

平成 2 7 年 6 月 1 2 日現在

機関番号：1 2 1 0 2

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012 ~ 2014

課題番号：2 4 5 4 0 2 5 0

研究課題名 (和文) 格子量子色力学による未発見ハドロン探索

研究課題名 (英文) Search for undiscovered hadron by lattice QCD

研究代表者

滑川 裕介 (Namekawa, Yusuke)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号：0 0 3 7 7 9 4 6

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 2,300,000 円

研究成果の概要 (和文) : 物質の最小構成要素はクォークである。但し、重いクォークから構成される物質は、多くが未発見である。そこで、4 番目に重いチャームクォークを含む複合粒子を対象に、質量スペクトルを数値シミュレーションにより調べた。

本研究により得られたチャームクォーク 1 つを含むバリオン質量スペクトル値は、実験値と一致した。他方、チャームクォークを 2 つ含む $cc(3520)$ バリオン質量値は、報告されている実験値とは有意に異なる。本計算により、既存の実験値は誤りであり、真の値は 100 MeV 程度高い事を示した。また、他のチャームクォークを 2 つ及び 3 つ含む未発見バリオンに対する質量予言値を 2 % の精度で決定した。

研究成果の概要 (英文) : The smallest component of known material is a quark. But, a theory of quarks anticipates additional unknown materials. I investigated mass spectrum including charm quarks by numerical simulations.

This study shows that the baryon mass spectrum including one charm quark agrees with experiments. On the other hand, the $cc(3520)$ baryon mass which includes two charm quarks significantly deviates from the reported experimental value. It suggests the experimental value is not correct. The true value is predicted to be 100 MeV higher. In addition, spectrum of other undiscovered charmed baryon comprised of two and three charm quarks is predicted in 2% precision.

研究分野：素粒子理論

キーワード：計算物理

1. 研究開始当初の背景

研究開始時の大きな実験的発展として、四クォークから構成されるハドロンの発見が挙げられる。 $X(3872)$ 、 $Y(4260)$ 等、単純な非相対論的構成子クォーク模型では説明できないチャームoniumライクハドロンの発見された。それに加え、存在が確定したならば確実に四クォークから成るエキゾチックハドロンとして、 $Z_c(4430)$ も報告されている。このように、チャームクォークを含む中間子及びそのエキゾチック系における実験には、非常に著しい進展が見られていた。

他方、チャームクォークを含むバリオンに対する理解は、芳しくなかった。チャームクォークを1つ含むバリオンに関しては、実験的に良く調べられている。しかし、チャームクォークを2つ含むバリオンに対しては、 $cc(3520)$ しか発見の報告をされていない。しかも、 $cc(3520)$ の存在は未だ確定していない。Particle Data Groupにおける $cc(3520)$ の存在確定ステータスは、poorである。実際、BABAR、Belle及びFocus実験では、 $cc(3520)$ は発見されていない。また、種々の模型を用いた理論的解析でも、 $cc(3520)$ の質量は 3520 MeV より大きい値を示す。残念ながら模型による解析は模型依存性が大きく、 $cc(3520)$ 問題に対する決定的解答は与えられない。模型依存性の無い量子色力学(QCD)に基づく $cc(3520)$ の検証及び他の未発見チャームバリオンに対する予言が強く望まれていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、格子量子色力学(QCD)に基づく数値計算により、未発見ハドロンの性質を定量的に決定する事である。従来の格子計算とは異なり、重クォークを相対論的に取り扱う。加えて、世界初となる物理点直上の極めて現実に近いシミュレーションを実施する。これにより、誤差を押さえ、チャームクォークを含むバリオンの検証及び実験への予言を与える。

3. 研究の方法

本研究は、次のセットアップの元で実行した。本格子QCD計算には、私を含むPACS-CSグループにより生成済みのゲージ配位を使用した。ゲージ配位生成は研究開始までに完了させていたため、本研究を即座に開始できた。なお、このゲージ配位は、物理点直上でのアップ、ダウン及びストレンジクォークの動的効果を含んでおり、非常に現実世界に近いシミュレーションが可能である。また、格子サイズは 3 fm であり、重クォークを含むハドロンに対する有限体積効果は十分抑制される。軽いアップ・ダウン・ストレンジ

クォークに対しては、ゲージ配位生成時と同じクォーク作用を採用した。

本研究で工夫した点として、チャームクォークに相対論的重クォーク作用を用いた事が挙げられる。相対論的重クォーク作用中のパラメーターを非摂動的に決定し、有限格子間隔に起因する系統誤差を大幅に削減出来た。さらに、チャームクォークに対して相対論的重クォーク作用を用いている点を踏まえ、チャームバリオンに対して相対論的演算子を使用した。さらに、シグナルを改善するため、ゲージ固定後、各クォークに波動関数の重みを付与した。

4. 研究成果

本研究では、まず、実験的に良く調べられているチャームクォークを1つ含むバリオンに対する格子QCDシミュレーションを実行し、質量を求めた。得られた結果を実験値と比較し、本計算の信頼性を確認した。本計算手法の有効性確認は、本研究による検証及び予言の基礎付けを与えるものであり、重要である。特に、本計算で得られるチャームバリオン質量は、全て格子QCDからの予言値である。格子間隔及びアップ、ダウン及びストレンジクォーク質量は、軽いハドロンスペクトルを用いて決められている。チャームクォーク質量は、チャームoniumスペクトルで決定済みである。格子QCDによるチャームバリオン計算結果と実験値の比較は、自明では無い。

図1は、シミュレーションにより得られたチャームバリオン質量スペクトルと実験値の比較である。

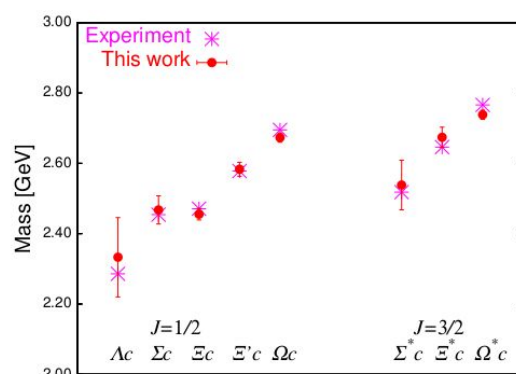


図1：シングルチャームバリオンスペクトル

この図から、シミュレーション結果は既存の実験値を全て正しく再現している事が分かる。また、本研究での工夫が活かされ、計算結果の精度は2%を達成出来た。

この結果を踏まえ、チャームクォークを2

つ以上含むバリオンに対する格子QCD計算を行った。シングルチャームバリオンの場合と同じく、ダブル及びトリプルチャームバリオンに対して相対論的演算子を使用した。

図2は、ダブル及びトリプルチャームバリオンスペクトルである。

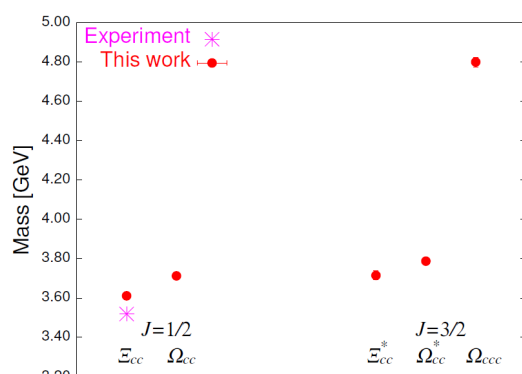


図2：ダブル及びトリプルチャームバリオンスペクトル

図2において、 $\Xi_{cc} (3520)$ の質量は未確定実験値3520 MeVを再現しない。未確定実験値とシミュレーション結果の差は4であり、有意な違いが見られる。本研究により、 $\Xi_{cc} (3520)$ の既存報告値は誤りであり、真の質量値は100 MeV程度高いと判明した。

また、未知のダブル及びトリプルチャームバリオンに関する質量スペクトル予言値を高精度で得る事に成功した。本研究で予言された未発見ハドロンは、現在稼働中のLHC実験及びBELLE2等の将来実験での発見が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計9件)

- (1) H. Matsufuru, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, S. Motoki, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, S. Ueda, N. Ukita, "OpenCL vs OpenACC: Lessons from Development of Lattice QCD Simulation Code", Proc. Comp. Sci. 51 (2015) 1313, 査読有, DOI: 10.1016/j.procs.2015.05.316
- (2) Y. Namekawa, "Comparative study of topological charge", PoS LATTICE2014 (2015) 344, 査読有, <http://pos.sissa.it/archive/conferences>

/214/344/LATTICE2014_344.pdf

- (3) S. Ueda, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, S. Motoki, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, N. Ukita,

"Lattice QCD code Bridge++ on multi-thread and many core accelerators",

PoS LATTICE2014 (2015) 036, 査読有, http://pos.sissa.it/archive/conferences/214/036/LATTICE2014_036.pdf

- (4) S. Motoki, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, S. Ueda, N. Ukita,

"Development of Lattice QCD Simulation Code Set "Bridge++" on Accelerators", Proc. Comp. Sci. 29 (2014) 1701, 査読有, DOI: 10.1016/j.procs.2014.05.155

- (5) S. Ueda, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, S. Motoki, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, N. Ukita,

"Development of an object oriented lattice QCD code 'Bridge++'", J. Phys. Conf. Ser. 523 (2014) 012046, 査読有,

DOI: 10.1088/1742-6596/523/1/012046

- (6) PACS-CS Collaboration: Y. Namekawa, S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie,

"Charmed baryons at the physical point in 2+1 flavor lattice QCD", Phys. Rev. D 87 (2013) 9, 094512, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.87.094512

- (7) S. Ueda, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, S. Motoki, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, N. Ukita,

"Bridge++: an object-oriented C++ code for lattice simulations", PoS LATTICE2013 (2014) 412, 査読有, http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/412/LATTICE%202013_412.pdf

- (8) PACS-CS Collaboration: S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie,

"1+1+1 flavor QCD + QED simulation at the physical point", Phys. Rev. D 86 (2012) 034507, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.86.034507

- (9) Y. Namekawa

"Charmed baryon spectroscopy on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD", PoS LATTICE2012 (2012) 139, 査読有, http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/139/Lattice%202012_139.pdf

〔学会発表〕(計9件)

- (1) Y. Namekawa

「Heavy hadrons from lattice QCD」(招待講演),

Structure and productions of charmed baryons II (Tokai, Japan, Aug. 7-9, 2014)

(2) Y.Namekawa

「Comparative study of topological charge」,

The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (New York, USA, June 23-28, 2014)

(3) 滑川 裕介

「格子 QCD によるヘビーハドロン」(招待講演),

「ヘビークォークハドロンと原子核のスペクトルと構造」研究会(KEK、つくば、2014年2月26-28日)

(4) Y.Namekawa

「Charm quark physics from lattice QCD at the physical point」,

Future Prospects of Hadron Physics at J-PARC and Large Scale Computational Physics (Ibaraki, Japan, Feb. 11-13, 2013)

(5) Y.Namekawa

「Charmed baryons from lattice QCD」, Hadron Structure and Interactions 2012 (Osaka, Japan, Nov. 16-17, 2012)

(6) 滑川 裕介

「物理点における 2+1 フレーバー格子フル QCD シミュレーションによるチャームバリオンの研究」,

日本物理学会 2012 年秋季大会(京都産業大学、京都、2012年9月11-14日)

(7) 滑川 裕介

「Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD」(招待講演),

「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会(名古屋大学、名古屋、2012年7月12-13日)

(8) Y.Namekawa

「Charmed baryon spectroscopy on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD」,

The 30th International Symposium on Lattice Field Theory (Cairns, Australia, June 24-29, 2012)

(9) Y.Namekawa

「Charm quark physics from lattice QCD」(招待講演),

International Workshop on heavy quark hadrons at J-PARC of Technology 2012 (Tokyo, Japan, June 18-22, 2012)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

滑川 裕介 (NAMEKAWA, Yusuke)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号: 00377946

(2)研究分担者

()

研究者番号:

(3)連携研究者

()

研究者番号: