

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2010

課題番号：19540287

研究課題名 (和文) 量子色力学に基づくクォーク多体系の研究

研究課題名 (英文) Research of Multi-Quark Systems based on Quantum Chromodynamics

研究代表者

菅沼 秀夫 (SUGANUMA HIDEO)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10291452

研究分野：素粒子・原子核理論

科研費の分科・細目：物理学，素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：量子色力学，クォーク，グルーオン，格子ゲージ理論，カラーの閉じ込め，

カイラル対称性，エキゾチック・ハドロン，超弦理論

1. 研究計画の概要

強い相互作用の基礎理論である量子色力学 (QCD) に基づき、核子・中間子などのハドロンや非摂動的真空に対して、クォーク・グルーオンのレベルから解明していく。特に、強い相互作用に対する第一原理計算である格子QCD理論計算により、現代物理学の最重要未解決問題の1つである「カラーの閉じ込め現象」や、近年実験的にも注目されている「エキゾチック・ハドロン」などのクォーク多体系の研究を行う。また、超弦理論でのDブレーンを用いた新たな非摂動的解析方法である「ホログラフィックQCD」等も積極的に用いて研究を遂行する。

2. 研究の進捗状況

強い相互作用の基礎理論である量子色力学 (QCD) に基づいて「クォーク多体系の研究」「グルーオン自由度に対する定量的解析」「カラーの閉じ込めとその起源」「ホログラフィックQCDによるバリオンの研究」などの独自性の高い研究を行った。尚、これらの研究は世界に先駆けて行われ、フィジカル・レビュー誌などの国際的な一流学術誌に掲載された。主な成果は以下の通りである。

(1) ランダウ・ゲージなど適当なゲージの下、格子QCDにおけるリンク変数をフーリエ変換し、運動量空間でのグルーオンの寄与を解析することによって、QCDの個々の現象に対して“重要なスケール” (重要なグルーオン運動量成分) を特定する一般的な方法を

開発し、“クォーク閉じ込め力の起源” が、グルーオンの1.5 GeV以下の運動量成分にあることを世界で初めて示した。

(2) 格子QCDを用いてランダウ・ゲージでのグルーオン伝播関数を解析し、ハドロン物理の重要なスケールでは、それが4次元の湯川型の伝播関数で表されることを見出した。これを基に“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。

(3) 超弦理論のDブレーンで構成されるホログラフィックQCDを用いて、バリオンとバリオン物質を世界で初めて定量的に研究し、高密度QCDの相転移が“バリオン密度の非局在化”として起きる事を示した。

(4) 2つの重いクォークと1つの軽いクォークからなる系に対するポテンシャルを世界で初めて格子QCDと解析的な模型計算の双方において明らかにし、バリオン中での2クォーク間の有効閉じ込め力が、もう1つのバレンス・クォークの動的な効果により減少する事を示した。

(5) クォーク多体系中でのクォーク間ポテンシャルに対する系統的な格子QCD研究により、クォーク多体系での閉じ込め力に対して“ストリング描像”が成立する事を世界で初めて定量的に明らかにした。

3. 現在までの達成度

①当初の計画以上に進展している。

(理由)

強い相互作用の第一原理であるQCDからのクォーク多体系やクォーク閉じ込めの研

究は、我々のグループがこれまで世界的にもリードしてきた領域であり、実際、本研究課題の前身である「3クォーク系に関する格子QCD研究」は、格子QCDの標準的な教科書の1節として取り上げられるなど、確立した研究実績となっている。

本研究課題では、そこでの研究実績を基にして、クォーク多体系等に対して系統的かつ多方面に研究を拡張できたと思う。実際、本研究課題に関連する研究成果は、量的には、学術論文のみでも3年間で30編あり、アクティビティーは十分に高いと判断できる。

質的にも、本研究課題での研究成果の多くは、世界に先駆けて行ったものであり、国際的な一流学術誌である *Physical Review Letters* や *Physical Review D* などに掲載されている。その実績を反映して、国際会議や研究会での招待講演も多い。

実験的な潮流としても、高エネルギー実験である KEK-Belle 実験等において、チャーム・クォークやボトム・クォークを含む新たなハドロンが多数発見され、1つのエポックとなるなど、クォーク多体系の物理は大きく発展しつつあり、本研究課題においても、クォーク多体系中の閉じ込め力の研究をはじめ、マルチクォークの研究に貢献している。

研究上の予想外の前進としては、QCDの非摂動的性質の根幹であるグルーオンの性質に注目したことが新基軸であった。従来は、クォークの自由度が中心的に取り上げられてきたが、本研究課題では、クォークのみならず、グルーオンの自由度に対しても焦点をあてて、定量的に分析し、カラーの閉じ込め現象に対する“重要なグルーオン成分”の定量的な特定に世界で初めて成功した。また、グルーオン伝播関数の詳細な解析から、グルーオンのスペクトル関数を世界に先駆けて導出するなどしている。これらは、グルーオン自由度を陽に持つ「ハイブリッド粒子」等の新粒子の性質と深く関連し、実験サイドへの有用な提言が与えられると期待している。

4. 今後の研究の推進方策

今後も強い相互作用の第一原理計算である格子QCDを基軸にして、クォーク多体系や、カラーの閉じ込め・カイラル対称性の自発的破れ等の非摂動的現象に対する定量的解析を行っていく。また、新たな非摂動的解析方法であるホログラフィックQCDを援用し、新ハドロン粒子の性質を新たな視点から分析していく。

その際、QCDの非摂動的性質の根幹である低エネルギー領域でのグルーオンの性質に焦点をあて、マルチクォーク以外にも、グルーボールやハイブリッド粒子などのクォーク模型を超えた新しいタイプの粒子に対

しても定量的に分析し、高エネルギー実験を含む実験サイドへの理論的予言を行いたい。

更には、Large Hadron Collider の ALICE 実験での超高温のクォーク・グルーオン・プラズマ生成実験で重要になるとと思われる超高温のQCD系への適用も行っていく。

5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計30件)

- ① 入谷匠, 菅沼秀夫, 飯田英明, Gluon-propagator functional form in the Landau gauge in SU(3) lattice QCD: Yukawa-type gluon propagator and anomalous gluon spectral function, *Physical Review D***80**, 114505(20 pages) (2009) 査読有
- ② 山本新, 菅沼秀夫, Relevant energy scale of color confinement from lattice QCD, *Physical Review D***79**, 054504(11 pages) (2009) 査読有
- ③ 名和要武, 菅沼秀夫, 古城徹, Brane-induced Skymion on S^3 : baryonic matter in Holographic QCD, *Physical Review D***79**, 026005(25 pages) (2009) 査読有
- ④ 山本新, 菅沼秀夫, Lattice analysis for the energy scale of QCD phenomena, *Physical Review Letters* **101**, 241601 (4 pages) (2008) 査読有

[学会発表] (計7件)

- ① 菅沼秀夫, Lattice QCD analysis for gluons, International Workshop “QCD Green's Functions, Confinement, and Phenomenology” 2009/ 9/ 7-11, Trento, Italy (招待講演)
- ② 菅沼秀夫, Inter-quark potentials in baryons and multi-quark systems in QCD, International Conference on “Chiral Symmetry in Hadron and Nuclear Physics” (Chiral07) 2007/11/ 13-16, Osaka (招待講演)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

研究成果等に関するウェブサイト
<http://homepage3.nifty.com/suganuma-kyoto/hideo/>