

(続紙 1)

京都大学	博士 (理 学)	氏名	入 谷 匠			
論文題目	Lattice QCD analysis for non-perturbative gluon properties from the Landau gauge to the Coulomb gauge					
(論文内容の要旨)						
強い相互作用の基礎理論である量子色力学 (Q C D) は非可換ゲージ理論であり、グルーオンの自己相互作用によって漸近的自由性がもたらされる。その結果、低エネルギー領域での Q C D は、クォークとグルーオンの非常に強結合な系となり、真空の構造自身が摂動的な場合と比べて大きく変質し、カラーの閉じ込めやカイラル対称性の自発的破れなどの顕著な非摂動的現象が起こる。そして、それら非摂動的現象の基礎理論 Q C D からの説明は未だになされていない理論物理学上の重要な課題である。 申請論文では、強い相互作用の第一原理計算である格子 Q C D を用いて、強い力をもたらす本質であるグルーオンの非摂動的な性質を様々な視点から研究した。グルーオンの性質を議論する際にはゲージ固定が必要になるが、申請論文では、基本的なゲージであるランダウ・ゲージ、クーロン・ゲージ、及び、その両者を連続的に結び付ける一般化ランダウ・ゲージ (λ ゲージ) におけるグルーオンを分析した。尚、申請論文は申請者らが行った 3 つの関連するオリジナルな研究に基づいている。 第 1 の研究では、格子 Q C D を用いて、ランダウ・ゲージのグルーオン伝播関数を詳細に解析することで、その関数形を考察し、あわせてグルーオン・スペクトル関数を研究した。申請論文では、クォーク・ハドロン物理学において重要な領域である $0.1\text{fm} \sim 1\text{fm}$ に着目し、ユークリッド時空でのランダウ・ゲージのグルーオン伝播関数が、4次元の湯川関数で精度良く表されることを明らかにした。これは時空があたかも 3次元時空に低次元化した場合に対応する。この結論を基に、グルーオンのスペクトル関数の解析的な関数形を世界で初めて導出した。得られた、グルーオンのスペクトル関数は“∞の留数を持つ正の極”と“負の領域”を持つ異常なものである。 第 2 の研究では、Q C D における代表的な 2 つの異なるゲージであるランダウ・ゲージとクーロン・ゲージを、実パラメータ λ で連続的に結び付ける“一般化ランダウ・ゲージ (λ ゲージ) ”を考察し、クォーク間の「瞬間ポテンシャル」等のゲージ依存量に対する詳細な研究を行った。$0.1\text{fm} \sim 1\text{fm}$ での「瞬間閉じ込め力」は、ランダウ・ゲージに近い領域ではゼロであり、クーロン・ゲージに近い領域では、静的な閉じ込め力の 2 倍以上になり、λ と共に連続的に変化する等の性質を明らかにした。更に、「クォーク・ポテンシャル模型を記述する Q C D のゲージ」の候補として“λ_c ゲージ”を提案した。このゲージでは、クォーク間の物理的ポテンシャルが瞬間ポテンシャルで近似でき、理論は、クォーク同士が瞬間的にポテンシャルで作用しあう、クォーク・ポテンシャル模型と類似の状況になること等を指摘した。 第 3 の研究では、クーロン・ゲージでの閉じ込めの物理的描像と低運動量グルーオンの寄与に関する研究を行った。このゲージでは“グリボフ・ホライズン”付近でのファデーフ・ポポフ (F P) 演算子の低固有値成分が、大きなカラー・クーロン・エネルギーを与え、クォークの閉じ込めに重要な役割を果たすと推測されているが、申請論文では、格子 Q C D で得られたクーロン・ゲージでの非摂動的 Q C D 真空のグルーオン配位から、低運動量のグルーオン成分を除去すると、F P 演算子の低固有状態が消失し、同時に閉じ込め力も消失することを明らかにした。これは、低運動量グルーオン、F P ゼロモード、及び、閉じ込め現象の間の密接な相関を示すものである。						

(論文審査の結果の要旨)

素粒子標準理論の一角である量子色力学(QCD)に基づく強い相互作用の解明は、現代の理論物理学に残された最重要課題の1つであるが、その低エネルギー領域での強結合的性質に起因して、数学的に極めて解析が困難な課題である。特に、カラーの閉じ込めの機構の物理的解明は、クォーク模型やQCDが確立して以来30年以上続いている難問であり、これまでに様々な理論的な仮説が提案されてきた。

申請論文では、これらの非摂動的性質の解明に対して、強い相互作用の本質的な担い手であるグルーオンの自由度に着目し、第一原理計算法である“格子QCDモンテカルロ計算法”を用いて、非摂動的な解析を試みている。グルーオンは非可換ゲージ場であり、その性質を論じる際にはゲージ固定が必要になるが、用いるゲージに応じてグルーオンは様々な異なる側面を見せ、その全貌を捉え理解することは難しい。

申請論文では、ランダウ・ゲージとクーロン・ゲージという2つの代表的なゲージを取り上げ、更に、それら異なるゲージを連続的に結び付ける“一般化ランダウ・ゲージ(λ ゲージ)”を考察し、様々なゲージの観点から非摂動的グルーオンを論じている。この様な広範なゲージでのグルーオンの研究は、これまでに余り例を見ない。

申請論文の第1の研究では、格子QCDを用いて、ランダウ・ゲージでの非摂動的グルーオンの伝搬関数を定量的に解析し、クォーク・ハドロン物理学で重要となる領域での関数形を考察し、精度良く4次元湯川型関数で近似できることを示し、それに基づきグルーオンのスペクトル関数を世界で初めて導き出した。尚、この研究成果は、当該分野では世界的に注目されており、数十の学術論文に引用されている。

申請論文の第2の研究では、ランダウ・ゲージとクーロン・ゲージという2つの代表的なゲージを連続的に結び付ける“一般化ランダウ・ゲージ(λ ゲージ)”を考察し、2つの異なるゲージが連続的に推移する様子を定量的に分析している。また、クォーク間の「瞬間ポテンシャル」に対する分析から、「クォーク・ポテンシャル模型を記述するQCDのゲージ」の候補として“ λ_c ゲージ”を提案している。これは、ハドロンの諸性質の記述に多大な成功を収めている現象論的な有効模型である「クォーク模型」を基礎理論であるQCDと結びつける野心的な試みとして評価できる。

申請論文の第3の研究では、クーロン・ゲージでの閉じ込め機構の有力なシナリオを、低運動量グルーオンの寄与という新たな視点から、格子QCDを用いて定量的に分析し検証している。これにより、低運動量グルーオン、ファデーフ・ポポフ演算子のゼロモード成分、クォークの閉じ込め現象の間の密接な相関を明らかにした。

これらの研究は、いずれもQCDの本質的な自由度であるグルーオンの非摂動的性質を明らかにし、強い相互作用を基礎理論から論じる際の有用な指針を与える。

この様に、申請論文では、QCDとクォーク・ハドロン物理の最重要課題の1つを、最先端の方法で分析し、複数の重要な研究成果を挙げておりその寄与は大きい。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、平成25年1月18日に、論文内容とそれに関連した口頭試問を行い、その結果合格と認めた。