

III-1. 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、石井 理修、根村 英克

講師 谷口 裕介

研究員 浮田 尚哉、Nguyen Hoang Oanh、佐々木健志、滑川 裕介

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。今年度は特に、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 原子核の研究などを推進し、物理的な結果を得るに至った。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 年度から準備研究を行い、2011年度は本格的な研究を開始した。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、2010年度から蔵増が計算科学研究機構の主任研究員を兼任している。

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の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。次のステップとして、平成 22 年度からは 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を開始した。

なお、PACS-CS は平成 23 年 9 月末をもって運用を終了し、平成 24 年 2 月より後継機となる密結合並列演算加速機構実証システム HA-PACS (計算ノード数 268、GPU 部ピーク演算性能 713Tflops、CPU 部ピーク演算性能 89Tflops) が稼働を開始した。

(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, 滑川)

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を再現すべく 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。電磁相互作用および up と down クォークの質量差は reweighting 法によって取り入れている。本格計算は $32^3 \times 64$ の格子サイズを用いて行われ、up クォーク質量、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 4 つの物理インプットとして π^+ メソン、 K^0 メソン、 K^+ メソン、 Ω バリオンを採用した。これにより、up と down クォークの質量差を直接定量的に評価することが可能となった。現在計算は終了し、論文を準備中である。

物理点における体積効果検証に関しては、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) を利用して 64^4 の格子サイズを用いた 2+1 フレーバー-QCD シミュレーションを実行中である。本年度は reweighting 法を用いた物理点へのチューニングが主な課題であった。図 1 はハドロン質量の実験値との比較を表している。ここでは、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 3 つの物理インプットとして、 π メソン、 K メソン、 Ω バリオンの質量を用いており、黒丸がオリジナルなシミュレーション結果、青丸はチューニング後の物理インプット、赤丸はそれ以外のハドロン質量を表している。青丸で表された結果から、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適切になされていることがわかる。チューニング後も ρ メソン質量と Δ 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。

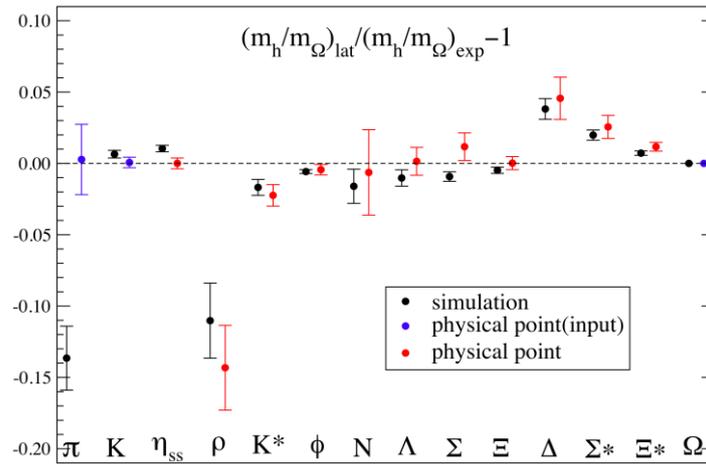


図1 ハドロン質量の実験値との比較

Ω バリオンの質量で規格化されている。黒丸、青丸、赤丸に関しては本文を参照。

(2) 格子 QCD による原子核の直接構成 (宇川、藏増)

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り開始され、平成 22 年度には 2 核子系の計算が試みられた。これらの計算は、コストを抑えるためにクエンチ近似かつ重いクォーク質量を用いた試験的なものである。2 核子系にはスピン三重項チャンネル(重陽子)とスピン一重項チャンネルが存在するが、前者のみが束縛状態であり、その束縛エネルギーが 3MeV 弱と極めて小さいことが大きな特徴である。しかしながら、シミュレーション結果は両チャンネルとも束縛状態であり、われわれが見出したスピン一重項チャンネルの束縛状態は、クエンチ近似かつ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。そのため、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て最終的に非束縛状態になるのではないかと推測し、本年度は 2+1 フレーバー QCD シミュレーションによりヘリウム原子核および 2 核子系の束縛エネルギー計算を実行した。現在のところ、 π メソン質量が約 500MeV 程度の世界でも 2 核子系の両チャンネルは束縛状態であることが示唆されている。結果は、近々に論文に纏める予定である。

(3) U(1)問題の研究 (石塚、宇川、吉江)

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。その興味深い一つとして、フレーバー 1 重項の疑スカラー粒子 (η' 粒子) の質量の問題 (U(1) 問題) の研究があげられる。この η' 粒子は、他の疑スカラー粒子と異なり、大きい質量を持つ。これは、 $U(1)_A$ の量子異常による破れによって、質量を獲得すると考えられている。この現象の深い理解の為に、この粒子の質量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、PACS-CS グループ によって生成されたゲージ配位 ($a=0.0907\text{fm}$, $L=2.9\text{fm}$) の中で、クォーク質量 : $m(\pi)=410\text{MeV}$ と $m(\pi)=300\text{MeV}$ の二つの質量のもとで数値計算を行った。このような大きい体積での計算は、これまでに行われていなかった。同じ量子数を持つ疑スカラー粒子 : η 粒子との混合は、二種類の演算子を使い相関関数行列を計算する事によって解いた。我々の得た η 粒子と η' 粒子の質量の結果は以下で

ある。 $m(\pi)=410\text{MeV}$ では $m(\eta)=593(43)\text{MeV}$, $m(\eta')=850(68)\text{MeV}$, $m(\pi)=300\text{MeV}$ では $m(\eta)=617(53)\text{MeV}$, $m(\eta')=1050(240)\text{MeV}$ である。これらは実験値: $m(\eta)=548\text{ MeV}$, $m(\eta')=958\text{ MeV}$ を、おおむね再現している。しかし、この問題の完全な理解のためには、更に統計誤差を小さくし、クォーク質量を詳細に調査し、その後に実験値と比較する必要がある。現在、統計精度向上させるための計算を継続中である。

【2】格子 QCD によるバリオン間力の研究 (青木、石井、根村、佐々木)

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体力に拡張し、核子の場合3体力は近距離で常に斥力になることを示した。また、石井らはポテンシャルを精度よく求める新しい方法を提案し、力学的クォークの寄与を含んだ計算で核力ポテンシャルを求めた。

(1) フレーバーSU(3)極限での H ダイバリオン

昨年度、HAL QCD Collaboration は、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が、今年度はクォーク質量がより重いものと軽いもので計算を行い、H ダイバリオンの束縛エネルギーの質量依存性を詳細にしらべた。また得られたポテンシャルを用いて、SU(3)の破れの効果を近似的な手法で計算した。

(2) ストレンジネス $S=-2$ のバリオン間相互作用

佐々木らは、従来のHAL QCD collaborationによるポテンシャルの導出方法を結合チャンネルSchroedinger方程式に適用しストレンジネス $S=-2$ の2体バリオン系のポテンシャル行列を得た。この系のspin singlet部分はSU(3)極限でH-dibaryonが束縛しているチャンネルであり、sクォークがu,dより重くなり、SU(3)の破れに伴ってこの束縛系がどのように変化するかを調べる上で重要な計算となる。現在の計算では、CP-PACS/JLQCD Collaborationによって生成されたパイオン質量が 875MeV に対応する $2+1$ フレーバーゲージ配位を使っており、その散乱位相差を見るとH-dibaryonが深く束縛している兆候(図3)を示している。今後の計算により、ハドロン質量が現実世界に近づくにつれてH-dibaryonがどのような運命を辿るかを検証できると期待される。

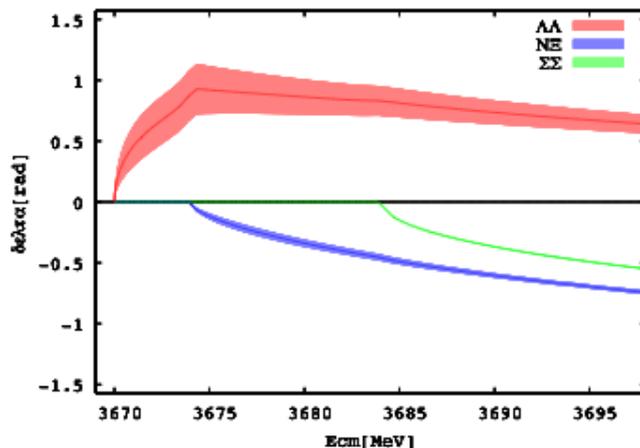


図3: ストレンジネス $S=-2$ 系の散乱位相差。

(3) バリオン間三体力の研究

近年、原子核の性質、あるいは超新星爆発や中性子星といった高密度系の性質を理解する上で、三体力の果たす役割の重要性が認識されている。土井らは、格子 QCD による三体力の決定に向けた研究を行った。本年度は、三核子系としては三重陽子チャンネルを対象とし、三核子が等距離直線上に並んだ空間配置における三体力を研究対象とした。三体力を不定性無く求めるためのフレームワークを構築すると共に、実際の格子計算を、CP-PACS Collaboration によって生成されたパイオン質量が 1.1GeV に対応する 2 フレーバーゲージ配位を用いて行った。その結果、近距離において三体斥力効果が存在することを見出した(図4)。

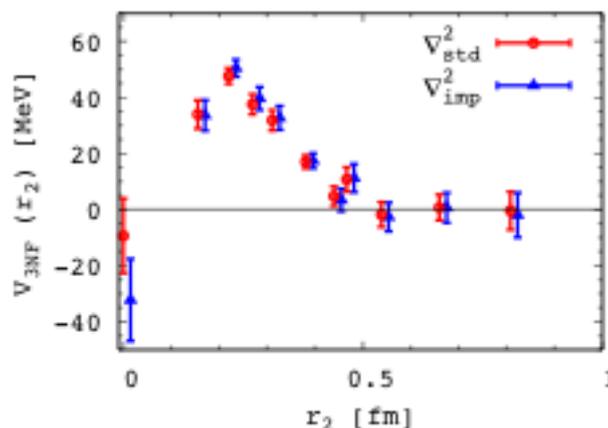


図4: 三核子が等距離 r_2 [rm] で直線上に並んだ場合における三体力 [MeV]。

【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 2

1年度から、現実的な $N_f = 2 + 1$ でのシミュレーションを進めている。第一段階として、u, d クォーク質量が現実より重い点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(図5)。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。この研究では、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することで、計算コストを大幅に削減した。

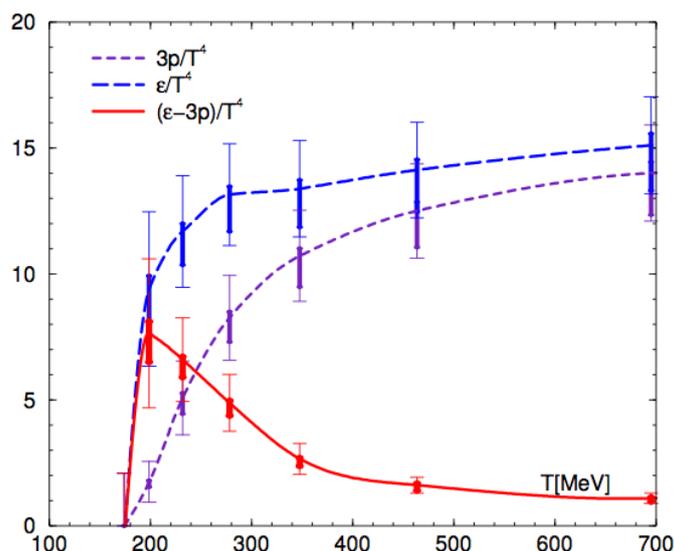


図5: ウィルソン型クォークを用いた $N_f=2+1$ QCD の状態方程式。

p はクォーク物質の圧力、 ϵ はエネルギー密度、 $\epsilon - 3p$ はトレース・アノマリを表す。u, d クォークは現実より重く、 $T \sim 200$ MeV あたりが有限温度クロスオーバー温度に相当する。

(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最も直感的な情報を含んでいる。他方、系の作用に現れる物理量に関するヒストグラムは、reweighting 法で系のパラメータ依存性を調べる上で、中心的な役割をはたしており、reweighting 法を使う上で必ず計算する量でもある、我々は、これらのヒストグラムから定義される有効ポテンシャルと reweighting 法を組み合わせることにより、相転移次数を容易に判定する解析方法を開発した。

その第一段階のテストとして、クォークが重い領域の QCD の相構造を、密度がゼロの場合(平成22年度)と有限密度の場合(平成23年度)の両方について研究した。クォークが重い領域では、クォークが重い極限から reweighting することにより、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が適用出来る。密度がゼロの場合には、系のゲージ部分の内部エネルギー密度に相当するプラケットの有効ポテンシャルを計算し、その振る舞いから相構造を研究した。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 β 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、動的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6左)。有限密度では、プラケットと、重いクォークの自由エネルギーに相当するポリアコフ・ループの二つの観測量に関する有効ポテンシャルを調べる必要がある(図6右)。化学ポテンシャルを含むホッピングパラメータ展開とシミュレーションにより、クォークによる有限密度位相項の評価を行い、1次相転移がクロスオーバーに変わる臨界点の位置は、位相項を無視した「位相クエンチ QCD」の臨界点からほとんど動かないことを示した。

この研究の最終目標は、クォークが軽い領域における QCD の有限密度相構造の解明である。現在それに向けて、研究を進めている。クォークが軽くなると、ポリアコフ・ループは重要な役割を果たさなくなるので、クォーク部分の内部エネルギーに対応する、クォーク行列式そのものに関する有効ポテンシャルを研究する。位相クエンチ QCD でシミュレーションを実行し、化学ポテンシャルが小さい領域で有限密度位相項の効果を reweighting 法で評価した結果、この領域では位相項の効果は小さいことを確認した。現在、化学ポテンシャルがより大きい場合を研究している。

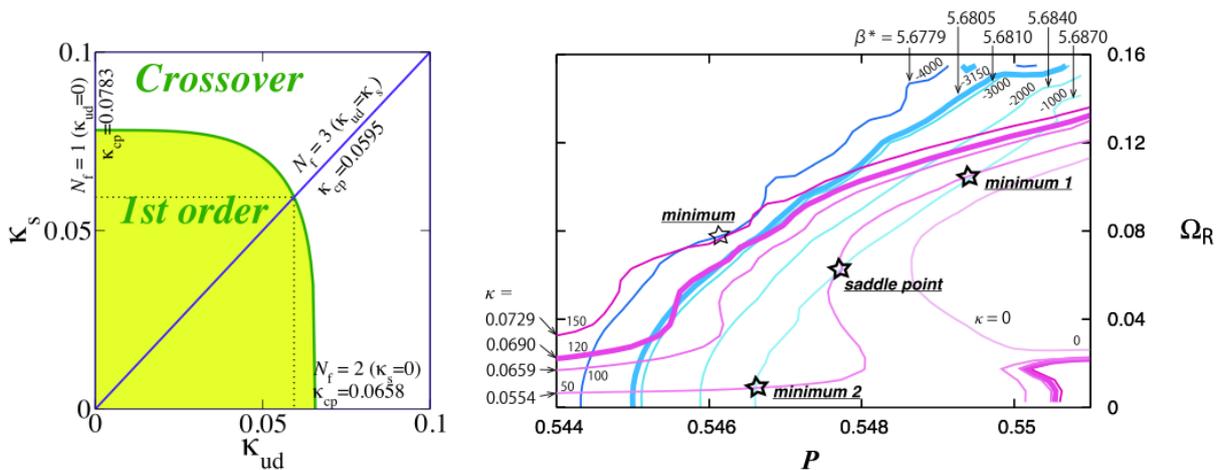


図6: 重クォーク領域における $N_f=2+1$ QCD の有限温度相構造の研究。

(左) 密度ゼロの場合の、有限温度相転移次数のクォーク質量依存性。横軸は ud クォーク質量の逆数、縦軸は s クォーク質量の逆数を表し、緑の領域は有限温度相転移が1次となる範囲を表す。(右) 有限密度の場合の有効ポテンシャルの温度、およびクォーク質量依存性。赤い線と青い線は、それぞれ、有効ポテンシャルの物理量 P (プラケット) と Ω_R (ポリアコフ・ループ) に関する微分がゼロになる場所を表す。赤い線と青い線が交差する点で、有効ポテンシャルの極小点や鞍点の位置がわかる。極小点が二つある場合は相転移が1次で、一つになるとクロスオーバーになる。

(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/Ψ などが消失する兆候は確認できなかった。

【4】有限密度 QCD (宇川、藏増)

有限密度 QCD 研究のためには、非ゼロ化学ポテンシャル領域での格子 QCD 計算が必要となる。しかし、化学ポテンシャルの導入は「符号問題」を引き起こしてしまう。そのような困難を克服すべく、われわれはまず符号問題の解析的研究を行った。具体的には、クォーク行列式を巻き付き展開法を用いて表すことにより、符号問題の根源である複素位相を解析的に表現し、さらに重質量展開法を適用することによって位相の上限値が格子の空間体積に比例し、時間方向の伸張とともに指数関数的に抑制されることを見出した。この解析の結果を検証するために、格子サイズ $6^3 \times N_T$ の 4 フレーバー QCD において N_T を変えることにより、位相がどのように変化するかを調べた結果が図 2 にまとめられている。化学ポテンシャル μ を固定すれば、 N_T を大きくするほど位相 θ の大きさが小さくなることが見て取れる。今後、巻き付き展開法を用いて相転移のオーダーパラメータであるクォーク数密度を計算し、相転移の次数や相転移温度を決定する計画である。

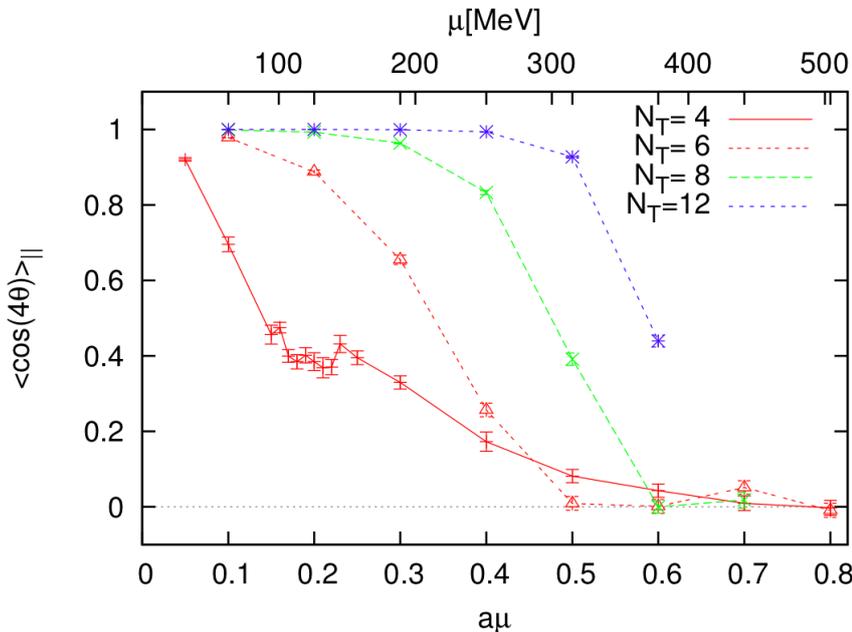


図2 4 フレーバー QCD における位相の化学ポテンシャル依存性。
格子サイズ $6^3 \times N_T$ を用いた 4 フレーバー QCD の結果。

【5】繰り込み定数や改良係数の計算 (谷口)

$K \rightarrow \pi \pi$ 崩壊過程の行列要素を繰り込むために必要な繰り込み定数を、Iwasaki gauge action と clover 項に

より改良された Wilson fermion action の組み合わせについて計算した。

次世代の京コンピューターにおける数値計算で採用すべき action のパラメータ探索の一環として、smeared link を用いた Wilson fermion action において、clover 項の改良パラメータ C_{SW} の決定を行いました。今回は手始めとして、smearing の回数是一回で、smearing parameter は $\rho=0.1, 0.2$ を採用した。

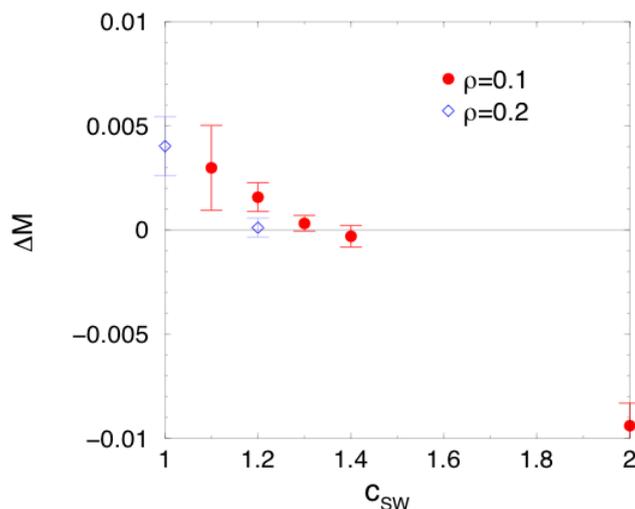


図: パラメータ C_{SW} の決定。 $\Delta M=0$ となる点として C_{SW} を決定。

【6】ILDG/JLDG の構築・運用に係わる活動 (吉江, 浮田)

国内の格子QCD 研究者のデータグリッドJapan Lattice Data Grid (JLDG) の利便性・可用性の向上のため、以下の改良を行った。(1)既設拠点のサーバ増設(筑波大、KEK、大阪大、広島大)、(2) 拠点の新設(東京大、名古屋大)、(3)JLDGファイルシステムマウント機能の実装(筑波大)、(4)管理機器の2重化、(5)管理・運用・保守マニュアルの作成(外注)。

格子QCD共通コードとILDG(International Lattice Data Grid)の連携に関し、次の検討を行った。(1) ILDGフォーマットの配位入出力、(2) エジンバラ大学と共同で開発した Metadata Capture システムの利用。

4. 研究業績

(1) 研究論文

【1】関連

1. PACS-CS Collaboration: T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa, Two-nucleon bound states in quenched lattice QCD, Phys. Rev. D 84 (2011) 054506.
2. PACS-CS Collaboration: Y.Namekawa, S.Aoki, K.-I.Ishikawa, N.Ishizuka, T.Izubuchi, K.Kanaya, Y.Kuramashi, M.Okawa, Y.Taniguchi, A.Ukawa, N.Ukita, T.Yoshié, Charm quark system at the physical point of 2+1 flavor lattice QCD, Phys. Rev. D 84 (2011) 074505.
3. Y. Nakamura, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, T. Sakurai, H. Tadano, Modified block BiCGStab for lattice QCD, Comput. Phys. Commun. 183 (2012) 34.

4. PACS-CS Collaboration: T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa,, Calculation of Helium nuclei in quenched lattice QCD, AIP Conf. Proc. 1374 (2011) 627.
5. N. Ukita for PACS-CS Collaboration, 1+1+1 flavor QCD+QED simulation at the physical point, Proceedings of Science (Lattice 2011) 144.
6. Y. Namekawa for PACS-CS Collaboration, Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD, Proceedings of Science (Lattice 2011) 132.
7. PACS-CS Collaboration: A. Aoki et al., Rho meson decay in 2+1 flavor lattice QCD, Phys. Rev. D84(2011) 094505.
8. N. Ishizuka for PACS-CS Collaboration, Rho meson decay width from 2+1 flavor lattice QCD, Proceeding of Science (LATTICE2011) 125.

【2】関連

9. Keiko Murano, Noriyoshi Ishii, Sinya Aoki, Tetsuo Hatsuda, ``Nucleon-Nucleon Potential and its Non-locality in Lattice QCD``, Prog. Theoretical. Phys. 125 (2011) 1225-1240
10. T. Doi, S. Aoki, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura and K. Sasaki (HAL QCD Collaboration), Exploring Three-Nucleon Forces in Lattice QCD, arXiv:1106.2276 [hep-lat] (2011), Prog. Theor. Phys., in press.
11. Sinya Aoki, Noriyoshi Ishii, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Takashi Inoue, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura, Kenji Sasaki (HAL QCD Collaboration), ``Extraction of Hadron Interactions above Inelastic Threshold in Lattice QCD``, Proc. Jpn. Acad., Ser. B, Vol. 87 (2011) 509-517.
12. Sinya Aoki for HAL QCD Collaboration, ``Hadron interactions in lattice QCD``, Progress in Particle and Nuclear Physics 66 (2011) 687-726.
13. Takashi Inoue, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Noriyoshi Ishii, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura, Kanji Sasaki (HAL QCD Collaboration), ``Two-Baryon Potentials and H-Dibaryon from 3-flavor Lattice QCD Simulations``, arXiv:1112.5926 [hep-lat], Nucl. Phys. A, in press.
14. Kenji Sasaki (for HAL QCD Collaboration), ``Strangeness S=-2 baryon-bayon interactions from lattice QCD``, Proceedings of Science (Lattice 2011) 173

【3】関連

15. Kazuyuki Kanaya, Lattice results on the phase structure and equation of state in QCD at finite temperature, AIP Conference Proceedings 1343 (2011) 57-62.
16. H. Saito, S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Phase structure of finite temperature QCD in the heavy quark region, Phys. Rev. D 84 (2011) ref.054502, pp.1-9.

17. H. Ohno, S. Aoki, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Saito and T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Charmonium spectral functions with the variational method in zero and finite temperature lattice QCD, Phys. Rev. D 84 (2011) ref.094504, pp.1-13.
18. Y. Nakagawa, S. Ejiri, S. Aoki, K. Kanaya, H. Ohno, H. Saito, T. Hatsuda, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Histogram method in finite density QCD with phase quenched simulations, PoS(LATTICE 2011) (2012) ref.208, pp.1-7.
19. H. Saito, S. Aoki, K. Kanaya, H. Ohno, S. Ejiri, Y. Nakagawa, T. Hatsuda, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Finite density QCD phase transition in the heavy quark region, PoS(LATTICE 2011) (2012) ref.214, pp.1-7.
20. S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Nakagawa, H. Ohno, H. Saito, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Numerical study of QCD phase diagram at high temperature and density by a histogram method, Cent. Eur. J. Phys. (2012) in press.
21. Y. Maezawa, T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya and H. Ohno (WHOT-QCD Collaboration), Free energy of static quarks and Debye screening mass in 2+1-flavor lattice QCD with Wilson quark action based on fixed-scale approach, arXiv:1112.2756[hep-lat].
22. T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno (WHOT-QCD Collaboration), Equation of state in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach, arXiv:1202.4719[hep-lat].
23. 斎藤華, 朴泰祐, 金谷和至, 埴敏博, 佐藤三久, スクリプト言語Xcryptによる格子QCDシミュレーションの最適化, 情報処理学会研究報告, 2011-HPC-130(58), pp. 1-6
24. 斎藤華, 朴泰祐, 金谷和至, 埴敏博, 佐藤三久, スクリプト言語 Xcrypt による格子 QCD シミュレーションの自動化, 2012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(HPCS2012)論文集, pp. 7-14

【4】関連

25. S. Takeda, Y. Kuramashi, A. Ukawa, On the phase of quark determinant in lattice QCD with finite chemical potential, arXiv: 1111.6363 [hep-lat].

【5】関連

26. Y. Taniguchi, “Renormalization factor of four fermi operators with clover fermion and Iwasaki gauge action “, PoS LATTICE2011 (2011) 331.

その他

27. Taro Kimura, Shota Komatsu, Tatsuhiro Misumi, Toshifumi Noumi, Shingo Torii, Sinya Aoki, “Revisiting symmetries of lattice fermions via spin-flavor representation”, JHEP 01 (2012) 048.
28. Sinya Aoki, Hidenori Fukaya, “Interpolation between the epsilon and p regimes”, Phys.Rev.D84 (2011)014501.

(2)学会発表

(A)招待講演

1. 青木慎也「Nuclear Force from Quarks and Gluons」`Japan Days` Colloquium, May 2, 2011, University of Wuppertal, Wuppertal, Germany (The 150th anniversary of the Friendship Treaty between Japan and Germany)
2. 青木慎也「Lattice QCD with Wilson quarks and chiral perturbation theory--From introduction to recent topics--」ECT* Workshop `Chiral dynamics with Wilson fermions`, October 24-28, 2011, ECT*, Trento, Italy.
3. 青木慎也「Future prospect of hadron physics from lattice QCD」Workshop on 'Future Prospects of Hadron Physics at J-PARC and Large Scale Computational Physics' Feb. 9 (Thu) - 11 (Sat), 2012, Ibaraki Quantum Beam Research Center, Tokai, Japan
4. 青木慎也「Chiral Symmetry and eigenvalue density at Finite temperature」YIPQS-HPCI international-molecule-type workshop on 'New-type of Fermions on the Lattice' Feb.9-24, 2012, YITP, Kyoto, Japan
5. 金谷和至「Phase Structure of QCD from the Lattice」International Workshop on Extreme QCD 2011 (XQCD 2011) (San Carlos, Mexico, July 18-20, 2011)
6. 金谷和至「CP-PACS プロジェクトについて ~計算科学専用計算機開発における物理屋の役割~」三好甫先生記念計算科学シンポジウム (工学院大学新宿キャンパス, 東京, Sept. 10, 2011)
7. 藏増 嘉伸「PACS-CS における素粒子物理学研究」, 第 2 回「学際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, つくば市, 2011 年 9 月 12-13 日)
8. 藏増 嘉伸「格子 QCD による原子核の構成」, 研究会「大規模計算による原子核研究の展開 -核子多体系を中心に-」(理研, 和光市, 2012 年 1 月 24-25 日)
9. 藏増 嘉伸「大規模格子 QCD シミュレーションで探る 10^{-13} cm」, 第 4 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (シーサイドホテル舞子ビラ神戸, 神戸市, 2012 年 3 月 3-5 日)

(B)その他の学会発表

1. 藏増 嘉伸「基礎科学分野実問題における固有値解析エンジンの高性能利用技術開発」, 並列固有値解析研究会 (伊香保温泉旅館 よろこびの宿 しん喜, 群馬県, 2011 年 11 月 3-4 日)
2. N. Ukita「1+1+1 flavor QCD+QED simulation at the physical point」, The XXIX International Symposium on Lattice Field Theory, Lattice 2011 (Squaw Valley, Lake Tahoe, CA, USA, July 11-16, 2011)
3. Yusuke Namekawa「Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD」, The XXIX International Symposium on Lattice Field Theory, Lattice 2011 (Squaw Valley, Lake Tahoe, CA, USA, July 11-16, 2011)
4. 滑川 裕介「Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD」, 新学術領域「素核宇

- 宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会（理化学研究所計算科学研究機構，神戸市，2011 年 6 月 23-24 日）
5. 滑川 裕介「物理点における 2+1 フレーバー格子 QCD シミュレーションによるチャームクォーク系の研究」，日本物理学会 2011 年秋季大会（弘前大学，青森県，2011 年 9 月 16-19 日）
 6. Yusuke Namekawa「Charm quark physics from lattice QCD」，“Hadron Structure and Interactions”（RCNP, Osaka, Nov. 25-26, 2011）
 7. 滑川 裕介「Charm quark physics from lattice QCD」，“素核宇融合による計算基礎物理学の進展」（会歆の郷，三重県，2011 年 12 月 3-5 日）
 8. Yusuke Namekawa「Charm quark physics from lattice QCD」，HPCI Workshop “Expanding the Horizon of Theoretical Particle Physics through Computational Methods”（KEK, Tsukuba, Dec. 19-21, 2011）
 9. Yusuke Namekawa「Charm quark physics from lattice QCD」，Workshop on “Elucidation of New Hadrons with a Variety of Flavors”（Osaka University, Osaka, Feb. 20-21, 2012）
 10. Yusuke Namekawa「Charm quark physics from lattice QCD」，KEK Flavor Factory Workshop（KEK, Tsukuba, Mar. 8-10, 2011）
 11. 石塚 成人「Rho meson decay width from 2+1 flavor lattice QCD」，The XXIX International Symposium on Lattice Field Theory, Lattice 2011. (the Village at Squaw Valle, Lake Tahoe, California, USA, July 11-16, 2011)
 12. 石塚 成人「格子上のハドロン散乱」，新学術領域「素核宇宙融合」x「新ハドロン」クロスオーバー研究会（理化学研究所 計算科学研究機構，兵庫県 神戸，2011 年 6 月 24 日 - 24 日）
 13. 石塚 成人「Rho meson decay from lattice QCD」，日本物理学会（弘前大学，弘前市，2010 年 9 月 16 - 19 日）
 14. 佐々木 健志 (for HAL QCD Collaboration)，「チャンネル結合を考慮した格子 QCD によるハイペロン間相互作用」，新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会（理化学研究所 計算科学研究機構），2011 年 6 月 23-24 日
 15. Kenji Sasaki (for HAL QCD Collaboration)，「Strangeness $S=-2$ baryon-baryon interactions from lattice QCD」，The XXIX International Symposium on Lattice Field Theory (Squaw Valley, Lake Tahoe, California, USA), July 10-16, 2011
 16. 佐々木 健志 (for HAL QCD Collaboration)，「Lattice QCD study of baryon-baryon interaction with strangeness $S=-2$ 」，日本物理学会 2011 年秋季大会（弘前大学），2011 年 9 月 16-19 日
 17. 佐々木 健志 (for HAL QCD Collaboration)，「Lattice QCD studies of strangeness $S=-2$ baryon-baryon interactions」，素核宇融合による計算基礎科学物理学の進展（三重県志摩市 会歆の郷），2011 年 12 月 3-5 日
 18. 佐々木 健志 (for HAL QCD Collaboration)，「格子 QCD による一般化核力の研究」，HPCI 戦略プログ

- ラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」全体シンポジウム(秋葉原コンベンションホール), 2012年3月7-8日
19. 齋藤華, 朴泰祐, 金谷和至, 塙敏博, 佐藤三久 「スクリプト言語 Xcrypt による格子 QCD シミュレーションの最適化」 2011年並列/分散/協調処理に関するサマー・ワークショップ(SWoPP2011) (, July 27-29, 2011)
 20. 齋藤華, 朴泰祐, 金谷和至, 塙敏博, 佐藤三久 「スクリプト言語 Xcrypt による格子 QCD シミュレーションの自動化」 2012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(HPCS2012) (, Jan. 24-26, 2012)
 21. Y. Taniguchi, The XXIX International Symposium on Lattice Field Theory, Village at Squaw Valley, Lake Tahoe, California, USA, July 11 to July 16, 2011.
 22. 谷口 裕介、HPCI 研究会「計算的手法による素粒子論研究の広がり」 --- Expanding the Horizon of Theoretical Particle Physics through Computational Methods, December 19-21, 2011, Kobayashi Hall, KEK
 23. 吉江友照、「計算素粒子物理学データグリッド JLDG」、gfarm セミナー、NTTコミュニケーションズプレゼンテーションルーム(2011/06/20)
 24. 吉江友照、「Status Report: JLDG」、17thILDG workshop, TV conference hosted by INFN, Italy (2011/09/23)
 25. 吉江友照、「HEPnet-J/sc 報告」、HEPnet-J ユーザー会、近畿大学(2011/12/17-18)
 26. 吉江友照、「格子 QCD データグリッド JLDG」、HPCI 分野5全体シンポジウム、秋葉原コンベンションホール (2012/03/07-08)

4. 連携・国際活動・社会貢献、その他

1. 青木慎也 他, 新学術領域「素核宇宙融合」x「新ハドロン」クロスオーバー研究会 --多様な方法でせまるハドロン物理への挑戦-- 主催 2011年6月23、24日、理化学研究所 計算科学研究機構、神戸、参加者約60名
2. 青木 慎也 他, 新学術領域「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」/HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」/京都大学基礎物理学研究所 主催 サマースクール「クォークから超新星爆発まで」--基礎物理の理想への挑戦--, 2011年8月4日-8日、京都大学 基礎物理学研究所、京都、参加者約35名
3. 青木慎也 他, 新学術領域「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」/HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」主催シンポジウム「素核宇宙融合による計算基礎物理学の進展 -マイクロとマクロのかけ橋の構築-」 2011年12月3日-5日、合歓の郷、志摩、参加者約60名
4. 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 第三回 2011年6月8-9日(参加者約40名) 東京大学 理学部、東京 第四回 2012年1

月 11-12 日 京都大学 基礎物理学研究所, 京都(参加者約30名)、第五回 2012 年 2 月 27-28 日 理学研究所 仁科加速器研究センター、和光(参加者約20名)

5. 青木 慎也 他, HPCI 戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」全体シンポジウム, 2012 年 3 月 7、8 日、秋葉原コンベンションホール、東京、参加者約60名
6. 金谷 和至 他, 国際シンポジウム「Quarks and Hadrons under Extreme Conditions - Lattice QCD, Holography, Topology, and Physics at RHIC/LHC -」(慶應義塾大学 来往舎, 2011年 11 月 17-18 日) 参加者 38 名(内, 海外5ヶ国6名)