

論文審査の結果の要旨

氏名 竹中彰

素粒子の標準モデルは電弱相互作用と強い相互作用で構成されているが、1998年のニュートリノ振動の発見により、標準モデルを超える現象が存在することが判明した。次のステップとして、電弱相互作用と強い相互作用を統一的に記述する素粒子の大統一理論の検証が宇宙線・素粒子実験物理学の最重要課題の一つとなっている。素粒子の大統一理論は、標準モデルでは起こりえない陽子崩壊を予言する。

本論文は、5万トンの水チェレンコフ型観測装置スーパーカミオカンデ検出器で取得された観測データ（観測期間は1996年から2018年まで、6,000日以上に及ぶ450 kton・year）を用いた陽子崩壊($p \rightarrow e^+\pi^0$ 及び $p \rightarrow \mu^+\pi^0$)の探索に関する研究である。

本論文は8章からなり、第1章は導入部、第2章は動機と共に素粒子の標準モデル、大統一理論に関する記述、陽子崩壊探索の現状、第3章はスーパーカミオカンデ検出器のハードウェア構成詳細と測定器の校正、第4章は陽子崩壊信号及び雑音となる大気ニュートリノ事例に関するモンテカルロシミュレーションの詳細、第5章は膨大な宇宙線観測データから（陽子崩壊事例候補や大気ニュートリノ事例が主成分である）fully contained 事例データセットを作成するデータリダクション方法、それによる陽子崩壊候補や最終的な雑音となる大気ニュートリノ事例の検出効率に関する詳細、第6章はfully contained 事例データセットに関して、事例に含まれる各チェレンコフリングを電子型[電磁シャワーを起こす不鮮明なチェレンコフリング]またはミューオン型[電磁シャワーを起こさないので鮮明なチェレンコフリング]に選別し、事例としての発生位置、全不変質量、全運動量を再構成する方法の詳細、スーパーカミオカンデ検出器のエネルギースケールの様々な不定性に関する議論等、第7章は陽子崩壊探索の結果、系統誤差の評価に関する詳細、大統一理論との比較、将来への展望、第8章は結論について述べている。

スーパーカミオカンデ検出器は、高速荷電粒子が水中で発するチェレンコフ光を約11000本の直径20インチ光電子増倍管で検出し、その電荷及び時間情報からチェレンコフリングを引き起こした粒子を識別し、そのエネルギー、方向、

発生場所を算出するリアルタイム計測実験である。本論文で対象にしている陽子の崩壊モードは $p \rightarrow e^+\pi^0$ および $p \rightarrow \mu^+\pi^0$ の 2 つである。例えば、前者はスーパーカミオカンデ検出器の内部（実効質量内）で、1 個の 0.5 GeV 程度の電子の引き起こす電子タイプのチェレンコフリングと、それと正反対の方向に出る中性パイ中間子が 2 本のガンマ線に崩壊して作る 1 個あるいは 2 個の電子型チェレンコフリングとして観測され、ミュー粒子崩壊信号は観測されない。つまり、その事例再構成後の全質量は約 1 GeV（陽子質量）、全運動量は大気ニュートリノ事例と異なりかなり小さいことが一番の特徴である。論文提出者は、陽子崩壊探索感度を向上するために、従来解析では検出器の壁から 2 m 内側であった 22.5 kton の実効質量を壁から 1m 内側までの 27.2 kton に初めて拡張することに成功した。実効質量を壁に近づけると様々な効果の評価を詳細に見積もらねばならないために、今までグループでは逡巡していたが、論文提出者は検出効率、様々な装置性能やそれらの系統誤差の評価を行い、実効質量の約 20 % の拡張に成功した。また、論文提出者は独自に粒子識別能力を向上する解析方法を考案し、それにより陽子崩壊信号の検出効率を拡張領域で約 20 % 改善した。これらの改善を取り入れた解析を行い、陽子崩壊信号を探索したところ、

$$\tau/B(p \rightarrow e^+\pi^0) > 2.4 \times 10^{34} \text{ years} \quad (\text{観測事象 0, 期待背景事象 0.59})$$

$$\tau/B(p \rightarrow \mu^+\pi^0) > 1.6 \times 10^{34} \text{ years} \quad (\text{観測事象 1, 期待背景事象 0.94})$$

という結果を得た。大気ニュートリノ事例から期待される背景事例を統計的に有意に超過する事例は観測されなかったが、90 % の信頼度で与えられたこれらの寿命の下限値は過去のスーパーカミオカンデ実験が持つ世界記録を 1.5 から 2 倍程度上回る世界で一番厳しい制限であり、論文提出者を第一著者として *Physical Review D* 102, 112011 (2020) に公表済みである

以上のように、本論文はスーパーカミオカンデ検出器を用いて陽子崩壊 $p \rightarrow e^+\pi^0$ 及び $p \rightarrow \mu^+\pi^0$ の寿命に関して世界最高の下限値を与える研究であり、宇宙線・素粒子実験物理学に大きく貢献するものである。

なお、本論文の実験はスーパーカミオカンデ実験という大きなグループ実験であるが、論文提出者が主体となって検出器の実効質量を 20 % 拡張（他の解析にも利用可能）し、また粒子識別能力の改良を通じて陽子崩壊信号の検出効率を改善したことにより初めて可能となった成果であり、論文提出者のスーパーカミオカンデ実験及び論文に関する寄与が十分であると判断した。また、共同実験代表者から論文内容の結果を学位論文として提出することについて了承を得ているものであることを確認した。

従って、審査員一同は博士（理学）の学位を授与できると認める。