



Title	Chiral Dynamics in Nonperturbative Vacuum of QCD
Author(s)	佐々木, 勝一
Citation	大阪大学, 1997, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/39986">https://hdl.handle.net/11094/39986</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、<a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

氏名	佐々木 勝一
博士の専攻分野の名称	博士(理学)
学位記番号	第 12926 号
学位授与年月日	平成9年3月25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	Chiral Dynamics in Nonperturbative Vacuum of QCD (非摂動論的 QCD 真空におけるカイラル力学)
論文審査委員	(主査) 教授 土岐 博
	(副査) 教授 大坪 久夫 教授 東島 清 教授 阿久津泰弘 教授 岸本 忠史

### 論文内容の要旨

量子色力学(QCD)物理において「カラーの閉じ込め」のメカニズムを明らかにすることはその低エネルギー及び中間エネルギー領域の物理としてハドロン現象を理解する上で重要な命題です。近年、超大型計算機による格子QCDの数値実験の発展と、「トポロジー」及び「双対性」の数理の新しい展開によって、QCDの非摂動論的な側面の理解が大幅に進んでいます。QCDは't Hooftが提唱したアーベリアン・ゲージで考察すると、電磁気学理論と類似の可換ゲージ理論に還元され、その結果重ね合わせの原理等が可能になるなどその取り扱いが非常に簡単化されます。その際、QCDの持つトポロジーを反映して理論には「モノポール」が出現し、更にこのモノポールが凝縮することによってカラーの閉じ込めが「双対的なマイスナー効果」として記述できること等が格子QCDの数値実験等により明らかにされてきています。そこでもしQCD真空がQCDモノポールの凝縮相にあるならば、QCD真空の励起状態であるハドロンの力学にどのような影響を及ぼすのかという問い合わせは興味深いものと思われます。

本研究の前半ではまずハドロン物理を考える上で必要不可欠な $SU_A(N_f)$ のカイラル対称性に伴う自発的対称性の破れについて着目しました。カイラル対称性は質量ゼロのフェルミオン粒子に由来する対称性であり、クォークの質量がゼロの場合にはローレンツ変換によっても異なるヘリシティ(カイラリティ)状態のクォークに移り変わることはないですから、もし相互作用がカイラル対称性を有していれば、クォークのヘリシティは相対論的にも保存します。しかしながら相互作用を通してクォークが質量を獲得する場合、カイラル対称性は自発的に破れることになります。そこでQCDモノポールが凝縮した真空においてその真空の媒質効果によってクォークが力学的質量を得るか、すなわちカイラル対称性が自発的に破れが生じるかということについて研究を行いました。

まず、QCDモノポールが凝縮した結果、「双対的ヒッグス機構」を通じて双対的マイスナー効果(カラーの閉じ込め)が具現化する、双対的ギンツブルグ・ランダウ理論から「QCDモノポール凝縮相」におけるグルーオン・プロパゲーターをもとめます。そして、このグルーオン・プロパゲーターを用いてクォークの力学的質量に対する自己無撞着方程式(シュインガー・ダイソン方程式)の定式化を行いました。この方程式から真空の媒質効果(QCDモノポール凝縮による効果)によって変化したクォーク・グルーオン間の相互作用がクォークの力学的質量の発生にどのように影響するかについて詳細に調べることができます。定式化したシュインガー・ダイソン(SD)方程式はクォークの質量関数に対する非線形積分方程式となりますが、それを数値的に解くことによってクォークの力学的質量の発生の有無が判明し、カイラル対称性の自発的破れがQCDモノポールの凝縮した真空において起きるか否かを判定す

ることができます。その結果、グルーオンとのクーロン的な引力相互作用が弱い場合でも QCD モノポールの凝縮した相においては真空の媒質効果から生じる長距離強相関によってクォークが力学的質量を大幅に獲得することがわかりました。定量的に詳しく調べるために、この長距離強相関に対して現象論的に指摘されているクォーク・反クォーク間の弦張力 ( $\sim 1 \text{ GeV/fm}$ ) が再現できるように理論のパラメータを決定しました。このとき「カラーの閉じ込め」と同時に「カイラル対称性の自発的破れ」も起こることを示しました。さらにその破れの度合を定量的に示す、クォーク凝縮  $\langle \bar{q}q \rangle$  の値やパイオニ崩壊定数  $f_\pi$  もそれぞれ実験値をよく再現することが明らかになりました。

これらのことから、QCD 真空の有する「双対的マイスナー効果（QCD モノポール凝縮）」によってカラーの閉じ込めだけでなく、QCD 真空においてカイラル対称性も自発的に破れることの要因になりうると結論づけられます。さらに言及すれば、我々の結果は「カラーの閉じ込め」と「カイラル対称性の自発的破れ」の物理的機構が QCD モノポールの凝縮という一元的な現象によって統一的に理解され得ることを示唆しています。このことは、以前より格子 QCD の数値実験によって示された『閉じ込め・非閉じ込め相転移とカイラル相転移の臨界点の一致』という事例を解釈する手がかりとなると考えます。さらに有限温度におけるカイラル相転移についての研究も行い、カイラル相転移の臨界温度とクォークの閉じ込めの強さを表すハドロン弦張力あるいは、QCD モノポール凝縮との間に線形的な強い相関があることを示しました。

QCD におけるもう一つ別の位相幾何学的欠陥として、非自明な古典的ゲージ配位（インスタントン）が存在しますが、後半の研究ではこのインスタントンと QCD モノポールとの関係を軸に研究を行ないました。まず、インスタントン配位はそれ自身の「双対性」からアーベリアン・ゲージの一つである最大可換ゲージ固定条件（MA ゲージ）を満足しています。この結果、インスタントン配位を背景場として用いることで QCD モノポールの古典的な配位としての存在を解析的に示すことができます。このとき QCD モノポールはインスタントンの中心を貫く世界線として得られ、QCD モノポールとインスタントンとの強い相関を示唆します。このような古典的議論における強い相関が量子論のレベル、すなわち QCD 真空において成り立っているか否かを格子 QCD の数値実験を用いて研究を行ないました。

数値実験では QCD 真空においてモノポールが担う部分を数値的に取り出すことが可能です。そのモノポール背景場の下でインスタントンの位相幾何学的な性質を特徴づける Pontryagin 指数、 $Q$  を観測し非自明な配位  $Q \neq 0$  が存在することを発見しました。逆に、モノポールの寄与を除いた背景場の下では非自明な配位が存在しないことから Pontryagin 指数に対する QCD モノポール卓越が示されます。このことからインスタントンとモノポールとの間に量子論的なレベルにおいても強い相関が保持されていることがわかります。さらにモノポール世界線の長さとインスタントン・反インスタントンの数に相当する量がほぼ比例関係にあることを示し、このことからコスタリック・サウレス転移型のモノポールの凝縮はインスタントンが介在する共同現象（パーコレーション）であるという可能性について言及しました。

最後に、QCD が持つ位相幾何学的な性質に着目しました。それは零質量のクォークに対する Dirac 演算子の零固有値の数がインスタントンを背景場として考えた場合、そのインスタントンの Pontryagin 指数という全く別の位相不変量と等しいという、「アティヤ・シンガーの指数定理」が成り立つことが知られています。この Dirac 演算子の零固有値はカイラル非対称な零モードであり、 $U_A(1)$  のカイラル対称性に対して「カイラル量子異常」をもたらします。その結果  $U_A(1)$  のカイラル対称性が量子論のレベルで明白に破れます。このことはいわゆる  $U_A(1)$  問題を解決するという点でハドロン物理において重要かつ不可欠な意味を持っています。そこで、モノポールを背景場としたときの Dirac 演算子の固有値に関して調べることによって、QCD モノポールと  $U_A(1)$  量子異常との関わりをさぐるとともに QCD モノポールとインスタントンとの強い相関をこのような位相幾何学的な意味づけの下で検証しました。その結果、Pontryagin 指数のときと同様、モノポールの背景場において零モードの存在が確認され、モノポールの寄与を除いた背景場の下では零モードが存在しないことがわかりました。さらにモノポールの背景場の下でも指数定理が成り立っていることを発見しました。このことから  $U_A(1)$  量子異常に対しても QCD モノポール卓越という事実が存在するとともに位相幾何学的な観点からも QCD モノポールとインスタントンとの強い相関が存在することを示しました。

## 論文審査の結果の要旨

量子色力学（QCD）の真空は複雑な構造を持つ。そのことにより、物質の構成粒子であるクォークはハドロン内に閉じ込められている。さらにカイラル対称性が自発的に破れることによりクォークは質量を得る。佐々木君はこれら素粒子・原子核物理の最も基本的なQCD真空の問題に直接切り込む研究を行ない、大きな成果を挙げた。

クォークの閉じ込めがQCDモノポールの凝縮によって引き起こされるとする双対ギンツブルグ・ランダウ理論(DGL)を定式化し、DGL理論を用いてカイラル対称性の自発的破れが起こることを示した。さらに、格子QCD理論を用いてそのQCDモノポールの出現を大規模数値計算で確かめ、その上でモノポールとインスタントンは強く関連していることも示した。もしそうであれば、インスタントンが引き起こすと議論されているU(1)カイラル異常にもQCDモノポールが重要な働きをするはずであることに着目し、大規模計算で実際にそれを確かめた。

非可換ゲージ理論の二つのトポロジカルな現象を結び付け、さらに、それらがQCDの真空に重要な働きをしていることを、解析的さらに数値的に示したことは、素粒子・原子核物理の発展に重要な寄与をしたと評価できる。

これらの研究内容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のあるものと認める。