

## I-1 素粒子分野

### 1. メンバ

教授 宇川 彰, 青木 慎也(共同研究員), 金谷 和至(共同研究員)

准教授 石塚 成人, 蔵増 嘉伸, 吉江 友照

助教 谷口 裕介

研究員 石井 理修, 浮田 尚哉, 加堂 大輔, 滑川 祐介, 山崎 剛

### 2. 概要

素粒子分野においては、本年度も、格子場の理論の研究を柱に活発な研究活動が行なわれ、数理物質科学研究科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。

筑波大学の格子ゲージ理論の研究者は、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 が導入されたのを契機として新たな研究グループとして立ち上げられた PACS-CS Collaboration に参加している。PACS-CS Collaboration では、物理的な  $u, d$  クォーク質量での  $N_f=2+1$  QCD の大規模シミュレーションを目標にゲージ配位の生成を行ない、第1段階の計算を終了し、その研究成果の一部を発表した。また、物理的な  $u, d$  クォーク質量での  $N_f=2+1$  QCD の大規模シミュレーションを開始し、ゲージ配位生成を継続中である。一方、一部の研究者は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の IBM BlueGene/L と日立 SR-11000 を用いて研究を進める JLQCD Collaboration に参加し、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による研究を展開した。

また、これらの大規模な研究と並行して、核子間ポテンシャルの研究、ハドロン間相互作用の研究、核子形状因子の研究、有限温度・有限密度 QCD の研究、QCD の結合定数のスケール依存性の研究、繰り込み定数の非摂動的計算、カイラル摂動論を用いた研究、なども行われた。

さらに、格子 QCD 配位やその他のデータを共有する為のデータグリッド ILDG の構築に参画した。

### 3. 研究成果

#### 【1】PACS-CS Collaboration の活動(全員)

計算科学研究センターでは、平成 17 年度から 3 ヶ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 月から稼働を開始した。PACS-CS Collaboration は PACS-CS を主要な計算設備として格子 QCD の研究を行うことを目的とし、筑波大学物理学系メンバーを中心として組織されている。その目標は、domain-decomposed HMC (DDHMC) アルゴリズムと polynomialHMC (PHMC) アルゴリズムを組み合わせることによって 3 種類( $u, d, s$ )の軽いクォークをその物理的質量(物理点)において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的予言を行うことを目標としている。平成 18 年度は、PACS-CS 稼働開始に伴うプログラム開発と比較的重い  $u-d$  クォーク質量でのシミュレーションを実行し、平成 19 年

度は、物理点へ向けて up-down クォーク質量を段階的に軽くすることによって物理量のクォーク質量依存性を調べる事が主要課題であった。平成 20 年度は、これまでの課題を継続するとともに、いよいよ PACS-CS プロジェクトの目標である物理点でのシミュレーションに取り組んだ。また、平成 20 年 6 月からは新たな超並列クラスタ計算機 T2K-Tsukuba(計算ノード数 648、ピーク演算性能 94.Tflops)が稼動を開始するとともに、それを利用した計算も始まった。以下に平成 20 年度における進展を述べる。

昨年度に引き続き、非摂動的に O(a)改良された Wilson クォーク作用と Iwasaki ゲージ作用を用いて、格子サイズ  $32^3 \times 64$ 、格子間隔  $a = 0.09\text{fm}$  のシミュレーションを行った。up-down クォーク質量に関しては、カイラル摂動論からの予言を検証するために  $m_{ud} = 61, 41, 22, 19, 11, 3 \text{ MeV}$  という広範な値を採用した。strange クォーク質量に関しては過去の計算によって推定された物理的質量に固定したが、 $m_{ud} = 19 \text{ MeV}$  の点においては 20%程度軽い値も採用し、strange クォーク質量依存性を調べた。物理量のクォーク質量依存性としてパイ中間子質量の 2 乗を裸のクォーク質量で割ったものを図 1 に示した。赤丸は今回 PACS-CS 機において計算したものであり、黒丸は PACS-CS 機の前身である CP-PACS 機等を用いて計算したものである。物理的な up-down クォーク質量に近付くにつれて下に凸な曲率を確認することができるが、これはカイラル摂動論において予言される振舞いと一致している。このことは物理点あるいはそれに非常に近いクォーク質量でのシミュレーションが本質的に重要であることを示している。また、同じ配位を用いたハドロン質量の計算によって、物理点におけるハドロン質量が数%の範囲内で実験と一致していることを見出した(図2)。以上の結果は論文 1 としてまとめ、すでに出版済みである。

図1:  $m_{\pi}^2/m_{ud}$  を  $m_{ud}$  の関数としてプロットしたもの。但し、両者は格子単位で与えられている。赤丸は PACS-CS 機を用いて得られた結果を表し、黒丸は CP-PACS 機等を用いて得られた以前の結果を表す。赤の垂直破線は物理的な up-down クォーク質量の位置を示している。黒線はクォーク質量依存性を明瞭にするために引いた直線である。

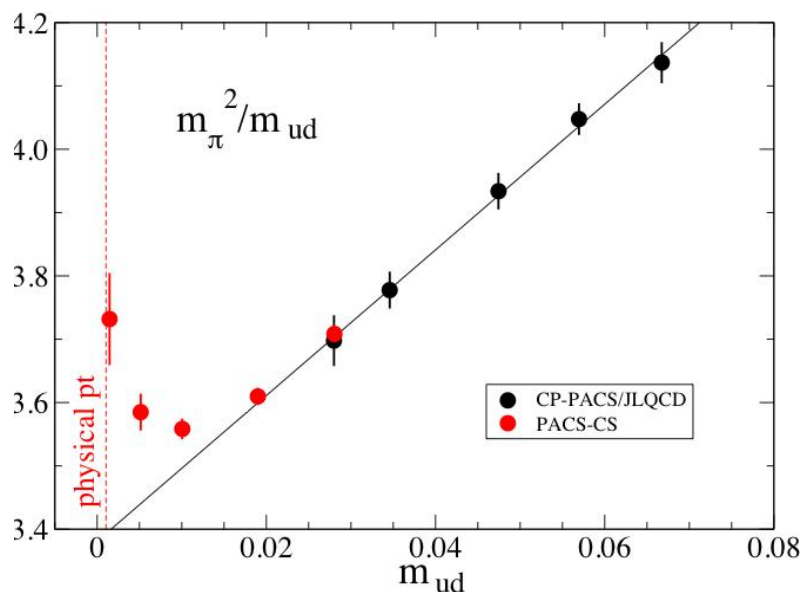
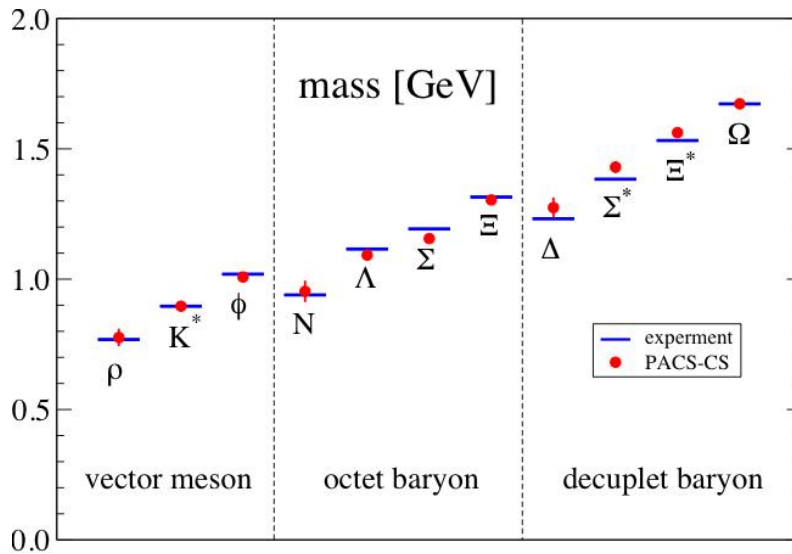


図2: ハドロン質量の実験値との比較。横棒は実験値を表す。



平成 20 年度は新たに PACS-CS プロジェクトの目標である物理点直上におけるシミュレーションに取り組んだ (論文 2,3)。格子サイズおよび格子間隔はこれまで行ってきた重いクォーク質量でのシミュレーションと同じものを採用し、up-down および strange クォーク質量に関する物理点は、これまでの計算結果を外挿することによって推定した。シミュレーションの結果わかったことは、計算コストおよびアルゴリズムの安定性に関しては問題はないが、up-down クォーク質量および strange クォーク質量の物理点への微調整という課題を解決する必要があるということである。現在我々は Reweighting と呼ばれる方法による物理点への微調整が可能か否か調べている段階である。微調整の問題は別にして、アルゴリズム的に物理点直上のシミュレーションが可能になったことは疑いの余地がない。我々は物理点における体積効果を調べるために T2K-Tsukuba を用いて格子サイズ  $64^4$ 、格子間隔  $a=0.09$  fm のシミュレーションを開始した。この計算は平成 21 年度も継続実行の予定である。

## 【2】有限温度・有限密度QCDの研究(青木、金谷、石井、浮田)

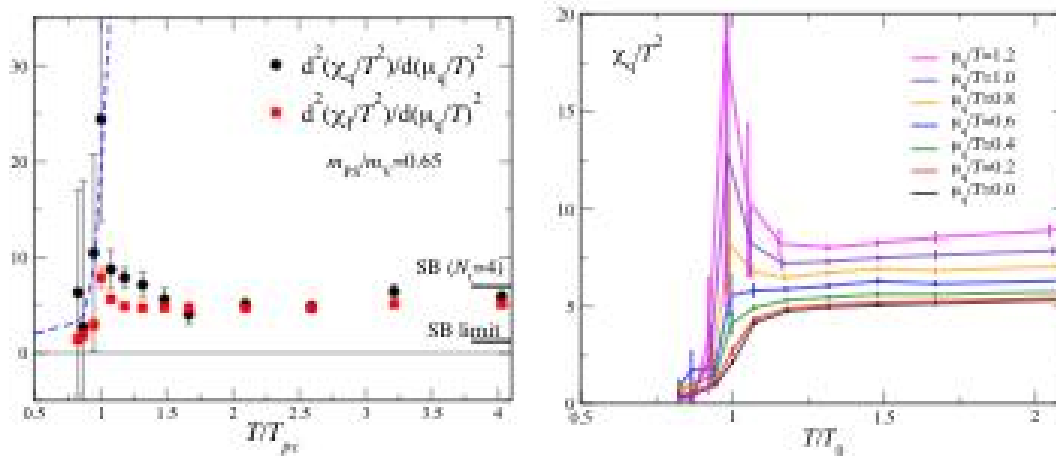
我々は、Wilson クォークによる有限温度・密度QCDの研究を推進している。Wilson クォークによる計算は世界的に見ても筑波の cp-pacs グループ以降ほとんど行われていなかった。そのため、まずは有限温度の相図が既に詳細に調べられている  $N_f=2$  QCD の場合について、Wilson クォークとして最初の有限密度QCD研究を実行した。有限密度に関しては、化学ポテンシャルに関する Taylor 展開の手法を用いた。従来の方法に加えて有限密度の複素位相部分をガウス関数で近似して reweighting 法を用いる新しい手法による状態方程式の有限密度効果の計算や、クォーク数密度揺らぎの計算なども行った。これらの計算で、従来の Staggered クォークの計算で見ついていた有限密度領域でクォーク数密度の揺らぎが増大する兆候が Wilson クォークによっても確認できた(図 3 参照)。

また、 $N_f=2$  QCD の配位上での magnetic および electric デバイ遮蔽の詳細に関する研究を行った。Euclid 時間反転 と 荷電共役 の対称性を考えることによってあるゲージ固定条件のもとで、Polyakov loop

相関を対称性に応じて分類し、それぞれの遮蔽質量を導出する事ができる。その結果、有限温度摂動論からの予想の通り、magnetic 遮蔽質量 ( $m_M$ ) は electric 遮蔽質量 ( $m_E$ ) よりも大きくなる事などを示した。さらに両者の質量比 ( $m_E/m_M$ ) が AdS/CFT 対応より求められる値に良く一致する事などを議論した。

これらの計算に関しては国際会議などで発表を行った。また現在投稿論文を準備中である(論文9、10)。

図3: Wilson クォークによる有限温度・有限密度QCDの研究。左図:  $N_f=2$  QCD における、クォーク数密度揺らぎ(黒)とアイソスピン数密度揺らぎ(赤)の化学ポテンシャルに関する2階微分。  $m_{PS}/m_V = 0.65$ ,  $\mu_q=0$  での結果。前者が相転移点で特異的なのに対し、後者は強い特異性を示さない。右図: テーラー展開法と、近似的改良を組み合わせた、 $\mu_q$  ゼロでない時のクォーク数密度揺らぎの温度依存性。



### 【3】有限温度・有限密度状態方程式の計算方法開発(T-integral 法)(青木, 金谷, 石井, 浮田)

最終目標である  $N_f=2+1$  QCD での有限温度・有限密度研究は、極めて多くの計算時間を要求する。従来の固定格子数( $N_t$ )で integral 法を用いる計算方法では、ゼロ温度格子のシミュレーションを大量に要し、それが全体の計算コストの大きな部分を占めている。それを大きく削減する方法として、固定格子間隔アプローチを提案した。この方法では従来の熱力学量の計算と異なり、ゲージ結合定数ではなく、時間方向の格子サイズによって温度を変えるという手法での有限温度の研究を行う。

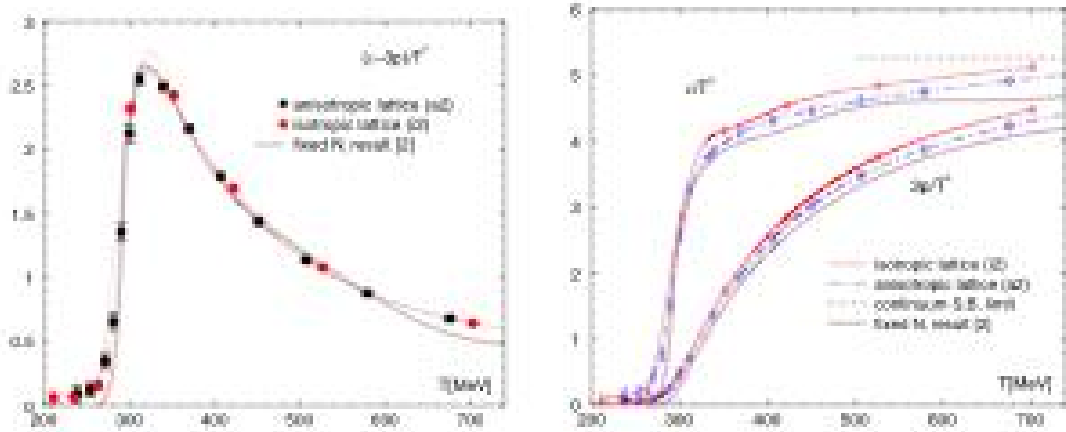
我々は、固定格子間隔アプローチで状態方程式を計算するために、状態方程式の新しい非摂動的評価法 T-integral 法を開発した。従来の非摂動的評価法 integral 法は固定格子間隔では用いることは出来ないが、ある熱力学関係式を元に、状態方程式(圧力)をトレースアノマリーの温度積分としてあらわすと、固定格子間隔でも状態方程式の計算が可能になる。このアイデアをまずクエンチ近似 QCD の場合でテストして、従来の方法で求めた状態方程式の結果と遜色の無い結果を再現した。

この研究では、等方格子と非等方格子の場合について計算を行った。非等方格子では空間方向に比べ時間方向の格子間隔のみを細かくできるので、固定格子間隔アプローチでも温度を細かくコントロールできる。図4(左)の結果は新しいアプローチで計算した等方、非等方格子でのトレースアノマリーの値と、従来の手法による結果との比較を行っている。図4(右)ではトレースアノマリーの温度積分で求められる状態方程式の結果である。これらは、ほぼ従来の大規模計算の結果を再現して、新しいアプローチの有効性を示した。T-integral 法

は、従来の integral 法と相補的で、特に従来の方法で格子化誤差が出やすい相転移点近傍で精度の良い計算を行える可能性がある(論文7,8)。

現在、固定格子間隔で  $N_f=2+1$  QCD の有限温度配位を生成しており、その成果の一部は国際会議でも発表した。

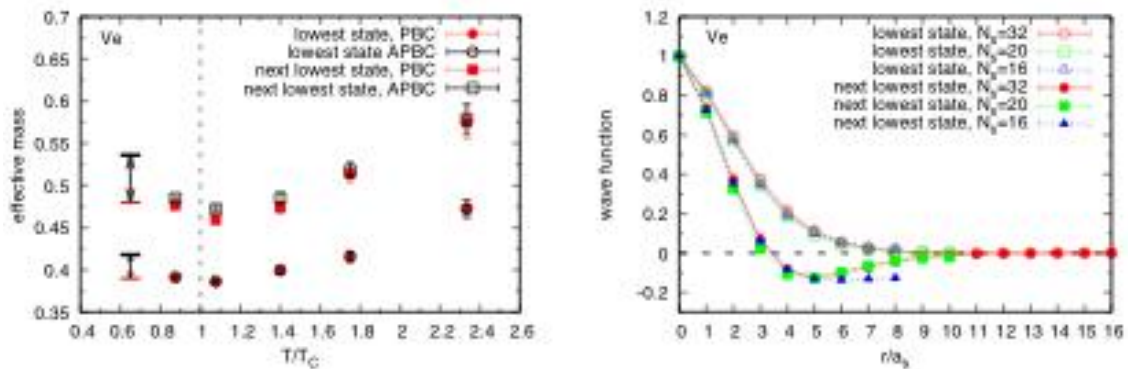
図4: 固定格子間隔アプローチと T-integral 法による有限温度・有限密度QCDの状態方程式の研究。クエンチ近似でのトレスアノマリー(左図)と状態方程式(右図)の結果。



#### 【4】クォーク・グルオン・プラズマ相におけるチャーモニウム消失の(青木, 金谷, 石井, 浮田)

チャームクォークと反チャームクォークの束縛状態であるチャーモニウム(特に  $J/\psi$ ,  $\chi_c$ ,  $\phi'$  状態など)がクォーク・グルオン・プラズマ(QGP)相中で消失する温度や特性を格子QCDによる第一原理計算で研究した。これは、重イオン衝突実験でQGP生成を示す重要なシグナルの一つである「 $J/\psi$  抑制」を判断する上で本質的な情報となる。先行研究では、最大エントロピー法により計算されたスペクトル関数を用いた解析が主流であったが、この方法には不定性があるため、異なる解析手法による検証が必要である。我々は、対角化の方法を用いて S 状態と P 状態の基底状態と励起状態に対する有効質量及び波動関数を計算し、有効質量の空間方向境界条件依存性及び波動関数の空間分布を調べることでチャーモニウムの消失の有無を確かめた。また、特に P 状態には不必要な定数モードの効果が大きく寄与していることが指摘されており、我々はこの影響を取り除いた解析も行った。シミュレーションは  $O(a)$  改良されたウィルソンクォーク作用とプラケットゲージ作用を使用し、クエンチ近似を用いて行った。その結果(図 [ohno\\_fig](#) 参照)、少なくとも臨界温度の 2.3 倍の温度まで 1S, 2S, 1P, 2P 状態のチャーモニウムが消失することは確認できなかった(論文6,11,12,13)。図 5参照。

図5: チャーモニウム消失の研究。ベクターチャンネルに対する結果。左図は有効質量の温度変化を表しており、色の違いは空間方向の境界条件の違いを表している。散乱状態の場合には矢印で表わされる程度の違いみられるはずだが、そのような違いはみられない。一方、右図は臨界温度の 2.3 倍の温度における波動関数の空間分布を表しており、色の違いは空間方向の格子サイズの違いを表している。明らかに波動関数は空間的に局在していることがわかる。これらの結果は、束縛状態がまだ存在していることを示している。



#### 【5】ILDG・JLDG の構築(宇川, 吉江, 石井)

格子 QCD シミュレーションの基礎データである配位を国際規模で共有する International Lattice Data Grid プロジェクトに参加し、システムの改良に携わった。また、システム概要と利用状況を国際会議にて報告した(論文14)。

#### 【6】格子 QCD によるバリオン間力の研究(青木, 石井)

2 つの核子の間に働く力、核力は、中遠距離では引力、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、石井らは昨年度、東京大学の初田との共同研究で、二核子系の波動関数から核子間のポテンシャルを導き出すという方法を用いて格子 QCD により計算したが、その方法のまとめを論文23として発表した。

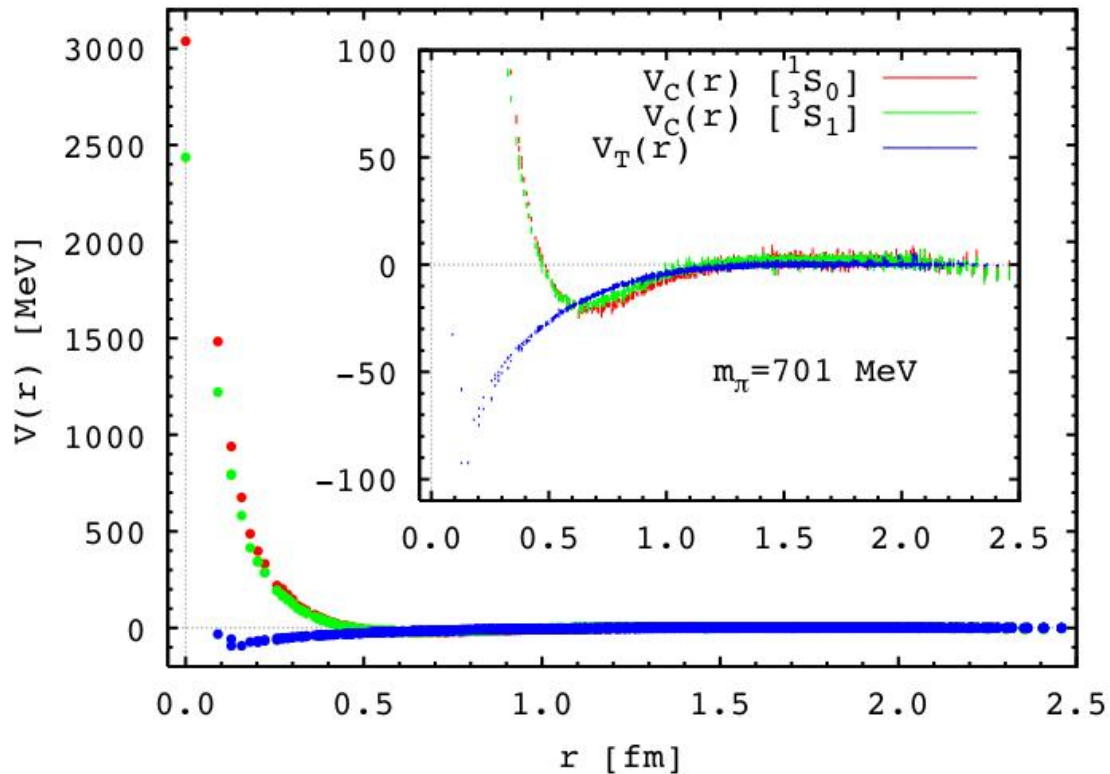
今年度は、中心力以外の成分としてポテンシャルのテンソル力の計算を行った(論文36)。さらに、力学的クォークの寄与を含むゲージ配位での計算も行った(論文36)。図6は、 $\pi$  中間子の質量が 700MeV に対応する PACS-CSCollaboration によって生成された 2+1 フレーバーの格子 QCD のゲージ配位を使って計算された核力ポテンシャルである。スピン一重項の中心力と、スピン三重項の中心力およびテンソル力の結果を示している。どちらの中心力も斥力芯を持っているが、テンソル力には中心力がないことが見てとれる。また、この研究を進展させ、ストレンジ・クォークを含むバリオンであるハイペロンと核子のポテンシャルの計算も行った(論文26,35)。

波動関数からポテンシャルを定義する方法では、波動関数のエネルギーに対するポテンシャルの依存性が問題となる。今年度は、エネルギーを変えた波動関数からポテンシャルを計算し、そのエネルギー依存性を評価した(論文34)。また、2 次元の解けるモデルを使って、波動関数から定義されるポテンシャルの一般的性質



を研究した(論文24)。

図6:2+1 フレーバー格子 QCD の計算で得られた2核子間のポテンシャル。 $\pi$  中間子の質量は約 700MeV である。赤がスピン一重項の中心力、緑がスピン三重項の中心力、青がスピン三重項のテンソル力である。



### 【7】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(青木)

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  $N_f=2$  格子 QCD(論文22)と  $N_f=2+1$  格子 QCD でゲージ配位を生成し、それを用いた研究を行った。

ゲージ場のトポロジーを固定した計算から理論的考察を用いてトポジカル電荷の帯磁率を計算した(論文11)。 $\epsilon$  領域での有限体積の計算で、中間子の相関関数からカイラル摂動論のパラメタを決定し(論文19)、また、中間子の質量や崩壊定数のクォーク質量依存性を詳細に調べた(論文25)。さらに、K 中間子の  $B$  パラメタの決定(論文20)や QCD の結合定数の決定(論文27)なども行った。

### 【8】 $\pi\pi$ 散乱の位相差の計算(石塚)

格子 QCD のクエンチ近似の計算で  $\pi\pi$  散乱の位相差を、ゼロで無い相対運動量を持つ  $2\pi$  中間子系の波動関数から求めた(論文15)。

### 【9】格子 QCD による中性 K 中間子の B パラメタの非摂動的繰り込み定数の計算(青木、谷口、吉江)

orbifolding を用いた格子上の Schrödinger functional の定式化を domain-wall fermion に適用し、その具体

的な応用として Kaon B-parameter 及び u, d, s quark 質量の非摂動論的な繰り込みを行った。(論文16)。

#### 【10】CD の結合定数のスケール依存性の研究(青木、谷口、山崎)

$N_f=2+1$  QCD の結合定数を Schrödinger functional formalism を用いて格子上の数値計算から非摂動論的に求めた(論文17,その他の学会発表15、28)。

結合定数が低エネルギー領域でエネルギースケールに依存しなくなる非自明赤外固定点探索のため、既存の方法よりも有限格子間隔に起因する系統誤差が小さなウィルソンループを用いたスキームを提案し、クエンチ近似 QCD を用いて試験的な計算を行なった(論文40)。

村野らは、動的 u,d クォークの効果を取り入れた QCD の非摂動的な結合定数のスケール依存性をシュレディンガー汎関数法を用いて計算した。特に、格子間隔依存性をプラケットゲージ作用と岩崎ゲージ作用で比較した(論文42)。

#### 【11】格子 QCD による核子形状因子の計算(山崎)

格子上で良いカイラル対称性を持つドメインウォールクォーク作用を用いて u,d,s クォーク動的効果を含んだ核子形状因子を計算した。他グループのこれまでの結果との比較から、ベクトル流に関する形状因子に比べ、軸性ベクトル流に関する形状因子には非常に大きな有限体積効果が含まれる事を示した(論文41)。

#### 【12】カイラル摂動論に対する有限格子間隔の影響の研究(青木)

Wilson fermion の場合に、 $\pi\pi$  散乱に対する有限格子間隔の影響をカイラル摂動論を用いて研究した(論文28)。また、twisted mass 格子 QCD の  $\pi$  中間子の崩壊定数をカイラル摂動論の1ループで計算し、有限格子間隔の影響を評価した(その他の学会発表21)。

### 4. 研究業績

#### <研究論文>

1. PACS-CS Collaboration: S. Aoki, N. Ishii, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshiwase, 2+1 flavor lattice QCD toward the physical point, Phys. Rev. D 79, No. 3 (2009) ref. 034503, pp.1-33.
2. Yoshinobu Kuramashi for the PACS-CS Collaboration, PACS-CS results for 2+1 flavor lattice QCD simulation on and off the physical point, Proceeding of Science (Lattice 2008) 018.
3. PACS-CS Collaboration: N. Ukita, S. Aoki, N. Ishii, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, T. Yoshiwase, 2+1 flavor lattice QCD simulation with  $O(a)$ -improved Wilson quarks, PoS Lattice 2008 097.
4. PACS-CS Collaboration: D. Kadoh, S. Aoki, N. Ishii, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshiwase, SU(2) and SU(3) chiral perturbation theory analyses on meson and baryon masses in 2+1 flavor lattice QCD, PoS Lattice 2008 092.



5. PACS-CS Collaboration: Y. Namekawa, S. Aoki, N. Ishii, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, K. Sasaki, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshiy'e, Charm quark system in 2+1 flavor lattice QCD using the PACS-CS configurations, PoS Lattice 2008 121.
6. WHOT-QCD Collaboration: T. Umeda, H. Ohno, and K. Kanaya, Charmonium dissociation temperatures in lattice QCD with a finite volume technique, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 35 (2008) ref.104157, pp.1-5.
7. WHOT-QCD Collaboration: T. Umeda, S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno, Fixed Scale Approach to Equation of State in Lattice QCD, Phys. Rev. D 79, No.5 (2009) ref.051501(R), pp.1-5.
8. WHOT-QCD Collaboration: T. Umeda, S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno, Thermodynamics of SU(3) gauge theory at fixed lattice spacing, PoS(LATTICE 2008) (2009) ref.174, pp.1-7.
9. WHOT-QCD Collaboration: S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, Y. Maezawa, N. Ukita, T. Umeda, Equation of state at finite density in two-flavor QCD with improved Wilson quarks, PoS(LATTICE 2008) (2009) ref.189, pp.1-7.
10. WHOT-QCD Collaboration: Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, N. Ukita, T. Umeda, Magnetic and electric screening masses from Polyakov-loop correlations, PoS(LATTICE 2008) (2009) ref.194, pp.1-7.
11. WHOT-QCD Collaboration: H. Ohno, T. Umeda, K. Kanaya, Search for the Charmonium Dissociation Temperature with Variational Analysis in Lattice QCD, PoS(LATTICE 2008) (2009) ref.203, pp.1-7.
12. 大野浩史、梅田貴士、金谷和至 for WHOT-QCD Collaboration, 有限温度格子 QCD における対角化の方法を用いたチャーモニウムの解析, 素粒子論研究 116 No. 6 (2009) ref. 732, pp30-32.
13. H. Ohno, T. Umeda and K. Kanaya (WHOT-QCD Collaboration), Search for the Charmonia Dissociation in Lattice QCD, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 36 (2009) ref. 064027.  $\text{\label{paper:ft8}}$
14. T. Yoshie, Making use of the International Lattice Data Grid, Proceeding of Science (Lattice 2008) 019.
15. K. Sasaki and N. Ishizuka, I=2 Two-Pion Wave Function and Scattering Phase Shift, Phys. Rev. D78 :014511, 2008.
16. Y. Nakamura, S. Aoki, Y. Taniguchi and T. Yoshie [CP-PACS Collaboration], Precise determination of  $B_K$  and right quark masses in quenched domain-wall QCD, Phys. Rev. D **78**, 034502-1-29 (2008).
17. Y. Taniguchi [for PACS-CS collaboration], Non-perturbative renormalization of Nf=2+1 QCD with Schroedinger functional scheme, PoS **LATTICE** (2008) 229, 1-7.

18. JLQCD Collaboration and TWQCD Collaboration: S. Aoki, T.W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T.H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, K. Ogawa, T. Onogi, N. Yamada, Topological susceptibility in two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry, *Physics Letters B* 665 (2008) 294.
19. JLQCD Collaboration: H. Fukaya, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, K. Ogawa, T. Onogi, N. Yamada, Lattice study of meson correlators in the epsilon-regime of two-flavor QCD, *Physical Review D* 77 (2008) 074503.
20. S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, J. Noaki, T. Kaneko, H. Matsufuru, T. Onogi, N. Yamada, for the JLQCD Collaboration,  $B_K$  with two flavors of dynamical overlap fermions, *Physical Review D* 77 (2008) 094503.
21. E. Shintani, S. Aoki and Y. Kuramashi, Full QCD calculation of neutron electric dipole moment with the external field method, *Physical Review D* 78 (2008) 014503.
22. JLQCD Collaboration: S.Aoki, H.Fukaya, S.Hashimoto, K-I.Ishikawa, K.Kanaya, T.Kaneko, H.Matsufuru, M.Okamoto, M.Okawa, T.Onogi, A.Ukawa, N.Yamada, T.Yoshie, Two-flavor QCD simulation with exact chiral symmetry, *Physical Review D* 78 (2008) 014508.
23. S. Aoki, T. Hatsuda, N. Ishii, The Nuclear Force from Monte Carlo Simulations of Lattice Quantum Chromodynamics, *Comput. Sci. Disc.* 1 (2008) 015009.
24. S. Aoki, J. Balog and P. Weisz, Bethe--Salpeter wave functions in integrable models, *Progress of Theoretical Physics* 121 (2009) 0812015.
25. J. Noaki, S. Aoki, T.W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T.H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada, for the JLQCD, TWQCD Collaborations, Convergence of the chiral expansion in two-flavor lattice QCD, *Physical Review Letters* 101 (2008) 202004.
26. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Hyperon-nucleon force from lattice QCD, *Physics Letters B* 673 (2009) 136-141.
27. E. Shintani, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko H. Matsufuru, T. Onogi, N. Yamada, S-parameter and pseudo-Nambu-Goldstone boson mass from lattice QCD, *Physical Review Letters* 101 (2008) 242001.
28. S. Aoki, O. Bär, B. Biedermann, Pion scattering in Wilson ChPT, *Physical Review D* 78 (2008) 114501.
29. E. Shintani, S. Aoki, T. W. Chiu, S. Hashimoto, T. H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada, for the JLQCD, TWQCD Collaboration, Lattice calculation of strong coupling constant from vacuum polarization functions, (arXiv:0807.0556[hep-lat]).
30. Sinya Aoki, Oliver Bar, Benedikt Biedermann, Pion Scattering in Wilson Chiral Perturbation Theory, *PoS LAT2008* (2008).
31. T.W. Chiu, S. Aoki, S. Hashimoto, T.H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada (for JLQCD and TWQCD Collaborations), Topological susceptibility in (2+1)-flavor lattice

- QCD with overlap fermion, PoS LAT2008 (2008) 072.
32. J.Noaki, S.Aoki, T.W.Chiu, H.Fukaya, S.Hashimoto, T.H.Hsieh, T.Kaneko, H.Matsufuru, T.Onogi, E.Shintani, N.Yamada, Light meson spectrum with  $N_f=2+1$  dynamical overlap fermions, PoS LAT2008 (2008).
  33. T.Kaneko, S.Aoki, T.W.Chiu, H.Fukaya, S.Hashimoto, T.H.Hsieh H.Matsufuru, J.Noaki, T.Onogi, E.Shintani, N.Yamada (JLQCD, TWQCD collaborations), Pion vector and scalar form factors with dynamical overlap quarks, PoS LAT2008 (2008) 158.
  34. Sinya Aoki, Janos Balog, Tetsuo Hatsuda, Noriyoshi Ishii, Murano, Hidekatsu Nemura, Peter Weisz, Energy dependence of nucleon–nucleon potentials, PoS LAT2008 (2008) 152.
  35. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, for PACS–CS Collaboration, Lambda–nucleon force from lattice QCD, PoS LAT2008 (2008) 156.
  36. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, for PACS–CS Collaboration, Nuclear forces from quenched and  $N_f=2+1$  full QCD using the PACS–CS gauge configurations, PoS LAT2008 (2008) 155.
  37. T. Hatsuda, N. Ishii, S. Aoki, H. Nemura, From lattice QCD to nuclear force. Mod.Phys.Lett.A23:2265–2272,2008.
  38. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Lattice QCD calculation of nuclear forces, Mod.Phys.Lett.A23:2281–2284,2008.
  39. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Lattice QCD simulation of hyperon–nucleon potential. Mod.Phys.Lett.A23:2285–2288,2008.
  40. E. Bilgici, A. Flachi, E. Itou, M. Kurachi, C.–J D. Lin, H. Matsufuru, H. Ohki, T. Onogi, and T. Yamazaki, A new scheme for the running coupling constant in gauge theories using Wilson loops, Phys. Rev. D, submitted (arXiv:0902.3768[hep-lat]) .
  41. T. Yamazaki, Y. Aoki, T. Blum, H. W. Lin, S. Ohta, S. Sasaki, R. J. Tweedie, and J. M. Zanotti (RBC and UKQCD Collaborations), Nucleon form factors with 2+1 flavor dynamical domain–wall fermions, Phys. Rev. D, submitted (arXiv:0904.2039[hep-lat]) .
  42. K.Murano, S.Aoki, Y.Taniguchi and S.Takeda, Universality of the  $N_f=2$  Running Coupling, Proceeding of Science ( Lattice 2008) 228.

## <学会発表>

### (A)招待講演

1. 藏増 嘉伸「Current status toward the proton mass calculation」, Rencontres de Moriond, (La Thuile, Italy, Mar 14–21, 2009).
2. 藏増 嘉伸「2+1 flavor lattice QCD simulations toward the physical point」, Workshop on Perspectives and challenges for full QCD lattice calculations, (Villazzano, Italy, May 5–9, 2008).
3. 藏増 嘉伸「PACS–CS results for 2+1 flavor lattice QCD simulation on and off the physical point」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory, (Williamsburg, Virginia, Jul 14–20, 2008).

4. 大野浩史「Search for the Charmonia Dissociation in Lattice QCD」、International Conference on Strangeness in Quark Matter 2008 (Beijing, China, October 6-10, 2008).
5. 青木 慎也「Lattice QCD」、The International Conference on Particle and Nuclei (PANIC08)、(Eilat, Israel, November 9-14, 2008).
6. 青木 慎也「Neutron EDM, muon  $g-2$ , E $\times$ M effect」、Scientific Challenges for Understanding the Quantum Universe and the Role of Computing at Extreme Scale (Menlo Park, CA, USA, December 9-11, 2008).
7. 青木 慎也「Some Topics on Chiral Perturbation Theories in Lattice QCD」、International Workshop on Frontier Problems in Strong Interaction Physics、(Poornaprajna Institute of Scientific Research, Bidalur, Bangalore, India, January 12-17, 2009).
8. 青木 慎也「Fundamental challenge of QCD」、47. Internationale Universitätswochen für Theoretische Physik Schladming, Stria, Austria, 28 February - 7 March, 2009.
9. 石井 理修 「Nuclear forces from lattice QCD」(keynote talk), Korean Physical Society Meeting, (Gwangju, South Korea, Oct. 23-24, 2008).
10. 藏増 嘉伸「PACS-CS および T2K オープンスパコン ー格子 QCD からの視点ー」、第八回 PC クラスタ シンポジウム、(秋葉原コンベンションホール、秋葉原、2008年12月11-12日).
11. 藏増 嘉伸「格子 QCD の今後に向けて」、次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム2008、(丸の内 MY PLAZA ホールおよび MY PLAZA 会議室、千代田区、2008年9月16-17日).
12. 藏増 嘉伸「T2K アプリケーション(格子 QCD)」、T2K シンポジウム2008、(筑波大学計算科学研究センター、つくば市、2008年4月24-25日).
13. 青木 慎也パネルディスカッション「シミュレーションによる素粒子・原子核・宇宙物理の新展開」コーディネータ、計算基礎科学シンポジウム「シミュレーションでせまる宇宙の成り立ちー素粒子・原子核・宇宙物理の展望」(東京ステーションコンファレンス、東京、2008年6月16日).
14. 青木慎也 分科会 E 素粒子・原子核・天文学「次世代スパコンで物質と宇宙の進化を探る」モデレーターおよびパネルディスカッション「計算基礎科学における人材育成の現状と課題」コーディネーターおよび 全体討議「次世を担う世界水準の人材育成に向けて」次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム 2008一次代を担う世界水準の人材育成に向けてー (MY PLAZA、東京、2008年9月16、17日).
15. 青木慎也 「本領域の基本方針」、ワークショップ「計算科学による素粒子・原子核・宇宙の融合」(筑波大学計算科学研究センター、2008年12月1日-2日).
16. 青木 慎也 「計算基礎科学連携拠点」、シンポジウム「大規模計算が切り拓く基礎科学の将来」(つくば国際会議場 中ホール 300、2009年2月23日).
17. 石井 理修 「Multi-Quarks and Nuclear Force in Lattice QCD」、RCNP Workshop 「Challenge to New Exotic Hadrons」(RCNP, Osaka, Japan, July 30-31, 2008).
18. 石井 理修 「格子 QCD からみた J-PARC」、KEK 研究会「J-PARC の物理:ハドロン・原子核研究の新し

- い局面」(KEK, 2008年8月7日～9日).
19. 石井 理修「格子 QCD と J-PARC 一核力プロジェクトの近未来の拡張形(私見)ー」(パネルディスカッション), RIKEN 研究会「J-PARC でのハドロン物理を考える研究会」(理化学研究所、2008年9月1～2日).
  20. 山崎 剛「格子上での散乱・共鳴・束縛状態」「ストレンジネスを含むクォーク多体系分野の理論的将来を考える」研究会 (KKRホテル熱海、熱海、2009年2月27～28日)

## (B)その他の学会発表

1. 藏増 嘉伸「PACS-CS results for light quark physics in 2+1 flavor lattice QCD」, CCS Workshop on Perspectives on Light Quark Simulations through Machine, Algorithm and ILDG, (Tsukuba, Japan, Mar 10-12, 2009).
2. 滑川 裕介「Charmonium in 2+1 flavor lattice QCD」, International Workshop on Heavy Quarkonia 2008 (Nara, Japan, Dec. 2-5, 2008).
3. 浮田 尚哉「2+1 flavor lattice QCD simulation with  $O(a)$ -improved Wilson quarks」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory, (Williamsburg, Virginia, Jul 14-20, 2008),
4. 加堂 大輔「SU(2) and SU(3) chiral perturbation theory analyses on meson and baryon masses in 2+1 flavor lattice QCD」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory, (Williamsburg, Virginia, Jul 14-20, 2008).
5. 滑川 裕介「Charm quark system in 2+1 flavor lattice QCD using the PACS-CS configurations」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory, (Williamsburg, Virginia, Jul 14-20, 2008).
6. 梅田貴士「Charmonium Wave Functions at Finite Temperature from Lattice QCD Calculations」, RIKEN BNL Research Center Workshop on "Understanding QGP through Spectral Functions and Euclidean Correlators" (BNL, Upton, USA, Apr.23-25, 2008),
7. 梅田貴士「Thermodynamics of SU(3) gauge theory at fixed lattice spacing」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2008) (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008),
8. 大野浩史「Search for the Charmonium Dissociation Temperature with Variational Analysis in Lattice QCD」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008).
9. 金谷和至「Equation of state at finite Density in two-flavor QCD with improved Wilson quarks」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2008) (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008).
10. 梅田貴士「QCD Thermodynamics at fixed lattice scale」, The 2nd Asian Triangle Heavy Ion Conference (ATHIC 2008) (Tsukuba, Japan, Oct. 13-15, 2008).
11. 金谷和至「Lattice studies of QCD at finite temperature and finite density」, The 2nd Asian Triangle Heavy Ion Conference (ATHIC 2008) (Tsukuba, Japan, Oct. 13-15, 2008).

12. 金谷和至 「Fixed scale approach to the equation of state on the lattice」, The 21st International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2009) (Knoxville, TN, USA, Mar.30-Apr.4, 2009).
13. 吉江 友照 「Updates to the QCDml and sharing quark propagators」, The 12th International Lattice Data Grid Workshop (TV workshop hosted by EPCC, Edinburgh, UK, May 23, 2008)。
14. 吉江 友照 「Making use of the International Lattice Data Grid」(plenary), The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008).
15. 谷口 裕介 「Non-perturbative renormalization of  $N_f=2+1$  QCD with Schroedinger functional scheme」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice2008), (College of William and Mary, Williamsburg, Virginia, USA).
16. 青木 慎也 「Energy dependence of nucleon-nucleon potentials」, ``The XXVIth International Symposium on Lattice Field Theory'', (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008).
17. 石井 理修 「Nuclear from quenched and  $N_f=2+1$  full lattice QCD using the PACS-CS gauge configurations」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory, LATTICE2008 (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008).
18. 石井 理修 「Lattice QCD calculation of the nuclear force」, The 3rd LACM-EFES-JUSTIPEN Workshop, Joint Institute for Heavy Ion Research, (Oak ridge National Laboratory, Feb. 23-25, 2009).
19. 山崎 剛 「Non-perturbative determination of running coupling constant with twisted Polyakov loop」 16th YKIS Conference, Progress in Particles Physics 2008 (Kyoto, Japan, Feb. 16-19, 2009)
20. 村野啓子 「Universality of the  $N_f=2$  Running Coupling」The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Williamsburg, Virginia, USA, July.14-19,2008).
21. 上田悟 「Wilson Chiral Perturbation Theory for twisted mass QCD at NLO」The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Williamsburg, Virginia, USA, 2008 July 14-19).
22. 浮田 尚哉 「現実的なクォーク質量での  $N_f = 2 + 1$  格子 QCD 計算」, 日本物理学会年会 (山形大学、山形、2008年9月20-23日)
23. 浮田 尚哉 「PACS-CS の取り組み」, ストレンジネスを含むクォーク多体系分野の理論的将来を考える」 研究会 (KKR ホテル熱海、熱海、2009年2月27-28日)。
24. 滑川 裕介 「Charm quark system in  $2+1$  flavor lattice QCD」, 日本物理学会年会 (山形大学、2008年9月20-23日)。
25. 大野浩史 「有限温度格子 QCD における対角化の方法を用いたチャーモニウムの研究」, 基研研究会 「熱場の量子論とその応用」(京都大学基礎物理学研究所、京都、2008年9月3日-5日)
26. 大野浩史 「有限温度格子 QCD における対角化の方法を用いたチャーモニウムの解析」, 日本物理学会秋季大会 (山形大学、山形, Sept. 20-23, 2008).
27. 梅田貴士 「Thermodynamics at fixed lattice spacing」, 日本物理学会秋季大会 (山形大学、山形, Sept. 20-23, 2008).



28. 谷口裕介「 $N_f=2+1$  格子 QCD における非摂動的な繰り込み」、日本物理学会 2008 年秋季大会 (山形大学).
29. 石井 理修「格子 QCD による核力」、基研研究会「原子核の分子的構造と低エネルギー核反応—束縛系から散乱系へ—」(京都大学基礎物理学研究所、2008 年 7 月 2 日~4 日).
30. 石井 理修「格子 QCD による核力(III)—クエンチ QCD によるテンソル力と PACS-CS ゲージ配位を使ったフル QCD による核力」、日本物理学会 2008 年秋季大会 (山形大学、2008 年 9 月 20~23 日).
31. 石井 理修「格子 QCD からハドロン相互作用へ」、ワークショップ「計算科学による素粒子・原子核・宇宙の融合」(筑波大学計算科学研究センター、2008 年 12 月 1~2 日).
32. 石井 理修 「Nuclear force from 2+1 flavor lattice QCD using PACS-CS gauge configurations」、日本物理学会 第 64 回年次大会 (立教大学、2009 年 3 月 27~30 日).
33. 山崎 剛「Two-particle wave function with lattice scalar QED」日本物理学会年会(立教大学、東京、2009年3月27~30日).
34. 村野啓子「Universality study of Step Scaling Function in QCD with two dynamical quarks」日本物理学会年会(近畿大学、大阪、2008 年 3 月 22-26 日).
35. 村野啓子「格子 QCD から計算された核力ポテンシャルのエネルギー依存性」日本物理学会 秋季大会 (山形大学、山形、2008 年 9 月 20-23 日).
36. 村野啓子「格子 QCD から計算された核力ポテンシャルのエネルギー依存性(2)」日本物理学会年会 (立教大学、東京、2009 年 3 月 27-30 日).

## 5. シンポジウムの開催

1. 「CCS Workshop on Perspectives on Light Quark Simulations through Machine, Algorithm and ILDG」、筑波大学計算科学研究センター、つくば市、2009年3月10~12日、参加国数:5ヶ国、参加者数:36人。  
主催者:吉江友照、藏増嘉伸