

素粒子理論サブグループ

1. 研究活動の概要

以下に素粒子理論サブグループの研究活動を (1-8):ニュートリノ物理の現象論、(9, 10):それ以外の研究項目の順序で記述する。

1) 神岡・韓国 2 検出器系 (T2KK) による (2-3) 角パラメータ縮退の分解 (南方)

昨年度の研究において、東海村に建設中の Japan Accelerator Research Complex (J-PARC) からのニュートリノビームをそれぞれ 0.5 メガトンの水体積を持つ神岡・韓国に設置された同一 2 検出器系によって受ける設定 (Tokai-to-Kamioka-Korea、略して T2KK と呼ばれる) によって、ニュートリノ質量パターン (質量階層性) とレプトン CP 位相の同時決定が可能であることを示した。これはこの設定が南方・布川によって発見された質量階層性に関するパラメータ縮退を分解できることによって可能となった。今年度はこの研究を継続し、T2KK によって残された (2-3) 角にまつわるパラメータ縮退を分解できるかどうかを検討した。韓国検出器は約 1000 km の基線長を持ち、さらに J-PARC からのニュートリノビームが低エネルギー (ピーク値 0.7 GeV) をもつことの二つの理由から太陽ニュートリノ振動に感度がある。この太陽振動項は係数に s_{23}^2 をもつ大気振動項と異なり、係数 c_{23}^2 に比例する。この特徴を利用し、神岡・韓国の検出器が太陽項に対して感度が違うことを使って 2 検出器の比較によって太陽項の効果を取り出し、(2-3) 角パラメータ縮退の分解が可能であることを示した。

この 2 年間の研究によって、(1-3) 角が次世代の加速器・原子炉実験によって探索できる範囲にある限り、T2KK は全てのニュートリノパラメータ 8 重縮退を分解する能力を備えていることが示された。神岡・韓国 2 検出器系のアイデアは今や国際的に認知された存在で、2005 年 11 月に行われた第 1 回に引き続き、2006 年 7 月 13-14 日の両日ソウル国立大学において第 2 回 T2KK 国際ワークショップが開催された。(東大宇宙線研 梶田隆章氏、中山昭英氏、およびリオデジャネイロカトリック大学 布川弘志氏との共同研究)

2) 原子炉実験と T2K 加速器実験の組み合わせによる 2-3 角パラメータ縮退の分解法 (南方)

2-3 角パラメータ縮退を分解する方法は T2KK のように太陽項を特定する方法が唯一ではない。2003 年に南方・杉山・安田・井上・末包は原子炉 1-3 角実験を提案すると同時に、これと加速器ニュートリノ実験の組み合わせによって 2-3 角パラメータ縮退の分解が可能であることを指摘した。この提案に依拠して、T2K 実験の実験家の参加を得てこの詳細なシミュレーション結果と整合的な解析コードを開発し、2-3 角縮退の分解能力があるパラメータ領域の精密な評価を行った。この結果、この方法が $\sin^2 2\theta_{13} = 0.5 - 0.6$ の比較的大きな 1-3 角の領域で知られている限りでの既存の全ての方法を上回る縮退分解能力をもつ事を明らかにした。(京都大学 中家剛氏、平出克樹氏、素粒子原子核研究所 杉山弘晃氏、リオデジャネイロカトリック大学 布川弘志氏、およびサンパウロ大学 R. Zukanovich-Funchal 氏、W. J. C. Teves 氏との共同研究)

3) ニュートリノ振動による新しい物理の探求 (安田・北澤)

標準模型を超える新しい物理をニュートリノを通して研究するために、現象論的にフェルミオンの 4 体有効相互作用を仮定し、このニュートリノ振動に与える影響を考察する試みがここ数年、世界中で行われている。我がサブグループでも、昨年度からこの研究に取り組んでいて、ニュートリノの伝播中における新しい物理の効果が存在する場合、現在進行中のアメリカの MINOS 実験 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) で、標準的なニュートリノ振動では説明できない大きな振動確率が観測される可能性があることを指摘した。今年度の研究では、新しい物理で説明される有意性を、新しい物理のパラメータの値の関数として求

め、そのパラメーターの値が現在他の実験で制限されている上限値近くにあり、かつパラメーターの位相が運の悪い値にない場合には、MINOS 実験で新しい物理による効果が存在することを言える可能性があることを示した。(高エネルギー加速器研究機構 杉山弘晃氏との共同研究)

4) ニュートリノファクトリーにおけるユニタリー性の破れの探求 (安田)

標準模型を超える物理が存在する場合、3世代の枠組みでユニタリー性の破れと解釈されるような現象が起こりうる。そのような可能性のうち、最も簡潔な場合(標準模型でニュートリノに関する部分に非ユニタリー性の源が存在し、かつ3種類の軽いニュートリノのみがある場合)について、将来のニュートリノファクトリーにおけるニュートリノ振動実験においてユニタリー性の破れが測定できるかどうかを吟味した。基線の長さ 100km で $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ のチャンネルを測定すれば、ユニタリー性の破れのパラメーターの位相が測定できる可能性があることを示した。この研究では、木村-高村-横枕の方法を拡張して得られた振動確率の近距離の極限の展開による解析的方法と、近似を使わない数値的方法を用いたが、ともに同じ結論を与えている。(マドリッド自治大学の Fernandez Martinez 氏、Gavela 氏、Lopez Pavon 氏との共同研究)

5) 近似的 $\mu - \tau$ 対称性からのニュートリノ混合角への示唆 (婦木)

ニュートリノ振動実験の結果から混合角 θ_{13} が他の混合角 θ_{12} 、 θ_{23} に比べて非常に小さく、太陽ニュートリノの質量二乗差 Δm_{\odot}^2 が大気ニュートリノの質量二乗差 Δm_{atm}^2 に比べて非常に小さい事が分かっている。この小さな混合角と質量二乗差の比の起源はニュートリノ質量を生成する物理を考えると興味深い。小さな混合角の起源として近似的 $\mu - \tau$ 対称性が知られていたが、CP 位相がない場合についてはあるが、一般的な解析をする事により小さな質量二乗差の比を与えるこれまで知られていなかった新しい解を得た。また、この別解において成り立つ混合角間の関係式があることを示した。さらに、電子数保存則の微小な破れをがあるときは小さな混合角 θ_{13} と小さな質量二乗差の比が同時に導かれる可能性があることを明らかにした。(東海大学 安江正樹氏との共同研究)

6) メスバウアー増幅された共鳴吸収反応による質量二乗差の測定精度 (南方・内波)

最近 Raghavan によって束縛ベータ崩壊 ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \text{orbital } e^- + \bar{\nu}_e$ からでる反電子ニュートリノを時間反転の関係にある共鳴吸収反応 $\bar{\nu}_e + {}^3\text{He} + \text{orbital } e^- \rightarrow {}^3\text{H}$ によって観測する方法が提案されている。ビーム源のトリチウム、ターゲットのヘリウムの双方を冷却して結晶中に埋め込むことができれば、メスバウアー効果によって共鳴反応断面積が 10 桁も増幅されることから注目を浴びている。これにより 18.6 keV の単色エネルギーの反電子ニュートリノを使って基線長約 10 m の 1-3 角測定実験が可能であることになる。この実験が可能であるとすると、ビームの単色性によって大気振動の質量二乗差 Δm_{31}^2 の精密測定が可能になることを指摘した。この実験を想定し、かつ移動可能な検出器の存在を仮定して測定精度の精密な評価を行った。その結果、 $0.3 (\sin^2 2\theta_{13}/0.1)^{-1}\%$ (1σ CL) 程度の今までどの方法で得られたものよりも高い精度を達成できることが分った。また、この評価方法を確立するために安田・杉山等による統計的解析手法に従ってカイ二乗の解析的表式を求めた。

7) 二つの大気ニュートリノ振動の質量二乗差の精密測定による質量階層性の決定 (南方)

二つの大気ニュートリノ振動に関係した質量二乗差 (Δm_{31}^2 と Δm_{32}^2) の両方を精密に測定することによってニュートリノの質量階層性を決定できることが知られている。この原理に基づき、上記のメスバウアー増幅された共鳴吸収反応によって主に Δm_{31}^2 を、T2K II 実験によって主に Δm_{32}^2 を測定することを想定して質量階層性の決定感度の評価を行った。この両方の測定の系統誤差を 0.5% 程度まで低減できれば、この決定が比較的大きな θ_{13} の領域において可能であることを指摘した。この質量階層性の決定法における定量的感度評価はこの我々が行ったものが初めてである。(リオデジャネイロカトリック大学

布川弘志氏、フェルミ国立加速器研究所 S. J. Parke 氏、およびサンパウロ大学 R. Zukanovich-Funchal 氏との共同研究)

8) ニュートリノファクトリーとスーパービームに関する国際検討調査 (安田)

2005年9月から2006年8月の間、ニュートリノファクトリーとスーパービームに関する国際検討調査 (International Scoping Study of a future neutrino factory and super-beam facility; 略して ISS) という活動が立ち上がり、過去日米欧で個別に行われていたニュートリノ研究の将来計画スタディを、国際的にかつ統一的に行う試みが行われた。ISSは物理、測定器、加速器の3部会よりなり、さらに物理部会は理論、現象論、実験、ミューオン物理の4小部会よりなっていた。安田は現象論小部会の世話人として、主として将来の大強度ニュートリノ長基線実験において、3種類の質量を持つニュートリノの標準模型からのずれを探る可能性について調査を行った。この物理部会の調査の結果は、近い将来報告書として公表される予定である。

9) 弦模型における電弱対称性の自発的破れ (北澤)

素粒子の質量は「電弱対称性の自発的破れ」に伴って「湯川相互作用」を通じて生成される。現在の素粒子物理学のもっとも重要な問題のひとつは、この「電弱対称性の自発的破れ」の機構の解明である。様々な機構が提案される中で、「電弱対称性の自発的破れ」が「必然的」に起きるようなものはきわめて少ない。これまで提案された「電弱対称性の自発的破れ」の機構のほとんどが場の量子論の枠内で提案されたものであることから、場の量子論の枠組みを越えて弦理論の枠組みでこの問題に取り組みれば、新たな解が見えてくると考えた。そこで、弦理論の枠組みで「電弱対称性の自発的破れ」を論じるべく、「超対称性のない特異点上のDブレーン」という系について調べた。具体的に非自明な「湯川相互作用」を実現している現実に近い模型を構成し、ヒッグス粒子の質量に対する量子補正の計算を試みた。量子補正の結果、ヒッグス粒子の質量の2乗が負になれば「電弱対称性の自発的破れ」が起きることになる。具体的な計算の結果、ヒッグス粒子の質量の2乗が負になる結果を得て、弦理論における輻射補正によって「必然的」に弦の張力のスケールで「電弱対称性の自発的破れ」が起きる機構を提案した。

10) NS-NS タドポール問題 (北澤)

超対称性のない弦模型においては「NS-NS タドポール問題」の解決が必要である。「NS-NS タドポール」が存在するということは真空からひとつの粒子が突然生成され得るということで、物理的には背景時空や背景場が正しい解になっていないことを意味する。この問題の発見は古く、根本的な解決はきわめて難しいが、A.Sagnotti 氏のグループが、真の真空を知らなくても「タドポール再足し上げ」という操作を行うことにより、真の真空での物理量を計算できることを場の理論の範囲で提案している。この「タドポール再足し上げ」を弦理論において実現するべく、まずボゾン弦理論のDブレーンにおいて実際に彼らの「タドポール再足し上げ」に相当する操作を考案し実行した。その結果、タドポールがあるときのもともとのDブレーンの真空のエネルギーと「タドポール再足し上げ」の寄与を加えると、Dブレーンの真空のエネルギーは合計でゼロになることを示すことができた。真の真空のエネルギーがゼロになることは、「タキオン凝縮」の議論によって示唆されているものである。この結果は、超弦に拡張する等、さらに検討すべきものである。(この研究はピサ高等師範学校の A.Sagnotti 氏と議論しつつ進めたものである。ローマ大学の G.Pradisi 氏とも議論し、アドバイスを受けた。)

2. 研究業績

1) 論文

K. Fuki, M. Yasue: What does $\mu - \tau$ symmetry imply in neutrino mixings? *Physical Review D* **73** (2006) 055014-1-8.

T. Kajita, H. Minakata, S. Nakayama, and H. Nunokawa: Resolving Eight-Fold Neutrino Parameter Degeneracy by Two Identical Detectors with Different Baselines, *Physical Review D*, **75** (2007) 013006-1-12.

N. Kitazawa, Radiative Symmetry Breaking on D-branes at Non-supersymmetric Singularities, *Nuclear Physics* **B755** (2006) 254-271.

H. Minakata, H. Nunokawa, S. J. Parke, and R. Zukanovich Funchal: Determining Neutrino Mass Hierarchy by Precision Measurements in Electron and Muon Neutrino Disappearance Experiments, *Physical Review D* **74** (2006) 053008-1-8.

H. Minakata and S. Uchinami: Recoilless Resonant Absorption of Monochromatic Neutrino Beam for Measuring Δm_{31}^2 and θ_{13} , *New Journal of Physics* **8** (2006) 143-1-23.

K. Hiraide, H. Minakata, T. Nakaya, H. Nunokawa, H. Sugiyama, W. J. C. Teves and R. Zukanovich Funchal: Resolving θ_{23} Degeneracy by Accelerator and Reactor Neutrino Oscillation Experiments, *Physical Review D* **73** (2006) 093008-1-13.

2) 国際会議報告

T. Kajita, M. Ishitsuka, H. Minakata and H. Nunokawa: Resolving mass hierarchy and CP degeneracy by two identical detectors in Kamioka and Korea, *Journal of Physics Conference Series* **39** (2006) 332-334.

N. Kitazawa: Electroweak Symmetry Breaking in TeV-scale String Models, *AIP Conference Proceedings* **881** (2007) 73-81.

H. Minakata: Do Neutrinos Violate CP?, *Venice 2006, Neutrino oscillations*, pp 49-63.

H. Minakata: Resolving Degeneracy in Neutrino Oscillation Parameters, *Physica Scripta T* **127** (2006) 73-77.

H. Minakata, H. Nunokawa, S. J. Parke, and R. Zukanovich Funchal: Determining ν Mass Hierarchy by Precise Measurements of two Δm^2 in ν_e and ν_μ Disappearance Experiments, *Physica Scripta T* **127** (2006) 33-34.

H. Minakata: Neutrinos: Opportunities and strategies in the future, Proceedings of International Conference on Heavy Quarks and Leptons (HQL 06), pp 523-556, Munich, Germany, 16-20 Oct 2006, eConf C0610161, 036, 2007.

3) 学会講演

日本物理学会第 61 回年次大会 2006 年 3 月 27 日 ~ 3 月 30 日 (愛媛大学)

婦木健一 : $\mu - \tau$ 対称性の破れからの帰結とニュートリノ混合

日米及び環太平洋地域 2006 ハワイ素粒子物理学会 2006 年 10 月 29 日 ~ 11 月 3 日
(ハワイ、ホノルル、シェラトンワイキキホテル)

T. Kajita, H. Minakata, S. Nakayama, and H. Nunokawa: T2KK Solves 8-fold Parameter Degeneracy

S. Uchinami and H. Minakata: Recoilless Resonant Absorption of Monochromatic Neutrino Beam for Measuring Δm_{31}^2 and θ_{13}

国内研究会

素粒子物理学の進展 2006 :

2006 年 7 月 31 日-8 月 3 日 (京都大学基礎物理学研究所)

安田修 : ニュートリノ振動研究の現在と未来 (招待講演)

婦木健一 : 近似的 $\mu - \tau$ 対称性とニュートリノ振動 (ポスター発表)

第 20 回宇宙ニュートリノ研究会 2007 年 2 月 20 日 (東京大学宇宙線研究所)

内波生一 : 地球の物質密度測定を使う MSW 理論のテスト

Graduate Lectures in Sapporo & Winter School in Niseko '06
2006 年 3 月 5-7 日 (北海道 ニセコ憩いの村)

婦木健一 : What Does $\mu - \tau$ Symmetry Imply Neutrino Mixing? (ポスター発表)

国際会議

3rd International Scoping Study Meeting of Neutrino Factory and Super-beam Facility,
Rutherford Appleton Laboratory, Didcot, UK, April 25-27, 2006

O. Yasuda: Model independent analysis of new physics interactions and implications for long baseline experiments,

2nd Scandinavian Neutrino Workshop (SNOW2006)

AlbaNova University Center, Stockholm, Sweden, May 2-6 2006

H. Minakata: Resolving Degeneracy in Neutrino Oscillation Parameters (Invited talk)

H. Minakata, H. Nunokawa, S. J. Parke, and R. Zukanovich Funchal: Determining ν Mass Hierarchy by Precise Measurements of two Δm^2 in ν_e and ν_μ Disappearance Experiments

2nd World Summit on Physics "Beyond the Standard Model"

Galapagos Islands, Ecuador, June 22-25, 2006

H. Minakata: Neutrinos; Future Opportunities (Invited talk)

2nd International Workshop on a Far Detector in Korea for the J-PARC Neutrino Beam
Seoul National University, Seoul, Korea, July 13 - 14. 2006

H. Minakata: T2KK Solves 8-fold Parameter Degeneracy (Invited talk)

6th Rencontres du Vietnam, Challenges in Particle Astrophysics
Hanoi, Vietnam, August 6-12, 2006

H. Minakata: T2KK Solves All the Neutrino Parameter Degeneracy

4th International Scoping Study Meeting of Neutrino Factory and Super-beam Facility,
University of California, Irvine, USA, August 21-23, 2006

O. Yasuda: Summary of Phenomenology Subgroup (Invited talk)

8th International Workshop on the Neutrino Factories, Superbeams, and Beta Beams
University of California, Irvine, USA, August 24-30, 2006

H. Minakata: Getting the Most from Neutrino Oscillation Experiments (Invited talk)

H. Minakata, H. Nunokawa, S. J. Parke, and R. Zukanovich Funchal: Determining the Neutrino Mass Hierarchy by Precise Measurements in Disappearance Experiments

O. Yasuda: Summary of WG1 (Theoretical Part) (Invited talk)

International Conference “Heavy Quarks and Lepton
Munich, Germany, October 16-20, 2006

H. Minakata: Strategy of Neutrino Experiments (Invited talk)

International Workshop on “Origin of Mass and Strong Coupling Gauge Theories
Nagoya, Japan, 21-24 November 2006

N. Kitazawa: Radiative Electroweak Symmetry Breaking in TeV-Scale String Models

International Workshop on Neutrino Masses and Mixings – Toward Unified Understanding of
Quark and Lepton Mass Matrices, Shizuoka, Japan, December 17-19, 2006

H. Minakata: Neutrinos; Looking Forward to the Future (Invited talk)

XII International Workshop on Neutrino Telescopes, Istituto Veneto di Scienze
Lettere ed Arti, Venice, Italy, March 6-9, 2007

H. Minakata: Measuring Earth Matter Density and Testing the MSW Theory (Invited talk)

A topical conference on elementary particle physics and cosmology,
Coral Gables and Key Biscayne, Florida, USA, December 15 - 19, 2006

O. Yasuda: Possibility to probe new physics in the future long baseline neutrino experiments (Invited talk)

4) 学会誌等

田村詔生、末包文彦、安田修：原子炉を用いたニュートリノ混合角 θ_{13} の精密測定
日本物理学会誌 61 (2006) 799-806.