



Solar neutrino measurement in Super-Kamiokande-IV

Hasegawa, Makoto

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2019-03-25

(Date of Publication)

2024-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7435号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007435>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 長谷川 誠

専 攻 物理学

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

Solar neutrino measurement in Super-Kamiokande-IV

(スーパーカミオカンデIVにおける太陽ニュートリノ測定)

指導教員 竹内 康雄

標準太陽模型 (Standard Solar Model : SSM) は太陽の構造や太陽内または周辺で起こっている反応をこれまでうまく記述していた。太陽ニュートリノの生成過程や地球上で観測されるニュートリノフラックスもまたSSMによって予想されていた。太陽ニュートリノは太陽の中心核における核融合反応によって生成された電子ニュートリノのことである。しかしながら、地球上における太陽ニュートリノ実験で観測されたそのニュートリノフラックスはSSMでの予想値よりも少なく、太陽ニュートリノ問題と呼ばれた。それは素粒子物理学における標準模型でも説明できないものだった。

一方、その標準模型を超えた枠組みの中でニュートリノが質量を有することによるニュートリノ振動により、その太陽ニュートリノフラックスの欠損が説明できると考えられた。それは太陽ニュートリノの場合、電子ニュートリノがミューニュートリノやタウニュートリノなど他のフレーバーのニュートリノへ遷移するニュートリノ振動によって説明できるというものである。その後、太陽ニュートリノにおけるニュートリノ振動は様々な太陽ニュートリノ観測実験によって実証され、さらに他のフレーバーのニュートリノにおいてもニュートリノ振動が確認された。

しかし、太陽ニュートリノ振動における物質効果 (MSW効果)から予想されるスペクトラムの歪みは、まだ発見に至るまでの精度で観測されていない。MSW効果とは、ニュートリノが太陽や地球など比較的高密度の物体の内部を通過する際、そこに含まれる電子から影響を受けることで真空中でのニュートリノ振動より強く振動することである。そのスペクトラムの歪みが有意に発見されなかった場合、物質効果は他の理論によって説明される可能性がある。また、振動パラメータの一つであるニュートリノの質量差 (Δm^2_{21})がニュートリノ実験と反ニュートリノ実験 (KamLAND実験)の間で 2σ 程度の差 (tension)を持つことが懸念されている。反ニュートリノとニュートリノで振動パラメータが有意に異なる場合、CPT対称性の破れなど新しい物理の発見に繋がる可能性がある。

これらの残存している問題は、スーパーカミオカンデ (SK)における太陽ニュートリノ観測の主な目的となっている。SKは純水を用いたチェレンコフ光検出器としては世界最大の22.5 ktonの有効体積を持ち、MeV領域の太陽ニュートリノの検出において十分なエネルギー分解能と世界一の統計量を有する。SKは円筒型のタンク内に純水、壁面に約11,100個の光電子増倍管を設置した検出器である。SKは1996年4月以降、SK-I~SK-IVまで4つの

長谷川 誠 : NO.2

phaseで実験を行っている。

SKの太陽ニュートリノ解析ではニュートリノと水中の電子の弾性散乱によって発生するチェレンコフ光を観測ターゲットとしている。その検出情報からイベントの反応点の位置、反跳電子の飛来方向やエネルギーを再構成している。本研究では、SK-IVで取得した2008年10月から2017年12月末までの約2860日分のデータを用いて太陽ニュートリノ解析を実施する際、MSW効果の高精度な観測をするため、太陽ニュートリノ解析におけるエネルギースケールの改良と系統誤差の再見積りをした。エネルギースケールの改良としては、PMT(光電子増倍管)ゲインやダークレートが増加することによるエネルギースケールの系統誤差の増加が懸念されたため、太陽ニュートリノ事象の再構成プログラムにそのゲイン補正を取り入れた。また、その改良した解析ソフトを用いて電子LINAC(Liner accelerator) 較正試験によるエネルギースケールの確認をした。その結果、ニュートリノフラックスにおける総系統誤差は1.6%と見積もることができた。

本論文では、そのSK-IVで取得した2,860日分のデータを含めた全てのphase(5,695日分)のSKデータとその他の太陽ニュートリノ実験の結果を含めてニュートリノフラックスと振動パラメータの計算を行った。SK-IVのみのデータセットから得られたエネルギー領域 3.5 - 20.0 MeVにおけるニュートリノ振動を仮定しない⁸B太陽ニュートリノフラックスは $(2.295 \pm 0.015 \text{ (stat.)} \pm 0.037 \text{ (syst.)}) \times 10^6 / (\text{cm} \cdot \text{s})$ となり、SKの全てのphaseで観測したデータから得られた⁸Bニュートリノフラックスは $(2.33 \pm 0.04 \text{ (stat. + syst.)}) \times 10^6 / (\text{cm} \cdot \text{s})$ となった。ニュートリノ振動パラメータはSKのデータセットのみでは $\sin^2 \theta_{12} = 0.332^{+0.022}_{-0.022}$ と $\Delta m_{21}^2 = (4.73^{+1.35}_{-0.86}) \times 10^5 \text{ eV}^2$ 、また他の太陽ニュートリノ実験とcombinedした結果は $\sin^2 \theta_{12} = 0.310 \pm 0.014$ と $\Delta m_{21}^2 = (4.82^{+1.23}_{-0.66}) \times 10^5 \text{ eV}^2$ という結果が得られた。さらに、その全ての太陽ニュートリノ実験の結果と原子炉実験から、これらの振動パラメータは $\sin^2 \theta_{12} = 0.310^{+0.012}_{-0.012}$ と $\Delta m_{21}^2 = (7.49^{+0.19}_{-0.18}) \times 10^5 \text{ eV}^2$ となった。本研究によって、スペクトラム歪みは前回の結果に対してsignificanceが下がる結果となり、またニュートリノ実験と反ニュートリノ実験における Δm_{21}^2 のtensionは差がわずかに大きくなった。

氏名	長谷川 誠		
論文題目	Solar neutrino measurement in Super-Kamiokande-IV (スーパーカミオカンデIVにおける太陽ニュートリノ測定)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	竹内 康雄
	副査	教授	河本 敏郎
	副査	講師	前田 順平
	副査		
印			
要 旨			
<p>本論文は、スーパーカミオカンデ実験の4番目のフェーズ(Super-Kamiokande-IV, SK-IV)の全期間(2008年10月~2017年12月、観測時間2860日間)の観測データを初めて用いて、太陽ニュートリノの精密測定に取り組んだものである。</p> <p>第1章では、本研究の背景に関する概要が述べられている。標準太陽模型(SSM)により太陽ニュートリノの強度とエネルギー分布がモデル化されていること、「太陽ニュートリノ問題」と呼ばれる理論と観測の矛盾がかつて存在したこと、ニュートリノ振動によりその問題が解決したこと、スーパーカミオカンデ(SK)での太陽ニュートリノ観測の現状、等の研究の背景の概説がなされている。その後、本研究の特徴が述べられている。</p> <p>第2章では、ニュートリノ研究の現状のレビューと本研究の動機について述べられている。まず、ニュートリノ振動と呼ばれる現象が実験的に観測されているが素粒子の標準模型では説明できないことと、標準的なニュートリノ振動の理論について述べられている。その後、太陽ニュートリノに関して、標準太陽模型の概要と、これまでの太陽ニュートリノを観測した主な実験の概要と結果について、紹介されている。最後に、現在のSK実験における研究課題として、「アップターン」と呼ばれる標準的なニュートリノ振動で期待されるエネルギースペクトルの歪みが観測されていない事と、太陽ニュートリノ実験と原子炉からの反ニュートリノを用いた実験の間で観測されたニュートリノ振動パラメータ(質量差)にわずかな差(テンション)があること、が述べられている。さらに、本論文の研究動機として、エネルギー較正の手法を改善し、系統誤差を再評価し、SK実験の観測データを1190日分増やすことにより、これらの研究課題に迫ることが述べられている。</p> <p>第3章では、SK実験についての概要が述べられている。SK実験の装置は岐阜県飛騨市神岡町の地下1000mに設置されていること、50ktonの純水と、約11100本の20インチ光電子増倍管(PMT)を用いた水チェレンコフ装置であること、などが述べられている。また観測は1996年4月から始まり、2018年5月までに4つのフェーズにより行われていること、最後のSK-IVにおいては、2008年10月から2017年12月までに観測時間2860日のデータが得られていることが述べられている。さらに、純水装置、内水槽、外水槽、電子回路などのハードウェアについての説明がある。さらに、事象再構成手法に関する詳細な説明と、再構成した事象の質評価パラメータに関する詳細な説明がなされている。</p> <p>第4章では、検出器のシミュレーションの手法について詳細が述べられている。シミュレーションはGEANT3ベースのプログラムで行われること、上下非対称性を考慮した水の透過率等を入力情報として用いる事、太陽ニュートリノ生成手法などについて述べられている。</p> <p>第5章では、エネルギースケールの較正について述べられている。20インチPMTの増幅率(ゲイン)や、暗電流(ダークレート)が時間とともに変化していること、本研究で新たにPMTのゲインやダークレートの補正をエネルギーの再構成手法に導入したこと、その結果としてSK-IV検出器のエネルギースケールが時間的に安定になり、SK-IVの全観測期間のデータを使った詳細な太陽ニュートリノ研究が可能になったこと、などが述べられている。さらに、電子線形加速器を用いたエネルギー較正手法に関する詳細な説明、</p>			

氏名

長谷川 誠

及び、重水素・トリチウム装置を用いたエネルギー較正手法についての説明がなされ、本研究で得られたエネルギースケールの系統誤差は 0.53% で有ることが述べられている。

第 6 章では、観測データの解析手法について述べられている。まず、太陽ニュートリノ解析で使用可能な観測データの選び方についての説明がなされ、SK-IV における太陽ニュートリノ解析の観測期間が 2860 日となったことが述べられている。次に、太陽ニュートリノ以外のバックグラウンド事象削減の各ステップの手法や事象の分布について詳細な説明がなされている。最後に、データ削減のまとめと、シミュレーションで評価した太陽ニュートリノ事象の検出効率についてのまとめが示されている。

第 7 章では、前節で得られた最終的なデータセットから、太陽ニュートリノ信号を抽出するための手法について詳細が述べられている。太陽ニュートリノ事象分布とバックグラウンド事象分布に対応したそれぞれの確率密度関数を用いること、典型的な確率密度関数分布の例、SSM から予測される SK で観測される太陽ニュートリノのエネルギー分布などについて述べられている。

第 8 章では、系統誤差の評価方法と結果に関して説明がなされている。本研究ではエネルギースケールの計算方法を改善したため関連する系統誤差の再評価を行ったこと、得られた系統誤差の結果、などについて述べられている。

第 9 章では、本研究で得られた太陽ニュートリノ観測の結果について述べられている。SK-IV の 2860 日間の観測期間に得られた太陽ニュートリノ事象数が、 $55,810 \pm 360$ (stat.) ± 543 (syst.) であること、ニュートリノ振動がないと仮定した場合の、シミュレーション(MC)と観測データ(DATA)の比が、 $DATA/MC = 0.437 \pm 0.003$ (stat.) ± 0.007 (syst.) であることなどが述べられている。また、SK の全観測期間で得られた、ニュートリノ振動がないと仮定した場合の Φ_B 太陽ニュートリノ強度は、 $(2.33 \pm 0.04) \times 10^6$ /cm²/s であること、SK の全観測期間が初めて太陽サイクル 23 と 24 のほぼ全体をカバーしたこと、1 年毎に平均化した DATA/MC 値は、定常的なニュートリノ生成と矛盾がないこと、等が述べられている。ニュートリノ強度の昼夜変動に関しては、今回の解析では更新されず、これまでの論文公表結果の紹介がなされている。エネルギースペクトル分布に関しては、本研究で得られた解析結果について述べられている。これらの観測結果を用いたニュートリノ振動解析手法についても述べられており、SK 実験で得られたニュートリノ振動パラメータの値について述べられている。

第 10 章では、エネルギースペクトルの「アップターン」についての議論と、ニュートリノ振動解析結果について他の太陽ニュートリノ・原子炉ニュートリノ実験の結果を考慮した議論がなされている。アップターンに関しては、低エネルギー領域での太陽ニュートリノエネルギースペクトルの統計誤差は削減されたが、最低観測エネルギー領域の中心値が(誤差の範囲で)下がる結果となり、その影響でアップターンの発見の有意度はやや減少したことが述べられている。ニュートリノ振動解析結果については、太陽ニュートリノ実験と原子炉ニュートリノ実験の間の質量差パラメータの「テンション」は依然として 2σ レベルの差が残る結果となったことが述べられている。しかし、本研究では、これまでの SK 実験グループが公表してきたニュートリノ振動パラメータの観測精度をさらに高めることに成功し、世界最高精度と同レベルのニュートリノ振動パラメータ ($\sin^2 \theta_{12} = 0.310 \pm 0.013 \pm 0.012$, $\Delta m^2_{21} = (7.49 \pm 0.19 \pm 0.17) \times 10^5$ eV²) を得た事が述べられている。

第 11 章は、本論文のまとめに充てられている。

以上のように、本研究は、太陽ニュートリノの精密測定について、SK 検出器で得られた 5695 日の観測データを初めて用いて研究したものであり、素粒子ニュートリノの特性について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって、学位申請者の長谷川誠は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。