

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} GeV とかの超マイ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、

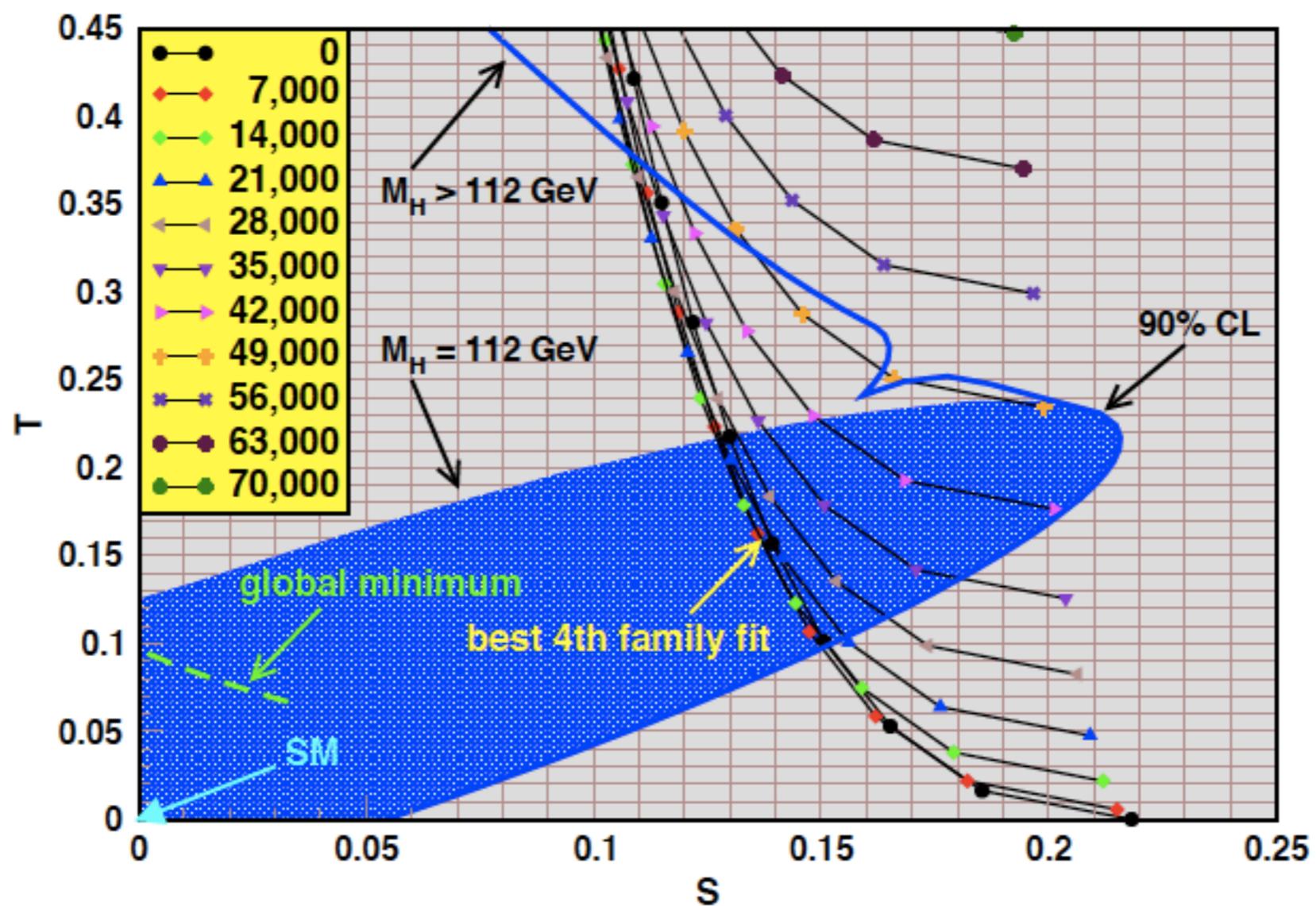
電弱対称性のオーダーパラメータ

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

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。

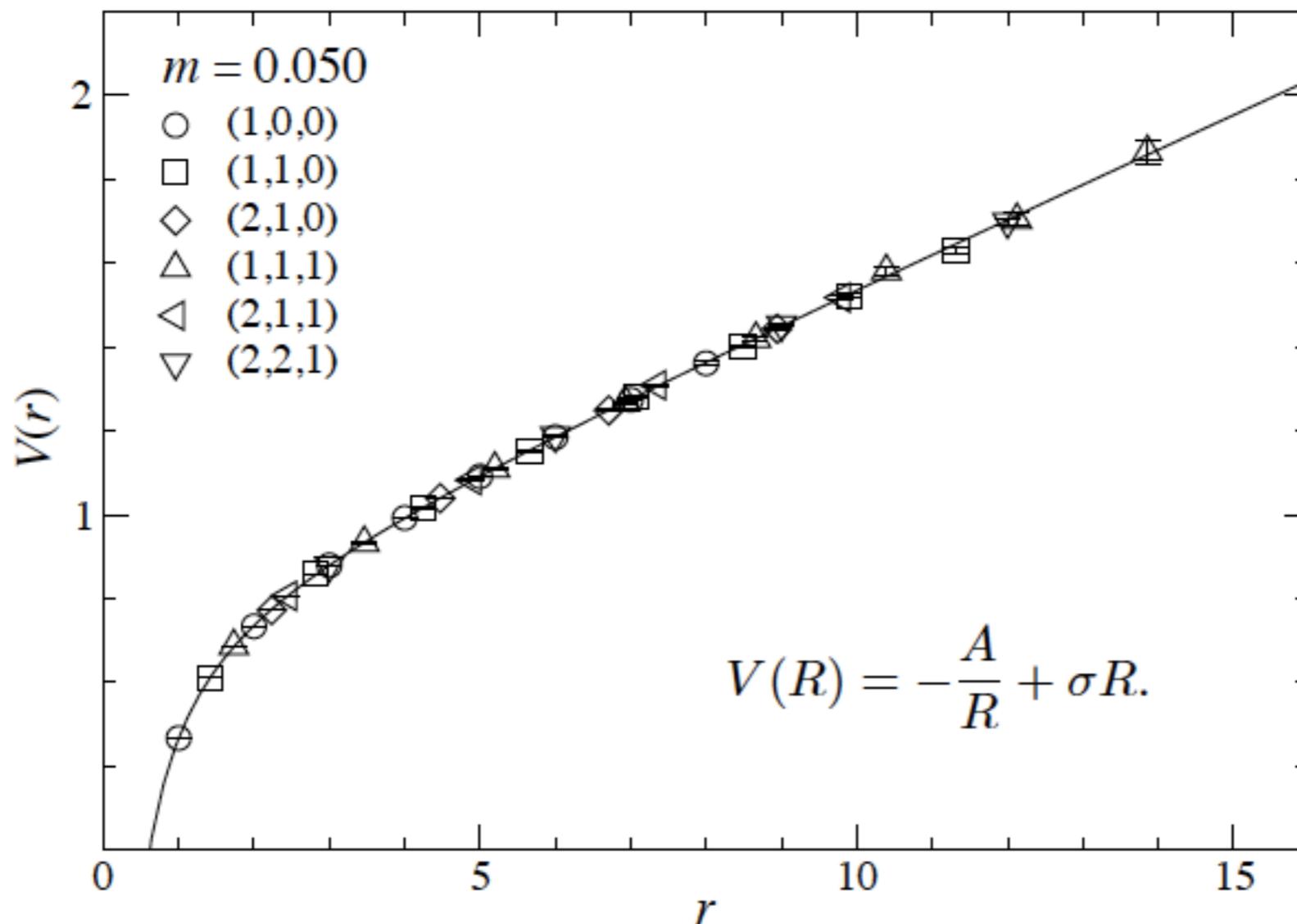
あああ～、もうわからん。

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.



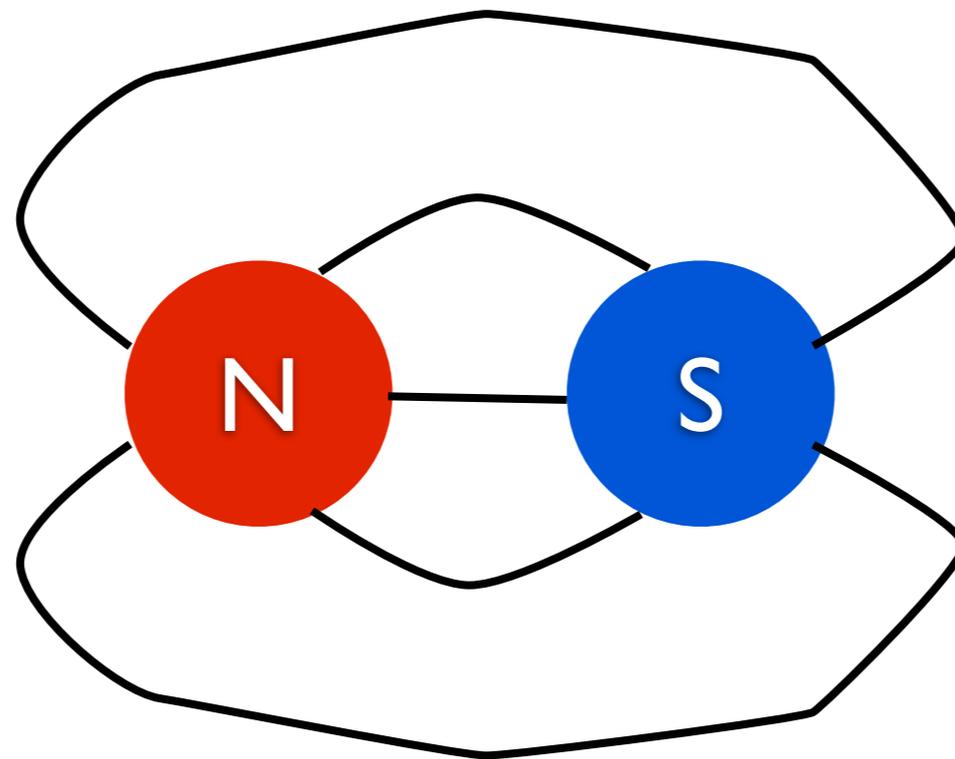
[JLQCD '08]

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]



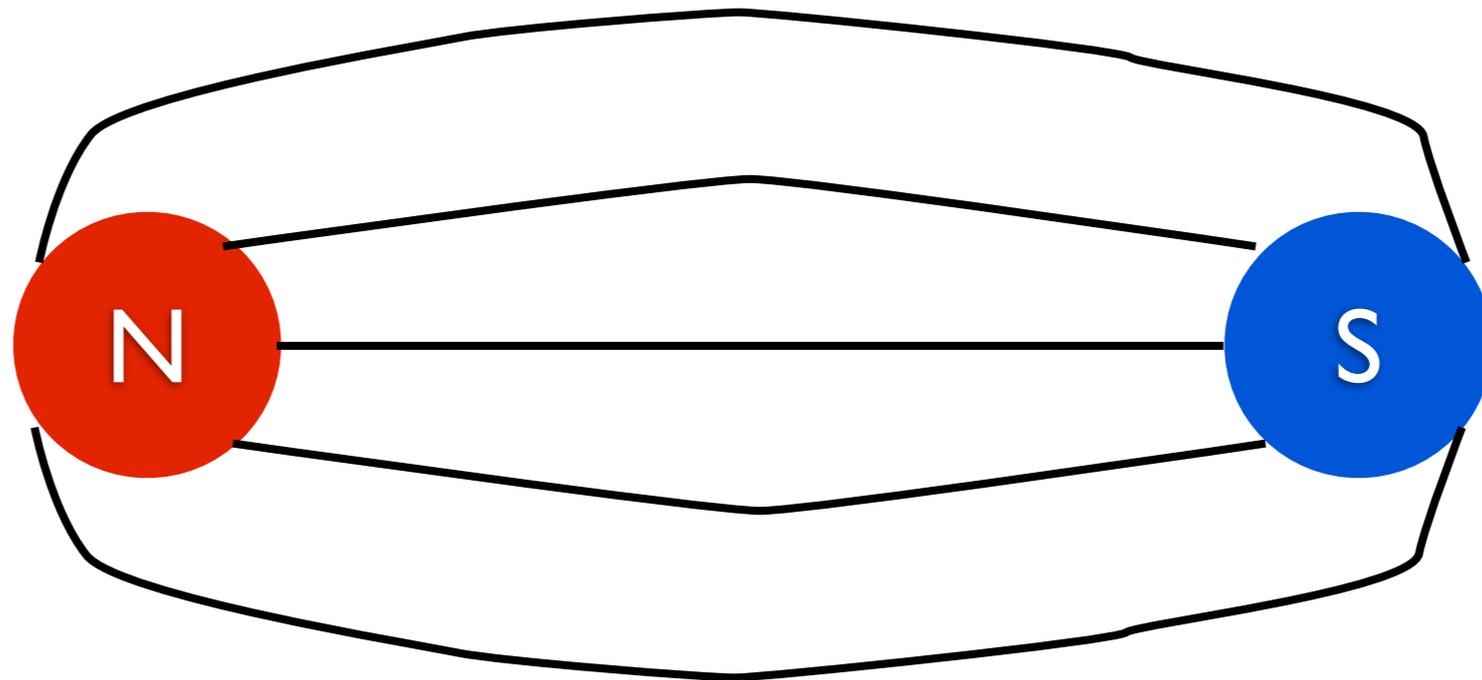
Coulomb like

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.

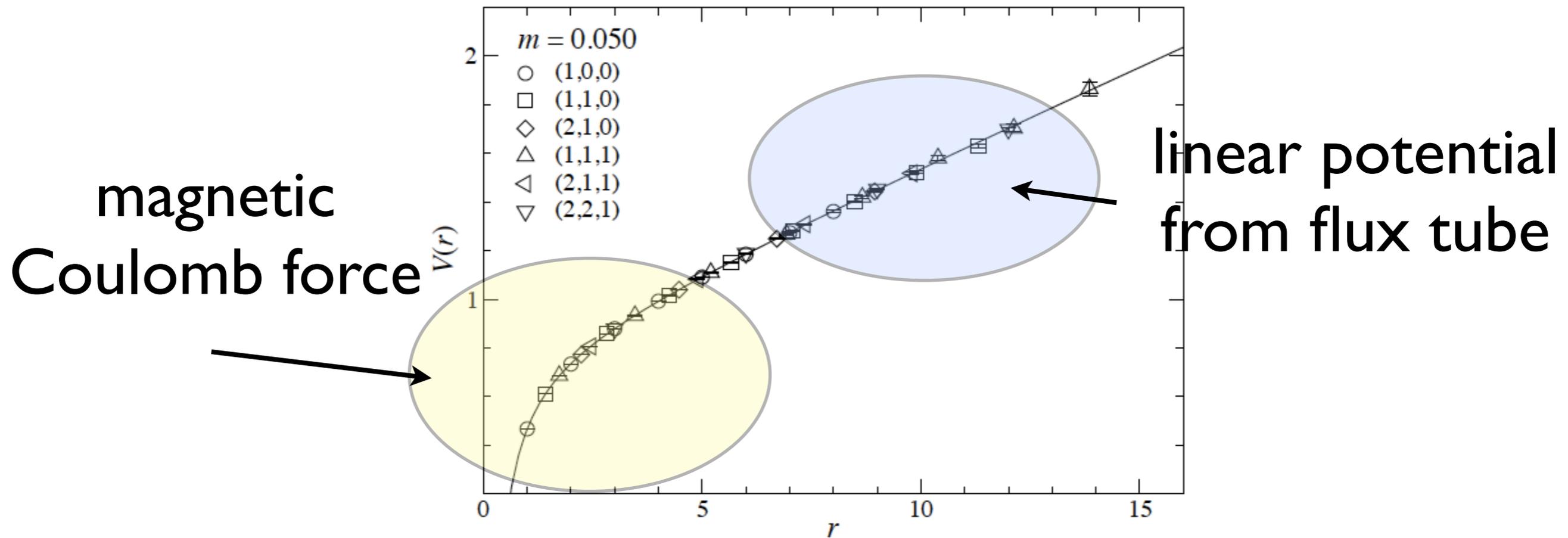
Confinement is dual to **Higgs** mechanism, and in the dual picture, the quarks are magnetic monopoles.

[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.

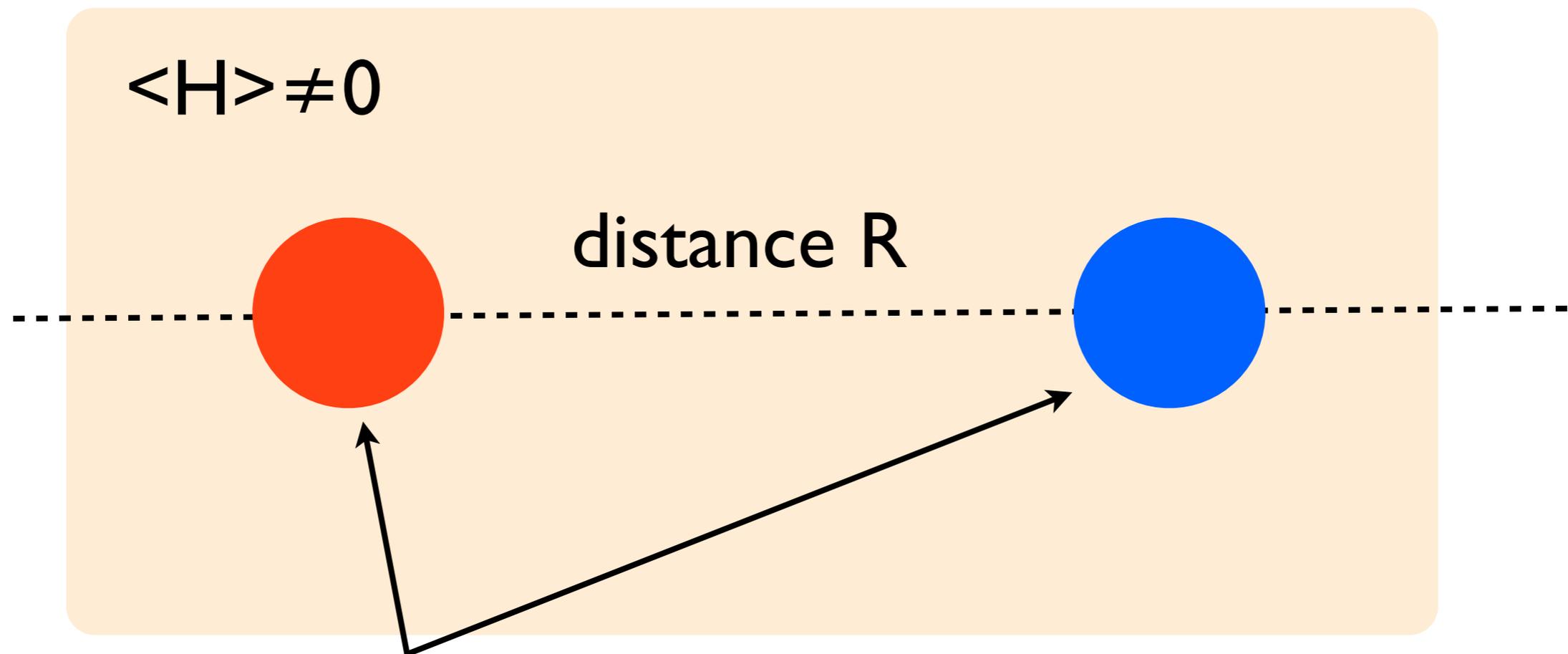
model:

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

model parameters are determined by hadron masses and

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

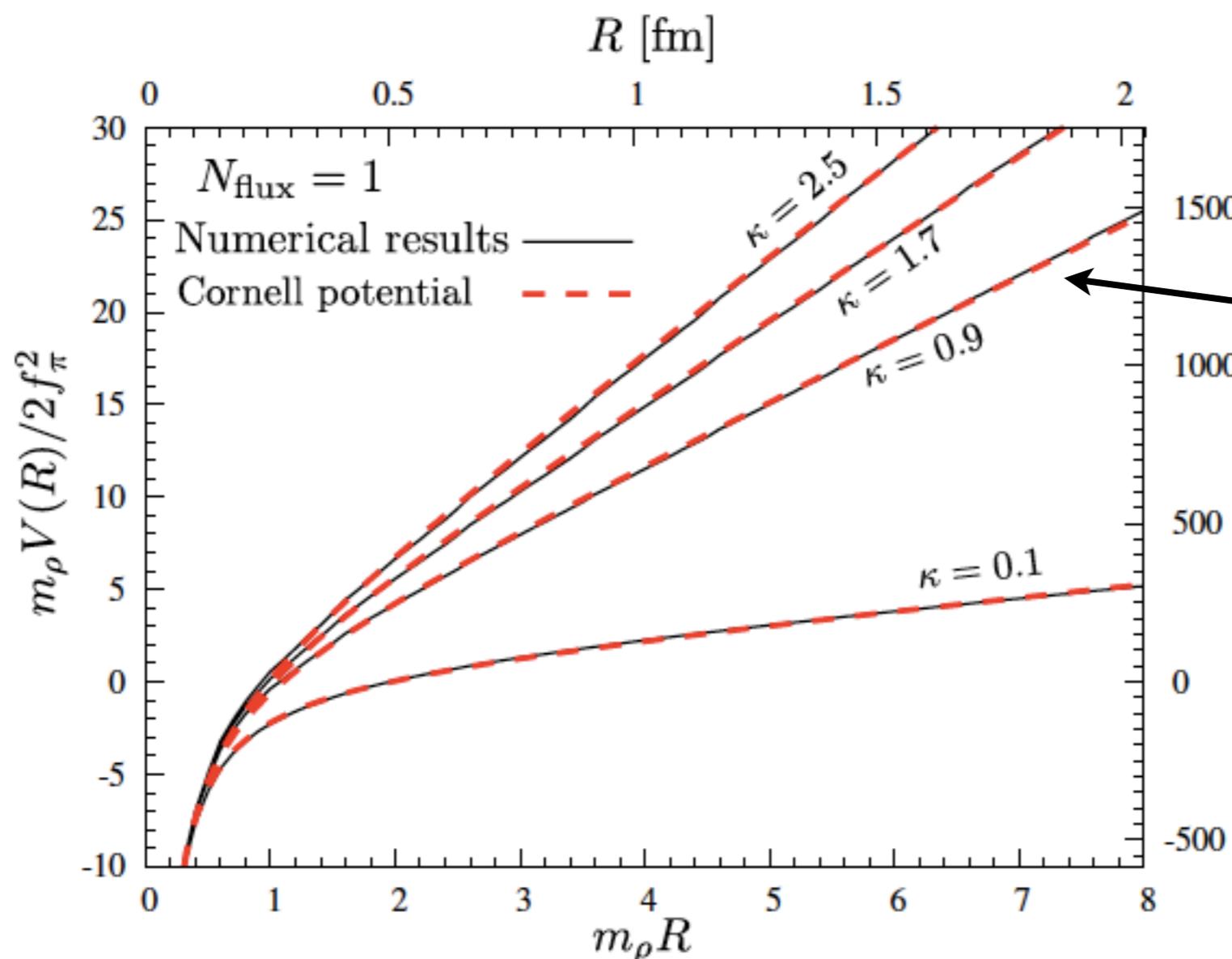
Calculate the energy of
the monopole-antimonopole system
in the Higgsed vacuum.



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、

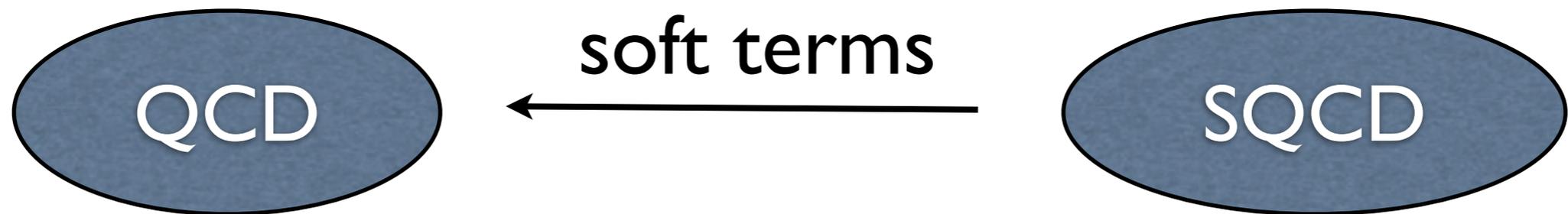
ヒッグス機構をもっているのではないだろうか？

Can we derive the magnetic model from QCD?

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

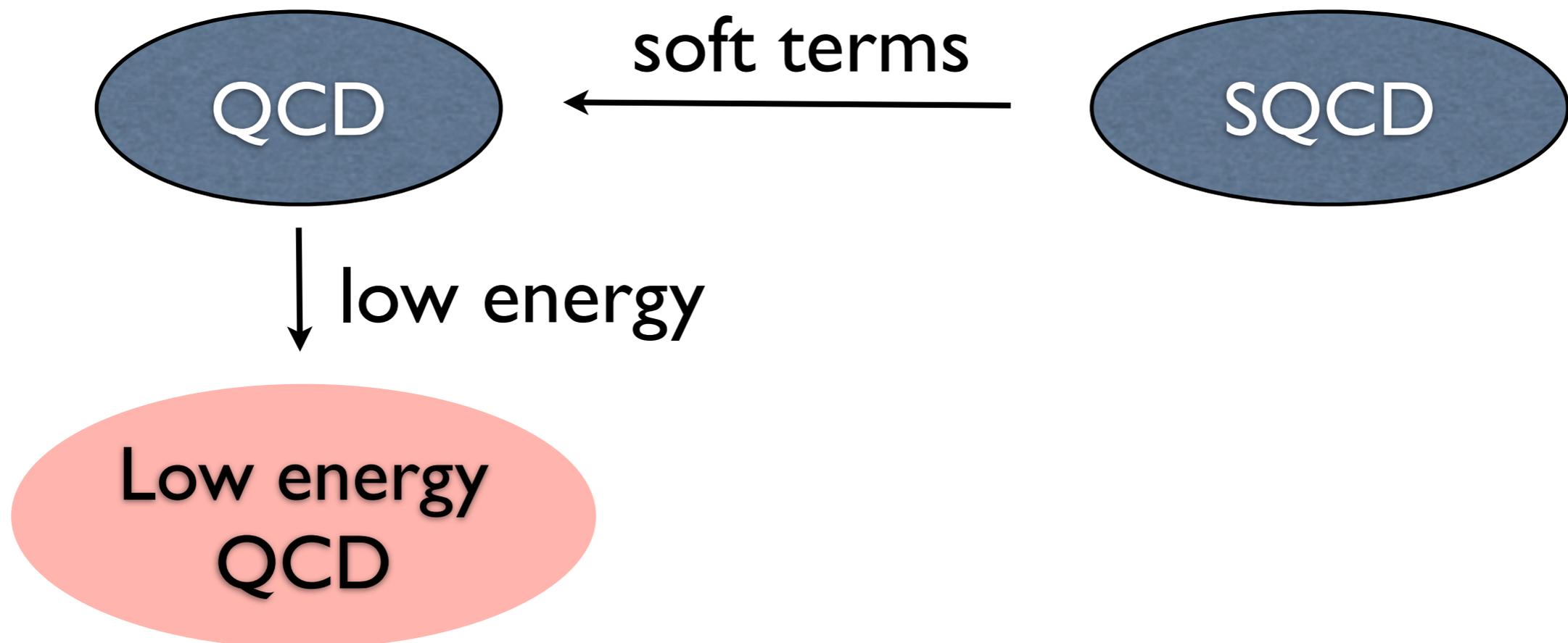
QCD from SQCD

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



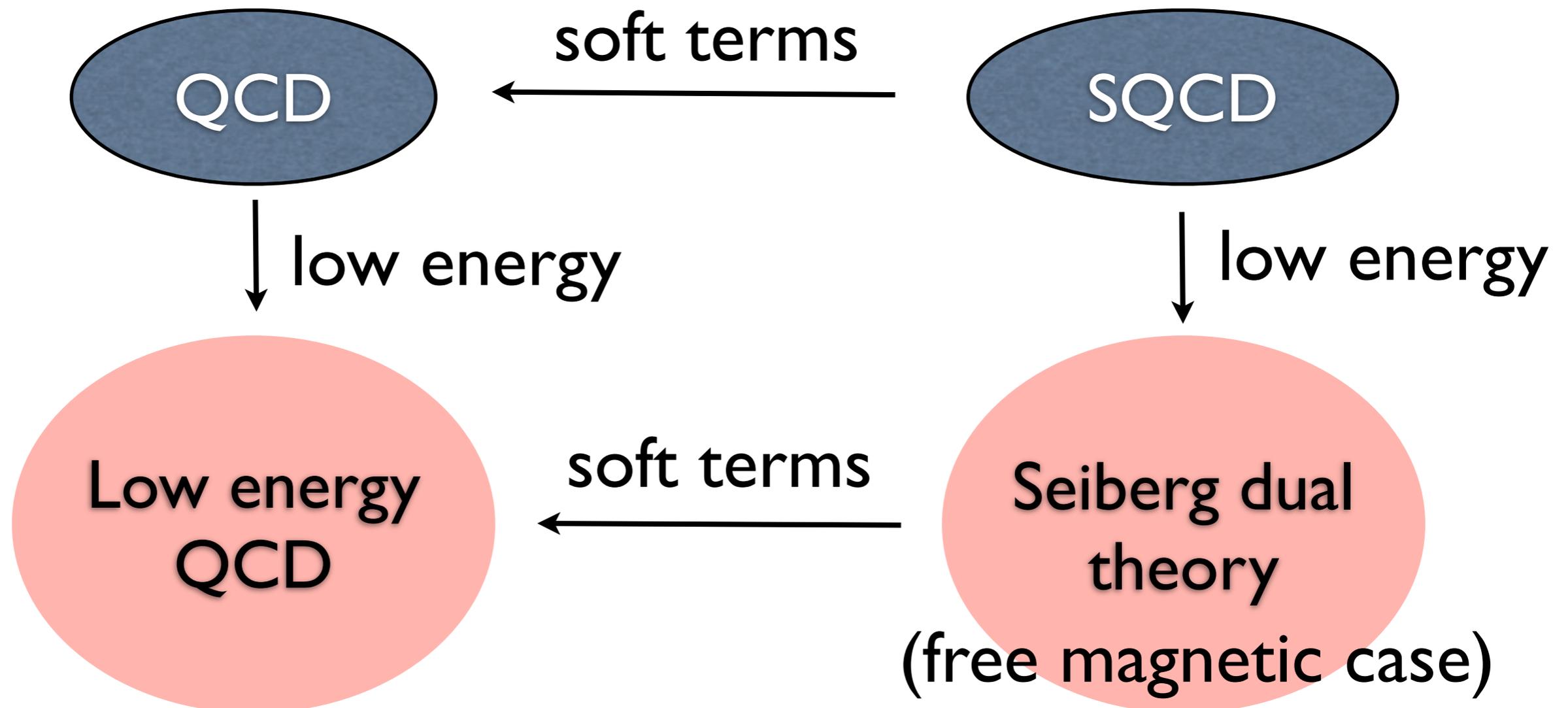
QCD from SQCD

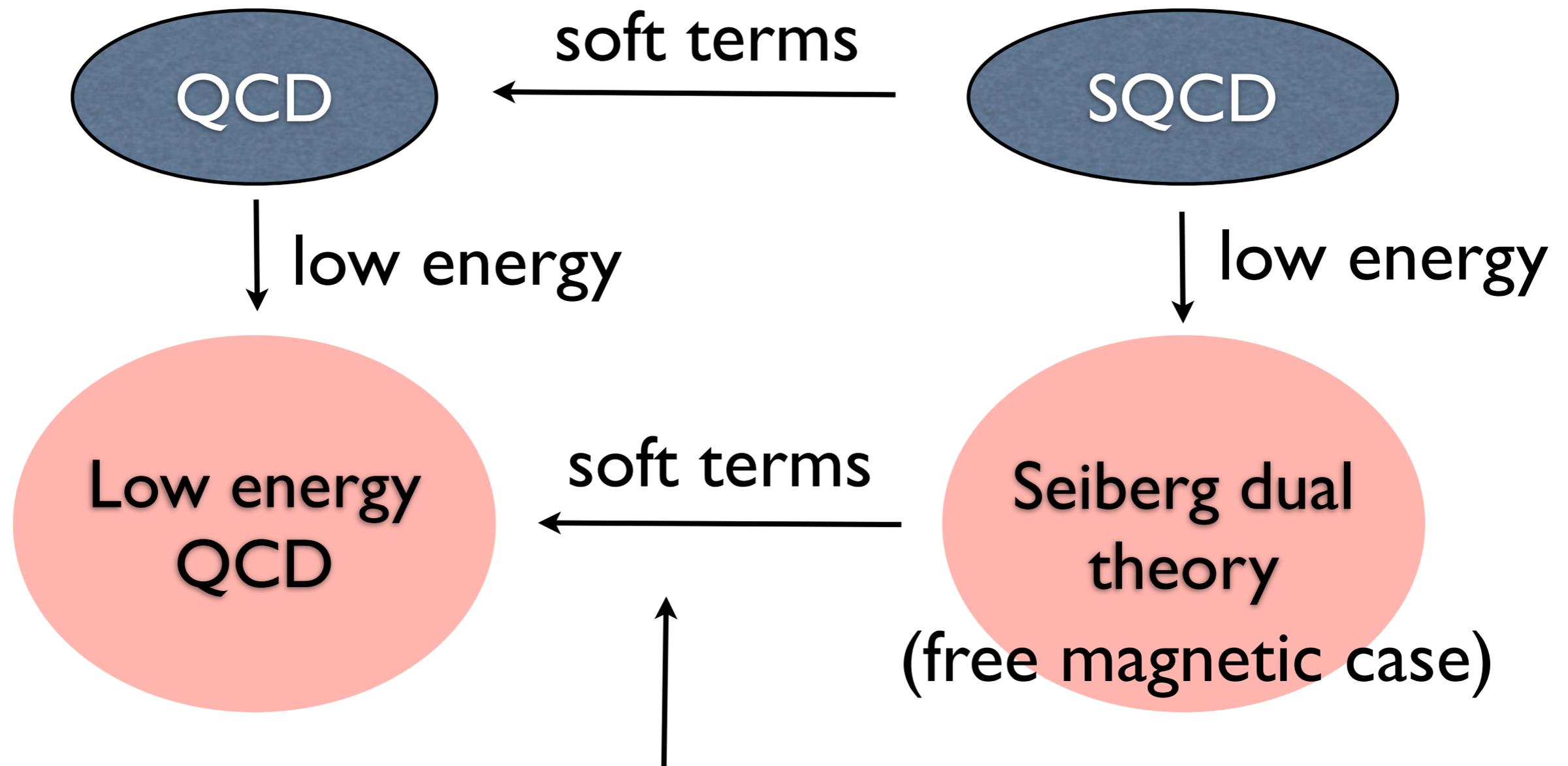
QCD can be obtained by adding soft mass terms for the gaugino and squarks.



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
Φ	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	$(2N_f - N_c)/N_f$

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



$$Y = -\frac{\tilde{B}m\Lambda}{\tilde{m}_M^2} \quad \text{split into two sectors.}$$

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
Φ	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	$(2N_f - N_c)/N_f$

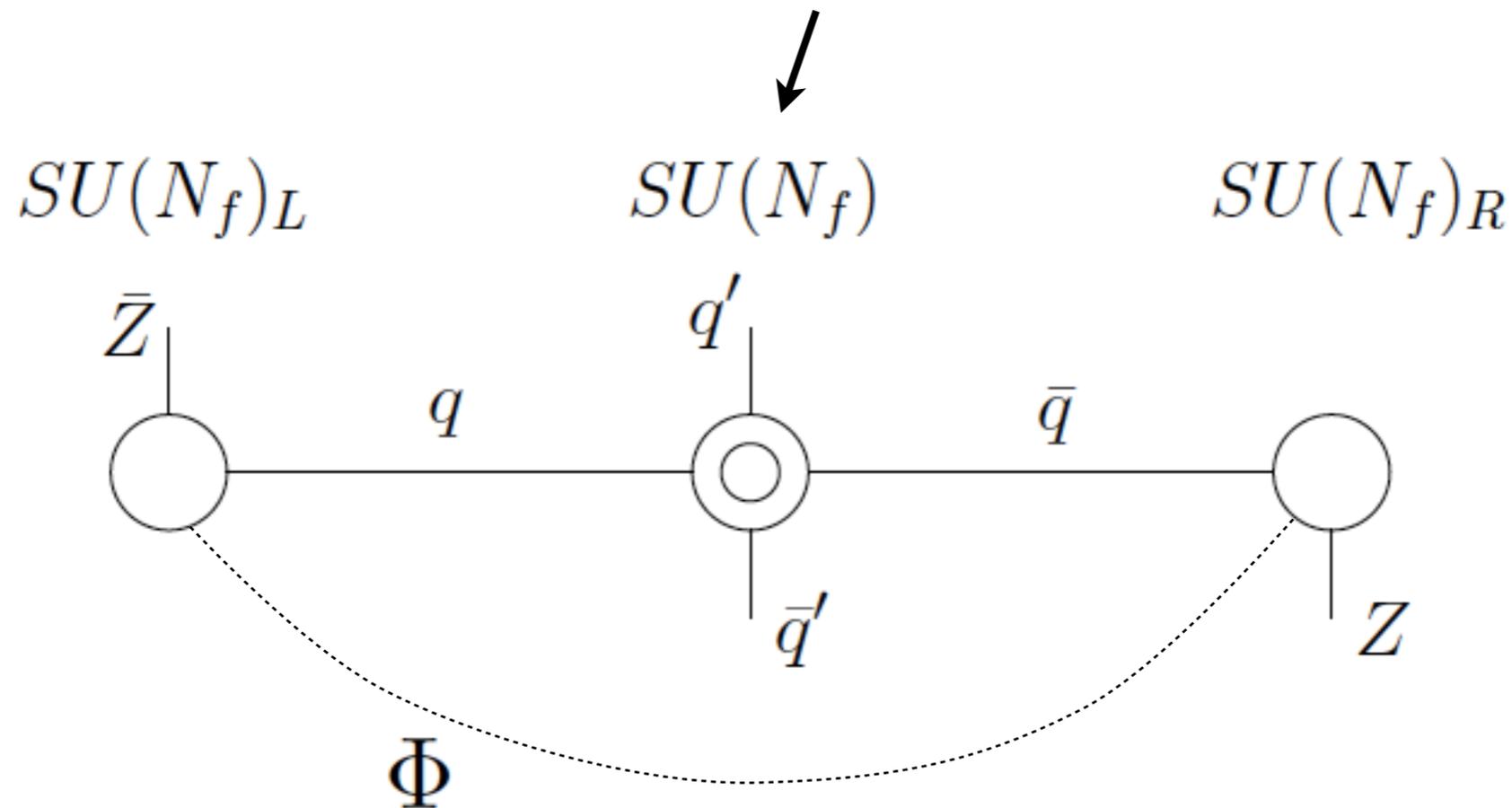
This sector has the same structure as the HLS.

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

break chiral symmetry and give masses to magnetic gauge bosons (ρ 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

ρ 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、

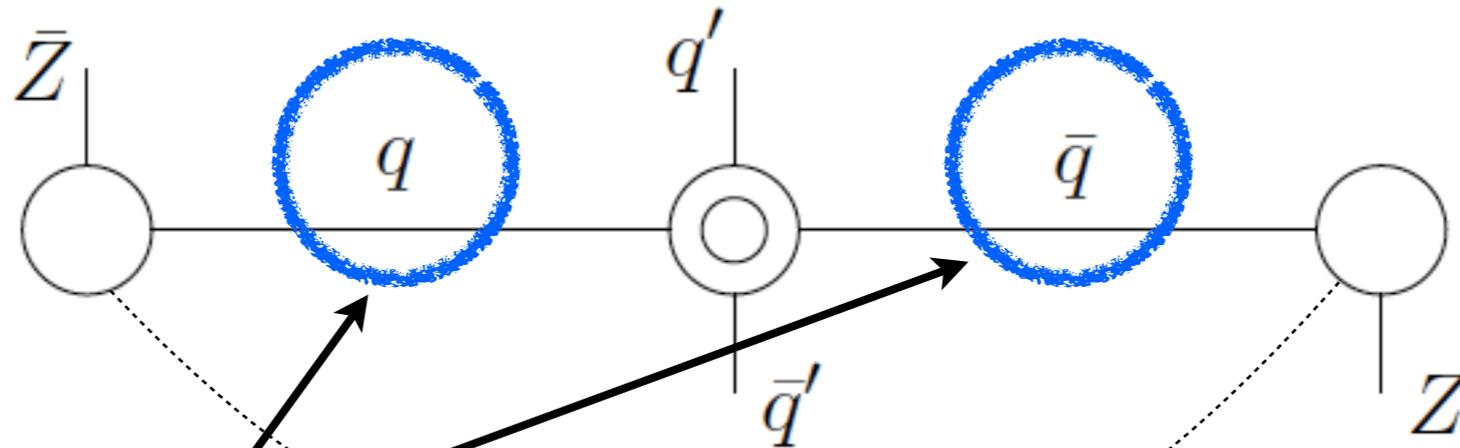
Electroweak
symmetry

Hidden local symmetry

$SU(N_f)_L$

$SU(N_f)$

$SU(N_f)_R$



Higgs fields

Φ

(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**

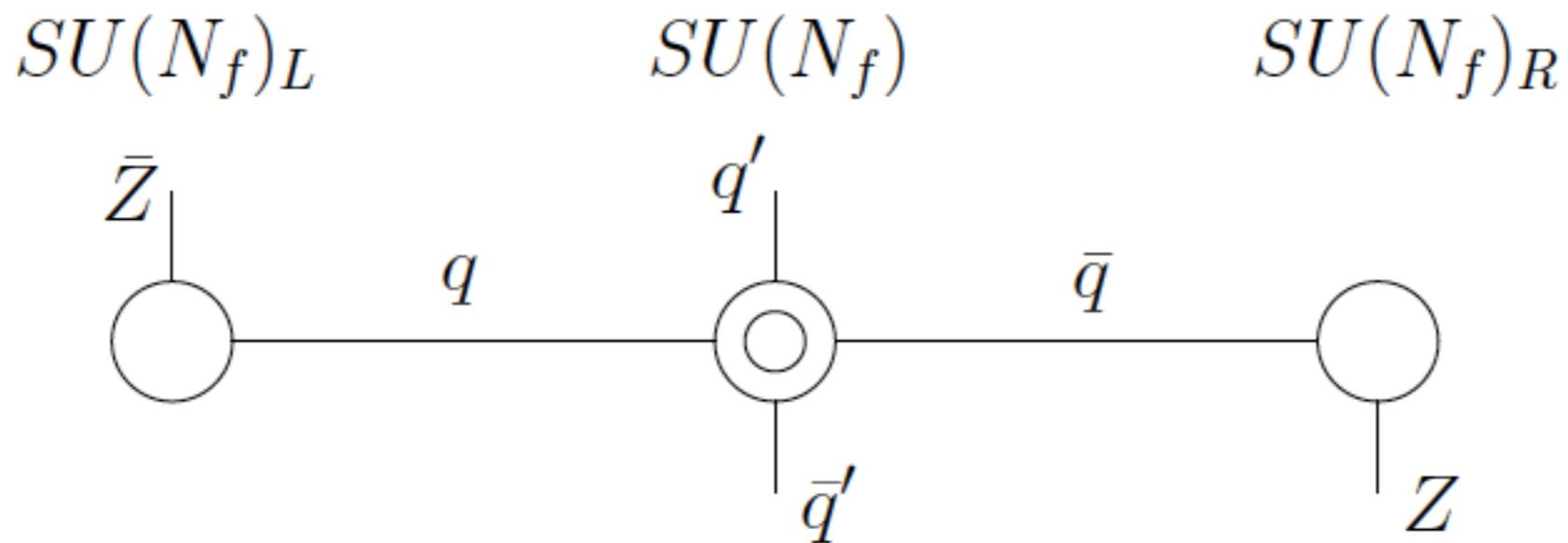


ヒッグスはほとんどelementary!

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 ρ 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!

