

氏名(本籍)	武田光平(千葉県)			
学位の種類	博士(物理学)			
学位記番号	博甲第5627号			
学位授与年月日	平成23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	Nucleon strange quark content from lattice QCD with exact chiral symmetry (厳密なカイラル対称性を持つ格子QCDからの核子ストレンジクォーク含有量)			
主査	筑波大学教授	理学博士	金谷和至	
副査	高エネルギー加速器研究機構教授			
副査		博士(理学)	橋本省二	
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	藏増嘉伸	
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	石塚成人	

論文の内容の要旨

本論文は、核子のストレンジクォーク含有量を、格子QCDを用いて数値計算し、その結果を報告したものである。

核子は単純なクォークモデルによれば、アップクォーク、ダウルクォークから構成された粒子である。しかし、強い相互作用を記述する場の量子論である量子色力学(QCD)における理解では力の媒介粒子であるグルーオンや、核子の量子数を担わない“海クォーク”も重要な構成要素であることが知られている。実際、核子の質量はアップ、ダウルクォーク質量の和で表されるにはあまりに大きく、構成粒子の複雑な相互作用の結果生み出されていると考えられる。このようにして生成される核子質量の中の海クォークの効果を見積もることは核子の性質を理解する上で非常に重要である。

また海クォークの定量的な理解は、現在盛んに行われている暗黒物質の探索実験との関連において非常に重要である。実験は暗黒物質と原子核の散乱による信号をとらえるものであるが、超対称性理論では暗黒物質の候補であるニュートラリーノと核子がヒッグス粒子を介して散乱する過程が有力である。この散乱断面積の決定に核子のストレンジクォーク含有量の値が大きな不定性を与えることが知られており、精密な計算が望まれているのである。

海クォークの中で最も軽いストレンジクォークの寄与は、重いクォークのように有効理論で取り扱うことは出来ず、また実験的に直接測定することも出来ないため、QCDの第一原理に基づいた計算が必要である。格子QCDはQCDの非摂動的な定式化として確立した手法であり、核子を含め多くのハドロンの性質の解明に貢献してきた。しかし、ストレンジクォーク含有量の計算は多くの困難を伴う。

格子QCDを用いた多くの先行研究がある。しかし、そのほとんどがQCDの基本的な性質であるカイラル対称性を有限格子間隔において壊したフェルミオンの定式化を用いている。このような定式化の場合、アップ、ダウルクォーク含有量とストレンジクォーク含有量の間、QCDの輻射補正による混合が生じる。アップ

プ、ダウンクォークは核子に対して量子数を担う価クォークであり、その含有量は大きな値を持つ。よって、ストレンジクォーク含有量の精密決定のためには、その輻射補正による混合を完全に解く必要がある。しかし、それを数値的に行う事は非常に難しく、不定性の要因になっている。

また、ストレンジクォーク含有量は海クォークの効果であるため、非連結クォークループを含んだファインマン・ダイアグラムの評価が必要である。クォークループは格子上的任意の点で計算されなければならないため、通常的手法では計算コストが膨大になってしまう。さらにこのクォークループは、カイラル対称性の自発的破れにより真空期待値を持つため、これを取り除く必要がある。有限のクォーク質量では、この真空期待値は発散を含んでおり、これが最終結果に対し大きな不定性の要因となる。カイラル対称性を保ったフェルミオンでは、発散は二次発散であるのに対し、多くの先行研究で用いられたカイラル対称性が壊れているフェルミオンでは発散は三次であり、不定性はより深刻である。

本論文では、カイラル対称性を格子上で厳密に実現する overlap fermion を用いて数値計算を行った。クォークループの計算は、all-to-all propagator 法を用いて行った。この方法において、クォークの伝播関数の長波長モードはディラック演算子の固有値、固有ベクトルから計算した。短波長モードは乱数法により計算した。QCD において低エネルギーの物理は、ディラック演算子の長波長モードが支配的なので厳密に計算し、一方、短波長モードの寄与は小さいので、計算量をかけないことで全体の計算コスト削減を行った。

数値計算は、まずアップ、ダウンクォークの動的な効果を含んだゲージ配位上で行った。上記の計算手法を用い非連結なクォーク・ループを含む三点関数と二点関数との比を取り、ストレンジクォーク含有量を求めた。本論文では、(含有量 \times ストレンジクォーク質量) = 0.032 (8) (22) という結果を得た。これはカイラル対称性を壊したフェルミオンによる往來の結果より一桁小さい。次にストレンジクォークも動的に取り入れた、より現実的なシミュレーションにおいても同様に計算を行い、アップ、ダウンクォークのみを動的に扱った場合と同等な値が得られた。以上の結果から、ストレンジクォーク含有量の値が、従来の結果に比較して非常に小さな値を取ることがわかった。

審査の結果の要旨

本論文は、核子のストレンジクォーク含有量を、格子 QCD による数値計算を行い、その結果を報告したものである。

格子フェルミオンの定式化として、カイラル対称性を格子上で厳密に実現する overlap fermion を採用した。それにより、これまでの研究で大きな不定性の要因となっていた、アップ、ダウンクォーク含有量との混合の問題をさけることが出来た。また、このフェルミオンを用いることにより、有限の真空期待値から生じる発散の次数を下げ、これまでの計算に比べ格段に不定の小さい信頼性の高い数値計算結果が得られた。

数値計算では、クォークの伝播関数の長波長モードを、固有値、固有ベクトルから計算し、短波長モードを乱数法により計算している。これは、QCD の性質を使った大変有効な方法であると考えられる。この計算方法は、将来行われる現実のクォーク質量に近い点での計算において、主流となるであろう。

本論文の研究成果は、核子の性質を定量的に理解する上で非常に重要な成果である。また、核子と暗黒物質との散乱断面積に対する大きい不定を取り除いた事になり、暗黒物質探索実験に対し大きな貢献が期待される。論文では、物理的考察が十分整理され、理路整然と研究成果が論述されている。以上のように、本論文は学位論文として十分な内容である。

よって、著者は博士（物理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。