

素粒子理論サブグループ

1. 研究活動の概要

1) 加速器・原子炉ニュートリノ θ_{13} 実験の総合的解析 (南方)

数年前から 1-3 角が現在知られている制限 (Chooz limit) と同程度の大きな値をもつとの予想に立って、この帰結を主に摂動論によって調べてきた。今年度になって、T2K 実験でミューニュートリノから電子ニュートリノへの転換事象が発見され、さらに、原子炉実験 Double Chooz に続いて Daya Bay および RENO によって反電子ニュートリノ消失の決定的証拠が観測されたことにより、「大きな 1-3 角の仮説」は実験的確認を得た。現状で得られている実験結果を総合的に解析して 1-3 角を決定し、これがゼロでない有限の値をもつという仮説の信頼度が 7.7σ であることを示した。また、加速器・原子炉両実験の組み合わせによって CP 位相 δ を決定できるという南方-杉山の予想 (2004 年) の有効性を初めて実験的にテストした。(サンパウロ大学 P. A. N. Machado 氏、R. Zukanovich-Funchal 氏、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) 太陽ニュートリノを用いるニュートリノ非標準的相互作用の探索 (南方)

これまでのニュートリノの非標準的相互作用 (NSI) の探索方法に関する研究の中で、NSI 対角要素 ε_{ee} に関する感度が他の要素に比して 1 桁以上も落ちることが認識されてきた。(この性質は菊地-南方-内波の摂動論的な取り扱いから予期されるものであった。) NSI 対角要素の探索方法として、近未来に得られる太陽ニュートリノデータを用いることによって、 ε_{ee} に関してかなりの高感度の探索が可能であることを見いだした。特に太陽ニュートリノの日夜変化と低エネルギーニュートリノの高精度のスペクトル測定がとりわけ高い検証感度を持つことを指摘した。(バレンシア大学 Carlos Peña-Garay 氏との共同研究)

3) ニュートリノ振動とニュートリノが超光速で伝播する可能性 (南方)

最近、精密な GPS を備えた OPERA 実験でニュートリノの伝播速度が測定された。(第 1 報ではニュートリノが超光速で伝播しているという結果であったが、この解析には誤りがあると信じられている。)これを契機に、ニュートリノの真空中および物質中での伝播速度に関する包括的な考察を特殊相対論の枠組みの中で行った。この結果、ニュートリノ振動による wave packet の形状の変形によって超光速の群速度をもつニュートリノの伝播が可能であることが分かった。これが支配的な効果で、これまで人々の議論してきた二つの質量固有状態の速度差の効果はこれに比べて極めて十分小さく、無視できることが分かった。もちろん、前者とて OPERA 第 1 報の結果である光速の 10^{-5} 倍程度もの超光速よりも 8 桁以上も小さい。(Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics の Alexei Smirnov 氏との共同研究)

4) 小さな炉心の原子炉によるステライルニュートリノ探索の現象論 (安田)

原子炉ニュートリノのフラックスの理論値が最近見直され、従来よりも 3% 増加したものが正しいフラックスであるという主張が専門家の間で出されるようになり、質量二乗差が 1eV^2 程度のニュートリノ振動に關与するステライルニュートリノの存在の可能性 (原子炉アノマリーと呼ばれている) が、再び脚光を浴びてきている。そこで、 1eV^2 程度の質量二乗差のステライルニュートリノのニュートリノ振動を探るための方法として、至近距離に測定器を置いた原子炉ニュートリノ振動実験の現象論を考察した。仮定としては、同一な前置検出器と後方検出器がそれぞれ一基で、Bugey 実験と同じ体積・系統誤差をもつこと、前置検出器と後方検出器の炉心からの距離を自由に換えられるとしてこれらの距離について最適化すること、ステライルニュートリノは 1 種類で、いわゆる (3+1)-スキームを考えること、である。結果は、商業炉の場合、炉心の直径が 3~4m あり、基線の平均化により 2eV^2 以上の質量二乗差

に対して感度が劣化することがわかった。一方、炉心の大きさが比較的小さな実験原子炉（高速中性子炉の常陽、ILLの実験炉、Osirisの実験炉等）の場合には、数 eV^2 程度の質量二乗差に対して $\sin^2 2\theta$ が 0.03 程度まで達成できることがわかった。

5) 準ステライルニュートリノ探索の現象論 (安田)

LSNDの実験結果や原子炉アノマリーから示唆される現象をニュートリノ振動で説明しようとする試みには、多くの場合、物質と一切相互作用のないステライルニュートリノが関与すると仮定されているが、その枠組みを少し広げ、新しい物理により物質とある程度相互作用すると想定される、準ステライルニュートリノとでも呼ぶべき粒子の現象論を考察した。一般的に、準ステライルニュートリノと通常のニュートリノの混合が十分小さい場合には現在までの実験結果と矛盾することがないと言える。これまでの解析の結果、物質とのポテンシャルが電子ニュートリノの標準的ポテンシャルよりも数倍程度以上に大きい場合には、太陽・大気ニュートリノからの制限により、LSND等の結果を説明することは出来ないことがわかった。定量的な解析は現在も継続中である。

6) 低スケール弦模型のLHC加速器実験における検証に向けた理論的研究 (北澤)

弦模型では異なる素粒子は唯一の弦の異なる振動モードとして表現される。エネルギーの最も低い振動モードが我々の知っている素粒子や力を媒介するゲージ粒子に対応するが、もちろんエネルギーの高い振動モードも存在し、それは未知の重い素粒子に対応するはずである。低スケール弦模型におけるように、弦の張力のエネルギースケールが TeV 程度であれば、弦模型の確実な予言として TeV 程度の質量を持つ粒子が存在しなければならない。欧州原子核研究機構 (CERN) でのLHC加速器実験の主な目的は電弱対称性の破れの物理を解明することであるが、それは同時に TeV のエネルギースケールの新しい物理の探索でもある。低スケール弦模型が真実であれば弦の励起状態が必ず発見されるはずである。しかしながら、 TeV 程度の質量を待った新粒子を予言する理論的仮説はたくさんある。そこで重要になるのは、 TeV 程度の質量の粒子が見つかった場合、それが弦模型における弦の励起状態であるのか、あるいはそうでないのかということ、どのようにして判定するかということである。

LHC加速器は陽子と陽子を衝突させる（現在の衝突エネルギーは $7TeV$ ）ものであるが、素過程は陽子を構成しているクォークやグルーオンの衝突である。この衝突によって励起状態が生成され、それが再びクォークやグルーオン2体崩壊するという過程を探索することが発見に向けて最も有望である。終状態は、互いに正反対の方向に生ずる2束の粒子群（ジェット）となる。観測されるたくさん2ジェット事象について、各事象ごとの2ジェットの不变質量を実験で測定してその分布を見ることができる。既知の物理の範囲では滑らかな分布が期待されるが、もし何らかの励起状態（新粒子）が存在すればその上にガウス関数型の共鳴の分布が見えるはずである。

弦模型の励起状態の特徴のひとつは、励起状態が繰り返すことである。それは、弦の振動状態（モード）が、低エネルギーのものから始まり高エネルギーのものに向けて無限にあることに対応する。そこで、弦模型の検証として興味深いのは、まず1つの共鳴状態が発見されたとして、次の2番目の共鳴状態をみることができるかどうかということである。そこで、低エネルギー弦模型における共鳴が実際に実験でどのように見えるかということ、弦模型の細部によらない理論的な計算を基礎として、計算機を用いたモンテカルロシミュレーションを行うことにより調べた。LHCの衝突エネルギーを、その設計値である $14TeV$ に設定した場合、弦の張力のエネルギースケールが $4TeV$ の場合、 $50 fb^{-1}$ の積分ルミノシティがあれば十分に発見可能であることを確認した。

弦模型の励起状態のもうひとつの特徴は、質量は縮退しているがスピンの異なる複数の粒子がその共鳴に寄与することである。これは、共鳴を構成しているジェットについて、加速器のビーム方向に対する角度分布を分析すれば明らかにすることができる。弦の第1励起状態については、スピン $1/2$ とスピン

3/2 の粒子の重なりとして見えるはずことがわかっているが、計算機を用いたモンテカルロシミュレーションを行うことにより、LHCの衝突エネルギーを14TeVに設定した場合、弦の張力のエネルギースケールが4TeVの場合、 20 fb^{-1} の積分ルミノシティがあれば、2つの寄与を十分に分解して観測することが可能であることを確認した。

この研究は東京大学(駒場)の大学院生の橋真奈美氏との共同研究である。

7) 弦理論におけるゲージ対称性の自発的破れ(北澤)

素粒子の世界において、電弱対称性という電磁相互作用と弱い相互作用を表現するためのゲージ対称性が存在し、さらにそれが自発的に破れていることは実験的に高い精度で確認されている。素粒子とそれらのあいだの相互作用を記述する確立した道具として場の量子論という枠組みがある。この枠組みにおいては上記の電弱対称性の自発的破れを実現することは比較的容易であり、LHCで現在探索中のヒッグス粒子の存在はひとつの予言である。しかしながら、素粒子とそれらのあいだの相互作用を記述する道具として弦理論を考える場合、電弱対称性の自発的破れの自発的破れを表現することは容易ではない。

低スケール弦模型を想定した場合、実験により弦の張力のエネルギースケールに下限がつくが、実験が進むにつれて、その値が大きくなってゆく可能性がある。どこまで下限が大きくなったら低スケール弦模型が排除されるかどうかを判断するために、弦の張力のエネルギースケールと電弱対称性の自発的破れのエネルギースケールの間の関係を明らかにしなければならない。そのために、最初の試みとして、ゲージ対称性の破れが実際に起こっている弦模型の構成を試みた。

この研究は高エネルギー理論研究室の小林秀太郎氏との共同研究であり、継続中のものである。

8) 弦模型における宇宙論(北澤)

一般に素粒子の弦模型は超対称性を持つとは限らない。超対称性を持たない場合、そのポテンシャルエネルギーが指数関数で記述されるスカラー場がいくつか現れる。指数関数型のポテンシャルの勾配が十分に緩やかな場合には宇宙のインフレーションを説明する可能性があることが知られている。弦模型は自然に宇宙のインフレーションを説明できる可能性を持つものである。指数関数型ポテンシャルを持つスカラー場がある場合の宇宙の時間発展を分類すると、ビッグバン特異点を時間の原点としたときに、スカラー場が指数関数型のポテンシャルを高いところから単純に下った後にインフレーションを起こすものと、低いところから一度登らされてから下っていった後にインフレーションを起こすものの2種類があることがわかる。前者については、弦模型を参照せずに多くの研究がなされたきたが、後者についての研究は多くない。弦模型については後者の可能性の方が高いという考察がある。後者の可能性、“climbing phenomena”、が実現している場合の宇宙背景輻射のゆらぎを求めた。結果としてゆらぎのスケールが大きくなるにつれて緩やかにゆらぎがなくなっていくという予言が得られ、これによって、宇宙背景輻射のゆらぎの多重極展開の最も低い部分が観測からずれていることを説明できる可能性を指摘した。

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 氏および S.P.Patil 氏との共同研究である。

2. 研究業績

1) 論文

K. Asano and H. Minakata: Large- θ_{13} Perturbation Theory of Neutrino Oscillation for Long-Baseline Experiments, *Journal of High Energy Physics* **1106** (2011) 022-1-26.

P. Coloma, A. Donini, J. Lopez-Pavon, and H. Minakata: Non-Standard Interactions at a Neutrino Factory; Correlations and CP Violation, *Journal of High Energy Physics* **1108** (2011) 036-1-41.

P. A. N. Machado, H. Minakata, H. Nunokawa, and R. Zukanovich Funchal: Combining Accelerator and Reactor Measurements of θ_{13} : The First Result, *Journal of High Energy Physics* **1205** (2012) 023-1-13.

O. Yasuda: Search for sterile neutrinos at reactors, *Journal of High Energy Physics* **11** (2011) 036.

M. Hashi and N. Kitazawa: Signatures of low-scale string models at the LHC, *Journal of High Energy Physics* **12** (2012) 050.

2) 国際会議報告

O. Yasuda: Sensitivity to sterile neutrino mixings and the discovery channel at a neutrino factory, Proceedings of the Fifth International Conference - Beyond 2010, edited by H.V. Klapdor-Kleingrothaus, I.V. Krivosheina, R. Viollier, World Scientific Publishing Co., (2011), 300-313.

O. Yasuda: Sensitivity of T2KK to non-standard interactions, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **217** (2011), 220-222.

O. Yasuda: Some attempts to explain MINOS anomaly, AIP Conf. Proc. **1382** (2011), 103-105.

O. Yasuda: Search for sterile neutrinos at reactors with a small core Acta Phys. Polon. **B42** (2011), 2379-2387.

3) 将来計画の実験計画書

S. Choubey et al. (135 authors including O. Yasuda), International Design Study for the Neutrino Factory, Interim Design Report, e-Print: arXiv:1112.2853 [hep-ex].

4) 学会講演

日本物理学会年会 2011 年秋季大会 2011 年 9 月 16 日 ~ 9 月 19 日 (弘前大学 文京町キャンパス)

浅野克博, 南方久和 (首都大): Chooz 限界程度の 1-3 角を持つニュートリノ振動の摂動論 (17aSA-8)

日本物理学会年会 2012 年春季年会 2012 年 3 月 24 日 ~ 3 月 27 日 (関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス)

安田修 (首都大): 小さな炉心の原子炉によるステライルニュートリノ探索の現象論 (24aGA-1)

橋 真奈美 (東京大)、北澤 敬章 (首都大): LHC 実験における low-scale string model のシグナル (24pGA-8)

国際会議

13th International Workshop on Neutrino Factories, Superbeams and Betabeams (NuFact11), 1-6 August 2011, CERN-University of Geneva, Geneva, Switzerland.

H. Minakata: If θ_{13} is Large, then What?

International Workshop on "Double Beta Decay and Neutrinos", 14-17, November 2011, Osaka, Japan.

H. Minakata: Era of the Accelerator and Reactor θ_{13} Experiments (Invited talk)

Nu HoRIZons V "Neutrinos in Physics, Astrophysics and Cosmology", 1-3, February 2012, Harish-Chandra Research Institute, Allahabad, India.

H. Minakata: Looking for Nonstandard Neutrino-Matter Interactions with Large θ_{13} (Invited talk)

35th International Conference of Theoretical Physics (Ustron'11), September 12-18, 2011, Ustron, Poland.

O. Yasuda: Search for sterile neutrinos at reactors (Invited talk)

Sterile Neutrinos at the Crossroads, September 26-28, 2011, Blacksburg, VA, USA.

O. Yasuda: Sterile Neutrinos at the Crossroads (poster)

A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami2011), December 15-20, 2011, Fort Lauderdale, Florida, USA

O. Yasuda: Search for sterile neutrinos at reactors (Invited talk)

5) 学会誌等

南方久和：最後の混合角 θ_{13} の発見

パリティ特集「物理科学、この1年」Vol. 27, No. 01 (2012) pp 52-53.

南方久和 (翻訳)：ニュートリノのヘリシティ反転を追い求めて

パリティ Vol. 27, No. 04 (2012) pp 20-26.

安田修：T2K 実験、第三レプトン混合角 θ_{13} の兆候をついに発見か?

日本物理學會誌 Vol. 66, No. 11 (2011) pp 810-812.