

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03653

研究課題名(和文)ニュートリノによる新物理の現象論的研究

研究課題名(英文)Phenomenological study of new physics with neutrinos

研究代表者

安田 修 (Yasuda, Osamu)

東京都立大学・理学研究科・教授

研究者番号：50183116

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：低エネルギーの長基線実験でのニュートリノ()振動確率を一般の非標準的相互作用が存在する場合に求めた。実験的誤差と非標準相互作用のパラメーターが十分小さい場合、T2HKとT2HKKの2実験の組み合わせにより、質量階層性、 (23) のoctant、CP位相、非標準相互作用のパラメーター3個を原理的に決定できることを示した。現在のIceCube施設の体積10倍以上の拡張版における高エネルギー大気・宇宙の観測を行えば、 (e) のエネルギースペクトルにへこみが観測されない場合、ステライル振動の混合角 (14) に制限が付けられ、その感度は短基線原子炉による制限よりも良くなることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1998年のスーパーカミオカンデ実験の発見以来、ニュートリノ振動現象について多くの結果が得られており、素粒子の標準模型の中の3世代のニュートリノに質量を与えるという枠組みでそのほとんどが説明されている。しかし、その枠組みで説明出来ないと思われる実験結果も若干存在する。その一つの原子炉ニュートリノ異常と呼ばれる現象は短距離の原子炉ニュートリノ実験でしか検証する方法が知られていなかったが、本研究は高エネルギーの大気ニュートリノや宇宙ニュートリノから制限を加える可能性を指摘し、新たな可能性を切り開いた。又、別な実験結果は非標準的相互作用の存在を示唆しており、その理論的研究の枠組みについても議論した。

研究成果の概要(英文)：Neutrino oscillation probability was derived in the presence of a generic Non-Standard Interaction (NSI) for long baseline experiment at low energy. If the experimental errors and NSI parameters are small, then it is shown that combination of T2HK and T2HKK in principle determines mass hierarchy, octant of $\theta(23)$, CP phase and 2 NSI parameters. On the other hand, it was shown that we can constrain the sterile neutrino mixing angle $\theta(14)$ in the absence of distortion in the energy spectrum of $\nu(e)$, and the constraint will be stronger than that from short baseline reactor neutrino experiments.

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 ステライルニュートリノ ニュートリノの質量

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

1998 年以降、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が次々と発表され、 $\nu_e \cdot \nu_\mu \cdot \nu_\tau$ の 3 種類のフレーバー状態間の混合の枠組みが確立し、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 T2HK 実験・T2HKK 実験やアメリカの DUNE 実験）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になると考えられている。

一方、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 年のアメリカ Los Alamos の LSND 実験と 2010 年のアメリカ Fermilab の MiniBooNE 実験で反ニュートリノのチャンネル $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ 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) 長基線原子炉ニュートリノ実験である日本の KamLAND と太陽ニュートリノ観測の質量二乗差 Δm_{21}^2 の測定値に食い違いが生じている、などである。(i)–(iii) を説明する非標準的シナリオとしてステライルニュートリノ（弱い相互作用すらせず、通常の 3 種類のニュートリノと混合を通してのみ相互作用する粒子）が、(iv) を説明するシナリオとして（ニュートリノのフレーバーを変化させる）非標準相互作用が提唱されており、本研究での主な研究対象となっている。

2. 研究の目的

素粒子物理学における最も重要な課題の一つは標準模型を越える物理の探求である。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求を試みるのに対し、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求するための現象論的研究を行う。特に、標準的な 3 世代のニュートリノ混合のシナリオで説明できない実験結果が現時点でいくつか知られており、その解釈としてステライルニュートリノ・非標準相互作用などの新物理の存在が提唱されている。本研究ではそれらの現象が標準模型で説明できるのか新物理が必要なのかを検討し、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

3.1 非標準相互作用がある場合のパラメーター縮退

本研究の対象はフレーバーに依存する中性カレント非標準相互作用である。そのラグランジアン密度は $\mathcal{L}_{\text{eff}}^{\text{NSI}} = -2\sqrt{2}\epsilon_{\alpha\beta}^{fP} G_F (\bar{\nu}_\alpha \gamma_\mu P_L \nu_\beta) (\bar{f} \gamma^\mu P f')$ で与えられる。ここで f と f' はフェルミオンで、 $f \cdot f'$ は物質中の u クォーク、d クォーク、電子を表す。 G_F はフェルミ結合定数、 P は $P_L \equiv (1 - \gamma_5)/2$ か $P_R \equiv (1 + \gamma_5)/2$ のどちらかの射影演算子を表す。この時、ディラック方程式の 1 成分に対するニュートリノのフレーバー固有状態 $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ に対する運動方程式は以下ようになる：

$$i \frac{d}{dx} \begin{pmatrix} \nu_e(x) \\ \nu_\mu(x) \\ \nu_\tau(x) \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} \nu_e(x) \\ \nu_\mu(x) \\ \nu_\tau(x) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$M \equiv U \text{diag}(0, \Delta E_{21}, \Delta E_{31}) U^{-1} + A \quad (2)$$

ここで U は真空中の混合行列、 A は非標準相互作用の影響を受けた物質ポテンシャルを表し、以下で与えられる：

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix},$$

$$A = A \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + A \sum_{f=e,\mu,\tau} \frac{N_f}{N_e} \begin{pmatrix} \epsilon_{ee}^f & \epsilon_{e\mu}^f & \epsilon_{e\tau}^f \\ \epsilon_{\mu e}^f & \epsilon_{\mu\mu}^f & \epsilon_{\mu\tau}^f \\ \epsilon_{\tau e}^f & \epsilon_{\tau\mu}^f & \epsilon_{\tau\tau}^f \end{pmatrix}.$$

$A \equiv \sqrt{2}G_F N_e$, N_f ($f = e, \mu, \tau$) はフェルミオン f の密度、 $\epsilon_{\alpha\beta}^f \equiv \epsilon_{\alpha\beta}^{ffL} + \epsilon_{\alpha\beta}^{ffR}$ は非標準相互作用のパラメーターである。非標準相互作用を仮定した長基線実験におけるニュートリノ振動の議論は (1) を出発点とし、一定の物質密度を仮定してニュートリノ振動の確率を求める。

3.2 ステライルニュートリノ

原子炉ニュートリノ異常等の現象をニュートリノ振動で説明しようとする、4番目の質量固有状態が必要となる。一方、1990年代の CERN における LEP 実験の結果から、 Z ボゾンと相互作用する軽いニュートリノは3種類に限られることが知られており、もし4番目のフレーバー固有状態が存在するならば、それは Z ボゾンと相互作用しないステライルニュートリノでなければならない。今、ステライルニュートリノの状態を仮定すると、運動方程式は以下のようになる：

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_e(t) \\ \nu_\mu(t) \\ \nu_\tau(t) \\ \nu_s(t) \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} \nu_e(t) \\ \nu_\mu(t) \\ \nu_\tau(t) \\ \nu_s(t) \end{pmatrix}$$

$$M \equiv U \text{diag}(0, \Delta E_{21}, \Delta E_{31}, \Delta E_{41}) U^{-1} + \text{diag}(A_{CC} + A_{NC}, A_{NC}, A_{NC}, 0) \quad (3)$$

U は6個の混合角と3個の CP 位相を持つ 4×4 の混合行列、 $A_{CC} = \sqrt{2}G_F N_e$ は荷電カレント相互作用による物質効果、 $A_{NC} = -G_F N_n / \sqrt{2}$ は中電カレント相互作用による物質効果をそれぞれ表す。

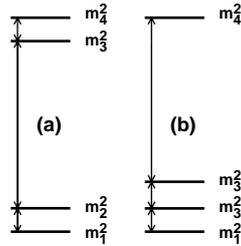


図 1: ステライルニュートリノの2つの質量パターン (a): (2+2)-スキーム, (b): (3+1)-スキーム。

ステライルニュートリノの質量パターンは図 1 のように2つの質量パターンがあるが、(2+2)-スキームは太陽・大気ニュートリノのデータを同時に説明出来ず、排除されている。(3+1)-スキームに関して、 $\nu_e \rightarrow \nu_e \cdot \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ の否定的結果と $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ における LSND と MiniBooNE の肯定的結果を同時に説明は出来ないことが知られている。しかし、原子炉ニュートリノ ($\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$) でも肯定的結果を出している実験が1つ (Neutrino-4) あるので、その結果を別な方法で検証することに意味があると考えられる。本研究では LSND と MiniBooNE の結果がニュートリノ振動以外の効果であるという仮説を立て、(3+1)-スキームを仮定して議論する。

4. 研究成果

4.1 非標準相互作用

長基線実験における $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ のニュートリノ振動の確率は、物質密度が一定の場合、(2) の M がユニタリ行列 \tilde{U} で $M = \tilde{U} \tilde{\mathcal{E}} \tilde{U}^{-1}$, $\tilde{\mathcal{E}} = \text{diag}(\tilde{E}_1, \tilde{E}_2, \tilde{E}_3)$ と対角化されて、近似なしで $P(\nu_\mu \rightarrow$

$\nu_e) = 4 \left| \tilde{U}_{e3} \tilde{U}_{\mu 3}^* \sin \left(\frac{\Delta \tilde{E}_{31} L}{2} \right) + e^{i \Delta \tilde{E}_{32} L / 2} \tilde{U}_{e2} \tilde{U}_{\mu 2}^* \sin \left(\frac{\Delta \tilde{E}_{21} L}{2} \right) \right|^2$ のように表せる。木村-高村-横枕によって発見された方法によれば、物質中のエネルギー固有値 \tilde{E}_j ($j = 1, 2, 3$) が求まれば、 $\tilde{U}_{\alpha j} \tilde{U}_{\beta j}^*$ ($\alpha, \beta = e, \mu, \tau; j = 1, 2, 3$) という量を解析的に求めることが出来る。T2K などの低エネルギー領域 ($E_\nu \sim 0.6 \text{ GeV}$) の長基線実験では $\Delta m_{21}^2 / 2E \sim A \ll |\Delta m_{31}^2| / 2E$ という条件を満たし、太陽ニュートリノと同じように近似的に \tilde{E}_j ($j = 1, 2, 3$) が求まる。その結果、低エネルギー領域で近似の良いニュートリノ振動の確率の解析的表式を求めることが出来る。その際、物質効果のポテンシャルを

$$\tilde{R}_{13}^{-1} R_{23}^{-1} A R_{23} \tilde{R}_{13} \quad (4)$$

のように太陽ニュートリノのフレーバー基底に変換すると都合が良い。T2HK では、基線長が 295km と比較的短いため、(非)標準の物質効果が無視でき、標準の枠組みと同様にパラメータ縮退を解くための議論が出来る。図 2 は $\theta_{23} = 42^\circ$ または $\theta_{23} = 48^\circ$ 、 $\delta = 225^\circ$ の場合に、 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \text{一定}$ の青色実線と、 $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = \text{一定}$ の緑色破線が与える領域が複素数 $z \equiv 2e^{-i\delta} s_{13} s_{23}$ の複素平面上に示されている。(a) は正しい octant ($\theta_{23}^{\text{true}}, \theta_{23}^{\text{test}} = (42^\circ, 42^\circ)$) の場合、(b) ($\theta_{23}^{\text{true}}, \theta_{23}^{\text{test}} = (48^\circ, 42^\circ)$) と (c) ($\theta_{23}^{\text{true}}, \theta_{23}^{\text{test}} = (42^\circ, 48^\circ)$) は間違った octant の場合で、 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ と $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$ の交点が、仮定している $\theta_{23}^{\text{test}}$ から算出される $|z| = 2s_{13} s_{23}$ の絶対値と整合性を持つかで、実験誤差が十分小さければ原理的に θ_{23} の octant を決定できることがわかった。

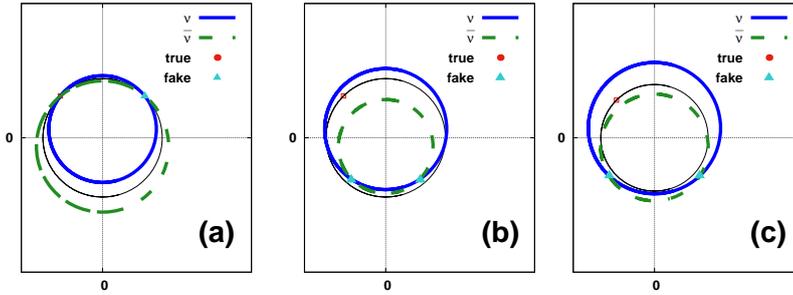


図 2: T2HK においてパラメータ縮退を解くための複素平面

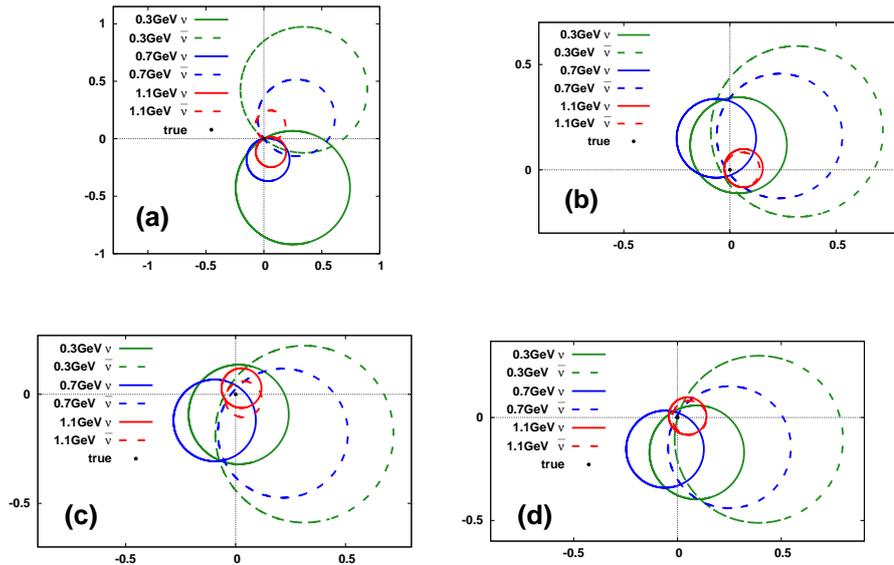


図 3: T2HKK において可能な 4 つのパターンの複素平面

T2HKK は基線長が 1100km と長いため、物質効果が寄与し、 Δm_{31}^2 の縮退を解くことが可能となる。図 3 には $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \text{一定}$ の実線と、 $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = \text{一定}$ の破線が、 $E_\nu = 0.3 \text{ GeV}$ (緑色) $E_\nu = 0.7 \text{ GeV}$ (青色) $E_\nu = 1.1 \text{ GeV}$ (赤色) に対して、与える領域が複素数 $z \equiv (AL/2) U_{\tau 3} \epsilon_N \simeq 0.18 \epsilon_N$ の複素平面上に示

されている (但し、 ϵ_N は (4) で変換された後の物質効果ポテンシャル行列の (1,2) 成分を $A = \sqrt{2}G_F N_e$ で割った変数である)。(a) $\sin \delta$ の符号と Δm_{31}^2 の符号が正しい場合には 6 本の線が一点で交わるが、(b) $\sin \delta$ の符号も Δm_{31}^2 の符号も正しくない場合、(c) $\sin \delta$ の符号は正しくないが Δm_{31}^2 の符号が正しい場合、(d) $\sin \delta$ の符号は正しいが Δm_{31}^2 の符号が正しくない場合、にはそれぞれ一点で交わず、実験誤差が十分小さければ原理的に Δm_{31}^2 の符号が決定できることがわかった。

4.2 ステライルニュートリノ

本研究で考察するのは、(3+1)-スキームにおけるステライルニュートリノ振動で、その質量自乗差 Δm_{41}^2 を 1eV^2 程度と仮定する。ステライルニュートリノに特有な 3 つの混合角のうち、 θ_{24} と θ_{34} はゼロとおき、 θ_{14} のみを仮定して、高エネルギーニュートリノ ($E_\nu \gtrsim 1\text{TeV}$) の振動現象を考える。太陽ニュートリノの質量自乗差 Δm_{21}^2 と大気ニュートリノの質量自乗差 Δm_{31}^2 は、 Δm_{41}^2 と比べて十分小さく、又 $|\Delta m_{j1}^2|/2E \ll A = \sqrt{2}G_F N_e$ ($j = 2, 3$) なので、(3) において標準的な 3 フレーバー混合の混合角である θ_{12} 、 θ_{13} 、 θ_{23} の効果は無視でき、実質的には混合角は θ_{14} のみとなる。 $\sin^2 2\theta_{14} = 0.05$ の時の地球の直径を通過するニュートリノの振動確率 $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$ は図 4 左のように、ある共鳴エネルギーの所でへこみが観測されると期待される。

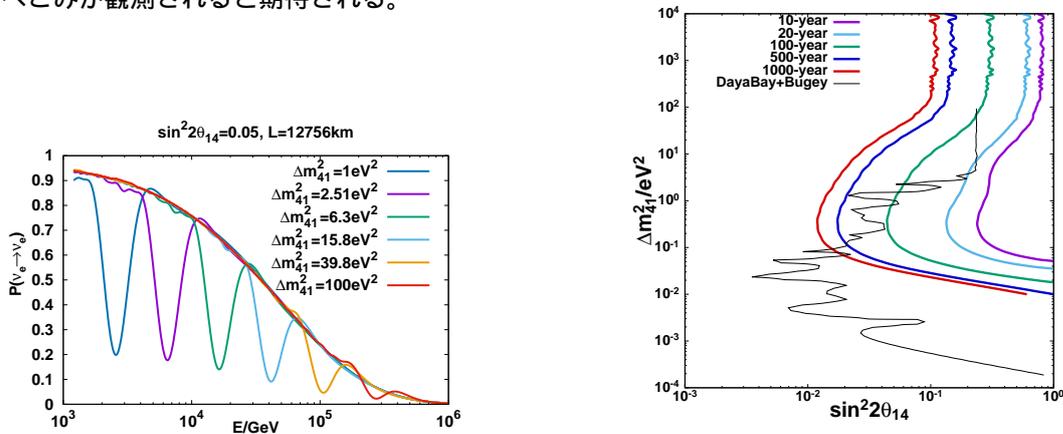


図 4: 左: 地球の直径を通過する場合の振動確率 $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$; 右: IceCube 実験の拡張版による θ_{14} への感度

このような高エネルギーニュートリノは IceCube などの超大型観測装置でのみ可能であるが、さらに ν_e 又は $\bar{\nu}_e$ のフラックスは大気ニュートリノでは全体の約 $1/20$ と少なく、宇宙ニュートリノでは全体の約 $1/3$ であるが元々大気ニュートリノよりも少ないため、統計をためるには現在の IceCube の 10 倍以上の体積を持つ将来の観測装置を仮定せざるを得ない。そのように体積が巨大化された観測装置を仮定すると、エネルギースペクトルのへこみが観測されない場合には θ_{14} に対して強い制限を与えることが出来、図 4 右のようになる。図 4 右では、IceCube 実験の 10 年、20 年、100 年、500 年、1000 年間のデータ取得による感度と表されているが、体積が 10 倍であれば、10 年間の観測で IceCube 実験の 100 年分を達成出来ることになり、これまでの典型的な制限である Daya Bay 実験と Bugey3 実験の制限を大きく改善できることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 M. Ghosh, O. Yasuda	4. 巻 35
2. 論文標題 Testing NSI suggested by the solar neutrino tension in T2HK and DUNE	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Modern Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 2050142--1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217732320501424	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 O. Yasuda	4. 巻 2020
2. 論文標題 Neutrino Oscillations at low energy long baseline experiments in the presence of nonstandard interactions and parameter degeneracy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 063B03--1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 O. Yasuda	4. 巻 NOW2018
2. 論文標題 Systematics in T2HK, T2HKK and DUNE	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 034-1,034-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.337.0034	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 K. Abe, O. Yasuda et al.	4. 巻 2018
2. 論文標題 Physics potentials with the second Hyper-Kamiokande detector in Korea	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 063C01--1-65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Osamu Yasuda	4. 巻 332
2. 論文標題 Recent status of neutrino phenomenology	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 043--1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.332.0043	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wang Yabin, Yasuda Osamu	4. 巻 2022
2. 論文標題 Search for sterile neutrinos by shower events at a future neutrino telescope	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 023B04--1-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yasuda Osamu	4. 巻 2022
2. 論文標題 Neutrino oscillation phenomenology and the impact of Professor Masatoshi Koshiba	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 ptac056--1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 安田修	4. 巻 706
2. 論文標題 ニュートリノとマヨラナ粒子	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 数理科学(サイエンス社)	6. 最初と最後の頁 14-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 安田修	4. 巻 701
2. 論文標題 書評「ニュートリノの物理学」	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 数理科学(サイエンス社)	6. 最初と最後の頁 72-72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 O. Yasuda
2. 発表標題 Neutrino oscillations at low energy LBL experiments in the presence of NSI and parameter degeneracy
3. 学会等名 Neutrino 2020 (poster) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安田修
2. 発表標題 非標準相互作用がある場合の低エネルギー長基線実験のニュートリノ振動とパラメーター縮退
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 O. Yasuda
2. 発表標題 Phenomenology of the nonstandard interactions of neutrinos with the solar neutrino parametrization
3. 学会等名 Miami2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 0. Yasuda
2. 発表標題 Practical tests on the PMNS paradigm
3. 学会等名 3 Neutrinos and Beyond (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安田修
2. 発表標題 ニュートリノ振動研究の現状と展望
3. 学会等名 日本物理学会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Osamu Yasuda
2. 発表標題 Recent status of neutrino phenomenology
3. 学会等名 14th International Conference on Heavy Quarks and Leptons (HQL2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Osamu Yasuda
2. 発表標題 Systematics in T2HK/T2HK/DUNE
3. 学会等名 Neutrino Oscillation Workshop (NOW 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Osamu Yasuda
2. 発表標題 Effect of systematics in the T2HK, T2HKK and DUNE experiments
3. 学会等名 A topical conference on elementary particles (Miami2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安田修
2. 発表標題 ニュートリノ振動実験とニュートリノの非標準相互作用
3. 学会等名 研究会「ニュートリノ原子核反応とニュートリノ相互作用」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yabin Wang, Osamu Yasuda
2. 発表標題 Phenomenology of sterile neutrino oscillations at a future neutrino telescope
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 O. Yasuda
2. 発表標題 CO2 Summary
3. 学会等名 新学術領域研究「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 安田修他, 高原文郎・家正則・小玉英雄・高橋忠幸(編)	4. 発行年 2020年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 912
3. 書名 宇宙物理学ハンドブック	

〔産業財産権〕

〔その他〕

基盤C「ニュートリノによる新物理の現象論的研究」(2018-2021年) http://musashi.phys.se.tmu.ac.jp/~yasuda/kibanc-2018/index.html

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------