



ニュートリノに質量がある証拠はこれまで発見されていなかった。また質量があったとしても、電子などより桁違いに軽いことはすでにわかっている。そのため、現在の素粒子の標準理論ではニュートリノの質量はゼロとしてあつまっている。しかし、ニュートリノに質量があることを禁止するような原理があるわけではないので、ニュートリノに質量があつたとしても何も不思議なことではない。また、シーソーメカニズム³⁾と呼ばれる理論から、ニュートリノに小さい質量があるなら、それは現在までに高エネルギーの加速器を用いた素粒子実験で調べられているエネルギー領域よりはるかに高エネルギーの素粒子物理に関係しているということが示唆されている。従って、ニュートリノの質量は、素粒子の標準理論で記述されるよりもはるかに高エネルギー領域での、大統一理論などのより基本的な理論への鍵を握っていると考えられる。

ニュートリノの質量を調べる方法はいくつかあるが、小さいニュートリノの質量を探るのにもっとも都合よい方法は、ここで述べるニュートリノ振動と呼ばれる現象を用いる方法である。ニュートリノ振動とは、例えば、はじめ ν_μ であったニュートリノが長い距離を飛行するうちに ν_τ として観測される現象である。今、例えば ν_μ と ν_τ という2種類のニュートリノを考える。ニュートリノ振動によって、最初 ν_μ として生成されたエネルギー E_ν (GeV)のニュートリノがある距離 L (km)を飛行した後、 ν_μ のままである確率は、以下の式で表せる。

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 L \Delta m^2}{E_\nu} \right) \quad (1)$$

ここで、 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$ は最初 ν_μ であったものが ν_μ のまま観測される確率、 Δm^2 は2種のニュートリノの質量の2乗の差 $((eV/c^2)^2)$ である。また、 θ は混合角と呼ばれるもので、 ν_μ と ν_τ が2つのニュートリノの質量の固有状態のどのような重ね合わせになっているかを示す。 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$ が1より小さくなった分、タウニュートリノ成分が現れる。こ

の式からわかるように、ニュートリノ振動によってニュートリノの質量の有無を検証できる。例えば、一番重いニュートリノの質量として、以下で述べる大気ニュートリノの結果から示唆される $0.05 eV/c^2$ とし、もう一つのニュートリノの質量はこれに比べれば無視できるくらいに軽いとする。また、ニュートリノのエネルギーとして典型的な大気ニュートリノのエネルギー1 GeVを取り、上式に代入すると、最初にニュートリノ振動の効果が最大になるのはニュートリノの飛行距離 L がおおよそ数百 km のときであることがわかる。従って、ニュートリノの生成点から測定器までの距離が十分大きければ、ニュートリノ振動の方法により、 $1 eV/c^2$ 以下のニュートリノの質量が測定可能である。なお、ニュートリノ振動で測定できるのは、上記のように、厳密にはニュートリノの質量ではないが、本稿では簡単のため質量と言うことがあるので了解していただきたい。

本稿では主にスーパーカミオカンデから得られた実験結果を述べるので、まずここでスーパーカミオカンデ実験について簡単に説明しておく。スーパーカミオカンデは、総重量5万トンの純水と多数の光電子増倍管と呼ばれる光検出器からなる水チェレンコフ測定器である。測定器は円筒形で、高さ42メートル、直径39メートルもの大きさになる。図1に示したのがスーパーカミオカンデ測定器の見取り図である。ニュートリノ相互作用という稀な現象を、宇宙線のバックグラウンドをできるだけおさえて観測するために、この測定器は地下1000メートルに設置されている。この深さでは宇宙線のフラックスは地上の約 $1/10^5$ になる。図2 (=表紙)に示したのが建設中のスーパーカミオカンデ測定器内部である。水槽壁面全体に取付けられているガラス球みたいなものが光電子増倍管である。ニュートリノ相互作用の結果生成された荷電粒子が水中を水中の光速以上で走るときに放出するチェレンコフ光を水槽壁面に取りつけた多数の光電子増倍管で観測することによって、ニュートリノ相互作用を観測する。水中をほぼ光速で走る荷電粒子から放

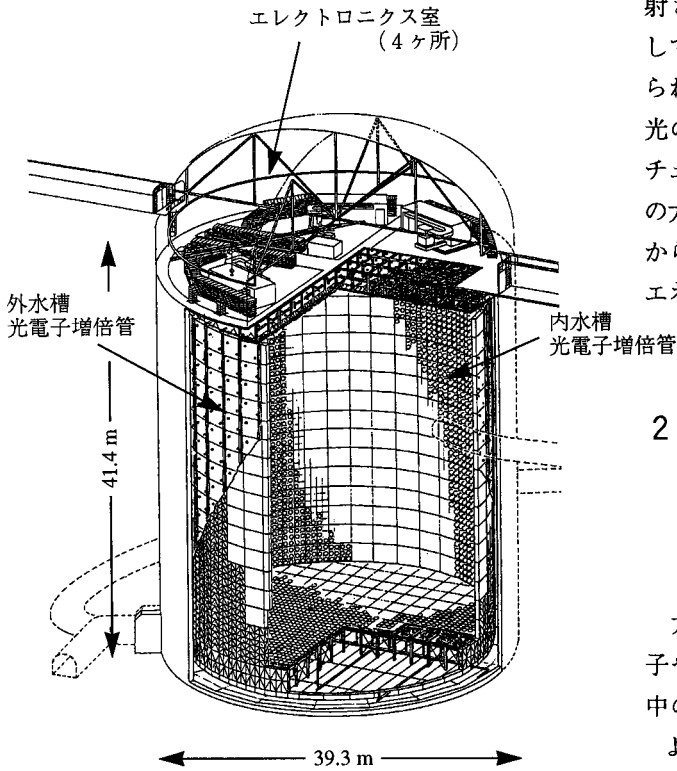


図1 スーパーカミオカンデ測定器の見取り図。測定器は2層になっており、外側の薄い層が宇宙線ミューオンなどを認識する外部測定器、中側がニュートリノ事象を観測する内部測定器である。それぞれの光電子増倍管からの波高と光の到達時刻の信号が水槽上に設置されたエレクトロニクスで読み込まれる。

射されるチェレンコフ光は粒子の進行方向に対して42度の方向に放出されるので、壁に取付けられた光電子増倍管で観測されるチェレンコフ光の形はリング状になる(図3を参照のこと)。チェレンコフ光を検出した各光電子増倍管の信号の大きさ(すなわち光量)と光の到達時間の情報から、粒子の種類、粒子発生点、方向、粒子のエネルギーなどの量を再構成し、いろいろな物理解析を行う。

2. 大気ニュートリノの観測と ν_μ と ν_τ 間のニュートリノ振動の証拠

大気ニュートリノは、大気上層に入射した陽子やヘリウム原子核などの一次宇宙線が、大気中の原子核との相互作用によって π 中間子(および、数は π 中間子の1割程度であるが、 K 中間子)を生成し、その π 中間子が崩壊し($\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$)、さらに π 中間子の崩壊で生成されたミューオン(μ)が崩壊する($\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e + \nu_\mu$)ことにより生成される。図4を参照。この崩壊過程で2つの ν_μ と1つの ν_e が生成されるため、フラックスの(ν_μ / ν_e)比は約1 GeV以下の低エネルギーではほぼ2になる。エネルギーが上がると共に、相対論の効果でミューオンの寿命が延び、崩壊する前に地上に到達し、止る確率が大きくなるため、この比は2より大きくなる。大気ニュートリノのフラックスの絶対値の不定性は、1次宇宙線強度測定の不確定さなどから、20%以上あるが、 ν_μ と ν_e のフラックスの比は上記のような簡単な理由で決まるので、この不定性は5%以下である。ところで、宇宙線が大気に突入するためには、実はある程度エネルギーが高い必要がある。というのは、地球には地磁気があり、磁場は荷電粒子の

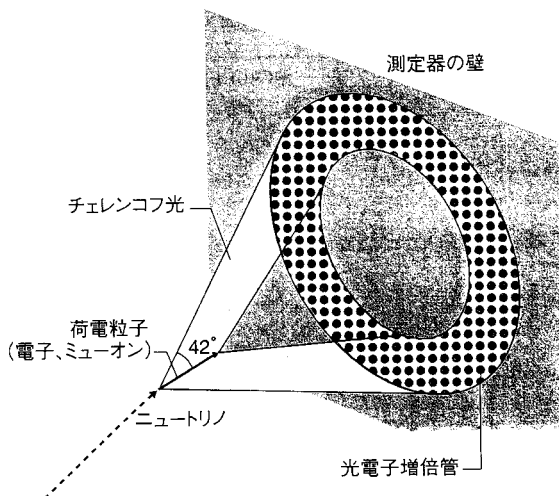


図3 ニュートリノ相互作用で生成された粒子と、それが発するチェレンコフ光、およびそれを観測する光電子増倍管の概念図。

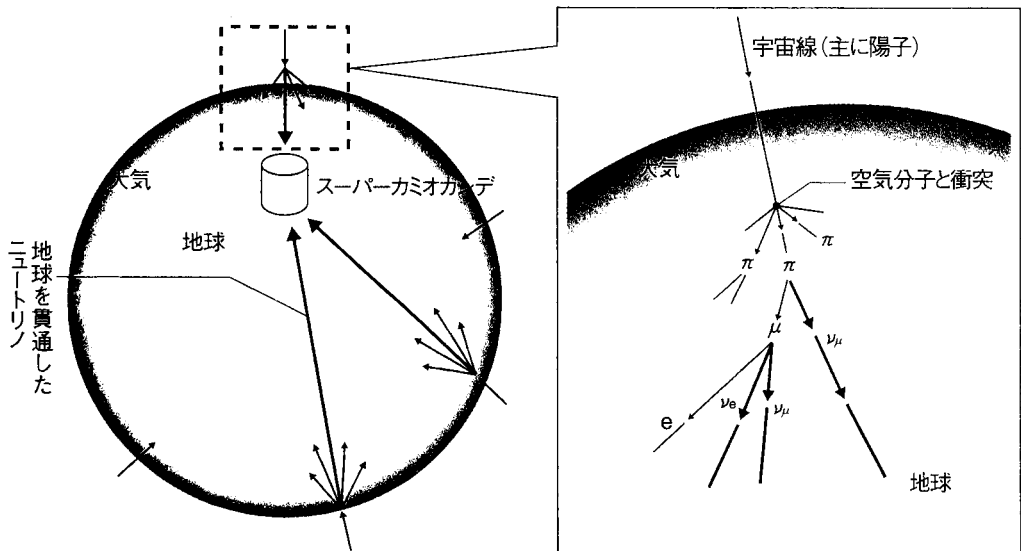


図4 大気ニュートリノの生成. 宇宙から飛来する宇宙線は大気中で空気の原子核と相互作用して π 中間子を生成する. 図中に示したような π 中間子の崩壊過程でニュートリノが生成され, それらが, スーパーカミオカンデで測定される. 地球の裏側で生成された大気ニュートリノも観測される.

軌道を曲げるので, あまり低エネルギーの粒子は大気よりはるか上空で螺旋軌道を描くだけで大気層まで入射できないのである. 地球上での磁場の強さは場所によって違うので, 宇宙線陽子が大気中に入射できるか否かの最低エネルギーは, 地球上の場所と宇宙線の入射方向ごとに違う. この最低エネルギーは, おおむね 10 GeV 程度である. 地磁気の影響があまりきかなくなる数十 GeV 以上の宇宙線は, 地球のどこにもほぼ同じ強度で降り注ぐので, 大気ニュートリノのフラックスは数 GeV 以上では, 数%内の精度で上下対称と予想される(あるエネルギーの大気ニュートリノは約 10 倍のエネルギーを持つ一次宇宙線から主に生成されると考えてください). さらにフラックスの天頂角依存性は精度良く計算できる.

さて, ニュートリノ振動があると, 大気ニュートリノデータはどのようになることが予想されるのであろうか? もし ν_μ と ν_e 間でニュートリノ振動があると, ν_μ が減ってしまうので上記の ν_μ と ν_e のフラックスの比が変わる. ところで, ニュートリノ

の飛行距離は, 真上から来るものが大気の厚さに対応しておよそ 15 km, 真下から来るものは地球の直径に対応して約 13000 km である (図4を参照). もし, ニュートリノの質量が小さいとすると, 式(1)より, ニュートリノは飛行距離が短い時はほとんど振動しないので, 上から飛来する大気ニュートリノはニュートリノの種類が変わってないのに, 下から地球を通過してくるものは, ニュートリノ振動により, 種類が変わっているという可能性もある. なお, タウニュートリノは相互作用の閾値が高く, ごく一部の高エネルギーニュートリノしか相互作用しないので, 簡単には, タウニュートリノの相互作用は大気ニュートリノ事象中では観測されないと考えてよい.

大気ニュートリノ中の ν_μ と ν_e のフラックスの比の測定は 1988 年, スーパーカミオカンデの前身であるカミオカンデによって初めてなされた. その結果は驚くべきもので, 観測された ν_μ と ν_e のフラックスの強度比(ν_μ / ν_e)は理論値の約 60%であった⁴⁾. この結果は, ニュートリノ振動を仮定すれば

説明できることはわかっていたが、結果が非常に重大であるため、種々の実験的なバイアスやバックグラウンドなどが疑われた。しかし、いくら調べても実験上の問題点は発見されなかった。

スーパーカミオカンデは、1996年春の観測開始以来約1年半の観測で、測定器内部で相互作用した大気ニュートリノ事象約5000例を観測した。これは、カミオカンデが約10年がかりで観測したデータ量の4倍以上である。これらの大気ニュートリノ事象について、スーパーカミオカンデでも ν_μ と ν_e のフラックスの強度比(ν_μ / ν_e)を求めると、観測されたエネルギーにあまりよらずに理論値の約60数%と、理論値より有意に小さい結果が得られた。これは、以前のカミオカンデの結果^{4), 5)}と誤差の範囲内で一致しており、この理論値からのずれを実験的不確定さなどで説明することはできない。一方、ニュートリノ振動があれば説明は容易である。

先ほど述べたように、数GeV以上のニュートリノについては、ニュートリノ振動がないとすると、上から来るニュートリノの数と下から来るニュートリノ数はほぼ同じはずである。一方、観測された ν_μ / ν_e 比の異常がニュートリノ振動によるものだとすると、式(1)よりわかるように、ニュートリノ振動はニュートリノの飛行距離によって大きく振動確率が変わるので、事象数の天頂角分布に際違った上下非対称性が予想できる。特にニュートリノのエネルギーが高いほど相互作用で生成される電子やミュオンの方向と、もとのニュートリノの方向がよく一致しているので、ニュートリノの方向が良くわかり、この効果をはっきり観測しやすい。このことは、既に、カミオカンデで観測されていたが⁵⁾、まだ3シグマ程度の有意性であり、統計の不足で決定的証拠とはならなかった。図5に、スーパーカミオカンデで観測された高エネルギー大気ニュートリノサンプル中のミュオン事象の天頂角分布を示す。図より、上向きのミュオン事象は下向きのそれに比べて $0.54 \pm \frac{0.06}{0.05}$ (統計誤差) ± 0.01 (系統誤差) しかない。統計的有意性は6シグマで

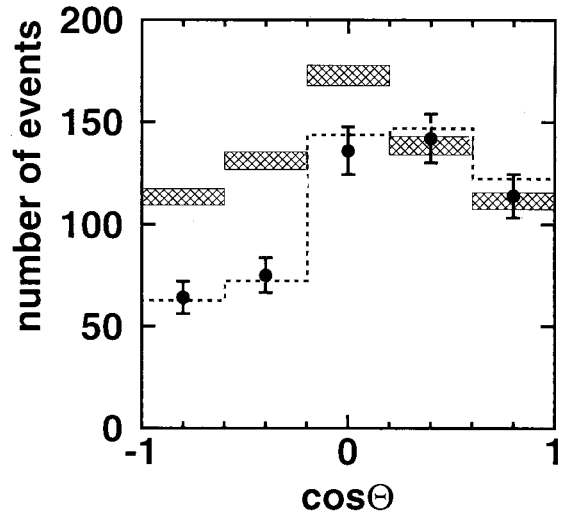


図5 スーパーカミオカンデで観測された高エネルギー大気ニュートリノサンプル中のミュオン事象の天頂角分布。陰影をつけたヒストグラムはニュートリノ振動を考えないときの予想分布を示す。また、青い点線のヒストグラムは $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 間のニュートリノ振動を仮定し、 $\Delta m^2 = 0.0022 \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta = 1.0$ の場合の予想分布である。この際、事象数は最もフィットが良くなるようあわせてある。 Θ は天頂角を表し、 $\cos \Theta = 1$ は下向きの事象を示す。

あり、統計的ふらつきではありえない。このエネルギー領域ではニュートリノ振動がない場合には、2%の精度で事象数は上下対称と計算されており、観測された上下非対称性をニュートリノ振動を導入せずに説明することはできない。一方、図5に示したように ν_μ と ν_e 間のニュートリノ振動を導入するとうまくデータを説明できる。ところで、図より、ほぼ水平方向から来るニュートリノでニュートリノ振動の効果が見えはじめていることがわかる。これらのニュートリノはほぼ500から1000 km程度飛行し、かつエネルギーが数GeV以上であることを考え、それを(1)式に代入すると、2種のニュートリノの質量の2乗の差(Δm^2)はおおよそ 10^3 から 10^2 (eV / c^2)²付近であることがわかる。なお、高エネルギーの電子事象の天頂角分布が予想通りであったことから、電子ニュートリノ

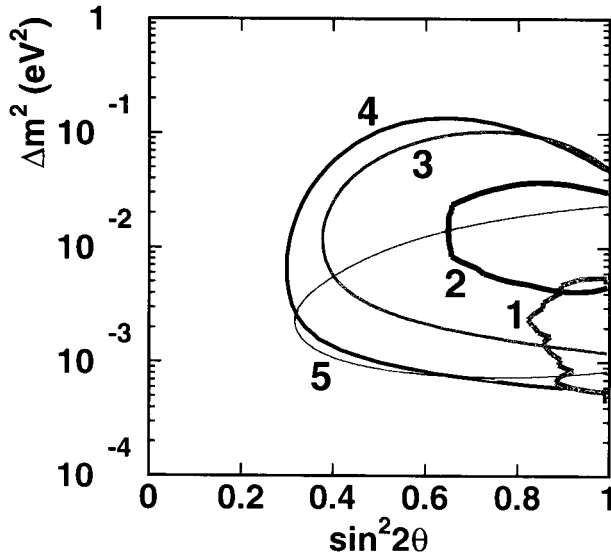


図6 カミオカンデとスーパーカミオカンデのデータから求めたニュートリノ振動のパラメータ (Δm^2 , $\sin^2 2\theta$) の90%信頼度で許される領域. $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動を仮定している. 図中のそれぞれの線の内部が許される領域である. 図中, (1) 太い青と (2) 黒の実線はそれぞれスーパーカミオカンデとカミオカンデの測定器内のニュートリノ事象, やや細い (3) 青と (4) 黒の実線がそれぞれスーパーカミオカンデとカミオカンデの上向きミューオン事象, (5) 一番細い青線がスーパーカミオカンデの上向きミューオンのうち, 止まった事象と突き抜けて行った事象の比から求めたものを表す.

は大気ニュートリノのニュートリノ振動とは関係なく, ν_μ と ν_τ 間のニュートリノ振動でないとデータをうまく説明できないこともわかる.

よりエネルギーの高い, 100 GeV のエネルギー領域の大気ニュートリノは, 測定器の下の岩盤での相互作用で生成され測定器に上向きに入射したミューオン事象として観測される. 岩盤で電子ニュートリノが相互作用した結果生成される電子は長い距離走ることはないの, これらの事象はほとんど全てミューニュートリノ事象である. スーパーカミオカンデは約 600 例, 外から入射して上向きに突き抜けていくミューオン事象を観測した. 観測された上向きミューオン事象の天頂角分布はニュ

ートリノ振動を仮定しないとデータと予想分布との合いは悪く, 一方ニュートリノ振動を仮定するとうまくデータを説明できた.

さらに, スーパーカミオカンデでは測定器に上向きに入射し測定器中で止まったミューオン事象についても解析を行った. 平均的には測定器中で止まるミューオンを生成するニュートリノのエネルギー (10 GeV 程度) は突き抜けていくミューオンを生成するニュートリノのエネルギー (100 GeV 程度) より低い. ニュートリノ振動の確率は上記 (1) 式からわかるようにニュートリノのエネルギーの関数である. したがって, ニュートリノ振動により (測定器内で止まる) / (突き抜けて行く) 上向きミューオンのフラックスの比が予想より低くなる可能性がある. 観測値は 0.22 ± 0.0023 (統計誤差) ± 0.014 (系統誤差) であり, 理論値 0.39 ± 0.05 (理論の誤差) より有意に小さかった. この違いもニュートリノ振動を仮定しないと説明できない. これら上向きミューオンの結果は測定器内で相互作用した事象の結果に比べると統計的には弱いものの, 違ったエネルギー領域, かつ違った性質のデータが同じニュートリノ振動で説明できる点で非常に重要である.

以上述べてきたように, 大気ニュートリノのデータを説明するにはどうしてもニュートリノ振動が必要になる. 図6にはカミオカンデとスーパーカミオカンデの大気ニュートリノデータから求めたニュートリノ振動パラメータの90%信頼度で許される領域を示す. 全てのデータが2種のニュートリノの質量の2乗の差 (Δm^2) でおおよそ 10^3 から 10^2 (eV/c^2)² 付近と, 大きい混合角 ($\sin^2 2\theta$) を示している. 異なる方法, また2つの実験がこのように矛盾の無い結果を示しており, ニュートリノ振動は疑いようのない結果である. この結果をもとに, スーパーカミオカンデ共同実験では, 大



気ニュートリノの観測を通して、ニュートリノ振動の証拠をつかんだと結論した。

さて、ここでカミオカンデとスーパーカミオカンデ以外の実験の結果に目を向けてみる。大気ニュートリノのフラックスの比 (ν_μ / ν_e) の測定に関しては、アメリカにあった水チェレンコフ測定器 IMB も精度は悪いものの同様の結果を得ており、また規模は約 1000 トンとスーパーカミオカンデの数十分の 1 だが、鉄と粒子の飛跡検出器を組み合わせた全く違うタイプの測定器 Soudan-2 が現在もアメリカで稼働していて、こちらからも同様の結果が得られた。また、上向きミューオンの測定に関しては、イタリアのグランサツソ研究所内にある MACRO 測定器で同様の測定が行われており、実際この測定器からもニュートリノ振動を支持する結果が得られた。以上のように、他の実験もスーパーカミオカンデの観測結果を支持するものとなっており、大気ニュートリノの観測からニュートリノ振動の証拠が得られたということは広く受け入れられるようになった。

3. 関連する話題と今後の展望

ニュートリノ振動は、長い間問題になっている「太陽ニュートリノ欠損の問題」も解決するのではないかと期待されている。「太陽ニュートリノ欠損の問題」とは、今までに行われた 5 つの太陽ニュートリノ観測実験が、全て標準的な太陽モデルに基づく理論値より、約 1/2 から 1/3 と少ないという問題である。もし、この問題がニュートリノ振動で解決されるなら、電子ニュートリノとミューニュートリノ間のニュートリノ振動であろう。残念ながら、ニュートリノ振動でなければならないという決定的な証拠は、まだ得られていないし、もしニュートリノ振動を仮定しても、ニュートリノの質量とニュートリノ間の混合角がどのくらいの値なのかはつきり決定できない。しかし、数年のうちに、スーパーカミオカンデを含めた第 2 世代の太陽ニュートリノ観測で、この問題に関する理解が大きく進むことが

期待されている。

大気ニュートリノに話を戻すと、大気ニュートリノに関しては、事象の頻度が少ないため、十分な精度で観測するにはどうしても大きな測定器が必要になる。現在のところ、スーパーカミオカンデを凌駕するような測定器の具体的な構想はないので、しばらく大気ニュートリノに関しては、スーパーカミオカンデの観測データを地道に増やしていき、さらに理解を深めるしかないであろう。特に、ニュートリノ振動の大きさ（混合角）の精密測定は、これから述べる加速器を使った実験が始まっても、しばらく大気ニュートリノ観測で精度を上げていくしかないと思われる。また、大気ニュートリノのデータがきっかけになって宇宙線の強度をより正確に測定しなおし、大気ニュートリノの解析の不確定さを少しでも取り除こうという機運が高まっている。これらの測定結果も、今後より精密にニュートリノ振動を調べるときの重要なデータとなるはずである。

一方、大気ニュートリノデータから明らかになったことは、数 GeV 以下のエネルギーを持つニュートリノは数百 km 程度でニュートリノ振動をするということである。高エネルギー加速器を使って人工的にニュートリノを生成することは既に数十年も行われていることであり、このニュートリノを数百 km 離れた地点で観測することも、現在の加速器の強度を考えると、測定器さえ大きいものがあれば可能である。このような観点から、大気ニュートリノで観測されたニュートリノ振動を加速器で生成したニュートリノで測定しようという計画が進行中である。一つは日本で行われているものである。つくばの高エネルギー加速器研究機構にある陽子加速器で 12 GeV まで加速された多数の陽子を標的にあて π 中間子を生成し、その π 中間子が崩壊してできるニュートリノを実験に用いる。このようにして加速器で生成されたニュートリノは、250 km 離れたスーパーカミオカンデで観測される。この実験は、既に 1999 年 3 月に始まり、当初の実験期間は 3 年を予定している。また、アメリカでも同様の実験を



2002年頃から開始する予定である。これらの実験ではニュートリノの飛行距離が正確にわかっているため、ニュートリノ質量の決定精度が大気ニュートリノを用いて測定するより良くなると期待されている。ところで、大気ニュートリノの観測から、我々は観測されたデータはミューニュートリノがタウニュートリノに振動しているとするとうまく説明できると言っているが、実際にニュートリノ振動で現れたタウニュートリノを観測したわけではない。加速器をもちいた実験計画のあるものは、ニュートリノ振動の結果現れてくる ν_τ を直接観測し、本当にニュートリノが振動して ν_τ になっていることを積極的に観測することも目指している。

4. おわりに

1988年にカミオカンデで初めて観測された大気ニュートリノの異常は、スーパーカミオカンデでの大気ニュートリノの観測を通してニュートリノ振動であることがはっきりし、ニュートリノに小さな質量があるという証拠が得られた。

また、今はまだ決定的なことを言える段階ではないが、もし太陽ニュートリノ欠損もニュートリノ振動であるということになり、電子ニュートリノとミューニュートリノ間のニュートリノ振動のパラメータが決定されたとすれば、大気ニュートリノで決定したミューニュートリノとタウニュートリノ間のニュートリノ振動のパラメータとあわせて、3種類のニュートリノの質量と混合角の基本的なパターンを知ることになる。これらは、素粒子の世界のより深い理解、例えば具体的な大統一理論の構築のために重要な鍵となるはずである。更に、ニュートリノのこれらの性質は、宇宙論や天体物理学のい

ろいろな場面で重要な鍵となり、これらの分野への波及効果も大きいであろう。

最後になったが、この文章でまとめた結果はスーパーカミオカンデ共同実験で得られたものである。この原稿を書くにあたっていろいろ協力して下さった共同研究者の方々に感謝します。

参考文献

- 1) 東京大学宇宙線研究所, 東北大学, 新潟大学, 高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所, 東海大学, 東京工業大学, 岐阜大学, 大阪大学, 神戸大学, および, アメリカを中心とする13の外国の研究機関の共同研究
- 2) Y Fukuda. et al., Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1562
- 3) T Yanagida, in Proc. of the Workshop on the Unified Theory of Baryon Number in the Universe, ed. by O Sawada and A Sugamoto (KEK report 79-18, 1979), p 95; M.Gell-Mann, P Romand and R Slansky, in Supergravity, ed. by P van Nieuwenhuizen and D Z Freedman (North Holland, 1979), p 315
- 4) K S Hirata et al., Phys. Lett. B 205 (1988) 416
- 5) Y Fukuda et al., Phys. Lett. B 335(1994) 237

Observation of Atmospheric Neutrinos in Super-Kamiokande and Evidence for Neutrino Oscillations

Takaaki KAJITA

Institute for Cosmic Ray Research, Univ. of Tokyo

Abstract: Super-Kamiokande is a 50,000 ton water Cherenkov detector. It observes the interactions of atmospheric neutrinos which are produced by cosmic ray interactions with air nuclei in the atmosphere. Through the observation of these neutrino events, the Super-Kamiokande collaboration found the evidence for neutrino oscillations, and therefore the evidence for non-zero neutrino mass.