

論文内容の要旨

論文題目 **Detailed studies of neutrino oscillations with atmospheric neutrinos of wide energy range from 100 MeV to 1000 GeV in Super-Kamiokande**

(スーパーカミオカンデにおける 100 MeV から 1000 GeV にわたるエネルギー範囲での大気ニュートリノをもちいたニュートリノ振動の詳細研究)

氏名 亀田 純

大気ニュートリノとは、一次宇宙線の大気中での反応によって作られるメソン（主に π 、 K 中間子）の崩壊によって生成されるニュートリノである。メソンの崩壊過程において、電子ニュートリノ (ν_e) とミューオンニュートリノ (ν_μ) とそれぞれの反粒子が大気ニュートリノとして生成される。大気ニュートリノには以下のような性質が存在する。

1. ニュートリノ flux の flavor の比 $(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/(\nu_e + \bar{\nu}_e)$ が 2 である。(ニュートリノのエネルギー \gg 数 GeV では 2 より大。)
2. ニュートリノ flux の天頂角分布に上下対称性がある。

これらの性質は一次宇宙線の flux や相互作用の詳細によらず成り立つ robust なものである。

スーパーカミオカンデは岐阜県神岡町の地下 1000 メートルに設置された 50 kton (有効質量 22.5 kton) の超純水を有する水チェレンコフ型検出器である。水チェレンコフ型検出器とは高速の荷電粒子が水中で放出するチェレンコフ光によって粒子を観測する装置である。ニュートリノは直接には観測されず、その反応によって生成される電子、ミューオン、ハドロンを捉える事によって観測される。また発生されるチェレンコフリングから荷電粒子の方向、種類（電子タイプ (e-like) とミューオンタイプ (μ -like))、運動量を知る事が出来る。

スーパーカミオカンデに置いて観測される大気ニュートリノの事象は以下のように分類される。

- (1) 検出器内でのニュートリノ反応で、粒子が全て検出器内にとどまっている事象 (Fully Contained 事象)

- (2) 検出器内でのニュートリノ反応で、少なくとも一つの発生粒子が検出器外に逃げている事象 (Partially Contained 事象)
- (3) 検出器近傍の岩盤中でのニュートリノ反応によって生成されたミュオンが検出器に入り、検出器内でとまる事象 (upward stopping muon 事象)
- (4) 検出器近傍の岩盤中でのニュートリノ反応によって生成されたミュオンが検出器を通過していく事象 (upward through-going muon 事象)

スーパーカミオカンデで観測される大気ニュートリノは、飛行距離はおよそ 10 km から 13000 km であり、エネルギーは上記の全ての事象パターンを併せると 100 MeV から 1000 GeV 以上の広い領域にわたる。

得られたイベントのうち、Fully Contained (FC) 事象で観測されたチェレンコフリング数が一つである事象 (1 リング事象) の、 e -like 事象と μ -like 事象の数の比 μ/e を、さらにその理論的な予想値で割った比 R を計算すると、以下のようになった。

$$\text{Sub-GeV} : R = 0.651_{-0.018}^{+0.019} (\text{stat.}) \pm 0.050 (\text{sys.}) \quad (1)$$

$$\text{Multi-GeV} + \text{PC} : R = 0.711_{-0.036}^{+0.039} (\text{stat.}) \pm 0.085 (\text{sys.}) \quad (2)$$

ここで Sub-GeV は Visible Energy が 1.33 GeV 以下の事象を、Multi-GeV は Visible Energy が 1.33 GeV 以上の事象を示す。また Partially Contained (PC) 事象は、その 97% が ν_μ charged current (CC) 反応であることが分かっているので、 μ -like として加えている。もし理論的な予想値とデータが合うなら R は 1 になるべきであるが、Sub-GeV, Multi-GeV の両方の領域に於て 1 よりも有意に小さな値である。

また、得られたイベントの天頂角分布を調べた。上向き事象 (再構成された天頂角 Θ が $\cos \Theta < -0.4$) と下向き事象 (再構成された天頂角 Θ が $\cos \Theta > 0.4$) の数の比を計算すると以下のようになった。

$$Up/Down = \begin{cases} 1.10 \pm 0.05 (\text{stat.}) \pm 0.011 (\text{sys.}) & \text{Sub-GeV } e\text{-like} \\ 0.89_{-0.085}^{+0.094} (\text{stat.}) \pm 0.009 (\text{sys.}) & \text{Multi-GeV } e\text{-like} \\ 0.76 \pm 0.03 (\text{stat.}) \pm 0.002 (\text{sys.}) & \text{Sub-GeV } \mu\text{-like} \\ 0.54_{-0.037}^{+0.039} (\text{stat.}) \pm 0.004 (\text{sys.}) & \text{Multi-GeV } \mu\text{-like} + \text{PC} \end{cases} \quad (3)$$

最初に記した通り、大気ニュートリノは上下対称性を持っていると考えられるが、 e -like がほぼ上下対象になっているのに対して、 μ -like 事象に有意な上向き事象の欠損が観測された。

これら観測結果を説明する方法の一つとしてニュートリノ振動が考えられる。ニュートリノ振動とは、あるニュートリノが時間発展していくと別の flavor のニュートリノに変わる現象である。ニュートリノに質量があり、かつ flavor の固有状態が質量の固有状態の重ね合わせとなっている場合にニュートリノ振動が引き起こされる。 ν_μ と ν_τ の間の 2-flavor ニュートリノ振動を考えると、距離 L (km) を飛行後のニュートリノの survival probability は以下の様に表される。

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 (1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E}) \quad (4)$$

ここで θ はニュートリノの質量固有状態の混合角、 Δm^2 (eV^2) は二つのニュートリノ質量の二乗差、 E (GeV) はニュートリノのエネルギーである。ニュートリノの survival probability は L/E

の関数として表される。この描像によりスーパーカミオカンデの大気ニュートリノの観測結果がよく説明される事は既に論文にて発表されている。

しかし、ニュートリノ振動を予言する理論は一つではなく、幾つかの理論は同様にニュートリノ振動を予言し、かつ有限質量起因の場合とは異なったエネルギー依存性をもつニュートリノの survival probability を予言する。それらは一般に L/E^n というタイプのエネルギー依存性をもつ。例えば、ローレンツ対称性の破れ ($n = -1$)、等価原理の破れ ($n = -1$)、CPT 対称性の破れ ($n = 0$) などである。スーパーカミオカンデで観測される大気ニュートリノは 100MeV から 1000GeV までの広範なエネルギー領域に渡っており、このようなエネルギー依存性を詳細に調べる事が可能である。

ニュートリノ振動の解析には FC 事象、PC 事象、upward stopping muon 事象、upward through-going muon 事象が全てを用いた。ニュートリノの survival probability が L/E^n 型の依存性を持つとして解析した結果、 $n = 1.14 \pm 0.11$ という結果が得られた。よって有限質量によるニュートリノ振動が最もよくデータを説明する事が示された。

また、有限質量による $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ 2-flavor ニュートリノ振動の振動パラメタ ($\sin^2 2\theta, \Delta m^2$) に対して、最適値は $(\sin^2 2\theta, \Delta m^2) = (1.00, 2.8 \times 10^{-3} \text{eV}^2)$ であり、90% C.L. での allowed region は、

$$1.8 \times 10^{-3} \text{eV}^2 < \Delta m^2 < 4.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2 \quad (5)$$

$$0.89 < \sin^2 2\theta \quad (6)$$

と得られた。

上記の研究に加え、物質中でのニュートリノの flavor を変えるような中性カレント反応 (Flavor Changing Neutral Current, FCNC) によるニュートリノ振動の可能性も調べた。この様な反応は素粒子の標準模型においては許されていないが、幾つかの理論において予言される。ニュートリノの FCNC が存在する場合、たとえニュートリノが質量を持たずまたニュートリノの flavor が mixing をしていなくても物質を通過する事によってニュートリノ振動が起きる。survival probability はニュートリノが通過した物質の量によってのみ決まりニュートリノのエネルギーには依存しない。このようなニュートリノ振動の場合、エネルギーへの非依存性によって観測されている upward stopping muon の flux と upward through-going muon の flux の比が予想値よりも小さい事を説明する事が出来ない。解析の結果、この様な描像は強く exclude される事が示された。

さらに、ニュートリノ崩壊の可能性も調べた。ニュートリノがある崩壊チャンネルを持つ場合、上向き ν_μ の欠損を説明する事が出来る事が幾つかの論文において示唆されている。本研究に於ては、ニュートリノの質量固有状態 ν_3 が、ある物質と反応をしない状態 (sterile state) X への崩壊チャンネルを持つ場合を研究した。ニュートリノが質量を持たない場合ニュートリノは崩壊する事が出来ないので、一般にニュートリノ崩壊は有限質量によるニュートリノ振動と共存する事になる。本研究では以下の2つの特別な場合を研究した。

1. ニュートリノ振動長がニュートリノ崩壊長に比べて十分に短く、ニュートリノ振動の効果が平均化されている場合。(数学的には $\Delta m^2 \rightarrow \infty$ に対応。)
2. ニュートリノ振動長がニュートリノ崩壊長に比べて十分に長く、ニュートリノ振動の効果が無視出来る場合。(数学的には $\Delta m^2 \rightarrow 0$ に対応。)

両方の場合に於て、survival probability は $(\sin^2 \theta, m_3/\tau_3)$ の2つのパラメタで特徴付けられる。ここで τ_3 は ν_3 の寿命、 m_3 は ν_3 の質量である。

一番目の場合は、FC 1 リング事象 + PC 事象 + upward muon 事象の解析によって exclude される事が示された。二番目の場合、 $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ 2-flavor ニュートリノ振動の場合と同様に FC 1 リング事象 + PC 事象 + upward muon 事象を良く説明出来る事が示された。

このため、さらに Neutral Current (NC) 反応事象を enrich したサンプルによる解析を行った。sterile state X へのニュートリノ崩壊の場合、NC 反応のイベント数は CC 反応のイベント数と同様に減る事が予想される。一方、 $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ 2-flavor ニュートリノ振動の場合、CC 反応の数は減少するが NC 反応の数は減少しない。よって、NC 反応事象を enrich したサンプルの上向きイベント数と下向きイベント数の比を調べる事により、2-flavor ニュートリノ振動と sterile state へのニュートリノ崩壊を区別する事が出来ると考えられる。観測された NC 反応 enriched サンプルの上下比は $0.96 \pm 0.072(stat.) \pm 0.005(sys.)$ であり、有意な上向きの欠損は見られなかった。解析の結果、FC 1 リング事象 + PC 事象 + upward muon 事象により得られた $(\sin^2 \theta, m_3/\tau_3)$ の 90% C.L. での allowed region が、NC 反応 enriched サンプルの解析によって 90% C.L. で exclude される事が示された。よって sterile state へのニュートリノ崩壊 ($\Delta m^2 \rightarrow 0$ は 90% C.L. で disfavor される事が示された。

以上、すべての解析を総合すると、スーパーカミオカンデで観測されたデータは、ニュートリノ質量の強い証拠である事が結論された。