

氏名	鈴木 遊
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第 8934 号
学位授与年月日	平成 31年 3月 25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	Study of Kaon Bag Parameter with Wilson Fermion using Gradient Flow (Gradient Flow を用いた Wilson フェルミオンでの K 中間子 Bag パラメータの研究)

主査	筑波大学教授	博士(理学)	藏増 嘉伸
副査	筑波大学教授	理学博士	金谷 和至
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	谷口 裕介
副査	筑波大学助教	博士(物理学)	大野 浩史

論 文 の 要 旨

本論文はK中間子の bag パラメーターと呼ばれる量に対して新しい繰り込みの手法を提唱し、そこで必要となる繰り込み定数の計算を行ったものである。

研究の背景

素粒子の標準模型において CP 対称性は破れており、実験的には $K^0-\bar{K}^0$ 混合の現象を通じて観測される。実験から CP 対称性の破れのパラメーターを決定することは現在の重要なテーマの一つとなっているが、K中間子はクォークで構成されたハドロンであるために $K^0-\bar{K}^0$ 混合には強い相互作用である QCD の補正が大きく寄与することになる。CP 対称性に関わるパラメーターを決めるためにはこの QCD 補正を取り除いてやる必要がある。その補正を表したものが bag パラメーターであり、格子 QCD の数値計算を用いて計算すべき量である。K中間子の bag パラメーターは4フェルミ相互作用に対する QCD 補正の形で表され、その計算のためには4フェルミ演算子に対する非摂動的な繰り込みが必要となる。特に格子 QCD において Wilson フェルミオンを採用した場合には繰り込みがより複雑になることが技術的な問題として存在していた。

本論文における進展

本論文においては gradient flow を用いた繰り込みの手法を4フェルミ演算子に適用することを提唱している。Gradient flow 方程式は仮想的な時間方向に時間発展(flow)を行う拡散方程式であり、格子上の全ての場を拡散方程式に従って発展させると以下の性質が得られる。

1. Flow した場の期待値には紫外発散が現れるが、それらは全て理論の基本的な場とパラメータの繰り込みによって吸収できる。特に演算子に特有な発散が現れなくなる点は特筆すべきである。
2. 発散が無くなり有限となった演算子は繰り込まれた量として解釈でき、高エネルギー物理学で標準的に使われている $\overline{\text{MS}}$ scheme への変換を行うことが可能である。
3. Gradient flow を課す事で統計的な揺らぎが抑えられ、シグナルの質が改善される。
4. Gradient flow を用いてトポロジカル感受率を計算した時に得られた経験から、gradient flow を行うことで Wilson フェルミオンが持たざるを得なかったカイラル対称性の破れの効果が弱まり、カイラル対称性の破れを抑える改善の効果がある事が期待される。

本論文では4フェルミ演算子に gradient flow 法を適用するにあたって必要となる量、特に2. の段階に必要な $\overline{\text{MS}}$ scheme への変換係数の計算を行っている。これは今後格子 QCD の数値計算によって bag パラメーターを求める時に必須となる量である。

更に、本論文では bag パラメーターのための変換係数のみならず、 $K \rightarrow \pi\pi$ の崩壊過程の繰り込みに必要となる変換係数の計算も手掛けており、将来的に役立つ事が期待されている。特に $K \rightarrow \pi\pi$ 崩壊過程を Wilson フェルミオンを用いて計算すると二次の紫外発散が現れる。この発散は演算子の繰り込みで取り除くことはできるが、数値誤差を増大させる原因となっている。Gradient flow を課すと演算子に特有なこのような発散は現れず、崩壊過程をより高精度で求められる事が期待できる。

また実践的な数値計算として、クォーク質量と π 中間子の崩壊定数の非摂動的な繰り込みを行っている。クォーク質量を PCAC 関係式から定義すると、その繰り込みは軸性ベクトルカレントと擬スカラー密度の繰り込みで与えられる。また π 中間子崩壊定数の繰り込みは軸性ベクトルカレントの繰り込みとして与えられる。これらの演算子の繰り込みを gradient flow 法で実行し、CP-PACS グループが以前実施した Schrödinger 汎関数を用いた非摂動的な繰り込み手法の結果と比較を行った。そして、お互いに矛盾しない結果が得られることを示した。数値計算のコストとしては gradient flow 法の方が優れており、今後のさらなる応用が期待される。

審 査 の 要 旨

[批評]

本論文では K 中間子 bag パラメーターの導出に必要な4フェルミ演算子の非摂動的な繰り込み手法として新たに gradient flow を用いた方法を提唱し、高エネルギー物理学で標準的に使われている $\overline{\text{MS}}$ scheme への変換するための係数を計算している。Gradient flow を用いると従来の方法に比べて比較的安価に非摂動的な繰り込みを実施でき、将来的に主要な繰り込み手法になるものとして期待されている。変換係数はその時に必要となる量である。筑波大学のグループでは物理的なクォーク質量を採用して、一辺10fm の巨大格子によるゲージ配位の生成を進めており、gradient flow を用いた K 中間子 bag パラメーターの計算はコストの点から最有力候補であると考えられる。本論文で計算された $\overline{\text{MS}}$ scheme への変換係数はその計算において必須となる量であり、この計算を行ったことは高く評価できる。

本論文は、以下の評価項目の全てを満たしていることを確認した。

- ① 研究内容に関連する先行研究の把握と理解、およびその文献・資料に対する適切な評価と引用

- ② 適切な研究課題設定および研究方法の明確な提示とその妥当性
- ③ 得られた結果の再現性、あるいは第三者による検証可能性
- ④ 明快な論文構成と結論に至るまでの論旨の適切な展開
- ⑤ 国際水準での学術的貢献

〔最終試験結果〕

平成31年2月8日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。