

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 藏増 嘉伸

助手 佐藤 勇二、谷口 祐介、毛利 健司

研究機関研究員 佐々木 潔

研究員 石川 智己、石井 理修、加堂 大輔、浮田 尚哉、梅田 貴士

筑波大学博士研究員 井出 健智、新谷 栄悟、壽崎 義明

大学院生 (18名)

【人事異動】

石川 智己氏が2006年10月に米国理研BNL研究センターに博士研究員として転出した。加堂 大輔氏、浮田 尚哉氏が2006年9月に、石井 理修氏が2006年10月に、梅田 貴士氏が2007年2月に、それぞれ研究員として着任した。

【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。昨年引き続き、CP-PACS/JLQCD Collaborations は、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の研究を引き続いて行い、得られた結果を論文にまとめた。2006年7月に計算科学研究センターの次期並列計算機として PACS-CS が導入されたので、新たな研究グループとして PACS-CS Collaboration を立ち上げ、 $N_f = 3$ QCD の大規模シミュレーションを開始した。この研究の最大の目的は、u, d クォークの質量をより軽くして物理的なクォーク質量に近い値で計算を行うことにある。一方、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では2006年3月から大型計算機設備が更新され、IBM BlueGene/L と日立 SR-11000 が導入された。JLQCD Collaboration はこれらの計算機を使って、格子上での厳密なカイラルを持つオーバーラップ・フェルミオン作用を用いた力学的クォークの数値シミュレーションを開始した。また、これらの研究と並行して、有限温度・有限密度 QCD の研究、 ρ 中間子崩壊幅の計算、U(1) 問題の研究、非摂動繰り込みの研究、ハドロン散乱の位相差の研究、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、twisted mass QCD の理論的考察なども行われた。

超弦理論の分野では弦の場の理論、行列模型、超弦理論とゲージ理論との対応という3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、閉じた弦の場の理論における 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、弦の場の理論と D-ブレーン、弦理論/スピン鎖対応、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、佐々木 潔、石川 智己、石井 理修、加堂 大輔、浮田 尚哉、梅田 貴士、井出 健智、新谷 栄悟)

(1) PACS-CS Collaboration 及び CP-PACS/JLQCD Collaboration の活動

計算科学研究センターでは、平成17年度から3ヵ年計画で特別教育研究経費（拠点形成）を受けて開発・製作が進められてきた超並列クラスタ計算機PACS-CS（計算ノード数2560、ピーク演算性能14.3Tflops）が平成18年7月から稼働を始めた(図1)。これを受けて、物理学系のメンバーが中心となり、PACS-CSを主要な設備として格子QCDの研究を行うPACS-CS Collaborationが結成されて活動を始めた。PACS-CSではdomain分割により長波長揺らぎと短波長揺らぎを分離するdomain-decomposed HMCを適用してup, down, strangeすべての軽いクォークを動的に扱うシミュレーションを行い、QCDに関する近似のない物理予言を引き出すことを目標としている。これは、平成17年度までの、CP-PACS/JLQCD Collaborationによる研究を引き継ぐものである。平成18年度の進捗状況は以下のとおりである。

a) プログラム開発

現実的なまでに軽いクォークでのシミュレーションを可能とすると期待される領域分割HMCプログラムの開発を年度当初に一応完了し、7月のPACS-CS稼働開始と同時に256ノードパーティション上での計算テストを開始した。その後、特にDirac行列の逆計算部分に様々なアルゴリズム改良・パラメータチューニングを実施し、年度末には実効速度を年度初めの約2倍に加速することができた(論文8)。現在、当該バージョンを用いている。

b) 物理課題研究の計算開始

平成18年9月より物理計算を開始した。当該時点までに行ったテスト計算により、領域分割HMCプログラムによって、自然界に対応するような軽いup-downクォークでのシミュレーションが可能と考えられること、その場合、重粒子についても有限サイズ効果が小さい結果を得るには空間サイズを3fmは必要であること、等の考慮から、格子間隔 $a=0.1\text{fm}$ の計算について、格子サイズを 323×64 、とすることとし、256ノードパーティションを用いて10月より本格計算に入った。クォーク質量は、ストレンジクォーク質量 m_s については、平成17年度までにCP-PACS/JLQCDで行った計算から推測される物理ポイ



図 1: 2006 年 7 月から筑波大学計算科学研究センターで稼働を開始した超並列計算機 PACS-CS。

ントに固定し、u-d クォーク質量は $m_{ud} = 40, 22, 12, 6\text{MeV}$ を当面の目標とすることとした。 m_{ud} の最後の点は、 $m_{\pi} \approx 200\text{MeV}$ であり、従来の Wilson 型クォーク作用でのシミュレーションでは考えられなかったほど軽い。また自然界の点 $m_{\pi} = 140\text{MeV}$ まで、後一步であり、この点がシミュレーションできれば格子 QCD に取り画期的な成果となる。平成 18 年度末までの約 7 ヶ月の計算により、 $m_{ud} = 40, 22, 12, 6\text{MeV}$ の点について、各々 100, 500, 500, 100 のグルオン配位が生成され、ハドロン伝播関数の計算が行われた。予備的質量解析によれば、メソン質量だけでなく、バリオン質量、メソンの崩壊定数などの分光学的基本量が、実験と良い一致を示し、メソンの崩壊定数について、カイラル摂動論の予言に従う曲率を示唆する結果が得られている。以上と並んで、クォーク質量の繰り込み定数及び強い相互作用結合定数の非摂動的決定のためのコード開発、 ρ 中間子の崩壊幅の計算（この方法は将来的に CP 非保存の計算などの実現にも重要な技術を与える）等、本課題の目標とするテーマが推進された。以上の結果は、2006 年 Lattice 国際会議などで発表された（論文 1,4）。また、CP-PACS/JLQCD で行われた計算を軽いクォーク質量の連続理論値の評価を中心に論文として取り纏め発表した（論文 5,6）。

(2) 軸性カレントも改良係数の非摂動的決定

論文 17 では、パイ中間子の崩壊定数の計算に必要な軸性カレントの改良係数 c_A を $n_f = 3$ の場合に非摂動的な計算で決定した。ここで求められた c_A を用いることで、 $n_f = 3$ の格子 QCD のシミュレーションから得られる崩壊定数のスケージングの破れから $O(a)$ の寄与を完全に排除することができるようになった。

(3) ρ 中間子崩壊幅の計算

ハドロン間相互作用の深い理解の為に、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第一原理から定量的に評価し、実験値と比較することが非常に重要である。これまでの格子 QCD の計算では、不安定粒子の存在しない、すなわち共鳴状態が存在しない簡単な系での散乱位相の計算のみが行われていた。

この研究では、アイソスピンが1である2体中間子系の散乱位相の計算を行った。この系では不安定粒子として ρ 中間子が存在する。更に、散乱位相の計算結果を元に ρ 中間子の崩壊幅、共鳴エネルギーを計算した(論文2)。これらの量はこれまで、散乱位相から直接ではなく、適当な仮定のもとで遷移振幅から求められていた。散乱位相からの第一原理計算はこれまで無かった。

図.2 に、散乱位相 $\sin^2 \delta$ (下図) と、共鳴質量 M_R (上図) の結果を載せた。図中での Cont と Lat は、二つの重心系エネルギーの算出方法での結果であり、両者の違いは格子化したときの離散化による誤差を意味する。散乱位相得た崩壊幅の値は 162 ± 35 MeV (Cont)、 140 ± 27 MeV (Lat) であり、実験値 150 MeV をよく再現している。

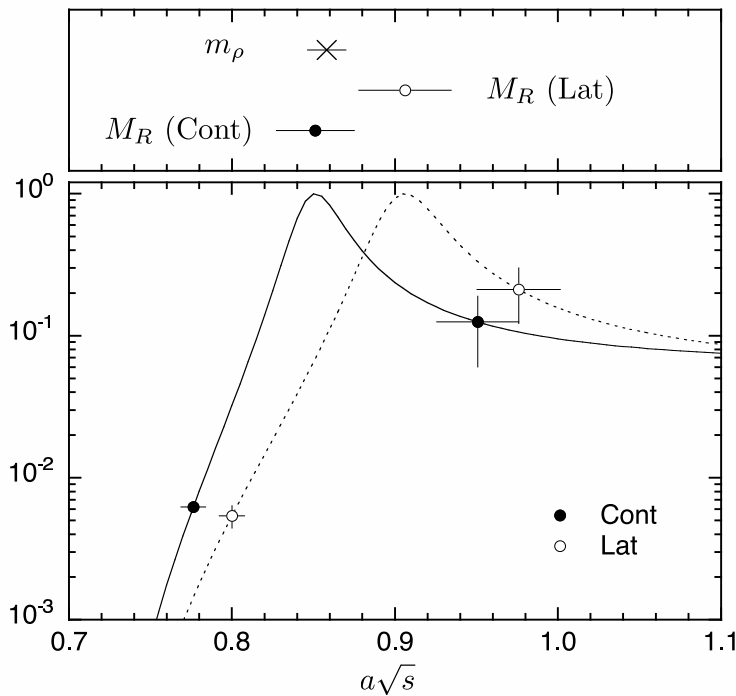


図 2: $I = 1$ 2 体 π 中間子系の散乱位相 $\sin^2 \delta$ (下図) と、共鳴質量 M_R (上図)。横軸は重心系エネルギー。

(4) U(1) 問題の定量的解決に向けての研究

CP-PACS/JLQCD Collaboration で生成した近似無し格子 QCD(Nf=2+1) 配位の内、最も荒い格子上の配位を用いて、eta 中間子、eta' 中間子質量を、u,d,s クォークの混合を解き、カイラル外挿を行って評価した。「eta 中間子質量は実験値と無矛盾で、eta' 中間子質量は実験値よりわずか 100MeV だけ小さい」という結果を得た (論文 3)。これは、U(1) 問題の定量的解決、つまり、他の擬スカラー中間子より圧倒的に重い eta' 中間子の質量を再現する問題の、定量的解決につながり得る、有望な結果である。

(5) 有限温度・有限密度 QCD の研究

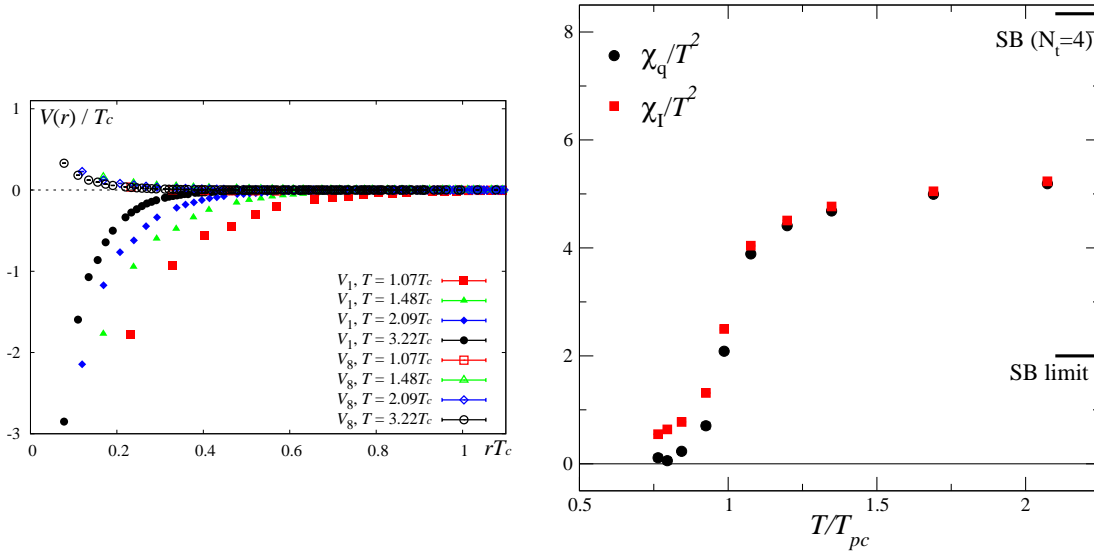


図 3: 有限温度・有限密度 QCD の研究。左図は、密度ゼロ、高温相におけるカラー 1 重項チャンネルと 8 重項チャンネルのクォーク・反クォーク間ポテンシャルの結果 (論文 2)。下側が 1 重項チャンネルで、「引力」になっている。他方、上側の 8 重項チャンネルは「斥力」となっていることがわかる。これらの振る舞いは、摂動最低次のカシミア係数の違いでよく表される。右図は、密度ゼロにおけるクォーク数密度のゆらぎ (黒) とアイソスピン密度の揺らぎ (赤) の温度依存性 (論文 1)。スタガード型クォークの結果と定性的に一致している。

フレーバー数 2 の動的クォークを含む QCD の有限温度・有限密度における性質を研究した。有限温度・有限密度 QCD の研究は、スタガード型クォークによる研究が先行しているが、格子化誤差を評価し、連続極限における信頼できる予言を行うためには、ウィルソン型クォークなど、他の格子クォークを使った研究が不可欠である。我々は、改良ウィルソン型クォーク (クローバークォーク) と岩崎改良ゲージ作用を組み合わせた作用を、厳密なアルゴリズムを用いてシミュレーションを実行した。第一段階として、密度ゼロでの、相転移温度、クォーク間力の温度依存性、及び、クォーク数密度のゆらぎの温度・密度依存性を研究した (論文 9,10,11, 12)。

図 3 を参照。現在、有限密度の場合に拡張する研究を進めている。

(6) 格子 QCD を用いた核力の研究

2つの核子の間に働く力、核力は、中距離では引力、近距離では強い斥力になることが実験的に知られているが、この核力の性質、特に近距離での斥力(斥力芯と呼ばれている)を理論的に導くことは、素粒子原子核物理に残された大問題の1つである。青木、石井は東京大学の初田との共同研究で、核子間のポテンシャルを格子 QCD の方法で計算した。CP-PACS Collaboration がパイ中間子散乱の位相差を計算するために定義した2つのパイ中間子に対応する波動関数を2核子の場合に拡張し、その波動関数からポテンシャルを計算するという方法を使った。格子 QCD のクエンチ近似で得られたポテンシャルを図4に載せる。中長距離の引力と遠方での斥力が再現されている。研究結果は論文 24、論文 25 として発表された。

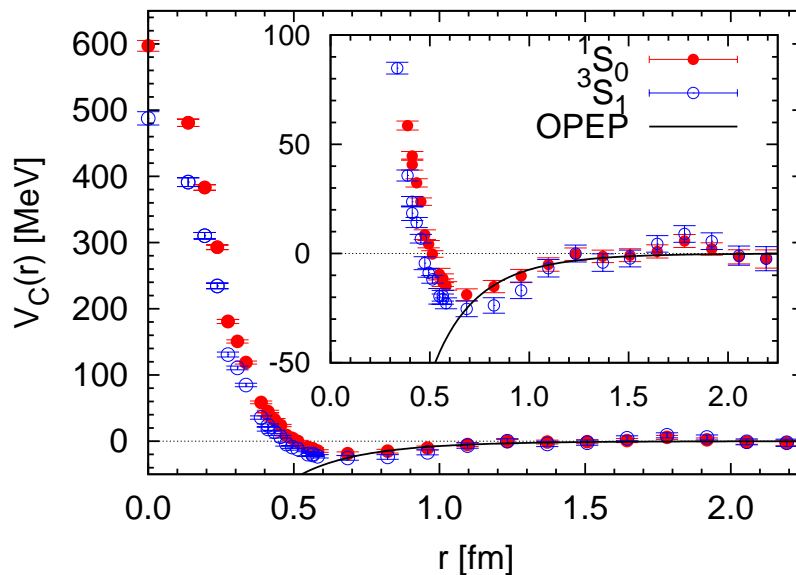


図 4: 格子 QCD のクエンチ近似計算で得られた 2 核子間のポテンシャル。●は核力のスピン 1 重項成分、○はスピン 3 重項の成分であり、実線は湯川ポテンシャルの寄与である。

(7) 二体波動関数を用いたハドロン散乱の位相差に関する研究

ハドロン間相互作用の深い理解を得るために、ハドロン散乱における位相差を評価する事は重要である。有限体積で散乱位相差を評価するための方法には、ハドロン間の相互作用距離が格子サイズの半分より小さくならない、という適用条件が存在する。相互作用距離の評価には、二体波動関数を用いる方法が有効である。過去に、入射エネルギーが非常に小さい状況におけるアイソスピン 2 のパイ中間子二体系に関して、この波動関数が評価され、

適用条件の成立が調べられた。本研究は、これを 20 倍程度大きな入射エネルギーを伴う状況へ拡張した。

結論として、考察中のパラメータ領域 ($m_\pi^2 = 0.18 - 0.35 \text{ GeV}^2$) において、相互作用距離が急激に変動する事はなく、3.5 fm 程度のサイズの格子を用いて、十分に信頼出来る解析が可能な事を見出した。さらに、二体波動関数を用いた散乱位相差の評価も行ない、時間相関関数を使用する従来の手法と比較して、統計精度を著しく向上させる事を見出した。本研究の成果は、現在、論文としてまとめている最中である。

(8) 厳密なカイラル対称性を持つクォーク作用を用いた研究

JLQCD Collaboration は、格子上で厳密なカイラル対称性を持つオーバーラップ・フェルミオンを力学的クォーク作用に用いた $N_f = 2$ の格子 QCD の数値シミュレーションを開始した。この計算では、カイラル対称性のおかげで、スケーリングの破れに $O(a)$ はないが、通常の計算に比べて数十倍の計算コストがかかる。KEK に導入された新しいスーパーコンピュータである BlueGene/L を使うことで、膨大な計算コストの一部は吸収できるが、それでも足りないので、その計算コストを下げるための方策をいろいろ検討した。ゲージ場のトポロジを固定することで、ウィルソン型演算子の固有値の値を大きくし、計算時間を削減したり、大規模逆行列の計算方法の加速、ゲージ場の生成方法である HMC 法の改良などを行った (論文 18, 19, 21)。その最初の成果として、比較的小さな体積で軽いクォークの場合である ϵ 領域での計算を世界で初めて力学的クォークを用いて行った。その結果、カイラル対称性の自発的破れの秩序変数を決定することができた (論文 16)。

(9) 4 体フェルミ演算子の非摂動的繰り込み定数の計算

orbifolding を用いた格子上の Schrödinger functional の定式化を domain-wall fermion に適用し (論文 23)、その具体的な応用として Kaon B-parameter の非摂動的な繰り込みを行った。

(10) twisted mass QCD の $O(a)$ 改良の考察

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。この理論はツイスト角が最大になると $O(a)$ のスケーリングの破れがなくなると期待されている。この性質は、「自動的な $O(a)$ 改良」と呼ばれている。我々は、最大ツイスト角がどのような時に成り立つかを対称性を用いて議論し、最大ツイスト角での「自動的な $O(a)$ 改良」を証明した。また、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、実際にどのように「自動的な $O(a)$ 改良」が実現されるかを示した。これらの結果は論文 13 や論文 22 に発表された。

(11) 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、中性子の電気双極子モーメント (NEDM) を計算を行った。昨年とは別のアプローチとして、外電場をいれた方法を用いてクエンチ近似の場合に NEDM を計算し、ドメインウォール・フェルミオン、クローバー・フェルミオンのどちらでもシグナルが取れることを示した。また、クローバー・フェルミオンを用いて NEDM のクォーク質量依存性を評価した (論文 14)。さらに、クローバー・フェルミオンの場合に力学的クォークの寄与を含んだゲージ配位を用いて、外場法によって NEDM を計算した (論文 20)。

(12) 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ると格子化誤差が大きく、実用的でない。青木、藏増らは、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 (論文 15)。

【2】 超弦理論

(石橋 延幸、毛利 健司、佐藤 勇二)

(1) 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運動方程式の解なのかということは問われてこなかった。弦理論を用いて素粒子の模型を構築する際、このような基本的な問題が非常に重要になる。

石橋、馬場は村上 (KEK) とともに O_{Sp} 不変な閉弦の場の理論においては D-ブレーンは BRS 不変な演算子として実現できるのではないかと提案をした。この提案を更に研究するため、 O_{Sp} 不変な閉弦の場の理論における BRS 不変な観測量を分類し、弦理論に含まれる粒子に対応するものを同定した。また、これらの粒子の S 行列をどの様に計算すればよいかを示した (論文 26)。

(2) ゲージ理論/重力理論双対性における可解構造

弦理論の主要なテーマの一つにゲージ理論/重力理論の双対性がある。特に、 $AdS_5 \times S^5$ 中の弦理論と $\mathcal{N} = 4$ 超対称ゲージ理論の対応は、AdS/CFT (共形場理論) 対応と呼ばれている。この研究において、近年、弦理論側を記述するシグマ模型が古典的に可解であり、また、ラージ N (カラー) 摂動論の低次でゲージ理論演算子の異常次元が可解なスピン鎖模型のハミルトニアンで表されることがわかり、弦理論、ゲージ理論、双方の可解構造が明らかになってきた。この発見により、強/弱結合対応のために解析が困難であった、超対称セクターを超えた AdS/CFT 対応が議論できるようになり、弦理論の大きな成果の一つとなっている。さらに、弦の古典近似/ゲージ理論の低次の摂動近

似にとどまらずにこれらの可解構造が保たれ、双方の理論は完全に可解であると期待されており、様々な状況証拠が積み上げられている。

このような進展と関連し、佐藤は酒井（慶応義塾大学）と共に次のような研究をおこなった。

- (a) (i) ゲージ理論の低ツイスト演算子に対応する弦の古典解を解析し、異常次元が角運動量 $S \gg 1$ について対数 ($\log S$) 的にスケールするというゲージ理論に特徴的な振る舞いが、弦理論側でも一般的に見られることを示した（論文 27）。
- (b) (ii) ゲージ理論/弦理論のスペクトルは、対応する可解モデルのベータ方程式にスカラー因子を導入することで結びつけられることが議論されている。このスカラー因子の意味は謎であったが、実は、物理的な真空が非自明な配位を持っている時に現れる有効的な位相因子であることを示した。この結果は、スカラー因子は手で与えられるのではなく、背後にある可解モデルの真空を正しく選ぶことで自然に導かれ、弦/ゲージ理論、双方のスペクトラムが自己完結的に決まっていることを示唆しており、この分野の重要な結果の一つとなっている（論文 28）。

(3) 行列模型を用いた higher spin 場の理論の研究

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 29）。また、超行列模型とスピン $(3,5/2)$ を持つ質量 0 の 4 次元 $N=1$ 超対称多重項の場の理論との関係を自由場の場合について調べ、この超対称場の理論の運動方程式の解は超行列模型の運動方程式を満たすことを示した（論文 30）。

(4) 1次元の非臨界弦の場の理論

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。この理論を用いて D-ブレーンとは何かという疑問について理解が進んでいる。石橋は山口（KEK）とともに 1次元の非臨界弦の場の理論を構築し、D-ブレーンに対応するフェルミオニックな演算子を弦の場で厳密に表す公式を与えた（論文 31）。

<論文>

1. PACS-CS Collaboration: A. Ukawa, S.Aoki, K.-I.Ishikawa, T.Ishikawa, N. Ishizuka, K.Kanaya, Y.Kuramashi, N. Tsutsui, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, T. Yoshie, Status and physics plan of the PACS-CS Project, Proceedings of Science (Lattice 2006) 039.
2. CP-PACS collaboration: S. Aoki, M. Fukugita, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, K. Sasaki, A. Ukawa, T. Yoshie, ρ meson decay from the lattice, Proceedings of Science (Lattice 2006) 110.
3. CP-PACS/JLQCD Collaborations: S. Aoki, M. Fukugita, K.-I. Ishikawa, T. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Yamada, T. Yoshie, An estimate of the η and η' meson masses in $N_f = 2 + 1$ lattice QCD, Proceedings of Science (Lattice 2006) 204.
4. PACS-CS Collaboration: Y. Kuramashi, S. Aoki, K.-I. Ishikawa, T. Ishikawa, N. Ishizuka, K. Kanaya, N. Tsutsui, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, T. Yoshie, 2+1 Flavor Lattice QCD with Lüscher's Domain-Decomposed HMC Algorithm, Proceedings of Science (Lattice 2006) 029.
5. CP-PACS/JLQCD Collaborations: T. Ishikawa, S. Aoki, 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, N. Yamada, T. Yoshie, Light quark masses from unquenched lattice QCD, hep-lat/0704.1937 (2007).
6. CP-PACS/JLQCD Collaborations: T. Ishikawa, S. Aoki, 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, N. Yamada, T. Yoshie, 2+1 flavor light hadron spectrum and quark masses with the $O(a)$ improved Wilson-clover quark formalism, Proceedings of Science (Lattice 2006) 181.
7. CP-PACS Collaboration: Y.Nakamura, S.Aoki, M.Fukugita, N.Ishizuka, Y.Iwasaki, K.Kanaya, Y.Kuramashi, J.Noaki, M.Okawa, Y.Taniguchi, A.Ukawa, T.Yoshie, Kaon B -parameters for Generic $\Delta S = 2$ Four-Quark Operators in Quenched Domain Wall QCD Proceedings of Science (Lattice 2006) 089.
8. PACS-CS Collaboration: K.-I.Ishikawa, S.Aoki, T. Ishikawa, N.Ishizuka, K.Kanaya, Y.Kuramashi, M.Okawa, Y.Taniguchi, A.Ukawa, T.Yoshie, An application of the UV-filtering preconditioner to the Polynomial Hybrid Monte Carlo algorithm, Proceedings of Science (Lattice 2006) 027.

9. WHOT-QCD Collaboration: S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki, K. Kanaya, Equation of state for two-flavor QCD with an improved Wilson quark action at non-zero chemical potential, Proceedings of Science (Lattice 2006) 132.
10. WHOT-QCD Collaboration: Y. Maezawa, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, N. Ukita, S. Aoki, K. Kanaya, Static quark free energies at finite temperature with two flavors of improved Wilson quarks, Proceedings of Science (Lattice 2006) 141.
11. WHOT-QCD Collaboration: N. Ukita, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa, S. Aoki, K. Kanaya, Finite temperature phase transition of two-flavor: QCD with an improved Wilson quark action, Proceedings of Science (Lattice 2006) 150.
12. WHOT-QCD Collaboration: Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, Heavy-Quark Free Energy, Debye Mass, and Spatial String Tension at Finite Temperature in Two Flavor Lattice QCD with Wilson Quark Action, Phys. Rev. D75(2007) 074501.
13. Sinya Aoki, Oliver Bär, Automatic $O(a)$ improvement for twisted-mass QCD in the presence of spontaneous symmetry breaking, Phys.Rev. D74 (2006) 034511.
14. E. Shintani, S. Aoki, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kikukawa, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, T. Yoshie, Neutron electric dipole moment with external electric field method in lattice QCD, Phys.Rev. D75 (2007) 034507.
15. CP-PACS Collaboration: Y. Kayaba, S. Aoki, M. Fukugita, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, T. Yoshie, First Nonperturbative Test of a Relativistic Heavy Quark Action in Quenched Lattice QCD, JHEP02 (2007) 019.
16. JLQCD collaboration: H. Fukaya, S. Aoki, T.W. Chiu, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, K. Ogawa, M. Okamoto, T. Onogi, N. Yamada, Two-flavor lattice QCD simulation in the epsilon-regime with exact chiral symmetry, hep-lat/0702003, Physical Review Letters in press.
17. T.Kaneko, S.Aoki, M.Della Morte, S.Hashimoto, R.Hoffmann, R.Sommer, Non-perturbative improvement of the axial current with three dynamical flavors and the Iwasaki gauge action, hep-lat/200703006, JHEP in press.
18. JLQCD Collaboration: N. Yamada, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, K-I. Ishikawa, K. Kanaya, T. Kaneko, H. Matsufuru, M. Okamoto, T. Onogi, Mobility edge and locality of the overlap-Dirac operator with and without dynamical overlap fermions, Proceedings of Science (Lattice 2006) 060.

19. JLQCD Collaboration: S. Hashimoto, S. Aoki, H. Fukaya, K. Kanaya, T. Kaneko, H. Matsufuru, M. Okamoto, T. Onogi, N. Yamada, Dynamical overlap fermion at fixed topology, Proceedings of Science (Lattice 2006) 052.
20. E. Shintani, S. Aoki, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, T. Yoshie, Calculation of Neutron EDM in quenched and full QCD, Proceedings of Science (Lattice 2006) 123.
21. JLQCD Collaboration: T.Kaneko, S.Aoki, H.Fukaya, S.Hashimoto, K-I.Ishikawa, K.Kanaya, H.Matsufuru, M.Okamoto, M.Okawa, T.Onogi, A.Ukawa, N.Yamada, T.Yoshie, JLQCD's dynamical overlap project, Proceedings of Science (Lattice 2006) 054.
22. Sinya Aoki, Oliver Bär, Automatic $O(a)$ improvement for twisted-mass QCD, Proceedings of Science (Lattice 2006) 165.
23. Yusuke Taniguchi, Schroedinger functional formalism with domain-wall fermion, JHEP **0610** (2006) 027.
24. N.Ishii, S.Aoki, T.Hatsuda, Nuclear Force from Lattice QCD, nucl-th/0611096, Physical Review Letters in press.
25. N.Ishii, S.Aoki, T.Hatsuda, Nuclear Force from Lattice QCD, Proceedings of Science (Lattice 2006) 109.
26. Y. Baba, N. Ishibashi and K. Murakami, Observables and correlation functions in OSp invariant string field theory, JHEP0705:020,2007.
27. K. Sakai and Y. Satoh, A large spin limit of strings on $AdS_5 \times S^5$ in a non-compact sector, Phys. Lett. B 645 (2007) 293-298.
28. K. Sakai and Y. Satoh, Origin of dressing phase in $\mathcal{N} = \Delta$ Super Yang-Mills, preprint, arXiv:hep-th/0703177.
29. Takashi Saitou, Bosonic Massless Higher Spin Fields from Matrix Model, JHEP0606:010,2006.
30. T. Saitou, Superfield formulation of 4D, N=1 massless higher spin gauge
31. N. Ishibashi and A. Yamaguchi, An exact bosonization rule for $c=1$ noncritical string theory, arXiv:0704.2960.

<著書・総説等>

1. 宇川 彰, 場の量子論とくりこみ理論の半世紀, 科学 76, No.4 (2006) 369-374.

2. 宇川 彰, 時空格子上の量子力学, 学術月報 59, No.6 (2006) 37-40
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.
4. 金谷 和至, 物理学専攻における大学院教育, 筑波フォーラム 72 (2006) 55-58.
5. 金谷 和至, 「くりこみ」が拓く量子の世界, 日経サイエンス 2006/11 36, No.11 (2006) 32-41.
6. 湯川・朝永生誕百年企画展委員会編集、佐藤文隆監修（江沢洋、小沼通二、西山伸、金谷和至、遠藤里佳、佐藤文隆）, 素粒子の世界を拓く – 湯川秀樹・朝永振一郎の人と時代, 学術選書 017 (京都大学学術出版会) (2006) 1-235.
7. 青木 慎也, 講座：計算物理 (連載 6 回)、パリティ 21, No.4 (2006/4)– 22, No.2 (2007/2).

<学位論文>

[修士論文]

1. 杉田 綾子
「クォーク・グルーオン・プラズマ生成のシグナルとしての J/ψ 抑制効果の検証」
2. 成田 圭輔
「軽い動的クォークを取り入れた現実的な格子 QCD シミュレーションに向けたアルゴリズムの改良」
3. 上田 悟
「カイラルツイストされた $N_f = 2$ 格子 QCD による π 中間子の性質の研究」
4. Nguyen Hoang Oanh
「Study of the phase structure of lattice QCD using dynamical twisted mass quarks」

<集中講義>

1. 青木 慎也 「格子上の場の理論入門」北海道大学理学部 2007年1月16日～18日

<研究成果発表（講演）>

[国際会議]

1. 宇川 彰 「Status and physics plan of the PACS-CS Project」 ,
The XXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006)
2. 青木 慎也 「Neutron Electric Dipole Moment from Lattice QCD」 ,
International Workshop on “Lattice QCD simulations with light quarks” (Ringberg Castle, Tegernsee, Germany, Apr. 23-28, 2006)
3. 青木 慎也 「Light quarks on the lattice」 ,
A Workshop and Symposium “RHIC Physics in the Context of the Standard Model” (Riken BNL Research Center, Upton, USA, June 19-23, 2006)
4. 青木 慎也 「Lattice QCD simulations with light dynamical quarks」 ,
“Quark Confinement and Hadron Structure VII”, (Universidade dos Azores, Ponta Delgada, Portugal, September 2-7, 2006)
5. 青木 慎也 「Chiral Perturbation Theory and Lattice QCD with Wilson-type Quarks」 ,
Workshop on “Lattice QCD, Chiral Perturbation Theory and Hadron Phenomenology ”, (European Center for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas(ECT*), Trento, Italy, October 2-6, 2006)
6. 青木 慎也 「Automatic $O(a)$ improvement for twisted-mass QCD」 ,
The XXIVth International Symposium on Lattice Field Theory (Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006)
7. 石塚 成人 「 ρ meson decay from the lattice」 ,
The XXIVth The XXIVth International Symposium on Lattice Field Theory (Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006)
8. 吉江 友照 「An estimate of the η and η' meson masses in $N_f = 2 + 1$ lattice QCD」 ,
The XXIVth International Symposium on Lattice Field Theory (Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006)
9. 藏増 嘉伸 「2+1 Flavor Lattice QCD with Lüscher’s Domain-Decomposed HMC Algorithm」 ,
International Workshop on “Lattice QCD simulations with light quarks” (Ringberg Castle, Tegernsee, Germany, Apr. 23-28, 2006)
10. 藏増 嘉伸 「Lattice QCD Calculation of Neutron Electric Dipole Moment」 ,
The IVth International Conference on Quarks and Nuclear Physics (Madrid, Spain, June 5-10, 2006)
11. 藏増 嘉伸 「2+1 Flavor Lattice QCD with Lüscher’s Domain-Decomposed HMC Algorithm」 ,

The XXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006)

12. 藏増 嘉伸 「Toward $N_f = 2 + 1$ Lattice QCD Simulation at the Physical Point on PACS-CS」 ,
Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities (Sheraton Waikiki Hotel, Honolulu, Hawaii, October 29-November 03. 2006)
13. 藏増 嘉伸 「Status of the 2+1 Flavor Wilson-Clover Simulation of QCD by PACS-CS Collaboration」 ,
Workshop on “Domain Wall Fermions at Ten Years” (Brookhaven National Laboratory , Upton, NY, USA, March 15-17, 2007)
14. 藏増 嘉伸 「Lattice QCD Calculation of Neutron Electric Dipole Moment」 ,
INT Workshop on “Electric Dipole Moments and CP Violation” (Seattle, Washington, USA, Mar. 19-23, 2007)
15. 谷口 裕介 「Non-perturbative renormalization of 4 fermi operator with Schrödinger functional scheme」 ,
Workshop on “Domain Wall Fermions at Ten Years” (Brookhaven National Laboratory , Upton, NY, USA, March 15-17, 2007)
16. 石川 智巳 「2+1 flavor light hadron spectrum and quark masses with the O(a) improved Wilson-clover quark formalism」 ,
The XXIVth The XXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006)
17. 石井 理修 「Nuclear Force from Lattice QCD」 ,
The XXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006)
18. 石井 理修 「Charmonium above T_c in lattice QCD」 ,
Selected Topics on Heavy Flavor Production in High-Energy Collisions (Tsinghua University, Beijing, China, November 22-23, 2006)
19. 石井 理修 「Lambda(1405) as a 5Q from anisotropic lattice QCD」 ,
Yukawa International Seminars (YKIS) 2006, New Frontiers in QCD —Chiral dynamics in nuclear medium (YITP, Kyoto, December 4-8, 2006)
20. 新谷 栄吾 「Calculation of Neutron EDM in quenched and full QCD」 ,
The XXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006)
21. 中村 庸介 「Kaon B -parameters for Generic $\Delta S = 2$ Four-Quark Operators in Quenched Domain Wall QCD」 ,
The XXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006)

22. 中村庸介 「Kaon B-Parameters for Generic $\Delta S = 2$ Four-Quark Operators in Quenched Domain Wall QCD」 ,
Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities (Sheraton Waikiki Hotel, Honolulu, Hawaii, October 29-November 03. 2006)
23. 石橋 延幸 「D-branes and closed string field theory」 ,
Komaba 2007, Recent Developments in Strings and Fields, 招待講演 (Komaba, Feb. 10-11, 2007)

[国内学会、研究会]

1. 青木 慎也 「格子 QCD で使いやすい計算機とは?」 ,
「計算科学の戦略と次世代スーパーコンピュータ」 シンポジウム (エポカル筑波、つくば、2006 年 4 月 5 日-6 日)
2. 石塚 成人 「 ρ meson decay from the lattice」 ,
日本物理学会春季大会 (首都大学東京、八王子、2007 年 3 月 25 日-28 日)
3. 吉江 友照 「Nf=2+1 格子 QCD による η/η' 中間子質量の評価」 ,
日本物理学会春期大会 (首都大学南大沢キャンパス、八王子、2007 年 3 月 25 日-28 日)
4. 加堂 大輔 「Light hadron spectrum with 2+1 flavor dynamical O(a)-improved Wilson quarks on the Lattice」 ,
日本物理学会春季大会 (首都大学東京、八王子、2007 年 3 月 25 日-28 日)
5. 石井 理修 「格子 QCD による核力の計算」 ,
日本物理学会秋季大会 (奈良女子大学、奈良、2006 年 9 月 20 - 23 日)
6. 石井 理修 「格子 QCD による核力」 ,
基研研究会 「有効相互作用の理論と核構造」 ,
(京都大学基礎物理学研究所、京都府京都市、2007 年 2 月 5 - 7 日)
7. 石井 理修 「Lattice QCD approach to the nuclear force」 ,
「ストレンジネスとエキゾティクス・理論の課題」 研究会 (志摩ビーチホテル、三重県鳥羽市、2007 年 3 月 1 日 - 3 日)
8. 石井 理修 「格子量子色力学による核力の研究」 ,
日本物理学会春季大会 (首都大学東京、八王子、2007 年 3 月 25 日-28 日)
9. 中村 庸介 「Non-perturbative renormalization factors of left-left four-fermion operators with the Schrodinger functional scheme」 ,
日本物理学会春季大会 (首都大学東京、八王子、2007 年 3 月 25 日-28 日)
10. 馬場 裕 「D-branes and closed string field theory」 ,
基研研究会 「弦理論と場の量子論における新たな進展」 (基礎物理学研究所、京都、Sept. 12-16, 2006)

11. 馬場 裕「Disk amplitudes from closed string field theory」,
日本物理学会春季大会 (首都大学東京、八王子、2007年3月25日-3月28日)
12. 齋藤 卓「Massless higher spin fields from matrix model」,
基研研究会「弦理論と場の量子論における新たな進展」(基礎物理学研究所,
2006年9月12日-9月16日)
13. 齋藤 卓「Massless higher spin fields and matrix model」,
日本物理学会春季大会 (首都大学東京 八王子, 2007年3月25日-3月28日)