

課題名 (タイトル) :

物理点上における陽子崩壊の格子 QCD 計算

利用者氏名 :

青木保道^(1,2)、藏増嘉伸^(3,4)、出渕卓^(6,1)、新谷栄悟⁽³⁾

理研での所属研究室名 :

(1)BNL 研究センター、(2)高エネルギー加速器研究機構、(3)計算科学研究機構、(4)筑波大学数理物質科学研究科、(5)Brookhaven National Laboratory, Physics department

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

陽子崩壊は新物理発見の手がかりを掴む重要な物理量として古くから観測を試みられているが、未だそのシグナルは捉えられていない。近年、Super-Kamiokande 実験施設の観測結果から得られた陽子寿命の下限値は、 $p \rightarrow \pi^0 \nu$ モードで 8.2×10^{33} 年と発表されている。次期実験計画である Hyper-Kamiokande ではさらに感度を向上させて、陽子崩壊の初観測を目指している。理論面では大統一理論 (GUT) から自然な形で陽子崩壊過程が予言できるが、観測結果を説明できるパラメータ領域は限られてきている。超対称性を取り入れた SUSY-GUT は現在のところ、その観測結果を無矛盾に説明できかつ、結合定数の統一、階層問題などの問題解決が可能となる魅力的な理論体系とみられている。その SUSY-GUT で予言される陽子寿命は 10^{35} 年程度なので、Hyper-Kamiokande 計画で十分観測可能である。理論計算では、GUT や SUSY-GUT で計算可能なモデルパラメータに依存する部分と、標準模型の枠内で計算可能な部分に分離して、実験と比較可能な崩壊振幅が導かれるが、モデルによらない標準模型の理論計算に含まれる不定性を極力排除することが、今後の陽子崩壊観測と GUT との比較を行う上で重要である。標準モデル計算における不定性は QCD からの非摂動的効果が大部分を占めている。これまでの現象論的なモデル、例えばクォークモデルやカイラル摂動論、で得られた結果には、現象論的なモデルに伴う高次補正項の不定性が大きく残っていた。そこで、その不定性を排除した第一原理計算が必要となっている。

本研究の目的は、陽子崩壊に関わる QCD 部分の計算を第一原理から求めて、その不定性を排除し

た厳密な値を提供する。その成果を元に、GUT の予言領域を絞り込んで、今後の陽子崩壊観測の計画に貢献していきたい。平成 29 年度の HOKUSAI を用いた研究では、格子 QCD 計算の厳密化のための試行として、パイ中間子質量を物理点近傍に設定した比較的小さい格子サイズの下で、その値を評価した。

2. 具体的な利用内容、計算方法

格子 QCD を用いた陽子崩壊に関わる行列要素の数値計算では、陽子からパイ、K、eta 中間子という遷移行列要素がターゲットである。核子と中間子を始状態・終状態としてその間にバリオン数の破れを含んだ 3 クォーク演算子に関わる。この行列要素の算出方法として、核子-演算子-中間子となる 3 点関数から直接行列要素を求める方法と、核子-演算子 2 点関数から関連する低エネルギー定数を求めてカイラル摂動論の評価式を用いる方法がある。平成 29 年度の研究では試行研究として後者の 2 点関数を用いた方法を試した。

用いるゲージ配位として、筑波大学に所属する研究者が中心となって進めている PACS グループのプロジェクトで生成したデータを利用する。PACS グループでは物理的なクォークを動的に含んだウィルソン型フェルミオンを使って、一辺が 5fm と 8fm の格子サイズのデータが用意されている。これらの配位上で陽子崩壊に関わる低エネルギー定数を算出して、これまでの重いパイ中間子質量における結果との比較を行った。この研究成果は、次の 3 点関数の計算に移行する際の準備的な研究となる。

3. 結果

図 1 にこれまでの重いパイ中間子における低エネルギー定数の結果をプロットした。パイ中間子

質量は 300MeV から 800MeV 動かして、その値の変化をみている。絶対値の大きさが、パイ中間子質量が小さくなるにしたがって減少していることが分かる。

図 2 に新しく計算した、低エネルギー定数の計算結果をプロットしている。この計算では 2 点関数の比を求めることで、時間に対して定数となる領域が基底状態における物理量に対応する。基底状態と励起状態の重ね合わせをより小さくするために、smearing 関数をソース点とシンク点の関数として用いるが、その関数形をチューニングしてより効率的に基底状態の近似関数を求めることが、重要となる。図 1 にはその関数形の設定として、ガウス型の波動関数を用い、その幅に対応する w の値によって定数領域が始まる位置が異なることが分かる。この結果から、 w 値として 64^4 と 96^4 格子では 10 を採用することがその基底状態を抜き出すためには効率的であることが分かった。

また、その定数領域の値をこれまでの 300MeV 以上の重いパイ中間子を用いた結果 (図 1) と比べると、おおよそ 3 倍程度小さくなっていることも分かった。この結果は、物理量のパイ中間子依存性が予想以上に大きいことを示唆している。一方で、5fm と 8fm における有限体積効果に関しては、大きさとして 1%程度であることが分かった。

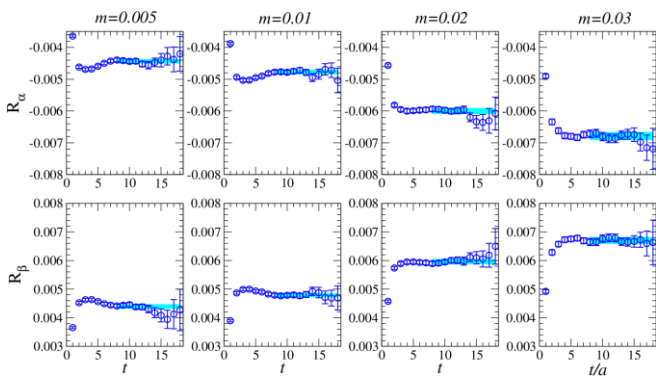


図 1: ドメインウォールフェルミオンを用いたパイ中間子質量 300MeV から 800MeV までの 2 点関数の比。バンドはフィットした結果を表す。

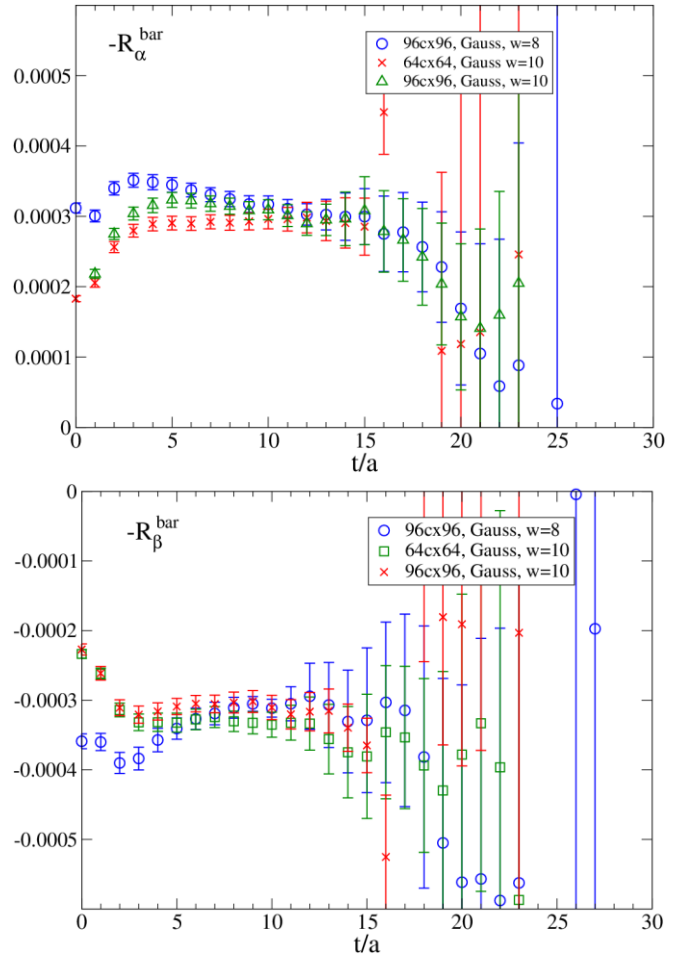


図 2: 陽子崩壊に関わる行列要素に比例する低エネルギー定数を 2 点関数の比から求めた結果。時間の関数としてプロットしている。異なるシンボルは格子サイズの違いと、smearing 関数の違いを表している。

4. まとめ

本研究では、陽子崩壊に関する行列要素のテスト計算として、2 点関数を用いた低エネルギー定数の計算を物理点近傍のゲージ配位上で行った。一辺が 5fm と 8fm の計算を比べると有限体積効果は小さいことが分かった。一方で、これまでの 300MeV パイ中間子質量の結果と比べて 3 倍以上小さくなることは、パイ中間子が小さい領域で急激なパイ中間子依存性の可能性を示唆している。

5. 今後の計画・展望

以上の結果を踏まえて、3 点関数の計算に移行して、物理点上での遷移行列要素の直接計算を行う。2 点関数で示唆している結果は、陽子寿命を延ばす方向に向かうために、理論的に興味深い。実際に、直接計算からの結果と比較して、最終的な値として論文発表を行う。

平成 29 年度 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

Yasumichi Aoki, Taku Izubuchi, Eigo Shintani, Amarjit Soni, “Improved lattice computation of proton decay matrix elements”, Phys. Rev. D 96, 014506 (2017), pp1—17

【国際会議などの予稿集、proceeding】

なし

【国際会議、学会などでの口頭発表】

口頭発表、発表者 Eigo Shintani, “Lattice calculation of matrix element on proton decay”, International Workshop on Baryon & Lepton Number Violation 2017, Case Western University, Cleveland, Ohio, USA, May 15—18 2017.

【その他（プレスリリース、学術会議以外の一般向けの講演など）】

なし