

氏名	森 俊彰
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5140号
学位授与の日付	平成27年 3月25日
学位授与の要件	自然科学研究科 先端基礎科学専攻 (学位規則第5条第1項該当)
学位論文の題目	Development of A Gadolinium-doped Water Cherenkov Detector for The Observation of Supernova Relic Neutrinos (超新星背景ニュートリノ探索のためのガドリニウム添加水チェレンコフ検出器の研究)
論文審査委員	教授 作田 誠 准教授 石野 宏和 准教授 小汐 由介 教授 吉村 浩司

学位論文内容の要旨

宇宙の始まりから現在まで宇宙で発生した数多くの超新星爆発から放出されたニュートリノを超新星背景ニュートリノ (Supernova Relic Neutrinos:SRN) と言う。この SRN を観測することができれば、超新星爆発の歴史や宇宙の歴史を検証することができる。スーパーカミオカンデ(SK)実験は反電子ニュートリノが陽子と反応し生成した陽電子のチェレンコフ光を検出することで SRN を探索し SRN に対して世界一の制限値を持っている。しかし SRN 信号がバックグラウンド埋もれてしまい SRN の発見には至っていない。そこで SK 検出器の純水にガドリニウム(Gd)を添加させることによって、陽電子と一緒に放出される中性子を捕獲する機能を付加させること計画している。Gd は中性子を捕獲する断面積が大きく、そして総エネルギー約 8MeV のガンマ線を放出する。このガンマ線と陽電子信号を遅延同時計測することによって SRN 信号を同定しバックグラウンドと区別化し、世界初の SRN 検出を目指している。

現在、この計画実現のため EGADS 実証実験を行っている。本論文は世界初の Gd 添加水チェレンコフ検出器 EGADS の構築によって同時遅延測定の実証・性能評価、そして SK 検出器で試験測定した Gd ガンマ線のデータ解析による Gd 添加 SK 検出器の性能評価を行い、それを基に SRN に対する感度を評価した。

EGADS 検出器による Gd ガンマ線の測定のため中性子線源を用いた擬似反電子ニュートリノ反応測定を行った。Gd ガンマ線信号の検出効率は(中性子の捕獲確率×Gd ガンマ線の再構成確率)で求められる。検出効率は 0.0115%、0.0230%Gd₂(SO₄)₃ 濃度でそれぞれ 22.7±0.7%、35.2±1.0%と求めた。またバックグラウンド混入率(400μsec 時間幅)は各濃度でそれぞれ 1.2±0.3%、1.1±0.3%と求めた。

SK 検出器内での性能評価のため、同じ中性子線源と Gd 溶液で満たされた小容器を用いて SK 検出器内でデータを取得した。EGADS と同様の解析を行い Gd ガンマ線信号の再構成確率、偶発的バックグラウンドの混入率(35μsec 時間幅)をそれぞれ 88.0±2.0%、(8±2)×10⁻³%と求めた。これらの解析を基にしたシミュレーションにより Gd 添加 SK 検出器で SRN 探索を行った場合、10年間の観測で宇宙線起因の偶発的なバックグラウンドの影響を受けず 16-30 個の SRN 信号が観測できると評価した。この予測値は SRN の理論モデルによって変わるが、理論モデルの違いなども議論できる統計量が期待できる。

また本論文では現在の SK の SRN 解析結果における重要なバックグラウンドの一つでもあるニュートリノ酸素原子核中性カレント(NCQE)反応によるガンマ線生成反応断面積についても議論している。この反応はニュートリノが酸素原子核と反応した際、酸素原子核が 10-30MeV に励起され核子を放出し、その際に ¹⁵O、¹⁵N からガンマ線を放出する反応である。本研究では(NCQE 反応断面積×ガンマ線放出確率)という導出過程によりガンマ線生成反応断面積を求めた。この計算結果は世界初であった。

論文審査結果の要旨

恒星の中で太陽質量の約8倍以上のものは進化の過程で重力崩壊し、大爆発(超新星爆発)を起こす。その約10秒間にニュートリノが爆発の総エネルギーの99%を持ち去る。そのためニュートリノは今でも謎である爆発機構を解明する鍵である。宇宙創成以来では約一秒に一回に起こると予想される超新星爆発から放出されたニュートリノを超新星背景ニュートリノ(SRN)と言う。このSRNを観測することは星形成や超新星爆発の過程で合成される重元素の歴史を研究することができる。

スーパーカミオカンデ(SK)実験では、検出器の純水にガドリニウム(Gd)を溶解させることによって、反電子ニュートリノが水と反応後に生成される陽電子だけでなく中性子を検出する機能を付加することが計画されている。Gdは中性子を捕獲後、総エネルギー約8MeVのガンマ線を放出する。このガンマ線と陽電子信号を遅延同時計測することによりSRN信号を同定しバックグラウンドを減らし、世界初のSRN発見を目指している。

本論文は世界初の200トンのGd添加水チェレンコフ検出器EGADSの建設によって同時遅延測定の実証・性能評価を行うだけでなく、SK検出器で試験測定したGdガンマ線のデータ解析によるGd添加SK検出器の性能評価を行い、それを基にSRNに対する感度を定量的に評価した。これらの解析を基にした計算評価によりGd添加SK検出器でSRN探索を行った場合、10年間の観測で宇宙線起因の偶発的なバックグラウンドの影響を受けず16-30個のSRN信号が観測できると評価した。この実証実験は世界初であり、世界が注目する革新的開発である。この業績は共同研究であるが、彼は検出器の建設、データ収集、光センサーの較正、計算の整備、SKでの検証実験の遂行、データ解析等、本質的な貢献をした。また本論文では現在のSKのSRN解析結果における重要なバックグラウンドの一つでもあるニュートリノ酸素原子核中性カレント反応によるガンマ線生成反応断面積についても世界で初めて計算した。

以上により本審査委員会は、本論文が岡山大学自然科学研究科博士論文に十分値すると判断した。