

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 (1-6):ニュートリノ物理の現象論、(7):それ以外の研究項目の順序で記述する。

2004年、日本の三つのニュートリノ振動実験が長く待ち望まれていた「振動的振舞い」の実験的証拠を見いだした。これはスーパーカミオカンデによって大気ニュートリノを使って、カムランドによって原子炉ニュートリノを使って、また、K2K (KEK To Kamioka 実験) によって加速器ニュートリノを使って得られたものである。この結果、ニュートリノ振動現象の存在は最早疑う余地のないものとなり、ニュートリノ質量とレプトンフレーバー混合の物理は確固たる土台を得て新しい段階に突入した。

1) クォーク・レプトン相補性

素粒子の標準模型において、クォークとレプトンは互いに互いを支え合う構成要素として存在する(アノマリー相殺機構)。また、大統一理論は強い力、弱い力、電磁気力の3力の統一されるエネルギースケールでクォークとレプトンが区別できず、互いに移り変わる世界が出現すると教えている。最近、このクォークとレプトン間の関係を新たな角度から捉え直そうという試み、「クォーク・レプトン相補性」が提唱され注目を集めている(Minakata-Smirnov, Raidal)。これはクォークセクターの1-2角(カビボ角)とレプトンセクターの1-2角(太陽角)との間に存在するカビボ角+太陽角=45度という近似的な経験的關係式を大統一の立場から解釈を与えようというアプローチである。これはクォーク・レプトンの1-2セクター間に非自明な関係が存在し、ここに最大角が潜んでいることを意味しており、大気2-3セクターにある最大角と合わせて、新しい双極大角仮説を強く示唆している。この仮説の意味するものやこのクォーク・レプトン相補性が埋め込まれた統一模型の構築などの様々の方向に向かって活発な研究が始まっている。

2) 原子炉ニュートリノ実験による1-2角の精密測定法

2003年に原子炉ニュートリノ実験による1-3角の測定についての新しいアイデアとその意義についての指摘がなされ(南方・杉山・安田・井上・末包)、世界的な原子炉ニュートリノ実験計画ブームの発端となった。今年度はこれに引き続き、原子炉ニュートリノ実験による1-2角の精密測定法に関する研究を行った。例えば、上記のクォーク・レプトン相補性仮説の検証はこのような1-2角の精密測定を必要とする。クォークセクターのカビボ角($\sin^2 \theta_C$)が約1%の精度で測定されているのに対して、レプトンセクターの1-2角の測定精度はこの10-20倍程度の大きな誤差をもっている。将来構築されるであろうクォーク・レプトンの統一理論の検証にもこの両セクターの1-2角の同程度の測定精度が必要である。この研究ではニュートリノ振動の第1振動極大を与える距離である柏崎刈羽原発から約60kmの地点にカムランド級の測定器(この設定をSADOと略称)を置いて6年間測定すれば、($\sin^2 \theta_{12}$)を約2%の精度で測定可能であることを見いだした。これは図に示されているように、世界最高の感度を達成すると思われていた低エネルギー太陽ニュートリノ測定による方法を凌駕するものである。

(上記課題はブラジル・リオデジャネイロカトリック大学 布川弘志、およびサンパウロ大学 R. Zukanovich-Funchal, W. J. C. Teves 両氏との共同研究)

3) 原子炉ニュートリノ振動実験における現象論

原子炉ニュートリノによる θ_{13} の測定実験は、加速器以外による θ_{13} の決定方法として注目を集めており、その測定精度がどれだけ良いかは加速器実験と原子炉実験を組み合わせる振動パラメーターの縮退問題を解決する際に重要な要素となる。昨年度の研究ではレート解析による測定精度の限界値を導いた

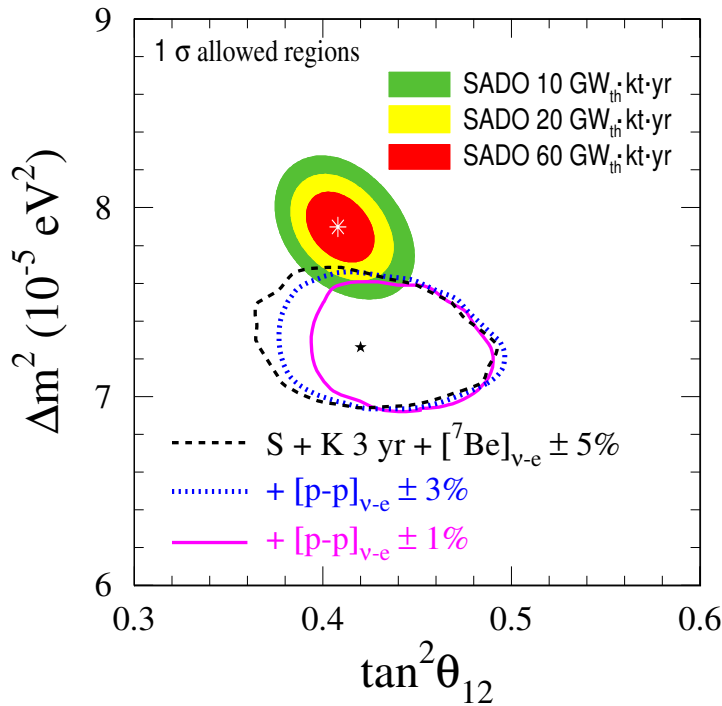


図 1: 原子炉ニュートリノ実験による 1-2 角測定 (SADO: 我々の結果) と低エネルギー太陽ニュートリノ測定による方法 (J. N. Bahcall-C. Peña-Garay 氏による) の感度比較。縦軸はニュートリノの質量二乗差。

が本年度はこの結果をエネルギースペクトルによる解析に拡張した。その結果、 $\sin^2 2\theta_{13}$ の測定精度は測定器固有の系統誤差のうち、エネルギーに依存するものとエネルギーに依存しないものの両方に依存し、エネルギーに依存する系統誤差が非常に小さくならないとレート解析による限界値を大幅に改善することが難しいことがわかった。

4) 長基線加速器実験による (2-3) 角測定

レプトンフレーバー混合行列の (2-3) 角、特にその最大角からのずれは (1-3) 角の小ささと関連して対称性の存在を暗示していて興味もたれている。これを視野において長基線加速器実験による (2-3) 角決定の問題に関する研究を行った。JPARC-SK 長基線加速器実験においてミューニュートリノの消失モードの測定実験によって $\sin^2 2\theta_{23}$ は 1% の精度で決定可能であると信じられている。にもかかわらず、 $\sin^2 \theta_{23}$ の決定精度は 10-20% 程度にとどまる。この理由を分析し、二つの主要原因を特定した。(1) $\sin^2 2\theta_{23}$ から $\sin^2 \theta_{23}$ への変換における Jacobian が最大角付近で大きな値をとること、(2) (2-3) 角にまつわるパラメータ縮退が最大角付近で両 octants の解を混同させ、精度悪化を招く。現在この問題を解決する方法について研究を進めている。

5) ニュートリノ振動における CP・T 非保存の統一像

2 年前の研究で「双確率空間における統一 CP・T ダイアグラム」を導入した。同時にこのダイアグラムのベースボールダイヤモンド型構造を説明する関係式として CP-CP、および T-CP 関係式を導いた。今年度の研究ではこの CP-CP、および T-CP 関係式が等価であることを証明し、ニュートリノ振動における CP・T 非保存の統一的記述を打ち立てた。CP-CP、および T-CP 関係式からの高次補正によるずれの計算も行われた。(上記課題はスエーデンの AlbaNova University Center, Royal Institute of Technology (KTH), Department of Physics, Division of Mathematical Physics から派遣されてきた留学生 Martin Blom 氏との共同研究)

6) 高エネルギー宇宙ニュートリノ振動の現象論

活動銀河核等からの高エネルギーニュートリノのフレーバーの比は、新しい物理を探る可能性として近年注目されている。ほとんどの場合、地球で観測される ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ のフラックスは等しくなることが知られているが、強い磁場がニュートリノ源付近に存在してかつニュートリノに比較的大きな磁気モーメントがある場合には、 ν_e とそれ以外のフラックスに有意な差が出る状況が存在することが断熱近似の範囲内で示された。しかし、その議論には断熱近似が正当化できること、特定の磁場のプロフィールを用いていること等々、色々な仮定があり、それらの吟味についての研究を継続中である。

7) 超弦理論に基づいた素粒子模型

タイプ II 型の超弦理論において D ブレーンという多次元を占める物体を導入することができる。そして、D ブレーンの占める空間にはゲージ対称性、すなわち力を媒介するゲージ粒子が局在することが知られている。さらに、2 つの D ブレーンの共有する空間（これを我々の 3 次元空間に同定する）に、カイラルフェルミオンが局在することが知られている。

一方、現在の素粒子についての実験事実をよく説明する標準模型は、いくつかのゲージ対称性とカイラルフェルミオンからなっている。しかし、標準模型には、いくつかの問題点があり、特に素粒子の質量やフレーバー混合の起源の問題は最も大きな問題のひとつである。標準模型では、素粒子の質量やフレーバー混合は湯川結合を通じて生成される。したがって、この湯川結合を導くことが今日の素粒子対理学における最も重要な課題の一つである。超弦理論における上記の状況により、タイプ II 型の超弦理論に D ブレーンを導入することによって、標準模型、そして湯川結合を導くことができる可能性がある。このアイデアに基づく素粒子模型を交差 D ブレーン模型という。

前年度に具体的に構成した模型を改良し、より現実的なものにした。この模型は、現在素粒子とされているものを、ほかの新たな素粒子、プレオン、によって構成される複合粒子としたものである。プレオンを束縛して我々の知る素粒子を構成するには強い力を必要とするが、これについては交差 D ブレーン模型の特徴である強い相互作用の導入が可能であることを利用している。素粒子の複合性の導入により、この模型は素粒子の質量を導く非自明な湯川結合を導く可能性を持つものになっている。

交差 D ブレーン模型において非自明な湯川結合を導くことは困難なことである。構成した模型はこの困難を解決したものであるが、素粒子の複合性の導入は大胆すぎる面がある。そこで、どうして普通に素直に模型を構成するとうまくいかないかということについて詳しく調べ、複合性の導入等の工夫を何もしないと現実的な湯川結合を導くことはできないことを証明した。

交差 D ブレーン模型には他にもいくつかの問題点があり、それらをひとつひとつ解決してより現実的な模型の構成を目指すことが今後の課題である。この目標に向けて、各国の研究者がそれぞれ様々な方向から研究を行っている。

2. 研究業績

1) 論文

M. Blom and H. Minakata: Unity of CP and T Violation in Neutrino Oscillations, *New Journal of Physics* **6** (2004) 130-1 – 130-2 (“Focus Issue on Neutrino Physics”).

N. Kitazawa: Dynamical Generation of Yukawa couplings in Intersecting D-brane Models, *Journal of High Energy Physics* **11** (2004) 044.

N. Kitazawa: Supersymmetric Composite Models on Intersecting D-branes, *Nuclear Physics* **B699** (2004) 124-134.

H. Minakata and A. Yu Smirnov: Neutrino Mixing and Quark-Lepton Complementarity, *Physical Review D* **70** (2004) 073009-1-12.

H. Minakata, M. Sonoyama, and H. Sugiyama: Determination of θ_{23} in Long-Baseline Neutrino Oscillation Experiments with Three-Flavor Mixing Effects, *Physical Review D* **70** (2004) 113012-1-13.

H. Minakata, H. Nunokawa, W. J. C. Teves and R. Zukanovich Funchal: Reactor Measurement of θ_{12} ; Principles, Accuracies and Physics Potentials, *Physical Review D* **71** (2005) 013005-1-17.

O. Yasuda: New plots and parameter degeneracies in neutrino oscillations, *New Journal of Physics* **6** (2004) 83-1 – 83-27 (“Focus Issue on Neutrino Physics”).

T.Kamijo, O.Yasuda, Y.Chikashige, T.Kon, Y.Takeoka, R.Yoshida: Salt neutrino detector for ultrahigh-energy neutrinos, *Physics of Atomic Nuclei* **67** (2004) 2050 – 2053.

2) 国際会議報告

N. Kitazawa: Dynamical Generation of Yukawa Couplings in Intersecting D-brane Models, Talk given at 12th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY 04), Tsukuba, Japan, 17-23 Jun 2004, KEK-Proceedings 2004-02, 861-864.

H. Minakata, Toward exploring unknowns in the lepton flavor mixing, Talk given at Hujihara Seminar; Neutrino Mass and Seesaw Mechanism, KEK, Japan, February 23-25, 2004., published in *Nuclear Physics Proceedings Supplement* **137** (2004) 74.

H. Minakata: Overview of degeneracies, Talk at Fifth International Workshop on Neutrino Factories and Superbeams, Columbia University, New York, June 5-11, 2003, published in *AIP Conference Proceedings* **721** (2004) 206-210.

H. Minakata: New views on the problem of CP violation, Talk given at Second International Workshop on Neutrino Oscillations in Vanice, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venice, Italy, December 3-5, 2003, published in *Venice 2003, Neutrino oscillations* pp. 303-320.

H. Minakata, H. Nunokawa and S. J. Parke: Long baseline neutrino oscillations: Parameter degeneracies and JHF / NUMI complementarity, *Proceedings of 4th Workshop on Neutrino Oscillations And Their Origin* (World Scientific, Singapore, 2004, eds Y Suzuki, M Nakahata, Y Itow, M Shiozawa and Y Obayashi) pp.196-201.

O. Yasuda: Parameter degeneracy and reactor experiments, *Proceedings of 4th Workshop on Neutrino Oscillations And Their Origin* (World Scientific, Singapore, 2004, eds Y Suzuki, M Nakahata, Y Itow, M Shiozawa and Y Obayashi) p 208 – 215.

O. Yasuda: Measurement of θ_{13} by reactor experiments, *AIP Conference Proceedings* **721** (2004) 190 – 193.

O. Yasuda: Measurement of $\sin^2 2\theta_{13}$ by reactor experiments and its sensitivity, *Proceedings of the 32nd Coral Gables Conference* (World Scientific, Singapore, 2005, eds T. Curtright, A. Perlmutter and S. Mintz) (2005) p 273 – 280.

O. Yasuda: Parameter degeneracies and new plots in neutrino oscillations, presented at 21st International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2004), Paris, France, 14-19 Jun 2004, published in Nuclear Physics Proceedings Supplement **143** (2005) 528.

3) 学会講演

日本物理学会第 59 回年次大会 2004 年 3 月 27 日～3 月 30 日 (九州大学)

南方久和：ダブル β 崩壊とニュートリノ (実験・理論核物理合同シンポジウム講演)

杉山弘晃, 安田修, 末包文彦, G.A. Horton-Smith: 原子炉ニュートリノを用いた 1-3 角測定精度の評価および複数の原子炉を用いた場合の影響

日本物理学会秋季大会 2004 年 9 月 27 日～9 月 30 日 (高知大学)

安田修：新しいプロットによるニュートリノ振動におけるパラメーター縮退の議論

国内研究会

第 4 回研究会理化学研究所集中セミナー「String Phenomenology」：2004 年 5 月 17 日 (理化学研究所)

北澤敬章：Dynamical Generation of Yukawa Couplings in Intersecting D-brane Models

三重冬の学校：2005 年 3 月 12 日～3 月 14 日

北澤敬章：Intersecting D-brane について—D-brane 入門から最近の話題まで—

基礎物理学研究所研究会 2004 「素粒子物理学の進展」:

2004 年 6 月 29 日～7 月 2 日 (基礎物理学研究所)

北澤敬章：Intersecting D-brane Models – review –

KEK 理論研究会 2005 「素粒子物理の現状と展望」 2005 年 3 月 3 日～3 月 5 日:

(高エネルギー加速器研究機構)

北澤敬章：Introduction to Intersecting D-brane Models

国際会議

21st International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino2004),
College de France, Paris, June 13 – 19, 2004

O. Yasuda: Parameter degeneracies and new plots in neutrino oscillations (Poster).

Third International School on the Neutrino Factories and Superbeams,

Tokyo Metropolitan University, Japan, July 16-24, 2004

H. Minakata: Phenomenology of Long Baseline Experiments (Invited lecture).

6th International Workshop on Neutrino Factories and Superbeams(NuFact 04),

Osaka University, Osaka, July 26 – August 1, 2004

O. Yasuda: Degeneracy and strategies of long baseline and reactor experiments (Invited talk).

Neutrino Oscillation Workshop (NOW2004), Conca Specchiulla, Otranto, Italy,

September 11-17, 2004

H. Minakata, H. Nunokawa, W. J. C. Teves and R. Zukanovich Funchal:
Reactor Measurement of θ_{12} ; Secret of the Power.

A Topical Conference on Elementary Particle Physics and Cosmology,
Sonesta Beach Resort Key Biscayne, Florida, USA, December 15 – 19, 2004

O. Yasuda: Parameter degeneracy and strategies of future long baseline neutrino experiments (Invited talk).

XI International Workshop on Neutrino Telescopes, Istituto Veneto di Scienze,
Lettere ed Arti, Venice, Italy, February 22-25, 2005

H. Minakata: Neutrino Mixing and Quark-Lepton Complementarity (Invited talk).