

氏名・(本籍)	いし づか なる ひと 石 塚 成 人
学位の種類	博 士 (理 学)
学位記番号	理博第1294号
学位授与年月日	平成5年3月25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	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)原子核理学専攻
学位論文題目	格子上の量子色力学におけるハドロン行列要素
論文審査委員	(主査) 教 授 柳 田 勉 教 授 吉 村 太 彦 助 教 授 大 川 正 典 (高エネルギー物理学研究所)

論文内容要旨

強い相互作用は量子色力学によって記述されると信じられている。量子色力学は漸近的自由という性質をもっており、高いエネルギー領域では、摂動論が使える大きな成功を収めている。しかしハドロンの物理を支配している低エネルギー領域では相互作用定数が大きすぎて摂動論を適用することができない。この困難を克服し理論を非摂動論的に扱うために生まれたのが格子場の理論である。

格子場の理論では場の変数が離散空間上で定義される。それによって理論に含まれる自由度が有限になり理論が数学的に完全定義される。それでも理論が複雑すぎて解析的研究はできない。しかし格子上で数値計算を行うことができ、ハドロンの物理量を定量的に評価することができる。ハドロンの物理量の中で我々が特に興味があるのはハドロンの質量と行列要素である。質量の計算は比較的簡単であり、計算法は確立している。現在までの所、実験値との完全な一致は見られていないが、実験値を再現することは量子色力学に課せられた基本課題であり着実な進歩が見られる。

一方、ハドロンの行列要素の計算は標準模型の検証に極めて重要な意味を持つ。例えば Cabbi-Kobayashi-Maskawa 行列を決定するには、弱い相互作用の有効ハミルトニアン演算子のハドロンの行列要素を定量的に求める必要がある。しかし行列要素の計算は質量の計算とは比べられないほど複雑である。質量を計算するにはハドロンの 2 体相関関数を計算すれば良いが、演算子の行列要素を求めるには一般に多体相関関数を計算する必要がある。多体相関関数の取り扱いが複雑であり、行列要素の計算法は確立していない。また、ハドロンの質量はくりこみ不変量であるが行列要素は不変量ではない。格子上で求められた行列要素から連続理論での行列要素を得るにはくりこみ補正をしなければならぬ。現在までの所、くりこみ補正を正しくとり入れた計算はなされていない。

これらの理由により、未だハドロンの行列要素の信頼しうる計算はなされていない。この論文での目的はくりこみ補正の効果も取り入れた計算を系統的に行うことにある。行列要素の計算法が確立していない理由のひとつに格子上の演算子が一般的に非局所的であることが挙げられる。このために gauge 不変な演算子は複雑になる。計算を簡単にするためにしばしば行われるのは gauge 固定を行ない、gauge 不変でない演算子を用いることである。しかし、これがどの様な系統誤差を生み出すか知られていない。我々は、 π meson の崩壊定数と K meson の B parameter を、gauge 不変な演算子と、そうでない演算子の両方を用いて計算し、これを系統的に調べた。

くりこみ補正をするには、連続理論の演算子と格子上の演算子の関係づけるくりこみ定数を計算しなければならない。現在までの所、くりこみ定数を確実に計算するには摂動論を用いるしかない。摂動論によって求めたくりこみ定数によって、非摂動論的に計算された行列要素が正しくくりこみ補正される保証はない。我々はこれを検証するために、連続極限では一致するが格子上では異なる gauge 不変な演算子とそうでない演算子の両方についてくりこみ定数を計算した。

そして両演算子から得られる格子上の行列要素に対して、くりこみ補正を行った。もしくりこみ補正によって両者が等しい結果を与えれば、くりこみ補正された量は物理的に意味のある値であると考えられる。またくりこみ補正の効果がどのように物理量に反映するか議論することもできる。

我々の得た結果は本論文の後半で詳しく議論するが要約すると以下である。始めにくりこみ補正前の B parameter では両演算子から得た値は大きく異なっていた。しかも μ^2 依存性が大きく異なる。しかし、この大きな違いはくりこみ補正によって約 5% まで小さくなる。この結果は B parameter に対して gauge 固定による系統誤差は無視でき、くりこみ補正は予想以上に大きいことを意味する。従って物理的に意味のある結果を得るためには、くりこみ補正は無視できない。これらの性質は B parameter 以外の行列要素に対しても当然考えられ、同様の解析が必要である。また improved coupling を用いることによって両演算子の差は更に小さくなることが分かった。特に π の崩壊定数では統計誤差内での完全に一致が見られた。これは格子上の摂動論に対して重要な情報を与える。

しかし、B parameter の計算が行われた $1.8 \sim 3.0 \text{ GeV}$ ではまだ有限格子間隔による影響が残っており、計算を更に行なう必要がある。これは今回の計算を続けるだけなので時間の問題である。また他の行列要素、例えば $K \rightarrow \pi \pi$ に対して同様の解析を行なうとどうなるか、これまでの結果は変更をうけるのか調べるのが重要である。

これらはこれから早急に行なうべき課題である。

論文審査の結果の要旨

ハドロンの行列要素の計算は標準模型の検証に極めて重要な意味を持つ。たとえば、Cabbibo-小林-益川行列（CKM 行列）を決定するためには、弱い相互作用による荷電カレントの大きさを評価する必要がある。もしクォークが裸のまま存在しているのであれば、クォーク間の素課程を調べればよい。しかし実際には、クォークは強い相互作用の影響を受けハドロンの中にとじこめられている。実験結果から CKM 行列の情報を取り出すには強い相互作用の効果を分離し、ハドロンの行列要素を計算する必要がある。現在の所、強い相互作用の非摂動的効果を第 1 原理から出発して計算できるのは格子上の量子色力学だけである。

本論文では、現象論的に最も重要であると考えられるパイ中間子の崩壊定数 f_π と K 中間子の B-パラメータ B_K の計算が行なわれている。

格子上の演算子は、一般的に非局所的である。このためにゲージ不変な演算子を作るのが極めて複雑になる。計算を簡単にするために、これまではゲージ固定を行いゲージ不変でない演算子を用いて計算が実行されてきた。しかし、この方法には Gribov 不定性等の問題があり、どのような系統的誤差を生み出すか知られていない。本論文では、ゲージ不変な演算子とそうでない演算子の両方を用いて計算を実行し、この問題を系統的に調べている。

その結果、格子上の崩壊定数 f_π と B-パラメータの値には有意な演算子依存性があることを示した。また、この差はくりこみ補正をする事により、大きく減少し、特に最近注目されている修正された結合定数を用いることによって、統計誤差内で両者の答えが一致することも示されている。つまり物理量 f_π と B_K に対しては、くりこみ補正を取り入れる限り、Gribov 不定性は問題にならないことが示されている。

この様に、本論文ではハドロンの行列要素の計算が非常に系統的に行われている。特に格子上でくりこみ補正の重要性を発見した世界でも初めての研究であり、新しく得られた知見も多い。

上記のごとく石塚君は格子上の量子色力学を自立して研究するための高度な数値的及び解析的研究能力と学識を有している。よって、石塚成人提出の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。