

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654077

研究課題名(和文) 飛行時間を使ったニュートリノの質量絶対値に関する直接測定

研究課題名(英文) Direct neutrino mass measurement using Time of Flight

研究代表者

丸山 和純 (Maruyama, Takasumi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：80375401

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子物理に残された問題の中の一つに、ニュートリノ質量が未だ直接測定されていないという問題がある。ニュートリノ振動で測定できるのは、複数ある質量固有値の2乗差のみ。本研究は、ニュートリノが特殊相対論に基づいて運動すると仮定し、ニュートリノの生成地点と検出地点間の飛行時間エネルギー依存性を測定することによってニュートリノ質量絶対値を探索する方法を探る。

まず始めのトライとしてT2K実験で295km飛行するニュートリノの飛行時間エネルギー依存性を測定し、 μ ニュートリノの質量に上限を与えた。また、その上限値を更に小さくするために、ハードウェア精密較正や異なったビーム・検出器を使う方法について考察した。

研究成果の概要(英文)：One of the most interesting topics in the elementary particle physics field is to measure the neutrino mass directly, not m^2 from neutrino oscillations. This research uses the energy dependence of the Time-of-Flight of neutrinos to measure it since the special relativity tells that lower energy neutrinos have longer Time-of-Flight. We first use the data taken for the T2K experiment, and had results, $M_{\nu} < 2.4 \text{ MeV}$. Then we investigate how to improve the results with the precise calibration of each hardware components of the T2K. We first measured the accuracy of the time synchronization of the new GPS system using TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer) with NICT laboratory, and the accuracy of the synchronization is better than 5ns. The calibration of the neutrino beam creation part was also performed, and the accuracy at present is better than 3ns. Finally, the new experiment to have a good sensitivity was considered.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ニュートリノ 質量 直接測定

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノの質量は、ニュートリノ振動を通して質量固有値の2乗差のみが分かっている状況が10年以上続いている。つまり、質量の絶対値は分かっていない。その直接的探索はいくつかの方法で行われているが、未だに質量を測定できていないうえに、測定に仮定も多い。(例;ニュートリノ無2重崩壊はニュートリノがマヨラナ型であることを仮定しているし、宇宙論は他のたくさんのパラメータが既知であることを仮定している)

そんな中、新しい仮定が少ないニュートリノの質量直接測定を行う方法・実験を考えることは重要であった。

2. 研究の目的

本研究は、ニュートリノ飛行時間のエネルギー依存性を測定することにより、ニュートリノの(質量固有値の2乗差ではなく)質量絶対値を探索する。これは、ニュートリノの運動学が、特殊相対性理論に基づくことだけを仮定すれば良く、他の方法に比べて圧倒的に測定に関する仮定が少ない。基本的にエネルギーの低いニュートリノほど、長い飛行時間を持つという単純な理論に基づく。また、良く知られているような超新星を使う方法ではなく、人工的に生成できる μ ニュートリノを生成・検出し、現存する精密な時間測定装置を使うことにより、どの程度までニュートリノの質量上限値を押さえることができるのかを試みる全く新しい方法である。

これは、最近のT2K実験、MINOS実験、OPERA実験等の長基線ニュートリノ実験が数百100km~1000kmの地球規模の距離を使いつつも、GPSを使うことによって、生成・検出地点での時間同期が高い精度で行えることによって初めて見えてきた方法でもある。一般に、300km離れた距離をニュートリノが飛行する時間は約1msである。

ニュートリノの上限値を既存の実験データで求めた後、その結果を現状の実験内で向上する方法があるか、また、どのような新しい実験を考えれば良いかという考察を行う。

3. 研究の方法

(1)具体的なニュートリノの上限値を求めるために、まずT2K実験データを使用する。T2K実験は茨城県東海村にある、J-PARC施設で人工的なミューニュートリノを生成し、295km離れた、岐阜県神岡町にあるスーパー神岡検出器でニュートリノを検出する実験である。T2K実験では、数10nsの安定性で飛行時間を測定することができて、生成されるミューニュートリノの平均エネルギーも他の長基線ニュートリノ実験よりも数倍から10倍小さい。これは、特殊相対論的に低いエネルギーほど飛行時間が大きくなるという効果を見るには有利である。

(2)上限値が求まったら、既存の実験でどこまで結果を良くできるかについて、考察を行う。既存の実験の場合、飛行時間の測定精度を上げるのが最も効率的な方法であるので、その精度向上が各ハードウェアコンポーネントでどの程度まで達成できるかを調べる。ここでは、同じ人工衛星を見るGPSをT2Kに新たに導入し、その精密較正を行った。また、ニュートリノの生成部分についても、精密較正を行う。

(3)既存の実験ではなく、新しい実験を考えた場合に、どのような実験を考えると、質量探索に関して最も性能が良くなるかを考察する。

4. 研究成果

(1) T2K実験での結果

この結果は発表論文にまとめられている(現在、Physical Review Dにも投稿中)、最初に結論を言えば、90%信頼度の上限値が2.4MeVという結論を得た。これは世界最高の直接測定(PDG[1])には届かないが、測定のポテンシャル将来性を十分示すものであった。

本測定では、まず、実験内で飛行時間測定の安定性がどれほどの精度で保証されるかを確認した。これは複合的に、ニュートリノの生成部、東海内でニュートリノ生成時間を実際に測定するニュートリノモニター検出器、GPSシステム、スーパー神岡検出器から不定性が生じるからである。結論として、20ns~30nsの安定性で飛行時間を測定できることを理解した。

次に、飛行時間のエネルギー依存性を見た。図1を見ると、スーパー神岡検出器で検出されたニュートリノはどのエネルギー領域でも特殊相対論予測と飛行時間が誤差の範囲で一致していることが分かる。

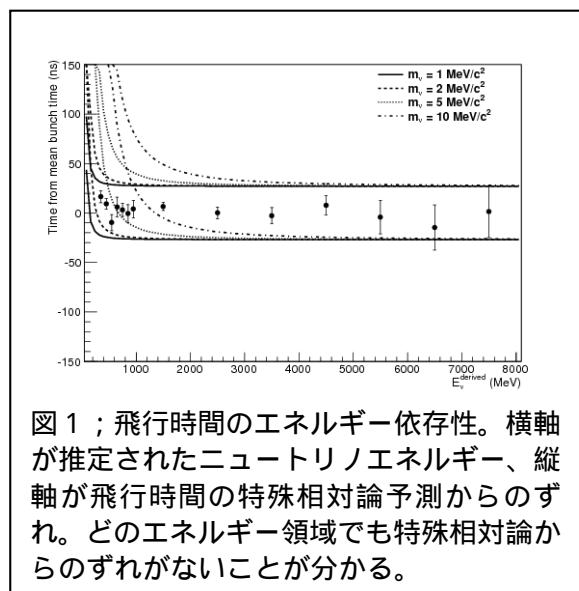


図1; 飛行時間のエネルギー依存性。横軸が推定されたニュートリノエネルギー、縦軸が飛行時間の特殊相対論予測からのずれ。どのエネルギー領域でも特殊相対論からのずれがないことが分かる。

また、この図には、ニュートリノに質量があった際の飛行時間のエネルギー依存性も重

ね書きしている。上下2つある線の幅が、測定系の系統誤差を表す。ニュートリノ質量について明確な情報を与えていることが分かる。

(2) ハードウェア 機器の精密較正

今回の結果を更に良くするには、基線を更に長くする(長い距離を飛ぶほど飛行時間が長くなり、エネルギー依存性の差が見やすくなるから) ニュートリノエネルギーを更に低くする(前述したとおり、低いエネルギーのニュートリノであればあるほど、飛行時間が長くなるから) 飛行時間測定の精度を上げる(図1の不定性の幅が小さくなればなるほど、依存性がより明確に見えるようになるから)のおおよそ3つの方法が考えられる。

既存の実験では、 γ をパラメタとして変更するのは難しいため、本研究では、について研究を進めた。

については、本研究では、次の2点を行った。

同じ衛星を東海と神岡の時間同期に使う新GPSシステムの導入と、その精密較正

ニュートリノビーム生成時間を測定する機器の精密測定。

GPSシステムは、人工衛星が発する電波(人工衛星に積まれた原子時計と同期した電波)を地上で捉えることによって、ある地点での絶対時間を保証できるシステムだが、T2K実験で使われているGPSシステムは、東海と神岡で見ている人工衛星が違うために、同期性の精度が現在の最新のものに比べ悪い。そこで、T2K実験では、最新鋭のGPSシステムを導入することによってその精度を上げることが可能かどうかを試した。(このGPSシステムはバックアップ機器として、2013年に導入された。)この最新鋭のGPSシステムは、東海と神岡で(複数の)同じ人工衛星を見ることによって、時間同期の精度を上げることができる。通常精度が数nsという仕様である。

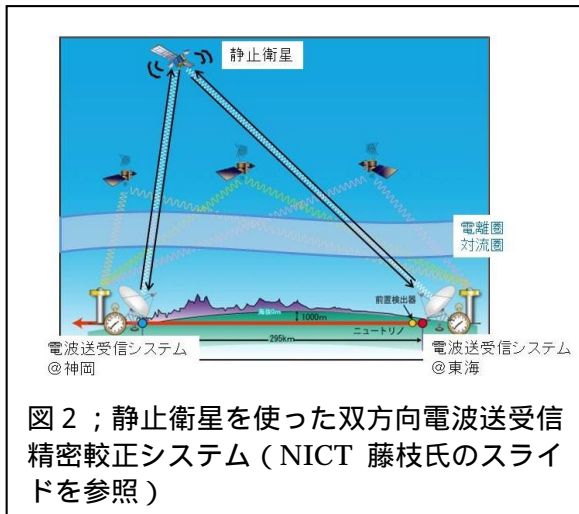


図2 ; 静止衛星を使った双方向電波送受信精密較正システム (NICT 藤枝氏のスライドを参照)

この最新鋭のGPSシステムを、静止衛星を使った(GPSとは独立の)方法を使って、精密較正をNICT研究所との共同研究で行った。

この方法と結果は引用文献の[2](既にNICT共同研究者が、IEEE国際海外でポスターとして発表したもの。現在、IEEEのプロシーディングスとして準備中。)に詳しいが、かいつまんで言えば、東海と神岡に同一型の電波送受信機を設置した後、静止衛星を経由して同時に東海 神岡、神岡 東海双方向に発した電波の受信時間を比較し、その同時性を見るものである(図2)。この方法では、GPSシステムで同期精度を悪くする大気中の電離圏・対流圏の影響を系統的に最小にできる(東海 神岡の電波パスと神岡 東海の電波パスが全く同じ経路を通るため)ため、最新鋭のGPSシステムよりも更に同期性能が10倍程度良く、精密較正に最適である。この精密較正の結果として、東海-神岡間の時間同期性は、最新鋭のGPSシステムを使えば、系統誤差込みで5ns以内で保証されることが示された[2]。

また、ニュートリノ生成時間を精密に理解するため、ニュートリノが生成される直前までの陽子ビームの測定装置について、検出器・ケーブル・エレクトロニクスによる遅延時間の徹底的な較正を行った。これはオシロスコープを使った単純な測定ではあるが、全てのコンポーネントについて、1つ1つ洗い出す必要があるため、根気が必要な作業である。この結果、ビームラインにある全ての検出器・ケーブル・エレクトロニクスの遅延時間を3ns以内の精度で理解することができた。現在、論文を用意して、コラボレーション内で回覧している段階である。

これらの精密較正の結果、ニュートリノ生成部及びGPSシステムの同期性については、5ns程度で理解できることを示した。スーパー神岡検出器に関しては、検出器が巨大なうえ、データ取得システムが複雑であるため、精密な較正はできなかった。

(3) 新しい実験の考察。

ニュートリノの質量上限値に関して考察をすると、上限値はおおよそ基線の距離、飛行時間分解能の平方根に比例するのに対し、ニュートリノエネルギーには比例することが分かる。そこで、最も効率的な実験は、エネルギーをT2Kよりも下げた実験を考へることであることが分かった。また飛行時間の測定精度は検出器の測定精度よりも、加速する陽子のビームが元々持つ時間幅(バンチ幅)や、人工ニュートリノが作られる際に、陽子から中間子を経由して、中間子がニュートリノを生成するまでの中間子の運動量などが大きな時間不定性を与えることが分かった。つまり、検出器を工夫するよりも、ビームに関して新たな努力をするべきであることが判明した。

これに伴い、加速器の専門家と議論を行っ

たところ、非常に時間幅の狭い電子ビームを使って、ニュートリノ生成反応に ($e+p \rightarrow \nu+n$) を使えないかどうか検討するのが良い、というコンセンサスを得た。ただし、これらは現在は現実性が低いため、ビームの開発等には開発研究が必要であることが理解された。

典型的に計算された例を見ると、基線 1 km、ニュートリノエネルギーが 5 MeV、飛行時間測定の分解能が 50ps で 1000 事象測定できたとすると、90%信頼度で 1.7keV の質量上限値を与えられそうである。

引用文献

[1] Particle Data Group web page

<http://pdg.lbl.gov/>

[2] EFTF 2014 conference; poster session

http://www.epapers.org/efTF2014/ESR/session_view.php?PHPSESSID=4dkgqh6cp1q9if3

[a6fmqgf4hhl&session_id=18](http://www.epapers.org/efTF2014/ESR/session_view.php?PHPSESSID=4dkgqh6cp1q9if3a6fmqgf4hhl&session_id=18)

の 7083 番の発表。(藤枝氏)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

K.Abe, T.Maruyama, et al,

“Upper bound on neutrino mass based on T2K neutrino timing measurements,”

arXiv[hep-ex]. 査読無 1502.06605 2015

pp16 (<http://arxiv.org/abs/1502.06605>)

6. 研究組織

(1)研究代表者

丸山 和純 (MARUYAMA Takasumi)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号： 80375401