

# 論文審査の結果の要旨

氏名 河内 太一

本論文は6章と補遺A、B、C、Dからなる。

第1章は、全体のイントロダクションであり、研究の背景と目的が述べられている。

第2章では、格子QCDとシミュレーションの基本事項がまとめられている。

第3章では、本論文において、有限の大きさのクォーク質量に対するクォーク間ポテンシャルを計算するために用いられる、新しい方法が説明されている。第1節で、相対論的ベーターサルピーター方程式の非相対論的シュレジンガー方程式への還元、第2節で、摂動的1グルオン交換が非相対論的極限でクーロンポテンシャルを与えることが述べられた後、第3節で、格子上での有効ポテンシャルの導出が示されている。まず、同時刻ベーターサルピーター振幅が有効シュレジンガー方程式を満たすことを要請することによって、非局所ポテンシャルエネルギーを定義し、次に、非局所ポテンシャルを速度について展開することによって局所ポテンシャルエネルギーが得られることが説明されている。

第4章では、第3章で説明されたポテンシャルエネルギーを求める新しい方法が、実際にうまくいくかどうかを確かめるために、クエンチ近似による格子QCDシミュレーションの結果が述べられている。第1節で、シミュレーションのセットアップが説明された後、第2節では、チャーモニウム質量、第3節では、クォーク-反クォークベーターサルピーター振幅の結果が示されている。第4節では、格子上でのラプラス演算子が、極座標表示で離散化の高次の項を取り入れることによって、誤差を小さくできることが議論されている。第5節で、クォークの運動エネルギー項に関する質量パラメターの決め方が議論された後、第6節で、得られたクォーク間ポテンシャルのスピンの依存しない部分とスピン-スピン部分が示されている。チャーモニウム系において、ポテンシャルのスピンの依存しない部分は、長距離ではリニア、短距離ではクーロンの振る舞いをするのが議論されている。また、得られたポテンシャルの体積依存性があまり大きくなく、計算に用いられた体積が十分大きいことも結論されている。

第5章では、より現実的な計算として、PACS-CSゲージ配位を用いた動的シミュレーションの結果が示されている。第1節で、シミュレーションのセットアップが説明された後、第2節で、チャーモニウム (heavy-heavy) 系における結果がまとめられている。チャーモニウムの質量、BS波動関数、クォークの運動エネルギー項に関する質量パラメターが示された後、チャーモニウムポテンシャルについての結果が議論されている。クエンチ近似を用いたシミュレーションの結果と同様に、得られたクォーク間ポテンシャルのスピンの依存しない部分は、長距離ではリニア、短距離ではクーロンの振る舞いをするのが

示されている。また、スピン-スピン部分は斥力的でレンジが短いことも示されている。第3節では、得られたクォーク間ポテンシャルを用いて、非相対論的シュレジンガー方程式を解いた結果が議論されている。まず、チャーモニウムが2つのチャーム中間子に壊れるエネルギーの閾値より下で、波動関数とエネルギーが示され、結果が格子 QCD による直接の結果と一意していることが確かめられ、異なる量子数を持つチャーモニウムの質量差が議論されている。次に、チャーモニウムが2つのチャーム中間子に壊れるエネルギーの閾値より上でも、非相対論的シュレジンガー方程式を解いた結果が議論されている。どちらの場合にも、得られた結果は実験と良く一致することが示されている。最後に、第4節では  $D_s$  中間子 (heavy-light) 系への適用にあてられている。 $D_s$  中間子系でも同様の結果が得られたことが議論されている。

第6章は、論文の結びである。まず、全体のまとめが述べられた後に、将来の課題として、スピン-軌道力やテンソル力等、すべてのスピンに依存するポテンシャルを求めることや、崩壊チャンネルの効果を取り込むことが述べられている。

本論文では、ベーター-サルピーター振幅を用いてポテンシャルを定義する新しい方法によって、動的な格子 QCD シミュレーションの結果からポテンシャルを決定したことが新しい結果である。この方法によって、ポテンシャルのスピンに依存しない部分が有限のクォーク質量に対してもリニア+クーロン型で与えられること、スピン-スピン部分が斥力的でレンジが短いことがわかったことは、チャーモニウムのような重いクォークからなる系の物理を理解する上で意義深いと考えられる。

なお、本論文第4章及び第5章は、佐々木勝一との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。