

素粒子理論研究室

1. 研究活動の概要

1) 現実的な実験値によるニュートリノ振動のパラメーター縮退に関する考察 (安田)

一定の基線の長さで一定のニュートリノエネルギーを持つニュートリノ長基線実験で、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の確率が測定できたとしても、CP位相は必ずしも一意的に決定できない、というパラメーター縮退の問題が以前から知られている。特に深刻なのは、階層性の不定性による縮退で、正常階層か逆階層かで、CP位相の真の値が大きく影響されることも知られている。2012年春に原子炉ニュートリノ観測によって第三番目のニュートリノ混合角 θ_{13} が決定されたのを受け、パラメーター縮退の問題が解決できるかどうか具体的に議論できるようになってきた。そこで安田が2004年に提唱した新しいプロットの方法によりT2Kの第二段階やNova等の近未来の長基線実験で、パラメーター縮退の解決の可能性を議論した。T2KとNovaを議論した理由は、これらがいわゆる off-axis のニュートリノビームを使う長基線実験で、ニュートリノエネルギーが近似的に一定とみなすことができ、この解析方法が正当化できるためである。解析の結果、T2KではCP位相が (90 ± 20) 度という特別な値を取る場合以外には階層性の縮退を取り除くことができず、基線の長いNovaも、ほとんど同じ情報しか与えないことが明らかとなった。これは両者とも同じモードを振動最大に近い条件で測定していることが理由であると考えられる。

2) 大気ニュートリノによる非標準的相互作用探索の現象論 (安田・深澤)

標準模型を越える新物理がある場合、その有効相互作用として、レプトンのフレーバーを保存しないものが現れる可能性がある。そのような有効相互作用のうち、中性カレントの相互作用は、ニュートリノの伝播における物質効果に寄与する。物質効果の標準効果からのずれを $\epsilon_{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta = e, \mu, \tau$) と表すと、 ϵ_{ee} 、 $\epsilon_{e\tau}$ 、 $\epsilon_{\tau\tau}$ の各成分への制約が最も弱いことが知られている。これらの成分が現在の実験からの上限值を取る時、その効果は10GeV程度のエネルギー領域で、通常のニュートリノの振動確率との違いが顕著となることが知られている。エネルギーが10GeV程度のニュートリノを観測し、物質効果をより良くテストするには基線が長い大気ニュートリノ実験（中でもエネルギーしきい値が低いスーパーカミオカンデ型の実験）が望ましいが、現在のスーパーカミオカンデ実験は残念ながら統計量がまだ十分とは言えない。そこで、将来のハイパーカミオカンデ実験について新物理のパラメーターに対する感度を数値的方法により詳細に議論した。解析に当たっては、制約の強い $\epsilon_{\alpha\mu}$ ($\alpha = e, \mu, \tau$) 成分を0とし、 $\epsilon_{\tau\tau}$ 成分は高エネルギー大気ニュートリノからの制約で $\epsilon_{\tau\tau} = |\epsilon_{e\tau}|^2 / (1 + \epsilon_{ee})$ となることを仮定して計算した。系統誤差を簡略化した計算の結果では、パラメーター $|\epsilon_{e\tau}|$ に対しては、これまでの制限を一桁程度改善できることがわかった。定量的な解析は現在も継続中である。

3) 弦模型における宇宙論 (北澤)

弦理論を用いて構成される素粒子の弦模型は標準模型を越えたものとして期待されているものである。重力相互作用を自然に含むという要請から、通常は弦の張力のエネルギースケールは非常に大きい（プランクスケール）と考えられ、その場合には弦の物理を加速器実験で検証することは不可能となる。しかしながら、弦模型の高エネルギーの物理が初期宇宙の高エネルギー現象において重要な役割を果たしている可能性があるため、弦模型の初期宇宙の現象への予言を行うことは重要である。最近の宇宙観測の結果は精密になってきており、弦模型の痕跡を見つけることのできる可能性がある。

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。そのようなスカラー場は宇宙のイン

フレーションを引き起こす可能性があるものの1つであり、したがって、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できる。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。大きなスケールのゆらぎが急速なくなってゆくという結果が得られ、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。

4) 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、欧州原子核研究機構 (CERN) での LHC 実験で発見された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を表現することは容易ではない。

低スケール弦模型、すなわち弦の張力のスケールがテラスケールで LHC 加速器実験で検証できるような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簡単かつ具体的な弦模型の構成を行った。ゲージ対称性の自発的破れを弦模型の有効場の理論において起こすことで満足せず、弦模型の構成要素である D ブレーンの配位がどのように変化してそれが起きるのかということをも明らかにした。

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る。

5) 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 ジェットの不変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。2 番目の共鳴状態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。

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。

2. 研究業績

1) 論文

Manami Hashi and Noriaki Kitazawa, Detectability of the second resonance of low-scale string models at the LHC, *Journal of High Energy Physics* **03** (2013) 127.

Noriaki Kitazawa and Shutaro Kobayashi, Spontaneous Gauge Symmetry Breaking in a Non-Supersymmetric D-brane Model, *Physics Letters* **B720** (2013) 373-378.

ATLAS Collaboration, ATLAS search for new phenomena in dijet mass and angular distributions using pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV, *Journal of High Energy Physics* **01** (2013) 029.

Emilian Dudas, Noriaki Kitazawa, Subodh P. Patil and Augusto Sagnotti, CMB imprints of a pre-Inflationary climbing phase, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **05** (2012) 012.

2) 国際会議報告

A. Donini, P. Huber, S. Pascoli, W. Winter, O. Yasuda: Neutrino oscillations physics with the Neutrino Factory, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **229–232** (2012), 516.

O. Yasuda: Some constraints on new physics by atmospheric neutrinos, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **229–232** (2012), 543.

3) 学会講演

● 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 9 月 11 日～ 9 月 14 日（京都産業大学）

安田修: Phenomenology of θ_{13} (11pSK-6) (招待講演)

● 日本物理学会年会 第 68 回年次大会 2013 年 3 月 26 日～ 3 月 29 日（広島大学東広島キャンパス）

安田修: 木村-高村-横枕によるニュートリノ振動確率導出方法の応用 (29pRB-4)

深澤信也、安田修: 大気ニュートリノで探る非標準的相互作用 (29pRB-5)

国内研究会

● 研究会「J-PARCにおけるニュートリノ物理の展望」、高エネルギー加速器研究機構、2013年1月31日

安田修: ニュートリノ実験の意義 (招待講演)

国際会議

● The 3rd UTQQuest workshop ExDiP 2012, Superstring Cosmophysics, 6-12, August 2012, Obihiro, Japan

N. Kitazawa: CMB imprints of a pre-inflationary climbing phase

● The 12th International Workshop on Tau Lepton Physics (TAU2012), September 17-21, 2012, Nagoya, Japan

O. Yasuda: Theory/Phenomenology Overview (Invited talk)

● A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami2012), December 13-20, 2011, Fort Lauderdale, Florida, USA

O. Yasuda: Parameter degeneracy revisited.