



Indications of muon neutrino oscillation in a 250km long baseline experiment

Iwashita, Taiki

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2003-03-31

(Date of Publication)

2013-04-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲2791

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1002791>

※ 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。



【 2 3 5 】

氏 名 ・(本 籍) 岩下 大器 (和歌山県)

博士の専攻分野の名称 博士 (理学)

学 位 記 番 号 博い第211号

学位授与の 要 件 学位規則第4条第1項該当

学位授与の 日 付 平成15年3月31日

【 学位論文題目 】

Indications of Muon Neutrino Oscillation in a 250km Long
Baseline Experiment
(250km長基線実験におけるミューオンニュートリノ振動の示唆)

審 査 委 員

主 査 教 授 森井 俊行

教 授 武田 廣

教 授 中川 和道

助教授 原 俊雄

助教授 青木 茂樹

(氏名：岩下大器 No.1)

ニュートリノは3種類ある中性のレプトンであるが、ニュートリノの質量は現在の素粒子物理学で支配的な標準理論においては0と仮定されている。これはニュートリノに質量があるとしても非常に小さいこと、ニュートリノの質量を0と仮定しても理論予想が実験結果を再現することによる。しかし、ニュートリノの質量が0であるという理論的根拠があるわけではない。また近年、大気ニュートリノまたは太陽ニュートリノの測定によって小さいが有限な質量の存在が示唆されている。K2K実験は、加速器で人工的に作り出したニュートリノを用いてニュートリノ振動を検出することで、ニュートリノ振動の確証を得、かつ定量的にニュートリノ振動のパラメータ測定をおこなう実験である。

ニュートリノ振動とは、2種類のニュートリノの質量の2乗の差と、質量の固有状態と弱い相互作用の固有状態の混合角が共にゼロでない条件のもとで、飛行中に固有状態間の遷移が起きる、つまりニュートリノの種類が変化する現象である。その遷移確率は量子力学から計算できて、 $P = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 L \Delta m^2}{E} \right)$ で表される。ここで L はニュートリノの伝搬距離 (km)、 E はニュートリノのエネルギー (GeV)、 Δm^2 は2種類のニュートリノの質量の2乗差 (eV^2)、 θ は固有状態間の混合角である。したがって、人工的にニュートリノビームを生成し、ビーム上の距離 L 離れた2点において、ニュートリノの種類と反応数、エネルギー分布を比較すれば Δm^2 、 $\sin^2 2\theta$ を測定できる。

K2K実験では、高エネルギー加速器研究機構の陽子シンクロトロンで作られたミュオンニュートリノビームを用いる。上の遷移確率の式における距離 L は250kmにして、前置検出器を研究機構の構内に建設した。250km先には、ニュートリノの観測において実績のあるスーパーカミオカンデ検出器 (SK) を配している (図1)。有感領域はパラメータ空間で $\sin^2 2\theta \sim 1$ 、 $\Delta m^2 \sim 10^{-2}$ から 10^{-3}eV^2 である。SKにおける大気ニュートリノの解析 (1144日) から、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動のパラメータは $\sin^2 2\theta \sim 1$ 、 $\Delta m^2 \sim 10^{-3}$ から $5 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ が示唆されており、K2K実験はSKの結果を検証する能力を持つ。

本研究では前置検出器の主要部分である SciFi 検出器を中心とした解析を行なう。SciFi 検出器は SciFi (シンチレーティングファイバー。蛍光物質でできた光ファイバー) をシート状に並べ、それを層状に配置して荷電粒子の飛跡をとらえる検出器である (図2)。20層のシート間には水ターゲットを配置し、ニュートリノが水と反応して発生する荷電レプトンを検出する。水ターゲットを用いる理由は SK と同じ物質を使うことで核内でのニュートリノ反応の違いを相殺するためである。SciFi からの光信号はイメージインテンシファイアチューブ (以下、IIT) によって増幅され、CCD カメラで撮影される。この SciFi 検出器によって得られる荷電粒子の飛跡情報から、ニュートリノとターゲット物質間の荷電カレント反応を選び出すことができる。この解析のためヒット検出、飛跡再構成などに必要なソフトウェアを開発した。

宇宙線の飛跡を用いて、SciFi 検出器のヒット検出効率を $96.5 \pm 0.5\%$ と見積もった。また飛跡検出効率は $93.6 \pm 0.8\%$ である。これらの数値はモンテカルロ法を用いた検出器シミュレーションでほぼ再現した。SciFi 検出器の位置分解能は飛跡とヒットとの距離の分布から、0.6mm と見積もった。分解能を決める主要な因子は物質による多重散乱であると考えられる。

(氏名：岩下大器 No.2)

1999年6月～2001年7月までに得られたニュートリノビームデータを用いて、SciFiトラッカーにおけるニュートリノ反応イベントを12317イベント得た。前置及び後置検出器の検出効率の差、フラックスの差、検出器の活動時間の差を考慮すると、振動が無いと仮定した場合に期待される後置検出器におけるニュートリノ反応イベント数を計算できる。その数は 85.9 ± 1.0 (統計誤差) ± 7.8 (系統誤差) である。一方1kt水チェレンコフ検出器からの期待イベント数は 80.6 ± 1.0 (統計誤差) ± 6.2 (系統誤差) であり両検出器の結果は矛盾しない。この期間に実際に後置検出器で観測されたイベント数は56であった。観測は無振動解を信頼度99%で排除する結果となっている。

また遷移確率はニュートリノエネルギーに依存するため、前置・後置検出器間におけるニュートリノエネルギー分布の歪みを考慮した解析が重要である。我々は前置検出器におけるニュートリノスペクトル分布を測定した。

準弾性散乱反応イベント $\nu + n \rightarrow \mu + p$ を選び出すと、荷電レプトンの飛跡と生成角、および SciFi 検出器の後方に配置したミュオン測定器の飛程から、ニュートリノのエネルギーを計算できる。このとき準弾性散乱反応に混入する非弾性散乱反応の量の情報が不可欠である。SciFi 検出器を用いて反応点付近の飛跡情報から非弾性散乱反応の量を推定し、前置検出器におけるニュートリノスペクトル分布を求めた (図3)。このとき前置検出器の一つである1kt水チェレンコフ検出器と併せてフィットを行なった。

求められた前置検出器でのエネルギー分布と併せて、後置検出器で観測された29イベントの1リングニュートリノイベントの再構成ニュートリノエネルギー分布 (図4) を用いた振動解析を行ない、振動パラメータの許容領域を図5のように制限している。 Δm^2 は $\sin^2 2\theta = 1.0$ のとき 1.5×10^{-3} から $3.9 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ の範囲である (信頼度90%)。この結果はSKの大気ニュートリノの解析結果と無矛盾である。

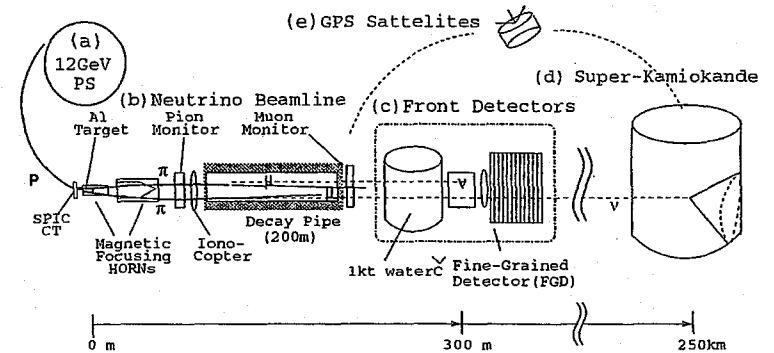


図1: K2K実験の概略

(氏名：岩下大器 No.3)

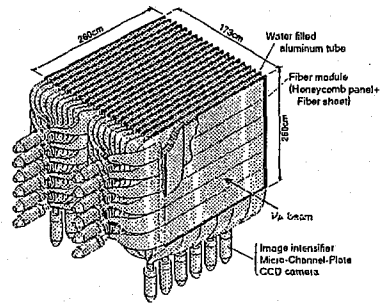


図 2: SciFi 検出器の外観

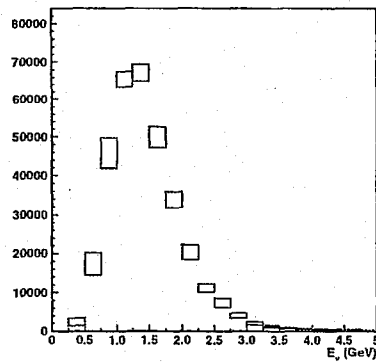


図 3: 前置検出器で測定されたニュートリノスペクトル。縦軸は arbitrary unit。

(氏名：岩下大器 No.4)

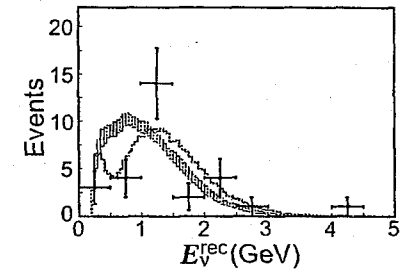


図 4: 再構成されたニュートリノエネルギー分布。点が実データ, 青のヒストグラムが無振動の場合のシミュレーション, 赤がベストフィットを示す。

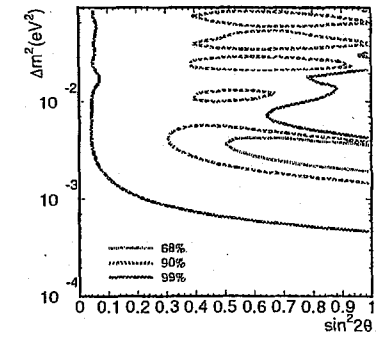


図 5: ニュートリノ振動のパラメータの許容領域。点線の右側が 68%, 破線で囲まれた内部が 90%, 2 本の実線で挟まれた領域が 99% である。

氏名	岩下 大器		
論文 題目	Indications of Muon Neutrino Oscillation in a 250km Long Baseline Experiment (250km長基線実験におけるミューオンニュートリノ振動の示唆)		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	森井 俊行
	副 査	教 授	武田 廣
	副 査	教 授	中川 和道
	副 査	助教授	原 俊雄
	副 査	助教授	青木 茂樹
要 旨			
素粒子の標準理論では、物質は6種類のフレーバーで分類されるクォークと、6種類のレプトンから造られている。その中で、質量が確定されていないのが3種類ある中性レプトンのニュートリノである。素粒子の標準理論では、ニュートリノの質量は0と仮定されている。これはニュートリノの質量があるとしても極めて小さいことと、ニュートリノの質量を0と仮定しても、理論予想が多くの実験結果を再現することによる。しかし、ニュートリノの質量が0である理論的根拠はない。それ故、ニュートリノの質量を実験で検証することは、素粒子物理学において大変重要である。 岩下氏は、つくば・神岡間長基線ニュートリノ振動実験（通称K2K実験）に参加して、ニュートリノの質量の検出に挑み、その結果を本論文としてまとめ上げた。K2K実験は、加速器で人工的に作り出したミューオンニュートリノを用いてニュートリノ振動を検出することで、ニュートリノ振動の確証を得、かつ定量的にニュートリノ振動のパラメータ測定を行う実験である。 ニュートリノ振動とは、2種類のニュートリノの質量の2乗差と、質量の固有状態と弱い相互作用の固有状態の混合角が共に0でないときに、飛行中に固有状態間の遷移が起きる、つまりニュートリノの種類が変化する現象である。その遷移確率は量子力学で計算でき、ニュートリノの伝搬距離L、2種類の質量の2乗差Δm^2、混合角θ、ニュートリノのエネルギーEで表される。したがって、人工的にニュートリノビームを生成し、ビーム上の距離L離れた2点において、ニュートリノの種類と反応数、そしてエネルギー分布を比較すれば、Δm^2と$\sin^2 2\theta$を測定できる。 K2K実験は、ニュートリノの生成点近くに設置した前置検出器と、250km 先にある後置検出器のスーパーカミオカンデ（SK）から成る。両検出器で測定したニュートリノのフラックスとエネルギー分布を比較して、ニュートリノ振動を検出する。 岩下氏は、前置検出器の心臓部とも言える飛跡検出器であるシンチレーティグファイバーシート飛跡検出器（SciFi トラッカー）の設計・製作段階からK2K実験に従事し、データ取得を行い、最終的な振動解析まで行った。1999年6月から2001年7月までに得られたミューオンニュートリノビームデータを用いて、SciFi トラッカーにおけるニュートリノ反応を12,428イベント得た。このイベント数から、振動がないと仮定した場合に後置検出器で期待されるイベント数を85.9 ± 1.0（統計誤差）+7.8（系統誤差）-8.5（系統誤差）と算出した。もう一つの前置検出器である1kt水チェレンコフ検出器からは、振動がないと仮定した場合に後置検出器で期待されるイベント数は80.6 ± 1.0（統計誤差）+6.2（系統誤差）-5.4（系統誤差）であった。これら両検出器の結果は矛盾しない。一方、この期間で実際に後置検出器で観測されたイベント数は56であった。このイベント数の減少は、ミューオンニュートリノが他のニュートリノに振動した結果だと考えられる。岩下氏は、この減少が偶然起こる確率は1%以下、すなわちニュートリノ振動が起こっている確率が99%以上であることを示した。 準弾性散乱反応$\nu + n \rightarrow \mu + p$を選び出し、ミュー粒子の生成角およびエネルギーを測定すれば、ニュートリノのエネルギーが得られる。前置検出器（SciFi トラッカーおよび1kt水チェレンコフ検出器）で得られたニュートリノエネルギー分布から、振動がないと仮定した場合に後置検出器で期待されるニュートリノエネルギー分布を求めた。それを、実際に後置検出器で測定したニュートリノエネルギー分布と比較したところ、明らかな差があった。両者の分布の差をニュートリノ振動が起こった結果だとして、ニュートリノ振動のパラメータΔm^2と$\sin^2 2\theta$を求めた。Δm^2は$\sin^2 2\theta = 1.0$のとき1.5×10^{-3}から$3.9 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$の範囲（信頼度90%）であった。 本研究は、世界で初めての加速器を使った長基線ニュートリノ振動実験で、ニュートリノ振動が起こっていることを強く示唆したものであり、ニュートリノ質量の2乗差の値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、学位申請者の岩下大器氏は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。			