

# 研究活動

## 1. 素粒子理論グループ

教授 青木 慎也、石橋 延幸、宇川 彰、金谷 和至

助教授 石塚 成人、吉江 友照

講師 蔵増 嘉伸

助手 佐藤 勇二、谷口 祐介、毛利 健司、Oliver Bär

研究機関研究員 佐々木 潔

研究員 石川 智己、村上 公一

大学院生 (22名)

### 【人事異動】

Oliver Bär 助手が2005年9月30日にフンボルト大学講師に転出した。佐藤 勇二助手が、文部科学省海外先進教育研究実践支援プログラムにより派遣されていた英国ロンドン大学インペリアル校から、2006年1月30日に帰国した。

### 【研究活動】

素粒子理論グループにおいては、本年度も、格子場の理論の研究と超弦理論の研究を二本の柱に、活発な研究活動が行なわれた。

格子場の理論グループでは、計算科学研究センターと密接な連携のもと、格子 QCD の大型数値シミュレーションが推進された。特に、u, d クォークと s クォークを正確に取り入れた  $N_f = 3$  QCD の大規模シミュレーションを行った。この研究には膨大な計算量が要求されるため、計算物理学研究センターの超並列計算機 CP-PACS、そのフロント計算機システム SR-8000 だけでなく、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の並列計算機 SR-8000、筑波大学学術情報処理センターの並列計算機 VPP-5000、地球シミュレーションセンターの地球シミュレータなど、使える計算機資源を集約して、プロジェクトを進めた。また、これと並行して、軽いハドロンの散乱、中性子の電気双極子モーメントの計算、格子上での重いクォークの定式化とその応用、ウィルソン型クォークのカイラル対称性の破れを取り入れたカイラル摂動論の研究、なども推進した。物理の研究以外には、計算科学研究センターの次期並列計算機である PACS-CS の設計、開発に協力した。

超弦理論の分野では弦理論の行列模型を用いた解析と、超弦理論とゲージ理論との対応という2つの関連するテーマを中心として研究が行われた。最近この分野においては、D-ブレーンと呼ばれるソリトン解の研究を通じて、弦理論の非摂動的定式化としての行列模型や、超弦理論とゲージ理論の双対性等のテーマが盛んに研究されている。特に近年、超弦理論とゲージ理論の関係が定量的なレベルまで明らかにされたり、非臨界弦の理論における D-ブレーンの意味が明らかになったり等の大きな発展があった。この状況の下で、非臨界弦の非摂動効果、弦理論/スピン鎖対応、5次元超重力理論、higher spin 場の理論等についての研究を行った。

## 【1】 格子場の理論

(青木 慎也、宇川 彰、金谷 和至、石塚 成人、吉江 友照、藏増 嘉伸、谷口 裕介、Oliver Bär、佐々木 潔、石川 智己)

### (1) $N_f = 2 + 1$ QCD: 動的な strange クォークを含むシミュレーション

#### a) 研究の目的

格子 QCD は QCD に関する様々な物理量の第一原理からの計算を可能にする現在唯一の形式である。しかし、そのシミュレーションには膨大な計算量が要求されるため、実際には次のような妥協のもとに計算が行われてきた。

- (i) 有限格子間隔
- (ii) 有限体積 (格子サイズ)
- (iii) 現実よりもはるかに重いクォーク質量
- (iv) クエンチ近似 (クォークの対生成・消滅効果 (動的効果) の無視)

このうち、(i)(ii)(iii) はそれぞれ、連続極限外挿、無限体積外挿、カイラル外挿によって原理的には除去可能な系統誤差である (実際には外挿関数形の不定性等の問題はある)。しかし、(iv) は質的に違い、除去可能な系統誤差ではない。しかも、理論のユニタリティを満足しない等の病的な要素も含んでいる。そこで、近年は計算アルゴリズムの進展や計算機性能の向上もあって、クォークの動的効果を取り入れたシミュレーションも行われてきている。最も軽い up, down クォークの動的効果は取り入れたシミュレーション ( $N_f=2$  QCD) の代表的なものとしては CP-PACS によるものが挙げられ、ハドロン・スペクトルに対する動的クォーク効果の重要性が示された。しかし、strange クォークも質量が QCD の典型的エネルギースケール程度であるので、重要な効果があると考えられる。(他方、strange より重いクォークの動的効果は重要ではない。) そこで格子場の理論グループでは CP-PACS と JLQCD の共同プロジェクトとして、up と down は縮退している近似で動的な strange クォークを取り入れた " $N_f=2+1$  QCD" の系統的シミュレーションを行っている。プロジェクトの目標は、 $N_f=2+1$  QCD の連続極限外挿を実行することにより、格子 QCD に残された大きな不定性であるクエンチ近似を取り除いた現実的なシミュレーションを初めて実現することにある。

#### b) ゲージ配位の生成

格子 QCD のシミュレーションにおいてはクォーク作用の選択として大きく分けて次のようなものがある。

- (i) ウィルソン・フェルミオン
- (ii) スタッガード・フェルミオン
- (iii) カイラル・フェルミオン (ドメインウォール、オーバーラップ)

(i) は最も標準的な形式で、計算コストは比較的大きく有限格子間隔においてカイラル対称性は保たれていないものの、理論的不定性は少ない。(ii) は計算コストが非

常に少なく、有限格子間隔で部分的なカイラル対称性が保たれているが、クォーク行列式の4乗根を取らなければならず、局所性が明らかでない等の理論的不定性が存在する。(iii)は有限格子間隔においてカイラル対称性は保たれている(あるいは制御できる)が、(i)の $O(100)$ 倍の計算コストを要するのが難点である。どの形式を選択するかは、求める物理、計算コストの兼ね合いであるが、(特にクォークの動的効果を取り入れたシミュレーションでは)この選択が計画全体の成否を左右する。我々は理論的不定性の少ない、より現実的なシミュレーションを目指し、(i)の形式を選択する。(i)の形式に則り、我々が採用している作用はIwasakiゲージ作用と $O(a)$ 改良Wilsonクォーク作用の組合せである( $a$ は格子間隔)。 $O(a)$ 改良係数はSchrödinger汎関数法を用い、非摂動的に決定した(論文1)。動的クォークのアルゴリズムとしてはPolynomial HMC (PHMC) アルゴリズムを用いている。

物理と計算コストの両側面から計画を練り、我々が採用したシミュレーション・パラメータは次の通りである。

- 格子間隔： $a \simeq 0.122, 0.10, 0.07$  fm の3点
- 物理的体積： $L^3 \simeq (2.0 \text{ fm})^3$  固定
- up, down クォーク質量： $m_{PS}/m_V \simeq 0.6 - 0.78$  の範囲で5点
- strange クォーク質量： $m_{PS}/m_V \simeq 0.7$  の周りで2点

ここで、 $m_{PS}, m_V$  はそれぞれ擬スカラー中間子とベクトル中間子の質量を表す。有限体積効果は中間子に関しては有意な影響を及ぼさない程度である。重粒子に関しては体積が充分ではないため、主な研究対象は中間子である。ゲージ配位生成には約2年半を要し、本年度で全て終了した。

#### c) ハドロンスペクトル、クォーク質量

ゲージ配位生成と並行して軽い中間子質量スペクトルと軽いクォーク質量について解析を行い、連続極限を取った。我々が採用した作用は完全に $O(a)$ 改良がなされているので連続極限への外挿で $a^2$ でスケールすると仮定している。(正確にはカレントの繰り込み因子は摂動論で計算されていて、クォーク質量に関しては $O(a)$ の寄与は残っている。しかし、ここではその寄与は小さいと仮定している。)軽い中間子質量スペクトルに関しては、連続極限で実験値を良く再現している(図1)。クォーク質量に関しては、連続極限での統計誤差が大きいが、 $N_f=2$ のときと同程度の値となっている(図2)。また、 $N_f=2$ の場合と同じく、 $N_f=2+1$ でも連続極限で物理量が、物理点を決定するときの入力の選択(K-input か  $\phi$ -input)に依存しないことが確認された(論文2, 本論文執筆中)。

#### d) 今後の課題

我々のシミュレーションではクエンチ近似を排除し、不定性のない現実的な計算に一步近付いた。しかし、我々が採用しているウィルソン・フェルミオン形式の欠点としては計算コストが大きく、現実よりもはるかに重いクォーク質量でしかシミュレーションを行えないことが挙げられる(少なくともこれまでは)。よって、カイラ

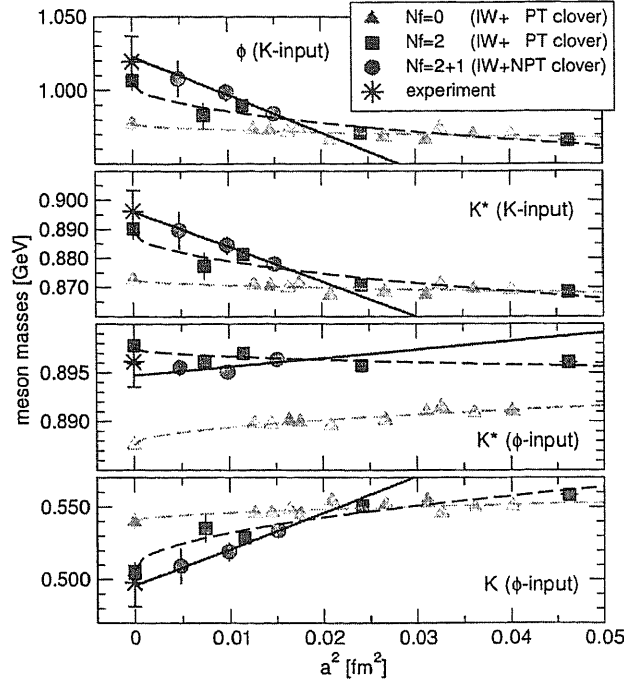


図 1: 軽い中間子質量スペクトルの連続極限への外挿。赤●が  $N_f=2+1$  の結果、緑\*が実験値。横軸は格子間隔の  $a$  二乗。比較のため  $N_f=2$  (青■) とクエンチ近似 (黄▲) の結果も図示した。K-input、 $\phi$ -input は strange クォークの物理点を決定するときの入力として、それぞれ K 中間子、 $\phi$  中間子を使ったことを意味する。 $N_f=2+1$  の中間子質量スペクトルは連続極限で実験値を再現する。

ル外挿は不定性の大きな要因となる。ところが、最近 M. Lüscher によって Domain Decomposed HMC (DDHMC) アルゴリズムによってウィルソン・フェルミオン形式においてもクォーク質量が軽い領域でのシミュレーションが可能であることが示唆された。我々は次の段階としてこの DDHMC アルゴリズムを使った現実に近いクォーク質量でのシミュレーションを試みている。また、現段階ではカイラル外挿には単純なクォーク質量の多項式を使っているが、カイラル摂動論によればクォーク質量が小さな領域での log 構造が示唆されている。我々が採用しているウィルソン・フェルミオン形式では有限格子間隔でカイラル対称性が陽に破れているためにカイラル摂動論が変更を受け、ウィルソン・カイラル摂動論と呼ばれるものとなる。このウィルソン・カイラル摂動論から導かれるカイラル外挿関数形を使いカイラル外挿の不定性を取り除くことも現在試みている。

#### e) その他の物理量計算

我々が生成した  $N_f=2+1$  のゲージ配位上で扱うべき物理は沢山あるが、特に  $\eta'$  中間子の質量計算は重要である。これは、素粒子物理学での大きな問題の一つとされている  $U(1)$  問題に付随したもので、フレーバー 1 重項中間子である  $\eta'$  がフレーバー

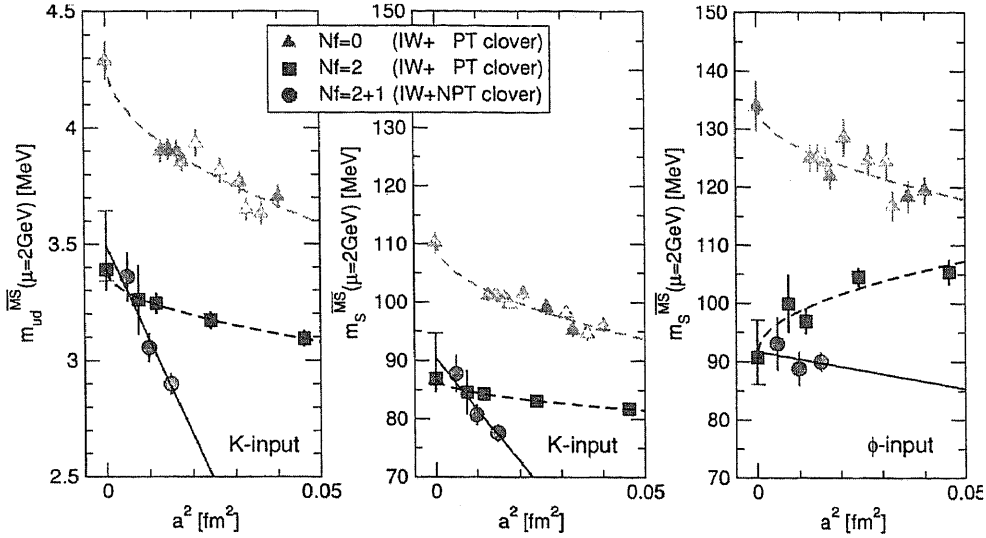


図 2: 軽いクォークの質量の連続極限への外挿。左が $u$  と  $d$  クォーク (K-input)、中央が strange クォーク (K-input)、右が $s$  strange クォーク ( $\phi$ -input)。クォーク質量は PCAC 関係式から決定し、繰り込みスキームは  $\overline{MS}$  ( $\mu = 2 \text{ GeV}$ )。赤●が  $N_f=2+1$  での結果。横軸は格子間隔  $a$  の二乗。比較のため  $N_f=2$  (青■) とクエンチ近似 (黄▲) の結果も図示した。連続極限で  $N_f=2+1$  と  $N_f=2$  の結果は同程度となっている。

8重項中間子より非常に重いことをどう説明するかという問題である。 $\eta'$  については strange クォークの動的効果が非常に効く可能性があり、現在計算が進行中である。その他、相対論的重クォーク作用を用いた  $N_f=2+1$  のゲージ配位上での重いクォークの物理に関しても計算が進行中である。

## (2) 一般的な $\Delta S = 2, 4$ クォーク演算子の摂動的繰り込み因子の計算

中性 K 中間子混合における CP の破れの測定は標準理論における小林・益川行列要素の決定、更には標準理論を超える新しい物理、例えば超対称性などの探索にとって重要な実験であるが、その解析の際にはバグ定数と呼ばれる  $\Delta S = 2, 4$  クォーク演算子を中性 K 中間子の状態で挟んだハドロン行列要素の理論的評価が必要となる。中村と蔵増は中性 K 中間子混合に寄与しうるすべての  $\Delta S = 2, 4$  クォーク演算子の繰り込み因子をドメインウォールクォーク作用と改良されたゲージ作用を用いて摂動的に計算した (論文 5)。ここで重要なことは、標準理論では一種類の 4 フェルミ演算子しか寄与しないが、超対称性粒子が存在すればより多くの種類の  $\Delta S = 2, 4$  クォーク演算子の寄与が許され、今回の計算ではそれらすべての演算子の繰り込み因子を評価したことである。

## (3) 軽いハドロンの散乱

ハドロン散乱長、および散乱位相を格子上の数値計算により計算する場合、これまで有限体積法が使われてきた。その方法では、有限体積での多体ハドロン系のエネ

ルギー固有値を計算し、それから散乱長や散乱位相を算出する。この場合、ハドロン間相互作用の到達距離が、考えている体積よりも小さいという仮定が必要である。これまでの計算では、実際その仮定が満たされているかどうかは完全には考えられていなかった。

この研究では、物理系をアイソスピンが2である2体パイメソン系に限定し、2体波動関数を数値的に計算した(論文7)。更に、計算された波動関数を解析することにより、相互作用の到達距離を求めた。それにより、一辺が3fmの体積であれば、アイソスピンが2である2体パイメソン系では、有限体積法の仮定がほぼ満たされることが分かった。今回の研究を他のハドロン系に応用することは将来の興味深い課題である。

(4) 格子上のカイラルフェルミオンに対する Schrödinger functional の定式化

格子上の Schrödinger functional の定式化に関して、従来の方法では余分なゼロモードが問題となっていた overlap Dirac operator に関して、orbifolding を用いた新しい方法を提唱した(論文8)。

(5) 格子上の超対称性の定式化

格子上の超対称 Yang-Mills 理論について理研の鈴木氏と共同で、2次元には摂動論的な fine tuning を用いて理論が適切に定義できることを議論し、dimensional reduction を用いた定式化を提案した(論文9)。

(6) 格子場の理論を用いた中性子電気双極子モーメントの研究

格子QCDの手法を用いて、クエンチ近似の下中性子の電気双極子モーメント(NEDM)を計算した。NEDM形状因子を3点関数から抜きだし、運動量1点で計算を行ない、NEDMの計算可能性を示唆した(論文12)。また、別のアプローチとして外電場をいれた方法論を用い、ドメインウォール、クローバーフェルミオンでNEDMシグナルがとれる可能性を示した(論文13)。

(7) ウィルソン型クォークのカイラル摂動論の拡張

ウィルソン型クォークのカイラル対称性の破れの効果を取り入れたカイラル摂動論を  $N_f = 2 + 1$  の動的クォークの場合に拡張した。実際にシミュレーションのデータに適用してカイラル外挿をするために、擬スカラー中間子の質量とクォーク質量の関係を計算した(論文14)。ベクター中間子を重い粒子として取り扱うカイラル摂動論の方法に同様にしてカイラル対称性の破れの効果を取り入れ、ベクター中間子の質量とクォーク質量の関係を計算した(論文15)。

(8) twisted mass QCD による ウィルソン型クォークのカイラル摂動論の研究

ウィルソン型クォークの変形として、カイラル領域の性質を改善した twisted mass クォークが提案され、クォークが軽い領域を研究する有望な方法として注目を集めている。上記の、ウィルソン型クォークのカイラル対称性の破れを取り入れたカイラル摂動論の方法を twisted mass QCD に適用し、そこから得られる公式を用いると、いろいろな数値計算の結果を説明できること、また、それを使ってカイラル摂動論の低エネルギー定数を決定できる可能性があること、を示した(論文16)。

### (9) 重いクォークに対する格子作用の研究

重いクォークを現在シミュレーションで用いられている程度の格子間隔で格子化すると格子化誤差が大きく、実用的でない。青木、蔵増らは、格子理論の改良を行うことにより、格子上で重いクォークを取り扱うための新しい格子作用を提唱した。この作用を用いて、どの程度、格子化による誤差が減らせるかを格子 QCD のクエンチ近似を用いて研究した。重いクォークがチャームの場合とボトムの場合を、いろいろな格子間隔で計算し、スケーリングの振る舞いを調べた (論文 6)。

### (10) 格子 QCD による中間子の形状因子の計算

$N_f = 2$  の力学的クォークの寄与を含んだ格子 QCD の計算で中間子の形状因子の研究をした。クォーク作用としては非摂動的に  $O(a)$  改良されたクローバー作用を用いて、K 中間子 (論文 19) と  $\pi$  中間子 (論文 20) の形状因子を計算し、カイラル摂動論の振る舞いなどと比較した。これらの物理量は小林-益川行列要素の決定に重要であり、力学的クォークの寄与を含んだ計算は世界で初めてである。

## 【2】 超弦理論

(石橋 延幸、毛利 健司、佐藤 勇二、村上公一)

### (1) 非臨界弦の理論の非摂動効果

1次元以下の時空で定義された非臨界弦と呼ばれる理論は、通常の弦理論のおもちゃの模型として、長年研究されてきた。特にこの理論を使って一般の弦理論の非摂動効果が通常の点粒子の場合と定性的に異なる形になることがわかってきた。この非摂動効果は D-インスタントンと呼ばれる古典解の寄与と同定されている。

石橋は山口 (KEK) とともに 0次元の非臨界弦における D-インスタントンの化学ポテンシャルの計算に現れる発散の原因を調べ、発散が現れないように計算する方法を与えた。この方法で化学ポテンシャルを計算すると、結果はユニヴァーサルであり、花田等によって得られた値と一致することを示した (論文 21)。

石橋は黒木 (理研)、山口 (KEK) とともに、論文 1 で得られた方法を使って一般に 1次元以下の非臨界弦における D-インスタントンの化学ポテンシャルを計算し、ユニヴァーサルな結果が得られることを示した。(論文 22)。

### (2) 重力理論/ゲージ理論双対性と可解性

弦理論における近年の主要なテーマに、弦 (重力) 理論とゲージ理論の双対性がある。特に、反ドゥジッター時空中の弦とゲージ理論の解析で現れるスピン鎖の対応は、弦/ゲージ理論双対性を、超対称セクターを超えて動力学的に研究する上で重要である。さらに、この対応においては、弦理論・スピン鎖双方に可解構造が現れ、理論・応用双方の観点から興味深い研究が進んでいる。

弦/スピン鎖対応では従来、弦理論側の解析はほぼ古典的なものであったが、この対応の理解には、弦理論側の量子論的な解析が必要となる。佐藤は藤 (KEK) と共に、弦の角運動量が大きい場合に (世界面の理論としての) 量子有効作用を系統的



に評価する方法を考案し、具体的に弦のエネルギーに対する量子補正を求めた（論文 23）。

また、ゲージ理論では、微分を多く含む複合演算子の異常次元は、そのスピン ( $S$ ) が大きい時には  $\log S$  のように振る舞い、ゲージ理論に特有の性質として知られている。佐藤は、酒井 (Ecole Normale Supérieure, Paris) と共に、可解構造を用いて弦の古典スペクトラムを解析し、特に、このようなゲージ理論演算子に対応する弦理論の解が無限に存在することを示した。

### (3) 5次元超重力と双曲型 Kac-Moody Lie 環 $G_2^H$

毛利は溝口 (KEK)、山田 (神戸) と共に 5次元超重力理論と、双曲型 Kac-Moody Lie 環  $G_2^H$  に基づく 1次元シグマ模型の両者の運動方程式の関係を明らかにした。また  $G_2^H$  root ベクトルの  $A_3$  分解の解析により、 $A_3$  1重項と、超重力の高次補正項  $ER^{k+1}$  の系列との対応を示した (論文 24)。

### (4) 行列模型からの higher spin 場の導出

IIB 行列模型に新解釈を与えることにより IIB 行列模型の運動方程式から重力の Einstein 方程式が得られることが最近、花田、川合、木村の研究によって示された。齋藤はこの研究の応用として、IIB 行列模型の運動方程式から bosonic massless higher spin 場に対する自由場の運動方程式が得られることを示した (論文 25)。

### (5) 弦の場の理論と D-ブレーン

弦の理論は D-ブレーンと呼ばれるソリトンを使ってその非摂動的な振る舞いが調べられてきた。ところが、これまでこの D-ブレーンが本当に弦理論のソリトン解として得られるかという問題は問われてこなかった。弦理論の理解が深まるにつれ、このような基本的な問題を理解することはより重要になってきていると考えられる。

馬場、石橋、村上は Osp 不変な閉弦の場の理論において D-ブレーンに対応するソリトン演算子を構築した (論文 26)。これらは偶数個の D-ブレーンまたは ghost D-ブレーンを生成する演算子である。

## <論文>

1. CP-PACS and JLQCD Collaborations: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, K-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, S. Takeda, Y. Taniguchi, N. Tsutsui, A. Ukawa, N. Yamada and T. Yoshié, Nonperturbative  $O(a)$  improvement of the Wilson quark action with the renormalization-group-improved gauge action using the Schrödinger functional method, Phys. Rev. D73, No. 3 (2006) ref. 034501, pp. 1-21.
2. CP-PACS and JLQCD Collaborations: T. Ishikawa, S. Aoki, O. Bär, M. Fukugita, S. Hashimoto, K-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y.

- Kuramashi, M. Okawa, Y. Taniguchi, N. Tsutsui, A. Ukawa and T. Yoshié, Light hadron spectrum and quark masses in 2+1 flavor QCD, PoS(LAT2005)057.
3. A. Ukawa, Hadron spectrum from lattice QCD, Int. J. Mod. Phys. A21 (2006) 726-732.
  4. A. Ukawa, Lattice QCD: Status and prospect AIP Conf. Proc. 815 (2006) 243-250.
  5. Y. Nakamura and Y. Kuramashi, Perturbative renormalization factors for generic  $\Delta S = 2$  four-quark operators in domain-wall QCD with improved gauge action, preprint hep-lat/0603012.
  6. Y. Kuramashi, Quenched scaling study of charm and bottom systems with a relativistic heavy quark action, PoS LAT2005:226,2006.
  7. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, K-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, T. Yamazaki, T. Yoshie, I=2 pion scattering length from two-pion wave functions, Phys.Rev.D71 (2005) 094504.
  8. Yusuke Taniguchi, Schroedinger functional formalism with Ginsparg-Wilson fermion, JHEP 0512 (2005) 037.
  9. Hiroshi Suzuki and Yusuke Taniguchi, Two-dimensional  $N = (2,2)$  super Yang-Mills theory on the lattice via dimensional reduction, JHEP 0510 (2005) 082.
  10. K. Sasaki, S. Sasaki and T. Hatsuda, Spectral analysis of excited nucleons in lattice QCD with maximum entropy method, Phys. Lett. B 623, (2005) 208-217.
  11. K. Sasaki and S. Sasaki, Finite size effect in excited baryon spectroscopy, PoS LAT2005, (2006) 060
  12. CP-PACS collaboration: E. Shintani, S. Aoki, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kikukawa, Y. Kuramashi, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, T. Yoshie Neutron electric dipole moment from lattice QCD, Phys.Rev. D72 (2005) 014504.
  13. E. Shintani, S. Aoki, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kikukawa, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, T. Yoshie, Neutron electric dipole moment from lattice QCD, PoS LAT2005 (2005) 128
  14. S. Aoki, O. Bär, T. Ishikawa, S. Takeda, Pseudo scalar meson masses in Wilson Chiral Perturbation Theory for 2+1 flavors, Phys.Rev. D73 (2006) 014511.
  15. S. Aoki, O. Bär, S. Takeda, Vector meson masses in 2+1 flavor Wilson Chiral Perturbation Theory, Phys.Rev. D73 (2006) 094501 (hep-lat/0601019).
  16. S. Aoki, O. Bär, Determining the low energy parameters of Wilson Chiral Perturbation Theory, PoS LAT2005 (2005) 046.

17. S. Aoki, QCD Phases in Lattice QCD, Int.J.Mod.Phys. A21 (2006) 682-687.
18. PACS-CS Collaboration: S. Aoki, K.-I. Ishikawa, T. Ishikawa, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, K. Sasaki, Y. Taniguchi, N. Tsutsui, A. Ukawa, T. Yoshie, The PACS-CS Project, PoS LAT2005 (2005) 111.
19. JLQCD Collaboration: N. Tsutsui, S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, N. Yamada, T. Yoshie, Kaon semileptonic decay form factors in two-flavor QCD, PoS LAT2005 (2005) 357.
20. JLQCD collaboration: S. Hashimoto, S. Aoki, M. Fukugita, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, N. Tsutsui, A. Ukawa, N. Yamada, T. Yoshie, Pion form factors in two-flavor QCD, PoS LAT2005 (2005) 336.
21. N. Ishibashi and A. Yamaguchi, On the chemical potential of D-instantons in  $c = 0$  noncritical string theory, JHEP 0506:082, 2005.
22. N. Ishibashi, T. Kuroki and A. Yamaguchi, Universality of nonperturbative effects in  $c < 1$  noncritical string theory, JHEP 0509:043, 2005.
23. H. Fuji and Y. Satoh, Quantum fluctuations of rotating strings in  $AdS_5 \times S^5$ , Int. J. Mod. Phys. A (in press)
24. S. Mizoguchi, K. Mohri and Y. Yamada, Five-dimensional Supergravity and Hyperbolic Kac-Moody Algebra  $G_2^H$ , Class. Quant. Grav. 23 (2006), pp. 3181-3194.
25. Takashi Saitou, Bosonic Massless Higher Spin Fields from Matrix Model, arXiv.org:hep-th/0604103, JHEP (in press )
26. Y. Baba, N. Ishibashi and K. Murakami, D-branes and closed string field theory, JHEP 0605:029 (2006).

<著書・総説等>

1. 青木 慎也, 「格子上の場の理論」, シュプリンガー・フェアラーク東京, 2005年10月
2. 宇川 彰, 「格子QCDと強い相互作用の物理」, パリティ 20, No.11 (2005) 28-29
3. 金谷 和至, 「格子QCDによるクォークとハドロンの第一原理計算」, 数理科学 44-3, No.513 (2006) 34-40

## 〈学位論文〉

### [博士論文]

1. 井出 健智

「Nonperturbative renormalization of meson decay constants for a renormalization group improved gauge action (くり込み群によって改良されたゲージ作用に対するメソン崩壊定数の非摂動的くり込み)」

2. 新谷 栄悟

「Neutron electric dipole moment from lattice QCD (格子 QCD による中性子電気双極子モーメントの研究)」

3. 壽崎 義明

「Nonperturbative Studies of Lattice Gauge Theories on Non-commutative Spaces (非可換空間上の格子ゲージ理論の非摂動的な解析)」

### [修士論文]

1. 斎藤 卓

「行列模型と Higher Spin」

2. 村野 啓子

「格子 QCD の有限サイズ scheme を用いた running coupling の計算」

## 〈集中講義〉

1. 石橋延幸 「弦理論入門」 茨城大学 2005 年 7 月 27 日～29 日

## 〈その他特記事項〉

1. 国際会議・国際研究集会の主催・共催

日本学術振興会 先端研究拠点事業「計算素粒子物理学の国際研究ネットワークの形成」(代表: 宇川彰) に基づき、格子場の理論国際研究協力ネットワークの形成と、国際格子データグリッド (ILDG) の構築に関連した、一連の国際会議を主催・共催した。

(a) Nara Workshop “Perspectives in lattice QCD” 31 October – 9 November 2005, International Seminar House, Nara, Japan

主催: 筑波大学計算科学研究センター、素粒子論研究室

参加国数 9 参加者数 45 主催者 蔵増嘉伸他

- (b) 4th International Lattice Field Theory Network Workshop “Lattice QCD via International Network” 8 – 11 March 2006, Graduate School for Advanced Studies (Sokendai), Hayama, Japan  
 主催：筑波大学計算科学研究センター、素粒子論研究室  
 参加国数 5 参加者数 32 主催者 青木慎也他
- (c) “International Lattice Data Grid Middleware Group Workshop 2005 at TSUKUBA”, 27 – 28 October 2005, Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan  
 主催：筑波大学計算科学研究センター、素粒子論研究室  
 参加国数 5 参加者数 20

### <研究成果発表（講演）>

#### [国際会議]

1. 石川智己 「Light hadron spectrum and quark masses in 2+1 flavor QCD」 ,  
 The XXIII International Symposium on Lattice Field Theory (Dublin, Ireland, July 25-30, 2005)
2. 石川智己 「Unquenched spectroscopy with dynamical up, down and strange quarks」 ,  
 The 4th International Lattice Field Theory Network Workshop “Lattice QCD via International Research Network” (Shonan Village Center, Japan, Mar. 8-11, 2006)
3. 宇川 彰 招待講演 「Hadron spectrum from lattice QCD」 ,  
 International conference on QCD and hadronic physics (Beijing, Republic of china, 16-20 June 2005)
4. 宇川 彰 招待講演 「Status of lattice QCD」 ,  
 XXV Physics in collision (Prague, Czech Republic, 6-9 June, 2005)
5. 宇川 彰 「The PACS-CS Project」 ,  
 XXIII International symposium on lattice field theory (Dublin, Ireland, 25-30 July, 2005)
6. 宇川 彰 「Looking back and looking ahead – Lattice QCD in an international setting –」 ,  
 4th International lattice field theory network workshop “Lattice QCD via International Research Network” (Hayama, Japan, 8-11 March 2006)
7. 蔵増 嘉伸 「Quenched scaling study of charm and bottom systems with a relativistic heavy quark action」 ,  
 The XXIII International Symposium on Lattice Field Theory (Trinity College, Dublin, Ireland, July 25-30, 2005)

8. 藏増 嘉伸 「Quenched scaling study of charm and bottom systems with a relativistic heavy quark action」 ,  
The 3rd International Lattice Field Theory Network Workshop “Future Opportunities: Ab Initio Calculations at the Physical Quark Masses” (Jefferson Lab, Newport News, USA, Oct. 3-6, 2005)
9. 谷口 祐介 「Two dimensional  $N=(2,2)$  super Yang-Mills theory on the lattice via dimensional reduction」 ,  
The 3rd International Lattice Field Theory Network Workshop “Future Opportunities: Ab Initio Calculations at the Physical Quark Masses” (Jefferson Lab, Newport News, VA, USA, 3 (Mon) - 6 (Thu) Oct. 2005)
10. 佐々木 潔 「Spectral analysis of excited nucleons and delta baryons from lattice QCD」 ,  
The 5th Circum-Pan-Pacific Symposium on 'High Energy Spin Physics' (Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, July 5-8, 2005)
11. 佐々木 潔 「Excited Baryon Spectroscopy from Lattice QCD: Finite Size Effect and Hyperfine Mass Splitting」 ,  
The XXIII International Symposium on Lattice Field Theory (Trinity College, Dublin, Ireland, July 25-30, 2005)
12. 佐々木 潔 「Excited Baryon Spectroscopy from Quenched Lattice QCD」 ,  
3rd International Lattice Field Theory Network Workshop “Future Opportunities: Ab Initio Calculations at the Physical Quark Masses” (Jefferson Lab, Newport News, USA, Oct. 3-6, 2005)
13. 新谷 栄悟 「Neutron electric dipole moment from lattice QCD」 ,  
The XXIII International Symposium on Lattice Field Theory (Trinity College, Dublin, Ireland, 25-30 Jul 2005)
14. 新谷 栄悟 「Neutron electric dipole moment from lattice QCD」 ,  
3rd International Lattice Field Theory Network Workshop, “Future Opportunities: Ab Initio Calculations at the Physical Quark Masses” (Jefferson Lab, Newport News, October 3-6, 2005)
15. 新谷 栄悟 「Neutron EDM with external electric field」 ,  
4th International Lattice Field Theory Network Workshop, “Lattice QCD via International Research Network” (The Graduate University for Advanced Studies, Shonan Village Center, March 8-11, 2006)
16. 青木 慎也 招待講演 「QCD Phases in Lattice QCD」 ,  
International conference on QCD and hadronic physics (Beijing, Republic of china, 16-20 June 2005)

17. 青木 慎也 「Wilson Chiral Perturbation Theory and the Bending Phenomenon in Twisted-mass Lattice QCD」 ,  
3rd International Lattice Field Theory Network Workshop, “Future Opportunities: Ab Initio Calculations at the Physical Quark Masses” (Jefferson Lab, Newport News, 3-6 October 2005)
18. 青木 慎也 「A comment on automatic  $O(a)$  improvement for twisted-mass QCD」 ,  
“Chiral Perturbation Theory Confronts Lattice QCD” (Valencia, 29-30 November 2005)
19. 石橋 延幸 「An exact bosonization rule for  $c = 1$  noncritical string theory」 ,  
RIKEN Symposium, International Workshop on Liouville Theory and Matrix Model 招待講演 (Wako, June 11-12, 2005)

[国内学会、研究会]

1. 石川智己 「Spectrum and quark masses in 2+1 flavor QCD – results from CP-PACS and JLQCD –」 ,  
KEK Theory Meeting 2006 “Particle Physics Phenomenology” (高エネルギー加速器研究機構, つくば, 2006年3月2日-4日)
2. 石川智己 「Light hadron spectrum in 2+1 flavor unquenched lattice QCD」 ,  
日本物理学会第61回年次大会 (愛媛大学・松山大学, 松山, 2006年3月27日-30日)
3. 新谷 栄悟 「格子QCDによる中性子電気双極子モーメントの研究」 ,  
日本物理学会秋季大会 (大阪市立大学杉本キャンパス, 大阪, 2005年9月12日-16日)
4. 新谷 栄悟 「Neutron electric dipole moment on the lattice」 ,  
KEK 理論研究会 2006 「素粒子物理の現状と展望」 (KEK, つくば, 2006年3月2日-4日)
5. 新谷 栄悟 「Neutron electric dipole moment in lattice QCD」 ,  
日本物理学会年次大会 (愛媛大学, 松山, 2006年3月27日-30日)
6. 佐藤 勇二 「On the spectrum of strings in  $AdS_5 \times S^5$  and integrability」 ,  
KEK 理論研究会 2006 招待講演 (高エネルギー加速器研究機構, つくば, 2006年3月13日-16日)