



2008年8月1日

基研研究会「量子場理論と弦理論の発展」

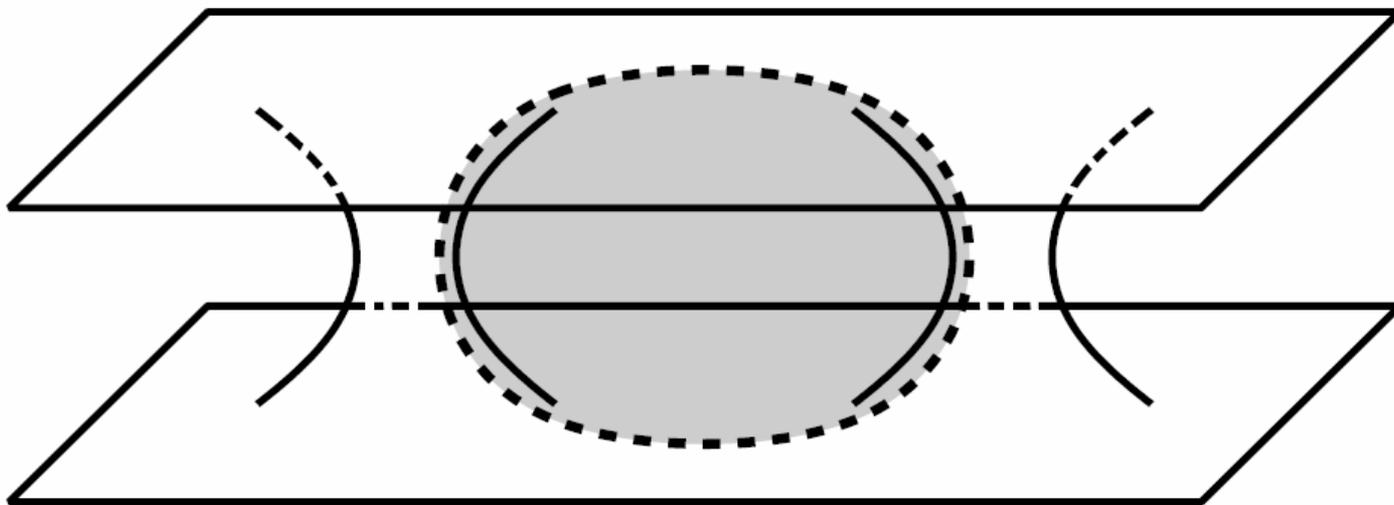
---

# ホログラフィックQCDにおける クォーク質量

---

橋本 幸士 (理研)

[arXiv/0803.4192\(hep-th\)](https://arxiv.org/abs/0803.4192), [JHEP07\(2008\)089](https://arxiv.org/abs/hep-th/0702089)  
w/ [T.Hirayama](#), [Feng-Li Lin](#) (台湾師範大)  
and [Ho-Ung Yee](#) (ICTP Trieste)



ホログラフィックQCDの代表的模型である酒井杉本模型でクォーク質量を導入することに成功した

## 結果

解析的な導出 :

Gell-Mann Oakes Renner 関係式  $m_\pi^2 \propto m_q$

Chiral lagrangian  $\text{tr}[m_q U]$ ,  $U \equiv \exp [i\pi(x)/f_\pi]$

Chiral condensate  $\langle \bar{q}q \rangle$

期待される発展 : ストレンジクォークの物理  
有限温度・密度系

問題

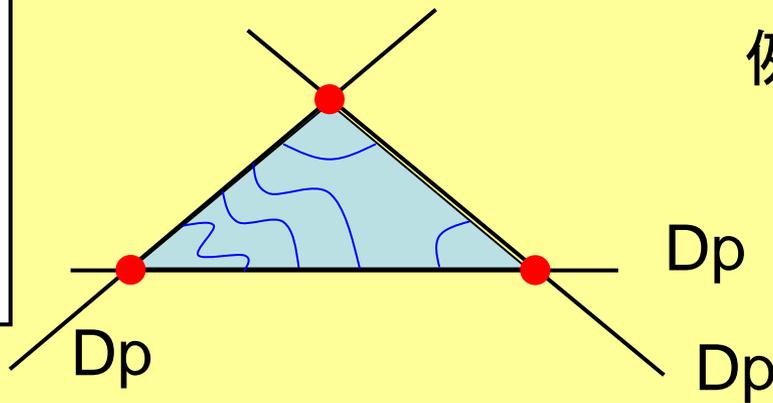
酒井杉本模型はAdS/CFTのQCDへの応用として成功を収めたが、クォークが無質量

原因

ブレーン配位において、 $q_L$  と  $q_R$  が、高次元内で別々の点に住んでいるため相互作用できない

我々の解決

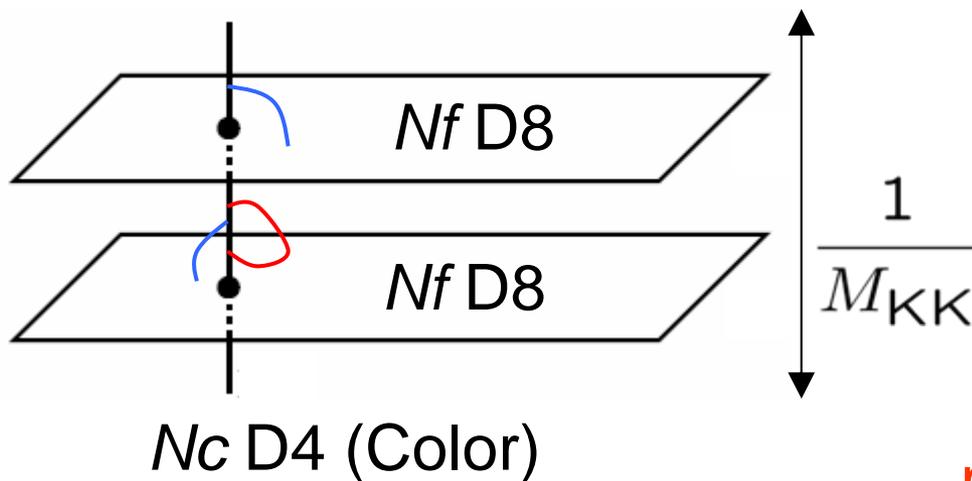
Worldsheet instanton



例) ストリング現象論における湯川相互作用

$$y \sim \exp[-S_{\text{Nambu-Goto}}]$$

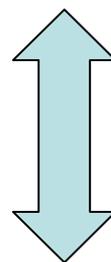
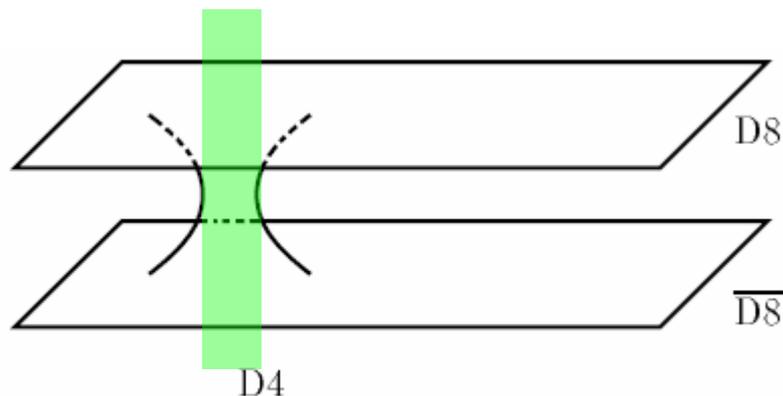
# 酒井杉本模型



String	QCD
D4-D4	Gluon
D4-D8	L-quark $q_L$
D4-D8	R-quark $q_R$

massless QCD

D4を重力解 で置き換え

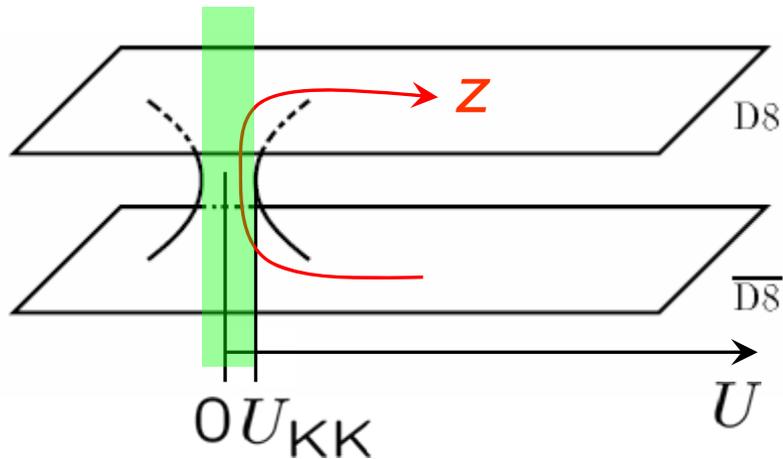


ゲージ重力対応  
(AdS/CFT)

D8上のゲージ場がメソン場を表す  
(ゲージ群はフレーバー対称性)

# 酒井杉本模型のメソンセクターの計算

D8ブレーン作用  $\frac{1}{2}T_{D8}(2\pi\alpha')^2 \int d^9x e^{-\phi} \sqrt{-\det g} \text{Tr} F_{MN} F^{MN}$



KK展開

$$A_\mu \rightarrow \text{ベクトルメソン}$$

$$A_z = \frac{1}{1+z^2} \pi(x)$$

$$U^3 \equiv U_{KK}^3 + U_{KK} z^2$$

Chiral lagrangian

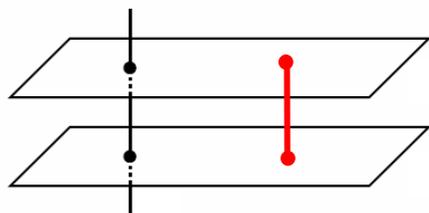
$$S = \int d^4x \left( \frac{f_\pi^2}{4} \text{tr} (U^{-1} \partial_\mu U)^2 + \frac{1}{32e^2} \text{tr} [U^{-1} \partial_\mu U, U^{-1} \partial_\nu U]^2 \right)$$

$$U \equiv \exp \left[ i \int_{-\infty}^{\infty} dz A_z \right] = \exp [i\pi(x)/f_\pi]$$

$$f_\pi^2 = \frac{1}{54\pi^4} (g_{YM}^2 N_c) M_{KK}^2 N_c$$

# クォーク質量のためには？

Higgs機構 → D8-反D8 弦のタキオン場の導入



[Casero, Kiritsis, Peredes (07)]

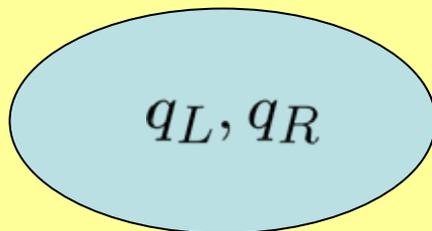
[Bergman, Seki, Sonnenschein (07)]

[Dhar, Nag (07,08)]

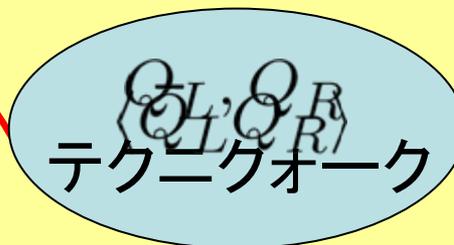
問題: タキオン作用が弦理論で正当化できない

我々の解 : テクニカラー → Worldsheet instanton

QCD セクタ



テクニセクタ



“Wボソン”

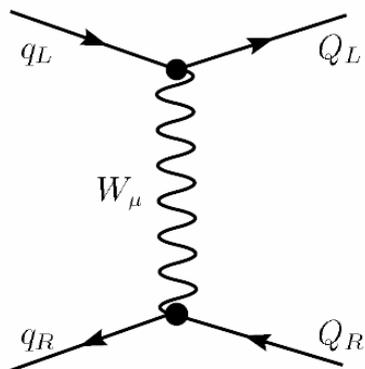


# テクニカラーによるクォーク質量

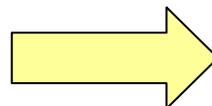
テクニカラーセクタ:  $SU(N')$

		$SU(N_c)$	$SU(N')$	$U(N_f)_L$	$U(N_f)_R$
QCD	$A_\mu$	adj.			
	$q_L$	□		□	
	$q_R$	□			□
テクニカラー	$A'_\mu$		adj.		
	$Q_L$		□	□	
	$Q_R$		□		□
メッセンジャー	$W_\mu$	□	□		

W-induced  
4-Fermi

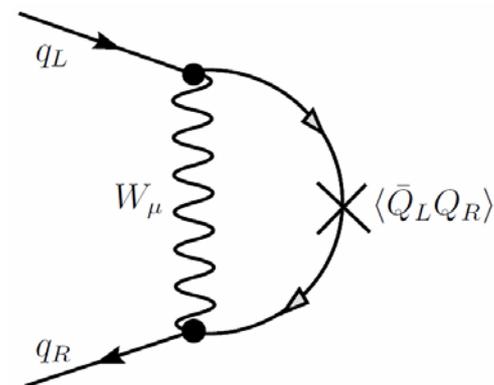


テクニクォーク

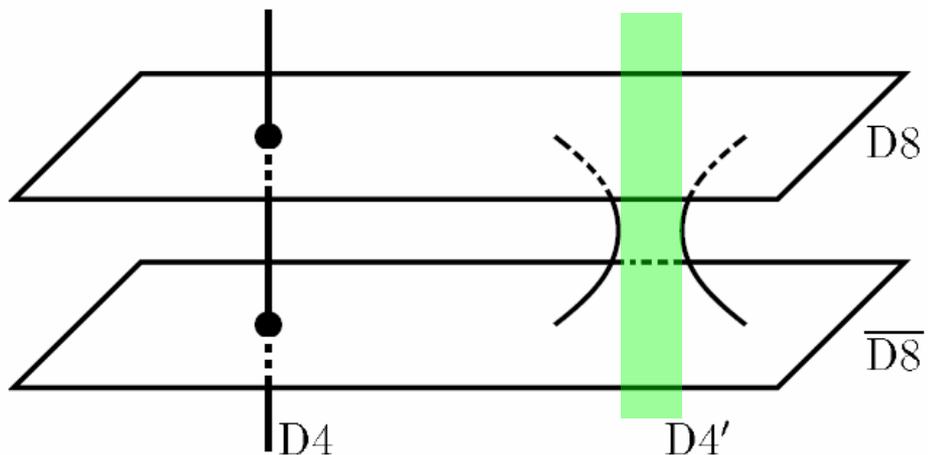
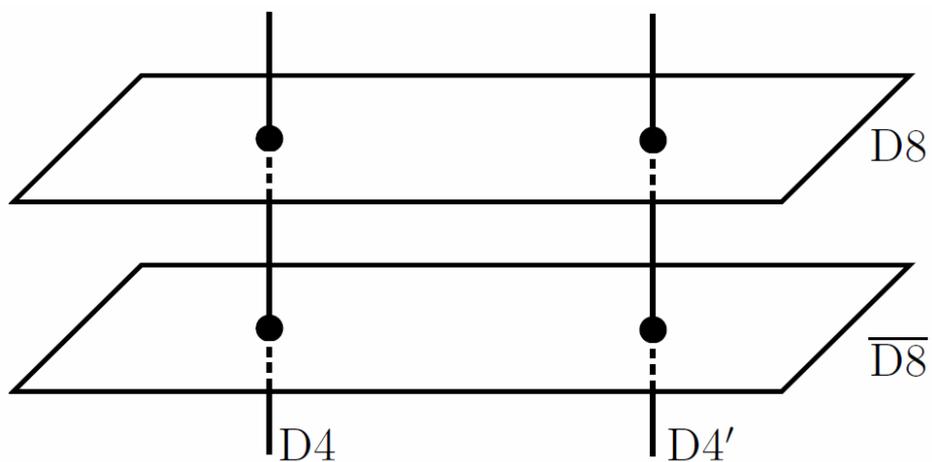


凝縮

クォーク質量



# テクニカラーを実現するブレーン配位



ref. [Hirayama, Yoshioka (07)]

テクニカラーセクタ

||

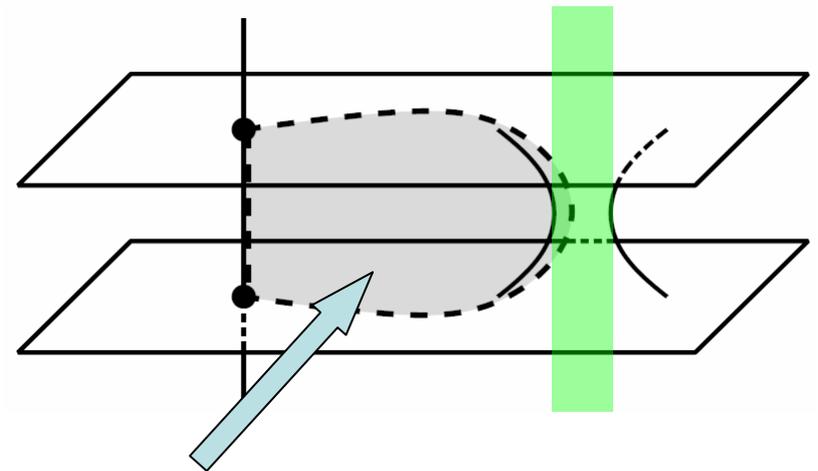
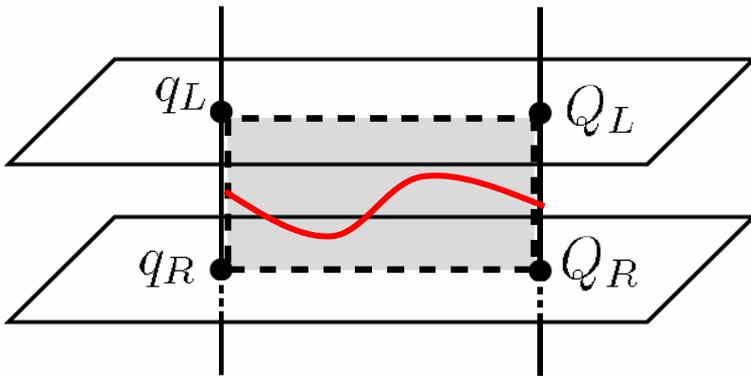
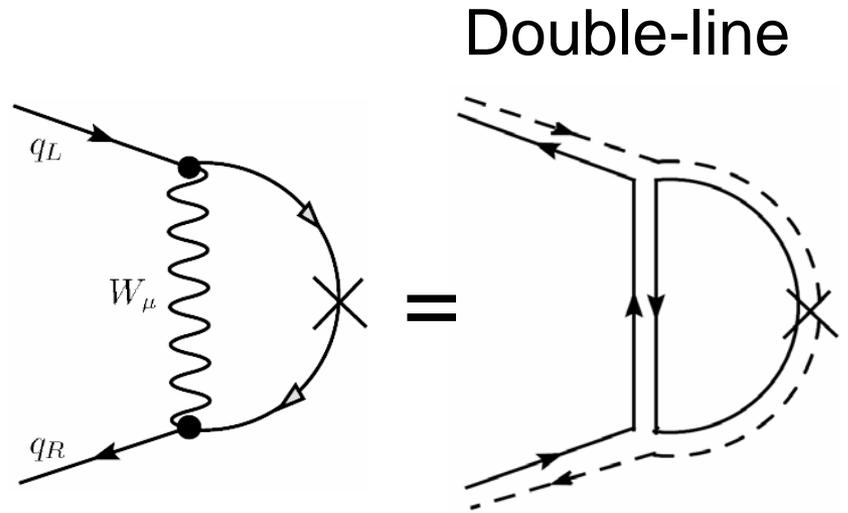
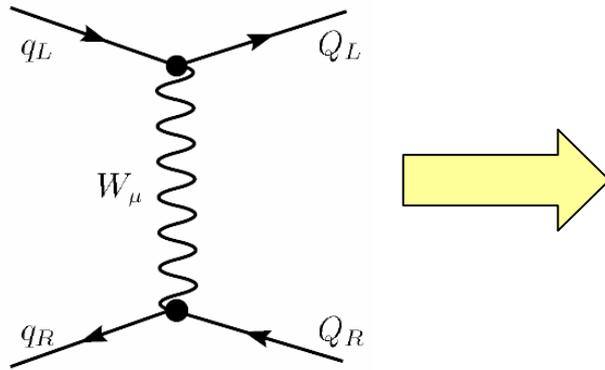
付加的な D4s

強結合テクニカラーセクタ

||

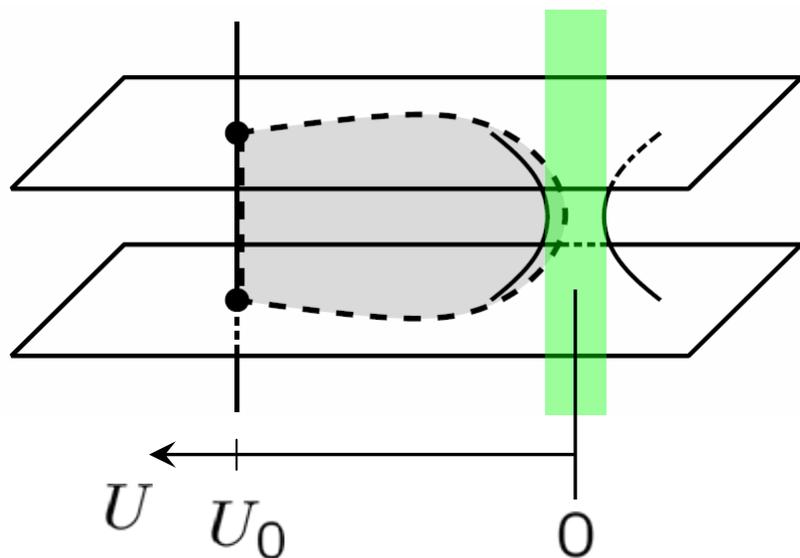
付加的な「throat」

# Worksheet instanton



Worksheet instanton

# クォーク質量



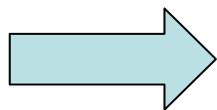
Worldsheet instanton

$$S_{\text{instanton}} = c \int d^4x \text{P tr } \bar{q}_L q_R \exp[-S_{NG}] + \text{h.c.}$$

W-boson の質量 :

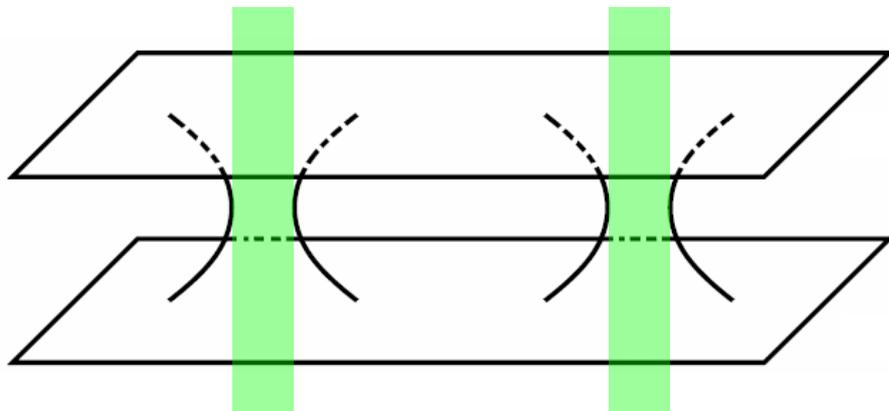
$$M_W = U_0 / (2\pi\alpha')$$

$$S_{NG} = \frac{1}{2\pi\alpha'} \int_0^{\delta\tau/2} d\tau \int_{U_{KK}}^{U_0} dU \sqrt{g_{\tau\tau} g_{UU}} = \frac{U_0 - U_{KK}}{2\alpha' M_{KK}} = \frac{\pi M_W}{M_{KK}}$$



クォーク質量 :  $m_q = c \exp \left[ -\frac{\pi M_W}{M_{KK}} \right]$

# パイオンの質量とカイラル作用

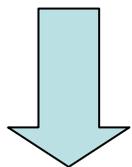


重力双対は 2つの「throat」  
 → D8上に 1-cycle

Worldsheet instanton

D8 ゲージ場への境界結合

$$S_{\text{instanton}} \sim \int d^4x \frac{1}{g_s} \text{Ptr} \exp \left[ -S_{\text{NG}} + \boxed{i \oint dz A_z} \right] + \text{h.c.}$$



$$\text{Ptr} \exp \left[ i \oint dz A_z \right] = \text{tr} U, \quad U \equiv \exp [i\pi(x)/f_\pi]$$

$$S_{\text{instanton}} = \frac{1}{g_s} \boxed{\exp[-S_{\text{NG}}]} \text{tr}(U + U^\dagger) \quad \text{Chiral lagrangian}$$

$$\sim m_\pi^2 \propto m_q \quad \text{GOR 関係式}$$

ホログラフィックQCDの代表的模型である酒井杉本模型でクォーク質量を導入することに成功した

## 結果

解析的な導出 :

Gell-Mann Oakes Renner 関係式  $m_\pi^2 \propto m_q$

Chiral lagrangian  $\text{tr}[m_q U]$ ,  $U \equiv \exp [i\pi(x)/f_\pi]$

Chiral condensate  $\langle \bar{q}q \rangle$

期待される発展 : ストレンジクォークの物理  
有限温度・密度系