

研究責任者名 Name	佐々木 勝一 Sasaki, Shoichi	所属機関 Affiliation	東北大学 Tohoku University
受理番号 Proposal No.	大型 12/13-02	研究課題名 Program title	格子 QCD に基づくハイペロン β 崩壊の研究 Hyperon beta decay from lattice QCD

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

成果の概要

Abstract

(和文)

バリオン八重項（ハイペロン）の質量スペクトルにおいて、フレーバーSU(3)の破れは精密に観測されているが、バリオン八重項の弱い相互作用によるセミレプトニック崩壊であるハイペロン β 崩壊においては、実験的にフレーバ SU(3)の破れを観測することは非常に難しい。本研究課題は、現実的な 2+1 フレーバー格子 QCD 数値計算を用いて、ハイペロン β 崩壊、特に $\Xi^0 \rightarrow \Sigma^+$ 崩壊と $\Sigma^- \rightarrow n$ 崩壊を用いて、フレーバーSU(3)の破れを 2-3%以下の誤差の範囲内でその破れの有無を観測することを目的としている。そのために、本年度は、その研究の中心を、すでに別の計算プラットフォームで最適化されている計算コードを KEK の BlueGene/Q 上に移植するに費やした。

(英文)

The spectrum of the octet baryons (hyperons) exhibits the definite SU(3) breaking effect, which is precisely measured in experiments. On the other hand, signature of the SU(3) breaking scarcely show up in various semileptonic decays among hyperons (hyperon beta decays) because of poor experimental precision. The level of precision required for determining the SU(3) breaking effect should be less than a few % accuracy. It could be easily accomplished by the first principle calculation, namely lattice QCD simulation

In this study, we will explore the SU(3) breaking effect in hyperon beta decays by using 2+1 flavor dynamical lattice simulations. We are especially interested in the $\Xi^0 \rightarrow \Sigma^+$ and $\Sigma^- \rightarrow n$ beta decays. We have spent this year of our project to port our existing program code, which is optimized on the different platform, to BlueGene/Q machine at KEK.

研究成果を公開しているホームページアドレス

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読つきの 学術論文数	プロシーディング 論文数	その他 (投稿中を含む)
	1 件		1 件	

成果の公表リスト（それぞれの枠に番号をつけて記入願います。）

口頭研究発表 Presentations at scientific meetings concerning the program		
1. "Status of semileptonic hyperon decays from lattice QCD using 2+1 flavor domain wall fermions" talk given by Shoichi Sasaki at the 31st International Symposium on LATTICE FIELD THEORY (LATTICE 2013), July 29–August 3, 2013, Mainz, Germany		
査読付きの学術論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。 Refereed Journal Articles (name of journal, volume, page, year)		
1	著者名 Author	
	タイトル title	
	雑誌名 name of journal	
	URL	
2	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	
3	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	
プロシーディング論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。 International Conference Proceedings (name of journal, volume, page, year)		
1.	著者名 Author	Shoichi Sasaki
	タイトル title	Status of semileptonic hyperon decays from lattice QCD using 2+1 flavor domain wall fermions
	雑誌名等 name of journal	PoS LAT2013 (2013) 388
	URL	
2.	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	
3.	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	
その他 (学位論文、紀要、投稿中の論文を含む) (URL を記載) Others (thesis for a degree, bulletin, papers to be published, etc.)		
特になし		
特記 (本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など) (過去に遡っても構いません。) Special Notes (newspaper article, literary works, awards, etc.)		
特になし		

平成 24 - 25 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

東北大学大学 理学研究科
准教授 佐々木 勝一

受理番号: 大型-12/13-02

研究課題名: 格子 QCD に基づくハイペロン 崩壊の研究

研究組織:

研究責任者
佐々木勝一 (ささきしょういち)
東北大学大学院 理学研究科 准教授

平成 24 - 25 年度の実施報告の詳細:

平成 22 年の 9 月まで運用されていた IBM Bluegene/L の利用による大型シミュレーション研究として、本研究課題はスタートしている。これまでに、研究責任者によって、RBC+UKQCD collaborations により公開されている 2+1 フレーバー Domain Wall Fermion (DWF) QCD ゲージ配位 (格子サイズ、 $24^3 \times 64 \times 16$ 。格子間隔は比較的粗い 0.12 fm で物理的空間サイズは一辺 2.7 fm の箱である) [1] を使ったハイペロン 崩壊の格子 QCD 数値計算が、平成 22 年度までの大型シミュレーション研究プロジェクトとして完了し、その数値計算の解析成果は平成 24 年 9 月に文献 [2] として発表している。

文献 [2] の研究では達成できなかった、連続極限 (格子間隔を零の極限) とカイラル極限 (アップ・ダウンクォーク質量を零の極限) に関連する系統誤差を評価することによってより計算の精度を高めることを主題として、昨年度より IBM BlueGene/Q の利用による KEK 大型シミュレーション研究を再開した。本研究課題は、すでに RBC+UKQCD collaborations によって無償公開されている、以前用いた格子間隔より細かい格子間隔 0.09 fm における、2+1 フレーバー DWF QCD ゲージ配位 (格子サイズ、 $32^3 \times 64 \times 16$) [3] を利用した格子 QCD 計算に着手することによって、前述の点に関する計算精度の向上が見込まれる。格子空間サイズは文献 [2] の研究と同様、空間方向に対して一辺 2.9 fm の格子サイズを用いた数値計算となり、前研究 [2] と同様、有限体積効果が充分無視できる格子サイズでの新たな 2+1 フレーバー格子 QCD 数値計算による研究が引き続き行なえる。すでに、筑波大学計算科学研究センター学際共同利用プログラム (T2K-Tsukuba) や理化学研究所 RICC (RIKEN Integrated Cluster of Clusters) の一般利用などを通じてその研究の一部は進んでいるが、本研究の完遂には演算性能の高い、IBM BlueGene/Q の利用が不可欠となる。

コードの開発・運用状況

昨年度までに、先行研究 [2] において作成した BlueGene/L 用の計算プログラムコード¹の BlueGene/Q 上への移植が完了し、新しい格子間隔での数値計算に必要な計算パラメータ（主に、クォークのソースサイズや3点関数のソース、シンクの間隔の調整）の見積りを済ませることができた。当該年度においては割り当てられた CPU 時間を用いて、すでに移植が完了していた計算プログラムコードの BlueGene/Q 上で走らせるための最適化を試みた。プログラムの並列化において、ノード間通信に関しては USQCD [5] が公開している QMP ライブラリ (Lattice QCD Message Passing) [6] を使い、同一のノード内の並列化には OpenMP を用いたハイブリッド並列化を併用した。また BlueGene/Q の性能を最大限に活かすためエディンバラ大学の Boyle 氏による BAGEL アセンブラ・ライブラリシステム [7] の実装を行なった。BAGEL を実装すると 128 ノード以上では MPI の代わりに BlueGene/Q の low-level message ライブラリ、SPI の利用も可能となる仕様ではあるが、現状ではノード間通信を MPI としたときのみ、その実装に成功している。

最適化した計算プログラムコードを使って、比較的規模の小さい格子サイズ $16^3 \times 32 \times 16$ (格子間隔は $a = 0.12$ fm) の DWF の 2+1 フレーバー QCD ゲージ配位 [8] を利用してテスト計算を行った。当該年度では 32 ノードと 128 ノードに CPU 時間が割り当てられていたので、まず 32 ノードサイズの下で、BAGEL 実装による計算コストの軽減がどのくらい見積もった。その結果は表 1 においてまとめてある。表 1 にあるように当該年度に実施した計算プログラムコードの最適化作業によって、その実効性能が推奨される理論性能の約 5% 以上 (10.00 GFLOPS/ノード) を達成できたことを確認できた。また 128 ノード上での予定している数値計算の実効スピードおよび 1 統計あたりの CPU 時間も表 2 のように計測を済ませている。

表 1: BAGEL 実装の有無の違いによる計算時間 (実測) と実効性能

格子サイズ	クォークの質量	ノード	BAGEL	ノード間通信	1 ジョブの時間	GFLOPS/ノード
$16^3 \times 32 \times 16$	$m_{ud} = 0.03$	32	無	MPI	170 mins	2.38
$16^3 \times 32 \times 16$	$m_{ud} = 0.03$	32	有	MPI	16 mins	14.59
$16^3 \times 32 \times 16$	$m_{ud} = 0.03$	32	有	SPI	n/a	n/a

表 2: BlueGene/Q の 128 ノード利用における 1 統計あたりにかかる CPU 時間と実効スピード

格子サイズ	クォークの質量	ノード	CG 総反復回数	1 ジョブの時間	GFLOPS/ノード
$32^3 \times 64 \times 16$	$m_{ud} = 0.004$	128	$\sim 277 \times 10^3$	4 hrs 29 mins	14.86
$32^3 \times 64 \times 16$	$m_{ud} = 0.006$	128	$\sim 207 \times 10^3$	3 hrs 43 mins	13.44
$32^3 \times 64 \times 16$	$m_{ud} = 0.008$	128	$\sim 167 \times 10^3$	3 hrs 15 mins	12.40

研究の進展状況

格子 QCD 数値解析によるハイペロン 崩壊の研究は歴史が浅く、現時点で現実的なフレーバー SU(3) の破れを厳密に取り入れた 2+1 フレーバーの動的格子 QCD 計算に関しては、他の競合する格子 QCD グループが現時点で予備的な研究結果を国際会議などで口頭公表している [9, 10] 段階であるのに対し、研究責任者は格子間隔 0.12 fm(その逆数が 1.73 GeV 程度) のゲージ配位上での $\Sigma \rightarrow n$ と $\Xi \rightarrow \Sigma$ の 2 つのチャンネルに対する数値解析をすでに完了させ、世界に先駆けて 2+1 フレーバーの動的格子 QCD 計算による最新結果を査読付きの学術論文 [2] として発表している。

2+1 フレーバーの動的格子 QCD 計算の結果 [2] は、ハイペロン 崩壊のベクトル結合²がフレーバー SU(3) 対称性を厳密に課した場合の値に比べて、つまりその比 $\tilde{f}_1(0) = f_1(0)/f_1(0)_{\text{SU}(3)}$ を考えた場合、1 より約 3%程

¹計算プログラムコードはコロンビア大学、ブルックヘブン国立研究所の格子 QCD プロジェクトチームが公開している CPS++ [4] をベースとして作成した。

²これが弱崩壊の一つである semi-leptonic 崩壊に際しての強い相互作用による量子補正に相当する。この量子補正はフレーバー SU(3) 対称性が厳密な場合には、対称性による量子補正は働かず、ベクトル結合は単に SU(3) 対称性に伴うクレブシュ・ゴールドン係数となる。

度減少することが確認できた。(図1参照) この結果は昔のクォーク模型を使った研究とは矛盾がないものの、模型の依存性のより少ない重いバリオンを含んだ拡張されたカイラル摂動論 [11] や Large N_c を用いた解析 [12] で予言されている $\tilde{f}_1(0) = f_1(0)/f_1(0)_{\text{SU}(3)} > 1$ とは、逆の傾向を示している。そこで過去の模型による研究との整合性を精査するために、さらなる格子 QCD 計算による研究として今まで評価していない「格子間隔依存性による系統誤差」の評価が急務となっている。

研究責任者によってこれまでに得られた、格子間隔 0.09 fm (その逆数が 2.28 GeV 程度) 上で π 中間子の質量が 390 MeV に相当する数値計算の予備的結果 [13] と文献 [2] の 2+1 フレーバーの動的格子 QCD 計算の結果を合わせて図1にプロットした。現段階では最新の細かい格子間隔の計算結果と文献 [2] の粗い格子間隔の計算結果との良いスケーリング (図中の点線によるカーブは粗い格子間隔のデータのみを fit したもの) が見られ、格子間隔依存性は充分小さいと期待できる。平成 25-26 年度の大型シミュレーションで引き続き、格子間隔 0.09 fm において、より軽い π 中間子の質量に相当するゲージ配位 (表3参照) を用いての計算を続行し、連続極限とカイラル極限の2つの系統誤差の評価を行なう予定である。すでに平成 24-25 年度の CPU 時間を使って、予定されている数値計算の 128 ノードを使った場合の1ジョブあたりの必要 CPU 時間とその際の実効スピードも表2のように計測が終っている。

図 1: $\Sigma \rightarrow n$ と $\Xi \rightarrow \Sigma$ の2つのチャンネルに対する、ハイペロン崩壊のベクトル結合

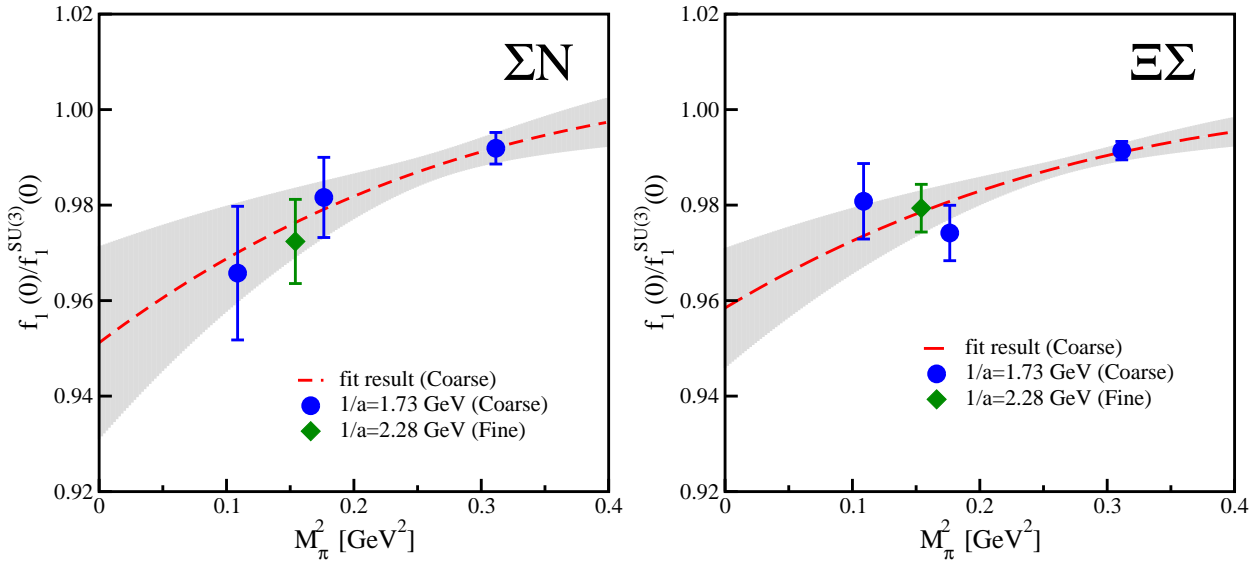


表 3: 今後予定している格子 QCD 計算

格子サイズ	クォークの質量	π 中間子の質量	統計数 \times ソース数
$32^3 \times 64 \times 16$	$m_{ud} = 0.004$	290 MeV	150×4
$32^3 \times 64 \times 16$	$m_{ud} = 0.006$	345 MeV	150×4
$32^3 \times 64 \times 16$	$m_{ud} = 0.008$	390 MeV	$100 \times 4(2)^3$

4つの異なるソース位置 ($t_{\text{src}} = 0, 16, 32, 48$) のうち、すでに $t_{\text{src}} = 0, 32$ については理研 RICC など完了している。

参考文献

- [1] C. Allton *et al.*, Phys. Rev. D **76** (2007) 014504.
- [2] S. Sasaki, Phys. Rev. D **86**, 114502 (2012).
- [3] Y. Aoki *et al.*, Phys. Rev. D **83** (2011) 074508.
- [4] <http://qcdoc.phys.columbia.edu/cps.html>
- [5] <http://usqcd.jlab.org/usqcd-software/>
- [6] <http://usqcd.jlab.org/usqcd-docs/qmp/>
- [7] <http://www2.ph.ed.ac.uk/~paboyle/bagel/>
- [8] <https://qcclattices.bnl.gov/>
- [9] H. W. Lin, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **187**, 200 (2009).
- [10] M. Gockeler *et al.* [QCDSF and UKQCD Collaborations], PoS **LATTICE2010**, 165 (2010).
- [11] L. S. Geng, J. Martin Camalich and M. J. Vicente Vacas, Phys. Rev. D **79**, 094022 (2009).
- [12] R. Flores-Mendieta, E. E. Jenkins and A. V. Manohar, Phys. Rev. D **58**, 094028 (1998).
- [13] S. Sasaki, PoS **LAT2013** (2013) 388.

研究発表リスト:

口頭研究発表

1. The 31st International Symposium on LATTICE FIELD THEORY (LATTICE 2013), マインツ大学, ドイツ, 2013年7月29日-8月3日
Shoichi Sasaki, “ Status of semileptonic hyperon decays from lattice QCD using 2+1 flavor domain wall fermions ”

論文

1. Shoichi Sasaki, “ Status of semileptonic hyperon decays from lattice QCD using 2+1 flavor domain wall fermions ”, PoS **LAT2013** (2013) 388.