

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13559

研究課題名(和文) 新光検出システム確立で目指す大型ニュートリノ・核子崩壊検出装置の高性能化

研究課題名(英文) Performance improvement of a future gigantic detector for neutrinos and nucleon-decay searches by a new photo-detection system

研究代表者

西村 康宏 (NISHIMURA, YASUHIRO)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授

研究者番号：40648119

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ニュートリノ・核子崩壊物理を探る次世代のハイパーカミオカンデ実験で重要な大口径光電子増倍管の実証測定と、検出精度を高める較正装置の研究を行った。ここで用いる新型光電子増倍管の光検出性能は従来より2倍以上に向上しており、この性能をスーパーカミオカンデ内で実測した。また、この高性能を引き出すために精度の良い時間較正が必要となり、パルス光の時間幅を保ったまま一様な光量を照射できるデフューザーボール光源を開発した。パルス光の時間特性を損なわず拡散する最適化を検討し、小型な拡散樹脂により一様な照射が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国際規模の新たなニュートリノ研究拠点が国内外で計画されている中、今後のニュートリノ・核子崩壊研究は大統計の事象数による高精度測定が必要となる。大型検出器の広い光検出領域で検出精度を高めるには、短パルス光を一様に照射する光源が重要であり、他の大型実験でも転用を見込める。

研究成果の概要(英文)：I have studied a calibration device to improve the detection accuracy of the next-generation Hyper-Kamiokande experiment, which will probe neutrino and nucleon decay physics. The photon detection performance of the new photomultiplier tube for Hyper-Kamiokande is more than twice that of conventional ones, where accurate time calibration is important to reach the intrinsic performance. Therefore, I studied a diffuser ball light source that can emit a uniform amount of light while minimizing the time width of the pulsed light. Optimization of the magnesium oxide concentration and size of the resin that diffuses the pulsed light without impairing its temporal characteristics was investigated. A uniform irradiation was achieved by using a small diffusing resin with an increased concentration. The correlation between the design and the light attenuation or pulse width was obtained, enabling the design of a diffuse light source that meets the specifications.

研究分野：素粒子実験

キーワード：検出器較正 ニュートリノ 光検出器 光源 核子崩壊

1. 研究開始当初の背景

近年になって国内外の複数のニュートリノ振動実験により、3つあるニュートリノ混合角の詳細が分かってきた。一方で、質量やレプトン CP 対称性はよく分かっていない。そこで、宇宙創生の謎にも絡むレプトン CP 対称性の破れの発見をはじめ、多くのニュートリノ物理発展を目指す次世代実験ハイパーカミオカンデの 2027 年観測開始を目指している。

素粒子の標準理論は現象を精密に再現する一方で、その不自然さを解消する新たな物理の枠組みはまだ掴めていない。ハイパーカミオカンデは、この存在の決定的な証拠となる核子崩壊に、従来より一桁高い感度を持つ。発見により標準理論を越える新たな物理の発展が期待される。

現行のスーパーカミオカンデは、20 年以上水チェレンコフ検出器内の構成はほぼ変わっていないが、2018 年にニュートリノと反ニュートリノを区別できる大幅な改良を終えて、スーパーカミオカンデ Gd の観測が始まった。これまで捉えられていない宇宙黎明期の超新星背景ニュートリノを 10 年間測定すれば有意度 2~5 で検出できる。

これら検出器で検出性能を高めるため、高精度で測定できる新たな大口径光電子増倍管が完成しつつあった。高精度の光検出性能と較正手法は、今後観測事象数が増えて精密測定を行うために重要になる。ハイパーカミオカンデの完成前、このスーパーカミオカンデ改良後に、将来の高精度光検出性能を事前に達成できる機会が得られた。

2. 研究の目的

本研究では、次世代水チェレンコフ実験の高精度光検出のための基礎技術確立を目的とする。新型高性能光検出器の実用時の性能を明らかにし、長期安定運用を実証する。また、検出時間性能を損なわずに正確に把握するため、短パルス幅光源開発による高時間精度検出の実現を目指す。これらの成果を次世代検出器で用いることで、将来のニュートリノ・核子崩壊の高精度観測を可能にすることが目的である。

3. 研究の方法

(1) 光検出器には個体差があり、周辺環境によってノイズや安定度が異なる。実際の使用時の性能を知るには、水チェレンコフ検出器に取り付けて長期判断する必要がある。そこで、ハイパーカミオカンデに先立ち、検出性能を向上させた新型 50 cm 径光電子増倍管(浜松ホトニクス社製 R12860)130 本程度を 2018 年にスーパーカミオカンデに取り付ける。個々の検出性能を継続して評価し、100 本以上の検出性能の平均値とばらつきを得る。水中低温下でスーパーカミオカンデ従来の光検出器と比較でき、10 年以上の観測に先立ち長期運用を行える。

(2) 現行の検出時間較正には、スーパーカミオカンデ中心から光を等方照射するために、光源のパルス入射光を拡散させるデフューザーボールを用いている。この中で時間が 3.6 ナノ秒(半値全幅)ふらつく見積もりがあった。ハイパーカミオカンデで用いる新型光電子増倍管の 1 光電子検出時間性能は 4.1 ナノ秒分解能(半値全幅)で、このふらつきと同程度なので時間分解能の見積もりに支障をきたす。そこで、0.5 ナノ秒の広がり光のパルス幅を抑えた光源を開発することで、光検出器が本来有する高い時間性能を引き出し、時間精度の較正を目指す。

4. 研究成果

(1) 140 本の新型光電子増倍管を事前に暗室内で性能測定し、2018 年にスーパーカミオカンデ内部に 130 本程度を取り付けた。2019 年始めにゲインを 1.7×10^7 に調整して性能評価を始め、長期の性能安定性評価を行った。水チェレンコフ光量は短波長に多く、1 光子光量の検出効率を従来型のスーパーカミオカンデで用いる光電子増倍管と比べ相対的に見積もったところ、1.97 倍の高い検出効率を確認でき、個体差は 5% に収まっていた。実際の検出信号で高い感度が初めて明らかになった。図 1 の左に、各 PMT の 1 光子相対検出効率分布を示した。また、1 光電子の時間分解能・光電子数(電荷)分解能の分布を、単色レーザー光とこれまで用いていたデフューザーボールを用いて見積もったところ、図 1 中図で示すように時間分解能()は従来型の 3.0 ± 0.2 ナノ秒から新型では 1.5 ± 0.1 ナノ秒へ向上した。取り付け前の事前測定では、取得回路やケーブル長が異なるが、約 1 ナノ秒の高分解能を得られていたが、この違いはスーパーカミオカンデ中では回路やケーブルの違いで説明できない時間性能悪化要因があることを示唆する。図 1 右図は、1 光電子ピーク電荷の広がり(/ピーク)が従来型の $54 \pm 9\%$ から $27 \pm 4\%$ の高い分

解能を得られたことを示す。検出効率と分解能は2倍に向上し、各性能の個体差のばらつきも小さいことを確認できた。

光電子増倍管では、熱電子等により暗中で見えるノイズが低エネルギー事象観測のバックグ

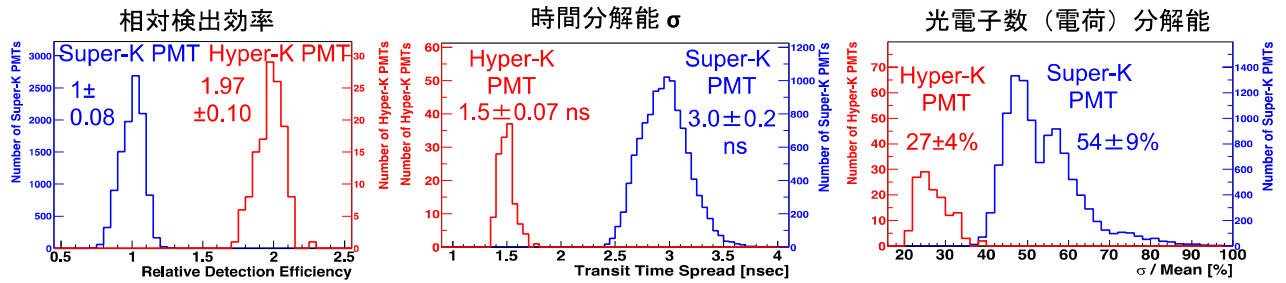


図1 スーパーカミオカンデ内で性能評価した新型光電子増倍管(R12860, 赤)と従来型(R3600, 青)の1光電子検出効率・分解能分布

ラウンドとなり、ダークカウントレートと呼ばれる。この安定化には長期を要し、84 日でレートが半減する傾向が見られた。1.5 年後には 5.35 kHz まで低下し、個体差は 8% であった。この後、ダークカウントレートをさらに下げ、ガラスの放射線量を半減した改良型がハイパーカミオカンデ向けに製造されることとなり、4 kHz のダークレートを見込んでいる。また、ゲインを 1 光電子のピーク電圧で 1.5 年間モニタしたところ、1.6% の高い安定性を確認した。

(2)パルス光を検出器中心で放出するために、光源としてはレーザー光の他に短パルス発生回路と多種の波長・大きさ(容量)のLEDを検討し、光を拡散するデフューザーにはスーパーカミオカンデ用いているものと濃度や大きさが異なるものを調査した。デフューザーには酸化マグネシウムの濃度が 2000ppm から 10000ppm まで異なる厚さの円板を試作し、減衰・時間幅悪化の相関を測定した。これを元に、100000ppm の酸化マグネシウム濃度で、10 mm から 30 mm 直径のデフューザーボールを試作した。図 2 に試作したデフューザーサンプルの写真を示す。このボールの中心に、光ファイバーを用いて 405 nm 波長のレーザー短パルス光を入射し、光放射の等方性・光量減衰・時間分解能を評価した。30 mm 直径の場合、参照した従来型デフューザーボールに比べて光量の放出角によるばらつきが 1/5 程度に抑えられ、等方性の改善が見られた。一方で、ボール直径が 4~5 mm 大きくなると光量は半減していた。ボール内での拡散による時間分解能の悪化は、直径 15 mm 以内であれば 0.5 ナノ秒以下のばらつきに抑えられることが分かった。



図2 試作したデフューザー円板・ボール

改良したデフューザーボールを用いて、新型光電子増倍管の時間性能を見積もるまでには至らなかったが、評価手法を確立して現状の性能を確認でき、光源の設計と性能の相関を得られ、将来の高精度測定のための較正手法を実現する基盤が整った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 西村康宏	4. 巻 40
2. 論文標題 ハイパーカミオカンデの大口径光検出器開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 高エネルギーニュース	6. 最初と最後の頁 86-97
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 5件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 西村康宏
2. 発表標題 ハイパーカミオカンデの光検出器高感度化
3. 学会等名 Scintillator for Medical, Astroparticle and environmental Radiation Technologies（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西村康宏
2. 発表標題 100万トン水チェレンコフ検出器（ハイパーカミオカンデ）の開発研究
3. 学会等名 令和元年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro NISHIMURA
2. 発表標題 Photo sensor developments for neutrino experiments
3. 学会等名 The 21st International Workshop on Neutrinos from Accelerators（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro Nishimura
2. 発表標題 Development of 50 cm Photo-Detectors for Hyper-Kamiokande
3. 学会等名 The 39th International Conference On High Energy Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Nishimura
2. 発表標題 The Hyper-Kamiokande Photodetector System using new 50 cm Photomultiplier Tubes
3. 学会等名 New and Enhanced Photosensor Technologies for Underground/underwater Neutrino Experiments (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Nishimura
2. 発表標題 Large Aperture Photodetectors for Water Cherenkov Detectors
3. 学会等名 Theory Meeting Experiment symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Nishimura
2. 発表標題 New Large Aperture Photodetectors for a Water Cherenkov Detector
3. 学会等名 The 16th Vienna Conference on Instrumentation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro Nishimura
2. 発表標題 Photosensors for the water Cherenkov neutrino detector Hyper-Kamiokande
3. 学会等名 IEEE NSS-MIC 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡崎玲大
2. 発表標題 大型水チェレンコフ検出器の較正に用いる光拡散ボールの性能向上
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	前川 雄音 (Maekawa Yuto)	慶應義塾大学・理工学部・学生 (32612)	
研究協力者	岡崎 玲大 (Okazaki Reo)	慶應義塾大学・理工学部・学生 (32612)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------