

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 (1-6):ニュートリノ物理の現象論、(7-8):それ以外の研究項目の順序で記述する。

1998年スーパーカミオカンデ大気ニュートリノ観測によるニュートリノ振動の発見をニュートリノ物理の第一の転換点とすれば、今年2002年にはカムランド実験によって原子炉ニュートリノの欠損が確認され、ニュートリノ物理学は第二の転換点を迎えた。この実験によって、40年近い長きにわたって未解決であった太陽ニュートリノ問題が最終的に大角度MSW解というニュートリノ振動解によって解決されたのである。この結果、我々はレプトンフレーバー混合を記述する牧・中川・坂田行列の(1-2)(太陽)および(2-3)(大気)セクターの構造をほぼ把握することができた。

さて、残るのは(1-3)セクターである。この中には世界のコミュニティの一致した次の目標である(1-3)角、さらにはレプトン小林・益川位相が含まれる。この探索方法を見出すべく今年度においても我が都立大計画班は文科省科研費 特定領域研究「ニュートリノ振動とその起源の解明」において理論系計画班の中核を形成し、国際共同研究を含む活発な研究活動を行った。

1) ニュートリノ振動確率の解析的表式

一定密度の物質中における三世代のニュートリノ振動の厳密な振動確率は比較的簡単な解析的表式で表わされることが木村・高村・横枕によって示された。この確率公式の小林・益川位相依存性は驚くべき簡単なものである一方、彼らが示したこの公式の導出方法は試行錯誤による要素があり、必ずしも体系的であるとはいえない。そこでこれを見通しのよい体系的な仕方でも導出することができる新しい定式化を提案した。この定式化によって、振動確率公式を一般の世代数のニュートリノ振動に対しても導出することができ、さらに物質効果が存在しかつ一様磁場がかかった場合にも同様な方法で振動確率が簡単な解析的表式で表わされることを示した。

2) CP・Tダイアグラム表示を用いたニュートリノ振動の統一的記述

昨年度、長基線ニュートリノ振動実験における純正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明快に図示できる有用な道具として「双確率空間におけるCPダイアグラム表示」を導入した。今年度の研究ではこれをT(時間反転)非保存測定をも考慮してこのダイアグラムの概念を拡張した。この結果得られた統一CP・Tダイアグラムの性質を解析することによって今まで十分な注意を払われることのなかったCPやT変換で結びつく振動確率間の新たな関係式(CP-CP、およびT-CP関係式)が得られた。このCP・TダイアグラムによってCP共役およびT共役を含む様々のチャンネルのニュートリノ振動の統一的記述が実現されていることも示された。

3) ニュートリノ振動におけるパラメータ縮退の一般論

極く最近のことであるが、加速器によるニュートリノ振動実験によるフレーバー混合パラメータの決定において「パラメータ縮退の問題」という深刻な問題が存在することが認識されてきた。これは、ニュートリノ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$)および反ニュートリノ($\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$)振動確率を実験で如何に精密に測定しても、(1-3)角、(2-3)角、およびCP位相がユニークに決まらず、一般には8重縮退解をもつというものである。上記研究で導入しその性質が明らかにされたCP・Tダイアグラムを用いるとこのニュートリノ振動におけるパラメータ縮退という現象の生起する理由が簡明に理解できる。この理解に基礎をおき、太陽質量二乗差が大気質量二乗差に比して十分小さいという実際によい近似の下でこのパラメータ縮退問題を解析的に解き、この一般的構造を明らかにした。特にこれまで求められていなかった縮退解間のCP位相の関係を簡単な形に解析的に表示することに成功した。また、この結果を用いて縮退を解くために必要

とされる(1-3)角に対する実験精度のおおまかな評価を行った。さらに T 非保存測定におけるパラメータ縮退問題を初めて議論し、この CP の場合との際だった定性的特徴の相違を明らかにした。

(上記2課題はブラジル、パウリスタ州立大学・布川弘志、および米国フェルミ国立加速器研・Stephen Parke 両氏との共同研究)

4) 原子炉実験による(1-3)角の測定とパラメータ縮退の問題

カムランド後ますます注目を浴びることとなった(1-3)角の決定に関して原子炉実験による測定法を提案した。この方法は加速器ニュートリノ実験に比して少なくとも一桁安価で、しかも素早く実行できる特質をもっている。我々はまた、この原子炉を使う測定法が加速器によるニュートリノ振動実験による方法と相補的役割を果たすこと、さらにはこれらを組み合わせることによって上記のパラメータ縮退の一部が解けることを具体的に示した。

この原子炉を使う(1-3)角の測定法は先にロシアのグループによって提案されていたが、その実現性の薄さから余り注目されてこなかった。我々の提案は24 GW という世界最大の熱出力(したがって最大の反電子ニュートリノフラックス)をもつ柏崎-刈羽原発における実験を想定した具体的なものであったこと、さらには、ちょうどタイムリーに衝撃的な実験結果を発表したカムランドグループの中核メンバーが含まれていたこと、などの理由で世界的に反響を巻き起こし、これを追って欧州、米国においていくつかの競合的計画が立案されてきた。

(この課題は東北大学ニュートリノセンター・末包文彦、井上邦雄両氏との共同研究)

5) レプトンフレーバー混合と二重ベータ崩壊

ニュートリノ振動を使うパラメータ決定には固有の限界がある。それはニュートリノ振動確率がニュートリノ質量二乗差だけに依存し、その絶対スケールの決定を許さないからである。この絶対値を決定するための最も有望な実験手段はニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊という現象を使う方法であると信じられている。現在このタイプの実験からは質量パラメータについての上限が知られている。一方、最近この現象を観測したと主張する人たちも現れた。この無ニュートリノ二重ベータ崩壊から実験的な上下限が与えられた場合にフレーバー混合パラメータや絶対質量スケールに課される制限をいかなる模型にも依らない仕方で一般的に導いた。さらに、これらを現実の実験値に当てはめ、例えば、二重ベータ崩壊実験から宇宙のオメガパラメータに対するニュートリノの寄与の上限を与えた。カムランド実験が(1-2)角をほぼユニークに決定した今、このような解析は極めて任意性の少ないものとなった。

6) ニュートリノを使った重力陥没超新星コアの診断学

昨年度開始した「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」研究プロジェクトを続行した。この基本的アイデアは、ニュートリノ振動の存在を前提とし反電子ニュートリノの温度とミュー・タウ(正反)ニュートリノの温度に差があることを使って、水チェレンコフ検出器で最も高統計の反電子ニュートリノ事象を使ってミュー・タウニュートリノの性質を調べようというものであった。一方最近独マックスプランク研究所のグループによって反電子およびミュー・タウニュートリノの温度にそれほど差がない可能性が強く示唆された。今年度の研究ではこの可能性を深刻に受け取り、1メガトンの体積をもつ日本の次期計画ハイパーカミオカンデ検出器でどの程度までこの困難を克服できるかを調べた。10%程度の温度差であれば我々の方法は有効であることが分かった。

(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、パウリスタ州立大学・布川弘志の各氏との共同研究)

7) 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により、もう少し踏み込んだ研究が可能になった。

そこでまず、重力の量子効果によるフェルミ粒子の凝縮について研究した。フェルミ粒子の動力学的な凝縮があると、何らかの対称性が自発的に破れる可能性があり、そして、対称性の自発的破れは素粒子物理学において非常に重要な現象であるからである。

タイプ II 型超弦理論とヘテロ型超弦理論における非自明な背景場の配位に fivebrane と呼ばれるものがある。この fivebrane においては非自明な時空間が実現されており、重力の量子効果によるフェルミ粒子（グラビティーノとディラティーノ）の凝縮が期待される。両理論の低エネルギー有効理論であるタイプ II 型超重力理論とヘテロ型超重力理論において、背景場の周りのフェルミ粒子のゼロモードを調べることにより、タイプ II 型理論においてはフェルミ粒子の 4 体凝縮が、そしてヘテロ型理論においてはフェルミ粒子の 2 体凝縮が可能であることが分かった。また、タイプ II 型理論においては、ある特定のフェルミ粒子（時空の対称性 $SO(5,1) \times SO(4) \subset SO(9,1)$ の $SO(4)$ spinor）の 2 点相関関数がゼロでなければならないことが予想された。

次にタイプ II 型超弦理論において直接に、D-brane boundary state を変形した boundary state を用いて、フェルミ粒子の 2 点相関関数を計算した。その結果、 $SO(4)$ spinor の 2 点相関関数は確かにゼロであることが分かった。さらにゼロでない 2 点相関関数をもつフェルミ粒子については、6 次元超重力理論の多重項の成分として理解できることが分かった。このような弦理論とその低エネルギー有効理論である超重力理論との直接の比較はすでに多くなされているが、フェルミ粒子についての事例は少なく、この研究はその第一歩であるといえる。

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

以前の研究で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を指摘した。今年度においては、このカイラル・アノマリーによる DCC 形成機構に特有な実験的予言を明らかにし、実験的コミュニティーに提案した。カイラル・アノマリーの効果の特徴を表し、かつ観測の容易な中性パイ中間子の崩壊生成物である光子の角度分布を測定し、このエリプティックフローパラメータ v_2 を決定すればよいというもので、通常の重イオン衝突事象に広く存在する流体力学的効果によるものと異なり、アノマリー機構は数 % の大きさの負の v_2 を予言することが分かった。これが米国ブルックヘブン国立研究所の RHIC 実験によってテストされ、立証（または逆に棄却）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. Asakawa, H. Minakata and B. Müller: Experimental Signatures of Anomaly Induced Disoriented Chiral Condensate Formation, *Physical Review* **C65** (2002) 057901.

P. Hernandez and O. Yasuda: Neutrino Oscillation Physics at a ν Factory, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A485** (2002) 811-818.

N. Kitazawa: Fermionic Zero-modes in Type II Fivebrane Backgrounds, *Modern Physics Letters* **A17** (2002) 2617-2625.

H. Minakata and H. Nunokawa: CP Trajectory Diagram; A tool for pictorial representation of CP and matter effects in neutrino oscillations, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A503** (2002) 218-221.

H. Minakata, H. Nunokawa and S. J. Parke: CP and T Trajectory Diagrams for a Unified Graphical Representation of Neutrino Oscillations, Physics Letters **B537** (2002) 249-255.

H. Minakata, H. Nunokawa and S. J. Parke: Parameter Degeneracies in Neutrino Oscillation Measurement of Leptonic CP and T Violation, Physical Review **D66** (2002) 093012.

H. Minakata, H. Nunokawa, R. Tomas and J. W. F. Valle: Proving Supernova Physics with Neutrino Oscillations, Physics Letters **B542** (2002) 239-244.

H. Minakata and H. Sugiyama: Constraints on Neutrino Mixing Parameters by Observation of Neutrinoless Double Beta Decay, Physics Letters **B532** (2002) 275-283.

2) 国際会議報告

H. Minakata and H. Nunokawa: CERN to Gran Sasso; Ideal Distance for Superbeam? Nucl. Phys. Proc. Suppl. **110** (2002) 404-406.

O. Yasuda: Recent Status of Neutrino Oscillation Study, in *Proceedings of the Sixth Workshop on Non-Perturbative QCD* (2002) 1-6 (World Scientific, Singapore, 2002).

O. Yasuda: Neutrino Oscillations with Four Generations, in *New initiatives on lepton flavor violation and neutrino oscillation with high intense muon and neutrino sources* (2002) 151-163.

O. Yasuda: Physics potential and present status of neutrino factories in *Proceedings of the Third International Workshop on Neutrino Oscillations and Their Origin (NOON2001)* (2002) 259-268 (World Scientific, Singapore, 2002).

3) 学会講演

日本物理学会第 57 回年次大会 2002 年 3 月 24 日 ~ 3 月 27 日 (立命館大学)

安田修: ニュートリノ振動における真空模倣現象

日本物理学会秋季大会 2002 年 9 月 13 日 ~ 9 月 16 日 (立教大学)

南方久和, 杉山弘晃: Constraints on Neutrino Mixing Parameters by Observation of Neutrinoless Double Beta Decay

安田修: 2 種類以上の不毛ニュートリノがあるシナリオに対する制限

国内研究会

ミュ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: 2002 年 6 月 14 日-15 日 (KEK)

安田修: WG2 overview

「特定・宇宙ニュートリノ研究会」

第 9 回: 2002 年 5 月 8 日 (東京都立大学国際交流会館)

杉山弘晃：二重ベータ崩壊理論解析のレビュー

第10回：2002年11月22日（東京大学宇宙線研究所）

南方久和：実験屋さんのためのパラメータ縮退

杉山弘晃：原子炉実験による θ_{13} 角の測定 (他の可能性・方法についてのレビューを含む)

第11回：2002年12月11日（東京大学宇宙線研究所）

南方久和：コメント - ニュートリノ振動現象論の立場から -

第12回：2003年1月9日-10日（新潟大学）

安田修：KamLAND and Solar Neutrinos II

国際会議

INT Miniworkshop on Neutrino Masses and Mixing

April 8 - 12, 2002, Seattle, USA

O. Yasuda: Status of Sterile Neutrino Schemes (Invited talk).

Third International Conference on Beyond Standard Model Physics (BEYOND2002),

Oulu, Finland, June 2 - 8, 2002

H. Sugiyama: Constraints on Neutrino Mixing Parameters by Observation of Neutrinoless Double Beta Decay (Invited talk).

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

The Fourth International Workshop on Neutrino Factories based on Muon Storage Rings

(NuFACT02), July 1-6 2002, London, UK

H. Minakata: Method for Determination of $|U_{e3}|$ in Neutrino Oscillation Appearance Experiments (Invited talk).

O. Yasuda: Summary of Working Group 2 (Theory Part).

Third Tropical Workshop on Particle Physics and Cosmology,

August 19-23, 2002, San Juan, Puerto Rico

H. Minakata: Diagnostics of Supernova by Neutrinos (Invited talk)

XVI Particles and Nuclei International Conference (PANIC02),

September 30-October 4, 2002, Osaka, Japan

M. Asakawa, H. Minakata and B. Müller: Negative Elliptic Flow from Anomaly Induced DCC Formation

H. Sugiyama: Constraints on Neutrino Mixing Parameters by Neutrinoless Double Beta Decay Experiments

Plenary Meeting of Studies of Neutrino Factory Complex

December 11, 2002, CERN, Geneva, Switzerland

O. Yasuda: Reactor Measurement of θ_{13} and Its Complementarity to Long-Baseline Experiments (Invited talk).

The Fourth Workshop on Neutrino Oscillations and their Origin (NOON2003)

February 10-14, 2003, Kanazawa, Japan

H. Minakata, H. Nunokawa, and S. Parke: Long Baseline Neutrino Oscillations: Parameter Degeneracy and JHF/NUMI Complementarity (Invited talk).

H. Sugiyama: Double Beta Decay Constraints (Invited talk).

O. Yasuda: Parameter Degeneracy and Reactor (Invited talk).

4) 学会誌等

南方久和：小柴先生、お待ちどうさま

天文月報 95, No. 12 (2002) 600.

南方久和：平成43回藤原賞 戸塚洋二氏（学界ニュース）

日本物理学会誌 57, No. 9 (2002) 676.

南方久和：佳境に入ったニュートリノ振動実験

パリティ 17, No. 04 (2002) 32-39.