

氏名	賀数 淳平
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第 8937 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	

Calculation of V_{us} from lattice QCD
(格子 QCD を用いた V_{us} の計算)

主査	筑波大学 教授	理学博士	金谷 和至
副査	筑波大学 教授	博士(理学)	石橋 延幸
副査	筑波大学 准教授	博士(理学)	石塚 成人
副査	筑波大学 准教授	博士(理学)	山崎 剛

論 文 の 要 旨

本論文は、素粒子標準模型を超えた物理探索で重要となる Cabbibo-小林-益川(CKM)行列要素の一つである V_{us} を、強い相互作用の第一原理計算が可能な格子 QCD を用いて決定する研究を行ったものである。

標準模型を超えた物理の探索は素粒子物理学の大きな目標であり、現在、様々な物理量を用いて行われている。その一つに、 V_{us} を用いたものがある。標準模型のもとでは、CKM 行列はユニタリー性を持つので、ユニタリー性の破れから標準模型を超えた物理のシグナルが検知可能である。アップクォークに関連した 3 個の CKM 行列要素 V_{ud} , V_{us} , V_{ub} はユニタリー性から関係が付いており、高精度で測定されている V_{ud} と非常に小さな V_{ub} を用いると、標準模型の元での V_{us} を見積もることができる。一方、 V_{us} を K 中間子セミレプトニック崩壊を用いて見積もることも可能である。これらの異なる方法で見積もった V_{us} が、不定性を超えて十分離れていれば、標準模型を超えた物理の発見と言える。現在、これらの値は 2σ 程度離れているが、標準模型を超えた物理の証拠としては十分ではなく、さらに不定性を抑制した V_{us} の見積りが望まれている。

K 中間子セミレプトニック崩壊を用いて V_{us} を見積もる際に大きな不定性となるのが、K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子である。形状因子はクォーク複合状態である π 中間子と K 中間子の内部構造を反映する量だが、実験では決定することができないため、強い相互作用の第一原理である QCD(量子色力学)に基づき理論的に決定する必要がある。しかし、QCD はクォーク閉じ込めの性質を持つため、クォーク

がハドロン束縛状態を構成する低エネルギー領域では理論の結合定数が大きくなり、摂動論的計算が困難である。

その困難を解決する現在最も有力な手法が、格子 QCD(格子量子色力学)である。有限格子間隔を理論に導入し、離散格子化した時空上で、QCD を数学的に厳密に定義した格子 QCD により、大型数値計算を用いた数値的な経路積分により QCD の非摂動計算が可能となる。格子 QCD 計算における主な不定性は、計算でパラメータとして扱う、クォーク質量・有限体積・有限格子間隔に起因する。それぞれのパラメータは現実世界を再現するように調整、もしくは極限を取る必要がある。この操作のため、現実的パラメータから離れた点で計算を行い、その結果の外挿が必要になる。特にクォーク質量に関しては、現実的クォーク質量では膨大な計算時間が要求されるため、現実よりも数倍大きな π 中間子質量での計算結果を、現実的質量まで外挿することが、現在でも主流の方法である。このような外挿により生じる不定性を抑えることが、 V_{us} を用いた新物理探索では重要になる。

本研究は、これらの格子 QCD の主要な不定性を可能な限り抑制するため、クォーク質量外挿の不定性を取り除くために現実の π 中間子質量と、有限体積効果が十分無視できると考えられる空間体積 (10 fm)³ を用い、かつ、改良された QCD 作用により有限格子間隔から来る不定性を抑えた、K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子の計算を行ったものである。 V_{us} の決定では、運動量遷移の関数として得られる形状因子の原点の値が重要なので、実験でよく使われている monopole ansatz や QCD の低エネルギー有効理論であるカイラル摂動論の表式を用いて、形状因子で一タの内挿から原点の値を求めている。その結果を用いた V_{us} の値は、これまでの格子 QCD 形状因子計算から求められた値より 1σ 以上大きいのが、一方でユニタリー性から見積もられた値と一致する結果である。これは、標準模型を超えた物理のシグナルは無いというもので、近年の格子 QCD 計算の傾向と異なった結論を得ている。本研究は、これまでにない大きな空間体積の格子を用いて物理点直上で評価したものであるが、この結果を確認するために、更なる統計誤差の抑制に加えて、計算に含まれる主要な不定性以外の系統誤差をさらに精査する必要がある。

審 査 の 要 旨

[批評]

本研究は、素粒子標準模型を超えた物理の探索で重要になる V_{us} を決定するため、K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子を強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD を用いて、高精度で求めることを目指した研究である。本研究の特徴的な点は、計算の不定性を可能な限り小さくするため、これまでにない大きな空間体積の格子を用いて物理点直上で形状因子の計算を実行している点である。本研究で得られた形状因子の結果は、これまでの格子 QCD 計算と遜色ない精度で得られており、研究の目標は達成できていると言える。この形状因子を用いて見積もられた V_{us} の値は、これまでの格子 QCD 計算の傾向と異なる結果となっているが、この結果を確認するための研究課題も議論されている。

格子 QCD を用いた素粒子標準模型を超えた物理の探索は、今後の大きな展開が期待される重要な研究であり、博士の学位に十分な研究内容である。

〔最終試験結果〕

平成31年2月8日、数理物質科学研究科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。