

Title	Dynamics of Light Quarks and Properties of Mesons in the Multi-Instanton Vacuum of QCD
Author(s)	Araki, Fumiaki
Citation	大阪大学, 2000, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.11501/3183681">https://doi.org/10.11501/3183681</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	荒木文明
博士の専攻分野の名称	博士(理学)
学位記番号	第 15811 号
学位授与年月日	平成12年12月26日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 理学研究科物理学専攻
学位論文名	The dynamics of Quarks and Properties of Mesons in the Multi-Instanton Vacuum of QCD (量子色力学の多体インスタントン真空における軽クォークの動力学 と中間子の性質)
論文審査委員	(主査) 教授 土岐 博  (副査) 教授 阿久津泰弘 教授 中野 貴志 教授 若井 正道 助教授 若松 正志

### 論文内容の要旨

本研究は、量子色力学(QCD)のユークリッド計量における古典解として与えられるインスタントンをQCD真空とみなし、インスタントンとクォークの相互作用を通じて有効作用を構成することで、クォークの動力的現象、中間子の性質、更に荷電 $\pi$ 中間子の電磁的性質を論じたものである。

インスタントンはQCDの現象におけるカイラル対称性の力学的破れや量子異常(U(1)<sub>A</sub>問題)を解く鍵として以前から知られている他、最近では格子QCDの大規模数値計算を用いたインスタントン間相互作用の研究において、インスタントンサイズ分布のサイズが大きい領域での指数振る舞いがQCDの閉じ込めに寄与するという結果も報告されている。本研究では、より現実的なQCD真空のモデルをインスタントンを用いて構成することを視野に入れ、近年の格子QCD数値計算で示唆されているインスタントンサイズ分布及び70年代半ばにトーフトによって与えられた紫外領域でのインスタントンサイズの分布を連続的につなげた有効サイズ分布関数を用い、これをクォークの有効作用に適用した。

クォークの動力的性質は、クォーク有効作用を鞍点法を用いて導出する際のギャップ方程式によって特徴づけられる。この方程式によりクォークの力学的質量が導出され、インスタントンサイズ分布との関係が示される。特にインスタントンサイズの大きい領域における分布の指数振る舞いは、運動量が0のクォークの質量が発散することを導き、これはクォークが常に質量殻上の状態にないというクォークの閉じ込め描像を示唆している。またこの質量関数からは、インスタントンサイズとクォークの動力的質の関係が明らかにされ、クォークの運動量が小さいときにインスタントンの空間充填率に敏感であることが示唆される。

中間子の性質に対しても、インスタントン真空の立場から研究される。中間子をクォーク・反クォークの束縛状態として考えるために、このインスタントン真空を背景にしたクォーク有効作用を用いてクォーク・反クォーク散乱のグリーン関数を求め、ベータ・サルピータ方程式により中間子の各チャンネルに対しT行列を構成する。このT行列を用いて中間子の伝搬関数、相関関数を導出し、 $\pi$ 中間子に対してカイラル極限でのゴールドストーンモードを示す一方、スカラーチャンネルの中間子 $a_0$ と $\sigma$ 中間子に対する質量と性質を評価し、インスタントンサイズの分布、インスタントンの空間充填率との関係を示した。

また、上記のクォークの質量関数とベータ・サルピータの方法により導出されるクォーク・ $\pi$ 中間子頂点関数を用いて $\pi$ 中間子の電磁カレントを構成し、カイラル極限での荷電 $\pi$ 中間子の電磁的性質を調べた。ここで、クォークは

インスタントンと強く相互作用しているため、クォークと光子との相互作用は非自明であり、申請者はウォード・高橋恒等式を満たす頂点関数を新たに導入することでこの問題に対処した。このフレームワークの下で荷電 $\pi$ 中間子の電磁形状因子と電磁半径を導出し、インスタントンのサイズ分布と空間充填率との関係を明らかにした。この結果、南部・ヨナラシニオ模型等で知られているベクトル中間子卓越模型を考慮せずとも $\pi$ 中間子の電磁半径は実験で知られている値に十分近い値を得ることができ、クォーク・反クォーク系としての $\pi$ 中間子の電磁的性質にインスタントンが有効であることが示唆される。

### 論文審査の結果の要旨

クォークやグルオンの力学は量子色力学で与えられる。核子やメソンの構造はその非摂動的振る舞いで与えられると考えられているが、解析的な取り扱いが確立されていない。最近の研究からインスタントンが非摂動論現象での中心的な働きをすると期待されてきており、申請者はハドロンの構造へのインスタントンの効果の研究を行った。

申請者はこのインスタントンを背景場としたクォークの振る舞いをゼロモードで記述し、クォーク間の相互作用を導き出し、その振る舞いからクォークの質量を導出した。クォークの閉じ込めなどの現象には大きなインスタントンの存在が大きく影響することを指摘している。さらにこの場合でもゴールドストーン定理が成り立つことを証明している。その上でスカラームソンの質量の計算を行い、インスタントンサイズの効果を調べた。パイオンの半径を計算する際にワード高橋アイデンティティを課すことにより実験値に近い値が得られることを示した。

この博士論文ではインスタントンのサイズの分布を考慮したハドロンの構造の計算方法を開発し、物理量への影響を数値的に調べたことでその重要性を示したことは学術的内容が高く、博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。