

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                       |         |          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------|
| 氏名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 酒井 聖矢                                                                                                                                                                                                                                                                 |         |          |
| 授与した学位                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 博 士                                                                                                                                                                                                                                                                   |         |          |
| 専攻分野の名称                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 理 学                                                                                                                                                                                                                                                                   |         |          |
| 学位授与番号                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 博甲第                                                                                                                                                                                                                                                                   | 7 0 4 1 | 号        |
| 学位授与の日付                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2 0 2 4 年 3 月 2 5 日                                                                                                                                                                                                                                                   |         |          |
| 学位授与の要件                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 自然科学研究科 数理物理学専攻<br>(学位規則第 4 条第 1 項該当)                                                                                                                                                                                                                                 |         |          |
| 学位論文の題目                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Measurement of the neutrino-oxygen neutral-current quasielastic cross section and study of nucleon-nucleus interaction model using atmospheric neutrino data in the SK-Gd experiment<br>(SK-Gd 実験における大気ニュートリノデータを用いたニュートリノ-酸素原子核中性カレント準弾性散乱反応断面積の測定および核子-原子核反応モデルの研究) |         |          |
| 論文審査委員                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 教授 石野宏和                                                                                                                                                                                                                                                               | 教授 横谷尚睦 | 准教授 吉見彰洋 |
| 学位論文内容の要旨                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                       |         |          |
| <p>2020 年 7 月、スーパーカミオカンデ(SK)に質量濃度 0.011%のガドリニウム(Gd)を導入し、超新星背景ニュートリノ(DSNB)の世界初観測を目標とする SK-Gd 実験を開始した。SK-Gd 実験の DSNB 探索における主な背景事象の 1 つに大気ニュートリノと酸素原子核による中性カレント準弾性散乱(NCQE)反応がある。この NCQE 事象を正確に見積もるためには中性子と酸素原子核の反応(二次反応)によって発生する脱励起ガンマ線の数やエネルギー、中性子の数を理解しなければならない。これまで SK 実験では GEANT3 ベースの SK 検出器シミュレーションを使用していたため、使用できる二次反応モデルは Bertini Cascade Model(BERT)しか無かった。しかし近年、Geant4 ベースの SK 検出器シミュレーションが開発されたことにより、Binary Cascade Model(BIC)や Liège Intranuclear Cascade Model(INCL++)といった様々なモデルの比較が可能となった。そこで今回、552.2 日分の Gd 質量濃度 0.011%の観測データから NCQE 事象を選別し、二次反応モデルの比較および大気ニュートリノ-酸素原子核 NCQE 反応断面積の測定を行った。まず、3 つの二次反応モデルについて、再構成チェレンコフ角度分布、再構成エネルギー分布、中性子の数分布の比較を行った。その結果、どの分布でも BIC と INCL++で使用されている蒸発モデルが観測データをより再現することを示唆した。また、観測データを用いて NCQE 反応断面積を測定した結果、理論予測値および先行研究の結果と誤差の範囲内で一致した。現在 SK 検出器には質量濃度 0.03%の Gd が導入されており、中性子同定効率 は Gd 質量濃度 0.011%時点での 35.6%から 63%まで上がると予想されている。その場合、同じ観測期間でも統計量は Gd 質量濃度 0.011%の時と比べて約 1.4 倍になると予想される。現在 Gd 質量濃度 0.03%のデータは約 1 年半取得されており、今後約 3 年観測を続けることで蒸発モデルを確定し、NCQE 反応断面積の系統誤差を大幅に削減できると期待される。</p> |                                                                                                                                                                                                                                                                       |         |          |

## 論文審査結果の要旨

太陽の 8 倍以上の質量を持つ恒星はその寿命の最後に超新星爆発を起こす。その際、核融合反応に伴い生成された重元素とともに、大量のニュートリノが放出される。宇宙 130 億年以前に最初の星ができて以来、宇宙の中でそのような現象は幾度と起き、ニュートリノが宇宙に貯められた。そのニュートリノを超新星背景ニュートリノ(DSNB)と呼ぶ。DSNB はその存在が予言されているが、まだ直接観測に成功した例はない。もし発見されると、宇宙が生まれて以来の超新星爆発の歴史がわかり、我々人間の体を作っている元素が宇宙でどのように造られてきたのかがわかる可能性がある。DSNB を捉えるために、純水 5 万トンからなる世界最大であるスーパーカミオカンデ検出器(SK)を用いる。DSNB のうち、反電子ニュートリノは水との反応により、陽電子とともに中性子を放出する。その両方を検出できれば、背景事象を抑制でき、DSNB に対する感度を改善できる。そこで、SK は、2020 年に元素中最大の熱中性子捕獲断面積を有する Gd を導入した。酒井氏は、Sk-Gd において、大気ニュートリノデータを用いたニュートリノ酸素原子核中性カレント準弾性散乱断面積を測定した。また、大気ニュートリノと水との反応によって生じる高速中性子の 2 次的相互作用モデルの選別の手法を提案した。これらの成果は、DSNB 測定の系統誤差を軽減する上で重要な研究成果と認められる。酒井氏は、Q1 ジャーナルである Phys. Rev. D に上記研究内容で第一著者として論文出版している。また、審査会における発表と質疑応答は適切に与えられた。以上から、酒井氏の業績は博士の学位に相当するものとし、合格と判定する。