

修士論文

ILC 測定器用ハドロンカロリメータ検出層の性能向上に
関する研究および宇宙線試験装置の開発

Study on performance improvement of HCAL active layer
for ILC detector and development of cosmic-ray test stand

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻

大谷研究室 35-166104

劉 靈輝

平成 30 年 2 月 13 日

概要

本研究では国際リニアコライダー (ILC) 計画の検出器案 ILD におけるアナログハドロンカロリメータの検出層の研究開発を行った。

ILC 計画は全長 31 km にわたる線形加速器を用いて電子陽電子を加速衝突させ、Higgs 粒子や top クォークなどの精密測定や新粒子の直接探索を行うことで標準模型を超える新物理を発見することを目的とする国際共同実験計画である。ILC の目的とする物理現象の多くは終状態に複数のハドロンジェットを含むため、これらのジェットのエネルギーを精度よく測定することが ILC における精密実験にとって重要となる。

ILD ではハドロンジェットのエネルギー分解能を大きく向上するために、ジェットの構成する粒子を一つ一つ識別して再構成し、それぞれの粒子に最も適した検出器を用いてエネルギーを測定する。これを実現するためにはハドロンカロリメータにも高い粒子識別能力が必要であり、そのために高精細な読み出しを持つハドロンカロリメータの開発が進められている。

本研究では、3つのテーマを掲げ、このハドロンカロリメータの性能向上のための研究を行った。技術開発という面においては、細かい読み出しを行うための大量生産に適したシンチレータの性能向上を行い、ハドロンカロリメータでの使用に耐える大きな発光量を持つシンチレータを開発した。また検出層のデザインについて、デザインを考える上で重要な問題となる光漏れをシミュレーションに実装し、光漏れが検出器の性能に与える影響を初めて定量的に評価し、同時に検出層デザインに定量的な指標を設けた。そしてこれらを含むこれまでに研究されてきた様々な技術を統合し建設される大型試作機の性能を確認するために、その大量の読み出しチャンネルを詳細に試験校正することの出来る、高い位置分解能を持つ試験装置を開発した。

これらの研究を通して ILC における高精細ハドロンカロリメータの性能向上に大きな貢献を果たした。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	国際リニアコライダー	1
1.2	ILC における検出器	3
1.2.1	International Large Detector	3
1.2.2	Particle Flow Algorithm	5
第 2 章	AHCAL	9
2.1	ハドロンカロリメータ	9
2.1.1	HCAL の設計	9
2.1.2	AHCAL の構造	10
2.2	高精細 AHCAL 検出層	11
2.2.1	シンチレータ	11
2.2.2	SiPM	11
2.2.3	HBU	12
2.2.4	HBU の DAQ	14
第 3 章	シンチレータ発光量の最適化	16
3.1	有機プラスチックシンチレータの成形と発光量	16
3.1.1	キャスト成形	16
3.1.2	射出成形	16
3.2	高性能射出成形シンチレータの開発	16
3.2.1	有機プラスチックシンチレータと発光剤	17
3.2.2	先行実験	17
3.2.3	測定セットアップ	19
3.2.4	測定方法	21
3.2.5	結果と考察	23
第 4 章	タイル間の光漏れの影響	27
4.1	新しい検出層デザイン案	27
4.1.1	ベースラインデザインの光漏れ	27
4.1.2	メガタイル	27
4.1.3	コーナー読み出しデザイン [9]	29
4.2	シミュレーション	32
4.2.1	iLCSoft	32
4.2.2	シミュレーションセットアップ	33
4.2.3	光漏れの影響の定性的な理解	34
4.3	再構成アルゴリズムの較正	35
4.3.1	再構成パラメータの較正	35
4.3.2	Software Compensation	35

4.4	結果と考察	36
第 5 章	宇宙線試験装置開発	39
5.1	概要	39
5.1.1	AHCAL 大型試作機	39
5.1.2	宇宙線を用いた大量試験	40
5.2	試験装置の開発	40
5.2.1	原理	40
5.2.2	設計	41
5.2.3	DAQ	43
5.2.4	解析手法	45
5.3	宇宙線カウンタの性能評価	47
5.3.1	実験セットアップ	47
5.3.2	宇宙線カウンタ内でのシンチレーション光の減衰	47
5.3.3	位置の再構成	48
5.3.4	ファイバー間の再構成の線形性	48
5.3.5	カウンタ端のヒット	50
5.3.6	系統誤差の評価	52
5.4	HBU の試験	55
5.4.1	実験セットアップ	55
5.4.2	角度補正	57
5.4.3	HBU 試験結果	57
5.4.4	Mainz での宇宙線試験との比較	58
5.4.5	タイル間の光漏れ	59
5.5	結論	61
第 6 章	結論	63

第1章 序論

1.1 国際リニアコライダー

国際リニアコライダー実験 (ILC: International Linear Collider) は現在計画中の次世代電子陽電子加速器を用いた高エネルギー物理実験である。図 1.1 のように長大な線形の加速器であり、その全長は 31 km にも及ぶ。ILC では電子と陽電子を生成してそれぞれ加速し、重心エネルギー 250 GeV で衝突させることで生じる物理を観測する。線形加速器であるため加速部分を拡張することでエネルギーの拡張が可能であり、将来的には TeV スケールでの物理探索も行うことができる。



図 1.1: ILC 実験の概観 ©Rey.Hori

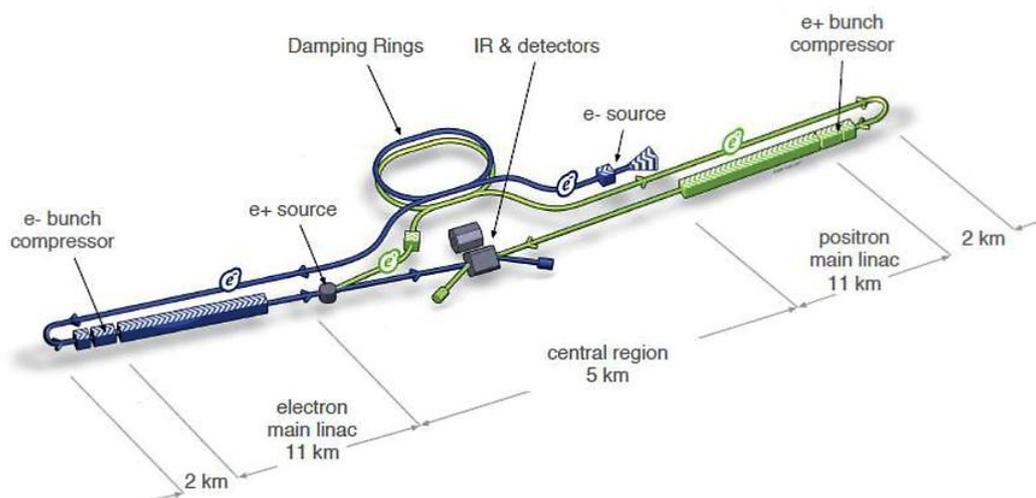


図 1.2: ILC 加速器の構成

ILC の加速器は図 1.2 に示すように、電子、陽電子源、ダンピングリング、メイン加速器等を含む。ILC での加速には図 1.3 にあるような超伝導加速空洞が用いられる。超伝導加速空洞は高純度のニ

オブを用い、2 K の超伝導状態での運用によって 31.5 MV/m の強電場による加速を行うことができる。



図 1.3: 超伝導加速空洞

ILC は線形加速器であるためそれぞれの粒子の衝突機会は一度きりである。ビームをより多く衝突させ統計数を得るために、ILC の加速器ではビームの大きさを厚み 6 nm にまで絞り輝度を高める試みがなされている。これらの加速器技術は日本の KEK、アメリカの SLAC 等で研究が行われており、要求される水準に近い値が達成されている。

Large Hadron Collider(LHC) に代表されるハドロンコライダーでは、ハドロンに内部構造があるため粒子同士の衝突過程が複雑であり、加速して与えた全エネルギーのうち一部しか求める反応に参与しない、主反応を起こした粒子以外が散乱しバックグラウンドとなるハドロンジェットを作る、などの問題があった。ILC は加速衝突させる粒子として内部構造のないレプトンを用いる事で、背景事象の少ない環境での実験を行い、ハドロンコライダーに比べより精密な測定を可能にする。図 1.4

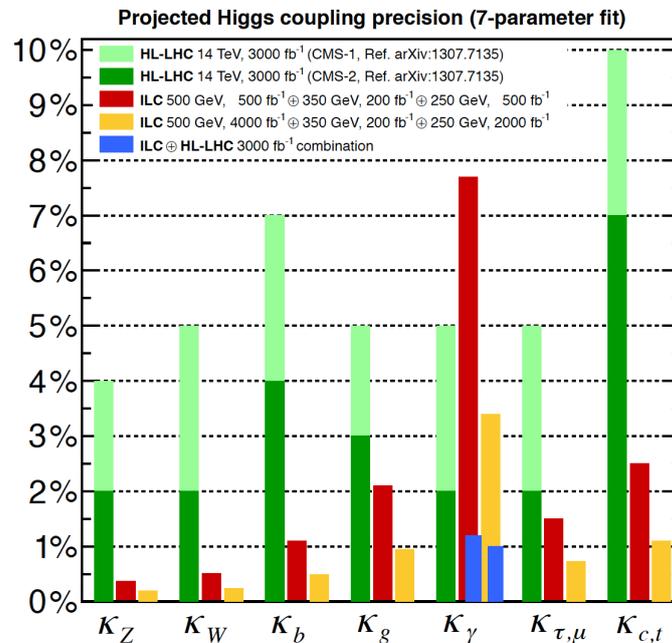


図 1.4: Higgs の結合定数の測定精度 [1]

は、現在アップデートが行われている High Luminosity LHC (HL-LHC) と ILC の測定精度を比較したものである。高い輝度での運用によって ILC では多くの Higgs の結合定数について 1% 以下の精度を達成でき、また統計が少なく十分な精度に到達できない γ との結合定数についても HL-LHC との協力によって 1% の精度にまで達することができる。

また、ILC は生成する電子や陽電子の偏極を調整できるという特徴がある。偏極を調整することにより、 $e^+e^- \rightarrow \nu_e \bar{\nu}_e h$ のような W の関わる反応などを促進、抑制することができ、選択的に反応を起こし観測をすることができると期待されている。

ILC では Higgs や top quark の質量、結合定数などの精密測定、また暗黒物質の直接探索等を通して新しい物理を解明する事を目的としている。

1.2 ILC における検出器

ILC における検出器として、International Large Detector (ILD) と Silicon Detector (SiD) の 2 種類が提案されている。基本的なコンセプトは共通しているが、主な相違点として飛跡検出器の技術が異なり、ILD はより大型の検出器を用いて、SiD はコンパクトな検出器に強い磁場をかけて、それぞれ高い分解能を達成する。ILD は主に日本やヨーロッパで研究開発が進められ、SiD はアメリカを中心に研究がなされている。我々は ILD のカロリメータの研究を行っている。

1.2.1 International Large Detector

ILC における測定器としてデザインされている ILD (International Large Detector) はバーテックスステディテクター、飛跡検出器、カロリメータ、ミュオン検出器を組み合わせた多目的検出器である。図 1.5 に示すような形をしており、直径 15 m、幅 13 m にも及ぶ。図 1.6 は ILD の断面図であり、ビームの衝突点に近い側から順に、バーテックスステディテクター、TPC、カロリメータと並んでいる。カロリメータの外側にはソレノイドコイルが置かれ、コイル内部にビームラインと平行な 3.5 T の磁場をかけている。

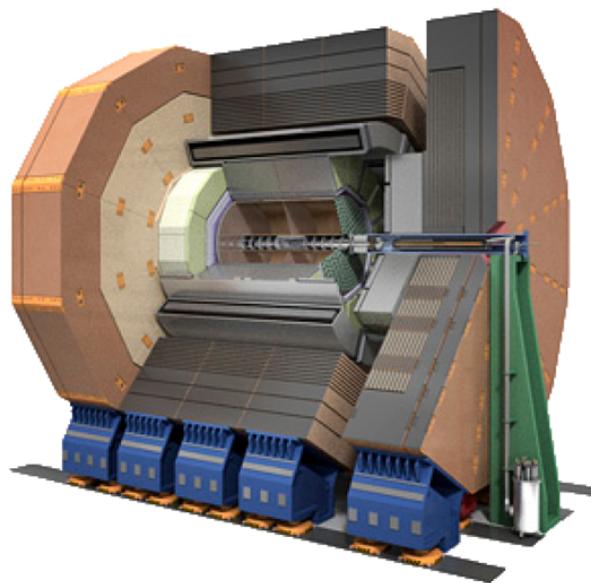


図 1.5: ILD の全体像 ©Rey.Hori

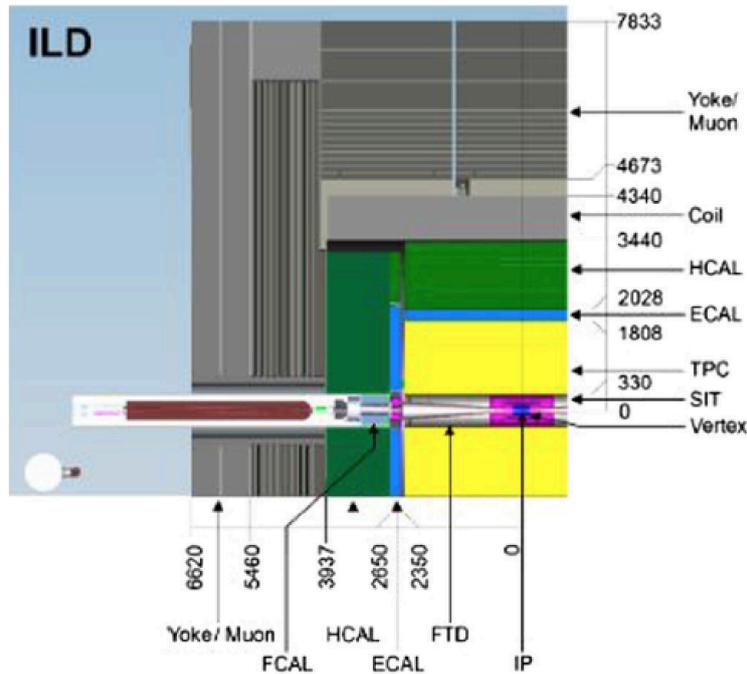


図 1.6: ILD 断面図 [2]

バーテックスディテクター

バーテックスディテクターはビームラインに最も近い位置に置かれるピクセル状の半導体検出器である。ビームの衝突点から 16 mm から 60 mm までの範囲に 3 層が置かれ、それぞれが $5 \mu\text{m}$ 以下の分解能を有する。荷電粒子の飛跡を細かく調べることで一次粒子の崩壊した位置を再構成することを主目的としている。

特にハドロンジェットについて、charm や bottom クォークは寿命が 10^{-12} s のオーダーであり、崩壊までに数百ミクロンを飛ぶことができる。バーテックスディテクターによる一次粒子の崩壊位置の特定は、これらの重いクォークの識別に有用である。また top クォークについては、寿命は短いほぼ全てが $t \rightarrow bW$ と崩壊するため、同様の識別が可能である。

飛跡検出器

飛跡検出器は磁場中での荷電粒子の飛跡を調べることで荷電粒子の運動量を精度よく求めるための検出器である。ILD では Time Projection Chamber (TPC) とその周囲を囲むようにして配置される半導体検出機を用いて飛跡の情報を 3 次元的に測定する。また、TPC の重要な特徴として、飛跡のトラッキングのみではなく検出されたシグナルの大きさから通過した粒子の dE/dx を調べ、粒子の識別を行うこともできる。

カロリメータ

カロリメータは粒子のエネルギーを測定するための検出器であり、光子や電子、陽電子のエネルギーを測定する電磁カロリメータ (ECAL) と、ハドロンエネルギーを測定するハドロンカロリメータ (HCAL) に分けられる。カロリメータは高エネルギーの入射粒子を物質中で相互作用させてシャワーを起こし、一つ一つの粒子のエネルギーを落としてその全エネルギーを測定する、という

手法でエネルギーを測定する。ILD で用いられるカロリメータはサンプリングカロリメータと呼ばれ、鉄やタングステンなど密度の高い物質で作られる吸収層とエネルギーを測定する検出層をバウムクーヘンのように交互に配置する。入射した高エネルギー粒子が吸収層と相互作用してシャワーを形成し、そのシャワーの形やエネルギーを検出層で測定することにより入射粒子のエネルギーを求めることができる。

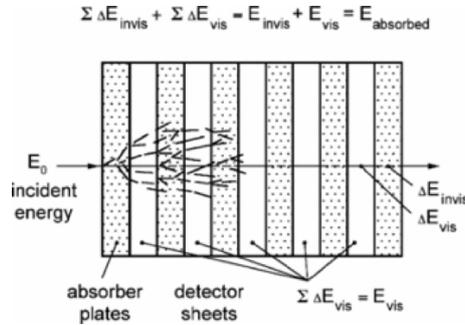


図 1.7: カロリメータの動作原理 [3]

フォトンや電子などは物質と電磁相互作用をするため、相互作用長が短く、短く狭い範囲に密なシャワーを作る。ECAL はこのエネルギーを高精度で測定するために多数の検出層を狭み細かい読み出しを行う。一方ハドロンは強い相互作用によってシャワーを生成するため、断面積が小さく、また反跳によってシャワーが広がりやすいため広い範囲に密度の小さいシャワーを作る。HCAL では相互作用長の大きいハドロンのエネルギーをカロリメータの内部で測定する必要があるため、吸収層の厚みも数も大きく造られる。

図 1.8 は ILC について研究されている様々なカロリメータの技術をまとめたものである。吸収層の材質としては鉄とタングステンの 2 種類が挙げられている。タングステンは若干高価だが鉄よりも密度が大きくカロリメータをコンパクトに作ることができるため ECAL に主に用いられる。ILC のカロリメータは後述するように読み出しを細かいピクセルに区切って位置分解能を大きく高めたデザインである。読み出しセルの大きさが十分に小さければ、シャワーのエネルギーはシグナルを検出したセルの個数に比例するという研究があり [4]、そのため検出器にヒットしたエネルギーをアナログに読み出す以外にも、一定の閾値を超えたかどうかのみを記録するデジタル読み出しを行うことができる。

1.2.2 Particle Flow Algorithm

ILC の特長の一つは背景事象の少ない環境で精密な測定を行うことができる点である。その中で Higgs の生成に大きく関わる Z や W ボソン、また top quark の精密測定を行う際に重要になるのがハドロンジェットのエネルギー分解能である。ジェットは生成されたクォークが多重に相互作用を起こしながら多数のハドロン、フォトン、レプトンとなって飛ぶ現象である。このうちジェットのエネルギーのおよそ 70% を構成するハドロンはカロリメータ内でのシャワー粒子数が少なく、また相互作用過程が複雑であるため測定の揺らぎが大きい。そのためジェットのエネルギーを高精度で測定しようとする際にハドロンのエネルギー測定が大きな障害となってしまう。

これを解決するための画期的な手法として Particle Flow Algorithm (PFA) [5] が開発された。図 1.9 の左のように、従来のジェットのエネルギーは ECAL と HCAL で測定されたエネルギーの和として求められていた。表 1.1 に検出器ごとのエネルギー分解能をまとめた通り [6]、ILC で扱う物理のエネルギー帯では、荷電粒子のエネルギーは飛跡検出器によって最も精度良く測定することがで

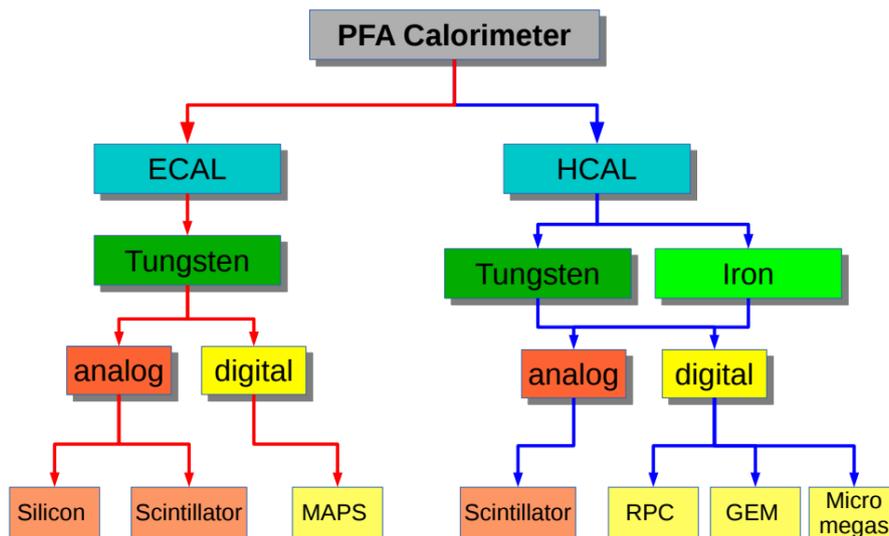


図 1.8: カロリメータの技術 [2]

表 1.1: 検出器ごとのエネルギー分解能

検出器	エネルギー分解能
飛跡検出器	$10^{-4}E(\text{GeV})$
ECAL	$\frac{15\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}}$
HCAL	$\frac{55\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}}$

きる。PFA の考え方は、入射する粒子一つ一つのシグナルを分別し、それぞれの粒子に最も適した測定器を用いてエネルギーを測定するというものである。すなわち、荷電粒子を飛跡検出器で、 γ を ECAL で、中性ハドロンを HCAL で、それぞれ測定することにより、ジェット全体のエネルギー分解能を大きく向上させることができる。図 1.10 は LHC における CMS 実験で PFA を用いたときのエネルギー分解能の向上をシミュレートした結果である。CMS の検出器は PFA のために最適化されていないが、PFA に特化させた ILC の検出器ではさらに良いエネルギー分解能を得ることができる。

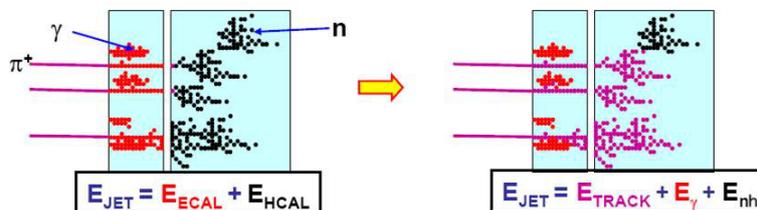


図 1.9: Particle Flow Algorithm の基本的な考え方。ECAL, HCAL 内のヒットを光子 (赤)、電子 (ここでは描かれていない)、荷電ハドロン (マゼンタ)、中性ハドロン (黒) に分類し分類に応じてエネルギー測定方法を変える。

典型的なハドロンジェットの中でハドロンはおよそ全エネルギーの 70% を占めるが、その内訳は 10% が中性ハドロン、60% が荷電ハドロンである。ハドロンの大部分をより良い精度で測定すること

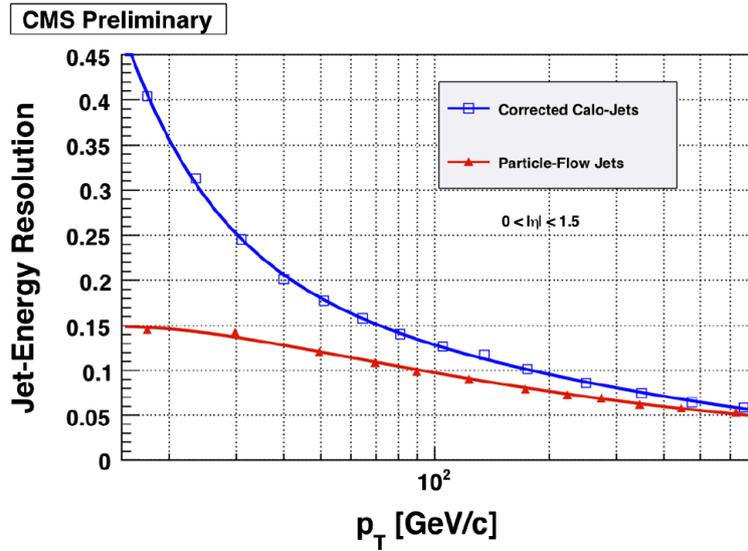


図 1.10: PFA を使った場合 (赤) と使わない場合 (青) のエネルギー分解能 [7], CMS バレル部分でのシミュレーション結果

で、ILC の検出器ではジェットのエネルギー分解能を全体で $\frac{30\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}}$ まで上げることを目標としている。

PFA の実現のためには、カロリメータにも高い粒子分別能力が要求される。そのために多数並べられた吸収層、検出層と高度にセグメント化された読み出しによって 3 次元的に高い位置分解能を持たせたカロリメータがデザインされ、研究されている。また、飛跡検出器とカロリメータの間に余分な物質が入らず、カロリメータ部分でも飛跡のトラッキングを行えるという点から、通常はカロリメータの内側に置かれるソレノイドコイルをカロリメータの外側に置いている。

図 1.11 は ILD モデルでのイベントディスプレイである。ECAL, HCAL での細かい読み出しによりカロリメータのヒットについて由来となる粒子の分別が可能となり、それらを飛跡検出器の飛跡と照合することで荷電粒子、中性粒子を見分けられる様子が見られる。

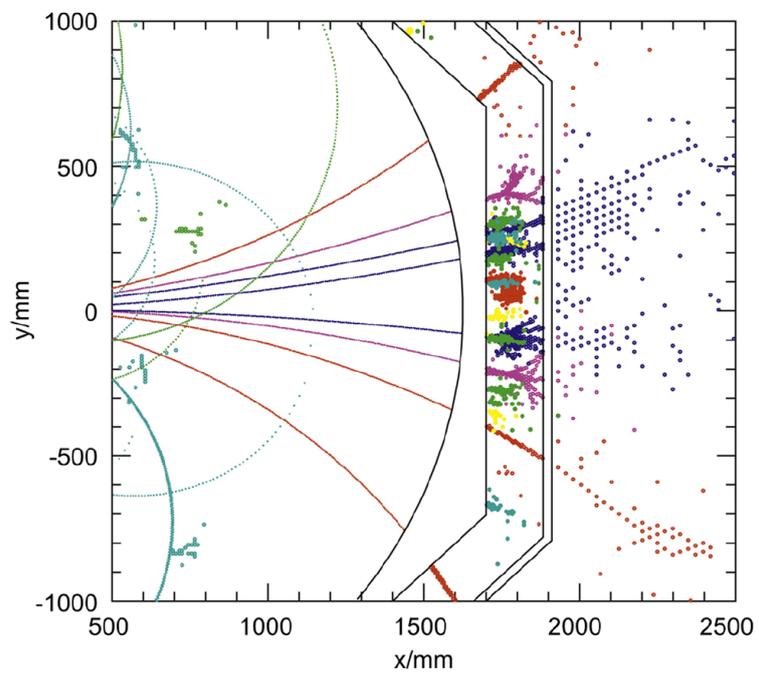


図 1.11: 高精細カロリメータを用いたイベントディスプレイ (シミュレーション)

第2章 AHCAL

Analog Hadron Calorimeter (AHCAL) は HCAL のために提案されている有力な技術のうちの一つであり、検出媒体としてシンチレータを用いて通過した粒子のシグナルをアナログに読み出す設計である。高精細な読み出しを実現するために 30 mm 角のタイル状に切り出されたシンチレータと、最新の高感度小型光センサである SiPM を用いている。

2.1 ハドロンカロリメータ

2.1.1 HCAL の設計

前章で述べたように、カロリメータは高エネルギー粒子を高密度の物質中で何度も相互作用させ、粒子群 (シャワー) を形成し全エネルギーを測定する。ハドロンカロリメータは電磁カロリメータよりも外側に置かれ、 e^\pm や γ よりも相互作用長の長いハドロンのエネルギーを測定するためのものである。ハドロンのエネルギーをカロリメータ内で測定しきるために HCAL は大きく作られ、吸収層として鉄を用いるデザインでは 48 層ずつの吸収層と検出層を並べ約 1 m の厚みとなる。

ハドロンの複雑な相互作用過程のためにカロリメータを用いたハドロンのエネルギー測定は難しく、PFA を用いた ILD の HCAL は荷電ハドロンのエネルギー測定を飛跡検出器に任せ中性ハドロンのエネルギーのみを測定することによって全体のエネルギー分解能を上げようと設計されている。しかしカロリメータには中性ハドロンも荷電ハドロンも飛来するため、それらのシグナルの分離が必要となる。図 2.1 は読み出しのセルの大きさによるエネルギー分解能の変化を、すべての検出器の入ったモデルでシミュレートされた結果である。30 mm まではセルを小さくすることで分解能が大きく改善するが、30 mm 以下の大きさでは分解能はほぼ変わらないという結果が得られ、読み出しセルの大きさが 30 mm に決定された。

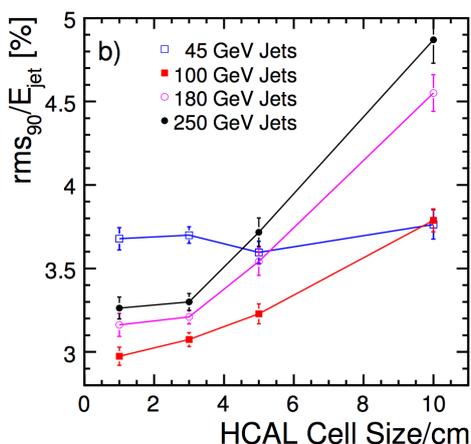


図 2.1: 読み出しセルの大きさの最適化 [2]

2.1.2 AHCALの構造

AHCALの主な部分はバレルと呼ばれる円筒状の構造であり、図2.2の緑の部分に示されるような形でビーム軸を囲むように置かれる。バレルは電子ビーム側と陽電子ビーム側の2つのバレルからなり、また各々はビーム軸周りの回転角 ϕ について16分割されている。

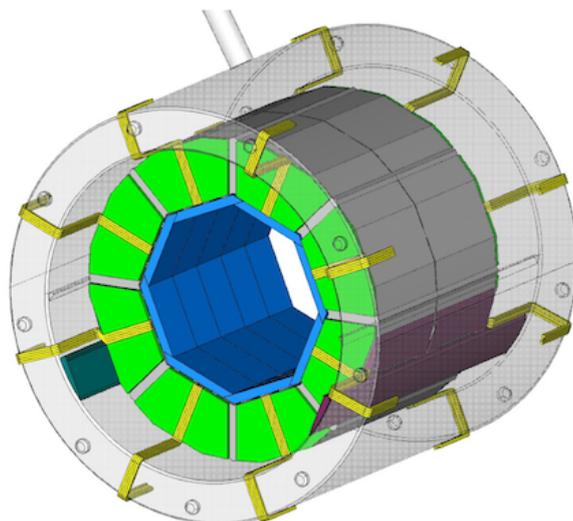


図 2.2: AHCAL のバレル部分 [8]

検出器の1単位は図2.3のようになっている。大部分のハドロンのエネルギーを外に逃がさずに測定するため、HCALは厚さ約1 m、48層の吸収層と検出層を持つ。検出層の制御やデータ読み出しは全て片側にまとめられ、ケーブルや制御ボードによるデッドスペースを可能な限り減らしている。

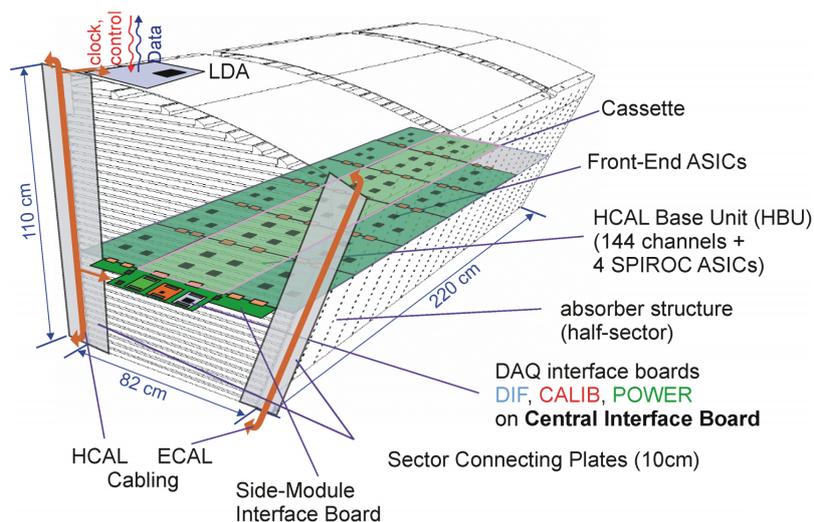


図 2.3: バレル部分の構造 [2]

バレル部分の両端にはエンドキャップと呼ばれる蓋がつけられる。エンドキャップはバレル部と同様に48層からなるカロリメータであり、ビーム軸に近い ($\cos\theta > 0.7$) 方向に飛びバレルでは捉えら

れない粒子を捉える。また、バレルとエンドキャップの隙間を埋める形で6層からなるエンドキャップリングが設置され、ILDの中心に位置する衝突点から飛来するほぼ全ての粒子を捉えることができる。

2.2 高精細 AHCAL 検出層

2.2.1 シンチレータ

AHCALの検出層にはプラスチックシンチレータを用いることが予定されている。30 mm角、3 mm厚のタイルは個別に反射材で包まれ、個々のタイルがそれぞれ独立に読み出される。このデザインではAHCALのシステム全体でおよそ800万枚のタイルが必要となり、製造、包装、配置の自動化が進められている。SiPMによるシンチレーション光の読み出しについては、図2.4の左右の写真にあるような中心読み出しと側面読み出しが研究されてきた。研究の結果、中心読み出しが応答の一様性も良く、アラインメントのズレによる影響も小さいことが理解され、現在はこちらが主流である。中心読み出しはシンチレータタイルの中心にディンプルと呼ばれる小さな窪みを作り、その窪みにSiPMが置かれシンチレーション光を検出する。



図 2.4: シンチレータタイル [9]。左は現在の標準である中心読み出しであり、右は側面読み出し。

2.2.2 SiPM

シンチレータからのシンチレーション光を読み出すために用いられるのが、小型光センサである Silicon Photo Multiplier (SiPM) である。SiPMはアバランシェフォトダイオードをピクセル上に整列したものであり、従来シンチレーション光の検出に用いられてきたPMTよりも小型ながら優れたフォトンカウンティング能力を持ち、読み出しの細分化に必要な不可欠な技術である。ILDのAHCALで現在採用されている標準的なSiPMは浜松ホトニクスが開発したMPPC(図2.5)であり、本研究でもSiPMにはMPPCを用いている。

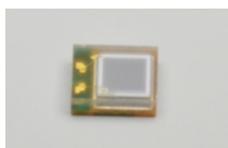


図 2.5: 表面実装型 MPPC (S13720-1325PS). 受光面 1.3 mm 角、25 μm ピクセルピッチ

図2.6はSiPMの波形の例であり、信号の大きさが離散化されフォトン一つ一つに対応するシグナルが観測できることがわかる。

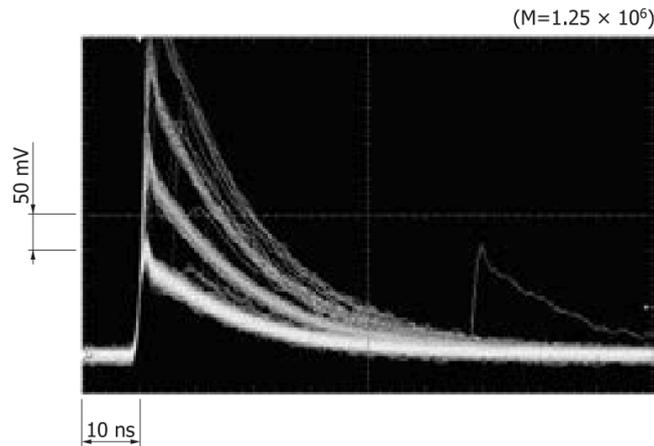


図 2.6: 暗室中で測定された MPPC の波形 [10]。シグナルはダークノイズとクロストークによるものと思われる。シグナルの大きさが光子数で綺麗に分離され、右にアフターパルスと思われる波形が見られる。

また、低電圧で稼働するため、電源や冷却システム等によって生じるデッドスペースを大きく削減することができる。SiPM のもう一つの特徴として、3 種類の固有のノイズ過程が存在することがあげられる。

ダークノイズ

SiPM は光が入射していなくても熱励起によって発生した電子がアバランシェを起こし信号を出力することがある。これは光子の入射と同じ過程を経て信号を出力するため、ダークノイズイベントと 1 フォトンイベントは原理的に区別することができない。ダークノイズはそれぞれのピクセルに一定の確率で発生する。

クロストーク

1 つのピクセルで発生したアバランシェ増幅の途中で電子と正孔が対消滅して発生した光子が隣のピクセルに入射してそこでアバランシェ増幅を起こしてしまうことがある。クロストークが起こると入射した光子の数よりも大きい数の光子が信号として検出されてしまう。

アフターパルス

増幅途中で電子が格子欠陥にトラップされ遅れて解放された際にもう一度アバランシェ増幅を起こすことがある。短時間で発生したアフターパルスはクロストークと同様に入射した光子の数を実際よりも多く見積もることにつながる。

2.2.3 HBU

AHCAL では大量の読み出しチャンネルを扱うために HCAL Base Unit (HBU) というモジュールが開発された。図 2.7 の上部にあるような正方形の部分が HBU の本体であり、1 枚の HBU は 12×12

に整列された 144 の SiPM を搭載し、それらは 6×6 ずつ 4 つの Application Specific Integrated Circuit (ASIC) によって制御されている。ASIC としてはフランス Omega 社の Silicon Photomultiplier Integrated Readout Chip (SPIROC) が採用されている。SPIROC は小型小電力で動作し、信号のチャージ測定、時間測定、自動トリガリングを備えている。1 枚の HBU は 144 チャンネルのシグナルをフロントエンドで加工してデータを送信することができ、データの圧縮やケーブル等のスペースの削減に大きく貢献している。HBU 同士は flexleads によって接続することにより、最大で 6 枚を直列に接続することができる。横方向にも 3 列を繋げ、最大で合計 18 枚の HBU を接続し読み出すことができる。また、HBU には各チャンネルに LED が取り付けられ、自身で SiPM の較正を行うことができる。

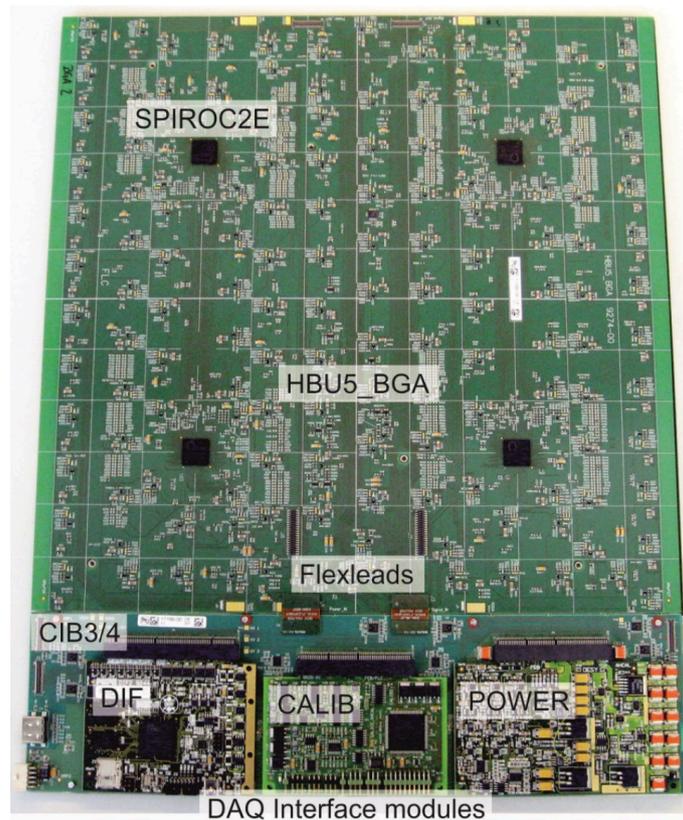


図 2.7: HBU

複数の HBU を並列して扱いデータを取得するために、幾つかの制御ボードが用いられる。図 2.8 に制御ボードの信号の流れを図解する。

DIF (Detector Interface)

DIF ボードには HBU への電源供給や較正用ボード、データ送信等のエレクトロニクスがまとめられており、1 枚の DIF で最大で 3×6 枚の HBU を動かすことができる。DIF ボードは図 2.7 の下に見られるように HBU の本体と flexleads を通して直接繋がっている。

LDA (Link Data Aggregation)

LDA は複数の DIF にコマンドを送信し、また DIF から送られるデータをパケットにまとめて PC に送るためのボードである。

CCC (Clock and Control Card)

CCC は AHCAL の DAQ の起点となる基板であり、LDA を介してすべての HBU に 40 MHz のマスタークロックや、スタートストップ等のシグナルを伝える。

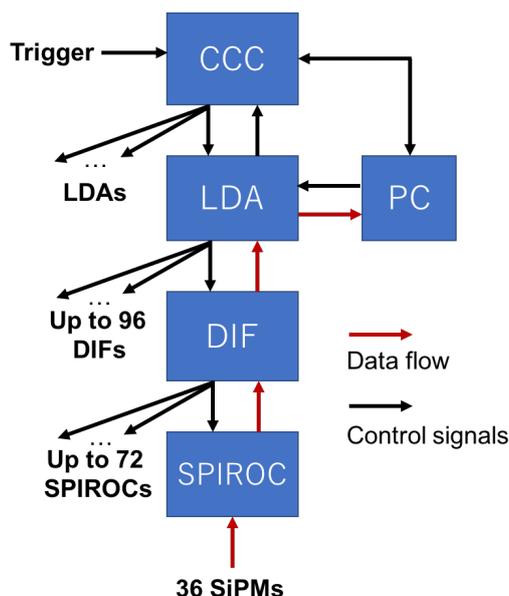


図 2.8: HBU の制御の流れ

2.2.4 HBU の DAQ

ILC のビームは 1 ms の出力と 199 ms の休止を繰り返すという構造をしている。これはビームの大きさや位置をナノメートル単位で調整する ILC において、電子陽電子源からの初期のビームの広がりやダンピングリングによって整えるために要する時間である。それに対応するように、HBU に搭載された SPIROC の DAQ は Read Out Cycle (ROC) と呼ばれる読み出しサイクルを繰り返して行われる。1 つの ROC では最大で 16 ms のデータ取得を行い、その後 40 ms ほどかけてデータの読み出しを行う。

HBU において得られたシグナルの時刻は Bunch Crossing ID (BXID) と TDC の値によって管理される。BXID はデータ取得開始時点から数えられる $4 \mu\text{s}$ のタイムウィンドウの番号であり、TDC は 1 つの BXID の中で 1000–4000 程度の値を動き細かい時間を記録する。TDC と実時間との対応は ASIC ごとに若干異なっており、計算機のタイムスタンプ等を利用して初めに較正しておく必要がある。

HBU のトリガーモードは自動トリガーと外部トリガーの 2 種類が存在する。

自動トリガーモードでは、あるチャンネルで閾値を超える信号が検出されると、対応する ASIC は決められたホールド時間後に ADC と TDC の値をホールドし、その BXID の終わりに 36 チャンネ

ルすべての値をメモリに記録する。1枚のASICは16イベント分のメモリセルを有しており、1つのASICのメモリセルが全て埋まるとLDA, CCCに信号が送られ、全てのHBUのデータ取得が停止しデータの読み出しが始まる。

外部トリガーモードでは自前のトリガーの代わりに外部からトリガー信号が送られ、それを使用してトリガーをかける。外部トリガーモードはLEDによるチャンネルの較正等、あらかじめ信号のタイミングがわかっている実験に用いられる。

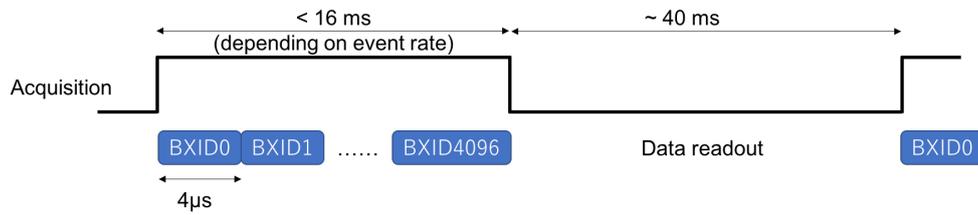


図 2.9: ROC の流れ

第3章 シンチレータ発光量の最適化

ILD AHCAL に用いられる読み出しチャンネル数は 800 万チャンネルと膨大な数であり、大量生産を念頭に置いたデザインをする必要がある。この章では大量生産に適した射出成形プラスチックシンチレータの性能を改善する試みについて述べる。

3.1 有機プラスチックシンチレータの成形と発光量

有機プラスチックシンチレータは、ベースとなるプラスチックに有機シンチレーション物質を溶かし込んだものである。プラスチックシンチレータの成形には幾つかの手法があり、市販されているプラスチックシンチレータの大部分はキャスト成形と呼ばれる手法を用いて成形されている。ここではプラスチックシンチレータの成形法と特徴について述べる。

3.1.1 キャスト成形

キャスト成形は液状の単量体や初期縮合物を型に流し込み、重合剤を加えることで重合反応を進めてプラスチックを製作する手法である。ベースとなるプラスチックは Polyvinyl toluene (PVT) が有名である。この成形法の主な利点としては、品質が安定し、透明度に優れシンチレータとしての発光量も多くなる。これまでの研究によってキャスト成形プラスチックシンチレータの発光量が AHCAL に用いるに十分な明るさであることが確認されている。また高温高圧等の特殊な設備を必要としないので小ロットの生産を低コストで行える、というものがある。しかし反対に大量生産を行おうとすると、1 回ごとにかかる時間と手間が大きく、コストも余分にかかってしまう。AHCAL では 800 万枚に及ぶタイルが必要であり、キャスト成形でこの量のプラスチックシンチレータを製作するのは現実的ではない。

3.1.2 射出成形

射出成形は加熱して可塑化させたプラスチックを金型に押し出し、成形、硬化させる手法である。主なプラスチック材料としては Polystyrene (PS) 等が挙げられる。射出成形の大きな利点は、金型さえ作ってしまえば短時間低コストで大量のプラスチックを成形できるので、大量生産に非常に適していることである。しかしキャスト成形と比べて品質に劣り、発光量も少なくなるためエネルギー分解能が低くなってしまう。

3.2 高性能射出成形シンチレータの開発

AHCAL では大量のシンチレータタイルを用いる必要がある、その生産には射出成形が適している。発光量を大幅に落とすことなく射出成形による大量生産を行うために、プラスチックシンチレータに添加する発光剤の濃度を変化させ、最適化する試みを行った。射出成形プラスチックシンチレータとしては、PS ベースに発光剤として p-Terphenyl (図 3.1), POPOP (図 3.2) を溶かし込んだもの

を使用した。また参照サンプルとして、キャスト成形プラスチックシンチレータである PVT ベースの市販のシンチレータ EJ-212 (Eljen Technology) [11] を使用した。

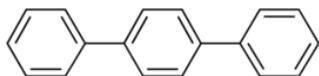


図 3.1: p-Terphenyl の構造式

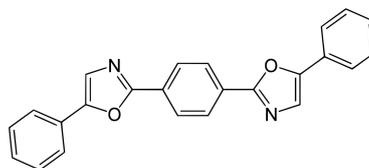


図 3.2: POPOP の構造式

3.2.1 有機プラスチックシンチレータと発光剤

PS のシンチレーション光は紫外領域にあり、その波長は一般的な半導体光センサや光電子増倍管の感度の外、あるいは感度の良くない領域にある。そのため発光剤を混ぜ込み波長を変換して光センサの感度領域へ移動させるということが行なわれている。ここで用いた p-Terphenyl, POPOP の吸収、発光スペクトルを図 3.3 に示す。

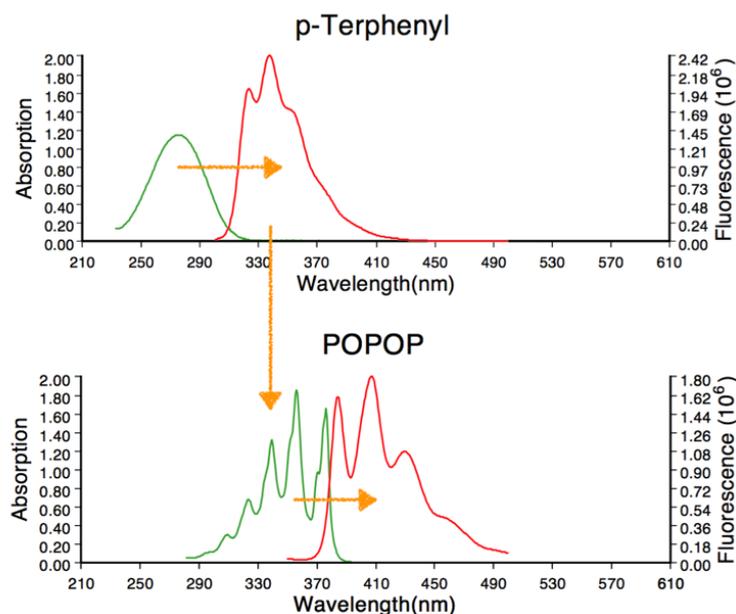


図 3.3: p-Terphenyl(上) と POPOP(下) の吸収、発光スペクトル [12]

また、浜松ホトニクス の MPPC の感度スペクトルを図 3.4 に示す。2 種類の発光剤によって PS の出す紫外光の波長を MPPC の最も感度の良い 450 nm 付近に移動させている。

3.2.2 先行実験

射出成形プラスチック材料についての先行研究 [13] では、ベースとなるプラスチックについて PS と Estyrene-MS の 2 種類の発光量を比較する実験が行われた。また、PS ベースの有機プラスチックシンチレータについては、添加した発光剤 p-Terphenyl の濃度を 1.2%–2.0%、POPOP

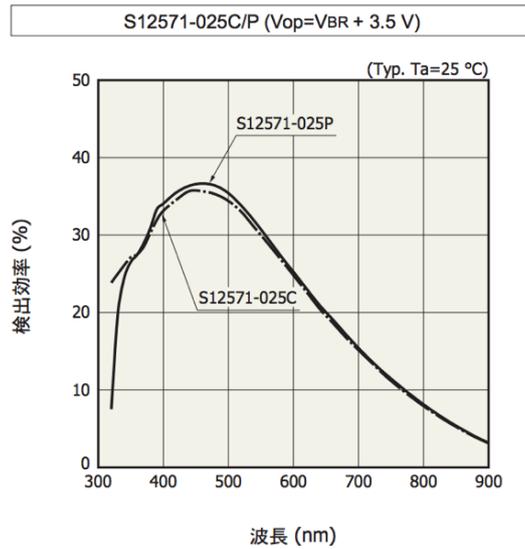


図 3.4: MPPC の感度スペクトル (浜松ホトニクス)

の濃度を 0.02%–0.05% で調製したものを用い、発酵剤の濃度による発光量の違いも調べられた。結果は図 3.5 にまとめられている。標準の濃度セットでの比較について、PS ベースのシンチレータは Estyrene-MS ベースのものよりも 20% 程度多い発光量が得られた。また、PS に添加する発光剤の濃度については、濃度が最大である、p-Terphenyl 2.0%、POPOP 0.05% で最大となる PVT の約 70% の発光量が得られた [13]。

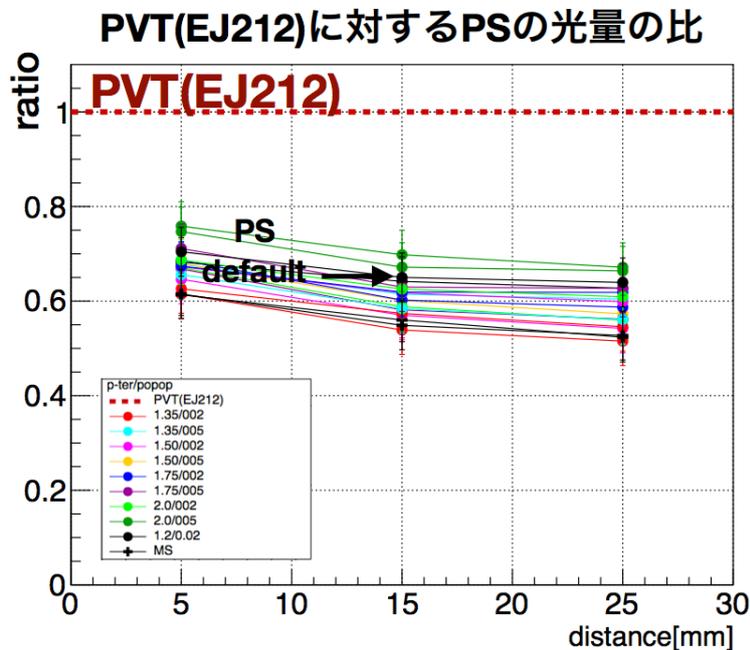


図 3.5: MS ベースと PS ベースシンチレータの発光量の比較 [13]

本研究ではさらに発光剤の濃度の大きい領域を調べるとともに、生産されたタイルごとの品質の個体差についての研究を行った。個体差についての評価を行う上で測定の実験性を確保するため、シ

ンチレータと SiPM の光学的カップリングの強化によって再現性をより高めることに成功した。

3.2.3 測定セットアップ

プラスチックシンチレータ

この実験で測定する対象であるシンチレータは、PS ベースのプラスチックシンチレータである。シンチレータの大きさは AHCAL のデザインと同じ、30 mm 角の厚さ 3 mm のタイル状のものを使用した。シンチレータタイルには図 3.6 右のように反射材を巻くことで SiPM の受光量を増やした。

射出成形は株式会社ジーテックの協力を得て行った。成形の際には既存の金型を用いるためにタイルよりも大きな板を作り、そこから 30 mm 角のタイルを切り出すという手法をとった。そのためタイルの上下面は射出成形したままの状態だが、側面は機械加工を行っている。

発光剤は一次発光剤として p-Terphenyl、二次発光剤として POPOP の 2 種類を添加した。濃度については表 3.1 にまとめられているように、p-Terphenyl を 1.75%–3.0%、POPOP を 0.05%–0.1% で調製した。

表 3.1: シンチレータに添加した発光剤の濃度とサンプル数

		p-Terphenyl			
		1.75%	2.0%	2.5%	3.0%
POPOP	0.05%	3	3	3	3
	0.07%	3	3	3	3
	0.1%	3	3	3	3

また、光量の比較に用いるために PVT ベースシンチレータである EJ-212 を同じ大きさで 2 枚用意し、測定を行った。EJ-212 はキャスト成形されたシンチレータであり、機械加工によって切り出され、全面が加工研磨されている。

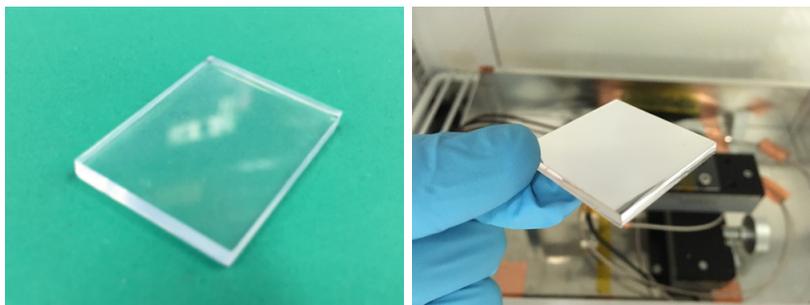


図 3.6: 測定に使用した PS ベースのシンチレータタイル 左: 反射材なし 右: 反射材あり

SiPM

光センサである SiPM には、浜松ホトニクス株式会社の製品である MPPC (S12571-025P) を使用した。この MPPC は受光面 1 mm 角、ピクセルピッチ 25 μm であり、これを図 3.7 のようにプリント基板上に表面実装した。MPPC は 2 つ用意し、シンチレータタイルの両側面からシンチレーション光の読み出しを行った。

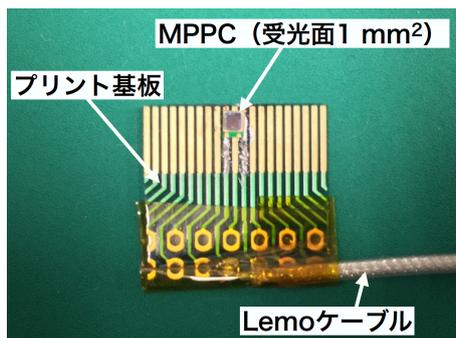


図 3.7: プリント基板上に半田付けされた MPPC

図 3.8 はセットアップを上から拡大した図である。シンチレータタイルは透明なアクリルのホルダーに入れられ、上部と側面からそれぞれネジで固定される。MPPC はシンチレータタイルの側面からネジで押し当てられ固定される。シンチレータ表面と MPPC 表面の光学カップリングはタイルの表面状態やエアギャップの空き具合等によって変化し、測定の度に揺らいでしまう可能性がある。この不定性を解消するため、オプティカルグリス (Saint-Gobain 社 BC-630) を用いてシンチレータと MPPC の光学カップリングの強化を施し、測定の再現性の向上を行った。また、これによって MPPC の受光量が 2 倍程度に増加し、より良い統計精度も得られる。

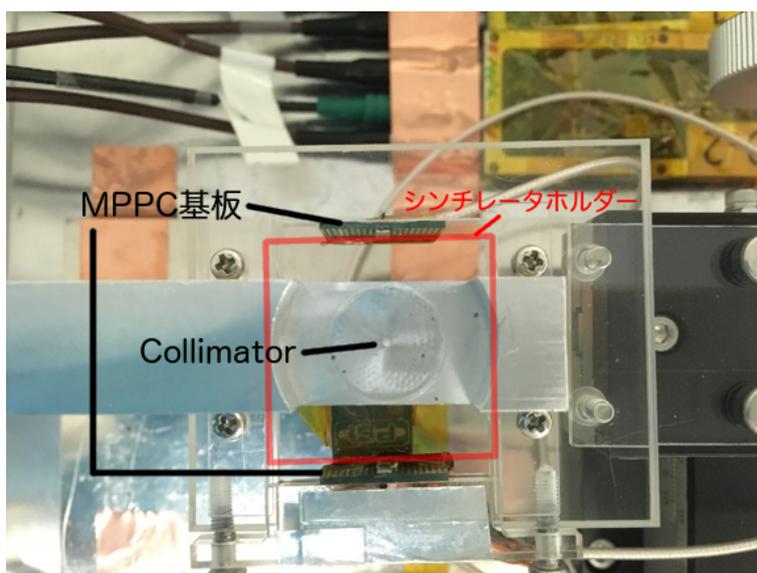


図 3.8: 測定セットアップ

DAQ

MPPC からのシグナルは小さいため、読み出しにはアンプを用いる必要がある。この実験ではスイスの Paul Scherrer Institute (PSI) で開発された SiPM 用の小型アンプ (図 3.9) を用いて信号の増幅を行った。

信号の波形読み出しには Domino Ring Sampling Chip (DRS) [15] と呼ばれる高速波形デジタルを使用した。DRS は図 3.10 に示されるような仕組みで最大 5 GHz のサンプリング速度と 1024

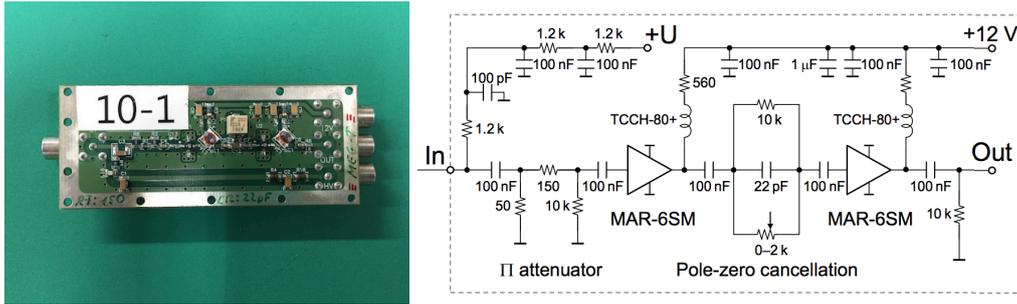


図 3.9: PSI アンプと回路図 [14]

個の記憶セルを持ち、トリガーによってデジタル化された波形を読み出すことができる。この測定では 1.6 GHz のサンプリング速度で 640 ns のタイムウィンドウでの読み出しを行った。

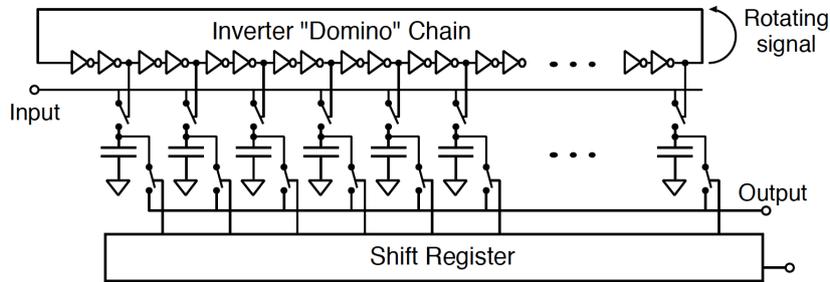


図 3.10: DRS の概念図 [16]

セットアップ

図 3.11 にセットアップの概略を示す。シンチレータの上部に ^{90}Sr 放射線源を固定し、 β 線を照射する。シンチレータの下にトリガーカウンタを置き、 β 線がシンチレータタイルを通過しトリガーカウンタに到達したイベントのみを選択した。それぞれの MPPC からの信号はアンプを経て DRS へ入力され、データを PC で収集する。

図 3.12 はセットアップの写真である。 ^{90}Sr 放射線源、シンチレータタイル、トリガーカウンタを固定し、目的とする位置に β 線を照射するためのジグを用いて実験を行った。 $\phi = 0.5 \text{ mm}$ のコリメータを用いて β 線を絞り、タイルの下に置かれたトリガーカウンタでトリガーをかけた。

トリガーカウンタとしては、5 mm 立方のプラスチックシンチレータ (EJ-212) の底面に受光面 3 mm 角の MPPC (S12572-025C) をオプティカルセメントで接着したものをを用いている。

放射線源とトリガーカウンタはアルミニウムのフレームに固定され、シンチレータタイルは手動 XY ステージを介して同じフレームに固定されている。XY ステージを動かすことにより、シンチレータタイル上に放射線を照射する位置を 0.1 mm の精度で合わせることができる。

3.2.4 測定方法

測定のセットアップはサーマルチャンバーの中に入れられ、光を遮断し一定温度 (24°C) に保った状態で行われた。また、両側の MPPC のゲイン及び光子検出効率 (PDE) を揃えるためにブレイク

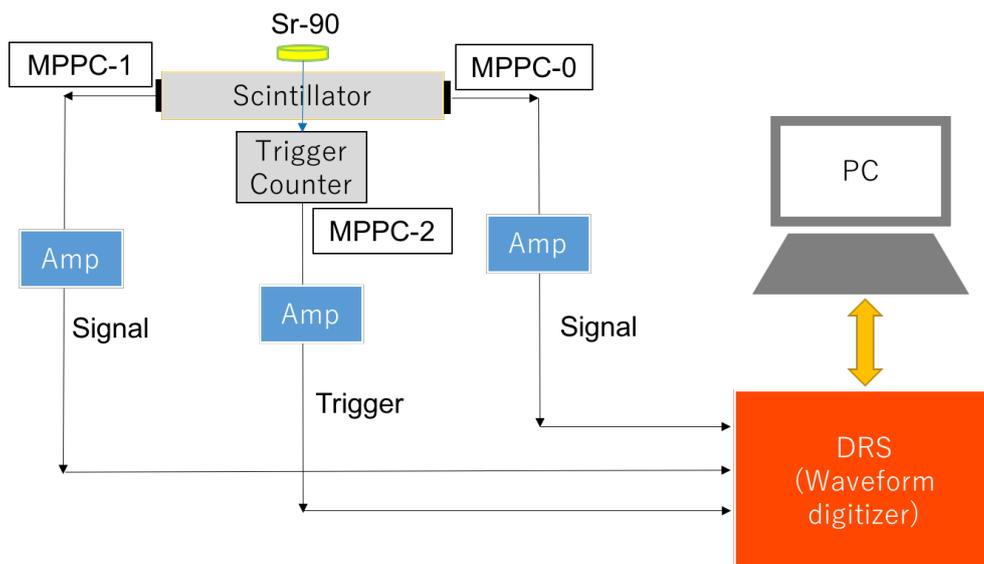


図 3.11: セットアップの概略

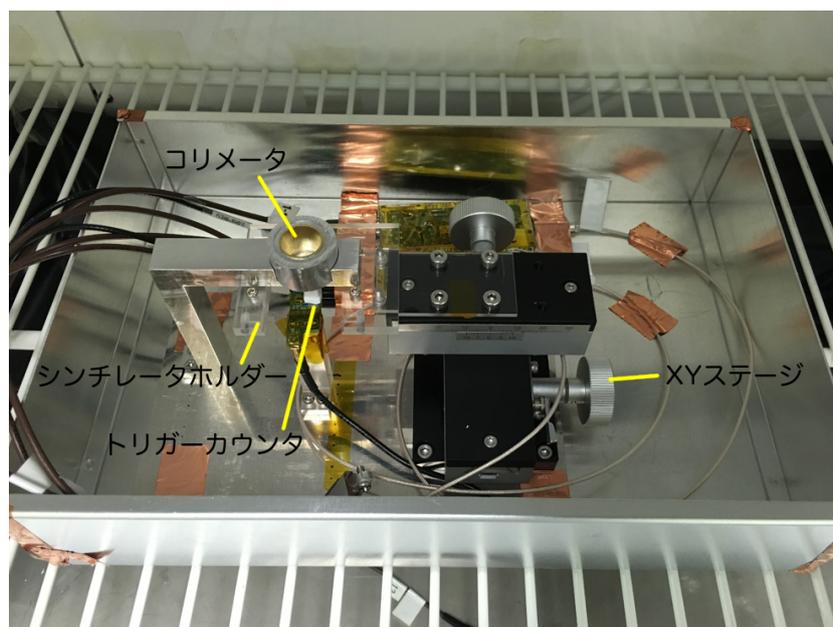


図 3.12: 測定セットアップの全体図

ダウン電圧を求め、等しいオーバー電圧 (3.5 V) をかけた。

測定対象として、PS ベースの 12 種類の発光剤濃度セットのサンプルをそれぞれ 3 枚ずつと、EJ-212 を 2 枚用意し、それらの発光量を調べた。同一サンプルを複数回測定して再現性の確認も行った。さらに、発光剤の濃度や射出成形の表面状態によってシンチレーション光の減衰長が変化するかを調べるため、照射位置と MPPC との距離による光量の変化を調べた。照射位置は図 3.13 に示すように、2 つの MPPC を結ぶ直線上で 5 mm 刻みでデータを取った。

図 3.14 は DRS によって得られる信号の波形である。-120 ns から立ち上がる波形がトリガーされたシンチレーション光による信号であり、これを積分することにより、MPPC が得た総チャージの

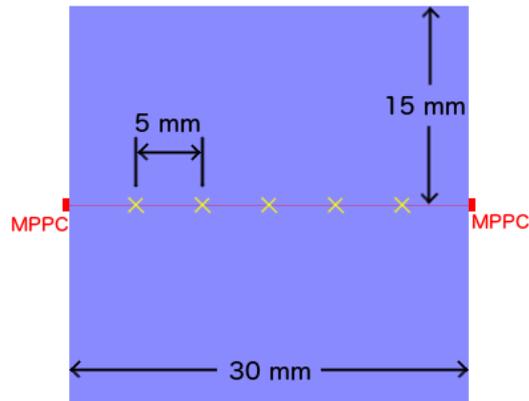


図 3.13: β 線の照射位置

値を求めることができる。このようにして得られたチャージの分布は図 3.15 のようになる。一定の厚みのシンチレータを通過する MIP¹ のエネルギーデポジットはランダウ分布に従うことが知られている。シンチレータに落ちたエネルギーのうち、MPPC に光子として検出される確率や測定誤差を考慮して、検出されるシグナルの分布はランダウ関数にガウス関数を畳み込んだ関数を用いてフィットすることができる。こうして得たフィット結果を用いて、そのピーク値をそのサンプルの発光量の代表値として用いた。

このチャージの値は MPPC のゲインに依存するため、ゲインに依存しない純粋な光量を得るために 1 光電子に相当するチャージの値を知る必要がある。1 光電子分のチャージの値を求めるために、MPPC からの信号にランダムに乗るダークノイズを利用した。図 3.14 の -300 ns 辺りに見られる小さな波形がダークノイズと思われるシグナルである。シンチレーション光によるイベントの直前の時間領域を利用してこのようなランダムに発生するダークノイズを観測し、そのチャージを計算した。チャージ分布は図 3.16 に示されるようになり、チャージが光電子数で量子化される。これらをガウス関数でフィットし、ピーク間のチャージの差を計算することで 1 光電子分のチャージの値を計算した。

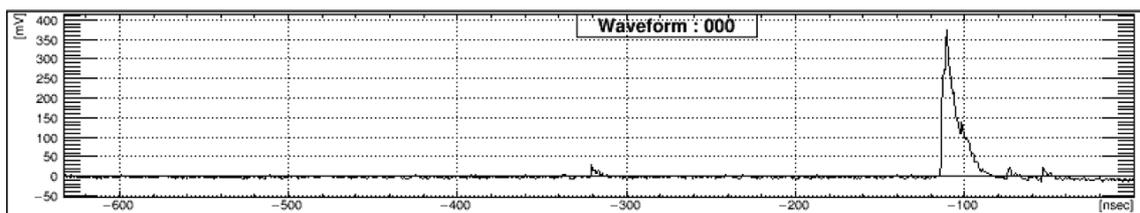


図 3.14: DRS によって得られる波形

3.2.5 結果と考察

図 3.17, 3.18 に、それぞれの発光剤の濃度に対する発光量の変化を示す。それぞれの点はその濃度のサンプル 3 枚の平均光量であり、誤差はこれら 3 枚の標準偏差を示している。同一サンプルを用いた際の測定の再現性は 3% に収まることが確認された。

¹ ^{90}Sr の放射する β 線は正確には MIP ではなく、エネルギーデポジットは MIP よりも 10–15% 大きくなる

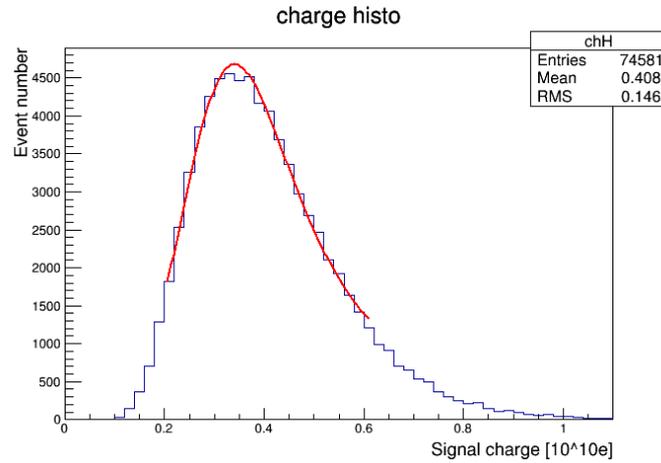


図 3.15: シグナルのチャージ分布

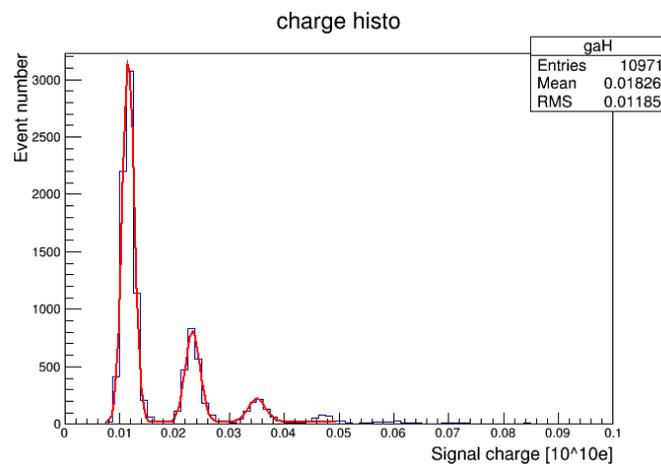


図 3.16: ダークノイズのチャージ分布

大まかな傾向として発光剤の濃度の上昇により発光量も増加する様子が得られ、最大の濃度セット、p-Terphenyl 3.0%, POPOP 0.1%では最大となる EJ-212 の 78%の平均発光量が得られた。標準の中央読み出しで設計された PVT ベースシンチレータを用いた測定によって、PVT ベースシンチレータでの光量は 50 フォトン程であることが知られている [17]。この研究によって得られた PS ベースシンチレータの最大発光量は 40 フォトン弱に相当し、ハドロンカロリメータでの測定に十分なだけの光量を達成できたと考えられる。今後さらに大きな発光剤の濃度を用いることによって更なる発光量の増加を図ることができる可能性がある。しかし同じ濃度セットのタイルごとの個体差が最大で 8%と決して小さくない値を持ってしまい、各濃度 3 枚程度のサンプル数では定量的な評価が困難になってしまっている。同一濃度のサンプル同士に大きな発光量の差が見られる原因として射出成形の際に発光剤の濃度にムラができている可能性や加熱による発光剤の劣化が考えられる。今後ジーテック社と協力し製造時の加工方法についての研究を計画している。

図 3.19 は、距離 $d = 15$ mm での光量を 1 に正規化した光量の位置依存性である。

$d > 15$ mm のとき、タイル毎のばらつきは測定誤差の範囲内に収まっており、大きな差は見られない。また、 $d = 25$ mm と大きくなっても光量は $d = 15$ mm のときの 90%を超えており、距離が離れた際の減衰は小さいことがわかる。

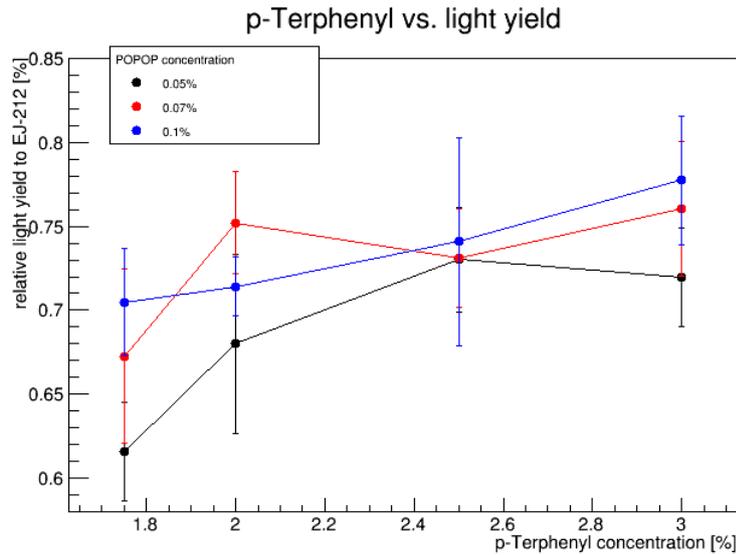


図 3.17: 光量の p-Terphenyl 濃度依存性。誤差はそれぞれの濃度におけるサンプルの標準偏差。

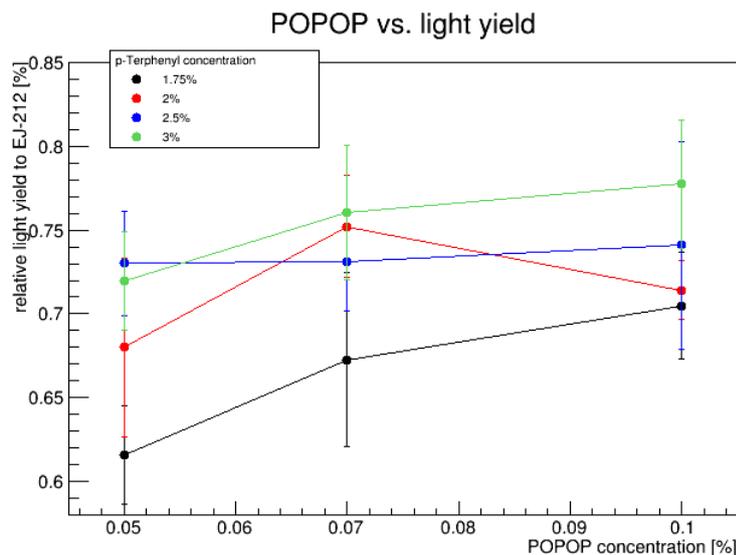


図 3.18: 光量の POPOP 濃度依存性。誤差はそれぞれの濃度におけるサンプルの標準偏差。

$d < 15$ mm のとき、発光剤の濃度による距離依存性の変化が若干見られ、p-Terphenyl の濃度の低いサンプルでより大きな距離依存性が現れた。これはもともと懸念されていた、「発光剤の濃度が増すことでシンチレーション光が吸収され減衰長が縮まる」という効果とは反対の現象である。反射材として用いた ESR は紫外光の反射率が極端に悪い [18]、発光剤の濃度が少ないことで紫外光のまま反射材に到達したシンチレーション光が反射されない、という効果が見られている可能性がある。この結果は発光剤の濃度をさらに上げることを後押しとなる。

キャスト成形された EJ-212 は射出成形された PS ベースシンチレータよりも距離依存性が小さくなっている。PS ベースシンチレータの発光剤の濃度を高めたときの距離依存性の減少はある地点で止まっているため、EJ-212 と PS ベースシンチレータの振る舞いの差は成形方法による表面状態の

違いに起因するものであると考えられる。表面を機械加工によって整えた PS ベースのシンチレータ
 タイルを用いて仮説を実証するとともに、距離依存性がタイルの集光量、一様性にどのように影響す
 るか今後シミュレーション等を用いて調べていく。

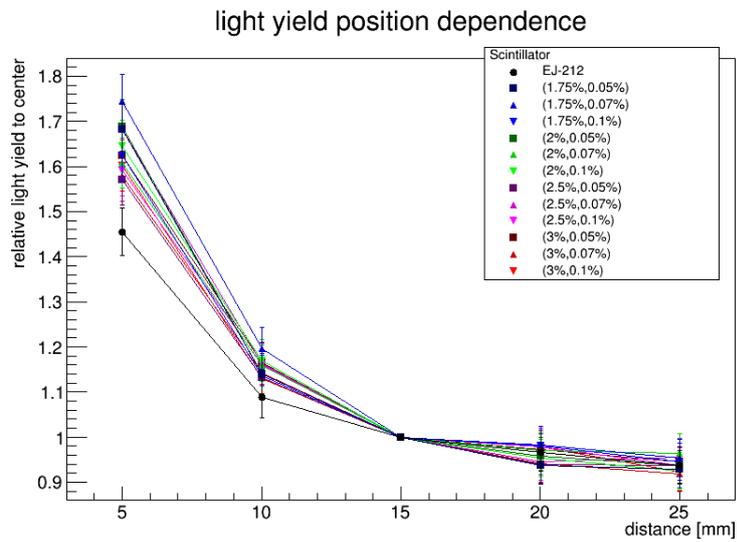


図 3.19: 光量の位置依存性

第4章 タイル間の光漏れの影響

AHCAL ではシンチレータをタイルに分割して細かい読み出しを行っているが、タイル間に光漏れがあれば偽のヒットを検出してしまい、エネルギーの誤評価、シャワー形の変化などの悪影響が出てしまう可能性がある。ここでは光漏れの大きさによって生じる影響をシミュレーションによって定量的に評価し、光漏れの観点から検出層のクオリティコントロールにおける重要な指標の一つを与える。

4.1 新しい検出層デザイン案

AHCAL の検出層デザインについて、製造の簡便化や性能向上を目指して様々な新しいデザインが提案されている。ここでは主要な新デザインを紹介するとともにベースラインのデザインと光漏れの比較を行う。

4.1.1 ベースラインデザインの光漏れ

5章で述べる新しく開発した宇宙線試験装置を用いて、標準的な AHCAL デザインでの光漏れを測定した。測定の方法や結果の詳細は 5.4.5 節で述べる。結果として、標準的なデザインでの隣接するタイルに対する 1 枚当たりの光漏れの値は平均で 0.55% であることがわかった。

4.1.2 メガタイル

メガタイルは個々のタイルを個別に製作し反射材で覆う代わりに、タイル 12×12 枚分の大きな 1 枚の板を作り、光学的にタイル状に分割するというデザインである。メガタイルの利点としては、製作、包装にかかるコストが大幅に削減できる点、またタイルの整列を簡略化できる点が挙げられる。しかし光学的な分割がきちんとしてできなければ大きな光漏れを引き起こす可能性がある。光学的な分割の手法としては、溝を彫りそこに TiO_2 のような白色顔料を流し込むという方法が主に研究されている。

具体的な手法は以下のようである。

1. 使用するタイルの厚みである 3 mm よりも若干厚い、4–6 mm の板を作製する。
2. 3 mm より若干深い程度の溝を彫り、そこに TiO_2 と接着剤を混ぜたものを流し込む。
3. 固まったところで溝の反対側から余分な厚みの部分を削り取る。

削るという部分で工程に手間が入ってしまうものの、各タイルを光学的に完全に分離し、シンチレータ内部での光漏れの余地を完全になくすることができる。

メガタイルの試作実験がドイツの Mainz グループによって行われている。Mainz では図 4.1 のような、 3×3 の大きさのメガタイルが試作された。タイルの境界となる部分には白色顔料が流し込ま



図 4.1: メガタイルの試作 [19]

れ、当たった光を乱反射する反射材として機能する。シンチレータはPVTベースのプラスチックシンチレータが用いられ、上面と側面に反射材 (DF2000MA) が被せられた。この試作機を用いてメガタイルの性能評価が行われた。

タイル間の光漏れについて、上述の通りメガタイルではシンチレータ内部は光学的に分離され、光漏れは起こらない。しかし、メガタイルは大きな一枚のシンチレータの板を用いる都合上、上部の反射材はメガタイル全体を覆うように被せられ、反射材とシンチレータとの間にエアギャップが開いてしまう。このエアギャップを通してあるタイル内で発生したシンチレーション光が隣のタイルに漏れ出す可能性がある。この光漏れの大きさがどの程度であるか、シミュレーションと実機試験で確認がなされた。

シミュレーションについては、反射材が全域にわたって平坦であり、シンチレータとの間に一様なエアギャップが存在するというモデルで行われた。宇宙線を用いたシミュレーションの結果としてエアギャップの大きさが数 μm では光漏れはほとんど起こらず、反対に 1 mm という大きなギャップが開いてしまえば 10% 近い光が四方に漏れ出してしまうという結果が得られた。メガタイルを扱う上では、エアギャップを小さくするためにシンチレータの表面や反射材の設置に注意することが肝要となることがわかる。

また、実機試験との比較を行うために HBU 基板上にある LED を用いたシミュレーションも行われた。図 4.2 は読み出し基板上の LED の位置と LED からの光によるシミュレーションの結果である。LED の位置が偏っている影響で光漏れの大きさにも方向依存性が現れている様子が見られる。

実機試験は大光量の測定を十分な統計で行うために、LED の光を一つのタイルに入射しそれに対する応答を調べる、という手法で行われた。中央のタイルの検出光量が 80 ± 1 フォトンとなるイベントを選択し、周囲のチャンネルの応答を調べたのが図 4.3 である。

中心チャンネルに大きなシグナルが入ることによってペDESTALが 0.5 フォトン分ほど落ちている様子が見られる。この分の補正を行い光漏れの平均値を算出すると、3.1–5.3% と求まる。前後左右の光漏れの大きさの違いは主に LED の位置による効果であると考えられている。光漏れの分布、大きさともにシミュレーションの結果とよく一致していることがわかる。

これらの結果から、メガタイルの試作機ではエアギャップが一様に 200 μm 開いたモデルと近い

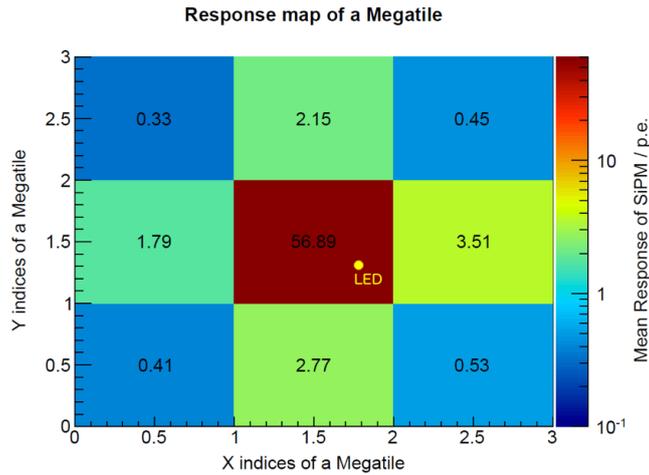


図 4.2: LED を用いたメガタイルの光漏れシミュレーション (エアギャップ 200 μm) [19]

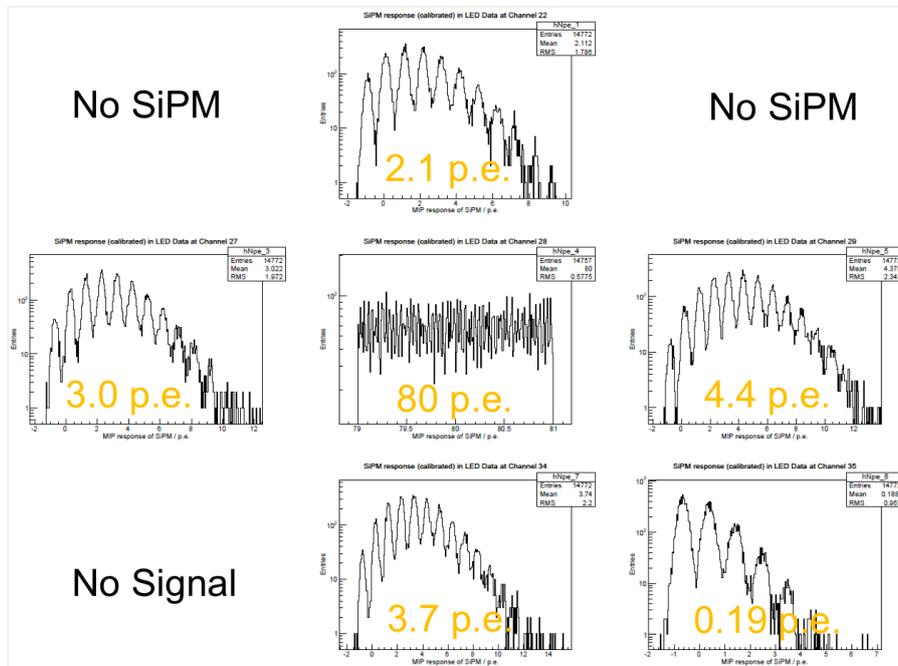


図 4.3: LED を用いたメガタイルの光漏れ試験 [19]

振る舞いが観測された。光漏れはタイル 1 枚につき 3.1–5.3% である。実際のメガタイルは 12×12 の大きさであり、この大きさの反射材を設置する際に今回の試作機と同等以下のエアギャップを達成できるかは今後の課題である。

4.1.3 コーナー読み出しデザイン [9]

図 4.4 は現在 AHCAL グループで標準として考えられている読み出し法の模式図である。30 mm 角のシンチレータタイルを並べ、タイルの中心に置かれた SiPM で個々のタイルの発するシンチレーション光を読み出す。対して図 4.5 はコーナー読み出しと呼ばれる読み出し法を模式的に表してい

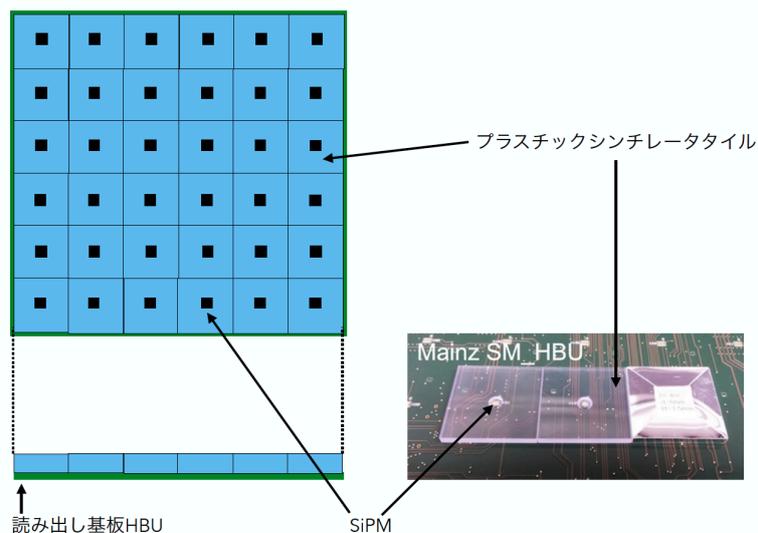


図 4.4: 標準的な読み出しデザイン

る。この読み出しのデザインではタイルの中心ではなく四隅に SiPM を配置し、1 枚のシンチレータタイルを 4 つの SiPM で読み出す。そのままではチャンネル数が 4 倍となってしまう、コストもデータ量もかさんでしまう。そのため 1 つの SiPM は角を共有する 4 枚のシンチレータを同時に読み出すことで標準的な読み出しと同じチャンネル数で読み出しを行うことができる。

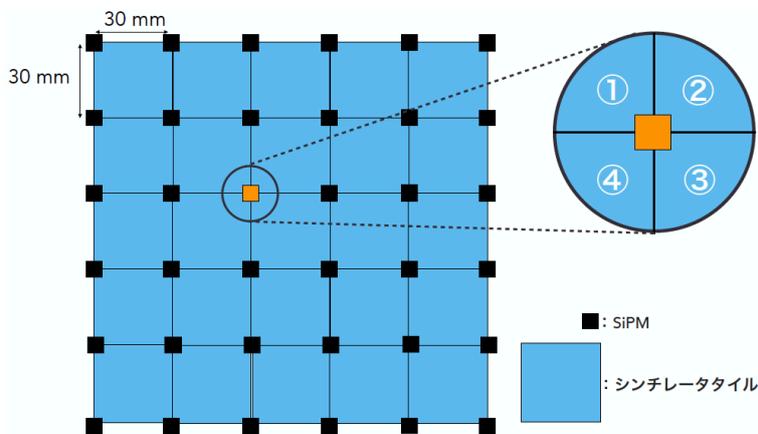


図 4.5: コーナー読み出しデザイン

コーナー読み出しではシンチレータタイルは図 4.6, 4.7 のようにタイルの 4 隅を切り落とした形で設計された。

この検出層デザインの利点は、第一に 4 つの SiPM のコインシデンスをとることでノイズを除去し、より低い閾値で信号を取得できることである。さらに 4 つの SiPM を用いることで得られる光量の総量、一様性が増し、4 つの MPPC の光量を比較することでタイル内のより細かい位置の再構成をできる可能性がある。同様に 4 つの MPPC の時間情報を合わせることで時間分解能の改善が見込まれる。また、SiPM の一つが壊れてしまっても周囲の SiPM で補うことで不感領域が生じないという利点も存在する。

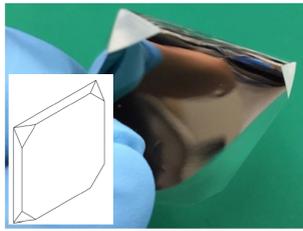


図 4.6: コーナー読み出し用シンチレータタイル

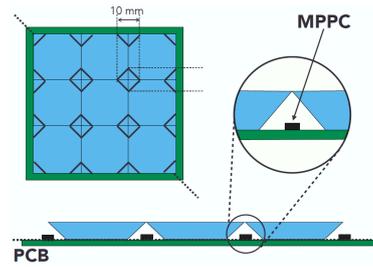


図 4.7: コーナー読み出しのセットアップ

しかし、4枚のシンチレータが同じ SiPM を共有する以上、シンチレータタイル間には光漏れが生じてしまう。

コーナー読み出しでは1つの読み出しチャンネルが1枚のタイルに対応しているわけではないため、光漏れの大きさの評価を標準的なセットアップと同様の方法で行うことができない。その上で標準的なセットアップと近い定義で光漏れの大きさを評価するために、図 4.8 のような状況を用いて実験が行われた。シンチレータタイルの1枚に β 線を照射し、四隅の SiPM (図 4.8 ch 1-4) で光量を測定する。角を共有するタイルの、共有していない3つの SiPM (図 4.8 ch 5-7) の光量の和を光漏れの大きさとして測定する。

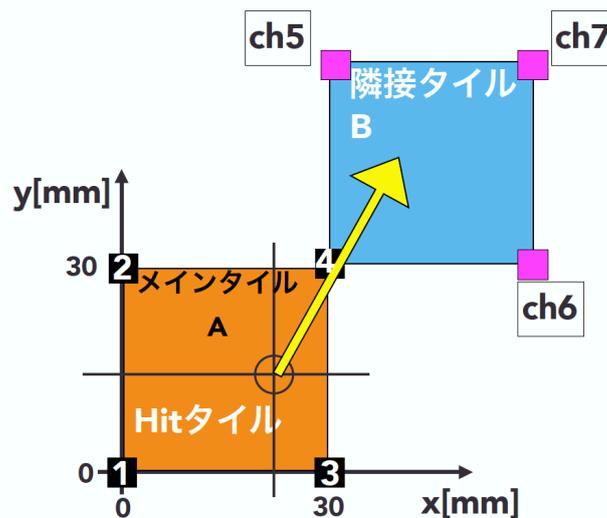


図 4.8: 4点読み出しデザイン

この測定の結果、 β 線を照射したタイルの光量は平均で34フォトンが得られ、光漏れの大きさは平均で1.3フォトンとなった。つまりこのデザインでは光漏れの大きさはおよそ3.3%となる。このデザインでは一辺を共有するタイルと角のみを共有するタイルとの間に大きな差異はないと考えられるので、周囲8タイルに等しく平均3.3%の光漏れが起こると推定できる。

光漏れ自体の大きさは上述のように求められたが、このデザインではそもそもの課題として、周囲にヒットしたタイルが複数存在するとヒットを誤認されやすい、ヒットが集中する領域では検出した光量のタイル別の内訳がわからない、などの問題があり、シャワーの形がぼやけやすい。これらの問題について定量的な評価は未だなされていないが、潜在的な光漏れとして一定の値を有している。

4.2 シミュレーション

上記のように新しい検出層デザインにおける光漏れによる悪影響が懸念されている。光漏れが実際にエネルギー分解能にどの程度の影響を与えるのかをシミュレーションによって調べたのがこの研究である。

4.2.1 iLCSoft

iLCSoft は ILC イベントのシミュレーション、解析に広く用いられているソフトウェア群である。様々な用途のために多くのプログラムを内包するが、ここではシミュレーションに使用するものについて簡単に述べる。図 4.9 は ILC におけるシミュレーションや解析の流れを模式的に表したものである。

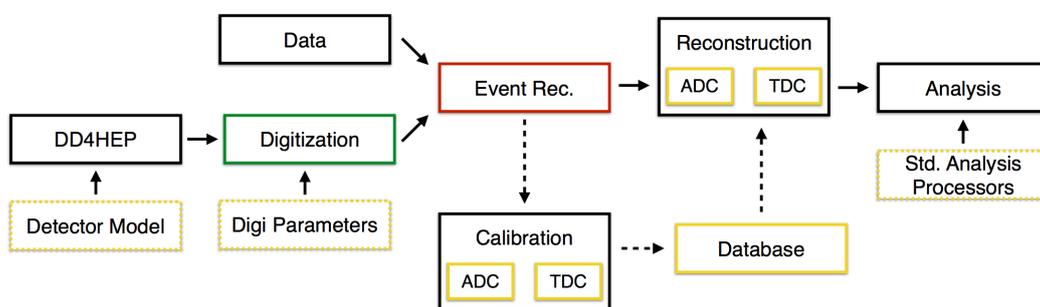


図 4.9: シミュレーション、解析の流れ

DD4HEP

Detector Design for High Energy Physics (DD4HEP) は検出器モデルのフレームワークであり、検出器の開発、最適化、実用に幅広く使用される。これまでに研究されてきた ILD の設計がモデル化されており、MC シミュレーションによって粒子を入射させた際の検出器との相互作用からヒットを生成することができる。

Marlin

Modular Analysis and Reconstruction for the LINear collider (Marlin) は iLCSoft 全体にわたって用いられるアプリケーションフレームワークである。後述する Digitization, Reconstruction 等の個々のプロセスが、それぞれプロセッサとして実装され、統括して実行される。

Digitization

DD4HEP を用いてシミュレーションを行うと、得られるヒット情報は各粒子がそれぞれの検出器を通過した際のエネルギーデポジットの形で与えられる。このヒットの情報から検出器からの信号の形に変化させるのが digitization のプロセスである。Digitization はノイズの影響や検出器の応答の揺らぎ、シグナルが大きい場合のサチュレーションの効果などを含めて行われ、実験で得られるデータと同じ形式の出力が得られる。Digitization を経ることでシミュレーションを実験データと同

列に扱うことができるようになる。Digitization の際には、図 4.10 のように MIP ピークの半分の値に閾値を設定し、それを越えたヒットのみをシグナルとして検出することでノイズを落とす。カロリメータの digitization では、「検出器中でのエネルギーデポジットのうち検出層でのエネルギーの割合」、「検出器の MIP に対する応答」がパラメータとして存在している。これらは既知のエネルギーの γ, K_L^0, μ 粒子等を用いて較正する。

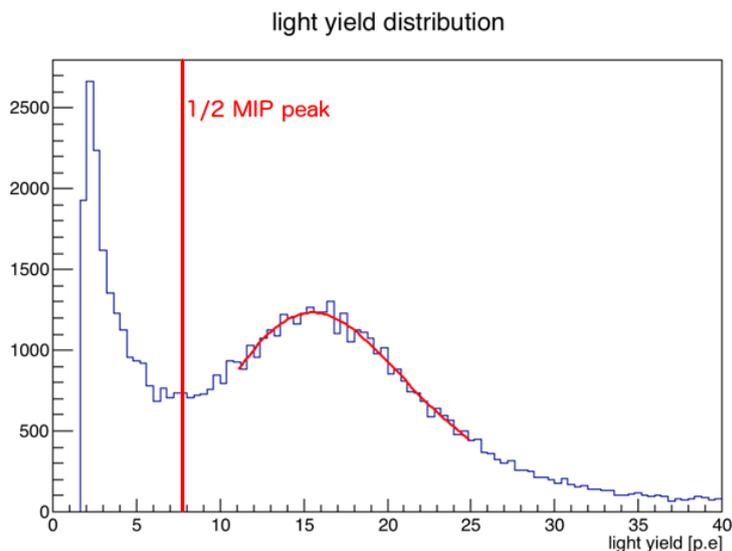


図 4.10: 検出層のチャージ分布と閾値の設定

Reconstruction

検出器からの信号の形で与えられたヒット情報を用いてイベントの再構成を行うのが reconstruction のプロセスである。カロリメータでの Reconstruction は、与えられた信号の大きさからエネルギーデポジットを再構成し、これらのヒットを PFA を用いて再構成する。

Pandora

Pandora は PFA を使用したイベント再構成アルゴリズムである。カロリメータのヒットのエネルギー分布をもとにそれぞれのヒットをクラスタに分け、Particle Flow Object (PFO) と呼ばれる 1 粒子由来のヒット群に分類する。PFO のクラスタ形やエネルギー分布から由来となる粒子の種類やエネルギーを推定し、飛跡検出器の情報と合わせて精度の高い再構成を実現する。Pandora PFA のパラメータとして、「検出されたエネルギーが MIP いくつに相当するか」、「ECAL HCAL それぞれの電磁シャワー、ハドロンシャワーに対する応答の補正」が存在する。これらは digitization の時と同様に、既知のエネルギーの γ, K_L^0, μ 粒子等を用いて較正する。

4.2.2 シミュレーションセットアップ

光漏れの与える影響について調べるために、既存の iLCSoft に新しくプロセッサを導入してシミュレーションを行った。このシミュレーションでは iLCSoft のバージョン v01-19-02、ILD モデルは ILD_11_v01 を用いた。HCAL についてのシミュレーションを行う上でジェットイベントを用意

するために、この ILD のモデルに対して中心から u,d,s クォークペアを打ち込み、MC シミュレーションでハドロンジェットの hit を生成した。

光漏れを実装するために新しく導入したプロセッサの働きを以下に述べる。

DD4HEP で生成されたヒットを digitization にかける前に、HCAL のシンチレータタイル内のエネルギーデポジットを隣接するタイルに分けるという形で光漏れの実装を行った。具体的に例をあげれば、5%の光漏れは図 4.11 のように実装した。すなわち、あるタイルに 1 のエネルギーデポジットがあったとき、そのタイルに隣接する 4 つのタイルにそれぞれ 0.05 ずつのエネルギーを分けることで擬似ヒットを生成する。このとき 0.05 ずつを周囲に分けたことによって元々のヒットのエネルギーは 0.80 に減らす。ここでは二次的な光漏れは考慮せず、また常に隣接する 4 つ全てに等しい一定の光漏れがあるとモデル化してシミュレーションを行った。このように光漏れによる擬似ヒットを加えたヒット情報を用いて、通常のプロセスで digitization, reconstruction を行い、光漏れの影響について調べた。このシミュレーション研究では、光漏れを 1-10% の範囲で 1% 刻みで加え、その影響についての調査を行った。



図 4.11: 光漏れの実装

4.2.3 光漏れの影響の定性的な理解

図 4.12 は ILD に入射した 20 GeV の K_L^0 が HCAL 上に形成するシャワーのイベントである。黒い点は光漏れのない場合のヒット位置であり、赤い点は 10% の光漏れを入れた場合のヒットの位置である。

光漏れの定性的な影響として、一つには図 4.12 に見られるようにシャワーの形が広がり、また内部のエネルギー分布が変化してしまうことが挙げられる。これにより PFA のクラスタリングが正常に働かなくなり、また後述する software compensation に重大な影響があることが予想される。

また、図 4.12 の孤立した黒点に見られるように光漏れを加えても周囲にヒットが増えない場合や、そもそも元のヒットが消滅してしまう場合が見られる。シャワーの端から外に与えられたエネルギーや、周囲にヒットのない孤立したヒットから周囲に与えられたエネルギーについて、分けられたエネルギーによるシグナルが MIP ピークの半分に届かなければ擬似ヒットは全てノイズとして切り捨てられるため、全体で検出されるエネルギーの値が小さくなってしまふ。また、特に元のヒットのエネルギーを分けた結果、元のヒットのエネルギーが閾値を下回ればヒット自体が消えてしまふ。これらの影響で光漏れによりエネルギーの検出効率が下がり、エネルギーが小さめに見積もられてしまふことが予想される。

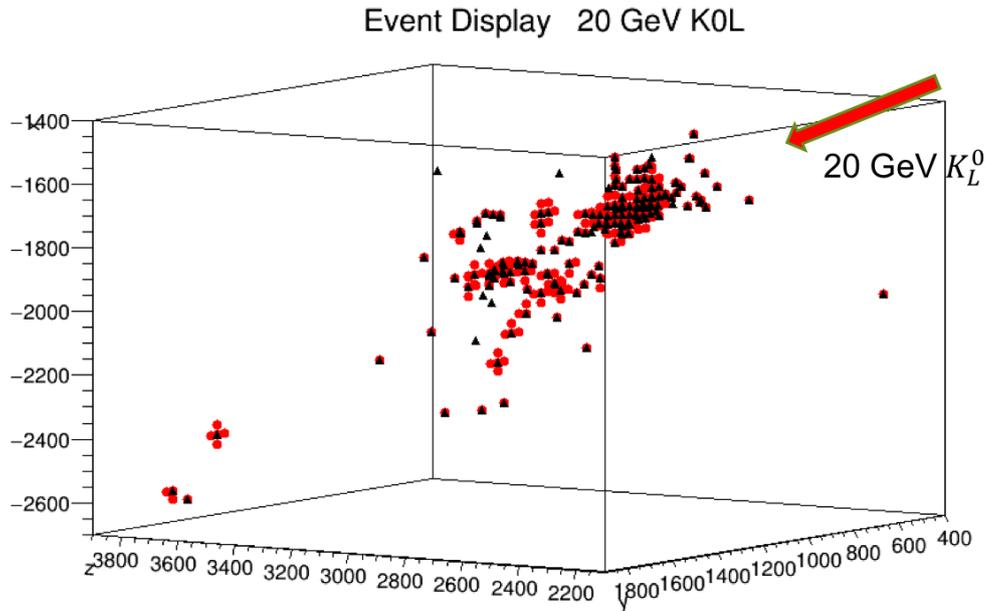


図 4.12: 光漏れのイベントディスプレイ 黒: 光漏れがないときのヒット位置 赤: 光漏れ 10%のときのヒット位置

4.3 再構成アルゴリズムの較正

4.3.1 再構成パラメータの較正

4.2.1 で述べたように、再構成アルゴリズム Pandora PFA には幾つかのパラメータが存在し、検出器のデザインや性能に応じて調整が可能になっている。光漏れによるエネルギーの誤評価に関しては、これらのパラメータを較正することによって是正することができる [20]。

4.3.2 Software Compensation

ハドロンシャワーはその過程で γ や e^\pm を放出することがある。これらはカロリメータ内で電磁サブシャワーを作り出すため、ハドロンシャワーの中には電磁的な成分が含まれる。この電磁成分が全体の中で運ぶエネルギーの割合はシャワー毎に大きく異なる。また一般にハドロンシャワーは、その過程で生まれるミュオンやニュートリノによってエネルギーが持ち去られてしまうことや、原子核の反跳、励起等でより多くのエネルギーが吸収層に落ちてしまうことにより、同じエネルギーの電磁シャワーよりも検出されるエネルギーが小さくなる。そのためこの検出器の応答の差を補完しなければハドロンシャワーのエネルギーを正確に見積もることができない。

そのために Pandora では software compensation と呼ばれるアルゴリズムを用いてソフトウェアでの補完を行っている。ハドロンシャワーと電磁シャワーの大きな差として、ハドロンシャワーは広い範囲に広がりまばらにエネルギーを落とすが電磁シャワーは狭い範囲で閉じ密にエネルギーを落とすことが挙げられる。このエネルギーの密度の差を用いることで、与えられたヒット情報からシャワーの種類を区別することができる。エネルギー密度の大きいものは電磁シャワー由来であるから重み付けを小さくし、反対に小さいものは重みを大きくすることで検出器の応答の差を補完する。

Software Compensation ではそれぞれのヒットを完全にハドロンシャワー、電磁シャワーと識別するのではなく、これらが混じったものであるとして、エネルギー密度に応じて連続に重み付けの値を

変化させる。具体的にはエネルギー密度 ρ [MeV/cm³] に対し

$$w(\rho) = p_1 \exp(p_2 \rho) + p_3 \quad (4.1)$$

で計算する。ここで p_1, p_2, p_3 はビームの総エネルギーに依存するパラメータであり、それぞれ

$$p_1 = p_{10} + p_{11} \times E + p_{12} \times E^2 \quad (4.2)$$

$$p_2 = p_{20} + p_{21} \times E + p_{22} \times E^2 \quad (4.3)$$

$$p_3 = \frac{p_{30}}{p_{31} + e^{p_{32} \times E}} \quad (4.4)$$

と、それぞれさらに9つの定数パラメータによって表現される。これらの式は観測で得られたエネルギー依存性をもとに現象論的に決定されたものである。

実際のエネルギー密度の分布は図 4.13 のように得られる。このエネルギー密度は色の違いによって描写されるように10の範囲に分けられ、それぞれの範囲で一定の重みがかけられる。重みの計算に用いられるエネルギー密度はそれぞれの範囲の中心の値である。標準のILDモデルでの重みの値は図 4.14 に示される通りである。

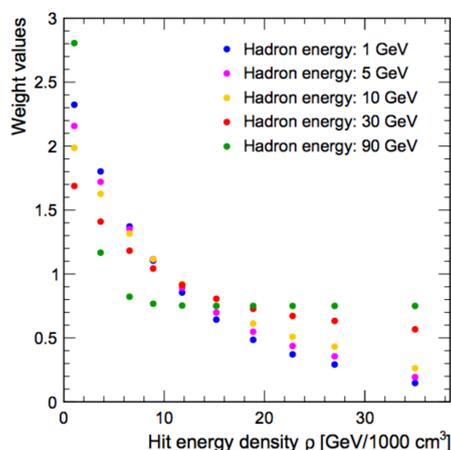
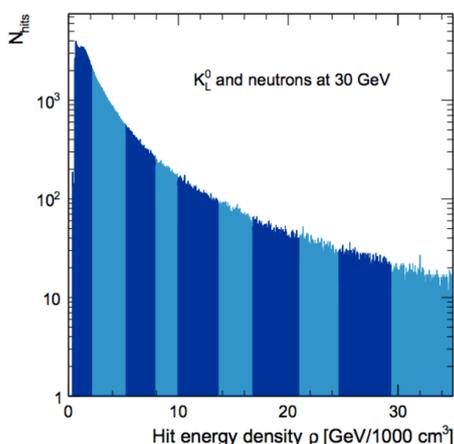


図 4.13: 30 GeV の中性ハドロンによるエネルギー密度 [21]

図 4.14: 様々なエネルギーのジェットに対する標準的な重み [21]

このように software compensation を適用することによって、図 4.15 に示されるように標準のILDシミュレーションにおいてエネルギー分解能を20%改善することに成功した。

しかし、シンチレータタイル間に光漏れが起これると高いエネルギー密度を持っていたチャンネルのエネルギーが分散してしまい、密度分布が変化してしまう。この状態では software compensation が正常に働かないため、補正を加える必要がある。ここでは、weight 関数の形は変えずに定数パラメータを最適化することで software compensation の補正を行った。すなわち、シミュレーションで様々なエネルギーの中性子を入射し、それに対する検出器の応答を最適化することで光漏れを含めた際の最適なパラメータの値を決定した。

4.4 結果と考察

上記のように Marlin パラメータの較正を行い、光漏れを加えたシミュレーションのデータを再構成した。ILD の中心の衝突点からは、91 GeV, 200 GeV, 360 GeV, 500 GeV のクォークペア (u,d,s) を生成

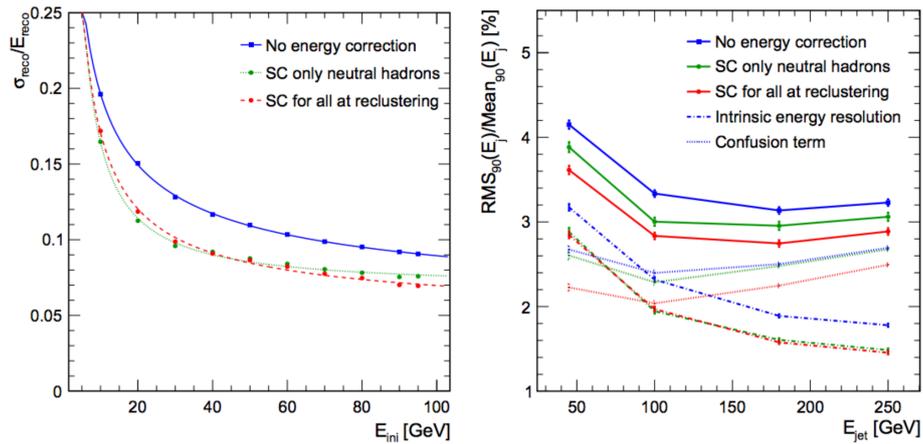


図 4.15: Software compensation によるエネルギー分解能の向上 左: 1 粒子 右: ジェット [21]

し、ILD モデルに打ち込んだ。ジェット一つ分のエネルギーの大きさはこの生成されたクォークペアのエネルギーの半分である。この性能評価は、AHCAL の主要部分であるバレル部分のみ ($|\cos\theta| < 0.7$) を用いて行った。エネルギー分解能の計算には RMS90 と呼ばれる手法を用いた。これは、外れ値を除いた全体の 90% のイベントのみを用いて標準偏差を計算するという方法である。RMS90 は余分な分布のテールの影響を除いて分解能の評価をすることができるが、得られた値は分解能そのものを表すものではないことは注意する必要がある。

このようにして再構成されたエネルギーの分解能を図 4.16 に示す。それぞれのグラフはそれぞれのジェットのエネルギーについて、光漏れの大きさに対するエネルギー分解能の変化を示している。また、図 4.17 は 4 つのエネルギーを同一軸にプロットしたものである。

これらの結果から、低エネルギーのジェットほど光漏れの影響を強く受けることがわかる。一方大きなエネルギーのジェットでは $\sim 5\%$ の光漏れはほとんど分解能の悪化を起こさない。

低エネルギーのジェットは構成するそれぞれの粒子が広い範囲に散らばりやすく、ヒットの位置もまばらになる。そのため、光漏れによって周囲に分散したエネルギーは多くが検出されずに消えてしまい、検出効率が落ちるために測定の揺らぎも大きくなってしまふ。反対に高エネルギーのジェットは粒子が固まって飛ぶため、より集中した範囲にヒットの大部分が集まる。1 チャンネルあたりの信号も大きく、また周囲に多くのヒットがあるため漏れ出たエネルギーも検出され、光漏れの影響が軽減されていると考えられる。

また、ILC のエネルギースケールは m_Z や m_H であり、典型的なジェットのエネルギーは 100 GeV 以下である。Pandora におけるクラスタリングもこのエネルギー帯を中心に最適化されているため、250 GeV のような大きなエネルギーのジェットでは Pandora のクラスタリングパラメータが最適化されておらず、光漏れによるシャワー形の変化に鈍感であるという仮説が立てられる。

このシミュレーション研究の目的は、検出層の開発を行う上で光漏れが HCAL の性能にどのような影響を与えるかを調べることである。結論として、高エネルギーのジェットに対しては 5-6% までの光漏れではほとんど悪化が見られない。低エネルギーのジェットは光漏れにより分解能が悪化し、5% の光漏れでは 3%、10% の光漏れでは 10% の悪化が見られた。

結論として、ILC で注目する低エネルギーのジェットは小さな光漏れにも敏感であり光漏れは可能な限り抑えるべきである。特に光漏れが 5% を超えると広いエネルギーに渡り大きな悪影響を及ぼすようになる。

この研究では最近接のタイルのみに一様な光漏れが起こるという単純なモデルでのシミュレーションを行ったが、今後光漏れのヒット位置依存性や二次的な光漏れなどの実測による理解を深めシミュ

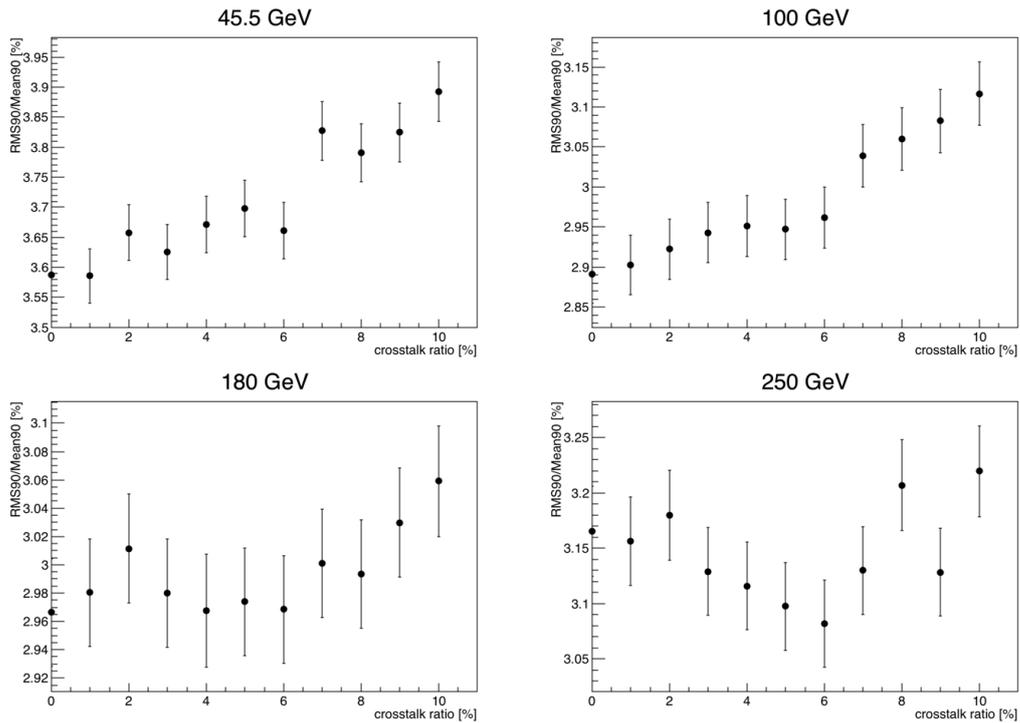


図 4.16: ジェットエネルギー毎の光漏れの大きさとジェットのエネルギー分解能。誤差はフィットエラー

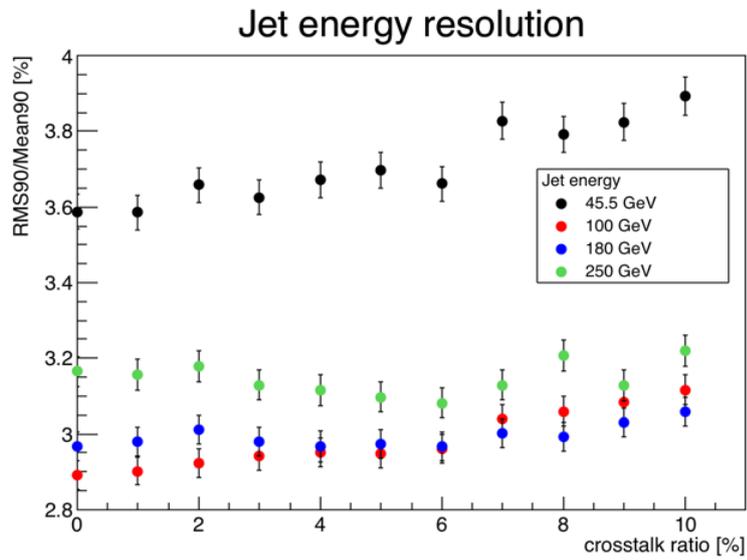


図 4.17: 光漏れの大きさとジェットのエネルギー分解能

レーションに反映させることで、より正確なシミュレーションを行っていく。5章で述べる新たに開発された宇宙線試験装置を用いることでこれらの詳細な測定を行うことができる。

第5章 宇宙線試験装置開発

AHCAL の大型試作機が現在建設中であり、2018 年内にビーム試験が予定されている。ビーム試験前に大型試作機の大量のチャンネルを試験、較正するために新たな宇宙線試験装置を開発し、その性能評価とドイツでのコミッショニングを行った。

5.1 概要

5.1.1 AHCAL 大型試作機

AHCAL では、これまで開発されてきたそれぞれの検出器技術やソフトウェアを実際の検出器を用いて試験するために大型試作機を建設しており、2018 年の早いうちに完成する見通しである。この大型試作機は 4 枚の HBU からなる検出層を 40 層用いて、ハドロンイベントに対する検出機の実際の応答を調べ、デザインした通りの性能が得られるか、また実際のハドロンシャワーの成長やハドロンに対する検出器の応答を詳細に理解することを目的としている。これは AHCAL バレルの 1% に相当する大きさであり、これまでで最大規模の AHCAL 試作機である。この大型試作機は様々な研究所で個々に開発された様々な技術や、量産性やコストを考慮したアセンブリの技術を統合し、実際に検出機を製作してその性能を確認するためのものであり、AHCAL の開発において重要なマイルストーンとなる。

この大型試作機には大量の ASIC, SiPM, シンチレータタイルが必要であり、準備にはドイツの DESY を中心として多くの研究機関が協力している。図 5.1 に示すようにフランスやロシアを含む多くの地域でそれぞれの部品が作られ、それらを組み上げて試験をし、DESY でまとめて完成させる。組み上げられた試作機を用いて 2018 年に CERN SPS のテストビーム施設においてハドロンビームを用いたビーム試験を予定している。

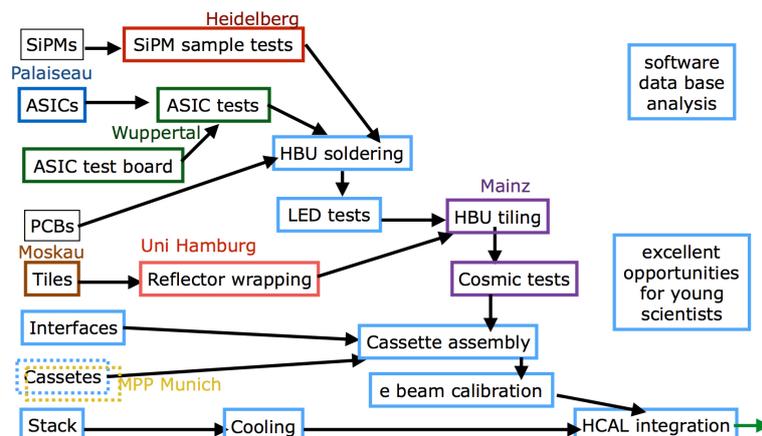


図 5.1: 大型試作機の製作の流れ

5.1.2 宇宙線を用いた大量試験

この大型試作機には総計 160 枚の HBU が用いられ、そのチャンネル数は 23,000 を超える。これらをテストビームにインストールする前に、これらのチャンネルがきちんと動作するかの確認、またそれぞれのチャンネルの較正を行う必要がある。大量のチャンネルを一斉に試験、較正するために、宇宙線を用いた試験装置を開発し、コミッショニングを行った。

5.2 試験装置の開発

5.2.1 原理

図 5.2 に示すように、宇宙線が通過したイベントをトリガーするために 2 枚の宇宙線カウンタを製作し上下に配置する。これらの中に試験する HBU を挟み、検出層の MIP に対する応答を調べる。

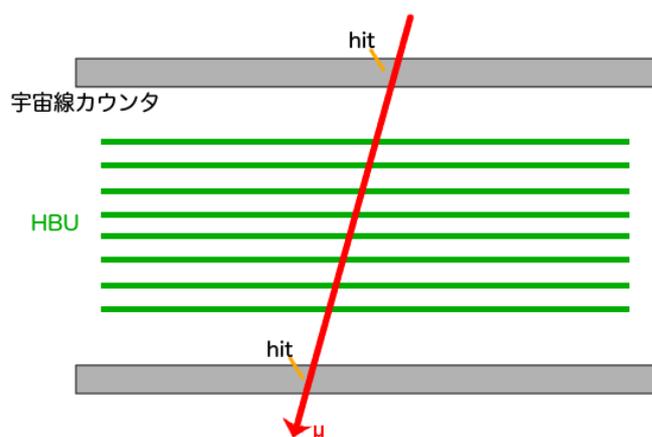


図 5.2: 宇宙線試験装置の概略図

今回開発した宇宙線試験装置は、単純な宇宙線イベントのトリガーに加え、宇宙線カウンタ自体に高い位置分解能を持たせることでより詳細な試験を行えるというものである。HBU の読み出しに用いられるシンチレータタイルの大きさ 30 mm 角に対し、5 mm 以下の分解能を持つ宇宙線カウンタを用いることで、タイル内部で宇宙線が通過した位置を求め、タイル内部の応答を詳細に調べることができる。また、上下に配置された宇宙線カウンタの位置情報を用いて宇宙線の軌跡を高い精度で求めることで、その角度から宇宙線がシンチレータ内を走る距離を求めることができる。この距離による補正を加えることで、MIP に対する正確な応答を調べることができる。

このような高い位置分解能を持たせた宇宙線カウンタとして、図 5.3 左に図解されているように、42 cm 角 6 mm 厚の大きな 1 枚のシンチレータプレートに 5 mm 幅で浅い溝を彫り、そこに Wave Length Shifting (WLS) ファイバーを埋め込む、という形をデザインした。1 枚の HBU の大きさが 36 cm であるため、このカウンタを用いて 1 枚の HBU を十分にカバーすることができる。上面と下面のファイバーが直交するよう縦方向と横方向に、それぞれ 84 本ずつのファイバーを入れる。宇宙線がシンチレータを通過すると、発生したシンチレーション光が周囲のファイバーに吸収され、それらがファイバーに沿って両端の SiPM に届きシグナルが検出される。図 5.3 の右にあるようにこれらのファイバーのシグナルはヒット位置周辺で大きく、離れるに従って小さくなっていく。このシグナ

ルの分布を用いて縦横それぞれの方向について再構成を行うことで、二次元的なヒットの位置を読み出すことができる。¹

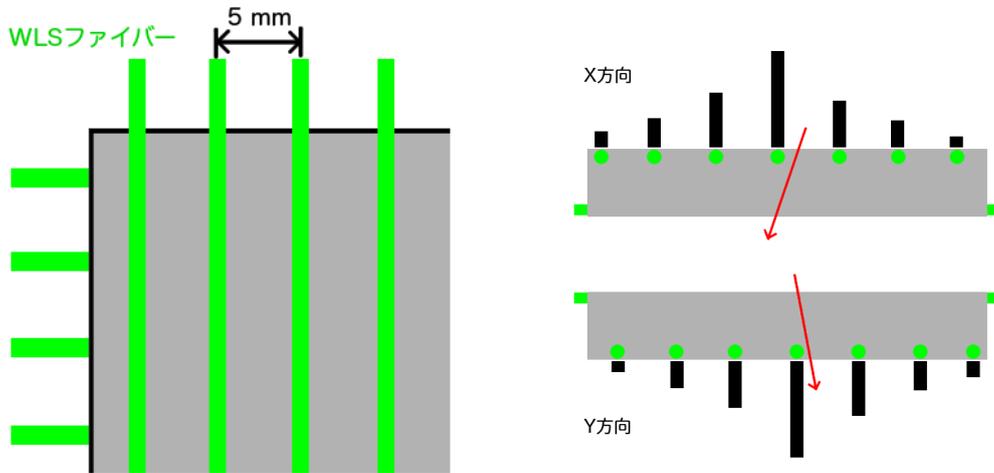


図 5.3: 宇宙線カウンタの設計とシグナル分布

このデザインでは1枚のカウンタに168本のファイバーが埋め込まれ、それらの両端からそれぞれ読み出しを行う為、1枚のカウンタを読み出すのに必要なチャンネル数が336と膨大な数になってしまう。これを避ける為に、幾つかのファイバーを束ねまとめて1つのSiPMで読み出すことを考えた。例えば16本おきに5本か6本ずつのファイバーをまとめることで読み出しチャンネル数を64チャンネルにまで削減できる。ここでファイバーを束ねてしまうと、そのSiPMからのシグナルがどのファイバーに由来するものかわからず、図5.4にあるように本来のヒット位置とは別に多数の偽ヒットが生じてしまう。

今回のセットアップでは、上下に配置した2枚の宇宙線カウンタの間に多数のHBUを挟み試験を行う。宇宙線カウンタの偽ヒットの間隔はHBUのタイルよりも十分広いため、これらのHBUのタイルの信号という情報を用いることで図5.5のように多数引かれる宇宙線の軌跡の候補の中から正しい軌跡を選び出すことができる。

5.2.2 設計

プラスチックシンチレータの素材としてPVTベースのEJ-212を用い、42 cm角6 mm厚の板を切り出した。切り出されたシンチレータの板に5 mm間隔で溝を彫り、そこに図5.6のようにWLSファイバー(Kurarey Y11, $\phi = 1$ mm)を埋め込み、全長にわたって光学セメントで固定した。

図5.7のように、WLSファイバーを16本おきに束ねて光学セメントを用いてクッキーに固定し、光学グリッドの塗られたMPPCに接続した。MPPCは1つのPCB上に16個を並べて表面実装した。

検出される光量を増やすために、シンチレータプレートの上面と下面には反射材(アルミ蒸着マイラー)を貼った。側面は黒く塗りつぶし、側面による光の反射の影響を抑えた。シンチレータの板は厚み3 mmのプラスチックカバーで覆い、アルミニウムのフレームに固定した。図5.8が組み上げられた宇宙線カウンタである。このカウンタを2台作製しトリガーカウンタとして使用した。

¹同じ5 mm刻みの読み出しならば、5 mm幅のストリップ状のシンチレータを並べた方が分解能が幾分か良くなる。しかしこの試験装置では性能を極限まで高める必要はなく、製作の簡便さからこのデザインを選択した。

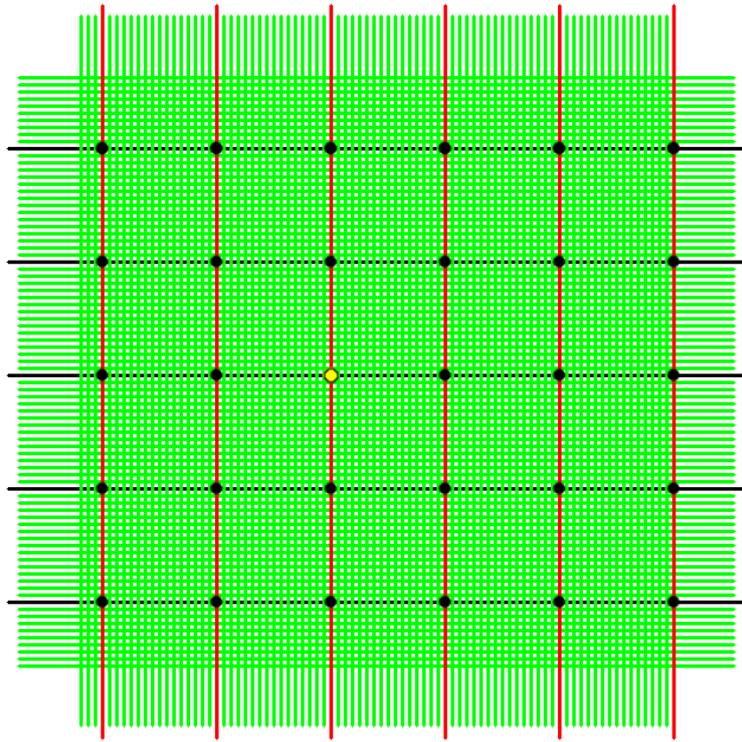


図 5.4: ファイバーを束ねることによるヒット誤認 (黄点: ヒット位置、黒点: 再構成位置)

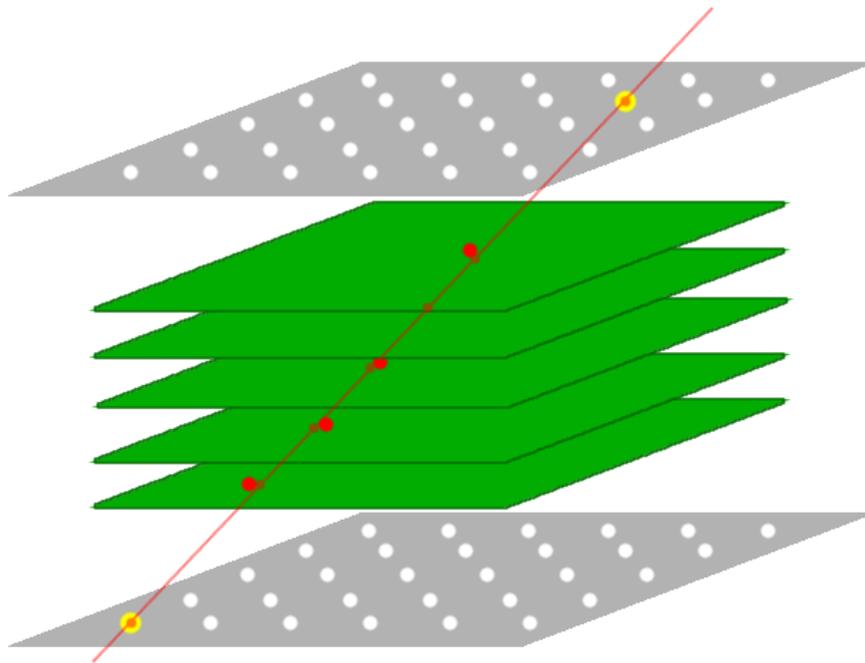


図 5.5: HBU のヒットを用いた本物のヒットの特定 (白点: 宇宙線カウンタ上のヒット候補、赤点: HBU 上のヒット)

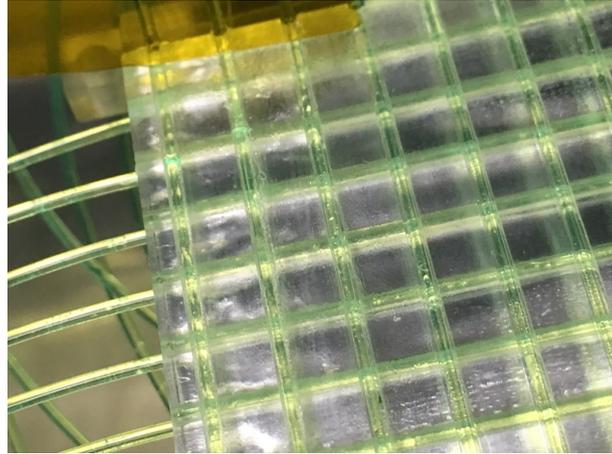


図 5.6: シンチレータに接着固定された WLS ファイバー

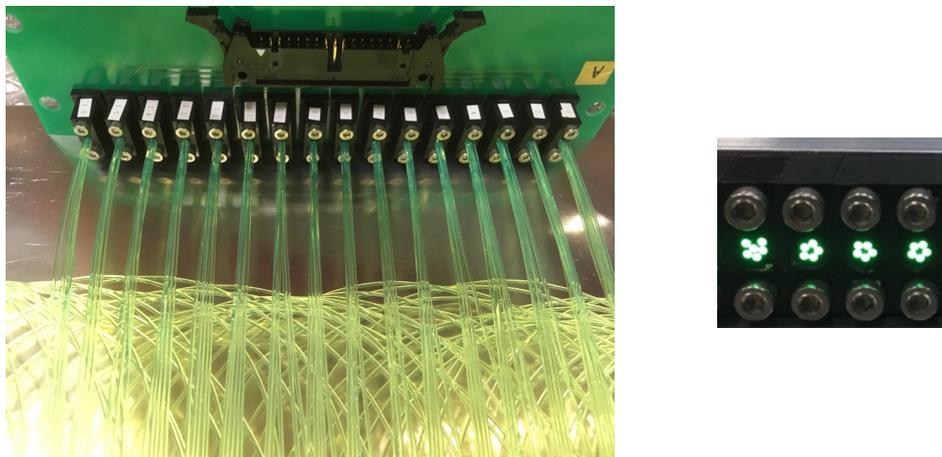


図 5.7: 束ねられ MPPC に接続されたファイバー

5.2.3 DAQ

信号の読み出しには、つくばの KEK を中心とした OpenIt で開発されている EASIROC モジュールを用いた [22]。EASIROC モジュールは EASIROC ASIC と FPGA を載せ、最大 64 チャンネルの MPPC を制御し読み出すことができる。EASIROC モジュールの基板と EASIROC Chip の回路図を図 5.9 に示す。FPGA のファームウェアを書き換えることで様々な実験に合わせて用いることのできる汎用エレキモジュールである。このセットアップでは 64 の MPPC 読み出しを持つカウンタを 2 台用いるため、EASIROC もそれぞれのカウンタに 1 台ずつ、計 2 台を用いた。

EASIROC のファームウェアは信州大学で開発されたものを使用した。このファームウェアにはクロックをカウントする形で TDC が導入されており、CCC からのクロックを入力することで HBU と同じ時間情報を持って動作させることができる。これにより、HBU と EASIROC の信号が同一の BXID に収まるイベントのみを選択することでデータの同期を行った。図 5.10 は同期したイベントについて HBU と EASIROC それぞれの TDC の値をプロットしたものである。両者に強い線形性が見られ、同期が正しく働いていることが確認出来る。何本もの線が見えるのは HBU の ASIC 毎に TDC の時間応答が若干ずつ異なるためである。

HBU と EASIROC を同期させる際の DAQ の制御の流れを図 5.11 に示す。それぞれの EASIROC のトリガーは 64 チャンネル全ての OR でかけた。宇宙線をトリガーするために、2 台の EASIROC

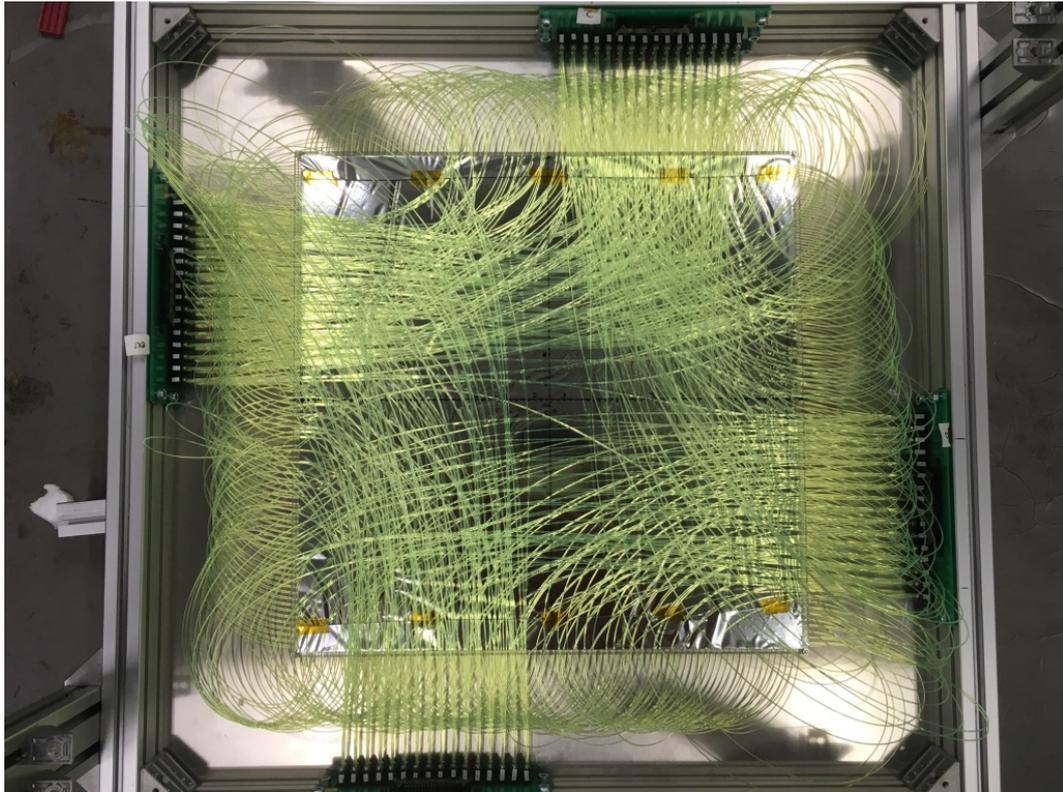


図 5.8: フレームに固定された宇宙線カウンタ

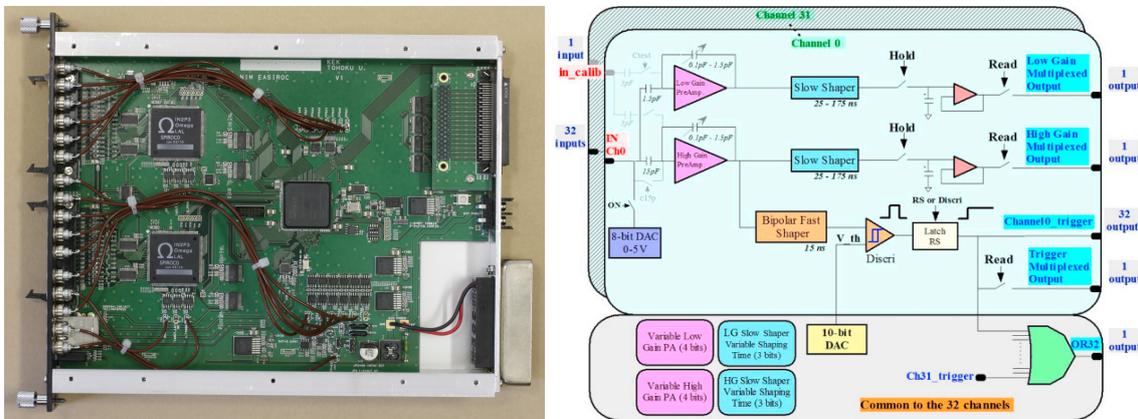


図 5.9: EASIROC モジュール (左) と EASIROC chip の回路図 (右)

のトリガー信号の coincidence を取り、遅延を挟んで EASIROC の信号をホールドする。Coincidence 信号は同時に CCC にも送られ、HBU のトリガーとしても用いられる。CCC からはマスタークロックの他に、ACQUISITION 信号を EASIROC に入力している。ACQUISITION 信号は HBU がデータ取得を行っている間 ON を、データ読み出しによって取得が行えない間 OFF を出力する。この ACQUISITION 信号の立ち上がりを EASIROC でカウントすることで、ROC の番号を双方の DAQ で共通させた。また、HBU がデータの読み出しを行っている間は EASIROC トリガーのコインシデンスに VETO を入力することで EASIROC のデータ取得も停止させた。

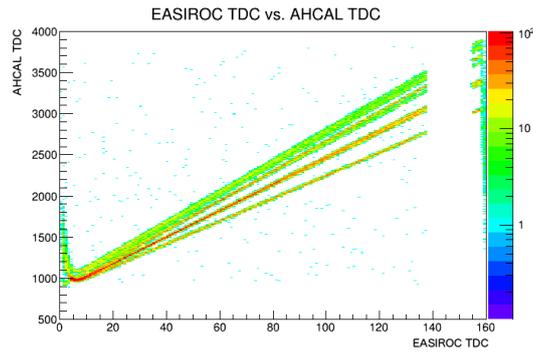


図 5.10: 同期を取ったイベントの TDC 比較

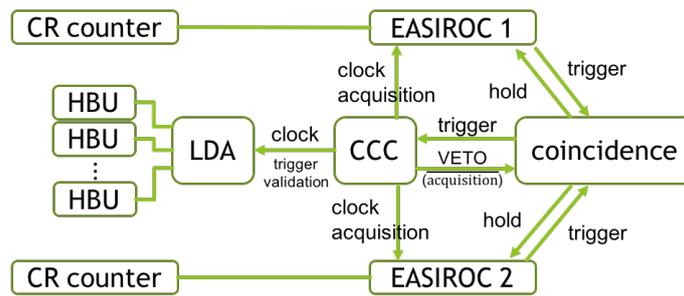


図 5.11: DAQ 制御シグナルの流れ

EUDAQ

EUDAQ は汎用の DAQ 用ファームウェアである。² 複数の DAQ をプロセッサとして並列に立ち上げ、得られたデータをデータコレクターを介して保存することができる。今回の実験でも HBU を扱う LabView プログラムと EASIROC の TCP/IP 制御を並列して処理するためにこのプラットフォームを用いた。

5.2.4 解析手法

宇宙線イベントはヒット周囲の数ファイバーには大きな光量を与えるものの離れたファイバーは片側 1 数フォトエレクトロン程度しか検出されない。そのため、宇宙線イベントの測定と同時に図 5.12 のように MPPC のゲインを調べるのに十分な統計を得ることができる。それぞれのチャンネルについてマルチガウシアンでフィットし、MPPC のゲインとオフセットを算出した。

この結果を元にそれぞれのチャンネルの ADC をフォトエレクトロン数に変換した。ただし変換の際に光量が 0 を下回る場合は 0 とした。

この時点で 2 台の EASIROC を合わせて計 5 チャンネル、図 5.13 のようにベDESTAL のみしか見えず信号を読めないデッドチャンネルが存在することが判明した。EASIROC モジュールは静電気に極端に弱く、セットアップの際にモジュールへ接触したどこかのタイミングで一部のチャンネルが故障してしまったものと思われる。EASIROC の修理が不可能だったため、これらのチャンネルは周囲のチャンネルの得たシグナルを元に復元することで対処を行った。

²<https://github.com/eudaq/eudaq>

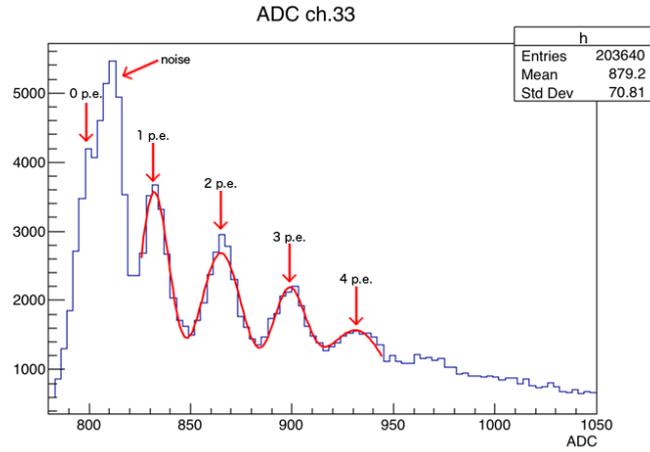


図 5.12: ADC の分布とガウス関数によるフィット

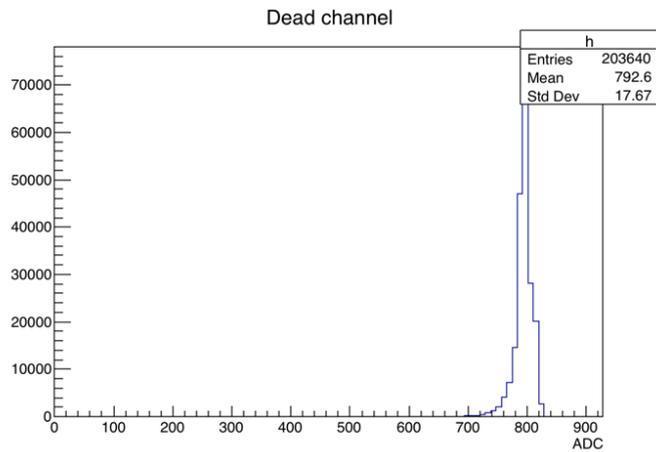


図 5.13: デッドチャンネルの ADC



図 5.14: デッドチャンネル周辺のチャンネル

図 5.14 のようにチャンネルの番号を置いた時、デッドチャンネルの計算式は

$$N_{pe}(k) = N_{pe}(l) \times \frac{N_{pe}(k+1) + N_{pe}(k-1)}{N_{pe}(l+1) + N_{pe}(l-1)}$$

で与えた。ただし、これら周囲のチャンネルのシグナルが総じて小さい時に、特に分母に入っている $N_{pe}(l+1) + N_{pe}(l-1)$ の値によって復元されたシグナルの大きさが大きく変動してしまうため、 $N_{pe}(l+1), N_{pe}(l-1)$ がどちらも 1 を超えていなければ復元を行わず $N_{pe}(k)$ は 0 のままとした。

宇宙線カウンタの片方向に入れられた 84 本のファイバーは 16 本おきに束ねて読み出されているため、シグナルの分布は周期的になっている。そこで 16 チャンネルを同列に扱えるよう、宇宙線のヒット位置の再構成には以下のような手法を用いた。

1. 図 5.15 のように、16 チャンネルずつ周期的に並ぶチャンネルを単位円の円周上に等間隔に配置する。
2. それぞれの点を検出されたフォトエレクトロン数で重み付けし、加重平均をとる (図の赤い点)。
3. 得られた平均の位置から偏角を計算し、対応する位置を求める。

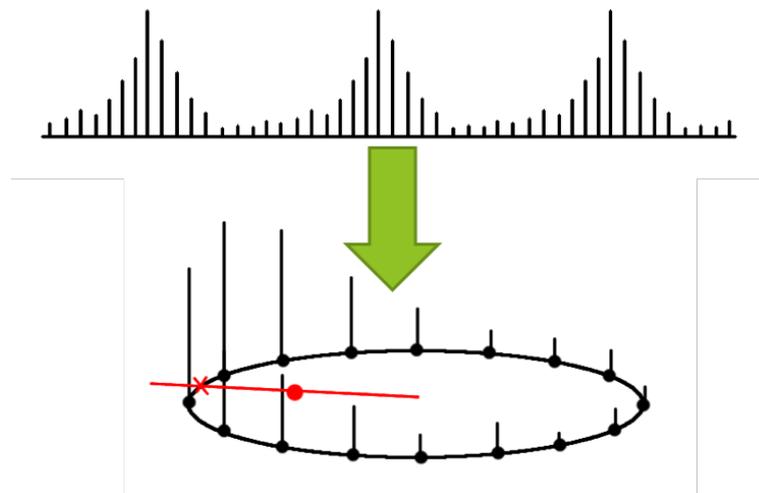


図 5.15: ヒット位置再構成の手法

5.3 宇宙線カウンタの性能評価

5.3.1 実験セットアップ

開発した宇宙線カウンタの性能を評価するために、図 5.16 のようなセットアップで実験を行った。宇宙線カウンタと抑えとなるプラスチックのカバーの上から、 ^{90}Sr を用いて β 線を照射した。コリメータは $\phi = 1.5 \text{ mm}$, $h = 3 \text{ mm}$ であり、プラスチックカバーの厚さは 3 mm である。

大域的な性能を調べるために、それぞれのカウンタについて縦横 84 本ずつのファイバーの中央直上に β 線を順に照射し、再構成を行った。また局所的な性能評価のために、2 本のファイバーの間を 1 mm 刻みで照射し位置の再構成を行った。

5.3.2 宇宙線カウンタ内でのシンチレーション光の減衰

図 5.17 はカウンタの一番端のファイバー直上に線源を置いた時のそれぞれのチャンネルの平均光量である。ファイバーがヒット位置から離れるにつれ、検出される光量は指数関数で減衰する様子が

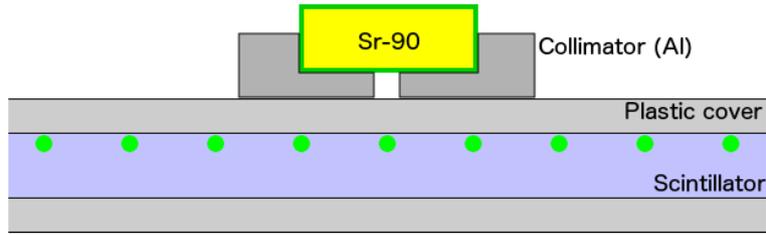


図 5.16: 宇宙線カウンタの性能評価のためのセットアップ

わかる。この光量分布を指数関数でフィットした結果、減衰長は 15.8 ± 0.06 mm と求まり、この宇宙線カウンタ内の光量分布はヒット位置からの距離 x を用いて

$$N_{pe}(x) = e^{-x/15.8 \text{ mm}} N_{pe}(0) \quad (5.1)$$

と表されることがわかる。この減衰長はファイバーを束ねたことによる周期 80 mm よりも十分に短く、ファイバーバンドルによる光量分布の歪みは小さいことがわかる。

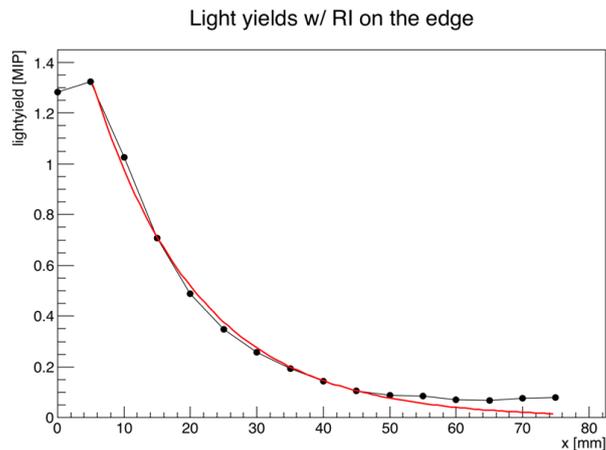


図 5.17: 距離による光量の減衰

5.3.3 位置の再構成

カウンタに β 線を照射した際の再構成された位置分布は図 5.18 のようになり、フィットしたガウス関数の σ の値を用いて位置分解能を評価した。再構成には環境放射線や宇宙線由来と考えられる一様なノイズが乗っているので、フィット関数はガウス関数に定数関数を足し合わせたものを用いた。

フィットによって得られた位置分布の中心値を用いて、図 5.19 の再構成結果を得た。再構成位置は、中心部分については線形に振る舞うもののカウンタの端でカウンタの中心に向かってずれることが見て取れる。この原因と対処については 5.3.5 節で述べる。

5.3.4 ファイバー間の再構成の線形性

5.3.2 節で見たように、ファイバーの得る光量はヒット位置からの距離に対し指数関数で減少すると考えて良い。ファイバーが稠密に入り連続的に読み出せるのならば位置の再構成は全ての点において

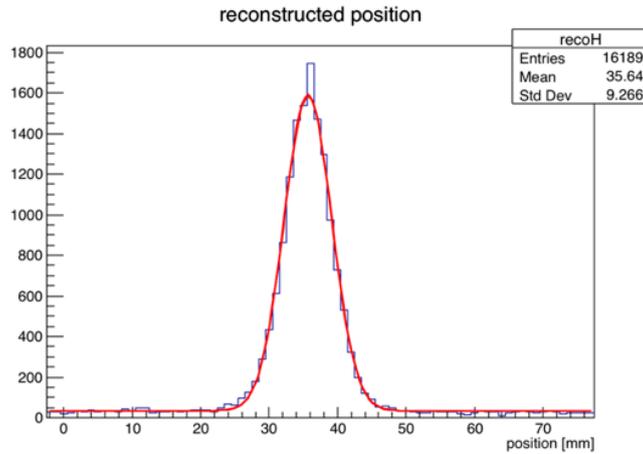


図 5.18: 再構成された位置の分布

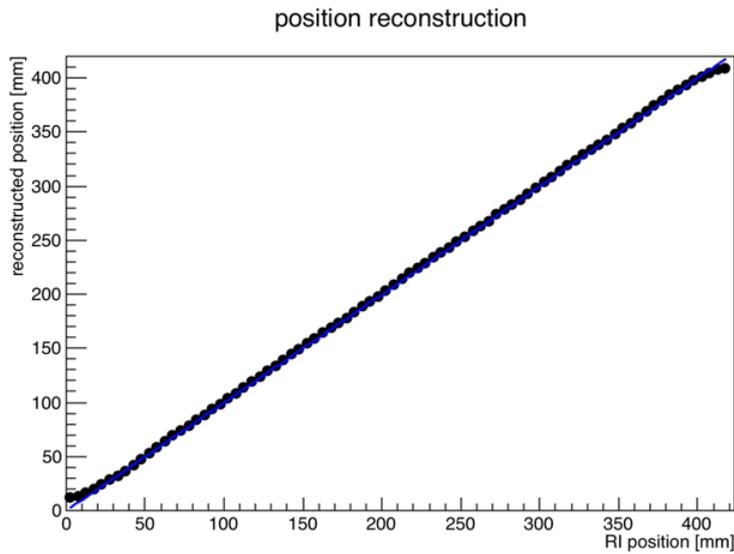


図 5.19: 照射位置と再構成された平均位置 青線は理論値

て線形に振る舞うが、実際にはファイバーは 5 mm おきにしかなく、読み出しは離散的に行なわれている。このことがファイバー間の再構成にどのような影響を与えるか調べる必要がある。

式 (5.1) を用いてファイバー間のヒット位置について、再構成された位置と実際の位置とのズレを数値計算した結果が図 5.20 である。傾向としては実際の位置よりも近い側のファイバー方向に再構成がずれる様子が見られる。しかしズレの値は最大で 0.02 mm であり、再構成の分解能に比べ十分に小さく無視して良い。理論的にこの宇宙線カウンタを用いてファイバー間についても線形に再構成ができると結論づけられる。

実際にファイバー間に 1 mm 刻みで β 線を照射した際の再構成位置を図 5.21 に示す。線源のライメントのエラーが大きく 0.1 mm オーダーでの議論はできないが、少なくとも 1 mm 単位の大きな非線形性はないことがわかる。

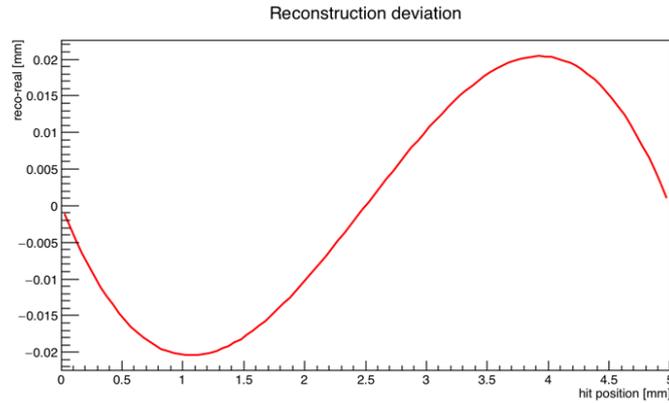


図 5.20: ファイバー間の再構成エラー

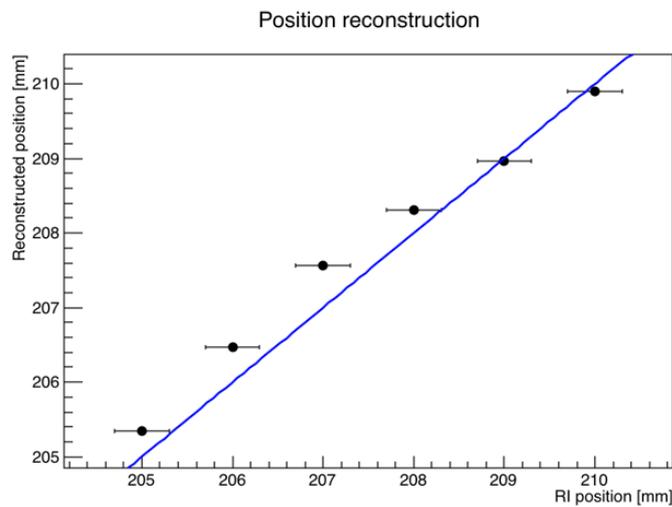


図 5.21: 実データを用いたファイバー間の再構成

5.3.5 カウンタ端のヒット

5.3.3 節でカウンタの端では再構成が正しい位置に為されないことを見た。この節ではその原因と補正について述べる。

原因

この宇宙線カウンタでの再構成方法は、宇宙線がヒットした位置を中心に 16 ファイバー、前後 4 cm ずつの情報を用いて位置の加重平均をとることで再構成を行っている。しかしカウンタの端から 4 cm 以内にヒットがあった時、用いるべきファイバーの一部が欠けてしまい、図 5.22 のようにシグナルの分布が非対称になってしまう。この状態で加重平均による再構成を行うと、信号の存在するカウンタ中心側へ再構成がずれてしまうことがカウンタ端での再構成エラーの原因である。また、再構成が中心側にずれることによって間隔が狭まり、 σ も小さくなってしまう。

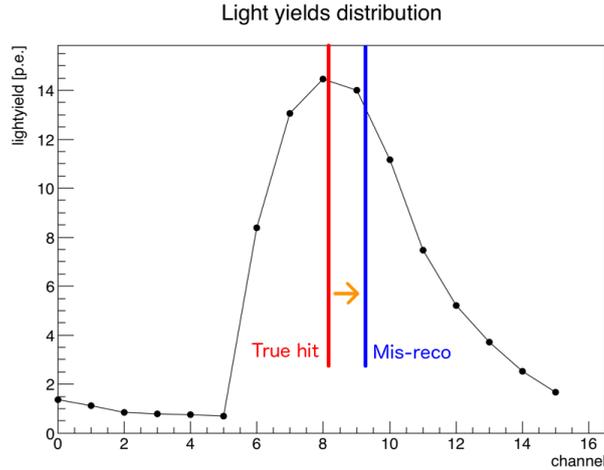


図 5.22: 端にヒットした際のファイバー毎のシグナル分布

再構成エラーの定量評価

式 (5.1) の分布を持つシグナルを円周上に並べ加重平均を取る操作は式に表すと

$$\bar{x} = \int_{-8+k}^{8+k} e^{-0.316|n|} \cos \frac{2\pi n}{16} dn \quad (5.2)$$

$$\bar{y} = \int_{-8+k}^{8+k} e^{-0.316|n|} \sin \frac{2\pi n}{16} dn \quad (5.3)$$

となる。 k はカウンタの端に消えたファイバー数である。ここでヒット位置は偏角 $\theta = 0$ に置き、加重平均は連続に取れるものとした。また、直近の 16 ファイバー分以外のファイバーからのシグナルは無視できるものとした。

カウンタの端でなければ $k = 0$ であり、 $\bar{y} = 0$ なので再構成は $\theta = 0$ と正しい位置になる。しかしカウンタの端では k が有限の値を持ってしまう。この時の再構成された偏角を計算すると、

$$\tan \theta = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = \frac{a \cosh(ak) \sin(bk) - b \sinh(ak) \cos(bk)}{ae^{8a} + a \cosh(ak) \cos(bk) + b \sinh(ak) \sin(bk)} \quad (5.4)$$

と得られる。 $(a = 0.316, b = \pi/8)$

図 5.23 の黒点は再構成された位置と実際の照射位置との差であり、赤い曲線がここで計算した端での挙動を表す関数である。求められた関数がカウンタ端での挙動をよく描写できていることがわかる。この関数を用いて端での再構成位置の補正を行った結果を図 5.24, 5.25 に示す。

ここで適用した補正は平均的な光量分布を基に計算されているため、必ずしも平均通りに振舞わないそれぞれのイベントでは補正が逆に再構成の精度を悪化させてしまう可能性がある。特にカウンタの最も端の部分は補正による効果が大きく、また元々補正関数の値域の外に再構成されてしまった点は補正によってカウンタの外に出てしまうという問題もあるため、正確な再構成が困難である。

このようなカウンタの最も端の部分を除けば、すべての位置で線形な応答を得られる様が見られる。また、端の部分での位置分解能の挙動も消え、全体で 3.3 mm 程度の分解能が得られていることがわかる。カウンタの右端に位置分解能が悪い点がいくつか集まっているが、この端に位置する 84 本目のファイバーが両側の読み出しとも亀裂が入りシグナルが安定しないために周辺の位置分解能の悪化を引き起こしていると考えられる。この問題については 5.3.6 節で詳しい議論を行う。

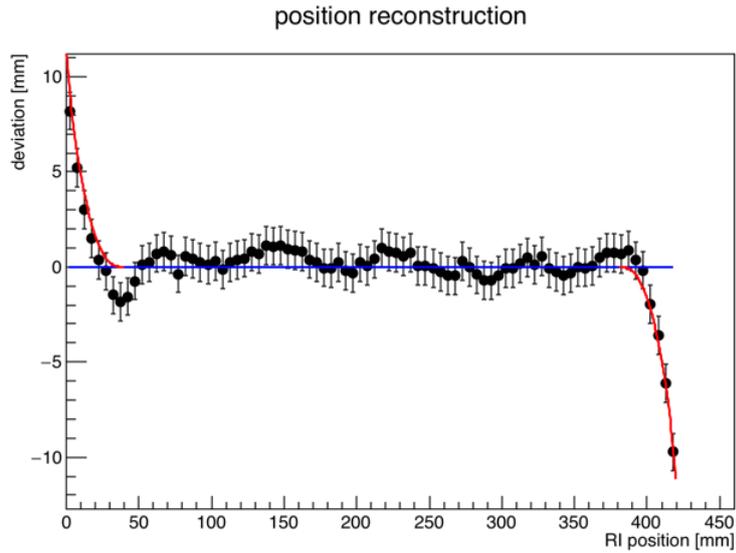


図 5.23: 再構成された位置と実際の照射位置の偏差のグラフ。青線は偏差 0 の線であり、赤線は計算によって求められた端での挙動を表す関数。各点の誤差は線源のアラインメントエラーとガウス関数のフィットエラーによるもの

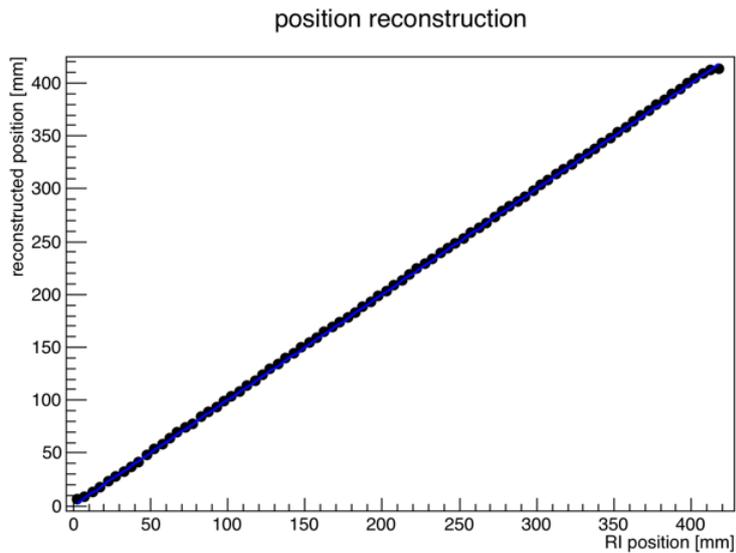


図 5.24: 再構成された位置の平均

5.3.6 系統誤差の評価

この実験ではファイバーやオプティカルセメントは全て同じ製品を用いたが、ファイバーの状態やセメントのムラなどによってそれぞれのファイバーの獲得光量には差が生じうる。ファイバーごとの獲得光量の補正を行うため、各ファイバー直上に線源を置き β 線を照射したデータを用いてそれぞれのファイバーの光量を求めた。ただし 5.4 節の実験においてはこの補正が間に合わなかったため適用されていない。そのためここでは、ファイバーの獲得する光量の差が再構成にどの程度の系統誤差を与えるかについて議論する。

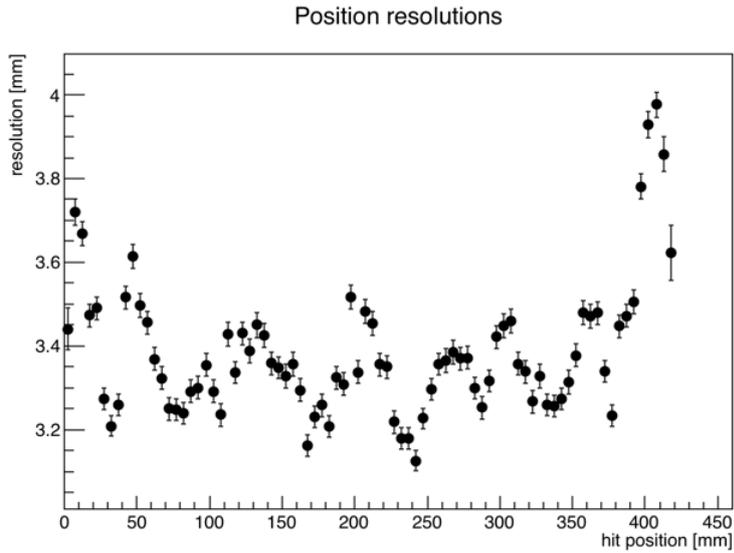


図 5.25: 位置分解能

デッドファイバーによる影響

ファイバーが外部の衝撃等によって折れる、切れる等した場合に、吸収されファイバーの中を進むシンチレーション光が MPPC に到達できずそのファイバーの片側の光量が減少し、場合によっては完全にシグナルが検出できなくなってしまう。このようなファイバーが 1 本あった際に再構成にどの程度影響するかを数値計算によって確かめたのが図 5.26 である。

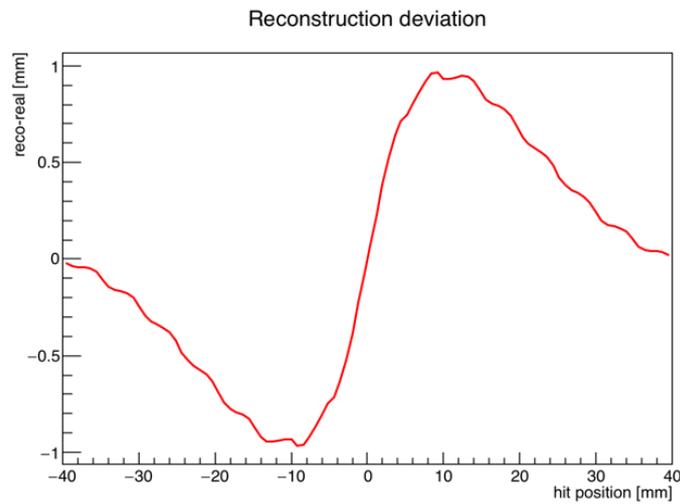


図 5.26: デッドファイバーによる再構成のズレ

$x = 0$ に置かれたファイバーの片側の読み出しが完全に機能せず、ファイバーの光量が半減した場合について、実際ヒット位置 x と再構成のズレを計算した。全体的に光量の少ないファイバーから遠ざかる方向に再構成点が生ずる様子が見られる。最も影響が大きいのは壊れたチャンネルのファイバーから 1 cm (2 ファイバー) 離れた位置にヒットがあった場合であり、1 mm のズレが見られた。

ファイバーごとの獲得光量の差による影響

図 5.27 は一つのカウンタの一方方向に入れられた 84 本のファイバーの獲得光量の分布を示している。ここで見られるように、ファイバーごとの獲得光量にはおよそ 5.3%のばらつきが見られた。この程度のばらつきが再構成に与える影響について数値計算によって確認した。

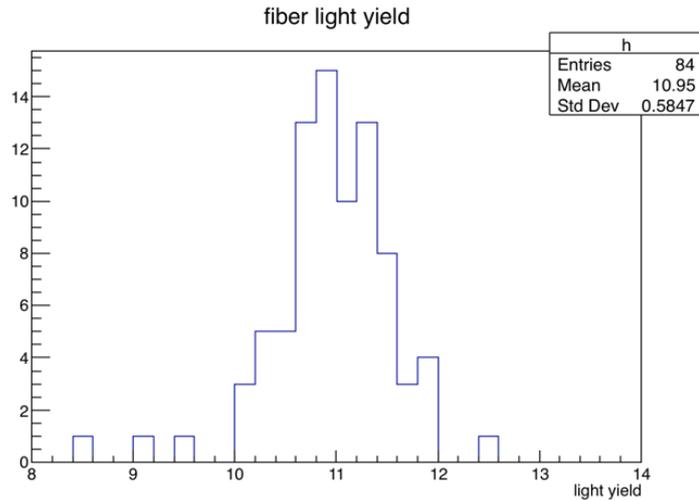


図 5.27: 一方向 84 本のファイバーからの両側の獲得光量の和の分布

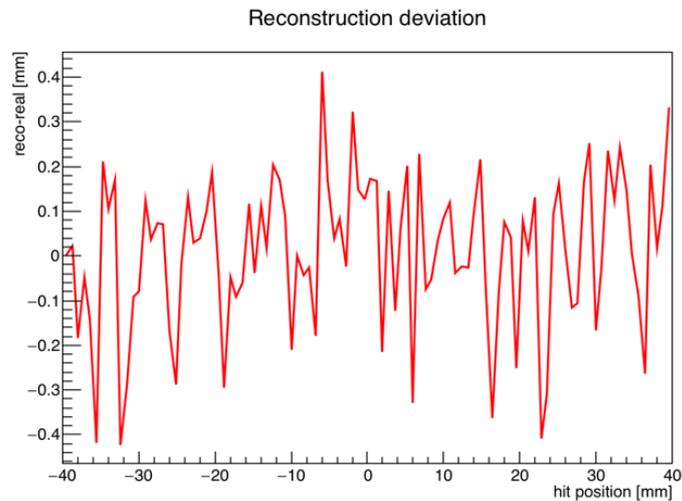


図 5.28: ファイバーの光量差 (5.3%) による再構成のズレ

図 5.28 のように最大で 0.4 mm 程度の系統誤差が生じることがわかる。この値は宇宙線カウンタの位置分解能に比十分に小さく、5.4 節の実験において致命的な問題を生じることはないと考えられる。

5.4 HBU の試験

2018年に予定されているテストビーム実験に向け、ドイツで新しいHBUの製作及びアセンブリが行なわれている。この新しいHBUの試験を行うために2017年11月にドイツのDESYで宇宙線試験装置のコミッショニングを行い、実際にHBUの試験を行った。

5.4.1 実験セットアップ

セットアップはDESYの実験ホールであるHera Westで行った。HBUのラックに2台の宇宙線カウンタを導入し(図5.29)、それらの間にHBUを入れて測定を行った。



図 5.29: HBU ラックに導入された宇宙線カウンタ。ラックの6番と19番に2台のカウンタがそれぞれ入れられている。



図 5.30: 試験装置と検出層の配置。アルミフレームに入れられた2台の宇宙線カウンタと、その間に3層のHBUが差し込まれている。真ん中のHBUが試験する対象。

大型試作機のためのHBUの製作はまだ全て終了しておらず、今回のコミッショニングは最初にDESYに届いた4枚のHBUを2×2に並べた新しい検出層1層と、過去のテストビームに用いていた古いHBUを2層用いて実験を行った。図5.30は今回用いた実験の配置写真であり、上下の宇宙線カウンタ(銀のフレーム内)の間に3層のHBU検出層(緑の薄いレイヤー)を挟み込んでいる。一番上の検出層は1枚のHBUからなり、一番下の検出層はHBUを2×2に並べたものである。これらは過去のテストビームの用いられた古い検出層であり今回は宇宙線カウンタのトラックの決定のみに使用した。真ん中に置かれたレイヤーが試験する対象である、新しい2×2のHBUからなる検出層である。我々の開発した宇宙線開発装置は1層1枚のHBUを測定するために作られており、4枚のHBUからなる大きな検出層については全域を測定することはできない。この試験では、テストビーム実験をする際に最もビームの当たる重要な領域である、検出層の中心部分の測定を行った。

このセットアップ全体を図5.31のようにブラックシートを用いて遮光した。このとき、HBUに直接接続されHBUの制御を行うDIFボードは発熱量が大きく、遮光によって内部に熱がこもることが懸念された。それを防ぐために図5.30の中段のHBUの直上に見られるように小型のファンを設置し、送風し空気を循環させることで過熱による故障を阻止した。HBU上やDIF上に複数組み込まれている温度計により検出層の温度は常にモニターされ、測定の間 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内で非常に安定していることが確認された。



図 5.31: ブラックシートにより遮光されたセットアップ

図 5.32 は今回用いたセットアップでの実際の宇宙線イベントのイベントディスプレイである。上下の黒い点は宇宙線カウンタのヒット位置の候補であり、赤い点と周囲の四角がヒットのあった HBU のタイルである。これらの位置情報を用いてプログラムで自動的に最もふさわしい軌跡が選択されている。具体的な手法としては、上下のカウンタのヒット候補を結んだ宇宙線の軌跡の候補それぞれに対し、「通過したヒットのあるタイルの枚数」が最大であるものを正しい軌跡として採用している。ただし、宇宙線カウンタの分解能を考慮してタイルの近傍を通過した場合にも通過したと扱っている。「通過したヒットのあるタイルの枚数」が最大であるものが複数あった場合、通過したタイルについて「タイル中心と軌跡の通過点との距離の二乗和」を計算し最小であるものを選択する。

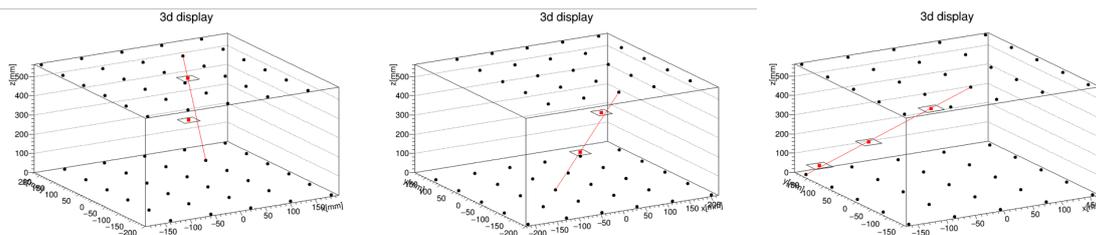


図 5.32: イベントディスプレイ。このグラフでは実際のセットアップと上下が反転している。1 枚目と 2 枚目の画像は 4HBU の層 2 つにヒットがあり、3 枚目の画像はそれに加え 1HBU の層にもヒットがある。

このイベントディスプレイには HBU の 2 層にしかヒットがないものと 3 層全てにヒットがあるものがある。今回の HBU 試験では試験すべき HBU が 1 層しかなく、古い 2 層の HBU を宇宙線の軌跡の決定のために用いた。しかし古い HBU にはデッドチャンネルが含まれ、またうち 1 層は試験領域の全てを覆えないために 3 層全てを用いて軌跡を決定できたイベントは限られている。今後新しい HBU の製作が進み検出層の数が増えていくことで、カウンタの inefficiency についての議論も行えるようになる。

5.4.2 角度補正

検出層のシンチレータタイル内を宇宙線が通過する長さは、タイルの厚み d 、入射角 θ に対して $\frac{d}{\cos \theta}$ ($> d$) と表される。宇宙線の軌跡の再構成を元に宇宙線の入射角 θ が算出できるため、シグナルに $\cos \theta$ をかけることで、様々な角度の宇宙線に対する応答を垂直入射に対する応答に直すことができる。

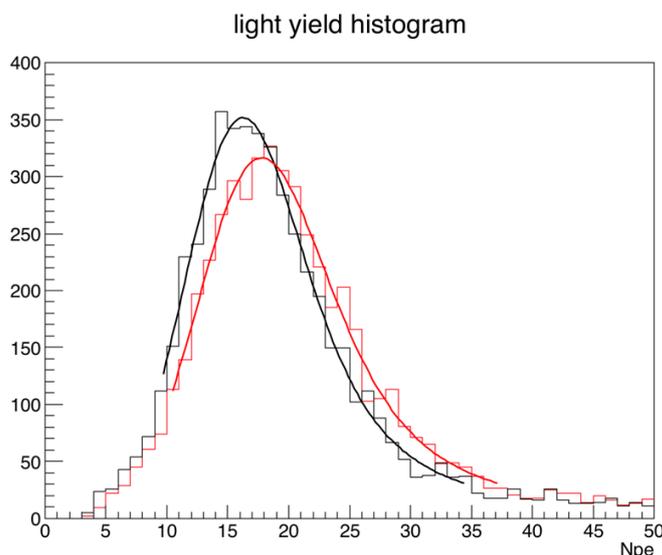


図 5.33: 角度補正前 (赤) と補正後 (黒) のシグナル分布と、それぞれをランダウ関数とガウス関数の畳み込みでフィットした曲線

図 5.33 に角度補正を適用した例を示す。角度補正を行うことにより期待通りに分布が低い方へ移動し分布の幅が狭まっている様子がわかる。

5.4.3 HBU 試験結果

HBU の試験結果として、各チャンネルの MIP に対する応答の確認を行ったのが図 5.34 である。ここでは 2×2 に並べられた HBU の中心 144 チャンネルについて応答がプロットされている。平均で 15–16 フォトンほどの光量が得られるが、低いチャンネルでは 11 フォトン、高いチャンネルでは 18 フォトンとチャンネル毎の差もある程度の値があり、それぞれのチャンネルの応答を調べて補正を行うことの重要性が理解出来る結果となった。

また、角度補正を行わない場合のチャンネルの応答を図 5.35 に示す。比較してわかるように、角度補正を行わない場合に中心部分でチャンネルの応答が大きくなる傾向が見られる。図 5.36 のように角度補正を行わない場合と行った場合との比を見ればこの傾向は明らかであり、この試験装置の中心部分でより大きな角度補正がかかっている様子がわかる。角度補正前は大きな角度の宇宙線が通ることによって見かけの応答が上昇するが、試験装置の端の部分では角度の大きな宇宙線がトリガーされず、垂直に近い宇宙線が多いため 1 に近い値が得られる。このタイルの位置による角度依存性の違いからも、宇宙線試験をする上で角度依存性を補正することの重要性がわかる。

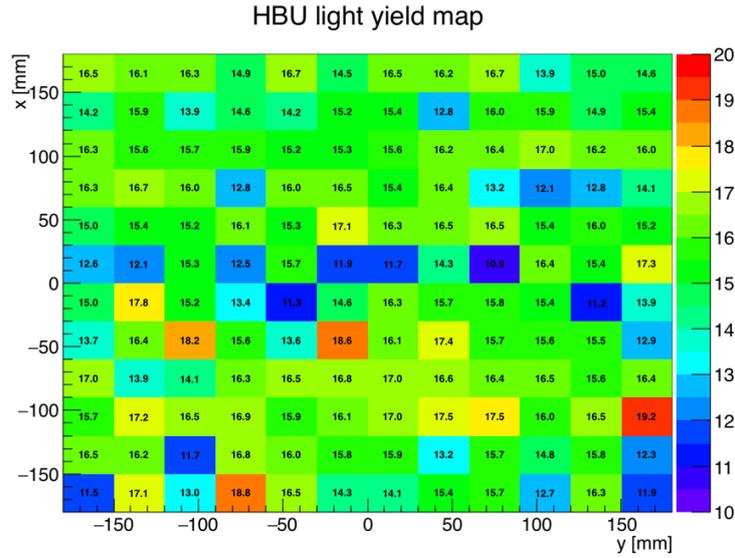


図 5.34: 宇宙線試験装置による HBU のタイル応答

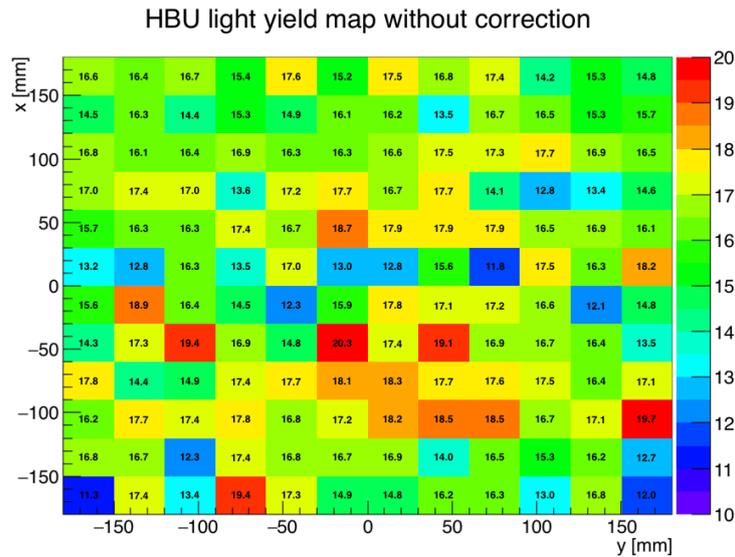


図 5.35: 宇宙線の入射角度による補正を行わない場合の HBU のタイル応答

5.4.4 Mainz での宇宙線試験との比較

図 5.1 でも見たように、Mainz では完成した HBU にシンチレータタイルを正しい順序で並べて検出層を完成させ、その後出荷前試験として Mainz グループ独自の宇宙線試験セットアップを用いた動作試験が行われている。Mainz では図 5.37 のように、HBU と同程度の大きさの宇宙線カウンタの間に HBU を挟んで通過した宇宙線のトリガーをかけることで試験が行われた。また、我々は 2×2 に並べて測定した HBU は Mainz では 1 枚ずつに分けて測定された。

Mainz で行われた宇宙線試験の結果を図 5.38 に対比する。2 つの実験で調べられた HBU の応答は同様の結果を示している様子がわかる。より対比を明瞭にするためにこれらの比を表示したのが図 5.39 である。我々の開発した宇宙線試験装置では角度の補正を行っているが Mainz では行っていない

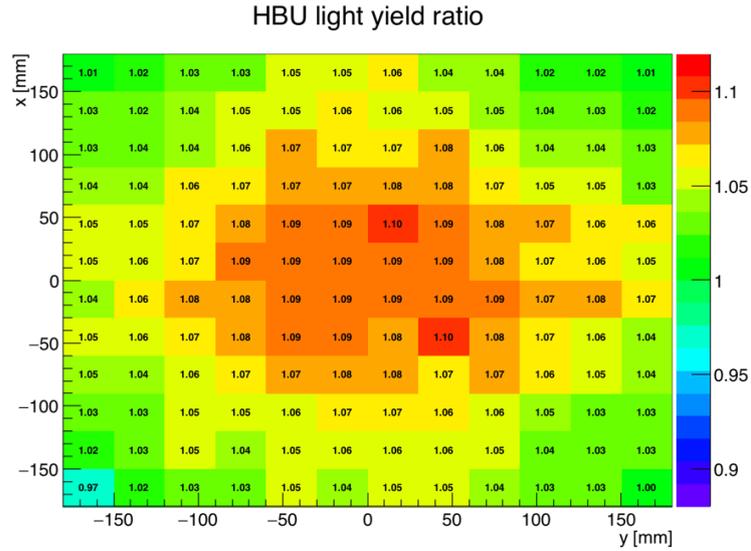


図 5.36: 宇宙線の角度による補正前後の比 (補正前/補正後)



図 5.37: Mainz の宇宙線試験セットアップ

ないため、全体として1よりも高い値が多く見えていることがわかる。また、この比のプロットにおける中心は1に近い値が多く、隅に行くに従って比の値が大きくなっていることがわかる。Mainzでの測定においてはこの図の中心はセットアップの端に当たり、この図の四隅がセットアップの中心に当たる。図 5.36 でも見られたように、セットアップの端では大きな角度で入射する宇宙線がトリガーできず、垂直に近い角度の宇宙線のイベントが得られ、逆にセットアップの中心では大きな角度で入射する宇宙線が見えるため光量が大きく見積もられてしまう。

今回開発した試験装置が Mainz の従来の宇宙線試験と同様の結果を示したことによりこの試験装置の正当性が確認され、また、宇宙線の入射角補正がうまく動作している様子も見られた。

5.4.5 タイル間の光漏れ

4.1.1 節で結果のみを先に述べたが、宇宙線試験装置を用いて標準的なセットアップでの光漏れの測定を行った。

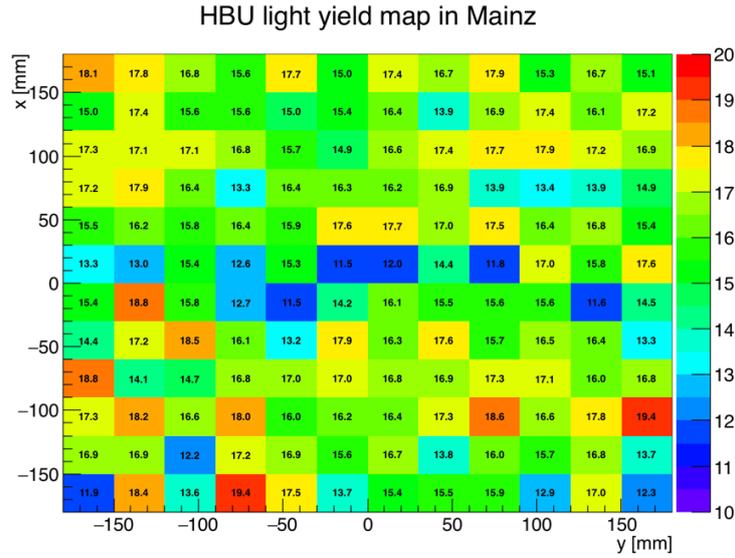


図 5.38: Mainz で行われた宇宙線試験の結果

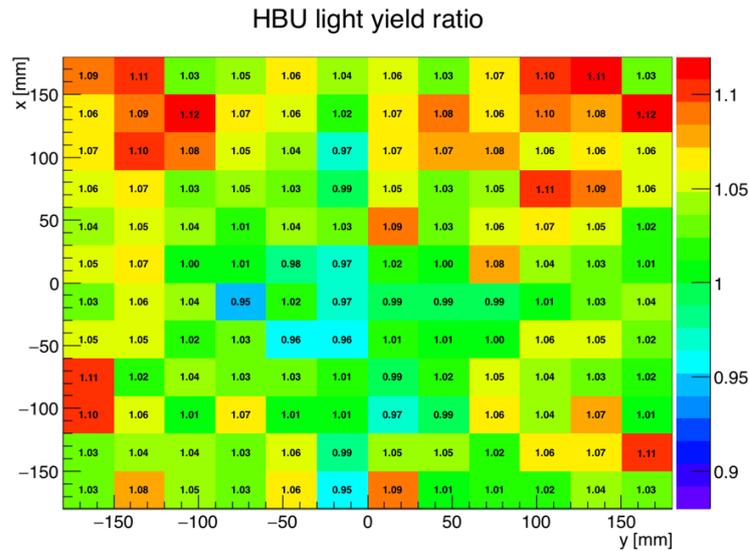


図 5.39: Mainz の結果と我々の開発した試験装置との結果の比 (Mainz/東京大学角度補正後)

図 5.40 のように、標準のデザインではシンチレータタイルは個別に反射材で覆われ、タイル中心の SiPM が置かれる部分と較正用の LED が存在する部分のみに穴が開けられ外部と光学的な相互作用を持つ。この反射材を巻く際に 4 隅が完全に遮蔽できない場合があるため、そこから周囲のタイルにシンチレーション光が漏れる可能性がある。この光漏れの大きさを調べるために、宇宙線試験装置を用いた測定を行った。あるタイルに着目し、そのタイルを宇宙線が通過した際の周囲の信号を調べ、チャンネル毎に平均光量を求めるという手法によって光漏れの評価を行った。宇宙線試験装置の分解能は 3-4 mm であるため、イベントを誤認することを防ぐために注目するタイルの端から 5 mm 以内を通過したイベントは除き、また中心タイルが十分な光量を得てないイベントも除外した。

こうして得られたシグナル分布を図 5.41 に示す。各タイルの数値は獲得した平均の光量である。



図 5.40: 反射材の巻かれたシンチレータタイル

タイルによって光量に多少のばらつきがあるため、中心タイルと一辺を共有する最近接 4 タイル、辺か角を共有する近接 8 タイル、何も共有しない遠隔 27 タイル、に区分し、それぞれの平均光量を計算することで光漏れの大きさを評価した。

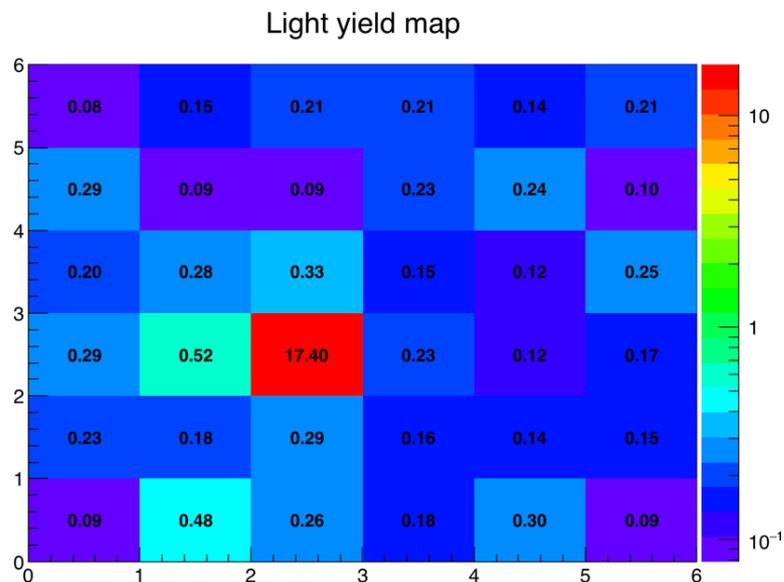


図 5.41: 光漏れの測定結果

図 5.41 を例にとると中心タイルの光量 17.4 に対し、最近接の平均が 0.34、近接の平均が 0.27、遠隔の平均が 0.19 であり、遠隔タイルの平均をバックグラウンドと捉えると最近接への光漏れは平均で 0.15 フォトンである。遠隔タイルの標準偏差 $\sigma = 0.008$ であり、求められた光漏れはタイルのばらつきよりも有意に大きい。中心のタイルの光量で規格化して、光漏れは約 0.87% である。

16 枚のタイルについて同様の操作を行った結果を図 5.42 に示す。光漏れの大きさはタイル毎に 0.1% から 0.9% まで大きく異なるが総じて 1% に届かないほどには小さく、平均で 0.55% であるという結果が得られた。

5.5 結論

2018 年に行われる大型試作機を用いたテストビーム実験に向け、大型試作機の大量のチャンネル試験、較正のための宇宙線試験装置を開発した。シンチレータプレートに 5 mm ピッチで WLS ファ

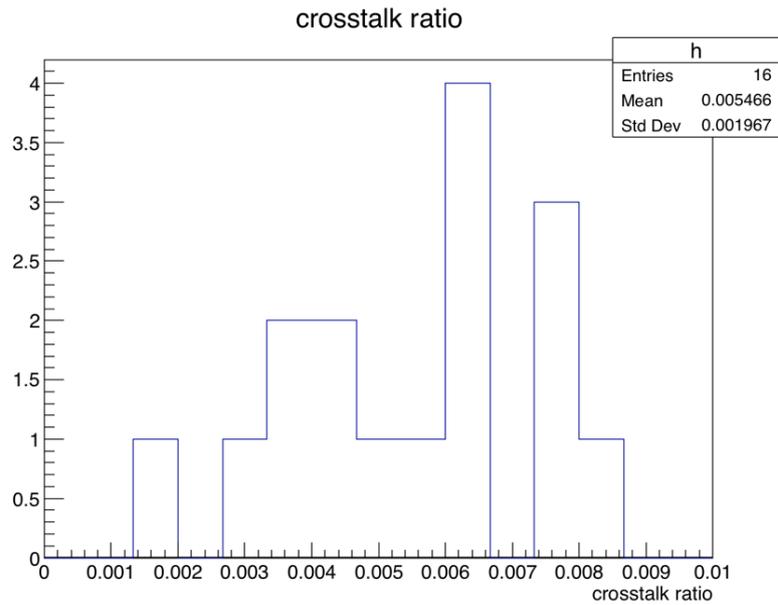


図 5.42: 光漏れの大きさの分布

イバーを入れたデザインのカウンタを用いて高い位置分解能を達成し、宇宙線の角度補正やタイル内の詳細なスキャンなど幅広い応用が可能である。

開発した試験装置はドイツの DESY に設置し、立ち上げと HBU の試験を行った。HBU の試験は初めに届いた 1 層の検出層を用いて行い、我々の試験とは別に行われた Mainz グループの宇宙線試験との整合が確認され、また角度補正の効果を確かめることができた。このコミッショニングの期間には十分な統計が得られず、この試験装置の特長のひとつであるタイル内の応答分布を調べることはできなかった。今後 HBU の製作が進み、新しい検出層が多数 DESY に届きそれらの試験をする際にこれらの詳細な応答の確認を行っていく。

また宇宙線試験装置の一つの応用として標準的な検出層デザインでの光漏れの実測を行い、光漏れの大きさが 0.55% と十分に小さい値であることが確認された。

第6章 結論

本研究では、ILC に用いられるハドロンカロリメータの検出層について、シンチレータマテリアル、検出層デザイン、DAQ 試験と多岐にわたる研究を通して性能の向上を目指した。

ILC で用いられる HCAL は PFA を用いるために高度にセグメント化されており、シンチレータタイルの数は 800 万にも及ぶ。このことを受け、大量生産に適した射出成形プラスチックシンチレータが検出層として十分な性能を持つかを調べ、また添加する発光剤の濃度を調整することで発光量の最大化を図った。依然として更なる発光量改善の可能性はあるものの、射出成形されたプラスチックシンチレータの発光量はキャスト成形されたシンチレータの光量の 80% 近くを達成し、ILC の検出層としての活用に必要な発光量が得られた。今後、プラスチックの製造会社であるジーテックと協力し、製造過程についての研究を行うことでタイル毎の個体差や射出成形の表面状態について改良を行うことを予定している。

また、細かく分割された読み出しを行う上で避けては通れない光漏れについて、シミュレーションを通してその影響を定量的に調べた。光漏れによるジェットのエネルギ分解能はジェットのエネルギによって異なる振る舞いを示すが、ILC 初期のターゲットとするエネルギスケールでは小さな光漏れにも敏感に反応し分解能が悪化するため、光漏れの抑制は重要な課題であることがわかる。光漏れは検出層の性能向上のため新たなデザインを提案する際にも重要な要素であり、この研究を通して検出層の製造や新しいデザインのクオリティコントロールに指標を与えることができる。

これらの個々の技術研究に加え、2018 年初夏に予定されている大型の試作機を用いたテストビーム実験、またその先の HCAL 本体の建設に向け、大量の HCAL 検出層を一斉に試験、較正するための試験装置を開発し、ドイツの DESY 研究所に設置しコミッショニングを行った。細かい読み出しを行う HCAL 検出層のさらに細かい応答まで詳細に調べることができる、非常に高い位置分解能を有した試験装置を用いて、検出層の運転や応答の試験だけではなく今後新たに開発される可能性のある改良された新しい HBU について詳細な測定を行うことができる。この試験装置の設計、開発、性能評価を行い、目標とする性能が達成できていることを確認し、また実際に HBU を用いた試験を行った。

これらの研究を通して ILC で用いられる高性能な HCAL 検出層の開発を行った。

謝辞

はじめに研究を進める中で基本的な知識から様々な技術まで幅広く指導をしてくださった大谷航准教授に多大な感謝を述べたいと思います。また、森俊則教授にはミーティングやゼミで多くのためになるアドバイスやコメントをいただきました。

DESY の研究者の方々にも宇宙線試験装置の立ち上げや HBU の取り扱いなど多くの協力をさせていただきました。特に、宇宙線試験装置の立ち上げや DAQ の整備に協力してくれた Jiri Kvasnika, 解析の相談に乗ってくれた須藤裕司さん、DESY での研究を全面的にサポートしてくれた Felix Sefkow, Katja Kuüger に心より感謝します。

シミュレーション研究を進めるにあたってソフトウェアの基本的な部分を指導してくださった KEK の Daniel Jeans, Pandora の較正や software compensation の最適化について非常に親身になって相談に乗ってくださったケンブリッジ大学の Steve Green, DESY の Shaojun Lu にこの場を借りてお礼を申し上げます。

この研究を進めていく際に多くの協力をしてもらった、小林暁くん、辻直希くん、鳥丸達郎くん、また岩本敏幸助教、内山雄祐特任助教、家城佳さん、西村美紀さん、小川真治さん、中尾光孝さん、岩井遼斗さん、宇佐見正志くん、恩田理奈さんという素晴らしい同僚に恵まれ、充実した研究生生活を送ることができました。出張を始めとする様々な手続きを円滑に進めてくださった ICEPP の秘書さんがたにも大変お世話になりました。

最後に支えてくださった家族の皆様と、守り導いてくださった主への感謝を以てこの論文の結びとさせていただきます。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Keisuke Fujii, Christophe Grojean, Michael E. Peskin, Tim Barklow, Yuanning Gao, Shinya Kanemura, Hyungdo Kim, Jenny List, Mihoko Nojiri, Maxim Perelstein, Roman Poeschl, Juergen Reuter, Frank Simon, Tomohiko Tanabe, Jaehoon Yu, James D. Wells, Hitoshi Murayama, and Hitoshi Yamamoto. Physics case for the international linear collider, 2015.
- [2] Ties Behnke, James E. Brau, Philip N. Burrows, Juan Fuster, Michael Peskin, Marcel Stanitzki, Yasuhiro Sugimoto, Sakue Yamada, and Hitoshi Yamamoto. The international linear collider technical design report - volume 4: Detectors, 2013.
- [3] Klaus Pretzl. Calorimeters in astro and particle physics. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, Vol. 31, No. 7, p. R133, 2005.
- [4] V. Ammosov, V. Gapienko, A. Ivanilov, A. Semak, Yu. Sviridov, E. Usenko, V. Zaets, and F. Sefkow. RPC as a detector for high granularity digital hadron calorimetry. *DESY-04-057*, 2004.
- [5] J C Brient and H Videau. The calorimetry at the future e^+e^- linear collider. *eConf C010630 (2001) E3047*, 02 2002.
- [6] Felix Sefkow, Andy White, Kiyotomo Kawagoe, Roman Pöschl, and José Repond. Experimental tests of particle flow calorimetry. *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 88, p. 015003, Feb 2016.
- [7] CMS Collaboration. Particle-Flow Event Reconstruction in CMS and Performance for Jets, Taus, and MET. Technical Report CMS-PAS-PFT-09-001, CERN, Geneva, Apr 2009.
- [8] Benjamin Hermberg for the CALICE Collaboration. Commissioning of the testbeam prototype of the calice tile hadron calorimeter, 2012.
- [9] Naoya Shibata. Development of hcal scintillator cell unit for ilc detector. Master's thesis, The University of Tokyo, 2016.
- [10] 浜松ホトニクス社. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/03_handbook.pdf.
- [11] Eljen Technology. <http://www.eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212>.
- [12] T. Adam, E. Baussan, K. Borer, J-E. Campagne, N. Chon-Sen, C. de La Taille, N. Dick, M. Dracos, G. Gaudiot, T. Goeltzenlichter, Y. Gornushkin, J-N. Grapton, J-L. Guyonnet, M. Hess, R. Igersheim, J. Janicsko Csathy, C. Jollet, F. Juget, H. Kocher, A. Krasnoperov, Z. Krumstein, G. Martin-Chassard, U. Moser, A. Nozdrin, A. Olchevski, S. Porokhovoi, L. Raux, A. Sadovski, J. Schuler, H-U. Schütz, C. Schwab, A. Smolnikov, G. Van Beek, P. Vilain, T. Wälchli, G. Wilquet, and J. Wurtz. The opera experiment target tracker. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 577, No. 3, pp. 523 – 539, 2007.

- [13] Naoya Shibata. JPS 71st annual meeting, 2016.
- [14] P. W. Cattaneo, M. De Gerone, F. Gatti, M. Nishimura, W. Ootani, M. Rossella, and Y. Uchiyama. Development of high precision timing counter based on plastic scintillator with sipm readout. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 61, No. 5, pp. 2657–2666, Oct 2014.
- [15] Stefan Ritt, Roberto Dinapoli, and Ueli Hartmann. Application of the drs chip for fast waveform digitizing. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 623, No. 1, pp. 486 – 488, 2010. 1st International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics.
- [16] Miki Nishimura. Meg 実験アップグレードに向けた分解能 30 ピコ秒の陽電子タイミングカウンターの研究開発. Master’s thesis, The University of Tokyo, 2014.
- [17] Naoki Tsuji. CALICE collaboration meeting at Tokyo, 2017.
- [18] M. Janecek. Reflectivity spectra for commonly used reflectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 59, No. 3, pp. 490–497, June 2012.
- [19] Yong Liu. CALICE collaboration meeting at Tokyo, 2017.
- [20] PandoraPFA. <https://github.com/PandoraPFA/LCPandoraAnalysis/tree/master/doc>.
- [21] Huong Lan Tran, Katja Krüger, Felix Sefkow, Steven Green, John Marshall, Mark Thomson, and Frank Simon. Software compensation in particle flow reconstruction. *The European Physical Journal C*, Vol. 77, No. 10, p. 698, Oct 2017.
- [22] OpenIt. <http://openit.kek.jp/project/MPPC-Readout-Module/public/MPPC-Readout-Module>.