

課題名(タイトル): バリオン数の破れを伴う核子遷移振幅の格子 QCD 計算

利用者氏名:

○青木 保道(1)

理研における所属研究室名:

(1)計算科学研究センター・連続系場の理論研究チーム

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 ($\sim 6.3 \times 10^{34}$ 年)、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} 年程となる可能性があり、Hyper-Kamiokande 観測可能な領域となる。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、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。古くは現象論的なモデル、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。モデルに依存しない格子 QCD による計算は、これまでにその方法論は確立されてきている。昨今可能になってきた物理点直上シミュレーションを用いて、カイラル外挿の系統誤差を排除した陽子崩壊計算により、この問題の終止符を打つことができる。

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。得られた結果は GUT の予言領域の絞り込みや、今後崩壊事象が観測された際には、ゲージ群の構造を含めたパラメータ決定に必要な不可欠な情報を与える。

2. 具体的な利用内容、計算方法

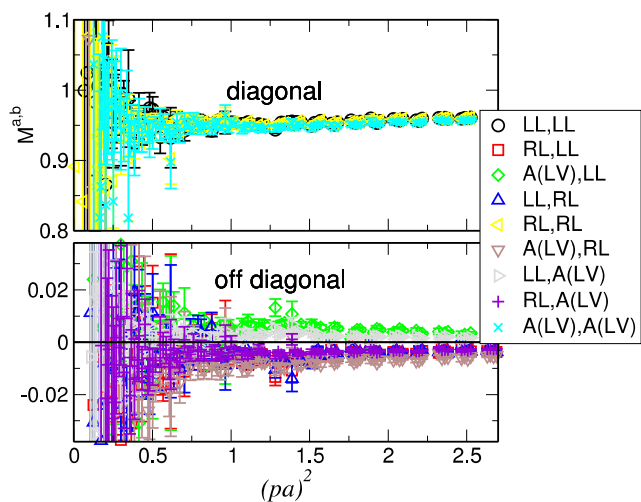
格子 QCD を用いた陽子崩壊に関わる行列要素の数値計算では、陽子からパイ、K、 η 中間子という遷移行列要素がターゲットである。核子と中間子を始状態・終状態としてその間にバリオン数の破れを含んだ 3 クォーク演算子に関わる。この行列要素の算出方法として、核子-演算子-中間子となる 3 点関数から直接行列要素を求める方法をとる。

3 点関数では、ソース点とシンク点を固定して 3 クォーク演算子をその間で動かすことで基底状態を得ることにする。このとき、シンク点に挿入する運動量は、遷移運動量がゼロとなる近傍に設定する。ソース・シンク間距離は格子間隔を単位として 18, 20, 24 と 3 パターンとり、基底状態のチェックを行う。

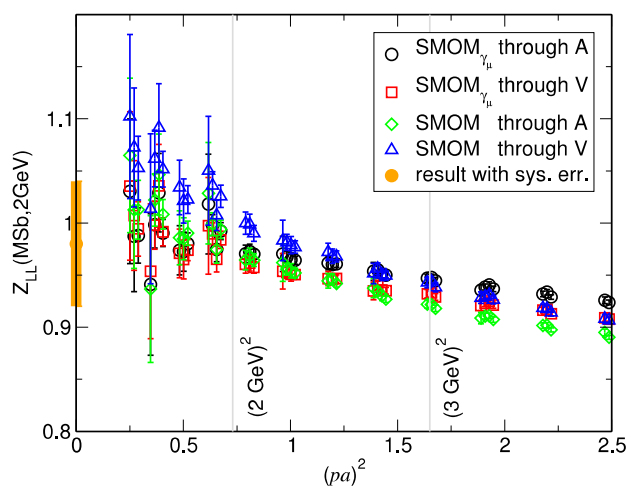
用いるゲージ配位とは、PACS グループのプロジェクトで生成したものである: 物理的質量を持つクォークを動的に含んだウィルソン型フェルミオン、一辺が 5.4 fm の 4 次元正方格子。これらの配位上での陽子崩壊に関わる行列要素の計算は主に、昨年度的一般課題で行われた。本年度はそのデータ保持と、追加の計算が必要になった場合に備えて簡易利用として申請していたが、くりこみ等のスパコンを必要としないポストプロセスの研究が主であり、利用実績は無かった。

3. 結果

遷移振幅計算に必要な形状因子の計算は昨年度報告した。この計算に用いた演算子については、さらに、適当なくりこみ操作が必要である。今年度は非摂動くりこみについて、方法論の構成から手法の開発、結果の導出まで行った。下図は新しく開発した陽子崩壊演算子の RI/SMOM くりこみスキームにおける頂点関数の 3×3 交差行列要素を二乗



外線運動量の関数としてプロットしたものである。Wilson 作用のカイラル対称性の破れをプローブする非対角要素は 1%程度であることが確認でき、このプロジェクトが目指す目標制度に比べ、離散化誤差由来の演算子混合が無視できることを示している。そこで乗法的くりこみを仮定し、修正 MS スキームでくりこみ点を 2GeV としたときの結果が次の図の様に得られ、適当な平均、外挿手続により繰り込み定数が求められた($x=0$ のオレンジバンド)。



4. まとめ

昨年度得られた陽子崩壊形状因子をくりこむための方法論の構成から手法の開発、結果の導出まで行った。これにより、くりこまれた陽子崩壊形状因子を通じて崩壊振幅が求められる。

5. 今後の計画・展望

昨年度報告の崩壊形状因子で、週状態が K 中間子なのは、規格化に用いる 2 点関数に不備があることが分かった。この修正を行うと共に、統計を上げた計算を遂行し、 π , K 終状態の全ての形状因子を求めてまとめる予定である。

6. 利用がなかった場合の理由

2019年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

- Yasumichi Aoki, Yoshinobu Kuramashi, Eigo Shintani, Natsuki Tsukamoto, “Proton decay matrix elements with physical quark masses”, PoS(LATTICE2019)141.

【口頭発表】

- 青木保道, 「物理点直上の陽子崩壊行列要素」, 日本物理学会 2019 年秋期大会, 2019 年 9 月 18 日, 山形大学小
白川キャンパス

【ポスター発表】

- Yasumichi Aoki, “Proton decay matrix elements with physical quark masses”, The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019), 2019 年 6 月 18 日, 中国武漢市
- Yasumichi Aoki, “Proton decay matrix elements with physical quark masses”, Fugaku QCD coding workshop, 2019 年 12 月 12 日, 理化学研究所計算科学研究センター(神戸市)
- Yasumichi Aoki, “Proton decay matrix elements with physical quark masses”, シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて (QUCS 2019), 2019 年 12 月 17 日, 京都大学基礎物理学研究所