

氏名（本籍） <sup>しの</sup> 篠 <sup>き</sup> 木 <sup>まさ</sup> 正 <sup>たか</sup> 隆（兵庫県）  
学位の種類 博士（理学）  
学位記番号 甲第1322号  
学位授与の日付 2024年3月18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 **Measurement of Cosmic-Ray Muon Spallation Products in Super-Kamiokande with Gadolinium Loaded Water**  
(ガドリニウム含有水を用いたスーパーカミオカンデにおける宇宙線ミュオン核の核破砕反応による生成物の測定)

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  
教授 小笠原 宏 教授 木村 真一

## 論文内容の要旨

宇宙線の大気中での反応により生成される高エネルギーのミュオンは宇宙線ミュオンと呼ばれる。地表に到達した宇宙線ミュオンは物質中での相互作用により原子核を破砕し、多数の中性子や放射性同位体を生成する。これらは、地下実験でのニュートリノ観測を始めとする稀な事象の探索における主なバックグラウンドとなる。本論文では、スーパーカミオカンデ検出器の観測データを解析し、宇宙線ミュオン起源の中性子および ${}^9\text{Li}$ の測定を行った結果について述べる。

スーパーカミオカンデ検出器は地下1,000 mに設置された水チェレンコフ検出器であり、円筒形タンクの内部に5万トンの超純水が満たされている。2020年には、水中にガドリニウムを添加し、スーパーカミオカンデ・ガドリニウム実験（SK-Gd 実験）が開始した。ガドリニウムは中性子捕獲反応によりガンマ線を放出するため、このガンマ線を検出することにより中性子が同定される。SK-Gd 実験の主な目的として、宇宙に恒星が誕生して以来発生してきた超新星から放出され、現在も宇宙を満たしているニュートリノ（超新星背景ニュートリノ）の初観測が挙げられる。この観測では、反電子ニュートリノと水中の陽子の反応で生成された、陽電子と中性子を検出する ( $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ )。スーパーカミオカンデ検出

器中での超新星背景ニュートリノの反応は年に数回程度しか起こらないと考えられており、陽電子による信号のみでは環境放射線などと区別できないが、陽電子と中性子捕獲反応による連続信号を選別することで、バックグラウンドを大幅に抑えることができる。超新星背景ニュートリノの観測が実現すれば、得られたエネルギースペクトルを既存の理論モデルと比較することで、超新星の発生頻度や爆発機構への理解が進展する。

SK-Gd 実験で超新星背景ニュートリノを検出するためには、長期間に渡り安定して観測を続ける必要がある。本研究では、宇宙線ミュオンが検出器の水中で生成する中性子を利用し、ガドリニウムによる中性子捕獲反応が検出器内で一様かつ安定して検出されていることを実証した。これはガドリニウム濃度が検出器中で一定であり、経年変化が起きていないことを示している。本研究で確立した手法は、観測と並行した検出器安定性の監視を可能にするものであり、超新星背景ニュートリノの発見に繋がる成果である。さらに本研究では、宇宙線ミュオン起源の中性子生成率を測定した。地下実験における MeV 以下のエネルギースケールの測定では、ミュオン起源の中性子およびその散乱で発生する反跳原子核がバックグラウンドとなる。特にハドロンの生成や散乱過程の計算には不定性が大きく、シミュレーションによる正確な見積もりが難しいため、現状では中性子生成率の測定結果をもとにモデル化する試みがなされている。従って、中性子生成率を実験で測定することが重要である。本研究では、中性子生成率の測定結果として  $(2.76 \pm 0.02 \text{ (stat.)} \pm 0.19 \text{ (syst.)}) \times 10^{-4} \mu^{-1} \text{g}^{-1} \text{cm}^2$  を得た。これは水標的を用いた測定としては二例目である。また、飛来するミュオンのエネルギー分布は検出器の位置する深さに依存するが、今回の測定は炭素標的を用いたカムランド検出器の近傍で行われたものであり、同じ深さで異なる標的により中性子生成率を測定した初めての例である。本研究結果は、宇宙線ミュオンによる物質中での中性子生成の系統的な理解に寄与する重要な知見である。

さらに、本研究では超新星背景ニュートリノの主要なバックグラウンドである  ${}^9\text{Li}$  のエネルギースペクトルを測定した。ミュオンの核破砕反応で生成される  ${}^9\text{Li}$  は 0.26 秒の寿命でベータ崩壊し、電子と中性子を放出する。超新星背景ニュートリノの反応では陽電子と中性子が発生するが、スーパーカミオカンデ検出器では電子と陽電子を識別できないため、 ${}^9\text{Li}$  の崩壊と超新星背景ニュートリノによる反応は区別できない。そのため、 ${}^9\text{Li}$  は低エネルギー領域における超新星背景ニュートリノ探索の主要なバックグラウンドとなる。本研究では、電子と中性子捕獲の連続信号を検出することにより宇宙線ミュオン起源の  ${}^9\text{Li}$  によるベータ崩壊事象を選別し、放出された電子のエネルギースペクトルを測定した。従来の純水でのスーパーカミオカンデでは 8 MeV 以上の領域のみで測定されていたが、本研究ではガドリニウム含有水でのデータを解析し、その下限値を 4.5 MeV まで引き下げての測定を実現した。宇宙膨張による赤方偏移の効果により、超新星背景ニュートリノのフラックスは低エネルギー側で大きいと予測されているが、この測定結果および本研究で開発した低エネルギー領域での解析手法は、超新星背景ニュートリノの測定感度の向上に寄与する研究成果である。

## 論文審査の結果の要旨

宇宙初期から現在に至るまでに発生した超新星から放出されたニュートリノは、現在も宇宙を漂っていると予測されている。これは超新星背景ニュートリノと呼ばれる。2020年には超新星背景ニュートリノの観測を主目的として、スーパーカミオカンデの超純水にガドリニウムを添加する改良が施されている。ガドリニウムを添加することにより、ニュートリノ反応で発生する中性子の検出効率が大幅に向上する。

本論文では、ガドリニウム含有水を用いたスーパーカミオカンデの観測データを解析し、宇宙線ミュオン起源の中性子およびリチウムの放射性同位体を測定した結果を報告している。

第1章では、研究の背景として、素粒子物理学の標準理論、超新星の爆発メカニズム、超新星によるニュートリノ放出、超新星背景ニュートリノとその観測の意義、宇宙線ミュオンに関わる物理現象などを説明している。

第2章では、研究の動機と論文の構成を説明している。申請者はスーパーカミオカンデに飛来するミュオンに着目し、検出器中での核破砕反応により発生した中性子および不安定核種の測定を研究課題としている。本章では、これらの測定が超新星背景ニュートリノの探索感度の向上に繋がる研究課題であることが説明されている。

第3章には、測定に用いた実験装置であるスーパーカミオカンデ検出器、および、その測定原理が記述されている。ガドリニウムを添加することによる、検出器の改良についても説明されている。

第4章では、検出器キャリブレーションについて述べられている。特に、中性子源を用いたキャリブレーションは、宇宙線ミュオン起源の中性子による測定と相補的な関係にあり、本論文でも比較による測定結果の検証が行われている。

第5章では、観測データから荷電粒子（電気を帯びた粒子）の発生点や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。

第6章から第8章は、本論文の中心に位置づけられる内容であり、データ解析の手法と測定結果を説明している。第6章では、宇宙線ミュオン起源の中性子を選定するデータ解析の手法を説明し、検出器中での中性子の分布、中性子の発生からガドリニウムによる吸収反応までに要する時間分布などの測定結果が示されている。これらの測定結果は、改良後のスーパーカミオカンデによる中性子検出効率の向上を実証するものである。申請者の開発した手法は、中性子の検出性能を常時監視することにより、長期に渡る安定した観測の実現に寄与する研究成果である。

第7章では、さらに研究を進展させ、ミュオンの核破砕反応による中性子生成率の測定結果を示している。検出器中で発生した中性子は、稀な現象を探索する素粒子物理学実験においてバックグラウンドの要因となるが、中性子や原子核などのハドロンの散乱の計算には不定性が大きく、シミュレーションによる見積もりが困難とされている。

この測定結果は、宇宙線ミュオンによる核破碎反応の系統的な理解に寄与する研究成果である。

第8章では、中性子の検出により、リチウム9のベータ崩壊を特定し、崩壊により発生したベータ線のエネルギースペクトルの測定結果を報告している。リチウム9のベータ崩壊は超新星背景ニュートリノの逆ベータ崩壊反応と類似しているため、特に低エネルギー領域での主要なバックグラウンドとなっている。申請者は、この測定結果と新たに開発した低エネルギー領域の解析手法により期待される、超新星背景ニュートリノの探索感度の向上についても説明している。

本論文では、ガドリニウム含有水を用いたスーパーカミオカンデの観測データを解析し、宇宙線ミュオンの核破碎反応により生成される中性子およびリチウムの放射性同位体を測定した結果をまとめている。これらの測定結果は、改良後のスーパーカミオカンデによる中性子検出効率の向上を実証し、核破碎反応の理解に繋がる新たな知見を与えるものである。さらに、申請者の開発した解析手法により、超新星背景ニュートリノの探索範囲を低エネルギー領域まで広げ、バックグラウンド混入量の不定性を抑えることで、探索感度が向上することを示している。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。