

2023年度 卒業論文

sPHENIX-INTT 検出器の性能評価の
ための GEANT4 による
Coulomb Scattering 効果の見積もり

奈良女子大学 理学部 数物科学科 物理学コース
高エネルギー物理学研究室

辻端日菜子

2023年 3月3日

概要

現在、奈良女子大学高エネルギー物理学研究室は、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) にて 2023 年より稼働予定の sPHENIX 実験に用いられる中間飛跡検出器 INTT の開発を行っている。INTT の開発には奈良女子大学のほか、理化学研究所、立教大学、BNL、国立台湾大学、国立中央大学などが携わっている。

先行研究にて INTT が荷電粒子の通過位置を測定するときの分解能が期待値よりも悪化していることが分かった。そこで本研究では検出器シミュレーションソフトウェア GEANT4 を用いて、INTT の位置分解能の悪化原因を突き止める研究を行った。

位置分解能が悪化する原因として検出器を構成する物質による多重散乱が考えられる。そのため、測定で使用したトリガーカウンターや暗箱などの物質がどの程度分解能の悪化に寄与するか調べた。また大角度散乱を引き起こす Coulomb Scattering がどの程度寄与するかも調べた。

その結果、実験で用いたトリガーカウンターや暗箱のほか、空気などの散乱の原因となる物質を取り除くことによって、hit 数を 1 に制限した場合においては、広がりのない hit 分布になった。

またセットアップごとの hit 分布のピーク幅の広がりを確認した。散乱の原因となる物質を増やすことによってだんだんピーク幅が広がっていった。さらに放射長から hit 分布の期待標準偏差を計算し、シミュレーションで得られた hit 分布のピーク幅と比較したことでシミュレーションが想定通りに作動していることを確認した。

また Residual 分布を作成したことによって、今後実験データと比較できるようになった。実験で見られた広く平らなテールはシミュレーションでも再現されており、テールが作られる原因はセンサーを横断するデルタ線であるということが分かった。

Coulomb Scattering 効果の見積もりについては、Coulomb Scattering を作用させる前後で分布の目立った違いは見られなかったが、Coulomb Scattering は 10 万イベントに 5 回の割合で起こっていることが分かった。先行研究の左側のテールが Coulomb Scattering によるものかどうかは現在調査中であるため、Coulomb Scattering した粒子がどのような挙動をするのか詳しく調べるのが今後の課題である。

目次

第1章 序論	2
1.1 素粒子物理学	2
1.2 半導体	3
1.3 研究背景	3
1.4 先行研究	6
1.5 研究目的	6
第2章 中間飛跡検出器 INTT	7
第3章 セットアップごとの測定への影響	9
3.1 研究方法	9
3.2 セットアップ	9
3.3 解析方法	12
3.4 結果と考察	14
3.5 まとめ・今後の課題	25
第4章 Coulomb Scattering 効果の見積もり	26
4.1 Coulomb Scattering の定義	26
4.2 研究方法	26
4.3 解析方法	26
4.4 結果と考察	26
4.5 まとめ・今後の課題	29
第5章 結論	30

目次

1.1	素粒子	2
1.2	RHIC の俯瞰図	4
1.3	飛跡検出器群の模式図	5
1.4	先行研究における Residual 分布	6
2.1	実際のシリコンセンサーラダー	7
2.2	シリコンセンサーモジュールの模式図	7
3.1	ELPH ビームテストのセットアップ	10
3.2	セットアップにビームを打ち込んでいる様子	10
3.3	L0 の hit 分布 (横軸: chip、縦軸: channel)	11
3.4	3 本のラダー	11
3.5	4 本のラダー	11
3.6	クラスタリング前の hit 分布	12
3.7	クラスタリング後の hit 分布	13
3.8	物質によるビームの多重散乱	14
3.9	A. 3 本のラダーを真空中に置いた場合の L0 の hit 分布 (hit 数 1 に制限)	15
3.10	A. 3 本のラダーを真空中に置いた場合の L0 の hit 分布 (青: hit 数 1 に制限、赤 hit 数制限なし)	16
3.11	A. 3 本のラダーを真空中に置いた場合の L0 の hit 分布	17
3.12	B. 3 本のラダーを空気中に置いた場合の L0 の hit 分布	17
3.13	C. 4 本のラダーを空気中に置いた場合の L0 の hit 分布	18
3.14	D. 4 本のラダー、暗箱、シンチレーションカウンターを空気中に置いた場合の L0 の hit 分布	18
3.15	L1 の hit 分布	20
3.16	Residual 分布	20
3.17	Residual 分布 (青: 期待値に最も近い点、赤: それ以外の点)	21
3.18	L1 を通過した粒子のエネルギー分布	22
3.19	入射角 θ , ϕ の定義	22
3.20	ビーム粒子の入射角 θ の分布	23
3.21	ビーム粒子の入射角 ϕ の分布	23
3.22	二次電子の入射角 θ の分布	24
3.23	二次電子の入射角 ϕ の分布	24
4.1	Coulomb Scattering ON の場合の hit 分布	27

4.2	Coulomb Scattering OFF の場合の hit 分布	27
4.3	相互作用回数 (Coulomb Scattering OFF)	28
4.4	相互作用回数 (Coulomb Scattering ON)	29

第1章 序論

1.1 素粒子物理学

1.1.1 素粒子とは

素粒子とは、物質を構成する最小単位の粒子のことである。

素粒子は半整数スピンを持つフェルミ粒子と整数スピンを持つボーズ粒子に大別される。フェルミ粒子は更にクォークとレプトンに分けられる。クォークとレプトンには、電荷が1だけ異なる対が3セット、計6種類ずつ存在する。

ボーズ粒子のうちスピンの0のものをスカラー粒子、それ以外をゲージ粒子と呼ぶ。また力を媒介する粒子としてスピン1のゲージボソンが存在する。

これらの素粒子をまとめたものが図1.1である。[1]

フェルミ粒子				ボーズ粒子	
	第1世代	第2世代	第3世代	ゲージ粒子	スカラー粒子
クォーク	u (アップ)	c (チャーム)	t (トップ)	g (グルーオン)	H (ヒッグス粒子)
	d (ダウン)	s (ストレンジ)	b (ボトム)	γ (光子)	
レプトン	e (電子)	μ (μ 粒子)	τ (τ 粒子)	W^+, W^- (W粒子)	
	ν_e (電子ニュートリノ)	ν_μ (μ ニュートリノ)	ν_τ (τ ニュートリノ)	Z (Z粒子)	

図 1.1: 素粒子

1.1.2 QGP (Quark-Gluon Plasma)

QGPとは、クォークとグルーオンからなる超高温、高エネルギー密度の物質のことである。

我々が日常目にする低温相では、クォークやグルーオンは核子内部に閉じ込められている。しかし高温では「閉じ込め」が破れ、クォークやグルーオンが広い空間を比較的自由に動き回る相になる。これをQGPという。この相は宇宙初期に存在していたと考えられている。

また米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) での重イオン衝突型加速器 RHIC にて、金原子核同士を超高エネルギーで衝突させることにより QGP を人工的に作り出せるようになった。[2]

1.2 半導体

半導体とは、シリコンやゲルマニウムなどの電気伝導度が良導体と絶縁体の中間にある物質のことである。

高純度半導体にリンなどのドナー電子を少量入れた n 型半導体とホウ素などのアクセプターを少量入れた p 型半導体を接合させ、p 側の電位を n 側の電位よりも低い逆バイアス状態にすると、n-p 接触面に電子も正孔も存在しない空乏層ができる。空乏層に放射線が入射すると電離作用で電子と正孔が作られ、逆バイアスの電界によってそれぞれが正と負の電極に集められる。電子や正孔が空乏層から電極に移動するとき、電極に誘導電荷が生じ、パルスとして取り出すことができる。

電子・正孔対を 1 つ作るのに要するエネルギーは、シリコンでは 3.64eV 、ゲルマニウムでは 2.96eV であり、アルゴンやキセノンのガスより 1 桁近く小さい。また気体に比べて密度が 1000 倍近く高いため、単位長さあたりの電離数が桁違いに多い。したがって発生する電子・正孔対の数は気体の場合に比べてはるかに多くなり、エネルギー分解能の高い検出器を製作することが可能になる。[3]

1.3 研究背景

1.3.1 RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider)

RHIC とは、BNL にある世界初の重イオン衝突型加速器である (図 1.2)。周長 3.8km の 2 つの超伝導加速器リングからなる。この 2 つのリングが 6ヶ所の衝突点で交差し、そこでビーム同士が 180° で衝突する。金原子核対や重陽子・金原子核、銅原子核・金原子核衝突などを行っている。また、最大重心系エネルギーは金原子核対で 200GeV 、陽子対では 510GeV である。[2]

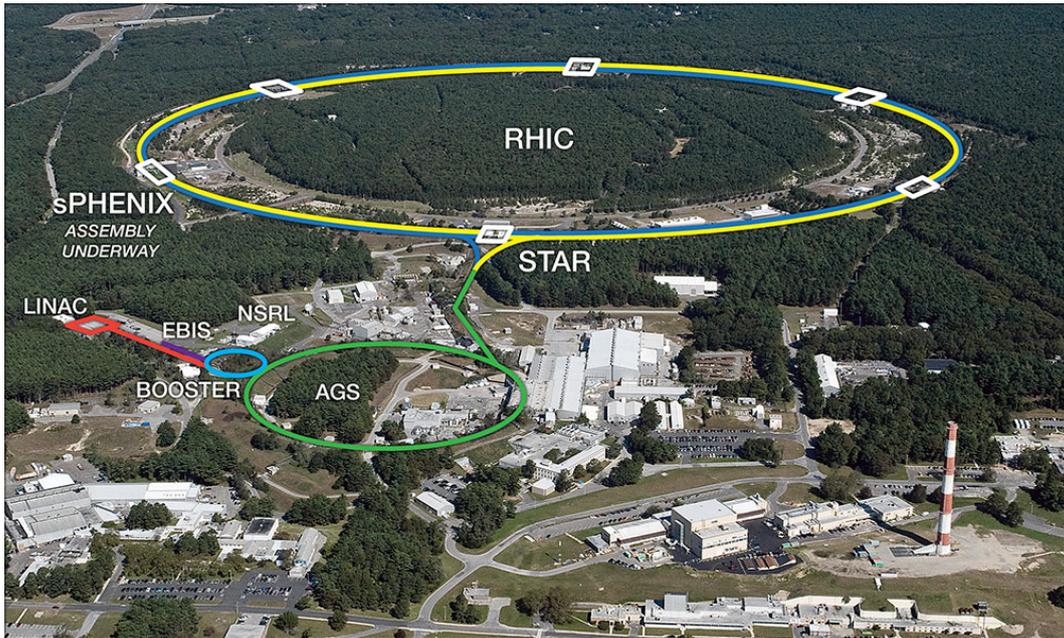


図 1.2: RHIC の俯瞰図

1.3.2 sPHENIX 実験

RHIC では 2000 年から 2016 年にかけて PHENIX 実験が行われていた。PHENIX 実験の目的は原子核衝突反応によって QGP を再現し、その性質を研究することにあった。[2]

sPHENIX 実験は PHENIX 実験をさらに高度化したものであり、2023 年より稼働予定である。sPHENIX 実験ではジェット、ジェット対の相関関係、 Υ 粒子などを測定し、QGP の輸送係数と色遮蔽長の温度依存性を決定する。これらの測定は高い検出効率と大きな検出範囲を持つハドロンカロリメータ、電磁カロリメータ、3つの飛跡検出器によって行われる。飛跡検出器は質量の異なる3つの Υ 状態を識別するのに十分な質量分解能を持つ。sPHENIX 実験は 20 週間の稼働で 5.0×10^{11} 回の金原子核衝突事象を観測する予定である。[4]

1.3.3 飛跡検出器群

sPHENIX 実験の飛跡検出器は内側から MVTX、INTT、TPC の3つで構成されている (図 1.3)。

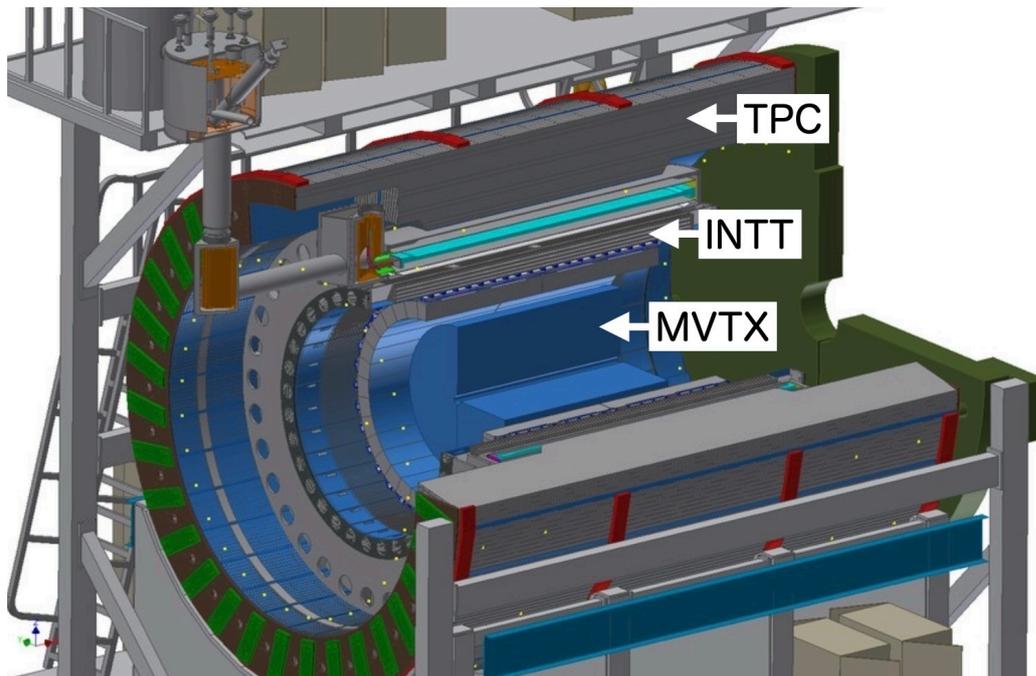


図 1.3: 飛跡検出器群の模式図

MVTX (Monolithic-Active-Pixel-Sensor-based Vertex Detector)

MVTX とは、sPHENIX 検出器の最内層に位置するピクセル型シリコン検出器である。LHC 加速器での ALICE 実験において開発された MAPS (Monolithic Active Pixel Sensor) を用いている。3 層の樽状構造となっており、衝突中心から最内層までの距離は 22.4mm、ピクセルサイズは $27\mu\text{m} \times 29\mu\text{m}$ である。

MVTX では精度の高い飛跡再構成が実現可能であり、衝突点と生成粒子の最近接距離を測定することによって重いクォークの検出を行う。

衝突中心からビーム軸方向に $\pm 10\text{cm}$ 、方位角方向に対して 2π の範囲を覆っている。[5]

INTT (INtermediate Tracker)

INTT とは、sPHENIX 検出器において、MVTX・TPC 間に位置するストリップ型シリコン検出器である。ビームパイプから 6 – 12cm に位置する。INTT は MVTX と TPC での飛跡を繋ぎ、運動量分解能を上げるとともに各飛跡に 1 ビームバンチ以下の時間情報を与える役割を担う。より詳細な説明は第 2 章に記す。

衝突中心からビーム軸方向に $\pm 23\text{cm}$ 、方位角方向に対して 2π の範囲を覆っている。[5]

TPC (Time Projection Chamber)

TPC とは、sPHENIX 検出器の最外層に位置するガス検出器である。ビームパイプから 20 – 78cm に位置しており、48 枚の読み出しパッドからなる。高い位置分解能を持ち、

荷電粒子における運動量測定において中心的な役割を担う。また、粒子のエネルギー損失 (dE/dx) を用いて荷電粒子の識別を行うこともできる。

衝突中心からビーム軸方向に $\pm 1\text{m}$ 、方位角方向に対して 2π の範囲を覆っている。[3][5]

1.4 先行研究

2021年12月に東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) において、INTT の検出効率を評価するためのビームテストが行われた。ELPH ビームテストのセットアップの詳細については第 3.2.1 章に記述する。

先行研究 [6] では、ELPH ビームテストのデータを用いて INTT の検出効率を求めており、その結果、検出効率は 98.37% 以上と決定された。

また、検出効率を求める過程で Residual 分布を作成している。ここで言う Residual 分布とは、基準となるラダーから予測されるあるラダーの hit 期待位置と、実際の hit 位置の差を横軸：channel、縦軸：entries のヒストグラムとして表した分布のことである。先行研究で作成された Residual 分布が図 1.4 である。図のように、ピーク位置の付近にはガウス分布に従わない部分が見られた。これをテールと呼ぶ。

先行研究では、わずかに検出効率が 100% に届かない原因がこのテールにあると結論づけていた。

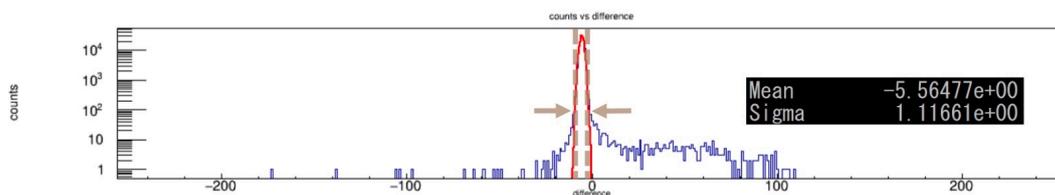


図 1.4: 先行研究における Residual 分布

1.5 研究目的

本研究の目的は、INTT の位置分解能が物質や Coulomb Scattering によってどのように影響を受けるかを調べることである。そのため、GEANT4 を用いて物質質量を変更した場合や Coulomb Scattering を作用させる場合のシミュレーションを行い、それらが位置分解能にどのように影響するかを調べた。

第2章 中間飛跡検出器INTT

INTT に用いられているシリコンセンサーラダーは、ストリップ型シリコンセンサー、FPHX 読み出しチップ、HDI から構成されている。

図 2.1 は実際のシリコンセンサーラダーである。



図 2.1: 実際のシリコンセンサーラダー

2.0.1 シリコンセンサー

1つのセンサーは縦：78 μ m、横：16mm (Type-A) もしくは20mm (Type-B)、厚さ：320 μ m のストリップ 128 個からなっている。以降このストリップを channel と呼ぶ。

Type-A シリコンセンサーが8 \times 2 個、Type-B シリコンセンサーが5 \times 2 個、計26 個のシリコンセンサーで1つのシリコンセンサーモジュールが構成されている。

2つのシリコンセンサーモジュールで1本のセンサーラダーが構成されており、INTT 全体では56本のセンサーラダーが用いられる。

シリコンセンサーの模式図を図 2.2 に示す。[5]

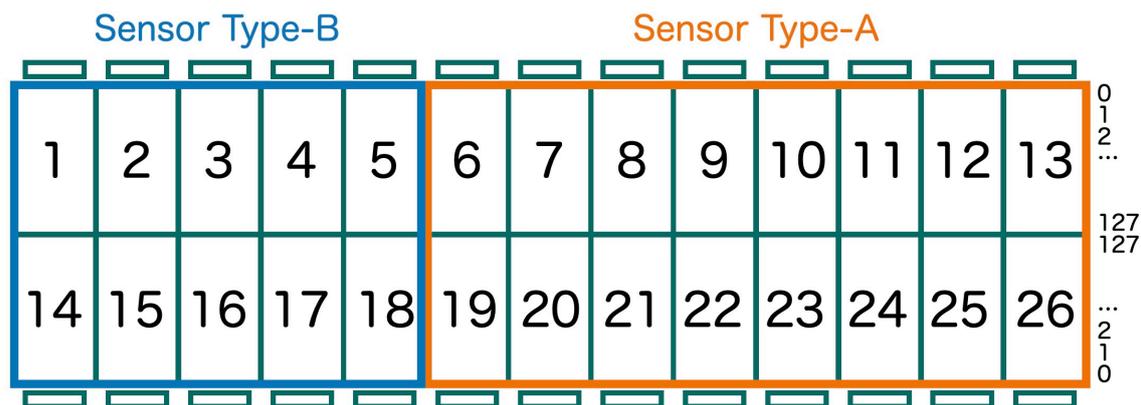


図 2.2: シリコンセンサーモジュールの模式図

2.0.2 FPHX チップ

FPHX チップとは、センサーからの信号を読み出すためのチップで、PHENIX 実験のシリコン検出器 FVTX でも用いられた。1 チップあたり 128 個の読み出しチャンネルを持っており、各チャンネルにおいて波形整形を行い、3bit の ADC を出力する。ADC0-7 の各閾値は 8bit の DAC によって設定できる。FPHX チップはシリコンセンサーおよび読み出し基板 (HDI) とワイヤーボンディングによって接続されている。[5]

2.0.3 HDI (High Density Interconnect)

HDI とは、入出力信号と電源を供給する基板である。FPC (Flexible Printed Circuits) という柔軟性が高く、薄い基盤で作られている。データを処理する読み出し基板 ROC (Read Out Card) とはコンバージョンケーブル、または Bus Extender を用いて接続される。[5]

第3章 セットアップごとの測定への影響

3.1 研究方法

粒子が物質中を通過する過程をシミュレーションすることができる GEANT4 というソフトウェアを使用して研究を行った。[7]

GEANT4 を用いて再現された ELPH ビームテストのセットアップにビームを打ち込むことによってシミュレーションデータを取得、そのデータを解析した。

GEANT4 内でセットアップを変更し、物質の影響を調べる。セットアップとして、最も物質量の少ないラダーだけの場合から、ビームテストと同じ物質質量まで以下に記述する4種類を用意し、比較した。またそれぞれのセットアップで Coulomb Scattering の効果を比較した。

分解能の評価として、検出器の hit 分布および hit 位置と期待位置との差である Residual 分布を用いた。本研究では、ビームを検出器に対して同じ位置に打ち込んでいるため、hit 分布が直接分解能を表している。データを用いて計算する Residual 分布は先行研究との比較のために用いる。

3.2 セットアップ

3.2.1 ELPH ビームテスト

図 3.1 は GEANT4 で再現された ELPH ビームテストのセットアップである。4 本のラダー、暗箱、3 台のシンチレーションカウンターで構成されている。

実際のビームテストで測定に使用されたのはビームライン最上流ラダーを除いた 3 本のラダーであるため、本研究でも下流 3 本のラダーで測定を行った。以降測定に用いた 3 本のラダーを上流から L0, L1, L2 と呼ぶ。

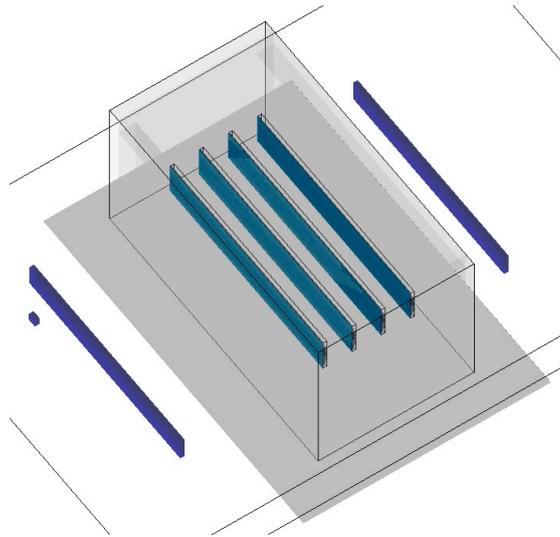


図 3.1: ELPH ビームテストのセットアップ

3.2.2 ビーム

本研究では、セットアップの 1m 上流からラダーに垂直な方向に 934MeV の陽電子ビーム 10 万本を打ち込んだ。図 3.2 は GEANT4 内のセットアップに上記の条件のビーム 1 本を打ち込んだときの画像である。図中を左下から右上にかけて横断している青線がビームである。このときの L0 の hit 分布を横軸：chip、縦軸：channel としてプロットした図が図 3.3 である。

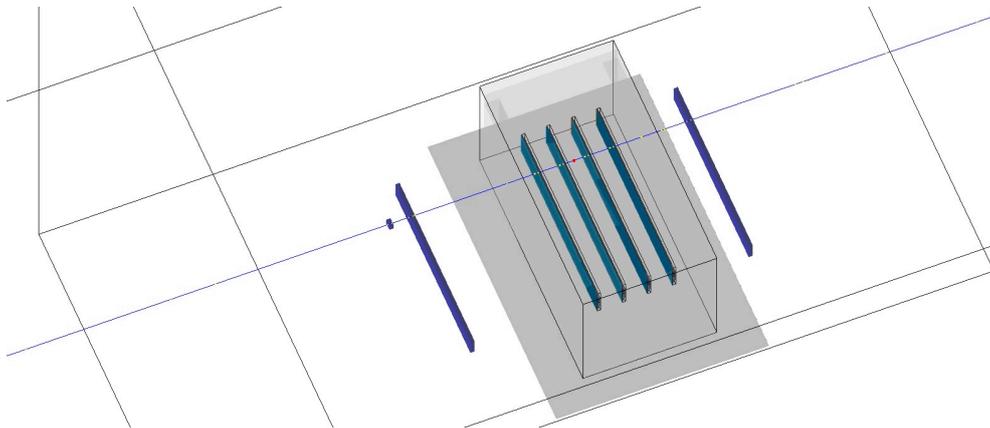


図 3.2: セットアップにビームを打ち込んでいる様子

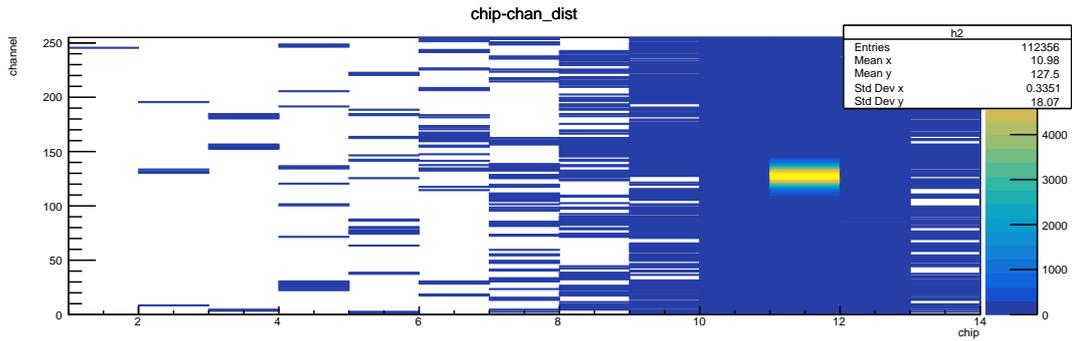


図 3.3: L0 の hit 分布 (横軸 : chip、縦軸 : channel)

3.2.3 セットアップの変更

本研究では、物質量の少ない順に以下の 4 種類のセットアップでシミュレーションを行った。

そのセットアップを以下に示す。

- A. 測定に使用する 3 本のラダーを真空中に置いた場合 (図 3.4)
- B. 測定に使用する 3 本のラダーを空気中に置いた場合 (図 3.4)
- C. 測定に使用しないラダー 1 本を加えた 4 本のラダーを空気中に置いた場合 (図 3.5)
- D. 4 本のラダー、暗箱、シンチレーションカウンターを空気中に置いた場合 (ELPH ビームテストのセットアップと同様) (図 3.1)

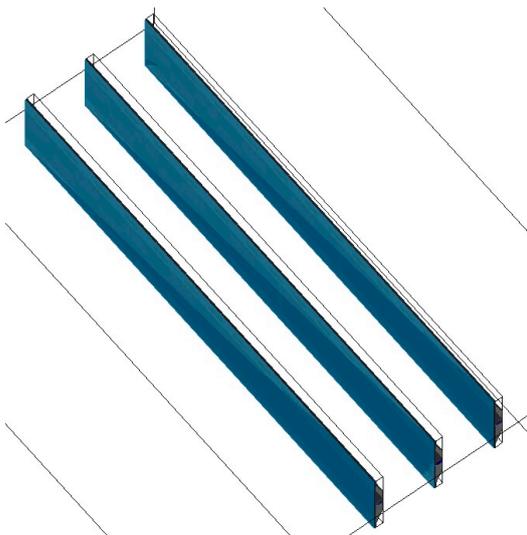


図 3.4: 3 本のラダー

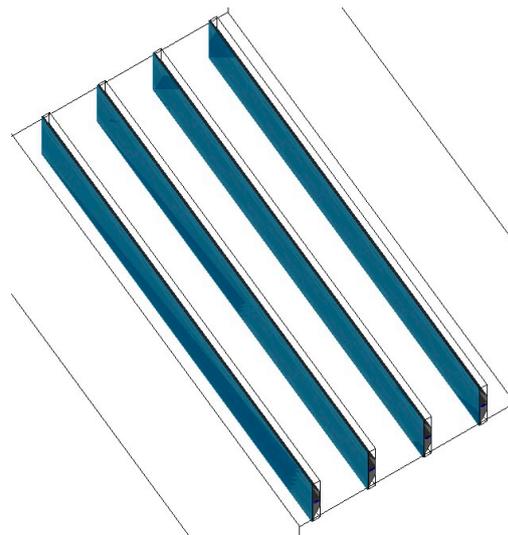


図 3.5: 4 本のラダー

3.3 解析方法

解析では hit 分布、Residual 分布を作成して比較した。hit 分布は、シミュレーションで得られたデータから hit した channel を抜き出し、ヒストグラムを作成した。Residual 分布はクラスタリング、hit 期待位置の計算、Residual の計算の順にデータを処理し、求められた Residual 値を用いてヒストグラムを作成した。

以下では、各項目について詳述する。

3.3.1 クラスタリング

荷電粒子が斜め方向に入射したときや入射位置によっては複数の channel にまたがって通過する場合がある。このとき 1 粒子の hit が各 channel に分かれて記録される、つまり 1 つの hit が複数の hit として記録されることになる。この同一イベント、同一ラダー内で複数の channel にまたがった hit を 1 つにまとめることをクラスタリングという。具体的には、損失エネルギーに対応する ADC 値を重みとして求めたクラスターの重心位置を新しい hit 位置とした。

以下にクラスタリングにおける hit 位置の計算式を示す。

$$\text{clustered channel} = \frac{\sum (\text{ADC}_i \times \text{channel}_i)}{\sum \text{ADC}_i}$$

またクラスタリング前後の hit 分布を図 3.6, 図 3.7 に示した。2 つの図を比較すると、クラスタリングによってエントリー数が減少し、ピーク幅が細くなっていることが分かる。

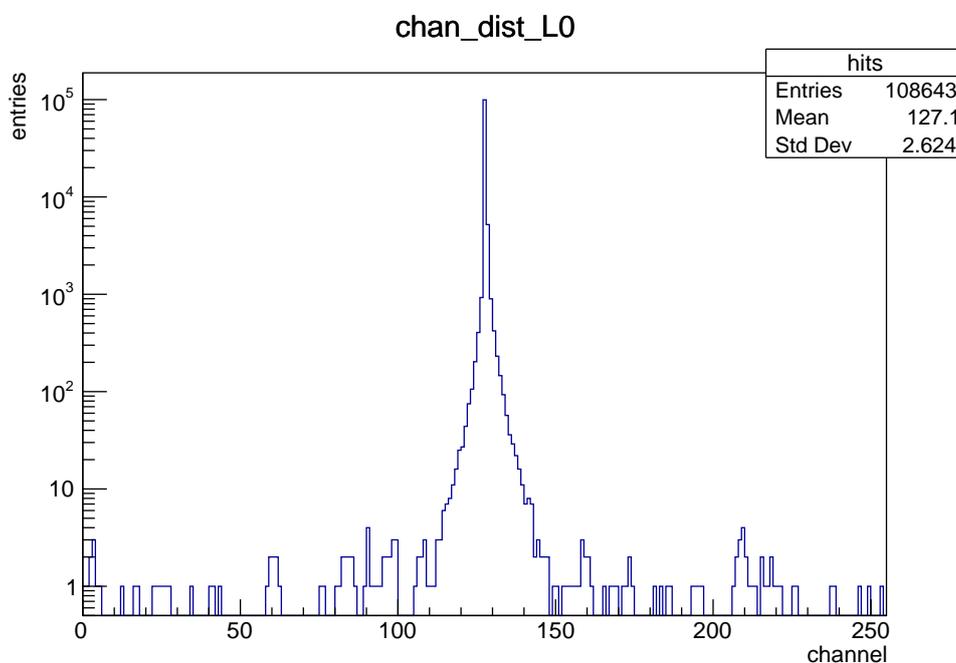


図 3.6: クラスタリング前の hit 分布

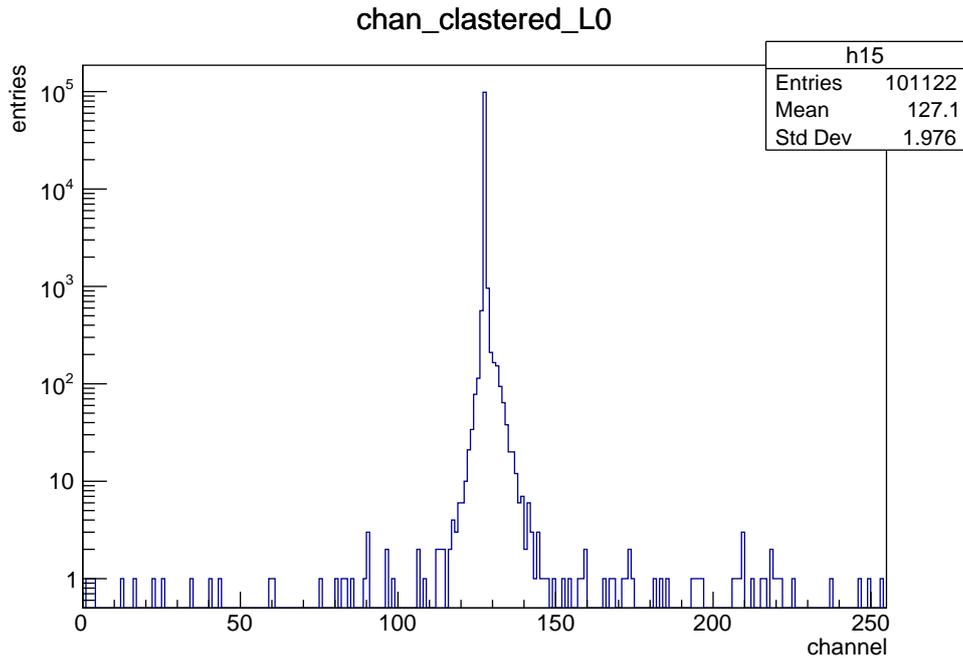


図 3.7: クラスタリング後の hit 分布

3.3.2 Residual 分布の作成

本研究ではビームをラダー表面に垂直に入射させているが、実験では必ずしも垂直とは限らない。しかしビームの入射角度が違えば hit 分布を同じように解釈することができない。

そこで導入するのが Residual 分布である。ここで言う Residual 分布とは、L0, L2 から予想される L1 の hit 期待位置と実際の hit 位置の差をヒストグラムとして表したものである。このときの hit 数を 1 に、L1 の hit 数を 1 以上に制限している。この分布を作成することによって、どんな角度で入射したビームでもラダーに垂直に打ったビームと同じように解釈することができる。

3.3.3 結果の検証方法

荷電粒子が物質を通過するとき、物質との相互作用により多重散乱し、粒子の方向が変化する。多重散乱において散乱角が小さい場合、その散乱角の角度分布はガウス分布で与えられる。

その標準偏差を以下に示す。[8]

$$\theta = \frac{13.6\text{MeV}}{\beta cp} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.088 \log_{10} \left(\frac{xz^2}{X_0\beta^2} \right) \right]$$

ここで、 βc は入射粒子の速度 [m/s]、 p は入射粒子の運動量 [MeV]、 z は入射粒子の電荷、 x は対象の厚み [m]、 X_0 は対象の放射長 [m] である。

それぞれの物質における x/X_0 を表 3.1 に示す。

空気	0.3
ラダー	1.2
シンチレーションカウンター	0.1

またビームの入射ビーム軸からのずれ y は、図 3.8 より以下のように近似できる。

$$y = x \tan \theta \approx x\theta$$

ここでビームの入射ビーム軸からのずれは、hit 分布のピーク幅に対応しているため、データと比較することによってシミュレーションの妥当性を検証することができる。

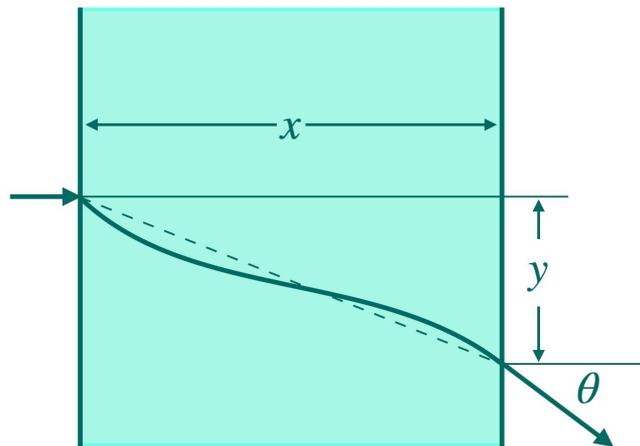


図 3.8: 物質によるビームの多重散乱

3.4 結果と考察

3.4.1 ビームを散乱させる物質が存在しない場合の hit 分布

A. 3本のラダーを真空中に置いた場合の L0 の hit 位置を横軸：channel、縦軸：entries (log scale) でプロットしたものが図 3.9 である。このとき hit 数を 1 に制限している。L0 の前にはビームを散乱させる物質が何も存在しないため、広がりのない分布になっている。

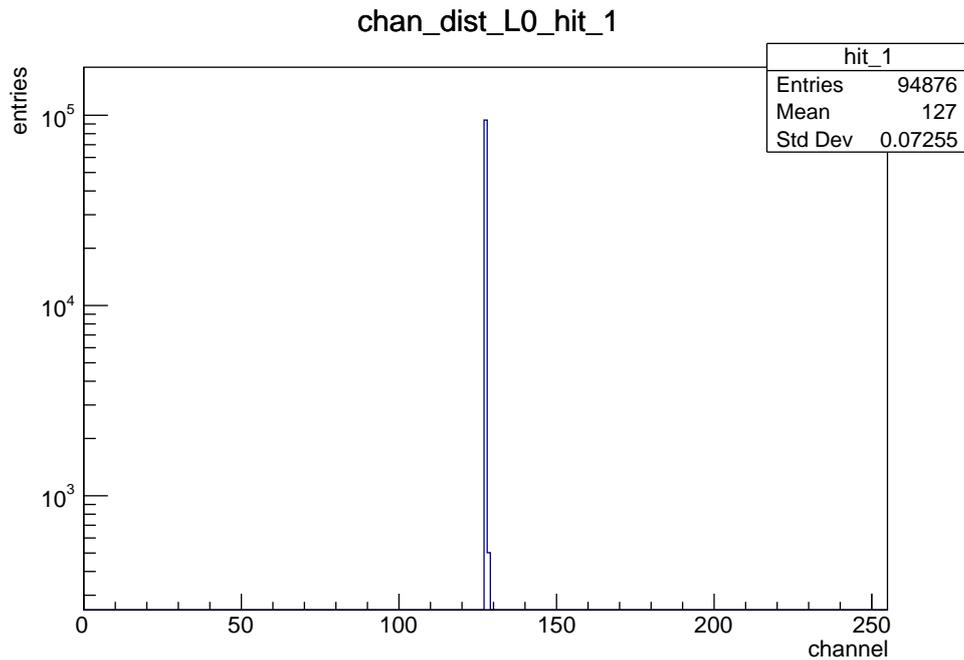


図 3.9: A. 3 本のラダーを真空中に置いた場合の L0 の hit 分布 (hit 数 1 に制限)

また、同一タイミング、同一ラダー内において複数回粒子が hit することがある。図 3.10 に、hit 数を 1 に制限した場合の hit 分布 (図 3.9) を青、hit 数を制限しない (複数 hit を含めた) 場合の hit 分布を赤でプロットした。L0 の前にビームを散乱させる物質が何も存在しないため広がりのない分布になるはずが、hit 数を制限しない場合には広がりのある分布になっている。この分布の広がりを解釈するため、複数 hit している粒子についての調査を行った。その詳細は第 3.4.5 章に記す。

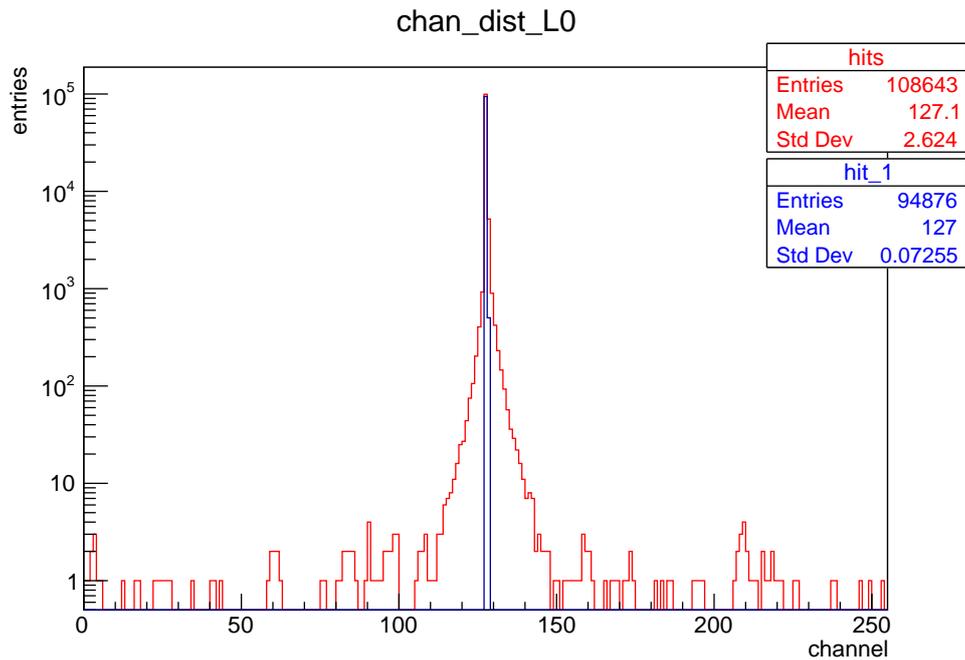


図 3.10: A. 3 本のラダーを真空中に置いた場合の L0 の hit 分布（青：hit 数 1 に制限、赤 hit 数制限なし）

3.4.2 セットアップごとの hit 分布の変化

セットアップごとの L0 の hit 分布を図 3.11 から図 3.14 に示す。このとき hit 数を 1 に制限した場合を青線、hit 数を制限しない場合を赤線で表している。それぞれ比較すると、物質を増やすごとに hit 分布の幅が大きくなっていることが分かる。

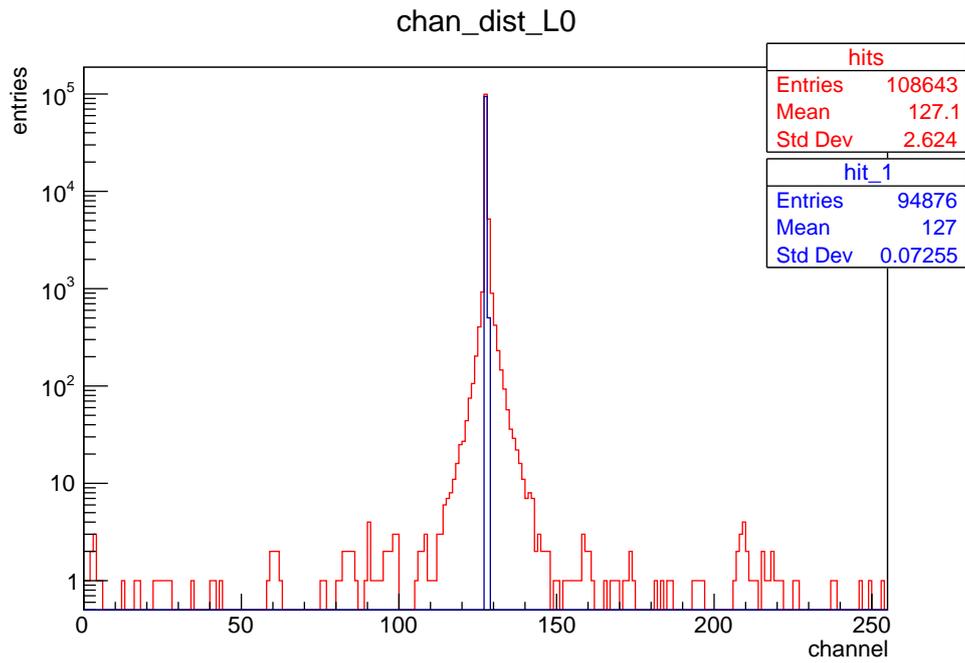


図 3.11: A. 3 本のラダーを真空中に置いた場合の L0 の hit 分布

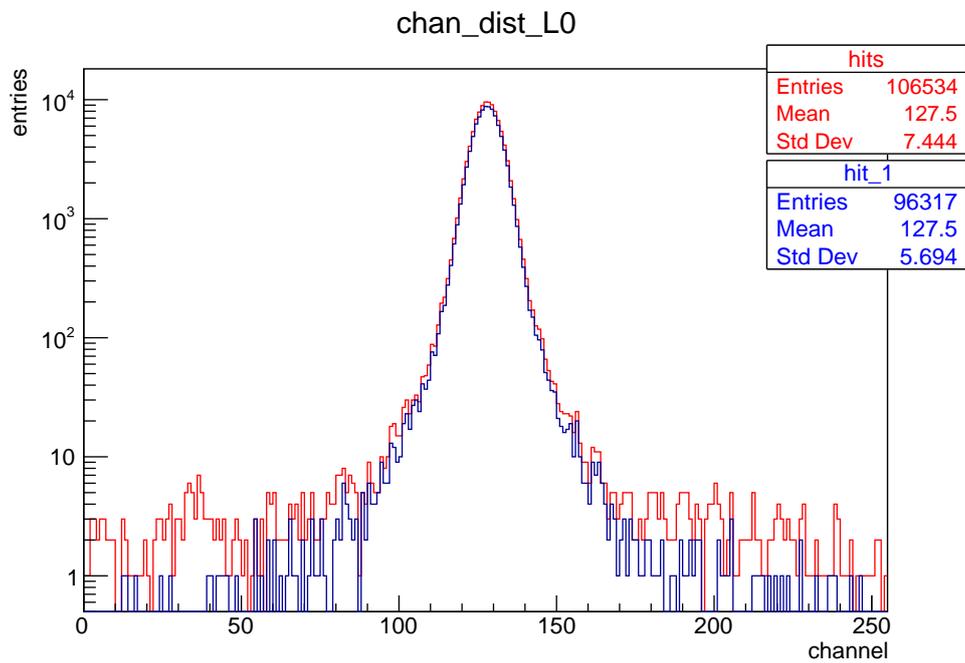


図 3.12: B. 3 本のラダーを空気中に置いた場合の L0 の hit 分布

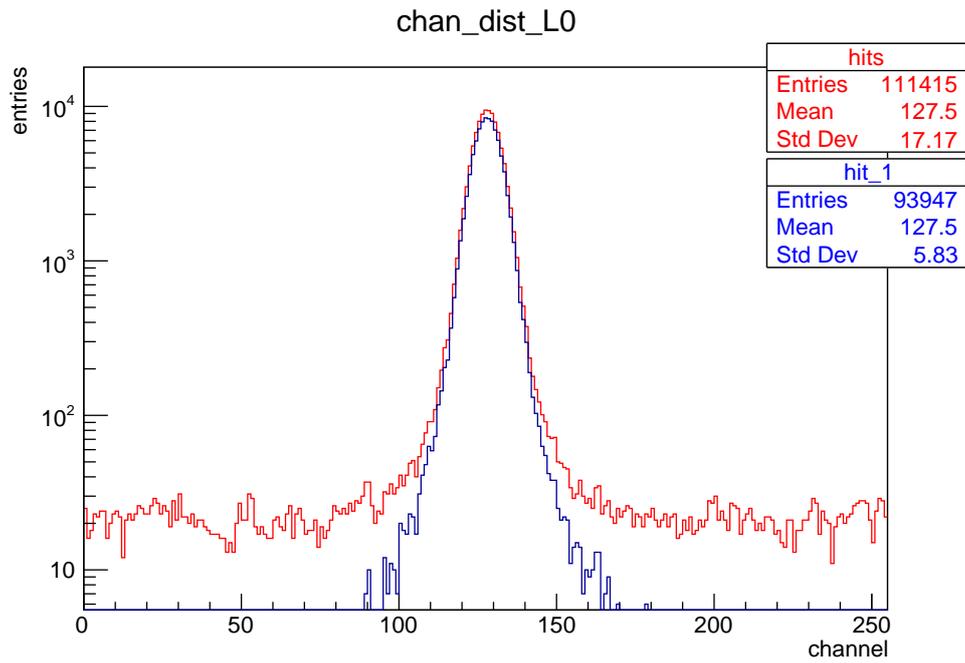


図 3.13: C. 4 本のラダーを空気中に置いた場合の L0 の hit 分布

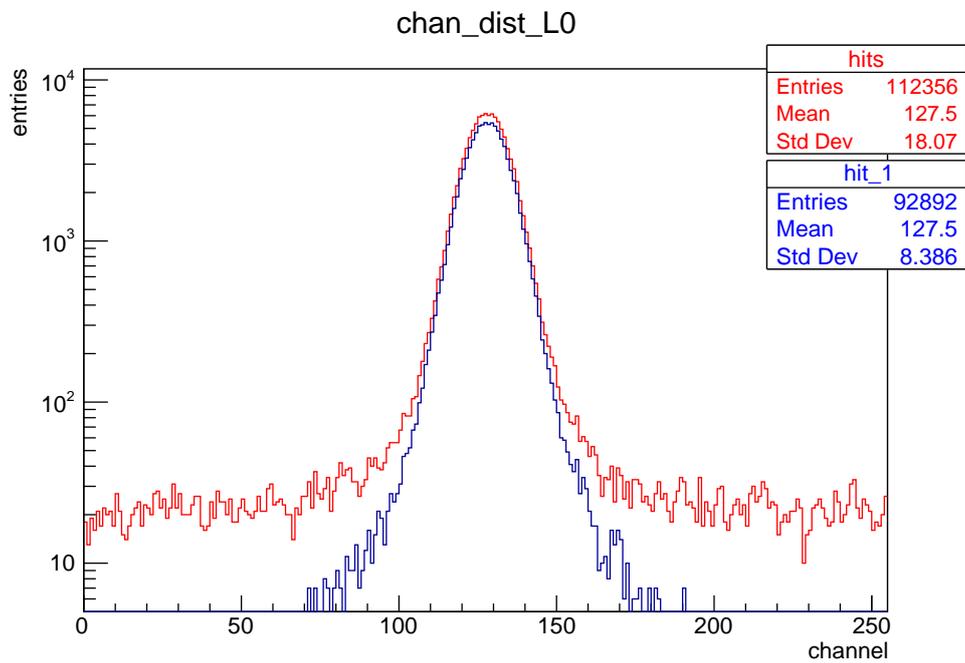


図 3.14: D. 4 本のラダー、暗箱、シンチレーションカウンターを空気中に置いた場合の L0 の hit 分布

3.4.3 結果の検証

それぞれ得られた hit 分布のピーク幅（標準偏差）を、放射長から算出した期待値と比較することによって、シミュレーションがうまく動いているかを確認する。セットアップごとの hit 分布のピーク幅と期待標準偏差を表 3.2 に示す。

まず測定に使用する 3 本のラダーを真空中に置いた場合を考える。

このとき期待標準偏差は 8.2ch であり、hit 分布のピーク幅と期待標準偏差の絶対誤差は、hit 数を 1 に制限をした場合には-2.5、hit 数を制限しない場合には-0.8 となった。どちらのピーク幅も理論値と同程度であるため、シミュレーションはうまく作動したと言える。

また、ほかのセットアップ（C. 4 本のラダーを空气中に置いた場合、D. 4 本のラダー、暗箱、シンチレーションカウンターを空气中に置いた場合）でも hit 数を 1 に制限した場合には、シミュレーションで得られたピーク幅は理論値と同程度であった。しかし hit 数を制限しない場合には、hit 分布のピーク幅と期待標準偏差の絶対誤差はテールの影響で比較的大きくなっている。よってテールは多重散乱以外の影響で作られている可能性が高いということが分かった。

表 3.2: hit 分布のピーク幅 [ch] と期待標準偏差 [ch]

	ピーク幅 (hit 数 1)	ピーク幅 (hit 数制限なし)	期待標準偏差
B. 3 本ラダー（空気）	5.7	7.4	8.2
C. 4 本ラダー（空気）	5.8	17.2	8.6
D. 4 本ラダー、暗箱、シンチレーションカウンター（空気）	8.4	18.1	9.1

3.4.4 Residual 分布の作成

今回のシミュレーションでも Residual 分布を作成したため、今後実験データと比較することができるようになった。作成した Residual 分布を図 3.16 に示す。

また今回はビームをラダーに垂直に入射させているため、Residual 分布と hit 分布は同じように解釈することができる。L1 の hit 分布を図 3.15、Residual 分布を図 3.16 に示した。どちらもセットアップは 3 本のラダーを真空中に置いた場合である。

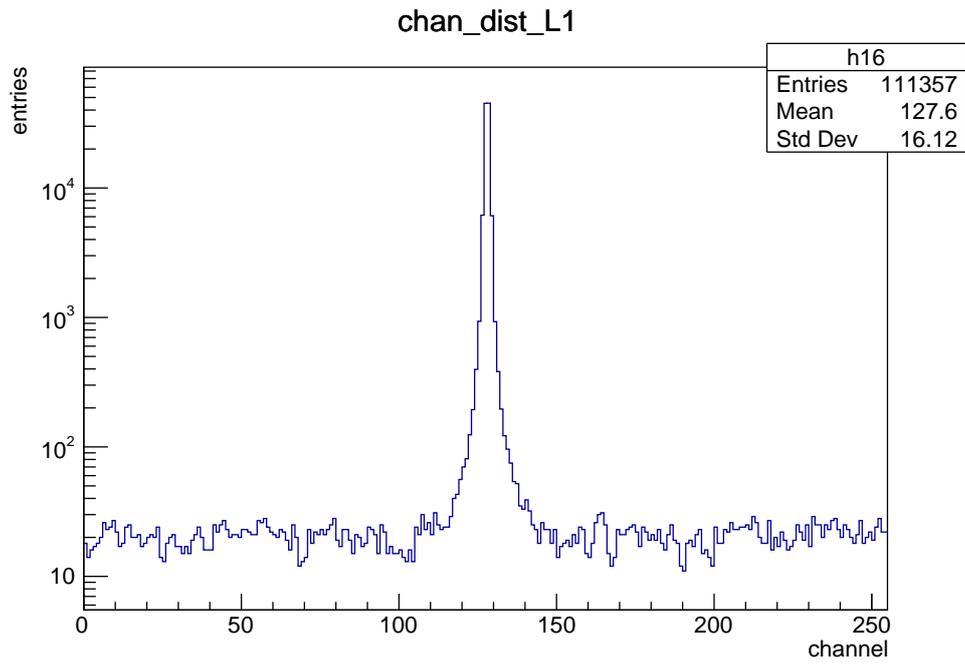


図 3.15: L1 の hit 分布

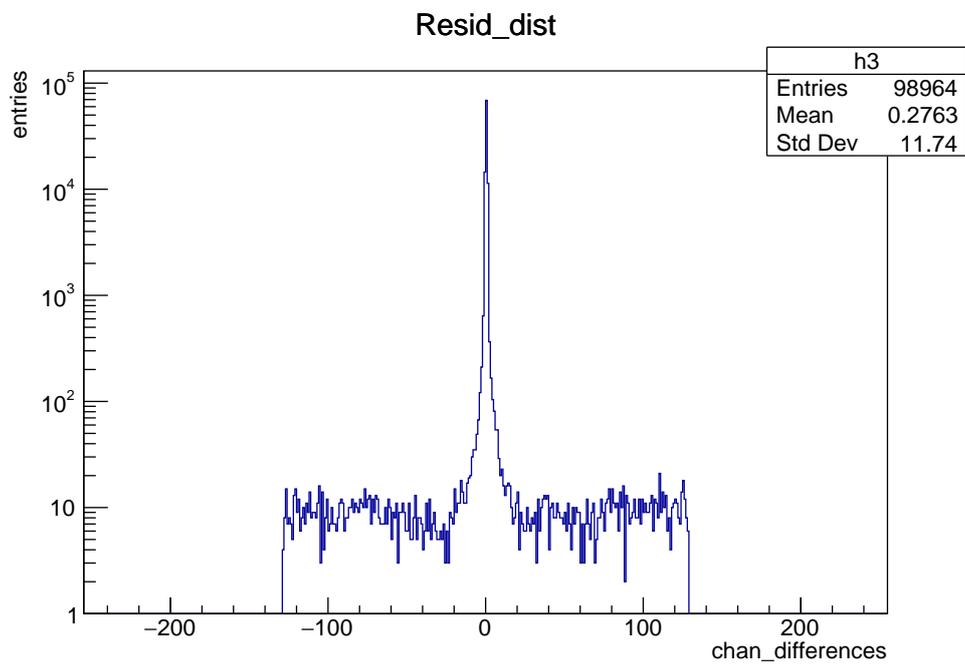


図 3.16: Residual 分布

3.4.5 先行研究のテール

図 3.16 の Residual 分布を見ると、先行研究における右側のテールと同じ広く平らなテールが見られる。つまり実験で見られた広く平らなテールはシミュレーションでも再現されたということである。また複数 hit を考慮し、図 3.17 の Residual 分布には、hit 期待位置に最も近い点を青線、それ以外の点を赤線で示している。図から分かるように、広く平らなテールは複数 hit した場合の hit 期待位置から遠い hit によって作られている。

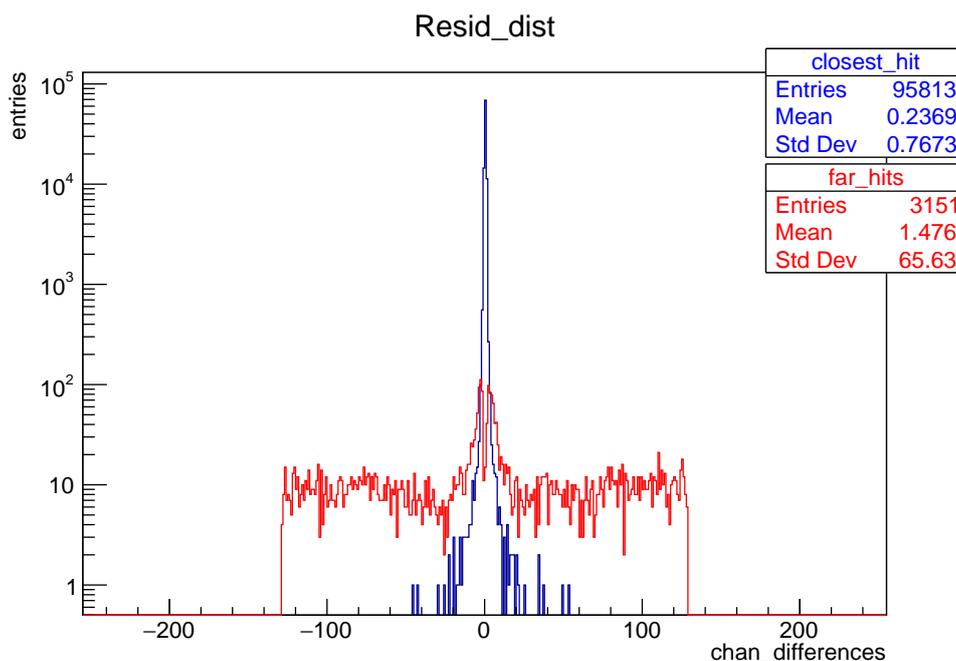


図 3.17: Residual 分布（青：期待値に最も近い点、赤：それ以外の点）

次にテールの原因について述べる。

今回テールの原因となっている粒子がセンサーを横断するデルタ線ではないかという仮説を立て、検証を行った。デルタ線とは、イオン化によって生じた、それ自身が再び電離や励起を起こすことのできる自由電子である。[9] もしテールの原因となっている粒子がセンサーを横断するデルタ線であれば、エネルギーが小さく、入射角が横方向の電子となる。

仮説を検証するため、粒子種ごとのエネルギー分布と入射角分布を調べた。セットアップは A. 3 本のラダーを真空中に置いた場合である。ビーム粒子と二次電子を区別するために、ビーム粒子を μ 粒子へと変更している。

まず、L1 を通過した粒子のエネルギー分布を図 3.18 に示す。青線でプロットされている粒子がビーム粒子 (μ^-)、赤線でプロットされている粒子が二次電子である。ビーム粒子は入射エネルギーである 934MeV 付近に分布しているのに対し、二次電子のエネルギーはほとんどが 0MeV 付近に分布している。

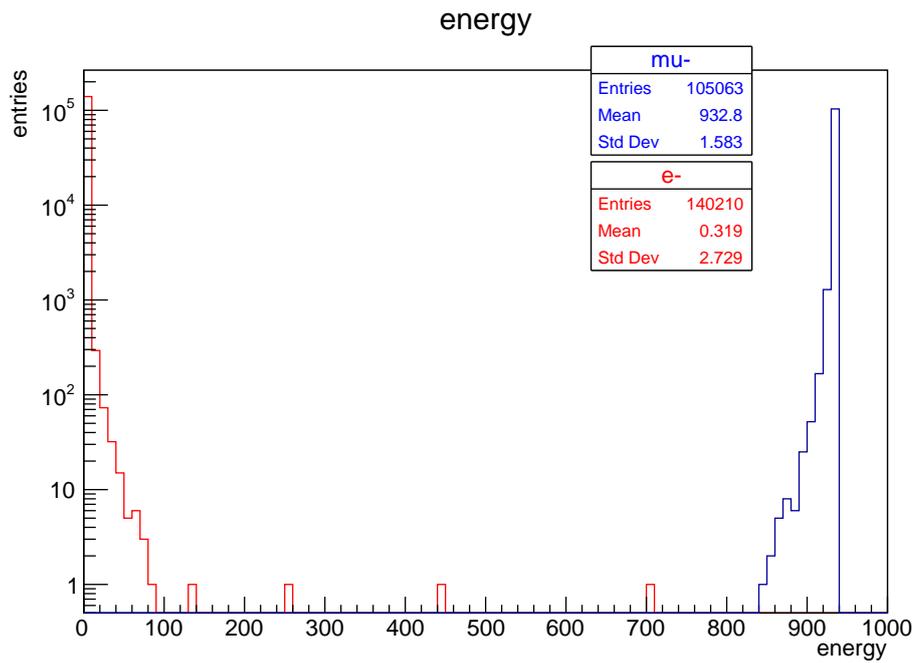


図 3.18: L1 を通過した粒子のエネルギー分布

次に L1 を通過した粒子の粒子種ごとの入射角分布を調べた。図 3.20 はビーム粒子のビーム軸中心の入射角 θ の角度分布であり、図 3.21 はビーム粒子のセンサー平面の入射角 ϕ の角度分布である。どちらも横軸:channel、縦軸:入射角で表している。 θ と ϕ の定義については図 3.19 に示す。図より、ビームを入射させた付近では、ビーム粒子はビーム入射軸に平行 ($\theta = 0$) にセンサー平面に一樣に通過している。

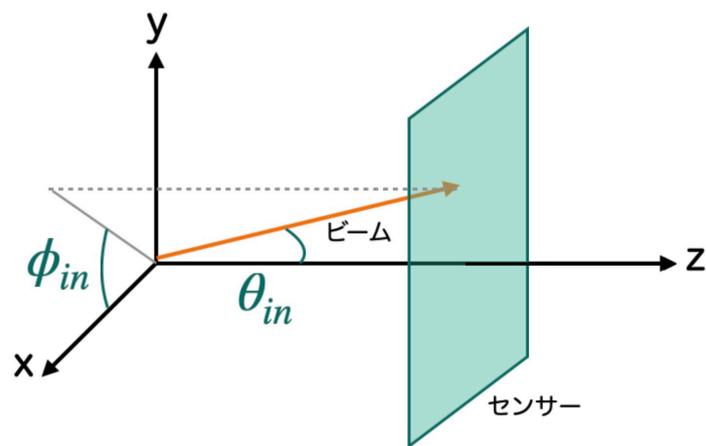


図 3.19: 入射角 θ , ϕ の定義

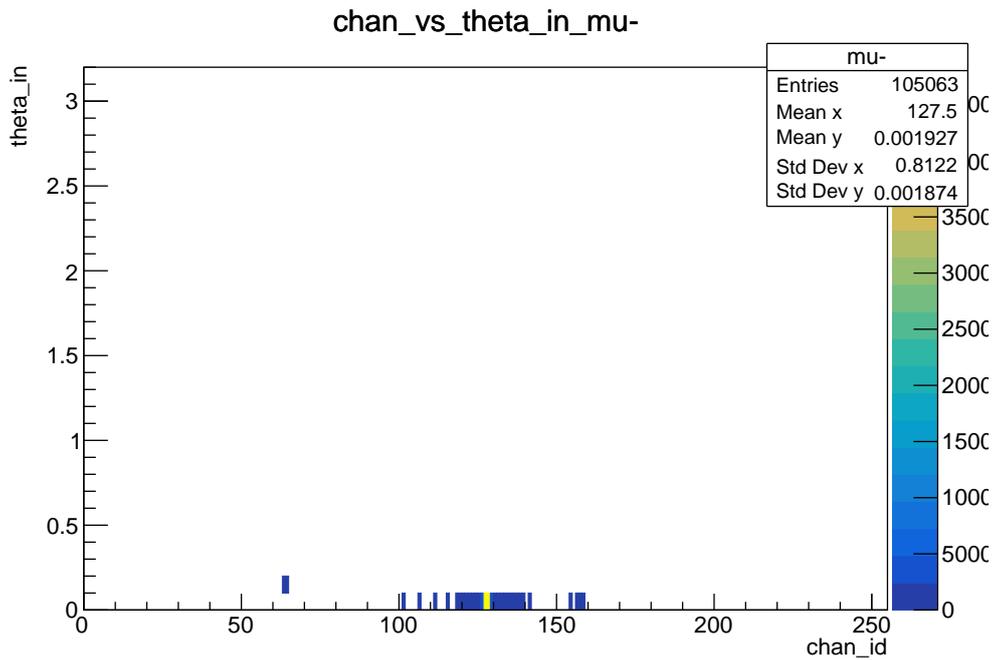


図 3.20: ビーム粒子の入射角 θ の分布

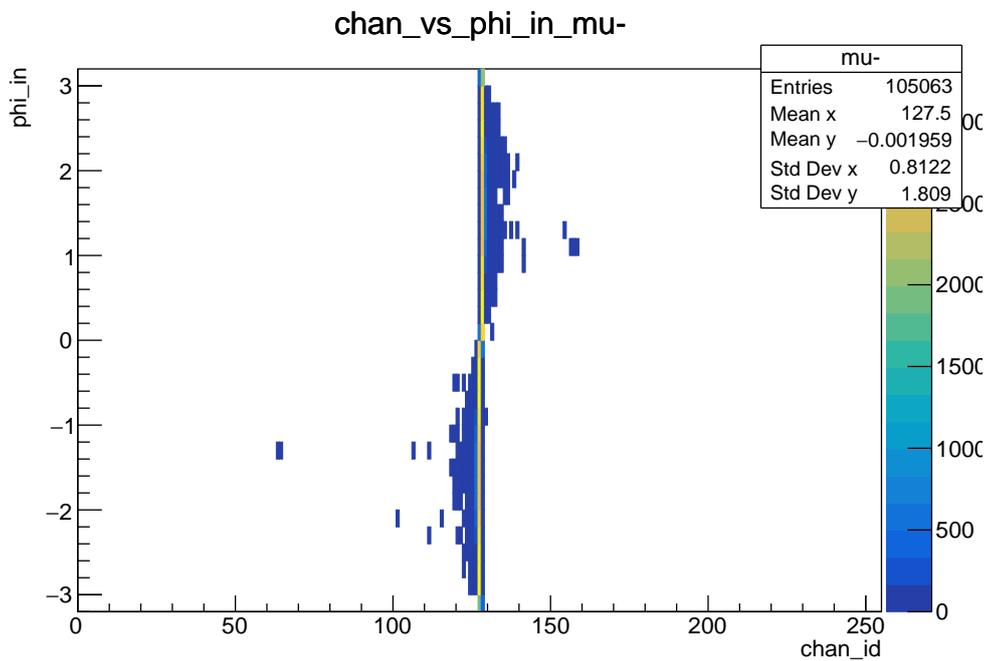


図 3.21: ビーム粒子の入射角 ϕ の分布

同様に図 3.22 は二次電子のビーム軸中心の入射角 θ の角度分布であり、図 3.23 は二次電子のセンサー平面の入射角 ϕ の角度分布である。二次電子はセンサーの全体に広がっ

て分布している。特にビームを入射させた channel 番号 127 付近ではビーム入射軸に垂直 ($\theta = \pi/2$) にセンサー平面に一様に通過している。

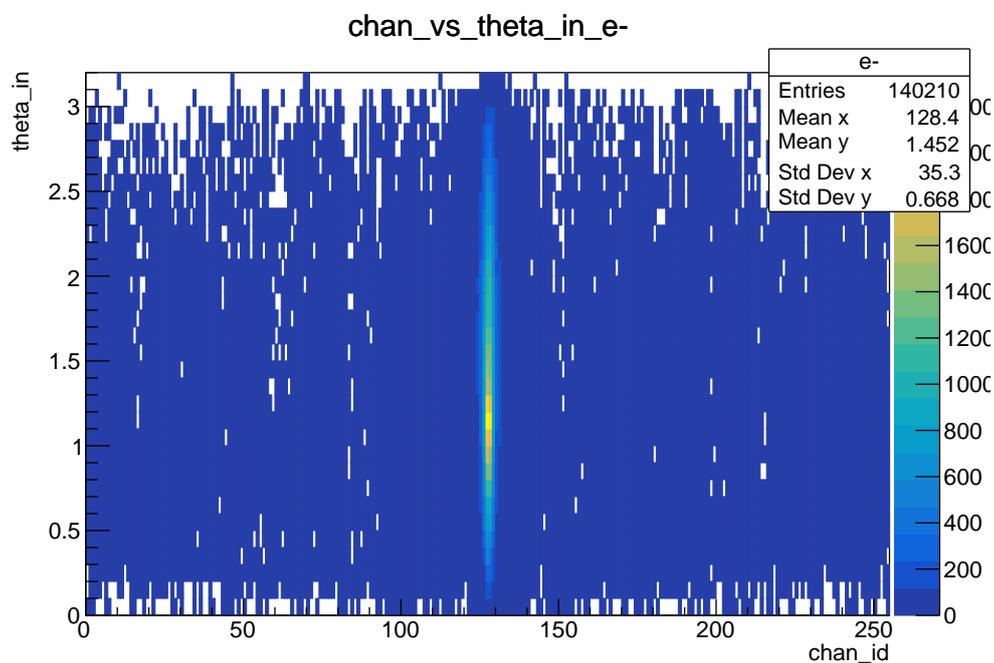


図 3.22: 二次電子の入射角 θ の分布

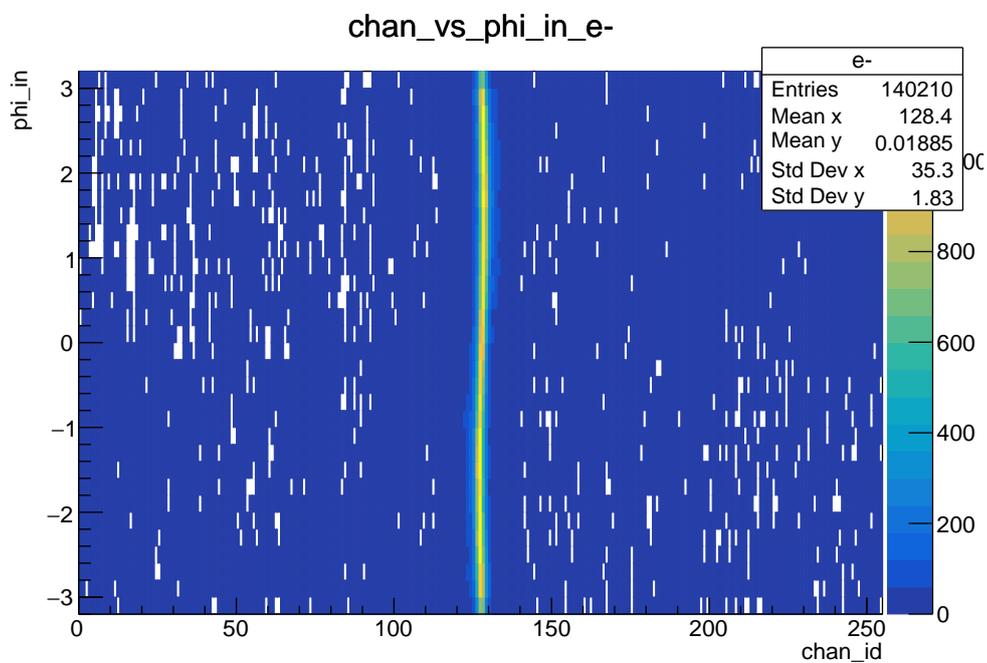


図 3.23: 二次電子の入射角 ϕ の分布

上記の2点をまとめると、二次電子のエネルギーは低く、センサーに平行な方向から飛んできている。よって仮説の通り、テールの原因となっている粒子はセンサーを横断するデルタ線である。

3.5 まとめ・今後の課題

セットアップを変更し散乱の原因となる物質を取り除くことによって、hit 数を1に制限した場合においては、広がりのない hit 分布になった。

またセットアップごとの hit 分布のピーク幅の広がりを確認した。散乱の原因となる物質を増やすことによってだんだんピーク幅が広がっていった。さらに放射長から hit 分布の期待標準偏差を計算し、シミュレーションで得られた hit 分布のピーク幅と比較したことでシミュレーションが想定通りに作動していることを確認した。

また Residual 分布を作成したことによって、今後実験データと比較できるようになった。その過程で、実験で見られた広く平らなテールはシミュレーションでも再現されており、テールが作られる原因はセンサーを横断するデルタ線であるということが分かった。

第4章 Coulomb Scattering効果の見積もり

4.1 Coulomb Scatteringの定義

入射粒子が物質に侵入していく過程で物質の構成原子と次々に衝突し、進行方向が変わっていく現象のことを多重散乱という。多重散乱において散乱角が小さい場合、その散乱角の角度分布はガウス分布に従う。

しかし稀にガウス分布に従わない大角度散乱が見られる。GEANT4では、この大角度散乱をCoulomb Scatteringとしてシミュレーションすることができる。

4.2 研究方法

セットアップは1番シンプルな状態、つまりA.測定に使用する3本のラダーを真空に置いた状態とした。そして、ラダーに垂直な方向に10万本の陽電子ビームを入射させる。Coulomb Scatteringを作用させる場合と作用させない場合、2通りのシミュレーションを行った。

4.3 解析方法

第3.3章と同様にクラスタリング、Residual分布の作成を行った。またシリコンセンサーと粒子の相互作用の種類ごとにエントリー数の分布を作成し、Coulomb Scatteringが起こった回数を確認した。

4.4 結果と考察

4.4.1 Coulomb Scattering効果による分布の変化

Coulomb Scatteringを作用させた場合のL1のhit分布を図4.1、作用させない場合を図4.2にそれぞれ示した。2つの分布を比較したが、Coulomb Scatteringを作用させる前後で大きな違いは見られなかった。

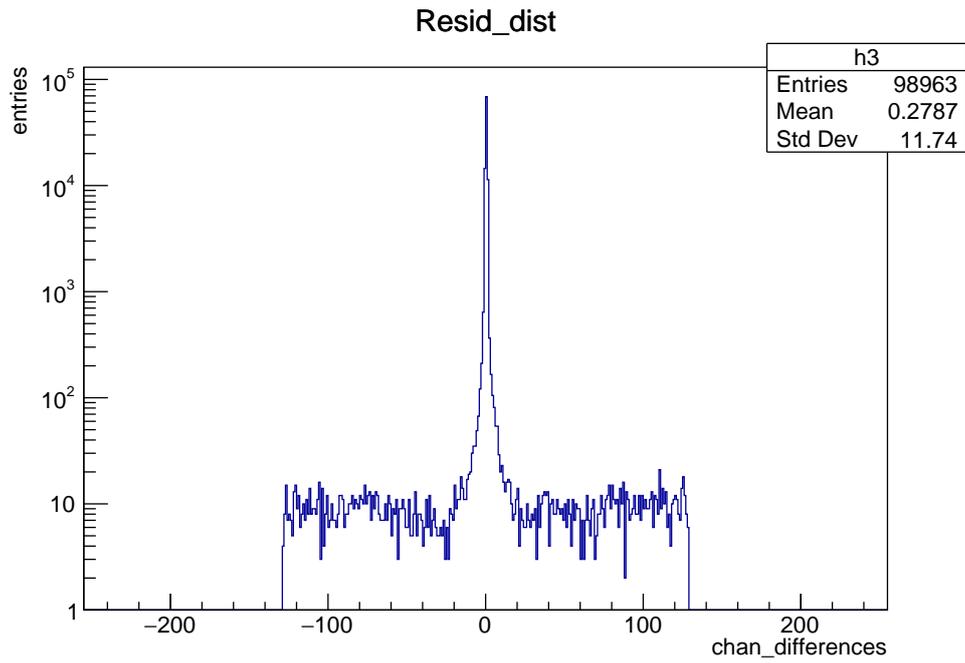


図 4.1: Coulomb Scattering ON の場合の hit 分布

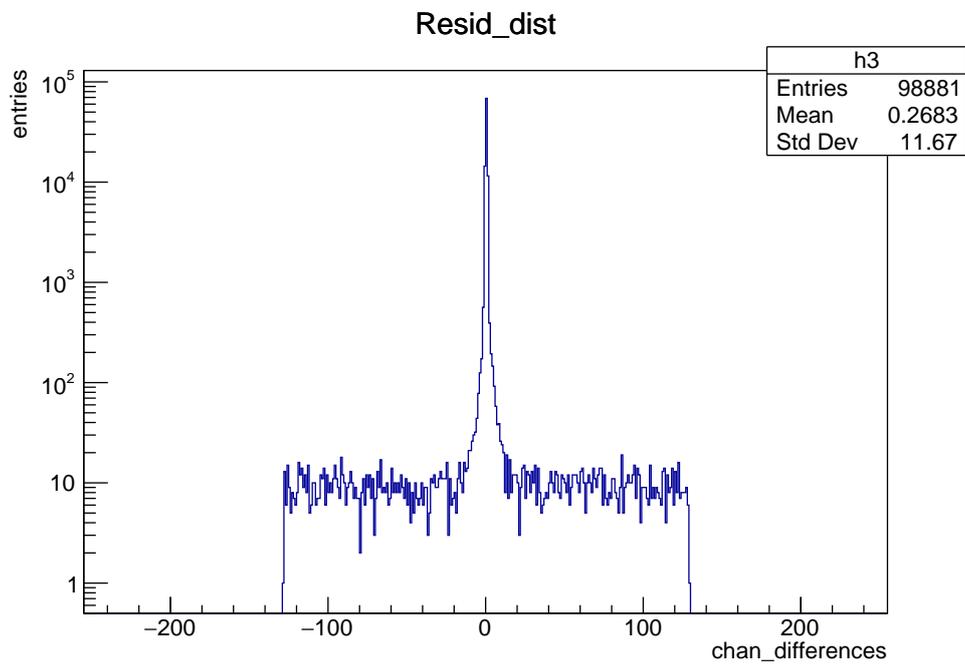


図 4.2: Coulomb Scattering OFF の場合の hit 分布

4.4.2 Coulomb Scattering が起こる割合

次に Coulomb Scattering が起こった回数を確認する。

今回は GEANT4 の `post_process_id` という変数を用いて、Coulomb Scattering 作用前後のシリコンセンサーと粒子の相互作用の回数を種類ごとに確認した。

図 4.3, 4.4 はその結果である。横軸を `post_process_id` (相互作用の種類)、縦軸を `entries` (log scale) とした。このとき `post_process_id=1` が Coulomb Scattering にあたる。Coulomb Scattering を作用させない場合は図 4.3 より、Coulomb Scattering のエントリー数 0、作用させた場合は図 4.4 よりエントリー数 5 ということが分かる。したがって 10 万イベントに 5 回の割合で Coulomb Scattering が起こっているということが分かった。

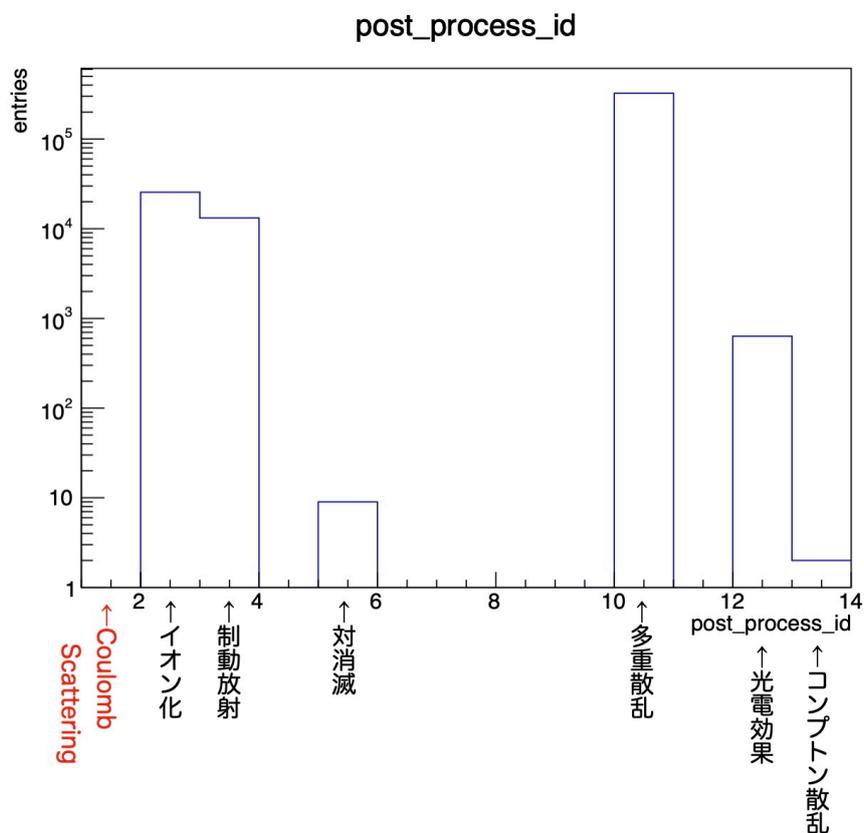


図 4.3: 相互作用回数 (Coulomb Scattering OFF)

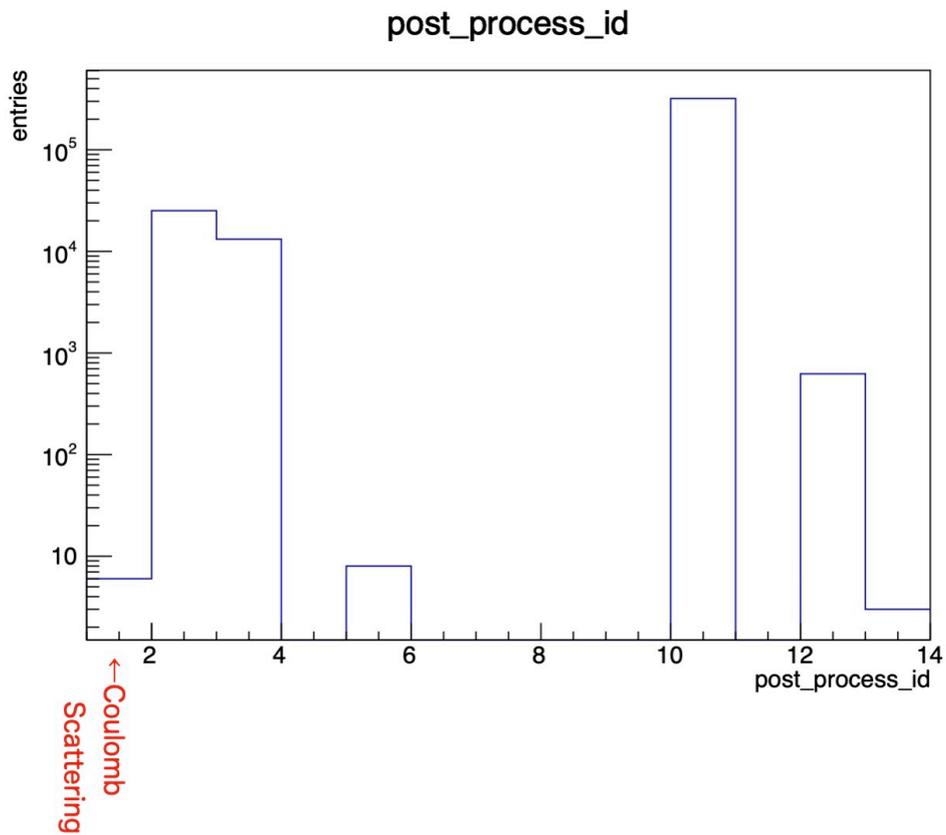


図 4.4: 相互作用回数 (Coulomb Scattering ON)

4.5 まとめ・今後の課題

Coulomb Scattering を作用させる前後で分布の目立った違いは見られなかったが、Coulomb Scattering は 10 万イベントに 5 回の割合で起こっていることが分かった。先行研究の左側のテールが Coulomb Scattering によるものかどうかは現在調査中である。Coulomb Scattering した粒子がどのような挙動をするのか詳しく調べる必要がある。

第5章 結論

本研究では検出器シミュレーションソフトウェア GEANT4 を用いて、INTT の位置分解能の悪化原因を突き止める研究を行った。

位置分解能が悪化する原因として検出器を構成する物質による多重散乱が考えられる。そのため、測定で使用したトリガーカウンターや暗箱などの物質がどの程度分解能の悪化に寄与するか調べた。また大角度散乱を引き起こす Coulomb Scattering がどの程度寄与するかも調べた。

その結果、実験で用いたトリガーカウンターや暗箱のほか、空気などの散乱の原因となる物質を取り除くことによって、hit 数を 1 に制限した場合においては、広がりのない hit 分布になった。

またセットアップごとの hit 分布のピーク幅の広がりを確認した。散乱の原因となる物質を増やすことによってだんだんピーク幅が広がっていった。さらに放射長から hit 分布の期待標準偏差を計算し、シミュレーションで得られた hit 分布のピーク幅と比較したことでシミュレーションが想定通りに作動していることを確認した。

また Residual 分布を作成したことによって、今後実験データと比較できるようになった。実験で見られた広く平らなテールはシミュレーションでも再現されており、テールが作られる原因はセンサーを横断するデルタ線であるということが分かった。

Coulomb Scattering 効果の見積もりについては、Coulomb Scattering を作用させる前後で分布の目立った違いは見られなかったが、Coulomb Scattering は 10 万イベントに 5 回の割合で起こっていることが分かった。先行研究の左側のテールが Coulomb Scattering によるものかどうかは現在調査中であるため、Coulomb Scattering した粒子がどのような挙動をするのか詳しく調べるのが今後の課題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々のご協力をいただきました。

はじめに、このような研究の機会を与えてくださった高エネルギー物理学研究室の宮林先生、下村先生、蜂谷先生に厚く感謝申し上げます。特に指導教官の蜂谷先生には、研究の基礎から発表の仕方、研究の楽しさまでたくさんのことを教えていただきました。

研究室の先輩方には右も左も分からない私を優しく導いていただきました。また時にはつまづきながらも研究を続けてこられたのは同期の皆さんのおかげです。

そして本研究へアドバイスをくださった理化学研究所の秋葉さん、中川さん、糠塚さんにも心より感謝申し上げます。

最後に、私のやりたいことを尊重しサポートしてくれる両親に感謝いたします。

関連図書

- [1] 渡邊靖志『素粒子物理入門』2002, 培風館
- [2] 秋葉康之『クォーク・グルーオン・プラズマの物理』2014, 共立出版
- [3] 政池明『素粒子を探る粒子検出器』2007, 岩波書店
- [4] sPHENIX『SPHENIX』2023.03.21 <https://wiki.sphenix.bnl.gov/index.php/SPHENIX>
- [5] 鈴木彩香『RHIC-sPHENIX 実験における INTT シリコンモジュールの性能評価 ビームテスト実験のデータ解析』2020, 奈良女子大学, 修士論文
- [6] 森田美羽『RHIC-sPHENIX 実験のための INTT 検出器のデータ読み出し性能の評価』2021, 奈良女子大学, 修士論文
- [7] GEANT4『Overview』2023.04.06 <https://geant4.web.cern.ch>
- [8] PDG『passage of particle through matter』2023.03.16 https://pdg.lbl.gov/2022/reviews/contents_sports.html
- [9] KEK『暮らしの中の放射線』2023.04.07 <https://rcwww.kek.jp/kurasi/page-26.pdf>