

2025 年度 修士論文

IceCube-Gen2 に向けた集光器 FOM の開発
(Developing the Fiber Optic Module (FOM) as a Light Collector
for IceCube-Gen2)

大阪公立大学大学院
理学研究科 物理学専攻
宇宙線物理学研究室

博士前期課程 2 年
学籍番号 BHB24057

石井 達希

概要

宇宙線物理学は、宇宙線の観測を通して宇宙環境や素粒子の振る舞いを探究することを目的としている。その宇宙線の起源を同定する新たな手段として、宇宙ニュートリノの観測が行われている。これはニュートリノが電荷を持たず、質量も非常に小さいことから、宇宙空間の磁場や天体にほとんど影響されることなく地球へ飛来してくることが理由である。

宇宙ニュートリノの観測は様々な手法で行われているが、ニュートリノの相互作用断面積の小ささから、総じて巨大な検出体積が必要となる。世界最大のニュートリノ観測施設である IceCube は、南極の氷中に 5000 台以上の光検出器を埋設して構成されている。ニュートリノと氷との相互作用により生成される荷電レプトンが、水中を伝搬していく中で発するチェレンコフ光を検出しようという試みであり、その検出体積は 1 km^3 におよぶ。

IceCube の次世代計画として、その体積を 8 km^3 まで拡大しようという、IceCube-Gen2 計画が進行している。これは IceCube の近辺にさらに穴を掘削し、1 万台近くの新検出器を導入しようというもので、相互作用事象の検出数増大や方向決定精度の向上を狙いとしている。IceCube-Gen2 では体積の拡大を優先したため、検出器同士の水平方向の間隔が IceCube から約 2 倍に広がっている。このために、本来最外部の検出器群によって除去されるはずであった背景事象について、そのエネルギー閾値が高くなってしまふことが予想されている。この解決には、IceCube-Gen2 の検出器間隔や検出器そのものの構造に変化を加えることなく、経済的かつ技術的に優れた集光能力を持つモジュールの導入が必要である。

我々はこの要件を満たすモジュールとして、波長変換機能を持つシンチレーションファイバーを主要構造とする集光器 Fiber Optic Module (FOM) の開発に取り組んでいる。本研究では、FOM の設計開発において必要となる、FOM を構成する Kuraray 製 B-3 ファイバーの光学特性や物性の情報を取得するため、各種の実験を行った。ファイバー内をシンチレーション光が伝播していくに伴う減衰の影響、チェレンコフ光の入射角度の影響、ファイバーの曲げにより生じる損失の影響、ファイバーの圧力と低温への耐性を調査した。得られた実験結果から FOM 案の妥当性を評価し、IceCube-Gen2 に採用される集光器として相応しいと結論づけた。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	宇宙線物理学	1
1.2	宇宙ニュートリノ	4
第 2 章	IceCube	9
2.1	IceCube	9
2.2	IceCube の次世代計画	12
第 3 章	集光器開発	17
3.1	シンチレーションファイバー	17
3.2	Fiber Optic Module (FOM)	18
第 4 章	シンチレーションファイバーの特性評価実験	20
4.1	減衰長	20
4.2	入射角度依存性	22
4.3	曲げ損失	23
4.4	圧力耐性	24
4.5	低温耐性	26
第 5 章	議論および今後	27
5.1	FOM 案の妥当性	27
5.2	新たな FOM 試作器の設計	28
第 6 章	結論	31
	謝辞	32
	引用文献	34

第 1 章

序論

1.1 宇宙線物理学

1.1.1 宇宙線物理学の概観

宇宙には様々な粒子が飛び交っており、そのうち概ね 1 GeV 以上の高エネルギー陽子・原子核は宇宙線と総称される。宇宙線物理学では、地球に到来した宇宙線の観測を通して、宇宙環境や天文現象、素粒子の振る舞いを探究することを目的としている。具体的にどのような観測を経てどのような課題に挑んでいるかを、以下に記述する。

1.1.2 空気シャワー

地球に到来した宇宙線は、大気中の原子核との相互作用によって二次的に π 中間子や K 中間子などのハドロンを生成する。このハドロンが十分に高いエネルギーを持っている場合、大気中の原子核との相互作用を行ってさらにハドロンを生成することを繰り返し、粒子数はねずみ算式に増加していく。この現象をハドロンカスケードと呼ぶ。カスケードによって生成された粒子を宇宙線の二次粒子、対して宇宙から飛来してきた最初の宇宙線を一次粒子と呼ぶ。ハドロンカスケードが発達していくに伴い、生成時点で二次粒子が持つエネルギーは小さくなっていく。

二次粒子として生成される π 中間子に着目すると、 π^+ 、 π^- はある段階でエネルギーの小ささから相互作用を行うより早く寿命を迎え、以下のように崩壊する。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.2)$$

ここで生成されるミューオンとニュートリノは、多くの場合そのまま地表まで到達する。これらをそれぞれ大気ミューオン、大気ニュートリノと呼ぶ。

π^0 の場合、相対論的なエネルギーを持っていたとしても 10^{-16} s 程度という寿命の短さから、すぐに 2 つの γ 線へと崩壊する。 γ 線が十分に高いエネルギーを持っている場合、それは電子対生成を起こし、また生成された電子（陽電子）が制動放射で γ 線を放出するというのを繰り返す、電磁カスケードと呼ばれる現象を起こす。

ハドロンカスケードと電磁カスケードを経て一次粒子が膨大な数の二次粒子群へと発展することを、空気シャワーと呼ぶ。一次粒子のエネルギーが高いほど最大発達時の二次粒子の数は増加し、 10^{19} eV ならば 10^{10} 個程度まで発達する。

1.1.3 宇宙線観測

宇宙線の観測手法は、大きく直接観測と間接観測に二分される。地表での宇宙線観測は空気シャワーを観測することと等しく、間接観測に分類される。対して、気球や衛星といった飛翔体により一次粒子の直接的な検出を試み

る実験が、直接観測に分類される。それぞれの概観を以下に述べる。

飛翔体による直接観測

上空に検出器を配置し、入射してくる一次粒子を観測する手法である。検出器は、一次粒子の飛跡を検出するトラッカー、エネルギーを測定するカロリメーター、粒子種を識別するためのスペクトロメーターや遷移放射検出器などを積層して構成される。宇宙線が磁場のかけられた検出器内を通過する際、その飛跡の曲率から運動量を、物質との相互作用による発光や電離損失から電荷量やエネルギーを精密に測定する。これにより、陽子、ヘリウム、重粒子、あるいは反物質（反陽子など）を一つ一つ識別することが可能である。

この手法の利点として、一次粒子の直接観測によりその電荷を直接的に決定できることなどが挙げられる。対して、気球や衛星の積載重量に限界があることから有効面積に制約が課せられること、ひいてはフラックスの小さいエネルギー帯の宇宙線を観測することが実質的に困難であることなどが欠点として挙げられる。1.1.4 項にて詳述するが、これは数百 TeV を超えるエネルギー帯にあたる。

この手法の例として、国際宇宙ステーションの日本実験棟船外実験プラットフォームきぼうに搭載されている CALET 実験を挙げる。CALET 実験は主に高エネルギー電子およびガンマ線の精密観測を目的としており、その検出器は機能の異なる 3 つの層が積層された構造を有している [1]。最上層には電荷測定器が配置され、入射粒子の電荷を測定することで原子核の種類を識別する役割を担う。その下部には、シンチレーションファイバーを直交させた層とタングステン板を交互に積層したイメージングカロリメータ (IMC) が設置されている。IMC は、入射粒子が引き起こす電磁シャワーの初期発達を捉え、高い精度で粒子の飛来方向を決定するとともに、シャワーの開始点から電子と陽子の識別を行う。最下層には、厚い PWO シンチレータを用いた全吸収型カロリメータ (TASC) が配置されている。TASC は垂直方向に 27 放射長という十分な厚みを持ち、TeV 領域の高エネルギー粒子が生成するシャワーのエネルギーをほぼ完全に吸収し、その総量を精密に測定する。これらの検出器の連携によって CALET は高いエネルギー分解能と優れた粒子識別能力を実現し、近傍加速源からの高エネルギー電子検出や暗黒物質探索といった課題に挑んでいる。

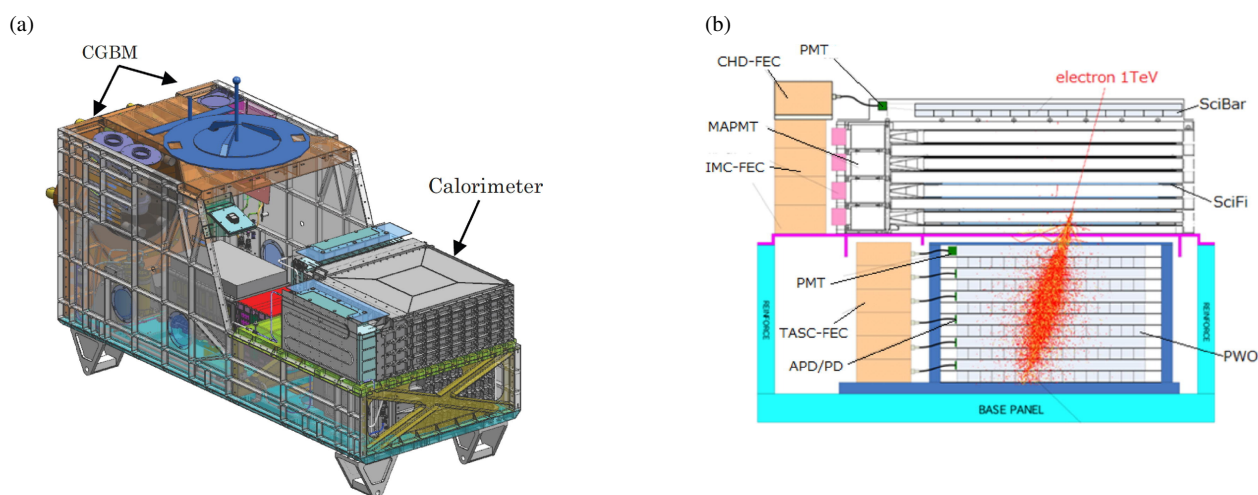


図 1.1 (a)CALET 実験に用いられている検出器の外観 [1]。 (b)CALET 実験のカロリメータに 1 TeV の電子が入射してシャワーをつくるイメージ図 [1]。

地表での間接観測

地表に検出器を配置し、入射してくる空気シャワーを観測する手法である。数十メートルから数百キロメートル四方程度の広大な敷地に、ある程度の間隔でシンチレーション検出器や水チェレンコフ検出器を配置する。空気シャワーがアレイを通過する際、各検出器が記録した粒子到達の時間差から到来方向を、粒子密度から一次宇宙線のエネルギーを再構成することが可能である。大気蛍光望遠鏡という大気中の分子が励起されて発する蛍光を望遠鏡で捉えシャワーの発達過程を立体的に観測する手法を併用することも多く、ハイブリッド観測と呼ばれる。

この手法の利点として、土地さえ用意できれば有効面積を容易に拡大でき、ひいてはフラックスの小さいエネルギー帯の宇宙線を観測することが可能であることなどが挙げられる。対して、空気シャワーの持つ情報からの再構成であることから、一次粒子の識別に不定性が含まれることなどが欠点として挙げられる。

この手法の例として、米国ユタ州の砂漠地帯に展開されている Telescope Array (TA) 実験を挙げる。TA 実験は主に超高エネルギー宇宙線の起源解明を目的としており、上述のハイブリッド観測を行っている [2]。地表にはプラスチックシンチレータを用いた地表粒子検出器 (SD) が格子状に配置され、空気シャワーが地表に到達した際の粒子密度やタイミングを測定する役割を担う。その外周には、多数の鏡と光電子増倍管 (PMT) を備えた大気蛍光望遠鏡 (FD) が設置されている。FD は、シャワー粒子が大気中の窒素分子を励起する際に発する微弱な蛍光を捉え、大気中におけるシャワーの初期から最大発達までの推移を立体的に観測する。これらの検出器の連携によって TA 実験は高い検出頻度と優れたエネルギー決定精度を両立し、超高エネルギー宇宙線のホットスポット探索 [3] や質量組成の測定 [4] といった課題に挑んでいる。

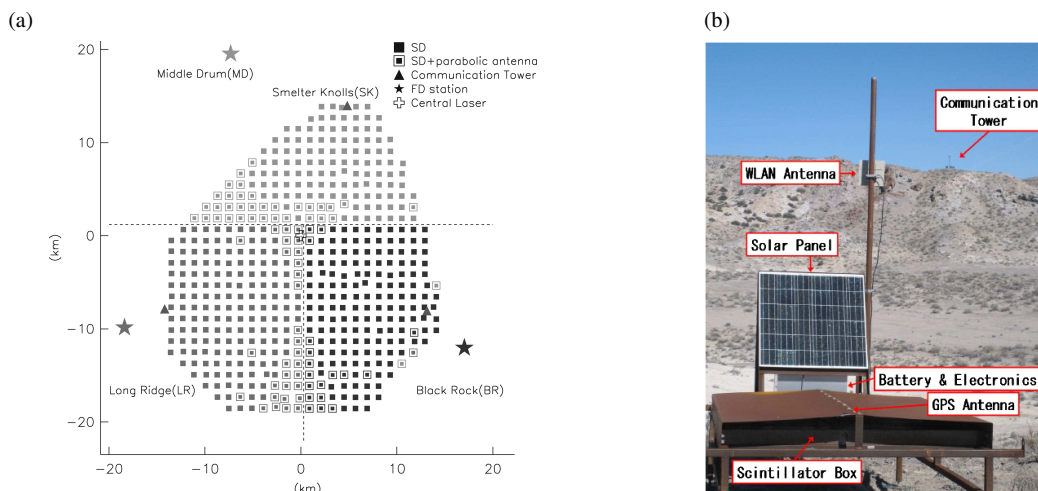


図 1.2 (a)TA 実験の検出器配置 [2]。(b)TA 実験の地表粒子検出器 (SD) の外観 [2]。

1.1.4 宇宙線のエネルギースペクトル

以上のような複数の手法で宇宙線の観測が続けられた結果、図 1.6 のような宇宙線のエネルギースペクトルが得られた [5]。このスペクトルはおおむね $dN/dE \propto E^{-\gamma}$, $\gamma \approx 2.7$ というべき乗則に従っているが、 10^{15} eV 付近の Knee や 10^{19} eV 付近の Ankle などと呼ばれる複数の折れ曲がり構造が見られる。これらの原因としてそれぞれに複数の説が唱えられている。

宇宙線スペクトルの構造の原因の解明は、すなわち宇宙線が生成される天体や天体現象、地球までの伝播過程にある物理現象への理解を深めることに相当する。しかしながら現在では、宇宙線は荷電粒子であることから宇宙磁

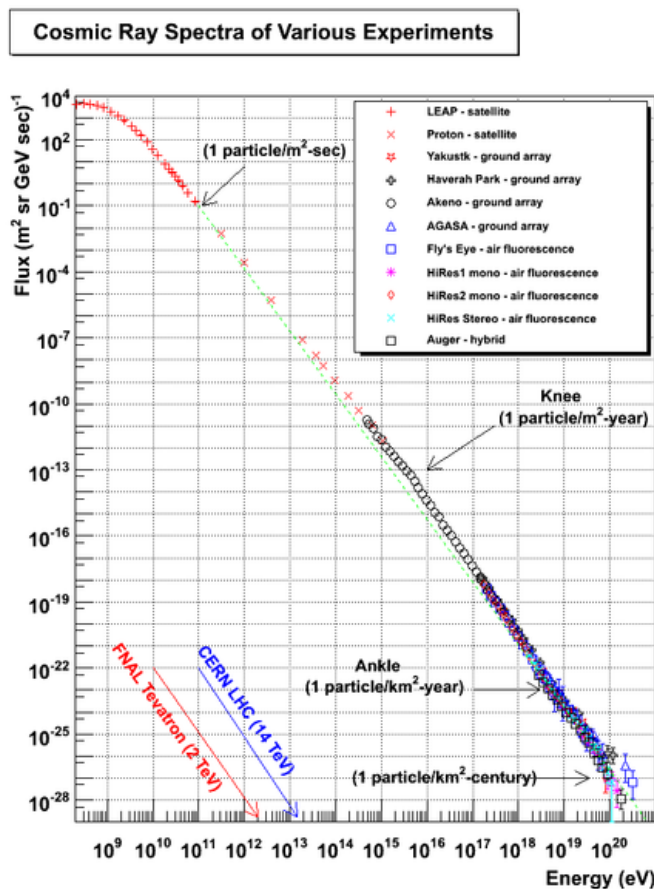


図 1.3 宇宙線のエネルギースペクトル [5]。

場によってその伝播軌道を大きく歪められてしまうこと、高エネルギー帯では宇宙マイクロ波背景放射との相互作用を起こすことなどが理由となり、起源天体の同定が難しいという状況にある [6, 7]。

1.2 宇宙ニュートリノ

1.2.1 宇宙ニュートリノの概観

宇宙線が生成された後に、起源天体そのものや星間物質を構成する物質、あるいはなんらかの光子と相互作用を起こし、ニュートリノを生成する過程が知られている。これは宇宙ニュートリノと呼ばれ、ほとんど真っ直ぐに宇宙空間を伝播していく。これはニュートリノが電磁相互作用や重力相互作用をほとんど行わず、弱い相互作用のみ行うことによる。したがって地球に到来する宇宙ニュートリノは、生成要因である宇宙線自体の生成位置、方向といった情報をほとんど保持している。このため宇宙ニュートリノの観測は、宇宙線の起源を解明する手段として期待が寄せられている。

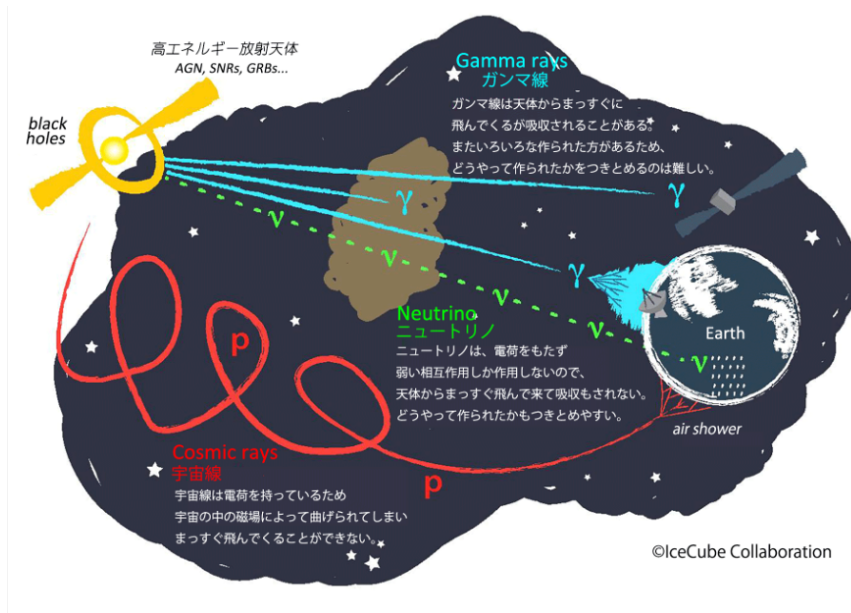


図 1.4 宇宙線、ニュートリノ、ガンマ線の観測における特徴を描いたイメージ図 [8]。

1.2.2 ニュートリノ検出の原理

ニュートリノは弱い相互作用しか行わないことから、直接的に検出することは非常に困難である。しかし弱い相互作用を行った場合、その過程には以下の二種類が存在する。

$$\nu_l + N \rightarrow l^\pm + X \tag{1.3}$$

$$\nu_l + N \rightarrow \nu_l + N \tag{1.4}$$

ここで l は任意の荷電レプトン、 ν_l は対応するニュートリノ、 N は核子、 X はハドロン粒子を表している。すなわち式 1.3 の反応では荷電レプトンが生じ、式 1.4 の反応では生じたハドロンがカスケードを引き起こすことでやはり荷電レプトンが生じる。これら荷電レプトンのエネルギーと軌道を知ることができれば、相互作用前の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である。

荷電レプトンが屈折率 n の媒質中にて光速 c/n より速い速度 v で伝播するとき、チェレンコフ光と呼ばれる光を放出する。この進行方向に対する放射角 θ_{cher} は $\cos \theta_{\text{cher}} = c/nv$ に従い、強度分布は光子数が波長 λ の 2 乗に反比例する。

したがって光検出器でこの光を検出することで、元となるニュートリノのエネルギーと到来方向を推定可能である。実際のニュートリノ観測環境においては、チェレンコフ光はおおむね波長域 400 nm 程度から 600 nm 程度に広がって分布する。

1.2.3 ニュートリノ観測施設

1.2.2 項の理論を背景に、様々なニュートリノ観測施設が建設、稼働された。

カミオカンデ

岐阜県神岡鉱山の地下実験室に建設されたカミオカンデ実験は、1970 年代後半に物理学界で注目された大統一理論が予言する陽子崩壊 ($p^+ \rightarrow e^+ + \pi^0$) を実験的に検証するため、小柴昌俊らによって立案された [9]。この実現

には、従来の限界を超えた受光面積を持つ世界最大（当時）の 20 インチ PMT（PMT）の開発が不可欠であり、浜松ホトニクスとの共同開発を経て 1983 年に実験が開始された [10]。

検出器は 3000 トンの超純水を蓄えた円筒形のタンク構造を有しており、その内壁には約 1000 本の 20 インチ PMT が配列されていた。超純水は光の伝播過程での減衰が少なく、その精製技術も確立されていることから、大体積の確保が比較的容易である [11]。カミオカンデは陽子崩壊に伴って発生すると予想される荷電粒子が生じさせるチェレンコフ光を捉え、そのエネルギーや飛跡を再構成を試みていた。そして、実験の途中からは、より低エネルギーの太陽ニュートリノを観測するため、タンク周囲に外部からの放射線バックグラウンドを排除する反同時計数（Veto）層が増設された。これは外部から侵入する宇宙ミューオンや大気ミューオンを検知してデータから排除することで、観測対象事象の純度を高めるために設置された。その他電子回路の改良などが施された、カミオカンデ-II と呼ばれる検出器の進化と運用によって、カミオカンデは当初の目的であった陽子崩壊に対し厳しい制限値を与えただけでなく、太陽方向からのニュートリノ検出に成功した [12]。

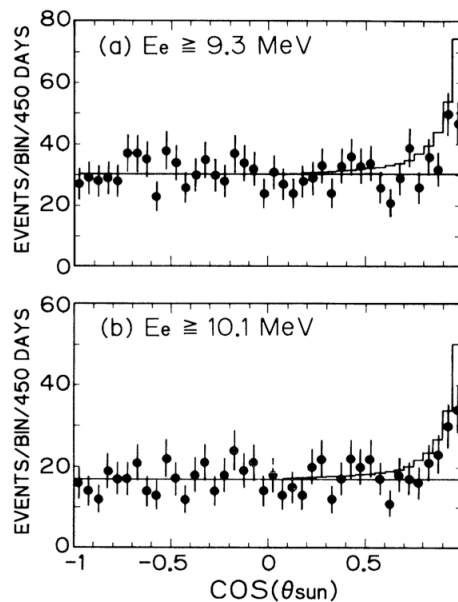


図 1.5 反跳電子のエネルギーごとの散乱角を示した図。太陽の方向 $\cos \theta_{\text{sun}} = 1$ に鋭いピークが見られる [12]。

このカミオカンデと他二つの実験によって、1987 年 2 月 23 日に発生し、SN1987A と呼ばれることになる超新星からのニュートリノ放射が観測された [13]。これは世界初の太陽系外天体からのニュートリノ検出であり、ニュートリノ天文学という新たな学問分野を創出する歴史的な成果を上げた。しかし同時に、宇宙ニュートリノの反応断面積の小ささから、実用的な検出頻度を得るためには媒体の体積のさらなる拡大が必要であることが示唆された [14]。したがってニュートリノ観測施設の媒体は、低コストで巨大な体積を用意でき、またチェレンコフ光を遠くまで伝播できる、透明度の高い物質でなければならない [11]。これらの条件を満たした施設をつくるアプローチは、実験ごとに少しずつ異なる。

スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデはカミオカンデの後継実験であり、同じく岐阜県神岡鉱山の地下深くに建設された検出器で主にニュートリノの精密観測および陽子崩壊の探索を行うことを目的としている。その検出器は約 5 万トンの超純水を蓄えた円筒形の二層構造を有している。検出器の内層部には内水槽（ID）が設けられ、壁面に約 1 万 1 千本の PMT を配置することで反応点を監視する役割を担う。ID はチェレンコフ光を捉えて荷電粒子のエネルギーや種類を識別する。ここで種類とは電子による事象かミューオンによる事象かといったことを指しているが、詳細は

2.1.2 項に後述する。ID の外周には外水槽 (OD) が設置されており、Veto として機能する。これらの検出器の連携によってスーパーカミオカンデは世界最大級の有効体積と高感度な事象識別能力を実現している。スーパーカミオカンデはニュートリノ振動 (ニュートリノのフレーバーが伝播中に変化する現象) が起こっている疑いないデータを提示し、ニュートリノがゼロでない質量をもつことを示したほか、超新星爆発の兆候を知るといった課題に挑んでいる [11, 15]。

ANTARES 実験

ANTARES 実験は、地中海の深海に検出器を建設し、高エネルギーの宇宙ニュートリノ観測を目的としている。その検出器は海底に係留された複数のストリングからなる三次元構造を為している。各ストリングには耐圧ガラス球に PMT を収めた光学モジュールが等間隔に配置され、海水中で荷電粒子が発するチェレンコフ光を検出する役割を担う。媒体として海水を用いることで、超純水のタンクとは比較にならないほど大きな検出体積を確保することが可能である。また伴って荷電粒子の長い軌跡を再構成可能であることから、ニュートリノの到来方向決定精度が上昇すること、タンクの製造や水の精製が不要であるため製造コストを抑えられることなどが利点となる。ANTARES は南半球の空に対する広い視野と優れた角度分解能を実現し、銀河中心方向のニュートリノ点源探索や暗黒物質の対消滅といった課題に挑んでいる [16]。

JUNO 実験

JUNO 実験は、中国広東省江門市の地下深くに建設された検出器を用いた実験である。原子炉から飛来する反電子ニュートリノの検出を通じた、ニュートリノの質量階層の決定を目的としている。その検出器は約 2 万トンの液体シンチレータを封入した球体構造を有しており、球体表面には大小 2 種類の PMT が高密度に配置されている。液体シンチレータが発するシンチレーション光の強度はチェレンコフ光よりはるかに大きく、また発光に必要なエネルギーの閾値が実質的に存在しないことから、JUNO は $3\%/\sqrt{E(\text{MeV})}$ という高いエネルギー決定精度を持つ。この能力を活かして JUNO は原子炉以外が起源のニュートリノ観測も行っており、太陽、超新星、大気ニュートリノまで、様々なエネルギー領域のニュートリノの精密観測といった課題に挑んでいる。

1.2.4 ニュートリノのエネルギースペクトル

以上のような複数の手法でニュートリノの観測が続けられた結果、図 1.6 のようなニュートリノのエネルギースペクトルが得られた [17]。

図中に記載されている通り、このスペクトルは宇宙ニュートリノに限らず様々な由来のニュートリノについて描かれている。宇宙ニュートリノはほかの由来のものに対して存在比が非常に小さく、巨大な検出体積が必要であることが推察できる。

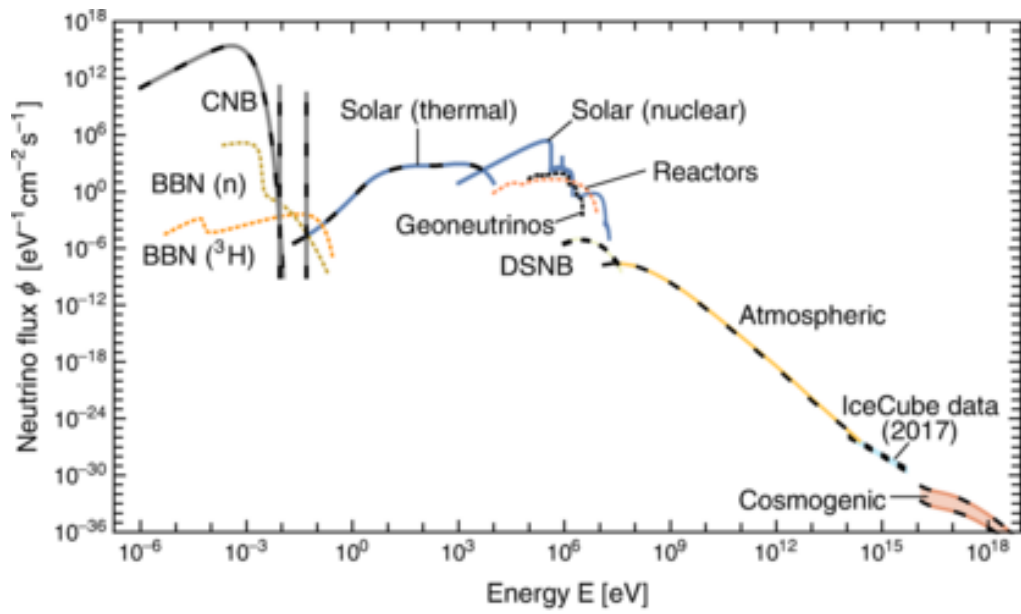


図 1.6 ニュートリノのエネルギースペクトル ([17] より一部改変)。実線はニュートリノ、点線は反ニュートリノ、実線と波線の重なった線はその両方を示している。

第 2 章

IceCube

2.1 IceCube

IceCube は、高エネルギー宇宙ニュートリノの起源の同定を目的とした、南極大陸の中心付近に位置する世界最大のニュートリノ観測施設である。

2.1.1 AMANDA 実験

IceCube の前身として、AMANDA 実験が存在した。これは 1980 年代にハワイ沖で進められていた深海ニュートリノ観測計画 DUMAND が技術的・資金的な困難に直面する中、南極に存在する天然の氷をチェレンコフ光伝播の媒体として利用する新たな着想から始まった [18]。すなわち氷に穴を開けて光検出モジュールを埋設しようという計画である。初期の試作段階 AMANDA-A では、氷に含まれる気泡による光の散乱が障害となるかと考えられたが、より深層の氷では高い透明度が実現されることが判明した。この発見がブレイクスルーとなり、熱水ドリルを用いて深さ 1500 m 以深に光検出器を埋設する手法が確立された [19]。

検出器は南極の厚い氷床を掘削した細長い穴の中に、耐圧ガラス球に封入された PMT を主要構成要素とする光検出モジュールを数珠つなぎに配置したストリング構造を有している。時期が進んだ AMANDA-II の段階では、計 19 本のストリングが設置され、各モジュールが検出したチェレンコフ光の到来時間差から粒子の到来方向を再構成する [20]。AMANDA の運用によって、氷床を巨大な素粒子検出器として利用可能であることを実証し、高エネルギーニュートリノ事象の観測に成功した [19]。

2.1.2 IceCube

AMANDA の後継である IceCube は、南極の氷をチェレンコフ光伝達の媒体として用いるという基本設計をそのままに、到来頻度の少ない TeV から数 PeV 程度の高エネルギー宇宙ニュートリノの観測が期待できる、立方キロメートル規模の検出機として建設された。南極点の近くに位置するアムンゼン・スコット基地からの後方支援を受けることを想定して、付近の氷を掘削し検出器を埋設するなどの作業が行われた。建設は 2010 年 12 月 18 日に完了し、2011 年の試験稼働を経て正式に稼働が開始された [14]。

IceCube の水中構造

IceCube は、図 2.1(a) のように、AMANDA と同様に光検出モジュールを数珠繋ぎで配置したストリング構造を有している。ストリングは 86 本あり、各ストリングに 60 個、計約 5160 個のモジュールが設置されている。モジュールは深さ 1450 m から 2450 m にかけて鉛直方向に約 17 m 間隔で連なっており、検出面は下を向いている。これは下から上へ向かう荷電粒子のみに目標を絞ることで、大気ミュオンなどのバックグラウンドの影響を減ら

すためである。水平方向には、図 2.1(b) のようにストリングのほとんどは約 125 m 間隔で規則的に配置されており、8 本だけが Deepcore と呼ばれ約 72 m 間隔、鉛直方向にも 7 m とより密に配置されている。

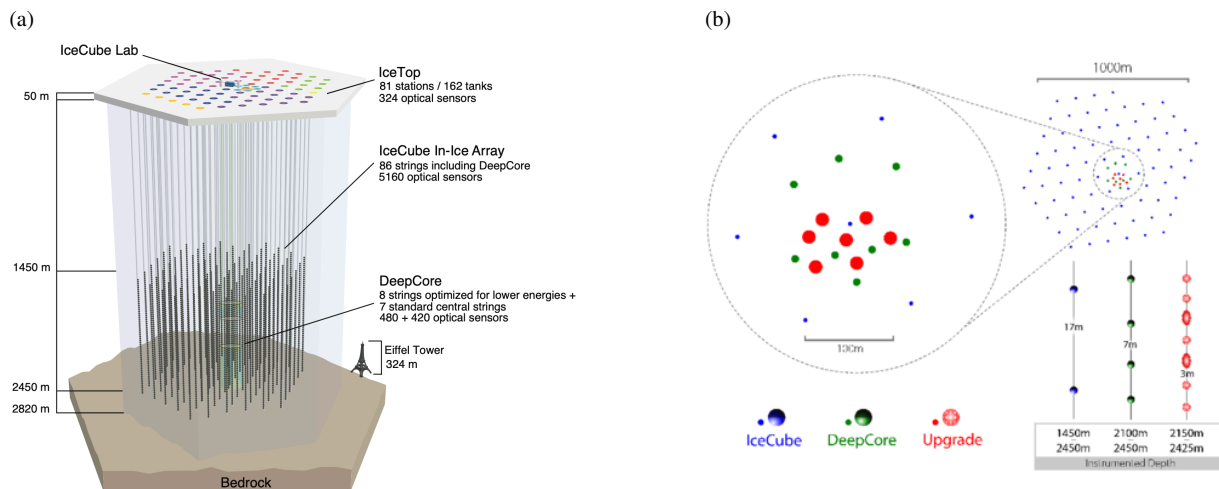


図 2.1 (a)IceCube の全体を描いたイメージ図 [14]。 (b)IceCube の検出機配置図 ([21] より一部改変)。

IceCube の検出体積は約 1 km^3 にのぼり、10 GeV から 100 GeV 程度のニュートリノに対して感度を持つ。

DOM

IceCube で埋設された光検出モジュールは Digital Optical Module (DOM) と呼ばれ、AMANDA と同様に耐圧ガラス球に PMT を主要構成要素とする光検出器を封入して製造されている。図 2.2(b) のように主要構成要素となるのは浜松ホトニクス製の 10 インチ PMT (R7081-02) で、他にメインボード、発光ダイオード (LED) フラッシュャーボード、高電圧発生器が封入されている。PMT はチェレンコフ光の波長領域に近い 300 nm から 650 nm に



図 2.2 (a)DOM の外観 [22]。 (b)DOM の構成 [14]。

感度を持ち、ピーク量子効率 は 390 nm 付近での約 25% である。DOM は PMT のゲインがおおよそ 10^7 程度になるように印加電圧を調整している。その直線性の限界である 1 mV から 2 V 程度まで、12 ns から 1500 ns 程度までの出力に ns スケールの時間分解能で対応しており、これは約 500 m 以内を通過した 10 GeV から 10 PeV 程度までのニュートリノに相当する。

メインボードはデータ収集、制御、較正、通信、電圧変換を一手に担う回路基盤である。これは PMT が出力するアナログ信号をデジタル信号へ変換し、ケーブルを通して氷上の IceCube 中央に位置する制御室 (ICL) へ送信する。

LED フラッシャーボードは PMT 信号の遅延などのほか、氷中で発光することで隣接する DOM の較正に用いさせる等の機能を持つ。高電圧電源の消費電力は、動作時で 300 mW 未満である。

ガラス球は外径 13 インチ、厚さ 0.5 インチで、水深 2.6 km に相当する 25 MPa の圧力に恒常的に耐えるように設計されている。ガラスの光透過率は 400 nm で 93% と測定された。PMT とガラスは厚さ約 1 cm 程度のシリコンゲル層によって接着されており、この層の光透過率は 400 nm で 97% と測定された [14]。

IceTop

IceCube のおおむね全てのストリングの直上に位置する氷上地点には、それぞれ氷タンクチェレンコフ光検出器が配置されている。これらを 1 km^2 の検出面積を持つアレイを IceTop と呼び、PeV から EeV 程度の宇宙線に感度を持つ。氷中の検出器とは独立した宇宙線やミューオン観測に用いられるほか、氷中の検出器に対する Veto として用いられることもある。

IceCube が観測するニュートリノ事象

IceCube が観測するニュートリノ事象は、図 2.3 のように以下の 3 パターンに分類される。

1. **トラック型**：ミューニュートリノが生成したミューオンの伝播によって形成される事象。ミューオンは透過力が高く、真っ直ぐな軌跡となるために角度決定精度が 1° 未満程度と非常に良い。しかし始点と終点の両方が検出体積内に収まっていない場合エネルギー決定精度は悪くなり、全体として $\log_{10} E$ で 0.3 程度となる [23]。
2. **シャワー型**：電子ニュートリノが生成した電子が引き起こす電磁シャワー、あるいはいずれかの成因のハドロンシャワーによって形成される事象。トラック型に比べ短い伝播距離の間に全てのエネルギーを失いやすいため、角度決定精度は 10° 程度と悪いが、エネルギー決定精度は 10 TeV 以上で 15% 程度と非常に良い [23]。
3. **ダブルバン型**：タウニュートリノがハドロンシャワーを生成した後、タウオンが伝播していった先で崩壊して再びシャワーを形成することで観測される事象。PeV 程度の高エネルギータウオンであれば生成から数十メートル程度で崩壊するが、低エネルギーではシャワー型との区別がつかない可能性がある。

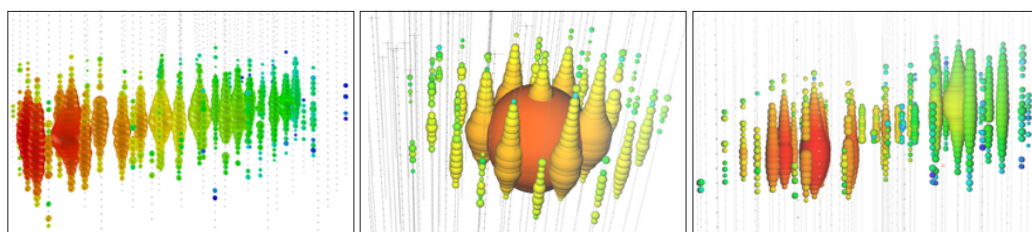


図 2.3 IceCube が観測するニュートリノ事象 [24]。左がトラック型、中央がシャワー型、右がダブルバン型。一つの光点が一つの DOM に対応し、光点の大きさが光量、色が赤から青にかけて検出時刻の早さを示している。

2.2 IceCube の次世代計画

2.2.1 IceCube Upgrade

IceCube の次世代計画として、IceCube Upgrade が進行中である。これは DOM と異なる新たな検出器を複数台、より密に設置することで、検出可能なエネルギー閾値を GeV 程度まで下げることにある。ニュートリノ事象は低エネルギーであるほど観測可能な軌跡が短くなることから、検出器同士の間隔が狭まるほど閾値が下がる。これによって大気ニュートリノの観測数も増加し、ニュートリノ振動のパラメータ決定精度の向上が期待されるほか、IceCube の観測精度向上にも繋がると考えられている。

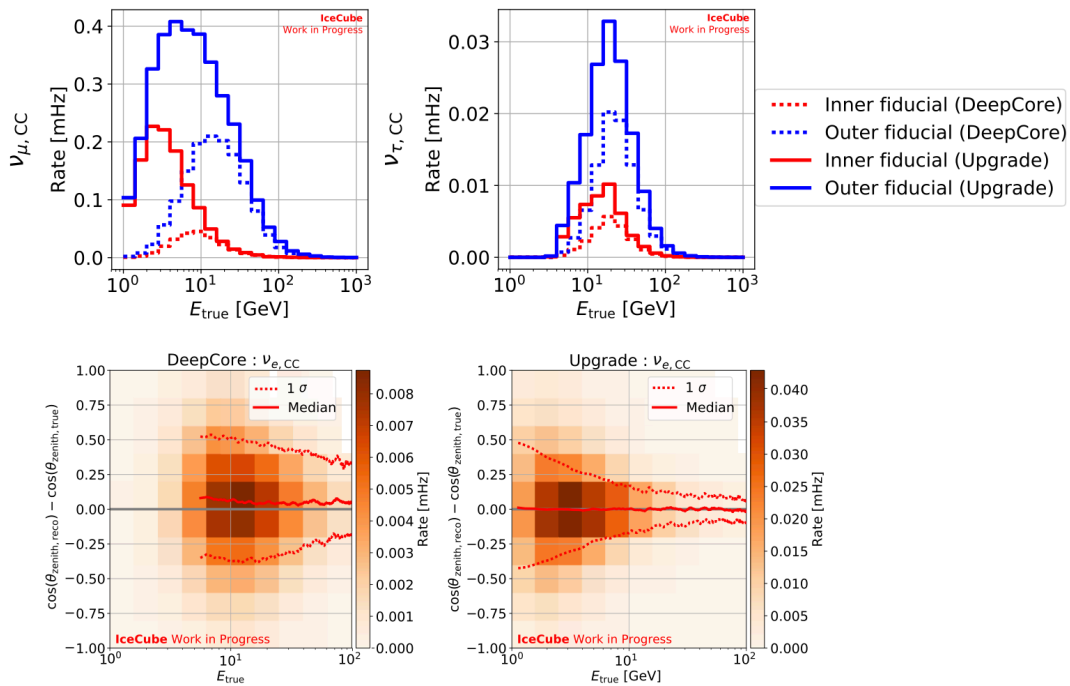


図 2.4 DeepCore と IceCube Upgrade の検出能力の比較。上図は半径 50 m×高さ 275 m の円筒 inner fiducial 内と半径 145 m の円筒 outer fiducial 内に頂点を有する、大気ミュー・タウニュートリノ事象の検出頻度。下図は電子ニュートリノによるカスケードから再構成された天頂角の分解能。ニュートリノ振動解析に関わるエネルギー帯において、IceCube Upgrade は Deepcore の 3 倍以上の改善が見込まれる [25]。

IceCube Upgrade の水中構造

図 2.11 の右端に、IceCube Upgrade で新たに掘削される穴の配置が図示されている。これらの穴に対し、新型検出器を約 100 個ずつ連ねた、7 本のストリングが導入される。ストリング同士の間隔は 20 m から 40 m 程度、検出機同士の鉛直方向の距離は 7 m と、いずれも IceCube より密になっている。

mDOM

IceCube Upgrade で埋設される検出機の一つが mDOM であり、693 個の新検出器のうち 402 個を満たす。mDOM の基本構成は DOM に近く、PMT、メインボード、LED フラッシャーボード、高電圧発生器がガラス球に封入されている。mDOM の最大の特徴は、DOM とは異なり 3 インチ PMT24 個で構成されることにある。これによって全方向にほぼ均一な感度を有し、有効検出面積も DOM の約 2.2 倍拡大されている。単一のモジュールに

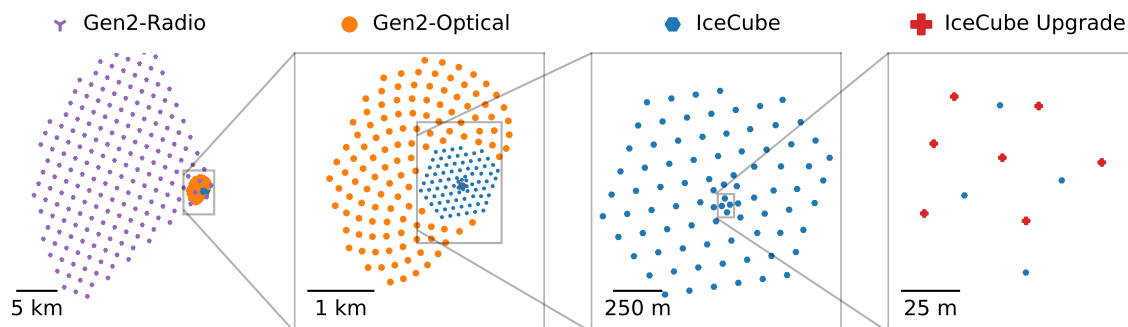


図 2.5 IceCube とその次世代計画の検出器配置図 [24]。

において各 PMT の検出信号の差から事象の方向情報を取得できること、高エネルギー事象に対するダイナミックレンジも改善されていることなどが利点と言える [26]。

(a)



(b)

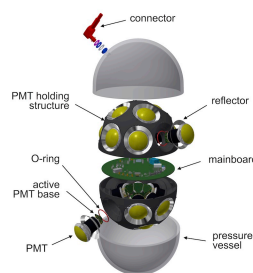


図 2.6 (a)mDOM の外観 ([26] より一部改変)。(b)mDOM の構成 [26]。

mDOM のガラス球は直径が 14 インチで、DOM の 13 インチより僅かに大きい。これは掘削する穴の直径が約 7% 増加し、その分コストと時間が増加することを示している。IceCube では約 60 cm の直径の穴が一つあたり約 32 時間かけて掘削され、これが 5 cm 縮むと時間と燃料消費量が 15% 削減可能だとシミュレートされている [14]。

D-Egg

IceCube Upgrade で埋設される検出機のもう一種が D-Egg であり、693 個の新検出器のうち 291 個を満たす。D-Egg の基本構成は DOM に近く、PMT、メインボード、LED フラッシャーボード、高電圧発生器がガラス容器に封入されている。D-Egg は、DOM とは異なり 8 インチ PMT 2 個で構成される。これによって得られる方向情報は mDOM と比べると限定的になるが、PMT の数が少ないため mDOM よりも消費電力を抑えられる。PMT は Box & Line 型を採用してダイナミックレンジの拡大と時間応答性の向上を実現しており、幅広いエネルギー帯に対応している [27]。

D-Egg のガラス容器は DOM と異なって球形ではなく、直径 12 インチ弱、高さ 534 cm の縦に長い楕円体形状である。この直径の小ささによって、埋設コストと時間を DOM よりも削減できる [14]。

IceCube Upgrade からの発展

IceCube Upgrade のさらに次世代計画においては、mDOM のように高性能さを優先した方式と、D-Egg 方式のようにコストを抑えることを優先した方式との、いずれを採用するかを対費用効果の面から比較して決定する必要

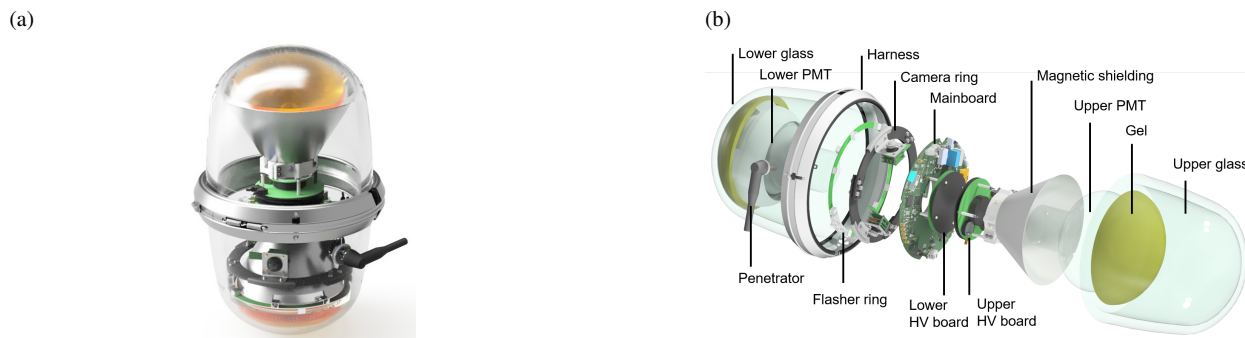


図 2.7 (a)D-Egg の外観 ([27] より一部改変)。 (b)D-Egg の構成 [27]。

がある [14]。

2.2.2 Icecube-Gen2

IceCube のさらなる次世代計画が IceCube-Gen2 である。これは IceCube Upgrade と正反対のアプローチであり、新検出機をより広範囲に埋設することで、TeV から EeV 程度の高エネルギーニュートリノ事象を、より精緻に観測することを目的としている。ニュートリノ事象は高エネルギーであるほど検出頻度が稀になることから、検出体積を拡大することで観測数を増加させる。また、高エネルギーの事象ほど荷電粒子の軌跡が長大になることから、大体積化によりその始点と終点の両方が検出体積内に収まりやすくすることで、エネルギー決定精度の向上も期待できる。

図 2.8 はシミュレーションにて IceCube-Gen2 の感度で突発的なニュートリノ点源を探索し得られる結果を示している。全体として IceCube と比較し IceCube-Gen2 の感度が上昇しており、点源探索をより強く期待できることが見て取れる。ただしここで PeV 以上の高エネルギーニュートリノは、低赤緯における地球を通過する距離の長大化に伴い吸収されやすくなることから、高赤緯での感度上昇は限定的である。

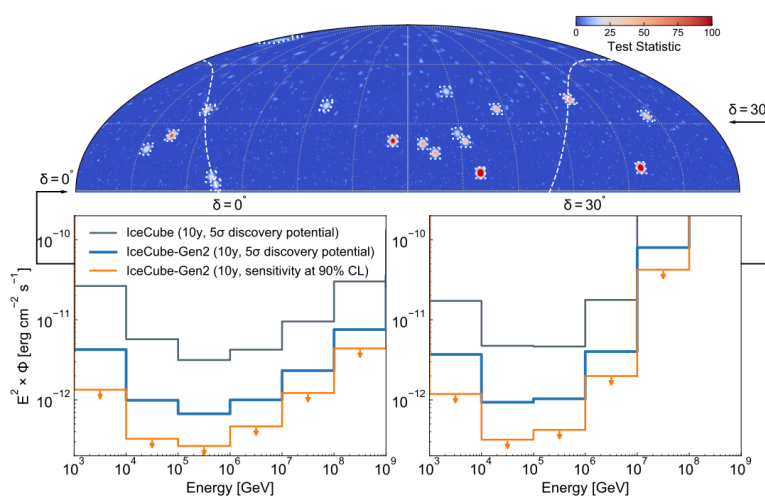


図 2.8 IceCube-Gen2 に期待されるニュートリノ点源の探索能力のシミュレーション結果。上図は IceCube-Gen2 を 10 年間運用した場合のトラック型イベントから得られた統計検定量。下図は赤緯 $\sigma = 0^\circ, 30^\circ$ における微分感度 [24]。

IceCube-Gen2 の水中構造

図 2.11 の左から 2 番目に、IceCube-Gen2 で新たに掘削される穴の配置が図示されている。これらの穴に対し、新型検出機を約 80 個ずつ連ねた、120 本のストリングが導入される。ストリング同士の間隔は 240 m 程度となり、IceCube の約 2 倍である。

LOM

IceCube-Gen2 へ採用される検出器は Gen2DOM と呼称されている。現在では、2.2.1 項で挙げた論理の帰結として、両方式のハイブリッドとなる、Long Optical Module (LOM) と呼ばれる検出器案が検討されている。

LOM の基本構成は DOM に近く、PMT、電子基盤、LED フラッシャーボード、ゲルパッドがガラス容器に封入されている。PMT に関して、LOM に導入されるのは 4 インチ PMT であるが、その個数が 16 個の案が LOM16、18 個の案が LOM18 として区別される。いずれの場合も、mDOM のように全方向への感度を持たせることを目的として複数台配置されている。

ガラス容器は LOM18 であれば直径 318 mm、高さ 540 mm で、内部は 0.5 bar まで減圧して密封され、70 MPa の圧力に耐える。LOM の電子基盤は Waveform microBase (wuBase) と呼称され、電圧の印加と信号の読み出し

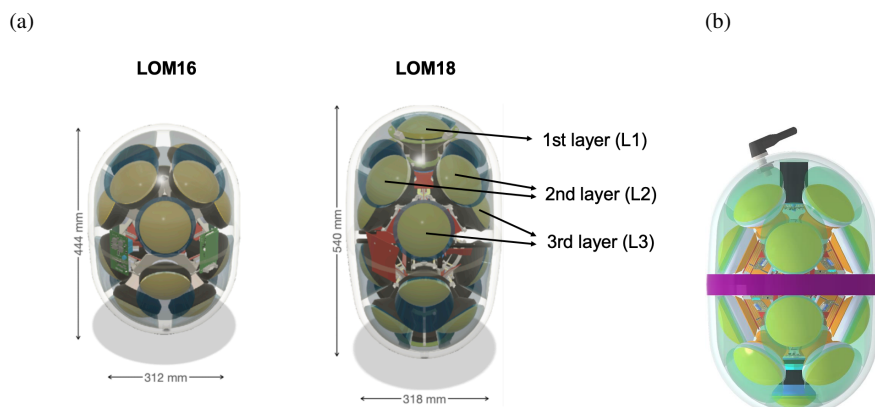


図 2.9 (a)LOM の外観 [28]。LOM16 の両極部分に PMT を追加した構造が LOM18 である。(b) 現在有力視されている LOM の構造のイメージ図。

を担う。

搭載されている ADC は、消費電力を抑えるためサンプリングレートが 60 MHz と小さいものが採用されている。PMT の 1 光子信号の半値幅が約 50 ns 程度であること鑑みると、これは信号を完全に捉えるために十分なレートとは言えないため、積分回路により波形を長くすることで時間分解能を向上させている。大きな信号による PMT 内での電子の飽和を防ぐため、アノードだけでなく 10 段あるダイノードのうちの 8 段目からも信号を読み出す。この 2 チャンネルからの読み出しによって電子飽和に影響されないダイナミックレンジの拡大を実現する。回路が同一だが形状が異なる Polar 型と Equatorial 型の二種類が、ガラス容器内で干渉しあわないように配置される。

ゲルパッドは PMT の光電面とガラスの間に充填され、構造を保持する役割を担う。シリコン製のゲルは反射率 1.4 とガラスの反射率 1.5 に近く、空気を介した入射よりも入射光子の反射や散乱を抑えることができる。また図 2.10 のように、ゲルパッド側面での反射を利用し、本来光電面へ入射しない光子を検出できるようになる効果が期待できる [29]。

現在の LOM 開発においては、LOM18 を製造する技術的難易度の高さから、図 2.9(b) のように極部分の PMT をそれぞれ上が 2 インチ、下が 3.5 インチのものへと変更した構造の採用が有力視されている。



図 2.10 ゲルパッドによる反射の効果で検出効率が增加するイメージ図 [29]。

2.2.3 IceCube-Gen2 の課題

2.2.2 項で触れたように、IceCube-Gen2 では検出器を埋設する水平方向の間隔が IceCube の約 2 倍に広がる。これによって軌跡が短い低エネルギーニュートリノの観測が難しくなり、その閾値は IceCube の 5 倍となる 10 TeV 前後まで上昇する。また、IceCube にとっての背景事象である大気ミュオンは、本来であれば埋設されている検出器群の最も外側に位置する検出器を Veto として用いることで除去される。しかし埋設間隔の拡大により、ちょうどそれらに検出されないよう検出体積内に入射してきた大気ミュオンが混入してしまう可能性が上昇する。

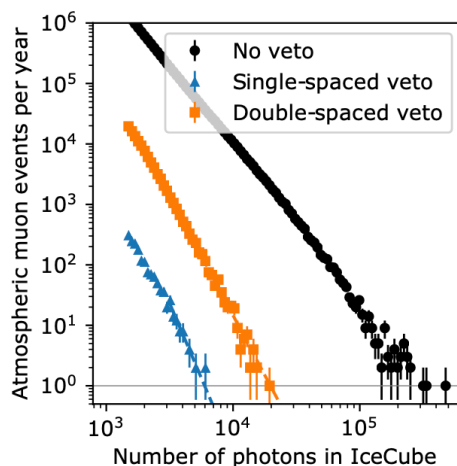


図 2.11 IceCube-Gen2 の Veto 能力の低下が表れている図。観測された 1 事象あたりの光子数に対し、大気ミュオンとして再構成された事象数を示している。黒が Veto なし、青が IceCube、オレンジが IceCube-Gen2[24]。

これらの課題を解決するための最も単純な手段は、検出器をより密に配置することである。しかし IceCube-Gen2 は検出体積の拡大を第一目的としており、費用的な面からその実行は難しい。そこで、1つの検出器あたりの集光力を向上させる手段が考慮されている。Gen2DOM そのものの集光率を現在以上に向上させることは、耐圧ガラス容器という限られた体積内に要素を詰め込んで製造されるモジュールであることから、技術的、経済的に限界が見えつつある。そこで、それらの観点から優位性を持つ新たなモジュールを最外部の Gen2DOM 付近へ導入し、その有効面積を拡大しようという提案がなされた。

第3章

集光器開発

2章での経緯から、IceCube-Gen2の諸課題を解決するため、経済面・技術面において優れる新たな光検出モジュールを導入することが提案された。先行研究において、Gen2DOMの集光率を向上させることを目的とした、シンチレーションファイバー束を用いた集光器 Fiber Optic Module (FOM) が発案された。

3.1 シンチレーションファイバー

IceCube-Gen2に対してLOMのようにPMTや電源を内包した検出モジュールを追加設置することは、経済面・技術面から難しい。そこで、安価かつ技術的に取り扱いが容易な素材として、波長変換機能を持つプラスチックシンチレーションファイバーが採択された。この種のファイバーは、中心部のコアと周囲のクラッドに分かれた構造になっており、そのコア部分には波長変換剤が混ぜ込まれている。したがってファイバー外部から入射した光はコア部分で吸収され、シンチレーション光として等方的に再発光されて、そのうち全反射条件を満たすものがファイバー端まで伝搬していく。

先行研究において、このようなファイバーを主要構成要素とするモジュールを、LOM近くの水中に埋設することが着想された。ファイバーの端面をLOMの検出面へと向けることで、本来検出器へ入射しなかったチェレンコフ光を再発光されたシンチレーション光として検出することができ、検出面積の実質的な増強が期待される。

シンチレーションファイバーの吸光度や放射光の強度は、ファイバーの構造や波長変換剤の種類によって調整できる。したがって、吸収光でチェレンコフ光の波長領域に感度を持ちつつ、放射光がLOMに内蔵されている光電子増倍管の量子効率が大きくなる波長領域で強く放射されるようなファイバーとして、Kuraray製の波長変換ファイバー B-3 が採用された。

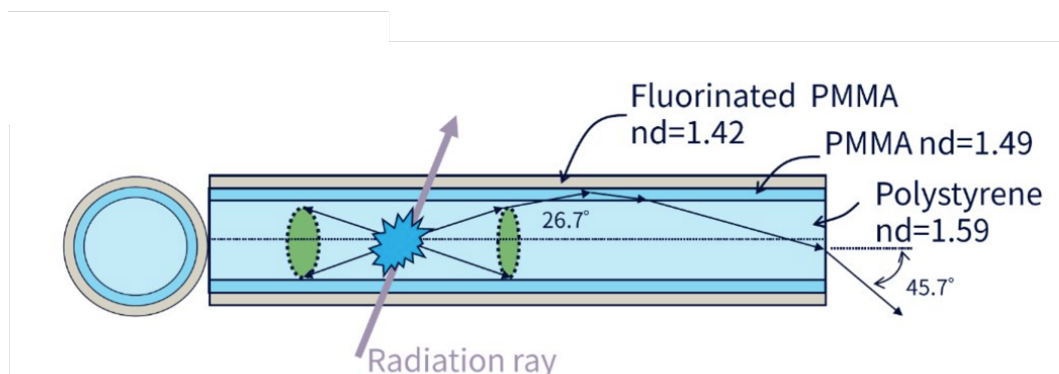


図 3.1 ファイバー B-3 のイメージ図。コア部分はポリスチレン、クラッド部分はポリメタクリル酸メチルとフッ素化ポリマーの二層からなる。

B-3 ファイバーの波長変換機能は、おおむね紫外光を青色光に変換させるものとして設計されている。具体的には、吸収光のピークは 351 nm、再発光される放射光のピークは 450 nm となっている。

Kuraray 製の波長変換ファイバーにはクラッドが 1 層のシングルクラッド方式と 2 層のマルチクラッド方式があり、B-3 ファイバーはマルチクラッド方式に該当する。Kuraray によると、これはシングルクラッド方式よりもトラッピング効率が良く、光収量が高くなる。またファイバーはその結晶構造の配列によって Non-S タイプと S タイプにも分類され、B-3 ファイバーが該当する S タイプは分子配列が伸びていく方向に揃っているため、無秩序な Non-S タイプと比べてクラッキングに強く、減衰長が 10% ほど短い [30]。

3.2 Fiber Optic Module (FOM)

3.2.1 FOM の概観

FOM は図 3.2(a) のように複数本のファイバーを円筒形に束ねた構造をしており、図 3.2(b) のように LOM に接続されているケーブルの周囲に巻きつけて配置する。この端面を LOM に接触させることで、本来 LOM へ入射しなかったチェレンコフ光をシンチレーション光に変換して検出面まで導くという過程を踏んで FOM は集光器として働くことが期待される。本案の特徴として、独自の光検出デバイスの導入が不要であることが挙げられる。この特徴は、稼働に電源や制御基盤などの技術的負担の大きい構造を必要としないこと、ダークレートの増加に寄与しないことなどの利点に繋がる。また、設計段階において主要構成要素であるファイバーの長さ・本数・密度を比較的容易に調節可能であることから、大面積化を無理なく行えると期待されている。

(a)



(b)

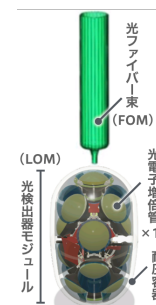


図 3.2 (a) 試作された FOM の外観。(b)LOM に接続された FOM のイメージ図。

3.2.2 試作器

千葉大学ハドロン宇宙国際研究センター (ICEHAP) と株式会社エム・ラインによって、図 3.2(a) にある FOM の初代試作器が製造された。100 本の Kuraray 製 B-3 ファイバーをプラスチック製の骨組みに糊で貼り付け、それを円筒形に巻いて固定するという過程を踏んで成形された。長さは約 100cm、直径は約 20cm で、片側のファイバー端を 1 箇所に集め束ねて固定している。

本試作器に生じた課題として、製造が終了した時点でファイバーが数十本破損してしまっていたことが挙げられる。この原因は、ファイバーごとに糊付けによって固定されている点から端の集合部までの距離がわずかつ異なることにあると見られる。端の固定点に強く引っ張り力やねじれ力がかかった際、すべてのファイバーで均一に支えるのではなく距離が短いファイバーにのみ特に強く張力がかかり、そのようなファイバーから順に折れていって

しまったと考えられる。

このような課題が生じることを設計段階から防ぐため、また限られた体積内で集光率を最大化するため、B-3 ファイバーの特性を知ることが重要である。4章においてこのための実験を行い、それらの結果を踏まえて新たに設計開発した試作機については5.2節に記している。

3.2.3 FOM のシミュレーション

シミュレーションツールキット GEANT4 を用いて、B-3 ファイバーと FOM 本体を再現し、その光学特性をシミュレーションを通して評価する試みが行われている。ここではその一端として、再現された FOM が寄与する検出器の有効面積の向上率を提示する。

400 本の B-3 ファイバーを直径 20 cm の円筒状に配置し、光子数 10000、波長 340 nm、半径 55 cm の円形ビームをその中心に向けて入射させた。これをファイバー群とビームのなす角度が 0° から 180° まで 10° ごとに各 50 回ずつ行い、再発光されてファイバー端まで到達した光子のうち脱出角度が 45° 以下のものが LOM18 の PMT の光電面まで到達するものとした。到達した光子は量子効率に従って検出されることから、これらの要素より光子の検出確率が算出でき、それに円形ビームの面積を乗じたものを有効面積とする [28]。

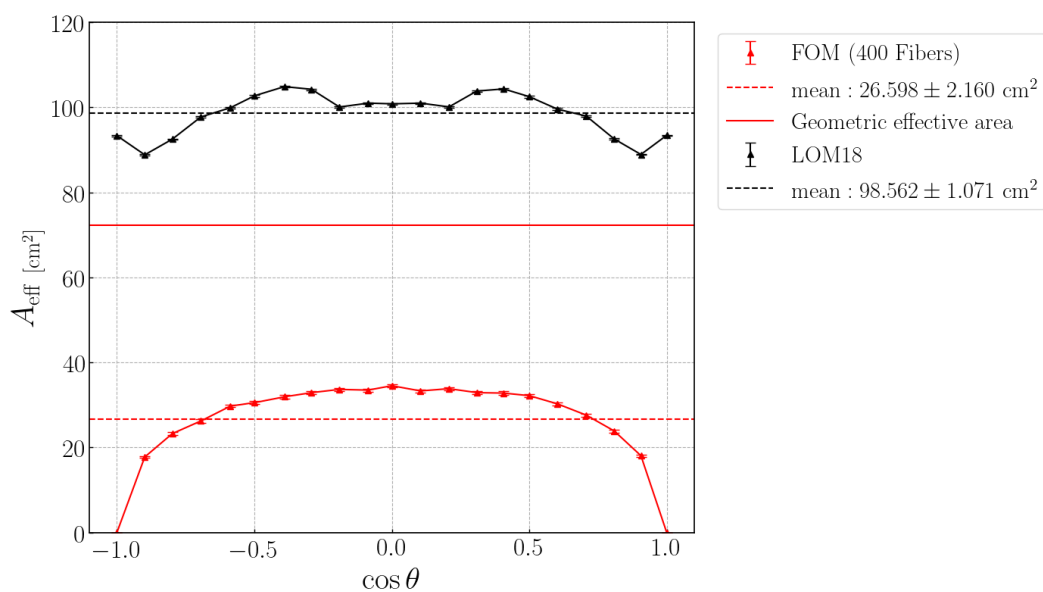


図 3.3 GEANT4 でのシミュレーションを通して計算された FOM の有効面積 A_{eff} 。赤の直線。黒線は LOM18 の有効面積。点線はそれぞれの平均値である [28]。

図 3.3 より、FOM の導入によって LOM18 に対し 25% ほどの有効面積の増強が期待できる。

第 4 章

シンチレーションファイバーの特性評価実験

FOM の制作にあたり、構造決定のためシンチレーションファイバーが持つ特性を理解する必要がある。このため、種々の実験を行った。また、得られた実験結果がどのように FOM の構造設計に関与していくかについては 5 章に記した。

4.1 減衰長

ファイバー内を伝播していく光は、その伝播距離に応じて減衰していく。この度合いを示す物理量を減衰長と呼び、光の強度が $1/e$ 倍になる距離として定義される。Kuraray のデータシートによると、B-3 ファイバーの減衰長は $L_{att} > 4.0$ m とされている [30]。これは Kuraray によって、以下の実験と概ね似たような手順の実験を行うことで算出された値である。FOM 本体の設計にあたって、シンチレーション光が検出機に到達するまでにその検出閾値を下回るほど減衰してしまうことのないよう、どの程度までの光路長が許容されるかを考慮する必要がある。よって本研究では減衰長の実測を行った。

暗室内に図 4.1(a) のようなセットアップを構築した。光源としてチェレンコフ光の波長に近い 405 nm にピークを持つ THORLABS 製のパルスレーザー (NPL41C) を使用し、シンチレーションファイバーの側面から入射させた。そして光源をファイバーと平行に移動させ、PMT とオシロスコープを用いて、PMT の光電面からの入射位置までの距離 L ごとに、ファイバーの端面からの放射光の波型を記録した。この波形の面積は端面からの放射光量に比例する量であることから、この変化をみることで伝播距離による減衰の影響を知ることができる。

事前に行った準備実験において、レーザーが点光源として近似できない程度の広がりを持つことから、ファイバーとレーザーとの垂直方向の位置関係のずれが入射光子数に大きな影響を与えているという結果が得られた。これを除くため、ファイバー 50 本を一行に隙間なく並べてカプトンテープで固定し (以後ファイバー板と呼称)、そ

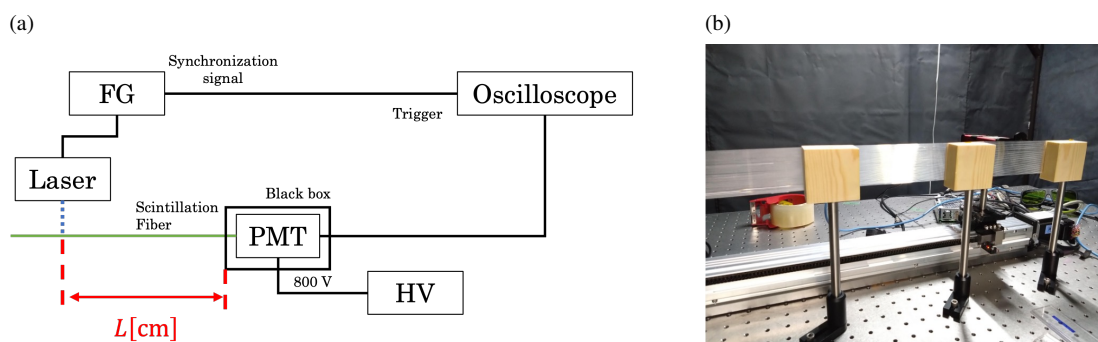


図 4.1 (a) 減衰長測定のセットアップ。(b) ファイバー板が支持される様子。

の側面から光を入射させた。ファイバー板は図 4.1(b) のように木製の支持具で支えられており、片端は集めて束ねられている。その端面を#2000 までのサンドペーパーで磨くことで内部からの放射を最大化している。

ファイバー板端を浜松ホトニクス製の 2 インチ PMT (Photomultiplier R1828-01) の光電面に接触させ、その波型を Teledyne LeCroy 製のオシロスコープ (WaveSurfer 4104HD) で測定した。レーザーのパルスレートは 1000 Hz、パルス幅は $5 \mu\text{s}$ であり、これは Tektronix 製のファンクションジェネレータ (AFG3102) によって制御されている。またこの同期信号をオシロスコープに送信しトリガー源としている。光源の移動は $1/2000 \text{ cm}$ 程度までの精度を持つ IKO 日本トムソン製の精密位置決めテーブル (TU60F79A/ATXXX5EK37) によって行われている。各器具は約 1 秒間隔で 100 個の波型を取得したのち 1 cm 移動することを $L = 30 \text{ cm}$ から $L = 90 \text{ cm}$ まで繰り返すよう、統合的にプログラム制御している。

系統的な不確かさが生じる要因を減らすため、迷光が入射しないように PMT は暗幕に包んで暗箱の中に入れ、ファイバー板は暗箱側面に開けた穴を通して光電面に接触させた。この際ファイバー端面と光電面との位置関係がずれることで出力が変化することを防ぐため、ファイバー板端を治具を用いて固定した。また光源についても同様に治具でレールに固定し、ファイバー板との距離・角度を保たせている。

オシロスコープにより GHz 程度のサンプリング周波数で取得された波型に対し、約 0.4 ns 間隔になるよう平均化処理を行なうことで、図 4.2(a) のような波型が得られた。ここで、処理の仕様のため間隔は 10^{-6} ns 程度のばらつきが生じる。これらの波型すべてに対して、その面積をそれぞれ算出した。はじめに、各波型を構成するデータ点のうち、最初 10 点と最後 10 点の計 20 点の電圧の算術平均値を全点から差し引くことで、ペDESTALの影響を除いた。次に、ある点について、その電圧と次の点までの時間差を乗じた量を算出した。この量を波形を構成する全点について総和をとり、その波形の面積とした。よってある L については 100 個の波型面積が算出され、それらの算術平均値を、その L での波型面積 y とした。ここで y は PMT が出力した電荷に比例する量であるため、本論内では電荷 (Charge) とも呼称する。また各 L での y の標準誤差もそれぞれ算出した。

各 L での y が図 4.3 である。 y のうち、ファイバー板を支える治具の影になってレーザーが入射していないとセットアップの外観から判断できうる位置のものにおいては、他のものに比べ顕著に小さくなった。しかしながら外観から正確にそのような位置を識別することは困難であったため、得られた面積から天下り的にすべての位置を以下の三種類に分類した。

1. obstructed : 波形面積 y が $5 \times 10^{-9} \text{ s} \cdot \text{V}$ 以下の点

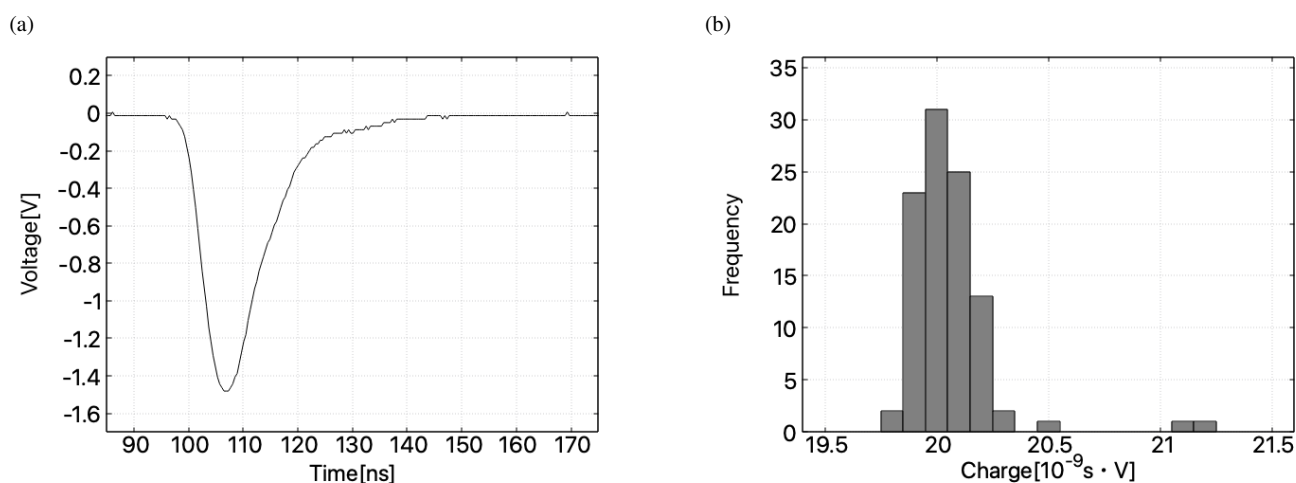


図 4.2 (a) 減衰長測定実験により得られた波型の例。(b) $L = 30$ における 100 個の波形面積のばらつき。この場合、得られた y は $20.1 \times 10^{-9} \text{ s} \cdot \text{V}$ 。

2. near : obstructed に分類された点に隣接した点
3. direct : obstructed、near のいずれにも分類されなかった点

これらのうち direct に分類された点のみを用いて減衰長 L_{att} を算出した。定義に沿って $y = a \cdot \exp(-L/L_{att})$ でフィッティングし、減衰長 $L_{att} = 367 \pm 100$ cm が得られた。これはカタログ値と誤差の範囲で一致しているものの、事前に予想していたより測定誤差が大きい結果である。統計誤差に関しては、いずれの点においても標準誤差が y の 10^{-4} 倍程度の大きさであったことから、重大な要因とは考えづらい。したがって、実験器具・装置の系統誤差の影響が大きいと考えられる。原因としては、ファイバー板に用いた各ファイバーごとに固有の歪みや細かい傷があること、 L が変化するに伴って光源のファイバーへの入射位置や角度が僅かずつ変化することなどが影響したと予想される。

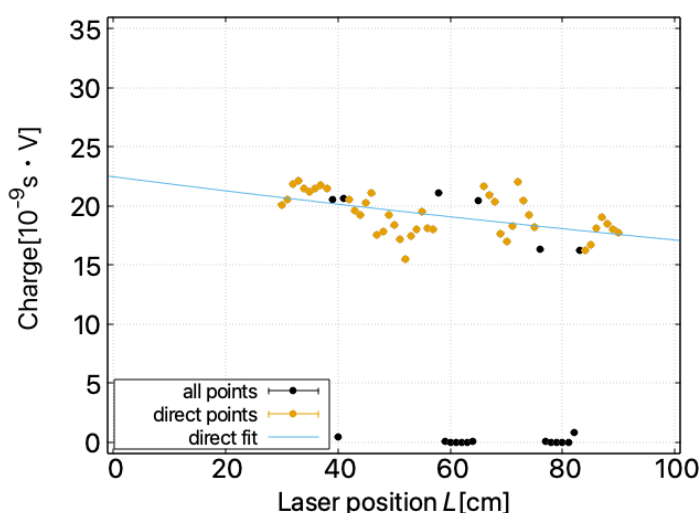


図 4.3 減衰長の測定結果。各点には標準誤差のエラーバーも付記しているが、その小ささからほとんど見えない。all points は測定したすべての L についての点、direct points は direct に分類された点、direct fit の曲線は direct に分類された点を用いて $y = a \cdot \exp(-L/L_{att})$ でフィッティングした結果を示している。

4.2 入射角度依存性

FOM の有効面積最大化のため、できるだけチェレンコフ光の入射角度に依らず検出できる構造を設計したい。そこで、ファイバーへの光の入射角度に対してどのように応答が変化するかを知るための実験を行った。

暗室内に図 4.4 のようなセットアップを構築した。光源からファイバーまでの距離を一定に保ちつつ、円弧上を動かすようになす角 θ を 30° から 150° まで 15° ずつ変化させて、各位置で取得した波形の面積を算出した。光源、レーザー、PMT その他治具等の実験器具は、ほぼ 4.1 節の減衰長の測定実験と同一のものを使用している。ただし、本実験はファイバー板ではなく一本のファイバーで行ったこと、取得した波形が一つずつであったことは異なる。これらはそれぞれ先行実験において、ファイバー板を保持する治具と θ を変化させる器具が接触してしまい両立が難しかったこと、 θ の変化と波型の取得を自動化させることが困難であったことによる。

得られた各位置での波形面積は図 4.5 のようになった。この結果は角度が垂直から平行に近づくほど端面に到達する光子数が増え、最大 1.5 倍程度になることを示している。これは入射光が波長変換されるまでに進める中心軸と垂直方向への距離が入射角度ごとに変化するためだと考えられる。Kuraray のデータシートにおいては、各種光学特性の値は波長変換の過程がファイバーのコア中心軸上で生じるという仮定に基づいて考慮されている [30]。し

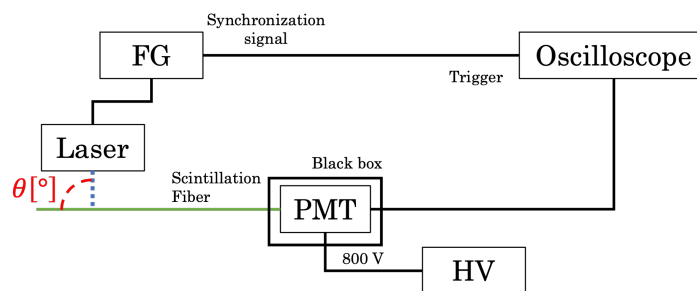


図 4.4 入射角度依存性測定の設定アップ。

しかし Kuraray によると実際には、コア内でその吸収光のピーク波長における光路長 1 mm での吸収効率が 90% から 99% となるように蛍光剤濃度が設定されている。このため、コア内の中心軸からどれだけ離れた位置で吸収されるかが入射角度によって変化する。吸収後のシンチレーション光の再発光は等方的に放射されるが、それが全反射条件を満たす割合は中心軸からの垂直方向への距離によって変化し、中心に近いほど減少する傾向にあると、共同研究者である太田新一郎氏によって報告されている [31]。この効果によって、入射角度に応じてその光量に差が出たと考えられる。

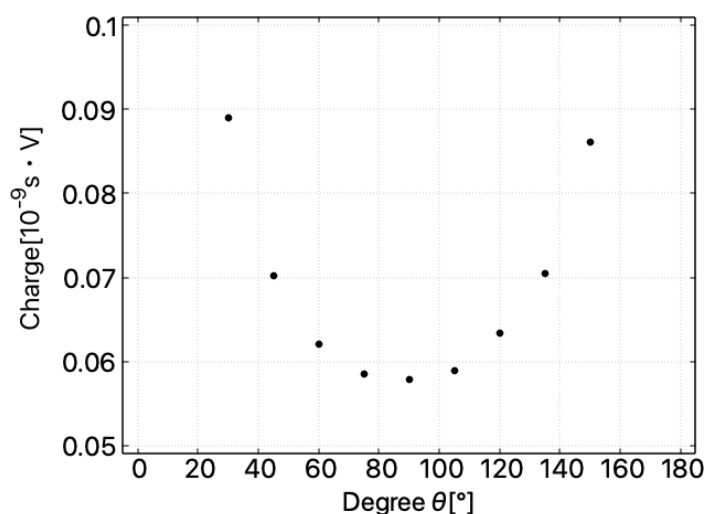


図 4.5 入射角度依存性の測定結果。

4.3 曲げ損失

光が伝播していくファイバーが曲がっている場合、真っ直ぐの場合と比べて損失が生じる。Kuraray のデータシートにおいてこの曲げ損失は図 4.6(a) のようになっている [30]。FOM の構造上、複数本のファイバーを円筒形に配置しその端面を束ねて単一の検出器へと導くことから、必ずファイバーが曲がる部分が生じる。したがって構造決定に際し曲げ損失がどの程度影響するか知る必要があったため、この実測を行った。

図 4.6(b) にある Kuraray で曲げ損失測定環境を参考にして、暗室内に図 4.7 のようなセットアップを構築した。光源、レーザー、PMT その他治具等は 4.1 節の減衰長の測定実験と同一のものを使用している。ただし本実験はファイバー板ではなく一本のファイバーで行い、一部にループ構造をつくってその長直径と短直径の算術平均値を曲げ直径 D とした。またファイバーに光を入射させる位置から左右それぞれ 3 cm 程度離れた位置を治具で固定

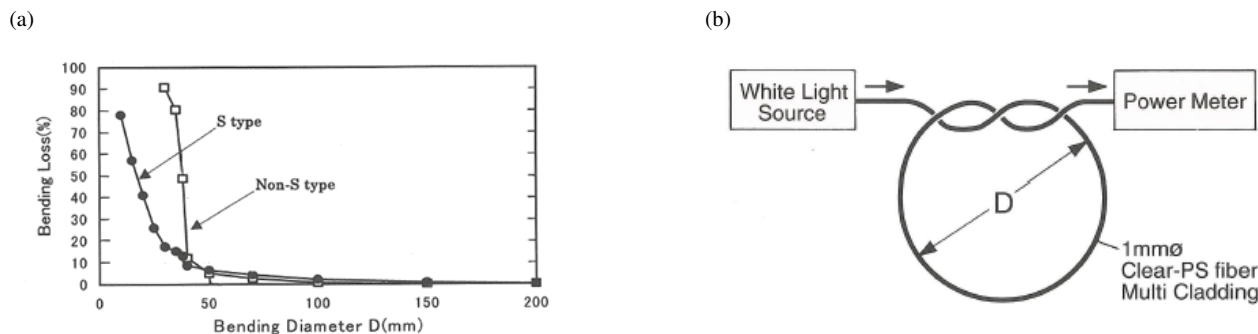


図 4.6 (a)Kuraray のデータシートによるファイバーの曲げ損失 [30]。本研究で用いているのは S Type。
(b)Kuraray の曲げ損失測定環境。D は長直径と短直径の算術平均値を用いている [30]。

することで、ファイバーと光源との位置関係を一定に保った。そして PMT を光電面に固定されたファイバー端ごと後退させていき、 $D = 20, 15, 10, 5, 4, 3, 2, 1$ cm となる位置で、約 1 秒間隔でそれぞれ 50 個の波形を取得した。また、Creality 製の 3D プリンター (K1 MAX) を用いて自身で設計した治具を複数製作し、追加で用いた。

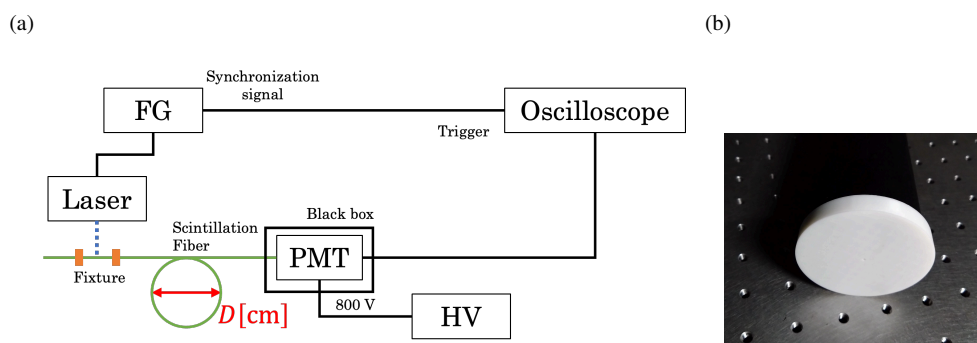


図 4.7 (a) 曲げ損失測定実験のセットアップ。(b)3D プリンターで作成した治具の一例。PMT の光電面に取り付け中心の穴からファイバーを通すことで、ファイバーの端面からの光以外の迷光を遮る。

得られた各位置での波形面積は図 4.8 のようになった。実験中 PMT の後退作業間に 2 回ファイバー端が光電面から外れてしまい、その都度固定をやり直したため、それらの位置関係が変化していることに留意する必要がある。ただしその影響を加味しても、曲げ直径 D に依る波形面積の変化に一意な傾向は見て取れない。図 4.6(a) によると $D = 1$ cm では 70% 程度の損失が生じるが、本実験においては測定誤差内の差しか生じなかったと判断した。

4.4 圧力耐性

FOM は南極の深さ 750m 付近で運用され、また導入時には氷に開けた穴の中を満たす水中に沈めて自然凍結を待つことから、数十 MPa 程度の圧力がかかる場面があることが想定される。同位置に埋設される LOM の場合、最も浅い埋設地点で約 50 MPa、最も深い埋設地点で約 70 MPa の圧力がかかることを想定して設計が行われている。ファイバーについてもその圧力耐性を知る必要があるため、実験を行なった。

4.1 節の減衰長測定に用いたファイバー板 A と、それと同様の手法で製作したファイバー板 B を用意した。図 4.9(a) にあるように、国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の高圧実験水槽装置にて、ファイバー板 A には 70 MPa、ファイバー板 B には 50 MPa の目標圧力をかける試験を行なった。加圧は 1 MPa/min、減圧は 2 MPa/min で行われ、加圧終了から減圧開始まで目標圧力のまま 10 分間保持された。

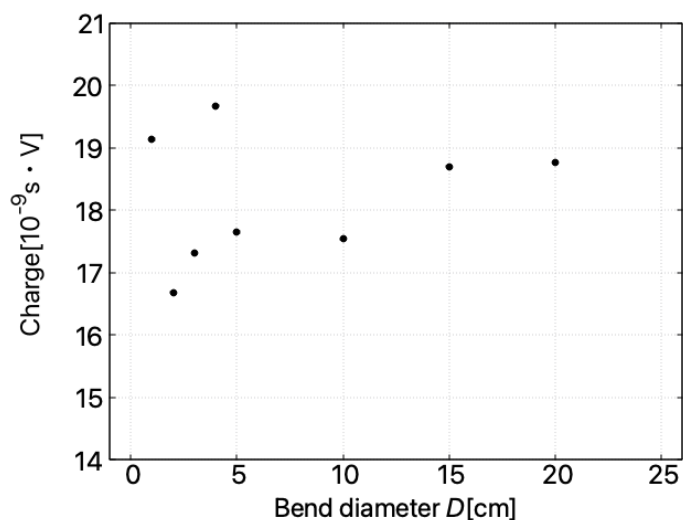


図 4.8 曲げ損失の測定結果。各点には標準誤差のエラーバーも付記しているが、その小ささからほとんど見えない。

(a)



(b)

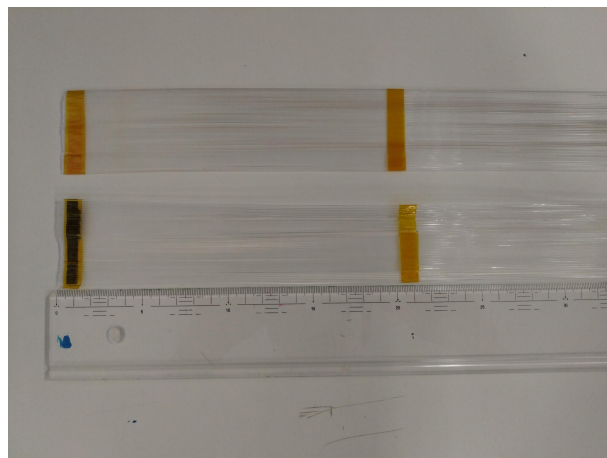


図 4.9 (a) 圧力試験の様子。ドラム缶に入れて水槽へ沈め、水圧をかけていく。(b) 上が圧力試験前のファイバー板 A、下が試験後のファイバー板 B。わずかに変形が生じている。

圧力試験後にファイバー板の外見を調べたところ、図 4.9(b) のように全体の形状に若干の変化が見られた。これはファイバーごとにわずかずつ収縮し、個別の方向に歪みやうねりが生じたことに起因すると考えられる。なお、全長は 120 cm から変化していなかった。次に顕微鏡を用いてファイバー表面を観察したところ、細かな傷がいくらかついているように見えた。ただしこれは別用途で用いていた複数のファイバーにも十分見受けられる特徴であるため、圧力試験の結果と断ずることはできない。

圧力試験後のファイバー A を用いて減衰長の測定を行なった。セットアップ・実験手法・解析手法はすべて 4.1 節と同一である。算出された減衰長は $387 \pm 104 \text{ cm}$ であり、圧力試験前の $L_{\text{att}} = 367 \pm 100 \text{ cm}$ と比較して有意な差は見られなかった。

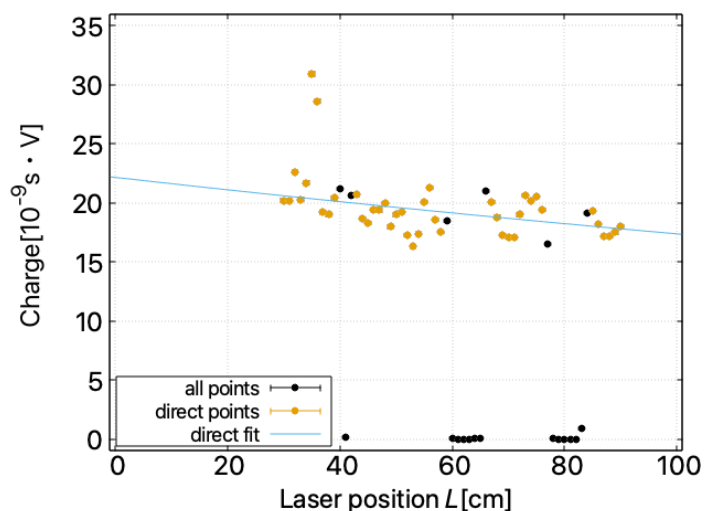


図 4.10 圧力試験後の減衰長の測定結果。点の分類は圧力試験前の結果図 4.3 と同様に行なった。

4.5 低温耐性

FOM は南極の水中で運用されることから、マイナス数十度程度の環境でのファイバーの特性がどのようなかを知る必要がある。したがってこれを確認するための実験を行なった。

ファイバーを 10 本束ね、213 K 程度に保たれている日本フリーザー製の冷凍庫 (NF-500HC) 内に静置し、その長さを測定した。室温での長さと比較したものが表 4.1 である。

表 4.1 温度ごとのファイバーの長さ

温度	長さ [cm]
室温 (約 303 K)	121.49 ± 0.01 cm
低温 (約 213 K)	121.45 ± 0.01 cm

線膨張率は $(3.7 \pm 1.3) \times 10^{-6} / \text{K}$ と算出された。

低温環境下、または低温に冷え切った状態でのファイバーの光学特性評価のため複数の実験を行ったが、冷凍庫内での測定器具や治具の操作、光源や PMT の温度依存性との切り分けが困難であったことから、ここでは記さず今後の課題とする。

第5章

議論および今後

5.1 FOM 案の妥当性

4章を踏まえて、改めて集光器の主要構成要素として Kuraray 製 B-3 ファイバーを用いるという FOM 案の妥当性を考察する。

5.1.1 ファイバー特性を踏まえた FOM 案の考察

4.1 節、4.4 節より、B-3 ファイバーの減衰長は 4m 程度であり、南極環境下で想定される圧力がかかっても大きくは変化しないと言える。これが集光器の主要構成要素として十分な性能であるかを確認する必要がある。現在 FOM のサイズ感についてはまだ未確定であるが、おおむね全長が 1m から 4m 程度に収まることを想定されている。これは FOM 本体の運搬において可能な限り体積を減らす必要があること、現地での設置が 1、2 人程度の少人数による作業となることを踏まえ、5m 以上の長さになるのはその取り回しの悪さから不相当と考えられるためである。よって、B-3 ファイバーの長さも同程度のスケールになると仮定すると、これはシンチレーション光が検出機に到達するまでにその検出閾値を下回るほど減衰してしまう距離より十分に短い。したがって、シンチレーション光がファイバー内を伝搬していくに際して生じる減衰の影響は、FOM 案の妥当性を補強すると考える。

4.2 節より、B-3 ファイバーはあらゆる方向からの入射光に対して有意な大きさの応答をするとと言える。これは PMT の光電面に入射する必要のある DOM のような検出器に対して明確に優位性を持つ一面と言え、集光面積の拡大という目的において望ましい特徴である。また 4.2 節より、入射角度に依って応答信号の大きさが最大 1.5 倍程度まで変化しうることも言える。これは FOM が信号の大きさを情報として用いないこと、その程度の変動であれば検出不可能になるほどの損失を引き起こす原因とはならないことから、重大な問題とならない。したがって、ファイバーへ入射する光の角度に依る損失の影響は、FOM 案の妥当性を補強すると考える。

5.2 節にて詳細を述べるが、FOM 案ではファイバーを曲げ直径 $D = 8\text{ cm}$ 程度まで曲げて配置する可能性も考慮されている。対して 4.3 節より、B-3 ファイバーの曲げ損失によっては $D = 1\text{ cm}$ 以上において測定環境による強度変化に飲まれる程度の影響しか生じなかったと言える。すなわち現実的に行われる程度のファイバーの曲げに対して、その減衰の影響は無視できる程度に小さくなると予想される。したがって、ファイバーの曲げ損失の影響は、FOM 案の妥当性を補強すると考える。

4.4 章、4.5 章から、B-3 ファイバーは高圧、低温環境下に置かれたとしても FOM としての構造を破綻させるほどにその特性に影響を及ぼすことはないと言える。したがって、これらの影響は FOM 案の妥当性を補強すると考える。

以上総じて、B-3 ファイバーは集光器の主要構成要素として十分な性能があると判断する。

5.1.2 FOM 案の実現に向けた考察

次に FOM 案の実現に必要な技術面・経済面を考察する。

B-3 ファイバーは直径 1mm のプラスチック製ファイバーであり、その保管や取り扱いに特別な手順はほとんど必要ない。FOM 本体の製造に関しても同様で、複雑な電気系統の導入やダークノイズへの懸念をせずに取り組むことができる。ファイバーを用いる案に特有の手順を考えると、一例として端面からの放射を最大化するためサンドペーパーで十分になめらかに磨く作業等が挙げられる。これは本研究において 50 本のファイバーをまとめて 30 分程度で磨き終えたことを考えると、数十台の製造が必要になったとしても十分に現実的な時間内に行うことができる。したがって、FOM 製造にあたっての技術的な課題はほとんど存在しないと考える。

本研究において、B-3 ファイバーは 1m あたり 930 円で購入され、また本体試作機の製造については、ファイバーの材料費を除いて 40 万円から 80 万円程度で行われた。FOM の形状が確定し量産が行われれば、推測ではあるが一台あたり 100 万円未満での製造は十分に可能であるとみられる。理想的な条件下で FOM1 台が LOM1 台と同等以上の集光面積増大効果を期待できる [31] ことを鑑みると、これは非常に安価である。

以上、技術面・経済面において FOM は明確に優れていると判断する。

5.2 新たな FOM 試作器の設計

5.2.1 二代目

3.2.2 項での初代試作器に生じた課題と 4 章での複数の実験結果を経て、二代目 FOM 試作器の設計・開発を行った。

まず、初代の課題であったファイバーの破損を招いた原因と推察される、ファイバーごとの張力の差を改善することにした。このため、初代の「ファイバーを骨組みに接着する」という設計思想から離れ、ファイバーを完全に固定してしまわない手法を提案した。具体的には、骨組みについてそのすべてをプラスチック製の板とするのではなく、一部に網状の構造体を導入した。この網に対して、図 5.1(a) のようにファイバーを垂直に、上下を交互に通して編み込むように配置する。網とファイバーは接着されておらず、編み込みによる摩擦力のみで保持される。板状の骨組みは網と貼り付けられて全体を円筒形に保つためのみ導入され、ファイバーとは接触しない。このファイバーを完全には固定しない構造によって、張力やねじれを柔軟に吸収可能であり、破損を防げると考えた。

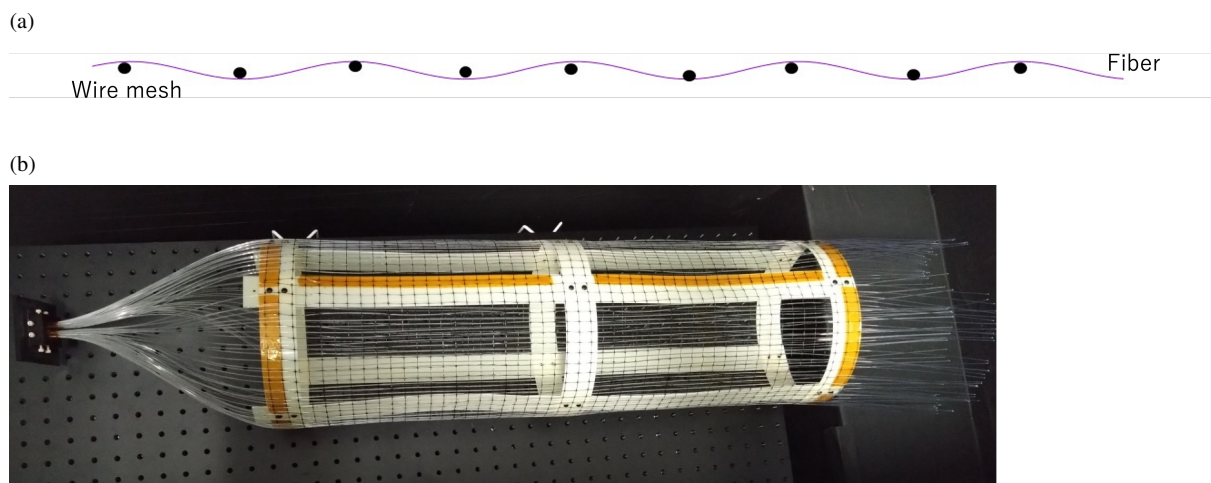


図 5.1 (a) ファイバーを網状の構造体に編み込むイメージ図。(b) 二代目 FOM の外観。

この構造の利点は他にもある。第一に、熱への耐性を生むことである。FOMを南極へ導入するに際しては、日本から現地まで貨物として海路で運ばれるということが半ば決定されている。この間に赤道を超えることから、FOM本体は周囲の気温が大幅に変化したとしても影響しない構造が求められる。二代目においては、この熱によるファイバーの伸縮・膨張の影響を吸収できるのはもちろんのこと、接着剤の熱による軟化や強度変化への心配が少ない。第二に、影となる部分が少ないことである。初代のように板状の骨組みを多く用いると、それに遮られてチェレンコフ光がファイバーまで到達しない入射角度が多くできてしまい、集光面積の低下につながる。対して二代目は細い糸が組み合わさっている網を用いることで、この影の面積を減らすことに成功している。

株式会社エム・ラインによって、図 5.1(b) にある二代目試作器が製造された。同社によって製造された初代では製造完了時点でファイバーの破損が生じていたが、この二代目ではそのようなことはなく、全体構造が安定していた。試しにファイバーに対し多少の引っ張りやねじりを加えてみたところ、想定通りうまくその力を吸収してくれているようであった。また、編み込みの摩擦力による保持は想定通りに機能し、FOMの片端を持って本体をぶら下げても、ファイバーが骨組みから脱落してしまうようなことはなかった。ファイバーを編み込むように配置することについて、真っ直ぐに配置していた初代とは異なりわずかに曲がりが生じることになるが、4.3節よりその性能に大きな変化は出ないと判断した。

5.2.2 三代目

二代目から発展させたい要素を中心に考慮して、三代目 FOM 試作機の設計が進んでいる。

初代・二代目に共通する課題として挙げられていたのが、「束ねていない側の端面へ向かう光は検出できない」ということである。ファイバー内でシンチレーション光は等方的に放射されるため、もし逆側の光も検出できれば単純に光量が2倍になると考えて良い。また両端それぞれの信号の時間差を見ることで、FOMに入射したチェレンコフ光の位置・時間・角度分解能の向上等の効果が期待できる可能性もある。よって両側の端面を検出機へ導く構造を考察した。

基本的な設計思想は、ファイバーを半ループ状に配置して両側の端面を同じ方向へと導くことである。これを少し並行移動させた位置に別のファイバーを配置することを繰り返すことで、図 5.2(a) のような板状の構造になる。これを円筒状に丸めることで、図 5.2(b) のような FOM の形状とする。

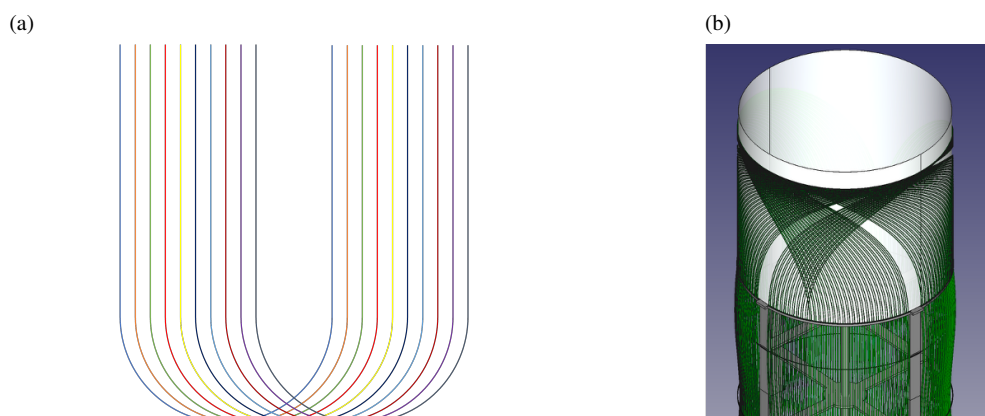


図 5.2 (a) 三代目試作器を丸める前のファイバーが半ループ状に配置されているイメージ図。(b) 三代目試作器のイメージ図。

この形状は、円筒面に対し半円を貼り付けるようにして半ループさせると表現できる。したがって曲げ部分の

ファイバーは、式 5.1 のようにパラメータ表示された曲線 $\mathbf{r}(t)$ で幾何的に表現できる。

$$\mathbf{r}(t) = \begin{cases} x(t) = 10 \cos t \\ y(t) = 10 \sin t \\ z(t) = \sqrt{(5\pi)^2 + (10t)^2} \end{cases} \quad (5.1)$$

ここで単位は cm である。FOM の円筒直径は未決定だが、現行の LOM 案の直径が 318 mm であることから、ここでは 20 cm と仮定した。

$\mathbf{r}(t)$ の曲げ直径 D は曲率 $\kappa = |\mathbf{r}'(t) \times \mathbf{r}''(t)| / |\mathbf{r}'(t)|^3$ の逆数を 2 倍することで得られるため、その最小値 D_{\min} は

$$D_{\min} = \frac{2}{\sqrt{\frac{1}{(5\pi)^2} + \frac{1}{10^2}}} \approx 17 \quad (5.2)$$

となる。したがって三代目の設計上で三次元空間内でのファイバーの曲げ直径は最小でも 17 cm 程度に収まると考えられる。4.3 節より、これに際する曲げ損失は特筆すべき値とはならない。

この円筒直径は現在での構造検討案のうち最小のものであり、これ以下の曲げ直径の曲げ構造が生じる可能性は少ない。

第6章

結論

IceCube-Gen2 での検出器埋設間隔の広がりによって、バックグラウンドとなる信号を除去する Veto 能力が低下する。この課題の解決のため、波長変換機能を持つシンチレーションファイバーを用いて作成した集光器 FOM の開発を進めている。本研究では、FOM の設計に際して必要となる B-3 ファイバーの特性を実験を通して測定した。

B-3 ファイバーの減衰長測定実験では、減衰長 $L_{att} = 367 \pm 100$ cm が得られた。これは Kuraray が実験によって取得した減衰長 $L > 4.0$ m と一致しており、水中への導入を想定した 70 MPa の圧力試験後でも $L_{att} = 387 \pm 104$ cm と有意な差は見られなかった。チェレンコフ光の入射角度の違いを想定した発光量の入射角度依存性測定実験では、入射角がファイバーと並行に近づくほど光量が大きくなり最大 1.5 倍程度まで上昇することが確認された。この効果はファイバー内での発光原理に基づく考察に一致している。ファイバーの曲げに際する光量の損失を測定した実験からは、現実的に FOM の設計上行われる程度の曲げでは、測定誤差内の損失しか生じないと判断できた。ファイバーの耐圧性能、対低温性能を確認する実験からは、水中への導入に支障がないと判断できた。その他、費用面、技術面からの考察において、FOM 案の採用に支障はないと判断した。実験を通して理解したファイバーの特性を考慮し、2 代目、3 代目となる試作機の設計開発を行なった。

今後は、ファイバーの特性を理解するための評価実験を続けつつ、FOM の設計の最適化に活用していくことが求められる。製造した FOM の試作機を用いた実験、ファイバーの構造から数値計算により求められるファイバー内での発光に関わる物理の理解、シミュレーションツールキット GEANT4 を用いた FOM の性能評価を通し、FOM 案の妥当性の補強を行なっていく。

謝辞

本研究にあたってご支援いただいたすべての方々に感謝いたします。

大阪公立大学の常定芳基教授には、非常に数多くのご指導やご助言をいただきました。宇宙線やニュートリノについての基礎知識から、実験器具の操作方法まで、研究を進めていくにあたって必要となる知識をいつも事細かに教えていただきました。私が重要なことを忘れてしまったり、何度も同じことについて尋ねてしまったりするようなこともありましたが、その度に快く、根気強くご指導いただきました。また進捗発表をもとに研究の発展性や方向性についていつも助言を頂き、常に研究の舵取りをしていただきました。私の拙い発想や提案に対しても真摯に向き合ってお答えいただき、研究を進展させていくにあたって非常に励みになりました。さらに日頃からの会話を通して、表現方法や物理学徒としての心構えについても、多くの学びを得ました。常定さんからは、研究に限らずあらゆる面で、本当に多くの影響を受けたと思っています。

大阪公立大学の藤井俊博准教授には、熱心なご指導を賜りました。進捗発表について、内容についての助言はもちろんのこと、解析方法やビジュアライズ方法について、私が全く思いもつかない視点から提案をいただくことが多くありました。その度に自分が実験結果に対して一面的な見方しかできていないことを痛感し、研究への姿勢を向上させていくことに繋がりました。

千葉大学の清水信宏教授には、数多くの助言をいただきました。実験の進め方や精度の上げ方に対して実践的なアドバイスを多数いただき、ともすれば単調になってしまいそうな再測定の繰り返しの中で、大きな原動力になりました。FOM が運用されるイメージを具体的に掴めるようになったのも、清水さんとの会話の影響が大きいです。耐圧試験の準備に際して、学生達より率先して作業に当たっていた姿は忘れません。同じく千葉大学の石原安野教授にも多くのご指導を賜り、研究方針決定の指針を示していただきました。またその他千葉大学学生である笠井勇次郎氏や瀬野禪太氏との交流を通し、IceCube-Gen2 への理解を改めて深めることができました。

大阪公立大学の同研究室においては、桜井駿介特任研究員と申興秀特任助教に、進捗報告を通して多くのご指導やご助言をいただきました。本筋から離れるような話題に対しても、気楽にお話しできました。並んで食事をしたり雀卓を囲んだり、プライベートでも楽しい時間を過ごさせていただきました。古前壱郎氏には、多くの議論や添削を通して、あらゆる期間にわたって研究を支えていただきました。相談するといつでも的確にご返答いただき、とても頼もしかったです。

共同研究者である太田新一郎氏は、研究もプライベートも通して支え合い、研究生生活を常に楽しく過ごすことができました。FOM 開発を目指す実験とシミュレーションの両軸として、不可欠な存在であり、良き友人でもありました。同じく共同研究者である湯浅圭太氏は、目を見張るほどの学習意欲と実際の進捗を見せており、今後の活躍が大いに期待できる存在です。二人とも、本当にお世話になりました。

その他同研究室所属の金智賢准教授、敷田淳氏、遠藤康平氏、橘春花氏、中川心媛氏、松下治斗氏、中本寛輝氏、田中花歩氏、板谷臯生氏のおかげで、日々の研究生生活を楽しく過ごすことができました。今後も旅行に行ったり誕生日を祝ったり、唐突に餃子パーティを始めたりするような、楽しい研究室風土を形作っていて欲しいと思います。

そして、大阪公立大学において初めて IceCube へ携わった学生である偉大なる先人、小林拓郎氏に特に感謝いたします。ともに研究を進め、その足跡を辿り、重要なことからどうでもいいことまで、本当に多くの面でお世話に

なりました。

最後に、研究生活を支えてくれた家族と友人に感謝いたします。

みなさん本当にありがとうございました。

引用文献

- [1] Akaike, Y., Adriani, O., Asano, K. et al. (2024) “The Calorimetric Electron Telescope (CALET) on the International Space Station: Results from the first eight years on orbit,” *Advances in Space Research*, **74**, No. 9, 4353–4367, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.04.035>, Progress in Astrophysics of Cosmic Rays.
- [2] Abu-Zayyad, T., Aida, R., Allen, M. et al. (2012) “The surface detector array of the Telescope Array experiment,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **689**, 87–97, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.05.079>.
- [3] Abbasi, R. U. et al. (2014) “Indications of Intermediate-Scale Anisotropy of Cosmic Rays with Energy Greater Than 57 EeV in the Northern Sky Measured with the Telescope Array Experiment,” *The Astrophysical Journal Letters*, **790**, L21.
- [4] Abbasi, R. U., Abe, Y., Abu-Zayyad, T. et al. (2024) “Isotropy of Cosmic Rays beyond 10^{20} eV Favors Their Heavy Mass Composition,” *Phys. Rev. Lett.*, **133**, 041001, DOI: [10.1103/PhysRevLett.133.041001](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.041001).
- [5] W.F.Hanlon (2008) “Updated cosmic ray spectrum,” URL: <https://web.physics.utah.edu/~whanlon/spectrum.html>.
- [6] Hillas, A. M. (1984) “The Origin of Ultra-High-Energy Cosmic Rays,” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **22**, 425–444, DOI: [10.1146/annurev.aa.22.090184.002233](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.22.090184.002233).
- [7] Kotera, K. and Olinto, A. V. (2011) “The Astrophysics of Ultrahigh-Energy Cosmic Rays,” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **49**, No. 1, 119 – 153, DOI: [10.1146/annurev-astro-081710-102620](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081710-102620).
- [8] ICEHAP (2026) 「ニュートリノについて | ニュートリノ天文学」, URL: <http://www.icehap.chiba-u.jp/icecube/neutrinos.html>.
- [9] Hirata, K., Kajita, T., Kifune, T. et al. (1989) “Experimental limits on nucleon lifetime for lepton+meson decay modes,” *Physics Letters B*, **220**, No. 1, 308–316, DOI: [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(89\)90058-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(89)90058-0).
- [10] Kume, H., Sawaki, S., Ito, M., Arisaka, K., Kajita, T., Nishimura, A., and Suzuki, A. (1983) “20 inch diameter photomultiplier,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **205**, No. 3, 443–449, DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-5087\(83\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0167-5087(83)90007-8).
- [11] Fukuda, S., Fukuda, Y., Hayakawa, T. et al. (2003) “The Super-Kamiokande detector,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **501**, No. 2, 418–462, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)00425-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)00425-X).
- [12] Hirata, K. S. et al. (1989) “Observation of B-8 Solar Neutrinos in the Kamiokande-II Detector,” *Phys. Rev. Lett.*, **63**, 16, DOI: [10.1103/PhysRevLett.63.16](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.63.16).
- [13] Hirata, K. et al. (1987) “Observation of a Neutrino Burst from the Supernova SN 1987a,” *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 1490–1493, DOI: [10.1103/PhysRevLett.58.1490](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.1490).

- [14] Aartsen, M., Ackermann, M., Adams, J. et al. (2017) “The IceCube Neutrino Observatory: instrumentation and online systems,” *Journal of Instrumentation*, **12**, No. 03, P03012 – P03012, DOI: [10.1088/1748-0221/12/03/p03012](https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/03/p03012).
- [15] Fukuda, Y., Hayakawa, T., Ichihara, E. et al. (1998) “Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos,” *Physical Review Letters*, **81**, No. 8, 1562 – 1567, DOI: [10.1103/physrevlett.81.1562](https://doi.org/10.1103/physrevlett.81.1562).
- [16] Ageron, M., Aguilar, J., Al Samarai, I. et al. (2011) “ANTARES: The first undersea neutrino telescope,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **656**, No. 1, 11 – 38, DOI: [10.1016/j.nima.2011.06.103](https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.06.103).
- [17] Vitagliano, E., Tamborra, I., and Raffelt, G. (2020) “Grand unified neutrino spectrum at Earth: Sources and spectral components,” *Rev. Mod. Phys.*, **92**, 045006, DOI: [10.1103/RevModPhys.92.045006](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.92.045006).
- [18] Halzen, F. (2017) “High-energy neutrino astrophysics,” *Nature Physics*, **13**, No. 3, 232–238, DOI: [10.1038/nphys3816](https://doi.org/10.1038/nphys3816).
- [19] Andrés, E., Askebjør, P., Bai, X. et al. (2001) “Observation of high-energy neutrinos using Čerenkov detectors embedded deep in Antarctic ice,” *Nature*, **410**, No. 6827, 441–443, DOI: [10.1038/35068509](https://doi.org/10.1038/35068509).
- [20] Abbasi, R., Ackermann, M., Adams, J. et al. (2009) “Search for point sources of high energy neutrinos with final data from AMANDA-II,” *Physical Review D*, **79**, No. 6, DOI: [10.1103/physrevd.79.062001](https://doi.org/10.1103/physrevd.79.062001).
- [21] Ishihara, A. (2019a) “The IceCube Upgrade - Design and Science Goals,” 1031, DOI: [10.22323/1.358.1031](https://doi.org/10.22323/1.358.1031).
- [22] Maunu, R. E. (2016) “A search for muon neutrinos in coincidence with gamma-ray bursts in the Southern Hemisphere sky using the IceCube Neutrino Observatory,” Ph.D. dissertation, University of Maryland, College Park.
- [23] Aartsen, M. G., Abbasi, R., Ackermann, M. et al. (2014) “Energy reconstruction methods in the IceCube neutrino telescope,” *Journal of Instrumentation*, **9**, No. 03, P03009 – P03009, DOI: [10.1088/1748-0221/9/03/p03009](https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/03/p03009).
- [24] Aartsen, M. G., Abbasi, R., Ackermann, M. et al. (2021) “IceCube-Gen2: the window to the extreme Universe,” *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, **48**, No. 6, 060501, DOI: [10.1088/1361-6471/abbd48](https://doi.org/10.1088/1361-6471/abbd48).
- [25] Ishihara, A. (2019b) “The IceCube Upgrade - Design and Science Goals,” *PoS, ICRC2019*, 1031, DOI: [10.22323/1.358.1031](https://doi.org/10.22323/1.358.1031).
- [26] Classen, L., Kappes, A., and Karg, T. (2019) “A multi-PMT Optical Module for the IceCube Upgrade,” URL: <https://arxiv.org/abs/1908.10802>.
- [27] Abbasi, R., Ackermann, M., Adams, J. et al. (2023) “D-Egg: a dual PMT optical module for IceCube,” *Journal of Instrumentation*, **18**, No. 04, P04014, DOI: [10.1088/1748-0221/18/04/p04014](https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/04/p04014).
- [28] Kobayashi, T. (2025) 「IceCube-Gen2 に向けた新型光検出器のための波長変換ファイバー型集光器の開発」, 修士論文, Osaka Metropolitan University.
- [29] Chiba, M. (2024) 「IceCube-Gen2 実験の新型光検出器用読み出し基板とその性能検査システムの開発」, 修士論文, Chiba University.
- [30] “Kuraray,” URL: <http://kuraraypsf.jp/pdf/all.pdf>.
- [31] Shinichiro, O. (2026) 「シミュレーションによる IceCube-Gen2 に向けた集光器 FOM の性能評価」, 修士論文, Osaka Metropolitan University.