

### 3 各研究部門の報告

#### I. 素粒子物理研究部門

##### 1. メンバ

教授 青木 慎也, 宇川 彰(計算科学研究センターフェロー), 金谷 和至(共同研究員)

准教授 石塚 成人, 蔵増 嘉伸, 吉江 友照

主任研究員 石井 理修

講師 谷口 裕介

研究員 浮田 尚哉, Nguyen Hoang Oanh, 中村 宜文, 滑川 裕介, 山崎 剛

##### 2. 概要

当部門では、本年度も、格子 QCD の大型シミュレーション研究の分野で活発な研究活動が行われた。当部門の研究者の大部分は、2006年7月の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に立ち上げられた研究グループ PACS-CS Collaboration に参加している。PACS-CS Collaboration では、当センターの PACS-CS や T2K-Tsukuba を主要計算機資源として、QCD に関する近似のない物理的予言を行うことを目的として、3 種類(up, down, strange)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  $N_f=2+1$  QCD の大規模シミュレーションを進めた。また、up, down 間の質量差や電磁相互作用を取り入れる  $N_f=1+1+1$  QCD の研究や、格子 QCD による He 原子核の研究などにも着手した。これらと並行して、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、や、計算技術開発なども行った。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/JLDG の構築・整備を推進した。

次世代スーパーコンピュータ「京」を中核とした革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの構築を主導するために、「High Performance Computing Infrastructure(HPCI)戦略プログラム」が文部科学省により推進されている。HPCI 戦略プログラムの 5 つの戦略分野の 1 つとして、青木が統括責任者を務める、分野 5「物質と宇宙の起源と構造」が採択され、2010 年度にはその準備研究を行った。分野 5 の戦略プログラムを実施する機関は、青木が拠点長を勤める「計算基礎科学連携拠点」(<http://www.jicfus.jp/jp/>)である。分野 5 の活動に関しては、<http://www.jicfus.jp/field5/jp/> を参照のこと。また、「京」を用いて計算機科学と計算科学分野の連携・融合を促す国際的な研究拠点として、神戸に計算科学研究機構(AICS)が設立され、蔵増が計算科学研究機構の主任研究員を兼任することとなった。

##### 3. 研究成果

###### 【1】PACS-CS Collaboration の活動(全員)

当センターでは、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 polynomial HMC (PHMC) アルゴリズムを組み合わせることによって 3 種類 (up、down、strange) 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である。平成 18、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ことが主要課題であった。平成 20 年度より 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への取り組みを開始し、平成 21 年度 reweighting 法を用いた物理点直上でのシミュレーションに成功した。

(1) 1+1+1 フレーバーQCD+QED シミュレーションの開発と物理点における体積効果の検証 (蔵増、浮田、中村、滑川)

次のステップとして平成 22 年度は2つの大きなテーマに取り組んだ。一つは 1+1+1 フレーバー QCD+QED シミュレーションの開発である。従来の格子 QCD 計算では、アルゴリズム的理由により up と down クォークの質量は人為的に等しくし (2+1 フレーバー)、電磁相互作用の効果も無視していた。これに対して、1+1+1 フレーバー QCD+QED シミュレーションでは自然界と同じように up、down、strange クォークの質量をすべて独立なものとして扱い、電磁相互作用の効果も同時に評価することを目指している。我々は、基本的戦略として reweighting 法によって電磁相互作用と up-down クォークの質量差を取り入れるを試みている。本年度は、格子上における電磁相互作用の定式化とそれに対する reweighting 法の適用テストを実施し、年度末から本格計算へと移行した。

もう一つのテーマは物理点における体積効果の検証である。このために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 94Tflops、平成 20 年 6 月稼働開始) を利用したより大きな空間サイズのシミュレーションを実行中である。PACS-CS を用いた物理点計算では、格子サイズは  $32^3 \times 64$  であったが、T2K-Tsukuba を利用した計算では、格子サイズは  $64^4$  であり、空間体積は 8 倍になっている。図 1 はハドロン質量および  $\pi$  メソン、K メソン崩壊定数の実験値との比較を表している。up-down クォーク質量、strange クォーク質量、格子間隔を決定するためのインプットは  $\pi$  メソン、K メソン、 $\Omega$  バリオンの質量であり、今後 reweighting 法を用いたクォーク質量の物理点へのチューニングが必要であることがわかる。また、 $\rho$  メソン質量と  $\Delta$  バリオン質量の実験値からのズレが他のハドロンに比べて顕著であるが、それらは実験的には共鳴状態であることが知られており、その効果は図中の結果には取り入れられていない。その他のハドロンに関しては、実験値とのズレは最大で数%程度である。

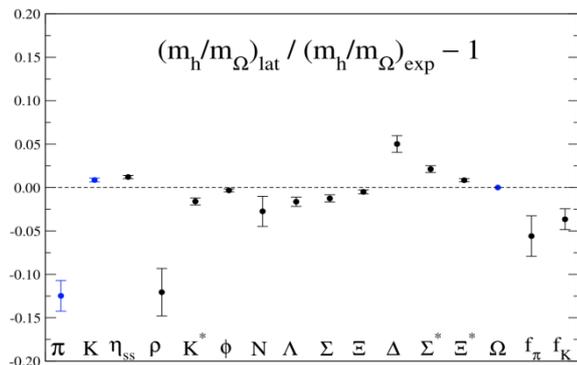


図1 ハドロン質量及び崩壊定数の実験値との比較

$\Omega$  バリオンの質量で規格化されている。青丸は up-down クォーク質量、strange クォーク質量、格子間隔を決めるためのインプットを表す。

## (2) ハドロン共鳴状態の解析 (石塚)

これまで PACS-CS および T2K-Tsukuba を利用して生成された配位を用いて様々な物理量を計算することが可能であるが、特に興味深いものはハドロン共鳴状態の解析である。その深い理解の為には、ハドロン散乱位相を格子上の数値計算により定量的に評価し、実験値と比較することが非常に重要である。この研究では、 $J(PC)=1(-)$  の共鳴状態である  $\rho$  中間子の研究を、2 体  $\pi$  の散乱位相から行った。 $\rho$  中間子の研究はこれまで、動的クォークとして  $u$ ,  $d$  クォークのみを扱った研究しかなかった。この研究では更に  $s$  クォークの効果を取り入れ、より現実に近い状況で研究を行った。数値計算は、PACS-CS グループによって生成されたゲージ配位 ( $a=0.0907$  fm,  $L=2.9$  fm) の中で、クォーク質量 :  $m_\pi=410$  MeV と  $300$  MeV の二つの質量のもとで行った。散乱位相から P-wave の有効長公式を用いて、それぞれの質量での  $\rho\pi\pi$  有効相互作用定数を求めた。我々の得た相互作用定数の結果は、 $m_\pi=410$  MeV では  $g=5.53$  (0.38)、 $300$  MeV では  $g=5.98$ (0.56) である。これらから相互作用定数のクォーク質量依存性が、非常に小さいことがわかった。また、これらの値から実際のクォーク質量 ( $m_\pi=140$  MeV) での  $\rho$  中間子の崩壊幅を評価すると、 $\Gamma=130$  (18) MeV と  $\Gamma=152$ (28) MeV である。これらは実験値  $150$  MeV をよく再現している。これらの研究の暫定的成果は既に論文に掲載されている。また最終研究成果は 2011 年度に論文掲載予定である。

## (3) 格子 QCD による原子核の直接構成 (宇川、蔵増、山崎)

格子 QCD による原子核の直接構成の研究は平成 21 年度にヘリウム原子核の束縛エネルギー計算によって開始されたが、平成 22 年度は 2 核子系の計算を試みた。2 核子系にはスピン三重項チャネル (重陽子) とスピン一重項チャネルが存在するが、前者のみが束縛状態であり、その束縛エネルギーが  $3$  MeV 弱と極めて小さいことが大きな特徴である。そのためヘリウム原子核の直接計算よりも困難であることが予想される。我々は先ず計算コストを抑えるため、クエンチ近似で重いクォーク質量を用いた試験的計

算を行った。散乱状態と束縛状態を識別するためには、2 核子系のエネルギーと 2 個の自由核子エネルギーの差の体積依存性を調べる必要がある。格子の空間サイズ  $L$  を 24 から 96 まで変化させる計算を行った結果、束縛エネルギーは無限体積の極限でも有限の値として存在し、スピン三重項チャンネル(図2左)とスピン一重項チャンネル(図2右)の両者とも束縛状態であるという結論が得られた。もちろん、自然界ではスピン三重項チャンネルのみが束縛状態であり、スピン一重項チャンネルは束縛していないため、我々が見出したスピン一重項チャンネルの束縛状態は、クエンチ近似および重いクォーク質量で計算を行ったことによる効果だと考えている。今後真空偏極効果を取り入れ物理的クォーク質量に近づけていけば、スピン一重項チャンネルの束縛エネルギーは徐々に減少し、最終的には非束縛状態になるのではないかと推測し、現在クォーク質量依存性を調べている。

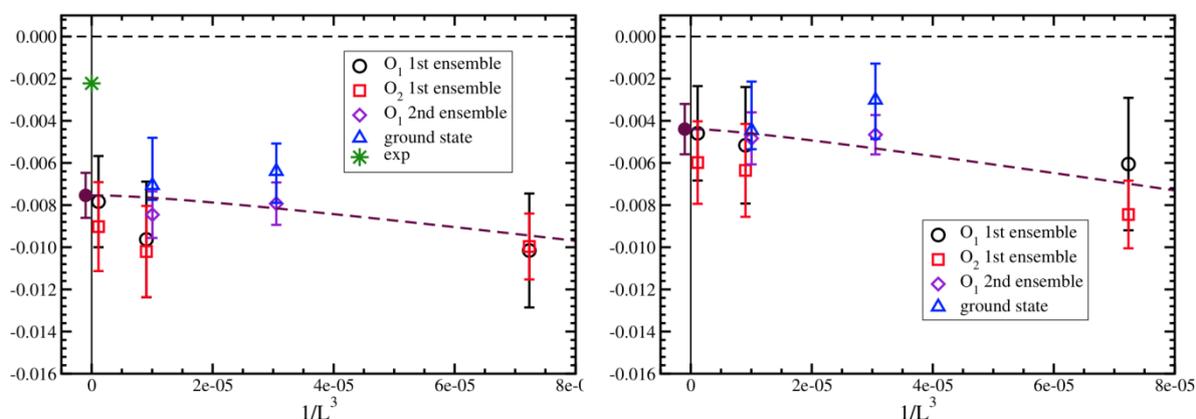


図2 2核子系エネルギーの束縛エネルギーの体積依存性。

破線は空間体積無限大への外挿の様子。左図:スピン三重項(重陽子)、右図:スピン一重項。

## 【2】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、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 により計算する方法を提案し、さまざまな研究を進めている。青木はポテンシャルの近距離での振舞を解析的に調べる方法を提案したが、今年度はその方法を3フレーバーに拡張し、チャンネルによっては斥力ではなく引力になるという結果を得た。また、ポテンシャルのエネルギー依存性及び、角運動量  $L$  依存性を調べ、ポテンシャルのエネルギー及び角運動量依存性が小さいことを示した。

### (1) フレーバーSU(3)極限での H ダイバリオン

HAL QCD Collaboration は、格子 QCD を用いてフレーバーSU(3)対称極限な世界におけるバリオン

間相互作用を調べた。彼らは S 波状態に注目し、最近に開発された方法を用いて、必要十分な6つのポテンシャルを導出した。フレーバー1重項チャンネルが他と異なり短距離で引力であり、H ダイバリオン状態が存在する可能性があるため、さらに研究を進めた。体積を大きくするなどした計算を行なった結果、フレーバーSU(3)対称極限ではHダイバリオンが存在することを示した(図3)。さらに、sクォークがu,dより重くなり、フレーバーSU(3)が破れた場合に、ポテンシャルを計算する方法を検討し、実際に数値計算を実行した。その結果、粒子基底で書いた 3x3 のポテンシャル行列が得られた。

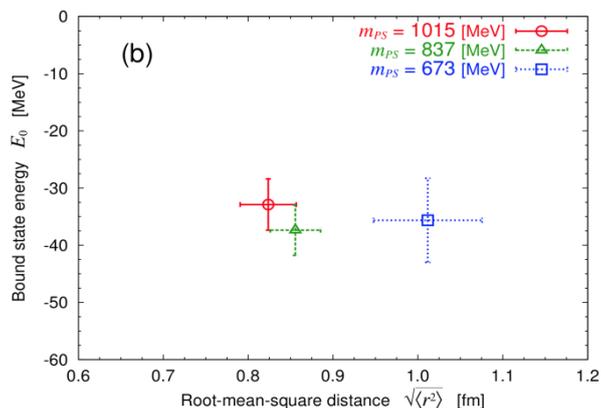


図3:H ダイバリオンの束縛エネルギー(MeV)と2バリオン間の平均距離(fm)。

## (2) バリオン間三体力の研究

近年、原子核や中性子星などの諸性質を理解する上で、三体力の果たす役割の重要性が指摘されている。土井らは、格子 QCD による三体力の決定を目指し、今年度は三体系内での有効二体相互作用に着目した計算を行った。PACS-CS Collaboration によって生成されたパイオン質量が 700 MeV に対応する 2+1 フレーバーゲージ配位を使って、三重水素原子核中の三体相互作用が計算された。ここでは 3 つの核子が直線上に並んだ配位での相互作用を計算している。三体相互作用に近距離での斥力の兆候が見えており、興味深い結果である。

## 【3】有限温度・有限密度 QCD の研究 (青木, 金谷)

### (1) 固定格子間隔アプローチと T-integral 法による状態方程式の研究

平成 20 年度に開発した T-integral 法に基づく固定格子間隔アプローチは、様々な温度のシミュレーションを、一つの格子スケールで実行する方法で、計算時間を大幅に抑えつつ、精度の高い有限温度計算を遂行する可能性を拓いている。平成20年度にクエンチ近似による試験研究で方法としての有効性を確認し、平成21年度に現実的な  $N_f = 2 + 1$  でのシミュレーションを、u, dクォーク質量が現実より重い点で開始した。固定格子間隔アプローチでは、既存のゼロ温度配位を活用できるメリットがある。CP-PACS+JLQCDグループによる  $N_f=2+1$  QCD の温度ゼロでの研究結果と公開されているゼロ温度ゲージ配位を利用して、そのシミュレーション・ポイントで有限温度シミュレーションを実行し、ウィルソン型クォークとして初めて、 $N_f = 2 + 1$  の状態方程式の計算に成功した。

## (2) 有効ポテンシャルによる QCD 有限温度・有限密度相転移の研究

QGP 有限温度・有限密度相転移の次数を判定するうえで、観測量のヒストグラムはもともと直感的な情報を含んでいる。我々は、測定が容易なプラケットのヒストグラムから有効ポテンシャルを定義し、その振る舞いから相転移の次数を研究する方法を提案した。そしてその応用として、SU(3)純ゲージ理論のシミュレーションとホッピングパラメータ展開により、クォークが重い領域での QCD の有限温度相構造を研究した。reweighting 法から導かれる有効ポテンシャルの微分の簡単な振る舞いを利用して、様々なゲージ結合定数  $\beta$  におけるシミュレーション結果を組み合わせ、プラケット期待値の広い範囲で有効ポテンシャルの微分を評価した(図4左)。

それに基づき、有効ポテンシャルを計算して、純ゲージ理論の1次相転移が、クォークの効果によりクロスオーバーに変わる臨界点の位置を評価した(図4右)。現在、この研究などに、化学ポテンシャルに関する Taylor 展開の手法を組み合わせ、有限密度における QCD 相構造の研究を進めている。

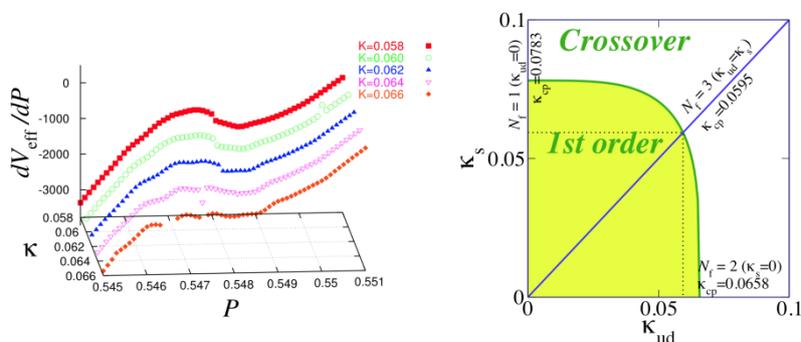


図4: (左)プラケット有効ポテンシャルの微分。(右)重クォーク領域における  $N_f=2+1$  QCD の有限温度相転移次数のクォーク質量依存性。

## (3) 格子上の中間子スペクトル関数の研究

チャーモニウムなどのスペクトル関数の研究は、クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)の性質を研究する上で重要な情報を与えている。これまで格子上では、最大エントロピー法を用いた計算が主に行われてきたが、仮想モデルの選び方に由来する結果の不定性の問題や、有限の格子上では離散的なはずのスペクトル関数が連続関数になってしまう原理的な欠陥があり、最終的なスペクトル関数の信頼性が問題となっている。我々は、対角化の方法を用いて、離散的なスペクトル関数を評価する方法を開発し、その有効性を検証した。自由 Wilson クォークの場合に、中間子伝搬関数から対角化の方法を使って得られるスペクトル関数と、スペクトル関数の解析解を比較し、対角化の方法で用いる規定の数を十分大きくすることで、解析解が再現されることを確認した。他方、時間方向の格子サイズや数値精度の限界による制限も明らかにした。次に、クエンチ近似QCDを研究し、基底状態に関しては、最大エントロピー法によるスペクトル関数のピークの位置とピーク周りの面積を、対角化の方法でよく再現することを示した。他方、第一励起状態に関しては、対角化の方法の方が実験値に近い結果を導くことを示した。有限温度では、格子サイズの制限により明確な結論は得られなかったが、少なくとも臨界温度の 1.4 倍の温度まで、 $J/\Psi$  など

が消失する兆候は確認できなかった。

#### (4) 重いクォーク間の自由エネルギーと遮蔽質量の研究

ゲージ不変なポリアコフ ラインを時間反転と荷電反転とでそれぞれ偶部分と奇部分に分類し、それらの相関関数から、電氣的遮蔽と磁氣的遮蔽をゲージ不変に定義する方法を提案した。実際に、 $N_f=2$  QCD の場合に相関関数の長距離での遮蔽を調べ、電氣的遮蔽質量と磁氣的遮蔽質量を計算した。電氣的遮蔽質量と磁氣的遮蔽質量の比(スクリーニング比)が有効模型や超対称模型と同様な振る舞いをしていることがわかった。

また、固定格子間隔アプローチで生成された  $N_f=2+1$  QCD の有限温度ゲージ配位上で、重いクォーク間の自由エネルギーを研究した。極めて高温でも、十分短距離では、自由エネルギーが温度ゼロでの重いクォーク間ポテンシャルに一致することを示した。これは、温度効果は長距離のもので、十分短距離では高温相でも温度効果が無いという、理論的予想と一致しているが、従来の研究では、自由エネルギーの原点が温度毎に異なるくりこみを受けるために、この理論的予想を使って、短距離で一致するように手で調整されていた。固定格子間隔アプローチでは、くりこみが温度に依らないためにそうした調整は不要であり、理論的予想を初めて確認することに成功した。また、長距離では、クォークの閉じ込めがやぶれて、自由エネルギーが一定値になる様子も確認された。 $N_f=0$  の結果と比べると、 $N_f=2$  および  $2+1$  の結果は有意に大きく、軽いクォークが大きな影響を持っていることが示された。

#### 【3】ILDG/JLDG の構築・運用に係わる活動 (吉江, 浮田)

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 (ILDG) プロジェクトに参画し、システムの構築・改良に携わった。ILDG に投入する配位のメタデータを半自動的に収集するシステムの構築プロジェクト (Metadata Capture Project) をエジンバラ大学と共同で推進した。また、国内の格子 QCD 研究者のデータグリッド Japan Lattice Data Grid (JLDG) の改良に携わった。

## 4. 研究業績

### (1) 研究論文

1. PACS-CS Collaboration: T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa, Helium Nuclei in Quenched Lattice QCD, Phys. Rev. D 81, No. 11 (2010) ref. 111504(R), pp.1-4.
2. Yoshinobu Kuramashi, Progress in Lattice QCD, Proceeding of Science (ICHEP 2010) 545.
3. Naruhito Ishizuka for PACS-CS Collaboration, Calculation of  $\rho$  meson decay width from the PACS-CS configurations, Proceeding of Science (LATTICE2010) 108.
4. Takeshi Yamazaki, Calculation of Helium nuclei in quenched lattice QCD, Proceeding of Science (LATTICE2010) 021.
5. Y. Taniguchi for PACS-CS Collaboration, Non-perturbative renormalization of quark mass in  $N_f=2+1$

- QCD with the Schroedinger functional scheme, PoS **LATTICE2010** (2010) 242
6. Y. Taniguchi for PACS-CS collaboration, Non-perturbative renormalization of quark mass in  $N_f=2+1$  QCD with the Schroedinger functional scheme, JHEP **1008** (2010) 101, 1-25
  7. T. Inoue, N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki (HAL QCD collaboration), Baryon-Baryon Interactions in the Flavor SU(3) Limit from Full QCD Simulations on the Lattice, Prog. Theor. Phys. 124 (2010) 591-603.
  8. Sinya Aoki, Janos Balog, Peter Weisz, Operator product expansion and the short distance behavior of 3-flavor baryon potentials, JHEP09(2010)083.
  9. H. Fukaya, S. Aoki, T.W. Chiu, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada (JLQCD and TWQCD collaborations), Determination of the chiral condensate from QCD Dirac spectrum on the lattice, Phys. Rev. D83 (2011) 074501.
  10. Takashi Inoue, Noriyoshi Ishii, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura, Kenji Sasaki (HAL QCD Collaboration), Bound H-dibaryon in Flavor SU(3) Limit of Lattice QCD, Phys. Rev. Lett. 106(2011) 162002.
  11. S. Aoki (for HAL QCD Collaboration), Baryon Interactions from Lattice QCD, AIP Conference Proceedings Vol. 1235 (2010) 16-22.
  12. S. Aoki (for HAL QCD Collaboration), Baryon-Baryon interactions from lattice QCD, Chinese Physics C 34 No.9 (2010) 1236-1240.
  13. Sinya Aoki, Lattice QCD and Nuclear Physics, to be published in LES HOUCHES SUMMER SCHOOL: SESSION 93: MODERN PERSPECTIVES IN LATTICE QCD: QUANTUM FIELD THEORY AND HIGH PERFORMANCE COMPUTING, 3-28 Aug 2009, Les Houches, France.
  14. JLQCD Collaboration: Guido Cossu, Sinya Aoki, Shoji Hashimoto, Takashi Kaneko, Hideo Matsufuru, Jun-ichi Noaki, Eigo Shintani, Finite temperature QCD at fixed Q with overlap fermions, PoS (Lattice 2010) 174.
  15. Sinya Aoki, Recent progress on nuclear potentials from lattice QCD, PoS (ICHEP2010) 362.
  16. JLQCD Collaboration: T. Kaneko, S. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, S. Hashimoto, J. Noaki, T. Onogi, Light meson form factors in  $N_f=2+1$  QCD with dynamical overlap quarks, PoS (Lattice2010) 146.
  17. JLQCD Collaboration: K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, T. Onogi, N. Yamada, Nucleon strange quark content in 2+1-flavor QCD, PoS (Lattice2010) 160.
  18. Keiko Murano, Noriyoshi Ishii, Sinya Aoki, Tetsuo Hatsuda, Non-locality of the nucleon-nucleon potential from Lattice QCD, PoS (Lattice2010) 150.
  19. E. Shintani, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Onogi, N. Yamada, Two-photon decay of  $\pi^0$  from two-flavor lattice QCD, PoS(Lattice 2010)159.
  20. Noriyoshi Ishii, Lambda-Nucleon and Nucleon-Nucleon Interactions on the Lattice, Few-Body Systems 49, 269-281 (2011).

21. K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, T.~Onogi and N.~Yamada [JLQCD collaboration], Nucleon strange quark content in 2+1-flavor QCD, Proceeding of Science (LAT2010) 160.
22. Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, N. Ukita and T. Umeda, Electric and Magnetic Screening Masses at Finite Temperature from Generalized Polyakov-Line Correlations in Two-flavor Lattice QCD, Phys. Rev. D 81, No.9 (2010) ref.091501(R), pp.1-5.
23. Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, H. Ohno and T. Umeda, Heavy-quark free energy at finite temperature with 2+1 flavors of improved Wilson quarks in fixed scale approach, PoS (LATTICE 2009) (2010) ref.165, pp.1-7.
24. K. Kanaya, S. Aoki, H. Ohno, T. Umeda, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa, Towards the equation of state in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks in the fixed scale approach, PoS (LATTICE 2009) (2010) ref.190, pp.1-7.
25. S. Ejiri, Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, T. Umeda, Equation of State and Heavy-Quark Free Energy at Finite Temperature and Density in Two Flavor Lattice QCD with Wilson Quark Action, Phys. Rev. D 82, No.1 (2010) ref.014508, pp.1-35.
26. K. Kanaya, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa, H. Ohno, H. Saito, N. Ukita, T. Umeda, QCD thermodynamics at zero and finite densities with improved Wilson quarks, Progr. Theor. Phys. Suppl., No.186 (2010) 556-562.
27. Kazuyuki Kanaya, Finite Temperature QCD on the Lattice -- Status 2010, PoS (LATTICE 2010) (2011) ref.012, pp.1-21.
28. S. Ejiri, Y. Nakagawa, S. Aoki, K. Kanaya, H. Ohno, H. Saito, T. Hatsuda, Y. Maezawa, T. Umeda, Scaling behavior of chiral phase transition in two-flavor QCD with improved Wilson quarks at finite density, PoS(LATTICE 2010) (2011) ref.181, pp.1-7.
29. H. Ohno, S. Aoki, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Saito, T. Umeda, An application of the variational analysis to calculate the meson spectral functions, PoS(LATTICE 2010) (2011) ref.209, pp.1-7.
30. H. Saito, S. Aoki, K. Kanaya, H. Ohno, S. Ejiri, T. Hatsuda, Y. Maezawa, T. Umeda, The order of the deconfinement phase transition in a heavy quark mass region, PoS(LATTICE 2010) (2011) ref.212, pp.1-7.
31. T. Umeda, S. Aoki, K. Kanaya, H. Ohno, S. Ejiri, T. Hatsuda, Y. Maezawa, EOS in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed-scale approach, PoS(LATTICE 2010) (2011) ref.218, pp.1-7.
32. H. Ohno, S. Aoki, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Saito and T. Umeda, Charmonium spectral functions with the variational method in zero and finite temperature lattice QCD, Phys. Rev. D submitted.
33. Kazuyuki Kanaya, Lattice results on the phase structure and equation of state in QCD at finite

temperature, AIP Conference Proceedings 1343 (2011) 57-62.

34. Mark G. Beckett, Paul Coddington, Balint Joo, Chris M. Maynard, Dirk Pleiter, Osamu Tatebe, Tomoteru Yoshie, Building the International Lattice Data Grid, Comp. Phys. Comm. 182 (2011) 1208-1214.

## (2) 学会発表

### (A) 招待講演

1. 藏増 嘉伸 「Progress in Lattice QCD」 35th International Conference on High Energy Physics (Palais des Cong`es, Paris, France, July 22-28, 2010)
2. 藏増 嘉伸 「Physical Point Simulation in 2+1 Flavor Lattice QCD」 CERN Theory Institute "Future Directions in Lattice Gauge Theory" (CERN, Geneva, Switzerland, July 19-Aug. 10, 2010)
3. 藏増 嘉伸 「Recent Results from PACS-CS Collaboration」 Japanese-German Seminar 2010 "Lattice QCD confronts experiment" (Mishima, Japan, Nov. 4-6, 2010)
4. 藏増 嘉伸 「Application of Block Krylov Subspace Algorithms to the Wilson-Dirac Equation with Multiple Right-Hand Sides in Lattice QCD」 (招待講演), Sixth Workshop on QCD Numerical Analysis (Boston University, Boston, USA, Sep. 8-10, 2010)
5. 山崎 剛 「Calculation of Helium Nuclei in Quenched Lattice QCD」 (The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory, Lattice 2010. (the Tanka Village Resort, Villasimius, Sardinia, Italy, June 14-19, 2010)
6. 青木 慎也 「Neutron electric dipole moment from lattice QCD」 International Workshop on Particle's EDM and Implications, (Shanghai, China, June 14-16, 2010.)
7. 青木 慎也 「Hadron-Hadron Interactions from lattice QCD」 (Elba XI Workshop ``Electron-Nucleus Scattering XI", (Elba, Italy, June 21-25, 2010.)
8. 青木 慎也 「Recent progress on nuclear potentials from lattice QCD」 35th International Conference on High Energy Physics(ICHEP), (July 22-28, 2010, Paris, France.)
9. 青木 慎也 「Extraction of hadron interactions from lattice QCD」 CERN Theory Institute "Future directions in lattice gauge theory LGT10", (19 July - 13 August, 2010, CERN, Switzerland.)
10. 青木 慎也 「Nuclear Force from lattice QCD and its extensions」 MLL-colloquium, (October 21, 2010, TU, Munich, Germany)
11. 青木 慎也 「Extraction of hadron interactions from lattice QCD」 Japanese-German Seminar 2010 "Lattice QCD confronts experiments" (4-6, November, 2010, Mishima, Japan)
12. 青木 慎也 「From Quarks to Supernovae」 International Symposium "From Quarks to Supernovae", (28-30, November, 2011, Atagawa Heights, Izu, Shizuoka, Japan)
13. 青木 慎也 「 $\alpha_s$  from PACS-CS」 (招待講演), Workshop on Precise Measurement of  $\alpha_s$ , (9-11 February 2011, Max Planck Institut für Physik, Munich, Germany)

14. 石井 理修「NN interaction from the lattice」(招待講演), International conference on the structure of baryons, BARYONS'10, (Dec.7-11, 2010, Osaka, Japan)
15. K. Kanaya 「Finite temperature QCD on the lattice -- status 2010」 The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2010) (Villasimius, Sardinia, Italy, June 14-19, 2010)
16. K. Kanaya 「Status of EOS calculation in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach」 (International workshop "Extreme QCD 2010" (XQCD 2010) (Physikzentrum Bad Honnef, Germany, June 21-23, 2010)
17. K. Kanaya 「Lattice results on the phase structure and equation of state in QCD at finite temperature」 International conference on "Quark Confinement and the Hadron Spectrum IX" (QCHS9) (Complutense University of Madrid, Madrid, Spain, Aug. 30-Sept. 4, 2010)
18. 吉江 友照 「格子 QCD データグリッド ILDG/JLDG の構築と運用」 第 3 回データ科学ワークショップ (筑波大計算科学研究センター, つくば, 2010 年 11 月 25-26 日)

#### (B) その他の学会発表

1. 石塚 成人「Calculation of rho meson decay width from the PACS-CS configurations」, The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory, Lattice 2010. (the Tanka Village Resort, Villasimius, Sardinia, Italy, June 14-19, 2010)
2. 滑川 裕介「Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD」, Japanese-German Seminar 2010 "Lattice QCD confronts experiment" (Mishima, Japan, Nov. 4-6, 2010)
3. Y. Taniguchi 「Non-perturbative renormalization of quark mass in  $N_f=2+1$  QCD with the Schroedinger functional scheme」, The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory, Tanka Village, Villasimius, Sardinia, Italy, June 14-19, 2010
4. Y. Taniguchi 「Non-perturbative renormalization of quark mass in  $N_f=2+1$  QCD with the Schroedinger functional scheme」, 国際シンポジウム「From Quarks to Supernovae」, 静岡県賀茂郡東伊豆町奈良本, Nov. 28-30, 2010
5. 石塚 成人 「Lattice QCD calculation of the rho meson decay width」, 国際シンポジウム「From Quarks to Supernovae」 (熱川ハイツ, 静岡県, 2010 年 11 月 28 日-30 日)
6. K. Kanaya 「QCD thermodynamics with Wilson-type quarks」, Japanese-German Seminar 2010 "Lattice QCD confronts experiments" (Mishima, Japan, Nov. 4-6, 2010)
7. 吉江 友照 「Status Report: JLDG」, The 16th International Lattice Data Grid Workshop (Video workshop hosted by Boston Univ., March 5, 2011)
8. 藏増 嘉伸 「Current Status and Future Perspectives in Lattice Gauge Theories」, 次世代格子ゲージシミュレーション研究会 (理化学研究所, 和光市, 2010 年 9 月 24-26 日)
9. 藏増 嘉伸 「エクサスケールコンピューティングで基礎科学が目指すもの」, 2011 年ハイパ

フォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム (産業技術総合研究所, つくば市, 2011 年 1 月 18-19 日)

10. 石塚 成人 「Calculation of rho meson decay width from the PACS-CS configurations」, 日本物理学会 (九州工業大学戸畑キャンパス, 北九州市, 2010 年 9 月 11-14 日)
11. 滑川 裕介 「Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD」, “New Hadrons” Workshop 2010 (理化学研究所, 和光市, 2011 年 2 月 28-3 月 1 日)
12. 谷口 祐介 「 $N_f=2+1$  QCD における Schroedinger functional scheme を用いた非摂動的な繰り込み」, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 11-14 日, 九州工業大学
13. 青木 慎也 「次世代スパコンの目指すもの」& 「私から見た次世代スパコン」, シンポジウム『次世代スパコンで展開が期待される素粒子物理学』、北陸信越地区素粒子論グループ合宿研究会、2010 年 5 月 23 日
14. 吉江 友照 「計算素粒子物理学のデータ共有基盤 JLDG の高度化」, 平成 21 年度 CSI 委託事業報告交流会 (学術総合センター, 東京, 2010 年 6 月 21 日)
15. 吉江 友照 「Hepnet-J/sc 報告」, Hepnet-J ユーザー会 (東大宇宙線研究所神岡研究施設, 神岡, 2010 年 10 月 30-31 日)

## 5. 連携・国際活動・社会貢献、その他

1. 青木慎也 他, 科研費新学術領域研究「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」主催国際シンポジウム”From Quarks to Supernovae” (熱川ハイツ, 伊豆, 静岡, 2010 年 11 月 28-30 日)参加者 約 80 名
2. 青木慎也 他, 科研費新学術領域研究「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」レクチャーシリーズの主催 第一回 2010 年 6 月 9-10 日 東京大学 理学部, 東京 第二回 2010 年 12 月 15-16 日 京都大学 基礎物理学研究所, 京都
3. 金谷 和至 他, 日本学術振興会 二国間交流事業 日独セミナー「格子 QCD の新段階 --- 実験の再現から予言へ (Lattice QCD confronts experiment)」 (三島市・三島商工会議所会館, 2010 年 11 月 4-6 日)参加者 44 名 (内、ドイツ 13 名、米国 3 名)
4. 金谷 和至 他, 国際ワークショップ「有限温度有限密度 QCD の非摂動的展望 (Nonperturbative aspects of QCD at finite temperature and density)」 (筑波大学計算科学研究センター, 2010 年 11 月 8-9 日) 参加者 43 名 (内、海外 7 ヶ国 12 名)
5. 金谷 和至 他, Asian School on Lattice Field Theory 2011 (Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India, 2011 年 3 月 14-25 日) 参加者 約 40 名