

弦理論からみた クォークの閉じ込め と カイラル対称性

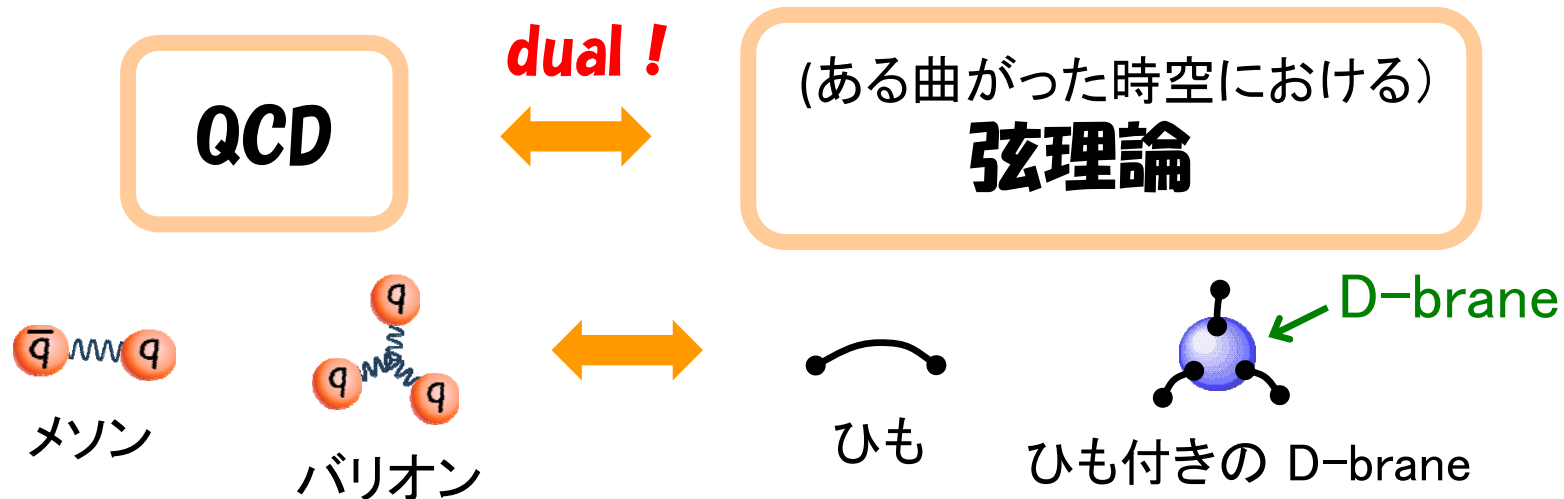
杉本 茂樹 (IPMU)

シンポジウム：「クォークの閉じ込めとカイラル対称性：
QCDの難問と多彩なアプローチの検討」

① Introduction

主張：

弦理論を用いることによって、クォークを用いない新しいハドロンの記述法が得られる！



- QCD ではだめというわけではなく、両者が(低エネルギーで)等価であると主張

★ 今日のテーマは
クォークの閉じ込め と カイラル対称性

結論：

弦理論の記述では、
これらの現象は幾何学的に理解される。
特に難しい計算をしなくても、絵を見れば分かる。

QCD

dual !
↔

(ある曲がった時空における)
弦理論

弱結合で良い記述

強結合、Large N_c で良い記述

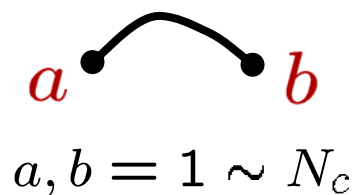
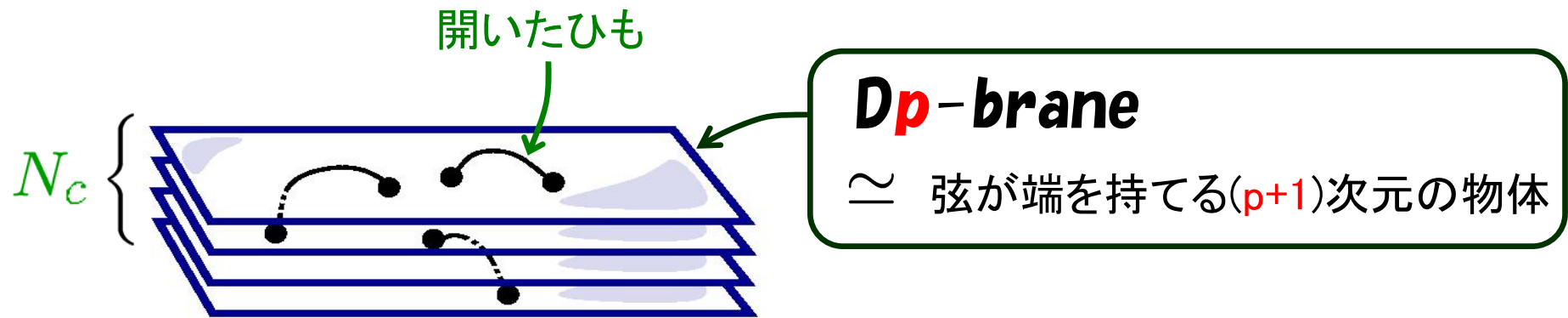
目次

- ✓ ① Introduction
- ② 弦理論による QCD の記述
- ③ クォークの閉じ込め
- ④ カイラル対称性
- (⑤ $G=O(N_c), USp(N_c)$ の場合)
- ⑥ まとめと考察

② 弦理論による QCD の記述

★ D-brane とは？

10次元時空に埋め込まれた $(p+1)$ 次元の物体を考える。



スピン1 で質量 0 の粒子 (ゲージ場) ができる。

$$(A_\mu)^a_b : U(N_c) \text{ ゲージ場}$$

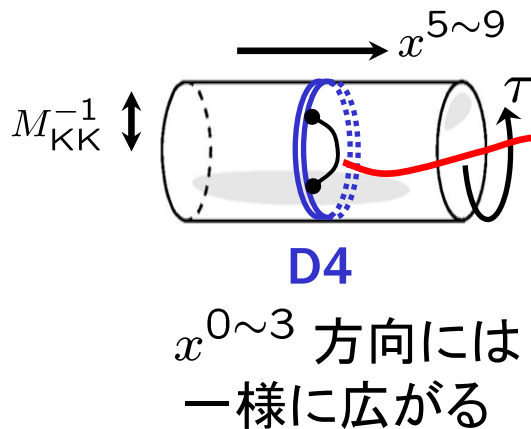


$(p+1)$ 次元 $U(N_c)$ ゲージ理論

が brane の上に実現される！

★ Yang-Mills 理論・QCD の構成

- D4-brane $\times N_c$ on S^1 with $\psi(x^\mu, \tau + 2\pi M_{\text{KK}}^{-1}) = -\psi(x^\mu, \tau)$ (fermion) [Witten 1998]

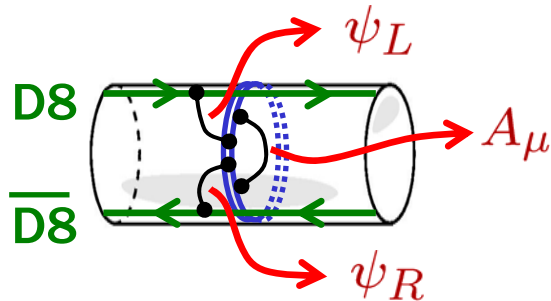


ψ_τ
 $A_\mu, A_\tau, \phi \times 5, \psi \times 4$
 質量を獲得 $\sim M_{\text{KK}}$

超対称性は完全に破れる

4 dim pure Yang-Mills (at low energy)

- 上の D4-brane 系 + D8- $\overline{\text{D8}}$ pair $\times N_f$ [Sakai-S.S. 2004]



	D4	D8	$\overline{\text{D8}}$
	$U(N_c)$	$U(N_f)_L$	$U(N_f)_R$
A_μ	adjoint	1	1
ψ_L	N_c	N_f	1
ψ_R	N_c	1	N_f

カイラル対称性

← gluon

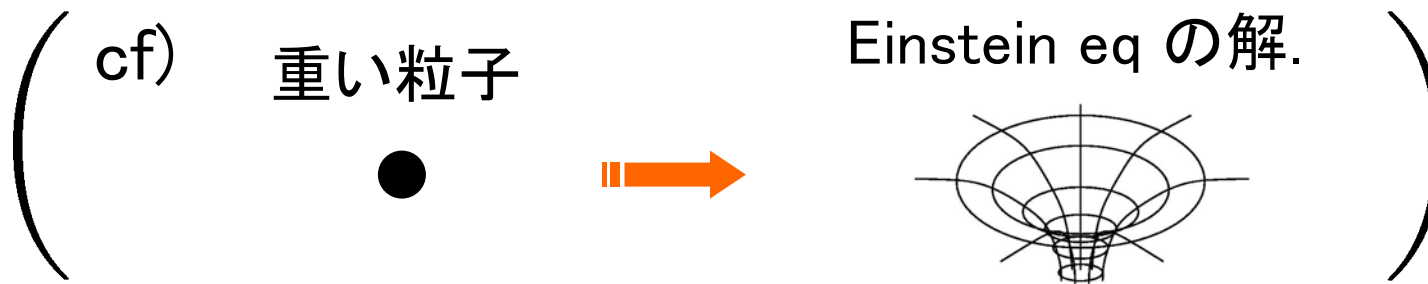
} ← quark

QCD with N_f massless quarks

(at low energy)⁶

★ Gauge / String duality

[Maldacena 1997]



Conjecture

ゲージ理論 **等価!** 曲がった時空における弦理論

large N_c , large λ **等価!** 古典重力理論が良い記述

($\lambda \equiv g_{YM}^2 N_c$)

★ Yang-Mills 理論の超重力理論による記述

[Witten 1998]

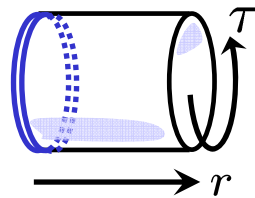
D4-brane on S^1

(with $\psi(x^\mu, \tau + 2\pi) = -\psi(x^\mu, \tau)$)

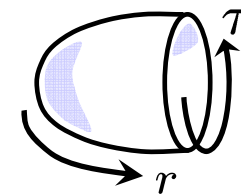
この D4 に対応する曲がった時空
における弦理論

$$\sim \mathbf{R}^{1,3} \times \mathbf{R}^2 \times S^4$$

D4



($x^{5\sim 9}$ の動径方向)



Yang-Mills 理論

(at low energy)

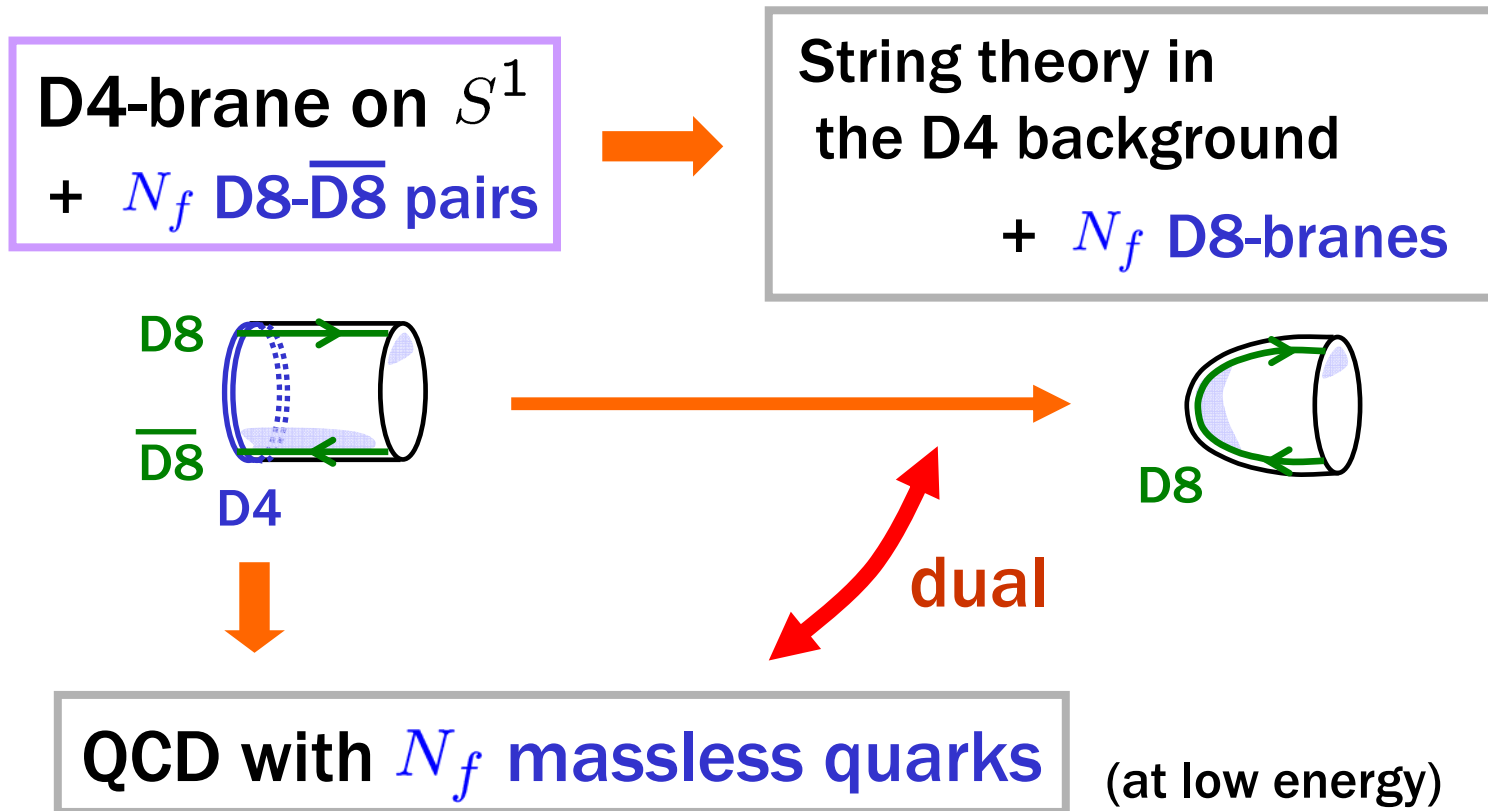
dual

★ Adding quarks [Sakai-S.S. 2004]

- ここで $N_c \gg N_f$ を仮定し、“probe 近似” を用いる。

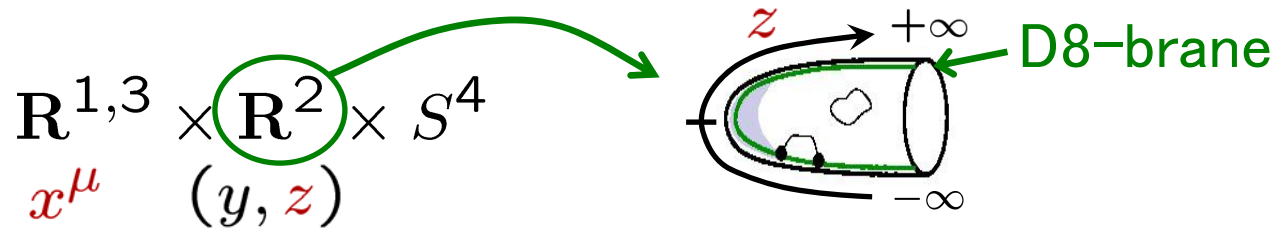
[Karch-Katz 2002]

- D4-brane をさっき用いた解に置き換える。
- Quark を加えるために導入した D8-brane は brane のまま扱う。



★ Hadrons in the model

◆ 今の背景のトポロジーは



D8-branes は $(x^\mu, z) \times S^4$ の方向にひろがっている

◆ この系に含まれる粒子

● 閉弦



グルーボール



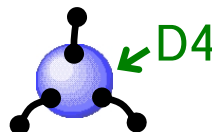
● D8 にくっついた 開弦



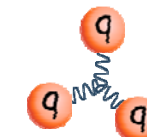
メソン



● S^4 に巻きついた D4



バリオン

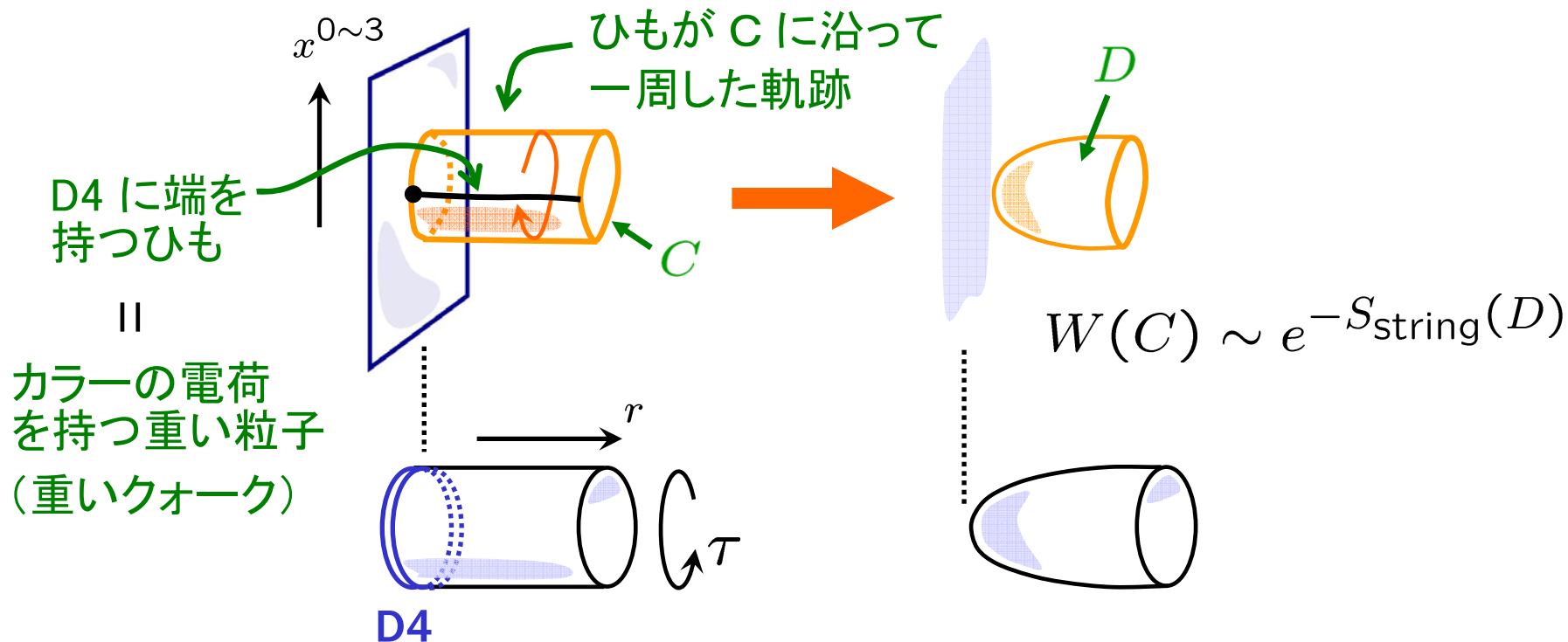


これを用いて、ハドロンに関するさまざまな量(スペクトル、質量、相互作用など)が計算できる！(涙を飲んで割愛)

3 クォークの閉じ込め

★ Wilson (Polyakov) loop

[Rey-Yee, Maldacena 1998]



さっきやった Yang-Mills 理論で、

- $S_{\text{string}}(D) \propto \text{Area}$ → **confinement**
- **Finite temperature** → **conf./deconf. transition** [Witten 1998]

(see next slide)

★ 有限温度での相転移

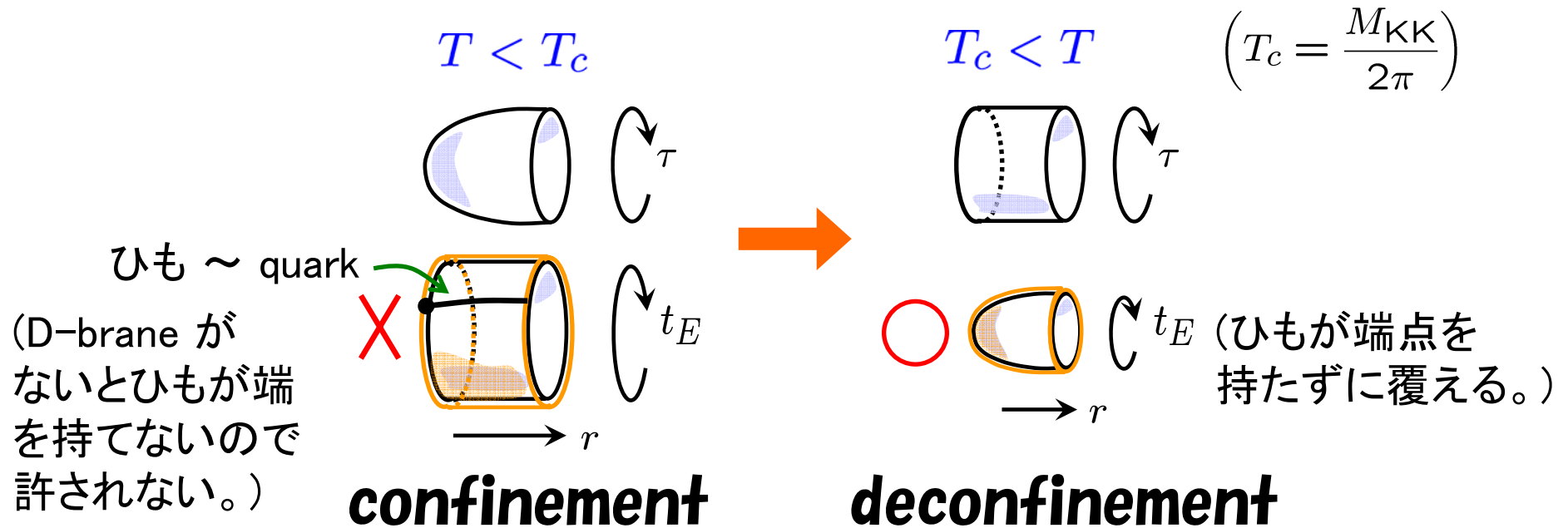
[Witten 1998]

- 時間方向をユークリッド化 & コンパクト化することで温度を導入

$$t_E \sim t_E + \beta \quad (\beta = 1/T) \quad \text{温度}$$

↑
Euclidean time

- 時間方向の S^1 の半径が τ 方向の S^1 と同じになるところで相転移が起こり、 τ と t_E の役割が入れ替わる。



4 カイラル対称性

[Sakai-S.S. 2004]

★ カイラル対称性の破れ

D4-brane を対応する超重力理論の解に置き換えると



D8 と $\overline{D8}$ は、つながって一つになる。

→ これはカイラル対称性の破れを表している！

$$U(N_f)_L \times U(N_f)_R \rightarrow U(N_f)_V$$



D8



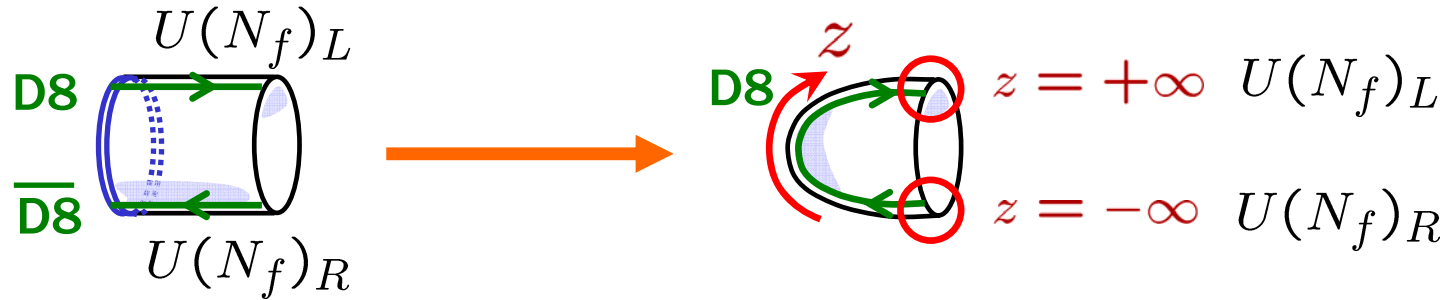
$\overline{D8}$



つながった D8

- Brane がつながることが、対称性の破れを意味する

★ 南部・ゴールドストーンモード (パイ中間子)



- $z = +\infty, -\infty$ でのゲージ変換が $U(N_f)_L, U(N_f)_R$

- ここで、
$$U(x^\mu) \equiv P \exp \left(- \int_{-\infty}^{\infty} dz A_z(x^\mu, z) \right)$$

↑
D8-brane 上のゲージ場

と置くと $U(N_f)_L \times U(N_f)_R \ni (g_L, g_R)$ のもとで

$$U \rightarrow g_L U g_R^{-1} \quad \text{のように変換。}$$

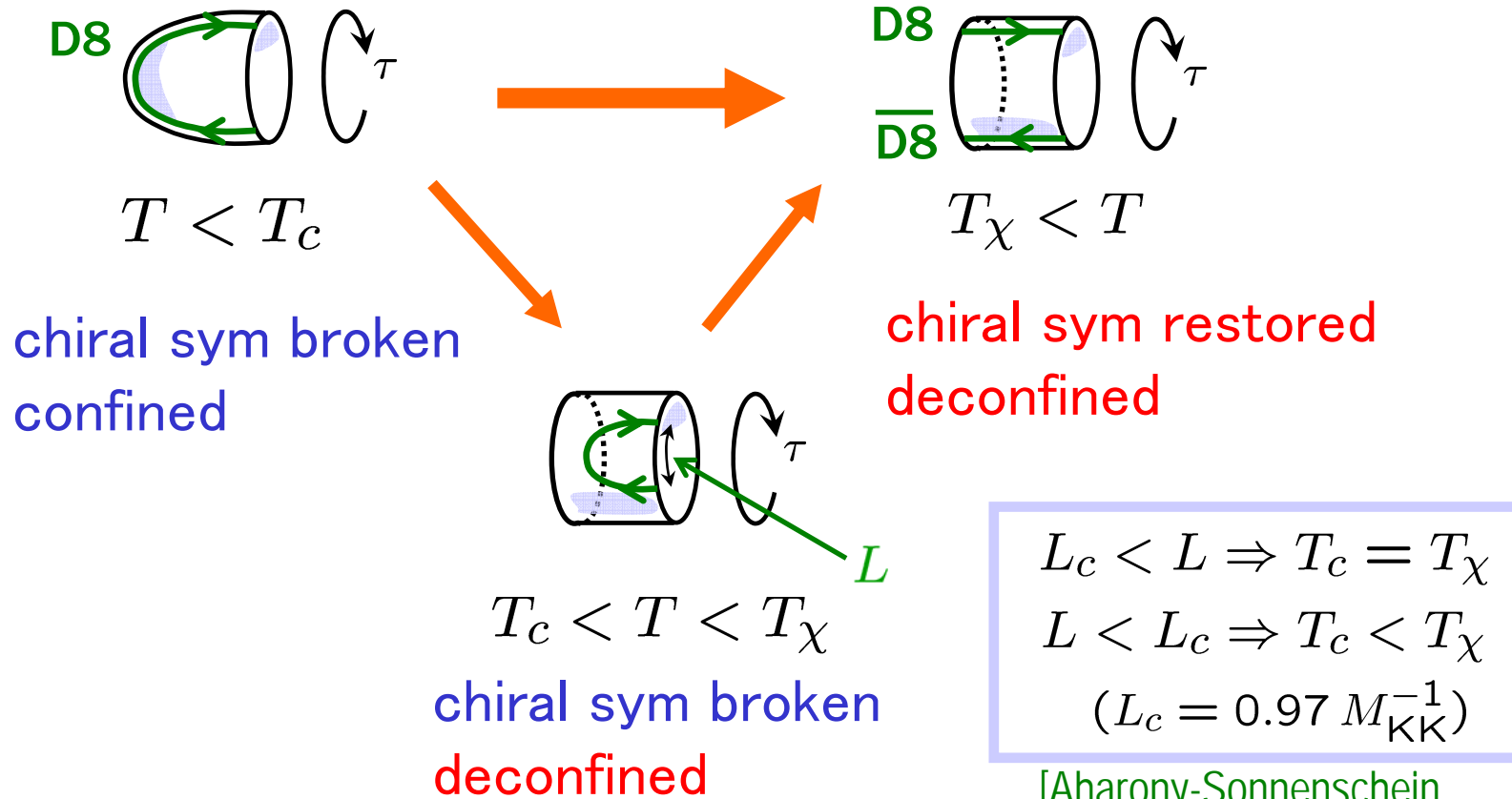
**カイラル有効理論におけるパイオン場と解釈される！
カイラルな有効作用を書き下すこともできる。**

★ カイラル対称性の回復

◆ 温度を上げていくとどうなるか？

Low temperature

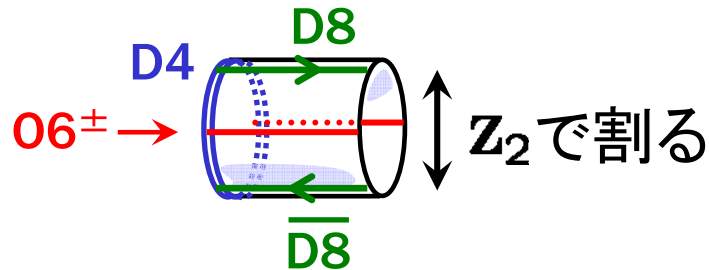
high temperature



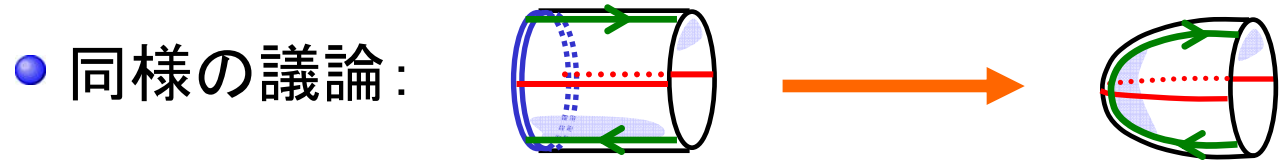
[Aharony-Sonnenschein
-Yankielowicz 2006]

4 $G=0(N_c), USp(N_c)$ の場合 [Imoto-Sakai-S.S. 2009]

- ◆ さっきのセットアップに Orientifold なるものを加えると、ゲージ群が $O(N_c), USp(N_c)$ の QCD が得られる。



$O6^+$	→	$O(N_c)$ QCD
$O6^-$	→	$USp(N_c)$ QCD

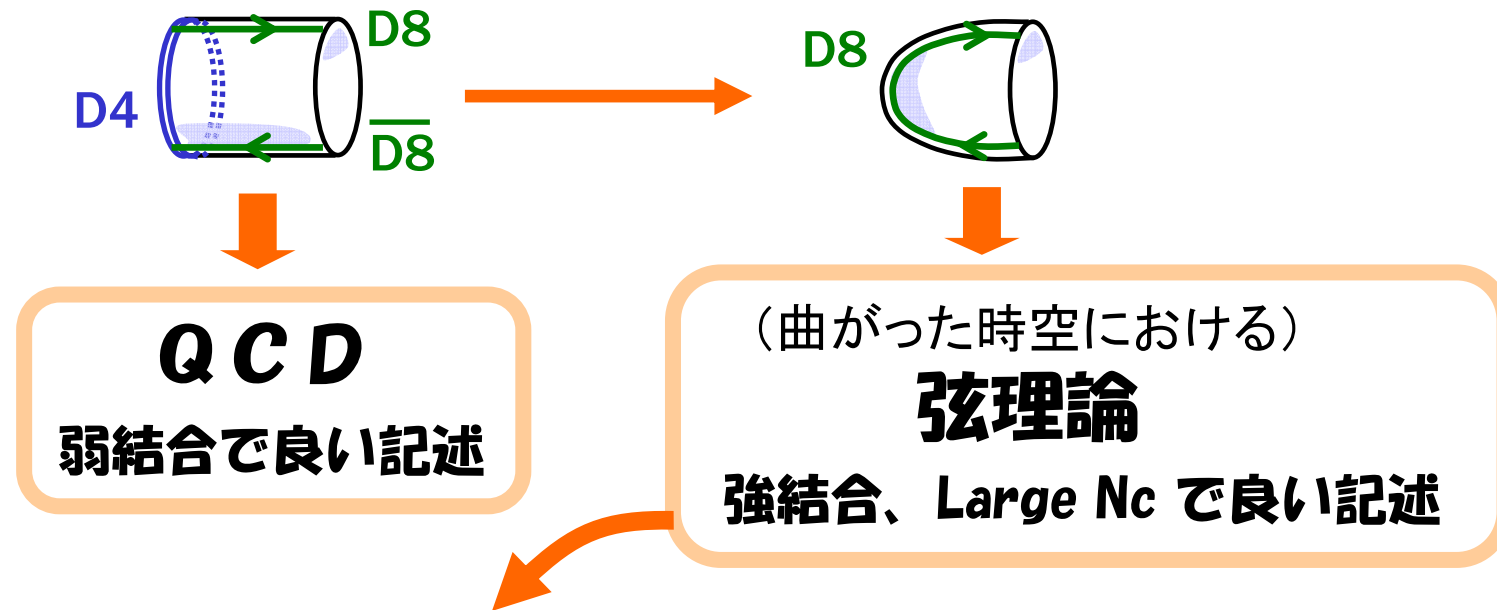


によって、次のフレーバー対称性の破れが予想される。

$U(N_f)$	→	$\begin{cases} O(N_f) & \text{for } O(N_c) \text{ QCD} \\ USp(N_f) & \text{for } USp(N_c) \text{ QCD} \end{cases}$
\updownarrow D8		\updownarrow D8 with $O6^\pm$

場の理論から期待されるものをばっちり再現!

5 まとめと考察



- 弦理論の記述では、閉じ込めやカイラル対称性の自発的破れは幾何学的に理解できる。
- カラーの電荷をもつ自由度はないので、その意味でのカラーの閉じ込めは自明とも言える。
- 逆に、弱結合の極限で自由なクォーク・グルーオンの系になることを示す方が難問。

これでQCDの難問が解決されたと言えるか？

課題：

- Gauge / String duality の証明
- 高エネルギーでも通用する弦理論の解析
→ 摂動論的 QCD を再現するか？
- Large Nc などの近似の改善

などなど

曲がった時空における弦理論の量子化など、
地道で基礎的な研究が重要。