

III. 素粒子宇宙研究部門

III-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

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 $N_f=3$ QCD の大規模シミュレーションを行うことを目標にゲージ配位の生成を行った。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、有限温度・有限密度 QCD の研究、繰り込み定数の非摂動的計算、なども行われた。さらに、格子 QCD 配位やその他のデータを国内・外で共有する為のデータグリッド JLDG・ILDG の構築に参画した。

3. 研究成果

【1】PACS-CS Collaboration の活動(全員)

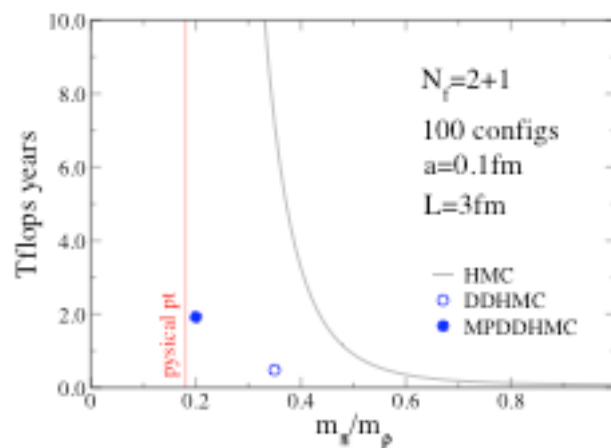
計算科学研究センターでは、平成 17 年度から 3 ヶ年計画で特別教育研究経費(拠点形成)を受けて開発・製作が進められてきた超並列クラスタ計算機 PACS-CS(計算ノード数 2560、ピーク演算性能 14.3Tflops)が平成 18 年 7 月から稼働を開始した。PACS-CS Collaboration は PACS-CS を主要な計算設備として格子 QCD の研究を行うことを目的とし、計算科学研究センターのメンバを中心として組織されている。その目標は、domain-decomposed HMC (DDHMC) アルゴリズムと polynomial HMC (PHMC) アルゴリズムを組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(physical point)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 up-down クォーク質量でのシミュレーションが主要課題であったが、以下に平成 19 年度における進展を述べる。

(1) 軽い力学的クォークの場合の計算アルゴリズムのコスト評価

平成 18 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 $m_{ud}=61, 41, 22, 19, 11, 3$ 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、 $m_{ud}=19\text{MeV}$ の場合は 20%程

度軽い値を採用し、strange クォーク質量依存性を調べた。平成 19 年度末の時点で最も軽い up-down クォーク質量は 3MeV 程度であり、これに対応するパイ中間子質量は 155MeV である。パイ中間子のコンプトン波長よりも大きな空間格子サイズで行われているシミュレーションとしては、現在のところ世界で最も軽い up-down クォーク質量を実現している。m_{ud}=3MeV のシミュレーションに関しては、これを可能とするために DDHMC に対していくつかのアルゴリズム的改良を施した。主な改良点は、(i)質量前処理、(ii)クロノジカル解法、(iii)デフレーション解法、の 3 つである。改良された DDHMC(MPDDHMC)アルゴリズムの計算コストと従来の HMC アルゴリズムの計算コストを図1において比較している。

図1:改良された DDHMC(MPDDHMC)アルゴリズムと従来の HMC アルゴリズムの計算コスト比較。HMC アルゴリズムに対する計算コストのクォーク質量依存性は過去のシミュレーション結果から得られた経験則。DDHMC の結果は m_{ud}=11MeV のシミュレーションポイントにおける計算コスト。

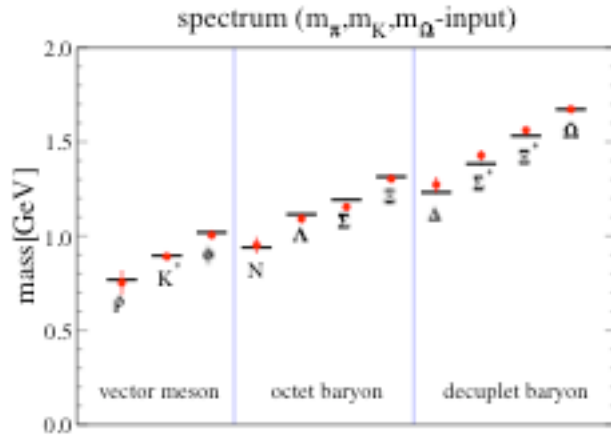


従来の HMC 法と比べて格段のコスト削減に成功しているとともに、現在の計算機性能で physical point のシミュレーションが可能であることが見てとれる。現実世界におけるパイ中間子質量 $m_\pi = 140$ MeV はもはや目前であり、平成 20 年度における目標は physical point におけるシミュレーションである。これは 1980 年代初頭に格子 QCD シミュレーションが始まって以来の大きな夢であり、格子 QCD 分野における画期的成果となることが期待される。

(2) ハドロン質量など物理量の計算

平成 19 年度末までに、m_{ud}=61,41,22,19,11,3MeV の点において各々 2500、2000、2250、2000、2000、990 分子動力学時間単位分のシミュレーションが終了し、生成されたグルーオン配位を用いてハドロン伝播関数の計算が行われ、メソン・バリオン質量、擬スカラーメソン崩壊定数などの測定がなされた。各物理量におけるクォーク質量依存性を解析した結果、擬スカラーメソンチャネルにおいてカイラル摂動論の予言に従う曲率を確認し、physical point 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、2007年 Lattice 国際会議で招待講演(論文1)と一般講演で発表された(論文 2,3)。以上と並行して、クォーク質量の繰り込み定数および強い相互作用の結合定数の非摂動的決定、rho 中間子の崩壊幅の計算、トポジカルチャージ測定、重いクォークの物理等、本課題が目標とするテーマが推進された。

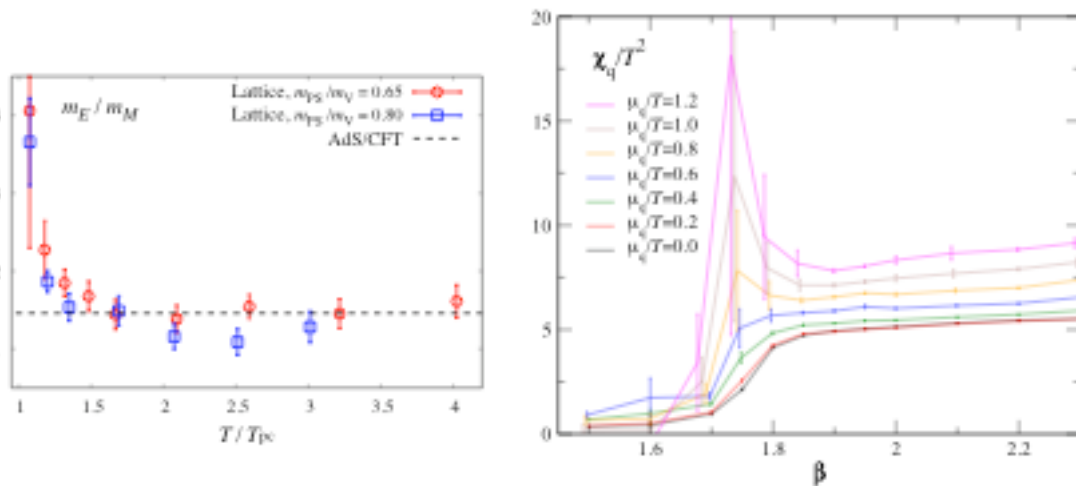
図2:ハドロン質量の実験値との比較。横棒は実験値を表す。



【2】有限温度・有限密度QCDの研究(青木、金谷、石井、浮田)

$N_f=2$ QCD の配位上での磁氣的、および電氣的遮蔽質量の計算を行った。Euclid 時間反転 と 荷電共役 の対称性を考えることによって Polyakov loop 相関をそれぞれの対称性に依じて分類し、これらの遮蔽質量を導出する事ができる。それらの結果、有限温度摂動論からの予想の通り、磁氣的遮蔽質量 (m_M) は電氣的遮蔽質量 (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。また、昨年度までに計算した $N_f=2$ QCD のゲージ配位を用いて重いクォークの自由エネルギーや、クォーク数サセプティビリティの有限密度効果に関する計算を行った。化学ポテンシャルに関するTaylor展開法を用いた。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 法を用いる手法による計算も行った(論文4、5、6)。図3参照。

図3: 有限温度・有限密度QCDの研究。左図は、磁氣的遮蔽質量 (m_E)と 電氣的遮蔽質量(m_M)の比である遮蔽質量比の温度依存性。AdS/CFT 対応からの予想 $m_E / m_{gap} = 1.46$ も図中に示した。右図は、複素位相をガウス関数で近似する手法による有限密度でのクォーク数サセプティビリティ。



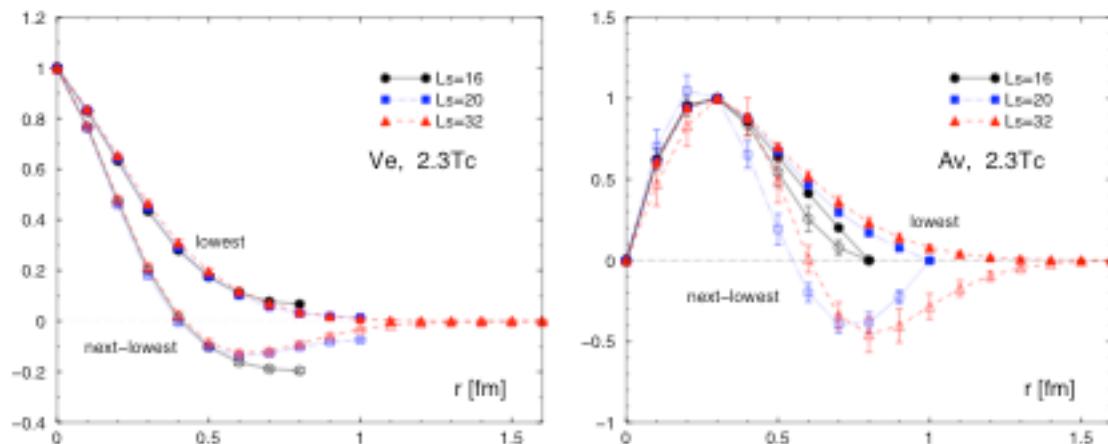
【3】クォーク・グルオン・プラズマ相におけるチャーモニウム消失の研究(青木, 金谷, 石井, 浮田)

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/ψ , χ_c , ψ' 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/ψ 抑制」を判断する上で本質的な情報となる。チャーモニウムの相関関数から、状態の質量スペクトルを計算し、それらの空間方向の境界条件を変える事によって、QGP 相におけるチャーモニウム状態の消失を判定する。同時に波動関数を計算し、その温度依存性も調べた。さらに、「間接的 J/ψ 抑制」のシナリオに重要な、励起状態 $\psi(2S)$ の計算を行う為に、対角化のテクニックを用いて基底状態と各励起状態を分離し、また、メソン相関関数の定数モードの効果を取り除いた計算を行った。

手法の確認のため、第一段階として非等方格子でのクエンチ近似 QCD の計算を行い、少なくとも $2.3T_c$ まで、チャーモニウムの S 状態、P 状態、さらにそれらの励起状態まで含めてハドロンの状態の消失が確認できないことを示した。図4参照。

図4: チャーモニウム消失の研究。Bethe-Salpeter 波動関数の体積依存性で、左図が S 波状態、右図が P 波状態に関する基底状態、第一励起状態を表す。



【4】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, 吉江, 谷口)

orbifolding を用いた格子上的 Schroedinger 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 質量の非摂動的な繰り込みを行った(論文 8)。

$N_f=2+1$ QCD における結合定数の非摂動的な running を、Schroedinger functional を用いて求めるための研究に着手した。

【5】ILDG・JLDG の構築(宇川, 吉江, 石井)

ILDG (International Lattice Data Grid)(論文9)は格子 QCD 配位を国際規模で共有するための Data Grid で、2002 年から開発が進められ、2007 年 7 月に5つの地域グリッドの相互運用が開始された(論文10)。計算科学研究センターの素粒子分野は、ILDG の日本の拠点として ILDG 構築に参画し、Middleware 開発(論文

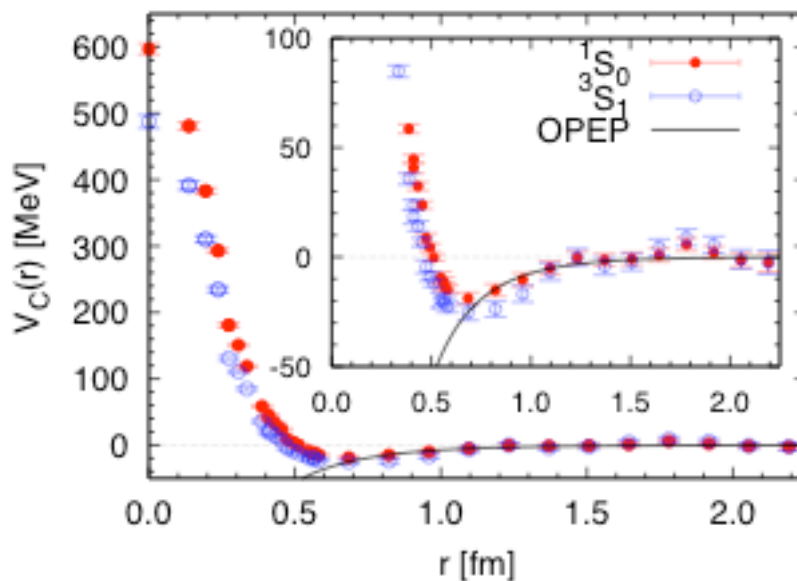
11)と QCD markup 言語 QCDml の策定(論文11)に貢献した。JLDG (Japan Lattice Data Grid)(論文9)は、国内の格子 QCD 及び関連分野の研究者のデータ共有をサポートする Data Grid で、2005 年に開発が開始され、2007 年 3 月システムが完成した。2007 年度は、JLDG に接続する 6 研究拠点の担当者と協力して、試験運用を行った。2008 年第 2 四半期に実運用を開始する予定である。

【6】格子 QCD による核力の研究(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5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12に発表された。

さらに、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り、力学的クォークの寄与を含むゲージ配位での計算も開始した(論文18)。また、この研究を発展させ、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17)。

図5: 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。



3. 研究業績

(1) 研究論文

1. $N_f=2+1$ dynamical Wilson quark simulation toward the physical point: Yoshinobu Kuramashi for the PACS-CS Collaboration, *PoS(LATTICE 2007)* 017.
2. Light hadron spectrum with 2+1 flavor dynamical $O(a)$ -improved Wilson quarks: 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, K. Sasaki, Y. Taniguchi, A. Ukawa, T. Yoshie, *PoS(LATTICE 2007)* 138.
3. Application of chiral perturbation theory to 2+1 flavor lattice QCD with $O(a)$ -improved Wilson quarks : PACS-CS Collaboration: D. Kadoh, S. Aoki, N. Ishii, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, K. Sasaki, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie, *PoS(LATTICE 2007)* 109.
4. Heavy-Quark Free Energy, Debye Mass, and Spatial String Tension at Finite Temperature in Two Flavor Lattice QCD with Wilson Quark Action: WHOT-QCD Collaboration: Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii and K. Kanaya, *Phys. Rev. D* 75 (2007) 074501.
5. Thermodynamics of two-flavor lattice QCD with an improved Wilson quark action at non-zero temperature and density: WHOT-QCD Collaboration: Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya and N. Ukita, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 34 (2007) 651-654.
6. Thermodynamics and heavy-quark free energies at finite temperature and density with two flavors of improved Wilson quarks: WHOT-QCD Collaboration: Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, N. Ukita, T. Umeda, *PoS(LATTICE 2007)* 207.
7. Precise determination of B_K and right quark masses in quenched domain-wall QCD: Y. Nakamura, S. Aoki, Y. Taniguchi and T. Yoshie [CP-PACS Collaboration], arXiv:0803.2569 [hep-lat].
8. Non-perturbative renormalization of four-quark operators and B_K with Schroedinger functional scheme in quenched domain-wall QCD: Y. Nakamura and Y. Taniguchi [CP-PACS Collaboration], *PoS(LATTICE 2007)* 248.
9. 計算素粒子物理学分野の国際データグリッドILDGと国内グリッドJLDG:佐藤 三久, 建部 修見, 吉江 友照, 石井 理修, 朴 泰祐, 宇川 彰, 情報処理学会研究報告, 2007-HPC-113, pp.13-18, 2007.
10. Towards an interoperable International Lattice Datagrid: P.Coddington, S.Zhang, N.Ishii, M.Sato, D.Melkumyan, D.Pleiter, G.Beckett, R.Ostrowski, J.Simone, B.Joo, C.Watson (ILDG Middleware Working Group), *PoS(LATTICE 2007)* 044.
11. Marking up lattice QCD configurations and ensembles: P. Coddington, B. Joo, C.M. Maynard, D. Pleiter, T. Yoshie (ILDG Metadata Working Group), *PoS(LATTICE 2007)* 048.
12. Nuclear Force from Lattice QCD: N.Ishii, S.Aoki, T.Hatsuda, *Physical Review Letters* 99 (2007)

022001.

13. Lattice QCD Calculation of the rho Meson Decay Width: 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, *Physical Review D* 76(2007) 094506.
14. WChPT analysis of twisted mass lattice data: Sinya Aoki, Oliver Baer, *Eur. Phys. J. A* 31 (2007) 781.
15. Lattice QCD simulations with light dynamical quarks: Sinya Aoki, *AIP Conf. Proc.* 892 (2007) 1.
16. The Vector and axial vector current in Wilson ChPT: S. Aoki and O. Baer, *PoS(LATTICE 2007)* 062.
17. Hyperon-nucleon potentials from lattice QCD: Hidekatsu Nemura, Noriyoshi Ishii, Sinya Aoki, Tetsuo Hatsuda, *PoS(LATTICE 2007)* 156.
18. Lattice QCD approach to nuclear force: Noriyoshi Ishii, Sinya Aoki, Tetsuo Hatsuda, *PoS(LATTICE 2007)* 146.
19. Hadron interactions from lattice QCD: Sinya Aoki, *PoS(LATTICE 2007)* 002.
20. Thermodynamics of $N_f=2$ QCD on anisotropic lattices: N. Namekawa, Y. Kikukawa, *PoS(LATTICE 2007)* 212.

(2) 学会発表

(A) 招待講演

1. Dynamical Wilson quark simulations toward the physical point: Y. Kuramashi, The XXV International Symposium on Lattice Field Theory (Regensburg, Germany, July 30 - August 4, 2007).
2. Can we extract physics at fixed topological charge?: S. Aoki, YITP@40 Anniversary Symposium (SUNY at Stony Brook, Stony Brook, NY, USA, May 2-5, 2007).
3. Hadron interactions from lattice QCD: S. Aoki, The XXV International Symposium on Lattice Field Theory (Regensburg, Germany, July 30 - August 4, 2007).
4. (The) Nuclear Force from lattice QCD: N. Ishii, Workshop on Hadron Physics on the Lattice (Milos, Greece, September 2007).
5. Lattice QCD calculation of Nuclear Forces: N. Ishii, The international workshop on chiral symmetry in hadrons and nuclei (Osaka, Japan, November 13 - 16, 2007).
6. NN potentials from lattice QCD: 石井 理修, 原子核・ハドロン物理横断研究会 (KEK、つくば、2007年11月)

(B) その他の学会発表

1. Light hadron spectrum with 2+1 flavor QCD with O(a)-improved Wilson quark: N. Ukita, The XXV International Symposium on Lattice Field Theory (Regensburg, Germany, July 30 - August 4, 2007).
2. Application of Wilson chiral perturbation theory to 2+1 flavor lattice QCD with O(a)-improved Wilson quarks: D. Kadoh, The XXV International Symposium on Lattice Field Theory (Regensburg, Germany,

- July 30 - August 4, 2007).
3. QCDml: Update Proposal: T. Yoshie, Workshop ILDG10 (Video conference hosted by CSSM, May 18, 2007).
 4. Marking up lattice QCD configurations and ensembles: T. Yoshie, The XXV International Symposium on Lattice Field Theory (Regensburg, Germany, July 30 - August 4, 2007).
 5. Update of the QCDml: T. Yoshie, Workshop ILDG11 (Video conference hosted by CSSM, Nov 30, 2007).
 6. Nuclear force from lattice QCD: S. Aoki, Riken BNL Research Center Annual Review meeting (Riken BNL Research Center, Upton, USA, November 5-6, 2007).
 7. Lattice QCD approach to baryon-baryon potentials: N. Ishii, Nuclear Physics at J-PARC --Pre-symposium of INPC2007-- (RICOTTI in Tokai village, Japan, June 1--2, 2007).
 8. Lattice QCD studies to nuclear force: N. Ishii, International Nuclear Physics Conference(INPC2007) (Tokyo, Japan, June 2007).
 9. Lattice QCD approach to NN potentials: N. Ishii, QCD Downunder II (Auckland, New Zealand, January 17 - 19, 2008).
 10. Thermodynamics of $N_f=2$ QCD on anisotropic lattices: Y. Namekawa, The XXV International Symposium on Lattice Field Theory (Regensburg, Germany, July 30 - August 4, 2007).
 11. Light hadron spectrum with 2+1 flavor dynamical $O(a)$ -improved Wilson quarks: 浮田 尚哉, 日本物理学会 第62回年次大会 (北海道大学、札幌、2007年9月21-24日) .
 12. $O(a)$ 改良されたウィルソソフェルミオンを用いた現実的なクォーク質量での $N_f=2+1$ 格子 QCD とハドロンスペクトラム: 浮田 尚哉, 日本物理学会年会 第63回年次大会 (近畿大学、東大阪、2008年3月22-26日) .
 13. Application of Wilson chiral perturbation theory to 2+1 flavor lattice QCD with $O(a)$ -improved Wilson quarks: 加堂 大輔, 日本物理学会 第62回年次大会 (北海道大学、札幌、2007年9月21-24日) .
 14. $O(a)$ 改良したウィルソソフェルミオンによる $N_f=2+1$ 格子 QCD におけるウィルソソカイラル摂動論を用いた解析: 加堂 大輔, 日本物理学会年会 第63回年次大会 (近畿大学、東大阪、2008年3月22-26日) .
 15. Topological susceptibility in $2+1$ flavor lattice QCD: 滑川 裕介, 日本物理学会年会 第63回年次大会 (近畿大学、東大阪、2008年3月22-26日) .
 16. Non-perturbative renormalization of quark mass for three flavours QCD with Wilson fermion and RG improved gauge action: 谷口 裕介, 日本物理学会 第62回年次大会 (北海道大学、札幌、2007年9月21-24日) .
 17. 格子 QCD 計算の将来像 --ペタフロップス計算機からグリッドまで: 吉江 友照, 「計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム (筑波大学、つくば、2007年9月3-4日) .

18. 格子 QCD データグリッド ILDG/JLDG の開発と運用: 吉江 友照, 日本物理学会 第 6 2 回年次大会 (北海道大学、札幌、2007 年 9 月 21-24 日) .
19. シミュレーションのためのデータグリッド --JLDG/ILDG の現状と将来: 吉江 友照, シンポジウム"未来の素粒子・原子核数値シミュレーション" (エポカルつくば, つくば、2007 年 12 月 19-20 日) .
20. HEPnet-J/sc 報告: 吉江 友照, HEPnet-J 利用者会 2008 (岡山大学, 岡山、2008 年 1 月 13 日-14 日) .
21. 格子 QCD のチャレンジ: ハドロンからハドロン間相互作用へ: 青木 慎也, シンポジウム"未来の素粒子・原子核数値シミュレーション" (エポカルつくば, つくば、2007 年 12 月 19-20 日) .
22. The nuclear force from lattice QCD: 石井 理修, 理研 RIBF ミニワークショップ"不安定核・ストレンジハドロン原子核の合同理論研究会---軽いエキゾチック系の構造を中心として---" (理化学研究所、和光、2007 年 7 月 17 日).
23. 格子 QCD による核力の研究: 石井 理修, 日本物理学会 第 6 2 回年次大会 (北海道大学、札幌、2007 年 9 月 21-24 日) .
24. 核力の第一原理計算: 石井 理修, 日本物理学会年会 第 6 3 回年次大会 (近畿大学、東大阪、2008 年 3 月 22-26 日) .

4. シンポジウムの開催

なし。