

# ヒッグス機構の 背後の理論

北野龍一郎（東北大）



# 125GeV

ヒッグス粒子がいました。

これが言っていることは、  
標準模型はとってもよい有効理論である。

# 何の有効理論だろうか？

- 量子重力理論（ひも？）の有効理論
- 大統一理論の有効理論
- 力学的電弱対称性の破れの有効理論

# High scale 仮説

大統一理論、超弦理論など

$10^{16}\text{GeV}$ とかの超ミクロなスケールで物理が大きく変化。

↓

低エネルギー有効理論に**なぜか**  
**ほとんど質量のない**スカラー場  
(Higgs場)が残る。

低エネルギーで小さい質量が重要になり、  
電弱対称性が破れる。

# つまり、

電弱対称性の破れは**おまけ**みたいなもの。

事件はもっと小さなスケールで起こっている  
という仮説。

# おまけだなんて・・・。

しかし、この仮説の最も強力なサポートは  
**フレーバー物理**にあると思う。

ヒッグス場がelementaryであるということは、  
fermionの質量項を書く上でとても重要。

小林・益川理論の成功は

**ヒッグス場がelementaryである**

という記述がよいということを物語っている。

# どれくらい？

もっとも強い制限はK中間子系のCPの破れで、

ヒッグス場 = elementary

の記述が

$\Lambda \sim 10,000 \text{ TeV}$ 程度のスケールまで破綻しては  
ならないことを示唆している。

# それでもやっぱり、

電弱対称性のオーダーパラメータ

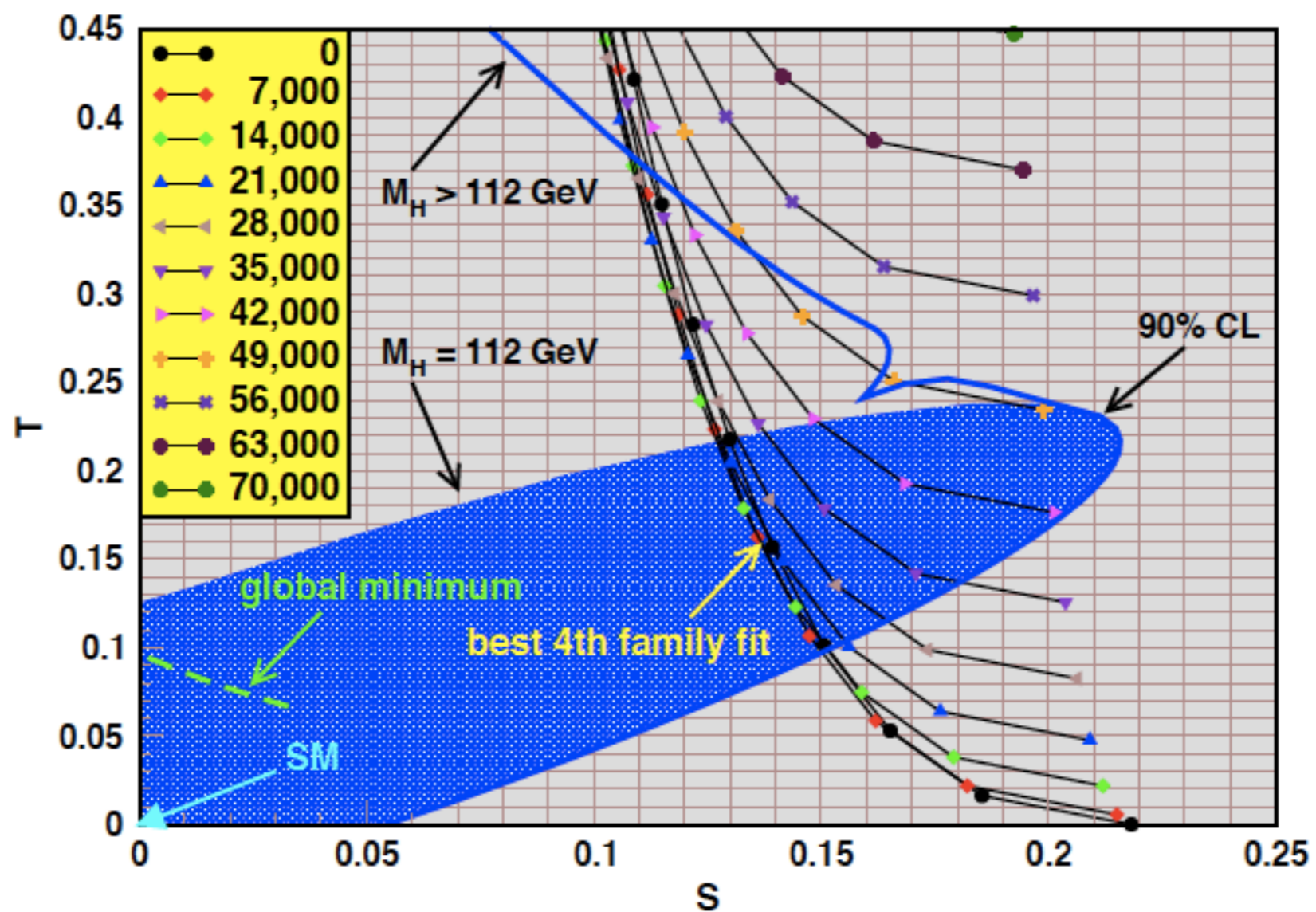
$$v = 246 \text{ GeV}$$

を見るに、

何らかのダイナミクスがTeV程度にあると  
する方が自然なのではないだろうか？



実は、いったんヒッグスを認めると、  
TeVダイナミクスはLEPとそれほど相性は悪くない。



[Ealer, Langacker '10]

# Low scale 仮説

何かしらの理論

TeVスケールでなにかが起こる。

低エネルギー有効理論に**なぜか**  
**ほとんど質量のない**スカラー場  
(Higgs場)が残る。

低エネルギーで小さい質量が重要になり、  
電弱対称性が破れる。

さっきと同じじゃん。

おなじです。志の高さの問題。

注意：この辺りから、私見たっぷりになります。

さっきと同じじゃん。

おなじです。志の高さの問題。

注意：この辺りから、私見たっぷりになります。

どちらの仮説にせよ、

ほとんど質量のないスカラー場

はなぜ有効理論に残っているのだろうか？

答え：たまたま、南部-Goldstone、SUSY

うーん Yukawa? ないじゃん。

まだ見つからないけど、やっぱり私としてはSUSY  
に齧りつく以外の選択肢が思い浮かばない。

# SUSY vs 125GeV

SUSYを選択するといろいろ計算できるので、  
125GeVって言うのはとても重要な情報となる。

MSSMにしては重すぎる！

なにか、もうひとひねり必要。

# そこで、

Low scale 仮説が輝いてくる。

TeVスケールのダイナミクスが  
ヒッグスに質量を与えているのでは  
ないだろうか？

しかし、さっき、Higgs は elementary  
でないと困ると言ったばかりじゃないか？

# だいたい、

ヒッグス機構を低エネルギー有効理論に  
残すようなダイナミクスってなんだ？

我々は真空のダイナミクスといえば  
QCDしか知らない。

しかも、電弱対称性の破れは  
あまりQCDっぽくないことは知っている。

あああ～、もうわからん。

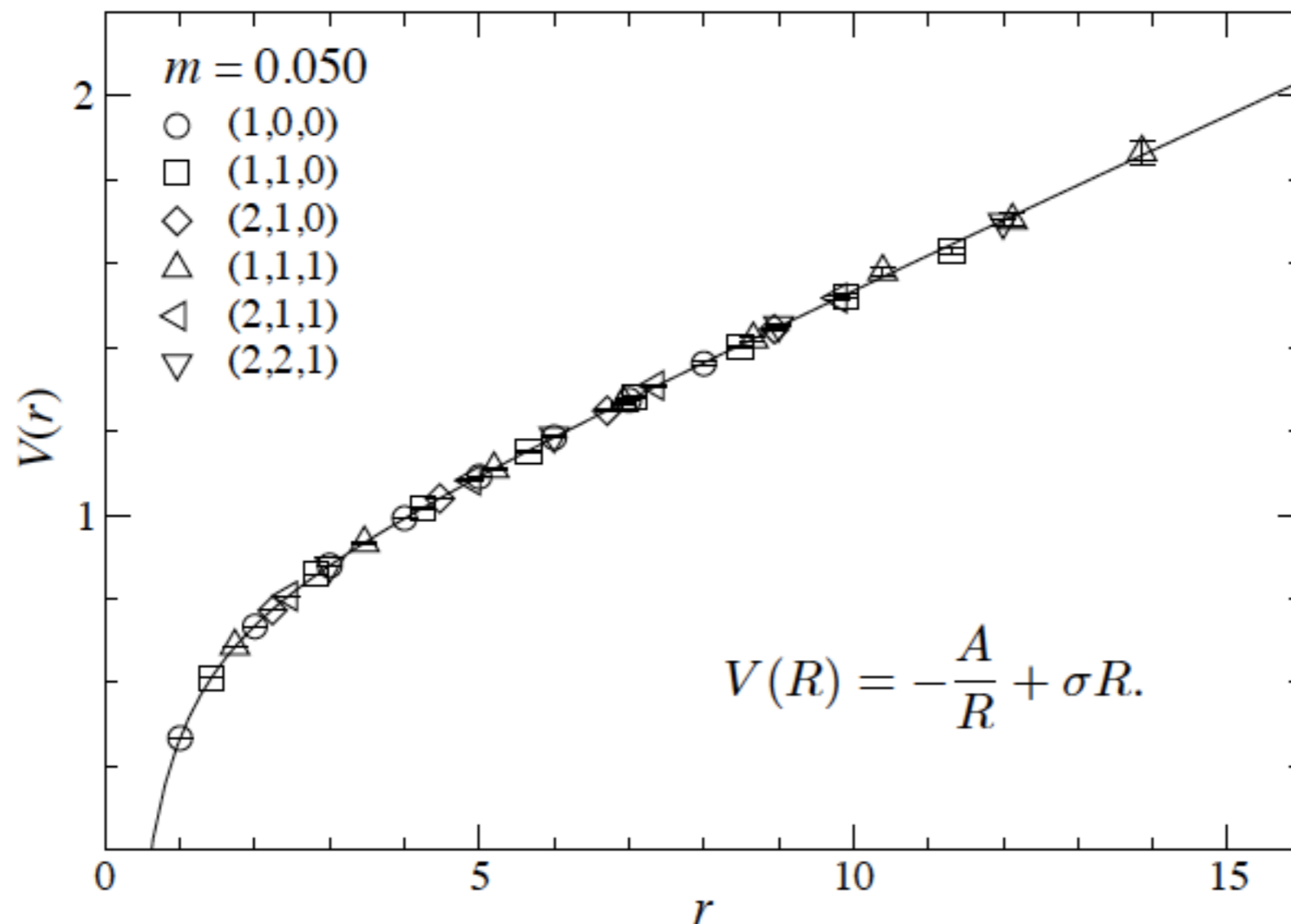


回り道かもしれないけど、

QCDをもう一回考えてみる。

# Quark Confinement

Quarkonium mass spectrum and lattice simulations both support the **Coulomb+linear** potential model for the “static” quark anti-quark system.



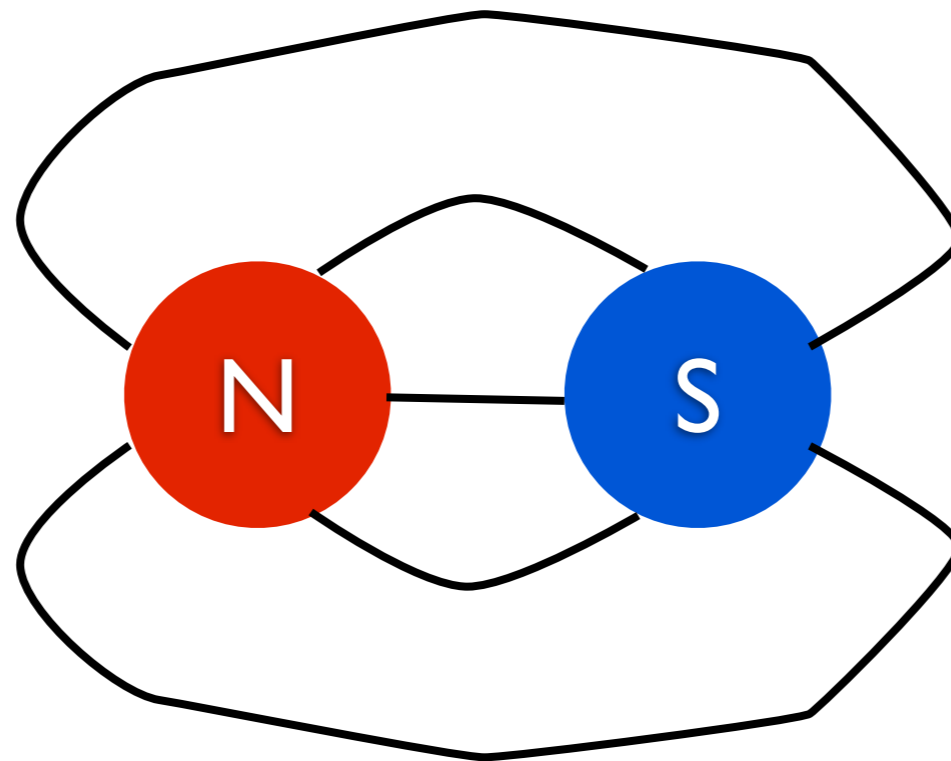
[JLQCD '08]

# なぜ?

There is a pretty simple picture.

Confinement is dual to **Higgs** mechanism, and in the dual picture, the quarks are magnetic monopoles.

[Mandelstam '75, 't Hooft '75]



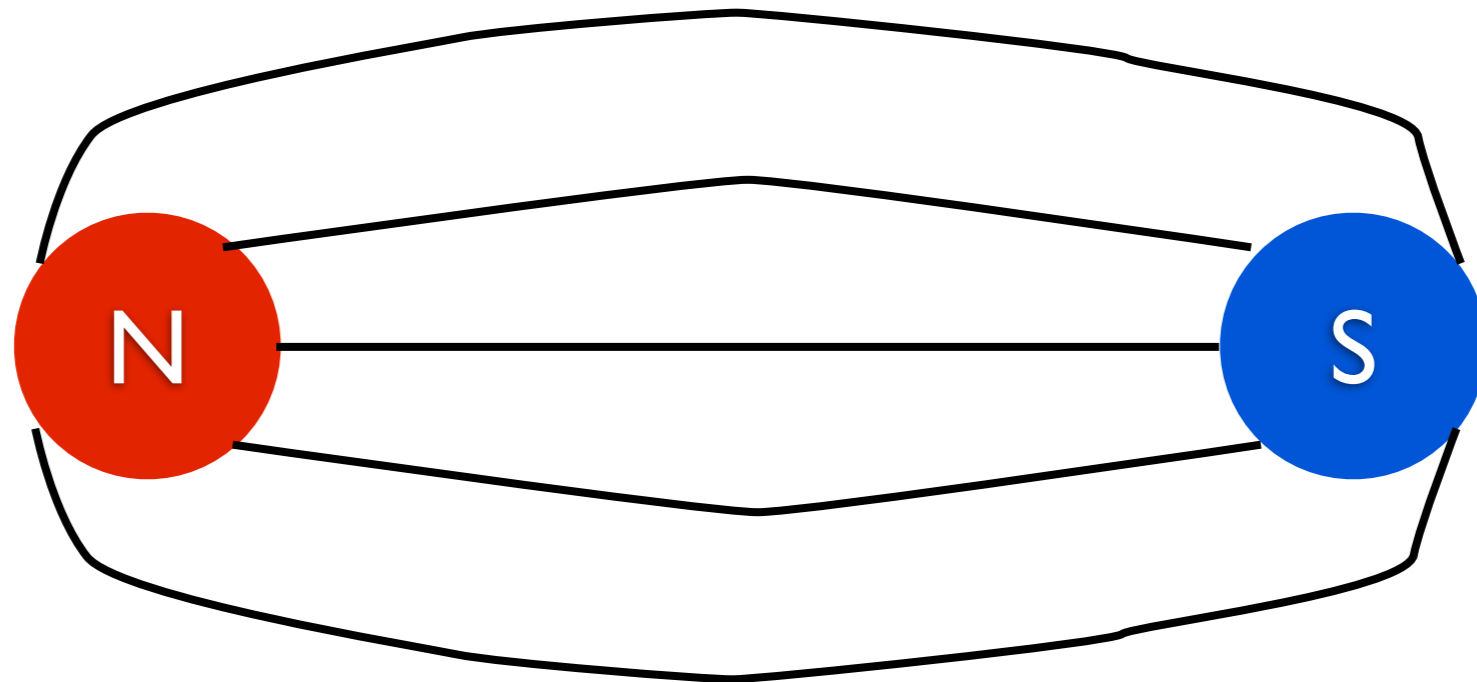
Coulomb like

# なぜ?

There is a pretty simple picture.

Confinement is dual to **Higgs** mechanism, and in the dual picture, the quarks are magnetic monopoles.

[Mandelstam '75, 't Hooft '75]



# なぜ?

There is a pretty simple picture.

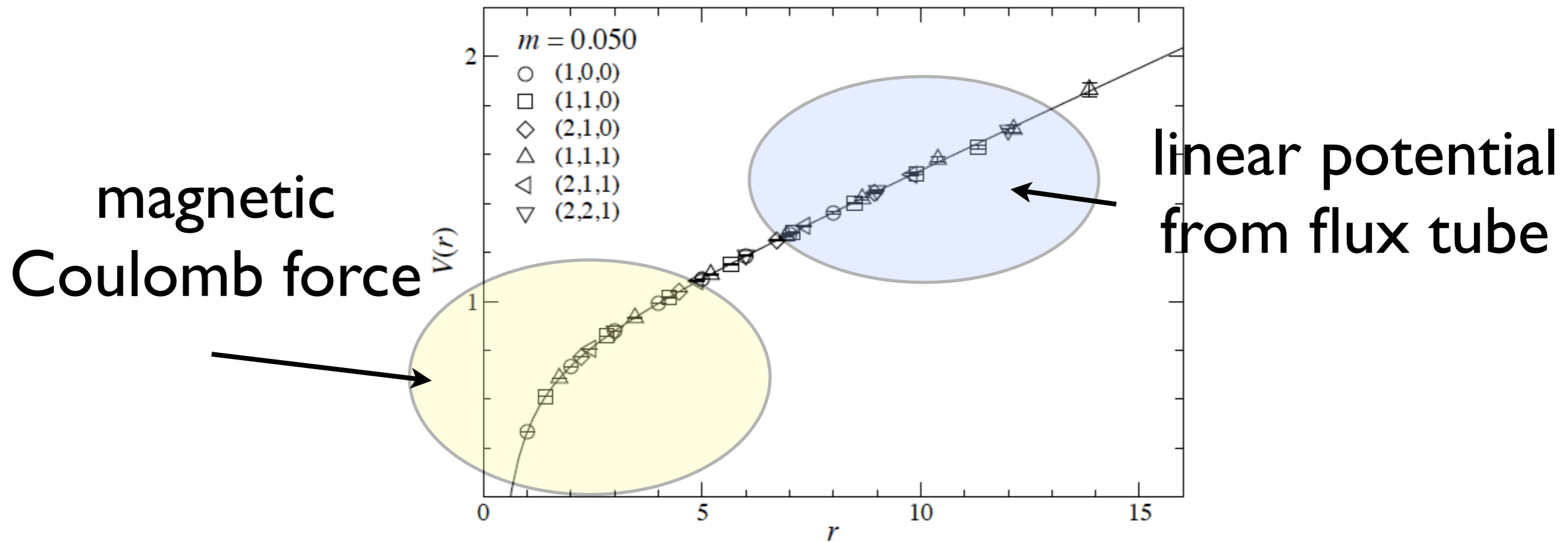
Confinement is dual to **Higgs** mechanism, and in the dual picture, the quarks are magnetic monopoles.

[Mandelstam '75, 't Hooft '75]



Linear potential

This mechanism provides us with a **classical (Higgs) picture for the quark confinement**.



$$V(R) = -\frac{A}{R} + \sigma R. \quad A \sim 0.25 - 0.5, \quad \sqrt{\sigma} \sim 430 \text{ MeV}.$$

If there is such a classical picture,

**Where is the magnetic  
gauge boson in QCD?**

There are massive vector mesons  $\rho(770)$ ,  $\omega(782)$ .

If there is such a classical picture,

Where is the magnetic  
**Higgs boson** in QCD?

There are massive scalar mesons  $a_0(980)$ ,  $f_0(980)$ .



Let's construct a model of  $\rho/\omega/f_0/a_0$  system as a **Higgsed gauge theory (GL theory)**, and compute the quark potential.

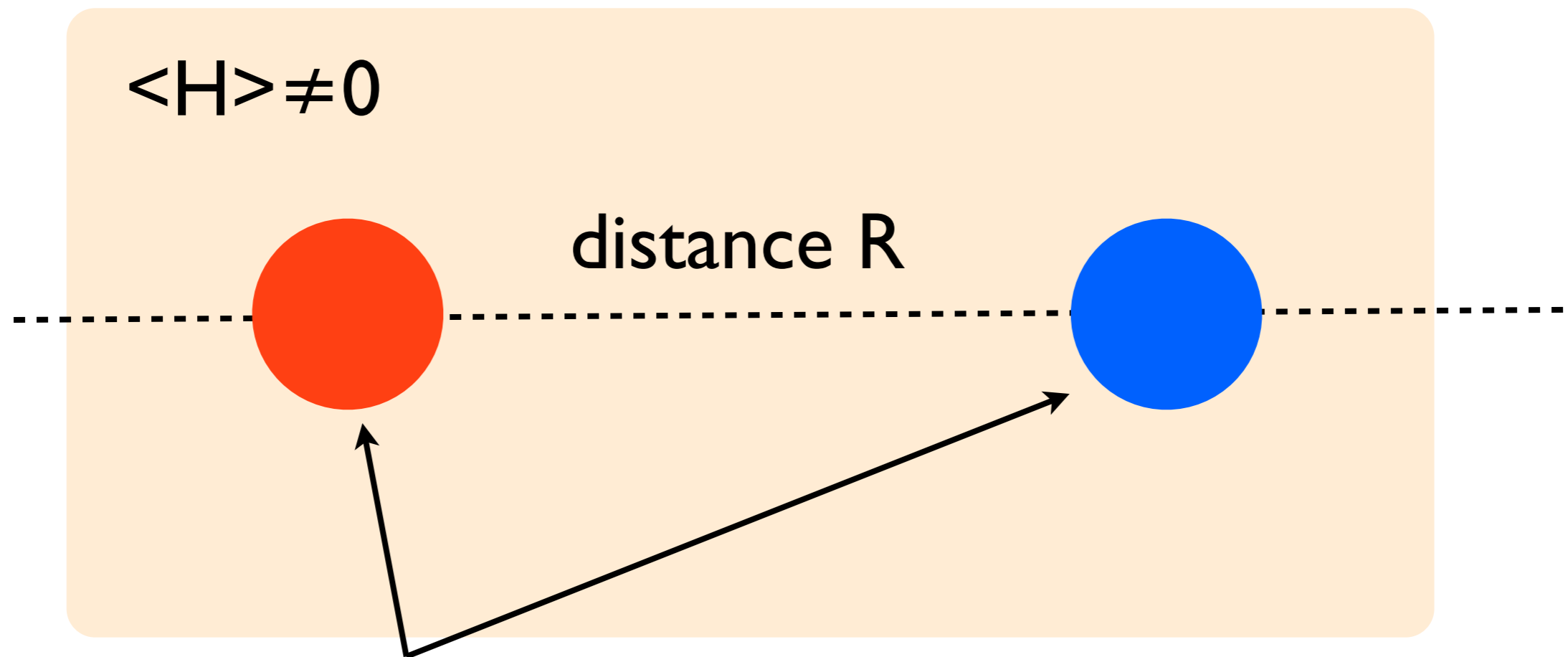
model:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^{(\omega)} F^{(\omega)\mu\nu} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^{(\rho)a} F^{(\rho)\mu\nu a} \\ & + \frac{f_\pi^2}{2} \text{Tr} [ |D_\mu H_L|^2 + |D_\mu H_R|^2 ] \\ & - V(H_L, H_R). \end{aligned}$$

model parameters are determined by hadron masses and

$$g = \frac{m_\rho^2}{g_\rho} \simeq 5.$$

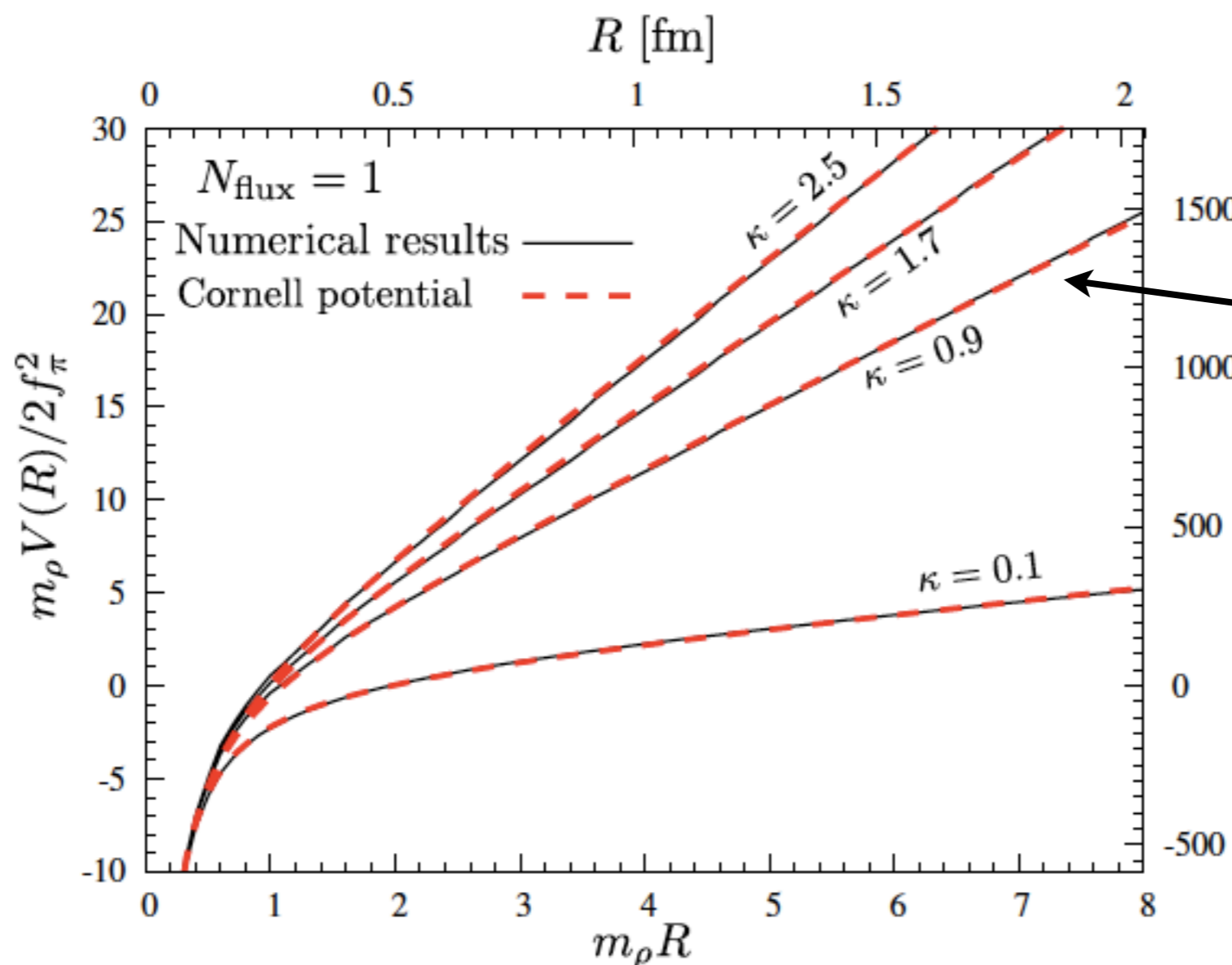
Calculate the energy of  
the monopole-antimonopole system  
in the Higgsed vacuum.



Dirac monopoles with a unit charge.  
(static quarks)

We could reproduce the QCD potential.

[RK, Nakamura, Yokoi '12]



this line

$A = 0.25$   
 $\sqrt{\sigma} = 400 \text{ MeV}$

$$V(R) = -\frac{A}{R} + \sigma R.$$

(monopole-antimonopole separation)

I think, it is not too crazy to say that,

the low energy hadron physics is  
**the magnetic picture of QCD!**

つまり、QCDだって

低エネルギー有効理論として、

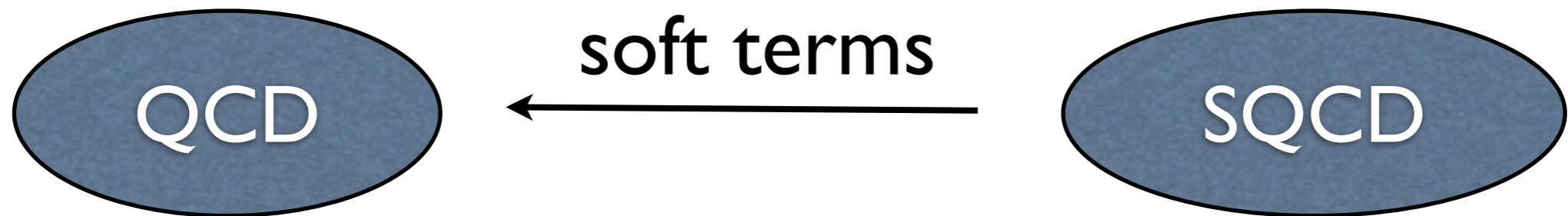
ヒッグス機構をもっているのではないだろうか？

# Can we derive the magnetic model from QCD?

It's difficult. But I will try here  
by using **electric-magnetic** duality in SUSY QCD.

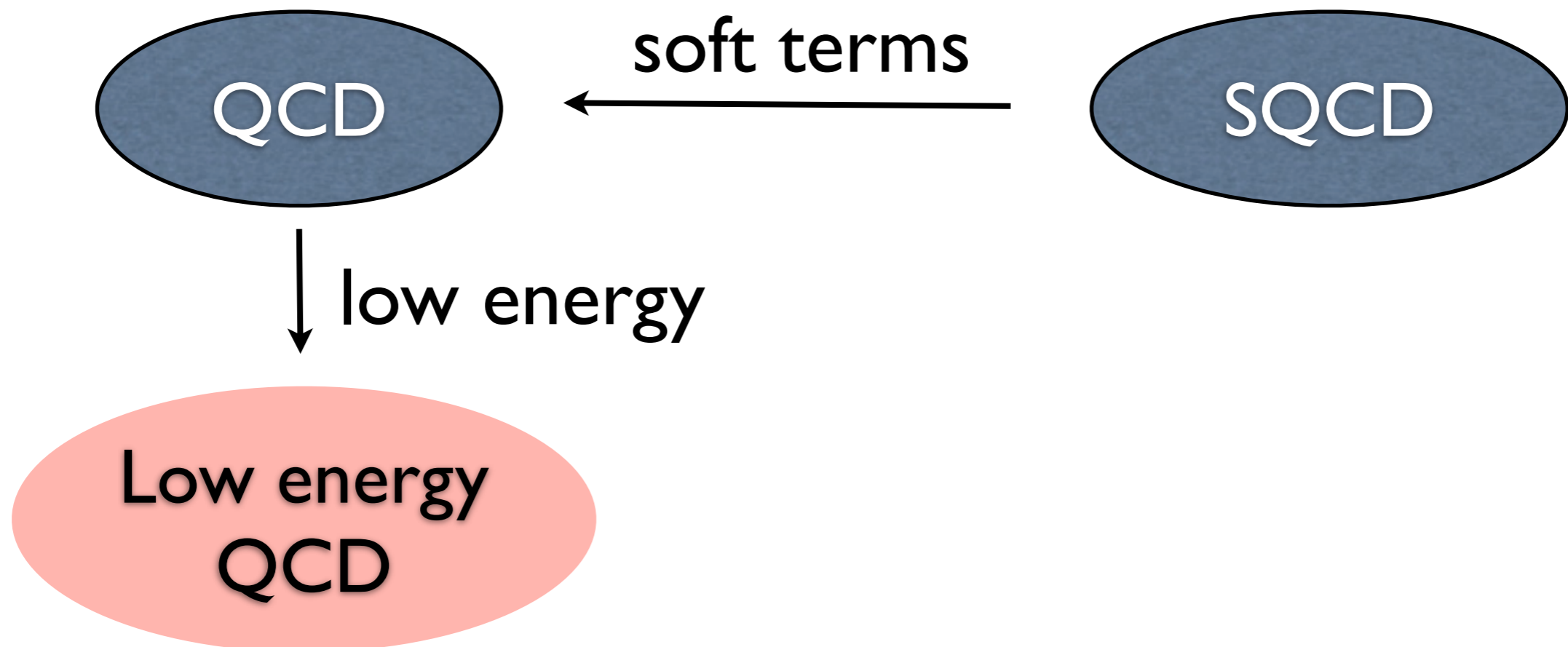
# QCD from SQCD

QCD can be obtained by adding soft mass terms for the gaugino and squarks.



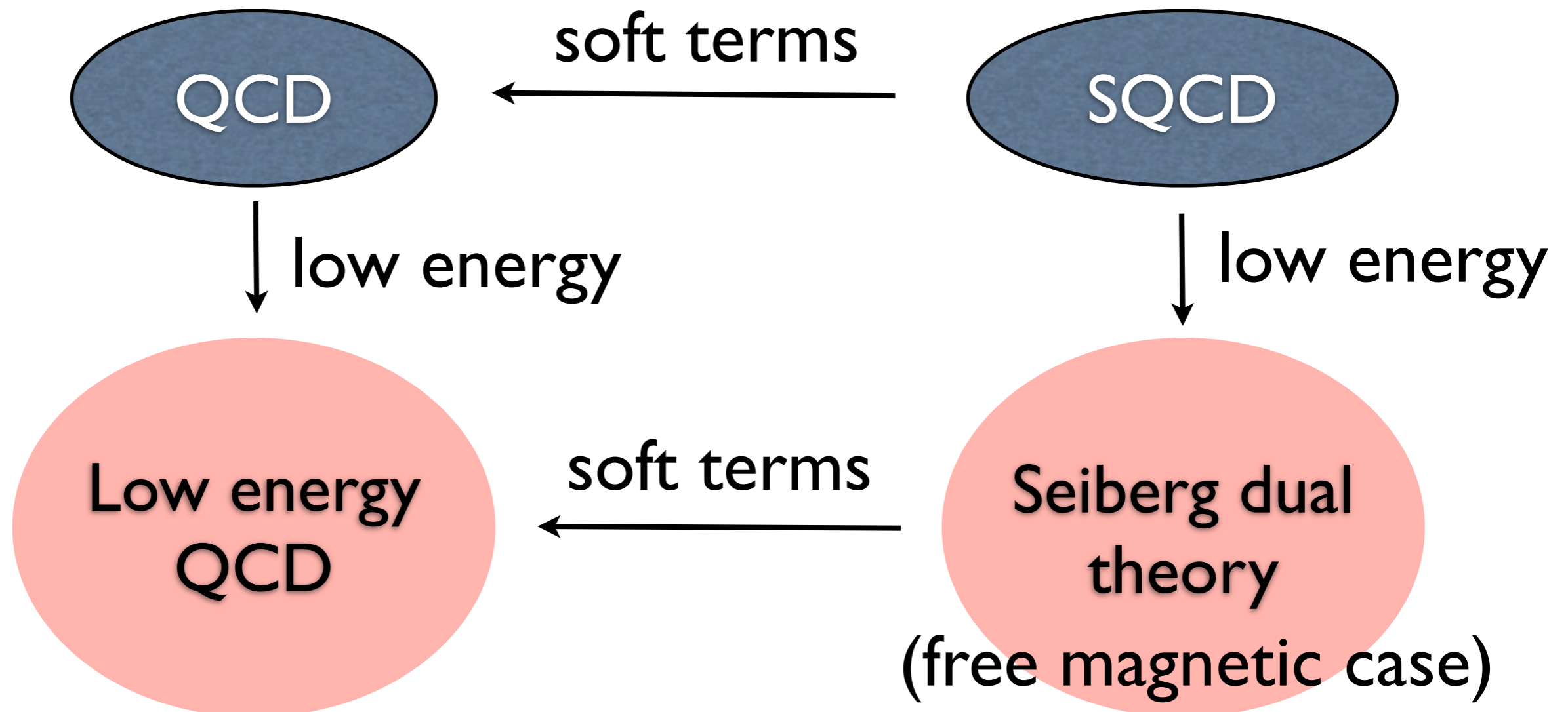
# QCD from SQCD

QCD can be obtained by adding soft mass terms for the gaugino and squarks.

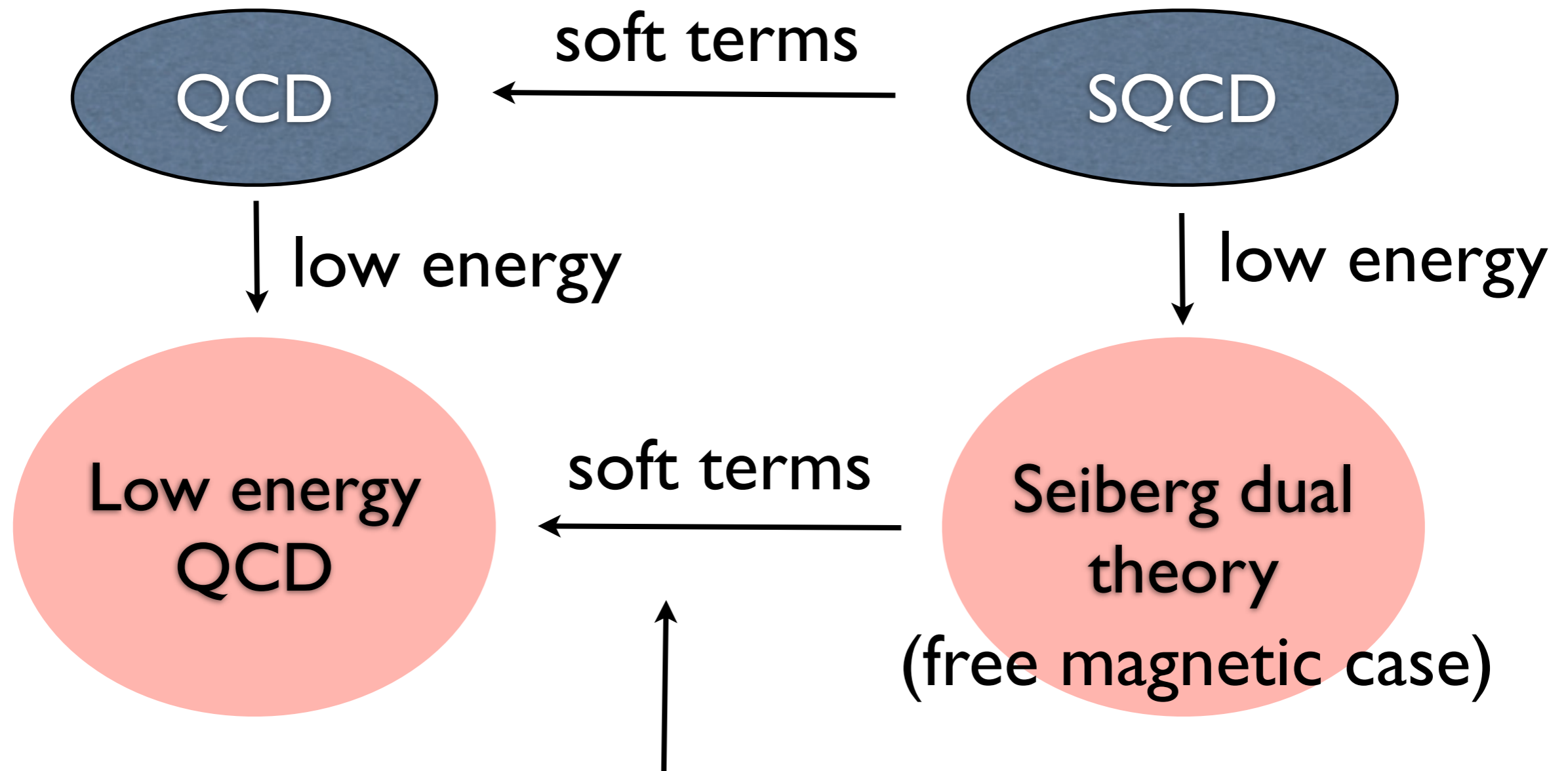


# QCD from SQCD

QCD can be obtained by adding soft mass terms for the gaugino and squarks.







The question is the smoothness of this limit.

[Aharony, Sonnenschein, Peskin, Yankielowicz '95]

And unfortunately, it has been shown that it is **not smooth** based on the Vafa-Witten theorem.

[Arkani-hamed, Rattazzi '98]

The problem was the spontaneous  $U(1)_B$  breaking due to tachyonic soft masses for the squarks.

Actually, one can easily evade this.

# model

	$SU(N_c)$	$SU(N_f)_L$	$SU(N_f)_R$	$U(1)_B$	$SU(N_c)_V$	$U(1)_{B'}$	$U(1)_R$
$Q$	$N_c$	$N_f$	1	1	1	0	$(N_f - N_c)/N_f$
$\bar{Q}$	$\bar{N}_c$	1	$\bar{N}_f$	-1	1	0	$(N_f - N_c)/N_f$
$Q'$	$N_c$	1	1	0	$\bar{N}_c$	1	1
$\bar{Q}'$	$\bar{N}_c$	1	1	0	$N_c$	-1	1

auxiliary massive flavors

$W = mQ'\bar{Q}'$ . (mass term for the auxiliary flavors)

$$\mathcal{L}_{\text{soft}} = -\tilde{m}^2(|Q|^2 + |\bar{Q}|^2 + |Q'|^2 + |\bar{Q}'|^2) - \left(\frac{m\lambda}{2}\lambda\lambda + \text{h.c.}\right) - (BmQ'\bar{Q}' + \text{h.c.})$$

(soft SUSY breaking terms)

# magnetic picture

	$SU(N_f)$	$SU(N_f)_L$	$SU(N_f)_R$	$U(1)_B$	$SU(N_c)_V$	$U(1)_{B'}$	$U(1)_R$
$q$	$N_f$	$\overline{N_f}$	1	0	1	$N_c/N_f$	$N_c/N_f$
$\bar{q}$	$\overline{N_f}$	1	$N_f$	0	1	$-N_c/N_f$	$N_c/N_f$
$\Phi$	1	$N_f$	$\overline{N_f}$	0	1	0	$2(N_f - N_c)/N_f$
$q'$	$N_f$	1	1	1	$N_c$	$-(N_f - N_c)/N_f$	0
$\bar{q}'$	$\overline{N_f}$	1	1	-1	$\overline{N_c}$	$(N_f - N_c)/N_f$	0
$Y$	1	1	1	0	1 + Adj.	0	2
$Z$	1	1	$\overline{N_f}$	-1	$\overline{N_c}$	1	$(2N_f - N_c)/N_f$
$\bar{Z}$	1	$N_f$	1	1	$N_c$	-1	$(2N_f - N_c)/N_f$

$$\mathcal{L}_{\text{soft}} = -\tilde{m}_q^2(|q|^2 + |\bar{q}|^2 + |q'|^2 + |\bar{q}'|^2) - \tilde{m}_M^2(|Y|^2 + |Z|^2 + |\bar{Z}|^2 + |\Phi|^2) - \left( \frac{m\tilde{\lambda}}{2}\tilde{\lambda}\tilde{\lambda} + \tilde{B}m\Lambda Y + Ah(q'Y\bar{q}' + q'Z\bar{q} + q\bar{Z}\bar{q}' + q\Phi\bar{q}) + \text{h.c.} \right).$$



$$Y = -\frac{\tilde{B}m\Lambda}{\tilde{m}_M^2}.$$

split into two sectors.

# Hidden Local Symmetry

	$SU(N_f)$	$SU(N_f)_L$	$SU(N_f)_R$	$U(1)_B$	$SU(N_c)_V$	$U(1)_{B'}$	$U(1)_R$
$q$	$N_f$	$\overline{N_f}$	1	0	1	$N_c/N_f$	$N_c/N_f$
$\bar{q}$	$\overline{N_f}$	1	$N_f$	0	1	$-N_c/N_f$	$N_c/N_f$
$\Phi$	1	$N_f$	$\overline{N_f}$	0	1	0	$2(N_f - N_c)/N_f$
$q'$	$N_f$	1	1	1	$N_c$	$-(N_f - N_c)/N_f$	0
$\bar{q}'$	$\overline{N_f}$	1	1	-1	$\overline{N_c}$	$(N_f - N_c)/N_f$	0
$Y$	1	1	1	0	1 + Adj.	0	2
$Z$	1	1	$\overline{N_f}$	-1	$\overline{N_c}$	1	$(2N_f - N_c)/N_f$
$\bar{Z}$	1	$N_f$	1	1	$N_c$	-1	$(2N_f - N_c)/N_f$

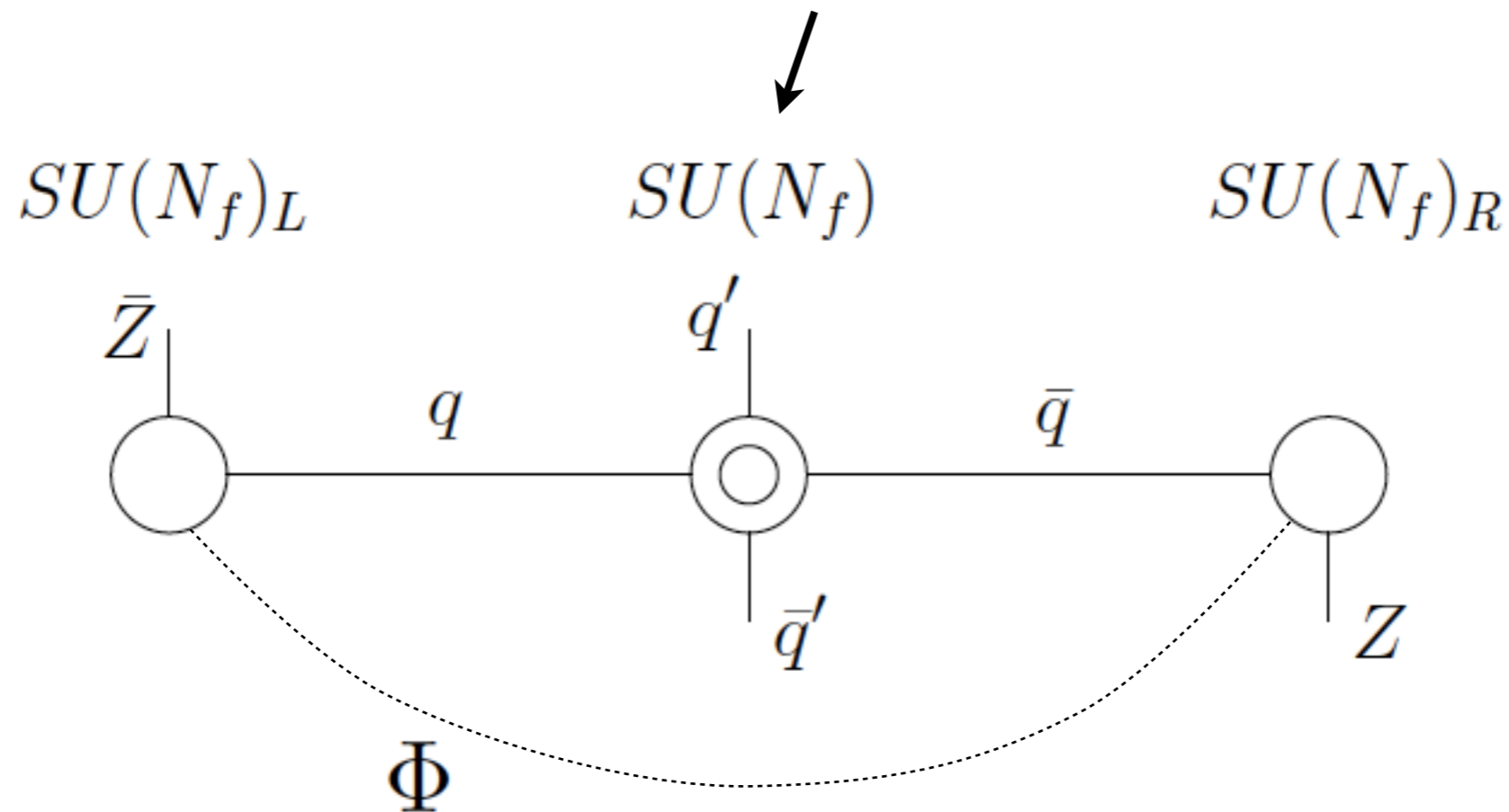
This sector has the same structure as the HLS.

$$q = \bar{q} = v\mathbf{1} \neq 0, \quad \Phi = v_\Phi \mathbf{1} \neq 0,$$

break chiral symmetry and give masses to magnetic gauge bosons ( $\rho$  meson) while leaving  $U(1)_B$  symmetry unbroken.

Magnetic picture:

Hidden local symmetry



$Z$  and  $q'$  have quantum numbers of quarks.  
They get masses from chiral symmetry breaking.

Pretty similar to low energy QCD!

I think SQCD is **smoothly connected** to QCD through the mass deformed  $N_f + N_c$  flavor theory.



If that's the case,

chiral symmetry breaking = magnetic Higgs mechanism  
= confinement

**$\rho$  meson is the magnetic gauge boson!**

[Seiberg '95, Harada, Yamawaki '99, Komargodski '10, RK '11, Abel, Barnard '12]

# 実は、

Electroweak symmetry breaking may be similar.  
Namely, the **SM may be the magnetic picture** of some  
fundamental theory.

[Seiberg '95, Maekawa'96, Strassler '96, ..., RK, Fukushima, Yamaguchi '10  
Craig, Stolarsky, Thaler '11, Csaki, Shirman, Terning '11, Csaki, Randall, Terning '11]

I think it is very important to look for  
a magnetic gauge boson (vector resonance) next  
at the LHC!



The SQCD model we studied for QCD has two limits.

1. non-SUSY limit: it's supposed to be QCD.

→ technicolor

2. SUSY limit: **massless** Higgs fields.

→ MSSM-like

In between two limits, one can obtain a theory with  
**partially composite Higgs.**

[RK, Luty, Nakai '12]

QCD用に使った模型をそのまま当てはめてみると、

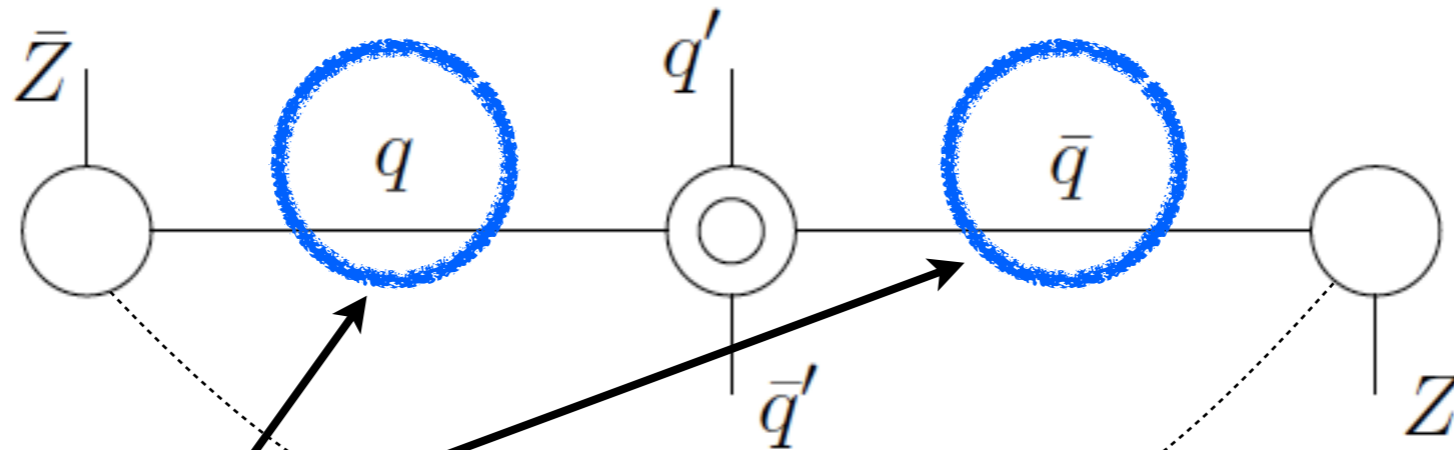
Electroweak  
symmetry

Hidden local symmetry

$SU(N_f)_L$

$SU(N_f)$

$SU(N_f)_R$



Higgs fields

$\Phi$

(Hu, Hd)

MSSM-like model as magnetic picture!

(ヒッグスレス模型+ヒッグス)

# うまく行きそう！

1、125GeVは説明できる？

この模型、 $N_f=2$ で 弱結合 **CFT**

ヒッグス場はCFTの一部。



ヒッグスの質量が持ち上がる。

MSSMで軽すぎた問題は解決。

しかも、弱結合なので持ち上がりすぎない。

# うまく行きそう！

2、フレーバーの問題は？ヒッグスはelementary  
でないと困るのでは？

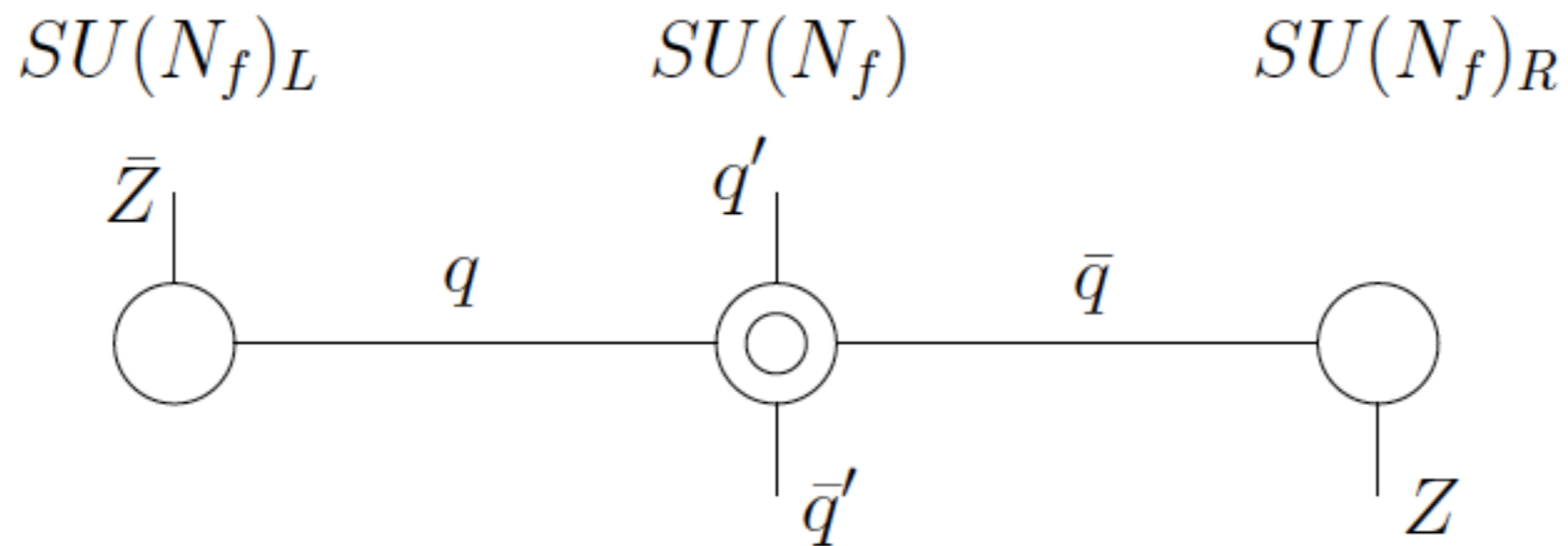
この模型、 $N_f=2$ で 弱結合 **CFT**



ヒッグスはほとんどelementary!  
しかも、ずっとelementaryでいられる！

# うまく行きそう！

3、トップクォークの質量だせるの？



$Z$ と $q'$ をトップと同定できる。(dual topcolor模型)

→ 真空中で質量を獲得。

# うまく行きそう！

4、SUSYが見つかっていないが？

この模型、 $N_f=2$ で弱結合 **CFT**



stopとヒッグスの質量パラメータはRGEにおいて

IR fixed pointをもち、その値は**ゼロ**。

つまり、電弱スケールと超対称性粒子の質量に

ちょっとした階層性が自然に生まれる。

# Summary

- A possible **smooth path** from SQCD to QCD is found.
- The  $\rho$  meson can be interpreted as **the magnetic gauge boson**.
- The Higgs mechanism in the SM may also be the magnetic picture.
- I think it is very important to look for a vector resonance!

