

弦理論を用いた QCD の非摂動的解析

Non-Perturbative Analysis of QCD using String Theory

プロジェクト代表者：谷井義彰（理工学研究科・教授）
Yoshiaki Tanii (Graduate School of Science and Engineering, Professor)

1. 有限温度・有限バリオン数密度におけるカイラル相転移

ゲージ理論と弦理論の対応関係を用いて、有限温度・有限バリオン数密度の場合に、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、相構造を明らかにした。

QCD は、素粒子の間に働く強い相互作用に対する基礎理論である。QCD におけるカラーの閉じ込めやカイラル対称性の破れといった強結合領域の振る舞いを説明する試みとして、AdS/CFT 対応を用いた D4/D8- $\overline{D8}$ 模型がある。 N_c 枚の D4 ブレインと N_f 枚の D8- $\overline{D8}$ ブレインからなる配位に対して地平面近傍極限とプローブ近似 ($N_c \gg N_f$) を考えることで、低エネルギー有効理論はフレーバーが N_f 種類のクォークを含んだ 4 次元 $U(N_c)$ Yang-Mills 理論となる。系のダイナミクスは D4 背景中の D8 ブレインの有効作用である Dirac-Born-Infeld (DBI) 作用によって記述される。この模型が持つ $U(N_f)_L \times U(N_f)_R$ カイラル対称性は D8- $\overline{D8}$ ブレインの配位によって $U(N_f)_V$ に破られる。この模型は有限温度の場合にも拡張されており、ゲージ理論側の閉じ込め/非閉じ込め相転移やカイラル相転移が論じられている。

我々は、新たに D8- $\overline{D8}$ ブレイン上に背景場として純電氣的な $U(1)$ ゲージ場を考え、その漸近値としてバリオン数に対応する化学ポテンシャルを導入し、有限温度・有限バリオン数密度の系における相構造を議論した。具体的には、低温 (閉じ込め) 相・高温 (非閉じ込め) 相のそれぞれにおいて、DBI 作用から導かれる D8 ブレインの配位と $U(1)$ ゲージ場に対する運動方程式の解を求め、これらの解に対する DBI 作用を評価することにより温度と化学ポテンシャルの変化に対する相構造を調べた。

解析の結果は次の通りである。低温相では、解として D8 ブレインと $\overline{D8}$ 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が破れた相であることが分かった。高温相では 2 種類の解が可能である。1 つは低温相同様、D8 ブレインと $\overline{D8}$ ブレインが U 字型につながった解であり、これはカイラル対称性が破れた相に対応している。もう 1 つは D8 ブレインと $\overline{D8}$ ブレインがそれぞれ真っ直ぐに伸びた解であり、これはカイラル対称性が保たれている相に対応している。高温相においてこれらのうちのどちらが実現されるかは、それぞれの解を DBI 作用に代入し、その大小関係の評価することによって判断できる。実際、数値計算によってこれを実行すると、(高温相中で比較的) 低温・低化学ポテンシャルの領域ではカイラル対称性が破れた相になっているが、高温、または、高化学ポテンシャルの領域では破れていない相になっていることがわかった。図 1 は、これを温度 T と化学ポテンシャル μ に対して図示したものである。点線は、閉じ込め相と非閉じ込め相の境界を表している。図中の曲線に沿ってカイラル相転移が起こり、そのときの化学ポテンシャルは温度が上がるほど小さくなっている。またある温度以上では常にカイラル対称性が保たれている相になっている。このカイラル相転移は 1 次相転移である。

N. Horigome and Y. Tanii, Holographic chiral phase transition with chemical potential, *JHEP* 01 (2007) 072.

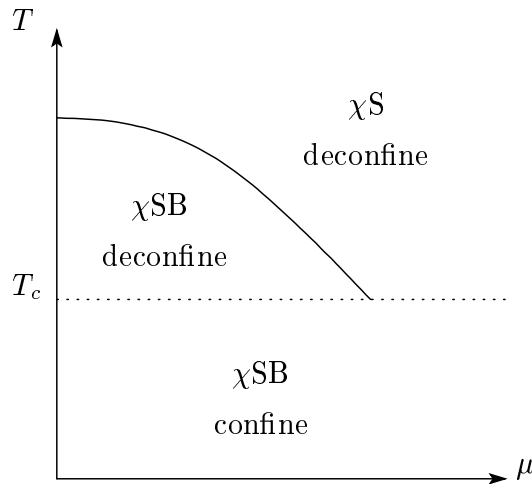


図 1: D4/D8- $\overline{D8}$ 模型の相構造

2. 反ド・ジッター時空中の超弦理論の対称性変換

反ド・ジッター (AdS) 時空を含む高次元時空中の超弦理論の作用の構築と量子化は、ゲージ理論と弦理論の対応関係の 1 つである AdS/CFT 対応の研究において重要な課題である。AdS₅ × S⁵ 上の IIB 型超弦理論については、世界面上の作用が Metsaev と Tseytlin により群論的な方法で構築されている。また、光円錐ゲージを用いた κ 対称性と世界面上の一般座標変換に対するゲージ固定についても議論されている。

我々は、AdS/CFT 対応の一般論を検討するために、AdS₅ × S⁵ 上の IIB 型超弦理論のもつ大局的対称性を群論的な方法を使って議論した。この対称性は超群 PSU(2, 2|4) によって表される。光円錐ゲージによって κ 対称性を固定した世界面上の作用を使い、PSU(2, 2|4) 変換の具体的な形を求めた。得られた対称性変換は、この対称性に対する Noether チャージを求める際に役立つ。また、最近の AdS/CFT 対応の研究で必要とされている、理論を矛盾なく簡略化する方法を見つける上でも有用である。

M. Nishimura and Y. Tanii, PSU(2, 2|4) transformations of IIB superstring in AdS₅ × S⁵, 投稿中.

3. 超重力理論の解説

超重力理論は、超弦理論の低エネルギー有効理論として現われ、ゲージ理論と弦理論の対応関係を議論する際に重要な役割を果たす。このような超重力理論について、特に弦理論の双対対称性に関係する非コンパクト対称性に重点をおいて、その概要を紹介した。

谷井義彰, 超重力理論と非コンパクト対称性, 数理科学 2007 年 3 月号 p.25.