

素粒子理論研究室

1. 研究活動の概要

2018年度は、2017年度末に転出された原子核ハドロン物理研究室の慈道氏の学生諸君が素粒子理論研究室に加わることとなり、大世帯の研究室となった。以下は元々の素粒子理論研究室の構成員と原子核ハドロン物理研究室から加わった構成員の研究活動の概要である。

1) MINOS 実験と MINOS 実験の混合角の測定値の違いを説明する可能性 (安田, 鈴木)

MINOS 実験におけるニュートリノ混合角は T2K 実験のものと有意に異なっていることが知られている。MINOS 実験グループが用いているニュートリノ核子散乱の断面積は必ずしも実験データを再現しておらず、又、彼らの最適解もフィットが悪いことが知られている。そこで、標準的枠組みの範囲内でニュートリノのエネルギーの推定値に大きな系統誤差があることを仮定し、フィットの良さが統計的に良くなるように (具体的には $\text{reduced}\chi^2$ が 1 となるように) 系統誤差を決めて解析を試み、MINOS 実験と T2K 実験との整合性を吟味した。結果は混合角の許容領域に関しては T2K と MINOS の齟齬が消失することはなかったが、質量二乗差に関しては両者の違いが少なくなることがわかった。

2) 太陽ニュートリノと KamLAND の違いを説明する新たな可能性の検討 (安田, 石田)

太陽ニュートリノ観測と KamLAND 実験の質量二乗差に有意な差があることが知られている。その差は主として、KamLAND 実験の質量二乗差を仮定した場合の太陽ニュートリノ生存確率のエネルギー依存性が太陽ニュートリノ観測のデータと矛盾していることに端を発している。その違いを説明するための可能性として、非標準的な大きさの太陽磁場とニュートリノ磁気モーメントを仮定して両者の差を説明する可能性を探った。残念ながらこのシナリオでは太陽ニュートリノ生存確率の現実的なエネルギー依存性の補正を説明することは出来ず、両者を整合させることは出来ないことがわかった。

3) 低エネルギー領域でのニュートリノ振動確率の表式 (安田)

太陽ニュートリノ観測と KamLAND 実験の齟齬を説明する一つの仮説としてフレーバーを保存しない非標準的相互作用が提唱されているが、そのような非標準的相互作用が存在する場合の低エネルギー領域での長基線実験でのニュートリノ振動確率の表式を一般の非標準的相互作用の場合に求めた。この振動確率は高エネルギー領域での Cervera の公式とは相補的なものとなっている。

4) 弦模型における電弱対称性の自発的破れ (北澤)

弦理論に基づく模型の中で、特に D ブレーンを用いる模型における電弱対称性の自発的破れの実現について研究した。電弱対称性の自発的破れに代表されるゲージ対称性の自発的破れは、同種の D ブレーンが平行にごくわずかだけ離れているという配位が安定に保たれた時に実現される。このような配位を安定に保つことは非常に困難で、活発な研究の対象にはなってこなかった。これまでの試みは配位を静的に安定化させることに集中していて、動的に安定化させる試みはなされていなかった。そこで、同種の D ブレーンが平行に、かつ連星のように互いに等距離を保ちながら安定に公転する可能性を追求した。最初の試みとして、互いに等速運動ですれ違う D ブレーンの中に働く力の精密な理解に努めた。相対速度がゼロの時には力は働かないが、相対速度がゼロでない場合には相対速度に依存した力が働くことを確認し、さらにその力のポテンシャルを複雑な弦の共形場の理論を使わずに、低エネルギー有効理論において近似的に求める方法について考察した。

この研究は高エネルギー加速研究機構の磯氏、須山氏および太田氏との共同研究である。

5) 宇宙背景輻射の大きなスケールのゆらぎの偏極 (北澤)

宇宙背景輻射のゆらぎの偏極, 特に大きなスケール (小さな波数) のゆらぎの B-mode と呼ばれる偏極 (大スケール B-mode 偏極) について研究した. 大スケールの温度ゆらぎには異常があり, それがインフレーションの始まりを見ているためであると解釈できることが知られている. また, 大スケール B-mode 偏極は宇宙のインフレーションによって生成された原始テンソルゆらぎのみを起源とすることが知られている. 大スケール B-mode 偏極を簡潔に計算する方法を提案し, それを用いて, 将来の LiteBIRD などの観測装置による大スケール B-mode 偏極の精密測定によって, 我々がインフレーションの始まりを見ているという解釈のさらなる傍証を得ることができると示した.

この研究は, ピサ高等師範学校の A.Sagnotti 氏, および PLANCK collaboration に属する A.Gruppuso 氏と P.Natoli 氏の協力を得て行った.

6) B 中間子の 2 体ハドロン崩壊を用いた $|V_{cb}|$ の決定 (北澤, 増川)

カビボ・小林・益川行列の要素のひとつである $|V_{cb}|$ を B 中間子の 2 体ハドロン崩壊を用いて決定する方法 (昨年度提案した方法) における, 終状態ハドロンの終状態相互作用 (final state interaction) の効果の大きさについて考察した. 特に, 非弾性終状態相互作用 (inelastic final state interaction) の大きさを見積もり, 決定される $|V_{cb}|$ の値に 20% 程度の理論誤差が生ずることを見出した. 現時点での B 中間子の 2 体ハドロン崩壊の分岐比の測定精度が同程度であるので, 決定される $|V_{cb}|$ の値には同程度の大きさの実験誤差がある. 将来の実験で分岐比がより精密に測定された場合には, 非弾性終状態相互作用の効果をより正確に理論的に評価する必要があることを認識した.

7) K 中間子原子のスペクトルと K 中間子原子核相互作用 (飯澤)

K 中間子原子において強い相互作用によるエネルギーシフトは斥力的であると観測されている. 一方 K⁻-原子核間にはたらく強い相互作用は引力であると考えられている. 両者を矛盾なく説明するには 2 つの機構が考えられる. 1 つは引力の強い力が K 中間子原子核状態をつくることで生じる準位反発によるもので, もう一つは吸収を表す光学ポテンシャルの虚部が斥力として効くことによるものである. この 2 つの機構に基づいてポテンシャルを構成した. 実験値を系統的に再現できるかどうかを調べた結果, 光学ポテンシャルの虚部の効果が斥力的なエネルギーシフトの起源であることがわかった. この結果は K 中間子原子核相互作用においては, 吸収の効果を表す虚部が束縛エネルギーにおいても大きな役割を演じることを示唆する.

この研究は, 東工大の慈道大介氏, 鳥取大学の池野なつ美氏, 京都産業大学の山縣淳子氏, 奈良女子大学の比連崎悟氏との共同研究である.

8) ハドロン質量スペクトルにおけるダイナミカル超対称性 (天野)

本研究では s クォークと ud ダイクォークの質量が約 500 MeV で非常に近いと考えられていること, また ud ダイクォークに対して, カラー $\bar{3}$ を取ることにより, この 2 粒子間に対称性を考えた. $SU(3)_F$ から発展させて代数を構築し, 縮退する粒子として s クォークスピン上下, スピン 0 ud ダイクォークの反粒子 3 成分でトリプレットを組む. ここから s クォークと ud ダイクォークを同一視し, トリプレットの質量の破れを求め, ハドロンの質量スペクトルを計算した. これらのハドロンに対して質量の破れから Gell-Mann 大久保の質量公式のような質量関係式を導いた. それらを実験値と比較しこの代数の妥当性, ハドロン内の超対称性, ダイクォークの存在, 性質について議論を行った.

本研究は東工大の慈道大介教授との共同研究である.

9) ダイクォーク模型における重いバリオンの励起エネルギー及びダイクォークの性質 (隈川)

近年、チャームクォークやボトムクォークといった重いクォークを含むハドロンが実験的に続々と発見されている。特に、重いクォークを1つ含むバリオンでは、2つの軽いクォークがダイクォークとしてふるまい、クォーク・ダイクォークの束縛状態として記述されることが期待され、ダイクォークの存在や性質に注目が集まっている。ダイクォークはバリオン内の2つのクォークでできる複合粒子であり、カラー $\mathbf{3}$ を持つ。本研究では、重いクォークを含むバリオンの質量より、ダイクォークの質量を決定した。さらに、ダイクォークに量子的な広がりを持たせ、 Λ_c 粒子の $1p$ 軌道の励起エネルギーを再現するようにすると、ダイクォークの平均二乗直径は $1.2[\text{fm}]$ 程度という計算結果が得られた。また、最近発見されたチャームクォークを2つ持つバリオン Ξ_{cc} についても計算を行い、励起スペクトルの予言を行った。

この研究は、東工大の慈道大介氏との共同研究である。

10) カイラル有効模型における真空構造での $U_A(1)$ 量子異常の役割 (河野)

本研究では、Nambu-Jona-Lasinio 模型 (以下 NJL 模型) と線形シグマ模型を用いて、真空構造における $U_A(1)$ 量子異常の役割を調べた。通常 NJL 模型においては、4点相互作用の結合定数がある臨界値を超えた時にカイラル対称性が自発的に破れ、線形シグマ模型では、シグマ場の2乗の係数が負になる状況でカイラル対称性が自発的に破れる。しかし、これら2つのモデルにおいて $U_A(1)$ 量子異常を考慮すると、先程の状況を満たしていない場合でもカイラル対称性が自発的に破れることが分かった。さらに、本研究では、どのような状況の時に $U_A(1)$ 量子異常が主体的な役割を担ってカイラル対称性を自発的に破るのかを調べ、そのような状況下で σ や η' の質量の満たすべき関係式を求めた。

本研究は、東工大の慈道大介氏、名古屋大の黒田佳樹氏と原田正康氏との共同研究である。

11) カイラルユニタリー模型を用いた核媒質中における K^+ 中間子に対する波動関数くりこみ (青木)

有限核子密度におけるカイラル対称性の部分的 (不完全) 回復を実験的に検証するために原子核中の Nambu-Goldstone (NG) ボソンの性質が研究されている。近年、カイラル対称性の部分的回復に付随する NG ボソンの性質の変化を与える補正として波動関数くりこみが重要だと考えられている。そこで、NG ボソンの一つである K^+ の核媒質中の性質を研究し、 K^+ に対する波動関数くりこみの影響がどのように現れるかを調べた。波動関数くりこみは核媒質中における自己エネルギーのエネルギー微分で得られる。自己エネルギーを構成するために、本研究では、tree レベルの KN 散乱振幅を next-to-leading order までのカイラル摂動論で計算し、ユニタリー化することでエネルギー適用領域を拡大した。 KN 散乱の実験データを再現するようにパラメータを決定した。波動関数くりこみは低エネルギーで6%程度の相互作用の増大を与えることが明らかになった。また、 KN 散乱振幅の $I=0$ チャンネルに $S=+1$ を持つエキゾチックな共鳴状態が存在し、共鳴のエネルギーの近辺で波動関数くりこみは強いエネルギー依存性を持つことが明らかになった。

この研究は、東工大の慈道大介氏との共同研究である。

2. 研究業績

1) 論文

Noriaki Kitazawa, Kyo-suke Masukawa and Yuki Sakai, Model independent extraction of $|V_{cb}|$ from two-body hadronic B-decays, *PTEP* **2019** (2019) 013B02.

Noriaki Kitazawa, Brane SUSY Breaking and the Gravitino Mass, *JHEP* **1804** (2018) 081.

A.Gruppuso, N.Kitazawa, M.Lattanzi, N.Mandolesi, P.Natoli and A.Sagnotti, The Evens and Odds of CMB Anomalies, *Physics of the Dark Universe* **20** (2018) 49-64.

K. Abe, O. Yasuda et al., Physics potentials with the second Hyper-Kamiokande detector in Korea, *PTEP* **2018** (2018) 063C01.

Kenji Aoki, Daisuke Jido, KN scattering amplitude revisited in chiral unitary approach and a possible broad resonance in $S=+1$ channel, *PTEP* **2019** (2019) 013D01.

2) 国際会議報告

Osamu Yasuda, Recent status of neutrino phenomenology, *PoS HQL2018* (2018) 043.

3) 学会講演

国内研究会

● 日本物理学会第 74 回年次大会 2019 年 3 月 14 日 – 17 日 (九州大学 伊都キャンパス)

天野大樹, 慈道大介: ハドロン質量スペクトルにおけるダイナミカル超対称性

河野晋之介, 慈道大介, 黒田佳樹, 原田正康: カイラル有効模型における真空構造での UA(1) 量子異常の役割

飯澤優太郎, 慈道大介, 池野なつ美, 山縣淳子, 比連崎悟: K 中間子原子エネルギースペクトルにおける斥カシフトの起源

青木健児, 慈道大介: カイラルユニタリー模型を用いた核媒質中における K^+ 中間子に対する波動関数くりこみ

● 研究会「ニュートリノ原子核反応とニュートリノ相互作用」2019 年 2 月 22 日, KEK 東海キャンパス

安田修: ”ニュートリノ振動実験とニュートリノの非標準相互作用” (招待講演)

● 討論型研究会 2018 「中間子原子核研究の展開」2018 年 10 月 9 日-11 日, 東京工業大学

河野晋之介: カイラル有効模型における真空構造での UA(1) 量子異常の役割

隈川健斗: 2つのダイクォーク模型による重いクォークを含むバリオン

天野大樹: Dynamical supersymmetry for strange quark and ud diquark in hadron mass spectrum

飯澤優太郎: Spectrum of kaonic atom and kaon-nucleus interaction revisited

● ELPH 研究会「原子核中におけるハドロンの性質とカイラル対称性の役割」2018 年 9 月 11 日-12 日, 東北大学電子光理学研究センター, 仙台市

隈川健斗: 2つのダイクォーク模型による重いクォークを含むバリオン

飯澤優太郎: Spectrum of kaonic atom and kaon-nucleus interaction revisited

青木健児: カイラル摂動論を用いた π 中間子-原子核相互作用の P 波成分に対する波動関数くりこみの影響

河野晋之介：カイラル有効模型における真空構造での UA(1) 量子異常の役割

国際会議

● KEK Theory workshop 2018, 17–20 December 2018, Tsukuba, Japan

N. Kitazawa: Gauge symmetry breaking in models with D-branes

● A topical conference on elementary particle physics and cosmology (Miami2018), 13–19 December 2018, Fort Lauderdale, Florida, USA

O. Yasuda: Effect of systematics in the T2HK, T2HKK, and DUNE experiments

● Satellite Workshop of QNP2018 on Hadron structure and interaction in dense matter, 11–12 November 2018, KEK Tokai Campus, Tokai, Ibaraki, Japan.

Y. Iizawa: Spectrum of kaonic atom and kaon-nucleus interaction revisited

● Tokyo Tech - Uppsala University 5th Joint Symposium, 24–25 September 2018, Ångström Laboratory, Uppsala University, Uppsala, Sweden.

Y. Iizawa: Spectrum of kaonic atom and kaon-nucleus interaction revisited

T. Amano: Dynamical supersymmetry for strange quark and ud diquark in hadron mass spectrum

● Neutrino Oscillation Workshop (NOW 2018) 9–16 September 2018, Rosa Marina, Ostuni, Italy

O. Yasuda: Systematics in T2HK/T2HKK/DUNE (Invited talk)

● International School for Strangeness Nuclear Physics (SNP School 2018), 1–3 August 2018, Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, Ibaragi, Japan .

Y. Iizawa: Spectrum of kaonic atom and kaon-nucleus interaction (Poster)

T. Amano: Dynamical Super Symmetry for Strange Quark and ud Di-quark in Hadron Mass Spectrum (Poster)

● 14th International Conference on Heavy Quarks and Leptons (HQL2018) 27 May – 1 June 2018, Yamagata Terrsa, Yamagata, Japan

O. Yasuda: Recent status of neutrino phenomenology (Invited talk)

4) 一般向けのアウトリーチ活動

安田修：講演会「みんなにわかるニュートリノのお話」(2018年8月19日, 東京台場, 日本科学未来館・未来館ホール) の世話人・動画撮影担当・YouTube 投稿担当

・はじめに (<https://www.youtube.com/watch?v=MABweKzGkL0>)

・素粒子(実験)の世界 (<https://www.youtube.com/watch?v=VWIaiAuvIww>)

・スーパーカミオカンデ実験でわかったこと (https://www.youtube.com/watch?v=Oc_b5NFDYBU)

・宇宙ニュートリノの発見 (<https://www.youtube.com/watch?v=d7vVl3yDeBA>)

・ニュートリノと鍛え合った写真技術は世界を透視し, 知は続き, つながってゆく (<https://www.youtube.com/watch?v=tTjAPPPMVTI>)