

素粒子理論研究室

1. 研究活動の概要

以下に研究室の活動を (1-6):ニュートリノ物理の現象論、(7-8):それ以外の研究項目の順序で記述する。

スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ実験によって発見され、SNO その他の太陽ニュートリノ実験、およびカムランド原子炉実験によって確認されたニュートリノ振動現象はニュートリノ質量とレプトンフレーバー混合の物理という新しい研究領域を創成した。これらの実験によって我々は牧・中川・坂田行列の(1-2)(太陽)および(2-3)(大気)セクターの構造をほぼ把握することができた。残るのは(1-3)セクターである。この中には世界のコミュニティーの一致した次の目標である(1-3)角、さらにはレプトン小林・益川位相が含まれる。この探索方法を見出すべく、我が都立大計画班は文科省科研費特定領域研究「ニュートリノ振動とその起源の解明」(今年度最終)において理論系計画班の中核を形成し、国際共同研究を含む活発な研究活動を行った。

1) (1-3)角の測定のための原子炉実験実現に向けた国際的リーダーシップ

次の目標である(1-3)角の決定に関して、我々のグループは東北大の実験グループと協力して原子炉実験による測定法を提案した。この提案は世界的な大きな反響に迎えられ、世界的規模の国際的実験グループ形成への潮流が形成された。この努力は125名の当該分野の実験・理論研究者が署名するWhite Paperとして結実し、欧州ではDouble Choozグループの実験計画が承認されるに至った。我が研究室の理論的活動がこの国際的実験グループ形成とWhite Paper執筆の原動力の一助となったことは言うまでもない。

日本においても24.3 GWという世界最大の熱出力(したがって最大の反電子ニュートリノフラックス)をもつ柏崎刈羽原子炉発電所における実験を想定した具体的計画が立案され、KAShiwazaki-KAriwaにちなんで、KASKAグループと銘打たれた。16年5月8,9日の2日間にわたって、第1回KASKA共同実験グループミーティングが都立大学国際交流会館において開催された。

2) 原子炉ニュートリノによる θ_{13} 測定の現象論

原子炉からの反電子ニュートリノ欠損測定実験は、三世代のニュートリノ振動の枠組における第三の混合角 θ_{13} の決定のための有力候補として最近注目を集めている。日本で想定されている柏崎刈羽原発での実験は、そのニュートリノフラックスが世界最大である一方、原子炉が複数個(7基)存在することによる付加的な不定性の存在が懸念されるが、この不定性は測定器を複数箇所(近距離に2個、遠距離に1個)に設置することにより問題とはならないことを示した。又、 θ_{13} の測定精度は、測定器の非相関系統誤差が主に寄与することから、現実的な測定器の系統誤差を仮定することにより測定精度の限界値を導いた。さらにその限界値を超えるためのアイデアとして、同一の測定器を一箇所に複数個設置することを提案した。

(この課題は東北大学ニュートリノセンター・末包文彦、カリフォルニア州立大学・Horton-Smith 両氏との共同研究)

3) 原子炉実験と長基線加速器実験の組み合わせによるCP非保存測定

原子炉実験による(1-3)角の測定と長基線ニュートリノ振動実験の組み合わせによってCP非保存位相の測定が可能であることを初めて指摘した。JPARC-Hyper-Kamiokande実験におけるCP非保存位相の測定は反ニュートリノモードでの電子型ニュートリノ出現実験の運転を必要とするが、これはニュートリノモードに比して同数の事象数を得るのに約3倍もの時間を要する。(JPARCはJapan Proton Accelerator Research Complexの略称)そこで当該実験では最初にニュートリノモードを2年、後に反ニュートリノ

モードを6年運転する予定である。しかし、もしニュートリノモード稼働時に原子炉ニュートリノ実験が稼働していれば、これと同期した2年間でCP非保存位相の測定が可能であることを示した。この方法によるレプトンCP非保存の測定方法は現行のSuper-Kamiokande (SK) 実験での10年間のニュートリノモード測定と組み合わせることによっても(少し感度が落ちるものの)実行可能で、Hyper-Kamiokande 検出器なしでCP非保存の測定を可能にする現在知られている唯一の方法である。

4) 長基線加速器実験による(2-3)角測定

(2-3)角は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1%の精度で決定可能であると信じられている。このような高精度の決定が課題となるとき、通常は小さいので無視されている3世代の効果を問題にする必要がある。当該実験グループと密接なコンタクトをとり、現実的な実験条件でカットされた後でのバックグラウンドの形状を考慮してこの(2-3)角の測定精度の評価を3世代混合の枠組みで行った。この結果、(2-3)角の測定精度は(1-3)角の不定性や(2-3)角の最大角からのずれによって大きな影響を受け、4-5%まで低下する領域があることが明らかにされた。

5) ニュートリノ振動における質量二乗差の符号の決定

ニュートリノの質量パターンを知るために欠くことができない測定量として大気ニュートリノ振動質量二乗差の符号がある。これは、原理的には、2000 km 程度の長基線加速器実験において物質効果との干渉効果を測定することによって決定可能である。しかしながらこのような長基線実験は巨大な検出器を必要とし、振動質量二乗差の符号決定への現実的な実験的戦略は未だ打ち立てられていない。日米の長基線加速器実験計画を組み合わせることによって、この符号の決定が可能になる可能性を議論した。その結果、(i) 米国のNO ν A (日本のJPARC-SK)を振動極大より大きな(小さな)エネルギーで運転することは感度を極端に減少させるので避けるべきであること、(ii) 通常言われる一方が反ニュートリノモードではなく、双方がニュートリノモードで運転することによってより高い精度で符号の決定が可能である、という二つの新しい知見を得た。これらの結果に到達する上で、以前に開発した関係した諸量をコンパクトに図示することのできる双確率空間のCPダイアグラムが大きな役割を果たした。

(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、および米国フェルミ国立加速器研・Stephen Parke 両氏との共同研究)

6) 加速器長基線実験によるパラメーター縮退の現象論

近未来に東海村 神岡で行われるJPARC実験でニュートリノと反ニュートリノの測定が振動最大のエネルギーで行われた場合、さらにどのような実験を行えばパラメーター縮退の問題を解決できるかを、($\sin^2 2\theta_{13}, 1/s_{23}^2$) 平面内の新しいプロットを導入することによって議論した。その結果、JPARCや米国のNO ν A (NuMI Off-axis Neutrino Appearance Experiment、ノバと読む) 実験で振動最大よりも低エネルギーで実験することが現実的に可能であれば、種々の不定性を解決する可能性があることを示した。それ以外に $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ の測定が有効であることも示した。

7) 超弦理論と重力の量子効果

昨年に引き続き、超弦理論におけるフェルミ粒子の凝縮について研究した。

ヘテロ超弦理論において、fivebrane という非自明な背景場がある場合に、ゲージ微子の伝播関数を計算した。計算は弦理論の共形場の理論を用いて、D-brane boundary state を変型した boundary state を使って行った。有効理論からの示唆として、fivebrane 背景においては、その非自明な4次元空間のフェルミ粒子の伝播はないことが知られているが、この計算の結果はこれを支持するものとなった。さらに、求めた伝播関数(2点相関関数)からゲージ微子の対凝縮を計算した。計算は厳密なものではなく、得られた結果は示唆に過ぎないが、有効理論から予想されている結果を支持するものとなった。

8) 超弦理論に基づいた素粒子模型

超弦理論における多次元を占める物体であるDブレーンの交差点にカイラルフェルミオンが局在する事実から、カイラルフェルミオンで構成されている我々の世界をDブレーンの交差する系として表現することができる可能性がある。このアイデアに基づく模型を交差Dブレーン模型という。多くの交差Dブレーン模型がすでに構成されてきたが、共通の問題として、必要でないゲージ相互作用が含まれてしまうこと、必要でない物質場が含まれてしまうことがあった。これは、超弦理論として無矛盾であるための条件を満たすために、必要以上のDブレーンを導入せざるを得ないことに原因がある。

余計なゲージ相互作用を適当に処理するのではなく、それを意味あるものとして解釈するアイデアを提案した。それは、余計な相互作用をクォークやレプトンの構成要素としてのプレオンの間に働く力として解釈するというものである。(ただし、クォークやレプトンの構成要素の存在は仮定に過ぎない。)具体的に構成した模型は非常に単純で、必要でない物質場の数も少ないものとなった。

課題として、クォークやレプトンの質量生成にかかわる湯川結合をどのように生成するか、低エネルギーで存在する超対称性をどのように破るか、などの問題が残っている。

2. 研究業績

1) 論文

M. Asakawa, H. Minakata and B. Muller: Negative Elliptic Flow from Anomaly Induced DCC Formation, Nuclear Physics **A721** (2003) 305-308.

N. Kitazawa, Gaugino Condensation in Heterotic Fivebrane Background, Modern Physics Letters **A19** (2004) 681-692.

N. Kitazawa, Fermion Propagators in type II Fivebrane Backgrounds, Physical Review **D68** (2003) 026005.

Y. Katagiri and N. Kitazawa, Fermionic Zeromodes in Heterotic Fivebrane Backgrounds, Progress of Theoretical Physics **110** (2003) 1211-1217.

H. Minakata and H. Sugiyama: Exploring Leptonic CP Violation by Reactor and Neutrino Superbeam Experiments, Physics Letters **B580** (2004) 216-228.

H. Minakata, H. Nunokawa and S. J. Parke: The Complementarity of Eastern and Western Hemisphere Long-Baseline Neutrino Oscillation Experiments, Physical Review **D68** (2003) 013010.

H. Minakata and H. Sugiyama: Double Beta Decay Constraints on Neutrino Masses and Mixing; Reanalysis with KamLAND Data, Physics Letters **B567** (2003) 305-314.

H. Minakata, H. Sugiyama, O. Yasuda, K. Inoue and F. Suekane: Reactor Measurement of θ_{13} and Its Complementarity to Long-Baseline Experiments, Physical Review **D68** (2003) 033017-1-12.

H. Sugiyama: Constraints on Neutrino Mixing Parameters by Neutrinoless Double Beta Decay Experiments, Nuclear Physics **A721** (2003) 521-524.

O. Yasuda: Summary of Working Group 1 at Nufact'01: Theory Part, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **503** (2003) 104 - 109.

B. Autin, D. A. Harris, S. F. King, K. S. McFarland and O. Yasuda: Summary of Working Group 2, Nufact02, Journal of Physics G **29** (2003) 1743 – 1755.

2) 国際会議報告

H. Minakata, H. Nunokawa, and S. Parke: CP and T Violation in Neutrino Oscillations, (Lecture presented at 10th Mexican School of Particles and Fields, Playa del Carmen, Mexico, 30 October-6 November, 2002,) AIP Conf. Proc. 670 (2003) 132-139.

O. Yasuda: Physics potential and present status of neutrino factories, Proceedings of the 3rd International Workshop on Neutrino Oscillations and their Origin (World Scientific, Singapore, 2003, eds Y. Suzuki, M. Nakahata, Y. Fukuda, Y. Takeuchi, T. Mori, T. Yoshida) p 259 – 268.

O. Yasuda: Neutrino factories: Physics potential and present status, Proceedings of 3rd International Conference on Particle Physics Beyond the Standard Model, (IOP Bristol, 2003, eds. Klapdor-Kleingrothaus), p 419 – 434.

3) 将来計画の実験計画書

Y. Kuno, Y. Mori, S. Machida, T. Yokoi, Y. Iwashita, J. Sato and O. Yasuda
A feasibility study of a neutrino factory in Japan, KEK Report 2003-5, September 2003.

K. Anderson et. al. (125 authors including H. Minakata and O. Yasuda)
White Paper Report on Using Nuclear Reactors to Search for a Value of θ_{13} , hep-ex/0402041, January 2004.

4) 学会講演

日本物理学会秋季大会 2003年9月9日～9月12日(宮崎ワールドコンベンションセンター)

南方久和, 杉山弘晃, 安田修: JHF-Kamioka 実験におけるパラメーター縮退問題の定量的解析

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)

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

国内研究会

第4回研究会「ミューオン蓄積リングを使ったニュートリノ源とそれが拓く物理」:

2003年5月16日-17日(東京都立大学)

杉山弘晃: Quantitative treatment of the parameter degeneracies at the JPARC experiment.

安田修: WG1 overview; Status of neutrino oscillation phenomenology—after SNO—

高エネルギーニュートリノ・宇宙線・線研究会—Ashra 計画を巡って—:

2003年7月24日(東京大学宇宙線研究所)

安田修: Neutrino oscillations in high energy cosmic neutrino flux

国際会議

XII International School “Particles and Cosmology”

Baksan Valley, Kabardino-Balkaria, Russia, April 21-26, 2003

H. Minakata: “Status of Neutrino Oscillations”, and “Parameter Degeneracy in Neutrino Oscillations”
(Invited lectures)

Workshop on Future Low-Energy Neutrino Experiments

University of Alabama, Tuscaloosa, USA, April 30 – May 2, 2003

O. Yasuda: Parameter degeneracy and reactor neutrino experiments.

Second International School on the Neutrino Factory

Shelter Island, New York, May 27-June 4, 2003

H. Minakata: Superbeams, Neutrino Factories and Beta Beams (Invited lecture)

5th International Workshop on Neutrino Factories and Superbeams

(NuFact 03), Columbia University, New York, USA, June 5 – 11, 2003

H. Minakata: Overview of Degeneracies (Invited talk).

H. Sugiyama: Resolving JHF Degeneracies.

O. Yasuda: Reactor measurements of θ_{13} (Invited talk).

19th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN03)

Lake Geneva, Wisconsin, October 6-11, 2003

H. Minakata: Neutrino Physics: Theoretical Status (Invited plenary talk)

2nd Workshop on Future Low-Energy Neutrino Experiments

Technische Universität München, Munich, Germany, October 9 – 11, 2003

H. Minakata: Comments on reactor-LBL complementarity (Invited talk).

O. Yasuda: Sensitivity of experiments with multi reactors and multi detectors.

Second International Workshop on Neutrino Oscillations in Vanice

Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venice, Italy, December 3-5, 2003

H. Minakata: New Views on the Problem of CP Violation (Invited talk)

Coral Gables Conference 2003

Lago Mar Resort Hotel, Fort Lauderdale, USA, December 17 – 21, 2003

O. Yasuda: Reactor Measurement of θ_{13} and Its Complementarity to Long-Baseline Experiments.

The 5th Workshop on Neutrino Oscillations and their Origin

(NOON2004), Odaiba, Tokyo, Japan, February 11-15, 2004

O. Yasuda: Toward exploring U_{e3} (Invited talk).

Hujihara Seminar; Neutrino Mass and Seesaw Mechanism, KEK, Japan, February 23-25, 2004

H. Minakata: Toward Exploring (1-3) Sector of the MNS Matrix (Invited talk)

3rd Workshop on Future Low-Energy Neutrino Experiments

Toki messe, Niigata, Japan, March 20 – 22, 2004

H. Minakata: Reactor Measurement of Lepton Mixing Parameters

O. Yasuda: Sensitivity to $\sin^2 2\theta_{13}$ at KASKA.

5) 科学研究費等報告

安田修：平成 13 年度～16 年度科学研究費補助金（基盤研究 C）研究成果報告書
「長基線実験に関連したニュートリノ物理学」

6) 学会誌等

安田修：ニュートリノ振動の現象論
日本物理学会誌 58 (2003) 349 – 355.

安田修：ステライルニュートリノとは何か？
パリティ 19 (2004) 61 – 64.