

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 (1-3):ニュートリノ物理の現象論、(4-6):それ以外の研究項目の順序で記述する。

ニュートリノ質量とレプトンフレーバー混合の存在の確立を受け、ニュートリノ物理のフロンティアは未知の (1-3) 角の決定、CP 非保存の探索、ニュートリノ質量パターンの決定とその意味するものの解明、さらには、未発見の新しい相互作用の探索に向かう。

1) ニュートリノ振動による新しい物理の探求

標準模型を超える物理が存在する場合、その兆候は標準模型のエネルギースケールでは標準模型と高いエネルギースケールの比により抑制されるが、量子力学的干渉を使うニュートリノ振動では、その微小な効果が観測できる可能性がある。ここでは現象論的にフェルミオンの 4 次の有効相互作用を仮定し、その係数に関する他の実験からの制約を課してニュートリノ振動に与える新しい物理の影響を考察した。新しい物理の効果は、この設定のもとでは、ニュートリノの生成点と検出点におけるものとニュートリノの伝播中におけるものが考えられるが、とりあえず伝播中の効果を議論した。その結果、質量による標準的なニュートリノ振動では説明できないほど大きな振動確率が観測される可能性があることを、現在進行中のアメリカの MINOS 実験 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) や、将来計画されているニュートリノファクトリー ($\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ 、 $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$) 等の基線の長いニュートリノ振動実験に対して示した。又、一定密度の物質中でのニュートリノ振動確率の解析的表式に対して知られていた木村-高村-横枕の方法を拡張し、新しい物理の効果が伝播中にある場合に、振動確率の解析的表式を与えた。さらに、その表式と、低エネルギー・高エネルギー極限での振る舞いから、上記の結果が得られる理由について直感的な説明を試みた。

2) 神岡・韓国 2 検出器系によるニュートリノ質量パターンと CP 位相の同時決定

東海村に建設中の Japan Accelerator Research Complex (J-PARC) からニュートリノビームを神岡に向けて発射し、これをスーパーカミオカンデで検出する Tokai-to-Kamioka (T2K) 実験が 2009 年度に稼働予定である。この実験はレプトンフレーバー混合で唯一残された未知の混合角 (1-3) 角を測定することを主目的としている。(1-3) 角がこの実験で測定可能なほど大きかった場合には小林・益川型のレプトン CP 位相の測定に進むことが可能で、このため陽子ビーム強度を 4MW に増強し、検出器として 1 メガトンの体積を持つハイパーカミオカンデの建設を伴う T2K の第 2 期実験が計画されている。ところが、T2K は基線長が約 300 km と短いために現在まで未決定のニュートリノ質量パターンを分解できず、このため、質量パターンの不定性が CP 位相の効果とからんで CP 対称性が破れているのかが曖昧になってしまっていることが知られている。

今年度の研究において、1 メガトンの体積を持つハイパーカミオカンデを二分割し、一つを神岡に、他の一つを J-PARC から約 1000 km 離れた韓国内の適当な場所に設置するという新しい可能性を提起した。両検出器をビーム軸から 2.5 度の同一角度に設置することによって、(ニュートリノ振動がなければ) 全く同一のエネルギー分布をもつビームを受けることが可能になる。神岡検出器が第 1 振動極大に、韓国検出器が第 2 振動極大に近い距離に設置されていることにより、両検出器におけるニュートリノ振動によりエネルギースペクトルの変形の度合いが大きく異なる。(図 1 参照) この性質を使って両検出器のデータを比較することにより CP 位相の効果と質量パターンの不定性に関係した物質効果を高感度で分解できることを示した。この韓国に設置する第 2 検出器のアイデアは国際的な注目を集めることになり、提案から半年を経た時点 (2005 年 11 月 18-19 日) でソウルのコリア高等研究所 (KIAS) において国

際ワークショップが開催されるに到った。(上記課題は東大宇宙線研 梶田隆章氏、米国・インディアナ大学 石塚正基氏、およびブラジル・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)

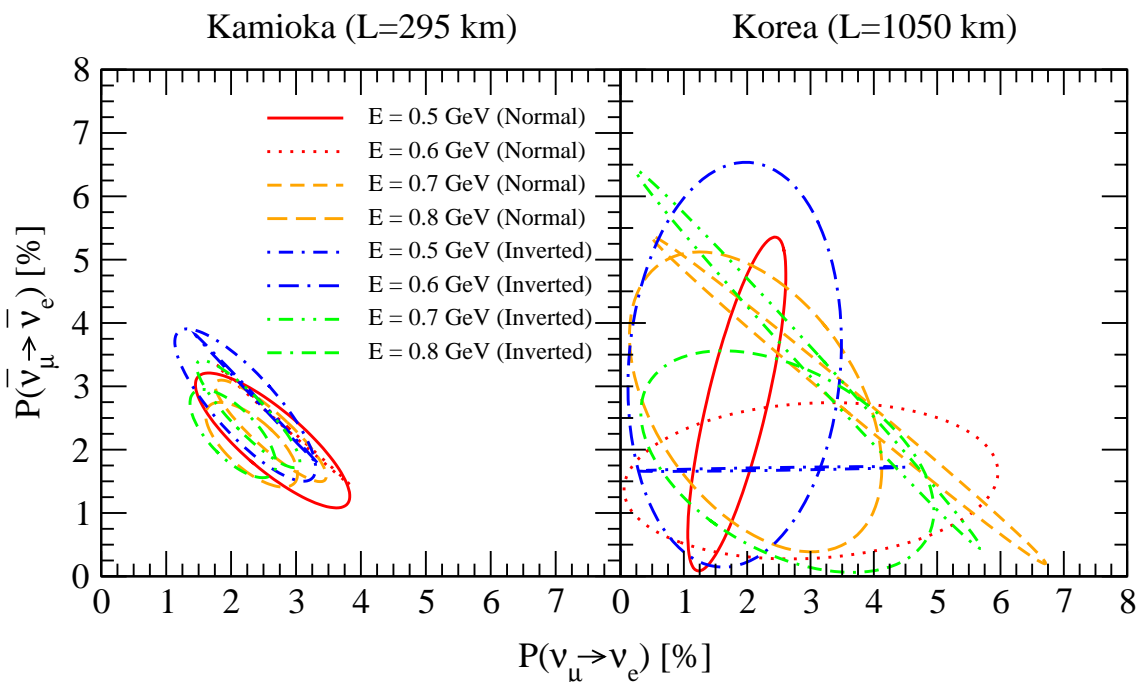


図 1: ニュートリノ振動によるエネルギースペクトルの変形が神岡・韓国両検出器によって大きく異なる様子が双確率空間の CP 位相の変化による楕円の振る舞いによって示されている。

3) 超新星ニュートリノを使う CPT 非保存の探索

超新星からのニュートリノはニュートリノ・反ニュートリノの混成ビームであり、このため、電子型、反電子型、ミュー・タウ型の 3 種類のニュートリノのエネルギースペクトルの分解・決定によって CPT 非保存の探索が可能になる。今年度の研究では初めて 32 種類の CPT 保存・非保存パターンの分類を行い、この方法を実行する場合に必要な各ニュートリノスペクトルの基本的公式を導いた。この結果を使いどのスペクトルのどの性質の決定が CPT 非保存の発見にとって最も重要であるか、さらには、(1-3) 角の測定が行われた場合にどれだけニュートリノスペクトルのパターンの絞り込みが可能であるかを明らかにした。

4) 弦模型における電弱対称性の自発的破れ

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ため、「湯川相互作用の結合定数の大きさ」が素粒子の質量を決める。「湯川相互作用の結合定数の大きさ」を量子場の理論の枠組みで説明することは長きにわたって試みられてきたが、まだ成功していない。一方、最近の弦理論の理解の進展により弦理論の枠組みでそれを説明する新たな可能性が見出された。私(北澤)自身も含めて内外の多くの研究者がこの問題に挑戦してある程度の成功を収めたが、量子場の理論に基づく試みの成果を越えるものは得られていない。弦理論に基づく上記の試みの中でひとつ大きく欠如している要素が「電弱対称性の自発的破れ」である。すべての弦理論に基づく試みには「電弱対称性の自発的破れ」の機構が含まれておらず、この意味でまったく現実的でない。弦理論における「電弱対称性の自発的破れ」の可能性を論じた論文は極めて少なく、私の知る限りでは一つしかない。しかも、その論文には「湯川相互作用の結合定数の大きさ」についての論述がない。そこで、弦理論の枠組み

で「電弱対称性の自発的破れ」と「湯川相互作用の結合定数の大きさ」を同時に論じるべく、「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モデルを構成し、ヒッグス粒子の質量に対する量子補正の計算を試みた。量子補正を無視すれば質量はゼロであるので、弦の張力のスケールを小さく取れば、プランクスケールに比べて小さな質量が得られるはずである。興味があるのはヒッグス粒子の質量の2乗が正になるか負になるかである。負になれば「電弱対称性の自発的破れ」が起き得る。計算技術が新しいものであるために、それを開発しながら進まなければならない、最終結果はまだ出ていない。(私が欧州原子核研究機構(CERN)にピサ高等師範学校の A.Sagnotti 氏を訪ねた際に、この問題についてアドバイスを受けた。)

5) 余剰次元モデルにおける強結合ゲージ相互作用

我々の認識している3次元空間に加えて、現在の実験では認識できないほど小さい閉じた空間(余剰次元)が存在すると仮定して、素粒子物理学の諸問題を解決しようとする試みがある。特に、電弱対称性の自発的破れに関する「自然さの問題」を、それを引き起こすヒッグス粒子が余剰次元を含む空間におけるゲージ粒子のうちの、余剰次元方向に方向に偏極した成分であるとするにより理解しようとする試みがある。ヒッグス粒子の質量の大きさが電弱対称性の破れのスケールを決めるのであるが、それが非常に大きなプランクスケールに比べて自然に小さくなることがわかれば、問題は解決する。ヒッグス粒子の起源がゲージ粒子であれば、ゲージ粒子の質量はゼロであるから、量子補正を考慮する前には質量はゼロということになり、従ってその小ささが保証できるというアイデアである(実際には大きな量子補正がある)。次の段階として、量子効果によって適当な大きさの質量を生成する機構が必要である。そこで、強結合ゲージ相互作用の非摂動論的效果により、自然にヒッグス粒子の質量を生成する機構を提案した。(これは、北澤とKEKの岡田宣親氏と徳島大学の波場直之氏との共同研究である。)

6) フラックス中のDブレーンの安定性

弦理論においてDブレーンというものを使って素粒子モデルを作る際、Dブレーンの余剰次元方向の運動を不可能にしておかないと、その自由度が我々の世界における非物理的な場として現れてしまう。その自由度をなくす方法のひとつとして、余剰次元内にフラックス(量子化されたテンソル場の期待値)を仮定する方法がある。フラックスを入れると余剰次元方向の平行移動の自由度がなくなることは例解できるのだが、Dブレーンが存在できる余剰次元内の位置がひとつに決まるのか、それともひとつたび設定したら動かないということであるのかが明確でない。特に、余剰次元内に2つのDブレーンを「平行に離して」設定できるかどうかは明確でない(いくつかのDブレーンを「平行に離して」設定することは具体的なモデルの構成で多用される状況である)。そこで、フラックス内の2つのDブレーンに働く力を、弦理論の低エネルギー有効理論である超重力理論を用いて調べた。(これは、北澤と高エネルギー理論サブグループのD3の学生の佐々木伸氏との共同研究である。)

2. 研究業績

1) 論文

T. Higaki, N. Kitazawa, T. Kobayashi and K. Takahashi: Flavor Structure and Coupling Selection Rule from Intersecting D-branes, *Physical Review D* **72** (2005) 086003-1-14.

M. Ishitsuka, T. Kajita, H. Minakata, and H. Nunokawa: Resolving Neutrino Mass Hierarchy and CP Degeneracy by Two Identical Detectors with Different Baselines, *Physical Review D* **72** (2005) 033003-1-14

N. Kitazawa, T. Kobayashi, N. Maru and N. Okada: Yukawa Coupling Structure in Intersecting D-brane Models, *The European Physical Journal C* **40** (2005) 579-587.

H. Minakata and S. Uchinami: Testing CPT Symmetry with Supernova Neutrinos, *Physical Review D* **72** (2005) 105007-1-14.

H. Sugiyama, O. Yasuda, F. Suekane, G.A. Horton-Smith: Systematic limits on $\sin^2 2\theta_{13}$ in neutrino oscillation experiments with multi-reactors, *Physical Review D* **73** (2006) 053008-1 – 053008-13.

T. Hatanaka, S. V. Ketov, Y. Kobayashi and S. Sasaki: $N = 1/2$ supersymmetric four-dimensional non-linear sigma-models from non-anti-commutative superspace, *Nuclear Physics B* **726** (2005) 481-493.

Y. Kobayashi and S. Sasaki: Non-local Wess-Zumino model on nilpotent noncommutative superspace, *Physical Review D* **72** (2005) 065015-1-10.

T. Hatanaka, S. V. Ketov, Y. Kobayashi and S. Sasaki: Non-anti-commutative deformation of effective potentials in supersymmetric gauge theories, *Nuclear Physics B* **716** (2005) 88-104.

Y. Kobayashi and S. Sasaki: Lorentz invariant and supersymmetric interpretation of noncommutative quantum field theory, *International Journal of Modern Physics A* **20** (2005) 7175-7188.

2) 国際会議報告

M. Ishitsuka, T. Kajita, H. Minakata, and H. Nunokawa: Establishing Neutrino Mass Hierarchy and CP Violation by Two Identical Detectors with Different Baselines Using the J-PARC Neutrino Beam, *Nuclear Physics Proceedings Supplement* **155** (2006) 168-169.

K. Long, M.D. Messier, O. Yasuda: Summary of the neutrino oscillations working group at NuFact05, *Nuclear Physics Proceedings Supplement* **155** (2006) 102–110.

H. Minakata: Quark-Lepton Complementarity; a Review, *Venice 2005, Neutrino telescopes*, pp 83-97.

H. Minakata, H. Nunokawa, W. J. C. Teves and R. Zukanovich Funchal: Reactor Measurement of θ_{12} ; Secret of the Power, *Nuclear Physics Proceedings Supplement* **145** (2005) 45-48.

T. Ota, O. Yasuda: Solving the degeneracy by a neutrino factory with polarized muon beam, *Nuclear Physics Proceedings Supplement* **155** (2006) 174–175.

3) 学会講演

日本物理学会第 60 回年次大会 2004 年 3 月 24 日～ 3 月 27 日 (東京理科大学野田キャンパス)

北澤敬章、小林達夫、高橋圭次郎、桧垣徹太郎：Yukawa matrices in intersecting D-brane

桧垣徹太郎、北澤敬章、小林達夫：Model building in Type IIB flux compactifications

日本物理学会 2005 年秋季大会 2004 年 9 月 12 日～ 9 月 15 日 (大阪市立大学杉本キャンパス)

内波生一：超新星ニュートリノによる CPT 定理の検証

国内研究会

2005 年度第 18 回理論懇シンポジウム :
2005 年 12 月 25 日-27 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 (Invited talk).

国際会議

20th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN05),
Delphi, Greece, June 6-11, 2005

H. Minakata: LBL Oscillation Physics

7th International Workshop on Neutrino Factories and Superbeams (NuFact 05),
Laboratori Nazionali di Frascati, Italy, June 21–26, 2005

O. Yasuda: Summary of WG1 –Phenomenological issues– (Invited talk).

M. Ishitsuka, T. Kajita, H. Minakata, and H. Nunokawa: Establishing Neutrino Mass Hierarchy and CP Violation by Two Identical Detectors with Different Baselines Using the J-PARC Neutrino Beam
Supersymmetries and Quantum Symmetries, Dubna, Russia, July 27-31, 2005

Y. Kobayashi: Various Noncommutativities from Twisted Hopf algebra

YITP workshop, String Theory and Quantum Field Theory, Kyoto, Japan, August 19-23, 2005

Y. Kobayashi: Deformed Wess-Zumino Model on the Noncommutative Space with Grassmann Number Parameters

Japan-US Seminar on Double Beta Decay and Neutrino Mass, Maui, Hawaii,
September 16-20, 2005

H. Minakata: Neutrino Masses and Mixing Constrained by Double Beta Decay (Invited Talk)

1st International Scoping Study Meeting of Neutrino Factory and Super-beam Facility,
CERN, Geneva, September 22–24, 2005

O. Yasuda: Introduction to sub-groups –Personal view on phenomenology– (Invited talk).

International workshop on Noncommutative Geometry and Physics
Sendai, Japan, November 1-4, 2005

Y. Kobayashi: Noncommutative Deformation and Drinfel'd Twisted Symmetry

An International Workshop on a Far Detector in Korea for the J-PARC Neutrino Beam,
Seoul, Korea 18-19 November, 2005

H. Minakata: Kamioka-Korea Two-Detector Complex; Its Power and Ideas Behind (Invited Talk)

A topical conference on elementary particle physics and cosmology,
Sonesta Beach Resort Key Biscayne, Florida, USA, December 14 – 18, 2005

O. Yasuda: Exact formula of three flavor neutrino oscillation probability and its application to high energy astrophysical neutrinos (Invited talk).

Second Cairo International Conference on High Energy Physics (CICHEP II),
Cairo, Egypt, 14-17 January 2006

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

The 2nd International Scoping Study Meeting of Neutrino Factory and Super-beam Facility,
KEK, Japan, 23-25, January 2006

H. Minakata: Quark-Lepton Complementarity; a review (Invited Talk)

Second International Workshop on Neutrino Oscillations in Vanice,
Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venice, Italy, February 7-10, 2006

H. Minakata: Do Neutrinos Violate CP? (Invited Talk)

4) 学会誌等

南方久和：ニュートリノ振動とニュートリノ質量
パリティ 特集「物理科学、この20年」20 (2005) 24-25.