

素粒子理論サブグループ

1. 研究活動の概要

LHC の稼働とともに、これまでニュートリノ物理を柱としてきた素粒子理論サブグループの研究活動に新しいコアが成長してきた。研究活動の概要の記述をこの新しい動きから始めたい。

1) 弦模型における宇宙論

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ていくものと、低いところから一度登らされてから下っていくものの2種類があることがわかる。

これらのスカラー場は「コンパクト化」された6次元空間の幾何学的状態（大きさや形）を反映するものである。超弦理論は時空10次元で定義されたものであり、6次元の「コンパクト」な空間の幾何学的状況により多様な素粒子の性質を説明しようとするものがある。したがって、これらのスカラー場の値は適切な値に固定されなければならない。1つの説得力のあるシナリオとしてKKLTのシナリオというものがあり、これは非摂動的効果により指数関数型のポテンシャルに「くぼみ」が作られ、スカラー場の値がそこに固定されるというものである。しかし、初期条件としてなぜ宇宙の最初にその「くぼみ」の位置にあるのかという問題がある。系の時間時間発展を詳しく調べると、スカラー場の動きは指数関数型のポテンシャルを駆け上るタイプであることがわかった。したがって、ポテンシャルを駆け上がってきたスカラー場が自然に「くぼみ」落ち込むということが可能で（もし上から落ちてきたとすると「くぼみ」が小さすぎるために捉えられない）、この問題が動力学により解決される可能性を示した。（ピサ高等師範学校の A.Sagnotti 氏と、パリ工科大学の E.Dudas 氏との共同研究）

2) 低スケール弦模型における電弱対称性の動力的破れ

素粒子の質量は電弱対称性の自発的破れに伴って生成される。電弱対称性の存在やそれが自発的に破れていることはこれまでの加速器実験等によって検証済みである。しかし、この自発的破れがどのようにして起きているのかということについては未知である。電弱対称性の自発的破れとそれともなう素粒子質量の起源について様々な仮説が理論的に提案されている一方で、今年度始まった欧州原子核研究機構（CERN）でのLHC加速器実験はそれらの仮説に審判を下そうとしている。素粒子物理学はその歴史上でもまれにみる注目すべき時代を迎えている。

未知の粒子群が存在してそれらが強結合相互作用をする結果として、電弱対称性の破れが起こるといふ仮説がある。このような動力的な対称性の破れは、強い相互作用を記述する量子色力学において実際に起きているものであり、この仮説は説得力がありまた理論的に美しいものである。しかし、強結合相互作用の必然の結果である結合状態が、電弱対称性ともなうゲージ粒子（相互作用を担う粒子）の間の運動項混合に及ぼすはずの影響が見えていないことが大きな問題とされている。

低スケール弦模型とは弦の張力のエネルギースケールが TeV のエネルギー領域にあるとする模型である（通常は、弦の張力のスケールはプランクスケール (10^{18} GeV) に取られる）。この場合には弦模型の必然的予言である「異常ゲージ粒子」の質量も TeV のスケールになる。この「異常ゲージ粒子」が一般に電弱対称性のゲージ粒子と必然的に運動項混合を起こすことを通じて、上記の問題が自然に解決す

る可能性を指摘した。弦模型において強結合相互作用を考えることは先入観として嫌われているが、これを打ち破ることにより新しい可能性があることを示した。

3) 低スケール弦模型のLHC加速器実験への予言

弦模型では異なる素粒子はひとつ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。それらの粒子は知られている素粒子の「励起状態」のように考えることもできて、相互作用を規定する量子数は対応する素粒子と同じである（スピン量子数以外）。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 7 TeV）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（カラーの閉じ込め現象のため、クォークやグルーオンは観測されず、かわりにそれを種として生成されるたくさんの結合状態（ハドロンジェット）として観測される）。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、既知の強い相互作用は滑らかな分布を予言するが、もし何らかの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。

弦模型における励起状態が他の物理と本質的に異なる点は、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。弦模型が予言する角度分布を計算した結果、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であり、どのような角度分布になるかということをはっきりとした。弦の励起状態の生成における角度分布についての詳細な理論研究はこれが始めてである。

弦模型は上記のスピン以外の粒子の寄与も予言する。その共鳴への寄与は小さいものではあるが、スピン 0 の粒子については特殊事情がある。スピン 0 の粒子の質量は必然的に他とは大きくずれることを発見した。それは、スピン 0 の励起状態にある弦（開弦）が他の種類の弦（閉弦）と混合することによるもので、具体的な計算の結果、質量の 2 乗に 10% の補正があることを見いだした。その結果、共鳴は単純なガウス型の分布からわずかにずれることとなる。この現象を観測するために測定すべき観測量について考察を行った。

4) 仮想カルツァ・クライン粒子の交換過程における新たな問題点（生田目）

素粒子相互作用を記述する 4 次元目以上の空間次元（余剰次元）の存在を仮定する模型では、余剰次元の効果は 3 次元空間を伝播する無限個の素粒子（カルツァ・クライン粒子）列として取り扱う。この研究では、仮想カルツァ・クライン粒子を交換する過程の散乱断面積を余剰次元方向の運動量保存則を陽に破っている模型（Arkani-Hamed-Dimopoulos-Dvali の模型）を用いて求め、それらが非物理的な振る舞いをもつ事を解析的に示した。具体的には、摂動論的に支配的になるであろう過程であるカルツァ・

クライン粒子生成過程の散乱断面積と、その過程に摂動論的に高次の補正を加えた過程（カルツァ・クライン粒子の崩壊先を指定した過程）の散乱断面積を比較し、終状態が2体の場合は後者の散乱断面積が前者の散乱断面積に比べ摂動の効果を超えて小さくなり、終状態が3体以上の場合には後者の散乱断面積が前者の散乱断面積に比べ摂動の効果を超えて大きくなることを明らかにした。

5) T2KK 長基線ニュートリノ実験計画におけるステライルニュートリノの探索の現象論 (安田・生田目)

将来の長基線ニュートリノ実験では、標準的な三世代ニュートリノ混合のパラメーターを精密に決定出来るだけでなく、標準的なシナリオからのずれを測定することにより、新しい物理を探索することも可能であると期待されている。この研究では、標準模型を超える物理により、ステライルニュートリノが存在する場合、現在の T2K 長基線ニュートリノ実験の拡張構想である T2KK 計画で、どの程度までステライルニュートリノ振動のパラメーターを制限できるかを、(3+1)-スキームと呼ばれる枠内で研究した。解析は現在も進行中であるが、これまでの結果によると、T2KK に近距離測定器がない場合には、大気ニュートリノ振動で最大の質量二乗差 Δm_{41}^2 の寄与の度合いを表す角度 θ_{24} に関する感度が従来よりやや改善される程度であることがわかった。

6) 大きな 1-3 角をもつ 3 世代ニュートリノ振動の摂動論 (浅野・南方)

ここ数年前からニュートリノデータの総合的解析から 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ことが示唆されてきた。最近 T2K 実験で発見された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はこの (比較的) 大きな 1-3 角の仮説を支持している。この場合には過去に 1-3 角が小さいという仮定の下でなされた様々の議論を見直す必要がある。長基線ニュートリノ振動実験の理論的解析に有用なニュートリノ振動確率の近似公式として最も良く知られているものとしては、Cervera 達によって導かれたものがある。この公式は 1-3 角が質量二乗差の比 $\simeq 0.03$ と同程度の極小の値をとるという仮定の下で導かれている。1-3 角が大きい場合には、この公式に 1-3 角の高次の補正項が必要になる。これを体系的に計算するために新しい摂動論の枠組みを構築し、この補正項を全てのチャンネルについて求め、この項のもつ性質や解析において果たす役割についての解析を行った。

7) 新物理による最近の MINOS 実験のデータに対する解釈 (安田)

2010 年 6 月の Neutrino2010 の会議で、MINOS 実験のニュートリノと反ニュートリノのデータが、標準的な枠組みでは 2σ で矛盾するという報告があった。大気ニュートリノと太陽ニュートリノ観測の結果と矛盾なくこの事象を説明するには、ニュートリノに非標準的物質効果の電子成分を τ 成分を導入するという可能性と、ステライルニュートリノを加える可能性が考えられる。そこで、それぞれの可能性について、数値計算による詳細な検討を行った。前者に関しては、得られた最善のフィットが、標準的なシナリオの場合と比べて 0.07σ しか改善せず、しかもその最善のフィットを与えるパラメーターは大気ニュートリノのデータから好ましくない領域にあり、MINOS のデータを説明するには至らないことがわかった。一方、後者に関しては、いわゆる (3+1)-スキームの範囲内で、 θ_{24} を 0 とおき、 Δm_{41}^2 を $1eV^2$ に固定してその他のパラメーターに関してフィットした所、標準的な三世代の場合が最善となることがわかった。これは少し前に行われた Nelson たちの結果を正すものである。

8) 非標準的な相互作用の全ての要素が存在する系のニュートリノ振動解析 (南方)

高いエネルギースケールに存在する標準模型を超える新しい物理の反映として、非標準的相互作用 (NSI) の効果をニュートリノ振動を使って探索する可能性が議論されてきた。しかし、これまでの研究では、理論的には同程度の小さい値をとるのが自然な NSI 行列要素の内、特定のもの 1 つ (ないしは 2 つ) 以外は無視できるという勝手な仮定の下に解析が行われてきた。この研究では全ての NSI 要素が存在する系の解析を可能にするコードを開発し、標準および非標準相互作用のパラメーターの感度解析を行う。コー

ド開発は MonteCUBE を元にして、これに適当な変更を加えて成功裏に行われた。現在はこの解析コードに基づいて、ニュートリノ物質中の伝播における非標準的相互作用の効果、標準理論パラメターの決定精度への影響などについての研究を行っている。(マドリッド自治大学 Pilar Coloma 氏、バレンシア大学 Andrea Donini 氏、ダーラム大学 Jacobo Lopez-Pavon 氏との共同研究)

2. 研究業績

1) 論文

E. Dudas, N. Kitazawa and A. Sagnotti, On Climbing Scalars in String Thoery, *Physics Letters* **B694** (2010) 80-88.

N. Kitazawa, A Closer Look at String Resonances in Dijet Events at the LHC, *Journal of High Energy Physics* **10** (2010) 051-1-12.

N. Kitazawa, Dynamical Electroweak Symmetry Breaking in String Models with D-branes, *International Journal of Modern Physics* **A25** (2010) 2679-2698.

H. Minakata and S. Uchinami: Parameter Degeneracy in Neutrino Oscillation – Solution Network and Structural Overview, *Journal of High Energy Physics* **04** (2010) 111-1-56.

H. Namatame: A Problem in Virtual Graviton Exchanges in Flat Large Extra Dimensions, *International Journal of Modern Physics A* **25** (2010) 4511-4523.

H. Oki and O. Yasuda: Sensitivity of the T2KK Experiment to the Non-standard Interaction in Propagation, *Physical Review* **D82** (2010) 073009.

2) 国際会議報告

A. Gago, H. Minakata, H. Nunokawa, S. Uchinami, and R. Zukanovich Funchal: Resolving Standard And Nonstandard CP Violation Phases In Neutrino Oscillations, *AIP Conference Proceedings* **1222** (2010) 140.

H. Minakata: Perturbation Theory of Neutrino Oscillations with and without Nonstandard Interactions, *Progress in Particle and Nuclear Physics* **64** (2010) 216-218.

3) 学会講演

国内研究会

● 基所研究会「場の理論と超弦理論の最前線」、京都大学基礎物理学研究所、2010年7月20日－24日
北澤敬章：Tadpole Resummations in String Theory

国際会議

● KEK Workshop on String Phenomenology 2010, Tsukuba, Japan, December 15-16, 2010.

N. Kitazawa: An Overview of D-brane Models

● KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2011), Tsukuba, Japan, March 2-5, 2011.

N. Kitazawa: Low-scale String Models and String Resonances in Dijet Events at the LHC

● Institute for Nuclear Theory Program “Long-Baseline Neutrino Physics and Astrophysics”, Seattle, University of Washington, July 26-August 27, 2010.

H. Minakata: Parameter Degeneracies in Neutrino Oscillations

● 24th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2010), Megaron Athens International Conference Center, Athens, Greece, June 14 - 19, 2010

O. Yasuda: Some constraints on new physics by atmospheric ν 's (Poster).

● 6th Open Meeting of the Belle II Collaboration, KEK, Tsukuba, Japan, July 5 – 7, 2010

O. Yasuda: Constraints on new physics from neutrinos (Invited talk)

● Neutrino Oscillation Workshop (NOW 2010), Conca Specchiulla, Otranto, Italy, September 4 – 11, 2010

O. Yasuda: Sensitivity of T2KK to non-standard interactions

● 6th Plenary Meeting of the International Design Study for the Neutrino Factory, Rutherford Appleton Laboratory, Didcot, UK, September 22 – 25, 2010

O. Yasuda: MINOS anomaly and non-standard interactions etc.

● 12th International Workshop on the Neutrino Factories, Superbeams, and Beta Beams (NuFact10), Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India, October 20 – 25, 2010

O. Yasuda: Some attempts to explain MINOS anomaly (Invited talk)

● A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami 2010), Lago Mar Resort, Fort Lauderdale, Florida, USA, 14–19 December 2010

O. Yasuda: Constraints on non-standard interactions in neutrino propagation from atmospheric neutrinos and T2KK long-baseline experiment (Invited talk)

4) 著書等

安田修: 「素粒子物理学ハンドブック」山田作衛他編, 朝倉書店 (2010)、2.10 章 ニュートリノ質量、p200 – p208