

2020 年度卒業論文
sPHENIX 実験における中間飛跡検出器 INTT の
宇宙線を用いた検出効率の研究

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
西森早紀子

2021 年 3 月 1 日

現在、奈良女子大学高エネルギー物理学研究室では、アメリカのブルックヘブン国立研究所の RHIC 加速器で 2023 年から行われる予定の「sPHENIX 実験」で導入予定の中間飛跡検出器 (INTT) の開発を行っている。INTT のグループには奈良女子大学の他に理化学研究所、立教大学、BNL、台湾中央大学、Purdue University、その他世界中の研究機関が参加している。

本研究では、INTT に用いる読み出しチップへの供給電圧の見積もりと、同じく INTT に用いるシリコンセンサーの検出効率の測定を行った。これらは INTT の開発に重要な測定である。読み出しチップの供給電圧の見積もりは、直接供給電圧を図ることができなかつたため、手前の regulator での電圧値を測定し、そこからの電圧降下を電流値と抵抗から計算して求め、読み出しチップへの供給電圧を見積もることができた。また、シリコンセンサーの検出効率の測定では、宇宙線を用いて検出効率を測定した。シリコンセンサーを挟むように外部トリガーを設置し測定を行った結果、先行研究より高い検出効率を求めることができた。

目次

第 1 章	序論	7
1.1	素粒子物理学の概要	7
1.2	半導体	9
第 2 章	sPHENIX 実験における INTT シリコン検出器	12
2.1	Relativistic Heavy Ion Collider(RHIC)	12
2.2	sPHENIX 実験	12
2.3	INTermediate Tracking detector (INTT)	13
2.4	DAC 閾値	17
2.5	研究目的	17
第 3 章	テストベンチでの INTT モジュールの動作確認	18
3.1	キャリブレーションテスト	18
3.2	キャリブレーションテスト方法	18
3.3	キャリブレーションテスト結果	19
第 4 章	FPHX chip への供給電圧の見積もり	21
4.1	概要と目的	21
4.2	方法	21
4.3	キャリブレーションテストによる動作確認	22
4.4	結果	24
4.5	まとめと今後の方針	28
第 5 章	宇宙線を用いた検出効率測定	29
5.1	目的	29
5.2	外部トリガーを用いた宇宙線測定	29
5.3	測定方法	31
5.4	検出効率の導出方法	33
5.5	外部トリガー 2 つを用いた結果	34
5.6	外部トリガー 3 つを用いた測定	40

5.7	まとめ	42
5.8	今後の課題	43
第 6 章	謝辞	45
参考文献		46

表目次

3.1	キャリブレーションモードにおける DAC 閾値設定。	19
4.1	台湾で測定した ROC と INTT の間の抵抗値。	22
4.2	regulator の出力電圧の測定結果。	24
4.3	FPHX chip への供給電圧の計算結果。	25
5.1	宇宙線測定における DAC 閾値設定。	31

目次

1.1	素粒子の標準模型。	8
1.2	宇宙進化の中での QGP の位置。	9
1.3	ミュー粒子のエネルギースペクトル。	10
1.4	pn 接合した半導体に順方向に電圧をかけた場合。	11
1.5	pn 接合した半導体に逆方向に電圧をかけた場合。	11
1.6	pn 接合した半導体による荷電粒子の検出過程。	11
2.1	RHIC 加速器の全体像。	13
2.2	sPHENIX 検出器の全体像。	14
2.3	TPC 検出器及び INTT 検出器。	15
2.4	INTT 検出器の外観。	15
2.5	シリコンセンサー Type-A と Type-B のシリコンセルサイズとその数。	16
3.1	キャリブレーションモードにおける読み出し回路	18
3.2	chip1 のでのキャリブレーションテスト結果の相関分布。	20
3.3	1 モジュール全体における全チャンネルでのテストパルスのヒット分布。	20
3.4	1 モジュール全体におけるテストパルスの入力波高と出力 ADC に分布。	20
4.1	regulator への供給電圧の見積もり方法。	22
4.2	regulator の位置。(C1877 : regulator)	23
4.3	FPHX chip に繋がる ROC の配線。	23
4.4	FPHX chip への供給電圧の計算結果と Regulator への供給電圧 (電源電圧) の関係。	26
4.5	FPHX chip への供給電圧を変化させた際のキャリブレーションテストの結果。	27
5.1	シリコン中で失うエネルギー。 [PDG (2020)]	30
5.2	宇宙線測定におけるの ADC 分布。	31
5.3	トリガーシンチレーター 2 つと INTT のセットアップ。	32
5.4	宇宙線測定の読み出し回路のロジックダイアグラム。	33
5.5	TDC の common start 信号及び ch0 2 の信号のタイミング調整。	34

5.6	各トリガーの ADC 分布。	35
5.7	各トリガーの TDC 分布。	35
5.8	ピークが 1 つの分布のカット。	36
5.9	上の外部トリガーの TDC 分布と下の外部トリガーの TDC 分布の相関分布。	36
5.10	下の外部トリガーにおける TDC と ADC の相関分布。	37
5.11	下の外部トリガーの ADC 分布以外のカットを適用した検出効率の分布。	39
5.12	下の外部トリガーの ADC から求めた検出効率。	39
5.13	宇宙線の通り方と ADC 分布の関係。	40
5.14	下の外部トリガーにカットをかけた際の宇宙線の限定。	41
5.15	全てのカットを適用した検出効率	42
5.16	シンチレータを 3 つ設置した際のセットアップ。	42
5.17	外部トリガー 3 つの場合の各トリガーの ADC 分布。	43
5.18	外部トリガー 3 つの場合の各トリガーの TDC 分布。	43
5.19	外部トリガー 3 つの場合に lower の ADC 分布から求めた検出効率。	44
5.20	外部トリガー 3 つの場合に全てのカットを適用した検出効率。	44

第 1 章

序論

1.1 素粒子物理学の概要

1.1.1 標準模型とクォークグルーオンプラズマ (QGP)

素粒子とは物質を構成する最小単位であり、全ての物質は素粒子からできていると考えられている。素粒子はスピンによって 2 つのグループに分けることができ、半整数スピンのフェルミ粒子、整数スピンのボース粒子がある。フェルミ粒子はさらにレプトンとクォークに分類することができる。レプトンには電子、 μ 粒子、 τ 粒子があり、これらには対になるニュートリノが存在しており、順に電子ニュートリノ、 μ ニュートリノ、 τ ニュートリノと呼ばれる。これら 6 種類がレプトンである。クォークは質量の軽いものから、u(up)、d(down)、s(strange)、c(charm)、b(bottom)、t(top) の 6 種類ある。これらのクォークを繋ぎ止める働きをするグルーオンというボース粒子がある。クォークをハドロン内部で束縛する働きをする。素粒子標準模型に登場する粒子の表を図 1.1 に示す。

クォークグルーオンプラズマ (QGP) とは、クォークとグルーオンからなるプラズマ状態のことである。プラズマ状態は固体、液体、期待に次ぐ第 4 の相状態であり、物質がイオン化エネルギーに相当する高温状態に達した時に実現する。同様に核子に閉じ込められているクォーク間のグルーオンによる結合が長くなることで隣の核子内のクォークとも結合できるようになり、元の核子中内のクォークと隣の核子内のクォークの区別がつかなくなる。グルーオンが長くなる（高温）もしくは核子中のクォーク間距離が短くなる（高圧）の状態をクォークグルーオンプラズマ (QGP) と言う。

クォークとグルーオンは陽子や中性子を構成する素粒子であるが、粒子間距離が離れるほど強い相互作用が強くなりこれらの素粒子はハドロン内に閉じ込められてしまうため、単体で観測することはできない。しかし高密度状態のような反応では、相互作用が弱くなるためハドロン内の閉じ込めから解放され、クォークやグルーオンが単体で存在する状態になると予想される。このようなクォークやグルーオンが比較的自由に動き回る相空間がクォークグルーオンプラズマ (QGP) である [秋葉 (2014)]。

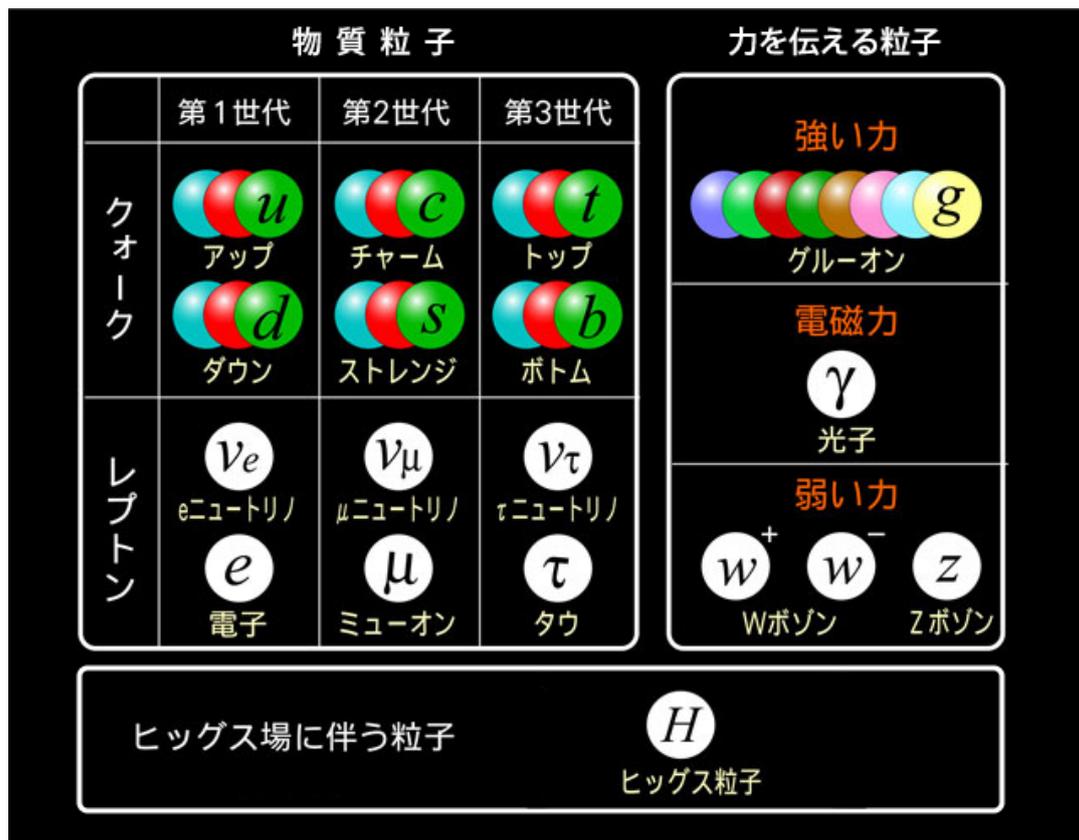


図 1.1 素粒子の標準模型。

QGP は宇宙の始まりとされるビッグバンの 10^{-5} 秒後に存在したと考えられている (図 1.2)。つまり、QGP を検証することは宇宙初期の状態の理解に繋がる。現在 QGP は大型加速器を利用した原子核衝突実験で人工的に生成できることが確認されており、今後はより精度よく様々な条件で統計的に、これまでできなかったジェットやアップシロンなどを用いて、QGP の物性の詳細を調べていく方針である。

1.1.2 宇宙線

宇宙線とは宇宙空間を高エネルギーで飛び回る放射線のことである、宇宙空間では 1 次宇宙線と呼ばれ、ほとんどが陽子である。これらが地球に大量に降り注ぎ大気圏を通過すると、大気中の原子核と衝突し、 π 中間子などの大量の 2 次粒子を生成する。さらにこれらの生成された粒子は高速で周りの原子核に衝突し数を増やしていく。一番多く生成される π 中間子は寿命が短くすぐ μ 粒子に崩壊し、地表に降り注ぐ宇宙線はほとんど μ 粒子である。 μ 粒子は 1 分間に 1cm^2 あたり約 1 個観測することができる。この地表付近で観測される宇宙線を 2 次宇宙線と言う。また宇宙線の代表である μ 粒子のエネルギースペクトル分布を表したグラフ (図 1.3) より、典型的なエネルギーは約 1GeV である。

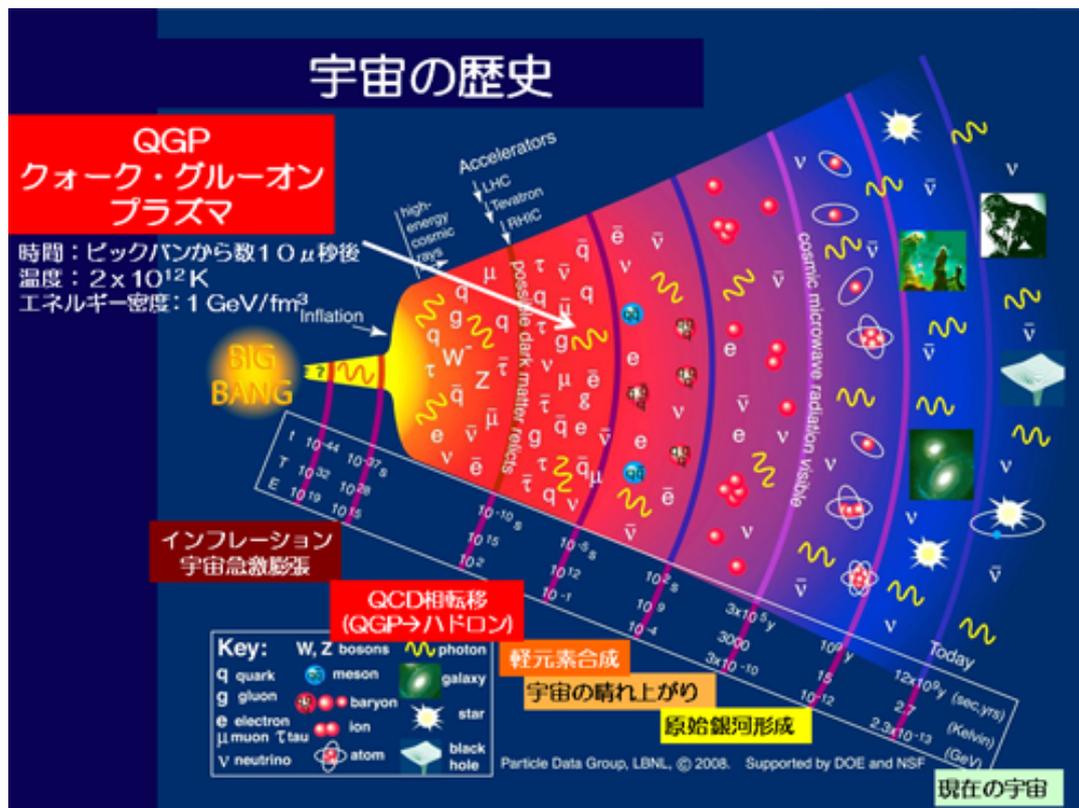


図 1.2 宇宙進化の中での QGP の位置。

μ 粒子を地表付近での実験に利用することは、大型加速器を使わずに MIP（最小電離粒子）のような損失エネルギーを得ることにおいて有効である。

1.2 半導体

半導体とは、電気伝導性の高い金属と電気をほとんど通さない絶縁体の中間の性質を持つ物質のことである。代表的な半導体としてシリコン（ケイ素）がある。半導体は温度を変化させたり、不純物を含ませることで抵抗率を操作することができ、この性質を利用して様々な電化製品の制御を行うことができる。

1.2.1 半導体の種類と性質

半導体には n 型半導体と p 型半導体がある。n 型半導体は Si 原子の一部を P などに置き換えることで作られる。Si よりリン (P) の方が電子の数が 1 つ多いため、P の持つ電子の 1 つは形式上余っている状態になる。この状態の物質に電圧をかけると、+ 側に電子が引き寄せられ、自由に動ける状態になる。これにより電流が流れる。また、n 型半導体は Si 原子の一部を ホウ素 (B) などの原子に置き換えることで作られる。B の最外殻電子は Si の最外殻電子より 1 つ少な

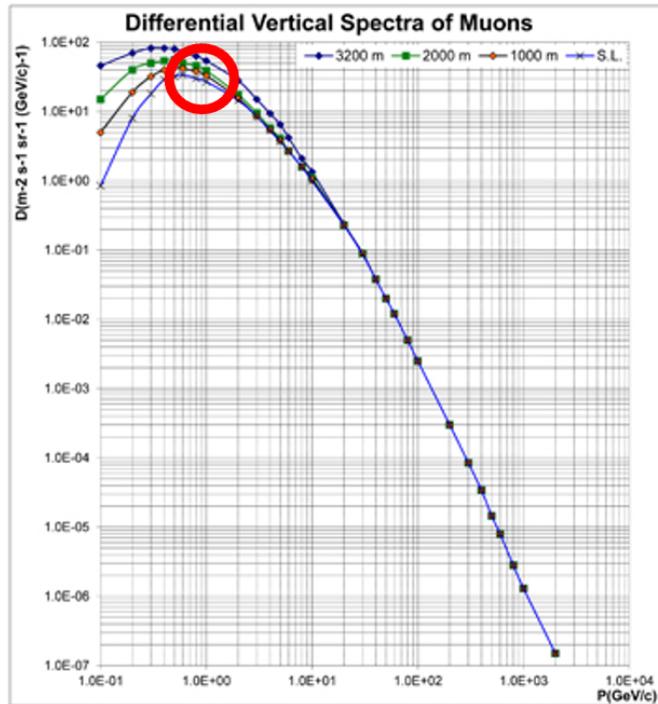


図 1.3 ミュー粒子のエネルギースペクトル。[1]
赤丸の部分がピーク値であり、約 1 GeV である。

いため、電子が入っていない場所ができる。この場所をホールという。これに電圧をかけると価電子 (最外殻の束縛電子) は + 側に引き寄せられ、移動した価電子がホールに落ち込むことで、ホールが移動しているように見える。この粒子の「移動」によって電流が流れていると考えることができる。

1.2.2 半導体による荷電粒子の検出

ここまでで述べた 2 種類の半導体を接合する (pn 接合)。この半導体に順方向に電圧を加えた場合の状態を図 1.4 に示す。この場合は、p 型と n 型の接合面 (ジャンクション) でホールと電子が出会い消滅する。その分新たに p 型側に電子が流入し、n 型側から電子が放出される。これを繰り返すことで電流が流れ続ける。一方で、この半導体に逆方向に電圧を加えた場合の状態を図 1.5 に示す。この場合は、ホールと電子が逆方向に進むので対消滅することができず、電流が流れない。pn 接合の接合面付近にはホールも電子もない空乏層という領域ができているが、図 1.5 の向きに電圧を加えた場合はこの空乏層が広がる。ここに荷電粒子が通過すると、電離作用により電子正孔対が生成する (図 1.6)。電離エネルギーは 3.6 eV である。発生したホールは陰極側へ、電子は陽極側へ移動し、荷電粒子が落としたエネルギーに比例した大きさの電気信号が現れる。この原理を利用した検出器がシリコン検出器である。

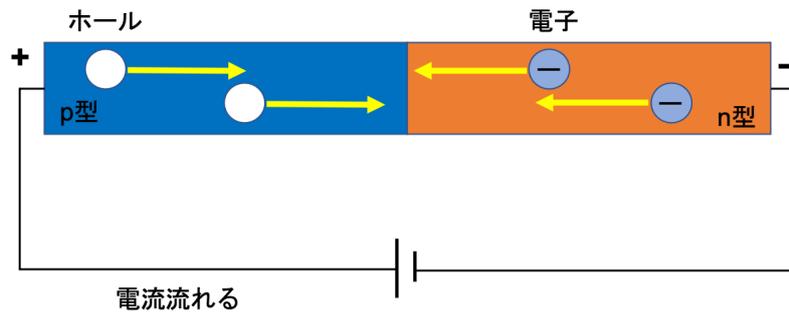


図 1.4 pn 接合した半導体に順方向に電圧をかけた場合。

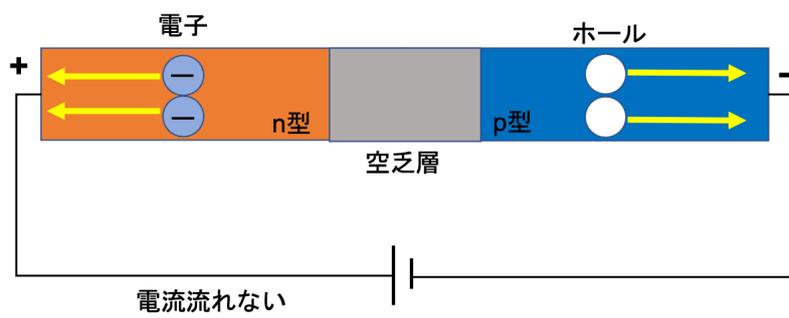


図 1.5 pn 接合した半導体に逆方向に電圧をかけた場合。

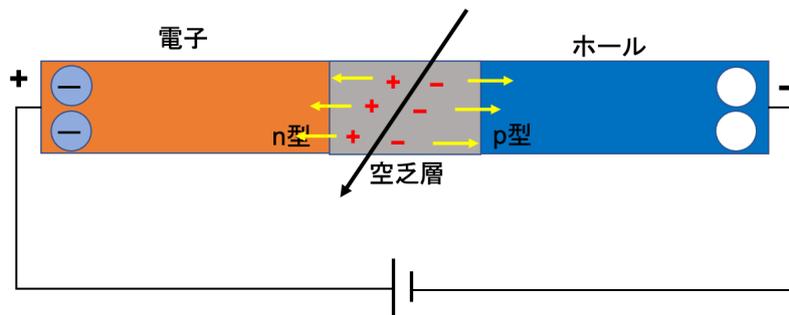


図 1.6 pn 接合した半導体による荷電粒子の検出過程。

第 2 章

sPHENIX 実験における INTT シリコン検出器

2.1 Relativistic Heavy Ion Collider(RHIC)

Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) は世界で初めての重イオン衝突型加速器であり、アメリカニューヨーク州ロングアイランドにあるブルックヘブン国立研究所にある。2000 年に稼働開始し、いくつかの実験が行われてきた。図 2.1 は RHIC の全体写真である。主な衝突原子核は金原子核対で、衝突時の核子対あたりのエネルギーは 200 GeV である。そのほかにも、ヘリウム原子核や陽子など様々な粒子での実験も行っており、陽子-陽子衝突な場合の最大重心系エネルギーは 510 GeV である。RHIC には 2 つの環状のビームラインがあり、時計回りと反時計回りそれぞれ周長が 3.8 km の加速器リングである。衝突点は 6 箇所設けられている。

2.2 sPHENIX 実験

sPHENIX 実験はブルックヘブン国立研究所 (BNL) の RHIC を用いて 2023 年から稼働予定の実験である。この実験は 2000 年から 2016 年まで同加速器で行われていた PHENIX 実験を高度化した次世代実験である。この実験では、ハドロジェットや Υ 中間子の測定を行い、QGP の性質解明を目指す。

図 2.2 に sPHENIX 検出器の全体像を示す。この検出器は 5 つの検出器で構成されており、内側から MVTX (MAPS based VerTeX Detector)、INTT (INtermediate Tracking detector)、TPC (Time Projection Chamber)、EMCal (Electro Magnetic Calorimeter)、HCAL (Hadron Calorimeter) である。このうち MVTX、INTT、TPC は衝突から発生した荷電粒子の飛跡を検出する飛跡検出器である (図 2.3)。アクセプタンスは、方位角方向に対して 2π 、擬ラピディティ方向に対して $|\eta| \leq 1.1$ を覆うように設計されている。

本研究は INTT の関するもので、2.3 節で詳細を述べる。

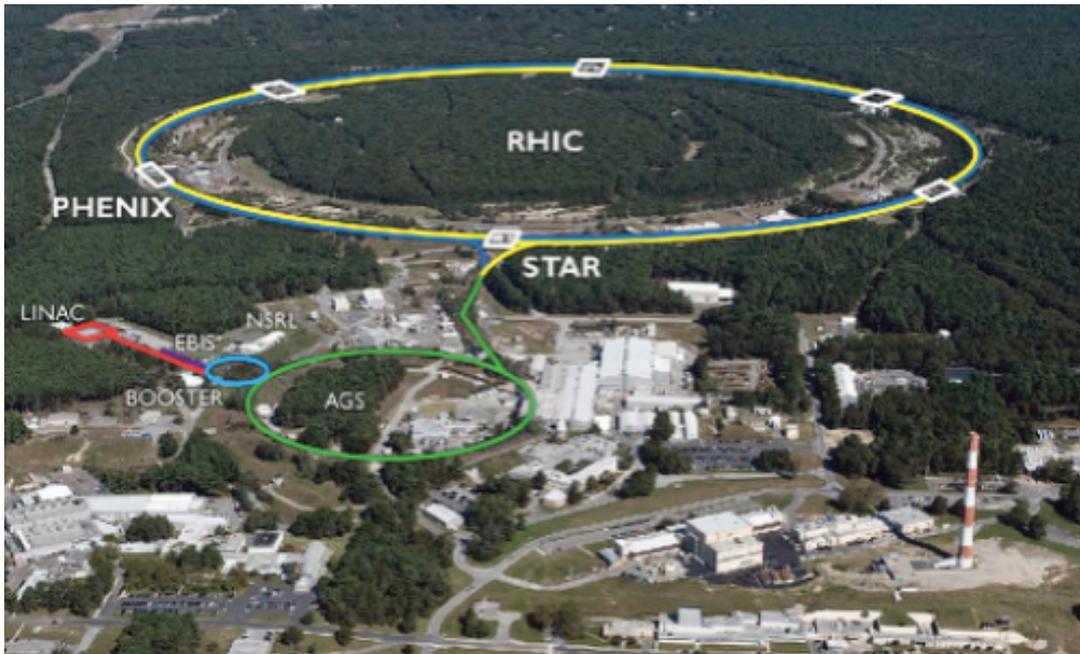


図 2.1 RHIC 加速器の全体像。

2.3 INTermediate Tracking detector (INTT)

INTermediate Tracking detector (INTT) は、sPHENIX 検出器において MVTX と TPC の間に位置するストリップ型シリコン検出器である。INTT 検出器の外観を図 2.4 に示す。INTT ラダーは2つのシリコンモジュールとステープで構成されている。シリコンモジュールは、シリコンセンサー、FPHX chip、HDI で構成されており、Conversion Cable、Bus extender という読み出しケーブルに接続される。

2.3.1 シリコンセンサー

本実験で用いる INTT 用シリコンセンサーの構造を図 2.5 に示す。このセンサーはシリコンストリップセンサーであり、 8×256 個のストリップが並ぶ Type A と、 5×256 個のストリップが並ぶ Type B の2つのセンサーで構成されている。各センサーのサイズは不感領域を除いて、Type A が $128 \text{ mm} \times 19.9 \text{ mm}$ 、Type B が $100 \text{ mm} \times 19.9 \text{ mm}$ である。このセンサーが図 2.5 に示すように1つのモジュールを構成している。センサー全体の大きさは、 $232.2 \text{ mm} \times 22.5 \text{ mm} \times 0.32 \text{ mm}$ である。

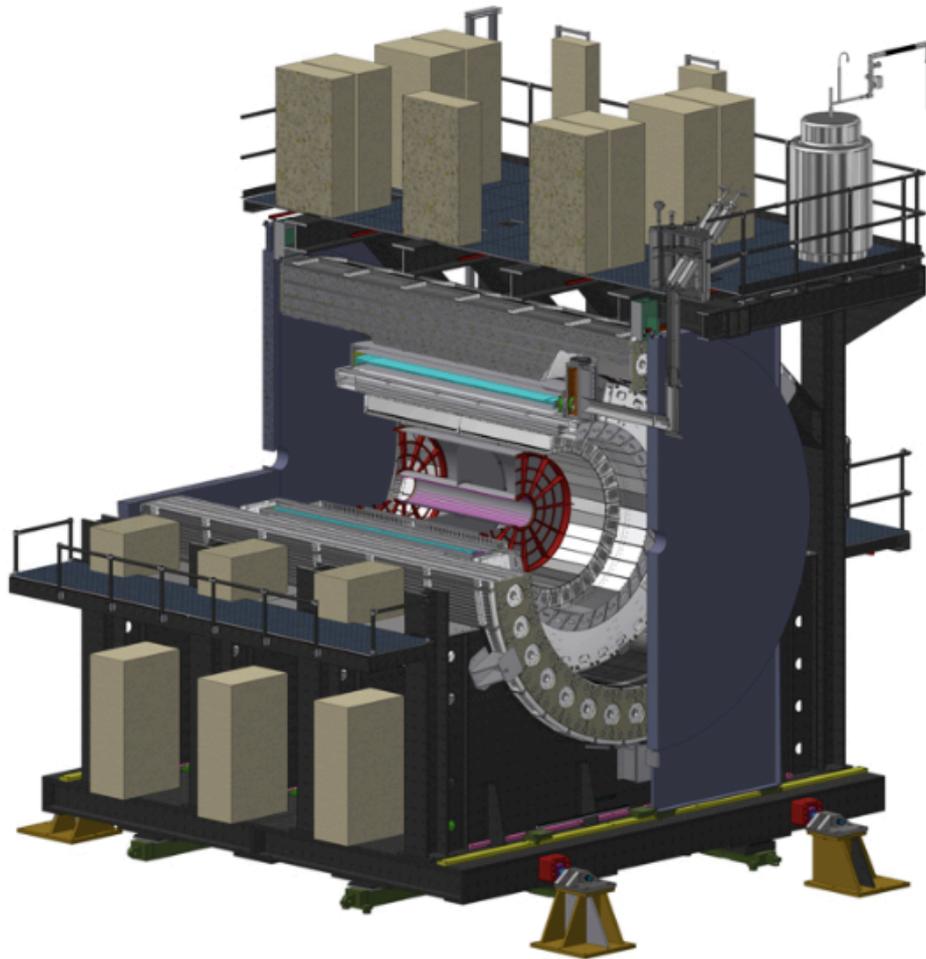


図 2.2 sPHENIX 検出器の全体像。

2.3.2 FPHX chip

FPHX chip は、PHENIX 実験の FVTX で使用された既存の読み出しチップである。INTT では、テスト用ハーフラダー 1 つあたり 26 個搭載されており、1 チップあたり 128 のチャンネルを持つ。各チャンネルにおいて波形整形を行い、3 bit の ADC を出力する。

2.3.3 High Density Interconnect (HDI)

HDI とは、FPHX チップへの入出力配線、センサー、FPHX chip への電源供給を行う基板である。FPC (Flexible Printed Circuits) と呼ばれる柔軟性の高い薄い基板で作られていて、PHENIX 実験の FVTX 検出器と同じ 7 層の銅とポリイミドと接着剤から構成される。

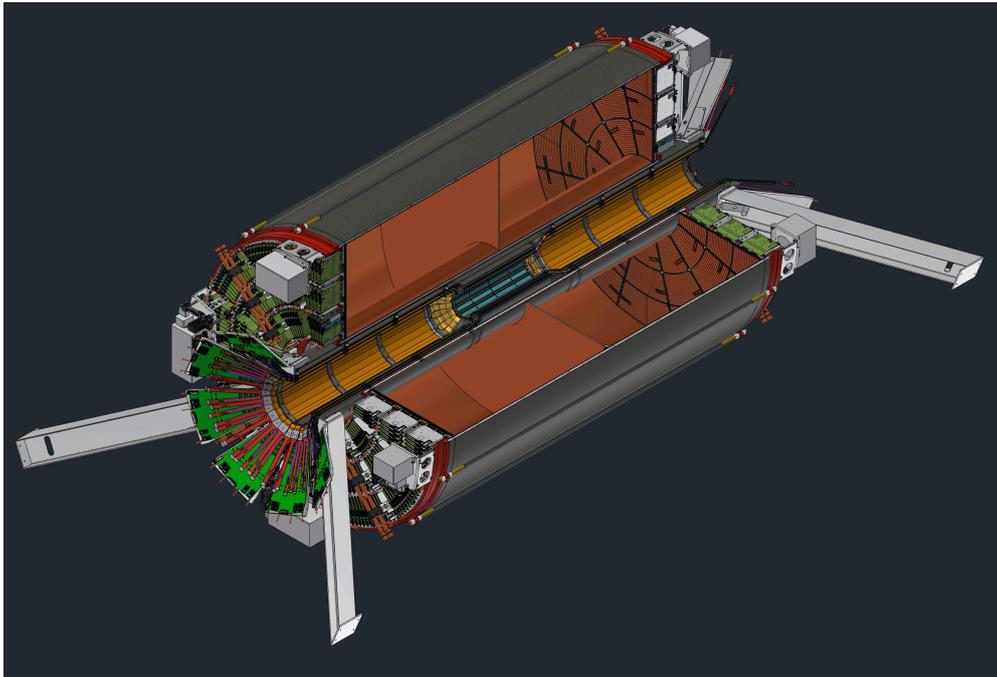


図 2.3 TPC 検出器及び INTT 検出器。

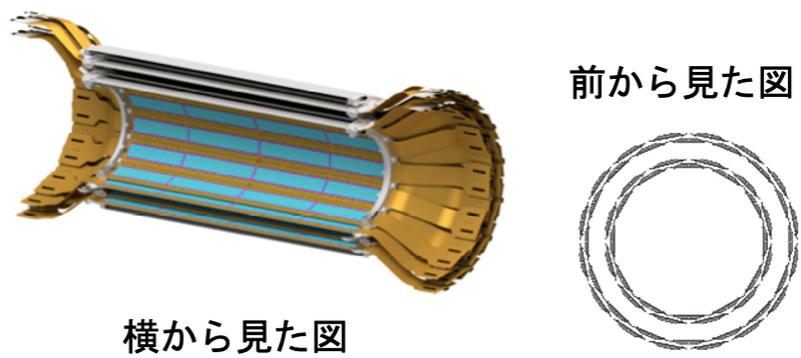


図 2.4 INTT 検出器の外観。

2.3.4 Bus Extender

Bus extender とは、HDI と ROC を繋ぐための高速データ伝送ケーブルである。Bus extender が通る空間が狭いことから、薄くフレキシブルな素材が使用されている。長さは 1.2 m である。

2.3.5 Conversion Cable

Conversion Cable とは、ROC と HDI を整合するためのケーブルである。長さが 20 cm のものと 40 cm のものがある。実際の実験では 20 cm のものを使用する予定であるが、センサーのテ

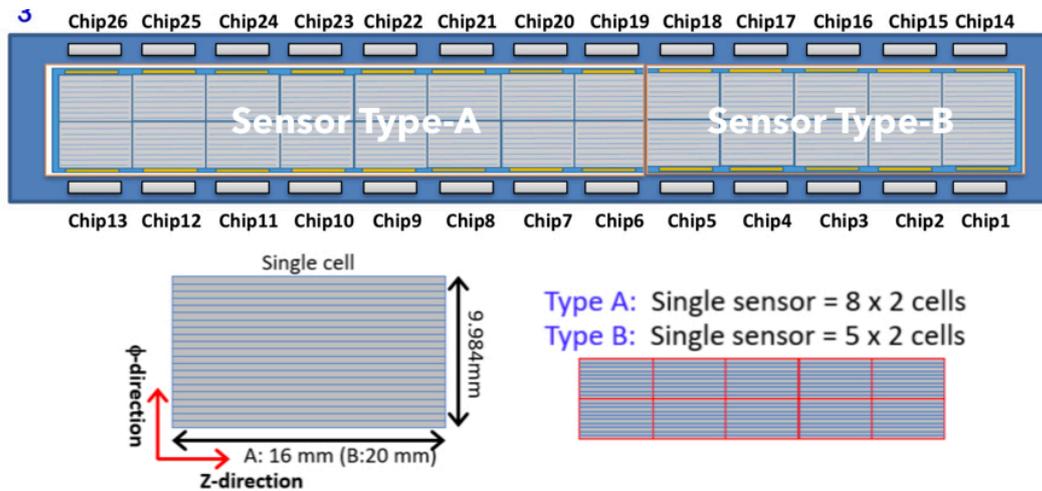


図 2.5 シリコンセンサー Type-A と Type-B のシリコンセルサイズとその数。

ストをする際には 40 cm のものも使用されている。

2.3.6 Read Out Card (ROC)

Read Out Card (ROC) とは、FPHX chip から出力された信号を読み出す基板である。PHENIX 実験で使用されていたものを再利用する形で sPHENIX 実験でも使用される。1 つの ROC で複数のシリコンモジュールの信号を読み出すことができる。受け取った信号を下流のモジュールを送る役割をし、また FPHX chip のキャリブレーションテストを行う際には、テストパルスを生成し FPHX chip に送る働きもする。データの転送には 4 本の光ファイバーケーブルを使用し、後段の FEM への高速転送を可能にしている。

2.3.7 Front End Module (FEM)

Front End Module (FEM) とは、VME 規格の読み出し基板であり、ROC から送られたデータを PHENIX 共通のフォーマットに変換する。FEM 1 枚あたりで光ファイバー 2 本分を担うことができるので、ROC 1 台に対して FEM 2 台が必要である。一方で、ROC への命令信号である Slow control は 1 枚の FEM で行うことができる。

2.3.8 FEM - Interface Board (FEM-IB)

FEM - Interface Board (FEM-IB) は、FEM 全体を制御するモジュールである。FEM と同様 VME 規格で作られている。主に、検出器全体を統括するクロック信号やトリガー信号、FEM の制御信号を受け取る。

2.4 DAC 閾値

FPHX 上の 3 bitADC の各閾値を設定するために DAC 閾値を設定する。閾値設定は 8 段階で行うことができ、小さい値から DAC 0 - DAC 7 を設定する。Threshold は DAC 値より、

$$Threshold[mV] = 210[mV] + 4[mV] \times DAC_{value} \quad (2.1)$$

の計算で求められる。本研究で用いる DAC 値設定は、キャリブレーションテストについては先行研究での設定を採用し、宇宙線測定については宇宙線のエネルギー分布を確認し再設定した (5.2.2 節参照)。

2.5 研究目的

私が INTT に関して取り組んだ研究は 2 つであり、

1. INTT モジュールの FPHX chip への供給電圧を見積もること
2. 宇宙線を用いて INTT 用シリコンセンサーの検出効率を測定すること

である。1 の研究は、ROC の Regulator の供給電圧の許容範囲を測ることで、適切なオペレーションをすることに繋がるため重要である。また、2 の研究は先行研究があり、この結果では検出効率が 96 % であったが、より高い検出効率を出したいと考え新たな実験セットアップを考え研究をした。

まず、第 3 章では研究に用いる INTT モジュールの動作確認について述べる。正常に動作しているモジュールか否かを判断する基準などに触れている。また、第 4 章では 1 の研究について、そして第 5 章では 2 の研究について具体的に述べる。

第3章

テストベンチでの INTT モジュールの動作確認

3.1 キャリブレーションテスト

INTT モジュールの性能評価のために、2018 年に奈良女子大学にテストベンチを構築した。ROC でテストパルスを生成し、そのパルスに対する応答を測定するためにキャリブレーションモードを用いてキャリブレーションテストを行い、また外部トリガーモードを利用した宇宙線測定および線源測定を行った。キャリブレーションテストとは、テストベンチを使用する際に各モジュールが正常に動作しているのか確認するために行うテストのことである。本章では、キャリブレーションテストの方法と望ましい結果について述べる。

3.2 キャリブレーションテスト方法

キャリブレーションテストのセットアップを図 3.1 に示す。

ノイズを減らすため、シリコンセンサーに 50 V の電圧をかける。ROC から HDI を介して送られたアナログ信号 (テストパルス) を FPHX chip でデジタル信号に変換し、再び HDI を介して ROC へ送られる。ROC へ送られた信号は FEM と FEM-IB を通り、PC へ送られる。ROC からテストパルスは FPHX chip の 1 チップ、1 チャンネル当たり 10 個ずつ送られる。複数のパルス

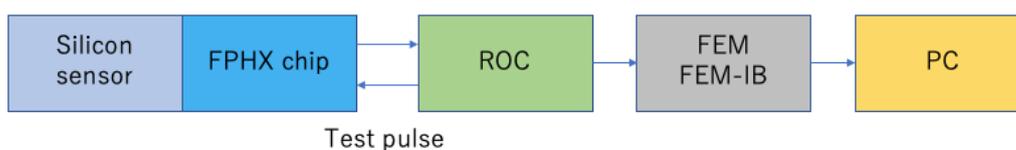


図 3.1 キャリブレーションモードにおける読み出し回路

波高が全チップ、全チャンネルへ順次スキャンされ全てのチャンネルに対し入力される。キャリブレーションテスト時の DAC 閾値は表 3.1 に示す。

表 3.1 キャリブレーションモードにおける DAC 閾値設定。

ADC	DAC value	Threshold [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

3.3 キャリブレーションテスト結果

図 3.2 の左は 1 chip での入力 amplitude とチャンネルの相関分布である。標準的なキャリブレーションテストでは DAC 0 閾値の値を 20 に設定しており、この値付近から徐々にヒット数が増えていき、ある値を超えると常に同じヒット数であることがわかる。図の右は、1chip での出力 ADC と入力 amplitude の相関分布である。この図より、入力 amplitude と出力 ADC が DAC 設定値に基づいた比例関係にあるということが出来る。

これらの図を 1 モジュール分 (26 chip 分) まとめて図 3.3 と図 3.4 に示す。どちらの図も下の段右より chip 1 - 13、上の段右より chip 14 - 26 となっている。このような結果になった場合、全 chip 全チャンネルで同等のヒット分布になっているので正常に動作していると判断することができる。

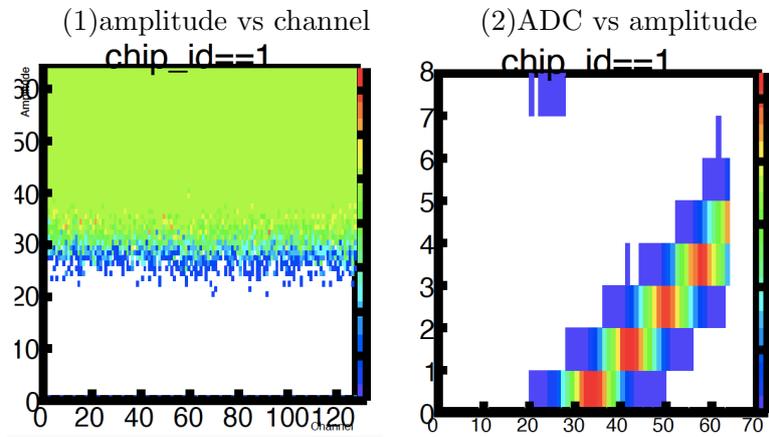


図 3.2 chip1 でのキャリブレーションテスト結果の相関分布。(1) chip 1 における全チャンネルでのテストパルスのヒット数分布。(2) chip 1 におけるテストパルスの入力波高 (amplitude) と出力 ADC の相関分布。

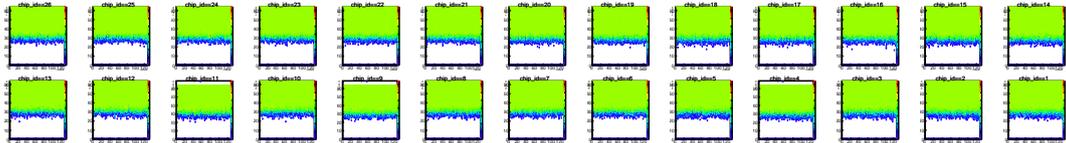


図 3.3 1 モジュール全体における全チャンネルでのテストパルスのヒット分布。

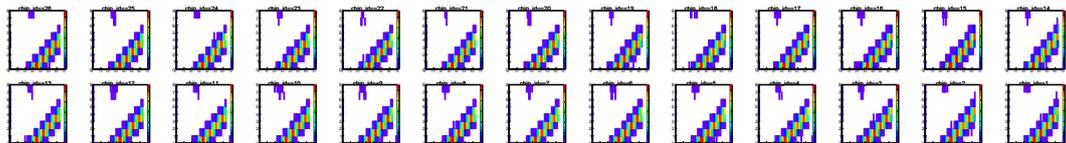


図 3.4 1 モジュール全体におけるテストパルスの入力波高と出力 ADC に分布。

第 4 章

FPHX chip への供給電圧の見積もり

4.1 概要と目的

FPHX chip は動作電圧が 2.5 V であり、ROC の regulator から 2.5 V が供給されるが、regulator から FPHX chip の間での電圧降下は避けられないため、chip には 2.5 V 未満が供給される。これは、ROC と FPHX chip の間の距離が長く、PHENIX 実験の FVTX のために作られたものであり、sPHENIX 実験の INTT 用に最適化されていないためである。以上より、FPHX chip が適切に動作する電圧範囲を知ることは適切なオペレーションのために不可欠である。

4.2 方法

4.2.1 供給電圧の計算方法

図 4.1 のような手順で供給電圧を求める。FPHX chip への供給電圧 V_{chip} を求めるためには、regulator での出力電圧 V_{reg} と、regulator と FPHX chip の間の電圧降下の値 ΔV から、

$$V_{chip} = V_{reg} - \Delta V \quad (4.1)$$

を計算すればよい。

V_{reg} は regulator の出力電圧を直接測定する。また、 ΔV は ROC と FPHX chip の間の配線抵抗 R と電流値 I_{INTT} から、

$$\Delta V = R_{ROCToChip} \times I_{INTT} \quad (4.2)$$

と計算して求める。

4.2.2 測定方法

計算で用いる値を順に測定していき、測定した値を用いて計算で chip への供給電圧を導出する。以下の手順で測定する。



図 4.1 regulator への供給電圧の見積もり方法。

- regulator の出力電圧を INTT への供給電圧を変えながら測定する。本測定では、電源電圧 3.6 V - 2.6 V の範囲で測定した。普段の測定は電源電圧 3.6V で測定を行なっているので、この値を基準に電圧を下げていき測定した。regulator の位置は ROC の裏側にあり、そこに直接テスターを当てて電圧を測定する。（図 4.2）また、ROC の設計図の一部を図 4.3 に示す。C1877 が測定する regulator であり、 V_{OUT-2} が chip への出力である。この 2 つが直接つながっているため、regulator での出力電圧が chip への出力電圧と一致するのである。
- ROC と INTT の間の抵抗値は台湾の共同研究者であるチェンウェイが測定した結果を用いた。（表 4.1）また、INTT への供給電流は電源装置のモニターに表示される値を使用する。この 2 つの値から電圧降下を計算できる。
- それぞれの電源電圧値でキャリブレーションテストを行い（4.3 節で説明）、正しく測定できるのかを調べる。

表 4.1 台湾で測定した ROC と INTT の間の抵抗値。
2 回の測定を行い、その平均値を今回の計算で用いた。

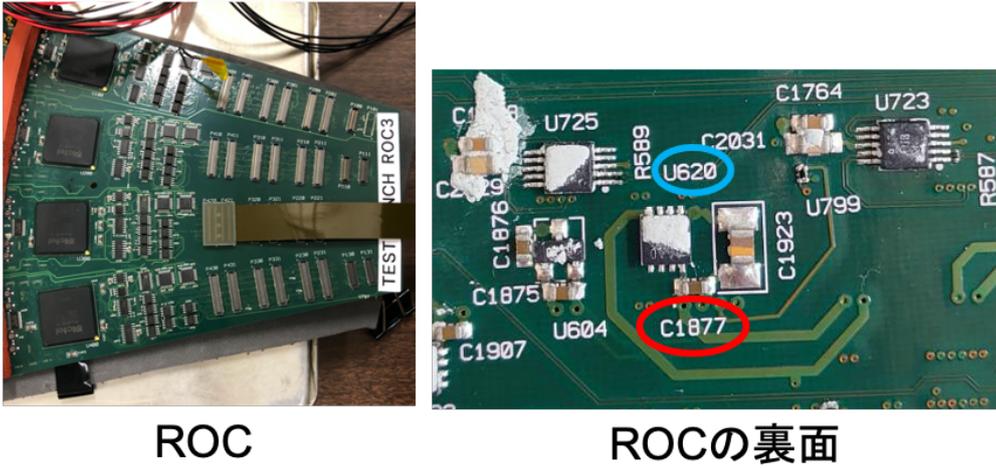
測定 1 [Ω]	測定 2 [Ω]	平均 [Ω]
0.31	0.314	0.312

4.3 キャリブレーションテストによる動作確認

キャリブレーションテストは、3.1 節で述べた通りの方法で行う。設定も全て同じである。キャリブレーションテストで、図 3.2 のような結果が各 chip で得られた場合に「正しい挙動である」と判断する。

供給電圧を変えながらキャリブレーションテストを行い、FPHX chip への供給電圧との対応関係を調べる。

裏返して拡大



ROC

ROCの裏面

図 4.2 regulator の位置。(C1877 : regulator)

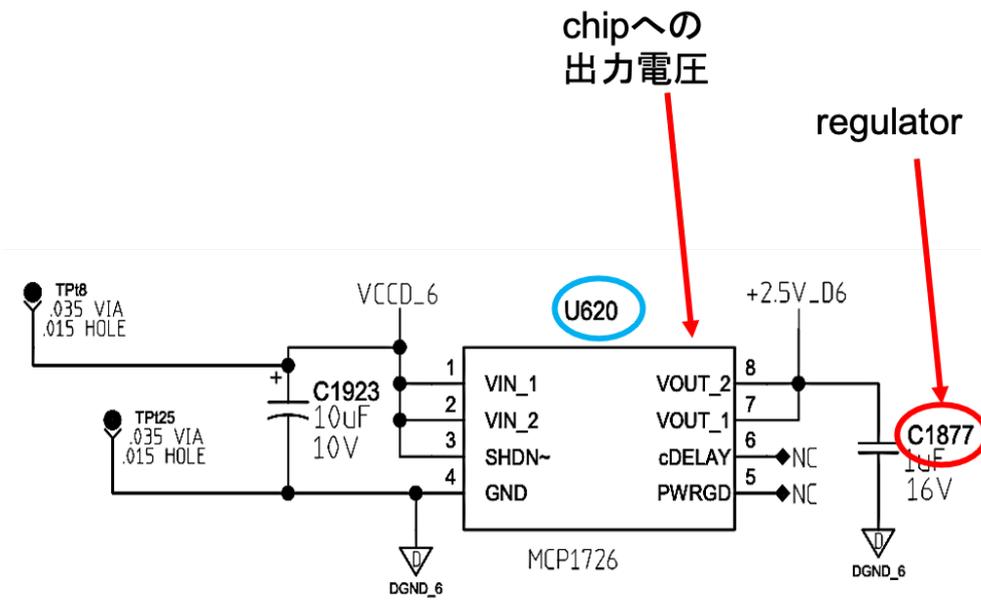


図 4.3 FPHX chip に繋がる ROC の配線。

表 4.2 regulator の出力電圧の測定結果。

供給電圧 [V]	regulator の出力電圧 [V]
3.60	2.477
3.50	2.477
3.40	2.477
3.30	2.477
3.20	2.477
3.10	2.476
3.00	2.471
2.90	2.350
2.80	2.275
2.70	2.203
2.60	2.121

4.4 結果

4.4.1 計算結果

Regulator の電圧の測定結果を表 4.2 に示す。また、その他の値と FPHX chip への供給電圧の計算結果を表 4.3 に示す。regurator の電圧測定は電源電圧 0.1V 刻みでしか行なっていなかったため、前後の電源電圧の時の測定結果を平均して用いた。

Regulator への供給電圧と FPHX チップへの供給電圧の対応を図 4.4 に示す。これより、電源電圧が 3 V より大きいとき、FPHX chip への供給電圧はほぼ一定だが、それを下回ると供給電圧は直線的に減少していくことがわかった。この電圧降下が FPHX chip の挙動に与える影響はキャリブレーションテストで確認した。

4.4.2 キャリブレーションテスト結果

キャリブレーションテストの供給電圧依存性を調べた。結果は図 4.5 に示す。

この結果より、電源電圧 3.1V 以上では正常に動作していると考えられる。しかし、3.1V を下回ると徐々に動作が悪くなっていき、2.8V まで下げると半分近い chip でデータが取れなくなった。chip1, 5, 9 への影響が顕著で、影響があったチップは 1 - 13 のいずれかであった。

表 4.3 FPHX chip への供給電圧の計算結果。

供給電圧	電源電流	ΔV	regulator 電圧 (c1877)	FPHX chip への供給電圧
3.60	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.55	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.50	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.45	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.40	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.35	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.30	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.25	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.20	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.15	0.53	0.16536	2.476	2.31114
3.10	0.53	0.16536	2.476	2.31064
3.05	0.52	0.16224	2.473	2.31126
3.00	0.52	0.16224	2.471	2.30876
2.95	0.52	0.16224	2.410	2.24826
2.90	0.50	0.15600	2.350	2.19400
2.85	0.49	0.15288	2.313	2.15962
2.80	0.48	0.14976	2.275	2.12524
2.75	0.47	0.14664	2.239	2.09236
2.70	0.45	0.14040	2.203	2.06260
2.65	0.44	0.13728	2.162	2.02472
2.60	0.43	0.13416	2.121	1.98684

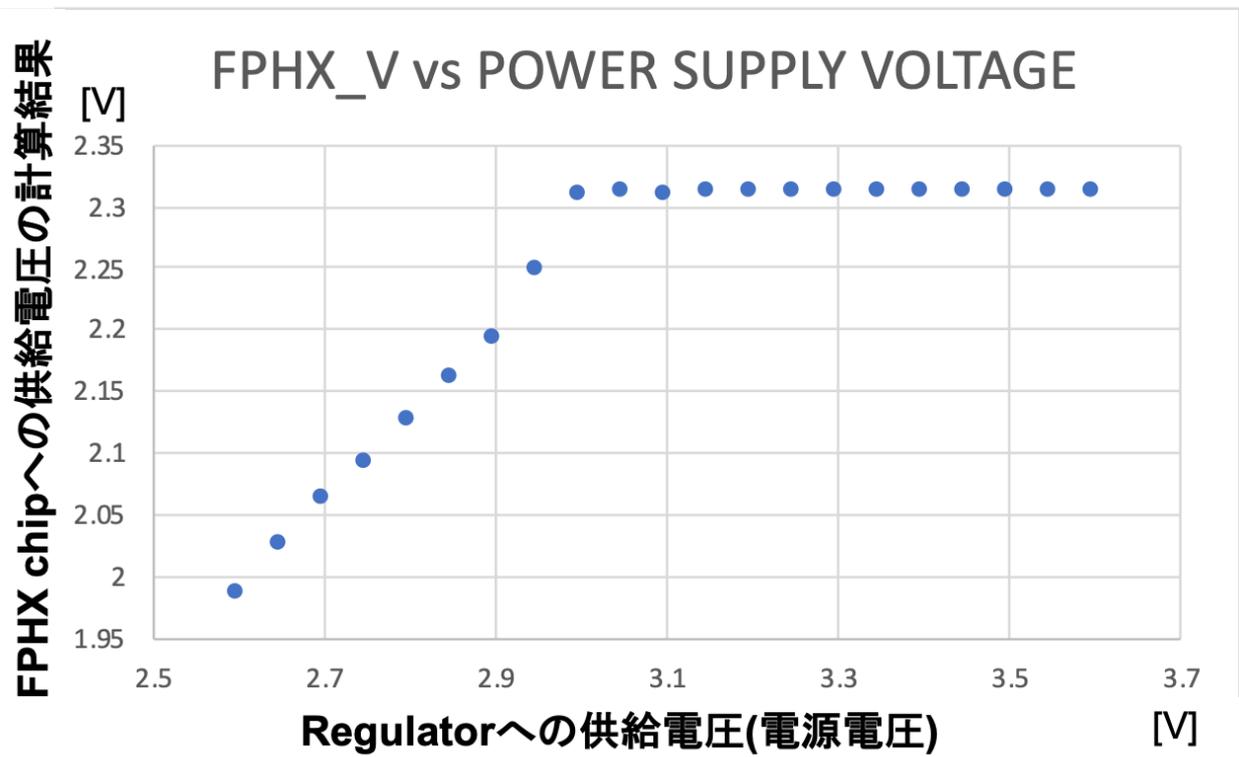


図 4.4 FPHX chip への供給電圧の計算結果と Regulator への供給電圧 (電源電圧) の関係。

PWR_SUPPLY_V	動作状況
3.6	正常
3.5	正常
3.4	正常
3.3	正常
3.2	正常
3.1	正常
3.05	chip5:ノイズ多め
3.03	正常
3.02	chip5,9:データ少なめ
3	chip1,5,9:ノイズ多め、データ少なめ
2.95	chip1,9:データ少ない、chip5:データ少なめ
2.9	chip1,9:データかなり少ない、chip5:データ少ない、chip4,7:データ少なめ
2.85	chip1,9:データなし、chip3,4,5,7:データ少ない、chip13:データ少なめ
2.8	chip1,9:データなし、chip3,4,5,7,13:データほぼなし

図 4.5 FPHX chip への供給電圧を変化させた際のキャリブレーションテストの結果。

4.5 まとめと今後の方針

FPHX chip への供給電圧を計算し動作状況を確認することで、FPHX chip への供給電圧の許容範囲を見積もることができた。

普段の測定では電源電圧 3.6V で測定を行なっているため、FPHX chip の動作に影響はないが、sPHENIX 実験で実際に使用する際は、間に Bus-extender が入り配線長がさらに長くなるので、電圧降下の値が今回の測定より大きくなると考えられる。よって、ROC に使用する Regulator を現在使用しているものよりも出力電圧が高いものに変える必要がある。

第 5 章

宇宙線を用いた検出効率測定

5.1 目的

INTT モジュールの検出効率は、ほぼ 100 % であることが期待される。しかし先行研究では、検出効率が約 96 % であるという結果が得られた [鈴木 (2019)]。本研究では、INTT 動作クロックとトリガーシンチレーターの信号のタイミング差に着目し、検出効率がどのように変わるのかを調べた。

5.2 外部トリガーを用いた宇宙線測定

5.2.1 宇宙線がシリコン中を通過する際の損失エネルギーとそれによる出力パルスの波高の見積り

宇宙線がシリコン中を通過する際に失うエネルギーの導出は先行研究に従った。[鈴木 (2019)] [柴田 (2019)]

320 μ m 厚のシリコン中で μ 粒子のような荷電粒子が失うエネルギーは、ベータ・ブロッホの式より表され、このような荷電粒子を Minimum Ionizing Particle (MIP) と呼ぶ。図 5.1 より、1 GeV のミューオンのエネルギー損失は約 $1.15 [MeV/g \cdot cm^{-2}]$ であることがわかるので、シリコン単位体積あたりの中で MIP が失うエネルギーは、

$$E[MeV] = 1.15[MeV/g \cdot cm^{-2}] \times 0.032[cm] \times 2.33[g/cm^3] = 0.0857[MeV] \quad (5.1)$$

と求められる。ここで、シリコンの密度は $2.33 [g / cm^3]$ である。

次に 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を求める。シリコン中で 1 つの電子正孔対を作るために必要なエネルギーは $3.62 [eV]$ であるので、

$$N_E = \frac{E[MeV]}{3.62[eV]} = \frac{8.57 \times 10^4[eV]}{3.62[eV]} \approx 23670[\text{個}] \quad (5.2)$$

電荷素量 $1.6 \times 10^{-19} [C]$ より電荷に変換すると、

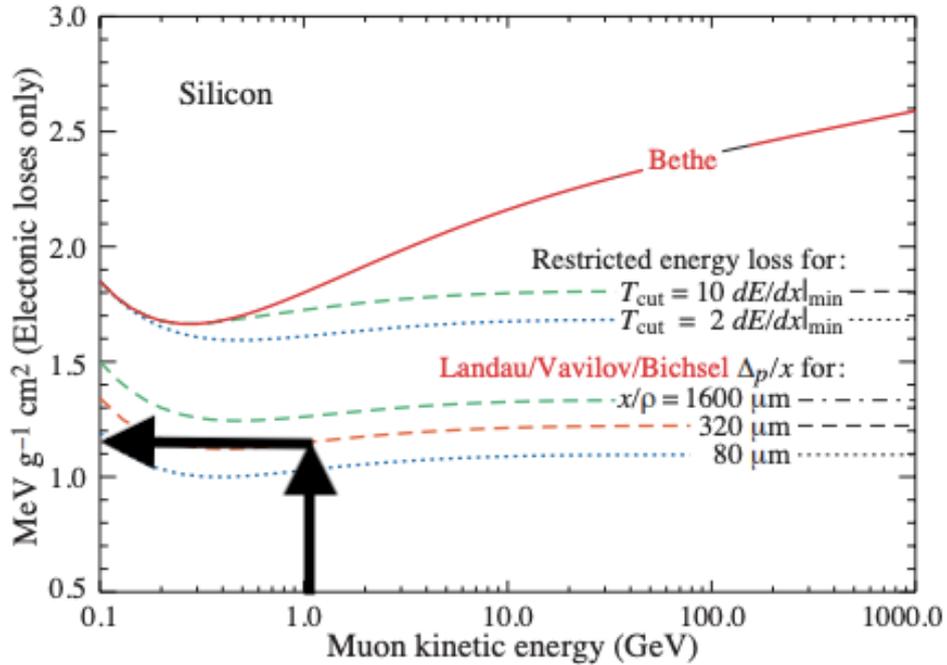


図 5.1 シリコン中で失うエネルギー。 [PDG (2020)]

$$C[fC] = N_e \times 1.6 \times 10^{-19}[C] = 23670 \times 1.6 \times 10^{-19}[C] \simeq 3.79[fC] \quad (5.3)$$

FPHX での増幅率が 100 [mV/fC]、オフセットが 200 ± 10 [mV] であるので、出力波高は

$$Pulseheight[mV] = 100[mV/fC] \times 3.79[fC] + 200 \pm 10[mV] \simeq 580 \pm 10[mV] \quad (5.4)$$

と求めることができる。

5.2.2 宇宙線測定時の DAC 値設定の決定

宇宙線測定をする際の DAC 値設定は、表 5.1 のように定めた。ここで、Threshold は (2.1) 式で求められる。

先行研究で用いた設定をほとんどそのまま使用したが、ADC0 の値を 10 から 20 に変更した。この変更を加えることでノイズを減らせたためである。

この DAC 値設定で、5.2.1 で計算したエネルギーの μ 粒子は ADC2 で検出されると考えられる。

本研究で使用したデータでの ADC 分布を確認したところ、図 5.2 のようになった。これより、確かに ADC 2 にピークがあり、予想される ADC 分布と一致している。

ADC	DAC value	Threshold[mV]
0	20	290
1	23	302
2	60	450
3	98	602
4	135	750
5	173	902
6	210	1050
7	248	1202

表 5.1 宇宙線測定における DAC 閾値設定。

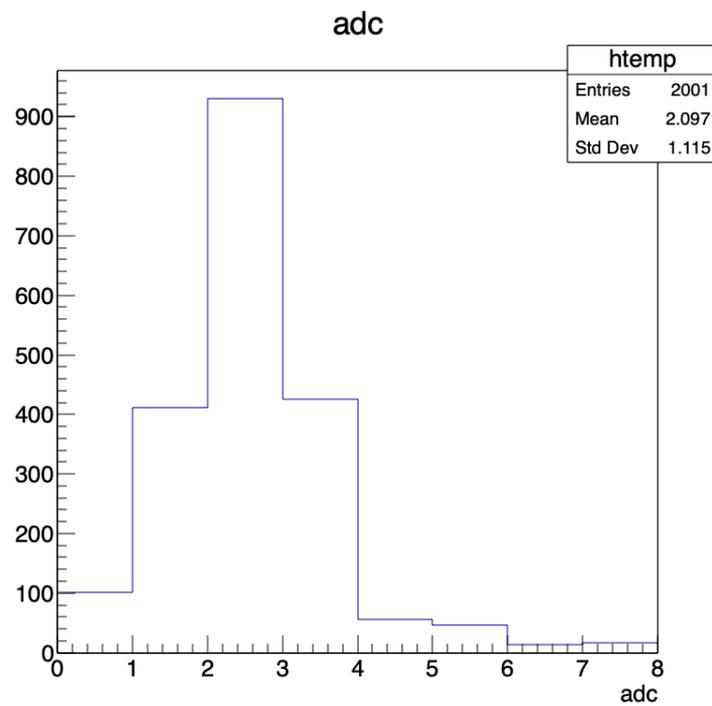


図 5.2 宇宙線測定におけるの ADC 分布。

5.3 測定方法

宇宙線を INTT で検出し、検出効率を見積もる。トリガーカウンターとして INTT の上下にシンチレーターを設置した。

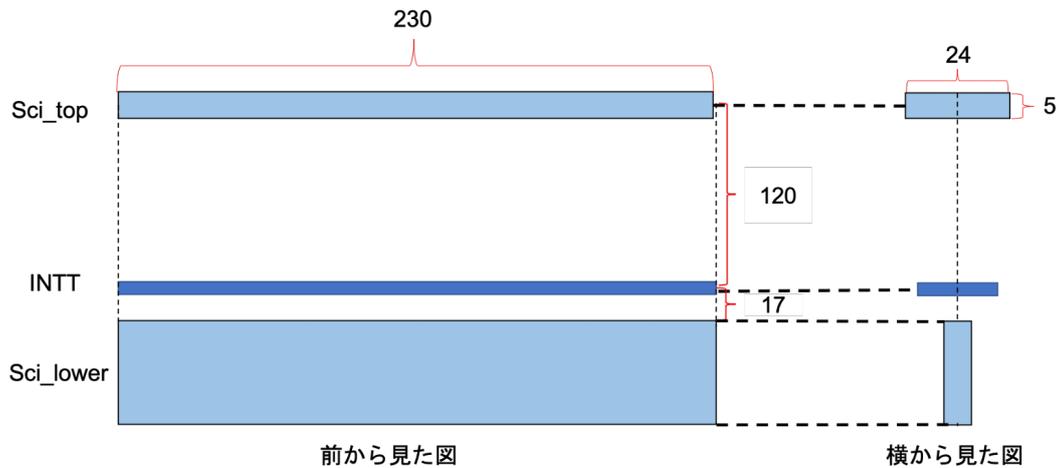


図 5.3 トリガーシンチレーター 2 つと INTT のセットアップ。(単位 mm)

5.3.1 各モジュールの配置

本研究では合計 2 つのトリガーシンチレーターを使用した。サイズは長辺が 230 mm、短辺が 24 mm であり、厚さが 5 mm である。上のトリガーシンチレーターを top、下のトリガーシンチレーターを lower と名付ける。2 つのトリガーシンチレーターと INTT は図 5.3 のようなセットアップで測定する。INTT を通る宇宙線に限定できるように、lower は縦向きに置いた。

5.3.2 トリガーシンチレーターの信号処理

NIM モジュールと CAMAC モジュールを用いてトリガーシンチレーターの信号処理回路を図 5.4 のように作成した。本測定ではこの図の PMT 1 と 3 のみを使用しており、PMT 1 が top、PMT 3 が lower に該当する。ADC は信号の波高を知るために、TDC は信号のタイミングを知るために測定する。以下にこの信号処理回路の具体的な説明を示す。

- 使用するトリガーシンチレーターの信号をそれぞれ CAMAC ADC に入れる。
- 使用するトリガーシンチレーターの信号をそれぞれ Discriminator に入れ、デジタル信号に変える。これらの信号を CAMAC TDC の各チャンネルに入れる。(ch 0, 2)
- デジタル信号に変換された信号を Coincidence モジュールに入れ、全ての信号の AND をとる。この信号を CAMAC TDC の Common Start 信号とする。
- TDC のスタート信号がストップ信号よりも早く TDC に入るようにするため、間に Gate generator を挟んで信号の delay や width を調整する。この時、TDC の common start 信

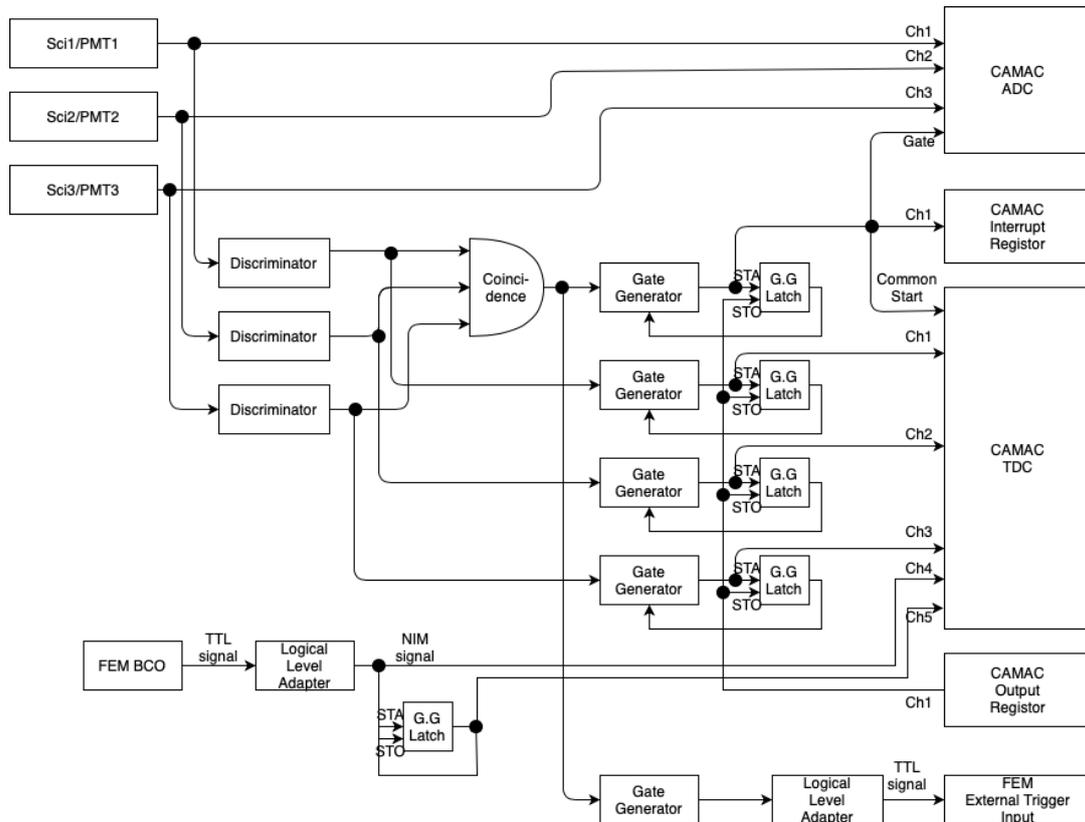


図 5.4 宇宙線測定の読み出し回路のロジックダイアグラム。はじめはトリガーシンチレーター 2 つ、その後 3 つで測定した。

号の方が ch 0, 2 の信号より早く CAMAC に入るように時間調整を行う必要がある。また、ch 0, 2 の信号はほぼ同じタイミングに信号が入力されるようにオシロスコープを用いて調整した (図 5.5)。

- 信号処理中に別の宇宙線が来ても検出しないようにするために Latch モードを加えている。
- FEM から BCO 信号を取り出し、CAMAC TDC に入れる (ch 3)。また、信号の幅を Gate Generator を用いて小さくしたのも CAMAC TDC に入れる。(ch 4)

5.4 検出効率の導出方法

検出効率の導出は以下の手順で行う。

1. CAMAC にヒットがあったイベント数を CAMAC event 、INTT にヒットがあったイベント数を INTT event と定義する。この時、CAMAC event のうち INTT にヒットがあっ

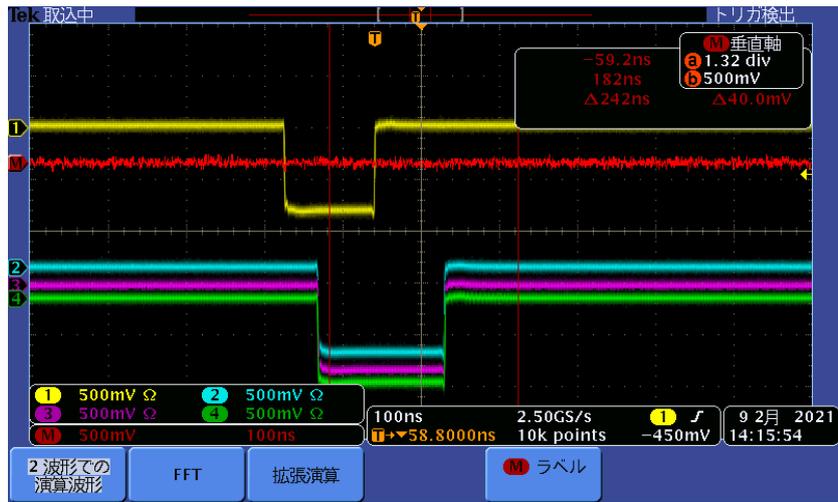


図 5.5 TDC の common start 信号及び ch0 2 の信号のタイミング調整。
 黄：common start、青：ch0、桃：ch1、緑：ch2

たイベント数は CAMAC event \cap INTT event となる。

検出効率は CAMAC event と CAMAC event \cap INTT event の比であるので、

$$\text{検出効率} = \frac{\text{CAMAC event} \cap \text{INTT event}}{\text{CAMAC event}} \quad (5.5)$$

と求めることができる。

2. 上述のイベント数をカウントするために、以下の手順で処理する。まず、dat ファイルで取り出されたデータを root ファイルに変換する。その際に、宇宙線のデータではないと判断できるノイズを取り除く。ノイズとは、ROC の使っていないポートに入った信号や、テストパルスの入力とみなされたデータである。
3. 生成した root ファイルで、使用した外部トリガーそれぞれの ADC 分布と TDC 分布を出し、適切なカットを決める。
4. 全てのカットを適用して、FEM の BCO 信号 (CAMAC TDC ch5) の分布を出す。この信号の合計が使用した全ての外部トリガーで検出したイベント数 (CAMAC event) である。決めた範囲で INTT にヒットがあったイベント数が INTT event であり、これらの数値を用いて 5.5 の計算をし、検出効率を導出する。

5.5 外部トリガー 2 つを用いた結果

5.5.1 ADC 分布と TDC 分布の結果

外部トリガー 2 つの時のデータから検出効率を導出する。

手順に沿って、まず初めに外部トリガー 2 つの ADC 分布と TDC 分布を出す。(図 5.6、図

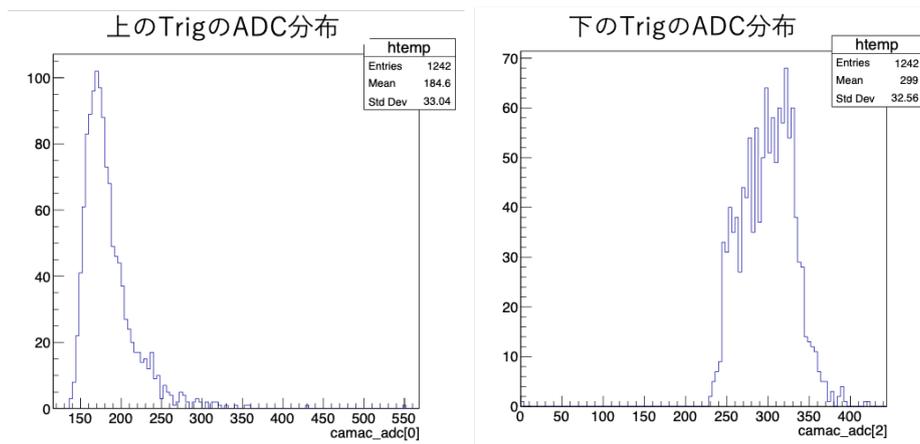


図 5.6 各トリガーの ADC 分布。

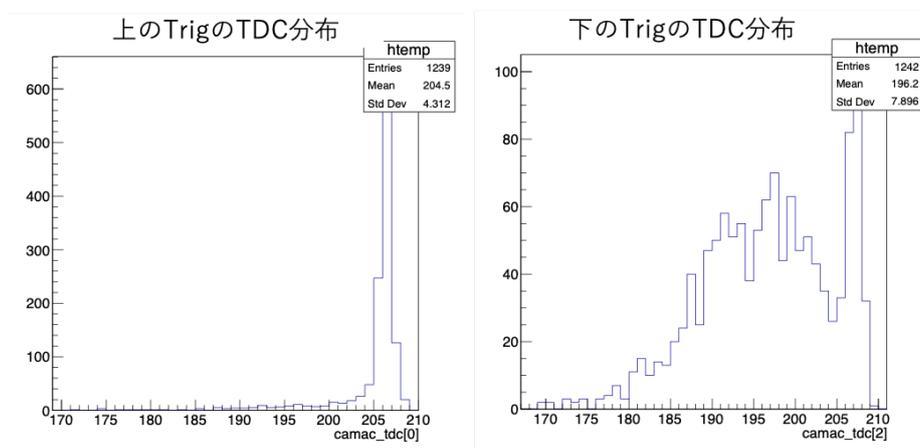


図 5.7 各トリガーの TDC 分布。

5.7)

5.5.2 TOP トリガーの分布のカット

図 5.6 と図 5.7 からカットを決めていく。まず、INTT を確実に通過した粒子を選択したいので、ピークが 1 つのものはピーク付近をカットに決める。今回の測定結果の中では、top の ADC 分布 (ADC_{top}) と TDC 分布 (TDC_{top}) はピークが 1 つしかないので、カットを決めることができた。決めたカットは ADC 分布が 150 ~ 200、TDC 分布が 204 ~ 207 である。(図 5.8)

5.5.3 lower のトリガーカウンタの TDC 分布

カットを決めていない分布は、lower の ADC 分布と TDC 分布である。まず初めに TDC 分布のカット決定について述べる。

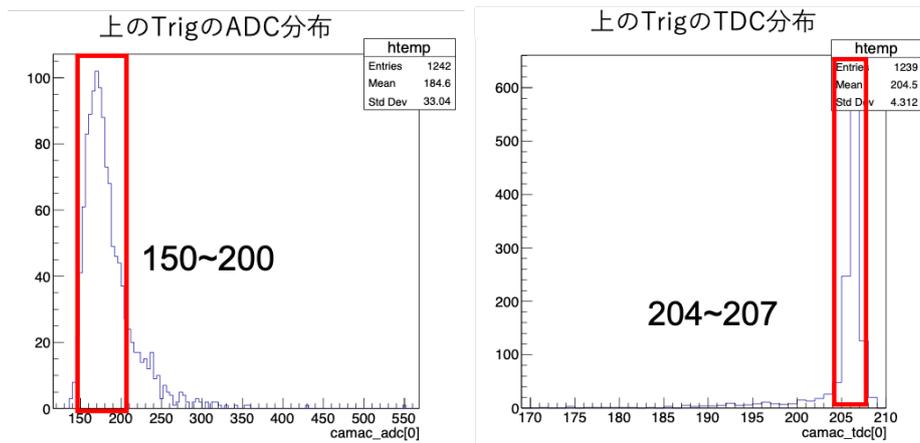


図 5.8 ピークが 1 つの分布のカット。

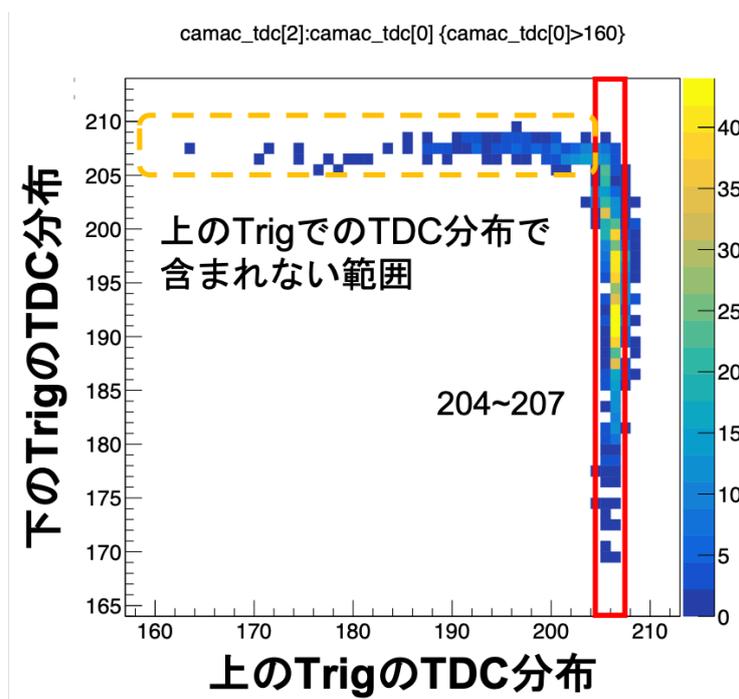


図 5.9 上の外部トリガーの TDC 分布と下の外部トリガーの TDC 分布の相関分布。

TDC_{lower} を決定するために、下と上の外部トリガーの TDC 分布の相関分布を作成した。(図 5.9) 既に先ほど上の外部トリガーの TDC_{top} は決定したため、その範囲を図に赤線で書き込んだ。図 5.9 から分かるように、TDC_{top} の範囲に含まれない領域が TDC_{lower} の 205 ~ 210 あたりの領域に見られる。(黄色点線で囲んだ範囲) この範囲は図 5.7 の右側の図の後半のピークにあたるので、今回カットをかけるのは前半のピークになる。

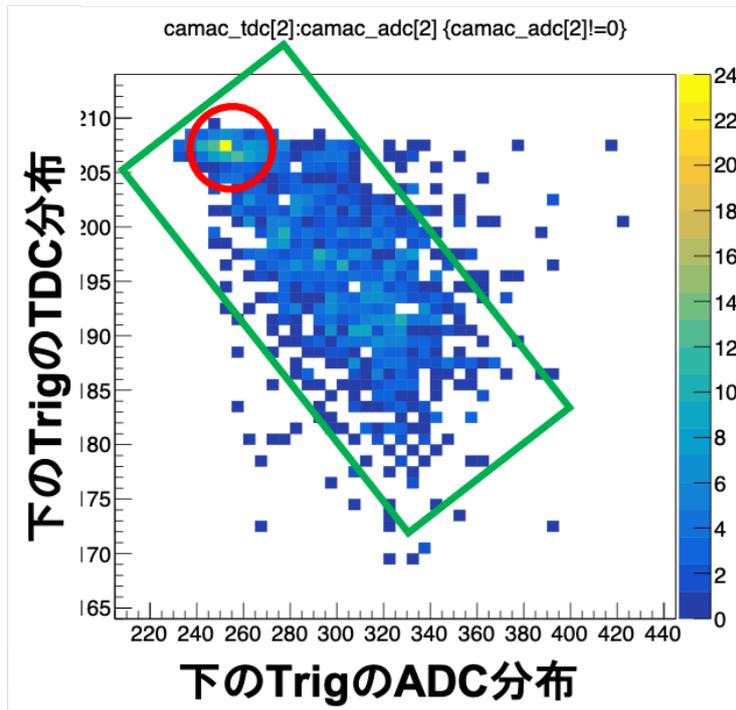


図 5.10 下の外部トリガーにおける TDC と ADC の相関分布。

カットには含まれない範囲になるが、黄色点線で囲った TDC が 205 ~ 210 の領域はなぜ存在しているのかを考える。そこでまず、lower の TDC と ADC の相関分布を出し関係性を考え、緑で囲ったように負の相関関係が見られた (図 5.10)。つまり、ADC 値が小さくなると TDC 値が大きくなって。ADC は波高に比例した量であるから、波高が小さいパルスが大きい TDC 値を出しているという現象が起きている。これは「スルーイングの効果」と呼ばれる現象である。

図 5.9 のグラフで黄色点線で囲った範囲は図 5.10 の赤丸で囲った部分に該当しているので、波高が小さいパルスが多くヒットしていたことがわかった。つまり、今回のカットでは、波高が小さいパルスをカットすることになる。

5.5.4 下の外部トリガーの ADC 分布のカット

ここまでで決めたカットを適用して検出効率を出すと、

$$\text{検出効率} = 662/715 = 91.2^{+1.1}_{-1.2}\%$$

となる。この値は先行研究で導出されていた約 96 % より低い。また、検出効率の TDC 依存性 (図 5.11) を見ると、検出率は TDC によらず誤差の範囲で一定になっている。このことから TDC に依存しないバックグラウンドがまだ残っていることが疑われ、それを取り除くために、カットをかけていなかった lower の ADC 分布について考えることにした。

ここまでカットをかけていなかった理由はピークの幅が広くカットの範囲が定められなかったため

である。つまり、TDC 分布のカットを考えたときのように 2 次元ヒストグラムを描いてもカットを決めることはできない。そこで、検出効率が外部トリガーの ADC 値によってどのように変わるのかを調べた。検出効率の求め方は 5.4 で記した通りで、lower の ADC 分布でも同様に求めることができる。求めた結果が図 5.12 である。全体での検出効率は

$$\text{検出効率} = 662/715 = 91.2^{+1.1}_{-1.2}\%$$

であり、FEM の BCO から求めた検出効率と一致している。

ここで、ADC 値が小さくなると検出効率が下がる。この範囲 (矢印：緑) での検出効率は

$$\text{検出効率} = 405/458 = 88.4^{+1.5}_{-1.7}\%$$

と求まり、逆に 320 以上の検出効率が高い範囲 (矢印：青) での検出効率は

$$\text{検出効率} = 246/256 = 96.1^{+1.2}_{-1.6}\%$$

と求まる。

320 より大きい範囲と小さい範囲では、セットアップ条件で何が違うのかを考えた。5.12 と 5.13 より、INTT に対して垂直に入射する宇宙線は長い間 lower 内を通るため、ADC の値は大きくなり (矢印：青)、斜めに入射する宇宙線は下の外部トリガー内を通る距離が短いため、ADC の値は小さくなる (矢印：緑)。垂直に入射する宇宙線のみを取るように入射をカットをかければ、より INTT を通る粒子に限定することができると考え、実際に 320 以上というカットをかけた際に INTT 中心部にヒットする宇宙線に限定できているのかを調べた (図 5.14)。この図は下の外部トリガーにカットをかけた際の宇宙線のヒット数の分布を表している。上の 2 つのグラフは chip 番号 1 - 13 の chip にヒットした宇宙線の個数を合計したもの、下の 2 つのグラフは 14 - 26 にヒットした個数を合計したものである。4 つのグラフそれぞれ横軸は宇宙線のカウント数、縦軸は INTT のチャンネル番号になっているが、INTT のチャンネル番号の振り方が反転しているため、上半分のグラフは縦軸を反転させることで、本来のシリコンセンサーの並びを視覚的に捉えやすくした。この図を見ると、確かに 320 以上というカットをかけると中心にヒットする宇宙線に限定できていることがわかる。

この結果より、下の外部トリガーの ADC 分布のカットは 320 以上という条件とし、この条件も含めて FEM の BCO で検出効率を求める。

5.5.5 検出効率の導出

ここまでで全ての分布でカットを決めることができたので、これらを適用した検出効率を導出した結果、

$$\text{検出効率} = 179/186 = 96.2^{+1.4}_{-2.0}\%$$

と求まった (図 5.15)。この値は先行研究 (ビームテスト) 時の結果と同程度の検出効率である。

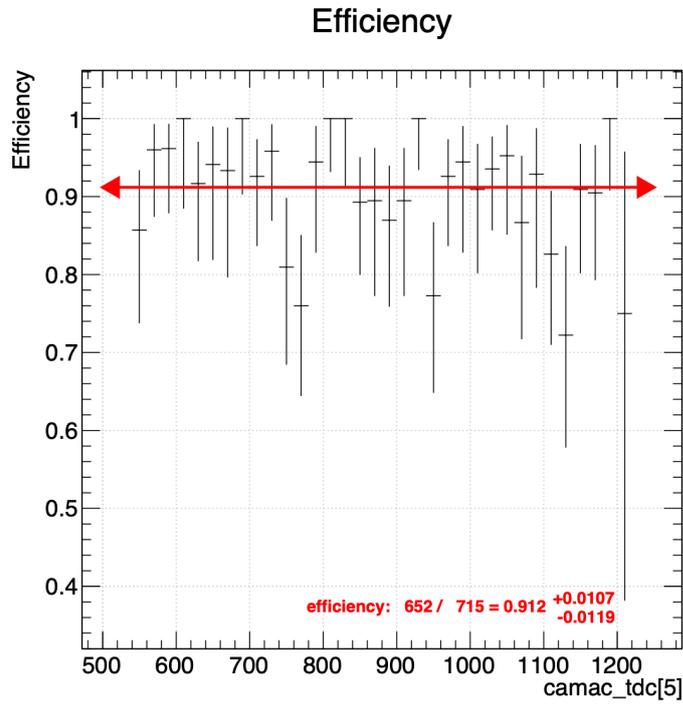


図 5.11 下の外部トリガーの ADC 分布以外のカットを適用した検出効率の分布。

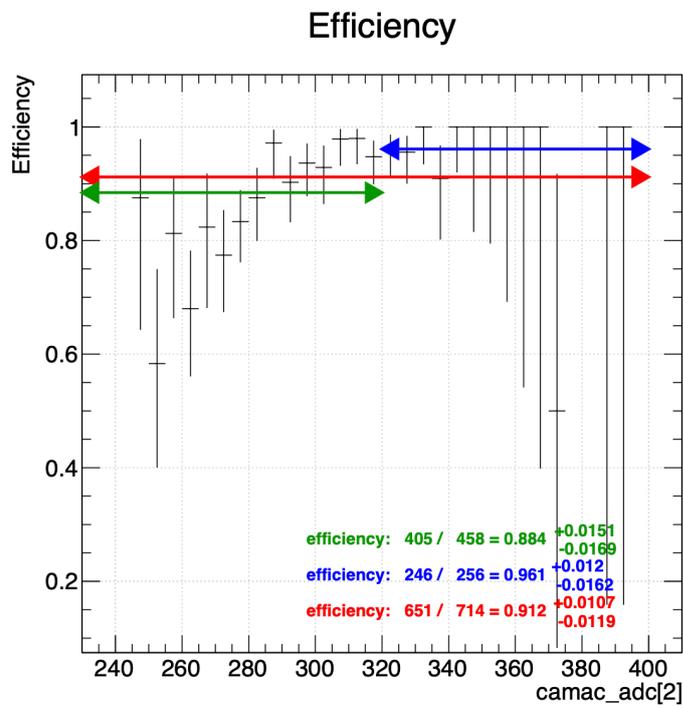


図 5.12 下の外部トリガーの ADC から求めた検出効率。

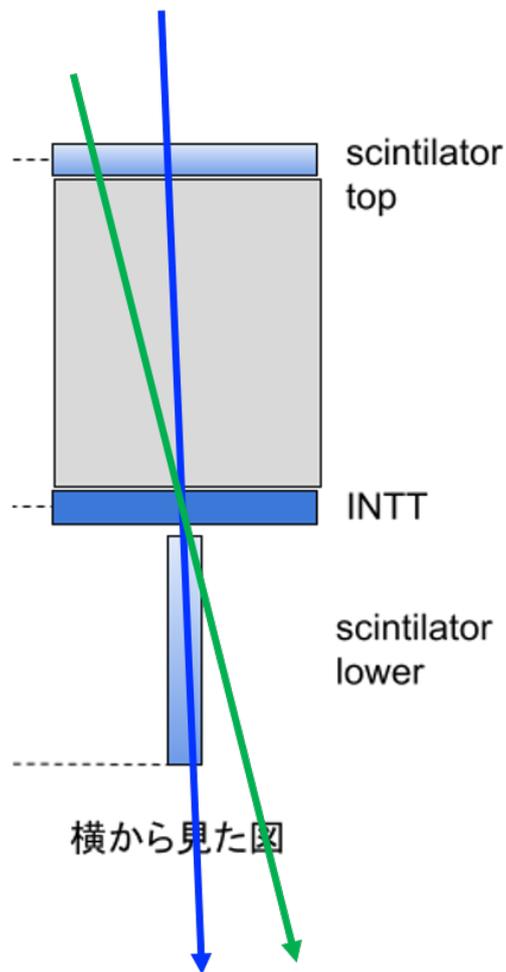


図 5.13 宇宙線の通り方と ADC 分布の関係。

5.6 外部トリガー 3 つを用いた測定

2つの外部トリガーを用いた測定で、先行研究と同程度の検出効率を出すことはできたが、まだバックグラウンドが残っておりそれを減らす必要がある。そこで外部トリガーの数を3つに増やし、より確実にINTTを通る宇宙線を測定できるようにした。セットアップは図5.16に示す。

2つのシンチレーターを用いた測定で使用していたtopとINTTの間に新たにupperというシンチレーターを設置した。このシンチレーターは縦と横の長さは他の2つのシンチレーターと同じであるが、厚さが2.5 mmと半分になっているため、荷電粒子が通過した際の発光量も他の2つのシンチレーターの半分になる。upperはCAMACのADC及びTDCのch 1に信号がいくように接続する。つまり、5.4のPMT 2がupperに該当する。

このセットアップで、外部トリガー2つの場合と同様にカットを決める。ADC分布とTDC分布と決めたカットは図5.17と図5.18に示す。lowerのADC分布は外部トリガー2つの場

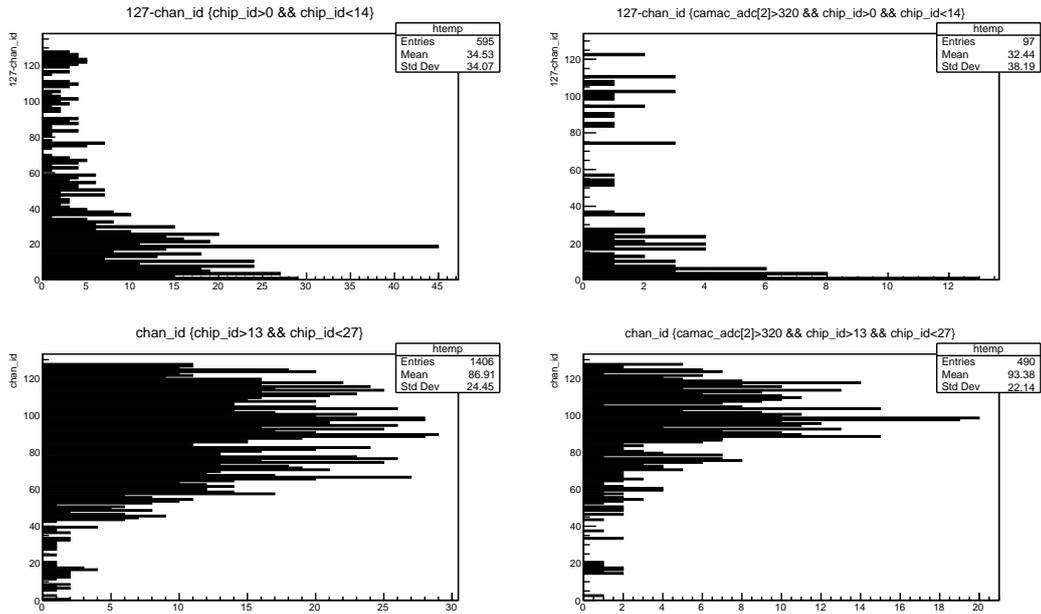


図 5.14 下の外部トリガーにカットをかけた際の宇宙線の限定。

上の 2 つのグラフは chip 番号 1 - 13 の chip にヒットした宇宙線の個数を合計したもの、下の 2 つのグラフは 14 - 26 にヒットした個数を合計したものである。4 つのグラフそれぞれ横軸は宇宙線のカウント数、縦軸は INTT のチャンネル番号になっているが、INTT のチャンネル番号の振り方が反転しているため、上半分のグラフは縦軸を反転させることで、本来のシリコンセンサーの並びを視覚的に捉えやすくした。この図を見ると、確かに 320 以上というカットをかけると中心にヒットする宇宙線に限定できていることがわかる。

(左：カット前、右：カット後)

合と同様に検出効率からカット範囲を求める。lower の ADC から求めた検出効率は図 5.19 に示す。ADC 値が 320 以上の範囲 (矢印：青) で検出効率が高く、

$$\text{検出効率} = 569/599 = 97.4^{+0.9}_{-1.3}\%$$

であるため、外部トリガー 2 つの場合と同様に 320 以上をカットとする。

以上でカットが決まり、ADC 分布は top が 150 ~ 220、upper が 180 ~ 230、lower が 320 ~、TDC 分布は top が 203 ~ 209、upper が 190 ~ 205、lower が 180 ~ 204 となった。このカットを適用させて検出効率を導出すると、

$$\text{検出効率} = 238/244 = 97.5^{+1.0}_{-1.4}\%$$

と求まる (図 5.20)。外部トリガーの数を増やすことで、検出効率が高くなる。

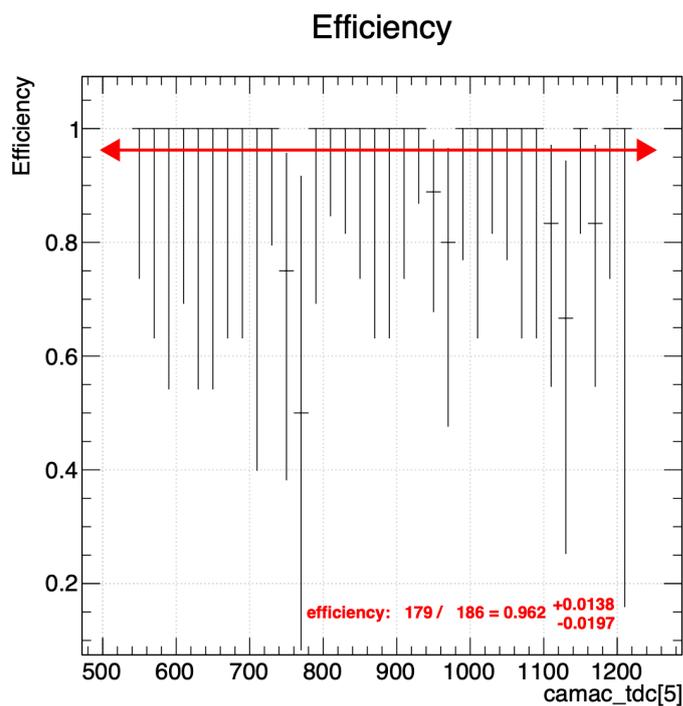


図 5.15 全てのカットを適用した検出効率

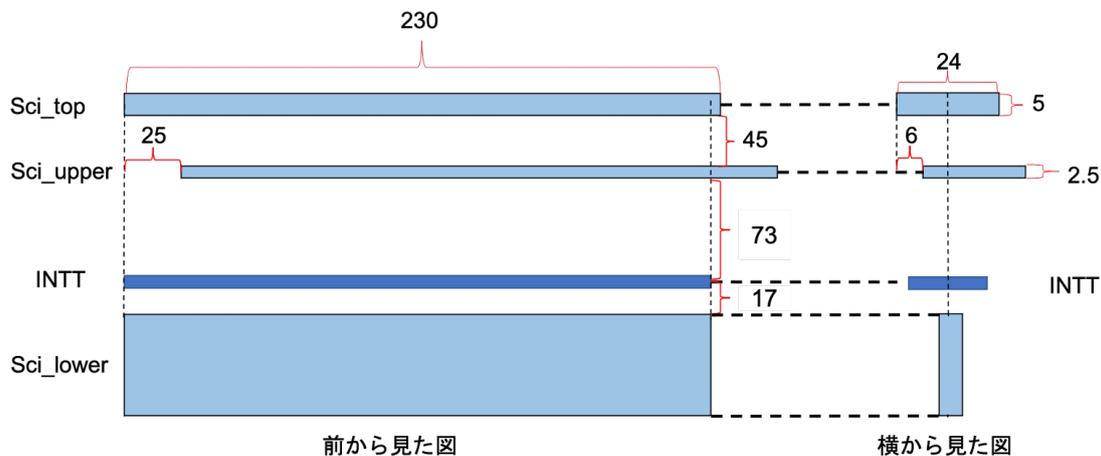


図 5.16 シンチレータを3つ設置した際のセットアップ。(単位 mm)

5.7 まとめ

テストベンチに新しく外部トリガーを用いた検出効率測定を行えるように、NIM や CAMAC の回路を導入することができ、DAQ にトリガー情報を追加できた。このことにより、以前より詳細に宇宙線を用いた検出効率測定を行えるようになった。検出効率を求めたところ、外部トリガー 2

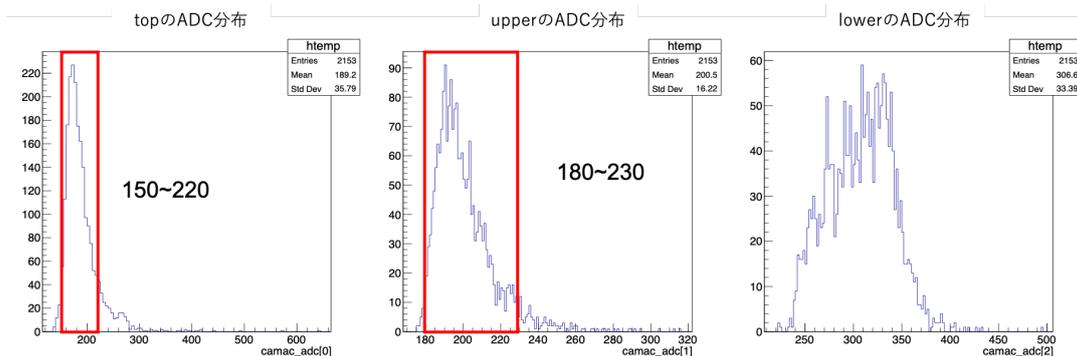


図 5.17 外部トリガー 3 つの場合の各トリガーの ADC 分布。

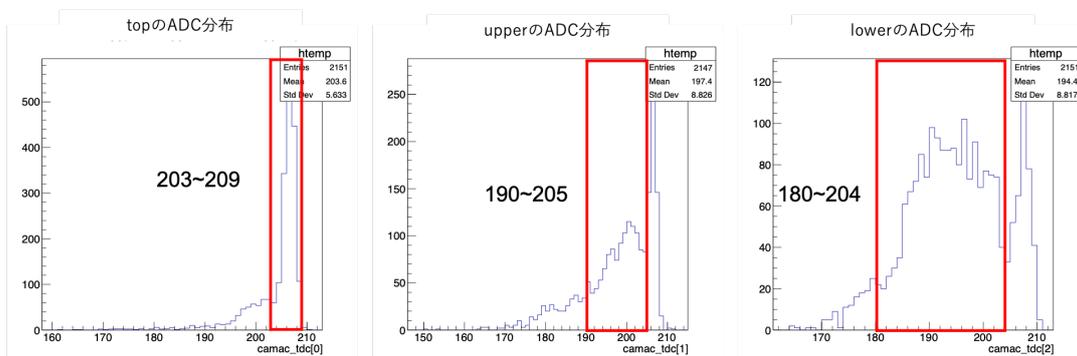


図 5.18 外部トリガー 3 つの場合の各トリガーの TDC 分布。

つの場合で先行研究と同程度の検出効率を求めることができ、さらに外部トリガーの数を増やすとより高い検出効率を求めることができた。

5.8 今後の課題

本研究では、INTT の検出効率 100 % を求めることはできなかった。考えられる原因として、INTT のシリコンセンサー 26 個の中で特定のセンサーだけが検出効率 100 % に満たないものがあるということである。しかし、現在のセットアップではセンサー別で検出効率を調べることができない。センサーの位置による検出効率の違いを調べるためには、現在シンチレーターの片側にのみ付けている PMT を、シンチレーターの両側に付ければ良い。これにより、PMT の読み出し時間差を用いて位置を特定することができる。このようにセットアップを改良して測定をし検出効率を求めると、より詳細な分析ができると考える。また、本研究はデータ数が少なかったため統計誤差が大きい。今後測定をする場合は同じ条件で多くのデータを収集し解析するべきである。

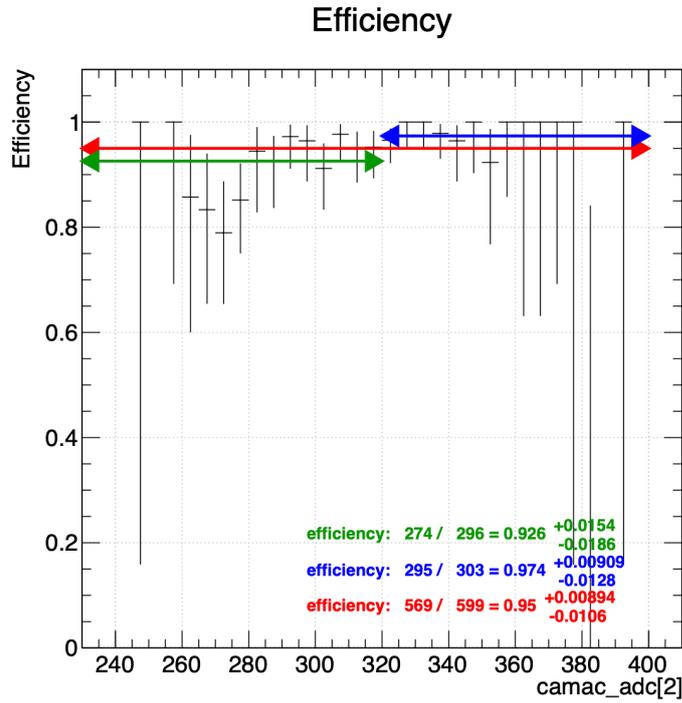


図 5.19 外部トリガー 3 つの場合に lower の ADC 分布から求めた検出効率。

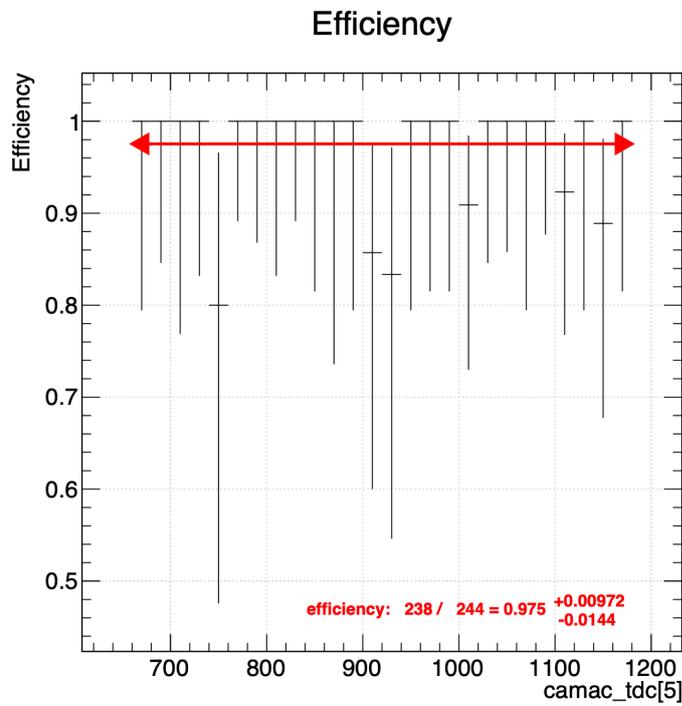


図 5.20 外部トリガー 3 つの場合に全てのカットを適用した検出効率。

第6章

謝辞

本研究を進めるにあたりたくさんの方にお世話になり、支えていただきました。

この1年間大学への入構が制限される中、最後まで研究を支えてくださった林井先生、宮林先生、下村先生、蜂谷先生に感謝いたします。特に指導教員をしてくださった蜂谷先生には本当にお世話になりました。例年より直接実験室でお会いできる機会が少なかったですが、限られた時間の中で研究に必要な知識をたくさん教えていただきました。大学院に進学した後にも大切な研究することに対する意識も蜂谷先生から学ばせていただきました。また、INTTグループの秋葉さん、中川さん、糠塚さんにもたくさんお世話になりました。毎週のミーティングの際に、研究をどのように進めていけば良いのか常にアドバイスしてくださいました。特に糠塚さんは、この研究の共同研究者として支えてくださいました。毎日のようにわからないことを質問していましたが、すぐに返信いただき研究をスムーズに進めていくことができました。INTTグループの先輩である森田先輩、柴田先輩には実験について何もわからなかった時から丁寧に様々なことを教えていただきました。同学年で同じINTTグループで頑張ってくれた並本さんとは、毎日励ましあいながら研究していました。何度も大変なことがありましたが、並本さんがいてくれたから最後まで頑張ることができました。そのほかにも、研究室で同学年のみんなにはいつも励ましてもらいました。友達と自由に会えない1年間でしたが、研究室の友達がいてくれたから毎日楽しい日々を過ごせました。最後になりましたが、これまで大学に通わせてくれてこの1年間も毎日支えてくれた家族に感謝します。

これから大学院では別の実験に参加して研究を進めていきますが、この研究室での経験はこれからも役に立つと思います。今まで本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] PDG 2020 Passage of Particles Through Matter.
- [2] PDG 2020 AtomicNuclearProperties.
- [3] 鈴木彩香 2020 「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.
- [4] 一色萌衣 呉羽広子 杉野和音 2019 『RHIC-sPHENIX 実験における INTT シリコンモジュールの性能評価とテストベンチ構築』, 卒業論文, 奈良女子大学.
- [5] 森田美羽 2020 「RHIC-sPHENIX 実験におけるバスエクステンダーの性能評価」, 卒業論文, 奈良女子大学.
- [6] 柴田実香 2020 「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」, 卒業論文, 奈良女子大学.
- [7] 並本ゆみか 2021 「放射線源を用いた sPHENIX 実験-中間飛跡検出器 INTT 用シリコンセンサーの性能評価」, 卒業論文, 奈良女子大学.
- [8] 長島徹 2015 『RHIC-sPHENIX 実験 Run15 における FVTX 検出器を用いた高多重度トリガーシステムの開発と陽子 + 陽子衝突系における方位角異方性の検証』, 修士論文, 立教大学大学院.
- [9] 益田英知 2017 「RHIC-sPHENIX 実験におけるシリコンストリップ検出器の開発」, 修士論文, 立教大学大学院.
- [10] 秋葉康之 2014 『クォーク・グルーオン・プラズマの物理実験室で再現する宇宙の始まり』, 共立出版.