

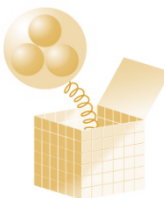
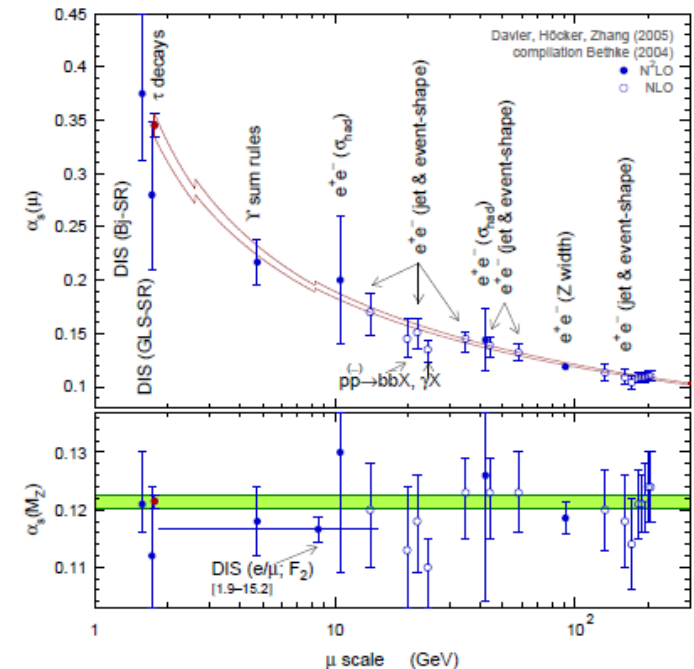
物質に重さがある理由の検証？ (格子QCDの進展)

橋本省二(KEK,素核研)
@第3回素核研金茶会
2007年7月20日



いまさらQCDなんて

- 60年代までの素粒子物理は混沌。
 - 多くの共鳴状態、S行列理論、分散公式、弦理論、...
 - いまになって論文を読んでも難しい...
- 70年代の漸近自由性の発見で一気に見通しが開ける。
 - DIS, e^+e^- , ...
 - 昔の難しい物理は忘れてもよい...

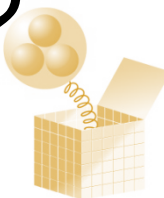




Jiro Kodaira (1951—2006)

「クォークは誰が見たか」

- 小平治郎、数理科学2006年12月号
 - 「誰も見ていない」が、「もう十分です」と言うほどの状況証拠。
 - 「現在QCDを研究する目的を『QCDのチェック』と考えている人はかなりの変人である。真の目的は未だ明らかにされていないQCDのダイナミクスを理解することであり、そのための努力が続けられている」。--- 数理科学2006年3月号より





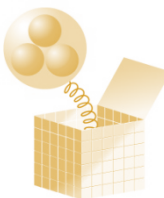
Jiro Kodaira (1951—2006)

pQCDの今そして今後

- 「(LHCでの) 超対称性粒子の発見は実験的には至難の技と考えられる。超対称性粒子は非常に多数の粒子にカスケード崩壊すると想像され、... 標準模型の範囲でも類似のイベントは十分起こりうる。標準模型からのバックグラウンドをいかに正確に抑えておくか」

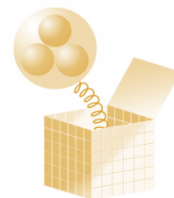
--- 小平治郎、学術月報2006年8月号

QCDを研究する目的のひとつの答え



やり残した宿題

- 60年代から残る宿題＝低エネルギーQCDを正確に計算する手法はいまだに確立していない。
- ハドロン原子核物理へ委託？
- 多くの素粒子実験でツケが残ることに。
 - LHC、Bファクトリー、K中間子崩壊、Muon g-2、NEDM、ニュートリノ...



ツケ

- LHC

- グルーオンPDF, パートンシャワー

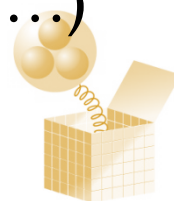
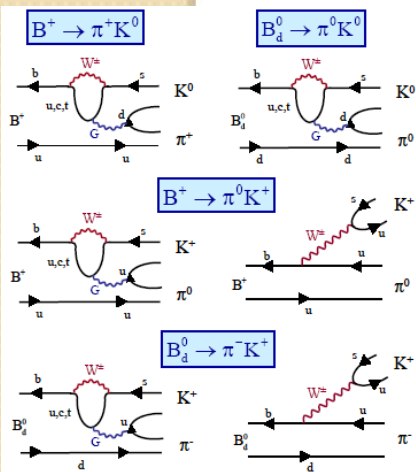
- 主戦場はQCD。ツールは自前で。

- Bファクトリー

- 実験データをどうCKM (or NP)に結びつけるか? グルーオンの衣装をとりさる。

- $B \rightarrow J/\psi K_S$ は幸運な例。 $\pi\pi$ ならアイソスピン対称性を使ってなんとか。それでもできない例はいっぱい。

- QCDにもとづく計算手法($1/M_b$ 展開、SCET, ...)



ツケ

- K中間子崩壊

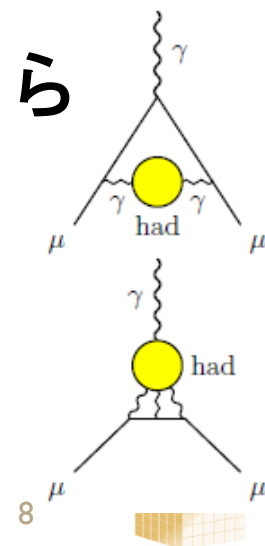
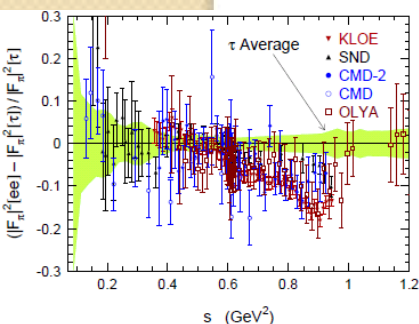
- Bと同様の問題。もっと難しい面も。

- ε'/ε は測られたが、CKM (or NP)の解析の役には立っていない。
 - 恐ろしく難しい実験($K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$)をやるはめに。

- Muon g-2

- レプトンの実験なのに、気がついたらQCDが不定性の原因に。

- Vacuum polarization (e^+e^- と τ の不一致)
 - Light-by-light 振幅



ツケ

- NEDM (中性子電気双
曲子能率)

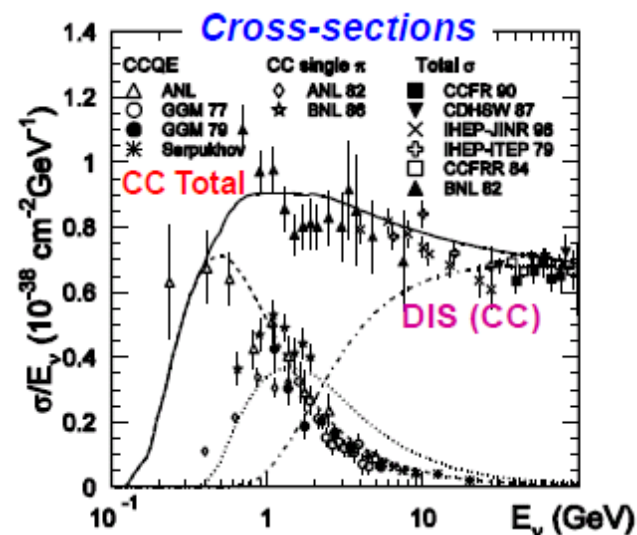
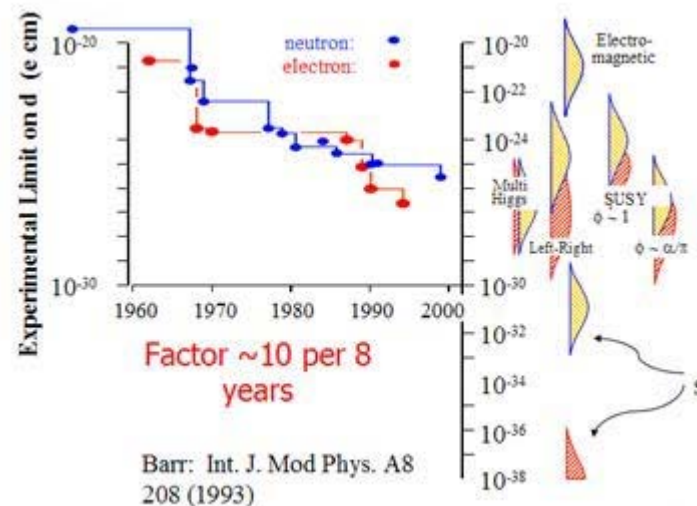
- もし見つかったら θ の値
はいくつ?

- まだ見つかってないので
安心?
 - CEDMも超対称模型の検証
に有用。

- ニュートリノ

- νN 散乱の断面積にはよ
くわかっていない部分
がある。

- 春の学会でシンポジウム



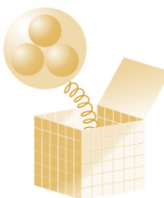
格子QCDは何をやっているのか

- 本来、これらの問題は格子QCDで計算可能なはず。

#\$%&=~#
¥\$\$&!

- なんでいつまでたってもできないの?

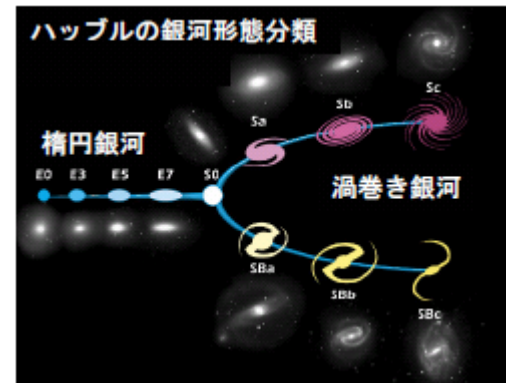
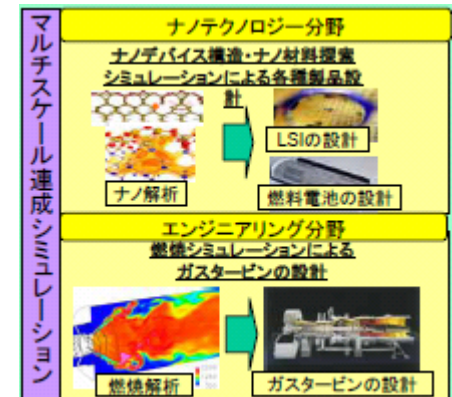
- マルチスケール問題
- 動的クォークの問題
- カイラル対称性の問題



マルチスケール問題

- 大きく異なるスケールを同時にシミュレーションするのはいつも大変
 - 遺伝子, たんぱく, 細胞, 最後は人体まで?
 - ナノ材料, 半導体
 - 星から銀河, 銀河のクラスター
- QCDの場合は、
 - b-クォーク, QCDスケール, パイ中間子, 原子核
 - 大したことなさそう...?

次世代生命体統合シミュレーション

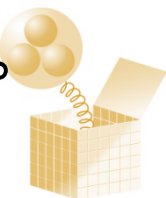


動的クォークの問題

$$\begin{aligned} Z &= \int [dU] \int [d\psi_f] [d\bar{\psi}_f] \exp(-S_g[U] - \bar{\psi}_f (D[U] + m_f) \psi_f) \\ &= \int [dU] \det(D[U] + m)^2 \exp(-S_g[U]) \end{aligned}$$

- クォーク行列式

- 普通に計算すると V^3 のコスト
- 何とかして逆行列の計算に持ち込む。コストは $V(ma)^{-1}$
- クォーク質量が小さいときに問題になる。シミュレーション全体では $V(ma)^{-2}$ 程度。
- ~2000年以降の格子QCDの最大の課題。
 - 2005年ころまでは $m_\pi \sim 500 \text{ MeV}$ が限界だった。
 - 最近は $m_\pi \sim 300 \text{ MeV}$ まで届くようになっている。

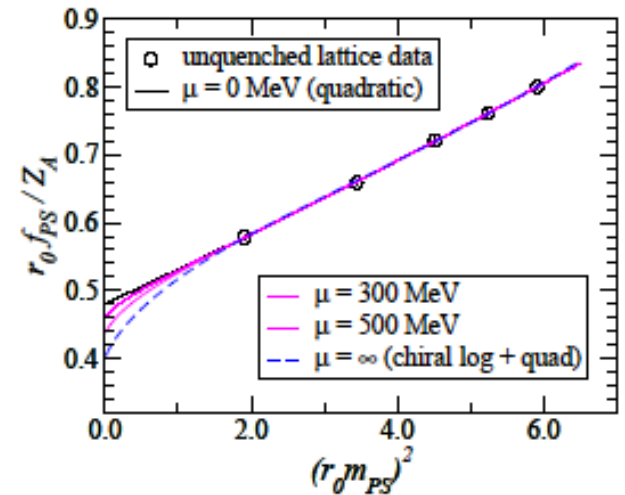


カイラル外挿

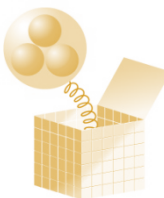
“軽いところまでできない
なら、適当に外挿すれば
いいではないか”

- そうでもない = マルチスケール問題。
- パイ中間子が軽くなるとループ効果で曲がる = カイラル摂動論の予言。
- どこから曲がるかは、QCDのダイナミクスによる。

JLQCD (2002)



$$\frac{f_\pi}{f} = 1 - \frac{N_f}{2} \frac{m_\pi^2}{(4\pi f)^2} \ln \frac{m_\pi^2}{\Lambda^2} +$$



カイラル摂動論?

QCD



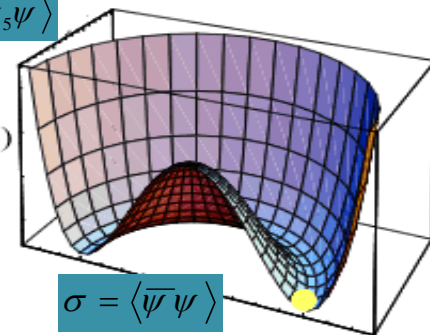
カイラル
有効理論

- 「有効理論」

- カイラル対称性の破れを仮定する。パイ中間子を南部ゴールドストーンボソンと同定すれば、有効理論が導かれる。
- 軽いパイ中間子だけ。
- 低エネルギーで正しい; 系統的な展開が可能。
- パイ中間子のループ効果(カイラルログ)。
- (次数を上げれば上げるほど)数多くの未定定数。

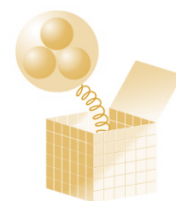
$$\pi = \langle \bar{\psi} \gamma_5 \psi \rangle$$

$V(\phi)$



$$\sigma = \langle \bar{\psi} \psi \rangle$$

格子計算の結果も低エネルギー極限では有効理論で記述されるはず。



カイラル対称性

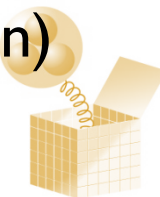
- 自発的カイラル対称性の破れ



- Nambu-Jana-Lasinio (1961): BCS理論にヒントを得たNJL模型
- 低エネルギーQCDのもっとも重要な性質の一つ（もう一つはとじこめ）

- 格子上のカイラル対称性

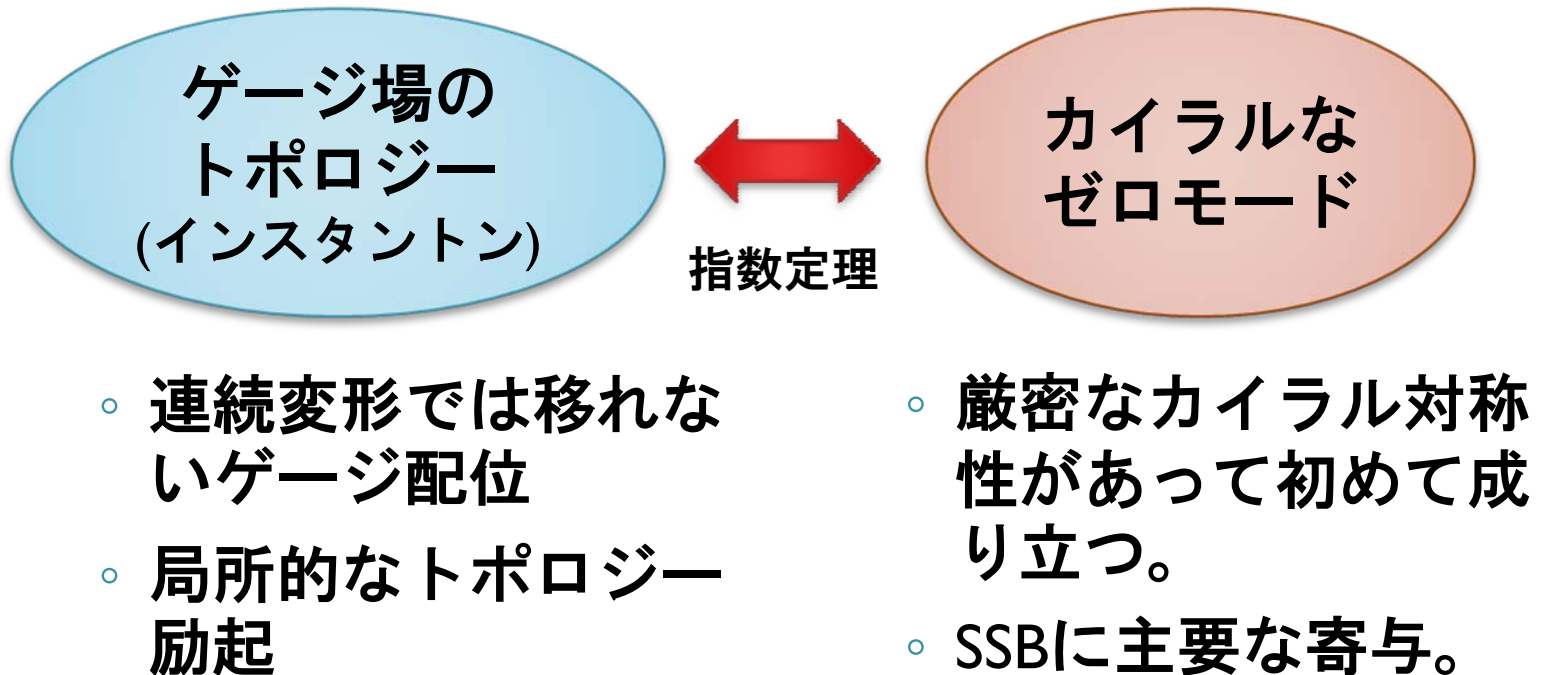
- カイラル対称性と格子は相性が悪い。
ニールセン-ニ宮の定理 (1981)
 - ・ カイラル対称性を陽に壊す (Wilson fermion)
 - ・ 余分なフレーバーを加える (staggered fermion)



トポロジー



- SU(3)ゲージ理論



ブレークスルー

- オーバーラップフェルミオン (Neuberger, 1997)

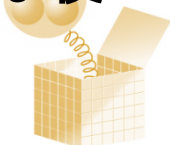
- 厳密なカイラル対称性
- 指数定理

$$D = \frac{1}{a} \left[1 - \frac{A}{\sqrt{A^+ A}} \right], \quad A = 1 - aD_W$$

$$\begin{aligned} \delta\psi &= \gamma_5 \left(1 - \frac{1}{2} aD \right) \psi, \\ \delta\bar{\psi} &= \bar{\psi} \left(1 - \frac{1}{2} aD \right) \gamma_5 \end{aligned}$$

ほかは？

- Domain-wall fermion
 - 近似的なカイラル対称性。
- Staggered fermion
 - 余分なフレーバーの粒子がいっぱい出てくる。行列式の4乗根=ユニタリティを壊す。
- Wilson fermion
 - カイラル対称性を陽に壊す。カイラル摂動論をそのまま使えない。



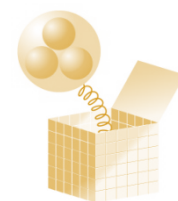
JLQCD collaboration

- メンバー

- 金児隆志、新谷栄悟、野秋淳一、橋本省二、松古栄夫、山田憲和 (KEK)
- 深谷英則 (理研)
- 青木慎也、石塚成人、宇川彰、金谷和至、蔵増嘉伸、谷口祐介、吉江友照 (筑波大)
- 大野木哲也 (京大基研)
- 石川健一、大川正典 (広島大)
- TWQCD collaboration: Ting-Wai Chiu、小川兼司 (National Taiwan U)

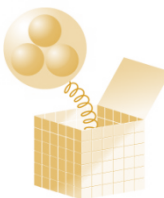
- 計算機

- IBM BlueGene/L, 57.3 Tflops
- 日立SR11000, 2.15 Tflops
- ...



プロジェクト

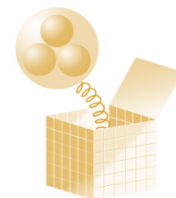
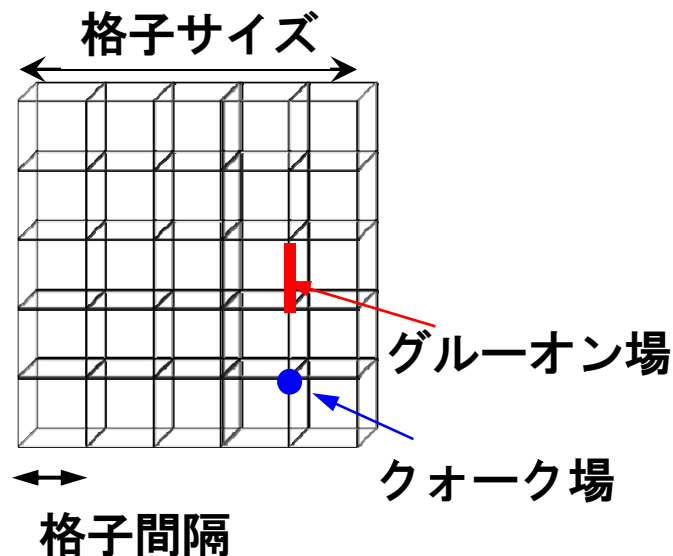
- 厳密なカイラル対称性をもつ格子QCDシミュレーション
 - “theoretically clean”
 - 軽いクォークのシミュレーションを実現
 - カイラル対称性の破れの検証
 - カイラル有効理論への橋渡し
 - 現象論への応用
 - “numerically expensive”
 - もっとも有望な手法への先行投資
 - 体積に制限



格子QCD

Wilson (1974)

- 時空を格子に切ってクォークとグルーオンの場を置く。
 - QCDの非摂動的定式化
- モンテカルロシミュレーションにより真空生成
 - 第一原理計算
- 現実には近似が必要
 - 有限の a
 - 有限の L
 - 比較的大きな m_q



カイラル対称性の破れを検証

“ほんとうにこうなっているのか？”

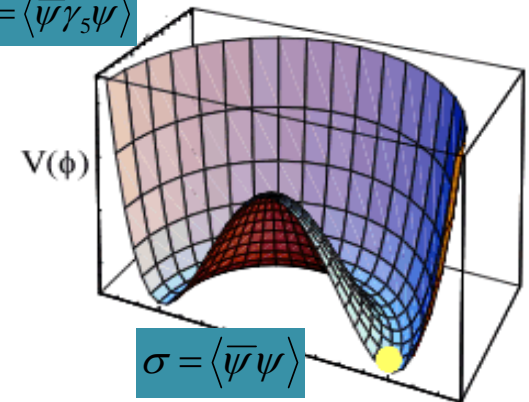
- BEC

- クォーク-反クォークの対がボース-アインシュタイン凝縮を起こす。
- クォークの低エネルギーモードの密度が有限に (Banks-Casher 関係式)

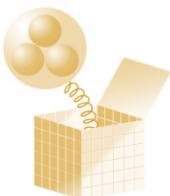
- Nambu-Goldstone

- 有効な力学的自由度としてパイ中間子だけが残る。

$$\pi = \langle \bar{\psi} \gamma_5 \psi \rangle$$

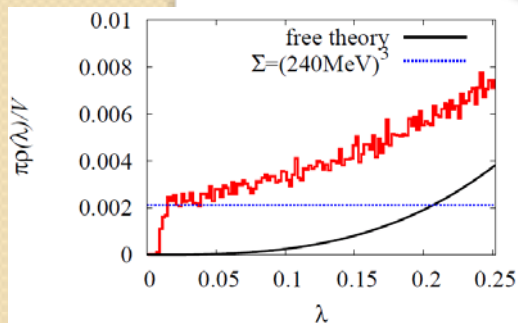


$$-\langle \bar{\psi} \psi \rangle = \pi \rho(0)$$



QCDから有効理論へ

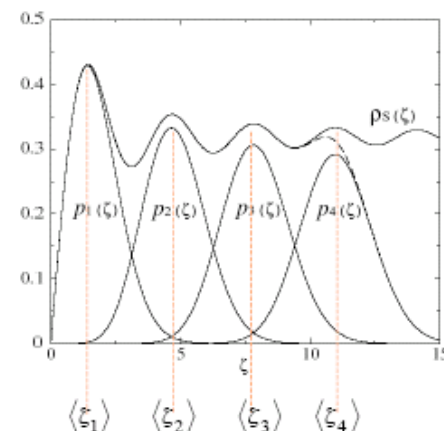
QCD



BEC

$$-\langle \bar{\psi} \psi \rangle = \pi \rho(0)$$

カイラル有効理論



(Damgaard-Nishigaki, 2001)

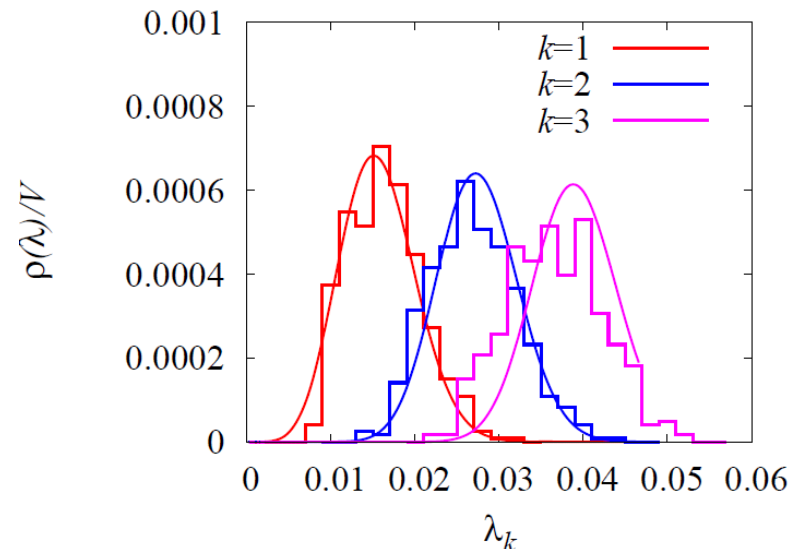
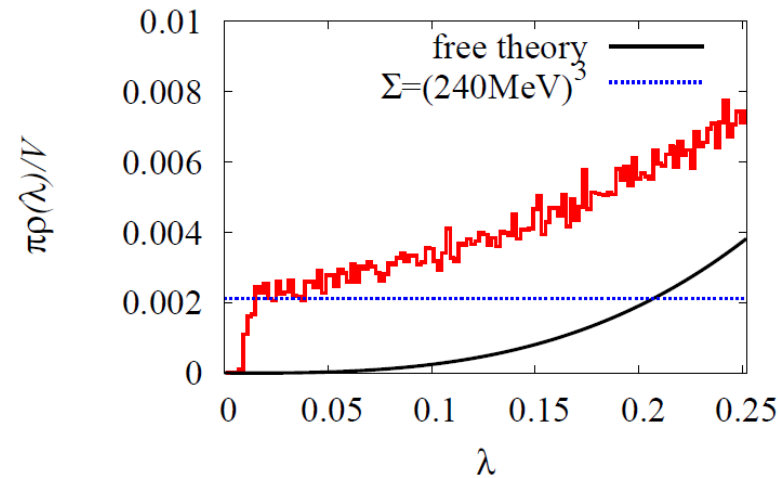
カイラルランダム
行列理論

有限体積 $m_\pi L < 1$

格子QCDによるテスト

JLQCD (Fukaya et al.), PRL98, 172001 (2007)

- 厳密なカイラル対称性
- カイラル極限にぎりぎりまで近づく ($m_q \sim 3\text{MeV}$)
- 有限体積 $m_\pi L \sim 1$
- クォークの固有モードを計算。凝縮が起こっているか?
- カイラルランダム行列理論との比較。

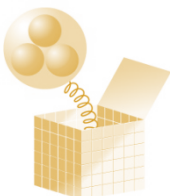
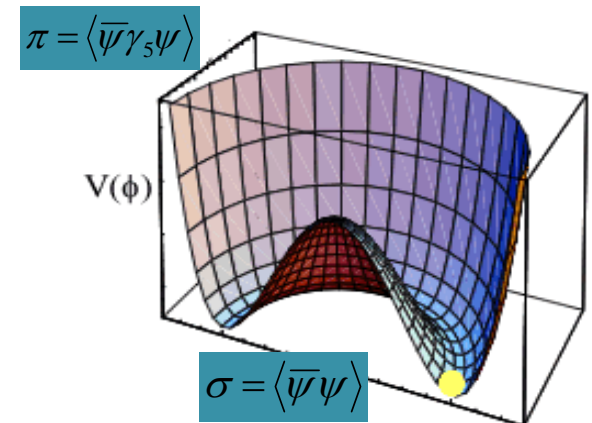
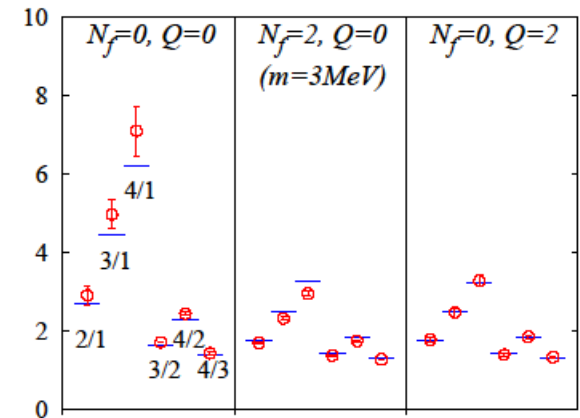


格子QCDによるテスト

JLQCD (Fukaya et al.), PRL98, 172001 (2007)

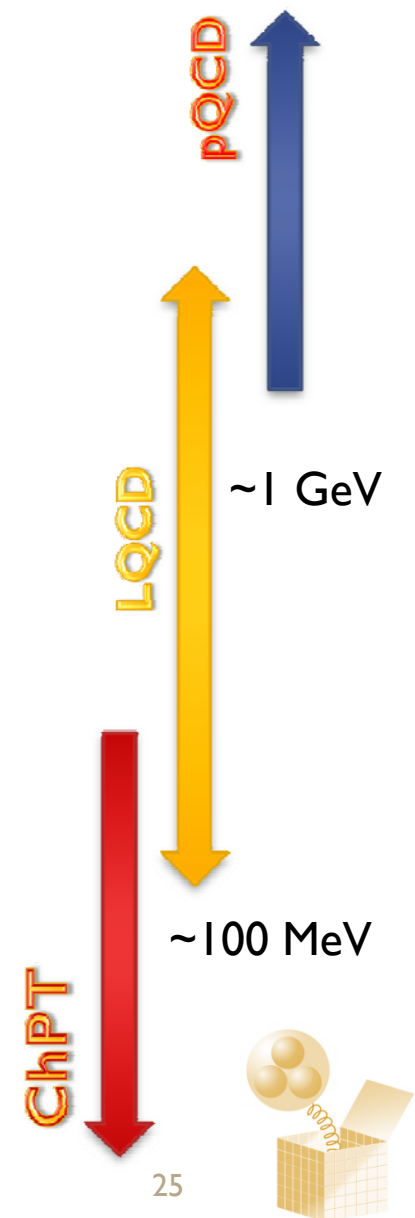
- 有限体積では対称性の破れは起きない。が、
- 固有モードのあらわれるパターンがカイラル対称性の破れを仮定した(有限体積での)理論と一致。
- $N_f=2$ QCDが低エネルギーで3個のパイオンに相当するモードをもつことを実証。

$$\Sigma^{\overline{MS}}(2\text{ GeV}) = [251(7)(11)\text{ MeV}]^3$$



どういう意味をもつか

- カイラル極限まで適応可能な非摂動QCD計算ツールが手にした。
 - 高エネルギーでは摂動的CDを適用可能。
 - 低エネルギーではカイラル有効理論とシームレスに接続。



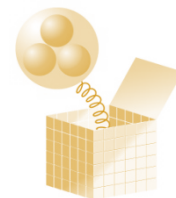
現象論への応用

一歩ずつ基礎固め

- カイラル凝縮
- パイ中間子の質量、崩壊定数、形状因子
- パイ中間子におけるアイソスピンの破れ
- パイ中間子散乱長
- K中間子の質量、崩壊定数
- K中間子セミレプトニック崩壊
- K中間子バググパラメタ B_K

理論的興味

- トポロジー感受率



パイ中間子

- NNLO (two-loop) カイラル摂動論のテスト

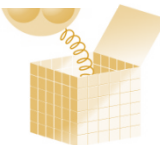
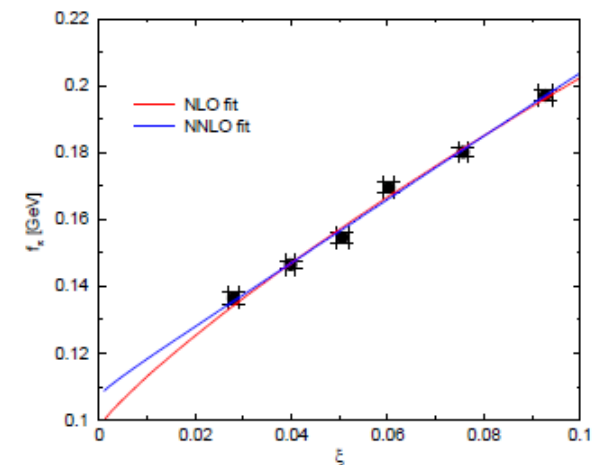
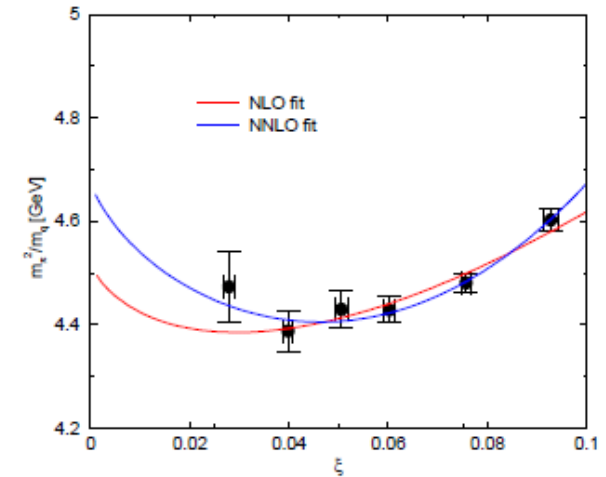
- m_π^2/m_q

- f_π

$$\frac{m_\pi^2}{m_q} = 2B_0 \left[1 + \xi \ln \xi + \frac{7}{2} (\xi \ln \xi)^2 + \text{analytic terms} \right]$$

$$f_\pi = f \left[1 - 2\xi \ln \xi + 5(\xi \ln \xi)^2 + \text{analytic terms} \right]$$

$$\xi \equiv \frac{m_\pi^2}{(4\pi f_\pi)^2}$$



Lattice 2007

University of Regensburg, July 30~

- Plenary

- H. Matsufuru, “Exploring chiral regime with dynamical overlap fermions”

- Parallel/poster

- J. Noaki, Pion mass and decay constant
- H. Fukaya, epsilon-regime correlator
- E. Shintani, $\pi^+\pi^0$ EM splitting
- T. Kaneko, pion form factor
- N. Yamada, B_K
- T.-W. Chiu, topological susceptibility
- SH, 2+1-flavor status
- T. Yagi, $\pi\pi$ -scattering
- T. Onogi, QCD at fixed topology

ご意見、ご提案を求む
(なんでもできるわけじゃないけど...)

