

超対称ゲージ理論と閉じ込め

大河内 豊

Perimeter Institute for Theoretical Physics
数物連携宇宙研究機構 (IPMU)

参考文献

Intriligator-Seiberg hep-th/9509066

K. Konishi arXiv:0809.1370 [hep-th]

QCD

- 現実世界の理解に不可欠
- クォークの閉じ込めを示唆
- カイラル対称性の自発的破れと関係
- 強結合領域でおこるが、定量的扱いが難しい

QCD-like Model

- 他の漸近自由な理論で閉じ込めは起こるのか？
- 閉じ込めのメカニズムは？
- カラーやフレーバーの数との関係は？
- カイラル対称性と閉じ込めの関係は？

QCD-like Model

- トイモデルだが、閉じ込めや強結合領域の物理の教訓を得る事ができる
- 理論を一般化してみることで、QCDが偶然に持っている特殊性がわかる
- ある種の漸近自由な理論は定量的にあつかうことができる

超対称性と閉じ込め

- 閉じ込めの説明：デュアルマイスナー効果
- magnetic object が真空中で凝縮するために、electric flux tubeができる
- このメカニズムは超対称性があっても同じであろう
- どんな object が凝縮しているのだろうか？超対称理論は定量的扱いが可

超対称化：SQCD

$$SU(N_c)_{\text{color}} \quad SU(N_f)_L \times SU(N_f)_R \times U(1)_B$$

- クォークのボソンパートナーの導入

$$Q = S + \theta q + \theta^2 F_Q$$

↑
スクォーク
(ボソン)

↑
クォーク

↑
SUSYの破れの
秩序変数 SUSY真空では
 $F_Q = 0$

θ_α グラスマニアン座標 (スピナーの足)

$$\theta_\alpha = (\theta_1, \theta_2) \quad \theta^3 = 0$$

超対称化：SQCD

- グルーオンのパートナーの導入

$$W_\alpha = \lambda_\alpha + (D + \sigma_{\alpha\beta}^{\mu\nu} F_{\mu\nu})\theta_\alpha + \theta^2 \partial_\alpha \lambda$$



グルーイーノ



グルーオン

$$\mathcal{L} = \int d^2\theta d^2\theta^\dagger K(Q, Q^\dagger) + \int d^2\theta W(Q) + c.c.$$

超対称理論の魅力

$$V = (\partial\partial^\dagger K)^{-1} |\partial W|^2$$

- SUSY-vacは、正則な関数 W のみで決まる。
運動項 $\partial\partial^\dagger K$ 発散がある点をのぞく
- W は摂動効果の補正を受けない
- W を対称性から決定でき、低エネルギーの自由度もわかる
- minimal SUSY (N=1)な場合、 K はコントロールできない

超対称理論と双対性

- より高い対称性を持つ理論では、閉じ込めはおこらない
- にもかかわらず、高い対称性を持つ理論は閉じ込めの理解にきわめて有用
- electric/magnetic dualityがエレガントに実現できる
- 摂動を加えることでminimalな超対称性に落とすことができる

超対称理論と双対性

- トーフーフトのabelianizationの具現化：N=2
Seiberg Witten
- N=4理論GNOデュアリティーが実現されており、adjoint場のmass termを小さく加えて、minimalな超対称性のみを保つ真空を作れる

超対称理論と双対性

Dirac: abelian

$$U(1) \quad e \cdot g = 2\pi n$$

$$U(1)^N \quad \sum_i (e_i^{(1)} \cdot g_i^{(2)} - e^2 \cdot g^{(1)}) = 2\pi n$$

GNO: non-abelian

$$SU(N)/\mathbf{Z}_N \iff SU(N)$$

$$G \iff \tilde{G}$$

表現のweight vectorの条件

$$\alpha \cdot \beta = 2\pi n$$

SQCDと閉じ込め

- 先に定義したSQCDでいくつか教訓をみたい
- 具体的にするために $N_f = N_c + 2$ を考える
- electricからは全く様相できないIR freeの相になる

SQCDと閉じ込め

$$SU(N_f - N_c) = SU(2)$$

$$SU(N_f)_L \times SU(N_f)_R \times U(1)_B$$

- 低エネルギーでは、別の自由度がよい記述を与え、superpotentialがある

$$W = M_i^j \tilde{q}_{dual}^i q_{dual}^j$$

- 様々な状況証拠から少なくともSUSYが破れていない場合には、この双対性は正しいと思われる

SQCDと閉じ込め

- 元の理論と双対理論の関係

$$\tilde{Q}^i Q_j \iff M_j^i$$

$$\epsilon_{\alpha_1 \dots \alpha_{N_c}} Q^{\alpha_1} \dots Q^{\alpha_{N_c}} \iff \epsilon_{\beta_1 \dots \beta_{N_f - N_c}} q^{\beta_1} \dots q^{\beta_{N_f - N_c}}$$

- このデュアルな理論のbeta関数はポジティブ！
閉じ込めがおこらずに、IRフリー
- フレーバーの幾つかに質量を摂動として入れてみよう

Massive SQCD

$$W_{\text{ele}} = m \tilde{Q}^{N_f} Q_{N_f} \iff W_{\text{mag}} = M_i^j \tilde{q}_{\text{dual}}^i q_{\text{dual}}^j + m M_{N_f}^{N_f}$$

- SUSY vacはゼロエネルギーなので、質量mの場合は積分できる

$$\langle \tilde{q}^{N_f} q_{N_f} \rangle = -m \delta_{N_f}^{N_f}$$

- magnetic objectの凝縮!

Massive SQCD

$$SU(N_f - N_c) \rightarrow 1$$

- $N_f = N_c + 1$ のデュアルマيسナー効果の一つの
方

$$\begin{aligned} q_i &= (q_1, \dots, q_{N_c+1}, q_{N_f}) \\ &= (B^a, q^{N_f}) \end{aligned}$$

- $N_f = N_c + 1$ の立場で、 q^{N_f} はモノポール、dual quarkバリオンである

$N_f = N_c + 1$ SQCD

- ひとつ場を減らした後のsuperpotentialは

$$W_{mag} = M_a^b \tilde{B}^a B^b$$

- これにinstanton補正が付け加わり

$$W_{mag} = M_a^b \tilde{B}^a B^b - \det M$$

- e.o.mより 2種類の真空の存在がわかる

$$M \neq 0, \quad SU(N_f)_L \times SU(N_f)_R \rightarrow SU(N_f)_v$$

$$M = 0, \quad \text{no breaking}$$

超対称性とカイラル対称性の破れ

- コンファインメントが起こるがカイラル対称性が破れない真空がある
- 閉じ込めとカイラル対称性の破れは一般に別の概念である
- QCDで2つが同じスケールで起きるとすれば、何らかの特殊事情による
- それは何か？

超対称性とカイラル対称性の破れ

- 超対称性を保つ真空では、クォークペアの凝縮は起きない

$$M_i^j \equiv \tilde{Q}_i Q^j$$

$$M_i^j = M_i^j + \theta \psi_{M_i^j} + \theta^2 F_{M_i^j}$$

$$F_{M_i^j} \sim \tilde{q}_i q^j$$

- スクォークの凝縮によってカイラル対称性の破れが引き起こされる

QCDのカイラル対称性の破れ

- フレーバーチャージを持ったnon-abelian monopoleの凝縮か？
- クォークペアの凝縮か？

クォークペアの凝縮か？

- non-SUSYである事が重要で、クォークの凝縮と関係しているのでは？
- 超対称性の破れのスケールが理論のスケールと同程度だとコントロールできない（適応限界）
- 別なアイディアが必要（ゲージ／グラビティーデュアル）

Non-Abelian Monopoleか？

- デュアルマイスナー効果を引き起こす
magnetic objectがフレーバー対称性の量子数を持っていたら？
- カイラル対称性と閉じ込めが同じメカニズムで起こる
- Non-Abelian Monopoleによるフレーバー対称性の破れはしばしば起こる

$$SU(N_f)_v \rightarrow SU(r)$$

SUSY場の理論の適応限界

- 超対称性を保つ真空はゼロエネルギーであり、低エネルギーで現れる自由度については理解した
- ウィルソニアン有効理論の最低次を知ったのみ。高次の微分項がスペクトルを知るには必要

今後の方向性

- ゲージグラビティー／デュアルからのフィードバック
- SUSY理論をつかった、ノンアーベリアンモノポールとカイラル対称性の破れの関係