

大気ニュートリノとニュートリノ振動

はじめに

今から約100年前、ビクトール・ヘスが自ら気球に乗って上空の放射線強度を測定し宇宙線が発見されました。その後の研究でこの宇宙線は陽子や原子核が主成分で、またそのエネルギーは非常に高エネルギーまで延びていることが判明しました。一方で、現在に至るまで宇宙線がどこでどのようなメカニズムで生成されているかは十分わかってはおらず、現在でもこの起源を求めて多くの研究がなされています。

宇宙線が大気中に入射すると、大気中の窒素や酸素といった原子核と相互作用し、その際に多くのパイ中間子が生成されます。パイ中間子のうち電荷がプラスかマイナスのものはミューオンとミューニュートリノに崩壊します。さらに、ミューオンの寿命は2マイクロ秒とわりあい長いのですが、大気上空で生成されるミューオンの多くは地表に到達する前に、電子（あるいは陽電子）とミューニュートリノと電子ニュートリノに崩壊します(図1)。なお、本稿では簡単のために電荷、あるいは粒子・反粒子の区別については基本的に無視します。これからもニュートリノと言ったときにはニュートリノと反ニュートリノの両方を意味していることを了解してください。

このように生成されたニュートリノを大気ニュートリノと呼びます。1962年に加速器実験でミューニュートリノが発見されると、大気ニュートリノの存在を確かめる実験が南アフリカとインドの鉱山の地下深くで行われました。これらの実験によって1965年

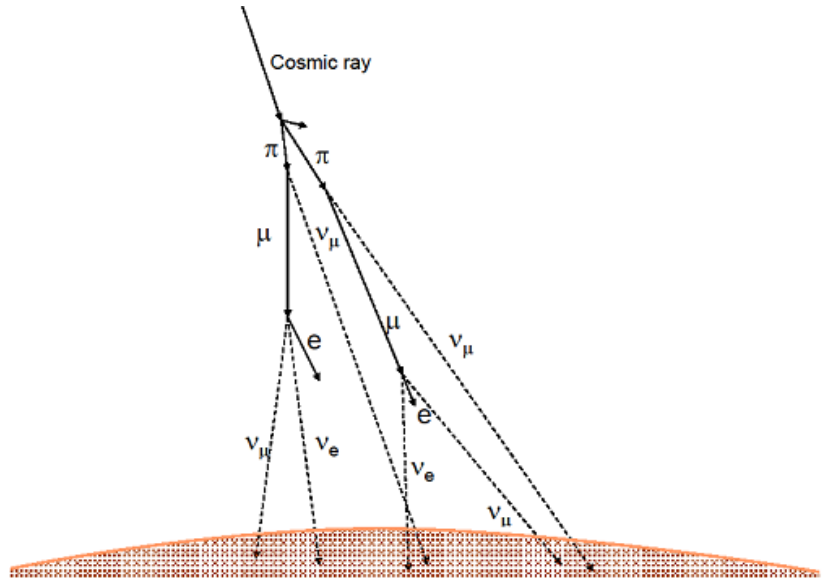
に大気ニュートリノが観測されました。本稿では宇宙線が生成するニュートリノを観測して行っているニュートリノ振動の研究について述べます。

カミオカンデでの大気ニュートリノ観測

大気ニュートリノが多くの研究者に注目されるようになったのは1980年代後半です。1965年に観測された大気ニュートリノは、しばらくの間広く注目される研究分野としては発展しませんでした。一方、1980年代に陽子崩壊実験が世界の数カ所で始めると、大気ニュートリノは陽子崩壊を探す際の最も邪魔なバックグラウンドとなりました。そのため、このバックグラウンドを理解する必要性がありました。それらの実験の一つがカミオカンデ実験でした。カミオカンデは岐阜県神岡にある鉱山の地下1,000メートルに設置された、有効質量約1,000トンの純水中での光の速度以上の高速で走る荷電粒子が放射するチェレンコフ光を、直径50cmの光電子増倍管1,000本で測定する装置でした。

ミューニュートリノの相互作用で生成されたミューオンは水中で少しずつエネルギーを失いながら進むのに対し、電子ニュートリノの相互作用で生成された電子は水中で電磁シャワーを形成するので、ミューオンと電子の水中での振る舞いは大きく違います。カミオカンデでは電子やミューオンはリング状のチェレンコフ光として観測されますが、水中での電子とミューオンのふるまいの違いはチェレンコフ光のリングの形

図1 大気ニュートリノの生成。



状の違いとなるため、ミューオンと電子の識別ができません。参考のため、図2に本稿の後半で述べるスーパーカミオカンデで観測された電子ニュートリノとミューニュートリノ事象のチェレンコフ光のリングのパターンを示しました。この考えに基づいて、カミオカンデでは電子型のチェレンコフリングが1つだけ観測され電子ニュートリノ相互作用と考えられる事象と、ミュー型のチェレンコフリングが1つだけ観測されミューニュートリノ相互作用と考えられる事象を識別し、それぞれの事象数を数えました。その結果、電子ニュートリノ事象はほぼ予想通りの数が観測されているにも関わらず、ミューニュートリノ事象の数はおよそ予想値の60%程度でした。

ここで予想値とは、計算から求めた大気ニュートリノのフラックスとニュートリノ相互作用断面積からカミオカンデ測定器内でのニュートリノ相互作用の数を求め、更にカミオカンデ測定器の検出効率などを考慮してモンテカルロ・シミュレーションで求めたものです。当時この予想頻度には宇宙線フラックスの観測値の誤差などから20から30%程度の誤差が考えられていましたが、電子ニュートリノとミューニュートリノの比は正確に計算できるので、その誤差は5%以内

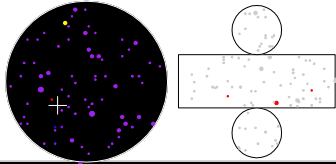
と見積もられました。これらの理由のため、上記の結果は計算の誤差などでは説明できないと考えられました。一方、例えばミューニュートリノとタウニュートリノ間のニュートリノ振動を仮定すれば上記のデータは説明できるということで、当時注目されました。

話を進める前に、ここでニュートリノ振動について述べておきます。ここでは簡単のためにミューニュートリノとタウニュートリノの2種類のニュートリノを考えます。もしニュートリノに質量があると、最初ミューニュートリノだったものが飛行中にタウニュートリノになり、またもとに戻るという具合に飛行中にニュートリノの種類が変わります。これをニュートリノ振動と言います。つまり、ニュートリノ振動が見つければ、ニュートリノが質量を持っている証拠となります。図3にニュートリノの飛行と共に最初ミューニュートリノだったものがミューニュートリノのままいる確率がどうなるかを示しました。このとき、重い方のニュートリノの質量として電子の質量の約 $1/10^7$ を仮定しました。もしニュートリノの質量がこれより重ければこの振動周期が短くなり、逆に軽ければ振動周期は長くなります。したがって、ニュートリノが別なニュートリノに移り変わる早さを観測すれ

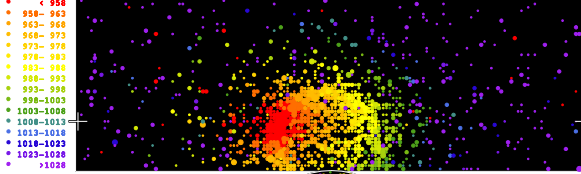
Feature

Super-Kamiokande

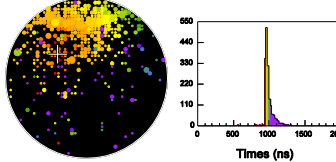
Run 3013 Event 149004
96-10-24:19:39:51
Inner: 1763 hits, 4003 pE
Outer: 3 hits, 5 pE (in-time)
Trigger ID: 0003
D wall: 697.4 cm
FC mu-like, p = 463.8 MeV/c



Time (ns)

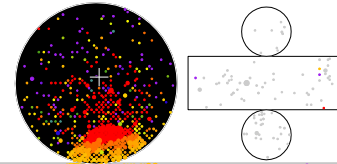


(a)

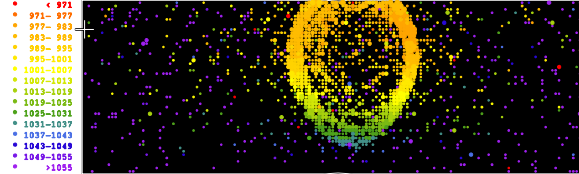


Super-Kamiokande

Run 3062 Event 475360
96-11-08:12:07:30
Inner: 2305 hits, 7763 pE
Outer: 5 hits, 4 pE (in-time)
Trigger ID: 0003
D wall: 691.3 cm
FC mu-like, p = 1088.0 MeV/c



Time (ns)



(b)

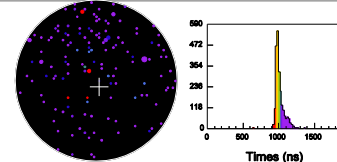


図2 スーパーカミオカンデで観測された (a) 電子ニュートリノと (b) ミューニュートリノ事象の例。図中丸の大きさが観測された光の強さを示す。また丸の色は光の観測された時間情報を表す。

ば、重い方のニュートリノの質量がわかることとなります。もう少しだけ図3に関連して言うておくと、図3ではあるところでミューニュートリノの確率がゼロになっていますが、これは特殊な場合です。一般にはミューニュートリノの減り方はほんの少しから、図3で示されるゼロまでのどこかになるはずですが、そして観測的に一番見つけやすいのは一番効果が大きい図3の場合です。

実際の実験の話に戻る前に、図3と大気ニュートリノを組み合わせて考えてみます。大気ニュートリノ実験ではおおざっぱに言って1 GeVのエネルギーのニュートリノ相互作用が多く観測されます。図3を見るとわかるように、もし重い方のニュートリノの質量が電子の質量の約 $1/10^7$ であれば、500 km程度走るとミューニュートリノである確率はゼロとなってニュートリノ振動の効果がはっきり見えるはずですが。大気の上空で生成されたニュートリノが真上から飛んできたとすると、その飛行距離は平均15 km程度なので、まだニュートリノは振動していません。一方、地球の直径は約12800 kmなので、地球の反対側から飛来するニュートリノは振動を何回も繰り返して飛んで来るこ

とになります。

カミオカンデの結果は興味深いものでしたが、必ずしも多くの研究者に受け入れられたわけではありませんでした。当時はカミオカンデ以外にも世界中で3つほど大気ニュートリノを測定できる装置がありましたが、その観測結果は一致していませんでした。このような状況のため、圧倒的な統計精度を持つ次世代のニュートリノ測定器、つまりスーパーカミオカンデを待つ必要がありました。

スーパーカミオカンデでの大気ニュートリノ観測とニュートリノ振動

スーパーカミオカンデが1996年に観測を開始すると、大気ニュートリノ観測に対する有効体積がカミオカンデより約20倍大きいので、観測データの量は格段に上がりました。またスーパーカミオカンデの観測は既に10年以上となり、今までの他の実験より長く観測を続け、更に多くのニュートリノのデータを用いた研究が可能となっています。

大気ニュートリノでニュートリノ振動が起こっていることを最も明確に示せるのは、上から飛来する

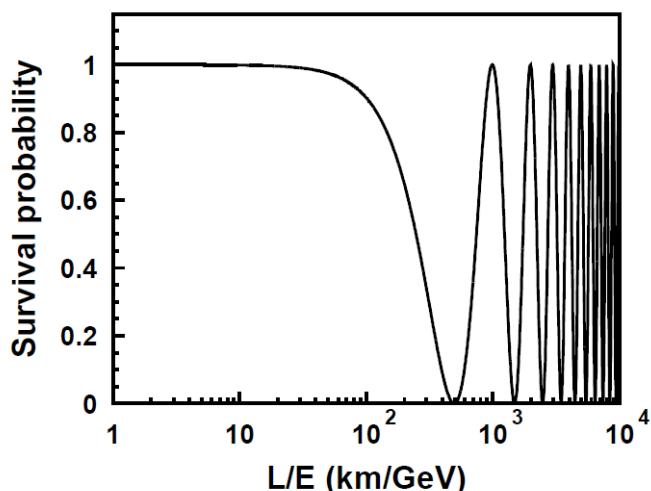


図3 ミューニュートリノがミューニュートリノとして残る確率を L/E の関数として示した。ここで $L(\text{km})$ は距離、 $E(\text{GeV})$ はエネルギーを表す。重い方のニュートリノの重さは電子の重さの $1/10^7$ を仮定している。

ニュートリノと下から飛来するニュートリノの数を比べ、予想値と合っているかどうか調べることで、ニュートリノ振動がなければ観測されるニュートリノ数は上下ほぼ同じと計算されているので、もし下から来るニュートリノの事象数が上から来るものの事象数より有意に少なければ、ニュートリノ振動の動かぬ証拠となります。更に、もしニュートリノ振動がミューニュートリノとタウニュートリノ間で起こっているなら、電子ニュートリノはニュートリノ振動と無関係なので、上下非対称性はミューニュートリノ事象には観測されますが、電子ニュートリノ事象には観測されないはず。このような考えに沿って、ニュートリノ事象の天頂角分布が精密に調べられています。その結果を図4に示しました。図4はスーパーカミオカンデの2008年までのデータをまとめたものですが、明確に上向きミューニュートリノ事象の欠損が確認できます。また、天頂角分布を見てみると、エネルギーが高い事象の分布のほうが上下非対称性の効果が顕著です。これは低エネルギーではニュートリノとニュートリノ反応の結果出てくるミューオンや電子との角度相関が悪くなって、ミューオンの方向を見ても上下非対称性がはつき

りわからなくなるためです。このようにして、1998年にニュートリノ振動が見つかりました。

図4のデータとニュートリノ振動ありの予想値とを比較することでニュートリノの基本物理量が測定されます。まず、ニュートリノ質量について、重い方のニュートリノは $0.05 \text{ eV}/c^2$ 程度と推定され、ニュートリノ以外で一番軽い電子と比べると $1/10^7$ の重さです。今述べているのは、一番重いニュートリノの質量ですので、おそらく比べるべきは一番重いクォーク(トップクォーク)の質量でしょう。この場合にはおおよそ $1/(4 \times 10^{12})$ となります。また、ニュートリノ振動でのミューニュートリノの減り方ですが、これは図3で示した理論値と矛盾しません。もし実験の精度がよければ、ミューニュートリノが増えたり減ったりするのがはっきり見えるはずですが、図4ではそれが平均化されて観測されています。つまり、最大限減ったり増えたりしているのですが、平均化されて半分になって観測されているということになります。いずれにしても、ニュートリノ振動の効果は考えられる範囲で一番大きいようです。これを研究者は「大きい混合」という言葉で表します。おそらくニュートリノ質量が小さい原因につい

SK-I+II+III, 2806 Days

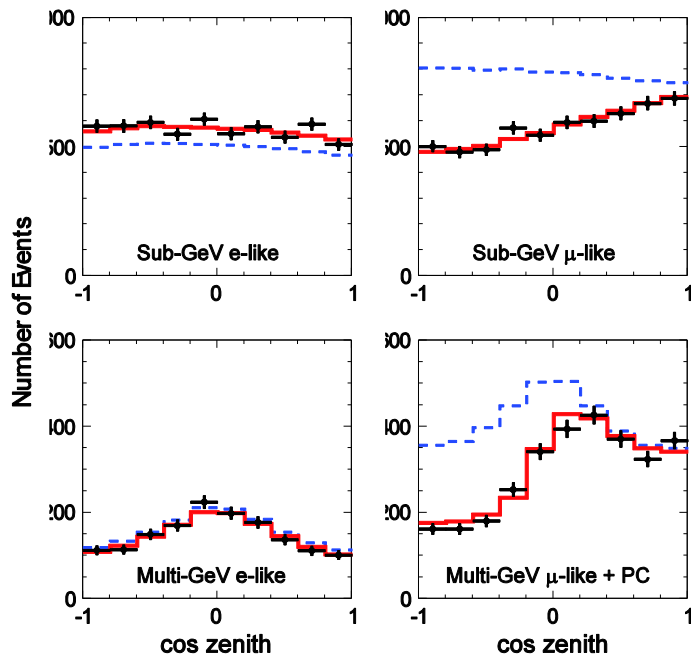


図4 スーパーカミオカンデで観測された大気ニュートリノの天頂角分布。 $\cos\theta = -1$ が上向き、 $\cos\theta = 1$ が下向きの事象を示す。左の2つの図は電子事象（多くは電子ニュートリノ事象）を示し、右の2つの図はミュオン事象（多くはミュオンニュートリノ事象）を示す。左右とも上の図は見えているエネルギーが1.3 GeV以下の事象を示し、下は1.3 GeV以上を示す。下のミュオン事象に関してはミュオンが測定器を突き抜けて行った事象も含む。点線のヒストグラムはニュートリノ振動が無い場合の予想値を示し、実線のヒストグラムはミュオンニュートリノとタウニュートリノ間のニュートリノ振動を仮定した分布を示す。

ては「シーソー機構」という有望な考えがあるのかと思われませんが、大きい混合については、まだその根本的な理解に至ったとは言えない状況かと思われま。理論家の皆さんに考えていただくと共に、実験的にも更に精度よく測定をしていくことが必要でしょう。

タウニュートリノの検出

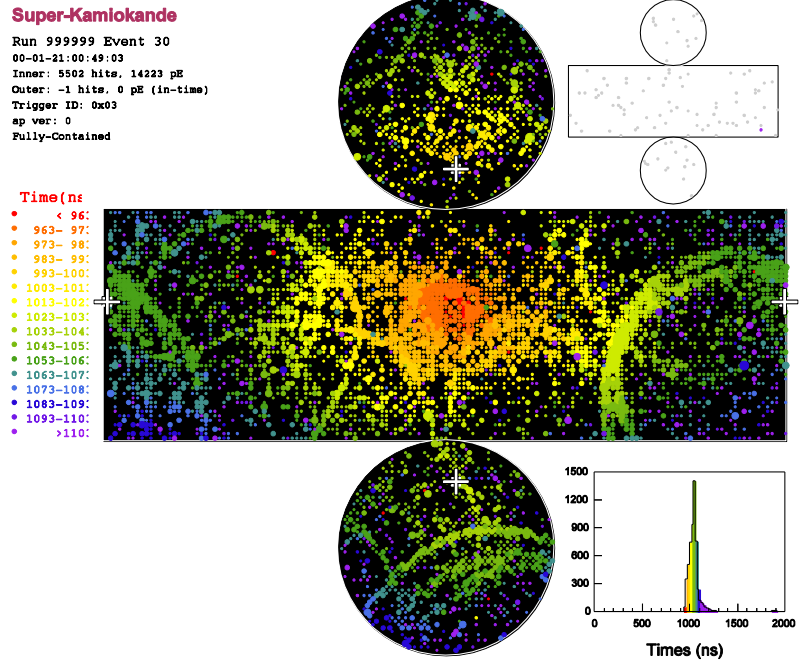
今までミュオンニュートリノとタウニュートリノ間のニュートリノ振動であると述べてきましたが、厳密には、ミュオンニュートリノが振動して別なニュートリノに転移し、その別なニュートリノは電子ニュートリノではないので、タウニュートリノであるべしというのが今までの議論です。従って、タウニュートリノに転移した証拠をタウニュートリノの検出で確認できれば決定打となります。

このような理由から、スーパーカミオカンデでは大気ニュートリノ中でニュートリノ振動によりタウニュートリノが生成された証拠を探しました。残念な

がらこの探索は簡単なものではありません。というのは、タウニュートリノの相互作用の敷居値は相互作用で生成されるタウ粒子が重いために、約3.5 GeVと割合に高く、また大気ニュートリノのフラックスはエネルギーが上がると共に急激に下がるため、この反応が起こる頻度が低いからです。それだけではなく、更に、タウニュートリノ反応で生成されたタウ粒子はすぐに崩壊し、特に65%の崩壊では終状態に（ニュートリノ以外は） π 中間子などのハドロンのみを含んでいるため、中性カレント事象と呼ばれる事象と明確な区別が付きにくいのです。図5にモンテカルロシミュレーションによる典型的なタウニュートリノの事象を示しました。多くのチェレンコフリングが重なり、解析は難しそうです。

一方で、大気ニュートリノ特有の利点もあります。もし、「タウニュートリノらしい事象」を選び出し、それについて天頂角分布を調べれば、タウニュートリノはニュートリノ振動によって生成されるので上向き事象しかなく、一方、バックグラウンドはミュオン

図5 タウニュートリノのモンテカルロシミュレーション事象の例。



トリノ事象を除いては上下対称となるためです。このため、「タウニュートリノらしい事象」の天頂角分布を調べ、上向き事象の超過を観測できれば、統計的にタウニュートリノ事象の存在を示すことができます。

このような考えに基づいて、スーパーカミオカンデではニュートリノ振動で生成されたタウニュートリノの存在の有無を調べました。その結果、統計的にはまだ決定的とは言えないものの、データはニュートリノ振動によってタウニュートリノが生成されたとして矛盾がないものでした。今後データが増えると共に、より明確な結論が出せるものと期待されます。また加速器を用いた実験でもタウニュートリノの探索が行われており、近い将来にはニュートリノ振動の結果生成されたタウニュートリノの観測が間違いないものになると期待されています。

おわりに

以上述べてきたように、大気ニュートリノの研究

からニュートリノ振動が発見されスーパーカミオカンデにおける高統計の観測によってニュートリノ振動現象の詳細が研究されています。今までは主に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について調べられてきましたが、ニュートリノには3種類あるので、最終的には3種のニュートリノ間のニュートリノ振動現象を調べる必要があります。既に、太陽ニュートリノと原子炉ニュートリノの観測から電子ニュートリノも振動することがわかっていますし、また加速器ニュートリノ振動実験 T2K をはじめ、近頃のデータはミューニュートリノがあまり高い頻度ではないものの電子ニュートリノに振動することを示唆しています。大気ニュートリノは、もし非常に高い統計精度で測定ができれば、これら全てのニュートリノ振動が測定可能で、またニュートリノが地球を通過してくるといふ他にはない特徴から、ニュートリノの重さの順番なども観測が可能だと考えられています。このため、大気ニュートリノは将来に亘ってニュートリノ物理に貢献していくと考えられます。