## 千葉大学大学院融合理工学府 修士論文

# IceCube-Upgrade 計画に用いられる新型光検出器 D-Egg の 2D Scan による方向依存性評価

先進理化学専攻 物理学コース

22WM2117 豊山 晋

2024年3月提出

概要

IceCube 実験では、南極氷河1km<sup>3</sup>の範囲に 5160 個の DOM (Digital Optical Module) と呼ばれる光 検出器を埋設し、宇宙ニュートリノの観測をしている。また、その到来方向からニュートリノ放射天 体の同定を目指している。現在、IceCube の次世代実験である IceCube-Gen2 実験が計画されており、 その前段階として IceCube-Upgrade 計画が進行中である。今計画では、IceCube の中心付近に新型光 検出器を約 700 台設置し、低エネルギー領域 (1 GeV ~ 1 TeV) のニュートリノの検出性能を向上さ せる。また、南極の氷中のチェレンコフ光の伝播を調べることで氷の光学的特性による系統誤差の軽 減に貢献する。

新型光検出器のうち 277 台は千葉大学で開発された新型光検出器 D-Egg である。DOM は耐圧ガ ラスの中に 10 inch の PMT が一つ含まれているのに対して D-Egg は 8 inch の PhotoMultiplier Tube (PMT) が上下に二つ搭載されている。シミュレーションを用いた評価によって DOM 比で 2.8 倍の 検出感度をもつことが期待されている。D-Egg は光子の入射方向により検出感度に差があることが 分かっている。ニュートリノフラックスの算出において光検出器の検出効率による系統誤差を削減 するためにはこの性能について実験的な検証をすることが重要である。本研究では D-Egg に対して モータによる制御で光源を動かしながら照射し,検出感度の方向依存性を調べた。また,その結果と Geant4 によるシミュレーション結果との比較をし,再現性を改善した。本論文ではその結果につい て議論する。

# 目次

第1章	ニュートリノ天文学
1.1	宇宙線スペクトル
1.2	ニュートリノ
	1.2.1 生成過程
	1.2.2 弱い相互作用
	1.2.3 チェレンコフ光
第2章	IceCube 実験
2.1	IceCube Array
	2.1.1 ニュートリノイベント
2.2	IceCube-Upgrade 計画
第3章	IceCube 検出器
3.1	現行の光検出器 DOM
3.2	D-Egg
	3.2.1 8inch PMT
	3.2.2 Main Board
	3.2.3 ガラスとゲル 12
	3.2.4 Effective Area
	3.2.5 FAT
第4章	PMT 15
4.1	PMTの検出原理
4.2	ゲイン1
4.3	QE
4.4	収集効率 (CE: Collection Efficiency) 10
4.5	Dark Rate
4.6	リニアリティ
4.7	Uniformity
第5章	D-Egg の光検出効率の直接測定 19
5.1	目的
5.2	スキャン装置の概略

目次
----

	5.2.1 光源	20
5.3	レーザーの光子数測定....................................	21
5.4	D-Egg の 2D スキャンのセットアップ	24
	5.4.1 今回使用する D-Egg	24
	5.4.2 Mini Field Hub	25
	5.4.3 Tabletop Main Board	25
	5.4.4 Reference PMT	26
	5.4.5 D-Egg の 2D スキャン	26
5.5	解析	26
	5.5.1 マッチング	27
	5.5.2 フィッティング	28
	5.5.3 リニアリティ	29
	5.5.4 結果	29
	5.5.5 Laser Stability	31
第6章	シミュレーションでの光検出効率の測定	33
6.1	シミュレーションプログラム: DOMINANT	33
	6.1.1 8 inch PMT の検出効率の実装方法	34
6.2	シミュレーションにおける D-Egg のスキャン測定 .................	34
	6.2.1 スキャン測定のセットアップ	34
	6.2.2 結果	35
第7章	実測値とシミュレーションとの比較	37
7.1	D-Egg の 2D スキャンの比較	37
7.2	シミュレーションの検証	37
	7.2.1 Uniformity 測定の較正	38
7.3	Effective Area	40
第8章	結論	45
第A章	Uniformity 測定の較正	47

# 第1章

# ニュートリノ天文学

## 1.1 宇宙線スペクトル

地球には宇宙線が届いている。宇宙線とはほぼ光速の速さで飛んでくる陽子や荷電イオンである。一次宇宙線は地球外つまり宇宙空間から地球に入射してきたものを指す。二次宇宙線は一次宇宙線が 地球大気と衝突して生成された粒子である。

図 1.1 は宇宙線のフラックスのエネルギー分布である。宇宙線フラックスはエネルギーが上がるに つれてべき乗で減少していき、10<sup>20</sup> eV 付近で急激に落ちている。この理由は、加速された陽子が宇 宙マイクロ波背景放射 (CMB: Cosmic Microwave Background) と衝突し、エネルギーを失うことで説 明される。この現象は GZK Cut Off と呼ばれている。

高エネルギー (> 10<sup>18</sup> eV) の宇宙線は銀河系内の磁場により閉じ込めることができない。よってガ ンマ線バースト天体 (GRB) や活動銀河核 (AGN) といった銀河系外由来の宇宙線である可能性があ り、高エネルギー宇宙線を観測することは放射線放出天体の理解につながる。しかし、陽子のような 荷電粒子は宇宙空間中の磁場により曲げられてしまう。それにより宇宙線の起源である放射線放出 天体の同定は困難である。この課題を解決し得るのがニュートリノである。ニュートリノは電荷を 持たないため磁場によって曲げられることは無い。また、弱い相互作用しかないため直接地球まで 到達する。よってニュートリノは高エネルギー宇宙線を理解することにおいて重要な役割を果たす。



図 1.1: 実際に観測された宇宙線のフラックス [1]。

1.2 ニュートリノ

1.2.1 生成過程

高エネルギー宇宙ニュートリノの生成過程を以下に示す。

$$p+\gamma 
ightarrow \Delta^+ 
ightarrow p+\pi^0$$
 $p+\gamma 
ightarrow n+\pi^+$ 
 $n 
ightarrow p+e^-+ar{
u}_e$ 
 $\pi^+ 
ightarrow \mu^++
u_\mu 
ightarrow e^++
u_e+ar{
u}_\mu+
u_\mu$ 

高エネルギーの陽子が CMB と衝突し、上式の過程を経て高エネルギーニュートリノが生成される。

1.2.2 弱い相互作用

ニュートリノは電荷を持たず、弱い相互作用でのみ反応を起こす。低い確率で核子と反応を起こす。 ニュートリノ ( $v_e$ ,  $v_\mu$ ,  $v_\tau$ )の相互作用には Charged Current Interaction(CC) と、Neural Current Interaction(NC) がある。

> $v_{\alpha} + N \rightarrow l^{\pm} + X$  : *CC* Interaction  $v_{\alpha} + N \rightarrow v_l + X$  : *NC* Interaction

ここで、lは荷電レプトン  $(e, \mu, \tau)$ 、N は核子、X はハドロンである。

1.2. ニュートリノ

#### 1.2.3 チェレンコフ光

ニュートリノは電荷を持たず、弱い相互作用でしか反応を起こさないため、直接観測することはで きない。ニュートリノを観測するには、ニュートリノと核子の反応で生成された荷電粒子が媒質の 中を光速よりも速い速度で動いた際に放出するチェレンコフ光を利用する。進行方向に対するチェ レンコフ光の角度 θ と光子数 N は以下の式で表される。

$$\cos\theta = \frac{1}{n\beta},\tag{1.1}$$

$$\frac{\partial^2 N}{\partial x \partial \lambda} = \frac{2\pi\alpha Z^2}{\lambda^2} \sin^2\theta, \qquad (1.2)$$

ここで $\lambda$  は波長、 $\alpha$  は微細構造定数、n は屈折率、Z は粒子の電荷、x は荷電粒子が進む距離、 $\beta = \frac{v}{c}$  (c は光速) である。検出したチェレンコフ光の光子数と放出角度からニュートリノの到来方向を推定 することが可能である。

# 第2章

# IceCube 実験

#### 2.1 IceCube Array

IceCube は南極のアムゼンスコットのアムゼンスコット基地内の約1km<sup>3</sup>の氷河中に光検出器埋設 を埋設して作られたニュートリ望遠鏡である。IceCube 実験は宇宙から来る高エネルギーニュートリ ノと南極の氷との相互作用で生成された荷電粒子が発するチェレンコフ光を捉え,エネルギーや時間 の情報から放射線放出天体を同定を目指すプロジェクトである。2005年に建設開始され,2011年に 完成している。

図 2.1 に示すように、南極氷河の 1450 m から 2450 m 深さに、約 5000 個 の Digital Optical Module (DOM) と呼ばれる光検出器が 86 本のケーブルで吊るされている。全 86 本のストリングの内、78 本 は各ストリングの間隔が 125 m, 垂直方向は 17 m の間隔で DOM が設置されている。残りの 8 本は Deep Core と呼ばれ、各ストリングの間隔が 72 m, 垂直方向は 7 m の間隔で DOM が密に設置されて いる。標準のアレイでは 100 GeV 以上のエネルギーのニュートリノ事象を観測対象しているのに対 し、Deep Core では 10 GeV から 100 GeV といった低エネルギーを対象している。



図 2.1: IceCube 実験の全体像 [2]。5160 個の DOM が埋設されている。IceCube の上の地表には"IceTop" では 宇宙線による空気シャワーを検出し、バックグラウンドとニュートリノ信号の区別に利用されている。

### 2.1.1 ニュートリノイベント

IceCube で観測された宇宙ニュートリノの観測事象を図 2.2 に示す。





図 2.2: IceCube のニュートリノイベント [3]。色は時間を表し, 球の大きさは DOM で検出されたチェレンコフ 光の光子の数を表している。左図のエネルギーの合計は 1.14 PeV。右図は 2.6 PeV

左のようなシャワー型のイベントは電子またはタウニュートリノによって引き起こされたもので、 エネルギーの同定は可能であるが到来方向を再構築するのは難しい。右のようなトラック型のニュー トリノイベントはミューニュートリノが CC interaction 反応によって生成されたミューオンによるも ので、1°未満の精度で到来方向の再構築が可能である。また、ダブルバング型と言われるイベントが ある。これはタウニュートリノが CC interaction 反応によって生成されたタウ粒子が後に電子やハド ロンに崩壊し二つ目のシャワーが生成される。

#### 2.2 IceCube-Upgrade 計画

IceCube の次世代実験として IceCube-Gen2 が計画されている。本実験は、IceCube 実験の約8倍の体積の氷河に約10000個の新型光検出器を埋設し、TeV以上の領域の感度を高めることが目的である。 IceCube-Gen2実験の前段階として、IceCube-Upgrade 計画が進行中である。本計画では Deep Core の付近に新型光検出器を約700台埋設する。7本の string で、間隔は25m、垂直方向は3mの間隔で新型光検出器が設置される。本計画では、低エネルギー(1 GeV から100 GeV)のニュートリノを対象としている。また、南極の氷河中の光の伝搬に伴う系統誤差の軽減にも貢献する。埋設予定の新型光検出器700台の内277台は千葉大学で開発された D-Egg 検出器である。



図 2.3: IceCube-Upgrade 実験の様子 [2]。各実験ごとのストリング間隔の概要を示した。

# 第3章

# IceCube 検出器

この章では初めに、次に IceCube の光検出器 DOM, IceCube-Upgrade で新しく埋設される D-Egg 検 出器について説明する。

3.1 現行の光検出器 DOM



図 3.1: IceCube DOM [4]。10 inch PMT が耐圧ガラスの中に搭載されている。

Digital Optical Module (DOM) は、現在 IceCube で稼働している光検出器である。図 3.1 で示すよう に、球形の耐圧ガラスの中に下向きに 10 inch の PMT が搭載されている。ガラス面と PMT は光学シ リコーンにより固定されている。Main Board は PMT からのアナログのシグナルをデジタル信号に 変換している。他にも DOM との通信が Main Board で行われている。Flasher Board には LED が搭 載されていて、他の DOM に対して光を照射し、較正を行っている。High Voltage Board は高電圧生成 器が搭載されていて印加電圧を増倍し PMT に高電圧を供給している。

### **3.2 D-Egg**



図 3.2: D-Egg の全体像 (左図) と内部構造 (右図) [5]。

IceCube-Upgrade で使用される D-Egg は千葉大学で開発された新型光検出器である。卵型の耐圧の グラスの中に浜松ホトニクス製の 8 inch の PMT が二つ搭載されている。これにより DOM 比で約 2.8 倍の検出効率を達成している。また、DOM が約 34 cm に対して、D-Egg は直径が約 30 cm と小さ くなっている。これにより南極の氷河に埋設する際の氷の切削費用を抑えることができる。camera ring は埋設後に再凍結した氷の光学的特性を測定することに利用される。Magnetic Shield (ファイン メットと呼ぶ) は地磁気によるノイズを削減するための磁気シールドである。DOM と同様、耐圧ガ ラスと PMT は光学シリコーンにより固定されている。また、ガラスの屈折率は 1.5、光学シリコーン の屈折率は 1.43 であり、ガラスと PMT の間を光学シリコーンで充填させることで屈折率の差を小さ くし光子の反射や屈折を防ぐ役割もある。Main Board はデータの収集や D-Egg の制御を行う。High Voltage board は PMT に高電圧を供給している。電圧やデータの送信は penetrator cable を通じて送 られる。

#### 3.2.1 8inch PMT

D-Egg の PMT は浜松ホトニクス製の 8inch PMT(R5912-100) が使用されている。ゲインは 10<sup>7</sup> に設 定する。ダイノードの段数は 10 である。



図 3.3: D-Egg で使用される 8inch PMT の外形図 [6]。

PMT の直径は 202 mm, キャソードの上面は半径 131 mm の球面でその中心を PMT の中心と定義する。PMT の側面はおおよそ円環面に沿っている。

#### 3.2.2 Main Board

Main Board は D-Egg の DAQ 基板である。円環状の形状で PMT のネックに位置している。Main Board には Micro Controller Unit (MCU), Field Programmable Gate Array(FPGA), Analog to digital converters(ADC), IceCube Comunications Module (ICM) が搭載されている。



図 3.4: Main Board の写真 (左図) とシステムの全体像 (右図) [5]。

MCU は Main Board の主要な機能を動かすためのソフトウェアが搭載されていて制御を行うと ころである (FPGA のトリガの設定など)。PMT からの信号はパルス整形された後, ADC でアナログ からデジタルに変換される。FPGA でデジタル化されたデータを一時的に保存し, トリガーレベルを 超えた波形のみを ICM に送っている。ICM は地上の DAQ システムから MCU や FPGA に指令を送 リ, データを地上に送る。また, クロックの信号 (60 MHz) を供給する役割がある。 3.2.3 ガラスとゲル

D-Egg に使用されるガラスとゲルについて説明する。低い波長の感度はチェレンコフ放射を検出 するには重要である。図 3.5 にガラスとゲルの波長に対する透過率を示す。IceCube DOM と比べて D-Egg のガラスとジェルの低い波長に対する透過率は向上している。



図 3.5: ガラスとゲルの透過率 [5]。青色の点線が現行の DOM 検出器で赤色の線が D-Egg 検出器である。

#### 3.2.4 Effective Area

シミュレーションにおける D-Egg の Effective Area を図 3.6 に示す。Effective Area とは検出器の実 効的な検出面積を表し、ビームの光子数  $N_{gen}$  と検出器が検出した光子数  $N_{det}$  を用いて式 3.1 のよう に計算される。D-Egg の Effective Area は角度依存性がある。理由は D-Egg に対して上から来た光 は PMT から見てみかけ上の面積が大きいのに対して横から来た光は小さいためである。IceCube の 解析において、ニュートリノのエネルギーや到来方向を同定する際にシミュレーションのデータを利 用しているため、Effective Area について理解することが重要である。

$$A_{eff} = Efficiency \times Beam Area \tag{3.1}$$

$$Efficiency = \frac{N_{det}}{N_{gen}}$$
(3.2)



図 3.6: 波長 400 nm における Effective Area の図 [5]。赤線: D-Egg, 黒線: IceCube DOM である。横軸は  $\cos \theta$  ( $\theta$  は天頂角である。検出器に対して下からビームを照射した時を  $\cos \theta = 1$  とする) で、縦軸は Effective Area の値を表す。D-Egg は上下二つに 8 inch PMT が搭載されていて上下に感度を持つ。

#### 3.2.5 FAT

D-Egg を南極に送る前に Final Acceptance Test(FAT) と呼ばれる最終試験が実験室で行われる。大型 冷凍庫の中で一度に 16 個の D-Egg を約 20 日間テストを行う。(-10 °C ~ -40 °C)





図 3.7: 左図は FAT が行われる大型冷凍庫。計 16 個の D-Egg を同時にテストすることが可能である。右図は Mini Field Hub であり, D-Egg とのコミュニケーションに用いられる。5.4.2 で記述。3 台の Mini Field Hub で 16 台の D-Egg と通信可能である。レーザーからの光は 32 本の光学ファイバーに分かれ, 16 台の D-Egg の上 下二つの PMT の正面まで運ばれる。 1. Gain Calibration

D-Egg の PMT は  $10^7$  のゲインになるように設定する。Single Photo Electron(SPE) level の光を 照射し,  $10^7$  ゲインのになるような高電圧を測定する。

2. Dark Noise

各温度において Dark Rate の測定を行う。Dark Rate については 4.5 で説明済み。

3. Linearity

Filter により強度を変えながら光量を調節し、測定を行う。

4. Timing Resolution

ニュートリノの到来方向を再構築するには信号のタイミングが重要である。Transit Time(TT) と は光電面から発生した光電子が陽極に到達するまでの時間を指し、そのばらつきを Transit Time Spread (TTs) は Timing Resolution に大きな影響を与える。

5. Double Pulse Feature

数 ns 差のピークを二つ持った波形を正確にとることはタウニュートリノの識別するために重要 である。ファンクションジェネレータで 20 ns 離れたバーストを発生させダブルピークを持っ た波形を作り測定する。

# 第4章

# **PMT**

### 4.1 PMT の検出原理

PMT (光電子増倍管)の光検出の原理について説明する。図 4.1 のように入射してきた光が光電面 (キャソード)に当たると、光電効果により光電子が放出される。放出された光電子はダイノード間の 電位差による電場で加速され第一ダイノード到達し、二次電子を放出する。その後、電子増倍部 (ダイノード)で 10<sup>6</sup> 以上に増幅し、最終的に陽極から電流として取り出される。



図 4.1: PMT の概念図 [6]。

### 4.2 ゲイン

キャソードから放出された光電子がダイノードで増倍される。その最終的な増倍率をゲインと呼ぶ。 ゲイン G は次式で表される。

$$G = A \times V^{kn} \tag{4.1}$$

A: PMT によって決まる定数,
k: 電極の構造材質で決まる定数,
n: ダイノードの段数,
V: 印加電圧

また、PMT のゲイン G は PMT の出力電荷 q, 電気素量 e, 光電子数 N<sub>PE</sub> を用いて

$$G = \frac{q}{e \times N_{PE}} \tag{4.2}$$

とも表せる。

### 4.3 QE

光電面にヒットした光子数の内, 光電子に換えられた割合を量子効率 (QE: Quantum Efficiency) と言う。

$$QE = \frac{N_{PE}}{N_{hit}} \tag{4.3}$$

*N<sub>PE</sub>*: 光電子数, *N<sub>hit</sub>*: 光電面にヒットした光子数

### 4.4 収集効率 (CE: Collection Efficiency)

光電面に光子がヒットした後,光電子が作り出される。しかし,すべての電子がダイノード間で増倍 される訳ではない。光電面から出た電子のうち第一ダイノードに集まる確率を収集効率と言う。

## 4.5 Dark Rate

PMT は光が入射していないときでも電流が陽極より取り出されることがある。これを Dark Rate と言う。Dark Rate の原因としては以下が挙げられる。

1. 光電面からの熱電子放出 光電面は常温でも熱電子を放出する。熱電子の放出量は以下の式で書くことができる。

$$I = A \cdot T^{5/4} \cdot e^{-e\psi/K_B T} \tag{4.4}$$

ψ: 仕事関数, e: 電子の電荷, K<sub>B</sub>: ボルツマン定数, T: 絶対温度 (K), A: 定数

熱電子放出は温度と仕事関数の関数で表される。温度が上がるほど熱電子放出量は多くなる。

- ガラスのシンチレーション
   光電面から出た電子の内,第二次電子面到達せずガラスに当たった際に発光する。
- 宇宙線などの放射線によるガラスの発光
   宇宙線(主にミューオン)がガラスを通った際にチェレンコフ光が発せられる。

D-Egg では常温では約3 kHz, 氷の中では約1 kHz の Dark Rate が発生する。

16

### 4.6 リニアリティ

PMT は広い範囲で入射光量に対する陽極出力電流のリニアリティ特性(直線性)の良い光検出器で あるが、短時間であまりに強い入射光を受けると直線性からズレが生じる。原因としては PMT は強 い光を検出した際にダイノードの後段で電流が流れ、電子の空間電荷密度が高くなり飽和現象が生じ るためである。図 4.6 に 8 inch PMT に光量を変えながら光を照射した時の光電子数の散布図を示す。



図 4.2: PMT(SQ0515) のリニアリティの図 [5]。横軸が本来の光量, 縦軸が実際に観測された光量である。(1% の時の光量を基準として本来の光量を計算している。) 青い線が測定値でオレンジの線が本来観測するべき光 電子数である。

## 4.7 Uniformity

Uniformity とは光子の入射位置の違いによる感度の均一性である。図 4.3 に 8 inch PMT の uniformity 測定のセットアップを示す。PMT のガラス表面の曲率中心を中心として, 天頂角  $\theta$  方向と方位角  $\phi$ 方向にモーターの制御によりレーザーを動かすことができる。常に PMT の曲率中心に照射する。 $\theta$ 方向 (0° から 60°)64 点,  $\phi$  方向 (0° から 360°)72 点の区間で PMT の波形データ取得する。





図 4.3: uniformity の測定のセットアップ [7]。

図 4.4 に測定の結果を示す。既に検出効率の分かっている PMT を Reference として入射位置ごとの検出効率  $E(\theta, \phi)$  を表した 2D マップ。



図 4.4: Uniformity の測定で得られた結果 [7] (PMT: SQ0775)。z 軸は入射位置ごとの入射光子数に対する検出した光電子数の割合の値。入射位置によって検出効率に差がある。

## 第5章

# D-Eggの光検出効率の直接測定

### 5.1 目的

シミュレーションにおける光検出器の検出効率の誤差はニュートリノフラックス測定の系統誤差に なる。第三章の図 3.6 でシミュレーションにおける Effective Area を示したが、D-Egg の検出効率は 光子の入射角度に依存性があり、そのシミュレーション結果が正しいかを調べるために実測をする。 D-Egg に対してレーザーをモーターによる制御で動かしながら照射し、検出効率を測定することで D-Egg の角度依存性を調べる。その結果とシミュレーションを比較し、シミュレーションを実測値に 近づけることでニュートリノ観測において検出器による系統誤差を軽減する。この章ではその測定 方法と結果について説明する。

### 5.2 スキャン装置の概略

研究の流れを説明する。本実験では光子数の分かっているレーザーを D-Egg に対して上下・横方向 から照射し,検出した光子数を測定する。検出効率が分かりシミュレーションと比較できる。また, Effective Area を計算し同様に比較する。

図 5.1 にスキャン装置を示す。暗箱の中の中央に D-Egg を置く。暗箱の外にあるレーザーの光は ファイバーを通じて暗箱内に運ばれる。ファイバーをモーターの制御により動かしながら D-Egg に 対してレーザーを照射することができる。本実験では  $\phi - r$  Scan と  $\phi - z$  Scan の二種類の測定が可 能である。それぞれ D-Egg に対して上, 横方向からのスキャンである。



図 5.1: D-Egg Scan の実際の様子。金属のボックスの真ん中に D-Egg が設置されている。ボックスの中には同 径、回転、鉛直方向に動くモータとモータ上に固定台がある。ボックスの外にあるレーザーダイオードから光 ファイバを通じて固定台に送られる。モータの制御により光源を動かしながら照射できる。固定台にはコリ メートレンズが搭載されていて平行な光を照射できる。レーザーのスポットサイズは約2mm である。

5.2.1 光源

今回使用する光源は半導体レーザーで波長 405 nm, 発光の時間幅は約 20 ns である。この光源を照射し, D-Egg の性能評価を行う。



図 5.2: 左はレーザーダイオードの回路。波長は 405 nm で, 光は光学ファイバーを通じて 2D スキャン box 内 に運ばれる。右は使用するファンクションジェネレータ。レーザーの TTL 信号と Tabletop Main Borad に送る 同期信号で使用される。Tabletop Main Board については 5.4.3 節で説明する。

## 5.3 レーザーの光子数測定

シミュレーションと実測値を絶対値で比較するためにレーザーの光子数 *N*<sub>LD</sub> を知る必要がある。そ こですでに *QE* が分かっている 8 inch PMT (SQ0515, QE:35.6 %) にレーザーを照射する。検出した 光電子数を *N*<sub>det</sub> とすると次式が成り立つ。

$$N_{LD} = \frac{N_{det}}{QE} \tag{5.1}$$

初めに測定で用いる 8 inch PMT のゲインキャリブレーションを行う。Single Photo Electron (SPE: 1 光電子)を放出するレベルの光を PMT に照射し, オシロスコープで 5000 波形を記録する。PMT か らの電流を I, オシロスコープの抵抗を R とすると電荷 Q は

$$V = IR \tag{5.2}$$

$$Q = \int \frac{V}{R} dt \tag{5.3}$$

と表せる。この積分を波形の数分繰り返し、ヒストグラムを得る。得られた電荷ヒストグラムの SPE 分布をガウス関数でフィットする。SPE の領域のフィッティング関数は以下の通り。

$$f(q) = A \exp\left(-\frac{(q - \mu_{spe})^2}{2\sigma_{spe}^2}\right)$$
(5.4)

A は規格化定数,  $\mu_{spe}$  は SPE の平均値,  $\sigma_{spe}$  は SPE の標準偏差である。PMT に供給する電圧を変えて測定する。図 5.3 に各 PMT 供給電圧ごとの電荷のヒストグラムを示す。



式 4.2 からゲインを求める。図 5.9 にゲインカーブを示す。ゲインのデータを式 4.1 の関数でフィットし, ゲインが 10<sup>7</sup> になるような高電圧を求める。



図 5.9: ゲインカーブの図。ゲインのデータを一次関数でフィッティングし、10<sup>7</sup> になる電圧を算出する。3.7 V は High Voltage Board に供給する電圧である。そこで電圧が 400 倍に増倍されて PMT に高電圧を送っている。

次にレーザーの光子数を知るために図 5.10 に示すセットアップで  $\phi$  - r Scan,  $\phi$  - z Scan のそれぞれのファイバーに対してキャリブレーションを行う。



図 5.10: レーザーのキャリブレーションのセットアップ。PMT の中心にレーザーを照射し, レーザーの光子数 を調べた。



図 5.11: PMT が検出したレーザー由来の電荷のヒストグラム。左: *φ* - *r* Scan のファイバー, 右: *φ* - *z* Scan の ファイバー

電荷のヒストグラムをガウス関数でフィットし、平均電荷Qを計算する。光子数Nは電気素量 e とゲインGを用いて

$$N = \frac{Q}{e \times G} \tag{5.5}$$

と計算できる。得られたレーザーの光子数を以下に示す。

表 5.1: レーザーのフォトン数

	$\phi - r$ Scan	$\phi - z$ Scan
NPE	$269\pm0.3$	$230\pm0.2$

### 5.4 D-Egg の 2D スキャンのセットアップ

これまでレーザーの光子数を測定した。D-Egg の検出効率を測定することでシミュレーションと実 測値を絶対値で比較することができる。D-Egg を入れた実験のセットアップを図 5.12 に示す。レー ザーはファンクションジェネレータで生成されたパルスをレーザーの発振の外部トリガとして発振 している。周期は 500 Hz, 波長は 405 nm である。レーザーの光は光学ファイバーを通じて遮光さ れたボックス内に運ばれる。ファンクションジェネレータはレーザーのタイミングと同期したパル スを生成し, Tabletop Main Board に送り, パルスの時刻を記録する。Tabletop Main Board は 5.4.3 節 で説明する。レーザーの安定性をモニタリングするために Reference PMT にもレーザーを照射する。 Reference PMT のデータはオシロスコープで取得する。D-Egg と Tabletop Main Board は Mini Field Hub を介して通信する。



図 5.12: 2D スキャンの概要。

#### 5.4.1 今回使用する D-Egg

図 5.13 に今回の実験で使用する D-Egg を示す。データの取得方法は波形データを取得する方法と Charge Stamp という方法がある。Charge Stamp は PMT の波形のうちある閾値を超えた波形の電荷 とピークの時刻 (Time Stamp) を記録する方法である。実験では Charge Stamp でデータを記録する。



図 5.13: 今回の実験で使用した D-Egg (DEgg2021-3-135, Upper PMT: SQ0775)

#### 5.4.2 Mini Field Hub

図 5.14 に Mini Field Hub (MFH) 写真を示す。MFH は D-Egg とのコミュニケーションを行う装置で ある。MFH は PC と D-Egg の間に位置していて、PMT に電圧をかける指示や、D-Egg からのデータ がの通信の仲介を行う。MFH には ICM が二つ搭載されていて複数の D-Egg の読み出しをすること ができる。



図 5.14: D-Egg と Main Board のコミュニケーションに使用される Mini Field Hub。

#### 5.4.3 Tabletop Main Board

Main Board は PMT からの波形の読み出しを行う基板であるが, Main Board 単体 (Tabletop Main Board と呼ぶ。)でもデータ取得が可能である。図 5.15 に今回使用する Tabletop Main Board の写真 を示す。D-Egg のデータにはレーザーの信号だけでなく Dark Rate や宇宙線といったノイズも含まれ る。ファンクションジェネレータからレーザーと同期したパルス (レーザーと同じ 500 Hz) を Tabletop Main Board のチャンネルに直接つなぎパルスの時刻を記録する。その時刻情報を使って D-Egg が検 出した信号のうちレーザー由来の信号を抽出する。



図 5.15: Tabletop Main Board の写真



図 5.16: Main Board で見たレーザーに同期したパルス の波形。ピークの時刻を記録する。

#### 5.4.4 Reference PMT

測定中にレーザーの安定性を見るために、2Dスキャンの外に置いた Reference PMT にレーザーを照 射し、2Dスキャン 中にモニタリングを行う。Reference PMT はゲインが  $3 \times 10^6$  になる電圧を供給 する。

#### 5.4.5 D-Egg の 2D スキャン

今回, 二種類のスキャンを行った。D-Egg の中心を原点とした円柱座標で考えて  $\phi$  - r Scan と  $\phi$  - z Scan である。モーターのステップサイズは以下の通りである。

1.  $\phi - r$  Scan

0 mm から 138 mm の間を 3 mm のステップ, 0° から 360° の間を 6 度のステップ

*φ* - *z* Scan
 161 mm から 293 mm の間を 3 mm のステップ, 0° から 360° の間を 6 度のステップ

各点において D-Egg と Tabletop Main Board それぞれ 2500 個の charge stamp を取得した。

#### 5.5 解析

ここでは実験データの解析方法について説明する。図 5.17 は φ - r Scan において実際に得られた D-Egg の電荷のヒストグラムである。110 pC 付近のピークはレーザー由来の信号であるが, 3 pC 付 近のピークと 200 pC 以上の信号はそれぞれダークレイト,宇宙線由来のノイズである。以下はノイ ズカットの手順を説明する。



図 5.17:  $\phi$  - *r* Scan における (*r*,  $\phi$ ) = (0, 0) での電荷のヒストグラム。宇宙線や Dark Rate によるノイズが含まれている。

5.5.1 マッチング

レーザー由来のシグナルの選別方法について二つに分けて説明する。

1. ΔT によるカット

レーザーは 500 Hz で照射している。隣同士のタイムスタンプの差が約2ms になっている信号 がレーザー由来の事象であるため,時間差が2ms ± 100 μs の検出事象を選別する。この選別 の効率は 32 % である。

マッチングによるカット
 ΔT によるカット後,マッチングを行う。Tabletop Main Board と D-Egg のタイムスタンプを Mini Field Fub での時刻に変換した。Tabletop Main Board で検出した時刻から 200 ns 以内のものを 信号とした。ΔT のカット後の選別の効率は 0.9 % である。



図 5.18: マッチングによるカット前後での電荷のヒストグラム。青色がノイズカット前の電荷のヒストグラム で黄色がノイズカット後を表している。ダークレイトや宇宙線によるノイズがカットされている。

以下は Transit Time のヒストグラムである。ここでの Transit Time は D-Egg で検出した時刻から Main Board で検出した時刻を引いたもの。



図 5.19: Transit Time のヒストグラム。TTs はヒストグラムをガウス関数でフィットした時の標準偏差で時刻 同期の精度を表している。

5.5.2 フィッティング

マッチング後の電荷をガウス関数でフィッティングし、その平均値を光子数に変換し、その値を代表値とする。



図 5.20:  $\phi$  - r Scan で (r,  $\phi$ ) = (0, 0) におけるノイズカット後の電荷のヒストグラム。ガウス関数でフィットし 平均電荷を求める。

#### 5.5.3 リニアリティ

D-Egg が検出した光子数は 4.6 節のリニアリティで示したように本来検出するべき光子数より小さい値になっている。測定した D-Egg のリニアリティは 3.2.5 節の FAT で既に測定済みである。図 5.21 にリニアリティの結果を示す。検出した光子数をフィットし、本来の検出するべき光子数に変換した。



図 5.21: sq0775 のリニアリティの図 [5]。横軸は本来検出するべき光子数, 縦軸は検出した光子数。青色の点が実測値, 青色の線が実測値をフィッティングしたもの。

#### 5.5.4 結果

以上の作業を各点において実行し、レーザーの光子数とD-Egg が検出した光子数から検出効率を求める。



光子の入射位置によって検出感度に差があることが分かる。PMT は検出効率に位置依存性があるためである。特に  $\phi$  - z Scan において z = 180 mm 付近にピークが見られる。これは磁気シールドであるファインメットで散乱され PMT に光子が到達したためである。



図 5.24: PMT のキャソードより下に位置する銀色で円錐の形状をした磁気シールドがファインメット (Hitach Metal 製) である。

図 5.25 は 2D プロットを r, z 方向にカットし、プロットしたものである。



図 5.25: 左は  $\phi$  - *r* Scan の図。横軸は測定中心からの距離 *r*, 縦軸は検出効率。右は  $\phi$  - *z* Scan の図。横軸は D-Egg の中心を原点とした位置 *z*, 縦軸は検出効率。

#### 5.5.5 Laser Stability

2D Scan 中は Reference PMT にレーザーを照射し, レーザーの強度の安定性をモニタリングする。2D Scan の方位角  $\phi$  ごとに Reference PMT のデータをオシロスコープで取得する。図 5.26 にその結果 を示す。レーザーの強度のばらつきは 3 % 以内であることが分かる。



図 5.26: 左: φ - r Scan。右: φ - z Scan。レーザーの強度の安定性の図。各 φ ごとの電荷を表す。

# 第6章

# シミュレーションでの光検出効率の測定

実測した D-Egg の検出効率と比較するために実測と同じ条件でシミュレーションをし検出効率を 求めた。この章では検出器のシミュレーションプログラムと結果について述べる。

## 6.1 シミュレーションプログラム: DOMINANT

DOMINANT (Dom Optical-photon to Material INteraction ANd Tracking simulator based on Geant4) [8] とはモンテカルロ法を用いて物質中における粒子の飛跡をシミュレーションする Geant4 をベースと した IceCube の光検出器用に開発されたプログラムである。DOMINANT ではゲルやガラスの中で の光子の吸収や異なる物質の境界面で起こる反射や屈折など考慮した上で PMT のカソードでのヒッ ト情報 (光子の座標)を得ることができる。ガラスやゲルの透過率は図 3.5 で示したデータをシミュ レーションに入れている。DOMINANT 上の D-Egg のそれぞれの部品形状は球や円筒などの立体の 組み合わせで表現されている。





図 6.1: 左図はシミュレーション上での D-Egg の様子。ガラスの中の青色はゲル, 白は Magnetic Shield, 赤色は 8 inch PMT, 緑は Main Board と High Voltage Board を表している。右図について, Geant4 では感度領域を設定 することができる。PMT にキャソード面を感度領域に設定する。図はキャソードにヒットした光子の座標の 散布図。

#### 6.1.1 8 inch PMT の検出効率の実装方法

PMT は光子の入射位置によってに検出効率に違いがあり、これをシミュレーションに取り入れる必要 がある。PMT の検出効率の位置依存性  $E(\theta, \phi)$  は 4.7 の Uniformity 測定のデータを使用する。Geant4 のヒット座標は三次元直交座標である。ヒット座標から検出効率を取得する際、三次元直交座標の (x, y) から PMT の中心を原点とした極座標 ( $\theta, \phi$ ) への変換を行っている。変換は図 6.2 で示した図面か ら計算している。



図 6.2: 左図は SQ0775 における Uniformity の測定データ。*θ* は PMT の中心を原点とした極座座標での方位角 である。天頂角 *φ* ごとの検出効率をプロットしたもの。右図は Geant4 における 8inch PMT の図面 [7]。PMT の感度面は球面と円環面の組み合わせで記述される。

検出する光子数  $N_{det}$  は光子のヒット座標に対応する検出効率  $E_i(\theta, \phi)$  を足し上げることで計算で きる。よって検出効率はビームの光子数  $N_{gen}$  を用いて

$$N_{det} = \sum_{i:hit} E_i(\theta, \phi)$$
$$Efficiency = \frac{N_{det}}{N_{gen}}$$

と表せる。

## 6.2 シミュレーションにおける D-Egg のスキャン測定

実測値と比較するために D-Egg の 2D Scan と同じ条件でシミュレーションを行う。シミュレーションでは各データ点で 1000 個の光子を照射する。検出した光子数を求めることで検出効率が分かる。

#### 6.2.1 スキャン測定のセットアップ

D-Egg の実測と同様の条件でシミュレーションを行う。シミュレーションでのセットアップを以下 に示す。 1.  $\phi$ -r Scan

r 方向は 0 mm から 141 mm の間を 3 mm のステップ, θ 方向は 0° から 360° の間を 6 度のス テップ

2.  $\phi$  - z Scan

z方向は 162 mm から 300 mm の間を 3 mm のステップ,  $\theta$  方向は 0° から 360° の間を 6 度のステップ

- 3. スポットサイズ = 2 mm
- 4. 照射する光子数 = 1000
- 5. 波長 = 405 nm



図 6.3: シミュレーションでの実験の様子。緑の線が光子である。ガラスとゲルの境界で反射や屈折が起こっている。

6.2.2 結果

図 6.4 にシミュレーションでのスキャン測定の結果を示す。実測と同様,  $\phi$ , r, z は D-Egg を中心と した円筒座標系である。



図 6.4: SQ0775 の検出効率の位置依存性  $E(\theta, \phi)$  を考慮したシミュレーションでの 2D スキャンの結果。PMT の検出効率の位置依存性が色のムラに表れている。左図の  $\phi$  - r Scan において感度領域の半径は約 118 mm で ある。右図の  $\phi$  - z Scan においてシミュレーションでは PMT の感度領域は水平であるため z = 85 付近で急激 に感度が落ちている。



図 6.5: 左は  $\phi$  - *r* Scan の図。横軸は測定中心からの距離 *r*, 縦軸は検出効率。右は  $\phi$  - *z* Scan の図。横軸は D-Egg の中心を原点とした位置 *z*, 縦軸は検出効率。

# 第7章

# 実測値とシミュレーションとの比較

実験結果とシミュレーションとの比較を2種類の方法で行った。

### 7.1 D-Egg の 2D スキャンの比較

実験とシミュレーションにおける 2D スキャンのデータを φ 方向に平均をとり、プロットしたもの を図 7.1 に示す。シミュレーションの D-Egg の検出効率の絶対値は実測値をよく再現できている。 r = 110, z = 180 付近でシミュレーションは実測値よりも多く見積もっていることが分かる。



図 7.1: 左図は *φ* - *r* Scan の図, 横軸は測定中心からの距離である。右図は *φ* - *z* Scan の図, 横軸は D-Egg の中 心を円柱座標の中心とした *z* である。縦軸は共に検出効率を表している。

## 7.2 シミュレーションの検証

2D Scan においてシミュレーションと実測値に差があることが分かった。特に図 7.1 でr = 110, z = 180付近で違いが顕著に表れている。この領域では PMT の縁部分に光子が当たっている。つまり PMT の 縁の感度が影響を与える。そこでシミュレーションに入れている 8 inch PMT の検出効率の場所依存 性測定 (4.7 節の Uniformity 測定) のキャリブレーションが出来ていなかったのではないかと考えた。



図 7.2: 左図は  $\phi$  - r Scan で r = 110 でのビームの様子。右図は  $\phi$  - z Scan で z = 180。

## 7.2.1 Uniformity 測定の較正

図 7.3 に Uniformity 測定のセットアップを示す。レーザーの軌道中心と PMT の中心がズレていた場合, 8 inch PMT の検出効率の位置依存性  $E(\theta, \phi)$  での  $\theta$  のキャリブレーションが必要になる。



図 7.3: Uniformity 測定のキャリブレーション。

そこでレーザーの軌道中心と PMT の中心が一致しているかを調べるために測定をすると, 少な くとも 7 mm の誤差が生じていることが分かった。具体的な測定方法については付録 A で説明する。 つまり Uniformity 測定での  $\theta$  と PMT の中心からの  $\theta'$  は違うことになる。これを考慮し, PMT のジ オメトリの図 6.2 を利用して  $\theta \to \theta'$ の変換を行った。図 7.4 に変換の結果を示す。



図 7.4: 8 inch PMT の検出効率の位置依存性  $E(\theta, \phi)$  をプロットした図。黒線が元のデータでそれ以外が Uniformity 測定のセットアップで起きた誤差の値ごとの検出効率を表す。0 mm は元の Uniformity のデータを 示しており, PMT の縁部分の感度を多く見積もっていることが分かる。

これらの位置依存性  $E(\theta, \phi)$  をシミュレーションに入れて 2D スキャンを再度解析した結果を図

7.5 に示す。Uniformity 測定のセットアップの誤差が20mmの時が一番 D-Egg の実測値を良く再現している。PMTの縁の感度を低くすることでシミュレーションにおける D-Egg のデータが実測値に対して約18%向上した。



図 7.5: 2D スキャンの図。黒線は実測値, その他はシミュレーションである。図 7.4 で示した PMT の場所依存 性  $E(\theta, \phi)$  ごとの 2D スキャンの結果。

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum \left( \frac{f_{exp} \binom{r}{z} - f_{sim} \binom{r}{z}}{f_{exp} \binom{r}{z}} \right)$$
(7.1)

表 7.1:  $\phi - r$  Scan と  $\phi - z$  Scan において実測値とシミュレーションの平均絶対誤差率 (MAPE)

MAPE	φ - r	<b>\$\$ - z</b>	Ave.
0 mm	35.7	67.9	51.8
7 mm	29.5	55.8	42.7
20 mm	18.2	48.1	33.1

### 7.3 Effective Area

次に、Effective Area による比較を行った。Effective Area は以下のように定義している。*N<sub>gen</sub>* はビームの光子数, *N<sub>det</sub>* は PMT が検出した光電子数である。

$$A_{eff} \equiv Efficiency \times Beam Area \tag{7.2}$$

$$Efficiency \equiv \frac{N_{det}}{N_{gen}}$$
(7.3)

計算方法について実際の測定とシミュレーションに分けて,説明する。

1. 実験

 $\phi$  - r Scan で得られたデータから以下の様に Effective Area を計算する。

$$Effective Area = \sum_{i} E_{i}(\mathbf{r}) \times \Delta S_{i}$$
(7.4)

$$E_i(\mathbf{r}) = \frac{N_{det}}{N_{LD}} \tag{7.5}$$

ここで  $N_{det}$  は D-Egg が観測した光子数,  $N_{LD}$  はレーザーの光子数であるがすでにキャリブレーションにより値は分かっている。 $\Delta S_i$  は D-Egg Scan のデータポイントの周りの扇形の面積である。その足し合わせで Effective Area を計算した。

2. シミュレーション

シミュレーションでは方位角は固定した状態で、天頂角を 0° から 180° の間を 10° ずつビームを 照射した。ビームは円形ビームである。Effective Area  $A_0$  はビームサイズ $A_0$ 、光子数  $N_{gen}$ 、PMT の検出効率の位置依存性  $E(\theta, \phi)$  を用いて以下の式で表される。

$$A_{eff} = \frac{A_0}{N_{gen}} \sum_{i:hit} E_i(\theta, \phi)$$
(7.6)



図 7.6: Effective Area のシミュレーションの様子。半径 26.7 cm と D-Egg 全体を覆うような大きさのビームを 照射した。ビームの光子数は 10000 個である。

図7.7 に Effective Area のプロットを示す。D-Egg の実測値は上の PMT だけを考えている。実測値 と比較するためにシミュレーションにおいても上の PMT だけ感度面として設定している。Uniformity 測定の誤差が 20 mm の時の位置依存性 (PMT の縁部分の感度を低くしたもの) をシミュレーション に入れた時,実測値を再現している (1%の誤差)。



図 7.7: 点は  $\phi - r \operatorname{scan}$  実測値から計算したもので,線はシミュレーションの値を表している。0 mm - 20 mm は Uniformity 測定の誤差の値を示していて,20 mm は PMT の縁部分の感度を低いことを意味している。 $\cos \theta = -1$ では D-Egg に対して上からビームを照射している。

Upper PMT	Experiment	0 mm	7 mm	20 mm
Effective Area ( $\cos \theta = -1$ )	$92.4 \pm 0.2$	104.2	101.3	93.5
実測値との誤差(%)	-	11.3	8.79	1.12

表 7.2:  $\cos \theta = -1$  の時の Effective Area の値。

次に、上下の PMT を感度として設定した時の Effective Area を図 7.8 に示す。シミュレーション では D-Egg の外側の環境を設定することができる。環境を空気と氷の場合で Effective Area を計算 する。PMT の縁部分の感度を低くすると  $\cos \theta = 0$  つまり D-Egg に対して横からビームを照射する 時の影響が大きくなる。



図 7.8: シミュレーションにおける図 7.4 の PMT の位置依存性  $E(\theta, \phi)$  ごとの Effective Area の図。左図が D-Egg の外側の環境は空気で右図が氷。



図 7.9: D-Egg の外側の環境による違い。左図は空気で右が氷である。屈折率の違いが表れている。

Effective Area を cos θ 方向に平均をとった値を以下に示す。Uniformity 測定の誤差が 20 mm の 時の PMT の位置依存性を入れたシミュレーションが D-Egg の実測値を再現していることが分かっ ている。特に D-Egg の外側の環境が氷の時,約 17% 多く Effective Area を見積もっていたことが分 かる。

$$\bar{A} = \frac{\int d(\cos\theta) A_{eff}}{\int d(\cos\theta)}$$
(7.7)

表 7.3: Effective Area の平均値

	0 mm	7 mm	20 mm
InAir	84.0	78.5	66.6
InIce	74.9	71.1	62.3

# 第8章

# 結論

本研究では、ニュートリノ観測において光検出器による系統誤差を削減するために IceCube-Upgrade に用いられる新型光検出器 D-Egg の方向依存性の直接測定を行った。その方法としてモータによる 制御で光子数の分かっているレーザーを動かしながら D-Egg に対して照射し、二種類の 2D Scan 測定 により検出効率を求めた。レーザーの光子数を測定することでシミュレーションと絶対値で比較する ことを可能にし、また Effective area でもシミュレーションと比較した。しかし、D-Egg の 2D Scan 測 定において実測値とシミュレーションに差があることが判明した。Geant4 を用いたシミュレーショ ンでは PMT の Uniformity のデータを光子の入射位置ごとの検出効率としてシミュレーションに取り 入れている。その Uniformity 測定のキャリブレーションができなかったことが原因であると捉え、シ ミュレーションが実際の測定に近づくように PMT の位置依存性を改善した。それにより D-Egg の 実験データに対してシミュレーションを 18 % 改善できた。そしてその PMT の位置依存性を用いて シミュレーションにおいて実際のデータに沿った Effective Area を再計算することでニュートリノ観 測において検出器による系統誤差の削減につながった。

# 付録 A 章

# Uniformity 測定の較正



図 A.1: 天頂角方向におけるレーザーの軌道の曲率半径が 300 mm とは機械的に決まっている。PMT の高さと 曲率半径は図 3.3 のデータシートを利用した。ある高さにレーザー墨出し装置を用いて水平にレーザーを照射 し、そこを基準にした。そこから PMT のネックとレールの最深部までの距離を測定した。

PMT の中心とファイバーの軌道中心が一致しているかを調べる。ある高さにレーザー墨出し器を 用いて基準を作る。まず、PMT の中心位置 *Z<sub>PMT</sub>* について基準から PMT の上部 (ネック部分) まで の距離を測定する。PMT の高さと中心から光電面までの距離は PMT のデータシートの値を利用し た。それにより PMT の中心位置が分かる。次にファイバーの軌道中心位置 *Z<sub>Laser</sub>* について、基準か らファイバーの軌道の最深部までの距離を測定する。軌道の曲率半径は 300 mm と機械的に決まっ ている。よってファイバーの軌道中心位置が分かる。PMTの中心とファイバーの軌道中心は少なくとも 7 mm はズレていることが分かった。

$$Z_{PMT} = 214.5 + 220 - 131 = 303.5 \pm 6 \tag{A.1}$$

$$Z_{Laser} = 596.5 - 300 = 296.5 \pm 1 \tag{A.2}$$



図 A.2: Uniformity 測定のセットアップ。左の PMT に対してレーザーを照射している。金色の部分が光電面である。赤線はレーザーの光に平行な線。

参考文献

- [1] Particle Data Group. Review of particle physics. Vol. 98, No. 3, p. 030001. Publisher: American Physical Society.
- [2] IceCube 実験 | ニュートリノ天文学 | 千葉大学ハドロン宇宙国際研究センター.
- [3] Francis Halzen and Ali Kheirandish. IceCube and high-energy cosmic neutrinos.
- [4] IceCube Collaboration. The IceCube neutrino observatory: Instrumentation and online systems. Vol. 12, No. 3, pp. P03012–P03012.
- [5] R. Abbasi. D-egg: a dual PMT optical module for IceCube. Vol. 18, No. 4, p. P04014.
- [6] 関連資料 | 光電子増倍管 (PMT) | 浜松ホトニクス.
- [7] Ayumi Kiriki. Detection efficiency of next generation icecube optical module, d-egg, and its sensitivity to optical properties of the antarctic ice with the geant4 based precise photon simulation.
- [8] DOMINANT dom optical-photon and material INteraction ANd tracking.
- [9] R. Abbasi. Improved characterization of the astrophysical muon–neutrino flux with 9.5 years of Ice-Cube data. Vol. 928, No. 1, p. 50. Publisher: The American Astronomical Society.

# 謝辞

本研究は千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターニュートリノ天文学研究室 (ICEHAP) にて行われました。本研究にあたり、ご指導をいただきました指導教員の吉田教授に感謝申し上げます。また、ミーティングにおいて測定や解析についてのアドバイスをいただいた石原教授、清水助教、Anna Pollmann 助教、研究員の方々に感謝いたします。ICEHAP の高橋 恵さんには日々の学生生活の支援をしていただき、ありがとうございました。最後に、学生の皆様のおかげで大学生活が充実したものになりました。ありがとうございました。