

氏 名	堀籠 儀穂
博士の専攻分野の名称	博士 (理学)
学位記号番号	博理工甲第 665 号
学位授与年月日	平成 20 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Chiral Symmetry Breaking and Phase Transitions in Holographic Gauge Theories (ホログラフィックなゲージ理論におけるカイラル対称性の破れと相転移について)
論文審査委員	委員長 教授 谷井 義彰 委員 教授 吉永 尚孝 委員 准教授 佐藤 丈 委員 教授 鈴木 健

論文の内容の要旨

We discuss the spontaneous breaking of the chiral symmetry in quantum chromodynamics (QCD) in the framework of the string/gauge duality. A relation between string theory and gauge theory was firstly pointed out by 't Hooft in 1974. His statement is as follows; the perturbative expansion of $SU(N_c)$ gauge theory can be considered as string loop expansion under large N_c limit with fixed $g_{YM}^2 N_c$, where g_{YM} is the gauge coupling of the gauge theory. It suggests that there is a correspondence between large N_c gauge theory and string theory. In 1997 Maldacena proposed an interesting conjecture, so called the AdS/CFT correspondence. This correspondence relates a weakly coupled string theory in $(d+1)$ -dimensional anti de Sitter (AdS) spacetime (times a compact space) to a strongly coupled d -dimensional conformal field theory (CFT). The AdS/CFT correspondence provides a new non-perturbative approach to strongly coupled gauge theories. Recently the AdS/CFT correspondence was extended to the string/gauge duality, which is a generalization to non-conformal and non-supersymmetric theories. The string/gauge duality can provide a useful tool for analysis of low energy behaviors of QCD such as the confinement and spontaneous chiral symmetry breaking. This approach to QCD is often called the holographic QCD.

In this doctoral dissertation we consider two different holographic models of QCD. One of them is the general intersecting Dq/Dp brane model consisting of N_c Dq -brane and a single probe Dp -brane. The other is the Dq/Dp - Dp brane model in which we use N_f Dp - Dp -brane pairs as probe brane. In both models there is an s -dimensional intersection between Dq -branes and probe brane. The theory localized at the intersection contains quarks and gluons in the fundamental and the adjoint representation of $SU(N_c)$, respectively. Such theory is QCD-like. We simply call this theory QCD_{s+1} . There are many brane configurations which are dual to QCD_{s+1} . However we can classify these configurations by a pair of numbers $(q+p, s)$

The differences between the Dq/Dp model and the Dq/Dp - \overline{Dp} model appear in the treatments of the chiral symmetry and the quark mass. In the Dq/Dp model there are configurations having the directions transverse to both Dq -branes and Dp -brane. Such configurations are called non-transverse intersections. The rotational symmetry $SO(9-q-p+s)$ of such directions can be regarded as the chiral symmetry of QCD_{s+1} for certain $(q+p, s)$. In the class (6, 1),

which is dual to QCD_2 , there is an $\text{SO}(4)$ symmetry and it is regarded as the non-Abelian chiral symmetry $\text{SU}(2)_L \times \text{SU}(2)_R$. In the class (10, 3), which is dual to QCD_4 , there is an $\text{SO}(2)$ symmetry and it is regarded as the Abelian chiral symmetry $\text{U}(1)_A$. For non-transverse intersections, we can separate Dq -branes and Dp -brane in the directions transverse to these branes and break the rotational symmetry. In the holographic description this deformation makes quarks on the intersection massive and leads to an explicit chiral symmetry breaking. The asymptotic separation between these branes is identified with quark mass. Therefore we can study the chiral symmetry breaking with a non-vanishing quark mass.

Alternatively, the situation of the $D4/D8/\overline{D8}$ model with $s=3$, which is an interesting example of the $Dq/Dp/\overline{Dp}$ model and dual to QCD_4 , is quite different. In this model quarks at the intersection are always massless since there is no directions in which we can separate both branes. However the gauge symmetry $\text{U}(N_{p/D8}) \times \text{U}(N_{\overline{D8}})$ on the probe $D8$ - $\overline{D8}$ -brane pairs can be regarded as the non-Abelian chiral symmetry $\text{U}(N_{p/L}) \times \text{U}(N_{p/R})$.

In both cases the breaking of the chiral symmetry is closely related to the configurations of the probe branes. In terms of the string/gauge duality we can study the dynamics of strongly coupled large N_c QCD_{s+1} . The near horizon limit and the probe approximation allow us to treat the Dq -branes as a background geometry and the Dp -brane or Dp - \overline{Dp} -branes as a probe which do not affect this background geometry. We study the dynamics of the probe branes in the Dq background geometry at zero and finite temperature T (and also at finite chemical potential μ) for the above two models. The temperature T is related to a period δt_E of the S^1 compactified Euclidean time coordinate as $T = 1/\delta t_E$. The chemical potential μ for the baryon number symmetry is introduced as a non-vanishing asymptotic value of the time component of $\text{U}(1)$ gauge field on the probe brane $A_0 \sim \mu$.

In the Dq/Dp model at zero temperature we find that the Dp -brane embedding breaks the rotational symmetry of the transverse space. The quark mass m_q and the quark condensate $\langle \overline{\psi}\psi \rangle$ can be read from the asymptotic behavior of the Dp -brane embedding. In particular there is a non-zero quark condensate even for massless quark limit. This corresponds to the spontaneous breaking of the chiral symmetry of QCD_{s+1} for certain $(q+p, s)$. Since the vacuum embedding spontaneously breaks the rotational symmetry $\text{SO}(9-q-p+s)$ to $\text{SO}(8-q-p+s)$, there should appear massless Nambu-Goldstone (NG) bosons. Indeed we find $(8-q-p+s)$ massless NG bosons associated with the spontaneous symmetry breaking by studying the fluctuations around the vacuum embedding. If quarks have a small mass the resulting NG bosons become pseudo-NG bosons with a non-vanishing mass. In the finite temperature analysis two types of Dq -brane background geometries are possible. One of them is dominant at low temperature and this background corresponds to the color confining phase. The other is dominant at high temperature and corresponds to the color deconfining phase. The phase transition between these two backgrounds corresponds to the confinement/deconfinement phase transition. As in the zero temperature analysis we also find that the Dp -brane embedding breaks the rotational symmetry of the transverse space. In the high temperature phase we find that the chiral symmetry restores only at high temperature limit $T \rightarrow \infty$.

In the $D4/D8/\overline{D8}$ model we introduce a chemical potential μ for the baryon number symmetry $\text{U}(1)_V$ as well as temperature T . We find that the $D8$ - $\overline{D8}$ -brane embedding breaks the gauge symmetry on the probe brane pairs as $\text{U}(N_{p/D8}) \times \text{U}(N_{p/\overline{D8}}) \rightarrow \text{U}(N_{p/D8})$. In the low temperature phase there are only U-shaped embeddings for which $D8$ and $\overline{D8}$ -branes are connected each other. This corresponds to the chiral symmetry breaking $\text{U}(N_{p/L}) \times \text{U}(N_{p/R}) \rightarrow \text{U}(N_{p/V})$. In the high temperature phase another type of embeddings is possible in addition to U-shaped embeddings. This is straight disconnected $D8$ and $\overline{D8}$ -brane embedding and this type of embeddings preserves the chiral symmetry. There is a phase transition between these two types of embeddings, and this transition corresponds to a chiral phase transition in QCD_4 . This phase transition is of the first order. We obtain the phase diagram in μ - T space.

論文の審査結果の要旨

本学位論文は、弦理論とゲージ理論の対応関係（弦／ゲージ対応）を用いて、QCD 型ゲージ理論におけるカイラル対称性の自発的破れについて解析したものである。素粒子の強い相互作用の理論である QCD においては、カイラル対称性のような低エネルギーでの性質は、相互作用が強いため通常の摂動論的な計算方法では解析できない。これらの強結合領域の新たな解析方法として、弦／ゲージ対応を使ったアプローチが最近注目されている。弦／ゲージ対応は、適当な曲がった時空上の弦理論とゲージ理論の等価性を示すものである。ゲージ理論に含まれるパラメータの適当な極限をとった場合、対応する弦理論はその有効理論である超重力理論の古典論で表すことができる。したがって、古典的な重力理論の解析によって、強結合ゲージ理論の性質を明らかにすることができる。

QCD 型のゲージ理論を考えるには、対応する弦理論において適当な D ブレインの配位を考える。D ブレインは弦理論に存在する広がりをもった物体で、場の理論のソリトンに相当するものである。開弦の両端は D ブレイン上に束縛されている。 N_c 枚の重なった D_q ブレイン (q はブレインの空間的な広がり次元) と N_f 枚の重なった D_p ブレインを考えると、両端が D_q ブレイン上にある開弦は $U(N_c)$ ゲージ粒子に、一端が D_q ブレインで他端が D_p ブレイン上にある開弦はクォークに対応する。本学位論文では、2 種類の D ブレイン模型を使って、QCD 型ゲージ理論のカイラル対称性の破れを解析している。1 つ目の模型は、 N_c 枚の D_q ブレインと $N_f=1$ 枚の D_p ブレインからなる D_q/D_p ブレイン系に基づいている。カイラル対称性は、 D_q ブレインと D_p ブレインの両方に直交した方向の回転対称性として表される。もう 1 つの模型は、 N_c 枚の D_q ブレインと N_f 枚の D_p ブレインと反 D_p ブレインの対からなる D_q/D_p - 反 D_p 系に基づいている。カイラル対称性は、 D_p - 反 D_p ブレイン上のゲージ対称性として表される。どちらの模型でも、 N_f を有限に保ち、 N_c が無限大の極限をとると、 D_q ブレインは曲がった背景時空によって表され、 D_p (- 反 D_p) ブレインは背景時空に影響を与えないプローブ・ブレインと見なすことができる。カイラル対称性の破れは、 D_p (- 反 D_p) ブレインの形によって決まる。

まず、 D_q/D_p ブレイン模型では、回転対称性下でのクォークの変換性を調べることで、それがカイラル対称性と解釈できることを示している。特に D_2/D_4 模型の場合には、カイラル対称性が非可換群になることを発見した。 D_q 背景時空中での D_p ブレインの運動方程式の解を数値計算によって求め、解の漸近的な形からクォーク質量に対するクォーク凝縮の振る舞いを求めている。クォーク質量がゼロの場合にもクォーク凝縮がゼロでない値を持つことから、カイラル対称性が自発的に破れていることを示した。また、この解のまわりの D_p ブレインのゆらぎを解析することにより、ゼロ質量の Nambu-Goldstone ボソンが現れることも示している。

次に、 D_4/D_8 - 反 D_8 ブレイン模型を使って、有限温度で、かつ、バリオン数に対する化学ポテンシャルがある場合のカイラル対称性の破れを議論している。バリオン数に対する化学ポテンシャルは、 D_8 - 反 D_8 ブレイン上の背景 $U(1)$ ゲージ場の漸近値として導入される。低温の閉じ込め相と高温の非閉じ込め相のそれぞれにおいて、 D_8 - 反 D_8 ブレインの形と $U(1)$ ゲージ場に対する運動方程式を解き、温度と化学ポテンシャルに対する相構造を調べている。閉じ込め相では D_8 ブレインと反 D_8 ブレインが U 字型につながった配位が得られ、化学ポテンシャルの値によらずカイラル対称性は破れている。非閉じ込め相では 2 種類の解が可能であり、温度と化学ポテンシャルの値によってどちらが実現されるかが決まる。1 つは閉じ込め相同様、 D_8 ブレインと反 D_8 ブレインが U 字型につながった解であり、カイラル対称性が破れた相に対応している。もう 1 つは D_8 ブレインと反 D_8 ブレインがそれぞれ真っ直ぐに伸びた解であり、カイラル対称性が破れていない相に対応している。

以上の解析方法と結果は、QCD 型ゲージ理論の強結合領域の性質を理解する上で有用であり、この分野の研究に重要な寄与をしていると考えられる。これらの成果は、2 編の論文として国際的学術誌に発表されている。以上のことから、本委員会は学位論文の内容が博士の学位に十分値するものとして、合格と判定した。