

2004年7月5日
東京大学宇宙線研究所プレス発表資料

「ニュートリノが波打つことの直接観測」の成功

スーパーカミオカンデ実験グループ⁽¹⁾
東京大学宇宙線研究所

東京大学宇宙線研究所・神岡宇宙素粒子研究施設で行われている国際共同実験「スーパーカミオカンデ」(研究代表者：鈴木洋一郎)では、1998年に宇宙線が大気中で生成するニュートリノ(大気ニュートリノ)の観測によって、ニュートリノ振動を発見し、ニュートリノが微小質量を持つことを示した。また、2001年には、太陽ニュートリノも振動していることの強い証拠を示した。その後の大気ニュートリノデータ量の増加と、解析に改良を加え、その詳細研究を続けてきたが、このほど、ニュートリノが減少した後、また増加するという、ニュートリノ振動に特徴的な「ニュートリノが波打つことの直接観測」に初めて成功した。これは、世界の研究者の間で、ニュートリノ研究を進める上での課題のひとつとされる「ニュートリノの存在確率の振動」を実際に観測事実として示したものである。結果は、先日、パリで行われた第21回ニュートリノ物理学・宇宙物理学国際会議に於いても発表され、6月29日にフィジカル・レビュー・レター誌に掲載が決定された(hep-ex/0404034)。

20世紀の後半に確立した素粒子の標準理論ではニュートリノには質量がないとされてきた。一方、もしニュートリノが微小な質量を持つとニュートリノの種類が変化する「ニュートリノ振動」がおこることが知られていた。従って、ある種類のニュートリノが別な種類のニュートリノに変化することが捕らえられればニュートリノに質量があることの証拠になる。特にニュートリノに質量がある場合ニュートリノ振動の理論によれば、エネルギーが同じニュートリノの減り方は飛行距離が大きくなると共にまず減り、また増えたりと、波打つはずである(図1、図2、およびその説明を参照)。

1998年にスーパーカミオカンデ実験グループにより発表された、大気ニュートリノ振動の発見は、ミューニュートリノ(μ)の方向を測定して、下向きに飛来する飛行距離の短いニュートリノは数が減っていないが、上向きに飛来する飛行距離の長いニュートリノはその数が約半分に減っているという観測結果に基づくものであった。これは、飛行距離が短い場合はまだニュートリノ振動の効果が現れていないが、ニュートリノが長距離飛行した場合、ニュートリノ振動で全く別なニュートリノ(タウニュートリノ(τ))に変化した場合と、もともと同一ニュートリノの種類である場合が半々であり、観測値はその平均を示していると解釈される。

今回スーパーカミオカンデ実験グループでは、解析を工夫して、大気ニュートリノのデータのうち、ニュートリノのエネルギーや飛行距離のよくわかっているデータのみを用いて、ミューニュートリノの減り方の詳細研究を行い、ニュートリノ振動の理論で予想されるように、ニュートリノが一度減りまた増加するという「ニュートリノが波打つことの直接観測」に初めて成功した（図3、図5、図6およびその説明を参照）。これは、世界の研究者から渴望されていた「ニュートリノの存在確率の振動」を観測事実として示したことであり、また、「ニュートリノ振動の波長を直接観測」することに成功したことでもある。

また近年、ニュートリノ振動でなくても、これまでのスーパーカミオカンデのデータの説明は可能とする理論（例えば飛行中のニュートリノが別な粒子に崩壊するニュートリノ崩壊仮説など）（図4、図6、およびその説明を参照）も現れていたが、実験データとの合いは必ずしも良くなく、実験データを説明する正しい理論である可能性は小さかった。これらの別理論では、ミューニュートリノの減り方の割合は飛行距離が大きくなると共にだんだん減るというものであり、決して減り方がニュートリノ振動の場合のように波打つことはない。従って、今回の研究成果はこれらの理論に別の観点からも止めを刺し、ニュートリノ振動以外に観測データを説明する可能性がないことをも決定的にした。

今回の成果のまとめ

大気ニュートリノ振動は、1998年にスーパーカミオカンデにより発見された。ニュートリノ研究を推進する上で、次の大きな課題は「ニュートリノの存在確率の振動」の実験的確認である。

- 1) これまでは、平均化されたニュートリノの減少として、ニュートリノ振動を観測していたが、今回、初めて振動のパターンすなわち「ニュートリノが波打つことの直接観測」に成功した。これが、「ニュートリノの存在確率の振動」を観測事実として示すものである。
- 2) これは、「振動の波長の直接観測に成功」したことにもなる。たとえば、1 GeV（10億電子ボルト）のエネルギーを持つニュートリノに対して、振動波長が約1000 kmであることが図6から直ちに読み取れる。
- 3) この解析には、距離やエネルギーの良く分かったデータを選別したため、約5分の1のデータが使われているに過ぎないが、波長の決定に対して精度が良いため、波長から直接導出される質量差の決定精度は、これまでの解析比べ約1.8倍向上した。
- 4) 波打つ様子の発見から、ニュートリノ崩壊の可能性に止めを刺した。（99.9%以上の信頼度）
（注意）この99.9%は、ニュートリノ崩壊を排除する信頼度であり、「振動なし」にたいしては、これまでの大気ニュートリノのデータにより99.99999.....（9が10個以上）%で排除している。（ただし、これだけ9が多い微小な確率は、文字通りの数値として意味をもっているのではなく、限りなく100%に近いと解釈すべきである。このような場合9の数の増減はあまり意味をもたない。）
- 5) この結果は、フィジカル・レビュー・レター誌に掲載が決定している。

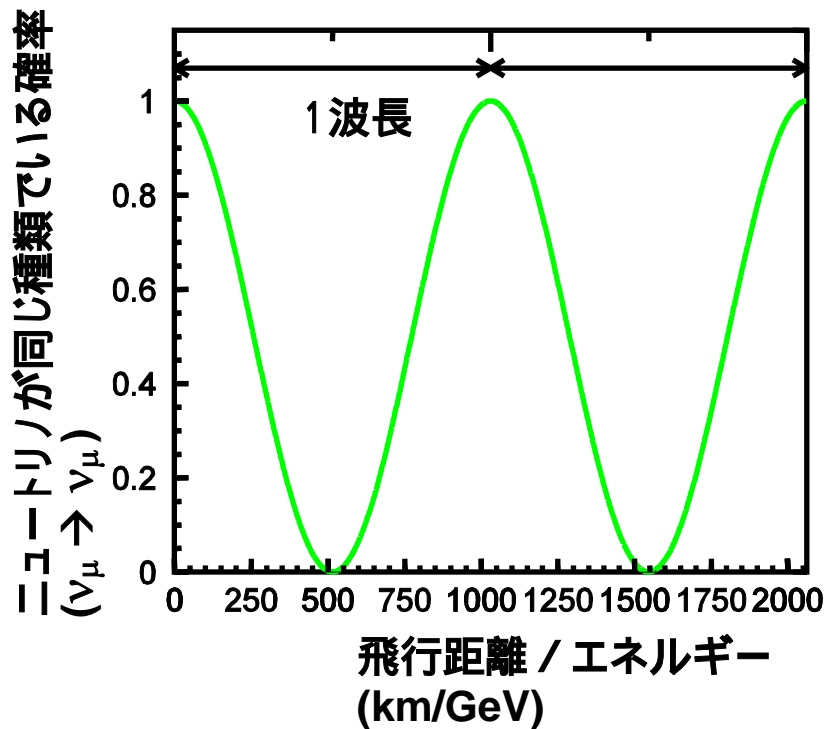


図1(イメージ図): ニュートリノ振動の波長は、エネルギーに比例するので、(ニュートリノの飛行距離 / ニュートリノのエネルギー)を横軸とすると、エネルギーによらず、同じ振動波形が見えることになる。エネルギーが大気ニュートリノの代表的エネルギーである1GeV(10億電子ボルト)としたときには、横軸はkmそのものになる。図の緑色の線は、ニュートリノ振動によって、ニュートリノが消える様子を表している。縦軸は、ニュートリノが同じ種類のニュートリノのままでいる生存確率をあらわしている。ニュートリノの飛行距離と共にまずニュートリノが減り、また増える、ということを繰り返す。この図から直ちに振動波長が読み取れる。

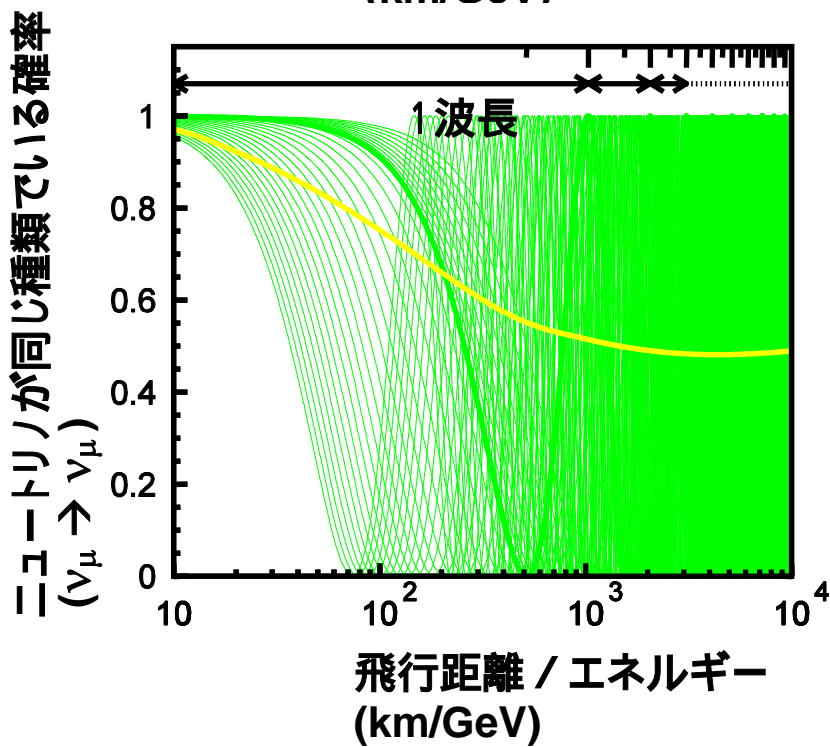
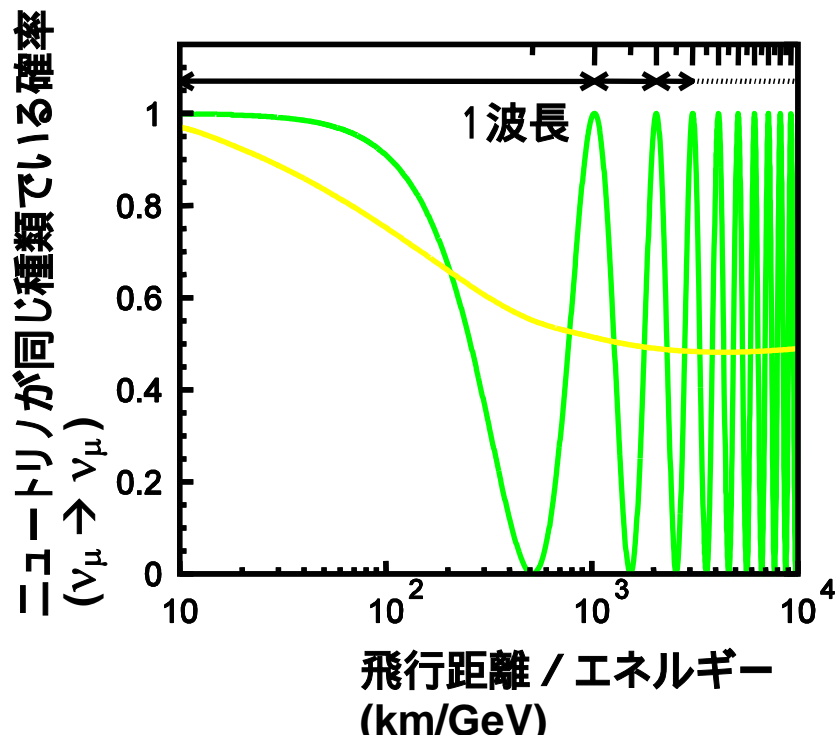


図2(イメージ図): 図1と同じくニュートリノ振動によってニュートリノが消える様子をしめす。横軸のスケールをlogとして、小さい(飛行距離 / エネルギー)から大きい(飛行距離 / エネルギー)まで1枚の図で示したもの。大気ニュートリノで、下向きに飛来するもの(飛行距離は数10km、代表的エネルギーは1 GeV)は、ほとんど振動の効果が見えないが、上向きニュートリノ(数100~10,000km)には振動の効果があることが理解できる。

実際には、すべてのデータを使うと、飛行距離やエネルギーの測定の不定性が大きいデータ(分解能の悪いデータ)があるため、下図のように振動のパターンがぼけてしまい、平均的には黄線で示すような振る舞いになってしまう。この段階では、波打ちは見えない。

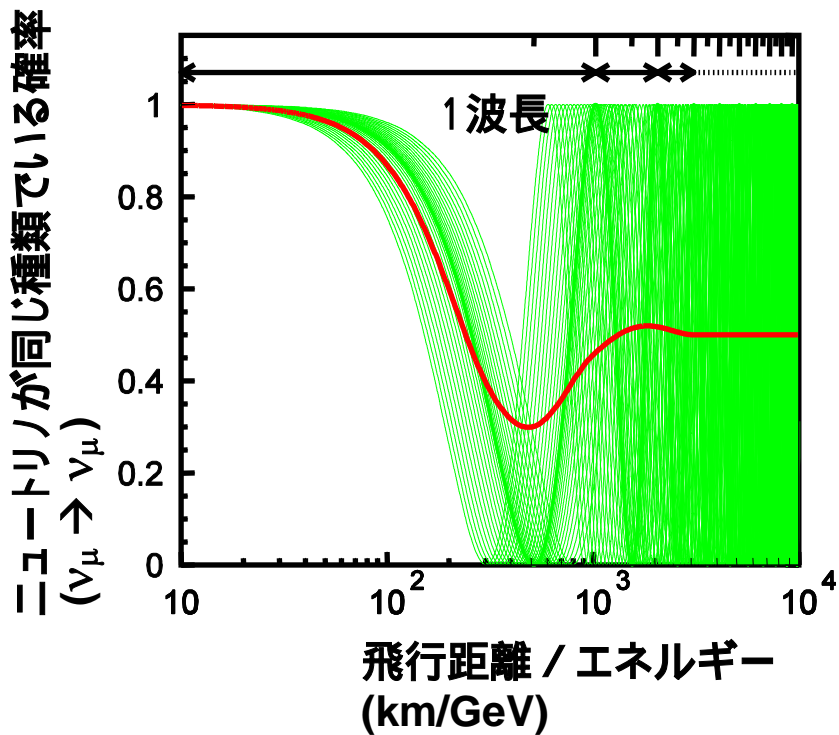


図3(イメージ図): 図2と同様であるが、距離の不定性が小さく、エネルギー分解能の良い事象だけを使った時に、ニュートリノが消える様子がどのように変わるかを示したもの。ニュートリノ振動に特徴的な波打ちが観測されるはずである。

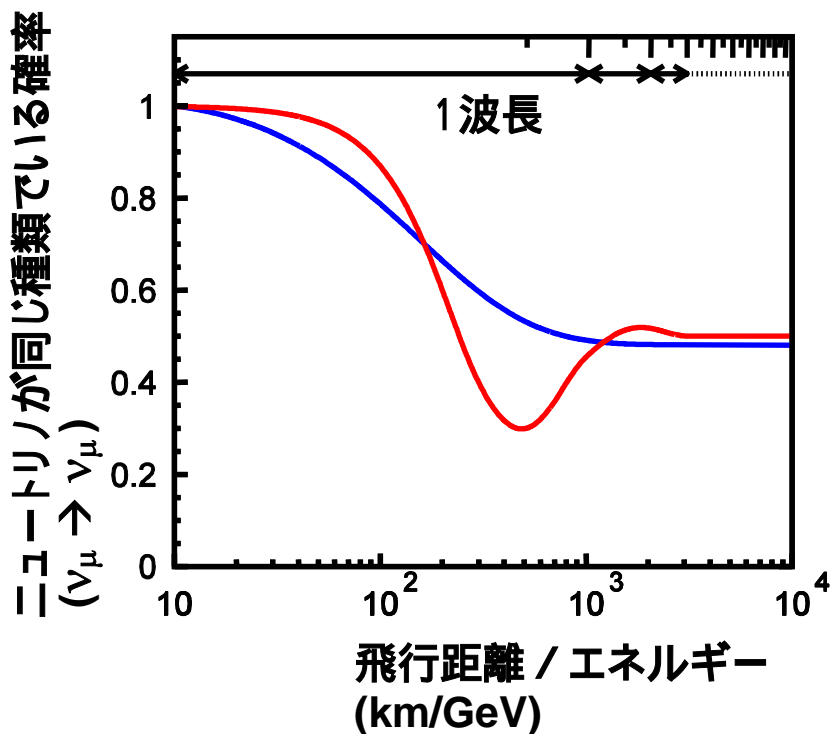


図4、青線は、「ニュートリノ崩壊」で予想されるニュートリノが消える様子。分解能の良いデータだけを選ぶなど、解析の改良により、特徴的な波打ち(赤線)が観測できると、「ニュートリノ崩壊」説に決定的な止めがさせる。

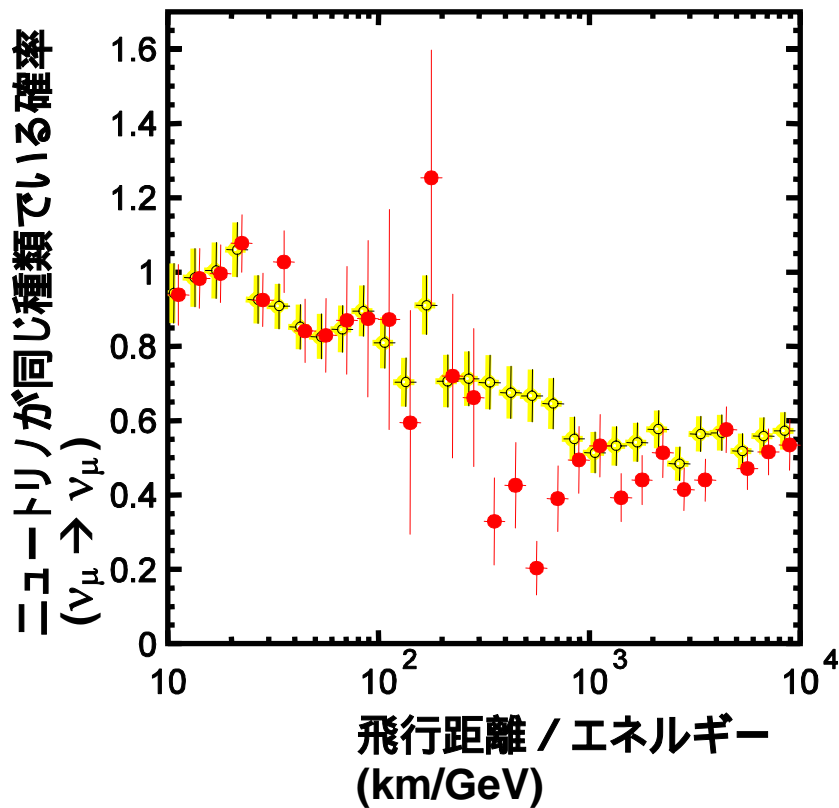


図5: 黄色いデータ点(黒で影)は、全データを使った解析で、分解能が悪いデータも含む。赤い点は、分解能の良いデータのみを選んだときのもので、300 ~ 700 kmあたりに、窪みが見える。

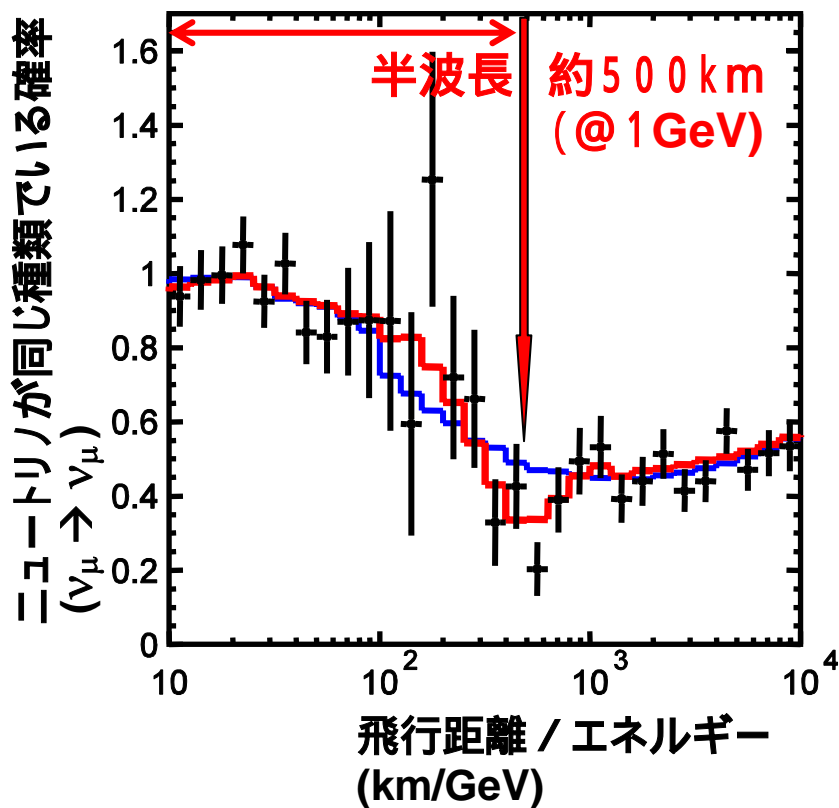


図6: 実験データ(黒)はニュートリノ振動(赤線)で予想されるように大きく減って、また増えてくる波打つ様子を示している。最も減ったところが、半波長に相当する。図から、直ちに半波長が(平均的大気ニュートリノエネルギーである1 GeVの時)約500 km、波長が約1,000 kmであることが分かる。青い線はニュートリノ崩壊から予想されるもの。実験データと合わないことが分かる。

(1) スーパーカミオカンデ実験グループは、日本、アメリカ、ポーランド、韓国の研究者からなる国際共同実験である。参加機関及び研究者数は、

国内

Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo (19)
Research Center for Cosmic Neutrinos, Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo (9)
Gifu University (1)
High Energy Accelerator Research Organization (KEK) (11)
Kobe University (1)
Kyoto University (11)
Miyagi University of Education (1)
Nagoya University (1)
Niigata University (2)
Okayama University (1)
Osaka University (5)
Shizuoka Seika Collage (1)
Shizuoka University (1)
Tohoku University (5)
Tokai University (2)
University of Tokyo (1)
Tokyo Institute for Technology (4)

外国

Boston University (6)
Brookhaven National Laboratory (1)
University of California, Irvine (10)
California State University (3)
Chonnam National University (3)
Duke University (1)
George Mason University (1)
University of Hawaii (5)
Indiana University (1)
Los Alamos National Laboratory (1)
Louisiana State University (3)
University of Maryland (4)
Massachusetts Institute of Technology (1)
University of Minnesota (1)
State University of New York, Stony Brook (9)
Seoul National University (2)
Sungkyunkwan University (2)
Warsaw University (2)
University of Washington (6)

国内 17 研究機関 76 名、 国外 19 研究機関 62 名 計 36 研究機関 138 名

会見参加者：

鈴木洋一郎 教授 スーパーカミオカンデ実験代表者

(東京大学宇宙線研究所・神岡宇宙素粒子研究施設長)

梶田隆章 教授 スーパーカミオカンデ実験執行委員会委員^{*})

(東京大学宇宙線研究所・宇宙ニュートリノ観測情報融合センター長)

中村健蔵 教授 スーパーカミオカンデ実験執行委員会委員

(高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・物理第3系主幹)

^{*})スーパーカミオカンデ執行委員会は、実験代表者と日本人研究者2名、アメリカ人研究者2名の計5名からなり実験グループの方針等を議論する。日本人委員は上記3名であり、アメリカ人委員は、

H. Sobel 教授 Department of Physics, University of California, Irvine

J. Stone 教授 Department of Physics, Boston University

の2名である。この2名は米国の予算当局に対しては、スーパーカミオカンデの **co-spokespersons** の役目をする。

注意：本件については、下記の時間以降に公表いただくようご協力お願いいたします。

テレビ・ラジオ・オンライン 7月5日(月)午後5時より

新聞紙面 7月6日(火)朝刊より