

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03578

研究課題名(和文)ニュートリノによる標準模型を超える物理の象論的研究

研究課題名(英文)Phenomenological study of physics beyond the Standard Model by 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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：T2HK実験とDUNE実験でのCP位相測定に対する地球物質密度の不定性の影響を調べた。基線長の長いDUNEでは、物質効果が比較的大きいため、無視出来ない効果が存在することがわかった。長基線実験における八分円縮退を、2004年に研究代表者が提唱したパラメータ縮退の図を用いて議論した。第一振動最大では八分円縮退が解決出来るが、第二振動最大ではその解決が難しくなることがわかった。長基線実験における時間反転不変性の破れを、時間発展がユニタリーな場合とそうでない場合について議論した。その破れのエネルギースペクトルを精密に測定すれば標準的なシナリオからのずれを探索出来る可能性のあることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実験開始が間近となっている長基線実験ではCP位相測定に関して誤差等の詳細な検討が必要になって来ている段階であり、本研究による物質密度の不定性の影響もその詳細の一つとして重要である。長基線実験における八分円縮退の議論は、2012年に原子炉ニュートリノ実験により(13)が決定されてからあまり議論されておらず、T2HK実験・DUNE実験でどのように八分円縮退が解決されるかを理解するのに役に立つ研究である。時間反転不変性の破れはT2HK・DUNE実験後のニュートリノ振動研究の方向性を考える上で重要なトピックスである。

研究成果の概要(英文)：We investigated the impact of uncertainties in Earth's matter density on the measurement of the CP phase in the T2HK and DUNE experiments. At DUNE, which has a long baseline, the matter effects are relatively significant and cannot be ignored. We discussed the octant degeneracy in long-baseline experiments using the parameter degeneracy diagram proposed by the research representative in 2004. It was found that the octant degeneracy can be resolved at the first oscillation maximum, but becomes difficult to resolve at the second oscillation maximum. We also discussed the violation of time-reversal invariance in long-baseline experiments, in cases where the time evolution is unitary and otherwise. It was found that a precise measurement of the energy spectrum of this violation could potentially explore deviations from the standard scenario.

研究分野：素粒子論

キーワード：ニュートリノ振動 フレーバー混合 ニュートリノの質量 パラメータ縮退 時間反転不定性 標準模型を超える物理

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

素粒子の標準模型はこれまでのほとんどの実験事実を説明することに成功し、その正しさが検証されてきている。しかし、標準模型は重力相互作用を含んでいない等の理由から最終理論と考えられてはおらず、標準模型を越える物理を探求することが現在の素粒子物理学における最も重要な研究課題の一つとなっている。2009年から開始されている 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。

ニュートリノの質量・混合は標準模型には存在せず、その存在が標準模型を越える物理学のヒントを提供していると考えられているため、ニュートリノは多くの研究者の注目を集めている。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(その傾向に若干の示唆があるものの)現時点で未定なものは、質量パターン・ $\theta_{23}$  の八分円縮退(大気ニュートリノ振動の混合角  $\theta_{23}$  が  $\pi/4$  より大きいか小さいか)・CP 非保存位相  $\delta$  のみであり、これらについては、現在建設中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 実験とアメリカの DUNE 実験)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では従来よりも精密な測定が可能になるため、これまでは無視出来ると考えてきた地球の物質密度の不定性なども考慮して測定を議論する段階になっている。標準的な3世代混合のシナリオの最終目的は CP 位相  $\delta$  の決定であり、前述の T2HK・DUNE 実験が実現された暁にはその目的が達成される見込みである。

さらに、前述の T2HK・DUNE 実験とその後に提案されている長基線実験では、ニュートリノ振動確率の精密な測定が出来るため、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。非標準的なニュートリノ振動のシナリオとしては、軽い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)、非標準的相互作用、ユニタリー性の破れなどが考えられており、標準的シナリオからのずれを検証することが将来のニュートリノ振動研究の重要なテーマの一つとなる。

## 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

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で与えられる：

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

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

ここで  $A \equiv \sqrt{2} G_F N_e$ 、 $G_F$  はフェルミ結合定数、 $N_e$  は電子の密度 (本研究では簡単のため一定の物質密度を仮定する) であり、 $\Delta E_{jk}$  はニュートリノの質量固有状態に対してニュートリノの運動量  $\vec{p}$  により  $\Delta E_{jk} \equiv \sqrt{\vec{p}^2 + m_j^2} - \sqrt{\vec{p}^2 + m_k^2} \simeq (m_j^2 - m_k^2)/2|\vec{p}|$  で定義されるニュートリノのエネルギー差、 $U$  はニュートリノのフレーバー固有状態と質量固有状態を関係付ける混合行列で、以下で与えられる ( $c_{jk} \equiv \cos \theta_{jk}$ 、 $s_{jk} \equiv \sin \theta_{jk}$ 、 $\theta_{jk}$  は3個の混合角、 $\delta$  は CP 非保存位相)：

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{-i\delta} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ e^{i\delta} s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

ニュートリノ長基線実験におけるニュートリノ振動の議論は (1) を出発点とする。

#### (1) 地球密度不定性

運動方程式 (1) からニュートリノ振動の確率  $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$  と  $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$  を求め、それらから事象数  $N(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$  と  $N(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$  が算出されるが、事象数は  $\rho_{\text{theory}}$  を地球の密度と仮定して理論的に計算した量である。実際には地球の密度にある程度の誤差があると考えられるので、地球密度の誤差を考慮に入れても  $\delta \neq 0$  が結論付けられるかどうか問題となる。そこで理論的な地球密度の値  $\rho_{\text{theory}}$  および  $\delta \neq 0$  なる CP 位相を仮定して算出した事象数  $N_j(\rho_{\text{theory}}, \delta)$  ( $j$  はエネルギースペクトルの  $j$  番目を表す添字) と  $\delta = 0$  の CP 位相で任意の地球密度の値  $\rho$  で計算した事象数  $N_j(\rho, \delta = 0)$  を比較するため、

$$\chi^2(\delta) \equiv \min_{\rho} \sum_j \frac{1}{\sigma_j^2} [N(\rho, \delta = 0) - N(\rho_{\text{theory}}, \delta)]^2$$

という量を導入する。ここで、 $\sigma_j$  はエネルギースペクトル  $j$  番目の事象数の誤差を表し、二つの事象数の違いが誤差と比較して大きいと判断できるかどうかを、 $\delta$  の関数として検定するのが  $\chi^2(\delta)$  という量である。 $\chi^2(\delta) \gg 1$  であれば、地球密度の不定性を入れても  $\delta = 0$  と  $\delta \neq 0$  の違いが示せることになる。

#### (2) 八分円縮退

加速器ニュートリノの長基線実験では、消失チャンネルの確率である  $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$  と  $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu)$  の値、出現チャンネルの確率である  $P \equiv P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$  と  $\bar{P} \equiv P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$  の値をそれぞれ測定する。しかし、この測定は、一定の基線長と一定のニュートリノエネルギーで行われるため、 $P=一定$ 、 $\bar{P}=一定$  という情報からは CP 位相  $\delta$  の値を一意的に決定出来ないことが知られている。特に、原子炉ニュートリノ実験により  $\theta_{13}$  が測定された 2012 年以前には、 $\theta_{13}$  の値、 $\theta_{23}$  の八分円領域、 $\delta$  の値に八通りの解が存在するという八重縮退の現象が存在していた。実際、 $\theta_{13}$ 、 $\theta_{23}$ 、 $\delta$  が未定の時、 $P=一定$ 、 $\bar{P}=一定$  という条件から  $\delta$  を消去し、

$X \equiv \sin^2 2\theta_{13}$ 、 $Y \equiv s_{23}^{-2}$  とおくと、得られる式は以下のように、 $(X, Y)$  平面内の二次曲線となる：

$$16CX(Y-1) = \frac{1}{\cos^2 \Delta} \left[ \left( \frac{P-C}{F} + \frac{\bar{P}-C}{\bar{F}} \right) (Y-1) - (F+\bar{F})X + \frac{P}{F} + \frac{\bar{P}}{\bar{F}} \right]^2 + \frac{1}{\sin^2 \Delta} \left[ \left( \frac{P-C}{F} - \frac{\bar{P}-C}{\bar{F}} \right) (Y-1) - (F-\bar{F})X + \frac{P}{F} - \frac{\bar{P}}{\bar{F}} \right]^2, \quad (3)$$

$$C \equiv \left( \frac{\Delta m_{21}^2}{\Delta m_{31}^2} \right)^2 \left[ \frac{\sin(AL/2)}{AL/2\Delta} \right]^2 \sin^2 2\theta_{12}, \quad \left\{ \begin{array}{l} F \\ \bar{F} \end{array} \right\} \equiv \frac{\sin(\Delta \mp AL/2)}{(1 \mp AL/2\Delta)}, \quad \Delta \equiv \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}.$$

2012年以前には図1(a)のように、通常質量順序 (Normal Ordering; 赤線) と逆質量順序 (Inverted Ordering; 青線) の2通り、 $\sin^{-2} \theta_{23} = 2/(1 \pm \sqrt{1 - \sin^2 2\theta_{23}})$  の2通り、(3) が二次曲線であるために  $Y = \text{一定}$  との交点が2通り、それぞれあり、一般的に八通りの解があり得た。しかし、2012年以降は  $\theta_{13}$  の値が決定されたため、図1(b)のように  $(\theta_{23}, \delta)$  について四通りの解が存在することになった。解の  $\theta_{23}$  の値は実験により異なり、又ニュートリノエネルギーにも依存するので、その様子調べる必要がある。

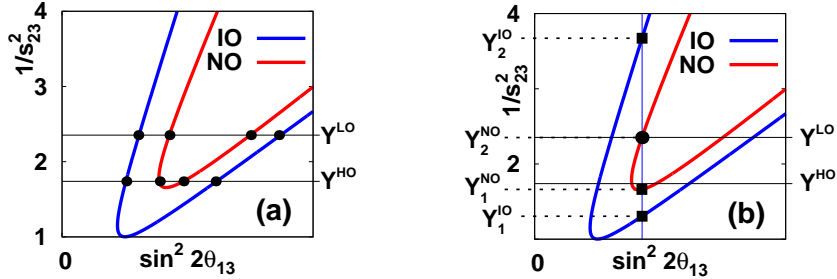


図 1: 八重縮退の図 . (a): $\theta_{13}$  決定前の状況 (b): $\theta_{13}$  決定後の状況

### (3) 時間反転不変性の破れ

(1) から物質中でのニュートリノ振動確率の解析的表式は、木村—高村—横枕の定式化と呼ばれる方法により求めることができる。それによると、ユニタリーな時間発展の場合には、(2) で  $\mathcal{A}$  を一般の  $3 \times 3$  エルミート行列に拡張した場合に定義される行列  $M$  とその自乗  $M^2$  の  $(e, \mu)$  成分を使って以下のように表せる：

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = 16 \operatorname{Im} [(M)_{e\mu}(M^2)_{e\mu}^*] \prod_{j>k} \frac{\sin(\Delta \tilde{E}_{jk} L/2)}{\Delta \tilde{E}_{jk}}$$

ここで行列  $M$  の固有値を  $\tilde{E}_j$  ( $j = 1, 2, 3$ )、 $\Delta \tilde{E}_{jk} \equiv \tilde{E}_j - \tilde{E}_k$  としている。時間発展がユニタリーでない場合には、質量固有状態に対して似たような議論をすることが出来、 $\prod_{j>k} \sin(\Delta \tilde{E}_{jk} L/2) / \Delta \tilde{E}_{jk}$  以外に余分な項が出てくる。時間反転不変性の破れを議論するには、 $\operatorname{Im} [(M)_{e\mu}(M^2)_{e\mu}^*]$  の因子等をさまざまな場合に評価することが必要となる。

## 4. 研究成果

### (1) 長基線ニュートリノ実験における地球密度不定性の影響

現在建設中である日本の T2HK 実験とアメリカの DUNE 実験では CP 位相の値が決定されると期待されている。CP 位相の効果は、一番小さい混合角  $\theta_{13}$  に比例して小さいと考えられているため、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  と  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  の確率を精密に測定しなければならない。これまでの解析では地球密度の不定性は考慮されて来なかったが、CP 位相を精度良く測定するには、地球物質密度の不定性が CP 位相の測定にどれだけ影響するかも考慮する必要が出てくる時

代になってきた。特に基線長の長いDUNE実験では、物質効果が大きく影響するため、地球密度不定性を考慮することが必要である。地球の物質密度の不定性については、地球物理の研究者 Geller-Hara による評価 (2001 年) によって、5%程度が妥当であると議論されているが、この研究では密度の不定性が悲観的な場合も含めて、0%、5%、10%の場合に CP 位相の測定値の精度について調べた。その結果、基線長の長いDUNEでは、物質効果が比較的大きいため、無視出来ない効果が存在することがわかった。

### (2) パラメーター縮退を表す図による $\theta_{23}$ の八分円縮退の理解

この研究では、現在建設中の加速器ニュートリノ実験である T2HK 実験 (日) と DUNE 実験 (米)、さらには将来計画として検討されている T2HKK 実験 (日韓) と ESS $\nu$ SB 実験 (スウェーデン) を念頭に置き、主として八分円縮退が解決できるかを、前述のパラメーター縮退を表す図を用いて議論した。その結果、第1振動最大 ( $E = |\Delta m_{31}^2|L/\{4(n+1/2)\pi\}$  ( $n=0$ )) を観測する T2HK 実験と DUNE 実験では八分円縮退が解決できるが、第2振動最大 ( $E = |\Delta m_{31}^2|L/\{4(n+1/2)\pi\}$  ( $n=1$ )) を観測する T2HKK 実験と ESS $\nu$ SB 実験では解決が難しいことがわかった。一般に、第2振動最大付近のみを観測する実験では、第2振動最大のエネルギー付近で  $(\sin^2 2\theta_{13}, \sin^{-2} \theta_{23})$  平面内の解の  $\sin^{-2} \theta_{23}$  の値がエネルギーに激しく依存することにより、エネルギーに関して平均化すると  $\theta_{23}$  に関する情報が失われ、八分円縮退の解決が難しくなることがわかった。さらに、 $(\sin^2 2\theta_{13}, \sin^{-2} \theta_{23})$  平面内における2次曲線は一般に双曲線・放物線・楕円のどれかになるが、どのエネルギー領域で各曲線になるかを、2次曲線の判別式をエネルギーに対してプロットすることにより議論した。結果として、八分円縮退を解決する第1振動最大付近では双曲線、八分円縮退の解決が困難になる第2振動最大付近では双曲線と楕円の間を激しく往復する振る舞いを持つことがわかった。

### (3) ニュートリノ振動における時間反転不変性の破れ

従来の加速器ニュートリノ実験は、 $\pi$  中間子の崩壊  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ 、 $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$  からの  $\nu_\mu$  或いは  $\bar{\nu}_\mu$  を用いているが、 $\mu^\pm$  の崩壊  $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$ 、 $\mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^+ + \nu_e$  からのニュートリノを用いるニュートリノファクトリーと呼ばれるアイデアが2000年頃に一時注目されていた。ニュートリノファクトリーの特長は非常に小さい値まで  $\theta_{13}$  を測定することが出来るというものであったが、2012年に原子炉ニュートリノ実験により  $\theta_{13}$  が測定されてその値が大きかったことがわかったこと、ニュートリノファクトリーの建設費用が大きいことなどの理由から、ニュートリノファクトリーのアイデアは忘れ去られていた。しかし、2022年に  $\mu$ TRISTAN と呼ばれるアイデアが出され、 $\mu^+$  ビーム同士の衝突実験が既存の技術で可能であることが指摘された。もし  $\mu$ TRISTAN が実現されれば、 $\mu^+$  ビームの衝突実験を実現する過程で、 $\mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^+ + \nu_e$  によるニュートリノファクトリーの可能性が開ける。 $\mu^+$  のニュートリノファクトリーでは、最初から  $\bar{\nu}_\mu$  と  $\nu_e$  が生成されるが、 $\mu^+$  を偏極させることにより  $\bar{\nu}_\mu$  の割合を減少させることが出来、理想的には  $\nu_e$  が優勢のビームを作りことが出来ると期待される。すると、 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$  の確率も測定することが出来、従来の  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  の実験結果と比較することにより、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  と  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$  の差、すなわち時間反転不変性の破れを測定することが出来る。この時間反転不変性は、CPの破れ ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  と  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  の違い) が  $\nu$  と  $\bar{\nu}$  に対する物質効果の違いから来る複雑さを持つのに比べて、簡潔な構造を持つことが知られている。この研究では、標準的な場合、非標準的相互作用がある場合、ユニタリー性が破れている場合の3つの場合について時間反転不変性の破れの解析的な表式を導出し、その破れのエネルギースペクトルを精密に測定すれば実験的に標準的なシナリオからのずれを探索することが可能であることを示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Osamu Yasuda	4. 巻 26
2. 論文標題 Analytic Formulae for T Violation in Neutrino Oscillations	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Entropy	6. 最初と最後の頁 472--1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/e26060472	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 Ghosh Monojit, Yasuda Osamu	4. 巻 989
2. 論文標題 Effect of matter density in T2HK and DUNE	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Physics B	6. 最初と最後の頁 116142--1-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nuclphysb.2023.116142	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 Y. Wang, O. Yasuda	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 Prog. Theor. Exp. Phys.	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 O. Yasuda	4. 巻 2022
2. 論文標題 Neutrino oscillation phenomenology and impact of Professor Masatoshi Koshiba	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 12B105--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 11月号
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	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 -

1. 著者名 安田修	4. 巻 4月号
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	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 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Osamu Yasuda
2. 発表標題 Synergy of HK & DUNE
3. 学会等名 XXX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Osamu Yasuda
2. 発表標題 Theoretical overview
3. 学会等名 21st international workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN22) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022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研究用原子炉によるステライルニュートリノ探索の可能性
3. 学会等名 研究用原子炉を用いた原子核素粒子物理学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安田修
2. 発表標題 Sterile neutrinos and non-standard interactions of neutrinos
3. 学会等名 Kagoshima Workshop on Particles, Fields and Strings 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Wang, O. 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0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

基盤C「ニュートリノによる標準模型を超える物理の象論的研究」  
<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~osamu.yasuda/kibanc-2021/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
---------	---------