

平成 13 - 16 年大型シミュレーション研究成果総説 平成 17 年大型シミュレーション実施報告書

課題番号: 大型-72 (H.13), 大型-85 (H.14), 大型-102 (H.15), 大型-110 (H.16)
研究課題名: 最大エントロピー法を用いた格子 QCD 数値実験により核子励起状態の研究
研究組織: 研究責任者 (3); 共同研究者 (1),(2),(5) [H.13, H.14], (1),(2),(5),(6),(7) [H.15,H.16]

課題番号: 大型-125 (H.17)
研究課題名: 格子 QCD によるクォーク・グルーオン・プラズマの動的構造の研究
研究組織: 研究責任者 (1); 共同研究者 (2),(3),(4),(5),(6),(7)

研究者氏名・所属・現職(平成 18 年 1 月 30 日現在)

- (1) 初田哲男 (はつだてつお) 東京大学大学院・理学系研究科 教授
- (2) 浅川正之 (あさかわまさゆき) 大阪大学大学院・理学研究科 教授
- (3) 佐々木勝一 (ささきしょういち) 理化学研究所 フェロー研究員
- (4) 江尻信司 (えじりしんじ) 東京大学大学院・理学系研究科 助手
- (5) 佐々木潔 (ささききよし) 筑波大学・計算物理学研究センター 研究員
- (6) 横川一夫 (よこかわかずお) 東京大学大学院・博士後期課程三年
- (7) 津村享佑 (つむらきょうすけ) 京都大学大学院・博士課程二年

平成 13-16 年度の研究成果総説

平成 13-16 年度研究課題「最大エントロピー法を用いた格子 QCD 数値実験による核子励起状態の研究」においては、割り当てられた CPU 時間を用いて、主として 3 つの研究を行った。

(i) 正負パリティを持つ核子および核子の励起状態の研究

格子間隔が 0.14fm、0.1fm、0.07fm に相当する 3 つの $\beta = 6/g^2 = 5.8, 6.0, 6.2$ の Wilson gauge 作用を用いたクエンチ近似の格子 QCD 数値計算を行った。その結果、格子上の虚時間方向の相関関数からスピン 1/2 及びスピン 3/2 のバリオンのスペクトル関数を求めることに初めて成功した。

ハドロンの質量スペクトルを量子色力学 (QCD) に基づいて再現することは、格子 QCD 数値実験における一つの重要な目標であるが、これまでの研究は主として「基底状態」の精密計算に限られていた。我々は、平成 13-16 年度に SR8000 を用いて行った虚時間相関関数の格子シミュレーションデータを、最大エントロピー法を用いて解析することにより、ハドロンのスペクトル関数を導出し、バリオンの動径励起状態についての研究を行った。

まず、スピン 1/2 (核子)、スピン 3/2 (核子) の基底状態と励起状態に関する有限体積効果を格子間隔 0.07fm ($\beta = 6.2$) に相当する Wilson フェルミオンを用いたクエンチ近似計算を行った。そして、励起状態に対しては基底状態と比べてクォークの質量が軽い場合に有限体積効果が無視できず、少なくとも 3.0fm 以上の格子サイズが必要であることを示した。

さらに、2 つの格子間隔 0.09fm ($\beta = 6.0$) と 0.14fm ($\beta = 5.8$) の場合のバリオン虚時間 2 点相関関数から、正パリティのバリオンのみならず、負パリティ状態に対しても、パリティ射影と最大エントロ

ピー法を用いてスペクトル関数が再構成できることを示した。我々が得た核子の励起スペクトルは、負パリティを持つ励起状態： $N^*(1535)$ と核子と正パリティを持つローパー共鳴 $N^*(1440)$ が、計算されたクォーク質量の全ての領域において近似的に縮退している。この結果は、現象論的クォーク模型に共通に見られるものとは異なり、より実験の示す質量スペクトラムと整合している。

以上の研究成果は、格子 QCD 国際会議で口頭発表され [1, 2, 3, 4]、その後 2 つの学術論文に詳しい内容が出版されている [5, 6]。また、これら一連の研究は、佐々木潔氏の博士論文（東京大学、H17 年 3 月）としてもまとめられている [7]。

(ii) ペンタクォーク・バリオンの研究

ペンタクォーク・バリオン $\Theta^+(1540)$ は、SPring8 での光子-原子核反応実験で初めて報告された、 K^+n に崩壊する幅の狭い共鳴状態である。終状態の量子数からこの共鳴状態は、スピン半奇数でストレンジネス + 1 を持ち、クォーク 4 つと反クォークからなるエキゾチックバリオンと考える事ができる。このようなバリオンの存在は、スキルム模型やカイラルソリトン模型など、核子をパイオンの位相的ソリトンとして取り扱うアプローチでは予言されていたが、クォーク模型などでは理解しがたい。実際、報告されているペンタクォークの質量は、クォーク模型で評価される値よりはるかに軽いこと、その崩壊幅が通常の強い相互作用によっておこる崩壊幅（ $\sim 100\text{MeV}$ ）よりも 2 桁程小さく（ $\sim 1\text{MeV}$ ）、異常に長寿命であることが挙げられる。現在のところ、スピンやパリティのみならず、その存在自体が実験的に確定していない。

本研究グループの佐々木勝一は、平成 15 年度の後半に世界に先駆けて、格子 QCD 数値実験によるペンタクォーク Θ^+ の研究を行った。特に、ペンタクォークがあるとすれば、そのスピン・パリティが $1/2^-$ の状態の方が $1/2^+$ の状態より質量が軽くなることを示した。また、反粒子のストレンジクォークを反粒子のチャームクォークに置き換えた、負のチャーム ($C=-1$) を持つエキゾチックバリオン Θ_c^- についても数値実験を行い、その質量が多くの現象論模型で予測されている程軽くなく、むしろ核子・D 中間子の崩壊閾値よりはるかに重いことから、かなり寿命が短い共鳴状態となる可能性が高いことを報告した。更に、平成 16 年度には平成 15 年度までに得られた統計数（135 統計）を最終的に 240 統計にまで増やした。

この研究結果は、ハドロン 03 国際会議での口頭発表 [9] の後、学術論文に出版された [10]。また、この仕事に関連した総合報告を格子 QCD 国際会議と原子核物理国際会議で行った [11, 12]。

(iii) クォーク・グルーオン・プラズマの輸送係数の研究

米国のブルックヘブン国立研究所の RHIC プロジェクトでの超高エネルギー重イオン衝突実験によるクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 探索において、相転移現象を記述できる完全流体力学方程式を用いた研究が行われている。そこでは衝突直後の非平衡過程から準熱平衡過程に達する緩和時間が短いことを想定し、準平衡過程への補正としての流体の輸送係数（熱伝導率や粘性）が小さいことを暗黙のうちに仮定している。昨今の流体模型を用いた RHIC 実験解析の成功から、それらの仮定が現象論的には正しい可能性が強くなった。そこで、強い相互作用の第一原理である QCD から理論的にその仮定の正当性を示すことが急務となっている。本研究では最大エントロピー法を用いて QGP の輸送係数の測定を試みた。平成 16 年度には、非等方格子を用いて非閉じ込め相転移温度より高温側の 3 点でゲージ場のみの格子シミュレーションを行い、最大エントロピー法を用いた解析によりグルーオン・プラズマの輸送係数が小さいこと示唆する結果を得た。この成果は、日本物理学会で口頭発表された [13]。

参考文献

- [1] S. Sasaki, K. Sasaki, T. Hatsuda and M. Asakawa, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 119 (2003) 302-304. [hep-lat/0209059]
- [2] S. Sasaki, Prog. Theor. Phys. Suppl. 151 (2003) 143-148. [nucl-th/0305014]
- [3] K. Sasaki, S. Sasaki, T. Hatsuda and M. Asakawa, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 129 (2004) 212-214. [hep-lat/0309177]
- [4] K. Sasaki and S. Sasaki, PoS LAT2005:060 (2005). [hep-lat/0508026]
- [5] K. Sasaki and S. Sasaki, Phys.Rev.D72 (2005) 034502. [hep-lat/0503026]
- [6] K. Sasaki, S. Sasaki and T. Hatsuda, Phys.Lett. B623 (2005) 208-217. [hep-lat/0504020]
- [7] K. Sasaki, Ph.D Thesis, Univ. of Tokyo, 2005.
- [8] S. Sasaki, Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 152001. [hep-lat/0310014]
- [9] S. Sasaki, AIP Conf.Proc. 717 (2004) 416-420. Talk at Hadron 03: 10th International Conference On Hadron Spectroscopy, Aschaffenburg, Germany, 2003.
- [10] S. Sasaki, Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 152001. [hep-lat/0310014]
- [11] S. Sasaki, Nucl.Phys. A752 (2005) 165-174. Invited talk at International Nuclear Physics Conferences (INPC 2004), Goteborg, Sweden, 2004.
- [12] S. Sasaki, Nucl.Phys.Proc.Suppl.140 (2005) 127-133. [hep-lat/0410016] Invited talk at 22nd International Symposium On Lattice Field Theory (Lattice 2004), Batavia, Illinois, 2004.
- [13] 津村享佑、浅川正之, 日本物理学会 2004 年秋季大会 (高知大学、2004 年 9 月)

平成 17 年度の実施報告の詳細

平成 17 年度は割り当てられて CPU 時間を用いて以下の研究を行った。

(i) 格子 QCD シミュレーションによる J/Ψ -ハドロン相互作用の研究

本研究の目的は、 J/Ψ 粒子と軽いハドロン (π 中間子, ρ 中間子, 核子) との低エネルギー極限 (閾値) での弾性散乱断面積と散乱長を格子 QCD から計算する事である。このような物理量は、 J/Ψ の核子や原子核との束縛状態の有無の判定や、重イオン衝突実験における j/Ψ とハドロンの弾性・非弾性散乱断面積に理論的拘束を与えるという意味で重要である。また、強い相互作用におけるフレーバーの保存のため、閾値での J/Ψ 粒子と軽いハドロンの相互作用は、グルーオンの交換を介してのみおこり、ヴァレンスクォークの対消滅過程を伴わない。従って、 J/Ψ -ハドロン相互作用は理論的な扱いが簡単になるだけでなく、ハドロン間相互作用における純粋なグルーオン交換の効果調べることができるという利点もある。

我々は、クエンチ近似の範囲で、 J/Ψ 粒子と軽いハドロンを格子上で同時に伝播させ、それぞれが独立に伝播する場合からのエネルギーシフト ΔE を計算した。Lüscher による有限体積格子上での散乱の位相差と ΔE を関係つける公式を援用すれば、散乱の閾値で定義される散乱長を数値的に求めることができる。エネルギーシフト ΔE の格子サイズ (一辺の長さを L とする) 依存性を調べるために、物理的サイズが $L = 1.6\text{fm}, 2.1\text{fm}, 3.2\text{fm}$ の格子上でシミュレーションを行い、 J/Ψ - π のチャンネルでは、 $1/L$ -展開から期待される $\Delta E \propto 1/L^3$ なる振る舞いを確認した。一方、 J/Ψ - ρ と J/Ψ - N のチャンネルについては、 $L = 1.6\text{ fm}$ のデータは、 $1/L$ -展開を行うには、散乱長が大きすぎる事を示唆したので、 $1/L$ 展開を行わず、位相差公式から散乱長を直接導いた。通常のブラケット作用と Wilson フェルミオンを用い、格子定数は $\beta = 6.2$ ($a = 0.068\text{ fm}$) ととり、以下のようなパラメーターを用いて計算を行った。

表 1: J/Ψ -ハドロン相互作用の格子計算で使ったパラメーター

$N_s^3 \times N_t$	L [fm]	κ	N_{gauge}
$24^3 \times 48$	1.6	0.1489, 0.1506, 0.1520	161 (85)
$32^3 \times 48$	2.1	0.1489, 0.1506, 0.1520	169 (55)
$48^3 \times 48$	3.2	0.1489, 0.1506, 0.1520	53 (53)

ここで、ホッピングパラメーター κ のそれぞれの値は、 $m_\pi = 1.2, 0.9, 0.6$ [GeV] に対応し、チャームクォークについては、 $\kappa = 0.1360$ をとった。また、 N_{gauge} は、解析に使用したゲージ配位の総数で、括弧内は H17 年度に生成されたもの、それ以外は H16 年度にすでに生成したものである。

我々の結果は、すべてのチャンネルで $\Delta E < 0$ となり、従ってグルーオン交換に起因するハドロン間相互作用が引力的であることを示している。また、 J/Ψ - π の散乱長は、クエンチ近似の範囲で精度よく決めることができ、 $0.0111(30)[\text{fm}]$ という値を得た。一方、 J/Ψ - ρ 及び J/Ψ - N の散乱長は、これより数十倍大きな値になる可能性を解析結果の中心値は示唆しているが、統計誤差の範囲で確定的な結論はまだ下せない。ただ、 $a_{J/\Psi-N} \sim 0.3 - 0.5\text{fm}$ という値は、QCD 和則や他の現象論的解析と同程度になっている。また、 J/Ψ - ρ 及び J/Ψ - N の全角運動量による散乱長の違いについては、誤差の範囲で有意な差は見られなかった。以下の表 2 に、最終的な s 波散乱長の値を各チャンネル毎に示してある。

本研究の一部は平成 17 年 7 月に行われた格子 QCD 国際会議において口頭発表し、プロシーディングスに報告した [a]。また、本研究は、横川一夫氏の博士論文（東京大学、H18 年 3 月）としてまとめられている。

表 2: J/Ψ -ハドロン弾性散乱における s 波散乱長

チャンネル	全角運動量	s 波の散乱長 [fm]
$J/\Psi-\pi$	1	0.0111(30)
$J/\Psi-\rho$	0	0.228(127)
	1	0.159(106)
	2	0.149(98)
$J/\Psi-N$	1/2	0.386(407)
	3/2	0.545(574)

(ii) 格子模型を用いた有限体積中での束縛状態の形成シグナルについての研究

近年、マルチクォーク状態（4クォーク状態）の候補と思われる中間子が複数発見された：BaBar の $D_s(2317)$ 、CLEO の $D_s(2463)$ 、Belle の $X(3872)$ などである。いずれもチャームクォークを含む共鳴状態で、崩壊閾値のすぐ下に存在し、非常に幅が狭く、非相対論的クォーク模型では存在が予測できなかった状態である。特に Belle の $X(3872)$ は $D\bar{D}^*$ の閾値のほぼ直上に存在し、 $D\bar{D}^*$ がルーズに束縛した分子共鳴状態である可能性がある。これは、通常のチャーモニウム ($c\bar{c}$) と荷電共役変換に対する偶奇性で区別できるため、今後の精密な実験が待たれる。

$X(3872)$ のマルチクォーク状態としての可能性を格子 QCD 数値シミュレーションで探る上での困難の一つは、分子共鳴状態のような弱く束縛した状態（あるいは閾値のごく近傍の束縛状態）と、引力的な相互作用を持つ二体散乱状態を、有限体積の格子上で区別する事が難しい点にある。これは、有限体積では、すべてのエネルギー固有値が不連続となり、無限系での束縛状態（離散状態）と散乱状態（連続状態）の区別が難しくなるという事と関係している。

本研究では、有限体積中での弱い束縛状態と二体散乱状態を区別する方法を模索するために、まず格子 QED による電子・陽電子束縛状態の研究を行った。この場合、ハドロンの分子共鳴状態のような「複合粒子同士による束縛状態」ではなく「素粒子による束縛状態」を扱うので、問題設定が簡単化され、精密な数値解析も可能となる。ただし、束縛状態から引力的な散乱状態への連続的な変化は、長距離クーロン相互作用があると不可能なので、光子に質量を持たせて電子・陽電子間の相互作用を短距離型にして数値実験を行った。

メトロポリス法を使ったモンテカルロ数値計算により、格子 QED 理論において光子が質量を獲得するヒッグス相のゲージ配位を生成し、そのゲージ配位の下で電子（陽電子）の伝搬関数を共役勾配 (CG) 法の一つ BiCGStab 法により求める。このようにして得られた電子の伝搬関数を用いて、ポジトロニウムの虚時間相関関数を測定した。電子と陽電子間の相互作用をコントロールして束縛状態と散乱状態を制御するために、電子の電荷を任意に変化させた。有限体積中では、もし電子と陽電子が束縛状態を形成せず二体の散乱状態となる場合には、その二体のエネルギーは有限体積の空間サイズ L に対してベキ型で変化し、束縛状態の場合には空間サイズ L の指数型で変化することが理論的に予想されていることから、いくつかの空間サイズ L での数値実験を行い、この理論的予想を検証した。

具体的には、Abelian Higgs model と Wilson fermion によるポジトロニウムのスペクトロスコピーを 6 つの格子体積で計算した： $8^3 \times 24$ (400 統計), $10^3 \times 24$ (300 統計), $12^3 \times 24$ (200 統計), $16^3 \times 24$ (200 統計), $20^3 \times 24$ (150 統計), $24^3 \times 24$ (150 統計)。

本研究の一部は平成 17 年 7 月に行われた格子 QCD 国際会議において口頭発表し、プロシーディングスに報告した [b]。

研究発表リスト (平成 17 年度研究分)

口頭研究発表 (国際会議):

[a] Low-energy J/Ψ -Hadron Interactions from Quenched Lattice QCD,

K. Yokokawa, S. Sasaki, A. Hayashigaki and T. Hatsuda,

Talk given at 23rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2005), Dublin, 2005.

PoS LAT2005:215, 2005. [hep-lat/0509189]

[b] Bound State Spectrum in the Finite Volume,

S. Sasaki and T. Yamazaki,

Talk given at 23rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2005), Dublin, 2005.

PoS LAT2005:061, 2005. [hep-lat/0510032]