

平成 15 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-102

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)

京都大学 理学研究科 助教授

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 修士課程 2 年

平成 15 年度の実施報告の詳細:

平成 15 年度は割り当てられた CPU 時間を用いて以下の 3 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 15 年度も平成 13,14 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。

すでに前年度までに格子間隔が 0.1fm に相当する $\beta=6.0$ の Wilson gauge 作用を用いたクエンチ近似の格子 QCD 数値計算において最大エントロピー法を用いたハドロンの動径励起状態の研究の有効性を示した。今年度は表 1 のような異なる格子間隔 (0.07fm と 0.14fm) での格子 QCD 数値計算を行い、有限格子間隔による系統誤差の見積もりや、零格子間隔への外挿 (連続極限をとる) を試みた。残念ながら現段階では格子間隔が 0.07fm に相当する $\beta=6.2$ の Wilson gauge 作用を用いた数値計算の統計が充分足りていないため、定量的な結論を最終的に得るには平成 16 年度の申請分による追加継続計算を必要としているが、定性的にはいくつかの重要な結果を得るに至った。

表 1: 平成 15 年度行った格子 QCD 数値計算

| β | Lattice size | Kappa values | Statistics |
|---------|------------------|---|------------|
| 5.8 | $24^3 \times 32$ | {0.16, 0.157, 0.1555, 0.154, 0.1530} | 200 |
| 6.2 | $24^3 \times 48$ | {0.1515, 0.1506, 0.1497} | 184 |
| | $32^3 \times 48$ | {0.152, 0.1515, 0.1506, 0.1497, 0.1489} | 240 |
| | $48^3 \times 48$ | {0.152, 0.1506, 0.1497, 0.1489, 0.1480} | 150 |

第一に正パリティのスピンの $1/2$ (核子)、スピンの $3/2$ (核子) のみならず、それぞれの負パリティの状態に対しても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。また、新しい定性的な結果として、CP-PACS collaboration によって最大エントロピー法を用いた π 中間子、 ρ 中間子に対する励起状態研究において確認されていた、格子化に伴うダブラー (紫外運動量カットオフ近傍に存在する非物理的な粒子モード) の束縛状態の存在をバリオン (核子系、 Δ 粒子系) の場合にも確認することができた。

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、または種々のモデル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 Θ_c の存在についても数値実験を行い、その質量が多く現象論モデル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。

3. 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。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。しかしながら、昨今の流体モデルを用いた 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 15 年度では比較的小さな格子サイズによるテスト計算を行い、最大エントロピー法を用いた解析の有用性を示すに留まった。なお、本研究は京都大学の学生、津村氏の修士論文としてまとめられている。

研究発表リスト:

学術雑誌:

1. S. Sasaki
Lattice Study of Exotic $S=+1$ Baryon.
Submitted to Phys. Rev. Lett. ,(hep-lat.0310014).

国際会議等のプロシーディングス:

1. S. Sasaki, K. Sasaki, T. Hatsuda and M. Asakawa,
Bayesian approach to the first excited nucleon state in lattice QCD.
Nucl. Phys. **B** (Proc. Suppl.) **119** (2003) 302-304.
2. S. Sasaki,
Latest results from lattice QCD for the Roper resonance.
Prog. Theor. Phys. Suppl. **151** (2003) 143-148.
3. K. Sasaki, S. Sasaki, T. Hatsuda and M. Asakawa,
Excited nucleon spectrum from lattice QCD with maximum entropy method.
To be published in Nucl. Phys. **B** (Proc. Suppl.)
4. S. Sasaki,
Pentaquark in lattice QCD.
Proceedings of the X International Conference on *Hadron Spectroscopy (Hadron 2003)*, September 1-6, 2003, Aschaffenburg, German.
To be published in the AIP series of conference proceedings.

口頭研究発表 (国際会議)

Invited Talks :

1. YITP International workshop on MULTI-QUARK HADRONS; FOUR, FIVE AND MORE?
February 17 - 19, 2004, YITP, Kyoto, Japan
S. Sasaki
Pentaquark Baryons from Lattice QCD.
2. KEK International workshop on NUCLEAR CHIRAL DYNAMICS.
March 18 - 20, 2004, KEK, Tsukuba, Japan
S. Sasaki
Pentaquark Baryons in Quenched Lattice QCD.

Contributed Talks :

1. The X International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron 2003)
September 1 - 6, 2003, Aschaffenburg, Germany
S. Sasaki
Exotic $S=+1$ baryon in lattice QCD.
2. The International Symposium on LATTICE 2003
July 15 - 19, 2003, Tsukuba, Japan
K. Sasaki, S. Sasaki, T. Hatsuda and M. Asakawa
Excited nucleon spectrum from lattice QCD with maximum entropy method.

口頭研究発表 (日本物理学会)

1. 日本物理学会 2004 年春の年会 (九州大学、箱崎、2004 年 3 月)
佐々木勝一
Pentaquark baryons in lattice QCD (招待講演)
2. 日本物理学会 2004 年春の年会 (九州大学、箱崎、2004 年 3 月)
津村享佑、浅川正之
最大エントロピー法に基づく、格子 QCD を用いたクォーク・グルーオン・プラズマの輸送係数の研究

口頭研究発表 (国内研究会)

1. 2003 年度 KEK 大型シミュレーション研究会「ハドロン物理と格子 QCD」
KEK, 2004 年 1 月 28-29 日
佐々木勝一
格子 QCD によるペンタクォークの研究

その他

1. 京都大学大学院・修士論文
津村享佑
最大エントロピー法に基づく、格子 QCD を用いたクォーク・グルーオン・プラズマの輸送係数の研究