

Is ``Quark-Gluon Plasma = Black Hole'' in string theory?

熱場の量子論とその応用

Takeshi Morita

PD, KEK 

(→ PD, Kentucky university (from October, 2013))

reference arXiv:1107.4048 (JHEP09 (2011) 073)

with G. Mandal (Tata Institute in India)

QCD関係の研究者ならおそらく

次のような主張を一度は聞いていると思う。

「“QCDにおけるQuark-Gluon Plasma = Black Hole”」

という関係がAdS/CFTで予言されている。

QCD関係の研究者ならおそらく
次のような主張を一度は聞いていると思う。

「“QCDにおけるQuark-Gluon Plasma = Black Hole”」
という関係がAdS/CFTで予言されている。



String theoryをきちんと調べると、
この関係が(超対称性の無い)QCD/YMでは
かなり疑わしいことがわかった。

◆ Introduction

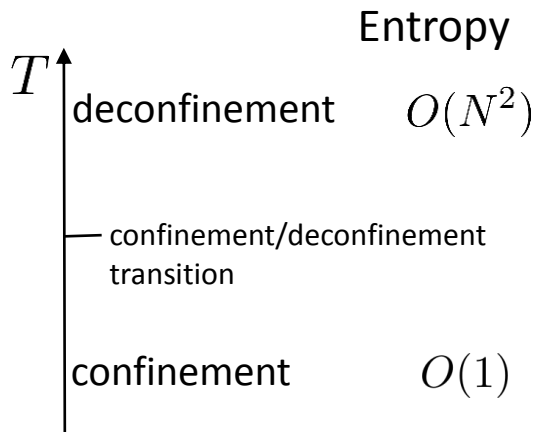
今日は簡単のためYMの有限温度を考える。

QCD=YM+quark

$$\frac{1}{4g^2} \int_0^\beta dt \int d^3x \text{Tr} F_{\mu\nu}^2$$

今日の話:

WittenのHolographic QCDを用いて、
この(→)相転移を重力から再現する。

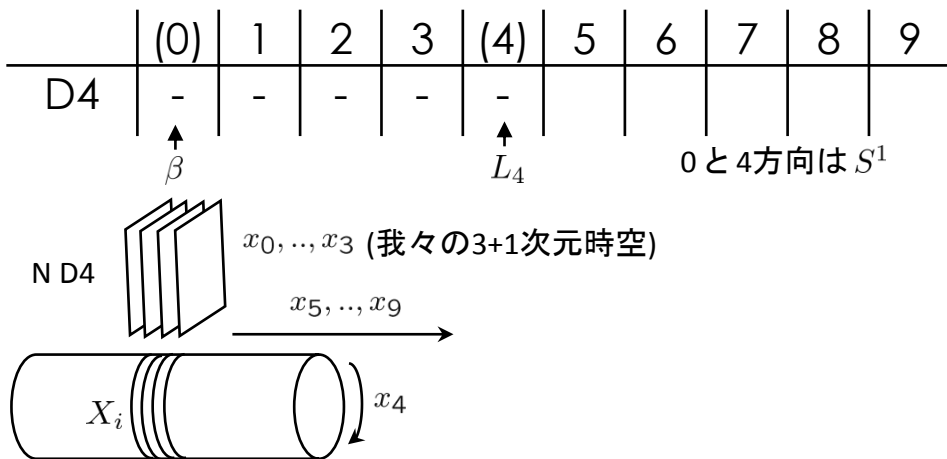


WittenのHolographic QCDの紹介

◆ WittenのHolographic QCD [Witten 1998]

◆ Set up: IIA string theory in $R^8 \times S_0^1 \times S_4^1$ (Euclidean, finite temperature)

N枚の D4 brane という4+1次元的な膜を次のように配置する。



◆ N D4 braneの有効理論 = 5-dim U(N) SYM. (今日はLarge-Nを考える。)

$$\left\{ \begin{array}{l} A_\mu \quad (\mu = 0, \dots, 3) \\ A_4 \end{array} \right\} \quad \text{5-dimensional gauge field}$$

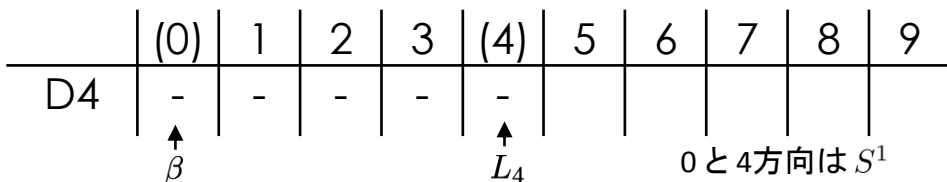
$$\left\{ \begin{array}{l} X_i \quad (i = 5, \dots, 9) \end{array} \right\} \quad \text{5 adjoint scalars}$$

$$\psi \quad \text{Fermions}$$

◆ WittenのHolographic QCD [Witten 1998]

◆ Set up: IIA string theory in $R^8 \times S_0^1 \times S_4^1$ (Euclidean, finite temperature)

N枚の D4 brane という4+1次元的な膜を次のように配置する。



x_4 : Fermion に半周期境界条件を課す。

$$\psi(x^4 + L_4) = -\psi(x^4)$$

→ mass $1/L_4$ → 超対称性を壊す。

◆ N D4 brane の有効理論 = 5-dim U(N) SYM. (今日は Large-N を考える。)

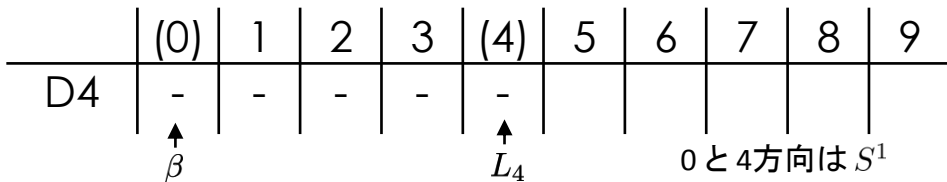
$$\left\{ \begin{array}{l} A_\mu \quad (\mu = 0, \dots, 3) \\ A_4 \end{array} \right\} \quad \text{5-dimensional gauge field}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X_i \quad (i = 5, \dots, 9) \\ \psi \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} \text{5 adjoint scalars} \\ \text{Fermions} \end{array}$$

◆ WittenのHolographic QCD [Witten 1998]

◆ Set up: IIA string theory in $R^8 \times S_0^1 \times S_4^1$ (Euclidean, finite temperature)

N枚の D4 brane という4+1次元的な膜を次のように配置する。



x_4 : Fermion に半周期境界条件を課す。

$$\psi(x^4 + L_4) = -\psi(x^4)$$

→ mass $1/L_4$ → 超対称性を壊す。

5d SYM on $S_\beta^1 \times S_{L_4}^1$

境界条件の効果で場が質量を持つ。

$$\left\{ \begin{array}{ll} A_\mu & (\mu = 0, \dots, 3) \rightarrow \text{massless (zero mode)} \\ A_4 & \rightarrow \lambda_4/L_4 \\ X_i & (i = 5, \dots, 9) \rightarrow \lambda_4/L_4 \\ \psi & \rightarrow 1/L_4 \end{array} \right\} \text{one-loop}$$

$$\lambda_5 = \lambda_4 L_4 \quad \text{'t Hooft coupling of 5dSYM}$$

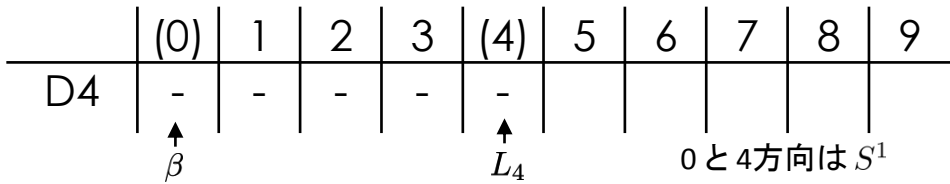
今日の話を重要な定数

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta (= 1/T) \\ L_4 \\ \lambda_4 \end{array} \right.$$

◆ WittenのHolographic QCD [Witten 1998]

◆ Set up: IIA string theory in $R^8 \times S_0^1 \times S_4^1$ (Euclidean, finite temperature)

N枚の D4 brane という4+1次元的な膜を次のように配置する。



x_4 : Fermionに半周期境界条件を課す。
 $\psi(x^4 + L_4) = -\psi(x^4)$
 → mass $1/L_4$ → 超対称性を壊す。

5d SYM on $S_\beta^1 \times S_{L_4}^1$

境界条件の効果で場が質量を持つ。

$$\left\{ \begin{array}{ll} A_\mu & (\mu = 0, \dots, 3) \rightarrow \text{massless (zero mode)} \\ A_4 & \rightarrow \lambda_4/L_4 \\ X_i & (i = 5, \dots, 9) \rightarrow \lambda_4/L_4 \\ \psi & \rightarrow 1/L_4 \end{array} \right\} \text{one-loop}$$



4d pure YM

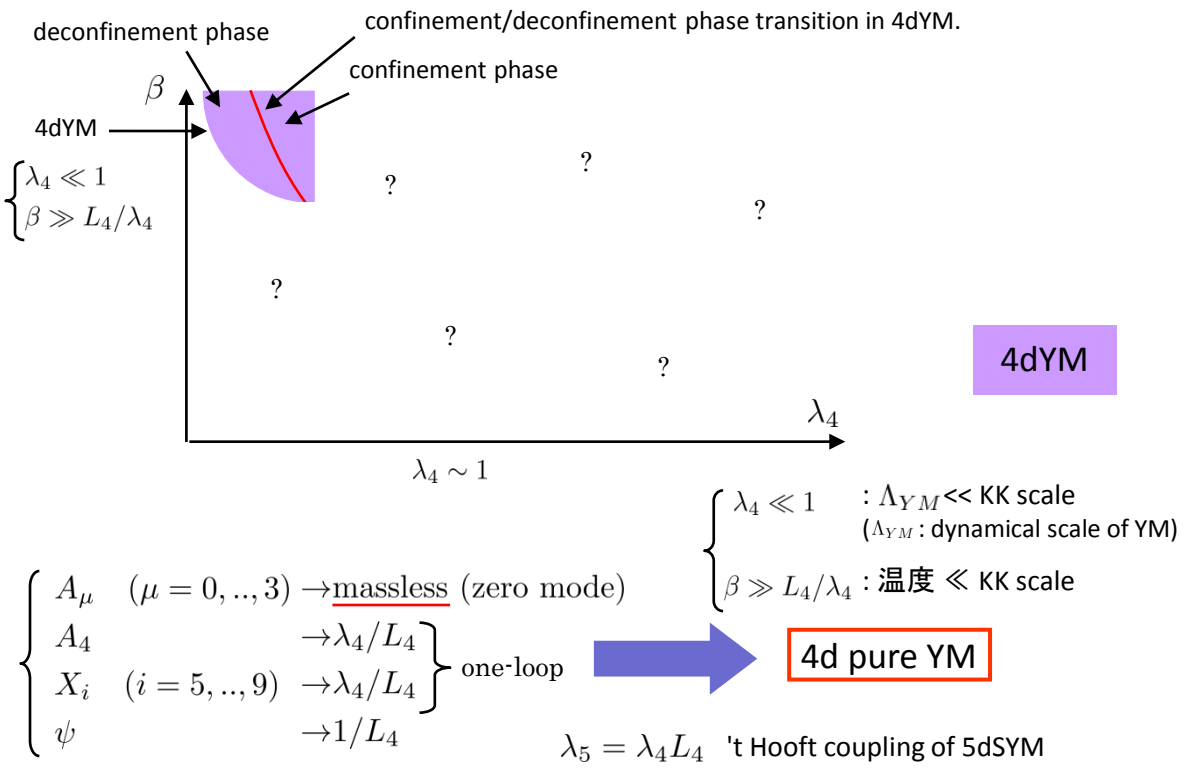
$\lambda_5 = \lambda_4 L_4$ 't Hooft coupling of 5dSYM

余分なmassive場を無視し
4次元YMをえるための条件

$$\left\{ \begin{array}{ll} \lambda_4 \ll 1 & : \Lambda_{YM} \ll \text{KK scale} \\ & (\Lambda_{YM} : \text{dynamical scale of YM}) \\ \beta \gg L_4/\lambda_4 & : \text{温度} \ll \text{KK scale} \end{array} \right.$$

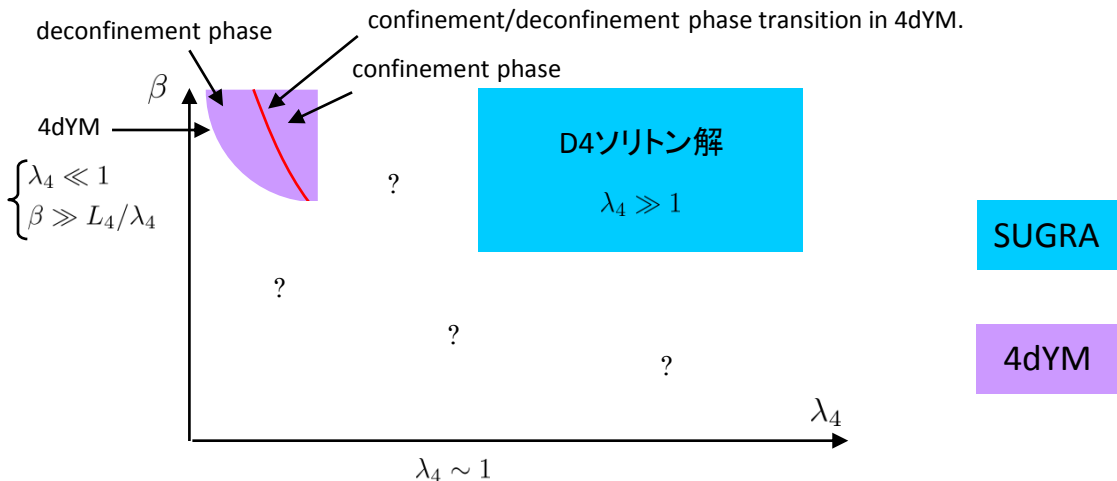
◆ WittenのHolographic QCD [Witten 1998]

◆ 5次元SYMの相構造 (以下の話では非常に有用)



◆ WittenのHolographic QCD [Witten 1998]

◆ 5次元SYMの相構造 (以下の話では非常に有用)

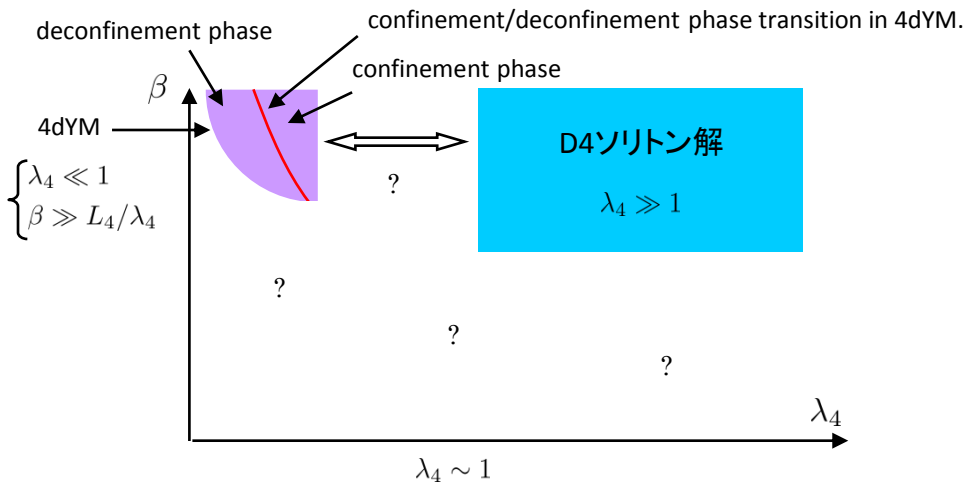


一方、強結合領域 ($\lambda_4 \gg 1$) では **IIA SUGRA (古典超重力)** の解析が有効。特に低温では **D4ソリトン解 (ブラックホールでない解)** という解が安定に存在する。

注) **超重力** と **Large-N SYM** の対応は多くの証拠が見つかりますが **間違いない**。
最近実際に 5dSYM から D4ソリトン解の熱力学が再現された。[Wiseman, T.M.-Shiba, 2013]
しかし、超対称性の破れの効果の大きい弱結合領域 ($\lambda_4 \ll 1$) では SUGRA の記述が悪くなり、超重力に **補正項** を加える必要がある。この補正項の計算は非常に難しい。

◆ WittenのHolographic QCD [Witten 1998]

◆ WittenのHolographyの基本的なアイデア



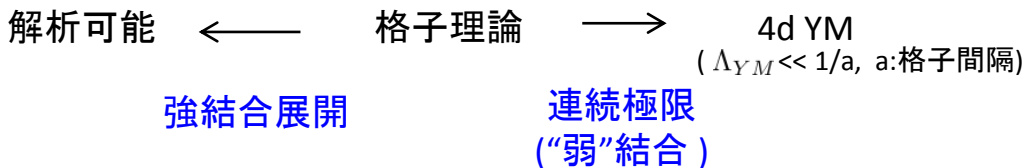
4d YM の情報を強結合展開のように
IIA SUGRA からえられるのでは無いか?

◆ WittenのHolographic QCD [Witten 1998]

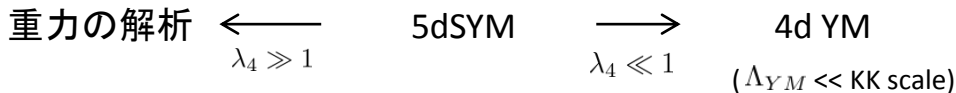
◆ WittenのHolographyの基本的なアイデア

◆ 格子ゲージ理論と似ている。

格子ゲージ理論:



Wittenのholographic QCD :

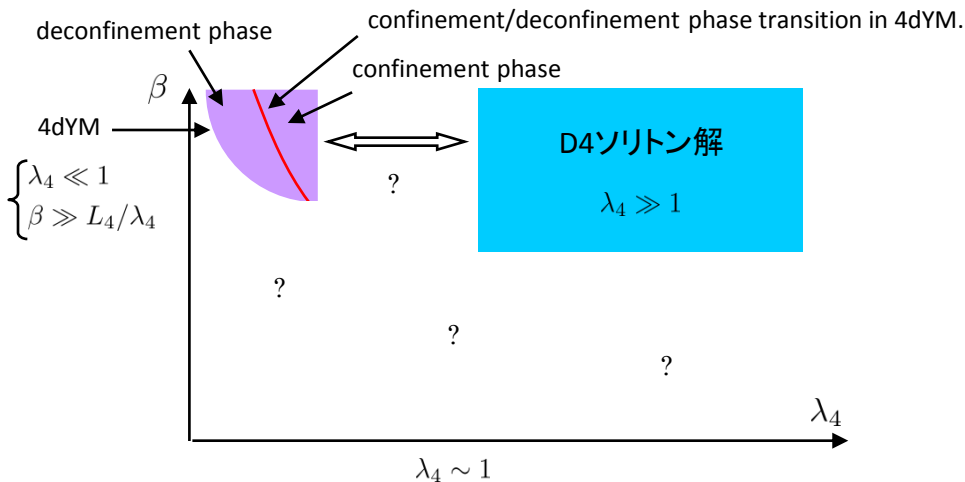


一般に強結合展開は定性的にそれほど悪くない。ただし、、、

1. 強結合と弱結合領域の間に相転移が起きない。
2. 連続理論で非物理的なDoublerのようなartifactに気をつける。

◆ WittenのHolographic QCD [Witten 1998]

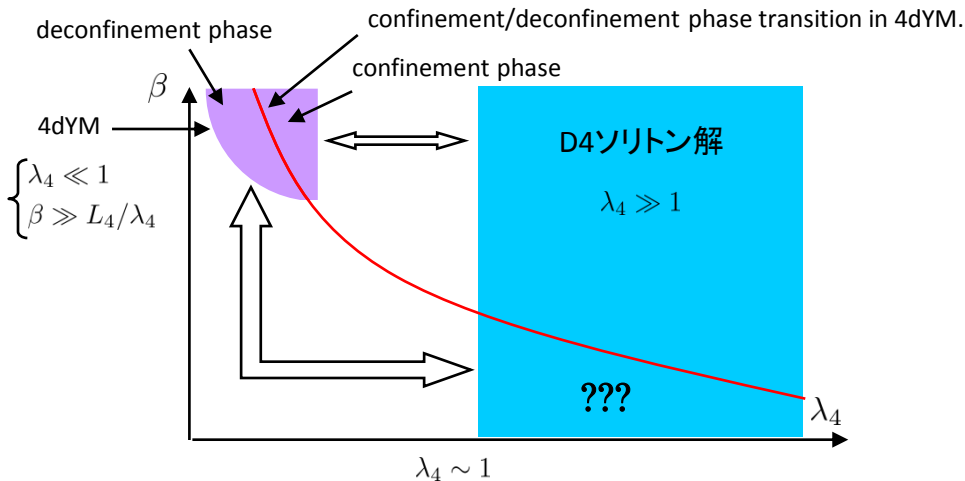
◆ WittenのHolographyの基本的なアイデア



実際にD4ソリトン解を用いてGlueballのスペクトラムなどの
YMの閉じ込め相のおもしろい結果が得られている。

◆ WittenのHolographic QCD [Witten 1998]

◆ WittenのHolographyの基本的なアイデア



WittenのHolographic QCDを高温領域に拡張し、
QGPや**閉じ込め・非閉じ込め相転移**の性質を
重力で調べるのは自然。

WittenのHolographic QCDの有限温度への拡張

◆ WittenのHolographic QCDの有限温度への拡張

有限温度YMを得るためにはFermionのt方向の周期により2つの方法がある。

	(0)	1	2	3	(4)	5	6	7	8	9
D4	-	-	-	-	-					
	↑				↑					
	<u>AP or P</u>				AP					
	$\psi(t + \beta) = \mp \psi(t)$				$\psi(x^4 + L_4) = -\psi(x^4)$					

通常有限温度場の理論なら半周期境界条件(AP)をとるのだが、
今のFermionは4次元極限でdecoupleする非物理的な場なので、
Fermionの境界条件はどちらでも良いはず。

→ 周期境界条件(P)と半周期境界条件(AP)の両方を調べてみる。
(我々の研究以前は半周期境界条件しか考えられていなかった。)

◆ (t方向)半周期境界条件での重力の解析

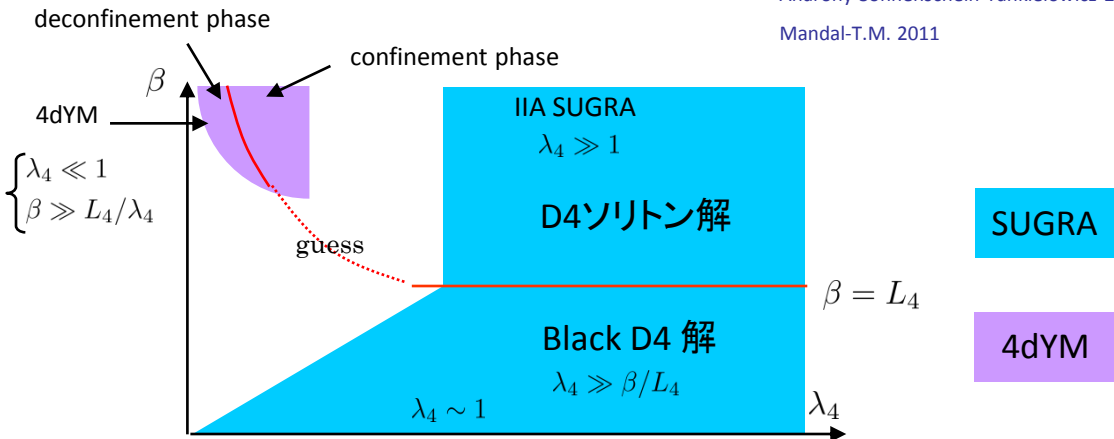
	(0)	1	2	3	(4)	5	6	7	8	9
D4	-	-	-	-	-					
	↑ AP				↑ AP					

◆ (t方向)半周期境界条件での重力の解析

◆ 5dSYMの相構造

Aharony-Sonnenschein-Yankielowicz 2006

Mandal-T.M. 2011



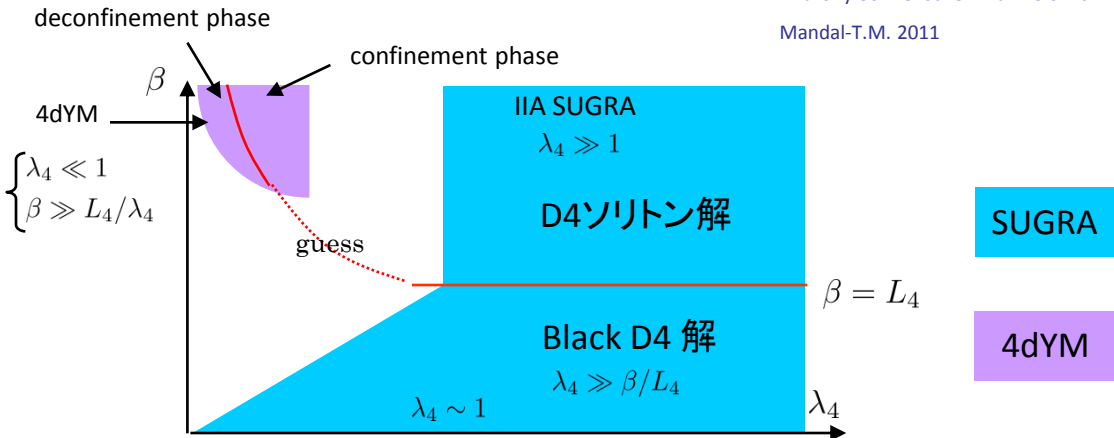
- 高温でBlack D4解と呼ばれるBlack holeの一種が安定に存在する。
- 多くの人がこの解が4次元YMの非閉じ込め相と対応すると信じた。

◆ (t方向)半周期境界条件での重力の解析

◆ 5dSYMの相構造

Aharony-Sonnenschein-Yankielowicz 2006

Mandal-T.M. 2011



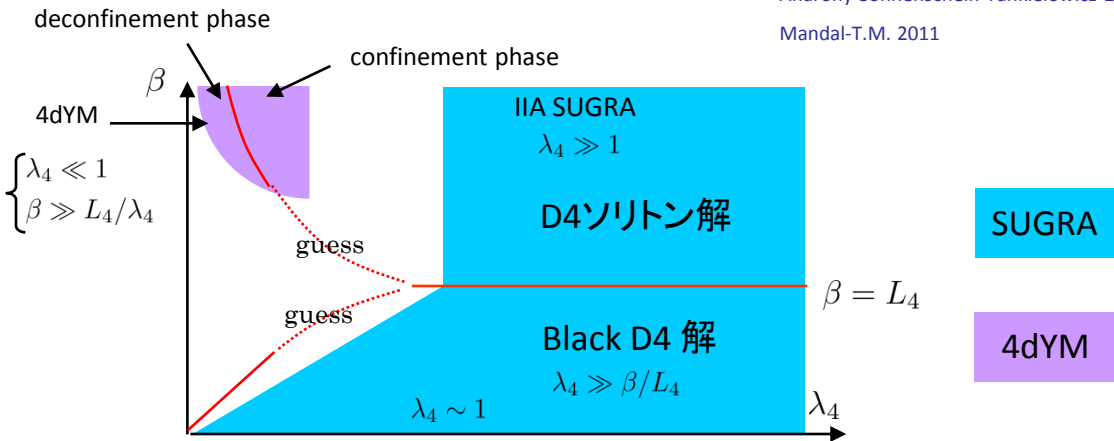
- 高温でBlack D4解と呼ばれるBlack holeの一種が安定に存在する。
 - 多くの人がこの解が4次元YMの非閉じ込め相と対応すると信じた。
- しかし誤解であった。

◆ (t方向)半周期境界条件での重力の解析

◆ 5dSYMの相構造

Aharony-Sonnenschein-Yankielowicz 2006

Mandal-T.M. 2011



オーダーパラメータを調べると少なくとも3つの異なる相が存在し、
Black D4解と4dYMの非閉じ込め相は異なる相に属し、
間で必ず相転移が起こることがわかった。→強結合展開が働かない。
(S_L^1 circleに巻き付いたWilson loopの値が異なる。)

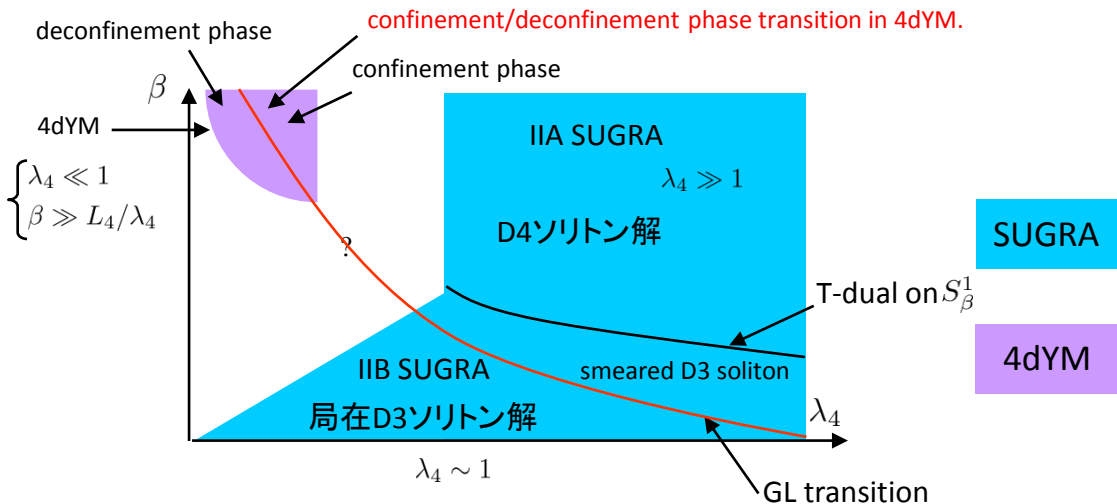
Black D4解は4次元YMの視点からは非物理的で
Holographyにおける**artifact**な解。

◆ (t方向)周期境界条件での重力の解析 Mandal-T.M. 2011

	(0)	1	2	3	(4)	5	6	7	8	9
D4	-	-	-	-	-					
	↑ P				↑ AP					

◆ (t方向)周期境界条件での重力の解析

Mandal-T.M. 2011



- 重力では高温で局在D3ソリトン解という解が安定。
- 局在D3ソリトン解と4dYMの非閉じ込め相は同じオーダーパラメータでおそらく(相転移が起こらず)連続的につながる。
- 局在D3ソリトン解はBlack holeでは無い。

Summary

◆ Summary

- WittenのHolographic QCDの解析は**非閉じ込め相**は**Black Hole**でなく、**局在D3ソリトン解**と対応することを予言。
- WittenのHolographic QCD以外にも、YM/QCDに対する様々な重力の模型が提唱されているが、これらは現象論的な模型で、本当にQCDを記述する保証が無い。
→ 超弦理論がBlack hole以外の時空を予言したことは深刻にとらえるべきでは？
- RHICにおける**universal viscosity ratio**の話も変更が必要かもしれない？
- **酒井杉本模型** = **Wittenの模型** + **quark**
やはり非閉じ込め相(QGP相)での解析はこれまで**black D4解**を用いて行われてきた。→ 修正が必要。
特に**カイラル対称性**が**磁場**や**有限密度**の効果でどのように影響を受けるのか多くの仕事がなされてきたが、これらの解析を局在D3ソリトン解でやりなおす必要がある。