

氏 名・（本 籍）	し みず いたる 清 水 格
学 位 の 種 類	博 士（理 学）
学 位 記 番 号	理 博 第 2 1 7 6 号
学位授与年月日	平 成 17 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研 究 科，専 攻	東北大学大学院理学研究科（博士課程）物理学専攻
学 位 論 文 題 目	An Evidence for Spectral Distortion of Reactor Anti-Neutrinos and A Study of Three Flavor Neutrino Oscillation (原子炉反ニュートリノにおけるスペクトルの歪みの証拠と3世代ニュートリノ振動の研究)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 井 上 邦 雄 教 授 鈴 木 厚 人, 岡 村 弘 之, 山 口 晃 助教授 諸 井 健 夫

論 文 目 次

- 1 Introduction
- 2 Detector
- 3 Event Reconstruction and Detector Calibration
- 4 Background Estimation
- 5 Reactor Anti-Neutrino Estimation
- 6 Significance of Neutrino Oscillation
- 7 Oscillation Analysis
- 8 Summary

論 文 内 容 要 旨

世界各地で行われている太陽ニュートリノと大気ニュートリノの観測の結果、ニュートリノの消失現象が確認され、またそれらはニュートリノ振動によって説明できるため、地上のニュートリノを用いて多くの検証実験が行われている。長基線ニュートリノ振動実験であるK2K（加速器ニュートリノ）とKamLAND（原子炉反ニュートリノ）において、ニュートリノ消失現象を検証することに成功した。しかし、これまでではどの実験においてもニュートリノ振動の最も重要な特徴であるニュートリノのスペクトルの歪みを観測することができなかった。本研究では、KamLANDのデータを用いてスペクトルの歪みを証明し、すべてのニュートリノ振動実験の結果を合わせた3世代ニュートリノ振動の解析(グローバル解析)を行う。

KamLAND (Kamioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector)では、平均距離、約180 kmの原子炉より飛

来する $\bar{\nu}_e$ の振動の研究を行っている。検出器は、1,000トンの液体シンチレータ、バッファオイル、水チェレンコフカウンターなどから構成されており、バックグラウンドを低減するための工夫がなされている。電子反ニュートリノは逆ベータ崩壊反応、 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ によって検出される。先発信号となる e^+ によりニュートリノのエネルギー、 $E_{\bar{\nu}_e} = E_{\text{prompt}} + \bar{E}_n + 0.8 \text{ MeV}$ が与えられ、それに続く $\sim 200 \mu\text{sec}$ 後の中性子捕獲による γ 線 (2.2 MeV) と同時計測することによりバックグラウンドを厳しく抑えることができる。

放射線源 (^{68}Ge , ^{65}Zn , ^{60}Co , AmBe) やミューオンによる原子核破碎のイベント (n - p , n - ^{12}C , $^{12}\text{B}/^{12}\text{N}$) を用いて、0.5～14 MeV でのエネルギーの校正を行っている。エネルギーの絶対値に対するエラーの他に、液体シンチレータのクエンチ (消光) やチェレンコフ光の寄与なども考慮すると、2.6 MeV における全エラーは 2.0% 以内に抑えられることが分かった。エネルギー分解能は、これまでの 1325 本の 17 インチの PMT (光電子増倍管) に 554 本の 20 インチの PMT が 2003 年 2 月 27 日に新たに加わったことにより、 $7.3\%/\sqrt{E(\text{MeV})}$ から $6.2\%/\sqrt{E(\text{MeV})}$ に向上した。

イベントの発生点 (バーテックス) は、PMT のヒットのタイミング情報から構成されている。装置の垂直方向に対しては、放射線源の位置は 5 cm 以内の精度で再現した。液体シンチレータの有効体積 (半径 5.5 m) に対するエラーは、一様なバーテックス分布を持つ $^{12}\text{B}/^{12}\text{N}$ イベントを用いて 4.7% 以内と見積られた。ニュートリノイベントの選定条件は、(i) 有効体積 ($R < 5.5 \text{ m}$)、(ii) 時間相関 ($0.5_{\mu\text{sec}} < \Delta T < 1000_{\mu\text{sec}}$)、(iii) 空間相関 ($\Delta R < 2 \text{ m}$)、(iv) 後発信号のエネルギー ($1.8 \text{ MeV} < E_{\text{delayed}} < 2.6 \text{ MeV}$) である。(i)-(iv) のカットによる検出効率は、AmBe の後発中性子イベントなどから $(89.8 \pm 1.5)\%$ と見積られる。

2002 年 3 月 9 日から 2004 年 1 月 11 日までのデータ (515.1 日) を用いて解析を行う。バックグラウンドイベントは、偶発イベント、 $^6\text{He}/^7\text{Li}$ 、高速中性子、 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ などを合わせると 17.8 ± 7.3 となる。ニュートリノ振動がない場合の期待される原子炉ニュートリノイベントは、先発信号のエネルギー閾値 2.6 MeV において 365.2 ± 23.7 (syst) であるに対し、観測されたのは 258 イベントであった。このことから、ニュートリノの平均生存確率 ($\frac{N_{\text{obs}} - N_{\text{BG}}}{N_{\text{expected}}}$) は 0.658 ± 0.044 (stat) ± 0.047 (syst) となり、99.998% の信頼度でニュートリノの消失が確認された。

ニュートリノ振動がない仮説に対する検定は、スペクトルの情報のみを用いても行うことができる。イベント数のスケールをフリーにしたニュートリノスペクトルの歪みに対する χ^2 検定によって、振動のないスペクトルは 99.78% の信頼度で排除された。さらに、他のニュートリノ消失仮説である、ニュートリノ崩壊やニュートリノディコヒーレンスなどはニュートリノ振動に比べ、有意に好まれていないことが確かめられた。

ニュートリノ振動は高い精度で確認されたので、次の課題はニュートリノ振動パラメータの決定である。LEP における Z ボソンの崩壊幅の測定からニュートリノは 3 世代であることが示されているので、一般的な形式である 3 世代ニュートリノ振動の解析を行う。太陽ニュートリノ実験 (Homestake, SAGE, GALLEX, GNO, SNO, SK) と KamLAND では Δm_{21}^2 , θ_{12} , θ_{13} に感度を持っているが、 θ_{13} に対しては CHOOZ, 大気ニュートリノ実験, K2K によって強い制限が与えられる。3 世代ニュートリノ振動での電子型ニュートリノの生存確率は、大きい質量差 Δm_{21}^2 の振動が平均化されるため、 $P_{ee}^{3\text{f}} = \cos^4 \theta_{13} P_{ee}^{2\text{f}} + \sin^4 \theta_{13}$ と単純化される。ここで、 $P_{ee}^{2\text{f}}$ は 2 世代ニュートリノでの生存確率であるが、電子密度は $N_e \rightarrow N_e \cos^2 \theta_{13}$ のように補正される。KamLAND では振動したデータが得られているので、エネルギーによらずに $P_{ee}^{3\text{f}}$ を減らす θ_{13} の寄与は好まれない。グローバル解析の結果、上限値 $\theta_{13} < 11^\circ$ (95% 信頼度) が与えられた。これらの実験からの制限の他に、超新星ニュートリノ (SN1987A) の Kamiokande, IMB のデータは物質振動の共鳴が起こる条件で $\theta_{13} < 0.6^\circ$ と強い制限を与えるが、この結果は超新星のモデルに依存するのでここでは考えない。

3 世代解析によって θ_{13} に対しては上限値のみが与えられたが、 Δm_{21}^2 , θ_{12} は有限な解を求めることができる。振動解は大混合角解 (LMA) のみが許され、 Δm_{21}^2 は KamLAND, θ_{12} は太陽ニュートリノ実験による

制限が支配的となっている。最適解は、 $\Delta m_{21}^2 = 7.9 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$, $\theta_{12} = 32^\circ$ で LMA I ($\Delta m_{21}^2 \sim 7 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$) の領域にあり、 $\Delta m_{21}^2 = 7.3 \sim 8.7 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$, $\theta_{12} = 29^\circ \sim 36^\circ$ が 95% の信頼度 (1 次元) で好まれる。LMA II ($\Delta m_{21}^2 \sim 2 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$) と LMA 0 ($\Delta m_{21}^2 \sim 2 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$) はそれぞれ 3σ , 4σ 以上の信頼度で排除された。また、 Δm_{21}^2 , θ_{12} の最適値とエラーは 2 世代振動を仮定した場合と、同等のものが得られることが確認された。

今後、加速器ニュートリノを用いた出現実験 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ などにより、未だに決定されていない θ_{13} が測定される可能性がある。 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ が観測された場合、レプトンセクターにおける CP 破れの検証ができる。ここで与えられた Δm_{21}^2 , θ_{12} の測定は、この効果を高い精度で測定するのに非常に重要である。

論文審査の結果の要旨

本論文は1000トンの液体シンチレータを有するカムランド実験装置を用いて原子炉ニュートリノを観測し、ニュートリノ振動の直接証拠となるエネルギースペクトルの歪みを観測するとともに、通常二世代で行われるニュートリノ振動解析をより一般的な三世代解析に拡張し、ニュートリノ振動パラメータを決定したものである。

カムランド周辺には、約180kmの距離に原子炉が多く分布しており、ニュートリノ振動現象の探索ができる。ニュートリノ振動は、原子炉出力から計算されるニュートリノ事象数からの欠損現象をもたらすとともに、振動速度のエネルギー依存性からくるエネルギースペクトルの歪みをもたらす。欠損現象だけでは、メカニズムは説き明かせず、ニュートリノ振動の導出には、理論的な仮定の下に太陽ニュートリノ観測結果と組み合わせる必要がある。対して、ニュートリノ振動に適合するエネルギースペクトルの歪みは、それ単独でニュートリノ振動の証拠となる。また、本来三世代存在するニュートリノに対し、これまでは二世代間の混合で近似した振動解析がなされていたが、大気・加速器・短距離での原子炉ニュートリノ実験を組み合わせることで、信頼性の高い三世代解析による振動パラメータの決定が可能となる。

本論文では観測期間の延長とともに有効体積・検出効率を改善し、振動が無い場合に予測されるニュートリノ事象数を 365.2 ± 23.7 にまで増大した。観測された事象数258に対し、 17.8 ± 7.3 事象のバックグラウンドが見積もられ、99.998%の信頼度で欠損現象を検証した。またエネルギースペクトルの歪みを99.78%の信頼度で観測し、ニュートリノ振動以外のモデルでは説明できないことも明らかにした。これをふまえて、三世代のニュートリノを考慮した振動解析を行い、特に1・2世代間の質量2乗差・混合角を、それぞれ95%の信頼度で $(7.3-8.7) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ と $29^\circ - 36^\circ$ と高精度で決定した。

本論文はニュートリノ振動の直接的な証拠である原子炉ニュートリノスペクトルの歪みを示し、より一般的な三世代におけるニュートリノ振動パラメータの精密測定を行っており、ニュートリノ研究の最重要項目についての理解を飛躍的に高めており博士論文として非常に高い評価に値する。したがって清水格提出の博士論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。