

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)、藏増嘉伸(2)、新谷栄悟(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

(2) 筑波大学大学院数理物質科学研究科

## 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  $8.2 \times 10^{33}$  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、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。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。

## 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とする。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 5.4 fm 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行列要素を算出した。本年度の研究成果ではとくに 3 点関数の計算とそこから抜き出された行列要素に含まれる不定性、具体的には励起状態からの寄与、を系統的に調べた。

## 3. 結果

まず、図 1 に 3 点関数から抜き出した行列要素 ( $\langle \pi^0 | O | p \rangle$ ) 中の形状因子の時間方向依存性をプロットしている。プラト

一領域が基底状態を表す。ソース・シンク間距離  $t_s$  を変化させることで、このプラトー領域の違いを見ているが、図 3 はその違いは見えておらず、誤差内で一致している。现阶段では  $t_s=18$  でもシグナルとみなせる領域があるが、プラトー領域がより明確な  $t_s=20$  をフィットでは採用する。ただし、ソース・シンク間距離が大きくなるほど、統計誤差が大きくなるため、今後より詳細に測るにはより多くの統計が必要である。

図 2 に、実際にフィットをして、各遷移運動量における行列要素の値をプロットしている。注意すべきは、本研究では繰り込み定数が計算途中であるために、ここでは bare 値を表している。その点を考慮したとしても、以前にドメインウォールから得られた値と比較して大幅に小さい。この結果は、これまでの外挿値に大きな系統誤差があったことを示唆している。図 2 に示すバンドの結果は 300MeV パイオン質量からの単純な線形外挿値なので、物理点近傍の非線形質量依存性は不確定である。この研究成果は、その効果が大きいことを示唆している。

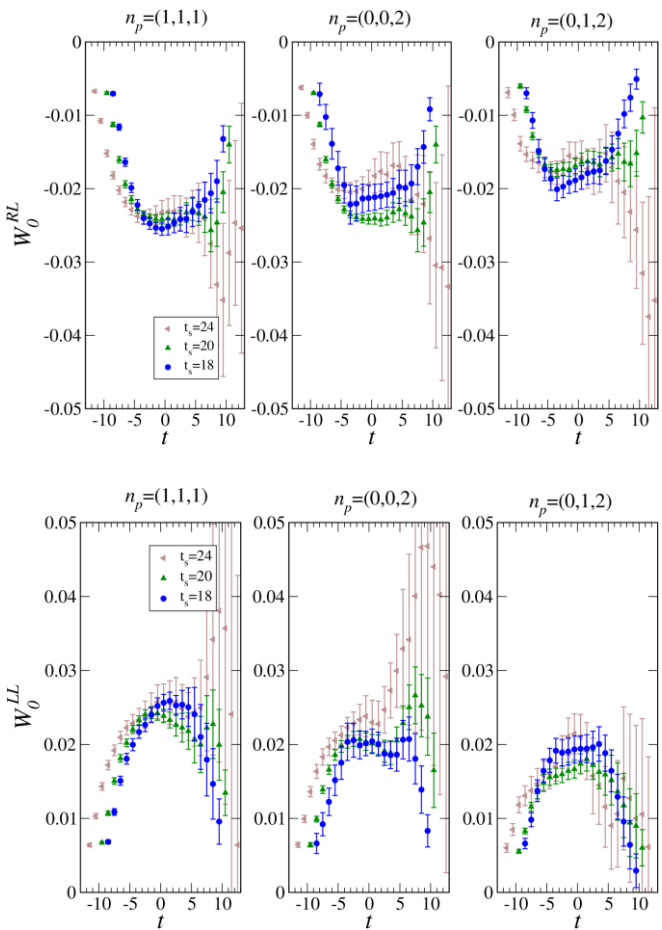


図 1 : 3 点関数から求められる形状因子の演算子時間方向依存性。上図は right-handed、下図は left-handed チャンネルを表す。左から右へ運動量を変化させている。異なるシンボルはソース・シンク

間距離の違いを表す。

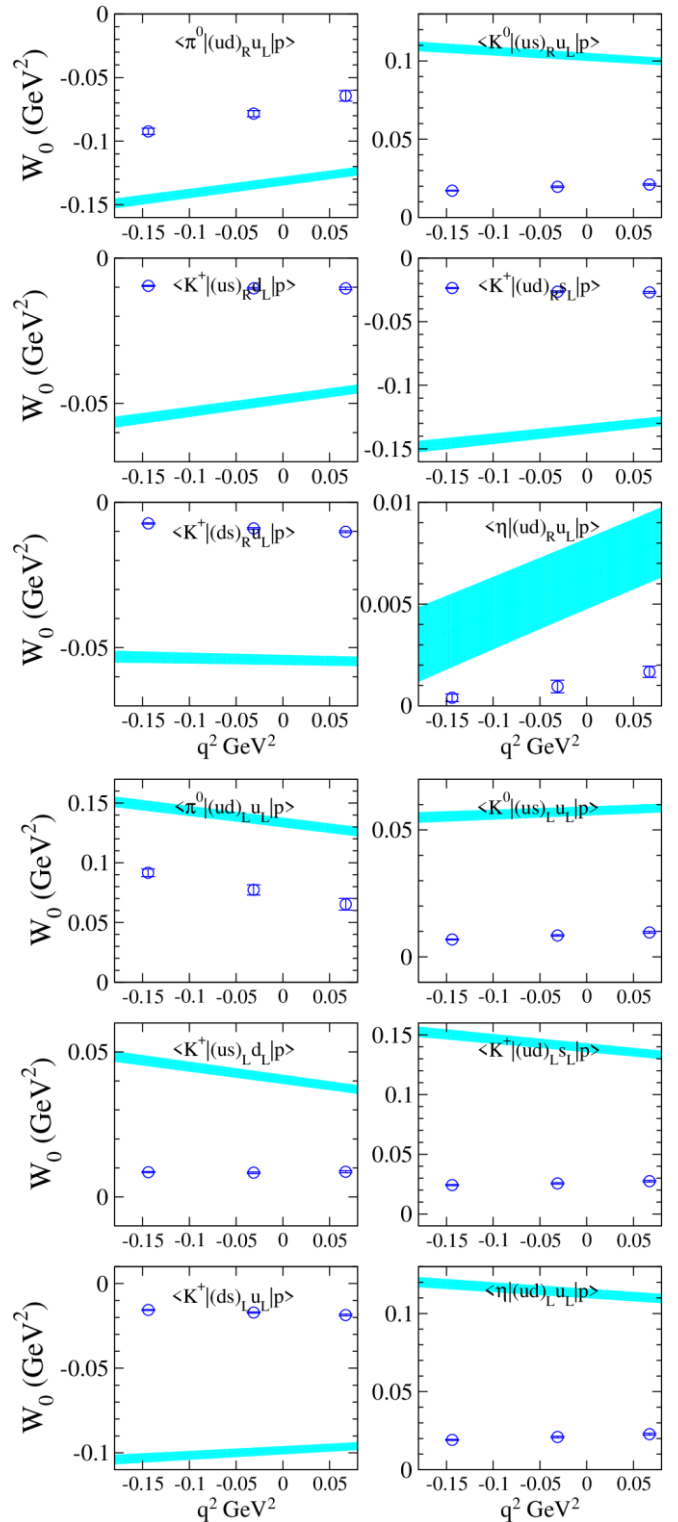


図 2 : 崩壊チャンネルごとの行列要素。横軸は二乗遷移運動量、縦軸は行列要素の値を示す。丸印は本研究で得られた格子 QCD の bare 値。バンドは以前のドメインウォールフェルミオンを用いて得られた物理点外挿後の繰り込み値。上図は right-handed、下図は left-handed のチャンネルを表す。

4. まとめ

平成 30 年度の研究成果では、物理点上におけるバリオ

ンスの破れにかかわる行列要素の格子 QCD 計算を進めて、直接的に3点関数を計算してその値を求めた。系統誤差の評価のために、ソース・シンク間距離を3つの場合で試して、格子間隔単位で18離れたとしても、その寄与がさほど大きくないことが分かった。フィットで求めた結果と過去の物理点上に外挿した結果と比較して、今回の結果は小さい値になっている。このことから、バリオン数の破れを伴う行列要素に物理点近傍の非線形クォーク質量依存性が示唆される。

#### 5. 今後の計画・展望

まず、繰り込み定数の計算を終わらせる必要がある。ウィルソンフェルミオンにおける各系統誤差を正確に評価したうえで、スケール2GeV における繰り込み定数の数値を求める。繰り込みスキームとして RI-SMOM をウィルソンフェルミオンに応用して用いる計画である。その後、くりこまれた行列要素の物理点直上の研究成果として論文発表する予定である。