

論文審査の結果の要旨

氏名 上野 昂

T2K (Tokai to Kamioka) 実験からのニュートリノビーム (エネルギーは 0.6 GeV 程度) を 295 km 離れた 5 万トンの水チェレンコフ型検出器スーパーカミオカンデに照射した際に、中性カレント反応により励起された酸素原子核が脱励起して放出されるガンマ線を検出することに世界で初めて成功した。その実験結果を予想値と比較することにより、sterile neutrino 振動のパラメーターに制限を与えた。また、本実験結果を踏まえ、今後の T2K 実験から期待される統計量を想定すると、宇宙開闢から現在までの超新星爆発起源のニュートリノの重畳 (supernova relic neutrino) を探索する感度が飛躍的に向上することを示した。

本論文は 10 章からなり、第 1 章は導入部としてニュートリノの性質やニュートリノ振動に関する記述及びニュートリノ観測実験のレビュー、第 2 章は T2K 実験の概要及びニュートリノビーム生成や near detector 設備、第 3 章はスーパーカミオカンデ検出器によるニュートリノ信号検出原理とハードウェア構成詳細、第 4 章は低エネルギー事象再構成ソフトウェアに関する説明、第 5 章は検出器の時間・エネルギースケール等の校正方法、第 6 章はモンテカルロシミュレーションの詳細、第 7 章はデータ解析手法、特に中性カレント反応起源脱励起ガンマ線の雑音となる事象の除去ソフトウェア、第 8 章は世界初の実験結果として得られた中性カレント反応起源脱励起ガンマ線事例の様々な分布の吟味、第 9 章は実験結果の系統誤差の見積もりに関する詳細及び sterile neutrino を仮定したニュートリノ振動解析結果や素粒子・宇宙線物理学への波及効果 (supernova relic neutrino 探索感度の向上)、第 10 章は結論について述べている。

T2K 実験からのニュートリノがスーパーカミオカンデ検出器中の水に含まれる酸素原子核と中性カレント反応を起こして励起された酸素原子核は数本 (全エネルギーは 10 MeV 程度) のガンマ線を放出して脱励起する。そのガンマ線にコンプトン散乱された水中の軌道電子が発するチェレンコフ光を 11129 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事例のエネルギー及び方向を算出するリアルタイム計測実験である。観測期間は 2010 年 1 月か

ら 2011 年 3 月、 1.43×10^{20} protons on targets である。雑音除去を行った結果、4MeV-30MeV のエネルギー範囲に 20 事例の中性カレント脱励起ガンマ線反応を世界で初めて検出（データ中に含まれる雑音は 0.6 事例）することに成功し、実験結果はモンテカルロシミュレーションの予想値 22.8 ± 6.2 事例と良く合うことが判明した。

その実験結果と予想値を比較することにより、通常の 3 flavor neutrino model に 1 種類の sterile neutrino を加えたモデルに 2 つのケースを仮定したニュートリノ振動解析を行い、振動パラメーターに制限 ($\theta_{34} < 58^\circ @ 90\% \text{C.L.}$ 及び muon neutrino が sterile neutrino に消える割合 $< 0.58 @ 90\% \text{C.L.}$) を与えた。

近い将来にガドリニウムをスーパーカミオカンデ検出器に溶解して supernova relic neutrino を検出する計画が進行中であるが、その際に究極の雑音となるのが大気ニュートリノによって引き起こされる中性カレント脱励起ガンマ線事例である。T2K 実験のニュートリノビームエネルギーは約 0.6GeV で、大気ニュートリノのエネルギーと酷似している。従って、本研究で検出された T2K ニュートリノビームによる中性カレント脱励起ガンマ線事例を用いることにより、大気ニュートリノによる中性カレント脱励起ガンマ線による雑音頻度を直接的に見積もることが可能となる。T2K 実験の最終統計量は本論文で用いられたデータ量の約 50 倍 (0.75MW で 5 年間の実験期間) であり、それらを用いることにより、大気ニュートリノによる雑音頻度の誤差を 10% 程度に押さえ込めることを示した。その結果、ガドリニウムを溶解したスーパーカミオカンデ検出器を約 10 年間稼働させることにより、supernova relic neutrino を 3σ レベル以上の有意性で検出できる道を切り拓いたことになる。

以上のように、本論文は T2K 実験のニュートリノビームをスーパーカミオカンデ検出器に照射することにより、中性カレント起源脱励起ガンマ線事象を世界で初めて検出した結果に関する研究であり、宇宙線物理学および素粒子実験物理学に大きく貢献するものである。したがって、審査員一同は本論文が博士（理学）の学位論文として合格であると判定した。なお、本論文の実験は T2K+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実験のキーポイントとなるシミュレーションコードや低エネルギーでの雑音を除去する解析ツールの開発を行うと共にスーパーカミオカンデ検出器の校正を行った。これらの貢献により、中性カレント起源脱励起ガンマ線事例を世界に先駆けて観測することが可能となり、その波及効果として世界がその検出を心待ちにしている supernova relic neutrino の観測を射程距離に捕らえることとなった。従って、論文提出者の両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。