



Title	Exotic hadrons in the QCD sum rule
Author(s)	Chen, Hua-Xing
Citation	大阪大学, 2009, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/23459">https://hdl.handle.net/11094/23459</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

氏 名	陳 華 星
博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	第 2 2 6 6 7 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 21 年 3 月 24 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	Exotic hadrons in the QCD sum rule (QCD 和則によるエキゾチックハドロン)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 土 岐 博 (副査) 教 授 浅 川 正 之 教 授 中 野 貴 志 教 授 細 谷 裕 准教授 保 坂 淳

## 論 文 内 容 の 要 旨

The theory of the strong interactions, Quantum Chromodynamics (QCD), originated from the systematics of hadron spectroscopy. The spectroscopy contains meson and baryon states, many of which are well classified by the quark model with quark contents  $q\bar{q}$  and  $qqq$ . Besides the quark model, QCD allows much richer hadron spectrum such as multi-quark states, hadron molecules, hybrid states, and glueballs etc. However the spectrum of QCD seem to saturate at  $q\bar{q}$  and  $qqq$ . Therefore, we call these spectrum beyond  $q\bar{q}$  and  $qqq$  exotic hadrons (exotica).

Exotica have been studied more than thirties years. R. L. Jaffe wrote two famous papers about scalar tetraquark states in 1976, whose structure is still not clear yet. In 2003, the pentaquark  $\Theta^+$  was observed in several experiments, but then several experiments denied its existence. After five years of intense study, the status of  $\Theta^+$  is still controversial. There are many other exotic candidates, such as  $\pi_1(1400)$ ,  $D_{sJ}(2317)$ ,  $X(3872)$ , and  $Y(4260)$ , etc. Their properties are difficult to be explained by the conventional picture of  $q\bar{q}$  and  $qqq$ .

In order to study these exotica, lots of methods have been used. Although we have known a lot about QCD, but still there are many important and essential dynamical aspects that we need to clarify. As a doctor student in RCNP, Osaka University, I spent my latest three years on the study of QCD. I hope I contributed, although the time is not long, and my contribution is rather restricted. Now I am trying to graduate and changing my career in the research, and I am required to write this doctor thesis.

The method we used in this thesis is the QCD sum rule, which has proven to be a powerful and successful non-perturbative method for the past decades. An introduction of QCD sum rule is written in Chapter 1, which contains the SVZ sum rule, and the finite energy sum rule.

This thesis is separated into two parts. In the first part, we classify the interpolating fields (currents) for hadrons in QCD, which are used in the QCD sum rule analysis in the second part. QCD currents can contain quark fields, antiquark fields and gluon fields. The quark and antiquark fields are Dirac spinors, and so currents can also be spinors, such as baryon current; Currents can also be scalars other than matrices, such as the meson current.

The notations and conventions we used are written in Chapter 1, where we construct meson currents ( $q\bar{q}$ ), diquark currents ( $qq$ ) and antidiquark currents ( $\bar{q}q$ ). In Chapters 2 and 3, we construct baryon currents and tetraquark currents, respectively. Chapter 4 is the discussion of color structure of multi-quark currents.

After classifying current in the first part, we can start to perform the QCD sum rule analysis, which is the second part of this thesis. We have three important criteria:

1. Convergence of Operator Product Expansion (OPE),
2. Positivity of spectral density,
3. Sufficient amount of pole contribution.

We take  $u\bar{d}s\bar{s}$  currents as an example and show our QCD sum rule analysis in Chapter 5. This procedure will be used in the following chapters: in Chapter 6, we study light scalar mesons; in Chapter 7, we study  $Y(2175)$  as a tetraquark states; in Chapter 8, we study  $\pi_1(1400)$ ,  $\pi_1(1600)$  and  $\pi_1(2015)$ . In Chapter 9, the QCD sum rule is used to study the bottom baryons which contain heavy quarks.

Above I just gave a short introduction to my thesis. In my three years' research, I learned much and had a great deal of fun. I hope the readers would enjoy my thesis.

## 論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

LEPSグループによるペンタクォーク粒子観測の報告以来、エキゾチックなマルチクォークハドロンに対する関心が高まっている。最近になりB-factoryにおけるX, Y, Z粒子等の発見、LEPSにおける高統計データの解析による $\Theta^+$ の再確認、 $\Lambda(1405)$ の分子構造に関する活発な議論によって、ハドロン物理は新しい局面を迎えている。一方理論的にはクォーク模型、格子QCD、有効ラグランジアンの方法など様々な手法を用いて精力的に研究が行われてきたが、確定的な結論に至っていない。それぞれの手法が「通常」のハドロン以外のマルチクォークハドロンでも有効かどうか、十分に検討されていないのが現状である。

ハドロンの有効理論として「QCD和則」の方法がある。これは2点関数からハドロンの情報を引き出す方法である。一方では、深ユークリッド領域で演算子積の方法によりQCD摂動計算した2点関数を、解析接続によって物理領域におけるスペクトル積分で表す。他方でスペクトル積分を現象論的に表すことによって、物理量の情報を引き出すことが出来る。

この方法で重要な点の一つに、2点関数を定義するハドロンの内挿場の選び方がある。「通常」のハドロンの場合（例えば $qq^*$ 中間子）、その選び方はほぼ唯一に決まるものの、マルチクォーク系では（例えば、 $qqq^*q^*$ 中間子）自由度が増え、その選び方には任意性が残る。これまではこの任意性をどのように決めるか、それによって和則がどのように変わるかについて、満足のいく研究がなされてこなかった。そのため、得られた結果の信頼性には疑問が持たれる場合があった。

これに対しChen君は、特にテトラクォーク系に対して内挿場の分類を定式化し、複数の自由度がある場合には、独立な内挿場の線形結合によって改善された内挿場を構成し和則計算を実行した。より広い空間の中で計算を行うことにより、これまでみられた2点関数の任意性を抑制し理論計算の信頼性を高めた。そして多くのエキゾチック状態への応用を行った。

(1) 軽いスカラー中間子の研究では、 $\sigma$ 、 $\kappa$ 、 $f_0$ 、 $a_0$ のSU(3)9重項の研究を行った。 $qqq^*q^*$ で可能な全内挿場の線形結合をうまく取ることで、実験に合う質量スペクトルを再現すること

が出来た。 $qq^*$ 内挿場の場合には実験データと比べ質量が大きすぎるため、上記中間子が $qqq^*q^*$ のテトラクォークである可能性を示唆することが出来た。

- (2) エキゾチックな $JPC = 1-+$ 状態に対して同様の和則計算を行い、実験で観測されている1600 MeV, 2000 MeV近傍に状態が存在する可能性を指摘した。実験では1400 MeV近傍にも状態が観測されているが、テトラクォーク内挿場を用いた和則計算では状態を見いだせなかった。これによって1400 MeVの状態はテトラクォークではなく、他の状態、例えばハイブリッド状態である可能性を指摘した。これら以外に、ストレンジエキゾチック中間子とバリオン状態にも適用した。

Chen君の研究は、内挿場の自由度を分類し改善することでQCD和則の予言能力を向上させ、エキゾチックハドロンの構造について理解を進めることに貢献した。以上のことから、博士（理学）の学位論文として十分価値のあるものと認める。