

氏 名	原田 将之		
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	6 9 2 7	号
学位授与の日付	2 0 2 3 年	9 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 (学位規則第4条第1項該当)		
学位論文の題目	Development of Neutron Tagging Algorithm and Search for Supernova Relic Neutrino in SK-Gd Experiment (SK-Gd 実験における中性子同定手法の開発と超新星背景ニュートリノの探索)		
論文審査委員	教授 吉村 浩司	教授 岡田 耕三	准教授 吉見 彰洋
学位論文内容の要旨			
超新星爆発機構を理解するためには、爆発で放出されるエネルギーの約 99%を持ち出すニュートリノの観測が必要不可欠となっている。そこで、宇宙開闢以来起こってきた超新星で生成されたニュートリノのフラックスである超新星背景ニュートリノ(SRN)の観測が待望されている。この詳細観測により、超新星爆発機構のみならず、宇宙の元素合成や星形成の歴史など、宇宙の進化に対する理解が格段に進む。本研究では、Super-Kamiokande 検出器で SRN を観測するために始まった新実験である SK-Gd 実験のデータを用いた最初の SRN 探索を行った。 Super-Kamiokande(SK)検出器は直径 39.3 m、高さ 41.4 m の円柱タンクに蓄えられた 5 万トンの超純水をニュートリノ標的としたニュートリノ検出器である。ニュートリノ反応で生成された荷電粒子が媒質中を移動する際に放出されるチェレンコフ光を内水槽壁面に設定された 11,129 本の光電子増倍管(PMT)で検出することで、間接的にニュートリノを観測することが可能である。 SK 実験では数~数十 MeV の反電子ニュートリノの逆ベータ崩壊 ($\text{IBD: } \bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$)の反応で生成される陽電子信号と、中性子が原子核に捕獲されることで放出する遅延ガンマ線信号の組み合わせを用いて SRN を探索している。純水では中性子信号は水素原子核による中性子捕獲で生成される 2.2 MeV のガンマ線であり、エネルギーの低さから検出効率は 20%と小さく、観測感度が制限されていた。そこで、中性子検出効率を向上させ、SRN 検出感度を高めるために、2020 年 8 月に SK-Gd 実験が始まった。SK-Gd 実験ではガドリニウム(Gd)を SK 検出器の超純水に導入することで、捕獲反応で生成される合計 8 MeV のガンマ線を高感度で検出することが可能である。 本研究では Gd による信号を検出するための新しい中性子同定手法を開発し、その手法を検出器シミュレーション(MC)に対して用いることで SK-Gd 実験で中性子検出効率を見積もった。また、Am/Be 中性子線源を用いた測定を SK-Gd 実験において初めて行い、検出効率における系統誤差を約 8%と見積もった。 開発した手法を用いて、SK-Gd 実験 552 日の観測データを用いて、8-30 MeV の領域で最初の SRN 探索を行なった。このエネルギー領域で考えられるバックグラウンドの除去方法を決定し、MC を用いてバックグラウンドを見積もった。見積もったバックグラウンドと観測データとを比較した結果、1.1σでバックグラウンドと観測が一致した。この結果より、SRN フラックスに上限値を設定した。SK-Gd 実験は中性子検出率が向上し、世界で最も感度が高い実験であることを示した。また、将来感度の見積もりから、超新星後にブラックホールを形成する割合について、場合によっては SRN フラックスの上限値から検証できることを示した。			

論文審査結果の要旨

超新星背景ニュートリノ (SRN) は、宇宙の開闢以来起こってきた超新星により生成されたニュートリノが蓄積し重ねあわさったものである。Super-Kamiokande(SK) 検出器の水にガドリニウムを加えてニュートリノ反応から生成する中性子を効率よく検出することで、SRN の探索感度を飛躍的に高めた SK-Gd 実験が行われている。

原田氏は、SK-Gd 実験において新しい中性子同定方法を開発し、検出器シミュレーション (MC) によってその性能を検証するとともに、Am/Be 中性子線源を用いた中性子検出システムを開発して、実際に SK-Gd 実験に用いて中性子の同定に成功した。これは水チェレンコフ検出器においてガドリニウムを用いた中性子を同定した初めての例である。

この手法を実際の観測データに適用し、SK-Gd 実験において SRN 探索を初めて行った。データ解析は原田氏が中心になって行い、エネルギー領域に応じてバックグラウンドを除去した結果有意な信号が得られず、90%の信頼度での SRN のフラックスの上限値を得た。この結果は従来の先行実験と比較すると、約 5 分の 1 の観測期間で同等の結果が得られており、SK-Gd 実験の感度の高さを証明するものである。この後 10 年間観測を続けることにより、理論モデルの制限にも用いることができることを示した。

以上のように、原田氏はSK-Gd実験に中心メンバーとして様々な貢献をするとともに、SK-Gdの初めてのSRN探索の主要な解析を行い、その結果をApJ Letterに第一著者としてまとめ、大きな成果をあげている。

本審査会の発表、質疑応答においても、論文内容を明瞭に報告し、すべての質疑において的確に応答したことから、原田氏が本研究全般を主導してきたことが窺える。

これらのことから、本審査委員会は、この論文は博士の学位に値すると認める。