

素粒子理論研究室

1. 研究活動の概要

今年度から4年間の予定で文部科学省科学研究費 特定領域研究「ニュートリノ振動とその起源の解明」が開始され、我が研究室は理論系計画班中で最大規模を持つ都立大班の中核としてその一翼を担っている。以下に研究室の活動を(1-6):ニュートリノ物理の現象論、と(7-11):それ以外の研究項目の順序で記述する。

1) 超新星ニュートリノを使ったニュートリノ質量パターンの決定

スーパー神岡実験によるニュートリノ振動現象の発見と KEK → 神岡長基線ニュートリノ実験 (K2K 実験) による確認を受けて確定してきたニュートリノ3世代混合スキームにおいて残された未決定な重要な要素の一つとしてニュートリノ質量パターンの問題がある。本年度の研究において、この順階層的あるいは逆階層的パターンのどちらが実現しているのかという問題への回答が超新星ニュートリノの観測とその分析によって与えられる可能性を指摘し、さらに超新星 1987A からのニュートリノデータの解析によって逆階層的パターンがほぼ排除できることを示した。これは超新星中の高い物質密度(太陽中心の 10^{10} 倍)によって、(1-3) 混合角が余程小さくないかぎり超新星中において起きるニュートリノ準位交差は必然的に断熱的であることに拠っている。この性質によってニュートリノ質量パターンが順階層的パターンか、あるいは逆階層的パターンかによって共鳴転換を起こすのがニュートリノなのか反ニュートリノなのかが決まり、水チェレンコフ検出器の特性を使ったデータの分析によって後者の場合がデータの統計精度の範囲で容易に排除されてしまうからである。

2) 低エネルギーニュートリノ振動実験による CP 非保存効果の測定

長基線ニュートリノ振動実験による CP 非保存効果の測定法において「物質汚染問題のない、しかも実験可能なパラメータ領域を探せ」という新しい戦略を追及している。100 MeV 程度のエネルギーを持つ正反ミュー・ニュートリノ実験の差によって CP 非保存効果の測定が行えることを指摘した。この過程で、短距離において物質効果が打ち消し合い混合角は強く物質効果を受けているにもかかわらず、CP 非保存項を含む振動確率は真空振動によって近似できる、という「真空模倣機構」を発見した。このタイプの低エネルギーニュートリノ実験で CP 非保存効果の測定を行う場合に最も都合のよい基線長の評価を行い、30 – 40 km という近距離がよいという結果を得た。具体的に K2K 実験のビーム強度の1桁の改善とメガトン級水チェレンコフ検出器を仮定し、統計的視点からは十分実行可能な実験であることを示した。我々の論文投稿後に現れた大物実験家 B. Richter の論文が影響して、このタイプの実験は反響を呼び、実際 CERN (欧州原子核研究機構) において検討されている実験計画案は我々のオリジナル案に酷似している。(上記2課題はブラジル・カンピナス大、布川弘志氏との共同研究)

3) ニュートリノファクトリーの現象論

加速リング中に蓄積されたミュオン崩壊から得られる強いニュートリノフラックスをビームとして使う長基線実験であるニュートリノファクトリーというアイデアが数年前から脚光を浴びている。三世代のニュートリノの枠組の中で未決定でありまた最も重要視されている CP 非対称の位相の測定の可能性を、各混合角・質量自乗差・密度の不定性の誤差の相関とバックグラウンドの寄与を従来の取り扱いよりも遥かに注意深く見積もることによって議論した。その結果、

従来最良であると思われていた基線の長さ 3000km、ミューオンのエネルギー 50GeV よりは若干小さな値 (基線の長さ ~ 2000 km、ミューオンのエネルギー ~ 20 GeV) の方が一般に良いという結論が得られた。この研究は、KEK 菅原機構長のイニシアティブによって創設された NuFACTJ Working Group の活動の一貫として行なわれた。(大和日英基金奨学生 John Pinny 氏との共同研究)

4) 四種類混合のニュートリノ振動の現象論

不活性ニュートリノを含む四種類混合のニュートリノ振動のうち、いわゆる $(2+2)$ スキームの枠組で大気ニュートリノのデータの解析を行ない、ニュートリノの3つの混合角がどれだけの範囲で許容されるかを議論し、大気ニュートリノの振動が $\nu_\mu \rightarrow \mu_\tau$ と $\nu_\mu \rightarrow \mu_s$ の混合で記述されるような解がまだ許されることを示した。さらに、その結果と太陽ニュートリノに関するバレンシアグループの結果とを組み合わせることにより、両方の実験で活性ニュートリノ振動と不活性ニュートリノ振動が混じる解のみが許容されることを示した。又、このような $(2+2)$ スキームで K2K 型の実験において中性カレントを使って CP 非保存を測定する可能性を議論した。この4世代解析は混合パラメーターへの人為的制限を含まず、現在のところ世界で最も一般的な解析である。

5) 磁場と重力場によるフレーバー転換への影響

重力場と磁場の両方が存在する時には、従来知られている物質効果の他に重力場から誘引される物質効果があることが知られているが、そのニュートリノのフレーバー転換に与える影響を、活動銀河核などの強い重力場のある状況下で有効ハミルトニアンを書き下すことにより議論した。特に質量自乗差が無視できる場合にも大きな効果が期待できることが示された。一方、二重中性子星が合体する時に発生すると考えられているガンマ線バーストの火の玉においても高エネルギーのニュートリノが生成されると予想されているが、非常に強い磁場があるためにニュートリノ振動が質量だけによる場合に比べてタウニュートリノの強度が大きくなることを示した。又、等価原理の破れによりニュートリノ振動が起こる場合にも従来の結果と違うタウニュートリノの強度が期待されることも示した。

6) 高エネルギーニュートリノ観測の検討

AMANDA 等の km^2 程度の広さを持つ高エネルギーニュートリノの観測の可能性について詳細な検討をし、活動銀河核などから飛来する高エネルギーニュートリノの事象数、フレーバーの識別をする方法、バックグラウンドの見積りを行った。

7) 超重力理論における超対称性の動力的破れ

超重力理論における超対称性の動力的破れの機構 (ゲージ化された $U(1)_R$ 対称性を用いるもの) に関して研究を進めた。この超対称性の動力的破れの機構は、昨年度に提案したものであるが、今年度はこの動力学を具体的な素粒子模型に組み込む努力をした。特に、超対称性が破れる系と我々の系が空間的 (時空の第5次元目に関して) に離れている場合 (“brane world”) について適用した。このように超対称性の破れが我々の系と空間的に離れているところ (“sequestered sector”) で起こる場合には、超対称性の破れは「アノマリー媒介」と呼ばれている機構で我々の系に伝わるしかない。この機構はとても単純でもっともらしいのであるが、一部の超対称粒子の質量の2乗が負になってしまうという問題を抱えている。ゲージ化された $U(1)_R$ 対称性がある場合にはこの問題が解決できることを示し、さらにこのゲージ対称性を利用した超対称性の動力学

的破れと組み合わせることは非常にもったらしいことを具体的に素粒子模型を構成して指摘した。現在の所、素粒子模型は時空間4次元の有効理論として記述されているが、本来あるべき5次元時空での記述をめざしてさらに研究を進めている。

8) 超弦理論と重力の量子効果

重力の量子効果(非摂動論的效果)が素粒子物理において重要な役割を演じるという示唆は以前から提起されてきている。しかし、重力の量子効果を解析する手法(Euclidean gravity)が本質的な困難を抱えているため、あくまでも示唆にすぎなかった。しかし、最近の弦理論の発展(D-brane)により、示唆されていた重力の量子効果(black hole entropy)をミクロスコピックな計算方法で再現することができた。従って、もう一度素粒子物理における重力の量子効果を、弦理論の技術を使って検討し直すことが可能であると思われる。この少々野心的な目標に向けて研究を進めている。

9) 自発的に破れる $N = 2$ 超対称ゲージ理論の真空構造

$N = 2$ 超対称ゲージ理論は低エネルギー有効理論が非摂動効果まで含めて厳密に決定されることが知られている。我々は、自発的に破れる $N = 2$ 超対称ゲージ理論に対して非摂動効果も含めた有効作用を構築し、その真空構造を解析した。このタイプのモデルは、古典的には超対称性が破れているにも関わらず真空期待値が無限に縮退していて真空が唯一に決まらない、という構造を持っている。しかし、非摂動効果を考慮した結果そのような縮退は解け、理論の真空が唯一に決まる可能性があることを示すことができた。

10) Disoriented Chiral Condensate (DCC) のパラメーター共鳴機構

昨年度に引き続いてDCCドメイン形成のパラメーター共鳴機構に関する研究を続行した。今年度の研究では粒子生成に伴う反作用としての背景シグマ場の振動の減衰効果をハートリー近似の範囲で取り込む定式化を使い、反作用がパラメーター共鳴機構の実験的特徴を覆い隠してしまわないかどうかという問題に関する検討を行った。小振幅近似の範囲で1粒子運動量分布を解析した結果、量子論的な反作用の効果を取り込んだ後も共鳴ピークが消失することはないという結論を得た。これは線形シグマ模型が結合定数が20という非常な強結合系であることを考えると驚くべき結果であり、この性質はパラメーター共鳴機構の実験的探査可能性に対して明るい見通しを与えるものである。(北里大・廣岡秀明氏との共同研究)

11) アハラノフ・ボーム散乱

Aharonov-Bohmによる記念碑的研究以来40年弱を経た今日もこの散乱に対する理解は完全な結着をみていない。この現象に対するより深い理解を実現するための第一歩として以前アハラノフ・ボーム散乱振幅のユニタリー性について調べた。(新井・南方、98年)この研究を発端としてアハラノフ・ボーム散乱振幅の前方付近での振る舞いについて徹底的な再検討を行った。Aharonov-Bohmによって導かれた散乱振幅は散乱角を一定にして高エネルギー極限をとる運動学的領域で有効であるが、前方付近では有効性が失われる。そこでユニタリティを議論する際に必要な表式を求めるために、アハラノフ・ボーム波動関数に立ち返ってこの積分表示を考察した。Bessel関数のSommerfeldの積分表示から出発し、巧妙な積分路および式変形によって前方付近で正確に成り立つ新しい表式を求めることに成功した。(イェール大学・Charles Sommerfeld教授との共同研究)

2. 研究業績

1) 論文

H. Athar and José F. Nieves: Matter effects on neutrino oscillations in gravitational and magnetic fields. *Physical Review D* **61** (2000) 103001.

H. Athar: Neutrino conversions in cosmological gamma-ray burst fireballs, *Astroparticle Physics* **14** (2000) 217-225.

H. Athar, G. Parente, and E. Zas: Prospects for observations of high-energy cosmic tau neutrinos, *Physical Review D* **62**, (2000) 093010.

H. Athar, M. Jezabek and O. Yasuda: Effects of neutrino mixing on high-energy cosmic neutrino flux, *Physical Review D* **62** (2000) 103007.

N. Kitazawa, N. Maru and N. Okada: R-mediation of dynamical supersymmetry breaking, *Physical Review D* **63** (2001) 015005.

N. Kitazawa, N. Maru and N. Okada: Models of dynamical supersymmetry breaking with gauged $U(1)_R$ symmetry, *Nuclear Physics B* **586** (2000) 261-274.

N. Kitazawa, N. Maru and N. Okada: Dynamical supersymmetry breaking with gauged $U(1)_R$ symmetry, *Physical Review D* **62** (2000) 077701.

H. Minakata and H. Nunokawa: Measuring Leptonic CP Violation by Low Energy Neutrino Oscillation Experiments, *Physics Letters B* **495** (2000) 369-377.

H. Minakata and H. Nunokawa: Inverted Hierarchy of Neutrino Masses Disfavored by Supernova 1987A, *Physics Letters B* **504** (2001) 301-308.

2) 国際会議報告

A. Chodos, H. Minakata, F. Cooper, W. Mao, and A. Singh: Two-Dimensional Model with Chiral Condensate and Cooper Pairs Having QCD-like Phase Structure, in *Dynamics of Gauge Fields: TMU-Yale Symposium*, pages 81-90, edited by A. Chodos, N. Kitazawa, H. Minakata and C. M. Sommerfield, Universal Academy Press, Tokyo, October 2000.

C. M. Sommerfield and H. Minakata: Aharonov-Bohm and Coulomb Scattering Near the Forward Direction, in *Dynamics of Gauge Fields: TMU-Yale Symposium*, pages 263-270.

N. Kitazawa: Physical Auxiliary Field in Supersymmetric QCD with Explicit Supersymmetry Breaking, in *Dynamics of Gauge Fields: TMU-Yale Symposium*, pages 103-109.

H. Minakata: MSW Effect in Supernova and Supernova Neutrinos, *KOSEF-JSPS Joint Seminar on New Developments in Neutrino Physics*, pages 98-109, edited by S. K. Kang, C. W. Kim, and K. Nakamura, published by Korea Institute for Advanced Study.

O. Yasuda: Neutrino Oscillation Analysis of Solar and Atmospheric Neutrino Data, *KOSEF-JSPS Joint Seminar on New Developments in Neutrino Physics*, pages 255-272.

H. Minakata: Answering the Sphinx's Questions on Neutrinos, *Proceedings of Workshop on Neutrinos Oscillations and Their Origin*, pages 343-346, edited by Y. Suzuki, M. Nakahata, M. Shiozawa, and K. Kaneyuki, Universal Academy Press, Tokyo, 2000.

O. Yasuda: Neutrino Oscillations in High Energy Cosmic Neutrino Flux, *Proceedings of Workshop on Neutrinos Oscillations and Their Origin*, pages 271-274.

O. Yasuda: Constraining Degenerate Neutrino Masses and Implications. Proceedings of 2nd Int. Conf. Physics Beyond the Standard Model, (IOP Bristol, eds. Klapdor-Kleingrothaus and I. Krivosheina), p 223 – 235 (2000).

A. Husain: High-Energy Cosmic Tau Neutrinos. Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **87** (2000) 442-444.

O. Yasuda: Phenomenology of Neutrino Oscillations at a Neutrino Factory, Proceedings of KEK Int. Workshop on High Intensity Muon Sources (World Scientific, Singapore, eds. Y. kuno and T. Yokoi), p 107 – 118 (2001).

3) 学会講演

日本物理学会春の分科会 2000年3月30日～4月2日 (近畿大学)

北澤敬章, 丸信人, 岡田宣親: Dynamical Supersymmetry Breaking with Gauged U(1)(R) Symmetry,

安田修: ニュートリノファクトリーにおけるニュートリノ振動の物理

日本物理学会第55回年次大会 2000年9月22日～9月25日 (新潟大学)

南方久和: ニュートリノ振動; これまでの成果と今後 (シンポジウム講演)

新井真人, 岡田宣親: Potential Analysis of $N = 2$ SUSY Gauge Theory with Fayet-Iliopoulos Term

北澤敬章, 丸信人, 岡田宣親: R-mediation of Supersymmetry Breaking .

小林慶重, 南方久和, 応和克己, 杉山弘晃: 2次元モデルによる Lorentz 対称性の破れの解析

千葉雅美, 安田修, Athar Husain 他4名: 岩塩を用いた超高エネルギーニュートリノ検出器の基礎研究

廣岡秀明, 南方久和: Dynamical Pion Production via Parametric Resonance from Disoriented Chiral Condensate

南方久和, 布川弘志: Measuring Leptonic CP Violation by Low Energy Neutrino Oscillation Experiments

安田修: 4種類ニュートリノ混合による大気ニュートリノの解析.

国内研究会

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」

第1回研究会：2000年5月10日～11日（高エネルギー加速器研究機構）

安田修：ニュートリノファクトリーにおけるニュートリノ振動の現象論.

第2回研究会：2000年9月13日～14日（高エネルギー加速器研究機構）

安田修：Four-Generation Neutrino Oscillation

3rd Workshop on High Intensity Secondary Beam with Phase Rotation

2001年3月12日～13日（高エネルギー加速器研究機構）

安田修：ニュートリノ振動の物理（最近の進展）

仙台現象論研究会「NEW DIRECTIONS TO UNIFIED THEORIES」

2000年10月23日～25日（東北大学理学部）

A. Husain: High-Energy Cosmic Neutrinos

「特定・宇宙ニュートリノ研究会」

第1回：2000年5月12日（東大宇宙線研究所）

安田修：大気ニュートリノの4世代解析とステライルニュートリノシナリオの現状

安田修：Conventional beam と neutrino factory における CP 非保存測定の比較

南方久和：Measuring Leptonic CP Violation by Low Energy Neutrino Oscillation Experiments

第3回：2000年9月29日（東大宇宙線研究所）

南方久和：超新星における MSW 機構の基礎

第4回：2000年10月31日～11月1日（新潟大学理学部）

安田修：二重ベータ崩壊から得られる制限のサマリー.

第5回：2001年2月23日～24日（東大宇宙線研究所）

安田修：日本版ニュートリノファクトリー WG レポート

国際会議

The 11th Mini-Workshop on Particle and Astroparticle Physics, Pusan, Korea,

May 19-20, 2000

N. Kitazawa: Dynamics of Supersymmetric Gauge Theories (Invited Lecture)

International Workshop on Muon Storage Ring for A Neutrino Factory (NuFACT'00),

Monterey, CA, May 22-26, 2000

O. Yasuda: Analysis of the Super-Kamiokande Atmospheric Neutrino Data in the Framework of Four Neutrino Mixings (Invited talk)

H. Minakata and H. Nunokawa: Measuring CP Violation by Low-Energy Medium Baseline Neutrino Oscillation Experiments

Third International Conference on Dark Matter in Astro and Particle Physics (Dark2000),
July 10-15, 2000, Heidelberg, Germany

H. Minakata: Degenerate and Other Neutrino Mass Scenarios and Dark Matter (Invited Talk)

International Conference on Supersymmetry and Quantum Field Theory; D. V. Volkov
Memorial Conference (SSQFT2000), July 25-29, 2000, Kharkov, Ukraine

M. Arai and N. Okada: Potential Analysis of $N = 2$ SUSY Gauge Theory with the Fayet-Iliopoulos Term

The 8th Asia Pacific Physics Conference (APPC2000), August 7-10, 2000, Taipei, Taiwan

H. Minakata: A Two-Dimensional Analog Model for QCD (Invited Talk)

H. Minakata: Introduction to University Mobility in Asia and the Pacific (UMAP) Activity

H. Athar: Ultrahigh-Energy Cosmic Neutrinos

30th International Conference on High-Energy Physics (ICHEP 2000), Osaka, Japan,
July 27-Aug 2, 2000

O. Yasuda: Four Neutrino Oscillation Analysis of Atmospheric Neutrino Data and Application to Long Baseline Experiments

Europhysics Neutrino Oscillation Workshop (NOW2000), September 9-16, 2000
Conca Specchiulla, Otranto, Lecce, Italy

H. Minakata: The Three Neutrino Scenario (Invited Talk)

Joint U.S./Japan Workshop on New Initiatives in Lepton Flavor Violation and Neutrino
Oscillations with Very Intense Muon and Neutrino Sources, Honolulu, Hawaii,
October 2-6, 2000

O. Yasuda: Four-Generation Neutrino Oscillation. (Invited talk)

KOSEF-JSPS Joint Workshop on "New Developments in Neutrino Physics",
Korea Institute for Advanced Study, Seoul, Korea, October 16-20, 2000

H. Minakata: MSW Effect in Supernova and Supernova Neutrinos (Invited Talk)

O. Yasuda: Neutrino Oscillation Analysis of Solar and Atmospheric Neutrino Data (Invited talk)

2nd Workshop on Neutrino Oscillations and Their Origin, Tokyo, Japan,
December 6-8, 2000

O. Yasuda: Various Solutions of the Atmospheric Neutrino Data. (Invited talk)

4) 科学研究費等報告

南方久和：平成9年度～11年度科学研究費補助金（国際学術研究（大学間協力研究）・基盤研究B）成果報告書「ゲージ場理論の動力学」

安田修：平成10年度～12年度科学研究費補助金（基盤研究C）成果報告書「大気ニュートリノ異常に関連した物理学」

5) 学会誌等

浅川正之、南方久和：カイラル対称性の破れによるドメイン構造（解説）日本物理学会誌 55(2000) 263-272 .

6) 編著書等

A. Chodos, N. Kitazawa, H. Minakata, and C. M. Sommerfield (ed.): *Dynamics of Gauge Fields: TMU-Yale Symposium*, Proceedings of TMU-Yale Symposium on the Occasion of TMU's 50th Anniversary and External Activity of APCTP, (407 pages), Universal Academy Press, Tokyo, October 2000.