

平成30年 5月25日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05058

研究課題名(和文) 標準模型を越える物理とニュートリノ

研究課題名(英文) Physics beyond the Standard Model and neutrinos

研究代表者

安田 修 (Yasuda, Osamu)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：50183116

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ニュートリノのフレーバー混合の標準的な枠組みについての知見が蓄積されてきた昨今、近未来のニュートリノ実験で探求できる新物理に注目が集まりつつある。ニュートリノのフレーバーに依存する非標準相互作用はその一つである。実は太陽ニュートリノと長基線原子炉ニュートリノ実験カムランドの質量自乗差に違いがあることが指摘されており、その違いが非標準相互作用からのニュートリノの物質効果によるものではないかという仮説がある。この研究では、将来のハイパーカミオカンデにおける大気ニュートリノ観測実験とT2HKK実験・DUNE実験が非標準相互作用に対してどれだけの感度があるか等に関して詳細に議論した。

研究成果の概要(英文)：Now that we have gained the knowledge on the neutrino flavor mixing in the standard scenario, attention is being focused on new physics which can be probed by the neutrino experiments in the near future. One such example is the nonstandard flavor dependent interaction. In fact it was pointed out that there is some discrepancy between the mass squared difference of the solar neutrino data and that of the KamLAND experiment, and a hypothesis has been put forward to explain this difference from this nonstandard interaction. In our work we have discussed in detail how the experiments, such as atmospheric neutrino observation at Hyperkamiokande, the T2HKK experiment and the DUNE experiment can probe the nonstandard interaction.

研究分野：素粒子論

キーワード：ニュートリノ振動 標準模型を越える物理 フレーバー混合 非標準相互作用 ニュートリノの質量

1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準模型は、後述するニュートリノの質量・混合を除いては、これまでの多くの実験によりその正しさが検証されてきている。2009年から開始している CERN の LHC 実験は従来よりも高い粒子のエネルギーにより標準模型を越える物理を探る試みである。一方、それとは相補的な方法として、ニュートリノを中心としたレプトンセクターにおける新しい物理を探索する可能性が考えられる。ニュートリノの物理学においては、これまでの大気ニュートリノ・太陽ニュートリノ + KamLAND・原子炉ニュートリノ・加速器ニュートリノ等の実験結果により、ニュートリノの質量と、 $(e) \cdot (\mu) \cdot (\tau)$  の3種類のフレーバー状態の間の混合の存在が確立されている。さらには3世代のニュートリノ混合の枠組みにおいて、3つの混合角と2つの質量二乗差がほぼ決定されるに至っている。標準的3世代混合の枠組みで未定なものは、質量パターンと CP 非保存位相のみであり、これらについては、次期計画の大強度加速器ニュートリノによる長基線実験(日本の T2K 実験の第二期計画等)や超巨大ニュートリノ観測装置(日本のハイパーカミオカンデやアメリカの ICECUBE 等)で決定されると期待されている。これらの大強度加速器ニュートリノ長基線実験 + 超巨大観測装置では従来よりも精密な測定が可能になるため、標準的な3世代のニュートリノ混合の枠組みからのずれを探索することも可能であると考えられている。ニュートリノの質量・混合がこの20年くらいの間に確立した過程で、標準的シナリオでは説明できない謎の現象もいくつか報告されてきている。謎の現象とは、(i)1995年の LSND 実験と 2010年の MiniBooNE 実験で反ニュートリノのチャンネル反  $(\bar{\nu}_\mu)$  反  $(\bar{\nu}_e)$  で肯定的結果が出ている;(ii)強い制限を与えていた原子炉ニュートリノ実験結果の解析に使われていた理論値が制限を弱くする方向に改訂されたため、過去の原子炉ニュートリノ実験のデータが肯定的と解釈されるようになっている(原子炉ニュートリノ異常);(iii)ガリウムによる太陽ニュートリノ観測装置の較正実験でニュートリノの欠損が報告されている(ガリウム異常);(iv)大気ニュートリノの sub-GeV 領域(低エネルギー領域)の e-like イベント(電子ニュートリノ  $(\nu_e)$  から発生するとみなされる事象)で観測されている実験値が理論値を上まわっている;(v)アンドロメダ銀河等からの起源不明な 3.5keV の X 線輝線が観測されており、質量 7keV のステライルニュートリノが崩壊した時のシグナルである可能性も議論されている、などである。これらの現象を一つの整合性のあるシナリオで説明できることは困難であるようには思われる。しかし、これらのうち一つでも確証されれば、これらの謎の解決の過程で標準模型の彼方への道が開ける可能性があり、これらの現象

の研究は重要である。特に(v)の報告は素粒子論と宇宙論における謎となっている。

2. 研究の目的

Higgs 粒子の発見で知られる CERN の LHC 実験が従来よりも高い粒子のエネルギーにより標準模型を越える物理の探索を試みるのに対し、それと相補的な方法として、ニュートリノを中心としたレプトンセクターにおいて新しい物理を探索するのが本研究の目的である。具体的には、近未来の大強度ニュートリノ加速器実験・超大型ニュートリノ観測施設における精密実験により測定できると予測される、標準的な3世代の枠組みからのずれに注目して標準模型を越える物理を探索するための現象論的研究を行う。本研究により、現在の国内外のニュートリノ研究計画の次の段階に指針を与えることを目指す。

3. 研究の方法

この研究では主にフレーバーに依存する非標準相互作用

$$\mathcal{L}_{\text{eff}}^{\text{NSI}} = -2\sqrt{2}\epsilon_{\alpha\beta}^{ff'P} G_F (\bar{\nu}_{\alpha L} \gamma_{\mu} \nu_{\beta L}) (\bar{f}_P \gamma^{\mu} f'_P)$$

を議論する。ここで  $G_F$  は主にフェルミ結合定数、 $P=(1 \pm \gamma_5)/2$  は射影演算子  $f_P, f'_P$  は物質中でニュートリノと非標準相互作用をする粒子で u クォーク, d クォーク, 電子のいずれか、 $\epsilon_{\alpha\beta}^{ff'P}$  は無次元の係数である。このとき、ニュートリノの物質中での運動方程式は以下ようになる ( $N_e$  は物質中の電子の密度、 $U$  は混合行列、 $\Delta E_{jk}=E_j-E_k$ ):

$$i \frac{d}{dx} \begin{pmatrix} \nu_e(x) \\ \nu_{\mu}(x) \\ \nu_{\tau}(x) \end{pmatrix} = [U \text{diag}(0, \Delta E_{21}, \Delta E_{31}) U^{-1} + A] \begin{pmatrix} \nu_e(x) \\ \nu_{\mu}(x) \\ \nu_{\tau}(x) \end{pmatrix}$$

$$A \equiv \sqrt{2} G_F N_e \begin{pmatrix} 1 + \epsilon_{ee} & \epsilon_{e\mu} & \epsilon_{e\tau} \\ \epsilon_{\mu e} & \epsilon_{\mu\mu} & \epsilon_{\mu\tau} \\ \epsilon_{\tau e} & \epsilon_{\tau\mu} & \epsilon_{\tau\tau} \end{pmatrix}$$

ここで、これまでの諸実験の結果から以下のような制限があることが知られている:

$$\begin{pmatrix} |\epsilon_{ee}| < 4 \times 10^0 & |\epsilon_{e\mu}| < 3 \times 10^{-1} & |\epsilon_{e\tau}| < 3 \times 10^0 \\ & |\epsilon_{\mu\mu}| < 7 \times 10^{-2} & |\epsilon_{\mu\tau}| < 3 \times 10^{-1} \\ & & |\epsilon_{\tau\tau}| < 2 \times 10^1 \end{pmatrix}$$

すなわち、近似的に

$$\begin{aligned} & \mu = 0 \\ & \text{としてよいことがわかる。一方、} \\ & \epsilon_{ee} = |\epsilon_{ee}|^2 / (1 + \epsilon_{ee}) \end{aligned}$$

という条件が高エネルギー大気ニュートリノ観測から近似的に成り立っていることが知られている。そこでここでは

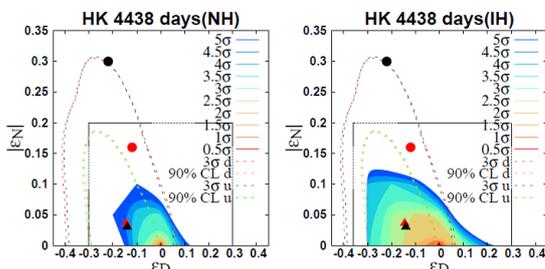
$$A = \sqrt{2}G_F N_e \begin{pmatrix} 1 + \epsilon_{ee} & 0 & \epsilon_{e\tau} \\ 0 & 0 & 0 \\ \epsilon_{e\tau}^* & 0 & |\epsilon_{e\tau}|^2 / (1 + \epsilon_{ee}) \end{pmatrix}$$

という近似の元で解析を行い、 $(\epsilon_{ee}, |\epsilon_{e\tau}|)$ の各点で標準的シナリオと非標準的ケースのそれぞれのイベント数を求めてその $\chi^2$ を計算し、残りの非標準的変数 $\arg(\epsilon_{e\tau})$ と標準的シナリオのパラメータで $\chi^2$ の最小化を行う。このようにして $(\epsilon_{ee}, |\epsilon_{e\tau}|)$ 平面で $\Delta\chi^2 = \text{定数}$ という条件から一定の有意度の許容領域を求め、各実験の非標準相互作用に対する感度を議論する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 大気ニュートリノによる非標準的相互作用探索の現象論

標準模型を越える物理がある時、レプトンのフレーバーを保存しない有効相互作用が一般には現れ得る。そのような有効相互作用はニュートリノの伝播における物質効果に修正項をもたらす。近年、太陽ニュートリノデータによる質量二乗差の値と KamLAND 実験によるその値に  $2\sigma$ 程度の違いがあることが指摘されており、前述の非標準相互作用の存在を仮定するとその齟齬が説明できることが知られている。この研究ではその非標準相互作用を、将来のハイパーカミオカンデ(HK)実験における大気ニュートリノ観測で検出できるかどうかを議論した。研究代表者らによる過去の研究では、HKの同じ観測の感度を解析したが、その手法にはいくつかの問題点があった：(i)三世代の基底を用いて、解析に当たっては、現在すでに強い制約が得られている  $\mu$  ( $=e, \mu, \tau$ )成分を0とし、(ii)  $\mu$ 成分は高エネルギー大気ニュートリノからの制約で  $|\epsilon_{e\tau}|^2 / (1 + \epsilon_{ee})$ となることを仮定していた。この研究ではこれらの2つの条件を仮定せずに解析を行った。その結果、質量パターンが正常階層性か逆階層性かで若干の詳細は異なるが、HKの大気ニュートリノ観測により、正常階層性の場合にはグローバルフィットの最適解が  $3\sigma$ 以上の信頼度でテストできることがわかった。下図の赤(黒)の三角印がuクォーク(dクォ

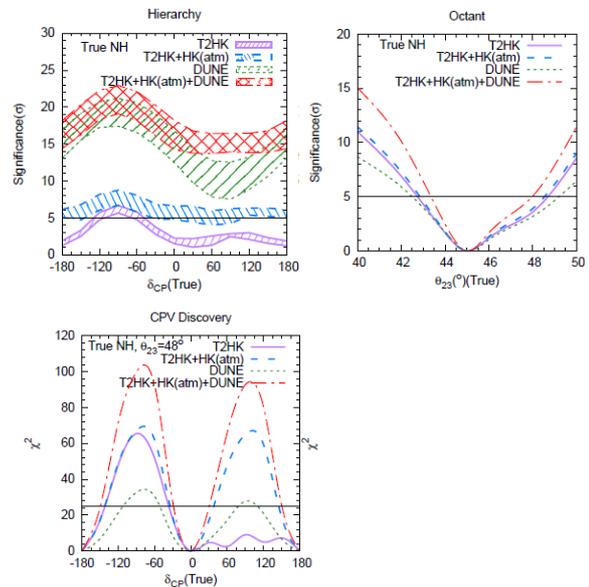


ーク)のみが非標準相互作用を持つとした場合のグローバルフィットの最適解、丸印が太陽・KamLANDのみの最適解であり、色のついた領域が、HKの大気ニュートリノの感度を表

している。

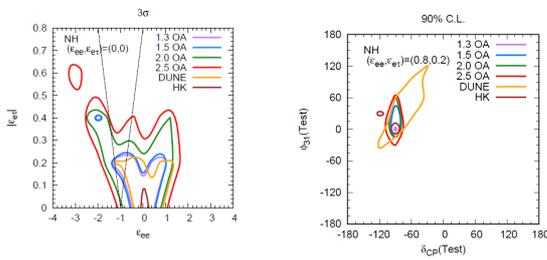
##### (2) ハイパーカミオカンデと DUNE 実験の振動パラメーター測定における相補性

将来のニュートリノ振動実験計画として、加速器ニュートリノ長基線実験では日本の T2HK とアメリカの DUNE が、又、自然のニュートリノ源ではハイパーカミオカンデ(HK)による大気ニュートリノ観測等が現実的なものと考えられている。この研究では、現時点で未定であるニュートリノの質量階層性、 $\theta_{13}$ の符号、CP 非保存位相に対する上記3つの実験の感度を議論した(下図参照)。T2HK + HK の大気ニュートリノ観測と DUNE ではそれぞれ  $5 - 8$  C.L.の質量階層性に対する感度を持つこと、又、これら3つを組み合わせただけの場合には質量二乗差、 $\sin^2 \theta_{23}$ の測定精度はそれぞれ  $0.3\%$ 、 $2\%$ 、 $20\%$ となることがわかった。又、HKの大気ニュートリノ観測で  $\theta_{23}$ のパラメーター縮退が起こる機構を明らかにした。



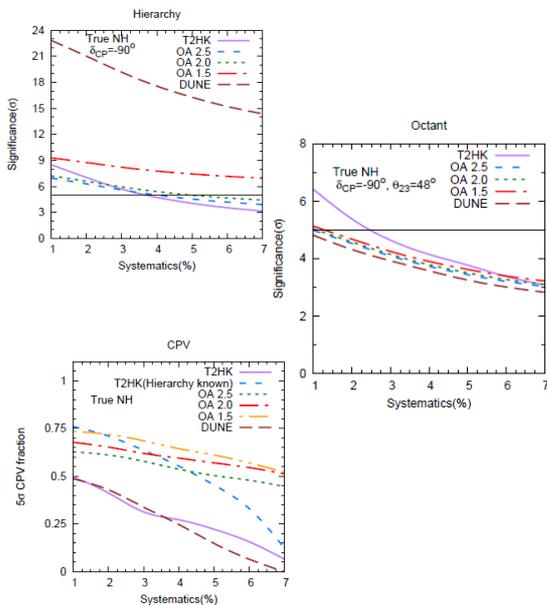
##### (3) T2HKK実験の非標準相互作用に対する感度

T2K実験の拡張計画であるT2HKK実験には基線長が短く、それ単独ではニュートリノの質量階層性に対する感度が低いという問題があることが知られている。それを補う計画として、第二の後置検出器を神岡だけではなく、韓国にも置くというT2HKK実験が提案されている。この研究では、ニュートリノ伝播に影響を与える非標準相互作用に対するT2HKK実験の感度を、簡単のため、非標準相互作用の $\mu$ 成分が0でかつ( $\epsilon_{e\tau}$ )成分が高エネルギー大気ニュートリノからの制限により従属変数になるという仮定の元に議論した。その結果、ビームの中心からのずれの角度が小さいほど感度が高くなり(下図左)標準的と非標準的な2つにCP非保存位相に対する感度は、T2HKK実験の方がアメリカのDUNE実験よりも良いことがわかった(下図右)。

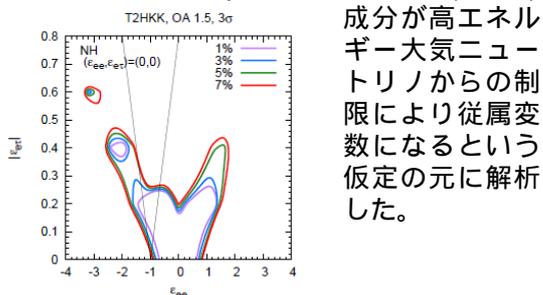


**(4) T2HK, T2HKK, DUNE 実験における系統誤差の効果**

将来計画である T2HK 実験、T2HKK 実験、DUNE 実験では、統計量が多いため系統誤差が重要になって来ると期待されている。この研究では、これら3つの実験において、ニュートリノの質量階層性、 $\theta_{14}$ - $\theta_{23}$  の符号、CP 非保存位相 に対する感度の系統誤差の依存性を議論した(下図)。



又、非標準相互作用に対する感度の依存性も議論した(下図)。その際には、簡単のため、非標準相互作用の  $\mu$  成分が 0 であつ( )



成分が高エネルギー大気ニュートリノからの制限により従属変数になるという仮定の元に解析した。

**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10件)

1 Osamu Yasuda, The sensitivity of the T2HKK experiment to the flavor-dependent non-standard interactions, 査読無, PoS, NuFact2017(2017)(131-1~6).

2 Monojit Ghosh, Osamu Yasuda, Effect of systematics in the T2HK, T2HKK, and DUNE experiments, 査読有, Physical Review D 96(2017)(013001-1~12); dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.96.013001

3 Osamu Yasuda, NSI at Hyper-Kamiokande 査読無, PoS NOW2016(2017)(029-1~3); dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2017.02.008

4 Shinya Fukasawa, Monojit Ghosh, Osamu Yasuda, Complementarity between Hyperkamiokande and DUNE in determining neutrino oscillation parameters, 査読有, Nuclear Physics B Volume 918 (2017)(337~357); dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2017.02.008

5 Shinya Fukasawa, Monojit Ghosh, Osamu Yasuda, Sensitivity of the T2HKK experiment to nonstandard interactions, 査読有, Phys. Rev. D 95, 055005(2017)(1-9); doi.org/10.1103/PhysRevD.95.055005

6 Shinya Fukasawa, Osamu Yasuda, The possibility to observe the non-standard interaction by the Hyperkamiokande atmospheric neutrino experiment, 査読有, Nuclear Physics B Volume 914(2017)(99-116); doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2016.11.004

7 Osamu Yasuda, Constraints on the flavor-dependent non-standard interaction in propagation from atmospheric neutrinos, 査読無, Journal of Physics: Conference Series Volume 718, (2016)(1-5); doi.org/10.1088/1742-6596/718/6/062072

8 Osamu Yasuda, The KTY formalism and nonadiabatic contributions to the neutrino oscillation probability, 査読無, Nuclear and Particle Physics Proceedings Volumes 273-275, (2016)(1789-1794); doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.2

9 Shinya Fukasawa and Osamu Yasuda, Constraints on the non-standard interaction in propagation from atmospheric neutrinos, 査読有, Advances in High Energy Physics Volume 2015(2015)(1-13); doi.org/10.1155/2015/820941

10 Osamu Yasuda, Constraints on non-standard flavor-dependent interactions from Superkamiokande and Hyperkamiokande, 査読無, PROCEEDINGS OF SCIENCE, Volume 226(2015)(1-6); doi.org/10.22323/1.226.0045

〔学会発表〕(計 15 件)

1 安田修, Monojit Ghosh, 太陽ニュートリノから示唆される非標準相互作用の T2HKK と DUNE による検証可能性(一般講演), 日本物理学会 第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 22 日~25 日, 東京理科大学 野田キャンパス.

2 安田修, 将来のニュートリノ実験で期待される物理 ---CP の破れ・非標準相互作用--- (招待講演), 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17 日~20 日, 大阪大学豊中キャンパス.

3 深澤信也, 安田修, 大気ニュートリノ実験からくる異なったパラメトリゼーションの非標準相互作用への制限(口頭発表), 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 21 日~24 日, 宮崎大学木花キャンパス.

4 Osamu Yasuda, New developments in neutrino oscillation phenomenology and search for new physics, Unification and Development of the Neutrino Science Frontier, 5-6 March 2018, Kyoto University Science Seminar House.

5 Osamu Yasuda, Testing NSI suggested by the solar neutrino tension in T2HKK and DUNE, December 18, 2017, A topical conference on elementary particles, astrophysics, and cosmology (Miami2017).

6 Osamu Yasuda, The sensitivity of the T2HKK experiment to the flavor-dependent non-standard interactions, The 19th International Workshop on Neutrinos from Accelerators (NUFACT2017), 25-30 September 2017, Uppsala, Sweden

7 Osamu Yasuda, Sensitivity of the T2HKK experiment to the non-standard interaction, INTERNATIONAL SCHOOL OF

NUCLEAR PHYSICS, 39th Course, 16-24 September 2017, Erice, Sicily, Italy.

8 Osamu Yasuda, Is nonstandard interaction a solution to the three neutrino tensions?, A topical conference on elementary particles, astrophysics, and cosmology (Miami2016) 14 - 20 December 2016, Fort Lauderdale, Florida, USA.

9 Osamu Yasuda, Possible observation of the non-standard interaction effects at Hyperkamiokande, Neutrino Oscillation Workshop (NOW 2016), 4-11 September 2016, Otranto, Lecce Italy.

10 Osamu Yasuda, Complementarity Between Hyperkamiokande and DUNE (invited talk), 12th Rencontres du Vietnam (NuFact 2016), 21-27 August 2016, ICISE, Quy Nhon, Vietnam.

11 Osamu Yasuda, Will atmospheric neutrino experiment at Hyper-Kamiokande see non-standard interaction effects?, 12th Rencontres du Vietnam (NuFact 2016), 21-27 August 2016, ICISE, Quy Nhon, Vietnam.

12 Osamu Yasuda, Synergy of T2HK & DUNE (invited talk), 3rd International Meeting on Large Neutrino Infrastructures, 30-31 May 2016, KEK, Japan.

13 Osamu Yasuda, Searching for non-standard interactions at the future long baseline experiments, A topical conference on elementary particles, astrophysics, and cosmology (Miami2015), 16 - 22 December 2015, Fort Lauderdale, Florida, USA.

14 Osamu Yasuda, Constraints on the flavor-dependent non-standard interaction in propagation from atmospheric neutrinos, XIV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP 2015), 7-11 September 2015, Torino, Italy.

15 Osamu Yasuda, Non-Standard interactions in propagation through atmospheric neutrinos, Neutrino Theory and Phenomenology Workshop (Nu@Fermilab), 21-25 July 2015, Fermilab, USA.

〔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：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://musashi.phys.se.tmu.ac.jp/~yasuda/kibanc-2015/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

安田 修 (YASUDA OSAMU)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：50183116

### (2) 研究協力者

深澤信也 (FUKASAWA, SHINYA)