

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540281

研究課題名(和文)ニュートリノで探る標準模型の彼方

研究課題名(英文)Physics beyond the standard model probed by 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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：T2Kの第二段階やNova等の近未来の長基線実験で、パラメーター縮退の解決の可能性を議論した。ニュートリノ振動確率に関する木村 高村 横枕の方法を、非断熱的遷移を含み振動の平均化が起こる場合に拡張した。通常よりもはるかに大きな物質効果を感じる非標準的ステライルニュートリノシナリオに対してスーパーカミオカンデの大気ニュートリノによる制限を議論した。ニュートリノの伝播における非標準的相互作用のうち、従来制限の弱かった電子・タウ成分に対し、高エネルギー大気ニュートリノから付いている既知の制約を仮定して、スーパーカミオカンデの大気ニュートリノによる制限と将来のハイパーカミオカンデの感度を議論した。

研究成果の概要(英文)：We discussed the possibility of resolving degeneracy of the mass hierarchy in the near future long baseline experiments such as the phase 2 T2K and Nova experiments. We extended the Kimura-Takamura-Yokomakura formulation, which was developed to obtain the analytic expression for the neutrino oscillation probability in the case with constant matter density, to the case where the matter density varies nonadiabatically and oscillations are averaged over. We discussed the constraint from the Superkamiokande atmospheric neutrino data on the nonstandard scenario of sterile neutrinos, which feel matter effect much larger than the standard case. We discussed the constraint from the Superkamiokande atmospheric neutrino data on and the sensitivity of the future Hyperkamiokande atmospheric neutrino experiment to the electron and tau components of the nonstandard interaction in the neutrino propagation, assuming the known constraint from the high energy atmospheric neutrino data.

研究分野：素粒子論

キーワード：ニュートリノ振動 標準模型を超える物理 フレーバー混合 非標準的相互作用 ニュートリノ質量

1. 研究開始当初の背景

これまでの大気ニュートリノ・太陽ニュートリノ + KamLAND 等の実験結果により、ニュートリノに質量と、 $(e) \cdot (\mu) \cdot (\tau)$ 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で、大気ニュートリノは $(\mu) \cdot (\tau)$ のニュートリノ振動(e, μ, τ の3つのフレーバーの間の転換現象)で、太陽ニュートリノは $(e) \cdot (\mu)$ と $(e) \cdot (\tau)$ の半々の振動で、それぞれ説明されることが明らかにされ、これらの事実と長基線実験の T2K と MINOS の本研究申請時頃の結果により、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。一方、1995年に発表されたロスアラモスの LSND 実験(反ニュートリノのチャンネル反 (μ) 反 (e) の探索)の結果は、上記の標準的な3世代のニュートリノ混合の枠組みでは説明できない現象として知られている。LSNDの結果をニュートリノ振動で説明するためには、新たなニュートリノを最低一つ導入する必要があり、この新たなニュートリノは、他の実験からの制約から、弱い相互作用をしない、ステライルニュートリノと呼ばれるものでなければならないことが知られている。LSNDの結果は、FermilabのMiniBooNE実験で2002年以来追試が行われて来ており、ステライルニュートリノのシナリオは、2007年のMiniBooNE実験の $(\mu) \cdot (e)$ の否定的結果により一時排除されたように見えていた。しかし、その後、いくつかの謎の現象が出て、ステライルニュートリノのシナリオは復活の兆しを見せ、現在再び活発に研究が行われている。謎の現象とは、(i)2010年にMiniBooNE実験の反 (μ) 反 (e) で肯定的結果が出た;(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た(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)本研究申請時頃の宇宙背景放射と宇宙の大規模構造に関する観測結果はニュートリノの数が4であることを示唆している、などである。LSNDから示唆されているステライルニュートリノが存在するのか、又、それが宇宙論から示唆されているものと直接関係あるのかどうかは素粒子論と宇宙論における謎となっている。これらを解決することは重要かつ緊急の課題であり、これら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る。

2. 研究の目的

現在ニュートリノの研究では、原子炉ニュートリノ異常、ガリウム異常、MiniBooNE実験の低エネルギー異常、大気ニュートリノ

sub-GeVのe-likeイベント異常等の謎の現象がいくつか知られている。これらの謎を解明することにより、標準模型を越える物理をレプトンセクターにおいて探ることが本研究の目的である。レプトンセクターにおけるこの研究は、現在行われているLHC実験とは相補的な方法として、重要なアプローチである。本研究により、3世代の標準的なニュートリノ混合を念頭に置いた、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。

(1) 標準的な3世代の混合の枠組みに関してはある程度、 $(\mu) \cdot (\tau)$ の質量と混合が解明されてきている一方、3世代の枠組みでは説明できない現象もいくつか知られている。1995年頃に発表されたLSND実験の結果やその追試のために行われているMiniBooNEの結果の一部、大気 $(\mu) \cdot (\tau)$ のsub-GeVエネルギー領域のe-likeイベントの増大等である。これら謎の現象の説明を試みると同時に、新しい物理に関する知見をニュートリノにより得ようというのが本研究の目的である。

(2) 一方、将来の大強度の長基線実験は、3世代の混合の振動パラメーターを精密に決定するだけでなく、標準的な枠組みからのずれを探ることもできると期待されている。将来の大強度の長基線実験でどのような新物理(3種類以上のニュートリノの混合や非標準的相互作用など)の知見が得られるかを研究することも本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 将来の長基線ニュートリノ実験における新物理探求の現象論
非標準的な相互作用がある場合、3世代のニュートリノ混合の枠組みでも生成・伝播・検出の各過程に新たな効果が現れることが期待される。特に伝播過程に現れる (e) と (τ) の成分は、現時点では非常に弱い制限しかないため、1000km以上の長基線実験で強い制限を与えられると期待される。本研究ではその制限を議論する。

(2) ニュートリノ振動確率の解析的表式の非断熱遷移がある場合への拡張
木村 高村 横枕によるニュートリノ振動確率の厳密公式は、一定密度又は断熱過程の場合にしか議論されていないが、実際には、非断熱遷移の寄与も考慮できるように改良することが望ましい。本研究では非断熱遷移の寄与もある場合に木村 高村 横枕の定式化を拡張し、その現象論を議論する。

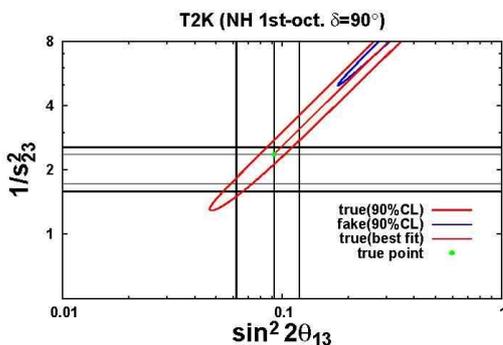
(3) ステライルニュートリノ探索の現象論
標準的ステライルニュートリノのシナリオではLSNDとMiniBooNEの実験結果の間の整合性が疑問視されており、それを拡張した枠組みも提唱されている。本研究ではその拡張されたシナリオの現象論を議論する。

4. 研究成果

(1) **現実的な実験値によるニュートリノ振**

動のパラメーター縮退に関する考察

一定の基線の長さとして一定のニュートリノエネルギーを持つニュートリノ長基線実験で、 (μ) (e) と反 (μ) 反 (e) の確率が測定できたとしても、CP位相は必ずしも一意的に決定できない、というパラメーター縮退の問題が以前から知られている。特に深刻なのは、階層性の不定性による縮退で、正常階層か逆階層かで、CP位相の真の値が大きく影響されることも知られている。2012年春に原子炉ニュートリノ観測によって第三番目のニュートリノ混合角 θ_{13} (13)が決定されたのを受け、パラメーター縮退の問題が解決できるかどうか具体的に議論できるようになってきた。そこで安田が2004年に提唱した新しいプロットの方法によりT2Kの第二段階やNova等の近未来の長基線実験で、パラメーター縮退の解決の可能性を議論した。T2KとNovaを議論した理由は、これらがいわゆる off-axis のニュートリノビームを使う長基線実験で、ニュートリノエネルギーが近似的に一定とみなすことができ、この解析方法が正当化できるためである。解析の結果、T2KではCP位相が (90 ± 20) 度という特別な値を取る場合以外には階層性の縮退を取り除くことができず、基線の長いNovaも、



ほとんど同じ情報しか与えないことが明らかとなった。これは両者とも同じモードを振動最大に近い条件で測定していることが理由であると考えられる。上図はCP位相が90度という特別な値でT2Kで例外的に縮退が解けている場合である。

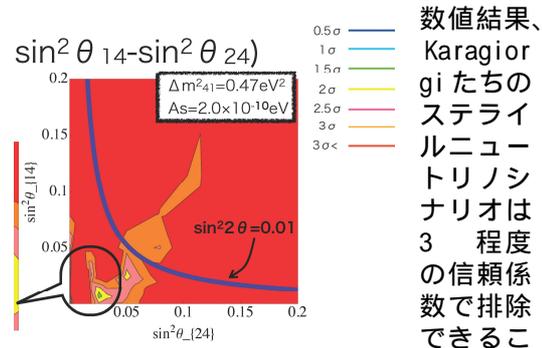
(2) ニュートリノ振動確率に関する木村高村 横枕の方法の非断熱的遷移を含む場合への拡張

物質中でのニュートリノ振動確率の表式は一般に複雑になるが、物質密度が一定の場合には解析的に与えられることが木村 高村 横枕により示されている。さらに、物質密度が断熱的に変化し、かつ基線の長さが大きいため振動の平均化が起こる場合にも木村 高村 横枕の方法を拡張することにより振動確率が解析的に求められることが安田の過去の研究により知られている。一方、物質密度が非断熱的に変化する場合で基線長が大きく振動の平均化が起こる場合には、2準位の場合の非断熱的遷移過程のランダウ-ゼナーによる取扱いを各準位交差に適用することによりある程度解析的に議論で

きると考えられている。しかし、その議論は、有効混合角が求まらなければ具体的に計算することが困難である。実は有効混合角は、エネルギー固有値が何らかの近似により解析的に求まっていれば、木村 高村 横枕の方法により解析的に表すことが可能であることがわかった。その際、有効混合角は、準位交差の近接点で $\pi/4$ になるべし、という条件から決定することができる。この事実により非断熱的遷移を含む場合で振動の平均化が起こる場合にも振動確率を解析的に表せることが示された。その例として、磁気モーメントを持つニュートリノが磁場中を運動する場合について、太陽ニュートリノの質量二乗差を無視でき、位相が存在しないという仮定のもとで議論した。

(3) 大気ニュートリノによる非標準的ステライルニュートリノシナリオに対する制限の現象論

1990年代に、標準的な3世代のニュートリノ振動では説明が出来ないLSNDの実験結果が出た後、その現象を追試するためにMiniBooNE実験がスタートした。その結果は2007年~2010年に報告されたが、MiniBooNE実験の結果はニュートリノと反ニュートリノのチャンネルで簡単な2世代のニュートリノ振動で説明できるものではなく、その後ニュートリノと反ニュートリノに差が出るようなシナリオが提唱された。その一つとして、ステライルニュートリノが通常よりもはるかに大きな物質効果を感じ、MiniBooNE実験のような基線の長さが短い場合でもニュートリノと反ニュートリノに違いが出るという可能性がKaragiorgiたちによって提案された。この研究では、このシナリオがスーパーカミオカンデの大気ニュートリノ観測からどれだけ制限を受けるかを議論した。大気ニュートリノは、伝播する基線の長いニュートリノを数多く観測できる所に特徴があり、ステライルニュートリノと通常のニュートリノに少しでも混合があると、標準的なシナリオからの予言値からずれたイベント数が出ることになる。本研究ではスーパーカミオカンデのモンテカルロの結果を厳密には再現できなかったため、我々のシミュレーションの結果を使って、標準的な場合と大きな物質効果のあるステライルニュートリノでKaragiorgiたちによるLSND+MiniBooNEを説明する混合角の場合とで比較をした。詳細な



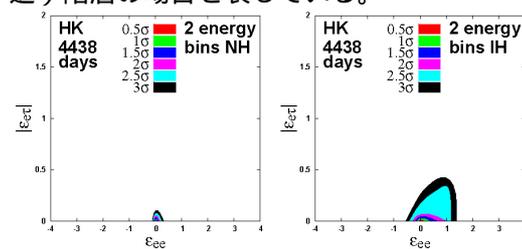
数値結果、Karagiorgi たちのステライルニュートリノシナリオは3程度信頼係数で排除できるこ

とがわかった。上図中の青い曲線は混合角度 (14) - (24) 平面における、Karagiorgi たちのシナリオの領域で、すべて 3 程度の信頼係数で排除されていることを示している。

(4) 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。ニュートリノの伝播における物質効果の標準模型からのずれを無次元パラメーター $(\epsilon_{\alpha\beta})$ ($\alpha, \beta = e, \mu, \tau$) で表すと、 (ϵ_{ee}) 、 $(\epsilon_{e\mu})$ 、 $(\epsilon_{e\tau})$ の各成分への制約が現在最も弱く、これらのパラメーターへの制限を改善することで、新しい物理のヒントが得られる可能性がある。ニュートリノの伝播の物質効果は、10GeV程度のエネルギー領域でかつニュートリノの走る基線が 1000km以上の長い場合に顕著となることが知られており、このエネルギー領域で基線の長い実験を精密に行うことにより、上記のパラメーターの制約を改善できると考えられる。スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノ観測は、エネルギーしきい値が低く、基線の長さも地球の直径程度まで観測できるので、ニュートリノの伝播における物質効果をテストするのに適した実験であると考えられる。本研究では、まず現在のスーパーカミオカンデ実験について上述のパラメーターに対する制限を数値的方法により詳細に解析した。しかし現在のスーパーカミオカンデ実験は残念ながら統計量がまだ十分とは言えず、統計誤差が支配的となっている。そこで、さらに将来のハイパーカミオカンデ実験について同様の解析を行った。解析に当たっては、現在すでに強い制約が得られている $(\epsilon_{\mu\mu})$ ($\epsilon_{\mu\tau})$ 成分を 0 とし、 $(\epsilon_{\tau\tau})$ 成分は高エネルギー大気ニュートリノからの制約で $|\epsilon_{\tau\tau}| \leq 1$ と仮定して計算した。ハイパーカミオカンデ実験の場合にはまだデータは存在しないので、ニュートリノの質量による標準的フレーバー転換のみがある場合と新しい物理がある場合のそれぞれのイベント数の理論的予言値の比較によって解析を行った。その結果、異なるデータセットの間での非自明な相殺が起こるため、全イベント数のみによるレート解析は、エネルギースペクトルによる解析に比べて新物理のパラメーターに対する感度が大きく劣ること、又、逆質量階層性の場合には、ニュートリノと反ニュートリノのイベント数の和のみによる解析がニュートリノと反ニュートリノの識別が出来た場合の解析に比べて感度が劣ることがわかった。下図

は、標準的枠組みが best fit であることを仮定した時のエネルギースペクトル解析によるハイパーカミオカンデ大気ニュートリノ実験の許容領域で (白色部分は 3 以上の信頼係数で排除される領域) 左(右)が正常(逆)階層の場合を表している。



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4件)

1. O. Yasuda, On nonadiabatic contributions to the neutrino oscillation probability and the formalism by Kimura, Takamura and Yokomakura, 査読有, Physical Review D, Vol. **89**, No.9, 2014, 093023 (1-17), <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.89.093023>.
2. O. Yasuda, Phenomenology of neutrino oscillation -Brief overview and its relevance to tau physics -, 査読無, Nuclear Physics Proceedings Supplement, Vol. **253-255**, 2014, 139-142, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucphysbps.2014.09.034>.
3. O. Yasuda, Some constraints on new physics by atmospheric neutrinos, 査読無, Nuclear Physics Proceedings Supplement, Vol. **229-232**, 2012, 543, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucphysbps.2012.09.543>.
4. A. Donini, P. Huber, S. Pascoli, W. Winter, O. Yasuda, Neutrino oscillations physics with the Neutrino Factory, 査読無, Nuclear Physics Proceedings Supplement, Vol. **229-232**, 2012, 516, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucphysbps.2012.09.153>.

[学会発表](計17件)

1. 安田修, ステライルニュートリノの現象論的レビュー, 第28回宇宙ニュートリノ研究会, 2015年2月21日, 東大宇宙線研(千葉県柏市).
2. 安田修, ニュートリノの現象論(招待講演), CRCタウンミーティング2014, 2014年7月12日~13日, 名古屋大学東山キャンパス(愛知県名古屋市).
3. 深澤信也, 安田修, ステライルニュート

- リノに働く新しい物質効果の探索, 日本物理学会 第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27 日~30 日, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市).
- 4 安田修, ニュートリノ振動の解明に向けて, 「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会, 2013 年 4 月 21 日, 東大本郷キャンパス(東京都文京区).
 - 5 安田修, ニュートリノ実験の意義 (招待講演), 研究会「J-PARC におけるニュートリノ物理の展望」, 2013 年 1 月 31 日, 高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市).
 - 6 安田修, Phenomenology of ν_{13} (招待講演), 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 11 日~14 日, 京都産業大学(京都府京都市).
 - 7 安田修, 木村-高村-横枕によるニュートリノ振動確率導出方法の応用, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 2012 年 3 月 26 日~29 日, 広島大学東広島キャンパス(広島県東広島市).
 - 8 深澤信也, 安田修, 大気ニュートリノで探る非標準的相互作用, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 2012 年 3 月 26 日~29 日, 広島大学東広島キャンパス(広島県東広島市).
 - 9 O. Yasuda, The KTY formalism and the neutrino oscillation probability including nonadiabatic contributions, A topical conference on elementary particles, astrophysics, and cosmology (Miami2014), 17 - 23 December 2014, Fort Lauderdale, Florida, USA.
 - 10 O. Yasuda, Constraints on non-standard flavor-dependent interactions from Superkamiokande and Hyperkamiokande, XVIth International Workshop on Neutrino Factories and Future Neutrino Facilities (NUFACT2014), 25-30 August, 2014, Glasgow, UK.
 - 11 O. Yasuda, Constraints on non-standard interactions by atmospheric neutrinos, 37th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2014), 2-9 July 2014, Valencia, Spain.
 - 12 O. Yasuda, Non-standard flavor-dependent interactions and atmospheric neutrinos, A topical conference on elementary particles, astrophysics, and cosmology (Miami2013), 12-18 December 2013, Fort Lauderdale, Florida, USA.
 - 13 O. Yasuda, An analytical treatment of neutrino oscillation probabilities (invited talk), 19th International Symposium on Particles, Strings and

- Cosmology (PASCOS2013), 20-26 November 2013, Taipei, Taiwan.
- 14 O. Yasuda, Constraints on non-standard interactions by atmospheric neutrinos, INTERNATIONAL SCHOOL OF NUCLEAR PHYSICS, 35th Course, 16-24 September 2013, Erice-Sicily, Italy.
 - 15 O. Yasuda, Recent status of neutrino oscillation phenomenology (Invited talk), JPS-KPS joint meeting, 24 April, 2013, Daejeon, South Korea.
 - 16 O. Yasuda, Parameter degeneracy revisited, A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami2012), 13-20 December, 2012, Fort Lauderdale, Florida, USA.
 - 17 O. Yasuda, Theory/Phenomenology Overview (Invited talk), The 12th International Workshop on Tau Lepton Physics (TAU2012), 17-21 September, 2012, Nagoya, Japan.

〔その他〕

ホームページ

<http://musashi.phys.se.tmu.ac.jp/~yasuda/kibanc-2012/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: 5 0 1 8 3 1 1 6

(2) 研究協力者

深澤信也 (FUKASAWA, SHINYA)