

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400287

研究課題名(和文)次世代ニュートリノ振動実験の物理発見能力の検討

研究課題名(英文)Physics discovery potential of future neutrino oscillation experiments

研究代表者

萩原 薫(Hagiwara, Kaoru)

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・教授

研究者番号：50189461

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：東海村のニュートリノを神岡で検出するT2K実験の将来計画として、ビーム基線上約1000kmの韓国東海岸に遠方検出器を設置するT2KK、約650kmの隠岐の島に設置するT2KO計画を提案した。

中国と韓国が計画する中距離原子炉反ニュートリノ振動実験によるニュートリノ質量階層性の決定は困難だが、米国主導による南極大陸氷中のアイスキューブ実験将来計画では決定的な測定が期待できる。

神岡の北方富山県内に強力なサイクロトロンを建設し、静止反ミュオン崩壊ニュートリノをスーパーカミオカンデと8km南に建設予定のハイパーカミオカンデで検出するTNT2K実験で、レプトン混合のCP位相が超高精度で測定できる。

研究成果の概要(英文)：Neutrino mass hierarchy and CP phase can be determined by placing a far detector in Korea (T2KK) or in Oki island (T2KO) along the T2K baseline.

Neutrino mass hierarchy determination is challenging for medium baseline reactor neutrino experiments planned in China and Korea, but it can be determined swiftly at PINGU, a proposed upgrade of the ICECUBE detector in Antarctica.

Leptonic CP phase can be measured very precisely if we construct a powerful cycrotron, producing neutrinos from stopped muon, by measuring its oscillation at Super-Kamiokande and at Hyper-Kamiokande.

研究分野：素粒子理論

キーワード：ニュートリノ ニュートリノ振動 ニュートリノ質量 レプトン混合 CP非保存

1. 研究開始当初の背景

2012年3月、中国のダヤベイ原子炉反ニュートリノ振動実験と、韓国のRENO原子炉実験で、第一世代と第三世代ニュートリノの1-3混合角が精密に測定された。その結果、ニュートリノのフレーバー振動実験によって測定可能な物理量は、三世代ニュートリノモデルでは、ニュートリノ質量の階層性(2世代、あるいは3世代のニュートリノ質量が縮退している可能性を確認するか排除する)、CP非保存位相の測定、そして2-3世代混合角の縮退の解除、の三課題であることが明らかとなった。

2. 研究の目的

ニュートリノ振動の将来実験について、上記三課題に絞ることで、それぞれの物理的発見能力と測定精度とを系統的に評価し、比較検討することで、素粒子実験に携わる方々に有用な情報を提供し、また、新しいアイデアの実験を提案することを目的とした。

3. 研究の方法

これまで日本がリードして来た、加速器ニュートリノ振動実験、東海村JPARCで生成されたニュートリノを神岡のスーパーカミオカンデ検出器で計測するT2K実験の将来計画として、ニュートリノビーム基線上の韓国東海岸(T2KK)または隠岐の島(T2KO)に遠方検出器を設置する提案の物理的発見可能性を定量的に評価する。中国と韓国で検討されている原子炉反ニュートリノ振動を50km程度の中基線距離で観測する将来実験(JUNO、RENO50)については、それらが第一目標と据えるニュートリノ質量階層性の決定に必要な検出器の能力を定量的に定める。そして米国主導による南極大陸の氷をターゲットとしたアイスキューブ(ICECUBE)実験の将来計画、ピングー(PINGU)による大気ニュートリノ振動検出実験による、物理的発見・測定能力を他の将来計画と共通の枠組みで評価する。ここで、共通の枠組みとは、既知のそして未知の物理パラメータ全ての値を固定せず、既知、及び予想される実験データを用いて許されるパラメータ領域を統計的手法で定め、結果を期待される標準偏差を用いて定量的に示すことである。

4. 研究成果

東海村JPARCで生成されたミュオンニュートリノを神岡の水チェレンコフ光検出器スーパーカミオカンデで測定するT2K実験の可能な将来計画として、ニュートリノビーム基線上、約1000kmの韓国東海岸に遠方検出器を設置するT2KK、そして、基線長が約650kmの隠岐の島に設置するT2KO計画のそれぞれについて、ビームの中心軸からの角度(off-axis angle)を調節して遠方検出器でより高いエネルギーのニュー

トリノを検出することにより、ニュートリノ質量階層性の決定が可能なること、CP位相の測定精度も良いことを明らかにした(論文)。この研究の一番重要な点は、質量階層性の決定のために必要なより高エネルギーニュートリノ散乱で重要となる、中世メソンによる雑音が、最新の水チェレンコフ光解析ツールで大幅に減らすことができることであり、従来の「高エネルギーニュートリノ散乱では電子ニュートリノ出現振動シグナルに対する雑音が高くなる」という問題意識の変更を促したことである。実際、T2KK計画に関する梶田隆章等による最初の提案では、この点を意識して、低エネルギーニュートリノ散乱に特化した実験を提案し、その結果、質量階層性に対する感度をほぼ失ったのである。最近、このT2KK、T2KO両提案実験の測定能力が反ニュートリノビームによる振動実験を加えることで更に大幅に向上することを、韓国の研究者と共に明らかにし、共著論文(Revisiting T2KK and T2KO physics potential and ν_{μ} - $\nu_{\bar{\mu}}$ ratio, by K.Hagiwara, P.Ko, N.Okamura, Y.Takaesu, arXiv:1605.02368)として発表、専門誌EPJCに投稿した(査読中)。

中国と韓国が推し進める基線長50km程度の中距離で原子炉反ニュートリノ振動を検出する計画については、他の将来実験の評価に用いられている標準的な統計解析が可能なることを示し、これらの計画が標榜するニュートリノ質量階層性の決定には超高精度のエネルギー測定が必要となること、一方、既知のニュートリノ混合パラメータの測定精度の飛躍的な向上が見込めることを明らかにした(論文)。この研究では、それまでの研究が主にフーリエ解析の手法によって階層性の決定を目指したために、通常の二乗検定法が使用できなかったことを改め、測定エネルギー分布を直接使用することで、統計誤差の評価、エネルギー測定精度の評価をより一般的な方法でできるようにした。さらに、この方法による誤差の評価と、それまでの、仮想実験を多数回繰り返して誤差を評価する方法との有意差が、簡単な統計的關係から求められることを明らかにした。

米国主導による南極大陸の氷中のニュートリノ実験アイスキューブの将来計画ピングーは、1km立方の巨大なアイスキューブ検出器群の中心部分に多数の氷チェレンコフ光検出器を高密度に設置することで、ニュートリノ検出エネルギー閾値を数GeV領域まで劇的に引き下げ、10GeV以下の領域で有意性のある大気ニュートリノ振動を検出することを目指す。大気ニュートリノ振動は、1998年に、スーパーカミオカンデが検出に成功し、その解析を主導した梶田隆章がノーベル賞を受賞した過程である。しかし、精密測定のためには、まず、地球内を通過するニュー

リノ振動を通過点の電子密度に応じて計算することが必要で、全ての物理パラメータを自由変数として解析する方法を用いるためには、その計算を飛躍的に高速系統化することが必要であった。そのための新しい解析の枠組み「Decomposition method」を提案し(論文)、その成果を用いてピングー実験の定量的、系統的な物理発見能力の評価を行った(論文)。論文では、ニュートリノのフレーバー振動を、地中の電子密度に依存するパラメータと、依存しないパラメータとに分離(decompose)することで、計算速度を飛躍的に高めると共に、実験結果の物理パラメータ依存性を明瞭にすることに成功した。その結果を用いて、ニュートリノ質量階層性については、実験開始後1年で有意な結果が予想されること、さらに、2-3世代混合角の縮退の解除について決定的な測定が期待できることを論文で明らかにした。一方、CP非保存位相の測定については、更なる低エネルギー領域への測定精度の向上が必要となることがわかった。我々の指摘を受けてピングー実験検討グループは現在、検出器の性能向上、より高密度な検出器の設置等によって、CP非保存位相の検出が可能となるアップグレードを検討している。

最後に、研究課題提案時点では想定していなかった、本研究の全く新しい成果として、スーパーカミオカンデが設置されている神岡の北方10km付近の富山県内に、強力なサイクロトロンを設置するTNT2K計画を提案した(論文)。サイクロトロンで生成される荷電メソンを静止させ、その崩壊による反ミュオンも静止させ、静止反ミュオン崩壊に特徴的な反電子ニュートリノの消失振動をスーパーカミオカンデ、及び、そこから8km南に建設予定のハイパーカミオカンデで二重に検出することにより、レプトン混合のCP位相を超高精度で測定することができることを明らかにした。稼働中のスーパーカミオカンデと、計画中のハイパーカミオカンデをそれぞれ、中距離と遠距離の検出器とすることで、効率良く系統誤差を削減できるからである。また、有意な測定は、稼働中のスーパーカミオカンデだけでも可能で、将来計画のハイパーカミオカンデについては、最終計画の5分の1のレベルで既に他の全ての計画を凌ぐ精度を得ることができることを示した。この提案は、クォーク混合のCP位相を測定したBファクトリーに匹敵する強力な実験提案である。提案の核である強力サイクロトロンは、中性子、中間子、K中間子、ミュオンを大量に生成し、K中間子やミュオンを用いた素粒子研究だけでなく、物性・生命研究の一大拠点となるもので、幅広い分野の自然科学研究者と関連する企業、国と地方政府によって真剣に検討されることを期待する。

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5件)

The leptonic CP phase from T2(H)K and μ^+ decay at rest, by J. Evslin, S.-F. Ge, K. Hagiwara, published in JHEP1602(2016)137. (査読有)

Physics reach of atmospheric neutrino measurements at PINGU, by S.-F. Ge, K. Hagiwara, published in JHEP1409(2014)024. (査読有)

A novel approach to study atmospheric neutrino oscillation, by S.-F. Ge, K. Hagiwara, C. Rott, published in JHEP1406(2014)150. (査読有)

Determination of mass hierarchy with medium baseline reactor neutrino experiments, by S.-F. Ge, K. Hagiwara, N. Okamura, Y. Takaesu, published in JHEP1305(2013)131. (査読有)

Physics potential of neutrino oscillation experiment with a far detector in Oki island along the T2K baseline, by K. Hagiwara, T. Kiwanami, N. Okamura, K-i. Senda, published in JHEP1306(2013)036. (査読有)

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕 出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子
核研究所・教授

萩原 薫 (HAGIWARA, Kaoru)

研究者番号：50189461

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：