

氏名（本籍） まつもと りょう 松本 遼（東京都）  
学位の種類 博士（理学）  
学位記番号 甲第 1295 号  
学位授与の日付 2023 年 3 月 19 日  
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当  
学位論文題目 **Search for proton decay into a muon and  
a neutral kaon in the Super-Kamiokande  
water Cherenkov detector**  
(スーパーカミオカンデ水チェレンコフ検出器によるミュオンと中性 K 中間子への陽子崩壊探索)

論文審査委員 (主査) 教授 石塚 正基  
教授 幸村 孝由 教授 鈴木 英之  
准教授 阿部 智広 教授 大宮 喜文  
教授 郡司 天博

## 論文内容の要旨

大統一理論は素粒子物理学の標準的なモデルである標準模型を超えた枠組みである。その検証は現在の素粒子物理学における最も大きいテーマの一つであり、陽子崩壊事象の観測は直接的な証拠となる。

本論文ではスーパーカミオカンデ検出器により陽子がミュオンと中性 K 中間子へと崩壊するモードの探索を行った。スーパーカミオカンデ検出器は岐阜県飛騨市の神岡鉱山地下 1000 m に位置する大型水チェレンコフ検出器である。直径 39.3 メートル、高さ 41.4 メートルの円筒形のタンクの中に 50 kton の超純水を含んでいる。水中で荷電粒子が飛行する際に発生するチェレンコフ光を壁面に取り付けられた約 11000 本の光センサー（光電子増倍管）により検出する。

新たに解析したのは 2008 年から 2018 年までの 10 年分のデータであり、過去にスーパーカミオカンデ内で行なわれたそれ以前の約 10 年分のデータを解析した結果と併せた解析も行った。背景事象となる大気ニュートリノ事象を削減し、陽子崩壊事象を選別するための条件を設定し、シミュレーションを用いて陽子崩壊の検出効率と予測される背景事象数を見

積もった。選別条件は中性 K 中間子の崩壊モードに合わせて 5 つ定義された。探索の結果、最終サンプルに統計的に有意な信号事象は観測されなかった。この結果から、許容されるミューオンと中性 K 中間子への陽子崩壊寿命の下限値を  $4.5 \times 10^{33}$  年と見積もった。さらにこの結果を過去の解析結果と合わせて評価すると下限値は  $3.6 \times 10^{33}$  年となり、これは過去の探索結果による寿命の制限値を 2 倍以上更新する世界で最も厳しい制限である。また、陽子崩壊の背景事象となる大気ニュートリノの観測はそれ自体が物理的に興味深い観測対象であり、その性質の解明はニュートリノの質量階層性や CP 位相の理解に繋がる。本論文では機械学習を用いたニュートリノ事象分類手法の更新についても述べる。

## 論文審査の結果の要旨

物質を形成する最も基本的な構成要素として素粒子が存在し、素粒子物理学の標準理論では陽子や中性子を形成するクォークと電子やニュートリノなどのレプトンに大別される。一方、クォークとレプトン、および、その間に働く相互作用を統合する新しい理論として、大統一理論が提唱されている。本論文は、世界最大の水チェレンコフ検出器であるスーパーカミオカンデの観測データを解析し、大統一理論で予言される陽子が別の粒子に崩壊する現象（以下、陽子崩壊）を探索した研究成果を報告している。

第 1 章では、研究の背景として、素粒子物理学の標準理論、および、標準理論の抱える課題を解決する新しい理論の候補である大統一理論について説明している。

第 2 章では、研究の動機と論文の構成を説明している。申請者は、大統一理論を検証するための方法として、陽子崩壊の観測に着目し、過去の実験による探索の現状と理論のモデルによる予測を調査した上で、ミューオンと中性 K 中間子への崩壊を探索の対象としている。

第 3 章では、陽子崩壊現象を探索するための実験装置であるスーパーカミオカンデ検出器、および、その測定原理について説明している。

第 4 章では、陽子崩壊現象の検出効率やバックグラウンドの混入量を見積もるために利用したシミュレーションを説明している。中性 K 中間子の原子核内や水中での散乱に関連する観測データを調査し、シミュレーションに取り入れることで計算の精度を向上している点は、申請者による研究の成果の一つと言える。

第 5 章では陽子崩壊の探索においてバックグラウンドとなる大気ニュートリノの発生原理、水中でのニュートリノ相互作用およびシミュレーションについて述べている。本研究の独自性として、機械学習を利用し、観測データから相互作用を起こしたニュートリノの種類を特定する手法を開発している。第 4 章ではこの手法の説明と従来の手法との比較による識別性能の評価を記述している。

第 6 章では、観測データから宇宙線ミューオンや環境放射線、実験装置のノイズによ

るバックグラウンド事象を取り除く手法について説明している。

第7章では、観測データから荷電粒子（電気を帯びた粒子）の種類、発生点、運動量などを推定する事象再構成と呼ばれる手法の説明をしている。特筆すべき点として、研究対象の特徴を捉えるため、スーパーカミオカンデで用いられていた従来の事象再構成手法を改良している。具体的には、陽子がミュオンと中性 K 中間子に崩壊する現象では、ミュオンの発生点と中性 K 中間子の崩壊による二次粒子の発生点が異なるため、申請者は発生点の異なる粒子を測定する改良を実現している。

第8章は本論文の中心に位置づけられる内容であり、観測データとシミュレーションに対して事象再構成を適用した結果をもとに、陽子崩壊を大気ニュートリノ事象と識別するための手法、および、スーパーカミオカンデのデータ解析による探索の結果を記述している。中性 K 中間子は短い時間で別の粒子に崩壊するが、その際に発生する粒子は一定ではなく、ある割合で様々な粒子が発生する。申請者は、それぞれの崩壊の特徴を捉えて選別条件を最適化し、測定感度を高めている。解析した観測データからは、有意な陽子崩壊の信号が検証されず、大統一理論のモデルを制限する結果を報告している。

第9章では観測データとシミュレーションによる検出効率およびバックグラウンドの見積もりをもとに、陽子崩壊の寿命に制限を与えている。本研究により、陽子がミュオンと中性 K 中間子に崩壊する現象に対し、これまでの測定により与えられていた寿命の2倍以上となる新たな下限値を設定している。これは世界で最も厳しい制限である。

第10章では系統不確かさについて詳細に述べている。物理過程および検出器応答に起因する不確かさの要因を洗い出し、それぞれについて、その大きさを評価している。

最後に本論文で陽子崩壊探索の研究を行った結果が第11章にまとめられている。

本論文では、素粒子物理学における最も重要な研究課題の一つである大統一理論の実証をテーマとし、大統一理論で予言される陽子崩壊の探索を行っている。スーパーカミオカンデ検出器の観測データを解析した結果、陽子が崩壊する現象は検出されなかったが、陽子がミュオンと中性 K 中間子に崩壊する寿命に対して、世界で最も厳しい下限値を与えている。申請者による研究成果は、大統一理論のモデルを制限するものであり、素粒子物理学の研究の発展に貢献する新しい知見である。以上により、本論文が博士（理学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。