

# 研 究 活 動

## 1. 素粒子理論グループ

教授 宇川 彰、梁 成吉

助教授 金谷 和至、吉江 友照、青木 慎也

講師 小林 庸浩

助手 石塚 成人、毛利 健司、青木 保道、野口 雅之、R. Burkhalter

COE研究員 江尻 信司、金児 隆志

学振研究員 出淵 卓、谷口 裕介、H.P. Shanahan、T. Manke、A. AliKahn

大学院生 13名

### 【人事異動】

岩崎洋一教授が平成10年4月1日に本学副学長に就任した。R. Burkhalter 助手が平成10年4月1日、毛利健司助手が平成10年7月16日にそれぞれ着任した。小林庸浩講師が平成11年3月31日をもって、筑波技術短期大学教授として転出した。

### 【研究活動】

素粒子理論グループにおいては、格子ゲージ理論の数値的研究と、超対称場の理論および弦理論の研究を二本の柱に、本年度も活発な研究活動が行なわれた。

格子ゲージ理論では、平成8年9月に完成した超並列計算機 CP-PACS を用いた格子 QCD の大型数値シミュレーションに大きな努力が払われた。平成8年度以来行なわれてきたクエンチ近似での軽いハドロンの質量精密計算が終了し、D. Weingarten らによる従来 of the best の結果 (1992 年) を凌駕する結果を得た。それによれば、実験値とクエンチ近似での値には 5-10% の明確な差異が存在する。この結果は、格子上の場の理論国際会議において発表され、1980 年に最初のハドロンのクエンチ近似計算が行なわれて以来の格子 QCD の懸案にほぼ最終的な答えを与えたものとして、注目を集めた。今年度には、次のステップとして、動的クォークの効果を取り入れたフル QCD の計算を開始した。これは、大きな格子間隔でも連続極限に近い結果が得られるよう改善された格子作用を用い、格子間隔  $1/a \sim 1-2\text{GeV}$  の領域を系統的に計算し、連続極限への外挿を目指した大規模シミュレーションで、現在精力的に計算が進められている。また、重いクォークを含んだハドロンの諸性質の研究も並行して進められている。以上の研究は、CP-PACS を有する計算物理学研究センターを中心に、学術振興会研究員として滞在する外国研究者も参加して、国際色豊かに行なわれた。

それに加え、高エネルギー物理学研究所のベクトル型並列計算機 VPP500/80 を用いた格子 QCD の共同研究も引続き追求された。特に、クエンチ近似での K 中間子の B パラメータの Kogut-Susskind 型及び Wilson 型クォーク作用による決定、同じく clover 型クォーク作用による B 中間子崩壊定数の決定など、CP 非保存現象の理解に重要となるハドロンの弱相互作用行列要素の研究を行った。さらに、有限温度相転移や重いクォークを含んだ中間子の崩壊係数などの計算を行った。

以上の大規模な活動と並び、格子上のカイラルフェルミオンの定式化とその応用、電弱相互作用における高温相転移、さらには量子重力の格子模型の研究など、格子ゲージ理論全般にわたる様々のテーマが調べられた。

超対称場の理論および弦理論の分野では、進展著しい超弦双対性の物理を中心に研究を進めた。現在、この分野では 11 次元 M 理論や 12 次元 F 理論の枠組みで、弦理論のコンパクト化、超重力理論とゲージ理論、超対称ゲージ理論の非摂動的構造に関する研究が展開している。その結果、超重力理論の半古典的な解析から共形不変な超対称ゲージ理論についての新しい知見が得られつつある。またストリング接合による例外型ゲージ対称性出現機構の解明も進展した。このような動向を反映して、例外型ゲージ/フレーバー対称性をもつ超対称ゲージ理論、Seiberg-Witten 解の位相的場の理論としての様相、弦理論のコンパクト化の幾何学を用いたモジュライ空間の構成、ストリング接合に基づくゲージ理論の BPS スペクトルの解析などについて活発に研究が進められた。

以上の二分野に加え、量子力学基礎論の研究も引続き追求されている。

## 【1】 格子ゲージ理論

(宇川 彰、金谷 和至、青木 慎也、吉江 友照、石塚 成人、R. Burkhalter、青木 保道、江尻 信司、金兎 隆志、出淵 卓、谷口 裕介、H. Shanahan、T. Manke、A. AliKahn)

### (1) 軽いハドロンの質量、崩壊定数などのクエンチ近似計算

計算物理学研究センターにて開発された超並列計算機 CP-PACS を用いた格子 QCD の数値シミュレーションの為にシミュレーションプログラムを開発・改良し、高い実効性能を確認した(論文 1,56)。これを用いた大規模計算によって、クエンチ近似のハドロン質量スペクトラムの精密計算を遂行し、格子クォークとしてウイルソン・クォークを用いて、連続極限での軽いハドロンの質量を精度 1 ~ 3 % で求めた。それにより、最大 10 % 程度の、実験値との明確な系統的な差異があることをあきらかにし、ハドロン質量計算におけるクエンチ近似の限界をはじめて示した。あわせて、擬スカラー粒子の質量・崩壊定数の解析により、カイラル摂動論で予想されているカイラル極限でのクエンチ近似特有の特異性の存在をあきらかにした(論文 3,15,13,64)。

また、格子クォークとしてウイルソン・クォーク、スタガード・クォーク、及びクローバー・クォークを用いて格子 QCD のクエンチ近似における軽いクォークからなるハドロンの質量、崩壊定数、クォーク質量などを、計算した。これらの物理量の連続極限の外挿値を評価し、それぞれの格子クォークによる結果を比較した(論文 17,49)

素粒子の標準理論の基本的パラメータである混合行列の現象論的解析において重要な役割を果たす、K 中間子のバグパラメータを、格子 QCD のクエンチ近似で、複数の格子クォークを使って数値計算し、連続極限の外挿値を評価した(論文 8,11,12,18,58)。また、K 中間子が  $\pi^0\pi^+$  チャンネルに崩壊するモードの崩壊幅を、ウイルソンクォークを用いた格子 QCD のクエンチ近似の数値計算で求め、カイラル極限への外挿値が実験値と一致する事を確認した(論文 5,19,28,)。さらに、陽子崩壊の研究に関係する、強い相互作用の行列要素を計算した(論文 50)。これら、格子 QCD におけるハドロン質量、崩壊係数、クォーク質量等の計算の現状を系統的にまとめ、総合報告した(論文 14,40,55,63)。

### (2) 改良された格子作用の研究

上記の我々の研究により、クエンチ近似の限界が明らかになった。より強力な予言を行うためには、動的クォークの効果を取り入れた「フル QCD」の計算を行う必要があるが、従来の方法をそのまま拡張したのでは、現実的な計算のために要求される計算量が膨大になり過ぎてしまう。この問題を解決するためには格子作用の改良が重要であろうと考えられている。そうした大規模なフル QCD 計算に向けての第 1 段階として、フル QCD 計算における格子作用の改良の効果を比較研究した。それにより、

1) クォーク作用の改良で、質量の値における有限格子間隔の系統御差を劇的に小さくできること、2) グルオン作用の改良で、クォーク・反クォーク間ポテンシャルの回転対称性が著しく改善されること、を示した(論文7,16,.)。

改良された作用を用いてハドロンの物理量を計算するためには、いくつかの繰り込み因子を新たに計算することが要求される。上記の研究から有望と考えられる、RG improved gluon action および clover action を用いた系において、bilinear quark operator の one loop level の繰り込み因子を摂動論で計算した(論文29,31,37,38,46)。格子QCDのスケーリングの振舞いを改善するために、クローバー項を加えたフェルミオン作用(クローバー作用)が現在広く用いられている。スケーリングの振舞いをよくするためにはクローバー項の係数(クローバー係数)を適当な値にとらなければならないが、その係数の摂動展開/非摂動計算の値はゲージ作用が通常のプラケット作用の場合にしか知られていない。現在、CP-PACS Collaboration ではクローバー作用と繰り込み群によって改良されたゲージ作用の組合わせでフルQCD計算が行われている。ここではクローバー係数には最低次を平均場によって補正した値が用いられている。そこで、今回、摂動計算の1ループでクローバー係数を計算し、現在、CP-PACS で使われている値が1ループの値から数パーセントしかずれていないことを示した(論文39,54)。

### (3) 軽いハドロンのフルQCD計算

上記の研究に基づき、クォーク部分もゲージ部分も改良された格子作用を用いて、軽いハドロンの質量と崩壊定数等のフルQCD計算が開始された。動的なu,dクォークの効果を取り入れることにより、クエンチ近似でみられた実験値との系統的な差異が縮小することを確認した。また、QCDポテンシャルにおける動的クォークの影響も研究し、クォーク相互作用の大きさには動的クォークの効果を確認できるが、弦の切断などのハドロンの生成効果を見るためには、遠距離での高統計データが必要であり、現在の計算では統計が大きく不足していることを示した(論文40,42,44,55)。

### (4) 重いクォークを含んだ中間子の崩壊定数

重いクォークと軽いクォークでできたB中間子やD中間子の崩壊定数を、格子QCDのクエンチ近似で、複数の格子クォークを使って数値計算し、連続極限の外挿値を評価した(論文6,9,20,21,51)。ハドロンの物理量を計算するために必要な、いくつかの繰り込み因子を計算した(論文24)。また、重いクォークを含んだ中間子の諸性質における動的なクォークの効果も、CP-PACSで生成された、改良された格子作用によるフルQCD配位を用いて研究した(論文41,.)。さらに、時間方向により細かい格子を持った非等方格子によるシミュレーションを行い、重いクォークを含んだハドロンの研究で、非等方格子が極めて有用であることを示した(論文57)。

### (5) QCDの有限温度相転移の研究

格子QCDの数値シミュレーションによってQCDの熱力学的諸量を計算するときには、ゲージ場の結合定数を非等方な格子間隔で微分した量(非等方係数)が必要になる。この研究ではその非等方係数の非摂動的な計算方法を提案し、 $SU(2)$ 、 $SU(3)$ ゲージ理論でそれを決定した。またそれを用いてグルーオン・ガスのエネルギー密度と圧力を計算した。今までの一部に摂動計算を用いた計算では、圧力が相転移点で不連続になるという結果が得られ、問題となっていたが、我々の新たに開発した非摂動的な計算方法ではそのような問題は起きず信頼できる結果が得られた(論文30,45)。

ウィルソン・フェルミオンやクローバー・フェルミオンを用いた格子QCDの相構造を、ゲージ作用として改良された作用を用いる場合について数値計算で調べ、標準

作用の場合と同様の複雑な相構造を持つことを確認し、有限温度相転移の様子を研究した(論文 2,25)。また、QCDにおけるクォークの閉じ込めとフレーバ数の関係をウィルソン・フェルミオンを用いた数値シミュレーションにより研究した(論文 35)。

また、こうしたウィルソン型のフェルミオンを用いた QCD の熱力学への解析的知見を得るために、2次元 Gross-Neveu モデルを Wilson フェルミオンを用いて格子上で定式化し、その相構造を解析的に調べ、そこから有限温度・有限密度のもとで連続理論がどのように構成されるかを研究した(論文 32,48)。

スタガード・クォークを用いた数値計算でフレーバ数が2の場合と、より現実的な軽いクォーク2種類、重いクォーク1種類(フレーバ数2+1)の場合について、有限温度 QCD 相転移の性質を調べ、臨界指数と相転移次数を研究した(論文 4,13, 22,52)。

こうした格子 QCD における有限温度計算の手法と現状をまとめ、総合報告を行った(論文 10,34)。

#### (6) 格子上のカイラル・フェルミオンの研究

4次元超対称ゲージ理論のゲージフェルミオンを格子上に実現するために、ドメインウォール形式を応用して質量零のマヨラナフェルミオンを定式化し零質量 fermion mode の安定性の研究やくりこみ方法の開発を行った(論文 23,26,27,36)。その応用として、axial Ward-Takahashi identity に対する one loop 量子補正、3点及び4点クォーク演算子のくりこみ因子の計算を行った。それにより、axial カレントが保存カレントとしての正しい性質を保っておりくりこみを受けないこと、そして axial 対称性から禁止される余分な mixing を受けることなくくりこみが行われることを示した。これはシミュレーションにおいても他のフェルミオンに比べて domain-wall fermion が有利になり得ることを示している(論文 38,61)。

#### (7) 電弱理論の有限温度相転移

SU(2) ゲージヒッグス模型の数値シミュレーションにより実験から分っているヒッグスボゾンの質量下限以下では電弱理論の有限温度相転移は無いことを示し、minimal standard model の範囲内では電弱バリオン生成シナリオは実現不可能であることを指摘した(論文 47,60)。

#### (8) オーバーラップ形式におけるゲージ対称性の復活

格子カイラルゲージフェルミオンの有力な定式化と目されるオーバーラップ形式において、有限の格子間隔ではあらわに破れているゲージ対称性が連続極限での復活について調べた。その結果なめらかなゲージ変換についての対称性はあるが不連続な変換関数に関する singular なゲージ anomaly があり、2次元においては並進対称性が破れることがあるということが分かった(論文 84,85)。

## 【2】 超対称場の理論、弦理論

(梁成吉、毛利健司、野口雅之)

### (1) $E_6$ 型 Seiberg-Witten 幾何

寺嶋と梁は、 $E_6$  型ゲージ対称性をもつ4次元  $N=2$  超対称 QCD において、ハイパー多重項が有質量の場合の低エネルギー有効理論を記述する Seiberg-Witten 幾何を、球面上の ALE ファイブレーションとして決定した。さらに、 $E_6$  ゲージ対称性を Higgs 効果によって  $SU(6)$ 、および  $SO(10)$  対称性へ破ることにより、 $SU$  型ゲージ群の反対称表現や  $SO$  型ゲージ群のスピンル表現に属する  $N=2$  ハイパー多重項と結

合する  $N=2$  超対称ゲージ理論の Seiberg-Witten 幾何を与える方程式を導いた (論文 73)。

(2) 4次元  $N=2$  ゲージ理論と 2次元位相的ストリング理論

梁は伊藤 (京大基研)、Xiong (Beijing) と共に、ADE 型ゲージ対称性をもつ 4次元  $N=2$  超対称ゲージ理論の低エネルギー有効作用の量子モジュライ空間の原点近傍のふるまいが、2次元位相的ストリング理論の相関関数の無限和によって表されることを見いだした (論文 72)。

(3) 4次元位相的ゲージ理論

梁は菅野 (広大理) と共にゼロ質量のクォーク自由度が入った  $N=2$   $SU(2)$  超対称ゲージ理論をツイストして得られる位相的ゲージ理論の経路積分測度を解析し、4次元多様体についての Donaldson-Witten 不変量の一般化を試みた (論文 71)。K3 曲面の場合は、得られた不変量は一般単純型と分類されるものと類似の性質をもつ。さらに、この結果より得られる Seiberg-Witten モノポール方程式の多成分版についても解析を行い、消滅定理を示すことができた。

(4) 例外型フレーバー対称性をもつ超対称ゲージ理論

IIB 型超対称弦理論に特異な 7-brane 背景と 3-brane 探針を導入することにより、3-brane 上には ADE 型の大域的対称性を持つ 4次元の  $N=2$  超対称ゲージ理論が得られる。野口、寺嶋、梁は、これらの理論に対し 7-brane 背景の特異性から 3-brane 上の理論の Seiberg-Witten 微分形式を決定した (論文 74)。

(5) Calabi-Yau 特異点上の D ブレイン

毛利は 4次元 Calabi-Yau 多様体の特異点上に局在する D 1 ブレインの有効理論として、カイラルな超対称性を持つ 2次元のゲージ理論を構成した (論文 75)。また、トーリック幾何学、凸多面体論を駆使して、Higgs モジュライ空間の系統的な解析法をあみだした (論文 76)。

(6) 4次元  $N=2$   $SU(2)$  SQCD の BPS スペクトル

4次元  $N=2$   $SU(2)$  SQCD は、IIB 超弦理論において D3-brane 上の有効理論として実現される。この描像に基づいて、大竹は  $N_f = 2$  でクォーク場に質量を持たせた場合の複雑な BPS スペクトルを、超弦理論の string junction の BPS スペクトルと対応づけて導いた (論文 78)。

### 【3】 物理学基礎論

(小林 庸浩)

(1) 熱力学に対する量子力学

フェルミオン系に対する熱力学を量子力学で作り上げる。温度の表現がボーズ系と異なること、またその意味することも明らかにした (論文 79)。

(2) 物理における同値と量子力学による観測問題

物理現象の同値性は誤差により決まる。誤差による同値性を無矛盾に論理化するには誤差を超準空間の無限小として扱わねばならない。超準空間上の量子力学の状態には誤差による同値性を入れることができ、その同値な状態に関して完全に同等な扱いをすることにより、量子力学の純粋状態が実験で得られる混合状態になることが示される (論文 80,81,82)。

(3) 超準空間上の格子空間と場の理論

超実数空間の閉集合上に無限小の格子間隔を持つ格子点の集合を取る。この集合にはモナドという概念を使うと、実数と1対1対応を持つ空間を埋め込むことができる。この空間では実数空間上の連続変換（平行移動、回転など）が問題なく入り、かつ、実数の1点に対応する集合は自動的に内部空間を持つことがわかる。この内部空間にはクォーク、レプトンの持つ内部対称性だけでなく、内部空間を局所慣性系として扱うことにより一般座標変換も導入できることがわかる（論文83）。

<論文>

1. Y. Iwasaki, The CP-PACS project, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 60A (1998) 246-254
2. S. Aoki, Phase Structure of Lattice QCD with Wilson fermion at Finite Temperature, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 60A (1998) 206-219
3. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, CP-PACS results for quenched QCD spectrum with the Wilson action, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 60A (1998) 14-25
4. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, H. Mino, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, Scaling Analysis of Chiral Phase Transition for Two Flavors of Kogut-Susskind Quarks, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 60A (1998) 188-194
5. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, Lattice QCD calculation of the  $K \rightarrow \pi^+\pi^0$  decay amplitude with the Wilson quark action, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 60A (1998) 89-98
6. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, B meson decay constant and non-relativistic interpretation of Wilson and clover fermion actions for heavy quark, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 60A (1998) 114-123
7. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, Full QCD simulation on CP-PACS, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 60A (1998) 335-340
8. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, The Kaon B-parameter with the Wilson Quark Action using Chiral Ward Identities, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 60A (1998) 67-76
9. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, T. Yoshié, Heavy meson decay constants from quenched lattice QCD, Phys. Rev. Lett. 80, No.26 (1998) 5711-5715
10. K. Kanaya, Order of the finite temperature QCD phase transition on the lattice, Proc. 3rd Intern'l Conference "Physics and Astrophysics of Quark Gluon Plasma"

(JCPA-QGP '97), eds. B.C. Sinha, D.K. Srivastava and Y.P. Voyogi, Narosa Pub., New Delhi (1998) 89-98

11. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, Kaon B parameter from quenched lattice QCD, *Phys. Rev. Lett.* 80, No.24 (1998) 5271-5274
12. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, Lattice QCD Calculation of the Kaon B-parameter with the Wilson Quark Action, *Phys. Rev. Lett.* 81, No.9 (1998) 1778-1781
13. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, H. Mino, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, Scaling analysis of the two-flavor chiral phase transition with the Kogut-Susskind quark action in lattice QCD, *Phys. Rev. D* 57, No.7 (1998) 3910-3922
14. T. Yoshié, Light hadron spectroscopy, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 63 (1998) 3-16
15. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, CP-PACS results for the quenched light hadron spectrum, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 63 (1998) 161-163
16. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneno, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, Hadron spectroscopy and static quark potential in full QCD: A comparison of improved actions on the CP-PACS, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 63 (1998) 221-226
17. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, The Light Quark Masses with the Wilson Quark Action using Chiral Ward Identities, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 63 (1998) 275-277
18. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, Results for Quenched  $B_K$  from JLQCD, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 63 (1998) 281-283
19. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié,  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$  Decay Amplitude in Quenched Lattice QCD, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 63 (1998) 284-286
20. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, B meson decay constant with the Wilson and Clover heavy quark actions, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 63 (1998) 356-358
21. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, K-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, H. Matsufuru, M. Okawa, T. Onogi, S. Tominaga, A. Ukawa, N. Yamada, T. Yoshié, Heavy quark mass dependence of

- semileptonic form factors for B decays, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 63 (1998) 380-382
22. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, H. Mino, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, Two-flavor chiral phase transition in lattice QCD with the Kogut-Susskind quark action, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 63 (1998) 403-405
  23. S. Aoki, Y. Taniguchi, One loop calculation of QCD with domain-wall quarks, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 63 (1998) 290-292
  24. K-I. Ishikawa, S. Aoki, S. Hashimoto, H. Matsufuru, T. Onogi, N. Yamada, Perturbative renormalization parameters for heavy quarks, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 63 (1998) 344-346
  25. S. Aoki, Y. Iwasaki, K. Kanaya, S. Kaya, A. Ukawa, and T. Yoshié, Finite-temperature chiral transitions in QCD with the Wilson quark action, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 63 (1998) 397-399
  26. S. Aoki, K. Nagai, S. V. Zenkin, Lattice fermions with Majorana couplings, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 63 (1998) 602-604
  27. S. Aoki, K. Nagai, The domain-wall model in an asymptotic-free dynamics, Phys. Rev. D 58, No.4 (1998) 45002
  28. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié,  $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$  Decay Amplitude with the Wilson Quark Action in Quenched Lattice QCD, Phys. Rev. D 58, No.5 (1998) 54503
  29. S. Aoki, K. Nagai, Y. Taniguchi, A. Ukawa, Perturbative Renormalization Factors of Bilinear Quark Operators for Improved Gluon and Quark Actions in Lattice QCD, Phys.Rev. D 58, No.7 (1998) 74505
  30. S. Ejiri, Y. Iwasaki and K. Kanaya, Non-perturbative determination of anisotropy coefficients in lattice gauge theories, Phys. Rev. D 58, No.9 (1998) 94505
  31. Y. Taniguchi, A. Ukawa, Perturbative calculation of improved coefficients to  $O(g^2a)$  for bilinear quark operators in lattice QCD, Phys. Rev. D 58, No.11 (1998) 114503
  32. T. Izubuchi, J. Noaki and A. Ukawa, Two-dimensional lattice Gross-Neveu model with Wilson action at finite temperature and chemical potential, Phys. Rev. D 58, No.11 (1998) 114507
  33. T. Hotta, T. Izubuchi, J. Nishimura, Multicanonical simulation of 3D dynamical triangulation model and a new phase structure, Nucl. Phys. B531 (1998) 446-458
  34. K. Kanaya, An Introduction to Finite Temperature Quantum Chromodynamics on the Lattice, Prog. Theor. Phys. Suppl. 131 (1998) 73-105
  35. Y. Iwasaki, K. Kanaya, S. Kaya, S. Sakai and T. Yoshié, Quantum Chromodynamics with Many Flavors, Prog. Theor. Phys. Suppl. 131 (1998) 415-426
  36. S. Aoki, Y. Taniguchi, One loop calculation of QCD with domain-wall quarks, Phys. Rev. D 59, No.5 (1999) 54510

37. S. Aoki, T. Izubuchi, Y. Kuramashi, Y. Taniguchi, Perturbative Renormalization Factors of Quark Bilinear Operators for Domain-wall QCD, *Phys. Rev. D* 59, No.9 (1999) 94505
38. S. Aoki, Y. Taniguchi, One loop renormalization for the axial Ward-Takahashi identity in Domain-wall QCD, *Phys. Rev. D* 59, No.9 (1999) 94506
39. S. Aoki, R. Frezzotti, P. Weisz, Computation of the improvement coefficient  $c_{sw}$  to 1-loop with improved gluon actions, *Nucl. Phys. B* 540 (1999) 501-519
40. R. Burkhalter for the CP-PACS Collaboration, Recent results from the CP-PACS Collaboration, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* (1999) in press
41. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, K. Nagai, M. Okawa, H.P. Shanahan, A. Ukawa, and T. Yoshié, Heavy quark Physics in  $N_f = 2$  QCD, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* (1999) in press
42. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, K. Nagai, M. Okawa, H.P. Shanahan, A. Ukawa, and T. Yoshié, Full QCD light hadron spectrum from the CP-PACS, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* (1999) in press
43. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, K. Nagai, M. Okawa, H.P. Shanahan, A. Ukawa, and T. Yoshié, Quenched Light Hadron Spectrum with the Wilson Quark Action: Final Results from CP-PACS, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* (1999) in press
44. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, K. Nagai, M. Okawa, H.P. Shanahan, A. Ukawa, and T. Yoshié, The static quark potential in full QCD, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* (1999) in press
45. S. Ejiri, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Non-perturbative determination of anisotropy coefficients and pressure gap at the deconfining transition of QCD, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* (1999) in press
46. S. Aoki, K. Nagai, Y. Taniguchi, A. Ukawa, One-loop renormalization factors and mixing coefficients of bilinear quark operators for improved gluon and quark action, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* (1999) in press
47. Y. Aoki, F. Csikor, Z. Fodor, A. Ukawa, The end point of the first-order phase transition of the SU(2) gauge-Higgs model on a four-dimensional isotropic lattice, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* (1999) in press
48. T. Izubuchi, J. Noaki and A. Ukawa, Two-dimensional lattice Gross-Neveu model with Wilson action at finite temperature and density, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* (1999) in press
49. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneda, S. Kaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, T. Onogi, S. Tominaga, N. Tsutsui, A. Ukawa, N. Yamada, T. Yoshié, Non-perturbative

- renormalization factors of bilinear quark operators for Kogut-Susskind fermions and light quark masses in quenched QCD, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) (1999) in press
50. JLQCD Collaboration: N. Tsutsui, S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneda, S. Kaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, T. Onogi, S. Tominaga, A. Ukawa, N. Yamada, T. Yoshié, Hadron matrix elements for nucleon decay with the Wilson quark action, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) (1999) in press
  51. JLQCD Collaboration: K.-I. Ishikawa, N. Yamada, S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneda, S. Kaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, T. Onogi, S. Tominaga, N. Tsutsui, A. Ukawa, T. Yoshié, Scaling behavior of  $f_B$  with NRQCD, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) (1999) in press
  52. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneda, S. Kaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, T. Onogi, S. Tominaga, N. Tsutsui, A. Ukawa, N. Yamada, T. Yoshié, Phase structure of lattice QCD at finite temperature for 2+1 flavors of Kogut-Susskind quarks, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) (1999) in press
  53. MILC Collaboration: C. Bernard, T. DeGrand, C. DeTar, Steven Gottlieb, Urs M. Heller, J. Hetrick, N. Ishizuka, C. McNeile, R. Sugar, D. Toussaint, M. Wingate, Heavy-Light Decay Constants: Conclusions from the Wilson Action, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) (1999) in press
  54. S. Aoki, R. Frezzotti, P. Weisz, Computation of the improvement coefficient  $c_{sw}$  to 1-loop with improved gluon actions, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) (1999) in press
  55. A. Ukawa for the CP-PACS Collaboration, Lattice QCD results from the CP-PACS computer, Parallel Computing (1999) in press
  56. S. Aoki, R. Burkhalter, K. Kanaya, T. Yoshié, T. Boku, H. Nakamura, Y. Yamashita, Performance of lattice QCD programs on CP-PACS, Parallel Computing (1999) in press
  57. CP-PACS Collaboration: T. Manke, H.P. Shanahan, A.A. Khan, S. Aoki, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, K. Nagai, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, Hybrid Quarkonia on Asymmetric Lattices, Phys. Rev. Lett. (1999) in press
  58. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, T. Yoshié, The Kaon B-parameter with the Wilson quark action using chiral Ward identities, Phys. Rev. D (1999) in press
  59. JLQCD Collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, S. Hashimoto, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneda, S. Kaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, T. Onogi, S. Tominaga, N. Tsutsui, A. Ukawa, N. Yamada, T. Yoshié, Non-perturbative determination of quark masses in quenched lattice QCD with the Kogut-Susskind fermion action, submitted to Phys. Rev. Lett.
  60. Y. Aoki, F. Csikor, Z. Fodor, A. Ukawa, The end point of the first-order phase transition of the SU(2) gauge-Higgs model on a 4-dimensional isotropic lattice, Phys.

Rev. D (1999) in press

61. S. Aoki, T. Izubuchi, Y. Kuramashi, Y. Taniguchi, Perturbative renormalization factors of three- and four-quark operators for domain-wall QCD, submitted to Phys. Rev.
62. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Hashimoto, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, and T. Yoshié, Comparative study of full QCD hadron spectrum and quark potential with improved actions, submitted to Phys. Rev.
63. T. Yoshie, Hadron spectroscopy from lattice QCD, Nucl. Phys. A (1999) in press
64. CP-PACS Collaboration: S. Aoki, G. Boyd, R. Burkhalter, S. Ejiri, M. Fukugita, S. Hashimoto, Y. Iwasaki, K. Kanaya, T. Kaneko, Y. Kuramashi, K. Nagai, M. Okawa, H.P. Shanahan, A. Ukawa, and T. Yoshié, Quenched light hadron spectrum, submitted to Phys. Rev. Lett.
67. K. Ito and S.-K. Yang, A-D-E Singularity and Prepotentials in  $N=2$  Supersymmetric Yang-Mills Theory, Int. J. Mod. Phys. A13 (1998) 5373-539
68. S.-K. Yang, Non-Perturbative Aspects of  $N = 2$  Supersymmetric Gauge Theories, Prog. Theor. Phys. Suppl. 131 (1998) 323-336
69. S. Terashima and S.-K. Yang, Exceptional Seiberg-Witten Geometry with Massive Fundamental Matters, Phys. Lett. B430 (1998) 102-108
70. K. Ito and S.-K. Yang, The WDVV Equations in  $N = 2$  Supersymmetric Yang-Mills Theory, Phys. Lett. B433 (1998) 56-62
71. H. Kanno and S.-K. Yang, Donaldson-Witten Functions of Massless  $N=2$  Supersymmetric QCD, Nucl. Phys. B535 (1998) 512-530
72. K. Ito C.-S. Xiong and S.-K. Yang, Seiberg-Witten Theory as  $d < 1$  Topological Strings, Phys. Lett. B441 (1998) 155-16
73. S. Terashima and S.-K. Yang, Seiberg-Witten Geometry with Various Matter Contents, Nucl. Phys. B537 (1999) 344-360
74. M. Noguchi, S. Terashima and S.-K. Yang,  $N=2$  Superconformal Field Theory with ADE Global Symmetry on a D3-brane Probe, hep-th/9903215, to appear in Nucl. Phys. B
75. K. Mohri, D-Branes and Quotient Singularities of Calabi-Yau Four-Folds, Nucl. Phys. B 521 (1998), 161-182
76. K. Mohri, Kähler Moduli Space for a D-Brane at Orbifold Singularities, Commun. Math. Phys. 202 (1999), 669-699 (in press)
77. S. Terashima, Supersymmetric Gauge Theories with Classical Groups via M Theory Fivebrane, Nucl. Phys. B526 (1998) 163-198
78. Y. Ohtake, String Junctions and the BPS Spectrum of  $N=2$   $SU(2)$  Theory with Massive Matters, hep-th/9812227
79. T. Kobayashi, A Model for the Quantum-Mechanical Description of Thermal Equivalence for Fermion Systems, Nuovo Cimento 113B (1998) 633-64

80. T. Kobayashi, Physical Equivalence Based on Observations and Equivalence in terms of Free Ultra-Filters in Quantum Mechanics of Non-Standard Spaces, Proceeding of Symposium on Symmetries in Science X, Olenum Publishing-corp. (1998) 153-163
81. T. Kobayashi, Uncertainties of Physical Observables and Decoherence of Quantum States, Proceeding of the 5th International Wigner Symposium, World Scientific (1998) 518-520
82. T. Kobayashi, Graining of Macroscopic Observables and Decoherence of Quantum States, Nuovo Cimento 113B (1998) 1407-1421
83. T. Kobayashi, Symmetries on Infinitesimal-Lattice Spaces, To appear in Proceeding of the 11th International Conference on Problems of Quantum Field Theories, Dubna, Russia, July 13-17 (1998)
84. T. Izubuchi, J. Nishimura, The restoration of gauge symmetry in the overlap formalism, to appear in Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)
85. T. Izubuchi, J. Nishimura, Translational Anomaly in Chiral Gauge Theories on a Torus and the Overlap Formalism, hep-lat/9903008 submitted to JHEP

<学位論文>

博士論文

1. 寺嶋 靖治  
「Seiberg-Witten Geometry via Confining Phase Superpotential」

修士論文

1. 岡本 昌高  
「Pure SU(3) gluon thermodynamics with RG-improved action」
2. 新堀 敏基  
「Gel'fand の 3 つ組と量子論理」
3. 藤村 佳代子  
「IIB 型ストリング接合と ADE ゲージ対称性の出現」

<講演>

[国内外の国際会議]

1. 宇川 彰 「Issues with the Aoki Phase」 RIKEN-BNL Research Center Workshop “Physics of the 1 TFLOPS RIKEN-BNL-Columbia QCD Project” (BNL, USA, Oct. 16. 1998)
2. 宇川 彰 「Recent results from the CP-PACS Collaboration」 The Centennial Meeting of the American Physical Society (Atlanta, USA, March 23-26, 1999)
3. 梁 成吉 「F-theory Compactification and 4d  $N = 2$  Superconformal Fixed Points」 Workshop on Supersymmetry and Unified Theory of Elementary Particles (Kyoto, Japan, Feb. 1-3, 1999)

4. 青木 慎也 「Computation of the improvement coefficient  $c_{sw}$  to 1-loop with improved gluon actions」 The XVI International Symposium on Lattice Field Theory "Lattice 98" (Boulder, USA, July 13-18, 1998)
5. 金谷 和至 「Full QCD light hadron spectrum from the CP-PACS」 The XVth International Symposium on Lattice Field Theory "Lattice 98" (Boulder, USA, July 13-18, 1998)
6. 吉江 友照 「Quenched Light Hadron Spectrum with the Wilson Quark Action: Final Results from CP-PACS」 The XVth International Symposium on Lattice Field Theory "Lattice 98" (Boulder, USA, July 13-18, 1998)
7. 吉江 友照 「Hadron Spectroscopy from Lattice QCD」 KEK-Tanashi International Symposium on Physics of Hadrons and Nuclei (Tokyo, Japan, Dec. 14-17, 1998)
8. 小林 庸浩 「Symmetries on Infinitesimal-Lattice Spaces」 The XI International Conference on Problems of Quantum Field Theories (Dubna, Russia, July 13-17, 1998)
9. 小林 庸浩 「Physica Equivalence Based on Observations and Equivalence in terms of Free Ultra-Filters in Quantum Mechanics of Non-Standard Spaces」 Symposia on Symmetries in Science (Bregenz, Austria, July 31-August 4, 1998)
10. 石塚 成人 「Non-perturbative renormalization factors of bilinear operators for Kogut-Susskind fermions」 The XVI International Symposium on Lattice Field Theory "Lattice 98" (Boulder, USA, July 13-18, 1998)
11. 青木 保道 「The end point of the first-order phase transition of the SU(2) gauge-Higgs model on a four-dimensional isotropic lattice」 The XVI International Symposium on Lattice Field Theory "Lattice 98" (Boulder, USA, July 13-18, 1998)
12. R. Burkhalter 「Recent results from the CP-PACS Collaboration」 The XVI International Symposium on Lattice Field Theory "Lattice 98" (Boulder, USA, July 13-18, 1998)
13. 金兎 隆志 「The static quark potential in full QCD」 The XVI International Symposium on Lattice Field Theory "Lattice 98" (Boulder, USA, July 13-18, 1998)
14. 江尻 信司 「Nonperturbative determination of anisotropy coefficients and pressure gap at the deconfining transition of QCD」 The XVI International Symposium on Lattice Field Theory "Lattice 98" (Boulder, USA, July 13-18, 1998)
15. H.P. Shanahan 「Heavy quark Physics in  $N_f = 2$  QCD」 The XVI International Symposium on Lattice Field Theory "Lattice 98" (Boulder, USA, July 13-18, 1998)
16. 野秋 淳一 「Two-dimensional lattice Gross-Neveu model with Wilson action at finite temperature and density」 The XVI International Symposium on Lattice Field Theory "Lattice 98" (Boulder, USA, July 13-18, 1998)

[国内]

1. 梁 成吉 「Strong-Coupling Gauge Dynamics and Symmetry Enhancement」 研究会 Summer Institute '98 (京大基研 1998 年 8 月)
2. 金谷 和至 「Phase structure of QCD at high temperatures」 研究会「高温高密度における非摂動現象」(広島テクノプラザ、東広島, Dec. 3-4, 1998)

3. 石塚 成人 「Lattice calculation of scattering length and phaseshift of  $I=2$  two pion system」 日本物理学会第 5 4 回年会 (広島大学、東広島, Mar. 28-31, 1999)
4. 青木 保道 「格子  $SU(2)$  ゲージ・ヒッグス模型における電弱理論の有限温度 1 次相転移の終点」 日本物理学会 (秋田大学、秋田, Oct. 3-6, 1998)
5. R. Burkhalter 「Dynamical quark effects on the light hadron spectrum」 日本物理学会 (秋田大学、秋田, Oct. 3-6, 1998)
6. R. Burkhalter 「Lattice QCD Results from CP-PACS」 筑波大学計算物理学研究センター研究会「CP-PACS による計算物理学」 (筑波大学計算物理学研究センター、つくば, Feb. 16-17, 1999)
7. R. Burkhalter 「Lattice QCD Results from CP-PACS」 Sapporo Winter School in Niseko '99 (北海道, Mar. 18-19, 1999)
8. R. Burkhalter 「Full QCD light hadron spectrum on CP-PACS」 日本物理学会第 5 4 回年会 (広島大学、東広島, Mar. 28-31, 1999)
9. 江尻 信司 「New analysis of equation of state」 研究会「高温高密度における非摂動現象」 (広島テクノプラザ、東広島, Dec. 3-4, 1998)
10. 江尻 信司 「clover クォーク作用によるフレーバー数 2 の full QCD 熱力学」 日本物理学会第 5 4 回年会 (広島大学、東広島, Mar. 28-31, 1999)
11. 金児 隆志 「Dynamical quark effects on the static quark potential」 日本物理学会 (秋田大学、秋田, Oct. 3-6, 1998)
12. 金児 隆志 「Sea quark effects on the hadron spectrum」 日本物理学会第 5 4 回年会 (広島大学、東広島, Mar. 28-31, 1999)
13. 出淵 卓 「Numerical simulation of lattice QCD using Domain-wall fermion」 研究会「格子ゲージ理論のカイラル対称性」 (京都大学、京都、1999年2月)
14. 出淵 卓 「Translational Anomaly in Chiral Gauge Theories and the Overlap Formalism」 研究会「格子ゲージ理論のカイラル対称性」 (京都大学、京都、1999年2月)
15. 出淵 卓 「Lattice QCD with domain-wall fermions」 日本物理学会 (広島大学、広島、1999年3月)
16. 寺嶋靖治 「Exceptional Seiberg-Witten Geometry with Massive Fundamental Matters」 日本物理学会分科会 (秋田大学、秋田、1998年10月)
17. 大竹 由記子 「BPS spectrum of  $N=2$   $SU(2)$  SQCD from the D3-probe realization」 日本物理学会年会 (広島大学、広島、1999年3月)
18. 野秋 淳一 「Lattice Gross-Neveu model の有限密度・有限温度相構造 II」 日本物理学会 (秋田大学、秋田, Oct. 3-6, 1998)
19. 野秋 淳一 「Glasgow アルゴリズムによる有限密度格子 QCD の研究」 日本物理学会第 5 4 回年会 (広島大学、東広島, Mar. 28-31, 1999)
20. 岡本 昌高 「くりこみ群により改良された作用」を用いた Pure  $SU(3)$  gauge 系の熱力学の数値シミュレーション」 日本物理学会 (秋田大学、秋田, Oct. 3-6, 1998)
21. 岡本 昌高 「Pure  $SU(3)$  gluon thermodynamics with RG-improved action」 日本物理学会第 5 4 回年会 (広島大学、東広島, Mar. 28-31, 1999)