

氏 名	ね ぎし しゅん すけ 根 岸 俊 輔
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 3125 号
学位授与の日付	平 成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	The Determination of the $B^*B\pi$ Coupling in Lattice QCD (格子 QCD による B 中間子の結合定数の決定)
論文調査委員	(主 査) 教 授 植 松 恒 夫 教 授 畑 浩 之 助教授 大野木哲也

論 文 内 容 の 要 旨

近年の研究で素粒子の基本粒子とその間の相互作用を記述する標準模型は、数々の実験事実の説明に成功をおさめてきた。一方、CP（荷電共役・パリティ変換）の破れに関連して、Cabibbo-小林-益川（CKM）行列の要素を決定することは標準模型を検証しこれを超える理論を探る上で極めて重要である。最近の B ファクトリーの実験はこの CKM 行列についての情報を提供してきたが、現在その中でも b クォークに関連した $|V_{ub}|$ 成分に多くの関心が寄せられている。

本学位申請論文は、格子量子色力学（QCD）のシミュレーションのアルゴリズムの改良を行い、HQET（Heavy Quark Effective Theory, 重いクォークの有効理論）の heavy 及び light クォークの複合状態であるメソン系の系統的な解析を遂行し、b クォークを含む B 中間子の $B^*B\pi$ 結合定数を高い精度で決定したものである。

上記の CKM 行列の $|V_{ub}|$ 成分については、 $B \rightarrow \pi \ell \nu$ 等の exclusive semileptonic decay での非摂動的効果の計算の誤差を減らすことが極めて重要である。なぜなら、それにより格子 QCD による形状因子の計算が改善されるからである。しかし、一般には、格子 QCD から形状因子を直接導出することは、運動量が nonzero recoil での B 中間子の 3 点相関関数を含むので、崩壊定数等の数値計算よりも困難である。

この理由から、静的極限で、クォークの行列式がクエンチ近似またはクエンチ近似でない格子量子色力学と整合する非摂動的重いクォークの有効理論（HQET）を用いた $B^*B\pi$ の結合定数の計算方法が、すでに開発されている。B 中間子の場合、重いクォークの対称性と軽いクォークのカイラル対称性の有効理論によって $|V_{ub}|$ の計算における形状因子を B 中間子と π 中間子の崩壊定数と $B^*B\pi$ の結合定数で表すことができる。特に $B^*B\pi$ の結合定数に関しては軸性カレントの計算から静的極限における結合定数 $\hat{g}_\infty$ との関係式が導き出せる。したがって、本学位論文での研究目標は、結合定数 $\hat{g}_\infty$ の高精度の計算をすることである。

一方 HQET の最大の欠点は、その伝播関数のノイズが非常に大きいということある。そのため、精度を良くするのに限度があり、更には HQET の一次の補正を研究することを困難にしている。クエンチ近似の場合では、大量のゲージ場を生成することによって統計誤差を減らし得るが、そうでない場合はゲージ場の生成は限られてしまうために統計誤差を減らす方法が必要となる。Alpha Collaboration と呼ばれるグループは HQET の作用に smearing したゲージ場を用いることによって、かなりのノイズを減らすことを実現した。特に、彼らは HYP smearing と呼ばれる方法が最も効率的であることを示した。また、TrinLat group は伝播関数から低エネルギーの固有関数を取り出して all-to-all で平均化し、残りの高エネルギーの状態関数は dilution noise を使うことによってノイズを小さくできる方法を提唱した。

本学位論文ではクエンチ近似のゲージ場による研究で 2 つの改良方法、HYP smearing と all-to-all で平均化した伝播関数を利用して数値シミュレーションにおける $B^*B\pi$ の結合定数のより高精度な計算を実行した。このことはクエンチ近似のゲージ場の数を 10～20 倍に増やすことと同じ効果が得られ、クエンチ近似ではない場合で計算コストを削減するとき非常に有用であることが明らかにされた。また、本研究でこの数値シミュレーションにおいて結合定数 $\hat{g}_\infty$ を計算した。

論文審査の結果の要旨

最近の素粒子論において、基本粒子とその間の相互作用を記述する標準模型は、これまで多くの実験事実の説明に成功をおさめてきた。一方、CP（荷電共役・パリティ変換）の破れに関連して、クォークのフレーバーの間の混合を記述する Cabibbo-小林-益川（CKM）行列の要素を決定することは標準模型を検証し、さらにこれを超える理論を探究する上で極めて重要である。B ファクトリーの最近の実験はこの CKM 行列についてのデータを提供してきたが、現在その中で未だ十分な精度が得られていない b クォークに関連した $|V_{ub}|$ 成分に多くの関心が寄せられている。

本学位申請論文は、この B 中間子の遷移行列要素の精密決定に有望視されている格子上的 HQET（Heavy Quark Effective Theory）を用いて、heavy-light クォーク系をクエンチ近似で、初めて $B^*\pi$ の結合定数の解析を系統的に行ったものである。特に従来他のグループがなし得なかった、格子 QCD のシミュレーションの計算時間を大幅に短縮するアルゴリズムの改良を行い HQET の静的な heavy-light クォーク・反クォークの複合状態であるメソンの系の解析を遂行し、 b クォークを含む B 中間子の $B^*\pi$ 結合定数を 2~3 パーセントの高精度で決定した。

一方、HQET には伝播関数のノイズが非常に大きいという欠点が存在する。そのため、本研究では B 中間子のような heavy-light メソン系の 2 点及び 3 点の相関関数に対して初めて従来の 2 つのグループによる改良すなわち、Alpha Collaboration の HYP smearing の手法と TrinLat グループによる伝播関数から低エネルギーの固有関数を取り出して all-to-all で平均化する方法を適用した。この際、従来試みられなかった 100 個の low-lying の固有モードを平均するという事でパラメータのチューニングを行い、現実に十分細かな格子で $B^*\pi$ 結合定数を高精度で求めることに成功し、新たな計算手法を確立した。特に、本学位申請者はこの目的のために改良された計算のアルゴリズムを作成する上で重要な貢献を行った。

上記の手法を応用して $|V_{ub}|$ の決定に必要な $B \rightarrow \pi \ell \nu$ における形状因子を soft-pion 定理を用いて、リコイルがゼロにおける B 中間子と π 中間子の崩壊定数と $B^*\pi$ の結合定数で表すことができる。特に $B^*\pi$ の結合定数に本研究では上述のごとく、クエンチ近似のゲージ場による研究で 2 つの改良方法、HYP smearing と all-to-all で平均化した伝播関数を利用して $B^*\pi$ の結合定数のより高精度な計算を実行した。今回、この研究ではクエンチ近似によるゲージ場を 32 個用意し、これらの数値シミュレーションを実行した。その結果、100 個の低エネルギーの固有関数が 2 点および 3 点の heavy-light 相関関数を支配することが判明した。実際、低エネルギーの固有関数を all-to-all で平均化することによってかなり誤差を減らすことが示せた。このことはクエンチ近似のゲージ場の数を 10~20 倍に増やす効果に相当し、クエンチ近似でない full QCD の場合でも計算コストを削減するときに非常に有用であることが明らかにされた。また、本研究では、数値シミュレーションにおいて結合定数 $\hat{g}_\infty$ を 2~3 パーセントの誤差の精度で計算した。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。