

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 (1-5):ニュートリノ物理の現象論、と (6-8):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 (SK) 大気ニュートリノ観測によるニュートリノ振動の発見、K2K 実験による確認、さらには SK と SNO の共同作業による太陽ニュートリノ振動の発見を受け、レプトンフレーバー混合の全体構造の解明に照準を合わせた研究が実験、理論の双方で進展しつつある。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」において我が都立大は理論系計画班の中核を形成し、今年度も国際共同研究を含む活発な研究活動を行った。

1) ニュートリノ振動における CP 位相効果と物質効果；CP 軌跡ダイアグラム表示

長基線ニュートリノ振動実験による CP 非保存効果の測定において純正 CP 位相効果とこれと見紛う効果を生じる物質効果の相互関係を完璧に理解することの重要性が指摘されてきた。この目的に向かって、この問題の理解に役立つ有用な道具として「双確率空間における CP 軌跡ダイアグラム表示」を導入し、この性質を明らかにした。この CP 軌跡ダイアグラムを使うと、CP 非保存位相効果、CP 保存位相効果、物質効果の三者を一枚の図の中に同時に表示でき、それぞれの効果の強さが一目瞭然で、いわば「ニュートリノ振動を目で見る」ことができる。これは、例えば CP 位相とニュートリノ質量パターン（順階層的あるいは逆階層的）との同時測定を目指す長基線ニュートリノ実験計画の立案に役立つと期待される。すでにこの CP 軌跡ダイアグラムを用いてパラメータ縮退の問題を議論する論文が現れるなど、ニュートリノ振動の理論的諸問題の解析に有力な手段を提供し始めている。

（この課題はブラジル、エスタデュアルパウリスタ大学・布川弘志氏との共同研究）

2) 牧-中川-坂田行列の (1-3) 行列要素の測定法

将来のニュートリノ振動実験による CP 非保存効果の測定にとって重要な条件はこの難しい測定の前に他の全てのフレーバー混合パラメータが精度よく決定されていることである。現時点でこの要請から最も遠いのが (1-3) 角である。この角は日本の将来計画 JHF2K 実験において測定されると期待されるが、我々はこの実験の第 1 期に予定されているニュートリノチャンネルのみを用いる測定では通常の実験誤差に加えてこれを上回る大きな固有の不定性が存在することを指摘した。

さらに上記の CP 軌跡ダイアグラムの方法を用いてこの問題の解決法を提案した。振動極大近くでエネルギーの微調整を行い、CP 軌跡ダイアグラムを最も薄っぺらにする。そこで反ニュートリノチャンネルを併用することによって精度よい測定ができることを示した。この提案は (1-3) 角が比較的大きいような場合には JHF2K 実験計画に影響を与える可能性がある。（この課題は東京大学宇宙線研究所・梶田隆章、エスタデュアルパウリスタ大学・布川弘志両氏との共同研究）

3) 長基線ニュートリノ振動の現象論における真空模倣機構

長基線ニュートリノ振動実験において、基線の長さが振動長よりも短い場合には、物質効果の寄与が無視できることが知られていて、真空模倣機構と呼ばれている。物質効果自身が弱い訳ではなく、MSW 共鳴効果が起きるようなパラメータの場合にも振動確率が真空中のニュートリノ振動のように振る舞うので不可思議な現象と考えられ、当該分野でもよく理解されてい

なかった。この研究ではしかるべき状況の下でのニュートリノ振動を一般的に議論して、真空模倣機構が働く条件を明らかにした。物質効果の1次項が相殺していることはよく知られていたが、次のオーダーまでの打ち消し合いがかなり一般的に起きることを示した。

4) 不活性ニュートリノを含むニュートリノ振動の現象論

いわゆる不活性ニュートリノを一種類含む四種類混合のニュートリノ振動のシナリオは、太陽ニュートリノ欠損・大気ニュートリノ問題・LSND実験を全てニュートリノ振動で説明するために活発に議論されて来た。我が研究室では昨年度にこの最も一般的な解析を世界で最初に実行し世に問うた。しかしながら、最近太陽ニュートリノと大気ニュートリノのデータが不活性ニュートリノ仮説を好まない傾向になってきたため、このような四世代形式の枠組の下で加速器・原子炉実験からの制約を満たし、太陽ニュートリノ・大気ニュートリノデータを説明するシナリオがどの程度の統計的確度で許されているかを定量的に再検討中である。

また、このシナリオが十分な確度で排除されてしまった場合を想定し、不活性ニュートリノを二種類以上に増やした拡張された枠組みを考察した。モデルのパラメータ空間は遥かに大きくなるにもかかわらず、この場合においても一つの質量自乗差が支配的になる限りすべての制約を満たすような解を得るのは四世代スキームと同程度に難しいことを一般的に示した。

5) ニュートリノを使った重力陥没超新星コアの診断学

ニュートリノ振動の発見によって、ニュートリノ観測を用いた重力陥没超新星コアの診断学の従来の戦略は変更を余儀なくされている。地上の検出器で観測された電子ニュートリノはコア中でタウニュートリノとして生まれたかも知れないからである。このような「ニュートリノ振動の存在を前提とした超新星コアの診断学」を体系的な研究プロジェクトとして開始した。今年度は水チェレンコフ検出器SK中での反電子ニュートリノ事象に限った解析を行った。これが考えられる全ての検出器のあらゆるチャンネルのうちで最も事象数が多い(銀河中心超新星で約1万イベント)からである。現在最有力の太陽ニュートリノ問題の大角度MSW解を仮定すると、通常期待されるように中性子星の束縛エネルギーと反電子ニュートリノの温度とが精度よく決定されること以外に、ミュー・タウ(正反)ニュートリノの温度が決定されるという驚くべき結果を得た。(この課題はバレンシア大学 Jose Valle、マックスプランク研究所 Ricard Tomas、エスタデュアルパウリスタ大学・布川弘志の各氏との共同研究)

6) 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)が素粒子物理に重要であるという示唆は以前から提起されている。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)をこれまでとは異なる手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することが可能であると思われる。

そこでまず最初に、重力の量子効果による gravitino 凝縮によって超対称性が自発的に破れる可能性について研究した。

まず、D-brane(弦理論において実現される多次元の広がりを持った実体)の張力が、gravitino凝縮が起きている場合とそうでない時に異なることを見出した。これは、低エネルギーの世界におけるD-braneを記述する低エネルギー有効作用の高次項を調べることによって得られる

結論である。高次項のうちの一部しかあからさまには書き下されていないため、必要な部分を新たに導いて上記のことを見出した。

次に、D-brane の張力を直接に超弦理論において計算した。時空間が平坦である時には gravitino 凝縮は起きず、このときの D-brane の張力はすでに計算されている。そこで、低エネルギー有効理論において gravitino 凝縮が起きると指摘されている特殊な時空間 (fivebrane background) における D-brane の張力を新たに計算し、二つの結果が一致しないことを見出した。Fivebrane background は位相的 (topological) に平坦な時空間とは異なっていて、また、位相的な性質は平坦になる極限をとっても消えない。したがって、得られた結果は背景時空間の位相的な効果により gravitino 凝縮が起きていることを示唆している。また、fivebrane background は半分の超対称性を破ることが知られていて、見出された張力のずれがまさにこの超対称性の破れに起源を持つことから、gravitino 凝縮が超対称性を破っていることも示唆される。

7) 高密度物質の物理に関連した低次元の場の理論

中性子星の核構造の解明や今後行われる重イオン衝突実験の解析をするためには有限のクォーク密度の下での量子色力学 (QCD) の真空構造を知ることが必要である。QCD において低密度、低温でのカイラル凝縮相とは違って高密度ではクォークがクーパー対を作って凝縮し、カラー超伝導相を形成するという指摘がなされている。また最近ではこれらの相が結晶構造を持つという指摘もされている。カイラルおよびクーパー対凝縮相をそれぞれもつ Gross-Neveu 型の 1+1 次元 4 体フェルミ模型の真空構造を調べ、前者においてはカイラル凝縮が結晶構造を持つという結果を再確認し、後者のクーパー対凝縮模型では超伝導相は空間的に一様で結晶構造を持たないことを初めて明らかにした。

さらに、QCD の臨界現象の理解の手助けとすべく Gross-Neveu 模型の有限温度・密度での相転移現象を取り扱った。特に、QCD と共通する際だった特徴である 3 重臨界点付近の振舞いを解析し、3 重臨界指数をラージ N 極限で計算した。また、数値計算の精度を高めて、この臨界指数が平均場近似での値と一致することを示した。

8) カイラル量子異常効果による Disoriented Chiral Condensate (DCC) ドメイン形成

1996 年 Minakata-Müller によって量子色力学に存在するカイラル・アノマリーの効果によって、相対論的重イオン衝突において DCC 状態の形成が飛躍的に強められる可能性が指摘された。この効果を浅川達の線形シグマ模型コードに組み込みんでこの可能性をテストした結果、アノマリー効果が DCC ドメイン形成に大きな影響を与えることが確かめられた。今年度においては、この DCC 形成におけるカイラル・アノマリー効果の実験的検証についての研究を行った。カイラル・アノマリーの効果の特徴を表すと思われる中性パイ中間子の角度分布を計算したところ、散乱平面に垂直な方向にピークを持つことが確認された。さらに、この崩壊生成物である光子の角度分布を計算したところ、中性パイ中間子と同様に散乱平面に垂直な方向に十分鋭いピークを持ち、より容易な包含 1 光子分布の測定によって DCC 形成におけるカイラル・アノマリー機構の実験的検証が行えることが分った。米国ブルックヘブン国立研究所の RHIC 実験によって我々の予言が検証されることが望まれる。

(この研究はデューク大学・Berndt Müller、京大・浅川正之の両氏との共同研究)

2. 研究業績

1) 論文

M. Arai and N. Okada: Vacuum Structure of Spontaneously Broken N=2 Supersymmetric Gauge Theory, Physical Review **D64** (2001) 025024.

H. Hiro-Oka and H. Minakata: Pion Production by Parametric Resonance Mechanism with Quantum Back Reactions Physical Review **C64** (2001) 044902.

T. Kajita, H. Minakata and H. Nunokawa: Method for Determination of $|U_{e3}|$ in Neutrino Oscillation Appearance Experiments Physics Letters **B528** (2002) 245-252 [hep-ph/0112345].

N. Kitazawa: Gravitino Condensation in Fivebrane Background, Physical Review **D65** (2002) 086004.

H. Minakata and H. Sugiyama: Lower Bound on $|U_{e3}|^2$ from Single and Double Beta Decay Experiments Physics Letters **B526** (2002) 335-344 [hep-ph/0111269].

H. Minakata and H. Nunokawa: Exploring Neutrino Mixing with Low Energy Superbeams Journal of High Energy Physics **0110** (2001) 001-033 [hep-ph/0108085].

H. Minakata and H. Nunokawa: Measuring Leptonic CP Violation by Low-Energy Medium Baseline Neutrino Oscillation Experiments, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A472** (2000) 421-426 [hep-ph/0009091].

K. Ohwa: Crystalline Ground State in Chiral Gross-Neveu and Cooper Pair Models at Finite Densities, Physical Review **D65** (2002) 085040.

H. Sugiyama: Critical and Tricritical Exponents of the Gross-Neveu Model in the Large-N Limit, Physical Review **D65** (2002) 085021.

J. Pinney and O. Yasuda: Correlations of Errors in Measurements of CP Violation at Neutrino Factories, Physical Review **D64** (2001) 093008.

O. Yasuda: Vacuum Mimicking Phenomena in Neutrino Oscillations, Physics Letters **B516** (2001) 111-115.

O. Yasuda: Analysis of the Superkamiokande Atmospheric Neutrino Data in the Framework of Four Neutrino Mixings, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A472** (2001) 343-347.

2) 国際会議報告

M. Arai and N. Okada: Potential Analysis of N=2 SUSY Gauge Theory with the Fayet-Iliopoulos Term, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **102** (2001) 219-226.

H. Minakata: The Three Neutrino Scenario, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **100** (2001) 237-243.

H. Minakata: Degenerate and Other Neutrino Mass Scenarios and Dark Matter, in *Dark Matter in Astro- and Particle Physics*, pp 404-419, edited by H. V. Klapdor-Kleingrothaus, Springer 2001.

O. Yasuda: Various Solutions of the Atmospheric Neutrino Data, in *Proceedings of the 2nd Workshop on Neutrino Oscillations and Their Origin (NOON 2000)* (2001) 134-143.

O. Yasuda: Four Neutrino Oscillation Analysis of Atmospheric Neutrino Data and Application to Long Baseline Experiments, in *Proceedings of the 30th International Conference On High-Energy Physics (ICHEP 2000)* (2001) 952-954.

M. Chiba, T. Kamijo, M. Kawaki, A. Husain, M. Inuzuka, M. Ikeda, and O. Yasuda: Study of Salt Neutrino Detector, in *AIP conference proceedings* **579** (2001) 204-221.

3) 学会講演

日本物理学会第 56 回年次大会 2001 年 3 月 27 日 ~ 3 月 30 日 (中央大学多摩キャンパス)

小川兼司、John Pinney、安田修：ニュートリノファクトリーでの CP 非保存の測定における誤差の相関

日本物理学会秋季大会 2001 年 9 月 22 日 ~ 9 月 25 日 (沖縄国際大学)

杉山弘晃：Gross-Neveu 模型の 3 重臨界指数

応和克己：4 体フェルミ模型における周期的基底状態

新井真人、岡田宣親：Vacuum Structure of Spontaneously Broken $N=2$ SUSY Gauge Theory

国内研究会

新世紀の素粒子像：2001 年 7 月 10 日 ~ 13 日 (京都大学基礎物理学研究所)

安田修：Recent Status of Neutrino Oscillation Study

PRISM Summer Workshop：2001 年 8 月 18 日 ~ 20 日 (日経連富士教育研修所)

安田修：Phenomenological Neutrino Oscillation – Situation after SNO

特定領域研究「ニュートリノ」神岡研究会：2001 年 9 月 5 日 ~ 6 日
(東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設)

安田修：Phenomenology of Neutrino Oscillations (Status including SNO Data)

Sapporo Winter School 2002：2002 年 1 月 9 日 ~ 11 日 (北海道大学理学部)

安田修：ニュートリノ振動の現象論

「特定・宇宙ニュートリノ研究会」

第 6 回：2001 年 6 月 2 日 (東京都立大学国際交流会館)

南方久和：太陽ニュートリノの教養物理

第8回：2001年11月9日（東京大学宇宙線研究所）

南方久和： θ_{13} 、 Δm_{13}^2 の符号、CP-phaseの測定と物質効果

国際会議

The Third International Workshop on Neutrino Factories based on Muon Storage Rings (NuFACT01), May 24-30, 2001, Tsukuba, Japan

H. Minakata and H. Nunokawa: CP Trajectory Diagram; A tool for pictorial representation of CP and matter effects in neutrino oscillations

O. Yasuda: Summary of Working Group 1 (Theory Part)

The Sixth Workshop on Non-Perturbative Quantum Chromodynamics
June 5-9, 2001, American University of Paris, France

O. Yasuda: Recent Status of Neutrino Oscillation Study (Invited talk).

7th International Workshop on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2001),
September 8-12, 2001, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Assergi, Italy

H. Minakata and H. Nunokawa: CERN to Gran Sasso; Ideal Distance for Superbeam?

Frontiers in Particle Astrophysics and Cosmology; EuroConference on Neutrinos in
the Universe, Lenggries, Germany, September 29 - October 4, 2001

H. Minakata: Diagnostics of Supernova Neutrinos by Superkamiokande (Invited Plenary Session Talk).

Tamura International School on Neutrino Physics, November 23-25, 2001,
Tokyo University of Science, Japan

O. Yasuda: Phenomenological Theory (1): Current Understanding;
Phenomenological Theory (2): Future Problem (Invited talks).

The 3rd Workshop on Neutrino Oscillations and their Origin (NOON2001),
December 5-8, 2001, ICRP, Univ. of Tokyo, Japan

O. Yasuda: Physics Potential and Present Status of Neutrino Factories (Invited talk).

The 18th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN2002),
January 21-26, 2002, Christchurch, New Zealand

O. Yasuda: CP Violation in the Lepton Sector and Neutrino Oscillations (Invited talk).

Fourth International Heidelberg Conference on Dark Matter in Astro and Particle Physics
(Dark2002), Cape Town, South Africa, February 4-9, 2002

H. Minakata and H. Sugiyama: Single and Double Beta Decay Constraints on Neutrino Mixing Parameters (Invited talk).

4) 科学研究費等報告

南方久和：平成12年度～13年度科学研究費補助金（基盤研究C）成果報告書
「高密度・急冷過程でのハドロン場の理論」

5) 学会誌等

南方久和：平成13年第47回仁科記念賞 鈴木洋一郎氏、中畑雅行氏（学界ニュース）日本
物理学会誌 57 No. 2 (2002) pp 116.