

令和2年度 修士論文

IceCube-Upgrade 計画で用いられる 新型光検出器 D-Egg の全体較正システムの開発

20WM2105

武政 祐哉

千葉大学大学院 融合理工学府先進理化学専攻 物理学コース

2022年3月3日

概要

IceCube 実験は南極点地下 1450 m から 2450 m の約 1km^2 の範囲に 5160 個の光検出器 DOM(Digital Optical Module) を埋設し、宇宙から飛来する超高エネルギーニュートリノの相互作用によって生じる二次粒子が放出するチェレンコフ光を観測する。ここからこれまで謎とされてきた宇宙線の発生源の同定を目指すプロジェクトである。IceCube 実験では Upgrade 計画が進行中である。

Upgrade 計画では 2023 年までに現在の IceCube 実験の中心付近に横にも縦にも密に新型光検出器を 700 台増設し、その内 300 台が千葉大学で開発及び製造をおこなった D-Egg が用いられる。現行の光検出器 DOM では光電子増倍管が下向きに 1 つ搭載していたのに対し、この D-Egg では上下に 2 つ搭載し、約 2 倍の検出能力を達成する。光電子増倍管は D-Egg のガラス球内部にゲルによって固定されている。

D-Egg の光検出性能をより詳細に理解するためには、ガラスやゲル中の光伝搬を含めた光電子増倍管の応答を評価する必要がある。この結果をシミュレーション研究に取り込むことで宇宙ニュートリノ観測の精度向上を目指している。本研究では D-Egg に向かって上下・横方向から較正用光源を照射し、D-Egg 全体をスキャンしながらその応答を検証することで、D-Egg の性能を評価を行う較正装置の開発を行う。本論文では、そのシステム開発の詳細と D-Egg 測定に適した光源の製作について述べ、実際の測定結果について議論する。

目次

第 1 章	ニュートリノ天文学	4
1.1	高エネルギー宇宙線	4
1.2	宇宙ニュートリノ	6
1.3	検出原理	6
第 2 章	IceCube 実験	8
2.1	実験施設	8
2.2	光検出器 DOM	9
2.3	ニュートリノ事象	10
2.4	IceCube-Upgrade	12
第 3 章	新型光検出器 D-Egg	13
3.1	基本構造	13
3.2	PMT	15
3.2.1	量子効率	16
3.2.2	ゲイン	16
3.2.3	収集効率とユニフォミティ	17
3.3	DAQ 基板	18
3.4	較正用 LED 基板	20
第 4 章	D-Egg の全体較正システム	21
4.1	研究目的	21
4.2	D-Egg Scan Box	21
4.2.1	reference PMT	23
4.2.2	光源	24
4.2.3	可動ステージ	28

	4.2.4 D-Egg	29
第 5 章	D-Egg の光検出測定	30
5.1	測定準備	30
5.2	測定方法	31
5.3	結果	31
	5.3.1 b-r scan	31
	5.3.2 b-z scan	33
	5.3.3 t-r scan	34
	5.3.4 t-z scan	35
5.4	シミュレーションとの比較	37
第 6 章	結論	41
付録 A	PMT による光検出	42
付録 B	DOMINANT	43

第 1 章

ニュートリノ天文学

天文学は自然科学として最も早く古代から発達した学問であり, 有史以前から常に人々の好奇心を刺激してきた. そして現代では, 今まで検出することが難しかったニュートリノなどの粒子観測が可能になったことにより謎とされてきた宇宙の様々な現象の解明できる可能性が出てきた. この章では謎の宇宙現象の一つである高エネルギー宇宙線の起源の探索についてニュートリノ天文学の観点から説明する.

1.1 高エネルギー宇宙線

宇宙には常に高エネルギーの粒子が飛び交っており, 我々の住む地球にも降り注いでいる. とくに 10^9 eV を超える相対論的な粒子は宇宙線と呼ばれている. この宇宙線は主に陽子 (90%) とヘリウム原子核 (9%) で構成されおり, エネルギー範囲はじつに 10^9 eV から 10^{20} eV におよぶ. 現在の人工加速器によって得られるエネルギーは約 10^{12} eV [1] であり, 10^{20} eV は人工では得られない非常に高いエネルギーである. そして宇宙環境は粒子密度が低く, エネルギーのやり取りをして熱的に緩和するにはきわめて長い時間がかかるため, この宇宙線のエネルギー分布は非熱的となる. 図 1.1 は様々な観測から測定された宇宙線フラックスのエネルギー分布である. 約 10^{11} eV のエネルギーを持つ宇宙線は $1m^2$ の範囲に 1 秒 1 つ観測できるのに対し, 10^{18} eV から 10^{19} eV の宇宙線は $1 km^2$ の範囲で 1 年かけてようやく 1 つ観測できることになる. つまり高エネルギー宇宙線になるほど観測には大きな検出面積と長い時間を要することがわかる.

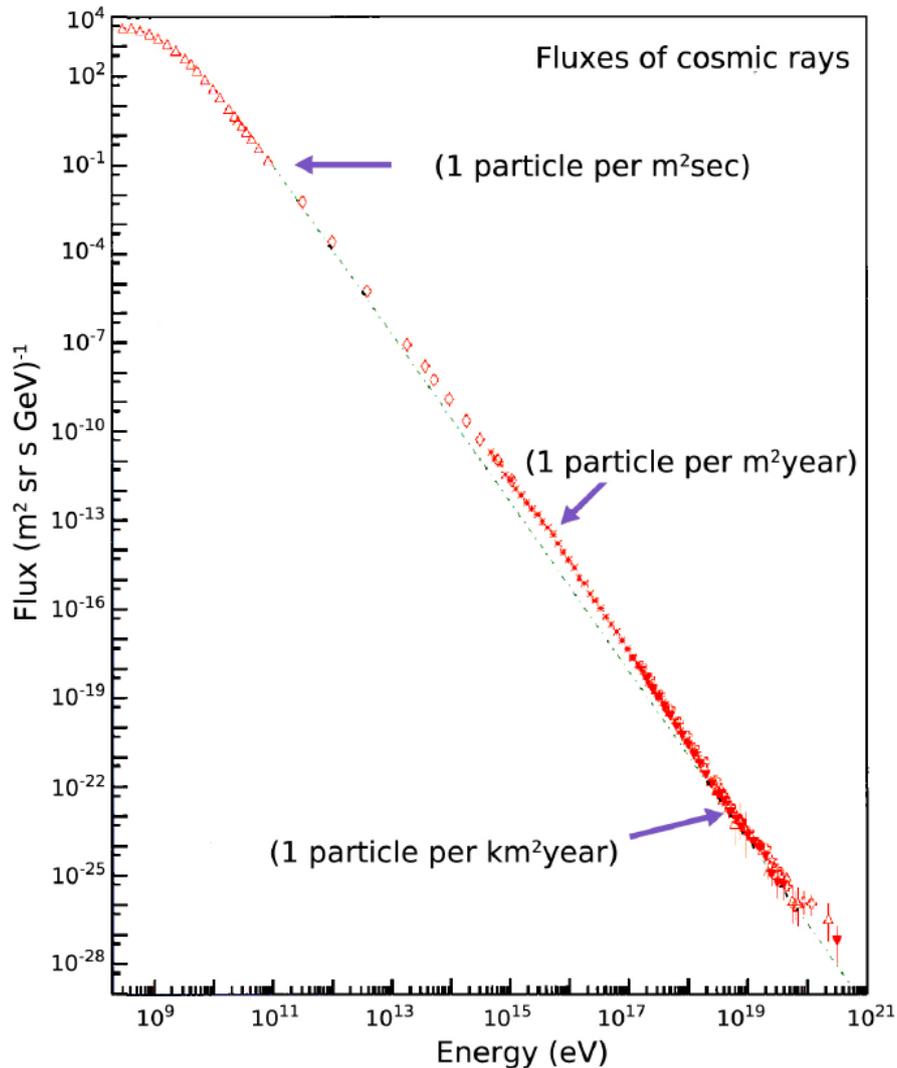


図 1.1: 様々な実験によって観測された宇宙線フラックスのエネルギースペクトル. [2] スペクトルは広い範囲でおおよそ $1/E^3$ に比例して減少している. またスペクトルは, その勾配の違いによって “knee” や “ankle” と区別される.

高エネルギー宇宙線の起源はまだ未解決であるが, 超新星残骸やブラックホールなどの天体から放出されているのではないかと考えられている. これらの天体は電波からガンマ線まで幅広い波長の光を放出するため, 放射線を用いた宇宙探索を行ってきた. しかしの観測では高エネルギー (特に PeV 領域~) になればなるほど多くの困難を生じる. また陽子線などの粒子放射線は電荷をもつため銀河系内外の磁場によって地球に到達するまでにその軌道を曲げられてしまう. またガンマ線などの電荷をもたない電磁放射線は宇宙線とは関係のなく電子からの電磁相互作用過程によって放射されるため, 直接的な証拠を掴む

ことが難しい。

これらの困難を避けるために、ニュートリノの観測が不可欠となる。ニュートリノは電荷を持たないため銀河系内外の磁場によって曲げられることがない。また弱い相互作用しかしないため、宇宙空間での衝突によるエネルギー損失もない。これにより高エネルギー宇宙線由来の宇宙ニュートリノは、発生源の情報を保ったまま地球に運ぶため宇宙線の起源を探るための強力な手段となる。

1.2 宇宙ニュートリノ

高エネルギー宇宙線 ($E > 4 \times 10^{19}$ eV) が天体周辺の物質や光と反応する過程で高エネルギーニュートリノが生成される。

$$p + \gamma \rightarrow n + \pi^+ \text{ または } (p + \pi^0) \quad (1.1)$$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1.2)$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.3)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (1.4)$$

この過程を複数回行うことで、宇宙線のエネルギーは 4×10^{19} eV 以下まで減少する。この限界エネルギーを GZK (Greisen, Zatsepin, Kuzmin) 限界と呼び、図 1.1 の ankle 部分のフラックスが急激に減少する原因であると考えられている。またこの限界エネルギーを超えた宇宙線によって生成されたニュートリノを GZK ニュートリノと呼び $EeV(10^{18}eV)$ のエネルギー領域であると考えられている。

1.3 検出原理

粒子検出器は電磁相互作用による信号を利用するが、ニュートリノは電荷をもたないため検出器に痕跡を残さない。そのため直接検出されるのではなく元素中の核子や電子などとの弱い相互作用によって生成された2次粒子を観測することでニュートリノの数やエネルギー、種類などの情報を得る。高エネルギーニュートリノ $\nu_l (l = e, \mu, \tau)$ の反応過程には中性カレント反応 (Neutral Current, NC) と荷電カレント反応 (Charged Current, CC) があり、以下の様になる。

$$(NC) : \nu_l + N \rightarrow \nu_l + X \quad (1.5)$$

$$(CC) : \nu_l + N \rightarrow l^\pm + X \quad (1.6)$$

ここで N は核子、 X はハドロン、 l は荷電レプトン (e, μ, τ) である。

この荷電粒子が媒質中を光速を超える速さで運動したときに光を放射する。この光をチェレンコフ光と呼び、単位長さ x あたりに放射される波長 λ の光子数 N_γ は Frank-Tamm の公式 [3] により、次のように表される。

$$\frac{d^2 N_\gamma}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)} \right) \quad (\beta = v/c) \quad (1.7)$$

ここで α は微細構造定数、 $n(\lambda)$ は媒質の屈折率である。また荷電粒子の進行方向に対するチェレンコフ光の放射角 θ は次の式で表される。

$$\cos \theta = \frac{1}{n(\lambda)\beta} \quad (1.8)$$

これらよりチェレンコフ光の強度と放射角度を調べることで、ニュートリノのエネルギーと到来方向を再構成することが可能になる。

第2章

IceCube 実験

高エネルギー宇宙ニュートリノの観測には巨大な検出面積を持つ実験装置が必要不可欠である。この章では世界最大の検出面積をもつニュートリノ観測施設, “IceCube 実験”の詳細と, 拡張計画である “IceCube-Upgrade” について説明する。

2.1 実験施設

IceCube 実験は南極のアムゼンスコット基地内に存在しており, 南極直下の深氷河を衝突標的兼チェレンコフ輻射体として用いているニュートリノ検出器である。観測施設の外観は図 2.1 のようになっている。

検出器は氷河内にある 86 本の縦穴を掘って配置される (String と呼ばれる)。全 String の内 78 本は, 120m 間隔の String にチェレンコフ光を検出する光検出器モジュール (DOM: Digital Optical Module) 60 個を深さ 17m 間隔に埋設され, 3次元の広がりを持たせた検出器アレイとなる。残りの 8 本の String においては, 72m 間隔の String に DOM が深さ 7m 間隔に埋設されることでより高密度なアレイが組まれている。これは DeepCore と呼ばれ, 主に低エネルギー ($GeV - 100GeV$) 領域のニュートリノ測定及び暗黒物質の探索に用いられる。String 内の全ての DOM は氷河の深さ 1450m から 2450m に位置している。そのため氷河の厚みによって地表から降り注ぐミューオンや大気ニュートリノなどの影響を取り除くことができる。

地表には, 162 台の氷のタンクが IceCube 検出器の表面上に均等に配置されている。各タンクには DOM が 2 台ずつ埋設されている。これらは “IceTop” と呼ばれ, 高エネルギー宇宙線が大気との相互作用によって生成された 2 次粒子空気シャワーを検出している。これらの空気シャワーは, 宇宙ニュートリノの探索においては雑音 (背景事象) として扱われ

るため、メインのモジュールと同時測定することで取り除くことが可能である。

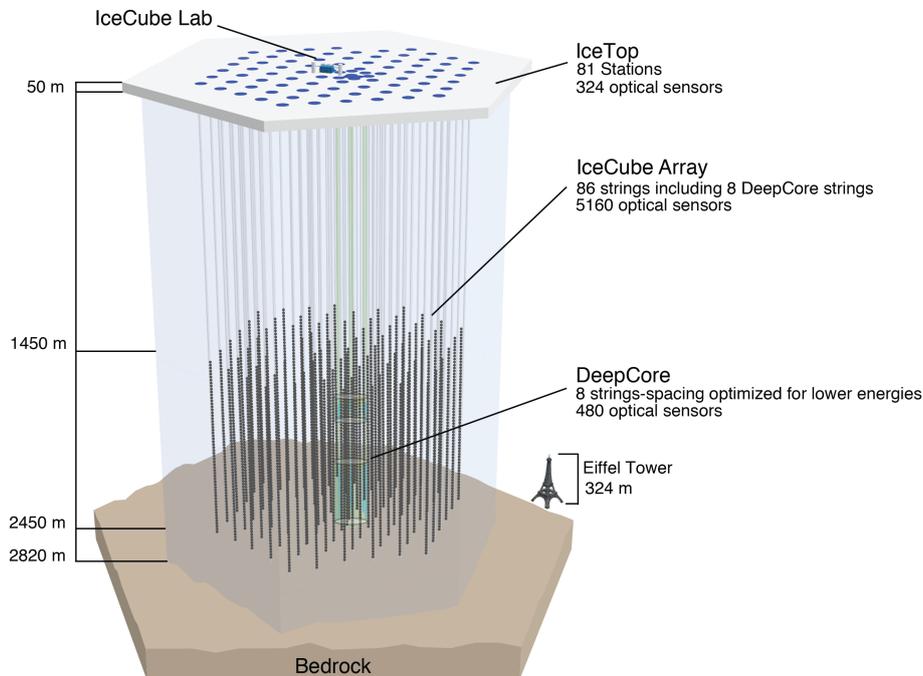


図 2.1: IceCube の実験施設 [4]. 氷河 1450m から 2450m の深さに合計 5160 の DOM が配置されている。DeepCore にはより密に DOM が配置されている。さらに地表には IceTop があり空気シャワーの観測を行っている。

2.2 光検出器 DOM

現在, IceCube 実験で稼働している光検出器は DOM と呼ばれる。(図 2.2)

DOM は球型の耐圧ガラス内部に 10 インチ光電子増倍管 (PMT:PhotoMultiplier Tube), DAQ 用基板 (Main Board), PMT のための高電圧供給基板 (HV supply board), 校正用 LED などが搭載されている。PMT は、カソード面とガラスの間の UV 透過性能を持ったシリコンによって固定されている。さらに PMT のカソード面は磁気シールド (Mu-metal cage) で覆われており、感度を均一にしている。PMT から得られたアナログ信号 (光の情報) は Main board によってデジタル化され、ペネトレータを介して地表にある施設にリアルタイムに転送される。これらのデータは半オンライン解析し、選択された一部の事象を衛星回線で北半球に伝送される。また校正用 LED は南極氷河の光伝搬特性の解析や他の DOM の応答確認などに用いられる。

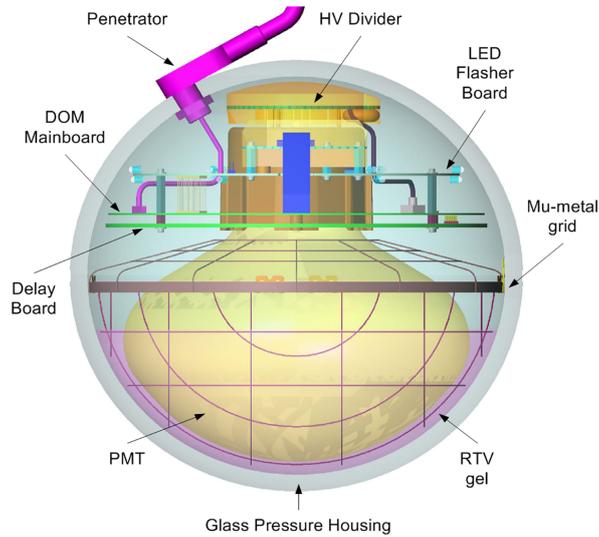


図 2.2: DOM の模式図. 耐圧ガラス球内部に基板,PMT などが搭載されている.

2.3 ニュートリノ事象

1.3 小節で述べたように,IceCube 実験では CC 反応あるいは NC 反応による 2 次粒子から生じるチェレンコフ光を検出することによりニュートリノの情報を再構築する. このとき観測されるニュートリノ事象は 3 種類ある (図 2.3)

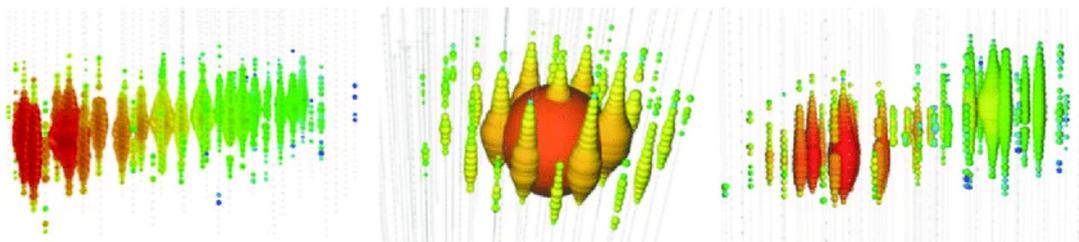


図 2.3: IceCube で観測される 3 種類のニュートリノ事象 [5]. 左から“トラック型”,“シャワー型”,“ダブルバンク型”と呼ばれる. 色のついた球は光を検出した DOM を表している. 球のサイズは相対的な光量を示し, 色は検出した相対的なタイミングを示す (赤から青の順に早い)

トラック型

ミューニュートリノの CC 反応によって生じたミューオンによって生じる. ミューオンは有効体積内を貫通するためエネルギーの同定は難しいが, 飛来方向の同定は

可能である.

シャワー型

電子ニュートリノまたは低エネルギーのタウニュートリノの CC 反応, あるいは全てのフレーバーの NC 反応によるハドロンシャワーによって生じる. ハドロンは氷河中のわずかな移動距離で散乱するため図のようにまとまった事象となる. 電子ニュートリノの場合飛来方向の同定は難しいが, 有効体積内で全てのエネルギーを失うためエネルギーの同定が可能となる.

ダブルバンク型

タウオンの平均減衰長は 5cm/TeV であり, 数 PeV 以上のエネルギーを持つタウニュートリノによってダブルバンク型の事象が見られる. タウニュートリノの CC 相互作用によって生じたタウオンが電子またはハドロンを生成し, 第二カスケードを引き起こすことで, 2 つの球形が現れる.

これまでに IceCube 実験では 2011 年と 2012 年に PeV 領域の高エネルギーニュートリノを 2 事象を観測し, 宇宙由来のニュートリノの存在を示唆した (図??). 2017 年には, “IceCube-170922A” と呼ばれるニュートリノ事象を観測し, 到来方向を世界中の望遠鏡・宇宙観測衛星が追観測を行った結果, 初めて高エネルギーニュートリノ放射天体の同定に初めて成功した [6]. 今後より多くの同定例を増やすため, 現在の IceCube 検出器の体積を拡張し, より角度分解能に優れた検出器を実装する IceCube-Gen2 計画が進行している.

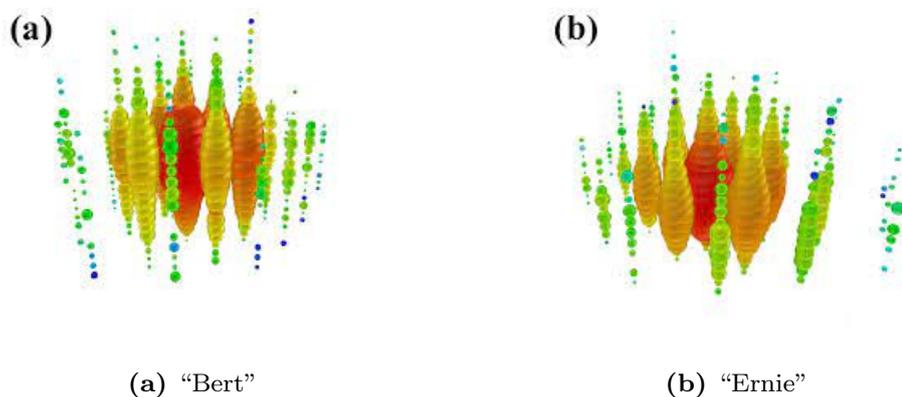


図 2.4: 2011 年, 2012 年に観測された高エネルギー宇宙ニュートリノの 2 事象 [7]. 左から “Bert”, “Ernie” と名付けられた.

2.4 IceCube-Upgrade

現在 IceCube 実験では拡張計画が進行している。これを次世代ニュートリノ望遠鏡計画 “IceCube-Gen2” [8] といい、2024 年までに次世代光検出器のデザイン決定、2026 年から建設開始、2030 年に稼働開始を目標としている。この計画では現行の String の外側に、新たに 120 本の String を 240m 間隔に設置する。各 String には 80 個の光検出モジュールが取り付けられており、検出器の有効体積は約 8 倍となる (図 2.5)。これによりより多くの高エネルギー宇宙ニュートリノの検出を目指す。

現在、IceCube-Gen2 の前段階として “IceCube-Upgrade” [9] が進行中である。この計画では、現行の検出器アレイに 7 本の String を追加し、そこに約 700 台の新型光検出器をより密になるように埋設する (図 2.5)。これにより今まで正確な検出が難しかった低いエネルギーのニュートリノを検出できるようになり、検出可能なエネルギー範囲を広げる。またニュートリノ到来方向の精度向上には氷河の光学特性の理解が重要であり、より密に埋設し解析することで、ニュートリノによる宇宙探索の精度が高くなる。

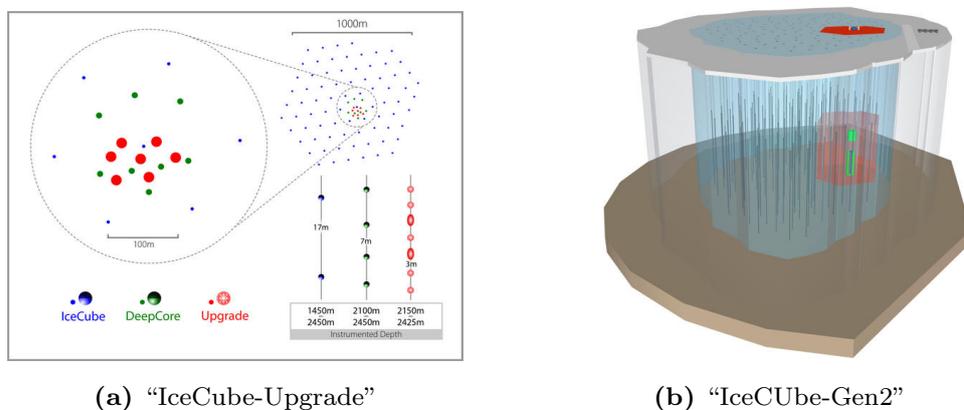


図 2.5: IceCube の拡張計画。IceCube-Upgrade では DeepCore 付近に 7 本の String 埋設され、検出器の間隔が 3m となる。IceCube-Gen2 では現行の検出器アレイの外側領域に 120 本の String が埋設され、有効体積が約 8 倍となる。

この Upgrade 計画で埋設するための新型光検出器が開発されており、主なものとして約 300 台が “D-Egg” (Dual optical sensors in an Ellipsoid Glass for Gen2)、約 400 台が “mDOM” (Multi-PMT Digital Optical Module) である。ここでは D-Egg について次章で説明する。

第 3 章

新型光検出器 D-Egg

IceCube-Upgrade に向け, 当研究グループが主となり新型光検出器 D-Egg を開発した. この章では新たに埋設される D-Egg の詳細について説明する.

3.1 基本構造

IceCube-Upgrade で新たに埋設される 700 台の新型光検出器の内, 300 台が D-Egg と呼ばれるものであり図 3.1 に示す.



図 3.1: 2023 年, 南極に 300 台埋設予定の新型光検出器 D-Egg. 上下に 2 つの PMT が搭載されており, 他にも較正装置であるカメラや LED 基板が搭載されている.

D-Egg は “Egg” という名前の通り高さ 21 インチ, 直径 30 cm の卵型である. これは上下 2 つの耐圧ガラス球を真空引きし窒素を半気圧まで充填させた後にハーネスを取り付けることで固定される. 内部には上下 2 つの PMT (3.2 節), PMT をガラス面に固定するための光学結合シリコン, PMT の地磁気ノイズを取り除くための磁気シールド (ファインメット), PMT への高電圧供給基板, PMT の信号や内部情報を読み出すためのデータ収集基板 (DAQ 基板) (3.3 節), MB からのデータを地上に転送するためのペネトレータケーブル, ドーナツ型の較正用 LED 基板 (3.4 節) が内蔵されている.

D-Egg の大きな特徴は, 上下に 2 つの PMT を搭載していることである. これによりあらゆる方向からのニュートリノ検出を可能にし, 現行の光検出器 DOM の約 2 倍の有効面積を持つ (図 3.2).

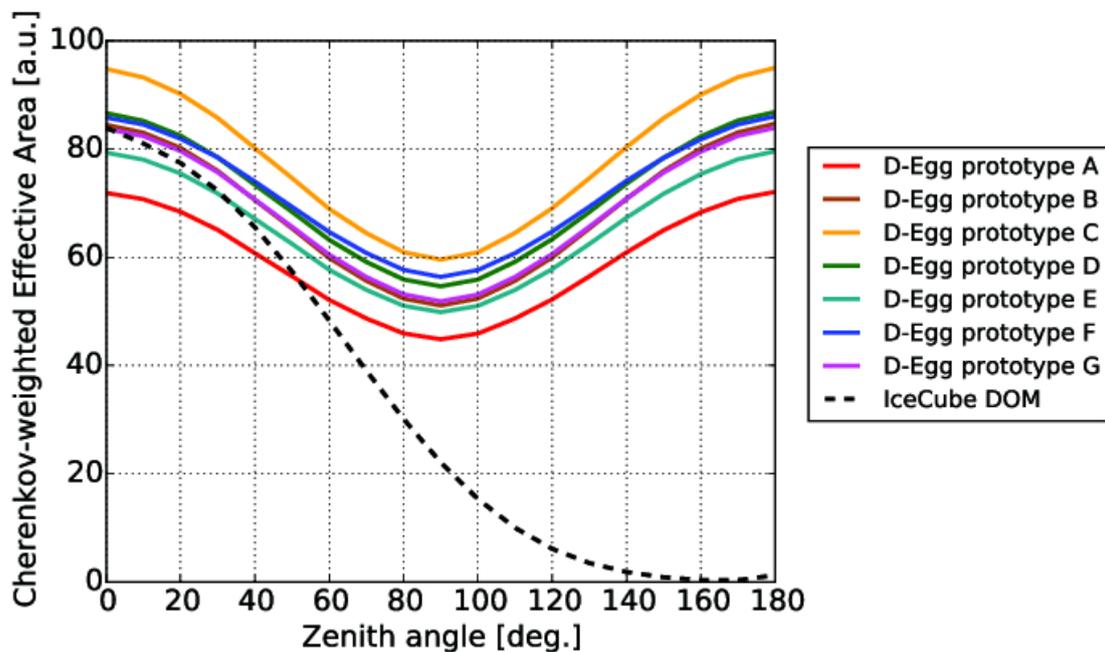


図 3.2: DOM と D-Egg のチェレンコフ光に対する有効面積のグラフ ([10]). 実線は D-Egg, 点線は DOM となっている. 上下に PMT が搭載されたことにより, 下向きのチェレンコフ光に対する感度が増加する.

3.2 PMT

D-Egg には浜松ホトニクス製の 8 インチ PMT(R5912-100) が採用されている.(図 3.3) PMT に向かって飛来してきた光子はバイアルカリでできた光電面に入射することで光電子を放出する. この光電子は第 1 ダイノードに衝突し二次電子を放出することで, 電子増倍する. これを繰り返すことで最終ダイノードで放出される電子数は約 10^7 倍になり, アンノードより取り出され検出される.



図 3.3: D-Egg に採用されている PMT(R5912-100).8 インチで光電面はバイアルカリでできている.

3.2.1 量子効率

光電面に入射した光子が光電子に変換される割合は量子効率 (QE:Quantum Efficiency) によって決まる. 光電面に入射した光子数を N_γ , 光電面で変換された光電子数を N_{pe} とすると, QE は以下の式で表される.

$$QE = \frac{N_\gamma}{N_{pe}} \quad (3.1)$$

IceCube 実験で観測されるチェレンコフ光の波長は, 300 から 600nm であるため D-Egg で用いられる PMT ではこの波長帯において高い QE をもつものが採用されている.

3.2.2 ゲイン

光電面によって変換された光電子がダイノードで増幅を繰り返し, 最終的な増倍率をゲインと呼ぶ. ゲインは PMT の印加電圧 V によって変化しゲイン G は以下の式で表されます.

$$G = A \times V^{\kappa n} \quad (3.2)$$

ここで A は定数, k は電極の構造などで決まる値, n はダイノード数である.

D-Egg で用いる場合, ゲインの値は常に 10^7 になるようにする. この値はそれぞれの印加電圧に対するゲインの値を測定し, 式 3.2 でフィッティングすることで求められる.

3.2.3 収集効率とユニフォミティ

PMT はダイノード間で効率よく電子を増倍するように設計されているが, それでも増倍に寄与しない電子が存在する. 光電面から放出された光電子数と最終的に陽極から出力されるパルス数の割合を収集効率 (CE:Collection Efficiency) と呼ぶ. CE は主に第 1 ダイオードの有効部分に入射することが重要であり, 第 2 ダイオード以降では電子数が大きくなるため CE に与える影響は少なくなる. これにより光の光電面に対する入射位置によって第 1 ダイオードの有効部分に光電子が入射するかの違いができるようになる. この違いを PMT のユニフォミティと呼ぶ.

実験室では図??にある装置を用いて, 400nm のレーザーを PMT 光電面の曲率中心に向けて入射するようにし, PMT 光電面を走査することでユニフォミティの測定が行われた. 図 3.5 はある PMT のユニフォミティ測定の結果であり, 入射位置によって CE の違いがあることがわかる.

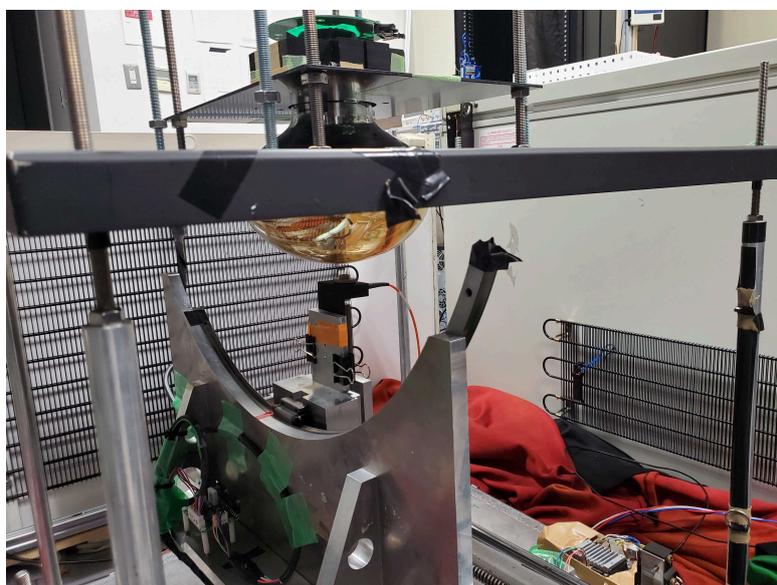


図 3.4: PMT のスキャンを行う装置. PMT の曲率中心に向かってあらゆる方向からビームを打ち測定することで, ユニフォミティを測定する.

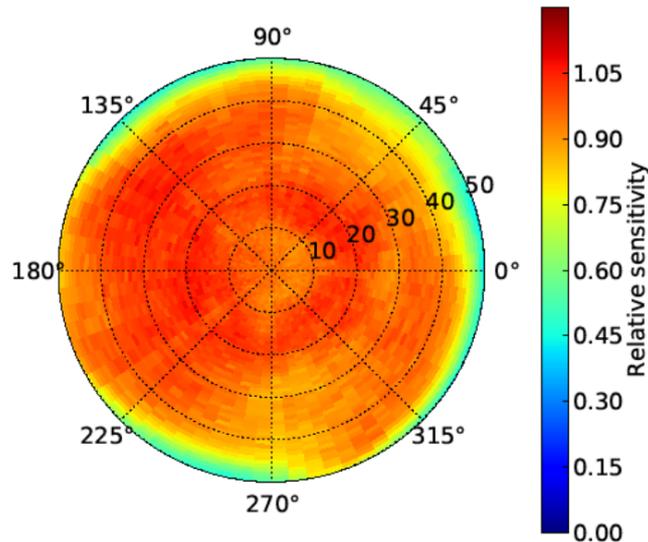


図 3.5: PMT のユニフォミティのヒートマップ.PMT の検出感度は縁にいくほど悪くなる. またこの分布は一様ではなく PMT の場所によってムラがある.

3.3 DAQ 基板

D-Egg 内の DAQ 基板は図 3.6 に示すような外径 246mm, 内径 86mm のドーナツ型となっている. 図??は DAQ システムである.D-Egg 内の PMT はこの DAQ 基板によって制御される.PMT で得られたアナログ信号は AD コンバータによってデジタル化され, 集積回路 (FPGA) に蓄積・処理が行われる. このデータは ICM(IceCube Communication Module) に送られ, D-Egg に取り付けられているペネトレータケーブルから地上に転送される. また地上からの指令はペネトレータケーブルを介し ICM から FPGA や MCU(MicroController Unit) に送る. MCU では D-Egg 内にあるカメラや較正用 LED 基板の制御を行う. 他にも気圧計, 温度計, 加速器計が搭載されており,D-Egg 内部の環境を測定できる.

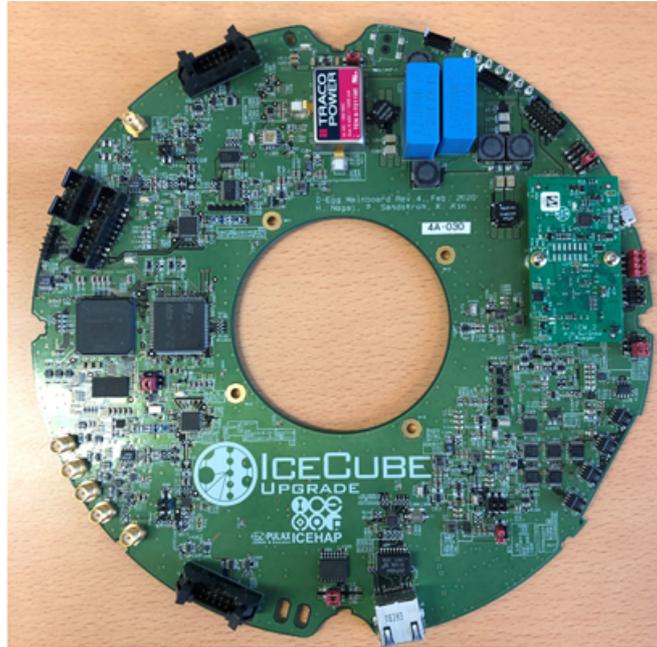


図 3.6: DAQ 基板.PMT のネック部分を通すために外径 246mm, 内径 86mm のドーナツ型になっている。

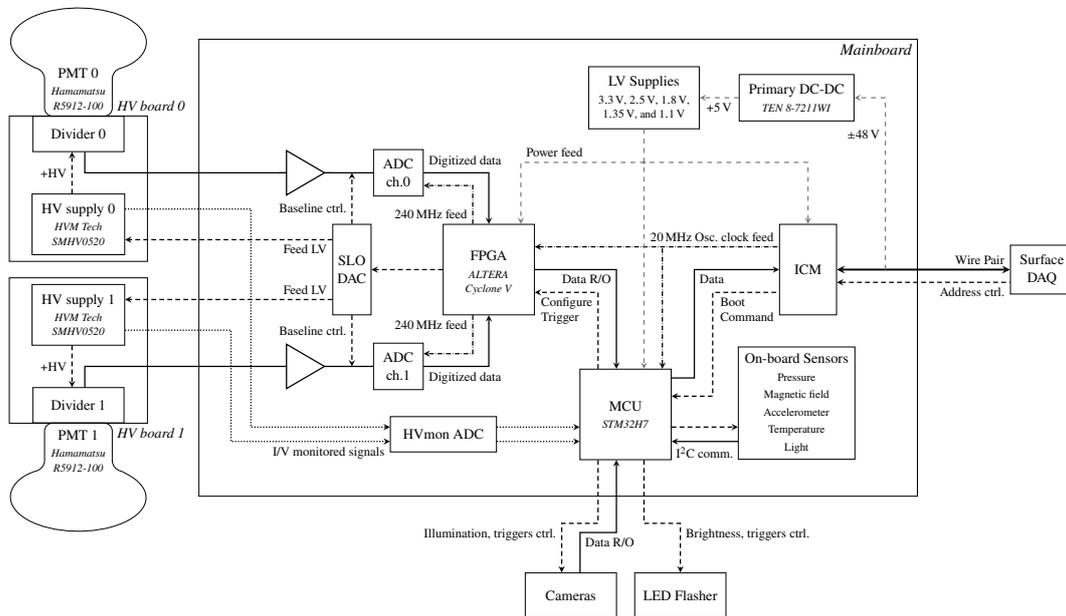


図 3.7: DAQ 基板のダイアグラム。

3.4 較正用 LED 基板

D-Egg 内の較正用 LED 基板 (Flasher ring) は図??に示すような外径 229mm, 内径 205mm のドーナツ型となっている. LED は Roithner 製の XR-400-50 が用いられており, 視野角 15 度・ピーク波長 405nm である. 基板上に LED が水平向きに 45 度間隔で 8 個, 鉛直下向きに 90 度間隔で 4 個, 合計 12 個の LED が搭載されている. この LED は基板上の回路により数 ns のパルス光を発する.

IceCube-Upgrade では検出器どうしをより密に埋設することから, この LED を用いた南極氷河の光学特性のより詳細な理解が期待される. 他にも検出器位置の較正や埋設後に再氷結する氷の特性の調査に用いられる.



図 3.8: 較正用 LED 基板. ドーナツ型をしていて水平向きに 45 度間隔で 8 個, 鉛直下向きに 90 度間隔で 4 個の LED を搭載している.

第 4 章

D-Egg の全体較正システム

D-Egg の詳細な光検出性能を測定するための D-Egg 全体較正システム (D-Egg Scan Box) を制作した. この章では D-Egg Scan Box を用いた測定の目的とシステム構成を説明する.

4.1 研究目的

D-Egg 内の 2 つ PMT はガラス内面と PMT のカソード面の間にゲルを充填させることにより固定される. ゲルが充填されることにより D-Egg に向かって来た光はガラス面で反射することなく PMT に届くようになる. D-Egg の光検出性能をより詳細に理解するためにはガラスやゲル中の光伝搬を含めた光電子増倍管の応答を評価する必要があるため, 本論文ではこの検出性能を実験により確かめることを目的としている. また測定を行うことで検出器シミュレーション研究や南極での実験の精度向上が期待される.

4.2 D-Egg Scan Box

D-Egg Scan Box は図 4.1 に示すような高さ 130cm, 縦横 110 cm の直方体になっており, 内部には 2 つの回転ステージと光ファイバが取り付けられた 4 つの一軸ステージによって, D-Egg の上面と底面方向, D-Egg の回転軸に対してコリメートされた光を打ちスキャンするシステムになっている. これにより D-Egg に対する光の照射位置に置ける相対的な検出感度の違いを測定する.

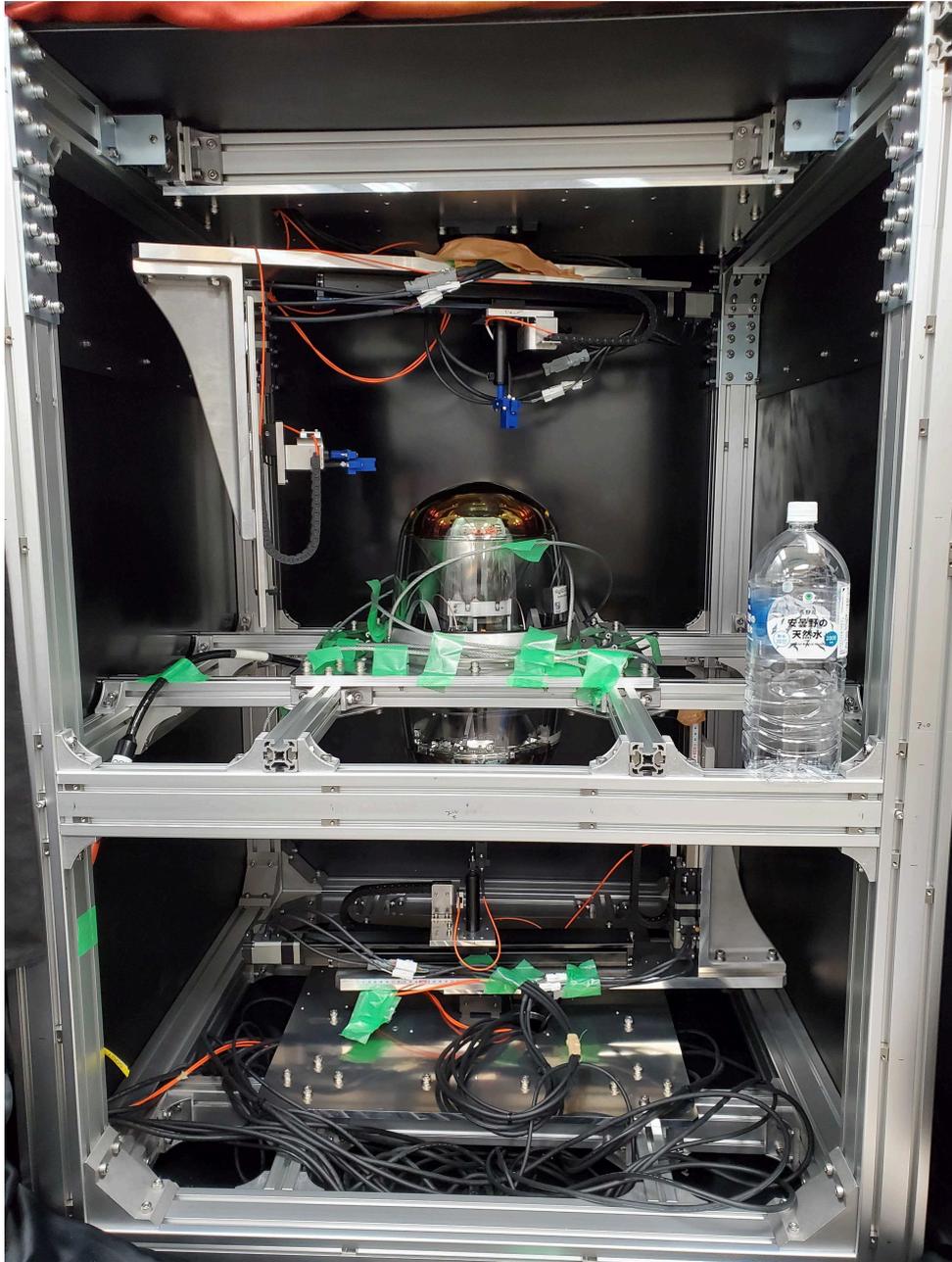


図 4.1: D-Egg Scan Box の全体図. 内部は 6 つのアクチュエータによって D-Egg 全体に光源を打ちスキャンするシステムになっている. オレンジのケーブルは光ファイバであり, 4 つの可動ステージに取り付けられている. また光はコリメートレンズを通り D-Egg をスキャンするため直径 3mm 程度のビームになっている.

光源は box 外部の LD から光ファイバを通じて箱内部に運ばれる. また光源を reference PMT で常にモニターすることで, 測定中の光源強度の変化を調べることができる. このシステムの構成を図 4.2 に示す.

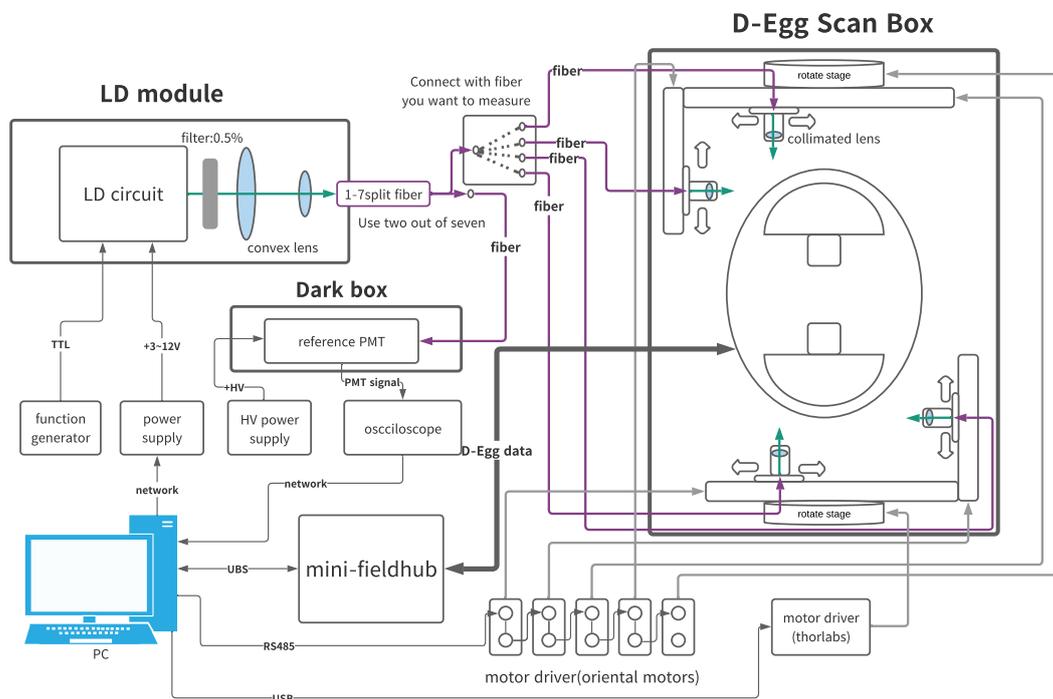


図 4.2: D-Egg Scan Box のダイアグラム.D-Egg Scan Box の外にある LD から光ファイバを通して D-Egg Scan Box 内部に光を運ぶ. また reference PMT を用いて常に光源をモニターする. このシステムに用いる機器はすべて 1つの PC で制御される.

4.2.1 reference PMT

reference PMT はシステムを用いた測定中の光源のモニターの他に, D-Egg Scan Box に放出されるビーム強度や安定性を確認するために用いる. reference PMT には 1000V から 1500V の高電圧を与える HV power supply 用いる. これにより光電面で変換された光電子が 10^6 オーダーで増倍される. reference PMT での波形信号はオシロスコープに送られ, network を通じて PC で解析される.

reference PMT のゲイン測定

reference PMT は D-Egg に向け放出された光の強度を測定するのにも用いられる. そのためあらかじめ PMT のゲインを知っていることでどのくらいの光子数のパルスが放出しているかを概算することができる. そのためこの PMT のゲインの測定を行った. PMT に向けて SPE(Single PhotoElectron) レベルの光を打ちオシロスコープで波形データを

読み取る。波形データから付録 A に従い計算することでゲインを求めることができる。図 4.3 は PMT に与えた高電圧に対するゲインを示したグラフである。

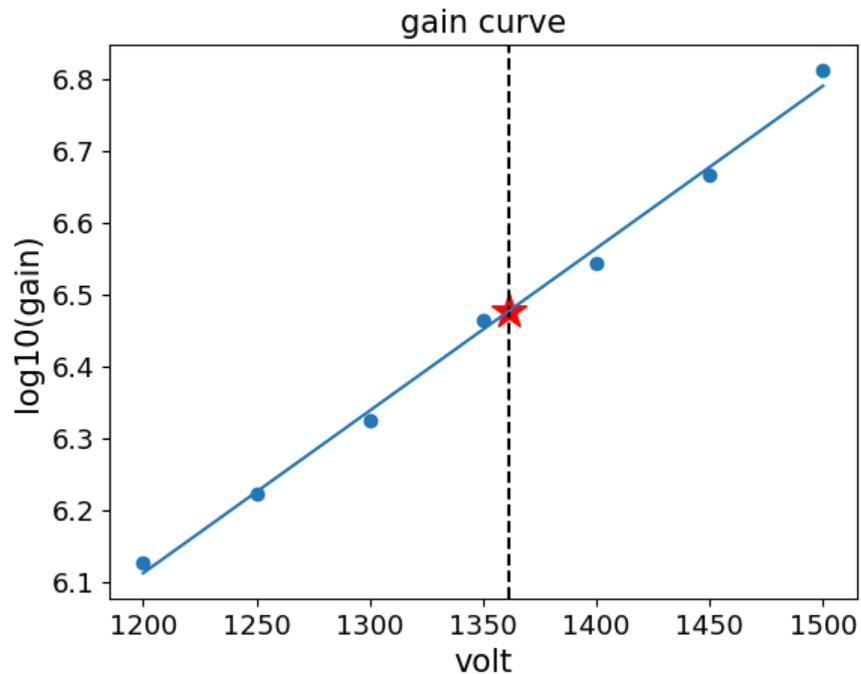


図 4.3: reference PMT のゲインと電圧の関係.x 軸は PMT に与えた電圧,y 軸はゲインの値に \log_{10} を取った値. 点は測定値で線は近似直線となっている。

y 軸がゲインに \log_{10} をとる値にすることで直線で近似することができる。この近似直線から PMT に 1361V を与えるとゲインが 3×10^6 となることがわかる。よって reference PMT に与える印加電圧を常に 1361V とすることで、 3×10^6 のゲインとして計算できる。

4.2.2 光源

この測定で用いる光源には D-Egg に用いられている耐圧ガラス球の最大透過波長である 405nm をピーク波長とする thorlabs 社の半導体レーザー (LD:Laser Diode) を用いる。LD は一般的な LED より波長や振幅のばらつきが少なくなっているためエネルギーのコントロールが容易となっている。

光源には立ち上がり時間が速く、発光時間幅が短い (10 から 20ns) パルス光が必要であるため、そのための回路基板の制作を行った。この回路図を図 4.4 に示す。

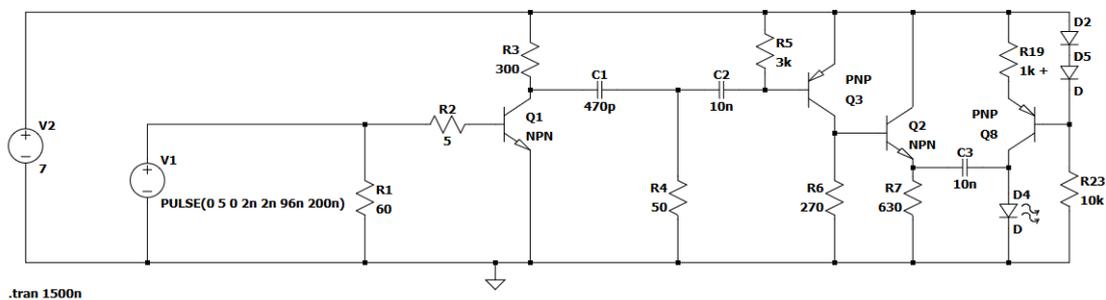


図 4.4: LD 基板の回路図 [11].C1 と R4 で構成される微分回路によって短パルスを生成している.

この回路には TTL 信号を送るための Function generator と 15V の電源を供給するための power supply を用いる. 供給電圧を変化させることで LD の強度をコントロールすることが可能となっている. この回路では主に C1 と R4 からなる微分回路と, 複数のトランジスタにより整形された時間幅の短いパルス信号の生成を可能にしている.LD から放出された光は透過率 0.5% の filter(??の結果により決定した) と 2 つの convex lens を通り 7 つの出力を持つ分岐光ファイバに入る.LD 基板,filter と 2 つの convex lens は 3D プリンタで制作したホルダーによって固定され,これを LD Module と呼ぶ(図 4.5). 分岐ファイバの 7 つの出力のうち, このシステムでは 2 つを用いる. そのうち 1 つは 5m の光ファイバに接続され, モニター用の PMT で受光する. またこの測定では 4 方向同時に光を打ち D-Egg の測定をすることはできない. そのため残りの 1 つの出力はスキャンしたい方向の光ファイバと接続される.D-Egg に向け放出される光は Scan Box 内の collimated lens を通ることで 2 3mm 程のビームとなる.

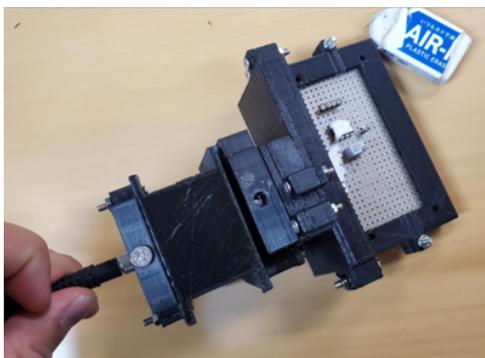


図 4.5: LDmodule の写真.3D プリンタによって制作した構造によりフィルタとコンベックスレンズが取り付けられている.

温度依存性

LD は温度依存性が強くわずかな温度変化により、強度が大きく変化することが知られている。そのため LD 基板にチップ型の温度計を取り付け熱伝導性の高いシリコンを LD の足部分と温度計に渡り塗った。LD からの光をファイバを通して PMT でモニターさせ、同時に温度計の値を raspberry pi を用いて測定し、温度変化に対する光強度の変化を測定した。更に同様の温度計を室内に配置し室温を同時に測定することで、LD 点灯時の温度変化を調べた。図 4.6 は測定時間に対する LD の相対的な光強度と室内・LD の温度の変化を示したグラフである。

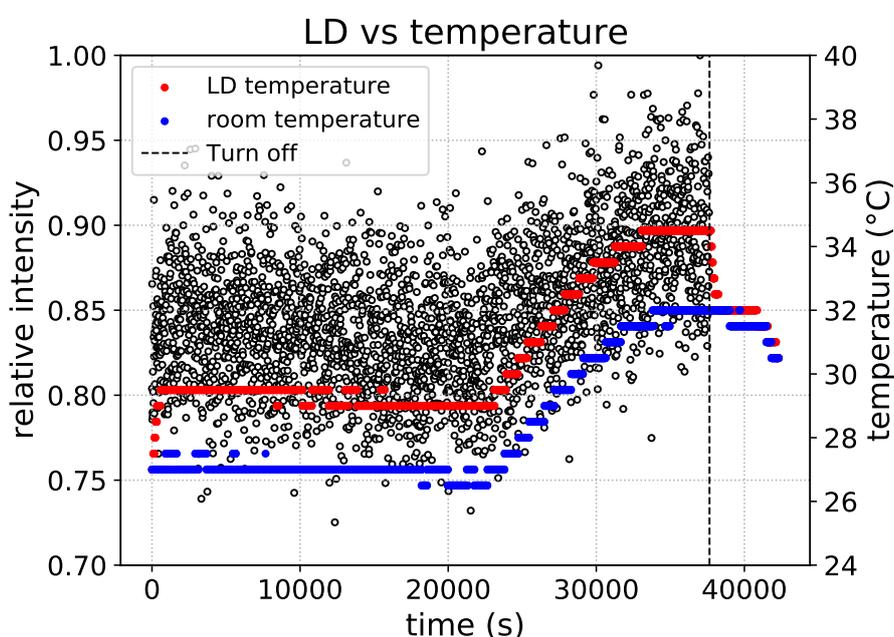


図 4.6: LD の光量と温度との関係。LD の温度が上がると同時に光量が増えていることがわかる。

5 °Cの温度変化に対して光量が約 7% 増加する。また LD を点灯してから数分間かけて温度が安定する。これにより D-Egg の測定では、空調などで室温を安定させ、測定までに光源を準備運転させる必要があることがわかる。また温度が変化しなければ長時間安定した強度の光を放出することがわかる。

光量

D-Egg に搭載されている PMT は約 250pe で飽和をはじめ。405nm での D-Egg の QE は約 0.35 であることから式 3.1 より 1 パルスあたり約 700 光子数以下の光量で測定

をする必要がある。LD の光量は LD 回路への印加電圧によって変化させることができる。そのため、D-Egg Scan Box 内の各ファイバーから放出されるパルス光の強度を LD 回路への印加電圧を変化させながら測定を行った。ファイバーから放出される光を前節で述べた reference PMT で受けオシロスコープから波形データを得る。各電圧に対して 5000 の波形データを解析することで図 4.7 に示すようなチャージのヒストグラムを得る。このヒストグラムをガウス関数でフィッティング (赤線) し、平均値をその印加電圧の代表値とする。この値を付録 A に従い 1 パルスあたりの光子数に変換する。これにより印加電圧に対する各ファイバーから放出される光量を示したグラフが図 4.8 である。このときの PMT のゲインは前節の通り 3×10^6 に設定していて QE は 0.25 として計算している。

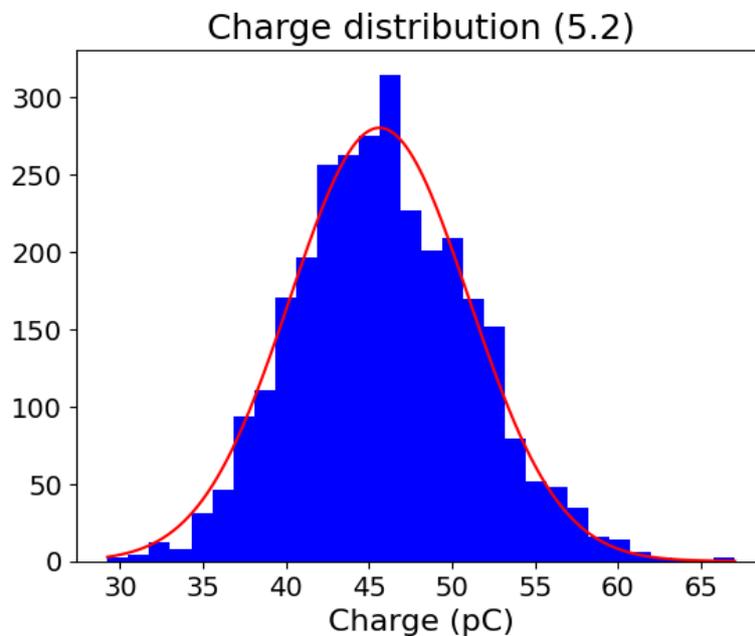


図 4.7: 5.2V の電圧に対し 5000 の波形データから得られたチャージのヒストグラム。赤線は分布に対してフィッティングしたガウス関数。

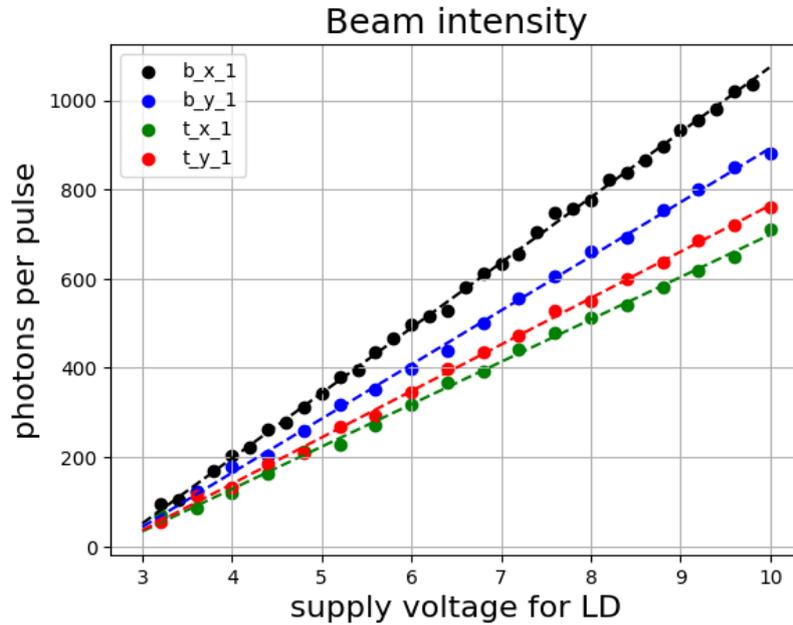


図 4.8: 各光ファイバから放出される 1 パルスあたりの光子数と LD 印加電圧の関係. 各一軸ステージに取り付けられる光ファイバによって色分けされている.

この結果から LD 回路への印加電圧を 7V 以下にすることで D-Egg 内の PMT が飽和することなく測定ができる. 各光ファイバから放出される光量には違いがあるものの, どれも直線で近似ができる. 現段階の測定プランでは D-Egg に照射する位置に置ける相対的な検出感度を測定するため, 光ファイバからの光量の違いは考える必要がない.

4.2.3 可動ステージ

Box 内には 6 つの可動ステージ (モータとアクチュエータ) が用いられる. 装置に用いられている可動ステージを表 4.1 にまとめる. 各ステージには Box の外部にあるドライバにそれぞれ接続されている. 5 つのオリエンタルモータ社のドライバ (AZD-AD) は, 図 4.2 の様に数珠繋ぎで接続することができ, 各ドライバに号機番号が割り振られる. これにより PC に 1 本の RS485 通信用ケーブルを接続することで, 5 つのドライバを独立にコントロールすることが可能となる. またドライバと PC を USB 接続し専用ソフトウェア (MEXE02) によりステータスの確認ができる. 残りの thorlabs 社の回転ステージは専用ドライバと PC を USB 通信することでコントロールを可能にする.

表 4.1: 可動ステージ一覧

名前	型番	メーカー	号機番号
上部回転ステージ	DGM130R	オリエンタルモータ	5
上部水平ステージ	SKR3306A	オリエンタルモータ	4
上部垂直ステージ	SKR2602A	オリエンタルモータ	3
下部垂直ステージ	SKR2602A	オリエンタルモータ	2
下部水平ステージ	SKR3306A	オリエンタルモータ	1
下部回転ステージ	HDR50/M	thorlabs	-

4.2.4 D-Egg

D-Egg とのコミュニケーションは図に示すような mini-FieldHub(MFH) というものを用いて行われる。MFB は PC と D-Egg との仲介的な役割をしている。MFB を介して D-Egg に指令を送ることで D-Egg 内の PMT に印加電圧を与えたり, D-Egg 内の較正装置を動作させたり, PMT や内部環境の情報取得をすることが可能になる。

D-Egg 内の PMT からの信号は波形データと charge stamp の 2 通りの方法で取得することが可能である。どちらもデータ取得に使われるトリガーは threshold trigger となる。そのため上下の PMT の信号に任意の threshold を設定することが必要となる。波形データを取得する場合, 設定した threshold を超えた付近の波形データ取得できる。波形データはより詳細な PMT 信号を取得できるが, その分データ容量と通信速度がかかる。一方 charge stamp の場合, threshold を超えた付近の波形データから計算されるチャージのみを取得する。詳細な波形データはわからないが短時間での測定が可能になる。そのため D-Egg Scan システムを用いた測定では charge stamp でのデータ取得を行う。

第 5 章

D-Egg の光検出測定

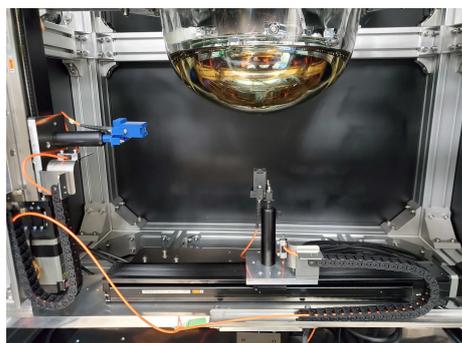
この章では前章で述べたシステムを用いた測定結果を述べる。また “DOMINANT” と呼ばれる IceCube 光検出器用に開発されたシミュレーションプログラムとの比較を行い、実際のデータとの相違を述べる。

5.1 測定準備

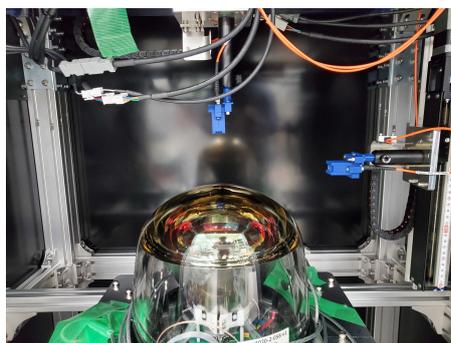
測定の準備として D-Egg の 2 つの PMT のゲインを 10^7 に設定する必要がある。そのため D-Egg 内の PMT のゲイン測定はスキャン前に行われ、この測定結果から各 PMT への印加電圧が決定される。

1 つの D-Egg に対し、D-Egg Scan は鉛直上向きのスキャン、下側側面の D-Egg 軸に対するスキャン、上側側面の D-Egg 軸に対するスキャン、鉛直下向きのスキャンの 4 つのスキャンが行われる。D-Egg Scan Box を円柱座標で考え、これらを “b-r scan”, “b-z scan”, “t-r scan”, “t-z scan” と呼ぶ。またそれぞれの scan に用いる光ファイバを “b-r ファイバ”, “b-z ファイバ”, “t-r ファイバ”, “t-z ファイバ” と呼ぶ。同時にスキャンすることはできないため、各スキャンに合わせて光ファイバの接続をする必要がある。

一軸ステージに接続されているドライバは位置決め機能が搭載されている。ステージの任意の位置をホームとして保存することが可能になる。そのため b-r ファイバと t-r ファイバを回転ステージの回転軸にセットしホームと設定した。この位置はレーザー墨出し器で位置決めを行った。b-z ファイバは D-Egg の最下点から下に約 20mm、t-z ファイバは D-Egg の最上点から上に約 20mm のところをホームとして設定を行った。(図 5.1)



(a) 下側ステージのホーム位置



(b) 上側ステージのホーム位置

図 5.1: 各一軸ステージのホーム位置. PC から指令を送ることで同じ位置に戻る.

5.2 測定方法

この測定では D-Egg を中心とした円柱座標で考える. b-r scan と t-r scan は, 回転台と r 方向の一軸ステージを用いて測定を行う. ϕ を 0° から 360° の区間を 12° 刻み, r を 0mm から 135mm の区間を 5mm 刻みの合計 858 点の測定を行うことで D-Egg の下・上面をカバーする.

b-z scan と t-z scan は, 回転台と z 方向の一軸ステージを用いて測定を行う. ϕ を 0° から 360° の区間を 12° 刻み, z を 295mm から 170mm の区間を 5mm 刻みの合計 806 点の測定を行うことで D-Egg の上下の側面をカバーする.

各点で 5000 の charge stamp を取り, チャージの分布をガウスフィッティングをし, 中央値をその点の収集効率の指標とする. それぞれのスキャンの点の最大値を 1 とし正規化することで D-Egg の相対的な検出感度の違いを求める.

また各 ϕ での測定後, reference PMT で光源強度を測ることで, 意図しない光量の変化を監視する.

5.3 結果

5.3.1 b-r scan

D-Egg 底面からの scan において, ある点でのチャージ分布と得られた相対的な検出感度のヒートマップを図 5.2 と図 5.3 に示す.

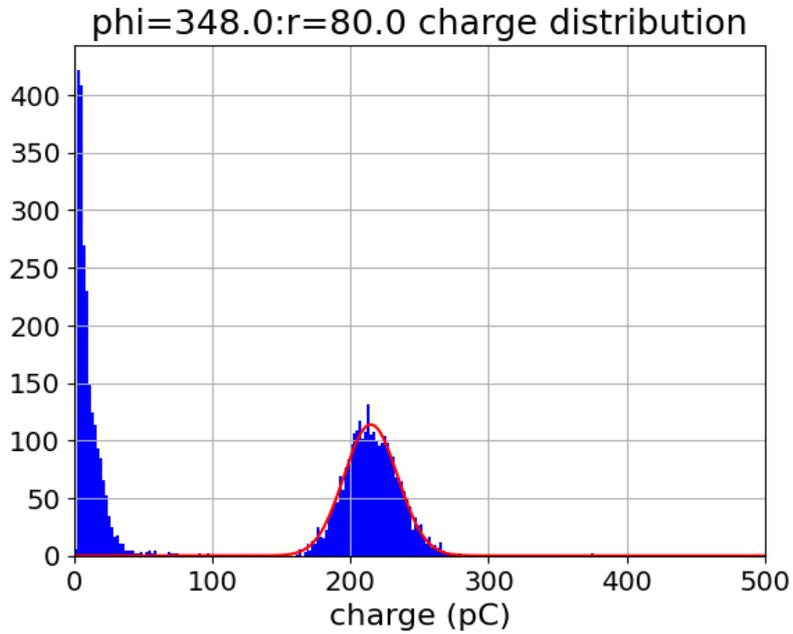


図 5.2: $\phi = 348^\circ, r = 80\text{mm}$ の点でのチャージ分布. 赤線は分布に対してフィッティングしたガウス関数. 2-4pC 付近のピークは光漏れやノイズである.

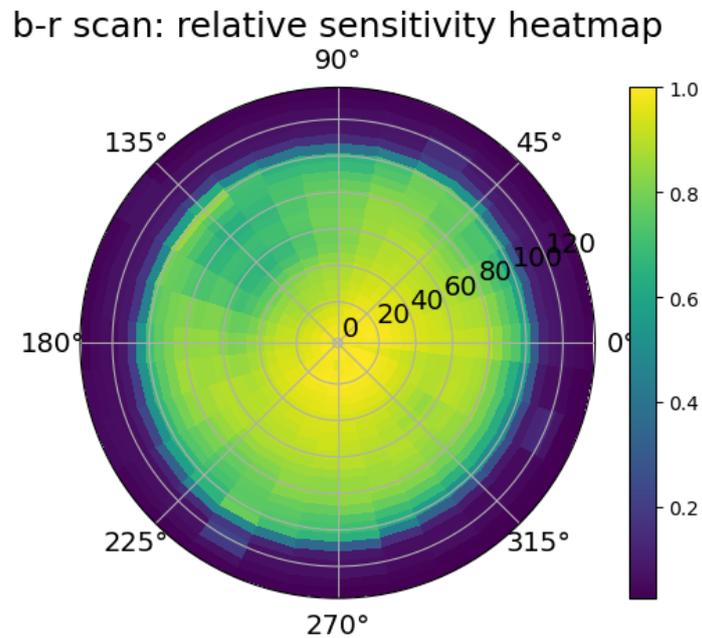


図 5.3: b-r scan で得られた相対的な検出感度のヒートマップ. 中心につれ検出感度が上昇する. また $r=110\text{mm}$ 付近に 90° 間隔で小さいピークが見える. これは Flasher ring の LED と LED カップに反射している影響である.

チャージ分布をみると, 赤線でフィティングされたピークの以外に 2 から 4pC あたりピークをもつ分布が存在する. これは PMT の trigger が threshold trigger であり, 2pe レベルの trigger をかけているからである. これによりダークノイズや Box への光漏れを拾っていると考えられる. この測定においてはある程度大きな光量での測定であるため気にしなくてよい.

ヒートマップをみると, 中心部から離れるにつれ徐々にチャージが弱まっていき, $r=100\text{mm}$ 付近で急激に減少することがわかる. これは 3.2.3 で述べたように PMT の縁側に光があたると検出感度が悪くなるからである. またある場所でチャージが減少するのも同じである. さらに $r=110\text{mm}, \phi = 55^\circ$ 付近から 90° 間隔で小さなピークがあることがわかる. この場所は Flasher ring にある鉛直下向きの LED の位置と一致しており LED や LED を固定しているカップに反射した光が PMT に届いていると考えられる.

5.3.2 b-z scan

D-Egg 下側側面の相対的なチャージのヒートマップを図 5.4 に示す.

$z=20\text{mm}-40\text{mm}, \phi = 150^\circ$ あたりでの検出感度の減少が見られる. この減少はユニフォミティ以外にもゲルの厚さやガラス球の細かな構造の違いによつての変化であることも考えられる. また $z=100\text{mm}$ 付近の PMT 上部での検出感度の減少具合に大きな差がある. これは図 5.5 で示すようなゲルが固体になるときにできる気泡などによる光の散乱などの影響を受けていると考えられる.

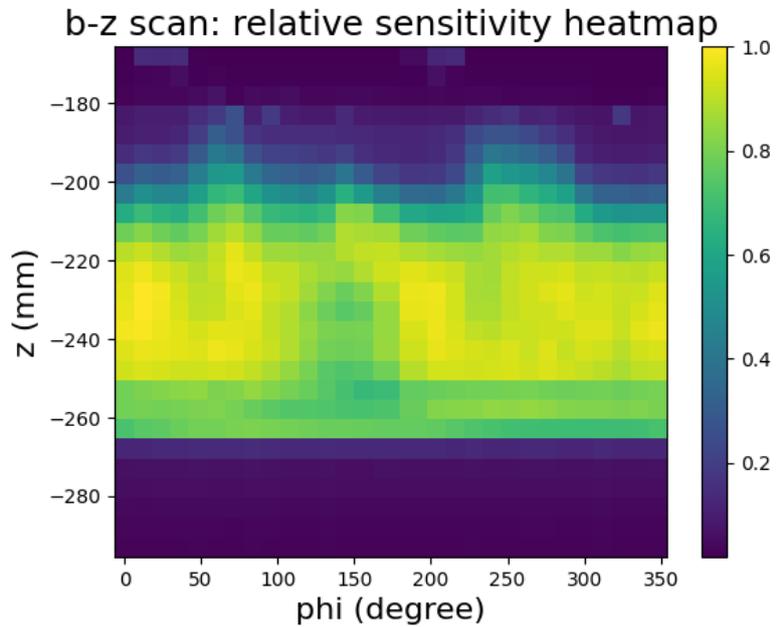


図 5.4: b-z scan で得られた相対的な検出感度のヒートマップ. $z=100\text{mm}$ 付近での検出感度に大きな差がある.

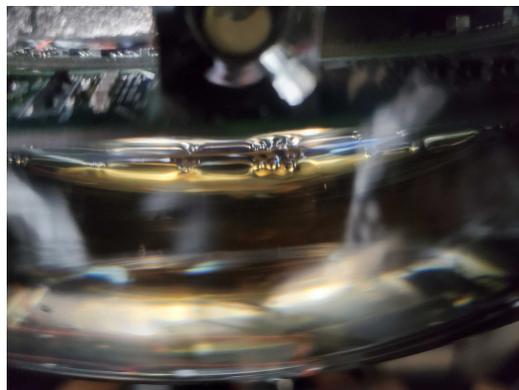


図 5.5: ゲルの気泡に光を照射したときの写真. 気泡に光があたり散乱されるのがわかる. これにより PMT に光が届く.

5.3.3 t-r scan

D-Egg 上面の相対的なチャージのヒートマップを図 5.6 に示す. b-r scan と同じような結果になるが D-Egg 上部には Flasher ring がないため, b-r scan でみえるような 90° 間隔の小さなピークは存在しない.

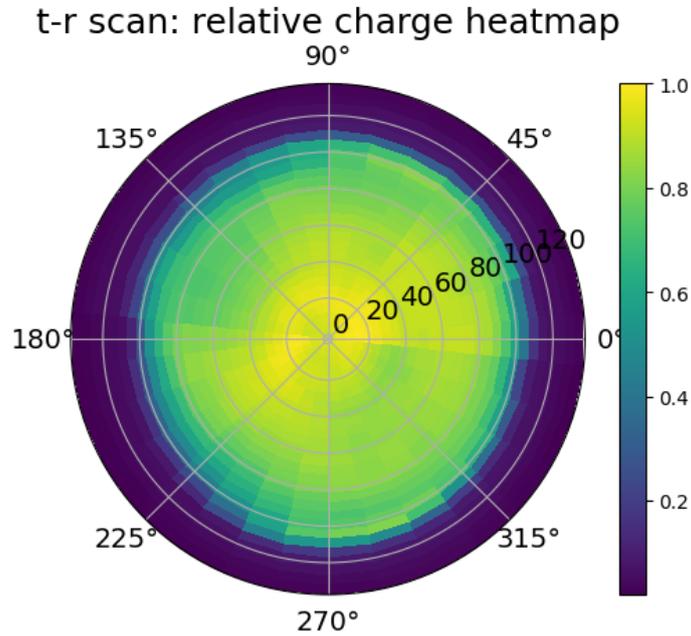


図 5.6: t-r scan で得られた相対的な検出感度のヒートマップ. b-r scan と同じような結果になっている

5.3.4 t-z scan

D-Egg 上側側面の相対的なチャージのヒートマップを図 5.7 に示す.

b-z scan と同様に検出感度に違いがある. また $z=115\text{mm}, \phi = 100^\circ - 250^\circ$ に大きなピークがある. これは PMT の地磁気によるノイズ削減のために取り付けられているファインメットが原因である. 光がファインメットに照射されると反射し PMT に光は届かないが, 図 5.8 のように光がファインメットの隙間に入射するとゲルやガラスを伝って PMT に光が届く. ファインメットはどの D-Egg にも同じ場所についているとは限らないためこのようなピークがみられる.

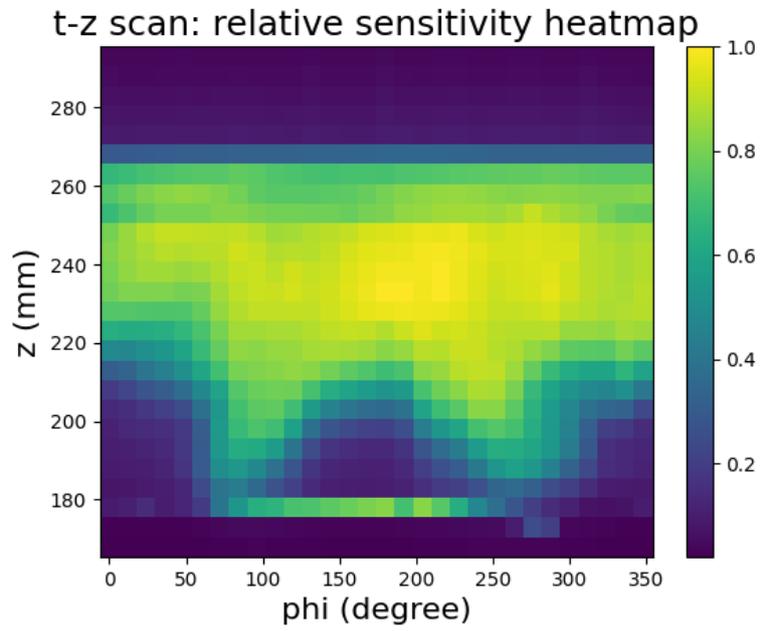


図 5.7: t-z scan で得られた相対的な検出感度のヒートマップ. $z=115\text{mm}$, $\phi = 100^\circ - 250^\circ$ 付近にピークがある. これはファイナメントとゲルの隙間に光が入ったためである.



図 5.8: ファインメットとゲルの中に光を入射させたときの写真. ゲルやガラスでの反射を繰り返し, PMT に光が届いているのがわかる.

5.4 シミュレーションとの比較

IceCube 実験は南極氷河で行われ, 一度検出器を埋設すると二度と取り出せない. そのためニュートリノの飛来方向やエネルギーを正確に理解するにはシミュレーションによる研究が必要不可欠である. 前節の実際のデータとシミュレーションでの結果の違いを示すことで, D-Egg シミュレーションに対する有効性を述べる.

このシミュレーションでは “DOMINANT” (Dom Optical-photon to Material INteraction ANd Tracking simulator based on Geant4)[12] と呼ばれる IceCube 光検出器用に開発されたプログラムを扱う (付録 B).

シミュレーションでの実験環境は実際の D-Egg Scan と同じにする. D-Egg 外部の環境を Air にし, D-Egg Scan 同様の 3mm の circle beam を D-Egg に向け照射する. それぞれのスキャンと同条件でスキャンをしデータを出くする.

DOMINANT で実装されている PMT はユニフォミティのような PMT にヒットした

場所による、検出感度の違いはない。シミュレーションでは PMT に光子がヒットした座標を保存する。解析のとき、その座標を 3.2.3 節で測定されたデータと比較しヒットした光子に重みをかけることでユニフォミティを考慮したシミュレーション結果を得られる。

これらを基にシミュレーションを行いそれぞれのスキャンに対する検出感度のヒートマップを図 5.9 に示す。ある PMT の実際に測定されたのユニフォミティデータを解析において畳み込んでいる。b-z scan, t-z scan のヒートマップは実際の測定同様ムラが大きいことがわかる。D-Egg 側面のスキャンは PMT のユニフォミティが大きく影響する。

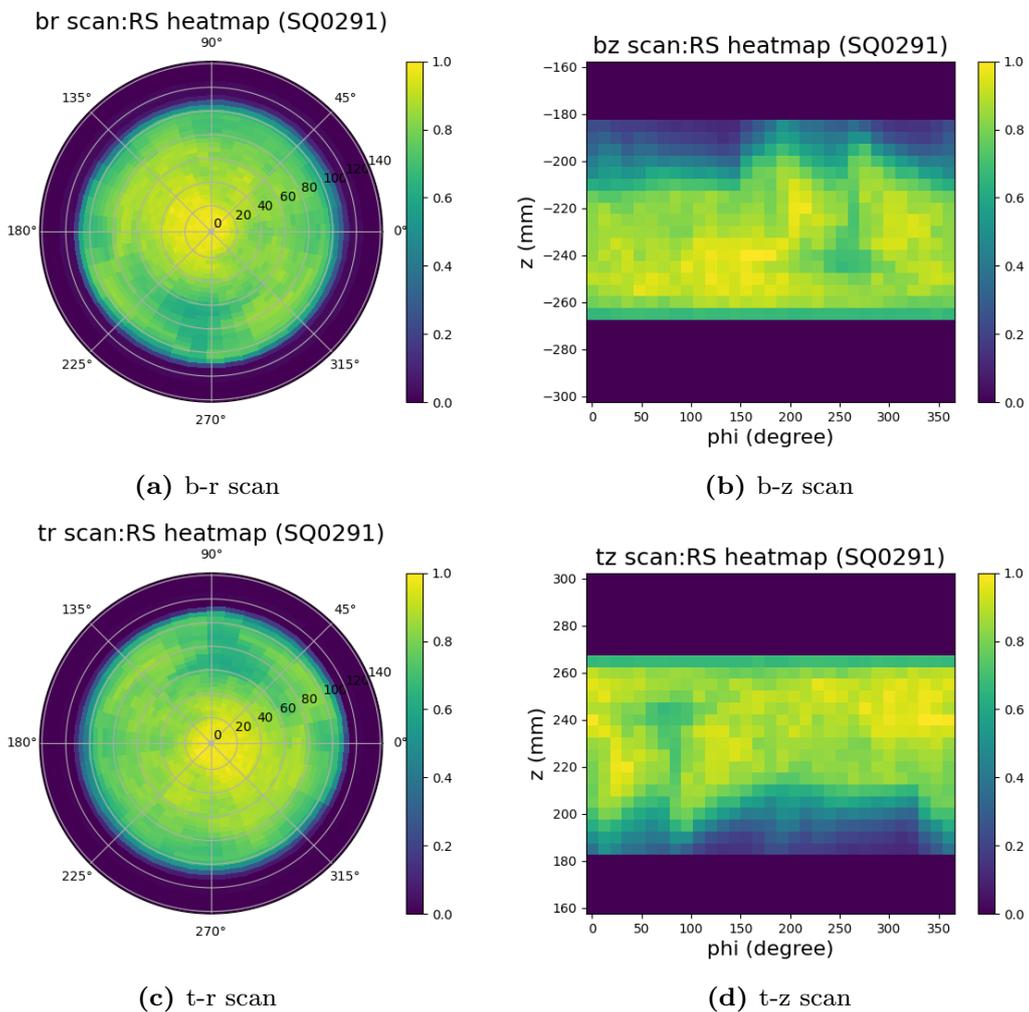


図 5.9: シミュレーションで測定した各スキャンのヒートマップ。

このヒートマップと実際のデータを比較するために、各 ϕ で移動距離 (r or z) に対する相対的な検出感度の変化を図 5.10 に表す。ここで ratio は黒線 (測定データ) の積分値の平均から赤線 (シミュレーションデータ) の積分値の平均を割ったものとなり双方

を比較している. これらを事前に測定された 12 個の PMT のユニフォミティデータでの比較の一部を図 5.1 にまとめる.

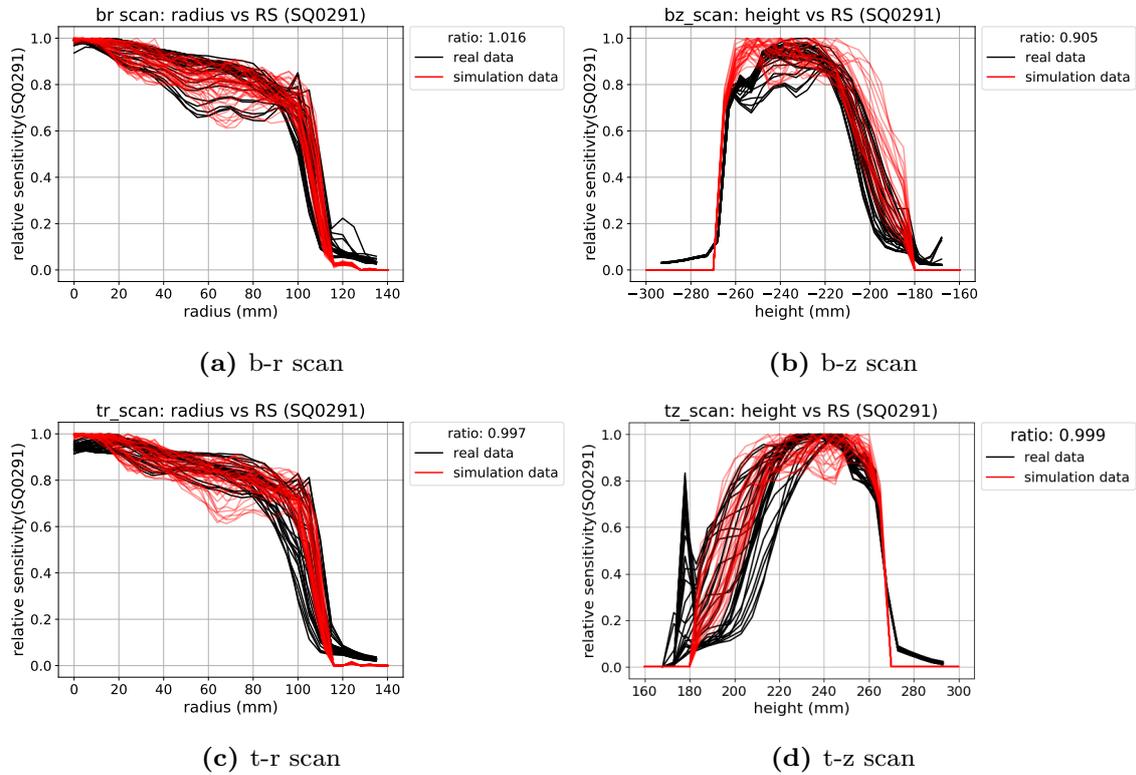


図 5.10: 各 ϕ で移動距離 (r or z) に対する相対的な検出感度の変化のプロット. 黒線が測定データ, 赤線がシミュレーションのデータとなっている.

測定の種類	PMT					
	PMT-1	PMT-2	PMT-3	PMT-4	...	average
b-r scan	0.947	1.016	0.947	0.905	...	0.935
b-z scan	0.860	0.905	0.968	0.812	...	0.845
t-r scan	0.930	0.997	0.930	0.888	...	0.915
t-z scan	0.904	0.999	0.914	0.855	...	0.899

表 5.1: 実際の測定結果と事前に測定された 12 個の PMT のユニフォミティデータを考慮したシミュレーション結果との比較.

この結果から実際のデータとシミュレーションは最もかけ離れている場合で 80 % であり, 平均して約 90 % の違いがあることがわかった. このことよりゲルやガラスの物質構

造,D-Egg 内部に搭載されているファインメットや基板類などの影響をしっかりと議論したうえでシミュレーション研究をする必要がある。

第6章

結論

本研究では,2023年のIceCube-Upgradeに向けて新たに南極氷河に埋設される新型光検出器 D-Egg の較正システム (D-Egg Scan Box) の制作, システムを用いた測定を行った. また実験データをシミュレーションでの結果との比較を行った.

D-Egg Scan Box を用いた測定では各光源の照射位置による検出感度の違いを測定できた. これらの結果から D-Egg 内のゲルや Flasher ring, ファインメットなど様々な影響を受け光が PMT の光電面に到達することがわかった. またシミュレーションとの比較からシミュレーションではかけ離れている場合で 80 % であり平均して 90 % であることがわかり, シミュレーションが幾分か過大評価していることがわかった.

今後は数多くの D-Egg の測定を行いデータを解析していくことで D-Egg の検出性能を理解することが重要である. またシミュレーションでの D-Egg の構造をより詳細に記述することでシミュレーションをより実際の測定環境に近づける必要がある.

付録 A

PMT による光検出

1 パルスあたりに PMT の陽極から出力される電荷 (チャージ) q_{pulse} と光電面への入射光子数 $N_{\gamma,pulse}$ との関係は式で表される.

$$q_{pulse} = N_{\gamma,pulse} \times Q_E \times G_{ain} \times e \quad (\text{A.1})$$

ここで Q_E は量子効率, G_{ain} はゲイン, e は電気素量である.

PMT からの信号をオシロスコープで検出される場合,PMT からの電流 $I(t)$ がオシロスコープの終端抵抗 R を通ることで図のような縦軸-電圧 V , 横軸-時間 t の波形データを得る. ここで $I = \frac{dq}{dt}$ とオームの法則 $V = IR$ から q_{pulse} は

$$q_{pulse} = \int \frac{|V(t)|}{R} dt \quad (\text{A.2})$$

と表される.

式 A.1 と式 A.2 より, 光源をゲインと QE の値を知っている PMT に照射しオシロスコープから得られる波形データを解析することで光源から放出される光子数を求めることができる. また SPE(Single PhotoElectron) レベルの光を照射することで PMT のゲインを測定できる.

付録 B

DOMINANT

DOMINANT は粒子と物質の相互作用をシミュレートするためのツールキットである Geant4[13] をベースに IceCube 実験用に作られたプログラムである。DOMINANT を用いることで、物質境界における光子の反射や屈折、物質における光の吸収、散乱を考慮した上で光子のシミュレーションができる。また PMT などの sensitive detector(SD) を配置することで、SD へのヒット情報 (座標やエネルギー) を取得することができる。これらの物質や SD はユーザーが自由に制作でき、目的に合ったシミュレート環境を設定できる。

現在 DOMINANT では DOM,D-Egg,mEgg[14] が実装されている。これらは CAD データを基に球などの基本立体の組み合わせで構成されている。例として D-Egg に半径 20cm の circle beam を打ったときの光子シミュレーションを図??に示す。

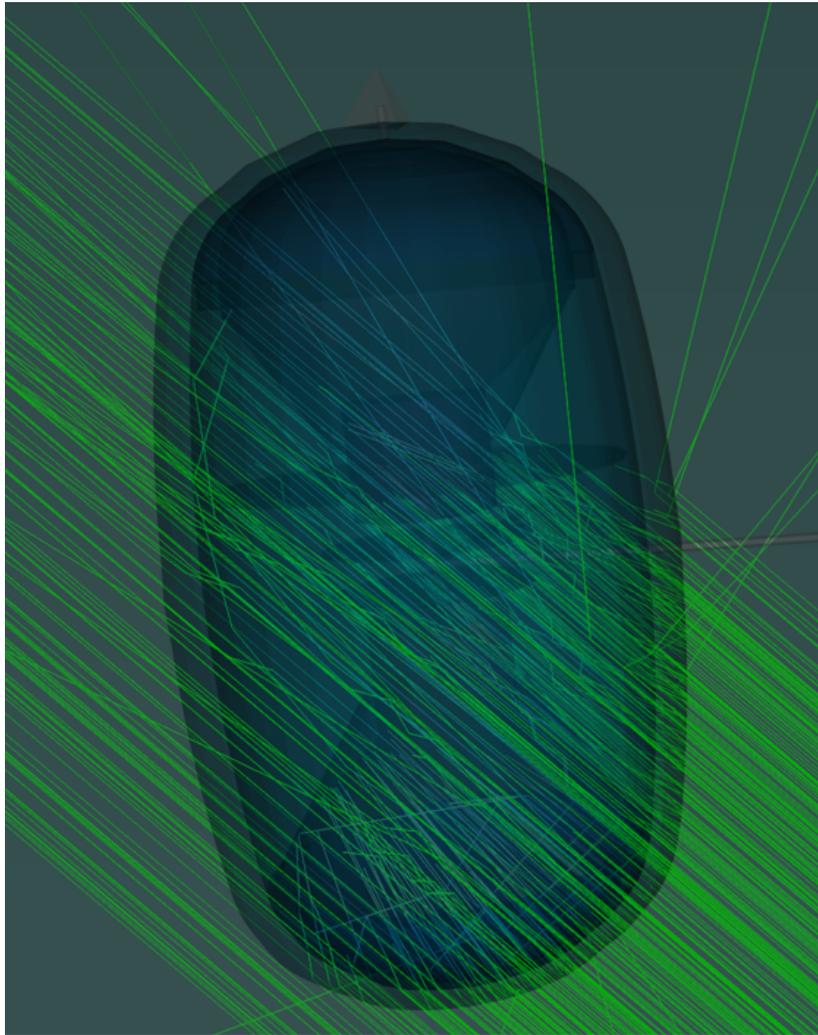


図 B.1: DOMINANT を用いた粒子シミュレーション.

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にて行われました. 本研究の遂行にあたり, 日頃から実験や解析方法について多くのご指導を頂いた指導教官である吉田教授並びに清水助教, 研究の着想から論文執筆までご助言を頂いた石原教授に感謝申し上げます. 永井特任助教, Colton Hill さん, Max Meier さんには, 定期ミーティングで適切なアドバイスを頂きました. 心より感謝致します. また同研究室の学生メンバーの多くのご支援のおかげで, 充実した研究生活を過ごすことができました. 皆様には感謝申し上げます.

参考文献

- [1] Particle Data Group and Zyla. Review of Particle Physics. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Vol. 2020, No. 8, 08 2020. 083C01.
- [2] Wolfgang Bietenholz. The most powerful particles in the universe: a cosmic smash. *Revista Cubana de Fisica*, Vol. 31, , 05 2013.
- [3] John David Jackson. *Classical electrodynamics*. Wiley, New York, NY, 3rd ed. edition, 1999.
- [4] M.G. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams, J.A. Aguilar, M. Ahlers, M. Ahrens, D. Altmann, K. Andeen, T. Anderson, I. Ansseau, and et al. The icecube neutrino observatory: instrumentation and online systems. *Journal of Instrumentation*, Vol. 12, No. 03, Mar 2017.
- [5] Marek Kowalski. Neutrino astronomy with icecube and beyond. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 888, p. 012007, 09 2017.
- [6] Mark Aartsen, Markus Ackermann, Jenni Adams, Juan Antonio Aguilar, Markus Ahlers, Maryon Ahrens, Imen Al Samarai, David Altmann, Karen Andeen, and et al. Neutrino emission from the direction of the blazar txs 0506+056 prior to the icecube-170922a alert. *Science*, Vol. 361, No. 6398, pp. 147–151, Jul 2018.
- [7] M. G. Aartsen, R. Abbasi, Y. Abdou, M. Ackermann, J. Adams, J. A. Aguilar, M. Ahlers, D. Altmann, J. Auffenberg, X. Bai, and et al. First observation of pev-energy neutrinos with icecube. *Physical Review Letters*, Vol. 111, No. 2, Jul 2013.
- [8] M G Aartsen, R Abbasi, M Ackermann, J Adams, J A Aguilar, M Ahlers, M Ahrens, C Alispach, P Allison, N M Amin, and et al. Icecube-gen2: the window to the extreme universe. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, Vol. 48, No. 6, p. 060501, Apr 2021.

- [9] Aya Ishihara. The icecube upgrade – design and science goals, 2019.
- [10] Yuya Makino. D-egg: A next-generation optical module for icecube. *EPJ Web of Conferences*, Vol. 207, p. 06005, 01 2019.
- [11] Wilfried Uehring, Chantal-Virginie Zint, and Jeremy Bartringer. A low-cost high-repetition-rate picosecond laser diode pulse generator. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 5452, , 09 2004.
- [12] K.Hoshina. Dominant. <http://www.pp1.phys.chiba-u.jp/research/IceCube/DetectorSim/DOMINANT/>.
- [13] CERN. Geant4. <https://geant4.web.cern.ch/>.
- [14] S.Mariko. Icecube gen2 計画における次世代光検出器「megg」の性能評価. http://www.icehap.chiba-u.jp/education/laboratory/files/msuzuki_thesis.pdf.