

素粒子理論サブグループ

1. 研究活動の概要

1) ニュートリノファクトリーを使う地球内物質密度測定 (南方・内波)

高輝度のミュオン蓄積リングを使うニュートリノファクトリーはレプトン混合パラメーターの精密測定のための将来計画の第1候補である。一方、ニュートリノファクトリーは3000 km以上の長基線を使うため、このCP非保存発見能力やCP位相測定感度が地球マントル内の物質密度の不定性によって大きく変化することが指摘されてきた。粒子反粒子対称性を破る地球内物質の効果が小林・益川型位相によるCP非保存と紛らわしい効果を生じるためである。本研究においては、発想を逆転して、ニュートリノファクトリー実験自身の中で地球内の物質密度を測定してはどうか、と考えた。まず、50GeV程度のエネルギーを持つニュートリノファクトリー実験を仮定し、どの基線長に検出器をおいた場合に物質密度測定感度が最大になるかという問いを發し、この答えとして、魔法基線と呼ばれる約7000 km程度の基線長が得られた。この魔法基線に置かれた検出器はパラメーター縮退を分解するという要請からすでに考察されていたもので、従ってこの結果は非常に都合が良い。標準的な設定で $\sin^2 2\theta_{13} = 0.01$ の場合には1.3% (1σ)の物質密度測定精度が得られることを示した。

2) ニュートリノファクトリーを使う非標準的ニュートリノ相互作用の探索 (南方・内波)

高いエネルギースケールに存在する標準模型を超える新しい物理の効果としてニュートリノを含むフェルミオンの4体有効相互作用を仮定し、この効果をニュートリノ振動を使って探索する試みがここ数年世界中で行われている。上記の研究を発展させ、ニュートリノファクトリー実験において、3000 kmおよび7000 kmの二つの基線長に置かれた2検出器系を用いてこの非標準的ニュートリノ相互作用を探索する方法を提案した。ニュートリノファクトリーを用いる非標準的相互作用の探索において、この新しい相互作用の効果が(フレーバー混合を含むように拡張された)標準理論のそれと紛らわしい効果を生じ、このために混乱が生じるという問題点が指摘されてきた。(1-3)角と非標準的相互作用間の混乱の問題である。我々は、上記の2検出器系を用いてこの混乱を解くことができること、および高精度の非標準的相互作用の決定が可能であることを示した。この結果は、非標準的相互作用の探索と、ニュートリノファクトリーの本来の目的であるレプトン・フレーバー混合パラメーターの精密決定が互いに矛盾せず同時に実行できることを示した初めての研究である。(リオデジャネイロカトリック大学 布川弘志氏・Cipriano Ribeiro氏、およびサンパウロ大学 R. Zukanovich-Funchal氏との共同研究)

3) ニュートリノ消失モードのみを用いる質量階層性の決定 (南方)

様々なニュートリノ質量階層性の決定法が提案されているが、我々のこの方法は特定フレーバーニュートリノの消失モードのみを用いるという点でユニークである。大気ニュートリノに関係したニュートリノ振動は、精密に解析すると、実は Δm_{31}^2 と Δm_{32}^2 に関係した微妙に異なる二つの振動数から成っていることが分る。この二つの振動の重ね合わせとして、速い振動と「うなり」に相当したゆっくりした振動モードが存在する。この「うなり」に比して速い振動モードの位相が進むか遅れるかが質量階層性によって決まってくる。精密測定を可能にすると思われるメスバウアー増幅された共鳴吸収反応を使い、この原理を利用して速い振動の位相の進み・遅れを測定して質量階層性を決定する方法を提案した。また、この感度領域の評価を与

えた。(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)

4) 高エネルギー宇宙ニュートリノによる不活性ニュートリノの徴候 (安田)

1990年代半ばの LSND 実験の結果により示唆された 4 世代目の不活性ニュートリノのシナリオは、2007 年に発表された MiniBooNE 実験の否定的結果により排除されたと考えられている。しかし、MiniBooNE を含むこれまでの否定的な諸実験の結果から受ける制限を全てみたとすような不活性ニュートリノのシナリオはまだ排除されている訳ではない。この研究では、活動銀河核やガンマ線バーストなどから来ると考えられている高エネルギー宇宙ニュートリノの観測において、上記の条件をみたす $(3+1)$ -スキームと呼ばれる不活性ニュートリノのシナリオが検証できる可能性について議論した。これら宇宙ニュートリノのフレーバーの比率には理論的不定性があるが、 μ ニュートリノと τ ニュートリノの比を議論すれば理論的不定性やエネルギー依存性に左右されずに不活性ニュートリノの徴候を見出すことが出来る可能性があることを示した。(上記課題はマドリッド自治大学のアンドレア・ドニーニ氏との共同研究)

5) ニュートリノ振動確率に関する木村-高村-横枕の方法の拡張—非断熱的遷移を含む場合— (安田)

3 世代の有質量ニュートリノの標準的な枠組みにおいて、一定密度の物質中での木村-高村-横枕によるニュートリノ振動確率の解析的表式は、前年度の研究で、物質効果が一般的な場合や物質密度が断熱的に変化する場合に拡張されている。今年度の研究では、特に 3 世代の場合に対し、木村-高村-横枕による定式化を使って有効混合角の解析的な表式を求めることにより、非断熱的遷移を含む場合にも振動確率を解析的に表せることを示した。その非自明な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議論した。この処方箋は、ハミルトニアン固有値が解析的に求まること、多重準位の非断熱的遷移が 2 準位の場合の積で近似的に取り扱えること、2 準位の場合の非断熱的遷移のランダウ-ゼナー因子が解析的に評価出来ること等の諸条件を前提としているが、それらが満たされていれば、4 世代以上の場合にも有効であると考えられる。

6) 近似的 $\mu - \tau$ 対称性ニュートリノ質量行列の分類 (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 θ_{13} と質量二乗差の比 $\Delta m_{\odot}^2 / \Delta m_{atm}^2$ 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。昨年度の研究で近似的 $\mu - \tau$ 対称性がこの起源の候補となる事を示したが、この対称性から混合角等の値へ課される制限はニュートリノ質量行列の構造により複数に場合分けされる事を示唆していた。また、この対称性の有無を判断するためにも具体的な解析が必要であった。そこで、近似的 $\mu - \tau$ 対称性からの制限を満たすニュートリノ質量行列を具体的に考え、各々の質量行列から導かれる混合角等の値の範囲を示した。また、各々の質量行列の場合に成り立つ混合角間の関係式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)

7) 超対称性のない弦模型における 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、一般に「NS-NS タドポール」というものが存在し、それ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を意味する。より物理的には背景時空

や背景場が弦理論の解になっていない、すなわち、基底状態（真空状態）としてより安定な状態が存在することを意味する。真の真空に移行することは極めて困難であることが知られているが、超対称性のない弦模型を使って素粒子現象を理解するためには、この問題の解決または回避は避けられない。なぜなら、実質的な困難として、物理量（例えば質量への量子補正）が「NS-NS タドポール」の存在により発散してしまうからである。弦理論ではなく、場の理論においては、「タドポール再足し上げ」という手法で問題を回避できることが知られている。これは、偽の真空にいながら真の真空での物理量を得る手法である。弦理論においてこの手法を実行する方法を開発し提案した。この方法は、閉じた弦に関する boundary state formalism が適用できる限り、超弦理論に基づく様々な模型（現実的の物理の記述や理解をめざすものを含む）に応用できるものである。

8) 弦模型におけるゲージ対称性の自発的破れ (北澤)

ゲージ対称性の自発的破れという現象は、電弱対称性の自発的破れとして実在することが知られている。場の理論に基づいた素粒子の「標準模型」においては、この現象を起こすためにだけ必要な粒子（ヒッグス粒子）を導入し、それに特殊なポテンシャルエネルギーを手で与えている。ローレンツスカラーの粒子であるヒッグス粒子に「手で」真空期待値を持たせることにより、電弱対称性の破れを起こしている。従って、電弱対称性の自発的破れは必然的に起こるという記述になっておらず、この不自然さが問題となっている。弦模型では、超対称性がなくても、質量がゼロのローレンツスカラーの粒子を導入することができ、その質量に対する量子補正量子補正いかんによっては、ゲージ対称性の自発的破れが引き起こされる可能性がある。そこで、開弦の自由度からのローレンツスカラーの粒子（Dブレーン上の開弦からのスカラー粒子）を分類し、その質量やポテンシャルの新しい計算法を開発した。質量などの物理量を計算する方法は以前から知られていたが、経験を要する非常に面倒なものであった。新しい方法の特徴は、boundary state formalism を使用して開弦から閉弦の描像は移ることにより、実際の計算を容易にするものである。また、自ら開発した NS-NS タドポールの再足し上げの方法を直接に適用することができるものである。この計算法を適用することにより、これまで抽象的、定性的に行われてきた電弱対称性の自発的破れが自然に起きる弦模型の構成を具体的に試みることができる。

9) 弦模型における自然なインフレーションの機構 (北澤)

弦理論におけるDブレーンという物体がある場合、非常に特殊な設定をしなくても、自動的に宇宙のインフレーションが起きる可能性を見つけた。考察は弦理論においてではなく、その低エネルギー有効理論である超重力理論において行った。Dブレーンが存在する特定の系においては、ディラトン場といわれるスカラー場が指数関数のポテンシャルエネルギーを持つ。ディラトン場の真空期待値の宇宙論的發展を追ってみると、宇宙初期にゼロから出発して、指数関数の「ポテンシャルエネルギーの壁」を上りつめ、そしてまた転がり下りてくるという解がある。指数関数の「ポテンシャルエネルギーの壁」を上りつめたときに、このポテンシャルエネルギーが宇宙のエネルギーを支配し、したがって、指数関数的な膨張（インフレーション）が引き起こされる。この可能性を機構を本当のインフレーションに応用できるかどうかはこれからの課題である。この研究は、ピサ高等師範学校の A.Sagnotti 氏と、パリ工科大学の E.Dudas 氏との共同研究で、まだ進行中のものである。

2. 研究業績

1) 論文

N. Cipriano Ribeiro, H. Minakata, H. Nunokawa, S. Uchinami, and R. Zukanovich Funchal: Probing Nonstandard Neutrino Interactions with Neutrino Factories, *Journal of High Energy Physics*, **12** (2007) 002-1-46.

E. Fernandez-Martinez, M. B. Gavela, J. Lopez-Pavon and O. Yasuda: CP-Violation from Non-Unitary Leptonic Mixing, *Physics Letters B* **649** (2007) 427-435.

K. Fuki and M. Yasue: Two categories of approximately mu - tau symmetric neutrino mass textures, *Nuclear Physics* **B783** (2007) 31-56.

N. Kitazawa: Tadpole Resummations in String Theory, *Physics Letters* **B660** (2008) 415-421.

H. Minakata and S. Uchinami: *In situ* Determination of Earth Matter Density in a Neutrino Factory, *Physical Review D* **75** (2007) 073013-1-12.

H. Minakata, H. Nunokawa, S. J. Parke, and R. Zukanovich Funchal: Determination of the Neutrino Mass Hierarchy via the Phase of the Disappearance Oscillation Probability with a Monochromatic $\bar{\nu}_e$ Source, *Physical Review D* **76** (2007) 053004-1-14.

H. Sugiyama and O. Yasuda: A Formula for the sensitivity to $\sin^2 2\theta_{13}$ in reactor experiments with a spectral analysis, *International Journal of Modern Physics* **A22** (2007) 3407-3428.

2) 国際会議報告

K. Inoue and H. Minakata: Neutrino Physics around MeV Energies, *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* **168** (2007) 389-394.

H. Minakata: Neutrinos; Looking Forward to the Future, *International Journal of Modern Physics E*, **16** (2007) 1313-1329.

H. Minakata: Measuring Earth Matter Density and Testing the MSW Theory, in *Venice 2007, Neutrino telescopes* 163-178.

H. Minakata: Looking for Leptonic CP Violation with Neutrinos, *Acta Physica Polonica B* **39** (2) 283-294.

O. Yasuda: New Physics Effects in Long Baseline Experiments, *Acta Physica Polonica B* **38** (2007) 3381-3388.

M. Chiba, O. Yasuda *et al.*, Measurement Of Attenuation Length For Radio Wave In Natural Rock Salt And Performance Of Detecting Ultra High-Energy Neutrinos, *Journal of Physics, Conference Series* **81** (2007) 012003-1-7.

P. Hernandez, C.W. Walter, and O. Yasuda: Summary of Working Group One, *AIP Conference Proceedings* **981** (2008) 135-138

A. Donini, P. Huber, S. Pascoli, W. Winter, and O. Yasuda: Physics and performance evaluation group, *AIP Conference Proceedings* **981** (2008) 43-45

3) 将来計画の実験計画書

A. Bandyopadhyay et al. (94 authors including N. Kitazawa and O. Yasuda), Physics at a future Neutrino Factory and super-beam facility, e-Print: arXiv:0710.4947 [hep-ph], Oct 2007.

4) 学会講演

国際会議

International Workshop on Double Beta Decay and Neutrinos,
Osaka, Japan, June 11-13, 2007

H. Minakata: What Can Double Beta Decay Experiments Do? (Invited talk)

9th International Workshop on the Neutrino Factories, Superbeams, and Beta Beams,
Okayama University, Okayama, August 6-11, 2007

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

13th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics
Moscow State University, Moscow, Russia, August 23-29, 2007

N. Cipriano Ribeiro, T. Kajita, P. Ko, H. Minakata, S. Nakayama, H. Nunokawa: Non-Standard Neutrino Physics Probed by Tokai-to-Kamioka-Korea Two-Detector Complex (Invited talk)

XXX Mazurian Lakes Conference on Physics, Piaski, Poland, September 2-9, 2007

H. Minakata: Looking for Leptonic CP Violation with Neutrinos (Invited talk)

31st International Conference on Theoretical Physics, Ustron, Poland, September 5-11, 2007

O. Yasuda: New physics effects in long baseline experiments (Invited talk)

Fourth International Conference on Flavor Physics (ICFP2007)
Beijing, China, September 24-28, 2007

H. Minakata: Long Baseline Neutrino Experiments with Two-Detector Setup (Invited talk)

3rd International Workshop on a Far Detector in Korea for the J-PARC Neutrino Beam
Tokyo, Japan, Sep. 30-Oct. 1 2007

N. Cipriano Ribeiro, T. Kajita, P. Ko, H. Minakata, S. Nakayama, H. Nunokawa: Probing Nonstandard Neutrino Physics at T2KK (Invited talk)

Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors 2007 (NNN07)
Hamamatsu, Japan, October 2 - 5, 2007

H. Minakata: Prospects of Supernova Neutrino Observation by Large Detectors

INO-KEK Meeting, 高エネルギー加速器研究機構, つくば市, November 27, 2007

O. Yasuda: Neutrino Phenomenology (Invited talk)

5) 学会誌等

南方久和：ニュートリノの質量 数理科学 No. 533 (2007) 42-46.

6) 編著書等

O. Yasuda, C. Ohmori, and N. Mondal (ed.): *NEUTRINO FACTORIES, SUPERBEAMS AND BETABEAMS*, Proceedings of the 9th International Workshop on Neutrino Factories, Superbeams, and Betabeams - NuFact 07, (408 pages), AIP Conference Proceedings Volume 981, American Institute of Physics, February 2008.