

# 平成 16 年度大型シミュレーション実施報告書

高エネルギー加速器研究機構長 殿

東京大学 理学系研究科  
助手 佐々木 勝一

受理番号: 大型-110

研究課題名: 最大エントロピー法を用いた格子 QCD 数値実験による核子励起状態の研究

研究組織:

研究責任者

佐々木勝一 (ささきしょういち)

東京大学 理学系研究科 助手

研究従事者

初田哲男 (はつだてつお)

東京大学 理学系研究科 教授

浅川正之 (あさかわまさゆき)

大阪大学 理学研究科 教授

佐々木潔 (ささききよし)

東京大学 理学系研究科 博士後期課程 3 年

横川一夫 (よこかわかずお)

東京大学 理学系研究科 博士後期課程 2 年

津村享佑 (つむらきょうすけ)

京都大学 理学研究科 博士課程 1 年

平成 16 年度の実施報告の詳細:

平成 16 年度は割り当てられた CPU 時間を用いて以下の 4 つの研究を行った。

## 1. バリオン励起状態の研究

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と言える。近年のクーエンチ近似の格子 QCD 数値計算による詳細な計算結果は、ハドロンの基底状態の質量を実験値と 5-10 % 程度の誤差の範囲以内で再現することに成功している。しかしこれらの成功は「基底状態」に限られており、「励起状態」については立ち後れている。

この立ち後れの主な原因としては、格子 QCD 数値計算においてハドロンの質量を計算するとき、ハドロンの虚時間 2 点相関関数の虚時間遠方での振るまいから求めるという方法に頼っていたことによる。この方法は基底状態の情報を得るのに適しているが、励起状態の研究には向いているとは言い難い。平成 16 年度も平成 13-15 年度から引き続き、最大エントロピー法を用いて、ハドロンの虚時間 2 点相関関数から直接ハドロンのスペクトル関数を導出し、ハドロンの動径励起状態についての研究を行った。

スピン  $1/2$  (核子) スピン  $3/2$  ( 粒子) の基底状態、励起状態についての詳細な有限体積効果を格子間隔  $0.07\text{fm}(\beta = 6.2)$  に相当する Wilson フェルミオンを用いたクエンチ近似計算により行い、励起状態に対しては基底状態と比べてクォークの軽い質量計算において有限体積効果が無視できないほど大きいことが明らかとなった。直感的には励起状態は基底状態などに比べ波動関数が広がっているために有限体積効果に敏感であることは自明であるが、非相対論的なクォーク模型などで予想されるよりも遥かに大きな励起状態に対する有限体積効果が観測された。バリオン励起状態の研究においては、有限体積効果が無視できるほどの大きさとして、少なくとも  $3.0\text{fm}$  以上格子サイズが必要であることを報告した。

2 つの格子間隔  $0.09\text{fm}(\beta = 6.0)$  と  $0.14\text{fm}(\beta = 5.8)$  に相当する Wilson フェルミオンを用いたクエンチ近似における、バリオン虚時間 2 点相関関数から、正パリティのスピン  $1/2$  (核子) スピン  $3/2$  ( 粒子) のみならず、それぞれの負パリティの状態に対してもパリティ射影技法を駆使して、最大エントロピー法を用いた解析によりスペクトル関数を再構成することに成功した。これらの成功により、一般に非相対論的なクォーク模型やバック模型を用いた解析では説明することができていなかった、核子の励起スペクトル問題についての一定の理解を得ることができた。格子 QCD で得られた核子の励起スペクトルは、非相対論的なクォーク模型やバック模型などのポテンシャル模型共通に見られている質量スペクトルとは異なり、負パリティを持つ励起状態:  $N^*(1535)$  と核子と同じ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で統計誤差の範囲で近似的に縮退しており、実験の示す質量スペクトラム:

$N(940) < N'(1440) \approx N^*(1530)$  を再現できることを示した。このことはポテンシャル模型と実験の核子の励起スペクトルの食い違いから、クォーク 5 体 ( $qqqq\bar{q}$ ) 系などといったエキゾチックなバリオン状態の候補とされてきたローパー共鳴がクォーク 3 体系として十分に記述できることを示唆していると考えられる。

以上の結果は、東京大学の学生、佐々木潔氏の博士論文としてまとめられ、さらに 2 つの学術論文として出版予定である。

## 2. ペンタクォークの研究

ペンタクォーク・バリオンとは Spring8 において RCNP の中野氏らによる詳細な実験により発見された、 $K^{+n}$  に崩壊する幅の狭いスピン半奇数の共鳴状態で、終状態の量子数からその共鳴状態はストレンジネス + 1 を持つエキゾチックなバリオン状態である。ここでエキゾチックと呼ぶのは、ストレンジネス + 1 を持つために、すくなくともそのバリオンが反粒子のストレンジクォークを含む必要があり、必然的にクォーク 5 体 ( $uudd\bar{s}$ ) 系として識別されるためである。その後の複数の追試実験により、ペンタクォーク・バリオンの存在はほぼ確定している。このようなエキゾチックバリオンの存在はスキルミオン模型やカイラルソリトン模型などといった、核子をパイオンのソリトン状態として取り扱う模型に共通に予言されていたが、クォーク模型などでは理解しが

たい不思議な状態である。ポイントは観測されている質量がクォーク模型で評価される質量よりもはるかに軽く、核子・K中間子の崩壊閾値よりわずかに重い共鳴状態であること。さらに驚くべきことは、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。また実験的には質量と崩壊幅の上限以外には、量子数として電荷とストレンジネスのみが観測されるに留まっている。特にその構造を理解する上、または種々の模型を選別する上で必要と考えられるスピン、パリティ、アイソスピンがまだ実験的に確定していない。

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 $\Theta(1540)$ の研究を行った。主に実験的に確定していないペンタクォークのスピン、パリティ、アイソスピンを特定するための研究を行い、QCDからの理論計算としてそれらを予言することを目的とした。ペンタクォーク $\Theta(1540)$ 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、前者は定量的にも $\Theta(1540)$ の質量をよく再現していることが判明した。こうして、本研究において $\Theta(1540)$ のスピン・パリティが $1/2^-$ であることを実験に先駆けて予言した。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なバリオン $\Theta_c$ の存在に関し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はなく、むしろ核子・D中間子の崩壊閾値よりもはるかに重いことから、 $\Theta(1540)$ のように寿命の長い共鳴状態ではなく、かなり寿命が短い共鳴状態である可能性が高いことを報告した。平成16年度に申請したの一部のCPU時間を使って平成15年度までに得られた統計数(135統計)を最終的に240統計まで増やした。その結果はPhys. Rev. Lett.に速報として発表した。今年度の後半では、引き続き、より詳細でより精度の高い計算をめざし、複数のペンタクォークオペレータを組み合わせでのcorrelator行列を用いての研究を始めた。3×3のcorrelator行列を計算するにあたって、計算規模がそれまでのものに比べて約10倍増えたため、最終的に平成16年度のCPU時間では十分な統計を獲得することができず、次年度にも研究が継続する予定である。

### 3. J/ψ 粒子-ハドロン散乱断面積の研究

続々と発表されるRHICの実験データは総合的にQGP生成を示唆している一方、QGP生成の決め手となるクリアーなシグナルはまだ得られていない。今後、クリアーなシグナルの候補の一つ「J/ψ 粒子抑制」に関するデータが実験の統計がたまり次第発表される予定ではあるが、理論的には「J/ψ 粒子抑制」がQGP生成の直接の証拠として考えてよいかどうかは議論の余地を残している。特に議論が絶えないものとして、ハドロン相でのJ/ψ 粒子崩壊の促進による「J/ψ 粒子抑制」の可能性である。本研究ではJ/ψ 粒子と他のハドロン、特に中間子や核子との非弾性散乱のモデル計算に必要なインプットとなるJ/ψ 粒子-ハドロンの弾性散乱断面積を直接格子QCDから見積もることを目的とする。そのような断面積の測定は当然J/ψ 粒子を標的や入射ビームとして使えない現在、実験的に測定することは不可能であり、第一原理であるQCDからその大きさを見積もることは非常に重要である。現在、モデル計算やQCD Sum Ruleを使った評価ではJ/ψ 粒子と散乱するハドロンの相対運動量がほとんど零に近い場合、その弾性散乱断面積は1-5 mb程度と見積もられている。これはJ/ψ 粒子-ハドロン散乱長に換算すると $10^{-1}\text{fm}$ のオーダーで、格子体積が $(1-2\text{fm})^3$ のオーダーの格子QCD数値計算で十分に取り扱いえるものである。今年度はJ/ψ 粒子を取り扱うために、格子間隔 $0.07\text{fm}(\beta=6.2)$ の格子間隔で $24^3 \times 48$ と $32^3 \times 48$ でのテスト計算を行った。引き続き平

成 17 年度の申請分で本格的計算  $48^3 \times 48$  を始める予定である。

表 1: 平成 16 年度行ったクエンチ近似の格子 QCD 数値計算

$\beta$	Lattice size	Kappa values	Statistics	Subjects
6.0	$16^3 \times 32$	{0.1550, 0.1530, 0.1515, 0.1500}	580	1
6.2	$24^3 \times 48$	{0.1520, 0.1515, 0.1506, 0.1360}	164	3
	$32^3 \times 48$	{0.1520, 0.1515, 0.1506, 0.1360}	260+98	2+3
	$48^3 \times 48$	{0.1520, 0.1506, 0.1497, 0.1489, 0.1480}	50	1

#### 4. クォーク・グルーオン・プラズマの輸送係数の研究

現在、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盛んに行われている。こ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。しかしながら、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 年度で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 点で純ゲージの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。

表 2: 平成 16 年度行った非等方格子を用いた有限温度 QCD の計算

Lattice size	Temperature	Statistics	Subjects
$32^3 \times 20$	$3.74 T_c$	71000	4
$32^3 \times 32$	$2.33 T_c$	100000	4
$32^3 \times 40$	$1.87 T_c$	60000	4

## 研究発表リスト:

### 学術雑誌:

1. S. Sasaki  
*Lattice Study of Exotic  $S=+1$  Baryon.*  
Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 152001.
2. K. Sasaki and S. Sasaki  
*Excited Baryon Spectroscopy from Lattice QCD: Finite Size Effect and Hyperfine Mass Splitting.*  
Submitted to Phys. Rev. **D**; (hep-lat/0503026).
3. K. Sasaki, S. Sasaki and T. Hatsuda  
*Spectral Analysis of Excited Nucleons in Lattice QCD with Maximum Entropy Method*  
Submitted to Phys. Lett. **B**; (hep-lat/0504020).

### 国際会議等のプロシーディングス:

1. S. Sasaki,  
*Pentaquark in lattice QCD.*  
Proceedings of the X International Conference on *Hadron 2003*,  
AIP Conf. Proc. 717 (2004) 416-420.

### 口頭研究発表 (国際会議)

#### Invited Talks :

1. The XXII International Symposium on LATTICE FIELD THEORY (LATTICE 2004)  
June 21 - 26, 2004, Fermilab, USA.  
S. Sasaki  
*Pentaquarks*
2. International Nuclear Physics Conference (INPC 2004).  
June 27 - July 2, 2004, Göteborg, Sweden  
S. Sasaki  
*Highlights of Baryon Spectroscopy from Lattice Calculations.*
3. International workshop on Pentaquark 2004.  
July 20 - 23, 2004, SPring-8, Japan  
S. Sasaki  
*Pentaquark Baryons from Lattice Calculations*

## Contributed Talks :

1. Quark Nuclear Physics 2005  
Feb.22-24, 2005, Phoenix Park, Pyoungchang, Korea  
K.Sasaki, S.Sasaki, T.Hatsuda  
*Excited nucleons in lattice QCD.*

## 口頭研究発表 (日本物理学会)

1. 日本物理学会 2004 年秋季大会 (高知大学、2004 年 9 月)  
津村享佑、浅川正之  
最大エントロピー法によるグルーオン・プラズマの粘性係数の測定
2. 日本物理学会 2005 年第 60 回年次大会 (東京理科大学、2005 年 3 月)  
佐々木 潔、佐々木 勝一、初田 哲男  
格子 QCD による核子励起状態、励起状態に対する有限体積効果の研究

## その他

1. 東京大学大学院・博士論文 (平成 2005 年 3 月)  
佐々木 潔  
Study of the Mass Spectra of Excited Baryons from Lattice QCD