 4 章	改良型 ECC (2D)	11
4.1	改良型 ECC (2D) の構造	11
4.2	従来型 ECC と改良型 ECC (2D) の検出効率比較	11
4.3	検出効率の位置依存性	15
第 5 章	改良型 ECC (3D)	18
5.1	改良型 ECC (3D) の構造	18
5.2	従来の ECC と改良型 ECC (3D) の検出効率比較	18
第 6 章	結論	21
付録 A	MIP	23
付録 B	検出効率	24
引用文献		33

第 1 章

ニュートリノ

1.1 ニュートリノの歴史

ニュートリノは β 崩壊の際に放出される電子のエネルギーが幅を持つことから, 1930 年に W.Pauli によって予言された粒子である. ニュートリノは物質を構成する最小単位の素粒子であり, 中性レプトンに分類される. ニュートリノは電荷を持たず, 質量も極めて小さい. 素粒子標準模型のニュートリノは弱い相互作用と重力相互作用でしか反応しなく, 質量は非常に小さいため透過性が非常に高い. 標準模型によれば, 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 3 世代とそれぞれに対応した反粒子が存在する.

1.2 ニュートリノ反応

本節では, ニュートリノと原子核反応について説明する. ニュートリノ荷電カレント反応はニュートリノのエネルギーによって主要な反応モードが異なる. ニュートリノ反応の中から, NINJA 実験における検出効率に関わる特に重要な荷電カレント準弾性散乱 (CCQE) と 2p2h(two-particle-two-hole) 反応について説明する.

1.2.1 CCQE 反応

NINJA 実験で用いられる J-PARC ニュートリノビームのエネルギー領域 (1 GeV 以下) では, CCQE 反応が最も支配的である. CCQE 反応は次式のようにニュートリノと核子が相互作用し, 荷電レプトンと核子を放出する反応である.

$$\nu_l + n \rightarrow l^- + p \quad (1.1)$$

$$\bar{\nu}_l + p \rightarrow l^+ + n \quad (1.2)$$

また, それぞれに対応するファインマンダイアグラムについても示す.

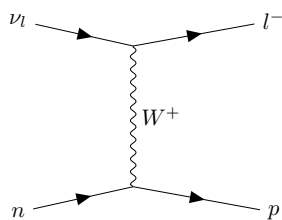


図 1.1 ファインマンダイアグラム ($\nu_l + n \rightarrow l^- + p$)

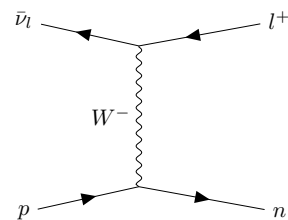


図 1.2 ファインマンダイアグラム ($\bar{\nu}_l + p \rightarrow l^+ + n$)

1.2.2 2p2h 反応

2p2h 反応とは、原子核内で2個の核子が相関をもって存在し、そのペアとニュートリノが反応することで終状態に2核子が放出される反応である。相関を持つ核子は中性子と陽子であることが多く、その場合は終状態で陽子が2個放出される。

$$\nu_l + n + p \rightarrow l^- + p + p \quad (1.3)$$

2p2h 反応を測定したい場合は陽子を二個とも観測する必要がある。2p2h 反応で放出される陽子は低運動量であり、T2K 実験で用いられるような大型の検出器は空間分解能が $\mathcal{O}(\text{cm})$ であるため測定が難しい。そのため、CCQE との区別ができずニュートリノ振動測定に対して大きな系統誤差を生じさせている。この問題を解決するために、NINJA 実験は原子核乾板を用いて、ニュートリノ反応の精密測定を行っている。

第 2 章

NINJA 実験

2.1 実験の概要

NINJA 実験は茨城県東海村にある J-PARC (大強度陽子加速器施設) の T2K 前置検出器ホール内でニュートリノと原子核の反応を精密に測定する実験である [1]. この実験では, 高い位置分解能を持つ原子核乾板を用いている. 低い運動量閾値でハドロンを検出するために, ターゲット物質と原子核乾板フィルムを交互に重ねた層状の検出器を用いる.

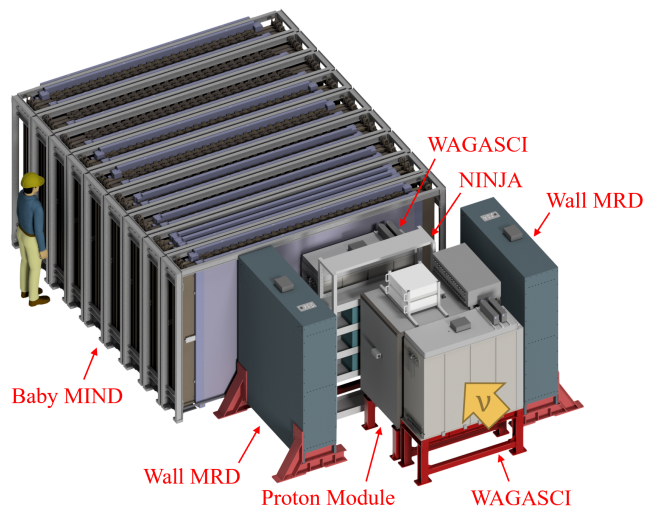


図 2.1 WAGASCI-Baby MIND 検出器と NINJA 実験の検出器 [2]

2.1.1 原子核乾板

原子核乾板はゼラチンの中に臭化銀 (AgBr) の結晶が分散された構造である. 現像処理をすることで, 荷電粒子が通った飛跡を銀粒子の並びとして可視化することができる. 高い位置分解能と角度分解能を持ち, 飛程が短い粒子の測定に向いている. NINJA 実験で使用する原子核乾板フィルムは, プラスチックでできた土台の両面に乳剤を塗った構造になっている. 土台と乳剤の物質の厚さはそれぞれ $210\ \mu\text{m}$ と $70\ \mu\text{m}$ である.

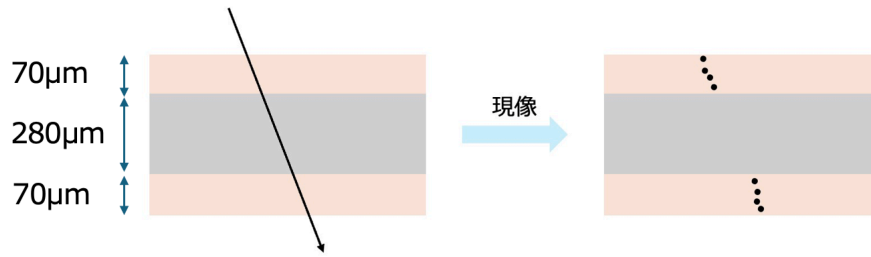


図 2.2 原子核乾板

2.1.2 検出器

精密な測定を実現するために、複数の検出器を組み合わせた構成になっている。

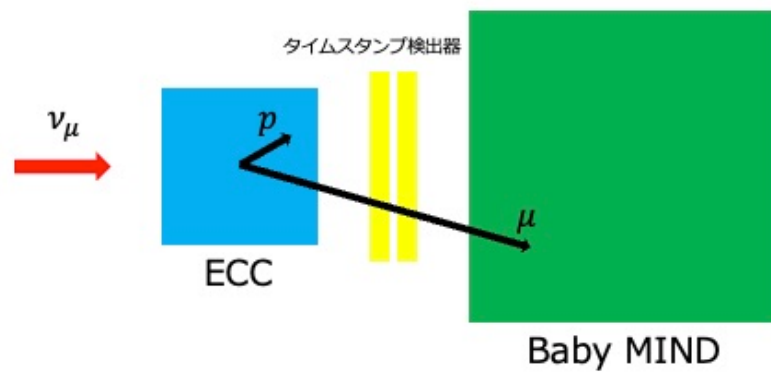


図 2.3 NINJA 実験で使用されている検出器の概略図

メインのターゲット検出器である Emulsion Cloud Chambers (ECC) は、ニュートリノビーム方向の最上流に配置されている。ECC はターゲット物質と原子核乾板フィルムが交互に重なった構造であり、ECC 内で発生したニュートリノ反応による荷電粒子の位置情報を記録する。その下流には Baby MIND が配置されている。Baby MIND は ECC 内のニュートリノ反応で発生したミューオンを検出する。ECC は高い位置、角度分解能を持つが時間情報を持たないため、実験中に生じたニュートリノ反応と関係のない宇宙線由来の飛跡も蓄積してしまう。Baby MIND は時間情報を持つが位置、角度分解能が $\mathcal{O}(\text{cm})$, $\mathcal{O}(0.1 \text{ rad})$ 程度である。よって正確な飛跡を選ぶために飛跡接続をするタイムスタンプ検出器を2つの検出機間に設置する。タイムスタンプ検出器として、エマルジョンシフターとシンチレーショントラッカーを用いている。

2.2 ECC

メインの検出器である ECC は原子核乾板とターゲット物質を交互に積み重ねた層で構成されている。

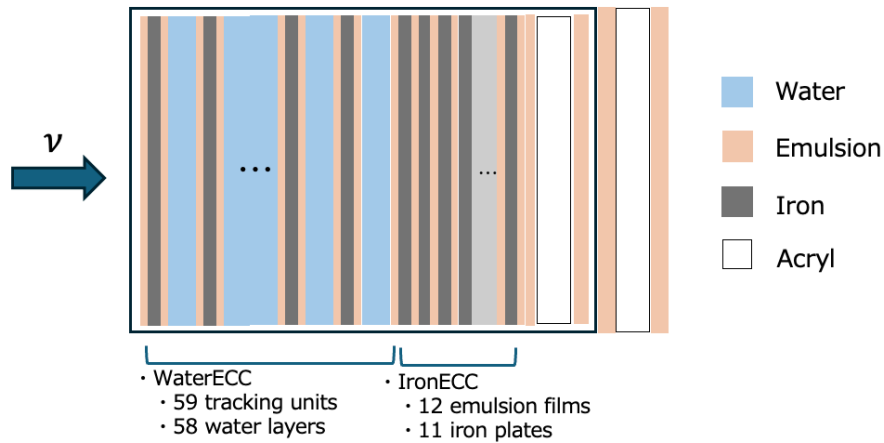


図 2.4 ECC の概略図

ニュートリノビーム方向の一番上流には水 ECC が設置されていて、59 個のトラッキングユニットと 58 層の水層で構成されている。水層の厚さは 2.3 mm であり、トラッキングユニットは、25 cm × 25 cm の原子核乾板フィルムを厚さ 500 μm の鉄板 (SUS316L) の両側に貼り付け真空にしたものである。鉄板は原子核乾板を保持するという役割とともに、荷電粒子の運動量測定にも使用される。水 ECC の下流には鉄 ECC が配置されている。鉄 ECC は 12 枚の原子核乾板フィルムと 11 枚の鉄プレートで構成されている。その下流には厚さ 2 mm のアクリル板と 4 枚の原子核乾板フィルムで構成された inside special sheet(ISS) が配置され、ここまでのユニットが厚さ 1 cm のアクリル容器に入っている。容器の外には ISS と同じ構成の outside special sheet(OSS) が配置されている。ISS と OSS は ECC とエマルジョンシフターの間でミュオンの飛跡をつなぐ役割を担っている。

現在 NINJA 実験で用いられているこの構造の ECC は、原子核乾板とターゲット物質をニュートリノビーム方向に対して垂直に積層した構造を持つ。この構造はビーム方向に平行に散乱される粒子に対しては高い検出能力を持つ一方で、ビーム方向に垂直に放出される荷電粒子に対しては飛跡がフィルムを通過する回数が極端に少なくなり、検出が困難であるという課題がある。そこで、この ECC の構造を改良し、大角度に散乱された粒子の検出効率をあげることが本研究の目的である。

第 3 章

従来型 ECC での検出効率

3.1 Geant4

まずは現在使われている ECC の構造を用いて荷電粒子の検出効率を Geant4 でシミュレーションした。Geant4 は欧州原子核研究機構 (CERN) で開発された、物質中を通過する粒子の物理相互作用をシミュレーションするソフトである。本シミュレーションで使用した Geant4 のバージョンは v11.3.2 である。シミュレーション実行で考慮する物理相互作用の情報をまとめたオブジェクトである Physics List は、Geant4 チームによって作成された標準的な物理リストの中の QGSP_BERT を使用した。

3.2 従来型 ECC の構造

従来型 ECC の構造は 2.2 節に示した通りであり、これを Geant4 上で再現した。それぞれの物質に対する厚さは表 3.1 の通りである。この原子核乾板を有感検出器として定義づけることで再現した。有感検出器とはシミュレーション結果を取得するための仕組みで、定義付けしたボリュームがイベントごとのデータを取り出せるようになる。

表 3.1 ECC に使われている物質の厚さ

物質	厚さ
水	2.3 mm
鉄	500 μm
原子核乾板	140 μm
アクリル板 (ISS,OSS)	2 mm

水とアクリル板については Geant が標準提供する、NIST 物質データベースのものを利用した (G4_WATER, G4_PLEXIGLASS)。鉄 (SUS316L) プレートと原子核乾板フィルムについては、実際に NINJA 実験の解析に使われている密度と元素比で再現した。密度は鉄が 8.03 g/cm^3 、原子核乾板が 3.816 g/cm^3 であり、元素比は表 3.2 と表 3.3 の通りである。また、Geant4 で従来型 ECC を再現した際の画面を図 3.1 と図 3.2 に示す。

表 3.2 鉄 (SUS316L) の元素比

元素	比
Fe	0.67
Cr	0.17
Ni	0.14
Mo	0.02

表 3.3 原子核乾板の元素比

元素	比
Ag	1.809
Br	1.332
I	0.012
C	0.276
H	0.054
O	0.252
N	0.074
S	0.007
合計	3.816

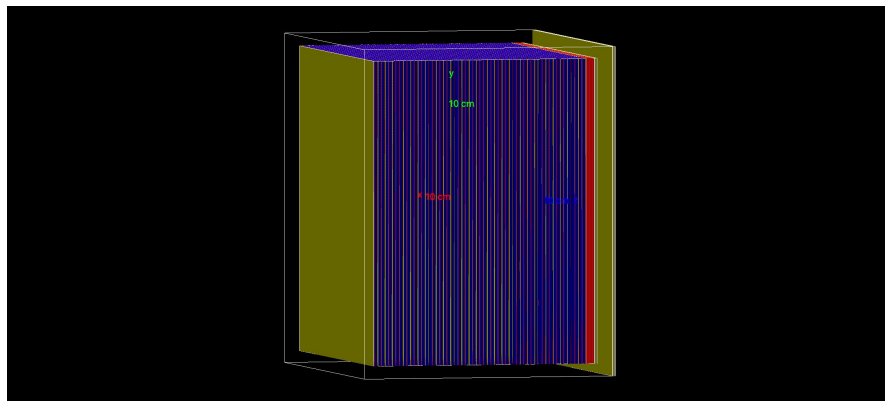


図 3.1 Geant4 での従来型 ECC の立体構造

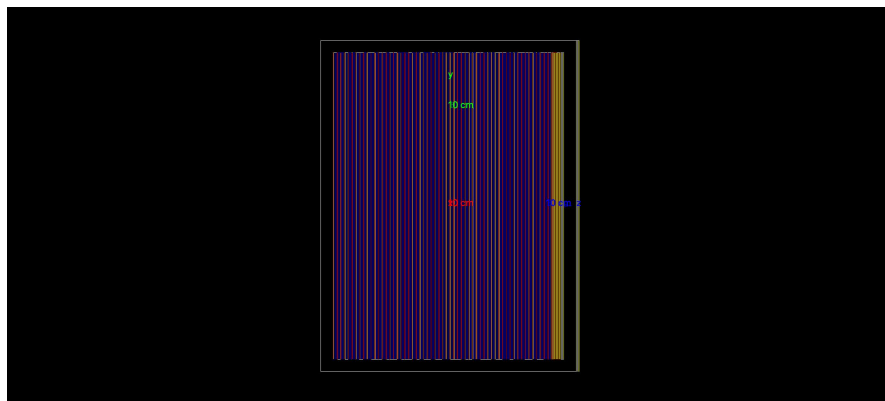


図 3.2 Geant4 での従来型 ECC の側面からの平面図

3.3 シミュレーション条件

本実験のシミュレーションの目的は、荷電粒子に対する ECC の検出効率を評価することである。シミュレーション対象とする荷電粒子は陽子、 μ 粒子 (+/-)、 π 中間子 (+/-)、 K 中間子 (+/-) である。本論文では陽子、 μ^- 、 π^+ についてのみ結果を考察し、残りの粒子に対する検出効率のグラフは付録に記載する。入射エネルギーは 10 MeV から 400 MeV の範囲とし、以下の刻み幅で測定を行った。

- 10 MeV - 160 MeV : 10 MeV 間隔
- 160 MeV - 200 MeV : 20 MeV 間隔
- 200 MeV - 400 MeV : 50 MeV 間隔

各エネルギーに対し、発射角 θ を 0 度から 180 度まで 1 度刻みで変化させ、各角度につき 10,000 個の粒子を発射して検出効率を測定した。 θ の定義は図 3.3 に記載する通りである。粒子の発射位置については、入射してきたニュートリノが水層で反応した事象を想定し、全水層の中からランダムに選択した層内のランダムな位置から生成させた。検出判定については、「トラッキングユニットに対して 3 ユニット連続でヒット」、あるいは「原子核乾板に対して 3 枚連続でヒット」のいずれかの条件が満たした場合に検出成功と判定した。エネルギー閾値を 0.04 MeV とし、この値を超えた時に「ヒット」と判定した。ここで、「ヒット」の基準となるエネルギー閾値は、フィルム 1 枚の厚さ 140 μm に対して、MIP (Minimum Ionizing Particle) が落とす平均エネルギーの半分である 0.04 MeV と定義した。これは実際に 1 GeV の μ^- を MIP とした場合の値を Geant4 で測定した。MIP に対する詳しい結果は付録 A に記載する。

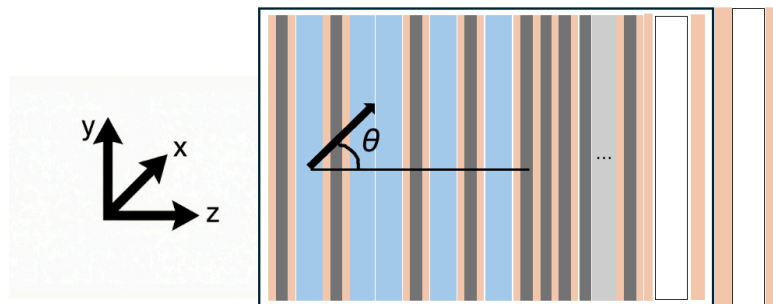


図 3.3 粒子の発射角度 θ の定義

次に、方位角 ϕ を定義する。図 3.4 に示す通り、 ϕ は z 軸を回転軸とする角度である。 ϕ をランダムに設定した場合は粒子が全方位に発射されるが、 $\phi = 0^\circ$ に固定した場合は x - y 平面内へと限定して発射される。本研究では、構造の異なる 2 種類の改良型 ECC を評価する。第 4 章で紹介する、改良型 ECC (2D) は回転対称性を持たないため、 $\phi = 0^\circ$ に固定した 2 次元的シミュレーションを行った。また、第 5 章で紹介する改良型 ECC (3D) は回転対称性を有するため、実際の実験環境に近づけるため、 ϕ を全方位に展開した 3 次元的シミュレーションを行った。

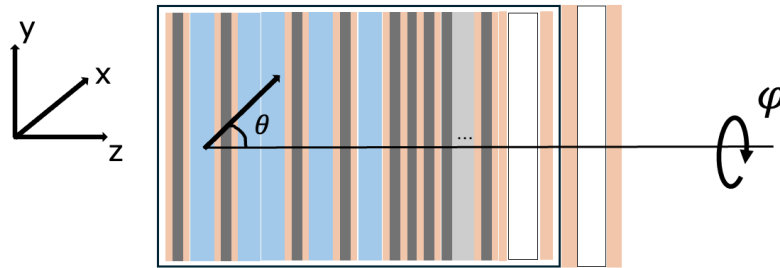


図 3.4 粒子の発射角度 ϕ の定義

3.4 シミュレーション結果

本章では、従来型 ECC における検出効率についてのシミュレーション結果を示す。検出効率は、全イベントに対する検出できた粒子の割合である。第 4 章では $\phi = 0^\circ$ に固定したシミュレーション、第 5 章では ϕ をランダムに設定したシミュレーションを行う。よって、その 2 つの場合において結果を比較するため、また、 ϕ による検出効率の差異があるのかを確認するため、方位角 ϕ を 0° に固定した場合とランダムに設定した場合の結果について示す。

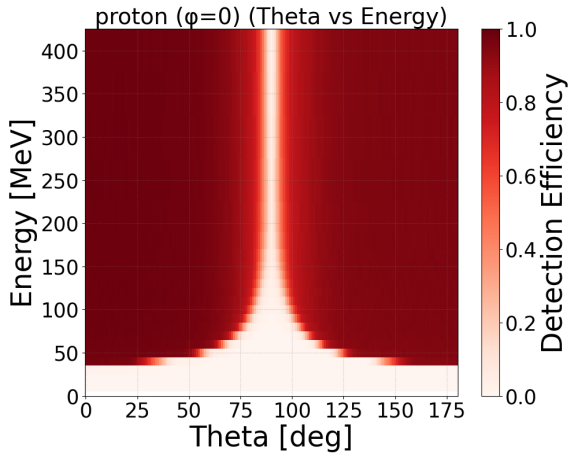
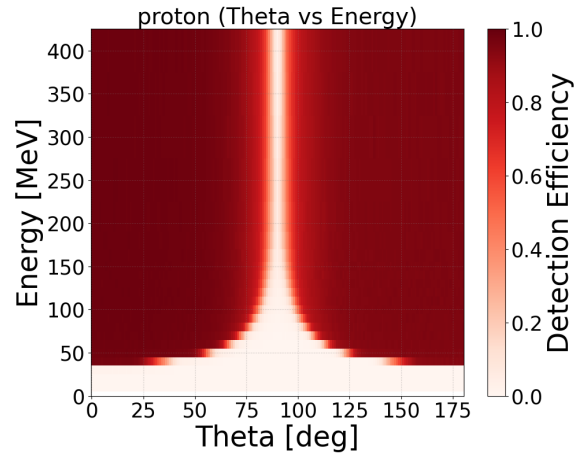
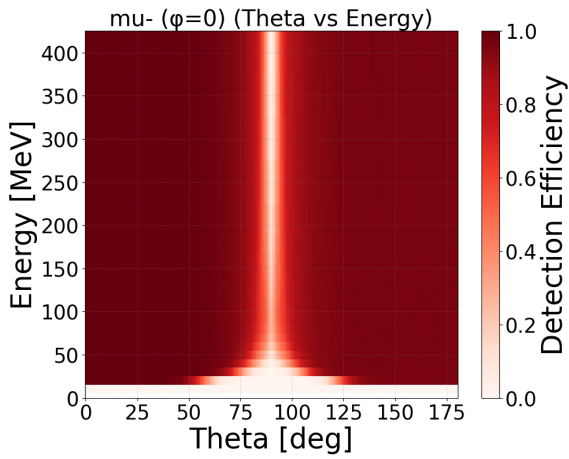
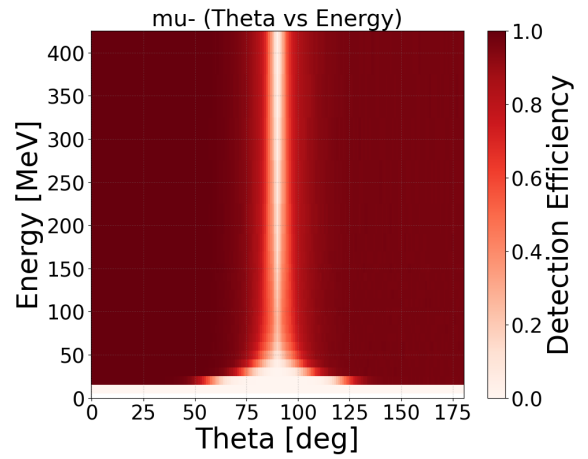
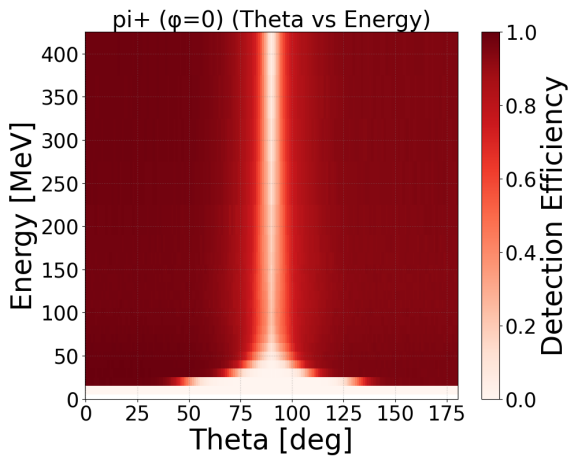
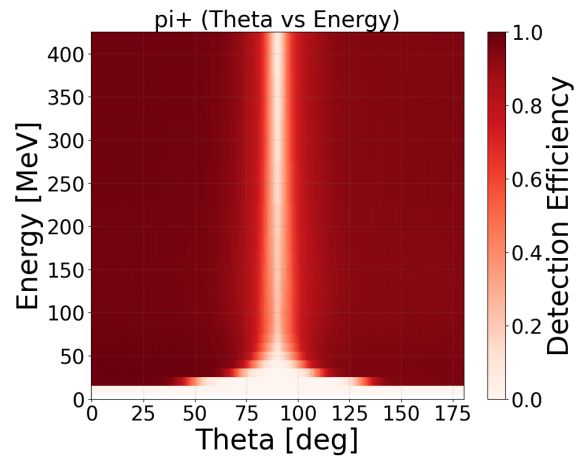
$$\text{検出効率} = \frac{N_{\text{detected}}}{N_{\text{total}}} \quad (3.1)$$

縦軸をエネルギー (MeV)、横軸を $\theta(^{\circ})$ とし、色の濃淡で検出効率を表した。まずは、陽子を発射した際の結果を図

3.5 と図 3.6 に示す。全エネルギーと全角度に対する平均の検出効率は、70.67% ($\phi = 0^\circ$)、70.66% (ϕ : ランダム) であり、方位角による検出効率の差は見られなかった。

エネルギーが大きくなるほど、検出効率も大きくなるという傾向が見られた。約 40 MeV より小さいエネルギーの陽子は検出するのに十分なエネルギーを持っていない、どの角度でも検出できていないことがわかった。また、入射角 θ が 90° に近づくほど検出効率は小さくなった。これが、層に対して大きな角度で発射された荷電粒子を検出することができないという現在の ECC の問題点である。

μ^- と π^+ に対する結果も同様に図 3.7、図 3.8、図 3.9、図 3.10 に記載した。 μ^- の全エネルギーと全角度に対する平均の検出効率は、85.88% ($\phi = 0^\circ$)、85.77% (ϕ : ランダム)、 π^+ に対する検出効率は、81.97% ($\phi = 0^\circ$)、81.92% (ϕ : ランダム) であった。どの粒子においても、方位角 ϕ を変化させたことによる検出効率への大きな影響はなかった。その他の粒子に対する結果については付録に記載する。

図 3.5 陽子に対する検出効率 ($\phi = 0^\circ$)図 3.6 陽子に対する検出効率 (ϕ : ランダム)図 3.7 μ^- に対する検出効率 ($\phi = 0^\circ$)図 3.8 μ^- に対する検出効率 (ϕ : ランダム)図 3.9 π^+ に対する検出効率 ($\phi = 0^\circ$)図 3.10 π^+ に対する検出効率 (ϕ : ランダム)

第 4 章

改良型 ECC (2D)

従来型 ECC では面と平行な方向に発射する荷電粒子を測定することが難しい。実際に 3 章の結果にあるように、90 度のまわりの角度では検出効率が著しく低下している。そこで、従来型 ECC の側面に追加で ECC を置くことで、90 度まわりの粒子を検出できるようにし、検出効率をあげることを試みた。直方体の ECC には 4 つの側面があるが、上と下のように対称に 2 つだけ ECC を追加したものを改良型 ECC (2D)、4 つ全ての方向に追加したものを改良型 ECC (3D) と呼ぶ。本章では改良型 ECC (2D) について述べる。

4.1 改良型 ECC (2D) の構造

改良型 ECC (2D) の構造は図 4.1 の通りである。

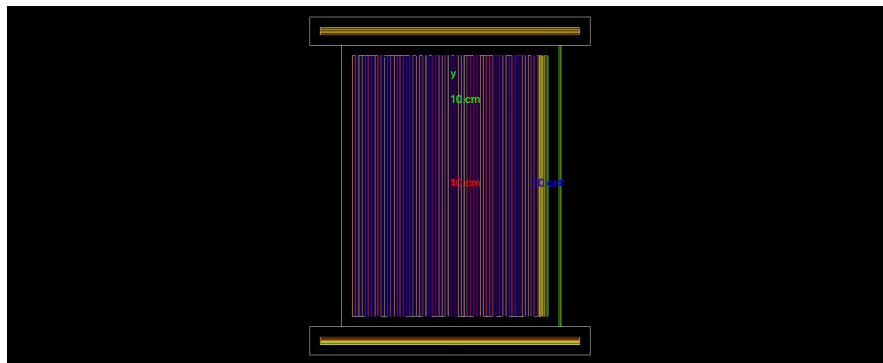


図 4.1 Geant4 での改良型 ECC (2D) の構造

追加する ECC としては、従来型 ECC で使用されている鉄 ECC の部分を採用している。つまり、ECC の上下に原子核乾板フィルムが 12 枚、鉄プレートが 11 枚交互に積まれていて、全体を厚さ 1 cm のアクリル箱に入れたものを追加した。長さや厚さなどは、2 章に記載した通りである。従来型 ECC と追加した鉄 ECC との間には、1 cm 厚さのアクリル箱 2 個分である、2 cm のフィルムが存在しない隙間がある。

4.2 従来型 ECC と改良型 ECC (2D) の検出効率比較

改良型 ECC (2D) は従来型 ECC の上下方向にのみ検出器を加えた構造であり、 z 軸回りの回転対称性がない。よって、本章では $\phi = 0$ として粒子の放出方向を検出器が配置された特定の平面内に限定し、2 次元的な評価をした。他の条件に関しては、3 章にある従来型 ECC に対する条件と同じである。まず、荷電粒子を陽子とした場合の結果を図 4.2 と図 4.3 に示す。図 4.2 の結果と図 4.3 の結果を比較すると、主に 90 度に近い高角度帯での検出効率が向上して

いる。全エネルギーと全角度に対する平均の検出効率としては 73.06% (改良型 ECC (2D)), 70.67% (従来型 ECC) であった。

μ^- と π^+ に対する結果も同様に図 4.4, 図 4.5, 図 4.6, 図 4.7 に記載した。 μ^- の全エネルギーと全角度に対する平均の検出効率は, 90.51% (改良型 ECC (2D)), 85.88% (従来型 ECC), π^+ に対する検出効率は, 85.58% (改良型 ECC (2D)), 81.97% (従来型 ECC) であった。どの粒子においても, 改良型 ECC(2D) の方が高い検出効率であった。その他の粒子に対する結果については付録に記載する。

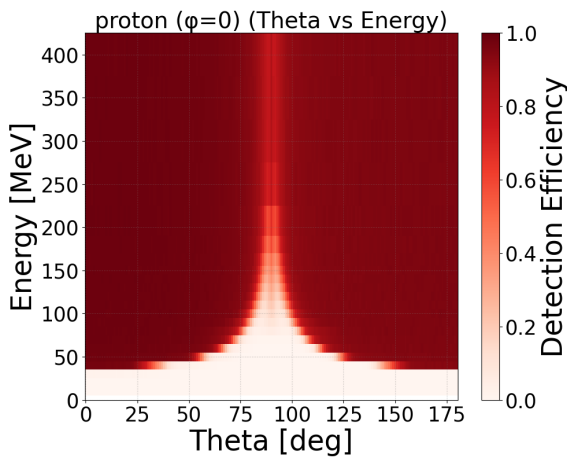


図 4.2 陽子に対する検出効率 (改良型 ECC (2D))

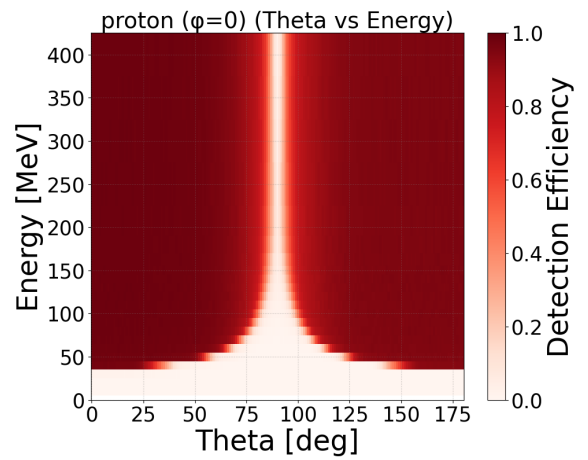


図 4.3 陽子に対する検出効率 (従来型 ECC)

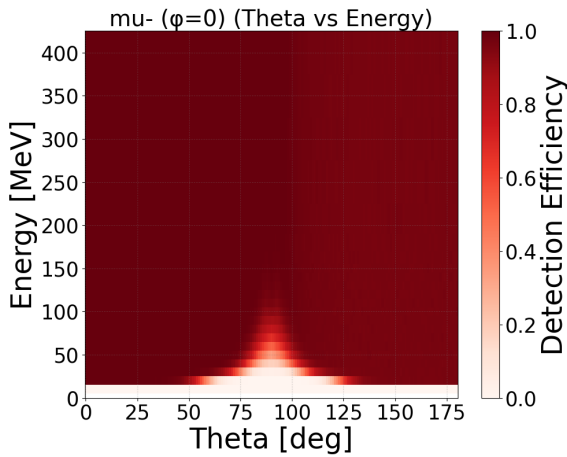


図 4.4 μ^- に対する検出効率 (改良型 ECC (2D))

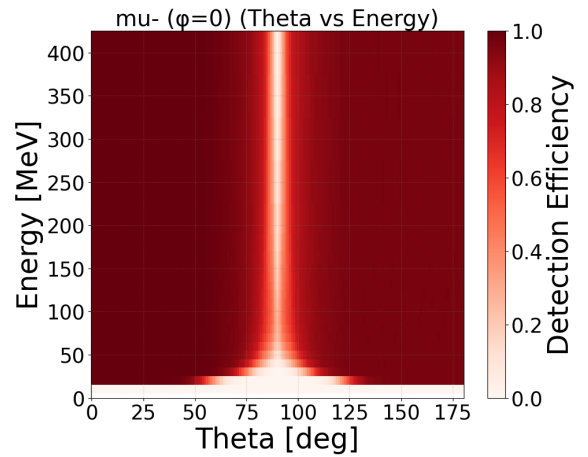


図 4.5 μ^- に対する検出効率 (従来型 ECC)

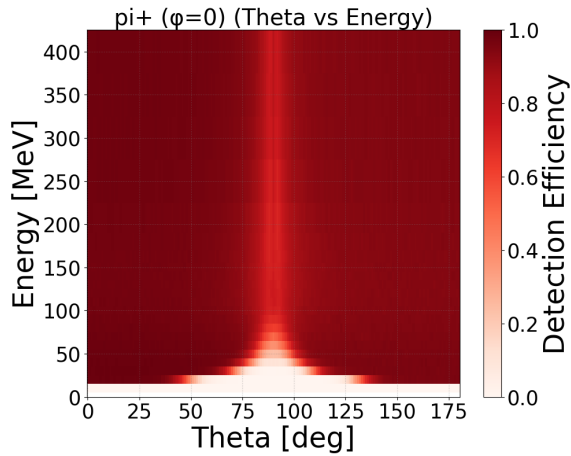


図 4.6 π^+ に対する検出効率 (改良型 ECC (2D))

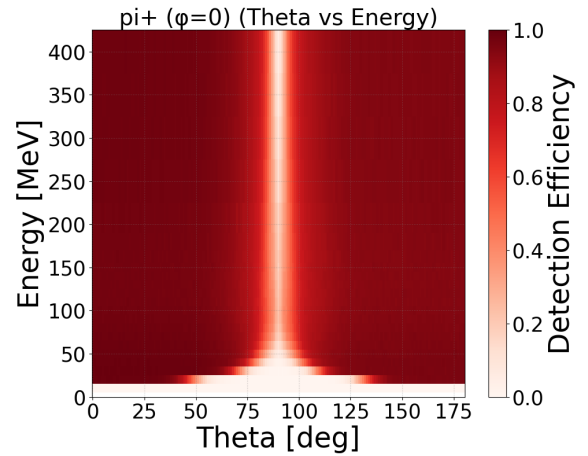


図 4.7 π^+ に対する検出効率 (従来型 ECC)

ECC の構造を改良することで、90 度に近い高角度帯での検出効率の向上が確認できた。比較しやすいように、改良型 ECC (2D) と従来型 ECC の検出効率の差について、図 4.8 から図 4.13 に示す。全ての角度に対してプロットしたものと、 θ を 75 度から 105 度の範囲に拡大したものを記載した。

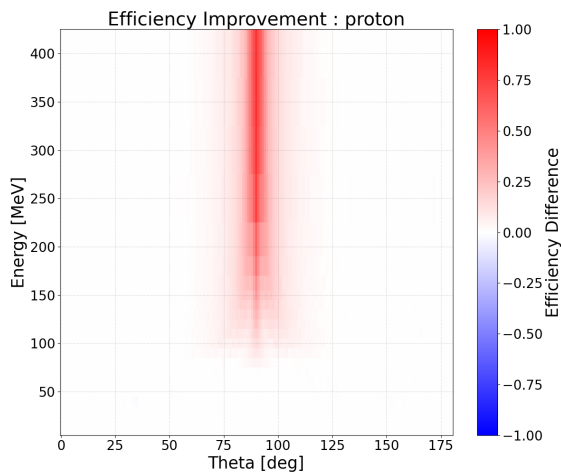


図 4.8 改良型 ECC (2D) と従来型 ECC の検出効率の差 (陽子)

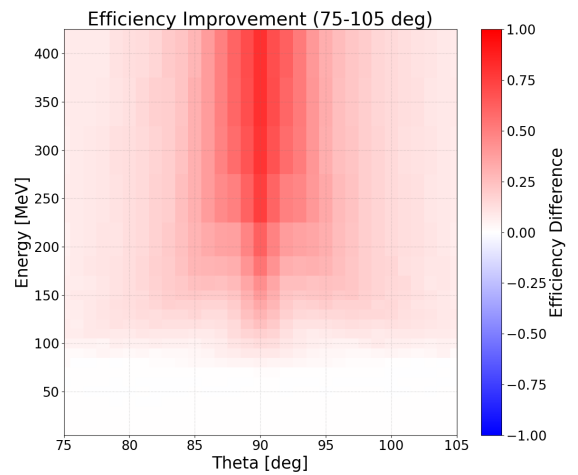


図 4.9 改良型 ECC (2D) と従来型 ECC の検出効率の差 (75°-105°)(陽子)

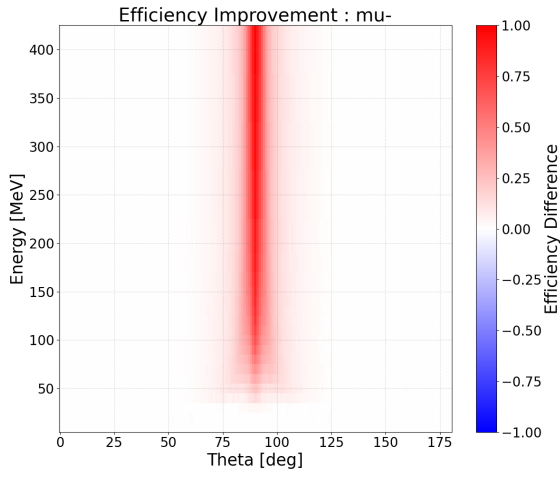


図 4.10 改良型 ECC (2D) と従来型 ECC の検出効率の差 (μ^-)

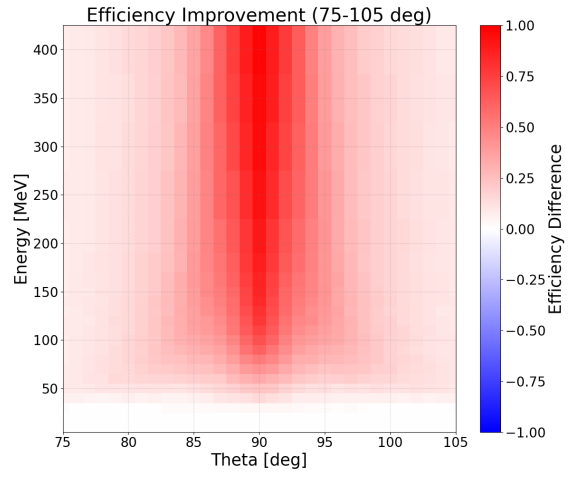


図 4.11 改良型 ECC (2D) と従来型 ECC の検出効率の差 ($75^\circ-105^\circ$)(μ^-)

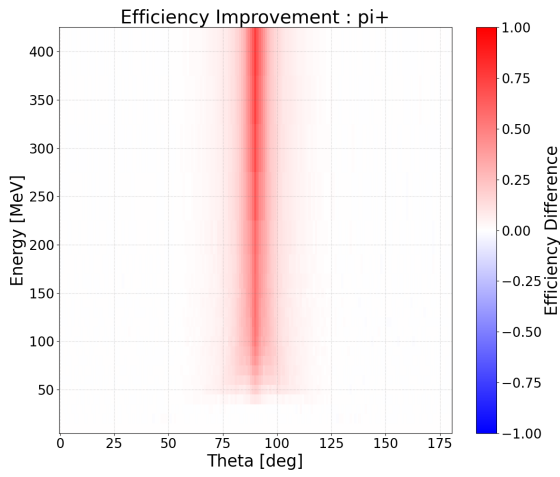


図 4.12 改良型 ECC (2D) と従来型 ECC の検出効率の差 (π^+)

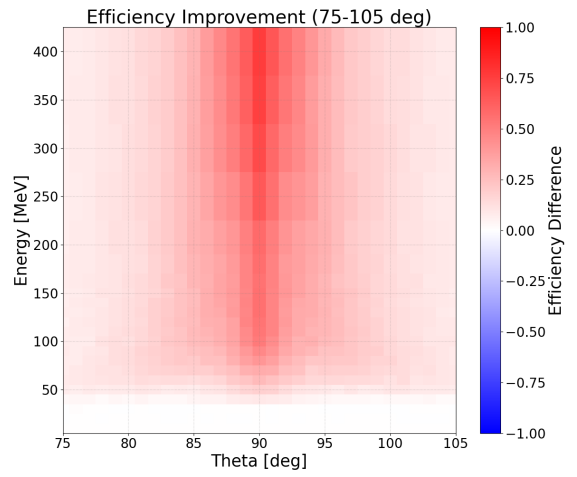


図 4.13 改良型 ECC (2D) と従来型 ECC の検出効率の差 ($75^\circ-105^\circ$)(π^+)

4.3 検出効率の位置依存性

ここからの考察は, π^+ を対象に進めていく. π^+ は陽子と μ 粒子の間ほどの透過力を持つ粒子である.

π^+ に対して, 発射位置の座標である (x,y,z) (図 4.14) それぞれの位置に対する検出効率について図 4.15 から図 4.20 に示す.

x と z については,ECC を改良したことによる位置依存性の変化はなかった. y 座標は, 値が大きくなるほど $+y$ 側に追加した ECC との距離が近づくことにより検出効率が向上していた.

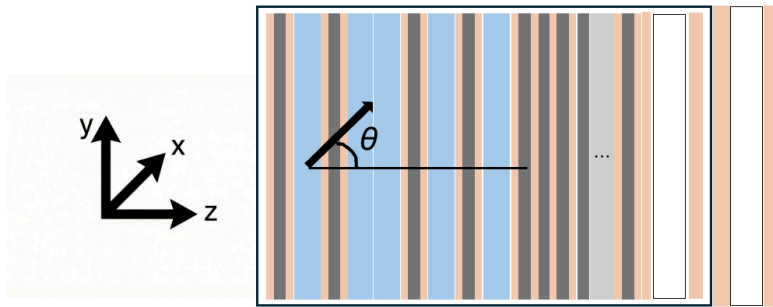


図 4.14 粒子の発射角度 θ と座標軸の定義

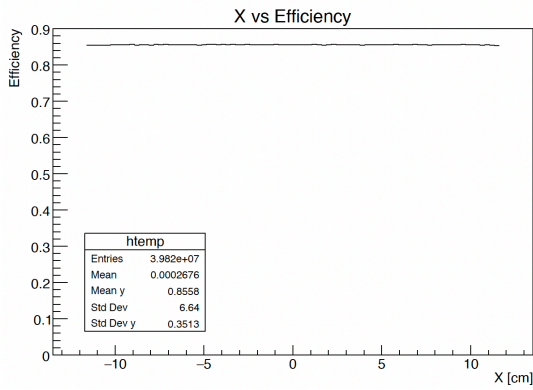


図 4.15 x の位置に対する改良型 ECC (2D) の検出効率 (π^+)

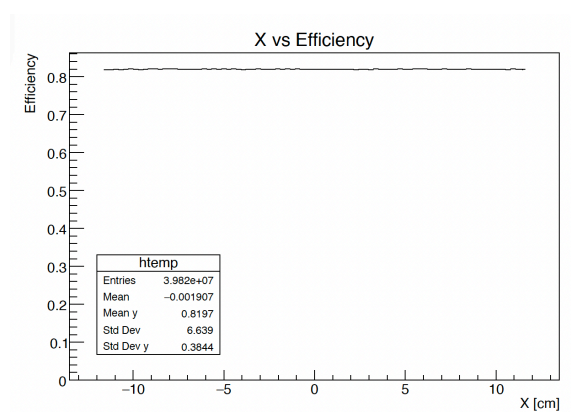


図 4.16 x の位置に対する従来型 ECC の検出効率 (π^+)

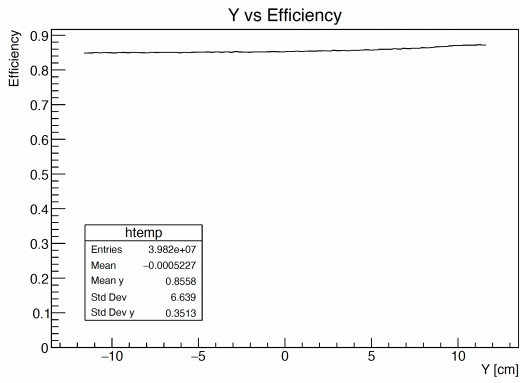


図 4.17 y の位置に対する改良型 ECC (2D) の検出効率 (π^+)

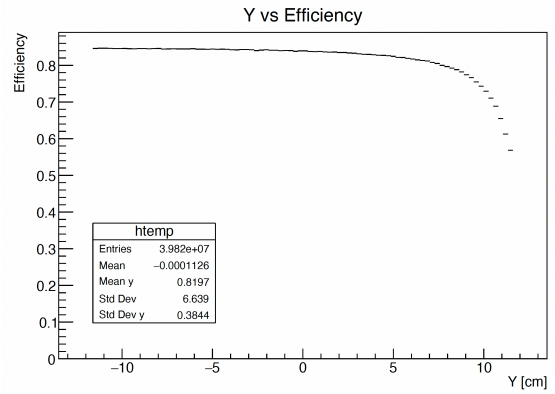


図 4.18 y の位置に対する従来型 ECC の検出効率 (π^+)

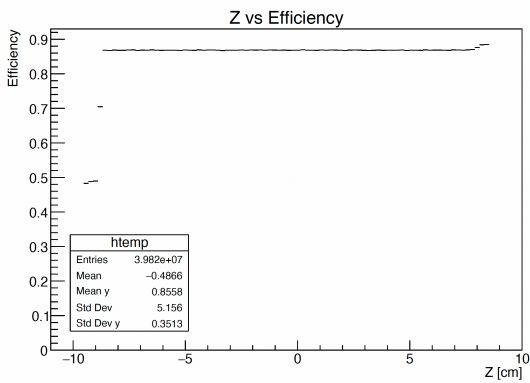


図 4.19 z の位置に対する改良型 ECC (2D) の検出効率 (π^+)

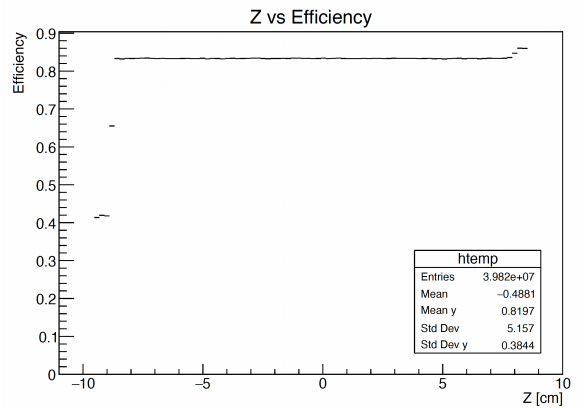


図 4.20 z の位置に対する従来型 ECC の検出効率 (π^+)

ここから、 y 座標による位置依存性についてさらに考察する。縦軸を y 座標、横軸を θ として検出効率を色の濃淡で表したグラフを図 4.21 と図 4.22 に示す。従来型 ECC では y の値が大きくなるにつれ、高角度帯での検出効率が低下する。これは、粒子の発生位置が検出器の側面に近づくとき、検出するのに十分な層数を通過する前に外に逃げ出してしまうからである。一方で、改良型 ECC (2D) では高角度帯において y の値が大きくなるほど検出効率が向上する。高角度帯へ発射された粒子は、主に従来型 ECC の上下に追加された ECC で検出される。したがって、 y の値が大きくなるほど $+y$ 側に設置された検出器に近い位置で発生することで検出効率が上がっていると考えられる。さらに図 4.21 に注目すると、 $y=0\sim 10$ かつ $\theta = 90^\circ$ の周りの領域で、検出効率が局所的に高くなっている部分が確認できる。これは、 θ が 90° に近づくほど、粒子は鉄 ECC の面に垂直に入射するからであると考えられる。検出器に対して垂直に近い角度で入射した粒子は、検出器の側面から抜け出しにくくなり、さらに複数層の原子核乾板を最短距離で貫通することができるため、検出効率が向上したと考察した。

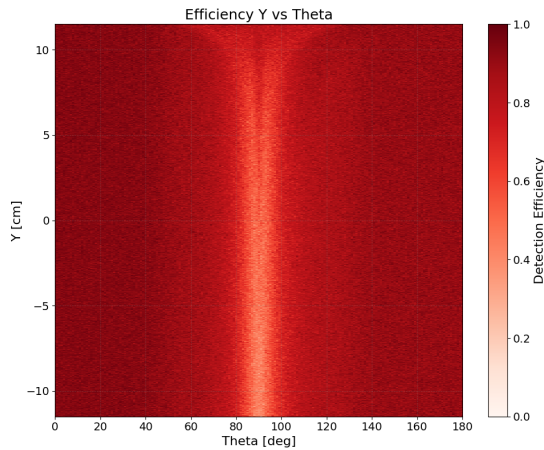


図 4.21 y の位置と θ に対する改良型 ECC (2D) の検出効率 (π^+)

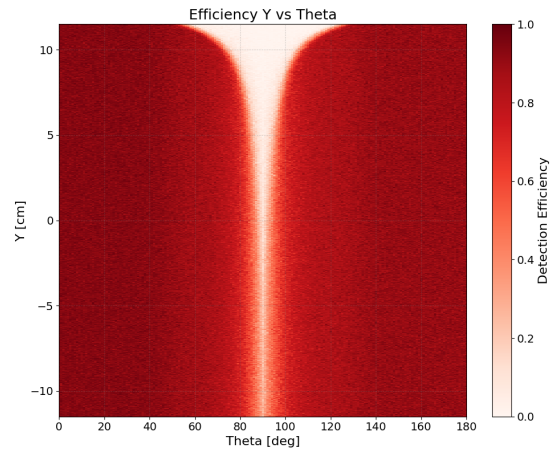


図 4.22 y の位置と θ に対する従来型 ECC の検出効率 (π^+)

第 5 章

改良型 ECC (3D)

5.1 改良型 ECC (3D) の構造

改良型 ECC (3D) は従来の ECC の側面の 4 方向全てに鉄 ECC を配置した構造になっている。この構造は回転対称なので、シミュレーションの際は荷電粒子を方位角 ϕ をランダムで発射した。実際の構造は図 5.1 に示す通りである。

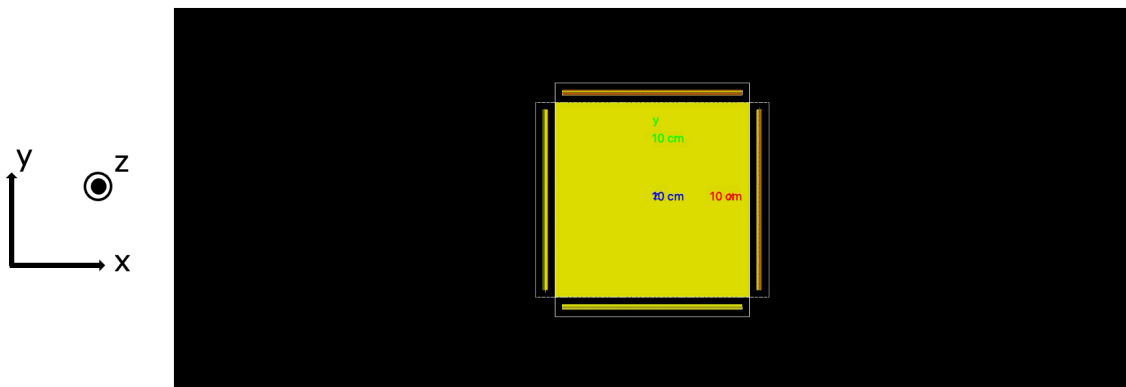


図 5.1 Geant4 での改良型 ECC (3D) の構造

5.2 従来の ECC と改良型 ECC (3D) の検出効率比較

この章では方位角 ϕ をランダムにした上で、従来の ECC と改良型 ECC (3D) の検出効率について比較する。陽子、 μ^- 、 π^+ に対する従来型 ECC と改良型 ECC (3D) の検出効率のグラフを図 5.2 から図 5.7 に示す。全エネルギーと全角度に対する平均の検出効率を表 5.1 に記載する。特に高角度帯で検出できるイベント数が増え、検出効率が向上した。

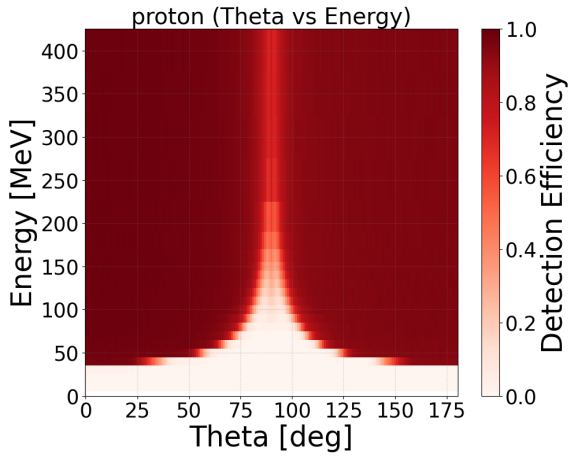


図 5.2 陽子に対する検出効率 (改良型 ECC (3D))

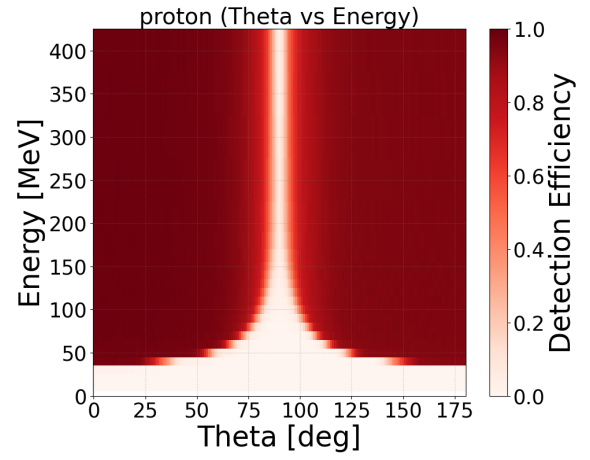


図 5.3 陽子に対する検出効率 (従来型 ECC)

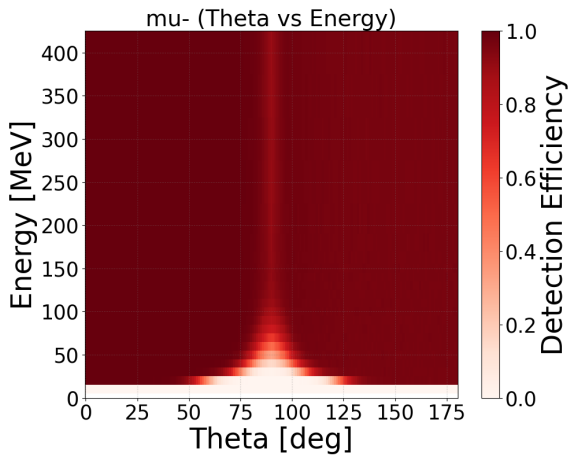


図 5.4 μ^- に対する検出効率 (改良型 ECC (3D))

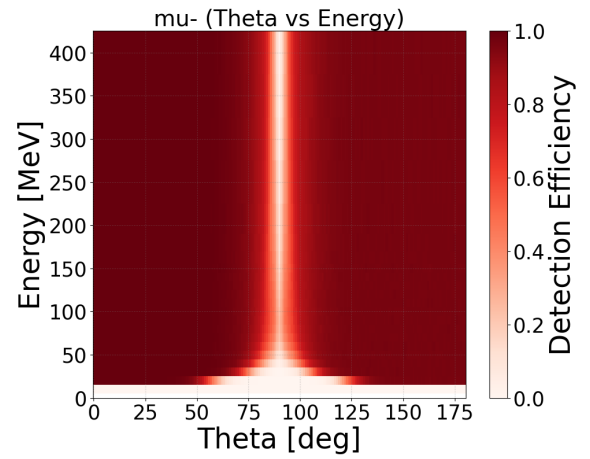


図 5.5 μ^- に対する検出効率 (従来型 ECC)

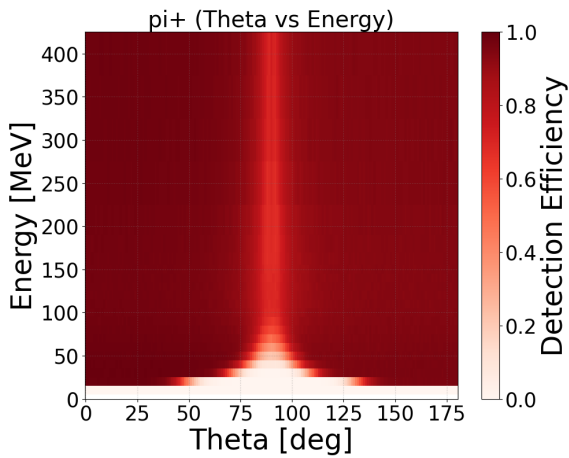


図 5.6 π^+ に対する検出効率 (改良型 ECC (3D))

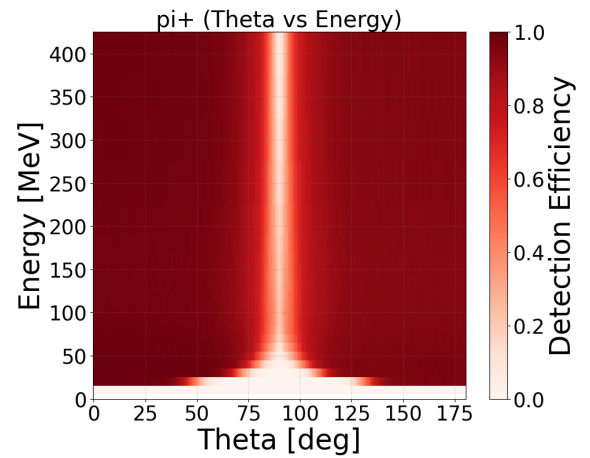


図 5.7 π^+ に対する検出効率 (従来型 ECC)

表 5.1 改良型 ECC (3D) と従来型 ECC に対する全エネルギーと全角度の平均の検出効率

粒子	改良型 ECC (3D)	従来型 ECC
陽子	72.83%	70.66%
μ^-	90.14%	85.77%
π^+	85.29%	81.36%

第 6 章

結論

はじめに、現在 NINJA 実験で使用されている検出器である ECC について、シミュレーションソフトである Geant4 上で再現し、検出効率の測定を行った。その結果、高角度帯で検出効率が大幅に低下することが確認できた。それを踏まえて、高角度帯に生成される荷電粒子も測定するために、従来型 ECC の末端にある鉄 ECC の構造を、従来型 ECC 側面の上と下に配置した。このようにして考案した改良型 ECC (2D) について、方位角 ϕ を固定することにより、2 次元平面内で荷電粒子を放出し、検出効率を測定した。その結果、主に高角度帯における検出効率の向上が見られた。また、発射位置の y 座標における位置依存性についても確認し、高角度帯において、 y の値が大きくなるほど検出効率が向上していることも確認できた。

さらに従来型 ECC の側面 4 方向全てに鉄 ECC を追加した改良型 ECC(3D) を Geant4 上で作成した。方位角 ϕ をランダムに発射してシミュレーションし、同様に高角度帯での検出効率の向上が確認できた。

今後は改良型 ECC (3D) に対する解析を進め、実際に新しい ECC を作成するための検証を行う。

付録 A

MIP

MIP として, 1GeV の μ^- を ECC に対して垂直に発射し, 水 ECC の原子核乾板フィルムで落としたエネルギーを測定した. 本実験のヒット閾値としては, MIP が落とすエネルギーの半分の値を採用した. データの数は 290572 個, 平均値が 0.0412 MeV, 標準偏差が 0.0276 MeV だった.

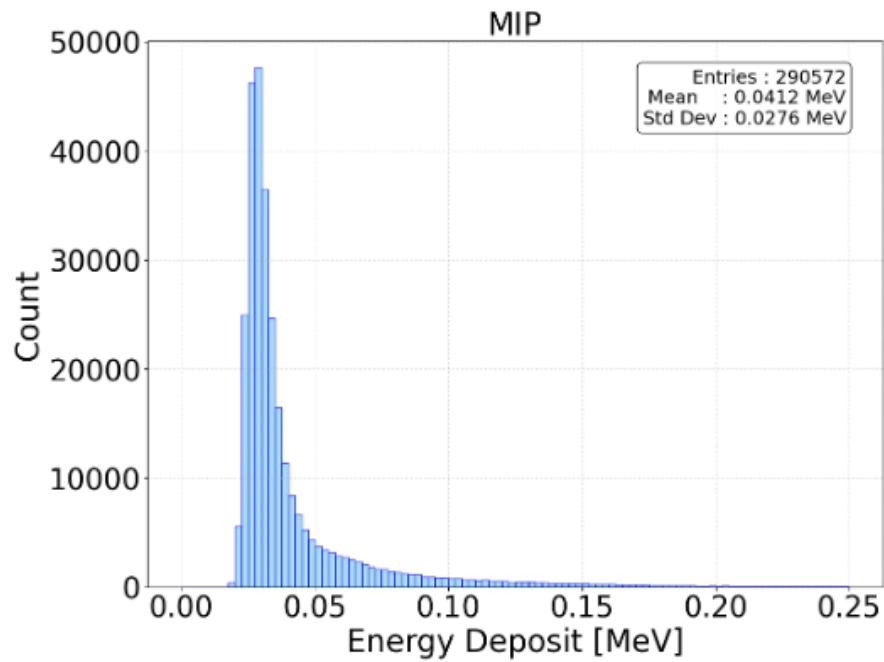


図 A.1 MIP がフィルムで落としたエネルギー

付録 B

検出効率

ここでは、本文に載せなかった粒子についての検出効率のグラフを記載する。図 6.1 から図 6.8 までは第 3 章の従来型 ECC に対する他の荷電粒子の結果である。表 6.1 は図 6.1 から図 6.8 までの結果に対する全エネルギーと全角度の平均の検出効率である。

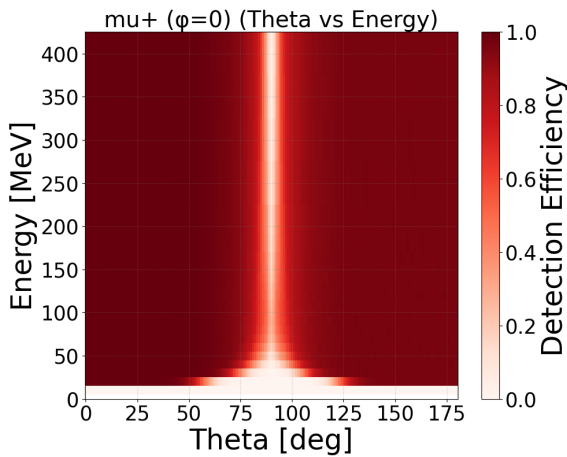


図 B.1 μ^+ に対する検出効率 ($\phi = 0^\circ$)

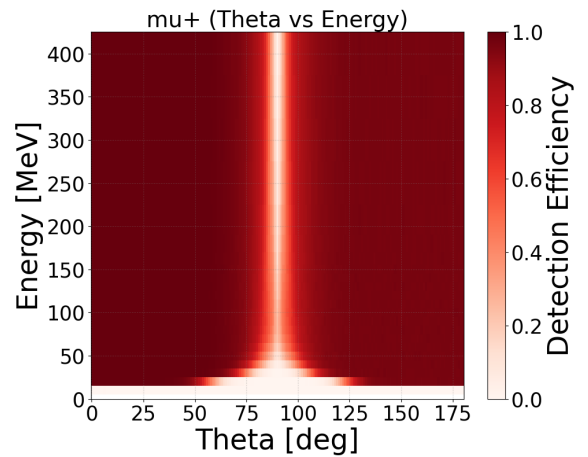


図 B.2 μ^+ に対する検出効率 (ϕ : ランダム)

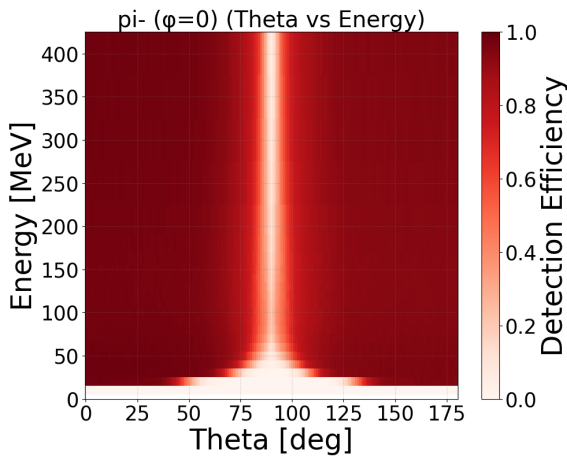


図 B.3 π^- に対する検出効率 ($\phi = 0^\circ$)

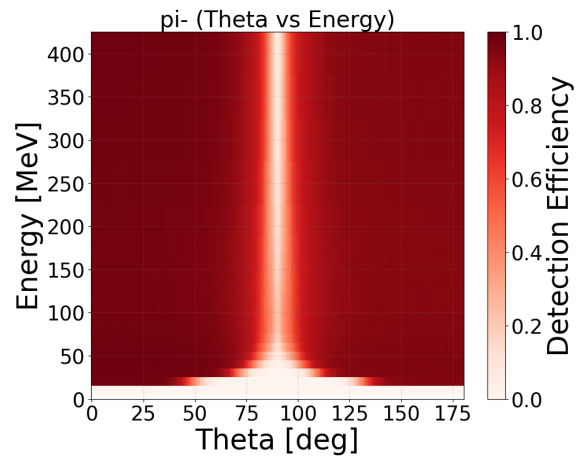


図 B.4 π^- に対する検出効率 (ϕ : ランダム)

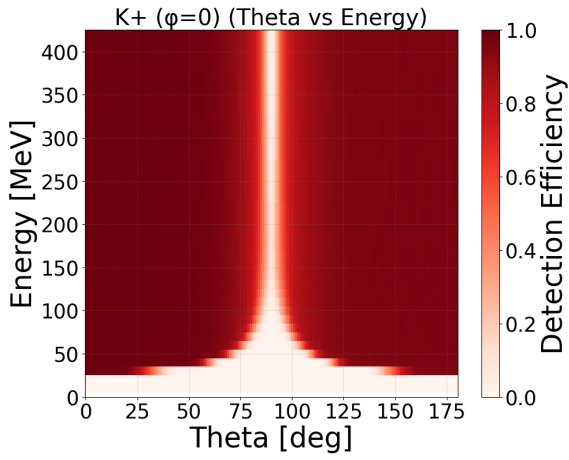
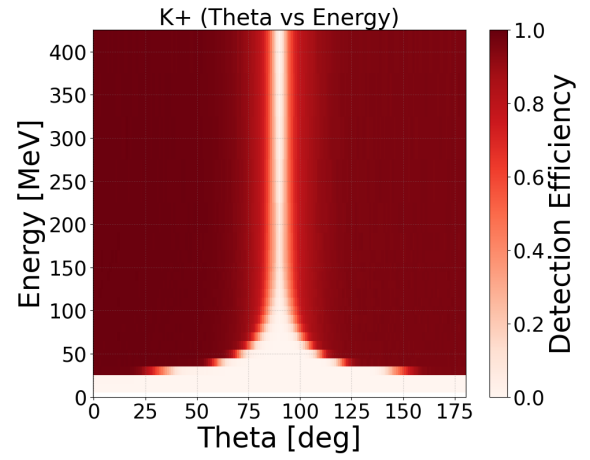
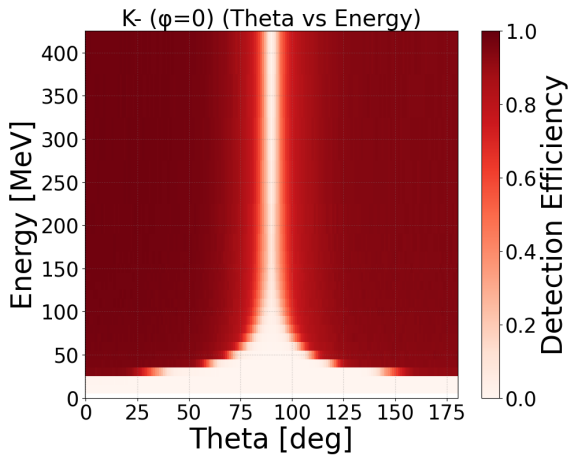
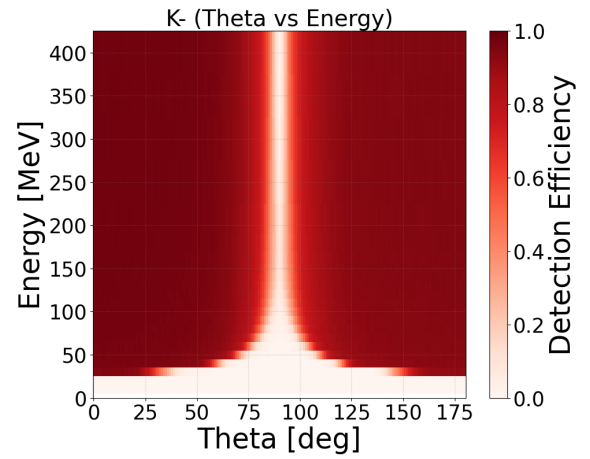
図 B.5 K^+ に対する検出効率 ($\phi = 0^\circ$)図 B.6 K^+ に対する検出効率 (ϕ : ランダム)図 B.7 K^- に対する検出効率 ($\phi = 0^\circ$)図 B.8 K^- に対する検出効率 (ϕ : ランダム)

表 B.1 従来型 ECC に対する全エネルギーと全角度の平均の検出効率

粒子	$\phi = 0^\circ$	ϕ : ランダム
μ^+	85.86%	85.77%
π^-	81.4%	81.36%
K^+	76.46%	76.44%
K^-	74.33%	74.31%

図 6.9 から図 6.16 は第 4 章の改良型 ECC (2D) と従来型 ECC に対する結果の比較である。表 6.2 は図 6.9 から図 6.16 までの結果に対する全エネルギーと全角度の平均の検出効率である。

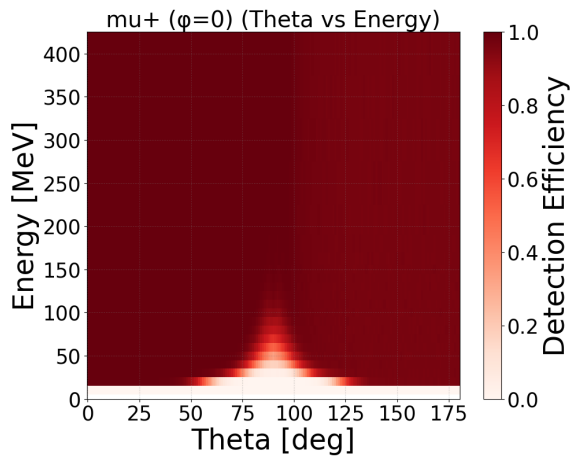


図 B.9 μ^+ に対する検出効率 (改良型 ECC(2D))

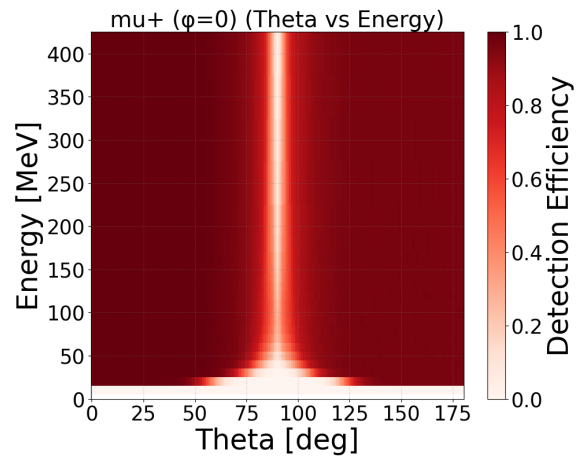


図 B.10 μ^+ に対する検出効率 (従来型 ECC)

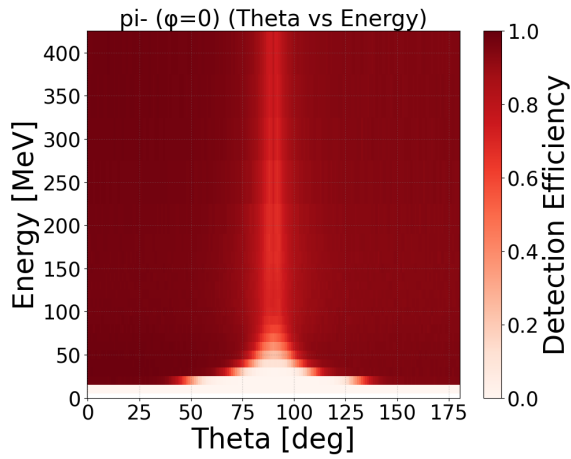


図 B.11 π^- に対する検出効率 (改良型 ECC(2D))

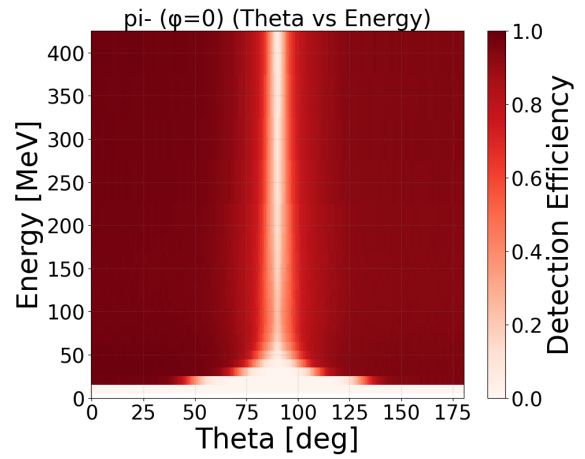


図 B.12 π^- に対する検出効率 (従来型 ECC)

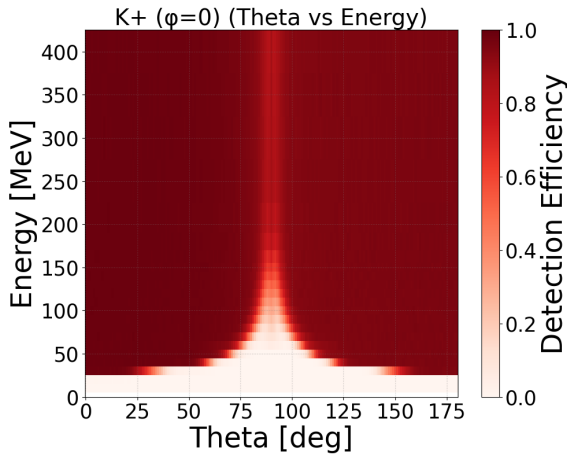
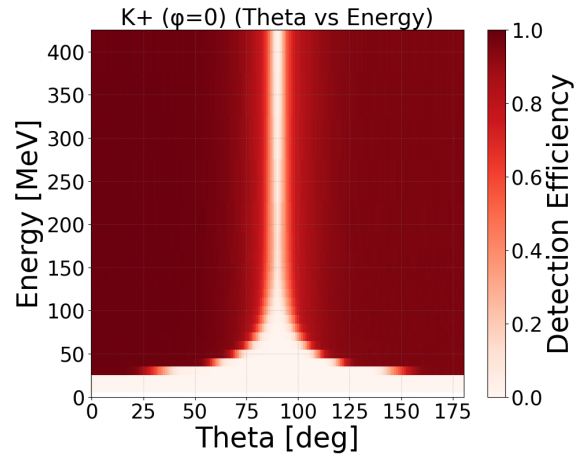
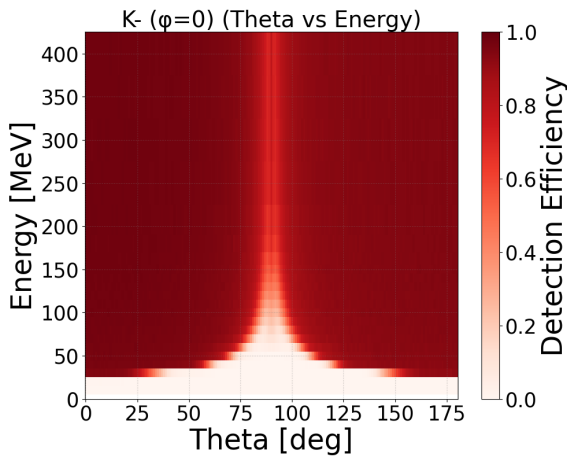
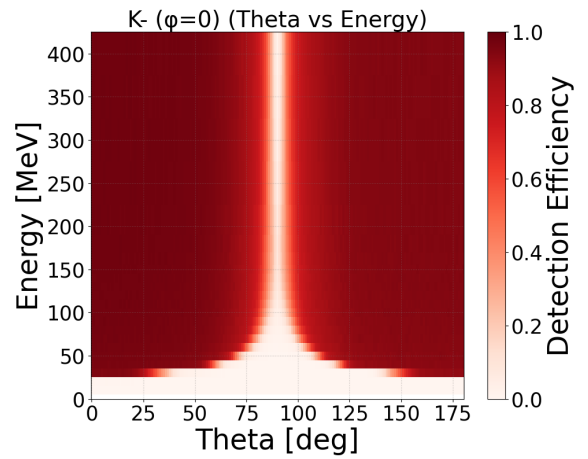
図 B.13 K^+ に対する検出効率 (改良型 ECC(2D))図 B.14 K^+ に対する検出効率 (従来型 ECC)図 B.15 K^- に対する検出効率 (改良型 ECC(2D))図 B.16 K^- に対する検出効率 (従来型 ECC)

表 B.2 改良型 ECC (2D) と従来型 ECC の全エネルギーと全角度の平均の検出効率

粒子	改良型 ECC (2D)	従来型 ECC
μ^+	90.5%	85.76%
π^-	84.97%	81.4%
K^+	79.6%	76.46%
K^-	77.11%	74.33%

図 6.17 から図 6.24 は第 5 章の改良型 ECC (3D) と従来型 ECC に対する結果の比較である. 表 6.3 は図 6.17 から図 6.24 までの結果に対する全エネルギーと全角度の平均の検出効率である.

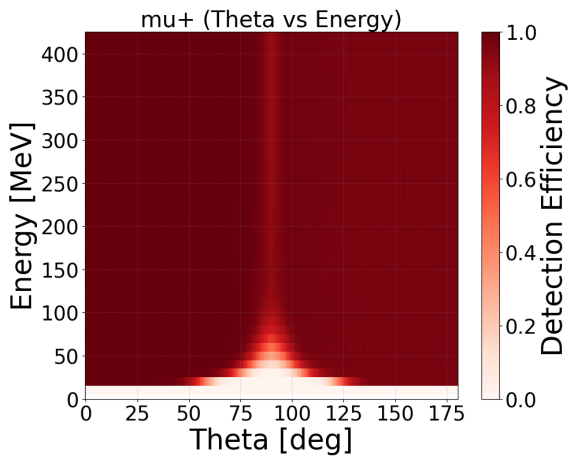


図 B.17 μ^+ に対する検出効率 (改良型 ECC(3D))

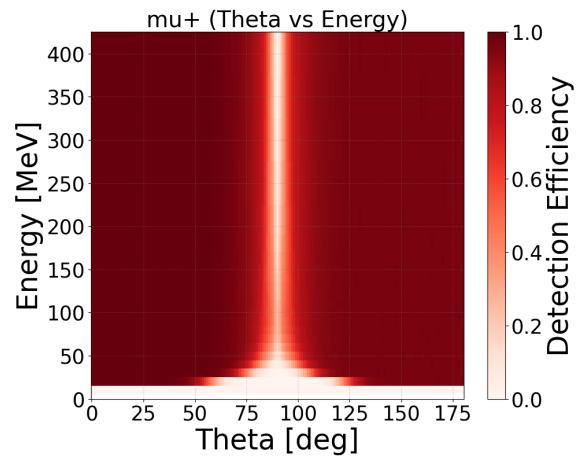


図 B.18 μ^+ に対する検出効率 (従来型 ECC)

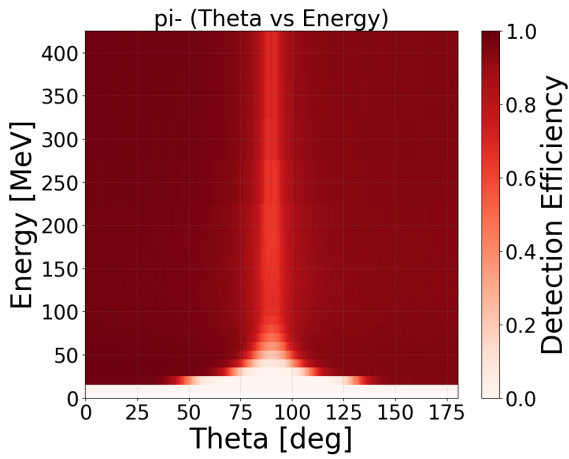


図 B.19 π^- に対する検出効率 (改良型 ECC(3D))

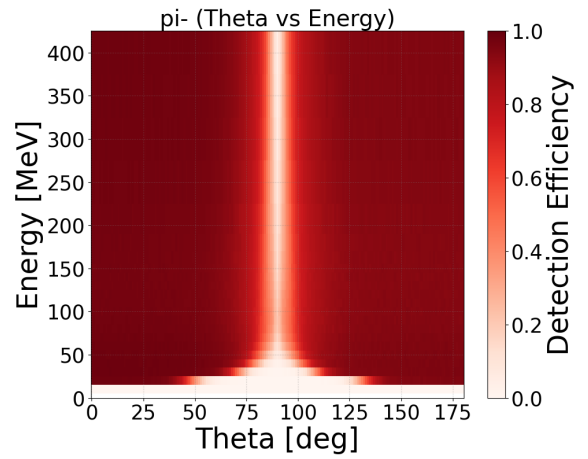


図 B.20 π^- に対する検出効率 (従来型 ECC)

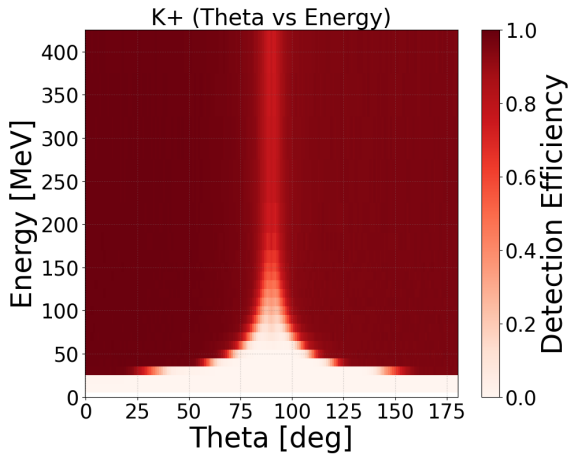
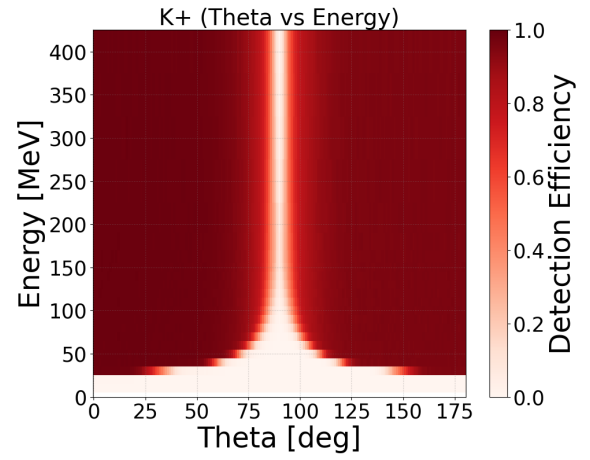
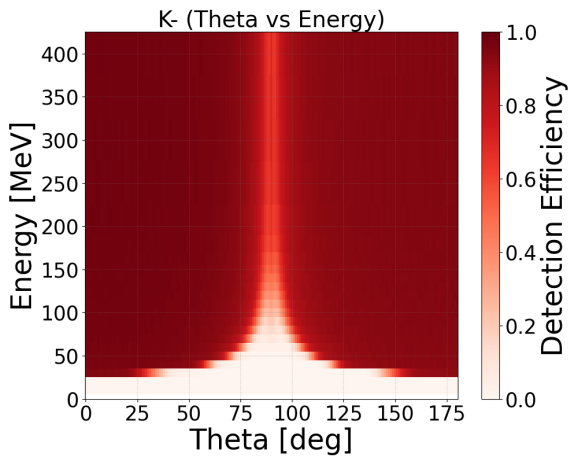
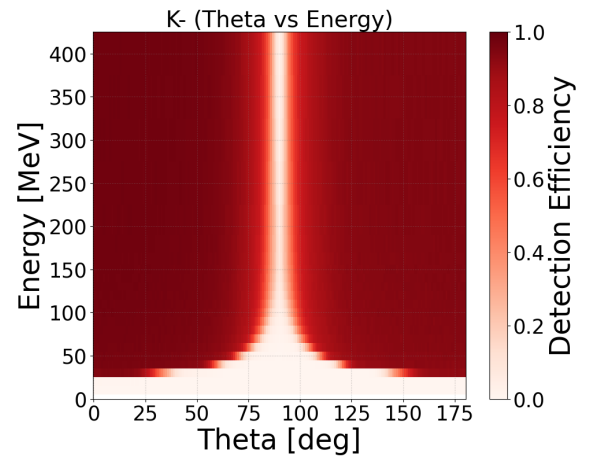
図 B.21 K^+ に対する検出効率 (改良型 ECC(3D))図 B.22 K^+ に対する検出効率 (従来型 ECC)図 B.23 K^- に対する検出効率 (改良型 ECC(3D))図 B.24 K^- に対する検出効率 (従来型 ECC)

表 B.3 改良型 ECC (3D) と従来型 ECC の全エネルギーと全角度の平均の検出効率

粒子	改良型 ECC (3D)	従来型 ECC
μ^+	90.13%	85.77%
π^-	84.68%	81.36%
K^+	79.32%	76.44%
K^-	76.85%	74.31%

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多くの方々に多大なるご支援とご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

指導教員である南野彰宏教授には、日々のゼミやミーティングを通して熱心なご指導と的確なご助言をいただき、大変充実した研究活動を行うことができました。また Christophe Bronner 助教には、本研究のテーマをご提案いただいたのみならず、研究を進める上で生じた疑問点の一つ一つに丁寧にお答えいただき、意欲的に研究に取り組むことができました。深く感謝申し上げます。

研究に行き詰まった際に親身になって相談に乗っていただいた平田さんをはじめ、共に切磋琢磨した研究室のメンバーの皆様にも、この一年間大変お世話になりました。

最後に、私がこのように恵まれた環境で研究に打ち込むことができたのは、日頃から温かく見守り、精神的に支えてくれた両親のおかげです。心より感謝申し上げます。

引用文献

- [1] NINJA 実験, URL : <https://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/2011/experiment/ninja/>.
- [2] Takahiro Odagawa (2023) 「study of neutrino-water interactions using nuclear emulsion detectors with improved event reconstructions」, 博士論文, 京都大学.