

2022 年度 修士論文

宇宙線を用いた  
sPHENIX 実験-中間飛跡検出器 INTT 用  
シリコンセンサーの検出効率測定

奈良女子大学大学院人間文化総合科学研究科  
数物科学専攻 物理学コース  
高エネルギー物理学研究室

博士前期課程 2 年  
学籍番号 21810076  
並本ゆみか

2023/03/01

## 概要

現在、奈良女子大学高エネルギー物理学研究室では、米ブルックヘブン国立研究所の重イオン衝突型加速器 (Relativistic Heavy Ion Collider: RHIC) にて 2023 年 4 月より行われる sPHENIX 実験に用いられる中間飛跡検出器 (INTT) の研究を行っている。sPHENIX 実験は、クォークとグルーオンが閉じ込めから解放された状態、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の性質を解明することを目的としている。sPHENIX 実験では衝突点付近に 3 つの飛跡検出器が導入され、そのうちの 하나가 INTT である。

INTT の性能評価を目的として、2021 年 12 月に東北大学電子光理学センターにてビームテストを行った。性能評価項目は、検出効率の測定、検出効率のタイミング依存性の検証、MIP によるエネルギー損失分布、長軸データ転送ケーブル Bus-Extender の動作確認である。ビームテストにおいて、INTT の検出効率は 98.37% 以上、最高値  $99.56 \pm 0.02\%$  という結果を得た。一方これらの項目のうち検出効率のタイミング依存性の検証については、照射されるビームのレートが、測定に使用した CAMAC モジュールの処理時間を遥かに上回っていたため検証できなかった。このため、ビームよりも低いレートの荷電粒子を用いて検出効率のタイミング依存性を検証する必要が生じた。そのために行ったのが宇宙線測定である。

本研究では、奈良女子大学に設置されたテストベンチを用いて行った宇宙線測定結果を解析し、INTT の検出効率の最終確認、及び検出効率のタイミング依存性の検証を行った。その結果得られた検出効率は  $99.51 \pm 0.06\%$  であり、またセンサー上での位置に関わらず検出効率は 99% 以上であることがわかった。また、検出効率のタイミング依存性は確認されなかった。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>7</b>
1.1	素粒子物理学	7
1.1.1	素粒子の標準模型	7
1.1.2	クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)	7
1.2	半導体	8
1.2.1	半導体を用いた荷電粒子検出原理	8
1.3	重イオン衝突実験	10
1.3.1	Relativistic Heavy Ion collider(RHIC)	10
1.3.2	sPHENIX 実験	10
1.3.3	sPHENIX 実験の飛跡検出器群	12
1.3.4	Monolithic-Active-Pixel-Sensor-based Vertex Detector(MVTX)	12
1.3.5	INTermediate Tracker(INTT)	12
1.3.6	Time Projection Chamber(TPC)	14
1.4	研究目的	14
<b>第 2 章</b>	<b>中間飛跡検出器 (INTT)</b>	<b>15</b>
2.1	INTT 用シリコンセンサーラダー	15
2.1.1	ストリップ型シリコンセンサー	16
2.1.2	FPHX chip	16
2.1.3	High Density Interconnect(HDI)	16
2.2	読み出し回路	16
2.2.1	コンバージョンケーブル	17
2.2.2	Bus-Extender	17
2.2.3	Read Out Card(ROC)	18
2.2.4	Front End Module(FEM), FEM-Interface Board(FEM-IB)	18
<b>第 3 章</b>	<b>テストベンチにおける宇宙線測定</b>	<b>21</b>
3.1	INTT の動作確認	21
3.1.1	キャリブレーションテスト	21
3.1.2	キャリブレーションテストの結果	21
3.2	宇宙線測定	23
3.2.1	宇宙線	23

3.2.2	測定方法	24
3.2.3	セットアップ	24
3.2.4	データ読み出し回路	25
3.2.5	宇宙線測定時の DAC 閾値設定	27
3.2.6	NIM、CAMAC を用いた宇宙線測定	29
<b>第 4 章</b>	<b>宇宙線測定データの解析と議論</b>	<b>32</b>
4.1	データの取り扱い	32
4.2	ノイズの除去	32
4.2.1	ホットストリップ	32
4.2.2	Double Saving Event(DSE)	33
4.3	クラスタリング	34
4.3.1	クラスタリングの手順	35
4.4	クラスター位置	36
4.4.1	X 方向の予想位置とクラスター位置のずれ-Residual 分布	36
4.4.2	Z 方向の予想位置とクラスター位置のずれ-セル差	36
4.5	複数クラスターの取り扱い	38
4.5.1	複数クラスターの解析	38
4.6	検出効率	42
4.6.1	検出効率の定義	42
4.6.2	検出効率の結果	42
4.6.3	検出効率のセル方向、ストリップ方向依存性	42
4.6.4	検出効率のタイミング依存性	44
<b>第 5 章</b>	<b>まとめ</b>	<b>47</b>
	<b>参考文献</b>	<b>49</b>

# 目次

1.1	素粒子の標準模型で扱う素粒子。 . . . . .	8
1.2	宇宙の歴史。 . . . . .	9
1.3	pn 接合型半導体を用いた荷電粒子検出原理。 . . . . .	9
1.4	RHIC の全体図。 . . . . .	10
1.5	sPHENIX 実験の検出器。 . . . . .	11
1.6	sPHENIX 実験の稼働予定。 [出典: C.McGinn 2022『sPHENIX overview』 <a href="https://indico.bnl.gov/event/15482/">https://indico.bnl.gov/event/15482/</a> ] . . . . .	11
1.7	sPHENIX 実験の飛跡検出器群。 . . . . .	12
1.8	TPC 内部に配置された INTT。 . . . . .	13
1.9	組み上げ途中の INTT バレル。 . . . . .	13
2.1	ビーム軸方向から見た INTT バレルの断面図。 . . . . .	15
2.2	INTT 用シリコンセンサーラダー。 . . . . .	15
2.3	ハーフラダーにおけるシリコンセンサーの模式図。 . . . . .	16
2.4	テストベンチにおけるデータ読み出し回路。 . . . . .	17
2.5	FPC 製コンバージョンケーブル。 左: small(20cm)、右: large(40cm)。 . . . . .	17
2.6	マイクロ同軸製コンバージョンケーブル (15cm)。 . . . . .	18
2.7	Bus-Extender の写真。 . . . . .	18
2.8	コンバージョンケーブル 3 本、データ送信ケーブル 2 本が接続された状態の ROC。 . . . . .	19
2.9	VME クレートに装着された FEM-IB(左) と FEM(右)。 . . . . .	20
3.1	キャリブレーションテストの概略図。 . . . . .	21
3.2	chip 1 の amplitude と ADC の相関分布。 . . . . .	22
3.3	chip 1 の amplitude と channel の相関分布。 . . . . .	22
3.4	応答が 15 回以上であることを示す over 15。 . . . . .	23
3.5	全 26 セル分のキャリブレーションテスト結果。 . . . . .	23
3.6	$\mu$ 粒子のエネルギー分布図。 [出典: M. Honda et al. 1995 Phys. Rev. D 52, 4985 「Calculation of the flux of atmospheric neutrinos」] . . . . .	24
3.7	宇宙線測定セットアップの模式図。 . . . . .	25
3.8	実験室における宇宙線測定セットアップ。 . . . . .	26
3.9	宇宙線測定の読み出し回路。 . . . . .	26
3.10	実験に使用した NIM モジュールセットアップ。 . . . . .	27
3.11	シリコン中で $\mu$ 粒子が失うエネルギー。 [PDG (2021)] . . . . .	28

3.12	NIM、CAMAC 回路。 . . . . .	30
3.13	CAMAC ADC を用いたシンチレーション検出器の ADC 値測定結果。 . . . . .	31
3.14	CAMAC TDC を用いた BCO のタイミング測定結果。 . . . . .	31
4.1	読み出しセル、ストリップ番号のフォーマット。 . . . . .	32
4.2	ホットストリップの例。 . . . . .	33
4.3	Double Saving Event の例。 . . . . .	34
4.4	ホットストリップ、DSE 除去後のヒット分布図。 . . . . .	34
4.5	測定された宇宙線の角度分布図。 . . . . .	35
4.6	センサー断面で見るクラスタリング手順。 . . . . .	35
4.7	Residual の模式図。 . . . . .	36
4.8	Residual 分布図。 . . . . .	37
4.9	セル差分布図。 . . . . .	37
4.10	同一タイミングに検出された複数個のクラスター。 . . . . .	38
4.11	同一タイミングに検出されたクラスター数のヒストグラム。 . . . . .	39
4.12	単一クラスターと複数クラスターの Residual 分布図 (青: 単一クラスター、緑: 複数クラスターのうち予想位置から近いクラスター、赤: 複数クラスターのうち予想位置から遠いクラスター)。 . . . . .	40
4.13	複数クラスターの ADC 分布比較。 . . . . .	40
4.14	単一クラスターの ADC 分布図。 . . . . .	41
4.15	ビームテストから得られた ADC 分布。 [出典: G.Nukazuka et al. 2023 ELPH annual report 2022 「PerformanceevaluationoftheIntermediateTrackerfor sPHENIX」 ] . . . . .	41
4.16	セルごとの検出効率ヒストグラム。 . . . . .	43
4.17	channel ごとの検出効率ヒストグラム。 . . . . .	44
4.18	BCO ごとの検出効率。 . . . . .	46

# 表目次

3.1	キャリブレーションテスト時の DAC 閾値設定。 . . . . .	22
3.2	宇宙線測定時の DAC 閾値設定。 . . . . .	29
4.1	各ラダーごとの検出効率。 . . . . .	42
4.2	セルごとの検出効率。 . . . . .	43
4.3	channel ごとの検出効率。 . . . . .	44
4.4	BCO ごとの検出効率。 . . . . .	45

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 素粒子物理学

#### 1.1.1 素粒子の標準模型

素粒子とは、物質を構成する最も基本的な粒子のことである。素粒子はスピン量子数  $s$  の値によって分類され、スピン量子数が半整数になる粒子をフェルミ粒子、整数になる粒子をボース粒子と呼ぶ。フェルミ粒子はさらにクォーク、レプトンの 2 種類に分けられ、クォークはアップ (u)、ダウン (d)、チャーム (c)、ストレンジ (s)、トップ (t)、ボトム (b) クォークの計 6 種類、レプトンは電子、ミュー粒子、タウ粒子とこれらに対応する 3 種類のニュートリノの計 6 種類に分類される。クォークとレプトンは、物質を作る粒子である。ボース粒子はスピン 0 のものがスカラー粒子、それ以外のがゲージ粒子に分類される。ゲージ粒子は素粒子の相互作用を伝える粒子であり、グルーオンは強い相互作用、光子は電磁相互作用、W 粒子と Z 粒子は弱い相互作用をそれぞれ媒介する。スピン 0 のスカラー粒子はヒッグス粒子のみであり、素粒子に質量を与える機構、ヒッグス機構に登場する粒子である。このように、素粒子とその間に働く電磁気力、弱い力、強い力を説明するモデルを標準模型と呼ぶ。自然界に存在する 4 つの力のうち重力については、素粒子間に働く重力が非常に小さいため標準模型には含まれていない。標準模型には、電弱相互作用を取り扱うワインバーク・サラム (WS) 理論と、強い相互作用を扱う量子色力学 (QCD) が存在する。物質粒子のうちレプトンは、電子、ミュー粒子、タウ粒子は電弱相互作用を、ニュートリノは弱い相互作用のみに関わり強い相互作用はしないが、クォークは色荷をもつため電弱相互作用と強い相互作用をする。図 1.1 に素粒子の標準模型で扱う素粒子を示した。[1][2][3]

#### 1.1.2 クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

物質には固体、液体、気体という 3 つの状態が存在し、それぞれの状態を相と呼ぶ。物質は温度変化に伴って相転移を起こす。これと同様に、クォークとグルーオンからなる物質にはクォークとグルーオンが核子内に閉じ込められていない高温の QGP 相と、クォークとグルーオンが核子内に閉じ込められている低温のハドロン相が存在し、温度約 2 兆°C で QGP 相からハドロン相への相転移が起こる。図 1.2 に示すように、ビッグバン直後の宇宙は QGP 相であったが、宇宙の膨張に伴いその温度が低下したことで QGP 相からハドロン相への相転移が起こった。このクォーク・ハドロン相転移はビッグバンから約  $10\mu$  秒後に起こったと考えられている。2010 年始めに、ブルックヘブン国立研究所の RHIC で生成された物質の温度が約 4 兆°C に達していると推定された。これはハドロン相から QGP 相への相転移が起こる 2 兆°C を超えており、QGP が生成された



フェルミ粒子				ボース粒子				
	第一世代	第二世代	第三世代					
QUARKS	<b>u</b> アップ	<b>c</b> チャーム	<b>t</b> トップ	ゲージ粒子	<b>g</b> グルーオン	<b><math>\gamma</math></b> 光子	<b>W</b> W粒子	<b>Z</b> Z粒子
	<b>d</b> ダウン	<b>s</b> ストレンジ	<b>b</b> ボトム		スカラー粒子	<b>H</b> ヒッグス粒子		
LEPTONS	<b>e</b> 電子	<b><math>\mu</math></b> ミュー粒子	<b><math>\tau</math></b> タウ粒子					
	<b><math>\nu_e</math></b> 電子ニュートリノ	<b><math>\nu_\mu</math></b> ミューニュートリノ	<b><math>\nu_\tau</math></b> タウニュートリノ					

図 1.1 素粒子の標準模型で扱う素粒子。

と確認された。また 2010 年末には欧州原子核研究所の LHC において鉛原子核衝突実験が開始され、RHIC よりもさらに高温の QGP が作れるようになった。[2]

## 1.2 半導体

半導体とは絶縁体と導体の中間の抵抗率を持つ結晶性の物質である。代表的な半導体として、ケイ素 (Si, Silicon) やゲルマニウム (Ge, Germanium) などの元素半導体や、ヒ化ガリウム (GaAs)、インジウムリン (InP) などの化合物半導体がある。半導体には電荷を運ぶキャリアが電子である n 型と、正孔である p 型がある。正孔とは軌道上に存在していた電子が外側の軌道に移動したことによって生じた抜け穴のことで、電子が抜けることで正の電荷を帯びるようになる。真性半導体は電気抵抗が大きく、あまり電気が流れないため、n 型シリコン半導体であれば V 族、p 型シリコン半導体であれば III 属の元素を混ぜることで電気が流れやすくなる。電子回路に使用する n 型、p 型半導体は真性半導体に不純物を混ぜ、電気が流れやすくなった半導体を使用する。[1][4]

### 1.2.1 半導体を用いた荷電粒子検出原理

p 型半導体と n 型半導体を接合すると、接合部付近では正孔と電子が互いに結びつき打ち消し合うことで、キャリアの存在しない空乏層と呼ばれる領域ができる。pn 接合型半導体の p 型側に、n 型側に対して負の電圧を印加すると空乏層が拡大する。この電圧を逆バイアス電圧と呼ぶ。空乏層に高エネルギーの粒子が入射すると電子正孔対が生成され、逆バイアス電圧によってそれぞれ逆方向へ移動する。この電化の移動により電極に信号が誘起され、その信号を読み出すことで粒子が通過した位置が特定される。シリコン半導体において、1 電子正孔対を生成するために必要なエネルギーは 3.55eV である。図 1.3 に半導体を用いた荷電粒子検出原理を示した。[5]



## 1.3 重イオン衝突実験

QGP 状態は、バリオン密度がほとんど 0 の高温状態、またはバリオン密度が高い状態を実現すると考えられている。すなわち十分に大きい空間を非常に高温にするか、非常に高いバリオン密度にすることで QGP が生成できると考えられる。そのために考えられたのが、重い原子核を高エネルギーに加速して衝突させる、重イオン衝突実験である。現在、重イオン衝突実験が行われているのは、欧州原子核研究機構 (CERN) と米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) である。[2]

### 1.3.1 Relativistic Heavy Ion collider(RHIC)

Relativistic Heavy Ion collider(RHIC) は米国ブルックヘブン国立研究所にある重イオン加速器である。QGP の生成、研究を目的として建設された加速器であり、2000 年から稼働し、様々な実験を行っている。RHIC は周長約 3.8km の 2 つの超伝導リングからなり、2 つのリングが交差する衝突点は 6 つ存在する。最高ビームエネルギーは、金原子核で核子あたり 100GeV、陽子では 255GeV である。重心系での核子あたりの衝突エネルギーはその 2 倍となり、それぞれ 200GeV、510GeV である。図 1.4 に RHIC の全体図を示した。[2]

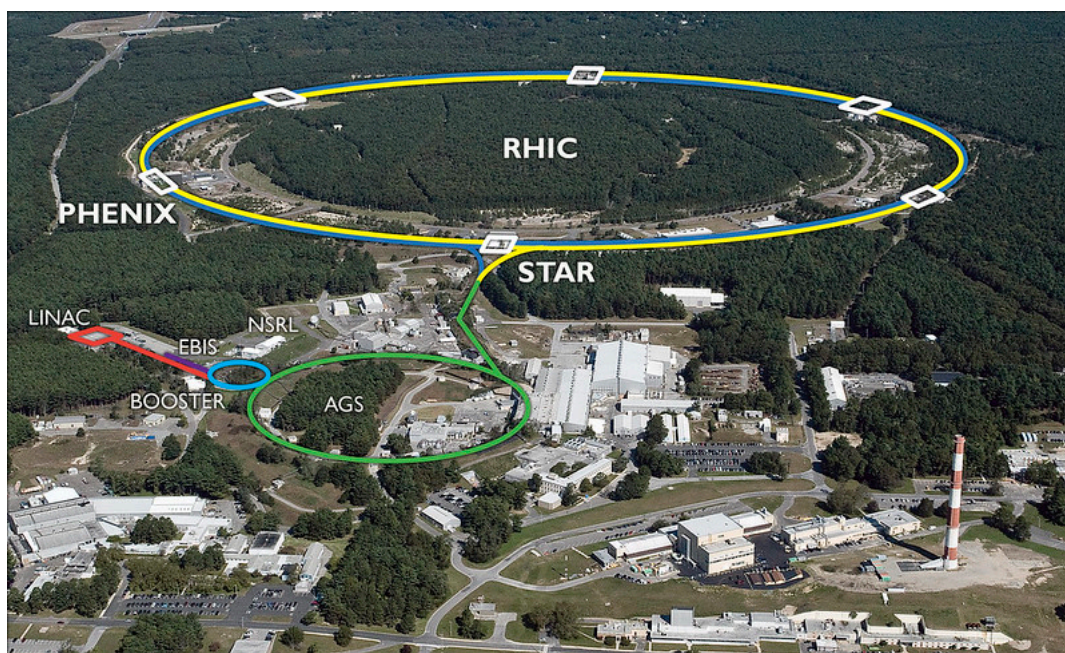


図 1.4 RHIC の全体図。

### 1.3.2 sPHENIX 実験

sPHENIX 実験は、QGP の研究を目的として 2000 年から 2016 年まで RHIC で行われていた PHENIX 実験の後継実験であり、2023 年 4 月から稼働予定である。図 1.5 に sPHENIX 実験で用いられる検出器の全体

像を示した。ハドロンジェット、ジェット相関、 $\Upsilon$  中間子を測定することにより、QGP における輸送係数とデバイ遮蔽長の温度依存性を決定することを目的としている。これらの測定のために、ハイレートかつ大きな検出範囲を持つハドロンカロリメータと電磁カロリメータ、3 種の飛跡検出器群を用いる。2023 年は金原子核衝突を最大 13 週の稼働で行う予定である。2023 年以降の稼働予定について、図 1.6 に示した。[6][7]

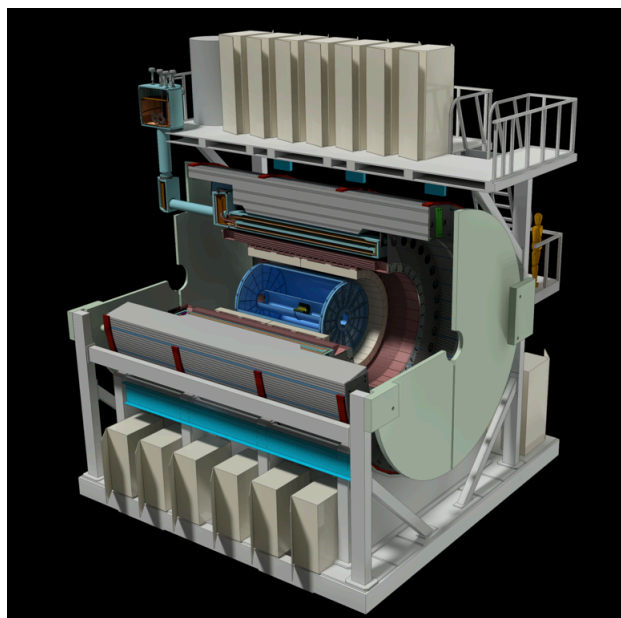


図 1.5 sPHENIX 実験の検出器。

Year	Species	$\sqrt{s_{NN}}$ [GeV]	Cryo Weeks	Physics Weeks	Rec. Lum.  z  < 10 cm	Samp. Lum.  z  < 10 cm
2023	Au+Au	200	24 (28)	9 (13)	3.7 (5.7) nb <sup>-1</sup>	4.5 (6.9) nb <sup>-1</sup>
2024	$p^\uparrow p^\uparrow$	200	24 (28)	12 (16)	0.3 (0.4) pb <sup>-1</sup> [5 kHz] 4.5 (6.2) pb <sup>-1</sup> [10%-str]	45 (62) pb <sup>-1</sup>
2024	$p^\uparrow + Au$	200	-	5	0.003 pb <sup>-1</sup> [5 kHz] 0.01 pb <sup>-1</sup> [10%-str]	0.11 pb <sup>-1</sup>
2025	Au+Au	200	24 (28)	20.5 (24.5)	13 (15) nb <sup>-1</sup>	21 (25) nb <sup>-1</sup>

図 1.6 sPHENIX 実験の稼働予定。[出典: C.McGinn 2022 『sPHENIX overview』  
<https://indico.bnl.gov/event/15482/>]

### 1.3.3 sPHENIX 実験の飛跡検出器群

sPHENIX 実験の飛跡検出器群は 3 つの飛跡検出器から構成され、ビームパイプに近い方から MVTX、INTT、TPC である。図 1.7 に飛跡検出器群の全体像を示した。

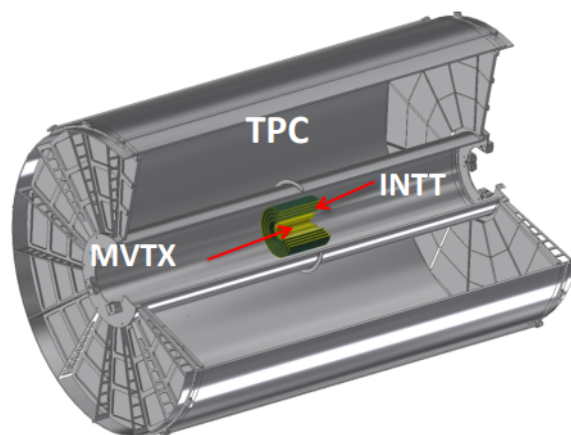


図 1.7 sPHENIX 実験の飛跡検出器群。

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

Monolithic-Active-Pixel-Sensor-based Vertex Detector(MVTX) は、飛跡検出器群の中でも最も内側に配置される検出器であり、ビームパイプから 2 – 6cm に位置するシリコンピクセル検出器である。MVTX には CERN で行われている ALICE 実験のために開発された Monolithic Active Pixel Sensor(MAPS) 技術が用いられている。ピクセルサイズは  $29.24\mu\text{m} \times 26.88\mu\text{m}$ 、厚み  $50\mu\text{m}$  であり、3 層構造のバレル型検出器である。MVTX は b-ハドロンや b-ジェットを測定することを目的としており、衝突中心からビームパイプ方向に  $\pm 10\text{cm}$ 、方位角方向  $2\pi$ 、ラピディティ方向に対して  $|\eta| < 1$  の範囲を覆う。[8]

### 1.3.5 INTermediate Tracker(INTT)

INTermediate Tracker(INTT) は MVTX と TPC の間に配置されるストリップ型シリコン検出器であり、ビームパイプから 6 – 12cm に位置する。TPC 内部に配置された INTT を図 1.8 に示す。また、図 1.9 は BNL にて組み上げ途中の INTT バレルの写真である。厚み  $320\mu\text{m}$ 、幅  $78\mu\text{m}$  のストリップ 128 本で 1 つのセンサーが構成されている。INTT は MVTX と TPC の飛跡をつなぎ、運動量分解能を上げる。また、1 ビーム周期以下の時間分解能を持つことから、衝突事象がどのビーム交差で起こったか区別でき、パイルアップの解決が可能である。衝突中心からビームパイプ方向に  $\pm 23\text{cm}$ 、方位角方向  $2\pi$  の範囲を覆う。[11]

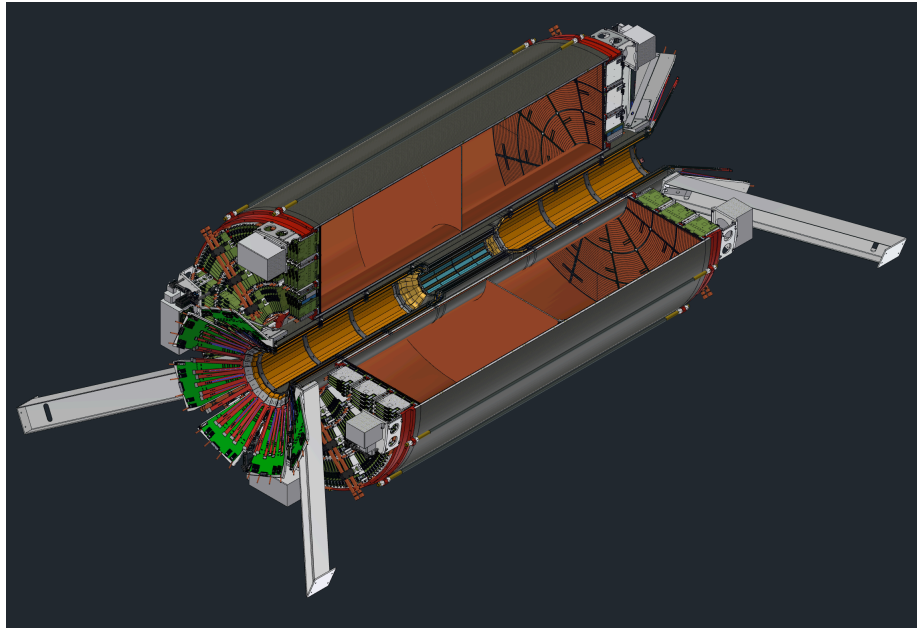


図 1.8 TPC 内部に配置された INTT。



図 1.9 組み上げ途中の INTT バレル。

### 1.3.6 Time Projection Chamber(TPC)

Time Projection Chamber(TPC) は、飛跡検出器群の中で最も外側に配置される検出器であり、ビームパイプから 20 – 78 cm に位置する。ドリフト領域内はネオン (Ne) と四フッ化炭素 ( $\text{CF}_4$ ) の混合気体で満たされており、ドリフト速度は  $\sim 80\mu\text{m}/\text{ns}$  である。TPC は 36 枚の読み出しパッドを持ち、読み出しパッド上に落ちた電子の場合は  $90\mu\text{m}$ 、最大ドリフト長 105cm をドリフトした電子の場合は  $130\mu\text{m}$  の位置分解能となる。衝突中心からビームパイプ方向に  $\pm 1.05\text{m}$ 、方位角方向  $2\pi$  の範囲を覆う。[9][10]

## 1.4 研究目的

2023 年 4 月からの sPHENIX 実験稼働に向けて、奈良女子大学内に設置したテストベンチを用いて INTT の動作確認を行ってきた。2019 年には INTT の検出効率測定を目的としてビームテストを行い、96% の結果を得た。これは予想値 99% 以上を下回っており、その理由としてセンサーが検出した信号のタイミングとビームクロックとの相対位相によっては信号の取りこぼしがあるのではないかという仮説を立てた。2021 年のビームテストで 99% 以上の検出効率を得たためにこの仮説の可能性は低いと考えられるが、ビームテストではバックグラウンドの混入による偶然同時事象の可能性を完全には否定できないので、さらに検証する必要がある。本研究では宇宙線を用いて測定を行うことにより、まず 2021 年ビームテストで得られた検出効率をデータレートやバックグラウンドの影響が無視できるほどに小さい環境での測定により確認すること、そして信号検出にタイミング依存性が存在しないと明らかにすることを目的としている。[11][12]

## 第 2 章

# 中間飛跡検出器 (INTT)

### 2.1 INTT 用シリコンセンサーラダー

INTT 用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 chip、HDI から構成されている。INTT バレルには図 2.1 に示すように、内層に 24 本、外層に 32 本、計 56 本のラダーが用いられる。またラダーは電氣的に 2 つに分割され、分割された 1 つをハーフラダーと呼ぶ。図 2.2 に INTT 用シリコンセンサーラダーの実機を示した。黄色の点線で囲んだ部分がハーフラダーである。

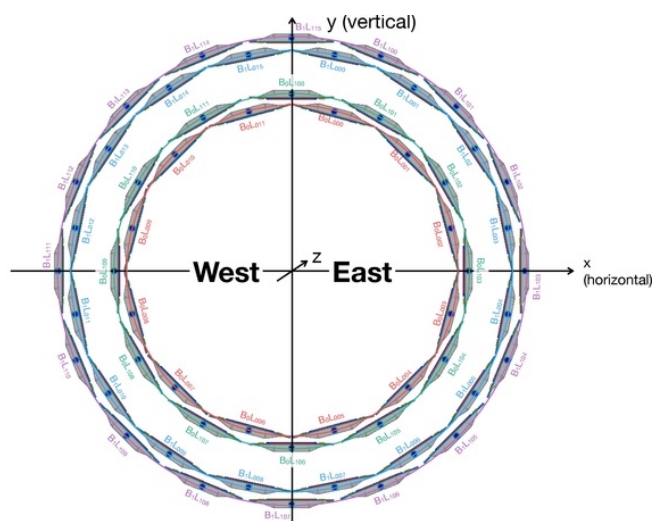


図 2.1 ビーム軸方向から見た INTT バレルの断面図。

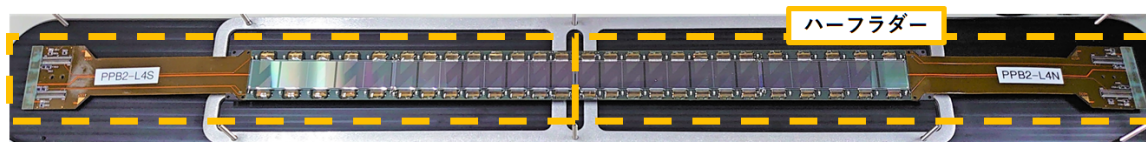


図 2.2 INTT 用シリコンセンサーラダー。



### 2.1.1 ストリップ型シリコンセンサー

INTT にはシリコンの横幅が異なる、2 種類のシリコンストリップセンサーが用いられる。衝突点に近いラダー中心部には横 16mm、幅 78 $\mu$ m、厚み 320 $\mu$ m の Type-A のセンサーが、ラダーの外側には横 20mm、幅 78 $\mu$ m、厚み 320 $\mu$ m の Type-B のセンサーが用いられる。Type-A は 2 $\times$ 8 個、Type-B は 2 $\times$ 5 個の読み出しセルに分けられ、各読み出しセルの信号を 1 つの FPHX chip が担う。また、図 2.3 に示すように各シリコンストリップには channel 番号が振られており、ラダーの外側が channel 0、ラダー中央が channel 127 となる。

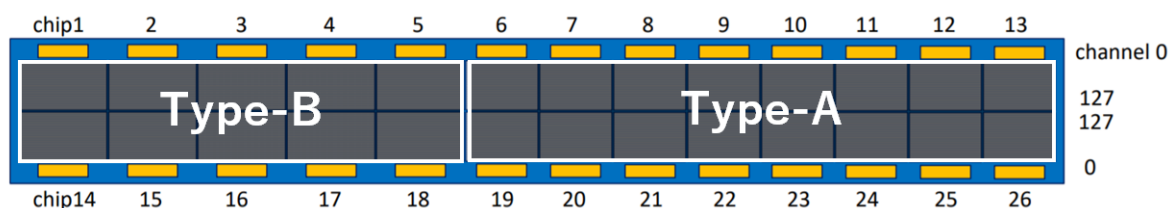


図 2.3 ハーフラダーにおけるシリコンセンサーの模式図。

### 2.1.2 FPHX chip

シリコンセンサーからの信号を読み出すために、INTT は FPHX chip を用いている。FPHX chip は、PHENIX 実験の FVTX 検出器に用いられていた読み出し chip である。1 本の INTT 用シリコンセンサーラダーには計 52 個の FPHX chip が搭載されている。FPHX chip はそれぞれ 128 チャンネルを持ち、各チャンネルから送られてきた信号について積分、波形整形を行う。FPHX chip は channel ごとに 8 個のコンパレータを持ち、閾値を 8 bit の DAC によって設定することができる。DAC 値と電圧値の変換式は

$$V(\text{mV}) = \text{DAC} \times 4 + 210 \quad (2.1)$$

である。また、出力信号は 3bit の ADC である。シリコンセンサー、FPHX chip、HDI はワイヤーボンディングによって接続されている。[13]

### 2.1.3 High Density Interconnect(HDI)

High Density Interconnect(HDI) は FPHX chip、シリコンセンサーへの入出力信号の配線と電源供給を行う基板である。Flexible Printed Circuits(FPC) と呼ばれる、柔軟性が高く薄い基板で作られている。ROC とはコンバージョンケーブル、あるいは Bus-Extender を用いて接続される。

## 2.2 読み出し回路

RHIC で実際に行われる sPHENIX 実験では、検出器から送られてくるデータとビームを同期させるために、ビーム周波数と一致した 9.4 MHz(106 nsec) の同期信号が RHIC より供給される。この信号を Beam

Clock(BCO) という。テストベンチにおいては、FEM-IB で BCO は生成され、ROC、FPHX chip に送られる。テストベンチにおけるデータ読み出しの概略図を図 2.4 に示した。

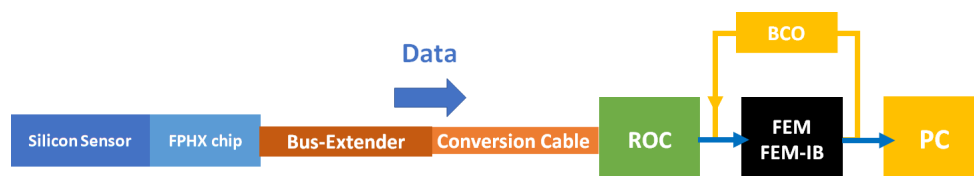


図 2.4 テストベンチにおけるデータ読み出し回路。

## 2.2.1 コンバージョンケーブル

コンバージョンケーブルは HDI と ROC で異なるコネクタを整合するためのケーブルで、データ伝送および HDI への電源の供給に用いられる。図 2.5 に示すように、FPC 製のコンバージョンケーブルは 20cm の small と 40cm の large の 2 種類があり、柔軟性が高いため上下方向の移動には問題がない一方で左右方向の移動はケーブルに負荷がかかってしまうという欠点があった。そのため、新たにマイクロ同軸ケーブル製のコンバージョンケーブル (図 2.6) を開発し、sPHENIX 実験ではこのコンバージョンケーブル 15cm、25cm と Bus-Extender を併用する。本研究では 40cm の FPC 製コンバージョンケーブルを用いて HDI と ROC を接続した。



図 2.5 FPC 製コンバージョンケーブル。左: small(20cm)、右: large(40cm)。

## 2.2.2 Bus-Extender

Bus-Extender は HDI と ROC を用いるために、コンバージョンケーブルと併せて用いられるデータ伝送ケーブルである。1 m 以上離れている HDI と ROC を接続するために、多量のデータを高速で伝送することができる、薄くて長さ 1 m 以上のケーブルが求められた。この条件を満たすケーブルは市販品には存在しないため、FPC を用いて新たなケーブルを開発した。Bus-Extender は、長さ 1.11m、幅 5cm、厚み 386 $\mu$ m、

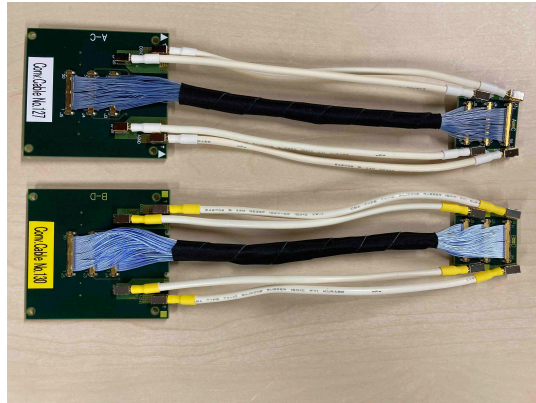


図 2.6 マイクロ同軸製コンバージョンケーブル (15cm)。

信号伝送速度は 200Mbps である。図 2.7 に実際の Bus-Extender を示した。[14]



図 2.7 Bus-Extender の写真。

### 2.2.3 Read Out Card(ROC)

Read Out Card(ROC) は複数のセンサーラダーから送られてきたデータの同期と結合を行い、次の読み出し回路に転送する読み出し基板である (図 2.8)。また、FPHX chip へ測定条件や閾値といった情報を、指定された chip へ転送する機能、FPHX chip の動作確認を行うキャリブレーションテストにおいて、テストパルスを発生させる機能、接続されたシリコンセンサーラダーへ電源を供給する機能を持つ。ROC 1 枚はセンサーラダー 4 本からの信号を処理する回路 (FPGA) が 4 セットあり、ROC で処理された信号はそれぞれ光ファイバーによって後段の処理回路に伝送される。

### 2.2.4 Front End Module(FEM), FEM-Interface Board(FEM-IB)

Front End Module(FEM) とは VME 規格の読み出し基板で、ROC から送られてきたデータを整理し sPHENIX 検出器で共通のフォーマットに変換する役割を持つ。FEM1 枚に『top』と『bottom』の 2 つのデータ受信ケーブル差込口が存在し、ROC1 枚から送られてくる信号のうち半分の信号担うことができる。このため、ROC1 枚のデータをすべて受け取るためには FEM は 2 枚必要である。一方で ROC への命令信号は

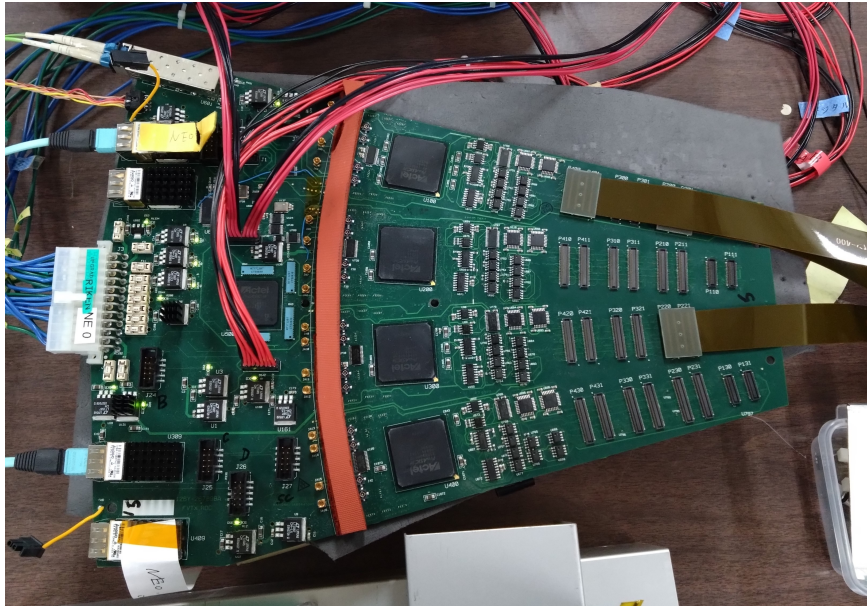


図 2.8 コンバージョンケーブル 3 本、データ送信ケーブル 2 本が接続された状態の ROC。

FEM1 枚で賄うことができる。データ処理用 FPGA は Xilinx 社製の Vertex-4 が搭載されており、トリガーシステムの構築が可能である。

FEM-Interface Board(FEM-IB) は FEM と同じく VME 規格のボードで、FEM を制御するために用いられる。また、検出器全体を統括するクロック信号やトリガー信号、FEM 制御信号を受け取る。テストベンチにおいては、クロック信号を生成する役割も持つ。図 2.9 は VME クレーツに装着された実際の FEM の写真であり、左側が FEM-IB、右側が FEM である。



図 2.9 VME クレートに装着された FEM-IB(左) と FEM(右)。

## 第3章

# テストベンチにおける宇宙線測定

INTT 用シリコンセンサーラダーの性能評価や読み出し回路の動作確認を目的として、2018 年に奈良女子大学にテストベンチが構築された。主に行われている測定は、読み出し回路の動作確認を目的として行うキャリブレーションテスト、シリコンセンサーの性能評価を目的として行う放射線測定、宇宙線測定である。同様のテストベンチが BNL、台湾の国立中央大学、理化学研究所に構築されており、それぞれ研究を行っている。

### 3.1 INTT の動作確認

#### 3.1.1 キャリブレーションテスト

キャリブレーションテストは読み出し回路の動作確認を行うテストである。キャリブレーションテストの概略図を図 3.1 に示した。ROC で生成したテストパルス (アナログ信号) を FPHX chip に入力し、FPHX chip は受け取った信号をデジタル信号に変換して ROC に送信する。このデジタル信号が ROC、FEM を通って PC にデータとして出力される。テストパルスの波高を amplitude と呼び、amplitude を 1 – 63 まで変化させることでテストパルスの波高を変えながらデータを取る。入力されるテストパルスは、1 chip、1 channel、1 amplitude あたり 10 回である。表 3.1 にキャリブレーションテスト時の DAC 閾値設定を示した。



図 3.1 キャリブレーションテストの概略図。

#### 3.1.2 キャリブレーションテストの結果

キャリブレーションテストの結果は 2 つの 2 次元ヒストグラムによって表される。図 3.2 は FPHX chip 1 の入力テストパルスの波高 amplitude と出力 ADC の 2 次元ヒストグラムを示しており、赤色が最もヒット数が多く、黄色、緑色、青色と色が変化するに連れてヒット数が減少している。この図から、入力信号と出力信号の大きさに相関関係があることがわかる。図 3.3 は FPHX chip 1 における amplitude とチャンネルヒッ

表 3.1 キャリブレーションテスト時の DAC 閾値設定。

ADC 値	DAC 設定値	電圧値 [mV]
0	20	290
1	25	310
2	30	330
3	35	350
4	40	370
5	45	390
6	50	410
7	55	430

トの位置の相関分布図であり、色がヒット数を示している。この図より、amplitudeがある値を超えるとヒットが記録され始めることがわかる。また、テストパルスを入力回数が10回であるにも関わらず、ヒット数が15を超えた場合は異常であることを示すために、図3.4のように分布図上に『over 15』と表示されるようになっている。これらの2次元ヒストグラムは、キャリブレーションテスト終了時には図3.5に示すように全26セル分表示される。この図においては、上段の2次元ヒストグラムから全26chipにおいてテストパルスの波高amplitudeと出力ADCに相関関係があること、また下段の2次元ヒストグラムから、全chipにおいてamplitudeがある値を超えたところからヒットが記録されており、データが欠けているchannelや入力回数以上のヒットを記録しているchannelがないことがわかる。この図は良好な結果を示している。

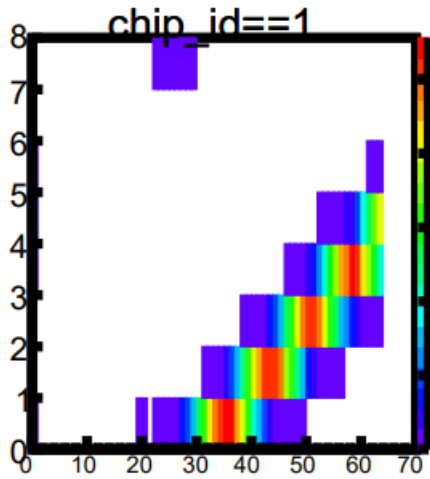


図 3.2 chip 1 の amplitude と ADC の相関分布。

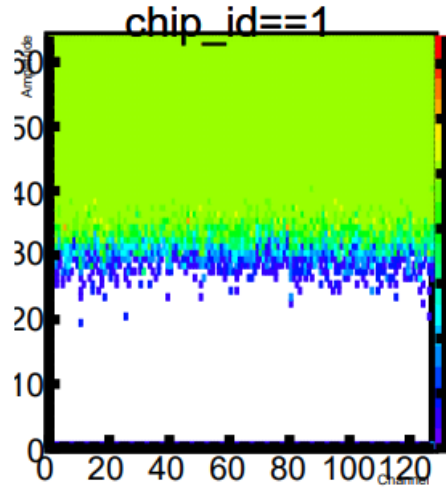


図 3.3 chip 1 の amplitude と channel の相関分布。

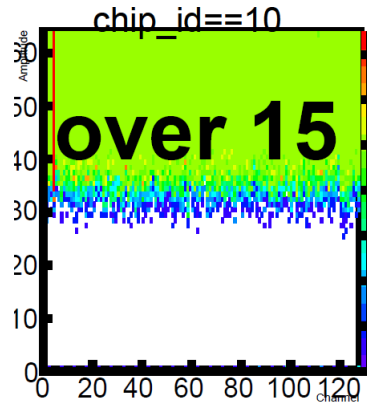


図 3.4 応答が 15 回以上であることを示す over 15。

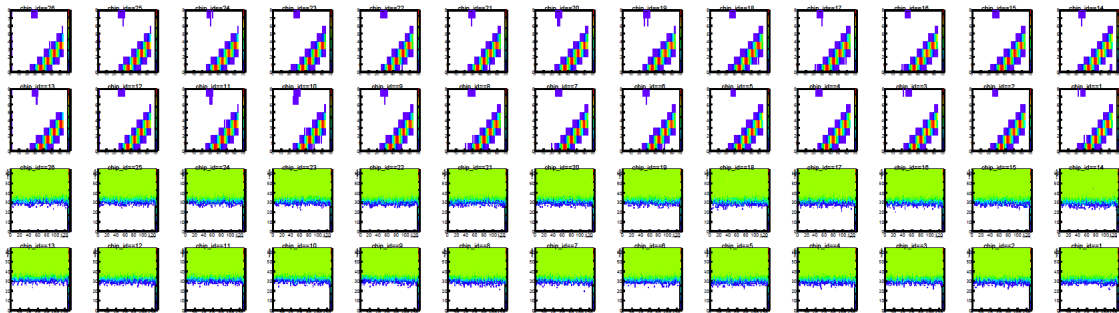


図 3.5 全 26 セル分のキャリブレーションテスト結果。

## 3.2 宇宙線測定

### 3.2.1 宇宙線

宇宙線とは、地球外より飛来する放射線である。あらゆる方向からほぼ一様に到来し、そのエネルギーは  $1 \text{ GeV} (10^9 \text{ eV})$  から  $10^{20} \text{ eV}$  までの領域にわたる。主成分は陽子であり、その他電子、ヘリウム、鉄などの原子核も宇宙線に含まれている。大気に突入する前の宇宙線を一次宇宙線と呼び、一次宇宙線が大気中の原子核と衝突することで生成される粒子は二次宇宙線と呼ばれる。二次宇宙線は陽子や中性子、陽電子や二次的な電子、 $\pi$  中間子などである。この内  $\pi$  中間子が崩壊することで、 $\mu$  粒子やニュートリノが生成される。地表で観測される二次宇宙線を生成するためには、一次宇宙線のエネルギーが少なくとも  $2 \text{ GeV}$  以上必要である。宇宙線は地表付近では典型的に  $0.4 \text{ GeV}$  のエネルギーを持ち、1 分間に  $1 \text{ cm}^2$  あたり約 1 個観測される。図 3.6 に  $\mu$  粒子のエネルギー分布図を示した。[15][16]



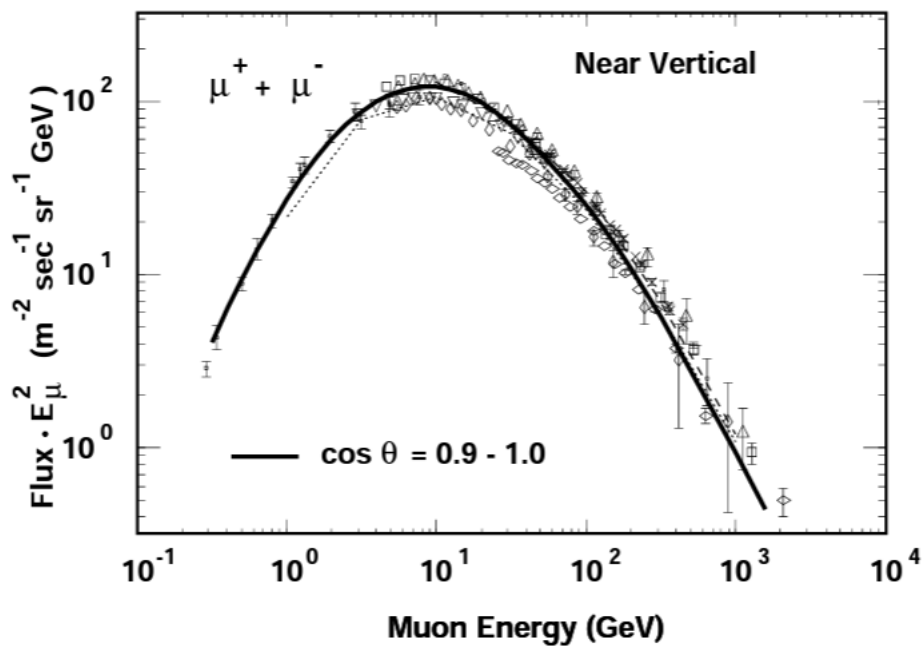


FIG. 19.

図 3.6  $\mu$  粒子のエネルギー分布図。[出典: M. Honda et al. 1995 Phys. Rev. D 52, 4985 「Calculation of the flux of atmospheric neutrinos」]

### 3.2.2 測定方法

シリコンセンサーを用いて荷電粒子を測定する方法は以下の 2 種類存在する。

1. シリコンセンサーが粒子を検出した際にデータを記録する、セルフトリガー測定。
2. シリコンセンサーとトリガーモジュールの双方が粒子を検出した際にデータを記録する、外部トリガー測定。

セルフトリガー測定はセンサーを通過したすべての粒子のデータが得られる一方で、センサーや読み出し回路由来の電気ノイズも記録してしまう。一方外部トリガー測定は、センサーとトリガーモジュールの双方を通過した粒子のみ記録するため、どちらか一方のみを通過した粒子のデータは得られないがノイズを減らすことができる。本研究では検出効率を測定するために、宇宙線が複数のセンサーを通過することを要求することから、外部トリガー測定を行った。

### 3.2.3 セットアップ

図 3.7 は宇宙線測定セットアップの模式図、図 3.8 は実際の測定セットアップの写真である。FEM、ROC はそれぞれ 1 つずつ使用し、ROC と HDI は FPC 製の 40 cm コンバージョンケーブルで接続されている。中央の暗箱の中に INTT 用シリコンセンサーラダーが 3 本平行に並べられており、ラダー間距離はそれぞれ

26.1 mm である。各センサーラダーには逆バイアス電圧 100V がかけられている。測定に使用したセンサーラダーを、最上段から L0、L1、L2 と呼ぶ。また、トリガーには暗箱の上下に配置されたシンチレーション検出器の coincidence 信号を用いている。シンチレーション検出器の光電子増倍管には  $-1000\text{ V}$  の電圧をかけた。シンチレーション検出器の配置は、暗箱上部には窓があるためセンサー上に配置することが容易だが、暗箱下部への配置の際は、暗箱内の構造や実際の測定データをもとに配置したため位置の精度はあまり良くない。テストベンチの構造上、本研究ではセンサーラダー全体は用いず、左側のハーフラダーを用いて測定を行った。

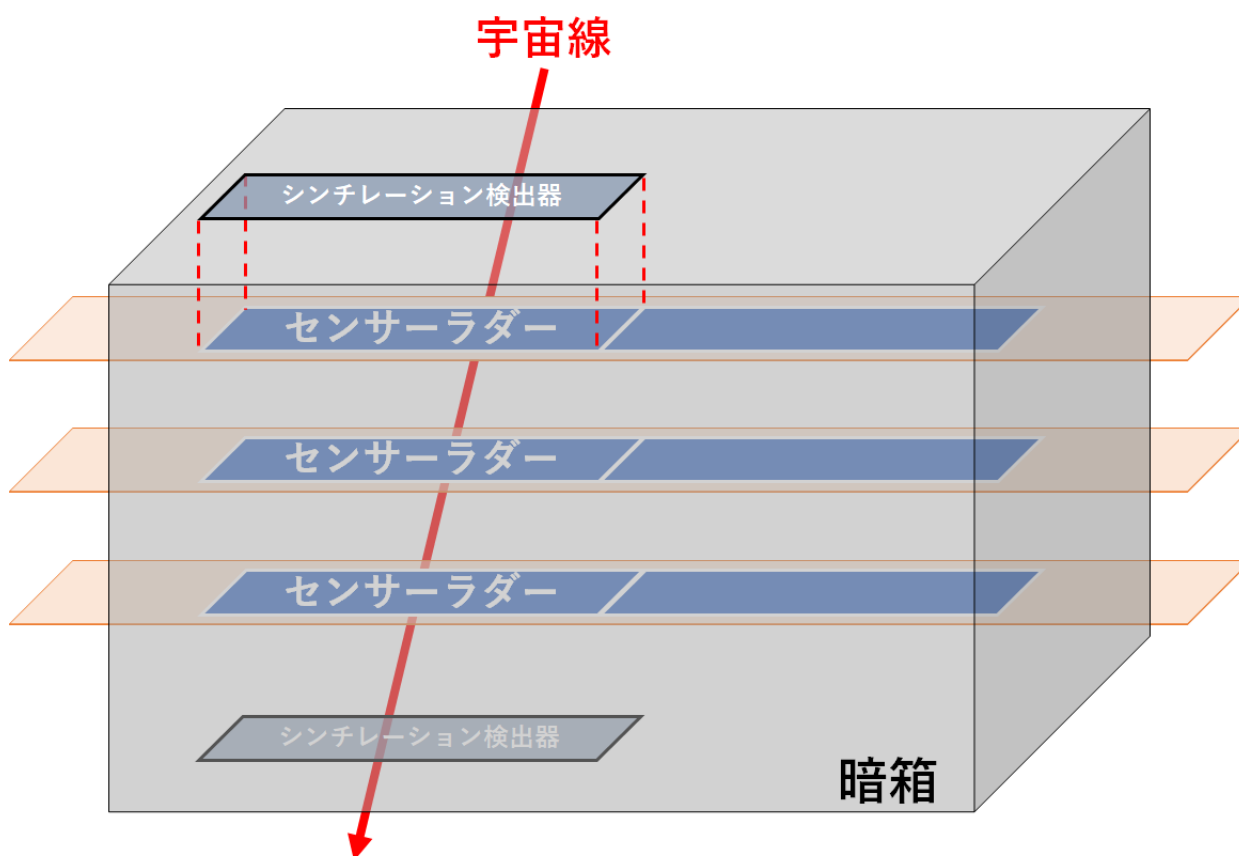


図 3.7 宇宙線測定セットアップの模式図。

### 3.2.4 データ読み出し回路

宇宙線測定におけるデータ読み出し回路を図 3.9 に示した。2 本のシンチレーション検出器を通過した宇宙線は、アナログ信号として NIM ビン中の Discriminator に送られる。Discriminator では予め設定された閾値を送られてきた信号が超えているか判別し、超えていた場合はデジタル信号に変換して出力する。2 本のシンチレーション検出器からの信号は Coincidence モジュールの And 回路に入り 1 つの信号になり、その後 Gate Generator で波形整形、Logic Level Adaptor で NIM 信号から TTL 信号に変換されて FEM にトリガー信号として入力される。シリコンセンサーを通過した宇宙線はアナログ信号として FPHX chip に送

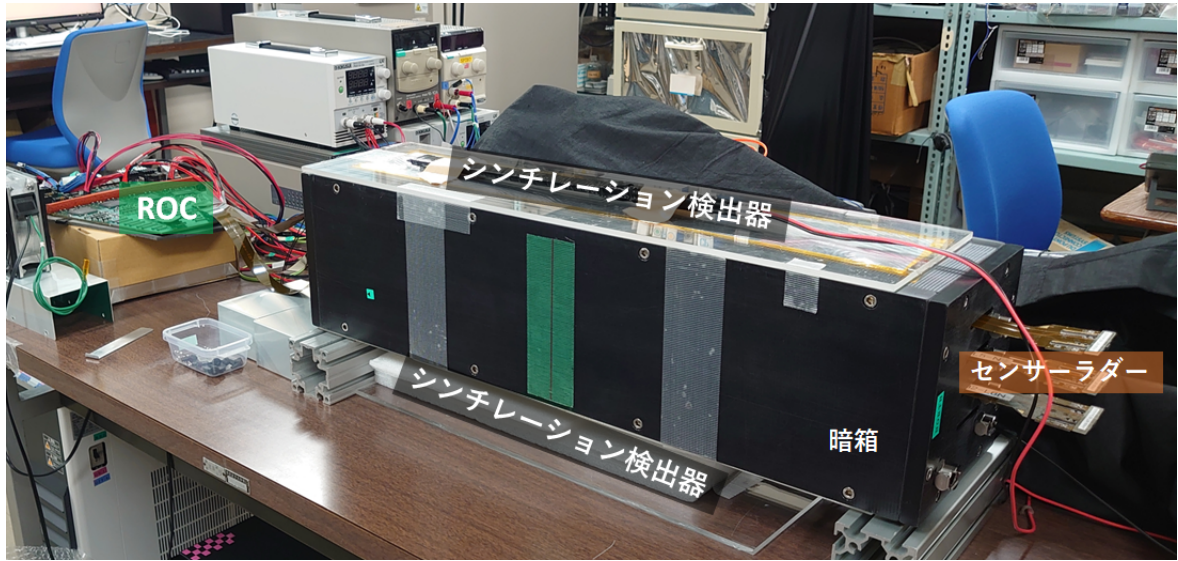


図 3.8 実験室における宇宙線測定セットアップ。

られ、そこで増幅、整形後デジタル信号に変換されてから ROC、FEM に送られる。トリガー信号とシリコンセンサーからの信号が同時に FEM に入力された際、PC にデータが記録される。実験で使用した NIM モジュールのセットアップ写真を図 3.10 に示した。

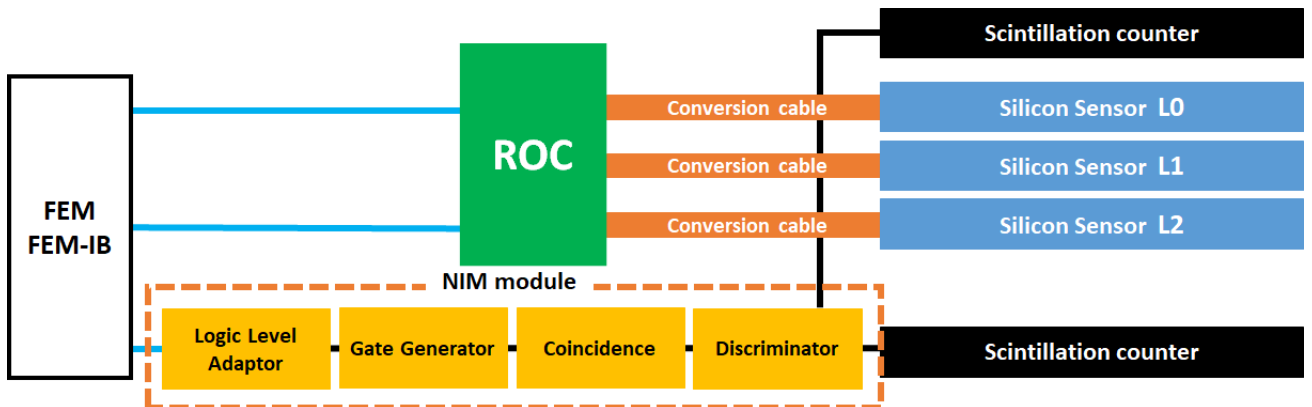


図 3.9 宇宙線測定の読み出し回路。

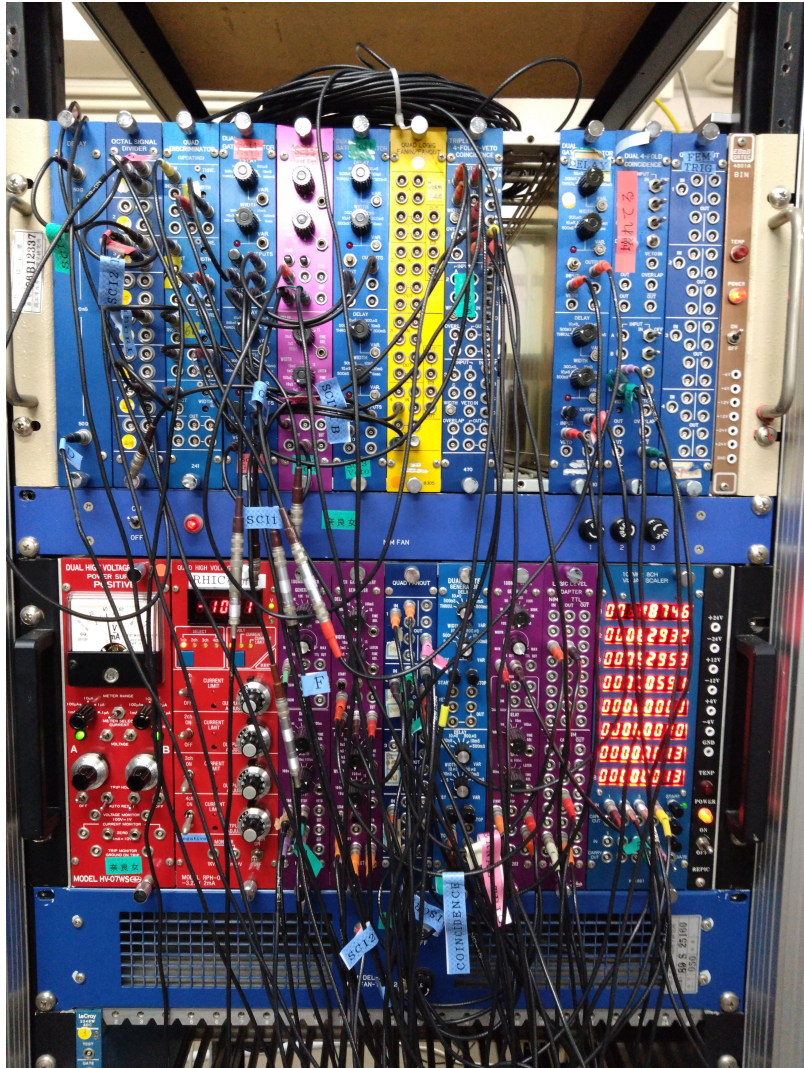


図 3.10 実験に使用した NIM モジュールセットアップ。

### 3.2.5 宇宙線測定時の DAC 閾値設定

荷電粒子が物質を通過する際に、物質中の原子から電子を叩き出してイオン化することがある。このときに荷電粒子はエネルギーを損失し、その量は Bethe-Bloch の公式から表される。また、宇宙線のような高エネルギー粒子が通過すると、エネルギー損失量は最小となる。このような粒子を最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle: MIP) と呼ぶ。図 3.11 より、0.4GeV の  $\mu$  粒子のエネルギー損失は約  $1.13[\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}]$  である。本研究で用いる INTT 用シリコンセンサーの厚みは  $320\mu\text{m}$  であるから、シリコンの密度  $2.33[\text{g}/\text{cm}^3]$  を用いて単位体積あたりのシリコン中で MIP が失うエネルギーは式 3.1 のように求められる。

$$E[\text{MeV}] = 1.13[\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}] \times 0.032[\text{cm}] \times 2.33[\text{g}/\text{cm}^3] = 0.0843[\text{MeV}] \quad (3.1)$$

よって、1 ストリップを通過するとき生成される電子正孔対の数は、1 電子正孔対を生成するために必要

なエネルギーが 3.55eV であることから、式 3.2 のように求められる。

$$N_e = \frac{E[\text{MeV}]}{3.55[\text{eV}]} = \frac{0.0843 \times 10^6[\text{eV}]}{3.55[\text{eV}]} = 23746[\text{個}] \quad (3.2)$$

電気素量  $1.6 \times 10^{-19}[\text{C}]$  を用いると、この電子正孔対の数は式 3.3 のようにして電荷に変換できる。

$$C[\text{fC}] = N_e \times 1.6 \times 10^{-19}[\text{C}] = 23746 \times 1.6 \times 10^{-19}[\text{C}] = 3.80[\text{fC}] \quad (3.3)$$

FPHX chip での増幅率 100[mV/fC] より、信号の出力波高を式 3.4 のように計算する。

$$\text{Pulseheight}[\text{mV}] = 100[\text{mV/fC}] \times C[\text{fC}] = 100[\text{mV/fC}] \times 3.80[\text{fC}] = 380[\text{mV}] \quad (3.4)$$

よって、宇宙線が厚さ  $320\mu\text{m}$  のシリコンストリップ 1 本を通過したときに出力される信号の波高は 380mV であると予想される。実際には宇宙線は複数のストリップにまたがって通過することがありうるので、ストリップ 1 本あたりの信号はこの値よりも小さくなることもある。この計算結果と 2.1.2 節で述べた DAC-電圧変換式を用いて、宇宙線測定時の DAC 閾値を表 3.2 のように設定した。[17][11][16]

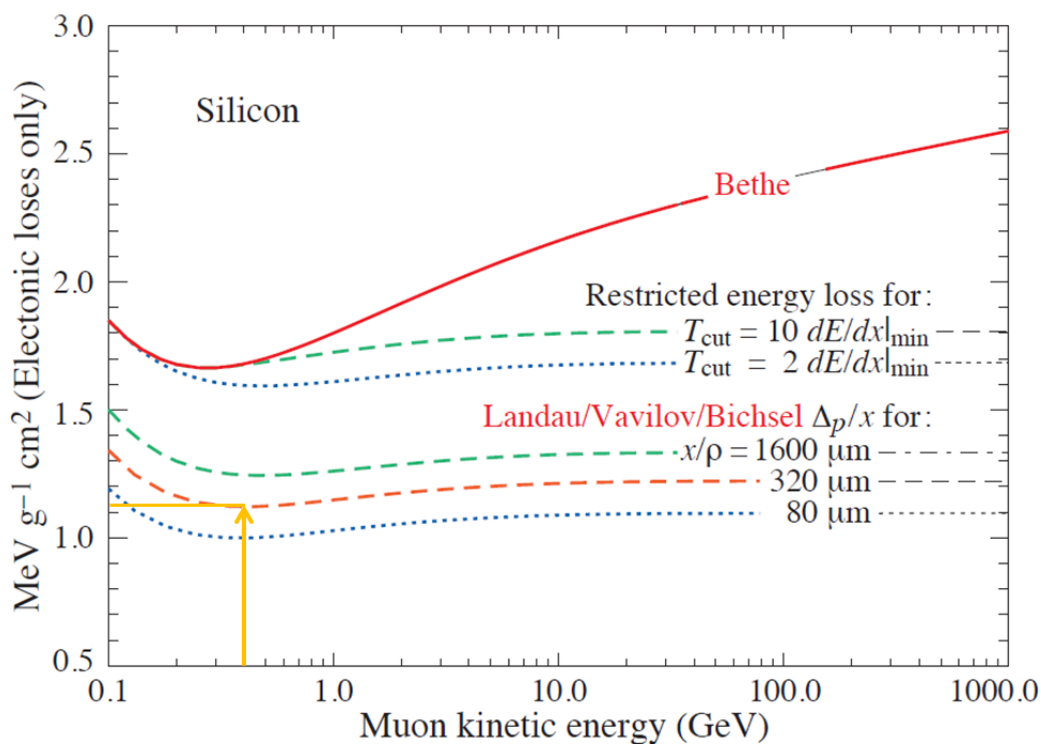


図 3.11 シリコン中で  $\mu$  粒子が失うエネルギー。[PDG (2021)]

表 3.2 宇宙線測定時の DAC 閾値設定。

ADC 値	DAC 設定値	電圧値 (mV)
0	15	270
1	30	330
2	60	450
3	90	570
4	120	690
5	150	810
6	180	930
7	210	1050

### 3.2.6 NIM、CAMAC を用いた宇宙線測定

トリガーモジュールであるシンチレーション検出器の ADC 値測定、および BCO と宇宙線のタイミング差測定のために、本研究では NIM、CAMAC を用いている。また、CAMAC TDC モジュールは測定範囲と時間分解能が変更可能であり、本研究では測定範囲 11bit、分解能 170psec に設定している。図 3.12 に NIM、CAMAC 回路図を示した。この回路は 2021 年ビームテスト時の回路と同様である。

図 3.13 は CAMAC ADC によるシンチレーション検出器の ADC 値測定結果を示しており、青線が上層、赤線が下層のシンチレーション検出器の結果である。立ち上がりの位置が異なるのは、使用した CAMAC ADC の channel ごとのペダスタルの違いによる。ペダスタルの違いを考慮すると、2つの ADC 値測定結果は同じ位置に MIP ピークを持っていることがわかる。同様に、図 3.14 は CAMAC TDC による BCO のタイミング測定結果を示している。TDC 値 400 及び 1000 付近のピークについては発生原因が不明であるが、450–1000 間ではほとんど一様な BCO が測定されていることがわかる。

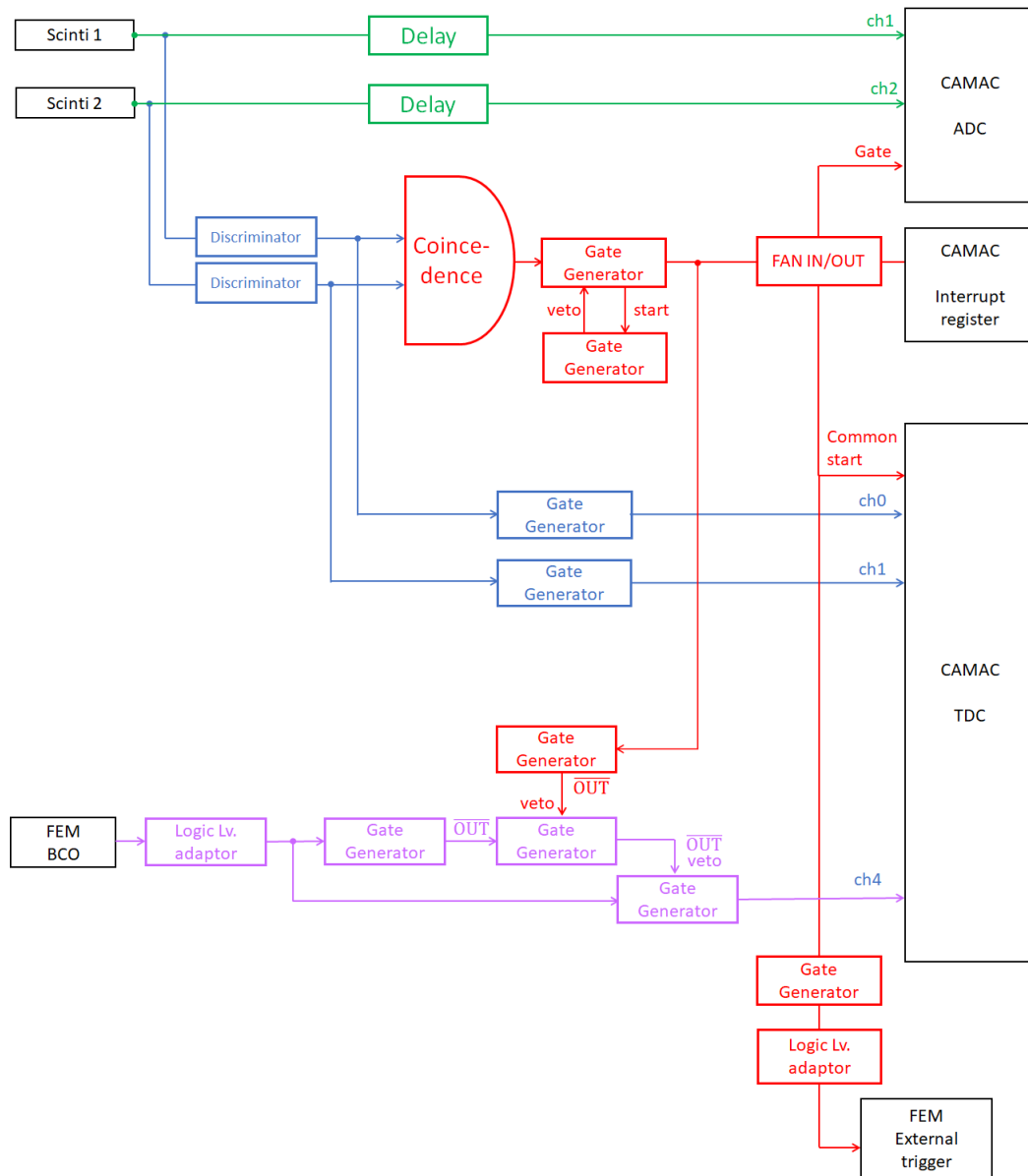


图 3.12 NIM、CAMAC 回路。

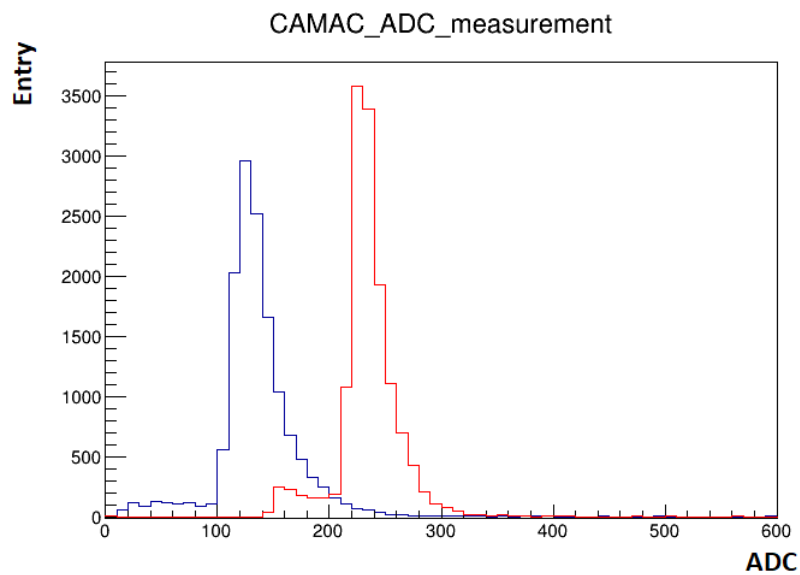


図 3.13 CAMAC ADC を用いたシンチレーション検出器の ADC 値測定結果。

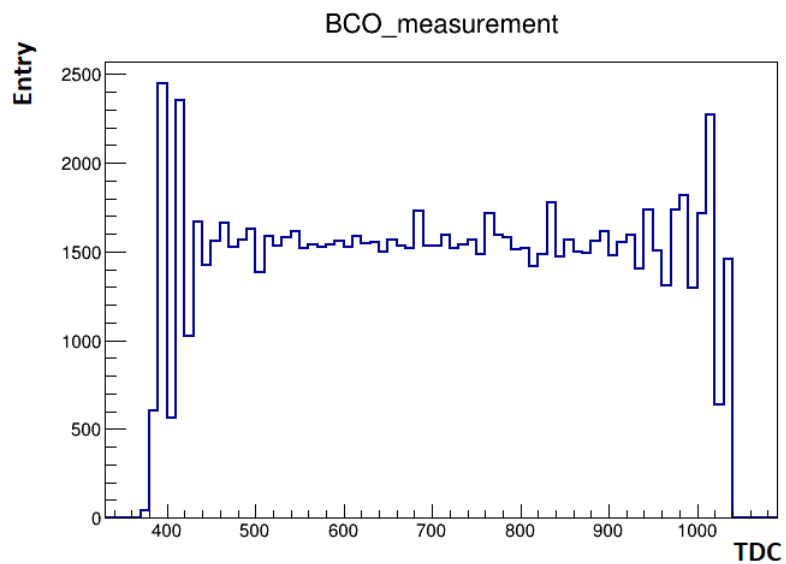


図 3.14 CAMAC TDC を用いた BCO のタイミング測定結果。



## 第 4 章

# 宇宙線測定データの解析と議論

宇宙線測定は総計約 36 日間行い、総ヒット数は約 43 万である。この測定データについて、以下の手順で解析を進め、検出効率、検出効率のタイミング依存性を確認した。

### 4.1 データの取り扱い

図 2.3 に示したように、ハーフラダーは読み出しセル  $2 \times 13$  個で構成されている。上下に並んだ読み出しセルではストリップ番号の進み方が異なるため、本研究では図 4.1 に示すように上下の読み出しセルを 1 つの読み出しセルとみなし、ハーフラダーを全 13 セル、各セルのストリップ番号は上から 0, 1, 2...255 と振り直した。

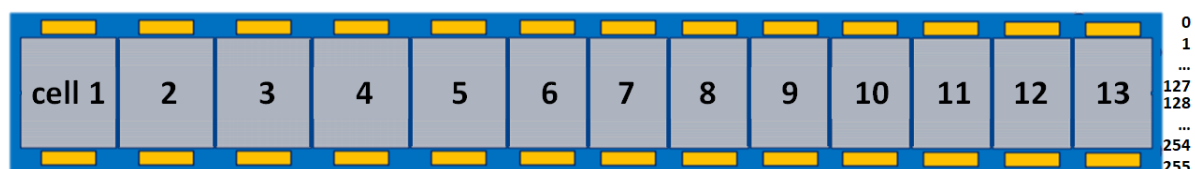


図 4.1 読み出しセル、ストリップ番号のフォーマット。

### 4.2 ノイズの除去

宇宙線データの中には、特定のストリップが周囲のストリップに比べてエンタリー数が桁違いに多いホットストリップ、ある宇宙線イベントのあとに全く同じイベントが複製される Double Saving Event(DSE)、予想位置から 2 セル以上離れた位置で記録されるクラスターという、3 種類のノイズが含まれている。これらについて以下で説明する。

#### 4.2.1 ホットストリップ

図 4.2 は 3 本のセンサーラダーを用いた宇宙線測定で得られた、ラダーごとのヒット分布図である。横軸がセル番号、縦軸が channel 番号であり、3 つの二次元ヒストグラムは上から上流のラダー L0、L1、L2 の結果

を示している。この図から、3本のラダー全てにおいてほとんど同じ位置に宇宙線が検出されていることがわかる。一方で黄色の丸で囲った部分のように、周囲に比べて明らかにヒット数の多いストリップが存在する。これは宇宙線ではなく回路由来のノイズであると判断し、解析対象のデータから除去した。

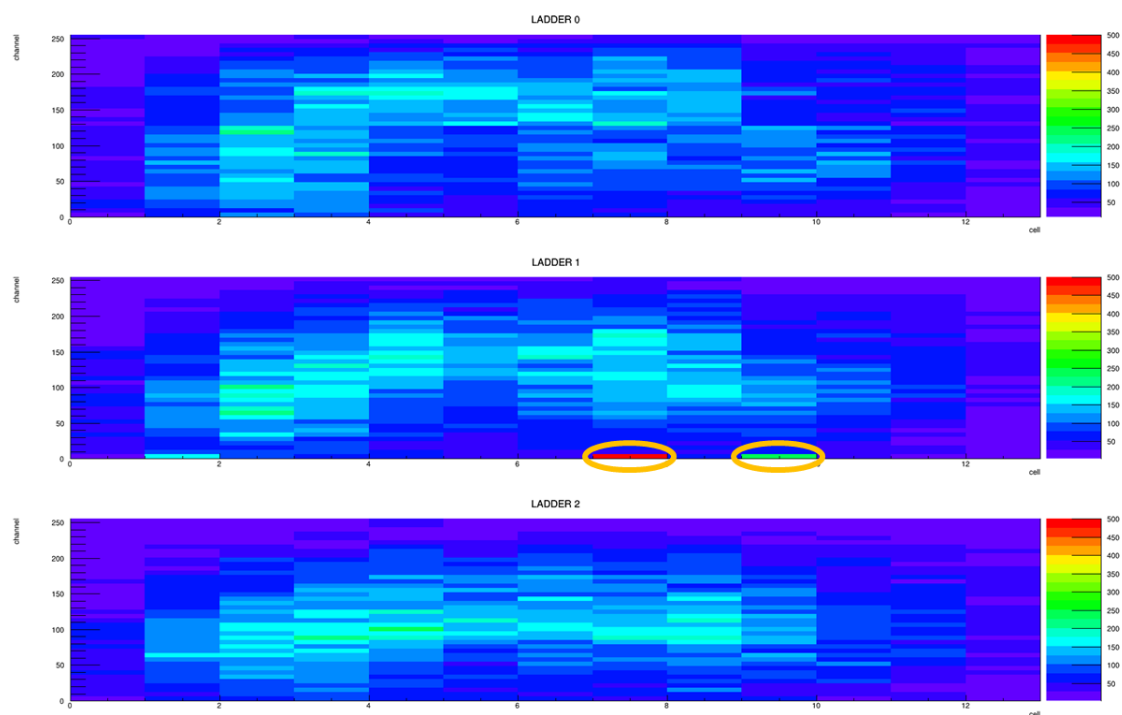


図 4.2 ホットストリップの例。

## 4.2.2 Double Saving Event(DSE)

図 4.3 は宇宙線測定結果の生データである。一番左は各ヒットに振られた番号 (Row) であり、次にそのヒットの ADC 値、ヒットが検出されたセル番号 (chip\_id)、channel 番号 (chan\_id)、ラダー番号 (module)、タイミング (bco)、そして各ヒットに振られるイベント番号が並んでいる。図中の番号 10 – 12 および 13 – 15 のヒットのように、あるヒットイベントの直後に、BCO だけが 1 異なりそれ以外の ADC 値、セル番号、channel 番号、ラダー番号がすべて同じヒットイベントが時折存在する。このような現象を Double Saving Event(DSE) と呼ぶ。DSE は 2021 年ビームテストにおいても確認された現象であり、発生原理は不明である。本研究では DSE が存在した場合、2 目以降のヒットイベントを解析対象のデータから除去した。

ホットストリップ、DSE 除去後のヒット分布を図 4.4 に示す。この図から、全ラダーの同じ位置で宇宙線が検出されており、セル番号 1 や 13、channel0 や 255 といったセンサーの端にあたる部分は宇宙線の検出数が少ないことがわかる。ヒットが集中している部分が弓形になっているのは、暗箱の下に置いたシンチレーション検出器が、シリコンセンサーからずれた位置にあるためだと考えられる。

Row	adc	chip_id	chan_id	module	bco	event
0	3	22	76	-1	0	0
1	3	20	65	5	0	1
2	4	19	63	6	0	2
3	3	22	76	4	102	3
4	3	20	65	5	102	4
5	4	19	63	6	102	5
6	2	8	120	4	91	6
7	2	22	97	5	91	7
8	1	22	68	6	91	8
9	2	22	69	6	91	9
10	4	9	83	4	19	10
11	3	11	104	6	19	11
12	2	10	100	5	19	12
13	4	9	83	4	20	13
14	3	11	104	6	20	14
15	2	10	100	5	20	15
16	1	4	74	4	109	16
17	1	4	73	4	109	17
18	5	4	115	5	109	18

図 4.3 Double Saving Event の例。

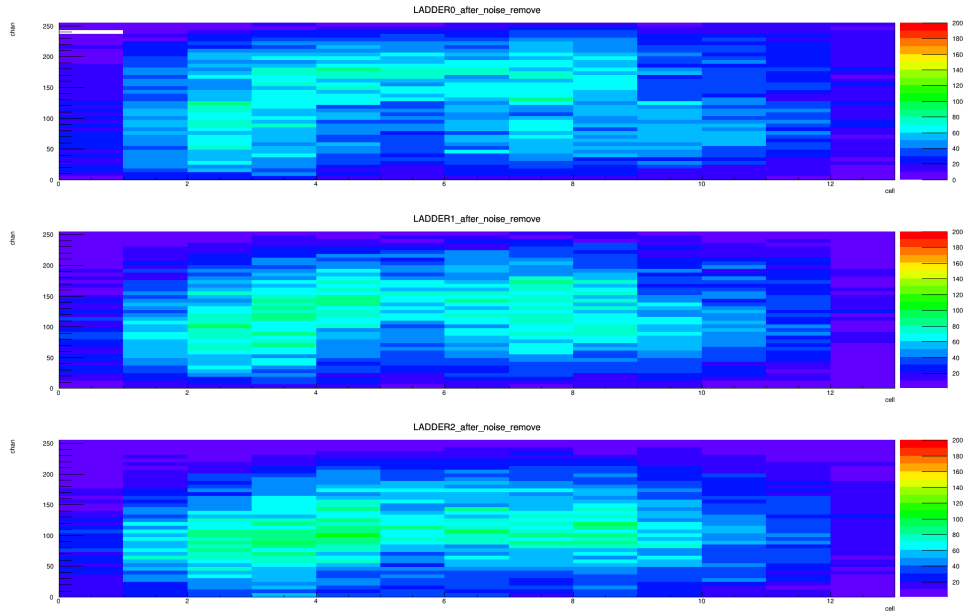


図 4.4 ホットストリップ、DSE 除去後のヒット分布図。

### 4.3 クラスタリング

宇宙線はあらゆる方向からほぼ一様に到来することから、複数のストリップにまたがって検出されることがある。図 4.5 に、各ラダーが同じセル番号にクラスターを 1 つだけ検出した際の、宇宙線の角度分布を示した。横軸は角度であり、 $0^\circ$  はセンサーに対し垂直に入射したことを示す。この分布図からわかるように、本研究では斜めに入射する宇宙線が多く測定されている。このような場合、信号は各ストリップごとに読み出されるため、1 本の宇宙線が複数個のヒットに分かれて記録されることとなる。これらのヒットを一つにまとめ

る処理をクラスタリングと呼び、以下で手順を述べる。

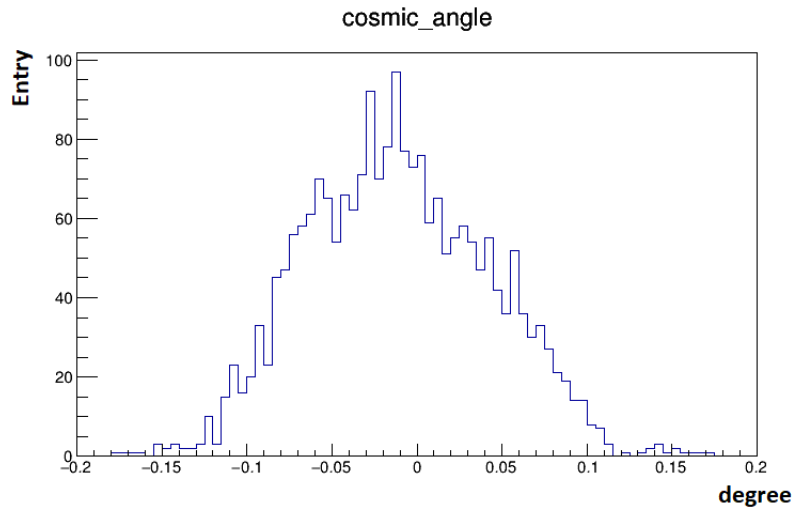


図 4.5 測定された宇宙線の角度分布図。

### 4.3.1 クラスタリングの手順

まず、同一イベント中のヒットの中で、同一ラダー、同一セル内かつ隣り合った channel を通過しているものを探す。そのようなヒット群が存在した場合、式 4.1 に示したように、ヒットの ADC 値を用いて重み付けした平均 channel 位置を計算する。この平均 channel 位置がクラスタの位置、また各ヒットの ADC 値の合計がクラスタの ADC 値となる。図 4.6 にクラスタリングの略図を示した。

$$\text{Cluster position} = \frac{\sum(\text{ADC} \times \text{Channel position})}{\sum \text{ADC}} \quad (4.1)$$

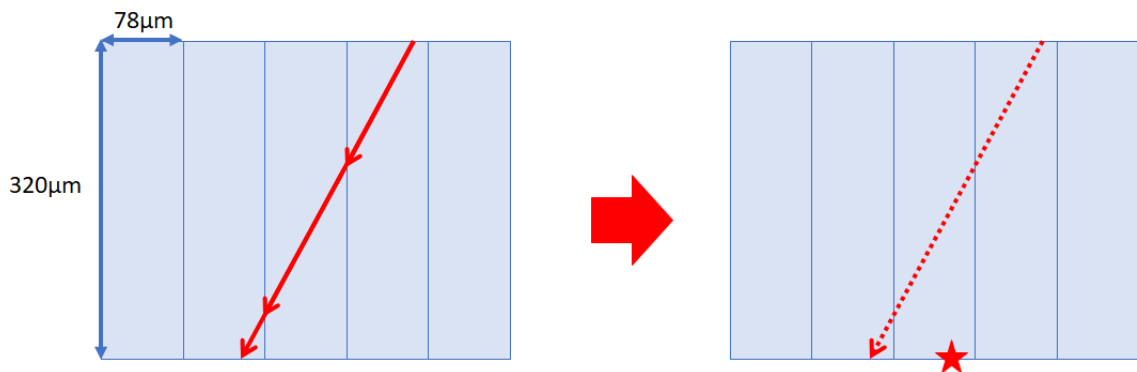


図 4.6 センサー断面で見るクラスタリング手順。

## 4.4 クラスタ位置

### 4.4.1 X方向の予想位置とクラスタ位置のずれ-Residual 分布

本研究では図 3.8 に示したように、3本のセンサーラダーを平行に配置し宇宙線を測定している。このため2本のラダーにおける宇宙線のクラスタ位置をもとに、残る1本におけるクラスタ位置を予想することが可能である。このとき、予想位置と現実のクラスタ位置の差を Residual と呼ぶ。4.7 は実際の宇宙線データであり、横軸は左からそれぞれ L0, L1, L2 に対応する。また、青点は各ラダーで検出されたクラスタの channel 位置を示している。L0 と L2 のクラスタを赤線のように結び、L1 で検出されたクラスタとの channel 位置の差を計算したものが、黄色矢印で示した Residual である。図 4.8 に、3層のラダーのうち L1 の Residual 分布を示した。ピークはストリップの差にして約 1.8 ストリップ分、実距離では約  $140\mu\text{m}$  のところに立っており、予想位置からのずれがほとんどないことがわかる。

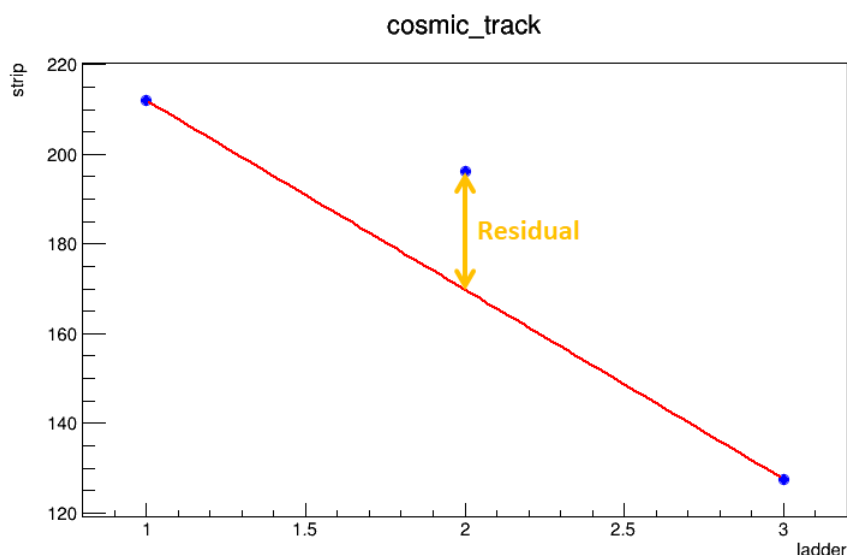


図 4.7 Residual の模式図。

### 4.4.2 Z方向の予想位置とクラスタ位置のずれ-セル差

図 4.1 に示したように、読み出しセルは横一列に並んでいる。もし2つの読み出しセルの境界付近を宇宙線が通過したとき、その信号は2つの読み出しセルにわたって記録される可能性がある。このことから、ある1本のラダーが検出したクラスタのセル番号と、他2本のラダーのセル番号が1ずれていることは有り得ると考えられる。このような、ある1本のラダーと他2本のラダーにおけるクラスタが存在するセル番号の差を、セル差と呼ぶ。L0 と L2 のクラスタが同じ番号のセルにあることを要求した上で、L1 とのセル差の分布を図 4.9 に示した。この図から、約 99.62% のクラスタはセル差  $\pm 1$  以内に収まっているが、それよりも大きいセル差を取っているクラスタがあることがわかる。セル差 2 以上のクラスタはノイズとみなして解析から除去した。

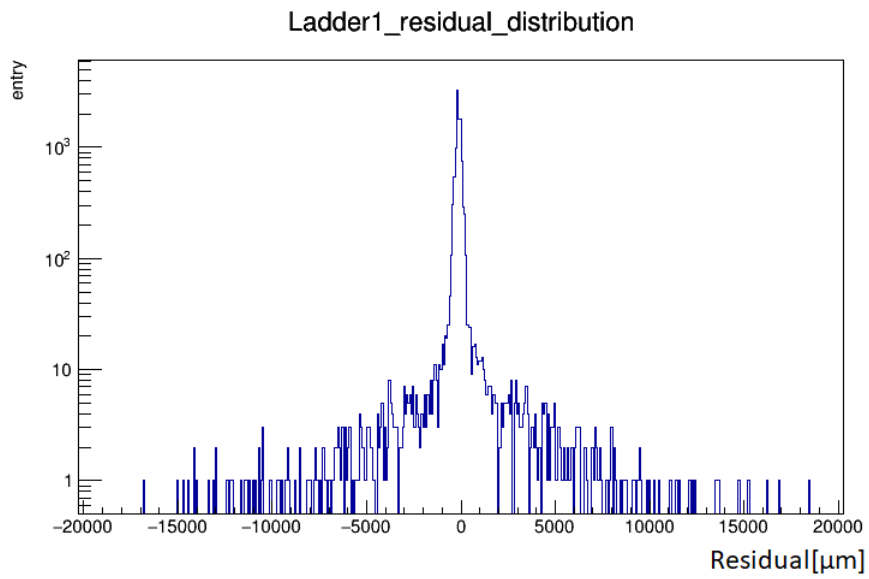


図 4.8 Residual 分布図。

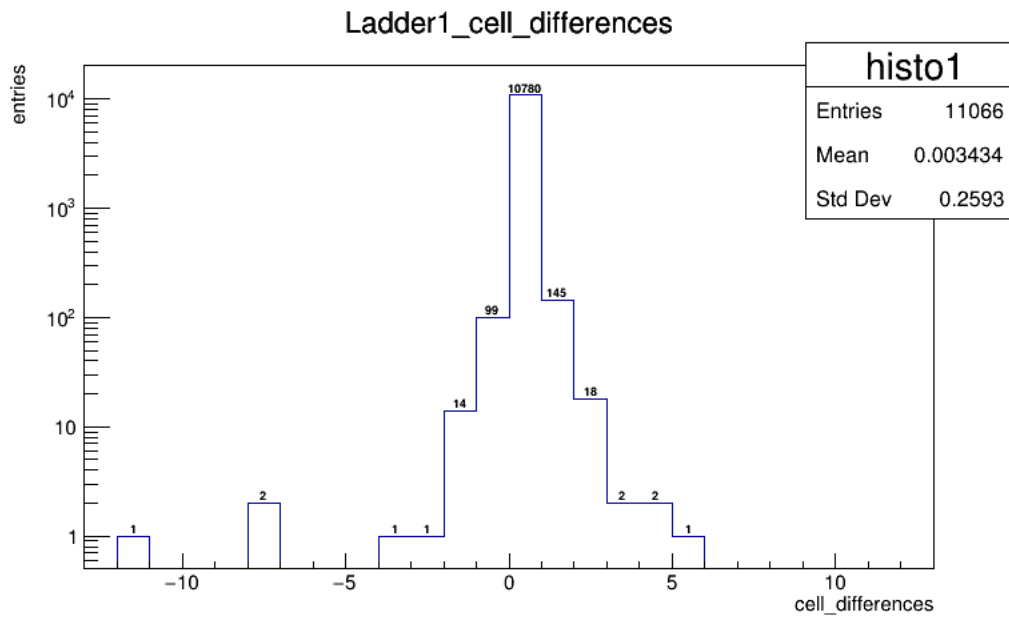


図 4.9 セル差分布図。

## 4.5 複数クラスターの取り扱い

宇宙線測定では、図 4.10 のように、同一タイミングに同一ラダーが複数個のクラスターを検出することがある。この現象について解析を行った。

図 4.11 は横軸に同一タイミングに検出されたクラスター数、縦軸にエントリー数をプロットしたヒストグラムである。このヒストグラムから、同一タイミングに検出されるクラスター数は 1 個である場合が最多だが、2 個以上検出される割合も約 4% 存在する。複数個のクラスターの中に宇宙線ヒットが含まれているか確認するために、以下の解析を行った。

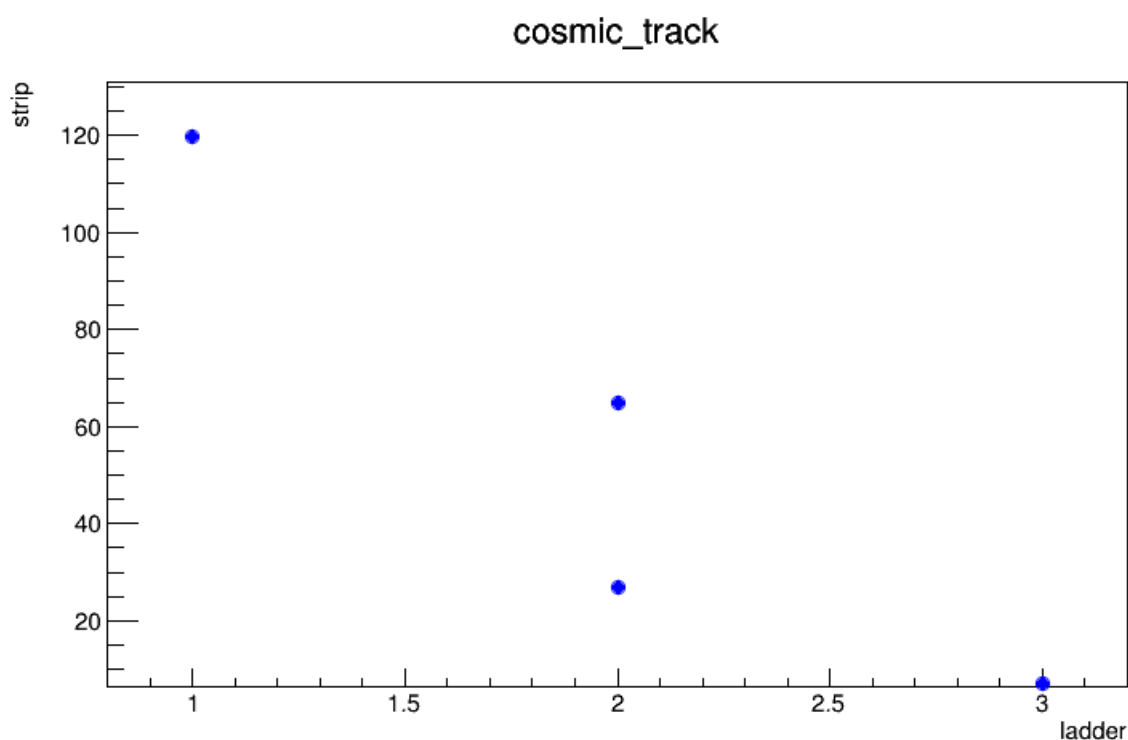


図 4.10 同一タイミングに検出された複数個のクラスター。

### 4.5.1 複数クラスターの解析

節で述べたように、宇宙線測定では 2 本のラダーで測定されたクラスターの位置から残る 1 本のラダー上でのクラスター位置を予想することが可能である。複数クラスターが検出されたイベントにおいては、予想位置に最も近いただ 1 つのクラスターと、それ以外のクラスターそれぞれで Residual 分布を作成した。また、単一クラスターの Residual 分布も作成し、これら 3 つの Residual 分布を重ね合わせたのが図 4.12 である。この図から、複数クラスターのうち緑線で示した予想位置に近いクラスターの分布図は単一クラスターの分布図と近い形になっており、ピークを同じ位置に持つことがわかる。

同様に複数クラスターを予想位置に近い、遠いで分け、ADC 分布を比較したものが図 4.13 である。また

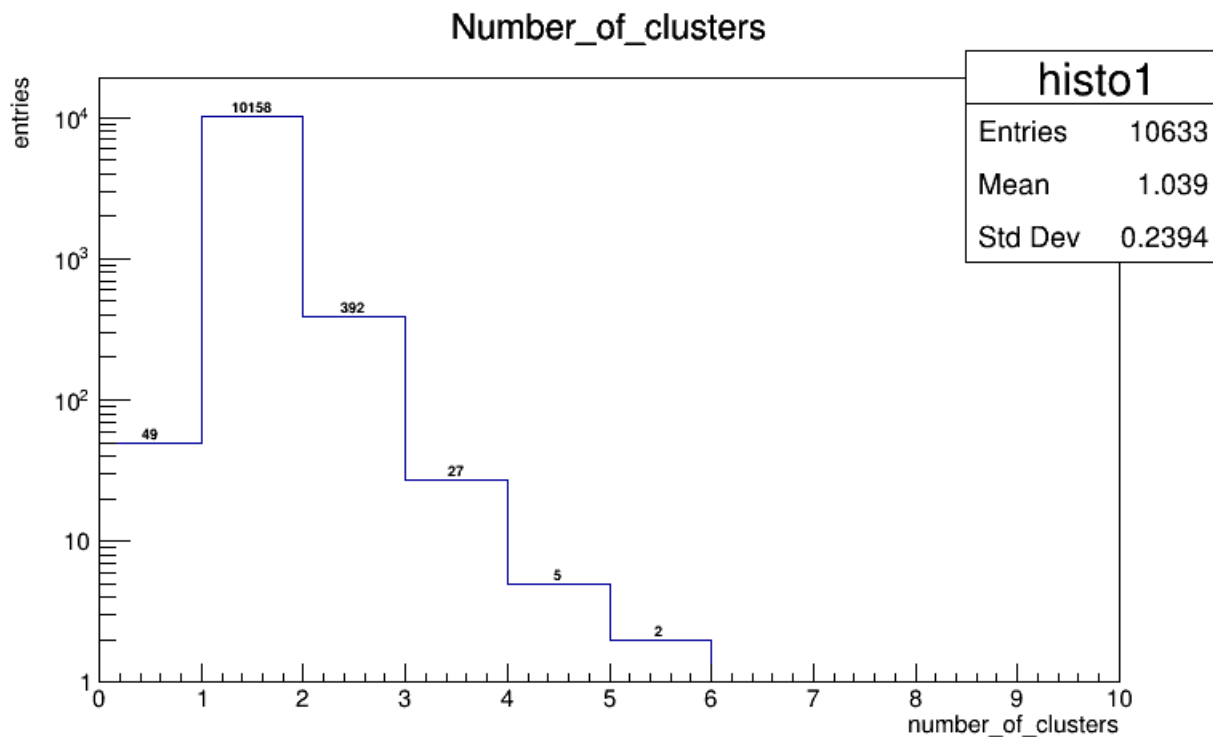


図 4.11 同一タイミングに検出されたクラスター数のヒストグラム。

単一クラスターの ADC 分布を図 4.14 に示した。これらの分布を比較すると、単一クラスターの分布図と複数クラスターのうち予想位置に近いクラスターの分布図はいずれも ADC 値 60 – 120 にピークを持っていることがわかる。このピークは、ビームテストから得られた ADC 分布 (図 4.15) と同じ位置にあることから、MIP ピークであると考えられる。このことから、予想位置に近いクラスターが宇宙線であり、それ以外のクラスターはノイズであると考えられる。



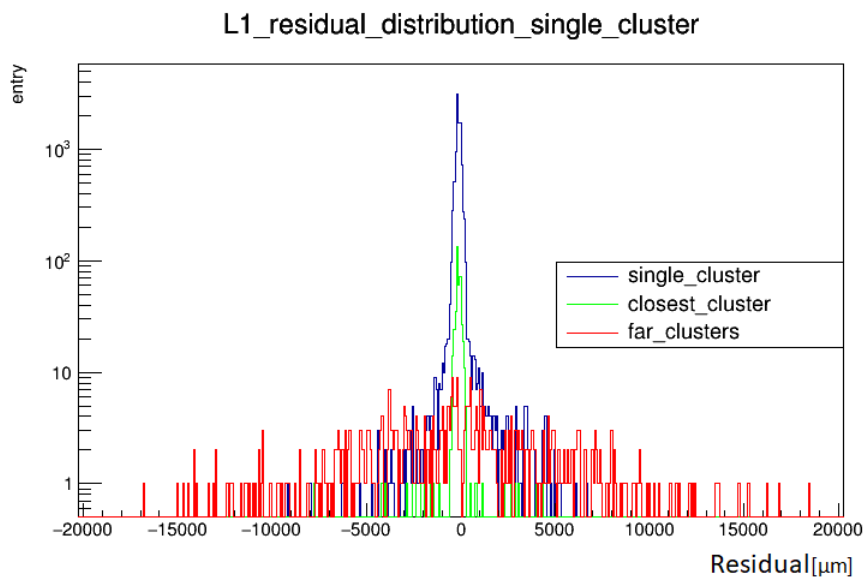


図 4.12 単一クラスターと複数クラスターの Residual 分布図 (青: 単一クラスター、緑: 複数クラスターのうち予想位置から近いクラスター、赤: 複数クラスターのうち予想位置から遠いクラスター)。

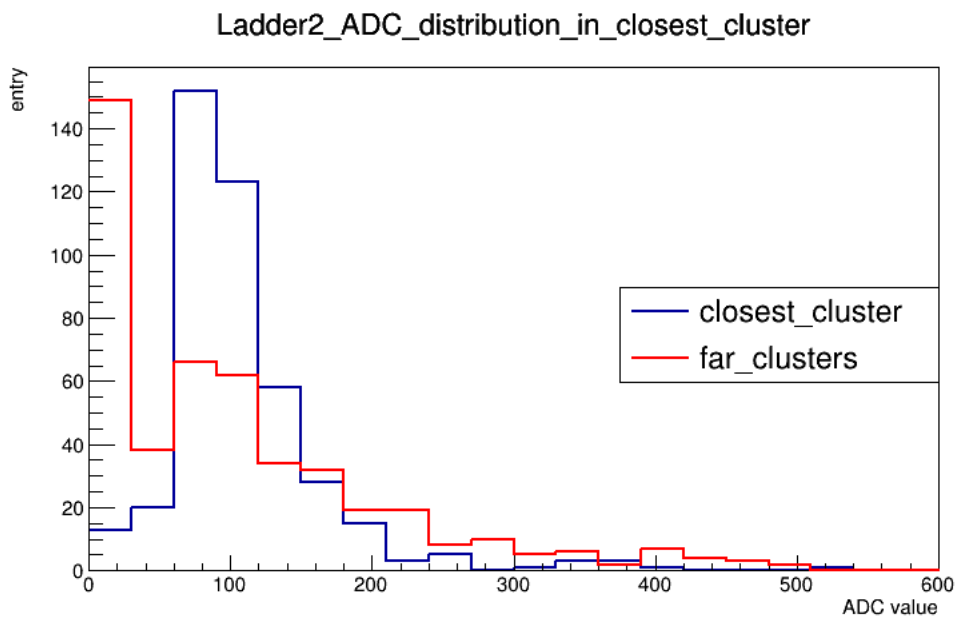


図 4.13 複数クラスターの ADC 分布比較。

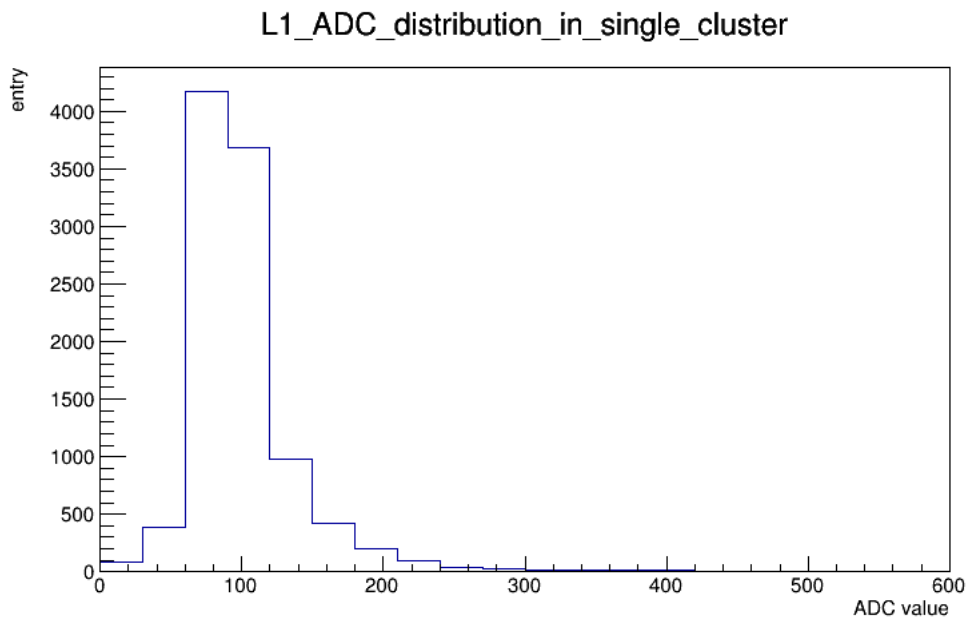


図 4.14 単一クラスターの ADC 分布図。

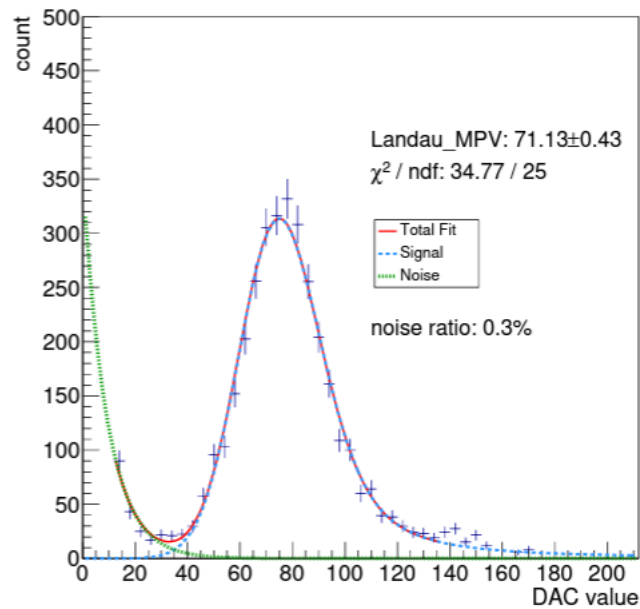


図 4.15 ビームテストから得られた ADC 分布。[出典: G.Nukazuka et al. 2023 ELPH annual report 2022 「PerformanceevaluationoftheIntermediateTrackerfor sPHENIX」]

## 4.6 検出効率

### 4.6.1 検出効率の定義

L1 の検出効率の定義を式 4.2 に示す。L0<sub>hit</sub>、L1<sub>hit</sub>、L2<sub>hit</sub> はそれぞれ各ラダーがクラスターを検出したことを示す。L1 の検出効率を求める場合、分母には L0、L2 がクラスターを検出した回数を、分子には 3 層のラダーすべてがクラスターを検出した回数を入れ、検出効率を計算する。

$$\text{Efficiency}_{L1} = \frac{N(L0_{\text{hit}} \cap L1_{\text{hit}} \cap L2_{\text{hit}})}{N(L0_{\text{hit}} \cap L1_{\text{hit}})} \quad (4.2)$$

$$\text{Efficiency Error}_{L1} = \frac{\sqrt{(N(L0_{\text{hit}} \cap L1_{\text{hit}} \cap L2_{\text{hit}}) \times (1 - \text{Efficiency}))}}{N(L0_{\text{hit}} \cap L1_{\text{hit}})} \quad (4.3)$$

### 4.6.2 検出効率の結果

L0、L2 が同じセルに 1 つのクラスターを検出し、L1 は 1 つ以上のクラスターを L0、L1 とセル差  $\leq \pm 1$  以内、また L0、L2 から予想されるクラスター位置が channel0 – 255 以内に持つと定めた場合、L1 の検出効率は  $99.51 \pm 0.06\%$  となった。同様の条件のもとで他のラダーについても検出効率を計算し、表 4.1 にまとめた。これらの結果から、L1 については東北大学にて行われたビームテストで得られた検出効率  $99.28 \pm 0.02\%$  を上回っていることが確認された。ビームテストに比べバックグラウンドの少ない宇宙線測定から得られたデータから計算を行ったため、ビームテスト時を上回る数値が得られたと考えられる。一方、宇宙線は 3 層のセンサーラダーを通過する際にセンサー内の原子とクーロン散乱を起こし、channel 番号 0 もしくは 255 よりも外側に粒子が飛び出してしまう、あるいはセル差 2 以上をとるセルまで粒子が飛ばされてそこで検出される可能性がある。このため、L2 と L1 を基準として検出効率計算を行った L0 と、L2 そのものの検出効率は L1 の結果を下回っていると考えられる。

表 4.1 各ラダーごとの検出効率。

L0 [%]	L1 [%]	L2 [%]
$98.98 \pm 0.07$	$99.51 \pm 0.06$	$96.20 \pm 0.12$

### 4.6.3 検出効率のセル方向、ストリップ方向依存性

INTT 用センサーラダーは 2.3 に示したように読み出しセル 26 個、各セルのストリップ 128 本で構成されている。読み出しセルの位置によって検出効率に差がないか、またストリップの位置によって差がないかを確認するために、L1 についてセンサーをセル番号ごと、channel 番号ごとにいくつかのグループに分けて検出効率の計算を行った。

ハーフラダーは図 2.3 に示したように、2 つの異なるセンサーから構成されているため、セル番号ごとの検出効率を求める際には Type-B のセンサーにあたるセル番号 1 – 5 と、Type-A のセンサーに当たるセル番号 6 – 9、10 – 13 に分けて計算を行った。その結果を表 4.2 と図 4.16 に示す。図 4.16 は横軸がセル番号、縦軸

が検出効率であり、X方向のエラーバーは検出効率計算に含まれているセルの番号の範囲を示している。これらの結果から、シリコンセンサーの Type やセルの位置にかかわらず、検出効率は 99% 以上であることがわかる。

また、channel 番号ごとの検出効率においては、全 256channel をエントリー数の少ない外側の channel は 0 – 47 と 192 – 255channel を 1 グループに、センサー中央部分は 16channel ずつに分けて検出効率の計算を行い、結果を表 4.3 と図 4.17 に示した。図 4.17 は横軸 channel 番号、縦軸検出効率であり、X 方向のエラーバーは検出効率計算に含まれている channel 番号の範囲を示している。この結果から、シリコンセンサーはストリップの位置にかかわらず検出効率 99% 以上であることがわかる。

表 4.2 セルごとの検出効率。

cell 1-5	$99.54 \pm 0.10\%$
cell 6-9	$99.30 \pm 0.15\%$
cell 10-13	$99.84 \pm 0.08\%$

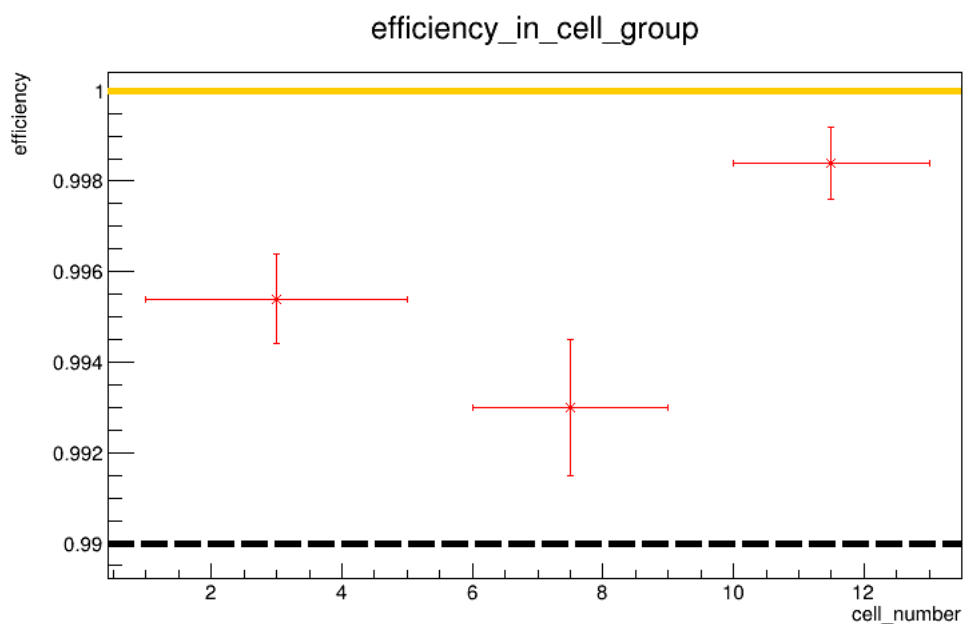


図 4.16 セルごとの検出効率ヒストグラム。

表 4.3 channel ごとの検出効率。

channel 番号	検出効率 [%]
0-47	99.21 ± 0.20
48-63	99.27 ± 0.26
64-79	99.52 ± 0.19
80-95	99.68 ± 0.16
96-111	99.69 ± 0.15
112-127	99.56 ± 0.18
128-143	99.72 ± 0.14
144-159	99.59 ± 0.18
160-175	99.71 ± 0.16
176-191	99.77 ± 0.16
192-255	99.22 ± 0.22

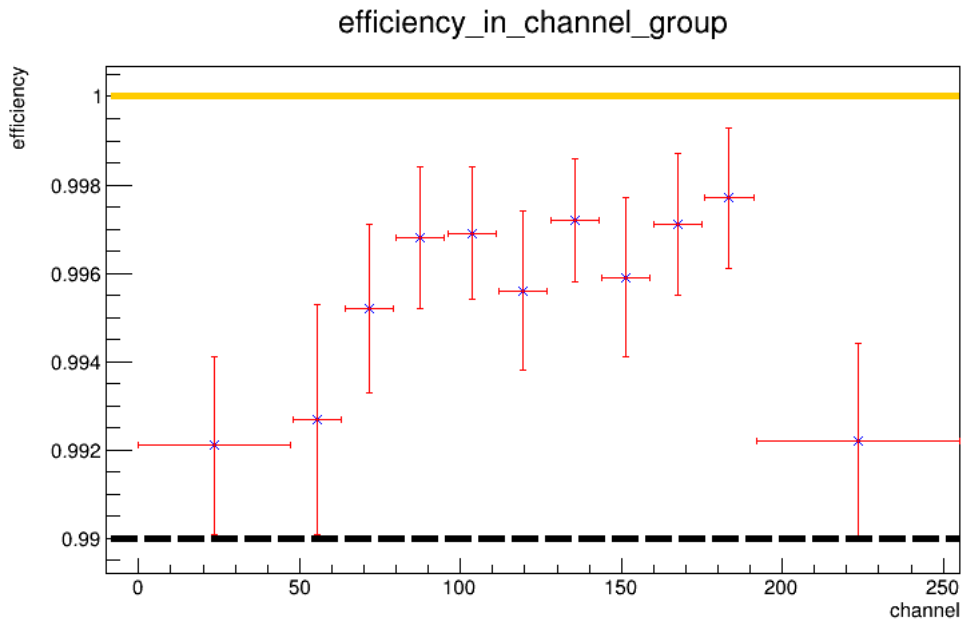


図 4.17 channel ごとの検出効率ヒストグラム。

#### 4.6.4 検出効率のタイミング依存性

宇宙線がシンチレーション検出器で検出したタイミングと BCO のタイミング差を CAMAC TDC で測定している。3.2.6 で述べたように、CAMAC TDC モジュールの分解能は 170 psec に設定されている。BCO の 1 周期 106 nsec を TDC の測定値に変換すると

$$106[\text{nsec}] \div 170[\text{psec}] = 106[\text{nsec}] \div 0.17[\text{nsec}] \sim 624 \quad (4.4)$$

となる。この計算結果と図 3.14 から、BCO1 周期は TDC 測定値 400 – 1024 に相当すると考えられる。BCO1 周期 106 nsec を 0 – 10[nsec]、11 – 20[nsec]... と 10 nsec ごとのグループに分け、それぞれのグループで検出効率を計算し、表 4.4 と図 4.18 にまとめた。この結果から、いずれのグループも検出効率 99% 以上を達成していることがわかる。また、BCO の立ち上がり、立ち下がりに当たる最初と最後のグループの検出効率は、中間に当たるグループの検出効率と誤差の範囲で一致している。

この結果から、10 nsec ごとのグループの中で最も低い検出効率は  $99.27 \pm 0.28\%$  である。4.6.2 節よりシリコンセンサーが常に検出効率 99.51% を持つとし、10 nsec のうち仮に 1 nsec 信号を検出できないタイミングがあったとすると、

$$\text{frac}99.51[\%] \times 9[\text{nsec}] + 0[\%] \times 1[\text{nsec}]10[\text{nsec}] = 89.56\% \quad (4.5)$$

となる。この数値は、10 nsec ごとのグループにおける検出効率の最低値 99.27% を下回っていることから、このような現象は起こっていないと考えられる。

表 4.4 BCO ごとの検出効率。

BCO[nsec]	検出効率 [%]
0-10	$99.52 \pm 0.24$
11-20	$99.81 \pm 0.14$
21-30	$99.49 \pm 0.23$
31-40	$99.29 \pm 0.27$
41-50	$99.90 \pm 0.10$
51-60	$99.44 \pm 0.25$
61-70	$99.59 \pm 0.21$
71-80	$99.68 \pm 0.18$
81-90	$99.40 \pm 0.24$
91-100	$99.27 \pm 0.28$
101-106	$99.50 \pm 0.29$

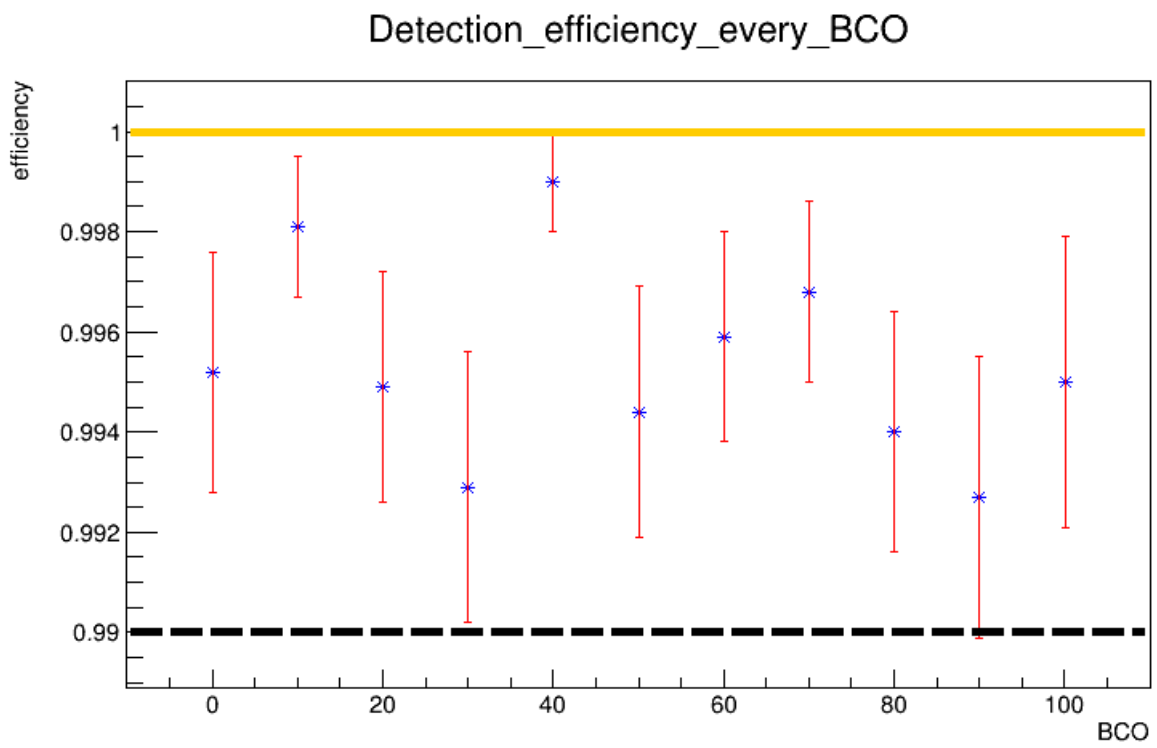


図 4.18 BCO ごとの検出効率。

## 第5章

### まとめ

本研究は、2021年に東北大学にて行われたビームテストの結果得られた検出効率の最終確認、及び検出効率のタイミング依存性の検証を目的として行ったものである。本学テストベンチを用いて約36日間宇宙線を測定し、そのデータを解析した結果、検出効率は $99.51 \pm 0.06\%$ の結果が得られた。これは、2021年ビームテストで得られた検出効率 $99.28 \pm 0.02\%$ を上回っている。この結果から、INTT用シリコンセンサーは99%以上の検出効率を持っていることが確認できた。また、2019年ビームテスト時に提唱された検出効率のタイミング依存性については、10 nsecごとの検出効率を計算しても確認されなかった。同様に宇宙線データを用いて、センサー上での位置における検出効率の依存性についても確認を行ったが、セル方向、ストリップ方向ともに検出効率に変化は見られなかった。このことから、INTTはタイミングやセンサー上の位置によらず、99%以上の検出効率を持っていることがわかった。

また、本研究を行うに当たり宇宙線測定用DAC設定を用意したことで、宇宙線のADC分布をINTTにおいて測定することができた。この分布は2021年ビームテストから得られたADC分布と同じ位置にピークを持つため、宇宙線のMIPが観測できたと考えられる。また2021年ビームテスト時に確認されたDSEについて、宇宙線測定においても一定の割合で存在することがわかった。DSEの発生原理は不明であるが、INTT実機で用いられる、FEM、FEM-IBに代わる新たなデータ処理モジュールFELIXでは発生しないことが確認されており、テストベンチで使用した読み出し回路に特有の問題であることが明らかになっている。

現在、sPHENIX実験の開始に向けてBNLでは検出器の建設が進んでいる。INTTはすでに建設が終わり、インストール直前である。実験開始直後からデータを取り、その解析を行うために研究者、学生の渡航が計画され、解析に用いるマクロを用意するなど、準備が進んでいる。



# 謝辞

本研究を進めるに当たり、多くの方のお世話になりました。特に指導教員の蜂谷先生には、3年の長きにわたりご指導いただきましたこと厚く感謝申し上げます。些細な進捗であっても常に報告を聞いてくださり、レスポンスを頂いたことが研究を続けるモチベーションとなりました。また私が研究に行き詰まっているときには常に声をかけてくださり、ともに解決策を模索してくださいました。このように修士論文を書き上げることができたのは蜂谷先生のお陰にほかなりません。本当にありがとうございました。

また、奈良女の重イオン研究グループを蜂谷先生とともに指導して下さった下村先生、理研の延興さん、秋葉さん、中川さん、糠塚さんには、奈良女での研究のみならず2022年夏に訪問したBNLにおいて研究、生活の両面で多大にお世話になりました。人生初の海外渡航でたくさんのかげがえのない経験を積むことができました。皆様に厚く感謝を申し上げるとともに、今後のsPHENIX実験における成功をお祈り申し上げます。また、BNLにおいてともに過ごし、11月のAsia Meetingでは暖かく歓迎して下さった台湾国立中央大学のCheng-Wei、Wei-Cheにも感謝申し上げます。お互いに出身地も言語も違いますが、同じ実験に携わったことで出会うことができたこと大変嬉しく思います。BNLで過ごした2ヶ月間は私の一生の宝物です。

そして、奈良女の学部から修士課程の計6年間をともに過ごした黒田さん、高濱さんに感謝申し上げます。研究生生活は大変なことが多くありましたが、研究室でいつも顔を合わせる同期のお陰で乗り越えることができました。また、学部4年間をともにし、その後総研大に進学された西森さんには、お互いの研究や私生活のやり取りを通じてたくさんの元気をいただきました。学会やポスター発表についてお互いに意見を交換することで良い発表を作り上げることができましたこと、御礼申し上げます。そして研究室ミーティングで進捗報告を聞いて下さった林井先生、宮林先生、住澤さんにも感謝申し上げます。

最後に、私を常に支えてくれた両親、兄、祖父に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] ブリタニカ・ジャパン 2015 『ブリタニカ国際大百科事典 小項目電子辞書版』
- [2] 秋葉康之 2014 『クォーク・グルーオン・プラズマの物理』, 共立出版
- [3] W.N.Cottingham, D.A.Greenwood 2005 『An Introduction to the Standard Model of Particle Physics』, Cambridge University Press (W.N. コッチェンガム, D.A. グリーンウッド 樺沢宇紀 (訳) (2005) 『素粒子標準模型入門』, シュプリンガー・ジャパン)
- [4] 竹内淳 2007 『高校数学でわかる半導体の原理』, 講談社
- [5] 三井真吾 2013 「p 型シリコンストリップセンサーとピクセルセンサーの設計及び放射線損傷評価」, 博士論文, 総合研究大学院大学
- [6] sPHENIX <https://wiki.bnl.gov/sPHENIX/index.php/SPHENIX> Retrieved January 10, 2023
- [7] A.Adare et al. 2015 arXiv:1501.06197 「An Upgrade Proposal from the PHENIX Collaboration」
- [8] Ming X. Liu 2018 「A Monolithic-Active-Pixel-Sensor-based Vertex Detector (MVTX) for the sPHENIX Experiment at RHIC」
- [9] H.Klest 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1498 012025 「Overview and design of the sPHENIX TPC」
- [10] H.Klest 2022 J. Phys.: Conf. Ser. 2374 012147 「A Compact TPC for the sPHENIX Experiment」
- [11] 鈴木彩香 2020 「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」, 修士論文, 奈良女子大学大学院
- [12] 森田美羽 2021 「RHIC-sPHENIX 実験のための INT 検出器のデータ読出し性能の評価」, 修士論文, 奈良女子大学大学院
- [13] J.R.Hoff et al. 2009 IEEE NSS/MIC 「FPHX: a New Silicon Strip Readout Chip for the PHENIX Experiment at RHIC」
- [14] T.Kondo et al. 2022 J-STAGE 「Development of Long and High-Density Flexible Printed Circuits」
- [15] 木舟正 2004 『宇宙高エネルギー粒子の物理学』, 培風館
- [16] 柴田実香 2019 「RHIC-sPHENIX 実験における中間飛跡検出器 INTT 用シリコンセンサーによる宇宙線測定」
- [17] PDG 2021 「34. Passage of Particles Through Matter」